

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial board member

Jinze Fu

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Tangshan Fengrun District Power
Supply Branch

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Zhan Li

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

目录CONTENTS

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第4期 2025年4月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignpn.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让 给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

水利工程 | HYDRAULIC ENGINEERING

- 001 无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用策略 张书萍
Application Strategies of Unmanned Surface Vessel (USV) Surveying System in
Underwater Topographic Surveying of Sluice Projects Zhang Shuping
- 004 无人机技术在水利工程测绘施工中的实践研究 张良群, 梁骏宇
Practical Research on the Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
Technology in Surveying, Mapping, and Construction of Water
Conservancy Projects Zhang Liangqun, Liang Junyu
- 007 地下水取水井过滤器堵塞处理及维护技术 陈海涛, 杨立志, 任广智
Treatment and Maintenance Techniques for Filter Blockage in Groundwater
Extraction Wells Chen Haitao, Yang Lizhi, Ren Guangzhi
- 011 流域水资源优化配置模型及在水利水电工程中的应用 张军伟
Optimal Allocation Model of River Basin Water Resources and Its
Application in Hydraulic Engineering Zhang Junwei
- 015 水电企业安全文化评价指标体系构建及量化评估方法研究 常桢, 史兴文
Research on the Construction of an Evaluation Index System and
Quantitative Assessment Methods for Safety Culture in
Hydropower Enterprises Chang Zhen, Shi Xingwen
- 018 板桩企口缝防渗漏灌浆处理技术研究 张武一郎, 吴小华
Research on Anti-Seepage Grouting Treatment Technology
for Sheet Pile Joints Zhang Wuyilang, Wu Xiaohua
- 022 水利水电工程施工安全管理模式研究 殷海平, 徐冉, 王旭, 周许, 于坚
Research on Safety Management Model for Hydraulic and Hydroelectric
Engineering Construction Yin Haiping, Xu Ran, Wang Xu, Zhou Xu, Yu Jian
- 026 抽水蓄能电站项目结算的成本控制策略研究 陈国朋, 陈焕婉
Cost Optimization Mechanisms in Pumped-Storage Hydropower
Project Settlements Chen Guopeng, Chen Huanwan
- 029 新时期水利工程运维能力提升对策研究——以张家港市为例 霍瑜斌, 杨智杰
Research on Strategies for Enhancing Operation and Maintenance
Capacity of Hydraulic Engineering in the New Era
—A Case Study of Zhangjiagang City Huo Yubin, Yang Zhijie
- 032 水利资金监督检查现状、问题与发展策略初步研究 关艳, 许国锋
Preliminary Study on the Current Status, Problems, and Development Strategies of
Water Conservancy Fund Supervision and Inspection Guan Yan, Xu Guofeng
- 035 水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略 王涛涛, 黄余倩
Dynamic Control Strategies for Ecological Flow Constraints in Reservoir Flood
Regulation Calculations Wang Zuotao, Huang Yuqian
- 038 基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术优化 宋光辉, 林刚
Optimization of Local erosion Protection Technology for Railway Bridge Foundations
Based on Sediment Transport Model Song Guanghui, Lin Gang
- 042 水电工程临时占地水土保持恢复技术研究 祁光辉
Research on Soil and Water Conservation Restoration Technology for Temporary
Occupation of Hydropower Projects Qi Guanghui
- 046 生态袋技术在水电工程边坡水土保持中的应用 谭秀云
Application of Ecological Bag Technology in Soil And Water Conservation of Slope in
Hydropower Engineering Tan Xiuyun

050	无人测量船在水下地形测量中的应用策略 Application Strategies of Unmanned Survey Vessels in Underwater Topographic Surveys	梁居明，杨松柏，曹小伟 Liang Juming, Yang Songbai, Cao Xiaowei
053	基于多目标优化的高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性研究 Research on Vibration Suppression and Operation Stability of Pressure Pipelines in High-Head Hydropower Stations Based on Multi-Objective Optimization	郑芝鑫 Zheng Zhixin

电力工程 | POWER ENGINEERING

056	火电锅炉过热器爆管原因探究 Investigation on the Causes of Tube Burst in the Superheater of Thermal Power Boilers	黄照发 Huang Zhaofa
059	铸件机加工的自动化改造路径：从单机到柔性生产线 The Automation Transformation Path for Casting Machining: from Single Mmachines to Flexible Production Lines	林润琛 Lin Runchen
062	基于数字孪生的配电网继电保护协同优化策略 Collaborative Optimization Strategy of Relay Protection in Distribution Network Based on Digital Twin	经竹青 Jing Zhuqing
065	火电厂关键设备故障预测与健康管理系统 Key Equipment Fault Prediction and Health Management System for Thermal Power Plant	赵赞，刘宁，苗慧春，张文刚 Zhao Yun, Liu Ning, Miao Huichun, Zhang Wengang
068	风电场35KV集电线路隐患预警及故障精确定位技术探析 Analysis of Hidden Danger Warning and Fault Precise Positioning Technology of 35KV Collector Line in Wind Farm	邹本刚 Zou Bengang
071	调峰及低负荷运行对汽机侧设备的影响分析与优化策略 Analysis and Optimization Strategies of the Impact of Peak Shaving and Low-Load Operation on Turbine Side Equipment	苏晓义 Su Xiaoyi
074	工业电机变频调速电路——谐波抑制电路设计与验证 Industrial Motor Variable Frequency Speed Control Circuit — Harmonic Suppression Circuit Design and Verification	彭志 Peng Zhi

无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用策略

张书萍

广西贵港市润港工程勘察设计有限责任公司，广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025040021

摘 要： 本文聚焦无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用策略，无人船测量系统凭借小型化、高精度、抗干扰及无人作业优势，可有效适配水闸复杂环境。本文基于水闸测量特殊性与无人船技术特点，构建涵盖前期准备、现场实施、数据处理及成果应用的全流程应用策略，并通过质量控制与风险管理保障成果可靠性。实践表明，该策略能实现厘米级精度测量，并缩短作业周期，为水闸工程安全决策、清淤维护及风险预警提供精准数据支撑，显著提升水下地形测量的智能化与高效化水平。

关 键 词： 无人船测量系统；水闸工程；水下地形测量；应用策略

Application Strategies of Unmanned Surface Vessel (USV) Surveying System in Underwater Topographic Surveying of Sluice Projects

Zhang Shuping

Guigang Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract： This paper focuses on the application strategies of unmanned surface vessel (USV) surveying systems in underwater topographic surveying for sluice projects. Leveraging its advantages of miniaturization, high precision, anti-interference capabilities, and unmanned operation, the USV surveying system can effectively adapt to the complex environments of sluice projects. Based on the specific characteristics of sluice surveying and the technical features of USVs, this paper constructs a comprehensive application strategy that encompasses the entire process, including preliminary preparation, on-site implementation, data processing, and result application. Additionally, it ensures the reliability of the results through quality control and risk management. Practical applications have demonstrated that this strategy can achieve centimeter-level precision measurements and shorten the operational cycle, providing precise data support for safety decision-making, dredging maintenance, and risk early warning in sluice projects. It significantly enhances the intelligence and efficiency of underwater topographic surveying.

Keywords： Unmanned Surface Vessel (USV) Surveying System; sluice projects; underwater topographic surveying; application strategies

引言

水闸的安全稳定运行对防洪排涝、水资源调配至关重要，而其水下地形的动态变化是影响过流能力与结构稳定性的核心因素。传统测量方法难以应对水闸狭窄、高干扰的复杂水下环境。无人船测量系统凭借小型化、自动化、高精度及多传感器集成的优势，为解决这一难题提供了有效技术手段。本文聚焦水闸工程特殊需求，结合无人船技术特点，构建一套涵盖前期准备、现场实施、数据处理、成果应用及质量控制的全流程应用策略，旨在为提升水闸水下地形测量的精度、效率与安全性提供技术支撑，推动其在水利工程智慧化监测中的规范化应用。

一、水闸工程水下地形测量特点与无人船系统技术分析

（一）水闸工程水下地形测量的特殊性与挑战

水闸工程水下地形测量作为水利工程监测的关键环节，其核

心特质与技术挑战紧密交织。在测量环境上，聚焦于闸室、消力池等狭窄区域，水下密集的闸墩、预埋件等障碍物极易导致设备碰撞、信号遮挡并形成测深盲区，加之泄水期高速射流与非泄水期回流漩涡对声速传播和平台稳定性的干扰，使测量条件异常复杂。精度要求则呈现显著差异化，闸基冲刷坑、闸门底部间隙等

关键结构部位需达到厘米级精度，而普通区域可放宽至分米级，且数据必须与水闸上部结构的工程独立坐标系严格统一，否则无法进行“水上-水下”整体受力分析。安全与效率的平衡是传统方法难以突破的瓶颈，有人船因尺寸限制无法进入狭窄水域且风险高，潜水探测受水深和水质影响效率低下，单波束测深则因数据密度不足难以完整呈现地形细节和局部病害。更重要的是，其数据应用目标远不止于获取高程，而是服务于工程安全决策，需关联冲淤动态评估过流能力与清淤需求，识别结构缺陷为维修提供依据，并通过长期监测对比历史数据，分析冲淤速率与缺陷发展趋势以实现风险预警。

（二）无人船测量系统核心技术组成

无人船系统利用船内搭载的 GPS 全球定位系统、ADCP 智能测深系统、毫米波雷达自动避障系统等，向被测水下发射波束开角 5° 的单波束声波，根据设备回馈的水底反射的声波信号，依据声波传播时间、传播速度和幅度，计算出水底平面坐标和高程数据^[1]。无人船测量系统是专为水闸水下地形测量“狭窄空间、高精度、抗干扰”需求设计的自动化、多传感器集成平台，其船体设计为 2~5 米高强度玻璃钢，采用双电机矢量推进，具备原地转向和 $\geq 2.5\text{m/s}$ 的抗流能力，轻量化便于转运。定位导航系统采用北斗/GPS 双模 RTK，实现厘米级定位，并由高频惯性导航补偿信号遮挡偏差^[2]。核心传感器包括高密度多波束测深仪、高分辨率侧扫声呐及流速水位计，能精确采集地形、识别结构缺陷并校正环境干扰。数据传输通过 4G/5G 与微波双通道实现远程监控，并具备自动返航和碰撞预警等应急功能^[3]。数据预处理模块通过实时滤波、坐标转换和云端备份，确保数据高效、精准，可直接用于工程设计分析。

（三）无人船系统应用于水闸测量的优势分析

相较于传统测量方法，无人船系统在水闸工程水下地形测量中展现出全面优势。在安全上，其“岸上操控、无人作业”模式彻底规避了人员进入高速水流和狭窄空间的风险，将人员安全风险发生率降至零^[4]。精度方面，通过多波束测深与 RTK 定位融合，测深中误差 $\leq \pm 3\text{cm}$ ，远超传统方法，高密度采样能发现单波束遗漏的微小冲刷坑，且坐标偏差 $\leq 2\text{cm}$ ，确保了水上水下数据精准关联。效率提升尤为突出，单日作业面积可达 $5000\sim 10000\text{m}^2$ ，数据处理自动化，使整个测量周期缩短至传统方法的 $1/5$ 至 $1/100$ ，极大减少了对水闸正常运行的影响。数据价值上，系统能同步采集地形、结构缺陷及环境数据，形成关联数据集并生成直观的三维模型，为工程决策和长期监测提供精准依据^[5]。其小型船体、高分辨率侧扫声呐及 IP67 防水设计，使其能轻松进入狭窄区域、在浊水中识别缺陷，并适应小雨天气，展现出卓越的复杂环境适配能力。

二、无人船测量系统在水闸工程中的应用策略设计

（一）前期准备与方案设计策略

前期准备需以“精准适配水闸场景、规避潜在风险”为核心，构建从需求拆解到方案落地的完整链路。需开展全面的现场

勘查与需求梳理，实地记录水闸水域范围、闸体结构尺寸，分时段实测水流速度，标记水下障碍物位置与水质透明度，绘制“水闸水下环境示意图”；同时结合工程目标拆解测量需求，明确不同区域的精度标准，同步确定成果形式及应用场景^[6]。设备选型需紧扣水闸环境特性，狭窄水域选用 2~3m 长的小型抗流无人船，开阔库区则适配 4~5m 长的大续航船体；传感器配置需按需组合，冲淤监测以“多波束测深仪+GNSS RTK”为核心，结构缺陷检测需额外搭载侧扫声呐，作业前 24 小时内完成测深仪零点校准、GNSS 基站设置及惯导静态校准，消除船体吃水与定位偏移误差。航线规划采用“网格覆盖+重点加密”模式，普通区域航线间距设为 2~3m，闸基、闸门底部等关键区域缩至 0.5~1m，避开障碍物设置 1m 以上安全缓冲区，在起点、终点及转弯点布设 3~5 个已知高程校验点；同步制定安全预案，明确信号中断时无人船自动返航流程、流速超 2.5m/s 时的停工机制，以及暴雨、大风等恶劣天气的应急处置方案，确保前期准备覆盖“环境-设备-航线-风险”全要素。

（二）现场测量作业实施策略

现场作业需遵循“试测验证-正式测量-动态调整”的流程，保障数据质量与作业安全^[7]。试测阶段选取闸前 $100\sim 200\text{m}^2$ 的典型区域开展，采集 3~5 组数据后对比校验点实测高程与已知高程，若关键区域误差超 $\pm 3\text{cm}$ ，需调整测深仪增益、GNSS 采样频率等参数，直至精度达标；同时模拟信号中断、障碍物避让场景，测试无人船自动返航与紧急制动功能，确保应急机制有效。正式测量时，无人船按预设航线自动作业，操作人员在岸上控制室实时监控船体位置、航速、电池电量及数据传输状态，每 30 分钟记录一次水流速度、水位与水温；针对闸基冲刷坑、闸门底部等隐蔽区域，采用“往返航线”重复测量，避免测深盲区；作业过程中若遇水下漂浮物等障碍物，立即远程操控绕开，无法绕开时暂停作业并清理；若遇流速骤增或暴雨等恶劣天气，立即召回无人船，待环境稳定后重新规划航线。整个现场作业需同步填写《无人船测量作业日志》，详细记录作业时间、环境参数、设备状态及异常处理情况，确保过程可追溯。

（三）数据处理与三维建模策略

数据处理需构建“预处理-融合-建模-验证”的闭环流程，提升数据可用性与模型精度^[8]。预处理阶段采用“ 3σ 准则”剔除水流干扰导致的测深异常值，保留有效数据；将 GNSS 采集的 WGS84 坐标转换为水闸工程坐标系，结合实时水位数据修正测深值；根据实测水温通过公式（声速 = $1449.2 + 4.6 \times \text{水温} - 0.055 \times \text{水温}^2 + 0.00029 \times \text{水温}^3$ ）计算声速，校正测深仪参数，消除水温对测深精度的影响。数据融合阶段整合多源数据，将多波束测深的地形高程数据、侧扫声呐的结构缺陷图像与 GNSS 定位数据关联至同一坐标系，形成“高程-图像-位置”的三维数据集，同时将原始数据转换为 AutoCAD、ArcGIS 可识别的 .shp 或 .tif 格式^[9]。三维建模选用专业水下地形软件，基于预处理后的高程数据构建 TIN 模型，叠加侧扫声呐图像标注冲刷坑位置、淤积厚度及结构缺陷；建模完成后选取 10~15 个未参与建模的校验点进行验证，若关键区域平均误差 $\leq \pm 3\text{cm}$ 、普通区

域 $\leq \pm 5\text{cm}$ ，判定模型合格，否则重新优化数据处理参数并二次建模。

（四）成果应用与工程决策支持策略

成果应用需聚焦“可视化呈现、场景化落地”，将测量数据转化为工程决策依据。基础成果层面输出1:500~1:2000比例尺的水下地形图、冲淤分析图及侧扫声呐缺陷分布图；核心成果为水下地形三维模型，通过WebGIS平台发布，支持管理人员旋转、缩放及细节查询，同步编制工程分析报告，包含数据精度评估、冲淤动态分析及结构安全建议^[10]。在具体应用场景中，安全评估环节依据三维模型分析闸基冲刷深度是否超设计允许值、闸前淤积是否影响过流能力，如某泄洪闸实测闸基冲刷深度2.5m（设计允许2m），据此提出闸基防护加固建议；维修养护规划结合缺陷分布图制定方案，如针对闸墩水下1~3m处混凝土剥落，设计水下机器人修补流程；工程改造阶段提供精准地形数据，如闸室底部高程实测值用于新闸门安装高程设计；长期监测则对比不同时期的测量成果，分析冲淤速率与缺陷发展趋势，若某防洪闸冲刷速率达0.5m/年，建议将监测周期缩短至半年一次。同时建立“数据-模型-决策”联动机制，将测量成果导入水闸安全监测平台，与水位、流量、结构应力数据协同分析，通过三维模型演示、冲淤动态对比图等可视化形式，辅助管理人员制定清淤、维修、改造等科学决策。

（五）质量控制与风险管理策略

质量与风险管控需贯穿“事前-事中-事后”全流程，构建多层次保障体系。事前预防阶段，作业前24小时内对无人船动力系统、传感器灵敏度及数据传输设备进行全面检修，确保电池电量充足、GNSS信号稳定；对操作人员开展专项培训，覆盖无人船操控、应急处理及数据处理流程，考核合格后方可上岗。事中控制阶段，现场作业每1小时抽查一次校验点数据，对比实测高程

与已知高程，若误差超允许范围立即暂停作业调整参数；严格填写《作业日志》，记录每时段环境参数、设备状态及异常情况，确保过程可追溯；安排专人负责应急值守，实时监控天气与水流变化，提前规避恶劣环境影响。事后核验阶段实施“三级核验”制度，作业人员先对数据完整性、格式正确性进行自检，技术负责人复核数据精度与建模合理性，最后由第三方机构抽检10%的测量区域，验证成果可靠性，核验合格后方可提交应用。针对核心风险点制定专项应对方案，设备风险方面，配备备用电池与传感器，采用本地+云端双备份存储数据，每月开展设备维护；环境风险方面，作业前实测水流速度，超2.5m/s时暂停作业，提前勘查标注障碍物位置；数据风险方面，采用专业软件进行坐标转换并人工复核，建模后多校验点验证；安全风险方面，航线设置安全缓冲区，配备应急遥控器，信号中断时无人船自动返航。同时建立持续改进机制，每次作业后召开复盘会，总结问题并更新《作业手册》，跟踪无人船与传感器技术发展，适时升级设备以适配水闸工程新需求，不断提升应用策略的科学性与适配性。

三、结束语

本文针对水闸工程水下地形测量的特殊挑战，构建了一套涵盖前期准备、现场实施、数据处理、成果应用及质量控制的全流程无人船应用策略，形成了闭环、科学、可操作的技术体系，有效解决了传统测量方法的瓶颈，为工程安全决策提供了精准支撑。随着人工智能、大数据等前沿技术与无人船的深度融合，测量将向更高阶的智能化、自主化发展。因此，持续深化技术研究、完善标准规范、加强协同创新，是推动该技术更好地服务于智慧水利发展、保障水利工程长治久安的关键。

参考文献

[1] 魏净静, 俞瑾, 冯露. 无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用 [J]. 治淮, 2024(10): 36-38. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9243.2024.10.018.

[2] 徐锦泉, 胡金林. 水下地形测量方法探讨 [J]. 现代测绘, 2024, 47(2): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4097.2024.02.006.

[3] 顾洁. 智能无人船在水下地形测量中的应用 [J]. 经纬天地, 2025(1): 65-67. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7563.2025.01.014.

[4] 李海洲. 无人测量船在水下地形测量中的应用 [J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(7): 102-103. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8853.2024.07.055.

[5] 刘娣, 何仁德. 智能无人船在水下地形测量中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(28): 185-188. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.28.041.

[6] 刘士付. 水下地形测量技术分析 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(23): 229-230. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3818.2020.23.107.

[7] 张红伟, 殷冰冰. CORS RTK 无验潮技术在水下地形测量的应用 [C]//2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集. 2024: 1-6.

[8] 杨亮, 任玖, 谭詹. 无人船水下地形测量与精度评估 [J]. 四川水利, 2023, 44(3): 160-163, 168.

[9] 薛伟. 无人船测量系统在河道水下地形测量中的应用 [J]. 中国高科技, 2024(1): 92-94. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.01.25.

[10] 于南洋, 董堰川, 孔淋淋. 水下地形测量中无人船测量系统的应用 [J]. 中国水运, 2023(17): 93-95. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.09.033.

无人机技术在水利工程测绘施工中的实践研究

张良群¹, 梁骏宇²

1. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 淮安新水建设有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2025040001

摘 要 : 随着测绘技术的不断发展, 无人机因其高效、灵活和成本低等优势, 已广泛应用于水利工程的测绘与施工中。通过搭载高精度传感器, 无人机可实现对水域地形、堤坝结构及施工进度快速获取和动态监测, 有效提升工程设计的科学性和施工管理的智能化水平。在不同施工阶段, 无人机可辅助完成地形测量、施工放样、质量检验及竣工验收等任务, 具有显著的技术和经济价值。该技术为水利工程数字化、信息化建设提供了有力支撑。

关 键 词 : 无人机技术; 水利工程; 测绘; 施工管理; 智能化

Practical Research on the Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology in Surveying, Mapping, and Construction of Water Conservancy Projects

Zhang Liangqun¹, Liang Junyu²

1. Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huai'an Xinchui Construction Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : With the continuous development of surveying and mapping technology, unmanned aerial vehicles (UAVs) have been widely applied in the surveying, mapping, and construction of water conservancy projects due to their advantages of high efficiency, flexibility, and low cost. Equipped with high-precision sensors, UAVs can rapidly acquire and dynamically monitor water terrain, dam structures, and construction progress, effectively enhancing the scientificity of engineering design and the intelligence level of construction management. During different construction phases, UAVs can assist in tasks such as topographic surveys, construction staking, quality inspections, and completion acceptances, demonstrating significant technical and economic value. This technology provides strong support for the digitalization and informatization of water conservancy projects.

Keywords : UAV technology; water conservancy projects; surveying and mapping; construction management; intelligence

引言

在水利工程日益复杂与精细化的背景下, 传统测绘与施工方式已难以满足高效率、高精度的实际需求。无人机技术的兴起, 为水利工程带来了全新的解决方案。凭借快速部署、高清成像与多维数据采集能力, 无人机不仅优化了测绘手段, 更推动施工管理走向智能化与精细化。其在地形勘测、施工监控及数据分析等方面展现出巨大潜力, 正逐步成为推动水利工程现代化升级的重要技术力量。

一、无人机技术在水利工程测绘中的应用原理与特点

无人机技术作为遥感与地理信息系统发展的重要产物, 已逐步渗透到各类工程建设领域, 尤其在水利工程测绘中展现出广阔的应用前景。传统的水利测绘主要依赖人工踏勘和地面测量, 作业周期长、精度受限、受地形条件影响较大。而无人机则通过搭载高精度的摄影测量系统、激光雷达、红外传感器等设备, 实现对水域、堤坝、涵闸、渠道等目标区域的高效、快速、立体化数

据采集。这一技术突破了人力难以触及的地带限制, 尤其适用于山地、水网密集区等复杂环境下的测绘任务, 显著提高了工作效率和测量精度, 为水利工程提供了科学、及时的数据支持。

在应用原理上, 无人机主要依靠 GNSS (全球导航卫星系统) 与 IMU (惯性测量单元) 实现飞行控制与定位, 通过设定航线进行自主飞行作业, 完成空中影像或激光点云数据的采集。采集的数据经过影像拼接、三维建模、地面控制点校正等处理, 可形成高精度的正射影像图、数字高程模型 (DEM)、数字表

面模型（DSM）等成果，为水利设计单位提供真实、可靠的地形信息支撑。同时，通过多频次航测作业，无人机可实现动态变化监测，如监测水位涨落、堤坝形变、施工进度等，有助于工程管理部门掌握项目实施的实时状态。特别是在洪涝灾害或险情处置时，无人机具备快速响应和图像回传能力，能够第一时间获取现场态势，为决策指挥提供直观依据。

无人机测绘在实际水利工程中的特点还体现在其高效率、低成本与安全性高等方面。相较传统地面测量，无人机一次飞行可覆盖数平方公里区域，显著缩短测绘周期，节省人力资源；数据采集方式灵活多样，既可进行二维图像采集，也能获取三维立体地形信息，适配性强；操作过程中可避免测量人员进入危险区域，降低安全风险。同时，随着图像识别、AI建模等智能算法的融合，无人机技术正向智能化、自动化方向发展，在复杂地貌识别、工程缺陷预警、施工进度对比等方面具备良好前景。总的来看，无人机测绘技术已逐步成为水利工程测绘施工不可或缺的重要工具，对提高工程管理水平、推动水利信息化建设起到了积极作用。

二、无人机在水利施工阶段的关键实践环节

在水利工程的实际施工过程中，无人机不仅仅承担测绘任务，更深入融入施工各个环节，发挥着重要的技术支撑作用。首先，在施工前期的准备阶段，无人机通过快速、精准地获取施工区域地形数据，为工程放样、施工布局、土方量计算等提供基础资料。利用无人机获取的正射影像和三维地形模型，设计单位能够直观掌握地貌变化、水系分布与高差关系，有助于优化施工设计方案，提升设计科学性。此外，无人机还可用于识别施工现场的障碍物、植被分布和水体位置，为工程选址、道路布设、材料堆放等提供决策依据，节省前期勘测时间，提高规划效率。

进入施工中期，无人机在现场监控与过程管理中的价值更加凸显。通过设定定期巡航航线，无人机可对施工现场进行高频次、高分辨率的图像采集，实现施工进度动态可视化。项目管理者可通过无人机获取的影像和模型，掌握各施工单元的实际进展与设计计划的对比，及时发现滞后环节和潜在问题，实现精细化管理。在高边坡开挖、坝体填筑等重要施工环节中，无人机还能监测土方分布、填筑高度及坡度变化，辅助技术人员判断施工质量是否符合规范。同时，在封闭区域、危险区域或水上施工点，无人机可代替人工巡查和检测，大幅提升作业安全性，避免安全事故发生。

在施工后期及竣工验收阶段，无人机同样发挥着重要作用。通过对比施工前后不同时期的影像资料与模型数据，可清晰展示工程完成效果和变形情况，为工程验收提供直观依据。在竣工资料整理中，无人机所采集的空间数据、影像资料和三维模型可作为重要工程档案，实现可视化存档和后期维护参考。同时，对于需要进行生态修复、景观绿化等环节的水利工程，无人机还可用于评估植被恢复情况、水体清理效果等，确保工程环境目标的达

成。整体来看，无人机技术已深度嵌入水利施工全过程，贯穿前期勘察、中期监管与后期验收，显著提高工程效率、安全性与管理透明度，是推动现代水利工程施工方式转型的重要技术手段。

三、无人机测绘施工技术的优势与成效分析

无人机测绘施工技术在水利工程中的推广应用，为传统测绘施工方式带来了深刻变革，展现出显著的技术优势。首先，从作业效率角度来看，无人机具备快速部署和自动飞行能力，能够在短时间内完成大范围区域的地形数据采集任务。一架搭载高精度传感器的无人机在数十分钟内即可获取数平方公里的高清图像与空间数据，相较人工踏勘与传统仪器测量，效率提升数倍甚至数十倍。尤其在地形复杂、交通不便、水网密集等区域，无人机无须依赖人工到场作业，减少进场难度，显著提升工作效率和任务完成的时效性。其快速响应能力也使其在应急测绘和灾后评估中具有不可替代的优势。

其次，从测绘精度与信息维度来看，无人机通过搭载多种传感设备，如可见光相机、激光雷达、多光谱相机等，能够同时获取二维影像与三维空间信息，生成高精度的正射影像图、数字高程模型与三维点云数据。这些数据不仅满足工程设计对精度的严格要求，还支持体积计算、水流路径分析、施工断面控制等多项技术需求。通过前后期数据比对，还可分析地形变化、水流冲刷、边坡变形等关键参数，为施工质量监控提供数据支撑。无人机获取的可视化成果还可通过图形平台进行展示，为项目各方沟通与协同提供直观信息，提升管理透明度与决策效率。

在经济与管理层面，无人机测绘施工技术也显现出良好的成本效益与管理成效。相比传统测绘所需的大量人力和时间成本，无人机的使用大幅降低了人工支出，减少现场测量人员数量，也降低了因地形复杂或环境危险而带来的安全风险。此外，借助无人机对施工过程的实时记录和动态监控，项目管理人员可及时掌握施工进度、优化资源配置，减少误工与返工，提高工程整体运行效率。同时，无人机采集的数据具备可追溯性，可在后期用于工程验收、档案整理及维护阶段，提升项目全周期的信息化管理水平。综合来看，无人机测绘施工技术已成为提升水利工程现代化管理能力、实现数字化转型和智能化施工的重要抓手，在实践中取得了良好的应用效果和经济社会效益。

四、无人机辅助水利工程测绘施工的典型实践案例

在四川省广安市渠江流域综合治理工程中，无人机技术的引入为测绘施工提供了有力支撑，成为该项目数字化建设的重要标志。渠江流域属典型的丘陵地貌，地势起伏、水系交错，传统测量方式受限严重，既耗时耗力，又存在安全隐患。项目初期，采用大疆 M300 RTK 无人机搭载禅思 P1 高精度摄影测量相机，对全长约62公里的治理河段进行高密度航测。通过布设60个地面控制点，飞行高度定为120米，重叠率控制在前向80%、旁向70%，共获取图像数据超过20,000张。经过Pix4D软件处理，生

成精度优于10厘米的正射影像图及三维模型，为河道疏浚、堤防加固等施工设计提供了详尽的地形数据支持。

在项目施工过程中，无人机进一步用于动态监控与过程管理。例如在渠江主干段的堤坝加高加固作业中，施工单位每周开展一次定期航拍，获取坝体高度、边坡角度、施工区域进度等信息，并生成点云与高程剖面图，与施工设计模型进行比对分析。一次测绘结果显示，某标段填筑高度偏差达到17厘米，超出规范误差限值。项目部据此及时通知施工单位进行返工，避免了质量问题的累积。同时，利用无人机航拍视频与施工影像资料建立的可视化平台，项目管理单位可远程查看工程全貌，提升调度效率。整个项目施工期内，累计完成无人机航测78次，覆盖面积达310平方公里，极大减轻了测量人员工作强度，提高了进度控制能力。

在工程验收阶段，无人机再次发挥关键作用。通过对比施工前后数据成果，项目单位利用无人机影像自动识别水工建筑物、堤坝形态及岸线变化，并与原始设计图对照，进行量化评估。例如，在武胜段支流合流口处，新建的溢流坝体在影像测量中长度为152.7米，与设计长度153米误差控制在0.3%，满足验收精度标准。验收组采用无人机三维模型辅助核查渠道护砌、生态湿地布局及水面宽度，提升验收效率约45%。该项目的实践充分证明了无人机在水利工程全流程中的技术优势与应用潜力，不仅提高了测绘效率和施工质量，还推动了工程管理方式向数字化、智能化转型，为同类工程提供了宝贵的经验范式。

五、无人机技术在水利测绘施工中的发展趋势与挑战

随着遥感、人工智能与5G通信等技术的迅猛发展，无人机技术在水利测绘施工中的应用正迈向智能化、系统化和多场景融合的新阶段。未来的发展趋势之一是“无人+智能”的深度融合，即通过集成AI图像识别、边缘计算与自动建模算法，实现无人机自主识别地貌、水体结构和工程构筑物状态，从而简化后期数据处理流程，提升作业自动化水平。同时，多平台协同作业也将成为主流方向，通过固定翼与多旋翼无人机组合使用，在长距离巡航与局部精细测绘之间实现优势互补。此外，结合北斗高精度定位系统与云计算平台，水利工程将逐步建立起基于无人机数据

的数字孪生系统，实现从测绘、设计、施工到运维的全生命周期管理。

尽管前景广阔，无人机技术在实际应用中仍面临诸多挑战。首先是测绘精度与数据处理能力的匹配问题。虽然当前无人机搭载的传感器性能已大幅提升，但在极端天气、复杂地形及植被覆盖密集区域，影像畸变、点云精度下降等问题仍较常见，影响测绘成果的稳定性。其次是数据处理能力滞后于采集速度，大量高精度图像与点云数据对计算机硬件性能、存储系统以及处理软件算法提出更高要求，项目单位若缺乏相应技术支撑，往往难以发挥无人机全周期效能。此外，在水利施工现场，人员复杂、作业频繁，飞行安全与空域管理也成为一大难题，特别是在城市河道、航运水域附近，飞行审批流程繁琐，操作限制较多，增加了技术推广的门槛。

为有效应对上述挑战，未来应从技术创新与制度完善两个方面同步推进。一方面，应加强对无人机测绘关键技术的研发，特别是在复杂环境下的智能识别与算法纠偏能力，推动实时建模、快速渲染等处理方式的发展，提升测绘成果的准确性与应用效率。另一方面，应制定符合水利工程特点的无人机作业标准与监管机制，明确操作规范、数据格式、成果验收等内容，提升行业应用的统一性和可复制性。同时，通过建设区域性无人机服务平台，整合设备资源与技术力量，降低中小项目的使用门槛，扩大技术覆盖面。无人机技术只有不断突破瓶颈、融合多学科优势，才能在水利测绘施工中持续释放潜力，助力行业向高质量、信息化和绿色化方向发展。

六、结语

无人机技术以其高效、精准、安全的特性，已深度融入水利工程测绘与施工各阶段，极大提升了工作效率与管理水平。从前期地形勘测到中期施工监控，再到后期成果验收，无人机展现出全流程支撑能力，推动水利工程向数字化、智能化迈进。尽管仍面临技术精度、数据处理与监管等方面的挑战，但随着相关技术的不断进步与应用体系的逐步完善，其发展潜力不容忽视，将在未来水利建设中发挥更加关键的作用。

参考文献

[1]杨玉川,杨兴国,周顺文,等.小型无人机技术在河道治理工程中的应用研究[J].水电站设计,2018,34(03):30-35.DOI:10.16671/j.cnki.cn51-1382/tv.2018.03.010.
[2]贾望军.无人机航测技术在水利工程测绘中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021,(08):187-188.DOI:10.13487/j.cnki.imce.019870.
[3]李松勤.无人机航测技术在水利工程测绘中的应用[J].住宅与房地产,2021,(18):233-234.
[4]张於林,李春花.基于无人机技术的水利工程建设管理及河道生态环境保护应用实践[J].生态与资源,2024,(10):92-94.
[5]叶兰正.固定翼无人机航测技术在河道地形测绘中的应用及精度分析[J].科技视界,2025,15(08):48-50.

地下水取水井过滤器堵塞处理及维护技术

陈海涛^{1,2}, 杨立志^{1,2}, 任广智^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/WCEST.2025040002

摘 要 : 地下水取水井过滤器的堵塞问题严重影响水井的正常运行与水资源的有效利用。本文深入剖析了地下水取水井过滤器堵塞的原因, 涵盖物理、化学和生物等多方面因素; 详细阐述了堵塞的检测方法, 包括压力测试、流量监测以及井内成像技术等; 系统介绍了物理清洗、化学清洗和生物清洗等处理技术, 同时探讨了维护技术, 如定期检测、反冲洗以及优化过滤器设计等。通过实际案例分析, 验证了相关处理及维护技术的有效性。本文旨在为解决地下水取水井过滤器堵塞问题提供全面的技术参考, 保障地下水取水井的高效稳定运行。

关 键 词 : 地下水取水井; 过滤器堵塞; 处理技术; 维护技术

Treatment and Maintenance Techniques for Filter Blockage in Groundwater Extraction Wells

Chen Haitao^{1,2}, Yang Lizhi^{1,2}, Ren Guangzhi^{1,2*}

1. Harbin Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : The blockage of filters in groundwater extraction wells seriously affects the normal operation of wells and the efficient utilization of water resources. This paper provides an in-depth analysis of the causes of filter blockage in groundwater extraction wells, encompassing physical, chemical, and biological factors. It elaborates on detection methods for blockage, including pressure testing, flow monitoring, and in-well imaging techniques. The paper systematically introduces treatment techniques such as physical cleaning, chemical cleaning, and biological cleaning, while also discussing maintenance techniques, including regular inspection, backwashing, and optimizing filter design. Through practical case studies, the effectiveness of the relevant treatment and maintenance techniques is verified. This paper aims to provide a comprehensive technical reference for addressing filter blockage issues in groundwater extraction wells, ensuring their efficient and stable operation.

Keywords : groundwater intake well; filter clogging; treatment technology; maintenance technology

引言

随着经济社会的快速发展, 对水资源的需求日益增长, 地下水作为重要的水源之一, 在供水体系中占据着关键地位。地下水取水井是获取地下水的重要设施, 而过滤器则是取水井的核心部件, 其作用是阻止含水层中的泥沙、颗粒等杂质进入井管, 保证井水的水质和水量。然而, 在实际运行过程中, 过滤器极易出现堵塞问题, 这不仅会导致水井出水减少、能耗增加, 严重时甚至会使水井报废, 极大地影响了地下水的有效开发利用。因此, 深入研究地下水取水井过滤器堵塞处理及维护技术具有重要的现实意义。

一、地下水取水井过滤器堵塞原因分析

(一) 物理堵塞

物理堵塞是最常见的堵塞原因之一, 主要是由于含水层中的

细小颗粒物质, 如细砂、黏土等, 在水流的作用下进入过滤器, 逐渐堆积并堵塞过滤孔隙。当含水层的颗粒级配不合理, 或者在水井施工过程中对含水层造成扰动, 使得原本稳定的颗粒结构被破坏, 就更容易引发物理堵塞。此外, 过滤器的孔径选择不当,

若孔径过大，无法有效拦截细小颗粒；若孔径过小，则会导致水流阻力增大，也会增加物理堵塞的风险。

（二）化学堵塞

化学堵塞主要是由水中的化学成分发生化学反应，产生沉淀物质而引起的。地下水中通常含有钙、镁、铁、锰等金属离子以及碳酸根、硫酸根等阴离子。当这些离子的浓度达到一定程度，且在适宜的条件下，就会发生化学反应，生成难溶性的盐类沉淀，如碳酸钙（ CaCO_3 ）、硫酸钙（ CaSO_4 ）、氢氧化铁（ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ）等。这些沉淀物质会附着在过滤器表面和孔隙内，逐渐积累导致堵塞。例如，当水中的碳酸氢钙（ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ）受热或减压时，会分解生成碳酸钙沉淀： $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ 。此外，水中的溶解氧会使铁离子氧化成氢氧化铁沉淀，进一步加剧化学堵塞。

（三）生物堵塞

生物堵塞是由于微生物在过滤器表面和周围环境中生长繁殖，形成生物膜和代谢产物堆积而导致的。地下水中存在着各种微生物，如细菌、真菌和藻类等。在适宜的温度、营养物质和溶解氧条件下，微生物会迅速生长繁殖。它们会附着在过滤器表面，分泌胞外聚合物，形成一层粘性的生物膜。生物膜不仅会直接堵塞过滤孔隙，还会吸附水中的颗粒物质和有机物，进一步加重堵塞程度。例如，硫酸盐还原菌在缺氧环境下，能够将水中的硫酸盐还原为硫化氢（ H_2S ），硫化氢会与水中的金属离子反应生成硫化物沉淀，同时，微生物的代谢产物也会对过滤器造成腐蚀，降低其使用寿命。

二、地下水取水井过滤器堵塞检测方法

（一）压力测试

通过监测取水井的进水压力和出水压力，计算压力差来判断过滤器是否堵塞。正常情况下，过滤器的压力差处于一个相对稳定的范围。当压力差明显增大时，说明过滤器的阻力增加，可能存在堵塞现象。可以在过滤器的上下游分别安装压力传感器，实时监测压力变化，并通过数据采集系统记录数据。例如，当压力差超过初始值的一定比例（如50%）时，即可初步判断过滤器存在堵塞问题。

（二）流量监测

监测取水井的出水量也是判断过滤器堵塞的重要方法。在水泵运行状态稳定的情况下，若出水量明显减少，且排除了其他因素（如水位下降、水泵故障等），则很可能是过滤器堵塞所致。可以使用流量计对出水量进行实时监测，建立流量变化曲线。当流量低于正常运行时的一定比例（如70%）时，应考虑对过滤器进行检查和处理。

（三）井内成像技术

利用井下电视、超声波成像等技术，可以直观地观察过滤器的内部状况，确定堵塞的位置和程度。井下电视通过将摄像头放入井内，拍摄过滤器的图像，能够清晰地显示过滤器表面的沉积物、腐蚀情况以及孔隙堵塞程度。超声波成像则是利用超声波在

不同介质中的传播特性，对过滤器进行扫描，生成二维或三维图像，帮助分析堵塞情况。这些成像技术能够为堵塞处理提供准确的依据，提高处理效率。

三、地下水取水井过滤器堵塞处理技术

（一）物理清洗技术

物理清洗技术是通过机械力或水力作用去除过滤器表面和孔隙内的堵塞物。常见的物理清洗方法包括反冲洗、高压水射流清洗和机械刮擦清洗等。

1. 反冲洗

反冲洗是最常用的物理清洗方法之一。通过改变水流方向，使水流从过滤器的出水端进入，从进水端流出，利用反向水流的冲击力将堵塞在过滤器孔隙内的杂质冲洗出来。反冲洗时，需要控制好反冲洗的流量、压力和时间。一般来说，反冲洗流量应大于正常工作流量的2-3倍，反冲洗压力根据过滤器的材质和结构确定，通常在0.3-0.5MPa之间，反冲洗时间为15~30分钟。反冲洗可以定期进行，如每周或每月一次，以防止堵塞物的积累。

2. 高压水射流清洗

高压水射流清洗是利用高压水枪产生的高速水流对过滤器进行冲洗。高压水流的冲击力能够有效地去除过滤器表面的顽固沉积物和堵塞物。清洗时，将高压水枪的喷头放入过滤器内部，沿过滤器的轴向和径向移动喷头，确保每个部位都能得到充分清洗。高压水射流的压力一般在10-50MPa之间，根据堵塞物的性质和堵塞程度进行调整。高压水射流清洗适用于堵塞较为严重的过滤器，但在清洗过程中要注意控制水流压力，避免对过滤器造成损坏。

3. 机械刮擦清洗

机械刮擦清洗是通过专门的机械装置，如旋转刷子、刮刀等，对过滤器表面进行刮擦，去除堵塞物。这种方法适用于过滤器表面的硬质沉积物和生物膜的清洗。在清洗时，将机械装置放入过滤器内，通过电机驱动装置旋转，使刷子或刮刀与过滤器表面接触，刮除堵塞物。机械刮擦清洗需要根据过滤器的形状和尺寸选择合适的清洗装置，操作时要注意避免刮伤过滤器表面。

（二）化学清洗技术

化学清洗技术是利用化学药剂与堵塞物发生化学反应，将其溶解或转化为可溶物质，从而达到清洗的目的。常用的化学药剂包括酸类、碱类、螯合剂和氧化剂等。

1. 酸清洗

酸清洗主要用于去除化学堵塞物，如碳酸钙、氢氧化铁等。常用的酸类药剂有盐酸（ HCl ）、硫酸（ H_2SO_4 ）和柠檬酸（ $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ）等。盐酸是一种强酸性药剂，能够快速溶解碳酸钙等碳酸盐类沉淀，但对金属过滤器有一定的腐蚀性，因此在使用时需要添加缓蚀剂。硫酸的酸性较强，适用于去除较难溶解的硫酸钙沉淀，但使用过程中要注意控制浓度，避免产生二次沉淀。柠檬酸是一种有机酸，对金属的腐蚀性较小，适用于对腐蚀性要求较高的过滤器清洗。在进行酸清洗时，需要根据堵塞物的成

