

胡靖宇, 樊梦洒, 冀荣贤, 等. 大型输水渠跨渠桥梁墩柱导流罩及现场试验研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1194-1203. HU J Y, FAN M S, JI R X, et al. Study on flow-deflector of cross bridge pier and field test in large transmission channel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1194-1203. (in Chinese)

大型输水渠跨渠桥梁墩柱导流罩及现场试验研究

胡靖宇¹, 樊梦洒¹, 冀荣贤², 左丽³, 崔金良¹, 娄利芳¹, 刘明潇⁴

(1. 中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 郑州 450016; 2. 南水北调中线实业发展有限公司, 郑州 450016;
3. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 4. 华北水利水电大学, 郑州 450046)

摘要: 为解决南水北调中线工程在加大流量输水期间出现跨渠桥梁密集段水位壅高、影响工程输水能力问题, 选取双泊河倒虹吸—梅河倒虹吸约 13.233 km 渠段为输水试验段, 以试验段内 5 座典型桥梁为试点, 运用流体力学理论进行流线型导流罩基础体型与结构设计并对设计方案进行比选优化, 运用数值模拟及原型观测试验研究方法进行桥梁墩柱导流罩应用效果研究。通过原型观测试验, 分析验证 5 座桥梁加装导流罩后试验段的流态及过流能力。结果表明: 5 座桥梁安装导流罩后, 桥梁墩柱附近流态显著改善, 试验段水头损失减少 64.4%, 综合糙率减少 8.0%, 试验段内过流能力提高 8.71%。研究成果可为长距离明渠输水工程中已建桥梁墩柱加装导流罩体型设计以及附近流态原型观测方法提供参考与技术支持。

关键词: 输水渠道; 流态优化; 导流罩; 原型观测

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0118

南水北调中线工程总干渠长 1 432 km, 起点陶岔渠首设计水位 147.38 m, 末端北拒马河总干渠设计水位 60.30 m, 靠重力自流输水。陶岔渠首入渠设计流量 350 m³/s, 加大流量 420 m³/s。在进行加大流量输水试验时, 部分渠段设计流量运行水位超过设计水位。通过对多渠段的长期观测, 部分跨渠桥梁墩柱区流态紊乱^[1-3], 有明显的绕流卡门涡街现象^[4-5], 因此, 探究跨渠桥梁墩柱对渠道水位壅高影响具有重要的理论意义与技术价值。

有关对桥墩流态、底部边界剪切应力的影响等方面研究较多^[6-9], 如施伟等^[1] 闸站并列布置工程泵站前池流态改善研究, 郭涵慧等^[9] 加装来流侧分隔板的圆柱绕流三维数值模拟研究, 但关于工程领域卡门涡流消除或改善措施研究还有待深入^[10-12]。为确定南水北调中线总干渠内跨渠桥墩对渠内输水及流态影响^[13-18], 有针对性地提出有效工程措施, 改善流态、减少水头损失, 增大中线整体过流能力, 研发流线型导流罩, 并选取壅水比较严重、桥柱比较密集的双泊河倒虹吸—梅河倒虹吸段作为现场试验段, 通过构建三维水动力学数值模型, 研究原桥墩流态紊乱现状^[19-21], 选取 5 座具有代表性的桥梁, 基于现有

桥墩设计不同体型的导流罩, 完成导流罩的制造和安装, 通过实测水力要素对导流罩的减阻效应进行评估。

1 研究区概况

选取南水北调中线干线双泊河倒虹吸—梅河倒虹吸阻水现象典型的渠段为研究试验渠段。该渠段长 13.233 km, 共有 17 座交叉建筑物, 其中: 1 座铁路桥和 1 座左排渡槽墩柱为实体墩, 改建难度较大; 其他 15 座公路桥渠中墩柱为单圆柱或多排柱式结构, 可以考虑采用流线型导流罩对已建桥墩进行减阻改造试验。位于试验段下半段的郟庄北、郭庄南、解放北路、崔庄东南、赵郭李西南、神州路等多座桥梁, 布置较为密集, 均为渠中双排柱阻水, 其功能有生产桥、小型公路桥、大型公路桥等。以上桥梁每排墩柱数量为 1 柱、2 柱、4 柱、10 柱不等, 涵盖了南水北调中线干渠大部分阻水墩柱数类型, 经综合比选确定郟庄北、郭庄南、解放北路、崔庄东南、赵郭李西南 5 座公路桥作为试验桥梁, 各试验桥梁主要参数见表 1, 采用设计水位下桥梁墩柱阻水面积与渠道净过水断面面积比值做为现状桥墩的阻水率。桥梁立面布置见图 1 和图 2。

收稿日期: 2023-07-07 修回日期: 2023-11-26 网络出版时间: 2023-12-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20231201.0922.002>

基金项目: 水利部国际合作与科技司、水利部科技推广中心水利技术示范项目(先进实用技术示范类)(SF-202118)

作者简介: 胡靖宇(1976—), 男, 河南驻马店人, 高级工程师, 主要从事科研项目管理及工程技术管理工作。E-mail: 1484614687@qq.com

表 1 试验桥梁主要参数
Tab. 1 Main parameters of test bridge

试验桥梁	阻水排数	单排桥柱数	柱径/m	阻水率	顺水流向柱中心距/m	中孔跨度/m
部庄北生产桥	2	1	1.5	0.060		30
郭庄南桥	2	2	1.6	0.041	4.5	40
解放北路桥	2	10	1.8	0.047	4.5×2+5.25×2+10.5+5.25×2+4.5×2	40
崔庄东南桥	2	2	1.6	0.041	4.6	40
赵郭李西南桥	2	4	1.6	0.041	5×3	40

