

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



编委 Editorial board member

付金泽 国网冀北电力有限公司唐山市丰润区供电分公司

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

张世元 景德镇市水利规划设计院

Zhang Shiyuan Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

詹 丽 景德镇市水利规划设计院

Zhan Li Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

李 岩 辽宁红沿河核电有限公司

Li Yan Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

目录CONTENTS

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第1期 2025年1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.artdesignp.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:

- 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。
- 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。
- 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。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

水利工程 | HYDRAULIC ENGINEERING

- 001 浅析芳纶材料在橡胶坝中的应用 梁姝颖
Analysis on the Application of Aramid Fiber Materials in Rubber Dams Liang Shuying
- 004 遥感技术在湖泊水质污染识别与
预警中的应用研究 李壮, 李国栋, 赵剑, 赵东来, 刘正宏, 籍哲羽
Research on the Application of Remote Sensing Technology
in the Identification and Early Warning of Lake Water
Pollution Li Zhuang, Li Guodong, Zhao Jian, Zhao Donglai, Liu Zhenghong, Ji Zheyu
- 007 水利工程管理中信息化技术的深度融合与创新应用 郑存宝, 董庆岛
Deep Integration and Innovative Application of Information Technology
in Water Conservancy Project Management Zheng Cunbao, Dong Qingdao
- 011 中小型水利工程信息化建设管护存在问题及对策 刘世轩
Problems and Countermeasures in the Information Construction and
Management of Small and Medium-sized Water Conservancy Projects Liu Shixuan
- 014 近二十年洞庭湖区洲滩演变及其影响研究 邹银翔, 张泽
Analysis of the Spatiotemporal Changes in Wetland Vegetation and the
Lake Basin Variation Patterns in the Dongting Lake Area Zou Yinxian, Zhang Ze
- 018 浅谈水利工程施工技术要点 刘军
A Brief Discussion on Key Points of Water Conservancy Engineering
Construction Technology Liu Jun
- 021 数智管控下水管道泄漏预警技术对策 王兵, 熊伶, 蒋有, 黄才生
Countermeasures for Water Pipeline Leakage Warning Technology under Digital
Intelligence Control Wang Bing, Xiong Ling, Jiang Yougao, Huang Caisheng
- 024 新基建背景下水利工程造价管理数字化转型路径研究 徐晓欢
Research on the Digital Transformation Path of Water Conservancy Project
Cost Management in the Context of New Infrastructure Xu Xiaohuan
- 027 截流技术在水利施工技术中的应用策略 李鹏
Application Strategy of Interception Technology in Water Conservancy
Construction Technology Li Peng
- 030 水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化研究 张立娟
Research on Optimization of Energy Dissipation Structure Shape for
Reservoir Hub Flood Discharge Structures Zhang Lijuan
- 033 水利工程施工管理的质量控制措施分析 赵文博
Analysis of Quality Control Measures for Water Conservancy Engineering
Construction Management Zhao Wenbo
- 036 水利水电工程施工中监理与检测的协同机制探究 陈和君
Study on the Coordination Mechanism of Supervision and Testing in Water
Conservancy and Hydropower Engineering Construction Chen Hejun
- 039 水利水电工程施工安全风险防控体系构建研究 唐恩棚
Research on the Construction of Safety Risk Prevention and Control
System for Hydraulic and Hydropower Engineering Construction Tang Enpeng
- 042 大口径PCCP管道在水利供水工程中的应用 王鑫
The Application of Large-Diameter PCCP Pipes in Water Conservancy
Water Supply Projects Wang Xin

045	水质中重金属元素对人体健康的潜在危害与影响机制 Potential Hazards and Impact Mechanisms of Heavy Metal Elements in Water Quality on Human Health	赵剑, 李昌, 国林, 胡宸, 凌昕, 赵思佳, 王旭, 高基景, 崔大鹏, 赵东来, 孙岐发 Zhao Jian, Li Chang, Guo Lin, Hu Chen, Ling Xin, Zhao Sijia, Wang Xu, Gao Jijing, Cui Dapeng, Zhao Donglai, Sun Qifa
-----	--	---

电力工程 | POWER ENGINEERING

048	风力发电机组电气与控制系统快速检修思路研究 Research on Quick Maintenance Approach for Electrical and Control Systems of Wind Turbines	赵海琦 Zhao Haiqi
051	电价政策调整对电力营销稽查重点的影响与应对 The Influence and Response of Electricity Price Policy Adjustment on the Focus of Electricity Marketing Inspection	徐琛苑, 侯家乐 Xu Chenyuan, Hou Jiale
054	基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统 Wind Power Fire Early Warning and Prevention System Based on Thermal Array and Ultraviolet Spark Detection Mechanism	张贵龙, 何俊杰, 陈从禹, 刘国正 Zhang Guilong, He Junjie, Chen Congyu, Liu Guozheng
058	智能工业厂房低压供电系统可靠性分析 Reliability Analysis of Low-Voltage Power Supply and Distribution System in Intelligent Industrial Factory	张盼, 杜飞扬 Zhang Pan, Du Feiyang

浅析芳纶材料在橡胶坝中的应用

梁姝颖

天津市水务规划勘测设计有限公司，天津 300204

DOI:10.61369/WCEST.2025010001

摘要： 本文深入探讨芳纶材料在橡胶坝中的应用。通过阐述橡胶坝的应用与发展，分析芳纶材料的性能特点，对比锦纶浸胶帆布与芳纶浸胶帆布在橡胶坝中的应用案例，揭示芳纶材料在提升橡胶坝性能、降低施工难度等方面的显著优势，同时对其应用效益、前景与挑战进行分析，为橡胶坝工程材料的选择与技术发展提供参考。

关键词： 芳纶材料；橡胶坝；性能优势；应用案例

Analysis on the Application of Aramid Fiber Materials in Rubber Dams

Liang Shuying

Tianjin Water Resources Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

Abstract： This paper delves into the application of aramid fiber materials in rubber dams. By elucidating the application and development of rubber dams, analyzing the performance characteristics of aramid materials, and comparing the application cases of nylon dipped canvas and aramid dipped canvas in rubber dams, it reveals the significant advantages of aramid materials in improving the performance of rubber dams and reducing construction difficulty. Simultaneously, the paper analyzes the application benefits, prospects, and challenges, providing a reference for the selection of rubber dam engineering materials and technological development.

Keywords： aramid materials; rubber dams; performance advantages; application cases

引言

橡胶坝作为传统水工建筑，因造价低、施工快、水位调节灵活，在水利灌溉、城市景观等领域广泛应用。随着水利工程发展，对其性能要求提高，传统坝袋材料强度不足、耐久性差等问题凸显。芳纶材料是高性能纤维，具备高强度、耐腐蚀、耐高温等优势。将其应用于橡胶坝，能提升力学性能、耐久性和耐高温性，还可减重、降低施工难度与成本，对推动橡胶坝技术发展及水利工程提质增效意义重大。

一、芳纶材料概述

（一）芳纶材料的定义与分类

芳纶是芳香族聚酰胺纤维的简称，它是由酰胺键连接芳香环形成的高分子化合物。芳纶主要分为两大类：一类是全对位芳纶，如聚对苯二甲酰对苯二胺（PPTA），其分子链呈伸直链状，具有超高的强度和模量；另一类是间位芳纶，如聚间苯二甲酰间苯二胺（PMIA），其分子链呈锯齿状，具有良好的耐高温性能和绝缘性能。目前，芳纶在耐热、耐化学性能好的同时，强度和刚性都很高。它可以在高温下使用，具有的阻燃性能，被广泛应用于防弹衣、建筑等领域。芳纶纤维还可以制成复合材料，用于制造高强度、轻量化的零部件^[1]。在橡胶坝应用中，主要使用的是全对位芳纶。

（二）芳纶材料的性能特点

芳纶作为高性能纤维材料，在强度、模量、耐化学腐蚀性、

耐高温性和耐疲劳性上优势显著。其强度和模量远超锦纶、涤纶等传统纤维，以全对位芳纶为例，拉伸强度达3.6–4.1GPa，拉伸模量达120–160GPa，是普通钢材5–6倍，能大幅提升橡胶坝坝袋力学性能，承受更大水压和拉力，增强安全性与稳定性。芳纶分子结构中的芳香环和酰胺键，赋予其优异的耐化学腐蚀性，在酸碱盐等化学介质中化学稳定性良好，不易降解腐蚀，对长期处于复杂水环境的橡胶坝很关键，可延长使用寿命、降低维护成本^[2]。另外，芳纶分解温度超500°C，高温下性能稳定，耐疲劳性好，能承受反复载荷，有效延长橡胶坝使用寿命，减少维修更换次数。

二、橡胶坝全面解析

（一）橡胶坝概况

橡胶坝是一种以高分子合成橡胶为主体材料，锚固在基础底

板上形成封闭状的袋式挡水建筑物，主要由坝袋、锚固系统、充排水系统和控制系统等部分构成。坝袋作为主体部分，一般由多层帆布和橡胶贴合而成，承担着挡水的关键作用。锚固系统则将坝袋稳固地固定在基础底板上，以此保障坝袋在充水挡水时的稳定性。充排水系统负责把控坝袋的充水与排水工作，进而实现橡胶坝的升降以及水位的调节。控制系统用于监测和调控橡胶坝的运行状态，确保其安全可靠地运行。橡胶坝的工作原理并不复杂，在需要挡水时，向坝袋内充水或充气，使坝袋膨胀升高；而在需要泄水时，将坝袋内的水或气排出，坝袋便会收缩下降，从而顺利实现泄水操作。

（二）应用范围

在水利工程领域，橡胶坝因独特结构与功能发挥着重要作用。在农田灌溉方面，它能依据农作物需水状况灵活调节水位，实现精准灌溉，极大提高水资源利用效率，如在部分灌区，通过拦河抬高水位，确保灌溉水流入农田。在城市景观建设中，橡胶坝可形成人工湖面，改善城市生态环境与景观效果，众多城市借此营造优美水景，为市民提供休闲好去处，提升生活品质^[9]。在防洪排涝上，洪水来临时，橡胶坝能迅速降低坝高宣泄洪水，减轻下游压力，平时又能充水挡水、调节水位，广泛应用于城市河道治理，助力抵御洪涝、维护水生态平衡。

（三）与水闸、水坝的优劣势对比

在水利工程中，橡胶坝与水闸、水坝相比，优缺点分明。从优势而言，橡胶坝结构简单，施工材料用量少，工艺简便，造价一般比同规模的水闸和水坝节省30%~50%，能有效降低成本^[4]。施工周期短，仅需几个月便可建成，可迅速投入使用，满足工程紧急需求，而水闸和水坝施工常需数年。它还具备高度灵活性，能依据水流和水位变化，灵活调节坝高与水位，这是水闸和水坝难以企及的。不过，橡胶坝也存在不足。耐久性欠佳，坝袋材料受自然环境和水流影响大，使用寿命通常在15~20年，远低于水闸和水坝的50年以上。维护管理成本高，需定期修补坝袋、紧固锚固系统等。并且，橡胶坝对基础条件要求苛刻，需坚实基础底板，在强地震、大洪水等极端状况下，安全性相对较低。

三、橡胶坝坝袋材料现状

（一）以锦纶浸胶帆布为主体的坝袋材料构成

目前，橡胶坝坝袋材料主要以锦纶浸胶帆布为骨架，与耐老化橡胶贴合而成。锦纶浸胶帆布由锦纶纤维织成的帆布经过浸胶处理制成，具有良好的强度和柔韧性。坝袋一般由外层橡胶、中间帆布层和内层橡胶组成。外层橡胶主要起到耐磨损、耐老化和防腐的作用；中间帆布层提供主要的强度和支撑；内层橡胶则起到防水和密封的作用^[5]。

（二）锦纶浸胶帆布的性能特点与优势

锦纶浸胶帆布是橡胶坝坝袋常用材料，性能出色。它抗拉强度较高，能承受一定水压力和拉力，保障坝袋挡水时结构稳定；耐屈挠性良好，可适应坝袋充排水时的反复变形，不易因频繁伸

缩而损坏；还具备较好的耐磨耐腐蚀性能，在一定程度上延长坝袋使用寿命，减少提前更换。在规范规定的坝高（一般小于5m）内，锦纶浸胶帆布坝袋优势显著，技术成熟、应用广泛，材料性能满足一般橡胶坝使用要求，成本相对较低，加工工艺也较简单，在保证质量的同时降低成本、提高生产效率。

（三）锦纶浸胶帆布在高坝应用的局限性

当坝高大于5m时，锦纶浸胶帆布坝袋的局限性逐渐显现。其一，随着坝高的增加，水压力增大，对坝袋强度要求更高，需要增加帆布层数来满足强度要求，但这会导致坝袋重量大幅增加。其二，坝袋重量过大带来了加工不便、运输困难、安装难度加大等一系列问题^[6]。例如，在运输过程中，需要大型的运输设备，增加了运输成本和难度；在安装过程中，由于坝袋重量大，需要使用大型的吊装设备，且安装精度难以保证，增加了施工安全风险。

四、芳纶浸胶帆布特性及应用潜力

（一）芳纶材料性能优势

与锦纶相比，芳纶在多项关键性能上更胜一筹。芳纶强度与模量远超锦纶，拉伸强度和模量达锦纶数倍，相同层数和厚度下，芳纶浸胶帆布能承受更大拉力，大幅提升橡胶坝强度与稳定性。在耐高温及耐化学腐蚀方面，芳纶也明显优于锦纶，在复杂环境中性能更稳定，不易老化损坏，可有效延长橡胶坝使用寿命。此外，芳纶密度小，相同强度要求下，芳纶浸胶帆布更轻，能解决高坝橡胶坝坝袋加工、运输和安装时的重量难题。

（二）芳纶材料在其他领域的应用借鉴

芳纶材料以其卓越特性在军事和航天等领域广泛应用。在军事领域，凭借高强度和耐冲击性能，芳纶被用于制造防弹衣、头盔等防护装备，为人员安全提供有效保障。在航天领域，基于高强度、轻量化和耐高温性能，芳纶用于制造飞行器结构部件，既减轻飞行器重量，又提升飞行性能。这些成功应用为芳纶在橡胶坝中的应用提供了宝贵借鉴^[8]。在橡胶坝应用中，必须重视材料的质量控制和加工工艺的优化。比如在制造芳纶浸胶帆布时，采用先进浸胶工艺十分关键，只有这样才能确保芳纶纤维与橡胶良好结合，从而提升材料整体性能，更好地发挥芳纶材料在橡胶坝中的优势。

（三）芳纶浸胶帆布应用于橡胶坝的可行性

从性能适配维度深入剖析，芳纶浸胶帆布所具备的高强度、高模量特质，使其在承受巨大拉力与压力时依然能够保持结构的稳定性，这对于需要抵御水压力冲击的橡胶坝坝袋而言，是至关重要的性能支撑^[9]。其卓越的耐高温性能，确保在高温环境下不会出现性能劣化，保障了橡胶坝在特殊工况下的正常运行；优异的耐化学腐蚀性能，使其在复杂的水环境中能够长期稳定工作，有效延长了坝袋的使用寿命。而重量轻这一突出优势，不仅降低了坝袋的整体重量，减少了运输与安装的难度，还在一定程度上降低了工程成本。

五、乐善橡胶坝案例深度剖析

（一）工程概况

乐善橡胶坝位于潮白新河天津市宁河段，1989年建成，原坝高5m，蓄水量约3000万 m³，承担蓄淡防咸、调剂水源功能。随着宁河区用水需求增长，现有蓄水量无法满足要求，遂开展改造加高项目。改造后，坝体设计主槽底宽90m，边坡坡比1:3.8，总长143.2m，坝高提至6.5m，为单向斜坡式单跨设计。改造效果显著，里自沽闸至乐善橡胶坝段河道主槽蓄水量增至5633万 m³，有效缓解七里海湿地生态问题，保障农业供水，改善生态环境。但改造后坝高超规范的5m，带来难题。胶布经纬向设计拉力值过大，为达坝袋强度要求需增加帆布层数，且坝高致使坝袋展开面积大增，坝袋重量过大，造成加工、运输、安装困难。

（二）锦纶浸胶帆布方案分析

乐善橡胶坝坝袋若采用锦纶浸胶帆布方案，胶布为三布四胶结构，三层550kN拉力的锦纶帆布经热压后，坝袋胶布经纬向拉力达1400kN/m。胶层设计上，外覆盖胶2.5mm抗磨损，夹层胶0.5mm起粘连缓冲作用，内覆盖胶2.0mm负责防水密封，坝袋总厚16mm，总面积3744m²，重105吨。此方案虽拉力达标，但重量过大，加工需大型设备与专业人员，成本高；运输依赖大型货车与特殊装备，难度及成本大增；安装靠大型吊装设备，精度难控，易引发安全事故，严重阻碍工程推进^[10]。

（三）芳纶浸胶帆布方案分析

本工程乐善橡胶坝在坝袋材料设计上，若采用芳纶浸胶帆布方案，坝袋胶布设计为二布三胶结构，两层帆布均为拉力高达900kN的芳纶帆布。在热压工艺实施过程中，芳纶帆布会产生15%的拉力损失，经精确计算，最终坝袋胶布的经纬向拉力达到1530kN/m。在胶层厚度规划方面，外覆盖胶设定为2.5mm，主要用于抵御外界的磨损与侵蚀，保护内部结构；夹层胶厚0.5mm，起到良好的粘连与缓冲作用；内覆盖胶为2.0mm，着重负责防水与密封功能。整体坝袋设计总厚度为10mm，经测算，坝袋总面积为3744m²，重量为67吨。与锦纶浸胶帆布方案相比，芳纶浸胶帆布方案优势明显。芳纶坝袋厚度薄、自重轻，比

锦纶坝袋减重约40%，极大改善运输与吊装难题，安装更便捷。同时，芳纶坝袋强度更高，虽帆布层数减少，抗拉强度却提升10%，不仅减少橡胶用量、降低加工成本，还因结合面减少，提高了整体安全性，有力保障橡胶坝稳定运行。

（四）方案对比与决策依据

在乐善橡胶坝的建设中，材料选择对工程的多个关键环节影响重大。锦纶浸胶帆布坝袋因重量大，在加工时需大型且专业的设备，运输要特制车辆与工具，安装需大型吊装器械且精度难控，施工难度极大；而芳纶浸胶帆布坝袋重量轻，极大降低了加工、运输和安装的难度。安全可靠方面，芳纶浸胶帆布坝袋强度高，层数少，减少了结合面，降低了因结合不牢导致的安全风险，安全性显著提升；相比之下，锦纶浸胶帆布坝袋重量大，在施工过程中易出现诸如吊装不稳等安全隐患。成本效益上，芳纶浸胶帆布虽单价高，但因其重量轻、强度高，能减少橡胶材料用量，简化加工流程，从长期运营维护及工程全寿命周期角度考量，具有更好的成本效益。鉴于本工程坝高较大，采用芳纶帆布可大幅降低坝袋重量，减少帆布层数，同时提高坝袋抗拉强度，有效降低工程运输与施工难度，增强工程运行的安全性，所以工程推荐采用芳纶浸胶帆布方案。

六、结束语

通过对芳纶材料、橡胶坝的研究及乐善橡胶坝案例分析，芳纶浸胶帆布在橡胶坝高坝建设中的优势显著。其高强度、高模量、耐高温、耐化学腐蚀和重量轻等特性，是橡胶坝坝袋骨架材料的理想之选，大幅提升了橡胶坝性能与稳定性。乐善橡胶坝改造项目运行至今已5年，运行效果良好，项目证实，相较于锦纶浸胶帆布，芳纶浸胶帆布有效解决了坝袋重量大、强度不足、施工难等问题，提高了工程安全可靠性与成本效益。展望未来，芳纶材料生产技术进步有望降本，其应用前景广阔。后续研究可优化芳纶性能，如提升耐疲劳性、研发降本工艺，拓展其在各类橡胶坝工程中的应用，助力水利事业发展。

参考文献

- [1] 李国. 芳纶纤维复合材料表面改性及其高质量轮廓铣削加工研究 [D]. 山东大学, 2023.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2023.007506.
- [2] 周宇函. 氩/氮双等离子体改性对位芳纶/环氧树脂复合材料力学性能研究 [D]. 河北科技大学, 2023.DOI:10.27107/d.cnki.ghbku.2023.000875.
- [3] 熊恬. 芳纶复合材料对体育产业创新发展的影响 [J]. 塑料助剂, 2023, (06): 58–61.
- [4] 刘宇升, 路玉琢, 张田, 等. 芳纶滤料的粉尘过滤性能 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2023, 36(05): 16–22+30.DOI:10.13338/j.issn.1006-8341.2023.05.003.
- [5] 乔远见, 黄正胜, 夏晨斌, 等. 碳纤维/芳纶纸基复合材料的制备及其电磁参数调控技术研究 [J]. 中国造纸, 2023, 42(10): 33–37+104.
- [6] 石文天, 王林, 刘玉德, 等. 微铣削芳纶纤维增强复合材料切削力信号特征试验研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 325–334.
- [7] 于意, 徐长刚, 邱长玉, 等. 芳纶柔性防刺材料的研究进展 [J]. 山东纺织科技, 2023, 64(04): 52–56.
- [8] 蔡玄龙, 倪妮, 张兆峰. 碳纤维与芳纶纤维增强环氧树脂复合材料的动态力学性能 [J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(07): 1–4+8.
- [9] 伍悦明, 吴铠, 王萍, 等. 芳纶平纹机织/非织造混杂结构复合材料低速冲击性能的有限元分析 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(06): 30–41.
- [10] 庞晓华. 芳纶及其复合材料在体育运动中的应用 [J]. 塑料助剂, 2023, (03): 58–61.

