

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



Editors-in-Chief

Jian Zhao

Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological
Survey

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

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第9期 2025年9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.artdesignnp.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。



- | | | |
|-----|--|---|
| 001 | 水利工程电气系统防雷接地设计与防护技术探析 | 宋杰 |
| | Exploration on Lightning Protection Grounding Design and Protection Technology for Electrical Systems in Water Conservancy Projects | Song Jie |
| 004 | 输电线路跨越高速公路施工的安全风险评估与防护策略 | 王坤 |
| | Safety Risk Assessment and Protection Strategies for the Construction of Transmission Lines Crossing Expressways | Wang Kun |
| 007 | 智慧水闸系统中物联网与大数据技术的融合应用 | 谢陆林, 徐鹏飞, 范小敏 |
| | Integrated Application of Internet of Things and Big Data Technologies in Intelligent Sluice Gate Systems | Xie Lulin, Xu Pengfei, Fan Xiaomin |
| 010 | 水电站电气设备故障应急处理方法研究 | 兰大伟, 柴俊岭, 汤建军 |
| | Research on Emergency Treatment Methods of Electrical Equipment Failure in Hydropower Station | Lan Dawei, Chai Junling, Tang Jianjun |
| 013 | 河道生态护岸工程施工技术与效果评价 | 杨永亮 |
| | Construction Technology and Effect Evaluation of River Ecological Bank Protection Engineering | Yang Yongliang |
| 016 | 基于梯度提升机的干旱趋势提取与 ARIMA 耦合预测模型研究 | 杨扬, 王振霖, 刘涛 |
| | Research on a Coupled Prediction Model Integrating Gradient Boosting Machine for Drought Trend Extraction with ARIMA | Yang Yang, Wang Zhenlin, Liu Tao |
| 019 | 水利工程施工质量通病防治对策分析 | 赵一麟 |
| | Countermeasure Analysis on Common Quality Fault of Water Conservancy Construction | Zhao Yilin |
| 022 | 电力营销大数据在客户信用风险评估中的应用 | 成先平, 朱风华, 周晨宇 |
| | Application of Power Marketing Big Data in Customer Credit Risk Assessment | Cheng Xianping, Zhu Fenghua, Zhou Chenyu |
| 025 | 大中型灌区渠道防渗衬砌施工关键技术
与质量控制研究 | 李瞻, 李晓罡, 李俊岭, 陈惠宇, 华烨 |
| | Research on Key Construction Technologies and Quality Control for Seepage Prevention Lining of Canals in Large and Medium-sized Irrigation Districts | Li Zhan, Li Xiaogang, Li Junling, Chen Huiyu, Hua Yao |
| 028 | 供配电系统备用电源可靠性提升研究 | 秋磊 |
| | Research on Improving the Reliability of Standby Power Supply in Power Supply and Distribution Systems | Qiu Lei |
| 031 | 小流域水保工程配置优化对生态系统服务功能协同提升机制研究 | 崔婷婷 |
| | Study on the Mechanism of Synergistic Enhancement of Ecosystem Service Functions through Optimization of Soil and Water Conservation Engineering Configuration in Small Watersheds | Cui Tingting |
| 035 | 郑州某污水处理厂碳排放监测研究 | 程顺利, 刘文科, 王语林, 王强 |
| | Research on Carbon Emission Monitoring of a Sewage Treatment Plant in Zhengzhou | Cheng Shunli, Liu Wenke, Wang Yulin, Wang Qiang |
| 038 | 基于状态监测的大型水泵预防性维护体系构建思考 | 郁昊 |
| | Thoughts on the Construction of a Preventive Maintenance System for Large Water Pumps Based on Condition Monitoring | Yu Hao |
| 041 | 铺管船张紧器控制系统研究 | 苏乐平, 孟旭, 韩林青 |
| | Research on the Control System of Pipe Laying Vessel Tensioner | Su Leping, Meng Xu, Han Linqing |

水利工程电气系统防雷接地设计与防护技术探析

宋杰

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.2025090001

摘 要： 本文聚焦水利工程电气系统防雷接地设计与防护技术探析，确立了“安全核心、因地制宜、分级防护、经济高效”的总体设计原则，并梳理了相关的国家标准与技术依据。在此基础上，深入剖析了防雷接地系统的关键技术，详细阐述了以接闪器、引下线和接地体为核心的“外部拦截”体系，以及以等电位连接、屏蔽防护和浪涌抑制为核心的“内部疏导”体系。针对水利工程中大坝泄洪设施、水电站厂房、泵站及远程测报通信系统等不同区域与设备的特殊性，提出了差异化的专项防护技术方案。文章对防雷接地工程的施工质量控制要点、系统测试验收标准以及运行维护策略进行了全面论述，旨在构建一个从设计、施工到运维的全生命周期、立体化的防雷安全保障体系，以期为我国水利工程的防雷设计与实践提供有价值的参考。

关 键 词： 水利工程；电气系统；防雷接地；外部防雷

Exploration on Lightning Protection Grounding Design and Protection Technology for Electrical Systems in Water Conservancy Projects

Song Jie

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

Abstract： This paper focuses on the exploration of lightning protection grounding design and protection technology for electrical systems in water conservancy projects. It establishes the overall design principles of "safety as the core, adapting measures to local conditions, hierarchical protection, and cost-effectiveness," and sorts out relevant national standards and technical bases. On this basis, it delves into the key technologies of the lightning protection grounding system, elaborating in detail on the "external interception" system centered around air terminals, down conductors, and grounding electrodes, as well as the "internal diversion" system centered around equipotential bonding, shielding protection, and surge suppression. Given the specific characteristics of different areas and equipment in water conservancy projects, such as dam flood discharge facilities, hydropower station powerhouses, pump stations, and remote measurement and communication systems, differentiated specialized protection technical solutions are proposed. The paper comprehensively discusses the key points of construction quality control, system testing and acceptance standards, and operation and maintenance strategies for lightning protection grounding projects, aiming to construct a full-lifecycle, three-dimensional lightning protection safety assurance system from design to construction and operation and maintenance, with the goal of providing valuable references for lightning protection design and practice in China's water conservancy projects.

Keywords： water conservancy projects; electrical systems; lightning protection grounding; external lightning protection

引言

随着我国水利事业的现代化发展，水利工程正朝着大规模、智能化、自动化方向快速迈进。以计算机监控、数据采集与监视控制（SCADA）系统、远程测报等为核心的电气自动化技术，已成为保障水利工程安全、高效运行的关键“神经中枢”。然而水利工程多建于江河湖泊之畔，地形开阔、水文气象条件复杂，往往处于雷电活动高发区域。其电气设备，特别是大量高度集成、低耐压水平的微电子设备，极易遭受雷电电磁脉冲的冲击，导致设备损坏、数据丢失、系统瘫痪，甚至引发安全事故，造成巨大的经济损失和不良社会影响。因此构建科学、可靠、高效的防雷接地系统，是保障水利工程电气自动化系统安全稳定运行的先决条件和基础保障。鉴于此，本文立足于系统工程理念，对水利工程电气系统的防雷接地设计与防护技术进行深入探析。文章从设计原则与依据出发，系统阐述外部防雷

与内部防雷的关键技术，并结合大坝、水电站、泵站及远程通信系统等典型场景，提出专项防护方案，对施工、验收与运维全流程管理进行论述。旨在构建一个从规划、实施到运维的全方位、多层次、立体化的防雷安全体系，以期为提升我国水利工程防雷技术水平、保障国家水网安全提供理论参考与实践指导。

一、水利工程防雷接地系统设计原则

（一）总体设计原则

水利工程电气自动化系统的防雷是一项系统工程，需从规划、实施到运维的全流程把控。前期规划需“因地制宜”，充分考量工程所在地的地理环境与气候条件^[1]。水利工程防雷接地系统设计，以安全为绝对核心，构建“外部拦截+内部疏导”的立体防护体系，全面保障设备、人员及工程稳定运行。设计必须因地制宜，紧密结合工程的雷电活动、地质水文与设备布局等特性，在高雷区强化防护，在高电阻率区采取降阻措施，在潮湿环境选用耐腐蚀材料。同时系统需与工程结构、电气、通信等深度融合，通过利用自然构件、整合接地系统来降低成本并避免干扰^[2]。在满足防护标准的前提下，方案应兼顾经济可行性与全生命周期成本，优先选用成熟技术并预留运维接口。依据设备重要性实施分级防护，将资源集中于 PLC、主变压器等核心敏感设备，实现精准、高效、经济的全面防护。

（二）主要设计依据

水利工程防雷接地系统的设计需以权威依据为支撑，确保方案的合规性与精准性^[3]。国家及行业标准规范是设计的法定基础，必须严格遵循《建筑物防雷设计标准》（GB 50057-2010）、《水利水电工程电气设计规范》（SL 581-2012）、《交流电气装置的接地设计规范》（GB/T 50065-2011）、《雷电防护系统部件》（GB/T 21714）、《水利水电工程防雷设计规范》（SL 257-2000）等核心标准，这些标准明确了防雷接地系统的技术要求、设计参数与测试方法，为设计提供法定依据。工程专项技术资料则是实现精准设计的关键，设计需以雷电灾害风险评估报告为依据明确区域雷电活动频率、强度及风险等级，依托地质勘察报告获取土壤电阻率、地层结构、地下水位等关键参数以支撑接地体设计与降阻措施制定，结合工程总体设计文件中的电气系统图纸、设备布局图等确保防雷接地系统与工程整体协调，参照设备技术说明书明确设备雷电耐受电压、接地要求等参数，实现防护方案与设备特性的精准适配^[4]。此外，设计还需参考行业内成熟的设计指南、技术手册及同类水利工程的成功案例，吸收实践经验以避免常见设计误区，同时严格符合工程所在地的地方标准与管理要求，确保设计方案既具备技术合理性，又拥有良好的合规性与可实施性。

二、防雷接地系统关键技术设计与实施

（一）外部防雷系统设计

外部防雷系统作为水利工程雷电防护的第一道屏障，其设计需与构筑物特性深度适配，核心在于接闪、引下、接地三大环节的协同工作^[5]。接闪器设计需差异化配置，对高耸构筑物采用独立避雷针确保保护范围，对大面积平面则采用避雷带与避雷网（网格不大于 $10\text{m} \times 10\text{m}$ ）组合防护，材质优先选用耐候导电的热镀锌钢或

不锈钢。引下线设计遵循“短直通畅”原则，沿构筑物外侧敷设，数量不少于两根且间距不超过 18m ，以确保雷电能量低阻传导。接地体是散流的关键，需依据地质勘察数据针对性设计，低电阻率区域采用复合接地网，高电阻率区域则通过换土、降阻剂或深井接地等措施优化，确保关键区域接地电阻不大于 1Ω ，一般区域不超过 4Ω ，从而将雷电能量安全高效地导入大地。

（二）内部防雷系统设计

水利工程内部防雷系统通过等电位连接、屏蔽防护和浪涌抑制三大核心措施，保护 PLC、远程测报终端等弱电设备。其基础是等电位连接，采用“总等电位+局部等电位”分级模式，在系统进线处用 $\geq 25\text{mm}^2$ 铜线将建筑主筋、各类金属管线等连接成统一等电位体，并在中控室等关键区域用 $\geq 16\text{mm}^2$ 铜线将设备外壳、电缆屏蔽层等做局部联结，以消除电位差^[6]。屏蔽防护则通过构建电磁屏障阻断干扰，要求电缆采用屏蔽型并穿金属管/线槽敷设且可靠接地，同时将中控室等关键区域建成屏蔽机房，确保屏蔽效能不低于 80dB 。浪涌保护是抑制过电压的关键，电源线路采用从高压到设备端的三级递进防护，通流容量逐级减小；信号线路则针对性配置与线路阻抗匹配的专用 SPD。所有 SPD 安装均需遵循短直接地原则，并串联空气开关以实现过流保护，共同构建起多层次、精准的内部防护网络。

三、特殊区域与设备的专项防护技术

（一）大坝及泄洪设施电气设备防护

针对大坝泄洪设备面临的雷击与潮湿威胁，防护方案整合了外部拦截与内部保护。外部通过在屋顶和传感器支架加装避雷带与避雷针来拦截直击雷，并利用大坝结构主筋作为高效引下线连接至坝基环形接地网，将所有金属设备统一接入，确保接地电阻 $\leq 4\Omega$ ^[7]。内部则采用防水屏蔽电缆穿镀锌钢管敷设，并在控制箱内配置防水型电涌保护器（SPD），同时选用 304 不锈钢材质设备、加强接线密封、设置排水与呼吸装置，以全面抵御潮湿环境影响，保障设备安全。

（二）水电站厂房与中控室防护

为应对水电站厂房高压设备与中控室弱电设备的不同雷击风险，需构建“高压区域分级防护、弱电核心全面屏蔽”的协同体系。针对厂房高压设备，以屋顶避雷网、钢结构引下线与全域接地网（电阻 $\leq 1\Omega$ ）阻断雷电波侵入，并在主变压器、配电柜及发电机出口形成三级 SPD 浪涌防护，同时高低压电缆分层隔离敷设^[8]。对于作为“神经中枢”的中控室，则采用效能 $\geq 85\text{dB}$ 的屏蔽机房进行全面电磁屏蔽，通过等电位系统（导通电阻 $\leq 0.03\Omega$ ）连接所有设备金属部件，并对电源和通信线路实施三级精细 SPD 防护，最后配备 UPS 确保核心设备在雷击停电时持续运行。

（三）泵站电气系统防护

泵站设备防护需综合应对浪涌、潮湿与腐蚀，外部采用“避

雷带+独立避雷针”组合防雷，通过热镀锌引下线连接至由铜包钢构建的复合接地网，所有设备外壳与底座均可靠接入并做防腐处理，确保接地电阻低于 $2\Omega^{[9]}$ 。核心设备防护上，电机电源采用穿防腐管的铠装屏蔽电缆，进线端加装 SPD，外壳设专用接地线；变频器输入输出端均配置适配 SPD；控制柜则选用防雨防尘柜体，内部设置等电位连接并分离强弱电。此外，定期检测 SPD 与接地电阻，雨季前重点检查防水密封。

（四）远程测报与通信系统防护

远程测报与通信系统的防雷核心在于“弱电精准防护、线路全程屏蔽、接地简化可靠”。设备本体采用“小型接闪+外壳接地”模式，在支架顶部加装微型避雷针，并将设备外壳可靠连接接地网；对于卫星天线等高耸设备，则单独设置独立避雷针，其引下线与设备接地系统分开敷设，避免干扰。线路防护实施“全程屏蔽+两端 SPD”，信号与通信线路采用双屏蔽电缆并穿金属管敷设，同时所有线路两端安装参数匹配的专用 SPD。接地系统采用“简易高效+等电位互联”设计，就近利用金属构件构建接地网，高电阻率区域辅以降阻剂，并通过通信电缆屏蔽层与中控室主接地网实现等电位连接。通过中控室系统实时监控 SPD 状态和数据完整性，远程评估防雷系统有效性。

四、施工、验收与运行维护

（一）施工质量控制要点

施工质量控制以“材料合格、工艺规范、连接可靠、环境适配”为核心，严格依据设计文件和标准执行。材料进场须严格检验，金属材料需提供合格证与检测报告，确保热镀锌层厚度不低于 $65\mu\text{m}$ 、铜包钢层不小于 0.25mm ，浪涌保护器（SPD）必须有认证且参数与设计一致，严禁使用不合格材料^[10]。施工工艺上，接地体埋深不小于 0.8m 并避开不良地质，垂直接地极需机械压入；焊接连接必须保证搭接长度，焊后及时进行两道防锈漆和一道银粉漆的防腐处理，潮湿区域还需额外包裹防腐胶带；引下线敷设应短直顺直，固定规范，穿墙楼板需做好保护密封。针对水利工程特殊环境，大坝坝体接地需与混凝土浇筑同步焊接主筋，泵站等潮湿区设备须加装防水盒并做好电缆密封，岩石地区则采用钻孔灌浆法固定接地极。所有关键工序如接地体敷设、焊接节

点等均需做好隐蔽工程记录，留存影像资料与检测数据，确保施工全程可追溯。

（二）系统测试与验收

系统测试与验收由第三方机构牵头，联合多方共同实施，合格后方可投用。测试需覆盖防雷接地核心性能，其中大坝、中控室等关键区域接地电阻须 $\leq 1\Omega$ ，泵站等区域 $\leq 4\Omega$ ，且测试点不少于节点总数的30%。防雷性能方面，引下线导通电阻 $\leq 0.1\Omega$ ，等电位连接电阻 $\leq 0.03\Omega$ ，中控室屏蔽效能需 $\geq 85\text{dB}$ ，SPD性能也须达标。此外，还需对主变压器进行跨步与接触电压测试，并对远程系统模拟雷击以检验数据传输稳定性。验收依据设计、施工及检测报告进行核验，合格则出具报告；若存在接地电阻超标等问题，必须限期整改并重新检测，直至全部符合要求。

（二）运行维护与管理

水利工程防雷运维以“预防为主、定期巡检、快速响应”为原则，并结合季节特点制定差异化计划。日常巡检根据风险等级划分，中控室等核心区每月1次，泵站等每季度1次，雷电高发期（4-9月）缩短为每月1次，重点检查接地、SPD状态、等电位连接及屏蔽电缆。每年开展一次全面检测，复测接地电阻、SPD参数等关键指标。维护上，SPD到期（3-5年）或接地体锈蚀超30%须及时更换，汛期前需进行专项检查与清理。同时建立雷电灾害应急预案，灾后迅速响应处置，并加强人员专业培训与应急演练，确保运维工作规范高效。

五、结束语

水利工程电气系统的防雷接地设计是一项系统性、综合性的工程，贯穿于工程的规划、设计、施工、验收及运行维护的全生命周期。本文通过对防雷接地设计原则、关键技术、专项防护方案以及运维管理策略的系统探析，旨在构建一个“外部拦截、内部疏导、分级防护、全程可控”的立体化安全防护体系。随着智能化、数字化技术在水利领域的深度应用，雷电防护技术也需与时俱进。希望本文的研究能为相关领域的工程技术人员提供有益的参考，共同推动我国水利工程防雷技术迈向更高的水平，为国家水网的安全、稳定、高效运行构筑坚实的技术屏障。

参考文献

- [1] 岳林东. 水利工程电气自动化系统防雷技术 [J]. 建筑与施工, 2025, 4(12): 151-152. DOI: 10.12417/2811-0528.25.12.068.
- [2] 葛雯静, 张宇亮. 水利工程电气自动化系统防雷技术研究 [J]. 现代建筑工程技术, 2025, 1(3). DOI: 10.37155/3041-0819-0103-5.
- [3] 张金凤. 水利工程电气自动化系统防雷措施分析 [J]. 科技信息, 2011(21): 452. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9960.2011.21.352.
- [4] 冯晶, 贾斌. 水利工程电气自动化系统防雷措施分析 [J]. 商品与质量 (建筑与发展), 2013(9): 596-596.
- [5] 钟伟民. 探析水利工程电气自动化系统防雷措施 [J]. 建筑工程与设计, 2023, 2(5): 22-24. DOI: 10.12417/2811-0536.23.05.008.
- [6] 孙会永. 水利工程电气自动化系统防雷技术 [J]. 电脑爱好者 (电子刊), 2020(5): 3913-3914. DOI: 10.12277/j.issn.1005-0043.2020.05.1960.
- [7] 孙跃文. 水利工程电气自动化系统防雷技术研究 [J]. 数码-移动生活, 2021(5): 407. DOI: 10.12277/j.issn.1673-0909.2021.05.268.
- [8] 赵云亮. 建筑电气防雷接地系统施工简述 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(7): 874-874. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2015.07.0532.
- [9] 李作琴. 水利工程电气自动化及其电气一次设计研究 [J]. 今日自动化, 2021(7): 19-21.
- [10] 王毅恒. 水利工程电气自动化系统防雷措施分析 [J]. 电脑校园, 2020(12): 7389-7390.

输电线路跨越高速公路施工的安全风险评估与防护策略

王坤

云南送变电工程有限公司, 云南 昆明 650216

DOI:10.61369/WCEST.2025090002

摘 要 : 输电线路跨越高速公路施工是一项风险较高的工程项目, 涉及带电操作, 高空作业等多重挑战, 对于施工安全防护提出了较高的要求。尤其是随着电网建设发展, 输电线路跨越高速公路施工规模日益扩大, 精准评估、有效防护施工中的安全风险, 对于保障电网稳定运行、维护施工人员生命安全具有重要意义。文章围绕输电线路跨越高速公路施工安全风险进行评估分析, 总结一系列防护策略以供参考。

关 键 词 : 输电线路; 跨越高速公路; 安全风险; 风险评估; 防护策略

Safety Risk Assessment and Protection Strategies for the Construction of Transmission Lines Crossing Expressways

Wang Kun

Yunnan Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650216

Abstract : The construction of transmission lines crossing expressways is a high-risk engineering project that involves multiple challenges such as live-line operations and high-altitude work, posing stringent requirements for construction safety protection. Especially with the development of power grid construction, the scale of transmission lines crossing expressways is expanding increasingly. Accurate assessment and effective protection against safety risks during construction are of great significance for ensuring the stable operation of the power grid and safeguarding the lives of construction personnel. This paper analyzes the safety risk assessment for the construction of transmission lines crossing expressways and summarizes a series of protection strategies for reference.

Keywords : transmission lines; crossing expressways; safety risks; risk assessment; protection strategies

引言

我国电网建设规模持续扩大, 输电线路与高速公路的交叉跨越需求随之增长。由于高速公路属于我国重要交通基础设施, 车流量大、车速快, 输电线路跨越高速公路施工往往涉及带电作业、高空作业以及临时设施搭建等环节。操作不当可能诱发导线坠落、人员伤亡或交通中断等事故, 其风险管理水平高低很大程度上决定了工程项目的成败。现阶段国家级行业已经颁布了多项政策和技术标准, 但实践中仍然存在落实不到位, 安全管理措施不合理等问题, 如何实现安全风险的精准识别与防护, 成为学术领域的一项热门课题。

一、输电线路跨越高速公路施工的风险分析

输电线路跨越高速公路施工场景伴随着多重风险, 这些风险具有多元性、突发性等特点, 具体表现在以下几点。

1. 机械设备器具风险。施工现场作业中需要涉及吊车、牵张机、旋挖钻、卡线器、绝缘子串等设备器具, 这些设备器具性能不合理或检修不到位, 容易诱发安全事故, 导致现场停工^[1]。

2. 人员操作风险。施工人员作为施工活动的执行者, 自身安全意识, 技能水平等高低很大程度上影响着总体施工安全。部分施工人员在高空作业时未按规定系安全带, 或带电作业时绝缘防护不到位, 均可能诱发安全事故。

3. 环境风险。高速公路沿环境复杂多变, 伴随着一系列不可控的因素。部分输电线路跨越点地形陡峭, 材料输送困难, 基坑

开挖可能造成公路边坡失稳; 在极端恶劣天气下诱发跨越架导电倒塌、雷击跳闸等安全事故^[2]。

4. 设计和施工方案风险。前期设计与施工方案缺陷, 可能导致后期风险进一步扩大。如跨越角度较小, 后期容易出现磨损或断线; 施工方案未针对高速公路车流量制定合理的交通疏导方案, 或是临时设施不完善, 伴随严重的车辆碰撞风险^[3]。

二、输电线路跨越高速公路施工安全风险评估体系构建

(一) 风险识别

风险识别是评估的基, 需要工作人员系统梳理工程项目施工全生命周期可能存在的安全风险。具体可采用现场调研 + 文献分

析+专家德尔菲法组合方法，系统梳理施工现场风险源，编制结构化清单，如表1。具体风险识别中，根据 GB 50545-2010、DL/T 5106等标准以及行业事故案例库，确定该项目施工中高峰风险环节；选择几个典型工程，观察施工过程的操作行为、管理措施以及环境条件，补充标准规范外的隐性风险；邀请10名行业专家，匿名问卷调查，对初步识别风险源的重要性打分评估，最终形成具体风险清单^[4]。

表1 典型风险源识别

维度	风险源	事故类型
人员	高处未系安全带、绝缘防护缺失、疲劳作业	触电、高空坠落、机械损伤
设备	卡线器滑脱、吊车支腿未伸展倾覆、工器具超出检修时限	机械损伤、导线坠落
材料	绝缘子机械强度不足、导线隐性损伤	绝缘子脱落、断线、工具断裂
方法	跨越角度小、交通疏导方案不合理	交通碰撞、社会影响
环境	雷电、保育等恶劣天气、山区地形陡峭	断线、坍塌、坠落

（二）评估方法

结合输电线路跨越高速公路施工风险的多样化特点，采用定性、定量相结合的方法进行评估。采用层次分析法分析多风险因素的重要性，搭建构造判断矩阵，计算各风险源的权重值；采用模糊综合评价法，分析风险严重程度和发生概率等模型指标，定性描述转化为定量评分。

评估指标包括目标层（施工安全综合风险）、准则层（机械风险、人员风险、材料风险、环境风险、方法风险）、指标层（具体风险源），并运用 AHP 法计算各层级指标权重^[5]。

（三）评估流程

为规范评估过程，保障评估结果可操作，需遵循标准化步骤进行评估：①准备阶段：该阶段主要负责收集高速公路运营数据、施工图纸以及气象记录等资料；设立安全评估小组，集合了高速公路管理者，第三方评估机构，电网安全工程师以及现场负责人等成员，明确各自的职责分工，协同开展工作。②风险识别阶段：根据工程实际情况动态定制风险源清单。③风险量化阶段：构造判断矩阵计算权重，针对三级指标确定隶属度，最终综合评分。④风险分级阶段：根据综合得分将风险划分为4级，I级需要立即停工整改；II级采取专项管控措施；II级日常监测；IV级日常管理。⑤反馈更新阶段：根据评估结果编制报告，由交管部门与施工单位审批，若后期设计变更，则需要重新评估和更新风险源，保证最终评估结果与工程实际相契合^[6~9]。