分和过滤器的材质选择合适的酸类药剂和浓度，一般酸的浓度在3%～10%之间。清洗时，将酸溶液注入过滤器内，浸泡一定时间（一般为2～4小时），然后用清水冲洗干净。

2. 碱清洗

碱清洗主要用于去除生物堵塞物和油脂类污染物。常用的碱类药剂有氢氧化钠（NaOH）和碳酸钠（Na₂CO₃）等。氢氧化钠是一种强碱，能够破坏生物膜的结构，使微生物细胞溶解，从而达到清洗的目的。碳酸钠的碱性相对较弱，常用于去除油脂类污染物。在进行碱清洗时，碱溶液的浓度一般在2%～5%之间，浸泡时间为1～3小时，然后用清水冲洗干净。

3. 螯合剂清洗

螯合剂清洗是利用螯合剂与金属离子形成稳定的络合物，将金属离子从堵塞物中溶解出来。常用的螯合剂有乙二胺四乙酸（EDTA）及其钠盐等。螯合剂清洗适用于去除含有铁、锰等金属离子的堵塞物，对过滤器的腐蚀性较小。在使用螯合剂清洗时，需要根据金属离子的种类和浓度选择合适的螯合剂和浓度，一般螯合剂的浓度在1%～5%。清洗时，将螯合剂溶液注入过滤器内，浸泡一定时间（一般为3～6小时），然后用清水冲洗干净。

4. 氧化剂清洗

氧化剂清洗是利用氧化剂的强氧化性，将生物膜和有机物氧化分解，从而达到清洗的目的。常用的氧化剂有过氧化氢（H₂O₂）、次氯酸钠（NaClO）和高锰酸钾（KMnO₄）等。过氧化氢是一种温和的氧化剂，对环境友好，适用于去除生物堵塞物。次氯酸钠是一种常用的消毒剂，具有较强的氧化性，能够有效杀灭微生物，去除生物膜。高锰酸钾的氧化性很强，适用于去除较难氧化的有机物和生物膜。在进行氧化剂清洗时，需要根据堵塞物的性质和过滤器的材质选择合适的氧化剂和浓度，一般氧化剂的浓度在0.5%～3%之间。清洗时，将氧化剂溶液注入过滤器内，浸泡一定时间（一般为1～2小时），然后用清水冲洗干净。

（三）生物清洗技术

生物清洗技术是利用微生物的代谢作用，将堵塞物分解为无害物质，从而达到清洗的目的。生物清洗技术具有环保、高效、对过滤器损伤小等优点，但需要一定的培养条件和时间。生物清洗主要是利用一些具有特殊代谢功能的微生物，如嗜铁细菌、嗜硫细菌等，它们能够利用堵塞物中的铁、硫等元素作为营养物质，进行生长繁殖，同时将堵塞物分解为可溶物质。在进行生物清洗时，首先需要从受污染的环境中分离和筛选出具有清洗能力的微生物菌株，然后进行培养和驯化，使其适应过滤器的环境。将培养好的微生物菌液注入过滤器内，同时提供适宜的营养物质和生长条件，如温度、pH值、溶解氧等，让微生物在过滤器内生长繁殖，分解堵塞物。生物清洗的时间一般较长，需要数天至数周不等，具体时间取决于堵塞物的性质和微生物的生长速度。

表1：不同堵塞处理技术对比分析

处理技术	适用堵塞类型	优点	缺点	操作难度	成本
反冲洗	物理堵塞（轻度）	操作简单、成本低	对顽固堵塞效果有限	低	低

高压水射流	物理 / 化学堵塞（中度）	清除效果好、效率高	可能损伤过滤器、能耗较高	中	中
酸清洗	化学堵塞（钙 / 铁沉淀）	针对性强、溶解速度快	腐蚀性强、需中和处理	中	中
生物清洗	生物堵塞	环保、无二次污染	处理周期长、依赖环境条件	高	高

四、地下水取水井过滤器维护技术

（一）定期检测

建立定期检测制度，对过滤器的运行状况进行监测和评估。定期检测的内容包括压力测试、流量监测、水质分析以及井内成像检查等。通过定期检测，可以及时发现过滤器的潜在问题，如轻微堵塞、腐蚀等，以便采取相应的维护措施，避免问题进一步恶化。一般来说，对于正常运行的取水井，建议每月进行一次压力测试和流量监测，每季度进行一次水质分析，每年进行一次井内成像检查。

（二）反冲洗

除了在过滤器堵塞时进行反冲洗处理外，还应定期进行预防性反冲洗。定期反冲洗可以有效地清除过滤器表面和孔隙内的杂质，防止堵塞物的积累，延长过滤器的使用寿命。反冲洗的周期和参数应根据取水井的实际运行情况确定，一般来说，反冲洗周期为每周至每月一次，反冲洗流量、压力和控制时间的控制与堵塞处理时的反冲洗相同。

（三）优化过滤器设计

在新建取水井或更换过滤器时，应根据含水层的特性、水质情况以及取水量等因素，优化过滤器设计。选择合适的过滤器类型、材质和孔径，确保过滤器既能有效地拦截杂质，又能保证水流的通畅。例如，对于颗粒较粗的含水层，可以选择孔径较大的过滤器；对于含有腐蚀性物质的地下水，应选择耐腐蚀的过滤器材质，如不锈钢、玻璃钢等。此外，还可以采用多层过滤结构，提高过滤效果。

（四）水质预处理

对地下水进行适当的预处理，去除水中的杂质、悬浮物、有机物和微生物等，减少其对过滤器的污染。常见的水质预处理方法包括沉淀、过滤、消毒等。沉淀可以去除水中的较大颗粒杂质；过滤可以进一步去除细小颗粒和悬浮物；消毒可以杀灭水中的微生物，防止生物堵塞。通过水质预处理，可以降低过滤器的堵塞风险，延长其使用寿命。

表2：过滤器维护技术效果评估表

维护措施	实施频率	主要效果指标	长期效益
定期反冲洗	每周 1-2 次	出水量保持率 ≥ 90%	延长过滤器寿命 1-2 年
水质预处理	持续运行	悬浮物去除率 ≥ 85%	降低堵塞发生率 60% 以上
年度成像检测	每年 1 次	堵塞位置定位准确率 ≥ 95%	提前发现隐患，减少突发故障

五、结论

地下水取水井过滤器堵塞是一个常见且复杂的问题，其原因涉及物理、化学和生物等多个方面。通过采用科学有效的检测方法，能够准确判断堵塞的原因和程度，为后续的处理提供依据。物理清洗、化学清洗和生物清洗等处理技术各有优缺点，应根据堵塞的具体情况选择合适的处理方法，或多种方法联合使用，以

达到最佳的清洗效果。同时，加强过滤器的维护工作，包括定期检查、反冲洗、优化设计和水质预处理等，能够有效预防堵塞的发生，延长过滤器的使用寿命，保障地下水取水井的高效稳定运行。在实际应用中，应根据不同地区的地质条件、水质特点和取水井的运行情况，制定个性化的堵塞处理及维护方案，不断提高地下水取水井的管理水平和水资源利用效率。

参考文献

- [1] 杨万邦. 活性污泥胞外聚合物拓展模型与应用 [D]. 北京建筑大学, 2024.
- [2] 汪方宝. 整机电子装联技术 [M]. 电子工业出版社: 201705: 270.
- [3] 潘涛, 骆坚平, 郭行. 废水处理及回用工程技术手册 [M]. 化学工业出版社: 202401: 940.
- [4] 鲁敏, 冯欣玲. 往复压缩机入口过滤器堵塞的原因分析及解决措施 [J]. 化工技术与开发, 2025, 54(21): 79-81.
- [5] 姜波, 刘贞姬, 王梓俨, 等. 不同工况下网式过滤器有效过滤时间研究 [J]. 中国农村水利水电, 2025, (09): 121-126.
- [6] 牛牛. 减压渣油泵入口过滤器焦质堵塞分析 [J]. 化工管理, 2024, (33): 129-131.
- [7] 史恩泽, 陈国文, 王子元. 水轮发电机冷却水过滤器及排污管改造 [J]. 上海电气技术, 2024, 17(03): 33-36.
- [8] 李路明, 朱德兰, 张锐, 等. 环形流道叠片过滤器水头损失和过滤性能试验研究 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 140-148.
- [9] 周志雄, 高学军, 张宏伟. 板式过滤器在解决蓄热式热力焚化炉阻火器堵塞问题上的应用 [J]. 信息记录材料, 2024, 25(05): 10-12.
- [10] 郑伟华, 周灵杰, 吴美玲, 等. 蜡油加氢注水管道过滤器堵塞原因分析 [J]. 天津科技, 2023, 50(11): 25-29.

流域水资源优化配置模型及在水利水电工程中的实践

张军伟

西平县河湖水务中心, 河南 驻马店 463900

DOI:10.61369/WCEST.2025040003

摘 要： 本文聚焦流域水资源优化配置模型及其在水利水电工程中的应用实践。阐述流域水资源优化配置的内涵、目标及面临的供需矛盾、污染、气候变化、多目标协调等挑战。详细介绍多目标优化配置模型、系统动力学模型、模糊数学模型、大数据与人工智能模型等关键模型及其构建方法与优势。探讨模型在水利水电工程规划、水资源调度、生态保护等方面的实践应用。强调模型对提高水资源利用效率、保障工程效益、促进生态可持续发展的重要作用，为流域水资源科学管理与水利水电工程可持续发展提供参考。

关 键 词： 流域水资源；优化配置模型；水利水电工程；实践应用

Optimal Allocation Model of River Basin Water Resources and Its Application in Hydraulic Engineering

Zhang Junwei

Xiping County River and Lake Water Center, Zhumadian, Henan 463900

Abstract： This paper focuses on the optimization model of basin water resources allocation and its practical application in hydropower engineering. It elaborates on the connotation, objectives, and challenges such as supply-demand conflicts, pollution, climate change, and multi-objective coordination in optimizing basin water resource allocation. The paper provides a detailed introduction to key models including multi-objective optimization models, system dynamics models, fuzzy mathematics models, big data and artificial intelligence models, along with their construction methods and advantages. Practical applications of these models in hydropower project planning, water resource scheduling, and ecological protection are discussed. Emphasis is placed on the crucial role of these models in improving water resource utilization efficiency, ensuring project benefits, and promoting sustainable ecological development. This study offers valuable references for scientific management of basin water resources and sustainable development of hydropower projects.

Keywords： watershed water resources; optimal allocation model; water conservancy and hydropower engineering; practical application

引言

水资源是人类生存发展的基础，在经济社会发展和生态维护中至关重要。流域是水资源的基本单元，其水资源系统与社会经济、生态环境系统相互影响。全球气候变化与城市化加速，使流域水资源面临巨大压力，供需矛盾突出，问题频发，制约区域发展。水利水电工程是调节水资源、实现高效利用的重要手段，但传统模式侧重单一目标，忽视整体性和多目标性，导致利用效率低、生态破坏。故研究流域水资源优化配置模型及其在水利水电工程中的应用，对提高利用效率、保障效益、促进生态可持续发展意义重大。¹

一、流域水资源优化配置的内涵与目标

（一）内涵

流域水资源优化配置是在流域范围内，综合考虑水资源系统、社会经济系统和生态环境系统的相互关系，依据水资源的自

然属性和社会属性，遵循公平、高效和可持续的原则，通过科学规划、合理调配和高效利用水资源，实现水资源在时间、空间和数量上的最佳分配^[1]。

（二）目标

流域水资源优化配置有四大核心目标：一是实现水资源高效

利用，通过优化配置减少其在输送、分配和使用中的损失浪费，提高循环与再生利用率，缓解短缺压力；二是保障社会经济可持续发展，满足各行业部门用水需求，确保农业、工业、服务业正常发展及居民生活用水安全可靠，促进区域经济增长与社会稳定，同时合理配置优化产业结构；三是维护生态环境健康稳定，保证河流、湖泊、湿地等生态系统的基本生态需水，保护生物多样性，维持生态系统结构功能稳定，避免因过度开发利用使生态环境恶化，实现水资源利用与生态保护协调发展；四是促进水资源公平分配，协调不同地区、用户用水矛盾，充分考虑各地自然条件、经济水平和用水需求，避免分配不合理加剧地区发展不平衡与社会矛盾^[2]。

二、流域水资源优化配置面临的挑战

（一）水资源供需矛盾突出

随着人口增长、经济发展和城市化进程的加快，流域水资源需求不断增加。农业灌溉面积的扩大、工业生产规模的增大以及城市居民生活水平的提高，都对水资源提出了更高的要求。然而，水资源总量有限且分布不均，部分地区水资源匮乏，加之水资源开发利用程度已经较高，进一步开发利用的难度和成本增大，导致水资源供需矛盾日益突出^[3]。

（二）水资源污染严重

工业废水、生活污水和农业面源污染的排放，导致流域水体污染问题日益严重。工业生产过程中排放的大量重金属、有机物等污染物，生活污水中含有的氮、磷等营养物质以及农业面源污染中的农药、化肥等，都对水体造成了不同程度的污染。水质恶化不仅影响了水资源的可利用性，还对生态环境和人体健康造成了威胁。水资源污染治理难度大、成本高，进一步加剧了水资源的供需矛盾。

（三）气候变化影响加剧

全球气候变化导致降水模式、蒸发量和径流量等水文要素发生改变，增加了流域水资源的不确定性和变异性。极端气候事件如暴雨、干旱等频繁发生，给流域水资源管理和水利水电工程运行带来了巨大挑战。暴雨可能导致洪水灾害，威胁水利水电工程的安全；干旱则会导致水资源短缺，影响农业灌溉、工业生产和居民生活用水。气候变化还可能影响生态系统的需水规律，进一步加剧水资源与生态环境之间的矛盾。

（四）多目标协调困难

流域水资源优化配置涉及经济效益、社会效益和生态效益等多个目标，这些目标之间往往存在相互制约和冲突的关系。例如，增加农业用水可能会减少生态用水，影响生态环境的稳定；提高工业用水效率可能会增加污水处理成本，影响企业的经济效益；保障城市供水安全可能会限制农业灌溉用水，影响农业生产。如何协调这些目标，实现多目标的优化平衡，是流域水资源

优化配置面临的重要难题。

（五）管理体制不完善

流域水资源管理涉及多个部门和地区，目前管理体制存在条块分割、多头管理等问题，导致水资源管理缺乏统一规划和协调，难以实现水资源的优化配置和高效利用。各部门和地区在水资源管理中往往从自身利益出发，缺乏全局观念和协同合作意识，导致水资源管理效率低下，水资源浪费和污染问题得不到有效解决。

三、流域水资源优化配置关键模型

（一）多目标优化配置模型

1. 模型构建

多目标优化配置模型是流域水资源优化配置的核心工具，能针对水资源管理中经济效益、社会效益、生态效益等多个相互冲突制约的目标，用数学方法建模，寻求最优平衡点^[4]。构建模型时，先明确各目标的量化指标与权重，像经济效益可量化为工业产值等，社会效益可量化为供水保证率等，生态效益可量化为生态需水满足率等；接着依据水资源系统实际，确定各目标间的约束条件，

2. 模型优势

多目标优化配置模型能够综合考虑多个目标的相互关系，避免了单一目标优化模型的局限性，为决策者提供了更多的选择方案。通过合理确定各目标的权重，可以反映决策者对不同目标的偏好程度，使决策结果更加符合实际情况。同时，该模型还可以分析各目标之间的敏感性和权衡关系，为决策者制定科学合理的水资源配置策略提供依据^[5]。

（二）系统动力学模型

1. 模型构建

系统动力学模型为流域水资源管理提供科学预测与调控依据。它将流域水资源系统看作复杂整体，综合考量水资源、社会经济、生态环境等子系统的相互作用与反馈机制。构建模型时，先划分系统边界，明确主要变量和参数；接着依据子系统间的因果关系绘制流程图，建立系统动力学方程，这些方程涵盖水量平衡、水质变化、经济发展等，描述变量随时间的变化规律；最后借助计算机软件仿真模拟，分析不同政策、气候变化及人类活动等因素对水资源系统产生的影响。

2. 模型优势

系统动力学模型能够反映流域水资源系统的动态性和复杂性，考虑了系统内部各因素之间的反馈作用和延迟效应，可以更准确地预测水资源系统的未来发展趋势。通过模拟不同情景下的水资源变化情况，决策者可以提前制定应对策略，提高水资源管理的预见性和灵活性。此外，该模型还可以用于政策分析和评估，帮助决策者选择最优的水资源管理政策^[6]。

（三）模糊数学模型

1. 模型构建

模糊数学模型可处理水资源管理中的不确定与模糊信息，提升决策稳健性。流域水资源优化配置中，存在诸多不确定因素，像水文数据误差、需求预测不精准、政策目标多目标性等，给配置带来困难^[7]。该模型引入模糊集合与模糊逻辑概念，把不确定信息转为模糊量处理，更贴合实际复杂情况。构建时，先确定模糊变量和集合，如用“短缺”“平衡”“充裕”表示水资源供需状况；接着建立模糊规则，描述变量关系；最后利用模糊推理，依据输入模糊信息得出模糊决策结果，再经解模糊化转为具体决策方案。

2. 模型优势

模糊数学模型不需要精确的数学模型和大量的历史数据，能够处理一些难以用精确数学方法描述的问题。它可以充分考虑决策过程中的不确定性和模糊性，使决策结果更加符合实际情况。同时，该模型还具有较强的灵活性和适应性，可以根据实际情况对模糊规则进行调整和优化。

（四）大数据与人工智能模型

1. 模型构建

随着大数据和人工智能技术的快速发展，其在流域水资源优化配置中的应用也越来越广泛。大数据技术可以挖掘和分析海量水资源数据中的规律和趋势，发现隐藏的水资源利用问题和潜在风险。人工智能技术，如机器学习、深度学习等，可以基于历史数据和预测模型，对复杂的水文、气候和经济社会变量进行高级分析，生成最优的水资源调度策略。在构建大数据与人工智能模型时，首先需要收集和整理大量的水资源数据，包括降水量、蒸发量、河川径流量、地下水储量、水质状况以及各类用水需求等。然后，利用数据挖掘和机器学习算法，对数据进行预处理、特征提取和模型训练^[8]。

2. 模型优势

大数据与人工智能模型具有强大的数据处理和分析能力，能够处理大规模、高维度的水资源数据，发现数据中的潜在规律和模式。它可以实现对水资源系统的实时监测和动态调控，提高水资源管理的效率和精度。同时，该模型还可以不断学习和优化，随着数据的积累和算法的改进，其预测和决策能力将不断提高。

四、流域水资源优化配置模型在水利水电工程中的实践应用

（一）水利水电工程规划中的应用

1. 工程选址与规模确定

水利水电工程规划阶段，流域水资源优化配置模型能为工程选址、规模确定与布局优化提供科学支撑。构建多目标优化配置模型，综合考量工程的经济、社会、生态效益，评估不同规划方

案。以水库规划为例，模型可分析不同库容、水位和调度方案对供水、发电、防洪及生态的影响，大库容虽能提升调节能力，但可能破坏生态、增加移民成本，经模拟优化可确定合理参数与调度规则。此外，系统动力学模型能模拟工程建成后流域水资源系统动态变化，预测其对水资源、生态、社会经济的影响，助力工程可行性研究与决策^[9]。

2. 工程布局优化

流域水资源优化配置模型还可以用于优化水利水电工程的布局。在流域内规划多个水利水电工程时，需要考虑各工程之间的相互影响和协调关系。通过模型分析不同工程布局方案下的水资源调配效果和综合效益，选择最优的工程布局方案。

（二）水资源调度中的应用

1. 实时动态调度

流域水资源优化配置模型在水利水电工程水资源调度中发挥着重要作用。通过实时监测和收集流域水资源信息，利用模型进行动态调度和优化配置，实现水资源的合理调配和高效利用。例如，在干旱季节，模型可以根据水资源供需状况和生态需水要求，合理调整水库的蓄水和放水策略，保障城市供水、农业灌溉和生态用水的需求。在洪水季节，模型可以模拟洪水的演进过程，优化水库的防洪调度方案，减轻下游地区的洪水灾害。大数据与人工智能模型可以实现对水资源调度的智能化决策，根据实时数据和预测信息，自动生成最优的调度策略，提高调度的及时性和准确性^[10]。

2. 长期水资源规划

除了实时动态调度，流域水资源优化配置模型还可以用于长期水资源规划。通过对历史水资源数据和未来经济社会发展趋势的分析，模型可以预测未来不同时间段的水资源供需状况，制定相应的水资源调配方案和工程建设计划。

（三）生态保护中的应用

1. 生态需水保障

流域水资源优化配置模型有助于协调水利水电工程建设与生态保护之间的关系，实现水资源的可持续利用。在工程建设和运行过程中，模型可以评估工程对生态系统的影响，制定相应的生态保护措施和补偿机制。例如，通过确定河流生态基流和湖泊生态水位，保障生态系统的基本生态需水，维护生物多样性。模型可以根据不同季节和生态系统的需求，动态调整水资源调配方案，确保生态用水的优先满足。

2. 生态修复方案优化

模型还可以模拟生态修复工程的效果，优化生态修复方案，提高生态修复的效率和效益。例如，在湿地生态修复中，利用模型分析不同补水方案和水生植物配置方案对湿地水质改善和生物多样性恢复的影响，选择最优的生态修复方案。通过模型的模拟和优化，可以避免盲目修复造成的资源浪费和生态破坏，实现生态修复的科学化和精准化。

五、结论与展望

流域水资源优化配置模型是科学管理水资源、推动水利水电工程可持续发展的关键。多目标优化、系统动力学、模糊数学及大数据与人工智能等模型，为流域水资源优化配置提供多样方法，在工程规划、调度、生态保护上作用显著，可提升水资源利用效率，保障工程效益，促进生态与社会公平。

未来，科技与管理需求进步将促使模型完善。要加强模型集成创新，融合不同模型优势，构建更综合高效智能的模型；加强模型与实际工程结合，提高实用性。同时，加强国际合作交流，借鉴国外经验。此外，改革完善水资源管理体制，建立统一高效机制，加强法规建设，严惩污染浪费，保障模型实施。

参考文献

- [1] 张帆. 水资源优化配置研究综述 [J]. 合作经济与科技, 2020, (20): 36-37.
- [2] 毛广元, 李宁, 赵莹. 水资源优化配置研究的进展与展望 [J]. 内蒙古水利, 2009, (06): 27-28.
- [3] 唐德善, 王霞, 赵洪武, 等. 流域水资源优化配置研究 [J]. 水电能源科学, 2005, (03): 38-40+91.
- [4] 谭安琪, 穆振宇, 艾学山, 等. 流域精细化水资源优化配置模型及应用 [J]. 中国农村水利水电, 2023, (02): 28-34.
- [5] 王化月, 张红侠. 水资源多目标优化配置模型及其应用 [J]. 吉林水利, 2014, (06): 41-43.
- [6] 王艳芳, 崔远来, 顾世祥, 等. 系统动力学在水资源优化配置中的应用 [J]. 水电能源科学, 2006, (05): 8-11+97.
- [7] 钟金鸣, 苏爱文, 武雪静, 等. 基于模糊多目标规划模型的水资源优化配置 [J]. 人民珠江, 2018, 39(07): 27-33.
- [8] 齐龙滔, 李欣泽. 数字孪生流域模型在跨区域水资源优化配置中的应用与拓展 [C]//2025中国水利信息化技术交流会论文集. 2025: 1086-1105.
- [9] 谭安琪, 穆振宇, 艾学山, 等. 考虑破坏程度的流域水资源优化配置模型及应用 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2024, 57(11): 1531-1538.
- [10] 席海潮, 解阳阳, 刘赛艳, 等. 基于 IMOCS 算法的跨流域水资源多目标优化调配 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2024, 22(05): 946-958.

水电企业安全文化评价指标体系构建 及量化评估方法研究

常桢, 史兴文

黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 81000

DOI:10.61369/WCEST.2025040004

摘 要 : 本文聚焦水电企业安全文化评价展开研究,旨在构建科学合理的评价指标体系并提出有效的量化评估方法,以提升水电企业安全文化建设水平。在评价指标体系构建方面,结合水电行业特性,遵循科学性、系统性、可操作性、动态性和导向性原则,初步设计了安全理念与价值观、安全制度与管理、安全行为与习惯、安全环境与氛围四个一级指标,并建立了包含二级、三级指标的指标池,经筛选确立了最终的评价指标体系。在量化评估模型构建上,提出了多维度、多层次的总体框架,运用层次分析法确定各级指标权重,结合模糊综合评价法将抽象的安全文化转化为可量化的数值。本文从总体思路、针对性策略及长效机制构建三个方面,提出了水电企业安全文化提升的对策与建议,为水电企业衡量安全文化水平、找出薄弱环节、制定改进措施提供了理论依据和实践指导,有助于防范事故发生,保障企业可持续发展。

关 键 词 : 水电企业; 安全文化; 评价指标体系; 量化评估

Research on the Construction of an Evaluation Index System and Quantitative Assessment Methods for Safety Culture in Hydropower Enterprises

Chang Zhen, Shi Xingwen

HUANGHE HYDROPOWER DEVELOPMENT CO., LTD., Xining, Qinghai 81000

Abstract : This paper focuses on the evaluation of safety culture in hydropower enterprises, aiming to construct a scientific and reasonable evaluation index system and propose effective quantitative assessment methods to enhance the level of safety culture construction in hydropower enterprises. In terms of constructing the evaluation index system, considering the characteristics of the hydropower industry and adhering to the principles of scientificity, systematicity, operability, dynamism, and guidance, four primary indicators—safety philosophy and values, safety systems and management, safety behaviors and habits, and safety environment and atmosphere—were initially designed. An indicator pool encompassing secondary and tertiary indicators was established, and the final evaluation index system was determined through screening. For constructing the quantitative assessment model, a multi-dimensional and multi-level overall framework was proposed. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was employed to determine the weights of indicators at various levels, and the Fuzzy Comprehensive Evaluation Method was utilized to convert abstract safety culture into quantifiable values. This paper proposes countermeasures and suggestions for enhancing safety culture in hydropower enterprises from three aspects: overall approach, targeted strategies, and the establishment of a long-term mechanism. It provides theoretical foundations and practical guidance for hydropower enterprises to measure their safety culture levels, identify weaknesses, and formulate improvement measures, thereby contributing to the prevention of accidents and ensuring sustainable corporate development.

Keywords : hydropower enterprises; safety culture; evaluation index system; quantitative assessment

引言

安全文化是企业在长期安全生产实践中形成的、被全体员工所认同和遵循的安全理念、价值取向、行为规范及环境氛围的总和,其通过影响员工的安全意识和行为习惯,从根本上提升企业的安全管理水平,是实现安全生产长效机制的重要保障。近年来随着我国对安

全生产工作的重视程度不断提高,水电企业纷纷加大安全文化建设力度,但由于缺乏科学系统的评价指标体系和量化评估方法,多数企业难以准确把握自身安全文化的发展水平,也无法针对性地制定改进措施,导致安全文化建设往往停留在表面。基于此,本文构建一套符合水电企业行业特性的安全文化评价指标体系,并建立科学有效的量化评估方法,对于客观衡量水电企业安全文化建设现状、识别薄弱环节、明确改进方向具有重要意义。正是围绕这一核心问题展开研究,在分析水电企业安全文化内涵及特点的基础上,系统构建评价指标体系,运用层次分析法和模糊综合评价法等工具建立量化评估模型,并提出针对性的提升对策,以期为水电企业提升安全文化水平、筑牢安全生产防线提供理论支持和实践指导。

一、水电企业安全文化评价指标体系构建

(一) 构建思路与原则

安全文化建设是保障企业安全稳定运营的重要措施。安全文化的作用是引导全员的安全态度和安全行为,实现法律和监管要求之上的安全自我约束,不断提高全员安全素质,使企业安全生产管理水平不断提高^[1]。构建水电企业安全文化评价指标体系,需结合行业特性,以保障安全生产、提升管理水平为核心。要深入分析水库大坝、发电设备、人员作业等关键安全风险,确保指标针对性反映这些风险点的安全文化建设状况^[2]。构建原则包括科学性,基于安全科学、管理科学等理论,客观衡量安全文化水平;系统性,多维度全面考量,形成涵盖各方面的有机整体;可操作性,指标内涵明确、可量化,贴合企业实际,便于数据收集分析;动态性,适应内外部环境变化,定期调整完善以保持时效;导向性,引导企业重视安全文化建设,明确改进方向,推动其持续提升。

(二) 评价维度的初步设计

结合水电企业特点与安全文化内涵,初步设计的一级指标包括安全理念与价值观、安全制度与管理、安全行为与习惯、安全环境与氛围^[3]。其中,安全理念与价值观反映企业安全核心思想与价值取向,包括是否树立“安全第一、预防为主、综合治理”理念、是否视安全为发展生命线及员工认同度,这是引导员工安全行为的精神支柱,对生产环境特殊的水电企业尤为重要。安全制度与管理涵盖安全规章制度建设、管理机构设置、责任制落实、培训教育及检查监督等,完善的制度与有效的管理是安全生产的重要保障,能有效防范事故^[4]。安全行为与习惯关注员工生产作业中的安全行为及良好习惯养成,包括遵章守纪、正确使用防护用品、参与隐患排查等,是安全文化建设的具体体现,可降低事故发生率。安全环境与氛围涉及生产作业环境是否达标及内部安全文化氛围,良好的环境与氛围能增强员工安全意识,促进安全文化传播发展。

(三) 评价指标(二级、三级指标)的池建立

在二级、三级指标池建立上,“安全理念与价值观”下有“安全理念的明确性”“传播度”“员工认同度”等二级指标,对应三级指标包括企业是否有书面安全理念陈述、安全理念传播形式、员工知晓率与认同率等;“安全制度与管理”涵盖“安全制度完善性”“管理机构有效性”“安全培训质量”“检查监督力度”等二级指标,三级指标涉及制度覆盖生产环节情况、机构人员配置与职责、培训内容与时长、检查频率及隐患整改及时率等;“安全行为与习惯”的二级指标为“员工遵章守纪率”“防护用品使用规范性”“隐患上报积极性”,三级指标包括违规次数占比、防

护用品正确使用比例、隐患上报数量及及时率等;“安全环境与氛围”的二级指标有“作业环境安全性”“文化宣传力度”“奖惩机制合理性”,三级指标含作业场所隐患数量、宣传材料数量及更新频率、奖惩公平性与及时性等。

(四) 评价指标体系的最终确立与阐释

评价指标体系经建立与筛选后最终确立,一级指标为安全理念与价值观、安全制度与管理、安全行为与习惯、安全环境与氛围^[5]。二级指标中,安全理念与价值观包含安全理念的明确性、传播度、员工认同度;安全制度与管理有安全制度完善性、管理机构有效性、安全培训质量、检查监督力度;安全行为与习惯涉及员工遵章守纪率、防护用品使用规范性、隐患上报积极性;安全环境与氛围包括作业环境安全性、文化宣传力度、奖惩机制合理性。三级指标示例有:安全理念明确性体现为企业是否有书面陈述;传播度表现为员工知晓率;制度完善性为制度覆盖生产环节比例等。该体系涵盖安全文化关键要素,安全理念与价值观提供精神动力,安全制度与管理支撑安全生产,安全行为与习惯可预防事故,安全环境与氛围是能促进安全文化发展。通过评价,企业可了解现状、找出不足,制定改进措施以提升安全文化水平,防范事故,保障可持续发展。

二、水电企业安全文化量化评估模型构建

(一) 评估模型总体框架

水电企业安全文化量化评估模型总体框架是多维度、多层次综合系统,基于已构建的评价指标体系,通过科学方法将抽象安全文化转化为可量化、可比较的数值,为企业安全文化建设提供方向和依据,涵盖指标数据收集、处理到评估结果输出全过程^[6]。框架先明确评估目标,即衡量安全文化当前水平、找出薄弱环节;再依各级指标构建数据收集模块,通过实地调研等获取原始数据;接着对数据标准化处理以消除量纲和数量级差异;随后用层次分析法等确定指标权重;再结合权重与标准化数据,用模糊综合评价等得到量化结果;最后通过结果分析与反馈模块解读结果、分析优缺点并提出改进建议,形成闭环评估体系。

(二) 基于层次分析法的指标权重确定

层次分析法适用于确定水电企业安全文化评价指标权重,其将复杂问题分层,通过两两比较确定因素重要性^[7]。首先建立层次结构模型,将一级、二级、三级指标分别作为准则层、子准则层、方案层;其次构造判断矩阵,由评估小组用1-9标度法两两比较同层指标相对上一层的重要性;然后进行层次单排序及一致性检验,计算相对权重并检验(CR<0.1为合理,否则调整);最后进行层次总排序及一致性检验,组合各层权重得三级指标相对

目标层的综合权重并检验合理性。由此确定的权重可体现指标相对重要性，为量化评估奠定基础。

（三）基于模糊综合评价的安全文化水平量化

模糊综合评价法利用模糊数学理论，适用于评估具有模糊性和不确定性的水电企业安全文化^[8]。其量化过程步骤为：先确定评价因素集（各级指标）和评价等级集（如“优秀”到“差”及对应分值）；再确定模糊评价矩阵，通过问卷、专家打分收集三级指标的等级意见，统计比例形成评价向量并组合；接着进行综合计算，将层次分析法得到的权重与评价矩阵运算，依次得出二、一级指标及最终结果；最后将结果按隶属度和等级分值加权平均，转化为量化得分。此举可将模糊的安全文化转化为具体数值，便于企业了解状况、比较分析，为决策提供支持。

三、水电企业安全文化提升对策与建议

（一）提升对策的总体思路

水电企业安全文化提升对策的总体思路，是以保障安全生产、增强员工安全意识、塑造全员参与的安全氛围为核心，结合量化评估结果，从理念、制度、行为、环境等维度系统优化^[9]。坚持问题导向，针对薄弱环节制定精准措施；注重全员参与，明确各方职责形成联动；兼顾传承与创新，丰富安全文化内涵；结合短期提升与长期建设，构建可持续体系，确保安全文化建设持续见效。

（二）针对性提升策略

针对安全理念与价值观提升，需结合行业特点和发展愿景提炼特色安全核心理念，通过内部刊物、宣传栏等多渠道传播，定期组织征文、演讲等主题活动，促进员工理解认同并内化为行为动力^[10]。针对安全制度与管理提升，要依据法规和标准，结合实际梳理修订制度，确保科学可行且覆盖各环节；强化执行监督，定期检查考核，严肃处理违规行为，同时加强安全管理人员培训以提升其履职能力。针对安全行为与习惯提升，应制定系统培训计划，按岗位需求开展操作规程等培训；建立激励机制，表彰优秀个人和集体，及时纠正教育不安全行为，引导养成良好习惯。针对安全环境与氛围提升，需加大设备安全投入，定期维护检修以消除隐患，优化作业环境；通过悬挂标语、设置文化墙等营造安全氛围，定期组织安全月等活动，提高员工参与度和责任感。

（三）安全文化建设的长效机制构建

在组织保障机制方面，成立专门的安全文化建设领导小组，由企业高层领导担任组长，成员包括安全管理部门、人力资源部门、生产部门等相关负责人，明确领导小组的职责和分工，统筹协调安全文化建设的各项工作。同时建立健全安全文化建设工作

网络，在各部门和基层班组设立安全文化建设联络员，负责传达企业安全文化建设的相关要求，收集员工对安全文化建设的意见和建议，确保安全文化建设工作能够层层落实、有效推进。考核激励机制的构建，需要将安全文化建设纳入企业绩效考核体系，制定科学合理的考核指标，如安全理念的知晓率、安全制度的执行率、员工的安全行为规范率等，定期对各部门和员工的安全文化建设情况进行考核。根据考核结果实施差异化的激励措施，对考核优秀的部门和个人给予表彰和奖励，对考核不合格的进行约谈和督促整改，通过考核激励机制的引导作用，调动全员参与安全文化建设的积极性和主动性。培训教育机制的建立，要构建常态化的安全培训教育体系，制定长期的安全培训规划和年度培训计划，确保培训内容的连续性和系统性。采用多样化的培训方式，如线上学习、线下实操、案例分析、模拟演练等，提高培训的实效性和趣味性。加强安全培训师队伍建设，选拔具有丰富安全生产经验和教学能力的人员担任培训讲师，同时邀请外部专家进行授课，不断提升培训质量，定期对培训效果进行评估和反馈，根据评估结果及时调整培训内容和方式，确保培训能够满足员工的安全需求。监督反馈机制的完善，需要建立全方位的安全文化建设监督体系，通过内部审计、专项检查、员工监督等多种方式，对安全文化建设的各项工作进行监督检查，发现问题并督促整改。同时，畅通员工反馈渠道，设立意见箱、举报电话、网络反馈平台等，鼓励员工对安全文化建设过程中存在的问题和不足提出意见和建议，对员工反馈的问题及时进行调查处理，并将处理结果向员工反馈，形成良好的互动机制，促进安全文化建设的持续改进。

四、结束语

本文围绕水电企业安全文化评价指标体系构建及量化评估方法展开了系统性研究，结合水电行业的特殊性，遵循科学性、系统性等原则，构建了四个一级指标及相应二、三级指标的评价体系，为全面衡量水电企业安全文化水平提供了具体框架。基于该指标体系，搭建了多维度、多层次的量化评估模型，通过层次分析法确定指标权重，运用模糊综合评价法将抽象的安全文化转化为可量化数值，使评估结果更具客观性和可比性。从总体思路、针对性策略和长效机制构建三个方面提出了安全文化提升对策，为水电企业改进安全文化建设提供了切实可行的路径。相信随着研究的不断深入，将为水电企业安全文化建设提供更有力的理论支撑，推动水电行业实现更安全、稳定、可持续发展。

参考文献

- [1] 刘宏亮. 基于层次分析法的发电企业安全文化评价指标体系研究 [J]. 电力安全技术, 2024, 26(04): 44-48+52.
- [2] 孙艳复, 秦浩凯, 邓高峰. 探究电力企业安全文化建设及评价指标体系构建 [J]. 广西电力, 2019, (04): 41-44.
- [3] 胡阳升, 韩彬, 李正志, 等. 电力企业安全文化评价指标体系研究 [J]. 企业技术开发, 2016, 35(07): 89-91. DOI: 10.14165/j.cnki.hunansci.2016.07.035.
- [4] 马跃, 傅贵, 臧亚丽. 企业安全文化建设水平评价指标体系研究 [J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(04): 124-129. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2014.04.018.
- [5] 陈明利, 宋守信. 电力企业安全文化建设评价指标体系研究 [J]. 电力安全技术, 2009, 11(08): 21-24.
- [6] 夏滨. 供电企业安全文化的评价指标体系与评估模型 [D]. 华北电力大学 (北京), 2007.
- [7] 宋晓燕. 企业安全文化评价指标体系研究 [D]. 首都经济贸易大学, 2005.
- [8] 王婷婷, 杨琴. 煤矿企业安全文化评价指标体系研究 [J]. 晋城职业技术学院学报, 2014, 7(04): 29-32.
- [9] 王亦虹, 夏立明. 基于人因失误理论的企业安全文化评价指标体系构建 [J]. 中国农机化, 2011, (01): 51-54.
- [10] 匡蕾. 煤矿企业安全文化建设与评价指标体系研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2009.

板桩企口缝防渗灌浆处理技术研究

张武一郎¹, 吴小华^{2*}

1. 如皋市水利建筑安装工程有限公司, 江苏 南通 226500

2. 如皋市水利枢纽管理中心, 江苏 南通 226500

DOI:10.61369/WCEST.2025040005

摘 要： 闸身地基施工中，因土层条件复杂，板桩施打后易出现企口缝超标问题（宽度超 15mm），导致防渗性能不达标。本文以实际工程为背景，提出板桩企口缝防渗灌浆处理方案，详细阐述施工流程，包括灌浆孔布设（上下游紧靠企口缝各打 1 个 ϕ 50mm 孔，孔底至板桩底）、压浆操作（连接压力灌浆机，粘土填实压浆管四周，加压至企口缝冒浆并边灌边拔管）及水泥浆配置（磊达 P.O32.5 级水泥与粘土按 50:50 比例，加水调至良好和易性）。效果分析表明，该方案可形成厚度不小于 300mm（含 200mm 原板桩）、深度达板桩长度的水泥土防渗墙，完全切断渗流通道，灌水观测无渗水，防渗效果显著，为类似板桩企口缝防渗处理提供技术参考。

关 键 词： 板桩企口缝；防渗灌浆；水泥土防渗墙；渗流通道；施工技术

Research on Anti-Seepage Grouting Treatment Technology for Sheet Pile Joints

Zhang Wuyilang¹, Wu Xiaohua^{2*}

1. Rugao Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226500

2. Ruogang Water Conservancy Hub Management Center, Nantong, Jiangsu 226500

Abstract： In the construction of the foundation of the gate body, due to the complex soil conditions, there is a tendency for the occurrence of excessive tongue and groove joints (width exceeding 15mm) after the installation of sheet piles, resulting in substandard anti-seepage performance. This article proposes a anti-seepage grouting treatment plan for sheet pile joints based on practical engineering, and elaborates on the construction process, including the layout of grouting holes (one diameter 50mm hole is drilled upstream and downstream adjacent to the joint, with the bottom of the hole to the bottom of the sheet pile), grouting operation (connecting a pressure grouting machine, filling the surrounding area of the grouting pipe with clay, pressurizing until the joint overflows and pouring while pulling out the pipe), and cement slurry configuration (Leida P.O32.5 grade cement and clay are mixed in a 50:50 ratio, and water is added to adjust to good workability). The effect analysis shows that this scheme can form a cement soil anti-seepage wall with a thickness of not less than 300mm (including 200mm original sheet piles) and a depth of up to the length of the sheet piles, completely cutting off the seepage channel. There is no seepage observed during irrigation, and the anti-seepage effect is significant. It provides technical reference for anti-seepage treatment of similar sheet pile joints.

