

南水北调中线工程输水建筑物整流累积效应研究

陈晓楠¹, 白一墨², 胡羽蝶², 曾 诚², 夏悦玥³, 尹雨然², 王玲玲²

(1. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 苏州市河道管理处, 江苏 苏州 215124)

摘要:为分析输水建筑物整流对南水北调中线工程输水能力的影响,以陶岔渠首闸至十二里河渡槽渠段为例,建立一二维耦合水动力模型,其中渠道段采用一维模型,4个输水建筑物段(刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽和淇河倒虹吸)采用二维模型,利用多年实测数据对耦合模型进行率定。分别对无整流方案和15种整流方案进行模拟计算,分析不同整流方案对上下游的影响,进而确定水头损失最小的整流方案。结果表明:单体整流影响范围为建筑物上下游3~5 km,多个建筑物整流的累积效果小于单个建筑物整流效果的线性叠加;对渠段中间2个输水建筑物(湍河渡槽、严陵河渡槽)进行整流的效果优于对上下游2个输水建筑物(刁河渡槽、淇河倒虹吸)进行整流的效果。

关键词:输水建筑物;整流;累积效应;数值模拟;一二维耦合模型;南水北调中线工程

中图分类号:TV135.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0061-05

Study on cumulative effects of rectification on water conveyance structures in Middle Route of South-to-North Water Diversion Project//CHEN Xiaonan¹, BAI Yimo², HU Yudie², ZENG Cheng², XIA Yueyue³, YIN Yuran², WANG Lingling² (1. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100038, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. River Management Office of Suzhou, Suzhou 215124, China)

Abstract: In order to analyze the impact of rectification of water conveyance structures on the water diversion capacity of the Middle Route Project of the South-to-North Water Diversion Project, taking the section from the gate of Taocha canal to the Shierlike aqueduct as an example, a coupled one- and two-dimensional hydrodynamic model was established, with the one-dimensional model adopted for the channel section and the two-dimensional model adopted for the sections of the four water conveyance structures (the Diaohu aqueduct, Tuanhe aqueduct, Yanlinghe aqueduct and Qihe inverted siphon). The coupled model was calibrated with multi-year measured data. Fifteen rectification schemes and a scheme without rectification were simulated to analyze the impact of different schemes on the upstream and downstream sections and to explore the rectification scheme with the minimum head loss. The results show that the impact range of rectification is from 3 to 5 km upstream and downstream of a single structure and the cumulative effect of multiple structures is less than that of the linear superposition of single structures. The effect of rectification of the two water conveyance structures (the Tuanhe aqueduct and Yanlinghe aqueduct) in the middle of the channel section is better than that of the two water conveyance structures (the Diaohu aqueduct and Qihe inverted siphon) in the upstream and downstream sections.

Key words: water conveyance structure; rectification; cumulative effect; numerical simulation; one- and two-dimensional coupled model; Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

南水北调工程是我国水资源调配的战略性工程,主要解决我国北方地区的水资源短缺问题。其中,中线工程从丹江口水库引水,向河南、河北、北京和天津自流输水。自2014年通水以来,截至2022年7月,已累计向北方调水超过500亿m³,对社会、经济、生态环境等方面产生了巨大的综合效

益^[1]。在大流量输水期间,南水北调中线工程部分输水建筑物出口处出现涡带绕流和水位波动等流态问题。为保证平稳调水和结构安全,管理部门相继对部分输水建筑物采取了相应的整流措施。目前,由于长距离输水渠道上输水建筑物整流效果的累积效应尚不明确,阻碍了南水北调中线工程输水建筑

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202605);江苏省水利科技项目(2022061);水利青年科技英才资助项目(水国科[2021]372号)

作者简介:陈晓楠(1979—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事长距离输水调度与水资源管理工作。E-mail:chenxiaonan@nsbd.cn