三、输电线路跨越高速公路施工安全防护策略

（一）完善安全防护设施

结合输电线路跨越高速公路施工安全风险需要，应精准识别施工中的交通干扰、机械碰撞以及导线坠落等高风险场景，设计多层次的安全防护措施^[10]。

1.跨越架与封网系统。在跨越两端设置独立的耐张塔，耐张

段长度150m ~ 200m范围内，避免导线张力过分集中于跨越点，最大程度上降低后期断线几率。跨越档悬垂绝缘子串设计为双联串结构，单联机械强度至少在设计值2倍以上，220kV线路单联设计荷载20kN，双联串总荷载不小于40kN，避免绝缘子破损诱发安全指数。跨越架适合选择直径不小于12mm的钢丝绳主材以及钢管立柱，布设间距不超过2m，顶部采用双层迪尼玛绳封网，与公路路面垂直距离在6m以上。

2.导线与金具强化。跨越档内导线禁止接头展放期间，借助张力控制装置保持张力，避免导线破损^[11~15]。导线与跨越架接触位置需要包裹一层橡胶皮，转角区域设置滑轮组降低摩擦系数，金具连接区域则涂抹一层导电膏降低接触电阻，避免线路过热烧蚀绝缘层^[16]。

3.临时接地与防雷保护。跨越架周围区域设置接地极，使用扁钢与跨越架牢固连接，接触电阻控制在0.1Ω以下，降低雷击事故几率。

（二）优化施工方案与技术

施工方案与技术优化，是规避风险保障作业效率与安全的重要环节。在设计阶段，选择正交跨越或锐角45°以上的跨越方案，若地形条件限制跨越角度不超过30°，可适当的增加中间锚塔平衡张力；结合跨越点地形动态调整档距，一般山地区在300m以内，平原区在400m以内，使用BIM模拟分析不同温度和覆冰等工况下导线张力变化，保证跨越档最大张力始终处于导线破断力的25%以内^[17]。

架线工艺优化改良，引入牵引机和张力机辅助作业，并安装视频监控系统，实时监控导线张力以及放线速度，若现场施工条件不便，可使用无人机航拍技术辅助监测跨越架与导线的间距，避免缝网碰撞诱发事故。在具体跨越时，施工人员可使用大疆M300 RTK无人机试飞，鞋带直径3mm的轻质迪尼玛绳跨越高速公路，随后逐步提升至导引绳、牵引绳以及导线，可大幅度减少吊车等特种设备在现场作业时间。封网作业活动则需要架线前进行，采用螺栓加固封网固定点与跨越架立柱，避免导线坠落影响封网施工质量^[8]。

（三）现场硬质隔离警示

由于高速公路的车流量大，车速通常在80km/h以上，因此施工期间可设置物理隔离和警示标志，降低行驶车辆误入施工区域的风险。在跨越点两侧延伸50m范围内设置彩钢瓦围挡，高度2m以上，在围挡顶部安装旋转式警示灯，底部则使用沙袋，避免被风吹倒。与交管部门联动，施工期间封闭外侧1~2条车道，具体需要结合工程的跨越架宽度确定，剩余车道则保持双向通行；道中间采用反光锥筒引导车辆变道，并在封闭区域点设置电子情报板，告知来往车辆施工区域限速40km/h。

跨越顶部设置施工现场禁止靠近的警示牌，并采用反光材质，确保来往行驶车辆能够远距离识别；夜间配备照射范围20m以上的LED投光灯，覆盖跨越架区域，保证施工现场设备设施可被来往车辆识别。封闭车道入口配备2名工作人员，经过专业培训后手持荧光棒引导车辆通行，雨雾天气则采用扩音器提醒“前往道路施工、减速慢行”^[19]。

（四）加强人员管理

为了保证现场施工人员生命安全，规避施工风险，应加强人员准入和分层培训工作。高处作业人员需要持证上岗，如吊车司机持有特种设备操作证 Q2，电工则需要持有高压电工证，并且出具近三年内无重大事故记录。施工作业前组织人员进行全面体检，重点排查有恐高症、高血压、糖尿病等人员，禁止疲劳作业或酒后作业^[20]。现场所有人员需参加统一的安全培训活动，丰富知识储备，学习如何精准识别风险源、如何防护、个人防护装备使用方法等；针对封网搭设、张力放线等高风险工序，组织工作经验丰富工程师现场实操培训，工作人员考核通过后方可上岗操作。除此之外，加强作业全过程监管，对于吊装、高处作业等环节配备专门的监护人员，督促工作人员规范系安全带和安全装备，一旦发现违规操作，则及时制止和纠正；设立安全积分制度月末对于积分考核符合标准者即可予奖励累计积分超出标准，则禁止其作业，需要重新培训、考核通过后方可上岗。

（五）编制应急预案

即便施工单位制定了一系列安全措施，但仍然可能出现高速连环碰撞或是导线突然坠落等安全事件，因此需要编制应急预

案，最大程度上减轻安全事故带来的损失。针对评估中的极高风险场景编制专项应急预案，并确定一旦出现紧急事故的全流程动作；设立应急指挥部，下辖交通组、医疗组、后勤组、抢险小组。同时加强现场应急物资的储备，如急救箱、封网绳、对讲机等，并与周围的施工单位建立合作关系，一旦出现安全事故，可紧急调拨其挖掘机、吊车等设备；与高速公路管理部门和属地消防等部门合作开通直通热线，定期组织联合演练，以便提高部门之间的协同效率。如果发生安全事故，需要在事故后24小时内设立调查组，分析事故原因，并形成事故调查报告追究责任人。

四、结论

综上所述，输电线路跨越高速公路施工过程中，风险源来源于各个环节，若风险识别不准确、安全防护不到位，可能诱发严重安全事故。因此，施工前完善配套安全设施，优化施工方案与技术，现场设置安全警示标志，并组织现场人员参加安全培训，多措并举下全面保障施工现场作业安全，将安全风险消灭在萌芽状态。

参考文献

[1] 赵浩杰. 高压输电线路施工作业风险和安全技术措施分析 [J]. 张江科技评论, 2024(5): 70–72.

[2] 向世聪. Y–G220 千伏架空输电线路工程跨越施工安全风险研究 [D]. 中国矿业大学, 中国矿业大学 (江苏), 2023.

[3] 邱秀珍. 110kV 架空输电线路重要跨越封网施工工艺研究 [J]. 电力设备管理, 2024(21): 231–233.

[4] 杨念. 输电线路架设跨越高速公路施工技术分析 [J]. 建筑设计与研究, 2024, 5(10).

[5] 谢宽. 500 kV 高压线路跨越施工技术的实践与优化 [J]. 标准生活, 2025, (06): 155–157.

[6] 田森, 杨晗. 输电线路架设跨越高速公路的施工技术探析 [J]. 越野世界, 2021(11): 181.

[7] 任宇浪, 肖德芳. 输电线路架设跨高速公路的施工技术探析 [J]. 电工技术, 2024(11): 114–116, 119.

[8] 汤向东. 输电线路跨越高速公路的施工技术分析 [J]. 集成电路应用, 2025, 42 (07): 198–199.

[9] 杨易, 苏敏, 何孔荣. 输电线路跨越改造项目措施费用取费现状及偏差分析 [J]. 工程与建设, 2023, 37 (05): 1643–1646.

[10] 张德强. 110 kV 架空输电线路跨越高速公路的施工工艺 [J]. 农村电气化, 2023, (10): 102–104.

[11] 李镇豪. 架空输电线路跨越高速公路更换导地线施工方法的研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64 (10): 135–136+140.

[12] 李会强. 超高压输电线路架设跨越高速公路施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2021, (21): 38–40.

[13] 田红羽. 超高压输电线路架设跨越高速公路施工技术 [J]. 数字通信世界, 2020, (07): 263+265.

[14] 黄琛, 王志强, 鲍威. 输电线路跨越高速公路架线的施工方法 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (05): 104–105.

[15] 王永刚, 张佑军, 陈建, 等. 浅谈输电线路架设跨越高速公路的施工技术 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (05): 119–120.

[16] 雷京津, 张佑军, 陈建, 等. 浅谈超高压输电线路架设跨越高速公路施工技术 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (04): 104–105.

[17] 叶修锋, 王永刚, 陈海峰, 等. 特高压输电线路跨越高速公路施工方案要点 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (04): 114–115.

[18] 黄小浪. 超高压输电线路架设跨越高速公路施工技术 [J]. 农村电气化, 2020, (01): 43–44.

[19] 丁政中, 王炳文, 包权宗, 等. 输电线路“三跨”工程跨越补偿费用计列原则研究 [J]. 项目管理技术, 2019, 17 (11): 108–114.

[20] 吴应天. 探析高压输电线路跨越高速公路施工对公路安全的影响因素 [J]. 甘肃科技纵横, 2019, 48 (07): 53–55.

智慧水闸系统中物联网与大数据技术的融合应用

谢陆林, 徐鹏飞, 范小敏

镇江市长江河道管理处(镇江市重点水利工程建设管理中心), 江苏 镇江 212000

DOI:10.61369/WCEST.2025090003

摘 要 : 在防洪减灾、水资源调配及流域生态保护需求日益精细化的背景下, 智慧水闸系统成为传统水利设施升级的关键方向。该系统通过物联网技术构建感知层, 整合水位传感器、闸位编码器、水质监测终端及视频监控设备, 实现水闸运行数据、周边水文环境数据的实时采集与传输。故此, 文章从物联网与大数据技术角度出发, 深入探讨智慧水闸系统的构建与应用, 希望能够为水利行业的智能化发展提供有益参考。

关 键 词 : 智慧水闸系统; 物联网技术; 大数据技术

Integrated Application of Internet of Things and Big Data Technologies in Intelligent Sluice Gate Systems

Xie Lulin, Xu Pengfei, Fan Xiaomin

Zhenjiang Yangtze River Management Office (Zhenjiang Key Water Conservancy Project Construction Management Center), Zhenjiang, Jiangsu 212000

Abstract : Against the backdrop of increasingly refined demands for flood control and disaster mitigation, water resource allocation, and watershed ecological protection, intelligent sluice gate systems have emerged as a crucial direction for upgrading traditional water conservancy facilities. This system constructs a perception layer through Internet of Things (IoT) technology, integrating water level sensors, sluice position encoders, water quality monitoring terminals, and video surveillance equipment to enable real-time collection and transmission of operational data from sluice gates and hydrological environmental data from surrounding areas. Therefore, this article delves into the construction and application of intelligent sluice gate systems from the perspectives of IoT and big data technologies, aiming to provide valuable insights for the intelligent development of the water conservancy industry.

Keywords : intelligent sluice gate system; Internet of Things technology; big data technology

在水利工程中, 水闸作为挡水、泄水或取水建筑物, 被广泛应用^[1-5], 其运行效率与管理质量直接关系到流域水安全与水资源利用效益, 并推动着我国水利事业向“智慧化、精细化”转型, 在此背景下, 传统水闸管理模式逐渐暴露出短板, 无法为调度决策提供全面、精准的支撑。而物联网及大数据技术能够推动水闸管理从“被动运维”向“主动预判”进行转变。由此可见深入探究智慧水闸系统中物联网与大数据技术的融合应用, 对于提升水闸运行管理水平、保障流域水安全及提高水资源利用效益具有至关重要的意义。

一、智慧水闸系统的核心技术基础

(一) 物联网技术在智慧水闸中的应用基础

大数据时代背景下, 利用物联网技术部署海量网络互联的传感设备, 不仅可以实现重要数据的实时采集, 还能智能分析潜在问题, 为水闸的安全稳定运行提供可靠保障^[6-12], 其应用基础围绕水闸运行数据的全链路获取与初步处理展开。

在感知层, 核心是构建适配水闸复杂环境的感知网络, 需重点解决设备环境适应性与数据采集关联性问题。水闸多处于潮湿、多尘或户外开阔区域, 感知设备需具备抗干扰、耐老化的硬件特性, 同时需根据水闸管理需求, 确定水位、闸位、流速、水质等核心指标的采集频次与精度, 确保数据既能反映实时状态,

又避免冗余。

传输层的应用基础聚焦于数据传输的稳定性与适配性。需结合水闸地理位置特点选择传输技术, 具体来说, 对于偏远、分散的中小型水闸, 低功耗广域网技术更适合长距离、低带宽的数据传输, 可降低设备能耗与部署成本; 对于数据量大、实时性要求高的大型水闸, 需依托高带宽移动通信技术, 保障闸位控制信号、视频监控数据等的实时传输。此外, 传输层还需构建多路径备份机制, 避免单一传输链路故障导致的数据中断。

接入层是物联网与后续大数据平台衔接的关键, 其应用基础在于实现多源感知数据的标准化接入。需制定统一的数据接入协议, 完成不同品牌、不同类型感知设备的数据格式转换, 同时对采集到的原始数据进行初步预处理, 包括数据校验、异常值过滤

与时间戳同步，确保进入大数据平台的数据具备完整性与一致性，为后续分析挖掘奠定基础。

（二）大数据技术在智慧水闸中的应用基础

大数据技术为智慧水闸系统提供“海量存储－深度处理－模型构建”的核心能力，其应用基础围绕水闸数据的全生命周期管理与价值转化展开。在数据存储层面，核心是构建适配水闸数据特性的存储架构。水闸数据兼具时序性与多源性，既包含长期积累的历史水文数据、设备运行数据，也包含实时产生的感知数据，需采用分布式存储技术实现海量数据的高效存储。同时，需根据数据访问频率差异，设计分层存储策略：将高频访问的实时数据存储于高速存储介质，保障查询效率；将低频访问的历史数据迁移至低成本存储介质，平衡存储性能与成本。

模型构建层面的应用基础在于建立贴合水闸管理需求的分析模型体系。需基于水闸运行规律与管理目标，设计针对性的模型框架：针对运行状态评估，需构建数据特征与状态等级的映射模型；针对风险预警，需挖掘历史故障数据与异常工况数据的关联规律，建立风险识别模型；针对调度优化，需结合水闸功能定位，构建多目标优化模型，且该技术能够直观地展示水闸的运行状态，提供实时监控、故障诊断和预警功能^[3]，并根据新产生的数据持续优化参数，提升模型对水闸运行状态的适配性与分析结果的准确性。

二、物联网与大数据技术的融合逻辑与架构

（一）物联网与大数据技术的融合核心逻辑

物联网与大数据技术的融合，本质是围绕智慧水闸“数据价值转化”形成的协同机制，核心在于打通“感知－处理－应用”的全链路数据流转，实现智慧水闸的应用场景建设。凭借云平台对数据运算与分析，依据决策结果实现对设施设备智能控制，形成一套“业务全域一张图”现代化、高科技系统^[4]。其中，物联网技术的核心作用是为大数据分析提供高质量、高时效性的“数据原料”，通过感知层设备捕捉水闸运行的动态指标与环境参数，再经传输层实现数据的无间断传递，确保大数据平台能获取完整的原始数据。

大数据技术则承担“数据加工”职能，对物联网传输的多源、异构数据进行标准化处理，消除设备差异导致的数据格式壁垒；同时通过时序分析、关联挖掘等技术，从海量数据中提取水闸运行规律、风险特征与调度优化方向。大数据分析结果可反哺物联网感知策略，比如根据风险预警需求调整特定指标的采集频次；物联网实时数据则持续更新大数据模型的训练样本，提升分析结果的准确性，最终实现从“被动采集数据”到“主动输出决策”的闭环。

（二）物联网与大数据技术的融合系统架构

智慧水闸中两者的融合架构遵循“分层协同”原则，整体分为感知层、平台层与应用层，各层通过数据交互实现技术融合落地。感知层是融合的基础，以物联网设备为核心，重点构建统一规范的采集网络，明确不同类型传感器的部署标准与数据传输协

议，确保采集的数据能直接适配后续处理需求，避免跨设备数据兼容问题。

平台层是融合的核心载体，整合大数据技术的核心功能模块，包括数据接入模块、数据处理模块、建模分析模块，同时嵌入物联网传输状态监控功能，实时排查数据传输异常。应用层是融合的价值落地层，基于平台层的分析结果，开发水闸运行监控、风险预警、调度决策等功能，通过可视化界面呈现数据结论，同时将决策指令反馈至物联网执行设备，实现“分析结果－设备动作”的直接联动，确保融合技术真正服务于水闸管理实践。

三、物联网与大数据融合在智慧水闸中的应用路径

（一）多源感知数据的标准化整合路径

物联网与大数据融合的首要应用路径，聚焦于解决智慧水闸数据碎片化问题，构建从“感知采集”到“价值提取”的标准化数据链路。该路径以“数据协同”为核心，先通过物联网技术建立统一的感知规范体系，针对水闸运行涉及的水位、闸位、流速、设备工况等不同类型数据，明确统一的采集频率、精度阈值与数据格式标准，确保分散部署的传感器采集的数据具备一致性，避免因设备型号差异导致的数据格式冲突。同时，传输环节需依托物联网的协议适配能力，通过制定统一的传输协议框架，平衡数据传输的实时性与低功耗需求，尤其针对偏远水闸场景，需构建多链路备份机制，防止单一传输故障导致的数据中断。

进入大数据处理环节后，融合重点转向数据的深度整合与质量优化。首先，大数据平台需搭建专门的多源数据接入模块，将物联网实时采集的数据与水闸历史运行数据、流域水文背景数据进行关联整合，通过数据映射技术建立不同数据维度的逻辑关联，形成覆盖“设备－水情－环境”的全域数据集。其次，利用大数据清洗算法对原始数据进行处理：针对传感器偶发故障导致的异常值，通过水闸运行的物理规律进行逻辑校验与剔除；针对传输延迟导致的缺失值，结合时序数据的趋势特征进行动态补全，确保数据质量满足分析需求，为后续应用场景提供精准的数据支撑。

（二）水闸运行状态的动态管控路径

智慧水闸管理系统可达成对水闸设备的远程监控与精准控制，显著提升操作的灵活性与运行效率。借助远程调度模块与智能控制算法，系统可快速响应汛期泄洪、枯水期蓄水等不同水情需求，大幅降低人为操作的复杂性与安全风险^[5]。在状态监测环节，物联网技术发挥前端数据感知核心作用，通过在闸体应力监测点、液压系统压力阀、控制系统信号接口等关键部位部署专用传感器，实时捕获设备运行参数与水情动态变化，并将这些数据以毫秒级响应速率实时传输至后端大数据分析平台，确保运行状态信息的即时性，规避传统人工巡检存在的时间滞后与盲区问题。

大数据技术在水闸状态评估与处置决策中承担核心支撑职能。首先，需基于水闸历史运行数据构建多维度运行状态评估模型，通过随机森林、神经网络等大数据挖掘算法提炼不同运行状态的特征指标体系，并设定各指标的安全阈值范围。当物联网终端传输的实时数据接入平台后，模型会自动将实时指标与安全阈

值进行比对, 结合设备健康度、水情紧急程度等多维度数据综合评估当前运行状态等级, 自动生成含趋势曲线、风险预警标识的可视化状态评估报告。若监测发现指标超出安全阈值, 大数据平台将通过数据溯源分析定位问题源头, 并触发分级处置机制。此外, 系统以可视化交互界面直观呈现核心功能与关联数据信息, 保障管理者与用户可以高效开展监控与操作: 管理人员可在管理后台执行入库登记、库存预警、出库追溯等表具仓库管理操作, 以及设备台账更新、运行数据导出、故障记录查询等设备信息管理操作; 用户则可在前端界面完成在线水费充值、缴费凭证下载、历史账单查询等操作, 助力用户直观掌握自身用水消耗情况, 进而优化用水行为^[16-20]。

（三）水闸调度决策的智能化优化路径

智慧水闸系统通过物联网与大数据的融合, 突破传统调度依赖经验的局限, 构建“数据支撑-模型运算-动态迭代”的智能化调度体系。在调度数据准备阶段, 物联网技术负责提供实时动态数据, 包括当前闸位开度、上下游水位、流量变化趋势等, 确保调度决策能贴合水闸实时运行工况; 大数据技术则承担全域数据整合职能, 将物联网实时数据与历史调度数据、流域水资源供需数据、气象预测数据进行融合, 构建多维度的调度决策数据库, 为方案生成提供全面的数据基础, 避免因数据片面导致的调度偏差。

调度方案生成环节, 融合应用体现在模型构建与多目标优化。大数据平台需搭建适配水闸多功能定位的调度优化模型, 该模型需嵌入多目标优化算法, 将水资源利用效率、防洪安全系

数、生态保护要求等目标转化为可量化的约束条件, 再以物联网实时数据与大数据整合的历史数据作为输入参数, 计算出满足当前需求的闸位调整幅度、流量控制范围、调度时长等核心参数, 生成初步调度方案。

方案实施后, 物联网能够实时采集方案实施后的运行数据, 大数据平台则对比分析实际效果与模拟效果的偏差, 通过数据挖掘技术定位偏差原因, 并根据原因优化调度模型。同时, 需将每次调度方案、实施效果、优化调整记录归档至历史数据库, 形成调度经验库, 为后续同类场景下的调度决策提供参考, 实现调度方案从“智能化生成”到“持续优化”的良性循环, 提升水闸调度的科学性与精准性。

四、结束语

综上所述, 物联网与大数据技术深度融合应用所构建的智能水闸系统, 为水资源管理优化、节约利用及智慧城市建设提供了关键技术支撑。通过多源感知数据的标准化整合、水闸运行状态的动态管控以及水闸调度决策的智能化优化, 能够实现水闸防洪排涝、农田灌溉、流域生态补水等多重功能的协同高效运转, 而进一步提升水资源的综合利用效益与配置精准度。未来, 等新技术的持续融入与落地, 物联网与大数据在智慧水闸领域的融合应用深度与广度将进一步拓展, 进而还将助力水利事业向更高质量、更精细化、更智慧化的方向转型发展。

参考文献

- [1] 张晨. A 水闸工程智慧水利系统需求分析与设计 [D]. 山东: 山东大学, 2024.
- [2] 明星. 分水闸门采用直流供电系统的设计研究 [J]. 陕西水利, 2024(6): 120-122, 126.
- [3] 张丹. 水闸对河道水流调控的影响及优化措施 [J]. 珠江水运, 2025, (16): 147-149.
- [4] 吴新友. 智能传感技术在水闸安全监测中的应用 [J]. 中国水运, 2025, (12): 48-50.
- [5] 陈鑫. 基于物联网的水闸电气设备无线调度自动化系统 [J]. 电气技术与经济, 2025, (05): 205-207+211.
- [6] 周桂珍, 叶超, 马越, 等. 基于物联网与大数据技术的新型电力系统数据通信优化策略分析 [J]. 电子技术, 2024, 53(10): 58-59.
- [7] 王传家. 物联网与大数据技术在智慧城市中的应用 [J]. 电子技术, 2023, 52(07): 68-69.
- [8] 李春辉. 大数据技术在物联网中的应用 [J]. 科技资讯, 2022, 20(14): 13-15.
- [9] 任志鹏, 邢红日. 基于物联网的农田水闸远程控制系统的研究 [J]. 现代化农业, 2020, (10): 65-66.
- [10] 张大伟, 马进, 周新华. 基于物联网大数据技术的智慧交通系统 [J]. 中国设备工程, 2019, (02): 158-159.
- [11] 梁宇. 大数据时代背景下物联网技术的实践探析 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(07): 32-34.
- [12] 李文艳. 基于物联网与大数据技术的智能交通系统设计与应用 [J]. 中国电信业, 2025, (02): 77-80.
- [13] 李亚楠, 李黎, 袁涛, 等. 基于数字孪生的智慧水闸监测数据可视化及预警分析 [J]. 数字技术与应用, 2025, 43(01): 85-87.
- [14] 蔡宏. 浅析智慧水闸一体化管理系统在水管单位中的应用 [J]. 水上安全, 2025, (01): 160-162.
- [15] 李照. 智慧水闸在东淝闸的应用与实践 [J]. 中国水运, 2024, (11): 39-41.
- [16] 江莉. 基于物联网及大数据技术的智能水表管理应用平台设计 [J]. 华东科技, 2024, (06): 39-41.
- [17] 张文璠. 浅谈水闸自动化控制系统的建设 [J]. 治淮, 2024, (03): 58-60.
- [18] 高戈, 刘博文, 周宇航, 等. 水闸管理智慧运维系统主要功能及运用浅析 [J]. 内蒙古水利, 2022, (12): 49-50+53.
- [19] 谷维超, 何旭斌, 张由松, 等. 基于 BIM+ 的智慧建管平台在水闸工程中的应用 [J]. 浙江水利科技, 2022, 50(06): 6-9+13.
- [20] 何立军. 基于物联网技术的水闸自动化远程控制方法 [J]. 农业科技与信息, 2022, (18): 88-91.

水电站电气设备故障应急处理方法研究

兰大伟, 柴俊岭, 汤建军

黄河水利水电开发集团有限公司, 河南 济源 459099

DOI:10.61369/WCEST.2025090004

摘 要 : 水电站作为国家能源供应体系的关键节点, 其电气设备的安全稳定运行直接关系到电网可靠性和社会经济发展。然而, 电气设备在复杂运行环境下不可避免会出现各类故障, 若应急处置不当, 极易引发连锁反应, 造成重大损失。因此, 深入研究高效、科学的应急处理方法具有重要现实意义。本文聚焦水电站核心电气设备故障, 系统梳理了常见故障类型及其特点, 深入剖析了故障应急处置过程中面临的技术性难点与非技术性挑战, 并基于现代技术手段与管理理念, 提出了涵盖设备状态实时监测预警、精准故障定位隔离、快速有效处置恢复以及全过程信息反馈优化在内的一整套具体、可操作的应急处理策略体系。

关 键 词 : 水电站; 电气设备; 故障应急; 状态监测

Research on Emergency Treatment Methods of Electrical Equipment Failure in Hydropower Station

Lan Dawei, Chai Junling, Tang Jianjun

Yellow River Water Conservancy and Hydropower Development Co., Ltd., Jiyuan, Henan 459099

Abstract : As a critical component of the national energy supply system, the safe and stable operation of electrical equipment in hydropower stations directly impacts grid reliability and socio-economic development. However, electrical equipment inevitably encounters various faults under complex operating conditions. Improper emergency response may trigger chain reactions, leading to significant losses. Therefore, developing efficient and scientific emergency management methods holds substantial practical significance. This paper focuses on core electrical equipment failures in hydropower stations, systematically categorizes common fault types and their characteristics, and analyzes technical challenges and non-technical obstacles in emergency response. Based on modern technological approaches and management concepts, it proposes a comprehensive and actionable emergency strategy system that includes real-time equipment condition monitoring and early warning, precise fault localization and isolation, rapid and effective recovery measures, and optimized information feedback throughout the entire process.

