河海大学学报

（自然科学版）

Hehai Daxue Xuebao

(Ziran Kexue Ban)

双月刊，1957年创刊

第54卷　第1期　2026年1月25日出版

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Bimonthly, Founded in 1957

Vol. 54　No. 1　Jan. 2026

本刊入选下列数据库

荷兰《文摘与引文数据库》（Scopus）
美国《化学文摘》（CA）
美国《剑桥科学文摘》（CSA）
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）
波兰《哥白尼索引》（IC）
中国科学引文数据库（CSCD）
中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）
中国科技论文与引文数据库（CSTPCD）
本刊被《中国知网》《万方数据系统数字化期刊群》
《中国学术期刊文摘》《中文科技期刊数据库》全文收录
并被COAJ收录

本刊荣获

第三届中国精品科技期刊
第六届中国精品科技期刊
首届江苏省新闻出版政府奖提名奖
中国高校百佳科技期刊
全国水利系统优秀科技期刊
华东地区优秀期刊
江苏省优秀期刊

主　　管：中华人民共和国教育部
主　　办：河海大学
编 辑 出 版：《河海大学学报（自然科学版）》编辑部
地址：南京市西康路1号　邮政编码：210098
电话：025-83786642　传真：025-83786642
电子信箱：xb@hhu.edu.cn
网络地址：https://jour.hhu.edu.cn
编委会主任：郑金海
主　　编：郑金海
编辑部主任：彭桃英
印　　刷：南京千字文印务有限公司
发 行 范 围：公开发行
国 内 发 行：中国邮政集团公司江苏省分公司
订　　阅：全国各地邮政局
国 外 发 行：中国国际图书贸易集团有限公司
（北京市 399 信箱　100048）

Supervisory Authority
Ministry of Education, P. R. China
Sponsored by
Hohai University
Edited and Published by
Editorial Board of Journal of Hohai University (Natural Sciences)
Address: No.1 Xikang Road, Nanjing 210098, P. R. China
Tel: 86-25-83786642
E-mail: xb@hhu.edu.cn
https: //jour.hhu.edu.cn
Editor-in-Chief
ZHENG Jinhai
Distributed at Home by
China Post Group Jiangsu Branch
Distributed Abroad by
China International Book Trading Corporation
P. O. Box 399, Beijing　100048, P. R. China

ISSN 1000-1980

国际标准连续出版物号：ISSN 1000-1980　国内邮发代号：28-63
国内统一连续出版物号：CN 32-1117/TV　国外发行代号：BM2740

定价：30.00 元

河海大学学报（自然科学版）
第五十四卷 第一期
二〇二六年一月

CSCD核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊
RCCSE核心期刊

ISSN 1000-1980
CODEN HDXZAI

河海大学学报

（自然科学版）

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

庆祝河海大学建校110周年

（二）

第54卷　第1期
Vol. 54_ No. 1
2026
1月

·编者按·

《河海大学学报（自然科学版）》百十校庆专辑

2025年，河海大学迎来建校110周年华诞。作为学校学术传承与创新的重要载体，《河海大学学报（自然科学版）》编辑部精心策划“庆祝河海大学建校110周年”系列专题征稿。征稿得到了海内外水文水资源、水利工程、港航物流、土木工程等领域专家学者的热烈响应与鼎力支持。经严格评审，录用了一批聚焦学科前沿，兼具理论深度与应用价值的优秀文章，涵盖水旱灾害防御、智慧水利技术、绿色港航建设、土木工程建设等关键议题，集中展现了相关领域的最新研究进展与创新实践。专题征稿部分成果已经发表于本刊2025年第5期，而围绕“水科学与水工程热点问题”“智慧港航工程热点问题”“土木工程学科热点问题”三大方向的征稿成果集结于本期发表。

百又十年弦歌不辍，治水兴邦初心不改。2个专辑既是对河海大学“艰苦朴素、实事求是、严格要求、勇于探索”校训精神的生动诠释，也是学报服务国家水安全战略、推动学科交叉融合的具体实践。我们期待，通过2个专辑的出版，为学界搭建交流合作的平台，为行业发展贡献智慧力量，更是向河海大学110周年校庆致以最诚挚的祝贺！

《河海大学学报（自然科学版）》编辑部

2026年1月

《河海大学学报（自然科学版）》第十三届编辑委员会

编委会顾问（以姓氏笔画为序）：

马洪琪　王　超　王光谦　卢耀如　严以新　汪集旸　张长宽　张建云　陆桂华　陈厚群

陈星莺　周创兵　胡亚安　钟登华　姜弘道　索丽生　徐　辉　徐祖信

主 任 委 员：郑金海

副主任委员：宋翔洲

主　　编：郑金海

副 主 编：施建勇　冯　钧　程亚军　孙洪广

编　　委（以姓氏笔画为序）：

丁　坤　丁选明　王　栋　王　媛　王卫光　王正伟　王延杰　王玲玲　王高旭　王锦国

甘　磊　付　静　冯　钧　吉伯海　伞冰冰　刘　凡　刘　桦　刘小峰　许文祥　许崇育

孙洪广　李　璐　李典庆　李琼芳　吴　峰　余　欣　张　犁　张玉全　张铁林　张继生

陆光华　陈永辉　陈　华（武汉大学）　陈　华（河海大学）　邵建富　周　丰　周玉良

周思源　郑金海　孟令奎　赵　春　赵兰浩　赵永好　赵海涛　赵燕容　禹海涛　施建勇

袁赛瑜　徐泽平　徐俊增　陶龙宾　黄　艳　梅国雄　彭桃英　董增川　韩光洁　程永光

程亚军　程旭华　鲁春辉　谢亿民　赖世兴　雷瑞波　管大为　谭　倩　霍冠英

《河海大学学报（自然科学版）》首届青年编辑委员会

王　超　尤国祥　付　瑾　吕亚茹　朱　淳　刘　懿　刘肖廷　李　源　李玉萍　李永富

杨士红　肖儒雅　吴　凡　吴　丹　吴　娟　吴玉娜　吴勇信　谷　岩　闵凡路　沈骁腾

宋子健　张　睿　陈东旭　陈伟秋　陈宇辉　陈更新　周亦洲　周海祚　柳梦阳　贺　瑞

徐　磊　高红民　郭　磊　黄浩乾　梁　越　蒋　晟　程　星　傅中秋　曾文治　魏长赟

河海大学学报

（自然科学版）

第 54 卷第 1 期　　2026 年 1 月

目　次

·水科学与水工程热点问题专题·

基于遥感土壤湿度数据的分布式水文模型参数联合率定方法 … 李致家，邓　帆，张汉辰，李安琪（1）
水上光伏覆盖率对水生态环境的影响机制研究进展
…… 王沛芳，张琳倩，张文静，刘雨曦，杨璐宇，王　洵（8）
融合语义分割与时空信息的水位智能识别方法
…… 周　聂，陈　华，刘炳义，易瑞吉，魏　苗，许崇育（18）
产流模式时空分布规律及其判别方法 …… 刘玉环，罗　赟，李致家，王春青（28）
基于禁忌搜索与粒子群优化算法的地下水污染源信息辨识
…… 徐　津，伍梦天，李　凯，王玲玲，朱　海，王明辉（36）
输水管道水锤-泄漏耦合数值模拟及反射系数特性研究
…… 周　领，王鹤鸣，徐　彬，李赟杰，潘天文（43）
堤坝渗漏入口示踪剂运移规律 …… 梁　越，邓惠丹，喻金桃，许　彬，饶育锋（53）

·土木工程热点问题专题·

联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术监测高陡边坡形变的研究进展
…… 何秀凤，李　钢，夏诸葛，肖儒雅，贾东振，宋敏峰（61）
低渗岩体渗流与溶质迁移超重力试验及数值模拟研究进展
…… 詹良通，王　浩，胡英涛，徐文杰，陈长杰（70）
基于变形与碳排放协调的模块式加筋土挡墙优化设计
…… 张　飞，朱玉明，孙逸飞，费建波，高玉峰（79）
黏土斜坡水平受荷桩承载特性研究
…… 麻　坚，郭　林，刘建生，徐　刚，柳建超，孙毅龙，李　辉（86）
多桩型复合地基支承路堤破坏模式及优化设计研究 …… 刘　剑，夏博洋，郑　刚（94）
江苏跨江大桥形变 InSAR 时空特征分析 …… 肖儒雅，王　迅，李子阳，李　益，何秀凤（102）
基于 CNN-Transformer-ARG 的双护盾 TBM 掘进速度预测模型 … 刘永胜，沈军宏，李　达，侯　超（112）
粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基填料水稳性与耐久性研究
…… 郭乔明，陈　峰，李春志，张育铖，杨　璐，陈　慧，关博文，赵　华（119）

·智慧港航工程热点问题专题·

海港智慧航道基础支撑平台架构与关键技术
…… 庞启秀，李怀远，辛海霞，赵张益，谢　琳，陈　纯（129）
弯曲航道通航水流特性及船舶运动特性数值模拟 …… 夏旭江，庄　宁，徐兴年，蔡飘洋（138）
多源环境信息融合驱动的船舶速度优化研究综述 …… 王苏阳，封学军，马兰青，沈金星，蒋仲廉（148）
三维效应对海上风机单桩侧向刚度的影响
…… 祝　亮，王　雨，罗　翔，曹淑刚，周全智，闫　琛，黄欣羿（160）
基于轻量化 SuperPoint 网络的水下光学图像特征提取 …… 刘　艳，朱昌盛，余　彬，霍冠英（167）

本期责任编辑：王　芳

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Vol. 54 No. 1 **Jan. 2026**

CONTENTS

Joint calibration method of distributed hydrological model parameters based on remote sensing soil moisture data ····· *Li Zhijia, Deng Fan, Zhang Hanchen, Li Anqi*(1)

Research progress on impact mechanism of floating photovoltaic coverage ratio on aquatic ecological environment ····· *Wang Peifang, Zhang Linqian, Zhang Wenjing, Liu Yuxi, Yang Luyu, Wang Xun*(8)

Intelligent water level recognition method integrating semantic segmentation with spatiotemporal information ····· *Zhou Nie, Chen Hua, Liu Bingyi, Yi Ruiji, Wei Miao, Xu Chongyu*(18)

Spatial and temporal distribution rules and identification methods of runoff generation modes ····· *Liu Yuhuan, Luo Yun, Li Zhijia, Wang Chunqing*(28)

Groundwater contaminant source information identification based on tabu search and particle swarm optimization algorithm ····· *Xu Jin, Wu Mengtian, Li Kai, Wang Lingling, Zhu Hai, Wang Minghui*(36)

Numerical simulation of water hammer and leak coupling in water pipelines and study on reflection coefficient characteristics ····· *Zhou Ling, Wang Heming, Xu Bin, Li Yunjie, Pan Tianwen*(43)

Tracer transport patterns in levee seepage inlet ····· *Liang Yue, Deng Huidan, Yu Jintao, Xu Bin, Rao Yufeng*(53)

Researoh progress on integration of BDS/GNSS and InSAR for monitoring deformation of high-steep slopes ····· *He Xiufeng, Li Gang, Xia Zhuge, Xiao Ruya, Jia Dongzhen, Song Minfeng*(61)

Research progress on hypergravity experiments and numerical simulation of seepage and solute migration in low-permeability rock mass ····· *Zhan Liangtong, Wang Hao, Hu Yingtao, Xu Wenjie, Chen Changjie*(70)

Optimization design of geosynthetic-reinforced soil segmental walls considering deformation and carbon emission coordination ····· *Zhang Fei, Zhu Yuming, Sun Yifei, Fei Jianbo, Gao Yufeng*(79)

Research on bearing characteristics of horizontally loaded piles on clay slopes ····· *Ma Jian, Guo Lin, Liu Jiansheng, Xu Gang, Liu Jianchao, Sun Yilong, Li Hui*(86)

Study on failure mode and optimization design of embankment supported by multi-pile type composite foundation ····· *Liu Jian, Xia Boyang, Zheng Gang*(94)

Spatiotemporal characteristic analysis of cross-river bridge deformation in Jiangsu Province with InSAR ····· *Xiao Ruya, Wang Xun, Li Ziyang, Li Yi, He Xiufeng*(102)

Prediction model of tunneling speed for double-shield TBM based on CNN-Transformer-ARG ····· *Liu Yongsheng, Shen Junhong, Li Da, Hou Chao*(112)

Research on water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler ··· *Guo Qiaoming, Chen Feng, Li Chunzhi, Zhang Yucheng, Yang Lu, Chen Hui, Guan Bowen, Zhao Hua*(119)

Architecture and key technologies of basic platform for intelligent waterways in seaports ····· *Pang Qixiu, Li Huaiyuan, Xin Haixia, Zhao Zhangyi, Xie Lin, Chen Chun*(129)

Numerical simulation of water flow characteristics in curved channels and ship motion characteristics ····· *Xia Xujiang, Zhuang Ning, Xu Xingnian, Cai Piaoyang*(138)

Review of research on ship speed optimization driven by multi-source environmental information fusion ····· *Wang Suyang, Feng Xuejun, Ma Lanqing, Shen Jinxing, Jiang Zhonglian*(148)

Influence of three-dimensional effects on lateral stiffness of offshore wind turbine monopiles ····· *Zhu Liang, Wang Yu, Luo Xiang, Cao Shugang, Zhou Quanzhi, Yan Chen, Huang Xinyi*(160)

Underwater optical image feature extraction based on lightweight SuperPoint network ····· *Liu Yan, Zhu Changsheng, Yu Bin, Huo Guanying*(167)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.001

基于遥感土壤湿度数据的分布式水文模型参数联合率定方法

李致家[1],邓 帆[1],张汉辰[2],李安琪[1]

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 宁夏大学地理科学与规划学院)

摘要:为探究在半干旱小流域引入遥感土壤湿度数据辅助分布式水文模型参数率定的可行性,提出了融合硬数据(流量)与软数据(遥感土壤湿度)的参数联合率定方法。该方法将 CLDAS 卫星遥感土壤湿度数据应用于 Grid-Multi-GA 模型中,采用多目标优化框架,以流量模拟的纳什效率系数和土壤湿度时空分布的 Spearman 相关系数作为双评价指标,通过系统调整权重实现两类指标的动态权衡,最终确定最优权重及其对应的产流和汇流参数组合,同时通过设置参数未率定、仅用流量率定、流量与土壤湿度联合率定 3 种情景,验证联合率定方法的可行性。宁夏原州流域的实例验证结果表明:流量与土壤湿度联合率定的 Grid-Multi-GA 模型在小流域中的洪水模拟中,纳什效率系数大于 0.7,Spearman 相关系数为 0.84,明显优于未率定和仅用流量率定的 Grid-Multi-GA 模型。

关键词:半干旱地区;Grid-Multi-GA 模型;参数率定;径流模拟;遥感土壤湿度;原州流域

Joint calibration method of distributed hydrological model parameters based on remote sensing soil moisture data

Li Zhijia[1], **Deng Fan**[1], **Zhang Hanchen**[2], **Li Anqi**[1]

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*;
2. *School of Geography and Planning, Ningxia University*)

Abstract: To explore the feasibility of introducing remote sensing soil moisture data to assist in distributed hydrological model parameter calibration in semi-arid small watersheds, a joint parameter calibration method that integrated hard data (flow rate) and soft data (remote sensing soil moisture) was proposed. CLDAS satellite remote sensing soil moisture data were applied to the Grid-Multi-GA model. A multi-objective optimization framework was adopted, and the Nash efficiency coefficient of flow rate simulation and the Spearman correlation coefficient of soil moisture's spatiotemporal distribution were used as dual evaluation indicators. By adjusting the weights of the system to dynamically balance two types of indicators, the optimal weight and its corresponding runoff generation and flow routing parameter combination were ultimately determined. To validate the feasibility of the joint calibration method, three model scenarios were established, namely uncalibrated parameters, calibration using only discharge, and joint calibration of discharge and soil moisture. The case study results in the Ningxia Yuanzhou Watershed demonstrate that the Grid-Multi-GA model jointly calibrated by flow rate and soil moisture achieves a Nash efficiency coefficient greater than 0.7 and a Spearman correlation coefficient of 0.84 in flood simulation for small watersheds, significantly outperforming both the uncalibrated model and the model calibrated only with flow rate.

Key words: semi-arid region; Grid-Multi-GA model; parameter calibration; runoff simulation; remote sensing soil moisture; the Yuanzhou Watershed

水文模型作为表征流域降雨-径流响应关系的核心工具,在水文预报、水资源优化配置及综合管理等领域得到广泛应用[1-4]。水文模型在参数率定时通常仅使用流量资料,且普遍认为径流序列的时长越久,越能精细刻画流域水文过程的内在特征,进而有助于提升模型参数率定的精度,因此模型参数的率定效果极大程度上取决于流量资料的序列长度与数据质量。然而只使用硬数据(直接观测、精度高、物理意义明确、不确定性低的数据)进行参数率定存在显著局限:①限制了模型发展;②对完整水文资料的依赖性过强,使其在资料缺失或无资料的小流域(尤其是干旱、半干旱地区)表现欠佳,核心问题在于参数难以精准确定。为突

基金项目:宁夏回族自治区重点研发项目(2023BEG02054);国家自然科学基金项目(52079035)

作者简介:李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail:zjli@hhu.edu.cn

通信作者:邓帆(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:231301010005@hhu.edu.cn

破这一局限,需要协同运用硬数据和软数据[5]。软数据指通过间接推断、低分辨率手段获取的数据,虽存在一定不确定性,物理意义直接性较弱,但具备空间覆盖广等优势。遥感土壤湿度数据作为软数据的一种,是连接降水入渗、蒸散发消耗与径流生成的核心状态变量,既能直接反映流域蓄水容量的动态饱和程度,又可通过阈值响应机制揭示水文过程的非线性特征,其模拟精度直接决定径流预测质量[6-11]。

随着卫星遥感技术的持续革新与发展,覆盖面广、时空分辨率高的水文遥感数据集日益丰富,如陆面数据同化系统(CLDAS)、土壤湿度与海洋盐度卫星、土壤湿度主动被动探测卫星、高级微波扫描辐射计2、高级散射计及风云系列气象卫星反演产品等[12-16]。这些由遥感获取的陆面蒸发、土壤湿度等数据可为水文建模的理论创新与应用拓展提供强有力的数据支撑。同时,随着卫星遥感、GIS、多源数据融合、水文大数据等技术的发展,降低了水文模型对水文资料的依赖性。

Grid-Multi-GA 模型作为 Grid-GA 模型的优化版本,通过将土壤垂向划分为上下两层,更贴合网格尺度下土壤性质的垂向差异,在半干旱地区径流模拟中展现出优异性能[2]。但该模型当前仍采用传统手动率定方法,依赖专家经验逐参数调试,效率与精度均有提升空间。鉴于此,本文通过在产流层引入 CLDAS 土壤湿度数据与模型模拟值进行动态同化,利用遥感土壤湿度数据验证产流模块的土壤水分动态模拟能力,并在汇流层延续传统参数率定方法,提出"土壤湿度动态约束-有限流量验证"的联合率定方法,通过宁夏原州流域对该方法进行验证,以期为小流域水文模型参数率定提供新思路。

1 研究方法

1.1 Grid-Multi-GA 模型

Grid-GA 模型[17-20]充分考虑了流域的下垫面和降雨空间分布的不均匀性,主要划分为蒸散发计算、产流计算及汇流计算三大功能模块,其中蒸散发与产流计算在独立网格单元内完成,汇流计算则严格遵循网格间的汇流演算次序逐单元推进。考虑到土壤在垂向上具有分布异质性,且不同深度土层的产流特性存在显著差异,在 Grid-GA 模型基础上,学者们将土层划分为上下两层,构建了产流过程更贴合流域实际水文情势的 Grid-Multi-GA 模型[21-26]。其计算流程如图1所示(图中 I_p 为当前时段的降雨强度;f_t 为 t 时段的下渗容量;F_t 为 t 时段的累积下渗量;F_p 为当前时段的下渗能力)。

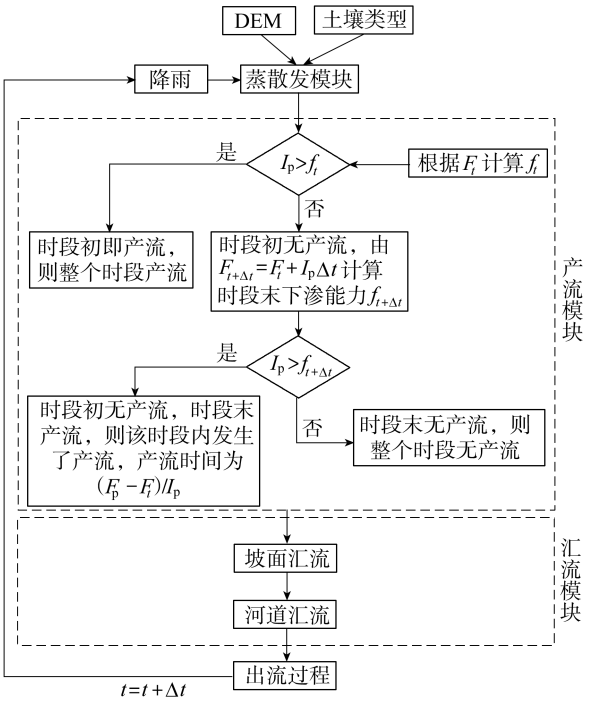


图1 Grid-Multi-GA 模型计算流程

Fig. 1 Grid-Multi-GA model calculation flowchart

相比于 Grid-GA 模型,Grid-Multi-GA 模型对网格下渗能力的计算有所优化,即湿润锋位于上层土壤时,按照 GA 下渗公式进行计算,当湿润锋进入下层后,按照式(1)进行计算,其余模块均与 Grid-GA 模型产流计算部分相同。Grid-Multi-GA 模型主要参数集中在产流、汇流部分,其中汇流参数主要包括蓄量流量关系曲线坡度、流量比重系数、河网消退系数、滞后时间,取值范围分别为0~0.5、0~0.5、0.001~0.999、1~10 h;产流参数中的最大累积下渗量无固定范围,其他参数范围见表1。

$$f_t=\frac{K_1K_2(\theta_{S2}-\theta_{I2})}{H_1K_2(\theta_{S2}-\theta_{I2})+K_1[F_t-H_1(\theta_{S1}-\theta_{I1})]}\left[\Psi_2+H_1+\frac{F_t-H_1(\theta_{S1}-\theta_{I1})}{\theta_{S2}-\theta_{I2}}\right] \tag{1}$$

式中:K_1、K_2 分别为上层、下层土壤的饱和水力传导度;Ψ_2 为下层湿润锋处土壤吸力;θ_{S1}、θ_{S2} 分别为上层、下层土壤饱和含水率;θ_{I1}、θ_{I2} 分别为上层、下层土壤的初始土壤含水率;H_1 为上层土壤厚度。

1.2 评价标准及目标函数

依据传统水文模拟与预报精度评定准则,参考 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,选择4种评价指标:径流深相对误差,以实测值的20% 作为许可误差,当该值大于 20 mm 时取 20 mm,小于 3 mm 时取

表 1　Grid-Multi-GA 模型产流参数取值范围

Table 1　Runoff generation parameter value ranges of Grid-Multi-GA model

土壤类型	土层	饱和孔隙度	有效孔隙度	湿润锋处土壤吸力/mm	饱和水力传导度/(mm/h)
壤土	上层	0.427~0.597	0.376~0.576	2.14~46.81	0.34
	下层	0.408~0.616	0.382~0.614	1.01~40.49	0.34
粉质壤土	上层	0.444~0.610	0.425~0.603	1.89~63.05	0.65
	下层	0.430~0.636	0.387~0.643	0.86~60.82	0.65
黏壤土	上层	0.434~0.560	0.328~0.532	6.13~118.90	0.10
	下层	0.401~0.501	0.228~0.530	4.36~78.73	0.10

3 mm;洪峰流量相对误差,以实测洪峰流量的 20%作为许可误差判定预报洪峰是否合格;峰现时间误差,以 3 h 作为许可误差;纳什效率系数,用来评价洪水实测过程与预报过程之间的拟合程度,越接近 1,说明模拟的效果越好。采用纳什效率系数作为径流模拟的目标函数;为评估遥感土壤湿度与 Grid-Multi-GA 模型模拟土壤湿度的一致性,将二者的 Spearman 相关系数作为土壤湿度的目标函数[27-28]。

1.3　参数率定方法

在参数联合率定过程中,将水文模型参数划分为产流和汇流参数,利用遥感土壤湿度数据和径流数据对这两类参数进行率定[29],主要步骤如下。

a. 构建目标函数。使用径流和土壤湿度数据率定模型时,目标函数 F_{out} 为:

$$F_{out} = wF_Q + (1 - w)F_{SM} \tag{2}$$

式中:w 为径流目标函数的权重;F_Q 为径流目标函数;F_{SM} 为土壤湿度目标函数。

b. 产流和汇流参数率定。模型采用产流和汇流参数联合自动率定方法,通过单一优化框架同步校准产流参数(土壤孔隙度、湿润锋吸力、饱和导水率等)与汇流参数(汇流滞时、河道曼宁系数等)。该过程由双目标协同驱动,以实测流量最优化为目标构建函数一,以土壤湿度数据最优化为目标构建函数二。基于 Python 优化框架,在参数物理可行域约束下,通过最大化加权综合目标函数实现双目标同步优化迭代。针对不同权重组合,分别运行模型,当综合目标函数达到最小值时,记录对应的产流和汇流参数最优解集,最终分析权重代表性并确定全局最优参数配置,确保水文过程模拟的系统一致性。

c. 参数率定结果整合。在参数率定过程中,通过产流参数与汇流参数的协同优化,确保模型整体性能。为确定最优 w,将 w 设置为多个值,分别对模型进行参数率定。由表 2 可知,$w=0.2$ 时 F_{out} 最大,因此将 w 设置为 0.2。

表 2　多目标率定结果

Table 2　Multi-objective calibration results

w	F_{out}	w	F_{out}
0.1	0.827	0.6	0.817
0.2	0.828	0.7	0.817
0.3	0.824	0.8	0.819
0.4	0.820	0.9	0.821
0.5	0.818		

2　实例验证

2.1　研究区概况

以宁夏回族自治区固原市清水河的原州流域为研究区,流域面积约 105 km^2,经纬度范围为 35°39′N~36°36′N、106°04′E~106°18′E,选取 4 个雨量站、1 个水文站(图 2)。清水河发源于六盘山东麓,流经宁夏和甘肃,最终注入黄河,流域面积 14 481 km^2,年平均水面蒸发量为 300 mm。该河流域受温带大陆性气候影响,水资源稀缺,降水时空分布不均,70%以上径流集中在汛期,且多以洪水形式出现。流域内水质差,河水矿化度高,水土流失严重。主河道在沈家河水库以上比较顺直,沈家河水库以下蛇曲蜿蜒。原州区境内,较大支流有 3 条,分别为冬至河、中河、苋麻河。清水河西侧支流洪水多、洪量大,主要来自冬至河、中河、苋麻河等支流。东部属黄土丘陵区,支流多而洪量小,主要有毛家沟、杨达子沟、大红沟、石景河等。

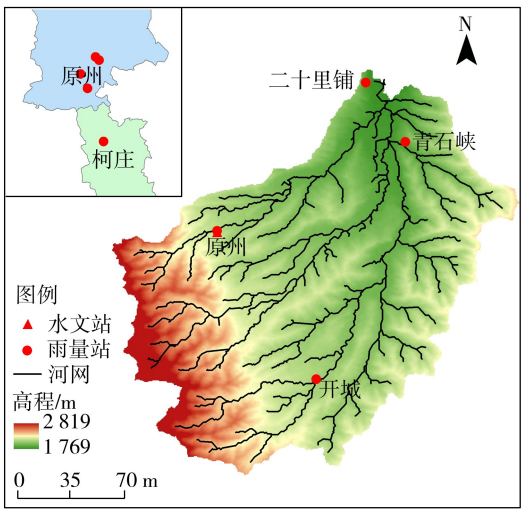


图 2　原州流域概况

Fig. 2　Overview of the Yuanzhou Watershed

2.2 研究数据

用于率定 Grid-Multi-GA 模型参数的数据主要包括 2009—2022 年实测降水、蒸发、径流数据、6 场洪水数据以及流域 DEM、内部栅格单元的坡度坡向、流径长度、流域平均坡度、平均河道坡度、植被类型、土壤类型与地形指数。初始 DEM 数据为美国太空总署(NASA)与国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM 数据,分辨率为 30 m,通过地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)下载。参考姚成[30]的研究,将 DEM 等资料通过 ArcGIS 处理后得到 input 数据。

CLDAS 土壤湿度数据来自中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS V2.0)近实时产品数据集(https://data.cma.cn/),其空间分辨率为 0.0625°、时间分辨率为 1 d,并提供 2017 年以来垂直分为 5 层(0~5、0~10、10~40、40~100、100~200 cm)的土壤湿度数据[31-35]。本文选取了 2018 年 1 月至 2022 年 5 月的 0~10、10~40、40~100 cm 深度的土壤湿度数据。根据 Grid-Multi-GA 模型的两层土壤结构,将 CLDAS 土壤湿度数据重新分层转换:0~30 cm 数据转换为模型表层土壤湿度,30~100 cm 数据转换为模型深层土壤湿度。

2.3 结果与分析

设置了 3 种不同的率定情景进行对照:①情景 1(未率定),采用 Grid-Multi-GA 模型默认参数集或基于区域土壤属性图获取的先验参数,未经任何率定;②情景 2(仅用流量率定),以流域出口断面实测流量为唯一优化目标,代表传统水文模型率定方法;③情景 3(流量与土壤湿度联合率定),同时以出口断面实测流量和流域土壤湿度为目标函数。

引入 CLDAS 遥感土壤湿度数据(2017 年 7 月、2018 年 5 月、2019 年 8 月、2022 年 5 月)对水文模型参数率定。由图 3 可知,从时间动态一致性上看,流域平均模拟土壤湿度与 CLDAS 遥感土壤湿度在时间序列上表现出较高的同步性,平均 Spearman 相关系数达到 0.84,表明两者在时间上的动态变化趋势非常吻合。同时,模拟土壤湿度与遥感土壤湿度在流域边界形态、空间梯度分布等格局特征上也呈现显著的相似性。

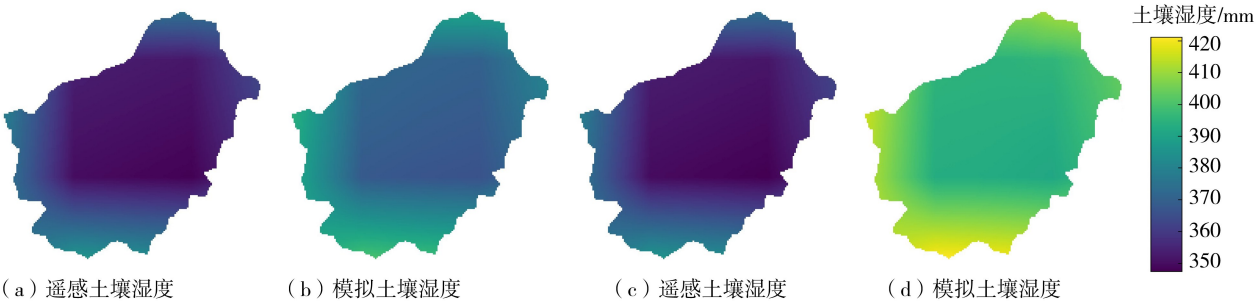


图 3 模拟土壤湿度与遥感土壤湿度时间变化

Fig. 3 Variation of simulated soil moisture and remote sensing soil moisture with time

情景 1 无需率定,故仅对比情景 2 和情景 3。由表 3 可知:与情景 2 相比,率定期情景 3 将土壤湿度动态同步性(Spearman 相关系数)提高至 0.84,径流深相对误差降低至 3.47%,洪峰流量相对误差减小为 -2.01%,峰现时间误差减小为 0,纳什效率系数提升至 0.81。率定期模拟评价指标表明,引入土壤湿度进行参数率定,提升了土壤湿度的模拟表现,从而提高了洪水的模拟精度。在参数率定中,可以针对每个网格单元分别对这些参数进行率定,以更准确地反映流域土壤物理特性,并进一步提升模型的整体模拟能力。

表 3 模型率定期和汇流验证期模拟评价指标

Table 3 Simulation evaluation indices for model calibration and flow routing verification periods

情景	Spearman 相关系数		径流深相对误差/%		洪峰流量相对误差/%		峰现时间误差/h		纳什效率系数	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
情景 1		0.42		30.68		40.21		5		0.53
情景 2	0.71	0.70	4.38	9.02	5.83	5.47	1	1	0.78	0.71
情景 3	0.84	0.85	3.47	8.11	-2.01	-2.25	0	0	0.81	0.74

注:表中评价指标分别为率定期和验证期的平均值。

由表 3、图 4 可知,验证期 3 种情景的模拟差异较为显著:情景 1,径流深相对误差为 30.68%,洪峰流量相对误差为 40.21%,表明其完全缺乏预测能力;情景 2 保持了基本可靠性,纳什效率系数为 0.71,但径流深相对误差为 9.02%,洪峰流量相对误差为 5.47%;情景 3 的 Spearman 相关系数高达 0.85,土壤湿度动态同步

性最优,洪峰流量相对误差仅为-2.25%,峰现时间误差为 0,显著优于情景 1 和情景 2。情景 3 在涨洪阶段显著优于其他情景,主要源于遥感土壤湿度数据有效约束了降雨初期的土壤湿度变化过程;至洪峰处,3 个情景模拟差异明显缩窄,因土壤饱和后产流主导因素转向降雨强度;退水期虽情景 3 仍保持小幅优势,但受限于模型主要考虑超渗产流,地面径流占比为主,在退水阶段呈现更为缓慢的态势,因此落洪阶段的拟合较差。

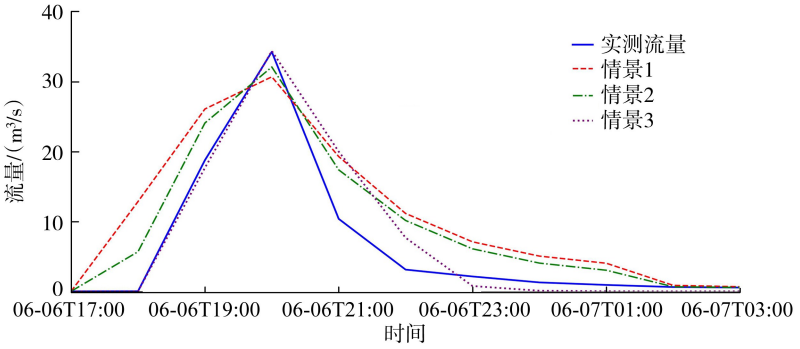


图 4　3 种情景的 2013060617 号洪水流量过程线

Fig. 4　Discharge hydrographs of flood event No. 2013060617 under three scenarios

2009—2022 年研究区仅有 6 场洪峰大于 10 m^3/s 的洪水,洪水编号分别为 2013060617、2014072712、2016082416、2018071007、2019082605、2022071016,基于情景 3 验证期这 6 场洪水的模拟评价指标见表 4。径流深模拟平均相对误差约 10%,全部洪次均为合格,洪峰流量平均相对误差约 5%,达标率为 100%;峰现时间在 4 次洪次中误差为 0,仅 2014072712 洪次实测洪峰滞后、2019082605 洪次模拟洪峰提前,主要是因为降雨空间分布不均;纳什效率系数均大于 0.70,表明了该方法在研究区的适用性。

表 4　情景 3 模型验证期模拟评价指标

Table 4　Simulation evaluation indices for model verification period in Scenario 3

洪号	径流深相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时间误差/h	纳什效率系数
2013060617	18.14	-1.67	0	0.71
2014072712	2.52	0.95	1	0.78
2016082416	11.56	1.21	0	0.73
2018071007	11.23	-8.25	0	0.71
2019082605	4.11	-1.48	-1	0.76
2022071016	2.11	1.96	0	0.74

Grid-Multi-GA 模型在验证期原州流域的汇流模拟达到预期,通过在参数率定时引入长时段连续的遥感土壤湿度数据,能在小流域地区突破传统硬数据依赖框架,基于硬数据与软数据的融合的土壤湿度动态约束-有限径流验证方法在小流域地区展现出显著可行性。

3　结　论

a. 情景 1 验证期洪峰流量相对误差和径流深相对误差均不合格,证实先验参数不可行;情景 2 虽洪峰流量相对误差为 5.47%,但径流深相对误差为 9.02%,且土壤湿度同步性偏低;情景 3 则实现洪水高精度模拟与土壤湿度最佳模拟,系统验证了联合率定方法的可行性。

b. 流量与土壤湿度联合率定的 Grid-Multi-GA 模型的模拟评价指标满足精度要求,证实该模型在宁夏半干旱流域具有可靠的洪水模拟能力。本文参数率定方法更好地考虑土壤湿度时空分布,有利于进一步提高洪水模拟预报精度。

参考文献:

[1] 程艳,裴盼盼,张祥祥. 国内外流域水文模型研究进展[J]. 现代农业科技,2023(23):133-136. (Cheng Yan, Pei Panpan, Zhang Xiangxiang. Research progress on watershed hydrological models at home and abroad[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(23): 133-136. (in Chinese))

[2] 杜若愚,程龙,蒲博文,等. Grid-XAJ 与 Grid-GA 模型在小流域洪水模拟中的适用性对比验证[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2024-12-12. https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20241212.1102.002. (Du Ruoyu, Cheng Long, Pu

Bowen, et al. Comparison and verification of the applicability of Grid-XAJ and Grid-GA models in small watershed flood simulation[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024-12-12. https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20241212.1102.002. (in Chinese))

[3] Roy A, Kasiviswanathan K S, Patidar S, et al. A novel physics-aware machine learning-based dynamic error correction model for improving streamflow forecast accuracy[J]. Water Resources Research, 2023, 59(2): e2022WR033318.

[4] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):471-480. (Li Zhijia, Yao Cheng, Zhang Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 471-480. (in Chinese))

[5] Seibert J, Mcdonnell J J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration[J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1241.

[6] 李巧玲,刘兴文,李致家,等. 多源多层土壤湿度实时同化及在实时洪水预报中的应用[J]. 水科学进展,2024,35(5):773-783. (Li Qiaoling, Liu Xingwen, Li Zhijia, et al. Real-time multi-source information assimilation improves multi-layer soil moisture for real-time flood forecasting[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 773-783. (in Chinese))

[7] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护,2023,39(1):109-118. (Zhang Li, Zhao Ziyang, Wang Hongrui, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 109-118. (in Chinese))

[8] 刘永伟,王文,刘元波,等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):483-491. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 483-491. (in Chinese))

[9] 张珂,周佳奇,张企诺,等. 栅格岩溶分布式水文模型[J]. 水资源保护,2022,38(1):43-51. (Zhang Ke, Zhou Jiaqi, Zhang Qinuo, et al. Grid-based karst distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 43-51. (in Chinese))

[10] 吴洪石,石朋,瞿思敏,等. 水文相似性研究进展[J]. 水资源保护,2023,39(6):77-86. (Wu Hongshi, Shi Peng, Qu Simin, et al. Research progress on hydrologic similarity[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 77-86. (in Chinese))

[11] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):1-8. (Wu Yongtuo, Li Zhijia, Qi Zhenya, et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 1-8. (in Chinese))

[12] 刘永伟,王文,刘元波,等. 基于 EnKF 方法和 SWAT 模型的土壤湿度数据同化试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2024,57(1):17-27. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Soil moisture data assimilation experiment based on EnKF method and SWAT model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(1): 17-27. (in Chinese))

[13] 耿德源,赵天杰,施建成,等. 地基雷达的微波面散射模型对比与土壤水分反演[J]. 遥感学报,2021,25(4):929-940. (Geng Deyuan, Zhao Tianjie, Shi Jiancheng, et al. Surface microwave scattering model evaluation and soil moisture retrieval based on ground-based radar data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(4): 929-940. (in Chinese))

[14] 何涯舟,张珂,晁丽君,等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. 水资源保护,2023,39(2):145-151. (He Yazhou, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 145-151. (in Chinese))

[15] Pierdicca N, Fascetti F, Pulvirenti L, et al. Analysis of ASCAT, SMOS, in-situ and land model soil moisture as a regionalized variable over Europe and North Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 170: 280-289.

[16] 姜璐璐,吴欢,Alfieri L,等. 基于遥感与区域化方法的无资料流域水文模型参数优化方法[J]. 北京大学学报(自然科学版),2020,56(6):1152-1164. (Jiang Lulu, Wu Huan, Alfieri L, et al. Review of regionalization and remote sensing based method for hydrological model parameters calibration in ungauged basins[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(6): 1152-1164. (in Chinese))

[17] 刘化芳,张成福,冯霜,等. 水文模型研究进展[J]. 绿色科技,2023,25(18):49-53. (Liu Huafang, Zhang Chengfu, Feng Shuang, et al. Research progress of hydrological models[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(18): 49-53. (in Chinese))

[18] 陈骄锐,李绍红,罗晓辉,等. 改进的 Green-Ampt 模型及其试验验证[J]. 工程地质学报,2023,31(5):1728-1737. (Chen Jiaorui, Li Shaohong, Luo Xiaohui, et al. An improved Green-Ampt model and its experimental verification [J]. Journal of

Engineering Geology,2023,31(5):1728-1737. (in Chinese))

[19] 曾凌,陈金凤,李雨,等. 基于卫星遥感数据率定分布式水文模型参数[J]. 水资源研究,2022,11(6):561-571. (Zeng Ling, Chen Jinfeng, Li Yu, et al. Parameter calibration of a distributed hydrological model based on satellite remote sensing data[J]. Journal of Water Resources Research,2022,11(6):561-571. (in Chinese))

[20] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (Du Ruoyu, Yao Cheng, Liu Yuhuan, et al. Grid-Xin'anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))

[21] 王越,李巧玲,肖杨. 概念性水文模型与智能模型在中小河流洪水模拟中的比较研究[J]. 水文,2024,44(1):44-49. (Wang Yue, Li Qiaoling, Xiao Yang. Comparative study of conceptual hydrological model and intelligent model in flood simulation of small and medium rivers[J]. Journal of China Hydrology,2024,44(1):44-49. (in Chinese))

[22] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):47-54. (Huo Wenbo, Li Zhijia, Zhang Ke, et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):47-54. (in Chinese))

[23] 李致家,霍文博,张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):385-391. (Li Zhijia, Huo Wenbo, Zhang Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):385-391. (in Chinese))

[24] Kang Shouxuan, Fei Liangjun, Zhong Yun, et al. A modified Green-Ampt infiltration model for muddy water[J]. Journal of Hydrology,2024,629:130606.

[25] 罗玉玲,秦洪亮,姚成,等. 基于网格水滴的汇流模拟计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):9-17. (Luo Yuling, Qin Hongliang, Yao Cheng, et al. Confluence calculation method based on grid water drop[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):9-17. (in Chinese))

[26] 李致家,孔凡哲,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2022.

[27] Chen Xi, Yang Tao, Wang Xiaoyan, et al. Uncertainty intercomparison of different hydrological models in simulating extreme flows[J]. Water Resources Management,2013,27(5):1393-1409.

[28] Zhuo Lu, Dai Qiong, Han Dawei. Evaluation of SMOS soil moisture retrievals over the central United States for hydro-meteorological application[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2015,83-84:146-155.

[29] 吴平辉,张佳鹏,王加虎,等. 径流与土壤湿度数据联合率定水文模型参数研究[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(4):72-76. (Wu Pinghui, Zhang Jiapeng, Wang Jiahu, et al. Study on multi-objective optimization of hydrological model based on runoff and soil moisture[J]. China Flood & Drought Management,2022,32(4):72-76. (in Chinese))

[30] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京:河海大学,2007.

[31] Zhu Qian, Wang Yushi, Luo Yulin. Improvement of multi-layer soil moisture prediction using support vector machines and ensemble Kalman filter coupled with remote sensing soil moisture datasets over an agriculture dominant basin in China[J]. Hydrological Processes,2021,35(4):e14154.

[32] 中华人民共和国水利部. 土壤墒情监测规范:SL 364—2015[S].

[33] WANG Yuanyuan, LI Guicai. Evaluation of simulated soil moisture from China Land Data Assimilation System (CLDAS) land surface models[J]. Remote Sensing Letters,2020,11(12):1060-1069.

[34] 韩帅,师春香,姜立鹏,等. CLDAS 土壤湿度模拟结果及评估[J]. 应用气象学报,2017,28(3):369-378. (Han Shuai, Shi Chunxiang, Jiang Lipeng, et al. The simulation and evaluation of soil moisture based on CLDAS[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2017,28(3):369-378. (in Chinese))

[35] 师春香,姜立鹏,朱智,等. 基于 CLDAS2.0 驱动数据的中国区域土壤湿度模拟与评估[J]. 江苏农业科学,2018,46(4):231-236. (Shi Chunxiang, Jiang Lipeng, Zhu Zhi, et al. Simulation and evaluation of soil moisture in Chinese regions based on CLDAS2.0 driven data[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(4):231-236. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-25　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.002

水上光伏覆盖率对水生态环境的影响机制研究进展

王沛芳[1,2],张琳倩[1,2],张文静[1,2],刘雨曦[1,2],杨璐宇[1,2],王 洵[1,2]

(1.河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室;2.河海大学环境学院)

摘要:通过系统梳理 94 篇关于水上光伏电站对水生态系统影响相关的文献,分析了水上光伏电站对水体非生物要素(水温、溶解氧浓度、营养盐浓度及污染物分布)、水生生物(浮游植物、水生植物、浮游动物、鱼类及鸟类)的影响,认为光伏面板覆盖率是驱动生态效应的核心因子,且水上光伏电站通过光-热耦合胁迫重塑浮游植物群落结构,抑制沉水植物光合作用,改变鱼类代谢节律及鸟类迁徙行为,并触发跨营养级生态级联效应。结合分区布局与材料优化、平衡发电效益与生态保护,提出了水上光伏覆盖率动态调控策略,即水域核心区覆盖率小于 30%,生态缓冲区覆盖率设置为 30%~60%;指出未来需进一步深入解析光热效应与气候变化的叠加响应机制,构建水动力-生态耦合模型,推动水上光伏发电向多能互补、生态协同的可持续模式发展。

关键词:水上光伏电站;水面覆盖率;生态影响;水环境;水生生物

Research progress on impact mechanism of floating photovoltaic coverage ratio on aquatic ecological environment

Wang Peifang[1,2], **Zhang Linqian**[1,2], **Zhang Wenjing**[1,2], **Liu Yuxi**[1,2], **Yang Luyu**[1,2], **Wang Xun**[1,2]

(1. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Department on Shallow Lakes*, *Ministry of Education*, *Hohai University*; 2. *College of Environment*, *Hohai University*)

Abstract: Through a systematic review of 94 pieces of literature related to the impact of floating photovoltaic power stations on aquatic ecological environments, the effects of such power stations on abiotic factors in water bodies (water temperature, dissolved oxygen concentration, nutrient concentration, and pollutant distribution) and aquatic organisms (phytoplankton, aquatic plants, zooplankton, fishes, and birds) were analyzed. It concludes that the photovoltaic panel coverage ratio is the core factor driving ecological effects. Floating photovoltaic power stations reshape phytoplankton community structures through light-thermal coupled stress, inhibit the photosynthesis of submerged plants, alter fish metabolic rhythms and birds' migration behaviors, and trigger cross-trophic-level ecological cascade effects. By combining zonal layout and material optimization while balancing power generation benefits and ecological protection, a dynamic regulatory strategy for the floating photovoltaic coverage ratio is used: Coverage ratio in core water areas should be less than 30%, while that in ecological buffer zones should be set between 30% and 60%. It also points out the need for future research to further analyze the superimposed response mechanisms of photothermal effects and climate change, construct hydrodynamic-ecological coupling models, and promote the development of floating photovoltaic power generation toward a sustainable model featuring multi-energy complementarity and ecological synergy.

Key words: floating photovoltaic power station; water surface coverage ratio; ecological impact; water environment; aquatic organism

随着能源短缺和传统能源环境污染问题愈加突出,发展清洁能源的需求日益紧迫[1]。世界各国正优先考虑开发太阳能,尤其是太阳能光伏发电技术[2],以减轻能源生产对环境的负面影响[3-4]。水上光伏电站不仅可以有效缓解太阳能需求与土地供应限制之间的紧张关系[5],且比地面光伏平均效能高出 11%[6]。此外,水上光伏有极高的脱碳潜力,在全球范围内每年可减少 4.5 亿 t CO_2 排放[7],同时太阳能光伏面板的铺设可有效减少水体蒸发,平均水面蒸发抑制率达 32.7%[8-9]。

全球水上光伏产业历经三阶段演进:技术验证期(2007—2013 年)、加速发展期(2014—2016 年)、爆发式增长期(2017 年至今),其演化轨迹呈现显著非线性特征。自 2017 年起,全球累计装机容量呈现指数型增

基金项目:河海大学大学生创新创业训练项目(202410294064Z);国家自然科学基金创新研究群体项目(51421006);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B230201026);国家自然科学基金面上项目(42377054)

作者简介:王沛芳(1973—),女,教授,博士,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail:pfwang2005@hhu.edu.cn

通信作者:王洵(1989—),女,青年教授,博士,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail:xwang2014@hhu.edu.cn

长趋势[10],至 2019 年末突破 2 GW 阈值[11],预计 2026 年的年装机量将达 4.1 GW[12]。地域分布呈现显著空间异质性,亚洲市场占据全球 67%以上份额并形成极化现象[13],其中中国虽起步较晚但实现了跨越式发展,现已形成全球最大规模水上光伏矩阵(装机总量突破 10 GW 阈值)并主导国际市场[10,14]。从工程维度划分,系统架构包含固定式与漂浮式两类范式,部署环境涵盖淡水与海水基质[15]。功能创新层面,水光互补模式通过水电调峰实现功率平滑输出,有效提升电网消纳能力[16-17];渔光互补系统则构建光伏-水产复合生态系统,通过遮光效应抑制藻类过度繁殖,同步降低蒸发强度,改善水体热力学环境并提升渔业经济收益[18]。目前,水上光伏建设正朝着多能互补、生态协同的第四代能源系统方向迭代演进。

随着水上光伏电站快速发展,其对水生态环境的影响逐渐受到关注。水生态系统作为地球生态环境的核心,由非生物与生物要素紧密交织、相互作用构成。光照、水温、溶解氧等非生物要素是水生生物生存繁衍的基础[19],水上光伏通过减少水体辐照度、降低水体表面风速显著改变水温等非生物指标,进而影响水生生物。在生物层面,水生态系统承载着丰富的生物多样性,其复杂的食物链和食物网依靠各营养级生物维持稳定[20]。浮游植物等微生物贡献着水生系统的初级生产力,水生植物和水生动物在稳定食物网中发挥关键作用。但水上光伏建设会干扰各营养级生物,最终可能破坏食物网结构。目前,水上光伏建设对水生系统影响的研究缺乏系统性,内在机制尚不明确。

本文通过分析 94 篇相关文献,系统梳理和总结水上光伏对水体非生物要素以及水生生物的生物量和物种组成、生物多样性的影响,并指出水上光伏电站对生态环境影响未来需重点关注的问题,以期为我国太阳能资源的合理开发利用以及水生态环境保护提供理论支持与实践指导。

1　水上光伏电站对水体非生物要素的影响

水体的理化性质等非生物要素,如水温、溶解氧、营养盐浓度及污染物分布,是维系水生态系统功能的基础框架。水上光伏电站的覆盖显著改变了这些非生物要素的时空格局,一方面水上光伏面板通过影响入水辐射量,改变水体热量;另一方面,光伏组件材料的环境迁移(如微塑料析出、酚类化合物溶出)存在直接引入新污染物的风险。这些非生物参数的连锁变化,通过光-热-氧-营养盐的级联效应,重塑了水环境的功能边界。

1.1　对水温的影响

水温调控水生态系统的物理、化学和生物过程[21]。水上光伏影响下,水温呈现显著的双峰型特征,表明光伏面板覆盖率对水体热动力特性具有非线性调控效应。当水上光伏电站覆盖率从 0 增至 10%时,表层水温微弱波动被水体较高的热容量(水体热容量为 4.2 kJ/(kg · K))及混合层热惯性有效缓冲[22];当覆盖率突破 10%临界阈值后,系统发生非线性相变,水温呈现先降后升的分段响应特征。迈瓦尔德湖模拟结果也证明[23],在低覆盖率阶段(小于 10%),短波辐射衰减主导冷却效应[24],主要是源于垂向传热抑制及蒸发冷却强化[23,25];当覆盖率超过阈值,长波辐射增强与传导热通量输入协同驱动水温上升,水体热惯性缓冲效应减弱,叠加风驱表层流削弱导致的水体分层加剧,形成热累积正反馈机制[26-27](图 1)。然而,目前针对覆盖率影响阈值的研究仍十分有限,亟须建立基于水-光-气耦合模型的动态监测体系,以精准解析水上光伏电站-水域生态系统的热力学调控阈值及其生态水文耦合机制。

1.2　对溶解氧的影响

溶解氧是水体生化条件改变的敏感指标。水上光伏覆盖率对水体溶解氧含量有着非线性调控机制。Li 等[28]发现,水上光伏覆盖率显著驱动溶解氧含量的倒 U 形变化,当覆盖率为 50%时溶解氧含量最高,主要是由于光伏组件遮蔽短波辐射引发水体冷却。Sánchez 等[29]也发现随着水温降低,溶解氧饱和度增加,冷却效应会通过增强水-气传质系数促进氧气扩散[30]。然而,覆盖率超过 50%时,受水上光伏遮蔽影响,水生系统光合作用和呼吸作用平衡被打破,短波辐射透过率骤降,导致光合作用速率与呼吸作用速率显著失衡,形成氧亏效应[30-31],溶解氧含量转而下降。同时,施工期沉积物再悬浮使水体浊度上升,湍流系数衰减和化学需氧量提升,导致溶解氧含量下降[32]。因此,为降低生态影响,低覆盖率区(<30%)可采用高透光的晶硅组件,而中高覆盖率区可以配置浮式曝气系统与藻类竞争抑制剂。此外,未来可针对不同区域特点,确定不同最优覆盖率,使资源开发与生态环境保护协同发展。

1.3　对富营养化状况的影响

氮、磷是造成水体富营养化的决定因素[33-34]。研究表明,覆盖率显著驱动水体总磷(TP)浓度呈现双峰

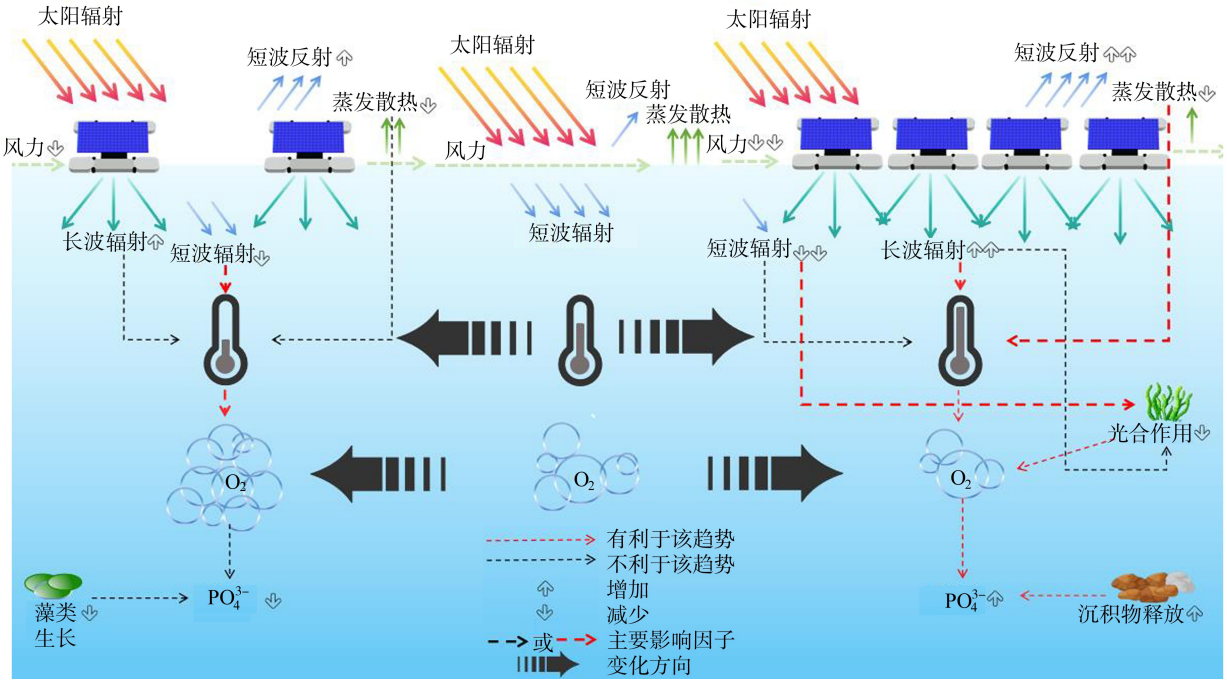


图1 水上光伏电站对水温、溶解氧、磷酸盐的影响

Fig. 1 Effect of floating photovoltaic power station on water temperature, dissolved oxygen, and phosphate

响应特征,当光伏覆盖率增至50%时,正磷酸盐浓度先下降11.65%后回升至初始水平[35],其动态演变受微生物矿化、藻类光抑制及沉积物再释放、厌氧释磷速率等多重调控[36-39]。其降低趋势是由于低覆盖率导致的适度遮光和降温,有效控制藻类生物量[39],使沉积物-水系统中藻类介导的磷释放过程被抑制[38];其上升趋势则是因为缺氧条件,厌氧释磷速率加快,促进了沉积物中磷的释放,使正磷酸盐的释放量远高于好氧条件[39]。同时,水体总氮(TN)浓度在低覆盖率下无显著变化[40],而在覆盖率大于50%的区域因沉积有机物矿化加速导致TN、TP累积风险增加[41]。而叶绿素a(Chl-a)浓度呈现阈值型响应特征,低覆盖率因光抑制解除导致Chl-a浓度异常升高,而高覆盖率下遮光效应与水温调控使Chl-a浓度显著下降[41-44]。当前研究在剂量效应方面存在一定争议,Lee等[40]基于6个监测点数据认为水上光伏电站对各类指标均无显著影响,而宋鑫等[41]通过干湿季的88组采样揭示了覆盖率大于50%时光伏板的覆盖降低了浮游植物对营养盐的利用率,可控制水体进一步富营养化。未来可通过构建光-热-营养盐耦合模型,量化水上光伏电站调控效应的时空异质性,探究对应藻类抑制与沉积物释放主导区,并提出生态友好型调控区间。

1.4 对污染物的影响

水上光伏电站对水体污染物的调控作用体现为直接释放与间接光化学效应的双重路径。直接污染途径涉及光伏组件与浮体材料的环境迁移,如晶硅电池封装材料中含有的酚类抗氧化剂(如BHT)在pH为6.5~7.5条件下有溶出风险,其释放风险与光伏覆盖率正相关[45]。水上光伏主要浮体材质高密度聚乙烯(HDPE)在光照条件下会显著浸出溶解有机碳(DOC)和总溶解氮(TDN)[46],尤其在加速中波红斑效应紫外线辐照条件下,每千克高密度聚乙烯DOC和TDN浸出量分别高达91~282 mg和1 805~2 285 mg[47]。人为活动可能会导致水上光伏体系中不同成分中的微塑料、有机碳、重金属和准金属在更大程度上浸出[45],如封装材料(如EVA)的降解会直接释放微塑料和有机碳,并破坏关键屏障,导致内部重金属与准金属被加速释放。在酸性雨水及破损条件下,晶硅组件中铅的浸出比例可达初始含量的17.9%~24.4%[48]。因此,材料选择对生态风险具有决定性调控作用。间接调控机制表现为光催化降解活性的空间异质性,如光降解在去除双氯芬酸[49]、有机磷[50]等有机污染物的过程中发挥重大作用。而光降解过程仅在光线充足的白天活跃,其过程包括光照导致的电子直接跃迁和光敏剂接收光子以产生的活性中间体降解污染物,因此光照显著调控光降解速率[51]。而水上光伏面板的覆盖会对进入水体的光照进行遮挡,使污染物的光降解过程受到抑制,但其对不同污染物的影响程度与作用机制仍需要进一步研究。

2　水上光伏电站对水生生物的影响

水环境与水生生物通过物质循环、能量流动和生物地球化学循环等过程紧密关联,水环境的理化性质(如水温、溶解氧)为水生生物提供生存基础,而水生生物的活动(如摄食、代谢)则改变水体理化指标,二者相互作用形成动态平衡。一方面,非生物要素的改变通过间接调控,重塑了水生生物群落的结构与功能,即光强抑制、水温波动等通过光-温-氧级联效应间接影响生物群落;另一方面,光伏组件本身的存在也直接对生物生存起到调控作用,即光伏面板的物理遮挡、材料浸出物直接作用于生物体。例如,面板遮光直接限制沉水植物收到的光照强度,而浮体释放的微塑料可通过摄食进入鱼类消化道[46]。本文将按生物类型(浮游植物、水生植物、浮游动物、鱼类及鸟类)分类阐述水上光伏电站的影响趋势及机理,并揭示其复合作用对食物网稳定性的潜在风险。

2.1　对浮游植物的影响

浮游植物作为水生系统的核心初级生产者,通过光合固碳驱动碳循环与能量流动,其生物量分布与群落结构直接调控水体营养状态[52]。光伏面板通过遮蔽太阳辐射引发浮游植物光抑制效应,当覆盖率大于 30%时,光合固碳速率下降,导致总生物量显著减少[5-6,11,53-58](图 2)。群落结构响应呈现阈值特征:低覆盖率区(<30%)硅藻占优(占比>60%),高覆盖率区(>60%)绿藻的占比增加[58]。水温调控效应进一步加剧生物量衰减[59],光伏覆盖导致春季表层水温降低 0.2℃、夏季降低 0.8℃[60],抑制了浮游植物酶活性,并影响了浮游植物对营养物质的吸收、利用效率,水温每降低 1℃时,浮游植物的丰度下降 9%[61]。此外,由于覆盖率会影响溶解氧含量,浮游植物的缺氧风险也会显著增大[62-63]。因此,应定量解析光-热-氧协同驱动效应,精准调控光伏覆盖率,实现生物量和藻类毒素释放抑制的协同优化,为水体污染防控和生态修复提供新范式。

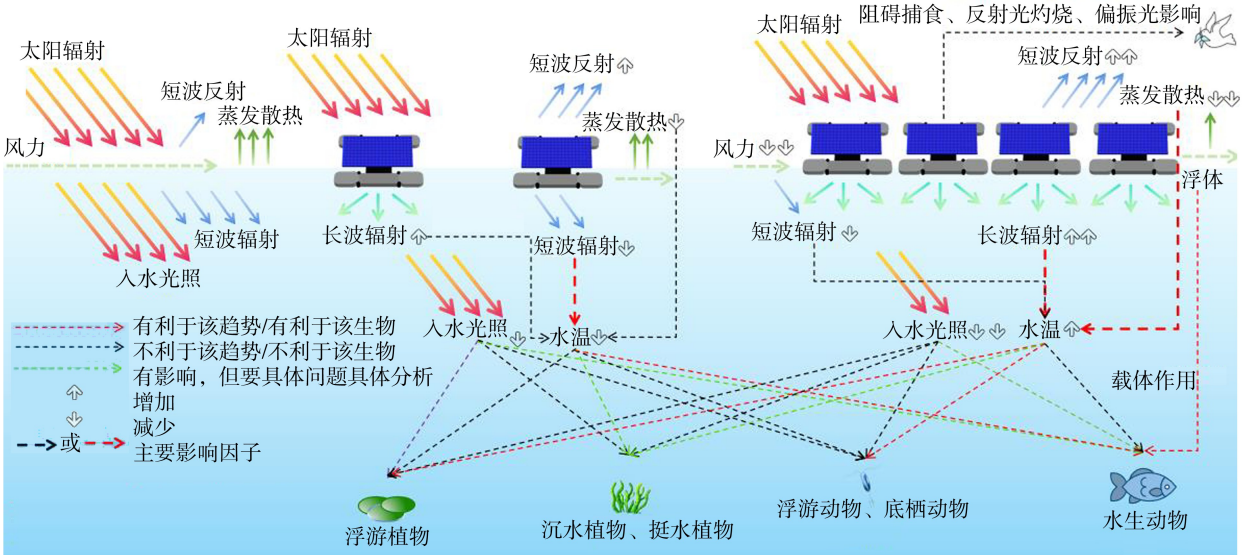


图 2　水上光伏电站对水生生物的影响

Fig. 2　Effect of floating photovoltaic power station on aquatic organisms

2.2　对水生植物的影响

水生植物对光伏覆盖的响应呈现多维环境胁迫的级联耦合机制。光照调控方面,以芦苇为例,低辐照度通过抑制光系统Ⅱ(PⅡ)电子传递链活性,限制 ATP/NADPH 供给,导致卡尔文循环中核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶羧化效率下降[64];而高光强则通过光抑制效应(如 D1 蛋白光氧化降解)和活性氧(ROS)累积引发光损伤[65]。沉水植物同样也会受到光照的影响,如苦草叶长与光强负相关[66]。其中物种适应性差异表现为遮光耐受型(如篦齿眼子菜通过扩大捕光色素蛋白复合体适应低光)与光敏感型(如大茨藻依赖高光驱动的 C4 代谢途径)的分化[67]。而光伏覆盖带来的水温波动通过影响酶促反应动力学和膜流动性,对不同类植物实施不同的调控作用,如黑藻、苦草喜温,金鱼藻耐寒[68-69],三者输出结果各有不同。此外,营养盐再分布触发植物离子稳态重构,轻度富营养化促进沉水植物硝酸盐同化和硝酸还原酶活性提升[70],但其在重度富营养化的水中则限制植物生长[71]。各类富营养化元素占比影响不同,如高氮磷比通过铁-磷共沉淀效应诱导

菹草铁限制性生长抑制[72]。光伏面板的安装可能导致营养物质的释放,从而对水生植物产生影响。此外,水体中的污染物质如重金属等能通过干扰植物的细胞生理活动来抑制其生长[68]。

2.3 对浮游动物和底栖动物的影响

水上光伏通过光照调控与热力学扰动,对浮游与底栖动物形成光-热耦合胁迫,进而重构其群落动态。水上光伏建设带来的光衰减直接抑制浮游动物光周期依赖性发育,例如甲壳类幼体孵化同步性破坏[73],并通过异养代谢与摄食行为解耦改变营养级联效应,典型表现为乌鳢幼鱼暗适应摄食强度提升[74]。水温波动通过热适应性阈值分化驱动浮游动物优势物种转变,当春秋季温度变化±1℃,会引发27%的丰度增减,以及温/冷水种的演替[62]。同时,水温也是影响底栖动物空间分布的主要环境因子,研究发现夏季大型底栖动物种类数量显著高于秋冬季[75]。综上,水上光伏建设会通过光-热协同效应使浮游动物生物量衰减及底栖群落功能冗余度下降,并重构生物群落结构。

2.4 对水生动物及鸟类的影响

水上光伏通过光胁迫、热力学扰动、溶解氧梯度重构及物理结构效应驱动水生动物生态位重塑。光照调控直接影响鱼类行为策略,如许氏平鲉群体游动的平均速度会随光照强度的增加而加快[76],而山女鳟在高光照条件下摄食效率与生长率优势验证光强驱动的生物能量分配优化[76]。水温也会影响鱼类的生理活动,当水温超过临界温度时则会导致鱼类机体内代谢紊乱、活动能力降低,甚至死亡[77],而适度遮阴可拓展养殖物种的热适应窗口,同步改善生长速率与繁殖成功率[78-79]。缺氧条件对鱼类生长有不利作用[80-81],溶解氧质量浓度低于5 mg/L时不利于有氧代谢产能,低于1 mg/L甚至引发窒息级联反应,会导致大规模鱼类死亡[82],光伏覆盖区的水温下降与溶解氧含量协同提升机制为渔业资源增殖提供潜在增益[83]。人工结构效应表现为光伏基质的生态工程功能,例如贝类附着生物量累积与类礁体聚集效应提升鱼类空间利用效率[84],然而偏振光干扰与栖息地破碎化导致鸟类迁徙导航紊乱及碰撞死亡率上升,由此形成捕食压力缓释与鸟类多样性衰减的拮抗效应[85-87]。上述多维环境因子的非线性互馈作用最终驱动水生动物群落结构与能流路径的拓扑重构。

2.5 对水生系统食物网的影响

水上光伏通过温度介导的代谢异速增长与光周期调控重构营养级联效应。浮游动物摄食效率呈现温度依赖性阈值响应[88],例如拟长腹剑水蚤在5~25℃范围内摄食率随水温上升呈线性增长,而桡足类在超过30℃时因酶热变性导致摄食抑制[89]。鱼类代谢率则遵循Arrhenius动力学模型,水温升高诱导摄食量增加[90-91],但光伏遮阴区温降引发浮游动物与鱼类间的营养传递效率衰减,例如拟长腹剑水蚤的能量通量下降导致鱼类营养供应不足[89]。光周期通过调控摄食节律影响能量传输路径,食蚊鱼日间摄食强度优势[92]、叉尾斗鱼仔鱼光驱动摄食正反馈[93]与乌鳢幼鱼暗适应摄食策略[75]形成多维光响应谱,而银鱼双峰摄食模式揭示光周期相位调谐的物种特异性[91]。

为系统量化上述光-热协同扰动对食物网结构的级联影响,生态网络分析提供了一种系统建模与能流路径解析的有效工具[94]。生态网络分析基于食物网拓扑结构与能流矩阵,可量化表征不同光伏覆盖率下能量在网络中的传输效率、循环指数、系统冗余度及关键物种/路径的贡献度变化。例如,通过构建浮游植物-浮游动物-鱼类简化能流网络,可模拟不同覆盖率(如<30%、30%~60%、>60%)下光抑制与水温变化对各营养级间能量通量的影响,识别系统脆弱性节点与能流瓶颈。光伏覆盖导致的浮游植物初级生产力下降可通过生态网络分析量化为系统总能流的降低[95],而中高覆盖率下营养级联解耦可体现为网络互惠性下降与循环流比例异常波动,提示系统稳定性衰减[96]。因此,未来研究可结合水文-生态耦合模型与生态网络分析方法,动态模拟不同光伏布局情景下食物网的能流重组过程,从而为制定覆盖率调控阈值与生态修复策略提供定量依据。

综上,光-热协同扰动通过代谢速率失配与摄食节律紊乱触发食物网结构重塑,结合生态网络分析方法可进一步量化能流路径变化及其系统级影响,并从跨营养级能量流动态与非线性互作网络视角解析其生态级联效应。

3 结 语

本文系统分析了水上光伏开发对水生态系统的影响,认为水上光伏电站覆盖率是主导其生态环境效应

的关键因子。非生物参数呈非线性响应,水温与溶解氧含量随覆盖率增加分别呈现阈值转折(先降后升)及倒 U 形变化(先升后降),但富营养化响应方向仍需系统验证。水上光伏电站覆盖率对水生态系统的影响机理复杂性源于多因子互馈作用,包括短波辐射衰减与风速降低对水温的拮抗效应,以及溶解氧-藻类生长-营养盐循环的级联反馈等。生物层面,水上光伏电站通过光-热耦合胁迫重塑群落结构,适度遮光抑制浮游植物生物量,降低富营养化风险,浮游与底栖动物丰度及多样性衰减,鱼类和鸟类呈现物种特异性响应(如代谢节律紊乱、迁徙行为干扰)。食物网能流路径因摄食效率异变(如浮游动物温度依赖性摄食阈值)及营养级联解耦而拓扑重构,加剧生态风险不确定性。

未来的水质影响研究中,需要充分考虑水上光伏组件覆盖率、面板材料其设置形式等对水生态系统的不同影响,细化覆盖率设置梯度等试验条件,综合分析找到生态效益最高点和生态风险最低点,并设置对应环境保护方案。为了平衡水上光伏电站发电效益与生态保护,可采用覆盖率动态调控策略即根据不同水域的生态需求,进行分区布局。在水域核心区,将水上光伏电站覆盖率控制在 30%以下,以减少对水生生物的负面影响;在生态缓冲区,将覆盖率设置在 30%~60%之间,兼顾发电效率与生态修复功能。还可进一步深入考虑水上光伏面板的倾角及水上光伏电站的结构设置对水生态系统的影响,探究其改善水上光伏负面影响的潜在效能,为水上光伏系统建设提供环境友好的解决方案。此外,目前已有研究仅关注部分藻类及少量鱼类,缺乏对水生系统食物网中各参与者间相互作用的探究,亟待从生态系统整体层面全面解析水上光伏系统的环境影响。未来的水上光伏产业需基于多尺度优化策略平衡发电与生态保护,包括动态调控覆盖率、分区布局、优化面板倾角与结构设计、强化生态功能(如人工基底效应),同时构建水动力-生态耦合模型,量化覆盖率梯度对能流网络的阈值效应,最后开展跨营养级互作研究,解析水上光伏电站驱动的正/负反馈机制。通过机理-模型-调控三位一体框架,实现水上光伏电站与水生态系统的协同优化。

参考文献:

[1] 张建平,张旭. “一带一路”伙伴国家应对气候变化资金需求评估研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2022,24(4):75-87. (Zhang Jianping,Zhang Xu. The assessment of the financial demand of BRI partner countries to cope with climate change[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences),2022,24(4):75-87. (in Chinese))

[2] Jean J,Brown P R,Jaffe R L,et al. Pathways for solar photovoltaics[J]. Energy & Environmental Science,2015,8(4):1200-1219.

[3] Qazi A,Hussain F,Rahim N A B D,et al. Towards sustainable energy:a systematic review of renewable energy sources,technologies,and public opinions[J]. IEEE Access,2019,7:63837-63851.

[4] Tang Jian,Ni Hao,Peng Runling,et al. A review on energy conversion using hybrid photovoltaic and thermoelectric systems[J]. Journal of Power Sources,2023,562:232785.

[5] Gorjian S,Sharon H,Ebadi H,et al. Recent technical advancements,economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems[J]. Journal of Cleaner Production,2021,278:124285.

[6] Sahu A,Yadav N,Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant:a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,66:815-824.

[7] Woolway R I,Zhao G,Rocha S M G,et al. Decarbonization potential of floating solar photovoltaics on lakes worldwide[J]. Nature Water,2024,2(6):566-576.

[8] 石兴鹏. 干旱区水上光伏发电及防蒸发节水试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.

[9] Bai Bo,Xiong Siqin,Ma Xiaoming,et al. Assessment of floating solar photovoltaic potential in China[J]. Renewable Energy,2024,220:119572.

[10] 张木梓,王艺澄. 全球水上光伏产业的发展现状及市场前景分析[J]. 太阳能,2020(7):19-24. (Zhang Muzi,Wang Yicheng. Global floating PV industry development status and market prospect analysis[J]. Solar Energy,2020(7):19-24. (in Chinese))

[11] Kumar M,Niyaz H M,Gupta R. Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2021,233:111408.

[12] Ghosh A. A comprehensive review of water based PV:flotavoltaics,under water,offshore & canal top[J]. Ocean Engineering,2023,281:115044.

[13] Niccolai A,Grimaccia F,Di Lorenzo G,et al. A review of floating PV systems with a techno-economic analysis[J]. IEEE Journal

of Photovoltaics,2024,14(1):23-34.
[14] 吴继亮,梁甜,糜文杰,等. 水上漂浮式光伏电站的发展及应用前景分析[J]. 太阳能,2019(12):20-23. (Wu Jiliang,Liang Tian,Mi Wenjie,et al. Development and application prospects analysis of floating PV power plants[J]. Solar Energy,2019(12):20-23. (in Chinese))
[15] Cazzaniga R,Cicu M,Rosa-Clot M,et al. Floating photovoltaic plants:performance analysis and design solutions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,81:1730-1741.
[16] 李建兵,罗洋涛,冯宇. 西藏阿里地区水光互补能源利用模式探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):465-470. (Li Jianbing,Luo Yangtao,Feng Yu. Discussion on energy utilization pattern of hydro-photovoltaic hybrid in Ngari area of Tibet[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):465-470. (in Chinese))
[17] 蓝虹. 青藏高原的"碳"路行走:探秘世界首例水光互补项目[J]. 世界环境,2023(6):16-21. (Lan Hong. Walking on the carbon road in Qinghai-Xizang Plateau:exploring the secrets of the world's first water-solar complementary power generation project[J]. World Environment,2023(6):16-21. (in Chinese))
[18] 徐洪钢. 渔光互补项目环境资源效益评价分析[D]. 南昌:南昌大学,2022.
[19] 马明珠. 水生态学视角下的河道疏浚与生态恢复[J]. 农业灾害研究,2024,14(3):238-240. (Ma Mingzhu. River dredging and ecological restoration from the perspective of water ecology[J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2024,14(3):238-240. (in Chinese))
[20] 张辉. 新时期水生态系统保护与修复新思路[J]. 农业灾害研究,2024,14(6):251-253. (Zhang Hui. New ideas for the protection and restoration of aquatic ecosystems in the new era[J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2024,14(6):251-253. (in Chinese))
[21] 余文公,夏自强,于国荣,等. 三峡水库水温变化及其对中华鲟繁殖的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(1):92-95. (Yu Wengong,Xia Ziqiang,Yu Guorong,et al. Water temperature variation in Three-Gorges Reservoir and its influences on procreation of Chinese sturgeons[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2007,35(1):92-95. (in Chinese))
[22] Exley G,Armstrong A,Page T,et al. Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification[J]. Solar Energy,2021,219:24-33.
[23] Ilgen K,Schindler D,Wieland S,et al. The impact of floating photovoltaic power plants on lake water temperature and stratification[J]. Scientific Reports,2023,13(1):7932.
[24] Aminzadeh M,Lehmann P,Or D. Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(7):4015-4032.
[25] 杨曦光,黄海军,刘艳霞,等. 水-气界面辐射能量的方向性特征及水体透射特征研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2013,38(8):1003-1008. (Yang Xiguang,Huang Haijun,Liu Yanxia,et al. Direction characteristic of radiation energy and transmission characteristic of waters at water-air surface[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2013,38(8):1003-1008. (in Chinese))
[26] Yang P P,Chua L H C,Irvine K N,et al. Radiation and energy budget dynamics associated with a floating photovoltaic system[J]. Water Research,2021,206:117745.
[27] 吴慕丹,袁万. 漂浮式水上光伏电站对湖库风生流作用机理的研究[J]. 太阳能,2021(12):30-36. (Wu Mudan,Yuan Wan. Research on action mechanism of floating water PV power station on wind-driven flow in lakes and reservoirs[J]. Solar Energy,2021(12):30-36. (in Chinese))
[28] Li Peidu,Gao Xiaoqing,Jiang Junxia,et al. Characteristic analysis of water quality variation and fish impact study of fish-lighting complementary photovoltaic power station[J]. Energies,2020,13(18):4822.
[29] Sánchez E,Colmenarejo M F,Vicente J,et al. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution[J]. Ecological Indicators,2007,7(2):315-328.
[30] El Baradei S,Al Sadeq M. Effect of solar canals on evaporation,water quality,and power production:an optimization study[J]. Water,2020,12(8):2103.
[31] Liu Zhao,Ma Chao,Li Xinyang,et al. Aquatic environment impacts of floating photovoltaic and implications for climate change challenges[J]. Journal of Environmental Management,2023,346:118851.
[32] Bray L,Reizopoulou S,Voukouvalas E,et al. Expected effects of offshore wind farms on mediterranean marine life[J]. Journal of Marine Science and Application,2016,4(1):18.
[33] 吴珊,张晓萍,张福萍. 2种藻类储磷释磷过程与生长情况对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):15-19.

(Wu Shan,Zhang Xiaoping,Zhang Fuping. Comparative study on phosphorus reserve and release process and growth of two kinds of algae[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(1):15-19. (in Chinese))

[34] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):42-49. (Liu Ruiyan,Zhang Jianhua,Liu Ling,et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):42-49. (in Chinese))

[35] Al-Widyan M,Khasawneh M,Abu-Dalo M. Potential of floating photovoltaic technology and their effects on energy output,water quality and supply in Jordan[J]. Energies,2021,14(24):8417.

[36] Zhao Haichao,Zhang Li,Wang Shengrui,et al. Features and influencing factors of nitrogen and phosphorus diffusive fluxes at the sediment-water interface of Erhai Lake[J]. Environmental Science and Pollution Research,2018,25(2):1933-1942.

[37] 陈友震. 杜塘水库沉积物-水界面氮磷释放通量研究[D]. 福州:福建师范大学,2011.

[38] Jiang Xia,Jin Xiangcan,Yao Yang,et al. Effects of biological activity,light,temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake,China[J]. Water Research,2008,42(8/9):2251-2259.

[39] Chen Xuechu,Kong Hainan,He Shengbing,et al. Reducing harmful algae in raw water by light-shading[J]. Process Biochemistry,2009,44(3):357-360.

[40] Lee I,Joo J C,Lee C S,et al. Evaluation of the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems[J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers,2017,39(5):255-264.

[41] 宋鑫,贝耀平,袁丙青,等. 水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):204-211. (Song Xin,Bei Yaoping,Yuan Bingqing,et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):204-211. (in Chinese))

[42] 李国文,董静,李根保,等. 升温对湖泊底泥藻细胞复苏及其生理特性的影响[J]. 水生生物学报,2012,36(4):696-703. (Li Guowen ,Dong Jing ,Li Genbao,et al. Effects of enhanced temperature on algae cells recruitment from sediment and their physiological characteristics[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2012,36(4):696-703. (in Chinese))

[43] 金相灿,储昭升,杨波,等. 温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响[J]. 环境科学学报,2008,28(1):50-55. (Jin Xiangcan,Chu Zhaosheng,Yang Bo,et al. Effects of temperature on growth,photosynthesis and buoyancy regulation of the cyanobacteria Microcystis flos-aquae and Planktothrix mougeotii[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(1):50-55. (in Chinese))

[44] Karpouzoglou T,Vlaswinkel B,Van Der Molen J. Effects of large-scale floating (solar photovoltaic) platforms on hydrodynamics and primary production in a coastal sea from a water column model[J]. Ocean Science,2020,16(1):195-208.

[45] Bhattacharya M,Kumar A,Nema A K,et al. Making a case for environmental risk-based monitoring of floating solar systems[J]. Environmental Science & Technology,2024,58(6):2595-2597.

[46] 郑志伟,史方,彭建华,等. 水面光伏电站对水域生态环境影响分析与对策[J]. 三峡生态环境监测,2018,3(4):47-50. (Zheng Zhiwei,Shi Fang,Peng Jianhua,et al. Influences and countermeasures of water surface photovoltaic power station on water ecological environment[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges,2018,3(4):47-50. (in Chinese))

[47] Ghanadi M,Padhye L P. Revealing the long-term impact of photodegradation and fragmentation on HDPE in the marine environment:origins of microplastics and dissolved organics[J]. Journal of Hazardous Materials,2024,465:133509.

[48] Nain P,Kumar A. Metal dissolution from end-of-life solar photovoltaics in real landfill leachate versus synthetic solutions:one-year study[J]. Waste Management,2020,114:351-361.

[49] Buser H R,Poiger T,Muller M D. Occurrence and fate of the pharmaceutical drug diclofenac in surface waters:rapid photodegradation in a lake[J]. Environmental Science & Technology,1998,32(22):3449-3456.

[50] Bouhala A,Lahmar H,Benamira M,et al. Photodegradation of organophosphorus pesticides in honey medium by solar light irradiation[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2020,104(6):792-798.

[51] Guo Zhongyu,Kodikara D,Albi L S,et al. Photodegradation of organic micropollutants in aquatic environment:importance,factors and processes[J]. Water Research,2023,231:118236.

[52] Lin Senjie. Phosphate limitation and ocean acidification co-shape phytoplankton physiology and community structure[J]. Nature Communications,2023,14(1):2699.

[53] Wang Jun,Lund P D. Review of recent offshore photovoltaics development[J]. Energies,2022,15(20):7462.

[54] Hooper T,Armstrong A,Vlaswinkel B. Environmental impacts and benefits of marine floating solar[J]. Solar Energy,2021,219:

11-14.

[55] Chang Y H, Ku C R, Yeh N. Solar powered artificial floating island for landscape ecology and water quality improvement[J]. Ecological Engineering, 2014, 69: 8-16.

[56] Song Xiangrong, Liu Tengteng, Wang Guangyao, et al. Floating photovoltaic systems homogenize the waterbird communities across subsidence wetlands in the North China Plain[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119417.

[57] Lu H L, Ku C R, Chang Y H. Water quality improvement with artificial floating islands[J]. Ecological Engineering, 2015, 74: 371-375.

[58] Exley G, Page T, Thackeray S J, et al. Floating solar panels on reservoirs impact phytoplankton populations: a modelling experiment[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116410.

[59] Lebel L, Lebel P, Chitmanat C, et al. Managing the risks from the water-related impacts of extreme weather and uncertain climate change on inland aquaculture in Northern Thailand[J]. Water International, 2018, 43(2): 257-280.

[60] Ziar H, Prudon B, Lin F Y, et al. Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inland water areas[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2021, 29(7): 725-743.

[61] De Senerpont Domis L N, Elser J J, Gsell A S, et al. Plankton dynamics under different climatic conditions in space and time[J]. Freshwater Biology, 2013, 58(3): 463-482.

[62] Cazzaniga R, Rosa-Clot M. The booming of floating PV[J]. Solar Energy, 2021, 219: 3-10.

[63] Rosa-Clot M, Tina G M, Nizetic S. Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project[J]. Energy Procedia, 2017, 134: 664-674.

[64] Baker N R, Rosenqvist E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(403): 1607-1621.

[65] 郭晓云,杨允菲,李建东. 松嫩平原不同旱地生境芦苇的光合特性研究[J]. 草业学报, 2003, 12(3): 16-21. (Guo Xiaoyun, Yang Yunfei, Li Jiandong. Studies on the photosynthetic characteristics of the leaves of *Phragmites communis* in different dry land habitats in the Songnen Plains in China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(3): 16-21. (in Chinese))

[66] Chou Qingchuan, Zhang Wei, Chen Jianfeng, et al. Phenotypic responses of a submerged macrophyte (*Vallisneria natans*) to low light combined with water depth[J]. Aquatic Botany, 2022, 176: 103462.

[67] 何玉实,王筱平,何彤慧,等. 水深、光照对三种沉水植物生长特征及除氮效果的影响[J]. 北方园艺, 2022(22): 81-90. (He Yushi, Wang Xiaoping, He Tonghui, et al. Effects of water depth and light on growth characteristics and nitrogen removal efficiency of three submerged plants[J]. Northern Horticulture, 2022(22): 81-90. (in Chinese))

[68] 余泽强,汪君晖,陈莉,等. 沉水植物生态修复现状及生长影响因素探究[J]. 工业用水与废水, 2024, 55(5): 66-71. (Yu Zeqiang, Wang Junhui, Chen Li, et al. Current status of ecological restoration by submerged plants and factors affecting plants' growth[J]. Industrial Water & Wastewater, 2024, 55(5): 66-71. (in Chinese))

[69] 胡婕,周文竹,仇恒帅,等. 升温对有沉水植物占优的水体水质影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(6): 1045-1050. (Hu Jie, Zhou Wenzhu, Qiu Hengshuai, et al. Effects of elevated temperature on water quality in an aquatic ecosystemdominated by submerged plants[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2023, 50(6): 1045-1050. (in Chinese))

[70] Beklioglu M, Moss B. Existence of a macrophyte-dominated clear water state over a very wide range of nutrient concentrations in a small shallow lake[J]. Hydrobiologia, 1996, 337(1): 93-106.

[71] 葛滢,常杰,王晓月,等. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1050-1055. (Ge Ying, Chang Jie, Wang Xiaoyue, et al. Relationship between the physiological characters and purification ability of different plants in waters with two trophic levels[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(6): 1050-1055. (in Chinese))

[72] Yan Zhiwei, Wang Qiuyue, Li Yang, et al. Combined effects of warming and nutrient enrichment on water properties, growth, reproductive strategies and nutrient stoichiometry of *Potamogeton crispus*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 190: 104572.

[73] 王利,陈剑锋,李芸,等. 水体光照强度对沿岸带浮游甲壳动物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(3): 44-51. (Wang Li, Chen Jianfeng, Li Yun, et al. Effects of light intensity on the epiphytic crustacean zooplankton community[J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(3): 44-51. (in Chinese))

[74] 谢从新,熊传喜,周洁,等. 不同光照强度下乌鳢幼鱼的摄食强度及动力学[J]. 水生生物学报, 1997, 21(3): 213-218. (Xie Congxin, Xiong Chuanxi Zhou Jie, et al. Feeding intensity and dynamics of juvenile northern snakehead, *Channa argus*, under different illumination[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1997, 21(3): 213-218. (in Chinese))

[75] 石金磊. 牡丹江流域下游大型底栖动物群落结构与环境因子相关性研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2023.

[76] 姜城,田涛,杨军,等. 光照强度对许氏平鲉群体结构及行为的影响[J]. 安徽农学通报,2022,28(7):83-87. (Jiang Cheng, Tian Tao, Yang Jun, et al. Effects of light intensity on population structure and behavior of *Sebastes schlegeli* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2022,28(7):83-87. (in Chinese))

[77] 张先炳,胡亚萍,杨威,等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响[J]. 水生态学杂志,2021,42(4):117-122. (Zhang Xianbing,Hu Yaping,Yang Wei,et al. Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish[J]. Journal of Hydroecology,2021,42(4):117-122. (in Chinese))

[78] Ramanan C J,Lim K H,Kurnia J C,et al. Towards sustainable power generation:recent advancements in floating photovoltaic technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2024,194:114322.

[79] Wang Tengwei,Chang Pinghung,Huang Yingsheng,et al. Effects of floating photovoltaic systems on water quality of aquaculture ponds[J]. Aquaculture Research,2022,53(4):1304-1315.

[80] Rao Y R,Howell T,Watson S B,et al. On hypoxia and fish kills along the north shore of Lake Erie[J]. Journal of Great Lakes Research,2014,40(1):187-191.

[81] Château P A,Wunderlich R F,Wang Tengwei,et al. Mathematical modeling suggests high potential for the deployment of floating photovoltaic on fish ponds[J]. Science of the Total Environment,2019,687:654-666.

[82] Nürnberg G K. Quantification of oxygen depletion in lakes and reservoirs with the hypoxic factor[J]. Lake and Reservoir Management,2002,18(4):299-306.

[83] Nguyen N H,Le B C,Bui T T. Benefit analysis of grid-connected floating photovoltaic system on the hydropower reservoir[J]. Applied Sciences,2023,13(5):2948.

[84] Pringle A M,Handler R M,Pearce J M. Aquavoltaics:synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,80:572-584.

[85] Mccrary M D,Mckernan R L,Schreiber R W,et al. Avian mortality at a solar energy power plant[J]. Journal of Field Ornithology,1986,572:135-141.

[86] Wu Jianguo,Wang Siyu,Gong Qian,et al. Impacts and response of solar energy utilization projects on ecosystem,biodiversity and environment[J]. Research of Environmental Sciences,2024,37(5):1055-1070.

[87] Londe D W,Fuhlendorf S D,Elmore R D,et al. Female greater prairie-chicken response to energy development and rangeland management[J]. Ecosphere,2019,10(12):e02982.

[88] 金琼贝,盛连喜,张然. 温度对浮游动物群落的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版),1991(4):103-111. (Jin Qiongbei, Sheng Lianxi,Zhang Ran. Effect of temperature on zooplankton communities[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition),1991(4):103-111. (in Chinese))

[89] Cowles T J,Olson R J,Chisholm S W. Food selection by copepods:discrimination on the basis of food quality[J]. Marine Biology,1988,100(1):41-49.

[90] 曹力欢,李静,张彦东,等. 浅析影响仔鱼开口摄食的因素[J]. 农村科学实验,2022(16):187-189. (Cao Lihuan,Li Jing, Zhang Yandong ,et al. A brief analysis of the factors influencing the opening feeding of larvae[J]. Rural Scientific Experiment, 2022(16):187-189. (in Chinese))

[91] 胡翠林. 洱海外来鱼类摄食及浮游生物生态学研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.

[92] 姚达章,陈国柱,林小涛,等. 食蚊鱼摄食特性及其与浮游动物和环境因子的关系[J]. 生态学杂志,2012,31(2):367-373. (Yao Dazhang, Chen Guozhu, Lin Xiaotao, et al. Feeding traits of *Gambusia affinis* and their relations with zooplankton and environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(2):367-373. (in Chinese))

[93] 刘宇航,陈国柱,林小涛. 不同光照条件下叉尾斗鱼仔鱼摄食节律[J]. 生态学杂志,2010,29(6):1161-1166. (Liu Yuhang, Chen Guozhu,Lin Xiaotao. Feeding rhythms of Macropodus opercularis larvae under different light condition[J]. Chinese Journal of Ecology,2010,29(6):1161-1166. (in Chinese))

[94] Fath B D,Scharler U M,Ulanowicz R E,et al. Ecological network analysis:network construction[J]. Ecological Modelling,2007, 208(1):49-55.

[95] Finn J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows[J]. Journal of Theoretical Biology,1976,56 (2):363-380.

[96] Gladstone-Gallagher R V,Hewitt J E,Siwicka E,et al. Ecological network analysis of traits reveals variable response capacity to stress[J]. Proceedings of the Royal Society B:Biological Sciences,2023,290(1998):20230403.

(收稿日期:2024-11-28　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.003

融合语义分割与时空信息的水位智能识别方法

周 聂[1],陈 华[1],刘炳义[1],易瑞吉[2],魏 苗[3],许崇育[1]

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室; 2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司;
3. 国家能源集团新疆吉林台水电开发有限公司)

摘要:针对复杂自然环境下因光照变化、干湿交替及背景干扰导致的水位识别精度低、稳定性差的问题,提出了一种融合语义分割与时空信息的水位智能识别方法。该方法通过构建融合残差连接、卷积注意力机制与空洞卷积模块的 FCN-RCA 模型,引入基于洪泛算法的图像分割优化方法,实现了对水体区域的高鲁棒性语义分割和结构完整性优化;利用仿射变换将分割结果映射至坡面物理空间,构建虚拟水尺实现水位的精确量化,结合视频帧的时空连续性信息,对水位边界进行时序一致性优化,以提升识别结果的稳定性与可靠性。新疆塔勒德萨依站的实例验证结果表明:该方法在多种气象、水文、光照条件下的平均交并比均超过 0.92,表现出优异的分割性能,且能准确提取水位边界;基于时空信息的动态水位优化方法有效保证了水位边界识别的稳定性与连续性,较优化前绝对平均误差(MAE)和均方根误差分别减小了 0.006、0.004 m,且纳什效率系数(NSE)提高了 0.024;长序列实测资料验证中水位识别 MAE 控制在 0.04 m 以内,NSE 最高达 0.997,证明该方法能够在复杂环境下实现厘米级水位识别,并具备良好的时序一致性和工程适用性。

关键词:水位识别;FCN-RCA 模型;虚拟水尺;时空平滑;图像识别

Intelligent water level recognition method integrating semantic segmentation with spatiotemporal information

Zhou Nie[1], **Chen Hua**[1], **Liu Bingyi**[1], **Yi Ruiji**[2], **Wei Miao**[3], **Xu Chongyu**[1]

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University*;
2. *China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd.*;
3. *China Energy Xinjiang Jilintai Hydropower Development Co., Ltd.*)

Abstract: To address the low accuracy and poor stability of water level recognition in complex natural environments, which result from illumination changes, alternation between wet and dry conditions, and background interference, an intelligent water level recognition method that integrated semantic segmentation with spatiotemporal information was proposed. An FCN-RCA model was constructed by combining residual connections, a convolutional attention mechanism, and an atrous convolution module; an image segmentation optimization method based on the flooding algorithm was introduced, and highly robust semantic segmentation and structural integrity optimization for the water body area were achieved. The segmentation results were mapped to the physical space of the slope domain via an affine transformation to build a virtual water gauge, enabling precise quantification of the water level. By leveraging the spatiotemporal continuity of video frames, temporal consistency optimization was applied to the water level boundary to enhance the stability and reliability of the recognition results. The case study at the Taleldesayi Station in Xinjiang demonstrates that the proposed method achieves a mean intersection over union (mIoU) exceeding 0.92 under various meteorological, hydrological, and illumination conditions, exhibiting excellent segmentation performance and accurate extraction of water level boundaries. The dynamic water level optimization method based on spatiotemporal information effectively ensures the stability and continuity of water level boundary recognition. Compared with the pre-optimization result, the absolute mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) reduce by 0.006 m and 0.004 m, respectively, while the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) increases by 0.024. In validation with long-term measured data, the MAE for water level recognition remains within 0.04 m, and the NSE reaches up to 0.997. These results confirm that the method can achieve centimeter-level water level recognition in complex environments, with good temporal consistency and engineering applicability.