通信作者:曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:czeng@hhu.edu.cn

物整流工程的进一步开展。因此,亟须对大型调水工程输水建筑物整流累积效应进行研究。

对水工建筑物采取整流措施可以改善过流流态,进而提高水流的稳定性和过流能力^[2]。前人对水工建筑物整流措施和整流效果开展了深入的研究。例如;Zhou 等^[3]采用正交试验和计算流体力学方法分析了不同参数组合下导流桥墩的流动特性,得到侧 45°弯角泵站前舱导流墩整流参数的合理值范围;资丹等^[4]开展大型泵站进水流场组合式导流墩整流优化研究,揭示了组合式导流墩在大型泵站进水流场改善流态的作用和效果;Xu 等^[5]研究了导流墩几何参数对流态的影响;罗灿等^[6]对非对称式闸站结合式泵站运行时隔墩前池的不良流态进行了整流研究,提出在前池内加设长导流墩的整流措施;郭子群^[7]对蓼窝水库除险加固工程溢流坝闸墩物理模型尾部体型进行优化,成功消除了泄槽段水冠和溅水现象;罗灿等^[8]针对某侧向进水泵站进水池内的不良流态,对翼型导流板的整流特性进行了数值模拟研究,结果证明翼型导流板可以有效解决进水池内的回流问题,改善流速分布的均匀性;于佳敏等^[9]采用一字导流墩调整水闸进流条件,并对其调整效果进行了评价;徐辉等^[10]对城市雨水泵站侧向出水箱涵内部的水力流态特性进行了分析,提出了在出水箱涵内加设由导流短墩、底坎、组合梁构成的组合式整流措施,有效提高了出水箱涵的出流均匀度。与上述水工建筑物的整流问题不同,南水北调中线工程沿线的各类输水建筑物存在着复杂多样的流态与水头损失问题,例如桥墩的水平绕流及下游卡门涡街、节制闸开合引起的水面线波动与水跃、渡槽和倒虹吸的涌波问题等。因此,对中线工程沿线输水建筑物采取整流措施是改善南水北调中线干渠过流流态、提升输水能力的迫切需要。

随着社会经济发展和城市化进程加快,各类输水建筑物被大量建设,以工程群的形式对河道(渠道)的水动力场、防洪安全、输水能力等方面产生了显著影响。南水北调中线工程规模庞大,控制节点多,可能出现的状况复杂。迄今为止,针对河道及长距离输水工程的研究主要集中于单个输水建筑物的水力特性以及整流效果探究,对多个输水建筑物整流累积效应的研究较少。累积效应是指由河流中多个水工建筑物共同作用影响下的连锁反应产生的叠加效应,表现为时间、空间、多元耦合等方面累积起来的差异性或非线性变化。目前,针对涉水建筑物群累积效应的研究主要局限于桥梁群、码头群和丁坝群的壅水作用。例如:韩露^[11]和余子牛^[12]分别对单个桥梁、桥墩和桥梁桥墩群进行研究,提出了计

算桥墩壅水效应的经验公式;吴迪等^[13]采用一维非恒定数学模型研究了佛山市桥梁群对河道行洪和水环境的影响;王恒山^[14]研究了沙河密集桥梁群对河道行洪累积效应,发现了桥梁群的壅水叠加效应;陈珺等^[15]基于平面二维非恒定数学模型开展了典型洪潮条件下桥梁和码头群对河道行洪的累积影响研究;江磊等^[16]采用平面二维数学模型研究了南京河段新济洲码头群密度及非均匀度对近岸洪水动力特性的叠加影响;潘海静^[17]运用理论分析、水槽概化试验和数值模拟试验相结合的研究手段,对非淹没大尺度丁坝群对河流系统的累积效应机理进行了研究;曹晓萌^[18]对丁坝群累积效应进行了研究,给出了间距阈值与弗劳德数、丁坝相对长度、水槽宽深比和相对淹没度等影响因素之间的关系。南水北调工程横穿多个流域带,综合考虑地形和经济因素,沿程设立渡槽和倒虹吸两类输水建筑物。目前,对于多个、多种输水建筑物联合作用下的水头损失、过流能力等水力过程衔接与互馈机制的研究较少。

为研究南水北调中线工程输水建筑物整流效果的累积效应,本文以南水北调中线陶岔渠首闸至十二里河渡槽渠段为研究对象,建立一二维耦合水动力模型,基于无整流方案和 15 种整流方案的模拟计算结果,对比分析了不同整流方案对上下游的影响范围,探索水头损失最小的整流方案,以期在南水北调中线工程输水建筑物整流工程的开展提供参考和技术支撑。