遥感技术在湖泊水质污染识别与预警中的应用研究

李壮^{1,2}, 李国栋^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 赵东来^{1,2}, 刘正宏^{1,2}, 籍哲羽^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150000

DOI:10.61369/WCEST.2025010002

摘要 : 本文概述了湖泊水质污染的常见类型及成因, 并探讨了传统湖泊水质监测手段的局限性。在此基础上, 详细介绍了遥感技术在湖泊水质监测中的应用原理、监测水质参数与变化趋势、污染源定位与追踪, 以及遥感技术在湖泊水质污染预警中的应用。在文章最后分析了遥感技术应用的优势与挑战, 并提出了相应的解决策略。通过案例展示, 验证了遥感技术在湖泊水质监测与预警中的有效性和可行性。

关键词 : 遥感技术; 湖泊水质污染; 识别与预警; 监测优势; 挑战与策略

Research on the Application of Remote Sensing Technology in the Identification and Early Warning of Lake Water Pollution

Li Zhuang^{1,2}, Li Guodong^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Zhao Donglai^{1,2}, Liu Zhenghong^{1,2}, Ji Zheyu^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey Bureau, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150000

Abstract : This article summarizes the common types and causes of lake water pollution and explores the limitations of traditional lake water quality monitoring methods. Based on this, it introduces the application principles of remote sensing technology in lake water quality monitoring, monitoring water quality parameters and trends, locating and tracking pollution sources, and the application of remote sensing technology in lake water pollution early warning. Finally, the article analyzes the advantages and challenges of applying remote sensing technology and proposes corresponding solutions. Through case studies, the effectiveness and feasibility of remote sensing technology in lake water quality monitoring and early warning are verified.

Keywords : remote sensing technology; lake water pollution; identification and early warning; monitoring advantages; challenges and strategies

引言

湖泊作为地球生态系统的重要组成部分, 其水质状况直接关系到生态平衡和人类健康。然而, 随着工业化和城市化进程的加快, 湖泊水质污染问题逐步加剧, 对生态环境和水资源安全构成了巨大威胁。传统的湖泊水质监测方法在全面性、实时性和成本效益方面存在局限, 难以满足现代湖泊保护的需求。遥感技术作为一种新兴的监测手段, 在湖泊水质污染识别与预警方面展现出了显著的优势。本文旨在探讨遥感技术在湖泊水质监测中的应用, 分析其优势与挑战, 并提出相应的解决策略, 以期为湖泊水质的科学管理和生态保护提供技术支持。

一、湖泊水质污染概述

(一) 常见湖泊水质污染类型及成因

地球上淡水资源占总水量百分比的 2.8%, 但可被人类利用的淡水总量只占地球上淡水总蓄量的 0.34%, 相当于地球总水量的

十万分之三, 而这些淡水资源大部分集中在湖泊河流之中。人们可直接使用的淡水资源少之又少, 尽管如此, 大部分水资源还存在严重污染现象, 威胁着人们正常生活^[1]。

而富营养化现象尤为显著, 源于水体中氮、磷等营养物质的过量积累, 这些通常来自未经处理或处理不当的生活污水、工业

通讯作者: 籍哲羽 627660530@qq.com。

排放以及农业活动中化肥和农药的过量使用。这些营养物质加速了藻类的异常繁殖，形成了有害的水华，破坏了水体的自然生态平衡。随之而来的是水质恶化、透明度下降和恶臭气味，严重时甚至引发生生生物的大量死亡，使湖泊失去自我净化能力，陷入无法自拔的恶性循环。

重金属污染亦是一个严重的挑战。采矿、工业排放等人类活动将重金属如汞、铬、铅、镉等引入湖泊，这些重金属不仅难以分解，还能在食物链中积累。最终，它们通过食物链进入人体，引发慢性中毒，对儿童和成人的健康构成严重威胁，可能导致肾脏损伤、神经系统疾病甚至癌症。

有机物污染同样不可小觑。生活污水、工业废水中的有机物，以及水体生物和底泥释放的有机质，都在不断加剧湖泊的污染。这些有机物在微生物分解过程中消耗大量溶解氧，导致湖水缺氧，威胁水生生物的生存，破坏湖泊的生态功能。湖泊水质污染不仅对生态系统造成毁灭性打击，导致生物多样性减少和生态功能退化，还影响周边环境，危害人类健康，限制社会可持续发展。

（二）传统湖泊水质监测手段及局限

长期以来，湖泊水质监测依赖于固定的监测站点和现场采样，结合实验室分析的技术。这些站点装备了先进的传感器，能够实时监测酸碱度、溶解氧、电导率等关键水质参数，并将数据传输至管理平台^[2]。此外，技术人员会采集水样进行化学和仪器分析，以测定化学需氧量、生化需氧量、重金属离子浓度及营养盐含量等指标。

尽管这种传统方法能够精确描绘特定位置的水质状况，但其局限性也日益显现。固定监测站点只能提供局部信息，而现场采样尽管覆盖多个点，但在广阔的湖泊环境中，所获得的数据仍然显得分散，难以全面代表整个湖泊的水质状况，容易忽视局部的污染问题或水质变化趋势。此外，传统监测方法在人力物力上的投入巨大，耗时耗力，且无法实现水质的实时监控，对于突发性污染事件的响应不够迅速。鉴于此，尽管传统监测手段仍具有一定的应用价值，但其局限性催生了新技术的探索。

二、遥感技术应用于湖泊水质检测的原理与基础

（一）遥感技术基础原理

遥感技术的基础原理是基于物体对电磁波的反射、吸收、辐射等特性差异来实现对目标物体的识别与信息获取。地球上的各类物体，包括湖泊水体及其所含的不同物质成分，在不同波段的电磁波作用下，会呈现出独特的响应特征，这就为遥感技术应用于湖泊水质监测提供了理论依据^[3]。

具体而言，遥感技术主要依靠传感器来获取地球表面信息。传感器安装在诸如卫星、飞机、无人机等平台上，它们能够接收地球表面反射、辐射或散射的电磁波，并将这些电磁波信号转换成数字信号，进而开展后续的处理分析工作。在湖泊水质监测领域，常用的卫星传感器有 Modis、Landsat、Sentinel 等。

MODIS 传感器，搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上，通过宽波段覆盖捕捉湖泊反射率，有效监测水质，揭示透明度、浊度、悬浮颗粒物和叶绿素浓度。叶绿素在蓝光和红光波段的反射是评估水质的重要指标。Landsat 系列传感器（TM、ETM+、OLI）以其高分辨率和长期记录，提供精细湖泊数据，大气和几何校正提高

了溶解氧、叶绿素估算的准确性^[4]。Sentinel 系列传感器则通过高分辨率、广泛覆盖数据，揭示了悬浮物和有机污染物含量，对水质监测至关重要。

（二）水质参数与遥感数据关联

遥感技术在湖泊水质监测中的应用，核心是利用传感器捕捉的水体反射率来反演水质参数。例如，MODIS 传感器能够覆盖宽波段，获取湖泊的自然光反射率，进而分析出透明度、浊度、悬浮颗粒物和叶绿素浓度等。为确保数据准确，需进行辐射定标和大气校正等预处理。通过 Python 等编程语言和算法，可以计算出反射光谱率，并依据经验关系反演水质参数。研究者已建立光谱反射率与叶绿素、悬浮物等参数的关系，并在实践中验证了其监测水质的有效性。这一方法基于物质在特定波段的吸收和反射特性，随着技术进步和案例验证，已成为一种超越传统手段的广范围、动态监测工具。

三、遥感技术在湖泊水质污染识别中的应用

（一）监测水质参数与水质变化趋势

遥感技术实现对湖泊水质的深度监测与分析，有效判断和预防污染。叶绿素 a 的浓度通过可见光和近红外波段反射率的变化来反演，其浓度升高指示浮游植物的过度繁殖，预警富营养化风险。悬浮物含量通过光谱特征分析估算，识别水体是否受泥沙、有机物污染。有色可溶性有机物的吸收特征揭示了水体中的含量和分布，异常升高指示有机污染。虽难以直接监测溶解氧，但可通过相关光学特性和生物活动间接推断其状况，如藻类繁殖导致的夜间呼吸作用消耗溶解氧。卫星遥感技术的连续观测提供了水质时间尺度变化，支持水资源可持续管理，而无人机遥感技术则实时监测突发污染事件，为应急响应提供信息。遥感技术成为守护水资源安全与清洁的重要工具^[5]。

（二）污染源定位与追踪

遥感技术在湖泊污染监测领域扮演着关键角色，特别是在识别和管理点源与面源污染方面。利用高分辨率遥感影像，能够精确地确定湖泊周边的点源污染源，包括工业废水排放口和生活污水排放口。这些影像不仅展示了污染源的具体位置，还结合了监测到的水质参数分布，为分析污染物在湖泊中的扩散路径和影响范围提供了依据，进而为污染治理提供了明确的目标和高效的策略。

在面源污染监测方面，遥感技术同样展现出其强大能力。它能够监测流域内的土地利用类型、植被覆盖状况、土壤湿度等关键信息，助力分析污染物的来源及其迁移路径。例如，监测农田的施肥和灌溉状况，以及降雨后地表径流的流向，可以揭示农业面源污染物如何进入湖泊及其潜在影响区域^[6]。

四、遥感技术在湖泊水质污染预警中的应用

（一）预警指标与阈值设定

在湖泊水质污染预警系统中，遥感技术的应用依赖于预警指标与阈值的科学设定，这是确保预警及时性与准确性的核心。预警指标的选择，如叶绿素浓度、悬浮物浓度和水体透明度，是基于它们与湖泊生态环境的密切相关性。叶绿素浓度反映了藻类的生长状况，悬浮物浓度揭示了水体物理状态的改变，而水体透明

度则直观体现了水质的综合状况。设定预警阈值时，需综合考虑湖泊的功能和生态环境特点^[7]。对于饮用水源地的湖泊，预警阈值应严格遵循国家水质标准；而对于渔业养殖湖泊，则需满足水生生物的生长需求。同时，不同地区的湖泊因其生态承载能力和水质背景值的差异，预警阈值也应相应调整。

（二）动态监测与预警机制

通过对比分析多期遥感数据，可以有效追踪湖泊水质变化趋势，并构建动态监测与预警系统。定期搜集的遥感影像携带着湖泊不同时期的光谱特征和关键水质参数信息。比较不同季节或时间间隔的数据，可揭示叶绿素浓度、悬浮物浓度、水体透明度等参数的时序变化。参数接近预警阈值时，系统自动启动预警。预警阈值的设定考虑湖泊功能和区域生态环境，如饮用水源地依据国家标准设定 COD、重金属含量阈值，而渔业养殖湖泊关注溶解氧含量、pH 值等指标。遥感监测数据揭示潜在威胁时，系统即时向管理部门发出警示，支持及时响应。

管理部门接警后，可迅速采取措施，如针对富营养化进行污染源排查和生态修复，对重金属污染加强工业监管和水体净化，对有机物污染提升污水处理。基于遥感技术的监测与预警机制，提升了湖泊水质污染防控能力，最大程度减轻污染影响，保障了湖泊生态系统的健康和水资源的可持续利用^[8]。

（三）案例展示——辽宁东部某湖泊水源地水质污染预警

在辽宁东部一个关键湖泊水源地中，遥感技术有效应用于水质污染监测与预警。鉴于湖泊水质对生态与人类健康的重要性，以及传统监测的局限性，遥感技术提升了监测的效率和精确度，为水生态保护提供了科学依据。研究利用 HJ1A/1B 和 Landsat8 OLI 数据，经过严格的数据处理，构建了水质监测与预警模型。通过 Pearson 分析，筛选出与水质指标高度相关的波段，建立了回归方程，并验证了模型的准确性。研究揭示了水质指标的空间分布，并建立了动态预警系统^[9]。

结果显示，研究确定了适用于水质反演的波段范围，实现了全面应急监测，并制定了灵活的预警方案，有效支持了水质保护决策。尽管存在监测重金属、水温等指标的局限性，未来工作将致力于模型优化和遥感技术应用的拓展，以提供更全面的水资源保护决策支持。

五、遥感技术应用的优势与挑战

（一）遥感技术应用优势

遥感技术在湖泊水质污染识别与预警方面，相较于传统监测

手段，展现了其独特的优势。它能够实现对广袤湖泊的大范围监测，覆盖传统方法难以到达的偏远或复杂地形区域，同步获取整个水域的宏观状况，确保了水质监测的全面性。与此同时，遥感技术的快速实时特性，使得它能够及时捕捉到水质异常变化，为突发污染事件的快速响应提供了可能。此外，相较于昂贵的实地采样和实验室分析，遥感技术的成本相对较低，减轻了监测工作的资源负担。最重要的是，遥感技术能够进行长期动态监测，通过多期遥感数据的对比分析，有效追踪湖泊水质的变化趋势，建立起动态监测与预警机制。这些优势恰好弥补了传统监测的不足，为湖泊水质的科学管理和生态保护提供了强有力的技术支持。

（二）面临的挑战与解决策略

遥感技术在湖泊水质污染监测与预警领域虽有优势，但实际应用面临挑战，亟需提高其性能和精度。恶劣天气，尤其是多云多雨地区，影响遥感影像质量，从而降低监测准确性。湖泊生态系统的复杂性和污染物间的相互作用，使得遥感技术在识别微量或混合污染物时遇到难题，不同传感器数据的一致性也是挑战，限制了数据融合的应用。

为应对这些挑战，数据校准和补充观测是关键。大气校正和地面气象数据有助于减少天气影响，而多平台、多时段观测，如无人机辅助，可提高数据的质量。通过优化反演算法和深度学习技术，可以增强对复杂水质情况的处理能力。确保传感器数据一致性的关键在于多源数据融合和建立统一标准。

六、结束语

遥感技术在湖泊水质监测方面具有显著优势，能够实现广域实时监测，成本效益高，便于长期跟踪。它克服了传统监测方法的局限，全面捕捉水质变化，有效构建预警体系。尽管存在天气影响、水质反演难题和数据一致性挑战，但通过数据校准、补充观测、算法优化和数据融合等措施，如大气校正和无人机辅助，结合深度学习，提升了监测精度和数据处理能力，确保了数据的准确整合。

参考文献

- [1] 冯小涛. 基于激光诱导荧光的湖泊水质污染检测研究 [D]. 淮阴工学院, 2023.DOI:10.27944/d.cnki.ghygy.2023.000105.
- [2] 多举措推动湖泊治理 [N]. 人民日报, 2022-07-27(017).DOI:10.28655/n.cnki.nrmrb.2022.008060.
- [3] 杨智玲, 程玮. 基于无人机遥感技术的渔业养殖池塘水质监测方法 [J]. 太原师范学院学报 (自然科学版), 2023, 22(02): 35-40.
- [4] 周源. 基于低空遥感技术的河道水质监测方法 [J]. 经纬天地, 2022, (02): 23-25.
- [5] 何雄. 基于无人机多光谱遥感图像信息的水质污染监测研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(12): 58-60.
- [6] 曹淑韵, 赵起超, 曲彦达, 等. 深度学习在水利遥感领域的应用 [J]. 科技风, 2023, (15): 88-90+145.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.202315030.
- [7] 唐立羽. 无人机高光谱技术在中小河道劣 V 类水体识别中的应用研究 [D]. 中国矿业大学, 2021.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001822.
- [8] 金涛. 智能水质检测及预警方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2023.002902.
- [9] 巴诺. 环境卫星遥感反演在水源地水质应急监测预警中的精度探讨及修正方法研究 [J]. 水利规划与设计, 2020, (03): 111-116.
- [10] 张盛楠, 连帅, 肖丁源, 等. 供水水质监测预警技术研究现状 [J]. 供水技术, 2022, 16(06): 27-33.

水利工程管理中信息化技术的深度融合与创新应用

郑存宝¹, 董庆岛²

1. 济宁市水利事业发展中心, 山东 济宁 272000

2. 山东公用工程管理有限公司, 山东 济宁 272000

DOI:10.61369/WCEST.2025010004

摘 要 : 水利工程作为国家基础设施建设的重要构成, 对社会经济发展与人民生活起着极为关键的支撑作用。从广袤农田的灌溉, 保障粮食稳定丰收, 到城市供水系统的稳定运行, 维系着千万居民的日常生活, 再到防洪减灾体系守护生命财产安全, 水利工程的影响力深入社会的每一个角落。在全球数字化浪潮汹涌的当下, 信息技术以令人惊叹的速度迭代更新。信息化技术在水利工程管理领域的渗透, 早已不是浅尝辄止, 而是从广度上不断拓展应用边界, 从深度上持续深化融合程度。它宛如强大的引擎, 为水利工程管理效率的提升注入源源不断的动力, 又似精准的罗盘, 为决策的科学性提供坚实有力的保障。在这数字化时代的大背景下, 全力推动信息化技术与水利工程管理的深度融合, 并实现创新应用, 已成为水利行业顺应时代发展潮流、迈向高质量发展新征程的必然选择与核心路径。因此, 本文深入探讨水利工程管理中信息化技术的深度融合与创新应用。通过分析信息化技术在水利工程管理各环节的应用现状, 结合实际案例阐述其融合方式与创新点, 强调其对提升水利工程管理水平的重要性及带来的变革。

关 键 词 : 水利工程管理; 信息化技术; 深度融合; 创新应用

Deep Integration and Innovative Application of Information Technology in Water Conservancy Project Management

Zheng Cunbao¹, Dong Qingdao²

1. Jining Water Resources Development Center, Jining, Shandong 272000

2. Shandong Public Engineering Management Co., Ltd., Jining, Shandong 272000

Abstract : As an essential component of national infrastructure, water conservancy projects play a pivotal role in supporting socio-economic development and improving people's livelihoods. From irrigating vast farmlands to ensure stable grain harvests, to the smooth operation of urban water supply systems that sustain the daily lives of countless residents, and to flood control and disaster mitigation systems that protect lives and property, the influence of water conservancy projects permeates every corner of society. In the current global wave of digitization, information technology is iterating and updating at an astonishing speed. The penetration of information technology into the field of water conservancy project management has long gone beyond mere experimentation. Instead, it is continuously expanding the boundaries of application in breadth and deepening the level of integration in depth. Like a powerful engine, it injects a steady stream of momentum into improving the efficiency of water conservancy project management, and like a precise compass, it provides a solid and powerful guarantee for scientific decision-making. In the context of this digital era, fully promoting the deep integration of information technology and water conservancy project management, and achieving innovative applications, has become an inevitable choice and core path for the water conservancy industry to follow the trend of the times and embark on a new journey of high-quality development. Therefore, this article delves into the deep integration and innovative application of information technology in water conservancy project management. By analyzing the current status of information technology applications in various aspects of water conservancy project management, and combining practical cases to elaborate on their integration methods and innovation points, the article emphasizes their importance in improving the management level of water conservancy projects and the transformations they bring.