Keywords : hydropower station; electrical equipment; emergency response; condition monitoring

引言

电力能源是社会运转的基石, 水电站凭借其清洁可再生特性在能源结构中占据重要地位。水电站电气设备, 包括发电机、变压器、开关设备、母线及继电保护装置等, 承担着电能生产、转换、输送与控制的核心职能, 其运行状态直接影响电站效能与电网安全。受设备老化、环境侵蚀、操作负荷、设计制造遗留问题等多重因素影响, 电气设备故障时有发生。一旦发生故障, 若不能及时、准确、高效地进行应急处置, 不仅可能导致设备严重损坏、电站停运, 甚至可能波及电网稳定, 造成大面积停电等严重后果。因此, 构建一套科学、系统、快速响应的电气设备故障应急处理机制, 对于保障水电站自身安全、提升供电可靠性、维护社会经济秩序至关重要。

一、水电站电气设备故障概述

水电站电气设备种类繁多, 主要包含发电机(组)及其励磁系统、主变压器及厂用变压器、高压断路器和隔离开关等高压开

关设备、各种母线和电力电缆、继电保护和自动装置等。这些建立多年之后的水电站设备若长时间运行有可能发生的典型设备故障有发电机定子绕组接地、匝间、层间短路、局部过热, 变压器油色谱异常或匝间、层间短路、线圈绝缘击穿, 断路器开断失

作者简介: 兰大伟(1989.03-), 汉族, 河南开封人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水电站运行管理。

败、拒动、误动，电压互感器精度误差增大、绝缘降低，继电保护装置动作无选择性（误动）或拒动（不动），继电保护或自动化设备通信中断等^[1]。这些故障现象可表现为发电机（组）非正常报警和（或）部分功能失用，也可能是断路器跳闸、机组停运甚至全厂停电。明确故障的种类是设备故障后进行合理有效应急处置的先决条件，也是确保水电站安全运行的首要基础。



二、电气设备故障应急处置的难点与挑战

（一）故障快速精准定位与隔离的技术难点

对于已经发生的电气设备故障，首先要面临的即是发现故障、确定故障发生的位置并采取措施隔离故障，实现短时间内的安全有效运行。水电厂的电气系统复杂，各单元电气设备关系密切、信号多种多样，保护装置一旦动作，其动作信号也只能对故障的大致地点有所描述，不能精确到具体设备的某个单元或某一个部件，如母线保护动作既有可能是母线上任何一个设备发生的故障引起的，那么问题很大；除此之外，故障还可能是有隐蔽性的故障或具有间歇性的故障，如电气设备出现的少量放电、接触不良等情况，对这些情况进行正常的监测是很难实时监测到的^[2]。

（二）应急响应时效性与资源调配的挑战

生产设备出现电气故障突发、紧急的特点，造成应急反应应该力求及时，在实践中，由于人力反应滞后、信息传递障碍、过程审批繁杂、现场因素影响等，在紧急状况出现的情况下，却不一定能够有效地完成应急响应。运行值班人员应快速解读电气告警信息，分析判断故障类型、程度等，据此参照流程手册执行相关应急预案。当反应过程中信息传递环节太多、信息传递核心人员缺席时，往往会错过处置的黄金时间^[3]。此外，应急处置工作所需配合不同部门也常常不同，可能涉及到运行部分、检修部、物资部等，需要实现高效的“人力物力”调配及现场“应急备品、备件”等快速投入使用，以此确保电气设备故障应急处置工作过程的高效率开展。

三、水电站电气设备故障应急处理的具体策略

（一）强化设备状态实时监测与智能预警

做好故障预判和尽早发现是提高应急处置水平的前提基础。应全方位全天候状态监测主设备的关键监测点。发电机组在线监测

绕组发热及振动、局部放电情况；变压器在线监测油温和油色谱、绕组热点温度及铁芯接地电流情况；开关设备在线监测机械特性及分、合闸线圈电流、触头温度以及 SF6 气体密度情况；电缆在线监测接头温度及局放强度情况。利用红外成像、超声、超高频局部放电、油色谱在线监测等先进手段，结合各设备的运行电流、电压、功率、频率等，构建装置的数据采集体系^[4]。利用大数据技术构建设备状态评估模型及设备故障预测模型，对数据进行智能挖掘和判断。在监测数据超出正常范围或者状态劣化时，系统自动分级预警和通过语音、铃声、手机短信及工作站弹窗等方式实时推送至运维人员，并具备预测故障发生的部位和可能的故障类型等信息，为应急处置预留时间，变被动抢险为预先规避。



（二）构建精准高效的故障诊断与隔离处置流程

当发生故障后，应进行规范化、流程化的应急处置，运行人员按照故障报警信息、保护动作报告、故障录波图、监控系统画面变化进行第一判据判断，确认故障影响范围，紧急启用备用设备或转移运行方式，防止事故进一步扩大。后续利用保护装置动作时序、故障录波器记录的电压电流波形、事件顺序记录 SOE 等相关数据，结合在线监测系统提供的实时 / 历史数据进行联合作业^[5]，通过对故障电流特征、保护动作逻辑是否符合预期、故障发生前后故障设备的状态变化等分析进行联判，必要时采用专家系统或故障诊断辅助软件辅助进行推理确认，精确定位故障设备后严格执行电气安全规程，运用开关、闸刀等设备将故障点可靠地从系统中隔离，做好隔离操作的可靠性和人员安全防护。隔离以后仍然能够运行的设备加强监视，故障设备在确保安全的前提下，由专业检修人员带上专业仪器进行现场勘查、测试，进一步分析其故障发生的原因和损坏程度，做好修复的前期准备。

（三）实施快速恢复与持续改进机制

隔离故障设备后，重点就是迅速恢复供电或减小停电损失。根据受损设备状况、备用零部件供应和电网调度规定来决定最快的方式和办法恢复设备。如果是轻微损伤的设备可以迅速修复，就地调配技术队伍快速处理；如果是需要更换部件的，则利用配置的同型备用部件进行更换，同时更换动作应规范快捷；主要设备严重受损，或难以在短时间内处理，应当采取临时旁路或通过临时接线，倒换运行方式等技术支持手段来尽可能地恢复供电，恢复动作后应实时监控相关设备的运行状态参数，确保系统

稳定。应急处理工作必须有完整的资料记录，包括故障状态、处理措施、处理耗时、参与人员、恢复效果等^[6]。事件过后必须召开事故分析总结会，找出故障发生的真正原因，评估应急预案及应急预案事件过程中的缺陷并进行改正。针对分析出的不足及问题，修改相应的应急预案和应急预案动作流程并补充相应的备用零部件或备品备件。

四、结束语

对于水电站电气设备故障的有效应急处置是确保电力安全运

行的重要组成部分，基于分析水电站电气设备故障的种类特性，直视应急处置方面定位和响应滞后等问题，在此基础上提出了加强设备状态监测预警、规范诊断隔离操作、健全快速恢复程序的有效手段，这些手段实施必须建立在状态监测技术的支撑、规范运行流程的基础上，在此基础上拥有专业性队伍的基础上。只有形成事前预防、事中监测、诊断、隔离、恢复、总结的完整闭环，从而确保水电站电气设备发生突发故障时，做到能够有效降低故障损失、保证电站自身安全及电网可靠运行，从而为社会经济的健康稳定发展提供源源不断的电力支持。

参考文献

[1] 张平. 水电站电气设备运行监测中的预防性试验分析 [J]. 中国科技纵横, 2025(1): 104–106.
[2] 张华宇. 水电站电气一次设备智能化技术探讨 [J]. 新潮电子, 2025(5): 109–111.
[3] 卢友. 水电站电气设备检修与运行维护现状及提升探讨 [J]. 电力设备管理, 2023(1): 38–40.
[4] 张发炽, 李祥汉. 水电站电气设备运维管理探析 [J]. 新潮电子, 2025(4): 172–174.
[5] 李小龙, 刘红旺, 王占清. 浅谈水电站电气设备的检修措施与故障处理 [J]. 水电站机电技术, 2024, 47(10): 126–129.
[6] 妮鹿菲尔·毛吾田. 水电站电气设备运行维护与故障检修研究 [J]. 光源与照明, 2023(1): 156–158.

河道生态护岸工程施工技术与效果评价

杨永亮

嵩县水旱灾害防御服务中心, 河南 洛阳 471400

DOI:10.61369/WCEST.2025090005

摘 要 : 河道是流域生态系统的核心廊道, 承担着水资源供给、泄洪排涝、生物栖息等重要职责。传统河道治理时采用的浆砌石、混凝土等硬质护岸虽然可以满足防洪、坡岸稳定等需求, 但会影响到水陆生态系统的物质循环与能量交换, 降低河道自净能力、减少生物多样性、导致景观单一化等。这不符合当前的生态文明建设要求。基于此, 下文将详细分析河道生态护岸的类型与技术特征, 探究植物型、土工材料复合型等河道生态护岸的施工技术要点, 并从水文调节、生物多样性恢复等维度进行效果评价。希望为河道生态护岸工程的优化设计和施工提供技术参考。

关 键 词 : 河道生态护岸工程; 施工技术; 效果评价

Construction Technology and Effect Evaluation of River Ecological Bank Protection Engineering

Yang Yongliang

Song County Flood and Drought Prevention Service Center, Luoyang, Henan 471400

Abstract : River channels are the core corridors of the river basin ecosystem, undertaking important responsibilities such as water resource supply, flood discharge and drainage, and biological habitat. Although the hard revetments such as masonry and concrete used in traditional river management can meet the requirements of flood control and slope stability, they will affect the material circulation and energy exchange of the aquatic and terrestrial ecosystems, reduce the self-purification capacity of the river, decrease biodiversity, and lead to the homogenization of the landscape. This does not conform to the current requirements of ecological civilization construction. Based on this, the following text will conduct a detailed analysis of the types and technical characteristics of river ecological revetments, explore the key points of construction techniques for river ecological revetments such as plant-based and geosynthetic composite types, and evaluate the effects from dimensions such as hydrological regulation and biodiversity restoration. It is hoped to provide technical references for the optimized design and construction of river ecological bank protection projects.

Keywords : river ecological bank protection project; construction technology; effect evaluation

前言

河道生态护岸工程遵循了“尊重、顺应以及保护自然”的理念, 能够将生态技术与工程结构融合。不仅可以提升岸坡的稳定性, 还能够修复、提升河道生态功能。近些年, 河道生态护岸工程开始应用在长江经济带、黄河流域生态保护带等领域。虽然相关技术在不断创新, 但在材料选型、施工工艺规范、效果评价等方面仍然存在不足。因此, 本文针对河道生态护岸工程的施工技术和效果评价开展探究是非常有必要的, 这样才能建立完善的效果评价指标体系, 提升河道生态护岸工程的长期生态效益。

一、河道生态护岸的类型和技术特征

(一) 植物型生态护岸

植物型生态护岸是利用原生植被的根系固土作用和茎叶消能作用来稳定岸坡、修复河岸生态。其优势是原生植被的成本低、景观自然、生态性好等。可优先应用在水流流速不超过1.5m/s,

坡度较缓的河道岸坡。

使用较多的植被包括: 狗牙根、结缕草等乡土草本植物, 杞柳、紫穗槐等灌木, 垂柳、枫杨等乔木。具体种植时需考虑到河道的水文条件、当地气候特征和土壤类型, 合理选型搭配。施工时要综合应用播种、扦插、植生袋铺设等方式, 打造“草本-乔木-灌木”综合防护体系。^[1]

作者简介: 杨永亮 (1982-), 男, 汉族, 河南省洛阳市人, 工程师, 从事水利工程方向。

（二）土工材料复合型生态护岸

土工材料复合型生态护岸能够将植物和生态袋、土工布、土工格栅等新型土工材料结合，进而形成复合防护结构。该结构既发挥了植物的生态性价值，又发挥了土工材料的高强度作用。一般应用在水流流速1.5–3.0m/s之间、坡度较陡的河道岸坡。

在选择土工材料时要满足高透水、高强度、耐用性强等要求，包括：聚丙烯无纺布制作的生态袋，透水不透土，腐蚀性较强。填充土壤后可直接堆叠形成岸坡主体；土工格栅，能够提升岸坡整体稳定性，防止坡体滑移；土工布，铺设在生态袋和坡体间，能够发挥隔离、过滤以及排水作用。在具体施工时要完成坡体开挖整形、铺设土工布、堆叠生态袋、固定格栅、种植植被等环节，这个过程要合理选择生态袋的搭接方式、把控好格栅的锚固深度等，这样才能提升结构的稳定性。

（三）生态混凝土型生态护岸

生态混凝土型生态护岸能够将生态混凝土作为主体材料，通过优化骨料级配、孔隙结构的方式完成强度支撑，并为植物提供适宜的生长空间。其具有强度高、耐久性好等优势，主要应用在水流流速3.0m/s以上，坡度较陡的河道岸坡。

生态混凝土主要分为植物型、多孔型和透水型三种，其中植物型生态混凝土需要预留植物生长孔、添加有机基材，为植物提供养分和生长空间。在施工时要严格把控混凝土配比，将孔隙率控制在20%–30%之间。还要做好混凝土的养护工作，防止混凝土出现早期开裂的情况。

二、河道生态护岸工程施工技术要点

（一）施工筹备

施工筹备是保障生态护岸工程质量的基础，需从三方面入手加强技术控制。

第一，精准勘察与参数校验。要通过现场勘察核实设计洪水位和河道常水位、汛期极值的契合度。整合已有数据模拟流速分布，根据结果优化护岸抗冲参数；开展土壤取样试验，获取地基承载力的真实数据。针对地下水埋深1.5m以上的区域制定降水、换填处理方案；核查原生植被的根系分布深度、水生生物的主要活动区，划定施工禁扰范围、设计生态缓冲带。

第二，设计交底和方案细化。组织设计、施工和监理方共同进行技术交底，确定护岸结构的具体构造细节。例如：格宾网丝径、孔径和填充石料级配。生态袋的搭接方式和固定间距；明确材料性能指标，包括：混凝土强度等级必须超过C25、生态基材有机质含量必须大于30%。确认植被选型是否符合当地的气候和水文条件；制定完善的生态专项保护方案，明确施工期间水生生物的迁移保护方式、设定植被恢复时序等。

第三，现场布置和资源调配。根据实际施工情况划定施工便道、材料堆放区等，不能占用河道行洪断面；结合生态要求配备相应的施工设备，包括：低噪声挖掘机、电动夯土机等，减少设备对周边环境带来的扰动；结合施工进度设定材料进场计划，提前对植被种苗、生态袋等材料做好保湿、防晒处理，确保材料性能达标。^[2]

（二）三类生态护岸核心施工技术

第一，植物型生态护岸施工技术。植物型生态护岸主要包含植被固坡、生态修复这两部分，在施工时需考虑到坡体稳定性和植物生长适应性需求。首先，要做好岸坡清理工作。利用除草机等小型机械清除坡体表面的杂草、枯枝落叶、腐蚀质层等，移除坡体表面的尖锐石块，防止伤害植被根系。清理时针对松散土体可采取人工夯实的方式，确保坡体表面平整坚实；其次，要改良土壤、种植植物。施工前对土壤进行取样检测，结合检测结果采取针对性改良措施。垂柳、旱柳等乔木植物可采取扦插、移栽法。最后，要做好后期养护工作。养护周期至少为6个月，第1、2个月每周浇水一至两次，及时清理杂草。第3、4个月每周浇水一次并施入速效肥，还要定期做好生物防治工作。第5、6个月逐渐减少浇水频率，提升植被耐旱能力。针对生长不良的植株要及时补株，确保养护期内的植被成活率达标。

第二，土工材料复合型生态护岸施工技术。土工材料复合型生态护岸主要包含土工材料加固和植被生态修复这两部分。在施工时需考虑到材料铺设质量、结构连接稳定性需求。首先，要进行坡体和基底开挖工作。可进行自上而下的分层开挖和支护操作，每层开挖深度控制在1.5m以内，利用挖掘机作业。开挖过程中时刻监测位移防止出现裂缝、滑坡的问题，并利用土工布覆盖或打上木桩临时支护。当基底开挖至设计标高后要利用蛙式打夯机进行分层夯实，将压实度控制在93%以上。如果是软土地基，可提前铺设30–50cm厚的砂砾垫层做好压实处理，边缘还要开挖排水沟及时排除地下水；其次，要铺设土工布、堆叠生态袋。要将外观无破损、无老化的土工布自上而下的顺坡铺设，确保土工布和坡体紧密结合。相邻土工布的搭切宽度必须在20cm以上，并进行双缝缝合或热熔粘结等，这样才能够保证土工布的强度达标。之后采取锚固固定，利用回填土壤压实。在堆叠生态袋时可在生态袋内填充土壤、有机肥和保水剂，确保填充量在90%以上。将密封好的生态袋自下而上的分层错缝搭叠，错缝距离为袋长的1/3左右，将袋子的四角利用专用连接扣固定；再次，要进行土工格栅锚固操作。选用双向塑料土工格栅与生态袋表面紧密贴合铺设。格栅呈现梅花型布置，格栅与锚杆连接处利用夹具固定。坡顶格栅延伸1.5m左右后嵌入锚固沟压；最后，要种植植被、设置排水系统。可在生态袋表面预留的种植孔中填充营养土，种植草本植物种子。还可以在生态袋每层的缝隙中喷播混合植被种子，提高植被覆盖率。种植结束后需在表面覆盖浸湿的无纺布，这样能够提高植被成活率。^[3]

第三，生态混凝土型生态护岸施工技术。生态混凝土型生态护岸主要包括模板、钢筋、混凝土浇筑、植物种植等部分。在施工时需考虑到结构强度、透水和透气性等需求。首先，要合理选择模板。一般以竹胶板、钢模板为主，刚度必须在挠度L/500以上（L为模板跨度）。安装前需涂刷脱模剂，接缝处利用海绵条密封避免漏浆，并按照设计确定坡度；其次，要做好钢筋绑扎操作。要按照设计要求选择HRB400级钢筋绑扎牢固，确保保护层厚度达标。验收合格后就可开展下一环节的浇筑工作；再次，要做好混凝土浇筑工作。要根据强度和孔隙率要求设计生态混凝土

土配合比。并采取泵送、人工浇筑的方式完成自下而上的浇筑作业，每层浇筑高度不能超过50cm。浇筑工作结束后还要进行为期14天的保湿养护工作；最后，要进行植物种植操作。当混凝土强度达到设计强度的70%左右时，就可以进行直生孔种植、喷播种植等。种植结束后要覆盖无纺布保湿，这样能够提升种子发芽率。

三、河道生态护岸工程效果评价体系

（一）构建评价指标体系

根据生态护岸工程的多功能性特点，本文可从水文调节、水土保持、生物多样性、景观提升四个维度构建评价指标体系，给出12项具体指标，并利用层次分析法明确各指标权重，评价标准分优秀/良好/一般三级，具体如下：

第一，水文调节：透水性（0.15， $\geq 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ / $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ / $< 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ）、水位调节能力（0.1，洪水位削减率 $\geq 10\%$ / $5\% \sim 10\%$ / $< 5\%$ ）。

第二，水土保持：土壤侵蚀模数（0.2， $< 500 \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ / $500 \sim 1000 \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ / $> 1000 \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ）、岸坡稳定性（0.15，无滑移坍塌/轻微裂缝/明显变形）。

第三，生物多样性：植物覆盖度（0.1， $\geq 85\%$ / $70\% \sim 85\%$ / $< 70\%$ ）、水生生物种类数（0.08，较施工前增 $\geq 30\%$ / $10\% \sim 30\%$ / $< 10\%$ ）、鸟类栖息数量（0.05，较施工前增 $\geq 20\%$ / $10\% \sim 20\%$ / $< 10\%$ ）。

第四，景观提升：景观协调性（0.07，高度协调/基本协调/不协调）、视觉舒适度（0.05，效果佳/较好/一般）、公众满意度（0.05， ≥ 90 分 / $80 \sim 90$ 分 / < 80 分）。

（二）评价方法与流程

生态护岸工程效果评价过程中主要采取实地监测、综合打分的方式，评价流程为三部分。

第一，采集监测数据。工程结束后要进行1-2年的数据采集，通过现场取样、仪器监测和问卷调查的方式获取指标数据。

例如：土壤侵蚀模数采取侵蚀针法监测。透水性采取双环入渗仪测定等。

第二，指标标准化处理。将实测数据按照评价标准转换为评价得分，（优秀=100分，良好=80分，一般=60分）。针对定量指标应用线性差值法计算具体分数。定性指标则采取专家打分法。

第三，综合评价得分。基于各指标权重和标准化得分，应用加权求和法算出综合评价分数。 ≥ 90 分为优秀，80-89分为良好，60-79分为合格， < 60 分为不合格。

（三）典型工程案例评价

以合肥某河道生态修复工程为例，工程总长2.5km，选取了土工材料复合型生态护岸，施工周期为2022年3月-2022年10月。在2023年10月进行效果评价：水文调节（透水性 $3.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、水位调节能力12.50%）、水土保持（土壤侵蚀模数320t/（ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ）、岸坡无滑移坍塌）、生物多样性（植物覆盖度92%，水生生物种类、鸟类栖息数量分别较施工前增加45%、28%）、公众满意度（92分）均获100分；景观协调性95分、视觉舒适度90分，综合得分98.15分（优秀等级）。该案例证明只要合理选择护岸类型、规范施工工艺就能提升工程生态效益。验证了本文建立评价体系的科学性和实用性。

四、结语

河道生态护岸工程施工是修复河道生态的重要举措，其施工质量及生态效果会直接影响到河道安全及流域生态系统的健康稳定性。本文分析了植物型、土工材料复合型等生态护岸的技术特征，从施工准备和核心施工环节入手分析了其技术要点，并建立了水文调节、水土保持等为一体的评价体系，可以客观反映生态护岸工程的综合效益，为工程效果评估提供参考。希望以此推动河道生态修复工程朝着精准化与长效化的方向发展。

参考文献

- [1] 陈旭. 预制混凝土生态框在河道治理工程中的应用研究 [J]. 内蒙古水利, 2025, (06): 18-19.
- [2] 王松. 河道生态治理工程绩效评价研究 [J]. 水土保持应用技术, 2021(04).
- [3] 朱珍宏. 生态混凝土在河道护岸工程中的抗冲刷与生物相容性试验 [J]. 工程与建设, 2025, 39(04): 928-930.

基于梯度提升机的干旱趋势提取与 ARIMA 耦合预测模型研究

杨扬¹, 王振霖¹, 刘涛²

1. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007

2. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114

DOI:10.61369/WCEST.2025090006

摘要 : 为实现对大范围旱情的风险精准管控, 对区域尺度气象干旱指数 (SPEI) 进行精准预测至关重要, 本研究构建了一种梯度提升机 (GBM) 与 ARIMA 模型相结合的混合预测框架。该框架通过 GBM 提取 SPEI 序列的内在长期趋势以构建增强型数据集, 利用 ARIMA 模型捕捉序列围绕该趋势的残差波动。以湖南省为案例进行验证模型基于 2012 年及之前的数据进行训练, 并对 2013–2020 年的逐月 SPEI 进行预测。结果表明: 模型综合预测性能优异, 测试集上的均方根误差 (RMSE) 为 0.47, 平均绝对误差 (MAE) 为 0.37, 纳什效率系数 (NSE) 达到 0.75, 趋势一致性指标高达 0.88, 能稳定再现湖南省干旱的宏观时空分布格局。

关键词 : ARIMA 模型; 梯度提升机; SPEI

Research on a Coupled Prediction Model Integrating Gradient Boosting Machine for Drought Trend Extraction with ARIMA

Yang Yang¹, Wang Zhenlin¹, Liu Tao²

1. Hunan Provincial Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha, Hunan 410007

2. College of Water Resources and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114

Abstract : To achieve precise risk management and control over large-scale drought conditions, it is crucial to accurately predict the regional-scale meteorological drought index (SPEI). This study constructs a hybrid prediction framework that combines a Gradient Boosting Machine (GBM) with an ARIMA model. The framework utilizes GBM to extract the inherent long-term trends in the SPEI series to construct an enhanced dataset, and employs the ARIMA model to capture the residual fluctuations of the series around this trend. Using Hunan Province as a case study, the model was trained on data from 2012 and earlier, and then predicted the monthly SPEI from 2013 to 2020. The results demonstrate that the model exhibits excellent comprehensive predictive performance, with a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.47, a Mean Absolute Error (MAE) of 0.37, a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient reaching 0.75, and a trend consistency index as high as 0.88 on the test set. It can stably reproduce the macroscopic spatiotemporal distribution pattern of drought in Hunan Province.

Keywords : ARIMA model; Gradient Boosting Machine; SPEI

引言

干旱是指长期无雨或少雨, 导致土壤水分亏缺、作物水分平衡破坏, 进而造成农业减产的一种重要农业气象灾害^[1]。随着全球气候变暖与人类经济社会活动的加剧, 水资源短缺问题日益突出, 干旱范围扩大、程度加深, 干旱化趋势已成为全球关注的焦点^[2]。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出, 受自然强迫和人类活动共同影响, 农业与生态干旱呈加剧趋势, 严重影响区域水资源安全、生态安全和社会经济发展^[3]。中国作为受干旱影响较为严重的国家之一, 近年来极端干旱事件频发, 如 2022 年长江流域特大干旱, 进一步凸显了干旱监测与预测的紧迫性^[4]。

在此背景下, 科学准确地评估和预测干旱成为应对干旱灾害的关键。干旱指数是干旱监测与评估的重要工具, 其中标准化降水蒸散指数由于综合考虑了降水和潜在蒸散发的共同作用, 能够更全面地反映水分供需平衡状况, 尤其适用于全球变暖背景下的干旱识别^[5]。近年来, SPEI 已被广泛应用于中国多个区域的干旱时空特征分析中^[6,7], 显示出其在湿润与干旱半干旱地区均具备良好的适用性^[6]。因此, 本文选取 SPEI 作为干旱监测与预测的核心指标, 旨在为进一步提升干旱预测能力、制定科学抗旱策略提供理论依据。

基金项目: 湖南省水利科技项目 (编号: XSKJ2024064-27)。

一、数据和方法

(一) 数据

SPEI数据来源于 CHM_Drought: A New High-Resolution Multi-Drought Indices Dataset for Mainland China

降雨数据来源于彭守璋. (2019). 中国 1km 分辨率逐月平均气温数据集 (1901–2024). 国家青藏高原科学数据中心.