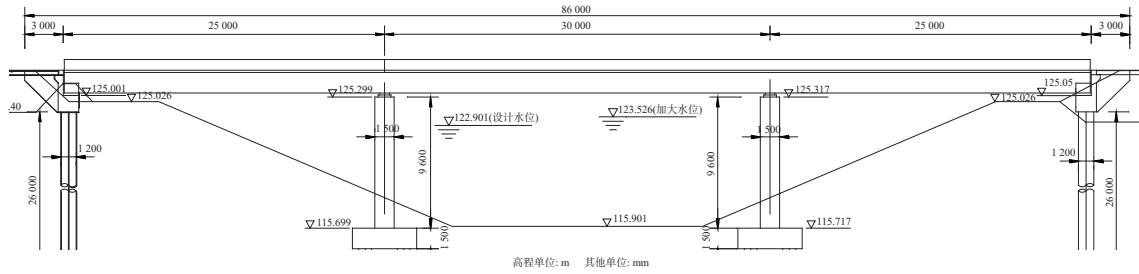


图 1 30 m 跨度桥梁墩柱横剖布置(部庄北生产桥)

Fig. 1 Cross sectional layout of pier column of 30m span bridge (Gaozhuang North Production Bridge)

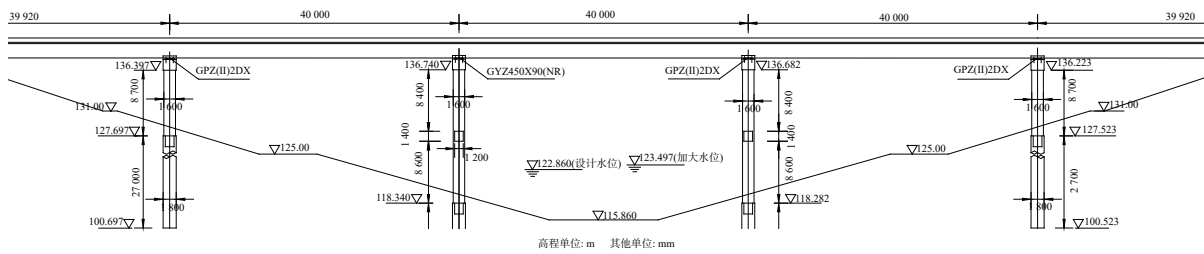


图 2 40 m 跨度桥梁墩柱横剖布置(解放北路桥)

Fig. 2 Cross sectional layout of pier column of 40m span bridge (Jiefang North Road and Bridge)

2 研究方法

2.1 基于数值模拟的桥墩绕流

利用计算机数值模拟的高效性,采用水动力数值模拟的方法,建立桥墩绕流数学模型^[7,9,15-16]。

基本控制方程。采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型构建三维水动力学数值模型^[10,15,18]。模型基于流体力学基本方程组构建,主要包括质量守恒方程和动量守恒方程^[19-20],由于模拟雷诺数远大于 2 000,还需增加湍流方程。

模型范围。模拟范围为桥墩上下游各 100 m,研究核心区是桥墩附近的流态^[21-22],不同方案根据桥梁宽度再适度微调。为了便于水位和水头损失的统计,各方案均将渠段出口渠底高程设置为 0,由此模型得到水位、总水头值为相对于出口渠底高程的相对值。

网格剖分。以 0.4 m 网格尺寸为基准,对不同工程部位采用不同的网格剖分尺寸^[21,23],其中,对桥梁上下游明渠采用 0.4 m 网格剖分,中间桥墩部位则采用 0.2 m 的加密网格,模型划分网格总数为 372 万个。

模型全部采用结构化网格,可以模拟计算加速收敛。

边界条件及参数设置。设置的边界条件包括上游明渠入口断面的进口边界条件、下游明渠出口断面的出口边界条件、模型底面和左右侧面的壁面边界条件和模型上部的边界条件,由于模型网格各分块均需设置单独的边界条件,块与块之间的交界面在模拟过程中数据实时交换。

进口边界条件。设置在上游明渠入口断面位置,根据模拟方案的不同,分别采用设计流量 305 m³/s 加大流量 365 m³/s,边界条件采用恒定值,在整个模拟过程中保持不变。

出口边界条件。设置在下游明渠出口断面位置,采用压力出口边界条件类型,根据模拟方案的不同,分别采用设计水位 7 m 和加大水位 7.548 m(相对于出口渠底高程水位),并给定标准大气压。

其他边界条件。整个模型上部开放区域为空气与水接触的开放区域,设置为压力边界条件,给定标准大气压;模型左右侧和底部为渠道或渡槽混凝土构件,给定壁面边界条件,定义为无滑移固壁边

界条件,近壁采用标准壁面函数,壁面法向速度为 0。

关键参数设置。包括初始条件、模拟时间步长、输出设置等^[24]。初始条件的设置仅影响前期模型计算的稳定性,模型计算稳定后最终的结果并不受初始条件影响,为确保模型平稳启动计算,将初始条件设置为与边界条件相匹配的水位,由此形成初始水体域,并给定初始流速,使其初始流量等于入口边界条件流量。其中:糙率设置为渠道衬砌糙率取 0.014,桥梁墩柱由于更加光滑^[25],参考相关规范取 0.013;模拟时间步长设置由模型收敛性决定,在模拟过程中实时调整,对于难以收敛的计算步采用更小的时间步长,否则增大时间步长以提高计算效率,

初始时间步长设置为 0.005 s;输出设置包括任意位置的水位、水深、流速、压强、湍流强度、动水压力等各项参数,此外各方案均在上下游固定断面位置设置虚拟挡板,用于统计该断面的流量、平均流速、总水头等,结果输出时间步长统一设为 1 s。

主要模拟成果。以设计流量 305 m³/s 和加大流量 365 m³/s 为控制条件对 4 种桩数共 8 个方案进行模拟,主要研究现状桥墩的绕流特征及阻水情况,模拟各方案得到不同断面的流速分布图、流场图、水位等值线图、流线图等。几类桥墩的绕流流态状况,见图 3。