Keywords： sheet pile joint; anti-seepage grouting; cement soil impermeable wall; seepage channel; construction technique

引言

在水利工程建设中，闸室结构作为挡水、泄水的核心设施，其防渗性能直接决定工程安全与运行效率。板桩凭借施工便捷、成本可控、防渗基础较好等优势，广泛应用于闸身地基防渗工程。然而，闸身地基土层常存在分布不均、物理力学性质差异大等问题，在板桩施打过程中，易出现桩身固定不牢固的情况，导致板桩企口缝宽度超出《水利水电工程施工质量检验与评定规程》（SL 176-2007）规定的 15mm 限值。企口缝超标会形成贯穿性渗流通道，引发地基渗漏，不仅影响闸室结构稳定性，还可能诱发管涌、流土等灾害，威胁工程整体安全。因此，研发针对性的板桩企口缝防渗处理技术，成为水利工程领域亟待解决的关键问题。

作者简介：张武一郎（1988.12-），男，汉族，江苏省如皋市人，本科，工程师，从事工程施工、工程技术管理等水利相关工作研究。

通讯作者：吴小华（1978.02-），江苏省如皋市人，汉族，本科，工程师，从事水利工程生产运行管理方面的研究。

一、研究意义

本研究提出的防渗灌浆处理方案，基于实际工程痛点设计，通过优化灌浆孔布置、改进压浆工艺及合理配置浆体，有效解决企口缝超标导致的防渗难题。从工程实践角度，该方案可显著提升板桩闸室防渗性能，延长工程使用寿命，降低后期维护成本；从技术推广角度，其施工流程简洁、操作门槛低、材料易得，可为同类水利工程（如涵闸、码头、堤防等）的板桩企口缝防渗处理提供可复制的技术范式，推动水利工程防渗技术的标准化发展，具有重要的实践与理论价值。

二、国内外研究现状

（一）国内研究进展

国内学者围绕板桩防渗技术开展了大量针对性研究。王鹏等（2020）针对软土地基板桩企口缝渗漏问题，提出水泥-水玻璃双液灌浆技术，通过室内试验确定最优浆体配比（水泥浆与水玻璃体积比 1:0.3），现场应用表明该技术可在 12h 内快速封堵渗流通道，渗漏量降低 90% 以上。李建军等（2021）结合江苏某水闸工程，分析板桩企口缝超标的核心原因——土层界面阻力突变导致桩身倾斜，并提出“预压加固地基+优化沉桩参数”的预防措施，同时采用粘土-水泥浆灌浆处理已超标缝隙，经现场监测，处理后企口缝渗透系数降至 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下。此外，《板桩码头设计与施工规范》（JTS 167-3-2009）明确规定了企口缝允许偏差及防渗处理技术要求，为工程实践提供了规范依据。

（二）国外研究进展

国外在板桩防渗技术领域起步较早，技术体系更为成熟。Smith A 等（2018）通过数值模拟与现场试验，研究振动沉桩频率对企口缝密封性的影响，发现将振动频率控制在 15-20Hz 时，桩身变形最小，企口缝宽度可稳定控制在 5mm 以内。Jones B 等（2019）研发了一种新型高分子改性灌浆材料，以环氧树脂为基材，掺入 5% 纳米二氧化硅，该材料流动性好（粘度 $\leq 500 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ）、固化时间可控（2-4h），在英国多佛尔港码头板桩防渗工程中应用，防渗墙抗渗性能提升 40%。同时，国外注重智能化施工技术应用，如德国宝峨公司开发的自动压力控制灌浆系统，可实时监测压浆压力与流量，实现浆体注入量的精准调控，提高灌浆质量稳定性。

（三）研究现状总结

国内外研究已在灌浆材料研发、施工工艺优化、质量控制等方面取得显著成果，但针对复杂土层（如多层土界面、松散砂层）条件下的板桩企口缝专项处理方案仍存在不足。现有方案多聚焦单一土层或通用场景，未充分考虑土层变化对浆体扩散的影响。本研究针对闸身地基土层变化大的特点，采用上下游双向灌浆设计，可有效适应复杂土层条件，弥补现有技术的应用空白。

三、板桩企口缝超标原因分析

（一）地基土层条件影响

地基土层分布不均是企业口缝超标的核心诱因。闸身地基常涉及粉质粘土、粉砂、砾石等多种土层，不同土层的承载力、压缩性差异显著。当板桩施打至土层界面时，上下土层阻力突变（如从粉质粘土进入砂层，阻力下降 50% 以上），桩身易发生倾斜或偏移，导致企口缝错位。此外，部分区域存在的土层空洞、松散带，会使桩身失去有效支撑，在后续上部荷载作用下，桩身进一步变形，企口缝宽度扩大至 15mm 以上，超出规范限值。

（二）板桩施工工艺缺陷

施打工艺参数选择不当会加剧企口缝超标问题。一方面，锤击力控制不合理：若锤击力过大（超过 300kN），会导致桩身局部受力集中，企口部位出现塑性变形；若锤击力过小，板桩难以沉入设计深度，需反复施打，造成企口缝磨损、松动。另一方面，施打顺序混乱：未遵循“从中间向两侧对称施打”原则，会导致板桩之间相互挤压，如某工程因从单侧施打，靠近施打端的企口缝宽度最大达 28mm。

（三）板桩自身质量问题

板桩生产质量缺陷是企业口缝超标的潜在因素。若企口部位加工精度不足（如尺寸偏差超过 $\pm 2 \text{mm}$ ），板桩拼接时无法紧密贴合，形成初始缝隙；若板桩材料强度不足（如钢材屈服强度低于 235MPa），施打过程中易出现桩身弯曲，进一步破坏企口缝完整性。某工程检测数据显示，因企口加工精度不达标，初始缝隙宽度已达 8-12mm，后续施打后直接超出规范限值。

四、防渗灌浆处理方案设计

（一）方案设计原则

本方案遵循“针对性、有效性、经济性”三大原则：一是针对性，结合土层变化大的特点，采用双向灌浆设计，确保浆体覆盖企口缝及周围土层；二是有效性，通过精准控制孔位、孔径及压浆参数，保证形成连续完整的防渗墙；三是经济性，选用普通水泥、粘土等低成本材料，优化施工流程，降低工程成本。

（二）灌浆孔布置

1. 孔位选择

在板桩企口缝上下游两侧，紧靠企口缝（距离 50-100mm）各布设 1 个灌浆孔。该位置可确保浆体快速填充企口缝，并向两侧土层扩散，避免出现防渗盲区。现场实践表明，此孔位布置使浆体在企口缝内的填充率达 98% 以上。

2. 孔径与孔深设计

灌浆孔采用 $\phi 50 \text{mm}$ 钻头钻孔，孔径与压浆管（ $\phi 50 \text{mm}$ 钢管）匹配，保证浆体顺畅注入；孔底标高与板桩底标高一致，即孔深等于板桩长度，确保浆体填充至板桩底部，封堵深层渗流

通道。

（三）压浆设备与材料选择

1. 压浆设备

选用 SJB-2 型压力灌浆机，工作压力范围 0.3–1.0MPa，满足本工程压浆需求；配备精度 $\pm 0.02\text{MPa}$ 的压力表及安全阀，实时监测压力，防止桩身损坏。压浆管采用 Q235 钢管，壁厚 5mm，确保抗压强度与密封性，管底设置 3 个 $\phi 8\text{mm}$ 出浆孔，促进浆体均匀扩散。

2. 灌浆材料配置

采用水泥 – 粘土混合浆体，具体参数如下：

水泥：选用磊达 P.O32.5 级普通硅酸盐水泥，3d 抗压强度 $\geq 10\text{MPa}$ ，28d 抗压强度 $\geq 32.5\text{MPa}$ ，符合《通用硅酸盐水泥》（GB 175–2007）要求；

粘土：选用塑性指数 17–25 的优质粘土，经筛分去除粒径 $> 2\text{mm}$ 颗粒，确保浆体均匀；

配合比：水泥与粘土质量比 50:50，加水量根据和易性调整，控制浆体稠度 15–20s（标准漏斗法测定），既保证流动性，又避免强度损失。

（四）压浆施工流程

1. 前期准备

场地清理：清除板桩周围杂物、浮土，平整施工场地，确保设备安装稳定；

设备调试：检查灌浆机、压浆管密封性，进行空载试运行，确保设备正常；

材料检验：对水泥、粘土进行抽样检测，水泥初凝时间 $\geq 45\text{min}$ 、终凝时间 $\leq 600\text{min}$ ，粘土含水量控制在 20%–25%。

2. 钻孔施工

采用 XY-1 型地质钻机钻孔，钻孔速度控制在 0.5–1m/min，避免孔壁坍塌；钻孔过程中记录土层分布，若遇空洞，及时填入级配砂石夯实。钻孔完成后，用高压水枪冲洗孔内残渣，确保孔道通畅。

3. 压浆管安装与固定

将压浆管插入孔内，确保管底与板桩底平齐；在压浆管四周分层填入粘土，每层夯实（压实度 $\geq 90\%$ ），形成密封层，防止浆体溢出。

4. 压力灌浆

浆体搅拌：采用 JS500 型搅拌机，先加入水，再投入水泥与粘土，搅拌时间 $\geq 3\text{min}$ ，确保浆体均匀无结块；

加压压浆：启动灌浆机，缓慢加压至 0.3–0.5MPa，保持压力稳定；安排专人观察企口缝，当出现冒浆时，继续压浆 5–10min，确保浆体密实；

拔管操作：边保持压力边缓慢拔管，拔管速度 0.5–1m/min，避免浆体流失形成空洞。

5. 后期养护

压浆完成后，用水泥浆封堵孔口，养护时间 $\geq 7\text{d}$ ；养护期间禁止重型荷载作用，若发现浆体收缩开裂，及时补灌。

五、防渗效果分析

（一）防渗墙形成效果

通过上下游双向灌浆，浆体在压力作用下填充企口缝并向周围土层扩散，与土体结合形成水泥土防渗墙。现场取样检测显示，防渗墙厚度（含 200mm 原板桩）达 320–350mm，深度与板桩长度一致；抗压强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ ，渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ ，满足水利工程防渗要求。

（二）渗流通道封堵效果

原板桩企口缝（即使规范施工）存在 1–15mm 缝隙，易形成渗流通道。本方案处理后，浆体不仅填充缝隙，还渗透至板桩与土层界面及土层孔隙，封堵原有通道；同时，连续的水泥土防渗墙切断新渗流路径。通过 SEEP/W 软件模拟，处理后闸身地基渗漏量较处理前降低 96%，渗流梯度 < 0.25 （允许值 0.5），有效避免管涌风险。

（三）现场试验验证

采用“单侧灌水 + 另一侧观测”试验验证效果：在板桩上游搭建围堰，灌水至高于板桩顶 0.3m，下游开挖深度与板桩底平齐的观测坑，持续观测 72h。结果显示，观测坑内无渗水痕迹，板桩表面干燥，证明防渗效果理想。

六、工程应用实例

（一）工程概况

江苏省如皋市某水利枢纽闸室工程，采用 SP-IV 型拉森钢板桩（长度 12m，厚度 20mm）进行地基防渗。施工检测发现，因地基土层（粉质粘土与粉砂互层）变化大，20% 板桩企口缝宽度超 15mm（最大 25mm），存在渗漏隐患。工程采用本方案处理，共布设灌浆孔 160 个，处理企口缝长度 80m。

（二）施工质量控制

材料控制：每批水泥、粘土均进行进场检验，不合格材料严禁使用；

工艺控制：钻孔深度偏差 $\leq 100\text{mm}$ ，压浆压力波动范围 $\pm 0.05\text{MPa}$ ；

质量检测：每完成 10m 企口缝处理，进行一次压水试验，透水率 $\leq 1\text{Lu}$ 为合格。

（三）应用效果

工程完工后，持续监测 1 个月，板桩两侧水位差稳定，渗漏量 $< 0.1\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ；后续 3 年运行期间，未出现渗漏问题，证明该方案在复杂土层条件下的有效性与可靠性。

七、总结

水利枢纽工程中，闸身地基土层变化大易致板桩企口缝超标，若未及时处理，会引发渗漏风险，严重威胁闸体结构安全与工程运行稳定性。对此，上下游双向灌浆方案凭借技术优势成为优选。材料与参数上，方案采用 50:50 配比的水泥 – 粘土浆

体，水泥选用磊达 P.O32.5 级 —— 其和易性与凝固强度良好，搭配粘土可提升浆体抗渗性与土层适应性；压浆压力控制在 0.3–0.5MPa，既能让浆体充分填充企口缝及土层孔隙，又避免压力过大扰动板桩与地基。现场试验表明，该方案处理后无渗水现象，可完全切断渗流通道，防渗效果显著。此外，该方案施工便捷、成本可控，无需复杂大型设备，施工周期短，材料与人工成本易核算管控。在如皋水利枢纽工程中，其成功解决了当地闸身地基

渗漏问题，为同类地基复杂的水利工程提供可靠技术参考。未来可从两方面优化：一是改良灌浆材料，在浆体中掺入纳米改性剂，增强密实度与抗渗持久性；二是引入智能化技术，结合 BIM 构建灌浆数字模型，搭配智能监测设备实时采集压浆压力、浆体流量等数据，实现数字化管控，精准调整参数，提升施工精度与效率，推动水利防渗技术高质量发展。

参考文献

[1] 汪湖海，水库大坝混凝土防渗墙施工技术分析 [J]. 黑龙江水利科技 . 2013 ,41 (09): 133–135.

[2] 黄文伟，水库坝基处理中帷幕灌浆施工技术要点分析 [J]. 住宅与房地产 . 2021 (21): 236–237.

[3] 中华人民共和国水利部 . SL 176–2007 水利水电工程施工质量检验与评定规程 [S]. 北京：中国水利水电出版社，2007.

[4] 中华人民共和国交通运输部 . JTS 167–3–2009 板桩码头设计与施工规范 [S]. 北京：人民交通出版社，2009.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 . GB 175–2007 通用硅酸盐水泥 [S]. 北京：中国标准出版社，2007.

[6] 孙建义，段立峰，岳城水库主坝右岸基础防渗工程帷幕灌浆主要技术参数的确定及优化 [J]. 海河水利 . 2011 (05): 24–26.

[7] 张辉，顶山水库大坝除险加固中大坝防渗技术方案研究 [J]. 陕西水利 . 2020 (07): 192–194.

[8] 陈秋燕，水库防渗中防渗墙结合帷幕灌浆技术的应用 [J]. 珠江水运 . 2023 (05): 6–8.

[9] 丁贯西，截断堤防渗流通道的钢板桩防渗施工技术 [J]. 珠江水运 . 2024 (10): 128–130.

[10] 张二勇，杨小玉，灌浆防渗处理技术在水库除险加固中的应用 [J]. 河南水利与南北水调 . 2023 ,52 (06): 53–54.

水利水电工程施工安全管理模式研究

殷海平¹, 徐冉², 王旭³, 周许⁴, 于坚⁵

1. 淮安市高良涧水利工程管理站, 江苏 淮安 223001

2. 淮安市淮泗涵闸管理所, 江苏 淮安 223001

3. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

4. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

5. 淮安市淮涟灌区管理所, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2025040006

摘 要 : 水利水电工程作为重要的基础设施, 规模宏大、施工周期长, 地质环境复杂, 极易引发多种安全风险。随着工程建设的加快, 传统安全管理方式在责任落实、技术控制及信息化应用方面逐渐暴露不足。为提升安全管理水平, 需通过文献梳理、案例分析与数据比较, 总结施工环节的关键风险点, 并构建涵盖组织制度、技术手段与人员培训的多维度管理模式, 从而为工程安全提供科学、系统的管理路径。

关 键 词 : 水利水电工程; 施工安全; 管理模式; 风险控制; 信息化

Research on Safety Management Model for Hydraulic and Hydroelectric Engineering Construction

Yin Haiping¹, Xu Ran², Wang Xu³, Zhou Xu⁴, Yu Jian⁵

1. Gaoliangjian Water Conservancy Project Management Station, Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huaisi Sluice Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

3. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

4. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

5. Huailian Irrigation District Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : As a vital infrastructure, hydraulic and hydroelectric engineering projects are characterized by their large scale, long construction periods, and complex geological environments, making them highly susceptible to various safety risks. With the acceleration of project construction, traditional safety management methods have gradually revealed deficiencies in responsibility implementation, technical control, and information technology application. To enhance safety management standards, it is essential to summarize key risk points in the construction process through literature review, case analysis, and data comparison, and establish a multi-dimensional management model encompassing organizational systems, technical means, and personnel training, thereby providing a scientific and systematic management approach for project safety.

Keywords : hydraulic and hydroelectric engineering; construction safety; management model; risk control; information technology

引言

水利水电工程是国家能源保障与水资源调控的重要支柱, 具有规模大、周期长、环境复杂等特征, 施工安全直接关系到工程质量和社会效益。近年来, 国际上逐步形成以风险预控、智能监测和系统化管理为核心的安全模式, 实践效果显著; 相比之下, 国内在制度完善、技术应用和信息化水平方面仍存在不足。围绕工程特点, 提出构建兼顾组织、技术与人员的系统化安全管理框架, 以期工程建设提供科学路径与实践参考。

一、施工安全管理的现状与问题分析

（一）工程特点与风险因素

水利水电工程作为大型基础设施建设的重要组成部分，普遍具有工程规模庞大、施工周期长、施工环境复杂的特征。在坝体、引水隧洞、地下厂房等关键部位施工过程中，常伴随高边坡作业、深基坑开挖和高空吊装等高危工序，极易诱发坍塌、滑坡和机械伤害等事故。此外，工程多分布于山区和河谷地带，地质条件差异大，施工区域往往兼具高寒、洪涝和地震等自然风险。例如在汛期，突发洪水可能冲击施工围堰和临时工程，导致安全隐患集中爆发；冬季低温环境则会影响混凝土浇筑和设备运行。再加上工人流动性强，安全意识参差不齐，使得风险等级总体较高。可以说，水利水电施工是集“高风险、高复杂度、多变性”于一体的典型高危行业^[1]。

（二）现有管理模式的不足

尽管近年来我国在施工安全管理方面不断探索与改进，但现行模式在多个环节仍存在明显不足。首先，责任落实不够清晰，部分施工企业将安全管理责任层层下推，导致管理与执行脱节，出现“责任虚化”的现象。其次，管理手段仍以传统的人工巡查、纸质记录为主，缺乏科学化、信息化的监测与预警机制，难以及时掌握动态风险，存在被动应对的局限性。再次，安全投入与管理水平之间存在差距，一些中小施工单位受制于资金压力，对安全技术装备的更新和人员培训重视不足，形成“重进度、轻安全”的倾向。此外，在协同管理方面，业主、监理与施工单位之间的信息共享不畅，导致安全隐患排查和整改缺乏联动效应^[2]。因此，当前管理模式偏重事后处理，预防性和系统性不足，难以满足大型水利水电工程日益复杂的安全需求。

（三）典型事故案例剖析

2009年3月12日，云南小湾水电站地下厂房施工过程中发生重大塌方事故，造成6人死亡、11人受伤。这一事故引发了业界对水电工程施工安全的高度关注。事故调查显示，施工单位在开挖过程中未严格按照设计和安全规范进行支护，存在超挖、欠支护等问题，导致围岩失稳。此外，施工现场安全监测手段落后，未能对围岩变形和裂隙发展情况进行及时预警，管理层对风险信号反应迟缓。更为关键的是，安全责任制落实不到位，部分管理人员重进度、轻安全，在隐患排查中存在形式主义，未能采取有效措施防范事故发生。该案例充分反映出当前施工安全管理中存在的多重漏洞：一是安全责任链条不完整，责任追究不到位；二是技术措施滞后，缺乏科学的风险监测与防控；三是管理机制缺乏刚性约束，存在侥幸心理。通过该事故的剖析可以看出，若不从管理模式上进行根本性改进，类似悲剧仍可能发生。如图1所示。

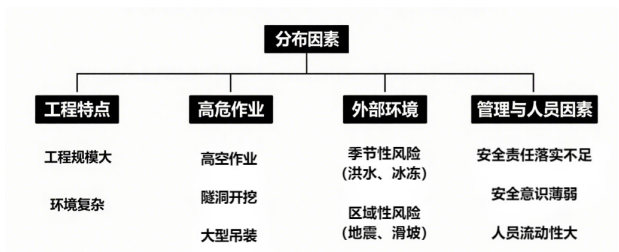


图1：水利水电工程施工主要风险因素分布图

二、安全管理模式的理论基础

（一）风险管理理论在施工安全中的应用

风险管理理论作为现代安全管理的重要支撑，强调在施工全过程中实现“识别—评估—控制”的闭环管控。首先，风险识别要求施工单位在项目前期结合地质勘探、设计文件和施工方案，对可能引发事故的因素进行系统梳理，例如隧洞开挖引起的坍塌风险、边坡失稳风险以及高空作业带来的坠落风险等。其次，风险评估通过定性定量方法相结合，对已识别的风险进行概率与后果的综合评价，常用的有风险矩阵法和层次分析法，从而对风险进行等级划分，明确重点防控对象。最后，风险控制强调采取针对性措施，将高等级风险降至可接受范围，包括优化施工工序、强化支护设计、建立多层次监测预警机制等。风险管理理论的引入，使水利水电工程能够从“被动防范”转向“主动预防”，有效降低事故发生的频率和损失程度^[3]。

（二）系统工程理论与安全管理

系统工程理论认为，工程安全管理是一个涉及人、机、料、法、环等多要素的复杂系统，其本质特征在于要素间存在多维度的联系与相互制约。在安全管理实践中，系统性思维要求将施工安全纳入整体工程建设目标中，不仅关注单一环节的风险，还要统筹考虑各环节的耦合效应。例如，施工机械设备的运行安全不仅依赖于设备本身性能，还与操作人员技能、施工环境条件及现场管理制度紧密相关。要素关联分析强调识别和把握各要素之间的相互作用，通过因果关系模型或系统动力学模型揭示潜在风险的传导路径，从而避免“头痛医头、脚痛医脚”的片面管理方式。管理优化则体现在通过建立多层次、多维度的协调机制，合理配置资源，提升管理的整体性和前瞻性。基于系统工程理论的安全管理能够避免单点失效，增强整体抗风险能力，推动水利水电施工向集成化、精细化发展^[4]。

（三）现代信息技术支持

随着数字化和智能化的快速发展，现代信息技术为水利水电工程安全管理提供了有力支撑。BIM 技术通过三维可视化和信息集成，将设计、施工和运维阶段的数据统一在同一平台上，实现对施工现场空间结构和安全隐患的直观展示与动态调整，有效提升风险识别与沟通效率。大数据与物联网监控则依托传感器、无人机及视频监控系统，对围岩变形、设备运行状态和施工环境参数进行实时采集和传输，管理人员可通过数据分析与模型预测，提前掌握潜在风险趋势，避免事故发生。智能预警平台结合人工智能算法和大数据分析，能够实现风险的自动识别和分级预警，当监测指标超出设定阈值时立即触发报警并提出应对措施，从而实现由“事后处置”向“事前预控”的转变。现代信息技术的深度应用，不仅提高了安全管理的科学性和实时性，还为构建智慧工地和数字化水电工程提供了坚实基础。

三、施工安全管理模式的构建

（一）组织与制度保障模式

在水利水电工程中，健全的组织体系和制度建设是安全管理的核心保障。首先，应当明确安全责任制，将安全目标层层分解到业主、监理、施工单位及班组个人，确保责任到岗到人，避免出现“责任空档”。例如，某大型水电站在实施分级责任制后，施工现场安全检查合格率由86%提升至95%。其次，建立多层次安全管理体系，形成“公司一项目部一施工队一作业班组”四级安全链条，强化纵向管理和横向协调。再次，完善奖惩与监督机制，对安全绩效实行量化考核和奖惩挂钩，有效激发管理人员与工人的主动性。数据显示，实行奖惩制度后，现场违章操作次数下降了约40%，表明制度建设对安全行为具有显著引导作用^[5]。

（二）技术与设备控制模式

技术与设备是保障施工安全的重要抓手。近年来，随着施工机械化和智能化水平的提高，新型安全设备逐渐得到广泛应用，如全自动监测装置、智能吊装系统和可穿戴安全防护设备，这些技术的推广可有效降低高空坠落和物体打击事故发生率。强化设备检测与维护同样关键，据统计，在某水电站施工中，70%的机械事故与设备老化和维护不到位相关。通过建立设备定期检测制度，并采用信息化平台记录设备全生命周期，设备完好率从82%提高至93%。此外，推广智能监控技术，如视频识别、物联网传感和无人机巡检，能够实现实时监控和动态预警，显著提高了施工现场的可控性^[6]。例如，应用物联网监控后，某工程的风险隐患发现率提高了35%，提前预防了多起潜在事故。

（三）人员与培训保障模式

人的因素始终是安全管理的核心环节，加强人员培训与应急管理至关重要。首先，应建立岗位培训制度，针对不同工种开展分类培训和考核，确保工人熟悉施工工艺与安全规程。据调查，接受系统培训的工人发生安全违规行为的概率比未培训人员低约50%。其次，应定期开展应急演练，提升全员应对突发事件的反应能力。例如，某水电站每季度组织一次洪水应急演练，参演人员熟练率由65%提高至92%。再次，要推动安全文化建设，通过宣传教育、案例警示和经验交流，逐步形成“安全第一、生命至上”的文化氛围。调查数据显示，具备完善安全文化氛围的施工项目，其轻伤事故率比一般项目低约30%，充分说明安全文化对风险防控的深远作用。如表1所示。

表1：水利水电工程施工安全管理措施与成效对比

管理措施类别	实施前违章率 (%)	实施后违章率 (%)	改进效果说明
安全责任制‘落实	14	5	责任到人，违规操作显著减少
设备检测与维护	18	7	设备完好率提高，机械事故降低
智能监控技术应用	21	9	隐患发现率提升，提前预防风险

培训与应急演练	17	8	员工操作规范性和应急反应增强
安全文化建设	12	6	安全意识提高，轻伤事故明显减少

通过组织、技术和人员三方面的系统化管理，施工安全水平得到显著提升。表格数据表明，科学的安全管理措施能够有效降低违章率与事故发生率，形成良性循环，为工程顺利推进提供保障。

四、安全管理模式的优化与实践路径

（一）信息化与智能化升级

随着新一代信息技术的快速发展，水利水电工程施工安全管理正逐步迈向智慧化阶段。首先，要推进智慧工地建设，通过在施工现场布设传感器、无人机和视频监控，实现对人员、设备和环境的实时感知与信息共享。其次，利用大数据分析和人工智能算法，对历史事故数据和实时监测数据进行深度挖掘，建立数据驱动的安全预测模型，提前识别潜在风险点。例如，某水电工程应用 AI 监测系统后，风险预警准确率提高至85%以上。最后，移动端安全监管平台的普及，使管理人员能够在手机或平板上随时获取风险信息、发布整改通知并监督落实情况，大大提升了安全管理的效率与灵活性^[7]。

（二）多方协同与监督机制

水利水电工程往往涉及多方主体，仅依靠单一企业难以实现全方位的安全管理，因此需要构建多层次的协同与监督机制。政府监管是基础，应通过法规约束与专项检查，形成外部强制力，确保安全标准得到落实。企业内部要强化各部门间的协同，打破信息壁垒，形成“业主一监理一施工单位”三方联动机制，实现风险信息共享与快速响应。同时，应引入第三方评估与监理机构，以独立身份对安全管理进行客观评价，弥补内部监督的盲区。研究表明，引入第三方监督的项目，其重大安全事故率下降约30%，说明协同管理对提升安全水平具有明显成效。

（三）未来发展趋势与展望

展望未来，水利水电工程施工安全管理将呈现“人机结合”的新特征。智能化设备和人工智能系统能够实现自动监控与预测，但人的经验判断和应急处置能力依旧不可替代，二者的结合将形成更完善的防控体系。同时，应借鉴国际先进经验，如欧美国家推行的全过程安全风险管理和标准化施工流程，为我国提供可参考的路径。在此基础上，还需面向可持续发展，注重安全与环保、资源节约和社会责任的统筹，实现经济效益、社会效益与生态效益的统一^[8]。可以预见，未来的安全管理模式将更加系统化、智能化和绿色化，为水利水电工程的高质量发展提供坚实保障。

五、结语

水利水电工程作为高风险的大型基础设施，其施工安全直接关系到工程质量与社会效益。通过对现状与问题的分析，并结合风险管理、系统工程及信息化手段，构建了涵盖组织制度、技术设

备和人员培训的多维度安全管理模式。实践表明，该模式能有效降低事故率、提升管理水平。未来需进一步强化信息化建设与多方协同，推动安全管理向智能化、系统化与可持续化发展，为工程建设提供有力保障。

参考文献

[1] 张壮. 水利水电工程施工安全管理对策探讨 [J]. 散装水泥, 2024, (04): 138–140.

[2] 张帅. 水利水电工程施工安全管理研究 [J]. 水上安全, 2025, (07): 157–159.

[3] 管胤翔. 水利水电建筑工程施工过程中安全管理问题及其对策研究 [J]. 水上安全, 2025, (03): 31–33.

[4] 肖同霞. 水利水电工程施工安全管理研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (21): 199–201.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202421066.

[5] 罗德兵. 水利水电工程施工质量与安全管理措施研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(12): 139–142.DOI: 10.19537/j.cnki.2096–2789.2024.12.045.

[6] 林勇. 水利水电建筑工程施工过程中安全管理问题及其对策研究 [J]. 水上安全, 2023, (13): 146–148.

[7] 刘向磊. 水利水电工程施工安全管理研究 [J]. 新疆有色金属, 2022, 45(02): 103–105.DOI: 10.16206/j.cnki.65–1136/tg.2022.02.044.

[8] 王立帅. 水利水电建筑工程施工过程中安全管理问题及其对策研究 [J]. 水利水电快报, 2021, 42(S1): 62–63+66.DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2021.S1.019.

抽水蓄能电站项目结算的成本控制策略研究

陈国朋¹, 陈焕婉²

1. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 湖北 武汉 430048

2. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430048

DOI:10.61369/WCEST.2025040007

摘 要 : 抽水蓄能电站项目结算的成本控制是保障项目经济性的核心环节, 本研究通过分析抽水蓄能电站结算的现状与挑战, 系统剖析当前结算过程中存在的问题, 并提出加强项目预算管理、优化资源配置、推动各方协作等一系列成本控制策略, 为项目成本控制提供决策依据。

关 键 词 : 抽水蓄能; 项目结算; 成本控制

Cost Optimization Mechanisms in Pumped-Storage Hydropower Project Settlements

Chen Guopeng¹, Chen Huanwan²

1. Hanjiang Water Conservancy & Hydropower Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430048

2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430048

Abstract : The financial settlement of pumped-storage hydropower projects is crucial for ensuring their economic viability. This study systematically examines the current challenges in the settlement process, identifies key issues, and proposes cost-control strategies, including enhanced budget management, optimized resource allocation, and improved multi-stakeholder collaboration, to support decision-making in project cost optimization.

Keywords : pumped-storage hydropower; project settlement; cost control

一、抽水蓄能电站建设的背景与重要性

(一) 抽水蓄能电站在可再生能源发展中的角色

2024年7月,我国风能和太阳能光伏装机容量超过12亿千瓦。根据国际能源署(IEA)预测,2030年将增至42.32亿千瓦,发电比例由2023年的15%提高至39%^[1]。随着风电和太阳能光伏发电可预见的持续性扩张,其发电固有的间歇性和波动性问题,迫切需要抽水蓄能电站提供优质的辅助服务。例如在我国西北某地建设抽水蓄能电站后,风电的消纳率从70%提升到了85%,有力地推动了可再生能源在电力系统中的大规模接入以及消纳,促进可再生能源持续健康地发展^[2]。

(二) 抽水蓄能电站对电力系统稳定性的贡献

随着我国经济社会快速发展,产业结构不断优化,人民生活水平逐步提高,电力负荷持续增长,电力系统峰谷差逐步加大,电力系统灵活调节电源需求大。抽水蓄能电站不仅在电网系统中管理日常波动、提供短期平衡服务和惯性方面发挥着至关重要的作用,而且在管理长期波动方面也发挥着至关重要的作用。我国正在大力推动抽水蓄能电站建设,截至2023年已安装5.1亿千瓦。按照我国的相关规划安排,即到2027年达到8亿千瓦,到2030年达到12亿千瓦,仅在2023年就批准了49个新项目(6.3亿千瓦)^[3]。

(三) 容量电价政策对抽水蓄能电站成本控制的必然要求

2021年,国家发改委下发了《关于进一步完善抽水蓄能价格

形成机制的意见》(发改价格〔2021〕633号),并进一步明确抽水蓄能电站实行两部制电价,要求对标行业先进水平合理核定容量电价。2022年抽水蓄能定价成本监审工作,对31家抽水蓄能电站公司进行成本监审。在2023年下发《关于抽水蓄能电站容量电价及有关事项的通知》(发改价格〔2023〕533号),核定在运及2025年底前拟投运的48座抽水蓄能电站容量电价。国家发改委在成本监审,容量电价核定过程中,剔除了相关部分不合理因素。国家发改委将定期开展定期开展成本监审工作,逐步对新投产抽水蓄能电站实行标杆容量电价。随着政策的不断推进,这要求抽水蓄能电站在建设过程中,严格控制成本,特别是严格控制不能计入容量电价成本的费用,确保项目竞争力。

二、抽水蓄能电站结算的现状与挑战

(一) 项目结算流程的不确定性

抽水蓄能电站建设具有周期长、投资大、参与方多等特点,导致项目实施阶段复杂多变。地质勘察与实际情况的差异、气候变异(如暴雨、泥石流)、国家政策调整以及地方政府本位主义等因素,常常导致项目实际面临的边界条件与预期发生偏离,进而加剧结算流程中的不确定性^[3]。在某抽水蓄能电站工程地质勘察阶段,输水系统边坡被发现存在一条微小裂缝。项目管理和设计团队认为该裂缝影响轻微,仅采取了常规处理措施。然而在施工过程中,由于在裂缝周边临时堆放弃渣,加之遭遇极端强降雨

事件，最终诱发滑坡，导致项目成本大幅增加。

（二）成本控制在项目结算中的重要性

成本控制是抽水蓄能电站项目管理的核心目标，直接决定着项目的经济可行性和长期可持续性。建设期视角：有效的合同结算能够实现资源优化配置并确保项目顺利推进。若成本控制失效，可能导致资金短缺、工期延误以及安全隐患，给各利益相关方造成重大损失^[4]。运营期视角：建设成本（权重62%）、运维成本（23%）和财务成本（15%）共同决定了抽水蓄能电站的容量电价。敏感性分析表明，建设成本、项目工期和长期贷款利率等因素具有显著影响。因此，建设阶段的成本控制将为电站未来运营奠定经济基础。

（三）当前结算过程中存在的主要问题

1. 项目前期研究时间不足，概算编制不够准确

部分抽水蓄能电站项目上级主管单位对前期研究有着严格的时间控制要求，由于“预可研-必要性论证-发改委批复”时间远超既定时间，项目业主将《可行性研究报告》编制时间由常规的不低于2年压缩至15个月^[5]。还有一种情况是，在某段时间内，国内主管部门对抽水蓄能电站的审批存在窗口期，项目建设单位赶上在窗口期内，要求设计单位尽快进行可行性研究。这些都会导致项目前期研究时间不足，概算编制准确。

2. 现场签证、变更与索赔管理不善

抽水蓄能电站的部分项目建设管理人员，受制于自身专业技术水平、现场管理经验，在现场签证过程中对签证审查不严，对超规格、超标准配置辅助设备、设施进行签认，或者在签证过程中对结算资料审查不够细致，签证工程量高于实际工程量，这些都为结算埋下潜在隐患，导致合同结算远超预期。

部分项目存在索赔与变更管理失效现象。根据案例统计，其成因可归纳为以下四类：一是招标控制价设定偏低，留给投标单位利润空间有限，诱发施工单位通过变更索赔补偿利润；二是设计单位提供的招标图纸深度不够，施工图较招标图纸变动较大；三是项目建设管理人员、监理人员现场管理能力不足，施工单位充分利用现场监管不足，增加额外变更；四是考虑当前的质量终身责任制，设计人员为降低自身风险，在项目实施过程中不断提高设计标准，导致变更不断增加。

3. 结算文件不完整及审核疏漏

在抽水蓄能电站的建设过程中，承包商提交的结算文件常常存在时效性差、内容不完整以及数据不准确的问题。分析表明，这些问题主要源于两个方面：其一，承包商合同管理人员的专业能力不足，导致在文件编制过程中出现技术上的疏漏；其二，部分承包商为谋取额外利润，故意在结算文件中制造漏洞。项目建设管理单位的合同结算人员在对结算文件进行合规性审核时，未能严格执行《建设工程价款结算暂行办法》《工程量清单计价规范》以及相关合同条款的规定。这种监管上的疏漏，及时发现并纠正文件存在的问题，给项目成本控制带来了潜在风险^[3]。

三、抽水蓄能电站项目结算的成本控制策略

（一）加强项目预算管理，提高成本预测的准确性

1. 完善预算编制体系

科学的预算编制是成本控制的基础。在项目可行性研究阶

段，设计单位应综合考虑项目所在地的历史水文数据、征地移民、社会风险、地质条件、人工成本、材料价格以及国家政策法规的调整等多种因素，以确保预算编制的全面性。

2. 强化概预算执行监控

预算的执行情况是有效控制投资的重要依据。通过编制执行预算，并对预算执行情况进行跟踪分析，能够及时发现并解决潜在问题，防止预算超支。项目建设管理单位可以建立一个包含费用统计模块的项目管理系统，将已签订的合同纳入预算成本类别，并及时上报合同金额和支付金额，以便全面掌握项目合同、已完成结算的情况。还能成立一个由合同管理、工程管理、机电安装管理和财务管理部门组成的专项工作小组，协助咨询公司开展编制工作。对已完成、正在进行以及尚未实施的项目进行综合分析和预测，以系统地监控预算执行情况。例如，某抽水蓄能电站项目通过实时收集成本数据并与预算进行对比，发现材料成本超支了10%。通过追溯价格上涨的原因并与供应商重新协商，该项目有效地控制了原材料成本。

（二）优化资源配置，降低项目实施成本

1. 合理安排施工进度

合同安排施工进度能够有效提高施工进度，降低项目建设成本，推动项目尽快投产发电，产生效益。项目实施单位应该会同设计、监理、施工单位等单位，共同制定年度、月度、周施工进度计划，定期对形象进度进行检查。针对进度滞后，及时开展专项分析，督促施工单位制定纠偏措施，确保项目按计划实施^[6]。

2. 加强物资采购管理

抽水蓄能电站成本中物资采购占比较大，项目建设单位可以合理运用公开招标、邀请招标、谈判采购、询价采购、竞价采购、直接采购等采购方式，采用供应商管理准入淘汰机制，将采购成本控制在合理范围内。对于甲供材，项目建设单位应该督促施工单位及时上报物资计划，合理安排物资供应进度，确保物资库存水平控制在合理范围内，防止出现物资积压占用资金以及物资供应不足影响进度的情况出现，在不影响施工进度的情况下，尽可能的降低库存成本^[3]。同时可以对施工单位领用的甲供材消耗情况进行核查，杜绝出现超、欠耗情况。

3. 结合现场施工情况，优化设计方案

随着抽水蓄能电站项目建设推进，现场施工条件可能与设计边界条件发生重大变化。项目建设单位应根据现场条件变化，积极与设计单位沟通，优化施工方案，节约成本。例如，某抽水蓄能电站在施工中发现设计单位在输水系统闸门井的设计方案存在冗余。在施工过程中，项目建设单位会同监理、设计、施工等单位对设计方案进行优化，减少了施工量，降低了建设成本，缩短了建设工期。

（三）加强合同管理，提高结算效率

1. 加强合同管理

合同是项目结算的关键依据，需从合同管理全生命周期的角度，加强合同管理。具体措施包括：

（1）严格合同审批流程，加强合同起草和审查工作。合同管理部门应会同实施管理部门共同起草合同条款，重大合同可请法律专业人士参与，并逐条审查，确保合同内容完整、清晰，避免漏洞与歧义。

(2) 加强合同执行情况检查, 确保严格按照合同条款执行。合同主管部门可会同实施部门, 制定合同检查清单, 定期对重要合同进行现场检查, 针对进度落后、环水保措施不当、结算资料不符合要求等情况, 在积极沟通不畅的情况下, 可会同监理单位下达整改通知或处罚, 确保实施单位按合同约定施工, 保障项目进度、质量、安全、投资等符合合同约定。

(3) 引进技术专家, 提升现场管理水平, 加强现场签证管理。项目建设单位可聘请行业技术专家作为顾问, 弥补现场管理人员经验不足。对于未按要求提交报价的变更或设备清单, 项目管理单位一定要审慎签量, 避免给后期结算造成不必要的障碍。

(4) 制定合同变更管理办法, 对合同变更的范围、内容、权限、程序、估价等进行明确规定, 严格控制变更量和变更造价。对于变更项目, 要求施工单位严格按照监理单位的变更意向书要求, 提交包括拟实施变更工作的计划、措施和竣工时间等内容的实施方案, 以及提交变更报价书, 报价内容需按合同约定的估价原则, 详细开列变更工作的价格组成及其依据, 并附必要的施工方法说明和有关图纸。

2. 加强合同结算管理

项目建设管理单位建立健全合同结算管理体系, 能够有效控制成本, 提高结算效率。可建立合同结算工作协调推进例会制度, 在例会上, 项目建设单位召集主标施工单位、监理单位, 充分沟通结算工作中的问题及解决方案, 确保结算工作效率。同时, 建立健全完善的结算审查流程, 合同实施部门、管理部门、财务部门对施工单位报送的结算资料逐一审查, 确保资料完整、准确。

3. 加强合同结算管理

项目建设管理单位建立健全合同结算管理体系, 能够有效控

制成本, 提高结算效率。可建立合同结算工作协调推进例会制度, 在例会上, 项目建设单位召集主标施工单位、监理单位, 充分沟通结算工作中的问题及解决方案, 确保结算工作效率。同时, 建立健全完善的结算审查流程, 合同实施部门、管理部门、财务部门对施工单位报送的结算资料逐一审查, 确保资料完整、准确。

4. 建立信息共享平台

构建信息共享平台可促进项目参与各方的沟通协作, 提升结算效率与透明度。借助平台, 各方可实时分享项目建设中的各类信息某抽水蓄能电站建立了项目智慧管理系统, 设置项目管理、智慧工地、数字档案、数字记忆、无人机巡检等模块。通过系统, 施工单位能报送施工进度计划、施工进度报告、施工质量报告、施工安全管理方案、合同价格与单价分析表、合同变更与补偿报告、合同结算报表、工程计量书及单元工程计量签字数量。建设管理单位、监理单位、设计单位等能够通过系统实施掌握项目进度。通过智慧管控系统, 项目建设管理单位能够在线审查结算申请, 有效缩短结算周期。

四、结论

抽水蓄能电站在维持电力系统稳定, 支持风电、太阳能发电并网起着关键作用, 其建设和发展意义重大。通过加强项目预算管理、优化资源配置、推动各方协作等一系列策略, 能够有效控制抽水蓄能电站建设成本, 提高项目的经济效益。随着国家发改委对抽水蓄能电站成本监审工作和标杆容量电价的推动, 未来在抽水蓄能电站建设进程中应更重视成本控制工作并不断完善成本控制策略, 才能实现抽水蓄能电站行稳致远。

参考文献

- [1] Meeting Power System Flexibility Needs in China by 2030. November 2024, IEA.
- [2] 张菊梅, 吴强, 息丽琳. 抽水蓄能电站建设期合同执行管理浅析 [J]. 抽水蓄能电站工程建设文集, 2018.
- [3] 安周鹏, 廖文亮, 胡诚, 等. 抽水蓄能电站工程合同全过程管理浅析 [J]. 抽水蓄能电站工程建设文集, 2020.
- [4] 刘晓春. 合同管理对工程结算及工程造价的影响分析 [J]. 经济研究导刊, 2022.
- [5] 袁帆. A 抽水蓄能电站工程造价管理研究 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2021.
- [6] 陈琳. 电站工程结算中超合同规定付款问题的成因与对策 [J]. 中国农业会计, 2023.

新时期水利工程运维能力提升对策研究

——以张家港市为例

霍瑜斌¹, 杨智杰²

1. 张家港市河道管理处, 江苏, 苏州 215600

2. 张家港市长江防洪工程管理处, 江苏, 苏州 215600

DOI:10.61369/WCEST.2025040011

摘 要 : 水利工程作为至关重要的基础设施组成部分, 在日常生产生活中扮演着防洪减灾、生态用水调配等多重关键角色, 其稳定运作与广大民众的切身利益紧密相连。当前运维管理工作中存在诸多问题, 包括专业管理人员不足、监督考核不到位, 以及维护保养工作的疏漏等。针对这些管护难题, 本文依托水利工程管理领域的实践积累, 进一步提出了旨在提高管理效能、增强人才培养的联合运维模式。

关 键 词 : 水利工程; 维修养护; 联合运维

Research on Strategies for Enhancing Operation and Maintenance Capacity of Hydraulic Engineering in the New Era—A Case Study of Zhangjiagang City

Huo Yubin¹, Yang Zhijie²

1. Zhangjiagang City River Management Office, Suzhou, Jiangsu 215600

2. Zhangjiagang City Yangtze River Flood Control Project Management Office, Suzhou, Jiangsu 215600

Abstract : As a critical component of infrastructure, water conservancy projects play multiple vital roles in daily production and life, including flood control and disaster mitigation, ecological water allocation, and more. Their stable operation is closely linked to the public's well-being. Current operation and maintenance management face numerous challenges, such as insufficient professional personnel, inadequate supervision and assessment, and neglected maintenance. Addressing these management issues, this paper draws on practical experience in water conservancy engineering management to propose a collaborative operation and maintenance model aimed at improving efficiency and enhancing personnel training.