Key words: water level recognition; FCN-RCA model; virtual water gauge; spatiotemporal smoothing; image recognition

---

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209101)

作者简介:周聂(1996—),男,博士研究生,主要从事智慧水利、视觉水沙要素监测与模拟研究。E-mail:niezhou@whu.edu.cn

通信作者:陈华(1977—),男,教授,博士,主要从事智慧水利、流域智能监测与模拟研究。E-mial:chua@whu.edu.cn

水位监测是洪水预警、防灾减灾、水资源调度与河道综合治理的重要基础,高精度水位监测对提升流域管理效率与水安全保障能力具有重要意义[1]。传统水位监测方法因其理论成熟、稳定性高,在水文监测中发挥着重要作用[2]。然而,在山区河流、偏远地区或极端洪水等工况下,传统接触式方法面临布设困难、维护成本高、人工依赖性强等问题,难以实现水位的高频、连续、广覆盖监测[3]。

随着智能感知技术的快速发展,基于图像识别的非接触式水位监测方法逐渐兴起,为实现全天候、远程化、自动化的水文信息获取提供了新途径[4-6]。图像识别方法通常通过部署固定式摄像设备,采集水面及岸坡图像序列,并结合图像分割、边缘检测或深度学习模型提取水体边界与水位线信息,可在不直接接触目标水体的前提下,实现对水位变化的高时效监测[7-8]。同时,具备布设灵活、成本较低、维护便捷等优势,尤其适用于野外复杂区域的水位动态获取[9-10]。

近年来,国内外学者围绕图像水位识别的关键环节开展了大量研究[11]。在图像预处理方面,常采用图像增强、直方图均衡与伽马校正等方式提高边缘清晰度和视觉质量[3]。在水体分割方面,从早期基于阈值与边缘的传统方法,发展到以 FCN、U-Net、DeepLab 为代表的深度语义分割网络,显著提升了分割的精度与鲁棒性[12-16]。在水位线提取方面,部分研究通过结构特征定位、边界检测与几何拟合等方式提取水位线,也有学者尝试引入激光雷达、水尺识别或图像深度估计增强其准确性[17-18]。总体而言,现有研究已在方法多样化、模型精细化和处理自动化等方面取得了长足进展,为图像水位识别提供了坚实的技术基础。然而,现有方法虽在理想或可控的试验条件下表现良好,但在复杂自然工况中仍面临突出挑战。在实际应用中,光照条件随昼夜和天气变化剧烈波动,强降雨、大雾、积雪等会干扰水体与岸坡边界识别,洪水期的湍流和波浪亦加剧水位线定位难度,导致图像信号退化、误检增加[19-20]。尽管深度分割方法在像素级精度上表现突出,其在强光照变化、复杂气象及显著水动力扰动下的鲁棒性与时序一致性仍有限,容易出现结果波动[21-22]。此外,基于实体水尺的识别方法,因水尺表面字符易受遮挡与污染,难以保证在复杂环境下的长期稳定运行[23-24]。上述因素均会显著影响图像分割的精度与水位提取的稳定性,使得现有方法在复杂环境中的鲁棒性与泛化能力受到显著制约[25-26]。

针对上述问题,本文提出了一种融合语义分割与时空信息的水位智能识别方法,并以新疆塔勒德萨依站实测资料为基础,系统开展方法验证与精度评估,以期为构建高频、智能、可靠的视觉水文监测系统提供理论支持。

1　水位智能识别方法

以视频图像为输入,经过多阶段处理实现水位的精准识别与异常过滤步骤如下:①预处理。通过特征点匹配、透视变换和图像重采样实现抖动消除与图像校正。②高精度语义分割。构建结合残差连接机制、卷积注意力模块(convolutional block attention module,CBAM)[27]与空洞卷积结构(atrous spatial pyramid pooling,ASPP)[28]的 FCN-RCA 模型,以提升水体区域分割的准确性和鲁棒性。③语义分割优化。引入基于洪泛算法的后处理方法,提高水体边界的完整性与精细度,开展坡面空间重建,利用仿射变换与图像标定将分割结果映射至物理空间,并结合双向垂直搜索策略,确定水位边界。④结合箱线图与 Z-score 标准化方法进行异常值检测与过滤,实现水位识别结果的稳定输出。具体的技术路线如图 1 所示。

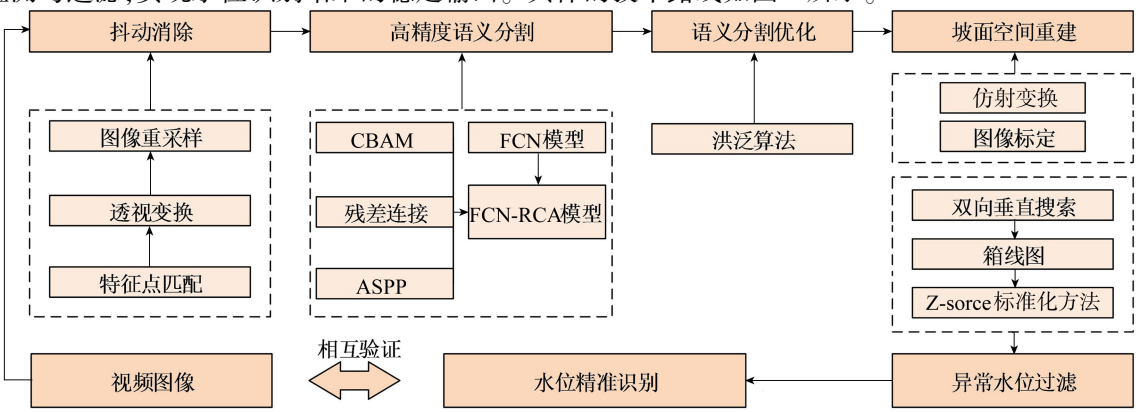


图 1　水位智能识别方法技术路线

Fig. 1　Technical route of intelligent water level recognition method

1.1 基于 FCN-RCA 模型的水体语义分割方法

为提升水体语义分割的鲁棒性,在传统 FCN 主干网络基础上,集成残差连接机制、CBAM 与 ASPP 构建 FCN-RCA 模型,旨在通过三者协同作用,提升模型在复杂场景下的语义分割精度与泛化能力,其网络结构如图 2 所示。

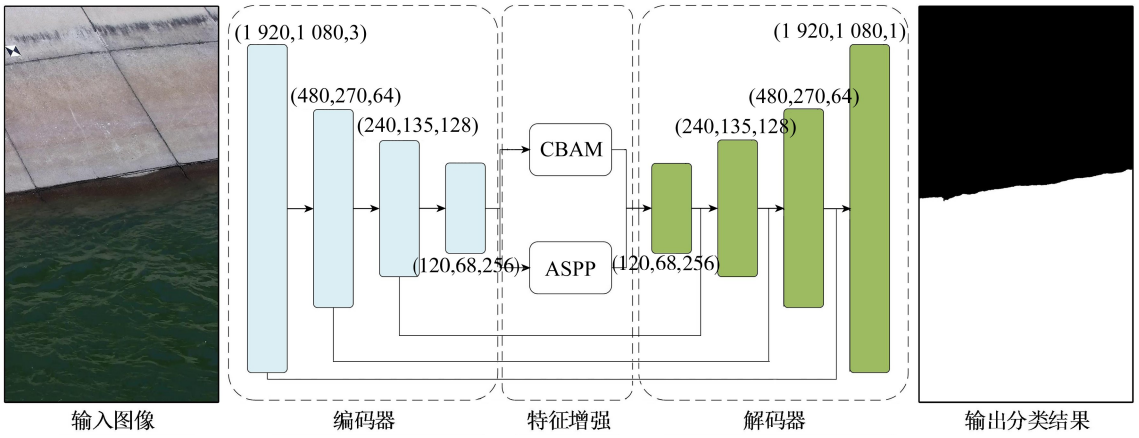


图 2 FCN-RCA 模型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FCN-RCA model structure

针对传统 FCN 在深层网络中易出现梯度消失与特征退化的问题,研究在编码器与解码器之间嵌入轻量级残差连接模块。通过构建跨层跳跃路径,实现高分辨率浅层特征与低分辨率深层特征的对齐与融合,提升边界信息表达能力。具体地,设第 l 层浅层特征为 $F_l \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$($H$ 和 W 分别为输入浅层特征的空间分辨率,C 为浅层特征通道数),第 L 层深层特征为 $F_L \in \mathbf{R}^{H\times W\times D}$($D$ 为深层特征通道数),特征融合过程可表示为:

$$F = \mathrm{Conv}_{1\times 1}\{\mathrm{Concat}[F_l;\mathrm{UpSample}(F_L)]\} \tag{1}$$

式中:$\mathrm{Conv}_{1\times 1}$ 为卷积核大小为 1×1 的卷积层,用于对拼接后的多尺度特征进行通道维度映射与融合;Concat 为通道拼接;UpSample 为双线性插值上采样。

特征融合使得高分辨率低层特征与低分辨率高层特征形成互补,提升边界分割精度。在完成基础特征提取与多层级信息融合之后,为进一步引导模型聚焦于关键区域特征,同时抑制冗余背景干扰,在模型中引入了 CBAM。CBAM 由通道注意力机制与空间注意力机制串联构成,分别在特征图的通道与空间维度生成权重图,对输入特征进行逐元素加权,从而动态突出对分类或分割任务更具贡献的信息区域。

在自然场景中,水位线形态往往呈现出显著的尺度多样性,既包含细微的局部边缘特征,也具有较强延展性的整体结构。为有效提升模型对多尺度特征的捕获能力,在网络结构中引入了 ASPP。ASPP 由多个空洞卷积分支组成,每个分支使用不同的膨胀率以捕获不同尺度的局部与全局特征,并辅以全局平均池化分支引入全局上下文信息。各分支输出的特征在通道维度上进行拼接,从而形成一个融合多尺度语义信息的特征图,提升语义分割任务的性能。设输入特征为 $X \in \mathbf{R}^{H\times W\times C}$,ASPP 的输出特征可表示为:

$$Y = \mathrm{Concat}[F, \mathrm{AvgPool}(X)] \tag{2}$$

其中

$$F = (\mathrm{Conv}_{3\times 3}^{d_1}(X), \mathrm{Conv}_{3\times 3}^{d_2}(X), \mathrm{Conv}_{3\times 3}^{d_3}(X), \mathrm{Conv}_{3\times 3}^{d_4}(X))$$

式中:$\mathrm{Conv}_{3\times 3}^{d_j}$ 为不同膨胀率(d_1、d_2、d_3、d_4)的空洞卷积操作;AvgPool 为全局平均池化操作。此设计可以有效捕捉图像中的多尺度语义信息,从而提高分割性能。

针对水位识别的像素级分割任务,采用二分类交叉熵损失作为模型的优化目标:

$$B = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\{y_i \ln\sigma(p_i) + (1-y_i)\ln[1-\sigma(p_i)]\} \tag{3}$$

式中:B 为二分类交叉熵损失;σ 为 Sigmoid 函数;y_i 为像素 i 的真实标签(水体为 1,非水体为 0);$\sigma(p_i)$ 为通过 Sigmoid 函数对模型输出 p_i 转换后的概率值,其取值范围为[0,1];N 为像素数量。

1.2 基于洪泛算法的图像分割优化方法

在强降雨、雪天等场景中,雨滴与雪花造成的模糊与遮挡效应显著削弱了水体边界的辨识度,常出现局部孔洞或边界误分等问题,影响水位识别的准确性。为此,引入了基于洪泛算法的图像分割结果优化方法,

利用区域连通性信息对漏分与错分区域进行自动识别与修正。

洪泛算法本质上是一种区域生长算法,通过像素相似性约束,不断扩展相邻像素以形成连通区域,常用于区域填充和连通性检测。设定一个起始点 $p_0=(x_0,y_0)$,从其八邻域出发,递归检查像素值是否满足填充条件,若满足则赋值为目标类别并加入队列,直至连通区域填满。

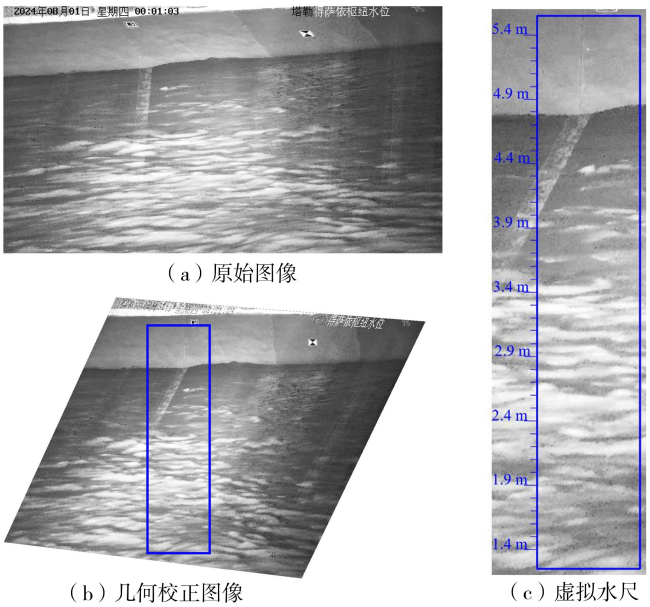
本文将图像划分为水体和非水体两类,误分情况主要为错分和漏分,修复误分区域步骤如下:①对初始分割结果进行二值化处理,其中非水体区域设置为 0,水体区域设置为 1;②以图像中正确划分的非水体为出发点,通过洪泛算法,将连通的非水体区域全部填充为水体;③填充完毕后,将其作为掩码 M_1,其中 $M_1(x,y)$ 为 0 处代表的即是将水体划分为非水体的漏分区域,进而在原始图像中,令掩码图像中 $M_1(x,y)$ 为 0 位置所对应的原图像的 $I(x,y)$ 更新为 1,即完成漏分水体修正;④以图像中正确划分的水体为出发点,通过洪泛算法,将联通的水体区域全部填充为非水体,即将联通区域内所有的 1 设置为 0;⑤填充完毕后,将其作为掩码 M_2,其中 $M_2(x,y)$ 为 1 处即是将非水体划分为水体的错分区域,进而在原始图像中,令掩码图像中 $M_2(x,y)$ 为 1 位置所对应的原图像的 $I(x,y)$ 更新为 0,即完成错分水体修正。

1.3　基于坡面空间重建的虚拟水尺构建方法

传统基于实体水尺的图像识别方法,通常依赖于对实体水尺的检测与识别,并通过字符识别、刻度提取等方式读取水位。然而,在野外环境中,实体水尺字符易受遮挡和污染,难以保证在复杂环境下的长期稳定运行。为此,引入虚拟水尺构建技术,通过建立图像坐标与坡面坐标系间的映射关系,替代实体水尺进行水位估算。

实际应用中,摄像机通常固定安装于渠坡一侧,并以一定倾角拍摄,导致图像存在畸变,使得像素坐标无法直接反映坡面上各位置的真实几何关系,需对图像进行空间几何还原。渠系边坡在宏观尺度上可视为二维平面,因此采用仿射变换实现从图像坐标系到坡面参考坐标系的映射关系构建。仿射变换是一类保持点间共线性与比例关系的线性几何变换,适用于摄像机姿态稳定、场景基本平面的应用场景。在二维平面假设下,仿射变换共含有 6 个自由度,至少需 3 组非共线对应点对以解算参数。该变换坡面控制点可通过全站仪、RTK-GPS 等高精度测绘设备直接测量,然后将其投影到定义的二维坡面坐标系中;图像中的对应点通常由人工标注高辨识度特征点获得。图像与坡面之间的空间映射关系建立后,构建虚拟水尺,实现水位线的量化定位与刻度映射。虚拟水尺基于图像-地形映射关系建立等距刻度系统,在图像中重构具有物理意义的尺度基准,从而支持水位的直接读取与数值估算。构建流程如下:①进行坐标系定义与原点选取,在坡面坐标系中选取一条与水位线近似垂直的参考直线作为虚拟水尺轴线,并设定其原点对应的坡面坐标;②开展尺度设定与刻度生成,根据设定的实际间距生成等间距刻度点,并将其对应的坡面坐标通过仿射变换逆映射至图像中,完成刻度位置的图像标定;③进行视觉呈现与高程标定,在图像中对各刻度位置进行可视化叠加显示,同时标注其在坡面坐标系中的真实高程数值,实现从图像直接读取水位值的功能。

相较于传统依赖实体水尺识别字符或刻度线的方式,虚拟水尺具有不依赖实物标志、灵活布设、抗环境干扰能力强、远程可视化读取等显著优势。图 3 为原始图像、经仿射变换后的几何校正图像以及基于重建结果叠加生成的虚拟水尺的示意图。



（a）原始图像　（b）几何校正图像　（c）虚拟水尺

图 3　仿射变换示意图

Fig. 3　Illustration of affine transformation

1.4　考虑时空信息的动态水位优化方法

自然场景下,受湍流扰动、波浪涌动等复杂水动力因素影响,河流水位常呈非稳态特性,瞬时水位波动剧烈、离散性强。传统依赖单帧图像或瞬时值的水位识别方法在水位陡涨陡落条件下易出现误判,难以满足高动态场景的稳定识别需求。为此,基于视频数据的时间连续性与空间冗余性,提出考虑时空信息的水位识别策略。从每段视频中

提取10帧图像,在每帧中选取15个相邻位置点,形成150组时空分布的水位样本,通过多帧融合与空间平均抑制瞬时误差,提升识别稳定性。

为实现水位边界的精确定位,采用双向逼近的垂直搜索策略:①依据测点位置获取其在图像中的横向坐标 x;②以图像顶端的非水体区域为起始点,自上而下搜索,定位到第一个水体像元,其垂向位置记为 y_1;③以图像底端的水体区域为起始点,自下而上搜索,直至检测到首个非水体像元,其垂向位置记为 y_2;④若在该垂线上满足 $y_1-y_2=1$,则表明水位边界在该位置已被正确划分,相应水位识别值有效,若不满足此条件则判定该垂线位置存在错误分割。

同时,考虑到激波、漂浮物与强光等因素可能引发局部异常,进一步引入两阶段统计剔除机制。首先,采用箱线图法基于四分位距(I_{QR})检测并剔除初步异常值。箱线图的四分位数 Q_1 和 Q_3 分别为排序后数据集中位于第25%分位数和第75%分位数位置的值,则 I_{QR} 可以表示为:

$$I_{QR}=Q_3-Q_1 \tag{4}$$

根据 I_{QR},异常值的判断范围的下限 L_{bound}、上限 U_{bound} 分别为:

$$L_{bound}=Q_1-1.5I_{QR} \tag{5}$$

$$U_{bound}=Q_3+1.5I_{QR} \tag{6}$$

若某一数据值超出这一范围($[L_{bound},U_{bound}]$),则该值被视为异常值。随后,对剩余样本使用Z-score标准化方法进行二次筛查。

1.5 模型评价指标

采用图像分割任务中常用的平均像素精度(MPA)和平均交并比(mIoU)衡量分割模型表现。其中MPA通过计算每个类别的像素准确率来评价模型的分割效果,并对所有类别像素准确率取平均,进而衡量模型的分割精度。mIoU则通过计算每个类别的交集和并集比例,衡量预测的分割类型和真实标签区域之间的重叠度。

采用纳什效率系数(NSE)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)评估水位识别效果,全面验证识别模型的性能。NSE取值小于或等于1,越接近1,拟合效果越好;RMSE越接近0,拟合效果越好;MAE越接近0,拟合效果越好。

2 实例验证

2.1 研究区域及数据集构建

为构建适用于自然复杂环境的高鲁棒性图像分割模型,基于新疆塔勒德萨依站于2023年5月1日至2024年12月31日采集的高清视频资料与通过实体水尺观测获取的实测水位数据,建立模型训练数据集。所采集的数据覆盖枯水、平水和丰水等典型水文过程,具备良好的时序连续性和代表性,有助于提升模型在多变水文条件下的适应能力与泛化性能。

在样本选取方面,考虑了多种复杂环境变化:①来流条件方面,样本覆盖低水位、中水位和高水位等不同流量场景,包含水体湍流与波浪涌动的情况,以反映水体边界形态的剧烈变化,提升模型在扰动水位线下的定位鲁棒性;②光照条件方面,样本涵盖晨昏、强光和夜间等不同亮度场景,覆盖昼夜交替导致的色彩与对比度剧烈波动,并包含逆光、耀斑与低照度等因素,确保模型在复杂光照下仍能保持较强的适应性;③气象要素方面,数据覆盖雨、雾和雪等典型天气过程,包含强降雨造成的图像模糊与水体边界遮蔽、雾气导致的信号对比度下降、积雪覆盖干扰坡面轮廓等自然现象,从而增强模型在多源噪声与图像信号降质环境下的分割鲁棒性。

图像数据通过定间隔抽帧方式从原始视频中提取,分辨率为2 560像素×1 440像素。样本标注采用Labelme工具进行像素级语义精细标注,确保标签一致性和精度。在完成1 000张高分辨率图像标注的基础上,通过随机裁剪、旋转等方式生成256×256像素尺寸的增强样本共计100 000张。

2.2 图像分割效果评价

图4为本文构建的图像分割模型在多种典型环境条件下的水体分割表现。测试场景包括:低水、中水、高水3种来流情形,低光、耀光、夜间3种复杂光照场景,以及雾天、雨天、雪天3种高环境干扰条件,以期模拟野外长期运行过程中可能遭遇的典型干扰情形。在光照稳定、无明显干扰的情形下,模型可实现边界清晰、形态完整的水体区域分割,分割结果与人工标注高度一致,适用于各类水位变化场景。在低光、耀光和夜间等光照扰动下,尽管图像亮度和对比度有所波动,模型仍保持稳定的边界识别能力,显示出良好的光照适

应性。雾天条件下,由于图像对比度降低,分割精度略有下降,但整体误差较小。相比之下,雨天和雪天对模型性能影响较为显著。雨滴和雪花引起的模糊和遮挡,使得水体边界辨识度降低,部分区域出现错分或漏分,尤其在雪天条件下,岸上积雪的高反射性使水面与周边背景难以区分,误分区域显著增多。

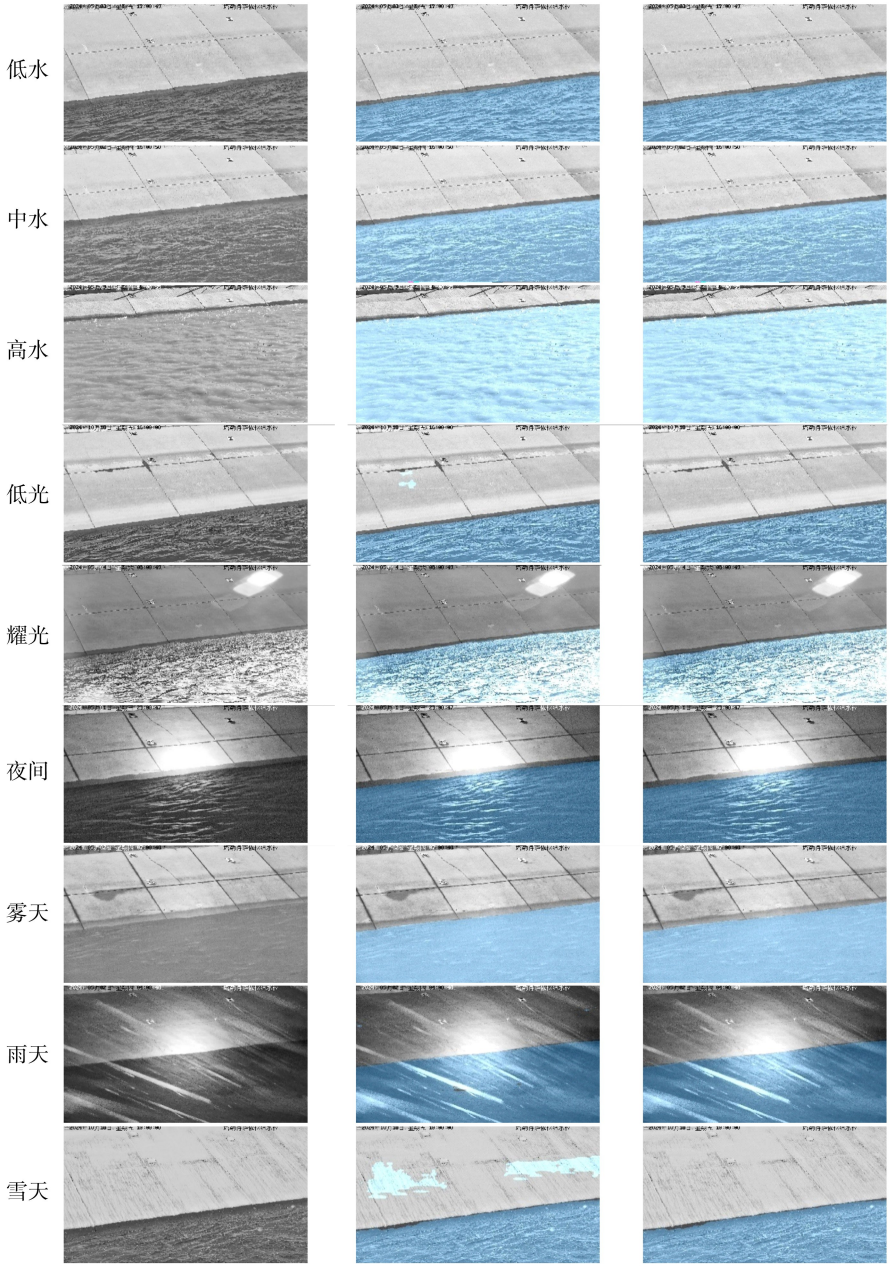


图 4　图像分割结果

Fig. 4　Image segmentation results

由图 5 可知,在正常光线和水位条件下,模型均实现了极为准确的图像分割,模型 mIoU 与 MPA 均超过 0.98,表现出极高的分割精度。低光条件下,mIoU 略降至 0.964,但总体鲁棒性仍良好。雨天和雪天情景中,模型性能明显下降,雪天场景的 mIoU 降至 0.748,MPA 降至 0.920,成为最具挑战的场景类型。经洪泛算法优化后,图像局部噪声导致的异常分割噪点得到有效剔除,图像分割效果得到有效提高。在光线良好条件下,分割效果提升并不明显,这主要是由于图像分割算法在无优化条件下,即能实现近乎完美的水位边界分割。而在降雨及降雪条件下,图像分割效果得到了有效提高,其 MPA 分别上升了 0.009 和 0.060,mIoU 同样呈增加趋势,分别提升了 0.017 和 0.173,表明本文的时空平滑优化方法对剔除异常误差、保证图像整体的分割效果稳定具有显著作用。

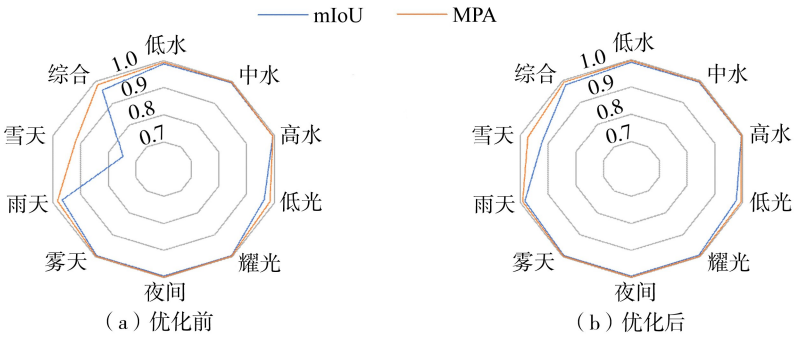


图5 模型经洪泛算法优化前后识别指标对比

Fig. 5 Comparison of recognition metrics of model before and after optimization with flooding algorithm

2.3 水位边界识别效果评价

水体分割效果评价能够量化模型的整体分割性能,但由于分割指标主要衡量的是整体分割情况,且水体区域通常占据较大面积,因此整体分割指标往往偏高。然而,水位识别更关注的是水位边界的准确分割和定位,因为这直接影响最终的水位解译结果,因此进一步分析了模型对水位边界的识别效果。由图6可知,3种来流情形下本文方法可稳定识别出干湿交界处的水位线,边界连续性与形态精度均与目视判断高度一致;在光照干扰场景(如低光、耀光与夜间)下,尽管图像对比度下降或存在强反射干扰,本文方法仍能准确提取水体边界;尽管气象要素干扰场景中存在雨滴条纹、飘雪遮挡等高频噪声干扰,本文方法仍能有效提取水体边界,仅在局部存在轻微扰动,表现出良好的鲁棒性,具备较高的工程适用性。

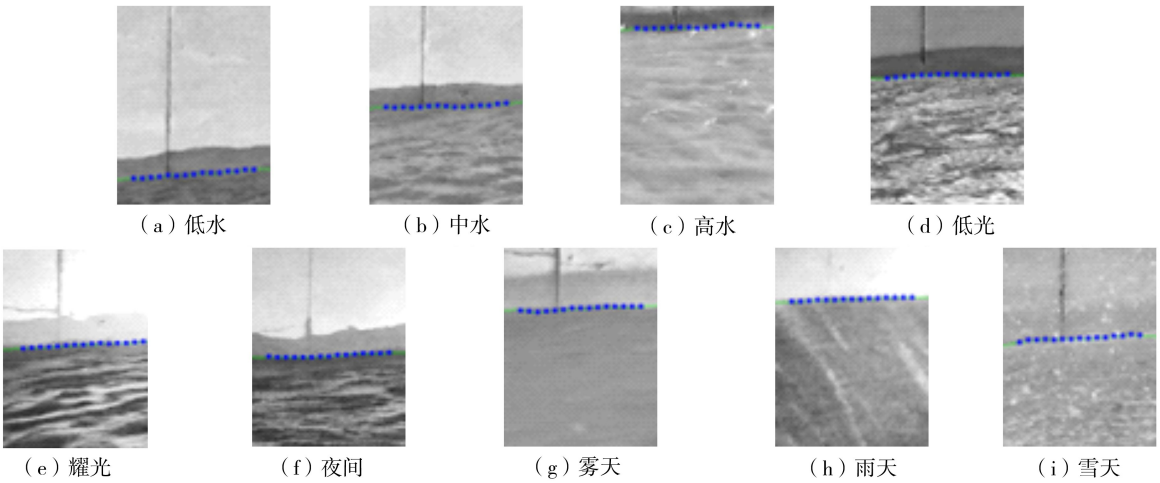


图6 水位边界识别结果

Fig. 6 Water level boundary recognition results

2.4 动态水位优化方法效果评估

选取水位波动较为明显的2023年8月16日实测数据,评估动态水位优化方法的有效性与适用性。由图7(a)可知,空间尺度上,各测点水位在短时间内整体较为平稳,箱体高度基本控制在3 cm以内,但局部仍存在一定差异,其中测点12~15的最大偏差超过5 cm,显示这些位置存在异常波动。由图7(b)可知,时间尺度上,各视频帧的识别结果整体稳定,箱体高度在4 cm以内,但部分时刻最大差异仍可达5 cm。这主要与局部水流速度较快、坡面碰撞激起浪涌有关,导致不同测点间存在差异。2023年8月16日9:00的实测水位为4.83 m,优化前识别值为4.87 m,优化后为4.84 m,异常水位修正策略可在一定程度上降低水位误差。

由图8可知,未采用动态水位优化方法优化前,识别结果与实测值间的MAE、RMSE分别为0.037、0.038 m,NSE为0.875,已具有较高的准确性。经过异常值剔除后,识别精度进一步提升,MAE降至0.031 m,RMSE降至0.034 m,NSE提升至0.899。相比优化前,MAE和RMSE分别减小了0.006、0.004 m,NSE提高了0.024,表明基于时空信息的动态水位优化方法能够在一定程度上滤除由激波、浪花等非稳态干扰引起的识别偏差,增强模型鲁棒性。

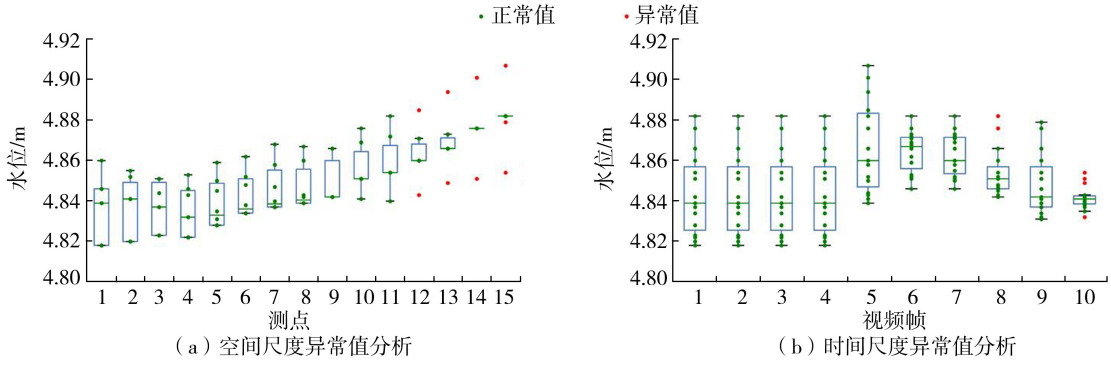


图 7　2023 年 8 月 16 日 9:00 异常值识别结果

Fig. 7　Anomaly recognition results at 9:00 AM on August 16, 2023

2.5　长序列实测资料验证

为评估本文方法在不同水文条件下的水位识别稳定性与精度,选取新疆塔勒德萨依站 2024 年 5 月、8 月、10 月 3 个典型月份中各 15 d 的连续实测数据进行比测分析。考虑 8 月上旬视频数据存在通信与供电中断问题,实际采用 8 月 15—31 日的数据,其余月份选用当月前 15 d 数据。

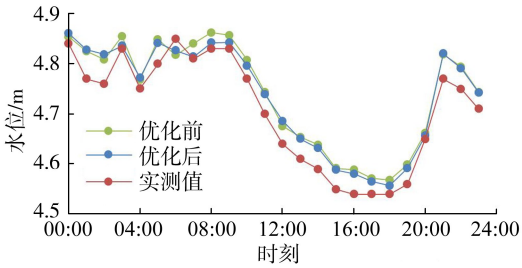


图 8　采用时空异常处理的 2023 年 8 月 16 日水位识别结果

Fig. 8　Water level recognition results using spatiotemporal anomaly processing

由图 9 可知,5 月水位呈波动上升趋势,变幅为 2.28 m,水位识别值与实测值吻合良好,且 NSE 为 0.997,MAE、RMSE 分别为 0.031、0.038 m,表明具有较高的识别精度。8 月水位波动频繁,平均水位为 4.61 m。在强降雨等复杂环境下,系统仍表现出良好的识别能力。如 8 月 19 日暴雨天气下,尽管图像受到条纹状噪声干扰,局部区域存在误分现象,但整体最大识别误差仍控制在 0.07 m 以内,显示出系统对恶劣气象条件具有一定的适应能力与稳定性。整体而言,在高波动期能较好跟踪水位变化过程,NSE 为 0.956,MAE 和 RMSE 分别为 0.027、0.033 m,表现出良好的动态适应性与识别精度。10 月水位整体偏低,平均水位为 2.90 m,水位整体呈波动下降趋势,变幅为 0.78 m;NSE 为 0.987,MAE、RMSE 分别为 0.022、0.026 m,表明水位识别结果具有较高的可靠性,可较好地反映退水期的水位变化过程。

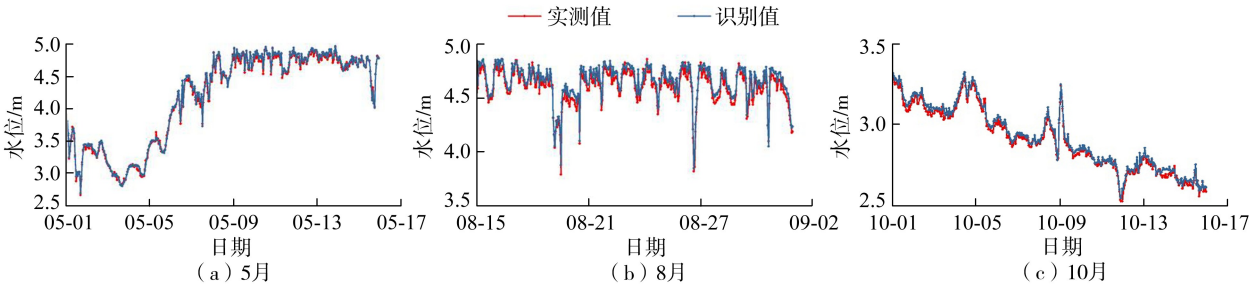


图 9　2024 年 5 月、8 月、10 月水位识别结果

Fig. 9　Water level recognition results on May, August, and October in 2024

整体而言,5 月涨水期、8 月强波动期以及 10 月退水期 3 个典型水文情形下,本文方法均展现出良好的识别稳定性与精度。各月水位识别误差控制在厘米级,NSE 均高于 0.95,能够有效应对不同水位变化特征下的边界波动与图像干扰。本文方法在实际复杂水文环境中具备良好的时序一致性与工程可用性,可为水位的连续自动监测提供可靠技术支撑。

3　结　语

本文提出了一种融合语义分割与时空信息的水位智能识别方法,该方法在新疆塔勒德萨依站的验证结果表明,在多种光照与水文条件下均表现出较高精度与稳定性,各场景下 mIoU 均超过 0.92,长序列实测验

证中水位识别 MAE 控制在 0.04 m 以内,NSE 最高达 0.997,证明本文方法能够在复杂环境下实现厘米级水位识别,并具备良好的时序一致性和工程适用性。

本文方法适用于岸坡规整、摄像机安装稳定的明渠、河道和水库等场景,在雾、降雨、积雪及漂浮物干扰下仍能保持较高识别精度。然而,在暴雨、暴雪等极端条件下,图像质量下降可能导致识别精度降低。未来可结合雷达等多源信息开展补充观测,并探索动态边界建模,以提升极端条件和复杂地貌下的水位感知能力。

参考文献:

[1] 程海云. 推进新时代长江水文高质量发展体系建设构想[J]. 人民长江,2023,54(1):88-97. (Cheng Haiyun. Conception on promoting construction of high-quality development system of Yangtze River hydrology in new era[J]. Yangtze River,2023,54(1):88-97. (in Chinese))

[2] 刘子奇,李丹勋,朱德军,等. 基于单目视觉的无水尺水位测量方法[J]. 仪器仪表学报,2024,45(7):27-37. (Liu Ziqi,Li Danxun,Zhu Dejun, et al. Monocular vision-based gaugeless water level measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2024,45(7):27-37. (in Chinese))

[3] Wu Zeheng,Huang Yu,Huang Kailin,et al. A review of non-contact water level measurement based on computer vision and radar technology[J]. Water,2023,15(18):3233.

[4] Dubey A K,Gupta P K,Dutta S,et al. An improved methodology to estimate river stage and discharge using Jason-2 satellite data[J]. Journal of Hydrology,2015,529:1776-1787.

[5] 王俊,熊明. 水文监测体系创新及关键技术研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

[6] Giulietti N,Allevi G,Castellini P,et al. Rivers' water level assessment using UAV photogrammetry and RANSAC method and the analysis of sensitivity to uncertainty sources[J]. Sensors,2022,22(14):5319.

[7] 李翊,兰华勇,严华. 基于图像处理和 BP 神经网络的水位识别研究[J]. 人民黄河,2015,37(12):12-15. (Li Yi,Lan Huayong,Yan Hua. Research on water-level recognition based on image processing and BP artificial neural network technology[J]. Yellow River,2015,37(12):12-15. (in Chinese))

[8] 栾清华,秦志宇,王东,等. 城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展[J]. 水资源保护,2022,38(1):106-116. (Luan Qinghua,Qin Zhiyu, Wang Dong, et al. Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):106-116. (in Chinese))

[9] 孙英豪,丁勇,李登华,等. 基于图像识别的无标尺水位测量技术研究[J]. 水利水运工程学报,2023(4):91-97. (Sun Yinghao,Ding Yong,Li Denghua,et al. Research on measuring technique of water level without scale based on image recognition[J]. Hydro-Science and Engineering,2023(4):91-97. (in Chinese))

[10] 张文静,张振,黄剑,等. 基于图像语义分割的水位智能监测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):24-30. (Zhang Wenjing, Zhang Zhen, Huang Jian, et al. Intelligent water-level monitoring method based on image semantic segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):24-30. (in Chinese))

[11] Van Daele R,Dance S L,Ojha V. Deep learning for automated river-level monitoring through river-camera images:an approach based on water segmentation and transfer learning[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(8):4435-4453.

[12] 李欣宇,孙传猛,魏宇,等. 融合 Transformer 与残差通道注意力的恶劣场景水位智能检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(1):59-69. (Li Xinyu, Sun Chuanmeng, Wei Yu, et al. Water level intelligent detection method based on fuse Transformer residual channel attention mechanism in harsh environments[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2023,37(1):59-69. (in Chinese))

[13] 王宇,魏宇,孙传猛,等. 复杂恶劣环境下水位智能检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(11):119-131. (Wang Yu,Wei Yu, Sun Chuanmeng, et al. Research on intelligent detection method of water level in complex and harsh environment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2023,37(11):119-131. (in Chinese))

[14] 傅启凡,路茗,张质懿,等. 基于语义分割的水位监测方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(4):0410004. (Fu Qifan,Lu Ming,Zhang Zhiyi,et al. Water level monitoring method based on semantic segmentation[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2022,59(4):0410004. (in Chinese))

[15] Wei Lifu,Kong Shihan,Wu Yuquan,et al. Image semantic segmentation of underwater garbage with modified U-Net architecture model[J]. Sensors,2022,22(17):6546.

[16] 张文静,张振,黄剑,等. 基于图像语义分割的水位智能监测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):24-30. (Zhang Wenjing,Zhang Zhen,Huang Jian,et al. Intelligent water-level monitoring method based on image semantic segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):24-30. (in Chinese))

[17] 陈伟昌,杨跃,韦三刚,等. 基于 FMCW 的雷达式水位测量装置关键技术及算法实现[J]. 中国农村水利水电,2017(7):99-102. (Chen Weichang,Yang Yue,Wei Sangang,et al. Key technologies and its implementation of water level measuring device based on FMCW radar[J]. China Rural Water and Hydropower,2017(7):99-102. (in Chinese))

[18] 白岗岗,侯精明,韩浩,等. 基于深度学习的道路积水智能监测方法[J]. 水资源保护,2021,37(5):75-80. (Bai Ganggang,Hou Jingming,Han Hao,et al. Intelligent monitoring method for road inundation based on deep learning[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):75-80. (in Chinese))

[19] 张衍,王剑平,张果,等. 图像法水位检测研究进展[J]. 电子测量技术,2021,44(13):104-113. (Zhang Kan,Wang Jianping,Zhang Guo,et al. Review of image water level detection[J]. Electronic Measurement Technology,2021,44(13):104-113. (in Chinese))

[20] 孙传猛,魏宇,李欣宇,等. 复杂场景下无水尺水位的影像水位反演智能检测方法[J]. 测绘学报,2024,53(3):558-568. (Sun Chuanmeng,Wei Yu,Li Xinyu,et al. Intelligent detection method of image water level inversion for water level without water scale in complex scenes[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2024,53(3):558-568. (in Chinese))

[21] 房爱印,王永贤,尹曦萌,等. DetSegNet:一种基于检测和分割的高精度水尺水位检测网络[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):28-34. (Fang Aiyin,Wang Yongxian,Yin Ximeng,et al. DetSegNet:a high-precision water gauge level detection network based on detection and segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):28-34. (in Chinese))

[22] 郭明辰,张润润,闻余华. 基于 PSO-LSTM 模型的平原河网汛期水位预测[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):64-70. (Guo Mingchen,Zhang Runrun,Wen Yuhua. Prediction of water level of plain river network during flood season based on PSO-LSTM model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):64-70. (in Chinese))

[23] 陈珺,黄燕华,洪朋,等. 基于机器学习模型的河道水位预测[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):9-14. (Chen Jun,Huang Yanhua,Hong Peng,et al. Prediction of river water level based on machine learning model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):9-14. (in Chinese))

[24] 汪崎宇,张振,张田雨,等. 采用断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),2025-05-28. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250527.1651.010. (Wang Qiyu,Zhang Zhen,Zhang Tianyu,et al. Visual measurement of water level in rivers using virtual water gauge generated by the cross-section data[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025-05-28. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250527.1651.010. (in Chinese))

[25] 李涛,徐高,梁思涵,等. 人工智能图像识别在水利行业的应用进展[J]. 人民黄河,2022,44(11):163-168. (Li Tao,Xu Gao,Liang Sihan,et al. Application progress of artificial intelligence image recognition in water conservancy industry[J]. Yellow River,2022,44(11):163-168. (in Chinese))

[26] 陈永平,韩韬,邱超,等. 基于调和分析及 VMD-LSTM 混合模型的甬江河口水位预报方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):1-10. (Chen Yongping,Han Tao,Qiu Chao,et al. Water level forecasting method for the Yongjiang River Estuary based on harmonic analysis and VMD-LSTM hybrid model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):1-10. (in Chinese))

[27] Woo S,Park J,Lee J Y,et al. CBAM:convolutional block attention module[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Munich:Springer,2018:3-19.

[28] Chen L C,Papandreou G,Kokkinos I,et al. DeepLab:Semantic image segmentation with deep convolutional nets,atrous convolution,and fully connected CRFs[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2017,40(4):834-848.

(收稿日期:2025-08-06　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.004

产流模式时空分布规律及其判别方法

刘玉环[1,2],罗 赟[3],李致家[2],王春青[1]

(1. 黄河水利委员会水文局;2. 河海大学水文水资源学院;3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院)

摘要:为提高半湿润半干旱地区洪水预报精度,针对其产流特点,结合水文气象、土壤地形和植被地貌等指标,通过优选判别指标、层次权重评估、滚动修正聚类等方法建立网格层次聚类产流模式判别(GRGI)方法。黄河中游千阳流域的实例验证结果表明:GRGI 方法能够精确地识别千阳流域蓄满、超渗产流模式的时空分布,千阳流域整体以蓄满网格为主,占比在 70%以上;与 Grid-XAJ 和 Grid-GA 模型相比,基于产流判别规则改进 Grid-XAJ-SIDE 模型的径流深误差、洪峰误差及峰现时差合格率分别提高约 12%、35%、12%。

关键词:半湿润半干旱地区;蓄满产流;超渗产流;产流模式识别;Grid-XAJ-SIDE 模型;过程精细化模拟

Spatial and temporal distribution rules and identification methods of runoff generation modes

Liu Yuhuan[1,2], **Luo Yun**[3], **Li Zhijia**[2], **Wang Chunqing**[1]

(1. *Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission*;
2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*;
3. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission*)

Abstract: To improve the accuracy of flood forecasting in semi-humid and semi-arid regions, the runoff generation characteristics of these regions were analyzed, as well as indexes such as hydrometeorology, soil and topography, and vegetation landcover. The grid hierarchical-clustering runoff generation pattern identification method (abbreviated as GRGI) was established through the optimization of identification indexes, hierarchical weight evaluation, and rolling correction clustering. Case verification results of the Qianyang Watershed in the middle reaches of the Yellow River show that the GRGI method can accurately identify the spatial and temporal distribution of the saturation-excess and infiltration-excess runoff generation modes in the Qianyang Watershed, with the saturation-excess pattern grid dominating, accounting for more than 70% of the total. Compared with those of the Grid-XAJ and Grid-GA models, the qualified rates of runoff depth error, peak flow error, and peak time difference of the Grid-XAJ-SIDE model improved based on runoff generation identification rules are increased by about 12%, 35%, and 12%, respectively.

Key words: semi-humid and semi-arid region; saturation-excess runoff generation; infiltration-excess runoff generation; identification of runoff generation mode; Grid-XAJ-SIDE model; process-refined simulation

洪涝灾害是我国最为多发的自然灾害之一,而北方半湿润半干旱地区尤为突出,该区域的洪涝灾害不仅强度大、频次高,且影响范围广,由此酿成的经济损失难以估量[1-2]。基于水文模型的洪水预报是减少洪涝灾害损失最行之有效的非工程措施[3-5],然而在半湿润半干旱地区,几乎没有一个水文模型能取得满意的模拟效果[6-8]。目前,湿润地区的预报精度已经达到 80%以上,而半湿润半干旱地区整体预报精度不高,尤其在中小河流,只有 40%~50%,难以满足洪水预警预报的需求[9]。

半湿润半干旱地区洪水预报困难的问题从 20 世纪 80 年代开始困扰至今。早期学者们认为半湿润半干旱地区的下垫面空间异质性强,导致土壤的下渗能力空间分布不均,国内外学者们围绕下渗理论开展了大量研究,并以此来构建相应的洪水模型,如 Green-Ampt 入渗模型[10]、陕北模型[11]、双超模型[12]等。然而,在半湿润半干旱地区复杂的下垫面情况和变化多端的降水条件下,流域经常出现蓄满产流和超渗产流交替主导、

基金项目:"十四五"国家重点研发计划(2023YFC3206701);河南省自然科学基金青年项目(252300423290);黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2023-11);水利部重大科技项目(SKR-2022024);黄河水利委员会水文局科技计划项目(R202315)

作者简介:刘玉环(1993—),女,工程师,博士,主要从事产流模式及洪水预报研究。E-mail:lyh_yuhuan@163.com

通信作者:罗赟(1991—),男,工程师,博士,主要从事水文循环与水资源规划管理研究。E-mail:luoyun_hhu@hhu.edu.cn

相互交织的现象[13]。当降雨强度大于土壤下渗率或土壤蓄满后,形成的地面径流能够沿坡面河网快速到达流域出口,形成快速涨落的洪水形态;当土壤的下渗能力大,降雨补充土壤缺水后,会形成一定比例的壤中流和地下径流,在土壤的调蓄作用下,这部分径流呈现缓涨缓落的形态;当土壤下渗能力小或土壤缺水量大时,无法产生地下径流。因此,以蓄满产流为主导的洪水往往会产生较多的壤中流和地下径流,洪水形态缓涨缓落且呈现偏态;以超渗产流为主导的洪水以地面径流为主,基本没有或有少量的地下径流,洪水过程陡涨陡落,形态对称性较好。在半湿润半干旱地区,完全蓄满或超渗的洪水数量很少,多数洪水形态,既有陡涨陡落的洪峰过程,又有缓慢的退水过程,前者是由降雨强度大于下渗能力产生的超渗地表径流,后者是部分地区土壤补充至田间持水量产生了饱和地表径流、壤中流或地下径流,说明超渗产流和蓄满产流在该地区的洪水中均有发生。单一产流模型无法准确描述这一复杂产流现象,因此需要对产流模拟进行综合考虑:如增加超渗的新安江模型[14]、蓄满-超渗兼容模型[15]、VIC-3L 模型[16]、垂向混合产流模型[17]、TOKASIDE-D 模型[18]、地表地下人工双调蓄 GXAJ-DAR 模型[19]等。虽然学者们一直致力于解决半湿润半干旱地区洪水预报困难的问题,但仍没有形成类似蓄满产流或超渗产流这样明晰的理论。因此,有必要深入研究半湿润半干旱地区复杂产流规律和水文模型。

本文基于前人研究,针对半湿润半干旱地区水文和下垫面特点,结合水文气象、土壤地形和植被地貌等指标因子,在网格尺度上,通过优选判别指标、层次权重评估、滚动修正聚类等方法建立网格层次聚类产流模式判别(grid hierarchical-clustering runoff generation pattern identification method,GRGI)方法,并在黄河中游典型流域——千阳流域进行验证。

1　产流模式空间分布判别方法

1.1　产流模式判别规则

每场降雨发生前,流域的初始产流模式均不一样,降雨发生时,在降雨和土壤含水量的作用下,产流模式会发生变化。基于此,本文将流域的产流模式判别分为两种情况:降雨发生前的初始状态、洪水期的动态变化。

a. 降雨发生前的初始状态。依据流域下垫面的地形、土壤、植被等分布确定流域蓄满和超渗的初始空间分布;依据流域前期土壤含水量对初始空间分布进行调整,即土壤含水量达到田间持水量的调整为蓄满状态,小于毛管断裂含水量的调整为超渗状态。

b. 洪水期的动态变化。降雨发生时期,以降雨强度和土壤含水量两个指标共同判定:首先判断土壤含水量的状态,当土壤含水量达到田间持水量全部转换为蓄满网格;其次当降雨强度大于下渗能力时,蓄满转换为超渗,否则下渗量用于补充土壤缺水量,蓄超状态不变。降雨结束后退水阶段,以土壤含水量作为判断指标:土壤含水量达到田间持水量时,超渗转换为蓄满;小于毛管断裂含水量时,蓄满转为超渗;土壤含水量介于两者之间的产流状态不变。

1.2　网格尺度初始产流模式判别方法

流域的实际产流过程十分精细复杂,对于特定流域,降雨特性及下垫面条件的时空变化可能导致径流形成过程具有多样性,复杂多变的产流模式很难用简单的指标进行量化[20-21],因此有必要开展网格尺度的产流模式精细判别研究。本文在已有产流模式变化特征研究的基础上,建立 GRGI 方法对网格尺度初始产流模式进行判别。

1.2.1　初始指标优化筛选

水文气象指标包括前期累计净雨量、前期土壤含水量、前期累计蒸散发等;土壤地形指标包括土壤类型、饱和导水率、孔隙度和坡度等;植被地貌指标包括土地利用类型、植被覆盖度、土地裸露指数、地形湿度指数、归一化植被指数、叶面积指数等。由于影响产流模式的指标数量较多,采用相关分析法分别计算各指标与洪水径流量、洪峰量的相关系数,剔除相似指标,然后依据专家经验,选择相关系数 0.75 以上的指标作为产流模式判别指标,结果见表 1。

1.2.2　指标权重确定

确定指标权重的方法较多,其中层次分析法的精度较高,既可定性分析又能定量分析,且在很多领域中都有较好的应用。因此,本文采用层次分析法确定各指标的权重,主要步骤为:①构建层次体系;②构建各个指标间的判断矩阵;③求解权重并进行重要性排序(方根法);④一致性检验。

表1 产流模式判别指标及判别依据

Table 1 Identification indicators and rationale for runoff generation modes

指标类型	指标	指标含义	判别依据
水文气象	前期累计净雨量	标准化处理的洪水发生前15 d累计净雨量,	局部降雨集中区域(前期累计净雨量大于0.75)为易蓄满区域
	前期土壤含水量	标准化处理的洪水发生前15 d土壤含水量	大于0.75为易蓄满区域
土壤地形	土壤类型	主要包括砂土、壤砂土、砂壤土、粉砂土、壤土、砂黏壤土、粉壤土、黏壤土、黏土	砂土、壤土类为易蓄满区域,黏土类为易超渗区域
	饱和导水率	土壤的入渗能力及产生径流的潜力,越易入渗,径流潜力越高	中等以上入渗能力(饱和导水率大于14 mm/h)为易蓄满区域
	坡度	坡面的垂直高度和路程的比值	小于或等于5°为易蓄满区域
植被地貌	土地利用类型	重分类为水域、森林、草地、耕地及裸土等5种	水域、森林为易蓄满区域,草地、耕地及裸土为易超渗区域
	植被覆盖度	森林面积占土地总面积之比	小于或等于40%为易超渗区域
	地形湿度指数	地形和土壤特性对土壤水分布的影响	小于或等于5为易超渗区域

注:前期累计净雨量、前期土壤含水量采用最大最小法进行标准化处理。

1.2.3 产流模式综合判别

根据表1的判别依据对产流模式进行初步判别,其中蓄满属性标记"1",超渗属性标记"0",再利用各指标权重计算网格蓄超产流模式综合判别指标(式(1)),进而全面综合地考量所有指标在判别过程中的作用,确保分析的完整性与系统性。在权重的影响下,可有效放大某些关键指标的影响力。

$$C_1 = \sum_{k=1}^{m} w_k \frac{s_k}{s_{k,\max}} \tag{1}$$

式中:C_1 为每个网格的产流模式综合判别指标;w_k 为指标 k 的权重;s_k 为指标 k 标准化取值;$s_{k,\max}$ 为指标 k 标准化的最大值;m 为指标个数。

采用滚动修正聚类分析法对产流模式判别指标进行聚类,逐步逼近修正综合判别指标的阈值,进而采用该阈值进行最终的产流模式判别,具体步骤如下。

a. 选取待分类判别指标的80%数据作为样本集为 X,20%数据作为验证集,X 为:

$$X = \{x_{ik} \mid i = 1,2,\cdots,n;k = 1,2,\cdots,n\} \tag{2}$$

式中:x_{ik} 为第 i 个洪水事件指标 k 的特征值。

b. 采用最大最小法对指标标准化处理,消除不同指标间物理量纲的差异性,得到新的样本集 X'。

c. 根据贴进度法,采用海明距离公式计算相似系数 h 以表征样本集中元素的接近程度,h 越接近1,表示对应指标的特征值越相似,建立样本集中元素的模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R} = (h_{ij})_{n\times n}$:

$$h_{ij} = 1 - \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} |x'_{ik} - x'_{jk}| \qquad (i,j = 1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

d. 设单指标的阈值集合为 $\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$,令最大值 $x_1 = 1.0$,$x_2 = 0.95$,依次等差对阈值集合赋值。将 $\boldsymbol{R}$ 的所有元素降序排列,选取 x_1,将所有等于 x_1 的元素归为一类,记为 A,不等于 x_1 的归为另一类,记为 A';选取 x_2,在 A' 中采用第1步的方法再分类,依此类推直到将样本集中的所有元素进行聚类。

e. 聚类结束后,采用式(1)计算综合判别指标,根据指标分类结果,即可获得分类结果的综合判别指标阈值。分别采用综合判别指标阈值、聚类分析法对验证集进行分类,并对比分析两种分类方法的结果。如果两种结果误差在10%以内,则表明聚类分析法推求的综合阈值可行,否则调整单指标的阈值集合,重复步骤d~e,重新聚类计算综合阈值,直至两种结果误差在10%以内。

根据产流模式综合判别指标阈值对流域所有网格的产流模式初始状态进行判别。

2 实例验证

2.1 研究流域及数据

千阳流域位于陕西省,隶属黄河中游千河水系,控制站为千阳水文站,控制流域面积2 935 km^2(图1)。千阳流域属半湿润半干旱气候,多年平均降水量为696 mm,多年平均径流量3.705亿 m^3。流域地形沟壑纵横,上游为土石山区,森林茂密,植被良好;中下游为黄土高原沟垒区,地表覆盖较差。2008年千阳水文站附

近修建橡胶坝,流域上游有段家峡水库,此后流域拦洪效率增强,洪水频次降低。

下垫面数据包括:数字高程地图(DEM)、土壤类型、土地利用类型、植被覆盖度等。DEM 来自国家地理空间数据云(SRTMDEM 数据产品),分辨率为 90 m。土壤类型数据来自 HWSD 世界土壤数据集,分辨率为 1 km,由上(0~30 cm)、下(30~100 cm)两层土壤数据组成。土地利用类型数据来自国家基础地理信息中心(GlobeLand30 数据),分辨率为 30 m。植被覆盖度数据采用归一化植被指数(NDVI)表示,来自国家地理空间数据云(MYD13A1 植被指数产品),分辨率为 500 m。水文气象资料包括:2010—2018 年降水量、蒸发及断面流量数据,来自陕西省水文局和黄河水利委员会水文局提供的摘录数据。

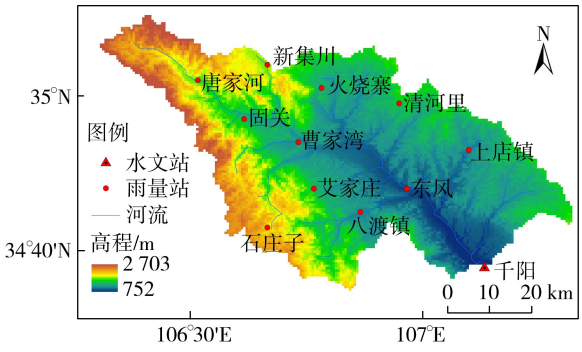
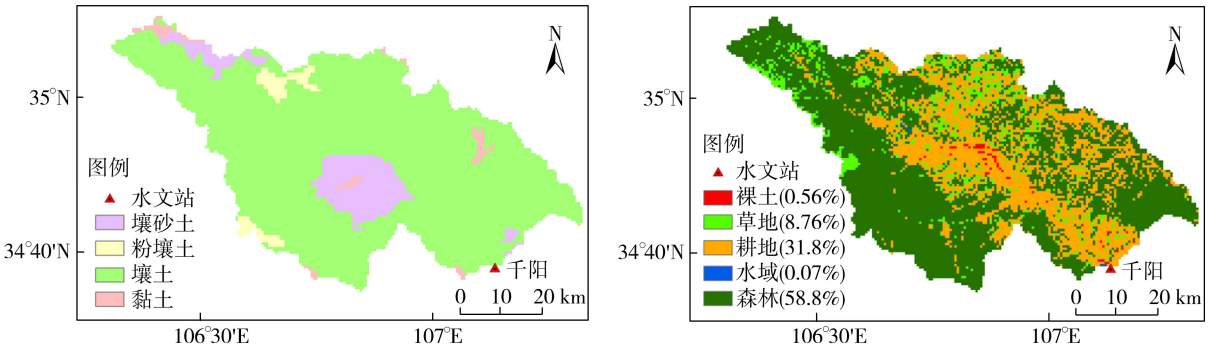


图 1　千阳流域地形水系分布

Fig. 1　Terrain and water system distribution in the Qianyang Watershed

根据 DEM 提取千阳流域边界和流域范围内的土壤类型、土地利用数据。经统计,千阳流域的土壤类型以壤土为主,上层土壤、下层土壤中壤土占比分别为 86.2%和 59.9%,如图 2(a)所示。上层土壤除壤土外,多为粉壤土或壤砂土,下渗率较高;下层土壤的黏壤土占比增加,土壤下渗率较低,出现了弱不透水层,上渗下堵是产生壤中流的天然条件。由图 2(b)(图例中土地利用类型后括号中数字为面积占比)可知,千阳流域的土地利用类型主要为森林和耕地,占比分别为 58.8%和 31.8%,森林主要分布在流域西侧,耕地集中在流域中下游以及分散在流域东北区域。



(a)上层土壤类型　　(b)土地利用类型

图 2　千阳流域上层土壤类型和土地利用类型分布

Fig. 2　Upper layer soil type and land use type distribution in the Qianyang Watershed

2.2　产流模式初始分布

依据层次分析法指标间的重要度,对水文气象、土壤地形、植被地貌 3 个层级的各指标进行相互比较,得到各层指标间的比较判断矩阵见表 2~5,并根据方根法求解各指标的权重以及一致性检验指标,结果见表 6。

表 2　准则层判断矩阵

Table 2　Judgment matrix of criterion layer

指标	水文气象	土壤地形	植被地貌
水文气象	1	1/2	1/2
土壤地形	2	1	4
植被地貌	2	1/4	1

表 3　水文气象指标判断矩阵

Table 3　Judgment matrix of hydrometeorological indicators

指标	前期累计净雨量	前期土壤含水量
前期累计净雨量	1	2
前期土壤含水量	1/2	1

多层指标权重叠加后,产流模式判别指标按权重从大到小依次为:前期土壤含水量、植被覆盖度、前期累计净雨量、地形湿度指数、坡度、土地利用类型、饱和传导度、土壤类型。将研究流域所有洪水的水文气象、土壤地形、植被地貌等数据进行标准化后,通过滚动修正聚类分析法,计算得到产流模式的综合指标阈值,为 0.632。

表4 土壤地形指标判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of soil and terrain indicators

指标	土壤类型	饱和导水率	坡度
土壤类型	1	2	3
饱和导水率	1/2	1	3
坡度	1/3	1/3	1

表5 植被地貌指标判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of vegetation and geomorphology indicators

指标	土地利用类型	植被覆盖度	地形湿度指数
土地利用类型	1	2	3
植被覆盖度	1/2	1	1/3
地形湿度指数	1/3	3	1

表6 各指标权重以及一致性检验

Table 6 Weights of indicators and consistency tests

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	综合权重	一致性检验
水文气象	0.474	前期累计净雨量	0.333	0.158	0.043<0.1
		前期土壤含水量	0.667	0.316	
土壤地形	0.149	土壤类型	0.157	0.023	0.033<0.1
		饱和导水率	0.249	0.037	
		坡度	0.594	0.089	
植被地貌	0.376	土地利用类型	0.163	0.061	0.061<0.1
		植被覆盖度	0.540	0.203	
		地形湿度指数	0.297	0.112	

千阳流域的产流模式判别后的初始分布如图3所示。整体来看,千阳流域的初始超渗网格面积占比为0~31.18%,以蓄满网格为主。从典型洪水的蓄超分布可知,QY-20180707、QY-20130720洪水事件的前期土壤含水量较大,整个流域基本处于蓄满状态,其超渗网格面积占比分别为0.02%和3.25%。QY-20100721洪水的初始超渗网格面积占比为24.99%,与其相似占比的洪水有7场(18%~27%之间),相应的蓄超空间分布亦类似。相比其他洪水,QY-20150811洪水事件的超渗网格面积占比较高,为31.18%,就空间分布来看,主要由中游北部的局部聚集的超渗网格造成。

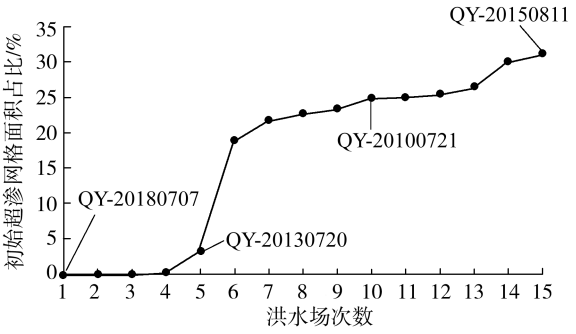


图3 千阳流域典型场次洪水的初始产流模式分布

Fig. 3 Distribution of initial runoff generation modes for typical floods in the Qianyang Watershed

2.3 验证分析

为验证蓄超时空组合的产流模式判别规则,以Grid-XAJ模型为对象进行改进研究,在Grid-XAJ模型产流模块中添加超渗模块,结合产流模式时空动态判定规则,对洪水过程中的产流模式进行动态识别和调整计算,构建蓄超时空动态组合的网格新安江(Grid-XAJ-SIDE)模型,模型详细结构及介绍,见文献[22]。Grid-XAJ模型、Grid-GA模型、Grid-XAJ-SIDE模型分别代表蓄满、超渗、蓄超兼存3种产流模式。为比较3种不同产流模式模型的应用效果,将其分别应用于千阳流域2010—2018年的洪水事件进行参数率定、洪水模拟和对比分析(2010—2014年率定,2015—2018年验证)。另外,选择径流深误差合格率、洪峰误差合格率、峰现时差合格率和Nash-Sutcliffe系数等4个指标对各模型的模拟结果进行综合评价。半湿润半干旱地区的洪水峰高时短,因而更加关注洪峰的模拟情况,本文评价将以洪峰误差合格率与峰现时差合格率为主要评价指标,径流深误差合格率为次要评价指标,Nash-Sutcliffe系数为参考指标。

2.3.1 模型参数率定

Grid-XAJ-SIDE模型的参数确定方法:①参数空间估算,网格张力水蓄水容量(W_M)、土壤湿润锋处土壤吸力(S_F)等参数均采用Grid-XAJ和Grid-GA模型的参数估计方法进行估算[23],此类参数估算后不再进行率定;②人工经验优选,蒸散发折算系数(K)、深层蒸散发系数(C)等参数采取集总式考虑,根据流域实测水文资料,采用人工优选法在经验取值范围内进行率定。在Grid-XAJ-SIDE模型率定中,产流模式转化过程中,模型状态参数(累积下渗量、土壤含水量等)也随之实时调整或更新,以保证计算连续性和水量平衡。

为更清晰地反映模型改进前后的效果,千阳流域3个模型的人工率定参数基本保持一致(表7),仅

Grid-GA 模型的河网消退系数 C_s 相较于其他两个模型偏小,主要是因为超渗产流在千阳流域的计算产流量偏小,较小的 C_s 可以减小河网的调蓄作用,增大模拟洪峰。

表 7　千阳流域各模型参数率定值

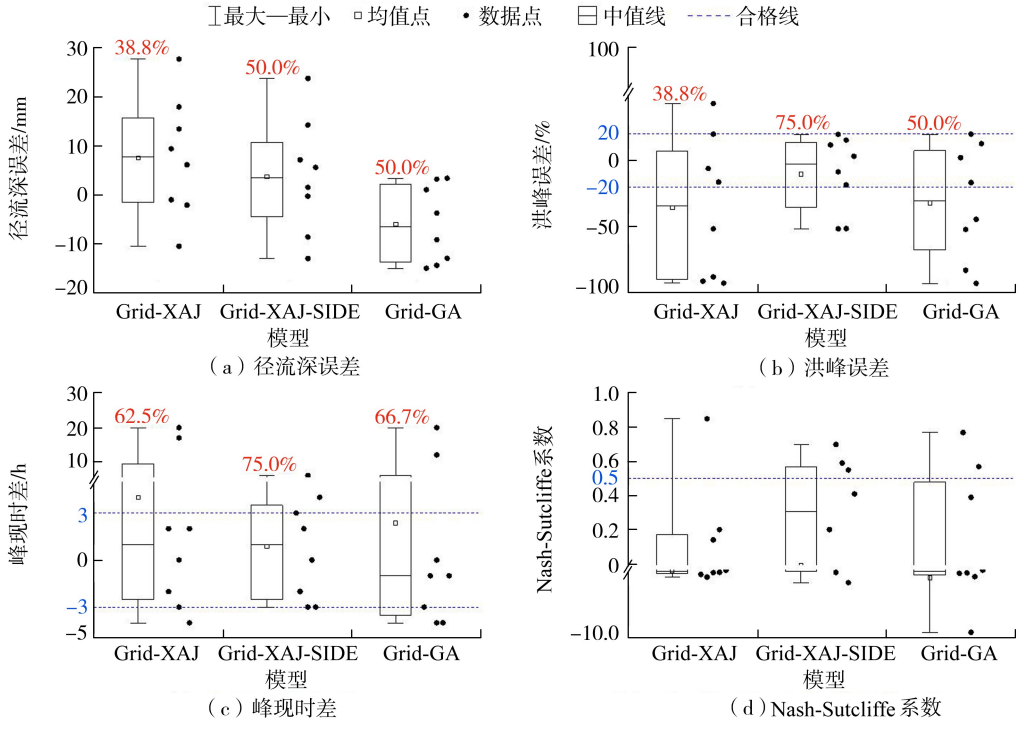
Table 7　Calibrated parameter values of different models in the Qianyang Watershed

模型	K	C	F_m/mm	C_i	C_g	C_s	K_e	X_e	L_{ag}/h
Grid-XAJ	1.05	0.08		0.7	0.9	0.93	0.025	0.48	1
Grid-XAJ-SIDE	1.05	0.08	1 000	0.7	0.9	0.93	0.025	0.48	1
Grid-GA	1.05		1 000			0.81	0.025	0.48	1

注:F_m 为最大累积下渗量;C_i 为壤中流消退系数;C_g 为地下径流消退系数;K_e、X_e 为河道马斯京根汇流参数;L_{ag} 为滞后时间。

2.3.2　洪水模拟结果

由图 4 可知,3 个模型的洪水径流深模拟,合格率分别为 38.8%、50.0%和 50.0%,说明 3 个模型对千阳流域的径流量模拟精度一般,主要原因是 2008 年千阳水文站上游修建了一座橡胶拦水坝,影响了天然径流规律,尤其是小洪水被拦蓄后,其模拟洪水总会出现被高估的趋势。在洪峰误差方面,Grid-XAJ-SIDE 模型的模拟结果最好,洪峰误差的均值和中值线均接近 0,且合格率为 75.0%,相比于 Grid-XAJ 模型和 Grid-GA 模型的合格率有明显提高,这与产流模式动态识别密切相关。在峰现时差方面,相比单一产流模型,Grid-XAJ-SIDE 模型合格率提升至 75.0%,且峰现时差分布最窄,说明模型对洪峰出现时间的控制效果得到改善。3 个模型的 Nash-Sutcliffe 系数一般,模拟最好的 Grid-XAJ-SIDE 模型也只有 3 个洪水事件的 Nash-Sutcliffe 系数大于 0.5。综上,Grid-XAJ-SIDE 模型明显提升了洪水模拟精度,侧面反映其对产流模拟适应力增强。



注:图中红色字体的百分数为该指标的合格率。

图 4　千阳流域 3 个模型评价指标结果

Fig. 4　Results of three model evaluation indicators for the Qianyang Watershed

2.3.3　典型洪水分析

选择千阳流域典型洪水事件 QY-20100721 进行详细分析。由图 5 可知,QY-20100721 洪水事件的洪峰约 2 000 m^3/s,属于量级较大的双峰洪水,降水量大(261 mm)且空间分布均匀。虽然 Grid-XAJ-SIDE 和 Grid-GA 模型的模拟过程线接近,但前者模拟的洪峰和形状过程更接近实测洪水;Grid-XAJ 模型在主峰阶段的模拟洪水偏低,在随后的次峰模拟较好。

根据前期影响雨量计算结果可知,QY-20100721 平均前期影响雨量约为 120 mm,平均饱和度 0.67,初始蓄满网格占比为 73.5%。由图 5(b)(c)可知,流域的蓄满超渗网格动态变化如下:①超渗网格快速增加:

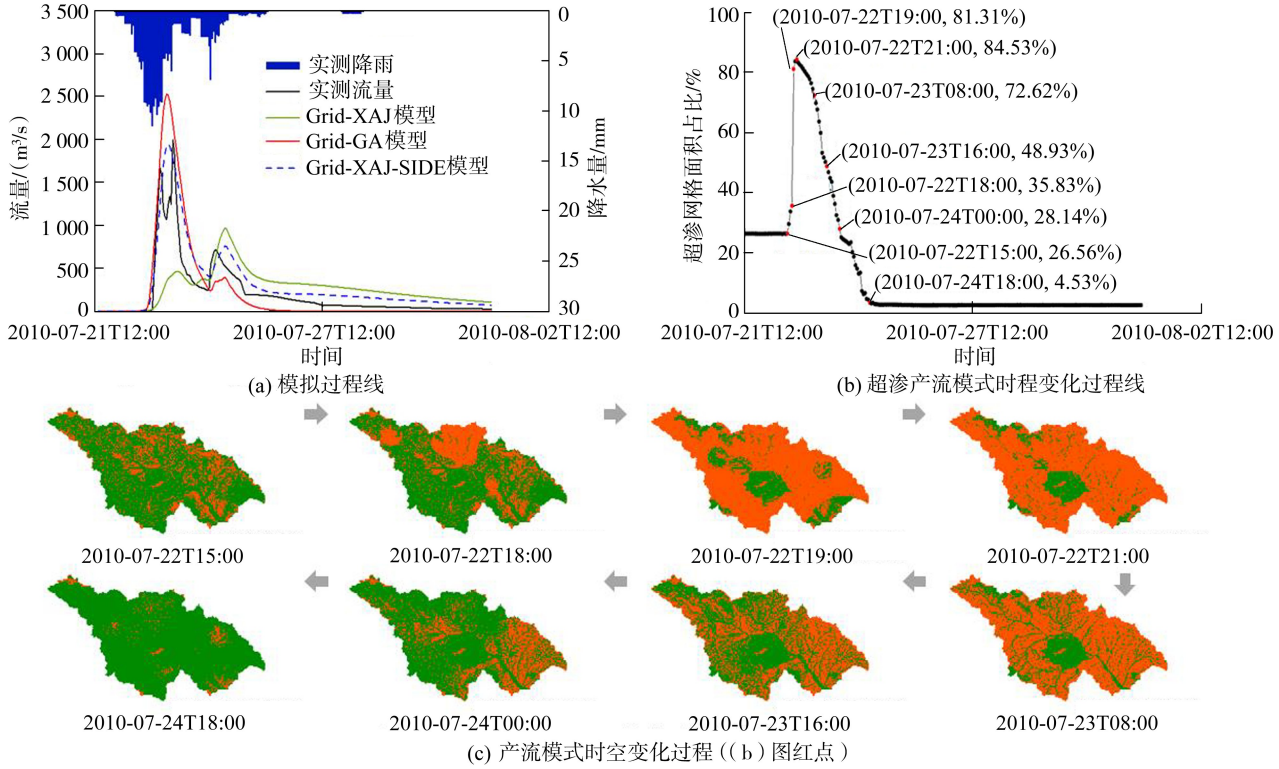


图5 千阳流域QY-20100721洪水过程及其蓄超网格时空动态变化过程

Fig. 5 Process for QY-20100721 flood event and its spatial and temporal dynamic SE-IE change in the Qianyang Watershed

2010-07-22T15:00—21:00,流域降雨空间分布较为均匀,全流域超渗网格大面积增加,在21:00达到了84.53%,尤其是18:00—19:00的1 h内,发生了大强度的全流域降雨(平均降雨强度大于10 mm/h,单点最大强度为35.6 mm/h),使得流域的超渗网格面积占比急速增加至81.31%;②蓄满网格增加:2010-07-22T22:00—2010-07-24T18:00,随着降水的累积,超渗网格缺水量得到补充,发生超渗转蓄满,超渗网格面积占比相比初始状态减少约25%,直至2010-07-24T18:00流域所有网格均为蓄满状态。由图5(c)可知,河道网格包气带较薄,蓄满速度快,最先完成超渗向蓄满的转换。

根据QY-20100721洪水事件的蓄超时空动态变化过程剖析不同模型表现优劣的内在成因。QY-20100721洪水发生前期,土壤缺水量较大,无论降雨强度大与否,Grid-XAJ模型计算时仍需先补充土壤缺水后发生产流,因而在主峰的模拟洪水偏低;而Grid-GA模型在大强度降雨下,可以先产生超渗地表径流,模拟出快速涨落的洪水过程。随着降雨进行,土壤缺水量补充完毕,Grid-XAJ模型开始产流,从而较好地模拟出后续的洪水过程,相反Grid-GA模型在小强度降雨的模拟效果不如Grid-XAJ模型,是因为Grid-GA模型假定土壤是半无限土柱,即不会达到蓄满状态,入渗到土壤中降雨不会再产流。Grid-XAJ-SIDE模型在结合两种产流模式后,优化了Grid-GA在后半段洪水模拟的缺陷。Grid-XAJ-SIDE模型中即使是超渗产流主导的网格,当下渗量补充土壤含水量达到蓄满状态后,超渗网格可以转换为蓄满网格,在蓄满产流的作用下,土壤中的蓄水量会产生壤中流和地下径流,因而在后期更接近实测退水过程。

3 结 论

a. 在综合考虑水文气象、土壤地形和植被地貌等因子后,基于网格的层次聚类产流模式判别方法能够较精确地识别出千阳流域蓄满产流和超渗产流的空间分布,整体以蓄满网格为主,占比在70%以上,划分结果与流域实际下垫面特点接近,能够有效地反映出流域内不同下垫面特征空间变化的特点。

b. 基于长序列历史洪水模拟,对千阳流域蓄满、超渗产流模式划分结果进行检验,与单一产流洪水模拟结果相比,采用改进后的Grid-XAJ-SIDE模型的径流深误差、洪峰误差及峰现时差合格率分别提高约12%、

35%、12%,模型产流计算更加精细。蓄超判别方法可以展现两种产流模式交替出现以及相互转换的过程,在结合两种产流模式的优点后,既实现了径流量的增加,也保证了洪水峰值和出现的时间,扩大了栅格新安江模型在半湿润半干旱地区洪水模拟的适应范围。

参考文献:

[1] WMO. Manual on flood forecasting and warning[R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2011.

[2] Jonkman S N. Global perspectives on loss of human life caused by floods[J]. Natural Hazards, 2005, 34(2): 151-175.

[3] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 1-7. (Rui Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 1-7. (in Chinese))

[4] Guo Liang, He Bingshun, Ma Meihong, et al. A comprehensive flash flood defense system in China: overview, achievements, and outlook[J]. Natural Hazards, 2018, 92(2): 727-740.

[5] 王晟,张珂,晁丽君,等. 基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 70-76. (Wang Sheng, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Assessment of flood and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 70-76. (in Chinese))

[6] 李琪. 全国水文预报技术竞赛参赛流域水文模型分析[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 191-195. (Li Qi. Analysis and discussion related to the hydrological watershed models used in the first hydrological forecasting technology competition of China [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(2): 191-195. (in Chinese))

[7] Sittner W T. WMO project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1976, 21(1): 203-213.

[8] 石朋,陆美霞,吴洪石,等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 19-25. (Shi Peng, Lu Meixia, Wu Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 19-25. (in Chinese))

[9] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (Zhang Ke, Niu Jiefan, Li Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))

[10] Neuman S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 564-566.

[11] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社, 1984: 15-16.

[12] 王印杰,王玉珉. 土壤非饱和导水率机理的探讨[J]. 水利学报, 1994, 25(12): 78-82. (Wang Yinjie, Wang Yumin. Characteristic function of soil moisture and analytical solution of richards equation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(12): 78-82. (in Chinese))

[13] Zhang Li, Hu Caihong, Jian Shengqi, et al. Identifying dominant component of runoff yield processes: a case study in a sub-basin of the middle Yellow River[J]. Hydrology Research, 2021, 52(5): 1033-1047.

[14] 李致家,孔祥光,张初旺. 对新安江模型的改进[J]. 水文, 1998, 18(4): 20-24. (Li Zhijia, Kong Xiangguang, Zhang Chuwang. Improving Xin'anjiang model[J]. Journal of China Hydrology, 1998, 18(4): 20-24. (in Chinese))

[15] 雒文生,胡春歧,韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 6-13. (Luo Wensheng, Hu Chunqi, Han Jiatian. Research on a model of runoff yield reflecting excess infiltration and excess storage simultaneously[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(4): 6-13. (in Chinese))

[16] Xu Liang, Xie Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9/10): 1173-1193.

[17] 包为民,王从良. 垂向混合产流模型及应用[J]. 水文, 1997, 17(3): 18-21. (Bao Weimin, Wang Congliang. Application and improvement of vertical-mixed runoff model[J]. Journal of China Hydrology, 1997, 17(3): 18-21. (in Chinese))

[18] 刘玉环,刘志雨,李致家,等. 华北地区分布式蓄超空间动态组合 TOKASIDE-D 模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 105-112. (Liu Yuhuan, Liu Zhiyu, Li Zhijia, et al. TOKASIDE-D model of spatial dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff for North China region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 105-112. (in Chinese))

(下转第 42 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.005

基于禁忌搜索与粒子群优化算法的地下水污染源信息辨识

徐 津[1,2,3],伍梦天[1,4],李 凯[5],王玲玲[1,2,3],朱 海[1,2,3],王明辉[5]

(1. 河海大学水灾害防卸全国重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室;
4. 河海大学水文水资源学院; 5. 宿迁市水务工程建设管理中心)

摘要:为准确辨识地下水污染源位置、污染物释放过程等关键信息,采用模拟-优化理论框架,将需要同步辨识多种污染源信息的地下水反演问题概化为包含离散型、连续型变量的混合变量优化问题,并提出了一种基于禁忌搜索与粒子群优化算法的两阶段组合优化(TS-PSO)算法,该算法采用禁忌搜索策略确定污染源位置,利用粒子群优化算法识别污染物的释放强度及释放过程。算例验证结果表明:与传统演化算法(GA、PSO 算法)相比,TS-PSO 算法的求解效率更高,计算结果更可靠,计算精度更高;对于多个污染源的反演问题,TS-PSO 算法可快速、有效地辨识污染源位置、污染物释放强度和释放过程。

关键词:地下水污染;信息辨识;优化算法;禁忌搜索;粒子群优化算法

Groundwater contaminant source information identification based on tabu search and particle swarm optimization algorithm

Xu Jin[1,2,3], **Wu Mengtian**[1,4], **Li Kai**[5], **Wang Lingling**[1,2,3], **Zhu Hai**[1,2,3], **Wang Minghui**[5]

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*, *Hohai University*;
2. *College of Water Conservancy & Hydropower Engineering*, *Hohai University*;
3. *Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic Systems*, *Ministry of Water Resources*, *Hohai University*;
4. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*;
5. *Suqian Municipal Water Affairs Engineering Construction Management Center*)

Abstract: To accurately identify key information such as the groundwater contaminant source location and contaminant release process, the simulation-optimization theoretical framework was used. The groundwater inversion problem that requires simultaneous identification of information from multiple contaminant sources was generalized as a mixed-variable optimization problem involving discrete and continuous variables. A two-stage combinatorial optimization algorithm based on tabu search and particle swarm optimization (TS-PSO) algorithm was proposed. The algorithm applied the tabu search method to locate contaminant sources and then used the particle swarm optimization algorithm to determine the contaminant release intensity and process. The verification results of the numerical examples show that compared with traditional evolutionary algorithms(GA and PSO algorithm), TS-PSO algorithm has higher solution efficiency, more reliable calculation results, and higher calculation accuracy. For the inversion problem of multiple contaminant sources, TS-PSO algorithm can quickly and effectively identify the location of contaminant sources, as well as the release intensity and release process of contaminants.

Key words: groundwater contaminant; information identification; optimization algorithm; tabu search; particle swarm optimization algorithm

地下水是全球可利用的最大淡水资源。近几十年来,日益加剧的人类活动对地下水的水质造成了严重的负面影响,引发了一系列地下水污染事件[1-2]。地下水污染通常具有存在的隐蔽性、发现的滞后性、治理的复杂性等特点[3]。在地下水污染造成严重影响前,如何依据有限的监测资料,快速、准确地定位污染源泄露

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202600);国家自然科学基金项目(52479062,52309086);江苏省科学技术基础研究计划青年基金项目(BK20241516);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201185);龙溪河流域洪水与环境风险预警系统开发咨询服务项目(3704-PRC)

作者简介:徐津(1992—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:hhu_xj@hhu.edu.cn

通信作者:朱海(1986—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:h.zhu@hhu.edu.cn

位置、识别污染物释放强度及过程就显得尤为重要[4-5]。

地下水污染源信息辨识方法中,基于模拟-优化理论框架的演化算法应用最广泛[6]:如,Singh 等[7]通过结合遗传算法(GA)和地下水水流及溶质输移模型,准确定位了地下水污染源;Wu 等[8]提出了耦合差分进化算法和自适应径向基神经网络的求解框架,快速率定了单个或多个污染源在多个时期的释放强度;高琬玉等[9]提出了自适应权重粒子群算法,在替代模型的辅助下,识别了污染源释放历史;王敬等[10-11]采用 SCE-UA 算法有效地校准了多污染源在不同边界条件下的释放历史;江思珉等[12-13]采用和声搜索算法、改进的模拟退火算法,反演了多种地下水污染源信息。

已有采用演化算法辨识地下水污染源信息的研究,多数集中于单独定位污染源的位置或校准污染源的释放历史[14],但大部分实例存在污染源位置、释放历史均未知的问题,需进行同步辨识[15]。同步实现污染源位置与释放历史的辨识属于混合变量优化范畴,而离散型变量优化时搜索空间不连续、多片段的特征制约了连续空间平滑性搜索方法的应用,使传统演化算法在求解此类问题时,常面临计算结果波动较大、精度难以保障的难题[16]。为此,本文提出了一种基于禁忌搜索(tabu search,TS)算法与粒子群优化(PSO)算法的组合优化算法(TS-PSO 算法)来辨识地下水污染源信息。该算法采用两阶段组合优化框架,借助禁忌搜索法确定污染源位置,利用 PSO 算法校正污染物的释放强度和释放过程。

1　研究方法

地下水污染源信息的辨识需综合考虑地下水水流及溶质运移规律,并借助高效的优化算法处理污染信息反演问题。本文采用的模拟-优化理论框架包括地下水水流和溶质数值模型、TS-PSO 算法。

1.1　数值模型

假设地下水的流动为稳态、各向异性且密度恒定,则多孔介质中的三维地下水流动可用偏微分方程描述:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+q_{\mathrm{s}}=S_{\mathrm{s}}\frac{\partial h}{\partial t} \tag{1}$$

式中:k_{xx}、k_{yy}、k_{zz} 分别为渗透系数张量在 x、y、z 方向的分量;h 为水头;q_{s} 为单位体积含水层的源汇项流量;S_{s} 为贮水率;t 为时间。

地下水溶质输移控制方程考虑了地下水的对流、弥散、源汇项、平衡吸附作用以及一级不可逆反应,化学组分 m 的三维运移偏微分方程为

$$\theta R\frac{\partial C_{m1}}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C_{m1}}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(q_iC_{m1})+q_{\mathrm{s}}C_{ms}-\lambda_1\theta C_{m1}-\lambda_2\rho_{\mathrm{b}}C_{m2} \tag{2}$$

式中:x_i 为空间坐标方向 x、y、z;C_{m1}、C_{m2} 分别为溶质组分 m 的溶解浓度、吸附浓度;C_{ms} 为源汇项中溶质组分 m 的浓度;q_i 为达西速度;D_{ij} 为水动力弥散系数张量分量;R 为滞留系数;θ 为含水层的孔隙度;λ_1 为溶解相的反应速率;ρ_{b} 为孔隙介质的体积密度;λ_2 为固相吸附/解吸反应速率常数。

采用美国地质调查局最新发布的 MODFLOW6 的 GWF 模型与 GWT 模型分别模拟地下水流动与溶质输移[17]。为了便于与优化算法耦合,采用基于 Python 语言开发的 Flopy 包[18],通过编写代码构建、修改、运行地下水数值模型,提取关键模拟数据[19]。

1.2　TS-PSO 算法

TS 算法由 Glover[20]于 1986 年提出,是一种全局性的逐步寻优算法,通过引入一个灵活的存储结构以及与其对应的禁忌长度、禁忌准则、藐视准则等策略,从而具备了一定的自主学习和灵活记忆能力。相比于 GA 和 PSO 算法,TS 算法更能规避局部最优的情况,且其邻域搜索特性使其在求解离散型变量优化问题上表现更优。PSO 算法是通过模拟鸟群觅食行为来寻优的经典仿生演化算法,基本思想是凭借群体中个体之间的协作和信息共享寻找最优解。相较于其他演化算法,PSO 算法的优势是简单易实现、没有过多的自定义参数,且能较好地处理连续变量优化问题。

TS-PSO 算法兼具 TS 算法的邻域搜索特性与 PSO 算法的全局寻优机制,保证了计算的可靠性与精度,尤其适用于解决混合变量优化问题。TS-PSO 算法的核心思想是采用两阶段优化策略,对不同类型的变量进行独立求解:第 1 阶段,利用 TS 算法在决策空间中的邻域探索,确定离散型变量 x_{dis};第 2 阶段,基于 TS 算法

确定的离散型变量,采用PSO算法进一步优化,搜索对应的最优连续型变量 x_{con}。两阶段交替执行,不断迭代优化,最终收敛至全局最优解,实现对混合变量优化问题的高效求解。图1为TS-PSO算法的流程框架,关键步骤包括初始化、禁忌表更新和邻域搜索。

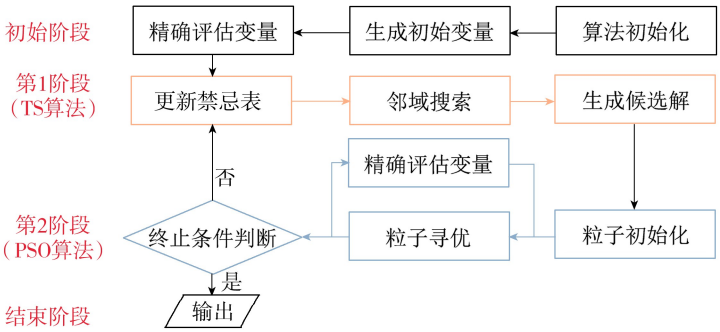


图1 TS-PSO算法的流程框架

Fig. 1 Flow framework of TS-PSO algorithm

a. 初始化。初始化禁忌表,采用拉丁超立方采样法,生成 N_0 组初始变量,存储于种群Pop中,调用数值模型对每组变量进行评估,并记录种群的最优变量(x_{best})、目标值(f_{best})。

b. 禁忌表更新。遍历当前种群Pop,逐一检查其解的质量:①若 $f_{i'}>f_{best}$,将 $f_{i'}$ 对应变量 $x_{i'}$ 的离散部分加入禁忌表;②若 $f_{i'}\leqslant f_{best}$,且变量 $x_{i'}$ 已在禁忌表中,则释放其禁忌状态;③若 $f_{i'}\leqslant f_{best}$,且变量 $x_{i'}$ 不在禁忌表中,则更新最优变量 x_{best} 及最优目标值 f_{best}。

c. 邻域搜索。以当前最优解 x_{best} 为中心,依据禁忌表,生成 N_{new} 组候选解,存储于Pop中,候选解的生成公式如下:

$$x_{i',new}=x_{i',best}+\mathrm{RandI}(L)\quad i'\in[1,n]$$

$$x_{con,new}=x_{con,best}$$

$$x_{new}\leftarrow x_{dis,new}\cup x_{con,new}$$

式中:$x_{i',new}$ 为第 i' 个候选解;n 为离散变量个数;L 为禁忌长度;RandI为随机整数函数,即随机生成处于 $[-L,L]$ 之间的整数。

依据对TS-PSO算法的预试验,取 N_0、N_{new} 分别为10、10,取禁忌长度 L 为1。

2 算例验证

2.1 算例概况

如图2所示,假设平原地区某研究区内存在二维均质各向异性承压含水层(800 m×1 200 m),采用边长为50 m的正方形网格将研究区域剖分为16行24列。南北两边均为隔水边界,东西两边为定水头边界,水头分别为90、80 m。承压含水层的渗透系数为18 m/d,孔隙率为0.25,纵向弥散度为40 m,横向弥散度为15 m。研究区内存在一处潜在污染源区域,此区域是污染物渗入地下水的高发地带,并可能存在单个或多个污染源,同时污染物呈不定期持续释放状态。算例的目标是基于污染源区域下游7口观测井的污染物浓度数据,反演污染源的关键特征信息。数值模拟的设置如下:模拟时长为40月,划分为20个应力期(每个应力期为2月),时间步长设定为6 d。各观测井每个时间步长末的污染物浓度由地下水数值模型的正演计算获得。

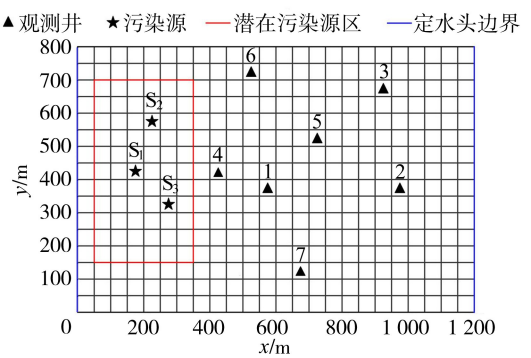


图2 算例概况

Fig. 2 Case overview

2.2 工况1:单个污染源信息识别

假定存在某个污染源在模拟期的前5个应力期持续向地下水释放污染物,且每个应力期均以连续稳定的方式释放,释放强度保持恒定。污染源位置的(行,列)信息为(9,4),应力期1~5的释放强度分别为65、

40、3、23、46 kg/d。7 口观测井模拟期对污染物质量浓度的监测结果如图 3 所示。该工况污染源待辨识的信息包括污染源的位置(行,列),应力期 1~5 的污染物释放强度。采用 TS-PSO 算法、GA、PSO 算法分别进行反演,辨识结果见表 1。

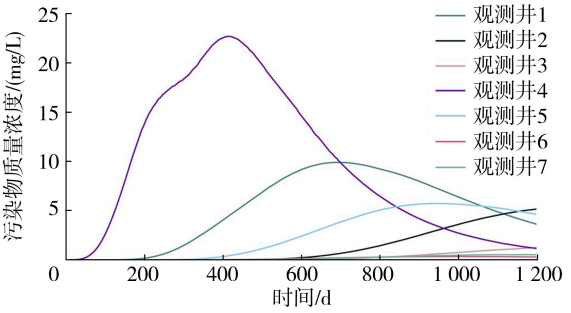


图 3　各观测井污染物质量浓度变化曲线(单个污染源)

Fig. 3　Contaminant mass concentration variation curves at observation wells (single contaminant source)

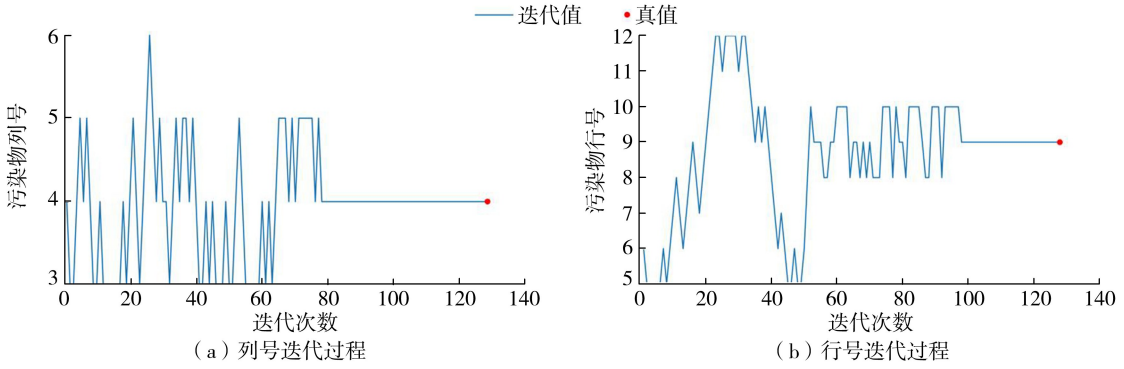
表 1 的目标值依据研究区内各观测井于模拟期内所监测到的污染物浓度观测值与模拟值,通过均方根误差(RMSE)的计算方式得出。算法所获取的目标值越小,意味着模拟值与观测值的拟合度越高,相应地,反演结果也越精确。由表 1 可知,TS-PSO 算法精确辨识了污染源位置,且其目标值为 0.352,小于 GA 和 PSO 算法,说明 TS-PSO 算法的污染源位置的辨识能力优于 GA、PSO 算法。TS-PSO 算法基于正确的污染源位置准确地校正了污染源所有应力期的释放强度;GA、PSO 算法在校正应力期 3 的释放强度时产生了较大的误差,主要原因可能是污染源位置的反演误差导致了 GA、PSO 算法无法正确校正污染源释放强度,这进一步验证了 TS-PSO 算法在求解地下水混合变量优化问题的优势。由图 4 可知,TS-PSO 算法经过约 40 次迭代,首次求解得到了污染源的真实位置,此后在真实位置附近迭代,最终在约 80 次迭代之后稳定收敛于真实位置。TS-PSO 算法基于两阶段优化框架,在校准离散型尤其是整数型变量上具有 TS 的优势,能较好地辨识污染源位置。

表 1　各算法对单个污染源位置和释放强度的辨识结果

Table 1　Identification results of each algorithm for location and release intensity of a single contaminant source

算法	污染源位置(行,列)	污染物释放强度/(kg/d)					目标值
		应力期 1	应力期 2	应力期 3	应力期 4	应力期 5	
TS-PSO 算法	(9,4)	64.82(0.28%)	39.63(0.93%)	2.99(0.33%)	22.54(2.00%)	45.25(1.63%)	0.352
GA	(8,5)	63.25(2.69%)	40.11(0.28%)	1.62(46%)	23.83(3.61%)	46.82(1.8%)	3.374
PSO 算法	(7,4)	64.52(0.74%)	39.45(1.38%)	2.32(22.67%)	23.13(0.57%)	45.94(0.13%)	2.192

注:污染物释放强度后括号中的数据为污染物释放强度的相对误差。



(a) 列号迭代过程　　(b) 行号迭代过程

图 4　TS-PSO 算法单个污染源位置辨识过程

Fig. 4　Process of identifying location of a single contaminant source using TS-PSO algorithm

由图 5 可知,TS-PSO 算法优化过程中具有最快的收敛速度和最佳的寻优效果,但初期(前 50 次迭代内),其搜索能力稍逊于 GA 和 PSO 算法,随着迭代进行,TS-PSO 算法的优化效率迅速提升,并在约 100 次迭代后稳定达到最优目标值,展现了卓越的收敛能力和全局优化性能。相比之下,虽然 GA 和 PSO 算法在迭代初期目标值减小较快,但在后期易陷入局部最优状态,最终优化效果明显低于 TS-PSO 算法。结合图 4 分析,TS-PSO 算法在 50 次迭代后目标值的迅速减小,主要归功于其在污染源位置辨识上的准确性。

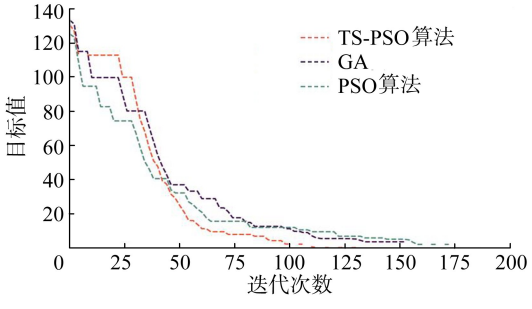


图 5　单个污染源时各算法的优化过程

Fig. 5　Optimization process of algorithms for a single contaminant source

2.3 工况2:多个污染源信息识别

假定存在3个污染源,且均在模拟期的前5个应力期持续向地下水释放污染物,污染源具体位置和释放强度见表2。模拟期内,7口观测井对污染物质量浓度的监测结果如图6所示。该工况待辨识的参数包括3个污染源的位置信息以及3个污染源在前5个应力期的释放强度,共计21个参数。

表2 污染源真实位置和释放强度

Table 2 Actual location and release intensity of contaminant sources

污染源	位置(行,列)	污染物释放强度/(kg/d)				
		应力期1	应力期2	应力期3	应力期4	应力期5
S_1	(9,4)	21.00	52.00	13.00	40.00	22.00
S_2	(12,5)	14.00	5.00	30.00	14.00	40.00
S_3	(7,6)	32.00	25.00	7.00	18.00	23.00

由表3可知,TS-PSO算法精准辨识了S_1、S_2、S_3的位置,而GA、PSO算法均未能准确识别,进而干扰了污染源释放强度的校正,最终导致收敛于局部最优。由图7可知,TS-PSO算法辨识前期(约50次迭代内),污染源位置存在较大波动,说明此时处于全局搜索阶段,试图覆盖更广的解空间,随着迭代次数增加,污染源位置逐渐趋于稳定,在约100次迭代后完全收敛,准确锁定了污染源的真实位置。从目标值看,TS-PSO算法调用了28 750次数值模型获得了最优目标值(1.85);GA、PSO算法不仅调用了更多次的数值模型,而且求解的最优目标值也远远劣于TS-PSO算法。综上,TS-PSO算法比传统演化算法(GA、PSO算法)具有更高的计算效率与精度。

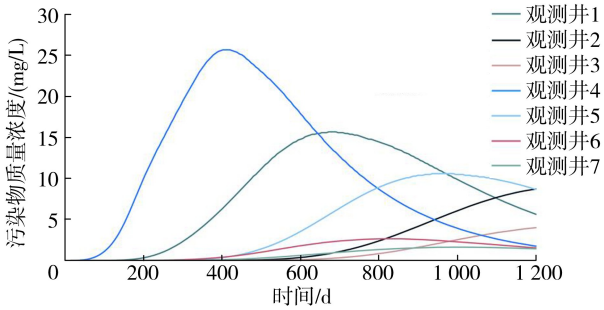


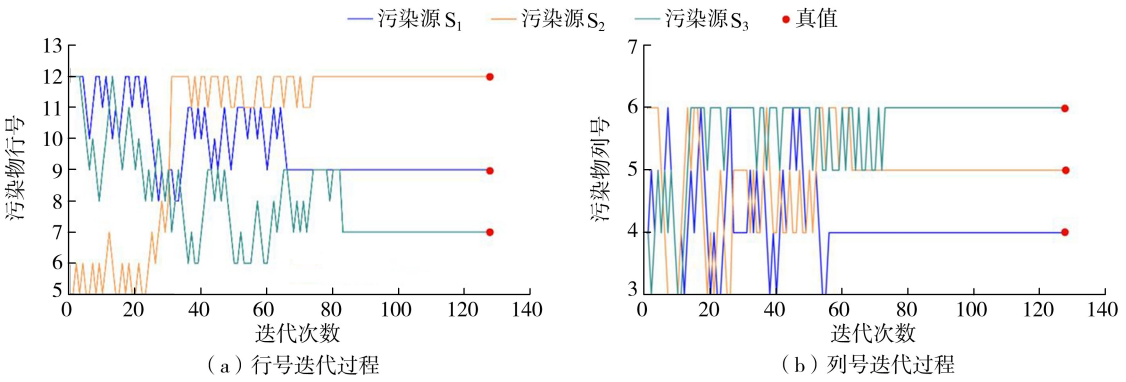
图6 各观测井污染物质量浓度变化曲线(多个污染源)

Fig. 6 Contaminant mass concentration variation curves at observation wells (multiple contaminant sources)

表3 各算法对多个污染源位置的辨识结果

Table 3 Identification results of each algorithm for location of multiple contaminant sources

算法	位置(行,列)			目标值	评估次数
	S_1	S_2	S_3		
TS-PSO算法	(9,4)	(12,5)	(7,6)	1.85	28 750
GA	(9,6)	(10,6)	(8,8)	13.62	37 100
PSO算法	(8,6)	(12,2)	(7,5)	10.20	34 350



(a)行号迭代过程 (b)列号迭代过程

图7 TS-PSO算法多个污染源位置辨识过程

Fig. 7 Process of identifying location of multiple contaminant sources using TS-PSO algorithm

由图8可知,相比GA和PSO算法,TS-PSO算法在目标值收敛速度和全局寻优能力方面表现出明显优势。尽管TS-PSO算法在初期的收敛速度稍慢,但其全局搜索能力更强,最终在约100次迭代后达到最优解,并稳定保持目标值最小。GA和PSO算法尽管初期目标值减小较快,但后期均出现停滞现象。由表4可知,TS-PSO算法基于正确的污染源位置准确校正了3个污染源前5个应力期的释放强度,因此在迭代次数足够的前提下,TS-PSO算法可高效解决多污染源信息辨识问题。

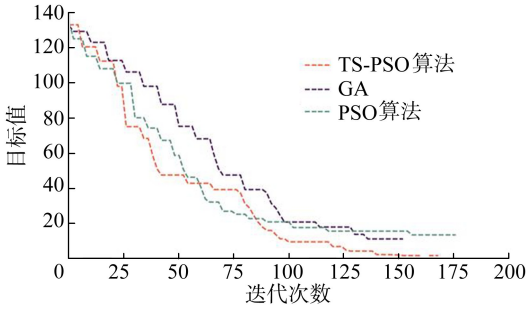


图 8　多个污染源时各算法的优化过程

Fig. 8　Optimization process of algorithms for multiple contaminant sources

表 4　TS-PSO 算法对各污染源前 5 个应力期释放强度的辨识结果

Table 4　Identification results of TS-PSO algorithm for release intensities of top 5 stress periods for each contaminant source

污染源	污染物释放强度/(kg/d)				
	应力期 1	应力期 2	应力期 3	应力期 4	应力期 5
S_1	20.88	52.11	12.99	39.48	22.45
S_2	14.00	5.00	31.00	14.00	40.00
S_3	32.00	25.00	7.00	18.00	23.00

3　结　语

本文提出的 TS-PSO 算法可高效、精准地辨识污染源关键信息。单个污染源时,TS-PSO 算法可精确辨识污染源位置,前 5 个应力期污染物释放强度的反演相对误差均低于 2.00%,目标值达到 0.352,展现出极高的计算精度。多个污染源时,TS-PSO 算法亦可精确辨识各污染源位置,并精准反演污染源释放强度,进一步证明了其在复杂环境中的适用性;传统 GA 和 PSO 算法分别经过 37100 次和 34350 次评估仍未达到理想解,而 TS-PSO 算法仅用 28750 次迭代便成功收敛至最优解,大幅减少了计算资源消耗和收敛时间。因此,相比 GA 和 PSO 算法,TS-PSO 算法对混合变量问题的求解能力更好。未来,可将 TS-PSO 算法与机器学习技术相结合,进一步拓展其在复杂地质环境及多源污染条件下的应用潜力。

参考文献:

[1] 徐腾,王以鹏,叶逾,等. 地下水超采管控体系及水量水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(4):27-35. (Xu Teng,Wang Yipeng,Ye Yu,et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):27-35. (in Chinese))

[2] 陈舟,王锦国,张延杰,等. 水利水电工程地下水环境影响评价关键问题及案例分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):48-55. (Chen Zhou,Wang Jinguo,Zhang Yanjie,et al. Key issues and case analysis of groundwater environmental impact assessment in water conservancy and hydropower projects[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):48-55. (in Chinese))

[3] 汪思颖,韩绮,张立秋,等. 中国地下水污染防治技术研究进展与展望[J]. 环境污染与防治,2024,46(12):1834-1840. (Wang Siying,Han Qi,Zhang Liqiu,et al. Research progress and prospect of groundwater pollution prevention and control technology in China[J]. Environmental Pollution & Control,2024,46(12):1834-1840. (in Chinese))

[4] 李子乐,安永凯,闫雪嫚. 耦合敏感性分析与两阶段马尔科夫链蒙特卡洛算法的地下水污染溯源辨识[J]. 地球科学与环境学报,2024,46(5):702-710. (Li Zile,An Yongkai,Yan Xueman. Coupled sensitivity analysis and two-stage MCMC algorithm for groundwater pollution source identification[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2024,46(5):702-710. (in Chinese))

[5] 潘紫东,卢文喜,范越,等. 基于模拟-优化方法的地下水污染源溯源辨识[J]. 中国环境科学,2020,40(4):1698-1705. (Pan Zidong,Lu Wenxi,Fan Yue,et al. Inverse identification of groundwater pollution source based on simulation-optimization approach[J]. China Environmental Science,2020,40(4):1698-1705. (in Chinese))

[6] 刘蒙,骆乾坤,安济民,等. 基于集成替代模型和遗传算法的地下水污染源信息识别[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(6):731-738. (Liu Meng,Luo Qiankun,An Jimin,et al. Identification of groundwater contaminant source information based on ensemble surrogate model and genetic algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural

Science),2024,47(6):731-738. (in Chinese))
[7] Singh R M, Datta B. Identification of groundwater pollution sources using GA-based linked simulation optimization model[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2006,11(2):101-109.
[8] Wu Mengtian, Xu Jin, Hu Pengjie, et al. An adaptive surrogate-assisted simulation-optimization method for identifying release history of groundwater contaminant sources[J]. Water,2022,14(10):1659.
[9] 高琬玉,卢文喜,潘紫东,等. 基于自适应权重粒子群优化算法的地下水污染溯源辨识[J]. 中国农村水利水电,2022(12):1-7. (Gao Wanyu, Lu Wenxi, Pan Zidong, et al. Inverse identification of contamination sources in groundwater based on adaptive weighted particle swarm optimization algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(12):1-7. (in Chinese))
[10] 王敬,韩忠,梁浩,等. 地下水污染强度反演识别的SCE-UA算法[J]. 中国农村水利水电,2020(12):106-111. (Wang Jing, Han Zhong, Liang Hao, et al. Groundwater contaminant inverse identification by SCE-UA optimization algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(12):106-111. (in Chinese))
[11] 黄林显,刘治政,邢立亭,等. 基于复合型进化算法的地下水污染反演模型[J]. 人民黄河,2019,41(4):58-63. (Huang Linxian, Liu Zhizheng, Xing Liting, et al. Inverse model based on SCE-UA optimization algorithm for unknown groundwater pollution identification[J]. Yellow River,2019,41(4):58-63. (in Chinese))
[12] 江思珉,张亚力,蔡奕,等. 单纯形模拟退火算法反演地下水污染源强度[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(2):253-257. (Jiang Simin, Zhang Yali, Cai Yi, et al. Groundwater contaminant identification by hybrid simplex method of simulated annealing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2013,41(2):253-257. (in Chinese))
[13] 江思珉,蔡奕,王敏,等. 基于和声搜索算法的地下水污染源与未知含水层参数的同步反演研究[J]. 水利学报,2012,43(12):1470-1477. (Jiang Simin, Cai Yi, Wang Min, et al. Simultaneous identification of groundwater contaminant source and aquifer parameters by harmony search algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(12):1470-1477. (in Chinese))
[14] 李小兰,曾献奎,王栋,等. 基于优化-自适应稀疏网格替代模型的地下水模拟参数不确定性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1234-1243. (Li Xiaolan, Zeng Xiankui, Wang Dong, et al. Uncertainty analysis of groundwater simulation parameters based on optimized-adaptive sparse grid surrogate model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2022,52(4):1234-1243. (in Chinese))
[15] Zhao Ying, Lu Wenxi, Xiao Chuanning. A Kriging surrogate model coupled in simulation-optimization approach for identifying release history of groundwater sources[J]. Journal of Contaminant Hydrology,2016,185-186:51-60.
[16] 张衡. 基于协同进化的混合变量粒子群优化算法[D]. 武汉:武汉大学,2020.
[17] 卢洪健,王卓然. 地下水模拟方法与应用软件研究进展[J]. 地下水,2022,44(6):49-52. (Lu Hongjian, Wang Zhuoran. Research progress in groundwater simulation methods and application softwares[J]. Ground Water,2022,44(6):49-52. (in Chinese))
[18] Leaf A T, Fienen M N. Flopy:the python interface for MODFLOW[J]. Groundwater,2022,60(6):710-712.
[19] Bakker M, Post V, Langevin C D, et al. Scripting MODFLOW model development using python and FloPy[J]. Groundwater,2016,54(5):733-739.
[20] Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence[J]. Computers & Operations Research,1986,13(5):533-549.

(收稿日期:2024-11-25 编辑:刘晓艳)

(上接第35页)

[19] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (Zhang Ke, Zhang Qinuo, Chen Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and undergroundregulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))
[20] Clark M P, Kavetski D, Fenicia F. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling[J]. Water Resources Research,2011,47(9):W09301.
[21] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):1-6. (Rui Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(1):1-6. (in Chinese))
[22] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (Du Ruoyu, Yao Cheng, Liu Yuhuan, et al. Grid-Xin'anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))
[23] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京:河海大学,2007.