(二) 模型

ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average Model) 模型全称为自回归差分移动平均模型。ARIMA 模型就是试图通过数据的自相关性和差分的方式, 提取出隐藏在数据背后的时间序列模式, 然后用这些模式来预测未来的数据。ARIMA 模型主要由三部分构成, 分别为自回归模型 (AR)、差分过程 (I) 和移动平均模型 (MA)。其中: AR 模型, 即自回归模型, 其优势是对于具有较长历史趋势的数据, AR 模型可以捕获这些趋势, 考虑了过去若干时期的观测值对当前值的影响。I 部分用于使非平稳时间序列达到平稳, 通过一阶或者二阶等差分处理, 消除了时间序列中的趋势和季节性因素。MA 模型, 即移动平均模型, 可以更好地处理那些有临时、突发的变化或者噪声较大的时间序列数据, 但是无法捕捉较长的历史数据, 考虑了过去的预测误差对当前值的影响。

结合这三部分, ARIMA 模型既可以捕捉到数据的趋势变化, 又可以处理那些有临时、突发的变化或者噪声较大的数据。

$$Y_t = c + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \xi_t$$

$$Y_t = \mu + \dot{\varphi}_1 + \theta_1 \dot{\varphi}_{t-1} + \theta_2 \dot{\varphi}_{t-2} + \dots + \theta_q \dot{\varphi}_{t-q}$$

$$Y_t = c + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \theta_1 \dot{\varphi}_{t-1} + \theta_2 \dot{\varphi}_{t-2} + \dots + \theta_q \dot{\varphi}_{t-q} + \dot{\varphi}_t$$

GBM (Gradient Boosting Machine) 算法是 Boosting(提升) 算法的一种。通过串行地生成多个弱学习器, 每个弱学习器的目标是拟合先前累加模型的损失函数的负梯度, 使加上该弱学习器后的累积模型损失往负梯度的方向减少。且它用不同的权重将基学习器进行线性组合, 使表现优秀的学习器得到重用。最常用的基学习器为树模型。

Gradient Boosting 还可以将其理解为函数空间上的梯度下降。我们比较熟悉的梯度下降通常是值在参数空间上的梯度下降。

而在 Gradient Boosting 中, 每轮迭代生成一个弱学习器, 这个弱学习器拟合损失函数关于之前累积模型的梯度, 然后将这个弱学习器加入累积模型中, 逐渐降低累积模型的损失。即参数空间的梯度下降利用梯度信息调整参数, 从而降低损失, 而函数空间的梯度下降利用梯度, 拟合一个新的函数, 从而降低损失。

二、分析方法

基于时空分解与特征增强的混合预测框架。构建湖南省大区域尺度上气象干旱指数 (SPEI) 的精准预测。使用梯度提升机 (Gradient Boosting Machine, GBM) 作为时序信号的解构与预测工具。GBM 模型凭借其强大的非线性拟合能力, 能够有效识别并学习历史数据中隐含的长期演变规律及复杂的季节性波动。

以2012年为时间节点, 将每个栅格2012年及之前的历史 SPEI 序列作为训练样本, 构建 GBM 预测模型。利用训练完成的模型外推2012年后的趋势成分, 根据历史信息预测未来趋势。通过模型获取的非线性长期趋势信号。作为额外变量与对应栅格的原始 SPEI 观测值在时序上进行融合, 生成一个包含原始观测值与趋势辅助变量的增强型数据集。

将每个栅格的增强型数据集输入时序预测模型进行最终学习与预测。鉴于研究涉及大规模栅格运算, 并确保预测结果在空间上的连续性与可比性, 本研究采用了一种“结构约束与动态检验相结合”的 ARIMA 模型参数配置策略。由于将全省区域划分成若干栅格, 为保证模型结构在空间上保持一定的连续性, 设置模型的自回归阶数 (p) 与移动平均阶数 (q) 被统一设定为 1。差分阶数 (d) 通过动态检验确定, 确保了每个栅格输入数据的平稳性。

最终, 该 ARIMA 模型在趋势辅助变量的引导下, 专注于学习并预测原始序列围绕该趋势的残差波动。通过“GBM 提供的非线性趋势基线”与“ARIMA 捕捉的线性残差校正”的有机结合, 本框架实现了对各栅格2012年后逐月 SPEI 数据的高鲁棒性预测。

三、结果分析

(一) 模型综合预测精度评估

为全面评估本研究所提出的“分解-优化-集成”混合模型在湖南省 SPEI 预测中的性能, 我们在全域栅格尺度上计算了多项定量评估指标。如图1所示, 模型在测试集 (2013–2020 年) 的整体表现优异。

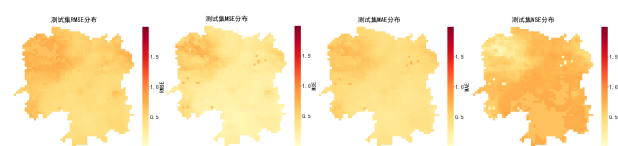


图1 测试集指标分布

(二) 预测结果的时空格局与稳定性分析

模型的预测能力不仅体现在宏观统计指标上, 更需通过其时空预测格局进行验证。空间格局再现能力: 通过对2013年与2017年3月到10月的可视化预测结果的示意图进行分析 (图2–17) 发现, 模型对于湖南省宏观干旱空间分布格局的预测与实际情况高度一致。例如, 对于湘北、湘中地区季节性干旱的空间范围与强度, 模型均能实现准确刻画。这证明模型成功学习了区域干旱的空间分异规律, 具备稳定的空间预测能力。

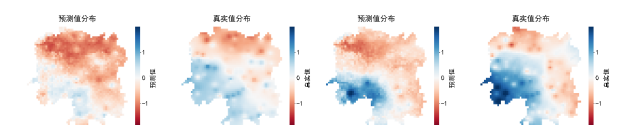


图2 2013年3月

图3 2013年4月

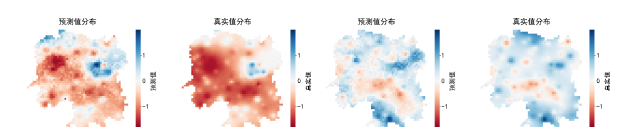


图4 2013年5月

图5 2013年6月

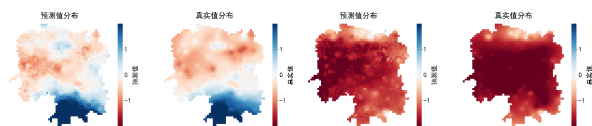


图6 2013年7月

图7 2013年8月

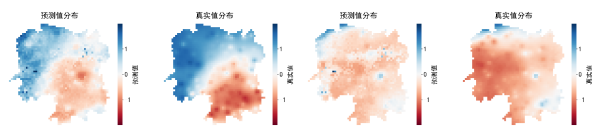


图16 2017年9月

图17 2017年10月

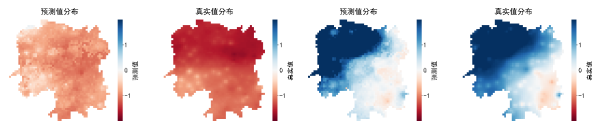


图8 2013年9月

图9 2013年10月

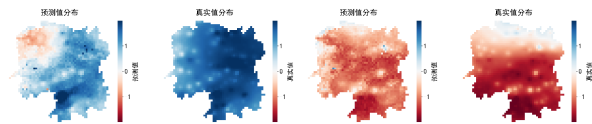


图10 2017年3月

图11 2017年4月

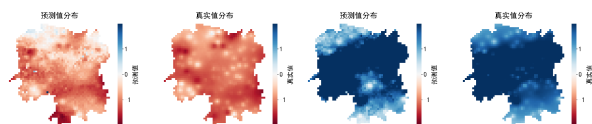


图12 2017年5月

图13 2017年6月

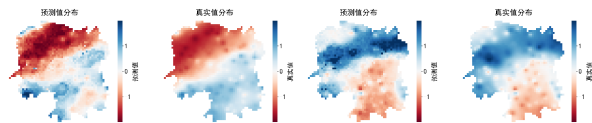


图14 2017年7月

图15 2017年8月

(三) 结论：模型有效性与应用价值

本研究构建的混合预测框架，通过梯度提升机（GBM）对非线性趋势的精准提取，与 ARIMA 模型结合，成功实现了对湖南省 2013 - 2020 年 SPEI 的高精度时空预测。统计有效性方面，模型在测试集上表现出优异的综合性能：均方根误差（RMSE）为 0.47，平均绝对误差（MAE）为 0.37，显示出预测值与实测值之间的偏差整体处于较低水平，模型输出稳健可靠；纳什效率系数（NSE）达到约 0.75，说明模型能够解释 SPEI 序列中大部分变异特征，预测效果显著优于均值预测；趋势一致性指标高达 0.88，进一步表明模型不仅在数值上拟合良好，更能准确捕捉各栅格的长期干湿演变规律。

模型成功再现了湖南省干旱的宏观空间分布格局，其误差在空间上的分布与地形、下垫面等地理气候特征相符，反映出模型对干旱驱动物理过程的合理刻画，增强了结果的可解释性与可信度。

参考文献

- [1] 孙嘉敏, 王爱慧. 近 120 年中国干旱年际变化特征及主要的影响因子 [J]. 气候与环境研究, 2024, 29(6): 681-694.
- [2] 高晴, 孙金伟, 赵晓雪, 等. 基于 SPEI 的中国干旱多尺度时空特征分析 [J]. 节水灌溉, 2024(6): 111-120, 127.
- [3] 高启慧, 秦圆圆, 梁媚聪, 等. IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议 [J]. 环境保护, 2023, 51(Z2): 82-84.
- [4] 李忆平, 张金玉, 岳平, 等. 2022 年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究 [J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 733-747.
- [5] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. 2010.
- [6] 谢坤, 丁明军, 张华敏, 等. 基于 SPEI 指数的鄱阳湖流域近 60 a 干旱时空变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 2015-2027.
- [7] 王文玉, 李涛, 高泽海, 等. 西北干旱地区气象干旱风险预测模型研究 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2025, 23(1): 117-130.

水利工程施工质量通病防治对策分析

赵一麟

山东中泽工程集团有限公司, 山东 菏泽 274000

DOI:10.61369/WCEST.2025090007

摘 要： 为了提高水利工程施工的质量，需加强对水利工程施工质量通病的防治。基于此，本文针对水利工程施工中的质量通病进行了全面梳理，涉及的维度主要包括工程设计方案的制定、施工材料的选用以及混凝土工程施工，并根据这些质量通病，提出了具体的防治对策，旨在保障水利工程的施工质量与功能的发挥。

关 键 词： 水利工程；施工质量；通病；防治

Countermeasure Analysis on Common Quality Fault of Water Conservancy Construction

Zhao Yilin

Shandong Zhongze Engineering Group Co., Ltd. Heze , Shandong 274000

Abstract： In order to improve the quality of water conservancy project construction, it is necessary to strengthen the prevention and control of common quality defects of water conservancy project construction. Based on this, this paper comprehensively combs the common quality faults in the construction of water conservancy projects, including the formulation of engineering design scheme, the selection of construction materials and the construction of concrete projects.

Keywords： water conservancy project; construction quality; common fault; prevention and control

引言

水利工程在调配水资源、农业灌溉以及防洪减灾等方面发挥着十分关键的作用，其施工质量直接关系到水利工程功能的发挥。在具体施工的过程中，设计方案的制定、施工材料的选用、施工管理工作的开展均是导致工程施工出现质量通病的主要因素。为此，需加强对工程设计方案的优化、严格地把控施工材料的质量、加强施工管理，同时做好混凝土维护与监测工作，以此为水利工程施工质量的控制提供重要保障。

一、水利工程施工质量通病

（一）设计环节存在的质量通病隐患

在水利工程设计环节，若设计方案的制定不够科学，或者缺乏针对性，均容易导致后续施工中出现质量问题。一些水利工程在设计前，未深入到施工现场进行全方位的地质勘察，通常都是根据常规资料进行制定，设计人员对现场地质条件、岩土特性、地下水分布等信息缺乏充分的掌握，导致坝型的设计、坝基的处理等不匹配现场地质条件，严重影响水利工程结构的稳定性。并且，部分设计人员在制定设计方案时，未全面分析水利工程的运行环境、功能发挥以及未来发展对水利工程功能需求的趋势。例如，在设计灌溉渠时，未精准地计算灌溉区域的面积、评估农作物生长的需水量以及现场的地形地貌，致使水流缺乏均匀性、水头损失较大，灌溉效率较低。另外，部分工程在制定设计方案时，未通过比对多个设计方案，从中筛选出经济性、技术可行性、施工便捷性均较高，且对周边环境影响较小的设计方案，设

计方案不够优化，后续施工难度与质量控制难度均较大。

（二）施工材料的质量问题

施工材料存在质量问题是引发水利工程质量通病的一个主要原因。例如，在采购水利工程的混凝土施工材料，如果未结合水利工程的特征以及施工环境选择类型、强度等级适宜的水泥，将严重影响混凝土的耐久性与强度。对于体积较大的混凝土施工，未选择使用低热型水泥，致使水泥发生水化反应时释放大量的热量，内外部温差较大，表面出现裂缝；并且在选择水泥材料时，未分析水泥的碱含量，一旦碱含量超出要求标准，与骨料发生反应将导致混凝土结构被破坏。骨料质量不符合要求，级配不合理、质地疏松、含泥量及针片状颗粒含量超标。在选择钢材时，未全面分析水利工程的受力与运行环境，导致选用钢材的强度、韧性与耐腐蚀性与设计要求不符，并且对于一些重点位置的钢材未进行防腐蚀处理，导致其在使用中很容易发生锈蚀，影响其使用寿命。除此之外，一些施工企业在选用水利工程防渗材料时，为了减少材料成本支出，采购的防水卷材抗渗性、厚度不达

标,或者选用的土工膜耐久性、强度较差,这些质量不达标防渗材料的使用,很容易发生老化、破损,对工程的防渗性造成较大影响。

（三）混凝土工程施工质量通病

混凝土工程是水利工程施工中非常重要的一个环节,但是,其中也存在着不可小觑的质量通病。其中比较常见的为蜂窝状窟窿,导致该质量通病的主要原因在于在配置混凝土时,原材料(如水泥、石子、砂等)的配比缺乏合理性,或者搅拌不够均匀,或者混凝土振捣不够密实,导致局部混凝土的石子较多、砂浆较少、结构酥松,石子间存在空隙,其将对混凝土的抗渗性与强度造成较大影响。

麻面也是混凝土工程施工中比较常见的问题,在局部混凝土表面比较粗糙,出现麻点、小凹坑等,但不存在钢筋外露的情况。导致该通病的主要原因为模板表面存在杂物或者较为粗糙。对于钢模板,若未涂刷钢模板隔离剂,或者涂刷不够均匀,在拆除模板时,均可能导致混凝土表面被粘坏;对于木模板,如果未将其彻底润湿,很可能会吸去混凝土表面的水分,致使其因为失水出现麻面;另外,在振捣混凝土时,若振捣不够密实,未完全排除气泡,其在模板表面停留,拆除模板后也会导致混凝土表面出现麻点,其除了会对混凝土外观质量造成影响以外,还会影响混凝土的耐久性,致使后续维护成本增加。

二、防治水利工程施工质量通病的有效对策

（一）优化水利工程设计

在建设水利工程的整个过程中,设计环节是保证水利工程施工质量的首要环节,所以在防治水利工程施工质量通病时,需加强对水利工程设计方案的优化。设计前,需深入到施工现场进行地质勘察,全面掌握施工现场的地质条件,以此为设计方案的制定奠定可靠的数据基础。在具体勘察的过程中,可通过地质钻探技术的运用,钻探数十米的深度,了解各层岩土的渗透性、抗剪强度以及抗压强度等。还可利用地球物理勘探技术,了解地质构造(如断层位置、褶皱走向、地下水分布等)。通过全面的地质勘察,促使设计人员可结合现场地质科学地设计水利工程的坝型、坝基等。

在设计水利工程时,还需对工程进行合理规划,以此在保证工程施工质量的同时,充分发挥其功能。规划时,需要全面分析水利工程的功能需求、运行环境条件和未来趋势。例如,在进行灌溉渠道规划的过程中,需结合灌溉区域种植的农作物、地形地貌和需水量等,科学地规划渠道的断面、坡度与走向。并通过水力计算,保证建设的渠道在灌溉高峰期也有充足的水量供应,同时确保水流的均匀性与平稳性,降低水头损失,实现高效灌溉。

除此之外,在设计水利工程施工方案时,需通过对多个设计方案的比对与优化,筛选出最为优质的设计方案。这就要求设计人员需设计多个切实可行的施工方案,在对设计方案进行评估、对比时,需从方案的经济性、技术可行性、施工便捷性和对周围环境的影响等维度做出评估与对比^[1]。例如,在进行水电站工程

设计时,设计人员设计了土石坝、混凝土重力坝以及拱坝三个方案,通过对比、分析,土石坝施工较为简便,无需投入较多资金,但是对防渗性有着较高的要求;混凝土重力坝虽然技术发展已经比较成熟,并且工程结构较为简单,但是施工量较大,需要投入较多的资源;拱坝可根据现场地形建设,工程量相对较小,但是对现场地质有着较高要求,且施工存在较大困难。经综合比较与分析,从施工技术、经济性以及对周边环境的影响等维度,最终选择了混凝土重力坝设计方案,同时对设计方案做出了进一步优化,以此为水利工程的施工质量提供重要支撑。

（二）严格把控施工材料的质量

施工材料的质量直接影响着水利工程施工的质量、安全性与耐久性。为此,在防治水利工程施工质量通病时,需严格把控施工材料的质量。对于混凝土工程,水泥的选择十分关键^[2]。需结合水利工程的施工环境与工程特征,选择适宜类型与强度的水泥。对于体积较大的混凝土施工,若想减少因内外部温度差而出现的裂缝,可优选低热水泥,注意把控水泥中碱的含量,防止碱和骨料发生反应,从而破坏混凝土结构。在选择骨料时,需注意把控骨料的级配、质地、含泥量、针片状颗粒含量等,以此保证混凝土的耐久性与强度。在选择钢材时,需结合水利工程的实际运行环境与受力情况,选择具有良好耐腐蚀性、韧性与强度的钢材。对于水利工程中泵站、水闸等部位,除了要选用具有良好耐腐蚀性的钢材以外,还需对钢材进行防腐处理(如热镀锌、涂刷防腐漆等),以此保证钢材的使用寿命。

在施工材料进场前,需严格地检测材料的质量。对于水泥,检测的指标主要有强度、凝结时间以及安定性等;对于骨料,检测的指标主要有含泥量、颗粒级配等;对于钢材,检测的指标主要有化学成分、力学性能等。同时,加强对施工材料的抽检,为了避免质量不达标的施工材料混入施工现场,需适当地增加抽检的样本量与频率^[3]。对于关键施工材料(如水泥、钢材等),需100%进行检验,以此保证各批材料质量均符合要求标准。

（三）加强施工管理

加强施工管理是保证水利工程施工质量的关键。在具体实施的过程中,首先,需根据水利工程的实际情况与特点,制定切实可行的施工方案,确定施工流程、施工技术、各个环节的施工进度和施工质量等。并构建完善的施工质量追溯机制,一旦水利工程的某一位置出现质量问题,可快速地追溯到具体的施工时间以及主要责任人,以便快速的分析、处理质量问题,同时强化整体施工人员的责任意识与质量意识。

其次,定期的组织施工人员进行专业培训。施工人员的专业技术水平与实操能力直接关系着水利工程的施工质量^[4]。在具体实施培训的过程中,培训内容需涵盖施工技术、施工安全知识与技能、操作规程、施工质量标准等。并定期邀请水利工程施工技术骨干、行业专家等进行理论知识讲解、亲身示范以及模拟操作训练等方式,促使施工人员可娴熟的掌握各施工技术与操作规程。专业培训除了可提高施工人员的专业技术水平以外,还可规范混凝土浇筑施工,确保施工人员可严格地按操作规程施工,以此确保混凝土浇筑施工的质量^[5]。

最后，全方位地监督水利工程施工，构建健全的施工监督体系，明确提出质量监督人员需定期检查施工现场，对施工中潜藏的可能影响施工质量的问题及时加以纠正。在进行重要环节、关键部位施工时，质量监督人员需旁站监督，保障该环节、部位的施工与质量要求标准、设计需求相符。同时密切监测、记录施工中形成的各项数据（主要包括混凝土沉降量、坍落度、抗压性、强度等），通过对比、分析，及时发现异常，并及时作出处理，从而有效地控制水利工程施工质量^[6]。

（四）加强对养护和监测体系的完善

加强对混凝土的养护，可提高混凝土的耐久性与强度。在浇筑完混凝土后，需及时加以养护，利用适宜的湿度与温度，使水泥充分发生水化反应，避免混凝土强度不达标、干裂等^[7]。特别是体积较大的混凝土更加需要注意做好养护。因为体积较大的混凝土在发生水化反应时将释放较多的热量，其内部温度上升，如果不能有效的控制混凝土的温度，内外温差较大，很容易引发裂缝。为此，在进行水利工程中体积较大的混凝土施工时，可通过冷却水管的预先埋设，降低混凝土内部的温度，同时借助保温被的覆盖，对保持混凝土表面的温度，以此将内外温差控制在25℃以内。在养护的过程中，还需定期监测混凝土的温度，结合监测结果对冷却水管内的水流量以及保温策略的实施加以调整，以此为混凝土养护创造适宜的湿度与温度，避免温度裂缝的出

现，提高水利工程混凝土的质量⁸。

在完善水利工程施工质量监测体系时，需实时性地对水利工程的运行情况加以监测，内容主要有水利工程坝体是否出现形变、应力应变、渗流；水闸闸墩的位置移动情况、闸门是否发生形变；渠道是否存在渗漏、边坡是否足够稳定等^[9]。在具体监测的过程中，可借助各种高精度监测设备的安装（如应力应变计、位移传感器以及渗压计等），实时监测大坝的垂直位移、水平位移、内部应力以及渗流量等。并全面分析、处理监测数据，以便及时发现水利工程大坝的异常变化，从而及时做出准确的处理，保证大坝运行的安全性。除此之外，还需定期全方位地检查水利工程，检查内容主要有：外观、结构、设备运行等，确保其中潜藏的安全风险以及质量问题可被及时发现与处理，保障水利工程的寿命与运行的稳定性^[10]。

三、结束语

综上所述，水利工程施工质量通病的防治是一项系统化的工作，在具体实施的过程中，需针对设计、材料、施工、养护等环节加强质量管控，最大限度的减少质量隐患的出现，从而为水利工程投入使用后的安全、稳定运行提供重要支撑。

参考文献

-
- [1] 胡洋. 水利工程施工质量控制解析 [J]. 模型世界, 2022(9): 109-111.
- [2] 孙会芝. 小型水利工程施工质量管理研究 [J]. 中国科技纵横, 2022(13): 109-111.
- [3] 闫兆波. 小型水利工程施工质量管理研究 [J]. 建筑与装饰, 2022(16): 106-108.
- [4] 宋健. 小型水利工程施工质量管理研究 [J]. 工程建设与设计, 2021(22): 208-210.
- [5] 罗龙, 宋恩, 刘英明. 简析水利工程施工质量评定管理 [J]. 水利技术监督, 2023(6): 4-6, 13.
- [6] 芮守香. 水利工程施工质量管理策略探究 [J]. 水上安全, 2023(6): 187-189.
- [7] 伍仪保. 水利工程施工质量控制及管理措施 [J]. 云南水力发电, 2022, 38(8): 275-277.
- [8] 李平福, 胡松涛, 章李乐, 等. 水利工程施工质量监理专项检测探讨 [J]. 江西水利科技, 2022, 48(6): 457-461.
- [9] 吴娟. 水利工程施工质量安全影响因素分析 [J]. 中国科技投资, 2023(24): 82-84.
- [10] 陈敏义. 水利工程施工质量控制问题及应对措施分析 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(1): 156-158.

电力营销大数据在客户信用风险评估中的应用

成先平¹, 朱风华², 周晨宇¹

1. 荆州三新供电服务有限公司, 湖北 荆州 434400

2. 国网荆州供电公司城区供电中心, 湖北 荆州 434400

DOI:10.61369/WCEST.2025090008

摘 要 : 在电力市场化改革持续深化的背景下, 客户信用风险评估成为电力企业营销管理的核心环节, 直接影响企业资金回笼效率与经营稳定性。传统信用风险评估方法因依赖单一财务指标、数据维度狭窄等缺陷, 难以适应复杂多变的电力消费市场。本文基于电力营销大数据的核心特征, 从数据采集与预处理、评估模型构建、风险管控应用三个维度, 深入剖析大数据技术在客户信用风险评估中的应用逻辑。通过对比传统模型与大数据驱动模型的差异, 重点探讨随机森林、神经网络等算法在电力场景的适配性, 并针对当前应用中存在的数据质量、隐私保护及模型适应性问题, 提出针对性优化策略, 为电力企业提升信用风险评估精准度、实现精细化管控提供理论与实践参考。

关 键 词 : 电力营销大数据; 客户信用风险评估; 数据预处理; 风险管控; 评估模型

Application of Power Marketing Big Data in Customer Credit Risk Assessment

Cheng Xianping¹, Zhu Fenghua², Zhou Chenyu¹

1. Jingzhou Sanxin Power Supply Service Co. Ltd., Jingzhou, Hubei 434400

2. State Grid Jingzhou Power Company Urban Power Supply Center, Jingzhou, Hubei 434400

Abstract : Against the backdrop of the continuous deepening of the power market reform, customer credit assessment has become the core link of power marketing management, directly affecting the efficiency of corporate capital recovery and business stability. Traditional credit risk assessment methods are difficult to adapt to the complex and power consumption market due to their reliance on single financial indicators and narrow data dimensions. This paper deeply analyzes the application logic of big data technology in customer credit risk assessment based on core characteristics of power marketing big data, from the dimensions of data collection and preprocessing, evaluation model construction, and risk control application. By comparing the differences between traditional models and big-driven models, this paper focuses on the adaptability of random forest, neural networks, and other algorithms in the power scenario, and proposes targeted optimization strategies for the current application problems as data quality, privacy protection, and model adaptability, providing theoretical and practical references for power enterprises to improve the accuracy of credit risk assessment and achieve refined control.