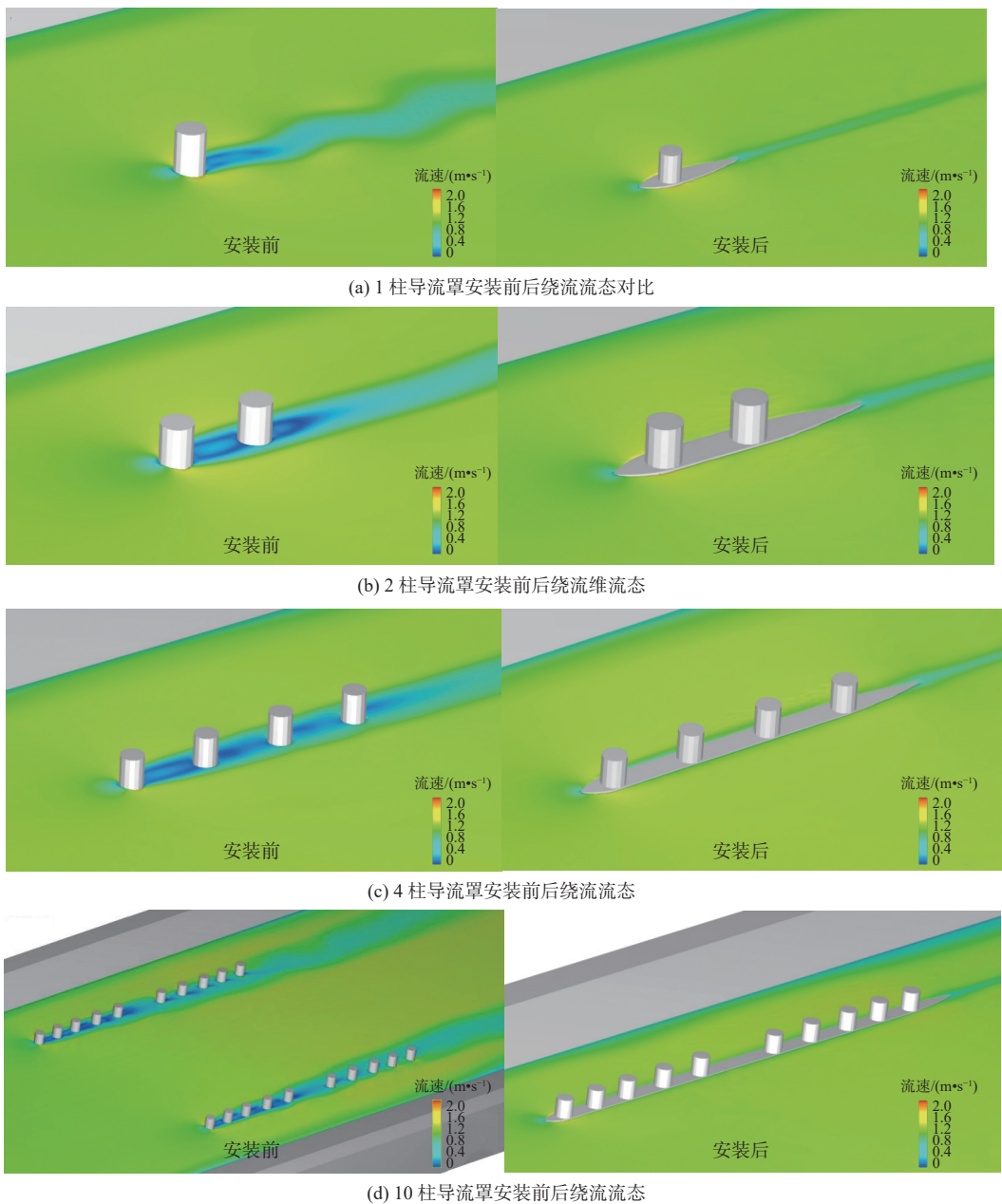


图 3 数值计算的桥墩流体

Fig. 3 Numerical calculation of pier fluid diagram

2.2 已建圆柱桥墩的流线型体型改造设计

南水北调中线工程跨渠桥梁墩柱大多为圆柱墩,渠道水流雷诺数已经达到 10^6 量级;数值分析显示,圆柱绕流尾涡区长度超过 $5D\sim 6D$ 后(D 为圆柱直径),尾流区湍动能消耗迅速衰减,湍流耗散率最大值均出现在桥柱后 $2.5D$ 范围内,这与林琳等^[46]关于绕圆柱湍流流场及其发展的计算研究成果相近。为了减小大量桥墩的绕流阻力损失,根据桥墩绕流规律,设想柱上游由圆弧面改为尖圆曲面,在墩柱下游涡流处增设流线型刚性导流罩壳体填补尾涡区,就可以消减能耗。综合考虑流态改善和能耗消减程度、工程投资、制造安装等问题,优选的1柱导流罩体型见图4。对于2柱及2柱以上多柱桥墩,导流罩前端和尾段均采用该体型,柱间平面连接。

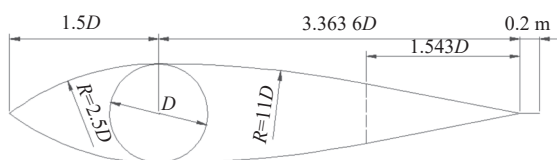


图4 1柱导流罩体型

Fig. 4 Shape of shroud

2.3 墩柱导流罩减阻效果的现场试验

为了检验已建桥墩外加导流罩的实用性及其减阻功效,在控制来流条件下,对试验桥群渠段进行了改造前与改造后渠段水流要素的现场观测试验。在现场观测试验中,首先根据设计体型结合现场安装导流罩实际条件,对导流罩材料、内部结构进行优化。此外,还需要观测研究导流罩对渠道底板安全的影响,监测、复核安装导流罩后渠道底板地基承载力、桥柱地基承载力,以及对桥梁结构安全的影响,并确保满足规范要求。本文的研究成果是基于5座公路试验桥梁的钢结构导流罩制造、安装后的现场试验观测研究所得到的。

3 现场试验研究

3.1 典型导流罩设置位置和观测方法

原型观测试验段总长 13.233 km,共有跨渠桥梁 16 座、跨渠铁路桥 2 座、跨渠渡槽 1 座、阻水建筑物共 17 座。试验段的桥梁布置(图1)。现场试验主要是分析试验段水位变化规律,尤其是设置导流罩后桥梁墩柱前后水位变化,根据桥梁和建筑物水位波动影响范围设置水位监测点。在试验段内 17 座阻水建筑物上下游各 50 m 渠道断面的左右岸对称各布置测点 1 个,对于距离较近的京广线铁路桥上下行支线和崔庄东南桥等,合并按一个桥梁布

