

公益广告



一滴清水 一片绿地 一个地球



国际标准连续出版物号: ISSN 1006-7647 国内统一连续出版物号: CN 32-1439/TV CODEN: SSKJAT 邮发代号: 28-244 国内定价: 15.00元

水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES

第四十六卷第三期

二〇二六年五月出版

中国科学引文数据库核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

ISSN 1006-7647
CN 32-1439/TV



水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2026年5月

第46卷 第3期
Vol. 46 No. 3

《水利水电科技进展》第七届编辑委员会

主任委员：郑金海

副主任委员：宋翔洲

主 编：苏怀智

副 主 编：冯建刚 窦 智

编 委 （以姓氏笔画为序）：

万伟锋 马金根 马福恒 王天星 王仁坤 王文全 王玉杰 王东栋 王金荣 王兆礼
王进廷 王志亮 王社亮 王环玲 王俊杰 王桂生 王继敏 文 章 方宏远 孔纲强
巴 晶 邓华锋 邓 军 左其亭 左 锐 龙 笛 卢永金 史广泰 付 强 白庆升
冯建刚 冯建军 冯树荣 成 立 华 明 向 衍 刘东海 刘昌军 刘建锋 刘晓丽
刘晓辉 刘海宇 刘 斌 刘新荣 刘耀儒 关铁生 许小华 许月萍 许增光 孙永林
孙永明 贡 力 苏怀智 李云开 李火坤 李书霞 李 伟 李 阳 李明超 李炎隆
李 剑 李洪涛 李晓俊 李高会 李家正 李超顺 李德友 杨 飞 杨威嘉 肖 艳
肖培伟 吴礼舟 岑威钧 佟宏伟 余天堂 邹德高 沈振中 张人会 张 帅 张永进
张宇宁 张 欣 张建伟 张春生 张 挺 张振华 张晓祥 张 婷 张 鹏 张 嘎
张 磊 张德胜 张璐璐 陈文龙 陈立华 陈 波 陈帝伊 陈益峰 陈 静 陈 璐
林鹏智 季 斌 金光球 金 浏 金祖权 金 峰 周玉良 周家文 周 雷 郑天元
郑克勋 郑爱武 练继建 赵明阶 钟启明 侯精明 俞晓东 俞 缙 姚 池 姚志峰
夏文博 徐 旭 高长胜 郭华明 郭进军 郭高贵 郭鹏程 唐立模 黄书岭 黄时锋
黄 彪 黄 铭 崔 博 假冬冬 彭建和 彭 鹏 蒋金洋 韩 伟 程永光 储洪强
雷 冬 雷金波 雷晓辉 窦 智 裴 吉 颜天佑 潘鹏志

《水利水电科技进展》首届青年编辑委员会

（以姓氏笔画为序）

于福荣 弓扶元 马 韬 王 帆 王茂松 王 珏 王晋伟 王高辉 王海龙 王 娟
王铭明 王 超 王超越 王瑞红 方 正 邓 超 卢加兴 叶长亮 田 威 付晓龙
付晓东 宁逢伟 权 辉 吕兴栋 吕锡芝 朱国俊 乔 伟 任炳昱 刘贝贝 刘 俊
刘 浏 刘 超 关 涛 江 汇 许贝贝 孙世坤 孙龙刚 孙奔博 孙洪亮 孙博闻
李兆恒 李兆峰 李 毅 杨 帆 肖晨光 吴学震 吴 钦 辛建达 沈月千 张启灵
张 君 张雨霆 张 洪 张紫涛 张 楠 张 雷 张雷克 张 睿 张 龔 陈 舟
范向前 欧 斌 明 波 罗 忆 周兴波 周佳庆 周佩剑 周银军 赵志高 段 伟
宫经伟 贺登辉 袁维海 聂利超 桂 跃 顾 昊 秘向丽 徐小蓉 郭文成 郭胜山
郭 涛 唐小松 黄先北 曹学兴 梁 越 葛 巍 蒋水华 韩 勃 程 龙 程勤波
傅中志 焦伟轩 舒 实 鲁 洋 曾永顺 曾献奎 温立峰 谭乔凤 谭 磊 熊 堃
潘坚文 戴云峰 魏博文

《水利水电科技进展》征稿简则

- 1 本刊是一份科学技术期刊（ISSN 1006-7647；CN 32-1439/TV），主要反映国内外水资源开发、利用、配置、节约和保护领域的科技进展和动态，为我国水利水电工程建设及运行管理服务。主要读者对象为水利水电及相关学科的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员和大专院校师生。本刊逢单月出版，国内外公开发行，邮发代号：28-244。
- 2 本刊主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境、水管理等有关的科技论文，设有研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目。本刊优先发表自然科学基金资助项目及其他重大科技项目的研究(技术)论文。
- 3 本刊已入选《中国科学引文数据库》《万方数据数字化期刊全文数据库》《中国期刊全文数据库》《中文科技期刊数据库》等数据库或网站。作者投稿时如无特别声明即被视为同意本刊通过上述媒体为读者提供服务；如有异议，请在投稿时说明。
- 4 来稿要求和注意事项
 - (1) 文稿务求内容正确，应注重技术创新或学术创见；重点突出作者论文的新贡献；要求文字精练，结构严谨，数据可靠（重要数据请注明出处）；避免写成报告、讲义和学位论文的缩写形式。文稿内容不能泄露国家秘密，在政治或涉外问题上符合国家政策。
 - (2) 文稿篇幅4 000~6 000字为宜，应提供中英文篇名、作者姓名及单位名称，并编写中英文摘要（约250个汉字）和关键词（4~6个）。简讯类文稿一般不超过800字。
 - (3) 文稿请用A4篇幅，正文用5号字通栏排版；编译稿应尊重原文的版权，注明原文出处（附外文原文或原文复印件）。计量单位一律使用法定计量单位。
 - (4) 文稿中的图表应设计合理，大小适当。请使用三线表。图表应排在正文引用处，先文后图表。
 - (5) 参考文献择作者亲自阅读、本文引用、公开发表或有案可查者列出，采用顺序编码制。中文期刊文献必须用中英文两种文字著录。常用著录格式（常用参考文献类型：期刊文章[J]；专著[M]；会议论文集[C]；学位论文[D]；标准[S]；报告[R]；报纸[N]；专利[P]；电子文献[EB/OL]）：
[1] 作者名（外文姓前名后）. 论文篇名[J]. 期刊名，年份，卷号（期次）：起止页码。
[2] 编著者（外文姓前名后）. 书名[M]. 版次. 出版地：出版者，出版年：起止页码。
[3] 作者. 题名[C]//文集编者. 文集名. 出版地：出版者，出版年：论文起止页码。
[4] 作者. 学位论文名[D]. 地名（城市名）：学位授予单位，年份。
[5] 作者. 报告名[R]. 收藏地（城市名）：收藏单位，年份。
[6] 作者. 题名[EB/OL]. [引用日期]. 获取和访问路径。
 - (6) 摄影作品以水利水电工程为主题，要求照片清晰、层次丰富，彩照，并附简短说明。
 - (7) 来稿请写明作者姓名、出生年、性别、职称、学位、主要研究方向（或从事的工作）、工作单位全称、邮政编码、通信地址、联系电话及电邮地址。
- 5 作者投稿，文责自负，本刊只对稿件作文字上的修改。请勿一稿多投。作者投稿满3个月未收到本刊编辑部通知者，可将稿件另行处理。
- 6 本刊对录用发表的文章将按与作者约定的稿酬标准支付稿酬。所付稿酬包括本简则第3条所列媒体的著作权使用费；同时向作者赠送当期样刊。
- 7 本刊对录用发表的文章酌收论文发表费，论文发表费在论文被录用后交纳。另有约定的除外。
- 8 本刊只接受网上投稿，网络地址：<http://jour.hhu.edu.cn>。
编辑热线：025-83786335；E-mail：jz@hhu.edu.cn 或 jz1981@vip.163.com。
微信公众号：“水利水电科技进展”或“slsdkjz”。

水利水电科技进展

(1981年创刊,双月刊)

第46卷第3期

2026

2026年5月10日出版

SHUILI SHUIDIAN KEJI JINZHAN

中国科学引文数据库核心期刊
中文核心期刊(2004—2026年)
中国科技核心期刊(2003—2026年)
中国高校百佳科技期刊
中国高校优秀科技期刊
全国水利系统优秀科技期刊
江苏省优秀期刊

编委会主任 郑金海
主 编 苏怀智
副 主 编 冯建刚 突 智
编辑部主任 雷 燕

责任编辑 刘晓艳
英文编辑 雷 燕

主 管:中华人民共和国教育部

主 办:淮海大学

编辑出版:《水利水电科技进展》编辑部

地 址:210098 南京市西康路1号

电 话:025-83786335

电子邮箱:jz@hhu.edu.cn

网络地址:http://jour.hhu.edu.cn

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:全国各地邮局

邮发代号:28-244

国外发行:中国国际图书贸易集团有限公司(北京399信箱100048)

国外发行代号:BM2740

广告许可证:苏工商3200004960327

中国标准连 ISSN 1006-7647

续出版物号:CN 32-1439/TV

CODEN: SSKJAT

国内定价:15.00元

目 次

· 专题综述 ·

我国河湖管理发展历程与未来展望 鞠茂森,吴宸晖(1)
不同尺度下水力诱发空泡溃灭特性研究进展

..... 葛 杰,徐 伟,王秀礼,郭文卓,赵媛媛(12)

上海市水资源量与可利用水资源量计算方法综述

...王一鸣,薛剑锋,乔红杰,顾圣华,刘曙光,娄 厦,杨中元(22)

· 研究探讨 ·

基于径流实验的产汇流机理研究与过程模拟

...许 钦,袁肖琦,陈 星,蔡 晶,金 晨,林晓清,周 宏(31)

河流水质变分数据同化研究 徐 健,赖锡军(37)

开闸时间对混流泵停机过程瞬态水力特性的影响研究

..... 陈会向,

吴伟松,王楚怡,冯建刚,黄富佳,夏臣智,阚 闾,徐 辉(42)

深厚覆盖层上面板坝加速度响应空间分布特性研究

..... 邹德高,唐 川,屈永倩,冉从勇(51)

长江流域山区暴雨洪水的多因素驱动机制

..... 王靖凯,余甜雪,李纪宇,叶 盛,冉启华(58)

刚性植被斑块分布形式对明渠水流特性的影响

..... 李国豪,李书芳,张景洲,于子斌,周 正(64)

基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统

..... 李鹏程,秦 臻,黄波林,董星辰,秦盼盼,张 鹏(73)

· 工程技术 ·

基于非结构化网格的地表水流和管网水流双向动态耦合模型

开发 陈同庆,陈家宇,王明娜,张庆河(80)

纳米添加剂对触变泥浆减阻效果影响的试验研究

...金棋武,杨 讷,夏 伟,张 军,陈 超,陈超维,王 伟(88)

基于 Kriging 代理模型优化算法的堆石坝参数反演方法

..... 顾 克,费香泽,刘佳龙,张 琰(95)

乌东德和白鹤滩水库蓄水后溪洛渡库区水温变化趋势分析

..... 唐玉川,张 勇,赵忠伟,王晓婷,谢长江(102)

大型立交地涵上下游连接段底坡坡比对其水力特性的影响

...曹 伽,林青炜,王 辉,陈 武,唐立模,屈一晗,曾 清(110)

基于数字孪生的水下挖掘智能引导与作业质量控制方法

..... 王子健,刘东海,黄 涛,孙晨阳(121)

电网负荷频繁波动下水电站负荷实时调整策略研究

..... 方国华,任旭东,颜 敏(129)

黄河三门峡水库 摄影:孟 凯(封面)

CONTENTS

Historical process and future prospects of river and lake management in China	<i>Ju Maosen, et al</i> (1)
Research progress on characteristics of hydrodynamic-induced cavitation bubble collapse at different scales	<i>Ge Jie, et al</i> (12)
A review of methods for calculating water resources and available water resources in Shanghai	<i>Wang Yiming, et al</i> (22)
Research on runoff generation and concentration mechanisms and process simulation based on runoff experiments	<i>Xu Qin, et al</i> (31)
Research on variational data assimilation for river water quality modelling	<i>Xu Jian, et al</i> (37)
Research on influence of valve opening time on transient hydraulic characteristics of a mixed-flow pump during shutdown process	<i>Chen Huixiang, et al</i> (42)
Study on spatial distribution characteristics of acceleration response of CFRD on deep overburden	<i>Zou Degao, et al</i> (51)
Multi-factor driving mechanisms of rainstorm-induced floods in mountainous areas of the Yangtze River Basin	<i>Wang Jingkai, et al</i> (58)
Effects of rigid vegetation patch distribution patterns on open-channel flow characteristics	<i>Li Guohao, et al</i> (64)
PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves based on multi-lens array camera	<i>Li Pengcheng, et al</i> (73)
Development of a bidirectional dynamic coupled surface water flow and pipe network flow model based on unstructured grids	<i>Chen Tongqing, et al</i> (80)
Experimental study on effect of nano-additives on drag reduction performance of thixotropic slurry	<i>Jin Qiwu, et al</i> (88)
Parameters inversion method for rockfill dams based on Kriging surrogate model optimization algorithm	<i>Gu Ke, et al</i> (95)
Analysis of water temperature variation trends in Xiluodu Reservoir area after impoundment of Wudongde and Baihetan reservoirs	<i>Tang Yuchuan, et al</i> (102)
Influence of bottom slope ratio of upstream and downstream connecting sections on hydraulic characteristics of large interchange culverts	<i>Cao Jia, et al</i> (110)
Method for intelligent guidance and operational quality control of underwater excavation based on digital twin technology	<i>Wang Zijian, et al</i> (121)
Real-time load adjustment strategy for hydropower stations under frequent grid load fluctuations	<i>Fang Guohua, et al</i> (129)

Sponsor: Hohai University

Editor & Publisher: Editorial Board of Advances in Science and Technology of Water Resources, Hohai University

Editors-in-Chief: Zheng Jinhai, Su Huaizhi

ISSN 1006 – 7647 **CN** 32 – 1439/TV

Address: 1 Xikang Road, Nanjing 210098, P. R. China

E-mail: jz@ hhu. edu. cn

http: //jour. hhu. edu. cn

Distributor: China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100048, P. R. China)

Issue Code: BM2740 **CODEN:** SSKJAT

我国河湖管理发展历程与未来展望

鞠茂森^{1,2}, 吴宸晖³

(1. 河海大学河长制研究与培训中心; 2. 河海大学商学院; 3. 南京市秦淮河河道管理处)

摘要:综合运用历史分析、政策文本研究与实践案例考察,系统分析了我国河湖管理的历史演进脉络和新时代改革创新举措,总结了新时代河湖管理的经验,应用生态系统服务、可持续发展、协同治理、公众参与等理论展望了我国河湖管理的转变方向与实现路径。研究表明,我国历来重视河湖管理事业的发展,现阶段在新发展理念和习近平总书记关于河湖管理的重要论述指导下,推动了河湖长制的落实、国家江河战略与国家水网的实施、美丽幸福河湖的创建,形成了适应新时代河湖管理改革的经验;坚持习近平生态文明思想引领、发挥举国体制办大事的优势、充分发挥河湖长制的作用、始终坚持系统治理的观念、持续加强河湖监管体系建设、充分加强新技术的应用。新时代河湖管理需实现从河湖工程建设为主向河湖资源配置为主、从河湖开发利用向河湖生态复苏、从政府管理河湖为主向全社会参与管理河湖、从关注河湖健康向美丽幸福河湖建设、从传统河湖管理向生态产品价值实现等五个转变,以期进一步提升河湖管理效能,实现人与自然和谐共生、河湖功能永续利用。

关键词:河湖管理;历史演进;新发展理念;河湖长制;美丽幸福河湖;生态产品价值

Historical process and future prospects of river and lake management in China//Ju Maosen^{1,2}, Wu Chenhui³
(1. *Research and Training Center for River Chief System, Hohai University*; 2. *Business School, Hohai University*; 3. *Nanjing Qinhuai River Management Office*)

Abstract: This paper employs historical analysis, policy text research, and practical case studies to systematically examine the historical evolution of river and lake management in China, as well as the reform and innovation measures adopted in the new era. It summarizes the experiences gained from river and lake management practices in the new era and, by applying theories such as ecosystem services, sustainable development, collaborative governance, and public participation, proposes the transformation directions and implementation pathways for river and lake management in China. Research indicates that China has always attached great importance to the development of river and lake management. Currently, guided by the new development philosophy and General Secretary Xi Jinping's important discourses on river and lake management, China has promoted the implementation of the River and Lake Chief System, the national strategy for major rivers and the national water network, and the creation of Beautiful and Happy Rivers and Lakes. These practices have collectively shaped a set of reform experiences suited to the new era in river and lake management: adhering to the guidance of Xi Jinping's ecological civilization thought, leveraging the advantages of the national system for accomplishing major tasks, fully utilizing the role of the River and Lake Chief System, consistently upholding the concept of systematic governance, continuously strengthening the river and lake supervision system, and vigorously enhancing the application of new technologies. In the new era, river and lake management needs to achieve five major transformations: from focusing primarily on river and lake project construction to emphasizing river and lake resource allocation, from river and lake development and utilization to ecological rejuvenation, from government-dominated management of rivers and lakes to societal participation in management, from focusing on river and lake health to the construction of Beautiful and Happy Rivers and Lakes, and from traditional river and lake management to the realization of the value of ecological products. These transformations aim to further enhance the effectiveness of river and lake management, achieve harmonious coexistence between humans and nature, and ensure the sustainable utilization of river and lake functions.

Key words: river and lake management; historical evolution; new development philosophy; River and Lake Chief System; Beautiful and Happy Rivers and Lakes; value of ecological products

基金项目:江苏省水利科技项目(2023015)

作者简介:鞠茂森(1967—),男,研究员,博士,主要从事工程项目管理、河湖管理和河湖长制研究。E-mail:maosenju@hhu.edu.cn

我国幅员辽阔、水系发达^[1],繁盛的文明史在很大程度上是一部与水共生、治水用水的历史^[2]。从古代的大禹治水、李冰治水^[3],到现代的长江三峡、南水北调工程建设,中华民族的智慧与汗水始终贯穿着对河湖资源的利用与管理^[4],历朝历代关于城市的选址、建设和迁移也大多与河湖的变迁紧密相关^[5],例如北京古代河湖水利体系规划设计中,通过健全完善水利格局、调蓄机制、雨洪蓄排能力、水利工程设计来满足城市运行的多元化需求^[6]。然而,随着快速的工业化和城镇化进程,我国河湖长期面临水资源短缺、水污染加剧、水生态损害等严峻挑战^[7],这推动了传统河湖管理理念与模式的不断革新。

立足新时代,以“创新、协调、绿色、开放、共享”为核心的新发展理念为推进生态文明建设提供了根本遵循^[8],习近平总书记关于河湖管理的重要论述为河湖管理现代化注入了全新动力,我国河湖管理理念正在新发展理念和“两山”理论的指导下不断演进^[9]。河湖长制的创新实践、国家江河战略与国家水网的实施、美丽幸福河湖的建设等一系列举措全面推行^[10],标志着我国河湖管理从传统的以开发利用为主转向保护与治理并重、人与自然和谐共生的新阶段^[11]。

全面推行河湖长制是贯彻新发展理念、建设美丽中国的重大战略^[12],可从加强治理体系建设、强化治理成效落实以及推进可持续发展“三步走”战略路径持续推进生态文明建设^[13]。相较历史上各朝各代职能较为单一的“河长”^[14],当今河湖长的任务增加、功能强化,需要协调水利、环保、城建、农业等多部门工作,河湖管理的整体性、统筹性和协调性逐步提升^[15],但在河湖长制综合管理数字化平台建设方面存在业务协同能力不足、数据共享水平不高、监督考核落实不到位等困境^[16]。同时,随着国家江河战略与国家水网建设的推进,我国已形成“四横三纵”天然水系与人工调水耦合互联的主骨架和大动脉。一方面,与传统水利基础设施相比,国家水网更加系统、协同、绿色、智能^[17],供水质量及保障程度、洪旱灾害防御能力等均得到有效提升^[18];另一方面,国家江河战略在促进我国南北方共同富裕中也发挥着重要作用^[19],要充分发挥长江经济带发展、黄河流域生态保护和高质量发展两大国家战略的高效联动。但也需要重视现阶段水网工程在规划设计、建设与运行管理中存在的水资源统筹调配能力不足、水网工程互联互通和协同融合不彻底、工程管理体制机制不健全、数字化和智慧化程度偏低等问题^[20]。此外,全国各地都在全面推进美

丽幸福河湖建设,已由试点探索、示范引领进入系统谋划、全面推进阶段^[21]。其中,美丽河湖强调构建优美的水生态环境,幸福河湖则更注重人与自然的和谐共生,既包含河湖自身的“幸福”,也包括河湖带给人类的幸福,是在美丽河湖基础上的迭代升级^[22],因此,建构河流伦理也是其中的重要议题^[23]。当下,河湖生态产品的内涵及价值实现研究也正在全面开展,借鉴生态系统服务功能属性的分类方法可划分为物质供给类、调节服务类和文化服务类^[24],其由地方经验上升为国家行动是经济增长问题源流、社会进步政治源流、可持续发展政策源流三个方面共同推动的结果^[25]。

从各类研究成果及实践成效中可以看到,我国河湖管理工作已取得显著进展。然而,多数研究侧重于特定制度或某一时段的分析,缺乏将历史演进、新时代改革创新与未来展望贯通的系统性分析框架,对于新时代河湖管理实践中形成的、具有中国特色的发展经验尚未提炼,也缺乏结合相关理论来研究总结我国河湖管理未来的转变方向。因此,本文系统梳理了我国河湖管理的历史演进与新时代改革举措,总结了新时代河湖管理的经验,展望了未来我国河湖管理的转变方向与实现路径,以期进一步提升河湖管理效能,以水资源可持续利用支撑经济社会高质量发展,助力谱写人水和谐、绿色发展的新时代篇章。

1 我国河湖管理的历史演进与新时代改革创新

1.1 古代河湖管理

我国江河湖库众多,自古以来国家就高度重视水利事业,历代设有专门管理机构,颁布相关法规,兴建大量水利工程^[26]。河湖管理体制也随经济社会发展与治水实践丰富而不断演进^[27]。

a. 体系初建(尧舜至汉):早期以大规模组织治水工程建设为特征^[28]，“事权统一”理念在此过程中初现。尧舜时期,大禹受命担任司空治水,改堵为疏并划分责任区,已蕴含系统工程与属地管理的雏形。春秋战国时期,李冰主持修建都江堰代表了地方郡守主导大型综合性水利工程的模式形成。秦设都水长、丞并制定《田律》,标志着水政管理被纳入国家法律体系。汉代的关键演进在于尝试统一事权,成帝始设河堤使者专责黄河,突破了此前水官分属不同部门的格局;东汉王景治河的成功,进一步证明了事权统一对大规模流域治理的有效性。

b. 机构专设(魏至宋):此时期,河湖管理在机构专业化设置上取得突破。曹魏在尚书台下始设

“水曹”,置水部郎^[29],成为中央首个专门水利机构。西晋升格为“都水台”,机构独立性和职能均有所增强。隋唐设立工部水部司与都水监并行,水部司掌政令法规,都水监负责工程实务,形成了行政与执行相对分离的体系。宋朝则经历了从“财政管理水权”到“水权独立管理”的转变,至仁宗嘉祐三年复置都水监,下设判监事、同判监、丞、主簿等职^[30],这一举措旨在通过专业化与制度化管理来应对当时日益严峻的黄河水患问题,但受宋代冗官问题影响,水政管理存在机构重叠、权责分散、水权不专的问题,行政运行效率较低。金朝治河机构承袭宋制,中央政府设都水监,并在尚书省下设工部,同时颁布《河防令》一改宋代水事管理混乱的弊病,河湖管理的法治化程度提升。

c. 事权集中(元至清):随着实践的深化和需求的提升,河湖管理体系朝着高度集权化、流域化方向发展。元朝进一步提高了都水监品秩,但职权分散。明朝由漕运都督兼理河道,始设总理河道,职权逐步集中。清朝将此制度推向顶峰,设立专业的河道总督衙门^[31],下设道、厅、汛、堡四级管理机构,形成了垂直、密集的流域管理体系。咸丰五年后,河务虽改归地方巡抚兼管,但此前的体系已具备现代流域机构的雏形,为近代河湖管理奠定了基础。

纵览历史,古代河湖管理体制与机构设置为当时治水兴国提供了制度保障,始终围绕“提高专业化水平”和“强化事权集中”两大核心展开,推动了都江堰、大运河、坎儿井等一系列重大水利工程的建设,其不仅是历史上河湖管理的重要成果,更作为活态文化遗产延续至今,依然发挥着重要作用。

1.2 新中国成立后的河湖管理机构与相关制度

新中国成立后,河湖管理开启了系统化、法治化的建设进程。国家通过设立专门机构、构建流域管理体系、出台法律法规和规章制度、丰富监管内容、创新体制机制^[32],为实现国家水安全和水资源可持续利用提供了坚实保障:①1949年10月设中华人民共和国中央人民政府水利部,后经一系列合并重组,最终于1988年4月第七届全国人民代表大会第一次会议通过了国务院机构改革方案,确定成立水利部,并于当年7月重新组建并开始运行,负责全国江河湖泊的管理,后在2018年水利部专门设立河湖管理司,进一步加强对全国河湖的管理;②1949年6月至1990年2月先后成立黄河水利委员会、长江水利委员会、珠江水利委员会、海河水利委员会、松辽水利委员会、太湖流域管理局、淮河水利委员会等七大流域管理机构,流域机构下设专门的河湖管理部门来具体负责本流域的一系列河湖管理工作;

③陆续出台相关法律法规,如1988年的《中华人民共和国水法》确立了水资源属于国家所有以及统一管理、分部门管理相结合的基本制度,同年发布的《中华人民共和国河道管理条例》为加强河道管理、保障防洪安全、发挥江河湖泊的综合效益提供了直接的法律依据,逐步形成以中央立法为纲领、地方立法为补充的完整规范框架,构建了涵盖水资源、水环境、流域治理、防洪抗旱等多方面的河湖管理法体系;④大规模开展长江三峡、黄河小浪底、南水北调、引滦入津等一批水利基础设施建设,开发利用河湖资源,为国民经济和社会区域协调发展提供了坚实的水资源保障;⑤不断加强河湖监管,如1992年的《河道管理范围内建设项目管理的有关规定》建立了涉河建设项目审批许可制度以从源头规范河道开发建设活动,2004年的《入河排污口监督管理办法》建立了入河排污口设置审批、登记以及相关监督管理体系以控制入河污染物排放,2014年的《关于加强河湖管理工作的指导意见》明确了新时期河湖管理保护的重点任务以实现传统管理向现代管理、粗放管理向精细管理转变,一系列政策文件的出台显著提升了河湖监管的制度化、规范化和精细化水平;⑥不断探索河湖管理体制机制,水利部基于浙江长兴、云南洱源、江苏无锡等地探索河湖长制的经验^[33],于2014年9月印发了《关于开展河湖管护体制机制创新试点工作的通知》,通过有组织的试点完成了对地方创新的认证、对核心制度的定型、对潜在风险的排查,从而为河长制在2016年后迅速在全国范围内全面建立并有效实施奠定了坚实基础。

1.3 新发展理念下的河湖管理改革

党的十八大以来,创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念与习近平生态文明思想的相继确立^[34],关于长江保护与绿色发展、黄河流域生态保护和高质量发展、大运河文化带建设等一系列重要论述的相继发表,为河湖管理提供了根本性的思想指引。从现实挑战来看,原有河湖管理存在职能分散、责任虚化、保护与发展失衡等问题,导致水灾害、水生态破坏等挑战叠加。新发展理念下的河湖管理改革,正是为了破解这些系统性难题,通过制度重构与战略提升,将理念转化为可持续的河湖管理实践,为深化河湖长制、落实国家江河战略与国家水网建设、建设美丽幸福河湖等注入新动能,既是回应“河川之危、水源之危是生存环境之危、民族存续之危”的必然选择,也是践行“治水即治国,治水之道是重要的治国之道”的战略担当。新发展理念下的河湖管理改革,是在我国生态文明建设进入关键时期、传统治水模式难以适应高质量发展需要的背景下展开

的深层变革。

新发展理念通过制度创新、战略升级、目标迭代的三维发力,构建起全方位、多层次的改革体系。一是创新发展引领制度变革,以河湖长制破解“九龙治水”困局。针对传统河湖管理责任分散、协同不足的痛点,新发展理念强调以制度创新激发治理效能。习近平总书记于2016年10月、2017年11月先后主持召开中央全面深化改革领导小组第二十八次会议、十九届中央全面深化改革领导小组第一次会议,审议通过了《关于全面推行河长制的意见》《关于在湖泊实施湖长制的指导意见》,在2017年新年贺词中发出“每条河流要有‘河长’了”的动员号令,全国超120万名河湖长履职上岗,建立了一系列的河湖管理制度,河湖面貌发生了显著改善^[35]。二是协调发展与开放发展重塑战略布局,以国家江河战略与国家水网建设筑牢水安全根基。为破解区域发展不平衡、水旱灾害防御能力不足的难题,新发展理念突出协调(区域统筹)和开放(内外联动)。习近平总书记于2021年10月首次明确提出国家“江河战略”,这是对长江经济带发展战略、黄河流域生态保护和高质量发展战略的提升和扩展^[36]。全面实施国家“江河战略”,需要健全完善国家水网布局^[37]。2021年至今,国家相继发布了《关于实施国家水网重大工程的指导意见》《“十四五”时期实施国家水网重大工程实施方案》《国家水网建设规划纲要》《关于全面推进江河保护治理的意见》,先后部署推进引汉济渭、黑龙江林海水库等百余项重大水利工程,并积极参与全球水治理,加强与周边国家的水资源合作,标志着河湖管理从单一流域迈向全域统筹管理新阶段,水安全保障能力进一步提升^[38]。三是绿色发展与共享发展驱动目标迭代,以美丽幸福河湖践行以人民为中心的价值导向。为满足人民群众对高品质生态环境的需求,2019年习近平总书记提出“让黄河成为造福人民的幸福河”。新发展理念强调绿色(生态优先)和共享(成果普惠)。当前河湖长制工作已进入美丽幸福河湖创建阶段^[39],国家层面上,水利部商财政部同意,于2022年起每年安排中央水利发展资金遴选出若干河湖,截至2025年总计遴选出122条(个)河湖,推动实现“河安湖晏、水清鱼跃、岸绿景美、宜居宜业”的幸福河湖建设目标。水利部河长办于2023年7月印发了《幸福河湖建设成效评估工作方案(试行)》,以科学评价幸福河湖建设成效。生态环境部等七部门于2025年5月联合印发了《美丽河湖保护与建设行动方案(2025—2027年)》,同年7月财政部、生态环境部评审出10个项目作为2025年中央

财政美丽河湖保护与建设项目。全国各地纷纷掀起全域美丽幸福河湖建设热潮^[40],为让人民群众共享治理成果、全面推进美丽中国建设提供了有力支撑。

2 新时代河湖管理的发展经验

2.1 坚持习近平生态文明思想引领

习近平生态文明思想为河湖管理提供了根本遵循和行动指南。这一思想体系以“绿水青山就是金山银山”为核心,通过“山水林田湖草沙是生命共同体”确立了系统性治理思维,以“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”十六字治水方针构建了科学治水框架,推动了治水管水方式从粗放向集约、从局部向系统、从行政主导向多元协同的重大转变。河湖长制的全面推行、国家“江河战略”的制定实施,正是习近平生态文明思想在治水实践中的生动体现,引领河湖管理走出了一条以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展新路径,为实现美丽中国目标和全球水治理贡献了中国智慧。

2.2 发挥举国体制办大事的优势

坚持党的集中统一领导,充分发挥我国特色社会主义制度能够集中力量办大事的显著优势,是推动河湖管理不断取得重大成效的根本保证。在党中央的坚强领导下,通过强化政府引导、促进部门协同、鼓励群众参与,有效凝聚多方合力,成功破解了许多长期积累的河湖治理和管理难题。长江大保护、黄河流域生态保护和高质量发展、大运河文化带建设以及全国范围的河湖“清四乱”专项行动等一系列重大实践^[10],从构想到布局,从理念到实践,从试点到推广,均彰显出举国体制在统筹资源、整合力量、协调行动、突破瓶颈等各方面的强大推动力,为河湖治理体系和治理能力现代化提供了坚实支撑。以水利部组织的“清四乱”为例,近年来累计清理整治乱占、乱采、乱堆、乱建问题29.4万个,拆除违建15000多万 m^2 ,铲除非法围堤2万 km ,清理垃圾超过1亿 t ,恢复连通湖泊水域面积1300多 km^2 ,清理妨碍河道行洪的高秆作物、阻水片林9000 hm^2 ,为河湖管理提供了有效保障。

2.3 充分发挥河湖长制的作用

河湖长制构建了以党政领导负责制为核心的省市县乡村五级河湖长责任体系,实现了一条河湖、一名负责人、一套方案的精准管理,是我国水环境治理领域的重大制度创新,有效破解了“多头治水”难题。通过建立“河长制+”协作机制强化了水利、环保、住建等部门联动与执法合力,通过推行跨界联合河长制实现了流域统筹协调治理^[41],通过创新民间河长模式构建了政府主导、公众参与的共治格局。

实践表明,河湖长制推动了江河湖泊面貌实现历史性改善,全国地级及以上城市黑臭水体基本消除,2025年全国地表水Ⅰ~Ⅲ类水水质断面比例较2016年提高了23.6个百分点,展现了制度优势转化为治理效能的成功路径。

2.4 始终坚持系统治理的观念

坚持系统观念,统筹推进国家水网建设,聚焦“国家-区域-基层”三级架构,打造了坚实的水利基石。在国家层面,构建国家水网主骨架和大动脉,如通过持续推进南水北调后续工程高质量发展,实施重大引调水工程,优化水资源战略配置格局,加快实现“系统完备、安全可靠,集约高效、绿色智能,循环通畅、调控有序”的目标;在区域层面,系统推进省市县级水网建设,促进国家骨干水网与区域水网互联互通,打通水网的“最后一公里”,提升区域水资源保障能力与防洪排涝效能;在基层层面,积极推进农村供水高质量发展,加快落实农村供水“3+1”标准化建设和管护模式,保障农村饮水安全,赋能乡村振兴,使得国家水网建设成果惠及广大人民群众,为经济社会高质量发展提供坚实的水安全保障。

2.5 持续加强河湖监管体系建设

我国对水资源实行流域管理和行政区域管理相结合的管理体制,正在打破以往重建设、轻管理,重治理开发、轻河湖保护观念的影响,河湖监管能力逐渐增强。一方面,持续加强河湖监管的法律法规与制度建设,先后颁布了《太湖流域管理条例》《中华人民共和国长江保护法》《中华人民共和国黄河保护法》;另一方面,在岸线管理、采砂管理、涉河建设项目管理、生态流量管理、河湖安全保护管理、取水管理、排水管理、河湖管理范围划定等方面出台了一系列政策文件和规范标准,逐步构建起现代化河湖监管体系。例如,水利部于2025年7月部署实施了河湖库一体化监测感知体系建设三年行动,应用卫星遥感、视频监控、无人机、北斗等技术强化河湖库水域岸线空间管控;水利部于2025年10月发布了SL/T 852—2025《河湖管理范围划定技术规范》,进一步规范了河湖管理范围划定的技术要求和工艺流程;水利部于2025年12月发布了SL/T 793—2025《河湖健康评价规范》,进一步规范了河湖健康评价工作程序和方法。随着各类最新国家要求的相继实施,河湖监管要求不断提高、制度体系日益健全、社会认知逐步增强,在法律、制度、机制、政策等多维度全面保障了河湖监管工作取得实效。

2.6 充分加强新技术的应用

大力发展水利新质生产力,深入推进智慧水利建设,充分加强新技术的应用,已成为新时代河湖管

理能力提升的核心驱动力。一方面,增强数字赋能和智慧化应用水平,充分应用人工智能、物联网技术、数字孪生技术、遥感卫星等新技术,充分利用河湖长制信息管理平台,推广智能化监测和管理手段,实现河湖管理工作从前端感知、后台分析、辅助决策全过程智能化现代化管理,有效解决河长履职监管和河湖数据整合等难题;另一方面,遵循“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”原则,围绕数字化、网络化、智能化的核心策略,通过构建数字化应用场景、实施智慧化模拟分析、实现精准化决策支持,全面加强算据、算法、算力建设与发展,构建具有预报、预警、预演、预案功能的智慧水利体系,为河湖长治久安注入创新动能。

3 我国河湖管理的未来展望

当前,河湖管理仍面临水资源短缺、水域岸线管理粗放、水污染防治不到位、水环境治理效果仍需提升、水生态脆弱、执法监管不力等问题。新时代要全面打造河湖管理现代化体系,落实好五个转变,最终实现河湖功能永续利用,奏响幸福河湖新篇章。

3.1 从河湖工程建设为主向河湖资源配置为主转变

过去河湖管理关注防洪灌溉等需求,大规模建设大坝、泵站等水利设施,在灌溉与农业发展、防洪与水利安全、经济发展和社会安定等方面发挥了重要作用,但同时也改变了河湖环境自然面貌,可能致使生态环境遭到破坏。生态系统服务理论强调自然系统对人类福祉的直接与间接贡献^[42],在河湖管理领域则要求从单一索取水资源的工程思维,转向维护和提升河湖生态系统的整体性、多样性与可持续性,以保障供给、调节和文化等多类服务功能。该过程中,工程建设是手段,优化河湖资源配置是目的。新发展理念下开展国家水网等工程建设,本质上是将水资源作为一种战略性要素,通过工程手段进行战略性调配^[43],是“全国一盘棋”思想在水资源领域的体现。且随着经济社会的发展,人民群众对水生态环境的需求日益增长,必须高度关注水生态和水环境质量。因此,新时期需要从关注河湖工程建设向河湖资源的优化配置与综合管理转变,深刻认识水资源的开发与生态环境保护的辩证关系。

水利部强调,要加快发展水利新质生产力,慎终如始抓好水旱灾害防御,全力推进国家水网重大工程建设。中共中央、国务院印发的《国家水网建设规划纲要》明确到2035年基本形成国家水网总体格局,响应了复杂水问题对系统性、适应性治理的现实需要,体现了“水资源-经济社会-生态环境”耦合系统协调发展的观念,标志着从传统的以工程建设为

中心转向以空间均衡与生态优先为原则的河湖资源配置模式。立足纲要导向,提出三方面转变思路:①把河湖资源配置纳入中国式现代化建设全过程,加强河湖资源有效配置研究,促进工农业生产和人民生活以及生态用水的协同;②全面深化国家水网建设,作为国之重器,系统解决我国复杂水问题;③全面推进河湖管理现代化,充分利用河湖长制信息管理平台^[44],实现河湖监测空天地水工一体化,积极构建智慧河长、智慧河湖、数字孪生流域和数字孪生工程,进一步提升河湖资源配置效率、公平性与生态可持续性。

3.2 从河湖开发利用向河湖生态修复转变

过去河湖开发主要侧重于经济利益,轻视了生态修复的重要性,这种以资源消耗和工程干预为主要手段的开发利用方式不具有可持续性,河湖作为典型的公共资源易因过度开发陷入水资源过度取用与浪费、水污染事件频发、水生态空间萎缩等公地悲剧现象^[45]。可持续发展理论强调水-经济-生态的协调发展^[46],明确河湖健康生态是高质量发展的基础;恢复生态学理论强调恢复河湖的结构完整性与功能韧性^[47],逐步推进从污染治理到生物多样性提升的系统性修复;近自然理念强调依托河湖自我修复能力开展生态化改造^[48]。这些理论均指明了以生态系统整体健康为核心的治理范式重构势在必行,其动因既源于国内生态文明建设的现实需要,也受到全球生态治理趋势的影响,如日本琵琶湖开展的连通水体、恢复湿地、重建滨岸带植被等多维度生态修复措施^[49],欧洲莱茵河兼顾生态保护、社会需求、经济发展和文化繁荣开展的综合治理^[50]。因此,当下复苏河湖生态具有重要意义。

2021年6月,水利部部长在“三对标、一规划”专项行动总结大会上,提出“复苏河湖生态环境”,同年12月,水利部印发《关于复苏河湖生态环境的指导意见》,提出了复苏河湖生态环境的主要任务,明确了系统性生态修复的重要性。结合文件部署,需要加强以下五个方面的工作:①推进解决河道断流、湖泊萎缩问题,实施河湖生态环境复苏行动,强化河湖水量、水质、水生态监测与分析;②保障河湖生态流量,加强江河流域及重大调水工程水资源调度,推进河湖重要控制断面的监测预警能力建设,着力培育水权交易、生态补偿等市场化平台^[51];③加强河湖保护,完善河湖管理范围划界成果,强化岸线规划约束,严格涉河建设项目和活动管理;④加快地下水超采综合治理,实行地下水取水总量、水位控制,建立地下水储备制度,加强地下水监测与分析评价;⑤科学推进水土流失综合治理,全面强化人为水

土流失监管,健全水土保持政策体制机制。

3.3 从政府管理河湖为主向全社会参与管理河湖转变

过去主要是政府采用行政手段管理河湖,能够调解不同利益主体之间的冲突、统筹区域内的河湖管理、迅速集中资源针对污染问题实施治理措施,但在制定政策、工程建设、河湖运营管理方面忽视了公众的参与,一定程度上导致了决策与实际需求脱节以及执行效率低下的现象。协同治理理论强调企业、高校、科研院所、公众等多元主体开展互动合作与资源共享^[52],其并非弱化政府责任,而是形成超越单一行政体系的治理合力。公众参与理论则进一步强调要赋予利益相关者知情权、监督权等权利^[53],以提升河湖管理相关决策的科学性与执行认同感。国内外已有较多公众参与河湖管理的方式,例如北美五大湖的合作模式^[54],推动公众等利益相关者协同治理;又如澳大利亚墨累-达令流域的跨界协同管理模式^[55],借助市场机制激活水资源的经济价值;再如浙江省德清县的民间河长模式和生态绿币机制^[56],将群众的治水热情转换成可量化的实际收益。这些举措都指向了河湖管理要向全社会参与管理河湖转变,深层目标是形成政府依法监管、市场有效激励、社会积极监督、公众自觉守护的现代化河湖管理共同体。

我国在法治层面已为公众参与提供了保障,例如《环境信息公开办法(试行)》《中华人民共和国环境保护法》《环境保护公众参与办法》《环境影响评价公众参与办法》《水污染防治行动计划》等法律法规中均强调了要强化公众参与和社会监督。基于现有法治支撑,应着力做好以下工作:①提高公众参与能力,加强公众与高校等相关培训单位的交流与合作,加强各类专业性、组织能力和执行能力较强的志愿组织引领,通过能力建设提高参与意愿;②落实公众全过程参与,保障公众协同参与决策制定与实施,鼓励公众参与河湖联合巡查工作,加强河长制公示牌、微信公众号等监督途径的建设^[57],在考核问责机制中引入公众满意度指标;③构建公众长效参与机制,完善水环境信息公开机制、公益诉讼机制、反馈机制、激励机制,充分运用市场机制,激发社会资本活力,形成多元投入的河湖治理新格局。

3.4 从关注河湖健康向美丽幸福河湖建设转变

过去一个阶段国家推行河湖健康评价、生态河湖状况评价,这些评价体系在河湖水环境改善、水生态恢复、水景观提升等方面取得了明显成效^[58-59],但都停留在河湖本身的健康层面,在一定程度上忽视了河湖与人类社会之间的深刻关系,当前人民群

众对河湖的期待已从“清水绿岸”转向“亲水体验”。人类福祉视角下的生态系统服务价值评估理论通过对河湖景观、休闲空间、文化底蕴等非使用价值的评估^[60],提供了将“绿水青山”量化、可视化为“金山银山”的方法路径,揭示了河湖健康仅为河湖管理的基线,其终极价值在于持续增进民生福祉,当下美丽幸福河湖建设直接呼应了人民对美好生活的向往中日益增长的亲水、乐水需求^[61-62]。因此,从关注河湖健康到美丽幸福河湖建设转变,绝非简单的评价指标扩充,而是一场以人民为中心的价值重构与实践升级^[63],响应中国式现代化对“人与自然和谐共生”的核心要求,满足高质量发展和美丽中国建设的现实需要。

水利部、财政部、自然资源部、交通运输部、农业农村部、国家林草局于2024年12月联合印发《关于全面推进幸福河湖建设的意见》,生态环境部、国家发展和改革委员会、财政部、住房城乡建设部、水利部、农业农村部、国家林业和草原局于2025年5月联合印发《美丽河湖保护与建设行动方案(2025—2027年)》,从政策层面确立了以高品质河湖生态环境支撑流域经济社会高质量发展的战略目标。为全面落实水利部、生态环境部关于幸福河湖和美丽河湖建设任务,需要做到:①巩固水环境治理,提升入河排污口整治效能,加强生活污水、工业园区和农业面源污染防治;②深化河湖公园建设,加强河湖岸线分区管控,进一步提升水域岸线清洁水平和文化遗产保护利用水平,为人民群众提供河湖岸线无障碍通道和集游憩、休闲、文旅功能一体的滨水空间;③切实发挥河湖长制作用,完善美丽幸福河湖建设工作机制,为美丽幸福河湖建设提供有力法治保障和高水平科技支撑;④建设更多的美丽幸福河湖,成为老百姓家门口的诗和远方,为实现美丽中国建设奠定良好基础;⑤建构河湖伦理^[64],保证河湖的开发利用能满足当代人生活安全健康的需求、子孙后代的基本生存条件、河湖文化的赓续传承,主张恢复和重建河湖生态系统,实现人类与河湖和谐相处。

3.5 从传统河湖管理向生态产品价值实现转变

传统的河湖管理关注防汛抗旱、水资源配置等方面的内容,是人们生存和生活的基本需求,其价值体现为直接、可计量的社会经济保障。现阶段人民群众对水的需求正在从“有水用”转向“用好水”,已进入提供更多优质生态产品以满足人民日益增长的优美生态环境需要的攻坚期。然而,生态产品价值长期存在难以有效变现的问题,根本原因在于这类服务长期被视为公共物品,其价值未能通过市场机制有效显化、量化与流通^[65],导致保护者难获收益、

使用者无需付费,从而陷入“保护者愈贫、使用者愈滥、资源愈衰”的恶性循环。因此,国家大力推进生态产品价值实现,强调在保护生态的基础上更好地获得经济收益,通过GEP核算实现价值认知,推动河湖生态优势、资源优势向发展优势、经济优势转化,旨在解决传统模式下的发展动力问题,最终目标是实现生态保护、经济发展与社会进步的协同共赢,是对“两山”理论的生动实践。

党的二十届三中全会强调健全生态产品价值实现机制,国务院关于全国部分地区要素市场化配置综合改革试点实施方案中也提出要深入开展生态产品价值实现机制探索。围绕机制健全与试点探索要求,提出如下建议:①加强水生态产品的系统研究,建立河湖生态产品价值核算体系;②开展河湖生态产品价值转换的试点示范,不断总结经验,形成水经济模式^[66],促进流域经济社会发展;③统筹推进两手发力的模式,从上下游生态补偿、水权交易转让、绿色金融、文化旅游等多渠道,创新河湖生态产品价值转换路径;④把河湖生态产品价值实现纳入各级河长考核评估体系,让各级党政领导真正成为“绿水青山就是金山银山”的实践者和推动者。

4 结 语

河湖管理是维护国家水安全、支撑可持续发展的重要保障。本文基于“历史演进-新时代改革创新-未来展望”的分析框架,结合相关理论与实践案例,对我国河湖管理的发展历程进行了系统性总结研究,对新时代河湖管理的转变与需求进行了研判。现阶段,要在习近平总书记治水思想的指引下,坚持习近平生态文明思想引领,发挥举国体制办大事的优势,充分发挥河湖长制的作用,始终坚持系统治理的观念,持续加强河湖监管体系建设,充分加强新技术的应用,实现从河湖工程建设为主向河湖资源配置为主、从河湖开发利用向河湖生态复苏、从政府管理河湖为主向全社会参与管理河湖、从关注河湖健康向美丽幸福河湖建设、从传统河湖管理向生态产品价值实现等五个转变,以期建成人与自然和谐共生的美丽中国,为中华民族永续发展筑牢水脉根基。

参考文献:

- [1] 刘涛. 生态文明建设背景下水资源管理的重要性及实践举措分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 268-269. (Liu Tao. Analysis of water resource management practice under the background of ecological civilization construction[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 268-269. Chinese)
- [2] 毛乐, 鄢超云. 我国古代“以水喻教”思想及其根源

- [J]. 全球教育展望, 2021, 50(9): 32-45. (Mao Le, Yan Chaoyun. The thought of "Using Water as Metaphor for Education" in ancient China and its root [J]. Global Education, 2021, 50(9): 32-45. (in Chinese))
- [3] 彭邦本. 上古蜀地水利史迹探论[J]. 四川大学学报(哲学社会科学版), 2007(6): 87-96. (Peng Bangben. On the historical remains of water conservancy facilities in early Sichuan [J]. Journal of Sichuan University (Social Science Edition), 2007(6): 87-96. (in Chinese))
- [4] 李加林, 田鹏, 龚虹波, 等. 中国水利发展与治水思想的历史演变及其时代价值解析[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(3): 64-72. (Li Jialin, Tian Peng, Gong Hongbo, et al. Evolution and contemporary mission of China's water conservancy development and water management philosophy [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2025, 36(3): 64-72. (in Chinese))
- [5] 殷淑燕, 黄春长. 论关中盆地古代城市选址与渭河水文和河道变迁的关系[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2006, 35(1): 58-65. (Yin Shuyan, Huang Chunchang. On the connection between the location of the ancient towns in the Guanzhong plains and the alterations of the Weihe's hydrology and waterway [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2006, 35(1): 58-65. (in Chinese))
- [6] 周坤朋, 王崇臣, 秦红岭, 等. 北京古代河湖水利体系的规划思想和经验智慧[J]. 南方建筑, 2023(12): 11-18. (Zhou Kunpeng, Wang Chongchen, Qin Hongling, et al. Planning and empirical analysis of ancient rivers and lake conservation systems in Beijing [J]. South Architecture, 2023(12): 11-18. (in Chinese))
- [7] 王金霞, 张丽娟. 绿色转型背景下农业节水的政策演进、发展困境及破解对策[J]. 中州学刊, 2024(5): 24-31. (Wang Jinxia, Zhang Lijuan. Policy evolution, development dilemmas, and countermeasures for agricultural water conservation in the context of green transformation [J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2024(5): 24-31. (in Chinese))
- [8] 王广义, 罗闰升. 新质生产力发展的新阶段: 以发展绿色生产力推进美丽中国建设[J]. 理论探讨, 2024(5): 137-143. (Wang Guangyi, Luo Runsheng. A new stage in the development of new-quality productive forces: promoting the construction of a beautiful China through green productivity development [J]. Theoretical Investigation, 2024(5): 137-143. (in Chinese))
- [9] 王红瑞, 杜新龙, 姜欣, 等. 当代中国河湖管理理念变迁[J]. 人民长江, 2025, 56(10): 84-91. (Wang Hongrui, Du Xinlong, Jiang Xin, et al. Evolution of river and lake management concepts in contemporary China [J]. Yangtze River, 2025, 56(10): 84-91. (in Chinese))
- [10] 徐辉, 张劲松, 鞠茂森, 等. 深化河湖长制改革的认识与思考[J]. 中国水利, 2025(5): 44-51. (Xu Hui, Zhang Jinsong, Ju Maosen, et al. Understanding and reflections on deepening the reform of the river and lake chief system [J]. China Water Resources, 2025(5): 44-51. (in Chinese))
- [11] 王茹. 人与自然和谐共生的现代化: 历史成就、矛盾挑战与实现路径[J]. 管理世界, 2023, 39(3): 19-30. (Wang Ru. The modernization of harmonious coexistence between humanity and nature: historical achievements, contradictory challenges and realization paths [J]. Journal of Management World, 2023, 39(3): 19-30. (in Chinese))
- [12] 纪平. 贯彻新发展理念全面推行河长制[J]. 中国水利, 2016(23): 2. (Ji Ping. Implementing the new development philosophy and comprehensively promoting the River Chief System [J]. China Water Resources, 2016(23): 2. (in Chinese))
- [13] 田鸣, 张阳, 汪群, 等. 河(湖)长制推进生态文明建设的战略路径研究[J]. 中国环境管理, 2019, 11(6): 32-37. (Tian Ming, Zhang Yang, Wang Qun, et al. Study on the strategic route of the promotion on water ecological civilization construction by River (Lake) Chief System [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(6): 32-37. (in Chinese))
- [14] 李轶. 河长制的历史沿革、功能变迁与发展保障[J]. 环境保护, 2017, 45(16): 7-10. (Li Yi. History, function and development of River Chief System [J]. Environmental Protection, 2017, 45(16): 7-10. (in Chinese))
- [15] 唐见, 罗平安, 李晓萌, 等. 河湖长制下跨省河湖联防联控问题及完善建议[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 6-10. (Tang Jian, Luo Ping'an, Li Xiaomeng, et al. Joint prevention and control for trans-provincial rivers and lakes under the River Chief System: problems and improvement suggestions [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(3): 6-10. (in Chinese))
- [16] 丰慧, 王荣华, 卢婷, 等. 河湖长制综合管理数字化平台建设的现状、困境与展望[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 89-100. (Feng Hui, Wang Ronghua, Lu Ting. Current status, difficulties, and prospects of comprehensive management digital platform for river and lake chief system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 89-100. (in Chinese))
- [17] 郭旭宁, 刘为锋, 邢西刚, 等. 国家水网的理论内涵与战略策略关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1055-1063. (Guo Xuning, Liu Weifeng, Xing Xigang, et al. National water network theoretical connotation and its relationship between strategy and tactics [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1055-1063. (in Chinese))
- [18] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设

- 的机遇与挑战[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1608-1617. (Xia Jun, Chen Jin, She Dunxian, et al. Opportunities and challenges of national water network construction under changing environment[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1608-1617. (in Chinese))
- [19] 赵前前, 范巧. “江”“河”国家战略联动促进中国南北方共同富裕的机制研究[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2022, 50(1): 27-38. (Zhao Qianqian, Fan Qiao. Linkage mechanism of the national strategies of “the Yangtze River” and “the Yellow River” to promote common prosperity of Southern and Northern China[J]. Journal of Lanzhou University (Social Sciences), 2022, 50(1): 27-38. (in Chinese))
- [20] 王梦晗, 严登华, 张鑫, 等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 35-41. (Wang Menghan, Yan Denghua, Zhang Xin, et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 35-41. (in Chinese))
- [21] 童学卫, 李爱花, 徐伟. 新时代河湖保护治理视角下的幸福河湖建设理念和思路[J]. 中国水利, 2025(20): 53-57. (Tong Xuewei, Li Aihua, Xu Wei. Concepts and approaches of the happy rivers and lakes initiative from the perspective of river and lake protection and governance in the new era[J]. China Water Resources, 2025(20): 53-57. (in Chinese))
- [22] 靳卫齐, 杨萌, 王利军. 美丽河湖与幸福河湖关系探究[J]. 环境与发展, 2025, 37(1): 92-95. (Jin Weiqi, Yang Meng, Wang Lijun. Research on the relationship between beautiful rivers and lakes and happy rivers and lakes[J]. Environment & Development, 2025, 37(1): 92-95. (in Chinese))
- [23] 李国英. 建构河流伦理的中国实践[J]. 中国水利, 2024(21): 3. (Li Guoying. Constructing river ethics: practices in China[J]. China Water Resources, 2024(21): 3. (in Chinese))
- [24] 常跃, 张亮. 河湖生态产品内涵及价值实现研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(5): 117-121. (Chang Yue, Zhang Liang. Advancements in the conceptualization and value realization of river and lake ecosystem products: a review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(5): 117-121. (in Chinese))
- [25] 郭萌, 王怡. 生态产品价值实现机制的试点、扩散与创新: 基于国家政策和欠发达地区地方实践“互文”的逻辑考量[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2025, 25(4): 83-94. (Guo Meng, Wang Yi. Pilot, diffusion, and innovation of the mechanism for realizing the value of ecological products: based on the logical consideration of the “mutual textuality” between national policies and local practices in underdeveloped regions[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2025, 25(4): 83-94. (in Chinese))
- [26] 《完善水治理体制研究》课题组. 我国水治理及水治理体制的历史演变及经验[J]. 水利发展研究, 2015, 15(8): 5-8. (Research Group on Improving the Water Governance System. Historical evolution and experience of water governance and its institutional framework in China[J]. Water Resources Development Research, 2015, 15(8): 5-8. (in Chinese))
- [27] 张细兵. 中国古代治水理念对现代治水的启示[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 29-33. (Zhang Xibing. Inspiration of ancient Chinese water control thinking for modern water control[J]. Yangtze River, 2015, 46(18): 29-33. (in Chinese))
- [28] 刘冠美. “易”对中国治水实践的影响[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2012, 14(3): 53-56. (Liu Guanmei. Impact of Yi on the practice of flood control in China[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2012, 14(3): 53-56. (in Chinese))
- [29] 张剑光, 邹国慰. 六朝隋唐五代江南城市的市政和社会管理[J]. 江汉论坛, 2013(2): 92-103. (Zhang Jianguang, Zou Guowei. Municipal and social administration in Jiangnan Cities during the Six Dynasties, Sui, Tang, and Five Dynasties periods[J]. Jiangnan Tribune, 2013(2): 92-103. (in Chinese))
- [30] 王战扬. 宋代中央水政机构及其权力演变研究[J]. 中国史研究, 2023(1): 121-133. (Wang Zhanyang. Studies on the central water conservancy institution and its power evolution in the Song Dynasty[J]. Journal of Chinese Historical Studies, 2023(1): 121-133. (in Chinese))
- [31] 陈桦. 清代防灾减灾的政策与措施[J]. 清史研究, 2004(3): 41-52. (Chen Hua. Disaster defense and reduction policies in the Qing Dynasty[J]. The Qing History Journal, 2004(3): 41-52. (in Chinese))
- [32] 侯玉婷, 沈志忠. 近代中国水利事业建制化研究[J]. 中国农史, 2020, 39(1): 25-35. (Hou Yuting, Shen Zhizhong. Institutionalization of water conservancy cause in the period of the Republic of China[J]. Agricultural History of China, 2020, 39(1): 25-35. (in Chinese))
- [33] 陈涛. 不变体制变机制: 河长制的起源及其发轫机制研究[J]. 河北学刊, 2021, 41(6): 169-177. (Chen Tao. Constant system with changed mechanism: study on the origin and its mechanism of River Chief System[J]. Hebei Academic Journal, 2021, 41(6): 169-177. (in Chinese))
- [34] 俞海, 马竞越, 贺舒琪. 人与自然和谐共生现代化视域下的习近平生态文明思想研究[J]. 阅江学刊, 2025, 17(1): 48-60. (Yu Hai, Ma Jingyue, He Shuqi. Harmonious coexistence between man and nature in the view of modernization: a study on Xi Jinping's ecological civilization thought[J]. Yuejiang Academic Journal, 2025, 17(1): 48-60. (in Chinese))
- [35] 谷树忠. 河湖长制的实践探索与完善建议[J]. 改革, 2022(14): 33-41. (Gu Shuzhong. Practical exploration and improvement suggestions of the River and Lake Chief

- System in China [J]. Reform, 2022 (14): 33-41. (in Chinese)
- [36] 李肇桀,张旺,刘璐,等. 对国家“江河战略”的认识与思考[J]. 水利发展研究, 2023, 23 (1): 12-15. (Li Zhaojie, Zhang Wang, Liu Lu, et al. Understanding and thought on the national “River Strategy” [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23 (1): 12-15. (in Chinese))
- [37] 李云玲,宋秋波,刘为锋,等. 国家水网调度指挥体系构建思路与路径探讨[J]. 中国水利, 2025(11): 1-7. (Li Yunling, Song Qiubo, Liu Weifeng, et al. Discussion on the construction ideas and pathways of the national water network dispatching and command system [J]. China Water Resources, 2025(11): 1-7. (in Chinese))
- [38] 余运磊,曹一一,周琪,等. 国家水网对中国地级市水资源短缺的缓解效果评估[J]. 水利学报, 2025, 56(4): 531-540. (She Yunlei, Cao Yiyi, Zhou Qi, et al. Assessment the impact of the National Water Network on water shortages in Chinese prefecture-level cities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(4): 531-540. (in Chinese))
- [39] 陈健,孙锋,雍会,等. 幸福河湖建设现状与推进对策探讨[J]. 水利发展研究, 2025, 25(7): 36-40. (Chen Jian, Sun Feng, Yong Hui, et al. Discussions on the current situation and relevant suggestions of the building of happy rivers and lakes [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(7): 36-40. (in Chinese))
- [40] 鞠茂森,吴宸晖,李贵宝,等. 中国河湖长制管理规范化与标准化进展[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 1-8. (Ju Maosen, Wu Chenhui, Li Guibao, et al. Progress of management normalization and standardization of river and lake chief system in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 1-8. (in Chinese))
- [41] 刘伟,吴加伟,陈雯. 太湖流域水生态环境跨界协同治理路径研究:以苏嘉联合河长制为例[J]. 湖泊科学, 2025, 37(5): 1671-1682. (Liu Wei, Wu Jiawei, Chen Wen. Pathway of transboundary collaborative environmental governance in the Taihu Basin: a case study of Suzhou-Jiaxing joint river chief system [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(5): 1671-1682. (in Chinese))
- [42] 丁童慧,陈军飞,嵇娟,等. 水-能源-粮食纽带关系与生态系统服务耦合研究进展[J]. 生态学报, 2025, 45(6): 3032-3045. (Ding Tonghui, Chen Junfei, Ji Juan, et al. Research progress and prospect of the coupling between water-energy-food nexus and ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (6): 3032-3045. (in Chinese))
- [43] 钮新强,吴永妍,王磊,等. 高质量建设国家水网工程的思考与建议[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 108-119. (Niu Xinqiang, Wu Yongyan, Wang Lei, et al. Thoughts and suggestions on high-quality construction of national water network project [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 108-119. (in Chinese))
- [44] 朱德米. 中国水环境治理机制创新探索:河湖长制研究[J]. 南京社会科学, 2020 (1): 79-86. (Zhu Demi. Institutional innovation of water environmental governance: a study on China’s river and lake chief system [J]. Nanjing Journal of Social Sciences, 2020(1): 79-86. (in Chinese))
- [45] 王勇. 公众共用物视野下的河湖长制反思与完善[J]. 水利经济, 2025, 43(1): 78-84. (Wang Yong. Reflection and perfection of river and lake chief system from the perspective of public commons [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(1): 78-84. (in Chinese))
- [46] 刘忠哲,魏慧贤,王富强,等. 中原城市群水-经济-生态可持续发展能力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(5): 99-109. (Liu Zhongzhe, Wei Huixian, Wang Fuqiang, et al. Sustainable development capacity assessment of water-economy-ecology system in central plains urban agglomeration [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46 (5): 99-109. (in Chinese))
- [47] 杨胜苏,刘卫柏. 基于恢复生态学的洞庭湖区“山水林田湖草”生态修复研究[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6430-6439. (Yang Shengsu, Liu Weibai. Research on ecological restoration of “landscapes, forests, fields, lakes and grasses” in Dongting Lake area: based on the perspective of restoration ecology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6430-6439. (in Chinese))
- [48] 段红东,刘小勇,李晓晓. 运用近自然修复理念维护河湖健康生命的认识与思考[J]. 水利发展研究, 2019, 19(9): 3-5. (Duan Hongdong, Liu Xiaoyong, Li Xiaoxiao. Understanding and reflections on maintaining the healthy life of rivers and lakes using the concept of near-natural restoration [J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(9): 3-5. (in Chinese))
- [49] 余辉. 日本琵琶湖流域生态系统的修复与重建[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 36-43. (Yu Hui. Ecosystem restoration and regeneration of Lake Biwa Basin, Japan [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 36-43. (in Chinese))
- [50] 沈桂花. 莱茵河水资源国际合作治理困境与突破[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 37-43. (Shen Guihua. Dilemma and breakthrough of international cooperation on water resources of Rhine River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 37-43. (in Chinese))
- [51] 踪家峰. 新时代河湖保护治理的方法路径[J]. 人民论坛, 2024 (14): 69-72. (Zong Jiafeng. Methodological pathways for river and lake protection and governance in the New Era [J]. People’s Tribune, 2024(14): 69-72. (in Chinese))
- [52] 王俊敏,沈菊琴. 跨域水环境流域政府协同治理:理论

- 框架与实现机制[J]. 江海学刊, 2016(5): 214-219. (Wang Junmin, Shen Juqin. Collaborative governance of water environment across river basin: theoretical framework and implementation mechanism [J]. Jianghai Academic Journal, 2016(5): 214-219. (in Chinese))
- [53] 王博, 张天星, 毛锦凰. 环境权感知对公众参与河长制河湖生态环境治理的影响: 基于政府公众参与平台建设中介效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(7): 134-143. (Wang Bo, Zhang Tianxing, Mao Jinhuan. Impact of environmental right perception on public participation in river and lake ecological environment governance under the River Chief System: based on the mediating effect of government-constructed public participation platforms [J]. China Population, Resources and Environment, 2025, 35(7): 134-143. (in Chinese))
- [54] 陈洁敏, 赵九洲, 柳根水, 等. 北美五大湖流域综合管理的经验与启示[J]. 湿地科学, 2010, 8(2): 189-192. (Chen Jiemin, Zhao Jiuzhou, Liu Genshui, et al. The experience and enlightenment of integrated river basin management for the great lakes [J]. Wetland Science, 2010, 8(2): 189-192. (in Chinese))
- [55] 张敏纯. 澳大利亚墨累-达令流域治理的经验与启示[J]. 国外社会科学, 2022(3): 62-72. (Zhang Minchun. Lessons and inspirations from the governance of the Murray-Darling River Basin in Australia [J]. Social Sciences Abroad, 2022(3): 62-72. (in Chinese))
- [56] 许佳君, 李萍. 河长制建设中的公众参与激励机制: 以德清“生态绿币”为例[J]. 水利经济, 2021, 39(2): 68-71. (Xu Jiajun, Li Ping. Motivation mechanism of public participation in establishment of river chief system: case study ecological green currency of Deqing City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(2): 68-71. (in Chinese))
- [57] 陈喆, 魏思奇, 吴仪邦, 等. 基于互联网社交媒体的“河湖长制”舆情分析系统构建[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 174-179. (Chen Zhe, Wei Siqi, Wu Yibang, et al. Construction of public opinion analysis system for “river chief system” management based on internet social media [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 174-179. (in Chinese))
- [58] 李冰, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊生态系统健康评价方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 98-106. (Li Bing, Yang Guishan, Wan Rongrong. Progress on evaluation methods of lake ecosystem health [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 98-106. (in Chinese))
- [59] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 太湖流域水环境综合整治与生态修复[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 76-79. (Chen Hesheng, Song Xiangfu, Zou Guoyan. Comprehensive improvement of water environment and ecological restoration in Taihu Lake Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 76-79. (in Chinese))
- [60] 李光, 付意成, 姜尚堃. 流域生态系统服务价值评估理论范式与框架构建[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(5): 480-491. (Li Guang, Fu Yicheng, Jiang Shangkun. A theoretical paradigm and integrated framework for the valuation of water ecosystem services in rivers basins [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(5): 480-491. (in Chinese))
- [61] 云兆得, 杨元月, 胡庆芳, 等. 高质量推进幸福河湖建设的认识与建议[J]. 中国水利, 2024(8): 55-62. (Yun Zhaode, Yang Yuanyue, Hu Qingfang, et al. Thoughts and advices on advancing the high-quality construction of Happy Rivers and Lakes [J]. China Water Resources, 2024(8): 55-62. (in Chinese))
- [62] 朱洁, 冯建刚, 高玉琴, 等. 基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 8-14. (Zhu Jie, Feng Jiangang, Gao Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 8-14. (in Chinese))
- [63] 吴强, 刘汗. 把“以人民为中心”贯穿水利工作全过程[J]. 中国水利, 2021(2): 7-9. (Wu Qiang, Liu Han. Putting people at the center should run through the whole process of water management [J]. China Water Resources, 2021(2): 7-9. (in Chinese))
- [64] 童学卫, 李爱花. 基于河流伦理的河湖保护治理行动框架与路径[J]. 中国水利, 2025(14): 18-22. (Tong Xuewei, Li Aihua. Framework and pathways for the protection and governance of rivers and lakes based on river ethics [J]. China Water Resources, 2025(14): 18-22. (in Chinese))
- [65] 沙宇聪, 田付玮, 戴江玉, 等. 河湖水生态产品价值核算与实现机制研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(4): 858-872. (Sha Yucong, Tian Fuwei, Dai Jiangyu, et al. Research progress of value accounting and realization mechanism of river and lake hydroecological products [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(4): 858-872. (in Chinese))
- [66] 张伟民, 贺新春. 绿色水经济发展的理论与实践探析: 以广东省为例[J]. 中国水利, 2024(10): 63-68. (Zhang Weimin, He Xinchun. Analysis on theory and practice of green water economy development: taking Guangdong Province as an example [J]. China Water Resources, 2024(10): 63-68. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-11-06 编辑: 俞云利)

不同尺度下水力诱发空泡溃灭特性研究进展

葛杰¹,徐伟²,王秀礼³,郭文卓³,赵媛媛⁴

(1. 新界泵业(浙江)有限公司; 2. 江苏大学能源与动力工程学院; 3. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心;
4. 江苏大学环境与安全工程学院)

摘要:从实验与数值模拟两个角度综述了水力诱发空泡溃灭特性的研究进展。实验方面,对比分析了电火花与激光两种主要水力诱发空泡方式的优缺点,并从自由域、近壁面、远壁面及空泡与颗粒相互作用4个方面阐述了空泡溃灭物理特性的研究进展;数值模拟方面,从宏观、介观、微观和多尺度4个方面综述了空泡数值模拟方法的发展,并重点探讨了空泡溃灭过程中空泡与壁面、颗粒、气泡之间的相互作用机理。指出未来水力诱发空泡研究可围绕同步观测技术的改进、压力测量技术的革新以及与人工智能、大数据等技术的深度融合等方向展开。

关键词:空泡溃灭;水力诱发;激光诱导;电火花诱导;多尺度;综述

Research progress on characteristics of hydrodynamic-induced cavitation bubble collapse at different scales//Ge Jie¹, Xu Wei², Wang Xiuli³, Guo Wenzhuo³, Zhao Yuanyuan⁴ (1. *Shimge Pump Industry (Zhejiang) Co., Ltd.*; 2. *School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University*; 3. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University*; 4. *School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University*)

Abstract: This paper reviews the research progress on the characteristics of hydrodynamic-induced cavitation bubble collapse from both experimental and numerical simulation perspectives. In terms of experimental approaches, the advantages and disadvantages of two main methods of hydrodynamically inducing bubbles, namely electric spark and laser, are compared and analyzed. The research progress on the physical characteristics of bubble collapse is elaborated from four aspects: free field, near-wall region, far-wall region, and the interaction between bubbles and particles. In terms of numerical simulation, the development of bubble numerical simulation methods is reviewed from macroscopic, mesoscopic, microscopic and multi-scale perspectives, with a focus on the interaction mechanisms between cavitation bubbles and walls, particles, and other bubbles during the collapse process. It is pointed out that future research on hydrodynamic-induced bubbles can be carried out in directions such as improving synchronous observation techniques, innovating pressure measurement technologies, and promoting deep integration with artificial intelligence and big data technologies.

Key words: cavitation bubble collapse; hydrodynamic induction; laser induction; electric spark induction; multiple scales; review

在水力机械等领域中,空化是一种特有且无法避免的现象^[1],空泡是产生空化现象的直观表现。在空泡溃灭过程中,内部能量的释放会引发高温和高压及微射流现象。这些极端物理特性可能对液压机和螺旋桨等流体机械设备产生破坏作用,从而导致压力脉动^[2]、振动^[3]、噪音^[4]、侵蚀和负载突变^[5]等问题。

为了有效利用空泡溃灭释放的能量,研究人员进行了广泛的探索^[6],如有机和无机化合物的合成和降解^[7]、电化学反应^[8]、药物或材料的清洁^[9],以及在特定环境下的射流切割和金属表面处理等,为

此,需研发可适配不同工程应用领域的解决方案,进而充分挖掘并发挥空泡溃灭所蕴含的技术潜力。

空泡的尺度可分为宏观^[10]、介观^[11]和微观^[12]3种,对应毫米(mm)、微米(μm)和纳米(nm)3种不同的半径单位,在这些不同的尺度下,空泡的演变规律存在一定的差异。总体而言,空泡体积小、演化周期短^[13],肉眼观测困难。本文综述了近年来空泡溃灭相关实验与数值模拟的研究进展,并对不同尺度空泡的研究现状进行了系统分析,对其未来发展趋势进行了展望,以期后续相关研究与工程应用提供理论参考。

基金项目:国家自然科学基金项目(52409116)

作者简介:葛杰(1986—),男,高级工程师,主要从事流体机械水力设计及结构优化研究。E-mail:gj@shimge.com

通信作者:赵媛媛(1987—),女,副教授,博士,主要从事多相流及多尺度瞬变流特性研究。E-mail:zyywx1987@163.com

1 空泡实验技术进展

实验是推动人们对空泡认识的基本方法,研究人员早期通过仪器观察,采取激光或电火花等方法生成一个或几个控制良好的单个空泡,使用高速摄像机记录空泡的初生、发展及溃灭等阶段的图像,从而记录空泡的动态特性。

1.1 电火花诱导

电火花诱导空泡实验装置^[14]由以下模块组成:①空泡生成模块。电火花诱导产生空泡,通过控制电火花电量来控制产生的空泡半径。②定位控制模块。通过三维运动控制平台控制空泡与壁面(颗粒)之间的相对位置。③数据采集模块。利用高速摄像机记录空泡生成与溃灭动态过程,同时配置专用光源,为影像采集提供稳定均匀的照明。④控制模块。采用数字延迟发生器实现高速摄像机、电容开关和光源等主要部件的同步。

研究人员对电火花诱导的空泡进行了大量的实验研究。在半球形气泡附近^[15],空泡溃灭出现向内外喷射的现象;空泡在壁面附近溃灭,第一次溃灭对壁面的冲击随距离的增加而减弱,而第二次溃灭对壁面的冲击呈现出先增大后急剧减小的趋势^[13];在自由域与壁面之间,Huang等^[16]发现空泡存在无尖峰的单涡形、带尖峰的单涡形和双涡形3种不同的形态。空泡与气泡相互作用时,离空泡较远的气泡对其影响较小,空泡会在演化过程中与气泡合并,并在溃灭时形态发生变化^[17];空泡与空泡相互作用时,其圆度、大小和间距会对空泡溃灭方向和声压产生影响^[18];在固体颗粒附近,颗粒数量会影响空泡的溃灭形式和方向,颗粒距离与空泡半径的比值会影响空泡溃灭方向,而颗粒与壁面之间的距离也会对空泡溃灭方向产生影响^[19]。

电火花诱导空泡的方法成本低、操作简单^[18],但是精度较差,而且容易产生振动与噪音^[14]。而上述的研究结果表明,电火花诱导的空泡之间的相互作用以及它们与气泡、壁面和颗粒之间的复杂关系都具有重要的研究价值,这些研究结果有助于深入理解电火花诱导的空泡行为,并为相关领域的应用和理论研究提供了参考。

1.2 激光诱导

激光诱导空泡实验装置^[20]由以下模块组成:①空泡生成模块。激光发生器产生空泡,通过控制激光发生器产生的能量来控制空泡的半径。②定位控制模块。借助三维运动控制平台,精准调控空泡的发生位置,以研究其与壁面或颗粒的不同相对位置的溃灭特性。③数据采集模块。与电火花诱导实

验装置类似,该模块的主要部件为高速摄像机,用于记录空泡的生成与溃灭过程。同时配备显微镜透镜以调整观测视角,并在摄像机工作期间提供必要的照明支持。④控制模块。采用数字延迟发生器实现高速摄像机、激光发生器和光源等主要部件的同步。所有的操作都在数字延迟发生器的控制面板上完成。

对激光诱导的空泡实验主要针对以下4个研究方向:

a. 自由域中空泡溃灭:空泡首先以球形膨胀,然后收缩,接着再次增大并演变成不对称的形状,最终溃灭为更小的空泡^[21]。

b. 壁面附近空泡溃灭:空泡中心到壁面的距离与空泡最大半径的比值对空泡形状演化具有显著影响。在空泡溃灭过程中,其运动方向受射流作用影响^[22]。当空泡靠近刚性壁边缘时,其运动将受到限制,溃灭时间也会延迟,并且在溃灭过程中呈现出橄榄形^[23]。针对不同壁面材料,如铝、钢、铜和丙烯酸树脂等,空泡的形态和冲击力大小因壁面材料的不同而异,壁面反射率的增大会导致空泡的运动行为得到放大,从而导致墙体上的初始冲击力增大^[24]。提高激光频率会增大空泡尺寸,同时空泡溃灭时对表面产生的弹性模量和表面硬度将降低^[25]。在空泡的工程应用方面,Wang等^[26]研究表明,可利用空泡溃灭产生的能量实现工件的重复冲压成形。

c. 液面和壁面之间的空泡溃灭:空泡溃灭时产生的射流总是指向密度较大的液体。当空泡接近液体界面时,空泡溃灭将穿透该界面,并在界面处形成蘑菇形液柱、尖峰液滴和球形液滴^[27]。增加空泡中的不可冷凝气体量会削弱溃灭过程,并降低最大压力、温度和延伸速率^[28]。

d. 空泡与颗粒相互作用:空泡的半径和与颗粒的距离对颗粒的位移产生影响,小距离下颗粒远离空泡,大距离下颗粒靠近空泡^[20],而颗粒的大小对空泡的影响并不显著^[29]。Luo等^[30]的研究探讨了不同激光能量和砂粒含量条件下,无限域和固壁附近空泡的脉动特性,发现高能量激光可增强降解效果,但能量过高时等离子体的吸收作用趋于饱和,使得降解效果下降。液体介质中的颗粒会抑制降解,而在适宜的砂粒含量下,降解效果可能恢复。

激光诱导方法产生的空泡具有纯度高、球形度高、重复性好和同步性好的优点^[20],但操作复杂,而且仪器价格较高,然而激光诱导空泡的实验研究为相关领域的进一步研究和应用提供了指导和启示。

2 空泡数值模拟进展

空泡的实验技术虽然不断演进,但仍存在诸多

局限性,包括高昂的成本、复杂的操作流程以及对仪器精度和实验环境条件的严格依赖。例如,激光诱导空泡实验需依赖高功率激光器与高速摄影系统,且极端高压、高速流场等工况下的测试存在安全风险与设备损坏隐患^[31-32];电火花诱导空泡实验虽成本相对可控,但也难以捕捉空泡溃灭微射流、冲击波等瞬态微尺度过程^[33]。这些因素限制了空泡的实验技术在复杂工况和极端条件下的应用范围,也使得单一变量精准调控、分子层面微观机制解析等研究目标难以通过实验直接实现。而数值模拟凭借其低成本、高灵活性和良好的可重复性,能够提供高度可控且可重复的模拟环境,能针对性弥补实验技术的局限性,且数值模拟发展可以从宏观、介观、微观和多尺度4个方面进行分析,如图1所示。其中,宏观计算流体力学(CFD)模拟可实现工程尺度空泡群演化与全流场参数的定量刻画;介观格子玻尔兹曼方法(LBM)可精细化捕捉近壁空泡与壁面、颗粒的介观相互作用,补充实验在局部流场细节观测上的不足;微观分子动力学(MD)模拟则可解析纳米级空泡成核、溃灭的分子作用机制,实现实验无法观测的微尺度效应研究;多尺度耦合模拟进一步整合不同尺度模拟优势。

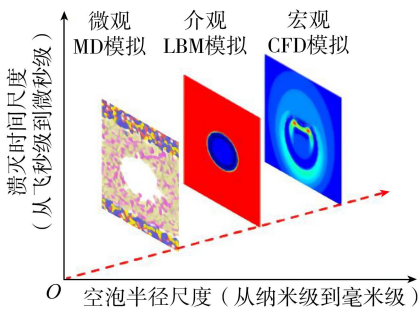


图1 不同尺度空泡示意图

此外,部分学者选择利用克努森数(Kn)将流动分为多个特征尺寸且有相应的流动基本方程。随克努森数增大,流动分为连续区、滑移区、过渡区与自由分子区^[34-35]。宏观的CFD计算基于连续介质假设,采用的是纳维-斯托克斯方程(N-S方程)作为控制方程,仅适用于 $Kn < 0.1$ 的流动。而在大克努森数($Kn > 0.1$)的流动中,就无法使用有限体积法、有限单元法等方法求解N-S方程进行分析。甚至随着克努森数的继续增大,进入自由分子区($Kn > 10$),分子间的碰撞起主导作用,这个时候往往需要使用微观MD进行模拟求解^[35]。而LBM基于玻尔兹曼方程,适用尺度广泛,尤其适用于 $0.1 < Kn < 10$ 的介观流动,计算时需进行格子单位与物理单位的转换。

2.1 空泡的宏观尺度研究

在宏观尺度的空泡研究中,CFD模拟被广泛应

用。CFD模拟可以研究复杂的流场,避免了传统实验带来的干扰和限制,能够精确控制和调整模型的参数,提供了高分辨率的空间和时间域,同时降低了模拟成本^[15]。此外,CFD模拟还能生成可视化的结果,直观地展示空泡的行为和流场特性^[36]。更重要的是,CFD模拟可以生成定量结果,与实验数据相对应,研究人员能够对空泡的特性进行深入分析和比较。

Zhan等^[37]发现,在溃灭阶段,改进的高分辨率交界面捕捉(MHRIC)捕获到的界面相对稳定,空泡半径的演化与理论解吻合较好。但实际上会出现多个空泡的情形且空泡的大小和尺度往往不同。基于此,Han等^[36]通过使用流体体积(VOF)方法,模拟了单空泡和双空泡系统的溃灭过程,并研究了空泡半径、压力、径向速度和加速度的变化。3个空泡相互作用时^[10],其位置和大小会影响溃灭顺序。此外,不同强度的射流可能会使空泡穿透射流或不受射流影响,如Goh等^[15]研究了水平放置在水下平板下方的空泡与附着在其上的空泡之间的相互作用,发现空泡溃灭形成的射流在不同距离下会朝向或远离水平板。

Tian等^[38]构建了含不凝气体的气-汽-液三相可压缩空泡动力学模型,可精准预测空泡多周期振荡,且发现不凝气体会削弱空泡溃灭强度;该团队还探究了曲面附近空泡多周期演化特性^[39],并且利用类似模型研究了缺陷壁面附近空泡动力学行为,发现缺陷深度与形状显著影响其特性,楔形缺陷易导致溃灭能量集中,缺陷深度增加会降低压力峰值^[40]。近几年,Zhang等^[41-42]建立了可以同时考虑边界、气泡相互作用、环境流场、重力、气泡迁移、流体压缩率、黏度和表面张力影响的新的气泡动力学统一理论,可以用于空泡、水下爆炸气泡等振荡气泡领域。基于气泡动力学统一理论,有学者对声场双气泡耦合作用^[43]、混合边界和多气泡之间的相互作用^[44]、气枪源产生的气泡的迁移效应等情形开展了研究^[45]。

Luo等^[46]对有壁面或无壁面条件下两个空泡的溃灭过程进行了研究,发现在有壁面的情况下两个空泡会朝对方溃灭并逐渐合并,合并之后会快速向壁面移动;随后还探讨了不同距离下空泡溃灭对壁面的冲击特性。除此之外,有学者还研究了不同类型的边界与空泡的相互作用,包括刚性边界^[47]、通孔平板^[48]、弹性边界^[49]以及平面壁^[50]等,结果表明,在弹性液面附近,受到球形约束的空泡会快速振荡,空泡振动的振幅和周期会随着弹性模量的增大和约束尺寸的减小而减小。同时,偏心率对空泡表面的约束作用较强,导致空泡表面呈现出非球形的变形^[50]。

对宏观尺度下空泡与颗粒相互作用的研究包括水利水电工程中的砂粒^[19]、生物体内抗体或蛋白质^[51]、超声波结晶过程中方解石晶体^[52]以及超声波清洗中聚苯乙烯胶乳颗粒^[53]等。Xu 等^[19]研究了不同尺寸和距离的砂粒对空泡溃灭特性的影响,发现砂粒会影响空泡溃灭的方式和方向;他们定量分析了颗粒与空泡的间距与颗粒尺寸的比值对空泡溃灭方向的影响,这对于控制固液两相流中的空化损伤具有重要意义。针对亲水颗粒,Arora 等^[54]研究了其附近初始阶段空化行为。

上述研究中,空泡溃灭产生的冲击波与污染物的相互作用是污水处理中的一个重要研究课题;在医学领域,空泡溃灭导致的脂质膜穿孔也是空泡与壁面相互作用的结果;而在水利工程中,空泡溃灭会产生微射流和冲击波,这会对流体机械造成破坏,影响其水力性能,从而导致能量损耗。

2.2 空泡的介观尺度研究

LBM 是近年来出现的一种新的高效数值模拟技术,与一系列传统宏观 CFD 模拟方法相比,LBM 具有计算效率高、复杂边界处理简单以及压力求解简便等优点^[55],是研究介观尺度空泡的主要方法。

a. 模型研究。Sukop 等^[56]最早采用 Shan-Chen 模型模拟了空化诱导下空泡的生长和溃灭过程;Chen 等^[57]研究了静态及剪切流中空泡的形成过程,并发现基于 Rayleigh-Plesset (R-P) 方程的计算结果与数值模拟的数据具有良好的一致性;Peng 等^[11]还对激光诱导形成的单个空泡进行了动力学数值模拟。为了深入研究 LBM 方法,Yang 等^[58-59]建立多松弛模型,研究了溃灭空泡的热力学特性,验证了该模型的有效性,并探究了含不凝气体的空泡溃灭过程。在当前 LBM 空泡生长与溃灭研究中,普遍采用热流耦合模型^[58-62],该模型可兼顾温度场与流场的相互作用,保障研究的准确性。对于多空泡,Shi 等^[63]结合 Carnahan-Starling (C-S) 状态方程进行了数值模拟,并对双空泡和多空泡系统进行了测试。

b. 壁面研究。空泡与壁面的 LBM 模拟研究中,Peng 等^[11]模拟分析了与固体边界不同距离处单空泡溃灭的过程并与实验结果进行了比较,给出了速度矢量、密度、压力和温度场。为了降低空化对实际工程固体材料的影响,Mao 等^[64]模拟了近壁面区域的单个空泡和多个空泡溃灭过程,比较了这两种溃灭过程对壁面造成的影响。对于不同类型的壁面或边界,Liu 等^[65]研究了无限域、直壁和凸壁 3 种典型边界的空泡生长和溃灭,并提出采用改进双分布函数来模拟非等温空化的演变。袁浩等^[66]也采用 LBM 探究了附壁型空泡的演化过程,发现壁面润

湿性通过非平衡杨氏力影响空泡演化,微射流体积与接触角余弦呈指数关系,黏度增大会减小射流体积并延长演化时间。

c. 影响因素研究。Peng 等^[67]研究了密度和黏度比较大的刚性边界附近单、双空泡的溃灭过程,分析了空泡与刚性边界距离对空泡寿命、最大溃灭压力、最快溃灭速度、最高溃灭温度的影响;除了二维的研究,他们还开展了三维空泡溃灭的数值模拟研究^[68]。袁晓龙等^[69]也采用 LBM 探究了汽液黏滞系数对空泡溃灭演化过程的影响规律,结果表明,汽相黏滞系数对溃灭过程中产生的最大微射流流速、峰值溃灭压力及最大溃灭时间均无显著影响;而液相黏滞系数与最大射流流速、最大压力呈负相关关系,与最大溃灭时间呈正相关关系。对于内部有不同气体的空泡,Ezzatneshan 等^[55]研究了固体壁面附近的 H₂O、LN₂ 和 LH₂ 空泡溃灭及表面的润湿性对空泡溃灭的影响。空泡与壁面的相互作用可以用于实际工程中降低空化对固体材料的影响,也可以利用空泡与不同壁面类型及间距所产生的差异化效应,来增强或者减弱空化诱导空泡的产生。

上述研究表明,LBM 方法在研究介观尺度空泡生长和溃灭过程中具有较好的适用性,研究人员能够更好地理解和预测空泡的运动、形态和相变行为。这些模拟结果可以与实验数据进行比较,从而验证模型的准确性和可靠性;此外,该方法还能提供空泡内部密度、温度等详细参数信息,为深入探究空泡动力学特性与热力学行为提供有力支撑。

2.3 空泡的微观尺度研究

人的肉眼所能观测到的尺度很有限,利用高速摄影实验装置也只能观测到微米级的空泡,纳米尺度下的空泡仍难以观测到,需采用 MD 模拟方法对微观尺度的空泡进行模拟分析^[70]。微观 MD 模拟是一种纳米尺度的模拟方法,通过模拟分子运动轨迹揭示空泡空化成核以及空泡溃灭的详细过程,从而深入了解其特征^[71]。

a. 壁面研究。在空泡溃灭过程中,会形成高速射流并释放能量。壁面作为与空泡相互作用的重要界面,在空泡研究中占据着重要地位。研究人员深入探讨了空泡与壁面的关系,旨在更好地理解空泡的初生、发展和溃灭过程,并揭示了它们之间的相互作用机制。例如:Xu 等^[12]构建了空泡与苯甲酰胺壁面不同间距的 MD 模型,采用 TIP4P-FB 水分子模型和 ReaxFF 力场研究空泡溃灭的动态特性和压力场变化规律,发现空泡与苯甲酰胺壁面之间的距离会影响空泡的溃灭;随后 Xu 等^[72]又构建了不同半径空泡的重金属复合模型,以压能、溃灭时间和空泡

