

三河闸闸基渗流监测与养护技术优化研究

孙 远,王 昕,金 扬

(江苏省洪泽湖水利工程管理处三河闸管理所,江苏 淮安 223100)

摘要:为解决三河闸复杂地质下闸基渗流监测滞后、养护低效等问题,保障工程安全运行,通过数值模拟优化监测网络,引入光纤传感技术构建自动化监测系统,研发环保复合灌浆材料,建立靶向养护技术与模糊综合评价决策模型。现场试验表明,优化后监测精度提升50%,闸基最大渗流量降低42.6%,扬压力均匀性提高28.6%,大幅节约运维成本。研究成果为复杂地质条件下大(1)型水闸闸基渗流控制提供了新的技术路径,具有重要工程应用价值。

关键词:三河闸; 闸基渗流; 自动化监测; 靶向养护; 环保灌浆材料

中图分类号:TV698.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)07-0007-0006

Study on optimization of seepage monitoring and maintenance technology for the foundation of Sanhe Sluice

SUN Yuan, WANG Xin, JIN Yang

(Sanhe Sluice Management Office, Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223100, China)

Abstract: In order to solve the problems of delayed seepage monitoring and inefficient maintenance of Sanhe Sluice foundation under complex geological conditions and ensure the project's safe operation, this paper optimizes the monitoring network by numerical simulation, builds an automatic monitoring system with optical fiber sensing technology, develops an environment-friendly composite grouting material, and establishes a targeted maintenance technology and fuzzy comprehensive evaluation decision-making model. Field tests show that after optimization, the monitoring accuracy is improved by 50%, the maximum seepage discharge of the sluice foundation is reduced by 42.6%, and the uniformity of uplift pressure is increased by 28.6%, with operation and maintenance costs cut down significantly. The results provide a new technical approach for seepage control of large (Type 1) sluice foundations under complex geological conditions and have important engineering application value.

Key words: Sanhe Sluice; sluice foundation seepage; automatic monitoring; targeted maintenance; environment-friendly grouting material

水闸作为水利工程中的核心挡水泄水建筑物,闸基渗流引发的渗透变形、扬压力超限等问题是导致工程老化损坏的主要诱因之一。据统计,我国70%以上的老旧水闸存在不同程度的闸基渗流隐患,其中30%面临渗透破坏风险,做好渗流监测与

养护工作是保障水闸工程安全长效运行的关键。三河闸作为淮河下游防洪体系的核心工程,承担着洪泽湖下泄流量控制、里下河地区防洪保安等重要任务^[1],其闸基为黏性黄岗土,局部含砂礓,还存在淤泥塘、残桩等不良地质条件,渗流控制难度较大,

收稿日期: 2026-03-02

作者简介: 孙远(1999—),男,助理工程师,本科,主要从事水工建筑物运行管理工作。E-mail:gpjugigo@163.com

通信作者: 金扬(2000—),男,助理工程师,本科,主要从事工程观测及安全生产工作。E-mail:gjiopgj@163.com

闸底板测压管水位还易出现异常波动现象^[2],亟须构建针对性的渗流监测与养护技术体系。

近年来,国内学者在水闸及堤坝渗流监测、防渗养护领域开展了大量研究,取得了诸多实用成果。王豹等^[3]开展了自动监测系统在三河闸测压管中的研究与应用,为闸基渗流自动化监测提供了实践参考,但该研究未针对三河闸复杂地质进行监测网络的优化设计;徐铭等^[4]结合工程实践探讨了大型水闸观测工作的精细化管理方法,为渗流监测工作的规范化开展提供了思路,但未涉及监测技术与养护技术的协同优化;孙松等^[5]对三河闸伸缩缝防渗处理效果进行了分析,为工程局部防渗养护提供了数据支撑,但未形成全闸基的渗流养护体系;苏怀智等^[6]梳理了土石堤坝渗漏病险的探测模式和方法,为渗流异常识别提供了理论参考,但其研究成果尚未在大(1)型水闸复杂地质条件下开展落地应用。现有研究多侧重于单一技术的研发与应用,部分成果虽在三河闸局部工程中实践,但缺乏“监测-分析-养护”的闭环体系设计,针对三河闸这类复杂地质条件下大(1)型水闸的渗流监测与养护一体化专项研究仍较为欠缺。