1 数值模型

一维模型基本方程采用圣维南方程组,二维模型基本方程采用沿水深积分的二维浅水方程,在 MIKE FLOOD 模块进行耦合计算。耦合计算的具体步骤为:①动态修正每一时刻的二维计算的时间步长,确保一维计算完成后,能将边界流量传递至所有二维重叠网格;②二维计算完成后,将网格值传递至所有重叠区域内的一维断面;③以重叠断面的圣维南差分方程组的残差和最小为目标,进行迭代修正。计算流程如图 1 所示。在本次建立的一二维耦合水动力数学模型中,充分考虑了初始条件、耦合边界时间滞后等因素导致的误差。在每一时间步内,对重叠区域内的一维断面和二维网格进行迭代修正,提高了模型的计算精度。

2 模型建立及参数率定

研究区域如图 2 所示,该渠段全长 97 km,主要有 4 个水工建筑物起到节制作用,包括刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽和淇河倒虹吸。各建筑物设计流量为 340 ~ 350 m³/s,加大流量为 410 ~ 420 m³/s。

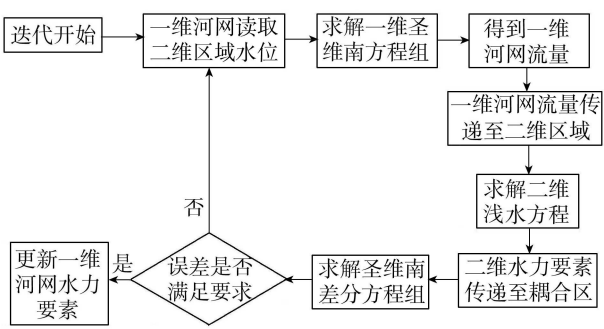


图1 计算流程

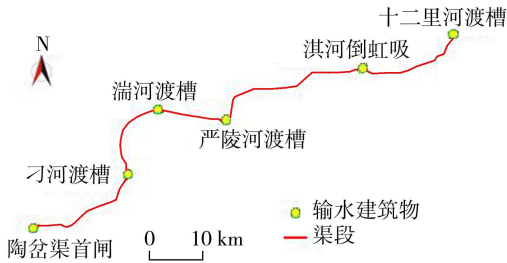


图2 研究区域示意图

采用设置三角形导流墩的整流措施对4个输水建筑物进行流态优化,该整流措施已在澧河渡槽实施完成,并取得了较好的整流效果。参考已有的整流经验,本文将三角形导流墩的长度设置为 $4D$ (D 为原导流墩宽度)。由于研究范围较大,采用二维模型的计算成本较高,而采用一维模型无法模拟针对导流墩的整流措施,故采用 MIKE FLOOD 建立一二维耦合模型。图3为整流前后刁河渡槽二维计算区域局部网格图,可见针对导流墩开展的整流措施。本次建立的一二维耦合模型包括5段一维模型区域和4段二维模型区域,其中二维模型区域包括刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽以及淇河倒虹吸出口段。为适应不规则几何边界,二维模型计算采用混合网格,其中矩形网格面积约为 50 m^2 ,闸墩附近进行网格加密处理,网格面积约为 5 m^2 ,网格总数约为17000。一维模型区域内渠道总长约 94.749 km ,断面总数为117个。为保证较好的模拟效果,二维模

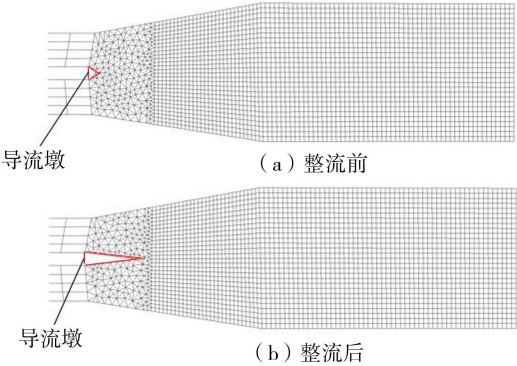


图3 整流前后刁河渡槽二维计算区域局部网格

型区域在渡槽进出口位置以及倒虹吸出口位置均向外延长 100 m 。

采用2020年6月1—7日的水位、流量实测数据对模型进行率定。上游边界为实测流量时间序列,下游边界为实测水位时间序列。通过模拟得到各输水建筑物出口位置的水位变化过程的计算值。图4为各输水建筑物出口处水位的率定结果。由图4可见,4个输水建筑物出口处的水位计算结果与实测值吻合较好,说明本文建立的一二维耦合模型能够准确模拟研究区域内的水动力过程。表1为4个输水建筑物出口位置的计算水位值与实测值的误差分析。其中,最大绝对误差为 0.07 m ,出现在淇河倒虹吸处,最大相对误差为 1.5% ,出现在湍河渡槽处。因此,所建立模型具有较高的可信度和可靠性。