面积变化率为研究对象,总结了应变率和空泡半径对空泡溃灭产生的影响;Pellegrin 等^[73]使用可调的原子间电势进行 MD 模拟,研究了在立方外壳中承受负压的受限 Lennard-Jones (L-J) 势流体中空泡的形成过程。空泡与壁面的研究是在各个尺度下都备受关注的研究领域,空泡与壁面的相互作用在多个领域具有重要的应用,如流体力学、声学、生物医学和材料科学等。

b. 颗粒研究。除了壁面,空泡与颗粒微观尺度研究也备受关注,主要涉及细胞膜^[74]、SiO₂ 和 PE 纳米颗粒^[75] 以及原子核^[76] 等。Nan 等^[74] 采用 Martini 粗粒化力场研究了冲击波作用下空泡溃灭与细胞膜的相互作用,当空泡溃灭产生的纳米射流穿透细胞膜时,在孔附近观察到环状空化区域。在纳米技术和医学研究中,发现纳米粒子会对空化造成影响,如 Li 等^[75] 研究了不同直径的 SiO₂ 和 PE 纳米颗粒对水中空化初生特性的影响,结果表明两类纳米颗粒均会破坏水体氢键网络稳定性;相同直径下 PE 纳米颗粒对空化初生的促进作用显著强于 SiO₂ 纳米颗粒。高殿荣等^[76] 在水或液态铜中嵌入不同尺寸的原子核,发现纳米核促进了空化发生。

c. 介质研究。Zhan 等^[77] 研究了不同速度水分子影响下空泡的收缩和溃灭过程,发现冲击速度越快,空泡溃灭时间越短,微射流的速度越高。除水介质之外,al Mahmud 等^[78] 对比了水和凝胶中纳米级空泡生长的压力要求,发现空泡需要更高的压力才能能在凝胶溶液中生长,同时空泡溃灭时间受介质黏度的影响;Baidakov 等^[79] 研究了拉伸 L-J 势流体中的自发空化现象,完整捕捉了跨越 230 个数量级的空泡初生率变化规律,研究发现模拟结果与毛细近似下经典理论只存在 16 个数量级的偏差。Dockar 等^[70] 基于力学平衡分析构建并验证了适用于准二维、三维空泡的新型空化阈值模型,结果表明,表面纳米空泡稳定性偏离经典 Blake 空化阈值,可在高负压条件下保持稳定;随后又进行了外部振荡压力场影响的表面纳米空泡的 MD 模拟^[71],揭示了表面纳米空泡的初生机理,证明经典球形空泡模型在此情形下不再适用。同样地,针对浸没基底上球形帽状表面纳米空泡的溃灭动力学问题,Dockar 等^[80] 模拟研究了不同尺寸和接触角下表面纳米空泡的空化诱导溃灭特性,并将结果与接近固体基底的球形空泡溃灭进行了比较,结果表明,表面纳米空泡模拟中的点蚀损伤大大减少,溃灭产生的凹坑深度取决于它们的接触角。这些特征适用于先进纳米材料制造、健康和精密清洁及易碎材料应用等领域。

d. 溶解气体研究。除了介质存在差异,空泡在

溶解不同气体时呈现出不同的性质。例如 Fu 等^[81] 采用柔性水分子模型进行 MD 模拟,系统探究了氧分子对溶解氧液体空泡成核的影响,并依据氧分子含量及氧分子与水分子的相互作用形式设置了 3 组不同的研究初始状态,结果表明溶解氧可显著降低空化成核势垒,促进异质空化成核;Zhou 等^[82] 研究了氧气和氮气对水空泡生成的影响,发现含有溶解气体的水具有更高的成核率,并且比纯水更容易导致空泡的形成。此外,对于空泡与介质之间的不同物质的研究,Man 等^[83] 开发了一种脂质涂层空泡模型,用于模拟双层脂质存在情况下的稳定空化现象,结果表明空泡振动产生的壁面剪切应力不会导致膜孔的形成。

以上研究表明,基于 MD 的模拟方法非常适用于研究微观尺度下的空泡行为。通过 MD 模拟,研究者能够深入探讨纳米尺度下空泡与周围环境的相互作用,包括表面张力、溶质扩散以及温度等因素的影响。这对于微流体学、纳米技术和生物医学等领域的研究具有深远意义。

2.4 空泡的多尺度研究

空泡的多尺度研究代表了一种综合性的探索方法,旨在全面理解和揭示空泡在不同尺度下的行为和相互影响。这种多尺度研究广泛涵盖了微观到宏观各种尺度范围,能更加全面地洞察空泡的性质和行为特征。相较单尺度模拟方法,多尺度研究能有效弥补宏观模拟缺失微观作用机制、微观模拟难以拓展至工程实际尺度的固有局限,在复杂空化流动刻画与工程效应预测中优势显著,例如近壁空化侵蚀预测^[84]、空化噪声预测^[85] 等。

Ghahramani 等^[86] 在 2018 年提出了一种多尺度模型,采用 VOF 和 Schnerr-Sauer 空化模型从宏观层面描述水和水蒸气,同时在微观层面开发了基于拉格朗日公式的离散气泡模型 (DBM),并成功进行了 DBM 和 VOF 之间的有效转换,实现了多尺度模拟;2021 年该团队^[87] 研究了多尺度空化流动,耦合了混合模型与基于拉格朗日的气泡模型,其中拉格朗日模型采用了一种四路耦合方法,考虑了各种小尺度现象的空化动力学,这一耦合模型清晰展示了多尺度空腔,准确揭示了各尺度气体结构与连续流之间的相互作用。随后, Li 等^[85] 在 2023 年的多尺度模拟中利用 Ffowcs Williams-Hawkins (FW-H) 方程确定了空化产生的噪声。Li 等^[88] 应用多尺度模型模拟缩放试验段中的空化流动,该模型基于 Schnerr-Sauer 空化模型求解宏观相间传质特性,结合简化 R-P 方程模拟微观离散气泡演化,并提出了跨尺度桥接算法,实现了宏观流场与微观空泡行为

的耦合模拟。同样地,田北晨等^[89-92]采用了欧拉-拉格朗日耦合求解算法,通过在欧拉体系下求解宏观尺度连续介质的空化过程,并在拉格朗日体系下模拟亚网格尺度微空泡与空化核的演化过程,深入研究了流场中多尺度空泡的演变特性,成功捕捉了离散空泡在一个云状空化周期内的时空分布特征。此外, Maeda 等^[93]在 2018 年提出了一种欧拉-拉格朗日耦合方法,用于模拟可压缩液体中的云空化现象,该方法以球形的点气泡作为气相,并通过 Keller-Miksis 方程在亚网格尺度实现其径向演变的跟踪;2023 年 Wang 等^[94]改进了上述方法,并应用于模拟收敛-发散试验段中的非定常空化流动,同时研究了多尺度的空化流动特性,成功预测了由脱落空泡溃灭引起的消散空泡现象。这项研究不仅有助于深入理解收敛-发散试验段内的非定常空化流动,还提供了一种强大的多尺度建模方法,能够更准确地捕捉不同尺度下的空泡行为和相互作用。Wang 等^[95-97]还构建了一套基于欧拉-拉格朗日耦合方法的多尺度空化流动精细模拟程序,采用欧拉法求解全域流场、拉格朗日法追踪空泡演化,完成了水翼绕流与工业喷管内的空化流动模拟,揭示了宏观流动对微观空泡团的影响;此外,他们借助该方法,成功预测了考虑不凝气体存在时的尖端涡流空化^[98],并获取了近壁空泡非球形坍塌的侵蚀冲击载荷^[84],为研究空化不稳定性机制提供了可靠的方法。

这些多尺度方法有望在空化流动研究的不同领域发挥重要作用,通过在不同尺度上采用不同方法,更直观地展示空泡在空化流动中的溃灭过程。但当前多尺度模型的发展与工程化应用仍面临一些难点:①计算成本高昂。多尺度模型需对不同尺度采用差异化的计算网格与算法,宏观尺度采用的网格比较粗糙,而微观或者介观尺度则需要极为精细的网格,跨尺度数据传递、迭代耦合会大幅增加计算量,对高性能计算资源依赖度高,并且难以实现大规模工程场景的快速模拟^[87]。②耦合界面复杂性高。宏观尺度基于连续介质假设,微观尺度依托于 MD 模拟,不同尺度的控制方程与参数体系存在差异,耦合过程中的参数匹配、数据传递与边界条件的转换比较困难,尚未形成统一的理论标准,数值的稳定性与模拟的精度也难以保证^[99]。

3 研究展望

近年来空泡溃灭的研究热点主要集中在以下几个方面:①水力诱导的空泡实验研究主要采用电火花和激光技术,通过高速摄影系统记录空泡溃灭过程,实验研究内容逐步丰富;②不同尺度下的空泡溃

灭数据模拟主要包括宏观、介观、微观和多尺度 4 个方面,其中 CFD 是主流方向,研究较深,其他方向的研究相对较为有限;③空泡溃灭的研究涵盖多个方向,包括空泡数量、模型类型、壁面类型、颗粒、不同介质以及不同气体等因素。

从空泡溃灭研究方法上来看,今后应重点在以下几个方面开展研究:

a. 同步观测技术的改进。空泡尺寸小、溃灭时间短,常规的观测方法受限很大,而空泡破裂形态变化和压力动态变化的协同研究、高速摄影系统和动态压力采集系统的配合使用,有助于更全面地认识空泡破裂动力学,因此需要寻求新的观察测量手段。

b. 压力测量技术的革新。空泡溃灭过程中,压力传播需要时间,使得测量结果不够准确;而空泡溃灭会产生振动,加上空泡溃灭的不对称性使得固定的压力传感器无法获得压力响应的全过程;当空泡比较小时,传感器感应区域的冲击面积也很小,实验得到的压力是整个传感区域接收到的压力的平均值,相当于降低了实际值。因此,目前实验的定量化研究仍面临诸多挑战,需要进一步革新压力测量技术。

c. 人工智能和大数据等技术的结合。智能流体力学是未来发展的重要趋势,机器学习技术已初步应用于空泡溃灭研究领域,目前相关研究主要集中在流体结构和工艺优化等方面,通过神经网络、算法改进或混合算法对实验和计算数据进行挖掘,实现对空泡溃灭过程的预测以及结构和工艺的优化。

未来空泡技术有望在多个领域实现创新发展。在水处理方面,可依托水力空化与高级氧化技术的耦合体系,利用空泡溃灭产生的微射流、高温高压及自由基效应,强化对难降解有机污染物、微塑料及重金属的去除,构建空化降解数值模型,为空化降解反应器的结构与运行参数优化提供理论依据;在声学方面,可以结合深度学习方法,构建螺旋桨梢涡空化噪声的精准建模方法,捕捉空化噪声的随机特性与声学特征,为水利枢纽、水下装备的空化噪声防控提供新路径;在化学合成中,借助空泡的瞬间高温高压及强湍流作用,提升反应速率与选择性,降低对催化剂的依赖,助力绿色合成与精细化工发展。这些拓展将为空泡技术的应用开创更广阔的前景。

参考文献:

[1] 佟艳群,黄建宇,吴笑漪,等. 纳秒激光诱导空化空泡的作用特性及影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12): 1013-1017. (Tong Yanqun, Huang Jianyu, Wu Xiaoyi, et al. Characteristics and influence of cavitation bubble induced by nanosecond pulsed laser[J]. Journal of

- Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35 (12):1013-1017. (in Chinese)
- [2] Zhang Wenwu, Yu Zhiyi, Zhu Baoshan. Influence of tip clearance on pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump passage [J]. Energies, 2017, 10 (2) : 148.
- [3] Liu Fushui, Hua Yang, Wu Han, et al. Experimental investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons growth characteristics of gasoline mixed with methanol, ethanol, or n-butanol in laminar diffusion flames [J]. Energy & Fuels, 2018, 32 (6) : 6823-6833.
- [4] Zupanc M, Pandur Ž, Perdih T S, et al. Effects of cavitation on different microorganisms: the current understanding of the mechanisms taking place behind the phenomenon. a review and proposals for further research [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 57: 147-165.
- [5] Wu Pengfei, Bai Lixin, Lin Weijun, et al. Mechanism and dynamics of hydrodynamic-acoustic cavitation (HAC) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 89-96.
- [6] Richards W T, Loomi A L. The chemical effects of high frequency sound waves I. a preliminary survey [J]. Journal of the American Chemical Society, 1927, 49 (12) : 3086-3100.
- [7] Colussi A J, Hung H M, Hoffmann M R. Sonochemical degradation rates of volatile solutes [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 1999, 103 (15) : 2696-2699.
- [8] Hua I, Höechemer R H, Hoffmann M R. Sonolytic hydrolysis of *p*-nitrophenyl acetate: the role of supercritical water [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1995, 99 (8) : 2335-2342.
- [9] Lesko T M. Chemical effects of acoustic cavitation [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2004.
- [10] Fong S W, Adhikari D, Klaseboer E, et al. Interactions of multiple spark-generated bubbles with phase differences [J]. Experiments in Fluids, 2009, 46 (4) : 705-724.
- [11] Peng Chi, Tian Shoucheng, Li Gensheng, et al. Simulation of laser-produced single cavitation bubbles with hybrid thermal Lattice Boltzmann method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119136.
- [12] Xu Wei, Zhu Rongsheng, Wang Jian, et al. Molecular dynamics simulations of the distance between the cavitation bubble and benzamide wall impacting collapse characteristics [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 352: 131633.
- [13] Luo Jing, Xu Weilin, Deng Jun, et al. Experimental study on the impact characteristics of cavitation bubble collapse on a wall [J]. Water, 2018, 10 (9) : 1262.
- [14] Zhang Qi, Luo Jing, Zhai Yanwei, et al. Improved instruments and methods for the photographic study of spark-induced cavitation bubbles [J]. Water, 2018, 10 (11) : 1683.
- [15] Goh B H T, Ohl S W, Klaseboer E, et al. Jet orientation of a collapsing bubble near a solid wall with an attached air bubble [J]. Physics of Fluids, 2014, 26 (4) : 042103.
- [16] Huang Guohao, Zhang Mindi, Ma Xiaojian, et al. Dynamic behavior of a single bubble between the free surface and rigid wall [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105147.
- [17] Luo Jing, Xu Weilin, Niu Zhipan, et al. Experimental study of the interaction between the spark-induced cavitation bubble and the air bubble [J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25 (6) : 895-902.
- [18] Xu Weilin, Li Jianbo, Luo Jing, et al. Effect of a single air bubble on the collapse direction and collapse noise of a cavitation bubble [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 120: 110218.
- [19] Xu Weilin, Zhang Yalei, Luo Jing, et al. The impact of particles on the collapse characteristics of cavitation bubbles [J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 15-24.
- [20] Zhang Yuning, Xie Xiaoyang, Zhang Yuning, et al. Experimental study of influences of a particle on the collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near a solid wall [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 105: 289-306.
- [21] Zhao Y L, Yin H L, Shi J C, et al. Dynamics of laser-induced shock wave and cavitation during laser ablation of aliphatic nitroalkanes [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 165: 107548.
- [22] Sun Yurong, Du Yuxin, Yao Zhifeng, et al. The effect of surface geometry of solid wall on the collapse of a cavitation bubble [J]. Journal of Fluids Engineering, 2022, 144 (7) : 071402.
- [23] Zhang Yuning, Qiu Xu, Zhang Xiangqing, et al. Collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near the edge of a rigid wall [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105157.
- [24] Fujisawa N. Laser-induced cavitation bubble behavior on solid walls of different materials [J]. Heat and Mass Transfer, 2022, 58 (3) : 499-504.
- [25] Zhang Zhen, Zhang Yi, Liu Denghua, et al. Bubble behavior and its effect on surface integrity in laser-induced plasma micro-machining silicon wafer [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 144 (9) : 091008.
- [26] Wang Liangliang, Guo Zhongning, Deng Yu, et al. Experimental research into microgroove stamping by laser-induced cavitation [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 146: 107549.
- [27] Yin Zhaoqin, Huang Zemin, Tu Chengxu, et al. Dynamic characteristics of bubble collapse near the liquid-liquid interface [J]. Water, 2020, 12 (10) : 2794.
- [28] Zhong Xiaoxu, Eshraghi J, Vlachos P, et al. A model for a laser-induced cavitation bubble [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 132: 103433.

- [29] Lyu Liang, Zhang Yongxue, Zhang Yuning, et al. Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 56: 63-76.
- [30] Luo Chunhui, Gu Jiayang, Xu Xinchao, et al. Impact of solid particles on cavitation behaviors and laser-induced degradation in aqueous suspension [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 76: 105632.
- [31] 谢小柱, 苑学瑞, 陈蔚芳, 等. 激光诱导空泡技术研究和应用新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080017. (Xie Xiaozhu, Yuan Xuerui, Chen Weifang, et al. New development and applications of laser-induced cavitation bubbles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080017. (in Chinese))
- [32] 马剑军, 胡冉冉. 激光诱导空泡观测技术变化的研究进展[J]. *技术与市场*, 2024, 31(3): 100-104. (Ma Jianjun, Hu Ranran. Research progress on the changes of laser-induced cavitation observation technology [J]. *Technology and Market*, 2024, 31(3): 100-104. (in Chinese))
- [33] 吴焱, 张鹏飞, 黄钰期. 振动及加热壁面条件下的近壁空泡溃灭可视化研究[J]. *内燃机工程*, 2024, 45(2): 102-108. (Wu Yan, Zhang Pengfei, Huang Yuqi. Visualization of bubble collapse near the wall under vibrating and heating wall boundaries[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2024, 45(2): 102-108. (in Chinese))
- [34] 朱维耀, 李华, 邓庆军, 等. 多孔介质细观流动理论研究进展[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(5): 951-962. (Zhu Weiyao, Li Hua, Deng Qingjun, et al. Review on mesoscopic flow theory in porous media [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(5): 951-962. (in Chinese))
- [35] Li Wenrui, Wang Dengke, Wang J G. Improved mathematical model of apparent permeability: a focused study on free and multilayer adsorptive phase flow [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 101: 104508.
- [36] Han Sen, Zhu Hanhua. Theoretical and numerical studies on the collapse of single- and double-bubble system in water [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2021, 93(3): 527-542.
- [37] Zhan Jiemin, Chen Yuehan, Li Yutian. Research on theoretical and numerical methods of single bubble oscillation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(4): 872-877.
- [38] Tian Lei, Zhang Yongxue, Yin Jianyong, et al. Investigation on heat and mass transfer characteristics of a near-wall multi-cycle cavitation bubble and its thermal effects on the wall using an improved compressible multiphase model [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 298: 117118.
- [39] 田磊, 张永学, 尹建勇, 等. 曲面附近空化泡多周期演变
- 的动力学特性及其对壁面的破坏作用[J]. *水动力学研究与进展*, 2023, 38(6): 996-1006. (Tian Lei, Zhang Yongxue, Yin Jianyong, et al. Dynamic characteristics of multi period bubbles near curved walls and their damage to the walls [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2023, 38(6): 996-1006. (in Chinese))
- [40] 杜先荣, 尹建勇, 张永学, 等. 基于 OpenFOAM 的缺陷壁面附近空化泡动力学过程模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 39-46. (Du Xianrong, Yin Jianyong, Zhang Yongxue, et al. Simulation of cavitation bubble dynamics near defective wall surface based on OpenFOAM [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 39-46. (in Chinese))
- [41] Zhang Aman, Li Shimin, Cui Pu, et al. A unified theory for bubble dynamics [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(3): 033323.
- [42] Zhang Aman, Li Shimin, Xu Runze, et al. A theoretical model for compressible bubble dynamics considering phase transition and migration [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, 999: A58.
- [43] 谈乃正, 詹立蕾, 李世民, 等. 基于气泡统一方程的声场双气泡耦合作用研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(2): 213-222. (Tan Naizheng, Zhan Lilei, Li Shimin, et al. A study on the coupling effect of double bubbles in sound field based on the unified equation for bubble dynamics [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(2): 213-222. (in Chinese))
- [44] Zhang Aman, Li Shimin, Cui Pu, et al. Theoretical study on bubble dynamics under hybrid-boundary and multi-bubble conditions using the unified equation [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2023, 66(12): 124711.
- [45] Liu Yi, Zhang Shuai, Li Shuai, et al. Application of the unified equation of bubble dynamics for simulating the large-scale air-gun bubble with migration effect [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(12): 127125.
- [46] Luo Jing, Xu Weilin, Li Rui. High-speed photographic observation of collapse of two cavitation bubbles [J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(11): 1707-1716.
- [47] Ma Xiaojian, Zhao Xin, Huang Biao, et al. On study of non-spherical bubble collapse near a rigid boundary [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(3): 523-535.
- [48] 马明凯, 尹建勇, 龚德鸿, 等. 通孔平板附近空化泡动力学特性数值模拟研究 [J]. *水力发电学报*, 2024, 43(10): 63-75. (Ma Mingkai, Yin Jianyong, Gong Dehong, et al. Numerical study on dynamic behaviors of cavitation bubbles near through-hole flat plate [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(10): 63-75. (in Chinese))
- [49] Yang Xiaobin, Liu Cheng, Wan Decheng, et al. Numerical study of the shock wave and pressure induced by single bubble collapse near planar solid wall [J]. *Physics of*

- Fluids,2021,33(7):073311.
- [50] Liu Junliang, Xiao Wei, Yao Xiongliang, et al. Dynamics of a bubble in a liquid fully confined by an elastic boundary [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(6):063303.
- [51] McLaughlan J R, Roy R A, Ju Hengyi, et al. Ultrasonic enhancement of photoacoustic emissions by nanoparticle-targeted cavitation [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13):2127-2129.
- [52] Wagterveld R M, Boels L, Mayer M J, et al. Visualization of acoustic cavitation effects on suspended calcite crystals [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(1):216-225.
- [53] Gonzalez-Avila S R, Huang Xiaohu, Quinto-Su P A, et al. Motion of micrometer sized spherical particles exposed to a transient radial flow: attraction, repulsion, and rotation [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(7):074503.
- [54] Arora M, Ohl C D, Mørch K A. Cavitation inception on microparticles: a self-propelled particle accelerator [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(17):174501.
- [55] Ezzatneshan E, Vaseghnia H. Simulation of collapsing cavitation bubbles in various liquids by lattice Boltzmann model coupled with the Redlich-Kwong-Soave equation of state [J]. *Physical Review E*, 2020, 102(5):053309.
- [56] Sukop M C, Or D. Lattice Boltzmann method for homogeneous and heterogeneous cavitation [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(4):046703.
- [57] Chen Xiaopeng, Zhong Chengwen, Yuan Xulong. Lattice Boltzmann simulation of cavitating bubble growth with large density ratio [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(12):3577-3584.
- [58] Yang Yu, Shan Minglei, Kan Xuefen, et al. Thermodynamic of collapsing cavitation bubble investigated by pseudopotential and thermal MRT-LBM [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 62:104873.
- [59] Yang Yu, Shan Minglei, Han Qingbang, et al. Effect of non-condensable gas on a collapsing cavitation bubble near solid wall investigated by multicomponent thermal MRT-LBM [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(2):024701.
- [60] Yang Yu, Shan Minglei, Su Nana, et al. Role of wall temperature on cavitation bubble collapse near a wall investigated using thermal lattice Boltzmann method [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 134:105988.
- [61] He Xiaolong, Peng Haonan. Modeling inception and evolution of near-wall vapor thermo-cavitation bubbles via a lattice Boltzmann method [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49:828-849.
- [62] 冉彬君, 汪磊, 袁浩, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的近壁区空化泡生长溃灭过程模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(5):32-37. (Ran Binjun, Wang Lei, Yuan Hao, et al. Simulation of growth and collapse processes of near-wall cavitation bubbles with lattice Boltzmann method [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(5):32-37. (in Chinese))
- [63] Shi Yazhen, Luo Kai, Chen Xiaopeng, et al. A numerical study of the early-stage dynamics of a bubble cluster [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(5):845-852.
- [64] Mao Yunfei, Peng Yong, Zhang Jianmin. Study of cavitation bubble collapse near a wall by the modified lattice Boltzmann method [J]. *Water*, 2018, 10(10):1439.
- [65] Liu Yang, Peng Yong. Study on the collapse process of cavitation bubbles including heat transfer by lattice Boltzmann method [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2):219.
- [66] 袁浩, 詹蝶, 宋翔, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的附壁型空化泡演化模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4):7-13. (Yuan Hao, Zhan Die, Song Xiang, et al. Simulation on evolution of an attached-wall cavitation bubble based on lattice Boltzmann method [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):7-13. (in Chinese))
- [67] Peng Haonan, Zhang Jianmin, He Xiaolong, et al. Thermal pseudo-potential lattice Boltzmann method for simulating cavitation bubbles collapse near a rigid boundary [J]. *Computers & Fluids*, 2021, 217:104817.
- [68] Peng Haonan, Fei Linlin, He Xiaolong, et al. Three-dimensional modelling of cavitation bubble collapse using non-orthogonal multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294:116720.
- [69] 袁晓龙, 何小泷, 汪凯迪. 汽液黏滞系数对空化泡溃灭过程影响的数值模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(5):19-23. (Yuan Xiaolong, He Xiaolong, Wang Kaidi. Numerical simulation of effects of vapor and liquid phase viscosity coefficients on cavitation bubble collapse process [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(5):19-23. (in Chinese))
- [70] Dockar D, Borg M K, Reese J M. Mechanical stability of surface nanobubbles [J]. *Langmuir*, 2018, 35(29):9325-9333.
- [71] Dockar D, Gibelli L, Borg M K. Forced oscillation dynamics of surface nanobubbles [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2020, 153(18):184705.
- [72] Xu Wei, Zhu Rongsheng, Fu Qiang, et al. Analysis of the influence of factor parameters on bubble collapse in a heavy metal complex system [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 347:118377.
- [73] Pellegrin M, Bouret Y, Celestini F, et al. Cavitation mean expectation time in a stretched Lennard-Jones fluid under confinement [J]. *Langmuir*, 2020, 36(47):14181-14188.
- [74] Nan Nan, Si Dongqing, Hu Guohui. Nanoscale cavitation in perforation of cellular membrane by shock-wave induced nanobubble collapse [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, 149(7):074902.
- [75] Li Buxuan, Gu Youwei, Chen Min. Cavitation inception of

- water with solid nanoparticles; a molecular dynamics study [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 120-128.
- [76] 高殿荣, 孙亚楠, 张宗熠. 气液双相微纳米气泡发生器的关键结构优化分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 129-136. (Gao Dianrong, Sun Yanan, Zhang Zongyi. Optimization analysis of key structure of gas-liquid two-phase micro-nano bubble generator [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(2): 129-136. (in Chinese))
- [77] Zhan Shengpeng, Duan Haitao, Pan Lin, et al. Molecular dynamics simulation of shock-induced microscopic bubble collapse[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(14): 8446-8455.
- [78] al Mahmud K A H, Hasan F, Khan M I, et al. On the molecular level cavitation in soft gelatin hydrogel [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9635.
- [79] Baidakov V G, Protsenko K R. Molecular dynamics simulation of cavitation in a Lennard-Jones liquid at negative pressures [J]. *Chemical Physics Letters*, 2020, 760: 138030.
- [80] Dockar D, Gibelli L, Borg M K. Shock-induced collapse of surface nanobubbles[J]. *Soft Matter*, 2021, 17(28): 6884-6898.
- [81] Fu Qiang, Liu Gang, Wang Xiuli, et al. Cavitation of dissolved oxygen liquid water under negative pressure[J]. *Molecular Simulation*, 2018, 44(18): 1501-1507.
- [82] Zhou Tingting, Zhao Fuqi, Zhou Hongqiang, et al. Atomistic simulation and continuum modeling of the dynamic tensile fracture and damage evolution of solid single crystalline Al with He bubble [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 234: 107681.
- [83] Man V H, Truong P M, Li M S, et al. Molecular mechanism of the cell membrane pore formation induced by bubble stable cavitation [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018, 123(1): 71-78.
- [84] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Luo Xianwu, et al. An improved Eulerian-Lagrangian method combined with ductile material model for cavitation erosion assessment [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2025, 147(5): 051502.
- [85] Li Linmin, Niu Yabiao, Wei Guolai, et al. Investigation of cavitation noise using Eulerian-Lagrangian multiscale modeling [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 97: 106446.
- [86] Ghahramani E, Arabnejad M H, Bensow R E. Realizability improvements to a hybrid mixture-bubble model for simulation of cavitating flows [J]. *Computers & Fluids*, 2018, 174: 135-143.
- [87] Ghahramani E, Ström H, Bensow R E. Numerical simulation and analysis of multi-scale cavitating flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 922: A22.
- [88] Li Linmin, Wang Zhengdong, Li Xiaojun, et al. Very large eddy simulation of cavitation from inception to sheet/cloud regimes by a multiscale model [J]. *China Ocean Engineering*, 2021, 35(3): 361-371.
- [89] 田北辰, 李林敏, 陈杰, 等. 绕水翼空化流动多尺度数值研究 [J]. *力学学报*, 2022, 54(6): 1557-1571. (Tian Beichen, Li Linmin, Chen Jie, et al. Numerical study of multiscale cavitating flow around a hydrofoil [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(6): 1557-1571. (in Chinese))
- [90] 田北辰, 李林敏, 黄彪. 不同空泡脱落模式下空化多尺度特性研究 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2024, 39(1): 87-96. (Tian Beichen, Li Linmin, Huang Biao. Investigation into the multiscale characteristics of cavitation flow under different cavity shedding mechanism [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2024, 39(1): 87-96. (in Chinese))
- [91] Tian Beichen, Li Linmin, Meng Yang, et al. Multiscale modeling of different cavitating flow patterns around NACA66 hydrofoil [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(10): 103322.
- [92] Tian Beichen, Huang Biao, Li Linmin. Investigation of transient sheet/cloud cavitating flow dynamics from multiscale perspective [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(7): 077115.
- [93] Maeda K, Colonius T. Eulerian-Lagrangian method for simulation of cloud cavitation [J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 371: 994-1017.
- [94] Wang Zhengdong, Li Linmin, Li Xiaojun, et al. Investigation on multiscale features of cavitating flow in convergent-divergent test section using Eulerian-Lagrangian method [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 238: 107853.
- [95] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Ji Bin. Euler-Lagrange study of cavitating turbulent flow around a hydrofoil [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(11): 112108.
- [96] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Ji Bin. Numerical prediction of cavitation erosion risk in an axisymmetric nozzle using a multi-scale approach [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(6): 062112.
- [97] Zhou Mingzhe, Wang Ziyang, Bai Xiaorui, et al. Numerical simulation of multi-scale cavitating flow with special emphasis on the influence of vortex on micro-bubbles [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, 34(6): 1032-1043.
- [98] Cheng Huaiyu, Long Xinping, Ji Bin, et al. A new Euler-Lagrangian cavitation model for tip-vortex cavitation with the effect of non-condensable gas [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 134: 103441.
- [99] Li Linmin, Xu Weisen, Jiang Bowen, et al. A multiscale Eulerian-Lagrangian cavitating flow solver in OpenFOAM [J]. *SoftwareX*, 2023, 21: 101304.

(收稿日期: 2024-11-07 编辑: 熊水斌)

上海市水资源量与可利用水资源量计算方法综述

王一鸣¹, 薛剑锋², 乔红杰², 顾圣华³, 刘曙光^{1,4}, 娄厦^{1,4}, 杨中元¹

(1. 同济大学土木工程学院; 2. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局; 3. 上海市水务局;
4. 同济大学长江水环境教育部重点实验室)

摘要:上海市作为典型的超大型水质型缺水城市,本地水资源匮乏,虽然过境水资源丰富,但受咸潮入侵、突发污染等威胁,供水安全保障面临严峻挑战。本文基于上海市的自然地理情况与水资源分区情况,介绍了上海市的水资源构成、水量水质特点及利用现状。结合现有成果,总结了适用于上海市本地水资源量、过境水资源量及相应可利用量的分析和计算方法,指出部分传统方法应用于高度城市化河网区域的局限性,同时对未来的研究方向提出了展望。

关键词:水资源综合利用;区域水资源量;可利用水资源量;本地水资源;过境水资源;上海市

A review of methods for calculating water resources and available water resources in Shanghai//Wang Yiming¹, Xue Jianfeng², Qiao Hongjie², Gu Shenghua³, Liu Shuguang^{1,4}, Lou Sha^{1,4}, Yang Zhongyuan¹ (1. College of Civil Engineering, Tongji University; 2. Changjiang River Estuary Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission; 3. Shanghai Water Authority; 4. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University)

Abstract: As a typical megacity facing water quality-induced water scarcity, Shanghai suffers from limited local water resources. Although transit water resources are abundant, the security of its water supply is severely challenged by threats such as saltwater intrusion and sudden pollution incidents. Based on the natural geographic conditions and water resources zoning of Shanghai, this paper introduces the composition of the city's water resources, the characteristics of water quantity and quality, and the current utilization status. Based on existing research, methods for analyzing and estimating local water resources, transit water resources and their corresponding exploitable quantities are summarized. The limitations of certain traditional methods when applied to highly urbanized river network regions are identified and future research directions are proposed.

Key words: comprehensive utilization of water resources; regional water resources; available water resources; local water resources; transit water resources; Shanghai City

水资源是自然资源的组成部分,也是人类赖以生存和发展的基础性资源,对社会生产和居民生活起着至关重要的作用。我国水资源总量较为丰富,但人均水资源占有量仅占全球平均水平的1/4^[1],许多城市存在水资源短缺问题。水资源短缺是关系经济社会发展的重大战略问题,它不仅制约了经济可持续发展,也极大地影响了人民群众的用水安全和城市的高质量发展^[2-5]。上海市是我国超大型城市,生产、生活、生态用水需求均较大。上海市过境水(太湖流域来水和长江过境水)丰富、本地水贫乏,目前建有长江陈行水库、青草沙水库、东风西沙水库和黄浦江上游金泽水库四大水源地,构成了

“两江并举、集中取水、水库供水、一网调度”的水源地原水系统格局。但上海市水源地受地理位置影响,面临突发污染事故和咸潮入侵风险,水质关键指标季节性波动大、改善难度高且周期长,同时市域内水源地间连通互济保障能力有限,因而是我国典型的水质型缺水城市。2024年初,上海市政府正式批复现代化市级水网建设规划,以“三江一网十枢”为总布局,聚焦水资源配置、水生态保护治理与防洪除涝减灾,强化水资源保障体系的支撑作用。科学地统计区域水资源量与可利用水资源量有助于提高水资源利用效率、优化水资源配置,实现经济社会与生态环境的和谐发展。

基金项目:上海市水务局科研项目(沪水科2023-06);上海市科技创新行动计划项目(22ZR1464200,22230712900)

作者简介:王一鸣(2000—),女,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail:2330819@tongji.edu.cn

通信作者:娄厦(1986—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail:lousha@tongji.edu.cn

本文基于上海市的自然地理情况,介绍了水资源的构成和特点,并参考《全国水资源综合规划技术大纲》(水规计[2002]330号文件)的总体框架,依据 GB/T 23598—2009《水资源公报编制规程》、SL/T 238—1999《水资源评价导则》、SL/T 278—2020《水利水电工程水文计算规范》及相关文献资料中的方法与案例,总结了上海市水资源量的分析和计算方法,以期为保障城市供水安全、提高水资源利用效率提供科学依据。

1 上海市水资源特征

1.1 自然地理

上海市坐落于长三角前缘、太湖流域下游,北枕长江、东临东海、南濒杭州湾、西与江浙相接。全市陆域总面积为 6340.5 km²,根据地形可划分为东部滨海平原、中部碟缘高地、西部淀泖低地、北部江口沙洲 4 个部分^[6]。上海市气候属亚热带季风气候,温和湿润、雨量充沛,其降水空间分布不均、年际变化大、季节性变化亦大,主要集中于 5—9 月,分为春雨期、梅雨期、秋雨期,其中盛夏和初秋的暴雨具有局部性、短历时、高强度的特点。上海市分属于太湖流域和长江流域,水网交织,主要有长江口、黄浦江及其支流吴淞江(苏州河)、太浦河等^[7-9],上海市水系分布及重要水文站分布见图 1。据 2023 年统计数据,全市共有河道(湖泊)46441 条(个),河湖面积 655.1905 km²,河湖水面率 10.33%。水面比降平缓,感潮河段受潮汐作用影响,局部水流呈往复流。

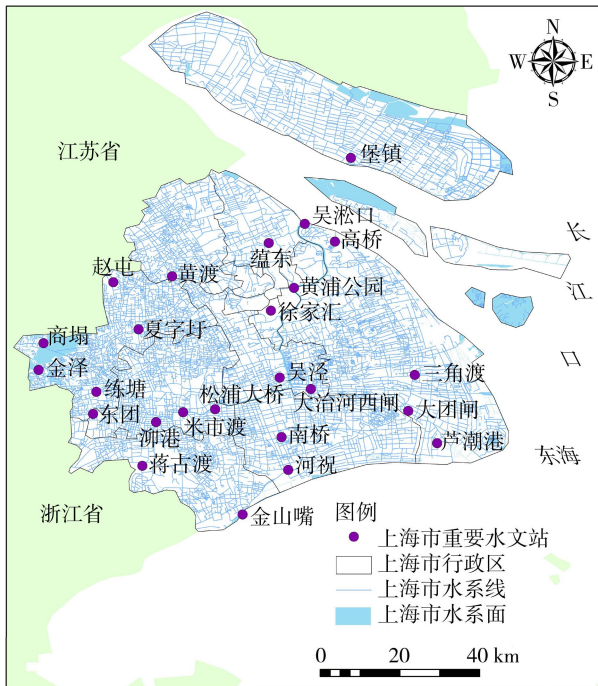


图 1 上海市水系分布及重要水文站分布

受半日潮影响,每天出现两次高潮和两次低潮,河口平均潮差约 2.3 m。

1.2 水资源分区

水资源分区以区域自然地理环境为基础,需考虑流域的完整性、与其他区域的协调性等,并结合该地区经济发展趋势和水资源开发利用需求^[10-11],具体包括气候条件和地质条件分区、行政分区与流域分区。按行政分区,上海市可分为中心城区、嘉定区、宝山区、闵行区、松江区、浦东新区、奉贤区、青浦区、金山区、崇明区。按流域分区,上海市包括黄浦江、杭嘉湖区、武阳区、通南及崇明岛诸河。由于上海市各部分水资源量大小相差较大且分布特点各不相同,需在分区的基础上对水资源分片开展计算,通常可分为长江口、黄浦江、淀山湖及 14 个水利片。结合《2023 上海市河道(湖泊)报告》与文献^[12],14 个水利片的面积及所在行政区如表 1 所示,14 个水利片总面积为 6158.62 km²,占上海市陆域总面积(6340.5 km²)的 97.13%,其余区域主要为沿海滩涂及未纳入水利片划分的区域。

表 1 上海市水利片基本情况

序号	水利片	总面积/ km ²	河湖面 积/km ²	所在行政区
1	嘉宝北片	698.77	57.51	嘉定区、宝山区、普陀区
2	蕴南片	173.37	4.42	宝山区、静安区、杨浦区、普陀区、虹口区
3	淀北片	179.28	6.35	长宁区、徐汇区、闵行区
4	淀南片	186.75	10.00	闵行区、徐汇区
5	浦东片	1976.60	190.79	浦东新区、闵行区、奉贤区
6	青松片	758.23	69.33	青浦区、松江区
7	太北片	85.05	16.14	青浦区
8	太南片	99.96	6.73	青浦区、松江区
9	浦南东片	479.00	32.93	金山区、松江区
10	浦南西片	293.06	19.00	金山区、松江区
11	高榻片	32.42	4.81	青浦区
12	崇明岛片	1070.00	102.21	崇明区
13	长兴岛片	76.87	17.97	崇明区
14	横沙岛片	49.26	4.56	崇明区
全市		6158.62	542.75	

2 上海市水资源构成与特点

2.1 水资源构成

上海市水资源包括本地水资源和过境水资源。本地水资源由地表径流和地下水组成。地表径流包括黄浦江、苏州河、川杨河、淀山湖等。根据《2023 年上海市水资源公报》,2023 年上海市地表径流量为 34.80 亿 m³,折合年径流深 548.8 mm。上海市主要地下水为松散岩类孔隙水^[9],2023 年上海市地下水资源量为 9.76 亿 m³,地下水与地表水资源不重复量为 6.70 亿 m³。因本地水资源总量等于地表径流和地下水与地表水资源不重复量之和,

2023年上海市本地水资源总量为41.50亿 m^3 。

过境水资源则由长江过境水量和太湖流域来水量组成,水资源量十分丰裕。2023年上海市太湖流域来水量为195.4亿 m^3 ,主要经黄浦江干流下泄排入长江口,通过黄浦江松浦大桥断面的年平均净泄流量为620 m^3/s ;长江干流来水量为6812.0亿 m^3 ,长江徐六泾水文站平均流量为21600 m^3/s 。

2.2 水资源特点及现状

2.2.1 水量

结合2023年上海市本地水资源总量与人口数量,上海市人均水资源占有量为167 m^3 左右,低于全国及世界平均水平,其中地下水仅约占地表径流量的28%,且曾存在地下水超采问题。在时间分布上,上海市丰水年、平水年、枯水年交替出现,出现比例约为0.21:0.54:0.25;水资源量年内分配不均、洪枯季节变化大,汛期水资源量约占全年径流量的60%^[13]。在空间分布上,受自然条件和工程措施的影响,区域性动态分布不均,存在着“郊区水网稠密、水资源量多,市中心区水网稀疏、水资源量少”的特点^[14],如2023年崇明区与中心城区水资源量分别为9.51亿、1.78亿 m^3 ,前者水资源量约为后者的5倍。

过境水资源量是上海市水资源量的重要组成部分,其数量约为本地水资源量的169倍,可弥补本地水资源量的不足。过境水资源量存在年内分配不均、年际变化相对较小的特点,以长江大通站为例,大通站最大、最小年径流量分别出现于1954年(13590亿 m^3)和2011年(6666亿 m^3),多年平均径流量为8974亿 m^3 ,年径流量在多年均值上下波动;大通站多年平均最大、最小径流量分别出现于7月(50000 m^3)和1月(11800 m^3),前者径流量约为后者的4.24倍;汛期为5—10月、枯水期为11月至次年4月,其中汛期径流量占全年径流量的70.15%,径流年内波动明显高于年际变化^[15]。

近年来上海市不断推进水资源开发项目,以提高水资源统筹配置水平。2023年上海市在用公共供水原水工程(包括青草沙、陈行、崇明东风西沙、黄浦江上游金泽饮用水水源及黄浦江上游松浦大桥备用饮用水水源)总取水能力达1334.5万 m^3/d ,大幅提高了上海市水源抗风险能力。同时,针对地下水超采问题,目前已全面关闭公共供水深井水厂,连续13年保持人工回灌量大于开采量^[3],2023年上海市人工回灌量达1512.20万 m^3 ,约为深层地下水开采量的20.4倍,地下水超采问题得到遏制。

2.2.2 水质

上海市地表水水质有显著提升。在1999年上

海市主要骨干河道、湖泊水质综合评价中,Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类、劣Ⅴ类河长分别占比10.1%、30.9%、31.2%、27.8%^[7]。而根据上海市生态环境局发布的《2023上海市生态环境状况公报》,全市主要河湖断面水质为Ⅱ~Ⅲ类、Ⅳ类的断面分别占比97.8%、2.2%,无Ⅴ类、劣Ⅴ类断面,可见地表水质已有明显改善。

对于地下水水质而言,根据《2018上海市生态环境状况公报》,国家级地下水监测点水质为Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类的数量分别占比7.7%、76.9%、15.4%;而根据《2023上海市生态环境状况公报》,地下水水质为Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅴ类的监测点数量分别占比2.3%、58.2%、39.5%,水质为Ⅲ类的地下水占比小幅下降,而Ⅴ类的地下水占比显著上升。

虽然上海市过境水资源量较为丰富,但水资源的利用在一定程度上受到水质条件的限制。黄浦江作为上海市重要的通航河道和接纳水体,其水质一方面面临着如航运事故、油品化学品泄漏等突发性污染及藻类、水葫芦等外源生物入侵的风险^[3,16],另一方面会受上游来水、生活污水与工农业污水等因素影响。例如:黄浦江吴泾段受流经化工区、上游农田多、相邻地块正开发建设等因素影响,其 COD_{Cr} 指标年际间有所上升,其他耗氧有机污染物指标降幅低于其他河段;黄浦江河口段因存在滨江雨污水合流排放问题,其溶解氧水平明显低于其他河段且改善效果不佳^[17]。因此,黄浦江水厂取水口一再向污染较轻的上游迁移^[18-19],但下泄水量较小时(如枯水季节)易受污水上溯的危害。

由于长江来水水量丰沛且水质良好,上海市人民政府在长兴岛西北方冲积沙洲青草沙上建设了青草沙水库,作为上海的水源地。该水库是目前国内最大的蓄淡避咸河口江心水库,具有库容大、水体停留时间长、水体自净能力强的特点^[20]。目前上海市原水供应总量的75%来自长江口水源地,可见其对全市供水的重要作用。虽然长江口水量丰沛、水质良好,但盐水入侵对长江口水质和可利用的淡水资源量具有严重影响。在长江径流量较小时(如枯水年份),长江口会遭遇不同程度的盐水入侵,一般为5~7d,严重时为十几天,极端情况下超过20d。盐水入侵会造成长江口水源地取水口的含氯度超标,若盐水入侵持续时间超过水源地供水能力,便会对城市供水安全造成严重威胁。例如:2014年长江口咸潮入侵事件历时19d,氯化物质量浓度最高超过3000 mg/L ,远超250 mg/L 的标准,影响人口高达200万^[21];2022年长江流域“汛期反枯”现象使陈行、青草沙、东风西沙水库均遭遇咸潮入侵问题,入

侵次数分别为 8、5、11 次,最长影响时长分别为 27、98、28 d,直通城市连续供水天数的极限,青草沙水库氯化物质量浓度最高达 2 980 mg/L^[22],给城市供水安全带来了巨大的挑战。

3 上海市水资源量与可利用水资源量计算方法研究进展

上海市水资源量分析首先需进行水资源分区,根据选用水文站、参证站的水文资料进行三性审查^[23],并进行还原计算与插补延长的数据处理工作。插补延长多使用相关分析法与水文比拟法^[24-25]来弥补收集的资料出现代表性较差或缺测的情况,以提高其可靠性;还原计算多使用分项调查法^[26-27],并分析选用水文站降雨-径流关系的一致性。

上海市水资源总量为地表径流量、地下水资源量中与地表水资源不重复量、太湖流域来水量与长江过境水量之和^[28];而可利用水资源量则是水资源总量中在技术可行、经济合理的情况下通过工程措施进行调节利用且有一定保证率的部分。

3.1 本地水资源量

本地水资源量包括地表径流量与地下水资源量。对于地表径流量,可以结合流域水量平衡法、年径流深等值线图法及各类模型(例如地面分类模型^[29-32]、SWAT 模型^[33-36]、HEC-HMS 模型^[37])进行计算。陈科信^[38]曾基于流域水量平衡公式估算了上海市本地区地表径流。等值线图法亦为常用手段,如周黔生^[39]在对杭州市进行分区后,结合等值线图法计算了各分区地表水资源量,并取其和为杭州市地表水资源量。近年来遥感技术的发展进一步提升了等值线图法的精度,如孙永寿等^[40]利用 ArcGIS 软件 ArcToolbox 将特殊地形区矢量等值线作内插处理,使用栅格化等值线法统计得到研究区水资源量;曾艳芬等^[41]采用 ArcGIS 自动绘制和人工经验修订相结合的方法绘制了径流深等值线图,并采用面积加权法量算了多年平均径流深,最后推求得到了地表水资源量;Kushwaha 等^[42]结合

ArcGIS 软件与 SWAT 模型计算了地表径流量,并评估了地表径流向深层含水层补给的地下水补给潜力。

流域水量平衡法与等值线图法概念清晰、计算便捷,但对于上海这个高度城市化且下垫面条件复杂的平原河网地区城市,分布式水文模型(如 SWAT)和水文水动力耦合模型^[43]能有效结合上海市城市化进程中的土地利用类型变化、水利工程调度等情况,更好地刻画城市下垫面变化与人类活动对地表径流量的影响。对于地表水可利用量的估算需区分不同单元,单一河道区适合采用扣损法^[32,44-45]或基于扣损法建立的去头斩尾法^[46],可减少流域内不同区域经济水平及工程建设不平衡所带来的影响。地表径流量与地表水可利用量计算方法对比见表 2。上海市大部分地区属河网密集区,河道纵横,水流交换复杂,直接应用扣损法较为困难,更宜采用水文水动力耦合模型进行模拟,如基于扣损法构建的平原区概化水库调蓄模型^[47-48],该模型综合考虑不同来水频率、工程引提水能力及生态用水情况来计算地表水可利用量及汛期弃水量,是研究河网地区可利用水资源量的有效手段。

对于地下水资源量可采用补给法、基流切割法^[49-51]进行计算,根据水量均衡原理^[6],含水层年补给量取含水层年净开采量及含水层年储存量的变化量之和。地下水资源分为浅层地下水(潜水)和深层地下水(承压水),潜水资源因透水性弱且易遭受污染,一般不开采利用,目前可开发利用的是承压水^[13]。地下水可开采量计算可使用可开采系数法^[52-54],取为可利用系数与地下水资源量之积。鉴于上海市长期面临地面沉降问题,在计算可开采量时,必须考虑开采量与地下水位及地面沉降的互动关系,如朱晓强^[55]结合罚函数法与变尺度法,建立了一维地面沉降非线性耦合数学模型,以计算大浦东地区承压含水层可开采地下水量。该方法对控制地面沉降具有重要参考价值。地下水资源量与地下水可开采量计算方法对比见表 3。上海市作为典型的软土地区,地下水超采易引发地面沉降,因此在

表 2 地表径流量与地表水可利用量计算方法对比

类别	方法	优点	缺点	适用性
地表径流量	流域水量平衡法	水循环过程概念清晰	各平衡项的精确测定存在难度,误差易累积	可用于理论分析或作为其他方法的校验基准
	等值线图法	原理简单,计算便捷	在站点稀疏或下垫面变化剧烈地区精度有限	适用于上海市水资源量宏观估算
	水文模型、水文水动力耦合模型	物理机制明确,能精细刻画下垫面空间异质性	数据需求量大,率定和验证过程复杂,计算成本高	适用于人类活动影响下上海市地表径流量评估
地表水可利用量	扣损法及其改进方法	计算简便,参数易获取	平原河网区水流方向不定、往复流显著,对其刻画不足	适用于上海市单一河道区
	水文水动力耦合模型	水流运动、闸泵调度情况模拟精确,结果可靠	模型构建复杂,需要详细的地形、水利工程运行等数据	适用于上海市河网密集区

表3 地下水资源量与地下水可开采量计算方法对比

类别	方法	优点	缺点	适用性
地下水 资源量	补给法	概念直接	参数(如降雨入渗系数)空间 变异性大	适用于上海市平原区地下水资源 量计算
	基流切割法	利用河道流量过程线数据, 计算便捷	方法选择存在主观性	适用于上海市山丘区地下水资源 量计算
地下水 可开采量	可开采系数法	操作简单,估算快速	系数取值存在主观性	可作为上海市区域性宏观规划的 参考
	耦合地面沉降的 数学模型	定量刻画开采-水位下降-地 层变形过程	需详细的地质参数,技术复杂	是实现上海市水资源可持续利用 与城市安全双目标的重要方法

可开采系数法的基础上,应进一步采用耦合地面沉降机制的数学模型进行校核,以确保水资源开采的地质环境安全。

对于本地水资源总量,除 GB/T 23598—2009《水资源公报编制规程》中的规范法外,还可参考水平衡方程法^[56]、Grey-Markov 模型^[57]等进行计算。对于本地可利用水资源总量,其总体计算思路为“地表水可利用量+地下水可开采量-两者重复计算量”,也有学者采用基于水量和水质的可利用水资源量指数法^[58]、MLF 流量法^[59]、可用流量法^[60]、F. J Mock 模型^[61]、Thorntwaite 水量平衡法^[62-63],或结合公共领域卫星数据产品^[64]进行推求。

3.2 过境水资源量

上海市过境水资源量包括太湖流域来水量和长江过境水量,可以使用代表站法^[65]进行推求。徐六泾水文站位于长江下游干流河口段,是长江入海水量的流量控制测站,大通水文站是长江干流最后一个径流控制站,两者实测流量数据可从长江水文网获取;黄浦江干流也有两大控制断面,上游以松浦大桥测站为常设断面,下游以吴淞口测站为调查断面^[12]。《2023 年上海市水资源公报》依据徐六泾水文站年平均流量、黄浦江松浦大桥断面年平均净泄流量分别推求其年入海水量和年净泄水量,即过境水资源量。对于长江水量,阮仁良^[12]参照大通水文站的实测水量,根据其与大通、徐六泾站区间水量之和推求徐六泾站多年平均径流量;卜东平^[15]以大通站与徐六泾站的区间来水量在大通站来水量中的占比为倍比,将大通站实测径流量放大得到长江上海段年过境水量;刘伟莘^[66]汇总了水闸和泵站引水量,取长江入海流量为大通流量与净引水流量之差。

计算可利用的过境水资源量时,需综合考虑水质维持需水(如压制咸潮)、生态需水及水利工程调度等因素。以长江口可利用水资源量为例,卜东平^[15]在不考虑长江河道地下水资源量的前提下,将长江上海段年可利用过境水资源量取为长江上海段年过境水量扣除生态用水及压制咸潮所需水量;顾圣华^[13]考虑咸水入侵的影响,建立了长江口吴淞站

多年平均月含氯度与相应长江月平均流量之间的关系,推算出长江口含氯度不超标情况下所需的长江上游来水流量,并将可利用量取为长江口年平均入海水量与冲盐必须保证入海水量之差。

除上述方法以外,还可以使用图解法、超标天数分析法进行计算。其中,图解法^[67]即建立长江口(以吴淞站为代表)出现含氯度月内超过 250 mg/L 的天数与相应长江大通站月平均流量相关图,得到一般情况下长江口含氯度不超标时的大通流量。超标天数分析法^[67]则是通过分析长江口含氯度超标天数与对应长江大通站月平均流量资料,建立相关方程,同样可推算出长江口含氯度不超标所需的长江来水流量。

同时,学者们进一步考虑潮差、风况等因素,结合相关模型(例如盐度预测经验模型^[68]、ECOM-si 三维盐度数学模型与 Delft 3D 模型^[69]等)计算、探讨了避免时间段内连续盐度超标的临界流量。如高华斌等^[70]基于新建站盐度、大通站流量、青龙港潮差间的相关关系,建立了盐度-流量-潮差多元回归模型,可用于流量与潮差不同时大于等于 12 500 m³/s 和大于 250 cm 情况下的临界流量经验值计算。

长江口咸潮入侵是制约上海市过境水资源可利用性的关键因素,长江口水质维持需水计算方法对比见表 4。对于上海市这样的对水资源安全保障要求极高的特大城市,可以采用能够综合考虑流量、潮差、风况等多重因子的盐度数学模型,更精确地模拟咸潮上溯规律,为水库避咸蓄淡调度提供精准预报支持。

生态需水量包括航运需水量、生物多样性需水量、河床冲淤变化需水量等,其计算方法可分为水文学法、水力学法、栖息地模拟法、整体分析法四大类。河口地区可根据 SL/T 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》中的入海水量法,参考河流开发利用程度相对较低年代的控制断面生态需水量与天然径流量之比,确定河口生态需水量占入海水量的比例;亦可借助数学模型,如王高旭等^[71]根据盐的质量分数这一反映河口生态环境是否健康的敏感因子,采

表4 长江口水质维持需水计算方法对比

方法	优点	缺点	适用性
经验法(图解法、超标天数分析法等)	基于历史数据,形式简单、计算快速	难以捕捉咸潮入侵的复杂物理过程(如潮汐、风场的影响)	适用于上海市水情紧急时的快速判断
盐度数学模型	物理机制明确,模拟流量、潮汐、风况等多因子共同作用下的盐度时空分布	模型构建、率定和验证需要海量数据和高水平专业技术	适用于上海市可利用的过境水资源量精确管理与风险评估

用大通站流量作为模型的上边界输入条件,计算了大通站不同流量时下游各控制站点盐的质量分数,以上海市自来水公司盐水入侵标准为控制标准,求得长江大通站适宜的生态流量。此外,南水北调、三峡工程等重大水利工程对长江口可利用水资源量的影响也需纳入考量,如阮仁良等^[72]根据上海市水务局《长江三峡工程对河口水文情况和环境的影响》的研究结果,取徐六泾站多年平均实测径流量减去冲盐输沙通航水量和南水北调东线引水量,结合三峡工程调蓄水量得到长江口可利用水资源量。

同样,对于黄浦江可利用水资源量,为了尽量抑制下游污水的上溯,可将黄浦江松浦大桥站多年平均净泄流量减去控制水质所需平均下泄流量,求得其可利用水资源量^[7]。2018年水利部发布的《太湖流域水量分配方案》指出,金泽水库实施后松浦大桥断面最小月净泄流量控制指标为 $100\text{ m}^3/\text{s}$;顾圣华^[13]结合“7Q10”法,将近十年最枯月平均流量或90%保证率最枯月平均流量作为参考值,但若上溯严重,应通过太浦闸及两岸口门调度增大下泄流量;刘水芹等^[73]基于MIKE软件建立了上海市内陆河网地区水量水质数学模型,以氨氮浓度为标准,分析了太浦闸调度下泄流量变化对松浦大桥站净泄流量与水质的影响;彭焱梅等^[74]在太浦闸调度基础上进一步考虑了两岸口门调度,采用太湖流域平原河网水量水质数学模型,模拟了不同典型年金泽水库、松浦大桥净泄流量与氨氮浓度情况;毛兴华等^[75]考虑黄浦江属长江支流,水资源条件受干流控制,提出增加氯离子浓度作为保障因子。黄浦江作为上海市重要的饮用水源和纳污河道,其可利用水资源量的确定需兼顾水质和水量。可以采用水动力模型(如MIKE、Delft 3D)模拟分析不同调度情景(如太浦闸调控、口门启闭)对净泄流量和关键水质指标(如氨氮、氯离子浓度)的影响,从而科学确定满足水质目标的可利用水资源量。

4 研究展望

水资源量、可利用水资源量及各分项的计算方法多种多样,不同计算方法在参数选取、空间尺度等方面存在差异。传统方法(如等值线图法、扣损法、可开采系数法等)评价高度城市化、河网密布、存在

地面沉降风险地区的水资源时可能存在适用性不佳、精度不足等局限。在今后的研究中,应着力推动水文-水动力模型深度耦合,发展适应超大城市下垫面复杂性的水资源评价模型,并融合遥感等新型监测数据,加强多源数据的融合与同化,提升模型在无资料或缺测区域的模拟能力。

过境水资源量是上海市水资源总量的重要组成部分,其可利用性常受咸潮入侵、污水上溯等水质问题制约。未来可开展针对过境水资源的水量-水质联合计算,通过基于物理过程的水文水动力耦合模型或基于数据驱动的机器学习等智能算法开展多情景联合调度研究,模拟不同气候条件和上游人类活动(工程调度等)组合下的水资源供给格局,考虑极端气候事件或突发污染事故对水资源可利用量的影响,为提升特大型城市水资源系统的韧性与保障能力提供前瞻性科学支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2023年中国水资源公报[R]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [2] 周琦,池飞,逢勇,等. 可利用水资源量正逆向联合计算方法[J]. 水资源保护,2016,32(5):42-46. (Zhou Qi, Chi Fei, Pang Yong, et al. A combined forward and reverse method for available water resources calculation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 42-46. (in Chinese))
- [3] 龚李莉,蔡梅,王元元,等. 新时期水资源保护面临的形势及对策建议:以上海市为例[J]. 人民长江,2023,54(增刊1):39-44. (Gong Lili, Cai Mei, Wang Yuanyuan, et al. Situation and countermeasures of water resources protection in new era: case of Shanghai City[J]. Yangtze River, 2023, 54(S1): 39-44. (in Chinese))
- [4] 何义亮,陈奕涵,彭颖红. 新加坡的水资源开发与保护对上海的启示[J]. 净水技术,2018,37(4):1-7. (He Yiliang, Chen Yihan, Peng Yinghong. Enlightenment of Singapore's water resources development and protection to Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(4): 1-7. (in Chinese))
- [5] 张兵,余一辰,邹晨. 低碳城市试点对工业水资源绿色效率的影响机制研究[J]. 水利经济,2024,42(3):1-7. (Zhang Bing, Yu Yichen, Zou Chen. Research on impact mechanism of low-carbon city pilot on green efficiency of industrial water resources[J]. Journal of Economics of

- Water Resources, 2024, 42(3): 1-7. (in Chinese))
- [6] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等.基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J].水资源保护,2024,40(3):71-77. (Wei Haoshan, Wang Hongrui, Jia Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 71-77. (in Chinese))
- [7] 顾圣华.上海市水资源特征[J].水文,2002,22(5):40-43. (Gu Shenghua. The characteristics of water resources in Shanghai [J]. Hydrology, 2002, 22(5): 40-43. (in Chinese))
- [8] 毛兴华.上海市水资源论证关键问题探讨[J].水利发展研究,2013,13(8):59-62. (Mao Xinghua. Discussion on key issues in the demonstration of water resources in Shanghai [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(8): 59-62. (in Chinese))
- [9] 刘华.上海市水资源安全利用理论及应用研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [10] 邱桃,张士锋,贤雯.中南半岛五国水资源分区研究[J].地理研究,2021,40(5):1421-1431. (Qiu Tao, Zhang Shifeng, Xian Wen. Study on water resources zoning of five countries in Indo-China Peninsula [J]. Geographical Research, 2021, 40(5): 1421-1431. (in Chinese))
- [11] 郝林钢,左其亭,石永强.流域水系统典型分区方法对比分析及应用[J].水电能源科学,2017,35(7):22-25. (Hao Lingang, Zuo Qiting, Shi Yongqiang. Comparative analysis and application of typical zoning methods in the study of river basin water system [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7): 22-25. (in Chinese))
- [12] 阮仁良.平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究:以上海市水资源引清调度为例[D].上海:华东师范大学,2003.
- [13] 顾圣华.上海市水资源可持续利用的探讨[C]//太湖高级论坛交流文集.上海:中国水利学会,2004:209-213.
- [14] 张小燕.浅谈上海的水资源保护[J].科技信息,2011(15):778. (Zhang Xiaoyan. A brief discussion on the protection of water resources in Shanghai [J]. Science & Technology Information, 2011(15): 778. (in Chinese))
- [15] 卜东平.咸潮入侵对长江上海段过境水资源利用的影响探讨[J].上海国土资源,2023,44(3):61-67. (Bu Dongping. Influence of saltwater intrusion on the utilization of transiting water resources in the Shanghai section of the Yangtze River [J]. Shanghai Land & Resources, 2023, 44(3): 61-67. (in Chinese))
- [16] 陈祖军,李珺,谭显英.上海城市水资源发展战略研究[J].中国给水排水,2018,34(2):24-30. (Chen Zujun, Li Jun, Tan Xianying. Study on development strategy of urban water resources in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 24-30. (in Chinese))
- [17] 卢智灵.黄浦江水生生态系统变化趋势分析与改善策略[J].净水技术,2024,43(6):80-88. (Lu Zhiling. Analysis of changing trends and countermeasures of water ecosystem in Huangpu River [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 80-88. (in Chinese))
- [18] 周超,高乃云,赵世焜,等.上海青草沙水库水质调查与评价[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(6):894-899. (Zhou Chao, Gao Naiyun, Zhao Shijia, et al. Evaluation of water quality in Qingcaosha Reservoir of Shanghai [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 894-899. (in Chinese))
- [19] 钱海雷,许慧慧,郭常义,等.青草沙水库启用对上海市浦西七区饮用水水质的影响[J].环境与健康杂志,2018,35(3):242-245. (Qian Hailei, Xu Huihui, Gu Changyi, et al. Effects of Qingcaosha Reservoir operation on drinking water quality in Puxi area, Shanghai [J]. Journal of Environment and Health, 2018, 35(3): 242-245. (in Chinese))
- [20] 李瑶,徐凌云,史云鹏.基于不同水质评价方法的长江口两大水源水库水质评价研究[J].环境科学与管理,2020,45(8):173-177. (Li Yao, Xu Lingyun, Shi Yunpeng. Research on water quality evaluation of two water source reservoirs in Yangtze River Estuary based on different water quality evaluation methods [J]. Environmental Science and Management, 2020, 45(8): 173-177. (in Chinese))
- [21] 毛兴华.2014年长江口咸潮入侵分析及对策[J].水文,2016,36(2):73-77. (Mao Xinghua. Analysis of saltwater intrusion in Yangtze River Estuary in 2014 [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 73-77. (in Chinese))
- [22] 顾晨.超大城市供水系统韧性评估与应用实践:以上海受咸潮入侵影响为例[J].净水技术,2024,43(5):1-9. (Gu Chen. Resilience assessment and application for megacity water supply system; case of Shanghai salt-tide intrusion [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 1-9. (in Chinese))
- [23] 辛亮,陈元芳,顾圣华,等.上海长江口区水情资料的三性分析及自动化计算[J].水力发电,2016,42(7):27-30. (Xin Liang, Chen Yuanfang, Gu Shenghua, et al. Three characteristics analysis and automatic calculation of hydrologic data in Yangtze Estuary area of Shanghai [J]. Water Power, 2016, 42(7): 27-30. (in Chinese))
- [24] 宫云赵,李振苓,刘本宝.青岛市分区地表水资源量计算与分析[J].人民长江,2020,51(增刊2):68-70. (Gong Yunzhao, Li Zhenling, Liu Benbao. Surface water resources calculation by area partition of Qingdao City [J]. Yangtze River, 2020, 51(S2): 68-70. (in Chinese))
- [25] 赵蕾,廖瑜.某水库年径流插补延长方法适用性分析[J].人民珠江,2023,44(增刊2):222-226. (Zhao Lei,

- Liao Yu. Applicability of annual runoff interpolation and extension method in a reservoir[J]. Pearl River, 2023, 44 (S2): 222-226. (in Chinese))
- [26] 郭志刚. 具有长期径流资料时设计年径流及年内分配计算分析[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(2): 73-74. (Guo Zhigang. Calculation and analysis of design annual runoff and annual distribution with long-term runoff data [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2013, 19(2): 73-74. (in Chinese))
- [27] 金翠翠, 李新德, 周伟凯. 清漳河流域刘家庄水文站设计年径流量及年内分配计算[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(8): 28-31. (Jin Cuicui, Li Xinde, Zhou Weikai. Calculation of annual runoff and annual distribution of Liujiashuang hydrological station in Qingzhanghe River Basin [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23(8): 28-31. (in Chinese))
- [28] 阮仁良, 阮大成, 张勇, 等. 上海市水资源统计和核算体系研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [29] 朱威. 扬州市沿江地区水资源配置相关问题研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [30] 赵林林, 缪成晨, 周子江, 等. 仪征市地表水资源评价与利用研究[J]. 治淮, 2019(2): 13-14. (Zhao Linlin, Miao Chengchen, Zhou Zijiang, et al. Research on the evaluation and utilization of surface water resources in Yizheng City [J]. Harnessing the Huaihe River, 2019(2): 13-14. (in Chinese))
- [31] 王柳林, 张秀菊, 纪鹏程, 等. 基于 CMIP6 的通州区未来地表水资源量估算[J]. 水力发电, 2023, 49(8): 27-31. (Wang Liulin, Zhang Xiuju, Ji Pengcheng, et al. Estimation of future surface water resources in Tongzhou district based on CMIP6 [J]. Water Power, 2023, 49(8): 27-31. (in Chinese))
- [32] 何琴, 童建, 罗俐雅, 等. 秦淮河流域地表水资源量计算分析[J]. 江苏水利, 2023(3): 41-43. (He Qin, Tong Jian, Luo Liya, et al. Calculation and analysis of surface water resources in Qinhuai River Basin [J]. Jiangsu Water Resources, 2023(3): 41-43. (in Chinese))
- [33] Juma L A, Nkongolo N V, Raude J M, et al. Assessment of hydrological water balance in Lower Nzoia Sub-catchment using SWAT model: towards improved water governance in Kenya [J]. Heliyon, 2022, 8(7): e09799.
- [34] Farzana S Z, Zafor M A, Shahariar J A. Application of SWAT model for assessing water availability in Surma River Basin [J]. Journal of the Civil Engineering Forum, 2019, 5(1): 29-38.
- [35] Maliehe M, Mulungu D M M. Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana Catchment, Lesotho [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 100: 305-316.
- [36] Tefera G W, Dile Y T, Srinivasan R, et al. Hydrological modeling and scenario analysis for water supply and water demand assessment of Addis Ababa City, Ethiopia [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 46: 101341.
- [37] Genjebo M G, Kemal A, Nannawo A S. Assessment of surface water resource and allocation optimization for diverse demands in Ethiopia's upper Bilate Watershed [J]. Heliyon, 2023, 9(10): e20298.
- [38] 陈科信. 上海地表水资源估算方法和特点[J]. 自然资源, 1982(4): 19-22. (Chen Kexin. Estimation methods and characteristics of surface water resources in Shanghai [J]. Resources Science, 1982(4): 19-22. (in Chinese))
- [39] 周黔生. 杭州市水资源量的计算[J]. 浙江水利科技, 1986(4): 31-40. (Zhou Qiansheng. Calculation of water resources in Hangzhou [J]. Zhejiang Hydraulics, 1986(4): 31-40. (in Chinese))
- [40] 孙永寿, 李燕. 基于栅格数据在水资源评价水资源量计算中的应用[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(10): 185-189. (Sun Yongshou, Li Yan. Application of grid data in calculation of water resources quantity in water resources evaluation [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(10): 185-189. (in Chinese))
- [41] 曾艳芬, 涂进, 陈莹. 云南省楚雄州水资源量、可利用量分析计算水资源管理对策建议[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 378-385. (Zeng Yanfen, Tu Jin, Chen Ying. Analysis and calculation of water resources quantity and availability and suggestions on water resources management in Chuxiong of Yunnan Province [J]. Advances in Geosciences, 2022, 12(3): 378-385. (in Chinese))
- [42] Kushwaha N L, Elbeltagi A, Patel A, et al. Assessment of water resources using remote sensing and GIS techniques [J]. Current Directions in Water Scarcity Research, 2022, 7: 85-98.
- [43] 高庆, 刘芸辰, 李根, 等. 基于水文水动力模型的平原地表水资源研究[J]. 水力发电, 2022, 48(8): 15-20. (Gao Qing, Liu Yunchen, Li Gen, et al. Study on plain surface water resources based on hydrologic-hydrodynamic coupling model [J]. Water Power, 2022, 48(8): 15-20. (in Chinese))
- [44] 张海明, 叶文, 臧力永. 生态文明视角下宿迁市可用水量研究[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(5): 46-48. (Zhang Haiming, Ye Wen, Zang Liyong. Research on available water resources in Suqian City from the perspective of ecological civilization [J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(5): 46-48. (in Chinese))
- [45] 董颖, 赵健. 水资源可利用量计算方法在陕北地区的应用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 104-108. (Dong Ying, Zhao Jian. The calculation method for available water resources of northern Shaanxi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(3): 104-108. (in Chinese))

- [46] 金新芽,张晓明,马俊. 地表水资源可利用量计算实用方法研究:以浙江省金华江流域为例[J]. 水文,2016,36(2):78-81. (Jin Xinya, Zhang Xiaowen, Ma Jun. A practical method for available surface water resources quantity calculation: a case study of Jinhuajiang River Basin in Zhejiang Province [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 78-81. (in Chinese))
- [47] 陈荣彤,董增川,邵逸卿,等. 基于概化水库模型的地表水资源可利用量研究:以里下河平原河网区为例[J]. 人民长江,2022,53(7):107-112. (Chen Motong, Dong Zengchuan, Shao Yiqing, et al. Study on availability of surface water resources in plain area based on generalized reservoir model: case of river network area of Lixiahe Plain [J]. Yangtze River, 2022, 53(7): 107-112. (in Chinese))
- [48] 马嘉忆,董增川,邵逸卿,等. 平原河网地区地表水资源可利用量计算方法研究[J]. 中国农村水利水电,2021(10):50-54. (Ma Jiayi, Dong Zengchuan, Shao Yiqing, et al. A study of the calculation method of available surface water resources of plain river network area [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(10): 50-54. (in Chinese))
- [49] 尤传誉,都兴伟,王建中,等. 基流切割法在山区地下水资源评价中的应用研究[J]. 东北水利水电,2019,37(9):43-46. (You Chuanyu, Du Xingwei, Wang Jianzhong, et al. Application study of base flow separation method in mountain groundwater resources assessment [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2019, 37(9): 43-46. (in Chinese))
- [50] 唐洪波,陈强,赵兴明. 多种基流切割法在青海地下水评价中的应用[J]. 人民长江,2010,41(14):41-43. (Tang Hongbo, Chen Qiang, Zhao Xingming. Application of base-flow separation methods in underground water evaluation in Qinghai Province [J]. Yangtze River, 2010, 41(14): 41-43. (in Chinese))
- [51] 许红燕. 舟山群岛地下水资源量及地下水水质评价[J]. 浙江水利科技,2014,42(2):66-68. (Xu Hongyan. Evaluation of groundwater resources and groundwater quality in Zhoushan Islands [J]. Zhejiang Hyrotechnics, 2014, 42(2): 66-68. (in Chinese))
- [52] 姚荣,张娜,唐德善. 湿润区域水资源可利用量研究初探[J]. 人民长江,2004,35(4):32-34. (Yao Rong, Zhang Na, Tang Deshan. Preliminary analysis of utilizable water resources volume in humid region [J]. Yangtze River, 2004, 35(4): 32-34. (in Chinese))
- [53] 刘权. 基于水资源优化配置的地下水可开采量研究[J]. 长江技术经济,2021,5(增刊1):120-122. (Liu Quan. Research on groundwater exploitability based on optimal allocation of water resources [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2021, 5(S1): 120-122. (in Chinese))
- [54] Lu Yao, Ma Zhenzhen, Wang Ting, et al. Development of a water resource allocation model based on the dynamic exploitable amount of groundwater and its application in the Jinghe County, Xinjiang [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 946072.
- [55] 朱晓强. 上海市大浦东地区地下水资源开发利用现状及潜力评价[J]. 水利规划与设计,2019(11):43-46. (Zhu Xiaoqiang. Evaluation of status and potential of groundwater resources utilization in Pudong District in Shanghai [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(11): 43-46. (in Chinese))
- [56] Wan Long, Zhou Jinxin, Guo Hongyan, et al. Trend of water resource amount, drought frequency, and agricultural exposure to water stresses in the karst regions of South China [J]. Natural Hazards, 2016, 80(1): 23-42.
- [57] Wang Hongcui, Hu Chao, Luo Yang, et al. Forecast of gross amount of water resources of Haihe River Basin based on Grey-Markov model [C]//International Conference on Environmental Pollution and Public Health (EPPH 2012) vol. 1. Scientific Research Publishing, 2012:610-612.
- [58] 张洪刚,张翔,吕孙云,等. 国内外水资源可利用量计算方法概析[J]. 人民长江,2008,39(17):18-20. (Zhang Honggang, Zhang Xiang, Lyu Sunyun, et al. Summary and analysis of calculation methods of available water resources quantity at home and abroad [J]. Yangtze River, 2008, 39(17): 18-20. (in Chinese))
- [59] Młyński D P, Wałęga A, Bugajski P, et al. Verification of empirical formulas for calculating mean low flow with the view to evaluating available water resources [J]. Acta Scientiarum Polonorum: Formatio Circumiectus, 2019, 18(2):83-92.
- [60] Więzik B. Calculating usable resources at surface water intakes using low-flow stochastic properties [M]//Pawlowski L, Dudzińska M R, Pawlowski A. Environmental Engineering III. London: CRC Press, 2010:539-542.
- [61] Herdiansyah A R, Zahra R A, Masjoyo Y M, et al. Analysis of meteorological water availability and water demand in Semarang Regency [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1039: 012011.
- [62] Irwan, Hardwinarto S, Sumaryono M, et al. Water availability analysis of Sangkulirang-Mangkalihat Karst in Kutai Timur Regency, East Kalimantan Province [J]. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 2020, 7(1): 153-155.
- [63] Lias S A, Irmayani, Laban S. The potential of water availability in Maros Watershed using Thornthwaite-Mather water balance method [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 486: 012135.

(下转第120页)

基于径流实验的产汇流机理研究与过程模拟

许 钦^{1,2,3,4},袁肖琦^{1,3},陈 星⁵,蔡 晶⁶,金 晨²,林晓清⁷,周 宏^{1,3}

(1.南京水利科学研究院水文水资源研究所; 2.长江保护与绿色发展研究院;
3.南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 4.石河子大学水利建筑工程学院;
5.河海大学水文水资源学院; 6.皖江工学院水利工程学院; 7.闽清县水利局)

摘要:针对产汇流机理在点尺度物理方程与流域尺度模型应用不匹配的问题,选取南大洼实验流域开展了2017—2018年降雨-径流原型实验,获取了总径流、分层径流、地下水位和土壤含水率等要素数据。在代表性单元流域(REW)理论框架下,基于质量守恒原理构建流域尺度守恒方程,建立了分布式REW水文模型,并在嵌套流域结合新安江模型开展了径流过程分层模拟与验证。结果表明:REW模型能够较好地再现汛期总径流变化过程,模拟结果与实测序列在变化趋势与量级上基本一致,误差主要集中于强降雨阶段;基于五子区结构的分层径流模拟结果与实测值吻合良好,地表径流、壤中流及地下径流均得到有效刻画;土壤含水率模拟值与实测值整体一致;基于REW模型的径流模拟方法可为小尺度流域水文过程模拟及机理分析提供新的技术路径。

关键词:径流实验;产汇流机理;REW模型;嵌套流域;分层径流

Research on runoff generation and concentration mechanisms and process simulation based on runoff experiments//Xu Qin^{1,2,3,4}, Yuan Xiaoqi^{1,3}, Chen Xing⁵, Cai Jing⁶, Jin Chen², Lin Xiaoqing⁷, Zhou Hong^{1,3}(1. Institute of Hydrology and Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 4. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 6. College of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology; 7. Mingqing County Water Conservancy Bureau)

Abstract: To address the mismatch between point-scale physical formulations of runoff generation and concentration and their application at the watershed scale, a prototype rainfall-runoff experiment was conducted in the Nandawa experimental catchment from 2017 to 2018. Multi-source observations, including total runoff, stratified runoff components, groundwater level, and soil moisture, were collected. Based on the representative elementary watershed (REW) theory, watershed-scale conservation equations were derived using mass conservation principles, and a distributed REW hydrological model was developed. Layered runoff simulations and validations were then performed in the nested watershed in conjunction with the Xin'anjiang model. The results show that the REW model effectively reproduces seasonal runoff dynamics, with good agreement between simulated and observed series in terms of both trend and magnitude. Errors mainly occur during extreme rainfall events. The layered runoff simulation results based on the five-subzone structure are in good agreement with the observed data, effectively capturing surface runoff, interflow, and groundwater runoff. The simulated soil moisture content is generally consistent with the measured values. The runoff simulation method based on the REW model provides a new technical pathway for hydrological process simulation and mechanism analysis in small-scale watersheds.