(收稿日期:2024-12-20 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.006

输水管道水锤-泄漏耦合数值模拟及反射系数特性研究

周 领[1],王鹤鸣[1],徐 彬[2],李赟杰[1],潘天文[3]

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 宁波市水务环境集团股份有限公司工程建设管理分公司;
3. 水资源工程与调度全国重点实验室)

摘要:针对长距离供水工程输水管道泄漏识别与定位难题,设计搭建了水锤-泄漏试验系统,构建了考虑动态摩阻和黏弹性效应的水锤-泄漏耦合数学模型以实现瞬态压力精确模拟,提出了泄漏反射系数和透射系数解析模型用于探究二者的影响参数,并通过试验系统验证了模型的准确性。试验与模型模拟分析结果表明:泄漏位置与压降峰值发生时间呈正相关关系;泄漏孔数量增加,压降呈"阶梯"状递增且瞬态压力衰减速率加快;动态摩阻引发的水锤波能量耗散导致反射系数较无摩阻工况降低;黏弹性管道的实际波速小于理论计算值,使得反射系数的计算结果偏大。

关键词:输水管道泄漏;瞬态流;水锤;动态摩阻;黏弹性管道;泄漏反射系数

Numerical simulation of water hammer and leak coupling in water pipelines and study on reflection coefficient characteristics

Zhou Ling[1], **Wang Heming**[1], **Xu Bin**[2], **Li Yunjie**[1], **Pan Tianwen**[3]

(1. *College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University*;
2. *Engineering Construction Management Branch, Ningbo Water Environment Group Co., Ltd.*;
3. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management*)

Abstract: To address the challenge of leak detection and localization in water pipelines for long-distance water supply projects, a test system for water hammer and leak was designed and constructed. Moreover, a numerical model of water hammer and leak coupling considering dynamic friction and viscoelastic effects was established to achieve accurate transient pressure simulation. An analytical model for leak reflection and transmission coefficients was proposed to investigate the influencing parameters of these coefficients, and an experimental system was designed to verify the model's accuracy. The results of experiments and model analyses indicate that the leak location is positively correlated with the occurrence time of the pressure drop peak; as the number of leak holes increases, the pressure drop shows a "stepwise" increase, and the transient pressure attenuation rate accelerates; the energy dissipation of water hammer waves caused by dynamic friction reduces the reflection coefficient compared to the frictionless condition; the actual wave velocity of viscoelastic pipelines is lower than the theoretical calculation value, leading to an overestimation of the reflection coefficient.

Key words: water pipeline leak; transient flow; water hammer; dynamic friction; viscoelastic pipeline; leak reflection coefficient

管道输水是国家水网建设的重要部分,随着工业发展与城市建设,供水管网日益庞大复杂,沿程输水建筑物及各类设施种类复杂、数量繁多,沿途与河流、公路、铁路交叉处存在许多穿越设计,部分深埋地下的管道检修起来十分困难,容易引发各种管道故障[1]。管线故障有多种类型,包括爆管、泄漏[2-5]、管壁侵蚀、管段堵塞[6]、阀门堵塞、气阻等。其中,管道泄漏问题频发,造成了以下后果:①浪费水资源;②直接的营收水(售水量)损失或由缺水导致的间接生产经济损失;③增加用于水处理、存储和运输的额外能源成本;④因负压或低压导致污水进入管道,造成饮用水安全问题。目前输水管道泄漏识别与定位已成为长距离供水工程的难题。

近年来,基于瞬态波的泄漏检测技术凭借其检测范围广、抗干扰能力强、非侵入式检测、响应速度快及成本低廉等优势,逐渐成为研究热点。该技术的要点在于对水锤传播机理的深入理解与瞬态压力的高精度数

基金项目:宁波市重大专项"科创甬江 2035"关键技术项目(2024Z285);青海省 2025 年中央引导地方科技发展资金专项(2025ZY040);国家自然科学基金项目(52209084)

作者简介:周领(1985—),男,教授,博士,主要从事水电站与泵站研究。E-mail:zlhhu@163.com

值模拟。在水锤机理与数值仿真研究领域,众多学者围绕动态摩阻效应展开了大量探索。为更准确模拟瞬态压力衰减,研究者们[7-11]将动态摩阻引入水锤方程,认为瞬态管壁切应力是导致管壁能量耗散被低估的关键因素,并在此基础上构建了多种动态摩阻模型,如以 Zielke[7] 模型、Vardy-Brown 模型为代表的卷积模型,通过加权函数量化历史速度与加速度对当前流态的影响,有效提升了瞬态管壁切应力的模拟精度。其中,由 Zielke 模型推导的管道瞬态层流卷积加权模型综合考虑了瞬时平均流速与加权历史流速变化,被视为精确的动态摩阻求解方案。针对玻璃管道等特殊材质,Gally 等[11]基于广义 Kelvin-Voigt 模型建立了适用于黏弹性管道水力瞬态过程的完整求解体系,该模型通过弹簧-黏壶并联结构,能够有效刻画材料在长时间作用下的可逆变形特性,为有机玻璃管内瞬态过程的模拟提供了理论支撑。

水锤-泄漏耦合过程中,泄漏的反射是检测、定位的关键因素,Jönsson 等[12]通过无摩阻假设推导了泄漏的反射系数,解析解表明泄漏反射系数大小取决于泄漏量和入射波与泄漏孔稳态压力的比值,并量化分析了管道泄漏情况下瞬态压力波的反射与叠加,从而解释了管道泄漏局部压降随周期增大的现象。Brunone 等[13]通过试验得到了与 Jönsson 等[12]解析解一致的结论,并指出对于小泄漏情况,将泄漏孔口视为圆形孔口对研究泄漏结果相差不大。Zhang 等[14]推导了考虑管道瞬态波传播衰减效应的泄漏反射系数,量化分析表明,在所有无量纲参数中,泄漏量对反射系数的影响最大(约占 40%),其次是入射波强度(占 23%),初始系统参数和流动条件的影响共占 20%,泄漏孔位置影响最小(占 17%)。Wang 等[15]将泄漏模型纳入连续性方程和动量方程,推导了泄漏阻尼率的解析表达式,并指出泄漏阻尼率呈指数型变化趋势。Ferrante 等[16]通过比较有泄漏和无泄漏管道的传递函数,发现泄漏会导致传递函数峰值减小,并提出根据泄漏阻抗比来区分泄漏的大小。

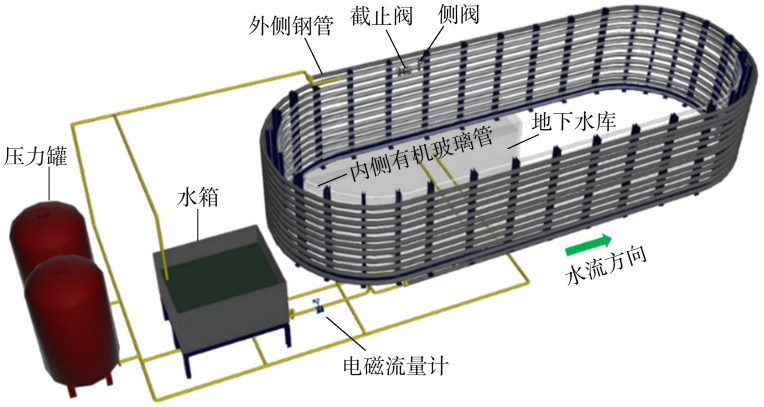
目前针对水锤-泄漏耦合特征的研究,水锤-泄漏耦合的仿真精准度有待提高,且对其特征与机制方面的研究仍有待深入。在前人研究的基础上,本文设计搭建了泄漏-水锤试验系统,建立了考虑动态摩阻和黏弹性效应的水锤-泄漏耦合数学模型,并试验验证了模型的准确性。通过理论模型推导、数值仿真模拟和物理试验验证等研究手段,分析了不同试验工况下的水锤-泄漏耦合特征,并推导了泄漏反射、透射系数解析模型,分析了反射系数解析解与无摩阻工况、动态摩阻工况、黏弹性工况反射系数的区别及其原因。

1 试验系统

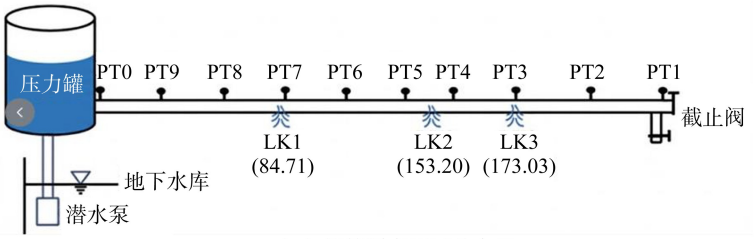
如图 1 所示,试验系统主要由输水管道系统、控制系统和测量系统组成。试验系统选取压力罐为上游边界,截止阀(DN50 手动球阀)作为下游盲端边界,利用侧阀(DN15 手动球阀)控制流量和激发瞬态。这是因为侧阀可在 0.02 s 内迅速关闭,能够产生具有较短波长的瞬态波,从而提高瞬态波的分辨率,获得较大的信号频率带宽和能量。为了保证水循环,侧阀水流流入地下水库,地下水库利用潜水泵向压力罐供水加压。

压力罐设计压力 1.6 MPa,容积 2.2 m^3,可根据试验工况的不同压力要求,提供接近恒压的水头。由于场地限制,钢管和有机玻璃管沿管道轴向盘旋上升布置,两套管道可由控制阀门切换使用。管道两端弯管转弯半径为 1.8 m,靠近压力罐的一侧进行抬升,连接上下两层管道,管道平均坡度为 0.4°。使用钢支架将管道固定于竖梁上,竖梁沿管线方向每隔 1 m 布置,弯管处另加竖梁加固,以削弱流固耦合的影响。管道钢管和有机玻璃管试验管道内径均为 50 mm,管壁厚度分别为 3.5 mm 和 5.0 mm,长度分别为 241.52 m 和 229.40 m。

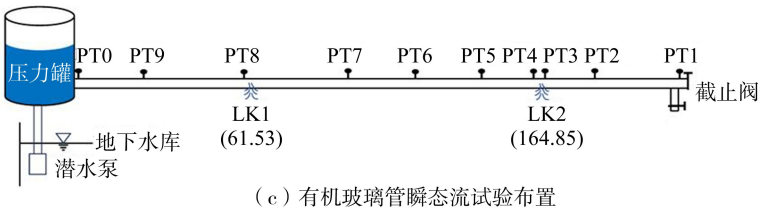
测量系统包括一个电磁流量计、10 个压力传感器(PT0 ~ PT9)、一套 NI9253 采集板和一台配备 LabVIEW 软件的台式计算机。电磁流量计位于压力罐出口,保证其“前 10 后 5”的安装方式。电磁流量计量程为 0.707 ~ 10 m^3/h,精度为满量程的 0.5%。压力传感器量程为-0.3 ~ 1.0 MPa,精度为满量程的 0.2%。钢管和有机玻璃管瞬态流试验的压力传感器位置和高程分别如图 1(b)(c)(图中 LK1、LK2、LK3 为泄漏孔的位置,括号中数据为泄漏孔与上游水库的距离)和表 1 所示。这些压力传感器用于校准管道性态参数(稳态摩阻系数和波速),并分析系统发生瞬态流时的管道各点压力响应。电磁流量计和压力传感器连接 NI 9253 采集卡,利用 LabVIEW 编程展示、处理和存储压力传感器、电磁流量计输出的电流模拟信号,并转化为对应的物理信号,采样频率设置为 2 000 Hz。



（a）输水管道系统布置



（b）钢管瞬态流试验布置



（c）有机玻璃管瞬态流试验布置

图 1　瞬态流试验系统示意图(单位:m)

Fig. 1　Transient flow experimental system (unit: m)

表 1　试验系统物理参数

Table 1　Physical parameters of test system

传感器编号	钢管瞬态流试验		有机玻璃管瞬态流试验	
	距压力罐距离/m	高程/m	距压力罐距离/m	高程/m
PT0	0.05	0.50	0.05	0.50
PT9	20.52	0.21	19.85	0.18
PT8	64.68	0.58	61.33	0.61
PT7	84.91	0.78	103.22	1.00
PT6	129.07	1.15	121.70	1.50
PT4	153.00	1.34	145.42	1.38
PT5	153.40	1.34	164.65	1.56
PT3	173.23	1.51	165.05	1.56
PT2	217.89	1.88	187.30	1.75
PT1	241.32	2.07	229.20	2.13

2　数学模型

2.1　水锤基本公式

对于弹性管道,经典水锤控制方程的连续性方程和动量方程[17-18]分别为:

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+H_w=0 \tag{2}$$

式中:H 为测压管水头,m;v 为流速,m/s;g 为重力加速度,m/s^2;a 为波速,m/s;H_w 管道流体中由于摩擦引起

的单位长度的水头损失,m;x 为沿管轴线距离,m;t 为时间,s。

在管道瞬态流的数值模拟领域,常见的计算方法主要有解析法、特征线法、图解法、有限元法以及有限体积法等[19]。其中,特征线法通过将水锤控制方程沿特征线方向转换为常微分方程组,并采用有限差分格式对已知边界条件进行数值求解,可精确获得计算域内各时间步长与空间节点上的压力及流量参数。相较于其他数值方法,特征线法的优势主要体现在以下三方面:①算法结构清晰,便于编程实现;②兼具较高的计算精度与运算效率;③数值稳定性优异[20-21]。因此,本文采用特征线法进行数值模拟。

如图2所示,将管道均分为空间步长为 Δx 的 N 段,时间步长均分为 Δt,分别沿着 C^+、C^- 两条特征线对式(1)与式(2)进行积分,可得:

$$C^+:v_P - v_R + \frac{g}{a}(H_P - H_R) + gH_{wR}\Delta t = 0 \tag{3}$$

$$C^-:v_P - v_S + \frac{g}{a}(H_P - H_S) + gH_{wS}\Delta t = 0 \tag{4}$$

式中:v_P、v_R、v_S、H_P、H_R、H_S 分别为节点 P、R、S 处的流速和测压管水头;H_{wR}、H_{wS} 分别为节点 R、S 处的水头损失;R、S 点分别代表模拟有压管道中 Δt 时刻第 Δx 和第 $3\Delta x$ 截面。

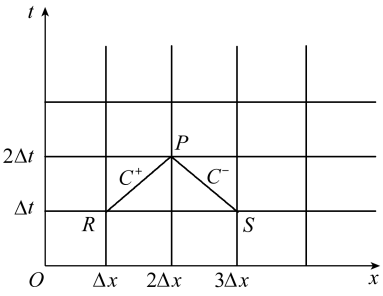


图2 特征线积分网格

Fig. 2 Characteristic line integration grid

2.2 动态摩阻效应

本文动态摩阻效应采用 Zielke 模型模拟。Zielke 模型认为管道瞬态流中瞬时管壁切应力由恒定项和附加项组成。恒定项为恒定状态切应力值,产生的压力衰减与稳态摩阻相同,附加项利用加权函数考虑历时速度和加速度对当前流态的影响,故摩阻项由恒定和非恒定摩阻项组成[21-24]:

$$H_w = H_{ws} + H_{wu} \tag{5}$$

其中

$$H_{ws} = fv|v|/2gD \qquad H_{wu} = \frac{16\nu}{gD^2}\int_0^t \frac{\partial v}{\partial t}(u)\,W(t-u)\,\mathrm{d}u$$

式中:H_{ws}、H_{wu} 分别为管道流中恒定摩阻和非恒定摩阻引起的水头损失;ν 为运动黏滞系数;u 为在 $0\sim t$ 之间积分的时间变量;f 为达西魏斯巴赫管道摩擦系数;D 为管道直径;W 为关于无量纲时间 τ 的加权函数。

2.3 黏弹性效应

本文黏弹性效应采用广义 Kelvin-Voigt 模型模拟。广义 Kelvin-Voigt 模型由于其准确简单的特点,在表示固体材料的蠕变和延迟特性时被广泛使用[25-26]。如图2所示,广义 Kelvin-Voigt 模型由 n 个弹簧与黏壶并联组合成的 Voigt 模型串联得到。元件数目越多,级数项越能精确地描述管道的黏弹性。

广义 Kelvin-Voigt 模型的蠕变函数表达式为:

$$J(t) = J_0 + \sum J_k(1 - \mathrm{e}^{-t/\tau_k}) \tag{6}$$

式中:J_0 为瞬时蠕变柔量;J_k 为第 k 个元件中弹簧的蠕变柔量;τ_k 为第 k 个元件中黏壶阻尼的松弛时间。这些参数均可由试验校核得出。

瞬时蠕变柔量 J_0 计算公式为:

$$J_0 = \left(\frac{1}{\rho a^2} - \frac{1}{\kappa}\right)\frac{\varepsilon}{D(1-\nu^2)} \tag{7}$$

式中:ρ 为水体的密度;κ 为体积弹性模量;ε 为管壁厚度。

2.4 泄漏模型

如图3所示,假定泄漏发生在第 i 个节点处,泄漏孔口外部压力为大气压。根据泄漏孔处的质量守恒定律,由连续性方程[27]可得:

$$Q_1 = Q_2 + Q_L \tag{8}$$

式中:Q_1 为泄漏孔前的流量;Q_2 为泄漏孔后的流量;Q_L 为泄漏流量。

根据动量守恒定律,可得泄漏边界处的测压管水头

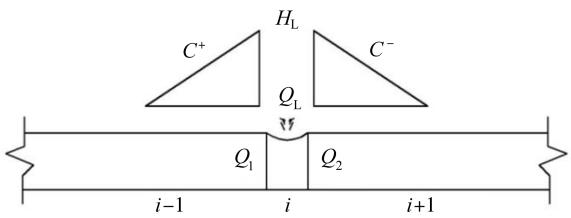


图3 水锤-泄漏耦合边界条件

Fig. 3 Coupled boundary conditions of water hammer and leak

满足:

$$H_1 = H_2 = H_L \tag{9}$$

式中:H_1 为泄漏孔前的测压管水头;H_2 为泄漏孔后的测压管水头;H_L 为泄漏孔处的测压管水头。

由孔口出流公式可得泄漏孔口的流量为

$$Q_L = C_d A_L \sqrt{2g\Delta H_L} \tag{10}$$

其中

$$\Delta H_L = H_L - z_L$$

式中:$C_d A_L$ 为泄漏孔口的联合泄漏系数,其中 C_d 为泄漏孔口的流量系数,A_L 为泄漏孔口面积;ΔH_L 为泄漏孔的压力水头;z_L 为泄漏孔高程。将式(8)~(10)与特征线方程联立求解,可得到泄漏孔处的压力和流量。

最后将式(8)(9)代入特征线方程(3)(4),便能得到 Q_1、Q_2、Q_L、H_1、H_2、H_L。

2.5　泄漏反射系数解析模型

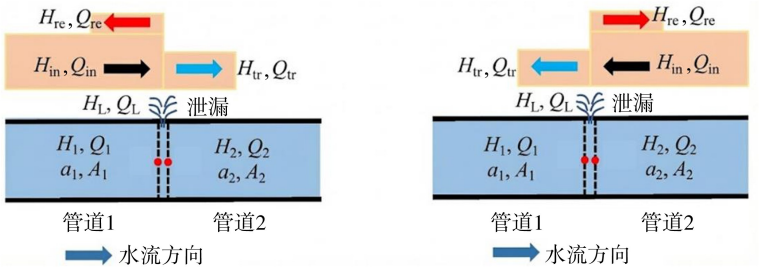
本文推导了泄漏的反射系数和透射系数,以研究瞬态波-泄漏耦合的反射和透射影响。当泄漏孔两侧的管道阻抗不同时,反射系数和透射系数是可变的。为了简化,假设:①瞬态压力和流量满足 Joukowsky 公式;②瞬态波在经过泄漏孔处没有额外的能量损失。

图 4 为两种不同入射波传播方向的瞬态波-泄漏耦合情况下,入射波的反射与透射示意图。稳态下泄漏孔处的流量和压力满足式(8)和式(9)。对于图 4(a)的情况,当入射波到达泄漏孔处时,其动量方程和连续性方程可以表示为:

$$H_{in} + H_{re} = H_{tr} = \Delta H_L - \Delta H_{L0} \tag{11}$$

$$Q_{in} + Q_{re} = Q_{tr} + Q_L - Q_{L0} \tag{12}$$

式中:H_{in}、H_{re}、H_{tr} 分别为入射、反射和透射压力水头;Q_{in}、Q_{re}、Q_{tr} 分别为入射、反射、透射压力水头产生的流量变化;Q_{L0}、ΔH_{L0} 分别代表初始状态(0 时刻)泄漏孔处的泄漏流量和水头变化。



(a) 入射波从管道1传播至管道2　　(b) 入射波从管道2传播至管道1

图 4　泄漏孔处入射波的反射与透射示意图

Fig. 4　Schematic diagram of incident wave reflection and transmission at leak point

根据 Joukowsky 公式,图 4(a)情况下瞬态波引起的水头变化与对应流量变化之间的关系为:

$$H_{in} = -(a_1 Q_{in})/gA_1 \qquad H_{tr} = -(a_2 Q_{tr})/gA_2 \qquad H_{re} = -(a_1 Q_{re})/gA_1 \tag{13}$$

式中:a_1、a_2 分别为管道 1、2 的波速;A_1、A_2 分别为管道 1、2 的截面积。将式(13)代入式(12),得:

$$\frac{gA_1}{a_1}H_{in} - \frac{gA_1}{a_1}H_{re} - \frac{gA_2}{a_2}H_{tr} = Q_L - Q_{L0} \tag{14}$$

将式(11) 代入式(10),泄漏孔处的瞬态流量可以表示为:

$$Q_L = C_d A_L \sqrt{2g(H_{tr} + \Delta H_L)} \tag{15}$$

对式(11) 和式(15)进行泰勒展开和一阶近似,得:

$$Q_L - Q_{L0} = C_d A_L\left(\sqrt{2g(H_{tr} + \Delta H_L)} - \sqrt{2g\Delta H_L}\right) \approx C_d A_L H_{tr}\sqrt{2g\Delta H_L}/2\Delta H_{L0} \tag{16}$$

因此,式(14)可以表示为:

$$\frac{gA_1}{a_1}H_{in} - \frac{gA_1}{a_1}H_{re} - \frac{gA_1}{a_1}H_{tr} = C_d A_L H_{tr}\sqrt{2g\Delta H_L}/2\Delta H_{L0} \tag{17}$$

将式(11)代入式(17)可得:

$$2\frac{gA_1}{a_1}H_{in} = \left(\frac{gA_1}{a_1} + \frac{gA_2}{a_2} + C_d A_L H_{tr}\sqrt{2g\Delta H_L}/2\Delta H_{L0}\right)H_{tr} \tag{18}$$

根据透射系数的定义,化简得:

$$R_{tr}=\frac{H_{tr}}{H_{in}}=2\frac{A_1}{a_1}\Big/\left(\frac{A_1}{a_1}+\frac{A_2}{a_2}+C_dA_L/\sqrt{2g\Delta H_L}\right) \tag{19}$$

式中:R_{tr} 为泄漏的透射系数。

根据反射系数与透射系数的关系,泄漏的反射系数 R_{re} 可以表示为:

$$R_{re}=R_{tr}-1=\left(\frac{A_1}{a_1}-\frac{A_2}{a_2}-\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right)\Big/\left(\frac{A_1}{a_1}+\frac{A_2}{a_2}+\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right) \tag{20}$$

同理,对于如图4(b)的情况,当入射波到达泄漏孔处时,其动量方程与式(2)一致,连续性方程变为式(12),该工况瞬态波引起的水头变化与对应流量变化之间的关系为式(13)。

结合式(11)(12)(13),泄漏的透射系数和反射系数可以表示为:

$$R_{tr}=2\frac{A_2}{a_2}\Big/\left(\frac{A_1}{a_1}+\frac{A_2}{a_2}+\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right) \tag{21}$$

$$R_{re}=\left(\frac{A_2}{a_2}-\frac{A_1}{a_1}-\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right)\Big/\left(\frac{A_1}{a_1}+\frac{A_2}{a_2}+\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right) \tag{22}$$

对于泄漏两端管道无阻抗变化的情况(即 $A_1=A_2=A$, $a_1=a_2=a$),其透射和反射系数可以简化为:

$$R_{tr}=2\frac{A}{a}\Big/\left(2\frac{A}{a}+\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right) \tag{23}$$

$$R_{re}=-\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\Big/\left(2\frac{A}{a}+\frac{C_dA_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}}\right) \tag{24}$$

3 时域上泄漏的瞬态流特征分析

钢管瞬态流试验和有机玻璃管瞬态流试验工况如表2所示。

表2 试验工况设置

Table 2 Test condition settings

试验	工况	背景压力/m	泄漏流量/(m^3/s)	泄漏孔数量	初始流量/(m^3/s)	泄漏孔与上游水库的距离/m
钢管瞬态流试验	1	20	0.2	1	1.0	84.71
	2	20	0.5	1	1.0	84.71
	3	20	0.7	1	1.0	84.71
	4	20	0	1	1.0	无泄漏
	5	30	0.5	1	1.0	84.71
	6	20	0.5	1	1.5	84.71
	7	20	0.5	1	1.0	153.2
	8	20	0.5	1	1.0	173.03
	9	20	0.5	2	1.0	84.71、153.2
	10	20	0.5	3	1.0	84.71、153.2、173.03
有机玻璃管瞬态流试验	1	20	0	1	1.0	61.53
	2	20	0.3	1	1.0	61.53
	3	20	0.5	1	1.0	61.53
	4	20	0.7	1	1.0	61.53
	5	20	0.5	1	1.0	164.85
	6	20	0.5	2	1.0	61.53、164.85

注:背景压力以压力水头表示。

试验过程中,通过改变泄漏孔处安装的阀门口径以及开度来改变泄漏量,背景压力、管道流量等参数保持相同,通过电磁流量计来观察泄漏量的大小,分别进行了泄漏量为0.2、0.5、0.7 m^3/s以及无泄漏情况下的瞬态流试验。在管道存在泄漏的情况下,瞬态压力会在第一峰值处因泄漏反射而产生压降。从图5(a)能够清晰观察到,泄漏量大小对瞬态压力变化和瞬态波衰减速度有显著影响:泄漏量大小与压力降幅及瞬态波在管道中的衰减速度均呈正相关关系。为探究背景压力对管道泄漏瞬态特性的影响,通过调整上游压力罐

内压力,设定了背景压力为 20 m 和 30 m 两种工况开展瞬态流试验。由图 5(b)可以看出,通过归一化处理(图中 α 为归一化水头,$\alpha=(H-H_g)/H_m$,其中 H 为试验测得数据,H_g 为背景压力,H_m 为直接水锤压力)可方便观察不同背景压力下第一峰值中的压降大小,使得由于背景压力造成的特征差异更加明显,可以看出背景压力与泄漏反射在第一峰值处造成的压降呈负相关关系,而水锤波在管道中的衰减速度趋于缓慢。

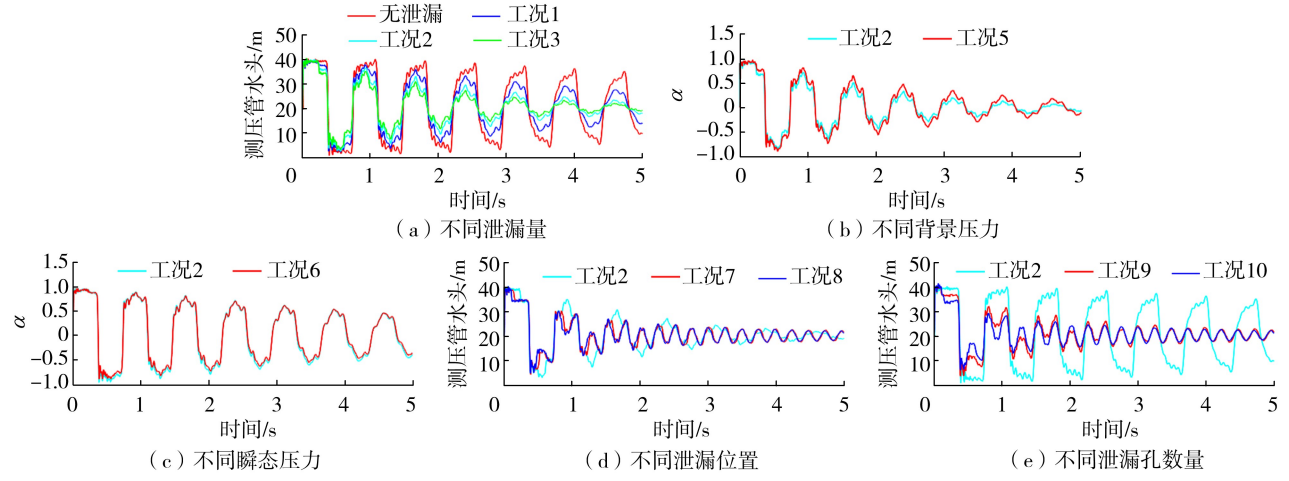


图 5　钢管水锤-泄漏耦合时域特性

Fig. 5　Time-domain characteristics of water hammer and leak coupling in steel pipes

通过直接水锤方程 $\Delta H=-a\Delta v/g$ 可知,改变流速变化量 Δv 的大小(即改变管道内流量的大小)可以改变直接水锤的幅值,通过调节水泵控制主管内流量分别为 1.0、1.5 m^3/s 进行瞬态试验。由图 5(c)可以看出,通过控制上游压力不变,改变主管中的流量大小来控制直接水锤波的大小,可改变第一峰值的压力最大值。在瞬态压力不同时,泄漏在瞬态过程中的特征并无明显变化。

本文试验系统在主管上设置了 3 个不同位置的泄漏孔,通过阀门控制泄漏状态,这 3 个泄漏孔与水库的距离分别为 84.71、153.2、173.03 m,试验中保持其他变量不变,由图 5(d)可知,高频压降的出现时间与泄漏位置密切相关,会影响第一峰值处压降发生的时间,原因是不同泄漏位置与阀门的距离不同,泄漏后的反射波到达阀门的时间不同,导致压降发生的时间不同。

通过调控每个泄漏孔处的阀门来控制实际泄漏孔的数量,在试验时保持背景压力、管道流量等参数不变,试验结果如图 5(e)所示,可以看出泄漏孔数量不同时,也有与泄漏位置不同情况下类似的特征。泄漏孔数量不同时,多一个泄漏孔,第一峰值处就多一次压降,泄漏孔越多压降次数越多,形成一种类似“阶梯”形的压力变化,并且随着泄漏孔数量的增加,瞬态波在钢管中的衰减速率呈现显著提升的趋势。

有机玻璃管中的瞬态-泄漏耦合特征与钢管中的特征十分类似,区别在于有机玻璃管中的波速与钢管相差较大,瞬态波的衰减速度也比钢管中要慢。

4　数值模拟验证及反射系数验证

水锤-泄漏耦合数学模型能够精准模拟不同管材和工况下的时域压力波动。钢管水锤-泄漏耦合数学模型在不同泄漏量、背景压力、瞬态压力、泄漏位置和泄漏孔数量工况下均能够较好地重现试验泄漏反射压降和整体压力波动衰减(图 6),有机玻璃管规律类似。

由图 6 可知,在不同泄漏孔数量、不同泄漏量、不同泄漏位置工况下,前几个周期钢管的试验值与模型模拟值都十分吻合,而有机玻璃管的试验数据在 0~10 s 内都可以进行精准的模拟,验证了前文对钢管和有机玻璃管建立的水锤-泄漏耦合数学模型的准确性,为后续验证泄漏反射系数解析模型及解释不同工况下的泄漏特征变化奠定了基础。基于弹性管道和黏弹性管道,利用水锤-泄漏耦合数学模型对泄漏反射系数解析解进行验证,并分析不同参数对泄漏反射系数解析解准确性的影响,结果如图 7 和图 8 所示(图中“解析解”为泄漏反射系数解析模型计算结果;“无摩阻”“动态摩阻”“黏弹性”分别为采用不考虑摩阻、考虑动态摩阻和考虑黏弹性的水锤-泄漏耦合数学模型的计算结果;泄漏位置由泄漏孔与上游水库的距离与管道总长的比值表示)。表 3 为背景压力、泄漏流量和泄漏位置的变化范围,当考虑某一变量时,其他参数为默认值。结果

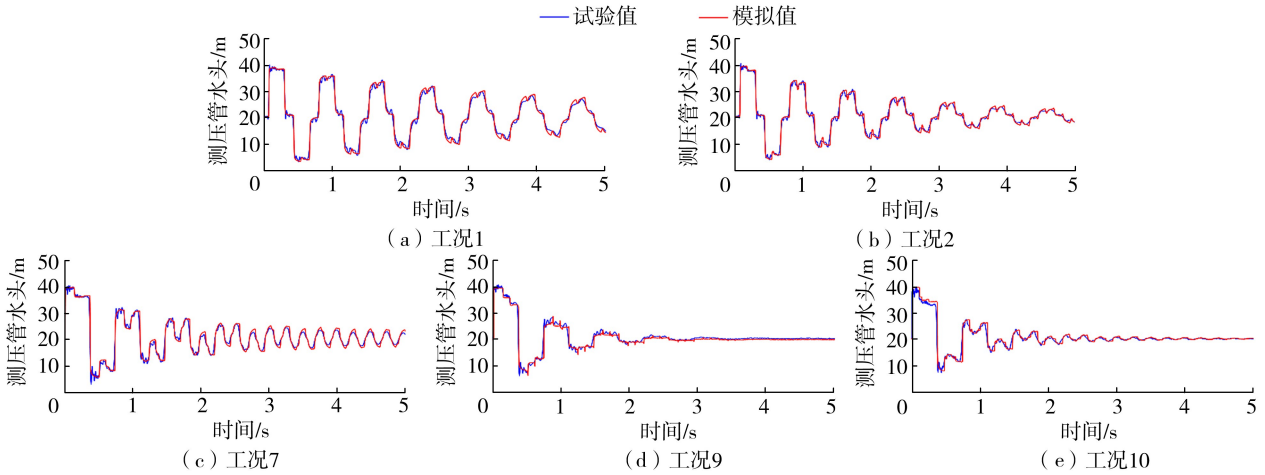


图6 钢管水锤-泄漏耦合试验结果与数学模型模拟结果对比

Fig. 6 Comparison between water hammer and leak coupling test results for steel pipes and simulation results of mathematical model

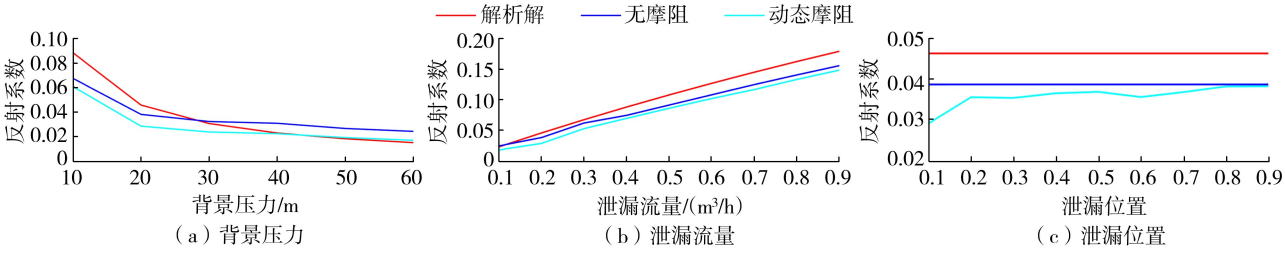


图7 钢管中不同参数对泄漏反射系数解析解和数值解的影响

Fig. 7 Influence of different parameters in steel pipes on analytical solutions and numerical solutions of leak reflection coefficients

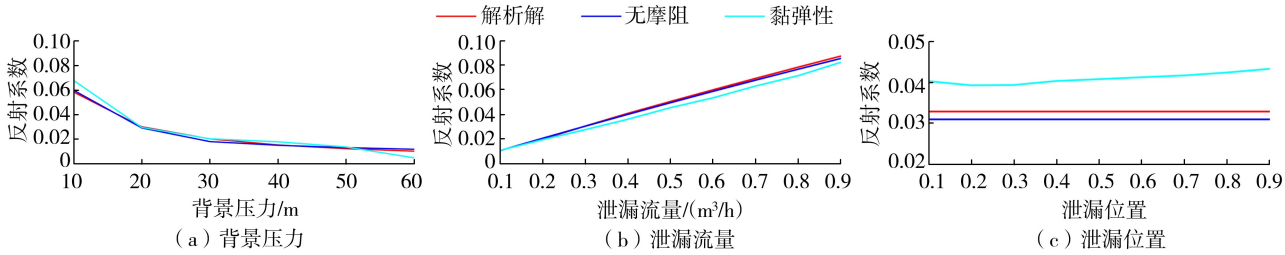


图8 有机玻璃管中不同参数对泄漏反射系数解析解和数值解的影响

Fig. 8 Influence of different parameters in PMMA pipes on analytical solutions and numerical solutions of leak reflection coefficients

表明,无论解析解还是数值解,泄漏反射系数与背景压力呈负相关关系,与泄漏流量呈正相关关系。

由图7和图8可知,考虑动态摩阻的钢管试验数据和考虑黏弹性的有机玻璃管试验数据所得反射系数,在不同工况下的变化趋势与试验结果高度吻合,且符合解析解、无摩阻模型、动态摩阻模型和黏弹性模型间的理论差异,充分验证了本文提出的泄漏反射系数解析模型的准确性。研究发现,各模型间存在如下显著差异:动态摩阻引起的能量耗散加速了水锤波在传播过程中的衰减,导致反射波到达测点时的幅值降低,因此计算所得的反射系数较无摩阻工况偏小;在考虑黏弹性效应时,管道中波速低于理论计算值(600 m/s),从而造成反射系数高于解析解及无摩阻工况。此外,工况参数对反射系数的影响符合理论推导规律,即背景压力增大时,反射系数降低;泄漏流量增大则使水锤波在泄漏孔处的水头损失增大,反射系数增大;无摩阻工况

表3 泄漏反射系数参数敏感性分析工况

Table 3 Sensitivity analysis of leak reflection coefficient parameters for operating conditions

数据类型	背景压力/m	泄漏流量/(m^3/h)	泄漏位置
默认值	20	0.3	0.7
变化范围	10~60	0.1~0.9	0.1~0.9

下,泄漏距离对反射系数无影响,与解析解推导结果一致,而考虑动态摩阻时,泄漏孔靠近阀门端(瞬态过程源点)使动态摩阻对水锤波的衰减作用减弱,反射系数逐渐趋近于无摩阻工况。

5　结　论

a. 泄漏量与压力降低程度、水锤波衰减速度呈显著正相关关系;背景压力与水锤波衰减速度呈负相关关系,背景压力增大会减小泄漏引发的第一峰值压降并延缓水锤波衰减。

b. 瞬态压力对泄漏特征的影响相对有限;泄漏位置与泄漏孔数量则通过改变压力波传播路径及叠加效应,对压力变化的时间序列产生重要影响,泄漏位置决定了瞬态波抵达时间与反射波返回阀门的时间差,而泄漏孔数量的增加不仅会形成多阶压降的“阶梯”特征,还会加速钢管中瞬态波的衰减过程。

c. 融合能量耗散机制的水锤-泄漏耦合数学模型,可精准模拟耦合过程中的瞬态压力;该模型在钢管与有机玻璃管中均具备可靠刻画能力,为水锤泄漏定量分析提供了有效工具。

d. 泄漏反射系数与透射系数的解析模型,可清晰阐释水锤-泄漏耦合物理机制;动态摩阻会降低反射系数,有机玻璃管模拟中偏小的波速会使反射系数高于解析解及无摩阻工况的模拟值,解析解与无摩阻模型的差异源于阻尼效应的一阶近似;解析模型明确了泄漏位置、泄漏流量与背景压力对反射系数的量化影响路径。

参考文献:

[1] 刘东海,胡东婕,陈俊杰. 基于 BIM 的输水工程安全监测信息集成与可视化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):337-344. (Liu Donghai, Hu Dongjie, Chen Junjie. BIM-based integration and visualization for dynamic safety monitoring information of water diversion project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(4):337-344. (in Chinese))

[2] Duan H F, Lee P J. Transient-based frequency domain method for dead-end side branch detection in reservoir pipeline-valve systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,142(2):04015042.

[3] Zeng Wei, Zecchin A C, Gong Jinzhe, et al. Inverse wave reflectometry method for hydraulic transient-based pipeline condition assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,146(8):04020056.

[4] Zeng Wei, Zecchin A C, Cazzolato B S, et al. Extremely sensitive anomaly detection in pipe networks using a higher-order paired-impulse response function with a correlator[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(10): 04021068.

[5] Che Tongchuan, Duan Huanfeng, Lee P J. Transient wave-based methods for anomaly detection in fluid pipes: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2021,160:107874.

[6] 周领,白光国,李赟杰,等. 基于匹配场处理法的管道局部阻塞定位方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(9):156-164. (Zhou Ling, Bai Guangguo, Li Yunjie, et al. Discrete blockage localization using the matched-field processing method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,52(9): 156-164. (in Chinese))

[7] Zielke W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow[J]. Journal of Basic Engineering,1968,90(1):109-115.

[8] Vardy A E, Brown J M B. Transient, turbulent, smooth pipe friction[J]. Journal of Hydraulic Research,1995,33(4):435-456.

[9] Vardy A E, BrowN J M B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows[J]. Journal of Sound and Vibration,2003,259(5): 1011-1036.

[10] Vardy A E, Brown J M B. Transient turbulent friction in fully rough pipe flows[J]. Journal of Sound and Vibration,2004,270(1/2):233-257.

[11] Gally M, Güney M, Rieutord E. An investigation of pressure transients in viscoelastic pipes[J]. Journal of Fluids Engineering, 1979,101(4):495-499.

[12] Jönsson L, Larson M. Leak detection through hydraulic transient analysis[M]//COULBECK B, EVANS E P. Pipeline Systems. Dordrecht: Springer,1992:273-286.

[13] Brunone B, Ferrante M. Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients[J]. Journal of Hydraulic Research,2001,39(5):539-547.

[14] Zhang Ying, Duan Huanfeng, Keramat A, et al. On the leak-induced transient wave reflection and dominance analysis in water pipelines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2022,167:108512.

[15] Wang Xiaojian, Lambert M F, Simpson A R, et al. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients[J]. Journal of

Hydraulic Engineering,2002,128(7):697-711.
[16] Ferrante M,Brunone B. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests:1. harmonic analysis[J]. Advances in Water Resources,2003,26(1):95-105.
[17] 于永海,索丽生. 有压瞬变流限压控制反问题的最优控制理论解法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(1):56-59. (Yu Yonghai,Suo Lisheng. Solution to inverse problem of hydraulic transients under limited pressure based on optimal control theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2006,34(1):56-59. (in Chinese))
[18] 郑源,索丽生,屈波,等. 有压输水管道系统含气水锤研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):277-281. (Zheng Yuan,Suo Lisheng,Qu Bo,et al. Study on water hammer with gas in pressurized water delivery pipeline system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(3):277-281. (in Chinese))
[19] CHAUDHRY M H. Applied hydraulic transients[M]. 3rd ed. New York:Springer,2014:4-7.
[20] 梁圣辰,张健,贺蔚,等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):170-175. (Liang Shengchen,Zhang Jian,He Wei,et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):170-175. (in Chinese))
[21] 周领,刘静,欧传奇,等. 水力瞬变中动态摩阻的改进加权类模型[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(2):164-169. (Zhou Ling,Liu Jing,Ou Chuanqi,et al. Improved weight-function model of unsteady friction in hydraulic transients[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(2):164-169. (in Chinese))
[22] 郭新蕾,郭永鑫. 管道泄漏检测中瞬变流非恒定摩阻模型的研究[J]. 水力发电学报,2008,27(1):42-47. (Guo Xinlei,Guo Yongxin. Study of unsteady friction models in transient flow for leak detection[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2008,27(1):42-47. (in Chinese))
[23] 吴金远,周领,刘德有. 考虑动态摩阻的抽水蓄能电站水力瞬变建模模拟[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(6):612-618. (Wu Jinyuan,Zhou Ling,Liu Deyou. Numerical simulation of hydraulic transients in pumped storage power station with unsteady friction[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2024,42(6):612-618. (in Chinese))
[24] 周领,易昌宇,车同川. 输水管道水锤能量衰减效应及参数影响研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(12):185-192. (Zhou Ling,Yi Changyu,Che Tongchuan. Research on water hammer energy decay effect of water pipeline and influence of parameters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,52(12):185-192. (in Chinese))
[25] 周领,田永薪,王栋仪,等. 考虑不确定性因素的弹性管道水锤模型及实验验证[J]. 力学学报,2024,56(11):3178-3187. (Zhou Ling,Tian Yongxin,Wang Dongyi,et al. Water hammer model for elastic pipelines considering uncertainty factors and experimental validation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2024,56(11):3178-3187. (in Chinese))
[26] 王宁,周领,李赟杰,等. 黏弹性管道水柱分离弥合水锤有限体积法模型[J]. 力学学报,2022,54(7):1952-1959. (Wang Ning,Zhou Ling,Li Yunjie,et al. Finite volume model of water column separation and rejoining water hammer in viscoelastic pipes[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2022,54(7):1952-1959. (in Chinese))
[27] 李赟杰,周领,欧传奇,等. 考虑动态摩阻的管道泄漏水力瞬变数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):62-68. (Li Yunjie,Zhou Ling,Ou Chuanqi,et al. Numerical simulation of hydraulic transient in a leakage pipe considering unsteady friction[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(1):62-68. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-01 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.007

堤坝渗漏入口示踪剂运移规律

梁 越[1,2,3],邓惠丹[1],喻金桃[4],许 彬[1,2,3],饶育锋[1]

(1. 重庆交通大学河海学院; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心;
3. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室; 4. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

摘要:为准确定位堤坝的渗漏入口,基于示踪法,采用室内模型试验和 Fluent 数值模拟方法,分析了示踪剂投放量、渗漏规模及示踪剂投放点位置对示踪剂运移规律的影响。结果表明:增加示踪剂投放量,壁面示踪剂峰值质量分数显著增大,穿透时间缩短,示踪剂运移速度加快;增大渗漏规模,示踪剂流失速率加快,壁面示踪剂峰值质量分数减小,示踪剂分布形状由圆形向椭圆形转变,且其长轴会沿示踪剂投放点与渗漏入口之间的连线方向排列,据此可推断渗漏入口方向;减小示踪剂投放点与渗漏入口距离,壁面示踪剂峰值质量分数减小,穿透时间延长,示踪剂分布面积显著增大。

关键词:堤坝渗漏识别;示踪法;示踪剂运移规律;模型试验;数值模拟

Tracer transport patterns in levee seepage inlet

Liang Yue[1,2,3], **Deng Huidan**[1], **Yu Jintao**[4], **Xu Bin**[1,2,3], **Rao Yufeng**[1]

(1. *School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University*;
2. *National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University*;
3. *Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University*;
4. *CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd.*)

Abstract: To accurately locate the levee seepage inlet, laboratory model tests and Fluent numerical simulations based on the tracer method were employed, and the effects of tracer dosage, seepage scale, and tracer injection point location on tracer transport pattern were analyzed. The results indicate that increasing the tracer dosage significantly raises the peak tracer mass fraction on the wall, shortens the penetration time, and accelerates tracer transport velocity. Enlarging the seepage scale accelerates the tracer loss rate, reduces the peak tracer mass fraction on the wall, and transforms the tracer distribution shape from circular to elliptical, with its major axis aligning along the line connecting the tracer injection point and the seepage inlet. This alignment can be used to infer the direction of the seepage inlet. Reducing the distance between the tracer injection point and the seepage inlet decreases the peak tracer mass fraction on the wall, prolongs the penetration time, and significantly expands the tracer distribution area.

Key words: levee seepage identification; tracer method; tracer transport pattern; model experiment; numerical simulation

截至 2024 年,我国已建成各类水库大坝 9.4 万余座,5 级以上堤防约 32 万 km,这不仅为国民经济与社会发展筑牢了防洪安全屏障,更创造了显著的社会、经济与生态综合效益。但大部分堤坝年代久远,受当时经济、技术水平的限制,很多工程存在建设等级低、施工质量差等问题,难以承受极端事件[1],潜在风险不断增加[2]。渗漏是堤坝的一个重大隐患[3],快速有效地定位和合理处置渗漏隐患是保障堤坝安全的关键[4]。

目前堤坝渗漏探测方法主要有野外巡测[5]、地质钻探法[6]、地球物理勘探法[7]以及示踪法[8]。地质钻探法仅能探测钻孔周边的地质情况,而在堤坝整体地质探测中,需布设大量钻孔,这不仅会对堤坝结构造成较大破坏,还存在成本偏高、经济效益不佳的问题。地球物理勘探法是识别潜在内部侵蚀区域的有效手段[9],其原理是利用堤坝隐患处与周围地质间的物理性质差异寻找地质异常区域,不破坏堤坝结构,不影响使用性能[10]。常用的地球物理勘探法主要分为地震法类、电法类、电磁法类[11]。陈亮等[12]以跨孔四极法和三极法对地下连续墙进行渗漏缺陷探测数值模拟及室内试验研究,认为跨孔电法能够精确地定位地下连续

基金项目:国家自然科学基金项目(52379097,52509138);广西科技计划项目(桂科 AA23062023);重庆市水利科技项目(CQSLK-2024005);重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202300744);重庆交通大学高层次人才引进计划项目(F1250081)

作者简介:梁越(1985—),男,教授,博士,主要从事水利工程灾害形成机理与防治研究。E-mail:liangyue2560@163.com

通信作者:邓惠丹(2002—),女,硕士研究生,主要从事水利工程灾害形成机理与防治研究。E-mail:1348695302@qq.com

墙渗漏位置;Abdulsamad 等[13]构建的岩石物理模型,不仅能够表征导电率与带电率,还能精准刻画地下水从渗漏管道出口端至堤坝底部的流动路径。地球物理勘探法可以确定地层中可能的导水通道,但较难确定这些通道是否造成了渗漏。

相比于地球物理勘探法,示踪法可以对水库渗漏问题提出更合理的解决方案:沈添耀等[10]提出了一种基于高密度电法与综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法,成功揭示了渗漏位置与范围;陈江等[14]利用温度示踪法成功检测并识别了水下混凝土结构的裂缝宽度;刘国庆等[15]针对石梁河水库北泄洪闸异常渗漏问题的研究表明,温度场示踪、天然水化学示踪和 ICP 化学示踪联合的示踪探测方法可精准溯源渗漏水源;张治国等[16]设计了一套可对渗流轨迹进行示踪的可视化模型试验装置,探究了渗流侵蚀过程中的砂土成拱效应及砂土位移演变规律;Stefania 等[17]以人工甜味剂为示踪剂材料,将示踪剂法与多元分析、迁移模型方法结合,研究了垃圾填埋场的渗漏来源;戚海博等[18]利用单孔热响应获得了高时空分辨率的地下水渗流场分布特征,并认为应用单孔热响应评价堤防渗流场具有可行性;Yu 等[19]通过结合示踪法和电阻率层析成像法,成功检测出垂直屏障泄漏并确定了泄漏点位置;梁越等[20]以透明土为材料,采用自研的 PIV-PLIF 渗流侵蚀试验系统研究了水力梯度对渗流侵蚀过程中孔隙溶液流速分布以及细颗粒运动的影响。

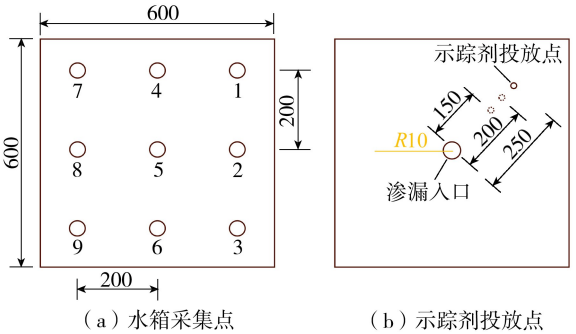
综上,示踪法能及时并准确找出渗漏隐患,但针对示踪剂运移规律的研究相对匮乏。掌握示踪剂运移规律是精准定位渗漏通道的核心关键,直接关系到示踪过程能否有效反映目标信息、能否为工程实践提供可靠参考依据等核心问题。鉴于此,本文通过室内模型试验探究示踪剂在渗漏条件下的运移规律,并结合 Fluent 软件进行模拟验证,研究示踪剂投放量、渗漏规模及示踪剂投放点位置对示踪剂运移规律的影响,以期为示踪法探测渗漏通道提供参考。

1 研究方法

1.1 模型试验

1.1.1 试验装置

试验装置主要包括电导率数据采集系统、示踪剂投放系统以及渗漏模型装置。电导率数据采集系统由数据采集控制计算机和电导率仪组成,电导率仪通过渗漏壁面各采集点的石墨探头连续采集各点的电导率值并将数据实时传送至 PC 端,计算机每 200 ms 采集并存储一次数据。试验水箱采集点如图 1(a)所示。示踪剂投放系统由示踪剂存放桶和蠕动泵组成。蠕动泵采用慧宇 BT100J-1A 型蠕动泵,通过设置不同的转速及蠕动泵工作时间调节示踪剂的投放速度和投放量,通过改变不同的吸力(即增加或者减少水泵数量)实现不同的渗流流量(渗漏规模)。通过设置 3 处与渗漏入口(位于 5 号采集点处)不同距离的示踪剂投放口(图 1(b)),模拟示踪剂不同的投放位置。



(a)水箱采集点 (b)示踪剂投放点

图 1 试验水箱采集点和示踪剂投放点设置(单位:mm)

Fig. 1 Setting of sampling points for test water tank and tracer injection points (unit: mm)

1.1.2 试验工况

本文主要分析示踪剂投放量、渗漏规模、示踪剂投放点位置 3 个变量对示踪剂分布及运移规律的影响,工况设置见表 1。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental condition

编号	示踪剂投放点与渗漏入口距离/mm	渗漏规模/(L/min)	示踪剂投放量/mL
T1	250	5.0	35
T2	250	5.0	70
T3	250	5.0	105
G1	250	2.5	70
G2	250	7.5	70
J1	150	5.0	70
J2	200	5.0	70

1.1.3 试验流程

①电导率校准及传感器标定。②配制示踪剂:试验中的示踪剂是由 NaCl 质量分数大于 99.5% 的分析氯化钠和自来水配制而成的饱和盐溶液。③打开水龙头,将试验水箱注满水,打开渗漏通道开关(即水泵),待水位平稳后开始采集电导率,随后立即打开示踪剂投放系统中的蠕动泵开关,开始注入示踪剂,直至示踪剂投放量达到试验设计值;待水箱中各点电导率值与

自来水电导率相近时,认为渗漏壁面不再存在示踪剂,停止采集。④其他工况重复步骤③即可。

1.2　数值模拟

Fluent 是一种求解偏微分方程的数值方法,基于有限容积法进行数值模拟。主要包括三大模块:①前处理模块主要用于创建几何模型、网格划分;②求解器模块主要用于网格计算,需要给定合适的计算模型、参数、边界条件等求解条件;③后处理模块主要用于分析和可视化结果。

1.2.1　模型构建

在 Geometry 中建立水箱的几何模型(图 2),其内径尺寸为 600 mm×600 mm×60 mm(长×宽×高)。为了降低模型墙体边界对示踪剂运移产生的影响,示踪剂投放位置在渗漏入口周围 400 mm×400 mm 范围内。在保证计算精确度的情况下,最小面网格设置在 0.003 m 以下,最大面网格设置在 0.03 m 以下的计算结果可信度较高,网格划分如图 3。

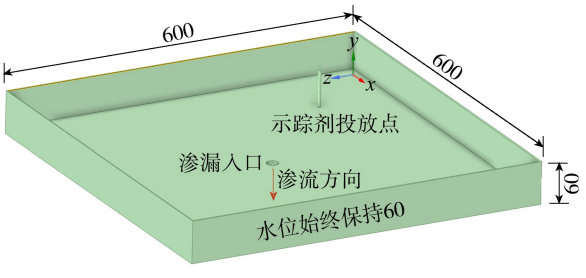
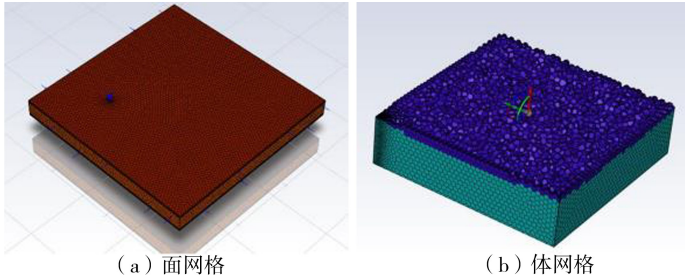


图 2　水箱的几何模型(单位:mm)

Fig. 2　Geometric model of water tank (unit: mm)



(a) 面网格　　(b) 体网格

图 3　网格划分

Fig. 3　Grid division

模拟选用的模型为标准的 K-epsilon (2 eqn)模型,壁面函数选用 Standard wall function。网格划分时,将模型定义为没有空隙的流体区域,并在 mixture-template 中,仅留下水和盐水,使整个模型完全由水构成。模拟设有两个入口,1 个出口,其中 inlet1 为示踪剂投放入口,为更好地模拟实际工程中研究区域外的水会自动向研究区域内补充,将模型四周设为压力入口 inlet2,仅补充水而不注入盐水。示踪剂入口设定为质量流入口,示踪剂投放质量速率设定为 0.043 kg/s,质量分数为 1(初始状态视为“纯示踪剂”),通过设置不同的投放时长以模拟不同示踪剂投放量工况,待示踪剂投放完毕后,将 inlet1 设置为壁面即可停止投放示踪剂。出口设置为质量流出口,位于壁面的中心,通过设定不同的流出质量速率模拟不同渗漏规模。运算设置如下:步长为 0.005 s,步数为 10 000,最大迭代次数为 10。采集点设置与物理模型试验(图 1(a))中保持一致。

1.2.2　模拟工况设置

为了对模拟结果进行验证,采取与室内试验相同的工况设置,同样分别考虑了示踪剂投放量、渗漏规模、示踪剂投放点位置对渗漏过程中示踪剂运移的影响。

示踪剂电导率主要受温度、掺杂程度以及各向异性等影响。本文主要通过采集壁面各点的电导率推算对应点及整个坝面的示踪剂质量分数,从而得到示踪剂在壁面的分布及其运移规律。通过开展 26 组不同质量分数示踪剂的预试验,获得示踪剂质量分数与电导率呈线性关系:

$$w = 0.05343N - 0.7651 \tag{1}$$

式中:w 为示踪剂质量分数;N 为电导率。

2　结果与分析

2.1　模型试验结果与分析

试验开始前,开展了一组无渗漏,示踪剂投放量为 70 mL 的预试验。由图 4 可知,示踪剂运移约 0.99 万 s 时,5 号采集点电导率达到峰值,9 号采集点的电导率在约 1.98 万 s 才达到峰值;达到峰值后,各采集点电导率曲线开始下降,最终

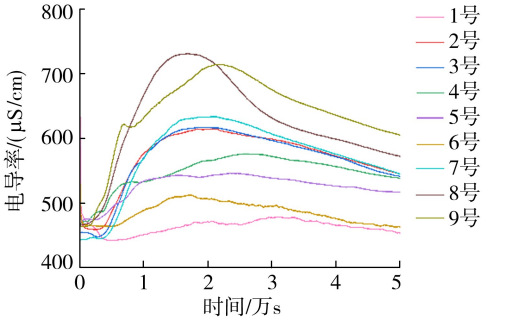


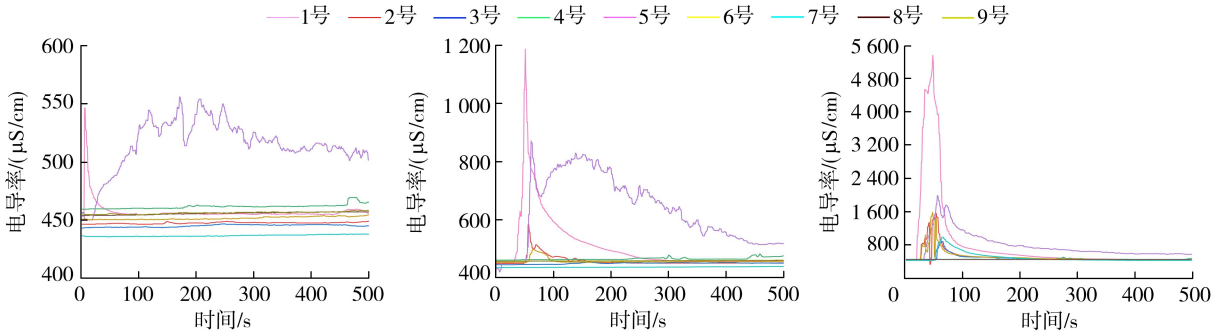
图 4　无渗漏时壁面各采集点电导率变化曲线

Fig. 4　Conductivity change curves at each sampling point of wall when there is no seepage

均停留在450~580 μS/cm,并趋于稳定。

2.1.1 示踪剂投放量对示踪剂运移的影响

对比图4和图5(b)可知,存在渗漏时,5号采集点在61 s已达到峰值电导率,相较于无渗漏时,电导率达到峰值时间缩短了9 839 s。无渗漏时,4号、8号、9号等采集点的电导率会随着时间的增加而逐渐增加直至峰值,但是发生渗漏时,4号、8号、9号等采集点的电导率几乎没有变化,主要是因为示踪剂随着水流从渗漏入口流出水箱,无法运移至这些采集点。由此,渗漏的存在大大加快了示踪剂的运移速度,也减小了示踪剂扩散的区域。



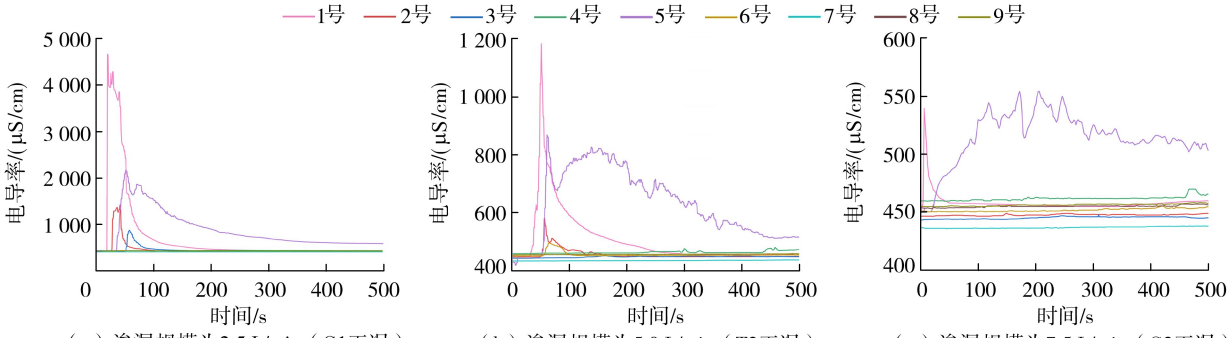
(a)投放量为35 mL(T1工况) (b)投放量为70 mL(T2工况) (c)投放量为105 mL(T3工况)

图5 不同示踪剂投放量下各采集点电导率变化曲线

Fig. 5 Conductivity change curves at each sampling point with different tracer dosages

2.1.2 渗漏规模对示踪剂运移的影响

由图6可知,随着渗漏规模的增加,1号采集点的峰值电导率减小,意味着坝面上的示踪剂质量分数随着渗漏规模增加而减小。因为示踪剂投放点位于1号采集点和渗漏入口之间,所以渗漏规模增大后,能够运移至1号采集点的示踪剂会减少。但是,随着渗漏规模的增加,渗漏入口周围的峰值电导率也减小。虽然渗漏规模增加导致更多的示踪剂流向渗漏入口,但这意味着有更多的水流向渗漏入口,进一步减小了坝面上的示踪剂质量分数,所以渗漏入口周围的电导率也减小。



(a)渗漏规模为2.5 L/min(G1工况) (b)渗漏规模为5.0 L/min(T2工况) (c)渗漏规模为7.5 L/min(G2工况)

图6 不同渗漏规模各采集点电导率变化曲线

Fig. 6 Conductivity change curves at each sampling point for different seepage scales

2.1.3 示踪剂投放点位置对示踪剂运移的影响

由图7可知,随着示踪剂投放点与渗漏入口距离的减小,5号采集点更快达到峰值电导率且峰值电导率更大。其他采集点的电导率达到峰值的时间有所延后且峰值更小,是因为距离越小,示踪剂能够更快通过渗漏入口流失,导致水箱内示踪剂余量很少,所以其他采集点电导率峰值很小且达到峰值所需时间较长。

2.2 数值模拟结果与分析

因采集点为对称式布置,因此只对1号、2号、3号、4号、5号和9号采集点进行分析。

2.2.1 示踪剂投放量对示踪剂运移的影响

由图8可知,6个采集点的示踪剂质量分数曲线先迅速上升至峰值质量分数再迅速下降最后趋近于0,且示踪剂质量分数从1/2峰值上升到峰值的时间明显大于从峰值下降到其1/2的时间。5号采集点的曲线不平滑,是由于其位于渗漏入口周围,流态相较于其他采集点更复杂。随着示踪剂投放量的增加:①各采集

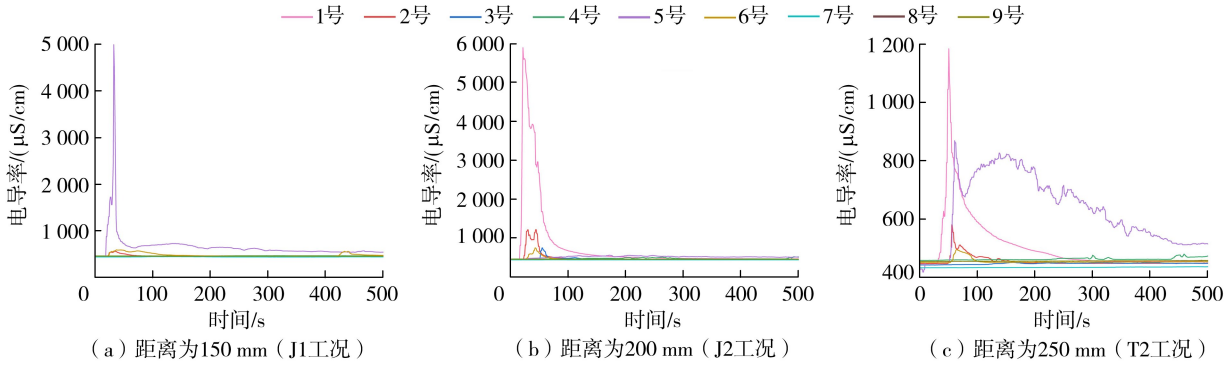


图 7　不同示踪剂投放点各采集点电导率变化曲线

Fig. 7　Conductivity change curves at each sampling point with different tracer injection point locations

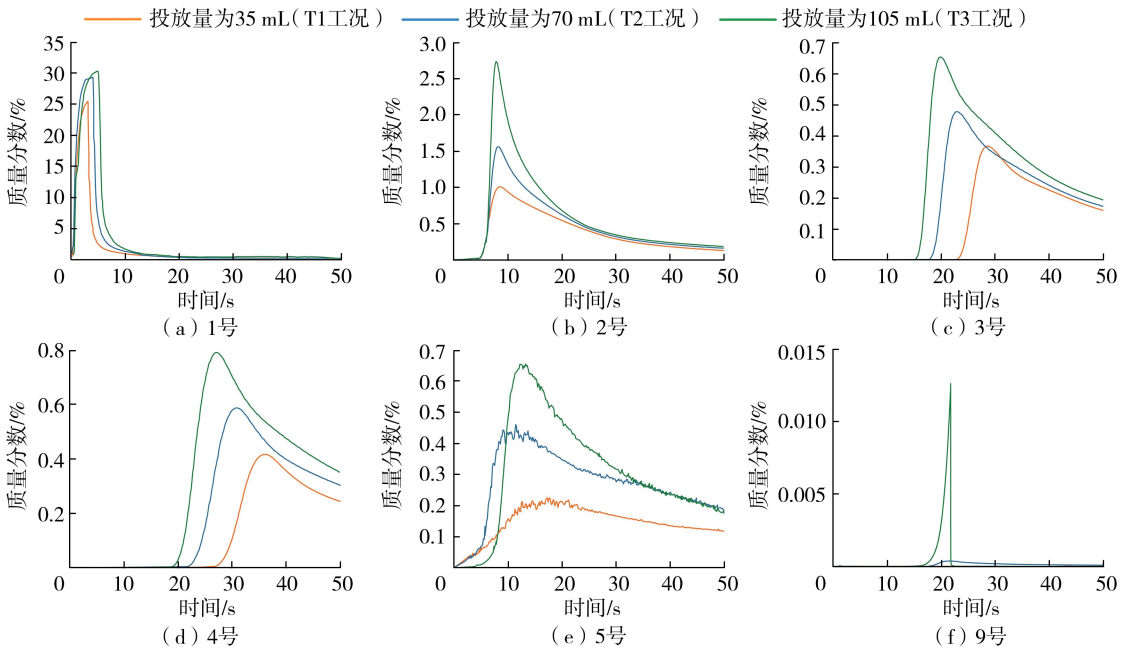


图 8　不同示踪剂投放量各采集点示踪剂质量分数曲线

Fig. 8　Curves of tracer mass fraction at each sampling point under different tracer dosages

点的峰值质量分数逐渐增大;②除 1 号采集点,其他采集点达到峰值质量分数的时间均提前,是因为示踪剂投放位置和 1 号采集点的距离最近,且不同示踪剂投放量是通过控制示踪剂投放时间实现的,其他采集点提前可能是因为随着示踪剂投放量增加,浓度梯度增加,导致示踪剂运移加快;③曲线的峰宽越宽,这是因为在同样大小的水流作用下,示踪剂投放量越大,示踪剂投放时间越长。峰值质量分数越大,达到峰值后的下降速度越快,这是由于峰值质量分数越大,采集点与周围水体的浓度梯度越大,示踪剂运移越快。3 种工况下 9 号采集点的质量分数均十分微小,所以后续不对 9 号采集点进行分析。

渗漏入口的存在会显著影响示踪剂质量分数云图的形状,浓度羽由椭圆形逐渐发展为圆形,影响范围逐渐扩散,呈对称分布现象,对称轴为示踪剂投放点与渗漏入口的连线(图 9)。

2.2.2　渗漏规模对示踪剂运移的影响

由图 10 可知,示踪剂质量分数从 1/2 峰值上升到峰值的时间明显大于从峰值下降到其 1/2 的时间。随着渗漏规模增大:①各采集点示踪剂峰值质量分数减小,这是因为随着渗漏规模的增加,水流挟带示踪剂的能力增强,导致更多的示踪剂随水流从渗漏入口流失,所以峰值质量分数减小且达到峰值的时间增加;②示踪剂质量分数由峰值下降至一半所需时间出现小幅增加,可能是因为渗漏入口对示踪剂分子的作用力与浓度梯度的作用力出现了部分抵消;③1 号采集点峰值宽度越窄,是因为随着渗漏规模的增大,示踪剂更容易随着水流的流动而流失或者由于水流流速的增加,示踪剂离开 1 号采集点速度变得更快。除 1 号采集点外,其他采集点与示踪剂投放点位置有一定距离,其峰值质量分数到达时间逐渐延后,曲线峰值宽度越来越宽,

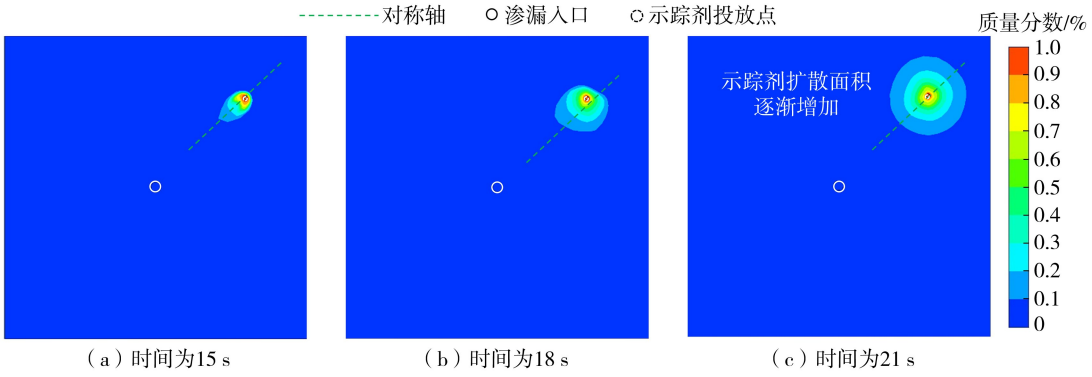


图9 不同时间示踪剂质量分数云图(T2工况)

Fig. 9 Tracer mass fraction contour map at different times (T2 condition)

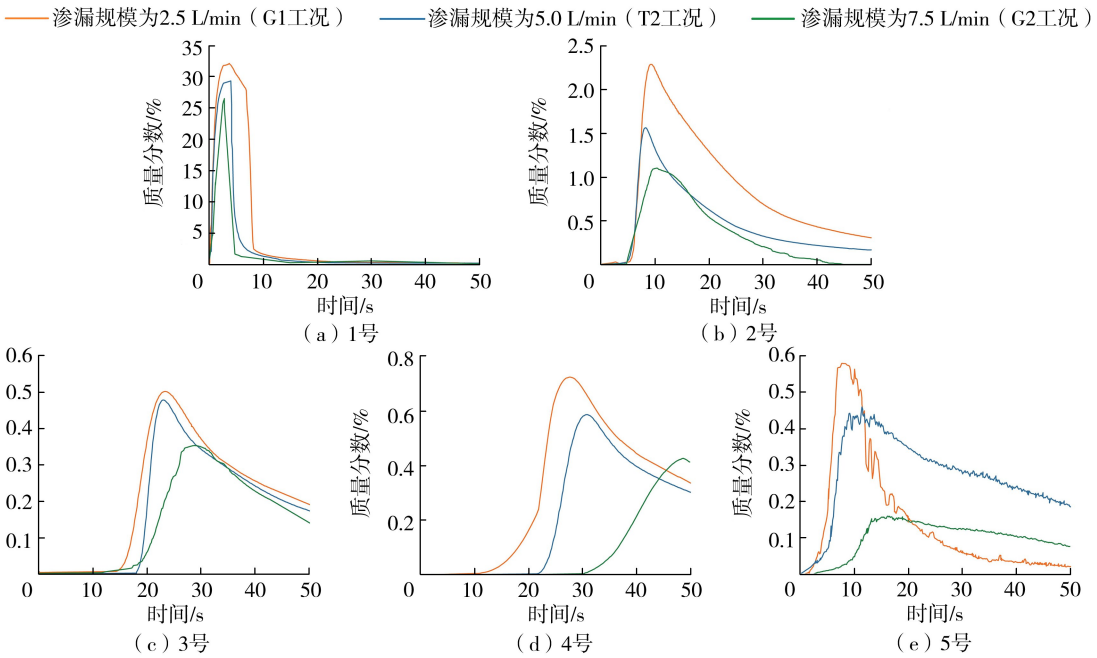


图10 不同渗漏规模各采集点质量分数变化曲线

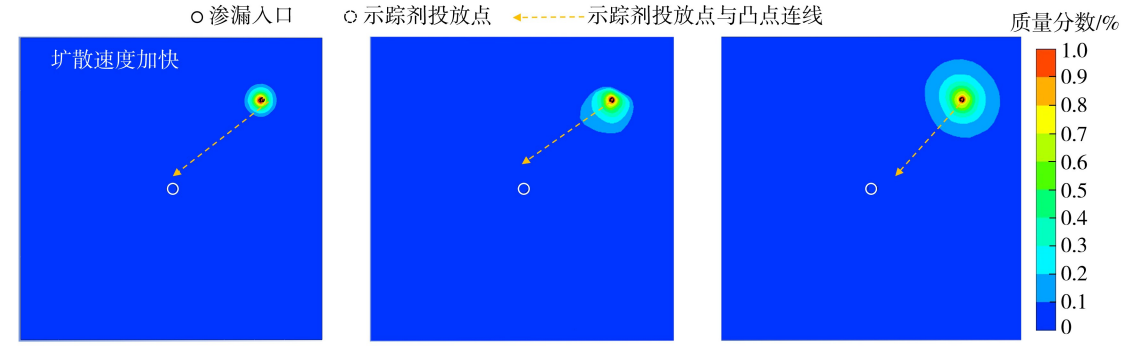
Fig. 10 Curves of mass fraction variation at each sampling point under different seepage scales

是因为随着渗漏规模的增加,示踪剂更容易从渗漏入口流失,示踪剂在壁面上的量较少,运移到其他采集点的速度越缓,因此采集点与示踪剂投放点存在一定距离的情况下,渗漏规模的改变会影响穿透时间。1号采集点,3种工况的峰值质量分数到达时间相差不大,是因为示踪剂投放点与1号采集点的距离太近,在投放示踪剂的过程中,示踪剂可以将其完全覆盖,所以采集点与示踪剂投放点距离过近的情况下,渗漏规模的改变不能影响穿透时间。

由图11可知,随着渗漏规模的增大,壁面上示踪剂分布的面积增大,这是因为随着渗漏规模的增大,水流对示踪剂的挟带作用越强。渗漏规模为2.5 L/min时,示踪剂的质量分数云图为圆形,也没有凸向渗漏入口的凸点,说明渗漏规模较小时对示踪剂的运移影响不明显。渗漏规模为5 L/min时,示踪剂质量分数云图开始向渗漏入口凸出,增加至7.5 L/min时,凸点弱化,但凸点仍指向渗漏入口的方向。因此,实际工作中,可以通过示踪剂质量分数云图的形状推测渗漏入口的大致方向。

2.2.3 示踪剂投放点位置对示踪剂运移的影响

由图12可知,1号采集点示踪剂质量分数变化曲线的宽度也随距离增加而增加,这是因为随着距离的增加,示踪剂运移受渗漏入口的影响会逐渐减小,进而导致示踪剂运移得更久。同时,随着投放点与渗漏入口间距离的增大,示踪剂质量分数减小得更快,但最终都会趋近于0,这是因为质量分数在达到峰值后开始下降的时间段内,1号采集点的质量分数较周围水体来说存在较大浓度梯度,故示踪剂会迅速扩散至质量分



（a）渗漏规模为2.5 L/min（G1工况）（b）渗漏规模为5.0 L/min（T2工况）（c）渗漏规模为7.5 L/min（G2工况）

图 11　不同渗漏规模下 15 s 时示踪剂质量分数云图

Fig. 11　Cloud map of tracer mass fraction at 15 seconds under different seepage scales

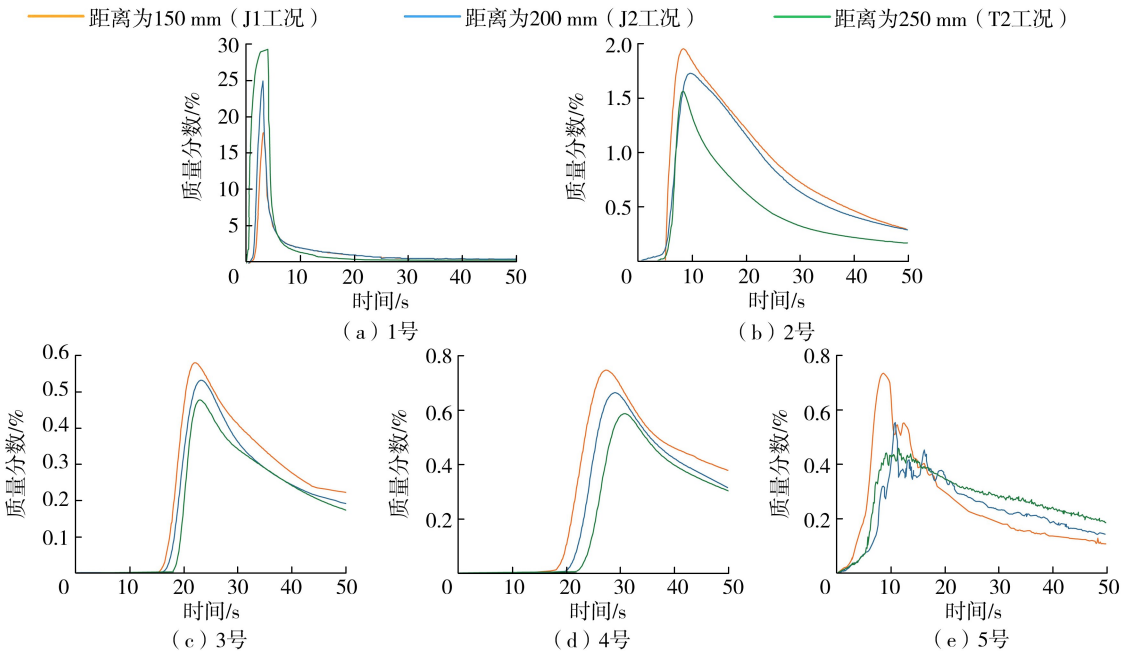


图 12　不同示踪剂投放点各采集点示踪剂质量分数变化曲线

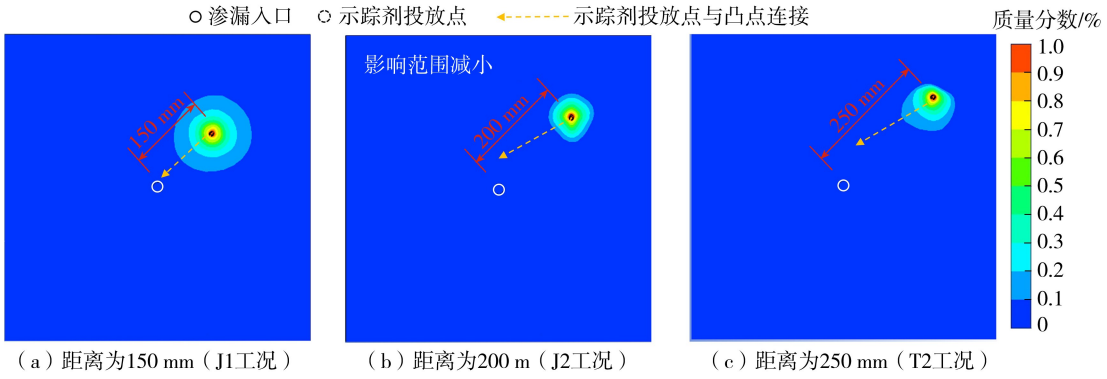
Fig. 12　Curves of tracer mass fraction variation at each sampling point under different tracer injection point locations

数较小区域,加之示踪剂停止投放没有示踪剂对 1 号采集点进行补充,这两部分原因导致示踪剂质量分数迅速下降;至于距离越大,浓度下降得越快,这同样是因为浓度梯度大造成的,因为距离越小,示踪剂受渗漏入口的影响越大,即示踪剂更容易从渗漏入口流失,导致采集点的峰值浓度更低,浓度梯度更小,所以浓度下降越慢。随着示踪剂的继续运移,浓度梯度降低,所以浓度下降的速度开始变慢。2 号、3 号、4 号和 5 号相应的图表数据呈现如图 12 所示,由于其变化规律的分析与前文类似,这里便不再赘述。

由图 13 可知,示踪剂投放点与渗漏入口距离为 150 mm 时,示踪剂影响范围最大,且质量分数云图凸向渗漏入口的凸点较为明显,说明渗漏入口已经开始影响示踪剂的运移,且已经有示踪剂从渗漏入口流失。距离为 200、250 mm 时,虽然同样存在凸点,但其影响范围大大减小,主要是因为随着示踪剂投放点与渗漏入口距离的增大,示踪剂影响范围逐渐减小,但示踪剂质量分数云图的圆形始终存在凸点,且凸点位置基本朝向渗漏入口,说明渗漏入口的大致方向可以通过模拟进行推断。同时,参考各采集点的示踪剂质量分数变化情况,可知随着距离的增加,渗漏入口对示踪剂分布及运移的影响减弱,且响应时间会延长。

3　结　论

a. 随着示踪剂投放量的增加,壁面上的峰值质量分数增大,穿透时间和主体穿透时间变短,因此加大示踪剂投放量能够加快示踪剂的运移速度。



(a)距离为150 mm(J1工况) (b)距离为200 m(J2工况) (c)距离为250 mm(T2工况)

图13 不同示踪剂投放点15 s时示踪剂质量分数云图

Fig. 13 Cloud map of tracer mass fraction at 15 seconds under under different tracer injection point locations

b. 随着渗漏规模的增大,示踪剂随着水流流失的速度加快,壁面上的峰值质量分数减小,主体穿透时间变短,示踪剂的分布形状会从圆形逐渐转变为椭圆形,并且其长轴会沿示踪剂投放点与渗漏入口之间的连线方向排列,因此可通过分析示踪剂的分布形状,大致推测渗漏入口的方向。

c. 示踪剂投放点与渗漏入口之间的距离越小,壁面上的峰值质量分数越小,主体穿透时间越长,示踪剂的分布面积会显著增大。

参考文献:

[1] 蔡跃波,向衍,盛金保,等. 重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用[J]. 岩土工程学报,2023,45(3):441-458. (Cai Yuebo, Xiang Yan, Sheng Jinbao, et al. Deep-water detection, monitoring, early warning and treatment of emergencies of major water conservancy projects:a review[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(3):441-458. (in Chinese))

[2] Wu Zhongru, Peng Yan, Li Zhanchao, et al. Commentary of research situation and innovation frontier in hydro-structure engineering science[J]. Science China Technological Sciences,2011,54(4):767-780.

[3] 陈建生,何会祥,王涛. 基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):358-363. (Chen Jiansheng, He Huixiang, Wang Tao. Dam leakage detection based on entropy weight-variable fuzzy set model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(4):358-363. (in Chinese))

[4] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):1-10. (Su Huaizhi, Zhou Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):1-10. (in Chinese))

[5] 周仁练,马佳佳,苏怀智. 基于无人机载红外-可见双光成像的土石堤坝渗漏巡查方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):154-161. (Zhou Renlian, Ma Jiajia, Su Huaizhi. Leakage inspection method of earth-rock embankment based on UAV with infrared and visible dual-light imaging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):154-161. (in Chinese))

[6] Wu Yao, Xu Shilang, Li Qinghua, et al. Estimation of real fracture parameters of a dam concrete with large size aggregates through wedge splitting tests of drilled cylindrical specimens[J]. Engineering Fracture Mechanics,2016,163:23-36.

[7] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-58. (Bai Guangming, Zhang Shoujie, Lu Jianqi, et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detectionusing the quasi-flowing field method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):52-58. (in Chinese))

[8] Mozafari M, Raeisi E, Zare M. Water leakage paths in the Doosti Dam, Turkmenistan and Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,65(1):103-117.

[9] Cardarelli E, Cercato M, Di Filippo G. Geophysical investigation for the rehabilitation of a flood control embankment[J]. Near Surface Geophysics,2010,8(4):287-296.

[10] 沈添耀,董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):63-69. (Shen Tianyao, Dong Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(2):63-69. (in Chinese))

(下转第137页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.008

联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术监测高陡边坡形变的研究进展

何秀凤[1],李 钢[2],夏诸葛[1],肖儒雅[1],贾东振[1],宋敏峰[1]

(1. 河海大学地球科学与工程学院; 2. 水利部信息中心)

摘要:概述了北斗/GNSS 与合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的基本原理,重点回顾了二者 21 世纪以来的理论发展历程,深入分析了二者在联合监测变形领域的最新研究进展,总结了当前北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在高陡边坡工程形变监测与安全防控工作中面临的核心问题及潜在挑战,认为北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可实现厘米级精度与全域覆盖的统一,显著提升了高陡边坡变形监测能力,指出未来应在空天地一体化监测网络的基础上深化北斗与国产 SAR 卫星数据融合,同时发展面向高陡边坡监测的行业大模型。

关键词:北斗卫星导航系统;全球卫星导航系统;雷达干涉测量技术;高陡边坡监测;变形监测;卫星大地测量

Research progress on integration of BDS/GNSS and InSAR for monitoring deformation of high-steep slopes

He Xiufeng[1], **Li Gang**[2], **Xia Zhuge**[1], **Xiao Ruya**[1], **Jia Dongzhen**[1], **Song Minfeng**[1]

(1. *School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University*;
2. *Information Center of the Ministry of Water Resources*)

Abstract: The fundamental principles of Beidou navigation satellite system (BDS)/global navigation satellite system (GNSS) and interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology were outlined, with a focused review of their theoretical developments since the 21st Ccentury. The latest research advances in their integrated application for deformation monitoring were analyzed in depth. Core issues and potential challenges currently faced by the combined BDS/GNSS and InSAR technology in monitoring engineering deformation and ensuring safety prevention for high-steep slopes were summarized. It is suggested that this integrated approach can achieve centimeter-level accuracy while enabling full-area coverage, significantly enhancing the capability for high-steep slope deformation monitoring. Furthermore, it is pointed out that future efforts should focus on deepening the integration of BDS and domestic SAR satellite data based on an integrated space-air-ground monitoring network, alongside the development of industry-specific large language models tailored for high-steep slope monitoring.

Key words: Beidou navigation satellite system; global navigation satellite system; interferometric synthetic aperture radar technology; high-steep slope monitoring; deformation monitoring; satellite geodesy

高陡边坡作为露天矿山、水利枢纽及交通路网等重大工程中的常见地质构造,其失稳引发的滑坡、崩塌等灾害严重威胁生命财产安全与基础设施可持续运营,一直受到工程界的广泛关注[1]。随着我国“交通强国”战略推进与资源开发深入,高陡边坡工程规模与复杂性持续提升。此类边坡受岩体结构脆弱性、水文地质作用及工程扰动等多因素耦合影响,极易诱发滑坡、崩塌等突发性灾害[2-3]。人工巡检及单一类型传感器布设等传统监测方法,存在数据离散性高、深部信息缺失及响应滞后等缺陷,难以捕捉高位危岩体的早期形变信号[4]。因此,亟须引入新型空间大地测量技术和预警技术,发展多源协同、空天地一体化的智能监测体系,提升高陡边坡滑坡灾害防控能力。

北斗卫星导航系统(以下简称“北斗”)精密定位技术与合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术为高陡边坡形变监测与灾害防控提供了关键技术支撑,既可实现实时、精准的状态感知,也可依托大数据分析预测其

基金项目:江苏省基础研究计划项目(BK20251497);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201054)

作者简介:何秀凤(1962—),女,教授,博士,主要从事 GNSS 卫星导航、InSAR 测量与地表形变监测应用研究。E-mail:xfhe@hhu.edu.cn

通信作者:夏诸葛(1993—),男,讲师,博士,主要从事 InSAR 测量与地表形变监测应用研究。E-mail:zhugexia@hhu.edu.cn

演化趋势,从而提升边坡安全保障能力。北斗是我国自主研发和建设的全球导航定位系统(GNSS),可以显著增强我国在高陡边坡安全监测等方面的预警能力[5]。基于北斗播发的卫星导航信号,接收机在开阔区域无需互相通视即可获取高精度的三维绝对坐标信息,实现对目标的精确定位。然而,受到监测站点数量与分布的限制,北斗难以独立实现对高陡边坡中高位危岩体(如坡顶变形体)、隐蔽性滑坡体等区域的面状监测,仅能选取有限关键点进行站点布设,采取"以点代面"的策略进行监测。

InSAR 技术为一种干涉雷达遥感技术,利用相位干涉原理,通过处理多期合成孔径雷达(SAR)影像数据,可以实现对地表大尺度、毫米级微小形变的监测[6],是复杂山区高陡边坡安全监测的有力工具。但 InSAR 技术也存在局限性,其无法直观地提供垂直或水平方向上的地面位移分量,只能反映卫星视线方向的形变分量。同时,因大气延迟效应和时空失相干等问题,导致 InSAR 数据处理中可能混入误差,掩盖或扭曲真实形变信号,从而影响对潜在边坡安全威胁的准确评估[7]。

通过联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术,构建起从点到面、从地面到空中的全方位、互补的高陡边坡一体化监控系统。该系统不仅能够实时捕捉高边坡的微小形变,还能精细描绘地形地貌,可以有效预测矿区、水利枢纽与交通路网等关键设施附近的高陡边坡潜在风险,并提升监测的准确性和可靠性[8],可为高陡边坡安全监测、管理决策提供坚实的数据支持。

本文系统阐述北斗/GNSS 与 InSAR 技术等新型空间大地测量技术在高陡边坡监测的应用现状和前景,论证了新型空间大地测量技术赋能高陡边坡形变灾害监测与防控的重要性和必要性,有助于实现高陡边坡的信息化、智能化监测,以期更好地应对我国"交通强国"战略推进所带来的高陡边坡重大工程挑战。

1 北斗/GNSS 与 InSAR 技术的原理

北斗/GNSS 与 InSAR 技术的各项指标见表 1。

表 1 北斗/GNSS 与 InSAR 技术指标

Table 1 Indicators of BDS/GNSS and InSAR techniques

技术	观测量	测量范围	测量精度	监测时效性
北斗/GNSS	水平、垂直向(三维)	点或局部区域(离散点)	毫米级	实时或准实时监测(采样率可达 200 Hz)
InSAR	视线向(一维)	大范围(空间连续、面状覆盖,可达数千公里)	厘米级至毫米级	有一定的时间延迟(数天至数十天,取决于数据获取和处理周期)
技术	获取变形量	垂直方向形变敏感度	现场作业	成本
北斗/GNSS	绝对量和相对量	敏感	需布设设备	设备初始投资较高(高精度接收机),但长期连续监测有效减少单位时间平均成本
InSAR	相对量	敏感	无需	SAR 数据获取与处理成本较高,但单次监测范围广,有效减少单位面积平均成本

1.1 北斗/GNSS 基本原理

北斗/GNSS 通过提供定位与短报文通信等功能,显著提升了高陡边坡安全监测管理的智能化与精准化水平,已成为保障我国重大工程边坡安全的重要技术基础。北斗/GNSS 高精度定位技术,包括精密单点定位(PPP)、静态差分技术和实时动态载波相位差分(RTK),已被广泛应用于各种监测领域[9]。PPP 技术作为一种独立的定位技术,在绝对定位方面具备一定价值,但其在误差校正能力和非模型化误差的处理方面仍存在局限性。相比之下,静态差分技术通过消除观测数据中的共有误差,实现了高精度的相对位置测量[10],在矿山、水利工程等设施微小形变的监测中得到了广泛应用。然而,静态差分技术在实时性方面的不足限制了其在快速形变监测中的应用。RTK 技术因能够实时监控快速或突变形变,在精密工程测量和安全性监测中变得日益重要。静态差分技术与 RTK 技术采用同样的双差观测方程,通过该方程可以计算接收机到基站的相对位置,并可以通过两次差分,消除或削弱具有高度空间相关性的误差,如卫星和接收机的钟差、电离层和对流层延迟误差等。

北斗/GNSS 在高陡边坡灾害监测领域还具有其他技术优势,例如,在遥感探测领域,可依托北斗/GNSS 发射的电磁波信号开展遥感监测。依据观测平台的差异,GNSS 遥感可划分为地基、空基与天基 3 种类型,能够针对性地满足不同领域的监测需求。北斗/GNSS 信号属于穿透能力较强的 L 波段信号,这一特性赋予其低成本、全天候连续监测的显著优势,不仅在气象水文、土壤湿度、水环境监测等领域展现出广阔的应用潜

力,更能为揭示高陡边坡形变与环境因子变化的耦合作用机制,提供多维度、高精度的数据支撑。此外,北斗独有的短报文通信功能,是其他 GNSS 不具备的核心优势[11],该功能可突破地面通信网络限制,在偏远无信号区域或恶劣极端环境下保障数据与指令的稳定传输,对于高陡边坡灾害监测中水文数据回传、水雨情信息实时上报、洪涝诱发边坡灾害预警及应急响应指令下达等关键环节,具有不可替代的实用价值[12-13]。

1.2　InSAR 技术基本原理

InSAR 技术最初应用在地形图绘制和获取地表三维数据[14],随后被拓展至地表形变监测、工程设施监测和灾害监测预警等多个领域,以满足不同应用场景的需求。InSAR 技术通过将同一区域不同时间获取的多个复数图像进行共轭相乘获取相位差信息。在剔除地形相位干扰后,InSAR 技术可实现对地表形变的有效捕捉,这一改进方法被命名为差分合成孔径雷达干涉测量技术(D-InSAR),并于 1992 年兰德斯地震期间成功应用于地表形变的监测工作[15]。然而,失相干噪声与大气延迟等误差源的存在,在一定程度上制约了 D-InSAR 技术的监测精度[16]。

为克服 D-InSAR 技术的局限性,提升监测精度,学者们开发出了多时相 InSAR 技术(MT-InSAR),也称时序 InSAR 技术(TS-InSAR),通过分析差分干涉图像序列,识别高相干性稳定散射点,并用最小二乘法重建形变时间序列,精度通常为厘米至毫米级[17],其主要技术发展进程如图 1 所示。依据依赖的主影像数量,MT-InSAR 技术主要分为两大类别:①单一主影像的永久散射体技术(PSI)[18],特别适用于城市地区,对于基础设施和裸露岩石等具有强烈反射性的物体建模效果显著;②基于多主影像的小基线集技术(SBAS)[19],更适合于对分布式目标进行建模和分析,被广泛用于研究地源机制和大型断裂带等广泛的地表探测。但是,SBAS-InSAR 技术在处理复杂场景和精细监控目标时,对变形细节的捕捉具有局限性。为了解决这一问题,基于全分辨率的 SBAS 技术应运而生,即分布式散射体(DS-InSAR)技术,是 InSAR 技术领域的研究热点之一[20-21]。

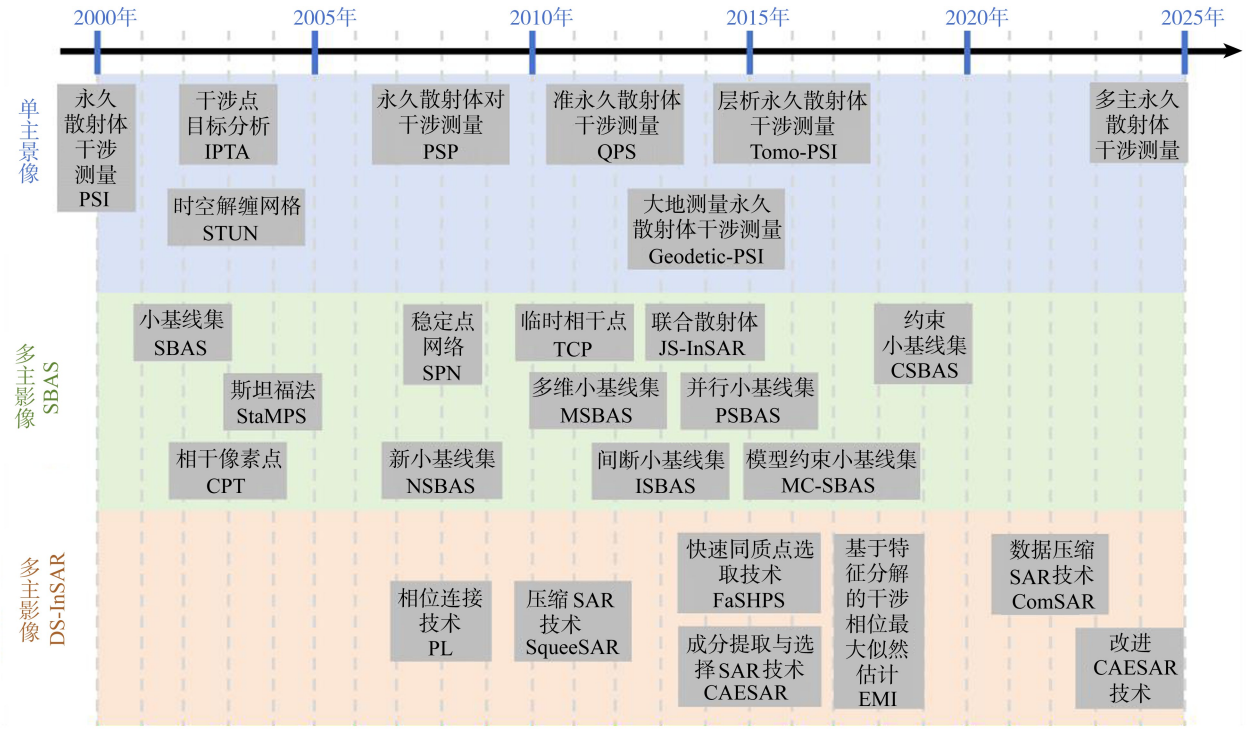


图 1　MT-InSAR 技术的发展进程

Fig. 1　Development process of MT-InSAR technique

1.3　北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法是当前地表形变监测领域的重要研究方向,二者在时空分辨率、观测维度和误差特性方面具有显著的互补性。北斗/GNSS 能够提供高时间分辨率、绝对三维形变信息,尤其擅长捕捉动态和突变形变,但其空间分辨率受限于接收机布设密度,难以实现面状连续监测。InSAR 技术则以高空间分辨率、大范围覆盖能力见长,能够获取地表连续的形变场,但其观测结果受限于雷达视线,仅

为形变的一维投影,且易受大气延迟、失相干等因素影响,时间分辨率相对较低。因此,两种技术的有机结合,可实现从“点”到“面”、从“相对”到“绝对”、从“一维”到“三维”的形变监测能力提升。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测可在以下方面发挥关键作用:①北斗/GNSS 可作为外部验证数据,用于评估 InSAR 形变结果的精度和可靠性,尤其在滑坡、地震等同震或缓变形变场中,北斗/GNSS 提供的高精度点位形变信息是验证 InSAR 结果的重要依据;②北斗/GNSS 数据还可用于辅助 InSAR 相位解缠,通过提供绝对相位参考或约束解缠路径,阻断误差在相位梯度剧变(如高陡边坡、采空区等)区域级联,改善相位解缠效果,提升形变序列的鲁棒性与效率[22-23];③北斗/GNSS 观测的天顶对流层延迟参数也可用于改正 InSAR 干涉图中的大气相位延迟,提升 InSAR 形变监测的准确性。例如,通过插值稀疏北斗/GNSS 站点数据或结合气象模型,可生成高分辨率的大气延迟改正场,显著抑制 InSAR 中的大气误差[24-25];④北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测能够实现地表三维形变场的重构。由于 InSAR 仅能提供卫星视线方向的形变,而北斗/GNSS 可提供东、北、垂直 3 个方向的高精度形变信息,通过建立联合观测模型[26-27],如基于加权最小二乘、方差分量估计、智能优化算法等模型,可将升、降轨 InSAR 面数据与北斗/GNSS 点数据融合,反演得到更真实、更全面的三维形变场,增强对形变机制的解释能力。

2 典型高陡边坡联合监测应用现状

2.1 矿区边坡灾害监测预警

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法应用于采矿高陡边坡形变的精准监测,已成为当前我国的研究热点问题之一[28]。21 世纪初以来,我国露天矿山开采深度持续增大,由“采场”模式快速向“深坑”模式演进。长期高强度开采导致边坡稳定性问题日益凸显,如抚顺西露天矿、鞍千铁矿排土场、弓长岭铁矿、紫金铜矿等典型高陡边坡,其高度已突破 400 m,坡脚至坡顶的垂直落差普遍超过百米[29]。在此背景下,传统的单点全站仪或水准测量方法,已难以满足“大范围、高精度、全天候”的现代监测需求。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可有效应对矿区高陡边坡监测的挑战。一方面,时序 InSAR 技术可在矿区大范围圈定高陡边坡不稳定区域,为北斗/GNSS 预警提供先验信息[30-31];另一方面,北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可有效提升形变监测精度与效果[29-34]。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在我国露天矿山防灾减灾中具有显著的实践应用效果:自 2017 年以来,辽宁、福建、西藏等省(区)依托该联合监测技术,累计发布红色预警 30 余次,成功避让滑坡险情,避免经济损失超过 10 亿元[29]。2023 年,应急管理部正式将“北斗/GNSS+InSAR 技术”纳入《露天矿山重大灾害防治推荐技术目录》,标志着该技术组合成功实现了从科研试验向标准化、规模化工程应用的跨越。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可在高陡边坡灾害监测中构建起“大范围筛查—重点区域加密—险情实时预警”的全链条监测预警体系,有效助力防灾减灾从“被动应对”转向“主动防控”,为矿山高陡边坡风险区的国土空间规划、工程安全运维与应急响应提供有力支撑。

2.2 库区坝体与边坡灾害监测预警

库区高陡边坡失稳具有极高的破坏性,可能导致巨大的人员伤亡、经济损失、基础设施破坏以及环境恶化等一系列问题,尤其是在库区大坝与河流、湖泊沿岸等关键工程设施附近,可能影响设施正常运转,导致工程安全问题并诱发地质灾害。例如,1963 年意大利维昂特水库曾发生灾难性的高陡边坡坍塌事件,质量约 1.5 亿 t 的泥石冲入水库,引发等量水体瞬间溃泻,造成下游 5 个村庄被毁、超过 4 000 人遇难[35]。因此,对库区坝体的安全监测具有重要的现实意义与工程价值。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在时效性、高效性与精确性等核心维度上,为库区坝体形变监测提供了全新的技术路径与应用可能。

有效的库区高陡边坡预警系统(early warning system,EWS)需要具备足够的区域覆盖能力、快速的时间采样能力、足够的测量精度以及性价比[36]。传统的边坡监测技术大多采用原位监测方式,受限于人力和时间,难以实现实时性、持续性和广域覆盖,尤其在偏远或地形崎岖地区实施具有挑战性[37]。InSAR 技术可以提供广域库区高陡边坡检测、监测和风险评估,确定重点高陡边坡体;而在重点目标滑坡体上,北斗/GNSS 监测设备可实时监控边坡位移和变形。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可以在不同尺度、不同维度、不同规模上精确捕捉不稳定高陡边坡的微小形变,增强灾害预警和应急管理的能力。例如,Zhou 等[38]基于 GNSS 与 InSAR 联合框架,将异质集成机器学习与 MT-InSAR 形变速率耦合,构建“大范围筛查—重点

区域加密—险情实时预警”全链条体系,动态修正传统边坡编目易犯的高估/低估难题,实现厘米级形变监测和滑坡易发性快速更新。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在小浪底水库、板桥水库、龙羊峡水库等重要工程设施的稳定性监测中发挥出重要作用。例如,Xiao 等[39]通过结合北斗/GNSS 与多波段 SAR 数据追溯历史形变、识别潜在库区安全隐患,并成功应用于南水北调东线工程中的双王城水库,实现了对长距离调水工程中大坝形变的高精度、空间连续监测,验证了联合监测技术在重大基础设施稳定性评估与安全预警中的有效性;Dai 等[40]通过北斗/GNSS 与时序 InSAR 技术监测三峡大坝坝体形变与稳定性,并揭示了与降雨、库水位和工程扰动等因素相关的地表沉降现象,为大坝安全管理提供了数据支持。综上,北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法不仅提高了监测的效率和精度,而且其可行性和有效性也经过了实践检验与应用验证,可以为库区高陡边坡的监测和风险防控提供一种精确、高效、实时的解决方案。

2.3　交通工程边坡灾害监测预警

公路、铁路等交通工程高陡边坡的稳定性直接关系重大基础设施安全,其灾害防治亟须兼顾大范围覆盖与高精度监测的技术手段。联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术,可凭借其时空互补特性和不同维度破解这一难题。

北斗/GNSS 通过地面接收机连续追踪卫星信号,可提供边坡表面离散点位的实时三维位移信息,时间分辨率优异但空间覆盖密度受限。InSAR 技术利用雷达卫星影像的相位差异,具备广域地表厘米级至毫米级形变监测能力,尤其对视线方向微小位移极其敏感,可用于监测识别交通工程高陡边坡坍塌前可能出现的微小形变。例如,Xia 等[41]在梅龙高速高填方边坡的研究中,成功利用时序 InSAR 技术捕捉到了高速边坡失稳前数周的预滑移信号,雷达视线方向形变速率可达 18.8 mm/a;Liu 等[42]通过改进的时序 InSAR 技术,精准识别出德钦县 317 处活动性滑坡,其中 81.4%为流动型,这些高陡边坡多分布在海拔 4 000 m 以上的高山区域,对交通工程和部分城镇安全构成重大威胁。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法的可靠性与预警价值,亦可通过典型工程应用案例得到充分验证:在昌赣高铁边坡监测项目中,Zhou 等[43]融合时序 InSAR 与北斗 RTK 监测数据,构建起“大范围筛查—高精度加密—多源耦合预警”的协同监测体系,该体系与 InSAR 监测结果的均方根误差不超过 7.1 mm,显著提升了监测数据的可靠性;在罗马尼亚布加勒斯特地铁建设监测中,Gheorghe 等[44]采用 InSAR 与 GNSS 协同监测技术,成功捕捉到自 2015 年 11 月起出现的异常加速沉降现象,合理推断其可能由地铁施工影响;在技术融合方法层面,Qiu 等[45]提出一种时空滤波融合算法,有效破解了北斗/GNSS 与 InSAR 数据融合过程中,因空间矩阵病态性导致的监测精度偏低、数据波动较大等技术瓶颈,其在空间域与时间域的综合性能均显著优于传统融合方法。

综上所述,北斗/GNSS 与 InSAR 技术的深度协同,通过整合卫星遥感的大范围筛查优势与地面定位的高精度、高时效特性,并结合地质、气象等多源参数,已发展形成一套成熟的“面状筛查—点状加密—机制解析—阈值预警”交通工程高陡边坡灾害一体化监测预警技术体系。该体系不仅能高精度识别潜在隐患,更能捕捉灾害前兆信息并解析致灾机理,为重大交通基础设施的边坡安全提供了从早期识别到精准预警的全流程技术支撑。

3　技术挑战与局限

在复杂监测场景中实现北斗/GNSS 高精度定位面临着一系列挑战,主要包括周跳的探测与修正、粗差处理、整周模糊度固定和多路径效应的抑制与消除。当处在较为复杂的观测环境中时,北斗/GNSS 数据中可能包含多种异常值和显著的多路径效应以及非模型化误差,为高陡边坡形变监测带来挑战。北斗/GNSS 的现代化、北斗的创新星座布局以及六频信号的加入,使得对多系统多频信号环境下周跳的检测与修复理论成为研究新热点。北斗/GNSS 周跳是因卫星信号被遮挡或受干扰等原因而发生的载波相位跟踪中断,可能导致高精度定位所依赖的整周模糊度参数发生跳变,从而使定位结果从厘米级退化至米级,并显著增加数据处理的复杂度。多路径误差是由信号在到达接收机前受到周围环境物体反射或衍射而产生的,会导致信号的相位和幅度发生变化,理论上这种误差相当显著,目前普遍通过硬件、软件方式进行修正。近年来机器学习也开始应用于多路径误差检测领域,且具有独特优势,但当多路径效应较弱时,机器学习算法可能会误判

并过度削弱相位数据,因此机器学习算法的可靠性与适宜性需要进一步研究。此外,快速而精确地固定整周模糊度是北斗在高精度形变监测中的关键[46]。北斗/GNSS多频信号技术,尤其是长波组合观测值的生成在复杂环境中展现出应用潜力,为整周模糊度的快速固定提供了创新解决方案。尽管如此,在狭窄巷道中实现模糊度的高效和精确固定[47],仍是研究中需克服的难题。

InSAR技术在实际应用中也受观测环境复杂性与低相干性问题的制约,易引发信号相位失真及衰减误差,进而影响监测结果的准确性与可靠性。与此同时,在数据处理与干涉影像解析过程中,大气效应的影响必须予以考虑并妥善处理。当前针对大气效应的改正策略主要分为两大类:一类是借助外部数据源或气象模型直接对干涉图进行改正,以剔除大气相位成分[24-25];另一类则通过分析干涉图中大气误差的分布特征,构建相应模型进行定量估算。相位解缠是时序InSAR获取高精度形变信息的关键步骤,其精度和稳健性对结果至关重要[48]。在实际应用中,高陡边坡常处于相干散射体稀疏区域,易因相位连续性假设失效引发相位解缠错误。为提升解缠精度与稳健性,可通过优化解缠空间网络的弧段质量及密度实现这一目标[49]。尤其在高陡边坡工程的相位解缠过程中,往往需面对低相干区域与高噪声环境的双重挑战,因此需结合不同高陡边坡及工程建筑物的结构特征,采用适配的优化方法,以保障解缠结果的精度与稳健性。

北斗/GNSS与InSAR技术联合监测方法同样面临诸多技术挑战:①异源观测数据间最优权比的确定尚缺乏统一理论框架,直接影响联合平差的精度与稳健性;②大气延迟误差与多路径效应在两种技术中的作用机制存在差异,其协同改正与抑制技术仍有待完善;③随着北斗/GNSS与InSAR技术的持续发展,有效观测数据呈快速增长态势,对数据的获取、存储及处理能力提出了更高要求。其中,如何实现大数据的高效、自动化处理与融合,已成为当前研究的核心重点。基于云计算的分布式存储体系有望成为解决上述数据存储与处理难题的有效途径。在数据处理算法层面,国内外学者已开展系列探索,提出并行化、分布式等高性能计算手段,以及压缩求解、增量更新等高效算法,为北斗/GNSS与InSAR大数据的快速协同处理提供了可行思路。但需注意的是,现有算法性能与计算资源配置仍需进一步优化提升。联合监测技术的发展需在理论算法、存储设备及计算硬件等多维度持续深化研究,具体包括优化数据聚合、压缩及并行处理策略,研发高效时序估计新算法,构建面向异构数据融合的新模型等。未来,随着多源遥感数据的深度集成、人工智能技术的融合应用以及云计算平台的支撑赋能,北斗/GNSS与干涉测量联合监测技术将迈入更高效、更可靠的应用新阶段,并在智慧城市建设、重大工程安全监测、地质灾害预警等关键领域发挥更为重要的作用。

4 未来应用与展望

近年来北斗/GNSS与InSAR技术为推进高陡边坡工程安全与防控提供了强大的感知能力,已在矿山高陡边坡监测、水电工程库区边坡监测、交通工程边坡监测、地质灾害隐患点稳定性监测等领域取得了众多成功案例。

4.1 强化“空天地一体化”高陡边坡监测感知网络

《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027年)》明确提出,要构建现代工程建设管理体系,提升工程安全管理水平,强化重大基础设施安全保障体系建设。在矿山、水利以及交通等关键边坡工程领域,传统原位监测或光学卫星在暴雨、雾霾等复杂气象条件下,对高陡边坡变形和地质灾害隐患的识别能力会受到严重影响,进而影响预警系统的及时性和应急响应的效率。因此,发展高陡边坡监测与防控专用SAR卫星,以及扩展相关观测体系显得尤为关键。在我国商业航天快速发展和相关行业多元需求的推动下,越来越多的专用卫星将在不久的将来发射升空,为我国提供高分辨率、高频次的卫星数据。同时,需结合已有对地观测卫星体系,加入来自地基和空基的传感器,如北斗/GNSS、InSAR、热红外相机、激光雷达、无人机平台等,研究如何准确、高效地融合多平台多源异质数据,提升交通工程高陡边坡、矿山高陡边坡、水电工程库区高陡边坡等全要素智能感知能力。

4.2 加强北斗与国产化SAR卫星数据的高陡边坡融合应用

深化北斗卫星导航系统与国产高分辨率SAR卫星数据的融合应用,是构建自主可控、高时效性高陡边坡监测预警体系的核心方向。北斗凭借其全球覆盖、高精度实时定位及独有的短报文通信能力,为高陡边坡关键位置提供毫米级位移监测基准,并在无网络区域实现监测数据实时回传与预警指令可靠下发,彻底打通预警链路。同时,国产SAR卫星在高陡边坡监测中的适用性呈现清晰的层次结构,其核心在于波段特性与

系统设计的差异(表 2)。L 波段的 SAR 卫星凭借其强大的穿透性、对缓慢形变的极高敏感性以及多星短重访优势,成为在植被覆盖区进行大范围、长时序毫米级形变监测与隐患普查的最优且最可靠选择。C 波段卫星群则在分辨率、重访周期与监测灵敏度上取得了最佳平衡,其亚米级分辨率和天级重访能力使其成为对重点区域进行精细化刻画与快速形变过程应急监测的高效互补平台。X 波段的 SAR 卫星虽因其较弱的穿透性和对几何畸变的敏感性限制了其在茂密植被区的应用,但对于某些特定指标场景下的高陡边坡监测(高分辨率、微变形变识别等)具有无可替代的价值。

表 2　典型国产干涉 SAR 卫星参数

Table 2　Parameters of typical domestic Chinese interferometric SAR satellites

卫星名称	波段	重访周期	空间分辨率(最高)/m	主要工作模式	监测特点
陆探一号	L	单星 8 d/双星 4 d	3	条带、推扫等多种模式	对植被覆盖区穿透性强、相干性高,但对形变敏感性略低于 C/X 波段卫星
涪城一号	C	单星 11 d/星座组合可达 2~3 d	小于 1	聚束、条带、扫描	植被穿透性与相干性较高,综合性能强
高景二号	X	组网后可达小时级	0.5	条带、(高分辨率)聚束等	高分辨率,易受失相干影响,对形变敏感性高
宏图一号(女娲星座)	X	组网后可达小时级	小于 0.5	分布式干涉、车轮编队	

优化高陡边坡观测体系的关键在于多源协同,通过北斗高精度三维形变监测结果与国产 SAR 卫星的广域面状形变信息,构建一个以 L 波段进行宏观筛查,引导 C/X 波段实施高频详查的从宏观到微观的多层次立体化监测网络,形成点面结合、空天地一体的智能感知网络。这不仅保障了核心形变信息获取的连续性与安全性,摆脱对外依赖,更能通过星座组网实现按需定制观测(如高频次监测、应急响应),显著提升广域隐患筛查与局部变形精细捕捉的时效性和灵活性。结合先进数据处理与智能解译模型,将实现对高陡边坡从毫米级位移捕捉、大范围高陡边坡区域的三维形变场构建到灾害演化智能分析的全链条防控,提升异常识别的空间连续性与精度稳定性,为国家重大基础设施安全提供更坚实、自主的科技支撑。

4.3　深度学习与行业大模型助力高陡边坡监测与防控体系

高陡边坡灾害防控亟须高精度、实时化与可溯源的监测预警手段。将深度学习模型融入北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测,可形成强大的智能化解决方案。该方案的核心在于协同发挥 InSAR(大范围、周期性形变探测)与 GNSS(点位高精度、高时间分辨率监测)的优势。通过 InSAR 广域筛查锁定隐患区,再利用 GNSS 对关键点位进行持续精准监测与验证,构建全面的形变场信息。相关实践[50]表明,集成“InSAR 广域监测—GNSS 精准验证—深度学习模型智能预测”的技术框架成效显著。深度学习模型可深度挖掘海量多源监测数据,精准捕捉复杂形变规律,实现灾害的超前预测与预警;同时,通过可解释性分析揭示降雨、水位变动等关键触发因子,使预警具备可溯源性。展望未来,构建面向高陡边坡监测的垂直行业大模型(如高陡边坡智能监测大模型)是重要发展方向。此类大模型通过对海量历史监测数据与灾害案例的预训练,具备更强的泛化能力与知识迁移能力,有望实现跨区域、多场景监测预警能力的快速部署及形变识别、预测、溯源、风险评估一体化的多任务协同,为决策提供更智能的技术支撑[51-52]。将北斗/GNSS、InSAR 技术与行业大模型深度融合,可以驱动高陡边坡监测防控向全域感知、智能预警、知识驱动的更高水平跃升,为国家重大工程安全提供更坚实的保障。

参考文献:

[1] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (Xu Weiya, Chen Shizhuang, Zhang Guike, et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):52-59. (in Chinese))

[2] 徐峥辉,王伟,宋月,等. 粤港澳大湾区并发复合灾害敏感性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):99-107. (Xu Zhenghui, Wang Wei, Song Yue, et al. Sensitivity assessment of parallel complex disaster in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(4):99-107. (in Chinese))

[3] 王伟,丁聪,刘世藩,等. 基于移动最小二乘法的阶跃型滑坡预警曲面模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53

(1):95-102. (Wang Wei, Ding Cong, Liu Shifan, et al. Stepwise landslide warning surface model with moving least squares[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1):95-102. (in Chinese))

[4] 程强,董秀军,余建华,等. 典型高陡边坡高位地质灾害调查及评估[J]. 工程地质学报,2017,25(增刊1):289-294. (Cheng Qiang, Dong Xiujun, Yu Jianhua, et al. High position geological disaster investigation and evaluation of typical high-steep slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(Sup1):289-294. (in Chinese))

[5] 徐一剑. 我国沿海城市应对气候变化的发展战略[J]. 气候变化研究进展,2020,16(1):88-98. (Xu Yijian. Development strategy of China's coastal cities for addressing climate change[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1):88-98. (in Chinese))

[6] 周佰铨,翟盘茂. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. 气象,2023,49(3):257-266. (Zhou Baiquan, Zhai Panmao. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(3):257-266. (in Chinese))

[7] 李泽红,董锁成,石广义. 关于制定"'丝绸之路经济带'重大工程建设与安全科技支撑计划"的思考[J]. 中国科学院院刊,2015,30(1):37-45. (Li Zehong, Dong Suocheng, Shi Guangyi. Science and technology supporting program for key projects construction and safety of silk road economic belt[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(1):37-45. (in Chinese))

[8] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1717-1733. (Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1717-1733. (in Chinese))

[9] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B3):5005-5017.