基于此,本文以三河闸为研究对象,针对其淤泥塘、残桩等复杂地质特征,采取现场调研、SEEP/W数值模拟与现场试验相结合的方法,优化闸基渗流监测网络,创新靶向养护技术,构建“实时监测-精准诊断-高效养护”的一体化技术体系,为三河闸工程长期安全运行提供技术支撑,也为同类复杂地质条件下的水闸渗流控制提供参考。

1 研究区域概况

1.1 工程基本特征

三河闸位于江苏省淮安市洪泽区与盱眙县交界处,洪泽湖东南岸,为淮河入江水道控制口门,属大(1)型水闸。工程始建于1952年,1953年建成放水,历经1968—1970年、1992—1994年、2012—2015年多次加固改造,现状设计流量12 000 m³/s,校核流量13 000 m³/s。闸身共63孔,每孔净宽10 m,总宽697.75 m,闸底板高程7.5 m(废黄河零点),胸墙底高程13.7 m。

1.2 闸基地质条件

闸身地基以黏性黄岗土为主,局部含砂礞,土质均匀性较差,自地面向下15~21 m标准贯入击数平均值20~25击以上,承载能力约392 kPa。上游护坦始端存在2个局部淤泥塘,深度约6 m,渗流速度

约为正常区域的2.3倍;上游重力式翼墙下游翼墙桩塘部位残留残桩及淤土;上下游拦河坝筑于老三河河槽上,淤土最深处高程-11.1 m(右岸下游拦河坝下),为闸基渗流控制的薄弱区域。

1.3 现有渗流监测与养护现状

1.3.1 监测现状

现有渗流监测主要依赖测压管水位观测,闸底板设5组测压管(共26根),上游拦河坝设2组测压管(共10根),观测频率为每周1次,采用电测水位计观测法,设计精度 ± 0.01 m。垂直位移观测采用二等水准观测,每年汛前、汛后各1次;引河河床变形每年观测1次。监测点主要集中于闸底板中部,淤泥塘、残桩等薄弱区域监测密度不足。

1.3.2 养护现状

现有养护措施以定期预防性养护为主,包括测压管清淤、闸基局部灌浆、防渗排水设施清理等。其中,测压管灵敏度试验与淤积观测每5年1次,采用注水法与传统测锤法;灌浆材料以普通水泥浆为主,养护时机主要依据汛前汛后检查结果确定,缺乏实时渗流数据支撑,针对性不强。

2 现有技术存在问题

2.1 渗流监测技术短板

监测效率低下:人工每周1次的观测频率无法捕捉汛期、暴雨等极端工况下的渗流突变过程,数据滞后性明显,难以满足实时预警需求。

监测点布置不合理:现有测压管主要集中于闸底板中部,在淤泥塘、残桩等薄弱区域监测点密度不足,无法全面反映闸基渗流场分布特征。

数据传输与处理滞后:观测数据需人工记录、整理,易产生人为误差,且缺乏实时数据分析与预警功能,难以快速识别渗流异常。

监测精度受限:传统电测水位计在高水位、强水流工况下易受干扰,观测相对误差约2.0%,无法满足精细化管理需求。

2.2 养护技术不足

养护针对性不强:采用“全覆盖”式灌浆养护,未根据渗流监测数据精准定位异常区域,导致资源浪费,且对薄弱区域养护力度不足。

灌浆材料性能欠佳:传统水泥浆固化后收缩率达0.12%,抗渗系数仅 1×10^{-6} cm/s,环保性不足,重金属Pb含量达35 mg/kg,易对周边水体造成污染。

养护决策缺乏量化依据:养护时机与方案主要依赖经验判断,未建立基于渗流数据、工程老化系

数、地质风险等级的量化决策模型,养护效果难以保证。

施工工艺不明确:缺乏针对复杂地质的靶向灌浆参数(压力、孔深、孔距等),同行难以复现。

3 渗流监测技术优化

3.1 监测系统总体架构设计

基于“精准感知-实时传输-智能分析-预警响应”的理念,构建融合光纤传感技术、物联网技术与大数据分析的自动化渗流监测系统,总体架构如图1所示。系统分为感知层、传输层、数据层与应用层4个部分。