Key words: runoff experiment; runoff generation and concentration mechanism; REW model; nested watershed; layered runoff

产流与汇流过程是水文学研究的核心内容,直接关系到水循环机理的揭示,也是流域水资源管理的科学基础^[1-2]。20世纪提出的超渗产流与蓄满产

流理论,为现代产汇流机制的研究奠定了理论基础^[3-4]。实际观测表明,在同一降雨条件下流域内往往并存多种产流模式,产流过程受气候、地形、土壤

基金项目:国家自然科学基金项目(52209031, U2443202, 52579005);水利部重大科技项目(SKR-2022067);山东省重点研发计划项目(2023CXGC010905);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y523008, Y522018);南京水利科学研究院研究生学位论文发展基金项目(Yy525020)

作者简介:许钦(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事产汇流理论和水文预报研究。E-mail:qinxu@nhri.cn

及下垫面等多个因子共同影响,表现出显著的非线性和空间异质性,这仍是水文学研究中的重大挑战^[5-7]。深度学习模型并非“通用最优”,其相对优势取决于流域尺度的水分环境与下垫面的组成及结构特征,因而在不同水文-地表情境下呈现差异化表现^[8]。如何精细刻画产流机制、定量描述产流面积的时空动态变化,已成为流域水文模型发展的关键科学问题^[9-10]。

在汇流机制研究方面,学界通常采用圣维南方程来刻画流域水体运动规律,并通过平均汇流时间与汇流时间分布函数来反映水体在流域中的运移过程^[11]。尽管已有研究^[12-14]采用卷积方法、经验函数或概念性模型探讨汇流时间分布函数的特征,但这些方法多依赖输入-输出关系,缺乏对流域内部物理过程的显式表达,因而难以揭示真实的产汇流机制。径流过程具有显著的尺度效应,小尺度实验揭示的机理往往难以直接推广至大尺度流域模拟,因此如何实现从点尺度到流域尺度的机制转换,已成为国际水文研究的前沿与热点^[15-20]。

近年来,基于代表性单元流域(REW)理论的建模方法为大尺度流域模拟提供了一种新的思路。该方法以守恒定律为基础建立流域尺度物理量守恒方程,为分布式水文模型的发展提供了理论框架^[21-22]。本文依托南大洼实验流域观测数据构建了分布式REW水文模型,实现了对地表径流、壤中流、地下径流及土壤水分过程的统一模拟与验证,并通过多要素观测资料的综合检验,进一步评估了模型在不同水文过程与不同流域尺度条件下的适用性与稳定性,以期为解决点尺度物理规律与流域尺度模型之间的尺度不匹配问题提供新的建模思路,同时为复杂下垫面条件下的流域水文过程模拟与机制分析提供方法支持。

1 实验流域概况

南大洼实验流域是位于安徽省滁州市花山流域内部的一处天然闭合小流域,面积为7897 m²,植被类型为天然林地。为便于水文过程观测,流域边界采用混凝土密封至基岩,尽可能消除侧向渗漏影响。通过69个钻孔的岩芯分析,确认流域基底为安山岩,岩体结构完整,无明显裂隙或断层。基岩以上第四系沉积物厚度为1~7 m,平均厚度为2.46 m,高差为12.9 m,地面坡度为6.7%~17.1%,排水沟比降为6.7%。原排水沟改造为分层集水槽,用以测定地面径流、壤中流和地下径流。

为深入认识水文现象并揭示其形成机理,本文基于南大洼实验流域开展径流观测实验。模型需要

输入水文、气象、地理等众多基础资料,其中水文要素包括流量、水位、土壤含水量等,气象要素包括蒸发量、降水量等,地理要素包括地理高程等数据。水文和气象资料可以通过设计、观测径流实验获取实测数据,地理数据可通过数字高程模型(DEM)及相关软件提取。观测设备主要分为以下两类:

a. 水文要素观测设备。南大洼实验流域内具有分层径流观测系统,可分别观测地表径流、0~50 cm 壤中流(早期为0~30 cm)、50~100 cm 壤中流以及总径流。流域内布设了34套土壤水分剖面速测仪和30个压力式水位计,分别监测土壤含水率和地下水水位动态。

b. 气象要素观测设备。实验流域蒸发数据采用邻近水文站实测蒸发资料。为观测降水量,流域内架设了11个林下雨量计和131个穿透雨集水器。实验场自行设计和建造了一个面积为8.45 m×4.05 m的林下雨量站,能够更精确地测量穿透雨。

2 研究方法

2.1 REW 理论框架与模型构建

传统分布式水文模型多基于连续介质力学方程,但这些方程在微观尺度上的假设难以直接适用于流域尺度的水文模拟。为解决这一矛盾,Reggiani等^[22]将流域视为开放热力学系统,在宏观尺度上建立了质量、动量、能量及熵的守恒方程,提出了REW理论框架。该理论框架将流域划分为若干个REW,每个REW进一步细分为5个功能子区:非饱和子区(u区)、饱和子区(s区)、蓄满产流子区(o区)、超渗产流子区(c区)和主河道子区(r区),各子区之间通过质量、动量、能量和熵交换相互作用。5个子区的面积随降雨、蒸散发、下渗等水文过程动态变化^[23]。

在REW理论框架下,微观质点的物理量守恒方程经时空均化处理后,升尺度为宏观常微分方程。为实现方程闭合,需要建立流域水文本构关系。几何特征包括各子区面积比、u区厚度、河网密度、主河道几何参数等;物理特征则涉及下渗率、蒸散发率、地下水回灌与毛管提升系数、超渗与饱和坡面流、渗流、河道入出流、蒸发损失及地下水-河流补给等。通过建立几何与水文的关系,可为模型方程的闭合与求解提供必要支撑。

本文建立了一系列描述流域产汇流机理的方程,包括REW 5个子区的物理守恒方程和流域本构关系,并由此构建了一个由9个状态变量及其对应质量守恒方程(并结合动量约束)组成的流域尺度分布式水文模型(以下简称“REW模型”)。各子区

之间的产汇流形成分析见图 1。

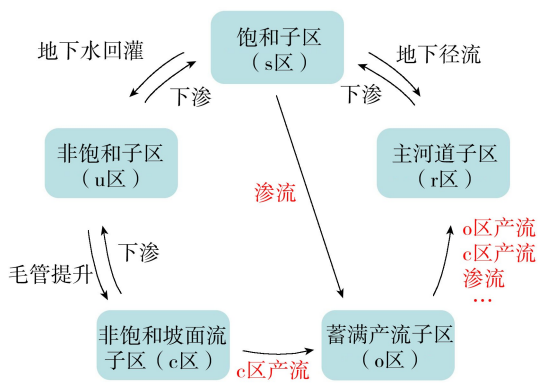


图 1 各子区产汇流机制与径流组成示意图

地表径流由超渗径流与蓄满径流组成,前者在 c 区产生并形成汇流流至 o 区,然后与后者汇聚共同流入 r 区;降水过程中随着雨水下渗,地下水位抬升,s 区范围不断扩大,该子区水分逐渐渗流至地表 o 区,形成壤中流汇入河道;部分地下水由 s 区侧向补给河流,形成地下径流。

2.2 REW 模型参数率定与验证

REW 模型在模拟流域产汇流时基于模拟流域的水文、气象、下垫面等特征将流域离散为若干个 REW 作为其基本计算单元,每个计算单元都必须包含独立完整的河道、坡面等流域结构组成。南大洼实验流域实测数据序列较短,直接率定出的参数可能存在不确定性。为解决此问题,采用“嵌套流域”的验证思路:先在自然地理条件相似且拥有长期水文气象观测数据的上级流域——沙河集水库流域进行模型参数率定与验证,再将参数应用于南大洼实验流域,增强模型在实验流域模拟的准确性,并检验模型在不同尺度上的适用性。

2.2.1 嵌套流域验证方案

沙河集水库流域(控制面积 300 km²)是南大洼实验流域的直接上级流域,两者属典型的内外嵌套关系,在水文、气象、地形、土壤等自然条件上高度相似,为参数移植提供了地理与物理基础。沙河集水库所用的降水、流量、蒸发等水文数据均来自《中华人民共和国水文年鉴》,包含 2008—2018 年的长期逐日平均降水量、逐日平均蒸发量序列。以 2008—2014 年数据作为模型率定期,2015—2018 年数据作为模型验证期,采用纳什效率系数(NSE)作为模型性能评价指标。

表 1 南大洼实验流域和沙河集水库流域 REW 模型参数率定结果

流域	地下水回灌提升系数	与 u 区渗透系数空间分布相关的尺度系数	u 区蒸散发系数	饱和坡面流产流系数	超渗坡面流产流系数	渗流系数			o 区相对面积计算系数			与毛管作用相关的系数
						β_1	β_2	β_3	α_1	α_2	α_3	
南大洼	6.42	0.95	144	1.33	1.37	0.08	0.96	0.13	9.32	2.27	16	0.63
沙河集水库	6.88	0.95	154	1.30	1.32	0.10	1.12	0.15	9.45	2.55	16	0.70

南大洼实验流域面积较小且地理特征均一,可将其视为一个独立的代表性单元进行高精度水文过程模拟。模型输入数据为 2017—2018 年的实测降雨、径流、土壤含水量和地下水位数据,蒸发数据采用邻近站点逐日观测值等权重分配。该模型可输出总径流、地面径流、壤中流及土壤含水量等多种水文要素,为揭示微观产汇流机制提供支持。

2.2.2 参数率定结果与尺度效应分析

沙河集水库流域和南大洼实验流域的参数率定结果见表 1,与南大洼实验流域的参数率定值相比,尽管存在细微差异,但两个流域的 REW 模型参数集整体表现出高度一致性。沙河集水库流域的产流系数略小而渗流系数略大,主要源于两个流域下垫面的差异,沙河集水库流域的植被覆盖率相对较低,导致其产流能力稍强、下渗能力稍弱。参数率定结果表明模型参数值在地理空间和水文气象特征相似的嵌套流域中具有可移植性,揭示了 REW 模型参数具有一定的尺度不变性,同时也印证了流域相似性与水文模型参数之间存在紧密联系。

3 结果与分析

3.1 总径流过程模拟检验

以南大洼实验流域 2017 年 5 月 24 日至 10 月 20 日为率定期,总径流深为 284.24 mm;以 2018 年 5 月 3 日至 7 月 22 日为验证期,总径流深为 236.69 mm。模拟 2017—2018 年汛期径流变化过程并与观测序列进行对比,检验 REW 模型对降雨-径流过程的再现能力。

根据径流过程模拟值与实测值对比(图 2),REW 模型能够较好地再现径流过程变化特征。从整体来看,模型模拟径流过程与实测值趋势基本一致,模型在不同年份均能较好地再现实验流域尺度径流量的变化趋势。传统水文模型如新安江模型在面积小于 1 km² 的微流域中难以适用,而 REW 模型在该尺度下表现出良好的适应性,显示出其在多尺度模拟中的潜力。

在极端降雨年份,模拟误差相对较大,主要来源包括:

a. 观测响应滞后与空间代表性不足。由于实验流域面积较小(小于 0.01 km²),强降雨期间地表

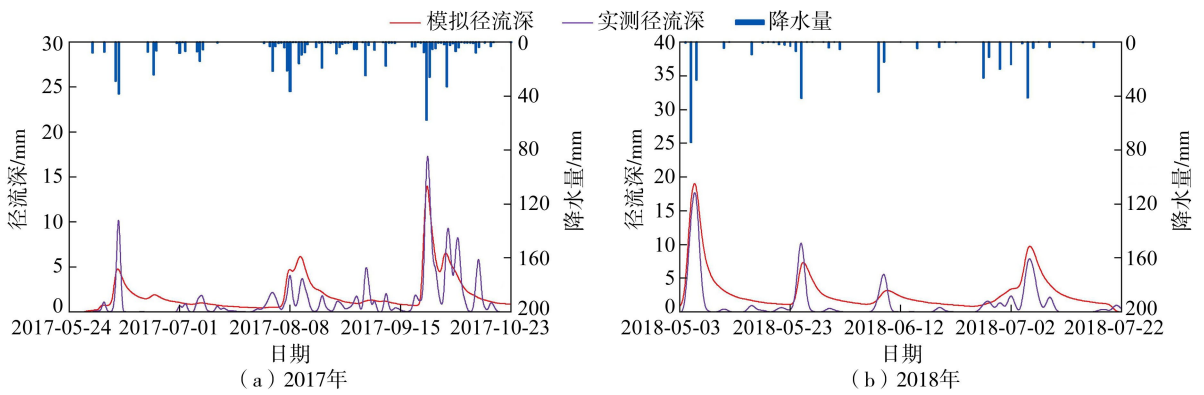


图2 2017年和2018年南大洼实验流域模拟径流与实测径流对比

径流迅速形成,但分层集水系统存在物理滞后现象(如壤中流汇集需时),导致观测峰值系统地滞后于模拟值约1~3 h。此外,11个林下雨量计在暴雨期间出现局部溅水与溢流现象,造成降雨输入低估约5%~8%,进一步放大了径流模拟误差。

b. 模型结构机制。REW模型当前采用固定的下渗参数,但在暴雨条件下,实际产流面积(包括超渗产流子区与蓄满产流子区)会显著大于模型初始设定的对应子区面积。未来应引入降雨强度驱动的下渗参数动态化方案,以提升极端条件下的输入精度与模型响应能力。

3.2 分层径流计算检验

为分析流域产汇流过程及不同径流成分的组成,本文基于南大洼实验流域2018年汛期逐日上午8:00的分层径流观测数据,分别采用地表径流深、0~50 cm土层壤中流径流深和地下水位对水文模型进行检验,模拟结果如图3所示。地表径流、壤中流、地下水位的过程线与实测值的变化趋势一致。在短时强降雨期间,模拟洪水过程线呈现尖瘦形态,实测曲线则相对圆胖,峰值相对误差明显扩大。模型对强降雨条件下产流范围扩大及汇流加速的响应偏于敏感,且采用固定参数,不能随降雨强度动态调整,致使暴雨期峰值偏高、过程偏窄,是误差的主要来源。

3.3 土壤含水率计算检验

土壤水分在产汇流过程中具有关键作用,其空间分布直接影响下渗、蒸散发及地表径流的分配比例^[24-27]。本文选用土壤含水率作为检验模型表现优劣的第二道标准。选取2018年汛期南大洼实验流域中心位置测点24 h步长、0.1~1.5 m深土壤体积含水率的平均值作为实测参照序列。

图4对比了土壤含水率计算序列与实测序列。对比曲线显示,模拟与实测土壤平均含水率在整个汛期呈现“同升-同降”的变化特征,但形态与相位存在明显差异:暴雨陡涨段,实测峰圆润,模拟峰尖锐

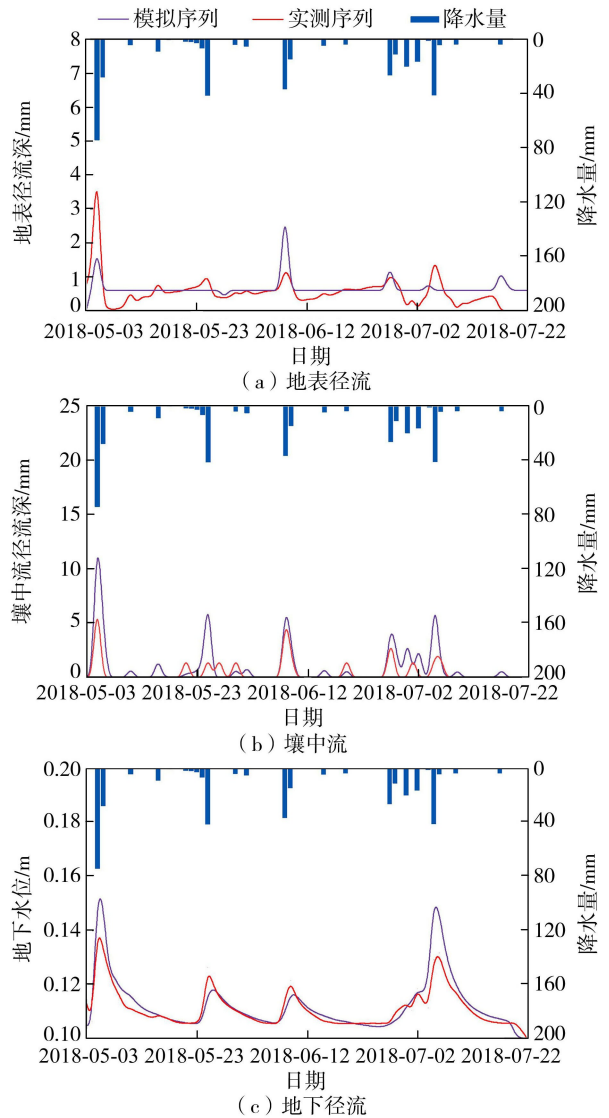


图3 2018年南大洼实验流域分层径流模拟序列与实测序列对比

且提前约半天;进入退水段后,模拟值下降更快,出现持续性低估情况,直至下次降雨前才缓慢靠拢。由此可直观判断,模型对土壤蓄水总量估计合理,但入渗速率设定过快、退水导湿率偏大,造成暴雨期湿度峰值高估、退水期湿度持续偏低的阶段性双向偏差。

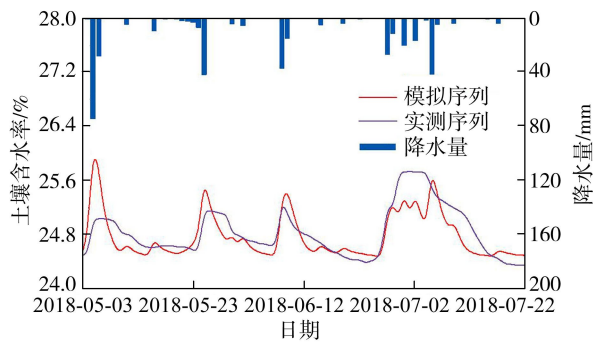


图4 2018年南大洼实验流域土壤含水率计算序列与实测序列对比

4 嵌套流域 REW 模型验证效果

4.1 日径流过程模拟及对比分析

采用 REW 模型对沙河集水库流域 2008—2018 年的逐日径流过程进行模拟,并与三水源新安江模型进行对比。逐日径流过程模拟结果特征值如表 2 所示。沙河集水库流域在率定期(2008—2014 年)和验证期(2015—2018 年)的模拟效果均达到水文模拟精度评价的基本要求,表明 REW 模型能够有效地应用于沙河集水库流域,为研究实验流域尺度与水文物理机制的关系提供了可靠工具。通过沙河集水库流域应用和检验,证明水文模型构建合理且参数率定正确,反映出 REW 模型在湿润地区小尺度天然流域应用效果较好。

表 2 REW 模型与新安江模型径流模拟精度对比

年份	REW 模型		新安江模型	
	NSE	相对误差/%	NSE	相对误差/%
2008	0.780	-9.37	0.933	3.40
2009	0.652	37.50	0.785	36.50
2010	0.539	9.15	0.419	43.50
2011	0.622	26.70	0.785	16.90
2012	0.753	16.00	0.810	5.23
2013	0.595	28.20	0.750	15.80
2014	0.728	4.30	0.880	17.30
2015	0.742	-3.10	0.892	13.20
2016	0.699	9.13	0.813	43.50
2017	0.682	27.90	0.866	17.80
2018	0.502	-7.15	0.827	2.56

4.2 分层径流过程模拟

对沙河集水库流域 2007—2018 年 13 场洪水过程开展地表径流、壤中流和地下径流过程分层模拟。以 161025 次和 170925 次洪水(图 5)为例分析洪水分层径流时间变化过程线特征,结果显示:沙河集水库流域壤中流一般发生在降雨初期,与降雨分配过程相似,在持续降雨-下渗驱动下非饱和子区土壤含水量达到饱和,地表发生蓄满产流现象,形成地表径流。长历时的降雨结束后,会形成曲线平缓的地下径流。部分洪水历时短、前期土壤湿度与地下水水

位偏低,其地下径流比重偏小。沙河集水库流域出流过程涨洪段主要以地表径流与壤中流为主体,退水尾部以地下径流为主体。各径流成分变化特征符合流域水文过程变化规律。

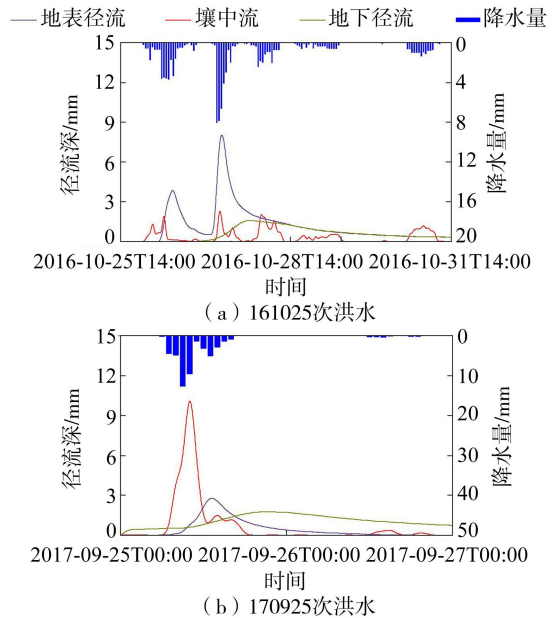


图5 沙河集水库流域洪水过程分层径流小时模拟

5 结论

a. REW 模型模拟的各水文要素与实测数据总体吻合,表明模型结构合理、参数稳定。通过嵌套流域参数移植验证,模型在不同尺度间仍具备较好的模拟能力,表明其参数具有一定的尺度可移植性与稳定性。

b. 基于 REW 模型实现了地表径流、壤中流及地下径流的分层模拟。地表径流由超渗产流与饱和产流共同贡献,壤中流与地下水径流在不同子区之间的水量交换过程得到合理刻画,土壤含水率模拟与实测序列高度一致。

c. REW 模型能够有效识别不同径流成分的贡献机制,较好地刻画流域水分存储与运移过程。模型在小尺度流域具备良好适用性,为缓解水文模拟中的尺度不匹配问题奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 许钦,金晨,张坤,等.耦合深度学习与水文模型的喀斯特地区径流模拟方法[J].水科学进展,2025,36(4):634-645. (Xu Qin, Jin Chen, Zhang Kun, et al. Runoff simulation in Karst regions by integrating deep learning with physically-based hydrological models[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(4): 634-645. (in Chinese))
- [2] 许钦,张坤,叶鸣,等.基于分区耦合模型的太湖流域地表水资源量研究[J].水利水电技术(中英文),2025,

- 56(9):30-41. (Xu Qin, Zhang Kun, Ye Ming, et al. Research on surface water resources in Taihu Lake Basin based on zonal coupling model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56 (9): 30-41. (in Chinese))
- [3] 赵丽平, 刘晓阳, 任明磊, 等. 垂向混合产流模型在三峡水库洪水预报中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22 (增刊 1): 1-9. (Zhao Liping, Liu Xiaoyang, Ren Minglei, et al. Application of vertical mixed runoff model in flood forecasting of Three Gorges Reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(S1):1-9. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] Sourya D A, Manikanta V, Imteaz M A, et al. Catchment features-based interpretation of performance of the conceptual hydrological and deep learning models using large sample hydrologic data[J]. Journal of Hydrology, 2025, 663:134270.
- [6] Li Congcong, Cai Yanpeng, Li Zhong, et al. Hydrological response to climate and land use changes in the dry-warm valley of the Upper Yangtze River[J]. Engineering, 2022, 19:24-39.
- [7] 陈星, 余钟波, 许钦. 太湖流域典型丘陵区分布式水文模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1):19-22. (Chen Xing, Yu Zhongbo, Xu Qin. Distributed hydrological simulation for a typical hilly watershed in Taihu Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1):19-22. (in Chinese))
- [8] Jin Chen, Xu Qin, Chen Xing, et al. Enhancing runoff prediction accuracy of deep learning model using baseflow separation method and timestamp information[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662:134044.
- [9] 茹希悦, 张洪波, 王志辉, 等. 河川径流组分的分区异质性与物理影响机制解析[J]. 人民长江, 2025, 56(11):119-130. (Ru Xiyue, Zhang Hongbo, Wang Zhihui, et al. Regional heterogeneity of river runoff components and underlying physical influence patterns[J]. Yangtze River, 2025, 56(11):119-130. (in Chinese))
- [10] 宋东东, 牟舵, 王广铭, 等. 基于 GPU 的分布式水文模型汇流并行算法研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(增刊 1):91-93. (Song Dongdong, Mu Duo, Wang Guangming, et al. GPU-based parallel algorithm for convergence of distributed hydrological models[J]. Pearl River, 2025, 46(S1):91-93. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] Kim S, Jung S. Estimation of mean water transit time on a steep hillslope in South Korea using soil moisture measurements and deuterium excess [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4):1844-1857.
- [13] Fovet O, Ruiz L, Hrachowitz M, et al. Hydrological hysteresis and its value for assessing process consistency in catchment conceptual models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1):105-123.
- [14] Wang Zhaocai, Wang Qingyu, Liu Zhixiang, et al. A deep learning interpretable model for river dissolved oxygen multi-step and interval prediction based on multi-source data fusion[J]. Journal of Hydrology, 2024, 629:130637.
- [15] 杨卫华, 孙文叶, 许志欣, 等. 水文尺度转换问题的探讨[J]. 人民珠江, 2016, 37(5):51-53. (Yang Weihua, Sun Wenye, Xu Zhixin, et al. Research on problem of scale in hydrology [J]. Pearl River, 2016, 37(5):51-53. (in Chinese))
- [16] Giudicianni C, Di Nunno F, Granata F, et al. Pseudo multi-scaling model of intensity-duration-frequency (IDF) curves[J]. Journal of Hydrology, 2026, 664:134370.
- [17] 任立良, 江善虎, 袁飞, 等. 水文学方法的演进与诠释[J]. 水科学进展, 2011, 22(4):586-592. (Ren Liliang, Jiang Shanhu, Yuan Fei, et al. Evolution of methodology in hydrology and its explanation [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4):586-592. (in Chinese))
- [18] 林雍权, 陈启慧, 李琼芳, 等. 基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3):21-26. (Lin Yongquan, Chen Qihui, Li Qiongfang, et al. Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum River Basin in Laos based on Xin' anjiang model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3):21-26. (in Chinese))
- [19] 董秀颖, 蒋蓉, 李舒宝. 水文实验研究的现状与发展探讨[J]. 水文, 2013, 33(6):21-24. (Dong Xiuying, Jiang Rong, Li Shubao. Discuss on development of hydrological experimental stations [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(6):21-24. (in Chinese))
- [20] Feng Fang, Wu Siqu, Feng Qi, et al. Quantification of runoff composition of Aksu River basin in the Tianshan Mountains, northwest China, indicated by stable hydrogen and oxygen isotopes[J]. Journal of Hydrology, 2026, 664:134342.

(下转第 79 页)

河流水质变分数据同化研究

徐健¹, 赖锡军²

(1. 上海市水务规划设计研究院(上海市海洋规划设计研究院);

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室)

摘要:在水质监测数据日益丰富的背景下,为提高河流水质模拟与预测的精度,基于偏微分方程最优控制理论,建立了一维非恒定河流水质模拟的变分数据同化模型,并采用孪生数值试验方法开展了以水质衰减系数、初始条件、上游边界条件和入河负荷过程为控制变量的数值试验。结果表明,模型可提取观测资料中的有用信息,快速校正模型控制变量,识别空间分布式的水质衰减系数、初始条件、上游边界条件以及入河负荷过程等,使预测结果逼近河流的真实水质过程。

关键词:水质模拟;河网;变分法;数据同化;数学模型

Research on variational data assimilation for river water quality modelling//Xu Jian¹, Lai Xijun²(1. Shanghai Water Planning and Design Research Institute (Shanghai Ocean Planning and Design Research Institute); 2. State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Given the increasing abundance of water quality monitoring data, this study develops a variational data assimilation model for one-dimensional unsteady river water quality simulation based on the optimal control theory of partial differential equations, with the goal of improving the accuracy of river water quality simulation and prediction. Twin numerical experiments are conducted using the water quality decay coefficient, initial conditions, upstream boundary conditions, and river pollutant load processes as control variables. The results indicate that the model can extract useful information from observations, rapidly correct the control variables, and identify spatially distributed water quality decay coefficients, initial conditions, upstream boundary conditions, and river pollutant load processes, thereby enabling model predictions to approach the actual water quality dynamics of the river.

Key words: water quality modelling; river network; variational method; data assimilation; mathematical model

当前,河流水质模型已被广泛应用于河湖水环境问题的诊断分析、水质风险预测预警、水生态环境规划与管理等,是流域或区域水资源、水环境和水生态管理的重要工具^[1]。河流水质模型经过长期的发展日臻成熟,模拟预测河流水环境过程的能力显著提升^[2]。然而,鉴于流域河湖水环境问题的复杂性,尽管模型理论方法逐步完善,但在实际应用中,水质模型模拟预测仍受难以确知的模型参数、不准确的初始条件、不完整的边界条件以及模型数值误差等制约,区域河网的水质模拟预测精度一直处于相对较低的水平,难以满足水环境精细化管理的要求^[3-4]。为提高河流水质模型在实用中的可靠性和精度,采用起源并发展于大气科学领域的同化方法是一个重要途径^[5]。

数据同化是指将观测资料有机融合到数学模型动态运行过程中的一种方法^[6]。该方法自从在大气科学领域被提出以来,已逐步在海洋科学、地球系统科学、水文学和水力学等学科领域得到发展和应用^[7-9]。河湖水质模拟预测涉及参数多,初始条件和边界条件不确定性大,数据同化是改善水质模型性能的重要方法。近年来,随着水环境监测技术的飞速发展,水质数据同化研究取得了显著进展。一方面,同化算法从早期的最优插值、三维变分向集合卡尔曼滤波、粒子滤波及四维变分等先进方法演进,有效解决了水质模型非线性强、维数高带来的计算难题^[10-13];另一方面,研究重点从单纯的状态更新(如浓度场校正)向“状态-参数”联合估计拓展,实现了模型关键参数的在线识别与修正^[14]。尽管如此,相

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211700)

作者简介:徐健(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事水务海洋规划研究。E-mail:jayxujian@163.com

通信作者:赖锡军(1977—),男,研究员,博士,主要从事湖泊流域过程与水安全调控研究。E-mail:xjlai@niglas.ac.cn

比于数据同化在数值天气预报等领域的成熟应用,针对复杂河网水质模拟预测的数据同化研究仍相对薄弱。当前,水质监测资料主要用于监测预警和水环境态势的把握,其在模拟预测中的深度挖掘与融合应用潜力尚未充分释放^[15]。

本文基于偏微分方程最优控制理论,建立了一维河流水质变分数据同化模型,并利用数值试验验证了其可靠性和精度。该模型通过同化观测浓度数据,可有效反演分布式参数及初始条件和边界条件,显著提升预测可靠性并抑制不确定性,从而拓展水质模型的应用范畴,为物联网背景下的水环境模拟提供技术支撑。

1 河流水质变分数据同化模型

1.1 河流水质控制方程

对于长河道的水质模拟预测,通常关注水质沿程分布情况,一般仅考虑水体中污染物沿河道纵向的随流输移运动以及沿程的生化降解过程。该过程一般可采用带有源项的一维对流扩散方程来描述:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(UC - D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -K_{\theta} C + S \quad (1)$$

式中: C 为水质指标的浓度; t 为时间; x 为空间坐标; U 为断面平均流速; D 为纵向分散系数; K_{θ} 为水质指标在水温 θ 时的一阶衰减系数,其与 20°C 时的衰减系数 K 的关系为 $K_{\theta} = K\beta^{\theta-20}$,其中 β 为温度修正系数; S 为水质指标的外部源汇项。

1.2 水质数据同化

水质数据同化的目标是通过实际观测水质指标浓度等数据和水质动态模型相互融合,以提高模型模拟和预测真实物理过程的精度^[10]。为此,引进代价函数 J 来描述模型水质指标模拟浓度与观测浓度之间的差,若观测资料为连续的,则可表示成二次泛函的形式:

$$J(P) = \frac{1}{2} \int_0^T \|HC - C_{\text{obs}}\|^2 dt \quad (2)$$

式中: P 为控制变量,如模型参数、初始条件和边界条件等; T 为总时长; $\|\cdot\|$ 为范数,通过范数的定义,可引入观测资料的统计信息; H 为观测算子; C_{obs} 为水质指标的观测浓度。

数据同化的过程是使水质模拟结果与观测数据尽可能一致,即代价函数(式(2))最小化。当代价函数取最小值时,模拟结果与实际观测数据最为接近,模拟的水质过程与真实水环境变化最相符。水质模拟变分数据同化是在水质控制方程约束下,寻找最优的控制变量 P (模型初始条件、边界条件和过程参数),使表征模拟结果与观测数据差异的代价

函数为最小,即:

$$\min J(P) = \frac{1}{2} \int_0^T \|HC - C_{\text{obs}}\|^2 dt \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} F(C, P) \equiv \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(UC - D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - S = 0 \\ C(x, 0) = C_0 \\ C|_{\partial\Omega} = C_1(t) \\ \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases}$$

式中: F 为质量守恒约束函数; C_0 为初始时刻的浓度值; $C_1(t)$ 为狄利克雷边界位置的随时间变化的浓度值; $\partial\Omega$ 表示研究区域 Ω 的边界。

如果计算出代价函数关于控制变量的梯度,则可采用梯度下降类方法优化求解代价函数的极小值。由于约束条件的方程为偏微分方程,代价函数关于控制变量的梯度不存在显式的表达式。直接计算梯度需要确定每一个参数的扰动并计算相应的输出,计算量极其巨大。根据偏微分方程最优控制理论,代价函数的梯度计算可通过变分原理采用伴随方程来高效求解。

伴随方程采用Lagrange乘子方法来推导。引入伴随变量(Lagrange乘子),将上述等式约束问题转换为最小化Lagrange函数 L 的无约束优化问题:

$$L(C, \Lambda) = J + \int_0^T \langle \Lambda, F \rangle dt = \int_0^T \int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} \|HC - C_{\text{obs}}\|^2 + \Lambda \left[\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(UC - D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - S \right] \right\} d\Omega dt \quad (4)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为内积; Λ 为Lagrange乘子,即 C 的伴随变量。

若 C 和 Λ 满足Euler-Lagrange条件: $\partial L / \partial \Lambda = 0$ 和 $\partial L / \partial C = 0$,则代价函数关于控制变量的导数就等于Lagrange函数关于控制变量的导数。

首先取泛函 L 的一阶变分,通过分部积分,可得:

$$\delta L(C, \Lambda) = \int_0^T \int_{\Omega} \left[-\frac{\partial \Lambda}{\partial t} - \frac{\partial U \Lambda}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \Lambda}{\partial x} \right) + HC - C_{\text{obs}} - \frac{\partial S}{\partial C} \right] \delta C d\Omega dt + \int_0^T \int_{\Omega} \delta \Lambda \left[\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - S \right] d\Omega dt + \int_{\Omega} \Lambda \delta C|_{t=0} d\Omega + \int_0^T \int_{\partial\Omega} \left(\Lambda \delta C U + D \delta C \frac{\partial \Lambda}{\partial x} - D \Lambda \frac{\partial \delta C}{\partial x} \right) d\partial\Omega dt \quad (5)$$

得伴随方程:

$$-\frac{\partial \Lambda}{\partial t} - \frac{\partial U \Lambda}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \Lambda}{\partial x} \right) + HC - C_{\text{obs}} - \frac{\partial S}{\partial C} = 0 \quad (6)$$

且满足定解条件 $\Lambda(T) = 0, \frac{\partial \Lambda}{\partial x} \Big|_{a\Omega} = 0, \Lambda \Big|_{a\Omega} = 0$ 。

基于 Lagrange 函数表达式中与控制变量 P 有关各项,可导出代价函数关于控制变量 P 的导数 $\partial J/\partial P$ 。由于初始条件仅是起始时刻的空间分布式参数,将其从控制变量 P 中提取出来单独表达,其余控制变量仍统一用 P 表示。代价函数关于初始条件及其他控制变量的导数分别为:

$$\frac{\partial J}{\partial C_0} = -\Lambda(0) \quad (7)$$

$$\frac{\partial J}{\partial P} = -\Lambda \frac{\partial F(C, P)}{\partial P} \quad (8)$$

1.3 模型构建

水质输运方程、伴随方程和相应的初始条件、边界条件构成了双向的积分系统,得到控制变量 P 的最优控制系统。基于该系统建立河流水质变分数据同化模型,在模型模拟过程中融入观测数据修正模型不可靠的初始条件、边界条件和过程参数等,达到提高模型模拟和预测精度的目标^[16]。求解最优控制系统中非线性偏微分方程的方法有多种,但由于实际河网水质变化过程难以获取解析解,故常采用基于时空离散的数值计算方法。

一维水质输运方程采用有限体积法离散,空间离散采用一阶迎风格式,时间离散采用显格式。伴随模型基于原水质模型代码,通过自动微分工具 Tapenade^[17]生成原始伴随代码,经人工优化以兼顾计算效率与内存开销,满足大规模运算需求。优化算法选用有限内存 BFGS 算法迭代校正控制变量^[18]。控制变量的选取遵循观测信息与控制自由度相协调的原则,以改善反演问题的适定性。水动力条件通过一维非恒定流模型预计算获取,作为水质模型的输入参数。具体同化流程见文献^[16]。

2 实例验证

2.1 计算案例

以具有环状河网结构的某平原区河网水系(河道平均坡降约 0.1‰)为例(图 1),检验河流水质变分数据同化模型的可靠性和合理性。将水系分成 11 个节点 11 条河段:主干段河段编号为①~⑨,长约 50 km,河道底宽 75 m,边坡为 1:3;侧支河段编号为⑩和⑪,长约 12 km,底宽 10 m,边坡为 1:3。模拟时段内平均流量约 100 m³/s,下游给定水位边界过程。下游河段 O 处有一观测点,可观测河流的水质变化过程。

为不失一般性,选择高锰酸盐指数为水质指标进行计算分析。水质模拟计算的主要输入条件包括

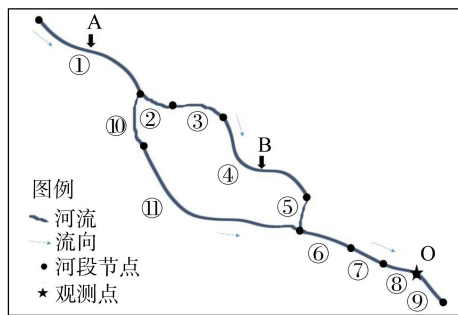


图 1 计算案例河流水系概化

模型的初始条件、边界条件和降解参数,采用标准的孪生数值试验^[19]进行验证。在孪生数值试验中,观测数据并非来自含有未知误差来源的实际观测资料,而是基于给定的模型初始条件、边界条件和模型参数,并采用水质模型模拟河流水质过程所生成的数据,即采用人工合成数据替代实际观测数据开展数据同化数值试验,以排除观测和数值误差等因素的干扰,科学检验数据同化方法的可靠性和准确性。

水质模拟所需的水量参数由水动力模型预计算得出,其中,曼宁糙率系数取值为 0.02。初始高锰酸盐指数给定统一的均值 6 mg/L。各河段的模型参数分别给定,一阶衰减系数 K 统一取 0.02 d⁻¹。

上游河段①的入流边界质量浓度过程表达式为:

$$C(t) = \begin{cases} 6 & t \leq 1, t > 16 \\ 6 \times \left[1 + \sin\left(\frac{t-1}{15}\pi\right) \right] & 1 < t \leq 16 \end{cases} \quad (9)$$

式中,时间 t 的单位为 d。下游河段⑨的出流给定自由输出的纽曼边界条件。

河段①和④有非恒定的污染负荷 L' 汇入,其变化假设为单峰正弦波形波动,河段④的负荷过程滞后河段①的时间为 4 d,其表达式为:

$$L'(t) = 5 \times \left[1 + \sin\left(\frac{t-1}{15}\pi\right) \right] \quad (10)$$

基于以上条件计算出河网的水质动态,并以观测点 O 的水质过程作为变分数据同化模型的观测数据。该模型涉及优化过程,其收敛判别标准采用代价函数关于控制变量的相对梯度足够小作为准则,在本文孪生数值试验中该阈值均取为 10⁻⁶。

2.2 降解参数识别

模型中降解参数为一阶衰减系数 K ,以其为控制变量开展数值试验。为更好地考查变分方法的性能,衰减系数采用空间分布式设置,即河网中每段河道的衰减系数值都具有独立的自由度(共 11 个变量)。文中列出 7 种工况,即各河段的初始衰减系数 K_0 的值分别取同样的 0、0.010、0.015、0.020、0.025、0.030、0.040 d⁻¹。针对衰减系数的不同初始

估计值,基于下游观测点 O 的水质过程资料,运用建立的模型进行水质同化计算,代价函数经过 10 余次迭代即可收敛到 10^{-9} 量级(表 1)。从同化计算得到的衰减系数误差热力图(图 2)可以看出,对于衰减系数的不同初始估计值,模型可快速校正多数河段的衰减系数,使其接近真实值。其中,河段①的识别效果最佳,各工况最大误差为 3.5%;河段③、④、⑥等次之,其衰减系数值也得到了有效识别,误差较初始估计值有明显改进,最高为 26.5%;河段⑨由于处于观测点下游,观测数据不含该河段的相关信息,因此该河段衰减系数值未得到校正,与初始估计值一致,模型无法识别。

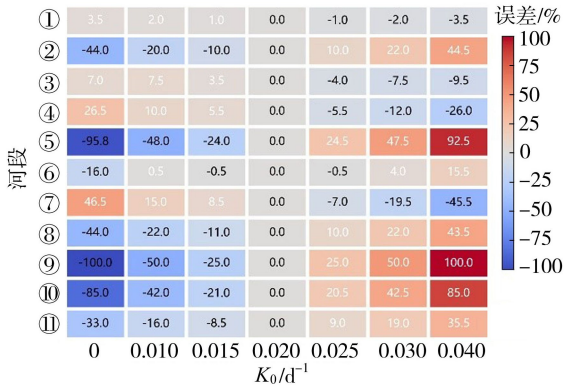


图 2 识别的衰减系数误差热力图

2.3 初始条件识别

初始条件对模拟开始时段的水质过程计算精度有较大影响,其影响程度与河流大小有关。在较短时段的水质模拟以及短期水质预测中,初始条件的设置影响很大,但是初始条件往往难以准确设定。利用数据同化识别初始条件,使预测更符合真实变化过程是数据同化理论方法的本质。本文通过同化观测点 O 的水质过程数据开展了各河段初始质量浓度识别的数值试验。各工况计算时,全河网初始质量浓度的估计值设为同一数值,分别为 0、4、5、6、7、8、15 mg/L。结果表明,经过 10 步左右迭代即可达到收敛条件,收敛代价函数相对值量级为 10^{-8} (表 1)。从误差热力图(图 3)可以看出,模型可以快速校正各河段的初始质量浓度,使各河段初始条件接近真实值 6 mg/L。对给定的不同初始

条件估计值 C_0 ,各河段的初始质量浓度均可得到不同程度的校正。总的来看,除个别河段外,相对误差均较同化前有明显下降。当初始质量浓度估计值为 5、7 mg/L 时,各河段平均值的相对误差分别从 16.7% 下降至 1.0%。当初始质量浓度估计值为 4、8 mg/L 时,各河段平均值的相对误差分别从 33% 下降至 2.0%。当初始估计值较真实值偏离较大时,河段⑥、⑨、⑩等河段误差相对较大,但是与初始估计值相比,经过同化后,初始质量浓度也有大幅改进。如对初始估计值为 15 mg/L 的工况,同化后河段⑥的初始质量浓度值误差为 87.8%,较原估计值误差(150%)有明显改进。

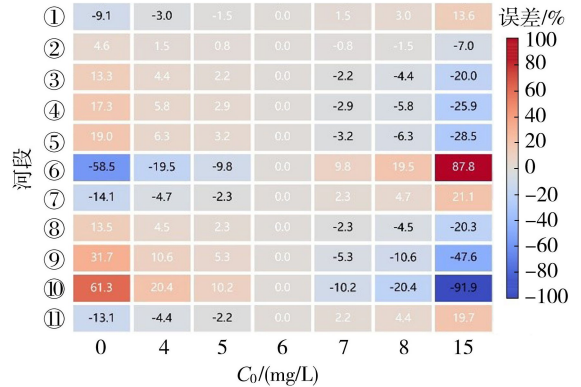


图 3 识别的初始质量浓度误差热力图

2.4 边界过程识别

上游非恒定边界是驱动河流水质动态演化的主导因素。然而实际应用中,边界条件常面临完全未知、部分缺失或含显著误差等情形,传统正向模拟方法难以应对此类不确定性。变分数据同化通过将边界过程作为控制变量,可有效解决该问题。本文假设上游水质边界条件不能准确获取,通过赋予其初始估计值开展数据同化的孪生数值试验。上游水质边界的初始估计值分 6 种工况设定,分别为给定 6 mg/L 的常数过程以及在此基础上添加 10%、20%、30%、40% 和 50% 不同等级的随机白噪声,计算工况分别对应初值 1~6(图 4)。无论哪种工况,通过同化观测点 O 的质量浓度变化过程,均可准确识别上游真实的水质变化过程,计算结果与真实值吻合,相对误差小于 0.2%。不同初始条件下算法

表 1 不同工况条件下同化数值试验迭代收敛结果

工况	衰减系数			初始质量浓度			上游边界过程			入河负荷		
	初值/ d^{-1}	N	J	初值/(mg/L)	N	J	初值	N	J	初值/(g/s)	N	J
1	0	16	3.27×10^{-9}	0	10	1.19×10^{-8}	真值	0	0	0	48	2.31×10^{-11}
2	0.010	14	1.39×10^{-8}	4	10	1.23×10^{-8}	初值 1	36	1.31×10^{-10}	3	54	3.69×10^{-10}
3	0.015	14	2.66×10^{-9}	5	10	1.31×10^{-8}	初值 2	47	2.43×10^{-12}	4	44	5.94×10^{-10}
4	0.020	0	0	6	0	0	初值 3	48	5.82×10^{-13}	5	0	0
5	0.025	11	3.31×10^{-9}	7	10	1.06×10^{-8}	初值 4	44	2.11×10^{-12}	6	49	2.30×10^{-9}
6	0.030	13	2.45×10^{-9}	8	10	1.11×10^{-8}	初值 5	47	1.78×10^{-12}	7	56	6.11×10^{-10}
7	0.040	15	3.49×10^{-9}	15	10	1.15×10^{-8}	初值 6	43	5.47×10^{-12}	15	55	3.15×10^{-10}

注: N 为迭代次数。

收敛需 36~48 次迭代,收敛时的代价函数降至 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ 量级。

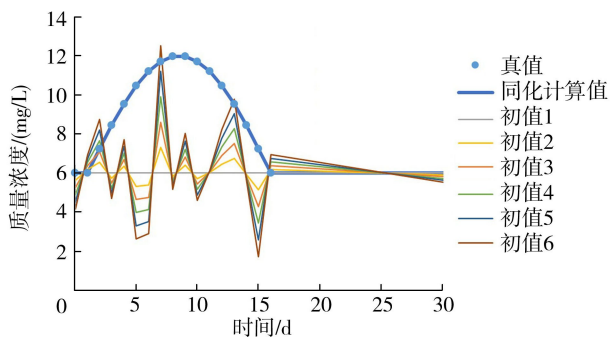


图4 同化前后上游边界水质质量浓度变化

2.5 入河负荷过程识别

污染沿河输入是影响河流水质变化的重要原因,但实际河流污染输入很难估算,这也是河流水质模拟预测中主要的不确定源。本文以入河污染负荷作为控制变量,通过同化观测点 O 的水质数据进行入河污染动态变化过程识别的数值试验,检验模型的可靠性。首先考虑进入河段①中的污染源 A 的识别,而将河段④中的污染源 B 认为已知(污染源 A 和 B 位置见图 1)。从污染负荷过程识别结果(图 5)可以看出,通过同化下游观测点 O 的水质资料,可准确识别污染源 A 的入河负荷过程,平均相对误差为 0.02%。同样,单独的污染源 B 的入河负荷过程也可精准识别。若污染源 A 和 B 均未知,通过同化下游观测点 O 的水质资料,可实现部分过程识别。从平均入河通量来看,两点累加的计算值为 13.6 g/s,与真实值 14.3 g/s 接近,相对误差为 4.9%。但由于仅有单点的观测资料,同化模型没有精确地捕捉到污染源 A 和 B 的入河污染负荷两个负荷峰过程,相位存在一定偏差。上游污染源 A 的

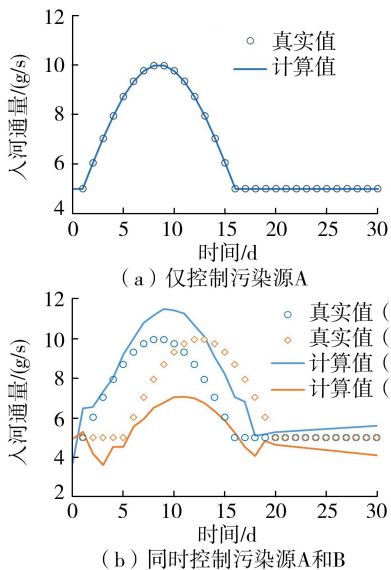


图5 污染负荷过程识别结果

波形更宽,而污染源 B 的波形缩窄。从其代价函数的收敛过程(图 6)来看,模型收敛较快,即使没有精准捕捉污染源 A 和 B 的入河负荷过程,模型在观测断面的模拟结果与实测值完全吻合,体现了异参同效效应,即对于不同的参数组合,模型的计算结果可保持一致。对于自由度大的变分数数据同化问题,可考虑丰富观测资料以改善数据同化效果。

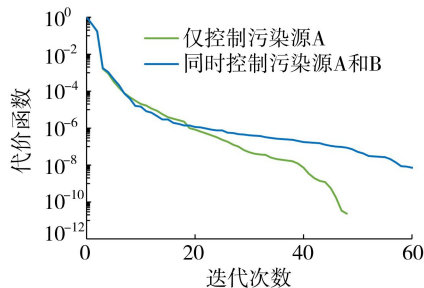


图6 以入河污染负荷为控制变量的同化数值试验收敛过程

3 结语

本文基于偏微分方程最优控制理论,建立了一维非恒定水质模型的河流水质变分数数据同化模型,并通过孪生数值试验方法开展了模型的可靠性和精度检验。以某河流为例,选择下游观测断面水质指标浓度过程作为观测数据,控制变量分别考虑空间分布式的水质衰减系数、初始条件、上游边界条件和入河负荷过程等 4 个常见的输入参数。数值同化试验结果表明,模型具有良好的收敛性和数据同化效果。当以衰减系数或初始条件为控制变量时,迭代 10~16 次即可收敛,并使代价函数相对值降至 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级。而以上游边界和入河负荷过程作为控制变量时,达到收敛的迭代次数增至 36~56 次。该变分数数据同化模型可基于时间序列观测资料反演空间分布式参数及相应的边界条件与入河负荷过程,但需指出,观测数据信息量不足将导致模型性能下降甚至失效。

参考文献:

- [1] 赖锡军. 流域水环境过程综合模拟研究进展[J]. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1123-1135. (Lai Xijun. A review of integrated water quality modeling for a watershed[J]. Progress in Geography, 2019, 38(8): 1123-1135. (in Chinese))
- [2] 杨研, 邵学军, 周刚, 等. 地表水环境质量模型评价体系的建立及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(2): 155-163. (Yang Yan, Shao Xuejun, Zhou Gang, et al. Assessment system for surface water environmental quality models[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2015, 55(2): 155-163. (in Chinese))

(下转第 101 页)

开阀时间对混流泵停机过程瞬态水力特性的影响研究

陈会向¹, 吴伟松¹, 王楚怡², 冯建刚¹, 黄富佳³, 夏臣智³, 阚 阚⁴, 徐 辉¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 南水北调(江苏)数智科技有限公司;
4. 河海大学电气与动力工程学院)

摘要:为研究真空破坏阀开启时间对混流泵机组停机过程瞬态水力特性的影响,建立了泵机组全过流几何模型,将实际的真空破坏阀装置简化为一个具有等效流通面积的球阀模型,采用动网格技术实现了球阀启闭与转轮旋转的耦合。通过设置提前开阀、联动开阀、延迟开阀3种控制方案,开展了停机瞬态过程的三维数值模拟,从外特性、压力脉动特性和内流特性3个角度探究了开阀时间对停机过程水力稳定性的作用机制,结合熵产理论揭示了停机过程中的能量耗散规律。研究结果表明:不同控制方案下外特性参数、压力波动、内流场变化等方面呈现相似的演变趋势,但在时间进程和变化幅值上存在差异;开阀时间对机组瞬态特性具有显著影响,相较于联动开阀方案,提前开阀方案虽能降低转矩与轴向力的峰值,但可能引发更为剧烈的初始水力冲击,而延迟开阀方案则会延缓工况转换,导致转矩、轴向力的反向极值分别增大至联动开阀方案的1.26倍和1.21倍,并加剧虹顶压强的脉动幅值;延迟开阀导致转轮区域能量损失显著升高;综合而言,联动开阀方案能在保证停机效率的同时,最有效地抑制水力振荡、降低载荷冲击与能量损耗,是实现平稳停机的最优策略。

关键词:混流泵机组; 停机过程; 水力特性; 球阀; 三维数值模拟; 熵产理论

Research on influence of valve opening time on transient hydraulic characteristics of a mixed-flow pump during shutdown process//Chen Huixiang¹, Wu Weisong¹, Wang Chuyi², Feng Jiangang¹, Huang Fujia³, Xia Chenzhi³, Kan Kan⁴, Xu Hui¹(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. South-to-North Water Diversion (Jiangsu) Shuzhi Technology Co., Ltd.; 4. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the effects of opening time of vacuum breaking valve on transient hydraulic characteristics of a mixed-flow pump unit during the shutdown process, a full-flow geometric model of the pump unit was established. The actual vacuum breaking valve device was simplified into a ball valve model with equivalent flow area, and the coupling of ball valve opening-closing motion and impeller rotation was realized by the dynamic mesh technology. Three schemes with different valve opening times were designed, namely the advanced opening scheme, the synchronous opening scheme, and the delayed opening scheme. Three-dimensional numerical simulations of the shutdown transient process were carried out. The influence mechanism of valve opening time on hydraulic stability during the shutdown process was explored from three aspects: external performance, pressure fluctuation characteristics, and internal flow characteristics. Combined with the entropy production theory, the energy dissipation law during the shutdown process was revealed. The results show that the external performance parameters, pressure fluctuation and internal flow field evolution present similar variation tendencies under different valve opening schemes, while differences exist in temporal evolution process and variation amplitude. The opening time of the valve exerts remarkable impacts on the transient performance of the unit. Compared with the synchronous opening scheme, the advanced opening scheme reduces the peak values of torque and axial force, yet it may induce more severe initial hydraulic impact. In contrast, the delayed opening scheme delays the operating condition transition, which makes the reverse extreme values of torque and axial force increase to 1.26 times and 1.21 times those of the synchronous opening scheme, respectively, and amplifies the pressure fluctuation amplitude at the siphon crown. Moreover, the delayed opening scheme significantly increases the hydraulic energy loss in the impeller region. In summary, the synchronous opening scheme can effectively suppress hydraulic oscillation, reduce load impact and energy loss while maintaining favorable shutdown efficiency, which is the optimal strategy for stable shutdown of the pump unit.

基金项目:国家自然科学基金项目(52476028,52379086);江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047)

作者简介:陈会向(1989—),女,副教授,博士,主要从事水力机械过渡过程研究。E-mail:chenhuixiang@hhu.edu.cn

通信作者:冯建刚(1976—),男,教授,博士,主要从事泵站工程水力学研究。E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

泵站作为水利工程建设中的关键设施,承担着区域防洪、除涝、灌溉、调水、供水等重要任务^[1-2]。在现代社会,泵站在保障水资源可利用性、促进农业发展和维持城市正常运转等方面起着至关重要的作用。然而,技术落后、机组效率低下等问题严重威胁着部分泵站的稳定运行与供水安全^[3]。因此,对现有泵站进行更新和改造是必要且紧迫的。

泵站在过渡过程中的安全稳定运行是保障其功能实现的关键。水泵机组在启动、停机和流量调节等过渡过程中,常常出现最不利工况。其中,由突然停电或操作引发的瞬态水力现象尤为复杂和危险,此时产生的剧烈压力波动与瞬态负荷^[4-5]会显著增加机械故障、结构破坏及水锤事故的风险,严重危及机组安全^[6-8]。在停机过程中,作为核心停机装置的真空破坏阀的作用至关重要。当泵机组停机时,真空破坏阀迅速开启,向泵体内补入空气,破坏可能形成的真空,从而有效防止飞逸反转、抬机以及巨大的反向水锤压力,对泵站部件起到关键性的保护作用。因此,深入研究真空破坏阀的运动规律与控制策略对泵站停机过渡过程的影响,对于优化泵站的运行与控制具有重大意义。

目前,国内外学者在泵及泵站过渡过程研究方面已取得显著进展。在瞬态特性研究方面,Tsukamoto等^[9]对离心泵启动过程的瞬态特性进行了开创性的试验与理论研究;Zhang等^[10]对比了自吸泵在不同启动速度下的瞬态性能;Kan等^[11]则利用熵产理论量化了轴流泵在不同运行模式下的能量损失。随着计算机技术与计算流体动力学方法的成熟,三维非定常数值模拟已成为研究过渡过程的高效可靠手段。例如:Kan等^[12]成功模拟了轴伸贯流泵机组的飞逸过渡过程;Chen等^[13]结合数值模拟与原型试验,深入探究了抽水蓄能机组启动过程中的水力特性。然而,现有研究多集中于启动过程或水泵水轮机的瞬态特性^[14-15],对于混流泵机组停机过程,特别是真空破坏阀控制策略的精细化研究仍相对有限。江如春等^[16]指出真空破坏阀是保障虹吸式出水流道安全的关键设备。饶天华等^[17]通过数值模拟分析了真空破坏阀的进口直径与开启压力对其水锤防护效果的影响。这些研究充分证实了真空破坏阀在瞬态防护中的有效性与重要性,但现有研究多停留在定性分析,针对其控制参数的系统性定量研究尚属空白,特别是在采用三维CFD动网格技术精确模拟真空破坏阀的开启过程以及对比分析

不同控制策略对瞬态流场及水力稳定性的影响方面,仍缺乏深入的探索。

基于此,本文以某立式混流泵机组为研究对象,基于ANSYS Fluent平台,采用SST $k-\omega$ 湍流模型及动网格技术,对其停机过渡过程进行了三维非定常数值模拟。与已有研究不同,本文重点关注停机过程中真空破坏阀的控制策略,通过固定机组转速开始下降的时刻,设定阀门的开启时间,系统性地探讨提前开阀、联动开阀与延迟开阀3种控制方案对机组内外特性、压力脉动等瞬态特性的影响规律,以期揭示不同控制策略下泵机组停机过程的瞬态响应机制,为优化泵站停机控制策略、保障机组安全稳定运行提供理论依据。

1 数值模拟方法及模型

1.1 控制方程及求解方法

采用CFD数值模拟方法计算泵机组停机过渡过程;考虑水体的不可压缩性,采用纳维-斯托克斯方程^[18]对其进行求解,基本方程中主要考虑连续性方程和动量守恒方程;采用结合了 $k-\varepsilon$ 模型与 $k-\omega$ 模型优势的SST $k-\omega$ 两方程模型^[19]作为三维数值模拟的湍流模型。

在求解器设置方面,本文采用PISO算法进行压力-速度耦合,与SIMPLE和SIMPLEC算法相比,该算法能更好地同时满足动量方程与连续性方程,不仅可以加快收敛速度,而且在瞬态问题的计算中具有优异的稳定性^[20]。参考压力值设定为一个标准大气压,壁面设置为无滑移壁面,时间步长设置为0.00133333 s。每个时间步内的残差收敛标准设定为 10^{-6} ,最大迭代次数为20,重力加速度为 9.81 m/s^2 。

为精确模拟停机过渡过程中的瞬态特性,本文构建了球阀模型,以达到实际泵装置中真空破坏阀的效果。同时,将全流道计算域划分为静止域、转轮旋转域及球阀运动域,各域之间通过交界面进行数据传递。将转轮和球阀设置为刚体,其转速随时间的变化规律用函数定义,该函数通过用户自定义函数(UDF)中的宏进行编译和加载。转轮旋转与球阀启闭两种运动在时间与物理上协同作用,实现耦合,运动指令通过UDF在时间上同步,网格更新在步骤上顺序执行,而最终的物理相互作用通过在同一时间步内求解统一控制方程得以实现。

1.2 转轮转速力矩平衡方程

在水泵启动过程中,水泵的转速时刻发生变化,

其转速变化满足力矩平衡方程:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_H - M_f \quad (1)$$

式中: J 为机组转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为转轮角速度, rad/s ; t 为时间, s ; M_H 为转轮叶片所受到的力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; M_f 为转轮叶片所受到的阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。由于轴承及轮盘摩擦较小,本文忽略这两部分对转轮转动的影响。

1.3 熵产理论

建立水力损失与熵产之间的关系,利用熵产理论对水泵的能量耗散进行量化评估,准确预测流动过程中的能量损失。由于水的比热容较高,通过传热产生的熵产可忽略不计。

单位体积总熵产率为:

$$\dot{S}_D''' = \dot{Q}/T \quad (2)$$

式中: \dot{S}_D''' 为单位体积总熵产率, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; \dot{Q} 为能量耗散率, W/m^3 ; T 为开尔文温度, K 。

雷诺时均流动的总熵产率包括由时均速度引起的直接熵产率和由脉动速度引起的湍流熵产率^[21-24]。此外,壁面区域存在高速度梯度,会产生较强的壁面效应,从而造成熵产。Duan等^[25]提出了一种适应性广、计算精度高的壁面函数来计算近壁面处的熵产率:

$$\dot{S}_w'' = \tau_w u_w / T \quad (3)$$

式中: \dot{S}_w'' 为由壁面剪切应力引起的壁面熵产率, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; τ_w 为壁面剪切应力, Pa ; u_w 为近壁面第一层网格中心速度, m/s 。

总熵产可由各熵产率分别对计算域进行积分后求和得出,用水力损失直观表示能量损失:

$$h_{ep} = TS/\dot{m}g \quad (4)$$

式中: h_{ep} 为水力损失, m ; S 为熵产, W/K ; \dot{m} 为质量流量, kg/s 。

1.4 泵站计算模型

以某立式混流泵机组及全过流系统为研究对象,计算模型严格遵循原型泵站的几何尺寸,比例为1:1。完整的计算域包括进水池、肘形进水流道、转轮、导叶、虹吸式出水流道以及出水池。泵站运行水位设定为设计水位,其中进水侧水位为7.1 m,出水侧水位为13.1 m。进水池的进水面设置为压力进口,出水池的出水面设置为压力出口,进出水池的自由液面均采用明渠边界条件,进出水池及空气库的顶部均设置为压力进口,压力设置为0。泵机组及过流部件的主要设计参数包括:转轮直径3150 mm、球阀直径650 mm、叶片角度 -4° 、叶片数4、导叶数6、设计扬程6 m、设计流量 $37 \text{ m}^3/\text{s}$ 、转轮额定转速125 r/min、主机组转动惯量 $38410 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。各区域

均采用六面体结构网格,泵站模型计算域如图1所示,具体部位的网格如图2所示。

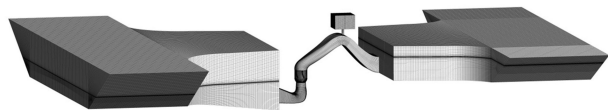


图1 泵站模型计算域

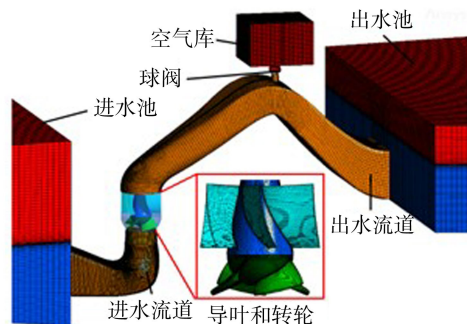


图2 泵站模型网格

为探究在停机过渡过程中泵机组内部的压力脉动特性,在进出水流道及转轮和导叶区域共设置12个压力脉动监测点和1个虹顶测点,压力脉动监测点P-IC1~P-IC4位于机组进水流道,P-IM1和P-IM2位于叶片上,P-GV1和P-GV2位于导叶区域,P-OC1~P-OC4位于机组出水流道,虹顶测点P-siphon位于虹吸式出水流道与球阀连接处。测点的具体位置如图3所示。

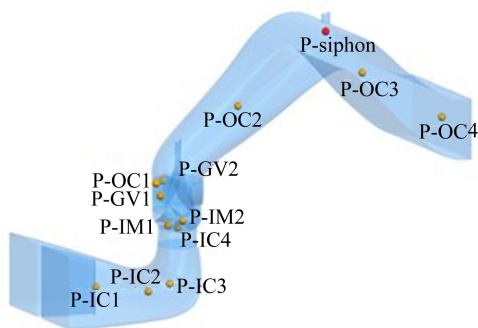


图3 机组流道测点位置示意图

1.5 网格无关性验证

采用ICEM软件对所建模型进行网格划分,并应用理查德森外推法进行网格无关性验证,采用网格收敛指数GCI来定量判断网络的计算结果是否收敛,评估验证网络的准确性^[26-28]。设立相同划分策略的3套网格方案,网格数量递增,尺度递减。根据美国机械工程师协会的建议,网格细化因子 r 应该大于1.3。3套网格的数量分别为322.55万、741.84万和1629.84万。分别选取水头和效率作为收敛性分析的变量,3套网格皆在设计工况下进行数值模拟计算。根据网格无关性验证,水头和效率作为分析变量时的网格收敛指数分别为2.21%

和 1.67%，说明网格已符合收敛标准（小于 3%）^[29]。综合考虑模拟精度与计算成本，最终确定网格总数为 741.84 万。

1.6 数值模拟验证

选取水泵效率、扬程系数和流量系数对模型试验和数值模拟结果进行对比。图 4(a) 对比了 6 个不同流量工况下的效率值，可以看到水泵效率的模拟值与试验值变化趋势较为一致，且在整个工况范围内吻合良好。图 4(b) 对比了扬程系数的模拟值与试验值，其模拟曲线与试验曲线基本重合。该结果表明，本文所采用的数值模型、网格策略及参数设置能够准确地预测泵机组的实际外特性，为后续停机瞬态过程的模拟研究提供了可靠依据。

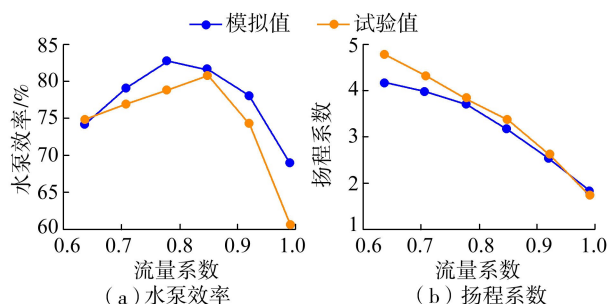


图 4 试验和模拟结果对比

2 不同开阀时间控制方案下机组停机过程水力特性

2.1 停机控制方案

转轮均以额定转速 125 r/min 运行至 5.6 s，此时电动机断电，转轮转速开始下降。设置 3 种开阀时间控制方案（表 1）：提前开阀方案（方案 S1），球阀在 0.5 s 到 0.6 s 打开；联动开阀方案（方案 S2），球阀在 5.5 s 到 5.6 s 打开；延迟开阀方案（方案 S3），球阀在 10.5 s 到 10.6 s 打开。

表 1 3 种控制方案下的特征时刻 单位：s

方案	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
S1	0.5	3.0	5.5	7.5	10.0	10.5	16.5	25.0
S2	0.5	3.0	5.5	8.0	10.5	11.0	17.0	25.5
S3	0.5	3.0	5.5	8.0	11.5	12.0	19.0	29.0

同时，为了便于后续的对比如分析，在每种方案下分别取 8 个特征时刻，具体如表 1 所示。在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻，转速均为额定转速；在 t_4 时刻，转轮转速降至额定转速的 50%；在 t_5 和 t_6 时刻，转轮转速接近零值，在 t_5 时刻，转轮仍为正转，在 t_6 时刻，转轮为反转；在 t_7 时刻，转轮转速达到最大反转转速；在 t_8 时刻，转轮转速为 0，标志着水泵机组停机的完成。

对转轮旋转状态的界定依据如下：设定机组初始额定旋转方向为正转，其角速度值为正。在瞬态

计算过程中，通过耦合求解的 UDF 实时监测转轮的角速度。当监测到的角速度数值由正过零转为负时，判定机组进入反转状态，即水轮机工况。因此，文中提及的“正转”“反转”“零转速点”均有明确的、基于求解器输出数据的量化依据。

2.2 不同控制方案下气液两相的变化规律

以 8 个时刻下的气液两相分布图（图 5）为依据，对 3 种控制方案下的气液两相变化规律进行分析。

以方案 S2（图 5(b)）为例对虹吸式出水通道内的空气体积分数变化进行分析。在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻，机组维持额定转速运行，球阀处于关闭状态，空气无法进入流道； t_3 时刻后，球阀开启，空气开始进入流道；直至 t_4 时刻，转轮转速降至额定转速的 50%，由于流道中仍有较大的正向流速，空气进入流道后在出水通道下降段上部形成空气囊，同时出水通道下降段水面快速下降；在 t_5 和 t_6 时刻，转速趋零，此时下降段水面已经降至出水池水面位置，上升段水面位于虹顶处，出水通道内水流已被空气切断，形成断流；在达到最大反转转速的 t_7 时刻及后续减速过程中，出水通道上升段水面位置逐渐下降，直至 t_8 时刻；在 t_8 时刻，上升段水面稳定在进水池水面位置，流道内外压力达到平衡，停机过程基本结束。

当球阀开启时刻滞后于转轮降速过程时，出水通道中的气液两相分布情况如图 5(c) 所示。在方案 S3 中，球阀直至 10.6 s 才开启。在阀门开启后的 t_5 时刻，空气才少量进入流道中，此后的过程与方案 S2 相同，直至 29 s 时，出水通道中的气液分布才算稳定。

方案 S1（图 5(a)）在机组尚处于稳定运行的 0.6 s 时刻即开启球阀，实现预充气。在 $t_2 \sim t_3$ 期间，电机未断电，转轮保持额定转速旋转，出水通道内逐渐形成堰流状态，其中自由液面的存在产生了潜在的失稳可能：自由表面波动的风险、周期性涡脱落可能诱发的结构振动，以及系统流体动力特性改变带来的耦合失稳可能性，这是与方案 S2 不同的地方，而 t_5 时刻后的过程基本与方案 S2 一致，并在几乎相同的时刻完成停机。

综上所述，通过对 3 种控制方案的对比可知：方案 S3 因补气进程滞后，导致停机达到稳定所需的时间最长；方案 S1 虽然能通过预充气的方式让空气提前进入流道，但实现停机的时间基本与方案 S2 一致，且其过程中会出现堰流现象，影响机组稳定运行；相比之下，方案 S2 最为可控和稳定。

2.3 不同控制方案下机组外特性分析

3 种控制方案下的停机过程外特性变化如图 6 所示。由图 6 可知，3 种方案在转速、虹顶测点压

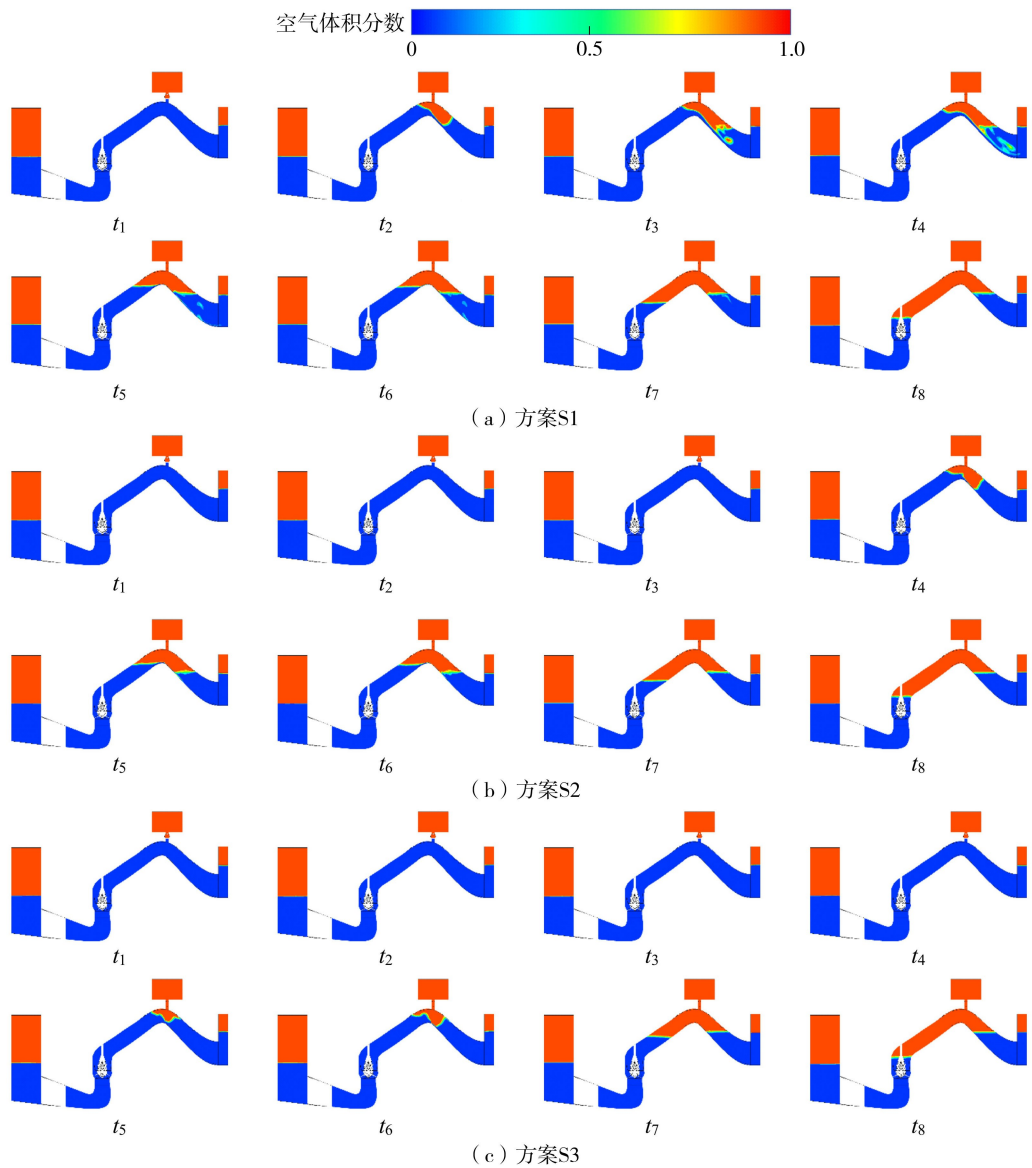


图5 3种控制方案下的气液两相分布

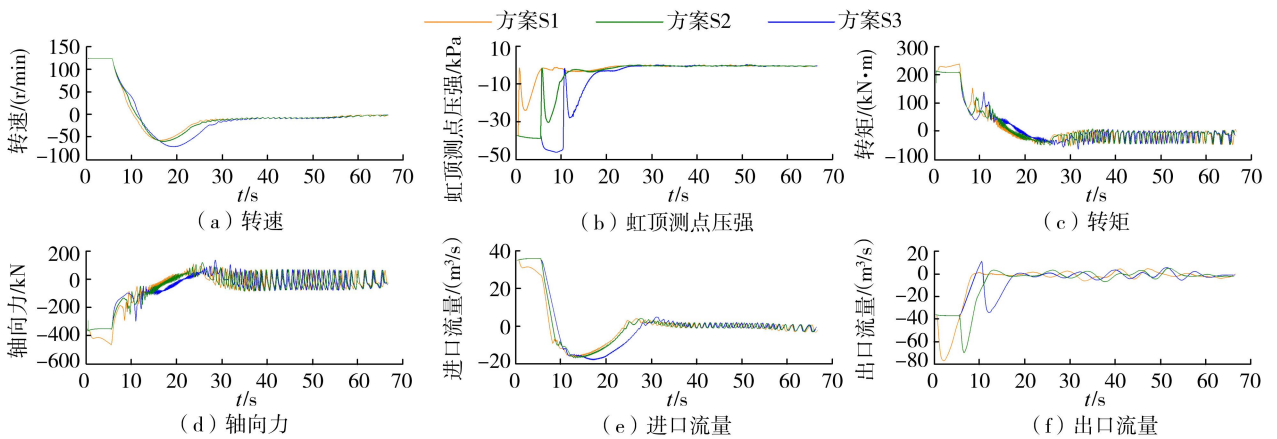


图6 3种控制方案下的外特性变化对比

强、转矩、轴向力与进出口流量等参数上变化趋势相近,但在响应速度、极值大小与过渡过程平稳性方面存在差异。

以方案 S2 为例,进口流量于 8.2 s 变为 0,机组

转速于 10.9 s 变为 0,最大反转转速于 17 s 达到 -58.9 r/min ,为额定转速的 47%。5.6 s 时机组开始停机,此时电机断电且空气阀同时开启,停机过程依次经历水泵工况、制动工况、水轮机工况。5.6~

8.2 s 为停机过程中的水泵工况,在此期间,进口流量迅速下降,由于虹吸式出水流道的几何特性,其下降段水面在球阀打开时迅速下降,导致出口流量先增大后减小。虹顶测点压强在开阀瞬间升至外界大气压,之后随着流态变化,虹顶测点处恢复真空,伴随着振动其真空值逐渐减小。叶片转矩和轴向力在水泵工况下均迅速下降。8.2~10.9 s 为停机过程中的制动工况,此时进口流量为倒流,转轮转速仍为正转并迅速减小,虹顶测点压强逐渐增大,真空度随之减小。在此期间,转矩和轴向力由迅速减小转为迅速增大。10.9 s 后,停机过程进入水轮机工况,由于空气已经截断水流,出水流道内的回流水体逐渐减少,进口流量及反转转速先增大后减小直至为0。转矩和轴向力均绕零值做一定程度的振荡直至稳定。

方案 S3 将开阀时间延后至 10.6 s,其进口流量于 9.1 s 变为 0,机组转速于 11.5 s 变为 0,最大反转转速于 19 s 达到 -71.2 r/min ,为额定转速的 57%。比较发现,在 5.6 s 之前,方案 S3 和方案 S2 的曲线几乎重合,由于 5.6 s 时电机断电,但球阀仍未打开,在后续的 5 s 内,转速持续减小,虹顶测点压强增大,出口流量减小,直到球阀打开,方案 S3 的各参数变化趋势才和方案 S1 一致,但转矩、轴向力的反向极值分别为方案 S2 的 1.26 倍和 1.21 倍。

方案 S1 提前了开阀时间,实现了预充气,其进

口流量于 7.4 s 变为 0,机组转速于 10 s 时变为 0,最大反转转速于 16.5 s 达到 -56.9 r/min ,为额定转速的 45%。由于在 0.6 s 时就将球阀打开,导致和方案 S2 相比,方案 S1 各项数据的响应和变化都有一定程度的提前。在 0.6~5.6 s 期间,球阀打开的同时转轮还维持额定转速,这使得方案 S1 的转矩、轴向力以及出口流量出现了更大的幅值。

对比发现,3 种控制方案的各项外特性参数均在停机过程中出现剧烈波动,但方案 S1 和 S3 的波动程度更大,且方案 S3 实现停机过程所需的时间更长,相比之下,方案 S2 最稳定和高效。

2.4 不同控制方案下压力脉动特性分析

在机组流道中设置 12 个压力脉动监测点,具体位置见图 3。在机组停机过程计算中,获取 3 种控制方案下监测点的压力脉动值,得到机组流道压力脉动变化情况,如图 7 所示。

由图 7 可见,不同区域测点的压强变化呈现不同的趋势,而相同区域测点的变化趋势相近,但波动幅度不同。进水流道内的压力脉动整体较弱,其压强变化主要呈轻微波动;而出水流道内各监测点压强变化较为剧烈,变化幅度更大。进出水流道这 8 个监测点中,靠近转轮进口区域的监测点 P-IC4 与靠近导叶出口区域的监测点 P-OC1 的压力脉动最为强烈。

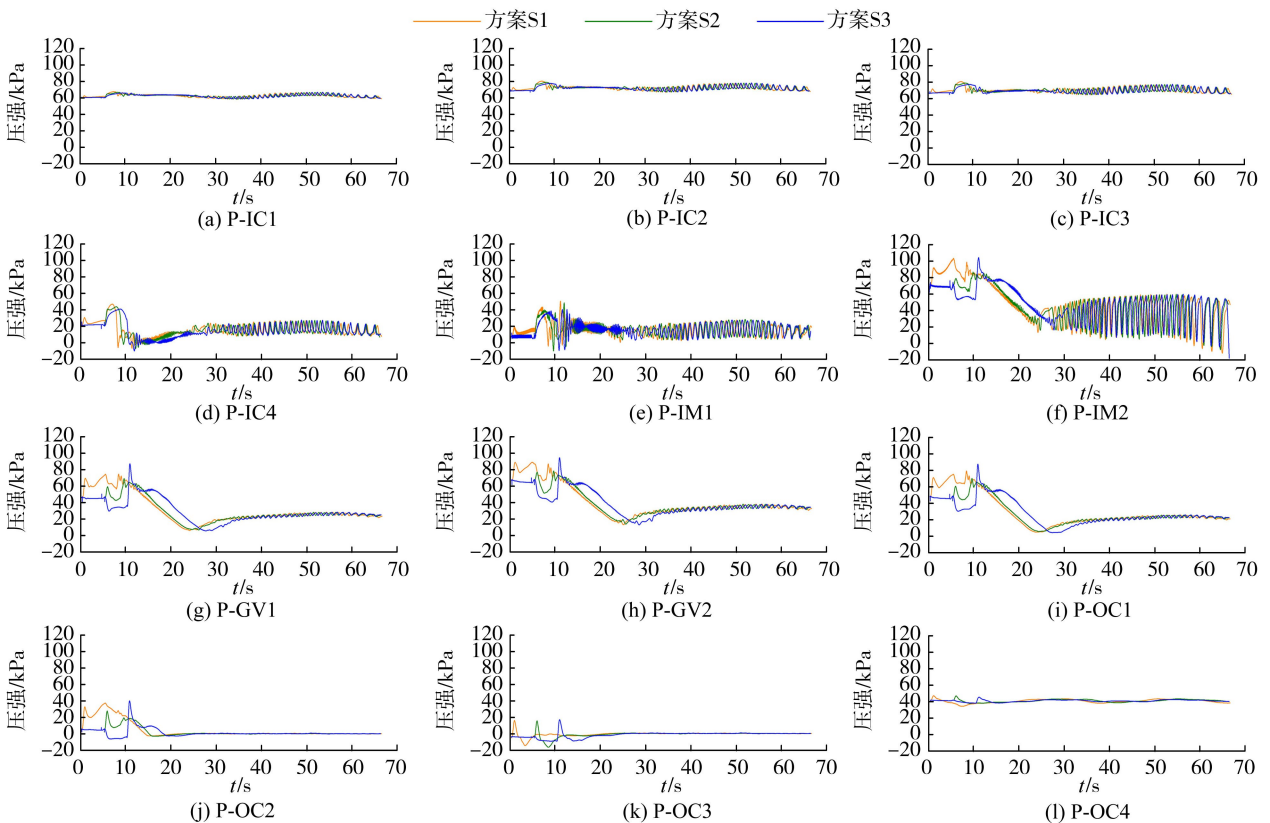


图 7 3 种控制方案下不同监测点压力脉动变化对比

以方案 S2 为例进行分析, P-IC1~P-IC3 这 3 个测点位于进水流道内, 压强的初始值均在 60~80 kPa 之间, 且都是在电机断电后有轻微的增大, 增大幅值不超过 80 kPa, 随后缓慢减小, 最后稳定在初始值附近。P-IC4 和 P-IM1 测点压强增大的幅度和前 3 个测点相比更大, 比 P-IM2、P-IGV1、P-IGV2 和 P-OC1 这 4 个测点更加缓和, 但这 4 个测点的压强在增大后有一段较长的减小过程, 最后均不同程度地绕零值波动。P-OC2~P-OC4 测点的压强则在轻微波动后稳定于零。

对于 3 种控制方案, 方案 S1 的压强最先开始变化, 5.6 s 前, 方案 S2 和 S3 的压强变化曲线保持一致, 5.6 s 后, 方案 S2 的压强变化趋势和方案 S1 开始的变化趋势一致, 方案 S3 由于此时球阀还未打开, 压强的变化较方案 S2 更为滞后。综上所述, 方案 S3 的各测点压强变化最为剧烈, 幅值最大, 以测点 P-GV2 为例, 在 10 s 前后的压强变化阶段, 方案 S3 的最大和最小压强分别为方案 S2 的 1.22 倍和 0.78 倍, 方案 S1 的变化剧烈程度和方案 S2 近似, 且更先达到稳定。

2.5 停机过程中内流特性分析

为更好地了解不同开阀时间在停机过程中对机组内流特性的影响, 分别对 3 种控制方案下不同时刻机组转轮区域和导叶区域的流速、压强、湍动能以及熵产率变化进行进一步对比分析。具体变化如图 8 所示。

如图 8(a) 所示, 3 种控制方案下整个流场的流速随着时间的推移逐渐减小, 导叶区域的流动逐渐趋于静止, 转轮仅在叶片附近存在一些细微水流流动, 在 t_5 时刻, 3 种控制方案均在叶片的吸力面处形成了块状的高速区, 随着时间的推移, 转轮开始反转, 水泵机组由制动工况进入水轮机工况, 高速区逐渐减小, 最后变成紧贴叶片吸力面的条状。对比 3 种控制方案, 方案 S1 通过早期补气主动重构流场, 在 t_2 时刻即削弱转轮出口高速核心区, 并于 t_3 时刻完成高速区从吸力面向压力面的翻转, 实现了气液两相流态的平稳切换; 方案 S3 由于补气的滞后, 高流速区域的大小明显小于前两种方案; 而方案 S2 的流场演变介于其他两种方案之间, 过渡更为连续。

图 8(b) 为停机过程中的压强变化。停机初期, 方案 S1 即在叶片压力面及下游导叶区域构筑高压缓冲区, 实现了压强的前瞻性调平。方案 S2 呈现过渡特征。至反转阶段, 方案 S3 在叶片吸力面侧形成明显的条状低压区, 在机组实现停机时, 在叶片吸力面侧的压强比前两种方案更低。

湍动能场的演化揭示了机械能耗散路径的差异。如图 8(c) 所示, 额定工况下, 湍动能仅分布于导叶头部动静干涉区域。方案 S1 通过气相引入, 在导叶区预先构建了能量缓冲机制。当转速降至 50% 时, 方案 S2 和 S3 出现湍流真空, 能量以势能形式危险积聚; 而方案 S1 则在叶片压力面与导叶流道中部形成新的湍流区, 实现能量的渐进式耗散。在

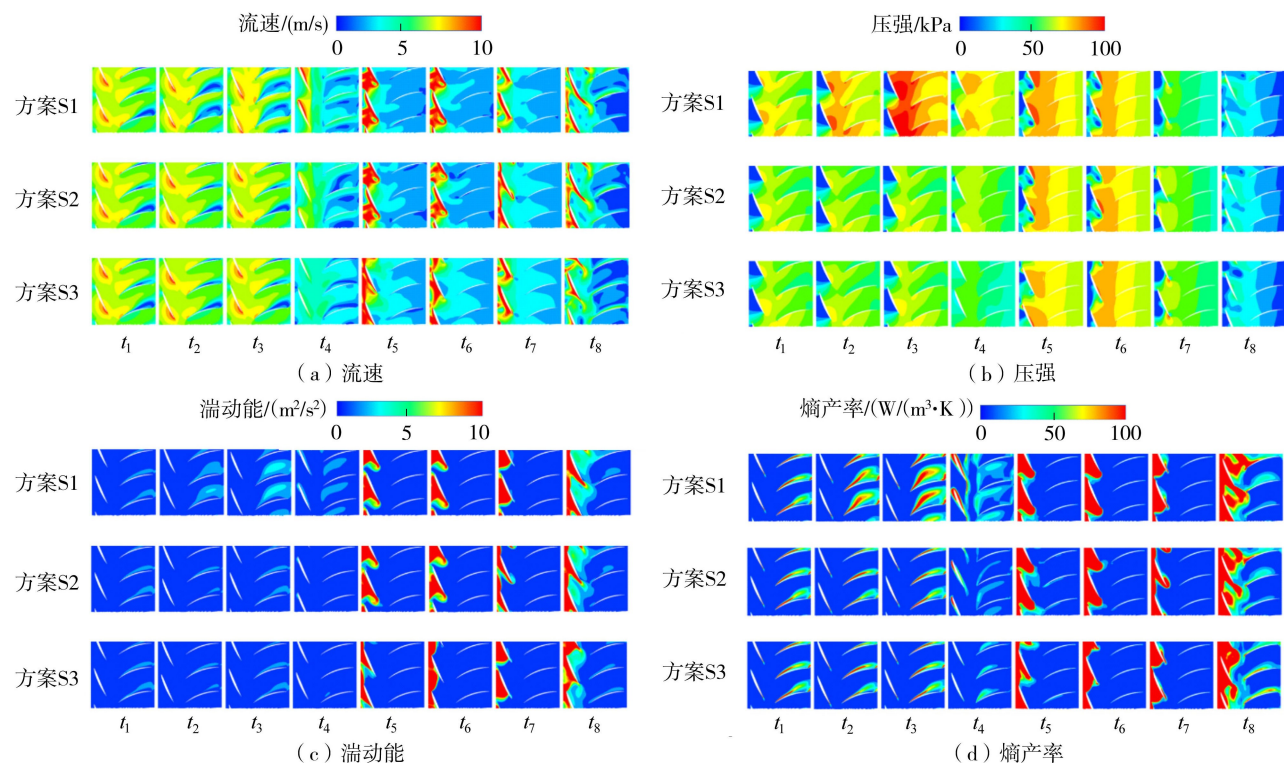


图 8 3 种控制方案下特征时刻内流场变化对比

正转接近零转速时刻,所有控制方案均在叶片吸力面出现大尺度分离引发的高湍流区,但方案 S3 呈现明显的受限失稳特征,预示着后续更剧烈的能量释放。

从热力学层面看,熵产率场揭示了不可逆损失的本质。如图 8(d) 所示,方案 S1 通过主动激发并扩大熵产区,系统性地提升了流场等效阻尼。在正转接近零转速时刻,各方案均于叶片吸力面达到熵产峰值,但方案 S1 展现出完全发展的耗散特征,而方案 S3 则表现为集中且受限的失稳状态。高熵产区从正转吸力面向反转压力面的翻转,标志着驱动机制的切换,方案 S1 在此过程中实现了更均匀、更可控的能量耗散分布。

上述分析表明,控制策略的本质差异体现在能量处理方式上:方案 S1 通过压强调平、湍流损失稳和熵产预设实现能量的分级耗散;方案 S2 在多数阶段表现出适中的过渡特性;方案 S3 则因缓冲缺失,导致能量集中释放,引发剧烈飞逸。从热力学角度看,方案 S1 将停机过程从熵产高度集中、峰值巨大的危险过程,优化为熵产分布均匀、峰值平滑的可控过程,展现出最优的流场主动管理能力。

然而,虽然方案 S1 通过前瞻性流场管理,获得了最优的内流稳定性与能量耗散品质,但其代价是引发了显著的初始水力冲击,将风险前置。相比之下,方案 S2 虽未追求极致的流场有序性,但通过同步响应机制,在转轮降速起始时刻协同介入,有效规避了方案 S1 的初始冲击与方案 S3 的极端反转载荷,是实现泵机组安全停机的最优控制策略。

3 结论

a. 在 3 种不同开阀时间控制方案下,机组停机过程中的外特性参数、压强波动与能量损失的演变趋势总体一致,但其动态响应的时间进程与变化幅值存在明显差异。

b. 在停机过渡过程中,提前开阀方案凭借预充气的机制,有效促进了空气的均匀分布,获得了最有序的气液界面与更优的瞬态流场品质,但因此引入了较大的初始水力冲击;联动开阀方案在停机完成时间与稳定性之间取得了最佳平衡;而延迟开阀方案则显著延缓了工况转换进程,导致转矩、轴向力的反向极值分别增大至联动开阀方案的 1.26 倍和 1.21 倍,增大了压力脉动强度。

c. 延迟开阀方案导致转轮区域在关键制动反转阶段的能量耗散最为显著,其熵产率远高于提前开阀与联动开阀方案。综合内部流场稳定性与外部载荷特性可知,联动开阀是平衡停机效率、载荷控制

与能量损耗的最优策略。

d. 本文研究在模型简化与参数维度上存在一定局限:基于不可压缩流与刚性壁面假设,结论更侧重于宏观水力稳定性评估,对极端水锤压力的预测需后续引入流固耦合模型;聚焦于阀门开启时间,将动作简化为瞬时,未来可拓展至包含开启速度在内的多维优化。

参考文献:

- [1] Tse H. Challenges for pumping station design in water industries: an overview of impacts from climate change and energy crisis[J]. *Water Research*, 2024, 253: 121250.
- [2] 徐辉, 谢锋, 张睿, 等. 城市污水提升双层泵站阶梯消能工水力特性分析及改善[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 81-89. (Xu Hui, Xie Feng, Zhang Rui, et al. Analysis and improvement of hydraulic characteristics of step energy dissipators in double-layer pumping stations for urban sewage lifting[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(5): 81-89. (in Chinese))
- [3] 周璐, 张健, 孟凡继, 等. 泵站水电转换系数的 BP 神经网络模型[J]. *水利经济*, 2024, 42(6): 71-75. (Zhou Lu, Zhang Jian, Meng Fanji, et al. BP neural network model of hydroelectricity conversion coefficient of pumping station[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(6): 71-75. (in Chinese))
- [4] Wang Wenjie, Tai Geyuan, Pei Ji, et al. Numerical investigation of the effect of the closure law of wicket gates on the transient characteristics of pump-turbine in pump mode[J]. *Renewable Energy*, 2022, 194: 719-733.
- [5] Li Deyou, Fu Xiaolong, Wang Hongjie, et al. Evolution mechanism of a prototype pump turbine after pump power-off[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(10): 106109.
- [6] Li Q, Xin L, Yao L, et al. Flow characteristics analysis of load rejection transition process in pumped storage unit based on cavitation model[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2024, 17(9): 2005-2015.
- [7] Li Zhenggui, Xu Lixin, Wang Dong, et al. Simulation analysis of energy characteristics of flow field in the transition process of pump condition outage of pump-turbine[J]. *Renewable Energy*, 2023, 219: 119480.
- [8] 郑源, 赵雪莹, 周文杰, 等. 空化诱导的离心泵叶轮区流动特性与压力脉动分析[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(10): 244-251. (Zheng Yuan, Zhao Xueying, Zhou Wenjie, et al. Analysis of flow characteristics and pressure pulsation in impeller region of centrifugal pump induced by cavitation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(10): 244-251. (in Chinese))
- [9] Tsukamoto H, Ohashi H. Transient characteristics of a

- centrifugal pump during starting period [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(1): 6-13.
- [10] Zhang Yuliang, Zhu Zuchao, Zhao Yanjuan, et al. Comparative experiments on a self-priming pump delivering water medium during rapid and slow starting periods [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2021, 45(4): 1007-1019.
- [11] Kan Kan, Zhao Feng, Xu Hui, et al. Energy performance evaluation of an axial-flow pump as turbine under conventional and reverse operating modes based on an energy loss intensity model [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(1): 015125.
- [12] Kan Kan, Zheng Yuan, Chen Huixiang, et al. Numerical simulation of transient flow in a shaft extension tubular pump unit during runaway process caused by power failure [J]. *Renewable Energy*, 2020, 154: 1153-1164.
- [13] Chen Huixiang, Liu Hanzhong, Kan Kan, et al. Analysis of hydraulic characteristics during low head start-up transition of pumped storage units based on entropy production theory [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114042.
- [14] 边少康, 张小莹, 李刚, 等. 重力流关阀规律及空气阀优化研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 55-61. (Bian Shaokang, Zhang Xiaoying, Li Gang, et al. Study on valve-closure law of gravity flow and optimization of air valve [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 55-61. (in Chinese))
- [15] 黄时锋, 周文萍, 程佳秋. 输水系统水泵失电工况出口阀关闭规律的优选 [J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(3): 56-60. (Huang Shifeng, Zhou Wenping, Cheng Jiaqi. Optimization research on closure law of outlet valve under power failure condition in water conveyance system [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(3): 56-60. (in Chinese))
- [16] 江如春, 王荣国, 宋佳. 大型泵站虹吸式流道真空破坏阀关键技术研究应用 [J]. *水利建设与管理*, 2023, 43(10): 38-41. (Jiang Ruchun, Wang Rongguo, Song Jia. Research and application of key technologies for vacuum breaker in siphon flow channel of large pumping station [J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2023, 43(10): 38-41. (in Chinese))
- [17] 饶天华, 秦战生, 刘绍谦, 等. 真空破坏阀对虹吸断流管道的水锤防护效果 [J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(12): 1243-1248. (Rao Tianhua, Qin Zhansheng, Liu Shaoqian, et al. Water hammer protection effect of vacuum break valve on siphon cut-off pipeline [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(12): 1243-1248. (in Chinese))
- [18] Cavazzini G, Houdeline J B, Pavese G, et al. Unstable behaviour of pump-turbines and its effects on power regulation capacity of pumped-hydro energy storage plants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 399-409.
- [19] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. *Journal of Computational Physics*, 1986, 62(1): 40-65.
- [21] Xu Zhe, Zheng Yuan, Kan Kan, et al. Flow instability and energy performance of a coastal axial-flow pump as turbine under the influence of upstream waves [J]. *Energy*, 2023, 272: 127121.
- [22] 周罗香, 张志兵, 孙政, 等. 基于熵产理论的水泵水轮机驼峰区内部水力损失特性研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 62-67. (Zhou Luoxiang, Zhang Zhibing, Sun Zheng, et al. Study on internal hydraulic loss characteristics of pump-turbine hump region based on entropy generation theory [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 62-67. (in Chinese))
- [23] Shen Simin, Qian Zhongdong, Ji Bin. Numerical analysis of mechanical energy dissipation for an axial-flow pump based on entropy generation theory [J]. *Energies*, 2019, 12(21): 4162.
- [24] Kock F, Herwig H. Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(10/11): 2205-2215.
- [25] Duan Lu, Wu Xiaolin, Ji Zhongli, et al. The flow pattern and entropy generation in an axial inlet cyclone with reflux cone and gaps in the vortex finder [J]. *Powder Technology*, 2016, 303: 192-202.
- [26] Stern F, Wilson R V, Coleman H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations, part 1: methodology and procedures [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(4): 793-802.
- [27] Roy C J. Grid convergence error analysis for mixed-order numerical schemes [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(4): 595-604.
- [28] Trivedi C, Cervantes M J, Gandhi B K. Investigation of a high head Francis turbine at runaway operating conditions [J]. *Energies*, 2016, 9(3): 149.
- [29] Wilson R V, Stern F, Coleman H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations, part 2: application for RANS simulation of a cargo/container ship [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(4): 803-810.

(收稿日期: 2025-11-08 编辑: 俞云利)

深厚覆盖层上面板坝加速度响应空间分布特性研究

邹德高^{1,2}, 唐川^{1,2}, 屈永倩^{1,2}, 冉从勇³

(1. 大连理工大学海岸与海洋工程全国重点实验室; 2. 大连理工大学建设工程学院;
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司)

摘要:为深入认识强震区深厚覆盖层上面板坝的动力效应,采用考虑大坝-覆盖层-地基之间的动力相互作用的三维波动分析方法,开展了深厚覆盖层上面板坝的地震响应分析,并考虑了河谷宽度、覆盖层特性、地震动特性等关键因素的影响。结果表明,岸坡边缘效应导致两岸附近的坝顶区域出现了较大的加速度响应;深厚软弱覆盖层的高频滤波效应削弱了河谷段的坝顶加速度响应;强震作用时土体模量降低和阻尼增大导致河谷段坝顶的加速度响应进一步降低;两岸附近的坝顶局部区域为坝坡抗滑稳定的薄弱部位,建议重点加固。

关键词:面板坝;深厚覆盖层;动力响应;抗震设计

Study on spatial distribution characteristics of acceleration response of CFRD on deep overburden//Zou Degao^{1,2}, Tang Chuan^{1,2}, Qu Yongqian^{1,2}, Ran Congyong³ (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology; 2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology; 3. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited)

Abstract: To gain a deeper understanding of the dynamic effects of concrete-faced rockfill dam (CFRD) on deep overburden in seismically active regions, seismic response analyses of CFRDs on deep overburden were conducted using a three-dimensional wave propagation analysis method that accounts for the dynamic interaction between the dam, overburden, and foundation, considering key factors such as valley width, overburden characteristics, and ground motion properties. The results show that edge effects near the abutments induce relatively large acceleration responses at dam crest regions in the vicinity of both abutments. The high-frequency filtering effect of the deep and soft overburden attenuates the acceleration at the dam crest in the valley section. Under strong seismic loading, the reduction in soil modulus and increase in damping further reduce the acceleration response at the dam crest in the valley dam segment. The local areas near the dam crest close to the abutments are identified as potential weak areas in terms of slope sliding stability, for which targeted reinforcement measures are recommended.