Keywords : water conservancy project management; information technology; deep integration; innovative application

一、信息化技术概述

信息化技术是以现代通信、网络、数据库技术为基础，对所研究对象各要素汇总至数据库，供特定人群生活、工作、学习、辅助决策等和人类息息相关的各种行为相结合的一种技术。其范畴涵盖广泛，包括但不限于数据采集技术，如传感器技术用于精准获取各类物理量数据；信息传输技术，像无线通信、光纤通信保障数据高速稳定传输；数据存储技术，包含关系型与非关系型数据库对不同类型数据的有效存储；数据分析与挖掘技术，借助算法从海量数据中提取有价值信息；以及各类新兴的智能技术，如人工智能、虚拟现实、区块链等，这些技术正深刻改变着各行业的运作模式，在水利工程管理领域也展现出巨大的应用潜力。^[1]

二、信息化技术深度融合与创新应用的意义

（一）提高管理效率

信息化技术实现业务流程自动化与智能化，极大减少人工操作环节。例如，传统人工巡检水利设施需耗费大量人力与时间，而基于物联网与图像识别的智能巡检系统可自动完成设施状态监测，快速生成巡检报告，工作效率呈数倍提升。办公自动化系统实现文件审批、信息传递电子化，缩短业务处理周期，整体大幅提高水利工程管理的工作效率。^[2]

（二）提升决策科学性

多源数据深度分析与挖掘为决策提供丰富、准确信息。通过对长期水文数据与实时气象数据的综合分析，能够更精准预测洪水、干旱等灾害发生概率与规模，辅助制定科学有效的防灾减灾决策。在水资源调配决策中，基于大数据分析的决策支持系统可考虑多种复杂因素，制定出更贴合实际需求的调配方案，提升决策的科学性与合理性。

（三）增强工程安全性

实时监测与智能预警系统利用传感器网络与数据分析算法，能够 24 小时不间断监测水利工程设施的运行状态。一旦发现异常，如大坝位移超过安全阈值、设备温度过高，系统立即发出预警信息，工作人员可及时采取措施进行处理，将安全隐患消除在萌芽状态，有力保障水利工程的安全稳定运行。^[3]

（四）促进水资源优化配置

信息化技术实现对水资源的实时动态监测与精准分析。通过对区域水资源分布、用水需求变化的实时掌握，结合决策支持系统的优化算法，能够科学合理地调配水资源。在农业灌溉、工业用水、居民生活用水之间实现平衡分配，提高水资源利用效率，缓解水资源供需矛盾。

三、信息化技术在水利工程管理中的应用现状

（一）数据采集与监测

在数据采集与监测方面，多元技术手段协同发力。以三峡水利枢纽工程为例，该工程部署了大量种类丰富的传感器。压力传感器如同忠诚的卫士，密集分布于大坝坝体，精准测量水压变化，为评估大坝结构安全提供关键数据，时刻保障着大坝在高压环境下的稳定运行。水质传感器则在库区多个点位实时检测水中各类污染物指标，确保长江中下游地区的水源质量，守护着广大区域居民的用水安全。同时，卫星遥感技术定期对三峡库区周边的水域面积、植被覆盖等情况进行宏观监测，为库区生态环境评估与水资源宏观调配提供依据。无人机也频繁出动，凭借其灵活机动性深入复杂地形区域，对大坝坝体、溢洪道等重点设施进行高清图像采集，及时发现如坝体裂缝、溢洪道损毁等细微状况，为工程维护提供详细一手资料。这些技术的综合运用，实现了从微观到宏观、从静态到动态的全方位数据获取，为准确评估三峡工程运行状态筑牢根基。

（二）信息传输与存储

信息传输依赖先进的通信网络。在南水北调中线工程中，无线通信网络尤其是 4G 乃至 5G 技术发挥了重要作用。工程沿线穿越众多偏远山区与复杂地形区域，通过建设无线基站搭建通信链路，将沿线分布的传感器采集到的水位、流量、水质等数据实时回传至数据中心。光纤网络则在数据中心与核心监测站点之间构建了高速、大容量的传输通道，确保海量数据能够高效传输。在存储环节，数据库技术不断升级。中线工程采用关系型数据库存储结构化的工程基础数据、日常运行记录等，利用其成熟的事务处理能力保障数据管理的稳定性与准确性。同时，针对海量非结构化数据，如工程建设过程中的视频资料、卫星遥感影像等，采用基于分布式架构的非关系型数据库 HBase，其强大的存储与检索性能有力保障了数据的安全性与随时可用性。^[4]

（三）决策支持系统

决策支持系统依托数据分析与挖掘技术构建。以黄河小浪底水利枢纽工程为例，通过对多年积累的历史水文数据、工程运行数据以及实时监测数据的深度分析，运用时间序列分析、聚类分析等算法，挖掘数据背后隐藏的规律与趋势。在防洪减灾决策方面，基于历史洪水数据和实时水位、流量变化，精准预测黄河洪水演进路径与峰值，为防洪预案的制定提供科学依据，有效保障黄河中下游地区人民生命财产安全。在水资源调配方面，综合考虑黄河流域用水需求、水源分布及来水情况，通过优化算法制定出最优的水资源分配方案，提升黄河水资源利用效率，保障流域内工农业生产与居民生活用水。^[5]

四、信息化技术与水利工程管理的深度融合

（一）业务流程与信息技术融合

水利工程管理涵盖规划、设计、建设、运行维护等多个复杂业务流程。在都江堰水利工程的现代化改造规划阶段，地理信息系统（GIS）与大数据分析相结合，对都江堰灌区的地形地貌、水资源分布、周边社会经济发展需求等多源数据进行综合分析，辅助制定科学合理的水利设施升级与布局优化规划，确保都江堰这一古老水利工程在新时代持续发挥灌溉、防洪等综合效益。在设计阶段，计算机辅助设计（CAD）软件不断升级，不仅能实现精确的二维、三维设计绘图，还与有限元分析软件集成，对工程结构的力学性能进行模拟分析，优化设计方案。在建设过程中，利用项目管理信息系统，通过信息化手段对工程进度、质量、成本进行实时监控与管理，确保工程按计划推进。在运行维护阶段，物联网技术让都江堰水利设施中的各类设备实现智能化连接，运维人员可通过手机或电脑远程监控设备运行参数，及时发现故障隐患并进行处理，保障工程稳定运行。^[6]

（二）数据融合

水利工程管理涉及工程数据、水文数据、气象数据、地质数据等多源数据。以雅砻江锦官电源组为例，该工程通过建立统一的数据标准与接口规范，利用数据抽取、转换、加载（ETL）工具，将分散在不同系统、不同格式的数据整合到数据仓库中。在数据仓库内，运用数据关联分析技术，将水文数据中的水位变化与工程数据中的大坝位移数据进行关联，能够更全面地评估工程运行状态。同时，结合机器学习算法对融合后的数据进行深度挖掘，发现潜在的数据关系，如气象数据中的降雨强度与库区来水流量的关联关系，为综合分析与决策提供更丰富、准确的数据支持，助力锦官电源组的科学调度与安全运行。

（三）系统集成

水利工程管理存在监测系统、调度系统、办公自动化系统等多个信息系统。在葛洲坝水利枢纽工程中，采用面向服务的架构（SOA）技术，将各个系统的功能封装成服务，通过服务总线实现系统间的通信与协作。例如，监测系统采集到的水位异常数据，能够通过服务总线及时传递给调度系统，调度系统据此做出相应的调度决策，并将决策指令反馈给相关执行设备。同时，办公自动化系统可获取工程运行状态信息，自动生成相关报告，实现业务流程的无缝衔接，大幅提升管理效率与整体运行效能，保障葛洲坝水利枢纽工程高效稳定运行。^[7]

五、信息化技术在水利工程管理中的创新应用

（一）智慧水利平台建设

智慧水利平台是信息化技术创新应用的核心载体。以浙江省的“浙水e家”智慧水利平台为例，它以云计算为基础架构，

提供强大的计算资源与存储能力，支撑海量水利数据的处理与分析。平台利用大数据技术对水利全生命周期数据进行汇聚、清洗、分析，挖掘数据价值。通过对历史用水数据的分析，预测未来用水趋势，为浙江省水资源规划提供依据。人工智能技术在平台中广泛应用，图像识别技术用于水利设施的安全巡检，自动识别设施表面的裂缝、破损等异常情况；智能语音交互技术方便工作人员查询信息、下达指令。通过该平台，管理者能够实时掌控全省水利工程全方位运行状况，基于精准数据做出科学决策，实现水利工程管理的智能化、精细化，提升了浙江省水利管理的整体水平。^[8]

（二）虚拟现实与增强现实应用

虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术在水利工程多环节发挥独特作用。在白鹤滩水电站的规划设计阶段，设计师利用VR技术创建逼真的虚拟水利工程场景，从不同视角对工程方案进行沉浸式体验，提前发现设计缺陷并优化，有效提高设计质量。在施工模拟中，通过构建基于AR的施工指导系统，将施工图纸以三维立体形式呈现在施工现场，施工人员可直观了解施工步骤与工艺要求，避免施工错误，提高施工效率。在运行维护培训方面，VR培训系统让运维人员在虚拟环境中模拟设备故障处理流程，通过反复实践提升应急处理能力，这种沉浸式培训体验极大提高了培训效果，为白鹤滩水电站的顺利建设与稳定运行提供有力支持。^[9]

（三）区块链技术应用

区块链技术凭借其去中心化、不可篡改等特性，在水利工程领域得到创新应用。在一些小型农村水利工程项目中，利用区块链技术记录工程建设资金流向、物资采购明细等关键信息，确保数据的真实性与完整性，防止资金挪用等问题发生。在工程建设项目的合同管理中，利用区块链智能合约技术，自动执行合同条款，提高合同执行的透明度与可信度。例如，在某小型水利灌溉工程的工程款支付环节，当工程进度达到合同约定节点时，智能合约自动触发支付流程，减少人为干预，降低合同执行风险，保障了小型水利工程建设顺利推进。^[10]

（四）人工智能算法优化调度

水利工程的调度决策直接影响水资源利用效率与工程安全。以丰满水电站为例，传统调度方法难以适应复杂多变的实际情况。引入人工智能算法后，通过构建包含水文、气象、用水需求等多因素的神经网络模型，对不同调度方案进行模拟预测，利用遗传算法在众多方案中搜索最优解。在水库调度中，运用这些算法综合考虑水库的蓄水量、来水情况、下游用水需求及防洪要求，制定出既能保障防洪安全又能最大程度满足供水、发电等需求的优化调度方案，提升了丰满水电站的综合效益，保障了松花江流域水资源的合理调配与利用。

六、结论

总之，信息化技术在水利工程管理中的深度融合与创新应用，为水利工程管理带来了革命性的变化。从基础的数据采集与监测，到信息传输、存储以及决策支持系统的构建，再到深度融合过程中的业务流程优化、数据融合与系统集成，以及创新应用层面的智慧水利平台建设、虚拟现实与增强现实、区块链和人工智能算法的应用，全方位提升了水利工程管理的效率、决策科学

性、工程安全性和水资源优化配置能力。随着信息技术的持续创新发展，如量子计算、边缘计算等新兴技术有望在水利工程管理领域得到应用，水利工程管理将不断向智能化、智慧化深度迈进，持续为水利行业的高质量发展注入强大动力，更好地服务于社会经济发展与人民生活需求。展望未来，水利工程管理与信息化技术的融合创新必将开拓出更为广阔的发展空间，助力解决全球水资源管理难题，推动人类社会与自然环境的和谐共生。

参考文献

[1] 朱敏. 水利工程建设管理系统研究 [J]. 治淮, 2020, (10): 62-63.

[2] 姬夏楠. 简析水利技术的信息化应用实践 [J]. 长江技术经济, 2020, 4(S2): 173-174.

[3] 马院峰. 大数据技术在水利信息化中的应用展望 [J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(09): 74-75.

[4] 李东晓. 信息技术在水利工程建设管理中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, (28): 171-172.

[5] 李震. 水利工程信息化建设必要性及发展方向初探 [J]. 珠江水运, 2020, (17): 62-63.

[6] 陈生军. 信息化技术在水利管理中的应用分析 [J]. 住宅与房地产, 2019(31): 140.

[7] 游艺林. 浅析信息化技术在工程管理中的应用 [J]. 居舍, 2020(01): 143.

[8] 刘凤军. 刍议信息化技术在农田水利工程施工管理中的应用 [J]. 农业工程技术, 2021, 41 (15) : 63+67.

[9] 李猛. 信息化技术在水利工程施工管理中的应用研究 [J]. 商品与质量, 2020 (42) : 297.

[10] 杨克傳. 信息化技术在水利工程管理中的应用 [J]. 中国科技纵横, 2020 (20) : 50-51.

中小型水利工程信息化建设管护存在问题及对策

刘世轩

通辽市水利事业发展中心, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/WCEST.2025010005

摘 要 : 中小型水利工程分布广泛, 是我国水利工程体系的重要组成部分。在当前科技发展背景下, 信息化建设管护成为提升中小型水利工程效益的关键手段。然而, 在实际推进过程中, 存在诸多问题制约着其信息化发展。因此, 本文分析中小型水利工程信息化建设管护存在的问题, 并提出相应对策, 以推动中小型水利工程信息化进程。

关 键 词 : 中小型水利工程; 信息化建设; 信息化管护; 问题; 对策

Problems and Countermeasures in the Information Construction and Management of Small and Medium-sized Water Conservancy Projects

Liu Shixuan

Tongliao Water Conservancy Development Center, Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : Small and medium-sized water conservancy projects are widely distributed and constitute an essential component of China's water conservancy project system. In the current context of technological development, information construction and management have become critical means to enhance the efficiency of small and medium-sized water conservancy projects. However, numerous issues exist in the actual implementation process, restricting their informatization development. Therefore, this paper analyzes the problems encountered in the information construction and management of small and medium-sized water conservancy projects and proposes corresponding countermeasures to advance the informatization process.

Keywords : small and medium-sized water conservancy projects; information construction; information management; problems; countermeasures

一、信息化技术概述

(一) 数据采集技术

数据采集是信息化建设的基础。在水利工程领域, 常用传感器技术实现数据采集。如压力传感器可测量水压, 用于监测水坝、管道等设施的压力状况; 水位传感器能精准获取水位信息, 为防洪、灌溉等决策提供依据; 流量传感器可测定水流流量, 便于掌握水资源动态变化。此外, 还有水质传感器, 可实时监测水体的酸碱度、溶解氧、化学需氧量等指标, 保障供水水质安全。这些传感器将物理量转化为电信号或数字信号, 为后续的数据处理与分析提供原始数据。例如, 在一些小型灌溉渠道中, 通过安装高精度的水位传感器, 能精确感知水位变化, 为农田灌溉提供精准的水位数据, 确保灌溉用水的合理分配。^[1]

(二) 数据传输技术

数据传输负责将采集到的数据传输至处理中心或存储设备。有线传输方面, 以太网技术应用广泛, 其具有传输速率高、稳定性强的特点, 适用于固定位置且距离相对较短的设备间数据传输, 如水利工程管理站内部设备连接。光纤通信则凭借其带宽大、传输损耗小、抗干扰能力强等优势, 常用于长距离、大容量数据传输, 可连接不同区域的水利设施监测点与管理中心。无线传输技术中, 4G、5G 网络发展迅速, 能够实现移动设备与远程服

务器的数据交互, 方便水利巡查人员通过移动终端实时上传现场数据。此外, 无线传感器网络 (WSN) 采用自组织、多跳的通信方式, 适用于传感器节点分布广泛且布线困难的区域, 实现大量传感器节点的数据汇聚与传输。在偏远山区的小型水利工程中, 由于地理环境复杂, 布线难度大, 无线传感器网络便能大显身手, 通过多个节点的接力传输, 将分散的传感器数据准确无误地传至管理中心。^[2]

(三) 数据处理与存储技术

数据处理技术对采集到的海量数据进行分析、挖掘与应用。大数据技术通过分布式存储与并行计算, 能够处理大规模、高维度、复杂结构的数据。在水利工程中, 可对多年的水位、流量、水质等数据进行分析, 预测水情变化趋势, 评估工程设施运行状况。机器学习算法作为大数据处理的重要工具, 能够对数据进行分类、聚类与回归分析。例如, 通过训练模型识别设备故障特征, 提前预警设备潜在故障。数据存储方面, 关系型数据库如 MySQL、Oracle 适用于存储结构化数据, 如工程设施的基本信息、监测数据的统计报表等。非关系型数据库如 MongoDB 则更适合存储非结构化或半结构化数据, 如工程现场拍摄的图片、视频资料等。此外, 云存储技术凭借其存储容量大、扩展性强、成本低等优势, 逐渐成为水利工程数据存储的重要选择, 方便数据的远程访问与共享。一些小型水库管理单位利用云存储, 将多年

来积累的水位、库容变化数据存储在云端，不仅节省了本地存储设备的成本，还方便管理人员随时随地通过网络访问这些数据，进行历史数据对比分析。^[4]

（四）信息展示与交互技术

信息展示与交互技术将处理后的数据以直观、易懂的方式呈现给管理人员，并实现人机交互。地理信息系统（GIS）能够将水利工程设施的地理位置、空间分布等信息与监测数据相结合，以地图形式直观展示工程运行状态，方便管理人员进行空间分析与决策。可视化技术通过图表、图形、动画等形式将数据可视化，如用折线图展示水位随时间的变化、柱状图对比不同区域的用水量等，使数据特征一目了然。人机交互技术包括触摸屏操作、语音识别与控制等，管理人员可通过这些方式便捷地查询数据、下达指令，实现对水利工程的远程控制与管理。在中型灌区的信息化管理中，利用 GIS 技术，管理人员可以在电子地图上清晰看到各个灌溉渠道的分布、水流走向以及各监测点的实时数据，通过触摸屏操作，能迅速切换不同区域、不同时段的数据展示，还能远程控制灌溉阀门的开关。^[4]