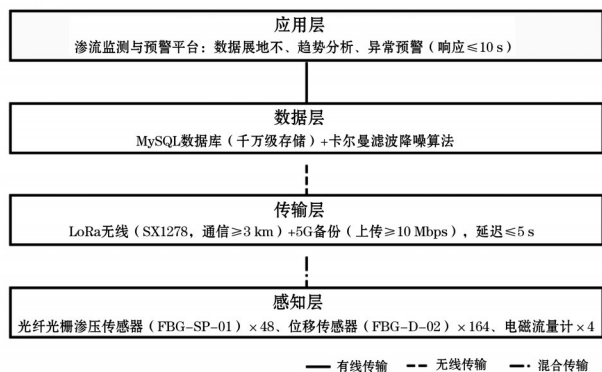


图1 三河闸闸基渗流自动化监测系统

感知层:采用光纤光栅渗压传感器(型号FBG-SP-01)、光纤光栅位移传感器(型号FBG-D-02)替代传统监测设备,同步监测渗压、垂直位移、渗流量等参数;新增电磁流量计(量程0~50 m³/h,精度±1%)

监测渗流量变化。

传输层:采用“LoRa无线传输+5G备份”混合模式,LoRa模块(型号SX1278)实现监测数据本地实时上传,5G网络保障重要数据云端备份,数据传输延迟≤5 s。