Key words: CFRD; deep overburden; dynamic response; seismic design

随着水电开发的持续推进,地质条件优越的理想坝址大多已被开发,目前有多座在建和拟建的重大水利水电工程选址在强震区覆盖层深厚的地基上。相比于混凝土坝,土石坝对覆盖层地基的适用性更好,是覆盖层地基上的首选坝型^[1-2]。覆盖层地基通常由低模量的冲积或沉积层构成,其动力特性与基岩显著不同,这种差异使得大坝的地震响应机制更加复杂。因此,深入研究深厚覆盖层上土石坝的地震响应特性,对于提高其抗震能力、保障大坝安全至关重要。

目前对土石坝动力效应的认识主要源于岩性地基上的工程实践。近年来,国内外学者对深厚覆盖

层上土石坝的地震响应进行了研究。例如:党发宁等^[3]依托下坂地工程,采用等效弹塑性模型探讨了土石坝的动力稳定性;何蕴龙等^[4]利用汶川地震数据进行了冷勒心墙坝的动力反应分析;岑威钧等^[5]研究了覆盖层上土石坝的极限抗震能力;方火浪等^[6]采用二维弹塑性有限元法研究了加速度与变形的动力响应特性;杨正权等^[7]提出了一种考虑覆盖层结构性变化的二维地震反应分析模型;余翔等^[8]采用不同的地震动输入方法开展了深厚覆盖层上土石坝二维动力响应分析;刘升欢等^[9]基于二维模型,分析了液化对场地卓越周期及坝体地震响应的影响;Yu等^[10]采用二维模型研究了水位对覆

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFF1702002);大连理工大学基本科研业务费项目(DUTZD25101)

作者简介:邹德高(1973—),男,教授,博士,主要从事岩土地震工程、高坝和核电工程抗震研究。E-mail:zoudegao@dlut.edu.cn

通信作者:屈永倩(1990—),男,副教授,博士,主要从事高土石坝和核电工程抗震研究。E-mail:quyongqian@dlut.edu.cn

盖层上土石坝地震响应的影响;Wang 等^[11-12]采用二维分析方法研究了覆盖层对地震动放大效应的影响;王飞等^[13]开展了不同地震动入射方向下覆盖层上土石坝的二维动力分析。目前的研究主要关注分析方法以及某个工程的动力响应,尽管三维分析方法逐渐普及,但对于深厚覆盖层上面板坝地震响应的三维空间分布特性及影响机制尚缺乏系统的深入分析。

针对上述问题,本文采用考虑大坝-覆盖层-地基相互作用的三维波动分析方法,对深厚覆盖层上的面板坝开展了系统的地震响应分析,考虑了河谷宽度、覆盖层厚度与模量、地震动强度及频谱特性等关键因素的影响,阐明了深厚覆盖层上面板坝加速度响应和坝坡稳定的空间分布规律,以期提升深厚覆盖层上面板坝动力效应的认识水平,为抗震设计和加固优化提供支撑。

1 模型与参数

1.1 研究方案

本文采用面板坝开展分析,坝高 140 m,坝顶宽度 12 m,上游坝坡 1 : 1.65,下游坝坡 1 : 1.75;河谷左岸和右岸坡度分别为 1 : 1.5 和 1 : 1.0。为系统研究河谷宽度及覆盖层特性对大坝地震响应的影响,本文考虑以下关键因素:河谷宽度 L (工况 1~6)、覆盖层厚度 D (工况 6~9)、覆盖层剪切模量系数 k_2 (工况 9~11)、地震峰值加速度 PGA (工况 9、12、13) 以及地震动频谱特性 (工况 9、14、15)。各工况的具体设置见表 1。

表 1 计算工况设置

工况	地震动	L/m	D/m	k_2	PGA/(m/s ²)
1	茨哈峡	63	0		4
2	茨哈峡	125	0		4
3	茨哈峡	250	0		4
4	茨哈峡	500	0		4
5	茨哈峡	1000	0		4
6	茨哈峡	2000	0		4
7	茨哈峡	2000	100	770	4
8	茨哈峡	2000	300	770	4
9	茨哈峡	2000	600	770	4
10	茨哈峡	2000	600	385	4
11	茨哈峡	2000	600	1540	4
12	茨哈峡	2000	600	770	2
13	茨哈峡	2000	600	770	6
14	大石峡	2000	600	770	4
15	古水	2000	600	770	4

1.2 有限元模型

图 1 为覆盖层厚度为 600 m 时的三维有限元模型,共有 1719875 个单元和 1751514 个节点。模型上下游方向边界距坡脚均不小于覆盖层厚度的 3 倍,左右岸方向基岩截取宽度为 $1.2H$ (H 为坝

高),竖向截取至覆盖层以下基岩,厚度为 $1.2H$ 。坝体网格高度为 $H/25$,覆盖层网格高度不超过最大剪切波速数值的 $1/40$ 。模型的计算域及网格尺寸均满足规范^[14]要求。在三维有限元数值分析中,大坝的施工与蓄水过程共分为 51 个荷载步,前 26 步模拟分层填筑过程,后 25 步则模拟从建基面开始蓄水至正常蓄水位的过程。

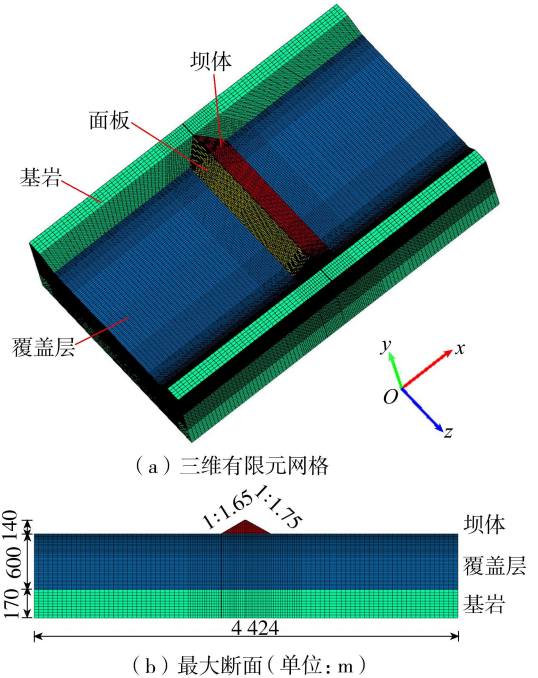


图 1 数值计算有限元网格

1.3 本构模型与参数

堆石体和覆盖层的力学参数见表 2,静力计算采用邓肯张 $E-\mu$ 和 $E-B$ 模型,动力计算采用等价线性模型。基岩和混凝土面板及防渗墙采用线弹性模型,基岩的密度为 2680 kg/m^3 ,弹性模量为 15 GPa ,泊松比为 0.3 ;混凝土的密度为 2500 kg/m^3 ,弹性模量为 30 GPa ,泊松比为 0.167 。面板与堆石体之间设置 Goodman 接触面单元,采用双曲线接触面模型模拟接触特性,模型参数包括:剪切模量系数为 4800 ,剪切模量指数为 0.56 ,接触面剪应力破坏比为 0.74 ,接触面外摩擦角为 36.6° ,黏聚力为 0 kPa 。

1.4 地震动参数

地震动输入采用基于人工边界与等效荷载的波动分析方法^[15],充分考虑了大坝-覆盖层-地基之间的动力相互作用。所选用的地震波为根据茨哈峡、大石峡和古水 3 个工程的场地谱合成的人工地震波。在地震动输入中,竖向加速度峰值取为顺河向和坝轴向峰值的 $2/3$ 。加速度峰值归一化后加速度时程如图 2 所示,对应的加速度放大倍数谱与傅里叶幅值谱见图 3。从加速度放大倍数谱可见,茨哈峡和大石峡工程的场地谱最大动力放大系数 β_{\max} 约

表 2 堆石体和覆盖层力学参数

区域	静力计算参数										动力计算参数				
	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	k	n	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	r_f	k_b	m	G	F	D	k_1	k_2	n'	λ_{\max}
堆石体	2420	1150	0.32	52.0	8.0	0.77	545	0.19				30.0	2190	0.36	0.20
覆盖层	2150	385	0.44	40.5	5.0	0.72			0.43	0.11	1.9	11.5	770	0.64	0.26

注： ρ 为密度； k 、 n 为切线变形模量相关材料常数； φ_0 为土体内摩擦角； $\Delta\varphi$ 为内摩擦角随围压的变化量； r_f 为土体偏应力破坏比； k_b 、 m 为体积模量相关材料常数； G 、 F 、 D 为切线泊松比相关材料常数； k_1 为动剪模量系数； n' 为动剪模量指数； λ_{\max} 为最大阻尼比。

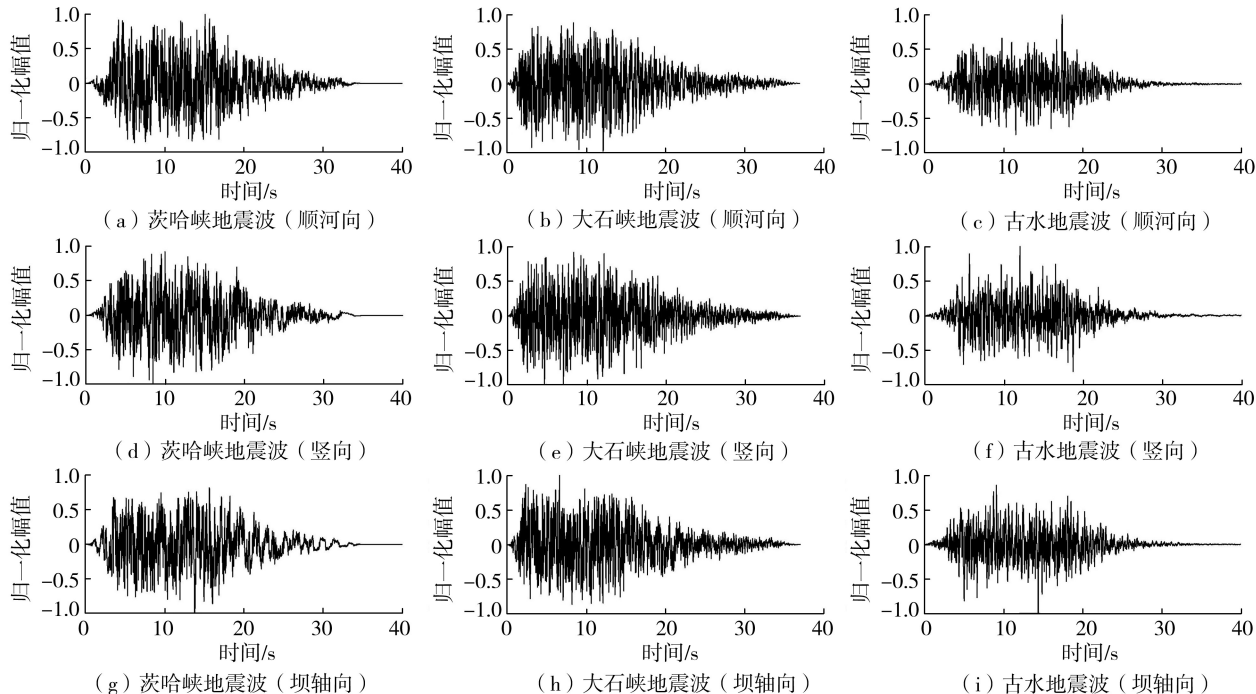


图 2 不同地震波归一化的加速度时程曲线

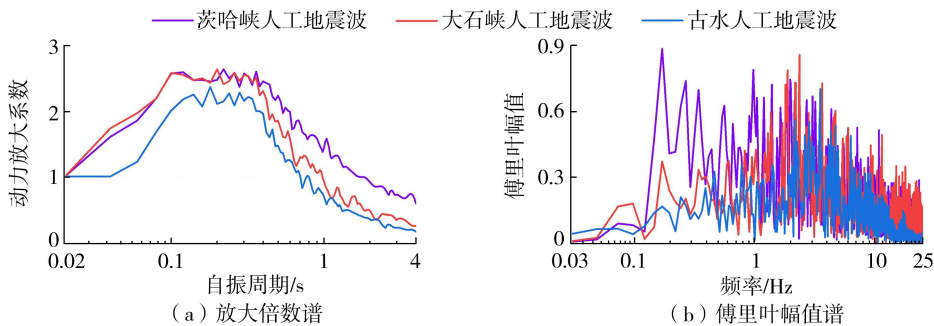


图 3 不同地震波的加速度放大倍数谱和傅里叶幅值谱

为 2.5, 而古水工程约为 2.0; 在特征周期 T_g 方面, 茨哈峡地震波为 0.4 s, 大石峡和古水地震波均为 0.35 s。此外, 傅里叶幅值谱显示, 茨哈峡、大石峡、古水地震波的卓越频率分别为 0.17、2.37、3.52 Hz。按低频成分含量由高到低排序, 依次为茨哈峡地震波、大石峡地震波和古水地震波。

2 面板坝的动力效应空间分布特性

2.1 河谷宽度的影响

图 4 为不同河谷宽度条件下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布, 图中两条虚线之间为河谷段。由图 4 可知, 河谷宽度对加速度峰值的分布形态具

有决定性影响。当河谷较窄 ($L \leq 250 \text{ m}$) 时, 加速度峰值呈显著的单峰分布, 最大值位于河谷中部, 并向两岸递减^[16]。随着河谷宽度增加, 加速度峰值由河谷的单峰分布逐渐转变为靠近两岸的双峰分布, 同时河谷中部形成一个相对较高的波动平台。这种随着河谷宽度变化而表现出的加速度响应复杂化现象, 源于河谷地形效应, 即边缘效应^[17-19]。该效应最早由 Kawase^[17] 在分析 1995 年日本 Hyogo-ken Nambu 地震在 Kobe 市的震害时提出, 并将其定义为“盆地边缘效应”。后续研究也利用这一理论对 1994 年美国 Northridge 地震^[18] 和 1995 年土耳其 Dinar 地震^[19] 的震害进行了解释。该理论的物理机

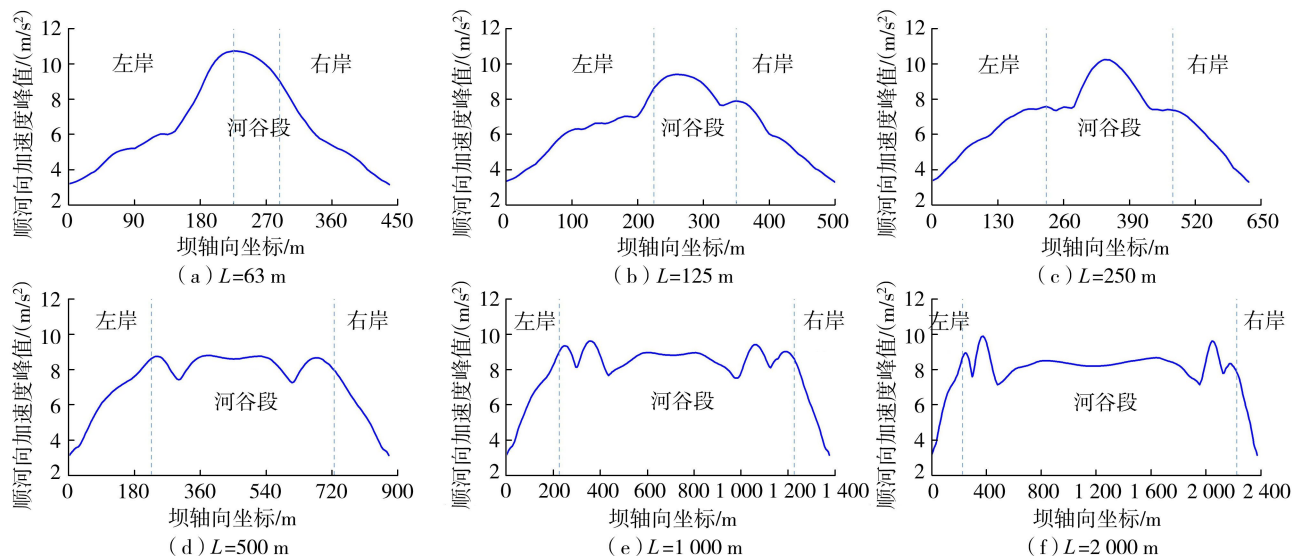


图4 不同河谷宽度条件下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

制如下:由于两岸基岩波速远高于坝体,地震波率先抵达岸坡,在岸坡-坝顶交界处因振动不连续激发出衍射波;衍射波与经基岩延迟传到坝顶的体波相遇,发生相长干涉,导致靠近河谷边缘的局部地震响应放大。窄河谷中,两侧衍射面波与直达体波几乎同时汇聚于河谷中心,因而中心处放大最为显著,这是边缘效应在河谷尺度较小时的一种集中体现。

2.2 覆盖层厚度的影响

图5为覆盖层厚度变化时坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布情况。由图5可见,河谷段坝顶加速度峰值曲线均呈显著起伏,且起伏形态随覆盖层厚度改变。总体上,加速度峰值在岸坡与河谷段交界处附近较大,而在河谷中部较小,这一空间分布特征在不同覆盖层厚度下均保持一致。此外,随着覆盖层厚度增加,坝顶加速度峰值呈下降趋势,表明覆盖层能够有效减弱坝顶地震动响应,具有系统性减震作用。这一规律与Peng等^[20]基于北京地区地下土层三维剪切波速模型的计算所得结论一致,即深层场地的放大系数普遍小于浅层场地。

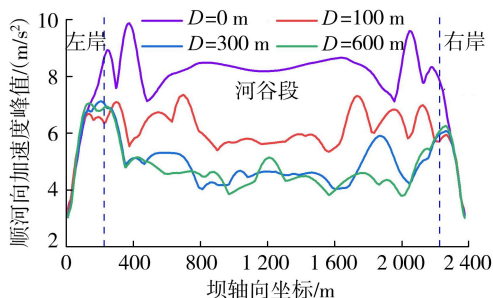


图5 不同覆盖层厚度条件下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

为进一步量化覆盖层厚度对面板坝动力响应的调控作用,以坝顶河谷段中点及其覆盖层-基岩交界

面投影的傅里叶幅值比(RFRS,即传递函数)为指标,提取系统基频。图6给出了不同覆盖层厚度下该点的顺河向加速度传递函数曲线。结果显示,随着覆盖层厚度增加,面板坝-覆盖层系统的最大RFRS值逐渐向低频方向移动;无覆盖层时,最大RFRS位于0.71 Hz,随着覆盖层增厚,最大RFRS依次移至0.59、0.32、0.24 Hz,即系统基频从0.71 Hz下降至0.24 Hz。这表明若输入地震动以高频为主,则覆盖层的滤波作用越强,有助于抗震;若地震动含长周期成分越高,则可能引发共振,导致坝顶加速度显著放大,甚至诱发液化或失稳。此外,当覆盖层厚度达到300 m和600 m时,两者在频率高于0.4 Hz时的传递函数曲线基本重合。由此可见,当覆盖层厚度超过一定值后,影响面板坝-覆盖层系统的地震响应差异的主要因素为地震动的低频成分。

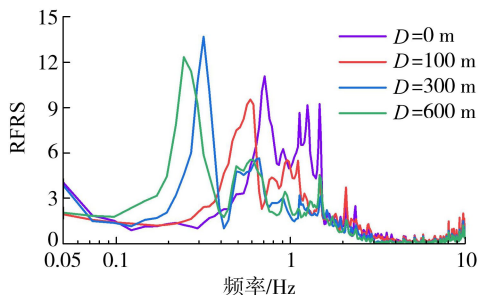


图6 不同覆盖层厚度下河谷段中点顺河向加速度响应的传递函数曲线

2.3 覆盖层模量的影响

图7为不同覆盖层剪切模量下的坝顶顺河向加速度峰值响应沿坝轴线的分布,均表现出两岸附近大、河谷段小的宏观规律。当剪切模量系数降低时,坝顶顺河向加速度峰值整体降低,且河谷段与两岸段的加速度峰值差异进一步扩大。图8为不同覆盖

层剪切模量下河谷段中点顺河向加速度传递函数曲线。可见,随着覆盖层剪切模量的减小,面板坝-覆盖层系统的最大 RFRS 的对应的频率依次为 0.34、0.24、0.15 Hz,表明系统的基频随覆盖层剪切模量的减小而降低。这些现象说明,覆盖层剪切模量的降低导致大坝-覆盖层系统的基频降低,覆盖层对地震动的滤波作用增强。这与已有研究结论^[21]一致,即覆盖层越软,滤波作用越显著,结构的加速度响应越小。

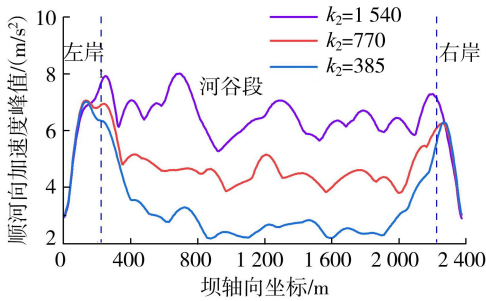


图7 不同覆盖层剪切模量系数下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

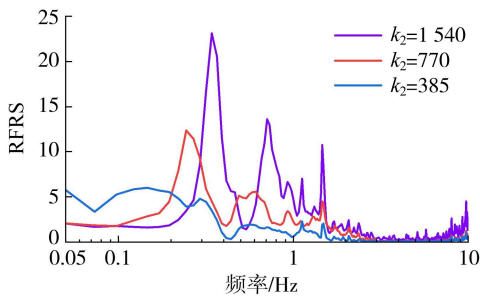


图8 不同覆盖层剪切模量系数下河谷段中点顺河向加速度响应的传递函数曲线

2.4 输入地震动强度的影响

图9为不同输入地震动强度下的坝顶顺河向加速度放大系数沿坝轴线的分布,均表现出两岸附近大、河谷段小的宏观规律。同时,随着输入地震动强度增大,坝顶的顺河向加速度放大系数整体呈下降趋势。已有坝体地震观测表明,坝顶PGA放大系数随坝基PGA的增大而减小^[22]。从土体动力特性变化的角度看,当地震动强度增大时,坝体和覆盖层的

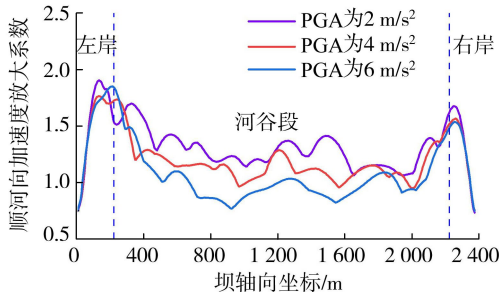


图9 不同输入地震动强度下坝顶顺河向加速度放大系数沿坝轴线的分布

动剪应变随之增大,导致材料剪切模量降低、阻尼增大,从而使面板坝-覆盖层系统整体刚度下降、耗能能力增强,动力效应因此减弱。例如,基于Aratozawa坝的长期地震监测记录显示,在Iwate-Miyagi地震中,坝体上部剪切模量从400 MPa降至50 MPa(对应最大剪应变 10^{-3}),坝体下部剪切模量则由800 MPa降至100 MPa^[23]。

2.5 地震动频谱特性的影响

图10为不同人工地震波激励下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布,均表现出两岸附近大、河谷段小的宏观规律。随着地震动低频成分含量的增加,坝顶加速度响应增大,表明低频分量的占比是决定深厚覆盖层上面板坝动力响应的关键因素。此外,在低频成分占优的茨哈峡地震波激励下,加速度峰值的最大值更靠近河谷,而大石峡和古水地震波激励下的加速度峰值的最大值则更靠近岸坡。这表明输入地震动频谱的改变,不仅会改变坝顶响应的强度,而且会改变面波与体波的干涉位置。

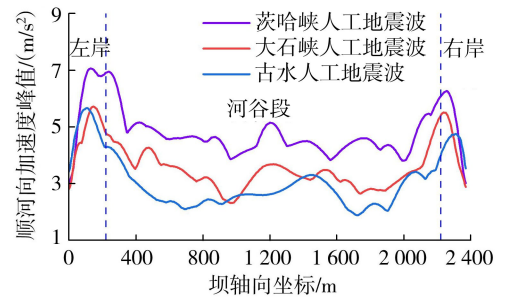


图10 不同人工地震波激励下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

3 深厚覆盖层上面板坝坝坡稳定及抗震加固

3.1 坝坡动力稳定的空间分布特性

采用有限元动力时程稳定分析方法^[24]对1.2节所示的面板坝开展坝坡稳定分析,分别选取3个典型位置,即河谷中部覆盖层厚600 m的断面、靠近两岸区域的覆盖层厚100 m的断面、两岸的无覆盖层断面。下游坝坡的稳定分析结果见表3。由前述分析可知,深厚覆盖层上面板坝的动力响应表现为两岸附近大、河谷段小的空间分布规律,因此坝坡稳定性表现出同样的规律,即两岸附近无覆盖层位置的安全系数最小(0.62),累积滑移量最大(13.2 cm);河谷段安全系数较大(1.24),覆盖层厚度为100 m的中间位置的坝坡稳定性居中,安全系数为0.93,累积滑移量为0.2 cm。两岸附近无覆盖层位置对应的最小安全系数的滑弧位置、安全系数时程和累积滑移量时程见图11~13。

表 3 下游坝坡稳定分析结果

工况	位置	D/m	最小安全系数	累积滑移量/cm
1	河谷中部	600	1.24	
2	近岸坡区	100	0.93	0.2
3	岸坡段		0.62	13.2

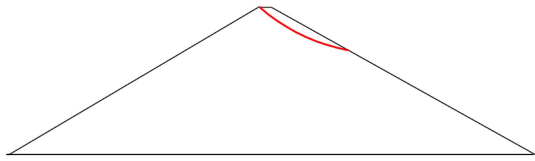


图 11 岸坡段最小安全系数对应的滑弧位置

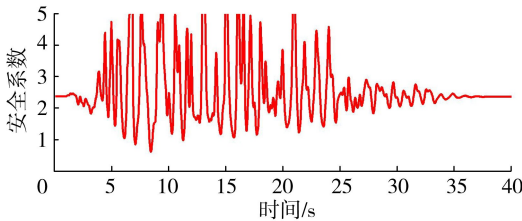


图 12 岸坡段地震过程中的安全系数时程

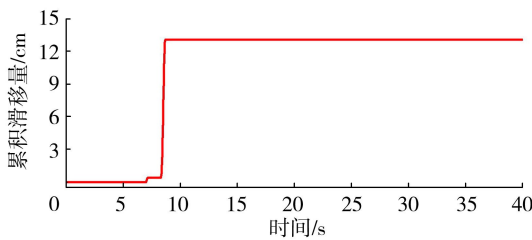


图 13 岸坡段的累积滑移量时程

3.2 坝坡的重点抗震加固区

前述研究表明,宽河谷深厚覆盖层上高面板坝的加速度响应受覆盖层厚度、覆盖层模量、地震动强度、地震动频谱特性的影响,但加速度空间分布均表现出两岸附近大、河谷段小的规律,两岸附近的坝顶区域为地震抗滑稳定的不利位置。因此,建议将两岸附近的 4/5 坝高以上区域作为坝坡抗滑稳定的重点加固区,可采用钉结护面板、加筋、放缓坝坡和抬高高压重等措施进行局部加固^[25]。

4 结论

a. 河谷的边缘效应导致大坝在靠近两岸的局部区域出现较大的地震响应。当河谷较窄时,左右两岸边缘效应导致的局部响应较大区域重合于河谷中部,表现为河谷中部加速度响应最大;当河谷较宽时,加速度响应呈现两岸附近大、河谷中部小的空间分布规律。

b. 随覆盖层厚度的增加或覆盖层模量的降低,大坝覆盖层的基频降低,滤波效应增大,河谷段的坝顶加速度响应减弱。当地震动强度增大,堆石体与覆盖层的模量随之降低且阻尼增大,同样导致河

谷段的加速度响应减弱,因此对于强震区深厚软弱覆盖层上的面板坝工程,两岸附近与河谷中部的坝顶加速度响应的差别更为显著。

c. 深厚覆盖层上的面板坝工程的基频较低,地震动的低频能量越丰富,坝顶加速度响应越大。因此,对于深厚软弱覆盖层上的面板坝工程,抗震分析时需重点考虑低频成分丰富的地震动。

d. 宽河谷深厚覆盖层上高面板坝的加速度响应表现为两岸附近大、河谷中部小的空间分布规律,两岸附近的坝顶区域为抗滑稳定的不利位置,建议对两岸附近的 4/5 坝高以上区域进行重点加固。

参考文献:

[1] 邹德高,屈永倩,孔宪京,等.深厚覆盖层上土石坝防渗墙损伤开裂精细化分析及防渗功能评价[J].水利学报,2024,55(2):147-157. (Zou Degao, Qu Yongqian, Kong Xianjing, et al. Refined failure analysis and functional evaluation of cutoff walls of rockfill dams on deep overburden [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(2):147-157. (in Chinese))

[2] 马春辉,侯媛媛,杨杰,等.基于RUN-XGBoost算法的土石坝渗流预测模型[J].水利水电科技进展,2024,44(2):72-78. (Ma Chunhui, Hou Yuanyuan, Yang Jie, et al. Seepage prediction model of earth-rockfill dams based on RUN-XGBoost algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(2):72-78. (in Chinese))

[3] 党发宁,胡再强,谢定义.深厚覆盖层上高土石坝的动力稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2041-2047. (Dang Faning, Hu Zaiqiang, Xie Dingyi. Dynamic stability analysis of high earth-rockfill dam on thick moraine cover foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (12) : 2041-2047. (in Chinese))

[4] 何蕴龙,刘俊林,熊堃.汶川地震冷勒大坝动力响应规律分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):157-164. (He Yunlong, Liu Junlin, Xiong Kun. Seismic response of Yele Dam during Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41 (3) : 157-164. (in Chinese))

[5] 岑威钧,张自齐,周涛,等.覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J].水利水电科技进展,2016,36(2):1-5. (Cen Weijun, Zhang Ziqi, Zhou Tao, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete-face rockfill dam on alluvium deposit[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2) : 1-5. (in Chinese))

[6] 方火浪,张轶群,郭婧,等.深厚砂质覆盖层土坝的弹塑性地震反应分析[J].岩土力学,2013,34(11):3197-3204. (Fang Huolang, Zhang Yiqun, Guo Jing, et al.

- Elastoplastic seismic response analysis of earth dam on deep sandy alluviums [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3197-3204. (in Chinese)
- [7] 杨正权, 刘小生, 赵剑明, 等. 考虑深厚覆盖层结构特性的场地地震反应分析研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 175-182. (Yang Zhengquan, Liu Xiaosheng, Zhao Jianming, et al. Study on ground seismic response analysis considering structural characteristics of deep overburden layer[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1): 175-182. (in Chinese))
- [8] 余翔, 孔宪京, 邹德高, 等. 覆盖层上土石坝非线性动力响应分析的地震波动输入方法[J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1858-1866. (Yu Xiang, Kong Xianjing, Zou Degao, et al. Seismic wave input method for nonlinear dynamic analysis of earth dam built on overburden[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1858-1866. (in Chinese))
- [9] 刘升欢, 宋志强, 王飞, 等. 深厚覆盖层液化对场地卓越周期及土石坝地震响应影响研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(4): 721-729. (Liu Shenghuan, Song Zhiqiang, Wang Fei, et al. Influence of liquefaction of deep overburden on the site predominant period and seismic response of the earth-rock dam[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(4): 721-729. (in Chinese))
- [10] Yu Xiang, Lai Yuanping, Qu Yongqian, et al. Study on seismic wave propagation regularity and dam-foundation interaction characteristics of earth-rock dam on deep overburden[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 164: 105803.
- [11] Wang Fei, Song Zhiqiang, Liu Yunhe, et al. Seismic wave input method for high earth dams considering the transmission amplification effect of the bedrock-overburden interface[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 130: 103927.
- [12] Wang Fei, Song Zhiqiang, Liu Yunhe, et al. Construction of the spatially varying ground motion field of a bedrock-overburden layer site and its influence on the seismic response of earth-rock dams[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(18): 1914.
- [13] 王飞, 宋志强, 刘云贺, 等. 基于设计地震动的斜入射波时程确定方法对土石坝地震响应的影响[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(19): 80-88. (Wang Fei, Song Zhiqiang, Liu Yunhe, et al. Effects of oblique incident wave time history determination method based on design ground motion on seismic response of earth-rock dam[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(19): 80-88. (in Chinese))
- [14] NB/T 11559. 2—2024 水电工程有限元数值分析导则第2部分:土石坝[S].
- [15] 孔宪京, 周晨光, 邹德高, 等. 高土石坝-地基动力相互作用的影响研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(12): 1417-1432. (Kong Xianjing, Zhou Chenguang, Zou Degao, et al. Influence of the dynamic interaction between high rockfill dam and foundation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1417-1432. (in Chinese))
- [16] 周晖, 李俊杰, 康飞. 面板堆石坝坝顶加速度沿坝轴线分布规律[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1534-1538. (Zhou Hui, Li Junjie, Kang Fei. Research on distribution of horizontal acceleration along axis of concrete-faced rockfill dam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1534-1538. (in Chinese))
- [17] Kawase H. The cause of the damage belt in Kobe: "the basin-edge effect," constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves[J]. *Seismological Research Letters*, 1996, 67(5): 25-34.
- [18] Graves R W, Pitarka A, Somerville P G. Ground-motion amplification in the Santa Monica area: effects of shallow basin-edge structure[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(5): 1224-1242.
- [19] Bakır B S, Özkan M Y, Cılız S. Effects of basin edge on the distribution of damage in 1995 Dinar, Turkey earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(4): 335-345.
- [20] Peng Yanju, Wang Zhenming, Woolery E W, et al. Ground-motion site effect in the Beijing metropolitan area[J]. *Engineering Geology*, 2020, 266: 105395.
- [21] 李小军, 程晓芳, 荣棉水, 等. 基于强震动记录统计分析的不同场地分类方法比较[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(4): 677-684. (Li Xiaojun, Cheng Xiaofang, Rong Mianshui, et al. Comparison of different site classification methods based on statistical analysis of strong ground motion records[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(4): 677-684. (in Chinese))
- [22] Park D, Kishida T. Seismic response of embankment dams based on recorded strong-motion data in Japan[J]. *Earthquake Spectra*, 2019, 35(2): 955-976.
- [23] Mogi H, Kawakami H. NIOM analysis of earthquake observation records in a rockfill dam[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022, 112(2): 1080-1100.
- [24] 徐斌, 邹德高, 孔宪京, 等. 高土石坝坝坡地震稳定分析研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(1): 139-144. (Xu Bin, Zou Degao, Kong Xianjing, et al. Seismic stability of slopes of high rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(1): 139-144. (in Chinese))
- [25] 邹德高, 周扬, 孔宪京, 等. 高土石坝加速度响应的三维有限元研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊1): 656-661. (Zou Degao, Zhou Yang, Kong Xianjing, et al. 3D FEM study of acceleration response of high earth-rock dams[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 656-661. (in Chinese))

(收稿日期: 2026-01-08 编辑: 俞云利)

长江流域山区暴雨洪水的多因素驱动机制

王靖凯¹, 余甜雪¹, 李纪宇¹, 叶盛¹, 冉启华^{1,2}

(1. 浙江大学建筑工程学院水科学与工程研究所; 2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室)

摘要:基于长江流域 212 个水文站点的实测数据,分析了洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度及流域面积之间的非线性关系,并验证了洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度的幂函数关系,进而量化分析了前期土壤相对饱和度与相对降雨强度的比值(SPR)和洪峰流量之间的关系,以及 SPR 和洪峰流量的线性拟合方程中的常量系数、自变量系数与流域平均坡度之间的关系。结果表明:随着流域面积的增大,降水量对暴雨洪水的影响减弱,而前期土壤饱和度的影响增强;随着 SPR 的增大,洪峰流量呈先增大后减小的规律;流域平均坡度与常量系数呈正相关关系,流域平均坡度与自变量系数呈负相关关系。

关键词:长江流域;暴雨洪水;洪峰流量;降水量;前期土壤饱和度

Multi-factor driving mechanisms of rainstorm-induced floods in mountainous areas of the Yangtze River Basin// Wang Jingkai¹, Yu Tianxue¹, Li Jiyu¹, Ye Sheng¹, Ran Qihua^{1,2} (1. Institute of Water Science and Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic System, Ministry of Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on observed data from 212 hydrological stations in the Yangtze River Basin, this paper analyzes the nonlinear relationships among peak discharge, precipitation, antecedent soil saturation, and drainage area. It verifies the powerlaw relationships between peak discharge and precipitation as well as antecedent soil saturation, and quantitatively analyzes the relationship between peak discharge and the ratio of relative antecedent soil saturation to relative rainfall intensity (SPR). Specifically, the relationships between the basin mean slope and the coefficients (both the constant and the independent variable coefficients) of the linear fitting equation relating SPR to peak discharge are investigated. The results show that with the increase of drainage area, the influence of precipitation on rainstorm-induced floods weakens, while that of antecedent soil saturation strengthens. With the increase of SPR, peak discharge first increases and then decreases. The basin mean slope is positively correlated with the constant coefficient but negatively correlated with the independent variable coefficient.

Key words: the Yangtze River Basin; rainstorm-induced floods; peak discharge; precipitation; antecedent soil saturation

洪水被联合国气候变化专门委员会认为是当今世界上造成巨大损失的自然灾害之一^[1],其中山洪因对降水响应迅速,易产生大量的地表径流和急速的地下径流,这使得山区集水区更容易受到洪水灾害的影响^[2]。近年来,受全球变暖和极端气候事件增多的影响,极端降水事件的频率和强度在部分地区显著增大^[3],山洪在世界范围内呈现出频发的趋势^[4],特别是长江流域,随着极端降水事件频率的上升,洪水高风险区不断扩大,致灾风险显著上升^[5]。

我国山区面积约占全国陆地面积的 2/3,全国山区人口占全国总人口的 56%,且我国几乎所有

山地(青藏高原内部山地除外)都发生过山洪灾害^[6],山洪灾害影响十分显著,全国山洪灾害伤亡人数占洪涝灾害伤亡人数的 70%左右^[7]。由于山洪灾害具有突发性,且致灾性很强,精准的山洪预测和风险评估是当前山洪灾害研究的重点方向,而这需要对洪水事件的产生机制和特点有更加深入的研究。虽然降水量一直被认为是导致洪涝灾害的重要因素,但仅凭降水量很难解释暴雨洪水的变化^[8],更加合理的解释是,暴雨洪水的变化是不同因素共同作用的结果。徐宗学等^[9]认为城市下垫面特征与产汇流机理深刻影响城市暴雨洪水。Pathiraja 等^[10]认为前期土壤饱和度是重要的主导因素。

基金项目:浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJWZ24E090002)

作者简介:王靖凯(1999—),男,硕士,主要从事水资源与水环境工程研究。E-mail:22212098@zju.edu.cn

Wasko 等^[11]发现降水量对洪水的影响存在一个临界点,超过该临界点,降水量将主导洪水响应;低于该临界点,洪峰流量将随着土壤湿度的降低而减小。除了研究降水量和前期土壤饱和度的共同作用,研究者也开始关注降水量和前期土壤饱和度对暴雨洪水的相对贡献。不同地区这两个因素对于暴雨洪水的相对重要性不同^[8],可能是因为不同地区空间尺度不同^[12-13],在大型集水区(大于或等于 1000 km²),洪峰流量更多地受前期土壤饱和度的影响,而在较小的集水区(小于 1000 km²),洪峰流量更有可能受降水量影响^[14]。在长江中下游流域中,降水量和前期土壤饱和度在不同的尺度下对于暴雨洪水的相对重要性有较大差别^[15]。Yu 等^[16]利用综合水文模型(integrated hydrology model, InHM)模拟了长江寿溪河流域(长江支流岷江上游的主要支流)在不同降水量和土壤湿度条件下的洪水响应,评估了特定环境中流域面积、降水量、土壤饱和度对于暴雨洪水的重要性,并指出流域暴雨洪水响应过程的影响因素存在非线性变化特征及尺度效应,但缺乏相应的实证数据对此规律进行验证。

本文在 Yu 等^[16]的研究基础上扩大研究范围,将研究区域设定为整个长江流域,利用长江流域内具有多年实测降水量、土壤湿度和径流资料的 212 个子流域水文站点的监测数据,探究流域面积、降水量、前期土壤饱和度等因素对暴雨洪水的影响,并利用数值拟合方法分析各子流域暴雨洪水的主导因素的空间分布特征。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

长江是我国最长的河流,全长约为 6300 km,发源于我国西部青藏高原地区。长江流域面积达 180 万 km²,覆盖我国约 19% 的国土面积。长江流域整体地势西高东低,横跨三级阶梯,地势地貌条件复杂。长江流域地处亚热带湿润季风气候区,60% 的降雨集中在 6—8 月^[17],年降水量达 1200 mm,但降雨在流域内部分布不均匀,近年来极端降雨事件的频率和强度有所增大,且流域内山地面积约占整个流域面积的 70%^[18]。降雨强度高、降雨时空分布不均以及与复杂地形的叠加作用,导致山洪灾害频发。加之长江流域经济发达,人口与产业密集,山洪的灾害性更为突出。2017 年长江流域洪涝灾害造成直接经济损失超过 900 亿元^[19],洪涝灾害规模大,损失严重。近百年来世界上 10 次最为严重的洪水中,7 次发生在中国,其中 5 次发生在长江流域,严重制约长江流域经济社会可持续发展。因此迫切需要对

长江流域暴雨洪水成因机理及不同影响因素的驱动作用进行探究。

1.2 数据来源

流域高程数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)的 30 m 精度数字高程模型。径流数据来自《中华人民共和国水文年鉴》中长江流域内的 212 个水文站点(图 1),选取 2008—2016 年共 9 年的日径流量数据。降雨和土壤含水量数据来源于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)发布的中国陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)近实时产品数据集,该数据集在中国境内具有较高的时空分辨率和准确性^[20]。

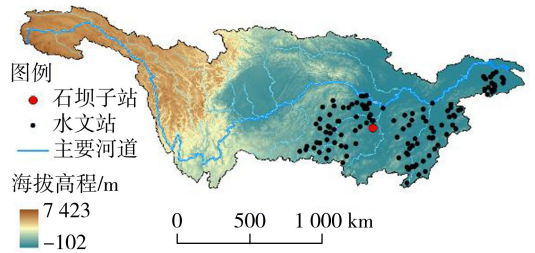


图 1 长江流域主要水文站点地理位置

2 研究方法

2.1 洪水事件选取

洪水事件包括洪峰、洪量、洪水过程线等^[21]。根据径流数据选择合适的洪水事件,充分考虑洪水事件的开始、结束和持续时间,有助于理解洪水过程的时间演变。当前洪水事件的常用选取方法包括通过设定流量阈值筛选洪水数据的超越峰值法(peaks over threshold, POT)^[22]和只识别每年最大洪水事件的年最大洪水事件法(annual maximum series, AMS)^[23]。POT 虽然能识别年内多个洪水事件,但阈值设定较为主观,影响结果的准确性。AMS 虽然标准客观,容易操作,但数据利用率低。为深入解析径流机制并提升数据利用率,本文综合两种方法,从 212 个水文站点 2008—2016 年的径流数据中挑选特征性较强的径流事件,以径流量开始上升视为一场次径流的开始,该径流过程终止于下一场次径流的开始,以此界定一个完整的单场次径流过程。每个站点每年选取 3 场次洪峰流量最大的径流过程,共计 5724 场次径流过程。

2.2 相对重要性评价方法

本文采用平均过序法(Lindeman-Merenda-Gold, LMG)来衡量多元回归中自变量的相对重要性。LMG 能清晰界定多元回归中自变量相对重要性的内涵,同时兼顾自变量的单独影响与交互影响,被认为是表征因素相对重要性的优良方法^[24]。

LMG 评价步骤如下:①建立包含若干个自变量的统计模型,并设定这些自变量进入模型的顺序;②在所有可能的进入顺序下,计算每个自变量进入该统计模型的半偏相关系数平方,用于排除其他自变量的干扰,精准衡量单个自变量的独特作用;③对所有自变量的半偏相关系数平方求均值,以衡量该自变量在控制其他自变量影响后对因变量所贡献的独立解释量。LMG 具体计算过程见文献[24]。

2.3 相对重要性评价指标

前期土壤饱和度和降水量是长江中下游流域暴雨洪水主要影响因素,虽然最大的洪峰流量总是在高前期土壤饱和度和极端降雨的条件下形成,但不同的先决条件下,两者对洪峰流量的影响存在差异。选择径流过程开始前 1 d 的土壤饱和度作为前期土壤饱和度指标,洪峰发生前 7 d 的累计降水量作为降水量指标。为了进一步量化极端洪水发生过程中前期土壤饱和度和降水量的相对重要性,采用前期土壤相对饱和度与相对降雨强度的比值(SPR)作为相对重要性评价指标^[25]:

$$R = S/P \quad (1)$$

式中: R 为 SPR; S 为前期土壤相对饱和度,是前期土壤饱和度与全年最大土壤饱和度的比值; P 为相对降雨强度,即洪峰发生前 7 d 的累计降水量与全年任意连续 7 d 累计降水量最大值的比值。

SPR 可反映前期土壤饱和度和降水量在洪水生成中的相对重要性。当洪水事件发生时,若 SPR 约为 1,则前期土壤饱和度和降水量对洪水事件发生的贡献相当;若 SPR 大于 1,说明该洪水事件发生主要受前期土壤饱和度的影响;若 SPR 小于 1,说明降水量是洪水事件发生的主导因素。

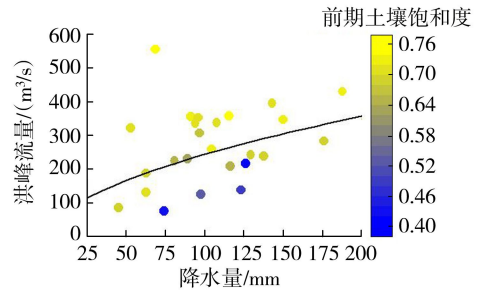
3 结果与分析

3.1 不同因素对暴雨洪水非线性变化的影响

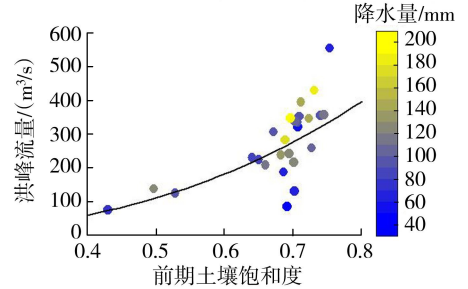
3.1.1 降水量和前期土壤饱和度

为了研究暴雨洪水响应过程与降水量、前期土壤饱和度的关系,将长江流域 212 个水文站点的实测各场次洪水洪峰流量分别与降水量和前期土壤饱和度进行拟合。选择石坝子站(流域面积 551 km²,图 1 中红色点)为代表站点,图 2 为该站点洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度的关系。可见洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度均呈幂函数关系。随着降水量和前期土壤饱和度的增大,洪峰流量不断增大,且其变化过程存在非线性特征,即流域暴雨洪峰流量变化的斜率随降水量的增大而降低(图 2(a)),随前期土壤饱和度的增大而增大(图 2(b))。降水量和前期土壤饱和度共同影响暴雨洪水响应过程:由

图 2(a)中蓝色点可知,前期土壤饱和度较低时洪峰流量始终较小;由图 2(a)中左侧黄色点可看出,在前期土壤饱和度较高的情况下,即使降水量较低也可能产生较大的洪峰流量。



(a) 洪峰流量与降水量的幂函数关系

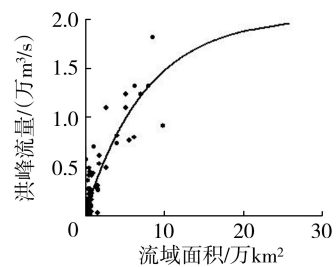


(b) 洪峰流量与前期土壤饱和度的幂函数关系

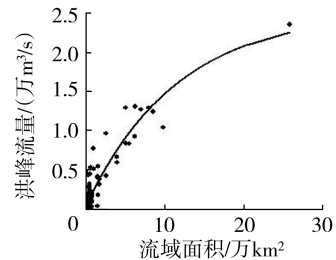
图 2 石坝子站洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度的关系

3.1.2 流域尺度因素

为进一步探究暴雨洪水的尺度效应,选取长江流域 212 个水文站点 2008—2016 年每年最大场次洪水作为研究样本,分析其洪峰流量与流域尺度因素(流域面积)的关系,并选取典型年份进行尺度效应分析,见图 3。可知洪峰流量随流域面积的增大而增大,且与流域面积存在明显的指数函数关系,大流域内洪峰流量的变化幅度远小于小流域。



(a) 2008年洪峰流量与流域面积的关系



(b) 2015年洪峰流量与流域面积的关系

图 3 长江流域不同年份洪峰流量的尺度效应

此外,洪峰流量的非线性变化表明洪峰流量的变化幅度与流域面积的变化幅度存在差异,以 2008 年

为例,当流域面积从 2.7 万 km² 增至 8.5 万 km²(约为 3 倍)时,洪峰流量增至 3.73 倍;而当流域面积由 8.5 万 km² 增至 25.8 万 km²(约为 3 倍)时,洪峰流量仅增大至 1.13 倍,远小于流域面积的变化幅度。即在长江流域范围内,大流域产流比率通常较小,这与 Yu 等^[16]的结论一致,但洪峰流量与流域面积的关系从 Yu 等^[16]中的线性关系转变为非线性的指数函数关系,这可能是流域面积扩大所致。

3.2 影响因素相对重要性

随着 SPR 的增大,长江上游小流域场次洪水洪峰流量呈先增大后减小的趋势^[16]。本文根据长江中下游流域实测数据,拟验证暴雨洪水产流过程的非线性变化,并量化分析降水量、前期土壤饱和度的相对重要性及其尺度效应。每个站点选取年最大 3 场次暴雨洪水过程,计算每场次暴雨洪水过程的 SPR。对 SPR 进行分组,并绘制单位面积洪峰流量与 SPR 的箱线图(图 4)。由图 4 可见:极小或极大的 SPR 都会导致洪峰流量的降低;从整体来看随着 SPR 的增大,单位面积洪峰流量呈先增大后减小的趋势;洪峰流量的最大值出现在 SPR 在 0.3~0.7 之间。而 Yu 等^[16]发现,长江寿溪河流域暴雨洪水的洪峰流量出现了随 SPR 增大先增大后减小的变化过程,当地洪峰流量的最大值出现在 SPR 约为 1 时。由此可见,实测洪峰流量最大值对应的 SPR 取值范围(即实测洪峰流量随 SPR 变化的转折点)与模拟结果不同,这种差异可能源于:①长江中下游各流域的前期土壤饱和度实测值大部分在 0.6~0.7 之间,极少出现极端情况,而模拟中设计了前期土壤饱和度 0.4 和 0.9 的工况,以分析极度干旱和极度湿润的情况;②流域间存在一定的下垫面条件差异;③实际场次洪水过程降雨历时长,而模拟中降水量数据取累计 7 d 降水量,长历时降雨会使流域产流更大程度依赖于降雨的作用^[26]。

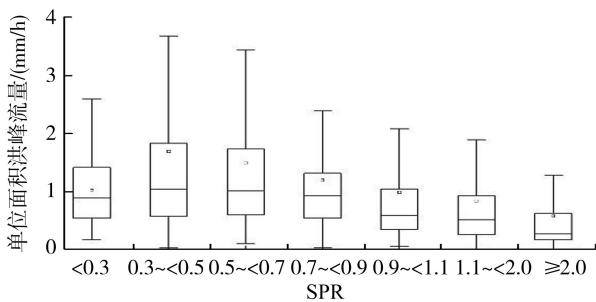
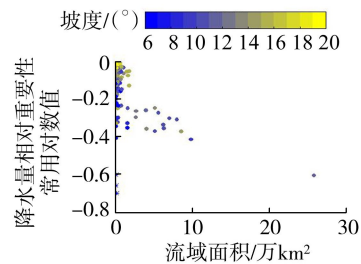


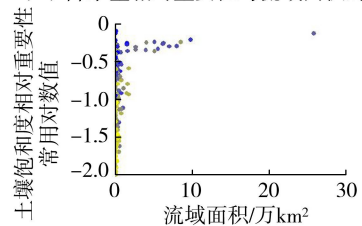
图 4 长江流域暴雨洪水洪峰流量与 SPR 的箱线图

在 Yu 等^[16]研究基础上,综合每个站点 27 场次暴雨洪水过程中洪峰流量、降水量和前期土壤含水量数据,基于 LMG 计算长江流域内 212 个水文站点控制流域中降水量和前期土壤饱和度对于各场次暴

雨洪水响应的相对重要性。为了更清晰地展现其动态变化规律,对每个站点降水量和前期土壤饱和度的相对重要性取常用对数值,其与流域面积的关系如图 5 所示,并用流域平均坡度进行着色。可知随着流域面积的增大,降水量的相对重要性降低,而前期土壤饱和度的相对重要性增大。从图 5(a) 看出有 3 个蓝色点的降水量相对重要性很小,这是由于其对应站点位于水库或湖泊旁,而水库和湖泊具有很强的径流调蓄作用,导致这些站点虽然流域面积小,但暴雨洪水的主导因素仍然是前期土壤饱和度。此外,流域平均坡度也在很大程度上影响着降水量和前期土壤饱和度的相对重要性。从图 5(b) 可知,坡度大的流域其前期土壤饱和度的相对重要性较小。因此在日常防汛工作中,要格外注意坡度较大的山区长时间连续降雨后的径流过程。在此情况下,流域内的土壤极度湿润,前期土壤饱和度会成为暴雨洪水形成的主要原因,即使是较小的降水量也会产生大量级的洪水。



(a) 降水量相对重要性与流域面积的关系



(b) 前期土壤饱和度相对重要性与流域面积的关系

图 5 长江流域降水量和前期土壤饱和度相对重要性与流域面积的关系

对 27 场次径流过程对应的洪峰流量、降水量和前期土壤饱和度数据取平均值,得到多年平均洪峰流量、降水量和前期土壤饱和度数据,采用 LMG 指标衡量各流域降水量和前期土壤饱和度的相对重要性,将相对重要性常用对数值大于 0.5 的影响因素作为该流域暴雨洪水的主导因素。图 6 为长江流域 212 个水文站点所控制的流域内场次暴雨洪水主导因素的空间分布。图 6 中粉色点代表该站点控制流域暴雨洪水的主导因素为降水量,蓝色点表示该流域暴雨洪水的主导因素为前期土壤饱和度。可以发现长江中下游流域大部分地区暴雨洪水的主导因素为降水量。前期土壤饱和度占据主导地位的流域多

处于流域干流水文站所控制的范围内,尤其是位于洞庭湖水系的湘江流域。

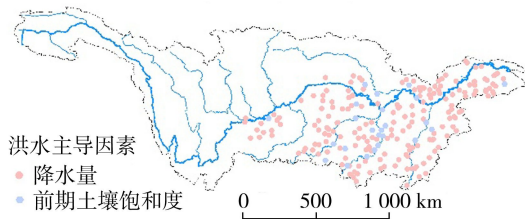
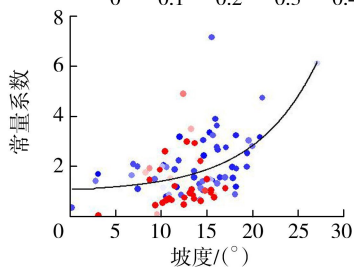
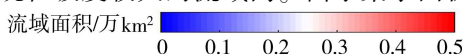


图6 长江流域暴雨洪水主导因素空间分布

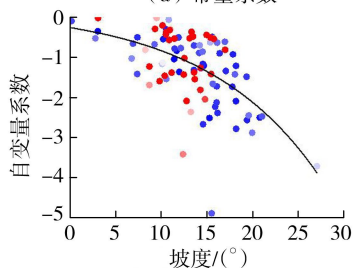
3.3 主导因素回归系数与流域平均坡度的关系

从各场次暴雨洪水过程的 SPR 与单位面积洪峰流量的关系可以发现,二者存在明显的负相关关系。对 212 个水文站点 27 场次暴雨洪水过程的所有 SPR 与相应洪峰流量进行线性拟合,分别统计 SPR 与洪峰流量的拟合方程中的常量系数及自变量系数,分析其与流域平均坡度的关系。

图 7 为常量系数和自变量系数随流域平均坡度的变化,可见拟合方程中的常量系数与坡度存在正相关关系,而自变量系数则随着坡度的增大而减小。这表明,在 SPR 和洪峰流量的关系中,随着坡度的增大,洪峰流量随 SPR 增大而下降的幅度不断增大,且这两个系数与坡度均存在显著的非线性关系,常量系数和自变量系数的变化幅度均随着坡度的增大而增大。一方面,坡度较大的流域内 SPR 普遍较小,这可能是由于陡峭的地形导致土壤的保水能力较弱,土壤含水量一般较低,从而导致 SPR 相对较小。另一方面,由于长江中下游流域较为平缓,水文站点控制流域的平均坡度大部分小于 20° ,洪峰流量随流域平均坡度的增大而增大,即大洪峰流量往往出现在坡度较大的流域内。由于集水面积大的流



(a) 常量系数



(b) 自变量系数

图7 常量系数和自变量系数随流域平均坡度的变化

域多位于河道中下游,其单位面积的洪峰流量变化平缓,其平均坡度一般也较小,因此大流域面积内洪峰流量随 SPR 的变化较为平缓。

回归分析时采用的是单位面积的洪峰流量,消除了流域面积对洪峰流量的影响。回归分析结果表明洪峰流量随 SPR 的变化很大程度上依赖于流域平均坡度的变化。而对于河流干流区域而言,其河道上已修建许多大型水库,故具有较强的洪水调蓄能力,从而降低了流域内发生暴雨洪水的风险。但在山区源头流域,流域平均坡度较大,各场次暴雨洪水响应过程洪峰流量变化幅度较大,且监控设备有限,发生暴雨洪水的风险较大,因此更需关注河流上游区域的暴雨洪水过程。

4 结论

a. 长江流域实测数据较好地验证了洪峰流量随降水量、前期土壤饱和度以及流域面积变化的非线性规律。洪峰流量与降水量呈幂函数关系,洪峰流量的变化幅度随前期土壤饱和度的升高而增大。洪峰流量的尺度效应表现为随着流域面积的增大,流域产流比率降低,且洪峰流量与流域面积的关系从线性关系逐渐转变为指数函数关系。

b. 长江流域实测数据较好地验证了各场次暴雨洪水过程中降水量和前期土壤饱和度相对重要性的非线性变化规律。随着 SPR 的增大,洪峰流量呈先增大后减小的规律,洪峰流量最大值出现在 SPR 处于 0.3~0.7 的范围内。与模拟结果一致的是,随着流域面积的增大,降水量对于暴雨洪水的相对重要性降低,而前期土壤饱和度的相对重要性升高,但长江中下游流域大部分区域暴雨洪水仍以降水量为主导因素。

c. 将各场次暴雨洪水过程的 SPR 与相应的洪峰流量进行线性拟合,结果表明拟合方程中的常量系数及自变量系数与流域平均坡度存在显著的非线性变化关系。常量系数与流域平均坡度呈正相关关系,而自变量系数则与流域平均坡度呈负相关关系,且常量系数和自变量系数的变化幅度均随流域平均坡度的增大而增大。

参考文献:

[1] IPCC. Summary for policymakers [C] // Barros C B V, Stocker T F, Qin D, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2012:25-64.

[2] Geitner C, Mergili M, Lammel J, et al. Modelling peak runoff in small Alpine catchments based on area properties

- and system status [C]//Veuilliet E, Johann S, Weck-Hannemann H. Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments. Berlin:Springer,2009;103-134.
- [3] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023,43(6):128-136. (Xie Zhigao, Jia Wenhao, Wang Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(6):128-136. (in Chinese))
- [4] Wang Xiekang, Gourbesville P, Liu Changjun. Flash floods: forecasting, monitoring and mitigation strategies [J]. Water,2023,15(9):1700.
- [5] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):6-12. (Gao Yuqin, Wang Hui, Liu Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):6-12. (in Chinese))
- [6] 马建华,胡维忠. 我国山洪灾害防治形势及防治对策[J]. 人民长江,2005,36(6):3-5. (Ma Jianhua, Hu Weizhong. Situation of flash flood disaster prevention and control in China and its countermeasures [J]. Yangtze River,2005,36(6):3-5. (in Chinese))
- [7] 水利部:当前我国已经全面进入汛期 局部地区发生了洪涝灾 [EB/OL]. (2020-06-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1669206599644932788>.
- [8] Berghuijs W R, Woods R A, Hutton C J, et al. Dominant flood generating mechanisms across the United States[J]. Geophysical Research Letters,2016,43(9):4382-4390.
- [9] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025,45(1):1-9. (in Chinese))
- [10] Pathiraja S, Westra S, Sharma A. Why continuous simulation?:the role of antecedent moisture in design flood estimation[J]. Water Resources Research,2012,48(6):W06534.
- [11] Wasko C, Nathan R. Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding [J]. Journal of Hydrology,2019,575:432-441.
- [12] Berghuijs W R, Allen S T, Harrigan S, et al. Growing spatial scales of synchronous river flooding in Europe[J]. Geophysical Research Letters,2019,46(3):1423-1428.
- [13] Blöschl G. Three hypotheses on changing river flood hazards[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2022,26(19):5015-5033.
- [14] Wasko C,Sharma A. Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures [J]. Scientific Reports,2017,7(1):7945.
- [15] 王金,冉启华,刘琳,等. 长江中下游流域极端洪水事件影响机制研究[J]. 中国农村水利水电,2022(6):119-124. (Wang Jin,Ran Qihua,Liu Lin,et al. Research on the dominant mechanism of extreme flow events in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(6):119-124. (in Chinese))
- [16] Yu Tianxue,Ran Qihua,Pan Hailong,et al. The impacts of rainfall and soil moisture to flood hazards in a humid mountainous catchment: a modeling investigation [J]. Frontiers in Earth Science,2023,11:1285766.
- [17] Xu Ying, Xu Chonghai, Gao Xuejie, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st Century [J]. Quaternary International,2009,208(1/2):44-52.
- [18] Lijuan C, Manyin Z, Weigang X. Yangtze River basin (China) [J]. Distribution, Description, and Conservation, 2018. doi:10.1007/978-94-007-4001-3_99.
- [19] 新华社. 长江流域去年洪涝灾害造成直接经济损失超 900 亿元 [EB/OL]. (2018-01-14). https://www.xinhuanet.com/politics/2018-01/14/c_1122256897.htm.
- [20] Sun Shuai, Shi Chunxiang, Pan Yang, et al. Applicability assessment of the 1998—2018 CLDAS multi-source precipitation fusion dataset over China [J]. Journal of Meteorological Research,2020,34(4):879-892.
- [21] 肖义,郭生练,刘攀,等. 综合多特征量的洪水事件频率问题研究[J]. 人民长江,2007,38(4):127-129. (Xiao Yi, Guo Shenglian, Liu Pan, et al. Research on flood frequency event with multiple variables [J]. Yangtze River,2007,38(4):127-129. (in Chinese))
- [22] 郑炎辉,何艳虎,李深林,等. 基于 POT 与 P-IOSM 的洪水风险信息挖掘[J]. 湖泊科学,2017,29(4):965-973. (Zheng Yanhui, He Yanhu, Li Shenlin, et al. The flood risk data mining based on POT and P-IOSM [J]. Journal of Lake Sciences,2017,29(4):965-973. (in Chinese))
- [23] Swetapadma S, Ojha C S P. Selection of a basin-scale model for flood frequency analysis in Mahanadi River Basin, India [J]. Natural Hazards, 2020, 102(1):519-552.
- [24] Groemping U. Relative importance for linear regression in R; the package relaimpo [J]. Journal of Statistical Software,2006,17(1):1-27.
- [25] Ran Qihua, Wang Jin, Chen Xiuxiu, et al. The relative importance of antecedent soil moisture and precipitation in flood generation in the middle and lower Yangtze River basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2022,26(19):4919-4931.
- [26] Vreugdenhil M, Széles B, Salinas J L, et al. Non-linearity in event runoff generation in a small agricultural catchment [J]. Hydrological Processes,2022,36(8):e14667.

(收稿日期:2024-09-10 编辑:骆超)

刚性植被斑块分布形式对明渠水流特性的影响

李国豪^{1,2}, 李书芳^{1,2}, 张景洲^{1,2}, 于子铖^{1,2}, 周正^{1,2}

(1. 河北工程大学水利水电学院; 2. 河北省智慧水利重点实验室)

摘要:为研究植被斑块分布形式对明渠水流特性的影响,设置了非淹没状态下3种植被斑块覆盖度和4种斑块破碎度,运用ANSYS Fluent对河道内纵向不连续分布的刚性植被斑块水流特性进行了数值模拟。结果表明:植被斑块纵向不连续分布干扰了流场流速的纵向连续性及其均匀性;当单元斑块尺寸恒定时,植被斑块覆盖度增大导致斑块区与主流区的流速差异增大;当植被斑块覆盖度恒定时,斑块破碎度增大促进了整体流场流速均匀化;植被底部至1/2水深区域的水流紊动性较大,且斑块覆盖度与斑块破碎度是影响紊动强度的重要因素;斑块覆盖度增大有利于增强主流区紊动特性,而斑块破碎度增大则有利于增强斑块内部的紊动特性。

关键词:水流特性;植被;斑块覆盖度;斑块破碎度;数值模拟

Effects of rigid vegetation patch distribution patterns on open-channel flow characteristics//Li Guohao^{1,2}, Li Shufang^{1,2}, Zhang Jingzhou^{1,2}, Yu Zicheng^{1,2}, Zhou Zheng^{1,2}(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Smart Water Conservancy)

Abstract: To investigate the influence of vegetation patch distribution patterns on open-channel flow characteristics, three vegetation patch coverage ratios and four patch fragmentation degrees were designed under non-submerged conditions. Numerical simulations of flow through longitudinally discontinuous rigid vegetation patches in a river channel were conducted using ANSYS Fluent. The results show that the longitudinally discontinuous distribution of vegetation patches disrupts the continuity and uniformity of flow velocity in the flow field. When the unit patch size is constant, an increase in vegetation patch coverage ratio leads to a greater velocity difference between the patch region and the mainstream region. When the vegetation patch coverage ratio is constant, an increase in patch fragmentation degree promotes the homogenization of flow velocity across the entire flow field. Flow turbulence is relatively strong in the region from the vegetation bottom to half of the water depth, and both patch coverage ratio and patch fragmentation degree are important factors affecting turbulence intensity. An increase in patch coverage ratio enhances turbulence characteristics in the mainstream region, whereas an increase in patch fragmentation degree intensifies turbulence characteristics within the patches.

Key words: flow characteristics; vegetation; patch coverage ratio; patch fragmentation degree; numerical simulation

植被作为河流生态系统的重要组成部分,广泛分布于自然河道中,其对河道水流形态的影响是水力学学科当前的研究热点^[1-2]。自然环境中,河道植物的存在虽会增大河床糙率及流阻^[3-4],但同时具有根系固土、减缓河床侵蚀、保滩护岸的功能,对治理河道水土流失、改善水环境、恢复水生态意义重大^[5-7]。探讨植被对生态河道水流特性的影响,对河流及湖泊的生态修复具有重要的科学意义。

自然河道中植被分布多样化,其分布特征对河道水流特性影响显著。目前,有关植被斑块对河道水流特性影响的研究颇丰,主要以物理试验和数值

模拟方法为主^[8]。就物理试验而言,Liu等^[9]通过对不同高径比的植被斑块尾流区进行测量,发现高径比决定了尾迹中涡结构的主导类型:当斑块高径比小于1时以垂向涡为主导,反之则以平面卡门涡为主导。Barcelona等^[10]选用聚乙烯丝条模拟柔性植被,探究了覆盖度对河道水流结构的影响,结果表明增加覆盖度会增强涡旋脱落并促进尾流数量增加。柳梦阳等^[11]系统研究了单个植被斑块覆盖度与尾流结构的内在关系,结果表明植被斑块内的出流强度与植被密度呈正相关关系。张维乐等^[12]通过室内水槽试验,分析了不同高径比及植被体积分

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209402);河北省自然科学基金青年科学基金项目(A类)(E20244021407);河北工程大学创新基金项目(SJ2401002176)

作者简介:李国豪(2001—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:1980900170@qq.com

通信作者:张景洲(1991—),男,讲师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhangjingzhou@163.com

数影响下单个斑块后的水流特性,得到了时均流速及雷诺应力的分布规律,并探究了不同尺度涡的空间模态及能量分布特征。就数值模拟而言,de Lima 等^[13-14]采用计算流体动力学技术研究了明渠水生植被周围的水流流动结构。Ghani 等^[15]研究了圆形交错植被斑块周围的流动情况,并通过试验与数值模拟进行了验证。Anjum 等^[16]运用 Fluent 软件中的雷诺应力模型,对占据河道一半宽度的纵向不连续刚性植被斑块的水流特性进行了数值研究,结果表明斑块间隙内的流速明显慢于斑块内部,植被不连续分布对水流结构具有显著影响。Liu 等^[17]通过大涡模拟研究了不同体积分数下沉水植被斑块的尾流变化,发现植被体积分数增大会导致横向和垂向出流增强,纵向出流减弱。

综上所述,目前河道植被斑块水流特性研究主要围绕植被斑块覆盖度、刚柔性、淹没状态及分布模式等展开,且多集中于单个或两个相邻斑块分布特征对河道局部水流的影响。然而,现代流域受人类活动的高度影响,加之水生植被的自组织行为^[18],导致植被群落由连续分布转变为具有穿插间隙的斑块网格结构,加剧了河道生境破碎化^[10],破坏了自然流域空间属性的连续性,使河道径流响应关系异常。仅以单个或两个相邻斑块分布特征为研究对象不足以代表广泛分布于河道中的植被斑块群落;同时目前考虑河道植被景观异质性的植被斑块变化响应研究较少,且其对流域尺度水流结构的影响机制尚不明确^[19]。为此,本文采用三维数值模拟方法,探究植被斑块覆盖度和斑块破碎度对河道水流流速及紊动结构的影响,以期为现代景观生态河道的规划及管理提供理论参考。

1 研究方法

1.1 数值模拟方法

Zhao 等^[20]以非连续方形植被斑块为研究对象开展物理模型试验,其植被斑块分布特征与本文研究工况相似,试验结果具有良好的代表性,故选择该试验作为本文数值模型验证的基准。该试验水槽长 20 m、宽 0.6 m、高 0.4 m,采用直径 8 mm、高 25 cm 的圆柱棒模拟植被。由于试验区域较大而植被尺寸较小,若对全域进行精细建模将导致网格数量庞大,因此对模型进行几何简化。在保持水槽断面尺寸、植被参数不变及流场均匀性与稳定性的前提下,仅取 2.0 m 长的局部区域作为计算域。ANSYS Fluent 软件中雷诺应力模型是模拟植被明渠水流特性的主要方法之一^[21],具有较高的物理真实性及模拟精度。故本文采用该模型,并基于有限体积法离散求解纳

维-斯托克斯方程(N-S 程),选用压力基分离求解器,采用 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合。边界条件设置如下:进口为速度入口,出口为压力出口;圆柱表面和壁面均设为无滑移固壁边界;自由水面采用刚盖假定。以特定位置的流速为对比参数,通过分析试验值与模拟值的吻合程度,完成模型参数率定,并验证所选数值模型的合理性。通过模拟调试对主要参数进行率定,最终确定动量与压力的松弛因子分别为 0.7 和 0.3,雷诺应力因子为 0.5,湍流动能与湍流耗散率均为 0.8,各控制方程的最小残差值设为 1×10^{-5} 。

因模型参数的无量纲化具有更好的物理意义^[22],为了排除量纲影响,增强结果的物理意义,本文对模型参数进行了无量纲化处理。图 1 为试验结果与数值模拟结果的对比(图中 v 为测量点流速, v_0 为进口流速(0.12 m/s), h 为测量点水深, h_v 为模拟植被高度(25 cm), v_s 为数值模拟流速, v_e 为物理试验流速, v/v_0 为无量纲流速, h/h_v 为无量纲水深),可知模拟结果与试验结果吻合良好(图 1(a)), v_s 与 v_e 数据点均分布在 1:1 线周围(图 1(b)),表明数值模型能够较好地模拟不连续植被斑块作用下的明渠水流。

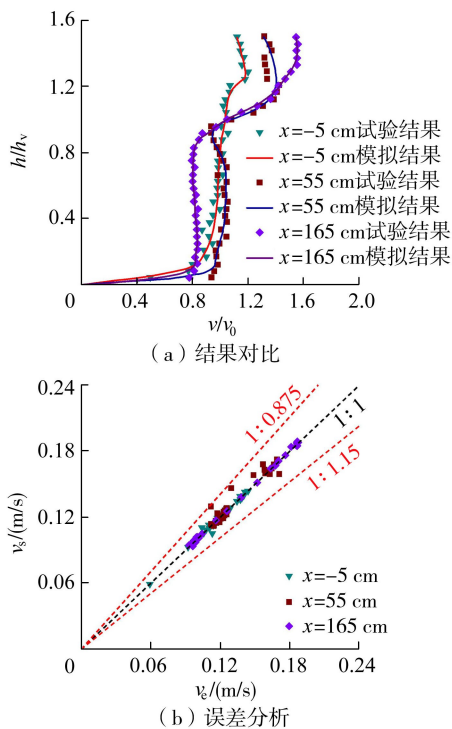


图 1 试验结果与数值模拟结果对比

1.2 计算方案

在数值模拟及试验中通常将植株概化为阻水圆柱体^[23]。本文数学模型中植被高 $h_v = 0.08$ m,直径 $d = 0.01$ m,计算区域长 1.72 m,宽 0.4 m(图 2)。在保证单元斑块形状及尺寸不变的前提下,通过缩减相邻植株间距以增加斑块内植株数量,从而提高斑

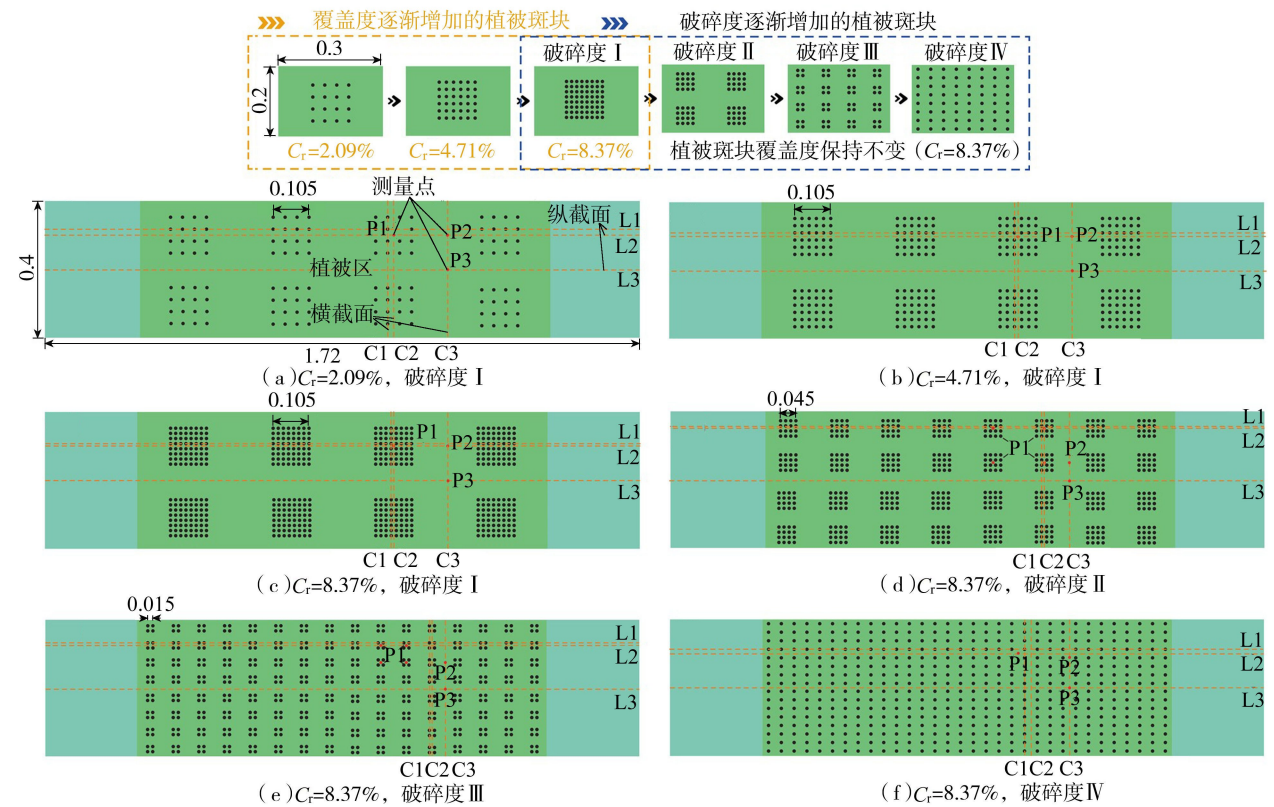


图2 不同植被斑块覆盖度和破碎度下数值计算区域底板布设示意图(单位:m)

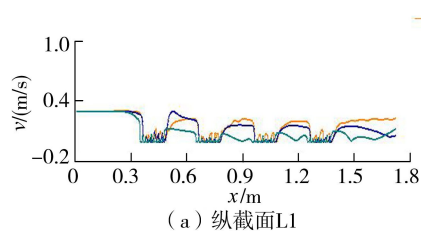
块覆盖度。针对单元斑块尺寸为 $0.3\text{m}\times 0.2\text{m}$ 的特定植被区,设置3种覆盖度(C_r),分别为2.09%、4.71%和8.37%(图2(a)~(c)),该覆盖度范围符合河道植被斑块分布实况^[17],具有一定代表性。由于目前河道水流特性研究多以植被均匀分布整个河道为主,而流域植被斑块群落具有破碎化分布特征^[24],考虑植被斑块景观异质性,将相同覆盖度(8.37%)下的单元斑块进行四分化。设置I~IV 4种斑块破碎度,前3种(I~III)单元方形斑块的边长依次为0.105、0.045、0.015 m,第4种(IV)单元斑块边长为植株直径0.01m(单株植被均匀分布于植被区),以研究植被斑块破碎化对明渠水流特性的影响(图2(c)~(f))。

2 结果与分析

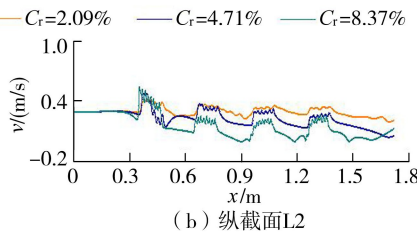
2.1 流速分布

2.1.1 纵截面流速分布

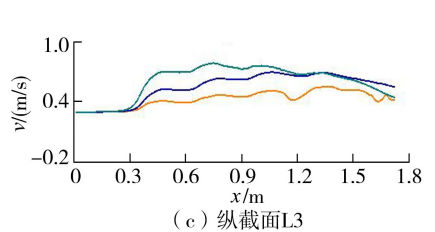
为更好地描述不连续植被斑块作用下流向流速



(a) 纵截面L1



(b) 纵截面L2



(c) 纵截面L3

图3 不同植被斑块覆盖度下各纵截面流速沿程变化

变化特征,选取纵截面L1(贯穿植被柱体)、L2(植株间过水区)、L3(河宽中心线),研究非淹没状态下特定水深($h=0.06\text{m}$)处流速沿流向(x 轴)的变化规律。

图3为不同植被斑块覆盖度下各纵截面流速沿程变化。由图3可知,纵截面L1处斑块区内流速小于其后方间隙区(图3(a)),而纵截面L2处流速大于其后方间隙区(图3(b))。植被斑块前后的流速差异表明斑块不连续分布干扰了流速的纵向连续性,破坏了纵向流场的流速均匀化。流经斑块区的流速呈锯齿状分布,这与吕升奇等^[25]所得的平均流速在簇状植被区呈波浪状分布的结论相似,其原因在于植被的尾流效应。此外,植被斑块区与间隙区的流速均与斑块覆盖度及沿程距离呈负相关关系。而纵截面L3的流速与斑块覆盖度呈正相关关系(图3(c)),这与植被区的规律完全相反。

图4为不同植被斑块破碎度下各纵截面的流速沿程变化。纵截面L1处水流以低于初始流速进入

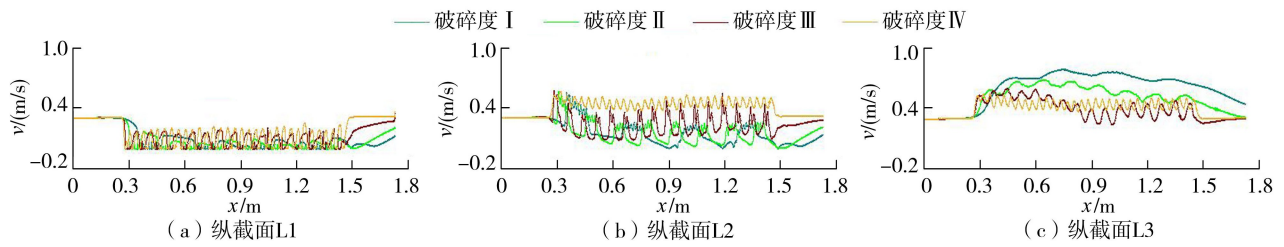


图4 不同植被斑块破碎度下各纵截面流速沿程变化

植被区,流速波动频率及变化幅度均与斑块破碎度呈正相关关系。纵截面 L2 的水流规律与 L1 相似,但流速随斑块破碎度的增大而增大的幅度更为显著;当植被均匀分布于整个河道时,流速变化幅度减小。相比于纵截面 L1 和 L2,纵截面 L3 处流速与斑块破碎度的关系呈现相反的规律,即流速与斑块破碎度呈负相关关系(图 4(c))。

2.1.2 横截面流速分布

为揭示植被斑块分布形式对河道横截面水流结构的影响,选取特定横截面 C2(位于斑块区内)和 C3(位于前后斑块之间)分析其流速变化。图 5 和图 6 分别为非淹没状态下不同植被斑块覆盖度及破碎度下横截面流速分布。

非淹没状态下,由横截面 C2 可知,无植被通流区的流速显著高于植被受阻区(图 5(a)、图 6(a)),表明植被区与通流区的交界处存在较大的流速差异,与 Zhang 等^[26]的研究结论相似。由横截面 C3 可知,植被后方的流速较小且变幅甚微(图 5(b)),表明植被后方有利于泥沙沉降。此外,由于植被区的阻水效应,水流被迫向植被区外侧产生侧向流,导致无植被通流区的流速骤增。

植被斑块覆盖度及破碎度是影响横截面流速的重要因素。斑块覆盖度增大导致斑块内部及其后方流速波动频率增大(图 5);斑块破碎度增大同样会

导致斑块内部及后方流速波动频率增大但变化幅度减小,即斑块内部及后方与其相邻过流区的流速差异减小(图 6)。此外,随着斑块破碎度的增大,横截面流速呈缓慢增大的趋势。这进一步表明斑块破碎化有利于横向流速均匀化,且有助于提高断面通流能力。

2.1.3 流速垂向分布

选取植被斑块内部点 P1、斑块间隙点 P2 和河道中心无植被通流区点 P3,研究其流速垂向分布规律。图 7 和 8 分别为非淹没状态下不同植被斑块覆盖度及破碎度下测点流速垂向分布。非淹没状态下,各测点流速沿垂向均呈“J”形分布。斑块覆盖度增大导致点 P1、P2 处的流速逐渐减小(图 7(a)(b)),当斑块覆盖度从 2.09% 增加至 4.71% 和 8.37% 时,点 P1 的平均流速分别减小 19% 和 52%,点 P2 的平均流速分别减小 52% 和 90%。与斑块覆盖度的影响相反,斑块破碎度增大却使点 P1、P2 处流速逐渐增大(图 8(a)(b)),当斑块破碎度从 I 增大到 II、III 和 IV 时,点 P1 的平均流速分别增加 18%、86%、275%,点 P2 的平均流速分别增加 76%、476%、58%。点 P3 处流速显著大于点 P1、P2,其原因为该处水流不受植被阻碍。此外,点 P3 处流速随斑块覆盖度增加而逐渐增大(图 7(c)),当植被斑块覆盖度从 2.09% 增加至 4.71% 和 8.37% 时,点

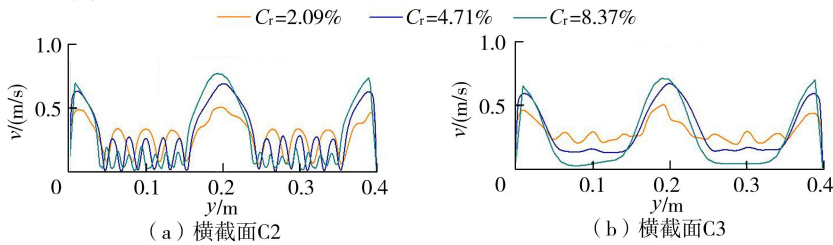


图5 不同植被斑块覆盖度下 2 个横截面的流速分布

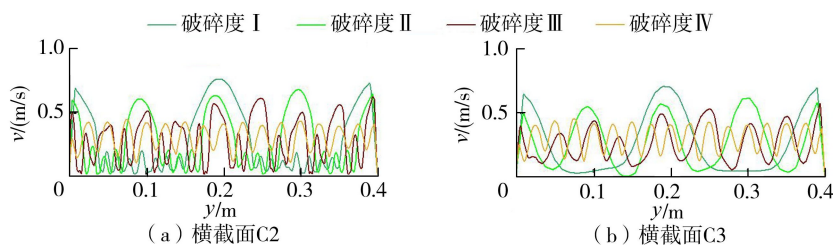


图6 不同植被斑块破碎度下 2 个横截面的流速分布

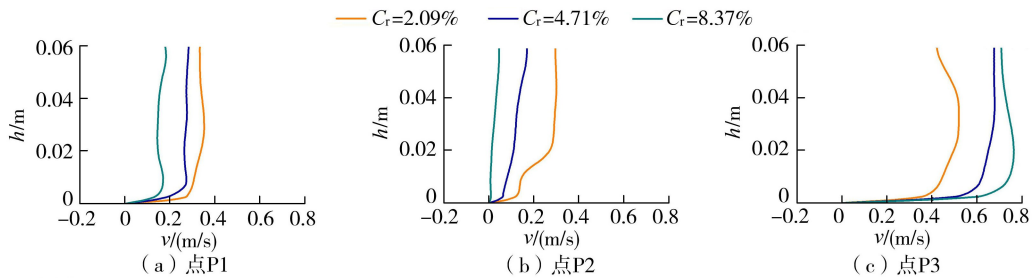


图7 不同植被斑块覆盖度下各测点的流速垂向分布

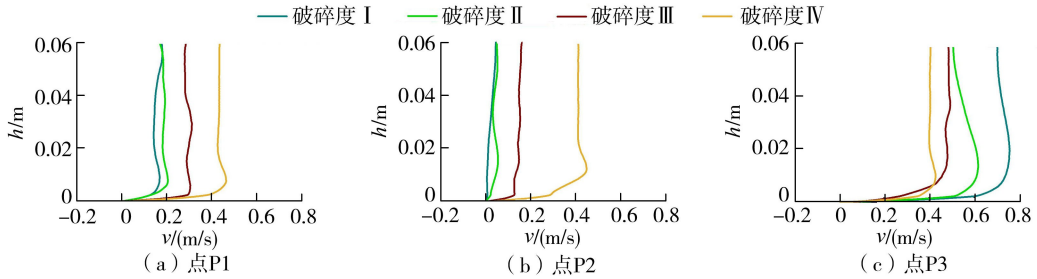


图8 不同植被斑块破碎度下各测点的流速垂向分布

P3 的平均流速分别增加 38%和 54%,这与点 P1、P2 处的规律相反,其原因为增大斑块覆盖度使植被与水流的碰撞作用增强,水流所受辐射程度增大,从而导致点 P3 处的流速增大。而点 P3 处流速随斑块破碎度的增加而减小(图 8(c)),当植被斑块破碎度从 I 增大至 II、III 和 IV 时,点 P3 的平均流速分别减小 22%、35%和 45%,究其原因因为斑块破碎化细化了整体河道的过水网格。这表明在单元植被斑块尺寸恒定的条件下,增大植被斑块覆盖度加剧了植被区与非植被区的流速分布差异化,而在覆盖度恒定的条件下,增大植被斑块破碎度则促使植被区与非植被区的流速分布均匀化。

2.2 流速等值线空间分布

图 9 为非淹没状态下水平截面($z = 0.06 \text{ m}$)的流速等值线空间分布,可以直观地反映植被斑块覆盖度和破碎度对河道水流流速整体变化的影响。由图 9 可见,未受植被阻碍区域的水流流速显著大于

受植被阻碍区域,植被斑块覆盖度增大加剧了斑块内部和后方与通流区之间的流速差异(图 9(a)~(c)),而在相同植被斑块覆盖度条件下,斑块破碎度的增大则缓解了这一流速差异现象(图 9(c)~(f))。沿斑块内部植被的横截面 C1、斑块内部间隙的横截面 C2 和相邻斑块间横截面 C3 的速度等值线空间分布,也反映了上述变化规律,限于篇幅,图 10 仅给出了横截面 C1 的流速空间分布。

图 11~13 分别为非淹没状态下纵截面 L1、L2、L3 的流速空间分布(0.06 m 水深范围内)。水流通过纵截面 L1 时,该区域流速较为缓慢,因受植被后方的尾流效应影响,导致斑块区流速低于其后方间隙区。水流通过纵截面 L2 时,植株间的互相挤压导致流经两斑块间的流速大于其后方间隙区。在受植被阻碍的区域,斑块内部及其后方间隙区的流速随沿程距离的增大而逐渐减小;而纵截面 L3(河宽中心线)的流速呈沿程增大趋势。综上所述,当植被