二、中小型水利工程信息化建设管护存在问题

（一）信息化建设规划不完善

许多中小型水利工程在信息化建设初期缺乏整体规划。不同地区、不同类型的中小型水利工程各自为政，没有统一的建设标准与规范。导致信息化系统在功能设计、数据格式、接口标准等方面存在差异，难以实现区域内水利工程信息的互联互通与共享。例如，部分地区的小型水库信息化系统与周边灌溉渠道的信息化系统无法有效对接，数据不能相互流通，影响了水资源的统一调配与管理。同时，由于缺乏长远规划，一些信息化建设项目在实施过程中频繁变更设计方案，造成资源浪费与建设周期延长。^[5]

（二）资金投入不足且分配不合理

中小型水利工程信息化建设管护资金来源有限，主要依赖政府财政拨款。由于资金总量不足，导致信息化建设设备采购、系统开发、人员培训等环节受到限制。一些地区为节省资金，采购低质量、性能差的信息化设备，这些设备易出现故障，数据采集不准确，严重影响信息化系统的运行效果。在资金分配上，重建、轻管护现象普遍。大部分资金用于信息化系统的建设阶段，而在系统建成后的维护、升级方面投入较少。随着时间推移，信息化系统因缺乏及时维护与升级，性能逐渐下降，无法满足水利工程管理的实际需求。

（三）专业技术人才短缺

中小型水利工程管理单位中，专业信息化技术人才匮乏。现有工作人员大多缺乏信息化技术知识与技能培训，对信息化系统的操作、维护不熟悉。在设备出现故障时，无法及时进行排查与修复，导致信息化系统长时间无法正常运行。同时，由于工作环境、待遇等因素限制，难以吸引外部专业信息化人才加入。这使得中小型水利工程信息化建设管护工作缺乏专业技术支持，无法

充分发挥信息化系统的优势。^[6]

（四）信息化系统集成度低

中小型水利工程信息化建设过程中，存在多个子系统独立建设的情况。如水文监测系统、工程安全监测系统、水资源管理系统等，这些子系统由不同厂家开发，采用不同的技术标准与接口规范，相互之间难以集成。数据无法在各子系统间共享与协同处理，形成了信息孤岛。例如，水文监测系统监测到的水位上涨信息不能及时传递给工程安全监测系统，导致无法综合分析洪水对工程设施安全的影响，降低了信息化系统的整体效能。

（五）数据质量与安全问题

在数据采集过程中，由于部分传感器设备老化、安装位置不合理或受到环境干扰，导致采集的数据存在误差、缺失或异常值。这些低质量数据进入信息化系统，影响数据分析结果的准确性与可靠性，进而误导水利工程管理决策。同时，中小型水利工程信息化系统的数据安全防护能力较弱。网络安全防护措施不到位，易受到黑客攻击、病毒感染等安全威胁，导致数据泄露、篡改或丢失。水利工程数据涉及国家安全、公共利益与人民生命财产安全，数据安全问题不容忽视。

三、中小型水利工程信息化建设管护对策

（一）完善信息化建设规划

制定统一的中小型水利工程信息化建设规划，明确建设目标、任务、标准与规范。根据不同地区水利工程特点与管理需求，进行合理布局与分类指导。建立区域内信息化建设协调机制，加强不同部门、不同项目间的沟通与协作，确保信息化系统的兼容性与可扩展性。在规划过程中，充分考虑未来水利工程发展趋势，预留技术升级与功能拓展空间，避免重复建设与资源浪费。例如，统一规定数据采集格式、接口标准，使不同水利工程信息化系统能够无缝对接，实现数据共享与协同管理。在规划某地区的中小型水利工程信息化建设时，应综合考虑当地的地形地貌、水资源分布、农业产业布局等因素，对不同类型的水利工程，如小型水库、灌溉渠道、泵站等，制定针对性的信息化建设方案，确保各系统在未来能够协同工作，实现水资源的高效管理。^[7]

（二）优化资金投入与管理

拓宽资金筹集渠道，除政府财政拨款外，鼓励社会资本参与中小型水利工程信息化建设管护。通过政府与社会资本合作（PPP）模式，吸引企业投资，共同建设与运营信息化项目。合理分配资金，加大对信息化设备采购、系统开发、人员培训以及后期维护、升级的投入。建立资金使用监管机制，确保资金专款专用，提高资金使用效率。在设备采购环节，严格按照质量标准选择性能稳定、可靠性高的信息化设备；在系统开发过程中，保证开发资金充足，打造功能完善、易用性强的信息化系统；在后期维护方面，设立专项维护资金，定期对信息化系统进行维护、保养与升级，确保系统长期稳定运行。在一些地区，通过 PPP 模式引入企业资金，建设了先进的中小型水利工程信息化监测系统，

企业负责系统的建设和前期运营维护，政府在后期根据运营效果进行考核并支付费用，这种模式既解决了资金短缺问题，又提高了系统的建设和维护质量。^[8]

（三）加强专业技术人才培养与引进

加强与高校、科研机构的合作，开展针对中小型水利工程信息化建设管护的专业培训课程。定期组织现有工作人员参加培训，提升其信息化技术知识与操作技能水平。设立人才引进优惠政策，吸引外部专业信息化人才到中小型水利工程管理单位工作。例如，提供良好的工作环境、待遇保障以及职业发展空间。同时，建立人才激励机制，对在信息化建设管护工作中表现突出的人员给予奖励，激发工作人员学习与应用信息化技术的积极性，为中小型水利工程信息化建设管护提供坚实的人才支撑。一些地区的水利部门与当地高校联合举办信息化技术培训班，对中小型水利工程管理单位的工作人员进行定期培训，培训内容涵盖传感器操作、数据处理软件使用、网络安全防护等方面，有效提升了工作人员的信息化技术水平。同时，通过提供住房补贴、科研项目支持等优惠政策，吸引了部分高校相关专业毕业生投身中小型水利工程信息化建设工作。^[9]

（四）提高信息化系统集成度

制定信息化系统集成标准与规范，要求各子系统开发厂家遵循统一标准进行系统开发。建立信息化系统集成平台，采用中间件技术、数据交换技术等，实现不同子系统间的数据共享与业务协同。对现有独立运行的子系统进行整合优化，消除信息孤岛。例如，通过建立统一的数据中心，将水文监测、工程安全监测、水资源管理等子系统的数据集中存储与管理，利用数据挖掘与分析技术，对多源数据进行综合处理，为水利工程管理提供全面、准确的决策支持。同时，加强对信息化系统集成项目的管理与监督，确保集成工作顺利进行，提高信息化系统的整体效能。在某中型灌区信息化建设中，建立了统一的信息化集成平台，将灌溉用水监测子系统、渠道安全监测子系统、泵站自动化控制子系统

等进行整合，通过中间件技术实现各子系统间的数据实时交换与共享，工作人员可以在一个平台上全面掌握灌区的运行情况，实现了高效的水资源调配与工程设施管理。

（五）保障数据质量与安全

建立严格的数据质量控制体系，在数据采集环节，定期对传感器设备进行校准、维护与更新，确保设备正常运行，采集数据准确可靠。制定数据审核制度，对采集到的数据进行实时或定期审核，及时发现并纠正数据中的误差、缺失与异常值。加强数据安全防护，采用防火墙、入侵检测系统、加密技术等网络安全防护措施，防止黑客攻击与数据泄露。建立数据备份与恢复机制，定期对重要数据进行备份，并存储在安全可靠的介质中。同时，加强工作人员的数据安全意识培训，规范数据操作流程，防止因人为因素导致数据安全事故发生，保障中小型水利工程信息化系统数据的质量与安全。在一些小型水库管理中，建立了每周对传感器进行校准的制度，每月对采集数据进行审核，及时发现并纠正异常数据。同时，安装了先进的防火墙和入侵检测系统，对关键数据进行加密存储，并定期将数据备份至异地的安全存储设备，有效保障了数据的质量与安全。^[10]

四、结论

总之，中小型水利工程信息化建设管护对于提升水利工程管理水平、保障水资源合理利用具有重要意义。针对当前存在的规划不完善、资金不足、人才短缺、系统集成度低以及数据质量与安全等问题，通过完善规划、优化资金管理、加强人才培养引进、提高系统集成度以及保障数据质量与安全等对策，能够有效推进中小型水利工程信息化建设管护工作，提高水利工程运行效率与管理效益，为区域经济社会发展提供坚实的水利保障。在未来发展中，应持续关注信息化技术发展趋势，不断完善中小型水利工程信息化建设管护体系，提升水利工程信息化水平。

参考文献

- [1] 陈红. 关于农业水利工程建设和管理工作中存在的问题及其解决策略分析 [J]. 南方农业, 2018(02):132-135.
- [2] 赵静. 关于农田水利灌溉工程规划设计与灌溉技术的核心分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2016(07):126 - 127.
- [3] 陈雪莲. 关于农田水利灌溉工程规划设计与灌溉技术的探讨 [J]. 农业与技术, 2015, 35(22):159-160.
- [4] 许开艳. 水利水电工程建设管理中存在的问题及解决措施 [J]. 水能经济, 2018, 000(001):275-275.
- [5] 牟锦亮. 水利工程建设管理工作中存在的问题及完善措施 [J]. 建材与装饰, 2019, 000(017):300.
- [6] 刘广辉. 水利工程建设管理中常见的问题及解决措施 [J]. 工程建设与设计, 2012(09):154-156.
- [7] 梁国振. 小型农田水利工程运行管护中的问题及对策 [J]. 企业科技与发展, 2015(14):79-80.
- [8] 刘爱国. 乡镇小型水利工程管护中存在的问题及对策研究 [J]. 企业改革与管理, 2015(13):175-176.
- [9] 刘斌. 乡镇小型水利施工管护的问题及对策 [J]. 科技创新与应用, 2014(21):190.
- [10] 卢雨生. 小型农田水利工程管护存在的问题及对策 [J]. 科技视界, 2013(22):176.

近二十年洞庭湖区洲滩演变及其影响研究

邹银翔，张泽

长沙理工大学水利与海洋工程学院，湖南 长沙 410114

DOI:10.61369/WCEST.2025010006

摘 要： 为更充分认识洞庭湖区近年来洞庭湖区湖盆高程演变规律及变化趋势，为湖区洲滩资源保护提供技术支撑。本文基于 landsat5/8 历史遥感数据，分析近二十年洞庭湖区洲滩变化情况，结合 2003、2022 年实测地形点数据通过 ANUDEM 模型进行湖盆重构，对比湖盆地形变化情况，探究洞庭湖区湖盆及洲滩演变形势。结果表明，各湖区洲滩平均面积呈现出上涨趋势，滩扩张意味着湖区水体范围萎缩。通过 DEM 空间量化分析，湖区整体表现为平均高程下降 0.69m，对应区域变化表现为“高淤低冲”，洲滩及其附近水域呈微弱上升，湖区中河槽呈明显下切。22~30m 区域向低区域转移 710.55km²，24~28m 区域向更高区域转移 148.69km²，洲滩出露时间持续延长，将导致湿生群落向旱生群落转移，降低植被种群多样性，将对湿地植被组成结构稳定性造成影响。

关 键 词： 洞庭湖；高程；遥感；时空演变

Analysis of the Spatiotemporal Changes in Wetland Vegetation and the Lake Basin Variation Patterns in the Dongting Lake Area

Zou Yinxiong, Zhang Ze

School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114

Abstract : In order to more fully understand the evolution patterns and trends of the lake bed elevation in the Dongting Lake area in recent years, and to provide technical support for the protection of the lake's sandbar resources. This study is based on historical remote – sensing data from Landsat 5/8. It analyzes the changes in sandbars of the Dongting Lake area over the past two decades. Combined with actual topographic point data from 2003 and 2022, the ANUDEM model is used to reconstruct the lake basin. Then, comparisons of the lake basin's topographic changes are carried out to explore the evolution of the lake basin and sandbars in the Dongting Lake area. The results show that the average area of sandbars in each lake area has shown an upward trend. The expansion of sandbars implies the shrinkage of the water body range in the lake area. Through DEM spatial quantitative analysis, the average elevation of the whole lake area has decreased by 0.69 m. The corresponding regional changes show "high siltation and low scouring", with a slight increase in the elevation of sandbars and their adjacent waters, and obvious downcutting of the river channel in the lake area. 710.55 km² of the 22 – 30 m elevation zone shifts to lower areas, and 148.69 km² of the 24 – 28 m elevation zone shifts to higher areas. The continuous prolongation of sandbar exposure time leads to the shift of wetland communities from wet to dry types, reduces vegetation population diversity, and impacts the stability of wetland vegetation composition.

Keywords : Dongting Lake; elevation; remote sensing; spatiotemporal evolution

引言

近些年受到自然演变及人类活动共同影响，江湖关系进入新一轮转变^[1]，洞庭湖湖区经历淤积—微冲刷复合演变过程，沟槽演变进一步加剧湖区水体交换的复杂性。加上人为影响导致洞庭湖湿地植被组成发生变化，促使洞庭湖湿地格局^[2]、湖区生态状况发生改变，引起一系列水生态、水环境问题^[3,4]，因此探究湖盆发育规律及其对生态影响变得格外重要。

目前，一些学者针对都给洞庭湖植被变化及湖盆冲淤进行了大量的研究分析，取得了丰硕的成果，朱玲玲^[5]、宋平^[6]、张琳^[7]、李义天^[8]、胡春宏^[9]等通过实测数据，聚焦水沙关系及地形高程变化，进一步分析洞庭湖湖盆冲淤及发育状况。白宽宽^[10]、王婉婉^[11]、邱罗^[12]、余姝辰^[13]等通过遥感技术，针对湖区洲滩水体覆盖情况，进而总结湖区洲滩时空演变规律。Yan^[14]、白玉川^[15]、刘易庄^[16]等通

过物理模型及数学模型等方式，开展洲滩、湖盆演变对水动力过程影响研究，进而探究洲滩演变对河湖水动力过程影响机制，因此，探究长时序洞庭湖区洲滩及湖盆发育规律，分析洲滩、湖盆变化与植被覆盖之间关系是十分有必要的。

前人的研究主要集中于河湖地形、水沙过程变化，对于近年来洞庭湖区湖盆高精演变状况及影响分析较少。因此，本文基于近二十年 landsa 遥感数据，结合 2003、2022 年实测地形点数据，通过遥感及 ANUDEM 模型对湖区洲滩及湖盆进行识别、重构，对比湖盆地形变化情况，探究近二十年洞庭湖区湖盆及洲滩演变形势。并结合洞庭湖区植被分布状况，分析湖盆发育与植被格局变化关系，研究成果可为洞庭湖区湖盆演变及植被资源保护提供理论依据及技术参考。

一、研究区域概况及方法

(一) 研究区域概况

洞庭湖（28°30′~30°20′N，111°40′~113°10′E）位于湖南省东北部，地处长江下荆江南岸，是我国第二大淡水湖泊，见图 1.1。洞庭湖整体呈现盆地形态，地势为西高东低，内部可分为东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖三部分，属于国家级、省级自然保护区范围，生态价值重大。洞庭湖作为长江与洞庭湖流域交汇的关键节点，其湖区面积达 2847km³，承接湘资沅澧四水及长江三口季节性来流，多年平均入湖水量达 2897*10⁸m³，经调蓄后由城陵矶汇入长江，湿地洪泛特性显著，加之受江湖关系影响，使得湖区湖盆发育机制变得十分显著。

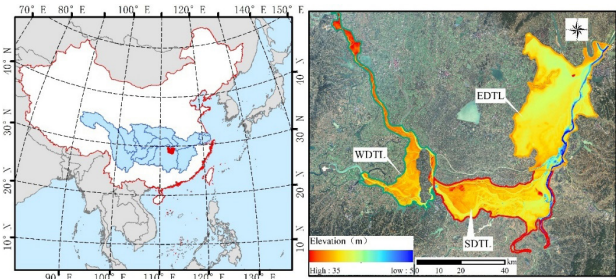


图 1.1 洞庭湖位置及高程示意图

(二) 研究方法

本文选取 2001—2023 年间无云条件下的 LandsatTM/ETM+（空间分辨率 30m）遥感影像数据 9 期，共 18 景数据来源于 USGS，影像轨道编号及采集具体时间见表 1.1，选取影像采集时间全部在 10 月至次年 1 月份之间，依据亚米级高精度实拍影像，捕捉洲滩信息作为遥感影像解译提取的样本点。

表 1.1 影像类型及成像时间汇总表

序号	卫星	时间	南咀	小河咀	杨柳潭	城陵矶
1	Landsat5-TM	LT2001--12.21	30.25	28.45	27.73	21.54
2		LT2004--12.13	30.32	28.52	27.68	21.93
3		LT2008--12.31	30.06	28.31	27.52	20.86
4		LT2011--01.15	30.66	28.95	28.22	22.10
5	Landsat8-OLI_TIRS	LC2014--01.23	30.18	28.44	27.81	21.10
6		LC2016--12.30	30.54	28.75	27.86	21.01
7		LC2017--12.17	30.08	28.16	27.37	20.37
8		LC2020--12.25	30.14	28.27	27.44	21.37
9		LC2023--12.25	30.24	28.31	27.37	21.60

遥感影像受到传感器、太阳、大气和地形的影响而失真，因

此，需对采集的影像进行预处理，包括辐射定标、大气校正、光谱增强、图像融合、图像镶嵌与裁剪等工作。本文基于随机森林算法构建湖区植被反演模型见图 1.2，通过对由输入变量和输出变量构成的训练样本数据集，构建多个决策树并将它们的预测结果进行汇总后应用于分类和回归问题其数学定义如下：

Entropy(S)=∑_{i=1}^cp_ilog₂(p_i) (0.1)

式中，S 为包含多个类别的数据集合，c 为数据集合中不同类别的数量，P_i为某一类别在数据集合中所占比例。

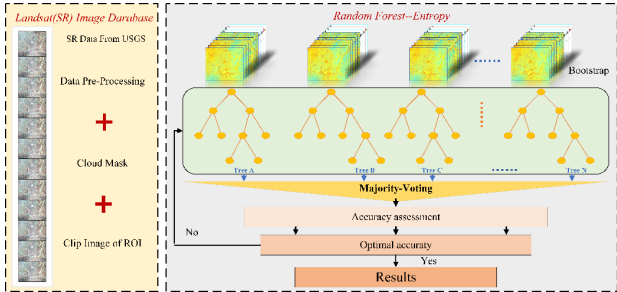


图 1.2 基于 RF 算法洞庭湖植被分类模型

本文对两种不同类型遥感卫星（Landsat5、Landsat8），依据商用亚米级高分辨率遥感数据，选取感兴趣区域构建高质量训练数据库，训练水体分离模型，并利用混淆矩阵对影像进行精度评价，水体分离精度 Kaapa 系数达 0.93。

二、结论与探讨

(一) 基于 landsat 遥感数据洞庭湖区洲滩变化分析

洞庭湖各子湖区中，典型湿地洲滩分布呈现出明显时空异质性，通过 GIS 空间分析工具统计研究区域面积，东洞庭湖（EDTL）、南洞庭湖（SDTL）、西洞庭湖（WDTL）面积分别为 1400.07km²、884.82km²、564.03km²。由图 2.4 可知 1987—2023 年洲滩面积变化情况，洲滩面积多年平均分别为：EDTL：1114.13 km²、SDTL：652.79 km²、WDTL：438.98km²，同时，各湖区洲滩面积呈现出上涨趋势，滩扩张意味着湖区水体范围萎缩，水生植被群落经历着从沉水植物（如苦草、黑藻）向挺水植物（如芦苇、荻）的演替^[17]，湿地系统正经历着从“洪泛型”生态系统向“陆生型”生态系统的结构性转变，这种群落结构改变将直接影响湿地碳循环和生物多样性维持能力^[18]。