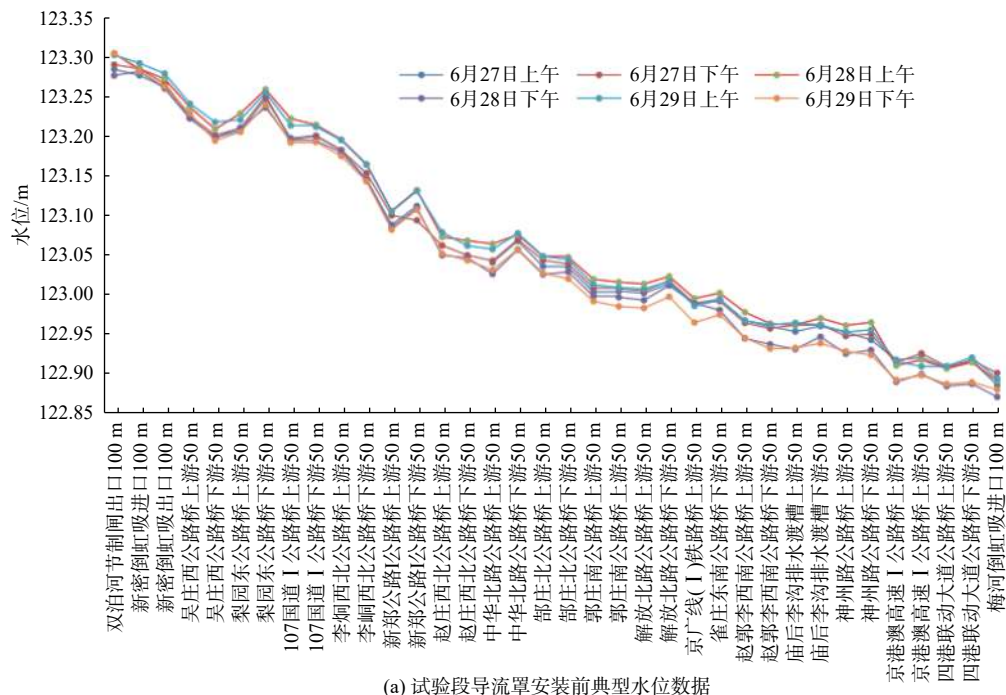
置观测断面与各测点;双泊河渡槽出口、新密铁路渠倒虹进出口、梅河渠倒虹进口各布置 1 个水位观测断面,每个观测断面同样在左右岸各布置 1 个观测点。共布置水位观测断面 36 处、水位观测点 72 处,每个水位观测点均安装有专用固定测量水尺,测量精度为 0.001 m。在安装导流罩前后的全部试验观测期内,每天上午、下午均观测记录观测点水位 1 次,每次读数 5 次取点平均,左右岸同时观测,以左右岸平均值作为断面平均采用值;同步记录试验段内双泊河节制闸和梅河节制闸的实时过闸流量。

3.2 观测试验条件及成果

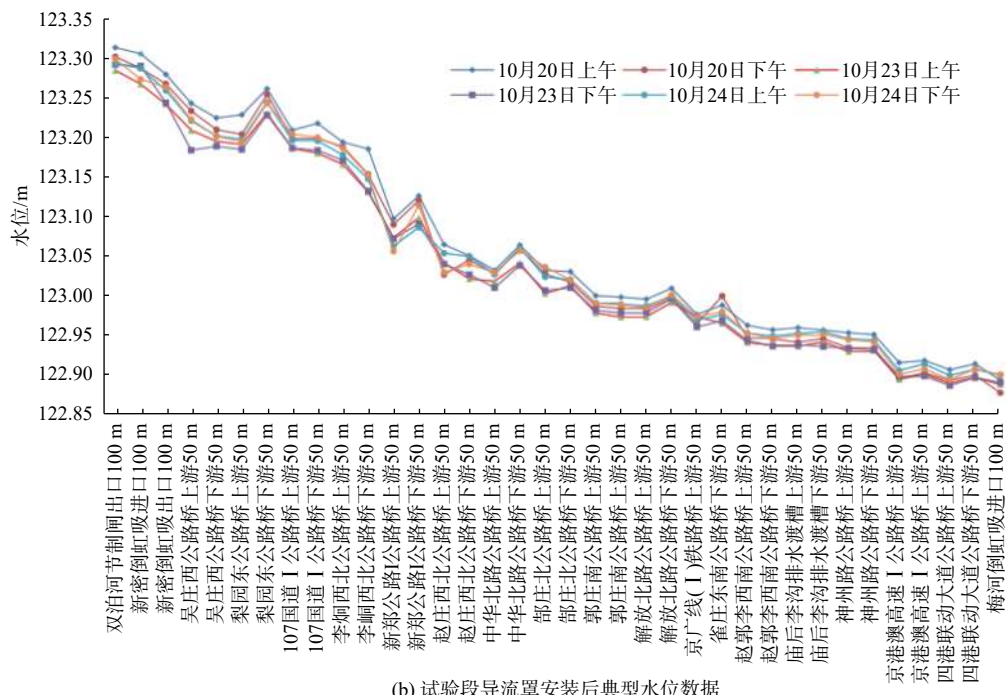
未改造前的试验观测。在试验桥墩导流罩安装前,通过闸站调度,在 2020 年 6 月 27—29 日作为导流罩安装前的代表性水位观测期,同时固定双泊河节制闸、梅河节制闸以及李垌分水口门的开度,保持总干渠双泊河-梅河试验段为恒定流状态。此期间试验段上游双泊河节制闸流量设计值 $220 \text{ m}^3/\text{s}$,实测流量最大值 $222 \text{ m}^3/\text{s}$,最小值 $218 \text{ m}^3/\text{s}$,波动 $\pm 2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。试验段下游梅河渠倒虹进口前水位设计控制在 122.880 m,实测水位最大值 122.901 m,水位最小值 128.871 m,波动 $\pm(0.10\sim 0.13) \text{ m}$ 。导流罩实施前共观测记录了 3 天内 36 个断面左右岸共 2 160 个数据,并计算分析比降与相应糙率。