Keywords : power marketing big data; customer credit risk assessment; data preprocessing; risk control; evaluation model

引言

电力作为基础能源产业, 其经营稳定性与社会经济发展紧密相关。随着电力市场从垄断向市场化转型, 客户群体呈现多元化特征, 工业、商业、居民等不同类型客户的用电行为与信用状况差异显著, 拖欠电费、恶意欠费等信用风险问题日益凸显, 给电力企业带来了不小的资金周转压力。传统客户信用风险评估主要依赖客户财务报表、历史缴费记录等静态数据, 评估维度单一且滞后性明显, 难以全面捕捉客户用电行为中的潜在风险点。而电力营销大数据涵盖客户用电负荷、缴费周期、用电习惯、客户基本信息及外部关联数据等多维度信息, 其海量性、实时性、多样性特征为精准评估客户信用风险提供了可能。将电力营销大数据应用于客户信用风险评估, 不仅能突破传统评估方法的局限, 更能为电力企业制定差异化服务与风险管控策略提供数据支撑, 对提升企业经营效益、保障电力市场有序运行具有重要意义。基于此, 本文聚焦电力营销大数据在客户信用风险评估中的应用展开深入研究。

一、电力营销大数据的特征及信用风险评估价值

（一）电力营销大数据的核心特征

电力营销大数据是电力企业在营销服务全流程中产生的各类数据集合，相较于传统数据，其核心特征体现在“4V”维度的深度延伸。一是海量性（Volume），电力企业服务范围覆盖各类客户，每日产生的用电负荷数据、缴费记录、业务办理数据等以TB级甚至PB级增长，例如一座中型城市电力企业日均处理的居民用电数据就可达数百万条，为风险评估提供了充足的数据样本。二是多样性（Variety），数据类型涵盖结构化数据与非结构化数据，结构化数据包括客户身份证信息、缴费金额、用电量等可直接统计的数据，非结构化数据则包含客户投诉录音、业务办理影像资料、用电行为轨迹等，多类型数据能全面刻画客户信用画像。三是实时性（Velocity），依托智能电表、用电信息采集系统等设备，电力营销数据可实现实时采集与传输，例如智能电表每15分钟就能上传一次用电数据，使企业能实时监测客户用电行为变化，及时捕捉风险信号。四是价值性（Value），电力营销大数据虽看似零散，但通过挖掘可提取客户用电规律、缴费意愿、消费能力等关键信息，例如通过分析工业客户的用电负荷波动，能预判其生产经营状况，进而评估其信用风险。

（二）电力营销大数据在信用风险评估中的核心价值

电力营销大数据的特征决定了其在客户信用风险评估中的独特价值，主要体现在评估维度拓展、评估时效性提升、评估精准度优化三个方面。在评估维度拓展上，传统评估仅关注客户历史缴费记录与简单财务数据，而电力营销大数据将评估维度延伸至用电行为、业务互动、外部关联等多个层面。例如，通过分析客户用电负荷的稳定性，可判断工业客户生产经营是否正常；通过客户办理用电增容、减容等业务的频率，能了解其经营规模变化，这些信息均为信用风险评估提供了新的依据。在评估时效性提升上，传统评估依赖年度或季度财务报表，数据更新滞后，而电力营销大数据的实时性使评估从“静态评估”转向“动态评估”。当客户出现用电负荷骤降、缴费延迟天数增加等异常情况时，系统可实时捕捉并触发风险预警，让企业提前采取管控措施。在评估精准度优化上，海量数据样本为评估模型提供了充足的训练数据，通过挖掘数据间的潜在关联，可有效识别传统评估中被忽略的风险点。例如，部分居民客户虽无欠费记录，但存在频繁更换用电地址、夜间用电负荷异常等情况，传统评估难以识别其潜在风险，而通过大数据分析可将此类客户标记为风险关注对象，提升评估的全面性。

二、电力营销大数据在客户信用风险评估中的应用环节

（一）数据采集：构建多维度数据资源池

数据采集是大数据应用的基础，电力企业需构建“内部数据为主、外部数据为辅”的多维度数据资源池，确保数据的全面性与针对性。内部数据采集主要围绕电力营销全流程展开，涵盖用

电信息数据、客户基础数据、营销业务数据三大核心模块。用电信息数据通过智能电表、用电信息采集系统等终端设备采集，包括用电量、用电负荷、用电时段、电压电流等实时数据，这些数据直接反映客户用电行为特征；客户基础数据来源于客户开户登记环节，包括客户姓名、身份证号、经营地址、联系方式、用电类型等静态信息，是区分客户类型、开展差异化评估的基础；营销业务数据涵盖缴费记录、业务办理记录、投诉举报记录等，其中缴费记录中的缴费周期、延迟天数、欠费金额等是传统评估的核心指标，而业务办理与投诉记录可辅助判断客户的合作意愿与履约态度。

（二）数据预处理：提升数据质量与可用性

原始采集的数据存在缺失值、异常值、重复值等问题，若直接用于评估会严重影响模型精度，因此数据预处理是关键环节，主要包括数据清洗、数据整合、数据标准化三个步骤。数据清洗主要是处理数据中的“噪声”，针对缺失值，根据数据类型采用不同方法：对于用电量等连续性数据，采用均值填充法或插值法；对于客户性别、用电类型等分类数据，采用众数填充法或标记为“未知”类别。

针对异常值，通过箱线图、Z-score等统计方法识别，例如某工业客户单日电量远超其历史平均水平，经核实为数据采集错误时，需用历史均值替换，若为实际生产波动则需保留并标记为异常行为。针对重复值，通过数据唯一标识（如客户编号）去重，确保每条数据对应唯一客户。

（三）信用风险评估模型构建：实现精准风险量化

模型构建是大数据应用的核心，需结合电力客户特征选择适配的评估模型，实现从“定性评估”向“定量评估”的转变。传统评估模型如层次分析法、逻辑回归模型因结构简单、可解释性强被广泛应用，但存在依赖主观判断、处理非线性关系能力弱等缺陷。基于电力营销大数据的评估模型需兼顾模型精度与可解释性，可采用“传统模型与机器学习模型结合”的思路，构建两阶段评估模型。第一阶段为特征工程，通过特征提取与筛选优化输入变量。基于预处理后的数据，提取三类特征：一是基础特征，如客户类型、用电规模、注册资本等；二是行为特征，如用电负荷波动系数、月均用电量增长率、缴费延迟频率等；三是关联特征，如征信逾期次数、行业景气指数与用电负荷的相关性等。采用方差分析、互信息法等方法筛选特征，剔除冗余特征与弱相关特征，例如若“客户性别”

与信用风险的互信息值极低，则剔除该特征，提升模型运算效率。第二阶段为模型训练与优化。针对不同客户类型选择适配模型：对于居民客户，因其数据维度相对简单，可采用逻辑回归模型，以缴费延迟天数、用电波动、投诉记录等为核心特征，实现快速评估；对于工业、商业等复杂客户，采用随机森林、神经网络等机器学习模型。随机森林模型可处理非线性数据，通过多棵决策树集成学习降低过拟合风险，能有效挖掘用电负荷与经营状况的潜在关联；神经网络模型具备强大的特征学习能力，可处理高维度数据，适合融合多源数据的复杂评估场景。模型训练过程中，将数据集按7:3的比例划分为训练集与测试集，用训练集训

练模型参数，用测试集验证模型精度，通过交叉验证、网格搜索等方法优化模型参数，例如调整随机森林的决策树数量、神经网络的隐藏层节点数等，确保模型的泛化能力。

（四）模型应用与风险管控：实现风险精准处置

评估模型的输出结果需要转化为具体的风险管控策略，才能真正发挥价值。电力企业可根据模型输出的信用评分，将客户划分为不同风险等级，实施差异化管控。通常将客户划分为 AAA 级（低风险）、AA 级（较低风险）、A 级（中等风险）、B 级（较高风险）、C 级（高风险）五个等级，不同等级对应不同的管控措施。AAA 级客户信用状况优良，可给予全额授信、先用电后缴费、延长缴费周期等优惠政策，增强客户黏性；AA 级与 A 级客户信用状况良好，采用常规管控措施，如按月缴费、定期信用复核；B 级客户存在一定风险，需加强风险预警，采用“预付费 + 定期监测”模式，设置用电额度预警线，当用电量接近额度时及时提醒缴费；C 级客户信用风险高，采取严格管控措施，如全额预付费、缩短缴费周期、增加现场核查频率，对于恶意欠费客户，依法采取停电措施并纳入失信名单。

三、电力营销大数据应用于信用风险评估的现存问题及优化策略

（一）现存主要问题

尽管电力营销大数据在信用风险评估中具有显著优势，但实际应用中仍存在三大问题。一是数据质量有待提升，部分老旧小区仍使用传统电表，无法采集实时用电数据，导致数据缺失；外部数据共享存在壁垒，部分征信机构、政府部门的数据开放程度低，难以实现全面融合；数据录入过程中存在人为错误，导致数据准确性下降。二是隐私与安全风险突出，电力营销数据包含客户个人信息、用电行为等敏感数据，数据采集与存储过程中若存在安全漏洞，易引发数据泄露；部分外部数据合作机构的安全防护能力不足，增加了数据安全风险。三是模型适应性不足，电力市场环境不断变化，如新能源并网、电价改革等会导致客户用电行为改变，现有模型若未及时更新，会出现评估偏差；不同区域客户的用电特征差异较大，统一模型难以适配区域个性化需求。

（二）优化策略

针对上述问题，从数据治理、安全防护、模型迭代三个层面提出优化策略。在数据治理方面，一是推进计量设备智能化升级，加快传统电表更换为智能电表的进度，实现所有客户用电数据的实时采集；建立跨部门数据共享机制，加强与征信、工商、司法等部门的合作，签订数据共享协议，明确数据共享范围与权责。二是建立数据质量管控体系，设立数据质量考核指标，如数据完整率、准确率、实时率，将考核责任落实到具体部门；采用自动化数据清洗工具，结合人工复核，提升数据处理效率与质量。在隐私与安全防护方面，一是构建全流程安全防护体系，数据采集阶段采用加密传输技术，如 SSL 加密；在数据存储阶段采用分区存储、数据脱敏技术，对客户身份证号、联系方式等敏感信息进行脱敏处理，仅保留评估所需的特征数据；数据使用阶段建立权限管理机制，根据岗位需求分配数据访问权限，防止数据滥用。二是加强合作机构安全审核，对外部数据合作机构的安全防护能力进行评估，签订安全协议，明确数据安全责任，定期开展安全审计。在模型迭代方面，一是建立模型动态更新机制，定期收集市场环境变化数据，如电价调整、新能源政策等，分析其对客户用电行为的影响，每季度对模型进行一次参数优化，每年进行一次模型重构；二是构建区域个性化模型，根据不同区域的经济水平、客户结构特征，在统一模型框架下调整特征权重，如工业发达区域增加用电负荷波动特征的权重，商业集中区域增加缴费频率特征的权重，提升模型的区域适配性。

四、结论

电力营销大数据为客户信用风险评估提供了新的技术路径，其海量性、实时性、多样性特征突破了传统评估方法的局限，通过数据采集与预处理、模型构建、风险管控等环节的协同运作，可实现信用风险的精准评估与动态管控。本文研究表明，构建多维度数据资源池是基础，数据预处理是保障，适配的评估模型是核心，差异化管控策略是关键。当前应用中存在的数据质量、隐私安全、模型适应性问题，需通过完善数据治理、加强安全防护、建立模型迭代机制等措施解决。

参考文献

[1] 霍爽, 王鹏. 大数据时代电力营销信息化建设研究 [J]. 产业科技创新, 2023, 5(04): 34-36.
[2] 李洋, 佟孟华, 褚翠翠. 供应链视角下金融错配的风险溢出效应 [J]. 中南财经政法大学学报, 2025, (04): 68-80.
[3] 苏瑞. 剖析商业银行集团客户信用风险成因, 解锁管理优化方略 [J]. 现代商业银行, 2025, (13): 50-52.
[4] 王亚楠. 建筑企业供应链金融风险管理要点及其策略探讨 [J]. 企业改革与管理, 2025, (12): 106-108.
[5] 邓鸿志, 邓鸿丽, 任文. DeepSeek 赋能商业银行的逻辑机理、技术路线与应用场景研究 [J]. 经济研究参考, 2025, (05): 79-94.

大中型灌区渠道防渗衬砌施工关键技术与质量控制研究

李瞻¹, 李晓罡², 李俊岭³, 陈惠宇⁴, 华烨⁵

1. 淮安市洪金灌区管理所, 江苏 淮安 223100

2. 淮安市洪泽区防汛防旱指挥部办公室, 江苏 淮安 223100

3. 盱眙县东灌区管理所, 江苏 淮安 223100

4. 淮安市洪泽区灌区管理所, 江苏 淮安 223100

5. 淮安市洪泽区节约用水管理服务中心, 江苏 淮安 223100

DOI:10.61369/WCEST.2025090009

摘 要 : 大中型灌区渠道防渗衬砌施工过程中, 采用了多项关键技术以提高衬砌结构的防渗性能和施工质量。通过优化衬砌材料选择, 应用高效的防渗材料, 如聚氯乙烯 (PVC) 衬砌膜, 结合先进的施工工艺, 确保了防渗效果的稳定性和长期耐用性。同时, 严格控制施工过程中每一环节的质量, 从衬砌基础的处理到材料的铺设, 都进行了精确控制, 以避免渗漏和裂缝的产生。此外, 采用了自动化检测技术, 对衬砌质量进行实时监控, 确保施工质量达到设计要求。这些技术手段有效提高了灌区渠道的防渗效果, 延长了使用寿命, 降低了维护成本, 保障了灌溉水源的安全和稳定供应。

关 键 词 : 灌区渠道; 防渗衬砌; 施工技术; 质量控制; 防渗材料

Research on Key Construction Technologies and Quality Control for Seepage Prevention Lining of Canals in Large and Medium-sized Irrigation Districts

Li Zhan¹, Li Xiaogang², Li Junling³, Chen Huiyu⁴, Hua Ye⁵

1. Hongjin Irrigation District Management Office, Huai'an, Jiangsu 223100

2. Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters, Hongze District, Huai'an, Jiangsu 223100

3. Dongguan Irrigation District Management Office, Xuyi County, Huai'an, Jiangsu 223100

4. Irrigation District Management Office, Hongze District, Huai'an, Jiangsu 223100

5. Water Conservation Management Service Center, Hongze District, Huai'an, Jiangsu 223100

Abstract : During the construction of seepage prevention lining for canals in large and medium-sized irrigation districts, multiple key technologies have been employed to enhance the seepage resistance performance and construction quality of the lining structure. By optimizing the selection of lining materials and applying efficient seepage prevention materials, such as polyvinyl chloride (PVC) lining films, combined with advanced construction techniques, the stability and long-term durability of the seepage prevention effect have been ensured. Meanwhile, strict quality control has been implemented at every stage of the construction process, from the treatment of the lining foundation to the laying of materials, ensuring precise control to prevent leakage and cracks. Additionally, automated detection technologies have been adopted for real-time monitoring of lining quality, ensuring that construction quality meets design requirements. These technological measures have effectively improved the seepage prevention effect of irrigation district canals, extended their service life, reduced maintenance costs, and ensured the safe and stable supply of irrigation water sources.

Keywords : irrigation district canals; seepage prevention lining; construction technology; quality control; seepage prevention materials

引言

大中型灌区作为农业灌溉的重要基础设施, 其渠道防渗效果直接影响灌溉水源的安全性与水资源的高效利用。随着灌溉需求的不断增加和气候变化的影响, 如何有效提升渠道的防渗性能, 减少水资源浪费, 已成为亟待解决的关键问题。通过应用先进的防渗衬砌施工技术, 不仅能够有效提高防渗效果, 还能延长渠道使用寿命, 降低维护成本, 为水利建设提供了切实可行的技术支持和保障。这些技术的实施对于确保灌溉系统的可持续发展具有重要意义。

一、大中型灌区渠道防渗衬砌施工技术概述

（一）大中型灌区渠道防渗衬砌的必要性

大中型灌区在现代农业灌溉系统中扮演着至关重要的角色，然而，随着水资源短缺问题的加剧，如何提高灌溉水的利用效率成为亟待解决的关键问题。渠道防渗衬砌施工作为确保灌溉水源不流失的核心技术，其重要性逐步凸显。传统渠道多采用土质或混凝土衬砌，但在防渗性方面存在一定局限。随着灌区规模的不断扩大，水资源的浪费问题尤为突出，亟需通过技术手段提升防渗效果^[1]。

防渗衬砌技术通过选用先进的防渗材料和优化施工工艺，能够有效减少水流渗漏，保障灌溉系统的稳定性与高效性。这不仅能减少水资源的浪费，还能降低水源枯竭的风险，有助于实现可持续水资源管理。因此，提升灌区渠道的防渗能力是解决当前水资源问题的一个重要技术手段，也是提高灌溉系统效益的关键。

（二）防渗材料的创新应用

随着防渗技术的发展，材料的选择成为影响施工效果的关键因素之一。在大中型灌区渠道的防渗衬砌施工中，传统的水泥混凝土、土工膜逐渐被新型的防渗材料所取代。聚氯乙烯（PVC）衬砌膜作为一种具有高防渗性能的材料，在大中型灌区的应用越来越广泛^[2]。该材料不仅具有优异的防渗性和耐候性，还能有效抵抗土壤中的化学物质，保证水源的纯净。

此外，近年来，一些复合型防渗材料的应用得到了广泛关注。通过将不同性能的材料进行复合，可以达到更好的防渗效果。例如，土工布与PVC膜的复合使用，不仅增强了防渗性，还提升了施工的灵活性和材料的经济性。这些创新材料的应用极大地提高了渠道防渗衬砌技术的可靠性和适应性^[3]。

（三）施工工艺的优化与创新

为了提高大中型灌区渠道防渗衬砌的施工质量，施工工艺的优化尤为关键。首先，施工前必须对渠道底基进行充分的处理，确保其平整性和坚固性。通过精细化的施工准备，能够有效减少因底基不均而导致的防渗膜铺设不平整，进一步提高防渗效果。

其次，施工过程中需严格按照设计要求进行每一环节的操作。比如，在铺设防渗膜时，需要确保膜与膜之间的接缝处不出现任何缝隙，以避免水流渗漏。在施工过程中，实时监控和质量检测技术的引入也使得施工质量得到了有效保障^[4]。通过采用先进的自动化检测设备，施工人员能够及时发现问题并进行修正，确保每一项施工步骤都符合防渗要求，最终实现理想的防渗效果。

二、防渗材料的选择与应用优化

（一）聚氯乙烯（PVC）衬砌膜的应用优势

聚氯乙烯（PVC）衬砌膜作为一种新型防渗材料，因其优异的防渗性能和较长的使用寿命，广泛应用于大中型灌区渠道的防渗衬砌中。PVC膜具有良好的柔韧性，能够适应不同地质条件下的变形需求，尤其在复杂地形中表现出较强的适应能力。同时，它具有较高的抗拉强度和抗化学腐蚀性，可以有效防止水流渗透，提高水源的利用率。

PVC衬砌膜还具备较好的抗紫外线能力，能够承受长时间的阳光暴晒而不出现老化现象。此外，其安装施工简便、工期短，且不需要特别复杂的设备，减少了施工成本和时间。因此，PVC

衬砌膜成为大中型灌区渠道防渗工程中的理想选择，尤其适用于气候变化较大的地区^[5]。

（二）土工膜与土工布复合材料的创新应用

除了PVC衬砌膜外，土工膜与土工布的复合材料在防渗衬砌中的应用也逐渐增多。这种复合材料结合了土工布的高强度和土工膜的优异防渗性能，使得防渗效果更加显著。土工布能够有效提高土体的稳定性，防止土壤的侵蚀和损坏，而土工膜则保证了水流不会渗透到土壤层中，确保了灌溉水的完整性^[6]。

复合材料的使用还能够提高施工的灵活性。通过在不同的施工环境中灵活选择土工膜和土工布的组合，能够应对各种复杂的地质条件。例如，在多变水位变化地区，使用这种复合材料能有效地控制水位波动带来的防渗压力，确保防渗效果的稳定性和长期性。

（三）复合材料的性能提升与适用范围

近年来，复合型防渗材料的研发和应用不断取得进展。在大中型灌区的防渗工程中，除了土工膜与土工布的简单组合外，一些新型复合材料通过增强材料的抗渗透性、耐高温性和耐腐蚀性，进一步提高了防渗效果。例如，采用高分子改性土工膜能够有效提升膜的机械强度和抗老化能力，从而在极端气候条件下仍能维持优异的防渗性能。

这些复合材料的性能提升使得其适用范围更加广泛，可以满足不同灌区、不同地质条件的防渗需求。无论是在湿润地区，还是在干旱地区，复合型防渗材料都能够提供良好的水源保护，延长灌溉渠道的使用寿命，降低水资源浪费，为水利建设提供了更多选择。

（四）防渗材料的可持续发展与环境友好性

随着环保理念的普及，防渗材料的可持续性和环境友好性逐渐成为选材的重要考量。新型环保防渗材料不仅具备优异的防渗性能，还考虑到资源的再利用和环境的保护。例如，部分复合型防渗材料采用可回收材料或环保聚合物生产，能够在使用寿命结束后进行再生利用，减少了环境负担。

此外，这些环保材料在施工过程中所需的能量消耗较低，有助于减少施工过程中产生的碳排放。随着绿色建筑理念的推广，环保型防渗材料的使用将成为灌溉系统中不可忽视的趋势，这不仅能够确保防渗效果的同时，也符合可持续发展的要求。

三、施工过程中的质量控制要点

（一）渠道底基处理的精细化控制

在防渗衬砌施工中，渠道底基的处理至关重要。底基是衬砌材料稳定性的基础，任何不平整或松动的地方都可能导致防渗衬砌效果不佳。因此，施工前必须对底基进行精细化处理，确保其平整度和压实度达到设计要求。常见的处理方法包括对底基进行夯实、清理杂物以及修整不规则的地面，这有助于提高防渗膜与底基的附着力^[7]。

在施工过程中，还需要使用测量工具对底基进行实时监控，确保其符合设计要求。采用精确的地面平整度测量仪器，可以避免人为误差，确保底基的施工质量，进而提高防渗效果。通过科学、合理的底基处理，不仅能延长渠道的使用寿命，还能减少未来的维修和保养成本。

（二）防渗膜铺设的施工精度控制

防渗膜的铺设是施工中最关键的环节之一，直接关系到防

渗效果的实现。铺设防渗膜时，首先需要严格控制膜片之间的接缝，确保接缝处没有缝隙，避免水流通过接缝渗漏。常见的接缝处理方法包括热焊接和机械压接，热焊接温度通常控制在400℃左右，压力保持在0.5MPa至1.0MPa之间，确保接缝密封良好。膜片的铺设应尽量避免褶皱和气泡，这些问题可能会导致防渗效果的降低，气泡可能产生水流通道，从而使防渗层失效。

在施工过程中，操作人员需根据设计要求合理拉伸膜片，确保膜片的张力均匀，避免局部过紧或松弛导致膜片损坏或局部渗漏。一般要求膜片的张力控制在10–15kN之间，以确保膜片在施工期间不受外力影响而产生变形。施工人员应定期使用高精度测量仪器检查膜片的铺设情况，如膜的厚度应达到0.3mm以上，发现问题应及时进行调整和修复。这种精细化的施工控制可确保防渗膜的密封性和长期稳定性，提升整体防渗效果。

（三）施工过程中的质量监控与反馈机制

施工质量的实时监控和及时反馈是确保防渗工程质量的重要环节。在施工过程中，必须使用现代化的监测设备进行质量检测，如渗漏检测仪、厚度测量仪等，对防渗材料的铺设质量进行全程跟踪。通过自动化检测设备，能够实时监测防渗膜的质量，及时发现可能存在的施工问题，如膜材缺陷、接缝问题等，从而避免问题的积累。

此外，施工中还应建立有效的反馈机制，将监测结果与施工计划紧密结合。任何施工过程中出现的质量问题都应及时反馈给相关负责人，进行整改。施工人员应根据监控数据调整施工方案，确保工程质量不受影响。通过这种高效的质量控制体系，能够最大程度保证防渗衬砌施工的效果，减少后期的维护和修复工作。

四、防渗衬砌技术的长期效果与经济评估

（一）防渗衬砌技术的长期效果评估

防渗衬砌技术的长期效果主要体现在其防渗性能的稳定性和耐久性上。通过使用高性能防渗材料，如PVC膜和复合型材料，可以大大降低水流渗漏率，确保灌区渠道的水源利用率。随着时间的推移，这些防渗衬砌材料的稳定性得到了进一步验证，尤其是在经历长时间的暴晒、雨水侵蚀及土壤变化等自然环境影响后，衬砌技术仍能保持其优良的防渗效果。

此外，防渗衬砌技术还可以有效减少渠道结构的老化和腐蚀，延长灌区渠道的使用寿命。通过对长期运行的数据跟踪分析，防渗衬砌技术在提高水利工程整体稳定性方面表现出色。较长时间的使用证明了防渗衬砌技术不仅能够适应复杂的地理环境，还能抵抗气

候变化带来的不利影响，保证了灌溉系统的持续稳定运行。

（二）经济效益分析与节约成本

防渗衬砌技术的应用在灌区的经济效益方面具有显著影响。首先，防渗衬砌技术通过减少水源浪费，能够大幅提升水资源的利用效率，尤其在干旱地区，减少水流的渗漏对于保障农业灌溉至关重要。例如，防渗材料的使用可以将水流渗漏率降低至5%以下，相比传统渠道的20%–30%渗漏率，节省了大量水资源。通过提高灌溉效益，减少了对其他水源的依赖，进一步降低了水资源开发、运输以及能源消耗的成本，提升了农业生产的可持续性。

其次，防渗衬砌技术能够延长灌溉渠道的使用寿命，从而减少了后期的维修和维护成本。相比传统的土质渠道，防渗衬砌的耐久性和稳定性显著提升，减少了因泄漏引起的频繁维修和更新，节约了大量的维护资金^[8]。长期来看，这种技术的应用为灌区节约了不少经济投入，提高了整体效益。

（三）综合评估与可持续发展前景

从长远来看，防渗衬砌技术不仅具有经济效益，还有助于实现水利建设的可持续发展。随着防渗材料的不断创新和施工技术的不断完善，防渗衬砌技术的应用将越来越普及，其效果也将更加显著。通过高效利用水资源，防渗衬砌技术为农业灌溉系统的持续发展提供了保障，同时也为生态环境保护做出了贡献。

未来，随着环保理念的深入发展，绿色建材和可再生材料的引入将进一步提升防渗衬砌技术的环境友好性。结合现代科技手段，防渗技术的经济效益和环境效益将得到更高的整合，使其在大中型灌区中的应用具备更广阔的前景，为水利工程的可持续发展提供更加坚实的支持。

五、结语

大中型灌区渠道防渗衬砌施工技术的应用，不仅显著提升了水资源的利用效率，还有效延长了灌溉系统的使用寿命。通过采用先进的防渗材料和精细化施工工艺，成功实现了灌区渠道的防渗功能，避免了水源的浪费，为农业灌溉提供了更加稳定和可靠的保障。同时，防渗衬砌技术的经济效益也得到了充分体现，减少了后期维护和修复成本，提高了整体效益。随着技术的不断进步，防渗材料的创新和施工质量控制完善的完善，将进一步推动灌区水利工程的可持续发展，为未来的水资源管理提供更加有效的技术支持。防渗衬砌技术的广泛应用，不仅是灌区建设的需求，更是现代农业灌溉发展的必然趋势。

参考文献

- [1] 马丹荣, 奚少良. 共和灌区续建配套与节水改造工程骨干渠道设计 [J]. 长江工程职业技术学院学报, 2024, 41(01): 23–27. DOI: 10.14079/j.cnki.cn42-1745/tv.2024.01.006.
- [2] 徐旺杰. 饶丰灌区渠道防渗衬砌型式选择及设计计算 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(02): 114–117.
- [3] 吴润昊. 水利灌区改造中的混凝土衬砌渠道防渗技术研究 [J]. 地下水, 2024, 46(05): 164–166+202. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2024-05-051.
- [4] 单长光. 万长灌区渠道衬砌施工防渗关键技术 [J]. 水利技术监督, 2024, (08): 166–168+188.
- [5] 龙建春, 谢顺胜. 小型灌区节水配套改造项目渠道衬砌防渗技术探讨 [J]. 湖南水利水电, 2021, (04): 90–91+107. DOI: 10.16052/j.cnki.hnslsd.2021.04.029.
- [6] 吴晓光. 谢寨灌区节水工程防渗渠道衬砌施工技术的应用 [J]. 乡村科技, 2021, 12(32): 118–120. DOI: 10.19345/j.cnki.1674-7909.2021.32.024.
- [7] 林美思. 中型灌区改造工程渠道防渗衬砌结构方案研究 [J]. 内蒙古水利, 2024, (11): 66–68.
- [8] 李帅. 中型灌区渠道防渗衬砌结构比选 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(08): 37–38.