[10] 段举举,沈云中. GPS/GLONASS 组合静态相位相对定位算法[J]. 测绘学报,2012,41(6):825-830. (Duan Juju, Shen Yunzhong. An algorithm of combined GPS/GLONASS static relative positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(6):825-830. (in Chinese))

[11] Yang Yuanxi, Liu Li, Li Jinlong, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20):2135-2143.

[12] 张同伟,李凌瑛. 基于北斗系统的地质灾害监测系统建设[J]. 电气技术,2021,22(1):99-103. (Zhang Tongwei, Li Lingying. Construction of geological disaster monitoring system based on Beidou system[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(1): 99-103. (in Chinese))

[13] 李曦亭,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18. (Li Xiting, Wang Leizhi, Shang Shouwei, et al. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin, sub-basin and urban[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2):12-18. (in Chinese))

[14] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Problems, 1998, 14(4):R1-R54.

[15] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364(6433):138-142.

[16] 朱建军,杨泽发,李志伟. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J]. 测绘学报,2019,48(2):135-144. (Zhu Jianjun, Yang Zefa, Li Zhiwei. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2):135-144. (in Chinese))

[17] 何秀凤,高壮,肖儒雅,等. InSAR 与北斗/GNSS 综合方法监测地表形变研究现状与展望[J]. 测绘学报,2022,51(7): 1338-1355. (He Xiufeng, Gao Zhuang, Xiao Ruya, et al. Application and prospect of the integration of InSAR and BDS/GNSS for land surface deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7):1338-1355. (in Chinese))

[18] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5):2202-2212.

[19] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11):2375-2383.

[20] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9):3460-3470.

[21] Minh D H T, Tebaldini S. Interferometric phase linking: algorithm, application, and perspective[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2023, 11(3):46-62.

[22] 罗海滨,何秀凤. GPS 控制点辅助 InSAR 相位解缠算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(5):630-636. (Luo Haibin,He Xiufeng. InSAR phase unwrapping algorithms with the aid of GPS control points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2017,42(5):630-636. (in Chinese))

[23] Gudmundsson S,Carstensen J M,Sigmundsson F. Unwrapping ground displacement signals in satellite radar interferograms with aid of GPS data and MRF regularization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(8):1743-1754.

[24] Yu Chen,Penna N T,Li Zhenhong. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2017,122(3):2008-2025.

[25] Yu Chen,Li Zhenhong,Penna N T. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. Remote Sensing of Environment,2018,204:109-121.

[26] 罗海滨,何秀凤,刘焱雄. 利用 DInSAR 和 GPS 综合方法估计地表 3 维形变速率[J]. 测绘学报,2008,37(2):168-171. (Luo Haibin,He Xiufeng,Liu Yanxiong. Estimation of three-dimensional surface motion velocities using integration of DInSAR and GPS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2008,37(2):168-171. (in Chinese))

[27] 汪友军,胡俊,刘计洪,等. 融合 InSAR 和 GNSS 的三维形变监测:利用方差分量估计的改进 SISTEM 方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1598-1608. (Wang Youjun,Hu Jun,Liu Jihong,et al. Measurements of three-dimensional deformations by integrating InSAR and GNSS:an improved SISTEM method based on variance component estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021,46(10):1598-1608. (in Chinese))

[28] Del Soldato M,Confuorto P,Bianchini S,et al. Review of works combining GNSS and InSAR in Europe[J]. Remote Sensing,2021,13(9):1684.

[29] 刘善军,吴立新,毛亚纯,等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2265-2276. (Liu Shanjun,Wu Lixin,Mao Yachun,et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2265-2276. (in Chinese))

[30] 魏恋欢,封秋月,毛亚纯,等. 基于多轨道 SBAS 方法的露天矿高陡边坡形变监测[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(10):1445-1451. (Wei Lianhuan,Feng Qiuyue,Mao Yachun,et al. Deformation monitoring of high steep slope in open-pit mine with multi-orbit SBAS[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2020,41(10):1445-1451. (in Chinese))

[31] 于冰,王冰,刘国祥,等. 融合 DT 和 SDFPT 的时序 InSAR 矿区形变监测与分析[J]. 自然资源遥感,2024,36(1):14-25. (Yu Bing,Wang Bing,Liu Guoxiang,et al. Deformation monitoring and analysis of mining areas based on the DT-SDFPT combined time-series InSAR[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2024,36(1):14-25. (in Chinese))

[32] Tondaś D,Ilieva M,Van Leijen F,et al. Kalman filter-based integration of GNSS and InSAR observations for local nonlinear strong deformations[J]. Journal of Geodesy,2023,97(12):109.

[33] Zhang Jinlong,Yang Rui,Qi Yuan,et al. A study on the monitoring of landslide deformation disasters in Wenxian County,Longnan City based on different time-series InSAR techniques[J]. Natural Hazards,2024,120(12):11851-11875.

[34] Tao Qiuxiang,Liu Ruixiang,Li Xuepeng,et al. A method for monitoring three dimensional surface deformation in mining areas combining SBAS-InSAR,GNSS and probability integral method[J]. Scientific Reports,2025,15(1):2853.

[35] Lacroix P,Handwerger A L,Bièvre G. Life and death of slow-moving landslides[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2020,1(8):404-419.

[36] Xia Zhuge,Motagh M,Li Tao,et al. The June 2020 Aniangzhai landslide in Sichuan Province,Southwest China:slope instability analysis from radar and optical satellite remote sensing data[J]. Landslides,2022,19(2):313-329.

[37] De Blasio F V. Introduction to the physics of landslides:lecture notes on the dynamics of mass wasting[M]. Dordrecht:Springer,2011.

[38] Zhou Chao,Gan Lulu,Cao Ying,et al. Landslide susceptibility assessment of the Wanzhou district:merging landslide susceptibility modelling (LSM) with InSAR-derived ground deformation map[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2025,136:104365.

[39] Xiao Ruya,Gao Xiaoyuan,Wang Xun,et al. Measuring dam deformation of long-distance water transfer using multi-temporal synthetic aperture radar interferometry:a case study in South-to-North Water Diversion Project,China[J]. Remote Sensing,2024,16(2):365.

[40] Dai Keren,Li Zhenhong,Xu Qiang,et al. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems:a novel and exciting framework[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine,2020,8(1):136-153.

(下转第 93 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.009

低渗岩体渗流与溶质迁移超重力试验及数值模拟研究进展

詹良通[1,2],王 浩[1,2],胡英涛[3],徐文杰[1,2],陈长杰[4]

(1. 浙江大学岩土工程研究所; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室;
3. 浙大城市学院工程学院; 4. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司)

摘要:高放废物地质处置的长期安全性高度依赖于地质屏障对核素迁移的有效阻隔,针对核素迁移过程的大时空尺度特征,超重力试验与多尺度数值模拟已成为研究裂隙介质中长历时渗流与溶质迁移行为的重要手段。本文综述了裂隙岩体渗流与溶质迁移超重力试验技术、裂隙岩体超重力试验相似性及地质屏障长期安全性评价等方面的研究进展,针对当前面临的微米级基质-裂隙一体化制备、复杂粗糙裂隙相似性理论以及热-水-力-化多场耦合等挑战,未来应在微细裂隙-孔隙结构的一体化打印、天然粗糙裂隙结构的超重力试验相似性理论、多过程响应机制及万年历时全过程模拟等方向开展进一步研究。

关键词:低渗岩体;裂隙;溶质迁移;高放废物;地质处置;超重力试验;数值模拟

Research progress on hypergravity experiments and numerical simulation of seepage and solute migration in low-permeability rock mass

Zhan Liangtong[1,2], **Wang Hao**[1,2], **Hu Yingtao**[3], **Xu Wenjie**[1,2], **Chen Changjie**[4]

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University*;
2. *Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University*;
3. *School of Engineering, Hangzhou City University*;
4. *Chengdu Engineering Corporation Limited, POWERCHINA*)

Abstract: The long-term safety of geological disposal for high-level radioactive waste relies critically on the effective retardation of radionuclide migration by geological barriers. Given the characteristics of radionuclide migration processes at large spatiotemporal scales, hypergravity experiments and multi-scale numerical simulations have become essential tools for investigating long-term seepage and solute transport behaviors in fractured media. Research progress in hypergravity testing techniques for seepage and solute migration in fractured rock masses, similarity theories for hypergravity tests of fractured rock masses, and long-term safety evaluations of geological barriers was reviewed. To address current challenges such as the integrated preparation of micron-scale matrix and fracture systems, similarity theories for complex rough fractures, and coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical (THMC) processes, future research should focus on the integrated printing of micro-fracture and pore structures, similarity theories for natural rough fracture structures in hypergravity experiments, multi-process response mechanisms, and full-process simulations spanning ten-thousand-year timescales.

Key words: low-permeability rock mass; fracture; solute migration; high-level radioactive waste; geological disposal; hypergravity experiment; numerical simulation

在核能快速发展的背景下,高放废物的安全处置已成为制约核能可持续发展的瓶颈问题。核反应堆运行及乏燃料后处理过程中所产生的高放废物,含有多种放射性强、毒性高且半衰期长达数万年的核素,若处置不当,可能导致核素泄漏,对生态系统安全与公众健康构成长期潜在威胁。如何实现高放废物的可控隔离和长期安全封存,是全球核能技术面临的重大挑战。地质处置是国际广泛认可的目前唯一可靠的高放废物处置方式[1],其安全性依赖于多重屏障系统(工程屏障与天然屏障)的协同阻隔作用。其中,地质屏障作为

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFA1612400);中国电力建设股份有限公司科技项目(P52422);中央高校基本科研业务费专项资金项目(226-2024-00083)

作者简介:詹良通(1972—),男,教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:zhanlt@zju.edu.cn

通信作者:徐文杰(1984—),男,教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:wenjiexu@zju.edu.cn

阻隔核素迁移的最后防线,其长期阻隔性能直接关系到处置库的服役寿命与环境安全[2]。

然而,核素在深部地质环境中的迁移是一个涉及万年尺度、千米量级的复杂物理化学演化过程。常规的室内物理试验受限于时空尺度,难以在有限周期内观测到长历时的运移行为。为了有效评价地质屏障的长期阻隔性能,超重力试验作为一种重要的试验手段,能够在相对较短的时间内再现长历时、大空间尺度的渗流与溶质迁移过程。然而,受限于试验尺度、时间压缩比以及监测手段,超重力试验在揭示全尺度裂隙网络的复杂运移规律、量化多过程耦合效应等方面仍存在一定的局限性。通过将超重力试验与数值模拟方法结合,可以为超重力试验提供有效的验证与补充,提高研究的科学性和可靠性,从而为高放废物地质处置的安全性评估提供更加全面的理论支撑和技术参考。

本文综述了近年来在高放废物地质处置背景下,围绕低渗岩体中溶质迁移的超重力试验与数值协同方面的研究进展,重点介绍了超重力试验技术的原理、裂隙渗流与溶质迁移超重力试验技术、裂隙岩体超重力试验相似性与基于超重力试验的地质屏障长期安全性评价方法,分析了当前研究中面临的问题与挑战,并展望了未来研究方向,旨在为高放废物地质处置的安全性评估提供理论支撑和技术参考。

1　超重力试验技术与研究现状

1.1　超重力试验技术

超重力试验是一种利用离心加速度模拟超重力场的物理模型试验方法,通过缩尺与缩时效应,能够在实验室尺度上再现实际工程中长历时、大空间尺度的演化过程[3]。超重力场通过离心机产生,将模型置于高速旋转离心机臂端的实验舱中,使模型承受远大于重力加速度的离心加速度,从而增大模型的体积力,补偿模型缩尺带来的自重应力损失。

相较于常重力条件下的物理模拟,超重力试验的核心优势体现在缩尺效应和缩时效应两个方面:①缩尺效应。在常重力场中,缩尺模型内部的应力低于原型,无法反映原型的应力水平。在超重力场中,若模型的缩尺比例为 $1/N$,对其施加 Ng 的离心加速度即可使模型的自重应力与原型一致,从而在缩尺模型上再现大尺度原型的应力场与水力场。②缩时效应。超重力场增大了不同相物质之间的相对驱动力,加快流体与溶质在模型中的迁移速度,从而在短时间内模拟原型中的长历时溶质或污染物迁移过程。

在低渗岩体(渗透率极低、裂隙发育且基质致密的岩石)中的渗流与核素迁移研究中,超重力试验因其在模型缩尺与加速核素迁移过程的独特优势,已成为评估高放废物地质处置库地质屏障长期安全性的重要技术手段。这一方法突破了常规试验在长历时数据获取方面的局限性,能够为高放废物处置库中核素迁移的长期演化行为提供试验数据支撑,进而为地质屏障安全性评估提供科学依据。

1.2　裂隙渗流与溶质迁移超重力研究现状

早期的超重力试验集中于孔隙介质中的渗流与溶质迁移过程研究。Arulanandan 等[4]提出了用于评价污染物迁移过程相似性的 8 个无量纲数,并通过试验证明了污染物迁移超重力试验的可行性。Hensley 等[5]开展了 NaCl 在粉土中长期迁移的超重力试验,在 100g 离心加速度下连续试验 27 h,模拟了填埋场中 31 a 的溶质迁移过程。张建红等[6]利用土工离心机开展了轻质非水相液体在非饱和土体中迁移的研究,试验结果表明超重力试验可以有效模拟轻质非水相液体在非饱和土体中的迁移过程。詹良通等[7]利用浙江大学 ZJU-400 超重力离心机成功模拟了氯离子在高岭土衬垫中长历时的击穿过程。Zhan 等[8]开展了重金属铅离子在粉土-膨润土阻隔墙和黄土-粉土-膨润土阻隔墙中迁移过程的超重力试验,在 100g 离心加速度下连续试验 43.8 h,验证了黄土改性屏障服役 50 a 的长期阻隔性能。上述研究表明,超重力试验可用于模拟污染物在孔隙介质中的迁移过程,其超重力长历时迁移过程相似关系已基本明确。

然而,低渗岩体属于孔隙-裂隙介质,与孔隙介质具有明显区别,裂隙的不连续性、粗糙度和不规则空间分布显著影响渗流路径与溶质迁移行为[9-12],导致孔隙介质中所确定的相似关系在低渗岩体中可能并不适用。过去的 30 年中,关于低渗岩体裂隙渗流与溶质迁移的超重力试验研究较少,裂隙渗流与溶质迁移的超重力效应不明确,其相似条件与相似性有待进一步探讨。在超重力试验中,通常使用与原型相同的流体,确保流体的物理性质(如密度、黏度、界面张力等)与原型一致,以避免引入更复杂的流体物理化学性质相似性问题。Culligan 等[13]通过分析重质非水相液体在多孔介质中迁移的控制方程,提出了适用于离心机模拟的相似关系。之后,Levy 等[14]基于该相似关系,采用人工合成的光滑壁面垂直毛细管模拟裂隙,利用土工离心

机模拟了重质非水相液体在裂隙中的迁移行为,试验结果表明,当离心机模型和原型中的惯性力可以忽略时,超重力试验与原型试验结果相似。在后续研究中,Levy 等[15]进一步考虑了接触角随流速变化的影响,构建了新的理论模型,并通过量纲分析得到了相应的超重力相似关系。上述研究验证了超重力试验在裂隙介质中预测重质非水相液体迁移规律的可行性与有效性。

为进一步探索裂隙介质中的非饱和渗流行为,Jones 等[16]利用离心机模拟了裂隙介质中的非饱和渗流过程,试验结果表明,超重力试验可以模拟不同流速下的非饱和裂隙渗流过程。Jones 等[17]还开展了压水吕荣试验,使用光滑透明玻璃板模拟水平和倾斜裂隙,研究了裂隙非线性渗流特征,结果表明随着入流压力的增加,优势渗流路径的宽度也随之增加。此外,Gurumoorthy 等[18]研究了非吸附性和吸附性离子在完整与裂隙花岗岩中的扩散行为,结果表明超重力试验能够显著缩短试验时间,得到的扩散系数与 1g 条件下的扩散系数吻合较好,表明利用超重力试验模拟污染物在完整和破碎岩体中的扩散行为是可行的。Nishimoto 等[19-20]采用超重力试验评估了核废料地质处置库近场长期的热-水-力耦合过程行为,通过 67 d 的连续试验复现了相当于原型约 165 a 的地质演化过程。

超重力试验作为模拟核素在低渗岩体中迁移行为的重要物理手段,已经在孔隙介质和简单裂隙结构中得到了较为广泛的应用。然而,目前相关研究普遍采用理想光滑平行板裂隙模型,难以反映天然低渗岩体的裂隙-孔隙结构、粗糙度以及不规则空间分布等特征。因此,针对天然复杂裂隙的几何特征,亟须建立正确的超重力试验相似关系,并发展适用于超重力试验的模型构建与实现方法,以提升其在模拟地质屏障中核素迁移的适用性。

2 裂隙岩体溶质迁移超重力试验技术

在裂隙渗流与溶质迁移试验中,确保试验模型的精确性和可控性至关重要。裂隙岩体密封与水力边界控制技术、3D 打印模型制备技术及微米级裂隙开度控制技术为裂隙渗流与溶质迁移研究提供了更加精确和可控的试验平台。

2.1 裂隙岩体密封与水力边界控制技术

裂隙岩体渗流试验的精确性高度依赖于试验系统的密封性能与水力边界的可控性。面对多尺度的试验对象与复杂的深部赋存环境,现有的密封与控制技术已形成了覆盖宏观应力耦合、动态剪切、高温高压、微观流场控制及超重力场等极端环境的综合技术体系。

针对深部岩体高地应力与高渗透压的模拟难题,整体包裹式密封与结构化加载密封是两种主要途径。邬爱清等[21]研制了裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统,系统采用外置式高压水密封舱与试样外封闭设计,将大尺寸裂隙岩体试样与加载装置整体置于密封舱内,模拟高水压与复杂应力环境;王颂等[22]研制了面向储层特性和深埋环境的超低渗测试系统,有效解决了高地温条件下致密岩石超低渗透率的测定难题;Li 等[23]设计了一种集成渗流夹具,通过在刚性加载板表面预制格栅状导流通道,能够在裂隙面上施加均匀的孔隙压力;王者超等[24]利用东北大学研制的硬岩真三轴应力-渗流耦合装置,实现了储层砂岩渗透率的各向异性测定。

在常规水力压裂试验方面,张波等[25]研制了便携式导水钢垫板装置,通过垫板中心的流体通道直接对试样内部施加高压水,实现了水压与围压的同步耦合加载;针对高温高压下的水力压裂试验,Zhang 等[26]则开发了一种楔形铜制机械密封结构,利用金属的热膨胀与压缩变形特性,解决了传统聚合物密封圈在高温环境下易失效的问题。当试验涉及剪切位移时,要求密封系统具备动态适应能力。为此,许江等[27]研发了剪切盒密封系统,能够在试样发生剪切变形和法向位移的过程中,始终保持稳定的流体压力,实现了剪切破坏全过程的密封。

随着研究深入至细观机理与超重力领域,对边界控制的精度提出了更高要求。为定量可视化裂隙中气水两相动态分布,Liao 等[28]设计了基于半透明多孔玻璃基质的试验系统,实现了裂隙-基质界面处微小毛细管压差的精准控制与气液两相流分布的定量可视化。针对超重力条件下开展低渗岩体渗流与溶质迁移试验的需求,Xu 等[29]研制了适用于超重力条件的密封与梯度水力边界控制装置,该装置能够在超重力环境下提供稳定可控的水力边界,为模拟复杂裂隙岩体内的渗流与溶质迁移行为提供试验保障。

2.2　低渗裂隙岩体模型制备技术

天然岩石因其非均质性、裂隙面粗糙以及空间分布不连续等特征,难以制备出裂隙形态及空间分布一致的岩石试样,这在很大程度上影响了试验的重复性和稳定性,不利于相关研究的开展[30]。因此,如何高效制备内部结构一致、几何参数可控的裂隙岩体模型,是开展物理模型试验的关键[31]。随着 3D 打印技术的发展,其在裂隙岩体制备中展现出巨大的应用潜力,具备批量化、参数化与可重复性等优势,使高效获取内部结构一致、几何参数可控的裂隙岩体模型成为可能。

近年来,3D 打印技术已广泛应用于裂隙岩体渗流与溶质迁移相关研究。例如:赵恺等[32]利用 3D 打印技术制作了平行、T 形、斜交及正交等多种形式的裂隙插片,最小裂隙开度为 1.5 mm,研究了气体在不同裂隙结构中的渗透特性;Suzuki 等[33]制作了包含随机分布圆盘裂隙的复杂裂隙网络模型,最小开度为 0.2 mm,并进行了示踪剂运移试验,试验结果与数值模拟结果一致,表明 3D 打印技术能够制作出符合要求的裂隙结构;崔澈等[34]构建了透明分形裂隙模型,分析了裂隙流量与压力水头、裂隙宽度和分形维数之间的关系;Li 等[35]利用 3D 打印技术制作了最小开度为 0.3 mm 的粗糙裂隙网络模型,结合 CT 扫描获取了模型内部结构,研究了裂隙中的非线性流动,结果表明 3D 打印技术可以较好地再现单裂隙的几何形状,但在制备具有多个裂隙和交叉点的复杂模型时精度有所下降;黄娜等[36]利用 3D 打印技术制作了三维粗糙裂隙网络模型试样,最小裂隙开度为 0.8 mm,研究了不同边界条件下的非线性流动特征。

尽管 3D 打印技术能够高效制备复杂裂隙网络模型,但目前成型精度尚难以实现微米级(<0.1 mm)开度裂隙模型的直接打印,限制了其在模拟极低渗透性岩体中的直接应用。为此,Xu 等[29]建立了可变开度 3D 打印裂隙模型制备方法,模型由树脂材料(模拟岩石基质)、可溶支撑材料(生成裂隙空间)与可压缩橡胶材料(用于裂隙开度控制)构成,通过外部加载使可压缩橡胶材料挤压变形以控制开度,如图 1 所示。

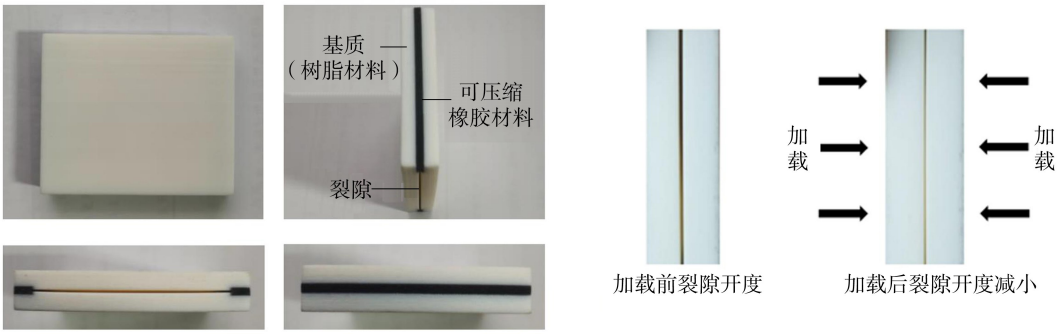


图 1　3D 打印可变开度单裂隙模型

Fig. 1　3D-printed variable aperture single fracture model

表 1 对不同人工裂隙制备方法进行了对比。机械切割法操作简单,但制备的裂隙形态较为单一;化学腐蚀法的裂隙制备过程缓慢,且难以控制裂隙形态;倒模法和巴西劈裂法虽然能够制造较为复杂的裂隙,但在裂隙形态的控制和精度方面仍存在局限。相比之下,可变开度 3D 打印裂隙模型制备方法能够精确控制复杂裂隙形态,并克服传统 3D 打印技术在微米级裂隙制备中的局限性。

表 1　人工裂隙制备方法对比

Table 1　Comparison of artificial fracture preparation methods

方法	主要裂隙类型	可重复性	成本	开度控制精度	模拟天然裂隙复杂性	说明
机械切割法	单一、规则、直线裂隙	高	低	低	低	裂隙面平滑,几何形态单一,无法模拟复杂网络
化学腐蚀法	随机溶蚀孔洞与微裂隙	低	高	不可控	适中	过程缓慢且随机,结果高度依赖于岩性和酸液
倒模法	依赖于母模的复杂裂隙	高	高	适中	高	母模制备困难,多次倒模易失真
巴西劈裂法	单一随机裂隙	低	低	适中	高	简单快捷,但裂隙形态、位置、开度均随机
3D 打印	任意复杂裂隙	高	适中	高	高	可精确控制复杂形态,开度一旦打印即固定
可变开度 3D 打印	开度动态可控的任意复杂裂隙	高	适中	非常高	高	可精确控制复杂形态,开度动态可控

密封与水力边界控制装置与可变开度 3D 打印裂隙模型的结合,能够实现模型边界条件与裂隙开度的精确调控。然而,当前 3D 打印所使用的打印材料与天然岩石在物理化学性质上存在本质差异,尽管已有部

分打印材料能够模拟岩石基质的孔隙结构及其渗透特性[37],但其通常不适用于微米级开度裂隙的高精度打印,亟须开发适用于微米级裂隙开度的可打印类岩材料,推动裂隙-孔隙结构一体化制备3D打印技术的发展与应用。

3 裂隙岩体超重力试验相似性

裂隙渗流与溶质迁移行为受裂隙几何特征显著影响,如裂隙开度、粗糙度等。在溶质长历时迁移行为研究中,超重力试验通过增大驱动力,有效缩短试验周期,从而在短时间内模拟原型尺度的长历时演化过程。然而,如何保证模型与原型中渗流与溶质迁移的相似性,是超重力试验准确性的核心问题。因此,需要开展超重力条件下裂隙渗流与溶质迁移的相似性分析。

3.1 裂隙渗流超重力效应分析

结合裂隙岩体密封与梯度水力边界控制装置与可变开度3D打印裂隙模型,Hu等[38]开展了超重力条件下单裂隙与裂隙网络渗流试验,对比了常重力($1g$)与超重力条件下的裂隙渗流试验结果,结果表明二者的流量与水力梯度关系均符合Forchheimer方程[39],说明常重力与超重力的非达西渗流特性一致,超重力场不会影响裂隙渗流试验结果。

Hu等[38]进一步验证了裂隙开度与渗流速度的相似性,并提出了裂隙渗流超重力试验的相似性判别标准。裂隙渗流特性与其自身特征有关,其中裂隙开度决定了裂隙岩体的渗透特性,从而影响渗流速度的相似性,因此裂隙开度的相似性至关重要。在超重力试验中,考虑到裂隙开度为微观尺寸,模型裂隙开度采用与原型相同的尺寸制作裂隙模型。经过超重力渗流试验验证,裂隙渗流速度的相似性取决于其所处的流动状态,可用临界雷诺数(Re_{cr})进行划分:当$Re \leqslant Re_{cr}$时,裂隙渗流处于达西流动区间,模型渗流速度为原型裂隙的N倍,验证了裂隙开度相似比为1;当$Re > Re_{cr}$时,裂隙渗流进入非达西流动区间,模型与原型裂隙渗流速度比值小于N,偏离线性相似关系。其主要原因是重力加速度较大时,流体流速较高,惯性力增大,导致裂隙渗流进入非达西流动区间,偏离了基于达西流动假设的理论模型。

通过结合甘肃北山预选区候选场址的水文地质条件[40],计算得到在$500g$条件下的雷诺数远小于1,表明在实际地质环境中,流动不会进入非达西流动区间,保证了超重力试验相似性理论的适用性。因此,该超重力试验方法可以有效用于地质屏障长期安全性的评估。

3.2 裂隙溶质迁移超重力效应分析

在裂隙超重力渗流过程相似性的基础上,Xu等[29]进一步开展了达西流动区间内裂隙岩体溶质迁移常重力与超重力对比试验,对比分析了常重力与超重力条件下的归一化出流浓度曲线,结果表明二者在出流浓度变化趋势上总体一致。表明超重力条件下3D打印裂隙模型中溶质迁移特性基本保持不变,超重力试验能够模拟裂隙岩体中的溶质迁移过程。

Xu等[29,38]的研究表明,通过正确设置裂隙几何参数与水力边界条件,超重力试验能够有效模拟裂隙渗流与溶质迁移过程,从而为地质屏障中核素长历时迁移过程提供试验依据。

尽管超重力试验为裂隙渗流与溶质迁移行为提供了重要的试验数据,但这些数据仅限于模型试验中的尺度和条件。为了更好地理解和外推实际地质环境中的渗流与迁移特性,结合数值模拟的参数反演方法显得尤为重要。通过将超重力试验与数值模拟相结合,能够反演出渗透系数、弥散系数等关键参数,这对于深入理解低渗岩体中的溶质迁移规律具有重要意义。

4 地质屏障长期安全性评估

通过3D打印裂隙模型与超重力试验平台,可以较好地揭示不同裂隙结构、流动状态和重力场条件下渗流与溶质迁移的相似性。然而,受限于试验尺度、时间压缩比以及监测手段,超重力试验在揭示全尺度裂隙网络的复杂运移规律、量化多过程耦合效应等方面仍存在局限性。通过结合数值模拟,能够拓展超重力试验的结论至更大的时空尺度。但数值模拟通常受到模型简化和参数假设的影响,在缺乏试验数据直接验证的情况下,往往存在一定的不确定性。为克服这些局限,超重力试验与数值模拟的结合成为解决这一问题的关键。超重力试验为数值模拟提供了长历时试验数据和物理验证,而数值模拟则在更大尺度上外推和补充试验结果,弥补试验中无法捕捉的复杂物理过程。同时,采用敏感性分析和参数优化等方法,可有效提高数值

模拟的精度,减少模拟与试验之间的差异,从而提供更加全面、可靠的结论。

4.1　地质屏障中核素长历时迁移模拟

在高放废物地质处置的安全性评估中,针对万年历时、千米尺度的时空演化难题,数值模拟已成为外推物理试验结论、评估地质屏障长期阻隔性能的关键手段。为在大时空尺度上进行高效评估,等效连续介质模型已被广泛采用。该模型基于升尺度理论,将复杂的裂隙-基质系统概化为具有等效水力学与反应参数的均匀介质。例如:Dai 等[41]提出了一个用于量化裂隙岩体中吸附系数尺度依赖性的升尺度模拟框架,在此基础上,Jia 等[42]进一步发展了一个集成响应面与蒙特卡罗模拟的不确定性量化框架,用于评估裂隙花岗岩中核素迁移的风险指标;凌辉等[43]模拟了中国北山高放废物处置库关闭 1 000 a 后核素迁移情况,并分析了地质屏障的阻隔性能;段先哲等[44]利用蒙特卡罗模拟方法,模拟了处置库关闭后的破损情景,并估算了 100 万 a 内的辐射水平。然而,这种基于连续介质和有效参数的模拟方法,其准确性高度依赖于升尺度过程的合理性与参数分布的可靠性,且该方法无法显式刻画由裂隙网络控制的几何拓扑结构,也难以捕捉裂隙岩体中普遍存在的优势通道流现象,在描述核素的迁移路径方面存在明显的局限性。

为了克服连续介质模型的局限,能够精确描述裂隙几何形态与连通性的离散裂隙网络模型在溶质迁移研究中得到了广泛应用。例如:Hyman 等[45]利用 dfnWorks 软件,采用粒子追踪法模拟了瑞典 Forsmark 场地千米尺度花岗岩中的流动与溶质运移;Wei 等[46]结合概率统计方法与离散裂隙网络模型对中国北高放废物处置库的安全性进行了评估,并分析了具有污染可能的区域;毛亮等[47]计算了放射性核素 Pu-240 在北山预选区中百万年时间尺度的迁移过程;Hu 等[2]以中国北山地下实验室为研究对象,分别构建了考虑导水节理带与导水断裂带的百米尺度地质屏障与千米尺度地质屏障数值模型,模拟了核素在地质屏障中的长历时迁移过程。

4.2　基于超重力试验的地质屏障长期安全性评价方法

超重力技术通过离心力场加速地质演化过程,已被证实是模拟地质屏障长期性能的有效手段。例如:Nishimoto 等[19-20]对核废料处置库近场环境开展了超重力试验,评估了原型地质处置库中约 165 a 的热-水-力耦合演化过程。为准确评价地质屏障的长期安全性能,Xu 等[29]基于 OpenGeoSys 裂隙岩体溶质迁移数值模拟方法与超重力试验,提出了基于超重力试验的地质屏障长期安全性评价方法,有效解决了实验室小尺度观测数据向现场大尺度预测外推的难题,为处置库的安全性评价及场址适宜性选择提供了关键的理论支撑与技术指南。此外,超重力技术也被应用于二氧化碳地质封存的安全性评估研究中,如 Lopez-Saavedra 等[48]构建了包含断层与盖层的复杂地质结构,在 50g 超重力条件下开展了米级尺度的二氧化碳地质封存模型试验,证实了超重力技术在揭示多相流长期演化机制及验证数值模拟可靠性方面的有效性。

5　研究展望

近年来,围绕低渗岩体渗流与溶质迁移超重力试验及数值模拟研究已取得阶段性进展,为深入理解地质屏障中核素迁移机制提供了重要支撑。然而,在地质屏障的长期安全性评估、构建可靠的预测模型等方面仍面临诸多挑战,未来亟须从以下几个方面进一步突破:

a. 裂隙岩体精细化制备技术。尽管 3D 打印技术已广泛应用于裂隙结构模型构建,但其在微米级裂隙开度控制与高精度可打印类岩材料等方面仍存在局限。一方面,目前模压成型精度尚不足以直接制备小于 0.1 mm 的微细裂隙,制约了其在模拟低渗岩体中的应用;另一方面,现有打印材料通常不适用于微米级开度裂隙的高精度打印,制约了基质-裂隙一体化迁移研究。未来需要在适用于微米级裂隙开度的可打印类岩材料开发、微米级裂隙开度控制技术方面进行持续研究,推进微细裂隙-孔隙结构的一体化打印技术发展,以制作更符合天然低渗岩体的物理模型。

b. 裂隙渗流与溶质迁移超重力试验相似性理论。当前裂隙渗流与溶质迁移超重力试验普遍采用理想光滑平行板裂隙模型,其在几何结构与流动特征上与天然粗糙裂隙存在显著差异,难以全面反映真实裂隙介质中渗流与溶质迁移行为。因此,亟须建立适用于天然粗糙裂隙结构的超重力试验相似性理论体系,并发展面向天然裂隙的超重力试验方法,以更好地模拟真实裂隙介质中的渗流和溶质迁移过程。

c. 多场耦合效应在超重力试验中的集成与应用。核废料处置过程受到热-水-力-化多场耦合效应的影响,而当前超重力试验中尚未充分考虑这些多场耦合的作用。在模拟低渗岩体的渗流与溶质迁移过程中,温

度、应力及水力场的相互作用会显著改变渗流特性并影响核素的迁移行为。未来应致力于开发具有温度和应力控制功能的超重力试验系统,以揭示热-水-力-化多场耦合在超重力试验中的综合效应。

d. 地质屏障万年历时核素迁移超重力试验。虽然超重力技术可有效压缩试验时间并模拟长历时迁移行为,但其在千米-万年尺度地质屏障核素迁移过程中的应用仍处于探索阶段,裂隙-基质溶质交换与壁面吸附等复杂过程在超重力场下的响应机制尚需深入研究。未来应聚焦于这些复杂过程在超重力场下的动态响应过程,结合超重力试验与数值模拟,逐步实现地质屏障中核素迁移的全过程模拟,为高放废物处置库的长期安全性评估提供科学依据。

参考文献:

[1] Wang Ju, Chen Liang, Su Rui, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: planning, site selection, site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.

[2] Hu Yingtao, Xu Wenjie, Zou Liangchao, et al. Evaluating the long-term barrier performance of fractured granite for nuclear waste disposal: impact of fast water-conducting path[J]. Engineering Geology, 2024, 337: 107583.

[3] Chen Yunmin, Tang Yao, Ling Daosheng, et al. Hypergravity experiments on multiphase media evolution[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(12): 2791-2808.

[4] Arulanandan K, Thompson P Y, Kutter B L, et al. Centrifuge modeling of transport processes for pollutants in soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(2): 185-205.

[5] Hensley P J, Schofield A N. Accelerated physical modelling of hazardous-waste transport[J]. Géotechnique, 1991, 41(3): 447-466.

[6] 张建红,胡黎明. 重金属离子和 LNAPLs 在非饱和土中的运移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 277-280. (Zhang Jianhong, Hu Liming. Migration behavior of heavy metal and LNAPLs in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 277-280. (in Chinese))

[7] 詹良通,曾兴,李育超,等. 高水头条件下氯离子击穿高岭土衬垫的离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 83-89. (Zhan Liangtong, Zeng Xing, Li Yuchao, et al. Centrifuge modeling for chloridion breaking through kaolin clay liner with high hydraulic head[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 83-89. (in Chinese))

[8] Zhan Liangtong, You Yuqing, Zhao Rui, et al. Centrifuge modelling of lead retardation in soil-bentonite cut-off walls[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2023, 23(4): 166-179.

[9] 鞠杨,张钦刚,杨永明,等. 岩体粗糙单裂隙流体渗流机制的实验研究[J]. 中国科学:技术科学, 2013, 43(10): 1144-1154. (Ju Yang, Zhang Qingang, Yang Yongming, et al. An experimental investigation on the mechanism of fluid flow through single rough fracture of rock[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2013, 43(10): 1144-1154. (in Chinese))

[10] Tzelepis V, Moutsopoulos N K, Papaspyros J N E, et al. Experimental investigation of flow behavior in smooth and rough artificial fractures[J]. Journal of Hydrology, 2015, 521: 108-118.

[11] Zhang Haoming, Qian Jiazhong, Liu Yong, et al. Applicability of the time fractional derivative model on Fickian and non-Fickian transport in the single fracture: an experimental investigation[J]. Geofluids, 2022, 2022(1): 4426630.

[12] 田峥颖,陈舟,马兴,等. 边界层对粗糙单裂隙溶质运移影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 106-113. (Tian Zhengying, Chen Zhou, Ma Xing, et al. Experimental study of the effect of boundary layer on the solute transport in a rough single fracture[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 106-113. (in Chinese))

[13] Culligan P J, Barry D A. Similitude requirements for modelling NAPL movement with a geotechnical centrifuge[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 1998, 131(3): 180-186.

[14] Levy L C, Culligan P J, Germaine J T. Use of the geotechnical centrifuge as a tool to model dense nonaqueous phase liquid migration in fractures[J]. Water Resources Research, 2002, 38(8): 1159.

[15] Levy L C, Culligan P J, Germaine J T. Modelling of DNAPL behavior in vertical fractures[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2003, 3(1): 1-18.

[16] Jones B R, Brouwers L B, Van Tonder W D, et al. Assessing geotechnical centrifuge modelling in addressing variably saturated flow in soil and fractured rock[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(15): 13203-13223.

[17] Jones B R, Van Rooy J L, Dippenaar M A. Lugeon tests at partial saturation: experimental and empirical contributions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(2): 351-372.

[18] Gurumoorthy C,Singh D. Centrifuge modeling of diffusion through rock mass[J]. Journal of Testing and Evaluation,2005,33(1):44-50.

[19] Nishimoto S,Sawada M,Okada T. New rapid evaluation for long-term behavior in deep geological repository by geotechnical centrifuge. Part 1:test of physical modeling in near field under isotropic stress-constraint conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49(8):3323-3341.

[20] Sawada M,Nishimoto S,Okada T. New rapid evaluation for long-term behavior in deep geological repository by geotechnical centrifuge. Part 2:numerical simulation of model tests in isothermal condition[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2017,50(1):159-169.

[21] 邬爱清,范雷,钟作武,等. 现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(11):2161-2171. (Wu Aiqing,Fan Lei,Zhong Zuowu,et al. Development of an in situ hydro-mechanical coupling true triaxial test system for fractured rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(11):2161-2171. (in Chinese))

[22] 王颂,张路青,周剑,等. 致密储层岩石超低渗测试系统研发与应用进展[J]. 工程地质学报,2024,32(4):1186-1198. (Wang Song,Zhang Luqing,Zhou Jian,et al. Development and application progress of ultra-low permeability testing system for tight reservoir rocks[J]. Journal of Engineering Geology,2024,32(4):1186-1198. (in Chinese))

[23] Li Fudong,Elsworth D,Feng Xiating,et al. Revisiting the normal stiffness-permeability relations for shale fractures under true triaxial stress[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2025,17(8):5001-5017.

[24] 王者超,易云佳,闵忠顺,等. 真三向应力作用下深部储层砂岩渗透率各向异性实验研究[J]. 力学学报,2023,55(7):1493-1504. (Wang Zhechao,Yi Yunjia,Min Zhongshun,et al. Experimental study on permeability anisotropy of deep reservoir sandstone under true triaxial stress[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2023,55(7):1493-1504. (in Chinese))

[25] 张波,李垚,杨学英,等. 一种用于水压致裂试验的水压供给装置研制及应用[J]. 岩土力学,2019,40(5):2022-2028. (Zhang Bo,Li Yao,Yang Xueying,et al. Design and application of a hydraulic pressure supply device for hydraulic fracturing experiments[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(5):2022-2028. (in Chinese))

[26] Zhang Hongwei,Chen Zhaoying,Zhou Chuanhong,et al. Mechanical sealing method for laboratory-scale hydraulic fracturing tests of granite rocks under high-temperature and high-pressure conditions[J]. Applied Sciences,2024,14(22):10255.

[27] 许江,刘义鑫,尹光志,等. 煤岩剪切-渗流耦合试验装置研制[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊 1):2987-2995. (Xu Jiang,Liu Yixin,Yin Guangzhi,et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(S1):2987-2995. (in Chinese))

[28] Liao Zhen,Detwiler R L,Cookson E S,et al. Quantitative visualization of two-phase flow in a fractured porous medium[J]. Water Resources Research,2024,60(4):e2023WR035806.

[29] Xu Wenjie,Hu Yingtao,Chen Yunmin,et al. Hyper-gravity experiment of solute transport in fractured rock and evaluation method for long-term barrier performance[J]. Rock Mechanics Bulletin,2023,2(3):100042.

[30] 江权,宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):23-37. (Jiang Quan,Song Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(1):23-37. (in Chinese))

[31] 余宸,田威,王杰,等. 砂型 3D 打印材料在岩体物理模型试验中的应用研究及展望[J]. 材料导报,2024,38(12):73-81. (Yu Chen,Tian Wei,Wang Jie,et al. Application research and prospect of sand-type 3D printing material in rock physical model test[J]. Materials Reports,2024,38(12): 73-81. (in Chinese))

[32] 赵恺,王环玲,徐卫亚,等. 贯通充填裂隙类岩石渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(6):1130-1136. (Zhao Kai,Wang Huanling,Xu Weiya,et al. Experimental study on seepage characteristics of rock-like materials with consecutive and filling fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(6):1130-1136. (in Chinese))

[33] Suzuki A,Minto J M,Watanabe N,et al. Contributions of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models[J]. Transport in Porous Media,2019,129(2):485-500.

[34] 崔澈,邹旭,李正,等. 分形岩石裂隙中渗流扩散运动的试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(11):3553-3562. (Cui Wei,Zou Xu,Li Zheng,et al. Experimental study on seepage diffusion movement in fractal rock fractures[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(11):3553-3562. (in Chinese))

[35] Li Bo,Wang Jiafei,Liu Richeng,et al. Nonlinear fluid flow through three-dimensional rough fracture networks:insights from 3D-printing,CT-scanning,and high-resolution numerical simulations[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,

2021,13(5):1020-1032.
[36] 黄娜,蒋宇静,程远方,等. 基于3D打印技术的复杂三维粗糙裂隙网络渗流特性试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学,2021,42(6):1659-1668. (Huang Na, Jiang Yujing, Cheng Yuanfang, et al. Experimental and numerical study of hydraulic properties of three-dimensional rough fracture networks based on 3D printing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6):1659-1668. (in Chinese))
[37] 储昭飞,吴志军,刘泉声,等. 基于核磁共振技术的石膏粉末型3D打印试样水理特性及裂隙渗流特性初探[J]. 中国科学:技术科学,2023,53(11):1871-1884. (Chu Zhaofei, Wu Zhijun, Liu Quansheng, et al. Preliminary investigation on the hydrophysical properties and fracture seepage characteristics of 3D-printed gypsum specimens based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(11):1871-1884. (in Chinese))
[38] Hu Yingtao, Xu Wenjie, Chen Yunmin, et al. Experimental study on the influence of hypergravity on the nonlinear flow behaviour in rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(2):961-978.
[39] Zimmerman R W, Al-Yaarubi A H, Pain C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3):384.
[40] 罗辉,陈伟明,周志超,等. 高放废物地质处置预选地段调查与适宜性研究[J]. 物探与化探,2023,47(6):1479-1489. (Luo Hui, Chen Weiming, Zhou Zhichao, et al. Investigation and suitability study of pre-selected sites for geological disposal of high level radioactive waste[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6):1479-1489. (in Chinese))
[41] Dai Zhenxue, Wolfsberg A, Lu Zhiming, et al. Scale dependence of sorption coefficients for contaminant transport in saturated fractured rock[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(1):L01403.
[42] Jia Sida, Dai Zhenxue, Yang Zhijie, et al. Uncertainty quantification of radionuclide migration in fractured granite[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 366:132944.
[43] 凌辉,王驹,陈伟明. 高放废物地质处置算井子候选场址核素迁移模拟研究[J]. 铀矿地质,2018,34(2):118-123. (Ling Hui, Wang Ju, Chen Weiming. Preliminary evaluation of radioactive effect of candidate sites in Suanjingzi sub-area for geological disposal of high-level radioactive waste[J]. Uranium Geology, 2018, 34(2):118-123. (in Chinese))
[44] 段先哲,牛苏娟,王灿州,等. 高放废物地质处置的安全评价模拟研究:以甘肃北山为例[J]. 中国矿业,2021,30(4):56-63. (Duan Xianzhe, Niu Sujuan, Wang Canzhou, et al. Safety evaluation study on the geological disposal of high-level radioactive waste: a case study of Beishan, Gansu province[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(4):56-63. (in Chinese))
[45] Hyman J D, Painter S L, Viswanathan H, et al. Influence of injection mode on transport properties in kilometer-scale three-dimensional discrete fracture networks[J]. Water Resources Research, 2015, 51(9):7289-7308.
[46] Wei Yaqiang, Dong Yanhui, Yeh T C J, et al. Assessment of uncertainty in discrete fracture network modeling using probabilistic distribution method[J]. Water Science and Technology, 2017, 76(10):2802-2815.
[47] 毛亮,李洪辉,王厉秦都,等. Pu-240在高放废物地质处置库备选岩体离散裂隙网络中的迁移模拟[C]//《环境工程》2018年全国学术年会论文集:中册. 北京:《环境工程》编委会,2018:183-188.
[48] Lopez-Saavedra S, Bajestani M S, Pantov D, et al. Hypergravity experiments on meter-scale porous media flow for geological carbon sequestration[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1):45712.

(收稿日期:2025-07-29 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.010

基于变形与碳排放协调的模块式加筋土挡墙优化设计

张 飞[1,2],朱玉明[1,2,3],孙逸飞[4],费建波[5],高玉峰[1,2]

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 2. 河海大学土木与交通学院;
3. 上海申通地铁建设集团有限公司; 4. 太原理工大学土木工程学院; 5. 深圳大学土木与交通工程学院)

摘要:为解决土压力理论设计模块式加筋土挡墙较为保守,无法同时兼顾侧向变形与碳排放这两个重要指标的问题,将考虑了模块、筋材与填土复杂相互作用的加筋土挡墙侧向变形解析方法与全生命周期评价方法相结合,借助多目标优化技术,提出了可协调侧向变形与碳排放量的模块式加筋土挡墙优化设计方法。实际工程案例验证结果表明:该优化设计方法可实现快速计算,便于实际应用;优化加筋长度和间距可以在碳排放量相同的情况下减小挡墙的侧向变形量;最优的筋材铺设长度随墙高增加而增大,当墙高低于 5 m 时,建议筋材长度取 0.6 倍墙高,反之建议筋材长度取 0.7 倍墙高。

关键词:土工合成材料;加筋土;挡墙;变形;碳排放;优化设计

Optimization design of geosynthetic-reinforced soil segmental walls considering deformation and carbon emission coordination

Zhang Fei[1,2], **Zhu Yuming**[1,2,3], **Sun Yifei**[4], **Fei Jianbo**[5], **Gao Yufeng**[1,2]

(1. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University*;
2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University*;
3. *Shanghai Shentong Metro Construction Group Co., Ltd.*;
4. *College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology*;
5. *College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University*)

Abstract: To address the limitations of earth pressure theory-based design for geosynthetic-reinforced soil (GRS) segmental walls, which is often relatively conservative and unable to simultaneously optimize lateral deformation and carbon emissions, an analytical method for predicting lateral deformation of GRS segmental walls with a life cycle assessment (LCA) framework was proposed. The analytical method considered the complex interactions among facing blocks, geosynthetic reinforcements, and backfill soil. By using multi-objective optimization techniques, an optimized design methodology for GRS segmental walls was developed to achieve a balanced trade-off between lateral deformation and carbon emissions. Validation using practical engineering case demonstrates that the optimized design methodology enables rapid calculation and is suitable for practical application. Lateral deformation can be reduced while maintaining equivalent carbon emissions by optimizing reinforcement length and spacing. The optimal reinforcement length increases with wall height: For walls lower than 5 m, a reinforcement length equal to 0.6 times the wall height is recommended, whereas for taller walls, a length of 0.7 times the wall height is advised.

Key words: geosynthetics; reinforced soil; retaining wall; deformation; carbon emission; optimal design

加筋土挡墙广泛应用于公路、铁路、机场和港口等关键基础设施中,其中模块式加筋土挡墙尤为受到工程师们的青睐[1]。加筋土技术发展初期各国主流规范大都采用基于土压力理论的设计方法,该方法忽略了面板的作用,保守地预测筋材加筋力从而造成设计安全冗余[2]。目前加筋土挡墙设计理念逐渐由“安全设计”向“性能设计”转变,工作状态的筋材加筋力和侧向变形成为重要的设计指标。Allen 等[2-3]给出了工作状态筋材加筋力预测方法,相较于传统规范设计方法[4]可以显著减小设计安全冗余;Christopher[5]将原型挡墙监测数据与数值分析结果相结合,得到 L/H(L 为筋材长度,H 为墙高)与墙面变形系数 δ_R 的关系,并进一步通过考虑筋材刚度影响实现了对最大墙面侧向变形的经验评估;Jewell 等[6]通过建立应力场和速度场之间的平衡关系,从而获得加筋土挡墙侧向变形的解析方法;Wu 等[7]在此基础上进一步考虑了模块式面板的

基金项目:国家自然科学基金项目(52322808,42577567,W2512032)

作者简介:张飞(1985—),男,教授,博士,主要从事边坡工程研究。E-mail:feizhang@hhu.edu.cn

通信作者:高玉峰(1966—),男,教授,博士,主要从事岩土地震工程研究。E-mail:yfgao66@163.com

影响;Zhang 等[8]提出了考虑模块式面板、筋材和填土之间复杂相互作用的加筋土挡墙侧向变形分析方法,实现了对模块式加筋土挡墙变形性能的准确预测。相较于筋材加筋力,墙面侧向变形在实际工程中能被更简单直接地观察和测量,因此基于墙面侧向变形的设计方法更符合性能设计的发展目标。

温室气体排放导致的全球变暖问题已经严重威胁人类安全,建设领域作为全球温室气体排放的主要"贡献者"[9],加速行业转型已迫在眉睫。如何在确保结构性能的情况下实现加筋土挡墙的低碳化设计具有极为重要的意义,其中合理的量化建设活动产生的碳排放量是推动行业低碳化转型的关键一步。全生命周期评价方法是量化碳排放的常用方法,随着行业转型的深入,岩土工程中的碳排放问题越来越受到研究人员的关注[10-13]。可回收钢材可显著降低工程建设对环境的影响,而隐含能源(embodied energy, EE)可用作评价支挡结构对环境影响的指标。为了确定对环境影响最大的因素,Zastrow 等[14]利用全生命周期评价方法对 30 个挡墙设计方法进行参数研究,发现随着墙高的增加,环境影响呈指数型增加;Pons 等[15]利用全生命周期评价方法比较了墙高低于 6 m 的不同类型挡墙,用以辅助设计人员根据墙高选择最佳挡墙类型;Rafalko 等[16]利用全生命周期评价方法分析了加筋土挡墙对环境的影响;Phillips 等[17]在 SEEAM 模型[18]的基础上考虑了经济要素的影响;Damians 等[19]利用全生命周期评价方法分析墙高变化对环境的影响,将其与传统重力式挡墙和悬臂式挡墙进行比较,从可持续发展的角度全面分析了加筋土挡墙的优势。当前针对加筋土挡墙低碳优化设计方面的研究仅仅是在传统规范设计基础上进行优化,一方面优化方案并不能有效减小传统设计存在的安全冗余,另一方面忽视了面板对加筋土挡墙稳定的贡献。结合挡墙侧向变形和全生命周期碳排放的优化设计才能真正实现可持续发展目标,突破传统设计方法中环境效益与结构性能难以兼顾的局限性。

本文将考虑模块、筋材、填土之间复杂相互作用的模块式加筋土挡墙侧向变形预测方法与全生命周期评价方法相结合,提出模块式加筋土挡墙低碳目标优化设计方法,并通过某实际模块式加筋土挡墙设计优化对该方法进行验证。

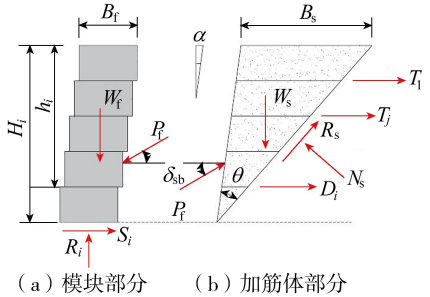
1 研究方法

1.1 模块式加筋土挡墙侧向变形分析方法

当前已有的侧向变形分析方法可分为经验方法、解析方法和数值方法 3 类。经验方法适用性及准确性较差;数值方法虽然可以实现较为准确的预测,但其复杂的建模过程和本构模型选择使得该方法难以大量推广;解析方法具有机理清晰、计算高效等优势,但需要引入合理的假设[20]。因此,本文采用解析方法,并做如下假设[8]:①加筋区填土采用无黏性土;②潜在滑动面为直线模式;③模块与加筋体之间的相互作用采用库仑土压力理论计算;④忽略加筋土挡墙水平滑移和填土压实对侧向变形的影响;⑤假设加筋土挡墙坐落在刚性地基上;⑥模块式加筋土挡墙工作状态下满足运动协调假设。

1.1.1 受力分析与平衡方程

针对某个潜在的滑动面开展受力分析,如图 1 所示(B_f 为模块面板宽度;h_i 为第 i 层筋材到墙顶的距离;H_i 为楔形体高度)。由于考虑了模块与加筋体之间的相互作用,因而需要单独隔离加筋体进行受力分析。模块部分受力包括:模块自重 W_f,作用在滑出点位置处模块上的竖向力 R_i,模块受到的土压力为 P_f,其中模块自重和土压力的竖向分量可由竖向力 R_i 平衡,土压力的水平分量则可由模块-筋材连接力平衡,土压力大小采用库仑土压力理论计算[21]。考虑到模块面板与填土相互作用的实际情况[22],受力分析过程中对土压力作用方向进行了调整,即土压力 P_f 与水平方向的夹角为模块-填土界面摩擦角 δ_{sb}。加筋体部分的受力包括:加筋体自重 W_s,模块所受墙后土压力的反作用力 P_f,沿潜在滑动面的剪力 R_s,垂直潜在滑动面的正应力 N_s,当前计算的工作状态加筋力 D_i,已计算出的稳定所需加筋力 $T_j(j=1,2,\cdots,i-1)$ 以及第 $i+1$ 个模块与筋材相互作用产生的剪力 S_i。需要注意的是,工作状态加筋力 D_i 与模块-筋材相互作用产生的剪力 S_i 之和等于第 i 层筋材稳定所需加筋力 T_i,各层筋材稳定所需加筋力 T_i 之和等于楔形体稳定所需加筋合力 T_g。沿水平方向和竖直方向建立力的平衡方程:



(a)模块部分 (b)加筋体部分

图 1 模块式加筋土挡墙力学分析模型

Fig. 1 Mechanical analysis model of a GRS segmental wall

$$R_c T_g + P_f \cos\delta_{sb} + R_s \sin(\alpha + \theta) = N_s \cos(\alpha + \theta) \tag{1}$$

$$R_s \cos(\alpha + \theta) + P_f \sin\delta_{sb} + N_s \sin(\alpha + \theta) = W_s \tag{2}$$

式中:R_c 为筋材覆盖率,采用土工格栅等需要连续性铺设的材料时,$R_c = 100\%$;α 为墙面与竖直方向的夹角,即墙面倾角,考虑到直线滑动模式假设适用于墙面接近直立的加筋土挡墙,因此 α 取值小于 20°;θ 为潜在滑动面与墙面之间的夹角。

结合莫尔-库仑强度准则可以获得工作状态加筋力 D_i 的表达式:

$$D_i = \frac{(W_s - P_f \sin\delta_{sb})[\cos(\alpha + \theta) - \tan\varphi \sin(\alpha + \theta)]}{R_c[\sin(\alpha + \theta) + \tan\varphi \cos(\alpha + \theta)]} - \frac{P_f \cos\delta_{sb}}{R_c} - \sum_{j=1}^{i-1} T_j - \zeta_i T_i \tag{3}$$

式中:ζ_i 为模块与第 i 层筋材之间的相互作用系数,取值范围为 $-1 \sim 1$;φ 为折减后的填土内摩擦角,$\tan\varphi = (\tan\varphi_{ps}/R_{FS})$,其中 φ_{ps} 为填土的峰值内摩擦角,R_{FS} 为反映工作状态填土强度的折减系数,根据 Zhang 等[8] 提供的预测方法进行确定。

1.1.2　筋材前后端拔出阻力

工作状态下筋材拔出阻力呈现非线性特点,Morsy 等[23] 通过一系列创新性的大型拔出试验,细致地调查了不同筋材与填土之间的相互作用,得到了大量数据,并基于试验数据,提出了整合多个影响筋材拔出特性因素的经验公式[24]:

$$T_{po(e)_i} = \left(\frac{J}{R_{Fp} R_c}\right)\left[\frac{\left(u_{g_i}(0) + b - \sqrt{u_{g_i}^2(0) + b^2}\right)\left(\frac{c}{1\,000L}\right)}{e^{cx/L}}\right] \tag{4}$$

其中

$$b = 3\,000\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{2.5}\left(\frac{J}{C_i S_r P_a}\right)^{-0.55} \qquad c = 8.5\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{0.33}\left(\frac{J}{C_i S_r P_a}\right)^{-0.18}$$

式中:$T_{po(e)_i}$ 为第 i 层筋材后端抗拔阻力;x 为筋材上某点到墙面距离;J 为筋材刚度;R_{Fp} 为筋材抗拔折减系数,取值为 1.5;$u_{g_i}(0)$ 为第 i 层筋材在其端部发生的变形;b、c 为经验参数;σ'_v 为有效上覆荷载;P_a 为标准大气压,取值为 101.4 kPa;C_i 为第 i 层筋土界面系数,等于 $\tan\delta_{sg}/\tan\varphi$;$\delta_{sg}$ 为筋材与填土之间的摩擦角;S_r 为加筋间距参考值,取值为 1 m。上述参数大都可以通过试验或查阅文献直接获得,而 $u_{g_i}(0)$ 则需要预先进行假设,其取值上限可保守地设置为墙高的 5%。工作状态加筋力分布需要进行修正才能获得最终的结果,如图 2 所示。

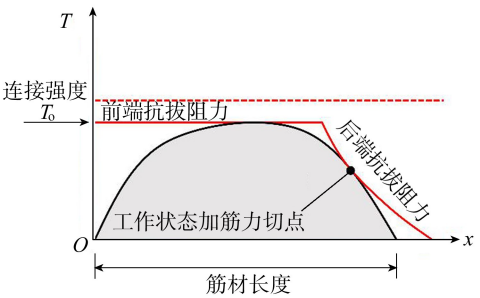


图 2　加筋力分布与前后端抗拔阻力

Fig. 2　Relationship between reinforcement force distribution and front/rear pullout capacity

1.1.3　运动协调假设

TOPDOWN 过程是一种由上至下逐层计算加筋力的方法[25],在原始 TOPDOWN 方法基础上引入运动协调假定,实现对上下层筋材间相互影响的耦合。Klar 等[26] 最早提出运动协调假定,认为模块式加筋土挡墙在工作状态下筋材不会与模块发生脱离,意味着每层筋材端部位置的筋材-填土相对变形始终等于对应位置的模块间变形。筋土相对变形可采用 Morsy 等[24] 提出的经验公式计算。对于接近于直立的模块式加筋土挡墙,模块-模块界面的变形为:

$$d_{f_i} = \sum_{k=i}^{n} \frac{S_k}{K_S} + \sum_{k=i}^{n} \frac{M_k}{K_M}(k - i + 1) S_v \tag{5}$$

式中:d_{f_i} 为第 i 层筋材位置处模块-模块界面变形,该变形由模块间的平动和转动两部分组成;K_S、K_M 分别为模块-模块界面的平动刚度和转动刚度;S_k、M_k 分别为第 k 层筋材与模块相互作用产生的剪力和弯矩;S_v 为加筋间距;n 为筋材层数。

1.2　模块式加筋土挡墙全生命周期碳排放计算方法

全生命周期评价涉及多种可用的方法,包括过程分析法、投入产出法、混合分析法。加筋土挡墙作为一种工程产品,实现精细化的碳排放评估必须考虑所有可能的工序,因此本文采用过程分析法构建模块式加筋土挡墙的全生命周期碳排放核算模型。

1.2.1 研究目标与范围

在确定适合的研究方法之后,需要选择合理的研究目标和研究范围。合理选择研究目标的原因:①全生命周期环境评价涉及产品从原材料获取到废弃物处理的全过程,其复杂性和数据量非常大,选择合适的研究目标可以明确评价的方向和范围,避免在评价过程中迷失方向或偏离主题;②选择合适的研究目标可以确保评价过程中数据采集和分析的准确性和完整性,从而得出更加可靠的评价结果;③明确的研究目标有助于在评价结果之间进行比较和分析,为后续的决策和改进提供依据。模块式加筋土挡墙多用于道路或者铁路工程中,属于线性结构,其建设材料的消耗量随着其长度的增加而增加。因此,本文的功能单位为满足最终建造高度的每延米模块式加筋土挡墙,后文中所有碳排放量均以该功能单位为基础。

完整的全生命周期评价涉及的阶段包括:原材料获取、建材加工制造、交通运输、建设施工、运营维护以及拆除、回收、再利用。原材料获取与加工阶段隐含碳排放量在全生命周期中占据主导地位[10],其次是交通运输和建设施工,结合岩土工程的特殊性[10],本文在进行碳排放计算时仅考虑原材料获取、建材加工制造、交通运输和建设施工4个阶段的排放,合理忽略了运营维护和回收再利用阶段[10]。

1.2.2 全生命周期清单分析

全生命周期清单分析包括搜集与工艺过程相关的能源和材料输入参数,主要作用是估算制造产品所消耗的资源量以及量化产品生产对环境的直接影响。结合本文研究对象,搜集的数据必须能满足计算单位宽度模块式加筋土挡墙在其全生命周期内碳排放量的要求。隐含碳因子指单位产品从原材料获取、生产加工到运输流通等全生命周期过程中直接或间接排放的二氧化碳总量,相关研究[10-11]表明采用该指标会获得更加可靠的评价结果,因此本文采用文献[27]的隐含碳因子数据(表1)进行计算。

表1 隐含碳因子数据

Table 1 Embodied carbon emission factor data

材料名	隐含碳因子/($kgCO_2e/t$)
混凝土	135
水泥砂浆	735
钢材	2 137.13
回填土	2.60
碎石	2.18
土工格栅	3 050

注:$kgCO_2e$ 代表千克二氧化碳当量。

1.2.3 全生命周期碳排放量化

原材料获取与生产加工阶段包含材料从获取到生产制造过程中产生的隐含碳。本文的分析对象为模块式加筋土挡墙,该结构建设过程中可能涉及以下建筑材料的使用:混凝土、水泥砂浆、钢材、回填土、碎石、土工格栅等。每种材料的隐含碳排放按总用量乘以各自指标对应的因子数值进行计算。

交通运输过程中隐含碳的排放主要来源于建设材料和机械设备往返施工现场的环节,需要考虑运输距离和不同运输载具的能源消耗情况,为保守起见,所有运载工具现场往返各一趟被认为是一次有效运输。一般来说,生产一个产品的设备磨损损耗非常低,计算过程中可以忽略不计。因此,建设施工过程中的隐含碳排放来自现场运行的机械设备,其评估方法为消耗的燃料量或电量与其对应因子的乘积。交通运输与建设阶段的隐含碳排放计算公式可参考 Zhu 等[10]的研究。

1.3 模块式加筋土挡墙低碳目标优化设计方法

帕累托前沿代表了在多目标空间中最优的权衡选择解,具体表示:帕累托前沿上的解具有非支配性、权衡取舍、最优性,即这些解是在多个目标函数下不被其他解支配的、达到最佳平衡的最优解。图3展示了可行决策空间和可行目标空间之间的映射关系,清晰地反映了设计变量如何映射到目标变量,从而获得帕累托最优解。基于 MATLAB 平台使用 NSGA-Ⅱ 算法[28-29]实现对帕累托前沿的搜索。

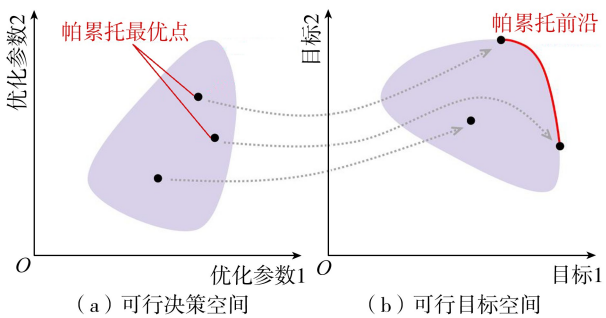


图3 目标优化中帕累托前沿示意图

Fig. 3 Illustration of a Pareto frontier in objective optimization

帕累托前沿上的膝点是多目标优化问题中一个尤为关键的解,它位于帕累托前沿面的突出部分,直观上表现为最"凹"的点。在膝点的邻域附近,任何一维目标值的微小变化都会导致其他维目标的大幅波动,这反映了膝点在一定程度上优于帕累托前沿面上的其他解。

多目标优化步骤如下:①初始化阶段,包括输入模

块式加筋土挡墙相关设计参数,设定种群规模、遗传代数、交叉和变异概率等参数,并随机生成初始种群;②对初始种群中的每个个体进行评估,计算其目标函数值,并进入核心的非支配排序阶段,通过比较个体间的优劣关系,将种群划分为不同的非支配层级;③计算每个个体的拥挤度距离,以维持种群的多样性,基于非支配等级和拥挤度信息,执行选择操作,挑选出用于遗传操作的父代个体,通过交叉和变异操作生成新的子代种群,然后新生成的子代种群与父代种群合并,形成临时种群,并再次进行非支配排序和拥挤度计算;④根据排序结果和拥挤度信息,从临时种群中挑选出最优个体,组成下一代种群,检查是否满足终止条件,若达到预设的遗传代数,则输出帕累托最优解集和膝点解,否则算法继续迭代,重复上述②~④流程,直至满足终止条件。

2　案例验证

2.1　设计案例及参数确定

Salem 等[30]基于 AASHTO 指南[4]设计并建造了高度 $H=4.4$ m 的模块式加筋土挡墙。该挡墙面板采用尺寸为 0.2 m × 0.2 m× 0.4 m 的混凝土砌块,砌块与砌块之间设置有剪切键提高模块抗剪能力;筋材采用坦萨公司 HDPE 单向土工格栅,平均刚度 $J=238$ kN/m;填筑材料采用砂土,土体容重 $\gamma=19$ kN/m^3,峰值内摩擦角 $\varphi_{ps}=47°$;模块与填土、筋材与填土之间的相互作用系数取值为 0.45;筋材共铺设 7 层;墙面倾角 $\alpha=0°$。

模块式加筋土挡墙侧向变形会随着筋材蠕变不断发生变化,因此单一的筋材值无法满足设计需求。通过对比发现,Salem 等[30]采用的 HDPE 单向土工格栅荷载-应变曲线与 Bathurst 等[31]测试的 HDPE 筋材特性相近,因此采用 Bathurst 等[31-32]提供的数据和筋材蠕变模型进行后续的优化设计。模块式加筋土挡墙的侧向变形采用拟合的经验公式,想要获得侧向变形结果还需要确定工作状态下填土内摩擦角 φ_{ws},采用 Zhang 等[8]提出的经验公式计算。

2.2　低碳目标优化设计

确定筋材长度 L 和加筋间距 S_v 是模块式加筋土挡墙设计需要考虑的关键因素,因而在多目标优化设计中将其作为待优化参数。L 视为连续变化的参数,其取值范围为 $0.5H \sim 1.1H$;S_v 视为离散变化参数,考虑待优化案例的模块高度为 0.2 m,而 S_v 超过 0.8 m 可能会导致面板局部失稳[33],因而其取值分别设为 0.2、0.4、0.6、0.8 m。开展多目标优化计算中其他关键参数取值如下:种群数取为 200,最大迭代次数取为 100,交叉概率取为 0.9,变异概率取为 0.5。基于侧向变形和碳排放联合的模块式加筋土挡墙的优化问题如下。

找到:设计参数 $d=\{L,\ S_v\}$

约束:$0.5H \leqslant L \leqslant 1.1H$

$S_v=\{0.2\text{ m},\ 0.4\text{ m},\ 0.6\text{ m},\ 0.8\text{ m}\}$

累计侧向变形最大值 $d_{a,max} \leqslant 3.5\%H$

目标:最小化累计侧向变形最大值

最小化隐含碳排放

$d_{a,max}$ 的约束条件采用 Bathurst 等[34]通过对比实测数据与多本规范建议值后给出的推荐指标。图 4 给出了膝点解对应隐含碳随优化代数的变化曲线。由图 4 可知,当优化代数在 100 左右时,膝点解达到稳定状态,此时可认为结果收敛。图 5 给出了基于 NSGA-Ⅱ算法直接搜索到的 108 个点所形成的帕累托前沿、膝点和不同帕累托最优解对应的鲁棒性(对优化参数进行随机扰动,以其目标函数标准差之和作为鲁棒性评价指标)。由图 5 可知,帕累托最优解主要出现在侧向变形较小的情况下,随着侧向变形不断增加,帕累托最优解的数量会逐渐减少且对应数据的鲁

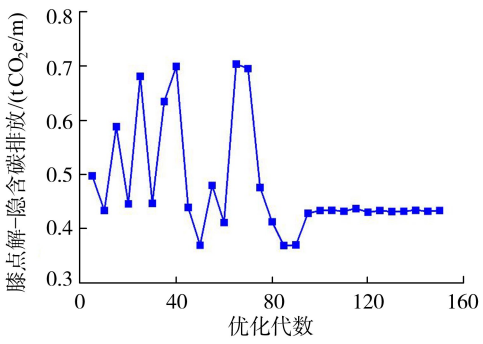


图 4　膝点解对应隐含碳随优化代数的变化曲线

Fig. 4　Variation curve of embodied carbon corresponding to knee point solution over optimization generations

棒性也逐渐变差。在获得帕累托前沿之后,工程技术人员可以根据实际经验或者特定的设计目标选择最佳的设计方案。

表2中优化方案1代表变形最小的非支配设计,但其对应的L最大、S_v最小,说明该方案适用于对变形要求较高的工程场景;优化方案2代表隐含碳排放最小的设计,能够在满足最大变形约束的前提下实现对环境影响的最小化;优化方案3代表了膝点结果,体现了2个互相冲突目标之间的最佳权衡。对比优化方案3和Salem等[30]原型墙设计方案可以发现,在隐含碳排放没有增加的情况下,适当地减小S_v可以实现墙面侧向变形的进一步减小,由此说明优化方案3代表的折中设计方案相比规范设计更为合理。

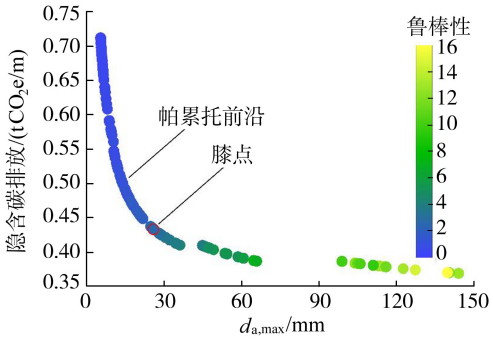


图5 优化案例帕累托前沿

Fig. 5 Pareto frontier for optimized case

表2 多目标优化设计方案

Table 2 Multi-objective optimization design options

设计方案	方案描述	设计参数		优化目标	
		L/m	S_v/m	$d_{a,max}$/mm	隐含碳排放/(tCO_2e/m)
文献[30]方案	基于AASHTO设计	3.2	0.6	30.0	0.43
优化方案1	帕累托前沿上变形最小的设计	4.8	0.2	5.3	0.71
优化方案2	帕累托前沿上隐含碳排放最小的设计	2.2	0.8	144.1	0.37
优化方案3	帕累托前沿上最折中的设计	2.7	0.4	25.9	0.43

挡墙高度的变化会导致模块式加筋土挡墙设计方案发生变化,一般挡墙高度降低会导致挡墙稳定性增加,而规范[4]一般没有考虑墙高变化的影响,而是建议筋材长度设置为墙高的0.7倍。为了研究挡墙高度的影响,分别选择3.4、4.4、5.4 m高度进行比较分析,其余设计参数不变。由图6和表3可知,随着挡墙高度的增加,最大侧向变形和隐含碳排放均增加,符合实际情况。帕累托最优解多出现在侧向变形较小的情况下,随着侧向变形的增大,帕累托最优解数量不断减少,其对应的鲁棒性也不断降低。此外,挡墙高度越低,其帕累托最优解鲁棒性越好,说明模块式加筋土挡墙的累计侧向变形最大值易受到挡墙高度的影响,且高度越高,累计侧向变形最大值对筋材长度的变化越敏感。筋材设计长度会随着挡墙高度的变化而变化,假定0.7倍墙高进行设计可能会产生保守的结果,从而造成不必要的环境负担。因此,对于高度小于5 m的模块式加筋土挡墙,建议筋材长度按照0.6H设置;对于高度大于5 m的模块式加筋土挡墙,建议筋材长度按照0.7H设置。

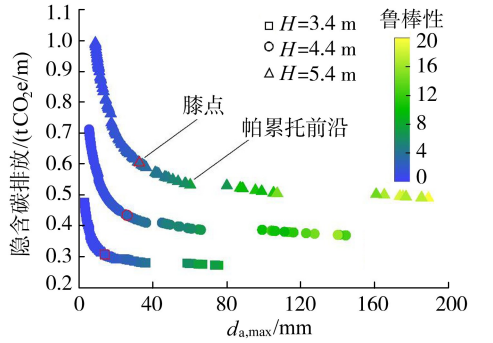


图6 挡墙高度对帕累托前沿影响

Fig. 6 Effect of wall height on Pareto frontier

表3 不同高度对应最优设计方案

Table 3 Optimal design options for different wall heights

H/m	L/m	S_v/m	$d_{a,max}$/mm	隐含碳排放/($t\ CO_2e$/m)
3.4	2.1 (≈0.6H)	0.4	13.9	0.31
4.4	2.7 (≈0.6H)	0.4	25.9	0.43
5.4	3.9 (≈0.7H)	0.4	32.3	0.61

3 结 语

可协调侧向变形与碳排放量的模块式加筋土挡墙优化设计方法可实现快速计算,便于实际应用。从设计角度考虑,筋材长度和加筋间距是重要的优化变量,选择合适的数值可以在碳排放总量不变的前提下实现结构性能的提升。挡墙高度对模块式加筋土挡墙的结构性能和环境效益均有较大影响,最优的筋材铺设长度应考虑墙高的因素,对于墙高小于5 m的挡墙,筋材长度宜取0.6H,而对于墙高大于5 m的挡墙,筋材长度宜取0.7H。

参考文献:

[1] 赵云斐,杨广庆,周诗广,等. 高速铁路土工格栅加筋土挡墙服役期力学行为研究[J]. 铁道学报,2020,42(6):129-138. (Zhao Yunfei,Yang Guangqing,Zhou Shiguang,et al. Research on mechanical behaviour of high-speed railway geogrid reinforced soil retaining wall during service period[J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(6):129-138. (in Chinese))

[2] Allen T M,Bathurst R J. Improved simplified method for prediction of loads in reinforced soil walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2015,141(11):04015049.

[3] 刘华北,王春海,汪磊. 土工合成材料加筋土挡墙运行期筋材拉力塑性力学分析方法[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(7):1083-1095. (Liu Huabei,Wang Chunhai,Wang Lei. Analyzing operational reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil retaining walls based on plasticity theory[J]. Scientia Sinica (Technologica),2022,52(7):1083-1095. (in Chinese))

[4] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Officials,2012.

[5] Christopher B R. Deformation response and wall stiffness in relation to reinforced soil wall design[D]. West Lafayette:Purdue University,1993.

[6] Jewell R A,Milligan G W E. Deformation calculations for reinforced soil walls[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio De Janeiro:ISSMGE,1989:1257-1262.

[7] Wu J T H,Pham T Q. An analytical model for calculating lateral movement of a geosynthetic-reinforced soil (GRS) wall with modular block facing[J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2010,4(4):527-535.

[8] Zhang Fei,Zhu Yuming,Yang Shangchuan,et al. Prediction method for lateral displacements of geosynthetic-reinforced soil walls with segmental block facings[J]. Geotextiles and Geomembranes,2025,53(1):378-393.

[9] 肖建庄,夏冰,肖绪文,等. 建筑结构隐含碳排放限值预设方法研究[J]. 中国工程科学,2023,25(2):187-197. (Xiao Jianzhuang,Xia Bing,Xiao Xuwen,et al. Presetting method for embodied carbon emission limit of building structures[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(2):187-197. (in Chinese))

[10] Zhu Yuming,Zhang Fei,Jia Shilin. Embodied energy and carbon emissions analysis of geosynthetic reinforced soil structures[J]. Journal of Cleaner Production,2022,370:133510.

[11] Abushama K,Hawkins W,Pelecanos L,et al. Embodied carbon optimisation of concrete pile foundations and comparison of the performance of different pile geometries[J]. Engineering Structures,2024,310:118109.

[12] 靳春玲,苏旸,贡力,等. 碳排放约束下的水工隧洞施工机群配置优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):84-90. (Jin Chunling,Su Yang,Gong Li,et al. Configuration optimization of construction machine group for hydraulic tunnel under carbon emission constraint[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):84-90. (in Chinese))

[13] Inui T,Chau C,Soga K,et al. Embodied energy and gas emissions of retaining wall structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2011,137(10):958-967.

[14] Zastrow P,Molina-Moreno F,García-Segura T,et al. Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls:a parametric study[J]. Journal of Cleaner Production,2017,140:1037-1048.

[15] Pons J J,Penadés-Plà V,Yepes V,et al. Life cycle assessment of earth-retaining walls:an environmental comparison[J]. Journal of Cleaner Production,2018,192:411-420.

[16] Rafalko S D,Sankey J E,Freitag N. Sustainability measures for MSE walls and baseline environmental impact evaluations[C]//Proceedings of the Earth Retention Conference 3. Washington:ASCE,2010:486-493.

[17] Phillips E K,Shillaber C M,Mitchell J K,et al. Sustainability comparison of a geosynthetic-reinforced soil abutment and a traditionally-founded abutment:a case history[C]//Proceedings of the Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016. Phoenix:ASCE,2016:699-711.

[18] Shillaber C M,Mitchell J K,Dove J E. Energy and carbon assessment of ground improvement works. II:working model and example[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2016,142(3):04015084.

[19] Damians I P,Bathurst R J,Adroguer E G,et al. Environmental assessment of earth retaining wall structures[J]. Environmental Geotechnics,2017,4(6):415-431.

[20] 李婷,苏谦,刘宝,等. 加筋土挡墙水平位移解析计算与参数分析[J]. 中国公路学报,2019,32(5):47-56. (Li Ting,Su Qian,Liu Bao,et al. Analytical calculation and parametric analysis of lateral displacement of reinforced soil retaining walls[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(5):47-56. (in Chinese))

(下转第 159 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.011

黏土斜坡水平受荷桩承载特性研究

麻 坚[1],郭 林[2,3],刘建生[1],徐 刚[1],柳建超[1],孙毅龙[2,3],李 辉[2,3]

(1. 金华电力设计院有限公司; 2. 温州大学建筑工程学院; 3. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室)

摘要:为解决黏土斜坡场地中桩基在水平荷载作用下的承载特性,明确斜坡不同角度这一关键因素对桩基工作性能的影响机制,通过黏土斜坡水平受荷桩模型试验,探究了斜坡角度对斜坡桩基水平位移、弯矩等的影响规律,揭示了水平荷载下斜坡单桩的水平承载特性,并采用数值模拟方法进一步分析了斜坡角度对桩基变形模式、*p-y* 曲线等的影响规律。结果表明:随着斜坡角度的增大,斜坡效应的影响逐渐凸显,桩基最大弯矩点位置上移,桩基水平位移增大,当水平荷载为 40 N 时,30°斜坡单桩水平位移较平坦场地增大约 40%;桩基 *p-y* 曲线的初始刚度和极限土抗力随着斜坡角度的增大而减小。

关键词:黏土斜坡;桩基础;水平承载特性;模型试验

Research on bearing characteristics of horizontally loaded piles on clay slopes

Ma Jian[1], **Guo Lin**[2,3], **Liu Jiansheng**[1], **Xu Gang**[1], **Liu Jianchao**[1], **Sun Yilong**[2,3], **Li Hui**[2,3]

(1. *Jinhua Electric Power Design Institute Co., Ltd.*; 2. *College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University*; 3. *Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province*)

Abstract: To investigate the bearing characteristics of pile foundations on clay slopes under horizontal loads and clarify the influence of a key factor, namely slope angle, on the performance of the pile foundations, model tests were conducted on horizontally loaded piles on clay slopes. The impact of slope angle on the horizontal displacement and bending moment of the pile foundations was explored, thereby revealing the horizontal bearing characteristics of the single pile under horizontal load on the slope. The numerical simulation method was used to analyze the influence of slope angle on the deformation mode and *p-y* curve of pile foundations. The results show that as the slope angle increases, the influence of the slope effect becomes gradually prominent, and the depth of the maximum bending moment point of the pile foundation has shifted upward. The horizontal displacement of the pile foundation increases. Compared with that in the flat site, when the horizontal load is 40 N, the horizontal displacement of the single pile on a 30° slope increases by 40%. Additionally, the initial stiffness and ultimate soil resistance of the *p-y* curve of pile foundations both decrease with the increase of the slope angle.