加装导流罩后的试验观测。5 座桥梁导流罩安装完成后,2020 年 10 月 22 日前通过闸站调度保持试验段上下游流量、水位均与导流罩安装前的代表性试验观测期相同,确保导流罩安装前后试验渠段上下游的水力控制条件具有相同的比较基础。2020 年 10 月 20—24 日在试验段流态稳定后,进行试验桥梁导流罩安装后的水位观测,实测流量最大值 $221 \text{ m}^3/\text{s}$,最小值 $218 \text{ m}^3/\text{s}$,波动 $\pm(1\sim 2) \text{ m}^3/\text{s}$ 。;实测水位最大值 122.899 m,水位最小值 122.862 m,波动 $\pm(0.10\sim 0.14) \text{ m}$ 。导流罩实施后观测记录了 3 日内 36 个断面左右岸共 2 160 个数据,并计算分析比降与相应糙率。

在全部试验观测期内,典型水位数据见图 5。由图 5(a)可见试验渠段所有阻水建筑物上下游都有局部水位壅高与降落,量值与局部水头损失的大小有关,高低不等;6 月 27 日的水位略偏高,而 6 月 29 日的水位略偏低,最大变幅 2.0~2.5 cm。由图 5(b)可见,安装导流罩后试验渠段水面线的沿程变化趋势与安装前基本一致,观测期间水位变幅偏低,最大变幅 1.8~2.3 cm。安装导流罩后试验渠段水面线及各局部水头损失均有所降低。



(a) 试验段导流罩安装前典型水位数据



(b) 试验段导流罩安装后典型水位数据

图 5 试验段导流罩安装前后典型水位数据

Fig. 5 Typical water level data before and after installation of shroud in test section

3.3 观测成果可靠性分析

水位波动分析。原型观测试验段进口流量基本处于恒定状态,对比同一观测断面每日数据,各观测断面水位波动幅度一般在 0.030 m 以内。对比不同观测时间全段水位数据,全段水位整体上升或下降,说明各断面的水位波动是由于下游水位控制而非测量精度。

局部水面线倒坡现象分析。在梨园东公路桥、

新郑公路桥、中华北路公路桥等小范围内下游水位高于上游水位的倒坡现象,其中最大的倒坡发生在梨园东公路桥附近。经分析表明:梨园东公路桥位置为渠道转弯段,转弯角达到 58°,较大的转弯角导致该位置水位波动较大,在弯道后发生波状水跃,从而出现较一定程度的水面倒坡;新郑公路桥的桥柱顺水流方向桥墩长达 50 m,水流条件已形同暗渠,水位观测断面位于桥前后 50 m 处,处于桥前水位跌

落和桥后波状水位跃升区, 因此实测水位也出现倒坡现象; 桥宽越大, 水位倒坡现象越明显。出现局部水位倒坡现象是边界条件下引起的局部流态转换形成的; 总体水面线变化趋势是合理可信的。

渠段水头差分析。通过对各观测断面每日观测结果取平均值, 得到导流罩安装后试验段起点水位 123.293 m, 终点水位 122.890 m, 总水位差 0.402 m; 而本试验段起点设计水位 123.298 m, 终点设计水位 122.661 m, 总水位差 0.637 m。可见, 导流罩安装后试验段起点水位基本相同, 闸站控制也相同, 但下游水位略偏高, 其原因: 一是渠道流量未达到设计流量, 水头损失也应低于设计值; 二是应用导流罩降低了各桥墩的局部水头损失。通过分析试验段沿线水位变化, 导流罩安装后水位倒坡位置和幅度与安装前基本相同, 原因也相同, 所以现场试验观测结果是合理可靠的。

4 分析与讨论

通过对 5 座公路桥导流罩安装前后桥墩处流态、水头损失、渠道过流能力的对比, 定性和定量分析评价在 220 m³/s 流量输水状态下导流罩安装前后总干渠的流态、水头损失变化。

4.1 采用导流罩后单桥的流态改善

在导流罩安装前后的试验观测期内, 采用无人机航拍桥墩附近流态, 对比结果见图 6。从导流罩

安装前后流态对比可以看出: 在总干渠流量和水位相同情况下, 导流罩安装后桥梁墩柱附近流态大幅改善, 导流罩周围水流平顺, 柱间涡流现象消失, 柱后水流不再摆动, “卡门涡街”现象消失; 渠道水位波动幅度减小; 两侧的低流速区影响范围大幅减小, 低流速区范围也变小, 流态始终保持稳定状态。



(a) 导流罩安装前流态 (b) 导流罩安装后流态

图 6 导流罩安装前后流体对比

Fig. 6 Fluid comparison before and after shroud installation

4.2 采用导流罩后桥群试验段水头损失与综合糙率分析

水头损失分析。在导流罩安装前后, 通过上下游闸站调度给试验段创造了相同水流条件, 确保导流罩安装前后水位变化具有相同的比较基础。将导流罩安装前后各 6 组数据分别取平均值后进行对比, 结果见图 7。5 座公路桥导流罩安装前后水位对比可以看出, 在试验段上下游基本处于相同水位和流量条件下, 导流罩的安装减少了水头损失, 试验段渠道水位明显下降, 其影响范围延伸至试验段上下游边界, 与现状相比, 局部水位最大下降 0.021 m, 位于第 1 座导流罩前的中华北路公路桥附近。