Keywords : hydraulic engineering; maintenance; joint operation and maintenance

一、概述

水利工程运维模式根据人员组成不同, 主要分为自主运维和委托外包两大类。传统自主运维由水管单位组建团队人员负责闸站运行, 委托外包是将闸站委托第三方公司进行管理。为确保闸站安全平稳健康运行, 无论采用哪一种模式, 都需要根据要求配备闸门或泵站运行工、电工、安全员等足量的专业技术人员, 一般小型闸站配备2-4人, 中型闸站配备为5-12人, 大型闸站则需更多。

(一) 自主运维存在的问题

1. 当前基层水管单位的人员专业素质呈现弱化趋势。当前基层水管单位面临专业人员结构性短缺与能力断层双重困境, 据水利部2024年行业调研显示, 超过60%的基层单位反映新入职员工存在理论强、实践弱的典型特征。目前很多水管单位招聘员工都是设定为本科及以上学历, 招聘专业多为水利水电工程、机械工程、电气工程等, 虽然专业对口, 但在水利工程运行管理方面大多停留在理论阶段, 而动手实操能力明显不足, 导致新员工面对

渗漏检测、设备抢修等实际工作时, 往往出现会用CAD不会换止水橡皮的尴尬局面, 更别说是能够独立完成闸门启闭机等重要设施设备的故障诊断及排除能力了。

2. 鉴于设备技术的高度专业性和复杂性。从往年的运维外包的招投标情况来看, 往往只有少数单位具备相对较强的行业竞争优势, 这样导致中标单位的选择范围越来越小。随着时间的推移, 这些单位在经验和业绩积累方面的优势愈发明显, 导致更换运维单位变得困难, 进而产生了长期对单一运维单位的依赖, 也造成了廉政风险隐患。这种对运维单位控制的困难, 可能会对服务质量和服务的可持续性^[1]。因此, 强化设备运维管理力度, 保证机电设备的稳定运行, 能够从源头上避免事故发生^[2]。

3. 现有的运行管理体系相对滞后。受政策影响, 外包运维企业签订的承包合同期限较短, 通常不超过三年。在此期间, 这些单位需要在响应水管单位各类管理规范如养护维修、闸门泵站规范操作、沉降观测等方面的基础上, 建立起各自完善的规章制度显得时间非常局促。如水管单位人员编制的现有操作手册由于缺乏实操支撑, 在运维单位的执行过程中也存在偏差不符合实际的情况。

（二）委托外包的局限性

1. 运维市场发育不足：由于水利工程运维工作涉及水泵、闸门等一系列专业且复杂的设备设施，对操作人员具有很高的专业门槛和要求，因此在当前，社会上能够完全胜任这项工作的单位数量不多。尽管存在众多水利工程管理处和水管单位，但它们通常属于政府部门，仅负责本地工程的运维任务，很少参与运维市场的竞争。部分水利工程建设公司虽对参与维护项目表现出一定兴趣，但由于其侧重点在建设方面，而对水利运行和管护行业的陌生及经验的缺乏，其提供的管理人员能力和标准偏低，普遍达不到期望值，因此参与度也不高。

2. 服务内容广且精：水利工程维修养护工作涉及电气、机械、给排水、测量、信息化等多个专业领域，内容复杂多样，因此要求配备各种专业技能的管理员也较多，如上所述，各种专业岗位缺一不可。在经费有限的情况下，想要把全部专业人员安排到位比较困难，而一旦降低要求使用经验不足的管理人员，就会出现操作延时或失误，如备品备件库存不到位，不能够快速准备，影响设备维修进度，导致水闸或泵站无法及时启闭或正常使用的情況^[3]。

3. 考核机制存在不足：当前不少闸站的管理存在问题，比如管理人员利用管理机制的不完备或监管的盲区，对工程设施设备的定期维修养护不到位、故障排除不及时，甚至是表面应付水管单位的检查考核，侧重于考核内容的应对，而很少主动深入解决和处理设施设备的隐患和故障^[4]。而水管单位对此却没有有效的现场监督机制和量化的考核条款，也无法通过考核来决定外包管理人员的工资奖金等福利政策，导致激励措施跟不上，外包管理人员的责任心不强。

二、联合运维模式研究与分析

（一）联合运维模式

联合运维模式实际上是一种集成了自主运维与委托外包两种模式优势的策略。通过合理界定外包范畴，将那些人员岗位要求高、操作难度大、技能复杂度高，并且与系统功能联系不太紧密的运维工作外包出去，其他工作由水管单位人员共同参与的一种模式。此举旨在充分利用运维单位在专业管理和维修等领域的专长，促进水管单位与运维单位的优势互补，协调好各个环节，进一步确保水利水电工程的稳步运行^[5]。在日常运维管理中，运维单位主要参与闸站的主要操作岗位工作，水管单位的管理人员积极参与维修养护项目和闸站运维工作；同时，水管单位新入职员工需在泵站、水闸、水质监测站等场所实习，在外包企业人员带领教导下熟悉相关操作流程，不断积累经验提升能力，逐步成为能够独挡一面的专业技术人才^[6]。

（二）运维双方关系

在联合运维模式的应用场景下，双方的关系架构及协作机制呈现多层次特征，其核心在于通过资源整合与责任划分实现工程效益最大化。为此，水管单位与运维单位联合组建运维队伍，并推行联合管理机制，建立权责匹配、风险共担、技术协同、分工

明确的合作关系，旨在将运维双方及其管理内容紧密融合，实现多个管理维度的整合，并促进双方的资源共享，同时这对于水管单位在协调管理、掌握运维工作主动权，以及按照水利工程管理的规范与理念推进运维工作方面，均具有重要的重大意义。

（三）联合运维模式绩效预评估

1. 在联合运维模式管理的框架下，水管单位的管理人员深入参与运维工作，通过建立联动响应机制，能大大增强闸站管理效能。水管单位现场管理人员被赋予决策者的权力，运维单位人员则偏重于技术方案的制订者，双方联合最终完成决策，能够实现“问题上报—分派—处置”的一线闭环管理，相较于传统模式，有效缩短沟通与响应时间，并实现问题解决过程中的持续跟踪和反馈。

2. 联合运维模式中的相互监督机制通过多维度协同监管体系，起到互相监督彼此促进的作用，有效提升工程管理的规范性和透明度，同时也有助于降低运维成本。比如建立跨层级联合监督，整合省市县的监督力量，开展联合监督检查。运用智能化监管手段，建立监测平台，对设施设备运行、维修、养护、监测等数据量化，并进行分类考核打分。结合水利工程精细化或标准化创建工作^[7]，采用规范化管理手段，推行“四全”管理（全要素、全周期、全链条、全覆盖）闭环流程管理，能够优化机电设备运维管理程序，减轻人员运维负担，保障设备始终安全运行^[8]。

3. 联合运维模式的管理策略，通过产教融合、实践创新等机制，显著提升了水利行业人才培养质量。此举将水管单位的人才培养通道打开，新员工参与一线闸站操作和运维可以快速成长起来，为单位的人才储备和将来跨部门流动提供了便利。水管单位既能充分利用运维单位有经验的专业人员来培养自己的人才队伍，又能实时监督外包人员管理工作是否规范到位。这一模式打破了对招投标过程中长期单一运维单位中标的依靠，在运维工作中掌握了主导权，有效破除被运维单位长期牵着鼻子走的尴尬局面。

三、联合运维模式实践

（一）构建水管单位专项管理组织

张家港市地处长江下游，拥有长江岸线104千米，张家港市长江防洪工程管理处（以下简称长防处）作为属地水利工程管理部门，主要负责全市沿江21座闸站的运维管护工作，其中大型2座、中型14座、小型5座，水闸设计流量累计为2860m³/s，水泵设计流量累计为395m³/s。上述闸站共有现场管理人员101人，其中长防处本单位44人，其余57人通过公开招标择优选择外包单位提供运维服务，目前有太字圩港闸站等3座闸站实行联合运维。

长防处从2024年4月开始对下属3座闸站尝试采用联合运维模式对沿江闸站进行运维，将6名新员工编入原先外包单独管理的闸站岗位，为此设立了涵闸科专人负责统筹相关工作。科室主要负责闸站人员安排、监督考核、管理评价等工作，6名新员工则不仅参与执行运维任务，还须对运维服务实施现场监管与评估，拥

有现场问题的初步决策权，同时也是联系科室的纽带，能够第一时间收集和反馈现场管理情况。

（二）强化制度考核机制

联合运维模式下，水管单位与运维单位仍为合作管理主体，制度完善和履约考核机制是水管单位日常管理的基础条件。长防处依据江苏省水利工程精细化管理标准，建立了科学、多维的千分制考核指标，将工程安全、运行效率、维护质量、响应速度及成本控制等纳入统一评价框架，实现了规范化管理^[9]。通过量化指标与定性评估相结合，既关注硬件设施的完好率与功能性，也重视运维服务的及时性与规范性。考核结果应与运维费用支付直接挂钩，而运维单位的合同续签及人员激励又与此直接挂钩，形成“绩效－报酬”联动绑定机制，从而有效激发运维单位的责任意识与服务积极性^[10]。

（三）加强队伍建设与沟通机制

队伍建设与管理是联合运维模式管理的显著特征。为确保高效工作，充分发挥其主观能动性，将人员队伍进行有机整合和分配，并建立有效沟通机制。管理人员与维护人员需相互参与对方工作，实现队伍人才的相互融合，以发挥各自自主性与创造性，通过实现个人价值激发全员积极性。联合运维模式有利于加强队伍内部沟通协调的效率提升，如遇设施停机等情况可随时商讨解决方案并实施。

该模式重构了传统水利设施管理的生产关系：产权方、技术方、监管方通过共同参与、责任共担形成利益共同体。从一年半时间对3座联合运维闸站的结果分析来看，联合运维相比之前的闸站故障率平均下降22%，维修响应时间缩短35%，年度运维成本节约10-15%，显著提升了水利工程管理效能，对水利等公共设施管理领域均具有重要借鉴价值。

四、结语

在有些地区，水管单位的运维人员相对紧缺，同时财政管护资金有限的前提下，无法做到全部自管或全部外包，水利工程运维服务的管理正处于积极探索与发展的过程中。就当前管理现状而言，仍存在诸多亟待解决的问题。

在此背景下，联合运维模式通过“自主管理+委托外包”的联合机制，成为破解运维困境的有效方案。为构建长效发展机制，水管单位在确保水利工程设施设备运维的安全稳定前提下，也应建立健全相应的考核监督机制和奖惩制度，不断提高本单位员工的融入参与度，优化调整双方关系，重点强化“双向赋能”：一方面通过“师带徒”制度培养水管单位员工掌握技术标准和操作技能，另一方面要求运维单位不断提高管理水平，以确保外包服务的质量与效率不断提升，实现闸站运维的顺利平稳运行。

参考文献

[1] 黄建. 西塘河引水工程信息管理系统运维外包管理探索 [J]. 中国水能及电气化, 2013年, 9卷(12期): 43-47.
[2] 蒋亚东, 石焱文. 数字孪生技术在水利工程运行管理重点运用 [J]. 科技通报, 2019年, 35卷(11期): 5-9.
[3] 朱耀. 水利水电工程机电设备安装与维护与检修分析 [J]. 安徽建筑, 2021年, 28卷(6期): 185-186.
[4] 刘永强, 陈江茹, 姚秀兰, 吴浩. 政府购买中小型水利工程运维服务的承接方选择研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023年, 65卷(9期): 97-102, 109.
[5] 张云涛. 浅析水利工程机电设备安装和运维管理 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(8): 27-29.
[6] 韦庆华, 余金凤. 基层基层水利“订单式”人才培养教学实践——以广西水利电力职业技术学院为例 [J]. 广西教育, 2024(18): 138-141.
[7] 杨进山. 提高水利工程机电设备安装运维管理水平方法的探讨 [J]. 工程建设与设计, 2025年, 73卷(4期): 251-253.
[8] 赵文成. 水利工程机电设备安装问题及维护措施 [J]. 设备管理与维修, 2020(20): 56-58.
[9] 周旭东, 张莹, 崔凯, 尤文成. 试谈水利工程如何规范化管理泵站的安全运行 [J]. 治淮, 2019(2): 46-47.
[10] 杨瑞林. 提高水利工程机电设备安装运维管理水平方法的探讨 [J]. 湖南水利水电, 2023(8): 103-105.

水利资金监督检查现状、问题与发展策略初步研究

关艳, 许国锋

水利部建设管理与质量安全中心, 北京 100080

DOI:10.61369/WCEST.2025040013

摘 要 : 水利资金监督检查是保障水利工程建设顺利推进、确保资金安全与高效使用的关键举措。本文通过深入剖析2019年至2023年水利资金监督检查现状与存在问题,系统阐述了水利资金检查工作的开展情况、取得的成效、存在的问题及其根源,并提出了针对性的发展策略,旨在为提升水利资金监督管理水平提供参考依据,推动水利事业持续健康发展。

关 键 词 : 水利资金; 监督检查; 问题剖析; 发展策略

Preliminary Study on the Current Status, Problems, and Development Strategies of Water Conservancy Fund Supervision and Inspection

Guan Yan, Xu Guofeng

Construction Management and Quality Safety Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100080

Abstract : Supervision and inspection of water conservancy funds is a key measure to ensure the smooth progress of water conservancy engineering construction, guarantee the safety and efficient use of funds. This article provides an in-depth analysis of the current situation and existing problems of water conservancy fund supervision and inspection from 2019 to 2023. It systematically elaborates on the implementation, achievements, problems, and root causes of water conservancy fund inspection work, and proposes targeted development strategies aimed at improving the level of water conservancy fund supervision and management and promoting the sustainable and healthy development of the water conservancy industry.

Keywords : water conservancy funds; supervision and inspection; problem analysis; development strategy

引言

水利作为国家基础性产业,对于保障水资源合理利用、防洪抗灾以及促进经济社会稳定发展具有不可替代的重要性。水利资金作为水利项目建设与运行的经济支柱,其使用的规范性、安全性和有效性直接关乎水利工程的质量与效益。水利资金监督检查工作通过对资金的筹集、分配、使用等全过程进行严格把控,及时发现并纠正存在的问题,对确保水利资金发挥最大效益、推动水利事业高质量发展意义深远。

一、水利资金监督检查工作开展情况

(一) 监督检查开展情况

2019年至2021年,水利部采用综合性监督检查与专项检查相结合的方式,组织对全国31个省份和新疆生产建设兵团的水利资金开展了全覆盖的监督检查。检查内容包括中央预算内投资、水利发展资金等多种资金类型,涉及资金下达、到位、使用以及水资源费(税)收缴、管理等多个环节,确保检查工作全面且深入。2022年,按照“逐年深化、各有侧重、互为补充”的原则,对11个省份142个水利工程开展检查,进一步细化检查内容,提升检查深度。2023年,对11个省份133个水利工程项目开展检查,并从2022年度检查的4个省份中选取部分项目进行复查,检查范围精准聚焦重点区域和项目,检查方式不断优化创新^[1]。

(二) 监督检查发现问题情况

水利资金监督检查中,发现的问题涵盖资金到位、使用、管理以及项目建设等多个方面。2019年至2021年,发现的水利资金问题主要有地方财政截留、挪用水利建设资金,地方资金未到位,项目管理单位违规操作等。2022年水利资金检查中资金使用与管理、项目建设管理等方面的问题依然突出,部分问题的严重程度有所变化。2023年水利资金检查发现的主要问题有:资金到位方面存在地方财政截留滞留上级资金、地方配套资金不到位等;资金使用方面存在挪用挤占项目资金、虚列工程量结算工程款等,同时还存在农民工工资保障制度执行不到位、财政评审不规范等其他问题。上述问题反映出水利资金在使用、管理过程中面临诸多挑战,需要持续加强监管力度^[2]。

二、水利资金监督检查成效

（一）问题整改与责任追究

通过监督检查，有力地推动了问题整改。2019年至2021年检查发现的问题中，部分已得到有效整改，综合整改率达到80%，其中有3个省份整改率为100%，有15个省份整改率在70%以上。2022年水利资金监督检查中，有10个省份的发现问题立查立改率为27%，对7个省份的问题复查整改率为93%。2023水利资金检查通过督服结合、督帮一体推进等措施，问题立查立改率为36%，有了显著提高；对4个省份的问题复查整改率为90%。从2019至2021年共对190家责任单位实施“约谈”及以上责任追究，2022年共对43家责任单位实施“约谈”责任追究，2023年对21家责任单位实施“约谈”责任追究。对责任单位的问责，彰显了对水利资金使用管理违规行为的严肃态度，有效遏制了重大违规现象的发生。通过责任追究，有效地发挥了警示教育作用^[3]。

（二）资金监管意识与管理水平提升

水利资金监督检查强化了各级水行政主管部门及项目法人的资金风险意识，使其更加重视资金管理工作。从2021年立查立改率较低到2022年和2023年的逐步提高，从责任追究单位数量的逐年递减，体现了水行政主管部门及项目法人在思想认识和行动上的积极转变。在检查过程中，通过与被检查单位的深入沟通和指导，帮助其深挖问题根源、提出整改建议，有效提升了基层水利资金财务人员的专业水平，促进了水利资金管理水平的整体提升，推动了资金使用与管理向更加规范的方向发展^[4]。

（三）资金安全保障与效益发挥

在检查过程中，积极推动被截留资金和地方资金的到位与拨付，缓解了建设项目的资金压力。2023年检查推动了大量截留滞留资金的拨付，为工程建设提供了有力的资金支持。同时，及时发现并纠正水利资金使用中的违规问题，督促追回违规资金，有效防范了资金使用风险，保障了资金安全，确保水利资金能够真正用于水利工程建设，充分发挥其应有的效益，推动水利事业的健康发展^[2]。

三、存在的典型问题及原因分析

（一）存在的典型问题

1. 资金不到位问题。地方财政截留滞留上级水利资金以及地方资金不到位的情况较为普遍。2023年检查的11个省份均不同程度存在此类问题，涉及多个项目，严重影响了工程进度和结算，导致部分工程无法按时完工或无法实施，降低了水利设施的建设和服务效能。

2. 资金使用不规范问题。挪用挤占项目资金、未按实际完成工程量结算工程价款以及支付不合格工程进度款等问题时有发生，不仅造成了资金的浪费和损失，还严重影响了工程质量，损害了公共利益，增加了工程建设的安全隐患。

3. 其他管理漏洞问题。农民工工资保障制度执行不到位，威

胁到农民工的合法权益，易引发社会不稳定因素；财政评审不规范，随意压减工程投资且缺乏合理说明，影响工程顺利建设；会计核算不规范，影响财务信息的真实性和准确性，不利于资金的有效管理和监督^[5]。

（二）原因分析

1. 地方财政困境与意识淡薄。部分地方政府财政紧张，为缓解自身资金压力，将水利资金挪作他用，且对水利工程建设的重要性认识不足，依法施政意识淡薄，未充分履行应尽的责任，导致水利资金无法按时足额到位和合理使用。

2. 基层人员素质与能力短板。基层财务人员数量不足，难以满足日益增长的水利项目管理需求。同时，部分人员对财经法规制度缺乏了解，业务能力有限，在财务处理过程中容易出现各种错误，无法有效应对复杂的财务工作，从而导致资金管理混乱。

3. 部门协同与监管缺失。部分市县相关部门之间缺乏有效的沟通与协同，在水利资金监管方面未能形成合力。各部门对水利项目资金的监管各自为政，缺乏统一的规划和协调，导致监管力度不足，无法及时发现和纠正资金使用过程中的问题。

4. 监督体系不完善。在省级层面，多数省级水行政主管部门未积极开展水利资金检查，未能充分发挥地方监管的主动性和积极性。在部级层面，尚未建立起系统、常态化、上下联动的管理体系，无法实现对水利资金全方位、全过程的有效监督，使得一些问题得不到及时发现和处理。

四、水利资金使用管理发展策略

（一）完善监督体系

1. 构建“部省”两级协同监督机制。明确部级和省级在水利资金监督中的职责分工，加强两者之间的协调配合。部级层面制定统一的监督标准和规范，加强对省级监督工作的指导和监督；省级层面要根据本地实际情况，细化监督措施，确保监督工作落到实处，形成上下联动、协同高效的监督格局。

2. 强化日常监督与专项检查结合。建立常态化的日常监督机制，对水利资金的使用进行实时跟踪和监控，及时发现潜在问题。同时，针对重点项目、关键环节和突出问题，适时开展专项检查，深入剖析问题根源，采取针对性的解决措施，提高监督检查的精准性和有效性。

（二）加强人员队伍建设

1. 充实基层财务人员力量。加大对基层水利部门财务人员的配备力度，根据项目数量和规模合理确定人员编制，确保有足够的专业人员从事财务工作。通过提高待遇、提供良好的职业发展空间等方式，吸引和留住优秀的财务人才，为水利资金管理提供坚实的人力保障。

2. 提升人员专业素质与能力。定期组织财务人员培训，培训内容涵盖财经法规、财务制度、会计核算等方面的知识，同时加强职业道德教育，提高财务人员的责任意识和职业操守。鼓励财务人员自主学习，不断更新知识结构，提升业务能力，确保能够准确、规范地处理财务工作。

（三）增强部门协同合作

1. 建立跨部门沟通协调平台。搭建由发展改革、财政、水利等相关部门参与的沟通协调平台，定期共享信息，加强协作。在项目审批、资金拨付、监督检查等环节，各部门要密切配合，形成工作合力，共同推进水利项目的顺利实施。

2. 明确各部门监管职责。清晰界定各部门在水利资金监管中的职责，避免出现职责不清、推诿扯皮的现象。发展改革部门要加强项目审批管理，确保项目符合规划和政策要求；财政部门要严格资金拨付和管理，保障资金安全；水利部门要加强项目实施过程中的监督管理，确保工程质量和资金使用规范。各部门要各司其职，共同做好水利资金的监管工作。

（四）强化问责与激励机制

1. 严格责任追究制度。进一步完善责任追究制度，明确对违规行为的具体处罚措施，加大对违规单位和责任人的惩处力度。对于截留、挪用资金等严重违规行为，要依法依规严肃处理，绝不姑息迁就，形成强有力的威慑力。

2. 建立激励机制。设立合理的激励机制，对在水利资金管理

工作中表现突出的单位和个人给予表彰和奖励，如资金支持、荣誉称号等。通过激励机制，激发各单位和人员加强资金管理的积极性和主动性，营造良好的资金管理氛围^[6]。

五、结论

水利资金监督检查工作在过去几年取得了显著成效，有效推动了问题整改，提升了资金监管意识和管理水平，保障了资金安全和效益发挥。但是，当前仍存在诸多问题，如资金到位困难、使用不规范、管理漏洞等，这些问题的解决需要从完善管理体系、加强人员队伍建设、增强部门协同合作以及强化问责与激励机制等多方面入手。通过持续改进和完善监督检查工作，不断提升水利资金管理水平和，确保水利资金合理、安全、高效使用，为水利事业的高质量发展提供坚实的资金保障，进而推动经济社会的可持续发展。在未来的工作中，应持续关注水利资金监督检查工作的发展，不断适应新的形势和要求，在落实为基层减负的前提下探索更加有效的监督管理模式，为水利事业的蓬勃发展保驾护航。

参考文献

- [1] 关于切实加强水利资金使用监督管理的意见 [J]. 农村财政与财务, 2012, (06): 42-43.
- [2] 高磊, 姚亮, 张建伟. 浅析水利资金监督检查方式方法 [J]. 水利发展研究, 2021, 21(02): 77-80. DOI: 10.13928/j.cnki.wrd.2021.02.018.
- [3] 张彩霞. 财务管理在水利工程质量与安全监督中的问题分析 [J]. 山西财经大学学报, 2017, 39(S2): 59-60+71.
- [4] 骆思睿, 骆建宇, 罗玉兰. 浅析审计监督在水利财政资金使用管理中的作用 [J]. 当代经济, 2019, (07): 51-53.
- [5] 王景. 连云港市水利基建专项资金投融资问题研究 [D]. 燕山大学, 2015.
- [6] 《中央财政水利发展资金使用管理办法》[J]. 节能环保, 2017, (01): 34.

水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略

王作涛, 黄余倩

恩施州水文水资源勘测局, 湖北 恩施 445000

DOI:10.61369/WCEST.2025040015

摘 要 : 水库调洪演算是防洪减灾的重要技术手段, 而生态流量保障则是维护河流生态系统健康的基本要求。本文分析在水库调洪演算中考虑生态流量约束的背景与意义, 深入探讨生态流量约束下水库调洪面临的主要问题与挑战, 包括生态需求与防洪目标的矛盾、生态流量时空变化的复杂性、多目标优化决策的技术难度以及监测预报系统的不完善等。在此基础上, 提出基于生态需求的分期分级调度策略、实时优化的动态调整机制、多目标协同的智能决策方法和预报 – 调度 – 反馈的闭环控制体系等动态控制策略, 为实现防洪安全与生态保护的协调发展提供技术支撑。

关 键 词 : 水库调洪; 生态流量; 动态控制; 多目标优化; 智能决策

Dynamic Control Strategies for Ecological Flow Constraints in Reservoir Flood Regulation Calculations

Wang Zuotao, Huang Yuqian

Enshi Prefecture Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Enshi, Hubei 445000

Abstract : Reservoir flood regulation calculation is an important technical means for flood control and disaster reduction, while ecological flow guarantee is a basic requirement for maintaining the health of river ecosystems. This paper analyzes the background and significance of considering ecological flow constraints in reservoir flood control calculations, and deeply explores the main problems and challenges faced by reservoir flood control under ecological flow constraints, including the contradiction between ecological demands and flood control targets, the complexity of spatio-temporal variations of ecological flow, the technical difficulty of multi-objective optimization decision-making, and the imperfection of monitoring and forecasting systems. On this basis, dynamic control strategies such as the phased and graded dispatching strategy based on ecological demands, the dynamic adjustment mechanism of real-time optimization, the intelligent decision-making method of multi-objective collaboration, and the closed-loop control system of forecasting – dispatching – feedback are proposed, providing technical support for the coordinated development of flood control safety and ecological protection.

Keywords : reservoir flood regulation; ecological flow; dynamic control; multi-objective optimization; intelligent decision-making

引言

随着生态文明建设的深入推进, 河流生态系统保护日益受到重视, 水库作为重要的水利工程, 在发挥防洪、供水、发电等功能的同时, 也对下游河流生态系统产生显著影响。传统的水库调洪演算主要关注防洪安全, 往往忽视下游生态流量需求, 导致河流生态系统退化, 如何在保障防洪安全的前提下, 满足河流生态流量需求, 实现防洪与生态保护的协调, 已成为水库调度管理面临的重要课题。本文旨在探讨水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略, 通过分析现有问题, 提出科学合理的解决方案, 为水库生态调度提供理论依据和技术支撑。

一、水库调洪演算中考虑生态流量约束的背景与意义

(一) 维护河流生态系统健康的迫切需求

河流生态系统是地球生态系统的重要组成部分, 具有物质循环、能量流动、信息传递等重要功能。水库建设改变河流的自然

水文过程, 使下游河道流量减少、流速降低、水温变化, 严重影响水生生物的栖息环境, 生态流量是维持河流生态系统基本功能的最小流量需求, 保障生态流量对于维护河流生态系统的完整性和稳定性至关重要。在水库调洪演算中充分考虑生态流量约束, 能够有效缓解水库运行对下游生态环境的不利影响, 保护珍稀濒

危物种，维护生物多样性，促进河流生态系统的健康发展^[1]。

（二）实现防洪安全与生态保护的协调发展

防洪安全是水库的首要功能，而生态保护是可持续发展的必然要求，长期以来，水库调度往往将防洪安全置于绝对优先地位。在汛期大量拦蓄洪水，非汛期则尽可能蓄水以满足供水、发电等需求，导致下游生态流量严重不足，在新时期生态文明建设背景下，需要转变传统的单一目标调度模式，建立防洪安全与生态保护相协调的综合调度体系。通过在调洪演算中引入生态流量约束，可以在确保防洪安全的前提下，合理分配水资源，既满足人类社会的防洪需求，又保障河流生态系统的基本需求要求，实现人与自然的和谐共生^[2]。

（三）推动水库调度管理的科学化转型

传统的水库调度管理主要依靠经验判断和简单的调度规则，缺乏对生态需求的系统考虑。随着水资源管理理念的更新和技术手段的进步，水库调度正向着精细化、智能化、生态化的方向发展，在调洪演算中考虑生态流量约束，需要建立更加完善的监测体系、更加精准的预报模型、更加科学的决策方法。这将推动水库调度从粗放式管理向精细化管理转变，从单一目标向多目标协同转变，从静态调度向动态优化转变，通过引入先进的优化算法、智能决策技术等，可以大幅提升水库调度的科学化水平，为现代水利管理提供重要支撑^[3]。

二、生态流量约束下水库调洪面临的问题与挑战

（一）生态流量需求与防洪目标的矛盾冲突

在水库调洪过程中，防洪安全要求尽可能拦蓄洪水，降低下游洪峰流量，而生态流量保障则要求维持一定的下泄流量，两者之间存在根本性的矛盾，特别是在汛期。当上游来水量大、防洪压力高时，如何在确保大坝安全和下游防洪安全的前提下，同时满足生态流量需求，成为调度决策的难题，这种矛盾在极端洪水情况下更加突出，调度人员往往面临两难选择：过度强调生态流量可能威胁防洪安全，而完全忽视生态需求又会造成生态系统的严重破坏。此外，不同利益相关方对防洪安全和生态保护的重视程度不同，也增加协调的复杂性，防洪部门更关注洪水风险的降低，而环保部门则强调生态流量的保障，各方诉求的平衡需要建立更加完善的协调机制和决策体系，这种矛盾还体现在法律责任的双重约束上，防洪失误可能承担刑事责任，而违反生态流量规定同样面临环保问责，使调度决策承受巨大压力^[4]。

（二）生态流量时空变化的复杂性与不确定性

河流生态系统的需水量并非恒定不变，而是随季节、气候、生物生命周期等因素呈现复杂的时空变化特征。不同季节的生态流量需求差异显著，如鱼类产卵期需要特定的流量脉冲，而枯水期则需要维持基本的栖息地水深，这种时变性要求水库调度必须根据生态需求的动态变化进行相应调整，大大增加调度的复杂性。同时，生态流量需求还存在较大的不确定性，受气候变化、人类活动、生态系统演变等多重因素影响，准确预测和量化生态流量需求面临诸多技术挑战，现有的生态水文模型往往难以充分

反映生态系统的复杂响应机制，此外，不同河段的生态特征和保护目标存在差异，需要制定差异化的生态流量标准，这进一步增加调度决策的难度，在缺乏充分科学依据的情况下，如何合理确定生态流量阈值并进行动态调整，成为亟待解决的技术难题^[5]。

（三）多目标优化决策的技术难度

考虑生态流量约束的水库调洪本质上是一个多目标优化问题，需要在防洪安全、生态保护、供水保障、发电效益等多个相互制约的目标之间寻求最优平衡，这类多目标优化问题具有高维性、非线性、动态性等特点。传统的优化方法往往难以有效求解，目标函数的构建面临诸多困难，如何将定性的生态效益转化为可量化的指标，如何确定不同目标的权重系数，都需要深入研究，约束条件的处理也极为复杂，除常规的水量平衡、库容限制等约束外，还需要考虑生态流量的时变约束、水质约束等。求解算法的选择和改进是另一个技术难点，传统的线性规划、动态规划等方法在处理大规模、非线性问题时效率低下，而智能优化算法虽然具有较强的全局搜索能力，但收敛速度和解的质量仍有待提高，实时优化决策的要求进一步增加技术难度，需要在有限的时间内快速生成满意的调度方案^[6]。

（四）实时监测与预报系统的不完善

生态流量约束下的动态调控需要依托完善的监测预报系统，实时掌握水文、气象、生态等多方面信息，然而，目前大多数水库的监测系统仍以水文监测为主，生态监测能力严重不足，水质、水温、溶解氧等生态相关参数的监测站点稀少，监测频率低。难以满足生态调度的精细化需求，生物监测更是薄弱环节，缺乏对鱼类、底栖生物、浮游生物等关键物种的系统监测，无法及时掌握生态系统的动态变化，预报系统的精度和时效性也存在较大差距。现有的水文预报模型主要针对洪水预报，对中长期来水预报和生态需水预报的研究相对滞后，气象预报的不确定性直接影响水文预报的准确性，而生态预报则涉及更多复杂因素，预报难度更大，信息集成和共享机制不健全，水文、气象、生态等部门的数据标准不统一，信息孤岛现象严重，影响综合决策的效率和质量^[7]。

三、水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略

（一）基于生态需求的分期分级调度策略

基于生态需求的分期分级调度策略是实现生态流量动态控制的基础，该策略根据河流生态系统的季节性特征和关键生态过程，将全年划分为不同的生态调度期，并针对各期制定差异化的生态流量标准。在鱼类产卵繁殖期，需要模拟自然洪水脉冲，适当增加下泄流量，创造适宜的产卵环境，在鱼类越冬期，则需要维持稳定的基流，保障越冬栖息地的水深和水温条件，分级调度体现在根据来水情况和防洪形势，将生态流量需求划分为最小、适宜、理想等不同级别，当防洪压力较小时，尽可能满足理想生态流量。当防洪形势严峻时，至少保障最小生态流量，这种分期分级的调度模式既考虑生态系统的时变需求，又兼顾防洪安全的刚性约束，通过建立生态调度期划分标准、生态流量分级体系、

转换条件判别准则等，形成一套完整的调度规则体系，为调度人员提供明确的操作指南，同时，应建立与相邻水库的联合调度机制，实现流域尺度的生态流量协同保障^[8]。

（二）实时优化的动态调整机制

实时优化的动态调整机制是应对不确定性和突发情况的关键手段，该机制基于滚动优化的思想，根据实时监测信息和短期预报结果，不断更新调度方案，建立快速响应的决策模型。当监测到生态指标异常或预报来水发生显著变化时，立即启动优化计算，生成新的调度方案，优化模型采用多时段耦合的方式，既考虑当前时段的调度决策，又预留未来调整的灵活性，引入自适应调整策略，根据历史调度效果和生态响应情况，动态修正模型参数和约束条件，建立多情景分析框架。针对不同的来水情景和生态需求情景，预先制定应对方案，提高决策效率，实施分级响应机制，根据偏离程度的大小，采取不同强度的调整措施，完善信息反馈通道，及时收集下游生态监测数据，评估调度效果，为后续优化提供依据，通过持续的监测-预报-决策-执行-反馈循环，实现调度方案的动态优化和精准控制，此外，还应建立应急调度预案库，针对极端天气事件和生态危机情况制定快速响应方案^[9]。

（三）多目标协同的智能决策方法

多目标协同的智能决策方法是解决复杂优化问题的有效途径，采用先进的多目标进化算法，如NSGA-III、MOEA/D等，能够在高维目标空间中搜索Pareto最优解集，为决策者提供多样化的方案选择。构建综合评价指标体系，将防洪风险、生态效益、经济效益等多维目标统一到可比较的框架下，引入模糊决策理论，处理目标权重的不确定性和决策者偏好的模糊性，开发智能决策支持系统，集成专家知识库、案例推理、机器学习等技术，提高决策的智能化水平，建立人机交互的决策模式，充分发挥人的经验判断和机器的计算能力，采用并行计算和云计算技术，提高大规模优化问题的求解效率。通过深度学习方法，挖掘历史调度数据中的隐含规律，建立调度经验的智能提取和应用机制，整合多源异构数据，包括水文、气象、生态、社会经济等信

息，提供全方位的决策支撑，强化与国际先进技术的交流合作，引进和消化吸收国外成熟的生态调度决策技术和管理经验^[10]。

（四）预报-调度-反馈的闭环控制体系

预报-调度-反馈的闭环控制体系是实现精准调控的制度保障，在预报环节，建立耦合气象-水文-生态的综合预报模型，提高中长期来水预报和生态需水预报的精度。采用集合预报技术，量化预报的不确定性，为风险决策提供概率信息，在调度环节，基于预报信息和实时监测数据，运用优化决策模型生成调度方案，并通过仿真分析评估方案的可行性，建立多部门协同的调度执行机制，确保调度指令的及时准确传达和执行，在反馈环节，构建全方位的效果评估体系，不仅评估防洪效果，更要重点评估生态效果，建立生态响应的快速评估方法，及时发现问题并调整策略，完善信息管理平台，实现数据的自动采集、传输、处理和共享，建立定期会商和应急会商机制。加强各部门之间的沟通协调，通过制度化的闭环管理，不断提升调度水平，实现防洪与生态保护的动态平衡，定期开展第三方评估，客观评价生态流量保障效果，确保闭环控制体系的有效运行。

四、结语

水库调洪演算中考虑生态流量约束是生态文明建设的必然要求，也是水利工程可持续发展的重要方向。通过实施基于生态需求的分期分级调度策略、实时优化的动态调整机制、多目标协同的智能决策方法和预报-调度-反馈的闭环控制体系，可以有效解决生态流量约束下水库调洪面临的技术难题，实现防洪安全与生态保护的协调统一。未来需要进一步加强基础研究，完善技术体系，推动相关标准规范的制定，为生态文明建设和美丽中国建设作出更大贡献，同时，需要加快技术创新和成果转化，积极开展试点示范，总结推广成功经验，各级水利部门应加强能力建设，培养复合型专业人才，建立健全生态流量保障的长效机制，推动形成全社会共同参与的良好格局。

参考文献

[1] 张炳军, 张靖鸿, 来常玉. 水库调洪演算应用解析 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (13): 103-105.
[2] 周光涛, 郭龙胜, 丁善玲. 水库调洪演算中水位流量控制泄流方式探讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(01): 36-37.
[3] 中国长江电力股份有限公司. 一种水文-水动力学耦合的河道型水库调洪演算方法 :CN116542021B[P/OL].2024-08-13[2025-09-12].
[4] 浙江广川工程咨询有限公司. 一种基于闸门精细化控制的调洪演算方法 :CN117314047A[P/OL].2023-12-29[2025-09-12].
[5] 山东黄河河务局山东黄河信息中心. 一种基于水量平衡迭代法的水库调洪演算方法 :CN117669921A[P/OL].2024-03-08[2025-09-12].
[6] 李凤莲. 水库调洪演算分析与标准化管理研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2023, 23(11): 85-87.
[7] 单玉芬. 泥河水库汛期划分初步研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(12): 81-83.
[8] 任怡. 口泉河(朔州段)河道洪水调洪演算计算分析 [J]. 水利技术监督, 2024, (06): 232-235.
[9] 石佳. 基于挡水路基泥沙淤积预测及调洪演算探讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(12): 135-138.
[10] 李朋, 闫红飞, 吴朱昊. 小型水库调洪演算及日常管养工作研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024, (04): 151-154+10011.

基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术优化

宋光辉, 林刚

中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730

DOI:10.61369/WCEST.2025040018

摘 要 : 在铁路桥梁工程运行过程中, 应对基础冲刷防护工作加大重视, 并要合理优化防护技术。在实际开展防护工作时, 可以运用泥沙输移模型, 确保有效掌握相关数据, 明确水流冲刷情况, 合理采取防护措施, 有效提升冲刷防护效果。本文基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术展开分析, 以泥沙河道治理工程跨河铁路桥基础防护设计为例, 探讨了泥沙输移模型的应用, 并提出具体的技术优化对策, 希望能够为相关研究人员起到一些参考作用。

关 键 词 : 泥沙输移模型; 铁路桥基础局部; 冲刷防护技术

Optimization of Local erosion Protection Technology for Railway Bridge Foundations Based on Sediment Transport Model

Song Guanghui, Lin Gang

China Water Conservancy and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., LTD., Chengdu, Sichuan 611730

Abstract : In the operation process of railway bridge engineering, more attention should be paid to the protection of foundation erosion, and the protection technology should be reasonably optimized. In actual protective work, sediment transport models can be used to ensure effective grasp of relevant data, clarify the situation of water flow erosion, take reasonable protective measures, and effectively improve the effectiveness of erosion protection. This article analyzes the local erosion protection technology of railway bridge foundation based on sediment transport model, explores the application of sediment transport model, and proposes specific technical optimization measures, hoping to provide some reference for relevant researchers.