Key words: clay slope; pile foundation; horizontal bearing characteristic; model test

为满足电力大容量输送的需要,近几年东南沿海地区电力基础设施建设不断完善,越来越多的输电线路工程在东南沿海地区的山岭中建设。由于山区地形条件的限制,斜坡地形下的输电线路桩基会受到不均匀应力场分布的影响,与传统的水平桩基相比,斜坡桩基的水平承载特性显著不同[1]。因此探究斜坡地形下水平受荷桩的承载特征具有重要的工程意义。

国内外众多学者通过模型试验和数值模拟研究,分析了斜坡地形条件下水平受荷桩的承载特性。例如:Yang 等[2]通过不同斜坡角度条件下的单桩水平加载系列试验,探究了斜坡角度对坡顶单桩承载特性的影响机理;朱刘山[3]采用数值模拟的方法分析了边坡角度对边坡单桩承载特性的影响及坡地条件下水平受荷桩的桩周土水平抗力与桩身水平位移曲线(*p-y* 曲线);高博雷等[4-5]通过开展斜坡单桩水平加载模型试验,发现斜坡的存在会减小浅层土体水平抗力,随着桩与斜坡距离的减小和斜坡角度的增大,土体水平抗力削减效应更加明显;Sawant 等[6]采用三维有限差分法分析了桩与斜坡的距离对桩基水平承载特性的影响规律;Jiang 等[7-8]理论分析了斜坡坡顶处水平受荷桩的变形特性,并提出了桩基的水平位移简化分析方法;Chen

基金项目:国网浙江电力有限公司科技项目(5211JH25000A)

作者简介:麻坚(1983—),男,正高级工程师,硕士,主要从事输电线路基础工程研究。E-mail:38360025@qq.com

通信作者:孙毅龙(1990—),男,副教授,博士,主要从事基础设计方法优化研究。E-mail:sunyilong@wzu.edu.cn

等[9]基于楔形体理论,分析了斜坡角度对砂土斜坡下桩基水平抗力的影响;Sun 等[10]基于数值计算结果,深入分析了黏土边坡上桩基的破坏模式。斜坡效应对桩基的水平承载特性影响显著,但上述研究主要关注斜坡桩基的水平承载特性。

针对斜坡地形中单桩的水平承载特性,喻豪俊等[11]通过现场试验探究了碎石土斜坡角度对单桩临界水平荷载的影响;Peng 等[12-13]基于土压力系数的理论假定,研究了斜坡桩基的非对称破坏模式;程刘勇等[14]通过模型试验探究了临坡距对单桩水平承载特性的影响规律;Zhang 等[15]通过模型试验和数值模拟分析了组合荷载作用下斜坡桩的承载特性;Jala 等[16]通过数值模拟发现斜坡角度对砂土中桩基的 p-y 曲线具有显著的影响,并建立了适用于砂土斜坡桩基的 p-y 曲线模型;乃麟元等[17]采用数值模拟方法研究了黏土边坡中单桩的水平承载特性;Khati 等[18]通过黏土斜坡的桩基系列模型试验研究了桩基长细比对其承载特性的影响。上述系列研究结果表明,斜坡角度对斜坡桩基的变形模式、承载特性有着显著的影响,但不同地基条件下斜坡角度对桩基承载特性的影响规律不尽相同,总体来讲,对于黏土斜坡桩基,其桩-土作用机理仍不明晰。

本文通过室内模型试验和数值模拟方法,分析桩基变形模式、p-y 曲线和不同黏土斜坡角度对斜坡单桩的水平位移、弯矩等的变化规律,揭示水平荷载作用下斜坡单桩的水平承载特性,以期为黏土斜坡桩基设计提供理论和数据支撑。

1　黏土斜坡单桩模型试验

1.1　模型试验装置

试验模型箱采用 45 号钢制作,箱壁厚度为 10 mm,箱体长 600 mm、宽 600 mm、高 800 mm,通过伺服电机作动器施加水平荷载,桩基的顶部位移通过激光位移传感器测定,应变片测定模型桩的桩身应变,加载方式为荷载控制方法。模型试验装置如图 1 所示。

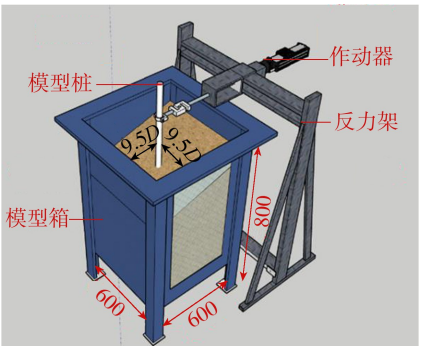


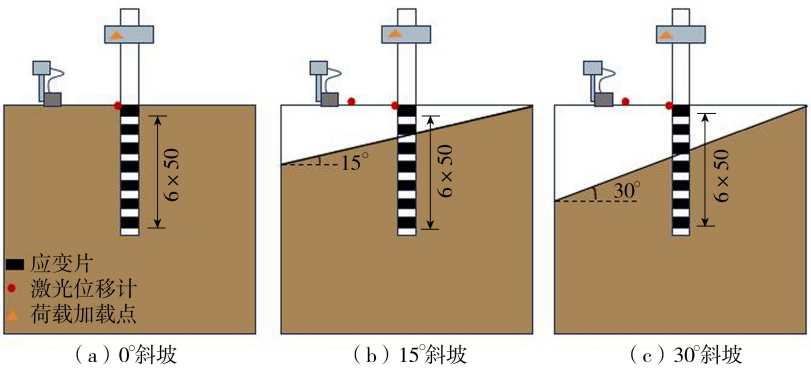
图 1　模型试验装置(单位:mm)

Fig. 1　Device of model tests(unit:mm)

1.2　试验模型及传感器布置

以浙江某输电塔基础为原型,进行试验桩的尺寸和刚度设计,考虑到模型箱尺寸(600 mm×600 mm)和边界效应,以 1∶10 的比例进行试验桩缩尺;为保证试验桩与实际桩刚性一致,选用 PPR 材料制作模型桩。模型桩桩径 D=36 mm,桩基长度为 100 cm,桩基埋深为 45 cm。

通过在桩基顶部布置激光位移传感器监测试验过程中桩顶的水平位移,为了获得试验过程中不同深度的桩身弯矩分布规律,沿桩身均匀对称布置 7 对应变片,每对应变片之间的距离为 50 mm,传感器的整体布置如图 2 所示。



(a) 0°斜坡　(b) 15°斜坡　(c) 30°斜坡

图 2　传感器布置示意图(长度单位:mm)

Fig. 2　Diagram of sensor layout (length unit: mm)

1.3　地基土制备

试验地基土体取自温州山区坡积黏土,为确定试验土体的基本参数,开展了比重瓶试验、直剪试验等一系列土体基本试验,测得土体密度为 1.8 g/cm^3、内摩擦角为 12°、黏聚力为 11 kPa、含水率为 25.5%。

试验采用分层填筑的方法制备试验地基土,每层50 mm,模型箱填筑土体高度为60 cm,通过控制土体最大干密度1.31 g/cm^3,实现模型箱内土体90%的压实度。填筑完毕后,将土体预压静置3 d,此时土体竖向变形基本稳定,可以忽略土中应力、竖向变形对模型试验的影响。若为斜坡地形试验,填筑至最高处后,先削坡处理再进行预压静置。

1.4 试验方案

大量工程实践表明,当斜坡角度大于30°时,地基的水平抗力急剧下降,因此桩基斜坡角度主要控制在30°以下[19]。基于此,试验中的斜坡角度取0°、15°、30°,如图3所示。试验过程中通过伺服电机作动器控制位移,加载速率为0.2 mm/min,加载点最大位移为50 mm,加载方式为静力加载,试验土体的压实度为90%。

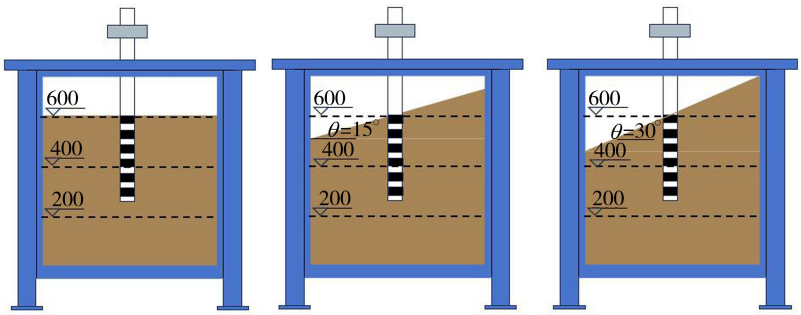


图3 不同斜坡角度的模型试验示意图(地基土埋深单位:mm)

Fig. 3 Diagram of model test with different slope angles (burial depth unit of foundation soil: mm)

2 结果与分析

2.1 桩基水平位移

如图4所示,随着水平荷载的增加,泥面处桩基水平位移逐渐增大,且曲线的线性规律性随着斜坡角度的增大逐渐减弱;随着水平荷载的增大泥面处受斜坡角度的影响更为明显,即相同荷载情况下斜坡桩基的水平位移更大。水平荷载为40 N、30°斜坡的泥面处桩基水平位移为16.1 mm,较平坦场地(0°斜坡)泥面处桩基水平位移增大了4.6 mm,增幅为40.0%;15°斜坡的泥面处桩基水平位移较平坦场地增大2.4 mm,增幅为20.9%。表明随着水平荷载的增大,斜坡效应对桩基水平承载特性的影响逐渐凸显。

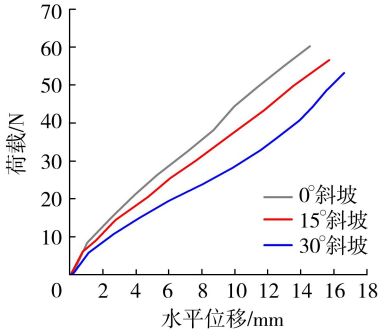


图4 不同斜坡角度下桩基泥面荷载-位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves for mudline at pile foundation under different slope angles

2.2 桩基弯矩

如图5所示,随着桩基埋深的增大,在浅层区域存在一个最大弯矩点,0°斜坡最大弯矩点位置在0.1 m埋深处,斜坡角度为15°时和30°时最大弯矩点位置在0.03 m埋深处,可以看出斜坡角度的存在导致桩基最大弯矩点位置上移,说明浅层土体对桩基承载性能的影响更加显著。随着桩顶水平位移的增大,桩基弯矩均增大,0°、15°、30°斜坡桩基最大弯矩分别从48、49、40 N·mm增大到146、128、105 N·mm,分别增大2.04倍、1.61倍和1.63倍。

由图5可知,桩顶水平位移为10 mm时,桩基最大弯矩差异较小;随着桩顶水平位移的增大,桩基最大弯矩差异增大,桩顶水平位移为40 mm时,0°、15°、30°斜坡桩基最大弯矩分别为146、128、105 N·mm,相比平坦场地,15°和30°斜坡桩基最大弯矩减小了约12%、28%。可以看出,随着斜坡角度的增大,相同桩顶水平位移下,桩基弯矩随着斜坡角度增大而减小,这主要是由于相同桩顶水平位移下斜坡桩基水平承载能力较低,桩基水平抗力减小,因此此时桩基弯矩减小。但随着桩基埋深增加,在深层土体中,斜坡角度对桩基弯矩的影响逐渐减小,即斜坡效应随着桩基埋深增加而逐渐减小。

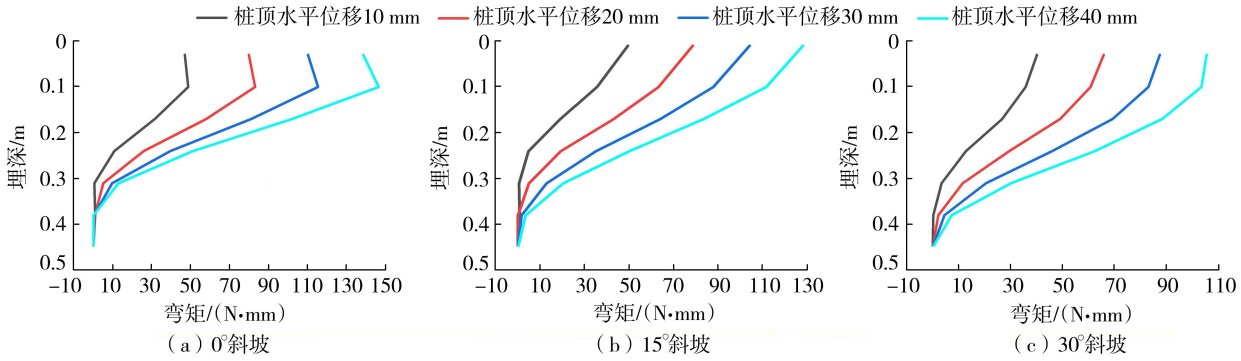


图 5　不同斜坡角度下桩基的弯矩分布曲线

Fig. 5　Bending moment distribution curves of pile foundation under different slope angles

2.3　桩身水平位移

如图 6 所示,随着桩顶施加的水位荷载增大,桩身水平位移整体均增大;随着桩基埋深的增加,桩身水平位移减小,但不同斜坡角度下桩身水平位移在 0.36 m 埋深附近处最小,该深度以下桩身水平位移继续增大。

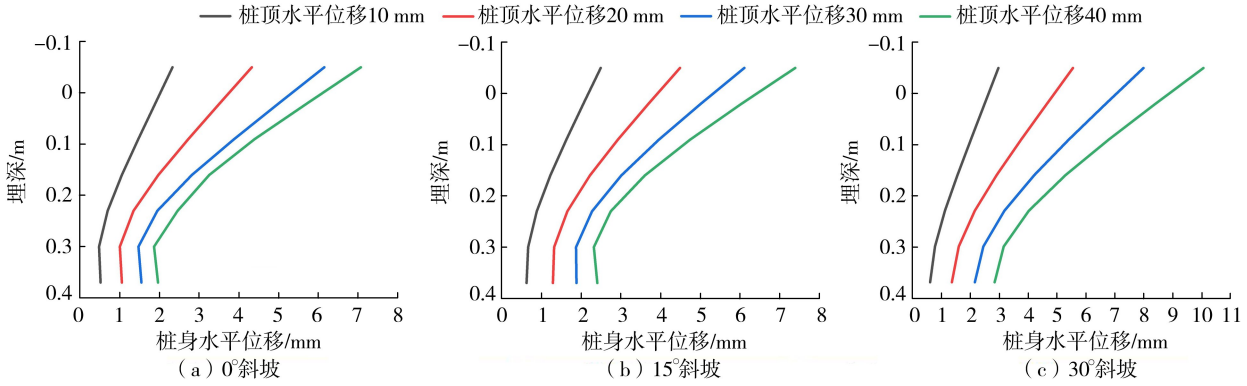


图 6　不同斜坡角度下桩身水平位移曲线

Fig. 6　Horizontal displacement curves of pile body under different slope angles

由图 6 可知,当桩顶水平位移为 10 mm 时,桩身水平位移随埋深增大线性减小,随着位移荷载增大,桩身水平位移分布发生改变,当桩顶水平位移为 40 mm 时,0°、15°斜坡桩基在 0.36 m 埋深以下为正向位移,30°斜坡桩基出现反向位移,表明随着斜坡角度增大,桩基变形模式发生改变,30°斜坡桩基在较大桩顶水平位移下呈现出刚性桩特征。

3　数值模拟分析

3.1　数值模型的建立及验证

由于模型试验监测手段的限制,桩周土抗力分布及变形模式、桩基 p-y 曲线等无法通过试验结果直接获得,为进一步分析不同斜坡角度下桩基承载特性的差异,在模型试验的基础上开展相应的数值模拟分析。

基于 FLAC3D 有限差分计算平台,建立模型试验的数值模型,整体模型均为实体结构化网格,桩基附近和浅层区域网格划分较细,深层和距离桩基较远区域网格划分较粗。土体采用摩尔-库仑本构模型模拟其非线性应力-应变关系,桩基采用弹性本构模型模拟,桩-土间的非线性相互作用采用接触面模拟,如图 7 所示。数值模型中土体的本构模型参数根据前面模型试验土体参数确定,桩基参数泊松比取 0.4,弹性模量取 700 MPa。

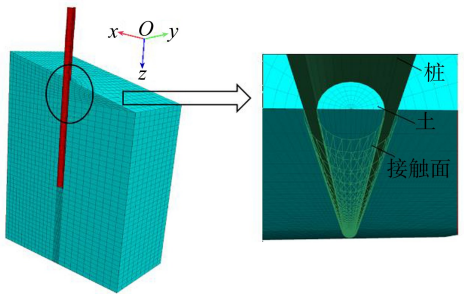


图 7　斜坡单桩数值模型及接触面设置示意图

Fig. 7　Schematic diagram of numerical model of single pile on slope and contact surface setting

由图 8 可知,数值模拟的泥面处桩基水平位移与试验结果差异较小,桩顶水平位移差异较大,但最大差异约为 10%,

表明该数值模型应用于不同斜坡桩基承载特性分析是可行的。

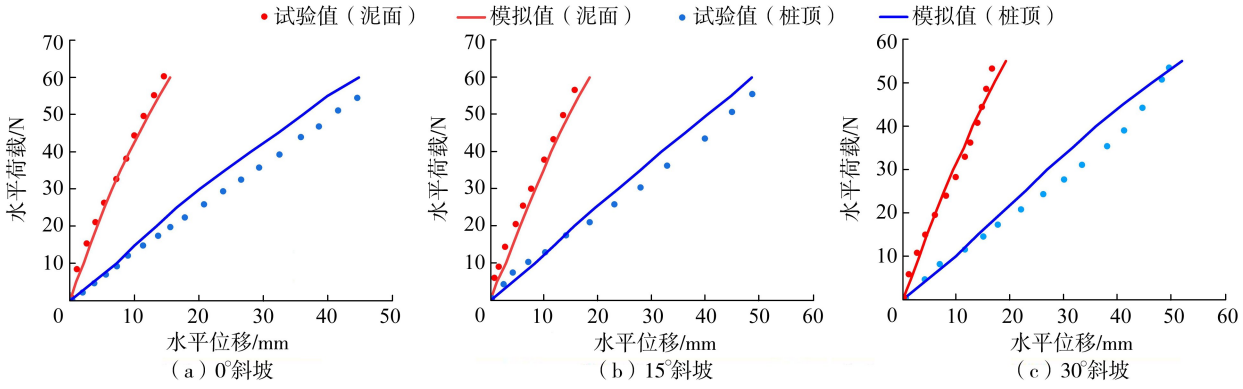


图8 不同斜坡角度下数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of numerical simulation results and tests results under different slope angles

3.2 桩基水平抗力分布及变形模式分析

为分析不同斜坡角度下水平受荷桩的变形模式,将水平荷载40 N作用下的桩周水平抗力数值模拟结果进行对比分析,结果如图9所示。由图9可知,随着斜坡角度的增大,桩周的水平抗力减小,深层土体的水平抗力由10 MPa减小到6 MPa,斜坡桩基需要更多的桩前土抗力抵抗水平位移发展,因此桩前土体的应力集中区域范围随着斜坡角度的增大而增大。

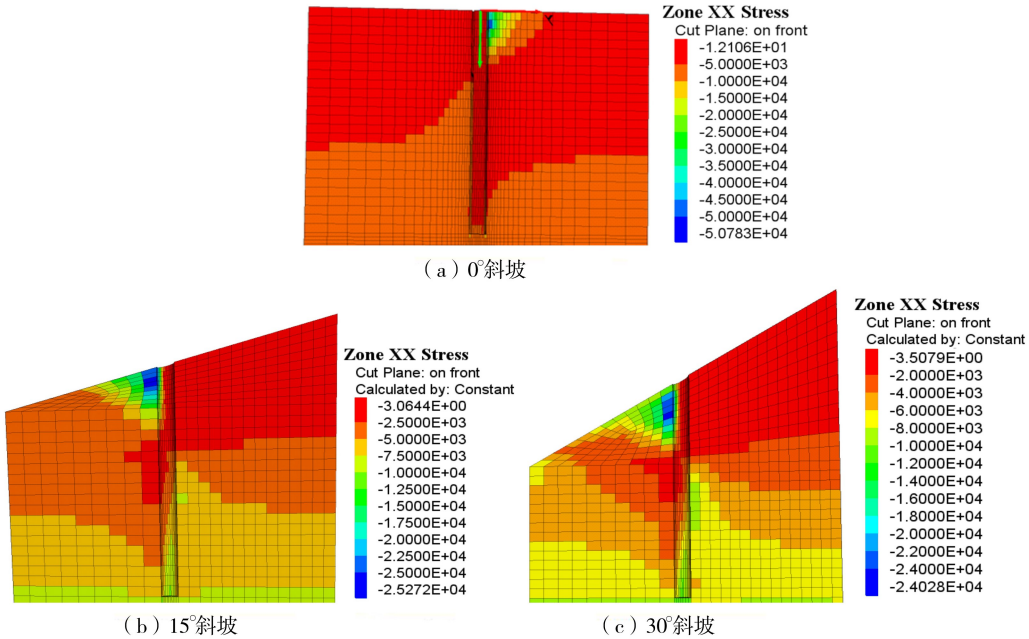


图9 不同斜坡角度下桩周的水平抗力分布云图(单位:Pa)

Fig. 9 Distribution cloud maps of horizontal soil resistance around pile under different slope angles (unit: Pa)

水平荷载40 N作用下桩周水平位移数值模拟结果如图10所示,随着斜坡角度的增大,水平荷载对桩前土体的影响区域增大,但不同斜坡角度下桩周土体的位移主要集中在桩前区域,深层土体的变形较小或几乎无变形,说明不同斜坡角度下桩基的变形模式是一致的,均为柔性桩模式。

3.3 桩基 *p-y* 曲线

图11为不同埋深0°、15°、30°斜坡的桩基 *p-y* 曲线,随着斜坡角度的增大,*p-y* 曲线的初始刚度和极限土抗力均减小,但随着土体深度的增加,斜坡角度引起的 *p-y* 曲线差异减小,表明斜坡效应在深层土体中的影响逐渐减小。由于浅层 *p-y* 曲线初始刚度和极限土抗力减小显著,因此斜坡桩基浅层的变形范围和水平位移增大。

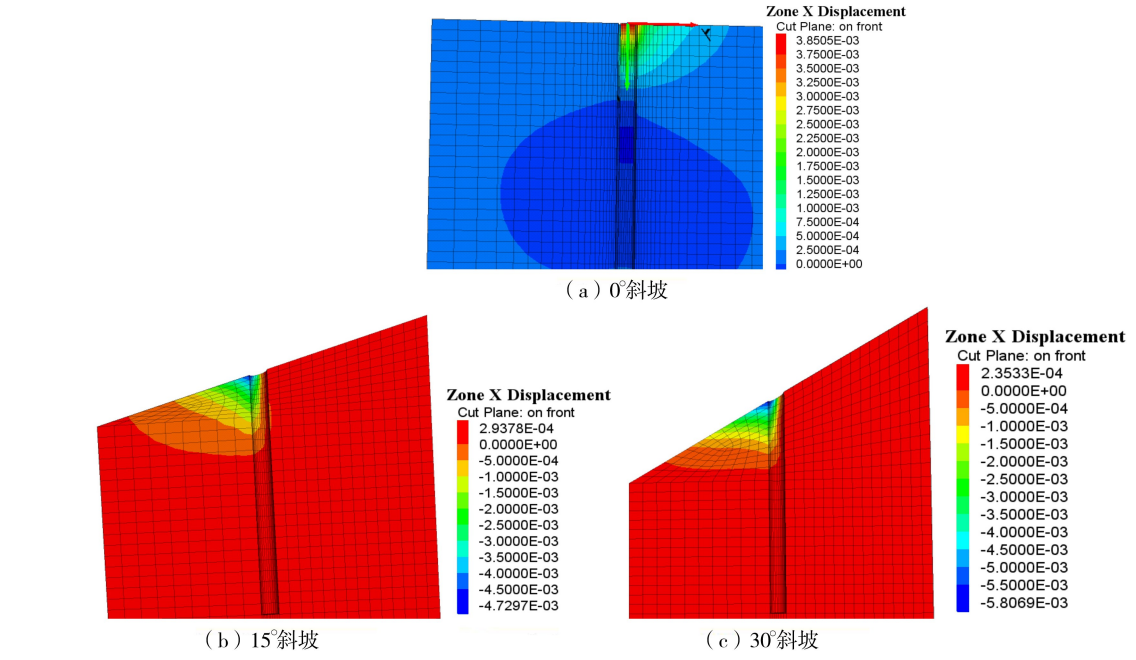


图 10　不同斜坡角度下桩周的水平位移分布云图(单位:m)

Fig. 10　Distribution cloud maps of horizontal displacement around pile under different slope angles (unit: m)

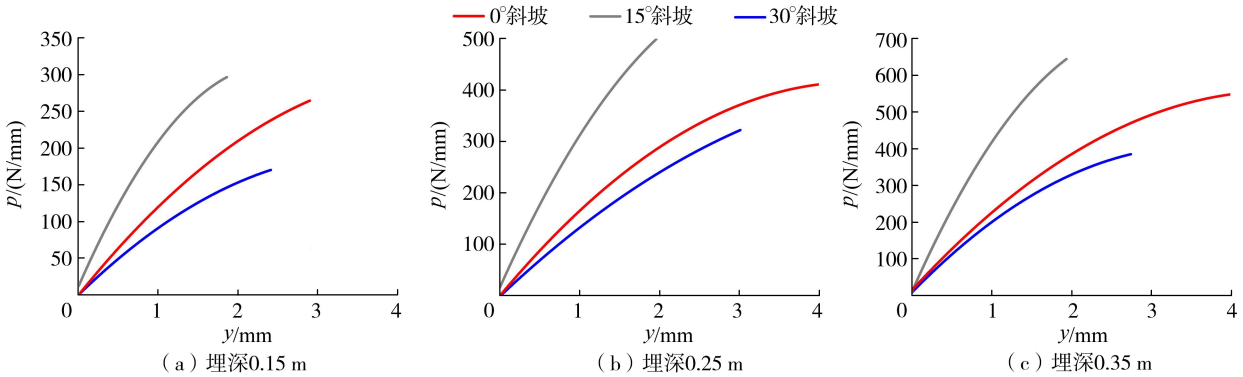


图 11　不同埋深处不同斜坡角度下桩基 *p-y* 曲线对比

Fig. 11　Comparison of *p-y* curves of pile foundation at different burial depths under different slope angles

4　斜坡桩基 *p-y* 曲线分析

为进一步分析斜坡效应对桩基 *p-y* 关系的影响,对数值模拟得到的桩基 *p-y* 曲线进行处理和分析,得到不同斜坡角度下桩基 *p-y* 曲线的初始刚度。为了更方便对比初始刚度随斜坡角度的变化规律,以 0°斜坡下桩基 *p-y* 曲线的初始刚度为基准,对 15°和 30°斜坡下桩基 *p-y* 曲线初始刚度的计算结果进行无量纲处理,结果如图 12 所示(横轴埋深比为桩基埋深与模型桩桩径的比值),可以看出桩基浅层 *p-y* 曲线的初始刚度减小最为显著,15°和 30°斜坡下桩基 *p-y* 曲线的初始刚度最大分别降低了约 21%和 28%。可见,随着埋深比的增加,斜坡角度对 *p-y* 曲线初始刚度的影响逐渐减小。

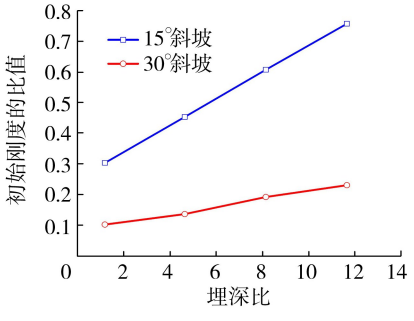


图 12　不同斜坡角度下桩基 *p-y* 曲线初始刚度的深度分布

Fig. 12　Depth distribution of initial stiffness of *p-y* curves of pile foundation under different slope angles

根据美国石油学会 API 标准规范中土体极限抗力计算公式[20],确定土体的极限土抗力影响系数如图 13 所示。由图 13 可知,随着埋深比的增大,极限土抗力影响系数先增大后趋于稳定;0°、15°、30°斜坡的稳定值约分别为 12、10、9,即

随着斜坡角度的增大,极限土抗力影响系数整体减小。进一步说明了斜坡效应引起桩基水平位移增大的原因。

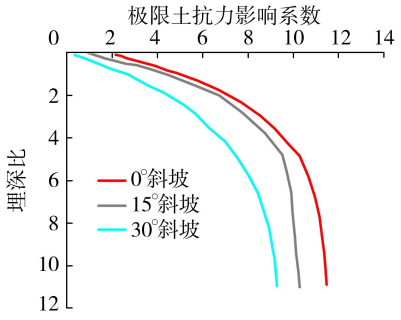


图13 桩基 *p-y* 曲线极限土抗力影响系数与埋深的关系

Fig. 13 Relationship between influence coefficient of ultimate soil resistance of *p-y* curve of pile foundations and burial depth

5 结 论

a. 随着斜坡角度的增大,斜坡效应的影响逐渐凸显,桩基水平位移增大。试验水平荷载为40 N时30°斜坡的泥面处桩基水平位移较平坦场地泥面处桩基水平位移增大约40%。

b. 桩基的弯矩随着桩基埋深的增加先增大后减小,且存在一个最大弯矩点,随着斜坡角度的增大,桩基最大弯矩点位置上移。但桩基的变形模式并未改变,试验中桩基变形模式均为柔性桩模式。

c. 随着斜坡角度的增大,桩基水平位移影响范围增大,*p-y* 曲线的初始刚度随着斜坡角度的增大而减小,但随着桩基埋深的增加,斜坡对初始刚度的影响减缓。

d. 随着斜坡角度的增大,桩基 *p-y* 曲线的极限土抗力减小,极限土抗力影响系数随着土体深度的增大先增大后趋于稳定,该系数稳定值随着斜坡角度的增大而减小。

e. 黏土斜坡桩基进行水平承载力设计时,应考虑斜坡效应对桩基水平抗力初始刚度及极限抗力的影响,本文只分析了15°和30°斜坡的计算结果,其他斜坡角度仍需进一步结合现场试验开展研究。

参考文献:

[1] 杨征宇,杨剑,王天慧,等. 输电塔基础斜桩非线性 *p-y* 曲线[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):104-108. (Yang Zhengyu,Yang Jian,Wang Tianhui,et al. Nonlinear *p-y* curve for batter piles in foundation of transmission towers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(1):104-108. (in Chinese))

[2] Yang Minghui,Deng Bo,Zhao Minghua. Experimental and theoretical studies of laterally loaded single piles in slopes[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering),2019,20(11):838-851.

[3] 朱刘山. 坡地条件下水平受荷桩 *p-y* 曲线试验与数值模拟研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.

[4] 高博雷,张陈蓉,张照旭. 砂土中边坡附近单桩水平抗力的模型试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(11):3191-3198. (Gao Bolei,Zhang Chenrong,Zhang Zhaoxu. Model tests on effect of slopes on lateral resistance of near single piles in sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(11):3191-3198. (in Chinese))

[5] Yuan Juyun,Song Qingwen,Ma Xianfeng F,et al. Centrifuge tests on the bearing capacity of rock-socketed pile in slope area [C]//The 7th China-Japan Geotechnical Symposium. Sanya:Beihang University,2018:415-421.

[6] Sawant V A,Shukla S K. Effect of edge distance from the slope crest on the response of a laterally loaded pile in sloping ground [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2014,32(1):197-204.

[7] Jiang Chong,Liu Lin,He Jiali,et al. Effect of the proximity of slope and pile shape on lateral capacity of piles in clay slopes[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering,2023,27(1):16-30.

[8] Jiang Chong,Lin Mingke,Liu Pan. Study on calculation method of lateral characteristics of offshore pile near layered soil slope [J]. Ocean Engineering,2023,289:116245.

[9] Chen Lujie,Jiang Chong,Pang Li,et al. Lateral soil resistance of rigid pile in cohesionless soil on slope[J]. Computers and Geotechnics,2021,135:104163.

[10] Sun Bowen,Jiang Chong,Pang Li,et al. Effect of the pile diameter and slope on the undrained lateral response of the large-diameter pile[J]. Computers and Geotechnics,2022,152:104981.

[11] 喻豪俊,彭社琴,赵其华. 碎石土斜坡水平受荷桩承载特性研究[J]. 岩土力学,2018,39(7):2537-2545. (Yu Haojun,Peng Sheqin,Zhao Qihua. Research on response of laterally loaded pile in gravel soil sloping ground[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(7):2537-2545. (in Chinese))

[12] Peng Wenzhe,Zhao Minghua,Zhao Heng,et al. Effect of slope on bearing capacity of laterally loaded pile based on asymmetric failure mode[J]. Computers and Geotechnics,2021,140:104469.

[13] Beena K S,Kavitha P E,Narayanan K P. Model studies on laterally loaded piles in sloping clay bed[J]. Indian Geotechnical Journal,2018,48(1):114-124.

[14] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等. 斜坡基桩水平极限承载力及影响因素模型试验和数值模拟[J]. 岩土力学,2014,35(9):2685-2691. (Cheng Liuyong, Xu Xichang, Chen Shanxiong, et al. Model test and numerical simulation of horizontal bearing capacity and impact factors for foundation piles in slope[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(9):2685-2691. (in Chinese))

[15] Zhang Jianwei, Wang Xiaoju, Wang Hao, et al. Model test and numerical simulation of single pile response under combined loading in slope[J]. Applied Sciences,2020,10(17):6140.

[16] Jala Y,Sawant V A, Mishra A. Development of *p-y* curves from numerical study of long piles in sandy slope[J]. Ocean Engineering,2025,319:120275.

[17] 乃麒元. 黏土斜坡地基中水平受荷桩承载特性研究[J]. 路基工程,2021(3):128-133. (Nai Qiyuan. Load-bearing characteristics research on horizontal load pile in clay slope base[J]. Subgrade Engineering,2021(3):128-133. (in Chinese))

[18] Khati B S,Sawant V A. Variation in lateral load capacity of pile embedded near slope with ground inclination and edge distance [J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2020,14(7):740-751.

[19] 刘静. *m* 法计算斜坡桩水平承载力的适用性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.

[20] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 *p-y* 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):127-134. (Bao Jinhu, Su Jingbo, Wu Feng, et al. Field horizontal loading test and *p-y* curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):127-134. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-19　编辑:熊水斌)

(上接第 69 页)

[41] Xia Zhuge,Zhou Chao,Wang Wandi,et al. Collapse of Meilong expressway as seen from space:detecting precursors of failure with satellite remote sensing[J]. Journal of Earth Science,2025,36(2):835-838.

[42] Liu Xiaojie,Zhao Chaoying,Yin Yueping,et al. Refined InSAR method for mapping and classification of active landslides in a high mountain region:Deqin County,southern Tibet Plateau,China[J]. Remote Sensing of Environment,2024,304:114030.

[43] Zhou Lyu,Wei Bangding, Ma Jun, et al. Monitoring and analysis of side-slope deformation along Changgan high-speed railway based on time-series InSAR and BDS techniques[J]. Natural Hazards,2024,120(14):13469-13491.

[44] Gheorghe M,Armaş I,Dumitru P,et al. Monitoring subway construction using Sentinel-1 data:a case study in Bucharest,Romania [J]. International Journal of Remote Sensing,2020,41(7):2644-2663.

[45] Qiu Dongwei,Wang Yuzheng,Zhang Yunlong,et al. Settlement monitoring data fusion approach for high-speed railways based on GNSS and InSAR[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2023,17(3):034507.

[46] Li Bofeng, Feng Yanming, Shen Yunzhong. Three carrier ambiguity resolution:distance-independent performance demonstrated using semi-generated triple frequency GPS signals[J]. GPS Solutions,2010,14(2):177-184.

[47] Zhang Xiaohong, He Xiyang. Performance analysis of triple-frequency ambiguity resolution with BeiDou observations[J]. GPS Solutions,2016,20(2):269-281.

[48] Wu Zhipeng, Wang Teng, Wang Yingjie, et al. Deep learning for the detection and phase unwrapping of mining-induced deformation in large-scale interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2021,60:5216318.

[49] Jiang Mi, Guarnieri A M. Distributed scatterer interferometry with the refinement of spatiotemporal coherence[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,58(6):3977-3987.

[50] Zhou Chao,Ye Mingyuan,Xia Zhuge,et al. An interpretable attention-based deep learning method for landslide prediction based on multi-temporal InSAR time series:a case study of Xinpu landslide in the TGRA[J]. Remote Sensing of Environment,2025,318:114580.

[51] Kalla D,Smith N,Kuraku S,et al. Study and analysis of chat GPT and its impact on different fields of study[J]. International Journal of Innovative Science and Research Technology,2023,8(3):827-833.

[52] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (Chen Xiaonan,Jin Yanguo,Xu Xinyong,et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):46-55. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-22　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.012

多桩型复合地基支承路堤破坏模式及优化设计研究

刘 剑[1],夏博洋[2],郑 刚[2]

(1.沧州曲港高速公路建设有限责任公司;2.天津大学建筑工程学院)

摘要:为系统研究桩体类型对复合地基支承路堤破坏模式及整体稳定性的影响,基于三维有限元分析方法开展了桩体破坏特性及地基剪切应变演化规律研究。采用全生命周期成本-效益分析方法对不同类型复合地基经济性进行了评估,以确定具备最优经济效益的复合地基设计方案。结果表明:路堤荷载作用下,桩体类型显著影响复合地基支承路堤破坏模式,随着桩体刚度增加,破坏模式从剪切破坏转变为弯曲破坏,破坏发展由同时破坏转变为渐进破坏;碎石桩复合地基塑性剪切应变沿路堤中心线呈渐进式发展趋势,而素混凝土桩复合地基剪切应变分别在路堤中心与坡脚区域呈渐进式与倒退式发展特征,最终形成贯通性临界滑动面;相较于同时提升全区域桩体强度,仅在路堤坡脚至坡肩之间设置高强度桩体即可显著提升路堤整体稳定性,表现出更优投资回报率与经济性。

关键词:路堤;复合地基;碎石桩;素混凝土桩;破坏模式;成本效益

Study on failure mode and optimization design of embankment supported by multi-pile type composite foundation

Liu Jian[1], **Xia Boyang**[2], **Zheng Gang**[2]

(1. *Cangzhou Qugang Expressway Construction Co. Ltd.*; 2. *School of Civil Engineering*, *Tianjin University*)

Abstract: To systematically investigate the influence of different pile types on the failure modes and overall stability of embankment supported by composite foundations, a three-dimensional finite element analysis method was employed to study pile failure characteristics and the evolution patterns of shear strain in foundation soils. A full lifecycle cost and benefit analysis framework was applied to evaluate the economic performance of various composite foundation configurations, thereby identifying the optimal design strategy with the highest cost efficiency. The results demonstrate that under embankment loading conditions, pile type significantly alters the failure mode of embankment supported by composite foundations. As pile stiffness increases, the failure mode transitions from shear failure to flexural failure, and the failure development pattern shifts from simultaneous failure to progressive failure. Specifically, in gravel pile composite foundations, the plastic shear strain in soils exhibits progressive development along the embankment centerline. In contrast, the shear strain evolution in plain concrete pile composite foundations displays distinct forward propagation at the embankment center and backward propagation at the slope toe region, ultimately forming a continuous critical sliding surface. Compared to strengthening piles across the entire area, installing high-strength piles only beneath the embankment slope toe to the shoulder of the embankment can significantly enhance the overall stability of the embankment, demonstrating superior return on investment and cost-effectiveness.

Key words: embankment; composite foundation; gravel pile; plain concrete pile; failure mode; cost and benefit

软土地区道路面临诸多挑战,其中地基处理方式是关键问题之一[1-2]。软土具有高压缩性、低强度和较差的排水性能,导致在路堤荷载作用下易发生沉降变形甚至失稳破坏,从而影响道路的稳定性和安全性[2-4]。复合地基技术可显著减少沉降,提高路堤整体稳定性,是软土地区道路工程中常用的地基处理方法。然而近年来,深厚软弱土地基上复合地基支承的高填方道路失稳事故频繁发生,因此,确保路堤的整体稳定性仍然是道路工程建设和使用中需要解决的关键问题。

根据复合地基中桩体的胶结特性、施工方法及刚度性能等技术参数的差异性,可将其划分为 3 种基本类型:①散体桩,包括砂桩、碎石桩等;②半刚性桩,包括水泥土搅拌桩、旋喷桩等;③刚性桩,包括素混凝土桩、

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52408385);河北省交通运输厅科技项目(201405)

作者简介:刘剑(1974—),男,正高级工程师,主要从事交通岩土工程研究。E-mail:liujian000202@126.com

通信作者:夏博洋(1993—),男,助理研究员,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:1019205010@tju.edu.cn

CFG 桩等[1-4]。对于不同桩体类型的复合地基,国内外学者针对其稳定性开展了广泛研究。例如:Almeida 等[5]基于离心机试验研究了路堤荷载作用下碎石桩复合地基的稳定性,发现碎石桩通过抗剪强度的发挥,进而对路堤的稳定性起贡献作用,主要破坏模式为剪切破坏,且路堤下所有桩体同时发生破坏;针对有黏结性的水泥土搅拌桩及素混凝土桩复合地基,Kitazume 等[6-7]通过离心机试验发现,相较于抗剪强度,其抗弯强度普遍较低,路堤荷载作用时易发生弯曲破坏,且破坏具有显著的脆性特性;Zheng 等[8-9]采用离心机试验与数值分析相结合的方法,揭示了刚性桩破坏发展过程,即路堤下最外侧桩首先达到极限拉应力而发生弯曲破坏,受弯截面处应力完全释放导致临近桩体拉应力上升,发生渐进破坏导致整体失稳。但已有研究对于桩-土之间相互作用的渐进破坏机理研究较少,且对于路堤体系中结构物破坏过程的研究仅限于桩体,缺乏对于土体破坏过程的相应研究。

实际工程应用中通常需要综合考虑安全效益与经济效益,传统的通过简单提高置换率以及桩体强度的方法增强路堤稳定性并不适用[10-11],需要寻找既能满足路堤稳定性要求,又经济高效的复合地基设计方案。为平衡交通基础设施投资成本与抗失稳风险能力,需建立综合评估方法为基建投资决策提供有效依据[12-13]。其中,Dennemann 等[14-15]提出的全生命周期成本-效益分析方法通过整合风险因素与投资回报率,被视为评估工程设计成本效益的有效手段。

本文基于 ABAQUS 有限元软件系统研究了不同桩体类型对复合地基支承路堤结构破坏模式与整体稳定性的影响,采用全生命周期成本-效益分析方法对多种复合地基的经济性进行了对比评估,旨在寻找经济高效的复合地基设计方案,为软土地区道路工程实践提供理论依据与决策参考。

1　数值模型构建与验证

1.1　数值模型与本构模型参数

本文研究依托蒙西至华中通道某铁路路堤建造段,该路段土体以冲洪积淤泥质粉质黏土、淤泥及粉质黏土为主,根据地质调查、静力触探、钻探确定软土层厚度为 8~24 m,局部最厚处达到 35 m。基于以上地质工况,采用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型如图 1 所示(图中 H 为填筑高度)。为了节约计算成本,考虑路堤及路基截面的对称性,取一半截面进行建模[16-17]。考虑纵向桩体间距的一致性,模型纵向(y 方向)取 1/2 桩间距进行建模[17-18]。为防止产生边界效应,模型总宽度为 40 m。路堤下方土体总厚度为 24 m,分为两层,上部为 15 m 软土层,下部为 9 m 粉质黏土层。路堤下共设置 7 排桩体,桩长 18 m,桩径 0.8 m,桩间距 3.2 m。其中,路堤坡脚至路堤坡肩位置以下的第 2、3、4 排桩为增强区域。粉质黏土层底部采用铰接边界,限制所有方向的位移,横向边界则采用滚动边界,限制水平方向的位移,模型可以沿深度方向移动。为了模拟地基的流固耦合行为,采用可以同时表征线性位移以及孔隙水压力的八节点六面体实体单元(C3D8P),八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)则用于模拟路堤填土和桩体的变形以及破坏行为[18-19]。共设计了 4 组方案(方案 2、4 分为增强区和非增强区):方案 1 全部采用碎石桩复合地基;方案 2 非增强区为碎石桩,增强区为 C30 素混凝土桩;方案 3 为 C30 素混凝土桩;方案 4 非增强区为 C30 素混凝土桩,增强区为 C50 素混凝土桩。

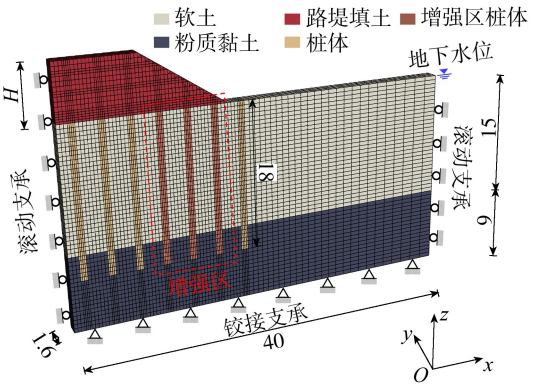


图 1　数值模型示意图(单位:m)

Fig. 1　Numerical model (unit: m)

路堤填土、下方的粉质黏土层和碎石桩均采用理想弹塑性本构模型模拟,并假定土体符合摩尔-库仑屈服准则[20-21]。采用修正剑桥本构(modified Cambridge clay,MCC)模型对软土层进行模拟,软土层的不排水抗剪强度 c_u 可通过表 1 中各项参数的取值自动计算,其计算公式为[22]:

$$c_u = \frac{M}{2}\exp\left[\frac{e_1 - (\lambda - \kappa)\ln 2}{\lambda} - \frac{e_0}{\lambda}\right] \tag{1}$$

式中:M 为强度参数;λ 为正常固结线的斜率;κ 为回弹线斜率;e_1 为参考应力 $p_1 = 1$ kPa 情况下对应的孔隙比;e_0 为初始孔隙比,其取值与土体受到的初始应力状态有关。通过式(1)计算得到的不排水强度随深度的

增加而增大,这种分布特点与实际情况一致。表1为数值模型中材料本构模型及参数选取。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	本构模型	M	λ	κ	p_1	e_1	ν	k/(m/d)	γ/(kN/m^3)	E/MPa	c/kPa	φ/(°)	ψ/(°)
软土	MCC	1.02	0.26	0.05	1	3.28	0.37	4.32×10^{-4}	18.00				
路堤填土	MC						0.30		16.47	34.4	1	41	12
粉质黏土	MC						0.30	1×10^{-3}	18.00	100	40	30	0
C30素混凝土桩	CDP						0.20		25.00	29 500		30	0
C50素混凝土桩	CDP						0.20		25.00	34 500		30	0
碎石桩	MC						0.30	1×10^{-3}	18.00	60		45	13

注:k为渗透系数;γ为容重;E为弹性模量;ν为泊松比;c为黏聚力;φ为内摩擦角;ψ为剪胀角。MC为摩尔-库仑模型。

对于素混凝土桩,采用混凝土塑性损伤(concrete damaged plasticity,CDP)模型模拟混凝土基体的破坏全过程[23]。CDP模型通过输入混凝土结构在单轴受力状态下的应力和非弹性应变,可以真实地模拟混凝土材料在荷载作用下的破坏行为。其基本假定如下:①混凝土材料为连续的实体单元;②混凝土材料损伤是各向同性的;③混凝土材料的主要破坏原因是拉伸开裂以及压缩破碎[24-25]。CDP模型中,混凝土两种破坏形式主要表现为在拉伸屈服后软化导致开裂和在压缩屈服后先硬化再软化导致压碎破坏。模型中需要分别输入非弹性应变以及受拉开裂应变,同时要保证与之对应的压缩/拉伸等效塑性应变大于0,并随着损伤因子增大而增大。

当混凝土材料处于弹性阶段时,CDP模型通过初始弹性模量E_0描述材料的力学特性,而当材料进入损伤阶段时,通过降低混凝土材料初始强度来描述其损伤破坏行为,计算公式分别为:

$$E_c = (1 - d_c)\, E_0 \tag{2}$$

$$E_t = (1 - d_t)\, E_0 \tag{3}$$

式中:E_c、E_t分别为受压和受拉损伤后刚度;d_c、d_t分别为受压和受拉塑性损伤因子。损伤因子的取值由单轴拉伸和压缩下的应力-应变关系确定,取值范围为0~1,其中1代表混凝土强度完全丧失,0代表混凝土没有发生任何损伤。

1.2 数值模型验证

数值模型中分别采用C30与C50素混凝土材料模拟非增强区和增强区桩体特性,根据GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,C30混凝土材料的弹性模量为29 540 MPa,轴心抗压强度为21.2 MPa,抗拉强度为2.43 MPa;C50混凝土材料的弹性模量为34 500 MPa,轴心抗压强度为38.4 MPa,抗拉强度为3.42 MPa。Xia等[13]研究表明,C30混凝土三点弯梁数值模拟与室内模型试验数据具有良好的吻合性,图2进一步呈现了CDP模型中受拉塑性损伤因子随开裂应变的演化规律,揭示了材料损伤累积的非线性特征。在进行参数分析前,将不同方案的极限路堤填筑高度数值模拟结果与Xia等[13]进行的离心机模型试验结果进行了对比,数值模拟结果与离心机模型试验误差均在10%以内,进一步验证了数值模型的准确性。

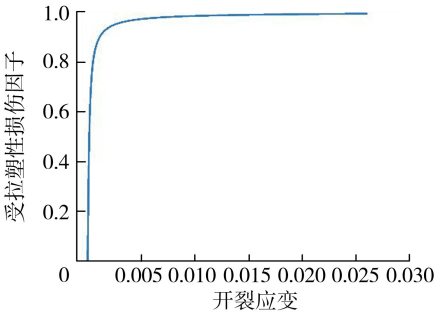


图2 C30混凝土受拉损伤特性

Fig. 2 Tensile failure characteristics of C30 concrete

2 桩体类型对复合地基支承路堤破坏模式及稳定性的影响

2.1 不同类型复合地基支承路堤极限填筑高度

图3为不同方案下路堤填筑高度-路面沉降的关系曲线。填筑初期,路面沉降随着填筑高度的增加而增大,填筑高度-路面沉降曲线表现为线性关系。当路堤临近破坏时,沉降增量显著增大,曲线斜率发生改变。为了定量确定各方案对应的极限路堤填筑高度,采用Villalobos[26]提出的方法,对填筑高度-路面沉降关系曲线的起始段与末段分别进行直线拟合并延长,延长线交点定义为屈服点,对应的填筑高度确定为极限路堤填筑高度,如图3中方案2所示,按此方法确定方案2的极限路堤填筑高度为8.0 m,相应方案1、3、4对应的极

限路堤填筑高度分别为 7.0、9.8、11.3 m。

2.2　不同类型复合地基桩体破坏特性

图 4 为路堤填筑过程中不同方案下桩体破坏模式。方案 1 碎石桩复合地基在达到极限路堤填筑高度时,桩体破坏同时发生,破坏类型为剪切破坏(图 4(a))。对于方案 2(图 4(b)),增强区的 C30 素混凝土桩发生弯曲破坏,且破坏具有渐进特性。其中,第 2~4 排素混凝土桩首先在软硬土层交界面处同时发生一次弯断,随后第 2 排桩在浅层发生二次弯断;临近整体失稳时,第 3、4 排桩也同时发生二次弯断。对于素混凝土桩复合地基(图 4(c)(d)),坡脚位置处的第 1、2 排桩首先在软硬土层交界面发生一次弯断,随着路堤填筑高度逐渐增加,破坏由路堤坡脚向路堤中心逐渐发展,当第 4、5 排桩发生二次弯断后,路堤整体发生失稳。在坡脚与坡肩之间采用 C50 混凝土材料不会改变桩体破坏顺序但会提高桩体发生二次弯断对应的极限路堤填筑高度(图 4(d)),进而有效地提高路堤的整体稳定性。

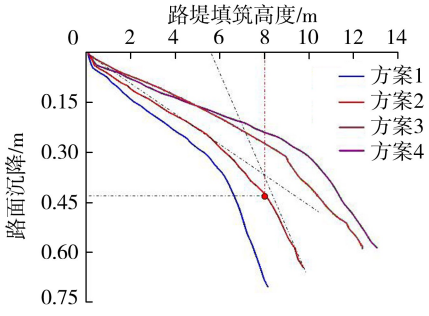


图 3　路堤填筑高度-路面沉降关系曲线

Fig. 3　Relationship curves between embankment filling height and pavement settlement

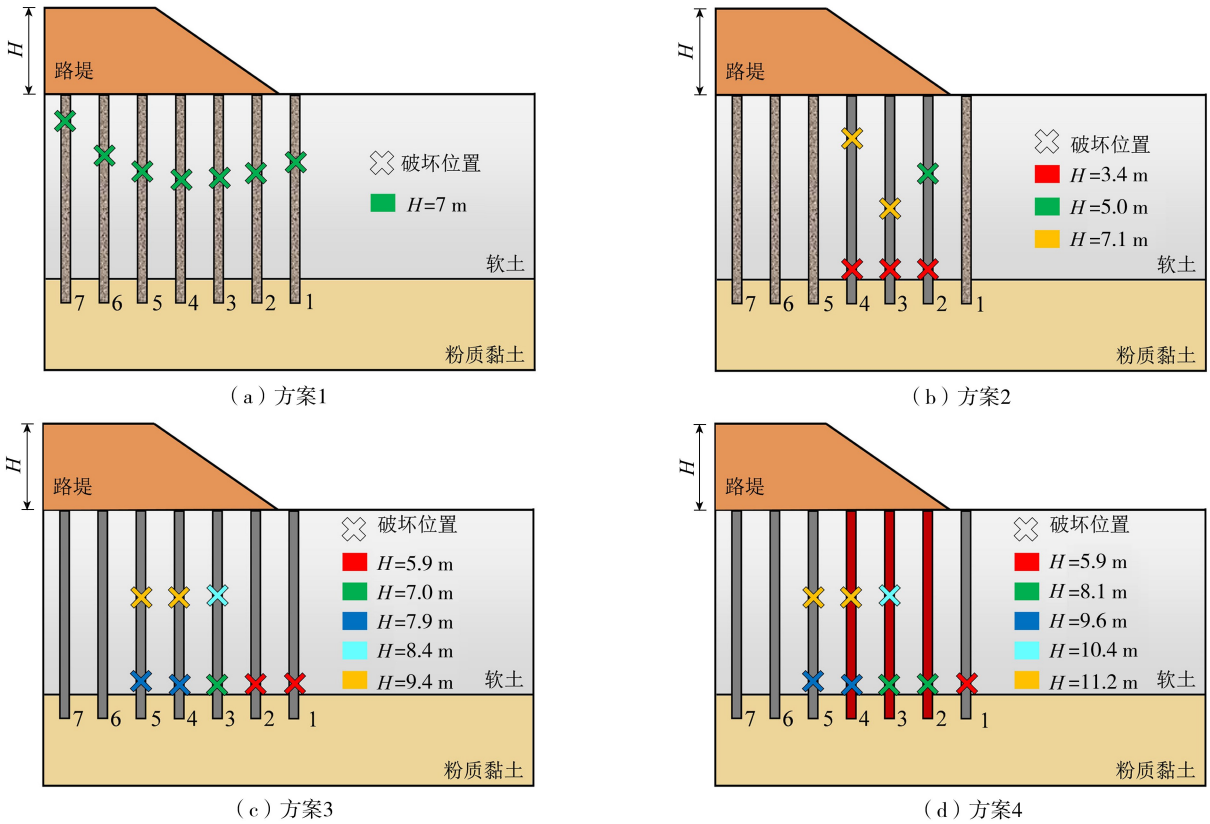


图 4　不同方案桩体破坏模式

Fig. 4　Failure modes of pile under different schemes

2.3　不同类型复合地基剪应变发展规律

图 5 为碎石桩复合地基(方案 1)在填筑过程中地基土的塑性剪应变发展过程。塑性剪应变首先在路堤中心出现并逐渐向坡脚发展,当填筑高度到达 7 m 时,路堤和路基中出现一条完整贯通的滑动带,此时路堤发生整体失稳。当采用碎石桩与素混凝土桩组合布桩方式(方案 2)时,塑性剪应变主要在坡脚以及路堤中心位置处累积,而增强区由于桩体强度较大,土体塑性应变累积量较小,表现为路堤中心与坡脚以外出现高剪应变区域,但相邻剪应变区不连通(图 6(a)(b)),然而当增强区的素混凝土桩发生弯断破坏以后,塑性区贯通,路堤发生整体失稳(图 6(c))。图 7 为 C30 素混凝土桩复合地基(方案 3)的塑性剪应变发展过程,软土层中的塑性剪应变首先出现于路堤中心以及坡脚以外区域,路堤中心处剪应变向坡脚处发展,坡脚位置处剪应变则向路堤中心方向逐渐发展,当填筑高度为 9.8 m 时,塑性区整体贯通,路堤发生整体失稳。对比图 7

与图8可以发现,当在坡脚与坡肩之间采用高强度混凝土桩时,可以有效限制坡脚外土体塑性剪应变的产生与发展,进而显著提高路堤的整体稳定性。

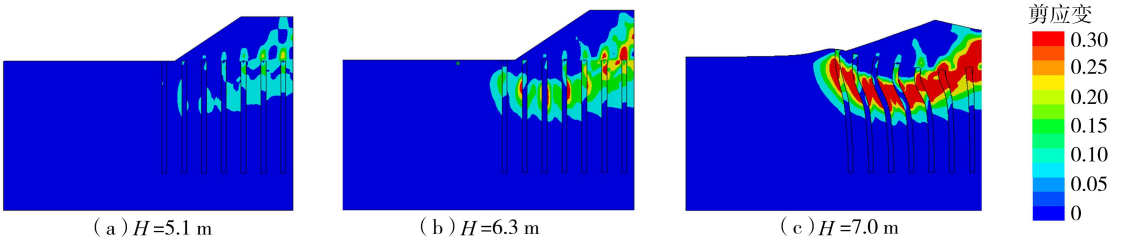


图5 方案1塑性剪应变发展过程

Fig. 5 Development process of plastic shear strain in Scheme 1

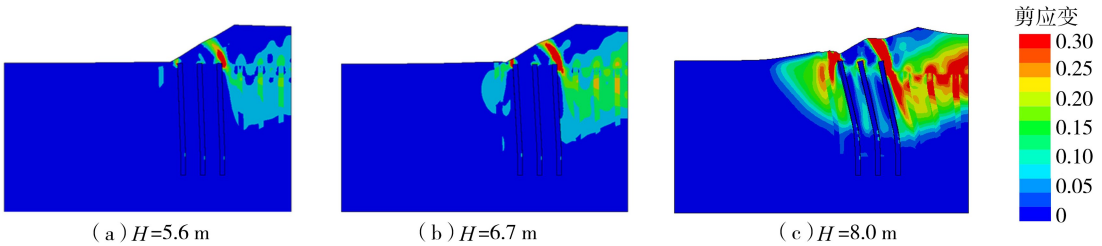


图6 方案2塑性剪应变发展过程

Fig. 6 Development process of plastic shear strain in Scheme 2

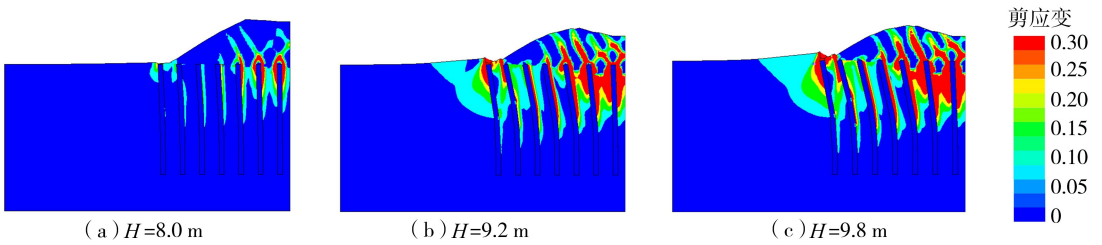


图7 方案3塑性剪应变发展过程

Fig. 7 Development process of plastic shear strain in Scheme 3

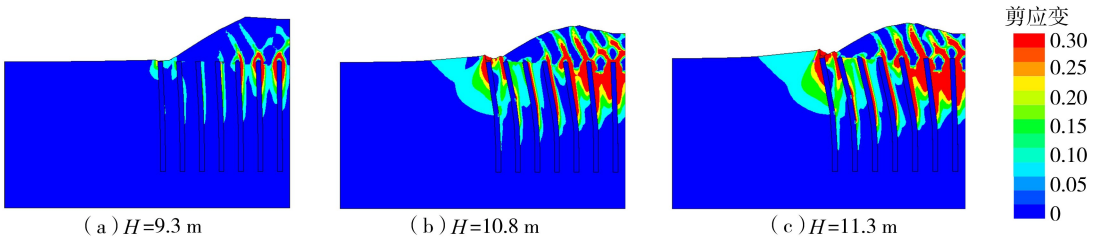


图8 方案4塑性剪应变发展过程

Fig. 8 Development process of plastic shear strain in Scheme 4

2.4 不同类型复合地基整体破坏模式

图9为不同类型复合地基在路堤荷载作用下的破坏机制以及临界破坏面形态特征。①如图9(a)所示,碎石桩复合地基在路堤荷载作用下,剪应变首先在路堤中心区域呈渐进式发展趋势,碎石桩同时发生剪切破坏,随后土体中形成完整贯通的塑性剪切区,最终导致路堤整体失稳。②如图9(b)所示,碎石桩与素混凝土桩组合复合地基桩体同时存在剪切破坏与弯曲破坏现象,其中素混凝土桩呈渐进式弯曲破坏特征。值得注意的是,土体剪应变场在此类复合地基中表现出渐进式与倒退式发展并存的规律,当增强区素混凝土桩发生二次弯断后,塑性剪切区贯通,路堤发生整体失稳。③如图9(c)所示,素混凝土桩复合地基在路堤荷载作用下,桩体破坏由坡脚位置处开始触发,向路堤中心逐渐发展,坡肩以外桩体会发生两次弯断破坏,并将桩体分为上、中、下3个部分,上部与下部桩体呈逆时针旋转趋势,中部桩体则呈顺时针旋转趋势。在土体塑性应变发展方面,坡脚区域剪应变为倒退式发展,路堤中心区域为渐进式发展,而坡肩位置则出现渐进与倒退应变

发展现象。当达到极限路堤填筑高度时,塑性剪切区贯通的临界滑动面位于两次弯断破坏位置之间。此外,混凝土桩体强度参数的提升虽不改变其破坏发展规律的基本模式,但可通过提高破坏阈值从而有效延缓破坏进程。

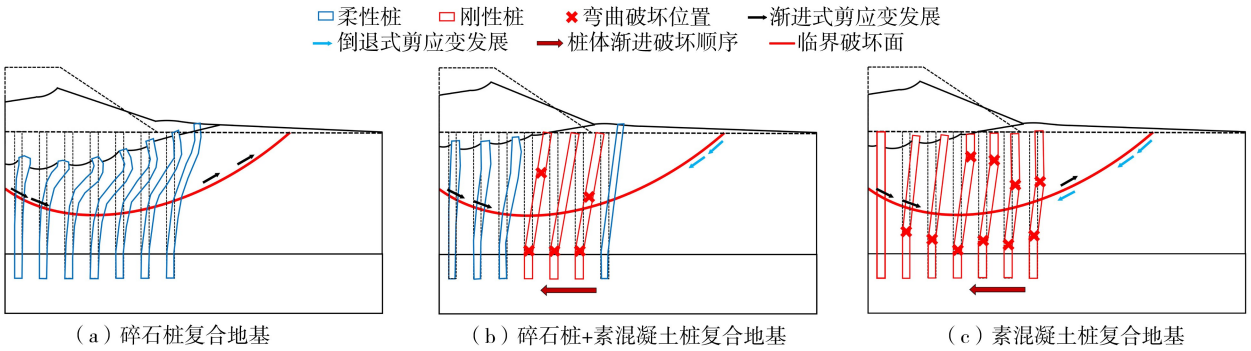


图 9　不同类型复合地基破坏模式及临界破坏面形态特征

Fig. 9　Failure modes and critical failure surface characteristics of different composite foundation types

3　复合地基优化设计方案

3.1　全生命周期成本-效益分析方法

在实际工程中,在确保路堤稳定性以及安全性的情况下,需要选择经济性最优的设计方案。全生命周期成本-效益分析方法是一种优化资源分配、选择经济性最优的防灾策略的一种评估方法[15,27],通过计算资产(如建筑、公路等)在整个生命周期内因各种原因受损可能导致的总经济损失,并与加固措施的成本对比,判断投资是否合理。成本-效益分析是一种广泛认可的用于比较多种替代性投资的工具,可以应用于多种情景中。本文采用成本效益比指标评估加固措施经济回报,特定加固措施的成本效益比为加固措施的效益净现值与实施加固措施的初始成本的比值,其中特定加固措施的效益净现值为完全破坏时的预期损失现值与加固措施下的损失现值之差。成本效益比大于 1 表示投资回报为正,即资产全生命周期内的经济效益超过加固措施建设成本,成本效益比越高,加固措施的经济效益越显著;成本效益比小于 1 表示投资回报为负,但若考虑其他协同效益(如减少交通中断、提升安全性、保护环境及更广泛的社会效益等),仍可能具有实施价值。

3.2　最优复合地基设计方案选择

本文基于全生命周期成本-效益分析方法,对比不同方案地基处理方式,确定在稳定性具备冗余度的情况下,选择最具经济效益的设计方案,进而实现路堤系统的优化设计。

对不同方案地基处理方式进行全生命周期成本-效益分析,需要计算各方案的效益净现值和初始成本,进而得到各方案的成本效益比,成本效益比最高的地基处理方式即为经济性最优选择。以整幅宽度路堤、纵向长度 3.2 m 作为标准进行计算,各方案工程建设成本计算基于公路工程估算指标。

为了计算不同地基处理方式下的效益净现值,以蒙西至华中通道某铁路路堤标准段填筑高度作为基准(H=5.0 m),通过计算路堤在建设与服役过程全周期的破坏概率以及对应的修复成本,计算不同方案地基处理方式的成本效益比,计算结果如表 2 所示。可以发现,随着桩体强度的增大,路堤的破坏概率逐渐降低,对应进行修复的费用逐渐减少,效益逐渐提高。

根据表 2,采用不同复合地基设计方案,均可有效提高路堤的安全性,且具有良好的经济性,即具有良好的投资回报率(成本效益比大于 1)。随着复合地基桩体强度的提高,路堤受损修复费用显著降低,但成本效益比并不与之成简单的线性关系。分别对比方案 1、2 以及 3、4 的增强措施效果,其中增设 3 排增强桩后,路堤受损概率降低,安全冗余度显著提升,同时受损修复费用减少,成本效益比提高。这表明增强桩体强度虽然会增加初期造价,但通过减少维修损失与延长服役周期,实现了更好的投资回报。对比方案 2 与方案 3 的强度调整影响可以发现,方案 3 通过提升非增强区桩体强度,虽进一步降低了受损概率,但导致成本效益比下降。该现象表明,非增强区的桩体强度提升对提高投资回报率呈负作用,其经济效益弱于提高增强区桩体强度。相比于提高全部复合地基桩体的强度,通过在增强区(即路堤坡脚至路堤坡肩位置以下的 2、3、4 排桩)设置增强桩,安全系数显著提升,同时有效提高了成本效益比,具有良好的投资回报率,经济效益最佳。

其中方案4(设置4排C30素混凝土桩与3排C50素混凝土增强桩)在具有最高安全性的同时,具有最好的经济性,是本文工程背景下的最优复合地基设计方案。

表2 不同方案地基处理方式成本效益比

Table 2 Cost and benefit ratio of foundation treatment methods under different schemes

方案	破坏概率	修复费用/元	加固策略效益/元	复合地基成本/元	成本效益比
1	0.64	82821	46587	37633.36	1.24
2	0.49	63410	65998	49978.16	1.32
3	0.33	42255	87152	66437.90	1.31
4	0.25	31782	97626	71866.57	1.36

4 结 论

a. 在路堤荷载作用下,碎石桩复合地基桩体发生剪切破坏,且路堤下所有桩体同时发生破坏;碎石桩与素混凝土桩组合复合地基桩体同时存在剪切破坏与弯曲破坏现象,其中素混凝土桩发生渐进式弯曲破坏;素混凝土桩复合地基桩体破坏由坡脚位置处触发,向路堤中心逐渐发展,坡肩以外桩体会发生两次弯断破坏,并将桩体分为上、中、下3个部分,上部与下部桩体呈逆时针旋转趋势,中部桩体则呈顺时针旋转趋势;此外,在坡脚与坡肩之间采用高强混凝土可防止桩体二次弯断,有效提高路堤整体稳定性。

b. 碎石桩复合地基在路堤荷载作用下,土体塑性区首先在路堤中心区域累积,呈渐进式发展趋势,最终形成贯通性塑性剪切区,导致路堤失稳。素混凝土桩复合地基坡脚及路堤中心剪应变分别呈渐进式与倒退式发展特征,坡肩位置同时存在以上两种演化形式。当达到极限路堤填筑高度时,临界滑动面位于桩体两次弯曲破坏位置之间。坡脚与坡肩之间设置高强度混凝土桩可有效抑制坡肩土体塑性剪应变发展,路堤整体稳定性提高。

c. 相比于提高全部桩体强度,通过在路堤坡脚至路堤坡肩之间设置增强桩体,安全冗余度显著提升,同时有效提高了成本效益比,具有良好的投资回报率。采用C30素混凝土桩和C50素混凝土增强桩组成的刚性复合地基是本文4个方案中的最优复合地基设计方案,该设计方案既确保了路堤的最佳稳定性与安全性,同时最大限度地降低了施工以及之后维护过程中所需要的成本。

参考文献:

[1] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报,2007,29(1):1-13. (Gong Xiaonan. Generalized composite foundation theory and engineering application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 1-13. (in Chinese))

[2] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146. (Zheng Gang, Gong Xiaonan, Xie Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146. (in Chinese))

[3] 张秀勇,王海龙,李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):455-459. (Zhang Xiuyong, Wang Hailong, Li Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459. (in Chinese))

[4] 郑刚,周海祚. 复合地基极限承载力与稳定研究进展[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(7):661-673. (Zheng Gang, Zhou Haizuo. State-of-the-art review of ultimate bearing capacity and stability of composite foundations[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(7): 661-673. (in Chinese))

[5] Almeida M S S, Davies M C R, Parry R H G. Centrifuge tests of embankments on strengthened and unstrengthened clay foundations[J]. Géotechnique, 1985, 35(4): 425-441.

[6] Kitazume M, Maruyama K. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3): 437-455.

[7] 刘宏扬,罗强,薛元,等. 路堤荷载下CFG桩复合地基失稳破坏特性离心模型试验[J]. 岩土工程学报,2022,44(8):1502-1511. (Liu Hongyang, Luo Qiang, Xue Yuan, et al. Centrifugal model tests on failure characteristics of CFG pile composite foundation under embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1502-1511. (in Chinese))

[8] Zheng Gang, Xia Boyang, Zhou Haizuo, et al. Influence of deep-cement-mixing column rows on the performance of geosynthetics-

reinforced column-supported railway embankment[J]. Transportation Geotechnics,2023,41:101012.
[9] Zheng Gang,Yang Xinyu,Zhou Haizuo,et al. Numerical modeling of progressive failure of rigid piles under embankment load [J]. Canadian Geotechnical Journal,2019,56(1):23-34.
[10] Chai J C,Shrestha S,Hino T,et al. 2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns[J]. Computers and Geotechnics,2015,68:28-37.
[11] 郑刚,程雪松,周海祚,等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. 土木工程学报,2022,55(7):1-38. (Zheng Gang,Cheng Xuesong,Zhou Haizuo,et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering[J]. China Civil Engineering Journal,2022,55(7):1-38. (in Chinese))
[12] Jamsawang P,Yoobanpot N,Thanasisathit N,et al. Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment[J]. Computers and Geotechnics,2016,72:42-56.
[13] Xia Boyang,Zheng Gang,Zhou Haizuo,et al. Stability analysis and optimization of concrete column-supported embankments in soft soil[J]. Acta Geotechnica,2024,19(5):2515-2531.
[14] Dennemann K L. Life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge seismic retrofits[D]. Houston:Rice University,2010.
[15] Shadabfar M,Mahsuli M,Zhang Y,et al. Resilience-based design of infrastructure:review of models,methodologies,and computational tools[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems,Part A:Civil Engineering,2022,8(1):03121004.
[16] 郑刚,郭知一,杨新煜,等. 桩体刚度对复合地基支承路堤失稳破坏模式的影响研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊1):49-52. (Zheng Gang,Guo Zhiyi,Yang Xinyu,et al. Influences of stiffness of piles on failure modes of embankment of composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(Sup1):49-52. (in Chinese))
[17] 郑刚,杨新煜,周海祚,等. 基于渐进破坏的路堤下刚性桩复合地基的稳定性分析及控制[J]. 岩土工程学报,2017,39(4):581-591. (Zheng Gang,Yang Xinyu,Zhou Haizuo,et al. Stability and control strategy of ground improved with rigid piles to support embankments based on progressive failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(4):581-591 (in Chinese))
[18] Liu K W,Rowe R K. Numerical study of the effects of geosynthetic reinforcement viscosity on behaviour of embankments supported by deep-mixing-method columns[J]. Geotextiles and Geomembranes,2015,43(6):567-578.
[19] 韦芳芳,包淑珉,邵盛,等. 砂土中螺旋桩在斜拉荷载作用下的承载性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):77-83. (Wei Fangfang,Bao Shumin,Shao Sheng,et al. Bearing performance of helical piles in sand under oblique tensile load [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):77-83. (in Chinese))
[20] 姚云龙,刘鑫,邵志伟,等. 桩土复合路基浅层垫层内摩擦角测试研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):108-115. (Yao Yunlong,Liu Xin,Shao Zhiwei,et al. Test on internal friction angle of shallow cushion layers in pile-soil composite subgrade [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(4):108-115. (in Chinese))
[21] 黄俊杰. 路堤下素混凝土桩复合地基变形失稳机理与注浆加固试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
[22] Liu Hanlong,Ng C W W,Fei Kang. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay:case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007,133(12):1483-1493.
[23] Montazeri M,Amiri G G,Namiranian P. Seismic fragility and cost-benefit analysis of a conventional bridge with retrofit implements[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2021,141:106456.
[24] 池寅,黄乐,余敏. 基于 ABAQUS 的钢-聚丙烯混杂纤维混 凝土损伤塑性本构模型取值方法研究[J]. 工程力学,2017,34(12):131-142. (Chi Yin,Huang Le,Yu Min. Calibration method of damage plasticity model for steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete based on abaqus [J]. Engineering Mechanics,2017,34(12):131-142. (in Chinese))
[25] Zheng Gang,Zhang Xiaokai,Zhang Tianqi,et al. Numerical study on mechanical behavior and ultimate bearing capacity of shield segment joints under different load conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,139:105204.
[26] Villalobos F A. Model testing of foundations for offshore wind turbines[D]. Oxford:University of Oxford,2006.
[27] Padgett J E,Dennemann K,Ghosh J. Risk-based seismic life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment [J]. Structural Safety,2010,32(3):165-173.

(收稿日期:2025-07-29　编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.013

江苏跨江大桥形变 InSAR 时空特征分析

肖儒雅[1],王 迅[1],李子阳[2],李 益[3],何秀凤[1]

(1. 河海大学地球科学与工程学院; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 3. 南京市防汛机动抢险队)

摘要:基于 2015—2024 年 Sentinel-1 卫星数据,利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术对江苏省不同类型跨江大桥开展了长时序形变监测与分析。结果表明:InSAR 技术可有效获取跨江大桥形变信息,监测效果受桥梁几何结构及材料特性影响显著;连续钢桁结构与钢桥塔具有良好的后向散射特性,监测点分布密集,利于精细刻画其周期性形变特征;斜拉桥与悬索桥形变主要集中于主跨中部,并向两端逐渐递减,累计形变量存在明显差异。结合温度数据分析表明,连续钢桁结构桥梁表现出显著的热胀冷缩效应,其周期性形变振幅由主跨中心向两端递增;斜拉桥与悬索桥的温变效应主要集中于钢结构桥塔部位。

关键词:跨江大桥;形变监测;InSAR;小波分析;时空特征;江苏省

Spatiotemporal characteristic analysis of cross-river bridge deformation in Jiangsu Province with InSAR

Xiao Ruya[1], **Wang Xun**[1], **Li Ziyang**[2], **Li Yi**[3], **He Xiufeng**[1]

(1. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Hohai University*;
2. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*;
3. *Nanjing Flood Control Mobile Rescue Team*)

Abstract: Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) was applied to Sentinel-1 satellite imagery from 2015 to 2024 to monitor long-term deformation of various cross-river bridge types in Jiangsu Province, China. The results demonstrate that InSAR effectively captures cross-river bridge deformation, with monitoring efficacy influenced by geometric structures and material properties of the bridge. Continuous steel truss structures and steel bridge towers exhibit strong backscattering characteristics, enabling dense monitoring point distributions that finely depict periodic deformation characteristics. For cable-stayed and suspension bridges, deformation concentrates at the mid-span and attenuates toward both ends, with notable differences in cumulative deformation magnitude. Integrated temperature data analysis reveals pronounced thermal expansion and temperature shrinkage effects in continuous steel truss bridges, characterized by periodic deformation amplitudes increasing from the mid-span center to both ends. Thermal effects in cable-stayed and suspension bridges are predominantly localized at steel bridge towers.

Key words: cross-river bridge; deformation monitoring; InSAR; wavelet analysis; spatiotemporal characteristic; Jiangsu Province

桥梁作为交通网络中的关键组成部分,对区域乃至国家经济发展具有重要作用。受长期运营、结构老化、荷载增加等因素影响,桥梁易出现损伤,进而可能诱发重大安全事故。因此,桥梁结构健康监测是交通与工程领域关注的重点[1]。传统的桥梁形变监测主要依赖水准仪、加速度计、全站仪、全球导航卫星系统(GNSS)接收机等设备,这些测量设备存在人工成本高、监测点空间密度不足等问题。我国现役桥梁数量已超百万座,构建低成本、高精度、高自动化水平的形变监测体系,对于预防桥梁工程风险具有重要意义。

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是近年来快速发展的影像大地测量技术,得益于其高时空分辨率、厘米级监测精度及低监测成本等优点[2-3],能够满足安全监测时空连续性要求,可为现有监测手段提供有效补充,已广泛应用于地震形变[4]、火山活动[5]、滑坡预警[6-7]、城市沉降[8]等领域。近年来,高空间分辨率、快重访 SAR 卫星与时序 InSAR 分析方法的发展,进一步推动了 InSAR 技术广泛应用于大坝[9-10]、机场[11]、桥梁[12]等城市生命线工程及重大基础设施形变精细监测。

基金项目:国家自然科学基金项目(42174018,42574067)

作者简介:肖儒雅(1987—),男,教授,博士,主要从事影像大地测量研究。E-mail:ruya.xiao@hhu.edu.cn

通信作者:何秀凤(1962—),女,教授,博士,主要从事卫星大地测量和形变监测研究。E-mail:xfhe@hhu.edu.cn

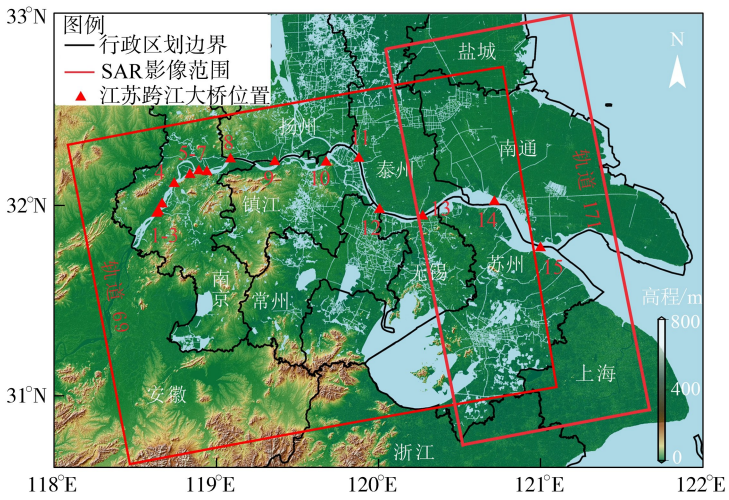
目前,国内外已有探索性研究利用 InSAR 技术对桥梁的形变特征进行精细刻画。Sousa 等[13]综合永久散射体与小基线集方法,对葡萄牙一失事桥梁进行历史形变回溯,首次验证了 InSAR 技术在桥梁形变监测中的有效性。Qin 等[14]基于时序 InSAR 技术监测大跨度钢结构桥梁的热胀冷缩形变,并结合特定桥梁结构分析了温度变化对桥体形变的影响。Ma 等[15]通过融合桥梁结构先验信息改进 InSAR 跨海大桥形变监测算法,提升了形变监测精度与风险识别能力。周云等[16]利用时序 InSAR 技术成功探测了京沪高铁南京大胜关长江大桥(以下简称"京沪高铁长江大桥")的显著周期性形变,并分析了其与温度变化的响应关系。Feng 等[17]结合长短期记忆神经网络与时序 InSAR 监测结果,分析了温度等外界因素对桥梁稳定性的影响,预测了桥梁形变特征,实现了异常预警。

现有研究不仅关注对特定桥梁开展 InSAR 形变监测的案例分析,也针对不同结构类型桥梁的形变规律进行了探索。例如:Qin 等[18]提出了一种针对桥梁的多时相差分 InSAR 技术,分析了拱桥与斜拉桥的形变特征差异;周云等[19]的研究中指出钢桥的回波信号强度优于钢筋混凝土桥,并对其机制进行了探究。但现有研究对桥梁类型的覆盖范围仍有限,对江苏省内的跨江大桥也缺乏系统研究。为此,本文选取 2015—2024 年欧洲空间局 Sentinel-1 卫星影像数据,以江苏跨江大桥为研究对象,开展长时序 InSAR 形变监测,旨在分析不同类型、材料桥梁形变在时空维度上的特征差异。

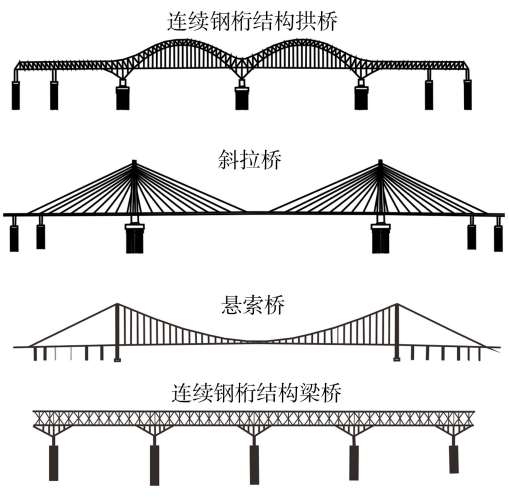
1　研究对象与数据

1.1　江苏跨江大桥概况

江苏省位于我国东部沿海地区,是长江三角洲、长江经济带和长三角城市群的重要组成部分。江苏地处长江、淮河及沂沭泗河下游,境内水系发达、河网密布,对陆路交通构成显著挑战。为此,江苏省建设了规模大、密度高的桥梁网络,其中尤以跨越长江的大跨度桥梁为标志性工程。仅在长江江苏段主航道,就已建成 15 座跨江大桥,其空间分布如图 1(a)所示。这 15 座跨江大桥中,超过半数位于南京市境内,其余长江沿岸城市境内分别建有 2 座或 3 座。



(a)桥梁空间分布及影像覆盖范围



(b)桥梁结构示意图

图 1　江苏跨江大桥空间分布与结构示意图

Fig. 1　Spatial distribution and structures of cross-river bridges in Jiangsu Province

长江江苏段主航道上的 15 座跨江大桥的桥梁类型、用途等信息如表 1 所示,按其结构主要可分为钢桁结构拱桥、斜拉桥、悬索桥与钢桁结构梁桥 4 种类型,其典型结构如图 1(b)所示。按桥梁用途统计,跨江大桥以公路桥为主,仅有少量公铁两用桥与铁路桥;就运营时间而言,除南京长江大桥运营已近 60 a 外,其余跨江大桥的运营时间在 5~25 a 之间,均未超过 30 a。江苏长江沿岸广泛分布由河流冲积作用形成的软土层,该类土体具有高含水量、大孔隙比、低承载力等特性[20-21],在长期荷载作用下易发生显著固结沉降,对跨江大桥等重大基础设施的长期安全运营构成潜在威胁。

表1 江苏跨江大桥基本信息

Table 1 Basic information of cross-river bridges in Jiangsu Province

编号	桥梁名称	桥梁类型	桥梁用途	通车时间
1	京沪高铁长江大桥	钢桁结构拱桥	铁路桥	2011年6月
2	南京大胜关长江大桥	斜拉桥	公路桥	2005年10月
3	南京江心洲长江大桥	斜拉桥	公路桥	2020年12月
4	南京长江大桥	钢桁结构梁桥	公铁两用桥	1969年1月
5	南京八卦洲长江大桥	斜拉桥	公路桥	2001年3月
6	南京新生圩长江大桥	悬索桥	公路桥	2025年11月
7	南京栖霞山大桥	悬索桥	公路桥	2012年12月
8	南京龙潭大桥	悬索桥	公路桥	2025年1月
9	润扬大桥	悬索-斜拉桥	公路桥	2005年4月
10	五峰山大桥	悬索桥	公路桥	2021年6月
11	泰州大桥	悬索桥	公路桥	2012年11月
12	常泰长江大桥	斜拉桥	公铁两用桥	2025年9月
13	江阴大桥	悬索桥	公路桥	1999年9月
14	沪苏通长江公铁大桥	斜拉桥	公铁两用桥	2020年7月
15	苏通大桥	斜拉桥	公路桥	2008年6月

1.2 研究数据

本文采用Sentinel-1卫星C波段合成孔径雷达(SAR)影像开展江苏跨江大桥形变监测与分析,空间分辨率约20 m。影像覆盖范围如图1(a)所示,共选取2015—2024年550景渐进式扫描地形观测(terrain observation by progressive scans,TOPS)模式VV极化单视复数影像,数据涵盖两个轨道:轨道69(275景,2015年4月至2024年10月)与轨道171(275景,2016年1月至2024年3月)。

此外,本文利用Sentinel-1卫星精密轨道星历产品与30 m空间分辨率的哥白尼数字高程模型(DEM)去除InSAR数据处理过程中轨道误差和参考相位对形变监测结果的影响。为探究温度变化对桥梁形变的驱动作用,结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA5再分析资料中0.25°×0.25°的时均气温数据分析桥梁形变与温度变化的响应关系。

2 时序InSAR形变监测方法

InSAR形变监测的基本原理是利用同一地区不同成像时刻的SAR回波信号之间的相位差,获取研究区地表形变信息[22]。本文采用GAMMA软件对Sentinel-1卫星数据进行处理,结合卫星精密轨道数据以削弱轨道误差,利用DEM数据对SAR影像进行精确配准、地理编码以及地形相位去除等。根据时空基线情况,设定每景影像最多与后续5景进行组合的小基线集干涉策略,以平衡数据量与处理效率。最终轨道69与轨道171分别生成了1 360幅和1 355幅干涉图,其最长时间基线分别为168 d和144 d,最短时间基线均为6 d,干涉图的时空基线结果如图2所示。

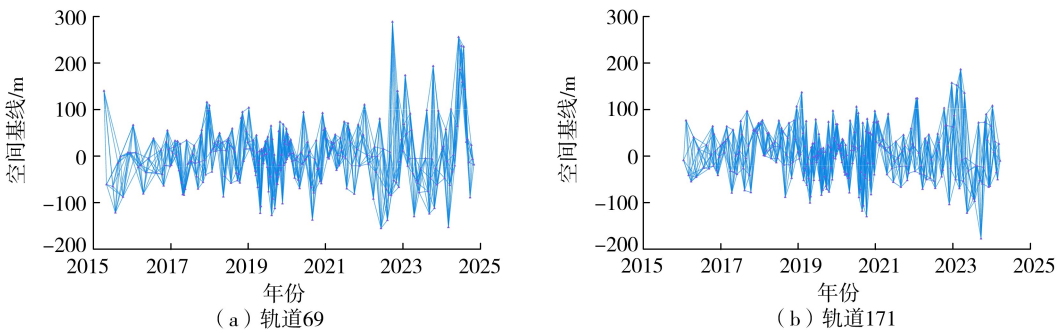


图2 江苏跨江大桥时序InSAR形变监测干涉图时空基线信息

Fig. 2 Temporal and spatial baselines of interferograms for time-series InSAR deformation monitoring of cross-river bridges in Jiangsu Province

本文基于StaMPS/MTI框架,应用改进的时序InSAR分析策略获取江苏跨江大桥形变信息。先利用振幅离差指数法选取候选监测点,然后采用迭代低通滤波提取候选点的空间相关相位分量,根据干涉相位时间

序列标准差进一步筛选候选点;将所有候选相干目标重采样以改善低相干区域的相位质量,并利用统计费用网络流方法[23]进行干涉相位解缠;最终基于最小二乘法估计监测目标的形变信息。

3　跨江大桥形变 InSAR 监测结果与分析

3.1　成像几何与散射特性

受 SAR 侧视成像几何影响,雷达波束斜向照射地表,导致不同地物特性与几何结构的目标监测效果存在差异。图 3 为不同类别地物的散射特性示意图。卫星雷达波到达水面时发生近似镜面反射,传感器难以有效接收回波信号,后向散射强度弱,因此长江水体呈现为低灰度值区域;而江面上的船只、桥梁则因后向散射强而显示为高灰度值目标。

(a)水体镜面反射　(b)船只二面角反射　(c)混凝土桥面镜散射、二面角反射　(d)钢结构桥二面角反射

图 3　不同地物 SAR 散射特性对比

Fig. 3　Comparison of SAR scattering characteristics of different ground objects

由于桥梁几何结构、表面材料的差异,跨江大桥上 InSAR 监测点的空间分布特征区别显著。例如,京沪高铁长江大桥跨江部分被连续拱形钢桁结构覆盖,钢桁结构与桥面及钢桁结构之间形成多个二面角反射结构,引发雷达信号多次反射,使得大量回波信号能被卫星传感器接收。因此,桥体部分在 SAR 强度影像上呈现明亮特征,监测点分布密集,且同样呈拱形(图 4(a))。南京大胜关长江大桥为钢塔斜拉桥,桥面为混凝土路面,雷达信号照射时易发生近似镜面反射;路面与路灯、斜拉索等桥梁构件可形成二面角,使部分回波信号到达卫星传感器。但其桥面两侧的斜拉索间距较大,因此桥体部分的 InSAR 监测点数量显著少于京沪高铁长江大桥;钢结构桥塔的散射特性较好,故南北两侧桥塔处的监测点分布相对密集(图 5(a))。

3.2　跨江大桥形变 InSAR 时空特征

本文选取京沪高铁长江大桥(钢桁结构拱桥)、南京大胜关长江大桥(斜拉桥)、南京长江大桥(钢桁结构梁桥)和江阴大桥(悬索桥)这 4 座覆盖了江苏长江主航道上全部桥梁结构类型的典型跨江大桥进行 InSAR 形变分析,4 座桥梁的建成通车时间在 10~60 a 范围内,具有显著的差异性,能够代表不同服役阶段的大桥状态。

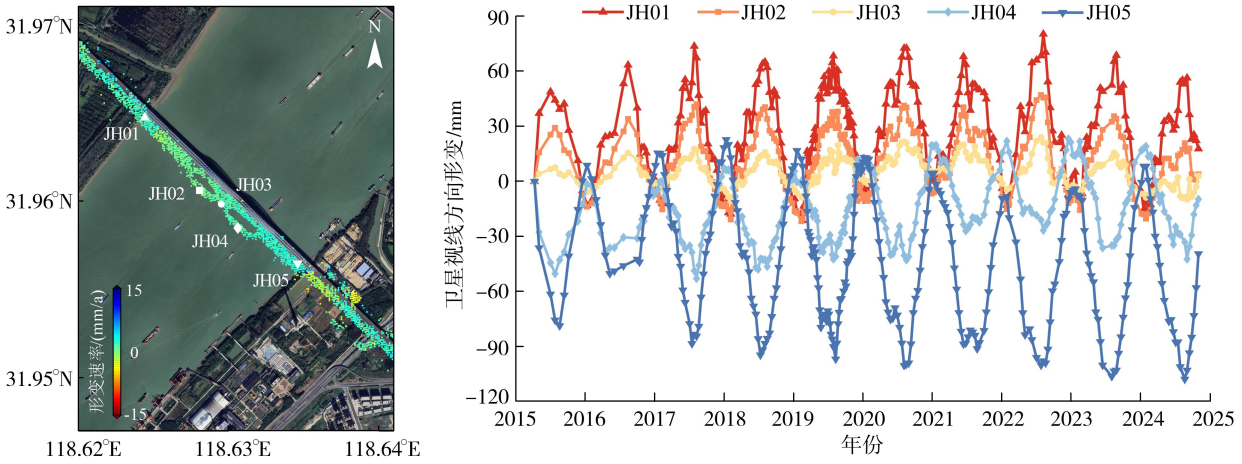
3.2.1　京沪高铁长江大桥

京沪高铁长江大桥是南京市境内唯一的高速铁路桥,设计为连续钢桁结构拱桥,采用六线轨道设计,是同时服务于京沪高铁、沪汉蓉高铁及南京城市轨道铁路的过江通道。主桥长 1 615 m,于 2011 年 6 月建成通车,可容纳 3 种不同速度等级的列车同时运行[24]。图 4(a)为桥体年平均形变速率监测结果。5 个 InSAR 典型监测点:JH01、JH05 位于钢桁结构东西两侧,JH02、JH04 位于两处拱形钢结构顶端,JH03 位于主桥中心拱形结构的连接处,沿卫星视线方向的形变时间序列结果如图 4(b)所示,其中正值表示桥体形变朝向卫星,负值表示形变远离卫星。桥梁各部位均存在明显周期性形变,主桥中部区域形变振荡幅度最小,向两端方向逐渐增大。此外,钢桁梁南北两侧(JH01 与 JH05)的形变相位相反。该周期性形变除受钢结构温度敏感性影响外,列车行驶的动态荷载亦可能是重要的驱动因素之一。

3.2.2　南京大胜关长江大桥

南京大胜关长江大桥于 2005 年 10 月正式通车,已运营超过 20 a,是我国首座钢塔斜拉桥。该桥桥面为六车道设计,主跨跨径 1 288 m,南北两侧各设一座 215 m 高的索塔。其桥面以上塔柱为钢结构,桥面以下塔柱为钢筋混凝土结构[25]。图 5(a)为桥体年平均形变速率监测结果,选取的 5 个典型 InSAR 监测点(DSG01、DSG05 分别位于桥梁主跨南北两端,DSG02、DSG04 分别位于南北两座索塔的钢结构部位,DSG03 位于主跨中心的斜拉索锚固区)形变时间序列如图 5(b)所示。

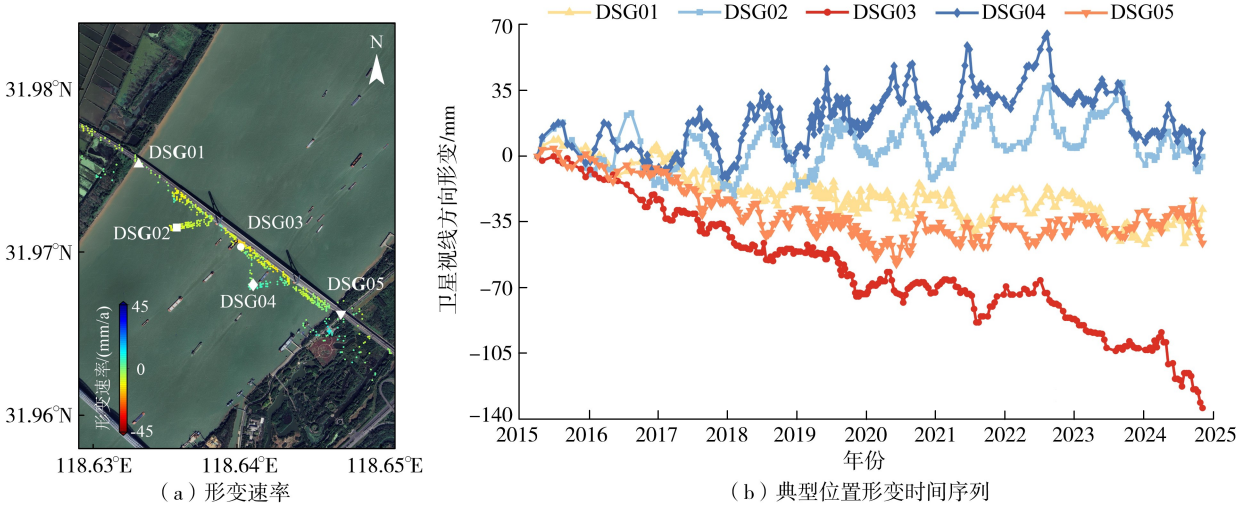
由图 5(b)可知,桥梁跨径南北两侧桥体区域(DSG01、DSG05)较为稳定,10 a 累计形变量约为 40 mm。



(a)形变速率 (b)典型位置形变时间序列

图4 京沪高铁长江大桥形变时序InSAR监测结果

Fig. 4 Time-series InSAR deformation monitoring results of Beijing-Shanghai High-Speed Railway Bridge over the Yangtze River



(a)形变速率 (b)典型位置形变时间序列

图5 南京大胜关长江大桥形变时序InSAR监测结果

Fig. 5 Time-series InSAR deformation monitoring results of Nanjing Dashengguan Bridge over the Yangtze River

索塔钢结构部位(DSG02、DSG04)存在显著的周期性形变,且两塔时序振荡特征基本一致,除钢结构热胀冷缩的温度效应驱动外,桥面系竖向及水平向荷载对桥塔的影响亦可能是周期性振荡的原因。主跨中心区域(DSG03)形变特征显著,10 a累计形变量接近140 mm。由于斜拉桥结构特性导致受力分布不均,桥梁表面形变呈现显著的时空差异。

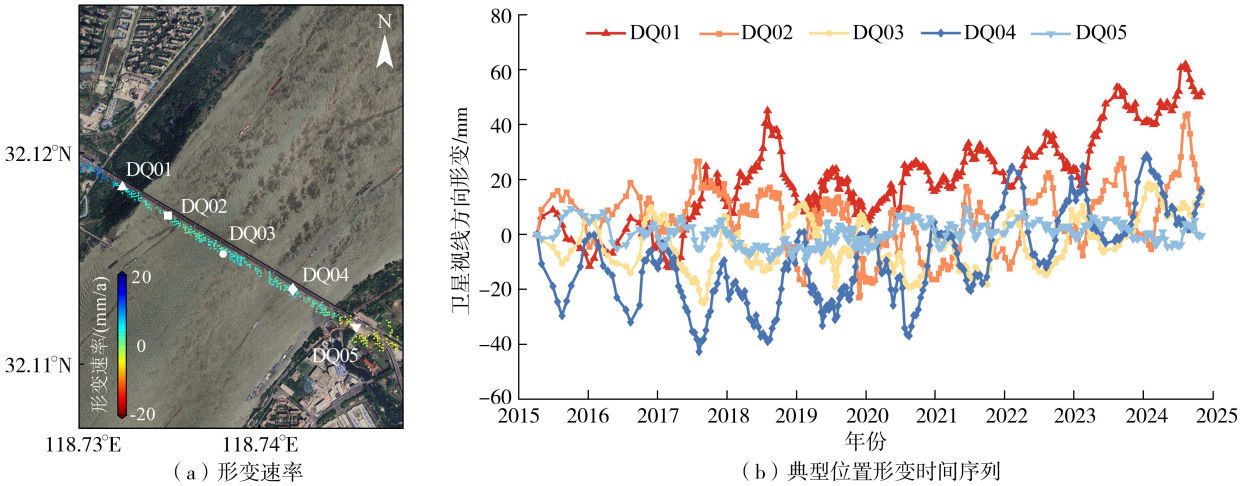
相较于连续钢桁结构覆盖的京沪高铁长江大桥,南京大胜关长江大桥桥面与桥塔的面层材料及结构形式差异显著,致使不同位置的形变特征一致性较差。此外,其钢塔处的周期性形变平滑度亦明显低于京沪高铁长江大桥,可能归因于公路桥所受随机交通荷载的非平稳性特性。相较于铁路周期性列车荷载,公路桥输入荷载的规律性较差,从而诱发更为复杂的桥梁结构动力响应。

3.2.3 南京长江大桥

南京长江大桥系长江流域首座我国自行设计建造的双层公铁两用桥,下层双线铁路桥于1968年10月通车,上层双向四车道公路桥于同年12月启用,运营已近60 a,至今仍是南京市跨江核心枢纽之一。南京长江大桥跨江主桥的上下两层由钢桁架结构连接。由于长期运营,公路桥面反复出现病害,2016年10月公路桥启动了为期27月的封闭维修,期间禁止机动车、非机动车及行人通行,但铁路桥维持正常运营[26]。

图6(a)为南京长江大桥年平均形变速率监测结果,选取的5个典型监测点(DQ01~DQ04点位于钢桁架主桥上部,DQ05位于南侧引桥处(该区段上下两层桥体无钢桁架连接))形变时间序列如图6(b)所示。

由图 6(b)可知,引桥处形变值较为稳定,而钢桁梁主桥则表现出周期性形变特征,此差异主要源于钢结构的热胀冷缩效应以及铁路桥荷载的耦合作用。



(a)形变速率　　(b)典型位置形变时间序列

图 6　南京长江大桥形变时序 InSAR 监测结果

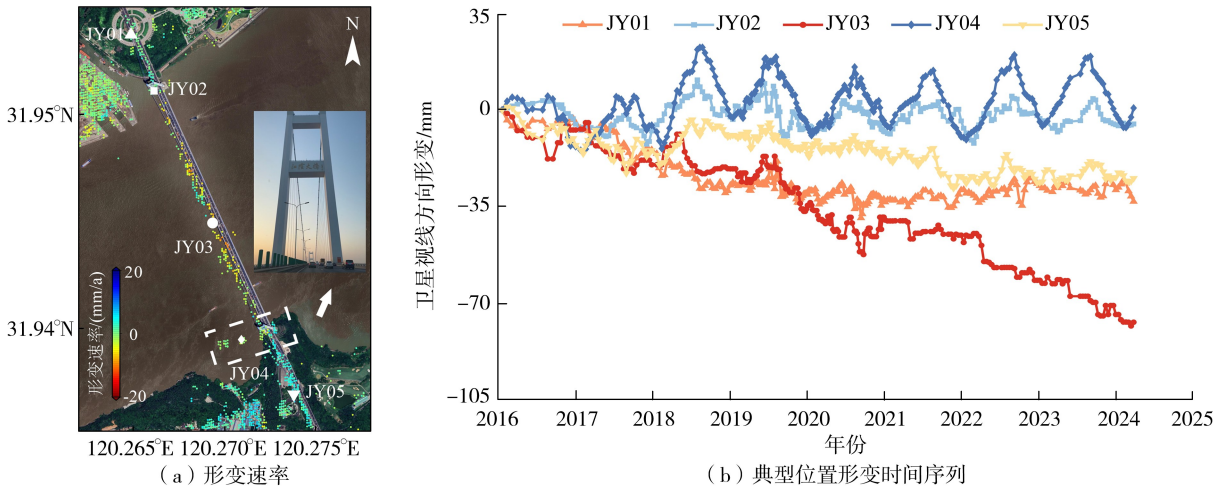
Fig. 6　Time-series InSAR deformation monitoring results of Nanjing Yangtze River Bridge

进一步的对比分析显示,南京长江大桥(连续钢桁梁结构)与京沪高铁长江大桥(连续钢桁拱结构)虽同属连续钢桁体系且均呈现周期性形变,但前者时序形变幅度显著小于后者。此现象可能源于南京长江大桥的长期服役,且其公路桥面板对钢桁结构热胀冷缩形变的有效约束作用。

3.2.4　江阴大桥

江阴大桥坐落于靖江市与江阴市之间,是北京至上海国道主干线的关键跨江工程,对贯通苏南苏北具有重要作用。大桥按六车道高速公路标准设计建造,于 1999 年 9 月建成通车,是我国首座跨径超千米的特大型钢箱梁悬索桥。其跨江主桥段无桥墩,仅靠南北两座 190 m 高的桥塔以及两侧缆索支撑桥体[27]。运营以来累计通行车辆已超 3 亿辆次,且超载、重载车辆通行比例持续增加,对桥梁结构长期性能构成显著影响。

图 7(a)为江阴大桥年平均形变速率监测结果,桥体中部形变较为显著,并向南北两端呈递减趋势。5 个 InSAR 监测点中,JY01、JY05 分别位于主桥南北侧主缆与桥体连接处,JY02、JY04 分别位于南北索塔处,JY03 位于主跨中点。JY04 周边水体区域内识别到的显著 InSAR 信号特征点,对应为南侧桥塔顶部。由图 7(b)可知,桥体中部形变显著,JY03 点累计形变量超 70 mm;主桥两端形变较为稳定,位于主缆与桥体连接处的 JY01、JY05 点累计形变约 35 mm,仅为主跨中部形变量的 50%;索塔处呈现周期性形变特性,南侧桥塔的形变振荡幅度较大。



(a)形变速率　　(b)典型位置形变时间序列

图 7　江阴大桥形变时序 InSAR 监测结果

Fig. 7　Time-series InSAR deformation monitoring results of Jiangyin Yangtze River Bridge

与斜拉桥(南京大胜关长江大桥)的形变空间分布特征相似,悬索桥(江阴大桥)亦呈现桥梁主跨中部形变最为显著、向桥体两侧方向逐渐衰减的特征。同时,索塔处形变受钢梁热胀冷缩效应与桥塔荷载的耦合作用影响,表现出周期性形变特性。对比图7(b)和图5(b)可知,江阴大桥主跨中部累计形变量仅为南京大胜关长江大桥对应值的50%,该差异或主要归因于二者在建造年代、服役时长以及桥体荷载模式等方面的不同。

4 跨江大桥形变温度驱动分析

为探究江苏跨江大桥不同位置的周期性形变特性,本文结合连续小波分析方法[28]进行研究。针对每座桥梁,分别选取3个典型监测点,其连续小波分析结果如图8所示。受连续钢桁结构温变效应影响,京沪高铁长江大桥与南京长江大桥在不同位置均表现出显著的年周期性形变特征,而南京大胜关长江大桥与江阴大桥的年周期性形变信号仅明显存在于南北钢结构桥塔处,桥梁主跨区域则未呈现稳定的周期性形变特征。基于小波变换识别的周期性形变特征,依据傅里叶级数理论,构建仅含年周期项的傅里叶级数模型$f(t)$:

$$f(t)=B_0+B_1t+B_2\cos(2\pi t)+B_3\sin(2\pi t) \tag{1}$$

式中:B_0、B_1分别为常数项与线性趋势斜率;B_2、B_3分别为年周期项系数;t为时间。根据周期项系数计算年周期性形变振幅A:

$$A=\sqrt{B_2^2+B_3^2} \tag{2}$$

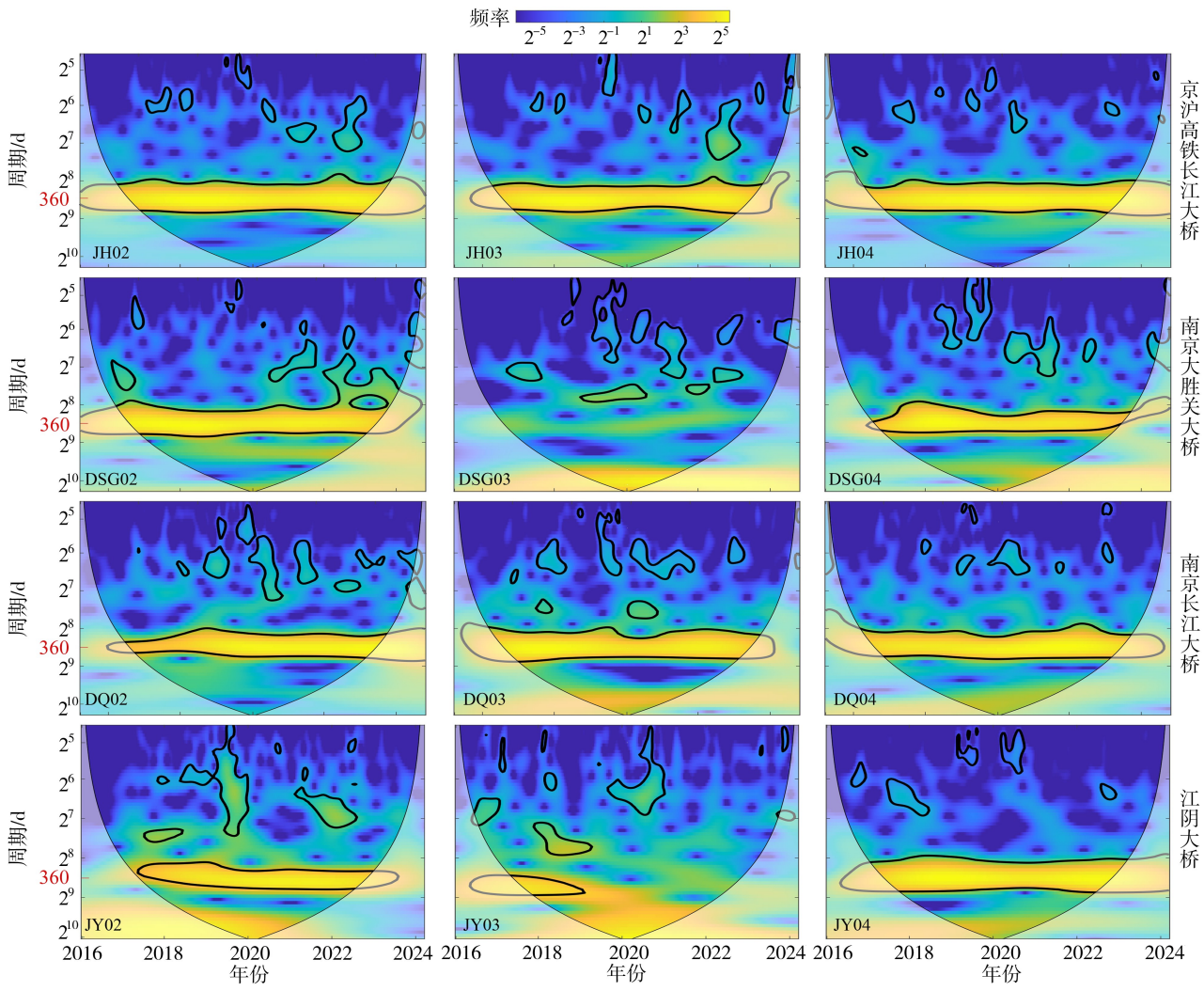


图8 4座跨江大桥典型监测点连续小波分析结果

Fig. 8 Continuous wavelet analysis results of typical monitoring points at four cross-river bridges

除主跨中心监测点DSG03(南京大胜关长江大桥)与JY03(江阴大桥)因无明显年周期性形变外,4座跨

江大桥各监测点的形变振幅计算结果如表 2 所示。

由表 2 可见,钢桁结构跨江大桥(京沪高铁长江大桥、南京长江大桥)的周期性形变振幅均呈现由主桥中部向两端逐渐增大的趋势,其中,京沪高铁长江大桥的振幅增幅最为显著。

此外,本文基于 ERA5 再分析资料计算每日平均气温,并选取与 InSAR 时序观测日期匹配的温度数据,开展形变与温度变化的交叉小波分析,结果如图 9 所示。图 9 揭示了桥梁形变与温度变化之间的相位关系:当监测点的形变与温度变化相位角为 0°时(如 JH02、JH03),两者呈正相关关系;当相位角为 180°时(如 JH04),形变响应滞后温度变化约 180 d(即 1/2 周期),此时二者呈负相关关系,这反映热胀冷缩效应下形变方向与温度升降呈反向变化。交叉小波对比分析表明,不同类型、材料桥体形变对温度变化的响应程度存在明显差异:京沪高铁长江大桥与南京长江大桥(均为钢桁结构)的形变受温度变化影响较为显著,而南京大胜关长江大桥(斜拉桥)与江阴大桥(悬索桥)的桥体中心区域温变效应相对较弱,两侧钢结构桥塔处的温度响应更为明显。

表 2　跨江大桥周期性形变振幅

Table 2　Periodic deformation amplitude of cross-river bridges

桥梁	监测点	振幅/mm
京沪高铁长江大桥	JH02	21.4±0.6
	JH03	7.6±0.4
	JH04	22.3±0.6
南京大胜关长江大桥	DSG02	12.4±0.6
	DSG04	9.9±0.9
南京长江大桥	DQ02	11.0±0.7
	DQ03	8.0±0.5
	DQ04	13.0±0.7
江阴大桥	JY02	3.3±0.3
	JY04	9.3±0.4

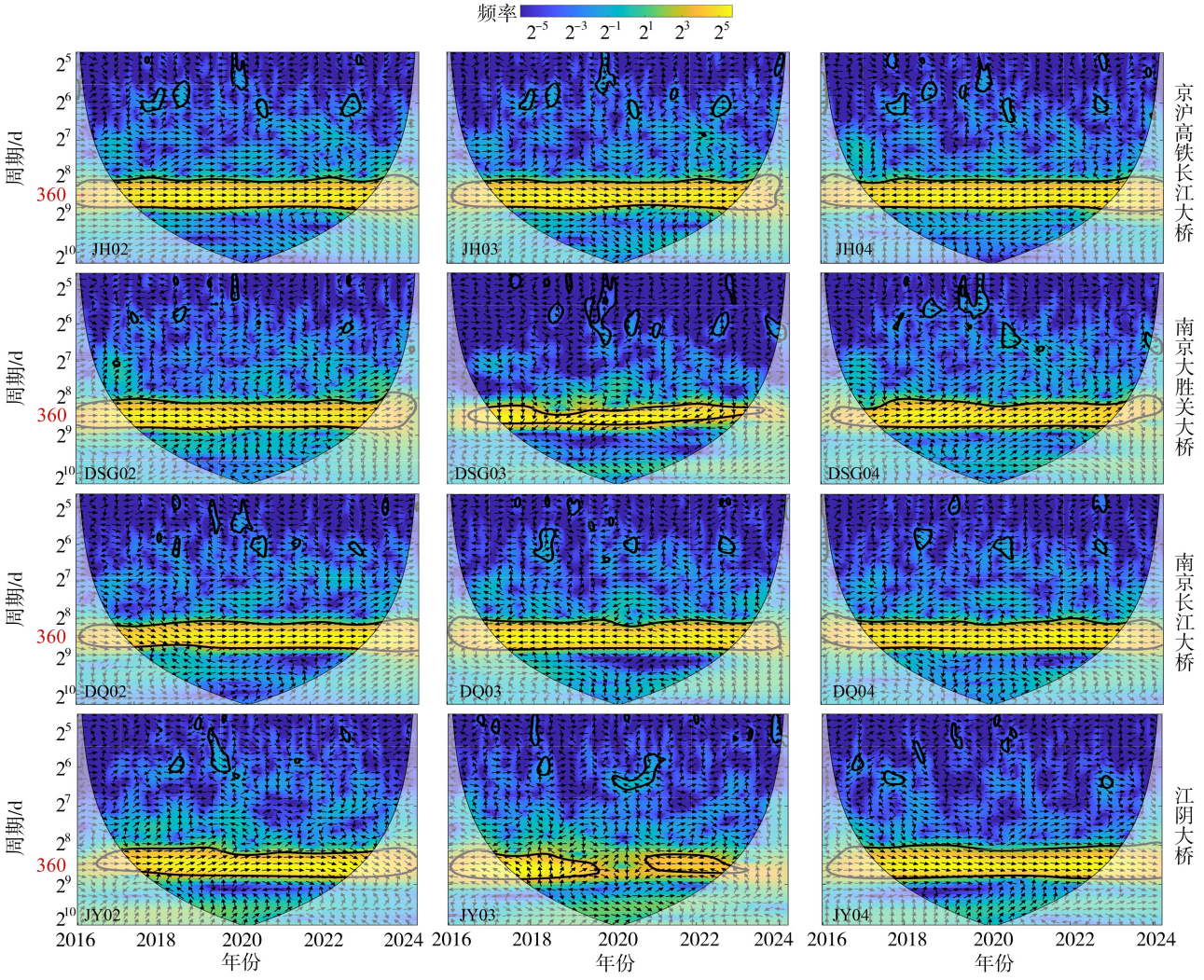


图 9　4 座跨江大桥典型监测点交叉小波变换结果

Fig. 9　Cross wavelet transform results of typical monitoring points at four cross-river bridges

5 结 论

a. InSAR 技术可有效获取跨江大桥形变信息,其监测效果受桥梁几何结构与材料特性影响显著。跨江大桥桥面与附属结构之间形成的二面角能显著增强 InSAR 后向散射强度。因此,在后向散射特性良好的连续钢桁结构与钢桥塔处,InSAR 监测点分布密集,可精细刻画桥梁的形变特征。

b. 不同类型跨江大桥的形变时空特征差异显著。连续钢桁结构桥梁整体呈现明显周期性形变,但振荡幅度存在空间分异;斜拉桥与悬索桥因结构特性导致各部位受力不均,形变主要集中于主跨中部,并向桥梁两端逐渐衰减;南京大胜关长江大桥主跨中心最大累计形变量约 140 mm,江阴大桥最大累计形变量约 70 mm。

c. 不同结构类型跨江大桥形变对温度变化的响应机制不同。京沪高铁长江大桥与南京长江大桥(钢桁结构)桥体形变与温度变化呈现显著相关性,其周期性形变振幅沿主桥中心向桥体两端递增。南京大胜关长江大桥(斜拉桥)、江阴大桥(悬索桥)桥梁中心区域温变效应相对较弱,其显著的周期性热胀冷缩形变主要集中于钢结构桥塔部位。

参考文献:

[1] 黄侨,李维珍,任远,等. 基于监测数据的悬索桥关键约束装置状态评估方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):61-68. (Huang Qiao, Li Weizhen, Ren Yuan, et al. Status assessment method of key restraint devices for long span suspension bridge based on monitoring data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 61-68. (in Chinese))

[2] 李振洪,朱武,余琛,等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报,2023,52(11):1805-1834. (Li Zhenhong, Zhu Wu, Yu Chen, et al. Development status and trends of Imaging Geodesy[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(11): 1805-1834. (in Chinese))

[3] Xiao Ruya, Yu Chen, Li Zhenhong, et al. InSAR stacking with atmospheric correction for rapid geohazard detection: applications to ground subsidence and landslides in China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 115: 103082.