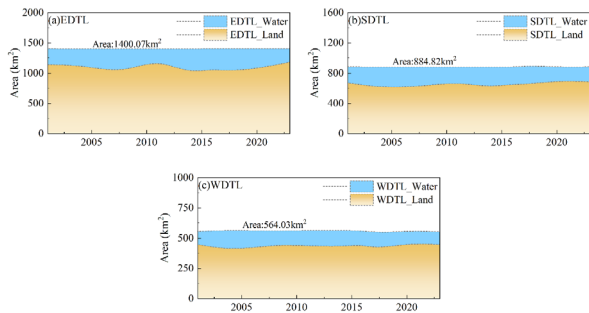


图2.4 洞庭湖 1987—2023 陆地面积变化图

（二）基于 landsat 遥感数据洞庭湖区采砂影响分析

通过对洞庭湖 2001—2023 年洲滩进行影像对比，洞庭湖水域面积辽阔，砂石资源丰富，是沿岸周边基建砂石开采的主要源区。开采面呈明显的锯齿状是人类采砂活动遥感译解特征之一^[10]。由图 2.5 可得，与 2001 年相比，2023 年的自然洲滩岸线由于人类采砂活动出现一定范围的萎缩，湖区岸线出现明显萎缩，其主要位置集中于湘江尾闾区域，有研究表明，近 15 年以来，洞庭湖受到采砂影响，引起湖区洲滩年均降幅达 12.67mm/a^[19]，其中 2006 至 2016 年，仅东洞庭湖飘尾洲采砂导致洲滩缩减面积为 2221.99hm²^[20]。可见，洞庭湖人为采砂是造成近 10 年洞庭湖岸边滩萎缩的重要原因，人为采砂影响范围集中且明显，对洞庭湖区影响范围有限，且多发生于湖内边滩位置。

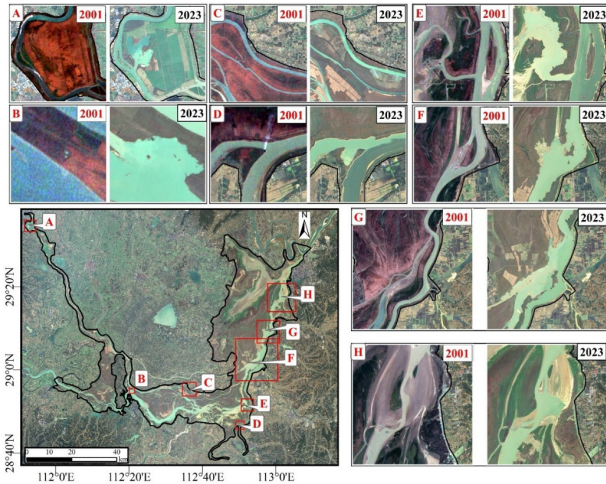


图 2.5 洞庭湖人为采砂前后对比示意图

（三）洞庭湖湖盆高程变化分析

洞庭湖受水沙关系影响，20 世纪湖区范围呈现出萎缩状态，湖区内部呈现出淤积状态，湖区洲滩面积扩张明显，高程变化上升显著^[13]。本节基于洞庭湖 2003 年、2022 年实测地形点数据采用 ANUDEM 模型^[21]，实现对洞庭湖区高程模型构建（栅格大小为 10m*10m），通过栅格计算实现差值计算，湖盆 2003—2022 地形变化情况见图 2.6。

结合表 2.4 分析可知，洞庭湖区地形变化呈“高淤低冲”，洲滩及周边水域地形升高，湖区主洪道区域地形下降。湖盆整体表现为下降，全湖平均高程下降 0.69m，下降超过 1m 区域主要集中于湖区内部河槽，以湘江尾闾下降最为明显，最大下降深度达 18.0m，其次是沅、澧水洪道、草尾河段、蒿竹河段以及南洞庭

湖内部交互水系，下降范围 0.5m—15.0m。三峡运行后受来沙条件，泥沙沉积量与来沙量变化影响，洞庭湖整体处于自然冲刷状态^[7]，叠加人为采砂、挖沟排水及航道建设影响，加剧洞庭湖盆地地形变化。

通过分析湖区内部地形变化发现，洲滩升高区域主要集中于东洞庭湖西南部（澧湖周边）、南洞庭湖中东部及西部（横岭湖及车便湖周边）及西洞庭湖东南部（目平湖周边）、澧水七里湖周边，最大淤积超过 3.0m。相较于湖区冲刷范围，淤积范围面积更小，同时其淤积高程更小。通过对湖盆升高进行归因分析，可得湖泊主要高程升高区域即在 2011 年前后就已存在^[5]，在三峡建成后湖区淤积主要影响因素来自人为围垦。洞庭湖区不同高程区域呈不同变化趋势，这种差异化地形变迁将加剧洞庭湖河湖两相转变过程。

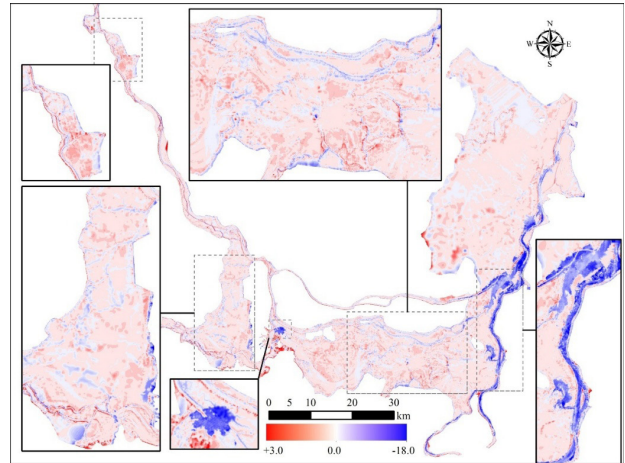


图 2.6 洞庭湖区 2003—2022 地形变化图

表 2.2 洞庭湖高程区域面积统计表

	DEM (m)	2003		2022		Difference	
		Area (km ²)	PCT (%)	Area (km ²)	PCT (%)	Area (km ²)	PCT (%)
1	<20	120.70	4.39	207.19	7.54	86.49	3.15
2	20—21	64.92	2.36	121.09	4.41	56.17	2.04
3	21—22	200.77	7.30	206.47	7.51	5.70	0.21
4	22—23	241.15	8.77	244.13	8.88	2.98	0.11
5	23—24	360.18	13.10	341.69	12.43	-18.49	-0.67
6	24—25	400.29	14.56	370.60	13.48	-29.70	-1.08
7	25—26	346.26	12.60	337.74	12.29	-8.52	-0.31
8	26—27	311.56	11.34	285.82	10.40	-25.74	-0.94
9	27—28	255.18	9.28	225.68	8.21	-29.49	-1.07
10	28—29	164.52	5.99	152.48	5.55	-12.04	-0.44
11	29—30	89.85	3.27	85.42	3.11	-4.43	-0.16
12	>30	193.02	7.02	170.08	6.19	-22.94	-0.83

由表 2.2 分析可得湖盆不同高程区域面积变化情况。洞庭湖盆高程主要集中于 23—27m 区间，其中 2003 年、2022 年此区间面积占比分别为 51.6%、48.6%，其中 24—25m 区间均属于各自年份面积最大区域，2022 年相较于 2003 年面积减少 29.7km²，此区域属于东洞庭湖洲滩、南洞庭湖河槽区域；仅 21m 及以下区域面积增大超过 50km²，此区域对应湘江尾闾区域及湖内河槽，受人为采砂影响，此区域面积略微增大。整体而言，湖盆呈现为高程

降低,其中30m以上区域面积变化小,结合区域矢量概况,可知该高程区域大部分属于澧水洪道范围。

（四）洞庭湖湖盆各高程区域转移矩阵分析

通过分析2003–2022高程区域转移情况可得,红色箭头代表由高向域转移面积超过20km²,蓝色箭头则代表由低向高转移面积超过20km²,箭头越宽代表着转换面积越大,由图2.7可知,22—30m高程区域向低区域转移710.55km²,以25m区域向24m区域转移面积最大,达93.97km²,说明该区域主要为冲刷及人为疏浚的河槽区域,24—28m高程区域向更高区域转移148.69km²,说明该区域主要为水陆交接区域向洲滩转移。通过对比洞庭湖典型植被时空演变规律,可知高程变化显著影响陆生植被的可生长区域^[2]。随着地形的降低和高程区域的转移,原本被水体覆盖区域逐渐露出,以芦苇为代表的陆生植被因其较强的耐淹性,使得能够在此区域逐渐扎根并扩张。

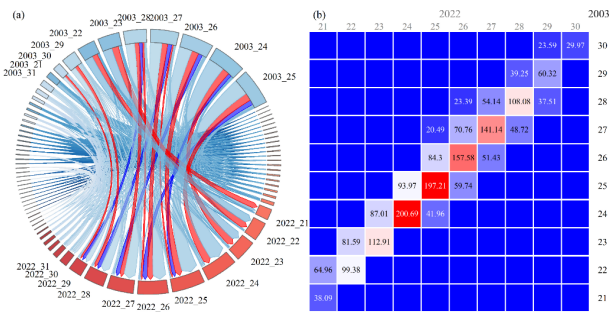


图 2.7 洞庭湖高程区域转移矩阵

随着长江干流及四水上游水库的建成运行,持续发挥拦沙作用,洞庭湖河槽区域将会持续保持微冲刷状态。从植被分布角度

出发,河槽的降低将会延长洞庭湖区河相持续时间,导致洲滩露出水面时间延长,滩地旱化致使湿生植被向旱地植被转化,将会加剧洞庭湖区典型湿地植被结构的转变。

三、结论

本章通过遥感分类模型对2001—2023年 Landsat 影像进行洞庭湖区水陆识别分离,结合2003、2022年实测地形点数据通过ANUDEM模型进行湖盆重构,探究洞庭湖区湖盆及洲滩演变形势。本章主要结论如下:

(1) 典型湿地洲滩分布呈现出明显时空异质性,对2001–2023年洲滩面积变化分析可得洲滩平均面积:EDTL: 1185.66km²、SDTL: 652.79 km²、WDTL: 438.98km²,同时,各湖区洲滩面积呈现出上涨趋势,滩扩张意味着湖区水体范围萎缩。

(2) 自然冲淤及人为疏挖共同影响下,湖区整体平均高程下降0.69m,对应区域变化表现“高淤低冲”,洲滩及其附近水域高程出现微弱上升,湖区中河槽出现明显下切,这种差异化地形变迁将加剧洞庭湖河湖两相转变过程

(3) 通过对不同高程区域面积转移情况进行分析,22–30m区域向低区域转移710.55km²,24–28m区域向更高区域转移148.69km²。同时,植被演替区域与洲滩发育区域高度重合,洲滩出露时间持续延长,将会导致湿生植被群落向旱生植被群落转移加剧湿地旱化,降低植被种群多样性,从而对湿地植被组成结构的稳定性造成影响。

参考文献

[1] 卢金友, 朱勇辉. 三峡水库下游江湖演变与治理若干问题探讨 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 98–107.
[2] 周静, 万荣荣, 吴兴华, 等. 洞庭湖湿地植被长期格局变化 (1987–2016 年) 及其对水文过程的响应 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1723–1735.
[3] Hu W, Li G, Gao Z, et al. Assessment of the impact of the Poplar Ecological Retreat Project on water conservation in the Dongting Lake wetland region using the InVEST model [J]. Science of The Total Environment, 2020, 733: 139423.
[4] 徐力刚, 谢永宏, 王晓龙. 长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望 [J]. 中国科学基金, 2022, 36(3): 406–411.
[5] 朱玲珍, 陈剑池, 袁晶, 等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响 [J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 348–357.
[6] 宋平, 方春明, 黎昔春, 等. 洞庭湖泥沙输移和淤积分布特性研究 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 130–134.
[7] 张琳, 马敬旭, 张倩, 等. 近 60 多年洞庭湖水沙演变特征及其与人类活动的关系 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 14–20.
[8] 李义天, 邓金运, 孙昭华, 等. 泥沙淤积与洞庭湖调蓄量变化 [J]. 水利学报, 2000(12): 48–52.
[9] 胡春宏. 长江与洞庭湖 鄱阳湖关系演变及其调控 [M]. 一一, 译. 中国科技出版传媒股份有限公司, 2017.
[10] 白宽宽, 李志威, 张鹏, 等. 基于多源遥感解译的洞庭湖区自然岸线演变过程研究 [J]. 湖泊科学, 2024, 36(5): 1537–1549.
[11] 王婉婉, 陈明珠, 雷雷. 西洞庭湖洲滩植物物种与功能多样性空间分布特征及其相关性 [J]. 生态与农村环境学报, 2024(6): 780–789.
[12] 邱罗, 余姝辰, 唐辉, 等. 民国中期以来洞庭湖洲滩演变特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(6): 1250–1261.
[13] 余姝辰, 邱罗, 贺秋华, 等. 基于多源遥感的洞庭湖洲滩时空演变研究 [J]. 自然资源遥感, 2024: 1–7.
[14] Yan G, Yuan S, Tang H, et al. Hydrodynamic Response of Channel Flow Confluence to the Tributary Floodplain Topography [J]. Water Resources Research, 2024, 60(8): e2023WR036244.
[15] 白玉川, 孙艳杰, 宋晓龙, 等. 尾间河道形态演变特征的模拟试验研究 [J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 508–520.
[16] 刘易庄, 蒋昌波, 向朝晖, 等. 洞庭湖地形变化对洪水过程的影响研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(2): 99–106.
[17] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 381–386.
[18] 余蓉, 项文化. 洞庭湖湿地 3 种植被类型生态系统的碳循环 [J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(3): 66–71.
[19] 余姝辰. 三峡水库运行前后洞庭湖洲滩面积变化遥感认识 [J]. 地球科学, 2019, 44(12): 4275.
[20] 唐辉, 邹娟, 尹向红, 等. 基于高分遥感的洞庭湖区河湖采砂监管及典型案例研究 [J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 302–309.
[21] 杨勤科, R.Mcivcar T, 李领涛, 等. Anudem—专业化数字高程模型插值算法及其特点 [J]. 干旱地区农业研究, 2006(3): 36–41.

浅谈水利工程施工技术要点

刘军

江西省安福县河湖灌溉服务中心, 江西 安福 343200

DOI:10.61369/WCEST.2025010008

摘要：水利工程，作为国家基础建设的关键构成，在水资源的科学调配、抵御洪涝干旱灾害、保障农业灌溉用水以及维护生态环境稳定等领域，发挥着无可替代的核心作用。本研究深度剖析水利工程施工里的各项关键技术要点，期望能为水利工程施工质量的提升给予坚实的技术支撑与参考依据，助力水利工程建设迈向更高质量发展阶段。

关键词：水利工程；施工；技术要点

A Brief Discussion on Key Points of Water Conservancy Engineering Construction Technology

Liu Jun

River and Lake Irrigation Service Center of Anfu County, Jiangxi Province, Anfu, Jiangxi 343200

Abstract： Water conservancy projects, as a key component of national infrastructure construction, play an irreplaceable core role in the scientific allocation of water resources, resisting floods and droughts, ensuring water supply for agricultural irrigation, and maintaining the stability of the ecological environment. This research deeply analyzes the key technical points in water conservancy project construction, hoping to provide solid technical support and reference basis for the improvement of water conservancy project construction quality, and help water conservancy project construction move towards a higher quality development stage.

Keywords： water conservancy project; construction; technical key points

引言

水利工程在实际施工过程中，深度掌握并运用先进的施工技术要点，成为了达成工程目标的关键。这不仅能够有力保证工程质量，让水利设施经受住时间与自然环境的考验；还能大幅提高施工效率，缩短工期，让工程早日投入使用、发挥效益；更能通过优化施工流程、合理配置资源，有效降低工程成本，实现经济效益与社会效益的最大化。

一、土方工程施工技术要点

（一）土方开挖

1. 施工前期，务必开展细致的地质勘察工作。全面掌握土壤类型、质地以及稳定性等关键信息，以此作为依据，科学确定土方开挖的方法与顺序。针对松软土壤，小型挖掘机即可高效作业；而面对坚硬岩石，采用爆破等特殊手段处理，才能确保开挖顺利进行。

2. 在运用机械开挖土方时，需要综合考量土质条件与开挖深度来合理挑选挖掘机以及运输设备。挖掘机种类繁多，每种都有其适配的作业场景。例如，履带式挖掘机适用于各种地形和土质，但移动速度较慢；轮式挖掘机移动速度快，但在松软的土壤上容易陷车。运输设备的选择也应根据开挖量和运输距离进行合理安排，以提高施工效率。

3. 开挖时务必严控坡度，预防土方坍塌。依据土质与开挖深度来确定合理坡度，通常情况下，土质越松软，所需坡度就应当

设置得越缓。在开挖过程中，应定期对坡度进行检查和调整，确保施工安全。

4. 深基坑开挖作为土方工程的高危环节，施工安全至关重要，必须采取有效的支护措施。土钉墙、排桩支护、地下连续墙等都是常见的支护方式。实际选择时，要综合考量基坑深度、土质状况以及周边环境等多方面因素，以保障施工安全^[1]。

（二）土方填筑

1. 土料的选择直接影响土方填筑的质量，选择质地均匀、压缩性小以及透水性良好的土料很关键。土料含水量极大影响填筑质量，过高或过低都会削弱压实效果。所以，填筑前务必测试土料含水量，保证其处于最优含水量范围，为填筑质量筑牢基础。

2. 采用分层填筑法施工，每层厚度最好别超30cm，用机械压实。分层填筑能让土方填得又匀又实，具体厚度要参考压实设备性能和土料特性来定，正常情况下不超30cm。压实设备的选择应根据填筑量和压实要求进行合理安排，常见的压实设备有压路机、推土机、平板夯等。

3. 压实过程中要注意控制压实度，确保土方填筑的质量。压实度是衡量土方填筑质量的重要指标，应根据工程设计要求严格把控压实环节。要选用恰当压实方法，控制好压实遍数，让压实度符合设计标准。还要定期检测压实度，一旦发现问题，马上处理。

4. 填筑完成后，应进行质量检测，包括干密度、压实度等指标。质量检测是保证土方填筑质量的重要环节，需运用科学检测方法及设备，像环刀法、灌砂法，还有核子密度仪法等，都是常见的土方压实度检测手段，精准判断压实效果。检测结果应符合工程设计要求，否则应进行返工处理^[2]。

二、混凝土工程施工技术要点

（一）混凝土配合比设计

1. 结合水利工程的设计规划与现场施工条件，明确混凝土的强度等级、抗渗等级等关键性能指标，确保其满足工程需求。例如，对于水工建筑物，应考虑混凝土的抗渗性、抗冻性等都需要进行明确。

2. 在水利工程混凝土施工中，原材料的选择和配合比确定极为关键。首先要依据工程强度与耐久性要求，挑选适配的水泥，比如需高强度时，硅酸盐水泥是不错选择；追求经济性和一定耐久性，普通硅酸盐水泥适用；处于有侵蚀性环境，矿渣硅酸盐水泥更为合适。骨料则要考量级配、粒径和含泥量，良好级配和合适粒径能增强强度，低含泥量可保证工作性。再根据混凝土性能和施工条件，选用外加剂，像加快施工进度用早强剂，高温施工为防混凝土过快凝结用缓凝剂，想提高混凝土流动性就用减水剂。最后，通过配合比试验，确定最优组合。