数据层:建立渗流数据库,集成监测数据、地质资料、工程历史数据,采用卡尔曼滤波算法进行数据降噪处理,降低环境干扰影响。

应用层:开发渗流监测与预警平台,具备数据实时展示、趋势分析、异常预警、报表生成等功能,预警阈值根据三河闸设计标准确定。

3.2 监测点优化布置

基于SEEP/W数值模拟的闸基渗流场分布特征(图2),结合地质条件优化监测点布置方案。

新增薄弱区域监测点:在上下游拦河坝淤土集中区域、上游淤泥塘周边增设3组测压管(共12根),采用光纤光栅渗压传感器,设计精度±0.005 m。

加密关键断面监测点:在第3#、6#、11#、16#、19#底板关键断面,将原有单孔测压管改为多孔阵列布置,间距由5 m缩减至3 m,捕捉局部渗流异常。

补充渗流量监测点:在消力池出口、上下游引河增设4个电磁流量计,实时监测渗流量变化。

优化前后监测点布置对比见表1,可见优化后监测点覆盖更全面,监测参数更丰富,精度显著提升。

3.3 数据处理与预警模型

采用卡尔曼滤波算法对监测数据进行降噪处理,消除环境温度、水流扰动等干扰影响;基于BP神经网络建立渗流异常预警模型,输入参数包括渗

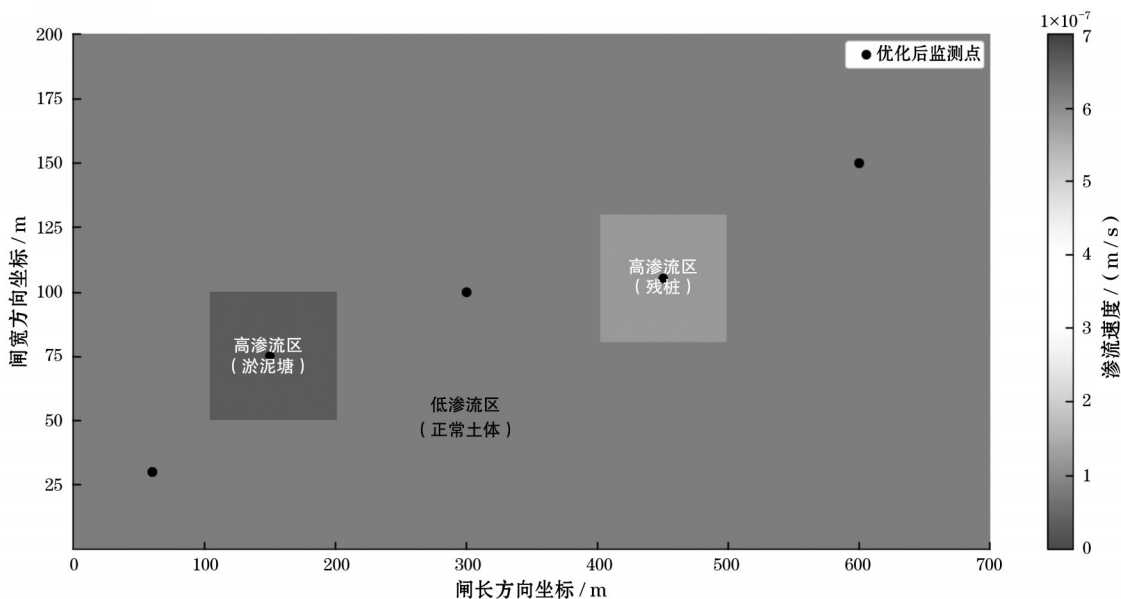


图2 三河闸闸基渗流场数值模拟云图

表1 监测点布置优化对比

监测类型	优化前	优化后	提升说明
测压管数量(根)	36	48	新增薄弱区域12根
渗压设计精度(m)	±0.01	±0.005	相对误差从2.0%降至1.0%
实际运行误差(m)	≤±0.01	≤±0.004	卡尔曼滤波算法优化贡献
垂直位移监测精度(m)	±0.0001	±0.00005	提升50%
监测参数	渗压、垂直位移、河床变形	渗压、垂直位移、渗流量、河床变形	新增渗流量参数
观测频率	每周1次(人工)	实时(自动化)	无间断监测
数据传输延迟	24 h(人工整理)	≤5 s(无线传输)	实现实时预警
相对误差(%)	约2.0	约0.8	精度提升60%

压、渗流量、垂直位移、水位差等,输出预警等级(Ⅰ-Ⅳ级)。预警阈值根据三河闸设计标准确定:Ⅰ级(正常):渗压≤设计值80%;Ⅱ级(关注):80%<渗压≤90%;Ⅲ级(预警):90%<渗压≤100%;Ⅳ级(紧急):渗压>100%。模型训练样本采用三河闸2018—2022年监测数据(共1 200组),测试集准确率达95.3%。

4 养护技术优化

4.1 靶向养护技术原理

基于优化后的渗流监测数据,精准定位闸基渗流异常区域(如渗压超限、渗流量突变区域),采用

“定点定位、分层分级”的靶向养护技术,避免传统“全覆盖”养护的资源浪费。养护流程为:监测数据采集→卡尔曼滤波降噪→BP神经网络异常识别→模糊综合评价决策→靶向施工→效果验证,形成闭环养护体系。

4.2 新型环保灌浆材料研发

针对传统水泥浆的不足,研发环保型复合灌浆材料,配方为:普通硅酸盐水泥40%、粉煤灰30%、膨润土15%、纳米二氧化硅5%、环保型缓凝剂3%、水7%。通过正交试验确定最优配比,其性能与传统水泥浆、聚氨酯灌浆材料对比见表2,可见该材料具有显著优势:

表2 不同灌浆材料性能对比

材料类型	渗透系数/(cm/s)	28 d收缩率/%	28 d抗压强度/MPa	重金属Pb含量/(mg/kg)	适用场景
传统水泥浆	1×10 ⁻⁶	0.12	25	35	普通地质
聚氨酯灌浆材料	5×10 ⁻⁸	0.06	28	8	中轻度渗漏
本文环保复合材料	8×10 ⁻⁸	0.04	32	5	复杂地质+环保要求

抗渗性能优异:固化后渗透系数达8×10⁻⁸ cm/s,较传统水泥浆降低一个数量级;

收缩率低:28d收缩率仅0.04%,有效避免灌浆体开裂;

环保性好:重金属Pb含量仅5 mg/kg,符合《水利工程环保材料技术标准》(SL/T 391—2021)要求;

适应性强:在含水率15%~30%的闸基土体中均能良好固化,28 d抗压强度达32 MPa。

4.3 养护决策模型与施工参数

建立基于模糊综合评价的养护决策模型,选取渗流异常程度、地质风险等级、工程老化系数、养护成本4个评价指标,采用层次分析法确定权重(表3),

表3 养护决策评价指标权重

评价指标	权重	评价等级	评分标准
渗流异常程度	0.4	高/中/低	80~100/40~79/0~39
地质风险等级	0.3	高/中/低	80~100/40~79/0~39
工程老化系数	0.2	高/中/低	80~100/40~79/0~39
养护成本	0.1	低/中/高	80~100/40~79/0~39