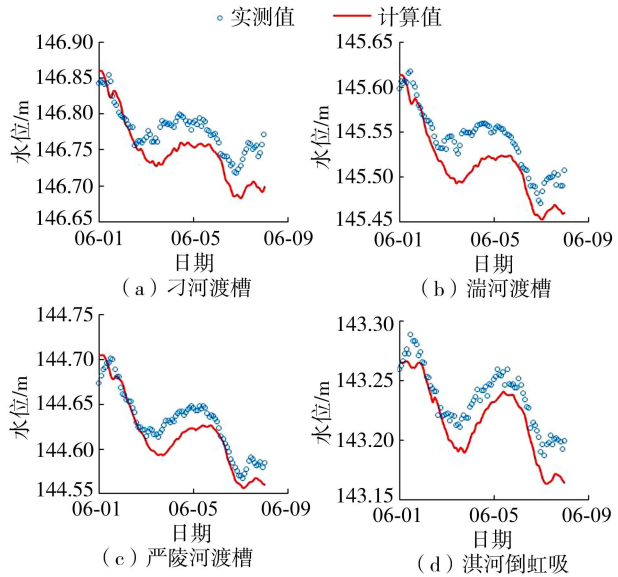


图4 输水建筑物出口处水位率定结果(2020年)

表1 率定结果误差分析

建筑物	最大绝对误差/m	平均绝对误差/m	相对误差/%
刁河渡槽	0.05	0.01	0.8
湍河渡槽	0.05	0.02	1.5
严陵河渡槽	0.03	0.02	0.9
淇河倒虹吸	0.07	0.02	1.0

3 输水建筑物整流累积效应分析

3.1 计算工况

根据研究内容,上游边界条件设置为设计流量,下游边界条件设置为设计水位。所涉及的整流建筑物从上游至下游分别为刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽和淇河倒虹吸。为对比研究不同建筑物的整流效果以及多个建筑物整流后的累积效应,根据建筑物位置设计了多种整流方案,其中包括4个输水建筑物分别整流的单个建筑物整流方案,以及不同输水建筑物组合的多个建筑物整流方案。具体整流方

案组合如表 2 所示。

表 2 整流方案	
方案	整流建筑物
1	刁河渡槽
2	湍河渡槽
3	严陵河渡槽
4	淇河倒虹吸
5	刁河渡槽、湍河渡槽
6	刁河渡槽、严陵河渡槽
7	刁河渡槽、淇河倒虹吸
8	湍河渡槽、严陵河渡槽
9	湍河渡槽、淇河倒虹吸
10	严陵河渡槽、淇河倒虹吸
11	刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽
12	刁河渡槽、湍河渡槽、淇河倒虹吸
13	刁河渡槽、严陵河渡槽、淇河倒虹吸
14	湍河渡槽、严陵河渡槽、淇河倒虹吸
15	刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽、淇河倒虹吸
16	无整流

3.2 结果分析

通过对不同整流方案的模拟计算,得到不同方案的沿程 4 个输水建筑物出口处水位值。通过与无整流方案(方案 16)中相应建筑物出口水位对比,得到各个整流方案实施前后水头差,如表 3 所示。由表 3 可看出,对于不同的整流方案,整流效果都在 10 cm 内。整流效果最好的是全部整流方案(方案 15),刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽、淇河倒虹吸出口位置水位分别下降了 6.4、5.5、4.4、5.8 cm。在仅对一个输水建筑物整流的方案(整流方案 1~4)中,整流效果最好是方案 1,刁河渡槽出口位置水位下降了 5.3 cm。对比 15 种整流方案与无整流方案的计算结果,发现各整流方案中没有整流的建筑物(如方案 11 中的淇河倒虹吸)在整流方案实施前后的出口位置水头差是毫米级,基本可以忽略不计。可见,对于整个渠段而言,其他建筑物的整流对没有

进行整流的建筑物基本没有影响。同时,对比刁河渡槽单体整流方案(方案 1),严陵河渡槽单体整流方案(方案 3),以及刁河渡槽、严陵河渡槽组合整流方案(方案 6)的工程前后水头差,可见组合整流方案(方案 6)的工程前后水头差并不等于单体整流方案(方案 1 和 3)中工程前后水头差之和,即多个整流建筑物累加效果并不等同于单个建筑物整流效果的线性叠加。