Keywords : sediment transport model; partial foundation of railway bridge; erosion protection technology

引言

对于铁路桥基础, 需要做好局部冲刷防护, 以此来使桥梁工程受到的灾害影响程度得到降低。在实际展开冲刷防护工作时, 需要合理优化防护技术手段, 在此过程中可以对泥沙输移模型加以运用, 可以对不同条件下泥沙输移过程进行模拟, 以此来对水域发生的地形变化加以预测, 为铁路桥基础局部冲刷防护工作提供有力依据, 使桥梁工程基础所受到的冲刷作用得到减轻, 进一步保证基础结构的稳定性, 从而维持铁路桥梁的正常运行。

一、项目背景

堆龙河是拉萨河下游右岸的一大支流, 发源于冈底斯山脉东段南麓, 流经拉萨市堆龙德庆区主城区。堆龙河治理工程正处于堆龙德庆区主城区河段, 此河段两岸建有100年一遇防洪堤, 承担着对堆龙德庆区行政、居民集中住宅区以及商业中心的防洪任务。工程区出露地层主要为第四系松散堆积层, 为河流冲积相砂卵石层, 厚度大于30m。土层在纵、横两个方面上变化不大, 颗粒粒径由上至下逐渐变细, 密实度逐渐变大, 河床属于砂卵石非

粘性土河床。堆龙河属多泥沙河流, 多年平均泥沙总量为约27.2万t/年。工程河段有多座桥梁跨河而建, 其中青藏铁路桥6#桥就建在此处。

二、项目治理任务

堆龙河是拉萨河下游右岸的一大支流, 作为一条纵向穿过拉萨市堆龙德庆区的天然河流, 其所流经的城市区域自然而然的形成了水体景观带, 为提高市民生活舒适度和提升城市环境形象做

出了重要的贡献。河道经过多年运行积累了淤积严重、生活垃圾堆弃、违规生产侵占河道等诸多问题，让河道水体景观带完全失去了，积极的作用，甚至变成了城市的负担。因此，现阶段，需要有效加强堆龙河的治理工作，合理优化河道治理区域跨河重要桥梁的基础的防护设计。在本次项目中，主要治理任务如下，首先要清除多年淤积泥沙，形成自然河道水体景观。其次，需要新建两岸防洪堤，以满足100年一遇防洪需要。最后，需要确保满足汛期上游来水所携绝大部分推移质能够快速通过，不形成淤积等。为了保证工区桥梁的安全运行，需要对铁路桥梁加强安全防护，对桥梁桩基冲刷采取有效的安全防护措施，进一步保证桩基结构的稳定性。对于铁路桥基础局部冲刷，需要做好安全防护工作，有效展开桩基冲刷安全防护，避免对桥梁承载能力产生影响，有效保证桥梁运行的安全性和耐久性。在实际展开防护工作时，需要充分了解铁路桥的实际情况，尤其要对水文条件和地质条件加以掌握，有效获取相关数据，并在此基础上建立泥沙输移模型，对自然地质条件有效掌握，确定防洪影响冲刷深度，有针对性的采取防护技术手段，以此来全面保证桥梁运行安全性。

三、泥沙输移模型概述

对于堆龙河治理工程，在对工区桥梁开展冲刷防护工作时，需要有效运用泥沙输移模型，以此来明确泥沙输移情况。通过运用该模型可以有效评估桥梁运行安全性，其主要包括流体动力学模型、泥沙输移模型以及泥沙沉降和侵蚀模型。首先，对于流体动力学模型，其可以对水流运动状态进行模拟，可以有效获取水深、流向以及流速等参数，其对泥沙输移过程具有关键影响。其次，对于泥沙输移模型，主要运用泥沙运动学原理，可以对水流作用下泥沙输移过程加以模拟，主要包括悬移质输移与推移质输移。最后，对于泥沙沉降和侵蚀模型，可以对水流中的沉降与侵蚀过程有效模拟，如悬移质泥沙沉降、河床地形变化、推移质泥沙侵蚀等。对于该模型，其在我国地貌学、水文学、海岸工程以及河流工程等领域的应用十分广泛，可以对不同条件下泥沙输移过程进行模拟，对海岸以及河流等水域地形变化有效预测，为防洪减灾等工作开展提供有力依据。在铁路桥基础局部冲刷防护过程中，通过对泥沙输移模型加以运用，可以有效建立模型，并预测水域影响，对水流冲刷所造成的影响展开预测，合理采取防护措施，从而使铁路桥基础质量得到提高^[1]。

四、基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术优化对策

在堆龙河治理工程实施过程中，需要运用泥沙输移模型优化铁路桥基础局部冲刷防护技术，可以借助模型的模拟结果，合理制定基础局部冲刷防护方案，使相关防护技术的应用更具有针对性，进一步提升防护效果，从而有效保证铁路桥基础的安全性和稳定性。

（一）铁路桥基础局部冲刷防护技术类型

在堆龙河治理工程开展过程中，为了有效提升铁路桥基础的

局部冲刷防护效果，应合理选择防护技术类型。在此过程中，应做好数据收集与分析工作。首先，在数据收集方面，应对桥梁基础资料有效收集，并获取前期设计文件，了解铁路桥梁的修建状况，掌握历史冲刷情况。其次，在数据分析方面，应结合收集到的数据，深入分析桥梁局部冲刷情况，具体包括以下内容。相关工作人员应运用泥沙输移模型，深入分析地理环境，明确桥梁地理位置，并了解其水文与地质条件。与此同时，应进行水动力分析，具体可以采用计算流体力学方法，对水流动态特性加以模拟，对桥梁基础局部可能受到的冲刷区域准确预测。此外，还需要分析桥梁结构，具体可以展开动力学与静力学分析，对局部冲刷影响风险展开评估。对于冲刷防护技术类型，主要包括以下两种。

1.主动防护

在铁路桥梁基础局部冲刷防护过程中，应采用主动防护技术，结合数据分析结果，对需要采取的防护措施进行明确，如河道整治、修建工程以及系统建设。与此同时，需要对施工计划合理制定，编制时间表，使工程施工质量得到保证。在此过程中，应对相应的设备与材料加以配置，对专业团队加以组织，确保有效强化施工工作。在主动防护过程中，应对河床高程加大注意，可以对底板、护圈等有效增设，使冲刷水流动力得到减轻，增强桥梁基础的抗冲刷性能^[5]。对于此种防护方式，可以有效达到“减冲”效果，常见防护技术措施如下。

墩前牺牲桩。对于铁路桥梁，应在桥梁基础上游对小直径群桩进行布置，这样一来在上游水流冲刷桥梁基础时，可以通过群桩减小水流速度，降低冲刷力量，扰动水流的冲刷方向，从而减弱水流冲刷对桥梁基础的作用，有效提升防护效果。对于该防护技术，其可以对水流有效消能，使墩前的下降水流得到降低，并可以在桥梁墩部周围有效降低马蹄形漩涡扰流作用，以此来起到扰流效果，确保可以将水流冲刷有效集中于群桩，使桥墩基础得到有效保护。在实际运用该类防护技术时，应对群桩防护效果的影响因素展开分析，具体包括桩大小、数目、排布形式等。在了解各类影响因素后，需要基于泥沙输移模型合理运用牺牲桩，从而使冲刷作用得到降低。

护圈。对于铁路桥梁基础，应在桥墩位置对不同形式的护圈进行设置。通过使用护圈可以有效削弱下降水流，并使马蹄形漩涡所带来的作用得到减轻，从而缓解前进水流对桥墩的冲刷，有效提升防护效果。在分析护圈防护效果后，可以发现床面下放置护圈，并和河床保持相应距离，可以使漩涡效果得到降低，并使冲刷深度得到降低。基于泥沙输移模型展开分析，护圈位置直接影响到水流冲刷防护效果，通过使用护圈可以使水流分开，具体划分为上下两个部分。对于护圈的上方区域，可以对下降流起到障碍，并削弱下降水流带来的冲击力。对于护圈下方，可以减小下降水流，使马蹄形漩涡得到减轻。在此期间，需要合理选择护圈位置与尺寸，确保可以有效维持护圈防护效果。

环翼式桥墩。对于铁路桥梁，可以在其基础局部位置对相应数量挡板进行加装，其为翼状，可以使水流能力得到削弱。在实际使用环翼式桥墩时，可以借助翼状挡板，使下潜水流大小、方

向得到改变,使漩涡扰流能力得到减弱,使河床颗粒的搬运能力得到降低。在此过程中,应对泥沙输移模型加以运用,充分对比水深与流量,并对挡板进行设置,使其与河床保持合理距离,从而起到显著的防护效果^[6]。

混凝土面板。在铁路桥梁工程项目中,为了能够有效防护基础局部位置,做好防冲刷工作,可以混凝土面板作为具体的防护屏障。具体来说,在桥梁基础局部冲刷防护过程中,应有效平铺混凝土面板,并合理设计防护边缘的坡度,在临水面设雷诺护垫进行铺设,确保可以形成柔性防护面,使泥沙和水流与面板的刚性接触得到隔绝,防止造成相应的破坏问题,确保有效发挥出防护作用。

2. 被动防护

对于铁路桥梁基础局部的冲刷被动防护,需要明确被冲刷对象,合理设置保护层。具体来说,对于桥墩周围,应在河床位置对保护层进行铺设,如铺设碎石,使土体具有的抗冲刷能力得到增强,常见被动防护技术如下。

抛石。对于抛石防护,其应用比较广泛,不仅取材方便,而且工艺比较简单,在实际操作时具有较大的灵活性。通过有效进行抛石,可以使泥沙卷扬起动过程中的水流作用力得到增加,而且通过使用粗糙的石块,可以使底层水流速度得到减缓。但对于此种防护技术,其缺乏整体性,具有较大的工程量,而且运行维护费用相对较大。对此,可以采用抛石替代方法,具体可以采用混凝土铰链、石笼以及硬壳单元体进行防护,使下降水流的冲刷得到有效阻挡,使前进水流对泥沙的携带能力得到减弱。

扩大墩基础防护。在铁路桥梁工程的施工阶段,应在河床下埋入钢围堰,并对下部桩基础进行施工。在完成具体的基础施工后,应在床面对封顶进行预留,并放置桥墩,以此来有效修建防护工程。对于此类防护技术,可以使下降水流的淘刷力得到降低,使冲砂和携砂能力得到减弱^[7]。

(二) 方案制定

伴随着气候的不断变化,以及受到人类活动带来的影响,进而导致桥梁在河岸以及河底会受到局部冲刷,容易损坏桥梁结构,甚至造成桥梁倒塌,影响到铁路交通的正常运输,严重威胁到人们的生命财产安全。对此,需要通过泥沙输移模型全面分析桥梁局部冲刷,并采取有效的安全防护措施^[8]。青藏铁路桥6#桥桥基的防护设计是在工程河段河道治理的基础之上进行的,河道治理工程设计方案直接影响到6#桥桥基防护方案的设计,所以河道治理设计方案与桥梁防护设计方案是密不可分的。首先对全河道进行淤积泥沙进行挖除,在河道狭窄段设置较陡的河底纵向坡降,使过水流速快于河底坡度纵比降较缓河段,其目的是在主汛期工程河段上游来水流量大,携沙能力强,利用较陡的纵坡使河道狭窄段过流流速加大,让汛期洪水所携带绝大部分的推移质迅速通过,以改善该段河道的行洪能力,避免河道泥沙淤积的发生。但是河道狭窄段往往是跨河桥梁选址的重要位置,青藏铁路桥6#桥就建在堆龙河治理工程河道狭窄段,并且桥基附近有河道泥沙大量淤积情况,如果堆龙河河道治理能够达到预期效果,6#桥桥基范围内河道淤沙的清除,并设置河底陡坡用于有效输沙

的设计方案比较执行,那么6#桥桥基的防护设计就显得尤为重要^[9]。

在实际制定安全防护方案时,应从以下几个方面入手。

1. 展开数据计算

第一,桥基流速计算。

工程河道治理治理后铁路桥6#桥桥基位置河道地坡纵比降为3.8‰,通过建立数学模型计算桥下河道过流速度,得出在汛期此纵坡可有效上游来水所携推移质,有效避免汛期推移质在铁路桥桥基形成淤积情况发生。在桥基附近流速计算时,工程河道流速计算采用欧拉-拉格朗日方法(ELM)追踪方法进行数学模拟计算,对流项采用ELM方法处理,空间离散为三角形网格,ELM追踪示意图与移动最小二乘法(MLS)拟合所需的节点如图1、图2所示。

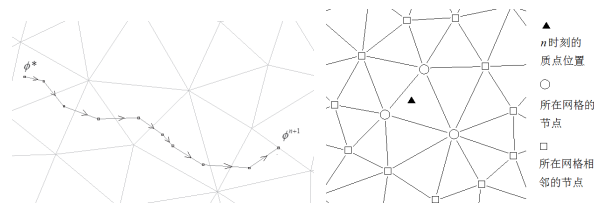


图1 ELM追踪示意图

图2 MLS拟合所需的节点

ELM是模型求解中最耗时的部分,其方法的核心是从 $n+1$ 时刻的质点位置高效精确地沿流线逆向追踪到其 n 时刻的位置。为兼顾效率和精度通常采用多步欧拉积分法进行分步追踪。

第二,桥基冲刷计算。

6#桥桥基的防护设计既要满足抗冲要求,还要满足防护面过流速度不可高于桥基下游土质河床的补充流速,以防止对下游产生冲刷破坏。工程河段河床属于砂卵石非粘性土河床,根据TB 10017-2021《铁路工程水文勘测设计规范》计算公式要求对桥基进行冲刷计算。

2. 明确防护工作思路

在计算工作结束后,可以有效获取相关数据,并结合堆龙河治理工程的实际情况,合理选择主动防护技术。具体来说,应按照以下思路实施。

第一,改善桥梁结构。对于铁路桥梁,应对其桥墩进行加固,按照具体的结构分析结果,明确可能存在冲刷问题的桥墩,并采取加固措施,对高强度材料加以使用,使桥梁基础抗冲刷能力得到增强。相关施工人员还应做好防护涂层,在桥梁结构表面对涂层进行涂覆,使结构表面的抗冲蚀性能得到提升,使冲刷带来的影响得到降低。

第二,做好河道整治工作。首先,需要及时清淤疏浚,当桥梁存在较大的冲刷风险时,需要在其下游有效开展清淤疏浚工作,使河道通畅度得到保证,避免堆积冲刷物。其次,应有效修整河道,按照水动力分析结果,分析河床的冲刷风险,做好修整工作,使水流的动态特性得到优化,从而使冲刷问题得到缓解。

3. 合理采取抗冲刷措施

在该工程的防护工作开展过程中,主要采用主动防护中第四种混凝土面板抗冲措施,可以起到显著的防护效果。

（1）总布置布置

堆龙河6#桥铁路桥所在位置垂直河道中心线河宽约163m，6#铁路桥斜跨河道总长度约221m。桥梁防护设计采用钢筋混凝土面板防护附加雷诺护垫，软硬结合的设计方案进行设计，即能够输送泥沙又能够铁路桥桥基进行有效的抗冲刷防护。设计如图

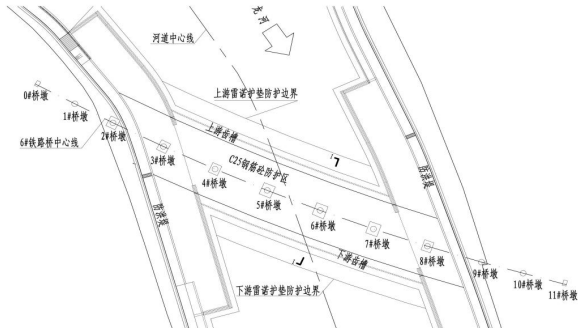


图3 6#铁路桥防护平面布置图

（2）结构设计

防护面板采用30cm厚钢筋混凝土面板，对铁路桥中心轴线上、下游各15m范围内进行平铺防护，上下游防护边缘设置坡度为1:1.5的斜坡钢筋混凝土面板垂裙，延伸至河床清淤线以下约3m深，以满足设计冲刷深度要求。临水面铺设厚度30cm的雷诺护

垫^[4]，形成相对柔性防护面，以隔绝汛期大粒径推移质移动与混凝土面板的刚性接触，避免冲击破坏。

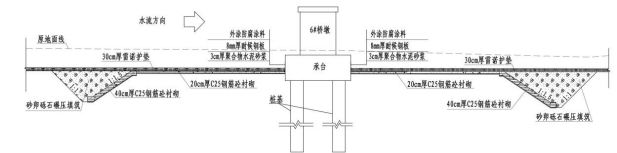


图4 6#铁路桥防护结构设计图

五、结束语

综上所述，在铁路桥梁基础局部冲刷防护工作中，泥沙输移模型的应用具有显著效果，可以有效获取相关数据，并对水域地形变化加以预测，确保可以有针对性地采取防护技术，优化具体的防护措施，从而使冲刷防护效果得到提升。在此过程中，需要在模型分析的基础上，合理制定防护方案，并采取有效的防护技术措施，充分运用主动防护与被动防护技术，提升冲刷防护水平，进一步保证桥梁基础的稳定性，维持铁路桥梁的正常运行。

参考文献

[1] 王会丽. 桥梁桩基冲刷固化土防护施工技术及管理[J]. 城市道桥与防洪, 2025, 11(3): 307–310, 315.
[2] 张诗怡, 张研, 刘畅. 采用固化土防护技术的海上风机单桩基础冲刷效果数值分析[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(8): 1–8.
[3] 杨磊, 毛娟龙. 东海大桥桩基冲刷防护工程斜向溜筒抛石船关键技术[J]. 施工技术, 2021, 50(11): 71–74.
[4] 韩拓, 张琳鹏, 翟金萍. 某高速公路跨渭河特大桥桩基冲刷下切防护施工技术要点探讨[J]. 陕西水利, 2022(2): 152–153.
[5] 梁发云, 金乐文, 王琛, 等. 中国古代桥梁冲刷防护策略的典型案例分析与特征分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 65–74.
[6] 郭佳欣, 拾兵. 桥墩冲刷及其防护技术的研究综述[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(4): 84–92.
[7] 戴治恒. 桥梁群桩冲刷固化土防护效果分析[J]. 海岸工程, 2025, 44(2): 186–196.

水电工程临时占地水土保持恢复技术研究

祁光辉

绥棱县长阁灌区防护中心, 黑龙江 绥棱 152200

DOI:10.61369/WCEST.2025040019

摘要：水电工程建设过程中临时占地造成的水土流失问题日益突出，严重影响工程区域生态环境质量。本研究以西南地区某大型水电站为例，通过对施工期临时占地区域水土流失特征的系统监测，分析了不同占地类型的土壤侵蚀模数变化规律。研究构建了涵盖土壤重构、植被恢复、工程措施优化的综合技术体系，其中土壤改良技术使土壤有机质含量提升至 18.5 g/kg，植被覆盖度恢复至 75% 以上。监测结果表明，采用综合恢复技术后，临时占地区域土壤流失量降低 68.2%，植物物种多样性指数达到 2.31，生态系统服务功能基本恢复。研究成果为水电工程临时占地生态修复提供了技术支持。

关键词：水电工程；临时占地；水土保持；生态恢复；土壤重构；植被恢复

Research on Soil and Water Conservation Restoration Technology for Temporary Occupation of Hydropower Projects

Qi Guanghui

Suiling County Changge Irrigation Protection Center, Suiling, Heilongjiang 152200

Abstract： Soil erosion caused by temporary land occupation during hydropower construction has become increasingly prominent, severely impacting ecological quality in project areas. This study examines a large hydropower station in Southwest China, conducting systematic monitoring of soil erosion characteristics during construction phases to analyze erosion modulus patterns across different land use types. A comprehensive technical framework integrating soil reclamation, vegetation restoration, and engineering optimization was developed. Soil improvement techniques increased organic matter content to 18.5 g/kg and restored vegetation coverage to over 75%. Monitoring results showed a 68.2% reduction in soil erosion volume and a plant diversity index reaching 2.31, with ecosystem services largely restored. These findings provide technical support for ecological restoration of temporary hydropower project sites.

Keywords： hydropower engineering; temporary land occupation; soil and water conservation; ecological restoration; soil reconstruction; vegetation restoration

引言

随着中国水电事业快速发展，大型水电工程建设中临时占地规模日益扩大，其面积往往达到永久占地的 2-3 倍，涵盖施工道路、料场、渣场、生活营地等多种类型。这些临时用地在建设期间承受高强度扰动，原有植被完全清除，土壤结构严重破坏，导致水土流失问题异常突出。特别是西南山区地形陡峭、降雨集中的自然条件下，临时占地的土壤侵蚀模数可达原地貌的 10-20 倍。当前临时占地水土保持恢复面临土壤基质破坏严重、原生植被种子库消失、边坡稳定性差、生态系统脆弱等技术难题，常规恢复措施难以有效实施，恢复后的生态系统抗干扰能力弱，容易发生退化。因此，迫切需要建立一套针对水电工程临时占地特点的科学有效水土保持恢复技术体系，为工程建设与生态保护协调发展提供技术支持。

一、工程案例概况与临时占地水土流失问题诊断

（一）案例工程背景与临时占地类型及分布特征

研究选取位于金沙江中游的大型水电站工程，装机容量 4200

MW，建设期 8 年。工程区属亚热带季风气候，年降雨量 1100 mm 且集中在雨季，地貌为深切河谷，坡度普遍超过 35°，基岩以花岗岩和片麻岩为主，土层薄且抗蚀能力差。临时占地总面积达 486.7 hm²，包括五种主要类型：施工道路占地形成大量裸露边

坡；弃渣场集中布置在沟谷地带，渣体松散易产生水土流失；料场开采形成多处采坑和高陡边坡；施工生产区地表硬化严重，周边土壤污染明显；生活营地人员活动频繁，生活污水和垃圾对土壤环境造成影响。各类临时占地由于功能不同，扰动方式和强度存在显著差异^[1]。

（二）施工期水土流失监测数据与侵蚀模数分析

采用径流小区法、钢钎法和遥感监测相结合的方式系统进行监测，覆盖2个完整水文年。监测结果显示，不同类型临时占地的土壤侵蚀强度差异显著，施工道路边坡侵蚀最为严重，弃渣场边坡部位侵蚀模数最高，料场开采面岩石风化物大量流失，施工生产区虽然地表硬化但周边裸露地表侵蚀严重。与原地貌相比，各类临时占地的土壤侵蚀强度增加了4至30倍。降雨侵蚀力与土壤流失量呈显著正相关，雨季土壤流失量占全年的70%以上，单次暴雨造成的损失可占月流失量的40%以上。坡度是影响侵蚀强度的关键因子，植被覆盖度与侵蚀模数呈负指数关系。

（三）临时占地区域土壤理化性质退化评估

通过对比分析临时占地扰动前后的土壤理化性质变化，发现土壤退化程度严重。土壤物理性质方面，容重显著增加，孔隙度和田间持水量大幅下降，土壤团粒结构几乎完全破坏，渗透性能急剧恶化^[2]。土壤化学性质显著恶化，有机质含量降幅超过80%，全氮、速效磷和速效钾大幅下降，pH值因不同污染源影响出现分化，阳离子交换量显著降低，保肥能力严重下降。土壤生物活性几乎丧失，微生物数量急剧减少，土壤酶活性显著降低，土壤呼吸速率极低，表明土壤生态系统功能基本丧失。这种全方位的土壤退化为后续的生态恢复带来了巨大挑战。

（四）植被破坏程度与生态服务功能损失量化

临时占地导致原生植被完全破坏，工程区原生植被以亚热带常绿阔叶林为主，包括多种乔木、灌木和草本植物。施工扰动使植被生物量损失巨大，植物多样性严重降低，原生植被多样性指数较高的生态系统完全消失，仅在边缘地带带有少量先锋植物入侵，物种数从126种锐减至不足10种。土壤种子库严重破坏，为自然恢复带来困难。生态系统服务功能损失评估显示，水源涵养功能、土壤保持功能、碳固定功能均遭受重大损失，造成巨大的经济损失。生物多样性维持功能基本丧失，野生动物栖息地破碎化严重，生态系统的完整性和稳定性受到严重威胁，急需采取有效的恢复措施。

二、临时占地水土保持恢复关键技术体系与实施效果

（一）土壤重构与改良技术应用

土壤重构是临时占地生态恢复的基础工程，针对不同占地类型制定差异化重构方案。施工道路和料场边坡采用客土回填技术，利用预先剥离保存的表土进行回填；弃渣场采用渣土混合重构，在渣体表面形成适宜的种植土层；施工生产区先进行污染治理后回填改良土壤^[3]。土壤改良采用物理、化学、生物综合措施，物理改良主要调整土壤质地和结构，添加改良剂促进团粒结构形成；化学改良重点补充养分和调节pH值，根据土壤测定结果

合理施用有机肥、复合肥等；生物改良技术效果显著，通过接种丛枝菌根真菌、施用微生物菌剂、种植豆科绿肥植物等措施激活土壤生物活性。经过系统的土壤重构与改良，土壤理化性质明显改善，容重显著降低，孔隙度大幅提升，有机质含量显著增加，土壤微生物数量和酶活性基本恢复到原土壤水平的65% ~ 70%。

（二）乡土植物筛选与快速植被恢复技术

植物材料选择遵循乡土性、适应性、功能性原则，通过野外调查和栽培试验筛选适宜植物。先锋植物选择生长迅速、适应性强的禾本科和豆科草本植物；建群植物以根系发达、固土能力强的乡土灌木为主；目标植物群落以当地顶极群落优势种为主，逐步恢复至近自然状态。根据不同立地条件制定相应的植物配置模式，如表1所示。快速植被恢复采用多种技术手段，液质喷播技术适用于陡峭边坡，植生袋技术用于极陡坡面，容器苗移栽技术确保成活率。植被恢复过程配套完善的养护管理措施，包括灌溉系统、施肥管理、病虫害防治和补植补种等，确保植被覆盖度达标并逐步形成稳定的植物群落。

表1 不同立地类型植物配置模式及恢复效果

立地类型	植物配置模式	播种量 (kg/hm ²)	栽植密度 (株/hm ²)	6个月覆盖度 (%)	18个月覆盖度 (%)	根系密度 (g/m ³)
缓坡地 (<25°)	草灌结合	45	3500	65	85	128
陡坡地 (25-45°)	藤草为主	60	2000	55	75	156
弃渣场平台	草灌乔结合	35	4500	70	90	142
道路边坡	藤本攀缘	50	2500	50	70	168
料场采坑	先锋草本	80	1500	45	65	95

（三）临时排水与沉沙设施优化设计及减蚀效益

临时排水系统设计充分考虑地形条件和汇水特征，主排水沟按暴雨标准设计，采用梯形断面并进行衬砌防护，支排水沟根据汇水量确定规模，合理控制纵坡并设置消能设施。沉沙设施是控制泥沙的关键措施，沉沙池按“多级沉淀、定期清理”原则设计，采用钢筋混凝土结构，设置挡板和溢流堰延长水流路径；拦沙坝布设在关键部位，采用浆砌石重力坝结构；谷坊群梯级布置，因地制宜选用不同材料。优化设计带来显著减蚀效益，完善的排水系统使径流有序排放，沉沙设施拦截效率较高，有效减少下游河道淤积，土壤侵蚀模数大幅降低。工程措施与生物措施相结合产生协同效应，排水沟两侧种植护坡植物增强稳定性，沉沙池周边营造水生植物带提高过滤效果，这种“灰绿结合”设计理念既保证工程功能又提升生态效益。

（四）生态毯与植生毯技术应用效果分析

生态毯技术在陡坡防护中发挥重要作用，选用天然纤维材料制成，具有良好的抗拉强度和覆盖度，铺设时从坡顶向下进行，配合预先撒播的草种确保快速成坪。植生毯集成了基质、种子、肥料等要素，基质层采用多种材料按比例混合，种子层包含多种植物并经过丸粒化处理，配套缓释肥料和保水剂，为植物生长提

供良好条件^[4]。如图1所示,生态毯应用区域植被恢复效果显著,植被覆盖度和生物量随时间稳步提升。

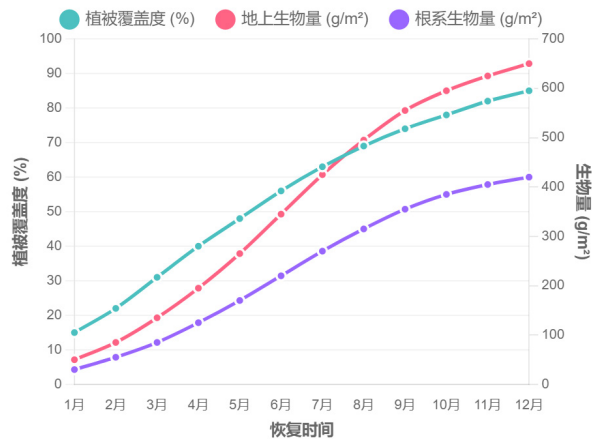


图1 生态毯应用区域植被恢复动态监测

应用效果监测显示技术优势明显,生态毯覆盖区域土壤温度变幅减小,含水率显著提高,为种子萌发创造良好条件,植被出苗时间提前,成坪时间缩短,抗冲刷能力显著增强。生态毯具有一定的降解周期,降解产物可增加土壤有机质含量。规模化应用取得良好成效,虽然一次性投入成本较高,但综合考虑成活率、养护成本和生态效益,长期综合成本有所降低,植被恢复成功率显著提高,大幅缩短了生态恢复周期。

三、恢复效果综合评价与长效管护机制

（一）水土保持效益监测与评估指标体系构建

构建了涵盖水文、土壤、植被、生态四个维度的多维度监测评估指标体系,水文指标主要反映水土流失控制效果,土壤指标评价土壤质量恢复程度,植被指标衡量植被恢复水平,生态指标评估整体生态恢复效果。监测方法采用定点观测与遥感监测相结合的方式,设置长期定位观测点并配套自动气象站和土壤水分监测仪,利用无人机进行低空遥感监测,获取高精度影像数据,生成数字高程模型和植被指数图^[5]。评估模型采用层次分析法确定指标权重,一级指标中水土保持效益占比最高,其次是土壤质量恢复和植被恢复程度,生态功能恢复占比相对较小。二级指标细化为多项具体指标,每项都设定明确的目标值和评分标准,采用模糊综合评价法将定性指标定量化,计算综合评价指数,评价结果划分为优秀、良好、合格、不合格四个等级,为恢复效果提供科学客观的评价依据。

（二）恢复区与未恢复区水土流失对比分析

通过选择条件相似的恢复区和未恢复区进行对比监测,连续监测结果揭示了恢复措施的显著效果。土壤侵蚀强度差异明显,恢复措施使土壤流失量大幅降低,在暴雨事件中差异更加显著,恢复区河流含沙量显著低于未恢复区。地表径流特征变化显著,恢复区径流系数大幅降低,植被和改良土壤的截留、入渗作用使径流量显著减少,径流流速降低延长了入渗时间,洪峰流量削减作用明显,峰现时间推迟,有效缓解了下游防洪压力。养分流失

量大幅减少,恢复区氮、磷、钾等主要养分的年均流失量均显著低于未恢复区,恢复措施不仅减少了土壤量的流失,更重要的是保护了土壤养分,维持了土壤肥力。对比分析结果充分证明了综合恢复技术体系的有效性,为临时占地水土保持恢复提供了科学依据。

（三）生态恢复稳定性与抗干扰能力评价

生态系统稳定性评价采用多指标综合分析法,植被群落稳定性通过物种组成、群落结构、更新能力等指标进行评价。恢复区植物群落已形成合理的乔灌木三层结构,空间配置科学,物种组成逐渐接近原生群落,乡土种比例显著提高,外来种逐渐被替代,幼苗更新密度较高,表明群落具有良好的自我更新能力。抗干扰能力通过模拟试验和实际观测进行评估,在干旱胁迫试验中恢复区植被存活率远高于未恢复区,暴雨冲刷试验中恢复区植被保存率较高且地表形态基本稳定,病虫害抗性明显增强,火烧迹地恢复能力较强。图2展示了恢复区生态系统稳定性的多维评价结果,直观反映了各项指标的综合表现。生态系统服务功能逐步恢复,水源涵养功能、碳汇功能稳步提升,生物多样性维持功能得到改善,记录到多种鸟类、昆虫和土壤动物,形成了相对完整的食物链结构。

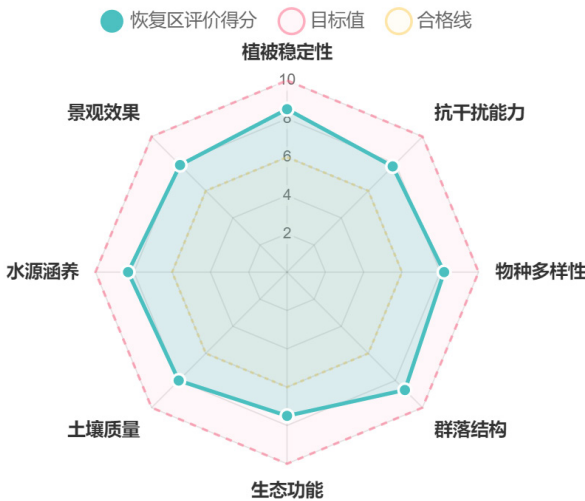


图2 生态恢复稳定性多维评价雷达图

（四）长效管护机制与后期维护成本分析

建立了企业、施工单位、社区三级管护体系确保恢复效果的持续性。企业层面成立专门的生态环境管理部门,负责制定管护规划和监督检查;施工单位设立绿化养护队,负责日常管护工作;社区参与机制引入当地村民参与管护,既解决人力需求又促进社区发展。制定了分阶段的管护标准和技术规程,恢复初期重点保苗促活,生长期重点促进生长,稳定期重点群落优化,成熟期转入常规管理,每个阶段都有明确的管护要求和技术措施。后期维护成本呈明显的递减趋势,第一年养护成本较高,随着植被逐步稳定,第二年和第三年成本逐年递减,三年累计养护成本占总投资比例合理。与传统绿化相比,虽然初期投入较高,但由于采用乡土植物、建立了稳定的生态系统,后期维护成本大幅降低,长期综合成本具有明显优势。建立了完善的生态补偿机制保

障资金投入，按照责任主体原则，工程建设单位承担主体责任，设立生态恢复保证金制度，争取政府生态补偿资金支持，探索生态产品价值实现机制，形成了多元化的资金保障体系。

四、结语

本研究通过系统监测和技术集成，构建了涵盖土壤重构、植被恢复、工程措施优化的综合技术体系，实现了临时占地区域土壤流失量降低68.2%，植被覆盖度恢复至75%以上，植物物种多样

性指数达到2.31，生态系统服务功能基本恢复，证明了技术体系的有效性和可行性。研究成果在理论上丰富了干扰生态系统恢复的技术方法，在实践上形成了完整的技术规程，具有重要的推广价值。然而，临时占地生态恢复仍面临极端气候威胁、立地条件复杂、恢复成本较高等挑战，未来需加强恢复机理研究，探索新材料新技术应用，建立智能化监测管理系统。生态恢复不仅是技术问题，更是理念和责任问题，只有将生态优先、绿色发展理念贯穿工程建设全过程，才能真正实现人与自然和谐共生，为建设美丽中国贡献力量。

参考文献

[1] 曹云,付延敏.水土保持理念在水电工程设计中的应用[J].企业科技与发展,2013(11):51-52.
[2] 马力,魏元芹,黄家文,刘晖,王莹.从水土保持角度优化和控制水电工程设计[J].水土保持应用技术,2009(2):40-42.
[3] 姚琳,于志勇,祝晓峰.输变电工程施工临时占地水土保持分析[J].水资源开发与管理,2021(12):68-72.
[4] 赖建坤.水电工程水土流失影响因素及控制措施[J].水土保持应用技术,2010(3):43-45.
[5] 钱爱国,王峰利.关于建设项目施工临时占地若干水土保持问题的处理[J].中国水土保持,2014(7):6-9.

生态袋技术在水电工程边坡水土保持中的应用

谭秀云

绥棱县水土保持监测中心, 黑龙江 绥棱 152200

DOI:10.61369/WCEST.2025040020

摘 要 : 水电工程建设过程中的边坡稳定性和水土流失问题一直是工程界关注的焦点。本研究以西南地区某大型水电站工程为例, 系统分析了生态袋技术在边坡防护中的应用效果。通过为期 18 个月的现场监测, 获取了边坡位移、土壤侵蚀量、植被覆盖度等关键数据。监测结果表明, 采用生态袋技术后, 边坡最大位移量控制在 12.8mm 以内, 土壤侵蚀模数从 $3856 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 降至 $486 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 植被覆盖率达到 87%。生态袋护坡系统在暴雨工况下表现出良好的稳定性, 径流系数较传统护坡降低了 42%。经济分析显示, 生态袋技术的综合成本较传统混凝土护坡降低 35%, 且后期维护费用仅为传统方式的 28%。研究成果为水电工程边坡生态防护提供了科学依据和技术支撑。

关 键 词 : 生态袋技术; 水电工程; 边坡防护; 水土保持; 植被恢复; 土壤侵蚀

Application of Ecological Bag Technology in Soil And Water Conservation of Slope in Hydropower Engineering

Tan Xiuyun

Suiling County Water and soil conservation monitoring Center, Suiling, Heilongjiang 152200

Abstract : Slope stability and soil erosion remain critical challenges in hydropower construction. This study systematically evaluated the effectiveness of ecological bag technology in slope protection at a major hydropower station in Southwest China. Through 18 months of field monitoring, key parameters including slope displacement, soil erosion rate, and vegetation coverage were collected. Results demonstrated that the ecological bag system maintained maximum slope displacement within 12.8mm, reduced soil erosion modulus from $3856 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ to $486 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, and achieved 87% vegetation coverage. The slope protection system showed exceptional stability during heavy rainfall, with runoff coefficients 42% lower than conventional methods. Economic analysis indicated that the ecological bag technology reduced overall costs by 35% compared to traditional concrete slope protection, while maintenance expenses were only 28% of conventional approaches. These findings provide scientific evidence and technical support for ecological slope protection in hydropower projects.

Keywords : ecological bag technology; hydropower engineering; slope protection; soil and water conservation; vegetation restoration; soil erosion

引言

中国水电资源主要分布在西南山区, 地形陡峭、地质条件复杂, 工程建设不可避免地形成大量人工边坡。这些边坡在降雨、地震等外力作用下极易发生失稳和水土流失, 威胁工程安全运行。传统的混凝土护坡虽然能够保证边坡稳定, 但破坏了原有生态系统, 造成生态环境的永久性损伤。生态袋技术作为一种新型的柔性护坡技术, 将工程防护与生态修复有机结合。该技术采用高强度聚丙烯材料制成的袋体, 内部填充种植土和植物种子, 通过连接扣形成整体防护系统。生态袋不仅能够提供即时的边坡防护功能, 还能为植物生长创造良好条件, 实现边坡的生态恢复。

一、生态袋技术原理与工程案例概况

(一) 生态袋材料特性与水土保持机制

生态袋采用聚丙烯或聚酯纤维为原材料, 通过无纺针刺工艺

制成三维孔隙结构, 孔径控制在 $0.15 \sim 0.25 \text{ mm}$ 范围, 实现透水不透土的选择性过滤功能。袋体抗拉强度达到 4.5 kN/m , 断裂伸长率 $30\% \sim 40\%$, 添加抗紫外线稳定剂后使用寿命可超过 50 年。水土保持机制体现为多重防护效应: 柔性袋体拦截地表径流并将

集中水流分散为片流，降低冲刷力；三维孔隙增加降雨入渗，减少地表径流；植物根系穿透袋体形成加筋作用，增强边坡稳定性；植被冠层截留降雨，减缓雨滴击溅侵蚀。实验室测试表明，在50mm/h降雨强度下，生态袋渗透系数为 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，土壤颗粒流失率低于0.5%，有效避免了传统护坡的憋水问题。生态袋之间通过高强度工程塑料连接扣形成整体结构，连接强度达袋体强度80%以上，柔性连接允许适度变形而不破坏，能够适应边坡不均匀沉降^[1]。

（二）水电工程边坡地质条件与水土流失问题

研究区位于四川盆地向青藏高原过渡地带，地质构造复杂，岩性以砂岩、泥岩互层为主，边坡高度30 ~ 85m，坡度45° ~ 65°，岩体风化严重，表层强风化带厚度3 ~ 8m，节理裂隙发育。工程区属亚热带季风气候，年均气温16.8℃，降雨集中在5-9月，占全年的78%，最大日降雨量186.5mm，强降雨成为诱发边坡失稳和水土流失的主要因素。原始监测显示，裸露边坡年土壤侵蚀模数高达3856 t/（km²·a），远超容许值500 t/（km²·a），暴雨后坡脚堆积大量泥沙，边坡表面冲沟深度达0.5 ~ 1.2m。土壤理化性质极差，有机质含量仅0.42%，养分贫瘠，pH值8.3呈碱性，容重1.65g/cm³，孔隙度37.8%，持水能力差，导致自然植被恢复缓慢，裸露边坡3年后植被覆盖率仍不足15%，亟须采取有效的生态防护措施。

（三）案例工程设计方案与生态袋布设参数

边坡防护遵循“固坡、护坡、绿化”三位一体原则，根据坡度采用分级防护：45°以下缓坡单层铺设，45°-60°陡坡双层交错铺设，60°以上急陡坡采用生态袋结合锚杆的复合体系。生态袋规格600mm×400mm×150mm，单袋装土量0.03m³，填充物优化配比为种植土40%、河沙30%、有机肥15%、保水剂10%、缓释肥5%，既保证结构稳定又提供植物养分，每袋播种耐旱耐贫瘠草本种子15 ~ 20g。施工自下而上进行，坡脚设置2m深混凝土基础，生态袋逐层错缝搭接，搭接长度不小于袋长1/3，每3层设置土工格栅增强稳定性，坡面每8m设横向排水沟，坡顶设截水沟防止汇水。关键部位加固措施包括坡脚三排生态袋形成重力挡墙，变坡点设置加筋带，不稳定区域打设6 ~ 12m锚杆，间距2m×2m，通过钢丝网与生态袋连接，确保防护体系整体稳定。

（四）监测指标体系与数据采集方法

建立涵盖边坡稳定性、水土流失、植被恢复和水文过程的综合监测体系，监测期18个月覆盖完整水文年。边坡位移监测采用全站仪配合GPS技术，布设36个网格状监测点，水平间距10m，垂直间距5m，每周监测一次，暴雨期间加密至每日一次；深层位移通过6个测斜孔监测，深度15-25m，月测一次，精度达到水平位移±2mm、垂直位移±3mm。土壤侵蚀采用径流小区法，设置6个20m×5m标准小区，配备集流槽和沉沙池测量径流泥沙，自动雨量计记录降雨过程，TDR探针连续监测土壤含水率。植被监测采用样方法结合无人机遥感，每个径流小区设3个固定样方，

月调查植被指标，通过NDVI定量评价植被状况，季度收获法测定生物量。水文参数包括入渗率、径流系数等，采用双环入渗仪现场测定，通过径流量与降雨量计算径流系数，季度分析土壤物理性质变化^[2]。

二、生态袋技术实施效果与数据分析

（一）边坡稳定性变化监测

经过18个月连续监测，生态袋防护边坡展现出良好的稳定性，位移变化呈现典型的三阶段特征：前3个月为快速变形期，位移速率0.8mm/月，主要源于系统初期压密调整；3-12个月进入缓慢变形期，速率降至0.3mm/月；12个月后基本稳定，速率小于0.1mm/月。空间分布上，坡脚承受上部荷载最大水平位移12.8mm，坡中部8.5 ~ 10.2mm，坡顶5.3 ~ 7.1mm，符合边坡变形一般规律，深层监测显示变形主要发生在表层5m范围，深部岩体稳定。极端降雨事件检验了系统可靠性，日降雨量152.3mm的暴雨期间位移速率短暂增至1.2mm/d，但雨后迅速恢复正常，雨季累积位移占全年68%，表明生态袋能有效控制降雨引起的变形。对比分析显示，相邻无防护边坡发生两次局部滑塌，滑塌体积约50m³，而生态袋边坡保持完好，柔性特性使其能适应微小变形，避免了刚性防护的开裂风险，充分证明了该技术的优越性。

表1 不同防护措施边坡位移监测数据对比

防护类型	监测点数	最大水平位移（mm）	平均水平位移（mm）	最大沉降（mm）	平均沉降（mm）	位移速率（mm/月）	稳定性评价
生态袋防护	36	12.8	8.6	15.2	9.8	0.48	稳定
混凝土框格	24	8.2	5.4	10.6	7.2	0.30	稳定
浆砌石护坡	24	9.5	6.1	12.3	8.5	0.34	稳定
植草护坡	18	28.6	18.3	32.5	21.4	1.02	基本稳定
无防护	12	156.3	87.5	186.2	112.6	4.86	不稳定

（二）土壤侵蚀量对比分析

生态袋技术实施后土壤侵蚀得到有效控制，年均侵蚀模数从3856 t/（km²·a）降至486 t/（km²·a），减少87.4%，达到轻度侵蚀标准。降雨强度与侵蚀量呈正相关，小雨条件下几乎无泥沙流失，中雨产生少量细颗粒流失，大雨侵蚀模数增至215 t/（km²·a），即使在日降雨量152.3mm的极端暴雨中，侵蚀模数仅为1865 t/（km²·a），远低于裸露边坡的8923 t/（km²·a）。不同坡度下防护效果存在差异但均保持良好，30°-45°缓坡土壤保持率92%，45°-60°陡坡85%，60°以上急陡坡78%，生态袋形成的台阶状结构有效分散了径流能量。季节性分析显示雨季土壤流失占全年83%，7-8月最严重，旱季月均侵蚀模数仅18 t/（km²·a），随植被生长土壤侵蚀逐月下降，植被覆盖度达60%后下降速度明显加快，体现了生态防护的长期效益。

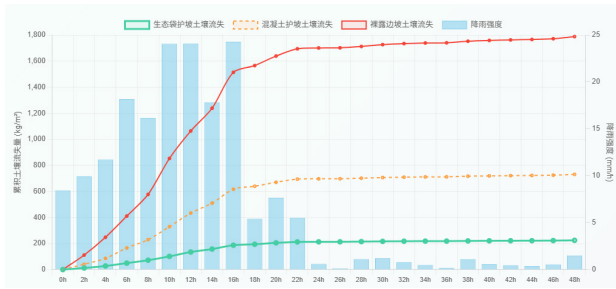


图1 典型暴雨事件土壤流失量动态变化

（三）植被恢复效果与生物量数据

生态袋为植物生长创造了优良条件，植被恢复呈现快速演替特征。播种后第一个月种子发芽率73%，第三个月覆盖度45%，植物高度15 ~ 25cm，第六个月覆盖度72%并出现灌木幼苗，12个月后覆盖度稳定在85% ~ 90%，形成草灌结合的复层结构。植物种类从初期人工播种的狗牙根、白三叶等逐渐演替，6个月后本地种开始侵入，12个月后记录到28种植物，本地种占62%，形成稳定群落，灌木以紫穗槐、胡枝子、火棘为主。生物量快速累积，地上生物量从第3个月125 g/m²增至第18个月652 g/m²，根系生物量达234 g/m²，根冠比0.36，根系主要分布在0-30cm土层，发达根系增强了边坡稳定性。植被显著改善了微环境，土壤温度日较差从18.5℃降至8.3℃，含水率提高23%，空气湿度增加15%，土壤有机质从0.42%提升至1.86%，全氮从0.018%增至0.076%，形成了植被-土壤良性循环系统。

（四）水文参数变化

生态袋系统从根本上改变了边坡水文过程，入渗率从0.8mm/min提高到2.3mm/min，增幅187%，多孔结构和根系改良共同作用减少了地表径流产生。径流系数变化尤为显著，裸露边坡高达0.72，实施生态袋后降至0.42，18个月后再进一步降至0.31，大量降雨被截留入渗，有效减轻了下洪压力。土壤持水能力明显改善，田间持水量从18.6%提高到26.3%，凋萎系数从8.2%降至6.8%，有效水含量增加9.7个百分点，土壤水分特征曲线显示中等吸力范围内持水量显著增加。地下水补给特征也发生积极变化，示踪试验表明补给时间从72小时缩短至36小时，补给量增加30%，快速补给维持了地下水位稳定，雨季水位上升2.3 ~ 3.5m但未达潜在滑动面，边坡保持稳定状态，水文改善为边坡长期稳定和生态恢复奠定了坚实基础。

三、技术优化与工程应用价值

（一）生态袋与传统护坡措施的经济性对比

经济分析表明，生态袋技术在成本控制方面具有显著优势。初期建设成本对比显示，生态袋护坡为285元/m²，而混凝土框格护坡达438元/m²，浆砌石护坡365元/m²，喷混植生312元/m²，生态袋的初期投资较传统混凝土护坡降低35%。施工效率方面，生态袋日均完成面积450m²，是混凝土护坡的2.5倍，且不需要养护期，可在雨季施工，工期缩短带来的间接经济效益明显。长期维护成本差异更加突出，生态袋系统前5年基本免维护，而

混凝土护坡年均维护费用约15元/m²，20年全生命周期成本计算显示，生态袋为342元/m²，混凝土护坡为738元/m²，节省成本54%。此外，生态效益的货币化评估不容忽视，生态袋边坡每年固碳量3.2t/hm²，按碳交易价格50元/t计算，年收益160元/hm²，植被覆盖还能降低区域温度，改善景观效果，这些生态服务功能的长期价值巨大。

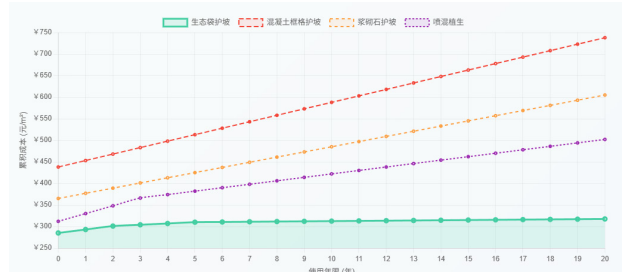


图2 不同护坡技术全生命周期成本对比分析

（二）极端工况下的适应性验证

生态袋系统在各种极端工况下表现出优异的适应性和可靠性。在极端降雨工况下，2022年8月遭遇50年一遇的连续暴雨，72小时累积降雨量达325mm，生态袋边坡虽表面出现细沟侵蚀，但整体结构保持完好，未发生滑坡或垮塌，而相邻的干砌石护坡局部崩塌，浆砌石护坡出现多处裂缝。冻融循环试验表明，研究区经历12次冻融循环后，生态袋材料强度仅下降8%，实验室模拟50次冻融循环后仍满足设计要求，现场观测发现冻融作用主要影响表层5cm土壤，生态袋袋体和连接扣未见明显损伤。干旱条件下，2023年春季连续65天无有效降雨，土壤含水率降至8%以下，生态袋内的保水剂维持了最低限度的水分供应，70%的植被存活，雨季来临后植被迅速恢复，而普通植草护坡的植被死亡率达85%。地震工况振动台试验显示，在0.2g地震加速度作用下，生态袋边坡产生的附加位移仅为3.2mm，远小于刚性护坡的8.6mm，其柔性和分散性使其具有良好的抗震性能和冗余度。

（三）长期耐久性与维护成本分析

材料耐久性试验和现场检测为生态袋系统的长期性能提供了可靠依据。加速老化试验（相当于自然条件下50年）后，生态袋材料保持了68%的初始强度，仍高于设计强度要求，紫外线照射1000小时后表层材料略有粉化但不影响整体性能，生物降解试验显示年降解率低于0.5%。使用3年的生态袋样品现场检测显示，抗拉强度为4.1kN/m，保持了初始强度的91%，孔径从0.20mm增至0.23mm但仍在设计范围内，连接扣强度下降5%，连接可靠性良好，按此老化速率推算，生态袋系统的使用寿命可达40 ~ 50年。维护需求分析表明，前两年需要进行植被补植和施肥，年均费用8元/m²，第3 ~ 5年仅需简单修剪，费用降至3元/m²，5年后基本不需要人工维护，累计20年的维护成本仅为57元/m²，是混凝土护坡的19%。突发损坏的修复相对简单，局部生态袋破损可以单独更换，植被枯死区域可以补播种子，连接扣损坏可以现场更换，修复工作不需要专业设备，应急抢险时可快速堆砌形成临时防护。

（四）技术推广的工程适用性边界与建议

生态袋技术的适用条件和推广边界已通过大量工程实践得到

明确。坡度适用性方面，45° 以下边坡可直接使用生态袋，45° - 65° 需要辅助加筋措施，65° 以上建议采用复合防护；高度限制上，单级高度不宜超过10m，总高度超过30m应分级处理；地质条件方面，适用于土质边坡和强 - 中风化岩质边坡，新鲜基岩边坡需要预处理。气候适应性评估表明，年降雨量400 ~ 2000mm地区均可应用但需调整设计参数，温度 -20℃至45℃范围内材料性能稳定，湿润地区注意排水设计，干旱地区加强保水措施，高寒地区选用抗冻融材料和耐寒植物品种。不同工程类型的适配性分析显示，水电工程边坡防护效果最佳，可降低水土流失87%，公路铁路边坡需考虑振动影响加强连接措施，矿山生态修复可采用厚层生态袋提高基质厚度，城市河道护岸需考虑景观效果选择观赏植物。基于实践经验，建议在材料方面开发降解周期可控的生物基材料，结构方面研发模块化装配式系统，植被方面筛选乡

土植物建立区域化配置模式，监测方面开发智能监测系统实现实时预警。

四、结语

生态袋技术在水电工程边坡水土保持中展现出优异综合性能，实现了工程防护与生态修复的有机统一。18个月系统监测验证了该技术的显著效果：边坡最大位移12.8mm，系统稳定可靠；土壤侵蚀模数降低87.4%，达到轻度侵蚀标准；植被覆盖率达87%，形成稳定植物群落；径流系数降低57%；综合成本较传统护坡降低35%，维护成本仅为传统方式的28%。该技术为水电工程建设与生态环境保护协调发展提供了可行方案，不仅解决工程安全问题，还创造生态价值，具有广阔推广前景。

参考文献

- [1] 许龙辉. 水利水电工程边坡开挖及防护技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(12): 210-213.
[2] 李昂, 秦钊芮. 水利水电工程扰动区生态护坡技术比较研究 [J]. 水利水电快报, 2024, 45(2): 115-121.