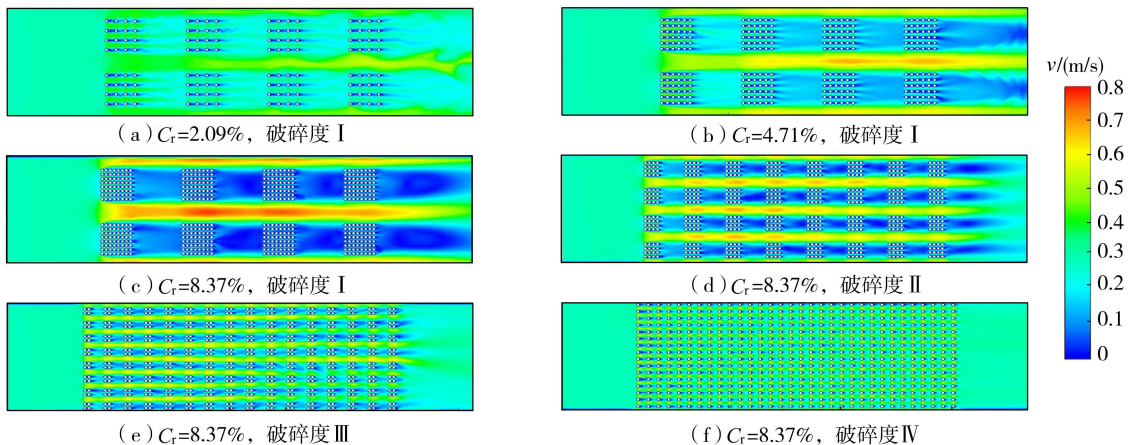


图9 非淹没状态下水平截面($z = 0.06 \text{ m}$)的流速空间分布

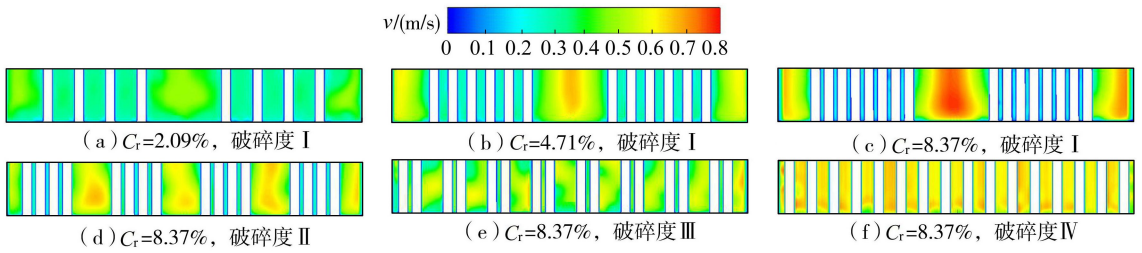


图 10 非淹没状态下横截面 C1 的流速空间分布

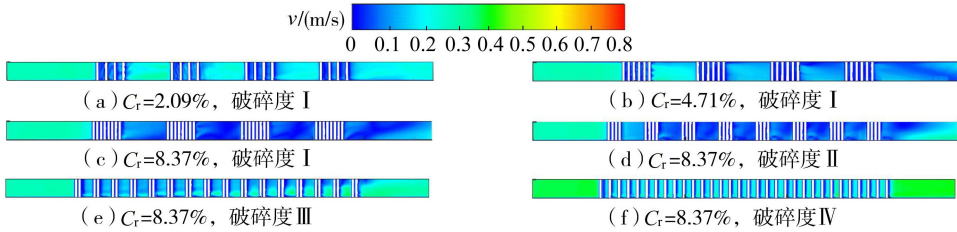


图 11 非淹没状态下纵截面 L1 的流速空间分布

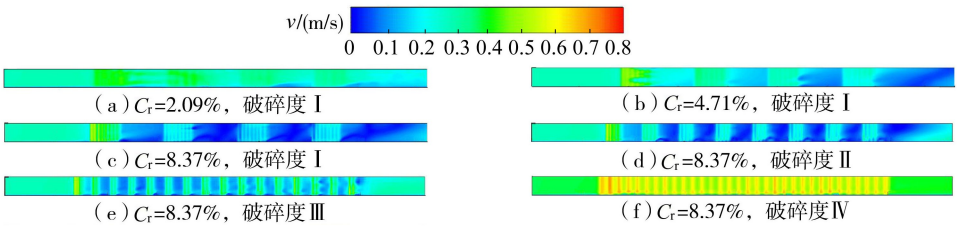


图 12 非淹没状态下纵截面 L2 的流速空间分布

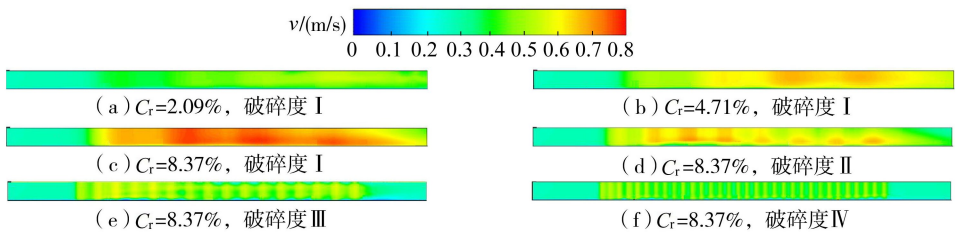


图 13 非淹没状态下纵截面 L3 的流速空间分布

斑块覆盖度增加时,水流阻碍作用增强,斑块内部水流流速减缓,进而可能导致泥沙堆积。当植被斑块破碎度增大时,河道内植被分布形式发生改变,导致植被分布均匀化,河道过水网格更为细致,同时水流整体流速更加稳定均匀。

2.3 湍流特征

2.3.1 雷诺应力垂向分布

图 14 和 15 分别为非淹没状态下不同植被斑块

覆盖度和破碎度下点 P1、P2、P3 的雷诺应力垂向分布。在植被底部至约 1/3 水深处,点 P1、P2 的雷诺应力与斑块覆盖度呈负相关关系(图 14(a)(b)),与斑块破碎度呈正相关关系(图 15(a)(b));而在相同水深范围内,P3 点处雷诺应力与斑块覆盖度呈正相关关系,与破碎度呈负相关关系(图 14(c)和图 15(c))。此外,在约 1/3 水深至水面范围内,植被斑块分布形式及水深对雷诺应力的影响甚微,雷

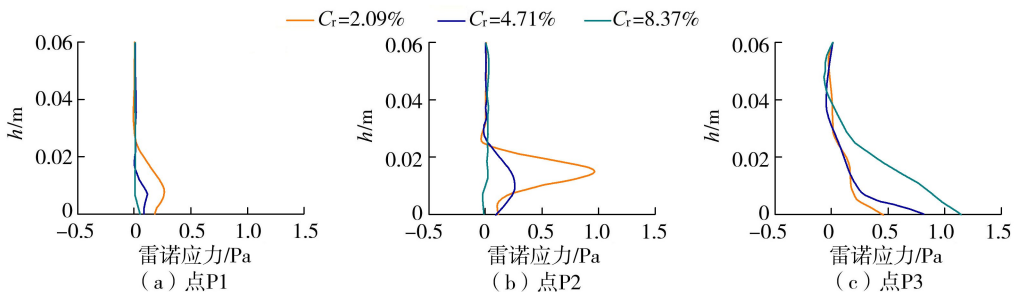


图 14 不同植被斑块覆盖度下各测点雷诺应力垂向分布

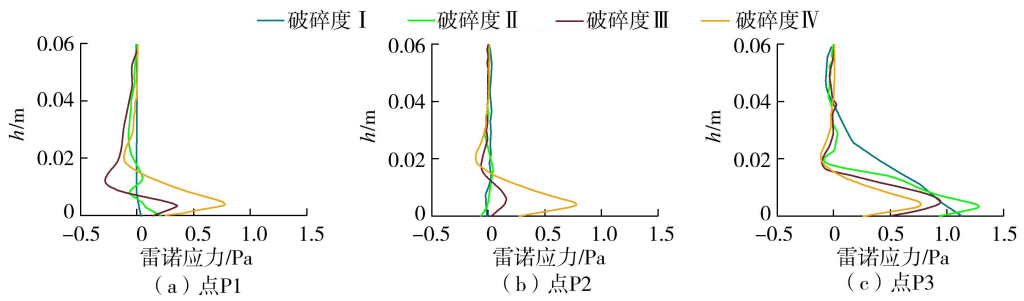


图 15 不同植被斑块破碎度下各测点雷诺应力垂向分布

雷诺应力值基本趋近于 0。当斑块覆盖度从 2.09% 增大至 4.71% 和 8.37% 时,点 P1 的平均雷诺应力值分别减小 69% 和 95%,点 P2 分别减小 57% 和 94%,而点 P3 则分别增大 34% 和 297%。当斑块破碎度从 I 增大至 II、III 和 IV 时,点 P1 的平均雷诺应力分别增大 3.00、9.33、28.66 倍,点 P2 分别增大 1.50、2.80、7.90 倍,而点 P3 则分别减小 24%、52% 和 69%。上述结果表明植被斑块覆盖度的增大加剧了植被区与非植被区之间雷诺应力分布的差异化,而斑块破碎度的增大则促进雷诺应力分布均匀化。

2.3.2 湍动能纵向分布

图 16 和图 17 分别给出了非淹没状态下 ($h = 0.06\text{ m}$) 不同植被斑块覆盖度和破碎度条件下 3 个纵截面的湍动能纵向分布,图 18 为非淹没状态下水平截面 ($z = 0.06\text{ m}$) 湍动能的整体分布云图。

非淹没状态下,水流流经植被区纵截面 L1 时,斑块内部的湍动能呈锯齿状分布且波动频率较大,而斑块后方则相对平缓;湍动能与斑块覆盖度呈负相关关系(图 16(a))。究其原因为斑块覆盖度增大导致水流所受植被阻力随之增大,进而使斑块内部的水流流速降低,故湍动能逐渐降低(图 18(a)~(c))。当水流流经相邻植株间过水区

纵截面 L2 时,植被段湍动能随斑块覆盖度的增加缓慢增大(图 16(b))。当水流流经无植被通流区纵截面 L3 时,湍动能随沿程距离的增大而增大,随斑块覆盖度的增大而显著增大(图 16(c))。

由图 17(a) 可见,纵截面 L1 的湍动能波动频率及变动幅度均与斑块破碎度呈正相关关系,究其原因为随着植被斑块破碎度增大,斑块内部水流流速增大,致使湍动能增大(图 18(d)~(f))。因此植被斑块破碎度也是影响河道流场紊动强度变化的重要因素。纵截面 L2 的湍动能变化规律与纵截面 L1 相似,湍动能波动频率及变动幅度均与斑块破碎度呈正相关关系,但当植被均匀分布于整个河道时,其变动幅度骤然减小(图 17(b)),究其原因为破碎度较低时(植株未达到均匀分布于整个河道),单元斑块内相邻植株的纵向间距均为 0.015 m,植株间距较小导致过流通道较窄,受植被影响流场极不稳定,故湍动能变幅较大;随着植被均匀分布于整个河道,相邻植株纵向间距增大至 0.025 m,过流通道宽度增大,水流受植株的影响减小,故湍动能变动幅度骤然减小。在无植被通流区纵截面 L3,湍动能随着斑块破碎度增大而增大(图 17(c)),但直至植被均匀分布于整个河道时,

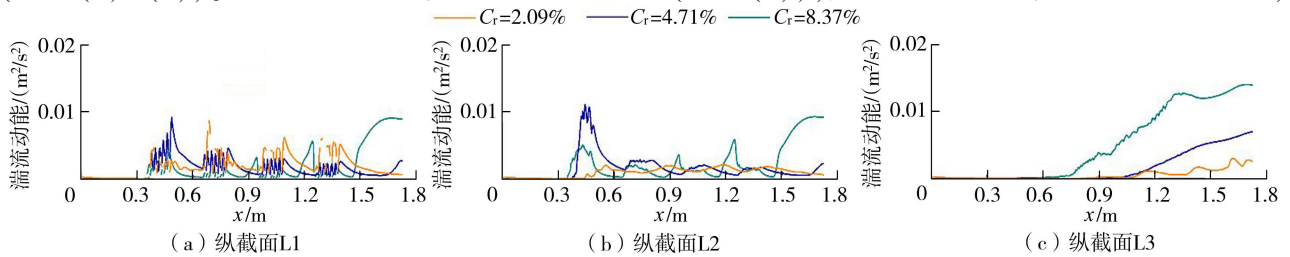


图 16 不同植被斑块覆盖度下各纵截面的湍动能沿程分布

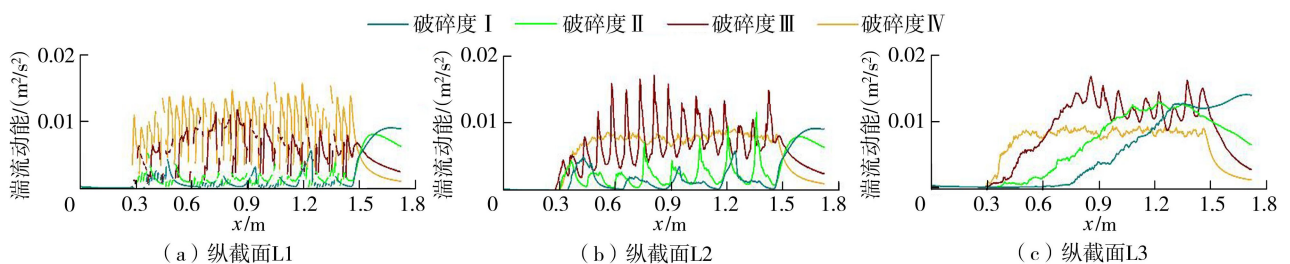


图 17 不同植被斑块破碎度下各纵截面的湍动能沿程分布

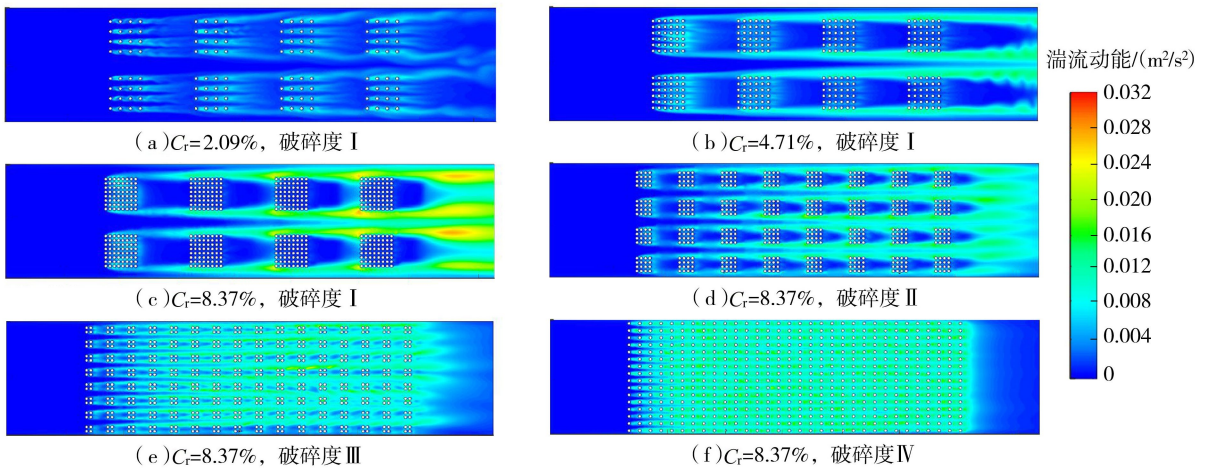


图 18 非淹没状态下水平截面 ($z=0.06\text{ m}$) 的湍流动能空间分布

整体湍流动能相对减小。

流场紊动特性的可行措施。

3 结论

参考文献:

a. 植被斑块分布形式的变化导致流场水流结构的时空变异性。当斑块覆盖度从 2.09% 增加至 8.37% 时,斑块内部平均流速减小 19%~52%,而无植被通流区平均流速增加 38%~54%,表明增加斑块覆盖度增大了植被区与无植被区之间的流速差异,斑块覆盖度的增大有利于斑块内部及后方河流生物适宜生境的塑造。当斑块破碎度从 I 增大至 IV 时,斑块内部平均流速增加 18%~52%,而无植被通流区减小 22%~45%,表明增加斑块破碎度促进了河道流场的整体均匀化,有利于河道泥沙沉积的空间分布均质化。

- [1] 桂婕,王平. 含复杂形态柔性植被水流水力特性的试验研究[J]. 水动力学研究与进展,2023,38(6):974-986. (Gui Jie, Wang Ping. Experimental study on hydraulic characteristics of water flow with complex flexible vegetation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(6): 974-986. (in Chinese))
- [2] 张云昌,丁洋,赵进勇. 河流伦理建构中的八个理论和实践问题探讨[J]. 中国水利,2024(16):7-11. (Zhang Yunchang, Ding Yang, Zhao Jinyong. Discussions on eight theoretical and practical issues in establishment of river ethics[J]. China Water Resources, 2024(16): 7-11. (in Chinese))
- [3] 张思毅,梁志权,谢真越,等. 白三叶不同部位减沙效应及其对径流水动力学参数的影响[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1306-1314. (Zhang Siyi, Liang Zhiquan, Xie Zhenyue, et al. Effects of different parts of *Trifolium repens* L. on sediment reduction and runoff hydrodynamic parameters[J]. Ecology and Environment Sciences, 2016, 25(8): 1306-1314. (in Chinese))
- [4] 李妍敏,安翼,刘青泉. 植被分布对小流域产流影响的数值实验[J]. 水科学进展,2015,26(2):187-195. (Li Yanmin, An Yi, Liu Qingquan. Effects of the distribution of vegetation on small catchment runoff during rainstorm events[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 187-195. (in Chinese))
- [5] 姚春萍,杨江龙,汪精云,等. 河流中低淹没度下刚性沉水植被阻力系数改进研究[J]. 水电能源科学,2024,42(4):62-66. (Yao Chunping, Yang Jianglong, Wang Jingyun, et al. Study of resistance coefficient of rigid vegetation in low submergence[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(4): 62-66. (in Chinese))
- [6] Yamasaki T N, Jiang Bei Han, Janzen J G, et al. Feedback between vegetation, flow, and deposition: a study of

b. 植被底部至 1/2 水深区域的流场紊动较强,且受植被斑块覆盖度与破碎度因素的制约:斑块内部及后方的紊动强度与覆盖度呈负相关关系、与破碎度呈正相关关系,而无植被通道区则呈相反规律。在 1/2 水深至自由表面区域,斑块分布形式对雷诺应力的影响甚微。当斑块覆盖度从 2.09% 增大至 8.37% 时,斑块内部平均雷诺应力减小 69%~95%,而无植被通流区增加 34%~297%,当斑块破碎度从 I 增大至 IV 时,斑块内部平均雷诺应力增大 3.00~28.66 倍,而无植被通流区减小 24%~69%。由此可见,斑块覆盖度的增大,同样加剧了植被区与非植被区之间雷诺应力分布差异化,而斑块破碎度的增大则促使雷诺应力分布趋于均匀。

c. 斑块内部的湍流动能呈锯齿状分布,且显著大于斑块后方。斑块覆盖度的增大加剧了斑块区与通流区的紊动差异性,有助于增强非植被通流区的紊动特性,而斑块破碎度的增大则缩小了斑块区与通流区的紊动差异性,有利于增强斑块内部的紊动特性。因此,合理调控斑块覆盖度和破碎度是调节

- artificial vegetation patch development [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126322.
- [7] 姜博, 张仟龙, 宋志坤, 等. 波流和植物作用下辽河口潮滩湿地水沙运动过程数值模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 47-54. (Jiang Bo, Zhang Qianlong, Song Zhikun, et al. Numerical simulation of water and sediment movement processes in the Liaohe Estuary tidal flat wetland under influence of wave flow and vegetation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 47-54. (in Chinese))
- [8] 周峰, 姜厦, Radnaeva D L, 等. 柔性植物影响下水沙运动及物质运输研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 107-116. (Zhou Feng, Lou Sha, Radnaeva D L, et al. Research progress on sediment movement and substance transport in flows with flexible vegetation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 107-116. (in Chinese))
- [9] Liu Chao, Hu Zhenghong, Lei Jiarui, et al. Vortex structure and sediment deposition in the wake behind a finite patch of model submerged vegetation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(2): 04017065.
- [10] Barcelona A, Oldham C, Colomer J, et al. Functional dynamics of vegetated model patches: the minimum patch size effect for canopy restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148854.
- [11] 柳梦阳, 槐文信. 基于粒子图像测速技术的淹没植被斑时均尾流结构研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(11): 1324-1331. (Liu Mengyang, Huai Wenxin. Investigation of the mean wake structures of submerged vegetation patches based on PIV measurement[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(11): 1324-1331. (in Chinese))
- [12] 张维乐, 吴时强, 吴时锋, 等. 沉水植被斑时尾流多尺度紊流结构研究[J]. *水科学进展*, 2023, 34(6): 913-927. (Zhang Weile, Wu Shiqiang, Wu Xiufeng, et al. Investigation of wake flow on submerged vegetation patches based on spectral proper orthogonal decomposition[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 913-927. (in Chinese))
- [13] de Lima P H S, Janzen J G, Nepf H M. Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2015, 15(4): 881-898.
- [14] Weber A, Zhang J, Nardin A, et al. Modelling the influence of aquatic vegetation on the hydrodynamics of an alternative bank protection measure in a navigable waterway[J]. *River Research and Applications*, 2016, 32(10): 2071-2080.
- [15] Ghani U, Anjum N, Pasha G A, et al. Investigating the turbulent flow characteristics in an open channel with staggered vegetation patches[J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(7): 966-978.
- [16] Anjum N, Tanaka N. Hydrodynamics of longitudinally discontinuous, vertically double layered and partially covered rigid vegetation patches in open channel flow[J]. *River Research and Applications*, 2020, 36(1): 115-127.
- [17] Liu Mengyang, Huai Wenxin, Ji Bin. Characteristics of the flow structures through and around a submerged canopy patch[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(3): 035144.
- [18] Ruiz-Reynés D, Gomila D, Sintés T, et al. Fairy circle landscapes under the sea[J]. *Science Advances*, 2017, 3(8): e1603262.
- [19] Liu Ji, Liu Xinliang, Wang Yi, et al. Landscape composition or configuration: which contributes more to catchment hydrological flows and variations? [J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(7): 1531-1551.
- [20] Zhao Fang, Huai Wenxin. Hydrodynamics of discontinuous rigid submerged vegetation patches in open-channel flow[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2016, 12: 148-160.
- [21] Choi S U, Kang H. Numerical investigations of mean flow and turbulence structures of partly-vegetated open-channel flows using the Reynolds stress model[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44(2): 203-217.
- [22] 闫静, 鲁经宇, 赵汗青, 等. 含植物明渠紊流流速分布无量纲化方法及流动分区[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 101-106. (Yan Jing, Lu Jingyu, Zhao Hanqing, et al. Dimensionless method for velocity distribution in vegetated open channel turbulent flows and flow sub-division[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 101-106. (in Chinese))
- [23] Atrah A B, Ab-Rahman M S, Salleh H, et al. Karman vortex creation using cylinder for flutter energy harvester device[J]. *Micromachines*, 2017, 8(7): 227.
- [24] Riva F, Martin C J, Galán Acedo C, et al. Incorporating effects of habitat patches into species distribution models[J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112(10): 2162-2182.
- [25] 吕升奇, 陈俊舟, 陈红, 等. 簇状分布的刚性双层植被明渠紊流特性分析[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(3): 8-12. (Lyu Shengqi, Chen Junzhou, Chen Hong, et al. Analysis of turbulent characteristics of open channel flow with patchy distributed double-layer rigid vegetation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(3): 8-12. (in Chinese))
- [26] Zhang Jingzhou, Zhang Shengtang, Wang Chuantao, et al. Flow characteristics of open channels based on patch distribution of partially discontinuous rigid combined vegetation[J]. *Frontiers in Plant Science*. 2022, 13: 976646.

(收稿日期: 2025-05-20 编辑: 雷燕)

基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统

李鹏程^{1,2}, 秦臻^{1,2}, 黄波林^{1,2}, 董星辰^{1,2}, 秦盼盼^{1,2}, 张鹏^{1,2}

(1. 三峡大学土木与建筑学院; 2. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室)

摘要:为解决滑坡涌浪三维缩尺试验中大视野与高分辨率流场测量难以兼顾的问题,建立了基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统,采用了广角畸变校正、不规则图像四角点映射、图像快速融合拼接以及大型滑坡涌浪流场 PIV 分析等 4 项关键技术,实现了对三维缩尺试验下滑坡涌浪运动过程的观测与 PIV 分析。以大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验为例进行了滑坡涌浪 PIV 分析,验证了大型滑坡涌浪 PIV 分析系统的精确度与可行性,可为进一步研究三维缩尺试验下滑坡涌浪的运动过程提供借鉴。

关键词:滑坡涌浪;多目阵列相机;PIV 分析;三维缩尺试验

PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves based on multi-lens array camera//Li Pengcheng^{1,2}, Qin Zhen^{1,2}, Huang Bolin^{1,2}, Dong Xingchen^{1,2}, Qin Panpan^{1,2}, Zhang Peng^{1,2} (1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University)

Abstract: To address the challenge of balancing a large field of view and high-resolution flow field measurement in 3D scaled model tests of landslide-generated impulse waves, we developed a PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves based on a multi-lens array camera. This system integrates four key technologies: wide-angle distortion correction, irregular image corner point mapping, rapid image fusion and stitching, and PIV analysis for large-scale landslide-generated impulse wave flow fields. It enables observation and PIV analysis of the movement process of landslide-generated impulse waves in 3D scaled model tests. Taking the large-scale 3D physical model test of Wangjiashan landslide-generated impulse waves as an example, PIV analysis of the landslide-generated impulse wave flow field was conducted. The results verify the accuracy and feasibility of the PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves, providing a reference for further research on the movement process of landslide-generated impulse waves in 3D scaled model tests.

Key words: landslide-generated impulse wave; multi-lens array camera; PIV analysis; 3D scaled model test

库区滑坡是水库蓄水运行期间的常见灾害,滑坡涌浪作为滑坡失稳入水形成的次生灾害,具有传播范围广、影响面积大等特点,是地质灾害研究的热点和难点^[1-8]。滑坡涌浪的研究方法主要包括经验公式法、数值分析法、物理模拟法等^[9]。其中,物理模拟法中的物理模型试验是研究滑坡涌浪运动传播过程和速度变化规律的重要手段^[10]。粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术因其非接触式测量、高分辨率和全场测速的特点,被广泛应用于滑坡涌浪物理模型试验研究中^[11-12]。例如 Fritz 等^[13-15]将 PIV 技术引入滑坡涌浪物理模型试验中,在 0.8 m×0.8 m 视场区域,成功获取了滑坡启动与

首浪传播过程的高分辨率图像序列,通过 PIV 分析实现了对滑坡表面速度矢量场的定量表征。

与传统的接触式测量方法相比,PIV 技术不会干扰流场,能够保持涌浪动力学行为的原始状态,是一种具有广阔发展前景的非接触式测量技术^[16]。虽然流场实时测量系统目前已经在很多河工模型试验中用来测量表面流速,但该系统需配置高精度激光器、声学探头及图像采集设备,初期投入大,维护成本高,而微观 PIV 技术难以用于大范围流场测量。因此,考虑通过多目阵列相机与 PIV 技术的协同应用来测量滑坡涌浪两相运动场。

多目阵列相机在滑坡涌浪物理模型试验中已得

基金项目:国家自然科学基金项目(U23A2045);重庆市规划和自然资源局科研项目(KJ-2023046)

作者简介:李鹏程(2000—),男,硕士研究生,主要从事水库地质灾害及涌浪灾害研究。E-mail:3213340270@qq.com

通信作者:秦臻(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事岩土工程勘察及地球物理勘探研究。E-mail:337203841@qq.com

到广泛应用,例如 Zweifel 等^[16-19]在试验尺度拓展方面进行了相关研究。针对大尺度试验需求, Mohammed 等^[20]通过 48.8 m×26.5 m 波浪池物理模型试验,集成水面/水下多相机系统,完整记录了滑坡运动过程及涌浪从传播到岸坡爬高的全过程; Umeyama^[21]在 26.0 m×0.8 m 的试验水槽中采用 PIV 和粒子追踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV) 技术,研究了不同相位的速度场和水体在一个周期内的运动轨迹;殷坤龙等^[22]通过高速摄影技术完整捕捉了滑坡入水至涌浪产生的瞬态过程; Xu 等^[23]构建了多视角观测系统,完成了 65.0 m×40.0 m×3.0 m 大范围流场的运动观测; Cao 等^[24]基于三峡库区 1:70 比尺模型 (原型尺寸为 6000.0 m×183.4 m),通过高速摄像技术完整记录了复杂地形条件下涌浪产生及传播的全过程。

尽管国内外已经开展了大量的物理模型试验来研究滑坡涌浪的运动规律,但大多数研究仅记录了涌浪的产生或传播过程,鲜有研究聚焦于三维缩尺试验下涌浪在复杂河道中的产生及传播过程,并对此进行 PIV 分析。本文通过建立基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统 (以下简称 PIV 分析系统),实现了三维缩尺试验下室内滑坡涌浪运动全过程观测,并通过自主研发的解算程序进行 PIV 分析,所得数据可为滑坡涌浪物理模型试验中滑坡运动过程及涌浪传播过程的量化分析提供参考。

1 PIV 分析系统构建

PIV 分析系统的构建以滑坡涌浪流场观测装置为基础,该装置通过科学布置多目阵列相机,实现对滑坡涌浪运动过程的连续记录。由于拍摄相机存在光学畸变,且单个相机拍摄视野有限,需将多台相机的观测区域拼接在一起以形成完整的试验区域,故引入多目阵列相机图像畸变校正与融合拼接技术 (具体包括广角畸变校正、不规则图像四角点映射、图像快速融合拼接),并结合大型滑坡涌浪流场 PIV 分析技术,最终实现对三维缩尺试验下滑坡涌浪运动过程的全过程观测与高精度 PIV 分析。

1.1 滑坡涌浪流场观测装置

滑坡涌浪流场观测装置主要由以下核心组件构成:高质量万兆网线、万兆交换机、大容量硬盘存储系统、8K 液晶显示器以及高清网络相机。各组件协同工作,实现了从数据采集、传输、存储到显示的全流程高效运作,保障了整个装置的稳定运行与数据的高效处理。

在滑坡涌浪流场观测装置中,多目阵列相机的

布置需遵循以下原则:①覆盖性原则。根据所需拍摄的试验场地面积,确定相机数量及排列方式,以实现有效覆盖;同时要确保所有相机的有效拍摄范围完整覆盖物理模型的涉水区域,以实现全面监测。②清晰度原则。考虑到安装便利性,相机通常安装在试验场顶板的主梁或次梁上。通过精确计算和反复调整,确定镜头与观测目标之间的最佳距离,以保证图像清晰度,还可通过调整相机焦距或增加相机数量来满足更高分辨率的要求。③重叠性原则。为便于后续图像处理中的裁剪与拼接,相邻相机的有效拍摄范围应保留一定重叠区域,实现图像的无缝融合。④可调节性原则。单个相机镜头位置的确定共涉及 5 个独立参数:镜头中心空间位置的坐标 (x, y, z) 、镜头成像平面的水平方位角和垂直方位角。通过微调这 5 个参数,可适应不同试验场景对相机视角、拍摄范围的要求,确保拍摄效果的稳定性与可靠性。

相机水平方位角与垂直方位角校正方法:结合显示终端输出的相机成像图像特征,在相机下方布置“十”字基准绳来实现校正。为使各相机镜头具有相同的水平方位角,旋转相机镜头,让上下方向的准绳上下对称,左右方向的基准绳左右对称。此时“十”字成像中心点可能未处于屏幕中心,主要由两种原因引起:一是垂直方位角不准确;二是镜头中心位置不正确。为校正相机镜头中心位置和垂直方位角,将水准仪置于相机上方,通过调整相机边缘的高度,使水准仪气泡居中,直至屏幕中“十”字中心与屏幕中心重合且上下、左右方向均对称时,单个相机校正完成。通过相同步骤再对其他相机进行校正。

1.2 多目阵列相机图像畸变校正与融合拼接技术

利用图像畸变的渐变特性和畸变分离相机模型 (一种将相机理想投影与光学畸变解耦建模的数学模型),本文提出了一种将畸变图像中的基准绳化曲为直的相机径向畸变校正方法,以便快速、高效地标定相机的径向畸变参数,消除图像畸变,进而提高图像量测与重建的效率及精度。

1.2.1 基于球面模型的广角畸变校正

为将鱼眼镜头的实际成像点恢复为理想像点,要建立理想像点与畸变图像对应像点间的映射关系。鱼眼镜头的成像球面模型为球面半径为 R 的半球形,投影面为 S ,将球面上的点投影到投影面 S 上,就可以实现图像的畸变校正^[25]。

空间中一条直线在透视投影的作用下,理应映射为一条直线,但由于相机的畸变,同一条直线的像点呈曲线分布。为得到准确的畸变校正系数 k_1 ,需要将畸变图像中的曲线拉直。受场地限制,且因相机数量众多,不能对每个相机布置众多纵横交错

规则网格线,并通过观察特征规则网格线的校正效果来实现畸变校正^[26]。为了便于标定和拼接裁剪,在相机底部布置4条相互垂直的基准线,根据径向畸变的原理可知,给定 k_1 一个初始值,使其渐变,将4条基准线逐渐由弯曲变化至拉直继而再次弯曲,在此过程中存在一个最优的 k_1 ,使特征规则网格线的校正效果最佳。其他相机以该畸变校正系数为参考,确保各相机畸变校正程度一致,以提升后续拼接裁剪的准确度。

1.2.2 不规则图像四角点映射

由于视角等多种因素的影响,鱼眼校正后的图像并不是规则的四边形,因此,基于不规则四角点映射原理,通过旋转、伸缩、投影、平移等变换将不规则的四边形变换为规则的四边形,将图像空间长与宽的真实比例调整为物体空间长与宽的真实比例,同时裁剪多余部分,以确保校正后图像的几何尺寸比例与实际物体的空间尺寸比例完全一致。

如图1所示,将原图像平面 $ABCD$ 上的一点 (X, Y) 映射至理想图像平面 $abcd$ 上的一点 (x, y) ,对应的三维齐次坐标转换关系可写成

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 为旋转与伸缩系数; a_{13} 、 a_{23} 为平移系数; a_{31} 、 a_{32} 为投影系数。

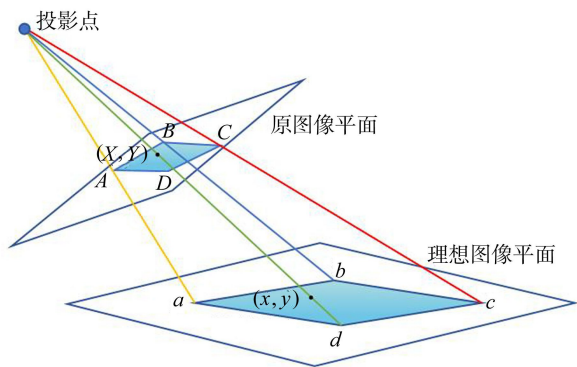


图1 透视变换示意图

分别在原图像平面和理想图像平面上选取4组对应点,即 $A(X_1, Y_1)$ 、 $B(X_2, Y_2)$ 、 $C(X_3, Y_3)$ 、 $D(X_4, Y_4)$ 与 $a(x_1, y_1)$ 、 $b(x_2, y_2)$ 、 $c(x_3, y_3)$ 、 $d(x_4, y_4)$,于是形成了对应点的映射关系。每组对应点有2个独立的线性方程,4组对应点共形成8个方程,通过求解该线性方程组即可得到8个参数的唯一解,进而得到单应矩阵 H 。对于校正后的规则网格点 (x, y) ,需按单应矩阵的逆矩阵 H^{-1} 反算其在原图像平面中的对应点,该对应点通常落在亚像素区域。最后采用双线性插值法(或更高阶插值法)通过邻近

整数像素插值,确定这4组对应点的准确坐标。通过以上步骤,可将任意不规则四边形区域快速、准确地校正为符合物体空间长与宽的真实比例且无畸变的矩形图像。

1.2.3 基于基准面的图像快速融合拼接

传统图像融合拼接技术在处理特征细节和实时性方面要求较高,且拼接后物体位置可能发生偏移。针对此问题,本文提出了一种基于基准面的图像快速融合拼接技术,专门用于流动场图像的高效处理。该技术的核心在于自动拼接基准面,其关键步骤是精确选取重叠矩形区域的4个角点。这4个角点不仅是重叠区域的关键特征点,也是不规则四边形映射的几何控制点。如图2所示,以水池表面作为基准面,该基准面的4个角点为 $H_1 \sim H_4$ 。当流动场发生变化时,位于其上方的基准绳位置保持不变。不同工况下水池表面会发生变化,若在水池表面布置基准绳网络,不仅工作量大,还可能因地形复杂而难以布置。因此,在基准绳交叉点处悬挂一个小浮标作为标识,该浮标的投影点即为交叉点在水池表面的投影,可作为单个相机不规则映射的特征点。不规则映射区域对应图2中黄色矩形区域的一个角点,该角点因相机拍摄视野重叠,会同步出现在相邻3台相机的拍摄图像中。基于此,首先通过不规则图像四角点映射,建立该角点在不同相机图像中的坐标关联,再使多相机图像中的该角点实现坐标重合,以该角点为基准,即可自动实现不同相机图像的快速融合拼接。这种固定的映射关系不仅适用于同一时刻的图像拼接,还适用于不同帧图像的拼接,从而显著提高了图像融合拼接的效率。

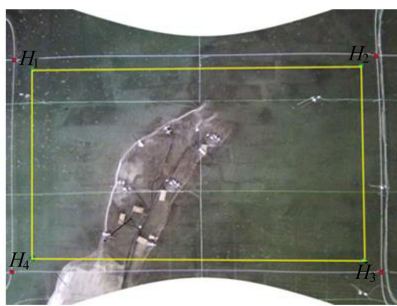


图2 水池表面基准面的映射特征点

在四角点映射过程中,理想图像的坐标应为像素坐标,而非长度单位坐标,因此需根据比例尺来计算图2中黄色矩形区域长和宽所对应的像素数量。按比例尺 s 将物理坐标换算为像素坐标时,设外围白色区域基准绳的长为 w 、宽为 h ,则黄色区域像素矩阵4个角点的坐标分别为 $(0, 0)$ 、 $(0, h/s)$ 、 $(w/s, h/s)$ 、 $(w/s, 0)$ 。经图像畸变校正与四角点映射后,可得到如图3(a)所示的试验区域全图像,再

通过融合拼接与裁剪优化,最终得到如图 3(b) 所示的适用于 PIV 分析的标准化图像。

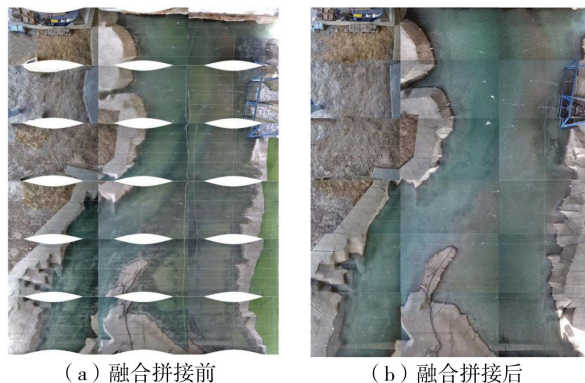


图 3 融合拼接前后图像示意图

2 PIV 分析系统应用实例

以大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验为例,进行滑坡涌浪 PIV 分析。为模拟王家山滑坡涌浪在大尺度复杂河谷中的传播,采用 1:150 的几何相似比,建立了如图 4 所示的大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验场,模型尺寸为 30.0 m×27.0 m×1.5 m,以大缩尺复现金沙江 4500.0 m×4050.0 m×225.0 m 的实际河谷^[27]。在模型上方布置 14 个相机,以实现对试验模型中有效河道区域的全覆盖监测。高清相机像素为 4000×3000,焦距取 2.8 mm,每台相机拍摄范围约为 8.0 m×6.0 m,通过对 14 台相机的视角调试与优化排布,最终形成 23.4 m×22.9 m 的 PIV 观测场。



图 4 大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验场

2.1 示踪颗粒选择

示踪颗粒在 PIV 技术中至关重要,若示踪颗粒具有足够高的流动跟随性,示踪颗粒的运动就能真实地反映流场的运动状态^[28-29]。在滑坡涌浪流场记录过程中,水流的成像效果受自由表面光照条件与示踪颗粒分布状态的双重影响。示踪颗粒的分布均匀性与成像清晰度直接决定图像是否满足后续 PIV 分析要求。图像尺寸应与其分辨率相匹配,并且能够区分水体在图像对(连续两帧图像)中的运

动。有时需从不同位置连续获取多张图像,再进行融合拼接以覆盖整个试验区域。

高质量示踪颗粒应满足以下要求:相对密度尽可能与试验流体一致,粒径足够小且大小分布均匀,形状尽可能为圆形,光散射效率足够高。为有效测得库水面上涌浪速度,PIV 示踪颗粒的密度应略小于水。选用超高分子乳白色蜡状聚乙烯(PE)圆形颗粒作为 PIV 示踪颗粒,该颗粒不溶于水,粒径为 4.0 mm,密度为 0.92 g/cm³。为了提高示踪颗粒在水面上的 PIV 分析辨识度,将其染至黑色。

2.2 涌浪传播分析

王家山滑坡位于会泽县娜姑镇王家湾村大水沟沟口段至石门坎段。王家山岸坡山顶高程为 1575~1770 m,高程 1125 m 以下以土质斜坡为主,坡度为 15~40°,高程 1125 m 以上为基岩陡坡,坡度为 50~60°。结合野外调查和勘探钻孔数据,滑体中部厚,两侧和后缘较薄,厚度为 14.1~87.6 m,滑坡面积约为 23.5 万 m²,总体积约为 611 万 m³,滑动方向为 260°。王家山滑坡为大型土质滑坡,滑坡破坏后带来的涌浪灾害严重威胁包括象鼻岭居民点在内的广大沿江移民的生命财产安全和基础设施安全。因此,对王家山滑坡涌浪的危害性进行风险评估非常必要。

以蓄水高程 825 m(此时滑坡最大启动速度为 4.42 m/s)工况为例,基于 14 台相机全场拼接图像,完成滑坡涌浪 PIV 运动数据采集。通过自主研发的 PIV 解算程序,获取滑坡运动过程和涌浪传播过程的流场(图 5、图 6),实现运动学特征的量化分析。

由图 5 可见,滑坡运动过程先加速后减速:28.8 s 时滑坡扰动水体有限,平面速度仅为 2.0 m/s,此时水体以局部振动为主;44.8 s 时扰动范围扩大,形成半环状涌浪,此时顺滑坡运动方向的水质点速度成为运动主导因素;53.6 s 时滑坡运动速度达到峰值 4.21 m/s,此时涌浪传播速度同步激增,水质点速度为 2.42 m/s;61.6 s 时滑坡运动终止,涌浪转入自由传播阶段。

由图 6 可见,涌浪传播过程受复杂地形影响显著:在金沙江河道内,94.4 s 时半环状涌浪遇左岸约束后发生分流,形成下游向冲沟爬高(最大爬高为 13.91 m)、岸坡反射(冲击速度为 2.39 m/s)及上游有侧限传播的三维效应。134.4 s 时涌浪首次冲击象鼻岭,鼻头区域局部淹没(冲击速度为 1.22 m/s);随后第二波涌浪沿两侧凹槽侵入,在小江侧形成速度为 3 m/s 的爬坡浪。206.4 s 时涌浪在河道内形成复杂的反射叠加流场,呈现全域覆盖态势。

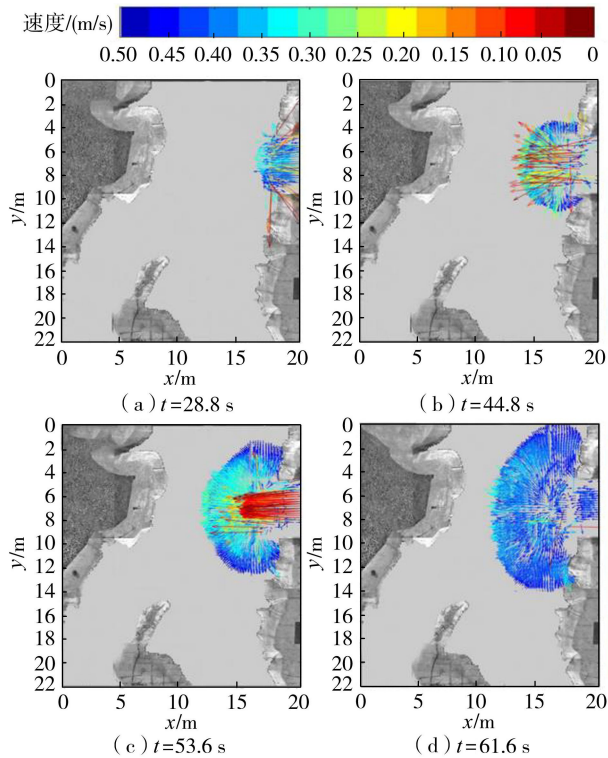


图5 王家山滑坡运动过程流场

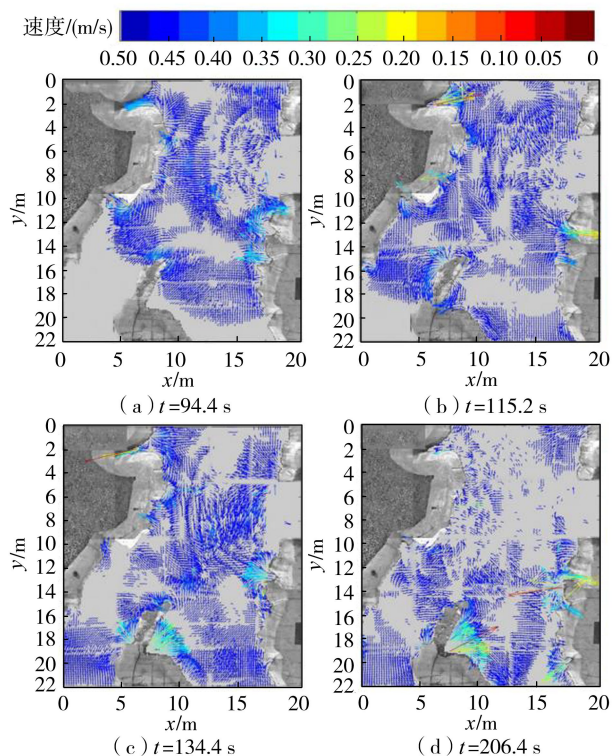


图6 王家山涌浪传播过程流场

3 PIV 分析系统精度验证与研究展望

3.1 精度验证

通过多组平行试验,对位移计测得的滑坡速度曲线和 PIV 分析系统测得的滑坡速度曲线进行标定。在 D3 相机图像中的滑坡区域选取 1 m^2 的矩形区域,统计该区域的滑坡历时速度曲线,与对应位置

位移计测得的滑坡速度时程曲线进行对比,结果如图 7 所示。由图 7 可见,PIV 分析系统的滑坡速度时程曲线与位移计的滑坡历时速度曲线几乎一致,仅因测量维度差异存在幅值偏差——位移计获取的是滑坡体空间合速度,而 PIV 分析系统测量的是 xOy 平面二维速度(未包含 z 向速度分量)。对两种方法所获取的滑坡速度时程曲线进行标定,将 PIV 分析系统测得的滑坡速度时程曲线进行垂直缩放,采用 0.838 作为标定系数,即将 PIV 分析系统的结果乘以 0.838,就可以得到和位移计相同的结果,表明 PIV 分析系统的测速结果可靠,精度较高。

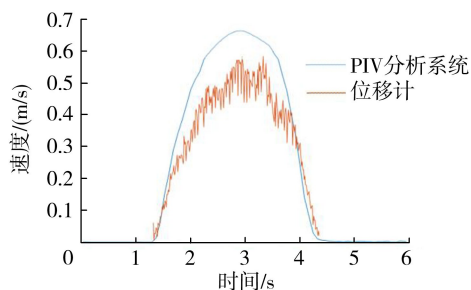


图7 两种方法测得的滑坡速度时程曲线对比

3.2 研究展望

当前 PIV 分析系统虽实现了三维缩尺试验下滑坡涌浪的二维流场观测,但仍存在优化空间,后续可从以下方面拓展研究:①三维速度测量优化:由于相机安装于天花板上,难以直接反映速度在深度方向上的变化,后续可以考虑安装水下相机,即可获得三维空间中的速度变化。另外 PIV 分析系统测得的速度为水平面上的二维速度,实际上运动的水表面为曲面,可以考虑在同一空间位置处安装多个相机从不同角度观测同一个区域,实现类似人类双眼视觉的立体成像效果,从而准确反映流场的景深特征。②系统应用场景拓展:若将该系统用于泥石流和碎屑流的运动观测,示踪颗粒的选择和布置成为准确反映泥石流和碎屑流运动规律的关键。目前国内地质工程领域,显微荧光技术主要用于特殊岩性识别和储层物性的微观评价,可以考虑将该技术引入大范围流场观测领域,对滑体材料进行荧光标记,并利用相机捕捉荧光信号,从而通过追踪标记材料来揭示泥石流和碎屑流的运动轨迹。

4 结论

a. 建立了 PIV 分析系统,采用广角畸变校正、不规则图像四角点映射、图像快速融合拼接以及大型滑坡涌浪流场 PIV 分析等 4 项关键技术,实现了对三维缩尺试验下滑坡涌浪运动过程的观测与 PIV 分析。

b. 该 PIV 分析系统已成功应用于王家山滑坡

涌浪物理模型试验。试验采用 1 : 150 几何相似比, 构建了尺寸为 30.0 m×27.0 m×1.5 m 的大型三维物理模型, 精准复现了金沙江原型河谷(4500.0 m×4050.0 m×225.0 m)的地形特征与边界条件。

c. 通过多组平行试验对位移计实测滑坡速度曲线和 PIV 分析系统测得的滑坡速度曲线进行标定, 结果显示二者速度变化趋势高度一致, 将 PIV 分析系统的结果乘以标定系数后, 可得到和位移计相同的结果, 验证了 PIV 分析系统的准确性。

参考文献:

[1] 黄波林, 殷跃平, 王世昌, 等. GIS 技术支持下的滑坡涌浪灾害分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (增刊 2): 3844-3851. (Huang Bolin, Yin Yueping, Wang Shichang, et al. Landslide impulsive wave hazard study supported by GIS technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (S2): 3844-3851. (in Chinese))

[2] 司鹏飞, 田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 28-32. (Si Pengfei, Tian Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 28-32. (in Chinese))

[3] 殷坤龙, 张宇, 汪洋. 水库滑坡涌浪风险研究现状和灾害链风险管控实践[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 1-12. (Yin Kunlong, Zhang Yu, Wang Yang. A review of landslide-generated waves risk and practice of management of hazard chain risk from reservoir landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 1-12. (in Chinese))

[4] Wang Wei, Chen Guangqi, Yin Kunlong, et al. Modeling of landslide generated impulsive waves considering complex topography in reservoir area [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5): 372.

[5] 陈世壮, 徐卫亚, 石安池, 等. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 83-93. (Chen Shizhuang, Xu Weiya, Shi Anchi, et al. Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 83-93. (in Chinese))

[6] Hunt J E, Tappin D R, Watt S F L, et al. Submarine landslide megablocks show half of Anak Krakatau Island failed on December 22nd, 2018 [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2827.

[7] 徐文杰. 库岸滑坡涌浪链生灾害动力学研究进展[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1929-1940. (Xu Wenjie. Research advances in disaster dynamics of landslide tsunami [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1929-1940. (in Chinese))

[8] 马鑫磊, 任光明, 夏敏. 滑坡涌浪预测评价方法综述

[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 89-98. (Ma Xinlei, Ren Guangming, Xia Min. Review on the forecast evaluation methods of landslide surge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 89-98. (in Chinese))

[9] Heller V. Landslide generated impulse waves: prediction of near field characteristics [D]. Zurich: Eth Zurich, 2007.

[10] Miller G, Take W A, Mulligan R. Parametric study of landslide generated impulse wave physical modelling [C]//Proceedings of the 6th Canadian Geo Hazards Conference. Kingston: Canadian Geotechnical Societ, 2014: 1-7.

[11] Mohammed F, Fritz H M. Experiments on tsunamis generated by 3D granular landslides [C]//Mosher D C, Shipp R C, Moscardelli L, et al. Submarine Mass Movements and Their Consequences. Dordrecht: Springer, 2010: 705-718.

[12] Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 012001.

[13] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Landslide generated impulse waves [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 505-519.

[14] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, 130(6): 287-302.

[15] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Landslide generated impulse waves: hydrodynamic impact craters [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 520-532.

[16] Zweifel A, Hager W H, Minor H E. Plane impulse waves in reservoirs [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2006, 132(5): 358-368.

[17] Huang Bolin, Li Bin, Zheng Jiahao, et al. Dynamic analysis of impulse waves generated by the collapse of granular pillars [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(1): 198-210.

[18] 陈小婷, 黄波林, 王健, 等. 基于粒子图像测速技术的滑坡-涌浪两相运动分析系统 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 492-499. (Chen Xiaoting, Huang Bolin, Wang Jian, et al. Two-phase motion analysis system for landslide-induced impulse wave based on the particle image velocimetry [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 492-499. (in Chinese))

[19] 孟珍珠, 胡林生, 沈优, 等. 基于改进 PIV 技术的库区滑坡涌浪试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 30-36. (Meng Zhenzhu, Hu Linsheng, Shen You, et al. Experimental study on landslide generated waves based on improved PIV technique [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 30-36. (in Chinese))

[20] Mohammed F, Fritz H M. Physical modeling of tsunamis

- generated by three-dimensional deformable granular landslides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(11): C11015.
- [21] Umeyama M. Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2011, 137(2): 85-94.
- [22] 殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 1067-1074. (Yin Kunlong, Liu Yiliang, Wang Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(5): 1067-1074. (in Chinese))
- [23] Xu Weiya, Lei Jie, Tian Lei, et al. Three-dimensional geomechanics experimental investigation on potential impulse waves generated by Wangjiashan Landslide in Baihetan Reservoir, China[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(2): 026601.
- [24] Cao Ting, Wang Pingyi, Hu Jielong, et al. Experimental study on the pressure of impulse waves generated by landslides on a bank slope [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(9): 1125-1138.
- [25] 熊琨, 何旭然, 王春喜, 等. 用于高精度准直测量的鱼眼相机标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(2): 202305. (Xiong Kun, He Xuran, Wang Chunxi, et al. Calibration method of fisheye camera for high-precision collimation measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(2): 202305. (in Chinese))
- [26] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 261-304.
- [27] 黄波林, 胡刘洋, 李仁江, 等. 水库区低 Froude 数的典型涉水滑坡涌浪缩尺物理模型试验研究: 以王家山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(8): 1899-1909. (Huang Bolin, Hu Liuyang, Li Renjiang, et al. Scaled experimental study on impulse wave generated by a typical semi-submerged landslide with a low Froude number in reservoir areas: taking Wangjiashan landslide as an example [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(8): 1899-1909. (in Chinese))
- [28] 万立国, 任庆凯, 田曦, 等. PIV 技术及其在两相流测量中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12): 463-467. (Wan Ligu, Ren Qingkai, Tian Xi, et al. PIV technique and its application in two-phase flow measurement [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(12): 463-467. (in Chinese))
- [29] 蔡楚江, 沈志刚, 肖昆, 等. 一种高散射率 PIV 实验用示踪粒子的制备[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(4): 65-68. (Cai Chujiang, Shen Zhigang, Xiao Kun, et al. The preparation of tracer particles with excellent scattering performance used in PIV experiment [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(4): 65-68. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-15 编辑: 骆超)

(上接第 36 页)

- [21] 田富强, 胡和平, 雷志栋. 流域热力学系统水文模型: 本构关系[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(5): 671-686. (Tian Fuqiang, Hu Heping, Lei Zhidong. Hydrological model of watershed thermodynamic system: constitutive relations [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 38(5): 671-686. (in Chinese))
- [22] Reggiani P, Sivapalan M, Hassanizadeh S M. A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum energy and entropy, and the second law of thermodynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 1998, 22(4): 367-398.
- [23] 梁忠民, 赵建飞, 段雅楠, 等. 微分形式新安江模型[J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 374-386. (Liang Zhongmin, Zhao Jianfei, Duan Ya'nan, et al. Differential-form Xin' anjiang model [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 374-386. (in Chinese))
- [24] 童冰星, 陈瑜彬, 张潇, 等. 考虑坡面沟流的土壤含水量精细化模拟及应用[J]. *水科学进展*, 2025, 36(3): 493-504. (Tong Bingxing, Chen Yubin, Zhang Xiao, et al. Elaborate simulation of dynamic soil moisture considering gully flow [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(3): 493-504. (in Chinese))
- [25] 李致家, 邓帆, 张汉辰, 等. 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[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2026, 54(1): 1-7. (Li Zhijia, Deng Fan, Zhang Hanchen, et al. Joint calibration method of distributed hydrological model parameters based on remote sensing soil moisture data [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2026, 54(1): 1-7. (in Chinese))
- [26] 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))
- [27] Liu Yuan, Qin Shujing, Cheng Lei, et al. Parameterization of the generalized complementary principle approach for evaporation using soil moisture measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 664: 134344.

(收稿日期: 2025-10-11 编辑: 俞云利)

基于非结构化网格的地表水流和管网水流双向动态耦合模型开发

陈同庆^{1,2}, 陈家宇^{1,2}, 王明娜^{1,2}, 张庆河^{1,2}

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要:针对当前地表水流和管网水流耦合模型多基于结构化网格、难以适配复杂岸线与城区边界的问题,基于开源非结构化网格水动力模型 FVCOM 与管渠水动力模型 SWMM,构建了实时双向动态耦合模型 FVCOM-SWMM。通过与商业软件和物理模型试验结果的对比,验证了该模型的可靠性;具有曲折海岸线和复杂建筑轮廓的海滨城区雨潮遭遇情景的模拟结果表明,该模型可以用于风暴潮影响下具有复杂边界城区的洪涝过程模拟。

关键词:地表水流;管网水流;潮流;非结构化网格;FVCOM;SWMM;动态耦合

Development of a bidirectional dynamic coupled surface water flow and pipe network flow model based on unstructured grids//Chen Tongqing^{1,2}, Chen Jiayu^{1,2}, Wang Mingna^{1,2}, Zhang Qinghe^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: To address the issue that current coupled surface water flow and pipe network flow models are mostly based on structured grids, making it difficult to adapt to complex coastlines and urban boundaries, a real-time bidirectional dynamic coupling model, FVCOM-SWMM, was developed based on the open-source unstructured-grid hydrodynamic model FVCOM and the pipe network hydrodynamic model SWMM. The reliability of the proposed model was verified by comparing its results with those from commercial software and physical model experiments. The simulated results of a rain-tide coincident event in a coastal urban area with tortuous coastlines and complex building layouts show that the model can be used to simulate flooding processes in urban areas with complex boundaries under storm surge conditions.

Key words: surface flow; pipe network flow; tidal current; unstructured grids; FVCOM; SWMM; dynamic coupling

在全球气候变化加剧的背景下,城区容易发生内涝灾害,城区内涝的相关研究一直广受关注^[1-4]。城区的排水管网是防洪排涝系统的重要组成部分^[3],在内涝过程中,地表水形成的水流和地下管网中的水流存在显著的交互影响。一方面,地表水流通过检查井等位置进入地下管网从而降低了地表水的局部深度,另一方面,当排水管网承载能力不足时,管网中的水体会从某些检查井向上流出从而影响地表水流。二者的相互作用是防洪减灾分析系统中需体现的重要物理过程^[5]。

除理论分析、模型试验外,数值模拟是研究城区泛洪过程中地表水流与管网水流耦合作用的重要手段^[6]。数值模型中的地表水流与管网水流的耦合作用主要采用离线单向耦合和动态双向耦合两种方式模拟。离线单向耦合通常只考虑管网水流对地表

水流的单向作用,即水流可从检查井处溢流到地表,而不能重新回流到管网^[5-11]。随着数值模拟技术的进步,采用动态双向耦合模型已成为模拟地表水流与管网水流耦合作用的发展趋势^[10]。在动态双向耦合方法中,为了准确模拟出地表水流和管网水流的耦合作用,模型中地表水流和管网水流两模块在计算过程中通过交换相关数据实现双向耦合^[12]。

动态耦合模型所采用的网格可分为规则排列的结构化网格和不规则排列的非结构化网格两类,其中结构化网格模型对街区形状规则、排列整齐的城区具有较好的模拟效果^[11-17]。曾照洋等^[11]将 SWMM(storm water management model)与 LISFLOOD 模型耦合,取得了较好的城区泛洪过程模拟效果。Jamali 等^[14]提出了一种基于元胞自动机方法的快速洪水淹没模型,曾照洋等^[15]耦合了 SWMM 和

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2601100)

作者简介:陈同庆(1980—),男,副教授,博士,主要从事海岸水动力与内涝研究。E-mail: tqchen@tju.edu.cn

WCA2D(water cellular automata 2D)模型,在特定的区域均取得了不错的模拟效果。以往的研究主要采用结构化网格模型,但当建筑物边界排列不规则,城区边界曲折变化时,规则网格较难描述复杂变化的边界。例如,海岸附近的城区由于曲折变化的海岸线,城区边界通常较为复杂。对于地表水流计算边界较复杂的情况,采用非结构化的网格可以较好地刻画边界的变化,因此采用非结构化网格模型对地表水流与管网水流的耦合作用进行模拟更具优势^[1]。

目前基于非结构化网格的地表水流和管网水流耦合模型较少,主要是部分商业软件^[18-20],如 MIKE FLOOD、Info Works ICM、PCSWMM 等,有必要基于开源程序开发基于非结构化网格的地表水流与管网水流的动态耦合模型。为此,本文基于开源海岸与海洋水动力模型 FVCOM (finite-volume coastal ocean model) 和水文水动力模型 SWMM,开发了地表水流和管网水流双向动态耦合模型 FVCOM-SWMM,并利用已有资料对模型的合理性进行了验证与分析。

1 耦合模型的建立

1.1 SWMM 管网水动力模型及产汇流模型

管网水动力模型基于 SWMM 开发,SWMM 采用一维圣维南方程构建,控制方程包括连续性方程和动量方程。

采用 SWMM 地表产汇流模块对产汇流进行计算。在实际城区的计算中将区域划分为子汇水区,依其特性单独计算净雨与地表汇流,并假定子汇水区产流量流入特定管网节点。各子汇水区可分为透水、有注蓄量不透水、无注蓄量不透水三部分计算产汇流。

1.2 FVCOM 地表水动力模型

地表水流模型基于 FVCOM 构建。FVCOM 最早由麻省大学陈长胜博士与伍兹霍尔海洋研究所的 Beardsley 博士合作开发,源代码开源至今仍在不断升级中。FVCOM 在近岸水动力与城市内涝方面有较好的应用^[21-22]。FVCOM 采用有限体积法离散求解控制方程,利用 MPI 实现高效的并行计算。在求解时,垂向采用 σ 坐标以实现底部地形的平滑处理。

1.3 动态耦合方法

关于地表水流和管网水流交换过程的计算,目前已有多种交换计算方法^[1,23],如常用的检查井简化法、雨水口法、雨水口-检查井法。检查井简化法^[23]不用考虑雨水口的具体位置、数量以及水流在雨水口的详细流动过程,通过检查井将地表水流和管网水流联系起来,大大降低了计算的复杂性^[23]。相比于其他方法,检查井简化法不需要详细的雨水口尺寸、形状、连接方式等数据,只关注检查井之间

的管道连接和基本参数(如管径、管长、坡度等)。本文采用检查井简化法表征地表水流和管网水流的交换过程,耦合物理过程如图 1 所示。管网内水头较小时,地表水流从检查井处流入管网,管网内水头较大时,水流从检查井流出汇入地表水流。首先需对 FVCOM 和 SWMM 两个模型的控制方程进行修改。为考虑地下管网对地表水流的影响,需在 FVCOM 连续性方程中增加质量源项,连续性方程改为如下形式:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}H)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}H)}{\partial y} = Q_{sur} \delta_{sur} \quad (1)$$

式中: \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向的垂向平均速度分量; η 为水位; H 为考虑水位变化的总水深; t 为时间; Q_{sur} 为从地下管网检查井节点溢流的流量; δ_{sur} 为狄利克雷函数,节点溢流状态下取值为 1,泄流状态下取值为-1,既不溢流也不泄流状态下取值为 0。

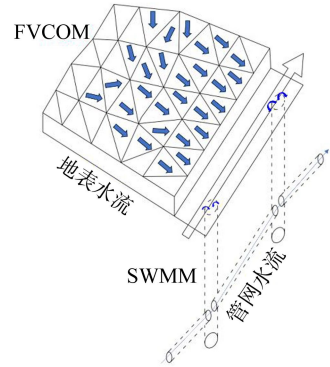


图 1 FVCOM 和 SWMM 耦合物理过程

为体现管网水流与地表水流的流量交换,SWMM 中节点处的流量守恒方程改写为:

$$A_j \frac{\partial \eta_j}{\partial t} = \sum_k Q_{pk} + Q_1 - \delta_{sur} Q_{sur} \quad (2)$$

式中: A_j 为检查井节点 j 的截面面积; η_j 为检查井节点 j 的当前水位; Q_{pk} 为连接该检查井节点的第 k 条管渠入流的流量; Q_1 为外部自定义添加的入流量。

对于地表水流与管网水流的交换流量,目前相关研究主要采用堰流或孔口出流公式进行计算。根据 Shi 等^[1]的计算方法,对于检查井处的交换流量,通过比较管网检查井位置处的水头和该检查井处地表水流的水头进行计算:

$$Q_{exc} = c_0 A_c \sqrt{2g |H_1 - H_2|} \quad (3)$$

其中 $H_1 = D_1 + Z$ $H_2 = D_2$
式中: Q_{exc} 为检查井处的交换流量; c_0 为流量系数; A_c 为检查井有效过流面积; H_1 、 H_2 分别为网格单元平均水头和检查井节点水头; D_1 、 D_2 分别为地表水深和检查井内水深; Z 为地表高程。

在程序实现上,将经过改写的 FVCOM 作为主

程序,将 SWMM 作为子程序供主程序调用,形成耦合模型 FVCOM-SWMM。在需要耦合的时间步,两个模型交换数据实现动态实时耦合。FVCOM 将计算得到的流量 Q_{exc} 传递给 SWMM,SWMM 将当前时间步长的检查井节点水头 H_2 传递给 FVCOM,如图 2 所示(图中 T_{C_n} 代表第 n 个耦合时间步, Δt_s 为 SWMM 计算时间步长, Δt_f 为 FVCOM 计算时间步长)。因为 SWMM 的管网水动力计算时间步长一般均大于 FVCOM 的地表水动力计算时间步长,所以可选取二者计算时间步长的公倍数作为耦合时间间隔。

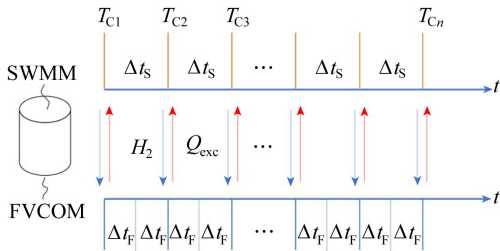


图 2 FVCOM 和 SWMM 耦合中的数据交互

根据地表水流与管网水流的不同状态,将地表水流与管网水流交互的状态分为如图 3 所示的 6 种,水流交互状态如下:①当 $D_1 > 0$ 时,若 $H_2 > Z$ 且 $H_2 > Z + D_1$,则交互状态为检查井出流;若 $H_2 > Z$ 且 $H_2 = Z + D_1$,则交互状态为既不入流也不出流;若 $H_2 > Z$ 且 $H_2 < Z + D_1$,则交互状态为检查井入流;若 $H_2 \leq Z$,则交互状态为检查井入流。②当 $D_1 = 0$ 时,若 $H_2 \leq Z$,则交互状态为既不入流也不出流;若 $H_2 > Z$,则交互状态为检查井出流。耦合程序实现的计算流程如图 4 所示。

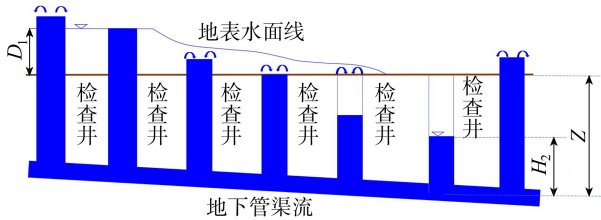


图 3 地表水流与管网水流交互状态示意图

2 模型验证与应用

2.1 理想案例验证

采用某理想的管网系统^[24]对本文构建的 FVCOM-SWMM 耦合模型进行验证。如图 5 所示(图中 D 为直径; L 为长度; n 为地表曼宁系数; H_0 为初始水深),管网系统由 6 个节点和 6 根管道组成,地表区域为边长为 200 m 的闭合方形区域,该区域覆盖管网的节点 J2、J3、J4、J5,在这 4 个节点处地表水流与管网水流存在交互耦合,即管网通过这 4 个节点与地表进行水流交换。J1 为管网的入流节

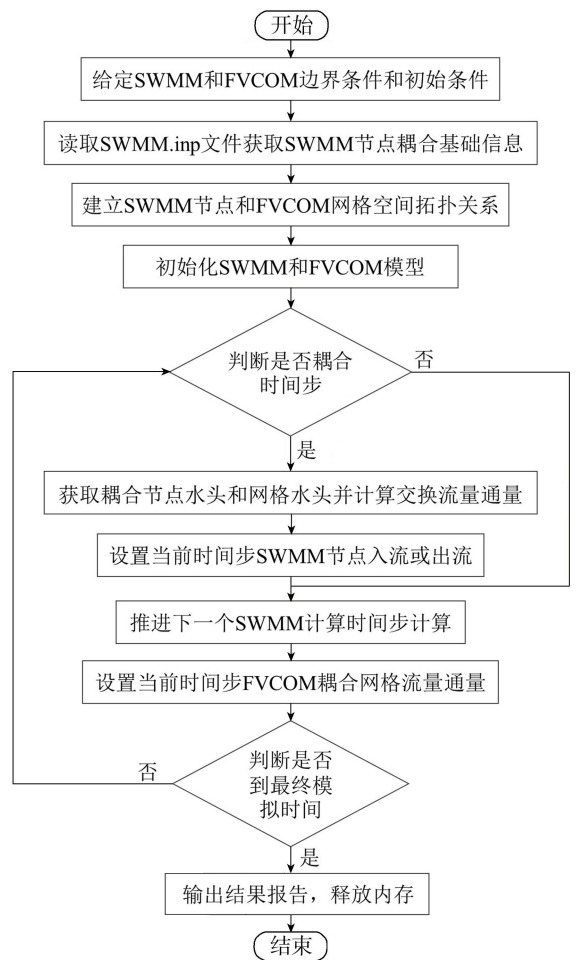


图 4 FVCOM 和 SWMM 耦合程序实现的计算流程

点, J6 为出流节点,地表高程统一为 0 m,地表曼宁系数取值为 0.025,管道的曼宁系数取为 0.013,地表网格大小为 4 m。管道底端与检查井的底端平齐。SWMM 中不设置子汇水区。水流通过节点 J1 进入管网系统,在 J2 处发生溢流,溢流到地表的水从 J3、J4、J5 回流到管网系统。模拟开始的 10 min 之内,节点 J1 的流量从 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。系统初始设置为无水,即管网内部和地表水体在初始时刻水深均为零。

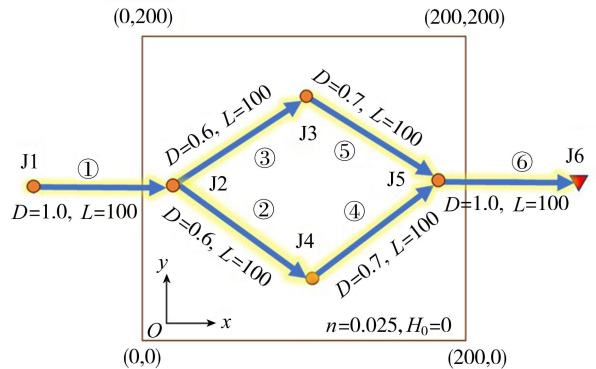


图 5 算例设置示意图(单位:m)

采用 FVCOM-SWMM 耦合模型对该算例进行计算,总模拟时长为 48 h,将模拟稳定后的结果与文

献[24]采用 Info Works ICM 商业软件模拟的结果进行对比,结果如表 1 和表 2 所示,两者的误差均在 10%以内,该差异可能是由于不同的网格划分以及模型算法之间的差异引起的,同时采用的流量公式的经验系数取值也会导致不同模型之间的差异。图 6 为排放口流量过程曲线,可以看出排放口流量在初期急速上升,而后缓慢上升,最后会稳定在 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 1 稳定状态时节点水位

节点编号	模拟水位/m		绝对差值/m	相对误差/%
	Info Works ICM	FVCOM-SWMM		
J1	1.500	1.590	0.090	5.66
J2	1.396	1.416	0.020	1.41
J3	0.991	1.061	0.070	6.60
J4	0.990	1.061	0.071	6.70
J5	0.779	0.860	0.081	9.42

表 2 稳定状态时管道流量

节点编号	模拟流量/ (m^3/s)		绝对差值/ (m^3/s)	相对误差/%
	Info Works ICM	FVCOM-SWMM		
J1	1.000	1.000	0.000	0.00
J2	0.413	0.445	0.032	7.19
J3	0.413	0.445	0.032	7.19
J4	0.471	0.478	0.007	1.46
J5	0.472	0.478	0.006	1.26
J6	1.000	0.990	-0.010	-1.01

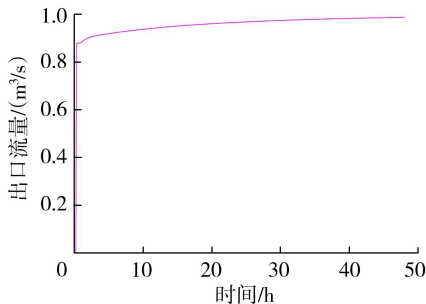


图 6 排放口流量过程线

图 7 为 45 min 和 105 min 时的地表水流流场,在模拟的初期阶段,J2 节点开始在地表发生溢流,地表水流经过一段时间后到达节点 J3、J4 和 J5 位置处,此时地表水位较检查井水位高,故而发生入流,初期阶段 J2 节点的溢流量大于 J3、J4 和 J5 节点入流量,地表水位缓慢上升。流场约到 24 h 后达到动

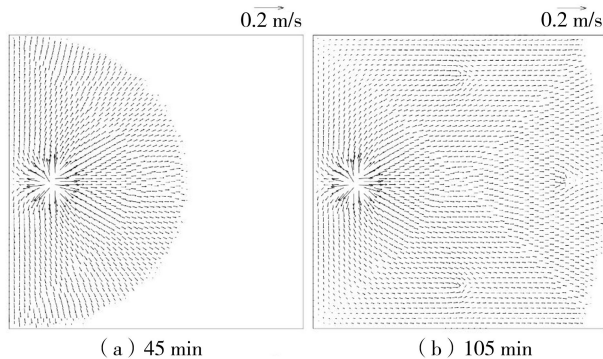


图 7 不同时刻地表水流流场

态平衡,即在每一个时间步计算中 J2 节点的出流量等于 J3、J4 和 J5 节点入流量之和。综上所述,FVCOM-SWMM 耦合模型可合理地反映地表水流与管网水流交互的物理过程。

2.2 物理模型验证

采用 Rubinato 等^[25]地表水流与管网水流交互的物理试验数据对 FVCOM-SWMM 耦合模型进行验证。模型布置示意图见图 8,试验水槽长宽分别为 8 m 和 4 m,坡度为 1 : 1 000,距离上游边界中点 2.5 m 处有一开放的检查井,截面形状为圆形,内径为 240 mm,检查井下连接内径为 75 mm 的圆形管渠,水槽底部距离管渠底部 478 mm,距离检查井中心 480 mm 的上游位置处布置了水头压力计,试验的具体布置形式见文献^[25]。水槽的糙率取为 0.02,管渠糙率为 0.009。水槽和管渠内初始水深为零。数值模拟中,地表水流下游边界和排水系统下游出口边界为自由出流边界,上游为恒定入流边界。

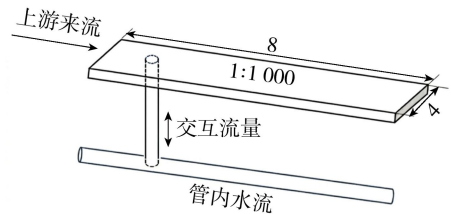


图 8 物理模型布置示意图(单位:m)

通过计算不同上游来流流量的情况,将地表水流的水深和地表水流与管内水流交互流量的模拟值与试验值进行了比较,结果如表 3 所示。从表 3 可知,测点水深和交互流量的模拟值与试验值误差均在 $\pm 4.5\%$ 以内。随着上游来流流量逐渐增大,水槽水流稳定时,测点水深逐渐增大,交互流量也随之增大。上述结果表明,FVCOM-SWMM 耦合模型模拟结果与试验结果吻合较好。

表 3 稳定状态时物理试验与数值模拟结果对比

弗劳德数	测点水深/mm		交互流量/ (L/s)	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
0.666	7.7	7.7	0.69	0.67
0.674	8.8	8.9	0.88	0.84
0.685	9.7	9.8	1.06	1.03
0.691	10.4	10.1	1.15	1.11
0.691	11.0	11.1	1.25	1.23

2.3 海滨城区实例验证

2.3.1 研究区概况

以典型海滨城区琅岐岛山语城区洪涝模拟为例来验证 FVCOM-SWMM 耦合模型在实际海滨城区雨潮遭遇情景下的性能。如图 9 所示,琅岐岛位于闽江入海口处,闽江口属于强潮河口,该地区的潮汐类型为正规半日潮,平均潮差约为 4.1 m,潮差大,历

史上水文灾害较严重,尤其是洪水和风暴潮给琅岐岛地区带来了巨大的灾害损失。

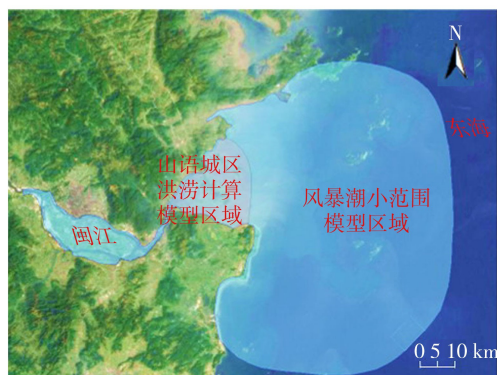


图9 山语城区示意图

2.3.2 模型构建

将 FVCOM-SWMM 耦合模型应用于具有曲折海岸线和建筑物排列较为不规则的琅岐岛山语城区,对特大风暴潮和极端降雨条件下城区的洪涝进行模拟分析。9608 台风经过研究区域附近时,福建当地验潮站出现千年一遇极值潮位,选取此次风暴潮作为计算条件。降雨选择 100 年一遇设计降雨条件,采用《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》中历时降雨强度公式进行计算。

采用大小模型嵌套的方式对风暴潮和城区洪涝进行模拟。风暴潮计算的大范围与小范围模型网格如图 10 所示,大范围模型的开边界潮位从全球潮汐模型获取,小范围模型水位边界条件从大范围模型计算结果中获取,两个模型水平方向网格采用单元为三角形的非结构化网格。山语城区洪涝地表水流模拟计算网格也采用单元为三角形的非结构化网格,如图 11 所示,最小网格单元的边长为 2m。山语城区洪涝计算的水位边界条件从风暴潮模拟的小范围模型模拟结果中获取。山语城区洪涝模拟计算时,右侧为高程较高的区域,计算中设置为固边界(图 11(b))。计算中台风采用 ERA5 再分析风场叠加 Jelesnianski 经验风场进行模拟^[1]

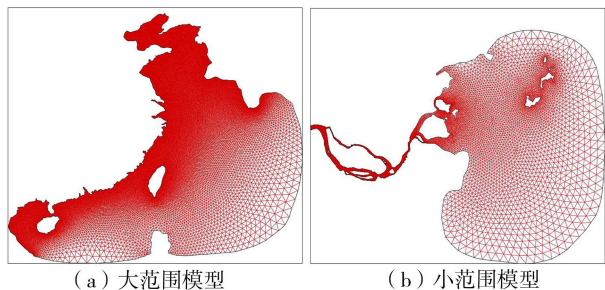


图10 风暴潮计算模型网格

模型水平和垂直方向的耗散系数分别取值为 0.4 和 10^{-6} ,底部的粗糙特征长度为 0.5 mm。首先对该城区附近水域的风暴潮进行模拟,风暴潮模型

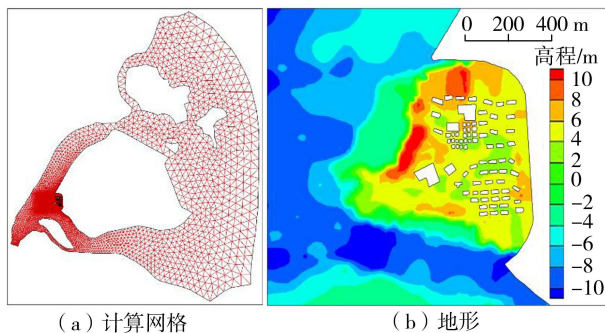


图11 山语城区洪涝计算模型网格与地形

计算时间段为 1996 年 7 月 26 日 8 时至 1996 年 8 月 3 日 8 时^[26],选取两个不同潮位观测站实测水位对风暴潮模型进行验证。

为分析风暴潮模拟的准确性,采用模型模拟结果的纳什效率系数(NSE)和标准化均方根误差(NRMSE)进行评价。水位验证结果如图 12 所示,经计算梅花和埕头两个潮位观测站处模拟水位的 NRMSE 均为 0.12, NSE 分别为 0.85 和 0.84,风暴潮模型水位模拟结果与实测数据吻合良好,可将该水位模拟结果作为山语城区洪涝模拟的边界条件。

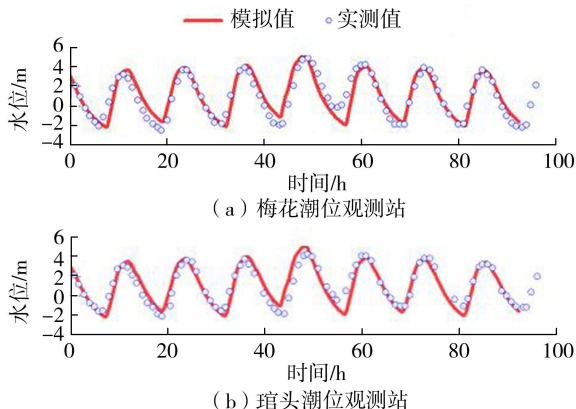


图12 风暴潮期间水位验证结果

由于缺少山语城区的详细管网数据,根据文献[27-29]和 GB 50014—2021《室外排水设计标准》,在城区主要道路中间添加检查井,检查井之间的间隔不超过 90 m,相邻两个检查井之间添加直径 1 m 的圆管,管道糙率为 0.013。按土地利用类型基本分类原则将研究区土地利用分为草地、道路、建筑用地 3 类,不同土地利用类型地块产汇流的洼蓄、下渗等参数按 SWMM 手册取值。山语城区土地利用类型和管网系统分布如图 13 所示。子汇水区划分采用泰森多边形方法,通过 GIS 处理计算得到不同子汇水区的 SWMM 模型参数如下:管道曼宁参数 0.013,不透水区曼宁系数 0.018,透水区曼宁系数 0.100,不透水区洼地蓄水深度 2 mm,透水区洼地蓄水深度 5 mm,无洼蓄不透水区占比 25%,最大下渗率 68 mm/h,最小下渗率 0.5 mm/h,衰减系数 4 h^{-1} 。

根据风暴潮模型模拟的潮位及风暴潮增水过程,台风登陆期间的风暴潮增水幅度达到最大,故选取台风登陆时段作为山语城区洪涝模拟时段,即 1996 年 8 月 1 日 8 时至 1996 年 8 月 1 日 20 时。

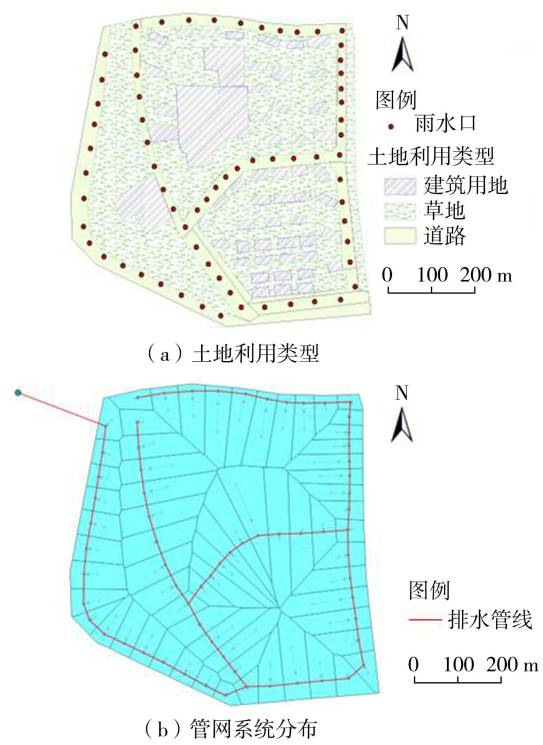


图 13 山语城区土地利用类型与管网系统分布

2.3.3 结果与分析

在特大风暴潮和 100 年一遇降雨条件下,降雨历时及近岸潮位变化过程如图 14 所示,山语城区不同时刻水深如图 15 所示(图中白色代表该区域此时没有地表水)。模拟开始后的 3 h 内,随着近岸潮位的上升,山语城区产生大量的积水,积水最大深度可达 2 m 以上。由于风暴增水较大,潮水漫滩进入城区,叠加极端降雨的影响,地势较低的城区出现了大面积的洪涝灾害。随着台风过境,产生漫滩的水量逐渐减少,城区积水深度和积水面积逐渐减小。由图 14 可知,降雨的峰值出现在 8 h 左右,而城区未出现明显的管网溢流,可能是由于 FVCOM-SWMM 耦合模型计算中采用的管径较大,管网的排水能力较大。由管道内水深变化结果(图 16(b))

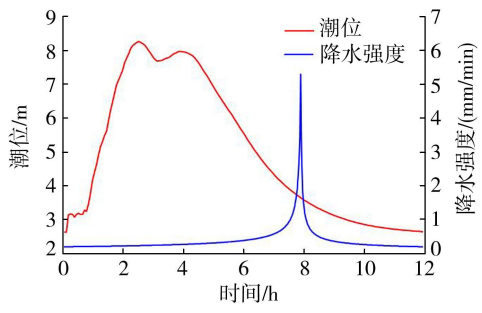


图 14 降雨历时及近岸潮位变化过程

可以看出,降雨峰值到来后,受降雨影响,管道内充满水,降雨减弱后,管道内水量减少。

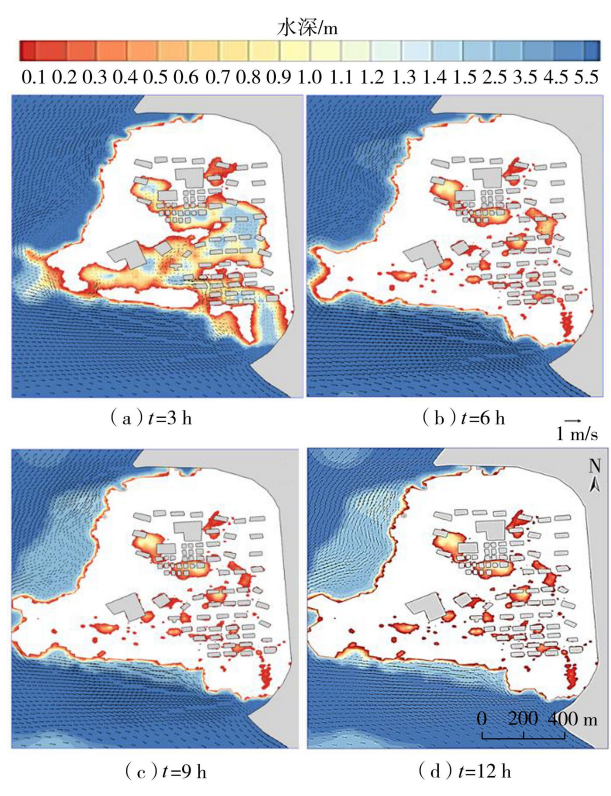
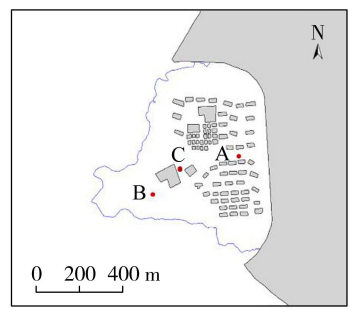
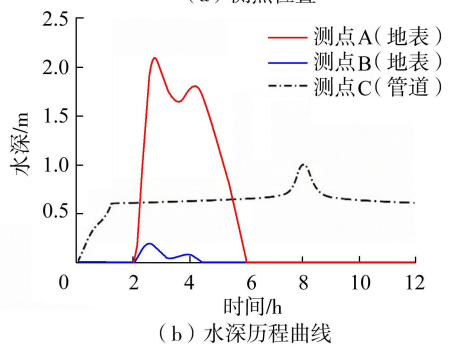


图 15 山语城区水深模拟结果

为分析不同位置处的洪涝淹没水深过程,选取城区内部测点 A、近海岸测点 B 对水深进行模拟分析。测点 A、B 位置如图 16(a) 所示,测点 A 位于城区的道路内,测点 B 位于沿海堤的公路中。



(a) 测点位置



(b) 水深历程曲线

图 16 测点水深模拟结果

图 17 为测点 A、B 处排水系统地面水流入流量变化过程曲线。测点 A 处地势较低,测点四周比测

点位置地势高。从图 16(b)和图 17 可以看出,测点 A 处水深从 2h 时开始上升,且随着风暴潮漫滩及降雨的影响,该处积水不断累积,最大水深可达 2.1 m,对城区影响较大;6h 时由于城区排水系统的作用,测点 A 处水深下降到 0。测点 A 水深变化过程出现两个峰值,这与风暴潮潮位的变化特性相关。测点 A 处积水过程持续约 4 h。

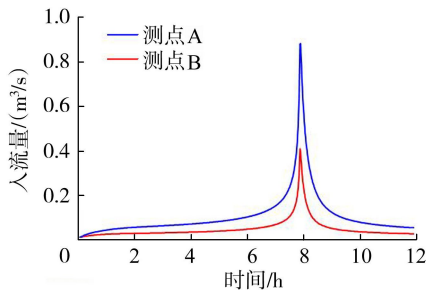


图 17 排水系统地面水流入流量变化曲线

测点 B 位于海岸附近,该地区高程从外海向内陆地区逐渐增大,地势的影响加上地下排水系统的作用,该处排涝较为顺畅,如图 16(b)所示,测点 B 处积水水深最大仅为 0.18 m,且积水持续时间相比于测点 A 处缩短了近一半。

通过以上分析可以看出,FVCOM-SWMM 耦合模型模拟结果可以合理地反映风暴潮和降雨影响下的城区洪涝过程。

3 结 语

利用开源海洋水动力模型 FVCOM 和管网水动力模型 SWMM 开发了基于非结构化网格的地表水流和管网水流双向动态耦合模型 FVCOM-SWMM,该模型基于非结构化网格,通过修改 FVCOM 和 SWMM 的控制方程,增加右端源项,采用双向实时耦合的方式,实现了地表水动力模型和管渠水动力模型的实时动态双向数据交换。理想案例中,FVCOM-SWMM 耦合模型计算稳定后的节点水位和管道流量结果与商业软件 Info Works ICM 模拟结果相对误差在 10%以内;对于物理模型试验,FVCOM-SWMM 耦合模型的计算结果与测点水深及交互流量试验结果误差均在 $\pm 4.5\%$ 范围之内,表明 FVCOM-SWMM 耦合模型能够准确模拟排水管网与地表水流的耦合作用。对具有曲折海岸线和复杂建筑轮廓的海滨城区特大风暴潮和 100 年一遇降雨条件下的城区洪涝模拟结果表明,FVCOM-SWMM 耦合模型能够合理模拟风暴潮影响下具有复杂边界城区的洪涝过程。

本文主要工作为基于非结构化网格开发地表水流与地下管网水流双向动态耦合模型,算例验证未

考虑风暴潮潮位峰值与降雨峰值同时出现的情况,也未深入探讨管网排水能力对城区内涝的影响,可在后续的研究中进一步探讨。

参考文献:

- [1] Shi Shaoyu, Yang Bo, Jiang Wensheng. Numerical simulations of compound flooding caused by storm surge and heavy rain with the presence of urban drainage system, coastal dam and tide gates: a case study of Xiangshan, China [J]. Coastal Engineering, 2022, 172: 104064.
- [2] Geng Yanfen, Mao Jiandong, Wang Zhili, et al. Analysis of interaction between surface and sewer pipe system based on computational fluid dynamics [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2020, 36(2): 198-205.
- [3] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等.基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 41-47. (Hou Jun, Chen Cheng, Zheng Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))
- [4] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等.基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (Song Yun, Li Qiongfang, Niu Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [5] Seyoum S D, Vojinovic Z, Price R K, et al. Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(1): 23-34.
- [6] Mignot E, Li Xuefang, Dewals B. Experimental modelling of urban flooding: a review [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 334-342.
- [7] 徐宗学,卢兴超,施奇妙.城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [8] 王兆礼,陈昱宏,赖成光.基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124. (Wang Zhaoli, Chen Yuhong, Lai Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))

- [9] 张弘强. 暴雨积水水动力耦合模型研究及应用[D]. 天津:天津大学,2019.
- [10] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 137-144. (Hu Weixian, He Wenhua, Huang Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 137-144. (in Chinese))
- [11] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77. (Zeng Zhaoyang, Wang Zhaoli, Wu Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese))
- [12] Leandro J, Martins R. A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5. 1 based on dynamic link libraries [J]. Water Science & Technology, 2016, 73(12): 3017-3026.
- [13] 银雅伦,侯精明,李欣怡,等. GAST-SWMM 耦合数值模型在大尺度城区致涝风险评估中的应用[J]. 环境工程, 2024, 42(4): 82-90. (Yin Yalun, Hou Jingming, Li Xinyi, et al. Application of GAST-SWMM coupled numerical model in large-scale urban inundation risk assessment[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(4): 82-90. (in Chinese))
- [14] Jamali B, Bach P M, Cunningham L, et al. A cellular automata fast flood evaluation (CA-ffé) model[J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 4936-4953.
- [15] 曾照洋,赖成光,王兆礼,等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38. (Zeng Zhaoyang, Lai Chengguang, Wang Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))
- [16] Liang Dongfang, Falconer R A, Lin Bingliang. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1/2): 147-158.
- [17] Hsu M H, Chen S H, Chang T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(1/2): 21-37.
- [18] Bisht D S, Chatterjee C, Kalakoti S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study[J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 749-776.
- [19] 封天雨,雷晓辉,王家彪,等. 基于 Infoworks ICM 模型的沿海城市暴雨内涝分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(6): 64-68. (Feng Tianyu, Lei Xiaohui, Wang Jiabiao, et al. Analysis of rainstorm waterlogging in coastal cities based on Infoworks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(6): 64-68. (in Chinese))
- [20] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (Fu Chun, Fu Yaozong, Xiao Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))
- [21] Tan Yuqing, Cheng Qiming, Lyu Fengwei, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: a case in university campus [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119599.
- [22] 魏书仪,刘非,袁绍春,等. 基于 SWMM 和 FVCOM 模型的城市多级排水系统改造模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(12): 29-39. (Wei Shuyi, Liu Fei, Yuan Shaochun, et al. Simulation study of urban multistage drainage system modification based on SWMM and FVCOM model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(12): 29-39. (in Chinese))
- [23] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 244-255. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 244-255. (in Chinese))
- [24] 陈文杰. 城市洪涝水文水动力模型构建与洪涝管理关键问题研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [25] Rubinato M, Martins R, Kesserwani G, et al. Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 421-432.
- [26] 孙永钊. 闽江口台风风暴潮危险性分析研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2022.
- [27] Jang J H, Chang T H, Chen Weibo. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation [J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 168-180.
- [28] Bazin P H, Nakagawa H, Kawaike K, et al. Modeling flow exchanges between a street and an underground drainage pipe during urban floods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(10): 04014051.
- [29] Dong Boliang, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles [J]. Science of the Total Environment, 2022, 827: 154098.