供配电系统备用电源可靠性提升研究

秋磊

珠海万力达电气技术股份有限公司, 广东 珠海 519000

DOI:10.61369/WCEST.2025090010

摘 要 : 工业生产扩张与能源结构优化, 使大型火电厂厂用电系统更复杂, 备用电源作为安全运行最后防线, 可靠性至关重要。本文以某电厂为对象, 聚焦3#锅炉投运后备用电源容量不足问题。分析显示, 扩容后35 MVA启备变需为总容量82 MVA的10段6kV母线提供备用, 多段母线同时失电时, 易引发启备变过负荷保护动作, 后果严重。为解决此“小马拉大车”矛盾, 本文提出两套方案: 一是基于物联网与 IEC 61850 标准的自主决策系统, 借分布式智能终端实现毫秒级负荷感知、容量评估与精准投切; 二是网络化集中管控系统, 通过主站监控结合变压器过载能力与人工干预管理负荷。本文阐述方案架构、交互机制及改造方案并多维度对比, 成果为该电厂及同类系统提供参考。

关 键 词 : 备用电源; 供电可靠性; 负荷分级; 智能决策; IEC 61850

Research on Improving the Reliability of Standby Power Supply in Power Supply and Distribution Systems

Qiu Lei

Zhuhai Wanlida Electrical Technology Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract : With the expansion of industrial production and the optimization of energy structure, the auxiliary power system of large thermal power plants has become increasingly complex. As the final line of defense for safe operation, the reliability of the standby power supply is crucial. This paper takes a certain power plant as the research object, focusing on the problem of insufficient standby power capacity after the commissioning of the 3# boiler. Analysis shows that after capacity expansion, the 35 MVA start-up/standby transformer is required to provide standby power for 10 sections of 6kV busbars with a total capacity of 82 MVA. When multiple busbars lose power simultaneously, it is prone to trigger the overload protection operation of the start-up/standby transformer, leading to serious consequences. To resolve this contradiction of "insufficient capacity to meet load demands", two schemes are proposed: First, an autonomous decision-making system based on the Internet of Things (IoT) and IEC 61850 standard, which achieves millisecond-level load sensing, capacity evaluation, and precision switching through distributed intelligent terminals. Second, a networked centralized control system that manages loads through master station monitoring combined with the transformer's overload capacity and manual intervention. This paper elaborates on the architecture, interaction mechanism, and transformation plan of the two schemes, and conducts a multi-dimensional comparison. The research results provide a reference for the studied power plant and similar systems.

Keywords : standby power supply; power supply reliability; load classification; intelligent decision-making; IEC 61850

引言

煤化工、火电等连续性生产企业中, 厂用电系统的高可靠性是安全生产的生命线^[1]。行业普遍采用“双电源、单母线分段”结构及快速切换 (FT) 装置, 确保工作电源故障时无缝切换至备用电源, 降低关键负载冲击^[2]。中国神华某电厂3#锅炉投运后, 6kV母线由8段扩至10段, 唯一备用电源—35 MVA启备变需承载10段母线82 MVA的总负载, 主备容量比仅42.6%。虽该比例未变, 但脱硫等关键负载集中增加, 使运行风险骤升。

若多点故障致5段以上母线同时切换备用, 启备变将过载跳闸, 不仅导致请求备用的母线失电, 更会因母线上的脱硫等关键设备停摆引发连锁反应, 可能造成全厂非计划停机, 产生重大损失。因此, 在不进行大规模硬件增容的前提下, 通过智能化手段提升备用电源可靠性, 成为亟待解决的难题, 本文即旨在分析该问题并提出可行方案。

作者简介: 秋磊 (1989.10—), 男, 汉族, 陕西武功人, 本科, 助理工程师, 从事电气自动化, 继电保护相关研究。

一、系统现状与风险量化分析

（一）厂用电系统拓扑结构

该发电厂的厂用电系统主要由以下部分构成：一是工作电源：分别由1#、2#发电机高厂变、0#炉及公用变、脱硫变以及新增的3#锅炉相关变压器提供。二是备用电源：统一由一台独立的启备变（35 MVA）通过备用段母线提供。三是母线结构：共10段6kV母线，分别为0#锅炉 A/B段、1#机组 A/B段、2#机组 A/B段、脱硫变 A/B段、3#锅炉 A/B段。

（二）容量瓶颈与风险场景建模

根据历史运行数据（见表1），各主要负载在最大工况下的需求容量已十分接近甚至超过其对应变压器的额定值。特别是3#锅炉投运后，其预计最大负荷将达到12 MW，对备用系统构成巨大挑战。

表1 厂用电各段最大负荷统计表

负载名称	平均负荷 (MW)	最大负荷 (MW)	换算变压器容量 (MVA)	需求最大容量 (MVA)
公用变	9.8	11.76	11.53	12
#2厂高变	7.8	9.36	9.17	10
#1厂高变	8.3	9.96	9.76	10
脱硫变	2.2	2.64	2.59	3
#3锅炉	-	12.00	33.05	35
总计	28.1	45.072	66.09	70

注：最大负荷按平均负荷的1.2倍估算。

通过模拟测算可以清晰地量化风险^[3]：3#炉投运前的情况是：假设8段母线总负载为49.2 MVA（82 MVA * 60%），则每段平均负载约6.15 MVA。35 MVA的启备变理论上可同时为5.7段母线提供备用，备用率为62.5%。3#炉投运后的情况是：10段母线总负载相应增加，但启备变容量不变。此时，其最多只能为5段母线提供可靠备用，备用率降至50%。

一个典型的高风险叠加场景是：在1#机组启动阶段，其A/B段母线（2段）由启备变供电；若此时脱硫变发生故障，其A/B段母线（2段）加上3#锅炉A/B段母线（2段）共4段将同时失电并请求切换。这将导致启备变需要同时承担6段母线的负载，远超其承载极限，系统崩溃风险极高。

二、技术解决方案设计

针对上述风险，本文摒弃了传统的“故障即切换”模式，转而从全局视角出发，设计了两套智能化解决方案。

（一）方案一：基于物联网的自主决策型备用电源切换系统

本方案的核心思想是构建一个去中心化、自组织的智能决策网络，实现“感知-决策-执行”闭环。

1. 系统架构与硬件部署

主机：1台，部署于启备变进线开关侧，作为决策核心。

从机：10台，分别部署于10段主进线母线的开关间隔，负责本地数据采集与执行。

通讯网络：采用双层光纤环网，底层为PRP（并行冗余协议）或HSR（高可用性无缝环网）冗余网络，承载IEC 61850-GOOSE实时报文；上层为传统IEC 104网络，用于三遥信息上传至监控后台。

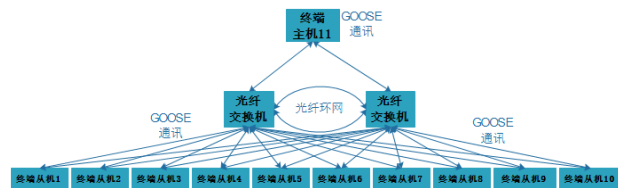


图1：物联网自主决策备用电源切换系统网络部署图

2. 信息交互与处理逻辑

所有终端通过GOOSE协议交换关键信息^[4]，包括开关状态、电压/电流、有功功率及负荷优先级（预设为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级）。其核心处理逻辑如下：

①事件触发：任一从机检测到母线失压，立即将事件信息及自身负荷数据广播至主机。

②全局计算：主机实时汇总所有在线从机的负荷，并计算当前空闲容量。

③智能决策：若待切换负荷总量 ≤ 空闲容量，则授权相应从机执行快切。若待切换负荷总量 > 空闲容量，则根据负荷优先级进行排序，仅允许高优先级负荷切换，并向低优先级从机发送“闭锁合闸”指令。

在已带载状态下，若新故障发生且容量不足，主机可主动发出指令，切除已接入的低优先级负荷，为新出现的高优先级故障负荷腾出容量。

（二）方案二：基于网络化的备用电源切换管控系统

本方案采用“集中监控、预警辅助、人机协同”的策略，充分利用现有运维体系。

1. 系统架构与硬件部署

主站：1套后台管理系统，部署于控制室PC端。

终端：10台快切终端，功能与方案一的从机类似。

通讯网络：采用星型光纤网络，终端与主站通过IEC 104规约进行通讯。

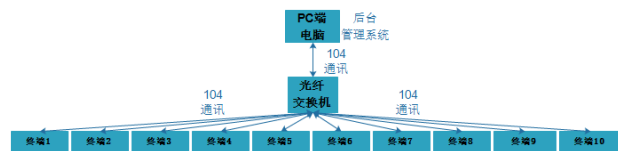


图2：基于网络化备用电源切换管控系统网络部署图

2. 信息交互与处理逻辑

终端周期性地将遥测遥信数据上传至主站。主站进行全局负荷计算，并执行以下逻辑：

①常态监控：主站持续计算启备变的实时负荷率和剩余容量。

②预警与闭锁：在快切动作前，主站若预测切换后会过载，则提前向对应终端下发“闭锁”信号，阻止其动作。

③极端工况处理：对于无法预判的多点同时故障，允许快切装置先动作。主站随即进入“过载应急模式”，利用启备变的短时过载能力（如超30%可运行120分钟），在此时间窗口内向运行人员发出声光报警和负荷切除建议。

④自动兜底：若运行人员未能在规定时间内（如30分钟）完成负荷调整，系统将自动按照预设优先级切除低级别负荷，强制系统回到安全运行区间。

三、方案综合对比与选型建议

两种方案都是基于传统型无扰动快切技术^[5]，所不同的是方案1：融合了新一代物联网技术，基于 IEC61850+GOOSE 通讯开发的自主决策备用电源切换系统；方案2：融合了新一代的网络化预判的、站预警技术的备用电源切换管控系统。下面对两种路线的具体差异进行对比见表2。

表2 两种技术方案综合对比表

对比维度	方案一：自主决策型	方案二：网络化管控型
自主程度	L4级（全自动，无需人工）	L2级（预警+人工干预）
运行风险	算法复杂，存在误切风险	依赖人工，对突发故障响应慢
施工难度	高（需改造所有间隔二次回路）	低（主要增加主站和通讯）
通讯方式	IEC 61850-GOOSE（实时性强）	IEC 104（通用性强）
组网方式	星环结合	星型结构
系统架构	分布式（鲁棒性好）	主从式（结构清晰）
调节速度	秒级调节（自主）	小时级调节（人工）
适用场景	对供电连续性要求极高的“黑灯工厂”	有人值守、强调人机协同的传统电厂

选型建议：若电厂具备较强的技术维护能力和对供电连续性的极致追求，且愿意承担较高的初期改造投入，则方案一是面向未来的发展方向。若电厂倾向于稳妥过渡，希望在保留现有运维习惯的基础上提升安全性，则方案二是更为现实的选择。

四、结论

本文针对某大型煤化工发电厂因系统扩容引发的备用电源可靠性危机^[6]，进行了深入剖析，并提出了两套具有创新性和实用性的解决方案。研究结论如下：一方面风险根源明确：3#锅炉投运导致的负载结构变化，是引发备用容量不足风险的根本原因，必须通过系统性方案而非局部修补来解决。另一方面技术路径可行：无论是基于物联网的自主决策系统，还是基于网络化的集中管控系统，都能有效规避启备变过载跳闸的风险，将“被动防御”转变为“主动管理”。最后一方面是价值导向清晰：方案的选择应紧密结合电厂的实际运维水平、风险偏好和投资预算。

智能化不是目的，而是提升本质安全的手段。本研究不仅解决了特定电厂的燃眉之急，其提出的“全局负荷感知”“动态容量评估”和“负荷分级管理”等核心理念，对于指导其他面临类似挑战的工业供配电系统升级改造，具有广泛的借鉴意义和推广价值。

参考文献

[1] 国家能源局. 发电厂厂用电设计技术规程 :DL/T 5153-2014[S]. 北京 : 中国电力出版社 , 2014.

[2] International Electrotechnical Commission. IEC 61850-5: Communication networks and systems for power utility automation-Part 5: Basic communication structure for substation automation systems[S]. 2013.

[3] 李永丽, 李博通. 智能变电站技术及其应用 [M]. 北京 : 中国电力出版社 , 2016.

[4] 李霞, 刘洋, 龙军, 等. 大型火力发电厂启动 / 备用电源接线探讨 [J]. 机电工程技术 , 2024, 53(12): 253-255+312.

[5] 陈益鑫. 数据中心市电电源和备用电源的切换控制逻辑研究 [J]. 智能城市 , 2024, 10(12): 54-57.

[6] 朱曙, 冉月, 赵慧明. 基于 IEC 61850 标准的配电站网络攻击模型研究 [J/OL]. 自动化技术与应用 , 2024.

小流域水保工程配置优化对生态系统服务功能协同提升机制研究

崔婷婷

四川省都江堰勘测设计院有限责任公司，四川 成都 611830

DOI:10.61369/WCEST.2025090011

摘 要： 以典型小流域为研究对象，构建水保工程措施配置结构与生态系统服务功能之间的耦合分析框架，综合运用情景模拟与系统动力学方法，探讨不同工程组合模式对水源涵养、水土保持、生物多样性及碳汇功能的协同作用机理。研究发现，合理优化坡改梯、植被恢复与谷坊等工程配置比例，可显著提升流域生态服务综合效益，并有效缓解单一治理模式下功能失衡问题。成果为小流域综合治理方案优化及生态效益评估提供理论依据。

关 键 词： 小流域治理；工程配置优化；生态服务功能；协同机制；水土保持

Study on the Mechanism of Synergistic Enhancement of Ecosystem Service Functions through Optimization of Soil and Water Conservation Engineering Configuration in Small Watersheds

Cui Tingting

Dujiangyan Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611830

Abstract： Taking typical small watersheds as the research objects, this study constructs a coupling analysis framework between the configuration structure of soil and water conservation engineering measures and ecosystem service functions. By comprehensively employing scenario simulation and system dynamics methods, it explores the synergistic mechanisms of different engineering combination patterns on water conservation, soil conservation, biodiversity, and carbon sequestration functions. The study finds that reasonably optimizing the configuration proportions of engineering measures such as slope-to-terrace conversion, vegetation restoration, and check dams can significantly enhance the comprehensive ecological service benefits of the watershed and effectively alleviate the functional imbalance issues under a single management model. The results provide a theoretical basis for optimizing comprehensive management plans and assessing ecological benefits in small watersheds.

Keywords： small watershed management; engineering configuration optimization; ecosystem service functions; synergistic mechanism; soil and water conservation

引言

小流域作为区域水土流失最为集中且治理单元最具针对性的空间尺度，其生态系统稳定性直接关系到区域水资源安全与生态环境质量。长期以来，小流域水土保持工程多以单一防护或拦截功能为导向，忽视不同工程措施之间的结构配置与生态系统服务功能之间的协同关系，导致治理效益分散、生态功能提升有限，相关研究已对小流域蓄排措施布局及优化模式进行了系统梳理^[1]。随着生态文明建设与流域综合治理理念的深化，推动水保工程从“单点治理”向“系统优化”转型已成为必然趋势。基于生态系统服务视角，探讨不同工程配置模式对水源涵养、水土保持、生物多样性及碳汇功能的协同提升机制，对于提高小流域治理的科学性与精准性具有重要理论价值和实践意义。本研究以典型小流域为对象，构建工程配置与生态服务功能之间的耦合分析框架，旨在为优化水土保持工程布局和提升综合生态效益提供依据。区域尺度的研究表明，土地利用格局演变对四川省生态系统服务价值产生了显著影响^[2]。

一、理论基础与研究方法

（一）小流域水保工程配置体系

小流域水土保持工程配置是指在特定流域空间范围内，基于地形地貌、水文特征和水土流失类型，对不同水土保持措施进行合理组合与空间优化布局的过程，其核心在于通过多措施协同控制径流形成、削减水流量并稳定地表结构，从而实现水土流失防治与生态功能提升的双重目标。当前，小流域水保工程主要包括工程措施、植物措施和农艺措施三大类型，其中坡改梯、谷坊等工程措施侧重于削减坡面径流速度和拦截泥沙输移，植被恢复、封禁育林等植物措施通过提高地表覆盖率增强土壤抗蚀性，而覆盖种植、轮作管理等农艺措施则在改善土壤结构方面发挥辅助作用。不同措施在空间尺度上的配置比例及其组合方式，直接决定了流域水保治理的综合效能，因此有必要从系统视角对其结构优化进行深入研究。

（二）生态系统服务功能构成

生态系统服务是指生态系统为人类社会提供的各种直接或间接利益，本研究结合小流域治理目标，选取水源涵养、水土保持、生物多样性维护与碳汇调节四类功能作为评价重点。其中，水源涵养功能主要体现流域对降水的滞蓄作用及对径流过程的调节能力；水土保持功能反映地表侵蚀控制效果；生物多样性体现生态系统稳定性与恢复程度；碳汇功能则是衡量生态修复对碳循环及气候调节贡献的重要指标。上述功能相互关联，共同构成小流域生态系统服务综合体系，相关研究从生态系统服务协同视角对土地利用及功能模拟进行了深入分析^[3]。

（三）工程配置与生态功能耦合机制

不同水保工程措施通过改变地表粗糙度、坡面结构与水流路径，影响坡面产流过程与土壤水分动态分布，从而调控侵蚀强度与植被生长条件，形成“工程配置—水文过程—土壤改良—植被恢复—生态反馈”的耦合链条。在合理配置条件下，各类措施之间通过正反馈机制实现协同效应，如梯田削减径流、拦沙坝促进沉积稳定、植被恢复增强固土能力，共同推动多生态服务功能的同步提升。

（四）协同效应评价模型构建

为定量反映不同工程配置模式对生态系统服务功能的综合影响，引入生态服务协同指数模型：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n w_i E_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2}} \quad \text{式 (1)}$$

式中，S为生态服务协同指数， E_i 为第i类生态系统服务功能值， w_i 为其对应权重，n为评价功能数量。该模型通过综合权重分配与标准化处理，能够有效表征不同工程配置下多功能之间的协同程度，为后续小流域水保工程优化提供量化依据和技术支撑，

同时为水土保持碳汇效应量化研究提供理论基础^[4]。

二、研究区概况与情景设定

（一）研究区自然条件

本研究选取四川丘陵区及西南典型土石山区小流域作为样本区，流域总面积约12.6 km²，地形以沟壑纵横的丘陵坡地为主，坡度整体分布在5°—25°之间，局部坡面超过30°，地形破碎度高，坡沟系统发育明显，属典型的中度至强度水土流失区。区域多年平均降水量约520 mm，降水时空分布不均，夏季暴雨频发，降雨强度大、历时短，易形成强烈坡面径流并引发严重侵蚀，水土流失问题突出。

从生态环境角度看，研究区植被覆盖率整体偏低，天然植被以灌草为主，乔木覆盖不足，局部区域存在明显裸露地表。土壤类型以黄绵土和褐土为主，质地疏松、结构稳定性差，抗蚀能力弱，在强降雨条件下极易发生冲刷与崩塌。受长期人为活动和不合理利用方式影响，流域生态系统结构失衡，亟需通过科学合理的水土保持工程配置实现系统性修复与功能提升。

（二）数据来源与分析指标

本研究所用数据主要来源于实地调查、遥感解译、水文监测站记录以及历史水土保持普查资料。通过布设监测断面采集径流量、降雨量和泥沙含量等数据，结合无人机航拍影像获取地表覆盖情况，并利用多源遥感影像反演植被覆盖度和NDVI指数，从而提高数据的空间精度与时间连续性。土壤理化性质数据则通过采样分析获取，包括土壤有机质含量、含水率及抗蚀性能参数。

在指标体系构建方面，围绕生态系统服务功能选取水源涵养能力、水土保持能力、生物多样性指数和碳汇潜力四个核心指标。其中，水源涵养以径流削减率和调蓄量为表征，水土保持以侵蚀模数变化为主要评价指标，生物多样性采用植被覆盖率与物种丰富度指数，碳汇功能结合植被生物量和土壤有机碳储量进行综合测算，形成较为完整的评价指标体系。

（三）工程配置情景构建

基于研究区现状水土流失特点和治理基础，构建三种对比工程配置情景，用于分析不同组合模式对生态系统服务功能的影响。情景A为工程主导型，重点加强坡改梯和谷坊建设，提高地表拦截能力；情景B为生态主导型，以植被恢复和封禁育林为核心，注重提升植被覆盖度；情景C为工程—生态复合型，通过合理比例搭配工程措施与植物措施，实现结构协同。

在情景构建过程中，充分考虑不同措施在空间分布上的合理性与功能互补性，如在坡面中上部布设梯田减缓径流，在坡面汇流关键节点布设谷坊控制泥沙输移，同时在缓坡区强化植被恢复，形成多层次防护体系。通过比较三种情景下生态服务功能的响应特征，分析最优配置模式，为后续小流域治理优化提供科学依据。

三、不同配置模式下生态服务协同效应分析

（一）水源涵养效应分析

不同工程配置模式对小流域水源涵养能力的影响具有显著差异。工程主导型配置通过坡改梯和谷坊削减坡面径流速度，在一定程度上提高了水体的滞蓄能力，但整体调蓄效果仍受植被覆盖不足的制约。生态主导型配置则依托大面积植被恢复增强地表入渗能力，对径流过程起到较好的缓冲作用，而复合协同型配置在工程措施与植被恢复的共同作用下，实现了径流削减与水分滞蓄的双重强化，表现出更为稳定的水源涵养能力。整体来看，复合型配置在改善流域水文过程方面具有明显优势。

为直观展示不同配置模式下水源涵养及其他生态服务功能的差异特征，现对各项指标进行综合对比，结果如表1所示。

表1 不同工程配置模式下生态系统服务功能对比			
指标类别	模式 A 工程主导型	模式 B 生态主导型	模式 C 复合协同型
径流削减率 (%)	22.5	28.1	35.6
土壤侵蚀模数 (t/km² · a)	4200	3600	2900
植被覆盖率 (%)	56	68	79
生物多样性指数	0.42	0.57	0.69
年碳汇量 (t/km²)	3.2	4.7	6.3
生态服务协同指数 S	0.64	0.72	0.86

从表1可以看出，不同工程配置模式对小流域生态系统服务功能的影响存在显著差异。其中，复合协同型配置模式（模式C）在径流削减、土壤侵蚀控制、植被覆盖度、生物多样性水平及碳汇能力等方面均表现出最优效果，其生态服务协同指数达0.86，明显高于工程主导型与生态主导型，表明合理整合工程措施与植物措施能够有效提升多功能协同水平，实现生态效益的整体优化，与相关流域生态系统服务协同研究结论具有一致性^[5]。喀斯特山区的相关研究同样表明，不同功能分区下生态系统服务在时空上呈现出显著的权衡与协同特征^[6]。

（二）土壤保持效应分析

土壤保持能力是衡量水土保持工程成效的关键指标之一。模式A在减少坡面径流冲刷方面起到一定作用，但由于缺乏持续的植被覆盖支撑，局部区域仍易出现再侵蚀现象。模式B通过提升植被覆盖率显著增强了地表抗蚀能力，使土壤侵蚀强度明显下降，而模式C在工程削能和植被固土的双重作用下，侵蚀模数降幅最为显著，表明其在稳定土体结构和减少泥沙输出方面优势明显。

（三）生物多样性变化特征

不同配置模式对流域生物多样性水平的影响呈现出递增趋势。工程主导型配置对物种生境改善作用有限，植被类型较为单

一；生态主导型配置通过恢复本地植被群落，提高了物种丰富度，但其稳定性仍受极端气候影响；复合型模式在优化地形结构和改善生境条件的基础上，为多种植物和微生物提供适宜环境，使生物多样性指数显著提升，生态系统结构更加稳定。

（四）碳汇功能响应

从碳汇角度分析，工程主导型配置对碳固定贡献较低，主要体现在土壤沉积层的被动碳储存，已有研究从坡面尺度揭示了水土保持措施对碳流失与固存过程的影响机制^[7]。生态主导型配置则通过植被生物量增加显著提升固碳能力，而复合协同型配置在兼顾植被恢复和土壤结构优化的基础上，实现了土壤有机碳和植被固碳的同步增长，其年碳汇量表现出最优水平，进一步凸显了工程与生态协同配置对“双碳”目标的积极促进作用。川西北高山峡谷区的森林碳储量及其空间分布特征研究进一步从区域尺度印证了植被恢复与保护对提升碳汇功能的重要性^[8]。

总体而言，不同工程配置模式在生态服务功能表现上存在显著差异，其中复合协同型模式在水源涵养、土壤保持、生物多样性及碳汇功能四个方面均表现最优，体现出明显的协同提升效应，为小流域综合治理提供了更具可持续性的技术路径。

四、配置优化路径与结论

（一）工程配置优化原则

小流域水土保持工程配置优化应遵循系统性、生态性与可持续性相结合的基本原则。首先，应坚持“生态优先、协同治理”的理念，在满足水土流失防控需求的基础上，注重生态系统整体结构的优化与功能协调。其次，应遵循因地制宜原则，根据地形地貌、水文条件及侵蚀特征差异，合理确定不同措施的空间布局与比例关系，避免“一刀切”式配置模式。此外，还应突出多目标统筹原则，在实现减流固土的同时兼顾生物多样性保护和碳汇功能提升，促进生态、经济与社会效益的协同发展。

（二）配置优化技术路径

从技术实践角度出发，小流域水保工程配置应构建“工程措施—植物措施—农艺措施”三位一体的复合体系。在坡面中上部优先布设坡改梯，削减径流能量并延缓汇流速度，在坡面汇流点或沟头关键节点布设谷坊以控制泥沙输移，同时在缓坡区域加强植被恢复，形成“上拦、中控、下护”的梯级防护结构。此外，可通过优化梯田间距、增加植被带宽及改善沟坡稳定结构，提高水分入渗率和土壤持水能力，从而形成稳定的生态恢复循环路径，推动小流域生态系统由被动修复向主动调控转变。

（三）管理与实践建议

在工程配置优化过程中，应同步强化管理机制与政策保障。一方面，建立完善的动态监测与评估体系，运用遥感监测与信息化手段实时评估工程效益变化，实现治理过程的精细化管理；另一方面，加大生态补偿和政策扶持力度，引导社会资本参与水土

保持工程建设,提高项目可持续运行能力。同时,还应加强基层治理能力建设,推动公众参与和生态意识提升,形成政府主导、社会协同、公众参与的多元治理格局,增强小流域水土保持的长效性。

（四）主要结论

综合研究结果表明,合理优化水保工程配置结构是提升小流域生态系统服务功能协同效益的关键路径。复合协同型配置模式在水源涵养、土壤保持、生物多样性及碳汇功能等方面均展现出

显著优势,其生态服务协同指数明显高于单一配置模式,充分体现了多措施协同作用的优越性。研究同时验证了协同评价模型在反映工程配置综合效应中的适用性,为小流域治理提供了可操作的技术支撑。总体而言,推进工程配置科学优化不仅有助于改善流域生态环境质量,也对实现区域可持续发展和生态安全保障具有重要意义。

参考文献

[1] 陈玉兰, 韩剑桥, 焦菊英, 徐倩, 陈同德, 李建军, 王楠, 白雷超. 小流域水土保持蓄排措施布局研究综述 [J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(2): 132-143.