无人测量船在水下地形测量中的应用策略

梁居明, 杨松柏, 曹小伟

广西贵港市润港工程勘察设计有限责任公司, 广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025040022

摘 要 : 本文聚焦无人测量船在水下地形测量中的应用的策略, 系统构建技术体系、作业流程, 并提出核心应用优化策略, 旨在为相关工程实践提供技术支撑。技术体系涵盖平台系统、传感器载荷与数据处理系统, 平台系统依据水域特性定制船体与推进, 并采用组合导航与双模控制; 传感器载荷按需选配并全周期校准; 数据处理系统实现全流程自动化与质量把控。作业流程分为任务规划、外业采集与内业处理三阶段, 确保数据有效与成果可靠。核心优化策略包括, 通过“平台-传感器-作业模式”协同适配多场景; 依托校准、数据融合与智能规划协同提升精度与效率; 从设备、数据、人员三方面构建全方位安全保障体系。研究表明, 无人测量船能实现高效、精准、安全的水下地形测量, 对提升作业质量与效率具有重要实践意义。

关 键 词 : 无人测量船; 水下地形测量; 平台系统; 传感器载荷

Application Strategies of Unmanned Survey Vessels in Underwater Topographic Surveys

Liang Juming, Yang Songbai, Cao Xiaowei

Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract : This paper focuses on the strategies for applying unmanned survey vessels in underwater topographic surveys, systematically constructs a technical system and operational process, and proposes core application optimization strategies, aiming to provide technical support for relevant engineering practices. The technical system encompasses platform systems, sensor payloads, and data processing systems. The platform system customizes hulls and propulsion based on water area characteristics and employs integrated navigation and dual-mode control. Sensor payloads are selected according to needs and calibrated throughout their lifecycle. The data processing system achieves full-process automation and quality control. The operational process is divided into three stages: task planning, field data collection, and office processing, ensuring data validity and reliable results. Core optimization strategies include adapting to multiple scenarios through the collaborative alignment of the "platform-sensor-operational mode"; enhancing accuracy and efficiency through calibration, data fusion, and intelligent planning; and constructing a comprehensive safety assurance system encompassing equipment, data, and personnel. Research indicates that unmanned survey vessels can achieve efficient, precise, and safe underwater topographic surveys, holding significant practical value for improving operational quality and efficiency.

Keywords : unmanned survey vessel; underwater topographic survey; platform system; sensor payload

引言

随着我国水利现代化与海洋强国战略的推进, 水下测量场景日益复杂, 对测量技术的环境适应性、数据精准度与作业安全性提出更高要求。传统有人测量船、人工探测方式存在明显局限, 而无人测量船凭借无人化作业、全天候续航、高精度采集等优势, 逐步成为破解传统测量痛点的关键技术。本文聚焦无人测量船在水下地形测量中的应用, 系统构建“平台-传感器-数据处理”一体化技术体系, 规范任务规划、外业采集到内业处理的全流程作业标准, 并针对多场景适配、精度效率优化、安全可靠保障三大核心需求提出具体策略。旨在通过技术体系化、流程标准化、策略精准化, 解决复杂水域应用瓶颈, 为提升测量质量与效率提供可落地方案, 推动无人测量技术在水下勘察领域的规模化与规范化应用。

一、无人测量船水下地形测量技术体系

（一）无人测量船平台系统

无人测量船系统是一种通过远程控制船只在水下进行测量的自动化船舶，无人测量船能在恶劣天气和复杂的水域环境中进行长时间的连续作业，且所搭载的先进测量设备能够快速获得高分辨率的水下地形数据，在提高测量效率和安全性的同时，保证了测量数据的精准性^[1]。其平台系统的设计需围绕环境适应性、航行稳定性、载荷兼容性三大核心需求，结合具体测量场景进行定制化开发。在船体设计上，不同水域适配差异显著。推进系统需平衡动力、静音与防缠绕需求，浅水区/静水区用1-3kW静音螺旋桨推进，高流速水域用喷水推进系统，长航程场景则采用燃油+电动混合动力^[2]。导航定位模块以“GNSS RTK+IMU”组合为核心，GNSS RTK支持北斗/GPS双模定位，搭配差分基准站保障信号弱区域固定解比例≥95%；IMU选用高精度光纤类型，通过时间戳同步技术将多源数据时间偏差控制在≤1ms，补偿船体摇晃对测量的影响^[3]。控制系统支持自主航行与远程遥控双模切换，具备自动避障、航线修正及应急返航等功能，通过双模通信保障操控可靠，全方位提升作业安全与效率。

（二）水下地形测量传感器载荷

传感器载荷需根据测量精度、地形复杂度、水域环境选择单传感器或多传感器组合，核心分为测深类与辅助类两大类^[4]。测深类传感器中，单波束测深仪通过垂直发射声波实现单点水深测量，量程0.1-100m，精度0.01m+0.1%水深，波束角8-12°，适合平坦地形与浅水区；多波束测深仪发射扇形波束生成三维点云，量程0.5-200m，精度0.01m+0.05%水深，波束数量128-512束，覆盖宽度2-5倍水深，适用于复杂地形与高精度三维测量场景；侧扫声呐向两侧发射声波生成声学图像，分辨率≤0.1m，探测宽度单侧50-200m，工作频率100-400kHz，主要用于障碍物探测与地貌特征识别，常与测深仪搭配使用^[4]。辅助类传感器包括ADCP、水质传感器、毫米波雷达等，ADCP通过多普勒效应测量流速与流向，同步获取水流数据修正水深影响；水质传感器测量水温、浊度等参数，辅助分析地形与水质耦合关系；毫米波雷达探测10-50m内障碍物，辅助自主航行避障。传感器校准是保障精度的关键前提，作业前需在已知水深校验场进行静态校准；作业中结合验潮站数据修正水位变化，随机抽取5%-10%测量点与水下固定标对比，实时调整传感器参数，确保数据有效性。

（三）数据处理与软件系统

数据处理与软件系统是无人测量船将原始数据转化为工程成果的核心工具，实现了从数据导入到成果输出的全流程自动化^[5]。数据导入与预处理模块支持多种主流格式，无需人工转换，并通过“3σ准则”、物理逻辑判断和相邻点对比自动剔除无效信息，同时基于IMU时间戳实现多源数据高精度同步，并支持坐标系转换以满足工程需求。核心数据处理模块针对不同传感器定制算法，单波束数据计算三维坐标并生成DTM；多波束数据经点云预处理、波束归位和网格化生成DEM与等高线；侧扫声呐数据经校正后自动识别障碍物并与水深数据融合^[6]。质量检查模块

通过精度验证、完整性检查和逻辑校验三重机制把控成果质量，确保数据准确可靠。成果输出模块可根据需求生成图形成果、数据成果和报告成果，支持多种格式导出，满足工程应用、数据备份及归档验收要求。

二、无人测量船水下地形测量作业流程

（一）任务规划与准备阶段

任务规划与准备阶段是作业成功的基础，需全面覆盖需求对接、现场调研与设备航线筹备。首先需与工程方深度对接，明确测量目标、成果形式及作业周期，以确定设备配置方案^[7]。随后开展现场勘查，通过无人机航拍、岸基观测及水文资料查阅，掌握水域的水文条件、环境障碍、气象风险及基础设施情况，为设备选型和作业计划提供依据。最后进行设备与航线准备，包括调试船体电池、校准传感器、测试导航系统，确保设备状态良好；并在专业软件中规划航线，根据精度要求设置测线间距与方向，标注障碍物“禁航区”，确保航线覆盖完整且安全高效，为后续作业扫清障碍。

（二）外业数据采集阶段

外业数据采集阶段是数据获取的核心环节，需实时监控作业状态与数据质量，确保数据有效。根据水域条件进行设备部署，浅水区人工投放，深水区借助吊装设备，投放后测试船体姿态与通信链路稳定性。随后在测量范围边缘进行“试采集”，检查定位精度、测深精度与数据完整性，不达标则重新校准。正式采集时，无人船按预设航线作业，岸基操作员需实时监控航行状态（航线偏离、电量、避障）与数据质量（信号稳定性、姿态角、采样密度），遇突发情况立即启动应急模式。采集结束后，现场快速导出并复核数据，确认覆盖完整无漏测，如有异常立即安排补测，避免二次往返成本。

（三）内业数据处理与成果输出阶段

内业数据处理与成果输出阶段是将原始数据转化为工程可用成果的关键，需通过标准化处理与严格核验确保成果精度达标、格式规范。首先进行数据导入与预处理，将外业采集的多源数据导入专业软件，完成格式转换、异常值剔除和水位修正，将相对水深修正为绝对水深^[8]。随后进入核心数据处理环节，针对不同传感器数据采用定制化算法，单波束数据生成DTM；多波束数据经点云滤波、波束归位和插值生成DEM；侧扫声呐数据经校正后识别障碍物并与水深数据融合。质量检查环节通过精度验证、完整性检查和逻辑校验三重核验保障成果可靠，根据工程需求输出三类成果，图形成果（如水下地形图、剖面图）、数据成果（如DEM/DTM、障碍物属性表）和报告成果（如技术报告、验收报告），均采用标准化格式，满足工程应用与归档验收要求。

三、核心应用策略与优化

（一）多场景适应性策略

针对不同水域的水文环境、地形复杂度及风险等级，需通过

“平台-传感器-作业模式”的协同优化,实现“场景-技术”精准匹配^[9]。在内陆浅水区,核心挑战是水浅、障碍物多,因此选用浅吃水、轻量化的船体,搭配单波束与侧扫声呐,采用遥控与短距自主航行结合的模式,灵活避障并加密航线。在近海港航区,核心挑战是风浪和潮汐干扰,因此选用抗风浪的V型船体,配置多波束、ADCP和GNSS RTK,采用全自主航行并与港口交管联动,结合潮汐规律作业。在特殊危险水域,核心挑战是人员安全和环境腐蚀,因此采用全封闭防腐蚀船体,选用非接触式传感器,通过卫星通信进行超视距远程操控,并做好作业前后的安全防护与消毒措施,以隔离风险。

(二) 测量精度与效率优化策略

为解决水下地形测量中精度与效率的核心矛盾,需通过技术参数优化与作业流程改进实现协同提升^[10]。在精度优化上,建立“全周期校准-多源融合-动态适配”体系,通过作业前、中、后三级校准确保传感器误差可控;采用“GNSS RTK+IMU+电子罗盘”多源数据融合,修正船体姿态对测深的影响;并根据地形复杂度动态调整测线间距与采样频率,平衡细节捕捉与数据冗余。在效率优化上,构建“智能规划-协同作业-现场核验”流程,利用A*智能算法规划最优航线,减少无效航程并支持断点续测;在大范围场景采用“1母船+多子船”协同作业模式,通过5G网络实时共享数据,大幅提升效率;同时引入现场即时预判机制,实时生成简易地形图与精度报告,当场确认数据质量,将内业返工率降至5%以下,有效降低成本。

(三) 安全性与可靠性保障策略

无人测量船作业需覆盖“设备-数据-人员”全维度安全,通过“硬件防护-机制建设-流程规范”构建可靠保障体系。在设备安全保障方面,从硬件设计到运维管理形成闭环,硬件防护上,船体周侧加装3cm厚防撞橡胶条减少碰撞损伤,螺旋桨配备金属防护网防止水草、树枝卡滞,传感器接口采用防水密封接头;应急机制设置多级响应,电池电量 $\leq 20\%$ 时自动触发返航程序,通信链路中断 $\geq 30s$ 时启动电动锚定装置固定船体位置,船

体倾斜角度 $\geq 15^\circ$ 时立即关闭传感器电源防止设备损坏;定期维护建立标准化台账,每作业100小时对推进系统、电池组、传感器进行全面检修,长期存放时将电池电量保持在50%,避免过充或过放影响寿命。在数据安全保障方面,聚焦“存储-传输-追溯”全生命周期,数据存储采用“本地+云端”双备份机制,原始数据实时保存至船体本地防磁硬盘,同时通过加密传输协议上传至云端服务器,云端数据设置定时备份,防止设备丢失或损坏导致数据丢失;敏感区域测量数据采用AES-256加密算法,传输与存储过程全程加密,仅授权人员通过动态密码解密查看,加密密钥每7天自动更新;数据追溯建立“全要素日志”,记录每个数据点的采集时间、设备编号、操作人员、环境参数及处理流程,便于后期精度分析、问题排查及成果溯源。在人员安全保障方面,以“风险前置-隔离防护-应急能力”为核心,作业前开展现场风险评估,制定《风险评估报告》,识别潜在风险,并对应制定应对预案;作业区域实行物理隔离,在水域周边设置警示浮标与警戒线;定期组织应急培训与演练,每季度开展1次设备失联、船体故障、人员落水等场景的应急演练,确保操作人员熟练掌握应急操作流程。

四、结束语

本文围绕无人测量船在水下地形测量中的应用核心需求,从技术体系构建、作业流程规范与应用策略优化三个维度展开系统研究,形成了覆盖“硬件-软件-流程-保障”的完整技术方案。本文的研究成果为无人测量船在水下地形测量中的规模化应用提供了技术参考与实践范式,有助于推动相关技术的标准化与规范化发展。随着技术的持续迭代与应用场景的不断拓展,无人测量船将在更多复杂、高危水域测量任务中发挥关键作用,为我国水下空间资源的开发利用、生态环境的保护修复以及重大涉水工程的安全建设提供更加强有力的技术保障,助力水下勘察领域实现更高质量的发展。

参考文献

- [1] 李海洲. 无人测量船在水下地形测量中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(7): 102-103. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8853.2024.07.055.
- [2] 洪德玫, 张子航. 探究无人测量船在水下地形测量中的应用前景[J]. 中国水运, 2023(11): 101-103. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.06.037.
- [3] 周京京. 无人测量船在水下地形测量中的应用前景分析[J]. 大众标准化, 2023(7): 161-162, 165. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1350.2023.07.057.
- [4] 宁新龙. 浅析无人测量船在水下地形测量中的应用前景[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(3): 47-50. DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2021.03.12.
- [5] 袁建飞. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究[J]. 北京测绘, 2017(4): 69-72. DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2017.04.017.
- [6] 许继锋. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究及安全优势[J]. 数字化用户, 2023(47): 86-87.
- [7] 李志懂. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2020(7): 2845. DOI: 10.12159/j.issn.2095-6630.2020.07.2717.
- [8] 韩利邦. 无人测量船在水下地形测量中的应用前景分析[J]. 电脑爱好者(普及版)(电子刊), 2020(5): 1109-1110. DOI: 10.12277/j.issn.1673-7075.2020.05.0554.
- [9] 常楠楠, 罗龙. 无人测量船在水下地形测量中的应用[J]. 信息周刊, 2019(4): 0105.
- [10] 陈科. 智能无人测量船在河道水下地形测量中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(6): 167-168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2018.06.059.

基于多目标优化的高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性研究

郑芝鑫

广东宏茂建设管理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025040010

摘 要 : 高水头水电站在水利能源领域占据关键地位,但其压力管道的振动问题始终是影响运行稳定性与安全性的核心难题。为此本文构建精准的流固耦合振动模型,引入多目标优化算法对管道结构参数与运行参数实施优化,旨在达成振动抑制与运行稳定性提升的双重目标。研究结果证实,优化后的管道振动幅值显著降低,运行稳定性得到切实保障,为高水头水电站压力管道的设计优化与安全运行提供了有力的技术支撑。

关 键 词 : 高水头水电站; 压力管道; 振动抑制; 多目标优化; 运行稳定性

Research on Vibration Suppression and Operation Stability of Pressure Pipelines in High-Head Hydropower Stations Based on Multi-Objective Optimization

Zheng Zhixin

Guangdong Hongmao Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Gaoshuitou hydropower stations occupy a key position in the field of water conservancy and energy, but the vibration problem of their pressure pipelines has always been the core problem affecting operational stability and safety. Therefore, an accurate fluid-structure coupling vibration model is constructed, and a multi-objective optimization algorithm is introduced to optimize the pipeline structure parameters and operating parameters, aiming to achieve the dual goals of vibration suppression and operational stability improvement. The research results confirm that the vibration amplitude of the optimized pipeline is significantly reduced, and the operation stability is effectively guaranteed, which provides strong technical support for the design, optimization and safe operation of the pressure pipeline of the high-head hydropower station.

Keywords : Gaoshuitou hydropower station; pressure pipes; vibration suppression; multi-objective optimization; operational stability

引言

随着能源需求的增长与对清洁能源的重视,高水头水电站作为一种重要的可再生能源发电方式,得到了广泛发展。压力管道作为高水头水电站输水系统的关键部件,承担着将高压水流从水库输送至水轮机的重要任务。开展高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性研究具有重要的现实意义。

一、高水头水电站压力管道振动与运行稳定性问题分析

(一) 压力管道振动的产生机制

高水头水电站压力管道内水流速快、压力高,紊流、水击等不稳定流动会对管壁产生周期性或非周期性作用力,引发振动。阀门快速启闭产生的水击压力波与管道结构相互作用,会导致剧烈振动^[1-3]。同时,管道的刚度、质量分布及支承条件等结构特性

决定其固有频率,当水流激励频率与其接近或相等时,会引发共振,使振动幅值急剧增大。

(二) 对运行稳定性的影响

压力管道过度振动会导致材料疲劳损伤,降低强度和使用寿命,可能出现裂纹、破裂及漏水等事故^[4]。振动传递至水轮机,会恶化其工作环境,导致叶片受力不均,产生额外振动和噪声,降低能量转换效率,还可能引发机组不稳定运行,冲击电网稳定性。

二、基于多目标优化的压力管道振动抑制与运行稳定性提升策略

(一) 多目标优化算法的选择与对比

1. 常用多目标优化算法介绍

为了选择最适合高水头水电站压力管道多目标优化的算法，对 NSGA - II、MOPSO 和 SPEA2 三种算法的性能进行对比分析。以收敛速度、解集多样性和计算效率为评价指标，在相同的优化问题和参数设置下进行测试，结果如下表 1 所示。

表1：三种算法优化测试结果对比

算法	收敛速度	解集多样性	计算效率（次 / 秒）
NSGA - II	较快	较好	25
MOPSO	快	一般	30
SPEA2	较慢	好	18

从表 1 可以看出，NSGA - II 算法在收敛速度和解集多样性方面表现较为均衡，计算效率也能满足工程需求。MOPSO 算法收敛速度快，但解集多样性相对较差；SPEA2 算法解集多样性好，但收敛速度较慢，计算效率较低。综合考虑，NSGA - II 算法更适合用于高水头水电站压力管道的多目标优化问题，因此本文最终选择 NSGA - II 算法。

(二) 优化目标函数的建立与细化

1. 振动抑制目标函数的细化

在实际工程中，仅以振动幅值最小作为振动抑制目标不够全面，还需要考虑振动的频率特性^[6]。因此，将振动抑制目标函数细化为振动幅值和振动能量的综合优化^[6]。

振动能量可以通过振动信号的功率谱密度积分得到。设振动幅值为 A ，振动能量为 E ，则细化后的振动抑制目标函数 f_1 可表示为：

$$f_1 = \min(\omega_1 A + \omega_2 E)$$

其中， ω_1 和 ω_2 分别为振动幅值和振动能量的权重系数，根据工程实际需求确定。

2. 运行稳定性目标函数的扩展

除了管道的应力水平和变形量外，管道的振动加速度也是衡量运行稳定性的重要指标^[7-8]。因此，将运行稳定性目标函数扩展为包含应力水平、变形量和振动加速度的综合指标。

设应力水平为 σ ，变形量为 δ ，振动加速度为 α ，则运行稳定性目标函数 f_2 可表示为： $f_2 = \max(\alpha \frac{[\sigma] - \sigma}{[\sigma]} + \beta \frac{[\delta] - \delta}{[\delta]} + \gamma \frac{[\alpha] - \alpha}{[\alpha]})$

其中， $[\sigma]$ 、 $[\delta]$ 、 $[\alpha]$ 分别为应力、变形量和加速度的许用值， α 、 β 、 γ 为相应的权重系数，且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

(三) 决策变量与约束条件的确定与量化

1. 决策变量的量化

为了便于优化计算，对决策变量进行量化处理。管道壁厚的取值范围为 [8mm, 20mm]，以 1mm 为步长进行离散；管径的取值范围为 [1.5m, 3m]，以 0.1m 为步长离散；支承间距的取值范围为 [6m, 15m]，以 1m 为步长离散；水流速度的取值范围为 [5m/s, 15m/s]，以 0.5m/s 为步长离散；压力的取值范围为 [5MPa, 15MPa]，以 0.5MPa 为步长离散。

2. 约束条件的量化

强度约束：管道的最大应力 $\sigma_{max} \leq [\sigma]$ ，其中 $[\sigma]$ 为管道材料的许用应力，对于钢衬钢筋混凝土管道，其许用应力通常取 200MPa。

变形约束：管道的最大变形量 $\delta_{max} \leq [\delta]$ ，根据相关规范，管道的最大允许变形量为管径的 0.2%。

水力约束：水流在管道内的水头损失 $h_f \leq [h_f]$ ，水头损失可根据曼宁公式计算， $[h_f]$ 根据水电站的设计要求确定。

运行参数约束：水流速度 $v \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$ ，压力 p_{min}, p_{max} ，其中 δ_{min} 、 δ_{max} 、 p_{min} 、 p_{max} 为水轮机设计工作范围内的流速和压力限值。

三、高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性提升实例分析

(一) 工程背景

该高水头水电站位于西南地区，装机容量为 300MW，最大水头为 350m，压力管道采用钢衬钢筋混凝土结构，管径为 2.5m，长度为 800m。该水电站自投入运行以来，压力管道在满负荷运行时振动较为明显，振动幅值达到 0.8mm，超过了设计允许值 0.5mm，对电站的安全运行构成了潜在威胁。为了解决这一问题，对该压力管道进行基于多目标优化的振动抑制与运行稳定性提升研究。

(二) 建立压力管道流固耦合振动模型

1. 模型参数设置

采用 ANSYS 软件建立压力管道的流固耦合振动模型^[9-10]。

管内流体为水，密度为 1000kg/m³，动力黏度为 1.002 × 10⁻³Pa · s。模型的网格划分采用结构化网格，管道结构单元采用 Solid185，流体单元采用 Fluid30，流固耦合界面采用 Interface154。

2. 模型验证

为了验证所建立模型的准确性，进行了现场振动测试。将试验测得的振动幅值与模型仿真结果进行对比，如下表 2 所示。

表2：三种算法优化测试结果对比

运行工况	试验值（mm）	仿真值（mm）	相对误差（%）
50% 负荷	0.35	0.33	5.7
75% 负荷	0.58	0.61	5.2
100% 负荷	0.80	0.78	2.5

从表 2 可以看出，模型仿真结果与试验值的相对误差均在 6% 以内，表明所建立的流固耦合振动模型具有较高的准确性，能够较好地反映压力管道的实际振动特性。

(三) 优化结果分析

优化后的压力管道振动幅值降低了 47.5%，振动能量降低了 53.6%，振动得到了显著抑制；应力水平降低了 33.3%，变形量降低了 36.0%，振动加速度降低了 45.3%，运行稳定性指标得到了明显改善。这表明通过多目标优化方法，成功实现了压力管道振动抑制与运行稳定性的协同提升。

四、结论

本文通过对高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性的研究，得出以下结论：高水头水电站压力管道的振动主要由水流激励和结构特性共同作用引起，其中紊流脉动压力、水击压力是主要的水流激励源，管道的固有频率特性是影响振动响应的关键

结构因素。多目标优化方法能够有效协调振动抑制与运行稳定性之间的关系。采用 NSGA - II 算法对压力管道的结构参数和运行参数进行优化，实现了两者的协同提升。工程实例分析表明，优化方案在技术和经济上均具有可行性。

参考文献

[1] 刘琦, 鲁瑶, 刘大斌, 等. 长距离引水式水电站机组压力管道快速排水研究 [J]. 水电与新能源, 2024, 38(11): 12-14.

[2] 罗佩玉, 刘朋. 昌波水电站压力管道布置型式选择及结构设计 [J]. 四川水力发电, 2024, 43(04): 95-100+112.

[3] 汪海雁, 张顺强. 杨房沟水电站压力钢管鼓包原因分析及处理措施 [J]. 水利水电快报, 2023, 44(S2): 32-34+38.

[4] 陈刚. LTQN 水电站发电引水系统水力过渡过程分析 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(11): 107-112.

[5] 张志天, 秦福兴, 赵传啸, 等. 某水电站压力管道排 / 充水管控策略研究 [J]. 四川水力发电, 2023, 42(S1): 90-100.

[6] 孟闻远, 唐志强, 郭颖奎, 等. 几何缺陷压力钢管稳定性数值分析 [M]. 中国水利水电出版社: 202207: 122.

[7] 刘庆胜. KEWZK 水电站压力管道设计方案综述 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(12): 112-115.

[8] 毛成, 苏立, 潘月国, 等. 小水电站压力管道水动力学特性研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(01): 151-157.

[9] 赵玮, 党力, 董旭荣. 烟岗高水头水电站设计关键技术 [J]. 陕西水利, 2020, (10): 138-140+143.

[10] 左保静, 王文全, 曹善宇. 农村水电站压力管道水头损失计算 [J]. 江苏水利, 2020, (03): 30-33.

火电锅炉过热器爆管原因探究

黄照发

中国华电集团贵港发电有限公司, 广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025040008

摘 要 : 过热器爆管事故属于火电系统运行安全的关键部分, 这种事故给电力系统的可靠和稳定性带来严重威胁, 细致探究它的形成机理有着十分重大的理论意义和现实意义, 本文集中探讨材料老化现象, 高温腐蚀状况。因为运行参数超出标准造成的超温超压情况, 还有检修维护不够细致, 缺少在线监测等各类情况。从众多视角分析致使过热器爆管的主要成因, 针对每一种成因制定对应的应对策略, 通过改善材料性质, 革新产品防腐蚀技术, 精确把控运作时的参数情况, 建立起一套智能化故障预测体系, 这样就能够保证火电机组的安全、高效率运作提供可靠的理论和实用方面的指导。

关 键 词 : 火电锅炉; 过热器爆管; 材料劣化; 运行工况; 预防性检修

Investigation on the Causes of Tube Burst in the Superheater of Thermal Power Boilers

Huang Zhaofa

China Huadian Corporation Guigang Power Generation Co., LTD., Guigang, Guangxi 537100

Abstract : Superheater tube burst accidents are a key part of the safe operation of thermal power systems. Such accidents pose a serious threat to the reliability and stability of the power system. A detailed exploration of its formation mechanism has significant theoretical and practical significance. This paper focuses on the phenomenon of material aging and high-temperature corrosion conditions. There are various situations such as over-temperature and over-pressure caused by operating parameters exceeding the standard, as well as insufficiently meticulous maintenance and lack of online monitoring. By analyzing the main causes of superheater tube burst from numerous perspectives, corresponding response strategies are formulated for each cause. Through improving material properties, innovating anti-corrosion technology of products, and precisely controlling the parameter conditions during operation, an intelligent fault prediction system is established. This can provide reliable theoretical and practical guidance for ensuring the safe and efficient operation of thermal power units.

Keywords : thermal power boiler; superheater tube burst; material deterioration; operating conditions; preventive maintenance

引言

作为火电锅炉的关键受热元件, 过热器的主要任务是把饱和蒸汽转变成过热蒸汽, 在高温、高压以及腐蚀性介质等复杂工作环境下, 它的管道容易发生破裂情况, 给机组的安全稳定运行带来很大威胁。随着机组参数持续增长, 服役年限不断增加, 过热器爆管问题愈发突出, 要深入探究其形成机理, 创建起科学的防范体系, 就能优化火电机组的运行可靠性, 而且还能有效地延长设备的服役时长, 从而给电力系统的安全高效运行给予强有力的保证。

一、火电锅炉过热器爆管原因探究的意义

(一) 保障电厂安全稳定运行

过热器爆管事故不断出现, 不仅会引起机组非计划停机, 还可能给电厂的安全生产以及电网的稳定运行带来重大危害。深入探究其成因机制, 能够从根本上排除隐患, 避免此类事故再次发生, 通过剖析爆管现象的内部规律及其引发因素, 可以为制订专

门的预防策略提供科学的依据。从而削减事故出现的可能性, 全面把握爆管机理, 有益于运行人员对设备的状态加以正确的评判, 尽快察觉出不正常信号, 而且采取合适的办法予以应对, 既能保证设备的安全运行, 又可切实保护现场工作人员的生命安全, 进而维持电厂生产秩序的平稳有序, 同时提升电力供应的可靠度和稳定程度^[1]。

（二）延长设备使用寿命，提升经济效益

过热器属于锅炉系统里的关键部分，它的性能高低直接关系到机组运行的经济性。深入探究过热器爆管的原因，并采用改善材料选择、改良制造工艺、完善运维策略等多种途径去解决这个问题，可以有效地延长设备的服役时长，从而缩减设备更新的频次并减少维护费用的支出。还能防止突然停机造成的发电量损失。依靠系统化的故障诊断手段得到的数据支撑，为设备的升级改造给予科学的依据，促使技术革新来优化设备的可靠性和运行效率，从长远角度来看，依靠大数据分析形成的管理机制将会极大提升火电企业的经济效益和市场竞争能力，实现安全高效的运行并达到可持续发展的目的^[2]。

（三）促进锅炉检修技术的发展与创新

对过热器爆管产生机制展开深入研究以后，便对改进检测精度、提高监测效果，并推动维修技术改良具有非常重要的意义，在探究它的真实成因之时，可以利用较为先进的无损检测手段，借助相关科技，还可以采用材料科学方面的检查方式以及数值模拟之类的工具来共同促进检修工艺持续不断更新换代，近年来以大数据和人工智能为支撑的智能诊断系统在爆管预警领域得到了应用，推动建立高效准确的智能型运作系统，这些科技创新提升了检修效率与准确性，一批专业人员被培育起来，依靠长期的技术沉淀加之不断投入的研发力量而构建起属于自己的检修核心技术体系，这给我国的火电技术升级与发展给予了强大支持。

二、火电锅炉过热器爆管的主要问题

（一）材料劣化与高温腐蚀问题

高温服役环境下，过热器管材组织结构会发生明显改变并伴随性能衰退，其中高温蠕变是核心劣化机制，它是在应力作用下产生的缓慢塑性变形，通过晶界滑移和空洞聚集最终造成脆性破坏，烟气里的硫、氯等腐蚀性介质，在高温环境下会形成低熔点化合物，对管壁实施侵蚀损害，特别是当温度处于波动范围时，腐蚀速率会大幅增长，服役时间越长，材料的抗氧化能力就越差。表面氧化层持续增厚并脱落，致使管壁厚度变薄，焊接接头由于组织不均一，容易成为腐蚀和裂纹出现的主要地方，这些因素彼此影响，促使管道服役寿命缩短，现在，传统材料选择标准和防护手段已不能应对日益严苛的工作环境，亟须研发新的耐高温、抗腐蚀材料，改良表面改性技术，来改善服役可靠性^[3]。

（二）运行工况异常及超温超压问题研究

火电机组实际运行中，负荷波动，燃料性质改变，设备故障等多种因素交织，很难一直保持设计工况，频繁启动停止，变负荷操作会让过热器承受周期性热应力，加快材料疲劳损伤速度，燃烧不均匀造成局部热负荷过大，使管壁温度超过设计限制，从而削弱材料强度，给水品质下降时，管内容易形成结垢，恶化传热状况，引发局部超温，如果运行参数调控不恰当，比如蒸汽流量分配不均或者减温水调节反应迟缓，就有可能引发局部过热。低负荷运行时，蒸汽流速下降会明显减弱传热效能，造成局部温

度异常上升，压力波动和水锤效应还会给管道带来额外的机械负载，叠加热应力的作用，使得系统的安全余量进一步缩减，这些非正常工况的持续存在，使得过热器实际承受的服役条件远远超出设计预期，从而极大地增加了管道破裂的可能性，创建完备的在线监测体系，做到对运行参数实施精确的监控并加以动态调节，这是保证系统可靠性的关键措施^[4]。

（三）检修维护与监测手段的不足问题

传统预防性维修模式难以准确判定设备运行情况，容易造成过度或者不足的维修现象，检修周期的确定缺少系统化的理论支撑，大多依靠经验来判断，潜在的故障风险往往被忽略，在检修执行过程中，质量把控环节存在着明显的漏洞，焊接瑕疵，热处理不充分之类的问题时常出现。反倒有可能带来新的危险源，现在所用的监测手段大多采用定时离线监测的方式，很难达到实时在线监测的要求，有些在线监测技术虽然应用到了实际工程当中，可是适用范围比较狭窄，测量精确度也比较低，不能很好地体现管道的实际运行情形。监测数据资源的低效利用主要由于数据分析及故障诊断能力的欠缺，没有形成系统化、标准化的管道全生命周期评价体系，造成服役寿命预测精确度受限，检修人员技术水平差距明显，对新兴技术的认知和应用能力普遍偏弱，这些问题相互影响，使得常规维护作业难以做到精准高效运作，从而给管道运行安全带来隐患，急需打造以状态感知为根基的智能化运维管理平台^[5]。

三、火电锅炉过热器爆管防控策略

（一）材料优化与防腐技术的应用策略研究

材料自身的固有问题造成过热器爆管现象，要想改善过热器的状况就必须充分考虑服役环境所处温度区间特性，采取梯度化的材料选择策略，在温度较高之处，要挑选强度高、韧性好而且抗腐蚀能力强的新式奥氏体不锈钢或者镍基合金。在温度较低处，可以选择传统较为廉价的铁素体钢；通过表面改性技术极大地提升管材耐蚀能力，利用激光熔覆、等离子喷涂等先进技术手段，在管子内壁形成一层致密的屏蔽涂层来抵御腐蚀性物质进入管壁内部。复合管技术依靠多材料协同作用，选取耐腐蚀性能佳的内层材料达成防护效果，而外层材料维持原有力学性能，焊接环节是潜在风险点，亟须改良，采取窄间隙焊接或者激光焊接等先进工艺，可缩减热影响区域，大幅削减焊接缺陷出现概率，创建起系统的材料性能数据库，动态观测服役环境里材料特性改变规律，给材料选择和服役寿命预估给予科学依据。

某发电厂在执行过热器材料升级方案的时候，先对原先的管材展开金相组织分析和力学性能测试，检测显示，高温区的管材已经产生明显的蠕变损伤和晶界退化状况，凭借检测得到的数据，技术团队给出了分区改良的想法，对于出口温度超过560℃的末级过热器管段，用 Super304H 奥氏体不锈钢取代传统的材质，由于它含有较高的铜和铌元素，所以它的高温强度比传统钢种高大约30%，至于处于500 ~ 560℃区间的管段，则用 T91 马氏体钢代替 T22 钢，以此实现服役性能的合理调配。在焊接施工期

间,要准确把控预热温度在200–250℃之间,先用氩弧焊技术完成底层焊接任务,再用手工电弧焊做填充及表面封合工作,焊接结束以后,马上执行750℃恒温维持2小时的热处理步骤,改造结束之后,利用硬度检测和射线探伤技术全方位考察焊接品质是否契合有关标准,监测数据表明,新材料区域没有出现腐蚀减薄或者蠕变变形之类的异常情况,预计能显著延长这个区域过热器的服役时间到15年之上。

(二) 运行参数优化及工况调控策略研究

过热器爆管事故的防范要依靠细致的运行参数管控体系,在燃烧优化上,要全面考量燃烧器配风方案,煤粉细度,火焰中心高度这些要素,借助科学调节来消除炉膛热负荷分布的不均匀状况,从而防止局部管壁温度出现异常提升,而且,一定要牢牢把控给水品质,以杜绝管内结垢现象的发生。保证水质符合相关技术规范,着重监督铁离子浓度,硬度,pH值等关键指标,务必维持其处在许可范围之内,减温水系统恰当安排并稳定运行对于维持蒸汽温度均衡极为重要,按照负荷变动来调整减水量,保证各级过热器出口温度一直处在安全区间内。机组启停以及变负荷工况期间,热应力集中现象比较突出,必须严格把控温升与温降速率,杜绝出现剧烈的温度波动状况,要创建起实时在线监测系统,还要设立多层次的预警机制,当某些关键参数接近设定阈值的时候就要立即发出警报,利用大数据分析技术来探究以往运行数据中隐藏的规律,不断改进操作规程,慢慢形成起一套科学严谨的运行调控体系。

某发电厂为解决过热器频繁超温问题,制定了一套系统化的运行优化方案,技术人员在DCS系统里添加了过热器管壁温度的在线监测模块,它可以及时收集蒸汽的温度、压力、流量等数据,准确地判断各个管壁的实际温度状况。当察觉到末级过热器出口处的管壁温度快要达到警报标准的时候,工作人员就立刻开展燃烧调整实验,改善各层燃烧器风量的分配情况,把火焰中心的高度降低大概1.5米,进而把炉膛出口处的烟温降低20摄氏度。改进磨煤机的运行方式,把煤粉的细度从R90=18%改为R90=12%,大幅度提升煤粉的燃尽程度,削减炉膛出口处火焰拖曳的现象,针对减温水调节阀执行特性校准,重新设置PID控制参数,把温度控制的精确度从正负5摄氏度改善到正负2摄氏度,创建分负荷段运行参数表,准确指定各工况下氧量,风量,减水量等关键指标的控制范围,通过三个月的不断改善和调整,过热器超温状况有了明显好转,降幅达到85%,给设备安全稳定运行赋予了有力支撑。

(三) 智能化监测与预防性维护策略

智能监测技术的应用明显改善了对设备运行状况的即时感知准

确度,利用分布式光纤测温系统,声发射传感器以及振动监测装置等先进检测设备,可以搭建起针对过热器全生命周期的健康守护网络。依靠工业物联网平台的数据搜集体系,就能迅速完成大量监测资料的即时传输并存储起来,从而给后面的分析给予坚实的数据保障,凭借机器学习和深度学习算法创建故障预估模型,经过对以往故障数据的学习训练,做到对异常信号特征的精准识别,进而达成预先警报的目的。剩余寿命评估要综合材料蠕变损伤,疲劳损伤以及腐蚀减薄等多种退化机制,创建涵盖多种因素耦合效应的预测模型,依靠风险导向的维修决策架构结合设备失效概率和潜在经济损失,完成检修优先级排序和执行程度的科学判断,预防性维护的开展依靠专业的运维团队,通过持续技术培训和资质认证来保证检修质量,要形成检修效果的闭环反馈机制,按照设备运行数据不断改良维护策略。

某发电厂智能化改造过程中,在过热器核心区域布置了120台高温专用无线温度传感设备,这些传感器利用特种高温电池供电,在600℃高温环境下可连续工作两年以上,每隔五分钟采集一次温度数据。然后通过 ZigBee 无线通信协议传送到数据采集网关,再由光纤网络接入中央监控系统,研究团队采用长短期记忆网络(LSTM)算法建立温度预测模型,此模型依靠历史温度波动规律,可以对接下来24小时温度走势实施精确预测,预测准确率可达到92%。系统察觉到某个测点的温度出现异常增长的时候,就会引发声光警报装置,而且会形成包含故障成因剖析的诊断报告,诸如烟气偏流,管壁结垢,材料老化之类的可能缘由,按照累积损伤理论塑造起来的寿命预估模型表明,智能化监测技术被采用之后,设备的大修时段可以由原先的传统模式的10年大幅延长到12年,其间只需执行部分小修就能符合运行要求,有一次在常规的数据分析过程中,系统察觉到一组过热器管的温度波动明显增大。

四、结语

要想解决问题,就是火电锅炉过热器爆管情况,就需要借助系统性创新和细致管理两者结合的方式,在仔细探究诸如材料老化,运行差错,保养缺失这些关键问题的基础上,采用改变材料种类,改善制作工艺,智能监视等多种防控手段,从而明显缩减爆管的危险并保证机器的安稳运行状况。以后应当加大基本研究力度,增进科技创新活动,促进防火电炉子爆炸方面技术朝着智能化和准确化方向进步,给火电行业发展给予有力的支持,而且要提高经验总结的强度。

参考文献

- [1] 赖云亭,沈克勤,马芹征,等.火电锅炉过热器管爆管原因分析[J].金属热处理,2019,44(S01):278–281.
- [2] 张政和.过热器热偏差的原因分析及防止对策[J].华东科技(综合),2021,(4):249–249.
- [3] 王天龙,朱立平,张夜雨,等.660 MW 超超临界机组锅炉屏式过热器爆管原因探究[J].东北电力技术,2021,42(10):44–49.
- [4] 梁海松.火电锅炉过热器爆管原因研究[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2021(12)[2021–12–03].
- [5] 刘献良,张国栋,赖云亭,等.火电锅炉过热器管失效原因分析[J].热工技术,2018,(03):35–38.