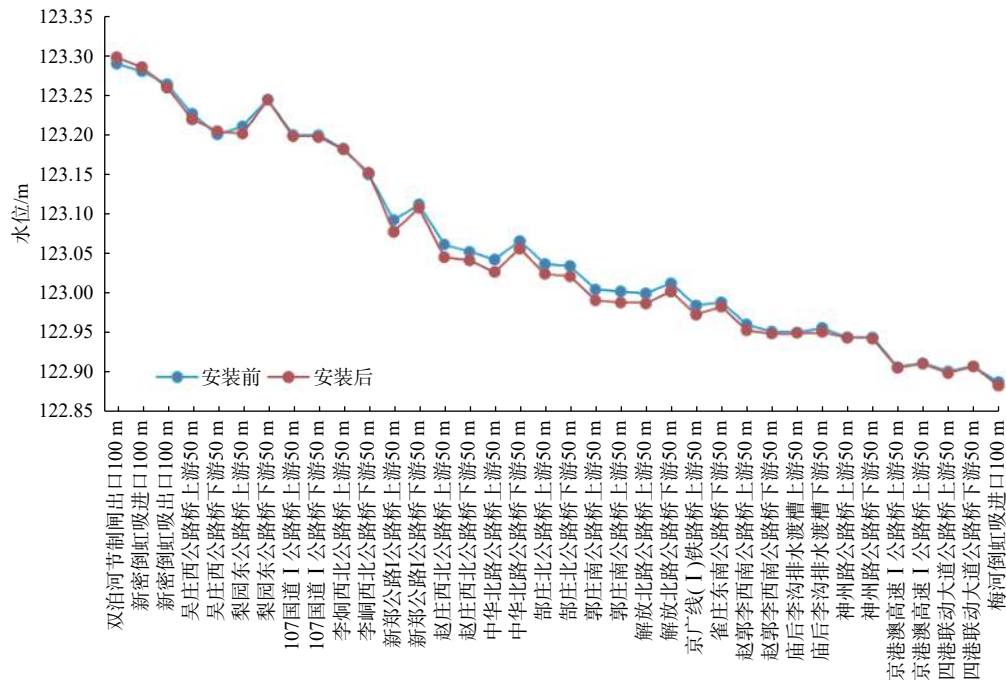


图 7 导流罩安装前后水位对比

Fig. 7 Comparison of water levels before and after shroud installation

各桥梁水位观测断面均位于桥梁上下游 50 m 处,部分水位观测断面位于桥前水位跌落和桥后水位跃升的范围内,实测水位出现倒坡现象,无法直接通过观测水位得到桥梁阻水损失。因此将多个桥梁结合起来考虑,当导流罩安装前后实测水位差异与采用相同边界条件下三维数模结合水面线推算计算的水位差异基本相同。在 220 m³/s 水力边界条件下,水头损失计算结果见表 2。

表 2 导流罩安装前后桥梁水头损失数值模拟结果

Tab. 2 Bridge head losses before and after shroud installation calculated by three-dimensional digital simulation

典型桥梁	现状桥柱水头损失/mm	安装后桥柱水头损失/mm	装导流罩后减少水头损失/mm
部庄北生产桥	2.7	1.0	1.7
郭庄南公路桥	3.6	0.9	2.8
崔庄东南公路桥	3.6	0.9	2.8
赵郭李西南公路桥	4.8	2.2	2.6
解放北路公路桥	8.6	3.3	5.3
合计	23.4	8.3	15.1

为验证实测数据与三维数值模型计算水头损失的准确性,采用明渠非均匀流公式从下往上推算水面线。以实测导流罩安装后水位开始明显降低的新郑公路桥上游 50 m 为本次水面线推算范围起点,终点取四港联动大道公路桥下游 50 m,该渠段是包

含了 5 座导流罩的试验段下半段。起推水位采用该位置导流罩安装前水位 122.908 m,流量均采用 220 m³/s。在水面线推算时,采用合适的综合糙率,使综合糙率加 5 座公路桥导流罩安装前的水头损失后推算的水位与导流罩安装前实测水位基本一致,然后以此综合糙率再加上导流罩安装后的 5 座桥梁水头损失推算导流罩安装后的水位,当推算的水位与实测水位也基本一致可证明 5 座公路桥导流罩前后采用的水头损失与实际水头损失一致。

水面线推算原理:采用明渠非均匀流公式从下往上推算水面线,根据渠道断面要素变化将推算渠段划分为若干段明渠,各段明渠内又按计算段长(100 m)分段计算,计算公式为

$$\frac{\left(h_i + \frac{v_i^2}{2g}\right) - \left(h_{i+1} + \frac{v_{i+1}^2}{2g}\right)}{\Delta l} = i - \bar{J} \quad (1)$$

式中:Δl 为渠段的长度, m; i 为渠底设计纵坡; h 为渠道水深; \bar{J} 为渠段的平均水力坡度,由式 $\bar{J} = \frac{\bar{v}^2}{C^2 R}$ 确定,其中, $\bar{v} = \frac{v_i + v_{i+1}}{2}$, $\bar{C} = \frac{C_i + C_{i+1}}{2}$, $\bar{R} = \frac{R_i + R_{i+1}}{2}$, C 为谢才系数; R 为渠道过水断面水力半径, m。式中具有下标 i 和 i+1 的量,分别表示计算渠段的下游断面和上游断面的水力要素。