3. 配合比设计时，需兼顾混凝土工作性、耐久性与经济性。工作性关乎施工，涵盖混凝土在施工时的流动性，便于浇筑；可塑性，利于成型；稳定性，确保均匀不离析，并应根据施工方法和施工条件进行合理调整。耐久性是指混凝土在使用过程中的抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性等性能，应根据工程的使用环境和设计寿命也要对其经济性展开考虑，并要求在确保混凝土质量达标的基础上，尽可能降低成本。可以通过合理选用原材料，比如性价比高的水泥、骨料，以及优化配合比来实现^[3]。

（二）混凝土浇筑

1. 浇筑前应检查模板、钢筋等工程的质量，施工时，模板与钢筋安装都马虎不得。模板要装得牢固、平整，尺寸精准，这样才能保证混凝土完美成型；钢筋安装也得严格按设计来，把控好间距，保护层厚度等也应符合规范规定。

2. 在混凝土施工环节，浇筑工艺至关重要。首先是分层浇筑，每层厚度不宜超过50cm，借助振捣器充分振捣，让混凝土均匀密实，防止离析。比如小型构件可用平板振捣器，大型基础则常用插入式振捣器，操作时要严格把控振捣时间与力度，避免过振或漏振。

3. 浇筑全程需合理控制速度，依据混凝土流动性与浇筑面积来调整。速度过快，混凝土各组分离，严重影响质量；过慢则会拉长施工周期，无端增加成本。

4. 针对大体量混凝土浇筑，温控措施必不可少。因其体积庞大，散热缓慢，内部易产生高温，引发温度应力导致裂缝。所

以，要降低入模温度，比如对原材料降温处理；加强保温保湿养护，防止混凝土表面过快失水；还可在内部设置冷却水管，循环通水带走热量，全方位保障混凝土质量，避免裂缝产生，确保工程的安全与稳定^[4]。

（三）混凝土养护

1. 混凝土浇筑结束后，养护工作刻不容缓，保持其表面湿润是关键。养护堪称保障混凝土质量的核心环节，一旦完成浇筑，就得立即着手。常见的养护手段有洒水养护、覆盖塑料薄膜养护以及喷涂养护剂养护等。

2. 养护时长通常不能少于14天，这是综合混凝土强度等级、环境温湿度等因素确定的。要是碰上重要部位的混凝土，像水工建筑物的基础和墩台，为了让混凝土强度达标，耐久性过关，养护时间还得适当延长。

3. 在养护方法的选择上，洒水养护最为普遍，定期给混凝土表面洒水，维持湿润状态。而覆盖塑料薄膜养护，能有效减少水分蒸发，让混凝土表面始终保持一定湿度，两种方法各有优势，可根据实际施工条件、成本预算等因素合理选用，确保混凝土在适宜环境下充分水化，提升工程质量。在冬季施工时，还应采取保温措施，防止混凝土受冻^[5]。

三、地基处理技术要点

（一）强夯法

1. 强夯法是利用重锤自由下落的冲击力对地基进行夯实，提高地基的承载力和稳定性。强夯法对多种地基有良好处理效果，像碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土，还有湿陷性黄土、杂填土和素填土等。施工前的试夯不容小觑，它能帮我们确定诸如夯击能量、夯击次数、夯点间距等关键强夯参数，为正式施工筑牢基础。为正式施工提供依据。试夯的面积不应小于400m²，试夯的次数一般为3~4次。

2. 强夯过程中要注意控制夯击能量和夯击次数，防止对地基造成破坏。夯击能量和夯击次数应根据地基的土质情况和设计要求进行确定，一般来说，土质越松软，夯击能量和夯击次数应越大。在强夯过程中，应定期对夯击效果进行检测，发现问题及时调整强夯参数。最后，查验地基承载力、变形模量等指标，确保检测结果契合工程设计要求。

（二）换填法

1. 换填法是将地基中的软弱土层挖除，换填强度较高、压缩性较低的土料，换填材料可选砂、碎石等。换填前，务必把基底的杂物、淤泥彻底清理干净，确保基底平整。

2. 换填过程中要注意换填厚度与压实度控制很关键。厚度依据软弱土层厚度和设计要求确定，通常别小于0.5m。压实度要按设计标准把控，采用分层填筑、压实的方式，保证每一层都达到压实度要求。

3. 换填时要严控厚度与压实度达标以及变形模量等指标。质量检测是换填法施工的最后环节，应采用科学的检测方法和设备进行检测。常见的检测方法有静载试验、动力触探试验、标准贯入试验等。检测结果应符合工程设计要求，否则应进行返工处理^[6]。

四、防渗处理技术要点

（一）灌浆法

1. 灌浆法是借助压力作用，把浆液注入地基，或是打进建筑物裂缝，让其凝结固化，最终形成连续且紧密的防渗帷幕，提高地基或建筑物的防渗性能。灌浆法适用于处理岩石地基、土质地基中的裂缝和孔隙等渗漏问题。在灌浆作业中，水泥浆、化学浆液等都可作为灌浆材料。要依据工程的地质条件、渗漏程度、施工环境等实际情况，挑选适配的灌浆材料^[7]。

2. 灌浆前开展灌浆试验十分必要。在试验中，像灌浆压力、灌浆量、灌浆浓度等关键参数都能得到确定。它是灌浆施工的关键环节，能为正式施工提供科学依据，确保灌浆效果达到预期。试验的面积不应小于 400m²，试验的次数一般为 3 ~ 4 次。

3. 灌浆时，把控灌浆压力与灌浆量极为重要，需依据地基土质和设计要求来定。通常情况下，土质越松软，所需灌浆压力和灌浆量就越小。灌浆期间，还得定期检测灌浆效果，一旦发现质量问题，马上调整灌浆参数，保障工程质量。

（二）防渗墙法

1. 防渗墙的施工方法有多种，防渗墙施工有多种方法，像泥浆护壁法、锯槽法、链斗法之类的，具有施工简单、成本低等优点。锯槽法和链斗法适用于处理较深的地基，具有施工效率高、质量好等优点。

2. 防渗墙施工时，严格把控墙体的垂直度、厚度和强度，是保障工程质量的关键。这三项指标直接关乎防渗墙的性能，必须严格依照工程设计要求执行。施工中，要选用先进的设备与技术，像是高精度的成槽设备，配合专业的测量仪器，实时监测并调整，保证墙体垂直误差在允许范围内，从而确保防渗墙能有效发挥作用，达到预期的防渗效果、厚度和强度达到设计要求。

3. 防渗墙完成后，应进行质量检测，这是防渗墙法施工的最后环节，应采用科学的检测方法和设备进行检测。常见的检测方法有注水试验、取芯试验等。检测结果应符合工程设计要求，否则应进行返工处理^[8]。

五、施工导流技术要点

（一）施工导流方案的选择

1. 根据水利工程的规模、施工条件和水文地质情况，选择合适的施工导流方案。施工导流方案的选择应综合考虑工程的规模、施工条件、水文地质情况、工期要求等因素。常见的施工导

流方案有全段围堰法导流和分段围堰法导流两种。

2. 施工导流方案的敲定，需全面权衡各项因素。要综合考量工程规模大小，大工程对导流要求更高；分析施工条件，像场地空间、设备进场难易程度等；研究水文地质情况，包括水位变化、地质透水性等；结合工期要求，工期紧的项目要选高效导流方案。常见的施工导流方案有全段围堰法导流和分段围堰法导流。分别修建围堰进行导流。在选择导流方案时，应根据工程的实际情况进行综合考虑，选择最适合的导流方案^[9]。

（二）围堰的设计与施工

1. 围堰设计需综合工程规模、施工条件、水文地质状况等因素。依据设计洪水流量、水位确定其高度、宽度与坡度，还要着重考量围堰的稳定性，确保能承受水压力和外力冲击，防渗性能应通过计算和试验进行验证。

2. 围堰施工方法有土石、混凝土、钢板桩围堰等。选方法时，要综合考虑地质条件、水流速、成本等。土石围堰因施工简便、成本低最常用；混凝土围堰适用于对强度和抗渗要求高的工程；钢板桩围堰常用于软土地基或狭窄场地。深水基础和高水头围堰，具有施工速度快、质量好等优点。

3. 围堰施工过程中要注意控制围堰的质量，施工时务必严格遵循设计要求，精准把控围堰高度、宽度、坡度等，确保其符合标准，保障安全性与稳定性。同时，强化对围堰的监测与维护，及时察觉并解决问题，筑牢安全防线^[10]。

（三）导流建筑物的拆除

1. 导流建筑物在水利工程施工完成后应及时拆除，恢复河道的自然状态。导流建筑物的拆除应在工程完工后及时进行，拆除过程中应注意安全，避免对周围环境造成破坏。

2. 拆除导流建筑物时应注意安全，避免对周围环境造成破坏。导流建筑物的拆除应采用合理的拆除方法和设备，确保拆除过程中的安全。同时，应加强对拆除过程的监测和管理，及时发现和处理问题，避免对周围环境造成破坏。

六、结论

水利工程施工技术要点涉及土方、混凝土、地基处理、防渗及施工导流等多方面。施工单位施工时，必须严格依据相关技术规范 and 标准，吃透各环节技术要点，保障工程质量。同时，持续引进、创新施工技术，提高效率、降低成本，助力水利事业蓬勃发展。

参考文献

- [1] 刘昌振. 浅谈工程水利技术施工 [J]. 科技黑龙江信息, 2021(1): 20.
- [2] 雷海新. 论控制工程水利施工技术与管理 [J]. 民居中华, 2021(10): 23-29.
- [3] 陈亮. 中小型水利工程施工中围堰技术的应用浅析 [J]. 价值工程, 2020(14): 198-199.
- [4] 高锐, 李渊, 章凯. 水利工程施工技术质量管理策略探讨 [J]. 工程建设与设计, 2020(09): 292-294.
- [5] 李晓东. 水利工程中水闸施工的技术要点及其注意事项分析 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44(03): 92-94.
- [6] 吴曙辉. 水利工程中的河道生态护坡施工技术应用要点分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (34): 199-201.
- [7] 于晓森. 水利工程堤防防渗施工技术要点 [J]. 水上安全, 2023, (14): 181-183.
- [8] 肖龙飞. 探究水利工程施工技术关键点 [J]. 低碳世界, 2023, 13(10): 40-42.
- [9] 赵杰. 水利工程中水闸施工的技术要点 [J]. 工程建设与设计, 2023, (18): 187-189.
- [10] 金国磊, 吴华欢, 尹上. 水利工程中水闸施工技术及管理措施分析 [J]. 水电站机电技术, 2023, 46(05): 96-98.

数智管控下输水管道泄漏预警技术对策

王兵, 熊伶*, 蒋有高, 黄才生
重庆市西部水资源开发有限公司, 重庆 401121
DOI:10.61369/WCEST.2025010009

摘 要 : 输水管道泄漏问题一直是水资源输配系统中的关键隐患, 其隐蔽性和突发性为常规监测带来了极大挑战。随着数字化与智能化手段的逐步引入, 传统人工巡查难以覆盖的盲区开始被打通, 数据驱动的预警机制正在形成。然而, 在感知技术、信号识别与系统联动方面仍存在明显短板, 制约了整体预警效能的提升。面对复杂地形、多源干扰与现场环境的高度不确定性, 构建具有实时响应能力与高度协调性的数智化预警体系, 是当前必须正视与深入攻克的方向。本文立足实际问题, 从结构复杂性、干扰源识别、数据整合等多个维度出发, 探讨切实可行的数智管控对策, 力图推动输水管道安全监控向更高水平迈进。

关 键 词 : 输水安全; 智能监控; 泄漏检测; 数据融合; 管控机制

Countermeasures for Water Pipeline Leakage Warning Technology under Digital Intelligence Control

Wang Bing, Xiong Ling*, Jiang Yougao, Huang Caisheng
Chongqing Western Water Resources Development Co., Ltd., Chongqing 401121

Abstract : The problem of water pipeline leakage has always been a key hidden danger in the water resource transmission and distribution system, and its concealment and suddenness pose great challenges to routine monitoring. With the gradual introduction of digital and intelligent means, blind spots that are difficult to cover with traditional manual inspections are being opened up, and data-driven warning mechanisms are taking shape. However, there are still significant shortcomings in perception technology, signal recognition, and system linkage, which restrict the overall improvement of early warning efficiency. Facing the high uncertainty of complex terrain, multi-source interference, and on-site environment, building a digital early warning system with real-time response capability and high coordination is the direction that must be addressed and deeply overcome. This article is based on practical problems, starting from multiple dimensions such as structural complexity, interference source identification, and data integration, to explore practical and feasible digital control measures, and strive to promote the safety monitoring of water pipelines to a higher level.

Keywords : water supply safety; intelligent monitoring; leakage detection; data fusion; control mechanism

引言

城市化进程不断加快的当下, 水资源的高效输送已成为基础设施运行中不可避免的重要课题。管道泄漏虽不新鲜, 却始终没有被真正有效掌控, 它不仅造成水量损失, 更容易引发次生风险, 干扰社会稳定运行。随着技术迭代与数字系统的落地, 输水安全从粗放式管理转向数智化调控已具现实基础。但仅有技术堆砌并不能构成有效防线, 感知的精准性、识别的敏锐性、响应的及时性缺一不可。本研究尝试从实际管控困境出发, 剖析制约泄漏预警系统实效的核心问题, 并对数智手段的应用路径进行针对性梳理和思辨, 旨在探索一条既贴合技术发展逻辑, 又符合现场需求特性的管道泄漏预警提升路径。

一、数智化背景下输水管道泄漏预警的总体认知

（一）输水管道泄漏的行业现状

一方面，输水管道作为城市水资源系统运行链的重要环节，当前泄漏一直没有获得系统有效的解决，现阶段各地主要依靠人工巡检、经验主义为主，不够及时、不够准确。局部管网虽然有感知网分布，但是覆盖不够全面、缺乏协同、数据缺乏集成分析、尚未构成完整的闭环风险预警系统，另一方面，当前许多地区的管网没有按照规范施工，因此结构信息不明确，排查费用昂贵、修复时间长，进而影响了泄漏后的响应速度。技术瓶颈的困境和管理瓶颈的困境共存^[1]。

（二）数字智能手段在泄漏预警中的融合应用

同时，近几年信息技术和智能化设备逐步引入到管网监控系统中，从前端感知到中端控制逐渐形成一个信息采集—传送—处理—反馈的技术闭环。在广度和精度上通过物联网、水质水压传感网、边缘计算等技术也已初见成效，但融合度尚不足，大多数是数据孤岛，不同软件平台没有统一的接口和协作，虽数据量大，但缺少利用。建设融合、统一的数据通道和智能调度是泄漏预报预警真正实施的必要基础。

二、输水管道泄漏预警面临的主要挑战

（一）管道分布复杂性对监测提出的难题

城市供水管网一般由城市各管辖范围和不同地面形式组成，由城市核心区再到城郊园区甚至山体之间，其覆盖物理单元非均等性表现突出，且管网布局缺乏统一的区域规划，而目前原有建设管网大多属于改造之前留下的管网，管网文件不规范或者缺失造成现场地形和台账信息脱节严重。在这种情况下，如何布局合理监测站，感知盲区和覆盖区域可能同时存在重叠。其次管网穿插跨越不同地形，同时可能有道路、房屋和地下构造物，且部分地方施工过程中受到限制，例如传感节点无法布置或者存在数据传输的问题^[2]。由此也会带来在管道结构上的未知性和复杂性，那么对此警报系统的反应也就相应复杂，现有技术应对手段薄弱，导致漏检误报频发，影响机制的可靠性和有效性。

（二）报警信号的多源干扰识别困难

现有泄漏监控的方法大多基于管道漏水前水压、流速、流量变化进行的预警，受到管道系统水锤、用户取水、抽水口启停以及泵闸开启和关闭等因素的影响，会产生很多假数据，很容易触发异常数据，使得一些波动在数值上近似与管道漏水一样。而这种假的数据对于预设阈值的干扰较大，使得报警后运维人员很难对频繁的报警加以判断，容易导致运维人员的怠倦情绪^[3]。对于假警报事件由于缺乏语义信息和人工判断，无法对多源、异构及混杂属性数据进行关联和融合分析。系统难以灵活识别多变状态，遇到多种不确定因素时，识别难度和误判率显著增加。

（三）现场环境变化对预警准确性的制约

现场环境往往是不稳定和可变的，季节性温度、水文水质、工程地层等环境因素在很多情况下可间接通过传感器的使用影响其工作状态，致使传感器采样存在不可避免的系统误差。在高温、低温条件和较强的电磁干扰、遮蔽环境中数据上传不顺畅，甚至有一定程度的延时、甚至断链的现象。施工现场人员、车辆

等外力冲击容易造成设备遭受轻度损坏甚至严重破坏，致使数据不可靠、不可持续^[4]。环境因素的随机性和不可控性要求系统除了具有良好的鲁棒性外，系统还要求必须有在线调整参数和错误检测功能，但目前大部分监测平台在实际工程应用时多为单一阈值与单一策略应用，缺少针对现场随机性与可变性的应变策略，极有可能造成漏报或误报，因此降低了监测的可靠性与实用性。

三、数智管控下输水管道泄漏预警技术对策

（一）数据采集方式的多元融合思路

输水隧洞跑水的预判最终决定于数据的多样程度、完整性和时效性，但搭建起实时化的数智体系需先要解决单一的信号来源问题，也就是创建多元化的数据采集平台。现今大部分的体系还是停留在水位、水量、流速等物理量的采集，没有考虑其他环境参数和人为动作的交叉影响，所以要通过多元化的传感平台完成对物理、环境、行为信息的同步采集。一方面，在信号感知方式上要推进声、光、电、化学反应、水质仪等信号传感方式对传统流量监测设备的复位式部署，而不是要求单一品类的传感器作为可靠的信号来源。另一方面，在数据感知节点上要优先布设在高风险区域的组合式信号采集平台，增强局部定位能力，同时采用流动式采集平台对重点点位实现定期巡逻，从而打通固态覆盖下的动态监测盲区。为确保数据一致性，可以通过边缘服务器对获取信息进行提前筛查、分类，防止未加工信息在链路上进行冗余传递而造成网络卡顿。整合方案的核心并不在于对不同类型采集方式的叠加使用，而是能构建多层分布式的数据采集框架，在底层实现对信号完整的控制，在中间实现对数据时效的压缩，在顶层实现对感知度的分级调度，这个形态的构建应当以体系对复杂现场环境的匹配程度为参照，不要陷入注重单点采集率的设计盲区^[5]。集中信息采集不但是信息覆盖率提升，还能使后续的认识提供有维度根据的数据资料，实现真实有效的自发式的信息感知系统。

（二）通信链路稳定性的强化路径

通信链路的稳定性和可靠性最终影响着系统闭环处理是否能够顺利启用，提高通信链路抗干扰能力和稳定性也不应该是后期才考虑的，而应该是作为系统架构设计初期就应当考虑的任务之一。由于传输环境上通常采用的是输水管网区域分散、环境干扰严重的特性，所采用的通信架构应为分散的通信网络，并采取无线和有线相结合的双通道通信方式，保障传输过程中的分层级数据可靠性，通常在埋地传输的地点优先选用广域低功耗通信(LoRa)、窄带IoT(NB-IoT)等具有穿墙特性的技术，克服物理环境对通信的干扰；同时，在通信盲点位置，设置相应的无线中继和信号中转设施，保障回传链路完整。为了减轻链路负载，应对节点传输速率进行自适应调节，引入节点本地缓存，可在无链路时将数据缓存在本地，直至链路恢复，在保障数据不丢失的前提下提高链路完好率；通信数据完整性验证也需加强，可通过在数据上添加哈希码并加上时间戳的方式避免数据在传递过程中被篡改或上传重复现象^[6]。系统应具备链路的实时感知和实时自适应特性，应实时对通信延迟、传输损耗和强度进行观察，并根据结果实时进行主备传输通道的切换或自适应地调整链路传输协议等配置项，保障系统能长期稳定运行。稳定通讯链路不是技术能力