[4] 许才军,熊维,刘传金. 利用大地测量观测资料研究青藏高原三维地壳形变及地震危险性评估进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):997-1009. (Xu Caijun, Xiong Wei, Liu Chuanjin. Progress in studying of 3D crustal deformation and seismic risk assessment of the Tibetan Plateau using geodetic observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 997-1009. (in Chinese))

[5] 许文斌,罗兴军,朱建军,等. InSAR 火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1632-1642. (Xu Wenbin, Luo Xingjun, Zhu Jianjun, et al. Review of volcano deformation monitoring and modeling with InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10): 1632-1642. (in Chinese))

[6] 李振洪,宋闯,余琛,等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):967-979. (Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979. (in Chinese))

[7] 廖明生,董杰,李梦华,等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报,2021,25(1):332-341. (Liao Mingsheng, Dong Jie, Li Menghua, et al. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 332-341. (in Chinese))

[8] Xiao Ruya, Wang Xun, Jiang Mi, et al. Decadal earth observation-informed analysis of urban riverbank deformation: InSAR insights into soft ground dynamics in Nanjing, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 144: 104868.

[9] 肖儒雅,何秀凤. 时序 InSAR 水库大坝形变监测应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1334-1341. (Xiao Ruya, He Xiufeng. Deformation monitoring of reservoirs and dams using time-series InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(9): 1334-1341. (in Chinese))

[10] Xiao Ruya, Jiang Mi, Li Zhenhong, et al. New insights into the 2020 Sardoba dam failure in Uzbekistan from Earth observation[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 107: 102705.

[11] Ma Peifeng, Wang Weixi, Zhang Bowen, et al. Remotely sensing large-and small-scale ground subsidence: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232: 111282.

[12] 廖明生,王茹,杨梦诗,等. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用[J]. 雷达学报,2020,9(3):409-424. (Liao Mingsheng,Wang Ru, Yang Mengshi, et al. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring[J]. Journal of Radars,2020,9(3):409-424. (in Chinese))

[13] Sousa J J,Bastos L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2013,13(3):659-667.

[14] Qin Xiaoqiong,Zhang Lu,Yang Mengshi,et al. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis[J]. Remote Sensing of Environment,2018,216:71-90.

[15] Ma Peifeng,Wu Zherong,Zhang Zhengjia,et al. SAR-Transformer-based decomposition and geophysical interpretation of InSAR time-series deformations for the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Remote Sensing of Environment,2024,302:113962.

[16] 周云,危俊杰,李剑,等. 基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(3):39-50. (Zhou Yun, Wei Junjie, Li Jian, et al. Research on temperature deformation monitoring of long-span bridges based on InSAR technology[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2024,51(3):39-50. (in Chinese))

[17] Feng Jinpeng,Gao Kang,Wu Gang,et al. A deep learning-based interferometric synthetic aperture radar framework for abnormal displacement deformation prediction of bridges[J]. Advances in Structural Engineering,2023,26(16):3005-3020.

[18] Qin Xiaoqiong,Ding Xiaoli,Liao Mingsheng,et al. A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,156:27-50.

[19] 周云,郝官旺,危俊杰,等. 基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构变形监测综述[J]. 工程力学,2025,42(4):25-37. (Zhou Yun,Hao Guanwang, Wei Junjie, et al. Review of PS-InSAR-based long-span bridges structural deformation monitoring[J]. Engineering Mechanics,2025,42(4):25-37. (in Chinese))

[20] 岑威钧,魏江梁,郑长海,等. 深厚软土覆盖层固结特性对面板堆石坝安全的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):39-46. (Cen Weijun,Wei Jiangliang,Zheng Changhai,et al. Influence of consolidation characteristics of deep soft soil overburden on the safety of a CFRD[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):39-46. (in Chinese))

[21] 吴建,周志芳,王浩,等. 太湖隧道湖相沉积软土工程特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):63-70. (Wu Jian,Zhou Zhifang,Wang Hao,et al. Study on engineering properties of lacustrine soft soils along the Taihu tunnel[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):63-70. (in Chinese))

[22] 肖儒雅,王迅,孙静怡,等. 国产 SAR 卫星差分干涉测量地表形变监测比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1517-1526. (Xiao Ruya,Wang Xun,Sun Jingyi,et al. Comparisons of differential interferometry of Chinese SAR satellites in ground deformation monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1517-1526. (in Chinese))

[23] Chen C W,Zebker H A. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization[J]. Journal of the Optical Society of America A,2001,18(2):338-351.

[24] 惠汝海,陈斌. 南京大胜关长江大桥主梁加速度响应的长期监测与分析[J]. 铁道建筑,2020,60(2):14-17. (Hui Ruhai, Chen Bin. long-term monitoring and analysis on main girder acceleration response of Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge[J]. Railway Engineering,2020,60(2):14-17. (in Chinese))

[25] 茅建校,桂桂,王浩,等. 台风下大跨度斜拉桥钢桥塔动力性能实测研究[J]. 中国公路学报,2023,36(7):102-113. (Mao Jianxiao,Gui Gui,Wang Hao,et al. Field measurement research on dynamic performance of steel pylon of a long-span cable-stayed bridge under typhoons[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(7):102-113. (in Chinese))

[26] 熊文,覃忠余,郭建,等. 南京长江大桥铁路层车致振动对公路层维修改造的影响分析[J]. 中国公路学报,2021,34(7):246-257. (Xiong Wen,Qin Zhongyu,Guo Jian,et al. Influence on highway bridge deck system reconstruction by train-passing-railway induced vibration of the Nanjing Yangtze River Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(7):246-257. (in Chinese))

[27] Liu Yun,Tao Tianyou,Wang Hao,et al. Probabilistic turbulence spectra of boundary-layer winds based on measurement at Jiangyin Bridge site[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2022,231:105159.

[28] Grinsted A,Moore J C,Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(5/6):561-566.

(收稿日期:2025-08-15　编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.014

基于 CNN-Transformer-ARG 的双护盾 TBM 掘进速度预测模型

刘永胜[1,2],沈军宏[3],李 达[3],侯 超[3]

(1. 隧道掘进机及智能运维全国重点实验室; 2. 盾构及掘进技术国家重点实验室; 3. 河南科技大学土木建筑学院)

摘要:为准确预测双护盾 TBM 掘进速度,提出了一种结合 CNN、Transformer 以及自适应残差门控(ARG)机制的智能预测模型。该模型通过双层卷积模块提取不同视角下掘进参数的局部特征,通过 Transformer 捕捉掘进参数的全局特征,并引入 ARG 机制动态加权所提取的局部和全局特征,基于历史掘进段监测数据预测未来掘进段的掘进速度均值、最大值和最小值。采用四川某山地轨道交通项目提取的 927 组掘进数据对模型进行了验证,结果表明:模型预测的均方误差、平均绝对误差、均方根误差和决定系数分别为 0.07、0.21、0.26 和 0.86,均优于 3 个对比模型;模型提取的多源特征经过权重分配关注重点信息后提升了预测结果的精度,验证了 ARG 机制对于多源模型的有效性,可为类似结构模型多源特征数据流的处理提供参考。

关键词:双护盾 TBM;掘进速度预测;Transformer;自适应残差门控

Prediction model of tunneling speed for double-shield TBM based on CNN-Transformer-ARG

Liu Yongsheng[1,2], **Shen Junhong**[3], **Li Da**[3], **Hou Chao**[3]

(1. *State Key Laboratory of Tunnel Boring Machine and Intelligent Operations*;
2. *State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology*;
3. *School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Science and Technology*)

Abstract: An intelligent prediction model integrating convolutional neural networks (CNN), Transformer, and an adaptive residual gating (ARG) mechanism was proposed, so as to accurately predict the tunneling speed of double-shield tunnel boring machines (TBMs). The model utilized a dual-layer CNN to extract local features of tunneling parameters from different perspectives, employed a Transformer to capture global features among these parameters, and incorporated the ARG mechanism to dynamically weight the extracted local and global features. Based on the monitoring data from historical tunneling segments, the mean, maximum, and minimum tunneling speeds of future tunneling segments were predicted. The model was validated using 927 sets of tunneling data extracted from a mountain rail transit project in Sichuan Province. The results indicate that the model achieves a mean square error of 0.07, a mean absolute error of 0.21, a root mean square error of 0.26, and a coefficient of determination of 0.86, all outperforming the other three comparative models. By assigning weights to the multi-source features extracted by the model, key information is emphasized, thereby improving prediction accuracy. This validates the effectiveness of the ARG mechanism in multi-source models and provides insights for similar structured models.

Key words: double-shield TBM; tunneling speed prediction; Transformer; adaptive residual gating

目前,隧道掘进过程中对于完整性较好的围岩,通常采用敞开式或单护盾隧道掘进机(tunnel boring machine,TBM)[1-4],而对于软岩、破碎围岩等复杂条件,则更适合采用双护盾 TBM[5-6]。双护盾 TBM 能够在掘进的同时完成管片安装,从而有效保障施工人员的安全,但是在高地应力软岩环境下,易发生掘进不平稳、卡机和坍塌等事故,影响掘进安全和效率,且会造成巨大的经济损失[7-8]。随着我国地下工程建设不断向深部和复杂地质区域推进,双护盾 TBM 掘进面临更多挑战。在隧道施工过程中,掘进速度不仅关系到整体施工进度,对掘进安全以及掘进控制参数的调控也具有重要的影响。因此,建立合理的双护盾 TBM 掘进速度预测模型,实现对不同地质条件下掘进速度的有效预测,具有重要的工程意义。

基金项目:河南省科技攻关项目(242102220037);盾构及掘进技术国家重点实验室开放课题项目(SKLST-2024-01)

作者简介:刘永胜(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事隧道及地下工程技术创新研究。E-mail:249674805@qq.com

通信作者:李达(1983—),男,教授,博士,主要从事岩土及地下工程理论和不良地质灾害治理研究。E-mail:49620364@qq.com

TBM 掘进参数预测模型可以归纳为理论模型、经验模型以及基于机器学习的智能模型三大类[9-11]。理论模型通常是基于物理、力学等基本原理,通过对掘进过程中岩石破碎、机器受力等的深入分析,建立数学方程或物理模型来描述掘进参数与地质条件、机器性能之间的关系[12]。然而,这类模型在实际应用中存在假设条件多、计算复杂、适应性差等问题。经验模型则是依据大量的工程实践数据,通过统计分析、回归分析等方法建立的掘进参数预测模型。这类模型虽然在实际工程中应用广泛,但也存在对历史数据依赖性强、泛化能力弱等缺点。基于上述原因,近年来基于机器学习的智能模型逐渐成为研究热点,此类模型能够自动提取数据特征、学习复杂关系、实现实时预测和优化控制,为 TBM 掘进参数预测提供了新的思路和方法[13-16]。例如:Armaghani 等[17]结合粒子群优化算法、帝国竞争主义算法两种优化算法构建了一种用于预测掘进速度的人工神经网络模型,结果表明,优化后的人工神经网格模型预测精度相较于未优化前有了显著提升;满轲等[18]基于哈里斯鹰优化算法对 LSTM-SVR 组合模型进行参数调优,结合改进的最小二乘数据融合方法,构建了面向 TBM 掘进参数预测的智能优化模型;李宏波等[19]为减少 TBM 掘进参数设定中的人为主观因素,提出了一种融合粒子群优化与最小二乘支持向量机(PSO-LSSVM)的 TBM 掘进参数智能预测方法,有效提高了掘进效率;Zhang 等[20]采用融合图卷积网络(GCN)和长短期记忆(LSTM)的深度学习模型,实现了对 TBM 掘进参数的实时预测,并采用多目标优化法,对主要操作参数进行了优化。

上述智能模型大部分是以 LSTM 为核心融合卷积神经网络(CNN)、GCN 等其他卷积算法的融合模型,其核心优势在于引入滑动卷积核在实际回归预测之前对输入数据进行特征提取,这种操作使 CNN 非常擅长从具有局部性特征的邻近参数变化中发现规律。相较于传统人工神经网络模型,上述智能模型在 TBM 掘进参数预测中表现出较强的时序建模能力,但 LSTM 模型本身依赖逐层序列处理,易受梯度消失影响,且在长序列数据上的计算效率较低,难以高效捕捉全局动态关联关系[21-22]。相比之下,Transformer 通过多头注意力机制,能够并行处理输入序列,有效提取特征之间的相互依赖关系,特别适合捕捉掘进参数间的复杂全局关系[23]。然而,Transformer 对局部时空特征的提取能力较弱,而 CNN 通过多尺度卷积核能够高效捕捉短期参数关联关系。基于上述研究背景,针对双护盾 TBM,本文通过结合 CNN 和 Transformer 模型的优势,实现对原始数据空间和时间特征的有效提取,并引入自适应残差门控(adaptive residual gating,ARG)机制在多源特征流之间自适应地选择更有价值的信息,从而构建基于 CNN-Transformer-ARG 的双护盾 TBM 掘进速度预测模型(以下简称“本文模型”)。该模型基于历史掘进环段统计数据预测下一环段掘进速度平均值的取值范围,可为双护盾 TBM 掘进施工提供指导。

1　模型原理与构建

1.1　CNN

CNN 的典型架构中卷积层通过滑动窗口机制实现局部特征捕获,池化层执行特征降维以抑制过拟合,而全连接层则完成全局特征分类或回归任务。卷积操作是一种局部加权的计算方式,可协助模型输入序列中的局部特征。对于时序数据预测而言,一般采用一维卷积核挖掘参数间的关联关系。

1.2　Transformer

Transformer 是一种基于注意力机制的新型神经网络架构,该网络架构彻底摒弃了传统的循环或卷积结构,通过编码器-解码器架构和多头注意力与前馈网络的设计,实现了对输入序列中元素间任意距离依赖关系的高效建模,并显著增强了对长序列全局信息的捕获能力。本文分析的是时间序列预测任务,故只采用 Transformer 编码器部分进行全局特征提取。Transformer 因其卓越的并行计算特性,解决了传统循环神经网络在处理长序列时可能存在的计算效率低下和梯度传播困难的问题,它通过计算序列中所有元素两两之间的权重,捕捉上下文信息进行预测。图 1 为 Transformer 编码器的基本结构,输入数据首先经编码层进入多头注意力层捕捉全局动态关联关系,随后通过前馈网络(包括全连接层和 ReLU)实现非线性变换;多头注意力机制与前馈网络层之后都连接残差连接层,其目的在于增强梯度传播。

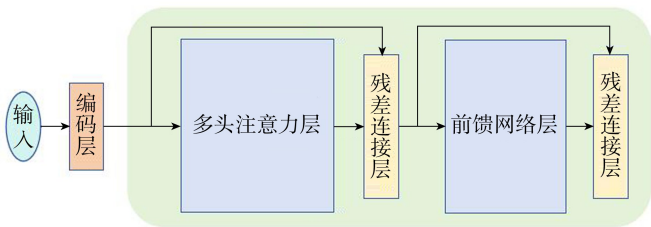


图 1　Transformer 编码器结构示意图

Fig. 1　Transformer encode structure

1.3 模型构建

本文模型是一个融合了 CNN 和 Transformer 优势的混合模型,能同时在时间和特征维度上进行建模,并通过一个 ARG 单元来优化信息流动。模型结构如图 2 所示。

本文模型主体由两个 1D CNN 和两个 Transformer 层构成,以形状为(6,11)的输入数据为例,数据首先经嵌入层后加入位置编码(positional encoding),形状变为(6,64);接着进入双分支 CNN 模块(多尺度卷积,核尺寸为 3 和 5,目的在于以不同视角高效捕捉短期参数关联关系)提取局部时序特征;随后分两部分,一部分输入 Transformer 层(具体结构如图 1 所示),捕捉全局依赖,另一部分同 Transformer 层出来的数据一起进入 ARG 层动态加权融合 CNN 和 Transformer 特征,实现多源特征的融合与选择。模型具体构建过程如下:

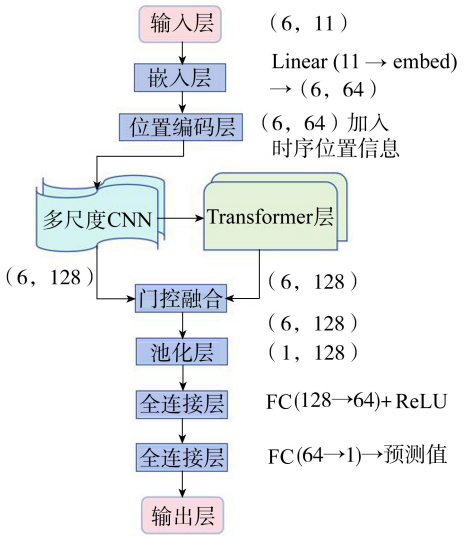


图 2 模型结构示意图

Fig. 2 Model structure

a. 位置编码。对于原始的 TBM 时序数据采用滑动窗口法进行分割得到特征序列。在正式进入模型训练前特征序列需要通过线性嵌入层映射到高维空间,为了保留时间序列位置信息,本文采用同 Transformer 模型相同的策略,使用正弦函数以及余弦函数进行位置编码。

b. 多尺度卷积特征提取。原始数据经过第一层映射和位置编码后进入 CNN 层进行卷积操作,该层采用双分支并行结构捕捉局部时序模式,其中卷积核分别设计为 3 和 5,获取不同时间尺度特征,多尺度特征通过通道进行平均融合。

c. Transformer 全局依赖建立。经过 CNN 层提取后的特征将进入 Transformer 层,其包含两个层级,每层由多头注意力机制和前馈网络组成,多头注意力可并行捕捉样本不同视角下的时序依赖。

d. ARG 机制。数据经过 CNN 层和 Transformer 层提取到局部卷积特征和全局时序特征两种不同尺度的时间序列依赖关系。为了在多源特征流之间自适应地选择更有价值的信息,本文引入 ARG 机制,该机制通过门控函数对不同路径的特征进行动态加权,自动调节信息流的通道贡献,从而提升模型对不同时间尺度特征的适应能力。具体而言,该机制通过一个门控网络生成门控权重来控制两者的融合比例。

2 模型验证

2.1 工程背景

四川某山地轨道交通项目的隧道穿越区位于青藏高原东缘过渡带,横跨四川盆地西缘与邛崃山北段,属强烈隆升背景下形成的冰川侵蚀型深切峡谷地貌。地面高程 2 750~4 300 m,隧道起讫里程左线 D1K101+415~D1K109+340,长 7 925 m,隧道最大埋深约 575 m;右线 DY1K101+360~DY1K109+222,长 7 862 m,隧道最大埋深约 545 m。隧道施工采用双护盾 TBM,设备由主机和后配套系统组成,整机长度约 194 m,总质量约 1 000 t。采用的 TBM 主要技术参数如下:刀盘开挖直径 6 480 mm,面刀 24 个,边滚刀 12 个,中心双刃滚刀 4 个,滚刀间距 78 mm,刀盘功率 2 450 kW,刀盘最大旋转速度 7.2 r/min,最大转速下扭矩 2 600 kN·m,脱困扭矩 12 120 kN·m,额定扭矩 8 080 kN·m。

2.2 掘进数据处理

2.2.1 数据集构建

用于模型训练的数据样本主要采集自隧道 DYK101+706.36~DYK102+532.60 段,根据地质勘察报告,该段穿越三叠系中统杂谷组地层,主要为变质砂岩夹板岩、灰岩,围岩等级主要为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级。TBM 数据采集频率为 1 次/min,采集的数据为包含贯入度、刀盘转矩在内的 80 余项参数数据,左线包含 79 d 的数据,右线包含 136 d 的数据。表 1 为部分数据统计信息。

针对 TBM 运行数据的非连续性特征,本文基于二值转台判别函数构建了多参数协同判定模型:通过同步总推力、刀盘扭矩和贯入度的参数组合,仅当三者均处于非零激活状态时,才能判定设备处于有效掘进工

表 1　TBM 掘进数据统计

Table 1　TBM tunneling data statistics

围岩等级	刀盘转速/(r/min)			刀盘扭矩/(kN·m)			总推力/kN			贯入度/(mm/r)			掘进速度/(mm/min)		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
Ⅲ	6.22	4.56	2.33	3466.06	1522.49	440.21	18311.90	9271.03	4083.81	18.95	10.42	4.43	70.09	46.60	20.01
Ⅳ	5.91	4.70	3.87	1896.59	1029.25	481.17	15599.20	9992.20	4070.24	13.10	9.08	5.02	67.26	40.58	22.72
Ⅴ	5.50	4.16	2.85	1879.82	838.80	252.14	14411.10	6251.87	2776.29	20.70	11.95	6.29	69.26	46.02	26.13

况,以此实现掘进环段的分割。经过提取掘进环段并去除单个掘进环段长度明显不合理的掘进环段,最终得到左线 462 组数据、右线 465 组数据,按围岩等级划分如下:Ⅲ级围岩 376 组数据,Ⅳ级围岩 110 组数据,Ⅴ级围岩 441 组数据。

2.2.2　异常值判定与核心参数筛选

孤立森林算法是一种基于树的集成方法,其基本思想是将异常样本视为在特征空间中的孤立点而正常样本则比较密集地分布在特征空间中。孤立森林算法通过构建一组随机划分的二叉树来实现这一目标。本文通过孤立森林算法快速识别数据中的异常值并采用线性插值的方法进行替换。异常值比例设置为 5%,该值基于 TBM 掘进数据的经验分布确定(异常值通常占总数据的 5%~10%),以避免过度剔除正常数据[24];树的数量设置为 100,该值通过初步敏感性分析确定,能在计算效率和检测准确性之间取得平衡,树的数量过多会导致计算开销增加,而过少则可能降低模型鲁棒性。图 3 为 TBM 某一掘进环段掘进速度平均值的修正示意图。

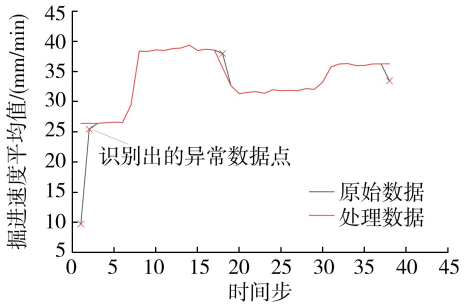


图 3　孤立森林算法异常值修正示意图

Fig. 3　Isolated forest algorithm anomaly correction

接下来对处理好的掘进数据进行特征分析,依次采用皮尔逊相关系数法和互信息法进行特征提取,前者能够快速识别与关键目标变量(如掘进速度平均值)有线性关系的传感器参数,并衡量变量之间的线性相关程度进行初步筛选,后者捕捉地质参数与机械响应的复杂非线性关系作为补充筛选。具体过程如下:

a. 使用皮尔逊相关系数法计算各参数之间的相关系数 r,并采用双重阈值特征筛选策略进行特征筛选:先基于皮尔逊相关系数($|r|>0.2$)保留与掘进速度相关的参数,继而以冗余阈值($r>0.9$)消除共线性特征,并依据目标相关性强弱确定保留优先级。图 4 为经过皮尔逊相关系数法初步筛选之后的特征热力图。

b. 使用互信息法计算初步筛选后的特征之间的互信息,然后设定互信息阈值为 0.5,以互信息值大于或等于 0.5 进行特征提取。采用阈值为 0.5,既有效保留了与掘进速度具有显著非线性关联的关键参数,又能有效减小特征维度,有助于后续模型训练。

通过上述两步特征提取过程,最终从 80 余项原始 TBM 监测参数中筛选保留 8 个核心参数,包括撑紧盾倾角、D 组油缸主推进压力、主驱动冷却回水流量、B 组油缸主推进压力、主驱动电机 1 速度、贯入度、A 组油缸主推进压力、刀盘转矩等关键特征。精简后的特征集既保留了与掘进性能强关联的机械驱动参数(如刀盘转矩、油缸压力),又涵盖了反映岩机相互作用的地质响应参数(如贯入度),在确保关键信息完整性的同时,显著降低了数据维度,为后续优化掘进参数模型奠定了数据基础。

2.2.3　滑动平均法降噪

在 TBM 掘进数据的处理过程中,由于设备振动、环境噪声等影响,采集到的数据往往含有一定的噪声。虽然进行了异常值的筛选与剔除,但为了提高预测模型的准确性,还需要对数据进行降噪处理。本文采用滑动平均法进行数据降噪。滑动平均法的原理简单来说就是对选定窗口内的观测值取平均,通过这样处理可以显著降低数据中的高频噪声,同时保留主要变化趋势。

采用滑动平均法降噪的窗口大小设置为 5,该值通过比较不同窗口大小(3、5、7)的降噪效果实验确定。窗口过小如 3 时降噪不足,过大如 7 时可能过度平滑导致趋势失真,窗口为 5 时,既能有效降低高频噪声(如设备振动引起的波动)又能保留掘进参数的主要变化趋势。

2.3　预测结果与分析

使用已筛选的 8 个核心参数作为模型输入,来分析模型在双护盾 TBM 掘进过程中的预测效果。将采集

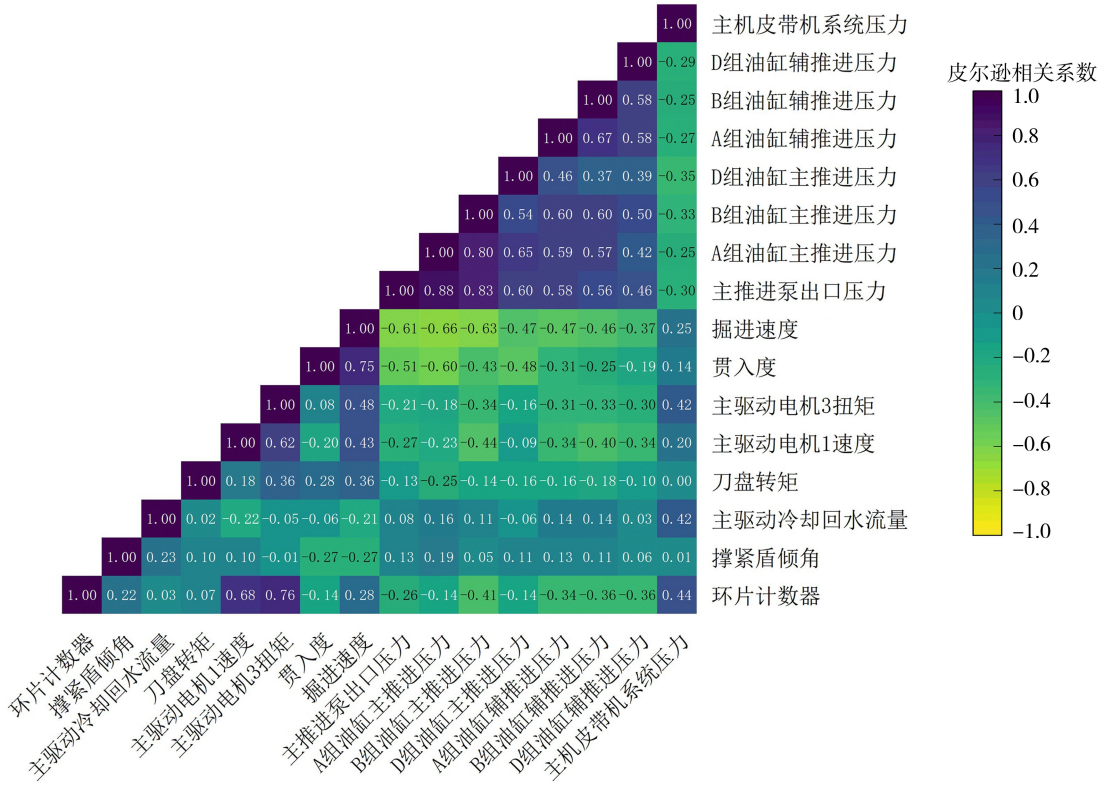


图4 皮尔逊相关系数法特征热力图

Fig. 4 Characteristic heat map of Pearson correlation coefficient method

到的927组数据按8∶2的比例进行划分,即80%的数据用于训练,20%的数据用于测试预测结果。此外,为全面评估模型的预测性能,选取均方误差(MSE)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)以及决定系数(R^2)作为评价指标。其中,MSE和RMSE更注重模型对较大误差的敏感性,MAE提供了误差的平均水平,而R^2则衡量了模型对目标变量的解释能力。通过对上述指标的对比分析,可以全面反映模型的预测效果。

2.3.1 预测结果

为了验证本文模型的可靠性,将本文模型与其他深度学习模型(CNN-LSTM-Attention、CNN-LSTM和LSTM)的预测结果进行了对比分析,结果如图5所示。各模型采用相同数据处理方法,时间序列样本分割窗口均为6,模型训练及验证均采用相同的优化策略即贝叶斯优化和时间序列交叉验证。

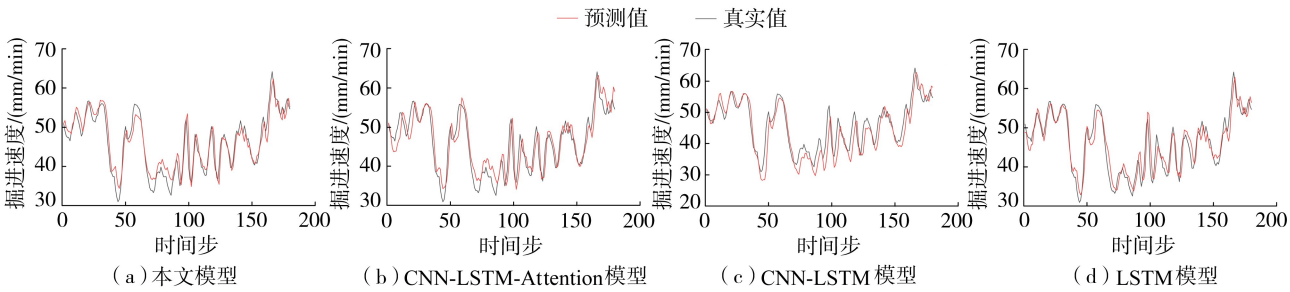


图5 4个模型预测值与真实值对比

Fig. 5 Comparison of predicted and actual values from four models

4个模型预测评价指标见表2,综合4项评价指标,本文模型展现了最优的预测性能,其R^2表现最优,预测误差(MSE、MAE、RMSE)均为最低。LSTM模型表现优异,与本文模型非常接近,其R^2达0.856,各项误差指标略高于本文模型。CNN-LATM-Attention模型预测性能明显弱于本文模型和LSTM模型,表明注意力机制和CNN结构的LSTM模型在本任务中未能显著提升预测精度。CNN-LSTM模型表现最不理想,其预测精度和对数据趋势的解释能力显著低于其他模型。

表 2　4 个模型预测评价指标统计

Table 2　Statistics of prediction evaluation metrics for four models

模型	MSE/(mm/min)^2	MAE/(mm/min)	RMSE/(mm/min)	R^2
本文模型	0.069	0.215	0.263	0.862
CNN-LATM-Attention 模型	0.105	0.253	0.327	0.811
CNN-LSTM 模型	0.128	0.262	0.358	0.756
LSTM 模型	0.071	0.228	0.278	0.856

可见,本文模型能够更有效地捕捉双护盾 TBM 掘进速度数据中的复杂时序模式和特征关系,验证了模型在掘进速度预测任务上的可靠性和优越性。但值得注意的是,CNN-LATM-Attention 和 CNN-LSTM 模型的表现均不及纯时序模型 LSTM,这表明当前 TBM 掘进速度预测任务可能更依赖于强时序动态特性。

2.3.2　ARG 机制对模型的影响

对于 CNN 层和 Transformer 层提取的两种特征,采用动态加权残差连接(模式 1)和直接融合(模式 2)两种不同的处理方法分别预测均值、最大值、最小值,以验证 ARG 机制的作用,结果如表 3 所示。

表 3　ARG 机制对模型的影响评价

Table 3　Evaluation of influence of ARG mechanism on model

模式	数据集	MSE/(mm/min)^2	MAE/(mm/min)	RMSE/(mm/min)	R^2
模式 1	均　值	0.069	0.215	0.263	0.862
	最大值	0.243	0.493	0.357	0.801
	最小值	0.099	0.241	0.315	0.810
模式 2	均　值	0.125	0.288	0.353	0.761
	最大值	0.277	0.358	0.526	0.773
	最小值	0.160	0.399	0.308	0.695

由表 3 可见,在均值预测中,模式 1 各评价指标全面优于模式 2;在最大值预测中,模式 1 的 MAE 略劣于模式 2,R^2、MSE 和 RMSE 优于模式 2;在最小值预测中,模式 1 的 MSE、MAE 和 R^2 表现更优,RMSE 则略劣于模式 2。总体来看,模式 1 的表现优于模式 2,尤其在均值和最小值预测中优势显著。此外值得注意的是两种模式下对于最大值的预测表现都不如均值和最小值,这种现象可能是源于模型对大误差的敏感性。综上所述,动态加权残差连接优于直接融合,验证了 ARG 机制在提升模型性能中的重要作用。

本文模型可用于实时预测双护盾 TBM 掘进施工掘进速度的均值、最大值和最小值,为施工参数优化(如刀盘转矩和推进压力调整)和安全预警(如卡机或坍塌风险)提供决策支持。相较于 CNN-LSTM 和 LSTM 等传统模型,本文模型通过 Transformer 的并行计算和 ARG 机制的动态融合,实现了更高的预测精度,在复杂地质条件下的多源数据处理中表现出一定的优势。此外,由于模型训练数据源自单一 TBM 隧道,对于和训练样本差异较大隧道的预测精度有待验证,若预测值与实际数据偏差较大,可采取措施如动态调整模型权重以偏向最新数据,或结合现场工程师经验进行手动校正,确保预测的可靠性。在实际施工中,可采用在线学习机制,持续更新模型参数以适应地质变化,辅以实时监控系统,及时调整掘进策略,从而减小对施工进度和安全的潜在影响。未来,可通过多项目数据验证,进一步推广该模型在不同 TBM 隧道类型中的应用。

3　结　语

本文构建了一种集成 CNN、Transformer 与 AGR 机制的复合型深度学习模型,旨在解决双护盾 TBM 掘进施工条件下的掘进速度预测问题。采用多指标评价了模型的有效性,并与已有模型预测结果进行了对比分析。实例验证结果表明,该模型在 MSE、MAE、MRE 和 R^2 等多项指标上均优于 CNN-LSTM-Attention、CNN-LSTM 和 LSTM 等对比模型,验证了其预测的有效性;ARG 机制能够自适应调节 CNN 与 Transformer 提取的多源特征权重,有效提升了模型的稳定性与精度,可为类似结构模型多源特征数据流的处理提供参考。

参考文献:

[1] Flor A,Sassi F,La Morgia M,et al. Artificial intelligence for tunnel boring machine penetration rate prediction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,140:105249.

[2]丁 自伟,高成登,张玲,等. 基于数据驱动的 TBM 掘进地层岩性识别预测方法[J]. 采矿与安全工程学报,2025,42(1):

147-160. (Ding Ziwei, Gao Chengdeng, Zhang Ling, et al. Prediction method for data-driven lithology identification of TBM tunneling strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(1): 147-160. (in Chinese))

[3] 王春萍,马洪素,陈亮,等. TBM 边刀作用下花岗岩围岩裂纹特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(12):2968-2979. (Wang Chunping, Ma Hongsu, Chen Liang, et al. Cracking characteristics of granite surrounding rock under TBM edge cutter fragmentation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12): 2968-2979. (in Chinese))

[4] 张金良,许弘毅,龚秋明,等. TBM 滚刀与高压水射流布局对滚刀破岩效率影响的室内试验[J]. 中国公路学报,2024,37(7):204-217. (Zhang Jinliang, Xu Hongyi, Gong Qiuming, et al. Experimental study on effect of layouts of TBM cutter and high-pressure water jet on cutting efficiency[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 204-217. (in Chinese))

[5] 梁芝军. 基于掘进物理规律与 LSTM 的双护盾 TBM 掘进姿态预测方法[J]. 铁道建筑技术,2024(12):5-9. (Liang Zhijun. Prediction method of double shield TBM tunnelling attitude based on tunnelling physical Law and LSTM [J]. Railway Construction Technology, 2024(12): 5-9. (in Chinese))

[6] 刘俊豪,胡甄巍,周小雄,等. 不同岩体条件下双护盾 TBM 施工性能分析[J]. 施工技术(中英文),2024,53(18):7-12. (LIU Junhao, HU Zhenwei, ZHOU Xiaoxiong, et al. Analysis of double-shield TBM construction performance under different rock mass conditions[J]. Construction Technology, 2024, 53(18): 7-12. (in Chinese))

[7] 崔光耀,麻建飞,王明胜. 双护盾 TBM 不良地质段卡机脱困技术研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(11):152-157. (Cui Guangyao, Ma Jianfei, Wang Mingsheng. Research on releasing technology of double-shield TBM jamming in poor geological section[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(11): 152-157. (in Chinese))

[8] 刘远程,邓荣贵,傅支黔,等. 双护盾 TBM 掘进过程中隧道围岩强度及变形测试研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(10):2679-2687. (Liu Yuancheng, Deng Ronggui, Fu Zhiqian, et al. Study on strength and deformation test of tunnel surrounding rock during double shield TBM tunneling [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2679-2687. (in Chinese))

[9] 仉文岗,唐理斌,陈福勇,等. 基于 4 种超参数优化算法及随机森林模型预测 TBM 掘进速度[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1186-1200. (Zhang Wengang, Tang Libin, Chen Fuyong, et al. Prediction for TBM penetration rate using four hyperparameter optimization methods and random forest model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(5): 1186-1200. (in Chinese))

[10] 侯少康,刘耀儒,张凯. 基于 IPSO-BP 混合模型的 TBM 掘进参数预测[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(8):1648-1657. (Hou Shaokang, Liu Yaoru, Zhang Kai. Prediction of TBM tunnelling parameters based on IPSO-BP hybrid model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1648-1657. (in Chinese))

[11] Kahraman S, Bilgin N, Feridunoglu C. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 711-723.

[12] 钱向东,侯成昊. TBM 掌子面力学模型与滚刀破岩力推力预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):97-103. (Qian Xiangdong, Hou Chenghao. Mechanical model of TBM working face and prediction of rock breaking thrust for disc cutters [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 97-103. (in Chinese))

[13] Pan Yue, Zhou Xiaojing, Qiu Shuigen, et al. Time series clustering for TBM performance investigation using spatio-temporal complex networks[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 225: 120100.

[14] Xue Yadong, Wang Jiaxuan, Zhou Mingliang, et al. Prediction of optimum TBM penetration strategy with minimum energy consumption in hard rocks[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104844.

[15] 刘颖彬,廖少明,杜华,等. 基于机器学习的地铁盾构掘进参数智能预测与控制方法研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(7):137-145. (Liu Yingbin, Liao Shaoming, Du Hua, et al. Research on intelligent predicting and controlling method of shield tunneling parameters based on machine learning[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(7): 137-145. (in Chinese))

[16] 孙峻枫,陈凡,宋天田,等. 基于神经网络的双模盾构复合地层掘进参数预测模型[J]. 铁道标准设计,2023,67(5):100-108. (Sun Junfeng, Chen Fan, Song Tiantian, et al. Tunneling parameter prediction model of dual-mode shield in composite strata based on neural network[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(5): 100-108. (in Chinese))

[17] Armaghani D J, Mohamad E T, Narayanasamy M S, et al. Development of hybrid intelligent models for predicting TBM penetration rate in hard rock condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 29-43.

[18] 满轲,曹子祥,刘晓丽,等. 利用 HHO-LSTM-SVR 模型预测 TBM 掘进参数[J]. 铁道标准设计,2025,69(8):123-132. (Man Ke, Cao Zixiang, Liu Xiaoli, et al. Prediction of TBM tunnelling parameters using HHO-LSTM-SVR model[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(8): 123-132. (in Chinese))

(下转第 176 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.015

粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基填料水稳性与耐久性研究

郭乔明[1],陈 峰[1],李春志[2],张育铖[2],杨 璐[1],陈 慧[1],关博文[3],赵 华[2]

(1. 江西省交通投资集团有限责任公司; 2. 南昌大学工程建设学院; 3. 长安大学材料科学与工程学院)

摘要:为探究粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉作为路基填料的水稳性和耐久性,采用试验结合数值模拟的方法,在分析粉煤灰和矿渣的质量比以及激发剂模数对粉煤灰-矿渣地聚物砂浆、粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料无侧限抗压强度影响规律的基础上,采用优化的配合比制备粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料,开展了软化系数和干湿循环试验,并通过有限元模型分析了在车辆荷载作用下不同干湿循环次数对粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基沉降的影响。结果表明:地聚物掺量显著影响粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料的水稳性与耐久性,软化系数随着地聚物掺量的提升呈增大趋势,由 0.77 提高到 0.81;粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料在 30 次干湿循环后强度损失率为 3.8%;路基最大沉降量随干湿循环次数增加呈现非线性增长特征,且沉降量随深度增加逐步衰减;由于黏土矿物吸水膨胀而破坏颗粒间的胶结作用,红壤土掺量对粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料的胶结性能有显著影响。

关键词:地聚物;长石粉;路基填料;水稳性;耐久性;数值模拟

Research on water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler

Guo Qiaoming[1], **Chen Feng**[1], **Li Chunzhi**[2], **Zhang Yucheng**[2], **Yang Lu**[1], **Chen Hui**[1], **Guan Bowen**[3], **Zhao Hua**[2]

(1. *Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd.*; 2. *School of Infrastructure Engineering, Nanchang University*; 3. *School of Material Science and Engineering, Chang'an University*)

Abstract: To explore the water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler, a method combining experiments and numerical simulation was adopted. Based on the analysis of the influence of the mass ratio of fly ash and slag and the modulus of activator on the unconfined compressive strength of fly ash and slag geopolymer mortar and fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture, the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture was prepared with the optimized mix ratio. The softening coefficient and dry-wet cycle tests were carried out, and the finite element model was used to analyze the influence of different dry-wet cycle times on the settlement of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed under vehicle load. The results show that the dosage of geopolymer significantly affects the water stability and durability of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture. The softening coefficient increases from 0.77 to 0.81 with the increase in the dosage of geopolymer. The loss rate of strength of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture after 30 dry-wet cycles is 3.8%. The maximum settlement of the roadbed shows a nonlinear growth trend with the increase of dry-wet cycle times, and the settlement gradually decreases with the increase in depth. Due to the water absorption and expansion of clay minerals, which destroy the cementation between particles, the dosage of red soil has a significant impact on the cementation performance of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture.

Key words: geopolymer; feldspar powder; roadbed filler; water stability; durability; numerical simulation

长石粉作为含锂瓷土矿提锂后的副产品[1],其消纳问题一直未能有效解决。随着新能源锂电产业的大规模发展,矿产资源开发的规模持续扩张,长石粉、尾渣等工业固体废弃物的存量迅速上升[2]。据统计,全国重要的锂资源供应地江西宜春每年平均可产出长石粉 3 000 万 t,未来随着碳酸锂产能的提升,长石粉的

基金项目:江西省交通运输厅重点工程科技项目(2023C0014)

作者简介:郭乔明(1976—),男,高级工程师,主要从事道路桥梁工程研究。E-mail:1617242511@qq.com

通信作者:赵华(1982—),女,副教授,博士,主要从事道路工程材料研究。E-mail:zhaohua@ncu.edu.cn

产出量将急剧增长,远超传统玻璃、陶瓷产业对于长石粉的消纳能力[3]。长石粉长时间堆放,不仅会占用大量的土地资源,而且由于其颗粒较小,很容易形成浮尘和扬沙而影响环境[4],长石粉的处置与资源化利用难题正逐步凸显为锂电产业可持续发展的关键制约瓶颈。与此同时,公路工程每年仅路基工程就消耗水泥和石灰等凝胶材料超10亿t。由于长石粉物理化学性质稳定,洁净度较高[5],属于一般固体废弃物,可以大规模回收利用,所以将长石粉作为路基填料用于公路路基填筑中,可以推动长石粉的资源化利用[6]。

长石在地壳中含量丰富,广泛存在于火山岩、变质岩和沉积岩中[7],主要成分为SiO_2、Al_2O_3、K_2O、Na_2O、CaO等[8],基本结构单元为Si—O四面体,具有较好的稳定性和高硬度等特点,但不具备黏结性能[9-10]。化学方法是对土体固化稳定提高其工程特性常用的手段之一,使用的化学材料通常有水泥、石灰和粉煤灰等无机材料[11],以及高分子聚合物等有机材料[12-13]。在无机材料中,常用的固化稳定材料是水泥,但水泥是一种钙基材料,其抗碳化能力及耐久性能在硫酸盐侵蚀或频繁干湿循环等环境下存在不足[14],并且水泥生产过程中会排放大量的CO_2造成环境污染,不符合绿色低碳的发展理念[15]。地聚物是采用以硅铝质工业固体废弃物粉煤灰、矿渣等为前驱材料制备的一种新型绿色固化胶凝材料,具有显著的经济效益和优异的综合性能,其力学性能优于传统硅酸盐水泥,表现出快硬早强、耐酸碱性、低渗透率、抗侵蚀以及良好的耐久性等特点[16-17],有望替代传统硅酸盐水泥黏结剂用于固化水泥基材料来生产道路基层填料。

目前,对地聚物稳定固体废弃物材料的研究已取得了丰硕的成果。例如:李永翔等[18]使用粉煤灰、矿渣配合湿电石渣作为前驱材料制备地聚物并固化煤矸石,研究结果表明,混合料满足基层强度要求,可以作为道路基层填料用于公路工程,且收缩性能表现更优;杨振甲等[19]采用矿渣-粉煤灰二元地聚物来固化淤泥,其力学性能及路用性能均满足工程要求,且地聚物掺量为20%时固化土的抗干缩性能最优,Na_2O与Al_2O_3摩尔比为1.0、SiO_2与Al_2O_3摩尔比为2.5时混合料的强度最大;吴伟军等[20]利用工业废弃物赤泥为前驱材料制备地聚物并对低液限粉土进行固化,发现16%掺量的赤泥固化土7 d无侧限抗压强度和劈裂强度分别是粉土的6.2倍和5.1倍,赤泥地聚物掺入粉土中,水化反应生成的C-S-H与C-A-H凝胶物质包裹着土颗粒,且生成的钙矾石晶体穿插在土颗粒之间使其成为一个整体,提高了固化土的强度;Raza等[21]使用粉煤灰和高炉矿渣替代聚乙烯纤维轻质地聚物复合材料中的硅酸盐水泥,发现在5%浓度Na_2SO_4溶液中放置90 d和180 d的地聚物试样质量损失率最低和最高分别为5.50%和8.92%,表现出更好的耐久性能;Rahman等[22]利用石灰石工业废粉与矿渣和粉煤灰来制备混合料试块,在浸泡28~90 d后,试块吸水率在2.6%~3.8%之间变化,并且在矿渣、粉煤灰、石灰石粉掺量分别为50%、10%、40%时制备的混合料试块透水深度最小,表现出较好的水稳性;Zhang等[23]使用粉煤灰-矿渣地聚物固化废弃钻井泥浆来制备道路基层填料,研究发现随着矿渣粉掺量由60%增加到100%,混合料的力学性能均明显提高,水稳性和抗干湿循环性能小幅度下降,但各组试件均满足路面设计规范对耐久性的要求,用作道路基层填料的稳定性是有保证的。

此外,也有一些学者通过数值模拟方法研究了固体废弃物填料路基的受力和变形规律。例如:乔瑞军等[24]利用MIDAS GTS软件研究了隧道爆破洞渣高填方路基沉降影响因素以及分层填筑施工下路基位移场和应力场特征,提出了利用隧道洞渣填筑路基的方案和路基沉降的控制技术;李涵等[25-26]数值模拟了考虑吸湿膨胀变形的泥岩填料路基沉降变形规律,构建了基于泥岩湿化变形的路基沉降变形计算数学模型,发现泥岩填料遇水膨胀不仅速度快而且膨胀变形较大,并给出了工程解决措施;李永靖等[27]利用数值模拟方法对煤矸石填料路基进行了地震荷载作用下的响应分析;邹敏等[28]使用有限元软件建立镍铁渣-黏土路基模型,分析了镍铁渣-黏土填料、车辆速度和交通荷载对镍铁渣-黏土路基动态应力与变形的影响;Gao等[29]利用数值模拟软件建立了填方路基全生命周期的应力与变形计算模型,对不同阶段填方路基模拟计算结果表明,填土自身的压缩固结是导致路基长期沉降的主要原因,路基中心沉降最大且对全生命周期变形最敏感。

尽管对各种固体废弃物路基填料已进行了大量研究,但关于长石粉作为路基填料的相关研究仍较少。为了评价长石粉路基填料的水稳性与耐久性,本文通过制备粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料开展了长石粉路基填料软化系数和干湿循环试验,并通过ABAQUS有限元软件建立地聚物固化长石粉路基结构模型分析了不同干湿循环次数下长石粉路基的沉降规律。

1 材料与试验

1.1 试验材料

试验所用的材料包括F类Ⅱ级粉煤灰、S95矿渣粉、长石粉、红壤土、复合液态碱性激发剂。长石粉由宜

春时代新能源科技有限公司提供,为钽铌矿提锂后的副产品,呈淡黄色颗粒状,通过液塑限联合测定法得到长石粉的液限为 25.9%,塑限为 19.0%,塑性指数为 6.9,属于砂性土。红壤土取自江西省新余市某高速改扩建施工现场附近,红壤土样的液限为 40.0%,塑限为 20.3%,塑性指数为 19.7,属于高塑性土。地聚物的制备方式为将粉煤灰和矿粉充分混合后,加入由 NaOH 溶于水玻璃混合搅拌制成的复合液态碱性激发剂拌和而成。原材料经 X 射线荧光光谱(XRF)分析测试的化学成分见表 1,图 1 为原材料的 X 射线衍射(XRD)图谱。由图 1 可知,粉煤灰的主要矿物成分为石英和莫来石;矿渣粉未发现明显的特征峰,表明其主要成分是玻璃质的非晶态物质;长石粉的主要矿物成分为石英和长石等;红壤土的主要矿物成分为石英和蒙脱石,其中石英的含量远高于蒙脱石。

表 1　原材料的化学成分

Table 1　Chemical composition of raw materials

材料	各化学成分的质量分数/%							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O
粉煤灰	49.26	30.14	5.16	6.53	2.16	2.62	0.76	1.51
矿渣粉	34.50	17.70	1.03	34.00	1.64	6.01	1.72	1.14
长石粉	80.10	11.30	0.11	0.51	0.08	0.04	3.77	3.51
红壤土	66.72	21.08	7.42	0.07	0.07	0.68	0.11	1.93

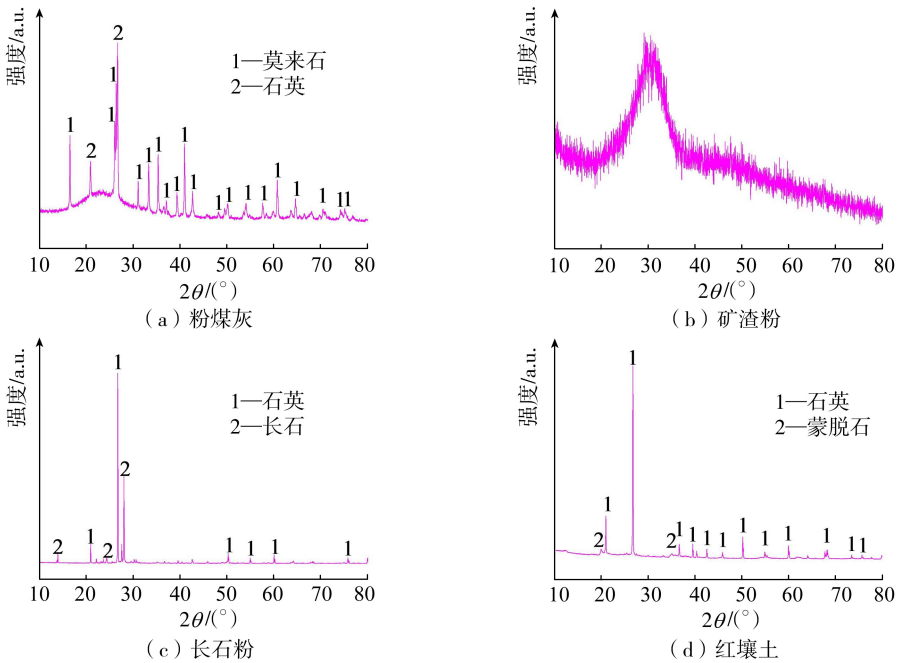


图 1　原材料的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of raw materials

1.2　粉煤灰-矿渣地聚物砂浆配合比设计

为了验证地聚物凝胶材料的力学性能,结合相关地聚物的研究成果[17-19,23],以粉煤灰与矿渣粉质量比为 7∶3 制备粉料,并且以 Na_2O 质量占粉料质量的百分比为第二变量制备地聚物,本文设计的 3 种不同激发剂模数的粉煤灰-矿渣地聚物砂浆配合比见表 2。

表 2　粉煤灰-矿渣地聚物砂浆配合比

Table 2　Mix proportion of fly ash and slag geopolymer mortar

试样编号	激发剂模数	各组成成分的掺量/%		
		粉煤灰	矿渣粉	Na_2O
A1	1.0	70	30	5
A2	1.0	70	30	10
B1	1.5	70	30	5
B2	1.5	70	30	10
C1	2.0	70	30	5
C2	2.0	70	30	10

根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》的规定,将地聚物替代水泥,采用标准砂制备 40 mm×40 mm×40 mm 立方体粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试样,标准养护 7 d 和 28 d 后进行无侧限抗压强度试验,每组配合比均制备 3 个平行试样,取平均值作为测试结果,如图 2 所示。

由图2可知,A组(A1和A2)试样无侧限抗压强度表现最好,7 d的无侧限抗压强度可达到28 d的76%以上,同时B组(B1和B2)试样初期强度略低,但28 d的无侧限抗压强度与A组的相差无几,后期强度发展潜力较大。在C2试样中,过多的水玻璃会因为结合水较多导致试块的水化反应减弱,从而降低粉煤灰-矿渣地聚物砂浆的无侧限抗压强度。除此之外还可以看到激发剂模数越大,粉煤灰-矿渣地聚物砂浆的早期强度越低,原因是随着激发剂模数的增大,Na_2O含量减少,溶液的碱性降低,低碱性环境下会减弱对铝硅酸盐原料粉煤灰的溶解作用,导致原料中的活性组分(Si和Al)溶出变慢,地质聚合反应的初始阶段受阻。

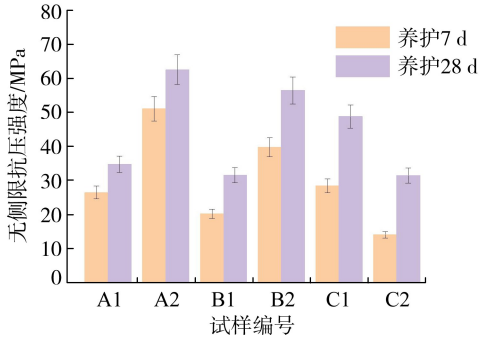


图2 粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试块无侧限抗压强度

Fig. 2 Unconfined compressive strength of fly ash and slag geopolymer mortar test block

基于上述粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验结果,开展粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉组成设计,每组设置10%、20%两种不同掺量的地聚物,制备粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料(以下简称"混合料")。通过击实试验确定混合料各配合比的最佳含水率和最大干密度,混合料的配合比及击实试验结果如表3所示。

表3 混合料配合比及击实试验结果

Table 3 Mix proportion and compaction test results of mixture

试样编号	激发剂模数	各组成成分的掺量/%			最佳含水率/%	最大干密度/(g/cm^3)
		长石粉	地聚物	红壤土		
A10	1.0	90	10	0	20.00	1.61
A11	1.0	80	10	10	20.53	1.58
A12	1.0	70	10	20	19.88	1.55
A20	1.0	80	20	0	20.92	1.60
A21	1.0	70	20	10	20.73	1.55
A22	1.0	60	20	20	21.52	1.52
B10	1.5	90	10	0	20.60	1.60
B11	1.5	80	10	10	20.23	1.58
B12	1.5	70	10	20	20.78	1.55
B20	1.5	80	20	0	22.64	1.59
B21	1.5	70	20	10	21.42	1.57
B22	1.5	60	20	20	21.90	1.55
C10	2.0	90	10	0	19.62	1.62
C11	2.0	80	10	10	19.78	1.58
C12	2.0	70	10	20	19.70	1.56
C20	2.0	80	20	0	20.53	1.58
C21	2.0	70	20	10	21.85	1.55
C22	2.0	60	20	20	20.72	1.53

依据JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,将粉煤灰、矿渣粉、长石粉、红壤土烘干后混合干拌均匀,然后添加激发剂。激发剂按照最佳含水率配置,但为方便工程应用,后续试验分别以20%、21%作为地聚物掺量10%、20%配合比下的含水率,将混合料闷料2 h后装入直径为50 mm、高50 mm的圆柱体模具中,使用压力机静压成型,加载速率为1 mm/min,加载完成后维持压力2 min,静置4 h后使用电动脱模器脱模,将脱模后的试样放入标准养护箱中养护,养护完成后进行无侧限抗压强度试验,结果如图3所示。

随着激发剂模数的增大,混合料的7 d和28 d的无侧限抗压强度差距逐渐增大,此发展趋势与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验相同。在3组配合比中,B组整体强度最高,峰值为3.24 MPa;A组次之,峰值为2.31 MPa;C组的强度远低于A、B两组,峰值仅有1.48 MPa,该结果与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验结果存在明显不同,原因是混合料配合比与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验的配合比存在显著区别,在两者试样制备过程中也发现干湿度和流动性存在显著区别,同时在养护过程中混合料水化反应程度降低,水化产物减少,导致强度降低,这造成了与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验不同的结果。据此,选用B组6个强度良好的配合比进行后续水稳性能和耐久性能试验。

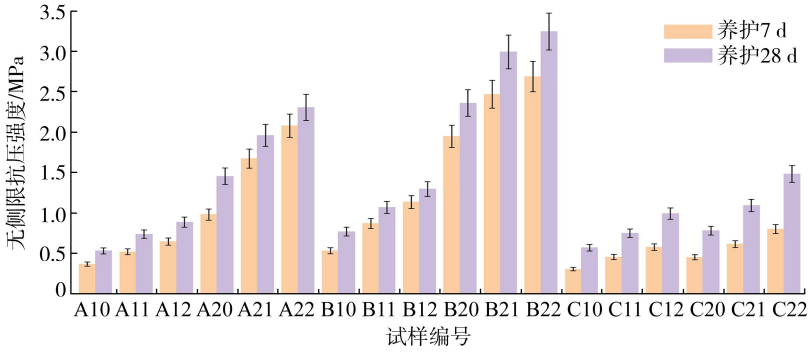


图 3　混合料试样无侧限抗压强度试验结果

Fig. 3　Unconfined compressive strength test results of mixture specimens

1.3　试验方法

选择筛选出的 B 组 6 种配合比,采用静力成型法制备直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱形试样。每种配合比分别制作 6 个平行试样,取其试验平均值作为测试值。为充分验证混合料的水稳性与耐久性,本文试验主要包括软化系数试验、干湿循环试验、抗剪强度试验和无侧限抗压强度试验,具体流程如图 4 所示。

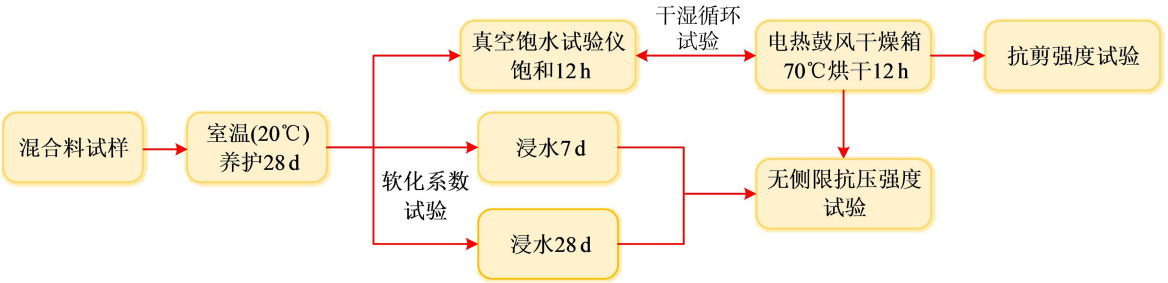


图 4　试验流程

Fig. 4　Test process

a. 软化系数试验采用养护 28 d 的试样,然后分别浸水 7 d 和 28 d 后测量其无侧限抗压强度,通过软化系数 K_f 来评价固化长石粉的耐水性。软化系数 K_f 的计算公式为:

$$K_f = f_1 / f_0 \tag{1}$$

式中:f_1 为试样浸泡 7 d 或 28 d 后的无侧限抗压强度,MPa;f_0 为试样养护规定龄期的无侧限抗压强度,MPa。

b. 干湿循环试验同样采用养护 28 d 的试样,将养护完成的试样分别进行 0、10、20、30 次干湿循环试验,浸泡 12 h、烘干 12 h 为一次干湿循环,然后通过干湿循环前后的强度损失来评价混合料的抗干湿循环能力。

c. 取干湿循环后的试样使用应变控制式直剪仪测量其黏聚力和内摩擦角,得到抗剪强度指标的变化规律,为后续数值模拟分析提供数据。

d. 使用路面强度试验仪分别对软化系数试验和干湿循环试验后的混合料试样进行无侧限抗压强度测试,测试时加载速率为 1 mm/min。

2　试验结果与分析

在试验过程中,由于 B12 试样在无约束条件下浸水后发生崩解,表现出较差的水稳性,因此无法进行软化系数和干湿循环的相关试验,试验中将其剔除。

2.1　软化系数试验

图 5 为混合料试样的无侧限抗压强度随浸水时间的变化,可以看出各组试样的无侧限抗压强度整体上随浸水时间的增加呈下降趋势,其中浸水 28 d 的强度下降幅度最大。B10、B11、B20、B21、B22 试样在浸水 28 d 后的软化系数分别为 0.77、0.65、0.81、0.79、0.73,B20 试样表现出相对较好的耐水性,而 B21、B22 试样(分别掺红壤土 10%和 20%)的耐水性较差,与干湿循环试验有着相似的结果,主要原因是高塑性土中的蒙脱石等黏土矿物颗粒细小,比表面积大,对水分子具有极强的吸附能力,并且这些黏土矿物多为层状结构,层间可以容纳大量水分子,使得矿物颗粒吸水膨胀,体积显著增大,而矿物层间结合力较弱,遇水易分散,破坏

了颗粒间的胶结作用,使试块软化,强度和水稳性下降。另外,浸水时充足的水分使试样内部未完全水化的产物可能会继续进行水化反应,因此浸水初期无侧限抗压强度会比浸水前略微提高。

2.2 干湿循环试验

图6为混合料试样干湿循环后无侧限抗压强度随循环次数的变化,图7为混合料试样抗剪强度指标随干湿循环次数的变化。由图6可以看出,试样的无侧限抗压强度整体随干湿循环次数的增加呈下降趋势,但下降幅度较小,强度损失较低。另外干湿循环试验中由于烘干会为试样提供短时间的高温养护环境,所以干湿循环10次时试样的无侧限抗压强度会略微提升。

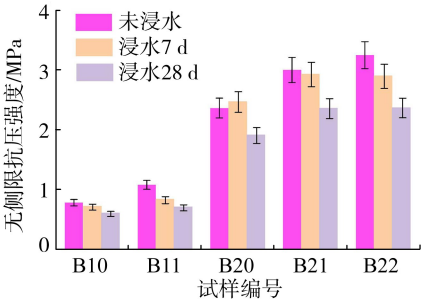


图5 混合料试样无侧限抗压强度随浸水时间的变化

Fig. 5 Change of unconfined compressive strength of mixture specimens with immersion time

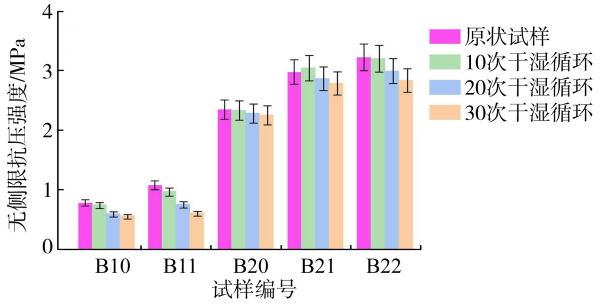


图6 混合料试样无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化

Fig. 6 Change of unconfined compressive strength of mixture specimens with dry-wet cycle times

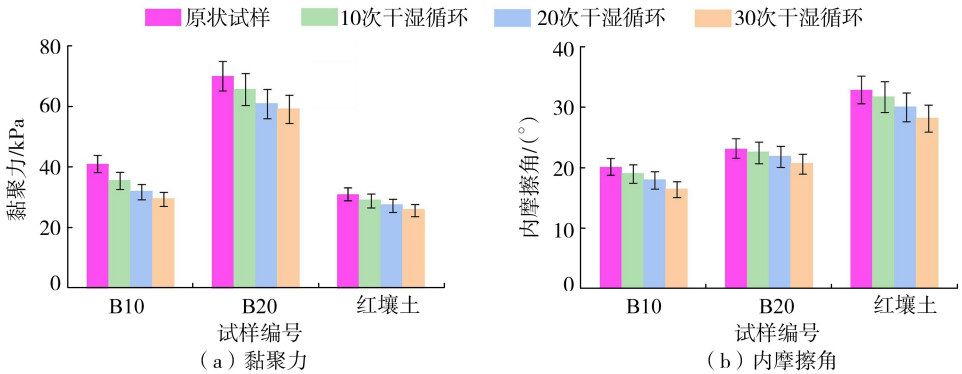


图7 混合料试样抗剪强度指标随干湿循环次数的变化

Fig. 7 Change of shear strength index of mixture specimens with dry-wet cycle times

B20试样相较于其他试样的强度损失最小,30次干湿循环的强度损失率只有3.8%,抗干湿循环能力最好。红壤土掺量分别为10%和20%的B21和B22试样虽然整体上无侧限抗压强度比不掺红壤土的B20试样高,但是在经过10、20、30次的干湿循环后强度损失比B20试样大。B21试样在干湿循环前的无侧限抗压强度为3.00 MPa,经过30次干湿循环后下降了0.19 MPa,强度损失率达6.3%。B22试样在干湿循环前的无侧限抗压强度为3.25 MPa,经过10、20、30次的干湿循环后分别下降到了3.23、3.02、2.86 MPa,强度损失率分别为0.62%、7.08%、12.00%。由此可以得出掺入红壤土的试样比不掺入红壤土的试样强度损失大,且红壤土掺量越高,强度损失越大,抗干湿循环能力越弱,主要是因为掺入的红壤土为高塑性土,具有吸水膨胀和失水收缩的特性。在干湿循环过程中,黏土矿物不断吸水膨胀和失水收缩,这种反复的体积变化会在材料内部产生应力和微裂纹,破坏试样的结构完整性;随着红壤土掺量的增加,黏土矿物在试样中的占比提高,干湿循环导致体积变化引起的破坏效应更为显著,使得土体的孔隙率增大、密实度降低,试样表面在水中更易脱落,从而使试样的强度在干湿循环过程中逐渐下降,抗干湿循环能力逐渐减弱[30]。

另外,由图6还可以看出,B20试样(地聚物掺量20%、未掺红壤土)的无侧限抗压强度比B10试样(地聚物掺量10%、未掺红壤土)高、强度损失小,B10试样经过10、20、30次干湿循环后的强度损失率分别为3.90%、23.38%、28.57%。这主要是由于长石粉作为低塑性砂土,不易吸水膨胀,水稳性较好,同时在激发剂作用下,地聚物发生解聚-缩聚反应,使得地聚物与长石粉颗粒之间有较好的界面结合,也促进地聚物中活性硅氧烷键的重新排列,形成更加致密和稳定的网络结构,从而提高长石粉的力学性能和耐久性。因此地聚

物掺量的增加能够增强长石粉颗粒之间的黏结能力,形成更加紧密的内部结构,减小了孔隙率,提高了材料的密实度。B20 试样中,20%的地聚物掺量使得材料具有更高的初始抗压强度,同时在干湿循环过程中,由于内部结构更稳固,抵抗体积变化和微裂纹形成的能力更强,从而强度损失率低于 B10 试样。

从图 7 可知,抗剪强度指标随着干湿循环次数的增加也呈现规律性变化,B20 试样由于地聚物掺量较高,所以其黏聚力整体上比 B10 试样高;而红壤土的黏聚力偏低,内摩擦角偏高,这与土壤结构密切相关,主要归因于其组构特征中粗粒优势形成的多级孔隙网络与胶结物含量较低的结构性特点。另外,经过干湿循环作用后,试样的黏聚力呈现先急速下降后逐渐趋缓的变化特征,最终达到稳定状态;而内摩擦角虽随干湿循环次数增加呈递减趋势,但其衰减幅度相对较小,经历 30 次干湿循环后不同试样的变化范围在 3°~5°。试验结果表明,试样强度减小主要源于黏聚力的显著衰减,干湿循环作用引发的试样内部结构损伤导致黏聚力劣化,宏观上表现为试样强度的衰减。

3　数值模拟

3.1　模型构建

数值模拟的路段采用高速公路标准,设计速度 100 km/h,双向 6 车道,根据 JTG B01—2014《公路工程技术标准》,车道宽度为 3.75 m,整体式断面,设置中央分隔带 1 m,左侧路缘带宽度为 0.75 m,右侧硬路肩宽度为 2.5 m,路堤边坡为 1∶1.5,车辆轮胎宽度为 0.3 m,轮轴净距为 1.5 m,路基总宽度为 30 m。考虑车辆荷载在路基深度中的扩散衰减特性及作用范围的三维尺寸效应,地基深度设为 30 m,计算宽度为 100 m,道路纵向总长度取 15 m。路基结构模型每层使用的材料不同,路基结构模型设计厚度及力学计算参数见表 4,不同干湿循环次数下混合料和压实土层(红壤土)的黏聚力与内摩擦角见表 5。

表 4　路基结构模型计算参数

Table 4　Calculation parameters of roadbed structure model

结构层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m^3)	阻尼系数	渗透系数/(10^{-7}cm/s)
沥青混凝土面层	0.20	1 200	0.25	2 360	0.9	600.0
水泥稳定碎石基层	0.35	1 500	0.35	2 050	0.4	300.0
水泥稳定碎石底基层	0.15	1 400	0.35	2 000	0.4	300.0
B10 组混合料	0.90	44	0.20	1 850	0.4	250.0
B20 组混合料	0.90	98	0.30	1 908	0.4	250.0
压实土层	5.00	60	0.30	1 856	0.4	5.4
天然地基土	30.00	30	0.35	1 460		5.4

注:B10 组混合料、B20 组混合料分别表示采用 B10、B20 试样配合比的混合料。

表 5　混合料和压实土层的黏聚力与内摩擦角

Table 5　Cohesion and internal friction angle of mixture and compacted soil layer

干湿循环次数	B10 组混合料		B20 组混合料		压实土层	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	40.57	19.92	69.71	22.96	30.58	32.70
10	35.24	18.87	65.42	22.38	28.67	31.59
20	31.58	17.84	60.59	21.71	27.06	29.89
30	29.16	16.28	58.94	20.52	25.48	28.04

根据表 4 和表 5 中的参数建立粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基结构模型,半幅路基结构模型尺寸如图 8 所示。沥青混凝土面层和水泥稳定碎石基层及底基层采用弹性本构模型,混合料、压实土层、天然地基土采用莫尔-库仑弹塑性本构模型[31]。x 轴方向为道路横截面方向,y 轴方向为道路深度方向,z 轴方向为道路纵截面方向。为使模拟有效进行,边界条件设置为左、右面需限制 x 轴方向的移动,前后限制 y 轴方向的移动,模型底部采用固定约束,限制 3 个方向移动,顶部为自由边界面,不限制约束。

依据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,荷载采用公路-Ⅰ级的汽车荷载,使用轴重为 100 kN 的单轴双轮组轴载,轮胎接地压强为 0.7 MPa,单轮接地当量圆直径为 213 mm,双轮接地面积为 0.071 4 m^2,由于现实中车辆荷载是一种随时间等因素变化的随机荷载,为使车辆荷载模拟更接近实际情况,可以使用半正弦动荷载模拟交通荷载[32]:

$$F = p + q \tag{2}$$

其中 $q = q_{\max}\sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{T}\right)$ $T = 12L/v$

式中:F 为模拟交通荷载;p 为静荷载,可取轮胎胎压;q 为动荷载;$q_{\max}$ 为车辆附加动载的幅值,一般不超过汽车静载的0.3倍;L 为轮胎接触面的半径,取15 cm;T 为车辆荷载作用周期;v 为车辆行驶速度。取 $q_{\max} = 0.3p$,可得模拟加载半正弦动荷载的解析式为:

$$F = 0.7\left[1 + 0.3\sin^2\left(\frac{\pi}{2} + 15.43\pi t\right)\right] \quad (3)$$

在模型顶面沿道路纵向设定荷载移动带,然后将荷载移动带细分成若干小矩形,每个小矩形的分布面积为0.30 m×0.24 m,也即为一个双轮组车轮的接地面积,汽车荷载以均布荷载形式施加在矩形内[33],如图9所示。使用ABAQUS有限元软件中的用户子程序VDload来实现荷载的移动,该子程序根据车辆行驶的时间和速度来确定荷载的坐标,然后根据时间按式(3)计算,将汽车荷载施加在相应的面积范围内,利用车辆行驶的时间和速度来控制荷载的移动,从而达到模拟车辆动荷载的目的。

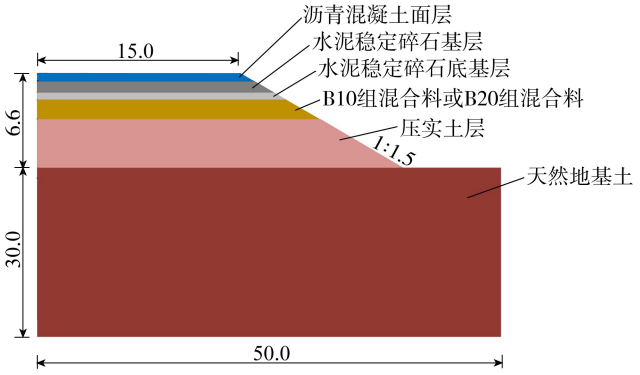


图8 半幅路基结构模型尺寸示意图(单位:m)

Fig. 8 Size diagram of half of roadbed structure model (unit: m)

路基结构模型网格划分如图10所示,模型的单元类型为六面体单元C3D8R,共229 068个单元。为便于数值模拟分析,对路基结构模型作出以下假设:①假定路基和路面为一种连续、弹塑性且均质的复合材料;②路基和路面各结构层之间在变形时不会产生相对移动,且变形连续;③路基和路面的材料参数在荷载施加和变形的过程中保持不变。

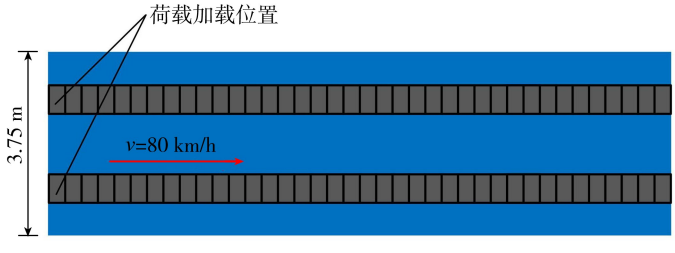


图9 荷载移动带划分

Fig. 9 Division of load moving zone

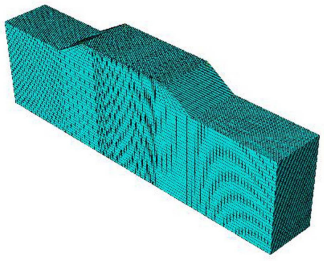
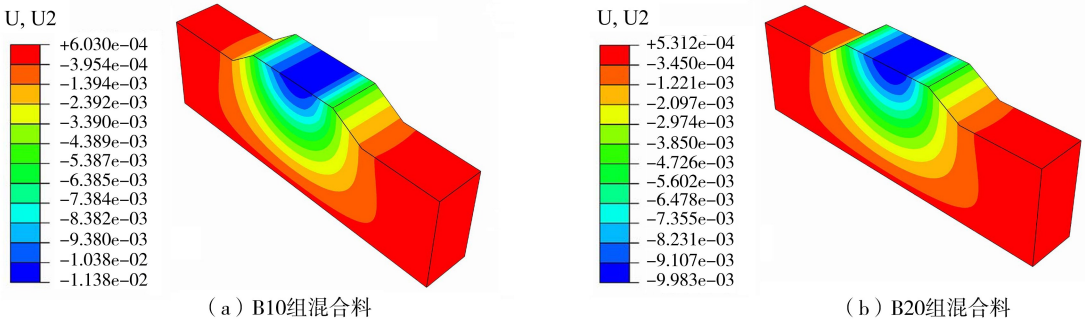


图10 路基结构模型网格划分

Fig. 10 Mesh subdivision of roadbed structure model

3.2 结果分析

采用构建的路基结构模型进行数值模拟,得到的沉降-位移云图如图11所示。由图11可知,在经过30次干湿循环后,B10、B20组混合料最大沉降量分别为11.3、9.98 mm,沉降量均小于JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》规定的15 mm,因此,此次模拟结果符合要求。不同干湿循环次数下路基沉降量随路基深度的变化如图12所示,随着干湿循环次数的增加,路基最大沉降量呈现持续增长趋势。路基沉降量随着路基深度的增加而逐渐减小,深度在5 m以内时,沉降量变化速度较快;当深度超过5 m后,变化速度较慢。



(a) B10组混合料 (b) B20组混合料

图11 路基结构模型沉降-位移云图(单位:m)

Fig. 11 Settlement and displacement cloud diagram of roadbed structure model (unit: m)

在相同深度处,沉降量随着干湿循环次数的增加而增大。

在图 12 中,蓝色区域为 B10 或 B20 组混合料路基结构层,紫色区域为压实土层。蓝色区域中在相同深度处,B20 组混合料的沉降量随着干湿循环次数的增加变化较小,说明 B20 组混合料的抗干湿循环能力较好,这与干湿循环试验结果一致。另外,由于 B10 组混合料的地聚物含量较低,弹性模量较小,在 30 次干湿循环后的沉降量较 B20 组混合料有较大增长,抵抗变形的效果变差。为了更加充分利用长石粉,在实际工程中若采用 B10 组混合料,可以在长石粉路基结构层上设置防水层。

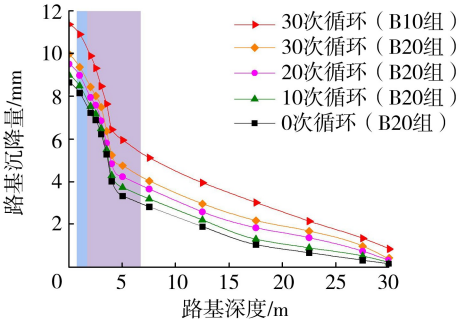


图 12　路基沉降量与路基深度的关系

Fig. 12　Relationship between roadbed settlement and depth

4　结　论

a. 随着激发剂模数的增大,粉煤灰-矿渣地聚物砂浆和混合料在 7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度差异逐渐扩大。激发剂模数为 1.5 时,粉煤灰-矿渣地聚物砂浆 28 d 的无侧限抗压强度与模数 1.0 时基本持平,后期强度发展潜力较大;同时,混合料的无侧限抗压强度性能最优,峰值达到 3.24 MPa。综合考虑材料的力学性能与经济性,试验选用激发剂模数为 1.5 的粉煤灰-矿渣地聚物作为长石粉的主要固化剂。

b. 软化系数试验表明,混合料具有良好的水稳性。增加地聚物掺量可提升长石粉抗水侵蚀能力;当地聚物掺量为 20%、长石粉掺量为 80%时,混合料的水稳性最佳。掺入红壤土会降低混合料的水稳性,这主要源于黏土矿物颗粒极易吸水膨胀,破坏颗粒间的胶结作用。

c. 干湿循环试验表明,混合料在 30 次干湿循环后的无侧限抗压强度损失较小,表现出较好的耐久性。当地聚物掺量为 20%时,混合料的强度损失率为 3.8%。抗剪强度指标随干湿循环次数的增加而逐渐减小,混合料强度减小主要源于黏聚力的显著衰减,干湿循环作用使得试样内部结构损伤从而导致黏聚力劣化,宏观上表现为试样强度的衰减。

d. 数值模拟结果表明,随着干湿循环次数的增加,路基的最大沉降量不断增大,并随深度增加沉降量不断减小,在路基相同深度处,沉降量随着干湿循环次数的增加而增大。

参考文献:

[1] Guan Bowen, Wu Qilin, Li Jun, et al. Sustainable utilization of feldspar powder from lithium extraction byproducts as road construction material[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e04039.

[2] 李飞跃,张立欣,于国娇. 工业固废基地质聚合物在环境领域的应用研究进展[J]. 化工新型材料,2024,52(2):254-258. (Li Feiyue, Zhang Lixin, Yu Guojiao. Research progress on the application of industrial solid waste-based geopolymer in environmental protection[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(2): 254-258. (in Chinese))

[3] Zhong Mingyang, Meng Jin, Ning Baokuan, et al. Preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue-iron ore tailings non-sintering ceramsite[J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136209.

[4] Kim J S, Lee J Y, Kim Y H, et al. Evaluating the eco-compatibility of mortars with feldspar-based fine aggregate[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00781.

[5] Wang Haoyu, Xiong Rui, Zong Youjie, et al. Effect of raw material ratio and sintering temperature on properties of coal gangue-feldspar powder artificial aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131400.

[6] An Liang, Chen Wenwu, Zhao Tianyu, et al. Utilization of solid waste materials as roadbed fillers in road construction: a review[J]. Materials Reports 2024, 38(S2): 257-263.

[7] Fuertes V, Reinosa J J, Fernández J F, et al. Engineered feldspar-based ceramics: a review of their potential in ceramic industry[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(2): 307-326.

[8] 赖纪全. 粗长石粉中回收锂云母的试验研究[J]. 中国金属通报,2019(7):144-145. (Lai Jiquan. Experimental research on recovery of lithium mica from coarse feldspar powder[J]. China Metal Bulletin, 2019(7): 144-145. (in Chinese))

[9] Xia Fan, Cui Shicai, Pu Xipeng. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste[J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 5197-5203.

[10] Enríquez E, Fuertes V, Cabrera M J, et al. Study of the crystallization in fast sintered Na-rich plagioclase glass-ceramic[J].

Ceramics International,2019,45(7):8899-8907.
[11] 吴鹏,刘瑾,史兴萍,等. 刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):76-86. (Wu Peng,Liu Jin,Shi Xingping,et al. Investigation on mechanical properties of red clay improved by locust bean gum and sisal fiber[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):76-86. (in Chinese))
[12] 朱旭芬,黄庭伟,刘瑾,等. 有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):90-98. (Zhu Xufen,Huang Tingwei,Liu Jin,et al. Study on unconfined compressive strength of sand improved by organic polymer composite fiber[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):90-98. (in Chinese))
[13] 彭劼,商志阳,曹天赐,等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):99-104. (Peng Jie,Shang Zhiyang,Cao Tianci,et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):99-104. (in Chinese))
[14] 闫启耀,吕恒林,韩启航,等. 复合工业废料-混合砂混凝土耐久性试验研究[J]. 建筑材料学报,2025,28(7):655-661. (Yan Qiyao,Lyu Henglin,Han Qihang,et al. Experimental study on durability of composite industrial waste-mixed sand concrete[J]. Journal of Building Materials,2025,28(7):655-661. (in Chinese))
[15] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,等. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究,2022,35(2):347-355. (He Jinyu,He Jie,Wang Yutao,et al. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China[J]. Research of Environmental Sciences,2022,35(2):347-355. (in Chinese))
[16] 赵人达,杨世玉,贾文涛,等. 粉煤灰基地聚物混凝土的耐久性研究新进展[J]. 西南交通大学学报,2021,56(5):1065-1074. (Zhao Renda,Yang Shiyu,Jia Wentao,et al. Review of recent progress in durability of fly ash based geopolymer concrete[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2021,56(5):1065-1074. (in Chinese))
[17] Nath P,Sarker P K. Effect of GGBFS on setting,workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition[J]. Construction and Building Materials,2014,66:163-171.
[18] 李永翔,季奎良,党彦. 地聚物稳定煤矸石混合料路用性能及机理探究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(5):28-36. (Li Yongxiang,Ji Kuiliang,Dang Yan. Road performance and mechanism of geopolymer stabilized gangue mixtures[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2024,45(5):28-36. (in Chinese))
[19] 杨振甲,何猛,吴杨,等. 矿渣-粉煤灰地聚物固化淤泥力学性能和路用性能研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2):693-703. (Yang Zhenjia,He Meng,Wu Yang,et al. Mechanical properties and road performance of slag-fly ash geopolymer stabilized sludge[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(2):693-703. (in Chinese))
[20] 吴伟军,张鲲鹏,张宁,等. 赤泥复合固化剂固化粉土路用性能及其机理[J]. 建筑材料学报,2025,28(3):227-235. (Wu Weijun,Zhang Kunpeng,Zhang Ning,et al. Road performance of red mud composite solidification agent for solidified silt and its mechanism[J]. Journal of Building Materials,2025,28(3):227-235. (in Chinese))
[21] Raza A,Salmi A,El Ouni M H,et al. Material characterization and thermal performance of polyethylene fiber-reinforced lightweight engineered geopolymer composites subjected to sulfate attacks[J]. Construction and Building Materials,2024,455:139156.
[22] Rahman M K,Kailani H Y,BahraQ A A,et al. Development of water-cured alkali-activated concrete with a high volume of silica-rich waste limestone powder and GGBS and fly ash materials:strength,durability,and life cycle assessment[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2025,37(1):04024448.
[23] Zhang Peng,Mao Yifan,Gao Zhen,et al. Efficient utilization of waste drilling mud to prepare material stabilized with fly ash/slag based geopolymer for subgrade engineering[J]. Journal of Environmental Management,2025,373:123600.
[24] 乔瑞军,栾治军,黄明利,等. 洞渣高填方路基沉降影响因素及其控制技术研究[J]. 公路,2024,69(3):49-55. (Qiao Ruijun,Luan Zhijun,Huang Mingli,et al. Research on influencing factors of settlement and construction technology of high filling subgrade with muck[J]. Highway,2024,69(3):49-55. (in Chinese))
[25] 李涵,曾亚武,汤禧龙,等. 泥岩碎屑作为路基填料的吸湿膨胀变形特性[J]. 长江科学院院报,2025,42(2):129-137. (LI Han,Zeng Yawu,Tang Xilong,et al. Water-induced expansion deformation characteristics of mudstone clast as roadbed filler[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2025,42(2):129-137. (in Chinese))
[26] 云海浪,韩文喜,王波,等. 砂泥岩混合填料湿化变形与沉降计算方法[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9487-9495. (Yun Hailang,Han Wenxi,Wang Bo,et al. Calculation method of wetting deformation and settlement of sand and mudstone mixed filling[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(22):9487-9495. (in Chinese))
[27] 李永靖,邢洋,韩俊俊,等. 煤矸石路基填料震陷变形特性分析[J]. 公路交通科技,2014,31(12):43-49. (Li Yongjing,Xing Yang,Han Junjun,et al. Analysis on subsidence deformation characteristics of coal gangue subgrade fill[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(12):43-49. (in Chinese))

(下转第176页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.016

海港智慧航道基础支撑平台架构与关键技术

庞启秀[1],李怀远[1],辛海霞[1,2],赵张益[1],谢 琳[1],陈 纯[1]

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心工程泥沙交通运输行业重点实验室;
2. 天津水运工程研究院有限公司)

摘要:构建了海港智慧航道基础平台的总体架构、逻辑架构及应用架构,并研究了全要素智能感知、高精度水动力泥沙模拟仿真和预报系统自动化运行等关键技术。以天津港为例,搭建了智慧航道基础支撑平台,实现了气象、水文、泥沙、船舶等多要素实时智能感知,以及未来 72 h 水位、流速、水深等关键环境要素模拟计算,并在天河超级计算服务器上自动化运行,实现了通航环境的智能化动态预报。根据天津港智慧航道基础平台正常运行 1 年多的情况,讨论分析了基础支撑平台建设经验教训和辅助航道养护、通航保障等港口智慧化生产运营管理服务方向。

关键词:智慧航道;基础支撑平台;智能感知;模拟预报;天津港

Architecture and key technologies of basic platform for intelligent waterways in seaports

Pang Qixiu[1], **Li Huaiyuan**[1], **Xin Haixia**[1,2], **Zhao Zhangyi**[1], **Xie Lin**[1], **Chen Chun**[1]

(1. *Key Laboratory of Engineering Sediment for the Transport Industry, National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT*;
2. *Tianjin Water Transport Engineering Research Institute Co., Ltd.*)

Abstract: The overall architecture, logical architecture, and application architecture of the basic platform for intelligent waterways in seaports were constructed. Key technologies were researched, such as full-element intelligent sensing, high-precision hydrodynamic sediment simulation, and automatic operation of the forecast system. On this basis, the basic platform for intelligent waterways was developed with Tianjin Port as a case study. The platform achieved real-time intelligent sensing of meteorological, hydrological, sedimentary, and vessel-related elements, along with simulated calculations of critical environmental elements such as water level, flow velocity, and water depth for the next 72 h. The platform operated automatically on the Tianhe supercomputer, achieving intelligent and dynamic forecasting of the navigation environment. Based on the normal operation of the basic platform for intelligent waterways in Tianjin Port for over one year, the experiences and lessons learned from the construction of the basic platform, as well as the directions for supporting waterway maintenance, navigation guarantee, and other aspects of intelligent production and operation management services of waterways, were discussed.