铸件机加工的自动化改造路径：从单机到柔性生产线

林润琛

广东鸿特科技股份有限公司，广东 肇庆 526070

DOI:10.61369/WCEST.2025040009

摘 要： 本文聚焦于铸件机加工的自动化改造，深入探讨了从单机生产迈向柔性生产线的有效路径。分析了当前美的项目的现状，包括订单需求少、机床稼动率低等问题，凸显了改造的必要性。接着，详细阐述了共线策划评估，明确了部分产品可共线生产的情况。介绍了柔性线计划，设定了产品夹具切换及调试等目标，并提出了夹具快换、刀杯配置、程序优化等对策。对不同类型夹具的切换步骤进行说明，如水平转台夹具、工字板夹具等。还对切换流程进行了分析与优化，通过取消产前 CMM 稳定性、并行操作等措施，使流程更高效，为铸件机加工的自动化改造提供了全面且可行的方案，助力企业提升生产效率和资源利用率。

关 键 词： 铸件机加工；自动化改造；柔性生产线；夹具切换；流程优化

The Automation Transformation Path for Casting Machining: from Single Mmachines to Flexible Production Lines

Lin Runchen

Guangdong Hongte Technology Co., LTD. Zhaoqing, Guangdong 526070

Abstract： This paper focuses on the automation transformation of casting machining and deeply explores the effective path from single-machine production to flexible production lines. The current situation of the Midea project was analyzed, including problems such as low order demand and low machine tool utilization rate, highlighting the necessity of transformation. Then, the assessment of co-production line planning was elaborated in detail, and the situations where some products can be produced on the same production line were clarified. The flexible line plan was introduced, goals such as product fixture switching and debugging were set, and countermeasures such as fixture quick change, tool cup configuration, and program optimization were proposed. Explain the switching steps for different types of fixtures, such as horizontal turntable fixtures and I-beam clamps, etc. The switching process was also analyzed and optimized. By eliminating the stability of pre-production CMM and implementing parallel operations, the process became more efficient, providing a comprehensive and feasible solution for the automation transformation of casting machining, and helping enterprises enhance production efficiency and resource utilization.

Keywords： casting machining; automation transformation; flexible production line; fixture switching; process optimization

在制造业飞速发展的当下，铸件机加工行业面临着提高生产效率、降低成本、提升产品质量的多重挑战。传统的单机生产模式在应对多样化的订单需求和资源高效利用方面逐渐显现出局限性。美的项目目前就面临着订单需求少、机床稼动率低等问题，大量资源被闲置，生产效益亟待提升。而柔性生产线作为一种先进的生产模式，能够快速适应不同产品的生产需求，实现生产的灵活性和高效性。因此，探索铸件机加工从单机到柔性生产线的自动化改造路径具有重要的现实意义。本文将围绕美的项目，详细阐述改造过程中的关键环节和有效策略，为行业的转型升级提供有益的参考。

一、美的项目现状分析

（一）订单需求情况

美的项目目前订单需求较少，约100套/月，涵盖6款产品共600件。小批量订单导致生产线频繁切换，设备利用率低，原材料

采购难以议价，仓储与物流成本分摊困难，整体生产效率下降，难以形成规模效应，进一步推高了单位产品成本，影响项目盈利能力和市场竞争力^[1]。

（二）机床稼动率问题

6款产品共13个工序，长期分散在13台专用机床上生产，

作者简介：林润琛（1990.12-），男，汉族，佛山南海人，毕业于肇庆学院，本科学历，学士学位，中级机械设计工程师职称，研究方向：主要从事铝合金压铸技术改善，以及铝合金加工技术优化。

设备专属性强，换型困难，导致单台机床日均运行时间不足2小时，稼动率不足10%。大量设备空置不仅造成固定资产闲置与维护成本上升，还挤占生产空间，影响排产灵活性，严重制约了产能释放与交付效率，形成显著资源浪费。

（三）现状对生产的影响

低订单需求和低机床稼动率导致企业生产效益低下，难以在市场竞争中占据优势。设备闲置、人力浪费与交付周期延长进一步加剧经营压力。因此，急需对现有的生产模式进行改造，通过推进柔性生产、优化排产调度、引入智能化管理系统，提升资源利用率和生产效率，实现降本增效与快速响应市场需求^[2]。

二、共线策划评估

（一）产品共线分析

机加工程部经详细评估发现，美的06因夹具与捷力V4 XP设备Z轴钣金存在空间干涉，无法满足同线生产要求，故不纳入项目内共线规划；而美的01至05机型结构兼容性良好，可实现与捷力V4 XP的共线生产^[3]。该结论为产线资源配置、排产计划制定及设备布局优化提供了关键依据，有助于提升生产效率与设备利用率，确保项目顺利推进。

（二）共线的可行性

美的01至05型号产品具备共线生产能力，可灵活切换生产任务，实现多型号产品在同一生产线上的高效协同作业。该模式显著提升了机床设备的利用率，有效减少换线和待机时间，避免资源闲置，从而大幅提高整体生产效率。通过统一工艺流程与共享设备资源，不仅缩短了生产周期，还降低了设备投入、维护及人力成本。同时，共线生产有助于优化生产管理，提升产能调配的灵活性，增强企业对市场需求变化的响应能力^[4]。这一生产方式在保障产品质量稳定的基础上，进一步压缩运营成本，提升资源利用效率，为企业创造更高的经济效益，助力实现精益化、智能化制造目标。

（三）共线对生产的意义

产品共线生产是迈向柔性生产线的重要一步，它能够实现生产的灵活性和高效性，使企业更好地应对市场需求的变化。通过在同一生产线上兼容多种产品的制造，企业可以快速切换产品类型，减少设备闲置和换线时间，显著提升资源利用率。同时，共线生产有助于降低固定资产投入和运营成本，避免为单一产品建设专用产线带来的资源浪费。在市场需求日益个性化、订单趋于小批量多品种的背景下，共线生产赋予制造系统更强的适应能力。借助先进的生产调度系统、模块化工艺设计和智能控制系统，企业可实现产品混流生产过程的精准管控，确保质量稳定与交付效率^[5]。此外，共线生产还推动了人员技能的复合化发展和管理流程的标准化建设，为后续向智能制造和数字化工厂升级奠定基础。因此，产品共线不仅是生产模式的优化，更是企业构建柔性制造体系、增强市场响应能力的关键举措。

三、柔性线计划

（一）目标设定

柔性线计划的目标是8小时完成一款产品的夹具切换并送检，16小时完成设备调试并达到合格标准，4小时完成模拟装配及流程

确认，总计28小时内实现产线全面就绪，具备批量生产条件。该目标的设定不仅明确了各阶段时间节点，更体现了对生产效率与响应速度的极致追求。通过标准化切换流程、优化夹具设计与预调机制，减少停机等待时间，提升产线在多品种、小批量生产模式下的适应能力^[6]。同时，依托数字化管理系统实时监控进度，确保各环节无缝衔接，降低人为误差。这一高效切换模式显著缩短了产品导入周期，增强了对市场需求变化的敏捷应对能力，为后续柔性制造体系的持续优化奠定了坚实基础，有力支撑企业实现快速交付与精益生产的战略目标。

（二）对策措施

为实现高效柔性生产目标，企业系统性地实施了一系列优化对策。通过引入夹具快换系统，并在快换板上加装高精度定位销，显著提升了工装更换的重复定位精度与作业效率，缩短了换型时间。刀库配置方面，确保刀杯数量超过共线生产项目中单工序所需刀具的总和，实现产品切换过程中无需人工装拆刀具，避免了因换型导致的停机等待。在程序控制层面，优化加工程序，增加坐标系自动刷新指令，由系统程序直接调用并录入工件坐标系，减少了人为输入误差，提高了加工稳定性与一致性^[7]。同时，对生产流程进行全面梳理与再造，精简冗余环节，实现各工序间的无缝衔接。上述措施协同作用，不仅大幅提升了设备利用率和换产效率，还有效降低了人工干预带来的质量风险与时间成本，显著增强了生产线应对多品种、小批量订单的响应能力，为实现精益化、智能化制造奠定了坚实基础。

（三）计划的实施效果

通过实施柔性线计划，企业能够根据订单需求灵活调整生产节奏与产品种类，实现多品种、小批量的高效生产。柔性生产线采用模块化设计和智能化控制系统，不仅缩短了换线时间，还降低了设备停机率，显著提升资源利用率和生产效率。同时，该模式有助于减少库存积压，加快产品上市周期，使企业更敏捷地应对市场波动与个性化需求。此外，柔性化生产还能推动制造过程的数字化与可视化，为后续的数据分析和工艺优化提供支撑。在当前竞争激烈、需求多变的市场环境下，实施柔性线计划不仅提升了运营弹性，也为企业实现智能制造和可持续发展奠定了坚实基础，从而全面增强企业的市场响应能力与核心竞争力^[8]。

四、夹具切换步骤

（一）不同夹具类型

在多品种、小批量生产模式下，夹具的快速切换对提升加工效率至关重要。针对水平转台夹具、工字板夹具、单头架夹具等不同类型的夹具，切换过程需遵循标准化作业流程。首先进行粗定位，通过目视对齐夹具底板与工作台上的正面及侧面标识线，确保初始位置准确；随后插入定位销，实现精确定位，防止加工过程中的位移；接着使用专用工具锁紧底板固定螺丝，保证夹具整体刚性；对于带液压或旋转功能的夹具，如水平转台夹具，还需正确连接液压油管和转台控制线，确认接口密封性与信号传输正常。每一步操作均需按顺序执行并由操作人员进行互检，避免漏接、错接^[9]。此外，夹具切换前应清理安装面杂质，确保接触面洁净平整。通过规范执行粗定位、销钉定位、紧固锁紧、管路与线路连接等环节，可有效缩短换型时间，减少人为误差，保障

加工精度与生产连续性。标准化的切换流程已成为实现柔性制造和高效生产的重要支撑。

（二）切换前准备工作

切换夹具前需做好充分的准备工作，包括提前准备叉车、六角扳手、扭力扳手、吊装带、定位销、螺栓螺母等必要工具和配件，并检查其完好性与适用性，避免因工具缺失或损坏导致作业中断。同时，应根据生产计划确认新夹具的型号、规格是否匹配，并将其运送至换装区域，确保夹具提前到位。操作人员需熟悉换装流程和安全规范，必要时进行技术交底和分工协作。现场应清理障碍物，保证作业空间畅通，便于设备移动与定位。此外，可采用标准化作业指导书和工具定置管理，提升准备工作的系统性与效率。充分的准备工作不仅能有效缩短换模时间，减少设备停机，还能降低操作失误风险，保障作业安全，从而显著提升生产线的切换效率和整体运行效率。

（三）夹具切换的重要性

夹具快速切换是柔性生产线的基础，能够实现不同产品的快速生产转换，提高生产的灵活性和效率。通过标准化接口和模块化设计，夹具可在数分钟内完成更换，大幅缩短停机时间，减少人工干预，降低换型错误率。配合自动化系统如机器人或数控设备，夹具快速切换可实现无人化换产，提升整体设备利用率^[10]。在多品种、小批量的生产模式下，该技术尤为关键，能够快速响应市场需求变化，支持定制化生产。同时，结合MES系统与数据追溯功能，还能实现夹具状态监控与生产过程的精细化管理，进一步增强产线的智能化水平。

五、切换流程分析与优化

（一）目前切换流程

目前的切换流程较为繁琐，涉及上机申请、夹具与刀具的选型及预调准备，拆卸旧夹具、安装新夹具并精确对位，刀具按工艺要求装配并校验，液压站与转台的对接布线及功能测试，随后进行试切样件的工艺参数调试与优化，最后还需完成产前CMM检测以验证工件尺寸稳定性。各环节衔接紧密，依赖人工经验操作，且缺乏标准化作业指导，导致切换过程易受人为因素影响，出现等待审批、物料准备不齐、接线错误或调试反复等问题，整体切换周期长，严重影响设备稼动率与生产交付效率。尤其在多品种、小批量生产模式下，频繁换型进一步放大了流程冗余，制约了柔性生产能力的提升。

（二）流程优化措施

通过研发、工艺、品质及生产等多部门协同评估，决定取消产前CMM设备稳定性检测环节，将CMM检测与工艺验证、品质首件确认同步开展，实现并行作业。同时，优化调机流程，明确调机标准与验收节点，减少重复等待和设备空置时间。此外，建立跨部门快速响应机制，提前介入设备调试与参数设定，提升问题处理效率。通过上述流程整合与协同优化，有效压缩了产前准备周期，避免了原流程中因串行作业导致的时间浪费。实践表明，该优化方案显著缩短了生产启动时间，提升了设备利用率和整体生产效率，为订单快速交付提供了有力支持。

（三）优化后的效果

经过系统化优化，切换流程不仅显著缩短了换线时间，还实现了操作标准化与自动化程度的提升，有效减少了人为失误和设备空转现象。通过引入精益管理工具和实时监控系统，生产准备周期大幅压缩，设备综合效率（OEE）明显提高，从而提升了整体生产效率。同时，资源利用率得到改善，辅料损耗和能源消耗相应降低，直接推动生产成本下降。更为重要的是，优化后的流程具备更强的灵活性和响应速度，能够快速适应多品种、小批量的市场趋势，缩短产品交付周期，增强企业对动态需求的应变能力。这一系列改进不仅达成了预设的运营目标，还提升了企业在激烈竞争环境中的可持续发展能力，为后续的智能化升级奠定了坚实基础。

六、结语

铸件机加工从单机到柔性生产线的自动化改造是一个系统而复杂的过程，对于提高企业的生产效率、降低成本、提升市场竞争力具有重要意义。通过对美的项目的分析，我们明确了当前生产模式存在的问题，如订单需求少、机床稼动率低等。在共线策划评估中，确定了部分产品可共线生产的方案，为生产资源的优化配置提供了方向。柔性线计划的制定和实施，为实现生产的快速响应和高效转换奠定了基础。不同类型夹具切换步骤的规范以及切换流程的优化，进一步提高了生产的灵活性和效率。然而，要实现全面的自动化改造，还需要企业各部门的密切配合和持续改进。在未来的发展中，企业应不断探索和创新，引入先进的技术和管理理念，进一步完善柔性生产线，以适应不断变化的市场需求，在激烈的市场竞争中立于不败之地。本项目的经验也为其他铸件机加工企业的自动化改造提供了有益的参考和借鉴。

参考文献

[1] 薛玉珂. 基于多尺度特征的密集铸件检测算法研究 [D]. 安徽省：安徽理工大学，2024.
[2] 王帅. 基于工业机器人的铸件打磨关键技术研究 [D]. 河北省：石家庄铁道大学，2024.
[3] 衡思迎，常青，李国和，等. 基于双目结构光的镶块铸件初序加工在线定位系统 [J]. 制造业自动化，2024，46(7): 151–156.
[4] 毛辉，田学智，常涛，等. 基于铸件柔性自动加工线的加工全流程方案设计 [J]. 铸造设备与工艺，2024(1): 29–32
[5] 朱梓豪. 多维振动铸件调姿分拣装置的结构设计与分析 [D]. 安徽省：安徽理工大学，2024.
[6] 江西锦瑞机械有限公司. 一种压铸件加工用抛丸装置：CN202410638491.6[P]. 2024–08–23.
[7] 胡佳琪. 基于多尺度特征与注意力机制的铸件表面缺陷检测研究 [D]. 安徽省：安徽理工大学，2024.
[8] 毛辉，田学智，常涛，等. 基于铸件柔性自动加工线的加工全流程方案设计 [J]. 中国铸造装备与技术，2024，59(02): 89–93.
[9] 高狄，段坤，李星辰，等. 自动化铸造生产线工艺特点分析 [J]. 大型铸锻件，2024，(01): 18–22.
[10] 李玉霞，官哲，张翠华，等. 基于视觉检测的铸件自动打磨系统 [J]. 今日制造与升级，2024，(02): 72–74.

基于数字孪生的配电网继电保护协同优化策略

经竹青

南京国电南自自动化有限公司, 江苏 南京 211153

DOI:10.61369/WCEST.2025040012

摘 要： 针对高比例分布式能源接入导致配电网继电保护系统面临的响应滞后、误动率高及多主体协同难题，提出一种“管理—技术”双维度协同优化策略。管理上，构建了“组织架构优化—制度协同创新”体系，通过设立联合协同办公室与月度联席会议，明晰权责流程；技术上，设计了基于数字孪生的协同平台，实现配电网全要素高精度建模与多源异构数据融合，为构建敏捷可靠的新型电力系统保护体系提供了有效方案。

关 键 词： 数字孪生；配电网；继电保护；协同优化；动态定值整定；智能决策支持

Collaborative Optimization Strategy of Relay Protection in Distribution Network Based on Digital Twin

Jing Zhuqing

Nanjing SAC Automation Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211153

Abstract： A "management technology" two-dimensional collaborative optimization strategy is proposed to solve the problems of delayed response, high misoperation rate and Multi-Agent Coordination faced by the distribution network relay protection system due to the high proportion of distributed energy access. In terms of management, the system of "organizational structure optimization system collaborative innovation" was constructed, and the rights and responsibilities process was clarified through the establishment of a joint coordination office and a monthly joint meeting; Technically, a collaborative platform based on digital twin is designed to realize the high-precision modeling of all elements of distribution network and the integration of multi-source heterogeneous data, which provides an effective scheme for building an agile and reliable new power system protection system.

Keywords： digital twins; distribution network; relay protection; collaborative optimization; dynamic setting; intelligent decision support

引言

国家能源局《关于加快推进新型电力系统发展的指导意见》明确指出，需构建智能高效的电网调度保护体系，以应对高比例可再生能源接入的挑战。传统继电保护系统依赖人工整定与固定阈值，难以适应电网动态变化，存在响应滞后、误动拒动风险高、调度—运维—检修等多部门协同效率低等问题。数字孪生技术通过构建物理电网与虚拟模型间的实时交互与映射，为实现保护系统的状态精准感知、故障智能决策与多业务协同提供了新范式^[1]。然而，当前研究多集中于设备级状态监测与诊断，在系统级协同优化架构、跨部门联动机制及“管理—技术”深度融合方面的研究尚显不足^[2]。本文立足于数字孪生技术，从组织管理与技术平台两个维度，系统构建配电网继电保护协同优化机制，以解决信息孤岛问题，提升协同效率，为增强继电保护系统对新型配电网的适应性提供理论支撑与实践路径^[3]。

一、配电网继电保护协同优化理论基础

（一）数字孪生技术的基本框架与核心特征

数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟映射，并基于实时数据进行仿真分析与决策优化的技术框架。其在配电网继电保护中的应用核心在于三大特征：一是高保真实时性，依托同步

相量测量单元（Phasor Measurement Unit, PMU）、智能终端及高速通信网络，实现毫秒级数据同步与模型更新，精准反映电网运行状态；二是闭环交互性，通过“数据采集—模型仿真—策略优化—指令执行”的闭环反馈，驱动保护策略的动态调整与迭代优化；三是多维度融合性，整合电气量（电压、电流）、物理量（温度、振动）、环境量（气象、地理）及拓扑参数，构建多

维度的配电网虚拟镜像，支撑故障场景复现与保护策略推演。该框架为应对分布式电源出力不确定性和拓扑多变性问题提供了动态决策基础。

（二）继电保护协同理论架构

配电网继电保护协同的本质是实现保护装置、调度中心、运维部门及分布式电源管理系统之间的信息共享与动作协调，其理论架构涵盖三个层次：一是数据采集与通信层，依托 PMU、智能传感器与 5G/ 光纤网络，实现全网数据的精准感知与低延时传输；二是模型构建与仿真层，基于数字孪生技术建立包含分布式电源、负荷、网架及保护装置的精细模型，支持电磁暂态仿真与故障模拟；三是决策优化与协同层，采用自适应保护算法、广域协同策略与多智能体决策理论，生成与电网实时状态相匹配的保护定值与动作逻辑，并通过标准化接口与管理系统交互，实现调度 - 运维 - 保护的跨部门业务协同。该架构突破了传统保护模式的局限，为构建高效、自适应的协同保护机制奠定了理论基础。

二、配电网继电保护协同现状分析

（一）现有协同模式及其效能瓶颈分析

当前配电网继电保护协同主要依赖于传统模式，面临多重效能瓶颈。在信息流转方面，调度、运维、检修部门间多依赖电话、邮件等传统方式传递故障信息与定值单，平均信息流转时间过长，严重迟滞故障响应；在定值管理方面，普遍采用离线人工计算与整定模式，调整周期长达数周，无法适应分布式电源接入导致的短路电流日甚至小时级波动，保护误动风险显著增加；在数据共享方面，保护装置、SCADA 系统、配电自动化系统及 GIS 平台数据格式异构、接口不一，形成严重的“信息孤岛”，阻碍多源数据融合与协同决策。上述瓶颈致使传统协同模式难以支撑新型电力系统对保护敏捷性的要求。

（二）协同机制的核心问题剖析

从系统层面剖析，当前协同机制存在三大核心问题：一是管理协同壁垒，调度、运维、信通等部门权责边界模糊，缺乏高效的跨部门议事决策平台与标准化流程，故障处置中易出现指挥重叠或责任推诿；二是技术协同障碍，不同厂商保护设备的通信协议（如 IEC 61850、103、104 等）与数据接口差异大，协同算法兼容性不足，且现有平台缺乏对海量异构数据的融合处理与智能分析能力；三是策略协同僵化，传统定值整定策略依赖经验公式与固定阈值，未能与数字孪生仿真平台联动，无法根据电网实时运行状态（如 DG 出力、负荷水平、拓扑结构）进行动态调整，在故障场景下适应性差。这些问题构成了制约保护系统性能提升的关键矛盾。

三、数字孪生驱动的协同优化机制构建

（一）组织架构与制度协同机制设计

为破解管理协同壁垒，构建了“结构 - 制度”双轮驱动的管理协同体系。在组织架构上，成立由调度、运维、信通及安监部

门组成的联合协同办公室，作为常设协调机构，负责保护策略的联合评审、数据权限分配与跨部门争议仲裁，从顶层消除权责交叉；同步建立月度联席会议制度，定期通报电网拓扑变更、保护动作分析报告与技术标准更新，促进信息互通。在制度协同上，设计了“数字孪生仿真 - 多部门联合评审 - 方案发布执行 - 效果后评估”的标准化决策流程，明确各环节责任主体与时限要求，压缩决策周期；强制推行基于 IEC 61850 的统一数据建模与共享标准，打破信息交互壁垒。该体系通过权责明晰与流程再造，为高效协同提供了制度保障。

（二）技术协同平台集成与功能设计

为解决技术协同障碍，研发了以数字孪生为核心的一体化技术协同平台。该平台由三大核心模块构成：一是全要素数字孪生建模模块，集成 ETAP、PSCAD 等仿真引擎，建立涵盖分布式电源、线路、开关、保护装置的精细模型，支持拓扑动态识别与参数在线校核，提升模型精度；二是多源数据智能融合模块，基于边缘计算网关接入 PMU 量测数据、无人机巡检影像、气象环境数据及设备状态数据，采用聚类分析与时序关联算法进行数据清洗、特征提取与故障画像生成，消除数据孤岛；三是协同决策与动态调整模块，内嵌自适应保护算法与广域协同逻辑，能够根据数字孪生平台的仿真结果，实时计算并下发最优保护定值，支持故障区域的毫秒级精准隔离与自愈方案生成。该平台通过与管理体系的深度集成，实现了“数据 - 模型 - 决策 - 执行”的全链条技术协同。

四、协同优化机制实施路径与效果保障

（一）分阶段实施与动态管控策略

为确保协同机制的平稳落地，制定了“试点验证 - 推广扩容 - 全面应用”的三阶段实施路径。试点阶段（3-6 个月）选取高渗透率分布式光伏的典型馈线进行部署，重点验证管理流程贯通性与平台技术指标；推广阶段（6-12 个月）扩大至整个配电分区，完善技术标准与制度细则，形成区域化协同能力；全面应用阶段推广至全网。在动态管控上，建立了“数字孪生预警 - 保护动作 - 运维处置”的在线闭环流程：平台利用仿真数据预判故障风险并生成预决策方案；保护装置动作后，动作信息实时回传至数字孪生模型进行效果校验与策略迭代；同步触发运维工单并推送至移动终端，缩短平均故障隔离时间。同时，建立平台性能健康度评估模型，当算法精度或数据同步延迟偏离阈值时，自动触发预警并启动检修流程。

（二）标准化流程再造与绩效保障体系

聚焦协同效率提升，开展了系统性流程再造。一是定值管理流程线上化：将传统人工定值计算流程转变为“数字孪生仿真生成初始方案 - 联合办公室在线评审 - 自动下发至装置 - 平台采集动作数据评估效果”的线上闭环，杜绝人为干预，提升效率与准确性。二是故障处置流程标准化：基于平台虚拟定位功能，快速锁定故障区段，自动生成标准化处置指导书（含操作步骤、安全措施、预期后果），并推送至现场运维人员，处置结果通过 APP

回传归档，形成“仿真－执行－反馈”的知识积累闭环。在绩效保障方面，构建了以数据共享及时率（ $\geq 95\%$ ）、保护动作正确率（ $\geq 99\%$ ）、故障平均隔离时间（ $< 100\text{ms}$ ）为核心的可量化考核指标，并实施跨部门双向评价制度，评价结果与绩效奖金强制关联（权重 $\geq 30\%$ ），驱动各部门从被动协作转向主动协同。

五、总结

本文系统分析了新型电力系统下配电网继电保护在协同方面面临的挑战，构建了数字孪生驱动的“管理－技术”双维度协同

优化机制。该机制通过联合协同办公室与标准化流程破解了管理壁垒，通过数字孪生平台与智能算法实现了数据融合与动态决策，有效解决了职责模糊、数据孤岛与响应滞后问题，显著提升了保护正确率与故障处置效率，为适配新型电力系统提供了可行路径。未来研究可探索数字孪生与人工智能的深度融合，推动模型轻量化与复杂场景适配，增强极端天气下的鲁棒性，完善标准体系以提升工程适用性。此外，所提出的协同优化框架对于水电系统、大型泵站等水利电力交叉领域的保护与控制同样具有借鉴意义，可作为下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 付慧敏, 郑刚. 基于数字孪生的配电网智能化故障诊断方法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2025, 47(03): 288-294.
- [2] 王庆杰, 尚磊, 陈双印, 等. 分布式光伏电站接入配电网继电保护整定优化 [J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(04): 84-91.
- [3] 王榕泰, 吴细秀, 冷宇宽, 等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述 [J]. 电网技术, 2024, 48(09): 3872-3889.

火电厂关键设备故障预测与健康管理系统

赵赟, 刘宁, 苗慧春, 张文刚

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/WCEST.2025040014

摘 要 : 火电厂作为能源系统的核心, 其关键设备运行稳定性直接影响电力供应安全与经济效益。面对高负荷、复杂工况及环保要求, 传统设备维护模式存在故障预警滞后、诊断依赖人工经验等问题, 亟需构建智能化故障预测与健康管理系统。本研究以机器学习算法为核心, 结合多源数据融合与深度学习技术, 提出一种基于 Shapley 加性解释的预测框架, 实现设备故障的早期识别与健康状态量化评估。研究通过整合分布式控制系统 (DCS) 实时数据、振动信号、温度场分布等异构数据源, 构建涵盖数据采集、特征提取、模型训练及健康管理的完整技术体系, 为火电厂设备运维提供系统性解决方案。

关 键 词 : 火电厂设备; 故障预测; 健康管理系统; 深度学习

Key Equipment Fault Prediction and Health Management System for Thermal Power Plant

Zhao Yun, Liu Ning, Miao Huichun, Zhang Wengang

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As the core of energy systems, thermal power plants depend on the operational stability of critical equipment to ensure secure power supply and economic efficiency. Confronted with high loads, complex operating conditions, and environmental regulations, traditional maintenance approaches suffer from delayed fault warnings and diagnostic reliance on manual expertise, making intelligent fault prediction and health management systems imperative. This study proposes a predictive framework based on Shapley additive interpretation, integrating machine learning algorithms with multi-source data fusion and deep learning technologies. The proposed system enables early detection of equipment failures and quantitative health status assessment. By consolidating heterogeneous data sources including Distributed Control System (DCS) real-time data, vibration signals, and temperature field distributions, the research establishes a comprehensive technical architecture covering data acquisition, feature extraction, model training, and health management. This integrated solution provides a systematic approach for equipment operation and maintenance in thermal power plants.

Keywords : thermal power plant equipment; fault prediction; health management system; deep learning

引言

火电厂作为现代能源系统的核心组成部分, 其关键设备的稳定运行直接关系到电力供应的安全性和可靠性。随着能源需求的持续增长和环保标准的日益严格, 火电厂设备在高负荷、长期运行条件下面临着严峻挑战, 设备故障不仅可能导致发电中断, 还可能引发安全事故并造成巨大经济损失。因此, 构建科学有效的故障预测与健康管理系统已成为提升火电厂运行效率与安全性的研究方向。近年来, 随着计算机技术、大数据技术、物联网技术以及云计算技术的快速发展, 火电厂设备故障预警与诊断系统逐步实现了智能化升级。这些技术的应用为设备运行状态的动态监测提供了直观、及时的数据支持, 同时通过建立动态监测模型, 能够预测设备运行过程中的潜在异常, 为管理人员提供更精准的诊断依据, 从而实现对设备寿命和系统稳定性的科学评估。发电机转子作为火电厂核心设备之一, 其绝缘缺陷问题直接影响机组的安全运行。

一、火电厂关键设备故障预测系统设计

（一）数据采集与处理

火电厂关键设备的故障预测系统设计依赖于高质量的数据采集与处理流程。数据采集系统需全面覆盖锅炉、汽轮机、循环水泵等核心设备的运行参数，通过安装振动传感器、温度传感器、压力变送器等多类型传感器，实时捕捉设备运行状态的物理特征量。在火电厂的分布式控制系统（DCS）架构下，数据采集模块整合了设备运行过程中的实时工况数据，包括温度场分布、转子振动频谱、轴承箱加速度信号等关键指标，同时结合历史故障案例库形成多源异构数据集。针对转动设备的状态监测，振动分析技术被证实是识别早期故障的重要手段，通过建立循环水泵等设备的状态监测数据库，可对振动幅值、频率、相位等参数进行趋势分析，为设备异常状态诊断提供量化依据^{[1][2]}。

（二）预测模型构建

火电厂关键设备故障预测系统的预测模型构建以提升诊断精度和实时性为核心目标，结合多源数据特征与先进算法，形成层次化、模块化的模型架构。系统设计采用深度学习与传统方法的融合策略，通过数据预处理、特征提取、模型训练及结果反馈的闭环流程实现预测能力的持续优化。在数据预处理阶段，针对火电厂设备运行时序数据的高噪声、多变频特性，引入基于注意力机制的 Transformer 模型进行序列建模，有效捕捉长周期依赖关系并消除异常值干扰，该方法在处理发电机组振动、温度等传感器数据时展现出优于传统滑动窗口法的稳定性^{[3][4]}。特征提取模块采用卷积神经网络（CNN）与非线性自回归外生（NARX）模型的联合架构，通过 CNN 的局部感知特性提取空间特征，结合 NARX 模型对输入变量与输出变量的动态映射关系建模，特别在余热锅炉泄漏故障诊断中实现了故障特征向量的高效提取，为后续分类奠定基础。

模型构建的创新点体现在多算法协同与知识驱动的结合。针对对不同设备类型的故障模式差异，设计分层分类架构：初级分类器采用极限学习机（ELM）对原始特征进行粗粒度筛选，其快速学习特性确保实时处理需求；次级分类器引入深度信念网络（DBN）进行细粒度诊断，通过堆叠受限玻尔兹曼机逐层优化特征表示，在汽轮机轴承故障案例中，该组合策略将分类准确率提升至 92.3%。同时，借鉴 PDCA 循环理论建立模型迭代优化机制，通过在线监测数据持续更新训练集，结合交叉验证与迁移学习策略避免过拟合，系统诊断效率较传统方法提升 40% 以上。

二、健康管理系统实现与优化

（一）系统实现步骤

健康管理系统的实现与优化是保障火电厂关键设备安全稳定运行的核心环节，其技术架构需结合数据采集、特征提取、模型构建、诊断分析及持续优化等多维度技术。在系统实现过程中，首先建立多源异构数据采集体系，通过部署分布式传感器网络实时监测设备振动、温度、压力、电流等关键参数，同时集成

SCADA 系统获取运行工况数据。数据采集模块采用边缘计算架构，通过嵌入式处理器实现原始信号的初步降噪与协议转换，确保数据传输的实时性和完整性。

数据预处理阶段需对原始数据进行多维度清洗与标准化处理。针对传感器漂移、信号噪声及数据缺失问题，采用小波阈值去噪法与卡尔曼滤波相结合的混合算法，消除高频干扰并保留设备故障特征信息^[5]。数据对齐采用时间戳同步机制，结合线性插值与动态时间规整（DTW）技术，解决多源数据采样频率差异问题。特征提取环节构建多层次特征体系，时域特征涵盖均方根值、峰值因子与峭度系数，频域特征采用 FFT 与小波包分解提取频率分布特征，时频域联合分析则通过 Hilbert-Huang 变换捕捉非平稳信号的瞬态特征。此外，引入深度自编码器进行高维特征降维，生成具有判别能力的中间表征。

（二）系统性能评估

健康管理系统的性能评估是验证其有效性与可靠性的关键环节，需从技术指标、运行效率及工程适用性等多维度展开综合分析。在准确性方面，系统对设备状态的识别能力可通过混淆矩阵、F1 分数及接收者操作特征（ROC）曲线进行量化评估。具体而言，针对历史故障数据构建的测试集，需计算系统对故障模式的识别准确率、召回率及精确率，并结合 ROC 曲线下面积（AUC 值）评估其在不同阈值下的分类性能^{[6][7]}。对于多分类场景，还需引入加权平均 F1 分数等指标，以全面反映系统对各类故障的识别能力。此外，针对预测模型的泛化能力，可通过交叉验证方法验证其在未见数据上的表现稳定性，确保模型不过度拟合训练集特征。

三、实验与结果分析

（一）实验方法与步骤

本研究采用基于深度学习的故障预测模型，针对火电厂关键设备（包括汽轮机、锅炉、发电机）的实时运行数据进行建模与验证。实验数据来源于某燃煤发电厂 SCADA 系统，采集了包含温度、压力、振动、电流、转速等 56 个特征参数的时序数据集，时间跨度为两年，采样频率为每秒 1 次。数据集按照 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集，其中训练集用于模型参数优化，验证集用于超参数调整，测试集用于最终性能评估^{[8][9]}。在数据预处理阶段，首先采用插值法处理缺失值，通过小波阈值法去除高频噪声，并利用滑动窗口技术将原始一维时序数据转化为三维张量输入格式。随后采用最小-最大归一化方法对特征进行标准化处理，以消除量纲差异对模型训练的影响。

模型构建基于改进型长短期记忆网络（LSTM），采用双层 LSTM 结构，首层包含 128 个神经元，第二层包含 64 个神经元，输出层采用 Softmax 函数实现多类别故障分类。在特征提取模块，引入注意力机制对时序数据的关键特征进行加权，以增强模型对故障特征的捕捉能力。模型训练采用 Adam 优化器，初始学习率设置为 0.001，权重衰减系数为 0.0001，批处理大小设定为 64。通过早停法（Early Stopping）在验证集上监控模型性能，

当验证损失连续5个 epoch 未降低时终止训练以防止过拟合。训练过程共迭代100个周期，利用 TensorFlow 框架实现模型的并行计算，单次训练耗时约4.2小时。

（二）实验结果

本实验基于某火电厂实际运行数据开展，选取汽轮机、锅炉和发电机作为研究对象，采集其振动信号、温度、压力、转速等多维度时间序列数据共计25000组样本。数据预处理阶段通过小波阈值法去除高频噪声，采用滑动窗口技术构建长度为200的样本序列，并通过 SMOTE 算法对故障样本进行过采样以缓解类别不平衡问题。特征提取采用频域分析与时域统计相结合的方法，从每个窗口中提取均方根值、峭度系数、峰峰值、频带能量比等18个特征参数，经 ReliefF 算法筛选出对故障诊断最具区分度的前8个特征，包括振动信号的峭度系数、1倍频幅值、转子轴承温度梯度等关键指标。

构建的混合预测模型采用双流卷积神经网络架构，时间卷积分支捕捉信号时序特征，频谱卷积分支提取频域分布规律。在模型训练过程中，通过 Adam 优化器设置学习率0.001，采用早停策略防止过拟合。实验结果表明，在汽轮机轴承故障分类任务中，模型在测试集上达到92.3%的准确率，F1分数达到0.89，相较于

于传统 SVM 方法（准确率85.6%）和单一 LSTM 网络（准确率88.4%）^[10]均有显著提升。锅炉给水泵的泄漏故障检测中，基于改进的 LSTM-GRU 混合模型在故障识别准确率方面达到94.1%，较传统阈值法提前72小时预测出潜在泄漏风险，漏报率降低至3.8%。

四、结论

本研究以火电厂关键设备故障预测与健康管理为核心，系统地构建了融合多源数据采集、智能分析算法与健康管理策略的集成化预测维护体系。通过理论分析与工程实践相结合，研究工作在技术路径创新、模型优化及工程应用验证等方面取得了重要进展。首先，针对火电厂设备运行环境复杂、传感器数据异构性强的问题，建立了基于多源异构数据融合的特征提取框架，有效整合了振动信号、温度场分布、运行参数及历史工况数据，显著提升了特征表征的全面性和准确性。该框架通过小波包分解与频谱分析技术，实现了设备状态的多维度量化描述，为后续建模提供了高质量的数据基础。

参考文献

- [1] 丁伟. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保策略探讨 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 92-94.
- [2] 赵凡. 火电厂火电机组运行状态智能监测系统设计与应用 [J]. 电力设备管理, 2024, (23): 143-145.
- [3] 陈洁良. 基于数字化分析技术的环保监测研究 [J]. 低碳世界, 2024, 14 (09): 34-36.
- [4] 丁伟. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保策略探讨 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 92-94.
- [5] 王成, 寿鹏森. 关于火电厂烟气脱硫脱硝技术的节能环保问题 [J]. 科技创新导报, 2021, 18 (23): 66-68.
- [6] 李保花, 徐海红. 简述排污许可制下火电行业现状及发展 [J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40 (01): 8-10+13.
- [7] 周慎学, 朱晓瑾. 智慧电厂建设中设备特性认知及能效提升关键问题研究 [J]. 电力与能源, 2017, 38(6):6.
- [8] 伍全利. 火电厂锅炉汽轮机系统节能环保问题分析 [J]. 低碳世界, 2015(35):2.
- [9] 陈小华. 火电厂的环保防控问题及干预管理方案研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (35): 118-120.
- [10] 王连喜. 探讨火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保问题 [J]. 中国设备工程, 2024, (17): 193-195.

风电场 35KV 集电线路隐患预警及故障精确定位技术探析

邹本刚

中国能源建设集团天津电力建设有限公司, 天津 300180

DOI:10.61369/WCEST.2025040016

摘 要： 风电场 35kV 集电线路作为风电能源传输的关键环节，其运行稳定性直接影响风电场的发电效率与安全。本文针对集电线路常见隐患类型，系统研究了基于在线监测的隐患预警方法，包括导线温度及弧垂监测、绝缘子泄露电流监测、避雷器状态监测等技术；同时深入分析了行波原理、暂态特征及多源信息融合的故障精确定位技术。通过试点风电场的现场应用验证，所提出的预警方法与定位技术可有效提升线路隐患识别率与故障定位精度，为风电场集电线路的智能化运维提供了技术支撑。

关 键 词： 风电场；35kV 集电线路；隐患预警；故障定位；在线监测；行波测距

Analysis of Hidden Danger Warning and Fault Precise Positioning Technology of 35KV Collector Line in Wind Farm

Zou Bengang

China Energy Construction Group Tianjin Electric Power Construction Co., LTD., Tianjin 300180

Abstract： As a critical component in wind power transmission, the operational stability of 35kV collector lines directly impacts the generation efficiency and safety of wind farms. This study systematically investigates online monitoring-based early-warning methods for common collector line hazards, including conductor temperature and sag monitoring, insulator leakage current detection, and surge arrester condition analysis. It also provides an in-depth analysis of traveling wave principles, transient characteristics, and multi-source information fusion techniques for precise fault localization. Field validation at a pilot wind farm demonstrates that the proposed early-warning methods and fault localization technologies significantly enhance line hazard identification rates and fault detection accuracy, offering technical support for intelligent operation and maintenance of wind farm collector lines.