由表 3 中各整流方案的水头差结果可以看出,整流措施对整流建筑物自身的影响较大,对其他上下游建筑物的影响并不明显。根据整流方案模拟结果,对于 4 个单体建筑物而言,整流效果最好的是全部整流方案(方案 15)。在只对两个建筑物整流的组合方案中(方案 5~10),考虑单体建筑物的整流效果,对于刁河渡槽和湍河渡槽整流效果最好的方案分别是方案 6 和方案 9,对于严陵河渡槽和淇河倒虹吸整流效果最好的方案分别是方案 10 和方案 7。如果只对其中 3 个建筑物进行整流(方案 11~14),对于刁河渡槽、湍河渡槽和淇河倒虹吸整流效果最好的组合方案是方案 12,对严陵河渡槽整流效果最好的组合方案是方案 14。因为方案 11 中刁河渡槽工程前后水头差(0.057 m)略大于方案 13 中刁河渡槽工程前后水头差(0.056 m),所以相邻建筑物(刁河渡槽、湍河渡槽、严陵河渡槽)的整流效果要优于相间建筑物(刁河渡槽、严陵河渡槽、淇河倒虹吸)的整流效果。对比方案 1、方案 5、方案 11 和方案 15 的水头差结果可知,整流建筑物个数越多,整个渠段的整流效果越好。

通过以上对比分析可知,4 个输水建筑物全部整流时,整流效果最好。针对全部整流的情况(整流方案 15),对整流建筑物影响范围进行研究,绘制

表 3 建筑物出口处水位及整流前后水头差 单位:m

方案	刁河渡槽		湍河渡槽		严陵河渡槽		淇河倒虹吸	
	整流后水位	工程前后水头差	整流后水位	工程前后水头差	整流后水位	工程前后水头差	整流后水位	工程前后水头差
1	146.572	0.053	145.389	0.008	144.517	0.005	143.211	0.009
2	146.613	0.012	145.361	0.036	144.512	0.010	143.218	0.002
3	146.623	0.002	145.379	0.018	144.497	0.025	143.216	0.004
4	146.609	0.016	145.386	0.011	144.516	0.006	143.185	0.035
5	146.573	0.052	145.354	0.043	144.509	0.013	143.214	0.006
6	146.571	0.054	145.381	0.016	144.490	0.032	143.195	0.025
7	146.578	0.047	145.385	0.012	144.510	0.012	143.171	0.049
8	146.605	0.020	145.357	0.040	144.487	0.035	143.208	0.012
9	146.615	0.010	145.352	0.045	144.510	0.012	143.173	0.047
10	146.615	0.010	145.378	0.019	144.485	0.037	143.174	0.046
11	146.568	0.057	145.349	0.048	144.483	0.039	143.215	0.005
12	146.564	0.061	145.347	0.050	144.514	0.008	143.163	0.057
13	146.569	0.056	145.382	0.015	144.483	0.039	143.168	0.052
14	146.602	0.023	145.348	0.049	144.482	0.040	143.165	0.055
15	146.561	0.064	145.342	0.055	144.478	0.044	143.162	0.058
16	146.625		145.397		144.522		143.220	

了陶岔渠首闸至十二里河渡槽段的沿程水面线,横坐标为距离渠首的里程,并与无整流方案(方案16)的水面线结果进行对比,如图5所示。从图5可以看出,4个输水建筑物共同整流时各个建筑物局部水面线相比于整流前均有所降低,整流后建筑物的影响范围为3~5 km。