Key words: intelligent waterway; basic platform; intelligent sensing; simulation and forecast; Tianjin Port

沿海港口逐步呈现大型化、深水化趋势,很多大型枢纽港如天津港、连云港等都已开挖升级至 30 万 t 级航道,港口通过能力得到大幅度提升,同时也对通航保障能力、航道建设养护的精细化与智能化管理水平提出了更高要求,以此更好地适配业务量高速增长与绿色智能发展的双重目标。近年来,国家先后出台多项政策文件,从智能航运、数字交通、新型基础设施等多方面提出了明确要求,推动物联网、人工智能、北斗导航等技术在航道管理中的深度融合。智慧航道是航道数字化与网络化发展的产物,以其前瞻性、系统性、科学性彰显出“远程智慧”的先进优势[1]。但是,智慧航道发展具有显著的阶段性特征,在不同的科学技术水平下具有不同的内涵、任务和内容,从发展历程上可分为数字航道、智能航道和智慧航道 3 个阶段[2]。国内数字航道始于长江数字航道[3-6],该航道为内河数字航道建设的主体和标杆,已构建起覆盖内河数字航道建设、电子航道图生产制作、运行服务及全流程管理的完整体系[7]。智慧航道是在数字航道基础上,利用智能传感

基金项目:天津市技术创新引导专项(基金)科技领军培育企业重大创新项目(S23PY17002);天津港(集团)有限公司重大创新项目(02122047)

作者简介:庞启秀(1977—),男,研究员,博士,主要从事港口航道及近海工程研究。E-mail:pangqixiu@163.com

通信作者:辛海霞(1980—),女,高级工程师,硕士,主要从事港口航道模拟仿真研究。E-mail:981161233@qq.com

器、物联网自动控制、人工智能等技术,自动获取航道系统要素信息,通过融合处理与深度挖掘,动态发布航道有关信息,实时地为航道维护管理、船舶航行提供可靠的航道信息[2-5,8-9]。另外,京杭大运河流域也开展了智慧船闸、数字航道、服务决策与支撑平台建设[10],江苏干线航道实现了电子航道图全覆盖[11]。在内河数字航道或智慧航道建设期间,也突破了大量关键技术难题。在长江数字航道建设中,开展了内河数字航道要素感知、电子航道图在线动态更新、大数据融合应用及对外服务等关键技术研究,奠定了长江干线数字航道工程建设与应用的技术基础[12];杨阳等[13]通过系统研究,提出了内河航道设施服役状态的一系列在线智能监测技术方法,进而给出了配套的航道设施智能预警技术方案;何涛涛等[14]搭建数字长江航道无人机无人船智能识别应用平台,利用人工智能识别技术,实现对航标的识别与状态检测、水尺观读和航道整治建筑物缺损检测。总体来看,数字航道、智慧航道的研究和建设大多数集中在长江干线航道及京杭运河、江苏干线航道等内河航道,沿海港口智慧航道的相关研究成果鲜有报道,也没有正式建设运行的海港智慧航道。相比于内河航道,沿海的水文、泥沙、气象等环境要素更加复杂,数据采集及传输、通信等方面的难度更大,其通航规则与内河航道相比亦存在显著差异,因此迫切需要在内河智能航道研究的基础上,结合沿海航道自身特点,开展海港智慧航道基础平台设计和关键技术研究。

本文设计了海港智慧航道基础支撑平台的总体架构、逻辑架构及应用架构,并针对航道信息基础设施建设中的多源异构数据智能采集与融合、高精度水文泥沙要素预测数值模拟、高性能仿真等关键技术进行研究,在此基础上开发并搭建了天津港智慧航道基础支撑平台。

1 基础支撑平台架构

1.1 总体架构

智慧航道基础支撑平台采用1+N的总体架构,如图1所示,1为智慧航道数字底座"1中心",N为智能化应用"N场景"。智慧航道数字底座"1中心"汇集了航道全要素数据资源体系,内涵了航道监测感知网、航道通信传输网、航道数据智能算法集、航道数据资源管理(大数据中心)等内容,是智慧航道建设的数字基础。智慧航道智能化应用"N场景"是从航道业务领域及职能部门的组织分工角度出发,设计智慧航道数字成果功能应用模块,形成不同业务场景下的智能化解决方案,实现航道业务的智能化转型升级。智慧航道应用场景包括但不限于航道建设养护、航道生产调度、航运信息服务、安全应急保障、电子航道图融合应用、航道数字孪生等。智能应用场景的实现采取模块化策略,可根据不同用户的具体需求进行定制化开发,并以插件化的方式与智慧航道基础支撑平台进行集成应用。

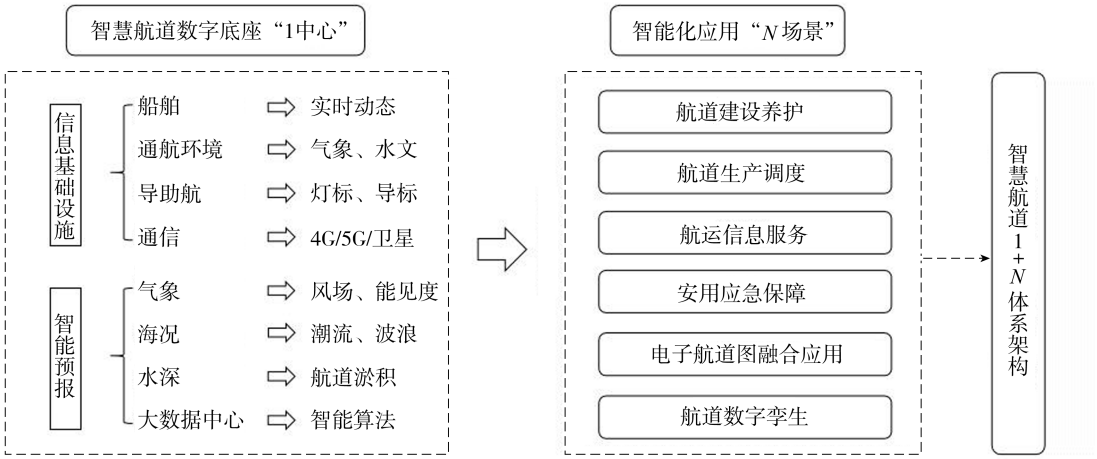


图1 平台总体架构

Fig. 1 Overall architecture of platform

1.2 逻辑架构

智慧航道基础支撑平台采用5层架构设计,分别为数据监测层、网络传输层、支撑环境层、业务模块层和终端应用层(图2),构建起数据驱动、智能响应、高效协同的智慧航道体系。数据监测层是平台的基础,负责采集航道水文、气象、船舶等要素的实时数据,作为智慧感知与决策分析的核心支撑,通过整合既有观测设备

与新建站点,构建覆盖全航道的观测网,为后续模型计算与业务应用提供可靠数据基础。网络传输层作为信息交互枢纽,支持各类通信方式,包括北斗通信、移动通信、甚高频、VPN、Lora、物联网络等,实现监测数据的实时上传与平台指令下发,保障数据在各层之间的稳定流通和快速响应。支撑环境层由云服务环境和超级计算环境双核构成;云环境负责数据管理、服务响应和系统控制,是平台“大脑”;超级计算环境为水动力与泥沙预报等高性能计算任务提供资源支撑,是平台“引擎”;两者通过安全网络实现高效协同。业务模块层围绕航道建设、运维、调度、安全、辅助决策等关键业务,搭建功能模块体系;各模块基于监测与预报数据,结合专业知识开展建模分析,为航道智能化管理提供决策支持和技术支撑。终端应用层面向港口管理单位、海事部门、引航机构和船舶用户等,提供三维可视化展示、数据服务与功能调用,通过门户网站、App 和接口服务等多种形式,实现平台成果的共享与高效应用。

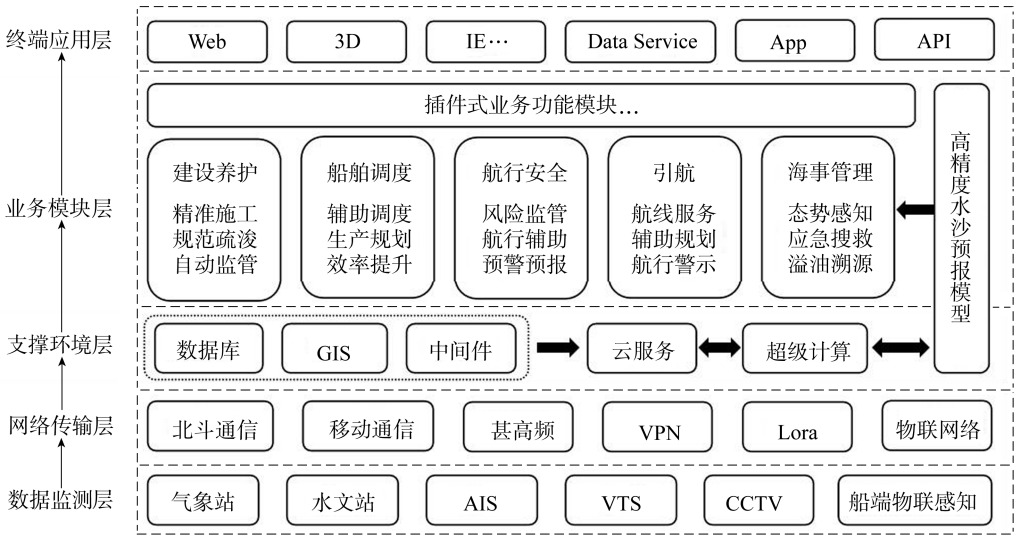


图 2　平台逻辑架构

Fig. 2　Logical architecture of platform

1.3　应用架构

智慧航道基础支撑平台在应用层面构建了四大核心子系统:航道全要素智能采集、水动力模拟预报、水沙分析和可视化应用,形成完整的数据生产—分析决策—可视服务闭环。航道全要素智能采集子系统作为平台的数据源头,整合现有及新建水文、气象、船舶等观测设备,构建多要素观测网,实现对航道状态的实时感知与数据汇聚,为平台模型计算和智能分析提供基础支撑。水动力模拟预报子系统通过部署高精度数学模型,生成潮位、潮流等预报数据,具备实时预报能力,是实现智慧化预测的核心组件。水沙分析子系统能自动处理与分析测回数据和泥沙数据,依托泥沙运动模型实现航道淤积状态和水深动态预报,并支持定期数据更新与汇总分析。上述三大子系统共同构成平台的基础数据生产体系,观测数据由平台数据中心统一管理,水文与泥沙模型部署于高性能计算环境,成果数据反馈用于平台智能化分析及可视化模块调用。可视化应用子系统构建用户端操作入口,基于 B/S 架构及动态可视化技术,提供交互式航道场景展示与功能操作,实时呈现模型仿真结果与业务状态,助力用户实现高效、直观的航道智能管理。

2　基础支撑平台关键技术

海港智慧航道基础支撑平台以航道环境要素数据的采集和预报为核心内容,关键技术主要包括航道全要素智能感知技术、高精度水动力泥沙模拟仿真、预报系统自动化运行。

2.1　航道全要素智能感知技术

《关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见》中指出,应推进航道智能感知设备部署应用,加强水位、气象、海况、航标状态、航道尺度、整治建筑物、桥梁通航净空尺度、通航建筑物运行状态的动态监测。通过在航道及周边合适位置部署前端传感器监测设备,重点监测航道的水文、气象等环境要素和船舶要素等,是建立智慧航道的基础,也是实现航道智能化升级的必要手段。航道全要素智能感知技术主要包括环境要素的感知、船舶要素的感知及后台数据管理,其技术路线如图 3 所示。

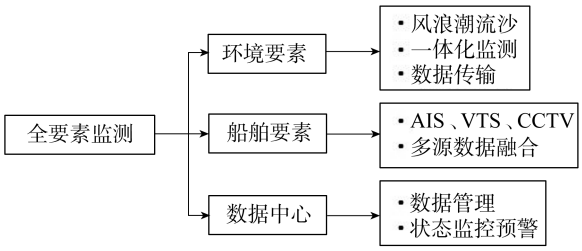


图3 航道全要素智能感知技术路线

Fig. 3 Technical route for full-element intelligent sensing of waterway

2.1.1 *环境要素感知*

根据航道水文气象监测规范(如GB/T 12763.3—2020《海洋调查规范—第3部分:海洋气象观测》)及技术指标进行部署实施,对气象六要素、能见度等气象数据和潮位、潮流、波浪、含沙量、水深等水文数据等进行实时监测。气象六要素及能见度主要通过建立气象站、能见度监测站的方式实时采集,观测手段已非常成熟。水文数据直接反映了航道通航条件,是影响船舶安全通航的重要环境因素,同时也是影响航道通航利用率的关键,因此水文数据是航道感知网的重点监测内容。潮位、潮流、波浪、含沙量数据的观测均有成熟的传感器设备,以浮标为载体辅以适当的通信手段,可实现以上数据的实时观测。

a. 潮位。潮位可采用压力式验潮仪进行测量,并配备移动数据通信、太阳能供电系统等,实时将数据传输至数据中心,实现潮位数据的24 h不间断连续采集与实时遥报。现场布设过程中,一般将验潮设备安装于海底。水下验潮设备的技术参数选择如下:①采样频率不低于2 Hz,具备数据平均及过滤平滑功能;②深度量程不少于30 m,精度不低于±0.05%FS,时间常数小于10 ms。

b. 测流设备。多选择基于声学多普勒原理的观测设备,技术参数如下:①具备底跟踪功能,以确保浮标在回旋运动过程中的测量精度;②具备自容式及在线式两种观测模式;③具备剖面分层功能,分层单元厚度不超过2 m;④底跟踪最大深度30 m,流速量程20 m/s,流速精度(0.25%±2) mm/s;⑤内置罗经与姿态传感器,能外接电池包。

c. 波浪。目前大多采用坐底式测量方法进行连续自动观测。波浪观测设备的技术参数如下:①测量参数包括波浪高度、波浪方向、周期;②波高、波向、波周期的测量范围分别为0~30 m、0~359°、0~25 s;③波高、波向、波周期的测量精度分别为测量范围的1%或0.01 m、±10°、±0.5 s;④波高、波向、波周期的测量分辨率分别为0.01 m、1°、0.01 s。

d. 含沙量数据通过浊度仪进行测量。测量精度为±2%测量值 或0.5 NTU;测量范围为0~1 000 NTU(低量程)/0~4 000 NTU(高量程)。水体含沙量观测需分层采集数据,然后通过"浊度观测值-含沙量"率定关系进行观测数据的转化,将结果转换成含沙量数据输出。

e. 基于遥测遥报的多源数据采集控制。按照设定的工作时序,由数据采集器自动采集、处理、存储观测数据,并将处理后的数据通过移动网络实时发送至接收站。

2.1.2 *船舶要素感知*

船舶动态数据包含船舶AIS信息、雷达扫测数据、CCTV视频监测数据。通过建立VTS雷达站、AIS陆地基站、CCTV视频监测站的方式可对港域船舶动态进行实时监管。不同监测方式采集到的信息也不完全相同,且各有优缺点,一般采用多种监测手段相结合的方式提高船舶动态监测的覆盖度及可靠性。目前大多数港口已有的VTS监管系统已经形成对海域船舶动态监管的全面覆盖,但尚需要完成多源数据融合与云物联集成改造,将已有船舶监测数据纳入智慧航道观测系统中,实现数据的实时对接,并对监测数据进行网络并入,实现数据实时传输。

2.1.3 *数据中心*

后台数据管理中心负责实时接收现场监测数据,对监测数据进行校核、解码、清洗、存储,并对现场监测设备的运行状态进行预警。

2.2 高精度水动力泥沙模拟仿真

虽然通过现场测站实时采集了水文要素,但测站建设和运维费用高昂,因此现场只会布设几个站位,导致有限的水文监测站数据不足以反映航道整体水文泥沙环境态势。同时,现场测站无法获得未来的海洋环

境变化过程,因此还需要依据水文水深的预报数据提升通航效率和安全保障水平。水动力及泥沙智能预报模型的实现依赖于高精度水文泥沙数值模拟技术和高性能计算机仿真技术的融合。根据智慧航道对水文泥沙场预报数据的需求,基于水动力及泥沙运动理论,对近海水体运动过程进行数学建模,并通过离散化运算实现物理方程求解,得到水体的运动过程,并输出潮、流、浪、沙等数据信息。

2.2.1 *数学模型控制方程*

控制方程主要包括动量方程、连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}-fv=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{\mathrm{m}}\frac{\partial u}{\partial z}\right)+F_u \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}+fu=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{\mathrm{m}}\frac{\partial v}{\partial z}\right)+F_v \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{4}$$

式中:u、v、w 分别为速度在 x、y、z 方向的分量;g 为重力加速度;t 为时间;ρ_0 为水体参考密度;ρ 为水体密度;p 为静水压力;f 为科氏参数;K_{m} 为垂向涡黏系数;F_u、F_v 为水平动量扩散系数。

悬沙运动控制方程为三维对流扩散方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial(w-w_{\mathrm{s}})}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(A_{\mathrm{H}}\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_{\mathrm{H}}\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{\mathrm{h}}\frac{\partial C}{\partial z}\right) \tag{5}$$

式中:A_{H}、K_{h} 分别为水平和垂向泥沙质量扩散系数;C 为悬浮泥沙浓度;w_{s} 为泥沙沉速。

2.2.2 *高性能模拟仿真技术*

沿海港口航道水域的潮汐与潮流,受近岸海域地形、岸线等地理条件的约束,叠加波浪、径流、气象强迫等动力因素的综合作用,呈现出显著的时空演变特征。为了保证数学模型运算速度及数据时效性满足港口航道生产业务应用,尚需要解决潮汐潮流预报准确性、空间高分辨率与计算效率、多要素综合作用与短预报时限的矛盾等 3 个关键技术问题。为此,本文将水文泥沙数学模型与高性能仿真技术进行融合,采用高效并行潮汐潮流三维数值模式,从预报精度、模拟效率、潮汐潮流对复杂动力要素的响应 3 个方面出发,采用不同的技术方法进行解决:①研发近岸海域分潮序列自动同化技术,采用短期实测数据同化,解决潮汐预报精度的问题;②采用区域分割和并行计算技术,形成大范围海域低分辨率网格和近岸高精度网格的在线嵌套模式,解决空间高分辨率与计算效率之间的矛盾;③实现风场动力环境耦合计算,考虑风场因素对潮汐潮流的影响,引入距平参数调差方法,解决多要素综合作用与短预报时限的矛盾。

2.3 预报系统自动化运行

数学模型建立完成后,动力环境及泥沙环境的智能预报还需要解决在无人干预的条件下实现模型自动化运算的问题。本文由预报系统完成水文泥沙要素的模拟计算及预报结果的输出。预报系统是航道智能预报的核心,其作用是加载各数学模型,按照计划任务及设计参数完成计算过程,并按指定格式输出计算结果,同时可通过定时任务计划及控制脚本实现整个计算过程的自动运行。

预报系统运行环境基于 Linux 系统平台,运行流程:①通过 Linux 系统的定时任务守护进程 crontab 定时启动预报主控脚本;②由主控 Shell 脚本逐级分解作业,依次完成数学计算模型所需的气象数据、潮汐开边界文件格式的转换;③计算文件准备完毕后调用 Linux 集群作业调度系统 Slurm,将数学模型计算任务提交并保障其运行所需的计算资源,以确保按照预期完成计算过程;④计算完成后进行预报结果的分析与处理,将预报数据进行备份,将指定的预报结果进行发布和展示;⑤将整个预报流程的日志信息发送至目标邮箱,以便对运行过程中可能出现的警告和报错信息进行监控。整个预报流程从启动到预报结果的发布都由布置在计算服务器中的预报系统控制,在布置完成后,其正常运行可完全脱离人工的操作。

3 天津港智慧航道基础支撑平台建设成果

3.1 基础数据现场实测站建设

在天津港海域建设了航道基础数据观测站,实现了数据的实时采集与传输,包括:1 个气象站,部署于东

突堤处;2个潮位站,采用压力式验潮仪,部署于东突堤和航道口门处;1个波浪和潮流站,采用多普勒声学波浪剖面流速仪AWAC(浪龙),该仪器与流速测量仪ADCP进行集成,实现浪、潮流一体化观测,部署于航道口门处;2个含沙量站,采用OBS 3+浊度计,部署于东突堤及航道口门处;1个AIS基站,监测港区周边船舶AIS数据,位于海边办公楼顶。

3.2 水动力和泥沙淤积模型构建与运算

通过自主研发风、浪、流、沙耦合的精细化模拟技术,建立天津港航道水动力和泥沙淤积模型,基于实时观测数据的同化反演实现预报精度的提升,并基于高性能并行化技术实现海量数据的快速运算。

a. 模型构建。数学模型涵盖了渤海和黄海全部及东海部分区域。为拟合岸线和航道、堤线等复杂边界,数学模型采用非结构化的三角形网格,重点对天津港主航道所在区域进行网格加密。

b. 模型验证。常规天气条件下,进行多组基于实测数据的模型验证工作,分别选取海域的短期序列(现场定点观测的大、小潮水文资料)和长期序列(观测数月的潮位、流速流向和含沙量)开展模型验证;极端天气条件下,主要依据的是近年实测风暴潮增水潮位过程,模型计算时考虑了空间分辨率为0.1°的实测风场数据,由此计算得到多个实测潮位站的潮位过程,并与实测值进行对比,同时对风暴潮增水期间的高潮位进行了误差统计分析,并根据结果对模型进行优化。

c. 模型运算。天津港智慧航道基础支撑平台在天河超算环境下完成了预报系统的调试、部署、上线,实现了预报系统的业务化运行及预报数据生产。预报系统由天河超级计算服务器上的定时任务守护进程启动预报主控脚本,控制数值计算程序逐级分解作业,依次完成计算文件准备、计算任务提交、计算任务执行、预报结果的处理、备份及发布,并对预报任务的计算时间及稳定性进行日志记录。

3.3 预报精度

天津港智慧航道基础支撑平台从2024年2月开始运转,利用平台测站开展风速、水位、潮流、波浪和含沙量等实时观测,同步开展水动力泥沙模拟计算,针对当日00:00起未来72 h的情况进行预报。正常天的潮位预测精度达到0.1 m左右,整体能够满足实际生产需求。同时各测站计算值与实测流速、流向在连续的变化过程中都比较接近,满足JTST 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》要求,潮流模型能够较好地反映天津港海域的潮流运动规律。

3.4 可视化展示系统

平台用户界面采用B/S架构,Web端用户界面的设计采用WebGIS界面风格,观测数据主要通过曲线图表方式展示,气象、潮流场、泥沙场预报数据通过动态矢量图层方式展示,地图图层包含电子地图、卫星图、电子海图、电子航道图及其他专题图等多种图层数据信息。整体界面风格适配大屏幕界面展示风格为主,内嵌智慧航道平台智能化建设养护功能模块,并预留生产调度、航运服务、通航安全保障等智能化应用场景接口。

天津港智慧航道基础支撑平台整体界面设计如图4所示,图中展示了天津港口门附近涨潮时刻的流场分布。同时具备人机交互操作功能,通过鼠标点击可以弹窗方式展示任何位置处的水深、潮位、流速、流向等关键要素。用户还可以通过窗口选项或界面上划线选取的方式,查询某段航线沿程在不同时刻的水动力要素预报值,并根据输入的阈值查询相关通航预警等,从而为计划调度、航行操作等提供辅助。

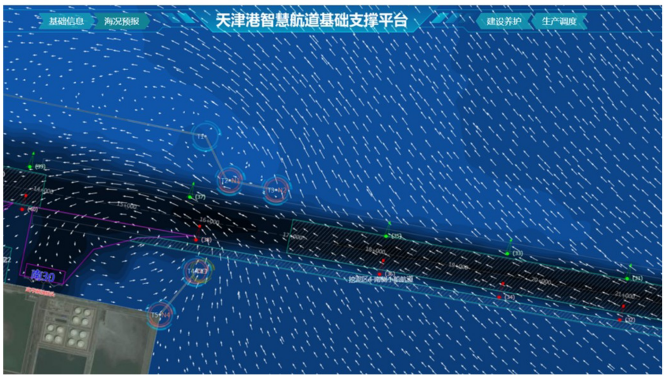


图4 智慧航道基础支撑平台可视化界面示意图

Fig. 4 Visualization interface of basic platform for intelligent waterway

4 讨 论

4.1 基础平台建设经验教训和发展方向

4.1.1 环境要素基础设施建设

天津港智慧航道基础支撑平台目前已经正常运转1年多的时间,各要素都按相关要求进行实时采集与传输、存储,为未来天津港建设世界一流智慧港口[15]打下了坚实基础。但是,口门附近海域因防波堤挑流产生环流,在转流时刻流向相对较乱,导致此处实测站与航道内的流速、流向有所差别。因此,后续实测站位应

尽量布设在口门环流直接影响区之外。

另外,存在沿海现场测站成本高、仪器容易锈蚀损坏、仪器维护成本高等行业共性难题,造成智慧航道建设总投资高昂,一定程度上抑制了海港智慧航道的发展,因此降低现场环境要素感知成本是迫切需要解决的问题。其中含沙量观测代价最大,目前基本是采用光学仪器测量浊度并根据率定关系计算含沙量,但因光学仪器容易附着海生物等而造成数据失真,需要非常频繁的清洗维护工作[16]。声学测量含沙量是一个重要方向,如使用 ADCP、AQUAscat 等声学测沙仪,除受水生物污垢影响较小外,还可测量得到非侵入式的含沙浓度剖面,将光学仪器的单点测量变为浓度剖面。但这种声学测量方法估算悬移质浓度也有较大的局限[16-17],如粒径影响、能量耗散等,因而现场实际操作中很少应用。另外,融合多源卫星遥感数据与现场观测资料,构建悬沙浓度反演关系,实现海域悬沙浓度反演,可大幅减少浊度计数量,并实现含沙量观测由个别站点升级为大范围海域,因此该技术在智慧航道中的应用将会更广阔。

水深观测方面由于难以克服定点大范围扫测及海量数据在线处理的难题,尚无法实现航道水深的实时自动观测,目前仍需依靠测量船定期扫测获得航道水深,采用的仪器为单波束测量仪或多波束测量仪。随着无人船测量技术发展,在适当位置设立无人船基地,针对波高和流速都较小的港池泊位及内航道等区域,在非通航时段对重点区域进行水深观测,将有助于实现水深自动化测量,并大幅降低成本。

4.1.2　模型预报精度

正常天气下的环境要素模拟预报精度已能满足相关规范要求,并满足船舶调度、引航等实际生产需求,但是在台风、寒潮等特殊大风作用下潮位、流速和泥沙淤积的预报精度都还有较大的提升空间。研究发现,台风中心附近增水变化显著,潮致欧拉余流速度也有较大变化[18],而渤海、黄海等海域经常会受寒潮影响而产生较大增减水。因此,水位变化即增减水以及上层水体的流速、流向等在很大程度上受风向、风速、风时等气象要素影响。但是目前风场预报精度相对较差,往往导致大风引起的相关环境要素的模拟与实测值相差较大,因此大风模拟精度提升是重要方向。另外,随着长期观测数据的积累,借助人工智能优化预报模型,也是提升水动力泥沙预报精度的一个重要方向。

4.1.3　动态展示

天津港智慧航道基础支撑平台具备了地理信息数据的展示与动态可视化功能,但离数字孪生平台还有较大差距。未来,需要利用数字孪生技术,开展复杂场景感知、自主协同控制、调度组织优化、信息安全交互等研究,形成泛在互联、高效智能的航道孪生场景应用[19-21]。

4.2　基于基础支撑平台的管理服务智慧化

借助基础支撑平台提供的基础数据,可以进一步推进生产调度智慧化、航道养护智慧化、航道公共服务智慧化。例如航道养护管理方面,利用基础支撑平台提供的预报水深,以施工全过程智能监测为主,并支持自动识别浅点、方量分析、疏浚计划制定与方案优化,提升施工全周期的规范化、透明化和智能化管理水平[22]。另外,还可为航道生产调度、通航安全保障、溢油及搜救等生产运营管理提供智能化辅助。

5　结　语

在基础支撑平台框架设计和环境要素感知与模拟预报关键技术研究的基础上,开发建设了天津港智慧航道基础支撑平台,实现了覆盖气象、水文、泥沙、船舶等多要素的实时智能感知,并通过高精度水动力泥沙模拟仿真和自动化运行,实现了未来 72 h 水位、流速、水深等关键环境要素预报,为航道通航、养护等业务提供数据支撑。在航道基础设施数字化的基础上,进一步开发相关功能模块来提升生产运营管理和对外服务智慧化水平,是未来智慧航道建设的重要发展方向。

参考文献:

[1] 许家帅,鲍可馨,马瑞鑫,等. 智慧水运发展综述与展望[J]. 水道港口,2025,46(1):1-11. (Xu Jiashuai, Bao Kexin, Ma Ruixin, et al. Review and outlook on the development of smart water transport[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2025, 46(1): 1-11. (in Chinese))

[2] 洛佳男,耿雄飞,文捷,等. 我国内河智慧航道现状、问题与展望[J]. 水运工程,2023(2):123-128. (Luo Jianan, Geng Xiongfei, Wen Jie, et al. Research status, problems, and prospects of smart channel for inland river in China[J]. Port & Waterway

Engineering,2023(2):123-128. (in Chinese))
[3] 郭涛,刘怀汉,万大斌,等. 长江"智能航道"系统架构与关键技术[J]. 水运工程,2012(6):140-145. (Guo Tao, Liu Huaihan, Wan Dabin, et al. System architecture and key technology research of Yangtze River intelligent waterway[J]. Port & Waterway Engineering,2012(6):140-145. (in Chinese))
[4] 吕永祥,何乐,陈琳,等. 长江数字航道和智能航道的分析与思考[J]. 交通科技,2013(2):161-164. (Lyu Yongxiang, He Le, Chen Lin, et al. Analytics and thoughts on Yangtze River digital and intelligent waterway[J]. Transportation Science & Technology,2013(2):161-164. (in Chinese))
[5] 刘怀汉,李学祥,杨品福,等. 长江智能航道关键技术体系研究[J]. 水运工程,2014(12):6-9. (Liu Huaihan, Li Xuexiang, Yang Pinfu, et al. System of key technology of Yangtze River intelligent waterway[J]. Port & Waterway Engineering,2014(12):6-9. (in Chinese))
[6] 陆英. 长江数字航道建设成果及展望[J]. 水运工程,2016(1):12-14. (Lu Ying. Progress and reflection of Changjiang digital waterway construction[J]. Port & Waterway Engineering,2016(1):12-14. (in Chinese))
[7] 李学祥. 内河智慧航道发展研究[J]. 中国水运,2023(7):15-19. (Li Xuexiang. Research on the development of inland river intelligent waterways[J]. China Water Transport, 2023(7):15-19. (in Chinese))
[8] 严新平,柳晨光. 智能航运系统的发展现状与趋势[J]. 智能系统学报,2016,11(6):807-817. (Yan Xinping, Liu Chenguang. Review and prospect for intelligent waterway transportation system[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016,11(6):807-817. (in Chinese))
[9] 李学祥,刘怀汉. 长江航道关键技术研发进展综述[J]. 中国水运,2023(1):93-95. (Li Xuexiang, Liu Huaihan. A review of research progress in key technologies of the Yangtze River Waterway[J]. China Water Transport, 2023(1):93-95. (in Chinese))
[10] 童剑. 京杭运河智慧航运建设方案研究[J]. 现代交通技术,2021,18(3):83-87. (Tong Jian. Research on the construction plan of smart shipping on the Beijing-Hangzhou canal[J]. Modern Transportation Technology, 2021, 18(3): 83-87. (in Chinese))
[11] 叶嘉宁,孙俊锋,廖鹏. 江苏智慧航道建设经验与展望[J]. 中国水运,2024(23):64-66. (Ye Jianing, Sun Junfeng, Liao Peng. Experience and prospects of intelligent waterway construction in Jiangsu Province[J]. China Water Transport,2024(23): 64-66. (in Chinese))
[12] 刘怀汉,张圣丽,沈思,等. 长江干线数字航道建设进展及展望[J]. 水道港口,2025,46(2):165-170. (Liu Huaihan, Zhang Shengli, Shen Si, et al. Effect and application of Yangtze River digital channel construction[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2025,46(2):165-170. (in Chinese))
[13] 杨阳,张明进,韩玉芳,等. 内河航道设施智能化监测预警与信息服务关键技术研究[J]. 中国基础科学,2021,23(1):26-33. (Yang Yang, Zhang Mingjin, Han Yufang, et al. Research on key technologies of intelligent monitoring, warning and information service of inland waterway facilities[J]. China Basic Science,2021,23(1):26-33. (in Chinese))
[14] 何涛涛,黄登,余长慧,等. 面向长江数字航道的关键航道要素智能感知研究[J]. 测绘地理信息,2023,48(1):122-126. (He Taotao, Huang Deng, Yu Changhui, et al. Intelligent perception of key waterway elements for digital waterway in Yangtze River[J]. Journal of Geomatics,2023,48(1):122-126. (in Chinese))
[15] 褚斌. 全力打造世界一流智慧港口 持续开创蓬勃兴盛天津港新局面[J]. 中国水运,2020(4):6-8. (Chu Bin. Build a world-class intelligent port and create a new situation of prosperous Tianjin port[J]. China Water Transport,2020(4):6-8. (in Chinese))
[16] 庞启秀,辛海霞. 风浪期间及风后泥沙现场观测技术研究[J]. 泥沙研究,2013(6):38-44. (Pang Qixiu, Xin Haixia. Techniques of felid survey of sediment during and after large wind waves[J]. Journal of Sediment Research,2013(6):38-44. (in Chinese))
[17] Thornea P D, Hanes D M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes[J]. Continental Shelf Research, 2002,22(4):603-632.
[18] 罗锋,汪忆,杨洁,等. 相似路径台风风暴潮过程对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):130-140. (Luo Feng, Wang Yi, Yang Jie, et al. Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):130-140. (in Chinese))
[19] 严新平,李晨,刘佳仑,等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2021,21(5):22-29. (Yan Xinping, Li Chen, Liu Jialun, et al. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2021,21(5):22-29. (in Chinese))

[20] 毕金强,高邈,鲍可馨,等. 沿海航道数字孪生场景构建方法研究[J]. 水道港口,2024,45(6):939-946. (Bi Jinqiang,Gao Miao,Bao Kexin,et al. Research on construction method of digital twin scene of coastal channel[J]. Journal of Waterway and Harbor,2024,45(6):939-946. (in Chinese))

[21] 马瑞鑫,薛礼,问皓,等. 数字孪生航道建设及航道智慧化指标体系研究[J]. 水道港口,2024,45(4):612-620. (Ma Ruixin,Xue Li,Wen Hao,et al. Research on digital twin waterway construction and intelligent waterway indicator system[J]. Journal of Waterway and Harbor,2024,45(4):612-620. (in Chinese))

[22] 庞启秀,李怀远,王克勤,等. 航道疏浚全过程智能监管系统研发[J]. 航海技术,2024(2):18-21. (Pang Qixiu,Li Huaiyuan,Wang Keqin,et al. Research and development of intelligent supervision system for the whole process of channel dredging[J]. Marine Technology,2024(2):18-21. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-01　编辑:刘晓艳)

(上接第 60 页)

[11] 徐力群,张国琛,马泽锴. 土石堤坝隐患探测综合物探技术发展综述[J]. 地球物理学进展,2022,37(4):1769-1779. (Xu Liqun,Zhang Guochen,Ma Zekai. Development of comprehensive geophysical prospecting technology for hidden danger detection of earth rock dams[J]. Progress in Geophysics,2022,37(4):1769-1779. (in Chinese))

[12] 陈亮,颜书法,万昱. 跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(8):1605-1614. (Chen Liang,Yan Shufa,Wan Yu. Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(8):1605-1614. (in Chinese))

[13] Abdulsamad F,Revil A,Ahmed A S,et al. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments[J]. Engineering Geology,2019,254:89-101.

[14] 陈江,熊杰,李宇驰,等. 基于热效应的涉水混凝土工程裂缝监测方法[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):296-303. (Chen Jiang,Xiong Jie,Li Yuchi,et al. Crack monitoring method for wading concrete engineering based on thermal effects[J]. Advanced Engineering Sciences,2023,55(1):296-303. (in Chinese))

[15] 刘国庆,洪云飞,王蔚,等. 联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):74-81. (Liu Guoqing,Hong Yunfei,Wang Wei,et al. Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):74-81. (in Chinese))

[16] 张治国,程志翔,张孟喜,等. 盾构隧道接缝漏损诱发水土流失模型试验及离散元分析[J]. 中国公路学报,2023,36(1):162-175. (Zhang Zhiguo,Cheng Zhixiang,Zhang Mengxi,et al. Model test and discrete element analysis of soil and water loss induced by joint leakage of shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(1):162-175. (in Chinese))

[17] Stefania G A,Rotiroti M,Buerge I J,et al. Identification of groundwater pollution sources in a landfill site using artificial sweeteners,multivariate analysis and transport modeling[J]. Waste Management,2019,95:116-128.

[18] 戚海博,顾凯,张博,等. 基于单孔热响应测试的地下水渗流场评价:以扬中指南村崩岸场地为例[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1713-1720. (Qi Haibo,Gu Kai,Zhang Bo,et al. Evaluation of groundwater flow field based on single-borehole thermal response test:a case study of Zhinan Village bank collapse site[J]. Journal of Engineering Geology,2022,30(5):1713-1720. (in Chinese))

[19] Yu Haitao,Liu Zhibin,Cai Xinchen,et al. Research on the detection of leakage points in vertical barrier walls using a combined method of ERT and tracer methods[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(59):123008-123021.

[20] 梁越,何慧汝,许彬,等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):60-66. (Liang Yue,He Huiru,Xu Bin,et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):60-66. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-17　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.017

弯曲航道通航水流特性及船舶运动特性数值模拟

夏旭江[1],庄 宁[1],徐兴年[1,2],蔡飘洋[1]

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 2. 苏交安(常州)水运安全技术咨询有限公司)

摘要:为揭示弯曲航道几何参数对通航水流条件及船舶运动特性的影响规律,以引江济淮工程典型弯曲航道段为研究对象,建立基于 MIKE21 的水流数学模型及 MMG 船舶操纵模型,系统分析了转弯角度(θ=60°,90°,120°)、弯曲半径(R=540,1 000,1 500 m)、航道宽度(B=60,90 m)对弯曲航道水流特性的影响,并量化了 1 000 t 级货船在弯曲航道中的运动规律。结果表明:转弯角度增大显著加剧了水流复杂性,θ=120°时弯顶壅水较 60°时上升 0.012 m,水面最大横比降位置由下游 1/3 处上移至上游 1/3 处,主流向凸岸偏移;弯曲半径的增大改善了通航条件,R=1 500 m 时凹凸岸水位差较 540 m 时降低了 60%,最大流速从 0.55 m/s 降至 0.35 m/s;航道宽度减小显著恶化水流条件,B=60 m 时最大流速、上下游水位差较 90 m 时均显著增大;船舶运动特性方面,下行船受水流主导,横移速度与舵角、漂角呈强负相关关系;上行船以自身动力为主,各参数相关性较弱。

关键词:弯曲航道;通航水流特性;船舶安全;数值模拟

Numerical simulation of water flow characteristics in curved channels and ship motion characteristics

Xia Xujiang[1], **Zhuang Ning**[1], **Xu Xingnian**[1,2], **Cai Piaoyang**[1]

(1. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University*;
2. *SJA (Changzhou) Maritime Safety Technology Conslting Co., Ltd.*)

Abstract: In order to reveal the influence of the geometric parameters of the curved channel on the navigable water flow conditions and ship motion characteristics, the typical curved channel section of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project was taken as the research object. Moreover, the mathematical model of the water flow based on MIKE21 and the MMG ship manoeuvring model were established. The influence of the turning angle (θ=60°, 90°, 120°), the bending radius (R=540, 1 000, 1 500 m), and the channel width (B=60, 90 m) on the flow characteristics of the curved channel were analyzed in a systematic way, and the movement law of 1 000 t class cargo ship in the curved channel was quantified. The results show that the increase in the turning angle significantly aggravates the complexity of water flow; the backwater at the top of the bend at θ=120° rises by 0.012 m compared with that at 60°, and the maximum transverse gradient of the water surface shifts from the downstream 1/3 to the upstream 1/3; the main stream shifts to the convex bank. The increase of the bending radius improves the navigable conditions, and the difference in water level between the concave and convex banks at R=1 500 m decreases by 60% compared with that at R =540 m; the maximum flow velocity decreases from 0.55 m/s to 0.35 m/s. The reduction of the channel width significantly worsens the water flow conditions, and the maximum flow velocity and the water level difference between upstream and downstream increase significantly at B=60 m compared with B=90 m. As for the ship motion characteristics, the downstream ship is dominated by the water flow, and the traverse speed with the rudder angle and drift angle show a strong negative correlation; the upstream ship is dominated by its own power, and the correlation of each parameter is weak.

Key words: curved channel; navigable water flow characteristic; ship safety; numerical simulation

随着内河航运的快速发展,航道的安全性和通航效率愈发受到重视,尤其是在弯曲航道中,水流的复杂多变以及航道的几何尺度对船舶的安全通航构成了显著影响[1-3]。弯曲航道因水流受地形约束形成非线性运动特征,易出现流速剧增、流向偏转及水面横比降不对称分布等复杂现象,进而影响船舶的操控性和航行稳定[4]。因此,深入研究弯曲航道的水流特性,对于保障船舶安全通航、提升航运效率、推动内河航运稳步发展具有重要的理论和实践意义。

通过对大量航道内船舶事故的调查,归纳分析出事故发生的主要原因在船员操作能力、船舶性能优化及

作者简介:夏旭江(1998—),男,博士研究生,主要从事水利工程研究。E-mail:18260635129@163.com

通信作者:庄宁(1977—),男,教授,博士,主要从事水利工程研究。E-mail:zhuangning1977@163.com

航道管理机制等方面,并针对这些安全影响因素提出了相应的提高通航可靠性的对策[5-8]:Chai 等[9]基于300 起船舶碰撞事故,分析总结出 98 种事故原因,并构建了事故致因网络和事故致因链网络;陈相宇等[10]结合具体案例分析了弯曲航道船舶安全事故发生的原因,认为需着重视对船员能力和专业素养的培养、航道实时信息的获取和发布、船舶间沟通协调以及合理设计航路等。可以看出学者们在弯曲航道通航安全方面大多是从船舶操纵参数角度进行分析,很少从弯曲航道水流特性以及船舶运动特性等方面对弯曲航道通航安全进行分析研究。弯道水流特性的研究可追溯至 1876 年 Thomson[11]的水槽试验,其发现弯道除纵向流速外还存在横向流速,奠定了研究基础。此后,学者们通过实测、物理模型及数值模拟,围绕水面形态、横纵向流速分布、环流结构等展开研究:Kalkwijk 等[12]推导了环流垂向分布公式;徐艳军等[13-14]揭示了横比降与环流对船舶漂移的影响。随着数值技术发展,陈相宇等[15-16]采用数值模型模拟了曲率半径、转角等对流速与水位的影响,陈翠霞等[17-18]对比分析了不同紊流模型的模拟精度。然而,现有研究大多针对天然河道或单一参数,对内河受限航道弯曲段的系统性研究不足,且国内通航标准也尚未明确相关水流条件规定。

在船舶运动特性方面,研究手段已从实船试验的数据采集[19]、船舶数值模拟研究[20]发展到船舶操纵数学模型,其中日本的分离型船舶运动数学模型因能合理表达流体动力而被广泛应用[21-23]。但针对弯曲航道特有的水流条件如横比降、环流与横移速度、舵角、漂角等船舶运动参数的关联性研究仍较缺乏,尤其对船舶在航道上行、下行时的特性差异研究不足。

综上,现有研究在弯曲航道通航安全方面仍存在明显不足,例如转弯角度、弯曲半径、航道宽度等航道几何参数与壅水高度、流速分布、水面比降等水流特性之间的关联揭示不足,尤其缺乏对弯曲航道的水流非线性特征的系统分析;船舶在弯曲航道中的运动特性如横移速度、舵角调整、漂角变化及其与水流条件的动态响应规律研究较为薄弱,难以支撑弯曲航道的安全通航需求。因此有必要对弯曲航道通航水流条件及船舶运动特性进行深入研究。本文依托引江济淮工程的典型弯曲航段,利用 MIKE21 软件建立水流数学模型,重点研究转弯角度、弯曲半径及航道宽度对弯道水流特性的影响规律,并结合 1 000 t 级货船双向航行试验,解析上行、下行船舶的运动特性差异,以期降低船舶在弯道段航行时可能面临的安全风险,并为工程弯曲航道设计优化与通航安全管控提供科学依据。

1　模型建立与验证

1.1　弯曲航道选取

引江济淮工程作为我国重大跨流域调水与航运工程,横跨长江、淮河两大流域,地跨安徽、河南两省,线路全长 723 km,通航等级为Ⅱ级,是沟通江淮地区的水运大动脉。工程沿线航道穿越平原、丘陵等多样地形,其中江淮沟通段的派河口枢纽至蜀山泵站枢纽段具有显著的连续反弯特征,不仅转弯角度大、弯曲半径差异明显,且弯道间直线段短,导致水流条件极为复杂,对船舶通航安全构成直接威胁。该航段作为工程通航的关键节点,对其弯曲航道的水流特性与船舶运动规律研究具有典型代表性与工程紧迫性。为系统开展相关研究,首先通过调研对工程沿线弯曲航道的核心特征参数转弯角度 θ 和弯曲半径 R 进行了全面采集与汇总,如表 1 所示。鉴于连续反弯段转向角度较大、弯道间直线段较短的特性对船舶通航安全影响显著,且各类通航标准均对此类参数提出了明确要求,在此基础上考虑到江淮沟通段蜀山枢纽上游总体布局上存在连续反弯段,有完整的弯道派生曲线,相对于整个航段具有代表性,因此选取地处安徽省合肥市肥西县派河口枢纽至蜀山泵站枢纽之间的蜀山枢纽段上游航道作为研究对象。

表 1　工程沿线弯道特征参数统计

Table 1　Characteristic parameters of bend along project route

θ 范围	航段弯道数		R 范围	航段弯道数	
	引江济巢及巢湖湖区段	江淮沟通段		引江济巢及巢湖湖区段	江淮沟通段
>0°~10°	56	0	>0~500 m	41	0
>10°~20°	40	18	>500~1 000 m	94	65
>20°~30°	24	22	>1 000~1 500 m	11	10
>30°~40°	15	11	>1 500~2 000 m	9	1
>40°	27	28	>2 000 m	7	3
总计	162	79	总计	162	79

1.2 平面二维水流数学模型

采用MIKE21软件建立水流数学模型[24-25],研究弯道特征参数对水流条件的影响,结合船舶操纵数学模型进一步探讨其对船舶通航可能产生的影响,据此为船舶实际安全航行提出可参考的通航安全保障措施。

1.2.1 控制方程

MIKE21水动力模块的核心理论基础为纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,该方程基于流体三向不可压缩、雷诺数均匀分布基本假定,同时遵循布辛涅斯克(Boussinesq)假定和静水压力假定[26-27]。模型的基本控制方程包括连续方程和动量方程:

$$\frac{\partial s}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial s}{\partial x}-\frac{\tau_{bx}}{\rho h}-\frac{1}{\rho h}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(Eh\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(Eh\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right] \tag{2}$$

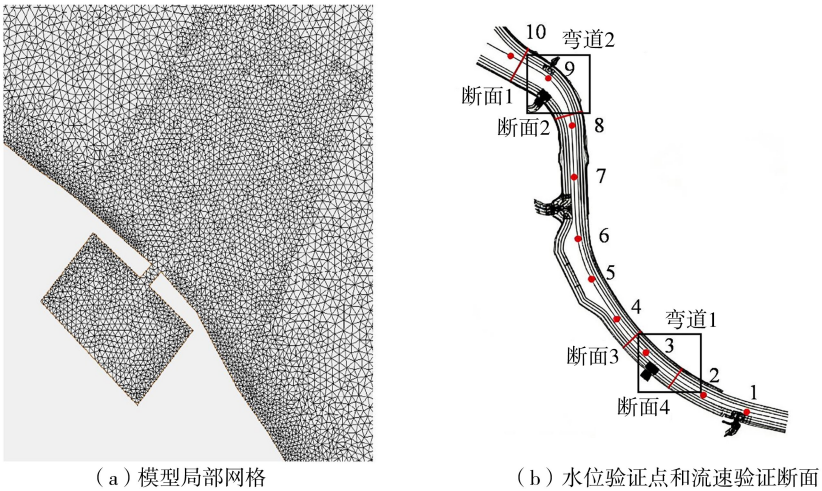
$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial s}{\partial y}-\frac{\tau_{by}}{\rho h}-\frac{1}{\rho h}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right)+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(Eh\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(Eh\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right] \tag{3}$$

式中:s为水位;t为时间;x、y分别为直角坐标系坐标;u、v分别为x、y方向的速度分量;g为重力加速度;ρ为水的密度;τ_{bx}、τ_{by}分别为x、y方向的河床面应力张量分量;S_{xx}、S_{xy}、S_{yx}、S_{yy}为辐射应力分量;h为总水深,$h=h_0+\eta$;h_0为静水深;η为静止水平面上的水位;E为涡动黏性系数。

1.2.2 模型建立与验证

以研究河段平面布置图和地形资料为基础,采用三角形非结构网格建立二维水流数学模型,局部加密。模型计算域共包括122 613个节点,238 972个网格,如图1(a)所示。模型进口边界由输水流量控制,出口边界由设计输水位控制,岸边界采用非滑移边界。模型采用实测资料率定方法确定床面综合阻力系数,取值为0.025。

选择与模型模拟工况一致的水文条件时段,即输水流量稳定在290 m^3/s进行数据采集。在研究区域沿航道中心线及两岸布设10个水位验证点,覆盖弯道进口、弯顶及出口关键区域,确保捕捉水流沿程变化特征。采用已计量校准的投入式水位传感器测量水位。测量时将传感器固定于航道两岸,确保探头完全浸没且避开船舶扰动区域,连续采集3 d,取每日稳定时段的平均值作为该验证点的代表水位。同时在研究河段设置流速验证断面,采用流速剖面仪测量水深0.5 m处的流速,重复测量3次后取平均值,确保数据稳定性。水位验证点和流速验证断面如图1(b)所示。



(a)模型局部网格 (b)水位验证点和流速验证断面

图1 弯曲航道模型局部网格及水位验证点、流速验证断面

Fig. 1 Curved channel model local mesh, water level verification points, and flow velocity verification sections

由表2可知,实测水位在各验证点存在波动,范围大致在8.851~9.015 m,模拟水位范围为8.899~8.971 m。各验证点水位模拟值与实测值吻合良好,差值范围为-0.044~0.048 m,满足JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》对平原河流规定的误差限值(±0.05 m),表明模型能够反映天然河流的水位变化。

由图 2 可知,断面 1 实测流速峰值为 0.51 m/s,距起点 80~100 m,模拟流速峰值与所处位置与实测值较为接近,且除个别点,流速模拟值与实测值变化趋势一致,模拟效果相对较好;断面 2 的实测流速峰值为 0.54 m/s,距起点约 60~80 m,模拟流速峰值为 0.52 m/s,位置与实测值相近;断面 3 的实测流速峰值 0.53 m/s,距起点约 100 m,模拟流速峰值与实测峰值差为 0.48 m/s,但位置相近,整体趋势相似;断面 4 的实测流速峰值为 0.28 m/s,距起点 120~140 m 处,模拟流速峰值为 0.27 m/s,位置和数值二者均较为接近,整体趋势一致。整体看,4 个断面流速模拟值和实测值总体趋势较为一致,表明模型能在一定程度上反映实际流速变化情况。

表 2　不同验证点水位验证结果

Table 2　Results of water level validation at different verification points

水位验证点	水位实测值/m	水位模拟值/m
1	9.015	8.971
2	8.986	8.960
3	8.973	8.943
4	8.951	8.935
5	8.908	8.937
6	8.947	8.933
7	8.915	8.907
8	8.851	8.899
9	8.921	8.902
10	8.913	8.899

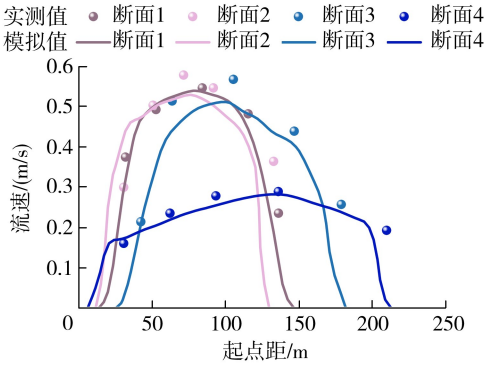


图 2　不同断面流速验证结果

Fig. 2　Flow velocity validation results for different sections

由图 3 可知,弯道 1 实测轨迹呈弯曲状,模拟水流流向与实测轨迹走向基本一致,意味着弯道处模拟水流流向能较好呈现实际水流的弯曲方向和大致路径;弯道 2 也呈现类似状况,实测轨迹与模拟水流流向高度契合,无论是弯曲趋势还是整体流向变化,均表现出一致性。因此,模型在反映弯道处水流流向时具备较高可靠性,能够较准确地模拟实际水流流向。

模型模拟的水位、流速、流向均满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求,可以切实反映实际航道中水流的运动状态,因此可基于该模型研究相关特征参数对弯道水流条件以及对船舶在弯曲航道航行的影响。

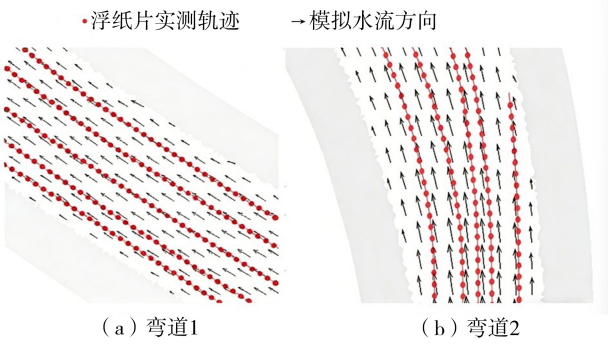


图 3　不同弯道处的流向验证结果

Fig. 3　Flow direction validation results at different bends

1.2.3　工况设置

为进一步研究不同弯曲航道特征对水流条件的影响,选择了转弯角度、弯曲半径、航道宽度作为特征要素,研究不同工况下的弯曲航道特征对水流条件的影响,因此设置 3 种工况:①θ 分别为 60°、90°、120°,固定 R=540 m、航道宽度 B=90 m;②R 分别为 540、1 000、1 500 m,固定 θ=44.05°、B =90 m;③B 分别为 60、90 m,固定 θ=44.05°、R=540 m。

1.3　船舶操纵数学模型

1.3.1　控制方程

采用 MMG 作为船舶运动的仿真模型,对研究河段船舶双向通航安全进行研究。在静水中的操纵平面运动数学模型基础上,仅考虑纵荡、横荡和首摇 3 个自由度,在方程右端加入风、浪、流的干扰作用力,可建立船舶平面运动方程:

$$\begin{cases}(m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)vr=X_{\mathrm{H}}+X_{\mathrm{P}}+X_{\mathrm{R}}+X_{\mathrm{WD}}+X_{\mathrm{WV}}+X_{\mathrm{C}}\\(m+m_y)\dot{v}+(m+m_x)ur=Y_{\mathrm{H}}+Y_{\mathrm{P}}+Y_{\mathrm{R}}+Y_{\mathrm{WD}}+Y_{\mathrm{WV}}+Y_{\mathrm{C}}\\(I_z+J_z)\dot{r}=N_{\mathrm{H}}+N_{\mathrm{P}}+N_{\mathrm{R}}-Y_{\mathrm{H}}X_{\mathrm{C}}+N_{\mathrm{WD}}+N_{\mathrm{WV}}+N_{\mathrm{C}}\end{cases}\tag{4}$$

式中:m 为船体的质量;m_x、m_y 分别为船体 x(纵荡)方向,y(横荡)方向的附连质量;r 为船舶绕 z 轴的艏摇角

速度;I_z、J_z 分别为船舶绕艏摇轴的转动惯量及惯性矩;X_{WD}、Y_{WD}、N_{WD} 分别为水流干扰作用产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩;X_R、Y_R、N_R 分别为舵产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩;X_{WV}、Y_{WV}、N_{WV} 分别为波浪干扰作用产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩;X_C、Y_C、N_C 分别为风力干扰作用产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩;X_P、Y_P、N_P 分别为螺旋桨产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩;X_H、Y_H、N_H 为不包括惯性力在内的船体水动力。

目前江淮沟通段航道按Ⅱ级航道标准设计,设计航道尺度为 4.0 m(航道水深)×60 m(航道底宽)×540 m(最小弯曲半径),设计代表船型为 1 000 t 货船、2 000 t 货船、100TEU 集装箱船、1 顶 2×1 000 t 分节驳顶推。考虑到实际通航船舶中,1 000 t 货船占比较大,本文建模的代表船型为 1 000 t 级货船,其船长为 58.0 m、船宽为 11.0 m、设计吃水为 2.8 m。

1.3.2 模型建立与验证

依据 JT/T 258—2021《长江运输船舶操纵性衡准》,结合类似研究和本文河段重要程度,本文主要通过航向稳定性、航向改变性和定常回转性对模型进行率定。经测定,1 000 t 级货船航向稳定性指标 ΔC_0 为 0°,小于 3.5°;航向改变性指标应舵转首指数 P' 为 1.12,大于 0.30;定常回转性试验中左、右旋的回转直径分别为 3.10L 和 3.20L(L 为船长),回转直径与船长之比均小于 4.0。综上,所建船舶操纵数学模型的操纵性指标符合内河船舶操纵性标准。

2 结果与分析

2.1 弯曲航道特征对水流条件的影响

由于弯道 1 断面更为规整,在其他条件不变的基础上分别调整原有模型弯道 1 的转弯角度、弯曲半径和航道宽度,工况均采用航道设计调水无支流工况,即上游按照设计输水流量 290 m^3/s,下游水位按照设计输水水位 8.9 m,其余支流按照干支流量关系和 5 年一遇标准给定流量。

2.1.1 转弯角度的影响

结合表 1 中弯曲河段的参数分布范围,转弯角度分别为 60°、90°和 120°,不同转弯角度弯道水位、流速分布如图 4、图 5 所示(两图中的线为等值线)。由图 4 可知,受入汇支流、支流口地形及弯道出口处航道宽度增大的综合影响,弯道水位仅呈现弯顶处凹岸水位高于凸岸的规律,未在弯顶处凹、凸岸出现水位极值,且仅在弯道出口凸岸观测到水位极小值,未发现极大值。等值线也未呈现层层包裹凸岸的形态,而是大致呈平行四边形分布,而凹、凸岸的水位极小值从侧面印证了相关研究中弯顶处凹、凸岸存在水位极值的结论。对比不同转弯角度下弯顶处水位可知,随转弯角度增大,弯道长度相应增加,弯道内整体壅水程度加剧:θ=60°时,弯顶处平均水位为 8.935 m;θ=90°时,同一位置水位升至 8.941 m,升高约 0.006 m;θ=120°时,水位进一步升至 8.947 m,较 θ=60°升高约 0.012 m。弯顶位置逐渐向上游偏移,水位亦逐步升高。对比弯道等值线间距可见,随转弯角度增大,最小等值线间距由下游逐步向上游迁移:θ=60° 时,最大横比降出现于下游距弯道出口 1/3 处;θ=120°时,位置上移至上游距入口约 1/3 处,且横比降有所增大。因此,随转弯角度增大,弯道内水位最大横比降位置将由下游逐步向上游迁移。

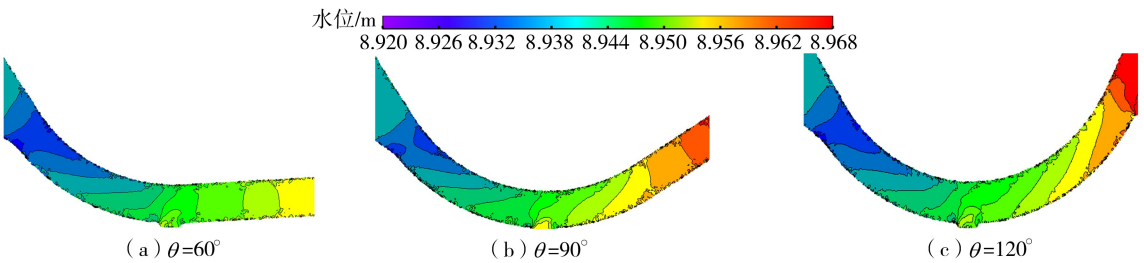


图 4 不同转弯角度下的水位分布

Fig. 4 Water level distribution at different turning angles

由图 5 可知,随着支流流量汇入,航道内流速等值线所包围区域的宽度明显增大,反映出断面流速随流量汇入有所增大。但随着水流在航道内前进,最大流速等值线包围区域的宽度和长度逐渐变小,第二大流速等值线包围区域宽度则有一定增大,且逐步向凸岸靠近,反映出弯道内主流会随弯道转角的增大,逐步贴向凸岸,使得凸岸逐步受到更大的冲刷力。反映到船舶通航条件上,可认为当船舶航行于小转角弯道时,需在

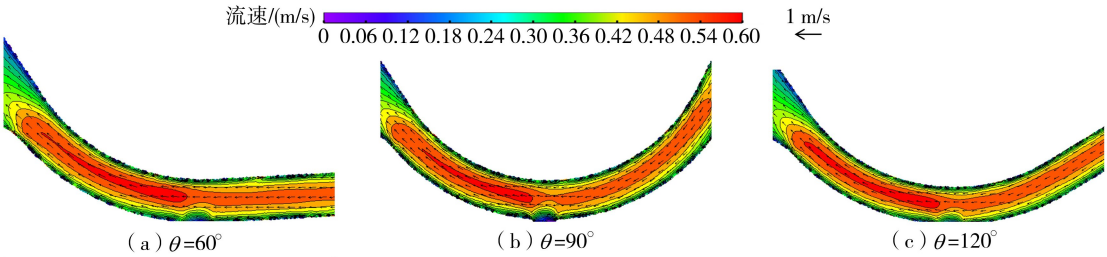


图 5　不同转弯角度下的流速分布

Fig. 5　Flow velocity distribution at different turning angles

弯道下游靠近出口段尤其注意控制船舶航向,而当船舶航行于大转角弯道时,需在弯道上游靠近入口段尤其注意控制船舶航向。同时由于航道主流的变化,通常情况下船舶需沿着航道中心线航行,尤其是航行于大转角弯道时,其弯曲段长度会更大,过往船舶需与岸侧保持必要的安全距离,并集中精力结合船舶情况操纵船舶,防止受水流主流的偏移发生搁浅或与其他船舶发生碰撞。

2.1.2　弯曲半径影响

由于研究河段为Ⅱ级航道,允许最小弯曲半径为 540 m,结合表 1 中弯曲半径分布范围,调整弯曲半径为 540、1 000、1 500 m。由图 6 可知,随着弯曲半径增大,弯道趋近顺直河段,两侧岸水位差减小,水面横比降降低:R=540 m 时,弯道凹岸与凸岸水位差达 0.02 m;R=1 000 m 时,水位差降至 0.012 m,降幅 40%;R=1 500 m 时,水位差进一步缩小至 0.008 m,仅为 540 m 工况的 40%。弯道长度增加,弯道内水流发展更充分,壅水现象逐渐减弱。由图 7 可知,航道内相同流速等值线包围区域宽度随弯曲半径增大而减小,R=540 m 时,最大流速 0.55 m/s;R=1 000 m 时,最大流速降至 0.45 m/s;R=1 500 m 时,最大流速仅 0.35 m/s。凸岸冲刷深度较 540 m 工况减少了 0.3 m,表明主流逐渐扩散,流速变小,水流趋于平缓,对岸侧冲刷减弱,这是因为在弯曲航道中,离心力是关键影响因素。离心力使凹岸水流受挤压产生壅水,水位升高,而凸岸水流分散,水位较低。曲率半径越小,离心力作用越显著,凹凸岸高程差越大,且流速分布受离心力与摩擦力共同调控影响。凹岸因水流汇聚及离心力作用,流速较高;凸岸水流分散且离心力作用弱,流速较低。因此在曲率半径小的情况下,较强离心力使凹岸高速流区集中且流速峰值高;随着曲率半径增大,离心力缓和,高速流区范围与流速峰值减小,流速分布更均匀。从船舶通航角度看,航行于弯曲半径大的航段,通航水流条件更佳,船舶安全性更高。

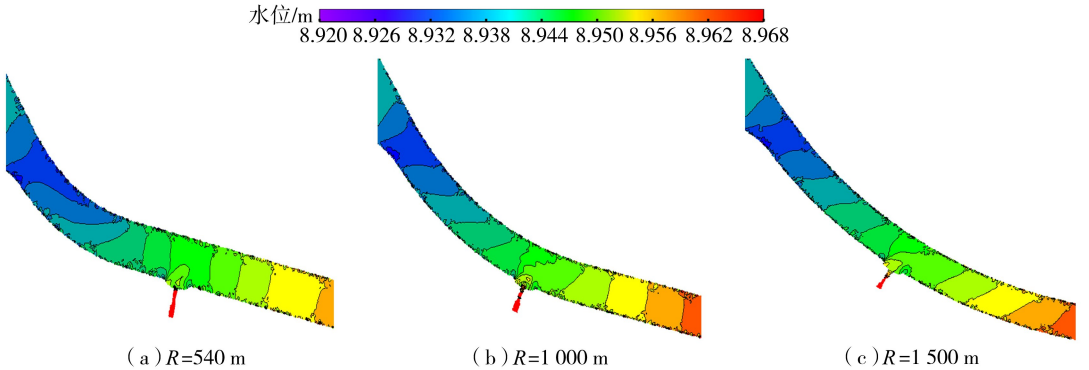


图 6　不同弯曲半径下的弯道水位分布

Fig. 6　Water level distribution in bends at different bending radii

2.1.3　航道宽度影响

航道宽度是弯曲航道的重要特征,常常被无量纲化以径宽比、宽深比等形式进行理论推导或拟合公式。由图 8、图 9 可知,从断面尺度分析,在水位较低的情况下,尤其是复式断面的航道,其过水断面面积会显著收缩;而在流量保持恒定的前提下,断面面积的减小会同步产生两个效应,一是水流流速相应增大,二是上游水流出现明显壅高,最终使得航道的上下游形成较大的水位差。随着航道宽度增大,断面面积也随之增大,数据显示 B=60 m 时,航道上下游水位差为 0.25 m,最大流速为 0.7 m/s;B=90 m 时,水位差降至 0.15 m,降低幅度为 40%,最大流速降至 0.3 m/s,表明弯道内壅水降低,同时航道内流速降低约 0.4 m/s,超过原来较小

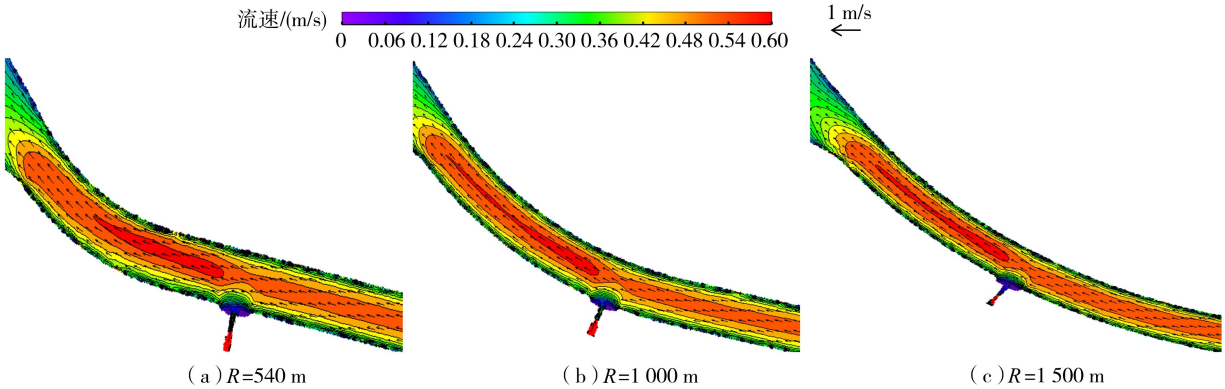


图7 不同弯曲半径下的弯道流速分布

Fig. 7 Flow velocity distribution in bends at different bending radii

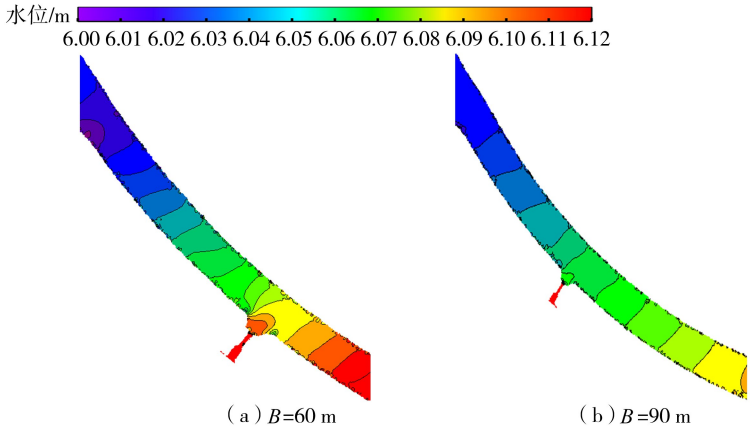


图8 不同航道宽度下的弯道水位变化

Fig. 8 Variation diagram of water level in bends for different channel widths

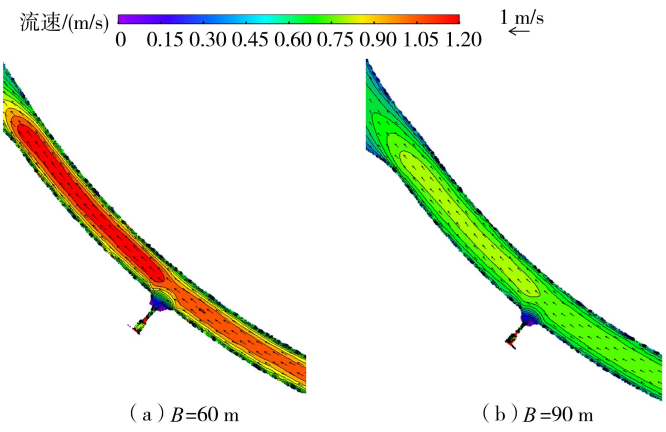


图9 不同航道宽度下的弯道流速变化

Fig. 9 Variation diagram of water level in bends for different channel widths

航道宽度时最大流速的1/3,水流流速变化幅度也随之减小。反映到船舶通航条件上,可以认为随着航道由丰水期向枯水期转变,航道宽度逐渐变小,通航水流条件会有一定恶化,船舶航行安全性降低。对于同一时期,船舶航行与航道宽度越大的航段,水流流速和水面纵比降会明显降低,通航水流条件会越好,船舶会相对更为安全。

2.2 弯曲航道船舶运动特性变化分析

选取2艘1 000 t级货船在弯道1繁华大桥处开展双向航行试验,研究弯曲航道船舶运动特性变化,结果如图10所示。货船的横移速度、舵角、漂角随航道里程变化如图11所示。由图11可知,下行船受到顺流推

力与弯道离心力叠加作用,横移速度波动剧烈,在弯道弯曲段呈现显著正负交替,体现横向往复摆动特征;上行船以自身动力克服水流阻力,横移速度波动平缓,受水流横向干扰较弱,运动稳定性显著优于下行船。舵角是船舶修正轨迹的主动操纵参数,下行船因横向受力复杂,舵角调整频繁且幅值较大,在急弯段出现多次大幅反向调整,因此需要通过舵力产生反向力矩以抵消横向偏移;而上行船受水流干扰较弱,舵角波动幅度小,仅需小幅调整即可维持轨迹。漂角为船舶首尾线与航迹线的夹角,反映了横向偏移程度。当横移速度增大时,船舶通过姿态调整使漂角反向减小,形成动态平衡以抑制偏移;而上行船因自身动力主导航向,水流横向作用对姿态影响微弱,漂角变化平缓。

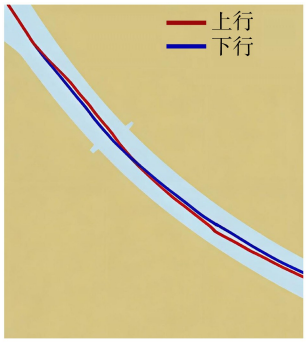


图 10　1 000 t 级货船双向航行试验轨迹

Fig. 10　Trajectory of 1 000 t class cargo ship in two-way sailing test

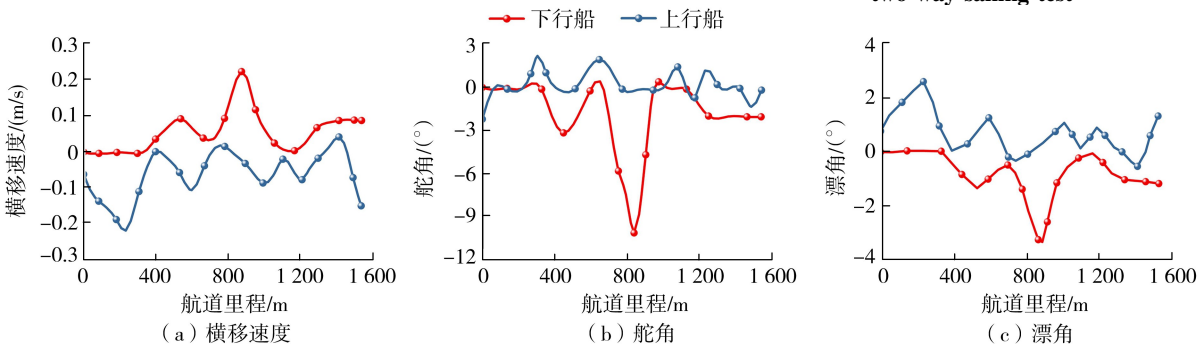


图 11　试验船运动特性随航道里程变化趋势

Fig. 11　Variation of test ship motion characteristics with channel mileage

船舶在弯曲航道中维持轨迹稳定的核心在于外力干扰与主动操纵的动态平衡。船舶在弯道行驶时的受力是决定其姿态与轨迹的核心,下行船主要受顺流推力、弯道离心力影响,横向偏移风险高,需通过高频次、大幅值舵角调整产生反向舵力,抵消横向干扰以约束轨迹,维持轨迹;上行船则以自身动力克服水流阻力为主,弯道离心力影响因逆流行驶被削弱,仅需小幅舵力修正微小偏移,轨迹稳定性相对更优。通过对测试数据进行分析,进一步研究弯曲航道上行、下行船的横移速度、舵角、漂角之间的相关性,结果如图 12 所示。

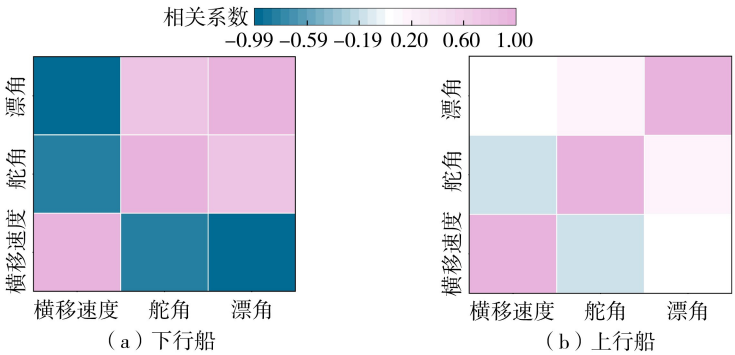


图 12　相关性分析

Fig. 12　Correlation analysis

下行船方面,横移速度与舵角呈较强负相关关系,从船舶航行力学角度看,下行时水流横向作用力改变横移速度,船员为抵消横向位移保持航线需反向调整舵角,故为负相关。横移速度与漂角区域亦为强负相关。漂角是船舶首尾线与实际航迹线夹角,下行横移速度增大使船舶横向偏移加剧,为保航向船舶调整姿态致漂角减小。舵角与漂角为较弱正相关,因舵角调整改变航向影响实际航迹,使漂角同向变化,但受水流等复杂因素干扰,相关性弱。

上行船方面,横移速度与舵角呈负相关关系,但相关性弱于下行船。因上行船逆水行驶,水流对横移速度影响小,自身动力对航向控制作用强,二者关联不明显。横移速度与漂角负相关程度弱,因上行靠自身动

力克服水流阻力,横移速度变化对漂角影响不显著,受船舶动力系统和航线保持机制综合作用,相关性不强。舵角与漂角为较弱正相关,舵角调整影响航迹致漂角变化,但因受力模式不同,整体相关性弱。

2.3 研究局限性与改进方向

本文系统分析了弯曲航道水流特性及船舶运动规律,但仍存在一定局限性:①水流模拟采用平面二维模型,难以完全刻画垂向流速分布及三维紊流结构,对弯道局部涡旋、凸岸回流等精细流态的表征精度有限,且模型参数基于经验率定,在复杂工况下可能产生偏差;②研究聚焦转弯角度、弯曲半径等几何参数,未充分纳入来流流量动态变化、风浪干扰等自然因素。针对上述局限,后续研究可从两方面进行改进:①构建三维水动力与船舶操纵动力学耦合模型,结合 CFD 技术捕捉船舶周围流场细节,并深化机理分析;②拓展多因素工况试验,涵盖不同流量、风浪及船型条件,建立船舶尺度与弯道参数的匹配关系,进一步增强结论工程适用性。

3 结 论

a. 转弯角度增大时,弯道长度相应增加,弯顶壅水高度显著上升,主流向凸岸偏移导致冲刷风险加剧;弯曲半径增大则促使水流趋于平缓,凹凸岸水位差显著减小,通航条件得到明显改善;而航道宽度减小会加剧流速及壅水程度,尤其在枯水期,窄航道的通航条件恶化更为显著。

b. 下行船受顺流推力与弯道离心力叠加影响,横移速度波动剧烈且其与舵角、漂角的相关性分析呈强负相关,在行进中需通过高频大幅舵角调整维持轨迹;上行船以自身动力主导,横移速度波动平缓,舵角调整幅度小,各船舶运动参数相关性较弱,操纵稳定性更优。

c. 弯曲航道安全通航的关键在于优先选择大弯曲半径、宽航道的布置方案,可显著降低水流扰动对船舶的影响;下行船过弯时需重点关注弯道上游段的航向控制,上行船需保持足够动力以抵抗横向水流干扰。

参考文献:

[1] 吾斯曼·若孜. 南溪县综合交通规划研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.

[2] 甘浪雄,吴昌胜,邓巍,等. 内河弯曲河道船舶过弯自适应航迹控制仿真[J]. 系统仿真学报,2021,33(2):461-471. (Gan Langxiong, Wu Changsheng, Deng Wei, et al. Simulation of adaptive track control of ship bending in inland river curved channel [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 461-471. (in Chinese))

[3] 赵维阳,李靓亮,茆长胜,等. 弯曲航道通航宽度和水流条件确定方法探讨[J]. 长江科学院院报,2013,30(9):37-42. (Zhao Weiyang, Li Liangliang, Mao Changsheng, et al. Preliminary study on the calculation of navigation width and the determination of flow condition of curved waterway[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(9): 37-42. (in Chinese))

[4] 夏婧. 基于数据驱动的内河船舶动态航速优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.

[5] Ai Wanzheng, Gan Xuezhen. Analysis on navigation reliability of curved channel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275-277: 2816-2820.

[6] 桓兆平. 关于船员培训考试发证建设的思考[J]. 中国水运,2018(12):23-24. (Huan Zhaoping. Reflections on the construction of the crew training examination and licensing system[J]. China Water Transport, 2018(12): 23-24. (in Chinese))

[7] 王群朋,谢松平,田圆圆,等. 大型船舶弯曲航道事故致因分析与对策研究[J]. 中国水运,2024,24(1):10-12. (Wang Qunpeng, Xie Songping, Tian Yuanyuan, et al. Analysis of the causes of large ship bending channel accidents and countermeasures research[J]. China Water Transport, 2024, 24(1): 10-12. (in Chinese))

[8] 王伟,刘弘昱,胡海宇,等. 内河航道网络优化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):74-80. (Wang Wei, Liu Hongyu, Hu Haiyu, et al. Study on optimization of inland waterway network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 74-80. (in Chinese))

[9] Chai Tian, Zhu Huaiwei, Peng Liyang, et al. Constructing and analyzing the causation chain network for ship collision accidents [J]. International Journal of Modern Physics C, 2022, 33(9): 2250118.

[10] 陈相宇,艾万政,冯娜. 内河弯曲航道船舶碰撞事故原因及对策[J]. 水运管理,2019,41(12):18-20. (Chen Xiangyu, Ai Wanzheng, Feng Na. Ship collision accident reasons and countermeasures of channel bends in inland water[J]. Shipping Management, 2019, 41(12): 18-20. (in Chinese))

[11] Thomson J. On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1877, 25(171/172/173/174/175/176/177/178): 5-8.

[12] Kalkwijk J P, Booij R. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow[J]. Journal of Hydraulic Research,1986,24(1):19-37.
[13] 徐艳军. 弯曲航道安全通航保障技术研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2017.
[14] 孙东坡,朱岐武,张耀先,等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展,2006,17(1):61-66. (Sun Dongpo,Zhu Qiwu,Zhang Yaoxian,et al. Study of circulating velocity profile and lateral sediment transport in curved channels[J]. Advances in Water Science,2006,17(1):61-66. (in Chinese))
[15] 陈相宇. 内河弯道水流特性及安全通航对策研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2020.
[16] 杨燕华,白玉川. 连续弯道水流运动的三维数值模拟[J]. 泥沙研究,2011(6):46-49. (Yang Yanhua,Bai Yuchuan. Three-dimensional numerical simulation of flow in successive bends[J]. Journal of Sediment Research,2011(6):46-49. (in Chinese))
[17] 陈翠霞,张小峰,冯向珍,等. 弯曲型及顺直型河道水流三维数值模拟[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(6):84-90. (Chen Cuixia,Zhang Xiaofeng,Feng Xiangzhen,et al. Three-dimensional flow numerical simulation in straight and meandering channels[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2018,39(6):84-90. (in Chinese))
[18] Yan Xiaohui, Rennie C D, Mohammadian A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes[J]. Environmental Fluid Mechanics,2020,20(6):1491-1510.
[19] Landsburg A C,Barr R A,Daggett L,et al. Critical needs for ship maneuverability:lessons from the houston ship channel full-scale maneuvering trials[J]. Marine Technology and SNAME News,2005,42(1):11-20.
[20] 胡旭跃,王巧洋,黄勇,等. 内河连续弯曲航道航行漂角分析[J]. 湖南交通科技,2010,36(2):179-180. (Hu Xuyue,Wang Qiaoyang,Huang Yong,et al. The analyze of the drift angle of the barge in inland waterway[J]. Hunan Communication Science and Technology,2010,36(2):179-180. (in Chinese))
[21] 王川隘,童思陈,蒋聘凤,等. 风流效应下船舶操纵运动数值模拟[J]. 大连海事大学学报,2020,46(3):50-59. (Wang Chuanai,Tong Sichen,Jiang Pinfeng,et al. Numerical simulation of ship maneuvering motion under wind and current effects[J]. Journal of Dalian Maritime University,2020,46(3):50-59. (in Chinese))
[22] 田红伟,官志鑫,易振宇,等. 湘江大花滩航道整治方案优化及效果数值研究[J]. 水运工程,2021(11):127-133. (Tian Hongwei,Guan Zhixin,Yi Zhenyu,et al. Numerical study of waterway regulation optimization and effect of Dahuatan shoal in the Xiangjiang River[J]. Port & Waterway Engineering,2021(11):127-133. (in Chinese))
[23] 姜帆,李云波,龚家烨. 六自由度三体船操纵运动自航模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(8):1117-1124. (Jiang Fan,Li Yunbo,Gong Jiaye. Self-propulsion simulation of maneuvering motions of a trimaran with six degrees of freedom[J]. Journal of Harbin Engineering University,2021,42(8):1117-1124. (in Chinese))
[24] 任杰,董增川,徐伟,等. 基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):420-424. (Ren Jie,Dong Zengchuan,Xu Wei,et al. Study on influence of river wavebreak forest on flood discharge ability based on MIKE21 FM Model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(5):420-424. (in Chinese))
[25] 施露,董增川,付晓花,等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):350-357. (Shi Lu,Dong Zengchuan,Fu Xiaohua,et al. Application of Mike Flood to analysis of flood and waterlogging risks of medium and small rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(4):350-357. (in Chinese))
[26] 周林飞,周乃恒,张静. 石佛寺水库历史洪水过程数值模拟与分析[J]. 水电能源科学,2016,34(9):56-60. (Zhou Linfei,Zhou Naiheng,Zhang Jing. Analysis and numerical simulation of historic flood process of shifoshi reservoir[J]. Water Resources and Power,2016,34(9):56-60. (in Chinese))
[27] 刘宏伟,储少志,蔡钊,等. 极端暴雨洪水条件下厂区不同排水方案的防洪能力模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):30-39. (Liu Hongwei,Chu Shaozhi,Cai Zhao,et al. Simulation study on flood control capacity of different drainage schemes in factory area under extreme rainstorm flood conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):30-39. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-20　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.018

多源环境信息融合驱动的船舶速度优化研究综述

王苏阳[1],封学军[1],马兰青[1],沈金星[2],蒋仲廉[3,4]

(1. 河海大学港航物流与绿色发展研究所; 2. 河海大学土木与交通学院;
3. 水路交通控制全国重点实验室; 4. 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心)

摘要:船舶速度优化是降低船舶能耗与排放的重要技术手段,其中考虑动态变化的航行环境是实现精确优化的关键。本文从环境因素影响机理、环境信息感知技术、优化模型与算法三方面系统回顾和评述了船舶速度优化领域的研究进展:优化模型已从静态规划发展为能应对时变环境的动态最优控制方法;数据驱动技术被广泛用于环境预测与能耗建模,提升了优化的精度和效率。尽管近年来船舶速度优化研究进展显著,但在船舶-环境耦合机理的精细化、优化算法的鲁棒性与效率以及多目标协同优化等方面仍面临挑战。加强耦合机理研究,发展融合机器学习与传统方法的智能优化算法,并将优化对象从单船拓展至船队协同,以推动船舶速度优化技术的持续发展与应用应是未来发展的重要方向。

关键词:船舶速度优化;航行环境;节能减排;多源信息融合;数据驱动

Review of research on ship speed optimization driven by multi-source environmental information fusion

Wang Suyang[1], **Feng Xuejun**[1], **Ma Lanqing**[1], **Shen Jinxing**[2], **Jiang Zhonglian**[3,4]

(1. *Institute of Maritime Logistics and Green Development, Hohai University*;
2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University*;
3. *State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety*;
4. *National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology*)

Abstract: Ship speed optimization is a key technical measure for reducing energy consumption and emissions, and considering the dynamic navigation environment is crucial for achieving precise optimization. The research progress in the ship speed optimization field was systematically reviewed from three perspectives: environmental factor impact mechanisms, environmental information perception technologies, and optimization models and algorithms. The models have evolved from static planning to dynamic optimal control methods capable of handling time-varying environments. Meanwhile, data-driven techniques have been widely applied to environmental forecasting and energy consumption modeling, enhancing optimization accuracy and efficiency. Despite significant progress in ship speed optimization research, challenges remain in the refined modeling of ship-environment coupling mechanisms, the robustness and efficiency of optimization algorithms, and multi-objective collaborative optimization. Future work should strengthen research on coupling mechanisms, develop intelligent optimization algorithms that integrate machine learning with traditional methods, and expand the optimization scope from single ships to fleet collaboration to promote the continuous development and application of ship speed optimization technology.

Key words: ship speed optimization; navigation environment; energy saving and emission reduction; multi-source information fusion; data drive

船舶运输作为全球大宗货物贸易的基石,在促进经济发展中扮演着不可或缺的角色。然而,随着航运业的持续发展,其带来的化石能源消耗和环境污染问题日益突出,尤其是温室气体和大气污染物的排放,对全球气候变化和区域空气质量构成了严峻挑战[1]。从根本上说,船舶速度优化是一项营运层面的关键决策过程,旨在为船舶在既定航线上规划出最优的速度策略。这一过程区别于主要决定地理路径的航线优化,它更聚焦于航行的动态执行。船舶速度优化核心目标是通过主动调节航速,在满足预计到达时间等关键商业契

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600200);江苏省交通运输科技项目(2024Y11)

作者简介:王苏阳(2000—),男,博士研究生,主要从事绿色港航研究。E-mail:wangsuyang@hhu.edu.com

通信作者:封学军(1974—),男,教授,博士,主要从事绿色港航研究。E-mail:fxj@hhu.edu.com

约的前提下,实现特定目标的寻优,最常见的即为最小化总航次成本(主要为燃油成本)与温室气体排放。此优化过程受到一系列复杂且动态变化的约束条件限制,包括船舶自身的主机功率与性能限制、航行区域的安全法规(如特定水域的航速限制)以及不断变化的外部环境因素(如风、浪、流)的实时影响。因此,随着多源环境感知技术的发展,船舶速度优化正从传统的基于静态经验的离线规划,迅速演变为一种依赖实时数据驱动的、贯穿整个航程的在线动态优化过程,以应对航行环境的高度不确定性。

在此背景下,国际海事组织(IMO)等机构已制定了一系列法规和目标,旨在降低船舶排放,推动航运业向绿色、低碳转型。尤其值得注意的是,在欧盟将航运业纳入碳排放交易体系(EU ETS)等市场化减排政策全面落地的背景下,船舶碳排放已跨越单纯的“环境合规”范畴,实质性转型为一个必须精确计量的经济成本议题。这不仅意味着航运公司需要为碳排放支付直接的经济成本,更使得航速优化决策必须将燃油价格与实时波动的碳配额价格、企业碳资产管理策略等复杂因素相结合,极大地增加了优化问题的复杂性和紧迫性。在此背景下,船舶速度优化作为营运层面的重要减排措施,因其无需大规模硬件改造、实施成本相对较低且减排潜力显著,受到了学术界和航运界的广泛关注[2-3]。

船舶在实际航行过程中,不可避免地受到复杂多变的航行环境因素的影响,如风、浪、流、水深以及航道条件等[4]。这些环境因素不仅直接影响船舶的阻力、推进效率和操纵性能,进而影响其燃油消耗和污染物排放,同时也对航行安全构成潜在威胁。传统的船舶速度优化方法往往基于理想或简化的环境假设,忽略了航行环境的动态性和不确定性,这使得优化结果在实际应用中难以达到预期效果,甚至可能引发新的问题[5-6]。因此,准确感知和预测航行环境,并将其有效融入船舶速度优化决策过程,对于提升船舶能效、降低排放、保障航行安全具有至关重要的意义。

综合来看,在航行环境因素及其影响机理方面,研究者们深入分析了风、浪、流等因素对船舶水动力性能和主机工况的量化影响[3-4,7-8]。在航行环境信息获取与处理技术方面,随着传感器技术、数值模拟、人工智能等技术的发展,环境信息的精度和实时性得到了显著提升[9-10]。在船舶速度优化模型与方法方面,从最初的静态优化策略到考虑动态环境的最优控制(如模型预测控制)、机器学习等方法,模型复杂度和求解精度不断提高。然而,面对日益精细化的减排需求和智能化航运的发展趋势,现有研究在环境因素的精细化建模、多源信息融合、复杂动态环境下的鲁棒优化以及实际应用推广等方面仍存在诸多挑战。

本文旨在系统梳理和总结考虑航行环境的船舶速度优化研究领域的最新进展:详细阐述主要航行环境因素及其对船舶航行的影响机理,回顾航行环境信息获取与处理技术的关键进展,重点评述考虑航行环境的船舶速度优化模型构建方法与求解算法,并对该领域未来的研究方向进行展望,以期为相关理论研究和实践提供参考。

1　航行环境因素及其对船舶的影响

实现可靠的船舶速度优化,其前提是准确量化航行环境对船舶性能的动态影响。船舶作为航行于水-气界面上的复杂运动体,其能耗与安全性能显著受到周边航行环境的制约[3]。这些环境因素通过产生复杂的水动力与空气动力效应,以附加的力与力矩形式作用于船体。而船舶最终的航行状态(如速度变化、燃油消耗和排放)则取决于其自身的动力学响应模型如何处理这些外部输入。因此准确辨识关键环境因素并阐明其物理作用机理,是构建高精度船舶速度优化模型、实现节能减排的理论基础。航行环境因素构成复杂,按其物理属性及作用域,可主要划分为水文气象因素和地理航道因素两大类,如表 1 所示。

表 1　主要航行环境因素及其影响效应

Table 1　Main navigation environment factors and their impact effects

因素大类	具体因素	关键影响参数	主要影响效应	常用分析方法	文献
水文气象	风	相对风速、风舷角、受风面积	附加风阻、产生漂移力与力矩、增加能耗	经验公式、CFD 模拟	[11-14]
	波浪	波高、波周期、波向角	波浪增阻、螺旋桨出水、推进效率下降	切片法、势流理论	[15-20]
	流	流速、流向	改变船舶对地与对水速度、影响能耗与航程	潮流预报、矢量合成	[4,21]
地理航道	浅水效应	水深与船舶吃水之比	船体下沉、浅水增阻、触底风险		[22]
	岸壁/弯道效应	船岸距离、航道曲率	产生船岸相互作用力与力矩、回转增阻、影响操纵		[23-24]

1.1　水文气象因素及其作用效应

水文气象因素具有显著的时空变异性,是影响船舶尤其是开阔水域船舶航行性能的最直接、最活跃的外

部驱动力

1.1.1 *风与空气动力效应*

风作用于船舶水线以上结构,产生空气动力,其影响主要体现为附加风阻和横向漂移效应。附加风阻是船舶总阻力的重要构成,尤其对集装箱船、汽车滚装船等高干舷、大受风面积的船型,其影响尤为显著[11]。附加风阻的大小与相对风速的平方、风舷角及船舶水上部分的空气动力学特性密切相关。Holtrop[12]最早于1984年提出了著名的Holtrop-Mennen方法,用于估算船舶的阻力,并通过实船试验数据进行了验证和修正;近年来,随着计算流体动力学(CFD)技术的发展,通过数值模拟可以更为精确地计算不同风况下的风力与风力矩系数,为能耗评估提供了更精细的输入[13-14]。这为提升模型的预测精度奠定了基础,但高精度的CFD仿真计算成本高昂,难以满足船载系统实时决策的需求。因此,当前的研究热点之一是利用离线的高精度仿真数据训练机器学习代理模型,从而建立能够快速预测附加风阻影响的轻量化模型,在保证精度的前提下,有效解决在线应用的实时性难题。

1.1.2 *波浪与水动力增阻*

波浪是导致船舶能耗增加和航行安全事故的最主要海洋动力因素。船舶在波浪中航行时,其产生的垂荡、纵摇等运动会向外辐射能量,同时船体对入射波的绕射和反射也会消耗能量,这些能量损失综合体现为波浪增阻[15-16]。波浪增阻的量值与波高、波周期、波向角及船型密切相关,在恶劣海况下可达静水阻力的数倍,是导致船舶燃油消耗急剧上升的核心因素[17]。此外,波浪还会引发螺旋桨出水等现象,造成推进系统效率的显著下降[18]。目前,切片法[19]、势流理论[20]等是计算波浪增阻的常用理论方法,但其在强非线性、破碎波等复杂条件下的精度有限。为了克服这一局限并提升预测精度,研究者们正越来越多地采用高精度的CFD方法进行数值模拟,以更准确地量化船舶在恶劣海况下的波浪增阻。与风力影响的建模类似,尽管CFD方法能够提供更精确的结果,但巨大的计算开销使其无法直接用于实时在线优化。因此,构建能够快速响应的船舶性能预测模型已成为关键,当前的一个重要研究趋势同样是开发基于机器学习的代理模型,通过离线训练来拟合高精度仿真或试验数据,最终实现在线应用的精确性与实时性的平衡。

1.1.3 *水流与相对运动效应*

水流(包括洋流、潮汐流及径流)通过改变船舶与水体间的相对速度来影响船舶推进系统。船舶主机的功率输出直接取决于其克服水阻力所需的对水速度,而船舶的实际位移则由对地速度决定,两者间的矢量差即为流速[4]。在感潮河段等潮流作用强烈的区域,水流的方向和速度呈周期性往复变化,为船舶速度优化带来了独特的挑战。利用潮汐规律(如利用高潮位进港、顺着落潮流出港)进行助航,是该类水域节能航行的关键[21]。精确的潮流预报和对转流时机的精准把握,是实现此类水域船舶速度优化的核心技术瓶颈。

1.2 地理航道因素及其作用效应

在港口、内河、运河等受限水域,地理航道边界会对船舶水动力特性产生显著影响,通称为受限水域效应。

1.2.1 *浅水效应*

当水深与船舶吃水之比减小时,船底与河床/海床间的间隙变小,水流加速,根据伯努利原理,船体下方压力降低,导致船体产生额外的下沉和纵倾,同时船舶总阻力显著增大,这种现象即为浅水效应[22]。浅水效应对船舶航速有天然的限制,过高的航速会引起剧烈的船体下沉,甚至导致触底危险。因此,浅水航道中的船舶速度优化需要在能效和安全富余水深之间寻求平衡。

1.2.2 *岸壁效应与弯道效应*

在狭窄航道或运河中,船体与航道岸壁间的相互作用(岸壁效应)会产生额外的阻力和复杂的船岸作用力和力矩,影响船舶的操纵性[23]。而在弯曲航段,船舶为保持航迹需要进行回转运动,操舵和船体漂移会产生附加的回转阻力,造成航速损失[24]。这些地理航道因素通常被视为船舶速度优化模型中的局部约束条件,需要在特定航段进行针对性的速度规划。

综上所述,航行环境因素通过复杂的水动力学与空气动力学效应对船舶性能产生显著的动态影响。因此,对这些时变环境信息的精确感知与可靠获取,构成了船舶速度优化问题建模与求解的必要前提。

2 航行环境信息获取与处理技术研究进展

为实现考虑航行环境的船舶能效优化,首先必须获取精确、可靠的环境信息。传统航海主要依赖静态海

图与气象传真,其信息的滞后性与低分辨率已难以满足现代航运精细化管理的需求。近年来,随着船载传感器、遥感技术以及数值模拟技术的发展,环境信息的获取与处理能力实现了质的飞跃,为动态优化决策提供了关键的数据支撑。

2.1　船基、岸基、天基多源协同的环境信息获取技术

融合船基、岸基与天基信息的多源、多尺度感知网络,是现代航行环境感知体系的核心,本文将此网络总结为多源协同感知网络架构(图 1),旨在为船舶提供全方位、立体化的环境感知能力。船载传感器系统是获取船舶自身状态及近场环境信息最直接的手段。船舶自动识别系统(AIS)能够实时广播船舶的经纬度、对地速度、对地航向等动态信息,海量的 AIS 历史数据已成为分析航路交通流、挖掘船舶行为模式、反演环境影响的重要数据源[25-26]。此外,计程仪、风速风向仪、测深仪等设备为获取对水速度、局部风况和水深等关键参数提供了保障。岸基观测系统,如高频地波雷达和沿岸水文站,则为港口及近岸水域提供了大范围、连续的流场和水位监测数据[27-28],其数据中心不仅汇集和处理本区域的观测数据,更承担着融合分析来自船基和天基信息的枢纽作用。为突破地理与视距的限制,天基系统利用卫星,从宏观尺度提供覆盖全球的海洋气象、遥感影像等环境数据,并为远洋船舶提供关键的通信中继服务[29-30]。最终,这三者获取的多源、多尺度异构数据在岸基中心实现高效融合与智能解译,形成全面、精准的综合海况与航行态势信息,再通过岸基或天基通信链路反馈至船舶,从而将孤立的“单船感知”提升为网络化的“协同感知”,为船舶提供全方位、全天候的环境感知与决策支持能力[31]。

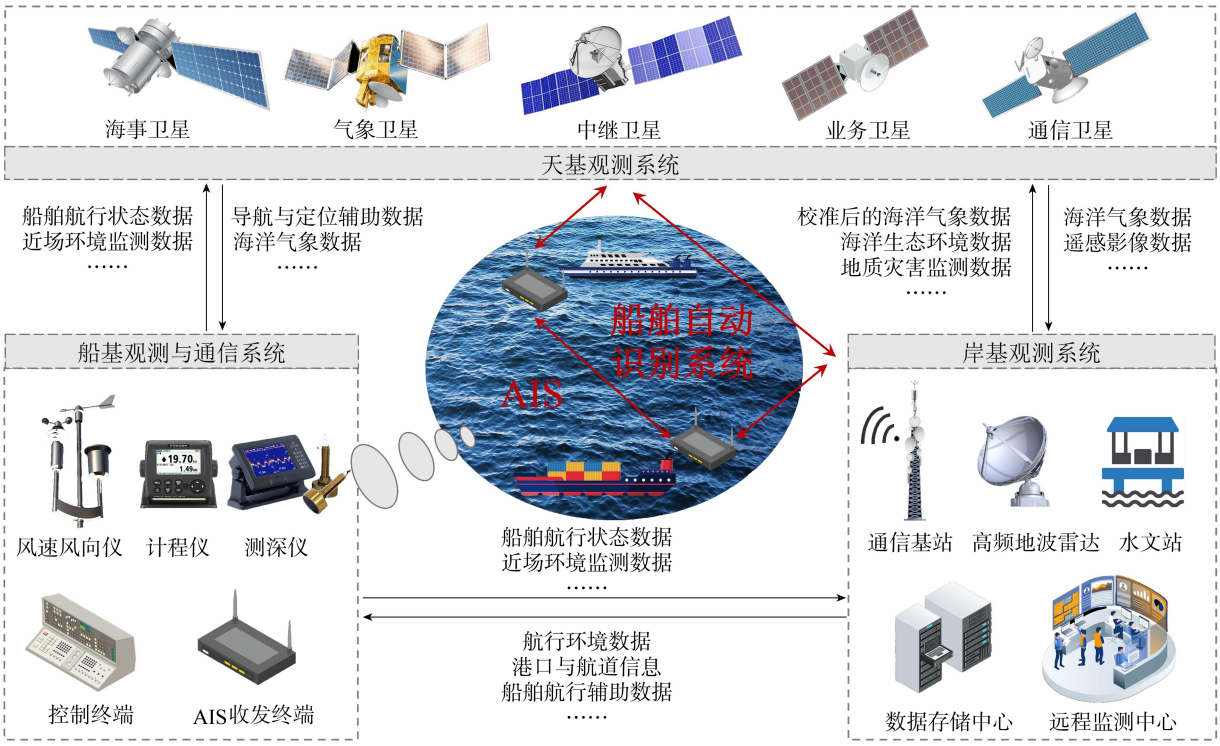


图 1　船基、岸基、天基多源协同感知网络架构

Fig. 1　Architecture of ship, shore, and space multi-source cooperative sensing network

2.2　高分辨率环境场处理与生成技术

为克服观测数据稀疏和预报模型时空分辨率不足的问题,研究者们开发了多种技术以生成可直接用于优化模型的高分辨率环境场。

2.2.1　水动力数值模拟

对于港口、河口及感潮河段等水文条件复杂的区域,高分辨率水动力模型是生成精细流场的关键技术。采用基于纳维-斯托克斯(N-S)方程或势流理论的数值模型,如 MIKE、Delft3D、ROMs 等,通过构建贴合实际岸线的计算网格,并输入实时的上下游水位或流量边界,能够精确模拟潮汐和径流耦合作用下的动态流场[21]。这类技术的应用,能够将环境因素从静态背景值提升为动态过程变量,是实现精细化优化的核心。

2.2.2 数据驱动与人工智能方法

近年来,人工智能技术,特别是机器学习技术,为环境信息的处理和预测开辟了新范式。研究者们利用人工神经网络、长短期记忆网络(LSTM)等深度学习模型,可以基于历史时间序列数据,对风、浪、流等要素进行短期预测,作为数值模型的补充或替代[32-33]。更进一步,数据驱动方法可以直接构建环境因素与船舶能耗、排放之间的端到端模型,即无需显式建模中间物理过程[34],为实时、快速地优化决策提供支持。例如,Yuan 等[35]提出了一种多源数据处理方法和实时燃油消耗计算方法,并基于 LSTM 建立了考虑多种环境因素的内河船舶能效优化模型。尽管多源信息获取技术已取得突破,但信息融合过程仍存在诸多难点。

2.3 多源环境信息融合方法

有效融合多源信息是实现精确感知的关键,但也面临数据异构性、不确定性及计算效率等挑战,因此,学界提出了一系列多源环境信息融合方法以应对这些挑战,如表 2 所示。这些方法各有侧重,其共同目标是提升融合系统的整体性能与可靠性。针对数据格式与时空分辨率各异的异构性问题,常采用空间插值与标准化方法,将多源数据统一到一致的时空网格中,为后续融合奠定基础[36]。为应对传感器噪声、模型预测误差等带来的不确定性,通常引入概率模型(如卡尔曼滤波模型[37])来量化和传递不确定性,或通过异常检测算法提升数据质量,从而增强优化决策的鲁棒性[38]。此外,为满足实时性要求,发展轻量化的代理模型和云-边-端协同计算架构,是平衡融合精度与计算效率的有效途径[39]。

表 2 主要多源环境信息融合方法

Table 2 Main methods for multi-source environmental information fusion

方法类别	主要技术/算法	适用场景与优势	文献
空间插值与标准化	空间插值、数据标准化	统一异构数据的时空分辨率,便于后续融合处理	[36,40-42]
概率模型	卡尔曼滤波、贝叶斯网络	量化和传递不确定性,提升鲁棒性,常用于动态环境感知	[37,38,43-46]
异常检测与数据清洗	异常检测算法、冗余变量检测	提升数据质量,剔除噪声和异常,提高决策可靠性	[47-48]
多层次融合	数据级、特征级、决策级融合	综合多源信息,提升目标检测、跟踪、定位等任务准确性	[31,49]
机器学习与 AI 融合	神经网络、随机森林等	自动提取特征,适应复杂环境,提升大规模数据处理能力	[50-51]
轻量化与协同计算	代理模型、云-边-端协同计算架构	平衡实时性与计算效率,适合大规模、分布式环境感知	[39,52-53]
传感器校准与对齐	传感器标定、统一参考系	保证多源数据在同一坐标系下融合,减少误差	[54-55]

3 多源环境信息融合驱动的船舶速度优化模型与方法

将动态的航行环境信息融入优化决策过程,是提升船舶能效和安全性的核心环节。近年来,研究者们围绕此问题,从传统的静态规划到复杂的动态最优控制等方面提出了一系列模型与方法。这些方法在优化目标、约束处理、环境因素耦合方式及求解算法上各具特点。

3.1 优化目标与约束条件

船舶速度优化本质上是一个多约束条件下的目标寻优问题。优化目标通常包括经济目标(如最小化燃油消耗或航次成本)和环境目标(如最小化 CO_2、NO、NO_2、SO、SO_2 等温室气体和污染物排放)[3,56-57]。在实际操作中,这些目标往往是耦合的,例如燃油消耗与 CO_2 排放具有强相关关系。

优化过程还必须满足一系列复杂的约束条件,主要包括:①航程与时间约束,如固定的航行距离和预计到达时间;②船舶性能约束,如主机功率、转速限制、最小与最大航速限制、螺旋桨推力限制等;③航行安全约束,如最小安全富余水深、航道边界限制、操纵性限制(如最大转向角速度)等;④法规约束,不仅包括如排放控制区的硫含量限制、IMO 的碳强度指标和现有船舶能效指数等强制性规定,还包括特定水域的强制性航行规则。例如,在长江干线航行时,船舶必须严格遵守《长江江苏段船舶定线制规定》相关规定,该制度对船舶的航行方式和航道使用进行了明确的划分与规定,直接构成了对航迹规划和航速选择的强约束。如何在一个统一的框架内有效处理这些多维、非线性的约束,是优化模型构建的关键挑战。

3.2 模型构建方法

3.2.1 船舶性能建模

精确的船舶能耗与排放模型是优化的基础。传统方法多采用基于静水阻力的"立方定律"[58],即燃油消耗与航速的三次方成正比。然而,该方法忽略了环境附加阻力的影响。为提高精度,研究者们通过引入风、浪等因素对阻力的影响来修正模型。例如,通过 CFD 方法或采用经验公式估算风阻力和波浪增阻,并将其

叠加到静水阻力上,从而建立更贴近实际的能耗模型[59-60]。此外,针对排放物,还需考虑主机在不同负荷下的排放因子变化,特别是在低负荷工况下,NO、NO_2 等污染物的排放呈现出强非线性特征[61]。

3.2.2　优化方法与求解算法

由表 3 可见,不同航行环境催生了具有显著不同数学特性的优化模型。例如,在海洋环境下,模型的核心是处理由风和波浪引发的连续变化的附加阻力,这自然地导向了动态规划或模型预测控制等最优控制方法。然而,当航行环境变为内河时,模型中引入了如宽度、水深等更为复杂的约束因子,特别是“螺旋桨空转”这类极端非线性事件等变量。这些因子使得问题不再是简单的连续优化,往往需要借助启发式算法(如遗传算法、粒子群算法)来寻求全局近似最优解。这种模型结构上的本质差异,决定了必须采用针对性的求解算法。根据问题的复杂性和对求解效率的要求,主要采用以下几种方法进行建模与求解。

表 3　不同航道环境下航速优化模型因子与表达式对比

Table 3　Comparison of factors and expressions for ship speed optimization models under different navigational environments

环境类型	主要影响因子	表达式	文献
海洋	环境流场、风、波浪、螺旋桨空转	$v_g=v_w+v_c$, $R_t=R_0+R_a$	[62-63]
河口	环境流场、水深	$v_g=v_w+v_c$, $R_t=R_0 f(h)$	[3,64]
内河	环境流场、航道宽度、水深	$v_g=v_w+v_c$, $R_t=R_0 g(w,h)$	[65-66]

注:v_g 为船舶的对地速度;v_w 为船舶的对水速度;v_c 为船舶所处位置的水流流速;R_t 为船舶受到的总阻力;R_0 为船舶的静水阻力,作为基准阻力;R_a 为风和波浪产生的附加阻力;h 为水深;w 为航道宽度;$f(h)$ 和 $g(w,h)$ 为考虑环境因素的阻力修正函数。

最优控制理论为解决动态系统下的优化问题提供了坚实的理论框架。在多阶段决策问题中,动态规划方法是应用最为广泛的最优控制方法之一。Zaccone 等[67]提出的三维动态规划模型,结合天气预报数据与船舶运动约束,在离散化的时空网格中搜索最优路径与航速组合,在北大西洋航线上有效优化了燃油消耗。

除动态规划外,线性二次型调节器与模型预测控制在船舶自动控制领域也取得显著成果。Johansen 等[68]基于线性二次型调节器设计了船舶自动避碰控制器,采用状态反馈实现对船舶航向的最优调节,且满足国际海上避碰规则。模型预测控制方法则基于滚动优化机制,动态响应环境变化,具有良好的鲁棒性与预测性[3]。

当优化模型具有高度非线性、约束较多,且难以用传统解析方法求解时,启发式智能算法表现出巨大优势。其中,粒子群优化算法(PSO)优势显著,该算法模拟鸟群觅食行为,通过个体与群体的信息交互实现全局搜索。De 等[69]提出的复合粒子算法(PSO-CP)结合 PSO 与散射操作,在路径-航速联合优化问题中实现了全局搜索与局部开发的有效平衡。遗传算法同样在船舶速度优化中得到广泛应用,该算法通过模拟自然选择和遗传机制处理离散变量优化问题。Kurpati 等[70]设计的改进型多目标遗传算法在船队设计与速度调度的多目标优化中取得良好效果。

此外,随着海量航行数据的积累,数据驱动方法为船舶速度优化提供了新的范式。Beşikçi 等[71]利用人工神经网络,可在多种环境变量下预测燃油消耗,支撑动态航速调整。

3.3　研究方法发展趋势

当前船舶速度优化领域的研究呈现出显著的融合与深化趋势,其核心在于打破传统模型驱动与数据驱动方法的壁垒,实现优势互补;同时,将优化视野从单船、单目标拓展至船队协同和多目标综合层面。

a. 模型驱动与数据驱动范式的深度融合。传统基于运筹学的模型驱动方法为船舶速度优化提供了坚实的物理机理框架,但在处理高度动态和不确定的航行环境时,其精度和适应性面临挑战[72]。与此同时,以机器学习方法为代表的数据驱动方法能够从海量历史数据中高效地挖掘环境因素与船舶能耗间的复杂非线性关系[57,73]。如图 2 所示,将两者结合的混合建模已成为当前研究的热点。典型的做法是将机器学习模型(如神经网络模型[74])用于精确预测环境附加阻力或实时油耗,并将预测结果作为优化模型的关键输入,再由动态规划、模型预测控制[3]等最优控制或运筹学方法进行求解。这种融合不仅提升了模型的预测精度,也保留了决策过程的物理解释性。在此基础上,探索端到端决策系统,即利用深度强化学习等方法,实现从环境信息输入到最优速度输出的直接映射,是实现模型无缝集成与实时决策的重要方向。

b. 优化的维度与广度正在显著拓展。如图 2 所示,研究问题正经历两个维度的跨越:①优化主体从单船优化向船队协同优化演进[70]。单船优化主要关注个体能效,而船队协同优化则需在更宏观的层面考虑港

口拥堵、航道容量、多船航线交叉影响等复杂因素,通过联合调度实现船队整体运营效益的最大化,这更贴近航运公司的实际运营需求[75]。②优化目标从单一目标向经济-安全-环境多目标综合优化发展[6,72,76]。早期的研究大多聚焦于燃油消耗或航次成本最小化,而当前的研究则将经济性(航次成本)、环保性(如碳强度指标)、安全性(如规避恶劣天气)和时效性(准班率)等多个维度纳入统一的优化框架中。这要求采用多目标遗传算法、分层协同优化等前沿方法,在相互冲突的目标间寻求帕累托最优解集,从而为航行决策提供更为全面和鲁棒的方案[75,77]。

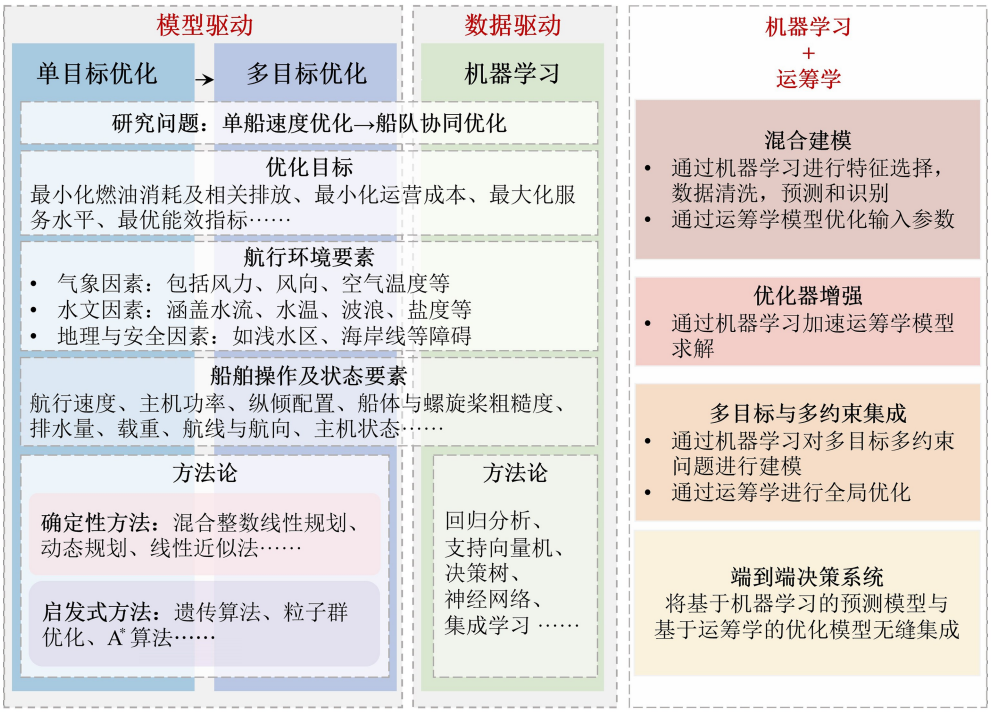


图2 船舶速度优化主要技术框架

Fig. 2 Main technical framework of ship speed optimization

c. 求解算法正朝着智能化与高效化方向发展,以应对日益复杂的优化模型。高维、非线性的多目标优化问题对传统求解算法构成了"维数灾难"的挑战[78]。为此,将机器学习与传统运筹学结合是提升求解能力的重要途径。如图2所示,这包括利用机器学习模型进行优化器增强,如通过学习来指导启发式算法的搜索路径或自动调整参数,从而加速收敛;也包括利用机器学习对复杂的约束或目标函数进行代理建模,以降低原问题的复杂度[79-81]。此外,粒子群优化、遗传算法等启发式智能算法因其强大的全局搜索能力和处理复杂约束的灵活性,在该领域仍扮演着不可或缺的角色,并正与其他方法不断融合,以寻求全局搜索与局部开发之间的更优平衡[3]。

综上,未来的船舶速度优化技术将更加依赖于多源信息融合、多学科方法交叉以及多维度目标的权衡[78,81]。这一系列发展趋势预示着,通过模型与数据的协同演进,有望实现航运系统在更高层次上的智能化与绿色化。

4 研究展望

近年来,随着船舶节能减排研究的深入,考虑航行环境的船舶速度优化数学模型,已发展出从静态规划到动态最优控制等的一系列方法,并初步具备了在特定航行任务下的能效提升潜力。但在模型的精细度、环境预测的准确性、优化决策的鲁棒性和实际应用的推广等方面仍存在不足。在今后的研究中,需重点关注以下4个方面:

a. 船舶-环境耦合机理的精细化。在持续深入研究风、浪、流等单一环境因素影响的基础上,应进一步发展能够耦合多因素非线性作用的综合水动力模型。当前模型大多简化了环境间的相互作用以及船舶在复杂环境下的动态响应,未来的研究需精细刻画在风、波浪、水流共同作用下,以及在浅水、狭窄等受限水域中,

船舶推进系统(主机、螺旋桨、舵)的动态性能变化及其对能耗与排放的非线性影响。这些机理的深化有助于夯实模型的物理基础并提升其预测精度,同时也依赖于计算流体动力学技术的发展及更高精度的试验验证。

b. 优化模型求解效率与鲁棒性的提升。基于复杂机理建立的船舶速度优化模型往往具有高维、强非线性的特点,导致传统最优控制方法面临“维数灾难”和计算量大的挑战。除了继续改进算法本身(如并行计算、模型降阶)外,将机器学习与传统优化方法相结合是重要方向。例如,利用神经网络进行能耗代理建模,或采用深度强化学习方法进行端到端的优化决策。这些方法的探索有助于在保证优化效果的同时,大幅提升求解效率,并增强模型对环境预测误差等不确定性的鲁棒性。

c. 优化维度的拓展。现有的船舶速度优化研究大多局限于单船的单一目标(如燃油消耗最低),这与航运公司的多目标运营需求和船队级的系统管理模式存在差距。未来的研究应向更高维度拓展,这不仅包括将优化主体从单船拓展至船队协同,对整个船队的航速进行联合调度以实现全局效益最大化,也要求在优化目标中将经济性(航次成本)、环保性(碳强度指标评级)、安全性(恶劣天气规避)和时效性(准班率)等多目标纳入考量。然而,更为关键的拓展在于,必须将“人”的因素置于核心,将优化维度从单纯的船舶物理系统提升至更为全面的“人-机-环境”协同优化系统。这意味着,智能优化系统不应是取代船员决策的“黑箱”,而应是辅助其高效协作的决策支持工具。未来的研究需要深入探索如何将自动化算法与船员的丰富经验有机结合,例如通过提供可解释的优化建议,并允许船员基于其专业的临场判断进行干预和调整,形成“人在环路中”的智能协同模式。同时,如何通过持续提供可靠稳健的决策支持并设计良好的人机交互界面,来逐步建立并增强船员对智能系统的信任,使其成为驾驶台值得信赖的“智能大副”,将是推动先进技术在航运界真正落地应用的关键。

d. 实际应用的检验与推广。现有大部分研究成果仍停留在理论建模与数值仿真阶段,与真实船舶运营数据的对比验证尚不充分,这可能是模型计算结果与实际节能效果存在偏差的原因之一。未来的研究需加强与航运企业的合作,利用船载数据采集系统获取实船数据,对各类优化模型进行系统性的验证与校准。更进一步,将这些复杂的优化模型转化为船员在驾驶台可信赖且易于操作的决策支持工具,本身就是一个巨大的挑战。在技术层面,这不仅要求能够高效融合船载传感器、气象预报、电子海图等多源异构数据并保证其质量与实时性,还需要设计出直观简洁的人机交互界面,将复杂的优化结果以清晰易懂的方式呈现给船员,避免信息过载。同时,模型本身必须具备足够的鲁棒性与自适应能力,以应对真实海洋环境的各种不确定性。然而,超越这些技术障碍,非技术性因素或许更为关键。核心在于赢得船员的信任与接受度,因为他们的丰富经验是任何算法都无法替代的,这就要求算法的建议过程必须具备一定的透明度和可解释性。此外,新的工具必须无缝融入现有的航行操作流程,并辅以系统的船员培训,同时这也可能要求航运公司的岸基运营管理模式做出相应变革,从而形成船岸一体的协同优化。此外,从服务航运业高质量发展的角度出发,今后的模型研究需更多考虑碳税、排放交易等市场化政策以及船员实际操作负荷等重要的经济和人为因素对优化决策的影响。

参考文献:

[1] Wang Xiaotong, Liu Huan, Lyu Zhaofeng, et al. Trade-linked shipping CO_2 emissions[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(11): 945-951.