(收稿日期:2025-02-23 编辑:熊水斌)

纳米添加剂对触变泥浆减阻效果影响的试验研究

金棋武¹, 杨 讷², 夏 伟², 张 军², 陈 超^{3,4}, 陈超维^{3,4}, 王 伟^{3,4}

(1. 浙江省水利水电工程质量与安全中心; 2. 浙江省水电建筑安装有限公司;

3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 4. 河海大学岩土工程科学研究所)

摘要:为寻找能有效提升引水工程顶管施工中触变泥浆减阻效果的纳米添加剂,设计了三因子五水平正交试验以获得适用于实际工程的触变泥浆最优配合比,并在此基础上进行缩尺物理模型试验以探究不同纳米添加剂对泥浆减阻效果的影响。结果表明:膨润土含量对泥浆黏度、滤失量和泥皮厚度有极大影响,CMC含量对泥浆滤失量和黏度影响较大,碳酸钠含量主要提高泥浆的pH值,对其黏度和滤失量也略有影响,选取质量分数为10%的膨润土、0.3%的CMC和0.32%的碳酸钠作为触变泥浆最优配合比;纳米添加剂的减阻效率大致在0.4~0.6之间,随着管土间压强增大,添加剂减阻效率有所降低;涂抹凡士林后管片变得光滑,其受到的摩擦力和管土黏聚力均有所降低;纳米碳粉和纳米氧化锌可降低管土间摩擦系数,所有纳米材料均可降低管土黏聚力,在实际引水工程中,可优先考虑将纳米氧化锌作为添加剂使用。

关键词:触变泥浆; 纳米添加剂; 减阻; 正交试验; 顶管施工

Experimental study on effect of nano-additives on drag reduction performance of thixotropic slurry//Jin Qiwu¹, Yang Ne², Xia Wei², Zhang Jun², Chen Chao^{3,4}, Chen Chaowei^{3,4}, Wang Wei^{3,4}(1. Zhejiang Provincial Water Resources and Hydropower Engineering Quality and Safety Management Center; 2. Zhejiang Hydropower Construction and Installation Co., Ltd.; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University; 4. Geotechnical Research Institute, Hohai University)

Abstract: In order to identify nano-additives that can effectively enhance drag reduction performance of thixotropic slurry used in pipe jacking construction of water diversion projects, an orthogonal test with three factors and five levels was designed to obtain an optimal slurry formulation suitable for engineering practice. On this basis, reduced-scale physical model tests were conducted to investigate the effects of different nano-additives on the slurry's drag-reduction performance. The results show that the bentonite content has a significant influence on the slurry's viscosity, fluid loss, and filter-cake thickness, the CMC content greatly affects fluid loss and viscosity, and the sodium carbonate content mainly increases the slurry's pH value, while only slightly affecting viscosity and fluid loss. Consequently, the optimal formulation was determined as 10% mass fraction of bentonite, 0.3% of CMC, and 0.32% of sodium carbonate. The friction reduction efficiency of the nano-additives is generally within 0.4 to 0.6 and decreases with increasing contact pressure between the pipe and soil. After applying petroleum jelly, the pipe surface becomes smoother, and both the friction force and pipe-soil cohesion are reduced. Nano carbon powder and nano zinc oxide can reduce the pipe-soil friction coefficient, and all nano-materials can reduce pipe-soil cohesion. For practical water diversion projects, nano zinc oxide is recommended as a preferred additive.

Key words: thixotropic slurry; nano-additive; drag reduction; orthogonal test; pipe jacking construction

为解决区域性缺水问题,优化水资源“南北调配、东西互济”格局,2023年印发的《国家水网建设规划纲要》明确提出将跨流域引调水工程列为国家水网建设核心任务。然而,随着引水工程规模不断扩大,面对生态环境敏感且需穿越河流湖泊水域或既有设施区域的复杂地段,传统施工方法已无法满

足工程需求^[1]。相较于明挖法、盾构法等地下开挖方法,顶管施工可避免大规模的土方开挖,对周围环境影响较小,且工期短、造价低、地层条件适应性强,在引水工程中得到广泛应用^[2]。但在长距离或复杂地层顶进过程中,管土界面摩擦持续累积,可能诱发“整体背土效应”^[3],进而威胁施工稳定性和工程

安全,因此如何有效控制管土界面摩阻成为顶管施工的关键问题。

触变泥浆由膨润土、水和化学处理剂混合而成,在静置和受扰动条件下分别呈凝胶和溶胶状态,这种独特的触变性使其被广泛应用于顶管施工中。在管节顶进过程中,触变泥浆作为润滑剂被压入管节与土层之间,将管土间的干摩擦转变为湿摩擦,大大减小了管节所受摩阻力,能有效降低背土效应对工程安全的影响^[4]。同时,在注浆压力作用下,触变泥浆向地层中渗透和扩散,逐步形成相对密实的泥浆套,对土层起到了一定的填补和支撑作用^[5]。但是,目前工程中所用的触变泥浆大多配方简单,仅有最基本的膨润土和水,减阻效果往往达不到预期值,并且对于不同性质的地层其减阻效果差异十分明显。因此,针对特定地层与工况,需要研发相应的减阻性能优良的触变泥浆以满足引水工程安全与高效的需求。

近年来,众多学者对触变泥浆开展了系统研究,取得了丰硕的成果。例如:刘招伟等^[6]针对不同覆土压力和浆土混合比例,利用自行设计的试验台架对触变泥浆在砂质土和黏性土两种地层条件下的减阻效果和浆液扩散半径进行了模拟试验,发现提高黏土含量会降低泥浆减阻效果;王明胜等^[7]对触变泥浆进行了一系列性能测试,以研究不同组分含量对泥浆性能的影响,并结合现场地层条件确定了泥浆最优配合比,根据现场实测数据得出泥浆的减阻效果达到50%以上;张雪等^[4]通过正交试验优选出触变泥浆的最优配合比,开展模型试验研究了泥浆的减阻性能,并结合电镜扫描试验结果分析了泥浆的微观结构和减阻机理,发现各组分含量都会影响泥浆性能。总体而言,现有研究多聚焦于膨润土、碳酸钠等常规材料体系内的配合比优化,主要改善泥浆黏度、滤失量等指标,而管土界面在高压、长时程条件下的边界润滑能力仍受材料本身性质制约,导致减阻性能存在材料上限^[8-9]。因此,将具备特殊润滑特性的材料作为添加剂加入触变泥浆中以提高泥浆的减阻效果将成为突破泥浆性能上限的关键。

目前,在润滑与减摩领域,纳米材料常被作为添加剂广泛用于提升水基或油基润滑介质的润滑效果,并减少物体摩擦损耗^[10-12],其作用机理通常包括在接触界面形成承载摩擦膜、以微滚动降低剪切阻力、对磨损表面起到修复与隔离作用等^[13-14]。相关研究表明,少量纳米添加剂与商用润滑剂复配即可显著提升润滑剂的减摩性能^[15],并已被拓展至钻井液等复杂流体体系以提升其减阻润滑能力^[16]。然而,与常规润滑液相比,顶管触变泥浆具有高固相、触变结构明显且需长时间静置等特点,纳米材料在其中的分散稳定性、团聚沉降风险及其在管土界

面上的有效作用方式仍缺乏面向工程的定量验证。因此,有必要结合典型顶管压力条件与界面状态,对纳米添加剂在触变泥浆中的减阻效果开展针对性试验研究。

基于上述背景与需求,本文以实际引水工程为依托,采用正交试验对膨润土-碳酸钠-羧甲基纤维素(CMC)体系进行配合比优化,并引入不同类型纳米添加剂以强化界面润滑,以期为特定地层顶管施工提供可复现的泥浆配方与添加剂选型依据。

1 试验原理及方法

1.1 泥浆制备

使用电子秤称取一定量胶质价为100 mL/15 g的膨润土、纯度大于95%的碳酸钠粉末和CMC。首先将膨润土与CMC干混均匀后加入泥浆桶,并加入计量水,以250~350 r/min的转速搅拌15 min,使其充分水化分散,随后将碳酸钠粉末溶解于少量水中配制成碳酸钠溶液,缓慢加入泥浆桶并继续搅拌15 min至均匀。为降低纳米材料团聚沉降风险,纳米添加剂采用先预分散、再掺入的方式加入。采用的纳米材料规格为20~50 nm,首先将称量好的纳米材料边搅拌边加入部分配制用水中,使其完全润湿并得到均匀的纳米分散液,随后倒入泥浆桶中继续搅拌15 min,使其在泥浆体系中充分分散。泥浆搅拌完成后,将其倒入空桶中封闭起来,放置24 h后进行后续试验。考虑触变泥浆在静置条件下可能发生析水或团聚沉降等情况,放置过程中应对泥浆状态进行观察,本文试验条件下未观测到析水或团聚沉降现象。

1.2 试验仪器

试验仪器包括中压滤失仪、量筒、比重计、电子pH计和马氏漏斗,分别用于测定触变泥浆滤失量、析水率、比重、pH值和黏度。此外,搭建缩尺物理模型,配合电子拉力计测定不同条件下管片与地层间的摩阻力。

1.3 试验原理

触变泥浆性能指标主要包括黏度、滤失量和析水率等,不同配合比的泥浆性能差异悬殊,因此本文首先以膨润土、碳酸钠和CMC为基料进行正交配合比试验,研究不同组分对泥浆性能的影响,并根据试验结果提出触变泥浆最优配合比;再进行缩尺物理模型试验,在最优配合比基础上,掺入纳米材料作为润滑添加剂,研究其对触变泥浆减阻润滑作用的提升效果。具体试验流程见图1。

1.4 试验方案

首先进行触变泥浆配合比正交试验^[17],取3种基料膨润土(A)、碳酸钠(B)和CMC(C)的质量分数 w_A 、 w_B 、 w_C 作为影响因子,依据工程常用范围设

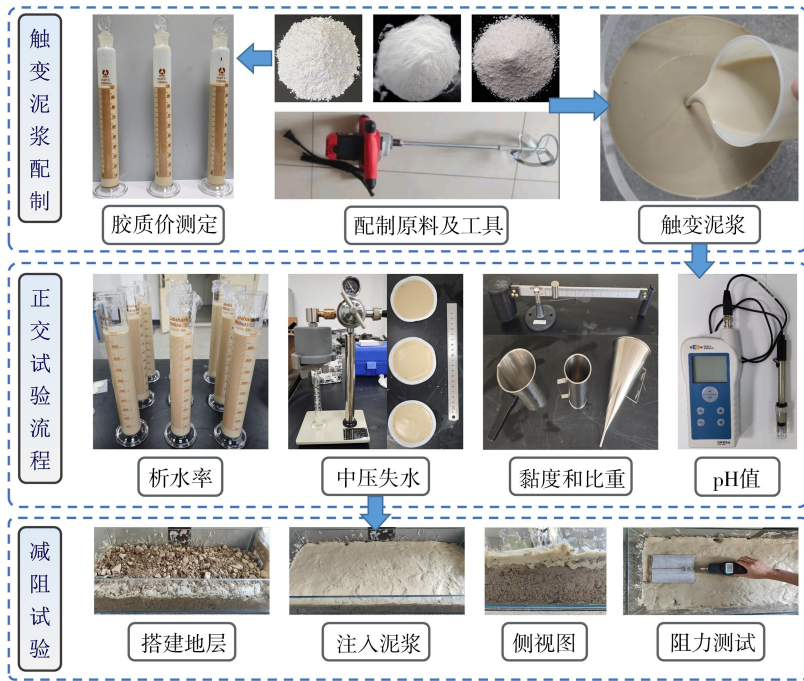


图1 试验仪器及流程

置5个水平^[4,18],具体水平值见表1。

表1 泥浆配合比取值

水平	$w_A/\%$	$w_B/\%$	$w_C/\%$
1	7.50	0.08	0.10
2	8.75	0.16	0.20
3	10.00	0.24	0.30
4	11.25	0.32	0.40
5	12.50	0.40	0.50

正交试验完成后,依据工程需求和规范要求选取泥浆最优配合比,在此基础上统一按0.5%的质量分数分别掺入纳米氧化硅、纳米氧化锌、纳米氧化铝、纳米碳粉和纳米纤维素以提高泥浆减阻润滑效果,并在缩尺物理模型中进行摩阻试验。摩阻试验所选用的混凝土板尺寸为150 mm×150 mm×10 mm。为模拟实际施工中管片涂蜡对减阻效果的影响,试验设置了采用刮刀在混凝土板底部均匀涂抹约2 mm厚的凡士林与不涂抹凡士林的对照工况,并对比了法向荷载为5.0、7.5、10.0 N条件下的摩阻试验结果。

2 触变泥浆配合比试验结果与分析

2.1 试验结果

按表1泥浆配合比基料取值进行三因子五水平正交试验,测试不同配合比泥浆的性能参数,试验结果见表2。本文所选配合比泥浆析水率皆为零,因此不作讨论。在部分组分条件下,泥浆黏度过大,甚至失去流动性,采用马氏漏斗测试时泥浆无法连续流出,导致读数超出该试验适用测量范围,因此不对读数进行记录,在后续极差分析时以1800 s代替读

数结果。

表2 正交试验设计及结果

编号	$w_A/\%$	$w_B/\%$	$w_C/\%$	比重	黏度/s	滤失量/mL	泥皮厚度/mm	pH值
1	7.50	0.08	0.10	1.04	47	11.2	1.0	10.46
2	7.50	0.16	0.20	1.04	59	9.6	1.5	10.61
3	7.50	0.24	0.30	1.04	81	8.4	1.2	10.80
4	7.50	0.32	0.40	1.04	136	7.8	1.5	10.83
5	7.50	0.40	0.50	1.04	206	7.2	1.5	10.90
6	8.75	0.08	0.20	1.05	77	8.8	2.0	10.48
7	8.75	0.16	0.30	1.05	88	8.2	2.0	10.62
8	8.75	0.24	0.40	1.05	129	7.0	1.8	10.72
9	8.75	0.32	0.50	1.05	104	6.8	2.0	10.82
10	8.75	0.40	0.10	1.05	228	10.2	2.0	10.87
11	10.00	0.08	0.30	1.06	82	8.2	2.0	10.38
12	10.00	0.16	0.40	1.06	154	7.2	2.0	10.61
13	10.00	0.24	0.50	1.06	404	7.0	2.0	10.95
14	10.00	0.32	0.10	1.06	1025	10.0	2.0	10.81
15	10.00	0.40	0.20	1.06	60	9.4	2.0	11.00
16	11.25	0.08	0.40	1.07		6.8	2.5	10.58
17	11.25	0.16	0.50	1.07		6.4	2.5	10.99
18	11.25	0.24	0.10	1.07	185	10.0	2.5	11.12
19	11.25	0.32	0.20	1.07	605	8.0	2.5	10.79
20	11.25	0.40	0.30	1.07		7.2	2.5	11.15
21	12.50	0.08	0.50	1.07		6.0	2.0	10.65
22	12.50	0.16	0.10	1.07	669	9.7	2.0	10.64
23	12.50	0.24	0.20	1.07		8.2	1.5	10.80
24	12.50	0.32	0.30	1.07		7.2	1.5	11.12
25	12.50	0.40	0.40	1.07		6.4	1.0	11.18

从表2可以看出,膨润土含量对泥浆比重起决定作用。当膨润土含量为7.5%时,泥浆比重为1.04,随着膨润土含量上升,泥浆比重逐渐增大,当膨润土含量为11.25%时,泥浆比重达到1.07。膨润土的主要成分为蒙脱石,是一种具有高吸水性的

黏土矿物,其颗粒能够吸收并保持大量水分。随着膨润土含量的增加,泥浆中的固体颗粒数量增加,使得泥浆密度增大,比重相应明显增大。其他因子掺量相较于膨润土极小,因此在膨润土含量相同时,其他因子变化对泥浆比重几乎没有影响。其余泥浆参数受不同因子耦合影响,无法直接看出各因子水平对浆液性能影响效果,需进行极差分析。

2.2 各因子水平对泥浆性能影响分析

根据正交试验结果进行极差分析,计算各因子所有水平的加和值和平均值,将各因子水平的平均值绘制成曲面图以直观分析不同因子对泥浆参数的影响效果,如图2所示。由图2可知,膨润土对泥浆各参数均有影响,CMC对泥浆滤失量和黏度影响较大,碳酸钠只对pH值有显著影响。根据平均值计算各因子对泥浆参数的极差(R 值),具体结果见表3。从表3可以看出,随膨润土含量增加,泥浆滤失量明显减小,泥皮厚度明显增大,黏度极大增加,pH值略有上升。膨润土主要矿物成分为蒙脱石,其结构为上下两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体,具有较强的吸湿性和胀缩性。在水中加入少量膨润土后,蒙脱石颗粒在水中分散,悬浮于水中,形成稀疏的网状结构,使浆液具有黏滞性、触变性和润滑性^[19]。膨润土含量上升后,泥浆中固相含量增加,黏土颗粒网状结构变得致密,能有效增大浆液的黏

度并降低滤失量。此外,由膨润土颗粒相互吸附黏结形成的泥皮也随固相含量增加而明显增大。

表3 各因子对泥浆参数的 R 值计算结果

因子	R 值			
	滤失量/mL	泥皮厚度/mm	黏度/s	pH 值
w_A	1.34	1.16	1468	0.224
w_B	3.54	0.24	779	0.126
w_C	0.26	0.20	299	0.510

随 CMC 含量增大,泥浆滤失量极大减少,黏度明显增大,泥皮厚度和 pH 值几乎不变。CMC 是一种易溶于水的高分子化合物,一方面,其分子链上的羧甲基基团能与水分子间形成氢键,在分子间提供相互作用力,从而增加浆液的黏稠度^[20]。另一方面,CMC 能吸附于泥浆表面并形成一层薄膜,可有效减少黏土颗粒间的团聚沉降,从而大大提高膨润土悬浮稳定性,减少泥浆滤失量。

随碳酸钠含量增大,泥浆 pH 值明显上升,黏度略有增大,滤失量略有减小,泥皮厚度几乎不变。碳酸钠是一种常见的碱性无机化合物,在泥浆中水解后与钙离子、镁离子等反应生成沉淀,减少膨润土中杂质对泥浆性能的不利影响^[21],增大泥浆黏度。此外,碳酸钠可改善黏土颗粒的水化性能,使矿物结合更多自由水,从而促进膨润土在水中分散形成泥浆,并降低浆液滤失量。

在实际工程中,需根据地层条件选用不同配合

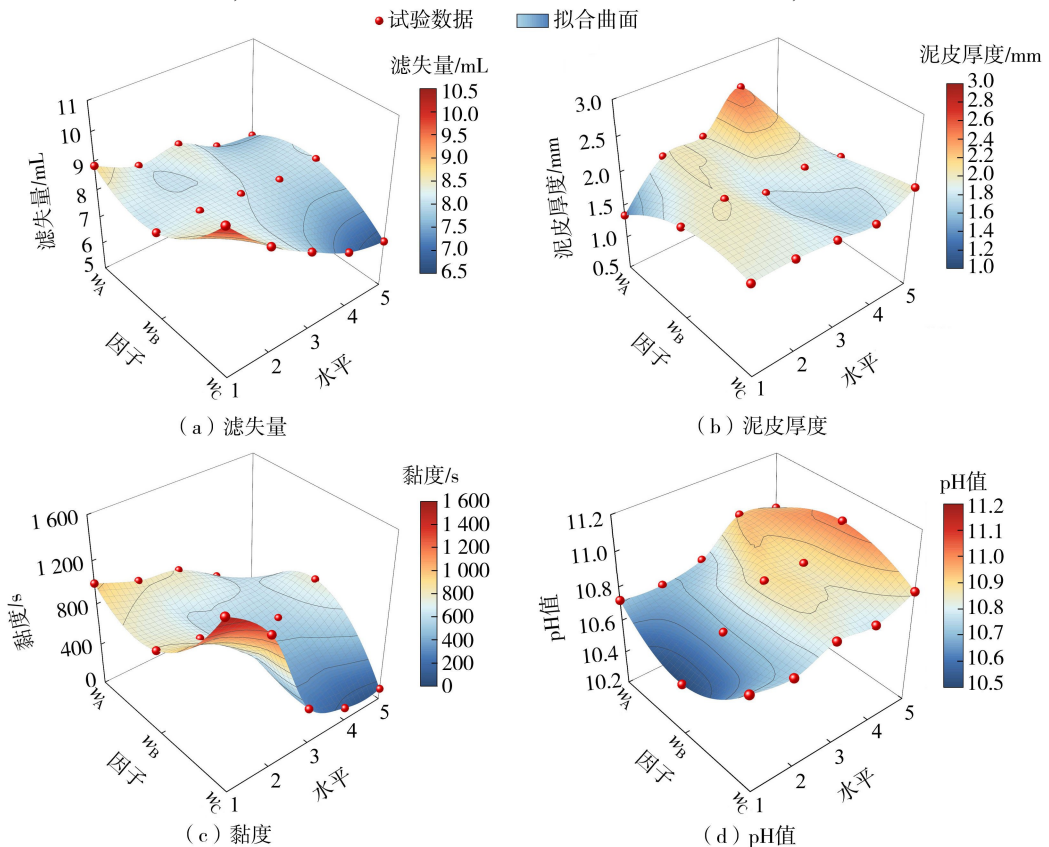


图2 泥浆参数随各组分水平变化

比泥浆以满足施工需求。一般工程要求触变泥浆黏度约为 120 s, 滤失量在 10 mL 以下, 泥皮厚度不大于 2 mm, pH 值约为 10, 并根据现场条件进行相应调整。根据表 2 试验结果及极差分析, 本文选取质量分数为 10% 的膨润土、0.3% 的 CMC 和 0.32% 的碳酸钠作为触变泥浆最优配合比。

3 摩阻试验结果与分析

3.1 试验结果

根据 1.4 节方案进行摩阻试验, 在不同压力条件下采用涂抹与不涂抹凡士林管片对每种纳米添加剂配制而成的触变泥浆进行 5 次拉力测试, 取 5 个结果的平均值作为该压力下管片所受摩阻力, 再对 3 种压力条件下的摩阻力平均值进行曲线拟合, 绘制水泥板拉力与不同荷载情况下水泥板重量的摩阻力 F 和压力 P 的曲线, 结果如图 3 所示。

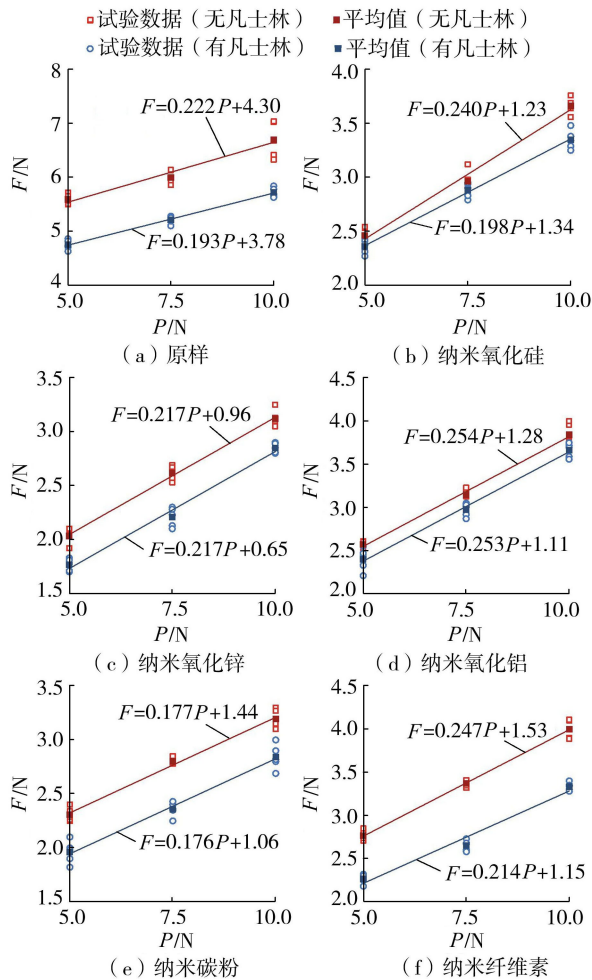


图 3 不同纳米添加剂对触变泥浆的减阻效果曲线

3.2 减阻效率分析

由图 3 可知, 添加不同纳米添加剂后管片所受摩阻力明显减小。定义添加纳米添加剂后管片所受摩阻力与原配合比条件下所受摩阻力比值为纳米添加剂的减阻效率, 将不同条件下添加剂的减阻效率

绘于图 4 中。由图 4 可知, 不同条件下纳米添加剂的减阻效率大致在 0.4~0.6 之间。其中, 纳米氧化锌和纳米碳粉的减阻效率明显高于其他添加剂。随着管土间压强增大, 添加剂减阻效率有所降低。这是因为在外部压力作用下, 黏土颗粒间接触面积增大, 相互作用力增强, 使得管土黏聚力增强^[22], 导致管片受到的摩阻力增大。

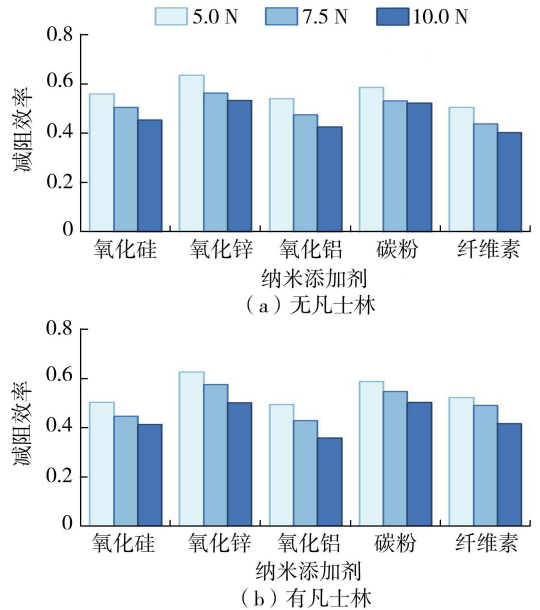


图 4 不同压力条件下纳米添加剂减阻效率

3.3 摩阻力组成分析

从图 3 还可以看出, 随着管土间压强增大, 管片所受摩阻力线性增大。管土间摩阻力主要由管土间摩擦力和管土黏聚力组成^[23], 单位面积所受摩阻力大小取决于摩擦系数、管土间压强及管土黏聚力, 可表示为:

$$f = \mu p + c \quad (1)$$

式中: f 为管片单位面积所受摩阻力, MPa; μ 为管土间摩擦系数; p 为管土间压强, MPa; c 为管片单位面积所受管土黏聚力, MPa。

对比不同粗糙度管片摩阻力, 可以发现涂抹凡士林后管片变得光滑, 管片不易与土粒间形成机械咬合, 其受到的摩擦力和管土黏聚力均有所降低。为具体分析不同条件下管土间摩擦系数及黏聚力, 将其绘制成柱状图, 如图 5 所示。由图 5 可知, 纳米碳粉作为润滑剂可有效降低摩擦系数, 纳米氧化锌的作用略小, 其余纳米材料对降低摩擦系数的作用不大。纳米碳粉和纳米氧化锌在摩擦过程中可在管片表面形成一层保护膜^[24], 以减少管片与土粒直接接触, 这不仅能减少管片损耗, 还可以显著降低管土间的摩擦系数。所有纳米材料均可显著降低管土黏聚力, 这是因为纳米材料粒径较小, 极易在水中分散并吸附水分子, 从而改善浆液流动性能。

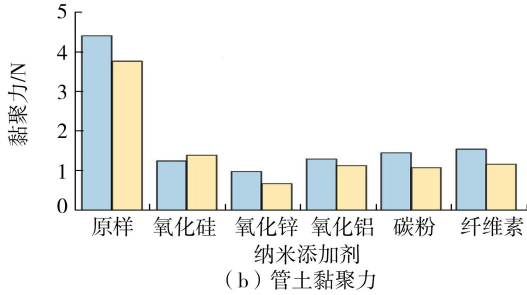
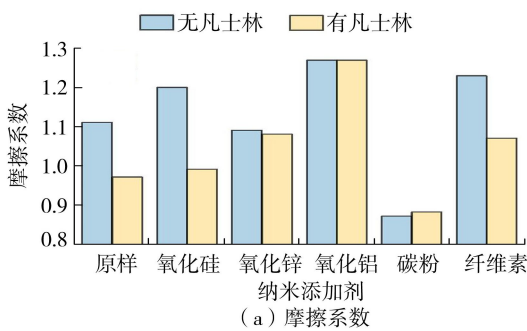


图 5 不同纳米添加剂对摩擦系数与管土黏聚力的影响

根据上述分析,选用纳米碳粉或纳米氧化锌作为纳米添加剂可有效提升触变泥浆减阻效果,但考虑到碳粉价格高昂,大量使用会降低工程经济效益,因此可优先考虑将纳米氧化锌作为添加剂使用。此外,也可根据实际条件选用其余纳米材料来减少管土黏聚力对管片的摩擦阻力。

4 结 论

a. 膨润土含量对触变泥浆黏度、滤失量和泥皮厚度有极大影响,对 pH 值略有影响;CMC 含量对泥浆滤失量和黏度影响较大,对泥皮厚度和 pH 值几乎没有影响;碳酸钠含量主要提高泥浆 pH 值,对黏度和滤失量也略有影响。综合试验结果和工程需求,选取质量分数为 10%的膨润土、0.3%的 CMC 和 0.32%的碳酸钠作为触变泥浆最优配合比。

b. 添加不同纳米添加剂可使触变泥浆减阻效果明显增强,不同添加剂的减阻效率大致在 0.4~0.6 之间。其中,纳米氧化锌和纳米碳粉的减阻效率明显高于其他添加剂。随着管土间压强增大,添加剂减阻效率有所降低。

c. 涂抹凡士林后管片变得光滑,其受到的摩擦力和管土黏聚力均有所降低。纳米碳粉和纳米氧化锌可降低管土间摩擦系数,所有纳米材料均可降低管土黏聚力。在实际引水工程中,可优先考虑将纳米氧化锌作为添加剂使用。

参考文献:

[1] 陈旺,彭焱锋,刘维正,等. 三孔顶管上穿施工对既有隧道与地表变形影响分析[J]. 现代隧道技术,2025,62(1): 170-182. (Chen Wang, Peng Yanfeng, Liu

Weizheng, et al. Analysis of the impact of the three pipe jacking over-crossing construction on existing tunnel and surface deformation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2025,62(1):170-182. (in Chinese))

[2] 丰土根,周坤,张箭,等. 大截面矩形顶管施工对既有管线影响研究[J]. 工程力学,2024,41(5): 1-12. (Feng Tugen, Zhou Kun, Zhang Jian, et al. Study on the impact of large cross-section rectangular pipe jacking construction on existing pipelines [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(5):1-12. (in Chinese))

[3] 高毅,冯超元,程鹏. 浅埋矩形顶管的“整体背土效应”研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(10): 1936-1942. (Gao Yi, Feng Chaoyuan, Cheng Peng, et al. Overall-carrying-soil effect of shallow buried rectangular pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(10):1936-1942. (in Chinese))

[4] 张雪,万中正,王传银,等. 无水砂层中矩形顶管施工用触变泥浆配比优化及减阻性能试验[J]. 工程地质学报,2021,29(5): 1611-1620. (Zhang Xue, Wan Zhongzheng, Wang Chuanyin, et al. Optimization thixotropic slurry ratio and drag reduction performance test for rectangular pipe jacking in anhydrous sand layer[J]. Journal of Engineering Geology,2021,29(5):1611-1620. (in Chinese))

[5] 寇磊,朱新华,白云,等. 顶管管节壁后触变泥浆探地雷达探测研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2): 477-483. (Kou Lei, Zhu Xinhua, Bai Yun, et al. Application of GPR to detect thixotropic clay slurry outside the tube of pipe jacking [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(2): 477-483. (in Chinese))

[6] 刘招伟,杨朝帅. 矩形顶管隧道施工中触变泥浆套形成规律及减阻效果试验[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(4): 568-576. (Liu Zhaowei, Yang Chaoshuai. Forming law of thixotropic mud holster and test of reducing resistance effect in rectangular pipe jacking tunnel construction [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2016,35(4):568-576. (in Chinese))

[7] 王明胜,刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术,2016,53(6): 182-189. (Wang Mingsheng, Liu Dagang. test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction [J]. Modern Tunnelling Technology,2016,53(6):182-189. (in Chinese))

[8] 刘俊霞,燕依梦,海然,等. 磷酸镁水泥及其修补砂浆耐水性研究进展[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3): 94-100. (Liu Junxia, Yan Yimeng, Hai Ran, et al. Research progress on water resistance of magnesium phosphate cement and its repair mortar[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43

- (3):94-100. (in Chinese))
- [9] 郑忠良, 尤博, 张兆彪, 等. 不同水灰比条件下碳酸钙晶须对水泥净浆收缩性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 66-72. (Zheng Zhongliang, You Bo, Zhang Zhaobiao, et al. Influence of calcium carbonate whiskers on shrinkage performance of cement paste with different water cement ratios[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 66-72. (in Chinese))
- [10] 乔红斌, 陈文勇, 张大伟, 等. 高分子固体润滑材料研究进展[J]. 高分子通报, 2023, 36(12): 1598-1609. (Qiao Hongbin, Chen Wenyong, Zhang Dawei, et al. Research progress on solid lubricating polymer materials [J]. Polymer Bulletin, 2023, 36(12): 1598-1609. (in Chinese))
- [11] 付甜, 麻拴红, 周峰, 等. 石墨烯的功能化改性及其作为水基润滑添加剂的应用进展[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(2): 408-425. (Fu Tian, Ma Shuanhong, Zhou Feng, et al. Progress of functionalized graphene nanomaterials and their applications as water-based lubricating additives[J]. Tribology, 2022, 42(2): 408-425. (in Chinese))
- [12] 王永欣, 胡艺纹, 赵海超, 等. 石墨烯基水基润滑添加剂研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19055-19061. (Wang Yongxin, Hu Yiwen, Zhao Haichao, et al. Research progress of graphene as additives of water-based lubricants [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19055-19061. (in Chinese))
- [13] 赵聪慧, 张传祥, 张晓琪, 等. 碳量子点的摩擦学研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 1-19. (Zhao Conghui, Zhang Chuanxiang, Zhang Xiaoqi, et al. Research progress of carbon quantum dot in tribology [J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 1-19. (in Chinese))
- [14] 王伟, 解泽磊, 屈怡坤, 等. Graphene/SiO₂ 纳米复合材料作为水基润滑添加剂的摩擦学性能[J]. 材料研究学报, 2023, 37(7): 543-553. (Wang Wei, Xie Zelei, Qu Yishen, et al. Tribological properties of Graphene/SiO₂ nanocomposite as water-based lubricant additives [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2023, 37(7): 543-553. (in Chinese))
- [15] 岳鹏, 张玉娟, 张平余, 等. 润滑油纳米添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 19-34. (Yue Peng, Zhang Yujuan, Zhang Pingyu, et al. Research progress of nanomaterials as lubricant oil additives [J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 19-34. (in Chinese))
- [16] 龙海锋, 王平全, 李前贵, 等. 纳米材料在水基钻井液中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(增刊1): 274-277. (Long Haifeng, Wang Pingquan, Li Qiangui, et al. Advances in the application of nanomaterials in water-based drilling fluids [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(S1): 274-277. (in Chinese))
- [17] 张伟为, 康元顺, 崔哲华, 等. 基于正交试验方法的大型有面外支撑杆 X 撑结构的屈曲分析和优化设计[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊1): 261-271. (Zhang Weiwei, Kang Yuanshun, Cui Zhehua, et al. Buckling analysis and optimal design of large-scale X-brace structure with out-of-plane support bars based on orthogonal test method [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(S1): 261-271. (in Chinese))
- [18] Yu Xiao, Cao Yajun, Tian Fubing, et al. Experimental study on the effect of hydroxyethyl cellulose on the friction-reducing performance of thixotropic slurries in pipe jacking construction [J]. Materials, 2025, 18(13): 3155.
- [19] 张超凡, 管学茂, 张海波, 等. 机械力化学改性钙基膨润土提高注浆材料的稳定性[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3408-3412. (Zhang Chaofan, Guan Xuemao, Zhang Haibo, et al. Mechano-chemical modified calcium bentonite improves stability of grouting materials [J]. Materials Reports, 2019, 33(20): 3408-3412. (in Chinese))
- [20] 袁小一, 崔琦, 陈兵. 聚合物对膨润土基竖向防渗屏障工程性能的影响与机理表征[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(6): 1090-1097. (Yuan Xiaoyi, Cui Qi, Chen Bing, et al. Effects of polymers on the engineering properties and modification mechanisms of bentonite-based vertical barriers [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(6): 1090-1097. (in Chinese))
- [21] 李娜娜, 刘月妙. 高温低氧条件下膨润土添加碳酸钠和菱铁矿试验研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(12): 2344-2352. (Li Nana, Liu Yuemiao. Experiment study on adding Na₂CO₃ and siderite into bentonite under high temperature and low oxygen condition [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(12): 2344-2352. (in Chinese))
- [22] 许桐, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 西宁盆地黄土区荷载条件下植被护坡力学效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 142-151. (Xu Tong, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Mechanical effects of vegetation protection on slope under loading conditions in loess areas of Xining Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 142-151. (in Chinese))
- [23] 张鹏, 谈力昕, 马保松. 考虑泥浆触变性和管土接触特性的顶管摩阻力公式[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2043-2049. (Zhang Peng, Tan Lixin, Ma Baosong, et al. Formulae for frictional resistance considering mud thixotropy and pipe-soil contact characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2043-2049. (in Chinese))
- [24] 苏峰华, 张欣博, 孙建芳. 功能化石墨烯及石墨烯基纳米复合材料润滑添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 1-17. (Su Fenghua, Zhang Xinbo, Sun Jianfang, et al. Research progress of functionalized graphene and graphene-based nanocomposites lubricant additives [J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 1-17. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-11-04 编辑: 俞云利)

基于 Kriging 代理模型优化算法的堆石坝 参数反演方法

顾克, 费香泽, 刘佳龙, 张琰

(国网电力工程研究院有限公司)

摘要:针对堆石坝参数反演常规方法效率偏低的问题,提出了一种基于 Kriging 代理模型优化算法的堆石坝参数反演方法,该方法通过拉丁超立方抽样方法在参数空间内抽取少量的初始样本点,建立较为粗糙的 Kriging 代理模型,然后根据多种加点准则选取新的样本点更新样本集,从而获得精度更高的 Kriging 代理模型并进行寻优,直至满足收敛条件。该方法在逐步增加样本点的过程中能够使得增加的样本点落在最有潜力获得最优解的参数空间内,降低了传统代理模型样本点选取的盲目性,从而提高反演效率。工程实例验证结果表明,该方法能减少调用有限元模型计算的次数,提高代理模型抽样的分析效率,缩短参数反演的时间,提高反演分析点平均计算精度。

关键词:堆石坝;参数反演;Kriging 代理模型;加点准则

Parameters inversion method for rockfill dams based on Kriging surrogate model optimization algorithm//Gu Ke, Fei Xiangze, Liu Jialong, Zhang Yan (*State Grid Electric Power Engineering Research Institute Co., Ltd.*)

Abstract: To address the low efficiency of conventional methods for parameter inversion of rockfill dams, a rockfill dam parameter inversion method based on a Kriging surrogate model optimization algorithm is proposed. The method first extracts a small number of initial sample points from the parameter space using the Latin hypercube sampling method to establish a relatively coarse Kriging surrogate model. New sample points are then selected according to various infill criteria to update the sample set, thereby obtaining a higher-accuracy Kriging surrogate model to perform optimization until the convergence conditions are met. During the process of gradually adding the number of sampling points, this method can ensure that the newly added sample points fall within the parameter space with the greatest potential for optimal solutions, reducing the randomness of sample point selection of traditional surrogate models and thus improving inversion analysis efficiency. The verification results from an engineering case show that the proposed method can reduce the number of finite element model calculations, improve the sampling efficiency of the surrogate model, shorten the parameter inversion time, and enhance the average calculation accuracy at inversion analysis points.

Key words: rockfill dam; parameter inversion; Kriging surrogate model; infill criteria

堆石坝是目前坝工领域应用最广泛的坝型之一^[1]。堆石坝的坝体变形控制是堆石坝安全运行的关键因素之一,受室内试验缩尺效应、筑坝料压实程度及运行环境等因素的影响,设计阶段确定的坝料参数与真实值往往存在一定的差异^[2],且对于建造年代久远的工程,相关数据的完整性不足,无法满足运营阶段坝体安全评价等要求。因此有必要通过其他方法获取坝料的真实参数,目前最常用的方法是通过坝体原位监测资料进行反演分析,从而获得坝料参数^[3]。

堆石坝参数反演方法前期以直接法为主,其主要原理是将参数反演问题转化为优化问题,利用各种寻优方法通过大量试算来寻找使得目标函数最优的参数组合,但这种方法在试算时需要调用有限元计算模型,效率较低,且难以收敛到最优的全局解^[4-6]。近年来机器学习算法在堆石坝参数反演中的应用越来越多,如误差反向传播神经网络、混合核相关向量机算法、支持向量回归和粒子群算法等。机器学习算法主要是通过参数空间内抽取一定数量的样本点进行有限元计算,建立样本点和计算结

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-301-XG)

作者简介:顾克(1988—),男,高级工程师,博士,主要从事抽水蓄能电站渗漏探测技术与数字化技术研究。E-mail:798161456@qq.com

通信作者:刘佳龙(1990—),男,高级工程师,硕士,主要从事抽水蓄能电站智能建造技术研究。E-mail:190222591@qq.com

果之间的映射关系,即代理模型,利用代理模型进行寻优,从而输出最优的反演参数^[7-10]。机器学习算法虽然在参数寻优的过程中避免了调用有限元模型进行计算,但在代理模型建立过程中,由于每个参数样本点均需要进行一次有限元计算以获得参数响应信息,并且样本数量和样本点的分布情况直接关系到代理模型的精度,因此为了获得准确的反演结果,往往需要在参数空间内均匀地抽取大量的样本点,并将样本点集合分为训练集和测试集,利用训练集建立代理模型,通过测试集验证模型精度,这种做法在样本抽取的过程中存在较大的盲目性,当样本点选取恰好都是在较有潜力的区域内时效率较高,反之则会有不少样本点落在与最优解相关性不大的空间内,对这部分样本点的计算必然导致反演分析效率的降低。

针对上述问题,本文提出了一种基于 Kriging 代理模型优化算法的堆石坝参数反演方法,该方法先采用少量初始样本建立较为粗糙的 Kriging 代理模型,然后根据多种加点准则选取新的样本点加入样本集,从而获得精度更高的 Kriging 代理模型并进行寻优,直至满足收敛条件。该方法在逐步增加样本点的过程中,能够择优选取参数空间内最有潜力的区域进行抽样,降低了传统代理模型建立过程中样本点选取的盲目性,可提高反演效率。

1 反演方法

1.1 Kriging 模型

Kriging 模型是基于空间统计学的最佳线性无偏插值方法的基础^[11],其核心是利用已知离散样本点的空间相关性,对待估点进行加权线性预测。该模型通过拟合变异函数刻画样本点间的空间自相关规律,确定不同位置样本对预测点的权重,使预测值满足无偏性(预测期望等于真实值期望)与最优性(预测误差方差最小),不仅能得到连续平滑的空间预测场,还能保留区域化变量的空间结构性与随机性。

区别于传统插值(仅输出预测值)方法,Kriging 模型最核心优势是同步输出预测值与预测方差:预测方差由样本点空间分布、变异函数参数、待估点与样本距离共同决定,距离样本越近、样本越密集,预测方差越小、精度越高;远离样本区域方差增大,直观量化预测不确定性。Kriging 模型本质是兼顾插值精度与误差统计度量的空间估计方法,既能实现未知点数值拟合,又能定量评价预测可靠性,在空间插值、场重构、不确定性分析中具备不可替代的优势。

1.2 代理模型的优化算法

由于 Kriging 代理模型能够同时给出未知点处的预测值与预测方差,因此新增样本点优化的策略可分两类:一是在当前代理模型的预测最小值周边区域选取新的样本点。这种策略的优点在于简单实用,易于操作,在代理模型精度较高时能够快速收敛,但其缺点也很明显,即当代理模型的样本点较少、精度不高时,易于陷入局部最优,因此仅使用这种优化策略无法满足要求。二是在代理模型预测精度较差的区域内选取新的样本点,从而提高代理模型在此区域内的预测精度,获得精度更高的代理模型,这种加点策略能够使优化朝着全局最优的方向进行。本文 Kriging 代理模型采用 MSP、MSE、EI 和 PI 共 4 种加点准则对模型算法进行优化,优化算法包含了上述两种样本点的添加策略。

1.2.1 MSP 加点准则

MSP 加点准则^[12]直接以当前代理模型预测最小值所在点作为样本点,并添加到样本集中作为建立新代理模型的样本点,其数学表达式为:

$$x_{\min} = \arg y_{\min}(x) \quad (1)$$

式中: x_{\min} 为当前代理模型最小值所在点的位置坐标; $y_{\min}(x)$ 为当前代理模型最小值; \arg 表示样本参数与目标函数值之间的映射关系,返回值为 $y_{\min}(x)$ 对应的输入样本点参数。

MSP 加点准则将当前代理模型的预测最小值所在点选为新的样本点,是一种局部的加点策略,当代理模型精度足够时(代理模型的最小值点已经与全局最优点较为接近,能够较好反映全局态势),可快速提高收敛速度,但也极易陷入局部最优。

1.2.2 MSE 加点准则

MSE 加点准则^[13]直接以当前代理模型预测方差最大值所在点作为样本点,并添加到样本集中作为建立新代理模型的样本点,其数学表达式为:

$$x_{\text{new}} = \arg s_{\max}^2(x) \quad (2)$$

式中: x_{new} 为新加点; $s_{\max}^2(x)$ 为预测方差最大值。

MSE 加点准则将当前代理模型给出的预测方差最大值所在点选为新的样本点,这种加点准则是全局加点策略,能够提高代理模型的全局精度,避免陷入局部最优。

1.2.3 EI 加点准则

EI 加点准则函数 $E(x)$ 表示某个选取样本点在该准则下的函数值,其数学表达式^[14]为:

$$E(x) = \begin{cases} (y_{\min} - y(x)) \varphi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{s(x)}\right) + \\ s(x) \psi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{s(x)}\right) & s(x) > 0 \\ 0 & s(x) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: y_{\min} 为已有样本集中最小真实响应值; $s(x)$ 为 Kriging 代理模型预测未知点处的标准差; $y(x)$ 为 Kriging 代理模型未知点的预测值; $\varphi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数; $\psi(\cdot)$ 为标准正态概率密度函数。

EI 加点准则假设 Kriging 代理模型预测值服从均值为 $y(x)$ 、标准差为 $s(x)$ 的正态分布, 式(3)表示当前代理模型预测值与已有样本最小真实响应值之差的期望值, 该期望最大值所在点即为代理模型预测值与已有样本值之差最大处的样本点, 将其添加到样本集中作为建立新代理模型的样本点, 以最大化改善期望。

观察式(3)可知有 2 个特点: 一是函数的峰值与 $s(x)$ 高度正相关, 因此得到的函数最大值所在点, 基本是代理模型预测方差较大区域的样本点; 二是代理模型预测值小于样本最小真实响应值的区域, 函数值也较大。EI 加点准则能够从全局出发在最有潜力的参数空间内选取新的样本点, 因此 EI 加点准则也是一种全局加点策略, 能够避免陷入局部最优。

1.2.4 PI 加点准则

PI 加点准则^[15]与 EI 加点准则类似, 也是假设 Kriging 模型预测值服从均值为 $y(x)$ 、标准差为 $s(x)$ 的正态分布, PI 加点准则表达式如下:

$$P(x) = \varphi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{s(x)}\right) \quad (4)$$

式中: $P(x)$ 为样本点的改善概率。该准则用于计算目标函数的改善概率, 并将改善概率最大值所在点作为新的样本点。式(4)表示代理模型预测值小于已有样本最小值的概率, 将概率最大值所在点添加到样本集中作为建立新代理模型的样本点。同样 PI 加点准则也能够从全局出发在最有潜力的参数空间内选取新的样本点, 也是一种全局加点策略, 能够避免陷入局部最优。

1.3 优化算法流程

本文对 Kriging 代理模型算法的优化体现在参数空间的全局加点阶段和局部加点阶段, 在全局加点阶段利用 MSE、EI 和 PI 加点准则, 确定代理模型预测方差最大值以及式(3)与式(4)最大值所在点, 将其作为新的样本点加入样本集后重新构建 Kriging 代理模型; 在局部加点阶段采用 MSP 加点准则, 将当前代理模型最小值所在点加入样本集, 重新构建 Kriging 代理模型。在全局加点阶段和局部加点阶段均使用 SFOA 算法^[16]寻优。

优化算法流程如图 1 所示, 其关键是全局加点和局部加点之间的切换。当全局加点阶段确定的样

本点的真实响应值小于当前样本的真实响应值时, 进入局部加点阶段; 在局部加点阶段, 当局部样本点过于密集时, 切换至全局加点。局部加点密集程度采用 Euclidean 距离 $d^{[17]}$ 来判断:

$$d = \sqrt{(x_{\text{new}} - x_{\text{old}})^2} \quad (5)$$

式中: x_{old} 为原有样本点, 当新加点与原有样本点之间的 Euclidean 距离小于一定的容差时, 说明局部样本点过于密集。

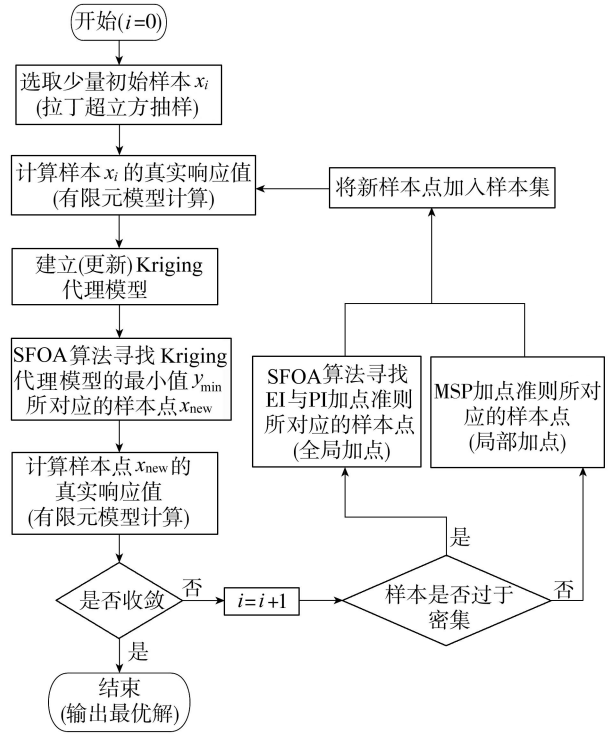


图 1 Kriging 代理模型优化算法流程

2 函数算例测试与验证

2.1 全局加点准则验证

采用一维函数验证全局加点准则, 一维函数表达式如下:

$$f(x) = (6x - 2)^2 \sin(12x - 4) \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (6)$$

初始样本点 $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.9$, 得到 Kriging 代理模型的预测曲线如图 2 所示, 可见代理模型曲线与函数真实响应曲线在 $0.4 \sim 0.6$ 和 $0.7 \sim 0.9$ 之间误差较大, 说明在这两个区域内需要增加新的样本点, 提高精度。图 3 为 Kriging 代理模型的预测方差曲线, 图 4 为 EI 和 PI 加点准则函数曲线, 可知 3 条曲线的峰值位置分别在 $x = 0.68$ (预测方差), 0.60 (EI 加点准则函数), 0.71 (PI 加点准则函数) 处, 均在 Kriging 代理模型预测曲线与函数真实响应曲线误差较大的区域, 说明本文采用全局加点准则进行优化是合适的。

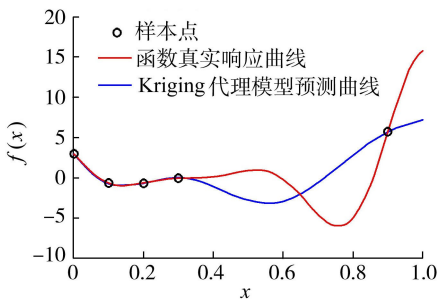


图2 一维函数真实响应曲线和 Kriging 代理模型预测曲线

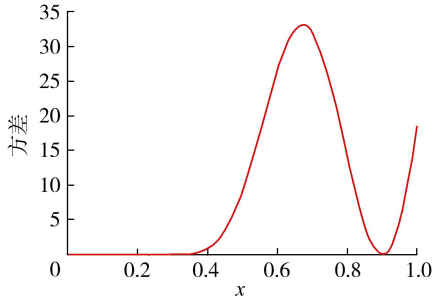


图3 一维函数 Kriging 代理模型预测方差曲线

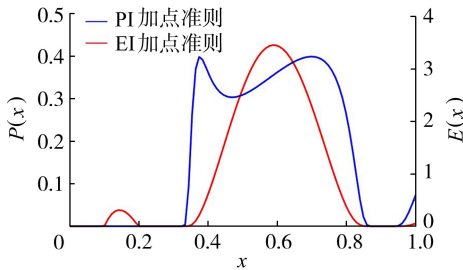


图4 EI 和 PI 加点准则函数曲线

2.2 多维函数测试

采用一个标准测试函数——camel6 函数来验证和演示本文 Kriging 代理模型优化算法的有效性和实施过程。二维函数的曲面形状见 <https://www.sfu.ca/~ssurjano/camel6.html>, 该函数具有 6 个极小值点, 全局的极小值为 -1.0316 , 函数表达式如下:

$$f(x_1, x_2) = (4 - 2.1x_1^2 + \frac{1}{3}x_1^4)x_2^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2 \quad (x_1, x_2 \in [-2, 2]) \quad (7)$$

式中: x_1, x_2 为 camel6 函数的自变量。

采用拉丁超立方抽样方法建立一个样本容量为 10 的初始样本集, 确定算法收敛的容差为 0.001, 样本密集程度的容差为 $0.01^{[15]}$ 。采用两种方法进行对比测试: ①方法 1 采用 SFOA 算法(粒子数 30 个)对式(7)直接寻优, 即采用直接法寻优; ②方法 2 采用拉丁超立方抽样方法抽取 50 组样本(40 组用于训练, 10 组用于验证)建立人工神经网络模型后利用 SFOA 算法寻优。图 5 为 3 种方法的寻优值收敛曲线, 本文方法仅需 10 次迭代就能满足收敛容差的

要求, 寻优值收敛至 -1.0310 , 而方法 1 需迭代 22 次, 每次迭代均需调用 30 次原函数计算, 才能收敛至 -1.0316 。方法 1 由于是直接法寻优, 其精度较高, 但调用原函数的计算达到了 660 次, 效率较低, 而本文方法迭代 10 次, 共计新增样本点 14 个, 调用原函数计算 24 次(含初始样本 10 次), 效率有了明显提升。

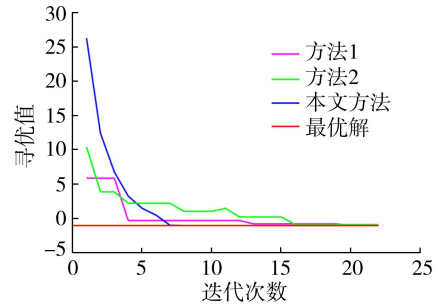


图5 不同方法的收敛曲线

方法 2 建立人工神经网络模型后, 利用 SFOA 算法经过了 18 次迭收敛至 -0.8996 , 精度较差, 且是通过样本容量为 50 的样本集建立人工神经网络模型后寻优, 即调用了 50 次原函数计算, 效率较低的同时, 精度也较差。这说明拉丁超立方抽样虽能实现在参数空间内样本分布的均匀性和随机性, 但也不可避免地导致在最有潜力获得最优解的参数空间区域内样本数量较少, 从而使得解的精度较低; 同时由于在远离最优解的参数空间内也分布了样本点, 浪费了这部分的计算资源, 导致效率降低。图 6 为本文方法和方法 2 的样本点分布, 本文方法在总样本点较少的情况下, 在最优解区域的分布较为集中, 提高了抽样效率, 而方法 2 样本点分布均匀且随机, 盲目性较高, 方法 2 在精度和效率上均不及本文方法。

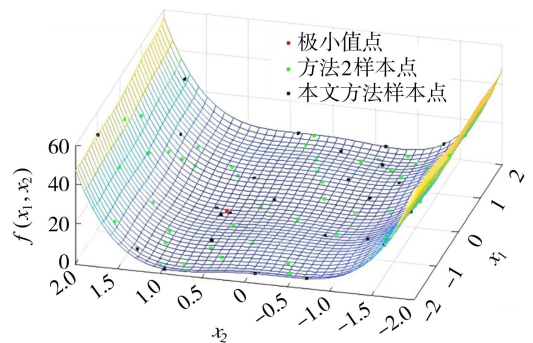


图6 二维函数算例曲面样本点分布

3 工程实例验证

3.1 工程概况

某抽水蓄能电站上水库面板堆石坝坝顶高程 1233.00 m, 最大坝高 86.00 m, 坝顶宽 10 m, 坝顶长

718.00 m,大坝上、下游坝坡均为 1 : 1.40。坝体内部沉降观测共布置 4 个断面,其中在最大监测断面测点布置如图 7 所示。最大监测断面处分别在高程 1 211.20 m 和 1 191.20 m 处布置了 2 套水管式沉降仪,测点编号分别为 A1-1~A1-3 和 B2-1~B2-6,共计 9 个测点。同时根据大坝填筑过程建立了有限元计算模型,共计单元 13 111 个,节点 14 292 个。

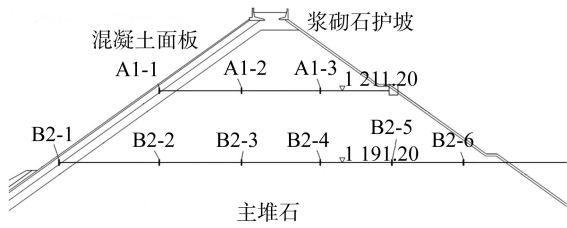


图 7 大坝最大监测断面测点布置(单位:m)

3.2 反演参数与测点选择

坝体填筑料主要包括垫层、过渡层、主堆石和次堆石。堆石料模型采用邓肯 *E-B* 模型,共有 9 个参数,若全部进行反演,则待反演参数有 36 个,因此有必要精简,其中初始内摩擦角 φ_0 、内摩擦角增量 $\Delta\varphi$ 和土体黏聚力 c 一般可由试验确定,卸载弹性模量参数 K_{ur} 的敏感性很低,可不用反演^[18],因此将切线弹性模量参数 (K, n)、破坏比 (R_f) 和切线体积模量参数 (K_b, m) 共 5 个参数作为待反演参数。主堆石与次堆石填筑比例较高,对坝体变形具有决定作用,因此必须进行反演,而垫层与过渡层填筑比例低,不参与反演。参考现场试验数据和类似的工程经验^[19-20],拟定了堆石料邓肯 *E-B* 模型和坝体材料待反演参数的取值如表 1 所示,共计 9 个待反演参数。

最大断面的 9 个测点中,测点 A1-1 和 B2-1 均在垫层内,由于垫层和过渡层的参数不进行反演,且这两测点靠近上游坝面,测值较小,故不纳入反演测点,因此确定反演测点为 A1-2、A1-3、B2-2~B2-6。建立目标函数如下:

$$\min T(x_1, x_2, \dots, x_9) = \min \left(\frac{100}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{u_k^* - u_k}{u_k} \right| \right) \quad (8)$$

表 1 待反演参数取值

材料	K	n	R_f	K_b	m	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	K_{ur}	c / kPa
垫层	1 150	0.42	0.71	680	0.33	47.0	5.7	1 800	0
过渡层	1 020	0.41	0.68	620	0.28	48.0	3.5	1 500	0
主堆石	800~1 500	0.20~0.45	0.60~0.90	250~650	0.10~0.30	50.6	8.5	1 300	0
次堆石	800~1 300	0.20~0.45	0.60~0.90	250~600	0.10~0.30	45.5	8.0	1 200	0

表 2 筑坝料 *E-B* 模型反演参数

材料	K	n	R_f	K_b	m	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	K_{ur}	c / kPa
主堆石	1 083.9	0.4149	0.8391	489.4	0.1962	50.6	8.5	1 300	0
次堆石	944.7	0.3888	0.8014	301.4	0.2247	45.5	8.0	1 200	0

式中: x_1, x_2, \dots, x_9 为 9 个待反演参数; u_k^* 为测点 k 的计算值; u_k 为测点 k 的实测值; N 为用于反演的测点总数。

3.3 反演结果分析

先采用拉丁超立方抽样方法建立 15 个初始样本,目标函数容差设定为 5%,样本密集度容差设定为 1%^[15],然后进行反演。图 8 为目标函数收敛曲线,仅迭代 9 次,目标函数就收敛到容差范围内,最终收敛值为 4.99%。共计新增样本点 19 个,其中全局样本点 15 个,局部样本点 4 个。反演确定的参数如表 2 所示。利用表 2 参数计算得到 7 个测点沉降值,与实测值对比,测点平均误差率为 4.99%,最小误差率为 2.00%,出现在测点 B2-3,最大误差率为 11.98%,出现在测点 B2-6。

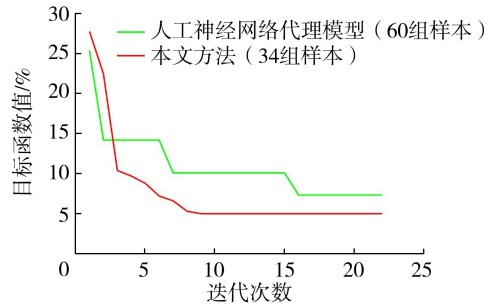


图 8 目标函数收敛曲线

为了对比,在参数空间内采用拉丁超立方抽样方法生成 60 个样本(50 个用于训练,10 个用于验证),采用方法 2 建立神经网络模型进行反演,其目标函数最小仅收敛至 7.33%(图 8),说明本文方法不仅效率高,精度也较高。本文方法使用 Kriging 代理模型配合加点准则反演堆石料邓肯 *E-B* 模型和坝体材料待反演参数,调用有限元模型计算的次数相较于采用神经网络模型的方法 2,由 60 次降至 34 次,效率提升 43.3%。

4 结 语

为了降低堆石坝参数反演过程中调用有限元模型计算的次数,提高反演分析效率,本文提出了一种

基于 Kriging 代理模型优化算法的堆石坝参数反演方法,针对传统代理模型建立过程中样本选取较为盲目的问题,Kriging 代理模型不仅能够给出未知点处的预测值,还能给出预测方差,为代理模型反演分析过程中样本点选取提供了优化的思路。本文方法可先在少量初始样本的情况下,构建相对粗糙的 Kriging 代理模型,然后根据多种加点准则,在最有潜力优化的区域内添加样本点,通过几次迭代即可获得最优解。实例函数与工程实例验证结果表明,本文方法调用有限元模型计算的次数由 60 次降低至 34 次,反演分析的效率提升了 43.3%,测点平均误差率从 7.33% 降至 4.99%,精度提高了 31.9%,具有较高的适用性和有效性及较高的精度。

参考文献:

[1] 顾淦臣,束一鸣,沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[2] 朱晟. 高面板坝堆石体的填筑质量控制指标研究与应用[J]. 岩土工程学报,2020,42(4):610-615. (Zhu Sheng. Study and application of control indices for filling quality of high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(4):610-615. (in Chinese))

[3] Zhou Wei, Li Shaolin, Ma Gang, et al. Parameters inversion of high central core rockfill dams based on a novel genetic algorithm[J]. Science China Technological Sciences,2016,59(5):783-794.

[4] Kavanagh K T, Clough R W. Finite element applications in the characterization of elastic solids [J]. International Journal of Solids and Structures,1971,7(1):11-23.

[5] 宋春晖. 地铁车站深基坑土体参数动态反演分析及变形预测[D]. 郑州:河南工业大学,2011.

[6] 向天兵. 大型地下厂房洞室群施工期动态反馈优化设计方法研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院,2010.

[7] Yu Yuzhen, Zhang Bingyin, Yuan Huina. An intelligent displacement back-analysis method for earth-rockfill dams [J]. Computers and Geotechnics,2007,34(6):423-434.

[8] 马刚,常晓林,周伟,等. 高堆石坝瞬变-流变参数三维全过程联合反演方法及变形预测[J]. 岩土力学,2012,33(6):1889-1895. (Ma Gang, Chang Xiaolin, Zhou Wei, et al. Integrated inversion of instantaneous and rheological parameters and deformation prediction of high rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(6):1889-1895. (in Chinese))

[9] 程欣悦,马刚,张贵科,等. 考虑监测数据时序特征和空间分布的堆石坝参数反演研究[J]. 水力发电学报,2024,43(5):54-67. (Cheng Xinyue, Ma Gang, Zhang Guike, et al. Study on parameter inversion of rockfill dams considering time series features and spatial distribution of

monitoring data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024,43(5):54-67. (in Chinese))

[10] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等. 土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):1-10. (Yuan Junping, Qiu Haolei, Hu Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(3):1-10. (in Chinese))

[11] Matheron G. Principles of geostatistics [J]. Economic Geology,1963,58(8):1246-1266.

[12] 周广得,吕小龙,黄丹,等. 基于 Kriging 代理模型的迭代更新高效反演方法[J]. 计算力学学报,2023,40(4):602-607. (Zhou Guangde, Lyu Xiaolong, Huang Dan, et al. Efficient iterative updating inversion method based on Kriging surrogate model[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023,40(4):602-607. (in Chinese))

[13] 勾红叶,梁浩,赵虎,等. 基于多目标并行加点映射代理模型的高速铁路桥上行车安全快速评价方法[J]. 铁道学报,2023,45(11):154-163. (Gou Hongye, Liang Hao, Zhao Hu, et al. An efficient evaluation method for running safety on high-speed railway bridges based on mapping surrogate model by multi-objective parallel infilling [J]. Journal of the China Railway Society,2023,45(11):154-163. (in Chinese))

[14] 张强,缪维跑,刘青松,等. 基于 EI 加点准则与代理模型的风力机专用翼型气动与结构优化设计[J]. 中国电机工程学报,2022,42(12):4467-4476. (Zhang Qiang, Miao Weipao, Liu Qingsong, et al. Aerodynamic and structural optimization design of dedicated airfoil of wind turbine based on EI criterion and surrogate model [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(12):4467-4476. (in Chinese))

[15] 余镇,樊志华,石宏雨,等. 基于代理优化算法的水下滑翔机外形优化设计[J]. 机械强度,2023,45(4):879-886. (Yu Zhen, Fan Zhihua, Shi Hongyu, et al. Shape optimization design of the underwater glider based on surrogate optimal algorithm [J]. Journal of Mechanical Strength,2023,45(4):879-886. (in Chinese))

[16] Zhong Changting, Li Gang, Meng Zeng, et al. Starfish optimization algorithm (SFOA): a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization compared with 100 optimizers [J]. Neural Computing and Application,2025,37(5):3641-3683.

[17] 李正良,彭思思,王涛. 基于混合加点准则的代理模型优化设计方法[J]. 工程力学,2022,39(1):27-33. (Li Zhengliang, Peng Sisi, Wang Tao. A surrogate-based optimization design method based on hybrid infill sampling criterion [J]. Engineering Mechanics, 2022,39(1):27-33. (in Chinese))

- [18] 李威,刘检生,施增强,等. 基于 XGBoost 算法的堆石料南水模型参数反演及应用[J]. 水利水运工程学报, 2023 (3): 111-120. (Li Wei, Liu Jiansheng, Shi Zengqiang, et al. NHRI model parameter inversion and application of rockfill based on XGBoost [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023 (3): 111-120. (in Chinese))
- [19] 邹全程,马刚,郭承乾,等. 基于多源监测数据与多目标优化的高堆石坝参数反演分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(11): 1539-1550. (Zou Quancheng, Ma Gang, Guo Chengqian, et al. Parameter inversion analysis of high rockfill dams based on multisource monitoring data and multi-objective optimization [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(11): 1539-1550. (in Chinese))
- [20] 熊健,戴宏武,肖兴军,等. 河南洛宁抽水蓄能电站工程蓄水安全鉴定中南院自检报告[R]. 长沙:中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 2024. (收稿日期:2025-02-27 编辑:熊水斌)

(上接第 41 页)

- [3] 陈炼钢,施勇,钱新,等. 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型: II. 应用[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 856-863. (Chen Liangang, Shi Yong, Qian Xin, et al. Hydrology, hydrodynamics, water quality model for impounded rivers: II. application [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 856-863. (in Chinese))
- [4] 魏祥龙,陆卫安,唐洪武,等. 上海市感潮河网水质劣化机理研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 319-328. (Wei Xianglong, Lu Weian, Tang Hongwu, et al. Study on the mechanisms of water quality deterioration in Shanghai City tidal river networks [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 319-328. (in Chinese))
- [5] Navon I M. Data assimilation for numerical weather prediction: a review [M]//Park S K, Xu Liang. Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 21-65.
- [6] Nichols N K. Mathematical concepts of data assimilation [M]//Lahoz W, Khatatov B, Menard R. Data Assimilation. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 13-39.
- [7] Reichle R H. Data assimilation methods in the Earth sciences [J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(11): 1411-1418.
- [8] Lai X, Liang Q, Yesou H, et al. Variational assimilation of remotely sensed flood extents using a 2-D flood model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(11): 4325-4339.
- [9] Javaheri A, Babbar-Sebens M, Miller R N, et al. An adaptive ensemble Kalman filter for assimilation of multi-sensor, multi-modal water temperature observations into hydrodynamic model of shallow rivers [J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 682-691.
- [10] Cho K H, Pachepsky Y, Ligaray M, et al. Data assimilation in surface water quality modeling: a review [J]. Water Research, 2020, 186: 116307.
- [11] Bertret V, Le Goff Latimier R, Monbet V. Data assimilation for prediction of ammonium in wastewater treatment plant: from physical to data driven models [J]. Water Research, 2025, 282: 123673.
- [12] Chen Cheng, Huang Jiacong, Chen Qiuwen, et al. Assimilating multi-source data into a three-dimensional hydro-ecological dynamics model using Ensemble Kalman Filter [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 117: 188-199.
- [13] 赖锡军,何国建. 基于四维变分同化法的巢湖流域南淝河水质模拟[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1458-1466. (Lai Xijun, He Guojian. Water quality modelling based on 4-dimensional variational assimilation method in the Nanfei River, Lake Chaohu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5): 1458-1466.)
- [14] Sun Mingzhuang, Li Zhili, Fu Guangtao, et al. ADAPT: a novel IoT-driven analytical data assimilation method based on phase-space tuning for long-sequence water quality forecasting [J]. Environmental Modelling & Software, 2026, 198: 106882.
- [15] Lofton M E, Howard D W, Thomas R Q, et al. Progress and opportunities in advancing near-term forecasting of freshwater quality [J]. Global Change Biology, 2023, 29(7): 1691-1714.
- [16] 赖锡军,傅国圣,孙波. 非恒定水流计算的最优控制问题及其变分求解[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 537-545. (Lai Xijun, Fu Guosheng, Sun Bo. Optimal control problems in unsteady flow computation and their variational solutions [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 537-545. (in Chinese))
- [17] Hascoët L, Pascual V. The Tapenade automatic differentiation tool: principles, model, and specification [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2013, 39(3): 20.
- [18] Gilbert J C, Lemaréchal C. Some numerical experiments with variable-storage quasi-Newton algorithms [J]. Mathematical Programming, 1989, 45(1): 407-435.
- [19] Li Zhijin, Wang Jinbo, Fu L L. An observing system simulation experiment for ocean state estimation to assess the performance of the SWOT mission: part 1, a twin experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(7): 4838-4855. (收稿日期:2025-11-25 编辑:俞云利)

乌东德和白鹤滩水库蓄水后溪洛渡库区水温变化趋势分析

唐玉川¹, 张勇¹, 赵忠伟², 王晓婷³, 谢长江⁴

(1. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院;
3. 河海大学水利水电学院; 4. 中国水利水电第八工程局有限公司)

摘要: 为了解乌东德和白鹤滩水库蓄水运行后溪洛渡库区水温的变化规律, 基于2019—2024年水温原型观测数据与2014—2018年历史水文资料, 采用数理统计法、对比分析法和Mann-Kendall趋势分析法, 引入热分层特性评价指标, 分析了溪洛渡库区水温时空变化特征与热分层演变过程。结果表明: 上游梯级水库蓄水后, 热分层稳定性逐渐提高, 下游水温呈现秋冬高春夏低的平坦化趋势和低温出现时间呈滞后化特征, 且水温平坦化和滞后的程度随梯级数量增加而增强, 热分层稳定指数峰值由 2.52 m^{-1} 增至 3.71 m^{-1} , 而垂向温度梯度蓄水后逐年降低; 入库水温夏季均值降低 0.52°C 、冬季升高 2.64°C , 年较差减小 7.78% ; 出库水温夏季均值降低 0.53°C 、冬季升高 1.93°C , 年内极值变幅降低 $0.6\% \sim 11.1\%$, 沿程各断面最低水温出现时间较蓄水前滞后 $4 \sim 26\text{ d}$ 。

关键词: 梯级水库; 下泄水温; 水库热分层; 溪洛渡水库; 乌东德水库; 白鹤滩水库

Analysis of water temperature variation trends in Xiluodu Reservoir area after impoundment of Wudongde and Baihetan reservoirs// Tang Yuchuan¹, Zhang Yong¹, Zhao Zhongwei², Wang Xiaoting³, Xie Changjiang⁴ (1. River Basin Hub Operation and Management Center, China Three Gorges Corporation; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 4. Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd.)

Abstract: To understand the variation patterns of water temperature in the Xiluodu Reservoir area after the impoundment and operation of the Wudongde and Baihetan reservoirs, this study analyzed the spatiotemporal variation characteristics of water temperature and the evolution process of thermal stratification in the Xiluodu Reservoir area based on in-situ water temperature observation data from 2019 to 2024 and historical hydrological data from 2014 to 2018. The analysis was conducted using mathematical statistics, comparative analysis, and the Mann-Kendall trend analysis method, incorporating thermal stratification evaluation indices. The results show that after the impoundment of the upstream cascade reservoirs, the thermal stratification stability gradually increased. Downstream water temperature exhibited a flattening trend, characterized by higher values in autumn and winter and lower values in spring and summer, and the occurrence of low water temperatures showed a lagging characteristic. Furthermore, the degree of water temperature flattening and lagging increased with the number of cascade reservoirs. The peak value of the thermal stratification stability index increased from 2.52 m^{-1} to 3.71 m^{-1} , while the vertical temperature gradient decreased year by year after impoundment. The mean inflow water temperature decreased by 0.52°C in summer and increased by 2.64°C in winter, with the annual temperature range decreasing by 7.78% . The mean outflow water temperature decreased by 0.53°C in summer and increased by 1.93°C in winter, with the intra-annual extreme variation range decreasing by 0.6% to 11.1% . The occurrence time of the minimum water temperature at various cross-sections along the channel was delayed by 4 to 26 days compared with the pre-impoundment period.