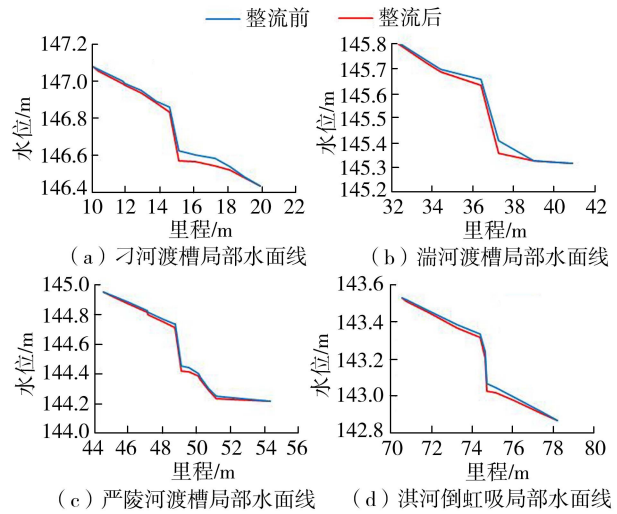


图5 整流方案15实施前后水面线对比

4 结 论

- a. 研究渠段内每个输水建筑物单体整流影响范围是建筑物上下游3~5 km。
- b. 研究渠段内多个输水建筑物共同整流的累积效应较弱。对于降低水头损失的效果来说,多个建筑物整流的累积效果小于单个建筑物整流效果的线性叠加。
- c. 对于多个建筑物整流方案,从整流建筑物数量上来看,整流的输水建筑物数量越多,能够达到的效果越好。
- d. 从整流建筑物位置来看,无论是单个建筑物整流方案还是多个建筑物整流方案,对于中间两个输水建筑物(湍河渡槽、严陵河渡槽)进行整流的效果优于对上下游两个输水建筑物(刁河渡槽、淇河倒虹吸)进行整流的效果。

参考文献:

[1] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(5):46-55. (CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(5):46-55. (in Chinese))

[2] 曾诚,邱斐,丁少伟,等. 复式断面明渠流能量及动量校正系数研究[J]. 水利水运工程学报,2022(4):46-54. (ZENG Cheng, QIU Fei, DING Shaowei, et al. Study on

energy and momentum correction coefficients in compound open-channel flows[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4):46-54. (in Chinese))

[3] ZHOU Jiren, ZHAO Miaomiao, WANG Chuan, et al. Optimal design of diversion piers of lateral intake pumping station based on orthogonal test[J]. Shock and Vibration, 2021,2021:6616456.

[4] 资丹,王福军,姚志峰,等. 大型泵站进水流场组合式导流墩整流效果分析[J]. 农业工程学报,2015,31(16):71-77. (ZI Dan, WANG Fujun, YAO Zhifeng, et al. Effects analysis on rectifying intake flow field for large scale pumping station with combined diversion piers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(16):71-77. (in Chinese))

[5] XU Wentao, CHENG Li, DU Kailian, et al. Numerical and experimental research on rectification measures for a contraction diversion pier in a pumping station[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022,10(10):1437.

[6] 罗灿,钱均,刘超,等. 非对称式闸站结合式泵站前池导流墩整流模拟及试验验证[J]. 农业工程学报,2015,31(7):100-108. (LUO Can, QIAN Jun, LIU Chao, et al. Numerical simulation and test verification on diversion pier rectifying flow in forebay of pumping station for asymmetric combined sluice-pump station project [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(7):100-108. (in Chinese))

[7] 郭子群. 蓼窝水库除险加固工程溢流坝闸墩尾部体型优化研究[J]. 中国水能及电气化, 2019(5):39-41. (GUO Ziqun. Optimization study on overflow dam gate pier tail shape of Shenwo Reservoir reinforcement project [J]. China Water Power & Electrification, 2019(5):39-41. (in Chinese))

[8] 罗灿,雷帅浩,陈锋,等. 泵站进水池翼型导流板整流特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021,41(4):53-59. (LUO Can, LEI Shuaihao, CHEN Feng, et al. Numerical simulation of rectifying characteristics of the airfoil deflectors in the sump of pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(4):53-59. (in Chinese)).

[9] 于佳敏,陆伟刚,奚望,等. 一字导流墩对弯道岔河进流调整的研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(8):50-56. (YU Jiamin, LU Weigang, XI Wang, et al. Research on the adjustment of the linear shaped pier to the curved forked river inflow[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(8):50-56. (in Chinese))

[10] 徐辉,张喆鑫,张睿,等. 城市雨水泵站侧向出水箱涵整流措施模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2022,42(2):1-5. (XU Hui, ZHANG Zhixin, ZHANG Rui, et al. Model test on rectification measures of lateral outlet box culvert in an urban rainwater pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(2):1-5. (in Chinese))

(下转第98页)

Chinese))

[21] 杨丽,吴雨茜,王俊丽,等. 循环神经网络研究综述[J]. 计算机应用,2018,38(增刊2):1-6. (YANG Li, WU Yuxi, WANG Junli, et al. Research on recurrent neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38 (Sup2):1-6. (in Chinese))