[2] 罗芳, 潘安, 陈忠升, 张寒. 四川省土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2021, 36(4): 734-744.

[3] 荐圣洪, 丁欣明, 余欣. 面向水土生态系统服务协同的土地利用模拟 [J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9470-9484.

[4] 曹文洪, 张晓明, 张永娥, 刘冰, 王友胜, 赵阳. 水土保持碳汇内涵与测算方法 [J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 1-11.

[5] 周怡宁, 张自正, 关颖慧, 林一诚, 周金星, 刘玉国. 小滦河流域生态系统服务时空变化及权衡与协同关系研究 [J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(6): 126-135.

[6] 赵筱青, 石小倩, 李取豪, 李益敏, 黄佩. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区 [J]. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756.

[7] 王璞, 任宗萍, 马晓妮, 王凯博, 董彭蓓, 贺国凯. 黄土坡面溶解性碳流失特征及其对水土保持措施响应 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 48-56, 64.

[8] 吴胜义, 王飞, 徐干君, 马浩, 党禹杰, 吴菲. 川西北高山峡谷区森林碳储量及空间分布研究——以四川洛须自然保护区为例 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1735-1744.

郑州某污水处理厂碳排放监测研究

程顺利^{1*}, 刘文科², 王语林³, 王强³

1. 河南省科学院, 河南 郑州 450046

2. 重庆工商大学环境与资源学院, 重庆 400067

3. 国家电投集团远达环保工程有限公司, 重庆 401122

DOI:10.61369/WCEST.2025090012

摘 要 : 随着全球气候变化问题的日益严峻, 污水处理过程中产生的温室气体排放已成为环境科学研究的热点。本研究以郑州市某污水处理厂为研究对象, 通过实时监测和分析其运行过程中的碳排放情况。结果发现郑州某污水处理厂的 CO₂ 排放当量为 103.65 kg/d, CH₄ 的排放当量为 166.64 kg/d, N₂O 的排放当量为 203.46kg/d, 全厂合计每天共排放 473.75 kg CO₂eq。从排放当量看, N₂O 是污水处理厂最大的温室气体排放源。CO₂、N₂O 的排放趋势基本一致, 均在好氧池排放量较大, N₂O 在二沉池排放量也较高。此外 CH₄ 在曝气沉砂池、好氧池的排放量较大。基于这些发现, 本研究提出了针对性的减排措施, 并对未来的研究方向进行了展望。

关 键 词 : 污水处理; 碳排放; 监测; 减排

Research on Carbon Emission Monitoring of a Sewage Treatment Plant in Zhengzhou

Cheng Shunli^{1*}, Liu Wenke², Wang Yulin³, Wang Qiang³

1. Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, Henan 450046

2. College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067

3. State Power Investment Corporation Yuanda Environmental Protection Engineering Co., LTD., Chongqing 401122

Abstract : With the increasingly severe global climate change issue, greenhouse gas emissions generated during the sewage treatment process have become a hot topic in environmental science research. This study takes a sewage treatment plant in Zhengzhou City as the research object and conducts real-time monitoring and analysis of its carbon emissions during operation. It was found that the CO₂ emission equivalent of a certain sewage treatment plant in Zhengzhou was 103.65 kg/d, the CH₄ emission equivalent was 166.64 kg/d, and the N₂O emission equivalent was 203.46kg/d. The total daily emissions of the entire plant were 473.75 kg of CO₂eq. In terms of emission equivalent, N₂O is the largest source of greenhouse gas emissions from sewage treatment plants. The emission trends of CO₂ and N₂O are basically the same, with larger emissions in the aerobic tank and higher emissions of N₂O in the secondary sedimentation tank. In addition, the discharge volume of CH₄ in the aeration grit chamber and aerobic tank is relatively large. Based on these findings, this study proposed targeted emission reduction measures and looked forward to future research directions.

Keywords : sewage treatment; carbon emissions; monitoring; emission reduction

引言

在全球气候变化的大背景下, 减少温室气体排放成为各国共同面临的挑战。污水处理作为城市基础设施的重要组成部分, 在改善水质的同时, 也伴随着能源消耗和碳排放问题。研究表明, 污水处理厂的运营活动, 尤其是能耗密集的处理工艺, 会释放大量的二氧化碳、甲烷等温室气体^[1]。因此, 开展污水处理厂的碳排放监测, 对于理解和控制这一行业的碳足迹具有重要意义。此外, 通过监测数据的分析, 可以为污水处理厂的节能减排提供科学依据, 进而推动绿色低碳技术的发展和應用。

近年来, 国际上对污水处理过程中碳排放的研究逐渐增多。学者们主要关注于污水处理过程中的能量平衡、物质转化以及温室气体的产生机理^[2]。例如, 一些研究集中在活性污泥法中的微生物代谢活动对甲烷和亚硝酸盐氧化还原反应的影响。国内研究则更侧重于实际工程案例的碳排放核算和节能潜力分析^[3]。然而, 目前关于污水处理厂全面碳排放监测的研究仍然较少, 尤其是在中国, 缺乏系统的

监测方法和长期的监测数据积累，特别是对于处理量较小的污水处理厂，其排放规律研究较为缺乏。

鉴于此，本研究旨在填补该领域的研究空白，通过对郑州某污水处理厂进行全面的碳排放监测，揭示其碳排放的特征和规律。具体内容包括：（1）解析污水处理厂的碳排放监测规律；（2）提出基于监测结果的减排建议。通过本研究，期望为污水处理厂的环境管理和政策制定提供科学依据，同时为相关领域的研究者提供参考。

一、材料与方法

（一）研究区域概况

本研究选取位于郑州的一家日处理小于5千吨的小型污水处理厂作为研究对象。该厂采用传统的活性污泥法（A²O工艺）进行污水处理，包括初级沉淀、生物反应、二级沉淀等主要步骤。厂区内设有完善的自动化监控系统，能够实时记录各项操作参数。

（二）实验材料

实验所用材料主要包括用于校准仪器的标准气体（CO₂、CH₄、N₂O），以及用于样品保存和运输的容器。所有化学试剂均为分析纯或更高纯度，确保实验结果的准确性。

（三）实验设备与仪器

碳排放的监测使用了高精度的红外气体分析仪，该仪器能够准确测定CO₂、CH₄、N₂O的浓度。此外，还使用了便携式气象站来记录风速、风向、温度、湿度等气象数据，以便后续数据分析时考虑天气条件的影响。数据采集系统用于连续记录监测数据，并通过无线网络传输至中央数据库。

（四）监测方法

碳排放的监测遵循了国际通行的方法学标准^[4]。具体而言，采用了静态箱法结合动态通量室法来估算不同处理单元的气体排放量^[5]。每个关键处理单元均设置了多个采样点，以确保数据的代表性和可靠性。

二、结果

（一）水体温室气体浓度测定结果

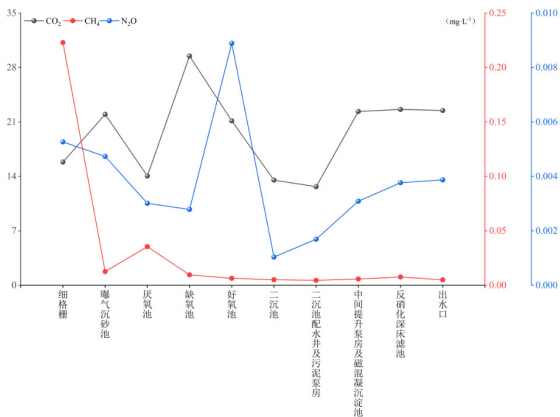


图1 污水处理厂水体中CO₂、CH₄、N₂O的水体浓度

图1所示为污水处理厂水体中CO₂、CH₄、N₂O在水体中的浓度。从图中可知，CO₂浓度变化范围为10.21–39.48 mg/L，

且呈现先增长后降低趋势；N₂O浓度变化范围为0.001–0.078 mg/L，沿层变化与CO₂的变化趋势一致。CH₄浓度变化范围为0.0023–0.34 mg/L，且呈现沿程降低趋势，其原因可能是沿程CH₄被氧化。

（二）排放通量结果

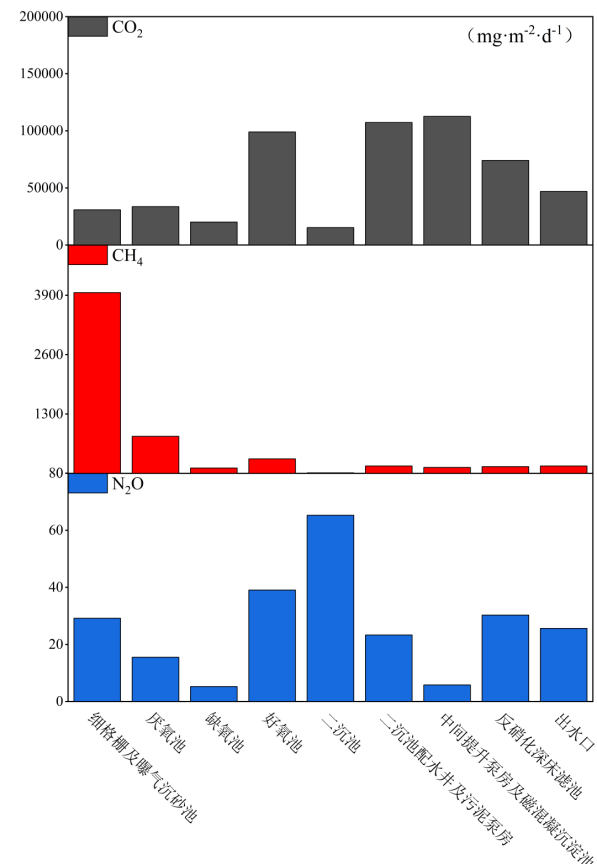


图2 排放通量结果

图2所示为污水处理厂CO₂、CH₄、N₂O排放通量。通量变化幅度为CO₂>CH₄>N₂O，其中CO₂通量变化范围在7932.40–198368.52 mg/m²/d；N₂O通量变化范围在0.78–131.49 mg/m²/d；CH₄通量变化范围在9.73–5230.72 mg/m²/d。同时，CO₂通量在好氧池、二沉池、磁混凝沉淀池部分通量较高，N₂O在好氧池、二沉池部分通量较高，CH₄在曝气沉砂池部分通量较高。

（三）排放量结果

表1显示是污水处理厂CO₂、CH₄、N₂O全厂实际排放量。CO₂、CH₄、N₂O全厂排放量分别为1036578.73 g/d、6104.20 g/d、745.29 g/d。其中CO₂排放量最大，变化范围为17264.81–631809.13 g/d；N₂O的变化范围为0.41–421.5 g/d；CH₄排放量变化范围为2.78–2367.57 g/d。图3所示为污水处理厂不同处理单

元 CO₂、CH₄、N₂O 排放量变化。CO₂、N₂O 的排放趋势基本一致，均在好氧池排放量较大，N₂O 在二沉池排放量也较高。此外 CH₄ 在曝气沉砂池、好氧池的排放量较大。

表 1 污水处理厂二期 CO₂、CH₄、N₂O 全厂实际排放量

名称	全厂排放量 (g/d)	排放当量 CO ₂ eq (kg/d)
CO ₂	1036578.73	103.65
N ₂ O	745.29	203.46
CH ₄	6104.20	166.64
合计		473.75

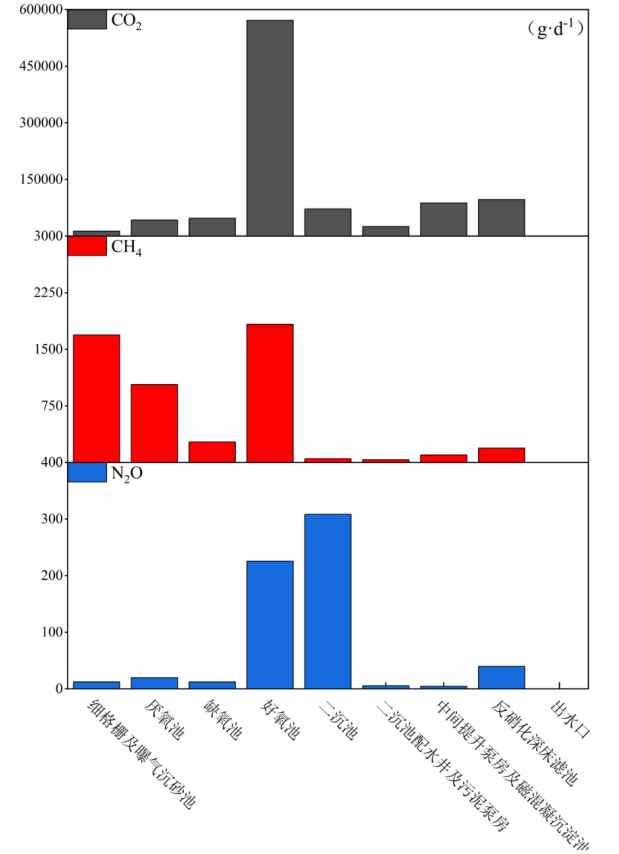


图 3 所示为污水处理厂不同处理单元 CO₂、CH₄、N₂O 排放量变化

（四）减排潜力与建议

基于本研究的发现，提出以下减排建议：首先，优化厌氧消化过程，通过改进搅拌和加热系统，提高沼气的捕获效率，减少甲烷逸散。其次，调整曝气策略，避免不必要的过度曝气，同时探索使用高效节能的曝气设备。再次，加强污泥管理，采用先进的污泥减量化技术，减少污泥处理过程中的能源消耗。最后，实施综合能源管理计划，提高整体能源利用效率，降低碳排放强度。通过这些措施的实施，有望显著降低污水处理厂的碳排放，为实现可持续发展目标做出贡献。

将本研究的结果与其他类似研究进行比较，可以发现一些共性和差异，这可能是由于地理位置、气候条件、污水处理工艺和管理水平的不同所致^[6-8]。尽管本研究提供了有关污水处理厂碳排放的宝贵信息，但仍存在一定的局限性。例如，监测周期的限制可能未能完全捕捉到极端天气事件对碳排放的影响^[9]。此外，由于资源和设备的限制，本研究未能涵盖所有潜在的碳排放途径。未来的研究应考虑更长时间的监测，以及更广泛的排放源，以便更准确地评估污水处理厂的整体碳足迹^[10]。同时，鼓励开展跨区域和跨国界的合作研究，以促进全球范围内污水处理行业碳排放的标准化监测和减排技术的发展。

三、结论

郑州某污水处理厂的 CO₂ 排放当量为 103.65 kg/d，CH₄ 的排放当量为 166.64 kg/d，N₂O 的排放当量为 203.46 kg/d，全厂合计每天共排放 473.75 kg CO₂eq。从排放当量看，N₂O 是污水处理厂二期最大的温室气体排放源。CO₂、N₂O 的排放趋势基本一致，均在好氧池排放量较大，N₂O 在二沉池排放量也较高。此外 CH₄ 在曝气沉砂池、好氧池的排放量较大。

参考文献

[1] 刘红光, 范晓梅, 刘卫东. 城市活动碳足迹计量及其对城市规划的启示——以北京市为例 [J]. 城市规划, 2012, 36, 45-50.

[2] 夏天虹, 张清东, 董桂君. 小城镇污水处理厂生命周期的碳排放评估 [J]. 四川环境, 2018, 37, 135-140.

[3] 杨健, 陆雅森, 施鼎方. 运用生命周期分析 (LCA) 评估和选择废水处理工艺 [J]. 工业用水与废水, 2000, 4-6.

[4] 于小迪, 董大海, 张晓飞. 产品碳足迹及其国内外发展现状 [J]. 经济研究导刊, 2010, 182-183.

[5] Aboobakar A, Cartmell E, Stephenson T, et al. Nitrous oxide emissions and dissolved oxygen profiling in a full-scale nitrifying activated sludge treatment plant[J]. Water Research, 2013, 47(2):524-534.

[6] Daelman M R, van Voorthuizen E M, van Dongen U G, et al. Methane emission during municipal wastewater treatment[J]. Water Research, 2012, 46(II):3657-3670.

[7] Yan X, Li L, Liu J. Characteristics of greenhouse gas emission in three full-scale wastewater treatment processes[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(2): 256-263.

[8] 张代钧, 卢迎波, 成连虎. 污水处理厂碳排放及其削减途径研究 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 13-19.

[9] 刘杨, 孙晓杰, 王文国等. ASM2D 模型模拟污水处理过程碳排放的研究 [J]. 山东化工, 2023, 52(17): 232-235.

[10] 李豪, 徐祖信, 尹海龙等. 我国城镇污水处理厂碳排放核算研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2023, 45(02): 252-257+263.

基于状态监测的大型水泵预防性维护体系构建思考

郁昊

苏州市河道管理处, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/WCEST.2025090013

摘 要 : 本文针对大型水泵故障诊断和维护的需求, 系统分析了机械故障、水力故障以及电气故障的典型模式。提出基于振动、温度、压力-流量等多参数的状态监测方案, 构建了数据采集、信号分析、故障诊断、维护决策四层预防性维护体系。通过物联网技术实现多源数据传输和边缘-云端协同存储, 结合特征工程提取故障敏感参数, 采用支持向量机、卷积神经网络等智能算法实现故障分类和剩余寿命预测。

关 键 词 : 大型水泵; 状态监测; 预防性维护; 故障诊断

Thoughts on the Construction of a Preventive Maintenance System for Large Water Pumps Based on Condition Monitoring

Yu Hao

Suzhou River Management Office, Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract : This article systematically analyzes the typical modes of mechanical, hydraulic, and electrical faults in response to the needs of fault diagnosis and maintenance for large water pumps. A state monitoring scheme based on multiple parameters such as vibration, temperature, pressure flow rate, etc. was proposed, and a four layer preventive maintenance system was constructed, including data acquisition, signal analysis, fault diagnosis, and maintenance decision-making. By using IoT technology to achieve multi-source data transmission and edge cloud collaborative storage, combined with feature engineering to extract fault sensitive parameters, intelligent algorithms such as support vector machines and convolutional neural networks are used to achieve fault classification and remaining life prediction.

Keywords : large water pump; status monitoring; preventive maintenance; fault diagnosis

大型水泵在水利、电力、市政等很多领域都广泛应用, 它可是流体输送系统中的核心设备, 它长期处在高负荷、多尘又潮湿的环境中, 容易出现轴承磨损、汽蚀、绕组短路等各类故障, 这会导致系统停机甚至引发安全事故, 传统的定期维护模式存在过度维护或者故障漏检的风险, 很难适应现代化的运维需求。

一、大型水泵故障模式与状态监测参数分析

(一) 大型水泵典型故障模式

1. 机械故障

机械故障主要是源于运动部件的摩擦、磨损或者结构失效, 轴承作为核心支撑部件, 长期承受着径向和轴向的载荷, 容易因为润滑不足或者装配偏差, 导致滚道剥落、滚子裂纹或者保持架断裂。在运行中会表现出异常振动或者异响, 轴系故障大多是由安装精度不足引发的, 如泵轴与电机轴不对中会导致联轴器偏磨和产生附加力矩, 而叶轮不平衡则会引起转子偏心旋转, 加剧轴承负荷并且产生周期性振动。密封系统故障通常表现为轴封泄漏, 机械密封面因为磨损、热变形或者杂质卡滞失去贴合性, 导致介质渗漏并且污染环境, 严重时会引起泵腔压力下降和效率损失。

2. 水力故障

水力故障是造成水泵性能退化的主要原因, 汽蚀属于最典型的水力故障, 主要是泵内局部压力低于介质饱和蒸汽压时, 液体会汽化从而形成气泡, 气泡在高压区溃灭会产生冲击载荷, 反复作用会让叶轮表面出现剥蚀、叶片变薄甚至穿孔。同时还会伴随着噪声和振动的情况, 流道异常包含流道内有异物堵塞、叶轮入口滤网破损或者导叶流道磨损, 这会导致过流面积减小、流速分布不均匀, 表现出来的就是流量下降、扬程降低或者效率大幅衰减。

3. 电气故障

电气故障会直接对设备的安全运行造成威胁, 电机绕组故障大多是由绝缘老化或者过热的情况所引起, 长期过负荷运行、电源电压波动或者环境潮湿会让绕组绝缘层出现开裂、击穿的情况, 进而形成匝间短路或者接地故障。其表现为电机温升异常、

电流增大或者保护装置跳闸，定子铁芯故障通常是因为硅钢片绝缘损坏产生了涡流损耗，从而导致铁芯局部过热、磁性能下降，严重时还会引发绕组烧毁。

（二）状态监测参数选取与监测方法

1. 振动监测

在轴承座、泵体或者电机端盖等关键部位安装加速度传感器，采集振动加速度、速度或者位移信号就能有效识别典型机械故障，在时域分析中，振动幅值的均方根值能够反映整体振动强度，峰值因子可以敏感捕捉冲击性故障，频域分析是通过傅里叶变换把时域信号转换为频谱图，特定频率成分对应着不同故障特征，如轴承故障的特征频率、转子不平衡的一倍频分量或者不对中的二倍频分量，通过连续监测振动信号的变化趋势能够早期预警轴承磨损、轴系失衡或者松动等潜在故障^[1]。以滚动轴承外圈故障为例，轴承故障特征频率计算公式如下：

$$f_o = \frac{n}{2} \times \frac{D}{d} \times (1 - \cos \alpha)$$

其中， n 为轴转速（Hz）；

D 为轴承节圆直径（mm）；

d 为滚动体直径（mm）；

$\cos \alpha$ 为接触角（°）。

2. 温度监测

轴承温度监测一般采用热电偶或者热电阻传感器，这些传感器安装在轴承外圈或者端盖的位置，能够实时监测滚动体与滚道产生的摩擦热，要是温度出现异常升高的状况，那就提示可能存在润滑不良、装配过紧或者内部磨损问题，电机温度监测需要覆盖定子绕组和铁芯这些部位，采用埋置式 PT100 传感器或者红外测温技术来进行监测，绕组温度一旦超过限定值可能预示着绝缘老化或者匝间短路现象，而铁芯温度出现异常大多与涡流损耗或者冷却系统失效存在关联。

3. 压力与流量监测

压力和流量这些参数能直接反映出水泵的水力性能以及运行状态，通过在泵的进出口管道安装压力变送器，监测进出口压力差就能计算出实际扬程，要是压力波动幅度增大可能意味着叶轮堵塞或者汽蚀发生了，流量监测会采用电磁流量计或者超声波流量计，这样能实时跟踪体积流量的变化情况，要是流量出现异常下降可能是因为进口滤网堵塞、叶轮磨损或者出口阀门误关了，监测泵腔真空度可以对汽蚀风险进行早期预警，当入口真空度接近临界值时就需要及时调整运行参数或者清理流道，对压力与流量进行联合分析能够评估水泵的效率，效率曲线出现异常偏移往往预示着水力部件的性能开始退化。水泵效率计算公式如下：

$$\eta = \frac{P_{\text{水力}}}{F_{\text{轴功率}}} \times 100\% = \frac{\rho g Q H}{1000 P_{\text{输入}}} \times 100\%$$