Key words: cascade reservoirs; discharge water temperature; reservoir thermal stratification; the Xiluodu Reservoir; the Wudongde Reservoir; the Baihetan Reservoir

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司技术服务项目(JG/19009B, JG/19010B, JG/19011B, JG/19012B); 中国长江三峡集团有限公司自主科研项目(NBYG202300751)

作者简介: 唐玉川(1995—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事环境水力学研究。E-mail: 2050915048@qq.com

通信作者: 谢长江(1982—), 男, 正高级工程师, 主要从事大坝安全监测技术和环境监测研究。E-mail: 54234482@qq.com

水温是水环境中的关键驱动因子,影响水体的理化特性及水生态系统的稳定性^[1-3],尤其对鱼类的生长繁殖具有重要作用^[4-5]。随着流域梯级水电的大规模开发,水电工程在产生巨大发电效益的同时,也对天然水环境造成多方面的影响^[6-7]。大型水库蓄水后常形成明显的热分层现象,热分层主要由温度差异驱动^[8-9],可分为混合期、形成期和稳定期3个阶段^[10]。Castrillo等^[11]采用机器学习方法评估了水库热分层状态,指出水位、太阳辐射和气温是影响温跃层深度的主要因子;Zhao等^[12]基于三维数值模型揭示了水库热分层结构的时空异质性和阶段性演变规律,发现不同热分层阶段具有不同的主导控制因子。

上游水库形成的热分层现象会导致下泄水温春夏偏低、秋冬偏高,引起下游河道水温节律的滞后,且这种滞后效应会沿程累积,对下游生态产生深远影响^[13-14]。任实等^[15]指出上游水库调度会改变下游入库水温和热分层结构;於孟元等^[16]发现水温累积效应会随梯级数量增加而增强,但在支流汇入后受到削弱;胡光洋等^[17]提出水库类型和梯级位置共同主导了累积效应的方向。因此,研究水库热分层及其在梯级系统中的累积效应,对认识水电开发的水环境影响具有重要意义。

溪洛渡水库是金沙江下游水电开发的梯级电站之一,上游连接乌东德和白鹤滩水库,下游连接向家坝水库,水库具有较强的调蓄能力。近年来,国内学者针对溪洛渡库区水温结构开展了较为深入的研究。程帅等^[18]研究发现溪洛渡库区水温分层季节性明显,表层水温与气温相关度较高;戴凌全等^[19]和杨宇等^[20]分别建立了二维和三维数值模型,评估了溪洛渡水库分层取水生态调度对下泄水温的改善效果。

目前,乌东德与白鹤滩水库已完成蓄水,其调度运行会影响下游溪洛渡水库的入库水温和流量过程,进而影响库区水温热分层结构与演变过程。但现有研究多集中于单库分析,对梯级水库联合调度下的水温累积效应仍有待深入研究。本文基于2019—2024年实测水温数据,结合2014—2018年历史水文资料,系统分析上游乌东德和白鹤滩水库蓄水前后溪洛渡库区垂向水温结构的演变规律,探讨梯级水库调度对热分层及下泄水温的影响,以为溪洛渡水库生态调度和下游水生态保护提供理论依据。

1 研究数据与分析方法

1.1 原型观测

1.1.1 监测设备

温度链监测采用基康技术股份有限公司生产的

铂电阻温度计,测温精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$;数据采集采用该公司生产的40通道和32通道自动化数据采集仪,数据传输通过中国移动物联卡实现。垂向水温监测采用Level SCOUT型监测仪。温度链通过数据采集仪每小时采集1次数据,并通过GPRS/GSM通信方式实时传输至设置在中国水利水电第八工程局有限公司总部的G云服务器。

1.1.2 监测点布置

根据HJ 91.2—2022《地表水环境质量监测技术规范》、SL 219—2013《水环境监测规范》、HJ 494—2009《水质采样技术指导》,在溪洛渡坝前断面布设1条垂向温度链,监测坝前垂向水温结构,每小时记录1次垂向水温数据。溪洛渡坝前垂向温度链总长225 m,监测水深181 m,共布设63支温度计:从高程600 m起向下每隔2 m布设8支温度计至高程584 m,然后每隔2.5 m布设42支温度计至高程479 m,最后每隔5 m布设13支温度计至高程419 m。为辅助校准水温监测高程,自垂向温度链底部起每隔30 m布设1支渗压计,共计6支。温度链安装完成后,监测线缆穿镀锌钢管沿防浪墙内侧监测沟敷设至监控房。此外,在溪洛渡库区沿程布设5个表层水温自动监测断面(图1),其监测设备采用固定安装或浮船锚固安装方式,每2 h监测1次表层水温。其中,白鹤滩水文站水温代表溪洛渡库区入库水温特征,溪洛渡水文站水温代表库区出库水温特征,金阳河汇口下游、美姑河汇口下游和溪洛渡坝前断面位于库区内部,其水温代表库区沿程水温变化特征。

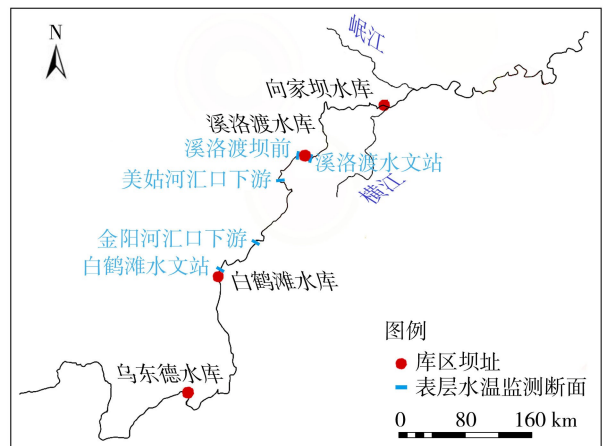


图1 梯级库区及断面布设示意图

1.1.3 研究数据

研究数据主要包括水位、流量、水温及气温数据。水位数据采用溪洛渡坝上(马家河站)2019年8月至2024年7月的逐时水位。流量数据包括溪洛渡水库2019年8月至2024年7月的逐时入库和出库流量。水温数据主要包括白鹤滩水文站、金阳

河汇口下游、美姑河汇口下游、溪洛渡坝前、溪洛渡水文站等断面 2019 年 8 月至 2024 年 7 月的表层与垂向逐时水温。此外,从水文年鉴中获取了白鹤滩水文站 2014 年 8 月至 2019 年 7 月的逐日水温及溪洛渡水文站 2016 年 8 月至 2019 年 7 月的月均水温数据。气温数据选用溪洛渡水库附近云南永善气象站 2019—2024 年的逐日气温数据,采用每日最高与最低气温的平均值进行分析。

结合水温监测时段,以每年 8 月至次年 7 月作为一个完整的监测年分析水温变化。根据上游乌东德、白鹤滩水库蓄水运行时间,将溪洛渡水库水温结构变化的分析时段分为 3 个时期:①运行期 I,乌东德水库蓄水前时段(2014 年 8 月至 2020 年 7 月);②运行期 II,乌东德水库蓄水后、白鹤滩水库蓄水前时段(2020 年 8 月至 2021 年 7 月);③运行期 III,白鹤滩水库蓄水后梯级四库联合运行期(2021 年 8 月至 2024 年 7 月)。

1.2 数据分析方法

1.2.1 数据质量控制

结合水体物理规律和监测断面地理特征,首先剔除明显失真的监测数据;随后通过统计指标(四分位距、滑动均值及数据标准差漂移)对单变量水温序列进行初步筛查,识别与整体分布偏离较大的异常数据。短时间表层水温缺失采用线性插值补齐,长时间表层水温缺失采用分段二次多项式拟合插补,垂向水温缺失及异常数据采用三次样条拟合进行重建。

1.2.2 统计分析法

基于各监测断面长序列水温观测数据,采用数理统计方法从水温的年内分布、年际变化等方面分析溪洛渡库区沿程水温的时空特征;结合水文站历史水温资料,以乌东德和白鹤滩水库蓄水时间为节点划分 3 个时期,从表层水温沿程分布、垂向水温时空分布特征两方面,系统分析上游梯级水库蓄水后溪洛渡库区水温的时空变化特征;此外,采用 Mann-Kendall(M-K)趋势分析法分析溪洛渡库区水温的长期变化趋势。

根据 GB/T 12763.7—2007《海洋调查规范 第 7 部分:海洋调查资料交换》,温跃层的空间特征通过温跃层深度、厚度和强度 3 个核心参数来表征,其中,温跃层深度指温跃层上界的深度,温跃层厚度指温跃层底界与顶界之间的距离,温跃层强度采用垂向温度梯度(VTG)表示,即单位深度上的水温变化率。在水深不足 200 m 的浅水区域中,垂向温度梯度达到或超过 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的水层即可视为温跃层,通常将表层 1 m 以内的浅层区(受太阳辐射和风浪扰

动显著)排除在温跃层判定范围之外。

考虑上下水体密度和深度的共同影响,引入热分层稳定指数 R 来衡量水库热分层稳定水平^[21],并根据指数大小划分不同分层时期: $R < 0.17 \text{ m}^{-1}$ 为未分层期, $0.17 \text{ m}^{-1} \leq R < 1.56 \text{ m}^{-1}$ 为分层形成期或消亡期, $1.56 \text{ m}^{-1} \leq R < 6.99 \text{ m}^{-1}$ 为稳定分层期。

2 结果与分析

2.1 不同时期上游来水水温变化

白鹤滩水文站位于溪洛渡库区库尾,其水温可代表白鹤滩水库出库水温和溪洛渡水库上游来水水温。图 2 为白鹤滩水文站 2014 年 8 月至 2024 年 7 月期间月均和季节平均水温的变化过程。由图 2 可见,白鹤滩水文站春季(3—5 月)平均水温变化范围为 $16.03 \sim 17.62^{\circ}\text{C}$,运行期 I 春季平均水温为 17.27°C ,运行期 II 为 17.18°C ;白鹤滩水库蓄水后第一年春季平均水温降低至 16.03°C ,第二年回升至 16.49°C ,第三年回升至 16.70°C 。对白鹤滩水文站 10 a 的春季平均水温进行 M-K 趋势分析,结果显示统计量 Z 值为 -1.25 ,表明在 0.05 显著性水平下,春季平均水温呈不显著降温趋势。白鹤滩水文站夏季(6—8 月)平均水温变化范围为 $21.11 \sim 22.23^{\circ}\text{C}$,运行期 I 夏季平均水温为 21.78°C ,运行期 III 降低至 21.26°C ,降低了 0.52°C 。夏季平均水温的 Z 值为 -1.79 ,表明水温呈显著降温趋势。白

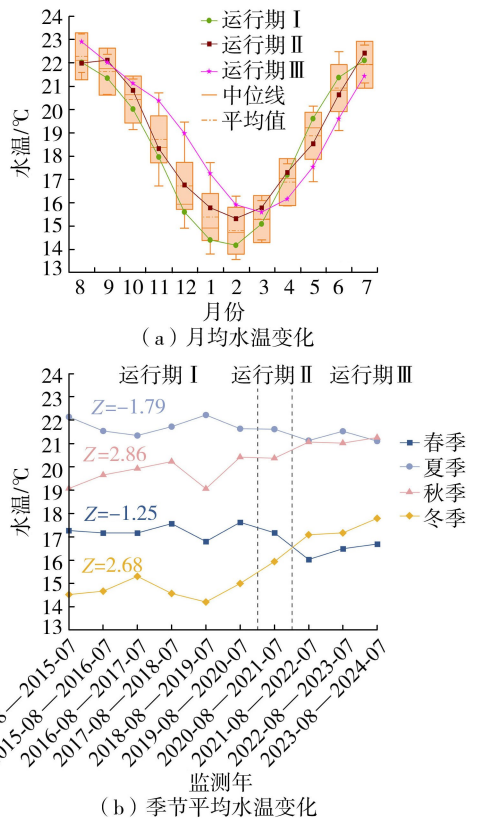


图 2 2014—2024 年白鹤滩水文站水温变化

鹤滩水文站秋季(9—11月)平均水温变化范围为19.07~21.26℃,秋季平均水温的Z值为2.86,表明在0.05显著性水平下,秋季平均水温呈显著升温趋势。运行期Ⅱ秋季平均水温为20.38℃,白鹤滩水库蓄水运行后,运行期Ⅲ秋季平均水温显著升高,第一年升高至21.07℃,第三年升高至21.26℃。白鹤滩水文站冬季(12月至次年2月)平均水温变化范围为14.20~17.80℃,2014—2024年冬季平均水温逐年升高,从运行期Ⅰ的14.71℃升高至运行期Ⅲ的17.35℃,升幅达2.64℃。冬季平均水温的Z值为2.68,表明在0.05显著性水平下,冬季平均水温呈显著升温趋势。

由表1可知,梯级水库蓄水导致下游水温呈现显著的热调节效应。蓄水后季节水温变幅收窄,表现为夏季峰值水温降低(平均降幅0.52℃),冬季谷值水温提升(平均升幅2.64℃);平均最低月均水温从运行期Ⅰ的14.10℃升高至运行期Ⅲ的15.57℃,且最低日均水温出现时间从1—2月滞后至3—4月。整体来看,乌东德和白鹤滩水库陆续蓄水后,水温变化曲线趋于平坦化,具体表现为水温年较差减小7.78%(从运行期Ⅰ的7.89℃降低至运行期Ⅲ的7.28℃)、季节极值趋中移动(运行期Ⅲ冬季水温反超春季0.95℃),形成“夏秋趋近、冬春抬升”的新型水温格局,证实了梯级水库蓄水对河流热力过程的平坦化影响。

2.2 不同时期库区水温结构变化

2.2.1 库首垂向水温结构

图3为不同运行阶段溪洛渡坝前逐时垂向水温分布示意图,表2为2019—2024年溪洛渡坝前水温

分层情况统计。5年数据序列结果表明,溪洛渡坝前水温一般于3月中下旬出现分层,秋冬季水温分层较弱或已消失;温跃层在4—6月形成,9—12月期间消失。

a. 运行期Ⅰ。2019年8—12月期间,溪洛渡坝前垂向水温介于13.95~26.69℃,水温分层持续至当年10月11日。在水温分层发展过程中,温跃层逐渐下移(从高程479m下移至高程439m),VTG逐渐增大,并于9月达到峰值0.51℃/m。2020年3月溪洛渡坝前表层水温开始回升,3月19日开始出现水温分层($R = 0.28 \text{ m}^{-1}$),5月15日R升至 1.95 m^{-1} ,进入稳定分层期。此时温跃层出现在486.5m高程附近,厚度约3m,温度范围为15.06~15.70℃。随着分层进一步发展,温跃层持续下移并带动深层水体升温,表底层温差逐渐缩小,至8月31日前后坝前分层消失,水体进入垂向同温混合阶段。运行期Ⅰ水温分层持续165d,R最大值为 2.52 m^{-1} 。分层期间坝前表层平均水温为20.09℃,底层平均水温为19.18℃,表底层平均温差为0.91℃。

b. 运行期Ⅱ。2020年10月至2021年2月,溪洛渡坝前垂向水温结构基本一致,水体处于同温状态。2021年春季,坝前表层水温开始回升,表底层温差逐渐加大,3月29日水温分层开始形成($R = 0.26 \text{ m}^{-1}$),5月9日R升高至 1.57 m^{-1} ,标志着稳定分层期形成。分层期间,温跃层由高程490~524m逐渐下降至460~489m,VTG逐渐增大,7月9日VTG达到最大值0.57℃/m,温跃层顶部高程位于479m处。随着温跃层下移,深层水体逐渐升温,至

表1 2014—2024年白鹤滩水文站水温统计值

运行期	时间	年平均水温/℃	最低月均水温/℃	最低日均水温/℃	最低日均水温出现时间
Ⅰ	2014-08-01—2015-07-31	18.26	14.11	13.30	2015-01-13
	2015-08-01—2016-07-31	18.26	13.57	13.00	2016-02-04
	2016-08-01—2017-07-31	18.44	14.90	14.20	2017-02-28
	2017-08-01—2018-07-31	18.53	13.80	12.30	2018-02-05
	2018-08-01—2019-07-31	18.08	13.80	13.40	2018-12-30
	2019-08-01—2020-07-31	18.67	14.43	14.02	2020-02-20
Ⅱ	2020-08-01—2021-07-31	18.78	15.30	14.91	2021-02-21
	2021-08-01—2022-07-31	18.83	15.35	15.11	2022-03-07
Ⅲ	2022-08-01—2023-07-31	19.05	15.58	14.95	2023-03-26
	2023-08-01—2024-07-31	19.22	15.77	15.50	2024-04-08

表2 2019—2024年溪洛渡水库坝前水温分层情况统计

运行期	时间	分层开始时间	分层结束时间	分层持续时间/d	平均温跃强度/(℃/m)	表层平均水温/℃	底层平均水温/℃	表底层平均温差/℃
Ⅰ	2019-08-01—2020-07-31	2020-03-19	2020-08-31	165	0.50	20.11	19.18	0.93
Ⅱ	2020-08-01—2021-07-31	2021-03-29	2021-10-08	194	0.55	21.23	20.25	0.98
	2021-08-01—2022-07-31	2022-03-19	2022-10-09	204	0.45	21.07	19.90	1.17
Ⅲ	2022-08-01—2023-07-31	2023-03-09	2023-09-23	198	0.38	20.86	19.64	1.22
	2023-08-01—2024-07-31	2024-04-01	2024-10-02	184	0.34	22.66	19.99	2.67

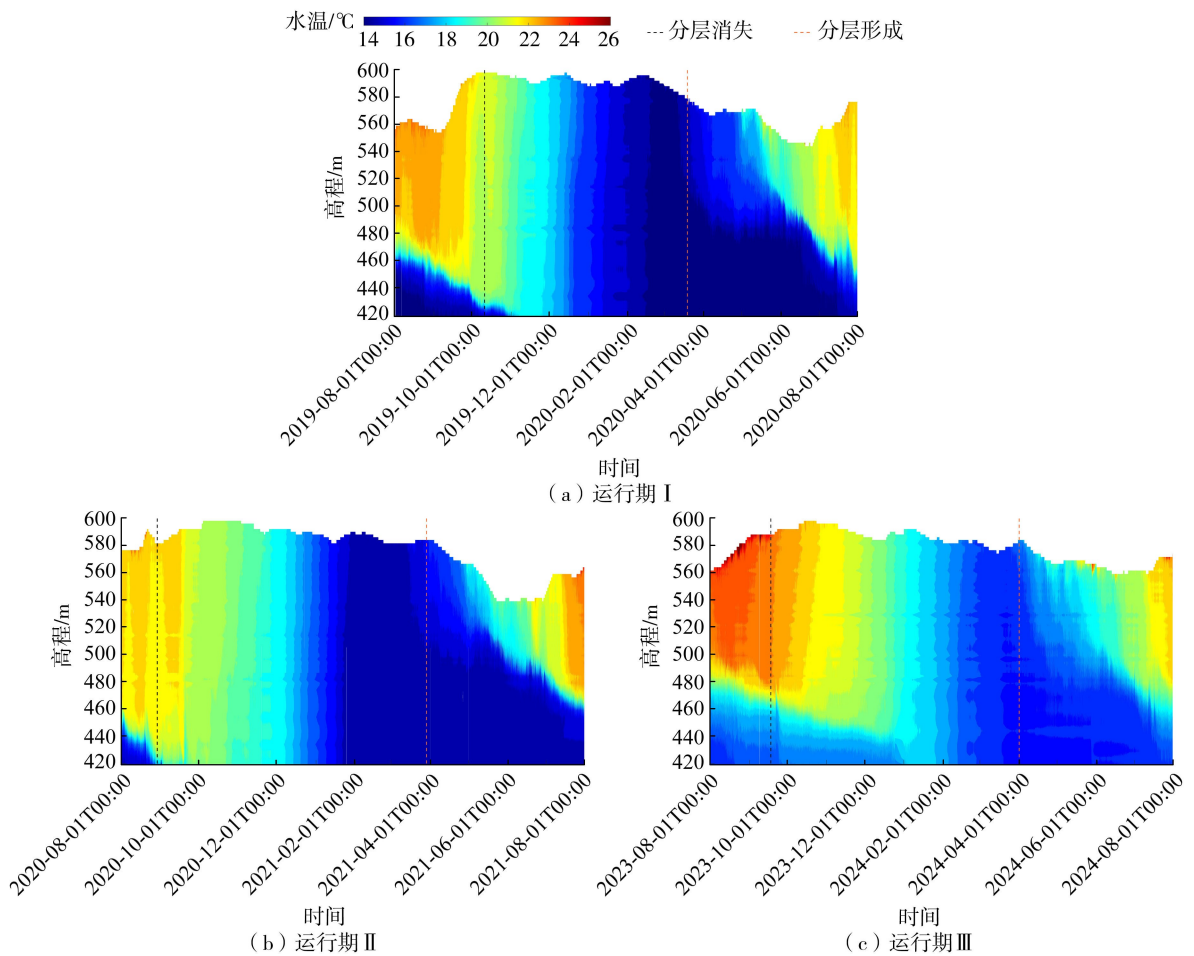


图3 不同运行阶段溪洛渡坝前逐时垂向水温分布

10月8日分层结束($R=0.15\text{ m}^{-1}$)。运行期Ⅱ水温分层持续约194 d,较运行期Ⅰ延长29 d。分层期间,坝前表层平均水温为 $21.23\text{ }^{\circ}\text{C}$,底层平均水温为 $20.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,表底层平均温差较运行期Ⅰ增大至 $0.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

c. 运行期Ⅲ。白鹤滩水库蓄水后3年分层期间表底层平均温差分别为 1.17 、 1.21 、 $2.67\text{ }^{\circ}\text{C}$,呈逐年上升趋势;水温分层起始时间分别为3月19日、3月9日和4月1日前后,对应的分层持续时间分别为204、198、184 d。在温跃层发育过程中,3年分层期间VTG的年均值分别为 0.45 、 0.38 、 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, R 最大值分别达到 2.27 、 2.81 、 3.71 m^{-1} 。与运行期Ⅰ相比,运行期Ⅲ水温分层持续时间逐渐缩短,VTG略有减小,而 R 增大,表明随着水库运行时间延长,热分层结构逐渐趋于稳定。

2.2.2 库区沿程水温分布

溪洛渡库区回水至白鹤滩水文站,回水区水温具有典型的库区调节特征,沿程水温变化较天然河道表现出明显的滞后效应。图4和图5分别为溪洛渡库区沿程断面的年均水温和日均水温变化过程。

由图4可见,溪洛渡库区呈现“入库低温-库中

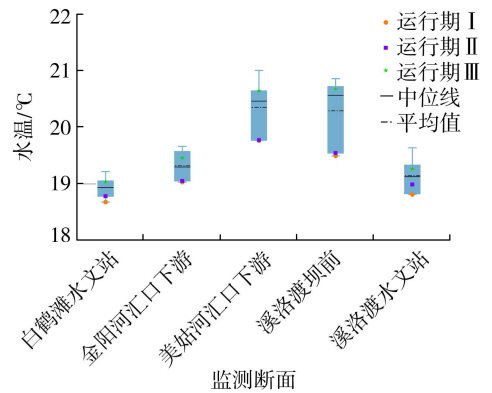


图4 2019—2024年沿程各断面年均水温变化

升温-下泄低温”的沿程年均水温分布规律。运行期Ⅰ沿程年均水温从白鹤滩水文站的 $18.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至美姑河河口下游的 $19.79\text{ }^{\circ}\text{C}$,经溪洛渡库区调节后,坝下水文站年均水温降至 $18.95\text{ }^{\circ}\text{C}$,出库年均水温较坝前偏低 $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。运行期Ⅲ沿程年均水温分布趋于平缓,各断面年均水温提升 $0.33\sim 1.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中坝前升温幅度最大($1.18\text{ }^{\circ}\text{C}$),入库和出库断面升温相对较小(分别为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$),出库水温较坝前降低 $1.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由图5可见,库区对水温的调节作用在降温期表现明显。运行期Ⅲ10月至次年4月沿程各断面

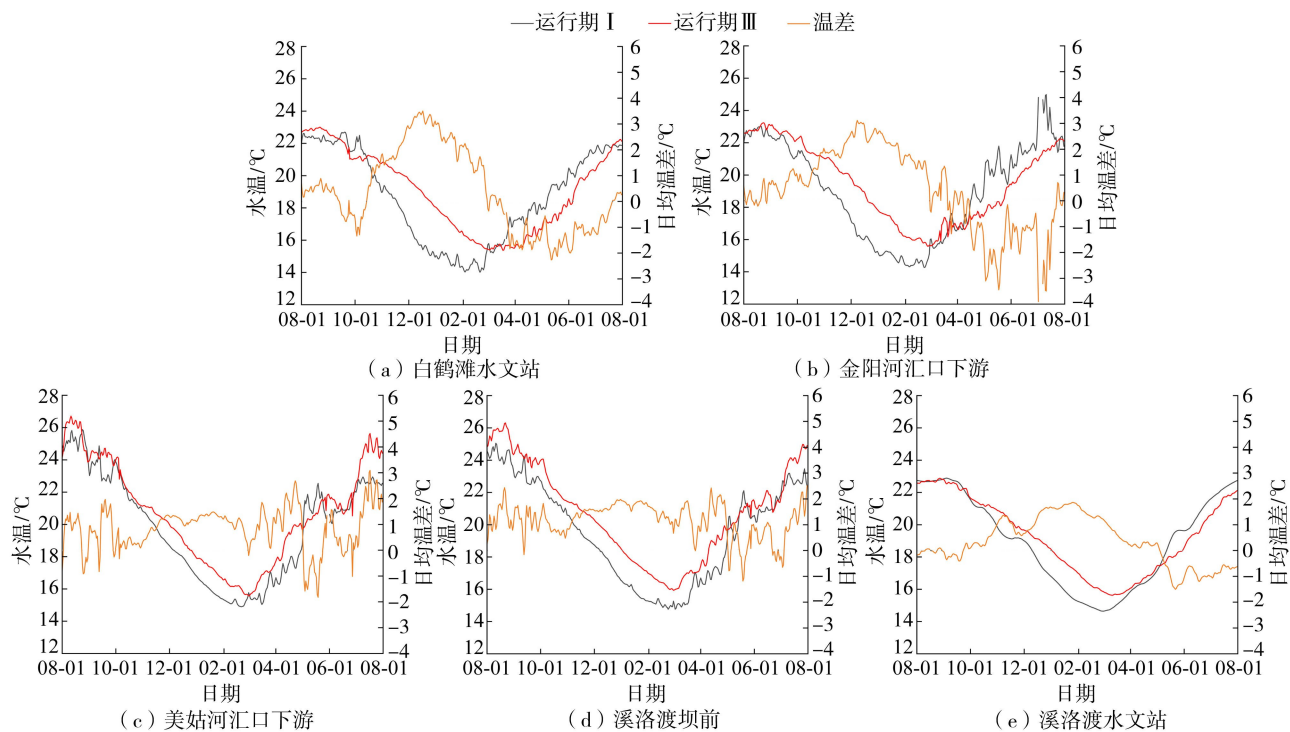


图5 2019—2024年沿程各断面日均水温变化过程

日均水温显著提升,白鹤滩水文站11月至次年2月平均升高 2.28°C ,金阳河汇口下游9月至次年2月升高 1.68°C ,美姑河汇口下游10月至次年4月升高 1.03°C ,溪洛渡坝前8月至次年4月升高 1.38°C ,溪洛渡水文站10月至次年4月升高 0.95°C 。沿程各断面最低水温升高 $0.67\sim 1.36^{\circ}\text{C}$,年内水温极差多数断面降低 $0.99\sim 3.10^{\circ}\text{C}$ 。此外,受库区调蓄影响,各监测断面最低水温出现时间较蓄水前滞后 $4\sim 26\text{d}$ 。

整体而言,梯级水库群蓄水运行后,库区良好的热容量调节能力改变了溪洛渡库区的水温时空分布特征,削弱了沿程水温的季节性波动幅度,增强了水温的时空稳定性。这种温度缓冲作用减缓了环境变化对水温的影响,特别是在低温期显著改善了下游河段的水温条件。

2.3 库区下泄水水温的变化过程

溪洛渡水文站位于溪洛渡大坝下游约 3 km 处,受溪洛渡大坝下泄水温的直接影响,其水温可以代表溪洛渡库区出库水温特征。图6为溪洛渡水文站2016年8月至2024年7月的月均水温和季节平均水温的变化过程。表3为2016—2024年溪洛渡水文站水温统计值。

乌东德和白鹤滩水库蓄水运行后,库区热分层调节机制改变了下泄水温特征,水库蓄水后储存夏季高温期的热量,并在秋冬季释放,表现为蓄水后(运行期III)冬季平均水温(17.72°C)较蓄水前(运行期I)的平均下泄水温(15.79°C)升高了 1.93°C 。

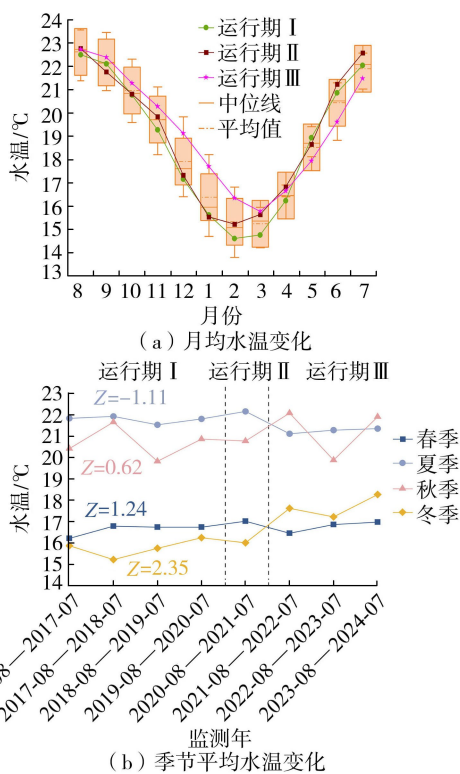


图6 2016—2024年溪洛渡水文站水温变化

冬季平均水温的 Z 值为 2.35 ,表明在 0.05 的显著性水平下冬季平均水温呈显著升温趋势。运行期I的秋季平均水温为 20.70°C ,运行期III的秋季平均水温较运行期I升高了 0.60°C 。

梯级水库蓄水的另一影响表现为,冬季库区储存的低温水使得次年春末夏初下泄水温偏低,下泄水温过程出现滞后化和平坦化特征。运行期III的夏

表3 2016—2024年溪洛渡水文站水温统计值

运行期	时间	年平均水温/℃	最低月均水温/℃	最低日均水温/℃	最低日均水温出现时间
I	2016-08-01—2017-07-31	18.60	14.21		
	2017-08-01—2018-07-31	18.91	13.80		
	2018-08-01—2019-07-31	18.12	13.60		
	2019-08-01—2020-07-31	18.92	14.94	14.65	2020-03-01
II	2020-08-01—2021-07-31	19.00	15.23	15.04	2021-02-11
	2021-08-01—2022-07-31	19.33	15.62	15.41	2022-03-12
III	2022-08-01—2023-07-31	18.82	15.72	15.45	2023-03-08
	2023-08-01—2024-07-31	19.64	15.95	15.72	2024-03-21

季平均水温(21.26℃)较运行期 I (21.78℃)降低了0.52℃,较运行期 II (22.17℃)降低了0.91℃。与秋冬季相比,夏季水温显著升高,但受汛期大流量和库区消落影响,高温水体在库区滞留时间较短,水温调节效应相对较弱。经 M-K 趋势分析,夏季平均水温的 Z 值为-1.11,未达到0.05显著性水平检验。由表3可见,运行期 III 3年中最低日均水温的出现时间较运行期 I 平均滞后约12 d。

2.4 梯级水库蓄水影响

上游梯级水库蓄水运行改变了下游库区的入库水温和流量过程,对溪洛渡库区水温时空分布产生累积影响。该影响主要通过热分层调节机制实现,表现为3个方面的变化特征:库区热分层结构演变、下泄水温平坦化和下泄水温滞后化。

2.4.1 库区热分层结构演变

根据溪洛渡坝前2019—2024年垂向水温分布结果可知,上游梯级水库运行影响了下游库区热分层结构。乌东德水库蓄水初期(运行期 II),热分层持续时间由蓄水前的165 d延长至194 d,表底层平均温差由0.93℃增至0.98℃;白鹤滩水库蓄水后(运行期 III),热分层持续时间逐年缩短(由首年204 d降至第二年的198 d再降至第三年的184 d),表底层平均温差进一步增大(最高达2.67℃),热分层稳定指数峰值由蓄水前的 2.52 m^{-1} 增至 3.71 m^{-1} ,表明上游水库调蓄作用增强了热分层稳定性。运行期 III 的分层起始时间较运行期 I 滞后了13 d,年均 VTG 由运行期 I 的 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 减小至白鹤滩蓄水后(运行期 III)第一年的 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、第二年的 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 及第三年的 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

库区热分层的季节演变规律表现为:蓄水期受气温下降影响,上游低温水与库区原有高温水体混合,库区水温随之下降;消落期气温回暖,上游干支流的水温开始回升,入库水温介于表层与底层水温之间,同时水库水位持续下降,库区水体热缓冲效应减弱;汛期入库高温水与库区底层低温水形成显著垂向温差,随着底层低温水持续下泄,新汇入的高温水体不断累积,温跃层位置逐渐下移;秋冬季表层水

温降低,垂向掺混促使下层水温相应升高,垂向温差缩小,水体趋于同温状态。由于上游乌东德和白鹤滩梯级水库投产运行时间较短,其对下游库区垂向水温结构的长期影响仍需持续监测。

2.4.2 下泄水温平坦化

水库蓄水运行后吸收和储存大量热能,对外界温度波动起到缓冲作用,能够有效减缓水温的剧烈波动,使得溪洛渡下泄水温呈现“秋冬高春夏低”的新型变化趋势。由于水库巨大的热容量,夏季蓄积的高温水体降温缓慢,在秋冬季仍能持续释放热量,导致秋冬季下泄水温明显升高。白鹤滩水库蓄水后冬季平均水温(17.72℃)较蓄水前升高1.93℃,M-K趋势分析显示冬季平均水温呈显著升温趋势($Z=2.35, p<0.05$);秋季平均水温也从蓄水前的20.70℃升高至21.30℃。冬季滞留库区内的低温水体在次年春夏季下泄,使得夏季下泄水温较蓄水前降低0.53℃。

水库蓄水增强了库区水体的掺混作用,促进了热量在不同深度间的传递,促使垂向水温分布趋于均匀化,从而降低了下泄水体温度的年内变化幅度,表现为高温降低、低温升高,年内极值变幅逐渐减小,水温变化曲线趋于平坦化。乌东德水库蓄水前下泄水温年内极差为8.55℃(最高值22.89℃,最低值14.34℃);白鹤滩水库蓄水后第一年水温极差降至8.50℃(最高值23.90℃,最低值15.40℃),降幅0.6%;至蓄水后第三年水温极差进一步缩小至7.60℃(最高值23.32℃,最低值15.72℃),降幅达11.1%,表明下泄水温的平坦化程度随时间推移逐渐增强。

2.4.3 下泄水温滞后化

梯级水库蓄水运行后,水深增加使水体热容量大幅提升,水体对热量的吸收和释放过程变得更加缓慢,导致水温对气象条件的响应滞后于天然河道,下泄水温变化出现滞后化,蓄水后水温变化曲线相对于天然河道产生时序偏移,最低水温出现时间滞后。乌东德水库蓄水前溪洛渡水文站最低日均水温出现在3月1日,而乌东德和白鹤滩水库蓄水后,最

低日均水温出现时间总体呈滞后趋势:蓄水第一年推迟至3月12日,第二年略有提前至3月8日,第三年进一步推迟至3月21日前后。统计分析表明,蓄水三年来最低水温出现时间较蓄水前平均滞后约12d。

3 结 论

a. 梯级水库蓄水运行通过库区热分层调节机制,改变了下游库区垂向水温结构,增强了热分层稳定性。热分层结构呈现春季形成,夏季达到稳定,秋冬季消失的周期性特征。白鹤滩水库蓄水后溪洛渡水库热分层持续时间由165d增加至195d(3年平均),垂向温度梯度降低,而热分层稳定指数峰值由蓄水前的 2.52 m^{-1} 增至 3.71 m^{-1} ,且分层稳定性随梯级数量增加而增强。

b. 梯级水库蓄水后具有良好的水温缓冲性,下游水温呈现“秋冬高春夏低”的新型变化趋势,蓄水增强了库区水体掺混,降低了下泄水温的年内变幅,水温变化趋于平坦化,且平坦化程度逐年增强。入库水温夏季均值降低 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季升高 $2.64\text{ }^{\circ}\text{C}$,年较差减小7.78%,季节水温极值趋中移动;出库水温夏季均值降低 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季升高 $1.93\text{ }^{\circ}\text{C}$,蓄水3年后年内极值变幅降低0.6%~11.1%。

c. 梯级水库蓄水后水体热容量大幅提升,下泄水温相对于天然河流出现明显滞后。从溪洛渡库尾至坝下水文站,最低水温出现时间较蓄水前滞后4~26d,蓄水3年来溪洛渡水文站最低水温出现时间较蓄水前平均滞后约12d。

参考文献:

[1] Boota M W, Soomro S E H, Xia Haoming, et al. Distribution and bioaccumulation of trace elements in two *Cyprinidae* fish species in the Indus river, Pakistan, including the impact of hydraulic structure on macroinvertebrates' biodiversity [J]. Environmental Research, 2024, 252: 118882.

[2] Soomro S E H, Shi Xiaotao, Guo Jiali, et al. Effects of seasonal temperature regimes: does *Cyprinus carpio* act as a health hazard during the construction of Suki Kinari hydropower project on Kunhar River in Pakistan? [J]. Science of the Total Environment, 2024, 907: 168023.

[3] 孙晓娟,余真真,左其亭,等. 水沙调控影响下小浪底水库水温模拟与演变特性[J]. 水资源保护, 2026, 42(1): 162-172. (Sun Xiaojuan, Yu Zhenzhen, Zuo Qiting, et al. Simulation and evolution characteristics of water temperature in the Xiaolangdi Reservoir under influence of water-sediment regulation [J]. Water Resources

Protection, 2026, 42(1): 162-172. (in Chinese))

[4] 郝好鑫,杨霞,杨梦斐,等. 金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 247-256. (Hao Haoxin, Yang Xia, Yang Mengfei, et al. Impacts of the cascade reservoirs of Jinshajiang River on water temperature and fish spawning time [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 247-256. (in Chinese))

[5] 王康,肖洋,毛劲乔,等. 水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 50-55. (Wang Kang, Xiao Yang, Mao Jingqiao, et al. Study on the spawning period of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 50-55. (in Chinese))

[6] Lu Shibao, Shang Yizi, Li Wei, et al. Economic benefit analysis of joint operation of cascaded reservoirs [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179: 731-737.

[7] Sun Qiao, Wang Jigan, Zhang Jie, et al. Selecting reservoir reconstruction schemes from an ecological-economic trade-off perspective: model building and case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134183.

[8] Shi Jianchao, Wang Lianxiang, Yang Yongrui, et al. A case study of thermal and chemical stratification in a drinking water reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2022, 848: 157787.

[9] Wang Li, Liu Jiarui, Bao Zhen, et al. Predictable shifts in diversity and ecosystem function in phytoplankton and zooplankton communities along thermocline stratification intensity continua [J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 168981.

[10] Madyouni H, Magermans P, Benabdallah S, et al. Simulation of thermal stratification and water temperature dynamics in the Joumine reservoir (Tunisia) [J]. Ecological Informatics, 2025, 86: 103012.

[11] Castrillo M, Aguilar F, García-Díaz D. A data-driven approach for the assessment of the thermal stratification of reservoirs based on readily available data [J]. Ecological Informatics, 2024, 82: 102672.

[12] Zhao Wenyan, Zhang Tao, Li Jianhong, et al. Spatio-temporal variability of the reservoir thermocline: insights from monitoring data and numerical modelling [J]. Hydrological Processes, 2025, 39(4): e70109.

[13] He Chunshan, Zhang Zhiguang, Wei Yuanqin, et al. The impact of cascade reservoirs development on the water temperature of a river basin: from the perspective of field data monitoring and historical data analysis [J]. River Research and Applications, 2025, 41(6): 1228-1241.

(下转第139页)

大型立交地涵上下游连接段底坡坡比对其水力特性的影响

曹伽¹, 林青炜¹, 王辉², 陈武³, 唐立模¹, 屈一晗¹, 曾清¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 江苏省淮沭新河管理处; 3. 江苏省骆运水利工程管理处)

摘要:为探究大型立交地涵上下游连接段底坡坡比对其水力特性的影响,以淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵为研究对象,采用1:30正态断面物理模型和OpenFOAM三维数值模型,开展了上下游连接段底坡坡比参数研究,从过流能力、流速分布、断面能量、水头损失、湍动能及其耗散率等方面对不同流量水位条件下的地涵水力特性进行了分析。结果表明:地涵总水头损失系数随上下游连接段底坡坡比增大呈先缓慢减小后迅速增大的非线性变化规律,总水头损失系数在0.837~1.464之间变化;下游涵首及连接段总水头水力坡降最大,其水头损失占比达55.07%~72.67%,并且对底坡变化最为敏感;坡比过大和过小均易引发不良流态,影响地涵过流能力,底坡坡比为1:7的方案水头损失最小,流态最优,并在不同流量下表现出优良且稳定的水力性能,其流量系数范围为0.868~0.928。

关键词:立交地涵;底坡坡比;水力特性;水头损失系数;淮河入海水道滨海枢纽

Influence of bottom slope ratio of upstream and downstream connecting sections on hydraulic characteristics of large interchange culverts//Cao Jia¹, Lin Qingwei¹, Wang Hui², Chen Wu³, Tang Limo¹, Qu Yihan¹, Zeng Qing¹
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Jiangsu Huai-Shu Xinhe Management Office; 3. Jiangsu Luoyun Management Division)

Abstract: To investigate the influence of the bottom slope ratio of the upstream and downstream connecting sections on the hydraulic characteristics of large interchange culverts, the interchange culvert of the Binhai Hub of the Huaihe River Sea-Entry Channel (Phase II Project) was taken as the research object. A parametric study on the bottom slope ratio of the upstream and downstream connecting sections was conducted using a 1:30 normal-section physical model and the OpenFOAM three-dimensional numerical model. The hydraulic characteristics of the culvert under different flow rate and water level conditions were analyzed in terms of flow capacity, velocity distribution, sectional energy, head loss, turbulent kinetic energy, and turbulent dissipation rate. The results show that the total head loss coefficient of the culvert exhibits a nonlinear variation pattern, first decreasing slowly and then increasing rapidly, with the increase of the bottom slope ratio of the upstream and downstream connecting sections. The total head loss coefficient varies between 0.837 and 1.464. The maximum hydraulic gradient of total head occurs at the downstream culvert inlet and its connecting section, where the head loss accounts for 55.07% to 72.67% of the total head loss, and this section is the most sensitive to changes in bottom slope. Both excessively large and excessively small bottom slope ratios are prone to inducing unfavorable velocity patterns, thereby affecting the flow capacity of the culvert. The scheme with a bottom slope ratio of 1:7 exhibits the minimum head loss, the optimal flow pattern, and excellent and stable hydraulic performance under different flow rates, with its flow coefficient ranging from 0.868 to 0.928.

Key words: interchange culvert; bottom slope ratio; hydraulic characteristics; head loss coefficient; the Binhai Hub of the Huaihe River Sea-Entry Channel

立交地涵主要用于解决水系河道之间的交汇问题,在我国防洪排涝工程和引调水工程中应用广

泛^[1]。随着工程应用的不断深入,其运行环境正经历显著变化。近年来,受全球气候变化影响,极端降

基金项目:淮河入海水道二期工程枢纽建设质量及安全保障提升关键技术研究项目(RHSD2/FW-2024-03);国家重点研发计划项目(2022YFC3202603)

作者简介:曹伽(2001—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:408653485@qq.com

通信作者:唐立模(1977—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:tanglimo@hhu.edu.cn

雨与洪水事件呈现出发生频率上升、强度增大的趋势,对流域防洪排涝体系整体的安全性与可靠性提出了更高要求^[2-3]。这种极端水文情势的持续加剧,使得传统防洪工程在设计标准、运行工况及安全储备等方面可能面临不同程度的适应性不足问题^[4-6]。在此背景下,立交地涵作为流域防洪排涝系统中的关键节点工程,承担着洪水过流与区域排涝的重要功能,其水力性能直接影响流域防洪体系的运行效能。因此,系统开展大流量工况下立交地涵水力特性及其影响机理研究,对于完善工程设计理论、提升防洪排涝能力具有直接意义,同时也对后续工程优化中防止泥沙淤积^[7-8]、延长工程使用寿命^[9]等方面具有重要参考价值。

立交地涵按断面形式通常可分为倒虹吸式、竖井式、上槽下洞式^[10-13]3种类型,不同形式在水头损失以及水力特性等方面存在差异。在实际运行过程中,立交地涵内部涉及“明渠流-有压涵流-明渠流”的复杂流态转换,在结构内部以及上下游范围容易引发泥沙淤积和不良流态等工程问题。国内外学者对此开展了大量研究。例如:吴时强等^[14]针对地涵下游河道回流区不良流态和高流速区域过大等问题,根据物理模型和二维水流数学模型结果,改进了翼墙布置形式,较好地改善了下游流态;傅朝康^[15]通过水工模型试验和数值模拟对废黄河立交地涵工程进行了防冲减淤研究,指出河道上游左岸区域因水动力较弱而成为主要淤积区域;朱明成等^[16]采用局部物理模型对新孟河奔牛立交地涵枢纽工程开展了过流能力、通航水流和泥沙淤积研究,根据涵孔的淤积平衡形态提出了地涵涵孔和纵剖面体型的优化方案。国外研究则更多聚焦于涵洞体型的水力优化与设计理论。例如:Nassralla^[17]分析了涵洞进出口扩散角与宽度收缩比对水力损失的影响,发现当进口收缩角为 15° 、宽度收缩比为2.33时进口能量损失最小;Jaeger等^[18-19]采用数值模拟和物理模型试验方法,研究了涵洞进口和顶部翼墙角度对过流能力的影响,发现具有 45° 倒角的圆形进口产生的湍动能最小,对过流能力的提升效果最好,并建议添加通风装置以进一步提升涵洞的过流能力;Sellevold

等^[20]在总结现有涵洞设计与数据的基础上,提出近似椭圆弧的进口边缘设计可有效减少水头损失;McKay^[21]基于临界流理论开发了最小能量损失(MEL)涵洞及其设计方法,在提高过流能力的同时有效降低了工程成本;Chanson^[22]统计了MEL涵洞工程40年的应用效果,证明了设计的合理性,并进一步强调了涵洞结构流线型的重要性。

可见,目前国内外关于立交地涵的研究多针对过流能力和泥沙淤积,对于大流量工况下立交地涵不同位置的流态演变和水力损失的系统及量化研究尚显不足。此外,地涵的结构特点决定了上下游连接段的底坡形式可能显著影响过涵水流,但围绕底坡参数对地涵水动力影响的敏感性研究在国内外尚不多见。本文以淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵为例,通过数值模拟结合物理模型试验对高淹没条件下大流量立交地涵进行研究,开展了上下游底坡参数对水动力影响的敏感性分析,揭示了不同行洪条件下地涵各部位的水力特性,以期为更好地发挥立交地涵防洪排涝作用以及地涵工程设计提供技术支撑。

1 工程概况

淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵位于江苏省滨海县淮河入海水道与通榆河交汇处,形式为上槽下洞式,上部为通榆河航道,下部为淮河入海水道(图1)。地涵主体由上游涵首段、涵身段、下游涵首段组成,沿水流方向总长100.00m,与上下游入海水道明渠通过连接段进行过渡。上游涵首段长27.50m,进口底高程-6.70m,与上游明渠段(底高程为-4.50m)通过底坡连接,向下经过两段圆弧段和一段斜直段过渡至涵身水平段,圆弧段半径分别为12.00、11.00m,斜直段与水平方向夹角为 38° ;涵身段底高程为-12.90m,长45.00m,矩形断面高6.50m、宽6.00m;下游涵首段长27.50m,与涵身通过斜直段连接,出口处底高程为-10.60m,通过底坡过渡至下游明渠段(底高程为-4.50m)。淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵建成后入海水道设计行洪流量将提高至 $7000\text{ m}^3/\text{s}$,并使洪泽湖防洪

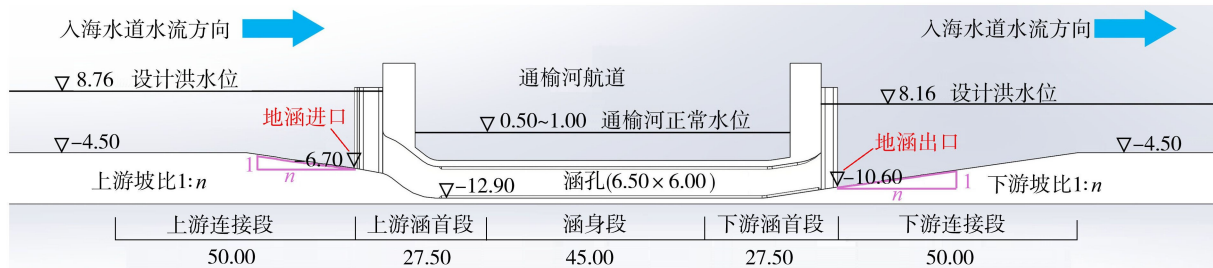


图1 滨海枢纽立交地涵布置(单位:m)

标准由 100 年一遇提高到 300 年一遇,同时可有效减少周边滞洪区进洪机遇。

2 研究方法

2.1 数学模型

按照工程原型建立淮河入海水道二期工程滨海枢纽地涵数学模型,由于立交地涵结构复杂,水平方向存在导流墩收缩段,重力方向存在圆弧过渡段,概化为二维模型难以准确描述水流特性,故建立三维数值模型。滨海枢纽地涵共有 63 孔(一期工程和二期工程),地涵横向宽度为 560.90 m,单孔净宽 6.00 m,两侧导流墩厚度为 0.55 m,过涵水流方向与入海水道方向平行。模型设置双孔(一个完整孔和两侧两个半孔)地涵断面模型,为避免上下游边界对地涵水流流态的影响,依据相同形式总渠地涵研究^[12],以地涵进出口为界分别向上下游设置 190.00 m(约 30D, D 为洞孔高度)、160.00 m 的过渡段,模拟范围长 450.00 m,宽 14.20 m,高 29.20 m。

基于通用计算流体力学开源平台 OpenFOAM 对地涵数学模型进行模型设置和方程求解。地涵出口处底部高速水流带动顶部水流旋转,且流动属于强湍流运动,故采用雷诺时均模型并选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[23]对方程进行封闭。RNG $k-\varepsilon$ 模型引入重整化群理论,对湍流耗散率扩散方程在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上进行了修正,使得其对于旋转结构能够有更加精确的模拟结果。数学模型相关控制方程可参考文献^[24]。

采用体积函数法(VOF)模拟空气与水的相界面位置及水面变化。基于有限体积法求解数学模型控制方程,空间离散采用二阶迎风格式,时间离散采用一阶隐式格式,速度压力解耦采用基于分离求解器的 PIMPLE 算法^[25]。考虑湍流脉动对流速提取的影响,当流场内水位稳定时取稳定后 500 s 时间段的流场数据进行分析。

模型进口分为水相进口和气相进口,水相为质量流量进口边界,气相为压力进口边界;出口边界为压力出口边界,满足静水压强分布;地涵壁面和侧壁与物理模型试验保持一致,采用壁面边界,并采用粗糙壁面函数,根据文献^[26]设置混凝土抹面对应参数。

考虑计算精度与计算效率,地涵数学模型采用结构化六面体网格划分,网格采用渐变网格,在地涵上下涵首位置以及水面附近网格进行加密,并进行网格无关性检验,选择上下游水深以及地涵总水头损失作为网格评判标准,计算结果见表 1。断面之间水头损失根据断面能量差值计算,断面能量及水头损失按下式计算:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_{w12} \quad (1)$$

式中: z_i 为断面位置水头, $i=1,2$; p_i 为断面静压; ρ 为流体的密度; g 为重力加速度; u_i 为断面流速; h_{w12} 为两个断面之间的水头损失; $z_i + p_i/\rho g$ 为断面测压管水头; $u_i^2/2g$ 为断面流速水头。物理模型结果在计算流速水头时可按照 $\alpha_i \bar{u}_i^2/2g$ 计算,其中, α_i 为断面的动能校正系数, \bar{u}_i 为断面平均流速。数学模型结果在计算时为了避免动能校正系数对结果的影响,采用对整个断面进行积分计算的方法。断面能量的计算方法可参考文献^[27]。

表 1 数学模型网格无关性验证

编号	网格数/万	上游水深/m	下游水深/m	总水头损失/m
1	10.1	12.970	12.652	0.318
2	14.2	12.993	12.648	0.346
3	24.3	13.010	12.655	0.351
4	67.2	13.018	12.649	0.355
5	116.2	13.013	12.650	0.358

随着网格数量的增加,上下游水深以及地涵总水头损失趋于稳定,当网格数量从 67.2 万增加至 116.2 万时,地涵上下游水深变化幅度均小于 0.1%,地涵总水头损失变化幅度小于 0.85%,表明网格数为 67.2 万时地涵数学模型的流场数据已满足网格无关性检验的要求,此时网格划分见图 2,其中沿 x 、 y 、 z 方向的网格数量分别为 810、24 和 67。以地涵出口断面为典型断面,沿 x 方向的相邻网格比为 1.0004 : 1;沿 y 方向的相邻网格比为 1 : 1;沿 z 方向位于明渠底与地涵底的区间(高程为 -12.9 ~ -4.5 m)网格比为 1 : 1,在明渠底与水面位置向中间水深位置的网格比为 1.0294 : 1;壁面法向网格尺度为 0.023D。

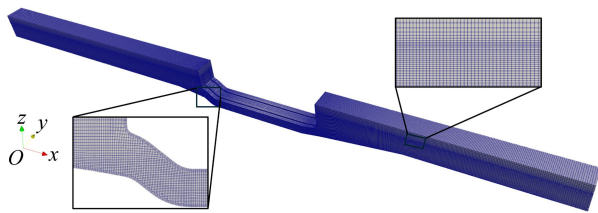


图 2 数学模型网格划分

模型沿程共布置 9 个测量断面 CS1 ~ CS9(图 3),每个测量断面沿垂线方向布设 5 个流速测点,测点高度分别位于 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 倍水深位置。

以淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵设计行洪工况作为模型验证工况,设计行洪工况下流速模拟值与试验值对比见图 4(地涵上下游连接段底坡坡比为 1 : 7)。地涵上下游水位断面 CS1 与 CS8 的流速最大误差为 5.93%,地涵出口断面底部

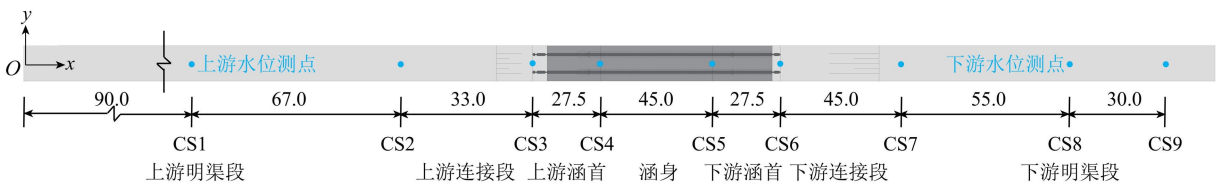


图3 流速及水位测点布置(单位:m)

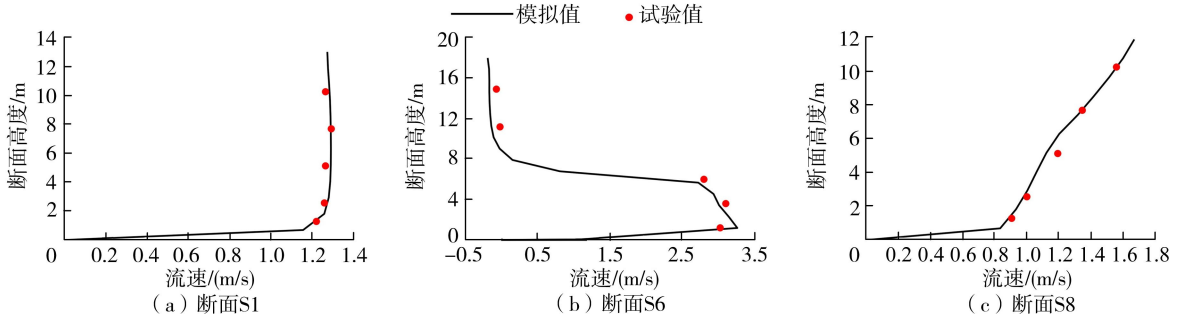


图4 设计行洪工况下流速模拟值与试验值对比

高流速点最大误差为 7.85%，顶部测点流速绝对误差小于 0.121 m/s。误差可能来自模型试验过程中的测量误差，也可能是由于数值模拟网格划分不够精细或湍流模型的适用性。但整体上数值模拟结果与模型试验结果吻合程度较好，说明了采用数值模拟进行立交地涵水力特性研究具有一定的可行性。

2.2 断面物理模型

地涵水流运动主要受重力作用驱动，因此选择重力相似作为相似准则进行断面物理模型设计，正态模型几何比尺为 1 : 30。选择有机玻璃制作地涵整体和上下游明渠部分，确保模型壁面糙率与混凝土表面糙率相对应。地涵断面物理模型布置见图 5。物理模型使用旋桨式流速仪对地涵流速进行测量；在每个测量断面底部布设连通管外接水尺读取水位；流量通过电磁流量计读取。

2.3 研究方案设计

立交地涵上下游涵首的体型设计通常以进出口底高程作为固定控制点，并由此向上下游进行过渡连接。其中，上下游连接段的关键体型参数为底坡坡比，鉴于实际工程上下游常采用相同底坡坡比并且多以“1 : n”形式表示，本文将研究参数统一设定为坡比 1 : n，具体见图 1。为便于对结果进行量化分析，进一步将坡比 1 : n 量化为单一参数 i (即 $i =$

$1/n$)。以设计行洪流量 7000 m³/s (对应双孔流量 222.22 m³/s) 为基准，采用数值模拟方法对不同坡比方案 (方案 1~10) 进行对比分析，旨在便捷且高效地获得地涵水力特性随底坡参数的变化规律，据此筛选出最优底坡方案。在此基础上，采用模型试验结合数值模拟的方式，对最优底坡方案开展不同流量水位组合工况 (方案 6、11 和 12) 下的水力特性分析与验证，全面评估其性能，并进行更深层次的机理分析，确保研究结论的准确性和丰富性。具体研究方案设计见表 2。

表2 研究方案设计

方案编号	n	i	行洪流量/(m ³ /s)	下游水位/m
1	0.5	2.00	7000	8.16
2	1.0	1.00	7000	8.16
3	1.5	0.67	7000	8.16
4	3.0	0.33	7000	8.16
5	5.0	0.20	7000	8.16
6	7.0	0.14	7000	8.16
7	9.0	0.11	7000	8.16
8	11.0	0.09	7000	8.16
9	13.0	0.08	7000	8.16
10	15.0	0.07	7000	8.16
11	7.0	0.14	6000	7.54
12	7.0	0.14	5000	6.89

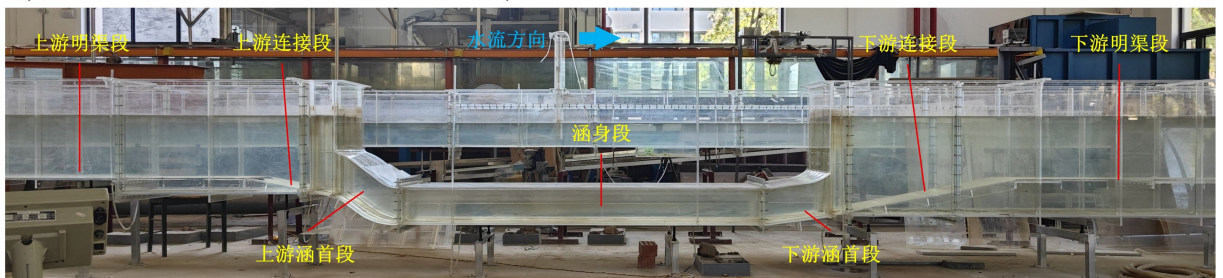


图5 地涵断面物理模型

3 结果与分析

3.1 底坡参数对地涵水力特性的影响

3.1.1 流速分布

上下游连接段不同底坡参数条件下地涵纵剖面与断面流速对比结果分别如图6和图7所示(图中均为提取的水相结果)。总体来看,地涵不同位置在各底坡方案下存在一定程度的差异。对于涵身断面CS5,各方案之间流速分布差异较小,最大流速介于3.23~3.31 m/s之间,底坡坡比的影响主要集中在地涵进出口位置。当坡比较大($n=0.5, 1.0, 1.5$)时,由于底坡变化剧烈,地涵进出口位置形成明显折角,导致该位置出现负流速或低流速区域,其中进口断面CS3的最大负流速为 -0.29 m/s。随着坡比减小,进口流速差异逐渐缩小。在地涵出口处水流沿底坡直冲顶部,引发下游水位较大波动,并在底部形成明显的负流速区域。当坡比适中($n=3, 5, 7$)时,进出口折角处不良流态基本消失,出口水流沿底坡平顺进入下游明渠段,在底坡底部形成高流速区域,底坡段低流速区域消失。当坡比继续减小($n=9, 11, 13, 15$)时,出口断面CS6的流速分布与 $n=3, 5, 7$ 时相似,最大流速为 $3.05 \sim 3.33$ m/s,且最大流速断面高度基本稳定在 1.19 m,受底坡坡比因素影响

较小,差异主要体现在底坡段,由于坡比减小,底坡长度增加,出口高流速水流会在抵达坡顶前完成明渠流态的转变,致使底坡段形成新的低流速区域。综上可知:底坡坡比过大会造成地涵进出口局部和下游明渠底部的不良流态,坡比过小则会因底坡延长而产生低流速区。这些不良流态会影响有压涵流向明渠流的正常过渡,影响地涵流态演变。相比之下, $n=3, 5, 7$ 时地涵断面流速受底坡影响较小,下游水流贴合底坡,无低流速区等不良流态,流态更加平顺。

3.1.2 水头损失

为分析底坡坡比对地涵不同位置水头损失的影响,对各部分水头损失进行计算。为避免断面流速分布不均匀对计算结果的影响,选择上游涵首及连接段、涵身段、下游涵首及连接段作为地涵水头损失分析的不同位置。其中上游涵首及连接段水头损失计算选取断面CS1与断面CS4,涵身水头损失计算选取断面CS4与断面CS5,下游涵首及连接段水头损失计算选取断面CS5与断面CS8(包括下游连接段底坡)。水头损失系数为:

$$\xi_{12} = 2gh_{w12}/v^2 \quad (2)$$

式中: ξ_{12} 为两个断面之间的水头损失系数; v 为地涵涵身断面平均流速。

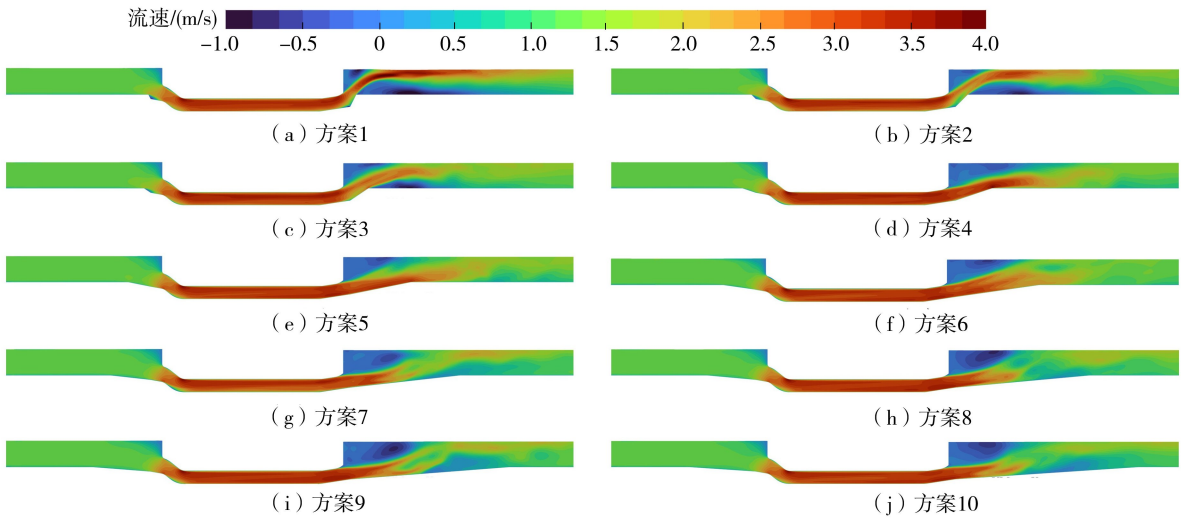


图6 地涵纵剖面流速对比

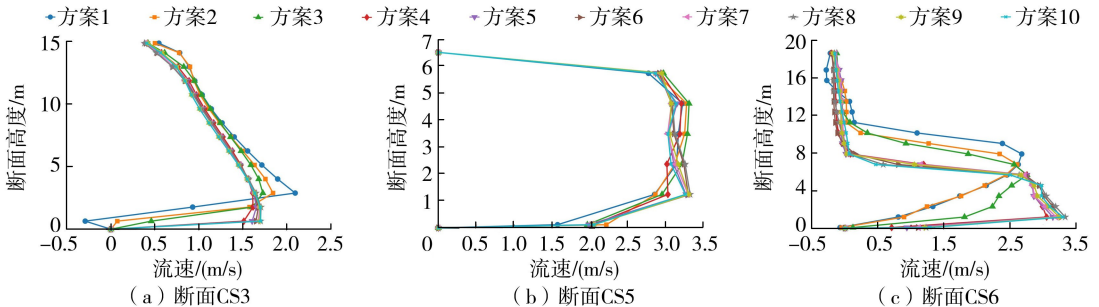


图7 地涵断面垂线流速对比

不同坡比条件下,地涵总水头损失及各部位水头损失结果如表 3 所示。当上下游底坡坡比 i 逐渐增大(即 n 从 15 减小至 0.5)时,地涵总水头损失呈现先略微减小后快速上升的变化趋势。当 n 为 0.5 时,总水头损失达到最大值 0.622 m,对应总水头损失系数为 1.464;当 n 为 7 时,总水头损失达到最小值 0.355 m,对应总水头损失系数为 0.837;当 n 为 1.5~15 时,总水头损失系数变化范围为 0.837~0.907,整体变化幅度小于 8.36%,且表现为先减小后增大的特征。同时,地涵不同部位水头损失随坡比的变化呈现不同的变化规律。上游涵首及连接段水头损失系数随坡比变化范围为 0.228~0.248,涵身水头损失系数随坡比变化范围为 0.120~0.152,两者受底坡坡比影响相对有限。与之相比,下游涵首及连接段水头损失则对底坡变化较为敏感。当 n 为 0.5 时,下游涵首及连接段水头损失系数达到最大值 1.064;当 n 为 1.5 时,下游涵首及连接段水头损失系数达到最小值 0.474;此后随 n 增大逐渐回升至 0.527。整体上,下游涵首及连接段水头损失系数随坡比增大呈现先缓慢减小后迅速上升的趋势。在所有方案中,下游涵首及连接段水头损失占比 55.07%~72.67%,为水头损失的主要部位。

基于上述结果及分析可知,上游涵首及连接段和涵身部位水头损失变化幅度有限,受底坡坡比影响较小。地涵水头损失主要集中分布在下游涵首及连接段位置,该部位水头损失占比超过一半,并且对底坡坡比更加敏感。当底坡坡比增大至一定范围时,下游涵首及连接段水头损失会显著增加,进而影响地涵的过流能力,并对工程运行安全构成潜在威胁。因此,在地涵底坡设计尤其是下游连接段底坡

设计时,应审慎选取底坡参数,避免采用过大的底坡坡比。

综合流速分布以及水头损失对比分析结果,建议 n 取 7,即立交地涵上下游连接段底坡坡比选取 1:7。在该方案下,地涵进出口水流与上下游底坡贴合良好,无明显不良流态,且地涵总水头损失系数最小。

3.2 不同流量水位组合下的地涵水力特性

3.2.1 过流能力

过流能力是地涵设计时的关键控制指标。基于前述确定的最优底坡坡比方案($n=7$),开展不同流量水位组合工况下的过流能力分析,对比不同工况下的地涵过流差异。

大型立交地涵在设计行洪条件下常处于高淹没条件(下游水深达到上游水深的 90%或以上),其流量系数可按式^[12]进行计算:

$$m = Q/A\sqrt{2g(\Delta H + \delta H)} \quad (3)$$

式中: Q 为过涵流量, m^3/s ; A 为地涵涵身段过流面积, m^2 ; ΔH 为上下游水位差, m ; δH 为恢复落差, m , 为下游水位与地涵出口水位差值,若无模型试验数据,可按照文献[12]中的式(6)计算。

不同行洪流量下,物理模型试验与数学模型计算的上下游水位差和流量系数结果如表 4 所示。由对比结果可知,两种方法获得的地涵流量系数误差的绝对值均小于 1.72%,表明数学模型与物理模型结果具有较好的一致性。随着行洪流量的减小,上下游水位差和恢复落差逐渐减小,流量系数也逐渐减小,其变化范围为 0.868~0.928,均高于地涵设计流量系数 0.863,物理模型和数学模型的上下游水位差最大值分别为 0.360、0.380 m,小于设计行洪

表 3 不同坡比条件下水头损失计算结果

i	n	上游涵首及连接段水头损失/m	上游涵首及连接段水头损失系数	涵身水头损失/m	涵身水头损失系数	下游涵首及连接段水头损失/m	下游涵首及连接段水头损失系数	总水头损失/m	总水头损失系数
2.00	0.5	0.105	0.248	0.065	0.152	0.452	1.064	0.622	1.464
1.00	1.0	0.105	0.248	0.059	0.139	0.273	0.643	0.437	1.030
0.67	1.5	0.105	0.248	0.058	0.137	0.201	0.474	0.365	0.859
0.33	3.0	0.099	0.233	0.057	0.133	0.203	0.477	0.358	0.844
0.20	5.0	0.097	0.228	0.056	0.131	0.205	0.483	0.358	0.842
0.14	7.0	0.101	0.238	0.051	0.120	0.204	0.479	0.355	0.837
0.11	9.0	0.100	0.236	0.060	0.141	0.210	0.494	0.370	0.872
0.09	11.0	0.099	0.234	0.061	0.144	0.216	0.508	0.376	0.887
0.08	13.0	0.101	0.237	0.061	0.144	0.223	0.525	0.384	0.905
0.07	15.0	0.099	0.233	0.062	0.147	0.224	0.527	0.385	0.907

表 4 水位差及流量系数结果对比

方案编号	行洪流量/(m^3/s)	上下游水位差/m		恢复落差/m		流量系数		流量系数误差/%
		物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	
6	7000	0.360	0.380	0.120	0.130	0.928	0.912	-1.72
11	6000	0.300	0.292	0.090	0.105	0.894	0.887	-0.78
12	5000	0.210	0.227	0.075	0.060	0.872	0.868	-0.46

水位差 0.600 m。

以上结果表明,最优底坡方案的过流能力满足行洪要求,其流量系数与相同上槽下洞形式的总渠道涵^[12]相近,可为相同类型工程设计提供参考。

3.2.2 流速分布

不同行洪流量方案下地涵纵剖面流速分布和进出口流线分布如图 8 和图 9 所示(图中均为提取的水相结果)。地涵整体流速随行洪流量的减小而

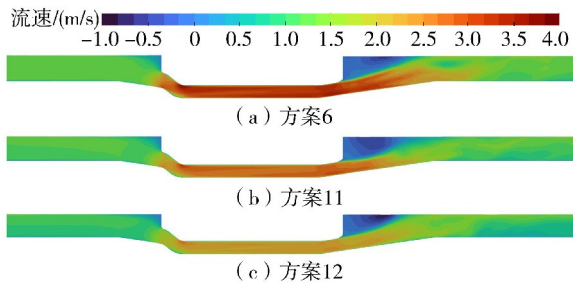


图 8 地涵纵剖面流速分布

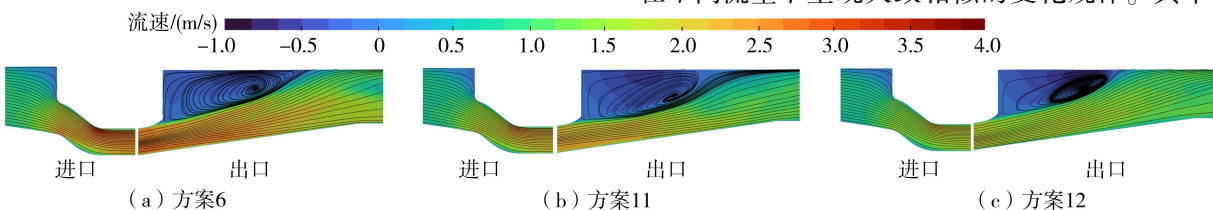


图 9 地涵进出口纵剖面流线分布

逐渐减小,各方案下地涵流速演变规律基本一致。水流在上游涵首位置由明渠流转变为有压涵流,并在顶部圆弧与水平段连接处达到流速峰值。进口纵剖面流线分布均匀,并未出现明显回流,流态过渡较为平顺。在下游涵首出口位置,流速分布呈现“底部流速大,顶部负流速”的特征,高流速水流流线分布相对更加均匀,顶部则形成明显回流区域。地涵底部高流速水流从有压涵流向明渠流过渡的过程中,与顶部水流发生动量交换,引起顶部旋滚,同时水流在连接段底坡向明渠流态过渡,在下游明渠段完成流态的转变。

各方案断面流速分布模拟值与试验值如图 10 所示,数学模型与物理模型在不同流量方案下上下游水位断面和地涵出口断面流速的最大误差为 7.85%,说明二者吻合较好。不同断面的流速分布在不同流量下呈现大致相似的变化规律。其中,上

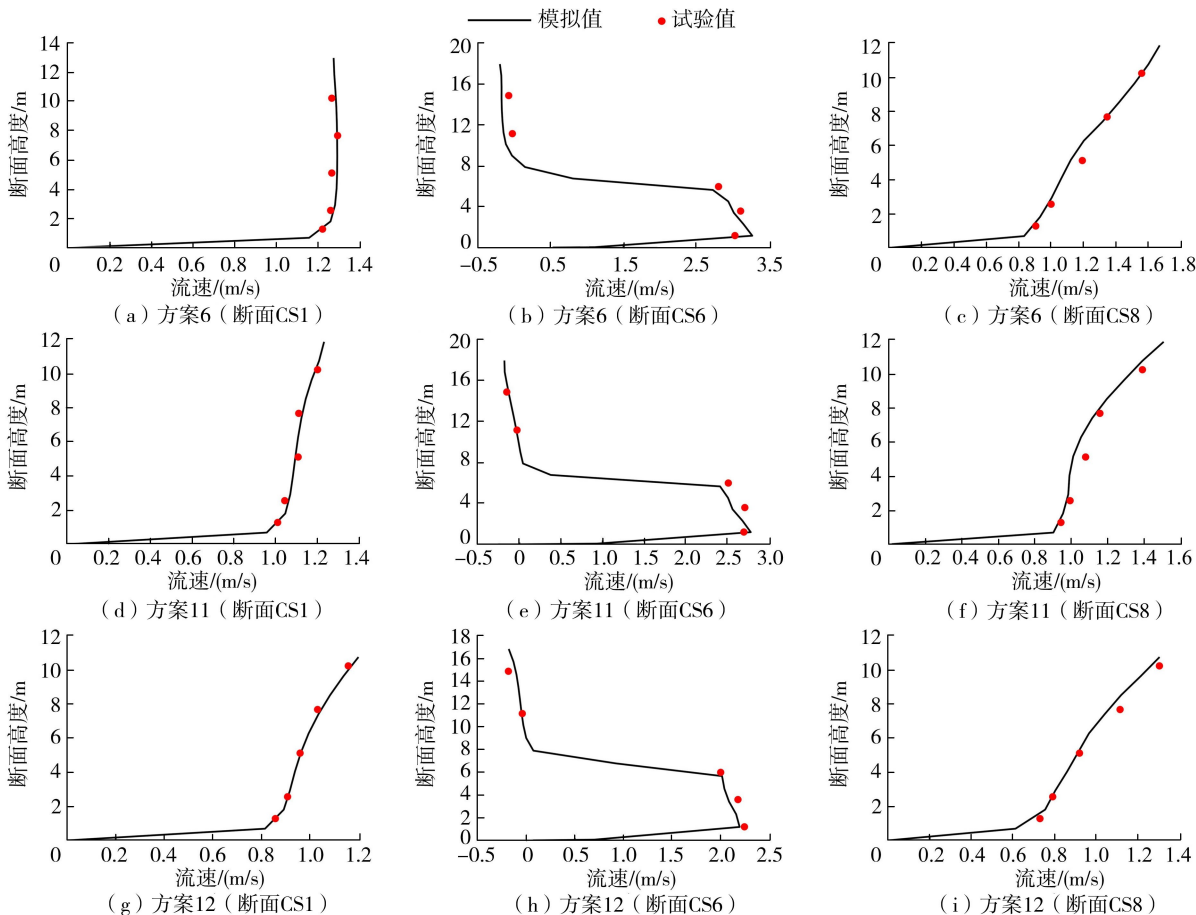


图 10 断面垂线流速模拟值与试验值对比

游水位断面 CS1 流速分布均匀性明显高于地涵出口断面 CS6 以及下游水位断面 CS8。随着行洪流量的减小,断面 CS1 流速整体上逐渐减小,流速分布由“均匀分布”逐渐向“顶部流速大于底部流速”转变,说明上游水位断面受地涵工程的影响程度逐渐减弱,流速分布逐渐趋于明渠流态。地涵出口断面 CS6 底部最大流速随行洪流量的减小逐渐减小,底部流速最大值分别为 3.27、2.78、2.20 m/s,均位于断面高度 1.19 m 处,顶部最大负流速介于 -0.18 ~ -0.20 m/s 之间。下游水位断面 CS8 的水流已基本完成了明渠流态的转换,流速沿垂线均匀变化,表现为顶部流速大于底部流速,最大流速分布在水面附近。

上述结果表明,在最优底坡方案($n=7$)下,地涵水流在不同流量水位工况下均能良好贴合底坡,流态演变平顺,过程中无底部负流速或低流速等不良流态现象。

3.2.3 纵剖面沿程断面能量变化

不同行洪流量方案下地涵纵剖面沿程断面能量变化如图 11 所示。在地涵水流的流动过程中,当水流从上游明渠进入地涵时,部分势能转化为动能,表现为测压管水头下降,流速水头上升;当水流从地涵出口进入下游明渠时,部分动能重新转化为势能,表现为测压管水头回升,流速水头下降;因此,沿水流方向,测压管水头呈现先减小后增大的变化趋势;而流速水头与之相反,呈现先增大后减小的规律;总水头则呈现沿程逐渐减小的规律。根据总水头的沿程水力坡降分布,地涵水流在上下游连接段、上下游涵首以及涵身处均产生不同程度的水力坡降,其中下

游涵首及连接段水力坡降最大,说明该区域为能量损失的主要区域。对比数值模拟和模型试验中地涵纵剖面总水头不难发现,模型试验的总水头整体上呈现沿程逐渐减小的趋势,但在流态过渡过程中的测点,例如地涵进出口断面 CS3 在不同方案下均出现了总水头大于后续点位的现象;相对而言,数值模拟的总水头沿程逐渐减小,并未出现总水头沿程升高的现象。引起这种现象的原因可能是地涵进口流速分布不均匀,导致整个断面的测压管水头分布不均匀,进而引起地涵进口断面总水头测量误差较大;而数值模拟由于对整个断面进行积分加权计算处理,避免了断面数据选取带来的误差,因此整体的总水头变化更加合理。

3.2.4 水头损失

不同行洪流量方案下地涵不同部位的水头损失计算结果如表 5 所示。结果表明:地涵总水头损失以及各部位水头损失总体上随行洪流量的减小而逐渐减小,水头损失系数随流量变化较小。具体来说,在方案 6、11、12 条件下,地涵总水头损失随行洪流量减小,由 0.358 m 逐渐减小至 0.178 m。总水头损失中下游涵首及连接段水头损失占比超过一半,为 56.71%~57.54%;其次是上游涵首及连接段水头损失,占比为 25.84%~28.86%;涵身水头损失占比最小,为 13.97%~16.85%。各部位水头损失系数的变化范围分别为:上游涵首及连接段 0.219~0.284,涵身 0.121~0.149,下游涵首及连接段 0.484~0.559。由此可见,下游涵首及连接段是影响地涵过流能力的主要位置,该结论与前述总水头沿程变化规律相一致。

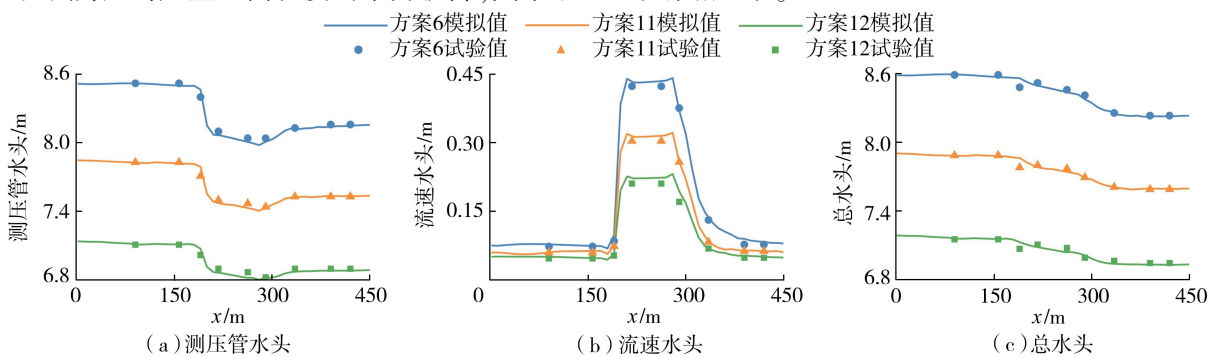


图 11 地涵纵剖面沿程断面能量分布

表 5 不同行洪流量下水头损失计算结果

方案 编号	上游涵首及连接 段水头损失/m		上游涵首及连接 段水头损失系数		涵身水头 损失/m		涵身水头损 失系数		下游涵首及连接 段水头损失/m		下游涵首及连接 段水头损失系数		总水头 损失/m	
	物理 模型	数学 模型	物理 模型	数学 模型	物理 模型	数学 模型	物理 模型	数学 模型	物理 模型	数学 模型	物理 模型	数学 模型	物理 模型	数学 模型
6	0.102	0.101	0.247	0.244	0.050	0.051	0.121	0.123	0.206	0.204	0.498	0.492	0.358	0.355
11	0.086	0.084	0.284	0.276	0.043	0.045	0.141	0.149	0.169	0.170	0.556	0.559	0.298	0.299
12	0.046	0.049	0.219	0.234	0.030	0.031	0.142	0.147	0.102	0.108	0.484	0.511	0.178	0.188

3.2.5 湍动能

基于数值模拟结果对地涵纵剖面流场数据进行深入对比分析,进一步探究影响地涵水力特性的主要原因和位置。不同方案下地涵纵剖面湍动能分布如图 12 所示。整体上,地涵湍动能主要分布在下游连接段以及下游明渠段。在最优方案条件下,随着行洪流量的减小,其湍动能的主要分布范围以及大小均逐步减小。随着行洪流量由 $7000\text{ m}^3/\text{s}$ 减小至 $5000\text{ m}^3/\text{s}$,地涵下游连接段最大湍动能由 $0.231\text{ m}^2/\text{s}^2$ 逐渐减小至 $0.146\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。造成这种现象的主要原因是流速分布引起的流速梯度差异,根据湍动能生成项的公式,湍动能主要由平均速度梯度产生,结合图 8 的流速分布结果,地涵下游连接段存在较大的流速梯度,地涵出口底部高流速带动顶部水流运动,存在剧烈的水流剪切,并且下游明渠段的流速分布不均匀程度相对更高。因此,湍动能主要集中在分布在地涵下游连接段及下游明渠段位置。同时,随着行洪流量的减小,下游连接段底部水流流速减小,与顶部水体的剪切作用减弱,流速梯度减小,下游流速分布更加均匀,湍动能分布范围以及大小也因此逐渐减小。

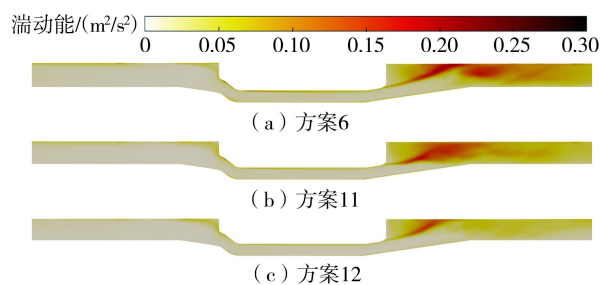


图 12 地涵纵剖面湍动能分布

3.2.6 湍动能耗散率

湍动能耗散率代表了单位体积流体中湍动能转化为内能的速率,是衡量湍流运动过程中能量转化的关键指标,对于理解流体运动过程具有重要意义。地涵纵剖面湍动能耗散率分布见图 13。总的来看,地涵的湍动能耗散率主要分布在下游连接段。随着行洪流量的减小,地涵下游连接段的湍动能耗散率范围和大小均逐渐减小。地涵湍动能耗散率主要分布在下游连接段,表明在该位置水流更多的湍动能转化为水体的内能,也因此导致地涵水头损失主要集中在该位置。随着行洪流量由 $7000\text{ m}^3/\text{s}$ 减小至 $5000\text{ m}^3/\text{s}$,地涵下游连接段湍动能耗散率最大值由 $0.063\text{ m}^2/\text{s}^3$ 逐渐减小至 $0.035\text{ m}^2/\text{s}^3$ 。引起这种现象的主要原因是水流之间的剪切作用引起的分子交换能力的变化。与地涵上游相比,地涵下游连接段底部高流速水流与顶部水体的剪切作用更强,导致分子之间的交换作用相对更强,最终导致该位置为

湍动能耗散率主要分布位置。其次,随着行洪流量的减小,纵剖面流速梯度减小,连接段的流体剪切作用逐步减弱,分子之间的交换能力减小,导致湍动能耗散率减小且范围缩小。

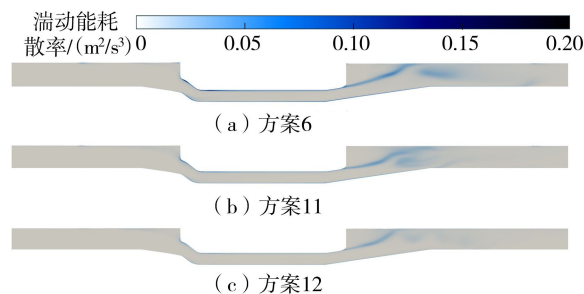


图 13 地涵纵剖面湍动能耗散率分布

4 结论

a. 地涵上下游连接段底坡坡比过大或过小均会在地涵运行过程中产生不良流态。尤其在坡比过大情况下,地涵会形成明显负流速区域。底坡坡比为 $1:3$ 、 $1:5$ 、 $1:7$ 时水流平顺过渡,无明显不良流态。

b. 地涵总水头损失随上下游连接段底坡坡比的增大呈现先缓慢减小后迅速增大的变化规律。下游涵首及连接段水头损失占比最大为 $55.07\% \sim 72.67\%$,并且对于底坡坡比因素更加敏感。当坡比较大时($n < 1.5$),该位置水头损失会明显增大。综合比较,上下游连接段底坡坡比为 $1:7$ 时地涵总水头损失最小,流态最为平顺,为最优坡比方案。

c. 在最优坡比方案下,立交地涵在不同流量工况下均表现出良好的过流能力,其流量系数为 $0.868 \sim 0.928$,均大于设计流量系数,满足工程设计行洪要求。地涵总水头损失及各部位水头损失整体上随流量减小而逐渐减小。流体的剪切作用是引起地涵下游连接段较高水头损失的主要原因。各流量工况下地涵水流流态平顺,无明显不良流态。

参考文献:

[1] 周剑,甘磊,蔡勇,等. 软土地基上立交地涵渗流-应力耦合及敏感性分析[J]. 水电能源科学,2025,43(12): 152-156. (Zhou Jian, Gan Lei, Cai Yong, et al. Seepage-stress coupling and sensitivity analysis of soft ground interchange culvert [J]. Water Resources and Power, 2025,43(12): 152-156. (in Chinese))

[2] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报,2024,55(11): 1298-1308. (Yuan Ximin, Lan Zhuoqing, Wang Lina, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(11): 1298-1308. (in Chinese))

- [3] 谢松,王磊之,覃光华,等. 深隧排涝工程对特大城市防洪排涝情势的影响[J]. 水资源保护,2025,41(3):111-118. (Xie Song,Wang Leizhi,Qin Guanghua,et al. Impact of deep tunnel drainage project on flood control and drainage situation in mega cities [J]. Water Resources Protection,2025,41(3):111-118. (in Chinese))
- [4] 李强,马福恒,李子阳,等. 极端天气下土石坝风险致因链解析及风险率预测[J/OL]. 水利水电科技进展,(2025-12-15). <https://link.cnki.net/urlid/32.1439.TV.20251213.1832.002>. (Li Qiang, Ma Fuheng, Li Ziyang, et al. Analysis of risk causation chain and prediction of risk rate for earth-rock dams under Extreme Weather Conditions [J/OL]. Advances in Science and Technology of Water Resources, (2025-12-15). <https://link.cnki.net/urlid/32.1439.TV.20251213.1832.002>.)
- [5] 张金良. 关于完善黄河流域防洪工程体系相关举措的思考[J]. 人民黄河,2022,44(1):5-9. (Zhang Jinliang. Thoughts on measures for improving the Flood Control Engineering System of the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2022,44(1):5-9. (in Chinese))
- [6] 李曦亨,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))
- [7] Zayed M. Blockage slope and ratio effects on box culvert hydraulics[J]. Discover Water,2023,3(1):23.
- [8] 王亦勤. 通榆河废黄河立交地涵工程防淤设计[J]. 水利水电科技进展,2003,23(2):44-45. (Wang Yiqin. Sediment control design for grade separation culverts at Tongyuhe River and abandoned Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,23(2):44-45. (in Chinese))
- [9] Aghniaey N, Rodgers N. Sustainability in design, construction and rehabilitation of culverts [C]// Proceedings of the CSCE 2014 General Conference. Halifax, NS, Canada; Canadian Society for Civil Engineering (CSCE),2014.
- [10] 徐金环. 水利立交地下涵洞输水输沙特性研究[J]. 泥沙研究,1999(1):33-38. (Xu Jinhuan. Study on characteristics of water and sediment transportation in crossing underground culverts [J]. Journal of Sediment Research,1999(1):33-38. (in Chinese))
- [11] 徐金环. 废黄河立交地下涵洞输送水沙特性研究[J]. 水利水电科技进展,1997(4):38-41. (Xu Jinhuan. Study on characteristics of water and sediment transport in underground culvert of Feihuanghe Interchange [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997(4):38-41. (in Chinese))
- [12] 周名德,周益人. 通榆河立交地涵泄流试验研究[J]. 江苏水利,1999(1):28-31. (Zhou Mingde, Zhou Yiren. Experimental study on discharge capacity of Tongyuhe Interchange underground culvert [J]. Jiangsu Water Resources,1999(1):28-31. (in Chinese))
- [13] 周名德. 立交地涵泥沙问题实例研究[J]. 水利水电科技进展,1996(3):210-219. (Zhou Mingde. An example for study on sedimentation of grade separation underground culvert [J]. Hydro-Science and Engineering,1996(3):210-219. (in Chinese))
- [14] 吴时强,吴修锋,周辉. 淮河入海水道淮安地涵枢纽河道水流数值计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(3):27-32. (Wu Shiqiang, Wu Xiufeng, Zhou Hui. Numerical simulation of transient channel flow for Huai'an Culvert Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2001,29(3):27-32. (in Chinese))
- [15] 傅朝康. 废黄河地涵工程对上下游河床演变的影响研究[D]. 扬州:扬州大学,2019.
- [16] 朱明成,甘申东,李寿千. 流域骨干水网立交地涵淤积规律与减淤措施研究[C]//中国水利学会. 2023 中国水利学术大会论文集(第三分册). 郑州:中国水利学会,2023:178-182.
- [17] Nassralla T H. Effect of inlet and outlet geometric shape variations of a pipe culvert on local head losses [J]. Journal of Engineering Sciences, Assiut University Faculty of Engineering,2015,43(6):807-822.
- [18] Jaeger R. Hydraulic improvements in culverts for climate change adaptation [D]. Queensland: University of the Sunshine Coast,2020.
- [19] Jaeger R, Tondera K, Pather S, et al. Flow control in culverts: a performance comparison between inlet and outlet control [J]. Water,2019,11(7):1408.
- [20] Sellevold J, Bruland O, Pummer E. Hydraulic efficiency and optimization of pipe culvert inlet edges [J]. VANN, 2023(4):235-250.
- [21] McKay G R. Design of minimum energy culverts [R]. Brisbane: Department of Civil Engineering, University of Queensland,1971.
- [22] Chanson H. Hydraulic performances of minimum energy loss culverts in Australia [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2007,21(4):264-272.
- [23] 葛均建,马山玉,李政鹏,等. 大型输水渠道倒虹吸流态优化试验研究[J]. 中国农村水利水电,2025(9):77-84. (Ge Junjian, Ma Shanyu, Li Zhengpeng, et al. Study on flow optimization in large transmission channel with siphon [J]. China Rural Water and Hydropower,2025(9):77-84. (in Chinese))
- [24] 曾诚,尹雨然,陈辰,等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):9-15. (Zeng Cheng, Yin Yuran, Chen Chen, et al. Numerical

- simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2): 9-15. (in Chinese))
- [25] 王浩博,周大庆,郭俊勋. 基于 PIMPLE 算法的低负荷水泵水轮机内部流态研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(11): 152-157. (Wang Haobo, Zhou Daqing, Guo Junxun. Research on internal flow pattern of low-load pump-turbine based on PIMPLE algorithm[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(11): 152-157. (in Chinese))
- [26] 张小康,杨建东. 水头损失的 CFD 计算[J]. *中国农村水利水电*, 2009(5): 105-107. (Zhang Xiaokang, Yang Jiandong. Computation of head losses by CFD[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 105-107. (in Chinese))
- [27] 刘荆辉,胡明. 动能修正系数对城门洞形尾水隧洞水头损失及其系数的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(6): 146-149. (Liu Jinghui, Hu Ming. Impact of kinetic energy correction factor on head loss and head loss coefficient of city gate-shaped tailrace tunnel[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(6): 146-149. (in Chinese))
- (收稿日期:2026-01-14 编辑:俞云利)
-
- (上接第 30 页)
- [64] Ali M I, Hashim M, Zin H S M. Assessing water availability over peninsular Malaysia using public domain satellite data products[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 18: 012187.
- [65] 李学辉,谷桂华,余守龙,等. 基于水量平衡和误差控制的出入境水量研究[J]. *人民长江*, 2020, 51(2): 97-100. (Li Xuehui, Gu Guihua, Yu Shoulong, et al. Study on inflow and outflow volumes of an area based on water balance and error control criteria[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(2): 97-100. (in Chinese))
- [66] 刘伟苹. 长江大通至河口段沿江引水变化特征及其对河口的影响分析[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [67] 顾圣华. 长江口环境用水量计算方法探讨[J]. *水文*, 2004, 24(6): 35-37. (Gu Shenghua. Study on the computational method for environmental water use in the Yangtze River Estuary[J]. *Hydrology*, 2004, 24(6): 35-37. (in Chinese))
- [68] 严鑫,孙昭华,谢翠松,等. 基于经验模型的长江口南支上段压咸临界流量[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 935-947. (Yan Xin, Sun Zhaohua, Xie Cuisong, et al. Estimation of critical discharge for saltwater intrusion in the upper south branch of the Yangtze River Estuary using empirical models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 935-947. (in Chinese))
- [69] 陈庆江,徐建益,朱建荣,等. 长江口水源地咸潮控制临界流量确定及保障措施[J]. *人民长江*, 2011, 42(18): 68-72. (Chen Qingjiang, Xu Jianyi, Zhu Jianrong, et al. Determination of critical flow for saline water intrusion into water source area of Yangtze River estuary and guarantee measures[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(18): 68-72. (in Chinese))
- [70] 高华斌,唐兵. 应对长江口咸潮入侵的临界流量经验模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(4): 25-29. (Gao Huabin, Tang Bing. Empirical model of critical flow rate in response to salt water intrusion in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(4): 25-29. (in Chinese))
- [71] 王高旭,李褪来,陈敏建. 长江口生态流量研究[J]. *水利水运工程学报*, 2010(3): 53-58. (Wang Gaoxu, Li Tilai, Chen Minjian. Analysis and calculation of ecological flow in Yangtze River Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(3): 53-58. (in Chinese))
- [72] 阮仁良,韩昌来. 长江流域发展对长江口水域功能开发的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(5): 427-432. (Ruan Renliang, Han Changlai. Effect of development in the Yangtze Basin on the exploitation of the water function in the mouth of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 427-432. (in Chinese))
- [73] 刘水芹,田华,易文林. 太浦闸调度对黄浦江水源地水质影响数值模拟[J]. *人民长江*, 2012, 43(12): 33-36. (Liu Shuiqin, Tian Hua, Yi Wenlin. Digital simulation for influence of Taipu Sluice operation on water quality of water source of Huangpu River[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(12): 33-36. (in Chinese))
- [74] 彭焱梅,曹菊萍,周宏伟,等. 不同典型年太浦闸控制运用对流域区域及黄浦江上游水源地影响研究[J]. *水利发展研究*, 2020, 20(7): 43-48. (Peng Yanmei, Cao Juping, Zhou Hongwei, et al. Study on the impact of Taipu Sluice control and operation in different typical years on the basin area and the upstream water source of the Huangpu River[J]. *Water Resources Development Research*, 2020, 20(7): 43-48. (in Chinese))
- [75] 毛兴华,李琪,陈澄. 感潮河流生态流量保障目标研究[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(9): 90-94. (Mao Xinghua, Li Qi, Chen Cheng. Research on ecological flow guarantee targets tive of tidal rivers[J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(9): 90-94. (in Chinese))
- (收稿日期:2025-03-20 编辑:俞云利)

基于数字孪生的水下挖掘智能引导与作业质量控制方法

王子健,刘东海,黄涛,孙晨阳

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室)

摘要:为提高水下挖掘作业质量,提出了一种基于数字孪生的水下挖掘智能引导与作业质量控制方法。该方法通过研制挖掘机智能引导硬件设备并构建挖掘机各部件几何关系与运动方程,实现了铲尖位姿的高效解算;结合 Three.js 与 Unity 3D 建立了水下开挖形体建筑信息模型(BIM),并耦合实时传感数据构建了挖掘机数字孪生模型;根据铲尖与挖掘目标相对距离的实时解算,给出了挖掘作业智能引导与作业质量控制方法,并开发了相应的系统。实例验证结果表明,该方法能实现作业过程三维可视化与远程协同监控,智能引导操作手纠偏,保障水下挖掘质量。

关键词:水下挖掘;位姿感知;智能引导;质量控制;数字孪生

Method for intelligent guidance and operational quality control of underwater excavation based on digital twin technology//Wang Zijian, Liu Donghai, Huang Tao, Sun Chenyang (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University)

Abstract: To improve the quality of underwater excavation operations, this paper proposes a digital twin-based method for intelligent guidance and operational quality control of underwater excavation. By developing intelligent guidance hardware for the excavator and establishing the geometric relationships and kinematic equations of its components, efficient calculation of the bucket tip pose is achieved. A building information model (BIM) of the underwater excavation profile is established using Three.js and Unity 3D, and a digital twin model of the excavator is constructed by integrating real-time sensor data. Finally, based on real-time calculation of the relative distance between the bucket tip and the target excavation surface, an intelligent guidance and operational quality control strategy for excavation operations is developed, and the corresponding system is implemented. Case study results demonstrate that this method enables three-dimensional visualization of the excavation process and remote collaborative monitoring, provides intelligent guidance for operators to correct deviations, and ensures the quality of underwater excavation.