的叠加，而是配合数据采样、信息处理乃至预报决策等工作的底层支撑、基础保证，是管控体系正常运作的重要保障。

（三）识别机制中的精细化处理策略

识别是泄漏事件发生后预警体系的决策核心，但是当前以阈值作为判别逻辑的泄漏识别方法在高复杂工况条件下区分度不足。实现精细化处理异常数据需要以数据结构化和识别路径模块化为基础，逐层剥离影响判断精度的冗余影响因素。识别逻辑不能依赖单一信号参数波动直接进行判断，应建立多维信息交叉互证的信号判别策略，将水压、流速、声频、环境湿度、电导率等指标组合在一起，进行相关联建模，交叉验证。识别逻辑需要设置多级判断路径，先进行初步判别，再进入更高层级数据比对和行为逻辑判别环节，逐渐剔除非泄漏信号。在数据挖掘层，应设置基于时序特征差异的鉴别策略，对异常持续时间、变化幅度、空间扩散等特征进行关注，建立动态阈值调节策略，使系统具备根据运行环境和历史信息进行自主调节的能力。在联动响应层，识别逻辑应具备反馈调节功能，对于误判和错判事件，在发生后能够通过操作记录和后验信息对识别逻辑进行调节，而不是仅仅依赖固定参数^[7]。这种机制对识别逻辑的要求是判断精度要高，并且具备不断学习和进化的能力。另外，应该对数据来源进行可靠性分析，给不同种形式的感知设施预设权重优先级，防止次优信号对整体识别结论造成误导。精细化的策略核心在于分层建构识别逻辑，将感知数据由粗向细处理，从筛查到比对再到判断形成闭环逻辑路径，真正实现由数据驱动向机制驱动的转变。

（四）平台化监控体系的构建逻辑

输水管道泄漏预警监控平台建设应结合输水管道泄漏预警工作全过程业务需求出发，不仅要考虑数据集中管理层面，更要达到原始数据到结果信息层的精确、及时、实时和动态映射和转换。平台应摆脱以往监控系统按功能分区建设导致的数据孤岛，应支持不同类型数据、来源、格式的融合，在顶层建立统一、多层次的数据体系，满足数据动态变化和时效性的要求，并以此建立多级数据管理体系，实现底层数据层级的实时汇聚，数据中间层的数据清洗和标准化，中间层的数据结构和结果表征的数据管理层次的综合性和完整性；应具备必要的警情触发规则，根据输水管道不同的地理线性及安全风险因子要求调整不同区域输水管道监控规则以及异常数据报警门限值，控制针对性地监控调整；支撑云边结合的计算架构，在边端进行数据预处理、分析、汇总过滤报警的初步排查，减轻中心平台的运算压力。同时平台应保持灵活的公开接口、开放协议设计，支持调度管理系统、维护管理系统、GIS等各类外部信息系统之间互联互通，共享数据资源，协同工作；提供开放的管理功能和多层次数据视图报表设计功能，用户能够自主设置不同层级管理者不同视图的数据功能权限

参考文献

- [1] 李明, 张伟. 城市输水管道泄漏监测技术现状分析 [J]. 给水排水, 2022, 48(5): 45-51.
- [2] 王强, 赵云. 智能感知技术在输水管网监测中的应用研究 [J]. 自动化仪表, 2023, 44(3): 12-18.
- [3] 陈晓东, 刘芳. 多源数据融合技术在管道泄漏预警中的实践探讨 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 67-71.
- [4] 何静, 周磊. 输水管道泄漏预警系统中的通信保障技术分析 [J]. 通信技术, 2022, 54(10): 89-95.
- [5] 张华, 李军. 数字化平台在城市供水管网监控中的建设思路 [J]. 城市水务, 2023, 27(2): 33-38.
- [6] 刘洋, 高峰. 输水管道智能监控与运行响应机制研究 [J]. 水利科技与经济, 2022, 28(4): 102-108.
- [7] 徐平. 基于分布式光纤传感的输水管道泄漏监测研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2024.
- [8] 高欢. 基于负压波法输水管道泄漏监测研究 [D]. 沈阳农业大学, 2022.
- [9] 黄美信, 陈建城, 于任鑫, 等. 输水管道泄漏智能在线监测预警系统设计及实现 [J]. 福建水力发电, 2021, (01): 58-61+64.
- [10] 林天翔, 冯少孔, 叶冠林, 等. 大型压力输水管道泄漏监测方法的试验研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(05): 136-142.

及灵活报表，包含用户查看原始数据、告警记录变动以及数据报警的历史追溯等功能。智能化管控平台的设计要遵循适应原理，能及时响应外部条件、设备能力和管道运行状况的变化而不断改变自身状态，不能让管控平台固化和封闭^[8]。智能化管控系统的应用除了体现在智能外，还体现在提供给用户正确的信息辅助决策，并且更有利于风险研判工作有科学性、可操作性。

（五）运行机制响应机制的协同完善

数智管控系统是否能够充分发挥作用是取决于运行机制以及响应机制协调完善的情况，这需要管理过程和技术手段有机结合，从而构成一个完善的泄漏事件发现、确认以及处置的闭环运行机制。其运行机制需要定义出责任人和流程节点，更好地协调不同参与主体之间的信息交互与任务分担，消除不同部门之间的信息孤岛，确保资源和信息的高效流转。而响应机制需要与预警等级以及泄漏程度的大小相联系，规划出不同的泄漏处置响应措施，确保响应措施的灵活性与高效性^[9]。在实际运行当中，应当实现自动预警和人工复审的有机结合，通过智能识别算法剔除易引发误判的警告信息，减少人工对泄漏预警进行判断与选择的任务量，然而也需要人工判断权作为必要的辅助环节，以保障最终响应决策的科学性和可操作性；运行机制需要保持灵活性，针对不同的运行效果以及反馈信息对运行参数以及策略进行相应调整，构成一个系统化的运行机制调整和修正的闭环机制。协调的另一层意义在于在应急响应层面，需要做好多层次、多维度的预案演练和培训工作，提升现场人员对于数智系统的掌握和使用水平，同时数智系统的应急资源包括人、材、机和材料等资源也要做好规划和响应，确保在发出泄漏信号后能够按照具体泄漏情况进行相应的应急力量动员等应急工作开展^[10]。在响应方面也并非仅仅是为了事故发生后开展相应的响应措施，同时也应当前移至对风险事件的预见和潜在安全隐患的排查，将泄漏预警作为持续安全保障的主要组成部分之一。

四、结束语

监测预警不仅是一个技术手段，而且是系统和机制，用现在推进数字改革的大背景，再去重新思考这个问题时，我们不能够局限地停留在埋点、埋设备这样的高度，应是数据打底，协同指挥为主导的全流程控制与管理。本文所提出的思路不是追求一个技术的叠加，而是能够每一级都能够真的用起来、每一项技术都能够切实地有它的定位，在实际的复杂场景中都站得起来，因此数智化手段不能成为空转的一个花架子，它才能够真正成为守护输水安全真正的利器。

新基建背景下水利工程造价管理数字化转型路径研究

徐晓欢

重庆市水利电力建筑勘测设计研究院有限公司, 重庆 400000

DOI:10.61369/WCEST.2025010010

摘要： 本文立足重庆市水利工程建设与管理实践，系统剖析传统水利管理模式的突出痛点，深入探讨新基建技术对水利行业实现智能化管理、精细化调度、精准化决策的赋能潜力。同时全面梳理国家及地方层面支持水利数字化转型的政策体系，针对当前数字化转型进程中面临的问题，提出具有针对性和可操作性的解决方案，旨在为水利行业数字化转型提供兼具理论深度与实践价值的参考依据。

关键词： 水利工程造价；新基建；数字化转型；BIM；区块链

Research on the Digital Transformation Path of Water Conservancy Project Cost Management in the Context of New Infrastructure

Xu Xiaohuan

Chongqing Water Conservancy, Electric Power, Construction Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400000

Abstract： Based on the construction and management practices of water conservancy projects in Chongqing, this paper systematically analyzes the prominent pain points of traditional water conservancy management models and explores in depth the potential of new infrastructure technology to enable intelligent management, refined scheduling, and precise decision-making in the water conservancy industry. Meanwhile, it comprehensively summarizes the policy system that supports the digital transformation of water conservancy at the national and local levels. Aiming at the problems faced in the current digital transformation process, it proposes targeted and operable solutions, aiming to provide a reference basis with both theoretical depth and practical value for the digital transformation of the water conservancy industry.

Keywords： water conservancy project cost; new infrastructure; digital transformation; BIM; blockchain

引言

近年来重庆市积极响应国家新基建政策，出台多项文件推动水利工程数字化改造。探索契合地方规范与行业特性的数字化转型路径，对提升水利工程造价管理科学性、降低建设成本、保障工程效益具有重要的现实意义。本文以重庆市水利工程为研究对象，深入剖析传统管理模式痛点，挖掘新基建技术赋能潜力，针对性提出数字化转型路径与应对策略，旨在为行业数字化转型提供参考。

一、水利工程造价管理现状与数字化基础

（一）传统管理模式现状

由于水利行业的特殊性，当前水利工程造价一般由专业设计人员提交工程量给造价人员，再由造价人员组价得到工程投资。这种传统计价方法一旦设计发生改变，造价人员需重新复核对比工程量，延长了项目编制周期^[1]。造价文件编制依赖《重庆市水利工程设计概（估）算编制规定》中的静态定额，但动态调整机制不足。设计变更流程缺乏数字化留痕，变更签证审批周期长，导致预算调整滞后。多参建方使用不同造价软件，数据格式不兼容，需人工二次录入，误差率大^[2]。施工阶段成本监控依赖定期

现场巡查，无法实时捕捉机械闲置、材料浪费等问题，导致结算时争议频发。竣工结算阶段依赖人工核对凭证，若凭证丢失，将会导致审计周期延长。

（二）转型的必要性

传统模式下信息传递不畅、数据处理效率低下等问题，严重阻碍了项目建设进度，无法满足现代水利工程高效、精准管理的需求。在成本管理方面，传统模式因缺乏实时、精准的监控手段，无法及时察觉并解决施工过程中资源浪费、成本超支等状况，且人工操作容易出错，责任追溯困难，进一步加剧了成本管理风险。而数字化转型能够实现对工程造价全流程的动态、精准管控，有效降低成本，提高资金使用效率，增强水利工程建设的

经济效益与社会效益。

（三）新基建技术赋能潜力

在水利工程造价管理领域，BIM、大数据与 AI、区块链、物联网（IoT）与 GIS 等技术正深度赋能全流程管控。BIM 技术通过 Revit 等软件在设计阶段构建水利工程三维模型，自动生成对接《重庆市水利工程设计概（估）算编制规定》中“建筑工程单价表”的工程量清单，实现土石方开挖、混凝土浇筑等关键环节的精准计量与全流程可视化，施工阶段依托 BIM + 物联网（IoT）技术实时追踪构件安装进度以优化人工审核效率^[3]。大数据与 AI 技术整合《重庆市水利工程施工机械台时费定额》《重庆市水利建筑工程预算定额》等历史数据构建本地化数据库，通过 AI 算法分析同类工程单方造价指标辅助投资估算，并开发风险预警模型利用深度学习技术预判材料价格趋势以提升造价管理的前瞻性^[4]。区块链技术将设计变更、现场签证等核心数据上链存证，实现变更审批的“一链追溯”，同时结合智能合约自动执行合同条款，有效降低人为干预导致的合规风险以保障流程透明化与规范化。物联网（IoT）与 GIS 技术通过施工现场传感器网络实时采集机械台班、材料消耗数据并接入造价管理平台以动态校准“施工机械台时费”，同时借助 GIS 技术与无人机航拍手段实时比对土石方填筑量与设计量，精准预警超挖超填问题以推动造价管理向精细化、智能化方向升级。

表1.1 传统管理模式与数字化转型后对比

环节	传统管理模式	数字化转型后
工程量计算	人工算量，误差率较大	BIM 自动算量，误差减小
设计变更处理	审批周期长，结算超概算案例频发	区块链存证，审批周期缩短
成本监控	定期现场巡查，争议频发	物联网实时监测
竣工结算	人工核对凭证，审计周期长	数据上链可追溯，审计效率提升

（四）政策与标准基础

国家与地方政策为水利工程造价管理数字化转型提供明确导向与支撑，《重庆市水利高质量发展三年行动实施方案（2023—2025年）》提出“加快水利数字化变革，推广应用 BIM 建设管理信息系统，推进数字孪生流域建设，开展数字孪生水利工程先行先试，推进数字孪生三峡工程重庆区域建设”，为造价管理数字化提供资金与政策支持。地方标准与技术规范方面，《水利工程工程量清单计价规范》要求“清单编码与 BIM 构件编码一一对应”，为数字化平台的数据标准化提供规则^[5]。为有序推进 BIM 技术在水利工程项目勘测、设计、施工及运行管理全生命周期的深度应用，2020 年8月7日，重庆市水利局发布《关于推进 BIM 技术在全市水利工程全生命周期应用的指导意见》，明确提出阶段性目标：到 2025 年，全市所有新建大中型水库工程和调水工程全面开展 BIM 技术应用，有条件的已成大中型水库工程和调水工程同步启动 BIM 技术应用，实现 BIM 技术在勘察设计、建设管理、运营维护等全流程环节的全覆盖。在政策与技术结合路径上，水利部在《2020 年水利网信工作要点》中明确提出，要“出台《水利工程 BIM 技术应用指导意见》，开展 BIM 和电子签章等应用试点”。这一部署进一步凸显了 BIM 技术在水利工程数字化进程中

的关键地位——作为推动智慧水利建设的核心技术支撑，BIM 技术的全面应用是加速传统管理模式向标准化、科学化、精细化、高效化转型的重要突破口，对提升水利工程全生命周期管理效能具有基础性、战略性意义。

二、水利工程造价管理数字化转型路径

（一）建立数字化管理体系

以《重庆市水利工程设计概（估）算编制规定》为核心框架，构建覆盖“投资估算—初步设计概算—施工图预算—竣工结算”全流程的数字化管理体系，依据《水利工程工程量清单计价规范》制定数据编码规则，将 BIM 模型构件编码与清单项目、定额子目一一映射，建立含人工、材料、机械的动态价格数据库并对接信息价，实现“材料预算价格 = 原价 + 运杂费 + 运输保险费 + 采购 + 保管费”的自动计算与价差动态调整；搭建云端协同平台集成参建方数据，设计阶段通过 BIM 模型自动生成预算，施工阶段利用物联网采集机械台班与材料消耗数据动态更新预算，变更签证通过区块链存证触发智能合约调整价款；制定《重庆市水利工程造价数字化管理实施细则》，明确各环节数据提交格式、审核流程及责任主体，将 BIM 模型、区块链存证记录等数字化成果纳入工程验收必备条件，强化“数据留痕”要求^[6]。

表2.1 主要材料转运费标准（含税）

序号	材料名称	单位	材料转运费（元）	
			≥ 20m 且 ≤ 50m	每增运 10m
1	块石、片石	m ³	19.50	1.70
2	砂	m ³	13.00	1.20
3	碎石、卵石	m ³	17.30	1.20
4	条石、料石	m ³	28.10	2.50
5	水泥	t	9.60	0.90
6	标砖	千块	29.50	2.10
7	钢筋	t	12.50	1.10

（二）提升数字化技术应用水平

聚焦 BIM、大数据、区块链等技术与重庆水利造价规范的深度融合以破解传统管理痛点，设计阶段运用 Revit 等软件创建水利工程三维模型，自动提取工程量并套用《重庆市水利建筑工程概算定额》生成“建筑工程单价表”，使混凝土浇筑、钢筋制安等分项工程计价误差率较传统方法降低，施工阶段通过 BIM + 进度管理模块关联 WBS 与预算子目，实时监控成本偏差^[7]。构建本地化造价数据库整合《重庆市水利工程施工机械台时费定额》《重庆市中小型水利水电设备安装工程概算定额》等历史数据，通过 AI 算法分析同类工程指标，将投资估算精度提升，并开发风险预警模型，基于市场价格波动数据提前 3 个月预测造价影响，动态调整预备费费率，落实“价差预备费动态计算”要求；将设计变更、现场签证、进度款支付等数据上链存证，实现数据不可篡改与全程可追溯。

（三）加强数字化人才队伍建设

以适应新基建与地方规范为目标构建“复合型人才 + 标准化培训”体系，在参建单位设立“数字化造价工程师”岗位，要求

从业者掌握 Revit 建模、Python 造价数据分析及《重庆市水利工程设计概（估）算编制规定》应用等技能，具备将技术标准转化为实操流程的能力，并鼓励一级造价工程师参与数字化项目以强化“造价+技术”复合能力；联合高校和相关单位等开发定制化课程，涵盖 BIM 造价应用、区块链存证操作及《水利工程工程量清单计价规范》解读等内容，推行“数字化造价师”认证，持证人员需通过本地规范应用与水利造价软件实操等考核，确保成果符合地方标准；对采用数字化技术节约造价超 5% 的项目团队给予专项财政补贴，将数字化技能纳入造价工程师继续教育必修内容，要求每年完成不少于 20 学时新技术课程，以及及时掌握相关规定及数字化工具应用技巧^[8]。

三、关键技术应用面临的问题与对策

（一）主要挑战

技术标准层面，重庆本地虽有《重庆市水利工程设计概（估）算编制规定》等规范，但 Revit 建模软件与造价软件等工具数据接口不统一，导致 BIM 模型工程量需人工二次换算对接《重庆市水利建筑工程概算定额》子目，跨平台数据传递误差率较大，且参建方系统数据格式不兼容，动态价格数据库更新滞后于市场；传统流程与技术适配方面，传统模式与 BIM 建模、区块链存证等技术存在流程冲突，且中小水利企业面临 Revit 专业版年费、区块链平台初期投入过高等成本压力；人才层面，全市“造价+数字化”复合人才占比过低，项目从业人员不熟悉《水利工程工程量清单计价规范》数字化模块，企业引入工具后因培训不足出现“模型建而不用”现象；政策执行上缺乏水利造价专项补贴细则，未明确区块链存证、BIM 模型法律效力，部分审计单位仍要求纸质凭证，导致技术应用与政策合规存在衔接缺口。

四、应对策略

完善技术标准与数据生态，由重庆市水利局牵头制定《水利工程造价数字化技术导则》，统一 BIM 模型交付与区块链存证格式，强制模型数据与《重庆市水利建筑工程概算定额》子目映射，搭建市级水利造价数据平台，整合多部门数据实现“动态数据库+智能调价引擎”联动，确保价差计算符合国家及行业规范^[9]。推广轻量化技术工具与成本分摊机制，通过政府补贴、行业协会统筹建立共享建模中心，降低中小企业 BIM 轻量化平台使用成本，开发适配重庆水利工程特性的“AI 算量插件”提升算量效率、减小误差，采用“政府搭台+企业租用”模式提供免费区块链存证服务^[10]。构建“三位一体”人才培养体系，依托高校和相关单位开设“数字化造价”定向班，融合地方规范解读与技术实操课程，实施“造价工程师数字化升级计划”要求三年内完成不少于 40 学时培训并与执业资格挂钩，建立“数字化导师库”通过项目试点“传帮带”提升基层能力。强化政策激励与监管创新，出台专项补贴办法对数字化项目进行补贴、对节约造价给予奖励，修订审计办法明确 BIM 模型与区块链存证法律效力，建立“技术应用信用评价体系”限制未达标单位参与投标，倒逼技术落地。

四、结束语

研究表明新基建技术能够显著提升水利工程造价管理的效率与精度，但水利工程造价管理数字化转型是一项长期、系统性工程，未来仍需持续完善政策细则，推动 BIM 与造价软件的深度兼容，探索轻量化技术在中小项目中的普及路径，并加强跨区域、跨部门的数据共享机制建设。

参考文献

[1] 李梦雅,陈佳琪.浅谈 BIM 在水利工程造价管理中的应用[J].治淮,2022,(02):58-59.
[2] 水利部关于印发《水利工程造价管理规定》的通知[J].中华人民共和国国务院公报,2023,(21):53-56.
[3] 李成栋,杨海欧,姜辉等.工程建设数字化转型标准体系研究[J].工程造价管理,2023,(3):12-20.DOI:10.19730/j.cnki.1008-2166.2023-03-012.
[4] 郑浩,姚振伟.BIM+GIS组合技术在水利工程项目全生命周期的应用[C]//河海大学,福建省幸福河湖促进会,福建省水利学会.2022(第十届)中国水利信息化技术论坛论文集.河南立信工程管理有限公司;2022:963-968.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.028518.
[5] 曾丹.基于 BIM 技术的建筑工程全过程造价数字化转型研究[J].中国住宅设施,2024,(07):184-186.
[6] 张艺馨.BIM 在水利工程项目应用推广影响机制研究[D].重庆大学,2022.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.002153.
[7] 张唯红.浅析 BIM 技术在水利工程造价管理中的应用[J].科技与创新,2024,(24):191-193.DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2024.24.060.
[8] 刘万海.BIM 技术在水利工程造价专业中的应用[J].中国招标,2023,(09):146-148.
[9] 何文思.水利工程造价管理的智能化发展分析[J].城市建设理论研究(电子版),2022,(27):138-140.
[10] 潘琰,张雪.水利工程造价管理的智能化发展分析[J].居业,2022,(02):183-185.