[22] 王增平,赵兵,纪维佳,等. 基于 GRU-NN 模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):53-58. (WANG Zengping, ZHAO Bing, JI Weijia, et al. Short-term load forecasting method based on GRU-NN model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 53-58. (in Chinese))

[23] 黄永涛,刘晓青,季威,等. HCM-PSO-GRU 组合预测模型在大坝变形预测中的应用[J]. 水电能源科学,2021,39(12):120-123. (HUANG Yongtao, LIU Xiaoqing, JI Wei, et al. HCM-PSO-GRU combined prediction model and its application in dam deformation prediction [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12):120-123. (in Chinese))

[24] 郭敏钢,宫鹤. 基于 Tensorflow 对卷积神经网络的优化研究[J]. 计算机工程与应用,2020,56(1):158-164. (GUO Mingang, GONG He. Optimization of convolutional neural network based on Tensorflow [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(1):158-164. (in Chinese))

[25] 徐嘉远,邹磊,夏军,等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):104-110. (XU Jiayuan, ZOU Lei, XIA Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 104-110. (in Chinese))

[26] 严帅,熊新. 基于 KPCA 和 TCN-Attention 的滚动轴承退化趋势预测[J]. 电子测量技术,2022,45(15):28-34. (YAN Shuai, XIONG Xin. Prediction of rolling bearing degradation trend based on KPCA and TCN-Attention[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(15): 28-34. (in Chinese))

[27] 欧斌,吴邦彬,袁杰,等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):21-26. (in Chinese))

[28] 罗玮沅,蒋亚楠,许强,等. 基于深度学习的滑坡位移时空预测[J]. 测绘学报,2022,51(10):2160-2170. (LUO Huiyuan, JIANG Yanan, XU Qiang, et al. A spatio-temporal network for landslide displacement prediction based on deep learning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2160-2170. (in Chinese))

[29] 陈振宇,刘金波,李晨,等. 基于 LSTM 与 XGBoost 组合模型的超短期电力负荷预测[J]. 电网技术,2020,44(2):614-620. (CHEN Zhenyu, LIU Jinbo, LI Chen, et al. Ultra short-term power load forecasting based on combined LSTM-XGBoost model [J]. Power System Technology, 2020, 44(2):614-620. (in Chinese))

[30] 徐冬梅,王亚琴,王文川. 基于 VMD-TCN 的月降水量预测模型[J]. 水文,2022,42(2):13-18. (XU Dongmei, WANG Yaqin, WANG Wenchuan. Monthly precipitation prediction model based on VMD-TCN [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(2):13-18. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-12 编辑:俞云利)

(上接第 65 页)

[11] 韩露. 明渠流条件下桥墩(群)阻水效应实验与数值研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.

[12] 余子牛. 平面二维数值模型与桥墩壅水问题的研究[D]. 北京:清华大学,1996.

[13] 吴迪,郭维东,阴云康,等. 佛山市中心组团桥梁群对河道影响的数值分析[J]. 水利水电科技进展,2006,26(1):27-30. (WU Di, GUO Weidong, YIN Yunkang, et al. Numerical analysis of influences of bridge group to be constructed in Foshan City on river courses[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1):27-30. (in Chinese))

[14] 王恒山. 沙河密集桥梁群对河道行洪累积效应研究[J]. 人民长江,2016,47(21):4-8. (WANG Hengshan. Study on accumulated effect of high density bridges on flood discharge of Shahe River[J]. Yangtze River, 2016, 47(21):4-8. (in Chinese))

[15] 陈珺,于明田,邓丽华,等. 感潮河道桥梁和码头工程群对行洪累积影响[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):49-56. (CHEN Jun, YU Mingtian, DENG Lihua, et al. Cumulative influence of bridge and wharf engineering groups on flood propagation in tidal rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):49-56. (in Chinese))

[16] 江磊,芦伟宏,胡春燕,等. 码头群密度及非均匀度对近岸区洪水动力特性的影响研究[J]. 水利水电快报,2017,38(11):47-52. (JIANG Lei, LU Weihong, HU Chunyan, et al. Study on the influence of wharf group density and non-uniformity on the flood dynamic characteristics in the nearshore area [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2017, 38(11):47-52. (in Chinese))

[17] 潘海静. 非淹没大尺度丁坝群对河流系统的累积效应机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.

[18] 曹晓萌. 丁坝群作用尺度理论及累积效应机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

(收稿日期:2023-04-13 编辑:俞云利)