[2] Corbett J J, Wang Haifeng, Winebrake J J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2009, 14(8): 593-598.

[3] Wang Kai, Yan Xinping, Yuan Yupeng, et al. Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 62: 685-698.

[4] Huang Liang, Wen Yuanqiao, Geng Xiaoqiao, et al. Integrating multi-source maritime information to estimate ship exhaust emissions under wind, wave and current conditions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 59: 148-159.

[5] Xia Zicheng, Guo Zijian, Wang Wenyuan, et al. Joint optimization of ship scheduling and speed reduction: a new strategy considering high transport efficiency and low carbon of ships in port[J]. Ocean Engineering, 2021, 233: 109224.

[6] Zheng Jianqin, Zhang Haoran, Yin Long, et al. A voyage with minimal fuel consumption for cruise ships[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 144-153.

[7] Huang Liang, Wen Yuanqiao, Zhang Yimeng, et al. Dynamic calculation of ship exhaust emissions based on real-time AIS data [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 80: 102277.

[8] 王壮,王凯,黄连忠,等. 海况识别下的船舶航速动态优化方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(4):488-494. (Wang Zhuang, Wang Kai, Huang Lianzhong, et al. Dynamic optimization method of ship speed based on sea condition recognition[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(4): 488-494. (in Chinese))

[9] 温家宝. 海洋环境大数据智能分析关键方法研究[D]. 天津:天津大学,2021.

[10] Yuan Shuyun, Li Ying, Bao Fangwen, et al. Marine environmental monitoring with unmanned vehicle platforms: present applications and future prospects[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159741.

[11] Grlj C G, Degiuli N, Tuković Ž, et al. The effect of loading conditions and ship speed on the wind and air resistance of a containership[J]. Ocean Engineering, 2023, 273: 113991.

[12] Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data[J]. International Shipbuilding Progress, 1984, 31(363): 272-276.

[13] Sun Zhiyuan, Li Ping, Sun Hanbing. Research of wind resistance and flow field of container ship[C]//Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Glasgow: American Society of Mechanical Engineers, 2019: OMAE2019-96798.

[14] Luo Shaoze, Ma Ning, HirakawA Y. Evaluation of resistance increase and speed loss of a ship in wind and waves[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2016, 1(3): 212-218.

[15] Lee J, Kim Y. Development of enhanced empirical-asymptotic approach for added resistance of ships in waves[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114762.

[16] Bašć J, Blagojević B, Andrun M. Improved estimation of ship wave-making resistance[J]. Ocean Engineering, 2020, 200: 107079.

[17] Liu Shukui, Papanikolaou A. Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula[J]. Ocean Engineering, 2020, 206: 107357.

[18] Saettone S, Tavakoli S, Taskar B, et al. The importance of the engine-propeller model accuracy on the performance prediction of a marine propulsion system in the presence of waves[J]. Applied Ocean Research, 2020, 103: 102320.

[19] Amini-Afshar M, Bingham H B. Added resistance using Salvesen-Tuck-Faltinsen strip theory and the Kochin function[J]. Applied Ocean Research, 2021, 106: 102481.

[20] Zhang Xinshu, Song Xingyu, Beck R F. Numerical investigations on seakeeping and added resistance in head waves based on nonlinear potential flow methods[J]. Ocean Engineering, 2023, 276: 114043.

[21] Shu Yaqing, Han Bingyu, Song Lan, et al. Analyzing the spatio-temporal correlation between tide and shipping behavior at estuarine port for energy-saving purposes[J]. Applied Energy, 2024, 367: 123382.

[22] Song S, Terziev M, Tezdogan T, et al. Investigating roughness effects on ship resistance in shallow waters[J]. Ocean Engineering, 2023, 270: 113643.

[23] Sano M, Yasukawa H, Hata H. Directional stability of a ship in close proximity to channel wall[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2014, 19(4): 376-393.

[24] Yang Bo, Kaidi S, Lefrançois E. CFD method to study hydrodynamics forces acting on ship navigating in confined curved channels with current[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(9): 1263.

[25] Gao Miao, Shi Guoyou. Ship-handling behavior pattern recognition using AIS sub-trajectory clustering analysis based on the T-SNE and spectral clustering algorithms[J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 106919.

[26] Rong H, Teixeira A P, Soares C G. A framework for ship abnormal behaviour detection and classification using AIS data[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 247: 110105.

[27] Feng Yao, Luo Feng, Liao Guisheng, et al. Nearshore bathymetry based on shore-based microwave radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(19): 23030-23043.

[28] Haller M C, Honegger D A, Pittman R, et al. Real-time marine radar observations of nearshore waves and flow structures from shore-based towers[C]//2019 IEEE/OES Twelfth Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM). San Diego: IEEE, 2019: 1-7.

[29] Aslam S, Michaelides M P, Herodotou H. Internet of ships: a survey on architectures, emerging applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9714-9727.

[30] Luo Dan, Chen Peng, Yang Jingsong, et al. A new ship tracing technology from oil spills based on multi-source data[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 207: 116808.

[31] Zhou Fan,Fan Yunli,Zou Jing,et al. Ship emission monitoring sensor web for research and application[J]. Ocean Engineering,2022,249:110980.

[32] Zhang Dongdong,Chen Baian,Zhu Hongyu,et al. Short-term wind power prediction based on two-layer decomposition and BiTCN-BiLSTM-attention model[J]. Energy,2023,285:128762.

[33] Tan Weikai,Yuan Caihao,Xu Sudong,et al. A Swin-Transformer-based deep-learning model for rolled-out predictions of regional wind waves[J]. Physics of Fluids,2025,37(3):036625.

[34] Wang Kai,Wang Jianhang,Huang Lianzhong,et al. A comprehensive review on the prediction of ship energy consumption and pollution gas emissions[J]. Ocean Engineering,2022,266:112826.

[35] Yuan Zhi,Liu Jingxian,Zhang Qian,et al. Prediction and optimisation of fuel consumption for inland ships considering real-time status and environmental factors[J]. Ocean Engineering,2021,221:108530.

[36] Shi Wenzhong, Guo Dizhou, Zhang Hua. A reliable and adaptive spatiotemporal data fusion method for blending multi-spatiotemporal-resolution satellite images[J]. Remote Sensing of Environment,2022,268:112770.

[37] Wang Kexin,Kong Jun,Feng Xuejun,et al. Safe tidal passage mode for locks in estuaries:a strategy integrating data assimilation with hydrodynamic modeling[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2025,30(4):05025009.

[38] Xu Chen,Du Xiaoping,Fan Xiangtao,et al. FastVSDF:an efficient spatiotemporal data fusion method for seamless data cube[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2024,62:5402022.

[39] Gao Huan,Zhu Xiaolin,Guan Qingfeng,et al. cuFSDAF:an enhanced flexible spatiotemporal data fusion algorithm parallelized using graphics processing units[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2022,60:4403016.

[40] Himeur Y,Rimal B,Tiwary A,et al. Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring:a review and future perspectives[J]. Information Fusion,2022,86-87:44-75.

[41] Yang Boquan,Li Jixiong,Zeng Ting. A review of environmental perception technology based on multi-sensor information fusion in autonomous driving[J]. World Electric Vehicle Journal,2025,16(1):20.

[42] Zhang Yuanyuan, Zhang Bin, Shen Cheng, et al. Review of the field environmental sensing methods based on multi-sensor information fusion technology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2024,17(2):1-13.

[43] De Paola A,Ferraro P,Gaglio S,et al. An adaptive Bayesian system for context-aware data fusion in smart environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2017,16(6):1502-1515.

[44] Röbesaat J,Zhang Peilin,Abdelaal M,et al. An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion:an experimental study[J]. Sensors,2017,17(5):951.

[45] Wang Wenhui,Chen Man,Peng Yumin,et al. Unstructured environment navigation and trajectory calibration technology based on multi-data fusion[J]. Computers and Electrical Engineering,2024,120:109658.

[46] 金桂中,陈国灿,赵兰兰,等. 基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):1-4. (Jin Guizhong,Chen Guocan,Zhao Lanlan,et al. Kalman filter correction technique based on multi-source forecast residuals [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(4):1-4. (in Chinese))

[47] Mancipe-Castro L,Gutiérrez-Carvajal R E. Prediction of environment variables in precision agriculture using a sparse model as data fusion strategy[J]. Information Processing in Agriculture,2022,9(2):171-183.

[48] Snauffer A M,Chauhan U,Cogert K,et al. Data fusion for environmental process control:maximizing useful information recovery under data limited constraints[J]. IEEE Sensors Letters,2019,3(1):7102204.

[49] Garcia F,Martin D,de la Escalera A,et al. Sensor fusion methodology for vehicle detection[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine,2017,9(1):123-133.

[50] 管亚硕,连炎清,金君良,等. 基于多模型神经网络的径流缺失数据重建:以渭河流域为例[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),2025-05-27. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250527.1556.004. (Guan Yashuo,Lian Yanqing,Jin Junliang, et al. Runoff missing data reconstruction based on multi-model neural networks:a case study of Weihe River Basin[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025-05-27. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250527.1556.004. (in Chinese))

[51] Wu Xinyi,He Aiping. Multimodal information fusion and artificial intelligence approaches for sustainable computing in data centers[J]. Pattern Recognition Letters,2025,189:17-22.

[52] 郑敬伟,刘舒,胡昌伟. 流域洪水数字模型标准化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(5):534-538. (Zheng Jingwei,Liu Shu,Hu Changwei. Standardization for watershed models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2009,37(5):534-538. (in Chinese))

[53] 李致家,李安琪,姚成,等. 基于分布式模型的永定河流域"23·7"特大洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):10-17. (Li Zhijia,Li Anqi,Yao Cheng,et al. Simulation of "23·7" catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(5):10-17. (in Chinese))

[54] 李宾,栾清华,李涛,等. 协同 MIKE11-KF 的遥感河道流量数据同化及实证研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),2025-02-24. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250224.1102.002. (Li Bin,Luan Qinghua,Li Tao,et al. A framework and its practice of river discharge assimilation through MIKE11-KF[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025-02-24. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250224.1102.002. (in Chinese))

[55] Zhang Yongsheng, Tu Chen, Gao Kun, et al. Multisensor information fusion: future of environmental perception in intelligent vehicles[J]. Journal of Intelligent and Connected Vehicles,2024,7(3):163-176.

[56] Wang Shuaian, Meng Qiang. Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2012,48(3):701-714.

[57] Luo Xi, Yan Ran, Wang Shuaian. Ship sailing speed optimization considering dynamic meteorological conditions[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2024,167:104827.

[58] Adland R,Cariou P,Wolff F C. Optimal ship speed and the cubic law revisited:empirical evidence from an oil tanker fleet[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2020,140:101972.

[59] Kontovas C,Psaraftis H N. Reduction of emissions along the maritime intermodal container chain:operational models and policies[J]. Maritime Policy & Management,2011,38(4):451-469.

[60] Lu Ruihua, Turan O, Boulougouris E, et al. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping[J]. Ocean Engineering,2015,110:18-28.

[61] Ni Peiyong,Wang Xiangli,Li Hu. A review on regulations,current status,effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines[J]. Fuel,2020,279:118477.

[62] Yang Liqian, Chen Gang, Zhao Jinlou, et al. Ship speed optimization considering ocean currents to enhance environmental sustainability in maritime shipping[J]. Sustainability,2020,12(9):3649.

[63] Echevarria E R,Hemer M A,Holbrook N J. Global implications of surface current modulation of the wind-wave field[J]. Ocean Modelling,2021,161:101792.

[64] Li Xiaohe,Sun Baozhi,Jin Jianhai,et al. Speed optimization of container ship considering route segmentation and weather data loading:turning point-time segmentation method[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2022,10(12):1835.

[65] Xie Wen,Xu Sudong,Zhang Nini,et al. Ship speed optimization method in canal environments considering waiting times for crossing locks[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2024,12(3):375.

[66] Golak J A P,Defryn C,Grigoriev A. Optimizing fuel consumption on inland waterway networks:local search heuristic for lock scheduling[J]. Omega,2022,109:102580.

[67] Zaccone R,Ottaviani E,Figari M,et al. Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation:a dynamic programming approach[J]. Ocean Engineering,2018,153:215-224.

[68] Johansen T A,Perez T,Cristofaro A. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2016,17(12):3407-3422.

[69] De A,Mamanduru V K R,Gunasekaran A,et al. Composite particle algorithm for sustainable integrated dynamic ship routing and scheduling optimization[J]. Computers & Industrial Engineering,2016,96:201-215.

[70] Kurpati A, Azarm S, Wu J. Constraint handling improvements for multiobjective genetic algorithms[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2002,23(3):204-213.

[71] Beşikçi E B, Arslan O, Turan O, et al. An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations[J]. Computers & Operations Research,2016,66:393-401.

[72] Li Xiaohe,Sun Baozhi,Guo Chunyu,et al. Speed optimization of a container ship on a given route considering voluntary speed loss and emissions[J]. Applied Ocean Research,2020,94:101995.

[73] Xie Xianwei,Sun Baozhi,Li Xiaohe,et al. Joint optimization of ship speed and trim based on machine learning method under consideration of load[J]. Ocean Engineering,2023,287:115917.

[74] Karatuğ Ç,Tadros M,Ventura M,et al. Decision support system for ship energy efficiency management based on an optimization model[J]. Energy,2024,292:130318.

[75] Wang Kai, Li Jiayuan, Yan Xinping, et al. A novel bi-level distributed dynamic optimization method of ship fleets energy

consumption[J]. Ocean Engineering,2020,197:106802.
[76] Yu Hongchu, Fang Zhixiang, Fu Xiuju, et al. Literature review on emission control-based ship voyage optimization [J]. Transportation Research Part D:Transport and Environment,2021,93:102768.
[77] Li Zhongwei,Wang Kai,Hua Yu,et al. GA-LSTM and NSGA-Ⅲ based collaborative optimization of ship energy efficiency for low-carbon shipping[J]. Ocean Engineering,2024,312:119190.
[78] Huang Luofeng,Pena B,Liu Yuanchang,et al. Machine learning in sustainable ship design and operation:a review[J]. Ocean Engineering,2022,266:112907.
[79] Lang Xiao,Wu Da,Mao Wengang. Physics-informed machine learning models for ship speed prediction[J]. Expert Systems with Applications,2024,238:121877.
[80] El Mekkaoui S,Benabbou L,Caron S,et al. Deep learning-based ship speed prediction for intelligent maritime traffic management [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2023,11(1):191.
[81] Li Xiaohe,Ding Kunping,Xie Xianwei,et al. Bi-objective ship speed optimization based on machine learning method and discrete optimization idea[J]. Applied Ocean Research,2024,148:104012.

(收稿日期:2025-07-29　编辑:熊水斌)

(上接第 85 页)

[21] Liu Huabei,Yang Guangqing,Hung Ching. Analyzing reinforcement loads of vertical geosynthetic-reinforced soil walls considering toe restraint[J]. International Journal of Geomechanics,2017,17(6):04016140.
[22] Leshchinsky D, Zhu Fan. Resultant force of lateral earth pressure in unstable slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2010,136(12):1655-1663.
[23] Morsy A M,Zornberg J G,Leshchinsky D,et al. Soil-reinforcement interaction:effect of reinforcement spacing and normal stress [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2019,145(12):04019115.
[24] Morsy A M,Zornberg J G. Soil-reinforcement interaction:stress regime evolution in geosynthetic-reinforced soils[J]. Geotextiles and Geomembranes,2021,49(1):323-342.
[25] Zhang Fei,Ge Bin,Leshchinsky D,et al. Effects of multitiered configuration on the internal stability of GRS walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2023,149(12):04023122.
[26] Klar A,Sas T. Rational approach for the analysis of segmental reinforced soil walls based on kinematic constraints[J]. Geotextiles and Geomembranes,2009,27(5):332-340.
[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
[28] Deb K,Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
[29] 汤岭,王海军,李致家,等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):21-28. (Tang Ling, Wang Haijun, Li Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):21-28. (in Chinese))
[30] Salem M A,Hammad M A,Amer M I. Field monitoring and numerical modeling of 4.4 m-high mechanically stabilized earth wall [J]. Geosynthetics International,2018,25(5):545-559.
[31] Bathurst R J, Naftchali F M. Geosynthetic reinforcement stiffness for analytical and numerical modelling of reinforced soil structures[J]. Geotextiles and Geomembranes,2021,49(4):921-940.
[32] British Standards Institution. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills: BS 8006-1:2010[S]. Milton Keynes,U. K. :BSI,2010.
[33] 常倩倩,束一鸣,黄松,等. 加筋间距对加筋挡土墙工作性态的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(5):557-562. (Chang Qianqian,Shu Yiming,Huang Song,et al. Effect of bar spacing on performance of reinforced soil retaining walls [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2007,35(5):557-562. (in Chinese))
[34] Bathurst R J,Miyata Y,Allen T M. Facing displacements in geosynthetic reinforced soil walls[C]//Proceedings of the Earth Retention Conference 3. Bellevue. Washington D. C. :ASCE Geo-Institute,2010:442-459.

(收稿日期:2025-07-24　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.019

三维效应对海上风机单桩侧向刚度的影响

祝 亮[1],王 雨[1],罗 翔[1],曹淑刚[1],周全智[1],闫 琛[1],黄欣羿[2]

(1. 龙源(北京)新能源工程设计研究院有限公司; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要:为探究三维效应对海上风机大直径单桩的影响,针对不同土体中水平受荷的大直径单桩构建了只考虑沿桩身分布的径向和环向应力分量的二维桩土相互作用解析模型,基于该模型分析了三维效应对单桩集总刚度、桩身响应(水平位移、转角、剪力、弯矩)和分布式弹簧刚度的影响。结果表明:三维效应对单桩力控集总刚度、桩身变形与剪力响应的影响很大,而对位控集总刚度、弯矩分布影响不大;忽略三维效应会得到更大的桩身响应,进而导致设计保守;三维效应对 p-y 弹簧的影响不大,而考虑了三维效应的 m-φ 弹簧才是造成单桩集中刚度、桩身响应差异的根本原因,因此在大直径单桩的设计中应当考虑 m-φ 弹簧的影响。

关键词:海上风机;大直径单桩;三维效应;竖向摩擦力;桩土相互作用

Influence of three-dimensional effects on lateral stiffness of offshore wind turbine monopiles

Zhu Liang[1], **Wang Yu**[1], **Luo Xiang**[1], **Cao Shugang**[1], **Zhou Quanzhi**[1], **Yan Chen**[1], **Huang Xinyi**[2]

(1. *Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Design and Research Institute Co., Ltd.*;
2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University*)

Abstract: In order to investigate the impact of three-dimensional effects on large-diameter monopiles used in offshore wind turbines, two-dimensional analytical model for pile-soil interaction was developed for large-diameter monopiles subjected to horizontal loading in various soil types, which considered only the radial and circumferential stress components distributed along the pile shaft. A comparative analysis was then conducted based on this model to investigate the effects of three-dimensional effects on the monopile's lumped stiffness, the response of the pile shaft (horizontal displacement, rotation angle, shear force, and bending moment), and the distributed spring stiffness. The results indicate that three-dimensional effects significantly influence the force-controlled lumped stiffness, pile deformation, and shear response of monopiles, while their impact on position-controlled lumped stiffness and bending moment distribution is relatively minor. Neglecting three-dimensional effects yields larger pile shaft responses, leading to a more conservative design approach. The three-dimensional effect has little influence on the p-y spring; however, the m-φ spring, which accounts for three-dimensional effects, is the fundamental cause of differences in lumped stiffness and pile shaft response in monopiles. Therefore, the influence of the m-φ spring should be considered when designing large-diameter monopiles.

Key words: offshore wind turbine; large-diameter monopile; three-dimensional effect; vertical friction force; pile-soil interaction

海上风能已成为前景广阔的可再生能源形式,在海上风电工程中,大直径单桩是当前应用最广泛的风机基础形式[1]。作为风电机组的核心支撑结构,海上风机基础不仅是机组在风浪、洋流等恶劣海洋环境中稳定运行的根本保障,还直接承担风机上部主体结构荷载以及各类复杂海洋环境荷载的作用。基础的承载性能对风电安全运行至关重要,因此学者们围绕大直径单桩在不同荷载工况下的承载特性开展了一系列针对性研究[2-4]。然而,从工程经济性角度来看,海上风机基础建设费用占比颇高,约占整个海上风电工程总建设费用的 25%~30%[5]。这种高额的基础建设成本已成为制约海上风电产业规模化发展的关键因素之一,因此进一步优化海上风机单桩基础的设计方案、降低建设成本,已成为推动海上风电产业高质量发展的重要课题。

目前,单桩的水平向受力特性通常采用 p-y 曲线法进行描述[6-7],但广泛使用的 DNV[6] 和 API[7] 规范中的 p-y 曲线均基于直径较小的细长柔性桩设计而得。与传统的细长桩不同,大直径单桩具有较小的长径比,因此忽略了沿桩身分布的竖向摩擦力的传统 p-y 曲线并不适用于海上风机大直径单桩的设计[8-14]。一些学者通过数值模拟和试验对竖向摩擦力对单桩水平向受力特性的影响进行了初步研究[15-16],确定了竖向摩擦

基金项目:国家能源集团科技项目(GJNY-22-13)

作者简介:祝亮(1974—),男,高级工程师,主要从事新能源电力开发研究。E-mail:12012195@ceic.com

通信作者:黄欣羿(1999—),男,博士研究生,主要从事海上风机基础响应研究。E-mail:huangxinyi@hhu.edu.cn

力对大直径单桩侧向刚度的影响。忽略竖向摩擦力会产生更大的桩身响应,从而导致过分保守的设计,但目前在静力条件下三维效应(考虑竖向摩擦力)对单桩的影响以及造成三维效应的机制并没有严格的解析法分析。因此,本文基于 He 等[17]提出的三维桩土相互作用解析模型,构建只考虑沿桩身分布的径向和环向应力分量的二维模型,并通过与三维模型的结果对比,分析三维效应对单桩侧向刚度的影响。

1　桩土相互作用解析模型

1.1　模型构建

对于顶部受到水平力 H_0 和弯矩 $M_0=H_0h$(h 为荷载的加载高度)的大直径单桩在弹性土体中的响应问题,大直径单桩的长度为 L,半径为 a,直径为 D,桩的壁厚为 t,He 等[17]指出桩土相对刚度 E_pI_p/E_sL^4(E_p、E_s 分别为桩基与土体的弹性模量,I_p 为桩基的截面惯性矩)大于 0.05 时,可以将单桩基础认为是刚体。本文计算的所有情况都满足上述范围,因此将大直径单桩基础简化为刚体进行计算。

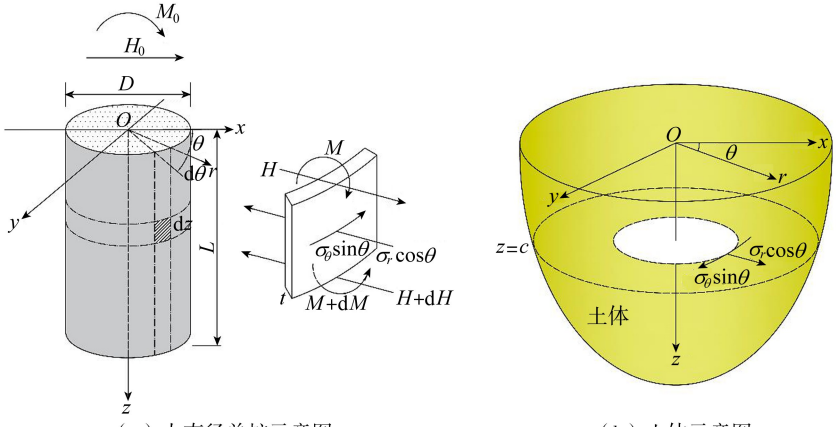
对于不考虑三维效应的二维模型,忽略了沿桩身分布的竖向摩擦力,对应地忽略了竖向的位移,只需考虑桩土界面的水平向位移。因此桩土接触界面上的边界条件可以表示为:

$$u_r(a,\theta,z)=w_r(a,\theta,z)\qquad u_\theta(a,\theta,z)=w_\theta(a,\theta,z)\qquad (0\leqslant\theta\leqslant 2\pi,0\leqslant z\leqslant L)\tag{1}$$

其中

$$u_i(a,\theta,z)=\sum_{j=r,\theta}\int_0^L \hat{u}_{ij}(r,\theta,z;a,\theta,c)\sigma_j(a,\theta,c)\,\mathrm{d}c\qquad (i=r,\theta)\tag{2}$$

式中:$u_i(a,\theta,z)$ 为土体的位移;$w_i(a,\theta,z)$ 为单桩的位移;$\hat{u}_{ij}(r,\theta,z;a,\theta,c)$ 为土体的格林函数[17];$\sigma_j(a,\theta,c)$ 为作用在桩土交界面的分布力(图 1)。



(a) 大直径单桩示意图　　(b) 土体示意图

图 1　基于格林函数的二维解析模型

Fig. 1　Green's function-based 2D analytical model

对于刚性大直径单桩基础,桩身上任意一点在水平力和弯矩作用下的位移可分为水平平移和摇摆旋转两部分(图 2):

$$\begin{cases} w_r(a,\theta,z)= & w_{x0}\cos\theta-\varphi_0 z\cos\theta \\ w_\theta(a,\theta,z)= & \varphi_0 z\sin\theta-w_{x0}\sin\theta \end{cases}\qquad (0\leqslant z\leqslant L,0\leqslant\theta\leqslant 2\pi)\tag{3}$$

式中:w_{x0}、φ_0 分别为桩顶的位移与转角。

为求解模型还需要两个额外方程,这两个方程可以从单桩顶部的受力条件中得到:

$$H_{z=0}=H_0\qquad M_{z=0}=H_0h\tag{4}$$

沿桩身分布的剪力 $H(z)$ 和弯矩 $M(z)$,可通过分布力与分布弯矩计算得到:

$$\begin{cases} H(z)=\displaystyle\int_z^L p_x(c)\,\mathrm{d}c \\ M(z)=\displaystyle\int_L^z m(c)\,\mathrm{d}c+\int_L^z p_x(c)(c-z)\,\mathrm{d}c \end{cases}\tag{5}$$

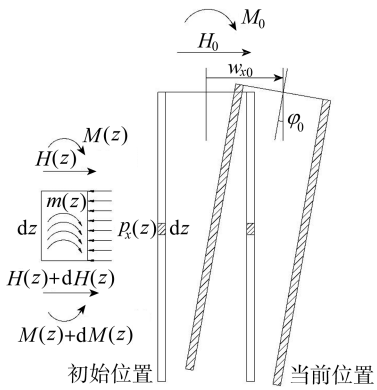


图 2　刚性单桩在水平力和力矩作用下的耦合振动

Fig. 2　Coupled vibration of a rigid monopile under horizontal force and moment

其中

$$p_x(z)=\int_0^{2\pi}[\sigma_r(a,\theta,z)\cos^2\theta-\sigma_\theta(a,\theta,z)\sin^2\theta]a\mathrm{d}\theta$$

$$m(z)=-\int_0^{2\pi}\sigma_z(a,\theta,z)\cos^2\theta a^2\mathrm{d}\theta$$

式中:$p_x(z)$为作用在桩上的分布水平力;$m(z)$为作用在桩上的分布弯矩。当不考虑三维效应时,忽略了竖向摩擦力σ_z,此时$m(z)=0$。

式(1)和式(4)是一组关于未知分布力σ_i和桩顶位移的Fredholm积分方程组,可以直接求解。参考He等[18]的方法,可将待求解边界条件写为矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{F} & -\boldsymbol{k}_M & -\boldsymbol{k}_F\\ \boldsymbol{G} & 0 & 0\\ \boldsymbol{H} & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\sigma}\\ \varphi_0\\ w_{x0}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ H_0\\ M_0\end{bmatrix}\tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_r^{(1)}\sim\sigma_r^{(n)},\sigma_\theta^{(1)}\sim\sigma_\theta^{(n)})^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{k}_M=(0\sim-L,0\sim L)^{\mathrm{T}}$$

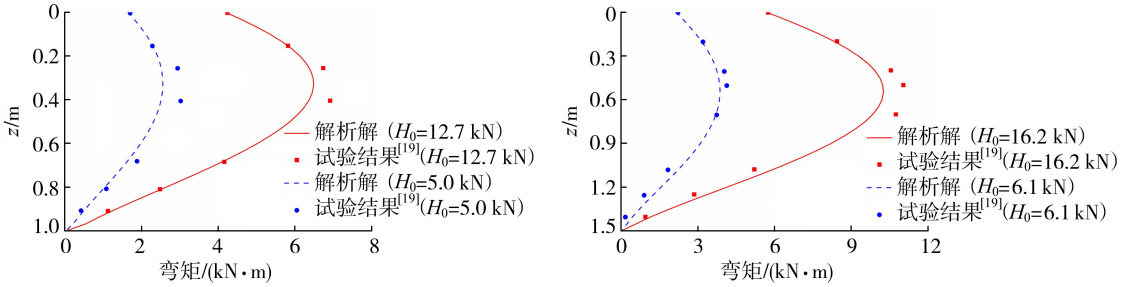
$$\boldsymbol{k}_F=(1\sim1,-1\sim-1)^{\mathrm{T}}$$

式中:$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{F}$为系数矩阵,具体表达式见文献[18]。

此外,本文还考虑了均质土、抛物线土和线性土3种不同的土壤类型。土体弹性模量随深度变化表示为$E_s(z)=k_Ez^\alpha$,其中k_E为弹性模量变化系数,α为土壤不均匀系数,当$\alpha=0$时为均质土,$\alpha=0.5$时为抛物线土,$\alpha=1$时为线性土。

1.2 模型验证

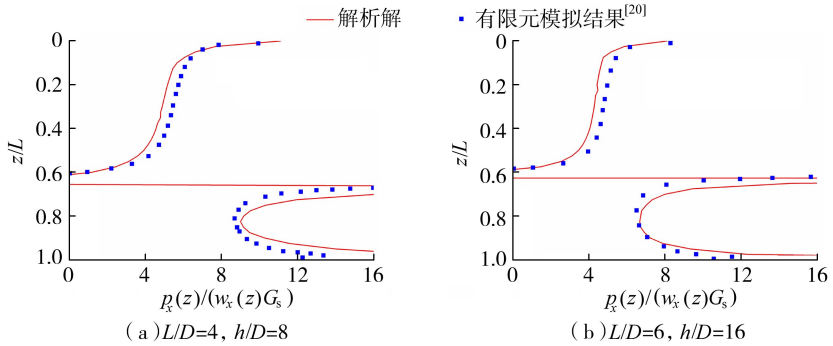
采用Wang等[19]的试验结果、Wan等[20]的精细有限元模型模拟结果验证本文解析模型的正确性。试验结果对比中解析模型土体假设为抛物线土($\alpha=0.5$),泊松比ν_s为0.3,弹性模量参考Robertson等[21]的结果,取$E_{sD}=5$ MPa(E_{sD}是深度为D处的土体弹性模量)。有限元模型结果对比中土体为均质土($\alpha=0$),泊松比为0.49,取$p_x(z)/(w_x(z)G_s)$(G_s为土体剪切模量)作为无量纲p-y刚度进行对比。由图3、图4可知,本文解析解与试验结果、有限元模拟结果吻合较好,验证了本文格林函数和解析模型的正确性。



(a) L=1.0 m, D=0.273 m, h=0.33 m　　(b) L=1.5 m, D=0.273 m, h=0.35 m

图3 弯矩的解析解与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of analytical solutions for bending moment and experimental results



(a) L/D=4, h/D=8　　(b) L/D=6, h/D=16

图4 p-y刚度的解析解与有限元模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of analytical solutions for p-y stiffness and finite element simulation results

2　结果与分析

为分析三维效应对单桩基础的影响,将二维模型和三维模型结果的差值定义为:

$$E_r = (f_2 - f_3)/f_3 \tag{7}$$

式中:E_r 为各项单桩响应(单桩的集总刚度、桩身响应以及土弹簧系数)的差值;f_2 为二维模型的模拟结果;f_3 为三维模型的模拟结果。

2.1　三维效应对集总刚度的影响

桩顶所受水平力 H_0 和弯矩 M_0 与相应的水平位移 w_{x0} 和转角 φ_0 之间的关系可用桩头集总静刚度矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} H_0 \\ M_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_H & K_{HM} \\ K_{MH} & K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{x0} \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中:K_H、K_M、$K_{MH}(=K_{HM})$ 分别为位控水平刚度、位控转动(摇摆)刚度、位控耦合刚度。

对于大直径单桩而言,直接处理桩顶荷载引起的响应通常更为方便。桩顶水平位移、转角与桩顶荷载的关系可以定义为:

$$w_{x0} = \frac{H_0}{K_h} + \frac{M_0}{K_{hm}} \qquad \varphi_0 = \frac{M_0}{K_m} + \frac{H_0}{K_{mh}} \tag{9}$$

其中

$$K_h = K_H - K_{HM}^2/K_M \qquad K_{hm} = K_{HM} - K_M K_H/K_{HM}$$

$$K_m = K_M - K_{MH}^2/K_H \qquad K_{mh} = K_{MH} - K_M K_H/K_{MH}$$

式中:K_h、K_m、$K_{mh}(=K_{hm})$ 分别为力控水平刚度、力控转动(摇摆)刚度、力控耦合刚度。

为方便对比,对式(8)、式(9)中的集总刚度进行无量纲化:

$$\begin{cases} \bar{K}_H = K_H/(G_{sD}a) & \bar{K}_{HM} = K_{HM}/(G_{sD}a^2) \\ \bar{K}_{MH} = K_{MH}/(G_{sD}a^2) & \bar{K}_M = K_M/(G_{sD}a^3) \\ \bar{K}_h = K_h/(G_{sD}a) & \bar{K}_{hm} = K_{hm}/(G_{sD}a^2) \\ \bar{K}_{mh} = K_{mh}/(G_{sD}a^2) & \bar{K}_m = K_m/(G_{sD}a^3) \end{cases} \tag{10}$$

式中:G_{sD} 为土体深度为 D 时的土体剪切模量。

由表 1 可知,均质土中三维效应对 $\bar{K}_H$ 和 $\bar{K}_{MH}$ 没有任何影响,对 $\bar{K}_M$ 的影响不大;相较于力控集总刚度,三维效应对位控集中刚度的影响可以忽略不计;三维效应对力控集总刚度的影响较大,E_r 范围为 5%~10%。抛物线土中,三维效应对 $\bar{K}_H$ 和 $\bar{K}_{MH}$ 仍然没有影响,对 $\bar{K}_M$ 的影响相较于均质土更小;但对力控集总刚度的影响较均质土更明显,E_r 范围为 9%~12%。线性土中,三维效应对位控集总刚度的影响仍然可以忽略不计,对力控集总刚度的影响仍然很大;对力控集总刚度的影响较抛物线土进一步增大,E_r 范围为 12%~15%。

表 1　不同土体中三维效应对集总刚度的影响

Table 1　Influence of three-dimensional effects on lumped stiffness in different soils

集总刚度类型	均质土			抛物线土			线性土		
	不考虑三维效应	考虑三维效应	E_r/%	不考虑三维效应	考虑三维效应	E_r/%	不考虑三维效应	考虑三维效应	E_r/%
$\bar{K}_H$	32.68	32.68	0.00	55.27	55.27	0.00	105.04	105.04	0.00
$\bar{K}_M$	1 621.02	1 678.65	-3.43	3 306.41	3 397.92	-2.69	6 911.41	7 072.95	-2.28
$\bar{K}_{MH}$	-184.62	-184.62	0.00	-379.57	-379.57	0.00	-789.15	-789.15	0.00
$\bar{K}_h$	11.62	12.35	-5.91	11.59	12.77	-9.24	14.69	16.75	-12.30
$\bar{K}_m$	578.12	635.75	-9.06	699.78	791.29	-11.56	982.92	1 144.46	-14.12
$\bar{K}_{mh}$	101.98	112.18	-9.09	100.88	114.19	-11.66	128.46	149.94	-14.33

注:大直径桩的 $L/D = 5$。

由图 5 可知,在 $3 \leqslant L/D \leqslant 8$ 时,三维效应对力控集总刚度的影响范围为 5%~30%,且随着 L/D 的增大而减小。对于相同的长径比,随着 α 的增大三维效应的影响也随之增加。

2.2　三维效应对桩身响应的影响

为了更好地理解土壤与单桩之间的相互作用,分析了不同土体中三维效应对桩身变形与内力的影响。

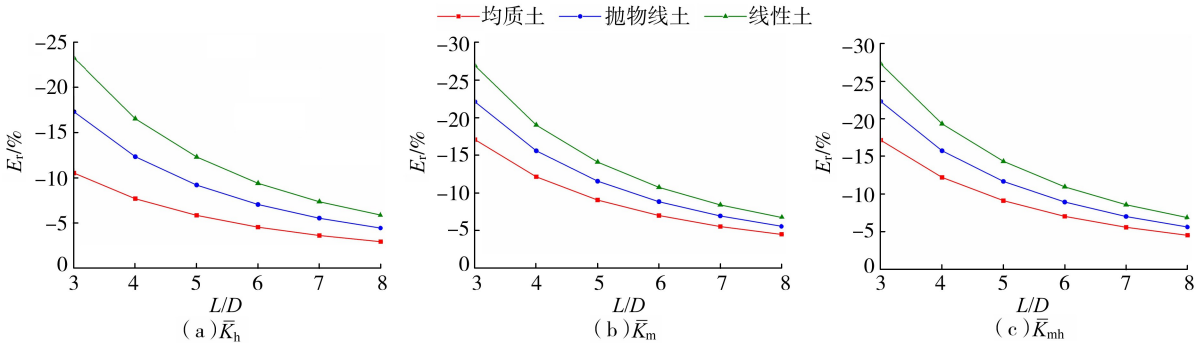


图5 不同长径比时三维效应对力控集总刚度的影响($\nu_s=0.35$)

Fig. 5 Influence of three-dimensional effects on force-controlled lumped stiffness at different aspect ratios ($\nu_s=0.35$)

图6为不同土体中,$L/D=5$、$h/D=10$的单桩桩身响应的对比,所有土体的泊松比均取0.35。由图6可知,均质土中,三维效应对水平位移、转角、剪力分布均具有较大影响,而对桩身弯矩分布影响不大,可以忽略。对于桩身变形,忽略三维效应会明显增大桩身的水平位移和转角;对于剪力分布,忽略三维效应同样增大了沿桩身分布的剪力。当忽略三维效应时,桩身变形与内力计算值都会变大,进而导致设计保守。抛物线土中,三维效应对弯矩的影响仍然很小,对水平位移、转角和剪力的影响仍然很大,E_r范围为12%~16%,三维效应的影响效果较均质土更为明显。线性土中,三维效应对弯矩分布的影响仍然可以忽略不计,对其余桩身响应的影响仍然很大,E_r范围为15%~20%。

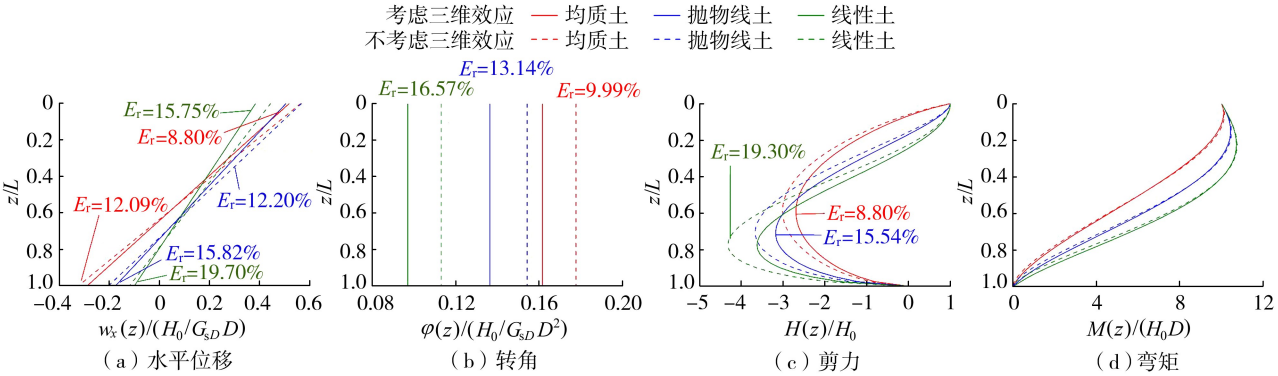


图6 不同土体中三维效应对桩身响应的影响

Fig. 6 Influence of three-dimensional effects on pile shaft response in different soils

由图7可知,在$3\leqslant L/D\leqslant 8$时,三维效应对桩身响应的影响最大能够达到40%以上,三维效应对单桩响应的影响与集总刚度类似,随着长径比的增大而减小,且随着α的增大而增大。

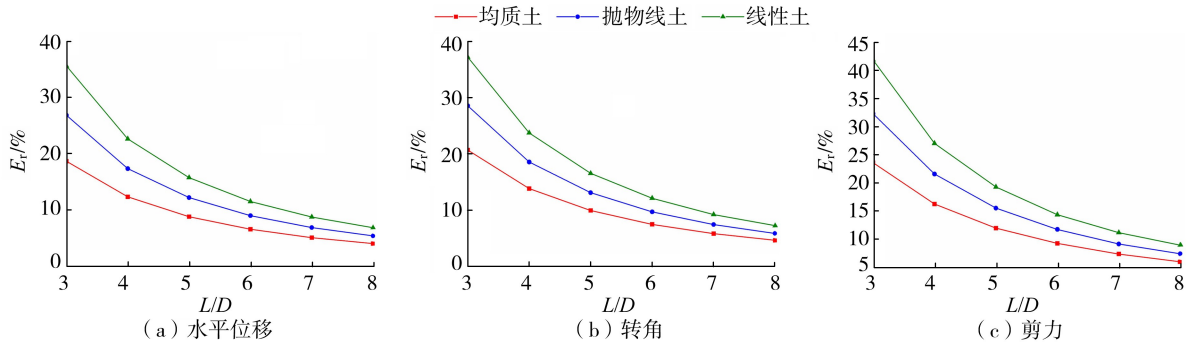


图7 不同长径比时三维效应对桩身响应的影响($\nu_s=0.35$)

Fig. 7 Influence of three-dimensional effects on pile shaft response at different aspect ratios ($\nu_s=0.35$)

2.3 三维效应对分布式弹簧刚度的影响

为分析造成集总刚度与桩身响应差异的原因,对简化的分布式Winkler弹簧模型进行对比分析。在一维的分布式Winkler弹簧模型中,桩基的位移和转动可表示为:

$$w_x(z) = w_{x0} - \varphi_0 z \qquad \varphi(z) = \varphi_0 \qquad (0 \leqslant z \leqslant L) \tag{11}$$

考虑三维效应的模型中,分布式 Winkler 弹簧刚度可写为[17,19]:

$$k_x(z) = p_x(z)/w_x(z) \qquad k_\varphi(z) = m(z)/\varphi(z) \tag{12}$$

为方便应用,弹簧刚度无量纲为 $k_x(z)/G_s(z)$ 和 $k_\varphi(z)/G_s(z)D^2$,分别称为 p-y 刚度和 m-φ 刚度。当不考虑三维效应时忽略沿桩身分布的弯矩,因此只存在 p-y 刚度,不存在 m-φ 刚度。由图 8 可知,3 种土体中,三维效应对 p-y 刚度的影响始终小于 5%,说明 p-y 刚度不是对桩身响应和集总刚度产生差异的关键因素。在二维模型中,忽略了竖向摩擦力 $\sigma_z(a,\theta,c)$,这时没有考虑由于竖向摩擦力产生的沿桩身分布的附加弯矩 $m(z)$。而沿桩身分布的转动 m-φ 弹簧(图 9)在刚性大直径单桩响应计算中作用十分显著[14]。因此在大直径单桩的设计中应当考虑 m-φ 弹簧的作用,而不仅是传统的 p-y 弹簧。

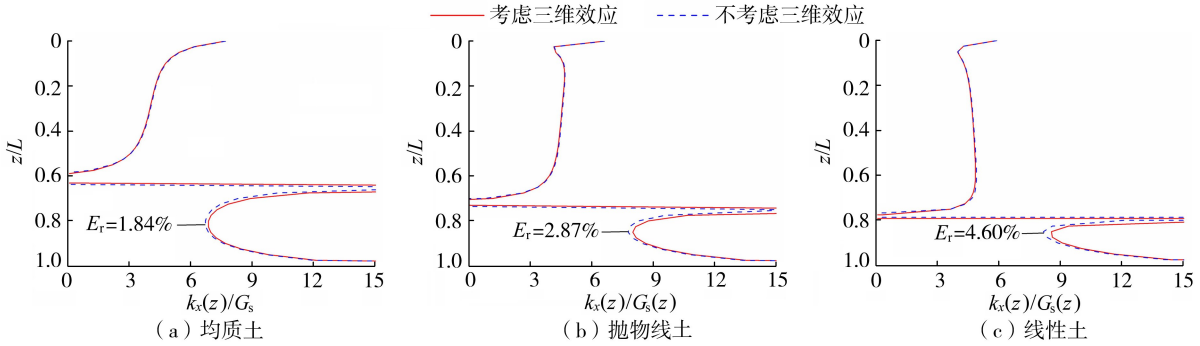


图 8　三维效应对 p-y 刚度的影响

Fig. 8　Influence of three-dimensional effect on p-y stiffness

3　结　论

a. 三维效应对位控集总刚度的影响较小,可以忽略不计;但是对力控集总刚度的影响很大,不可忽视。

b. 三维效应对单桩的弯矩分布的影响不大,对单桩的位移、转角和剪力的影响较大,不可忽视。当忽略三维效应时,得到的单桩的位移、转角和剪力均大于实际情况。

c. 三维效应对沿桩身分布的 p-y 刚度影响不大,造成集总刚度与桩身响应差异的主要原因是忽略了 m-φ 弹簧的作用,在大直径单桩的设计中应当考虑 m-φ 弹簧。

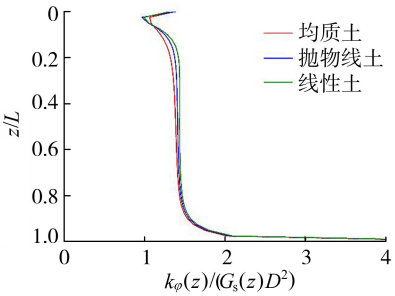


图 9　三维效应对 m-φ 刚度的影响

Fig. 9　Influence of three-dimensional effect on m-φ stiffness

参考文献:

[1] 邓友生,李卫超,王倩,等. 风电机组基础结构形式及计算方法[J]. 科学技术与工程,2020,20(21):8429-8439. (Deng Yousheng,Li Weichao,Wang Qian,et al. Structure types of wind turbine foundation and its calculation methods[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(21):8429-8439. (in Chinese))

[2] 袁煜晖,贺瑞,朱元张. 水平循环荷载下嵌岩单桩基础受力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):97-106. (Yuan Yuhui,He Rui,Zhu Yuanzhang. Experimental study on characteristics of rock-socketed monopile under lateral cyclic loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(6):97-106. (in Chinese))

[3] 贺瑞,朱元张,张继生,等. 地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):66-76. (He Rui,Zhu Yuanzhang,Zhang Jisheng,et al. Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):66-76. (in Chinese))

[4] 陶文艳,贺瑞,郑金海. 海上风机大直径单桩水平-摇摆耦合振动特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):260-267. (Tao Wenyan,He Rui,Zheng Jinhai. Analysis on horizontal-rocking vibrations of monopile supporting wind turbine[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(3):260-267. (in Chinese))

[5] 张崧,谭家华. 海上风电场风机安装概述[J]. 中国海洋平台,2009,24(3):35-41. (Zhang Song,Tan Jiahua. Introduction of offshore wind turbine installation[J]. China Offshore Platform,2009,24(3):35-41. (in Chinese))

[6] Det Norske Veritas. Design of offshore wind turbine structures:DNV-OS-J101[S]. Oslo:DNV,2013.

[7] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms:RP 2A-WSD[S]. Washington DC:API,2014.

[8] Negro V,López-Gutiérrez J S,Esteban M D,et al. Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines[J]. Renewable Energy,2014,63:125-132.

[9] 孙毅龙,许成顺,杜修力,等. 海上风电大直径单桩的修正*p-y*曲线模型[J]. 工程力学,2021,38(4):44-53. (Sun Yilong,Xu Chengshun,Du Xiuli,et al. A modified *p-y* curve model of large-monopiles of offshore wind power plants[J]. Engineering Mechanics,2021,38(4):44-53. (in Chinese))

[10] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及*p-y*曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):127-134. (Bao Jinhu,Su Jingbo,Wu Feng,et al. Field horizontal loading test and *p-y* curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(3):127-134. (in Chinese))

[11] 马美玲,李立辰,吴文兵,等. 基于现场试验的海上风电大直径钢管桩*p-y*曲线特性分析[J]. 海洋工程,2024,42(5):44-53. (Ma Meiling,Li Lichen,Wu Wenbing,et al. Characterization of *p-y* curve for a large-diameter steel pipe pile based on field test[J]. The Ocean Engineering,2024,42(5):44-53. (in Chinese))

[12] 王立忠,赖踊卿,洪义,等. 水平受荷桩"$p-y+M-\theta$"分析方法[J]. 岩土工程学报,2024,46(5):905-918. (Wang Lizhong,Lai Yongqing,Hong Yi,et al. A unified "$p-y+M-\theta$" model for laterally loaded piles considering rigidities of various piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(5):905-918. (in Chinese))

[13] 章巍,储著宇,陈学奇,等. 基于*p-y*曲线和实体有限元法的大直径单桩水平受荷性状研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(12):193-202. (Zhang Wei,Chu Zhuyu,Chen Xueqi,et al. Lateral behaviour of large-diameter pile based on *p-y* curve and solid FEM method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(12):193-202. (in Chinese))

[14] He Rui,Kaynia A M,Zhang Jisheng,et al. Influence of vertical shear stresses due to pile-soil interaction on lateral dynamic responses for offshore monopiles[J]. Marine Structures,2019,64:341-359.

[15] Byrne B W,McAdam R,Burd H J,et al. New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Oslo:CRC Press,2015:705-710.

[16] Zdravković L,Taborda D M G,Potts D M,et al. Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Oslo:CRC Press,2015:759-764.

[17] He Rui,Kaynia A M. Winkler spring coefficients for laterally loaded piles[J]. Computers and Geotechnics,2024,170:106264.

[18] He Rui,Kaynia A M,Zhu Tao. Effect of base shear and moment on lateral dynamic behavior of monopiles[J]. Ocean Engineering,2021,228:108957.

[19] Wang H,Lehane B M,Bransby M F,et al. Field and numerical study of the lateral response of rigid piles in sand[J]. Acta Geotechnica,2022,17(12):5573-5584.

[20] Wan Xiao,Doherty J P,Randolph M F. Relationships between lateral and rotational load transfer stiffnesses and soil modulus for the elastic response of monopiles[J]. Computers and Geotechnics,2021,137:104256.

[21] Robertson P K,Campanella R G. Interpretation of cone penetration tests. Part I:Sand[J]. Canadian Geotechnical Journal,1983,20(4):718-733.

(收稿日期:2025-04-23 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.020

基于轻量化 SuperPoint 网络的水下光学图像特征提取

刘 艳,朱昌盛,余 彬,霍冠英

(河海大学信息科学与工程学院)

摘要:针对水下光学图像质量下降导致的图像配准、三维重建等水下视觉任务中特征提取鲁棒性差的问题,提出了一种轻量化 SuperPoint 网络,该网络针对水下光学图像普遍存在颜色失真、模糊等细节退化问题,利用注意力机制,构建频域-空间域动态注意力融合模块,融合频域与空间域的特征信息,提升网络在水下退化图像中的特征提取能力;构建残差特征增强深度可分离卷积模块,以降低模型复杂度并增强网络的特征提取能力。验证结果表明:该网络较 SuperPoint 网络参数量减少了 13.8%,计算量降低了 8.0%,帧率提升 31.7%,光照变化和视角变化下的重复率分别提高了 2.3%和 2.1%,在 SQUID 和 FLSea 数据集上的特征点检测与匹配性能评估中具有较好的特征提取鲁棒性。

关键词:水下光学图像;SuperPoint 网络;轻量化网络;特征提取;特征融合

Underwater optical image feature extraction based on lightweight SuperPoint network

Liu Yan, Zhu Changsheng, Yu Bin, Huo Guanying

(*College of Information Science and Engineering, Hohai University*)

Abstract: In view of the poor robustness of feature extraction in underwater vision tasks such as image registration and 3D reconstruction caused by the decline in underwater optical image quality, an lightweight SuperPoint network was proposed. This network addressed the common challenges of detail degradation in underwater optical images, including color distortion and blurring. By leveraging an attention mechanism, it constructed a frequency-spatial dynamic attention fusion module that integrated feature information from both the frequency and spatial domains, thereby enhancing the network's capability for feature extraction in underwater degraded images. A residual feature enhancement depthwise separable convolutional module was constructed to reduce model complexity and enhance the feature extraction ability of the network. Verification results demonstrate that, compared with the SuperPoint network, the network proposed in this paper achieves a 13.8% reduction in the number of parameters, an 8.0% decrease in computational complexity, and a 31.7% improvement in frame rate. Meanwhile, its repeatability rates under illumination variation and viewpoint variation are increased by 2.3% and 2.1%, respectively. In addition, the network exhibits excellent robustness in feature extraction in the performance evaluation of feature point detection and matching on the SQUID and FLSea datasets.

Key words: underwater optical image; SuperPoint network; lightweight network; feature extraction; feature fusion

图像处理过程中,特征提取作为图像配准、运动跟踪、三维重建等视觉任务的基础,通常包含两个核心环节:特征点检测与特征描述符生成[1]。特征点检测旨在定位图像中具有显著局部结构信息的关键点,这些点可作为后续匹配与分析的基础[2];特征描述符旨在对关键点邻域进行独特数学表征,为特征点提供可区分、可匹配的描述符[3]。水下环境会对图像成像质量造成显著影响:①光在水中的强烈衰减导致红光被严重吸收而蓝光吸收较少,使图像普遍呈现蓝绿色调;②水体散射效应降低了图像对比度;③水中的有机物质和悬浮颗粒等杂质进一步造成图像模糊[4]。这些退化效应严重削弱了特征提取的鲁棒性,即不仅要求精确检测关键点,更需生成稳定且高区分度的描述符,因此如何提升模糊退化水下图像特征提取的鲁棒性,已成为亟待解决的关键问题。

为提高图像特征提取的鲁棒性,学者们提出了多种方法,主要分为传统图像特征提取方法和基于深度学习的图像特征提取方法。传统图像特征提取方法主要通过人工设计算法实现检测和描述图像中的关键局部特征[5],如 Harris 等[6]提出了一种特征点检测方法,通过计算图像局部窗口内的梯度信息检测角点,但其未

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3907203);国家自然科学基金项目(U2441254)

作者简介:刘艳(1984—),女,副教授,博士,主要从事智能感知与图像处理技术研究。E-mail:liuyan_s@163.com

生成特征描述符;FAST(features from accelerated segment test)角点检测方法[7]与 Harris 等[6]的方法类似,只提取特征点而不生成描述符,通过检测每个像素周围的邻域区域是否满足一定的亮度变化判断特征点;Lowe[8]提出的尺度不变特征变换(scale invariant feature transform,SIFT)解决了仅提取特征点的问题,检测出尺度不变的特征点后,还生成了描述符用于图像配准。加速稳健特征(speeded-up robust features,SURF)算法[9]作为 SIFT 的改进,通过加速 Hessian 矩阵的计算,改善了 SIFT 计算耗时的问题。ORB[10](oriented FAST and rotated BRIEF)利用 FAST 进行特征点检测,BRIEF[11](binary robust independent elementary features)作为特征点的描述符,以提高特征提取效率。这些传统方法依赖于人工设计的规则,无法有效适应复杂和多变的环境,尤其在处理水下图像时,由于光照衰减、颜色失真、模糊等问题,表现常常受到较大限制[12]。

随着深度学习技术的发展,卷积神经网络(CNN)在图像特征提取中得到了广泛应用,CNN 通过自动学习图像中的特征,能够在复杂和多变的环境中表现出更强的适应能力[13]。近年来,研究者提出了多种基于 CNN 的特征提取网络,如 Dusmanu 等[14]提出的 D2-Net 网络实现了特征点检测与描述符生成的端到端联合学习;Revaud 等[15]通过改进 D2-Net 网络,引入鲁棒性与可重复性损失,通过自监督学习提升特征点检测的稳定性;De Tone 等[16]提出 SuperPoint 网络,基于自监督训练框架,利用合成图像生成初始标签,以实现无监督的特征点检测与描述符提取,在光照变化、视角变化等复杂条件下表现出优异的稳定性和鲁棒性;Zhao 等[17-18]提出 ALIKED 方法,引入了稀疏可变形描述符头(sparse deformable descriptor head,SDDH),能够自适应地捕捉关键点周围局部几何形变信息,从而提升匹配精度和跨模态场景的适应性;Yao 等[19]提出的 EdgePoint2 网络则面向边缘计算场景,通过轻量化设计提高在嵌入式系统上的部署效率。上述方法虽然在不同场景下均取得了良好表现,但在水下图像处理方面仍面临诸多挑战:D2-Net 网络对纹理依赖性较强,在水下图像中容易遗漏低纹理区域的特征点;R2D2 网络的特征稠密性相对较低,匹配效果易受图像质量下降影响;而 SuperPoint 网络由于采用自监督训练机制与端到端联合架构,在面对光照变化与模糊干扰时表现出较强的鲁棒性,因而在水下图像处理任务中更具优势。Wu 等[20]将自注意力机制引入 SuperPoint 网络,增强了其对水下模糊图像中退化特征的感知能力,进一步验证了 SuperPoint 网络在水下场景中的良好扩展性与应用潜力。

为提升 SuperPonit 网络水下光学图像特征提取的实时性和鲁棒性,本文基于 SuperPoint 网络提出一种轻量化 SuperPoint 网络(以下简称“本文网络”),其主要特点为:①针对水下图像通常存在颜色失真、模糊等细节退化问题,构建频域-空间域动态注意力融合模块(frequency-spatial dynamic attention fusion module,FSDAFM),利用注意力机制,融合频域与空间域的特征信息,提升网络对水下退化图像的特征提取能力;②借鉴深度可分离卷积[21](depthwise separable convolution,DSC)思想,构建一种残差特征增强深度可分离卷积模块(residual feature enhancement depthwise separable convolution module,RFDS),在显著降低网络参数量、实现模型轻量化的同时,通过特征增强和残差学习机制提升网络的特征提取能力。

1 研究方法

1.1 网络总体结构

基于 SuperPoint 网络的轻量化特征提取网络,由改进共享编码层、特征点检测层、描述符解码层 3 部分构成,可同时检测及描述特征点,网络结构如图 1 所示,图中 H、W 分别为图像的高度、宽度。该网络使用自监督学习的方法进行训练,训练过程包括:①训练特征点检测器 MagicPoint 网络[22],该网络由改进共享编码层和特征点检测层组成,不包含描述符解码层,训练数据集为 Synthetic Shapes 数据集。训练过程中,采用数据增强技术,对每幅图像进行随机缩放和旋转,加入随机高斯噪声、运动模糊、亮度变化等,提高网络对光照、视角变化的鲁棒性,使网络初步具有检测特征点的能力。②使用训练好的 MagicPoint 网络从真实场景图像数据集中检测每一幅图像的特征点,并将检测到的特征点视为真实标签。在此过程中,输入图像会进行 N 次单应性变换。每次单应性变换后,均会在变换后的图像上检测到特征点。利用逆单应性变换,将所有 N 次变换中检测到的特征点重新映射回原始图像,确保提取到足够数量的特征点。③在第②步获得的标注真实场景数据集上训练本文网络,通过训练输入图像及 MagicPoint 网络提供的真实标签,在特征点检测层输出特征点并在描述符解码层输出其对应的描述符。

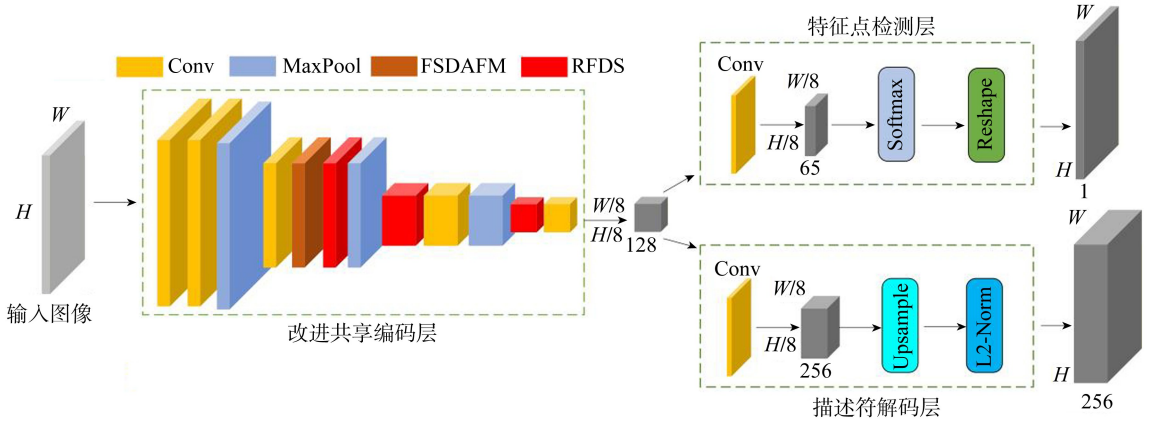


图 1　基于 SuperPoint 的轻量化特征提取网络框架

Fig. 1　Lightweight feature extraction network framework based on SuperPoint

1.2　基于 FSDAFM 和 RFDS 的改进共享编码层结构

1.2.1　FSDAFM

FSDAFM 的结构如图 2 所示,主要包含频域特征提取分支和空间域多尺度特征融合分支。①频域特征提取分支:设输入特征图 $X \in \mathbf{R}^{C\times H\times W}$,经傅里叶变换将特征图从空间域转换到频率域,得到实部图和虚部图,将二者拼接得到频域特征图,然后对频域特征图进行适当特征增强,并将增强后的频域特征图再次分为实部图和虚部图,重构为复数形式。通过傅里叶反变换将复数形式的频域图转换为特征图 $F_{\text{spatial}}^{\text{freq}}$,用于后续的特征融合。②空间域多尺度特征融合分支:设空间分支包含 3 个并行支路,每个支路考虑轻量化设计,采用深度可分离卷积体现轻量化设计。采用动态权重生成器计算每一个分支的权重,然后通过融合 3 个分支的特征,得到空间域多尺度融合输出特征图 $F_{\text{spatial}}^{\text{space}}$,拼接 $F_{\text{spatial}}^{\text{freq}}$ 和 $F_{\text{spatial}}^{\text{space}}$ 特征图并计算注意力图。

FSDAFM 针对水下图像常见的模糊、色彩失真等退化问题,基于水下退化在频域表现出的独特频率选择性进行设计。水下成像中,前向散射破坏低频成分导致全局模糊,而光吸收和后向散射则削弱高频细节信

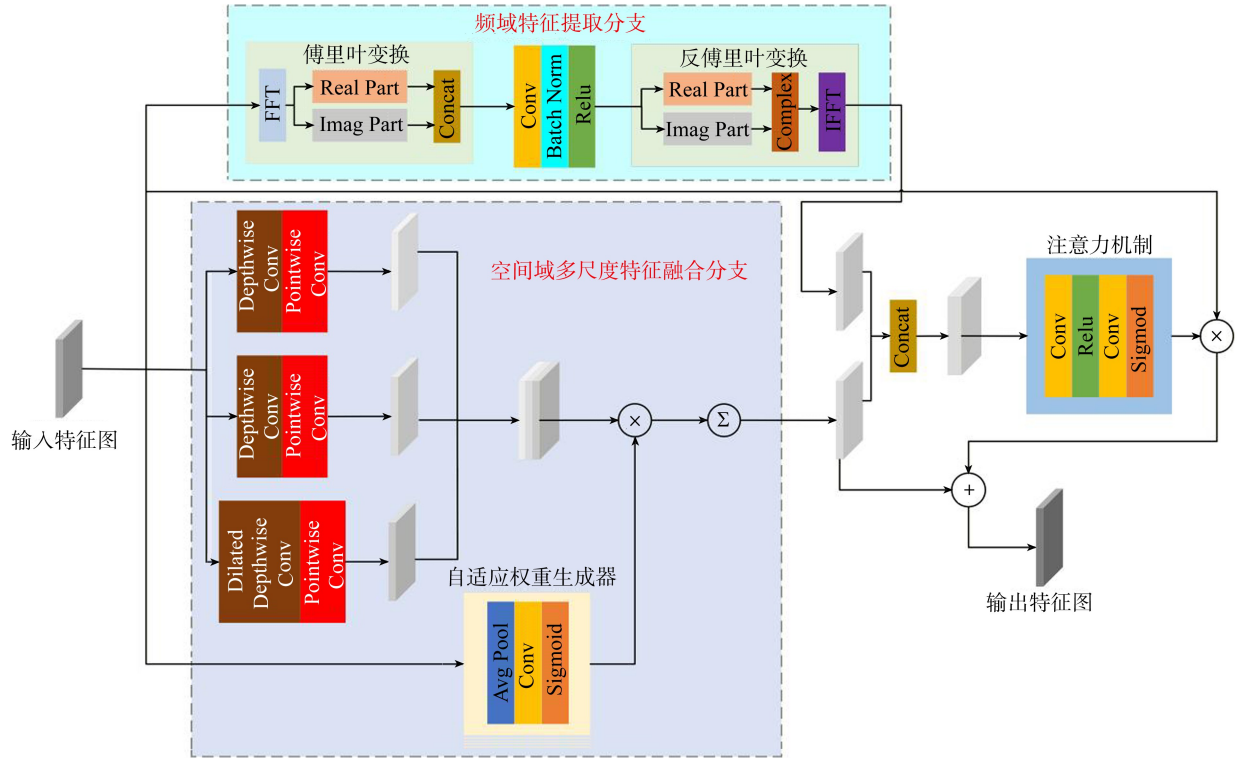


图 2　频域-空间域动态注意力融合模块

Fig. 2　FSDAFM

息。模块的频域分支通过傅里叶变换处理输入特征,将实部和虚部沿通道拼接,使1×1卷积层能够作为可学习频谱滤波器,自适应增强高频细节并抑制低频噪声。空间分支提取多尺度特征信息,通过注意力机制将频域优化后的特征与空间特征动态融合。这种物理机制引导的设计可提升模块对水下图像复杂退化的适应能力和特征提取鲁棒性。

1.2.2 RFDS

RFDS的结构如图3所示,图中C_{in}、C_{out}分别为输入、输出通道数目。设输入特征图为$X \in \mathbf{R}^{C_{in} \times H \times W}$,首先通过特征增强分支,生成每个通道的增强权重$w$。输入特征图$X$与$w$,逐通道乘积,得到特征增强后的输入特征图$X_{enchance}$。借鉴DSC思想[21],对$X_{enchance}$进行深度卷积和点卷积,然后引入残差连接思想,设计通道适配函数$\varphi(\cdot)$,当输入通道数与输出通道数不同,则输入特征图X通过适配层调整输入维度,否则残差$X_{residual}$即为输入特征图X。将深度可分离卷积的输出与残差相加得到输出特征图。

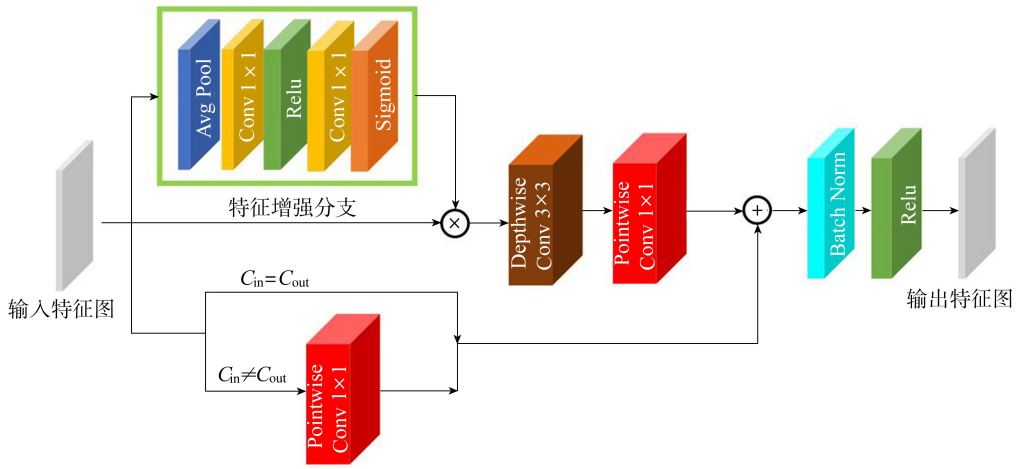


图3 残差特征增强深度可分离卷积模块

Fig. 3 RFDS

RFDS通过引入DSC降低了模型的参数量,从而实现了轻量化设计,确保了计算效率与模型性能的平衡。这一设计有效减少了计算资源的消耗,尤其在处理高维数据时,能够显著提升计算速度与存储效率。同时,RFDS通过残差连接和特征增强分支,进一步增强了网络的特征提取能力。残差连接通过跨层信息的传递,缓解了梯度消失问题,保证信息的有效流动;而特征增强分支则通过轻量化的全局信息捕获机制,强化了网络的上下文感知能力,帮助网络更好地捕捉全局特征,提升模型在水下复杂任务中的表现。

1.2.3 *共享编码层结构改进*

原SuperPoint网络共享编码层采用类似VGG[23]架构,包含4个处理阶段,每个阶段针对不同尺寸的特征图进行特征提取。尽管该架构设计简单直观,但其堆叠的普通卷积层导致网络深度较大、计算负担重、参数量大,难以满足水下检测任务中图像特征提取对实时性的需求。用RFDS替代原共享编码层中第2~4阶段的部分普通卷积操作,可降低网络参数量和计算量、提升推理速度,同时提升网络编码层的特征提取能力。考虑到水下退化图像在频域中呈现的独特特性,低频分量受散射噪声主导,而高频细节则因光吸收而减弱,在共享编码层第2阶段结构中引入了FSDAFM。该模块通过其频域处理分支,有针对性地抑制低频噪声并增强高频结构信息;同时利用注意力机制将频域优化后的特征与空间域特征动态融合,从而提高网络在水下图像特征提取上的鲁棒性。改进共享编码层结构见表1。

2 实例验证

实验硬件平台为Inter Core i7-13700KF@3.4 GHz CPU和NVIDIA RTX 3080 GPU设备,模型基于PyTorch架构实现,学习率为0.001,图像分辨率设置为240×320像素,单应性变换次数N设置为100。

2.1 数据集及数据增强

采用Synthetic Shapes[22]、RUOD[24]数据集训练网络检测特征点能力,并在SQUID[25]、FLSea[26]数据集进行试验。

表 1　改进共享编码层结构

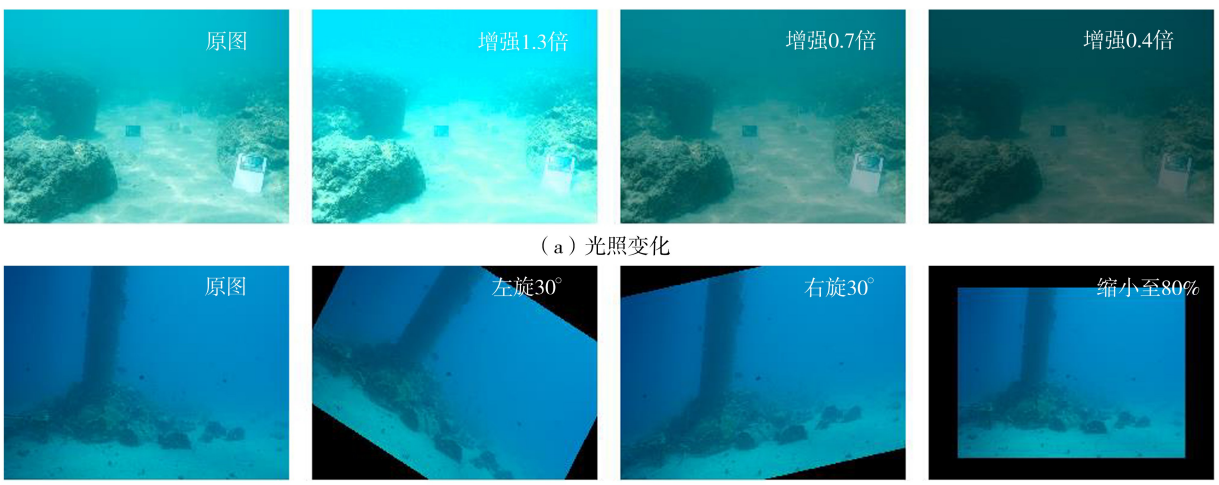
Table 1　Improved shared encoding layer structure

处理阶段	编码层	输入尺寸	输出尺寸
第 1 阶段	Conv	$W\times H\times 1$	$W\times H\times 64$
	Conv	$W\times H\times 64$	$W\times H\times 64$
	MaxPool	$W\times H\times 64$	$W/2\times H/2\times 64$
第 2 阶段	Conv	$W/2\times H/2\times 64$	$W/2\times H/2\times 64$
	FSDAFM	$W/2\times H/2\times 64$	$W/2\times H/2\times 64$
	RFDS	$W/2\times H/2\times 64$	$W/2\times H/2\times 64$
	MaxPool	$W/2\times H/2\times 64$	$W/4\times H/4\times 64$
第 3 阶段	RFDS	$W/4\times H/4\times 64$	$W/4\times H/4\times 128$
	Conv	$W/4\times H/4\times 128$	$W/4\times H/4\times 128$
	MaxPool	$W/4\times H/4\times 128$	$W/8\times H/8\times 128$
第 4 阶段	RFDS	$W/8\times H/8\times 128$	$W/8\times H/8\times 128$
	Conv	$W/8\times H/8\times 128$	$W/8\times H/8\times 128$

Synthetic Shapes 数据集是一个用于特征点检测的人工合成形状数据集。该数据集是在现有 Opencv 函数的基础上设计的,包含了多种简单的几何形状,如三角形、四边形、星形、直线、棋盘、三维立方体、椭圆等,其特点是图像简单,且能够提供特征点的真实标签,因此用于训练特征点检测器 MagicPoint 网络。

RUOD 数据集为水下真实场景数据集,涵盖一般水下场景,总共包含 14 000 张图像。本文将数据集划分为训练集和测试集,其中训练集包含 9 800 张图像,测试集包含 4 200 张图像。训练过程中,MagicPoint 特征点检测器从 RUOD 数据集中获取每张图像的真实标签,本文网络则利用这些水下图像及其对应标签进行训练。

SQUID 数据集包含来自 4 个不同地点的 57 对图像,分为 4 个子集,其中两个地点位于红海,代表热带水域,另外两个地点位于地中海,代表温带水域。在红海,Katzaa 是一个深度为 10~15 m 的珊瑚礁,包含 15 对图像,Satil 是一个深度为 20~30 m 的沉船,包含 8 对图像。在地中海,图像来自两个相隔 30 km 的岩石礁环境,其中 Nachsholim 的水深为 3~6 m,包含 13 对图像,Mikhmoret 的水深为 10~12 m,包含 21 对图像。但 SQUID 数据集在视角变化和光照变化方面存在不足,为此本文参考陆地场景特征提取性能测试基准中常用的 HPatches 数据集[27],从视角变化和光照变化两个方向分别对 SQUID 数据集进行增强操作。通过调整图像亮度模拟光照变化,并利用仿射变换和尺度缩放模拟视角变化,从而完成对 SQUID 数据集的数据增强,增强后的 SQUID 数据集包含 57 个光照变化较大的场景和 57 个视角变化较大的场景。由于 HPatches 数据集仅包含陆地场景,因此在实验部分未采用该数据集进行模型性能评估。增强后的 SQUID 数据集的图像示例如图 4 所示。SQUID 数据集以及增强后的 SQUID 数据集用于评估算法的特征点检测能力及匹配性能。



(a) 光照变化

(b) 视角变化

图 4　增强后的 SQUID 数据集的图像示例

Fig. 4　Image examples of enhanced SQUID dataset

FLSea 数据集也包含来自红海和地中海拍摄的水下双目图像,共包含 4 个子集。其中,Canyon1 和 Canyon2 分别为水下峡谷自然场景,包含 3 803 对和 2 362 对图像;Rock_garden1 和 Rock_garden2 为水下平坦沙区场景,分别包含 867 对和 305 对图像。同样用于评估算法的特征点检测能力及匹配性能。

2.2 评价指标

评价主要从算法的轻量化及实时性、算法特征点检测能力和匹配性能两方面开展。在轻量化和实时性方面,采用参数量、计算量和帧率作为评价指标。参数量表示模型的大小,参数量越小,表明模型越轻量化;计算量表示一次前向传播所需的浮点运算次数(单位为 10 亿次),计算量越低模型的计算复杂度越低,不需要高性能的硬件支持;帧率则用于衡量模型执行一次水下图像推理所需的时间,帧率越高模型的实时性越好。

在算法特征点检测能力和匹配性能方面,采用特征点重复率和描述符匹配准确率作为特征点检测和描述符匹配的性能指标。其中特征点重复率是衡量算法在不同视角、尺度和光照条件下对相同特征点检测一致性的指标。较高的特征点重复率表明算法在复杂的环境下仍能稳定地检测出相同的特征点,具有较强的鲁棒性。描述符匹配准确率则用于衡量特征点描述符匹配的精确度,该值越高,算法在匹配任务中能找到正确的匹配对的准确性越高。

2.3 结果分析

2.3.1 轻量化和实时性分析

采用参数量、计算量和帧率作为评价标准,将 SuperPoint 网络、SuperPoint+RFDS 网络、SuperPoint+FSDAFM 网络、本文网络进行比较,结果见表 2。将 RFDS 替换普通卷积后,SuperPoint 网络的参数量和计算复杂度显著下降,同时帧率大幅提升,表明 RFDS 的引入能够有效实现网络的轻量化,满足实时性需求。尽管 FSDAFM 会增加额外的模型参数和计算复杂度,但由于 RFDS 的优化作用,本文网络相较于 SuperPoint 网络在参数量上减少了 13.8%,计算量降低了 8.0%,帧率提升了 31.7%,仍能保持轻量化并提升实时性。

表 2 各网络的消融实验结果

Table 2 Ablation experiment results for each network

网络	参数量/10^6 个	计算量/亿次	帧率
SuperPoint	1.304	66.2	192
SuperPoint+RFDS	1.088	55.8	291
SuperPoint+FSDAFM	1.339	71.3	245
本文网络	1.124	60.9	253

2.3.2 特征点检测的有效性分析

对不同方法采用特征点重复率进行验证,即当前图像上检测到的特征点经过光照变化或视角变化在下一张图像上仍能稳定被检测到的概率。计算重复率的方法:选择前 k 个特征点,使用单应性矩阵(光照变化场景下单应性矩阵为单位矩阵)将原图的关键点映射到变换后的图像上,检查对应点是否在给定距离阈值内匹配,再计算匹配点占总点数的比例。k 为 300,距离阈值为 3 像素。针对水下光照变化、视角变化,在数据增强后的 SQUID 数据集上的对比试验结果见表 3。

表 3 各方法的特征点重复率

Table 3 Repetition rate of feature point for each method

方法	重复率/%	
	光照变化	视角变化
SuperPoint[16]	84.2	72.9
D2-Net[14]	63.6	29.1
R2D2[15]	66.9	61.6
ALIKED[17]	76.3	74.1
EdgePoint2[19]	78.5	48.1
SIFT[8]	48.5	57.6
ORB[10]	56.6	68.0
Harris[6]	82.1	38.2
FAST[7]	50.2	62.3
SuperPoint+RFDS	85.2	74.0
SuperPoint+FSDAFM	84.7	75.2
本文网络	86.5	75.0

由表 3 可知,在水下场景中,SuperPoint 网络相比于传统特征点检测器,在光照变化和视角变化方面表现出更好的鲁棒性。与深度学习方法对比,ALIKED 网络在视角变化方面的性能优于 SuperPoint 网络。传统特征点检测方法在水下环境中,由于图像质量下降,依赖的边缘和角点等特征变得模糊不清,从而使得特征点检测变得困难,导致特征点重复率较低。SuperPoint+FSDAFM 网络在特征点重复率上优于 SuperPoint 网络,尤其在视角变化的场景中重复率达到最高,表明 FSDAFM 能够有效应对水下复杂场景,提高模型在水下特征点检测任务中的鲁棒性。SuperPoint+RFDS 网络在参数量上有所减少,在光照、视角变化的水下场景中,其重复率均优于 SuperPoint 网络,表明 RFDS 的特征增强和残差连接机制确实能够提升特征提取能力。结合 RFDS 和 FSDAFM 的本文网络,在光照变化下达到了最高的重复率,虽然视角变化下略低于 SuperPoint+FSDAFM 网络,但在特征点重复率方面仍表现最佳。相较于 SuperPoint 网络,本文网络水下光照变化下的重复率提高了

2.3%,视角变化下的重复率提高了 2.1%。

为了避免偶然性,不同阈值设定下,对比不同方法的特征点重复率,结果如图 5 所示。在小阈值条件下,ALIKED 在视角变化方面具有最高的特征点重复率,展现出较强的特征点检测能力。但在不同阈值设定下进行综合评估时,本文网络在水下光照和视角变化场景中的平均重复率表现最优,有效提升了水下图像特征点检测的整体性能。

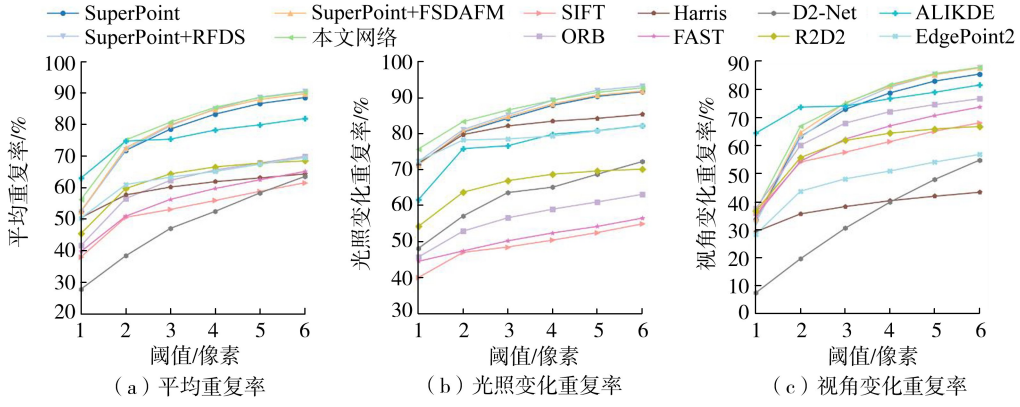


图 5　不同阈值下各方法的特征点重复率

Fig. 5　Feature point repetition rate for each method under different thresholds

2.3.3　特征点匹配结果及分析

分别对本文网络、SuperPoint 网络、D2-Net 网络、R2D2 网络、ALIKED 网络、EdgePoint2 网络以及传统的 ORB 方法、SIFT 方法在 FLSea 数据集和 SQUID 数据集上进行特征点匹配测试。

为客观评估算法生成的特征点描述符性能,采用描述符匹配准确率作为评价指标,该指标衡量匹配成功的特征点数与总特征点数的比率。为便于计算,在 FLSea 数据集和 SQUID 数据集上进行测试,采用暴力匹配算法进行描述符匹配,设置描述符最近邻匹配阈值为 0.8,最大检测特征点数目为 1 000,匹配结果见表 4 和表 5。基于学习生成的描述符能够在水下场景中有效捕捉到更具描述性和显著性的特征,而传统方法人工设计的描述符在水下图像中,由于常见的颜色失真、模糊等退化效应,其区分性和鲁棒性较差,导致匹配准确率较低。本文网络在 FLSea 数据集和 SQUID 数据集上的匹配准确率平均值分别达到 24.0%和 51.4%,虽然在部分子集上未达到最佳匹配率,但本文网络的平均匹配准确率仍高于 D2-Net 网络、R2D2 网络、ALIKED 网络以及 EdgePoint2 等。各方法的匹配结果如图 6 所示,在水下退化图像中,本文网络检测到的特征点数量多,且分布均匀,误匹配的情况少。对特征点匹配结果的量化和可视化分析表明,本文网络生成的特征点描述符具备更强的区分性、更高的鲁棒性以及更优的匹配性能。

表 4　FLSea 数据集中各方法的描述符匹配准确率对比　　**单位:%**

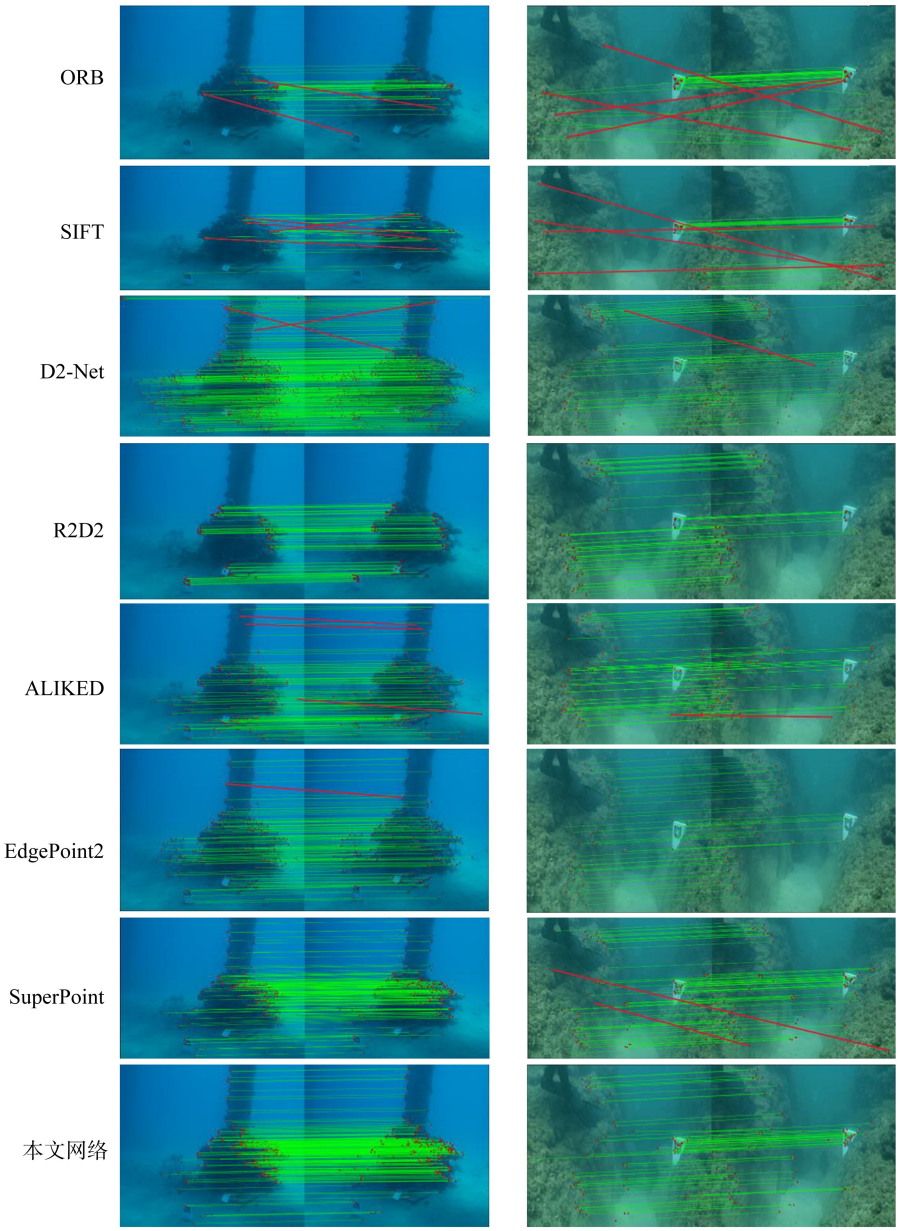
Table 4　Descriptor matching accuracy for each method in FLSea dataset　　**unit:%**

FLSea 数据集	SuperPoint[16]	SIFT[8]	ORB[10]	D2-Net[14]	R2D2[15]	ALIKED[17]	EdgePoint2[19]	本文网络
Canyon1	26.7	16.9	6.5	20.1	21.9	28.1	28.0	28.2
Canyon2	25.7	17.4	8.8	18.9	20.9	26.0	25.4	26.5
Rock_garden1	25.5	18.0	8.5	20.7	21.0	25.1	25.8	25.2
Rock_garden2	14.5	13.3	6.2	13.1	13.8	15.3	15.7	16.2

表 5　SQUID 数据集中各方法的描述符匹配准确率对比　　**单位:%**

Table 5　Descriptor matching accuracy for each method in SQUID dataset　　**unit:%**

SQUID 数据集	SuperPoint[16]	SIFT[8]	ORB[10]	D2-Net[14]	R2D2[15]	ALIKED[17]	EdgePoint2[19]	本文网络
Katzaa	64.0	41.7	14.9	49.4	45.2	63.9	55.6	63.0
Michmoret	44.5	45.3	19.1	39.3	37.8	44.8	47.1	46.5
Nachsolim	35.2	20.4	7.5	25.6	20.6	37.5	36.1	35.5
Satil	57.5	37.8	11.8	41.0	45.6	57.1	60.1	60.7



(a)水下偏蓝色调的图像对 (b)受到水下杂质影响而变得模糊的图像对

注:算法检测出的特征点用红色标出,红色连线表示这些特征点存在误匹配。

图6 特征匹配结果

Fig. 6 Feature matching results

3 结 语

本文提出了一种基于轻量化SuperPoint网络的水下光学图像特征提取方法。针对水下图像普遍存在的色彩失真、模糊等细节退化问题,利用注意力机制构建频域-空间域动态注意力模块(FSDAFM),通过融合频域与空间域特征信息,增强网络对水下退化图像的特征提取能力。为降低模型复杂度并提升实时性,设计了残差特征增强深度可分离卷积模块(RFDS)以取代普通卷积,在显著减少网络参数量的同时实现模型轻量化;通过特征增强与残差学习机制,提升网络的特征提取能力。实验结果表明,本文网络的参数量相较于SuperPoint网络显著降低,成功实现了轻量化设计;在SQUID和FLSea数据集上的特征点检测与匹配评估中,展现了最佳的特征点检测重复率和更强的描述符区分性,对于水下光学图像有较好的特征提取鲁棒性。

参考文献:

[1] Zhao Xuanran, Wu Yan, Hu Xin, et al. A novel dual-branch global and local feature extraction network for SAR and optical image

registration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2024,17:17637-17650.
[2] 李嘉祥,范影乐,武薇. 基于生物视觉机制的图像特征点检测方法[J]. 计算机工程与应用,2018,54(7):182-187. (Li Jiaxiang,Fan Yingle, Wu Wei. Image feature point detection method based on biological vision mechanism[J]. Computer Engineering and Applications,2018,54(7):182-187. (in Chinese))
[3] 徐晶,包利东,方明,等. 基于 Gabor 表示特征描述符的红外可见光图像配准[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(14):1437007. (Xu Jing, Bao Lidong, Fang Ming, et al. Infrared visible image registration based on Gabor representation feature descriptor[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2024,61(14):1437007. (in Chinese))
[4] Zhang Gangping,Li Chaofeng,Yan Jiajia,et al. ULD-CycleGAN:an underwater light field and depth map-optimized CycleGAN for underwater image enhancement[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,2024,49(4):1275-1288.
[5] Quan Dou,Wang Zhe,Lyu Chonghua,et al. LM-Net:a lightweight matching network for remote sensing image matching and registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2024,62:5229313.
[6] Harris C G,Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Alvey Vision Conference. Manchester:Alvey Vision Club,1988:1-6.
[7] Rosten E,Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[C]//9th European Conference on Computer Vision. Graz,Austria:Springer,2006:430-443.
[8] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision,2004,60(2):91-110.
[9] Bay H,Ess A,Tuytelaars T,et al. Speeded-up robust features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding,2008,110(3):346-359.
[10] Rublee E,Rabaud V,Konolige K,et al. ORB:an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona:IEEE,2011:2564-2571.
[11] Calonder M,Lepetit V,Strecha C,et al. BRIEF:binary robust independent elementary features[C]//11th European Conference on Computer Vision. Heraklion,Crete,Greece:Springer,2010:778-792.
[12] 张文静,张振,黄剑,等. 基于图像语义分割的水位智能监测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):24-30. (Zhang Wenjing,Zhang Zhen,Huang Jian,et al. Intelligent water-level monitoring method based on image semantic segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):24-30. (in Chinese))
[13] 赵二峰,李章寅,袁冬阳. 基于双阶段注意力机制的大坝变形深度学习预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):44-52. (Zhao Erfeng,Li Zhangyin,Yuan Dongyang. Deep learning model for deformation prediction of dam based on dual-stage attention mechanism[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):44-52. (in Chinese))
[14] Dusmanu M,Rocco I,Pajdla T,et al. D2-Net:a trainable CNN for joint description and detection of local features[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach:IEEE,2019:8084-8093.
[15] Revaud J,Weinzaepfel P,De Souza C,et al. R2d2:repeatable and reliable detector and descriptor[C]//Proceedings of the 33rd International Conference on Neural Information Processing Systems. Vancouver:Curran Associates Inc.,2019:1113.
[16] De Tone D,Malisiewicz T,Rabinovich A. SuperPoint:self-supervised interest point detection and description[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Salt Lake City:IEEE,2018:224-236.
[17] Zhao Xiaoming,Wu Xingming,Chen Weihai,et al. ALIKED:a lighter keypoint and descriptor extraction network via deformable transformation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2023,72:5014016.
[18] Zhao Xiaoming,Wu Xingming,Miao Jinyu,et al. ALIKE:accurate and lightweight keypoint detection and descriptor extraction[J]. IEEE Transactions on Multimedia,2023,25:3101-3112.
[19] Yao Haodi,He Fenghua,Hao Ning,et al. EdgePoint2:compact descriptors for superior efficiency and accuracy[EB/OL]. (2025-04-24). https://arxiv.org/abs/2504.17280v1.
[20] Wu Di,Su Boxun,Hao Lichao,et al. A feature detection network based on self-attention mechanism for underwater image processing[J]. Ocean Engineering,2024,311:118949.
[21] Chollet F. Xception:deep learning with depthwise separable convolutions[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu:IEEE,2017:1800-1807.
[22] Detone D,Malisiewicz T,Rabinovich A. Toward geometric deep SLAM[EB/OL]. (2017-07-24). http://arxiv.org/abs/1707.07410.
[23] Simonyan K,Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C]//3rd International Conference on Learning Representations. San Diego:3rd International Conference on Learning Representations (ICLR),2015.
[24] Fu Chenping,Liu Risheng,Fan Xin,et al. Rethinking general underwater object detection:datasets,challenges,and solutions[J]. Neurocomputing,2023,517:243-256.

[25] Berman D, Levy D, Avidan S, et al. Underwater single image color restoration using haze-lines and a new quantitative dataset[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(8): 2822-2837.
[26] Randall Y. FLSea: underwater visual-inertial and stereo-vision forward-looking datasets[D]. Haifa: University of Haifa, 2023.
[27] Balntas V, Lenc K, Vedaldi A, et al. HPatches: a benchmark and evaluation of handcrafted and learned local descriptors[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017: 3852-3861.

(收稿日期:2025-06-18 编辑:刘晓艳)

(上接第118页)

[19] 李宏波,张冬月,葛学元. 基于PSO-LSSVM算法的隧道掘进机掘进参数预测方法[J]. 科学技术与工程,2023,23(14):6230-6237. (Li Hongbo, Zhang Dongyue, Ge Xueyuan. Tunnel boring machine tunneling parameters prediction method based on PSO-LSSVM algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6230-6237. (in Chinese))
[20] Zhang Liamo, Guo Jing, Fu Xianlei, et al. Digital twin enabled real-time advanced control of TBM operation using deep learning methods[J]. Automation in Construction, 2024, 158: 105240.
[21] 满轲,曹子祥,刘晓丽,等. 地质突变条件下基于组合模型的围岩等级和TBM掘进参数预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):55-62. (Man Ke, Cao Zixiang, Liu Xiaoli, et al. Prediction of surrounding rock grades and TBM tunnelling parameters based on combined model under geological mutation conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1): 55-62. (in Chinese))
[22] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于PSO-LSSVM-BP模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (Xu Weiya, Chen Shizhuang, Zhang Guike, et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 52-59. (in Chinese))
[23] 赵宇,郑东健. 基于QR-KOA-ITransformer-BiLSTM的混凝土坝变形区间预测模型[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),2025-02-24. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250224.1500.004. (Zhao Yu, Zheng Dongjian. A deformation interval prediction model for concrete dams based on QR-KOA-ITransformer-BiLSTM[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025-02-24. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250224.1500.004. (in Chinese))
[24] Liu Feitony, Ting Kaiming, Zhou Zhihua. Isolation forest[C]//Proceedings of the 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. Pisa, Italy: IEEE, 2008: 413-422. doi: 10.1109/ICDM.2008.17.

(收稿日期:2025-07-02 编辑:熊水斌)

(上接第128页)

[28] 邹敏,尹平保,贺炜. 交通荷载下镍铁渣-黏土路基动力响应特性分析[J]. 公路与汽运,2024,40(6):71-75. (Zou Min, Yin Pingbao, He Wei. Analysis of characterization of dynamic response of nickel-iron slag-clay roadbed under traffic loading[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 71-75. (in Chinese))
[29] Gao Xuhe, Tian Weiping, Li Jiachun, et al. Analysis of deformation characteristics of filled subgrade treated by micro-pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 5755796.
[30] 马晓凡,陈红,刘瑾,等. CT扫描视域下黏土干湿循环劣化机理[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):111-118. (Ma Xiaofan, Chen Hong, Liu Jin, et al. Deterioration mechanism of clay in dry-wet cycle under CT scanning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 111-118. (in Chinese))
[31] 黄玉纯. 降雨入渗对土工格室加筋路基动力响应的影响研究[J]. 公路交通科技,2023,40(11):61-71. (Huang Yuchun. Study on influence of rainfall infiltration on dynamic response of geocell-reinforced subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11): 61-71. (in Chinese))
[32] 余云燕,刘武通,付艳艳,等. 交通荷载作用红层填料道路沉降细观模拟[J]. 地震工程学报,2023,45(1):1-11. (Yu Yunyan, Liu Wutong, Fu Yanyan, et al. Meso-simulation of road settlement of red beds filling under traffic load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 1-11. (in Chinese))
[33] 陈剑,苏跃宏. 交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究[J]. 公路交通科技,2011,28(5):44-48. (Chen Jian, Su Yuehong. Numerical simulation of dynamic performance of highway subgrade under traffic loads[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5): 44-48. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-08 编辑:熊水斌)