水面线及水头损失计算成果:通过推算,导流罩安装前后推算水面线与实测水面线对比见图 8。

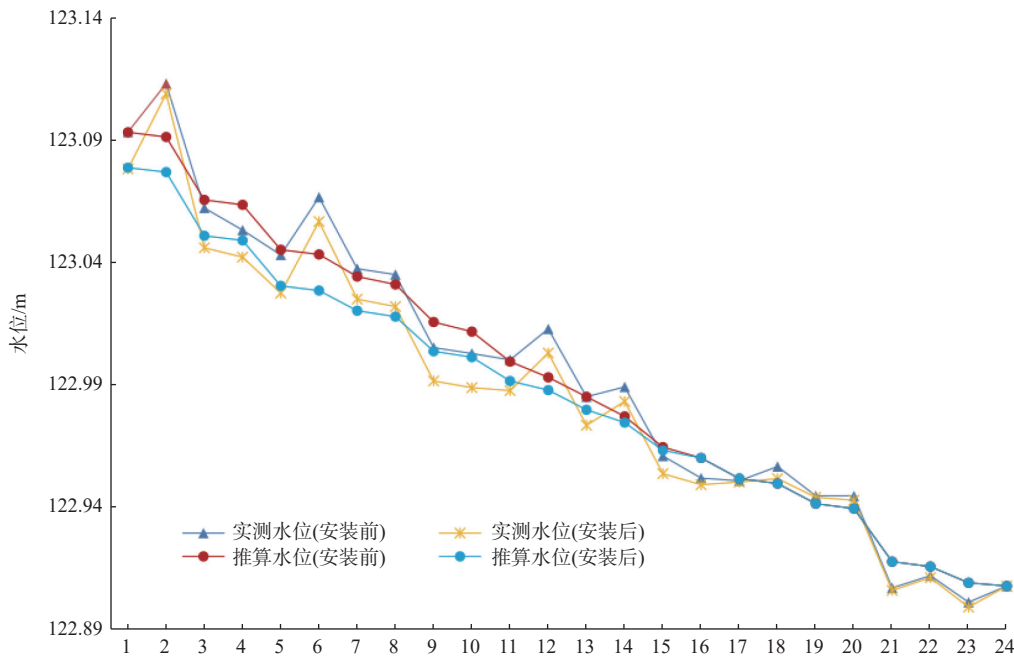


图 8 推算水面线与实测水面线对比

Fig. 8 Comparison between calculated water surface profile and measured water surface profile

从推算结果可以看出:在采用三维数模计算的 5 座公路桥导流罩安装前后水头损失基础上,推算

至起点的水位均与实测水位基本相符,从而验证了实测数据与三维水动力学模型计算成果准确性;在

实测水力条件(流量 $220 \text{ m}^3/\text{s}$, 节制闸控制壅水运行)下,导流罩安装前5座公路桥总水头损失 0.023 m ,导流罩安装后总水头损失 0.008 m ,水头损失减少 0.015 m ,减少率 64.4% 。

综合糙率分析。通过采用明渠非均匀流公式推算水面线并与实测对比,将桥梁阻水损失的变化换算成渠道综合糙率的变化,反算渠道综合糙率。对导流罩安装前后两种工况,均以各自实测的下游水位作为起推水位,按明渠非均匀流公式从下游向上游推算水面线,推算过程中不再考虑桥梁、弯道、渐变段等局部水头损失,只是通过改变渠道糙率,直到推算的水面线与实测水面线基本匹配,则可认为此时采用的渠道糙率为包含了桥梁、弯道、渐变段等局部水头损失的渠道综合糙率。

对比不同综合糙率推算的水面线与实测水面线,对于5座安装导流罩桥梁所在小范围渠段来说,在导流罩安装前,渠道取 0.0175 综合糙率推算至起点的水位与实测水位相等,可认为此时渠道综合糙率为 0.0175 ;而在导流罩安装后,当渠道取 0.016 综合糙率推算至起点的水位与实测水位相同,则可认为此时渠道综合糙率为 0.0161 。在实测 $220 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量输水工况下,导流罩安装后桥梁绕流涡旋降低,阻水损失减少,使得该段渠道综合糙率由 0.0175 降为 0.0161 ,减少了 8.0% 。

4.3 桥群试验段过流能力对比分析

渠道过流能力由底宽、渠深、边坡、纵坡、糙率决定,通过将桥梁墩柱阻水损失换算为渠道综合糙率后,即可反应桥梁阻水对渠道过流能力的影响,渠道过流能力计算采用明渠均匀流公式为

$$Q = CA\sqrt{Ri} \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

式中: Q 为渠道设计流量, m^3/s ; A 为渠道过水断面面积, m^2 ; C 为谢才系数; R 为渠道过水断面水力半径, m ; i 为渠道纵坡; n 为渠道过水断面糙率,取 0.015 。

桥梁安装导流罩后所在 3.61 km 渠段有多种不同尺寸的渠道断面,通过采用加权平均法概化后得到该明渠的平均边坡、平均底宽、平均纵坡,则可以根据综合糙率采用明渠均匀流公式计算在设计水位下的过流流量。经计算在桥群安装导流罩后,同水位下渠道过流流量可由 $265.10 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $288.20 \text{ m}^3/\text{s}$,过流能力提高 8.71% 。

5 结论

本文运用流体力学理论与数值模拟方法,进行了流线型导流罩基础体型与结构设计,并选取典型试验段进行了桥梁墩柱导流罩应用效果原型观测研究,得出以下结论:

圆柱桥墩尾涡区长度超过 $5D\sim 6D$ 后,湍动能消耗迅速衰减。基于桥墩改建与效能最优综合考虑,确定了单柱导流罩体型:头部(柱前)采用 $R=2.5D$ 、长度为 $1.5D$ 的尖圆对称曲线边界,尾部(柱后)采用 $R=11D$ 、长度为 $4.9D$ 的尖圆对称曲线边界;两柱以上桥墩柱间罩体采用平行直线连接。

对试验渠段内的5座公路桥墩柱安装导流罩前后的过流情况进行了三维数值模拟计算与现场观测研究,结果表明安装导流罩显著改善了桥柱周围渠道流态,且原型观测数据与数值模型计算结果比较吻合,表明建立的数值模型可有效支撑输水渠道流态优化调度方案研究。

原型观测数据表明安装导流罩后渠段水头损失、综合糙率均明显减小,而过流能力相应提高,其中,渠段总水头损失减幅达 64.4% ,渠段过流能力提高了 8.71% ,表明导流罩可有效提高渠道的输水能力,为大型输水渠道设计与改造提供技术参考。

参考文献:

- [1] 施伟,倪春,于贤磊,等. 闸站并列布置工程泵站前池流态改善[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 810-820. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0079.
- [2] 王才欢,王伟,侯冬梅,等. 大型输水渡槽水流超常波动成因分析与对策[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(2): 46-52. DOI: 10.11988/ckyyb.20200406.
- [3] 罗红春,冀鸿兰,牟献友,等. 冰下水流流态的原型观测试验研究[J]. 水文, 2022, 42(4): 7-11. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210155.
- [4] 林琳,王言英. 绕圆柱湍流流场及其发展的计算[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(3): 469-472.
- [5] 张石磊,李美玲,王智欣,等. 大流量明渠输水工程渡槽闸墩振动机理研究[J]. 人民长江, 2023, 54(3): 210-215. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.03.032.