Key words: underwater excavation; pose perception; intelligent guidance; quality control; digital twin

河道护坡、疏浚、防波堤及沟槽等工程建设常涉及大规模水下挖掘作业。由于作业面不可见,施工过程中缺乏直观视觉反馈,易引发超挖、欠挖等质量偏差,导致开挖精度与清淤效果难以保障,严重影响工程整体质量与进度。

为提升水下挖掘作业的精度与可控性,国内外学者在挖掘机位姿感知^[1-2]与施工引导方面开展了一系列研究。现有研究方法主要可分为两类:①基于计算机视觉的位姿估计方法,如 Liu 等^[3-6]通过图像处理与特征提取技术直接解析了挖掘机的空间位置与位姿;②基于惯性传感器的位姿解算方法,如 Lee 等^[7-10]利用 IMU(惯性测量单元)采集了各构件的倾角数据,通过运动学模型计算了全身位姿。在

工程应用方面,邓波等^[11]通过集成传感器实时解算铲斗坐标,以图形化界面引导操作;隗彦宏^[12]采用徕卡智能引导系统实现了岸坡开挖的精准控制,有效提升了作业效率。这些研究为挖掘机的实时位姿感知与施工引导奠定了基础,但其应用场景多集中于陆上或水上可见环境,尚未有效解决水下不可见条件下的作业质量控制问题。

随着工业 4.0 与智能化建造的发展,数字孪生技术因其在集成设计、施工仿真与运维管理中的强大能力,逐渐成为工程建设数字化转型的核心驱动力^[13-16]。在建筑工程领域,杜明芳^[17]提出了基于数字孪生的全生命周期系统集成方法;在水利水电工程中,张宗亮等^[18-20]率先将数字孪生技术应用于大

坝、厂房等复杂结构,推动工程建造向安全、优质、高效方向发展。进一步地,吴都督等^[21]在碾压混凝土坝施工中构建了“GIS+BIM+IoT”融合的智能建造平台,实现了全过程数字化管控;何绍波等^[22]则依托 BIM 与物联网技术,实现了地下厂房洞室群施工的精细化与智能化管理。这些实践表明,数字孪生与多源信息融合技术已具备支撑复杂工程透明化、协同化管控的能力,为水下隐蔽工程施工提供了重要技术范式。

然而,将数字孪生与实时引导技术应用于水下挖掘这一特殊场景,仍面临诸多挑战:①水下环境感知手段受阻,声学、光学等传感器易受水体扰动与悬浮物干扰,导致位姿感知精度与稳定性下降;②现有水下作业机器人研究多聚焦于自主导航、轨迹跟踪与轻量操作^[23],缺乏与工程 BIM 模型的高精度实时耦合,亦未形成面向开挖质量(如超挖、欠挖)的闭环控制机制;③虽有多传感器融合定位技术可用于水下载具位姿估计^[24],但其运动模型多针对流线型航行器,难以直接移植至具有多关节、大惯量特性的液压挖掘机,且未能与施工工艺指标直接挂钩。Tanoli 等^[25]在岸坡开挖中实现了参数化 BIM 建模与 3D 机械引导,Liu 等^[26-29]在城市路面挖掘与装备数字孪生方面进行了探索,这些工作为本文提供了重要参考。

然而,当前鲜有针对水下挖掘作业质量控制的研究,且难以做到对水下挖掘作业过程中挖掘机位姿的高精度快速感应,开挖质量难以实时可视化地反馈给操作手,无法实现有效的远程协同监控。因此,本文基于数字孪生技术,结合水下挖掘作业特点,研究水下挖掘智能引导与作业质量控制方法,并开发相应系统,对挖掘作业情况进行三维可视化反馈,以期为提高水下岸坡挖掘作业的质量与效率提供技术支撑。

1 挖掘机智能引导硬件设备开发与位姿感知

1.1 挖掘机智能引导硬件设备开发

挖掘机智能引导硬件设备主要包括位姿采集装置、实时定位模块、数据传输模块以及车载显示屏,其安装位置如图 1 所示。位姿采集装置的 IMU 主要包括 1 个双轴倾角传感器和 3 个单轴倾角传感器,用于实时采集挖掘机作业位姿信息。实时定位模块由 2 个 GNSS(全球导航卫星系统)接收器和 GNSS 基准站组成,用于获得挖掘机任意时刻的工作位置及航向角。数据传输模块由多功能端口、数据控制器与数据无线传输模块组成,用于实现挖掘机位姿、挖掘任务等数据在车载端与服务器之间的

传输交互;其中数据控制器通过 DTU(数据传输单元)从服务器端读取挖掘任务等信息,并实时集成、传输位姿采集装置所采集的数据至平板终端,同时接收平板的计算结果数据,通过 DTU 实时传输回服务器,实现 Web 端开挖作业远程实时监测与质量控制。车载显示屏用于挖掘过程的三维可视化展示,辅助挖掘机操作手对挖掘机三维位姿进行估计以及实时判断相对距离,并展示水下挖掘过程中挖掘机位姿与水下岸坡开挖情况,智能引导操作手进行正确的水下挖掘操作。鉴于水下及临水作业环境复杂,所有暴露在外的传感器及车载终端均采用 IP67 及以上防护等级的工业级封装,并对关键线缆与接口进行了防水密封处理。

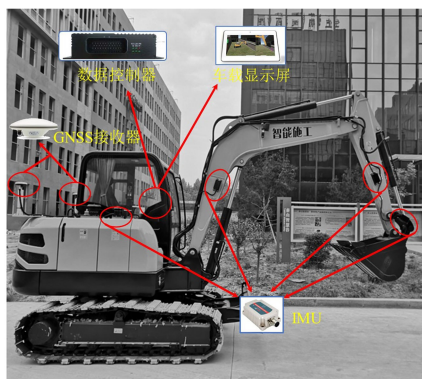


图 1 挖掘机硬件装置示意图

1.2 挖掘机作业位姿信息感知

为实时解算挖掘机铲尖坐标,需获取挖掘机的实时位姿信息及其固有机械结构尺寸。实时位姿信息通过安装在挖掘机上的传感器采集,具体包括:①大臂、小臂、铲斗与竖直方向的夹角 α 、 β 、 γ (由单轴倾角传感器测量);②车身的横滚角 φ 与俯仰角 θ (由双轴倾角传感器测量);③WGS84 坐标系下主定位天线 O 的三维坐标 (x_o, y_o, z_o) 及挖掘机的航向角 ψ 。

为进行挖掘机的位姿评估以及建立其动态孪生 BIM 模型,需通过激光全站仪采集挖掘机自身机械结构尺寸信息。关键参数包括:各铰接点在车身坐标系下的坐标、大臂长度 L_{AB} 、小臂长度 L_{BC} 、铲斗长度 L_{CD} 、各连杆长度 $(L_{CE}, L_{EF}, L_{FG}, L_{CC})$ 、左右铲尖偏移长度 L_{DM} 与 L_{DN} 、大臂偏转角 θ_1 和铲斗偏移角 θ_2 等。

为建立运动学模型并描述各构件之间的空间关系,定义如下坐标系(图 2):

a. 车身坐标系 $Oxyz$ 。以主天线 O 为原点,车身横向为 x 轴,纵向为 y 轴,竖向为 z 轴,符合右手定则。

b. 大臂坐标系 $Ax_1y_1z_1$ 。以大臂支点 A 为原点,

x_1 轴与车身 x 轴平行, z_1 轴沿大臂轴线指向铰点 B 。

c. 小臂坐标系 $Bx_2y_2z_2$ 。以小臂支点 B 为原点, x_2 轴与车身 x 轴平行, z_2 轴沿小臂轴线指向铰点 C 。

d. 铲斗坐标系 $Cx_3y_3z_3$ 。以铲斗铰点 C 为原点, x_3 轴与车身 x 轴平行, z_3 轴沿铲斗轴线指向铲尖。

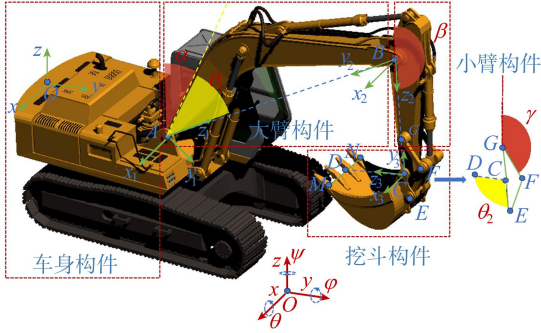


图2 挖掘机位姿几何关系示意图

各构件位姿采用 $z \rightarrow y \rightarrow x$ 顺序的欧拉角描述, 即依次绕自身坐标系的 z 、 y 、 x 轴旋转航向角 ψ 、横滚角 φ 与俯仰角 θ 。其旋转矩阵 $R(\psi, \varphi, \theta)$ 为:

$$R(\psi, \varphi, \theta) = R_z(\psi)R_y(\varphi)R_x(\theta) \quad (1)$$

$$\text{其中 } R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

式中: $R_z(\psi)$ 、 $R_y(\varphi)$ 、 $R_x(\theta)$ 分别为绕各轴的基本旋转矩阵。

对于本文研究的挖掘机, 车身、大臂、小臂和铲斗的航向角 ψ 与横滚角 φ 均与车身状态相同。各构件俯仰角确定如下: 车身俯仰角 θ_{body} 直接由双轴倾角传感器测得; 大臂俯仰角 $\theta_{\text{boom}} = \alpha + \theta_1$; 小臂俯仰角 $\theta_{\text{arm}} = \beta$; 铲斗俯仰角 θ_{bucket} 需通过其连杆机构的几何约束进行解算, 具体方法见 1.3 节。

1.3 基于欧拉角位姿转换的铲尖坐标计算

欧拉角作为一种直观的位姿表达方式, 仅需 3 个元素即可描述刚体位姿, 在航天、动画及人体位姿估计等领域已有广泛应用^[30-33]。尽管该方法在俯仰角接近 $\pm 90^\circ$ 时存在理论上的“万向锁”问题^[34], 但其完全适用于本研究的挖掘机作业场景, 因为挖掘机定点作业时, 运动以大臂、小臂和铲斗的俯仰为主, 机身航向与横滚角变化范围有限, 实际位

姿远离奇异点。同时, 欧拉角形式直观、与传感器输出直接对应, 便于实现高频率实时解算, 其精度基本满足工程厘米级控制需求。

1.3.1 铲斗俯仰角的几何解算

铲斗的俯仰角无法直接测量, 需通过安装在铲斗上的倾角传感器度数, 结合小臂俯仰角及铲斗四连杆机构 ($C-D-G-F$) 的尺寸进行解算:

$$\begin{cases} \theta_{FGC} = \beta - \gamma \\ L_{CF}^2 = L_{FG}^2 + L_{GC}^2 - 2L_{FG}L_{GC}\cos\theta_{FGC} \\ L_{FG}^2 = L_{CF}^2 + L_{GC}^2 - 2L_{CF}L_{GC}\cos\theta_{GCF} \\ L_{EF}^2 = L_{CF}^2 + L_{CE}^2 - 2L_{CF}L_{CE}\cos\theta_{FCE} \\ \theta_{\text{bucket}} = \beta + \theta_{GCF} + \theta_{FCE} + \theta_2 - \pi \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_{FGC} 为 $\triangle FGC$ 的点 G 处夹角; L_{CF} 为铰接点 C 与 F 之间的距离; θ_{GCF} 为 $\triangle GCF$ 的点 C 处夹角; θ_{FCE} 为 $\triangle FCE$ 的点 C 处夹角。

1.3.2 构件控制点的坐标转换

已知某点 P 在自身构件坐标系下的坐标向量为 P_{local} , 其所在构件原点在自身坐标系下的坐标向量为 P_{origin} , 则该点的世界坐标向量 P_{world} 为:

$$P_{\text{world}} = P_{\text{origin}} + RP_{\text{local}} \quad (3)$$

式中: R 为该构件的旋转矩阵。

1.3.3 铲尖坐标的链式求解

车身坐标系原点 O 的世界坐标向量由 GNSS 直接获得, 从车身开始逐步计算后续构件原点坐标向量。

基于车身坐标系到大臂坐标系的旋转矩阵 R_{body} , 结合大臂支点 A 在车身坐标系中的相对坐标向量 p_A , 可得:

$$P_A = P_O + R_{\text{body}}p_A \quad (4)$$

其中 $P_O = (x_O, y_O, z_O)^T$ $P_A = (x_A, y_A, z_A)^T$ 式中: P_O 为车身原点 O 的世界坐标向量; P_A 为大臂支点 A 的世界坐标向量。

大臂坐标系到小臂坐标系的变换仅包含沿大臂轴向的平移, 平移长度为大臂长度 L_{AB} , 基于旋转矩阵 R_{boom} 可得:

$$P_B = P_A + R_{\text{boom}}(0, 0, L_{AB})^T \quad (5)$$

其中 $P_B = (x_B, y_B, z_B)^T$ 式中: P_B 为小臂支点 B 的世界坐标向量。

基于小臂坐标系到铲斗坐标系的旋转矩阵 R_{arm} , 结合小臂长度 L_{BC} , 可得:

$$P_C = P_B + R_{\text{arm}}(0, 0, L_{BC})^T \quad (6)$$

其中 $P_C = (x_C, y_C, z_C)^T$ 式中: P_C 为铲斗铰点 C 的世界坐标向量。

最后, 基于旋转矩阵 R_{bucket} 计算左右铲尖点 N 和 M 的世界坐标, 以左铲尖点 N 为例:

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{P}_C + \mathbf{R}_{\text{bucket}} \mathbf{p}_N \quad (7)$$

式中: \mathbf{p}_N 为左铲尖点 N 在铲斗坐标系中的坐标向量; \mathbf{P}_N 为左铲尖点 N 的世界坐标向量。

通过上述过程,即可实现挖掘机铲尖三维坐标的实时高精度解算。

2 挖掘机与水下开挖形体数字孪生建模

2.1 挖掘机数字孪生模型

根据挖掘机机械结构尺寸,建立挖掘机的数字孪生模型。如图3所示,挖掘机数字孪生模型被分为4个部分,分别是车身构件、大臂构件、小臂构件和铲斗构件,在车身及构件相应位置安装有定位天线与倾角传感器,用于实时采集机身位置及各构件姿态数据。挖掘机数字孪生模型实时接收由1.3节中方法解算出的各构件位姿数据,并更新模型相应构件三维位姿,实现挖掘机物理模型与信息模型的耦合,同时基于Unity 3D和Three.js实现挖掘机孪生模型在车载端与远程客户端的三维可视化,辅助操作手判断挖掘机铲尖与水下岸坡的空间关系,提高作业效率与质量。

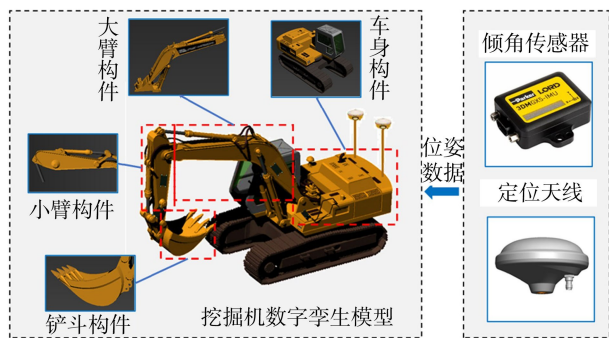


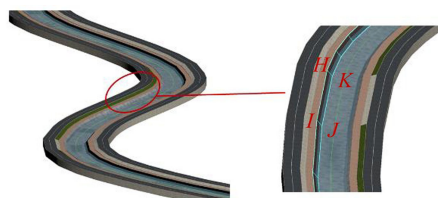
图3 挖掘机数字孪生模型

2.2 水下开挖形体 BIM 模型

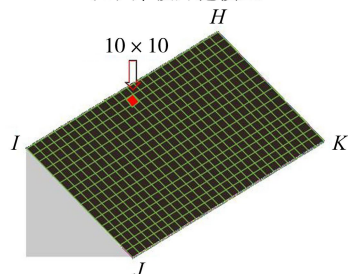
水下开挖形体 BIM 模型(以岸坡开挖为例)包括环境模型与岸坡开挖模型,如图4(a)所示。精细且合理的建模是实现水下挖掘作业智能引导与质量控制的基础。水下开挖岸坡的建模具体步骤如下:

a. 岸坡模型网格化。 每一段岸坡由4个顶点 H, I, J, K 唯一确定,对建立的岸坡开挖模型进行网格化分割,使每个位置处的开挖质量都可由该位置对应的网格特征唯一表示,本文按照 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的精度对岸坡开挖模型进行分割,如图4(b)所示。

b. 开挖检测面设定。 水下岸坡挖掘作业分为欠挖、合格、超挖3种开挖状态,为实现在水下岸坡某个位置处开挖质量的精确显示,参考SL 631—2012《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准—土石方工程》对边坡开挖允许偏差的常见要求,并结合工程实践,将检测面偏移量(即合格带宽



(a) 岸坡开挖模型



(b) 网格化模型(单位:cm)

图4 岸坡开挖模型及其网格化模型

度) 10 cm 作为判断“欠挖”与“超挖”的阈值,将岸坡网格化模型分别向上和向下移动 10 cm ,形成合格检测面与超挖检测面,并赋予不同的颜色,如图5所示,后续可通过碰撞检测来实现开挖岸坡模型的变化,直观展示开挖质量。



图5 岸坡开挖模型检测面设定(单位:cm)

3 水下挖掘智能引导与作业质量控制方法

3.1 铲尖与开挖岸坡相对距离实时解算

利用上文铲尖实时定姿方法实时解算挖掘机铲尖控制点的三维坐标,由水下岸坡的建模过程可知,每一段岸坡对象由其4个顶点唯一确定,由开挖岸坡设计资料获取顶点坐标。假设其中一段开挖岸坡模型顶点坐标为 H, I, J, K ,挖掘机铲尖控制点 Q 的坐标由本文1.3节方法确定。

定义点 Q 到四边形 $HIJK$ 的有向距离为 d 。当点 Q 位于设计开挖面外侧时, $d > 0$,表示欠挖;当点 Q 位于设计开挖面内侧时, $d < 0$,表示超挖。

选取平面上不共线的两个向量 \mathbf{U}_{HI} 和 \mathbf{U}_{HJ} ,则该平面法向量 \mathbf{n} 为:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{U}_{HI} \times \mathbf{U}_{HJ}}{\|\mathbf{U}_{HI} \times \mathbf{U}_{HJ}\|} \quad (8)$$

点 Q 到四边形 $HIJK$ 的有向距离 d 为:

$$d = \mathbf{U}_{HQ} \cdot \mathbf{n} \quad (9)$$

垂足 q 的坐标向量可表示为平面上点 H 沿基向量 U_{HI} 和 U_{HJ} 的线性组合:

$$P_q = P_H + sU_{HI} + tU_{HJ} \quad (10)$$

式中: s 和 t 为标量参数, 可求解由垂线性质 ($U_{Qq} \perp U_{HI}$ 且 $U_{Qq} \perp U_{HJ}$) 建立的方程组得到:

$$\begin{cases} U_{HQ} \cdot U_{HI} = s(U_{HI} \cdot U_{HI}) + t(U_{HJ} \cdot U_{HI}) \\ U_{HQ} \cdot U_{HJ} = s(U_{HI} \cdot U_{HJ}) + t(U_{HJ} \cdot U_{HJ}) \end{cases} \quad (11)$$

求解方程组(11)得到 s 和 t 后, 代入式(10)得垂足坐标向量 P_q 。

判断垂足 q 是否在四边形 $HIJK$ 内部的条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq s \leq 1 \\ 0 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

若满足该条件, 则点 q 在四边形内部(图 6(a)), 点 Q 到该段岸坡的相对距离即为点到平面的有向距离 d (由式(9)求得); 若不满足该条件, 则点 q 在四边形外部(图 6(b)), 点 Q 与该段岸坡的相对距离由点 Q 到各边线 (HI, IJ, JK, KH) 的最短距离确定。该结果可用于引导操作手作业。

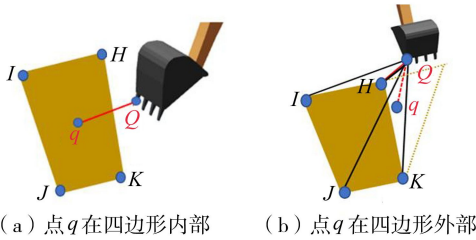


图 6 挖掘机铲尖与开挖岸坡相对距离计算

3.2 智能引导与作业质量控制系统开发与应用方法

3.2.1 系统开发

智能引导与作业质量控制系统采用分层分布式架构, 由车载端、服务器端、远程监控端及现场移动终端四部分构成(图 7), 通过无线网络实现数据交互与协同管控。

车载端负责从服务器端接收挖掘任务信息, 实时采集并解算挖掘机位姿数据, 通过内置算法实时

计算铲尖与开挖面的相对距离及开挖质量, 并基于 Unity 3D 引擎进行三维可视化展示, 同时将解算结果与关键过程数据实时上传至服务器。

服务器端负责接收、存储与管理来自车载端的所有数据, 提供数据转发、分析处理与历史数据查询服务, 为远程监控端和移动终端提供数据支撑。

远程监控端基于 Web 技术开发, 构建设备与开挖环境的 BIM 模型, 管理人员可以在此设定挖掘任务, 并实时接收服务器转发的现场数据, 实现开挖作业的远程、透明化协同监测与质量控制。任务完成后, 支持对开挖过程进行仿真回放、质量报表生成与多维度统计分析。

现场移动终端实时接收由服务器推送的报警信息及任务指令, 协助进行现场协调与应急管控, 形成管理闭环。

3.2.2 系统应用方法

基于距离解算结果和系统平台, 制定智能引导与作业质量控制方法。开挖岸坡模型依据设计开挖面和两层检测面, 将开挖区域划分为欠挖、合格和超挖三个空间区域。根据本文提出的挖掘机铲尖与开挖岸坡相对距离实时解算方法计算两者相对距离, 判断挖掘机铲尖所处的空间区域, 并对开挖岸坡模型网格进行变色处理。当 $d \geq 10$ cm 时, 表示挖掘机铲尖位于欠挖空间区域, 该位置开挖岸坡模型对应网格颜色为棕色, 操作手根据提示应对相应位置继续挖掘; 当 -10 cm $< d < 10$ cm 时, 表示挖掘机铲尖位于合格空间区域, 该位置开挖岸坡模型对应网格颜色为绿色; 当 $d \leq -10$ cm 时, 表示挖掘机铲尖位于超挖空间区域, 该位置开挖岸坡模型对应网格颜色为红色, 并发出报警提醒, 挖掘机操作手应立即停止该位置的开挖作业并采取相应填补措施。同时, 系统实时统计并显示整体开挖进度与开挖合格率, 为作业效率与质量提供量化评估指标。

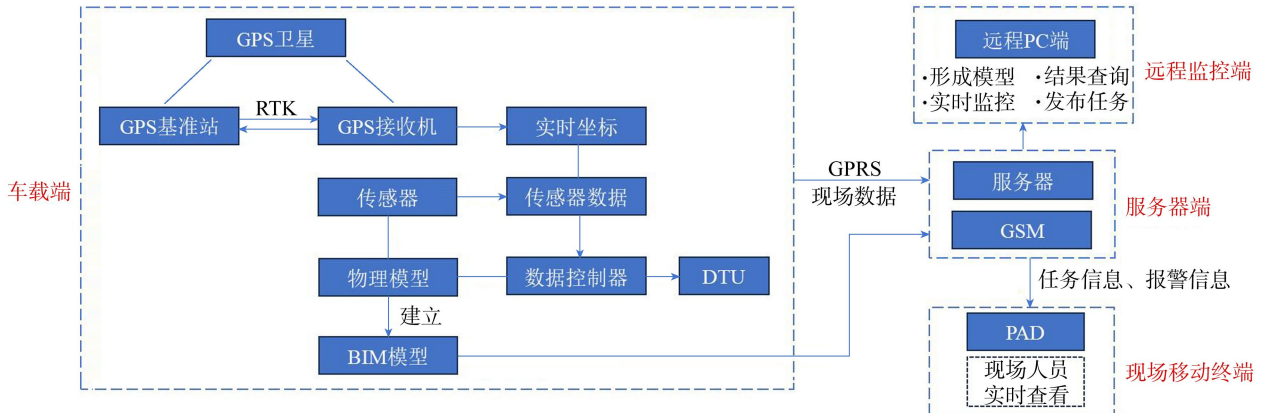


图 7 水下挖掘智能引导与作业质量控制系统架构

4 实例验证

4.1 三维位姿解算分析

为验证本文 1.3 节提出的铲尖坐标计算方法的精度,在挖掘机智能引导硬件装置安装完成后进行了现场测试。GNSS 接收机与倾角传感器以 20 Hz 频率采集位姿数据,同时采用精度为 1 mm 的激光全站仪对铲尖控制点的真实空间坐标进行同步测量,共获取 90 组有效样本数据。挖掘机关键机械结构尺寸经标定后如表 1 所示,铲尖坐标的实测值与解算值对比结果如图 8 所示。

表 1 挖掘机自身机械结构尺寸

参数	x_1/mm	y_1/mm	z_1/mm	L_{AB}/mm	L_{BC}/mm	L_{CD}/mm
初始值	-360	1030	-510	2992	1597	927
参数	L_{CE}/mm	L_{EF}/mm	L_{FG}/mm	L_{GC}/mm	$\theta_1/(\text{^\circ})$	$\theta_2/(\text{^\circ})$
初始值	260	317	351	241	35.6	104.87

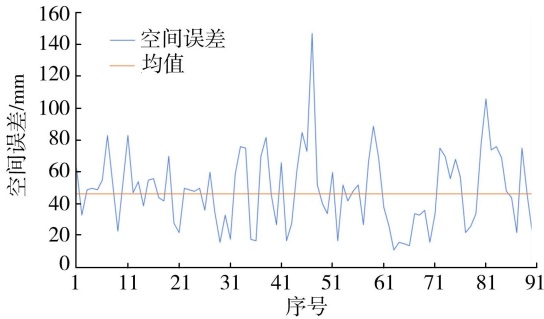


图 8 挖掘机铲尖坐标计算误差

由图 8 可知,误差均值为 4.63 cm。误差主要来源于传感器噪声、机械尺寸标定残余误差及坐标系转换累积误差。该精度完全满足水下开挖厘米级质量控制的工程需求,验证了本文铲尖坐标计算方法的正确性与实用性。

4.2 系统应用

4.2.1 车载端系统

车载端系统界面如图 9 所示。该系统基于 Unity 3D 引擎,集成了水下开挖形体 BIM 模型与挖掘机数字孪生模型。系统通过 C#脚本实时处理传感器数据,以 10 Hz 及以上频率同步更新数字孪生模型位姿,端到端延迟小于 200 ms,确保视觉反馈与物理设备状态高度实时一致。

该系统的核心功能是实时解算与可视化铲尖-岸坡空间关系。界面采用分屏双视角展示:左侧全景视角监控全局作业场景,右侧近景视角聚焦铲斗操作细节。基于实时解算的距离信息,系统实现了开挖状态的智能判断与可视化引导:岸坡模型网格根据铲尖距离动态变色(合格区绿色、欠挖区棕色、超挖区红色),并在超挖时触发声光报警。同时,系统实时统计并显示整体开挖进度与开挖合格率,为

过程量化管理提供直观依据。

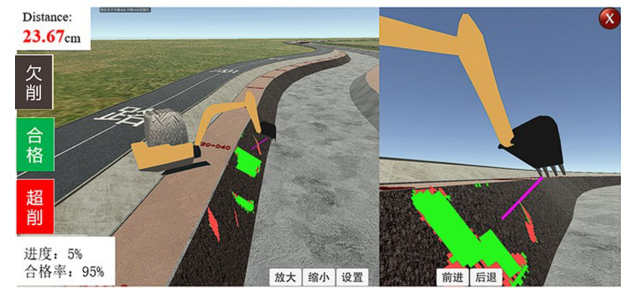


图 9 车载端系统界面

4.2.2 远程监控端软件系统

为支持施工过程的远程透明化管控,开发了基于 Web 技术的远程监控端系统,系统界面如图 10 所示。该系统通过与车载端共享服务器数据(网络传输平均延迟小于 100 ms,同步误差小于 50 ms),实现了施工状态信息的远程实时同步与可视化。管理人员可以在三维孪生场景中自由巡检,并结合左侧面板的实时数据(相对距离、开挖状态、进度与合格率)进行综合决策。

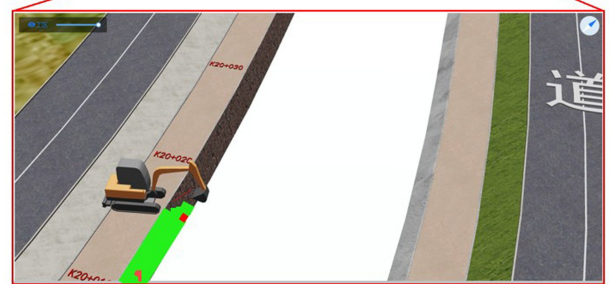


图 10 实时监控系统界面

此外,系统提供了强大的事后分析功能,岸坡开挖质量系统界面如图 11 所示。该系统支持开挖过程仿真回放、岸坡开挖质量色斑图生成、铲尖运动轨迹追溯及多维度报表自动输出。这些功能为复盘作业过程、分析报警根源、评估作业效率提供了有效工具,形成了“实时引导→过程监控→事后分析”的完整质量管理闭环。

5 结语

为解决常规水下挖掘作业中由于挖掘面不可见、开挖过程依赖于挖掘机操作手经验,使得开挖质



图 11 岸坡开挖质量系统界面

量难以控制而导致返工等问题,本文研发了水下挖掘智能引导与作业质量控制装置,并开发了相应系统,可在施工过程中通过车载端可视化智能引导和远程端协调监控,辅助操作手及时发现并纠正质量偏差,使得开挖质量始终处于受控状态,确保开挖面边坡高程与平整性符合设计要求,从而为可视性差的水下挖掘作业质量的管控提供有效的技术手段。

为将本系统应用于更广泛的工程实际,未来还需开展以下研究:在多机协同方面,应研发基于全局数字孪生模型的动态任务分配与冲突实时解算方法,构建低延迟通信的协同控制架构;针对沟槽、防波堤等复杂异形结构,需建立高精度参数化 BIM 建模与相应碰撞检测算法,并研究受限空间下的机械运动规划技术;为应对水流、泥沙等动态干扰,可探索多源信息融合定位方法,并引入基于环境动力学模型的扰动观测与补偿控制策略,以提升系统在真实水下复杂工况下的感知稳定性与引导可靠性。通过上述技术路径的突破,系统有望从当前的单机标准化作业平台,演进为适应多机协同、复杂结构与动态环境的下一代智能施工引导系统。

参考文献:

[1] Mahmood B, Han S, Seo J. Implementation experiments on convolutional neural network training using synthetic images for 3D pose estimation of an excavator on real images [J]. Automation in Construction, 2022, 133: 103996.

[2] Luo Han, Wang Mingzhu, Wong P K Y, et al. Full body pose estimation of construction equipment using computer vision and deep learning techniques [J]. Automation in Construction, 2020, 110: 103016.

[3] Liu Guangxu, Wang Qingfeng, Wang Tao, et al. Vision-based excavator pose estimation for automatic control [J]. Automation in Construction, 2024, 157: 105162.

[4] 倪佳敏, 马伟, 童欣, 等. 基于视觉的挖掘机位姿测量虚拟传感器研究 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 44-49. (Ni Jiamin, Ma Wei, Tong Xin, et al. Vision-based virtual sensor research for excavator position measurement [J].

Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 44-49. (in Chinese))

[5] Tian Zehui, Yu Yong, Xu Feng, et al. Dynamic hazardous proximity zone design for excavator based on 3D mechanical arm pose estimation via computer vision [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2023, 149(7): 04023048.

[6] Li Jinguang, Liu Yu, Wang Linwei, et al. A vision-based end pose estimation method for excavator manipulator [J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83(26): 68723-68741.

[7] Lee S, Park H, Chu B. Excavator posture estimation and position tracking system based on kinematics and sensor network to control mist-spraying robot [J]. IEEE Access, 2022, 10: 107949-107960.

[8] Tang Jingyuan, Luo Han, Chen Weiwei, et al. IMU-based full-body pose estimation for construction machines using kinematics modeling [J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104217.

[9] Zhao Jiangying, Hu Yongbiao, Tian Mingrui. Pose estimation of excavator manipulator based on monocular vision marker system [J]. Sensors, 2021, 21(13): 4478.

[10] Sun D, Ji C, Jang S, et al. Analysis of the position recognition of the bucket tip according to the motion measurement method of excavator boom, stick and bucket [J]. Sensors, 2020, 20(10): 2881.

[11] 邓波, 郭灵华, 刘菠. 3D 挖掘子在护岸水下理坡中的应用 [J]. 中国水运 (下半月), 2015, 15(5): 266-267. (Deng Bo, Guo Linghua, Liu Bo, et al. The application of 3D excavators in underwater slope management for bank protection [J]. China Water Transport, 2015, 15(5): 266-267. (in Chinese))

[12] 魏彦宏. 徕卡测量系统挖掘机智能引导方案在河道施工中的应用 [J]. 测绘通报, 2013(10): 133-134. (Wei Yanhong. Application of Leica measurement system's intelligent guidance scheme for excavators in river construction [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(10): 133-134. (in Chinese))

[13] 陈云, 涂宇轩, 陈述, 等. 混凝土坝施工现场人-机-环多要素识别方法 [J]. 水力发电学报, 2024, 43(12): 13-22. (Chen Yun, Tu Yuxuan, Chen Shu, et al. Recognition method for multi-elements in human-machine-environment scenarios of concrete dam construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(12): 13-22. (in Chinese))

[14] 黄显峰, 王宁, 刘志佳, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,

- 2024,44(4):51-58. (in Chinese))
- [15] 程丹丹,钮月磊,刘创. 基于数字孪生的智慧水利系统的设计与应用[J]. 现代信息科技,2025,9(2):105-109. (Cheng Dandan, Niu Yuelei, Liu Chuang. Design and application of intelligent water conservancy system based on digital twin[J]. Modern Information Technology, 2025, 9(2):105-109. (in Chinese))
- [16] 张社荣,姜佩奇,吴正桥. 水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展:数字孪生应用模式探索[J]. 水力发电学报,2021,40(1):1-12. (Zhang Sherong, Jiang Peiqi, Wu Zhengqiao. Advances in research of lean construction technology of integrated design and construction for hydropower projects: exploration of digital twin application mode [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(1):1-12. (in Chinese))
- [17] 杜明芳. 基于数字孪生的智慧建筑系统集成研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(6):44-48. (Du Mingfang. Intelligent building system integration research based on digital twin [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2020, 12(6):44-48. (in Chinese))
- [18] 张宗亮,杨宜文,张社荣,等. 黄登水电站特高碾压混凝土重力坝 BIM 技术应用[J]. 中国水利,2020(13):65-66. (Zhang Zongliang, Yang Yiwen, Zhang Sherong, et al. Application of BIM technology in super-high RCC gravity dam of Huangdeng Hydropower Station[J]. China Water Resources, 2020(13):65-66. (in Chinese))
- [19] 樊启祥,陆佑楣,周绍武,等. 金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J]. 水利学报,2019,50(3):294-304. (Fan Qixiang, Lu Youmei, Zhou Shaowu, et al. Research and practice on intelligent construction technology system of Jinsha River hydropower projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3):294-304. (in Chinese))
- [20] 牛景太,周华,吴邦彬,等. 考虑多重共线性影响的特高拱坝时空监控模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):29-35. (Niu Jingtai, Zhou Hua, Wu Bangbin, et al. Spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams considering multicollinearity effects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1):29-35. (in Chinese))
- [21] 吴都督,李志,刘金山,等. 智能建造技术在碾压混凝土坝施工中的应用与创新[J]. 水利水电科技进展,2024,44(增刊1):66-70. (Wu Dudu, Li Zhi, Liu Jinshan, et al. Application and innovation of intelligent construction technology in construction of roller-compacted concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(S1):66-70. (in Chinese))
- [22] 何绍波,何国锋,何金龙,等. 地下厂房洞室群施工关键技术研究[J]. 水利水电科技进展,2024,44(增刊1):28-33. (He Shaobo, He Guofeng, He Jinlong, et al. Research on key technologies for construction of underground powerhouse cavern group [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(S1):28-33. (in Chinese))
- [23] Dunbabin M, Marques L. Robots for environmental monitoring: significant advancements and applications[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(1):24-39.
- [24] Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: a review [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1):131-149.
- [25] Tanoli W A, Seo J W, Sharafat A, et al. 3D design modeling application in machine guidance system for earthwork operations [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12):4779-4790.
- [26] Liu Donghai, Sun Chenyang, Chen Junjie, et al. Multisensory and BIM-integrated digital twin to improve urban excavation safety[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2023, 37(5):04023025.
- [27] Tanoli W A, Seo J W, Sharafat A, et al. 3D design modeling application in machine guidance system for earthwork operations [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12):4779-4790.
- [28] Moon S, Seo J. Virtual graphic representation of construction equipment for developing a 3D earthwork BIM [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23(8):977-984.
- [29] 宋学官,来孝楠,何西旺,等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术[J]. 机械工程学报,2022,58(10):298-325. (Song Xueguan, Lai Xiaonan, He Xiwang, et al. Key technologies of shape-performance integrated digital twin for major equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10):298-325. (in Chinese))
- [30] Zeng Yuhang, Guo Hongwu. An euler angle calculation method for tailsitter UAV[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan:IEEE, 2017:814-819.
- [31] Perumal L. Euler angles: conversion of arbitrary rotation sequences to specific rotation sequence [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2014, 25(5/6):521-529.
- [32] Huang Suibin, Yang Kun, Xiao Hua, et al. A new head pose tracking method based on stereo visual SLAM[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2022, 82:103402.
- [33] Sun Jie, Lu Shengli. An improved single shot multibox for video-rate head pose prediction [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20):12326-12333.
- [34] 黄雪樵. 克服欧拉方程奇异性的双欧法[J]. 飞行力学, 1994(4):28-37. (Huang Xueqiao. The dual Euler method for overcoming the singularity of Euler equation[J]. Flight Dynamics, 1994(4):28-37. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-09 编辑:俞云利)

电网负荷频繁波动下水电站负荷实时调整策略研究

方国华¹,任旭东¹,颜敏²

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 清华大学水利水电工程系)

摘要:针对水电站在电网负荷波动下易出现机组频繁启停及穿越振动区等运行不稳定问题,构建了一种应对电网不同量级负荷波动的负荷实时调整策略。该策略通过电站状态更新、不增减机组、增减机组及全局遍历4个模块,灵活选择参与调整的机组组合;建立以耗水量最小化为目标的负荷优化分配模型,并采用动态规划算法进行求解。以乌江流域东风水电站为例对提出的策略进行了验证。结果表明:优化后电站机组三日启停累计次数和穿越振动区次数分别减少了44.12%和67.21%,总耗水量减少约76万m³;该负荷实时调整策略可有效保证发电需求,显著提高电站运行的经济性与稳定性,从而为水电站在电网负荷频繁波动下的实时调度提供可靠的技术支撑。

关键词:负荷波动;实时调整;负荷分配;动态规划

Real-time load adjustment strategy for hydropower stations under frequent grid load fluctuations//Fang Guohua¹, Ren Xudong¹, Yan Min²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University)

Abstract: To address operational instability issues at hydropower stations, such as frequent unit start-stops and passage through vibration zones, under fluctuating grid loads, a real-time load adjustment strategy was developed to handle grid load fluctuations of varying magnitudes. This strategy flexibly selects the combination of units participating in the adjustment through four modules: power station status updating, maintaining the number of operating units, increasing or decreasing the number of operating units, and global traversal. A load optimization allocation model aimed at minimizing water consumption was established and solved using a dynamic programming algorithm. Taking the Dongfeng Hydropower Station in the Wujiang River Basin as an example, the proposed method was validated. The results indicate that, following optimization, the cumulative number of unit start-stop cycles over three days and the number of instances of crossing the vibration zone decreased by 44.12% and 67.21%, respectively, while the total water consumption decreased by approximately 7.6×10^5 m³. This real-time load adjustment strategy can effectively ensure power generation demand, significantly improve the economic efficiency and stability of hydropower station operations, and thus provide reliable technical support for the real-time dispatch of hydropower stations under frequent grid load fluctuations.

Key words: load fluctuation; real-time adjustment; load allocation; dynamic programming

随着可再生能源的规模化并网以及用电需求的多样化发展,电网负荷波动呈现高频次、大幅度的变化趋势^[1-2]。在此背景下,水电作为我国最成熟且规模最大的可再生能源之一,因其启停灵活、调峰能力强、与出力波动强的风光等新能源存在天然互补优势^[3-4]等特点,其作用正逐步由“电量供应”转向“电网调节”。水电站机组能够根据电网实际用电需求实时调整出力,快速响应电网负荷需求,实现电能供需的平衡^[5]。因此,构建高效、科学的水电站负荷实时分配策略,对于有效应对电网负荷波动,提升电站运行的灵活性和稳定性具有重要意义。

当前,针对水电站负荷实时分配的研究主要聚

焦于电站机组组合选定与负荷优化分配两个方面。在机组组合选定方面,相关学者围绕如何快速应对电网负荷波动、动态调整机组启停状态开展了广泛研究。例如:徐弘玮等^[6]使用预训练的深度学习策略网络快速调整机组启停组合,利用最新环境状态进行推理,在线生成了负荷分配决策;钟青祥等^[7]构建了以耗水量最小、水位平稳为双目标的站内实时负荷优化分配模型,提出了基于组合思想改进的负荷分配总表,以解决构建总表时的维数灾问题;刘瑞等^[8]引入分级振动区理念,使电站在负荷波动下优先将负荷分配至稳定运行区内的机组,通过惩罚机制使负荷分配更倾向于在安全区域运行,

基金项目:国家自然科学基金项目(52179012)

作者简介:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhufgh@163.com

牺牲少量经济性以提升整体稳定性。在机组负荷优化分配方面,相关理论与方法研究已相对成熟,且在实际调度中得到了较为广泛的应用。现有负荷分配模型通常遵循“以电定水”优化准则^[9-10],即在既定负荷需求条件下,通过合理分配各机组出力,以耗水量最小化为目标,保障供电稳定性和快速响应能力。针对相关负荷分配模型,研究者已提出多种有效的求解方法。其中,等微增率法^[11]、拉格朗日松弛法^[12]、动态规划法^[13-14]等传统方法已形成较为完善的理论体系。同时,随着大数据分析和云计算平台的兴起,粒子群算法^[15]、蚁群算法^[16]、遗传算法^[17-18]等智能优化算法也被逐步应用于水库调度问题的求解中^[19-22]。

尽管上述研究在提升电站负荷实时响应能力和运行安全性方面取得了一定成果,但仍存在诸多不足。在当前水电站负荷分配模型的研究中,经济性方面侧重于耗水量优化,安全稳定方面则多聚焦于机组振动区,普遍忽略了实时调节过程中的安全稳定影响。一方面,受限于水库调度的复杂性和不确定性,现有研究多集中于短期调度策略的优化,常选用单一的负荷平均分配方法,采用离线计算得到静态负荷分配表,之后在实际运行中通过查表法或经简单在线修正后动态查表的方式,这种方式在面对突发性、大幅度负荷变化时,缺乏完整、科学的实时调整机制,调节精度有限,难以在多机组、复杂约束条件下实现经济性与安全性兼顾的目标。另一方面,在当前电网负荷快速变化、调频调峰任务日益繁重的背景下,水电站在不同量级负荷波动下的实时调节能力尚缺乏系统性研究,响应速度、调节稳定性与运行效益之间的协调机制亟须更加有效的模型和方法支撑。

综上,针对水电站运行过程中的实际需求,结合当前电网负荷日益复杂的发展趋势,本文提出了一种应对不同量级负荷波动的电站负荷实时调整策略,并以乌江流域东风水电站作为工程实例验证了所提策略的实用性与先进性。

1 基于逻辑判断的负荷实时调整策略

在水电站机组的实际运行过程中,一方面,受发电任务波动幅度大、周期长的影响,机组频繁穿越振动区^[23];另一方面,传统的负荷分配模型盲目追求机组总耗水量最小化,容易导致实际运行中机组负荷大面积转移、机组频繁启停。这不仅加速了设备老化,缩短了机组寿命,也对电站的运行稳定性构成了威胁。针对不同量级的电网负荷波动,按照尽量避免负荷转移过大、尽量避免穿越振动区、尽量避免

增减机组 3 个原则,构建了电站状态更新模块、不增减机组模块、增减机组模块以及全局遍历模块,提出了基于逻辑判断的负荷实时调整策略,流程如图 1 所示。

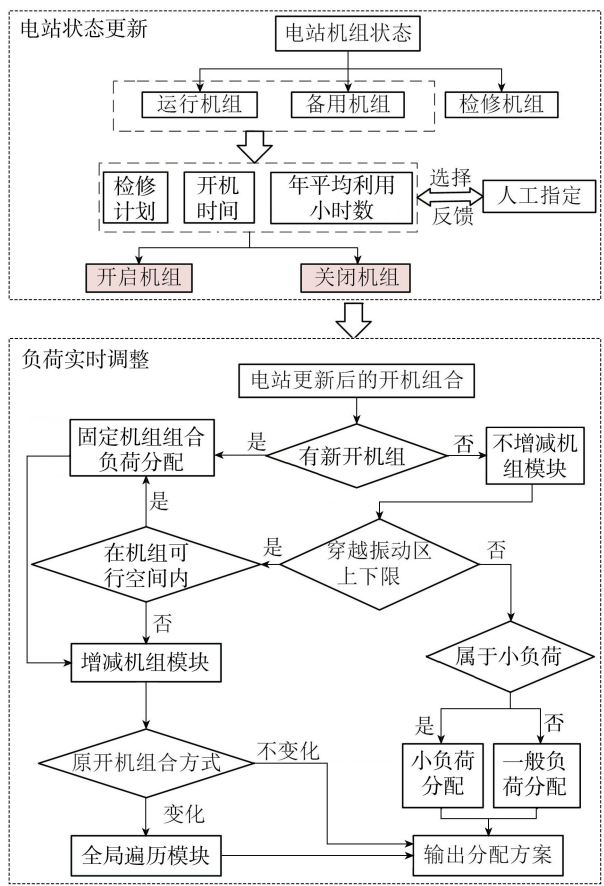


图 1 基于逻辑判断的负荷实时调整策略流程

1.1 电站状态更新模块

由于机组状态的约束以及人工指定的选择,负荷调整前需要对当前机组(运行机组、备用机组、检修机组)状态进行更新,开启需要开启的机组,关闭需要关闭的机组。电站状态更新流程包括机组状态实时分析以及人工指定更新两个单元。

1.1.1 机组状态实时分析

根据机组的状态将电站机组分为运行机组、备用机组以及检修机组 3 个部分。运行机组是指当前正在运行的机组,从检修计划、开机时间、年平均利用小时数 3 个方面对运行机组进行分析。若机组进入检修计划,则需要关闭;若不在检修计划内,且开机时间小于最小开机时间,则机组需要继续开启;若开机时间大于最小开机时间,按照机组的年平均利用小时数判断开机或关机的优先级。备用机组是指当前关闭且不在检修计划内的机组。通过关机时间对备用机组进行分析,若关机时间小于最小关机时间,则机组需要关闭;若关机时间大于最小关机时间,则机组可以开启,此时根据备用机组的年平均利

用小时数判断开机或关机的优先级。检修机组在检修计划内,机组需要关闭。

1.1.2 人工指定更新

将机组状态约束下更新得到的机组组合反馈给人工进行指定更新,开启人工指定需要开启的机组,关闭机组状态约束下需要关闭以及人工指定需要关闭的机组,完成电站状态更新。

1.2 不增减机组模块

在电站实际运行过程中,机组的启停会造成耗水量额外增加,更新后的机组组合若能够分配下达的负荷要求,则不增减机组。不增减机组模块流程如图2所示,根据发电任务变化计算负荷波动,不增减机组模块可分为以下3种工况。

1.2.1 负荷波动较小,各机组不穿越振动区

此时若仍然按照常规方法操作可能会造成机组负荷大范围转移,电站实际调度难度和经济收益不平衡,因此提出以下实时调整策略:

当负荷波动在人工设定的小负荷阈值内时,若开机机组型号一致,负荷上升时按开机时间由短到长设定优先级,保证快速进入高效率区;负荷下降时按开机时间由长到短设定优先级,有利于及时关闭疲劳机组。若不一致,以单位耗水量为依据设定优先级,优先分配至耗水少的机组。按优先级排序机组后,选择尽可能少的机组承担负荷变化,若一台机组能够承担,则将变化负荷全部加在这一台机组上,否则增加到下一个优先级机组,以此类推。如果机组负荷波动范围不穿越振动区的界限且在设定的小负荷阈值外时,则按一般负荷来分配,采用固定机组组合下的负荷优化分配方法,具体见第2节。

1.2.2 负荷波动超出机组振动区上下限,但仍在机组出力可行空间内

此时理论上机组出力需要穿越振动区,但为了避免发生机组频繁穿越振动区的情况,需考虑负荷未来趋势变化,具体实时调整策略为:当前电网要求

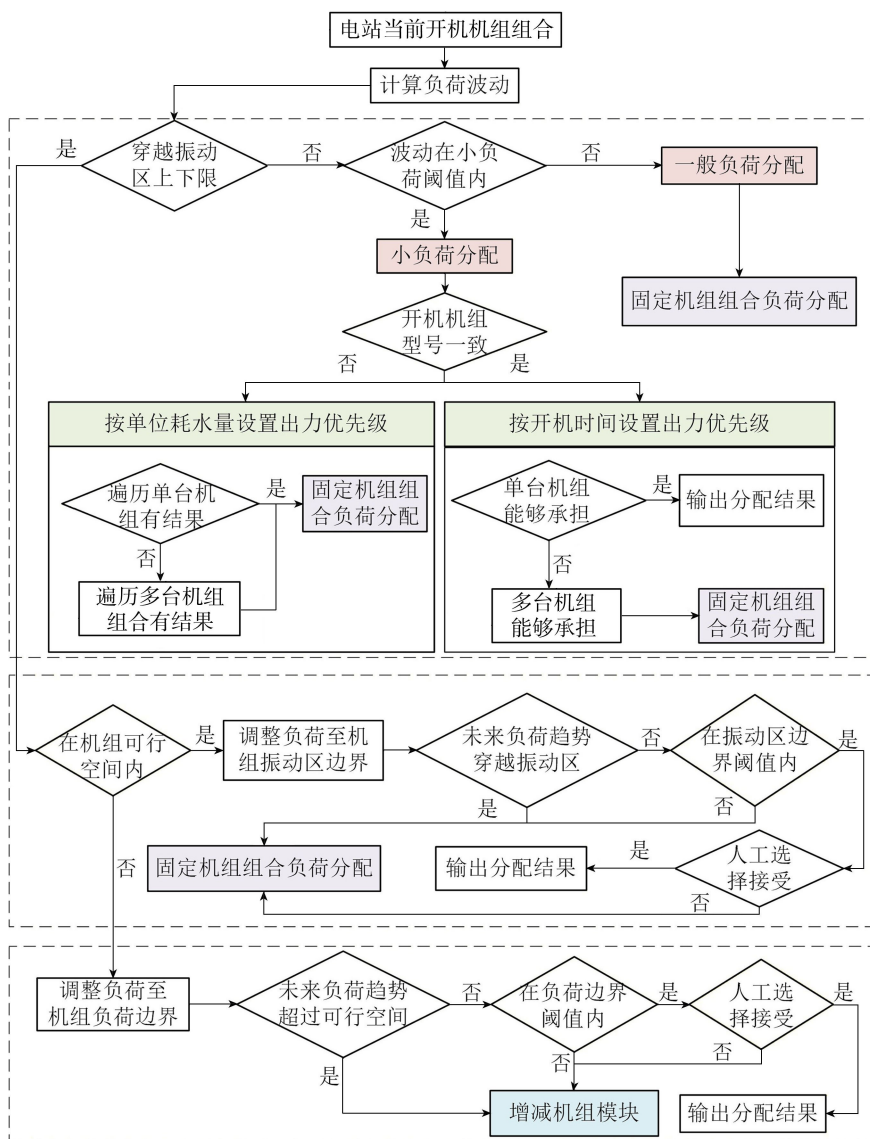


图2 不增减机组模块流程

电站增减负荷,但未来负荷没有相同的变化趋势,此时将所有机组负荷调至对应变化振动区边界,比较此时总负荷与电网要求负荷的差值,若差值在设定的振动区边界阈值内时按照此方案运行,否则采用固定机组组合下的负荷优化分配方法。

1.2.3 负荷波动超出当前机组组合的出力可行空间

此时理论上应增减机组,但为了避免机组频繁启停,同样考虑负荷未来趋势变化,具体实时调整策略为:当前电网要求电站增减负荷,但未来负荷没有相同的变化趋势,此时将所有机组负荷调至对应变化负荷边界,比较此时总负荷与电网要求负荷的差值,若差值在设定的负荷边界阈值内时按照此方案运行,否则根据实际情况,转入增减机组模块。

1.3 增减机组模块

在保证原开机机组启停状态不变的前提下,增减机组模块流程如图3所示。

1.3.1 负荷上升调整方案

当负荷波动上升时,首先判断可开启机组的型号是否一致,若不一致则遍历所有可行的开机组组合,

分别调用固定机组组合下的负荷优化分配方法;若一致则按照关机时间长短设定优先级,优先选择关机时间长的机组开启,直到负荷需求在机组可行出力空间内,之后进行固定机组组合下的负荷优化分配。

1.3.2 负荷下降调整方案

当负荷波动下降时,首先判断当前可关闭机组的型号是否一致,若不一致则遍历所有可行的关机组合,分别调用固定机组组合下的负荷优化分配方法;若一致则按照开机时间长短设定优先级,优先选择开机时间长的机组关闭,直到负荷要求在机组可行出力空间内,之后进行固定机组组合下的负荷优化分配。

1.4 全局遍历模块

上述增减机组模块是在维持原开机机组启停状态的基础上,调整其他机组,例如需要增加机组时,保证原开机机组不动,选择原关闭的机组进行开启。然而由于某些负荷的特殊性,使得需要大面积调整机组才能满足系统负荷需求,此时应调用全局遍历

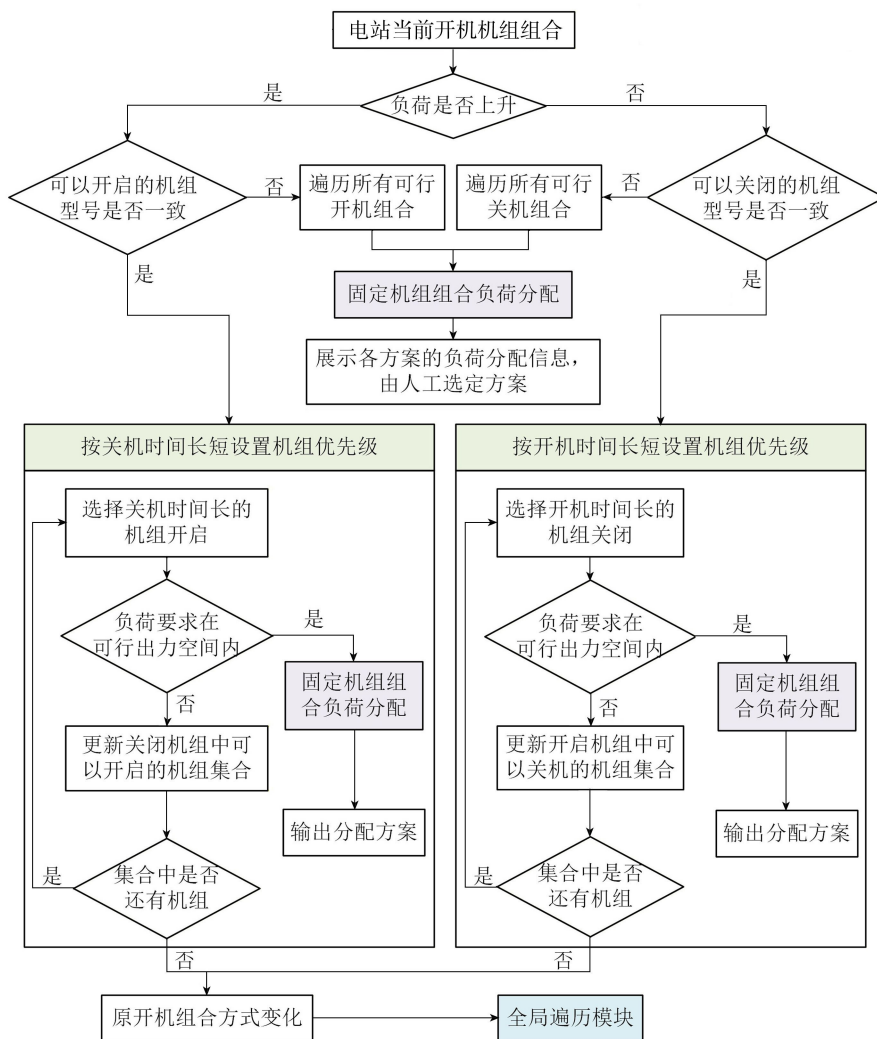


图3 增减机组模块流程

模块,该模块在遍历机组组合时可以改变原开机机组的启停状态,然后分别采用固定机组组合下的负荷优化分配方法,输出分配结果供人工进行选择。

2 固定机组组合下的负荷优化分配

2.1 负荷优化分配模型

采用“以电定水”优化准则,即在已知电站总出力需求的前提下,以发电耗水量最小化为目标,制定最优的负荷分配方案。该方案需综合确定机组的启停顺序、组合方式、投运机组数及各机组的具体出力分配。水电站优化目标可从空间维度与时间维度^[24]两个层面进行探讨,通过协调时间与空间两个维度的优化策略,可显著提高电站的整体运行经济性与水资源利用效率。

2.1.1 目标函数

在已选定的固定机组组合之间进行负荷的优化分配,以耗水流量最小为目标函数:

$$Q_t = \min \sum_{k=1}^N [X_{kt}Q_{kt} + X_{kt}(1 - X_{k,t-1})Q_{0,k} + X_{k,t-1}(1 - X_{kt})Q_{C,k} + C_kQ_{\Lambda,k}] \quad (1)$$

式中: Q_t 为 t 时段系统总最小耗水流量; N 为机组台数; X_{kt} 为第 k 台机组在 t 时段的开机状态,开机取1,关机取0; Q_{kt} 为 t 时段内第 k 台机组的耗水流量; $Q_{0,k}$ 、 $Q_{C,k}$ 分别为第 k 台机组的开机和停机惩罚流量; C_k 为第 k 台机组时段内负荷波动的穿越振动区次数; $Q_{\Lambda,k}$ 为第 k 台机组穿越振动区的惩罚流量。

2.1.2 约束条件

a. 电力系统约束:

$$\sum_{k=1}^N N_{kt} = N_{F,t} \quad (2)$$

式中: N_{kt} 为第 k 台机组在 t 时段的出力; $N_{F,t}$ 为 t 时段的电站发电任务。

b. 水库特性约束,包括水库水量平衡约束、库容曲线约束、库水位约束:

$$V_t = V_{t-1} + (Q_{R,t} - Q_{X,t})\Delta t \quad (3)$$

$$Z_{t+1} = f_{ZV}(V_{t+1}) \quad (4)$$

$$Z_{t+1,\min} \leq Z_{t+1} \leq Z_{t+1,\max} \quad (5)$$

式中: V_t 为 t 时段水库水量; $Q_{R,t}$ 为 t 时段水库入库流量; $Q_{X,t}$ 为 t 时段水库出库流量(包括弃水流量); Δt 为时段长度; Z_{t+1} 为 t 时段末水库水位; $f_{ZV}(\cdot)$ 为库容曲线函数; $Z_{t+1,\min}$ 、 $Z_{t+1,\max}$ 分别为 t 时段末水库允许最低和最高水位。

c. 水电站特性约束,包括机组水头限制、机组出力限制、机组发电流量约束:

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \quad (6)$$

$$N_{k\min} \leq N_{kt} \leq N_{k\max} \quad (7)$$

$$Q_{k\min} \leq Q_{kt} \leq Q_{k\max} \quad (8)$$

式中: H_{\min} 、 H_{\max} 分别为维持电站稳定运行的最小和最大水头; H 为电站的计算水头; $N_{k\min}$ 、 $N_{k\max}$ 分别为第 k 台机组的最小和最大限制出力; $Q_{k\min}$ 、 $Q_{k\max}$ 分别为第 k 台机组的最小和最大发电流量。

d. 爬坡能力约束:

$$|N_{kt} - N_{k,t-1}| \leq \Delta P_k \quad (9)$$

式中: ΔP_k 为第 k 台机组的爬坡能力限制,根据实际机组的特性确定。

e. 启停机时间约束:

$$\begin{cases} T_{C,k} \geq T_{C,k,\min} \\ T_{O,k} \geq T_{O,k,\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_{C,k}$ 、 $T_{O,k}$ 分别为第 k 台机组的实际关机和开机时间; $T_{C,k,\min}$ 、 $T_{O,k,\min}$ 分别为第 k 台机组最短关机和开机时间。

f. 振动区内运行约束:

$$(N_{kt} - N_{ktn,\max})(N_{kt} - N_{ktn,\min}) \geq 0 \quad (11)$$

式中: $N_{ktn,\max}$ 、 $N_{ktn,\min}$ 分别为第 k 台机组在 t 时段第 n 个出力的振动区上限和下限。

2.2 基于动态规划算法的模型求解方法

动态规划算法是求解厂内经济运行问题的经典方法,该算法利用最优性原理,将决策问题剖分为前后互相关联的多阶段问题,继而逐个进行解决,并准确找到全局的最优解。

2.2.1 空间维下单一时段负荷优化分配

a. 阶段与状态变量:采用同一时段机组实际运行台数 k 为阶段变量,所有机组总负荷 S_k 为状态变量。

b. 决策变量与状态转移方程:采用电站各机组承担的时段出力 N_k 为决策变量,以负荷平衡方程为状态转移方程:

$$S_k = S_{k-1} + N_k \quad (12)$$

c. 求解步骤:①根据水头确定各机组的振动区范围,在最小和最大出力之间扣除振动区生成各机组可行出力空间;②以机组总负荷为状态变量,根据各机组的可行出力空间,生成各阶段机组总负荷的范围;③前向状态遍历,设置离散步长,根据可行空间生成负荷离散点,由各阶段机组总负荷范围生成状态离散点,以耗水流量最小为目标,从1号机组往 N 号机组进行遍历搜索;④后向状态回溯,从 N 号机组往1号机组检索最优负荷的分配方案,完成求解。

2.2.2 时间维度下不同时段间机组启停优化

完成时段内负荷分配计算后,继续进行不同时段间机组启停优化计算,具体步骤如下:

a. 取不同优化时段 t 为阶段变量,单一优化时

段机组组合 J_t 为状态变量, 机组启停调整策略 u_t 为决策变量。

b. 将计算时段 t 的状态变量 J_t 与时段 $t-1$ 的状态变量 J_{t-1} 按机组组合标记方式转换为二进制数 X_{kt} , 确定时段决策变量 u_t 后, 计算机组启停、穿越振动区约束设计相应的惩罚流量:

$$Q_{P,kt} = X_{kt}(1 - X_{k,t-1})Q_{0,k} + X_{k,t-1}(1 - X_{kt})Q_{C,k} + C_k Q_{A,k} \quad (13)$$

式中: $Q_{P,kt}$ 为第 k 台机组在 t 时段机组启停和穿越振动区约束总惩罚流量。

c. 将式(1)作为模型目标函数, 重复 2.2.1 节动态规划算法优化不同时段间的机组组合及负荷分配方案。

2.2.3 引入并行策略思想

随着多核技术的发展, 并行策略思想逐渐成为主流。并行策略思想是将一个整体的复杂目标分解成各个子目标, 子目标之间的关联性较弱, 此时便可以利用各个核心建立多个线程, 独立求解各个子目标的解, 最后再将这些解进行优化比较, 最终得到原目标的最优解。与单核串行计算过程相比, 多核并行计算显著提高了计算效率^[25]。

针对不同时段间的负荷分配最优化问题, 由于时段间的结果互相影响, 不易引入并行策略。但对于同一时段的负荷分配优化问题, 由于机组运行时的水库参数相同, 且时段内的发电任务已经确定, 需要遍历的是根据预设步长划分的各机组的实际出力情况, 故可以将遍历的各机组实际出力范围划分为多个部分, 引入并行策略, 同时计算范围内多个决策部分, 并将计算结果暂时存储起来, 待遍历结束后对各出力方案所对应的耗水量进行比较, 从而得出该阶段的最优分配结果。相比传统算法, 引入多核并行策略后, 有效解决了水头、负荷和机组组合之间的重叠耦合计算问题, 增强了模型在复杂工况下的求解能力, 可以在一定程度上避免“维数灾”问题。

3 实例验证

3.1 研究区概况

乌江流域东风水电站位于贵州省境内, 属于不完全年调节水库。电站原装机容量为 3×170 MW, 2004 年初至 2005 年 5 月电站进行了增容改造和扩机工程, 现共装有 4 台混流式水轮发电机组, 机组装

机容量 695 MW (3×190 MW + 1×125 MW), 4 台机组具体参数如表 1 所示, 机组的振动区范围一般与水位相关, 东风水电站机组不同水位下振动区范围已根据现场运行经验得到。

结合电站实际运行工程经验, 拟定开停机惩罚水量为 50 万 $\text{m}^3/(\text{台} \cdot \text{次})$, 穿越振动区惩罚水量为 10 万 $\text{m}^3/(\text{台} \cdot \text{次})$, 机组最小开停机时间拟定为 1 h, 不增减机组模块中小负荷波动阈值设为 10 MW, 未来负荷趋势预测时间定为之后两个时段, 振动区和负荷边界阈值均设为 20 MW。

3.2 结果与分析

选用东风水电站 2018 年 2 月 1 日至 2 月 3 日的实际运行数据进行优化计算, 划分每个时段长 10 min, 每日共 144 个时段, 将每个时段内的实际出力平均值视作各时段的负荷指令, 根据实时调整策略进行出力优化处理, 并运用已建立的负荷优化分配模型进行求解, 测试模型运行效果。

3.2.1 负荷分配及出力优化结果

电站机组出力对比如图 4~6 所示, 优化后的机组出力总体上较实际运行时更平稳, 有效减少了机组频繁启停和穿越振动区的不利情况。机组启停次数和穿越振动区次数的对比结果如下: 东风水电站在三日实际运行中机组启停共 34 次, 优化后机组启停 19 次, 降幅达 44.12% ; 穿越振动区次数包括机组进入、离开振动区的次数, 以及持续在振动区内运行的时段数, 实际运行中共穿越振动区 61 次, 优化后穿越振动区 20 次, 降幅达 67.21% , 其中 2 月 2 日穿越振动区次数减少最多, 达 28 次, 同时该日也是优化结果与实际结果偏差最大的一日, 注意到 1 号机组在当日 8 时至 12 时的实际出力位于振动区内, 主要原因在于该时段电网负荷频率变化较快, 且实际运行中采用的负荷指令为离散点, 导致机组频繁穿越振动区。而在优化过程中, 通过负荷实时调整策略, 避免了此类问题的发生, 保证了机组运行的连续性与稳定性。

负荷分配及总出力对比如图 7 和图 8 所示。东风水电站 2 月 1 日至 3 日绝大部分时段内优化出力和实际出力数值接近, 个别时段出现偏差, 主要原因在于实时调整策略中设定的负荷阈值及机组运行约束的共同作用, 导致优化方案在执行过程中未能完全匹配实际负荷指令。以 2 月 2 日 11 时为例, 优化方案在满足约束条件下给出合理出力, 若按照实际

表 1 东风水电站机组参数

机组	型号	额定出力/MW	单机额定流量/ (m^3/s)	最大工作水头/m	最小工作水头/m	设计水头/m
1~3 号	HLTF12-LJ-410	190	172.36	132	95	117
4 号	HLFN33B-LJ-350	125	115.04	132	95	117

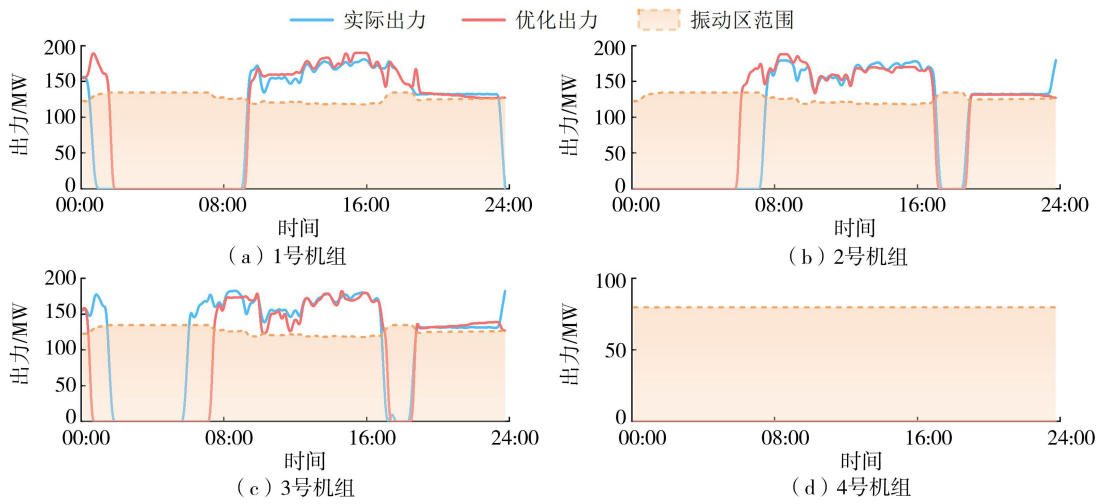


图4 2月1日电站机组出力对比

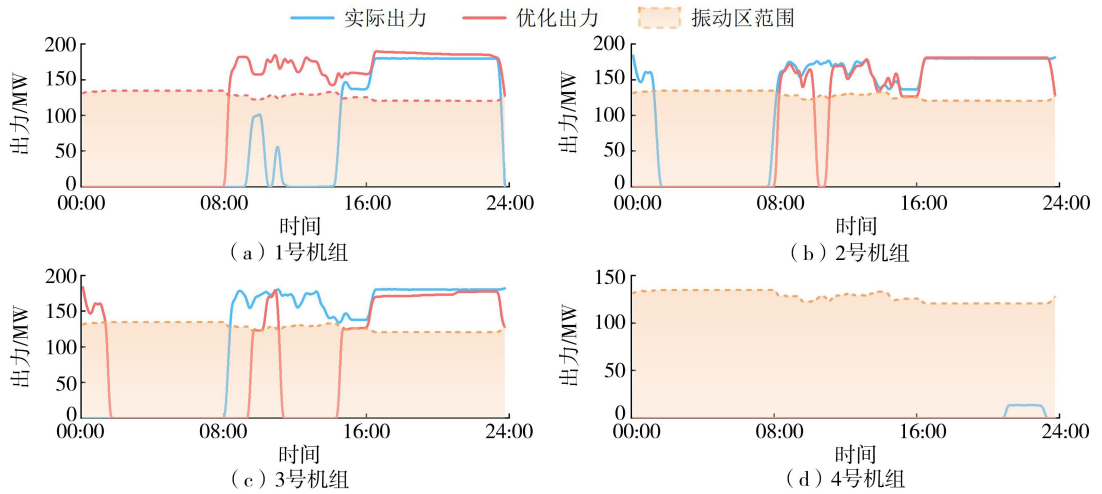


图5 2月2日电站机组出力对比

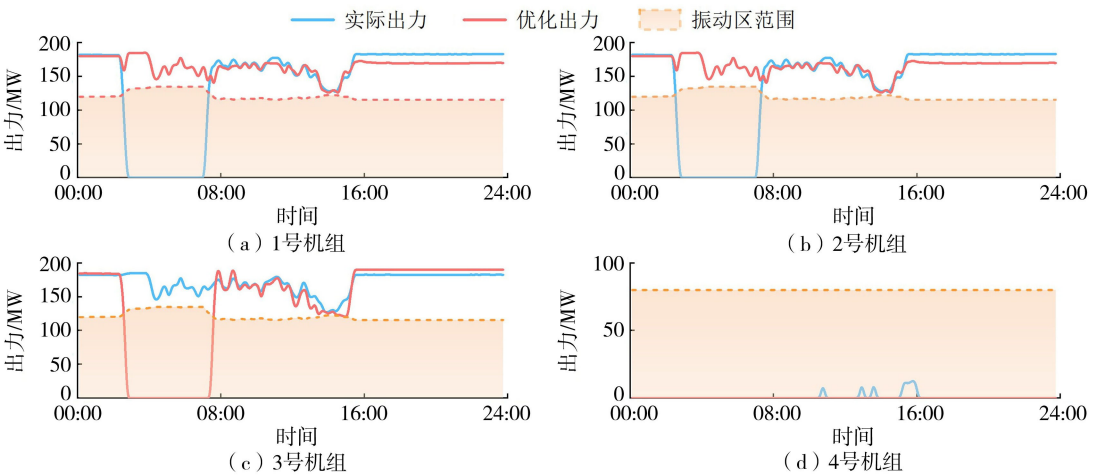


图6 2月3日电站机组出力对比

负荷指令继续加大负荷,将开启2号机组并使其在振动区内运行,为保证机组运行安全,最终选定优化方案出力。尽管如此,优化后的出力仍满足整体发电任务需求,且偏差控制在可接受范围内。

3.2.2 机组耗水流量和末水位结果

根据负荷分配结果,机组耗水流量及水位对比

如图9和图10所示,优化后的机组平均耗水流量整体呈明显下降趋势。统计结果表明,三日实际总耗水量为7748.71万 m^3 ,优化后总耗水量为7672.18万 m^3 ,累计耗水量减少约76万 m^3 ,节水效果显著。与此同时,电站末水位在三日均有所抬升,库容呈持续上升态势,蓄能能力有所提高。

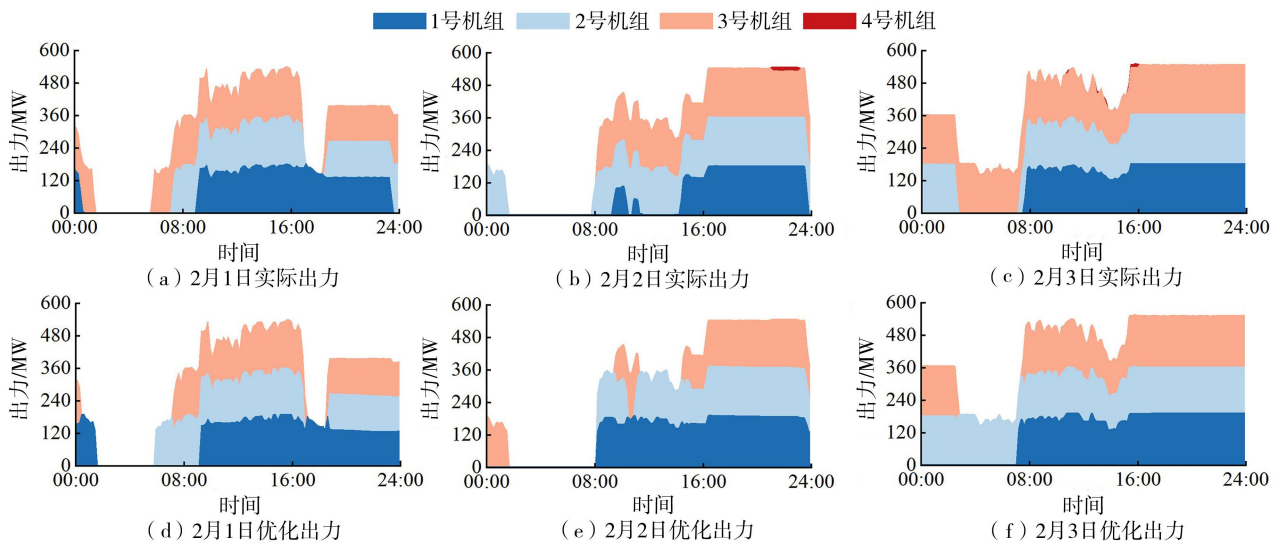


图7 机组负荷分配

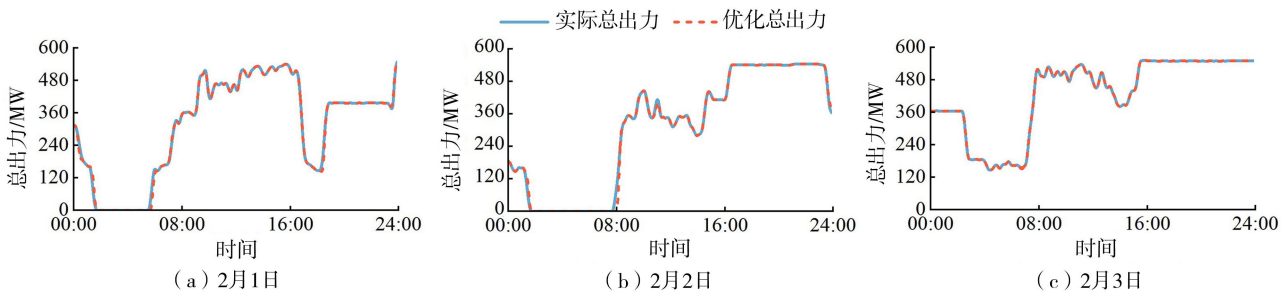


图8 机组总出力对比

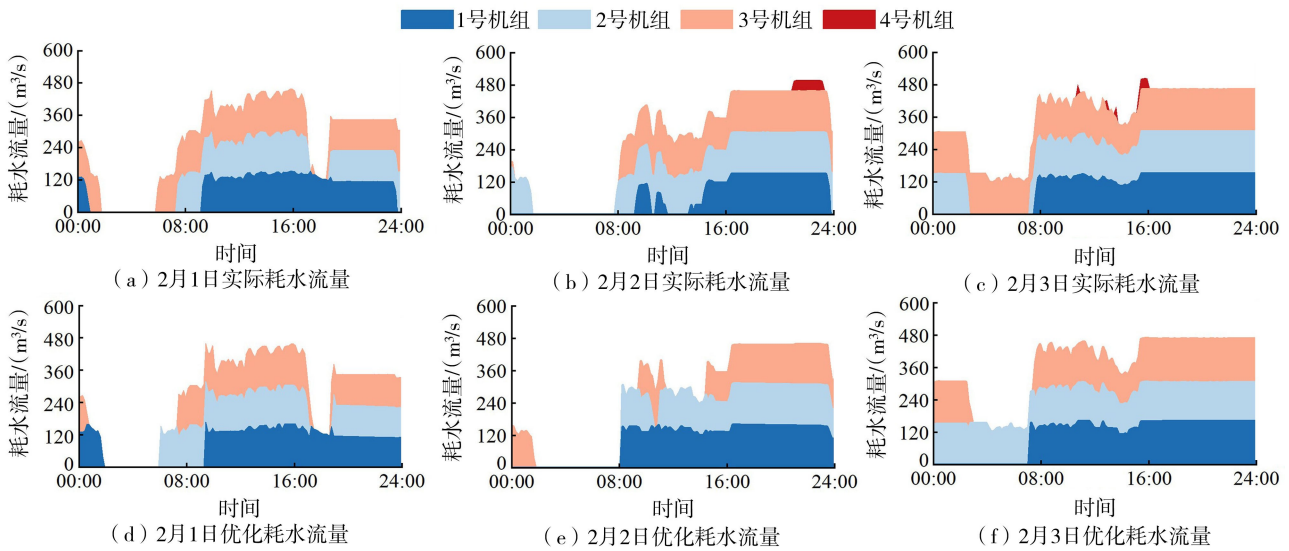


图9 机组耗水流量

3.2.3 不同量级负荷波动优化结果分析

不同量级负荷波动下的平均耗水流量优化结果如表2所示,实时调整策略在多数负荷波动区间均能实现节水效果。具体来看,当负荷波动处于0~40 MW范围时,平均耗水流量减少值在2.66~3.63 m^3/s 之间变化,节水幅度稳定,表明此阶段优化后的机组组合既能避免频繁启停,又能保持较高的水能利用效率。当波动幅度为40~60 MW时,节

水幅度显著提升,主要原因在于原运行方案在此区间的耗水效率较低,优化策略触发了较大规模的机组组合调整,使运行工况大幅向高效率区集中。当波动幅度超过80 MW时,平均耗水流量增加,表明在大幅波动下,受机组爬坡能力、振动区限制及稳定性约束影响,实时调整策略需要维持或启用部分高耗水机组,无法完全匹配最优分配调度方案,需牺牲部分经济性以保障运行安全。整体结果验证了负荷

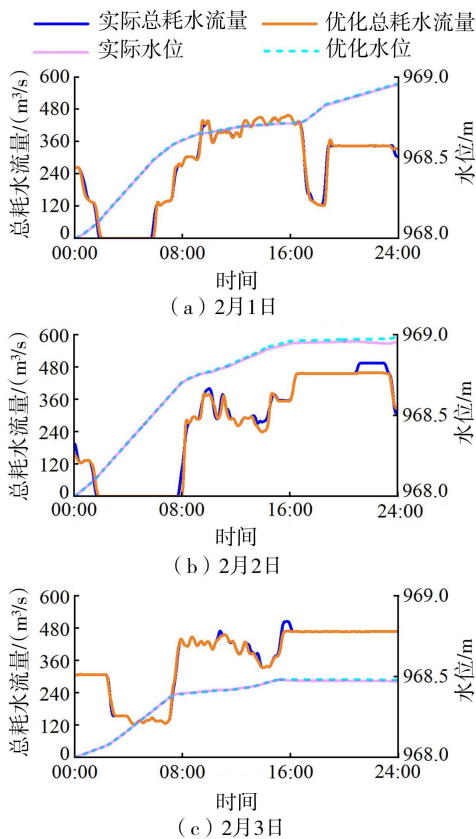


图 10 机组总耗水流量及水位对比

表 2 不同量级负荷波动优化结果

负荷波动 (MW)	0~10	>10~20	>20~30	>30~40	>40~50
平均耗水流量	3.23	2.66	2.87	3.63	11.85
减少值 (m ³ /s)					
负荷波动 (MW)	>50~60	>60~70	>70~80	>80~100	>100
平均耗水流量	37.36	2.58	-1.66	-8.37	-17.57
减少值 (m ³ /s)					

实时调整策略的实用性与先进性,优化效果达到了预期目标。

3.2.4 总体结果分析

优化结果与实际结果的对比如表 3 所示。结果表明:东风水电站 2 月 1 日、2 日、3 日的机组启停次数分别减少了 18.2%、27.3% 和 83.3%,穿越振动区次数分别减少了 35.7%、77.8% 和 72.7%,在完成负荷指令的同时,保证了电站运行的稳定性;总耗水量分别降低了 0.3%、2.4% 和 0.5%,末水位分别增加了 0.003 5、0.029 9、0.008 2 m,提高了电站运行的经济

表 3 优化结果与实际结果的对比

日期	分类	机组启停次数	穿越振动区次数	平均耗水流量/(m ³ /s)	总耗水量/万 m ³	末水位/m
02-01	实际	11	14	265.70	2297	968.9514
	优化	9	9	264.95	2289	968.9549
02-02	实际	11	36	264.93	2289	968.9539
	优化	8	8	258.51	2234	968.9838
02-03	实际	12	11	366.22	3164	968.4729
	优化	2	3	364.52	3149	968.4811

济性。综合来看,所提出的负荷实时调整策略与负荷优化分配模型在减少机组频繁启停和穿越振动区方面优化效果尤为突出,能够快速响应各类负荷波动指令,具有较强的适用性和较高的调度精度,兼顾电站运行的经济性与稳定性。

4 结语

针对机组频繁启停、穿越振动区等问题提出了负荷实时调整策略,通过逻辑判断灵活调整开机组合,并构建了基于动态规划的负荷分配模型,实现了水电站总耗水量最小化目标。乌江流域东风水电站实例结果表明:建立的负荷分配模型能够完成负荷分配任务,各时段优化出力与实际出力基本一致;提出的负荷实时调整策略可在减少机组启停次数和穿越振动区次数、降低耗水量方面进行进一步优化;负荷实时调整策略能够兼顾电站负荷分配过程中的经济性和稳定性,总体达到了预期效果。

未来研究将从当前单个电站负荷分配模型出发,进一步拓展至梯级水电站系统,构建多电站间协同调度与负荷分配机制。通过引入梯级间水量传递与负荷协调关系,可提升模型对实际工况的适应性和系统整体调节能力,为复杂梯级水电系统的实时调度提供理论支持与技术路径。

参考文献:

[1] 张俊涛,程春田,于申,等.水电支撑新型电力系统灵活性研究进展、挑战与展望[J].中国电机工程学报,2024,44(10):3862-3884. (Zhang Juntao, Cheng Chuntian, Yu Shen, et al. Progress, challenges and prospects of research on hydropower supporting the flexibility of new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3862-3884. (in Chinese))

[2] 周建平,杜效鹤,周兴波.面向新型电力系统的水电发展战略研究[J].水力发电学报,2022,41(7):106-115. (Zhou Jianping, Du Xiaohu, Zhou Xingbo. Study on hydropower development strategy for new power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7): 106-115. (in Chinese))

[3] 王立平,马实一,郭旭,等.风电-光伏发电-抽水蓄能联合优化调度方法[J].水利经济,2024,42(6):58-63. (Wang Liping, Ma Shiyi, Guo Xu, et al. Wind power-photovoltaic power generation-pumped storage joint optimal scheduling method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 58-63. (in Chinese))

[4] 方国华,刘畅,丁紫玉.基于备用流量的水风光多能互补优化调度[J].长江科学院院报,2025,42(4):36-44. (Fang Guohua, Liu Chang, Ding Ziyu. Optimization scheduling of hydro-wind-solar complementary systems

- based on standby flow [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42 (4): 36-44. (in Chinese))
- [5] 方国华,黄显峰,金光球,等. 水利水电系统规划与优化调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [6] 徐弘玮,徐刚,吴碧琼,等. 基于深度强化学习的三峡电站机组负荷分配实时决策方法[J]. 水力发电学报, 2024, 43 (8): 76-88. (Xu Hongwei, Xu Gang, Wu Biqiong, et al. Real-time decision-making method for unit commitment of Three Gorges Hydropower Station based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(8): 76-88. (in Chinese))
- [7] 钟青祥,李佳,牟时宇,等. 深溪沟水电站站内实时负荷优化分配[J]. 人民长江, 2023, 54 (12): 248-253. (Zhong Qingxiang, Li Jia, Mou Shiyu, et al. Optimization of real-time load distribution in Shenxigou Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2023, 54 (12): 248-253. (in Chinese))
- [8] 刘瑞,王义民,畅建霞,等. 考虑分级振动区的水电站厂内经济运行研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41 (2): 63-71. (Liu Rui, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. In-plant economical operation of hydropower stations considering graded hydro-unit vibration zones [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (2): 63-71. (in Chinese))
- [9] 纪昌明,俞洪杰,阎晓冉,等. 考虑后效性影响的梯级水库短期优化调度耦合模型研究[J]. 水利学报, 2018, 49 (11): 1346-1356. (Ji Changming, Yu Hongjie, Yan Xiaoran, et al. Study on the coupling model of cascade reservoirs' short-term optimal operation considering the influence of aftereffect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1346-1356. (in Chinese))
- [10] 梁树超,翟保豫,李星,等. 基于最优流量分配的水电站短期精细化调度研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42 (4): 188-191. (Liang Shuchao, Zhai Baoyu, Li Xing, et al. Research on short-term fine operation of hydropower station based on optimal flow allocation [J]. Water Resources and Power, 2024, 42 (4): 188-191. (in Chinese))
- [11] 孙耘,丁宁,卢敏,等. 等微增率法在厂级 AGC 节能负荷分配中的实用化研究[J]. 浙江电力, 2017, 36(9): 57-61. (Sun Yun, Ding Ning, Lu Min, et al. Study on application of equal incremental principle in energy conservation load distribution of plant AGC [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(9): 57-61. (in Chinese))
- [12] 李保健,武新宇,申建建. 考虑滞时电量的水电中期调度拉格朗日松弛方法[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (4): 59-64. (Li Baojian, Wu Xinyu, Shen Jianjian. Lagrangian relaxation method for medium-term operation of hydropower systems considering delayed energy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(4): 59-64. (in Chinese))
- [13] Xu Bin, Zhong Ping'an, Zhao Yunfa, et al. Comparison between dynamic programming and genetic algorithm for hydro unit economic load dispatch [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(4): 420-432.
- [14] 方国华,郑旺,吴承君,等. 梯级水库优化调度的改进 ODDDP 算法研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(9): 179-184. (Fang Guohua, Zheng Wang, Wu Chengjun, et al. Study on improved ODDDP algorithm for cascade reservoirs optimal operation [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(9): 179-184. (in Chinese))
- [15] 周建中,李英海,肖舸,等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41 (10): 1212-1219. (Zhou Jianzhong, Li Yinghai, Xiao Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (10): 1212-1219. (in Chinese))
- [16] 邓丽丽,杨侃,周佳佳. Memetic 算法在水电站负荷优化分配中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 50-55. (Deng Lili, Yang Kan, Zhou Jiajia. Application of Memetic algorithm to optimal load dispatch of hydropower station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 50-55. (in Chinese))
- [17] 黄显峰,黄晗,鲜于虎成,等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (2): 38-45. (Huang Xianfeng, Huang Han, Xianyu Hucheng, et al. Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(2): 38-45. (in Chinese))
- [18] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 51-58. (in Chinese))
- [19] 张验科,罗笙月,卢垚键,等. 风-光-混蓄长周期互补发电优化调度研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (4): 60-66. (Zhang Yanke, Luo Shengyue, Lu Yaojian, et al. Research on optimal operation for long-term complementary power generation of wind-photovoltaic-hybrid storage system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 60-66. (in Chinese))
- [20] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等. 考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (4): 67-75. (Zhao Ziwei, Yang Zhe, Zhang Quanwang, et

- al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 67-75. (in Chinese)
- [21] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaying, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [22] 李继清,龙健,刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))
- [23] Pan Hong, Luo Zhengliang, Hang Chenyang, et al. Optimization of load distribution method for hydropower units based on output fluctuation constraint and double-layer nested model[J]. *Mathematics*, 2024, 12(5): 662.
- [24] 徐刚,张侃,韦能. 市场环境下梯级电站厂间-厂内负荷分配模型[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(7): 46-56. (Xu Gang, Zhang Kan, Wei Neng. Inter-plant and in-plant load allocation model for cascade hydropower stations under power market [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(7): 46-56. (in Chinese))
- [25] 纪昌明,马皓宇,李传刚,等. 基于可行域搜索映射的并行动态规划[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 649-661. (Ji Changming, Ma Haoyu, Li Chuangang, et al. Research on parallel dynamic programming based on feasible region search mapping [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(6): 649-661. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-11 编辑:俞云利)

(上接第 109 页)

- [14] Mihailova P, Traykov I, Tosheva A, et al. Changes in biological and physicochemical parameters of river water in a small hydropower reservoir cascade [J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, 19(2): 286-289.
- [15] 任实,刘亮,张地继,等. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库水温分布特性[J]. *人民长江*, 2018, 49(3): 32-35. (Ren Shi, Liu Liang, Zhang Diji, et al. Research on water temperature distribution in Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 32-35. (in Chinese))
- [16] 於孟元,陈孝兵,薛敬阳,等. 金沙江下游水电站梯级开发对下游水温的影响[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(5): 65-71. (Yu Mengyuan, Chen Xiaobing, Xue Jingyang, et al. Influence of cascade hydropower construction on water temperature downstream of Jinsha river [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 41(5): 65-71. (in Chinese))
- [17] 胡光洋,杨中华,白凤朋,等. 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(1): 293-303. (Hu Guangyang, Yang Zhonghua, Bai Fengpeng, et al. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(1): 293-303. (in Chinese))
- [18] 程帅,左新宇,黄蕙,等. 溪洛渡、向家坝库区及坝下水温分布特性及成因分析[J]. *水利水电快报*, 2019, 40(8): 35-39. (Cheng Shuai, Zuo Xinyu, Huang Hui, et al. Characteristics and causes analysis of water temperature distribution in the reservoir areas and downstream of Xiluodu and Xiangjiaba dams [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2019, 40(8): 35-39. (in Chinese))
- [19] 戴凌全,张青森,任玉峰,等. 来流变化条件下溪洛渡水库生态调度期水温分层特性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(5): 132-139. (Dai Lingquan, Zhang Qingsen, Ren Yufeng, et al. Water temperature stratification characteristics of Xiluodu Reservoir in ecological regulation period under the condition of inflow change [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(5): 132-139. (in Chinese))
- [20] 杨宇,蒋定国,梁犁丽,等. 溪洛渡水库水温模拟与叠梁门分层取水效果分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(9): 143-155. (Yang Yu, Jiang Dingguo, Liang Lili, et al. Simulation of water temperature and analysis of stratified water intake effect of stoplog gates at Xiluodu Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(9): 143-155. (in Chinese))
- [21] 曾康,黄廷林,马卫星,等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 4979-4986. (Zeng Kang, Huang Tinglin, Ma Weixing, et al. Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 4979-4986. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-08 编辑:雷燕)