其中， ρ 为介质密度（kg/m³）；

g 为重力加速度（m/s²）；

Q 为流量（m³/s）；

H 为扬程（m）；

$P_{\text{输入}}$ 为电机输入功率（kW）。

4. 油液分析

油液分析是通过检测润滑油物理化学特性和污染物含量来评估机械部件磨损状态的，油液理化指标监测涵盖了粘度、酸值、水分和闪点这些方面，粘度升高有可能是因为润滑油氧化老化导致的。水分超标会降低润滑性能并且加剧机械部件的锈蚀情况，磨损颗粒分析是油液分析中的核心内容，它采用铁谱分析或者光谱分析这样的技术，能够识别颗粒的浓度、尺寸、形态以及成分等信息。

5. 电流与功率监测

电流与功率监测能够用来评估电气系统和负载状态，以此间接反映设备运行的实际工况。要通过在电机电源回路安装电流互感器，来采集三相电流信号。要是电流不平衡度超过了允许范围，就有可能提示绕组匝间短路、电源缺相或电机偏心。有功功率监测可以反映水泵实际输出的功率，功率突增可能是源于叶轮堵塞或者介质密度发生变化，功率骤降则可能与叶轮损坏或者联轴器断裂相关^[2]。

二、预防性维护体系总体框架设计

（一）体系构建目标与原则

体系构建的目标是把状态监测技术和维护管理流程整合起来，从而实现大型水泵全生命周期的高效运维，核心目标有实时掌握设备的健康状态，早期识别潜在的故障风险来避免突发停机，优化维护资源的配置，减少过度维护或者维护不足的情况以降低综合运维成本，延长设备的有效使用寿命，提升系统运行的可靠性与经济性，构建原则要满足系统性、实用性和可扩展性，系统性要求覆盖从数据采集到维护执行的全流程环节，确保各个模块能够协同联动^[3]。实用性强调技术方案要与现场工况相适应，避免过度依赖复杂算法或者高端硬件，可扩展性需要预留接口，支持新增监测参数、诊断模型或者管理功能，以适应设备升级和技术迭代的需求。

（二）体系分层架构

1. 数据采集层

数据采集层负责获取能反映设备状态的原始信息。要根据水泵的结构与故障特性情况，在关键部位部署多种类型的传感器。对于机械系统监测要选用振动加速度传感器，把它安装在轴承座、泵轴等振动敏感点^[4]。热状态监测采用温度传感器来进行，要覆盖轴承、电机绕组以及泵体表面。水力性能监测通过压力变送器与流量计，采集进出口的压力、流量数据。电气参数监测依托电流互感器与功率传感器，获取电机的电流、功率信号。传感器需要具备一定的抗干扰能力，要适应水泵运行的潮湿、多尘环境。数据采集频率要满足故障特征捕捉的需求，同时避免产生冗余的数据。

2. 信号分析层

信号分析层要对采集到的原始数据进行处理以及特征提取，从而为故障诊断提供数据方面的支撑。一开始要进行数据预处理工作，借助滤波算法把环境干扰和传感器噪声去除掉，采用平滑

处理方式消除信号上面的毛刺，并且对缺失的数据进行插值补全操作，以此确保数据的完整性。时域特征提取工作包含计算振动信号的峰值、均方根、峭度等统计量，以此反映信号的整体强度与冲击特性^[5]。频域特征是通过傅里叶变换将时域信号转换为频谱图，进而识别和故障相关的特征频率，时频域分析比较适用于非平稳信号，通过小波变换等方法来捕捉瞬时频率的变化，能够敏感识别早期出现的故障。

3. 故障诊断层

故障诊断层会根据信号分析结果来判断设备故障类型和严重程度，采用分层诊断策略开展工作，首先通过规则推理进行初步诊断工作，依据预设的阈值条件识别明显故障情况，例如振动幅度超限提示机械出现异常、温度超标预警过热风险问题，然后结合智能算法实现精细诊断操作。基于机器学习构建故障分类模型，把提取的特征向量输入训练好的支持向量机或神经网络，以此输出故障类型与发生概率，对复杂故障采用多参数融合诊断方式，通过证据理论或贝叶斯网络融合不同来源数据的诊断结果，进而提高故障诊断的准确性，诊断过程需要具备自学习能力，通过积累故障案例不断优化诊断模型，从而适应设备老化与工况变化情况。

4. 维护决策层

维护决策层需按照故障诊断结果来制定有针对性的维护策略，以此实现从状态监测到维护执行的闭环管理。一开始要进行健康状态评估，综合考虑故障类型、严重程度以及设备的历史数据，构建出健康度指数模型，从而量化设备当前的性能状态^[6]。接着要基于健康度指数与剩余寿命预测结果，制定分级的维护策略，对于轻度故障采用在线监测与状态跟踪的方式，对于中度故障安排计划性的维修工作，对于严重故障则触发紧急停机维护的操作。设备健康度指数（HI）计算公式如下：

$$HI = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{\text{参数}i - \text{参数}min}{\text{参数}max - \text{参数}min}$$

维护方案需考虑到资源方面的约束条件，要优化维护时间以及人员的配置情况，还需平衡好维护成本和系统的可用性，维护执行完成之后要进行效果评估工作，通过对比维护前后的各项状态参数，验证决策的有效性并且反馈到诊断模型中，以此持续优化维护策略。

三、状态监测关键技术实现

（一）物联网（IoT）数据传输与存储

物联网技术能给状态监测数据的实时采集和高效管理提供支撑，数据传输采用的是分层网络架构，感知层借助低功耗无线传

感器网络采集振动、温度等相关参数，利用 LoRa 或者 NB - IoT 技术达成远距离、低速率的数据传输，这适用于分散布置的水泵站点，核心层依靠工业以太网或者 5G 技术，保障振动频谱等高带宽数据的实时传输以满足毫秒级延迟要求^[7]。数据存储采用的是边缘 - 云端协同模式，边缘节点负责实时数据的本地化缓存与预处理，在过滤无效数据之后将关键特征上传到云端平台，云端数据库采用时序数据库来存储历史监测数据，结合关系型数据库管理设备基础信息与维护记录，通过数据压缩与冷热数据分离策略优化存储效率确保长期数据可追溯与快速查询。

（二）基于智能算法的故障诊断与寿命预测

智能算法能给故障诊断与寿命预测提供核心技术支撑，故障诊断采用“传统算法 + 深度学习”融合方案，针对典型故障利用支持向量机或随机森林模型实现快速分类，基于历史故障数据来训练模型参数，针对复杂多故障耦合场景采用卷积神经网络提取振动频谱图空间特征，结合长短期记忆网络捕捉时序依赖关系，通过端到端学习来提升诊断精度^[8]。寿命预测基于退化数据驱动方法，采用粒子滤波或高斯过程回归模型，把监测数据中的性能退化指标作为输入，构建设备剩余寿命预测模型，结合物理失效模型修正预测结果，通过动态更新模型参数适应设备老化规律变化，为维护决策提供定量依据（见表 1）。基于振动趋势的剩余寿命（RUL）预测模型如下：

$$RUL = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{RMS_{\text{极限}}}{RMS_0} \right)$$

其中，*k* 为退化速率（通过历史数据拟合）；

*RMS*_{极限} 为故障阈值；

*RMS*₀ 为当前 RMS 值。

表 1 智能算法性能对比表

算法类型	诊断准确率（%）	数据需求	计算复杂度	适用场景
SVM	85~90	中等	低	单一故障分类
随机森林	88~92	大	中	多故障识别
CNN	92~95	极大	高	频谱特征诊断

四、结论

本文针对大型水泵状态监测以及预防性维护问题，通过理论分析和整合，机械故障可以凭借振动特征频率这些参数精准定位，水力故障能依靠压力波动和效率衰减等参数来精准定位，电气故障则可通过电流不平衡与温度异常等参数精准定位，构建四层预防性维护体系实现了全流程闭环管理。

参考文献

[1] 陈凤霞. 大型水泵的运行维护与管理 [J]. 水上安全, 2023, (15): 130-132.
[2] 陈公朴. 大型水泵机组振动趋势预测方法研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(07): 38-40.
[3] 龚雪峰. 大型水泵日常维护及常见故障处理探究 [J]. 水上安全, 2024, (06): 178-180.
[4] 张磊. 大型水泵维护与性能优化研究 [J]. 水上安全, 2024, (03): 157-159.
[5] 陈凤霞. 大型水泵的运行维护与管理 [J]. 水上安全, 2023, (15): 130-132.
[6] 吴志兵. 大型水泵机组检修方法探析 [J]. 科技风, 2022, (11): 94-96.
[7] 潘书鹏. 大型水泵故障诊断应用管理系统 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(01): 109-111.
[8] 王世儒. 大型水泵机组耐久性影响因素及对策分析 [J]. 时代农机, 2017, 44(03): 52-53.

铺管船张紧器控制系统研究

苏乐平, 孟旭*, 韩林青

上海振华重工(集团)股份有限公司, 中交振华海上起重铺管核心装备工程技术(上海)有限公司, 上海 200125

DOI:10.61369/WCEST.2025090014

摘 要 : 张紧器控制系统高效稳定是铺管设备作业稳定性与可靠性的保证, 是海洋工程、石油开采等领域高效运行的有力技术支撑。本研究聚焦于张紧器控制系统, 深入剖析其系统架构、工作原理与控制策略。通过探究两者的动态张力调节机制及自动化控制, 揭示其协同工作在管道铺设作业效率与安全性中的关键作用。

关 键 词 : 张紧器; 张力控制; 控制系统; 系统设计

Research on the Control System of Pipe Laying Vessel Tensioner

Su Leping, Meng Xu*, Han Linqing

ZPMC, CCCC-Zhenhua Offshore Heavy-Lift & Pipe-Laying Core Equipment Engineering Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200125

Abstract : The efficient and stable operation of the tensioner control system is the guarantee of the stability and reliability of the pipe laying equipment operation, and it is a powerful technical support for the efficient operation in fields such as marine engineering and oil extraction. This research focuses on the tensioner control system, deeply analyzing its system architecture, working principle and control strategy. By exploring the dynamic tension adjustment mechanism and automatic control of the two, it reveals the key role of their collaborative work in the efficiency and safety of pipe-laying operations.

Keywords : tensioner; tension control; control system; system design

引言

在海洋工程、石油开采等复杂严苛的作业场景, 石油管道铺设作业中张力控制的可靠性直接关乎项目成败。张紧器是铺管设备中的关键设备, 它在铺管过程中通过气动或液压对管子施加持续的压力获得摩擦力, 用驱动电机对悬浮的管线进行收放操作, 从而起到拖拽管子的作用。张紧器作为保障石油管道铺设时张力恒定的核心装备, 其稳定运行可防止因张力失衡导致的设备故障, 有效规避作业安全风险。传统张紧器在动态载荷频繁变化时, 张力调节响应迟缓、精度不足对管线铺设产生不利影响。深入开展张紧器控制系统的优化研究是必要的。打造高智能、高效率、高稳定性的新型控制系统, 可为深水铺管的发展注入新动力。

一、铺管系统组成

一套典型的简约型铺管系统包括2台张紧器、1台 AR 绞车、1套变频驱动系统和1套集控操作台, 图1为铺管系统的主要设备。

二、张紧器结构和控制说明

(一) 张紧器结构

机械结构及传动系统: 上图的张紧器上下履带夹紧力由上下压载总成内的气囊产生; 履带驱动管线由带增量编码器的变频电

机、减速箱和驱动链轮组成, 变频电机提供收放的动力, 增量编码器检测电机的实际速度并反馈至变频器, 形成速度闭环控制; 张紧器立柱上的测力传感器用于检测管线的实际受力^[1]。上压载器上下运动由丝杠传动系统控制, 其由电机、减速器、丝杠等组成, 可适应不同管径管线。

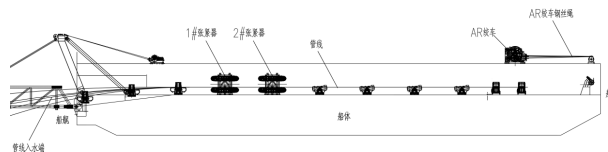


图1 铺管线主要设备

资助项目: 《深远海铺管铺缆核心装备及关键技术研究》(2024-ZJKJ-05)。

作者简介: 苏乐平(1980.05-), 男, 汉族, 上海人, 毕业于上海电机学院, 本科学历, 学士学位, 高级工程师, 研究方向: 海工装备自动化和起重铺管设计研究。

通讯作者: 孟旭, 男, 高级工程师, 博士研究生在读, 研究方向: 船舶与海洋工程。

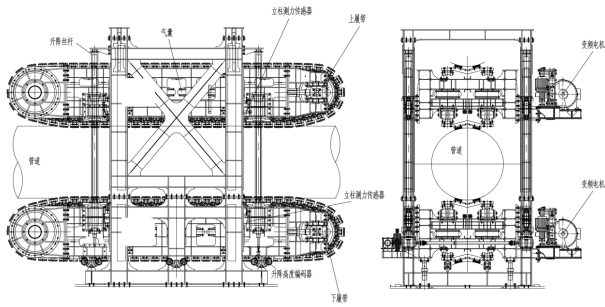


图2 张紧器结构

（二）控制核心

控制柜和变频驱动系统是控制系统硬件载体，包含可编程控制器（PLC）、人机界面（HMI）、变频模块等^[2]。PLC负责采集外部操作的指令和传感器信号、计算控制量、发送控制命令并接受反馈信号；变频器负责接收 PLC 指令并驱动变频电机。

三、张紧器系统设计

（一）控制系统硬件设计

1. PLC

本方案选用西门子 SIMATIC S7-300 系列 PLC，CPU 型号为 319-2PN/DP，具备 2 个通讯口（DP 口用于 CPU 与变频器高速通讯，PN 口用于 CPU 与人机界面 HMI 通讯），满足了复杂控制逻辑运算能力与多设备通讯的需求。

2. HMI

本方案采用施耐德 15 英寸触摸屏，集成于操作台，用于设备状态的监控、参数设定与操作指令发送。

3. 变频器

本方案采用 ABB ACS880 系列变频器，由电源模块、整流模块、逆变模块、制动模块、控制模块和接口扩展模块组成，通过调节电机速度和力矩限幅实现张力的精准控制^[3]。

（二）张紧器控制方法

张紧器控制基于反馈原理。在控制系统中，张力传感器实时监测张力并反馈至 PLC；当张力偏离预设值时，PLC 依据内置算法驱动执行机构调整张紧力^[4]。在铺管作业中，海浪、洋流、潮汐等环境因素导致管线的张力不断波动，张紧器需要能够快速响应、精准调节，以保持管线的张力处于可控范围内。

控制算法方面，常用比例-积分-微分（PID）控制算法，其根据张力偏差及变化率综合调节控制量，使张力快速稳定趋近目标值^[5]。

张紧器的核心控制目标是通过动态调节确保石油管道张力恒定，防止因张力失衡导致管道损坏或其他安全风险。张紧器的收放张力直接影响管线铺设深度，通过驱动电机控制可实现管线恒张力自动控制^[6]。在铺设过程中，管线受自重、海浪、海流等因素影响，弯曲应力不断变化，通过张紧器张力精准调节，使管线受力始终处于允许范围。

从软硬件综合考虑，本控制系统具备手动速度模式、待机模

式、自动恒张力模式，可在管线外载变化时实现自动收放管的作业。

（三）张紧器的操作流程设计

1. 上管操作

制动器打开，启动丝杠传动系统，顶升上压载器至足够高度，以便容纳管线进入。顶升到位后，停止丝杠电机，关闭制动器。利用外力拖动管线搁置在张紧器下压载器上，注意避免结构干涉。此时，上、下压载器的空气弹簧内部气压为 0，压载轮与其联系梁搁置在结构上，管线则搁置在链轨上，管线的重力最终传递到下压载结构。启动下压载器的驱动装置，以额定转速的 1/4 运转链轨，利用摩擦力拖动管线进入张紧器合适的位置。停止电机运转。

2. 夹管操作

根据管径实际的大小，重新调整上感应传感器的高度。打开制动器，启动丝杠传动系统，下降上压载器直至感应到上感应传感器后自动停止，关闭制动器。此时上压载器处在正确的工作高度^[7]。根据铺管前的管径及张紧力需求，设定气动系统的平衡气压值。启动空压机进行缓慢充压，直到特定压力后停止；管线在上、下压载器的空气弹簧作用下，到达某一高度处受力平衡后并停止。评估管线平衡后的管线高度、上下压载器空气弹簧行程的差距、气压值大小等，若与预先设定值有较大差距，则应调整或重新加载。启动张紧器 2 个驱动电机，以 1/4 额定速度移动管线，调整到合适的工作位置。

3. 初始放管

一步张紧器等待；二步待其余工作完成后（比如焊接管线），手动控制张紧器主动反转，以额定转速放出管线一段距离后停止。操作一步和操作二部循环。初始放管时，管线入海端并没有张紧力或张紧力很小，而这时候管子还没有放足^[8]。此时若采取正常工作模式的静带控制，可能导致张紧器一直收管，就放不了管，故需采取手动控制模式。直至释放了一定长度的管线，管线在受到拉应力或弯曲应力两方面时，才可进入正常工作模式。若检测到张紧力已经达到了静带以内，就可以开启正常工作模式。

4. 正常工作模式

切换张紧器为正常工作模式。所谓张紧器正常工作模式：当检测到张紧力小于静带下限时，为了避免管线有可能弯曲应力过大损坏，故需电机主动以额定速度反转（速度可设置），收拉管线，直到管线张紧力到达静带范围内；当检测到张紧力在静带范围以内变化时，张紧器应牢牢的抱住管线保持静止；当检测到张紧力大于静带下限时，为了避免管线拉应力损坏，故需电机能够被张紧力拉动反转，以额定转速（速度可设置），匀速放出管线，直到管线张紧力回到静带范围内^[9]。

5. 正常放管与收管

控制电机反转，释放一定长度的管线后停止。初始放管也可看成是正常放管的第一种模式。

注意正常放管和初始放管有不同之处，初始放管可能需要电机主动带动管线下放；正常放管则是电机被动控制管线下放；这两种情况电机出轴扭矩的方向可能是相反的。操作 a 和操作 b 循环

轮替，管线源源不断地被放下。正常收管切换成手动控制模式。控制电机主动转动，以额定速度（速度应可调）收进管线。

（四）控制模式设计

1.手动模式

仅用于维护和预操作，具体功能支持张紧器的压载器高度调节、夹紧、收管/放管操作。

2.自动张力模式

张紧器和 AR 绞车均以恒定管张力为目标，操作员设定张力点。张紧器张力数据来自结构集成的测量单元，AR 绞车数据来自测量滑轮。PLC 软件集成数字控制环，允许调节增益、死区等参数优化铺管条件。张力在设定点周围死区内时保持静止；低于死区下限自动收管；高于死区上限自动放管，减少管线不必要移动。

3.自动扭力模式

自动扭力模式作为自动张力模式的备份，用于张力传感器失效的工况。张紧器以恒定电机扭力（电流）工作，电机扭力保持在设定张力值（%），操作员可调节扭力设定点，适用于浅水铺管作业时特殊操作。

（五）人机界面与控制流程

1.人机界面功能

操作台布置于船舶驾驶室，人机界面（HMI）内嵌于操作台，下图为核心功能自动恒张力控制操作界面，具体有以下基本功能：

- （1）设备状态实时监控（张力值、电机转速、传感器状态等）。
- （2）控制参数设定（设定张力、张力上/下静带、动态补偿、静态补偿等）。
- （3）操作模式切换与手动指令发送。

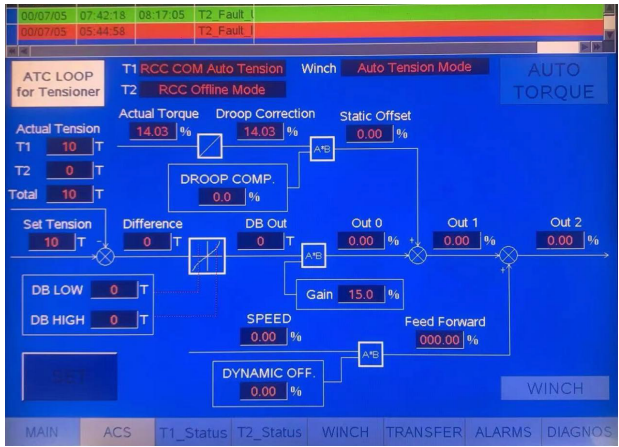


图3 自动张力控制控制流程 HMI 画面

张紧器的自动恒张力控制最终式通过变频器控制电机的速度与转矩限幅，这个也就是张紧器张力控制环的控制方法，下图为控制流程图和程序控制流程说明。

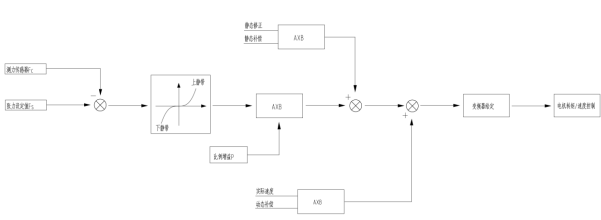


图4 控制流程图

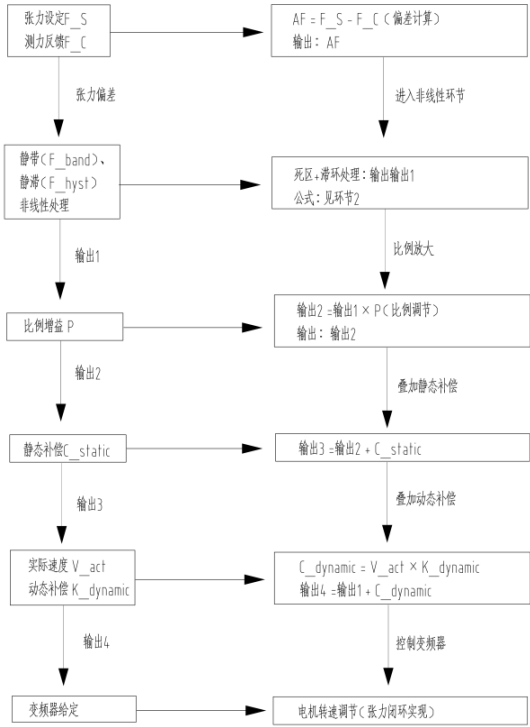


图5 程序控制流程说明

2.张力控制环设计说明

控制系统构建了力-速度双闭环控制体系，详细见控制流程图说明。包括内环与外环：

（1）内环（力闭环）：张力传感器实时监测实际的张力并反馈至 PLC；PLC 对比实际张力与设定张力值，通过 PID 算法调节变频器输出，控制电机的扭矩和转速，使张力快速趋近设定的目标值。

（2）外环（速度闭环）：编码器检测到电机实际转速，反馈至变频器形成速度的闭环，确保电机转速稳定，为张力调节提供精准的执行基础。

3.参数调节

（1）增益：为调节系统对张力偏差的响应灵敏度。增益过高易导致张力波动过大，过低则系统响应迟缓；需根据海况、管径等工况灵活调整。

（2）动态补偿：应对船体因海浪、洋流导致的张力波动，当张力因船体运动快速变化时，动态补偿增加额外速度斜坡，使系统响应超前于波动，减少张力超调的情况^[10]。

（3）静态补偿：主要解决管线静止时钢丝绳的微小蠕动问

题。当蠕动导致张力下降时，系统自动产生向上补偿动作，维持张力稳定。

四、结论

张紧器恒张力控制技术是保障铺管船高效安全作业的核心。该控制系统依托 HMI、PLC、变频器、张力传感器、电机及编码器等组件，通过 PLC 与变频器的高速通讯构建力-速度的双闭环控制体系并实时调控。该控制系统创新点在于灵活的参数调节与

多模式协同：增益与动态偏差的精准干预使系统快速切换响应特性，适应海浪、潮汐、铺设速度变更等复杂工况；手动 / 自动模式、张力 / 扭力模式及张力转移模式的无缝切换，确保从管线装载到铺设完成的全流程稳定可靠。静态补偿解决了管线静止时的蠕动问题，动态补偿则提升了系统对环境扰动的抗干扰能力。该控制系统的应用大幅提升了铺管作业的效率与安全性，为海洋工程、石油开采等领域的设备高效运行提供了有力技术支撑，具有广阔的推广价值与应用前景。

参考文献

[1] 张俊亮, 王晓波, 林立, 赵冬岩, 钟朝廷, . 电驱式张紧器恒张力控制系统研究与开发 [J]. 石油机械, 2008 年第 36 卷第 9 期: 167-178.

[2] 万剑波, 王福山, 雷江河, 周军峰, 赵冬岩, 钟朝廷, . 电驱式张紧器恒张力控制系统研究与开发 [J]. 石油机械, 2010 年第 38 卷第 12 期: 17-20.

[3] 李琳杰, S 形铺管船张紧器仿真平台构建及恒张力数学模型研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2015. DOI:10.7666/d.D751213.

[4] 张俊亮, 王晓波, 林立, 等. 铺管船用张紧器张紧系统分析 [J]. 石油机械, 2008, 36(9): 167-169, 178.

[5] 李广鑫, 曹为, 钟朝廷, 等. 深水铺管船 A&R 绞车控制系统概念设计 [J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 122-127. DOI:10.3969/j.issn.1005-9865.2011.03.018.

[6] 马晓林. 带式输送机张紧装置的研究 [J]. 机电工程技术, 2019, 48(5): 169-171.

[7] 王硕锋. 大型双滚筒摩擦绞车的设计要点 [J]. 船舶工程, 2023(S01): 216-219+233.

[8] 付万里, 白韬光, 刘贺. 深水起重铺管船 A&R 绞车系统设计研究 [J]. 船舶工程, 2015, 37(7): 50-53.

[9] 袁境声, 翁涛, 倪计民. 摩擦式自动张紧器的设计与优化 [J]. 柴油机设计与制造, 2022, 28(4): 14-19.

[10] 郭三本, 李广龙, 李利平, 等. 自动张紧器迟滞特性计算与试验分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 278-286.