- [6] 谭志荣,熊劭,王洋,等.高雷诺数下串列三圆柱绕流的大涡模拟[J].*水运工程*,2022(12):25-33. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20221129.016.
- [7] 郭志远,虞培祥,欧阳华.基于大涡模拟的圆柱绕流剪切层不稳定性[J].*上海交通大学学报*,2021,55(8):924-933. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.266.
- [8] 陈海登,陶祥海,庞圣养.基于浸入边界法的涡激振动流固耦合数值模拟方法[J].*水利水电技术(中英文)*,2021,52(1):89-95. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.01.009.
- [9] 郭涵慧,赵伟文,万德成.加装来流侧分隔板的圆柱绕流三维数值模拟研究[J].*中国造船*,2020,61(S2):132-141. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.014.
- [10] 薛海,刘培,王鹏涛,等.典型双孔渡槽复杂流态的改善研究[J].*水利水电工程学报*,2023(5):17-25.
- [11] 马山玉,李钊,王志刚,等.基于3D打印物模的输水渡槽出口流态优化试验[J].*水科学与工程学报*,2022(4):87-90. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2022.04.24.
- [12] 朱宸钰,于鑫,王睿智.施桥闸站进水流态数值模拟研究[J].*江苏水利*,2023(7):40-45. DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2023.07.013.
- [13] 周珊珊,金燕,王彬宇,等.弯道入流进水池流态分析与整流措施研究[J].*水电能源科学*,2021,39(5):135-138,142.
- [14] 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.
- [15] 卢炎,韩晓双,徐明林,等.低雷诺数下不等直径串联圆柱绕流数值模拟[J].*青岛大学学报(自然科学版)*,2022,35(4):47-52,58.
- [16] 李昕.基于FloEFD的单圆柱绕流数值模拟[J].*一重技术*,2023(3):1-3.
- [17] 陶梦琦,刘美红,康宇驰.基于micro-PIV的微通道内流体绕流单微圆柱和并联双微圆柱流场特性[J].*化工进展*,2023,42(6):2836-2844. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1512.
- [18] 杨林家,回广禄.基于二维流场圆柱绕流湍流数学模型的确定[J].*中国水运(下半月)*,2022,22(5):24-26,39.
- [19] 邱翔,吴昊东,陶亦舟,等.近壁面圆柱绕流中尾流结构演化特性的实验研究[J].*力学学报*,2022,54(11):3042-3057.
- [20] 周锟,胡进.绕流直接数值模拟误差分析[J].*力学与实践*,2023,45(1):54-66.
- [21] 陈洁,虞培祥,欧阳华.三维不等直径串列圆柱绕流的双涡脱落流态频率特征研究[J].*应用力学学报*,2022,39(2):386-393.
- [22] 王志飞,杨贝宁,王思莹.闸墩绕流影响因素及其作用规律分析[J].*水利水电科技进展*,2022,42(6):45-51.
- [23] 张宇鑫,曹曙阳,操金鑫.自动网格体系在柱体绕流大涡模拟中的适用性评估[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2023,51(4):542-550.
- [24] 周迎,肖瑜,张书花.闸站合建枢纽对渠道水流流态影响的数值模拟研究[J].*陕西水利*,2022(1):34-36. DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2022.01.028.
- [25] 于浩,尚华,孙维民.大跨径桥墩对河道流态影响的数值模拟分析[J].*山东水利*,2022(12):51-52,55. DOI: 10.16114/j.cnki.sdsl.2022.12.022.

Study on flow-deflector of cross bridge pier and field test in large transmission channel

HU Jingyu¹, FAN Mengsa¹, JI Rongxian², ZUO Li³, CUI Jinliang¹, LOU Lifang¹, LIU Mingxiao⁴

(1. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited Henan Branch, Zhengzhou 450016, China; 2. South To North Water Diversion Middle Route Industrial Development Corporation Limited, Zhengzhou 450016, China; 3. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 4. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to solve the engineering problem that the high water level in the intensive section of the cross-channel bridge affected the water transport capacity of the project during the period when the operating flow of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project exceeded the maximum designed flow for the first time in 2020, the 13.233 km section from Shuangji River inverted siphon to Mei River inverted siphon was selected as

the test section, and five typical bridges of the test section were selected as the test objects. The numerical simulation and prototype observation test research methods were used to design and study the application effect of the bridge pier guide dome.

The basic type of the guide dome was designed according to the hydraulic theory. The 3D hydrodynamic model parameters were calibrated using the prototype observation data of the unguided dome. Meanwhile, the schemes of different guide dome sizes were further compared and selected by numerical simulation, and the optimal scheme was obtained. Through the prototype test, the optimization of the flow pattern and the improvement of the water transport capacity of the test section of five bridges after installation of the guide domes were analyzed and verified.

The results showed that after the installation of the guide dome, the flow pattern near the pier of the five bridges was obviously improved, the head loss of the test section was reduced by around 64.4%, the comprehensive roughness was reduced by around 8.0%, and the flow capacity of the test section was increased by around 8.71%, which further verified the reliability of the numerical simulation.

The method of bridge pier guide dome design and prototype observation can also be effectively applied to other similar long-distance open channel water transmission projects.

Key words: water transmission channel; low pattern optimization; guide dome; prototype observation test research method

.....

(上接第 1193 页)

According to the research results, the water diversion project and pumped storage power station are implemented in a coordinated manner. The project has two major functions: water diversion and energy storage. Under the premise of reasonable control of scale, the overall investment of the project is shared by the service functions of water supply and energy storage. The cost of evenly spreading to a single cubic meter of water volume under certain conditions will be lower than the cost of constructing a separate water diversion project. In fact, it is equivalent to constructing a water diversion project of the same scale at a lower cost, reducing project investment and operating costs, and significantly enhancing the financial capabilities of the project. There are certain conditions for using the "water diversion+" model, and comprehensive consideration should be given to factors such as the construction needs, project scale, development timing, project scheduling, and operating costs of regional pumping and water diversion projects. At the same time, research results can provide new ideas for fully leveraging the economic benefits of the "water diversion+" model.

Key words: tunnel water diversion; pumped storage power station; water energy integration mode; "water diversion +"; cost of water diversion