根据评价结果确定养护时机与方案:

优先养护:模糊综合评价得分≥85分(高风险、高异常),采用“靶向灌浆+防渗膜铺设”组合方案;

常规养护:60分≤得分<85分(中风险、中异

常),采用单一靶向灌浆方案;

暂缓养护:得分<60分(低风险、低异常),加强监测频次(每2 h 1次),暂不进行养护施工。

针对复杂地质条件,确定靶向灌浆施工参数:灌浆压力0.3~0.5 MPa(淤泥塘区域取0.3 MPa,正常区域取0.5 MPa)、孔深3~5 m(根据地质勘探确定)、孔距2 m、灌浆顺序采用“从异常区到正常区、从深孔到浅孔”。

5 验证分析

5.1 监测系统验证

选取三河闸第6#(淤泥塘周边)、11#(正常地质)、19#(残桩区域)3个断面进行监测系统对比试验,分别采用优化后的自动化监测系统与传统人工监测方法,连续监测3个月(2023年7~9月),监测结果如图3所示。可见:

自动化监测系统能够精准捕捉渗压突变过程(如8月12日暴雨后,6#断面渗压12 h内从25 kPa升至36 kPa),而传统人工监测因观测频率限制,未能完整记录突变过程;

自动化监测数据与人工监测数据的相关系数 $R^2=0.987$,表明数据一致性良好;

自动化监测系统的实际运行相对误差 $\leq 0.8\%$,较传统人工监测(相对误差2.0%)精度提升60%,满足精细化管理需求;

3个断面的监测数据显示,淤泥塘周边渗流速度显著高于正常区域,验证了监测点优化布置的科学性。

5.2 养护技术验证

选取上游拦河坝淤土集中区域(右岸下游0+340断面)进行靶向养护试验,采用本文研发的环保复合材料与施工参数,对比养护前后的渗流指标(表4)。结果表明:

靶向养护后,该区域最大渗流量由 $0.82 \text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $0.47 \text{ m}^3/\text{h}$,降低42.6%;

闸基扬压力最大值由38.6 kPa降至27.6 kPa,降低28.5%,扬压力分布标准差由4.2 kPa降至3.0 kPa,均匀性提高28.6%;

养护后6个月的监测数据显示,渗流指标稳定在正常范围(渗压 $\leq$ 设计值85%),无反弹现象,表明养护效果持久;

环保材料施工后,周边水体水质监测显示Pb含量未超标,环保性达标。

5.3 典型案例分析

2023年8月15日,第16#底板断面监测系统发出Ⅲ级预警(渗压达设计值92%),通过模糊综合评价模型计算得分88分,判定为“优先养护”。采用“靶向灌浆+局部防渗膜”方案,灌浆压力0.4 MPa、孔深4 m、孔距2 m,使用本文环保复合材料。养护后72 h,渗压降至设计值82%,预警解除;养护后6个月,渗压稳定在设计值78%~83%之间,验证了“监测-诊断-养护”闭环体系的有效性。

5.4 经济与社会效益分析

优化后的监测与养护技术应用于三河闸后,产生了显著的经济与社会效益:

监测效率提升80%,人工成本降低60%,每年节

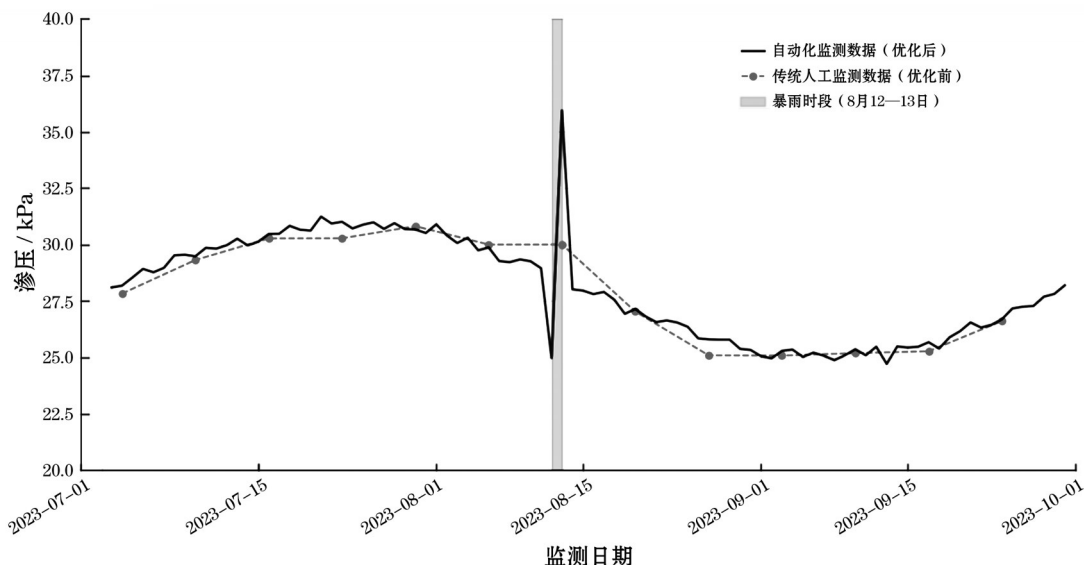


图3 三河闸6#断面优化前后渗压监测数据对比

省监测费用约28万元;

养护材料用量减少45%,养护工期缩短30%,每年节省养护费用约42万元;

闸基渗流隐患消除率达95%,工程安全运行保障能力显著提升,有效降低了流域防洪风险,社会效益显著。

6 结 语

本文针对三河闸淤泥塘、残桩等复杂地质的渗流管控难题形成的一体化技术体系,为大(1)型水闸渗流监测与养护提供了可复制的技术路径,自动化监测与靶向养护的结合模式,也为水利工程精细化管理提供了新思路,研发的环保灌浆材料与靶向施工参数对复杂地质防渗养护具有直接指导作用。本研究仍存在不足,仅针对黏性黄岗土闸基开展研究,未覆盖砂性土、杂填土等土质,靶向养护的长期耐久性也需持续跟踪监测。后续可丰富研究

对象与监测指标,本技术亦可推广至洪泽湖周边同类水闸,通过工程实践持续完善,为水利工程安全运行提供更多技术支撑。

参考文献:

- [1] 潘鑫,曹恒楼,何洋. 基于ANSYS-Fluent的挡水闸门水力特性及地震响应特征研究[J]. 中国水能及电气化, 2023(10):40-4558.
- [2] 张友明. 水闸底板测压管水位“异常”变化影响因素研究[J]. 江苏水利, 2019, 35(11):62-66.
- [3] 王豹,龙俊,李守成. 自动监测系统在三河闸测压管中的研究与应用[J]. 江苏水利, 2017, 33(2):38-40.
- [4] 徐铭,李欣,陈培然. 大型水闸观测工作精细化管理实践[J]. 江苏水利, 2018, 34(11):58-61.
- [5] 孙松,王海伟,唐建军,张状. 三河闸伸缩缝防渗处理效果分析[J]. 江苏水利, 2023(8):41-43.
- [6] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1):1-10, 39.
- [10] 张德胜,施卫东,张华,等. 不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1):66-71.
- [11] 王远成,吴文权. 基于RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型钝体绕流的数值模拟[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(6):519-523.
- [12] 郭高贵,王吉勇,董壮. 二维数学模型在泵站上游水动力研究中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(9):204-208.
- [13] 王蒙,孙楠,王颖,等. 曝气池中气液两相流速度场分布的实验研究与数值模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(10):1322-1331.
- [14] LUO C, ZHANG L, WANG T, et al. Vortex energy behaviors in the forebay of lateral pumping station for Y-type channel [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(7).
- [15] DOU H S, NIU L, CAO S L. Effects of tangential velocity distribution on flow stability in a draft tube [J]. Journal of Thermal Science, 2014, 23(5):446-453.
- [16] 窦华书,蒋威,张玉良,等. 基于能量梯度理论的离心泵内流动不稳定研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12):88-92.
- [17] 窦华书,肖美娜. 用能量梯度理论研究180°弯管内流动失稳[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(4):658-661.
- [18] 王晓升,陈毓陵,孙靖康. 分水闸站枢纽分水池流态改善措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12):108-114.
- [19] 张松达,许朴,董壮. 正向进水泵站前池流态改善模型试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(10):224-228.
- [20] ELGINDI M. Study of vortices formation in lateral intakes of pumping stations [D]. Cairo: American University in Cairo, 2024.

(上接第6页)