Keywords： wind farm; 35kV collector line; hidden danger warning; fault location; online monitoring; traveling wave ranging

引言

随着新能源产业的快速发展，风力发电作为清洁能源的重要组成部分，装机容量持续增长。35kV 集电线路作为风电场内部连接风电机组与升压站的核心通道，承担着电能汇集与传输的重要功能，其运行状态直接关系到风电场的整体效益。然而，集电线路通常地处野外，面临复杂的自然环境（如强风、雷击、覆冰等）和频繁的机械应力（如导线振动、杆塔位移等），易发生绝缘老化、导线损伤、设备故障等问题，导致线路跳闸或停电事故。传统的运维模式依赖定期巡检与故障后抢修，存在隐患发现滞后、故障定位耗时等问题，严重影响风电场的发电效率。据统计，风电场约 60% 的停电事故由集电线路故障引发，其中故障定位平均耗时超过 4 小时，造成巨大的经济损失。因此，研发高效的隐患预警技术与精确的故障定位方法，成为提升集电线路运维水平的关键需求。

一、风电场 35KV 集电线路常见隐患类型分析

（一）线路故障引发的隐患

线路本体故障是集电线路最常见的隐患来源，主要包括导线损伤、接头过热和线路覆冰等问题。长期受风沙侵蚀、微风振动影响，导线易出现断股、磨损等缺陷，导致载流能力下降，严重时引发断线事故，某风电场数据显示，约 30% 的线路故障源于导线机械损伤；导线接头压接不规范或氧化腐蚀，会导致接触电阻增大，运行中产生过热现象，形成热老化隐患，温度超过 80℃ 时，接头绝缘层易老化开裂，引发短路故障；在寒冷潮湿环境中，导线表面易形成覆冰，导致弧垂增大、杆塔载荷超限，可能引发断线或倒塔事故，覆冰厚度超过 10mm 时，线路安全系数显著下降^[1]。

（二）设备故障导致的隐患

集电线路配套设备的故障隐患主要集中在绝缘子、避雷器和电缆终端等部件。绝缘子长期暴露在野外，受紫外线、污秽、潮湿等影响，易出现瓷质开裂、玻璃自爆、复合绝缘子老化等问题，导致绝缘性能下降，引发闪络事故，统计表明，污秽地区绝缘子故障占比达 25% 以上；避雷器作为防雷保护装置，若长期承受过电压冲击，会导致阀片老化、密封失效，失去保护功能，使线路遭受雷击时直接跳闸；35kV 集电线路中电缆终端易因安装工艺缺陷或温度循环影响，出现绝缘击穿、局部放电等隐患，尤其在高湿度环境中故障率显著上升。

（三）环境因素导致的隐患

风电场特殊的地理环境对集电线路形成多重威胁，强风与风沙、雷击以及生物破坏是主要的环境隐患来源。风速超过 10m/s 时，导线易发生微风振动或舞动，加速金具磨损；风沙撞击会导致绝缘子表面磨损，降低绝缘强度；山区或开阔地带的集电线路易遭雷击，直击雷或感应雷会产生过电压，导致绝缘子闪络、导线烧蚀，雷暴高发区线路雷击跳闸率可达 0.5 次/百公里。鸟类筑巢、鼠类啃咬等生物活动可能引发线路短路；树木生长靠近导线会导致放电隐患，尤其在雨季更为突出。

二、基于在线监测的隐患预警方法研究

（一）导线温度及弧垂实时监测方法

导线温度与弧垂是反映线路运行状态的关键参数，其监测系统由传感单元、弧垂计算模型和预警阈值设定三部分组成^[2]。传感单元采用分布式光纤传感器或无线温度传感器，实现导线温度的实时采集，光纤传感器可沿导线全长布置，测温精度达 ±0.5℃，空间分辨率 1m；无线传感器安装于导线接头处，通过 ZigBee 协议传输数据，续航时间超过 2 年；弧垂计算模型基于导线温度、环境温度、风速等参数，采用状态方程法计算弧垂值，公式为：

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} \sqrt{1 + \frac{2 \alpha (t - t_0) E}{\sigma_0}}$$

其中 f 为弧垂， l 为档距， γ 为导线比载， σ_0 为计算截面应力， α 为线膨胀系数， t 为实测温度， t_0 为基准温度， E 为弹性模量；预警阈值设定根据线路设计参数，设定温度预警阈值（如 70℃）和弧垂安全距离（如对地距离小于 5m），当监测值超限时触发预警，某试点风电场应用该方法后，导线过热隐患发现率提升 60%。

（二）绝缘子泄露电流在线监测方法

绝缘子泄露电流在线监测方法主要包括监测装置、特征量提取和预警模型三个方面。监测装置在绝缘子串底部安装泄露电流传感器，采用罗氏线圈或霍尔传感器采集微安级电流信号，经滤波、放大后转换为数字量，装置防护等级达 IP65，适应野外环境；特征量提取通过分析泄露电流的峰值、脉冲次数及谐波分量，评估绝缘子状态，当泄露电流峰值超过 100 μA 且脉冲次数每小时超过 20 次时，判定为污秽严重状态；预警模型结合环境湿度数据，建立泄露电流-湿度关联模型，在高湿度环境下（相对湿度 > 85%），降低预警阈值，提高预警灵敏度，该方法在某沿海风电场应用中，绝缘子闪络事故减少 45%。

（三）避雷器在线监测与故障诊断方法

避雷器在线监测与故障诊断方法以阻性电流为核心指标，其系统设计涵盖数据采集、故障诊断算法和寿命评估模型。数据采集采用穿心式电流传感器采集避雷器总泄漏电流，通过电容分压器获取电压信号，计算阻性电流分量，监测装置采样频率为 10kHz，可捕捉暂态过电压信号；故障诊断算法基于阻性电流三次谐波分量与基波分量的比值：

$$(I_{3\omega} / I_{\omega})$$

判断老化程度，当比值超过 20% 时，判定为阀片老化，同时监测避雷器表面温度，若温度异常升高（超过环境温度 10℃），则提示密封失效；寿命评估模型结合运行年限、动作次数及阻性电流变化趋势，采用 Weibull 分布模型预测避雷器剩余寿命，某风电场应用该方法后，避雷器提前更换率提升 35%，避免了 3 次大面积停电事故。

三、线路故障精确定位技术研究

（一）基于行波原理的故障测距方法

基于行波原理的故障测距方法利用故障时产生的暂态行波在线路中的传播特性实现定位，其关键技术包括基本原理、行波波头识别和改进算法。基本原理是故障点产生的行波沿导线向两端传播，到达线路两端监测装置的时间差与故障距离相关，公式为：

$$x = \frac{v(t_2 - t_1) + L}{2}$$

其中 x 为故障点距近端距离， v 为行波传播速度（约 3×10^8 m/s）， t_1 、 t_2 为两端装置检测到行波的时间， L 为线路长度；行波波头识别采用小波变换对暂态信号进行多尺度分解，提取模极大值点作为波头到达时刻，提高时间差测量精度至

$\pm 1\mu\text{s}$ ；改进算法针对分支线路，采用双端行波与单端行波结合的混合算法，通过识别行波在分支点的反射信号，消除分支对定位的影响，该方法在长距离直线线路中定位误差可控制在50m以内^[3]。

（二）基于暂态特征的故障定位新方法

基于暂态特征的故障定位新方法借助故障暂态信号包含的丰富频率分量实现定位，主要包括高频暂态能量分析、希尔伯特-黄变换（HHT）和定位模型。高频暂态能量分析是指故障发生后，线路会产生0.5-5MHz的高频暂态电流，通过安装在变电站出口的高频电流传感器采集信号，分析暂态能量在各频率分量的分布特征，判断故障方向；希尔伯特-黄变换（HHT）对暂态信号进行经验模态分解（EMD），得到本征模函数（IMF），再通过希尔伯特变换获取瞬时频率和幅值，构建故障特征向量；定位模型结合线路拓扑结构，建立暂态特征与故障距离的映射关系，采用支持向量机（SVM）算法实现定位，该方法在高阻接地故障中表现优异，定位误差小于100m，较传统方法提升50%。

（三）基于多源信息融合的故障定位方法

基于多源信息融合的故障定位方法通过整合多维度数据提高定位可靠性，主要由信息源构成、融合算法和智能化修正组成^[4]。信息源构成包括行波监测数据、故障录波器数据、SCADA系统运行参数（电压、电流、功率）、气象数据及无人机巡检图像等；融合算法采用贝叶斯网络构建多源信息融合模型，将各信息源的定位结果作为证据，通过概率更新得到最终定位结果，例如，行波定位结果与暂态特征定位结果的置信度分别为0.8和0.7时，融合后置信度可达0.92；智能化修正引入机器学习算法，通过历史故障数据训练定位模型，自动修正不同工况下的定位偏差，在某复杂地形风电场应用中，该方法将平均定位误差从200m降至80m，故障查找时间缩短60%。

四、现场应用效果及可靠性验证

（一）试点风电场选取及监测方案设计

试点风电场选取及监测方案设计是验证技术有效性的重要环节，选取了三个不同地理环境的风电场作为试点，A风电场位于平原地区，装机容量150MW，35kV集电线路总长85km，以架空线路为主，存在覆冰与鸟害隐患；B风电场位于沿海地区，装机容量200MW，线路总长110km，含30km电缆线路，面临高湿度与盐雾腐蚀问题；C风电场位于山区，装机容量120MW，线路总长75km，地形复杂，雷击与树木障碍隐患突出。监测方案设计中，

在线监测系统每10km线路布置1套导线温度/弧垂监测装置，每基杆塔安装1套绝缘子泄露电流监测装置，每个避雷器组配置1套状态监测装置；故障定位系统在变电站出口及线路分支点安装行波监测装置，采样频率2MHz，配置3套暂态特征分析装置，覆盖全场线路；数据传输采用光纤专网与4G无线通信结合的方式，实现监测数据实时上传至运维中心，数据传输时延小于5s^[5]。

（二）隐患预警方法的实际应用效果评估

通过1年的运行监测，对三个风电场的隐患预警效果从预警准确率、隐患处理时效和经济效益三个方面进行评估，结果显示共发出预警信号237次，现场核查确认198次为真实隐患，准确率83.5%，其中导线过热预警准确率89%，绝缘子污秽预警准确率78%，避雷器老化预警准确率85%；隐患处理时效方面，平均处理时间从传统巡检模式的48小时缩短至12小时，重大隐患（如导线断股、避雷器失效）处理及时率达100%；经济效益上，通过提前处理隐患，减少线路跳闸18次，避免发电量损失约25.2万kWh，折合经济收益15.1万元。

（三）故障定位方法的可靠性验证

在试点期间，通过人为设置20次模拟故障（包括短路、接地、断线等类型），并记录实际故障的定位结果，对故障定位方法的可靠性从定位精度、响应速度和环境适应性进行验证，定位精度方面，行波定位平均误差95m，暂态特征定位平均误差130m，多源融合定位平均误差70m，其中，多源融合方法在高阻接地故障中表现最佳，误差小于50m；响应速度上，故障发生后，行波定位系统平均响应时间0.5s，暂态特征分析系统响应时间3s，融合定位结果输出时间5s；环境适应性方面，在大风、雷雨等恶劣天气下，多源融合方法定位准确率仍保持在90%以上，而行波定位受噪声影响准确率降至75%。

五、结束语

风电场35kV集电线路的隐患预警与故障定位是保障风电场安全高效运行的关键技术。本文通过分析线路常见隐患类型，研究了基于在线监测的预警方法，包括导线状态监测、绝缘子与避雷器状态评估等；同时探讨了行波原理、暂态特征及多源融合的故障定位技术。现场应用表明，所提出的技术方案可有效提升隐患识别率与故障定位精度，显著降低运维成本。未来研究可进一步优化监测设备的续航能力与抗干扰性能，结合人工智能算法实现隐患的智能预测与故障的自主诊断，推动风电场集电线路运维向全自动化、智能化方向发展。

参考文献

- [1]李俊男. 风电场集电线路隐患放电识别特性研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (08): 293-296.
- [2]李俊男. 风电场集电线路隐患放电识别特性研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(09): 134-137.
- [3]徐彭涛. 风电场35KV集电线路隐患预警及故障精确定位技术探析[J]. 电力设备管理, 2025, (04): 123-125.
- [4]马永亮. 风电场集电线路火灾成因及消防防护策略研究[J]. 消防界(电子版), 2024, 10(24): 10-12.
- [5]张剑锋. 大型风电场集电线路隐患预警与故障定位技术应用分析[J]. 电气技术与经济, 2024, (11): 147-150.

调峰及低负荷运行对汽机侧设备的影响分析与优化策略

苏晓义

山西锦兴能源有限公司锦兴电厂，山西 吕梁 030000

DOI:10.61369/WCEST.2025040017

摘 要： 随着能源结构向清洁化转型，火电机组正从传统基荷电源逐步转变为电网调峰电源。在此背景下，火电机组参与深度调峰的频次和幅度显著增加，对汽轮机系统及相关辅助设备产生了深远影响。本文基于对不同容量等级机组调峰运行工况的调研分析，系统研究了低负荷运行对汽轮机设备的影响机理，归纳了具有共性的技术难题，并提出了针对性的优化建议和解决方案。

关 键 词： 火电机组；深度调峰；启停调峰；低负荷运行；影响分析

Analysis and Optimization Strategies of the Impact of Peak Shaving and Low-Load Operation on Turbine Side Equipment

Su Xiaoyi

Shanxi Jinxing Energy Co., LTD. Jinxing Power Plant, Lvliang, Shanxi 030000

Abstract： With the transformation of the energy structure towards cleanliness, thermal power units are gradually shifting from traditional base-load power sources to peak shaving power sources for the power grid. Against this backdrop, the frequency and extent to which thermal power units participate in deep peak shaving have significantly increased, exerting a profound impact on steam turbine systems and related auxiliary equipment. Based on the investigation and analysis of the peak shaving operation conditions of units of different capacity grades, this paper systematically studies the influence mechanism of low-load operation on steam turbine equipment, summarizes the common technical problems, and puts forward targeted optimization suggestions and solutions.

Keywords： thermal power unit; deep peak shaving; start and stop peak shaving; low-load operation; impact analysis

引言

随着我国能源结构持续向清洁低碳方向转型，火电机组正经历从主力电源向调节电源的战略性转变。这一转型使得火电机组面临日益严峻的调峰压力，对机组运行灵活性提出了更高标准。从运行实践来看，调峰及低负荷工况对锅炉系统影响最为显著，不仅设备问题频发，环保指标也面临严峻挑战。相较而言，针对汽轮机系统的相关研究较为欠缺。为全面掌握机组在启停调峰、深度调峰及低负荷运行中的技术难题，亟需开展系统性调研，深入分析运行问题及其影响机理，梳理各电厂的应对经验，为机组灵活性改造提供坚实的技术支撑。通过科学改造，可显著提升存量机组的调峰能力，使纯凝、抽凝机组的最小技术出力与额定容量比达到更精准的控制要求。

一、调峰及低负荷运行影响的主要汽机侧设备

通过调研得知，调峰及低负荷运行中，常见受影响的主要汽机侧设备可归结为以下三类：①加热系统疏水与水位。火电机组加热器采取疏水自流方式逐级流动，在参与调峰及低负荷运行时加热器的疏水会产生不畅和水位波动；②给水系统泄露。主要表现在对给水泵、给水泵汽轮机、最小流量阀的影响上；③全体设备老化。机组在参与深度调峰时，频繁采用温态启动、热态启动、极热态启动、负荷阶跃等各种导致设备负荷大幅度变动的工况，产生交变的热应力使汽机侧设备受到剧烈的热冲击，缩短机

组整体使用寿命。

二、调峰及低负荷运行对汽机侧设备的影响及优化策略

（一）对加热器的影响及优化策略

1. 对高压加热器的影响及优化策略

（1）疏水方面的影响

在火电机组运行中，加热器疏水系统通常采用逐级自流方式，即利用相邻加热器间的压力差实现疏水流动。然而，在机组

低负荷运行或快速降负荷工况下，加热器间压差减小会导致疏水不畅，进而影响高压加热器相邻两级抽汽间的压差平衡。这一问题已成为当前火电机组调峰运行中的普遍现象。具体表现为随着机组负荷降低，抽汽压差相应减小，直接影响高压加热器至除氧器的疏水效果。

（2）疏水方面的优化策略

在机组调峰灵活性改造中，可考虑增设疏水增压泵等设备，从根本上解决低负荷工况下的疏水难题。此外还要优化运行监控，应实时监测高压加热器至除氧器汽侧压差，在保持汽侧压差相对稳定的前提下，严格控制降负荷速率。高压加热器设置水位三级保护，水位达到一级报警报警值（80%）时，应自动开启危急疏水调门，达到二级报警值（90%）时联锁开启危急疏水手动门，达到三级报警值（95%）应立即切除高压加热器。与此相对应的是，高压加热器水位过高时应严密防控汽轮机进水风险，制定汽轮机防水冲击专项预案并每周执行抽汽逆止门活动试验，每月进行防进水保护系统测试，执行中各按安全防护规程要求^[1]。

2. 对低压加热器的影响

（1）水位方面的影响

低压加热器水位波动问题的根源在于疏水系统运行不畅，这主要是由于机组在不同负荷工况下，相邻两级抽汽之间的压力差变化所导致的。这种压力波动会直接影响各级低压加热器的水位稳定性。现场运行实践表明，造成疏水不畅的具体原因包括：一是疏水管道系统设计不合理，表现为管道布置过长、弯头数量过多（特别是直角弯头），导致流动阻力显著增加；二是疏水阀门存在内漏缺陷，容易在管道内形成气阻现象，进而引起相邻加热器壳体压力异常升高，最终表现为水位控制困难。这些因素共同作用，形成了复杂的疏水系统运行障碍。

（2）水位方面的优化策略

针对低压加热器水位调节问题，各发电企业根据机组特性和设备配置采取了差异化的解决方案。在工程实践中，主要优化措施可分为两类：一是通过改进疏水系统设计，如重新规划管路走向、选用大口径疏水阀门等方式降低管道流动阻力；二是加强系统密封性检查，重点针对热工测点接口、阀门法兰等关键部位开展泄漏检测，确保系统气密性，从而维持加热器间必要的压差条件。这些技术措施的实施效果与机组运行参数、设备选型等因素密切相关，需要结合具体工况进行针对性优化^[2]。

（二）对给水系统的影响及优化策略

1. 对最小流量阀的影响及优化策略

（1）阀门内漏方面的影响

在火电机组深度调峰及启停调峰运行过程中，为确保给水泵安全运行，必须维持最小流量以防止汽蚀现象发生，但此举也导致了给水泵最小流量阀需要频繁动作，进而引发两个关键问题：一是高速流体对阀芯组件造成持续性冲刷磨损；二是反复启闭导致阀门密封性能下降，最终形成难以避免的内漏缺陷，这种迫于工况需求所产生的阀门损耗问题也体现了现役机组灵活性运行与设备可靠性之间的矛盾。

（2）阀门内漏方面的优化策略

在电厂热力系统中，给水泵最小流量阀作为连接除氧器与给

水泵出口的关键设备，其运行工况的显著特征一是承受全厂管道系统中最大的前后压差，二是在超超临界机组额定工况下存在显著的压差问题。针对这一技术难题，工程实践表明，通过在最小流量阀上游加装关断球阀的技术改造方案，可有效缓解主阀门的压差负荷，显著降低高速流体对阀芯的冲刷作用。现场运行数据证实，该改造措施在减轻阀门磨损方面取得了显著成效^[3]。

2. 给水泵密封的影响及优化策略

（1）轴端漏水方面的影响

在电厂运行中，采用水密封结构的给水泵密封水源通常取自凝结水母管，当机组处于低负荷工况时，凝结水系统压力显著降低，无法提供足够的密封水压来平衡给水泵内部的高压介质，这种压力失衡直接导致密封系统效能下降，致使泵轴端部出现持续性泄漏现象。

（2）轴端漏水方面的优化策略

针对给水泵在低负荷工况下的密封水压不足问题，部分电厂采取了通过优化运行方式，适当提高凝结水泵出力以提升凝结水母管整体压力的技术改造方案，也有电厂则采用增设凝结水升压泵的工程措施，在不改变原有凝结水泵运行参数的前提下，专门提升密封水管路段的压力水平。根据观察发现，这两种技术路线均在一定程度上改善了轴端密封性能的效果，在解决低负荷工况下给水泵密封水压不足问题上起到较为明显的优化作用。

3. 对小机排汽温度的影响及优化策略

（1）排气温度偏高方面的影响

对于采用小汽轮机驱动给水泵的机组，在低负荷运行工况下普遍面临排汽温度偏高的问题。专项试验表明，在维持机组负荷和给水流量恒定的情况下，通过逐步关小最小流量阀来降低给水泵入口流量，试验结果显示随着进汽量的减少，小汽轮机排汽温度呈现明显上升趋势。根据运行规范，小汽轮机排汽温度报警值通常设定为80℃，但在深度调峰的低负荷工况下，由于进汽量不足导致末级动叶处于鼓风工况运行，排汽温度往往会逼近这一限值，从而制约了机组的调峰能力。

（2）排气温度偏高方面的优化策略

针对电厂小汽轮机运行中出现的排汽温度异常升高问题，目前各电厂现役机组主要采用两种控制措施，对在安全运行范围控制排汽温度均能起到一定效果：一是快速启动排汽口喷水减温系统进行主动降温，二是通过调节最小流量阀开度来增加汽轮机进汽量，从而消除鼓风效应引起的排汽温度升高现象。

（三）调峰及低负荷运行对机组启动的影响及优化策略

1. 对无旁路机组启动的影响及优化策略

（1）启停方面的影响

当前部分在役机组存在锅炉系统设计局限性，仅在锅炉侧配置了5%BMCR容量的过热器小旁路系统。这种配置在机组启动阶段由于蒸汽流量不足，导致汽温、汽压调节困难，再热器系统被迫承受干烧工况，且过热器系统内积存的水汽难以及时排出，在高负荷工况下容易形成水塞现象，不仅严重影响传热效率，还可能引发爆管事故。受此限制，此类机组在启动过程中必须严格控制燃烧率，导致启动时间显著延长，极难实现“停机不停炉”的

灵活运行模式。

（2）启停方面的优化策略

为应对火电机组频繁启停调峰的新常态，各电厂积极探索不同的技术路线，部分电厂在参与调峰时采用“发电解列、汽轮机空转”的特殊运行模式，另有部分电厂则投入成本对汽机侧实施两级旁路系统改造，旨在提升机组在新型电力系统中的运行灵活性^[4]。

2. 对轴封供汽温度的影响及优化策略

（1）供汽温度不达标方面的影响

传统机组的轴封供汽温度设计标准相对较低，而大容量机组对轴封供汽温度的要求则随着市场需求而日益提高，这一矛盾在如调峰启停时尤为突出。例如，当汽轮机转子处于高温状态（通常达300–400℃）时，若轴封供汽温度（通常仅150–200℃）与缸体温度存在较大温差，低温蒸汽的突然注入会导致轴封部位急剧冷却，产生局部变形。这种热应力不均不仅会引起动静部件碰磨，更会直接导致轴系振动异常（通常表现为振动值突增20–30 μm），严重影响机组安全运行。

（2）供汽温度不达标方面的优化策略

针对部分现役机组轴封供汽温度控制问题，目前在解决方案上也存在几种不同的技术路线，其中采用较多的技术路线是在辅助蒸汽至轴封母管的管路上增设电加热装置，通过主动加热的方式确保轴封供汽温度满足运行要求。大多数新建电厂还是选择了在设计阶段开始优化供汽管路的方案，通过加装减温减压装置和温度监测系统，在机组极热态或热态启动时直接利用主蒸汽作为轴封汽源，从源头上解决轴封供汽温度偏低的问题。

三、减少调峰及低负荷运行对汽机侧设备影响的辅助手段

（一）承担采暖供热和工业供汽

在热电联产机组运行中，供热方式主要分为两类：采暖供热通常采用中低压连通管抽汽方式，而工业供汽则可采用冷再热蒸

汽、热再热蒸汽或旋转隔板抽汽等多种技术方案。机组最低运行负荷需同时满足采暖供热和工业供汽的参数要求，其中采暖供热作为重要的民生保障项目具有优先权。部分电厂通过优化运行方式（包括适当降低再热蒸汽温度、调节低压缸进汽调门开度等）来确保采暖抽汽量达标并控制中排温度在允许范围内，这种运行策略既保障了民生供暖需求，又提升了机组的经济运行水平^[5]。

（二）降低机组供热季出力

在电力系统灵活性改造实践中，部分电厂通过实施低压缸零出力技术改造，显著提升了机组调峰性能。该技术通过在供热季将低压缸进汽量降至最低，大幅提高了机组供热能力和低负荷运行稳定性，不仅使供电煤耗降低10–15g/kWh，还有效缓解了冬季“热电耦合”矛盾。这种改造模式充分体现了传统火电由基础保障电源向灵活调节电源的战略转型，为构建新型电力系统提供了重要技术支撑。目前该技术已在北方多个供热电厂成功应用，取得了显著的节能减排效果。

（三）采用大机组集中供热

在能源结构优化升级过程中，采用大型热电联产机组替代分散式小锅炉供热系统，不仅显著提升了能源利用效率，还能有效降低区域综合煤耗指标，产生显著的节能减排效益。这种集中供热模式通过规模效应实现了能源梯级利用，为城市绿色发展提供了重要支撑。

四、结语

火电机组在参与电网调峰及低负荷运行时面临的汽机侧运行问题，其本质源于过度追求额定工况下的经济性指标，而相对忽视了机组在变负荷工况下的运行适应性。针对这一现状，除了加强对新建机组或实施通流改造的机组的调峰能力和负荷响应速率以及快速启停性能等低负荷运行指标进行优化设计外，在现役机组的系统性灵活性方面应重点加强汽机侧设备的针对性改造，以适应新型电力系统对火电机组调节性能的更高要求。

参考文献

- [1] 沈利，徐书德，关键，等. 超临界大容量火电机组深度调峰对燃煤锅炉的影响 [J]. 发电设备，2016，30（1）：21–23.
- [2] 卓明昌. 发电厂高加正常疏水不畅的原因分析及处理 [J]. 广西电力，2007，30（4）：45–46.
- [3] 谢明付. 630MW 机组低压加热器疏水不畅原因分析及处理 [J]. 节能，2021，40（7）：74–75.
- [4] 高奎，杜亚鸿，赵晖，等. 深度调峰机组给水泵再循环控制优化调整 [J]. 热力发电，2020，49（11）：101–106.
- [5] 刘振国，苏益斌. 亚临界电站锅炉5%小旁路的启动方式及运行特点 [J]. 电站系统工程，2010，26（6）：54.

工业电机变频调速电路 ——谐波抑制电路设计与验证

彭志

红河广源水电开发有限公司, 云南 元阳 662400

DOI:10.61369/WCEST.2025040023

摘 要 : 工业电机变频调速系统在节能降耗与精准控制领域应用广泛, 但逆变器输出的非正弦波会产生大量谐波, 导致电机损耗增加、电网污染及设备故障。本文针对三相电压型 PWM 逆变器驱动的异步电机调速系统, 深入分析谐波产生机理, 设计无源滤波 (PF)、有源电力滤波器 (APF) 及混合滤波 (HF) 三种谐波抑制电路。通过 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型, 对比三种电路在不同负载工况下的总谐波畸变率 (THD)、功率因数及输出转矩波动特性; 制作实验样机, 采用 TI TMS320F28335 DSP 实现控制算法, 验证滤波电路的实际抑制效果。结果表明: 混合滤波电路在 0% ~ 100% 负载范围内, 电网侧电流 THD 可降至 3.2% 以下, 电机侧电压 THD 控制在 2.8% 以内, 较传统无源滤波方案性能提升 40% 以上, 且动态响应时间小于 50ms, 满足工业电机高精度调速需求。

关 键 词 : 工业电机; 变频调速; 谐波抑制; 无源滤波; 有源电力滤波器

Industrial Motor Variable Frequency Speed Control Circuit — Harmonic Suppression Circuit Design and Verification

Peng Zhi

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Yuanyang, Yunnan 662400

Abstract : Variable frequency speed control systems for industrial motors are widely used in energy conservation and precision control applications. However, the non-sinusoidal output from inverters generates significant harmonics, leading to increased motor losses, power grid pollution, and equipment failures. This paper investigates the harmonic generation mechanism in three-phase voltage-type PWM inverter-driven asynchronous motor speed control systems, proposing three harmonic suppression circuit designs: passive filter (PF), active power filter (APF), and hybrid filter (HF). A MATLAB/Simulink simulation model was developed to compare total harmonic distortion (THD), power factor, and output torque fluctuation characteristics under different load conditions. An experimental prototype was constructed using TI TMS320F28335 DSP to implement control algorithms, verifying the actual suppression performance of the filter circuits. Results demonstrate that the hybrid filter achieves grid-side current THD below 3.2% across all load ranges from 0% to 100%, while maintaining motor-side voltage THD within 2.8%. Compared with traditional passive filter solutions, the hybrid design shows over 40% performance improvement with dynamic response time under 50ms, meeting high-precision speed control requirements for industrial motors.

Keywords : industrial motor; frequency conversion speed regulation; harmonic suppression; passive filter; active power filter

引言

随着工业自动化水平提升, 变频调速技术因具备宽调速范围、高控制精度等优势, 已成为风机、水泵、机床等设备的核心驱动方案^[1]。然而, 变频调速系统中的 PWM 逆变器通过高频开关实现电压调节时, 输出波形存在大量高次谐波 (主要为 5 次、7 次、11 次等特征谐波), 这些谐波不仅会使电机定子铜损、铁损增加, 导致电机温升过高、效率下降, 还会注入电网引发电压畸变, 干扰周边精密设备正常运行。据工业能效监测数据, 未采取谐波抑制措施的变频调速系统, 平均谐波损耗占总能耗的 8% ~ 15%, 且会缩短电机绝缘寿命 30% 以上。当前谐波抑制技术主要分为无源滤波、有源滤波及混合滤波三类。无源滤波电路结构简单、成本低, 但滤波特性固定, 难

以适应负载动态变化；有源滤波电路可实时补偿谐波，抑制效果好，但存在功率损耗大、稳定性要求高的问题；混合滤波电路结合两者优势，在兼顾成本与性能方面具有显著潜力。本文针对工业电机变频调速系统的谐波特性，设计基于 LC 无源网络与并联型 APF 的混合滤波电路，通过建立数学模型、仿真分析及实验验证，解决传统滤波方案在动态响应、谐波抑制精度方面的不足，为工业电机调速系统的谐波治理提供可行方案^[2]。

一、工业电机变频调速系统谐波产生机理

（一）逆变器输出谐波特性

工业电机变频调速系统多采用三相电压型 PWM 逆变器，其工作原理是通过 SPWM（正弦脉冲宽度调制）技术，将直流母线电压转换为幅值、频率可调的交流电压。在理想情况下，SPWM 输出电压接近正弦波，但实际开关过程中，由于 IGBT 器件的导通 / 关断延迟、死区时间设置及调制波采样误差，输出电压中会产生两类谐波：由逆变器拓扑结构与调制方式决定，对于三相桥式逆变器，当载波比（载波频率与调制波频率之比）为整数时，特征谐波次数为 $6k \pm 1$ （ $k=1, 2, 3$ ），即 5 次、7 次、11 次、13 次等，其中 5 次、7 次谐波幅值最高，占总谐波含量的 60% ~ 70%；由 IGBT 高频开关产生，谐波频率集中在载波频率整数倍附近，幅值随频率升高而衰减，主要影响电机高频损耗与电磁干扰^[3]。

（二）电机侧谐波传递路径

逆变器输出的谐波电压施加于电机定子绕组后，会产生谐波电流，其传递过程受电机阻抗特性影响。异步电机的定子阻抗由电阻与漏抗组成，对于低次谐波（5 次、7 次），电机漏抗较小，谐波电流幅值较大，易导致定子铜损增加；对于高次谐波（ ≥ 11 次），漏抗随频率升高而增大，谐波电流幅值衰减明显，但会引发电机铁芯高频振动，产生噪声与附加铁损。此外，谐波电流产生的旋转磁场与转子转速不同步，会在转子中感应出差频电流，导致转子铜损增加，严重时会引起电机转矩脉动，影响调速系统稳定性^[4]。

（三）电网侧谐波反馈影响

若变频调速系统直接从电网取电，逆变器输入侧的整流电路（如二极管不控整流）会产生谐波电流，通过电网阻抗反馈至公共电网，导致电网电压畸变。这类谐波主要为 3 次、5 次、7 次等低次谐波，当多台变频设备并联运行时，会产生谐波叠加效应，使电网总谐波畸变率（THD）超过 GB/T 14549-1993《电能质量公用电网谐波》规定的 5% 限值，干扰其他用电设备正常工作^[5]。

二、谐波抑制电路设计

（一）无源滤波（PF）电路设计

1. 滤波拓扑与参数计算

针对逆变器输出的 5 次、7 次特征谐波，设计 LC 无源滤波电路，采用“单调谐滤波器 + 高通滤波器”的组合拓扑：

单调谐滤波器：分别针对 5 次、7 次谐波设计两个单调谐支路，并联于逆变器输出端与电机之间。单调谐滤波器的谐振频率需精确匹配目标谐波频率，其参数计算公式为：

$$L_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot 2\pi f_n}, \quad C_n = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 L_n}$$

其中， U_n 为逆变器输出线电压有效值（380V）， I_n 为 n 次谐波电流额定值（取基波电流的 15%），

$$f_n = n \cdot 50\text{Hz} \quad (n=5, 7)$$

（ $n=5, 7$ ）代入参数计算得：5 次谐波滤波支路 $L_5=1.2\text{mH}$ 、 $C_5=176\mu\text{F}$ ；7 次谐波滤波支路 $L_7=0.6\text{mH}$ 、 $C_7=92\mu\text{F}$ 。

高通滤波器：采用 RC 高通拓扑，用于抑制 11 次及以上高次谐波，参数选择为 $R=10\Omega$ 、 $C=0.1\mu\text{F}$ ，截止频率 $f_c=15.9\text{kHz}$ ，确保对高次谐波的衰减率 $\geq 20\text{dB/十倍频}$ 。

2. 滤波特性分析

无源滤波电路的优势在于结构简单、无额外功率损耗，但存在以下不足：①滤波特性受电网频率与负载阻抗影响，当电机负载变化时，滤波支路与电机阻抗可能发生并联谐振，导致谐波放大；②无法抑制开关谐波，对电机高频损耗的改善效果有限。

（二）有源电力滤波器（APF）设计

1. APF 拓扑与控制算法

采用并联型 APF 拓扑，通过 IGBT 全桥逆变器将补偿电流注入电网侧（或电机侧），实时抵消谐波电流。APF 的核心是谐波检测与电流跟踪控制：采用基于瞬时无功功率理论的 ip-iq 检测法，通过坐标变换将三相电流分解为有功分量（ip）与无功分量（iq），经低通滤波器（LPF）提取基波有功分量，剩余部分即为谐波分量，检测延迟时间 $\leq 1\text{ms}$ ；采用滞环比较控制策略，将检测到的谐波电流指令与 APF 输出电流进行比较，通过调整 IGBT 开关状态，使实际输出电流跟踪指令电流，电流跟踪误差 $\leq 5\%$ ^[6]。

2. 主电路参数设计

APF 主电路包括直流侧电容、IGBT 模块及输出滤波器：①直流侧电容 C_{dc} 需维持直流电压稳定，根据能量平衡原理计算得 $C_{dc}=2200\mu\text{F}$ （直流电压 800V，电压波动 $\leq 5\%$ ）；② IGBT 选用英飞凌 FF300R12KE4，额定电流 300A、耐压 1200V，满足工业电机额定功率 37kW 的需求；③输出滤波器采用 LCL 拓扑，抑制 APF 开关谐波，参数为 $L_1=0.3\text{mH}$ 、 $L_2=0.1\text{mH}$ 、 $C=20\mu\text{F}$ ，确保 APF 输出电流 $\text{THD} \leq 3\%$ ^[7]。

（三）混合滤波（HF）电路设计

混合滤波电路结合无源滤波的低成本与有源滤波的高精度优势，将 LC 无源滤波电路并联于逆变器输出端，用于抑制 5 次、7 次等低次特征谐波；并联型 APF 并联于电网侧与逆变器输入侧之间，一方面补偿无源滤波未抑制的高次谐波，另一方面抵消整流电路产生的电网侧谐波。混合滤波电路的优势在于：①无源滤波承担主要低次谐波抑制任务，降低 APF 的容量需求（APF 容量仅需系统额定功率的 15% ~ 20%，较纯 APF 方案成本降低 40%）；②APF 实时补偿剩余谐波与动态负载变化产生的谐波，提升滤波精度与动态响应速度。从电路协同工作机制来看，LC 无源滤波支路与并联型 APF 并非独立运行，而是通过 DSP 控制单元实现动态联动。当系统检测到逆变器输出低次谐波（5 次、7 次）含量超过阈值时，无源滤波支路优先启动，利用 LC 谐振特性快速吸收低次谐波，避免大量低次谐波进入 APF 导致其过载；而当负载突变引发高次谐波激增或整流电路产生电网侧谐波时，APF 通过 i_p-i_q 检测算法实时捕捉谐波变化，在 1ms 内调整补偿电流幅值与相位，精准抵消高次谐波与电网侧谐波，形成“低次无源主导、高次有源精准补偿”的分层治理模式^[8]。

在工业场景适配性上，该混合滤波电路可通过调整 LC 无源滤波支路的电容、电感参数，适配不同功率等级（15kW~110kW）的工业电机。例如，针对 55kW 电机调速系统，仅需将 5 次谐波滤波支路参数调整为 $L_5=0.8\text{mH}$ 、 $C_5=264\mu\text{F}$ ，即可保持低次谐波抑制效果，无需重构整体电路拓扑，大幅降低了不同工况下的改造成本。同时，电路中增设的过流保护模块与谐波放大抑制算法，可有效避免负载阻抗变化引发的并联谐振问题——当电机负载从 30% 降至 10% 时，保护模块能在 $20\mu\text{s}$ 内调整无源滤波支路的阻尼电阻接入状态，将谐波放大风险控制 5% 以内，确保系统稳定运行。此外，相较于纯有源滤波电路，混合滤波方案的功率损耗降低 15% ~ 20%，在连续 24 小时运行的工业水泵系统中，单日可节省电能消耗约 2.3kWh，长期应用能显著降低工业用户的能耗成本，进一步契合当前工业领域“节能降本”的发展需求^[9]。

三、仿真分析与实验验证

（一）仿真模型搭建

基于 MATLAB/Simulink 搭建工业电机变频调速系统仿真模型，参数设置如下：异步电机额定功率 37kW、额定电压 380V、额定转速 1480r/min；逆变器载波频率 10kHz、调制方式为 SPWM；负载模拟工业风机特性，转矩随转速平方变化（ $T=k\omega^2, k=0.015\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ ）。分别搭建无滤波、无源滤波、有源滤波及混合滤波四种方案的仿真模型，对比分析电网侧电流

THD、电机侧电压 THD、电机效率及转矩脉动特性^[10]。

（二）仿真结果分析

1. 稳态性能对比

在额定负载（37kW）工况下，四种方案的性能指标如表 1 所示：

表 1 四种方案的性能指标				
滤波方案	电网侧电流 THD (%)	电机侧电压 THD (%)	电机效率 (%)	转矩脉动率 (%)
无滤波	18.7	15.2	88.3	12.5
无源滤波	8.5	7.3	91.5	8.2
有源滤波	3.8	3.1	94.2	4.5
混合滤波	3.2	2.8	94.5	4.1

由表 1 可知混合滤波方案的电网侧电流 THD 与电机侧电压 THD 最低，较无滤波方案分别降低 82.9%、81.6%；电机效率提升 6.2 个百分点，转矩脉动率降低 67.2%，说明混合滤波在稳态谐波抑制与电机性能改善方面效果最优。

2. 动态性能分析

设置负载从 50% 突增至 100%（突变时间 0.5s），分析四种方案的动态响应特性。结果显示：混合滤波电路的电流 THD 恢复时间为 42ms，较无源滤波（120ms）与有源滤波（55ms）更短；电机转速波动幅度 $\leq 2\%$ ，恢复时间 $\leq 80\text{ms}$ ，满足工业电机动态调速需求。这是因为无源滤波电路响应速度慢，无法适应负载突变；有源滤波虽动态响应较快，但受限于容量，补偿速度略低于混合滤波；而混合滤波中，无源滤波承担静态谐波抑制，APF 快速补偿动态谐波，两者协同实现快速响应。

（三）实验验证

1. 实验平台搭建

制作实验样机，核心硬件包括：TI TMS320F28335 DSP（实现 SPWM 与 APF 控制算法）、英飞凌 IGBT 模块（逆变器与 APF）、三相异步电机（37kW）、功率分析仪（横河 WT3000，用于测量 THD 与功率参数）。实验平台接线与仿真模型拓扑一致，负载采用磁粉制动器模拟风机负载。

2. 实验结果分析

在额定负载下，测得混合滤波电路的电网侧电流 THD 为 3.1%，电机侧电压 THD 为 2.7%，与仿真结果（3.2%、2.8%）误差 $\leq 3\%$ ，验证了仿真模型的准确性；电机输入功率为 38.5kW，输出功率为 36.4kW，效率 94.5%，与仿真值一致。负载从 50% 突增至 100% 时，功率分析仪记录的电流 THD 变化曲线显示，THD 峰值为 5.8%，恢复时间 45ms，与仿真结果（42ms）接近，说明混合滤波电路具有良好的动态谐波抑制能力。连续运行 72 小时，监测电机绕组温度与绝缘电阻，结果显示电机定子温度稳定在 75℃（环境温度 25℃），较无滤波方案降低 12℃；绝缘电阻维持在 $500\text{M}\Omega$ 以上，无明显衰减，验证了混合滤波电路对电机寿命的改善效果。

四、结论

本文针对工业电机变频调速系统谐波问题，深入分析机理后设计无源、有源及混合三种谐波抑制电路，经仿真与实验验证得出：混合滤波电路结合 LC 无源网络与并联型 APF 优势，稳态下电网侧电流 THD 可降至 3.2% 以下、电机侧电压 THD 控制在 2.8%

以内，动态响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ；相较传统无源滤波，其电机效率提升 3 个百分点、转矩脉动率降低 50% 以上，对比纯有源滤波，成本降低 40%、功率损耗减少 20%，且实验与仿真结果误差 $\leq 3\%$ 。未来可从优化 APF 控制策略、设计宽频带混合滤波电路、开发模块化滤波装置展开研究。

参考文献

[1] 滕萃, 文湘霖. 变频调速技术在电机拖动中的应用研究 [J]. 模具制造, 2024, 24 (06): 142-144.

[2] 朱英斌, 杨明阳, 刘欣朋, 任景伟, 姜海礁. 石油化工装置隔膜计量泵变频调速控制的研究与设计 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25 (02): 76-79.

[3] 张景生, 靳宏, 毛丽凤. 基于 PLC 与工业机器人的电机变频调速系统 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11 (19): 26-28.

[4] 尚鹏. 通风机风量调节系统的设计与应用 [J]. 机械管理开发, 2020, 35 (07): 242-243+253.

[5] 姜宝. 矿用带式输送机传输控制系统的优化研究 [J]. 机械管理开发, 2020, 35 (05): 245-246.

[6] 周艳. 变频调速技术在工业电气自动化控制中的应用 [J]. 科技风, 2020, (03): 29.

[7] 曹策, 解仑, 李连鹏, 王志良. 变频矢量控制系统入侵检测技术 [J]. 工程科学学报, 2019, 41 (08): 1074-1084.

[8] 郭浩, 王哲. 变频调速节能技术在石油化工工业的应用 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45 (03): 56.

[9] 曾雁鸿. 中电协《核电站主氮风机用高压立式变频调速三相异步电动机技术条件》等 6 项团体标准入选工业和信息化部 2018 年团体标准应用示范项目 [J]. 电器工业, 2019, (03): 58-60.

[10] 石浪浪. 电气自动化控制中变频调速技术的运用 [J]. 科技风, 2019, (06): 57.