截流技术在水利施工技术中的应用策略

李鹏

临汾市联晟水利机械工程有限公司, 山西 临汾 041000

DOI:10.61369/WCEST.2025010011

摘 要： 截流技术是水利施工过程中重要的技术手段，其在实际应用中不仅能保证施工进度，还能提高工程质量。目前我国水利建设发展迅速，但由于缺乏成熟完善的截流技术，导致施工中经常出现问题。因此，加强对截流技术的研究与探讨具有重要意义。本文以某水库工程为例，分析了其在水利施工中的应用要点，并探讨了截流技术在水利施工技术中的施工管理措施以及工程截流的效果，通过分析，文章旨在为水利工程建设提供理论参考和实践指导。

关 键 词： 截留技术；水利施工；应用策略

Application Strategy of Interception Technology in Water Conservancy Construction Technology

Li Peng

Linfen Liansheng Water Conservancy Machinery Engineering Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041000

Abstract： River interception technology is an important technical means in the process of water conservancy construction. Its practical application can not only ensure construction progress, but also improve project quality. At present, China's water conservancy construction is developing rapidly, but due to the lack of mature and perfect interception technology, problems often occur during construction. Therefore, strengthening the research and exploration of interception technology is of great significance. This article takes a certain reservoir project as an example to analyze its application points in water conservancy construction, and explores the construction management measures and engineering interception effects of interception technology in water conservancy construction technology. Through analysis, the article aims to provide theoretical reference and practical guidance for water conservancy engineering construction.

Keywords： interception technology; water conservancy construction; application strategy

引言

水利工程作为国民经济发展的重要基础设施，是一项关系到国计民生和社会经济稳定的重大工程。当前我国水利技术水平不断提升，水利资源开发利用程度不断提高，但我国大多数水利工程都位于山区、丘陵地带，地质结构复杂，地形变化大，施工环境十分恶劣，尤其是在河流截流过程中，常常面临着各种不确定因素^[1]。因此，为了确保水利工程建设质量，保证工程质量达标，需要合理应用截流技术，制定科学的截流方案，以实现良好的防洪效果。截流技术是指为实现截断水流、将河道或渠道中的水流改向另一条河道或渠道而采用的一种方法^[2]。根据实际情况，可以分为永久性截流技术和临时性截流技术两类。目前，国内外对该技术的认识也存在很大差异，国外普遍认为，截流技术主要用于临时性河道治理；而国内则认为，截流技术不仅可以用于临时性河道治理，还可用于永久性河道治理。此外，还有学者认为，截流技术可以用于任何类型的河流治理。

随着科学技术的发展，截流技术的种类也越来越多，如土石坝下游截流技术、重力坝体上下游截流技术等^[3]。虽然不同的截流技术具有不同的特点，但是从本质上来看，截流技术都属于开挖技术，其目的就是通过开挖方式使水流改道。因此探究截流技术在水利施工技术中的应用很有必要^[4]。

一、工程概况

某地区位于黄河中游，地处黄土高原南部。该水库工程主要

包括大坝、溢洪道、泄水建筑物、引水隧洞和库区等部分，其中大坝为土石坝，坝顶高程为195.0m；溢洪道布置在左岸的峡谷中，全长206m；泄水建筑物布置在右岸的山谷中，全长403m；

引水隧洞长806m；总库容为7.9亿 m3。

根据设计要求，该水库截流工程施工范围内的地形地质条件复杂，且河床覆盖层较厚，存在大量松散岩体和岩石碎块。因此，截流过程中需要对河床进行处理，以确保截流工作的顺利进行。此外，由于该水库工程建设时间较早，受当时施工技术水平限制，截流技术应用水平不高，导致了截流效果不理想^[6]。

二、截流方案及施工要点

（一）前期准备

在进行截流施工时，首先要对施工场地的水文地质状况进行全面调查。根据实际情况确定合理的截流方案，并编制相应的技术方案。在此基础上，组织相关人员召开专题会议，对截流施工的关键问题进行深入探讨，确保截流工作的顺利进行。

截流施工前，需要先搭建临时围堰，为后续工作做好准备。在选择围堰顶高程时，要综合考虑施工区域内的水位、地形和水流等因素，确保围堰能够承受较大的水头压力，并满足施工要求。在搭设围堰时，要严格按照设计图纸和施工规范进行操作，避免出现误差或不符合规范要求的问题。同时，还要注意保持围堰与周围环境的协调性，避免影响施工进度或造成安全隐患^[6]。

（二）上下游水位观测

在围堰搭建施工结束后，要对施工过程中的上游和下游的水位进行监测，以决定施工的最优开槽时间。项目的进度、费用和安全是决定项目成败的关键。水位监测工作要求使用超声波水位计、雷达水位计等高精度水位监测设备，有专业人员对上游和下游水位进行实时连续监测。采用这些先进设备可以快速准确地获取水位变化情况，并将相关的数据资料通过数据传输系统传送到调度中心，从而为施工决策提供参考^[7]。

通常情况下，当上游水位比下游低的时候，水流的自然流动有利于排除建设中的渣土、废料等垃圾，而在这个时候，由于水流对建筑设备的冲击很小，可以大大减少建设周期，减少设备损耗、人工加班等造成的附加费用，因此，通常在这个时候开槽^[6]。相反，在上游水位高于下游时，由于较高的水压力增大了挖槽工作的困难，水流的冲击力容易造成工程装备的失控，严重时会造成围堰渗漏和坍塌等重大安全问题。所以，在决定开槽时机时，除要注意水位的变化外，还要考虑天气变化、水文循环和河道流量等多方面的影响。比如，在汛期到来之前，即使当前的水位状态看似合适时，仍需要对随后的暴雨造成的水位变化进行合理评估，以免出现突然的水位变化，从而影响到工程的安全性与工程质量。

（三）开槽施工

开槽施工的成功实施取决于能否合理地控制水位差。在水位相差很大的情况下，通常采用水面投石法或爆破法来调整水位。在水面投石时，需要依据流速及河床的地貌条件，准确地确定抛石的个数、大小及投放位置。工人们利用专门的抛石船，将石块按预定的计划投入到河流中，利用石块的堆积作用，在河床上构筑起一种具有缓流和减小水面差的临时挡水结构^[9]。

此外，还可以采用潜水泵抽水的方式来调节水位，以保证开槽机能够正常工作。施工单位会根据开槽区域的大小和水位差，合理布置潜水泵的数量和功率。在抽水过程中，实时监测水位变化，确保抽水速度与开槽进度相匹配。

在开槽过程中，需要注意保持开槽机的稳定和匀速前进，避免因速度过快而导致机器受损或发生事故。同时，还要注意观察围堰内外水位变化，及时调整开槽方向和深度，确保围堰与河床之间保持适当距离。

（四）护底施工

护底施工是保证截流工程稳定、耐久的重要步骤，其核心是通过对护基材料与施工技术的合理选用，构筑高强度、光滑的河床防护层，提高围堰抗冲性能^[12]。为此，必须选用适宜的材料及工艺，使其断面平滑、不开裂、不尖锐。常用的护底材料有：混凝土预制块，石笼网，土工合成材料等，见表1。

表1 常见护底材料

常见护底材料	特点	适用
混凝土预制块	强度高、耐久性好	适用于水流速度较大、冲刷严重的区域
石笼网	由高强度钢丝编织而成，内部填充石料，柔韧性强，	能够适应河床的变形，常用于地形复杂的河道
土工合成材料	具有良好的防渗和反滤性能，可有效防止水流渗透对河床的破坏。	

在施工过程中，需要采用高压水枪冲洗坝面，利用强大的水流冲击力，将坝面的浮土、杂物、风化层等彻底清除，使其达到设计要求的平整度和光滑度。在完成护底施工后，需要进行压实工作，采用振动碾、冲击夯等压实设备，对护底表面进行反复碾压或夯实。通过精确控制压实的遍数、速度和力度，使护底结构的密实度达到设计要求，从而有效提升坝体的承载力和抗冲刷性能。

（五）填筑施工

填筑施工是塑造载体结构的重要环节，其质量直接影响载体的密实度、承载力和整体稳定性。首先，填料的选择至关重要。常用的填筑材料有土料、石料、土石混合料等。土料应优先选择黏性土，其具有良好的可塑性和粘结性，但需控制土料中的有机质含量和杂质含量；石料要求质地坚硬、强度高，且粒径符合设计规定；土石混合料则结合了土料和石料的优点，适用于多种工程场景。施工前，需对填料进行严格的取样检测，分析其粒径、级配、含水量、压缩性等物理力学指标，确保填料性能满足工程要求。

在填筑施工过程中，严格控制施工技术参数是保证质量的关键。施工人员需按照分层填筑的原则，每层填筑厚度需根据压实设备和填料特性确定，一般控制在30—50cm之间。同时，要精准把控填料的粒径、级配和含水量。对于粒径过大的石料，需进行破碎处理；级配不良的填料，要通过掺配其他材料进行调整；含水量不符合要求时，采用晾晒或洒水的方式进行调节。在填筑过程中，采用推土机、装载机等进行摊铺，确保填料均匀分布，并保持连续填筑，避免出现施工缝和分层现象。每层填筑完成后，及时进行压实作业，使用压实设备按照预定的压实参数进

行碾压，直至达到设计要求的密实度。压实过程中，通过环刀法、灌砂法等检测手段，对每层的密实度进行检测，只有检测合格后，才能进行下一层的填筑。

三、截流技术在水利施工技术中的施工管理措施

在混凝土重力坝截流施工管理中，需要重视以下几个方面：

第一，要严格落实施工责任制。为确保工程顺利开展，必须建立健全的施工管理制度，加强现场管理，充分调动施工人员的工作积极性和主动性，提高其责任意识和安全意识，保证每个人都能认真执行施工规范要求^[9]。

第二，要制定科学合理的施工计划。由于截流施工过程比较复杂，涉及多道工序，因此需要根据现场实际情况制定科学合理的施工方案。该水利工程采用的截流技术包括水下抛石截流、坝面堵口截流、两岸快速围堰截流等多种形式，为了更好地完成截流施工任务，应该结合实际情况选择合适的截流施工方法，并将其作为重点进行安排。

第三，要加强对施工设备的管理和技术培训。施工单位应定期对设备进行检查，发现问题及时解决；同时也要加强对相关人员技术培训，使他们掌握足够的专业知识和技术能力，从而更好地开展各项施工工作，切实提升工程建设质量。

第四，要严格控制材料进场检验环节。为保证混凝土质量，必须严格按照国家有关规定做好进场检验工作。首先要对材料进行取样化验，检验其化学成分和物理性能是否符合要求，若不合格则严禁使用；其次是对土石等原材料进行检验，如含水量、密度、级配等指标均应达到设计要求。最后是对原材料进行抽检，通过试验分析其各项指标是否达标，若不合格则严禁用于施工。总之，要从各个环节入手，做到全面细致，从而保证施工质量^[10]。

第五，要强化应急处理能力。在截流过程中，可能会遇到各种突发事件，为了最大限度地降低风险，需要建立健全应急处理机制，一旦出现紧急情况，能够及时启动预案，快速应对，保证工程建设顺利进行。

四、截流效果分析

在本工程截流施工中，根据施工方案采取了多项措施确保施工质量、安全和进度。在整个截流工程中，运用了截流技术，有效地解决了河道流量大、水位高的问题，保证了施工质量和进度。通过本工程的实践经验，可以总结出以下几点结论：

首先，提高了截流效果。由于采用了先进的截流方案，如快速围堰、双向围堰等，使得截流过程更加高效、安全。同时，通过合理配置机械设备，实现了截流速度快、效率高的目标，确保了截流后水库的正常运行。其次，节约了成本。由于采用了新型材料和施工技术，减少了对环境的影响，降低了人工费用和施工成本。此外，通过科学安排施工计划和资源调配，实现了施工过程的优化管理，从而降低了成本支出。最后，保障了施工质量。在本工程截流施工中，通过严格执行质量标准 and 规范操作流程，保证了施工质量和精度，确保了工程建成后的稳定性和可靠性。通过对截流工程进行详细分析，我们可以看出，截流技术的应用不仅能够提高截流效果，还能节省成本、降低风险，并提高施工质量和进度。因此，水利工程建设者应当加强对截流技术的应用，不断创新和改进技术方法，以推动水利工程的可持续发展。

五、结束语

水利工程中截流技术应用十分关键，不仅能够加快施工进度，还能提升工程质量。我国部分地区因受自然因素影响较大，所以在开展水利工程建设过程中往往会面临很多问题，其中就包括截流问题。由于截流技术的重要性，所以相关人员需要结合工程实际情况，不断完善施工方案、优化施工措施，从而确保截流施工的顺利进行。通过对本文分析可知：现阶段我国水利施工中使用的截流技术相对落后，无法满足现代水利建设的需求。因此，有关部门需要加强对水利截流技术的研究，并积极探讨新的截流技术，从而提升水利截流技术的应用效果。同时也要注意，在实际应用中，还需要根据不同工程的具体情况，选择适合自己的截流技术方案，以实现最大限度地降低成本、提高效益。

参考文献

- [1] 张宏洲. 水利工程中导截流技术的特点及运用 [J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(06): 156-158.
- [2] 张家健. 水利水电工程中的导截流技术 [J]. 中国高科技, 2021, (09): 137-138.
- [3] 张维, 马炎松, 吴霞. 卡洛特水利枢纽工程截流关键技术与应用 [J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 179-183.
- [4] 戴欣明. BIM技术在导截流工程中的应用研究 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(23): 193-196.
- [5] 郭继涛. 浅析水利工程施工技术措施 [J]. 建筑与预算, 2022, (07): 80-82.
- [6] 高歌. 水利工程中截流施工工艺流程及实践 [J]. 四川水泥, 2020, (08): 148+150.
- [7] 王艳玲. 基于水利枢纽工程截流关键技术探究 [J]. 珠江水运, 2022, (03): 72-74.
- [8] 鲁军, 刘城, 严彬. 对水利施工中导截流施工技术的几点分析 [J]. 居业, 2021, (12): 183-184+187.
- [9] 牛家盈, 李斌. 截流施工技术在水利工程施工中的应用 [J]. 水上安全, 2024, (24): 175-177.
- [10] 史志奇. 截流技术在水利施工技术中的应用探讨 [J]. 居业, 2022, (07): 25-27.

水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化研究

张立娟

天津市水务规划勘测设计有限公司，天津 300204

DOI:10.61369/WCEST.2025010012

摘要： 本文围绕水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化展开研究，旨在提升泄洪安全性与工程效益。系统阐述水库枢纽构成及泄洪建筑物、消能工的功能与类型，分析水力学模型试验、数值模拟技术等优化方法的原理与应用。通过某水电站及某水库溢洪道消能工优化实例，验证优化方案显著改善水流流态、提升消能效率、降低冲刷风险的有效性。同时指出当前消能工体型优化面临复杂水力学分析难、多目标平衡复杂及环境因素制约等挑战，并针对性提出多技术融合分析、智能算法优化及环境适配设计等应对策略，为消能工体型优化提供理论与实践参考。

关键词： 水库枢纽；泄洪建筑物；消能工体型；优化研究

Research on Optimization of Energy Dissipation Structure Shape for Reservoir Hub Flood Discharge Structures

Zhang Lijuan

Tianjin Water Resources Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

Abstract： This article focuses on the optimization of the energy dissipation structure shape of reservoir hub flood discharge buildings, aiming to improve flood discharge safety and engineering efficiency. It systematically expounds on the composition of the reservoir hub, as well as the functions and types of flood discharge buildings and energy dissipation structures. It analyzes the principles and applications of optimization methods such as hydraulic model testing and numerical simulation technology. Through examples of energy dissipation structure optimization in a hydropower station and a reservoir spillway, it verifies the effectiveness of the optimization scheme in significantly improving water flow patterns, enhancing energy dissipation efficiency, and reducing erosion risks. At the same time, it points out that the current optimization of energy dissipation structure shape faces challenges such as difficult complex hydrodynamic analysis, complex multi-objective balancing, and environmental constraints, and proposes targeted countermeasures such as multi-technology fusion analysis, intelligent algorithm optimization, and environmentally adaptive design, providing theoretical and practical references for the optimization of energy dissipation structure shape.

Keywords： reservoir hub; flood discharge buildings; energy dissipation structure shape; optimization research

引言

水库枢纽作为水利工程核心，承担水资源调配、防洪减灾及综合利用等功能，通过蓄水泄洪调控，既能缓解水资源时空不均，保障农业、城市与工业用水，又能削减洪峰，降低下游洪水风险，如月潭水库优化泄洪建筑物提升防洪能力。泄洪建筑物作为水库枢纽关键，通过合理布置与设计，可快速泄洪、调节库水位，保障水库安全，某水利枢纽经优化泄洪闸体型，提升了泄流与消能效率。消能工体型优化同样重要，高速下泄水流若不消能会威胁枢纽稳定，而优化设计可改善水流流态，减轻下游冲刷，像某水电站采用面流扩散式消能工解决冲刷问题，卡拉水电站结合宽尾墩与跌坎消力池提高消能率，显著提升工程安全性与经济性。

一、相关概述

（一）水库枢纽构成与功能

水库枢纽是由多个水工建筑物有机组合而成的复杂系统，其核心构成包括拦河大坝、泄洪建筑物、输水系统及电站厂房等。

作为水资源开发利用的关键载体，水库枢纽具备三大核心功能，其一，水资源调配功能，通过拦蓄降水与径流，调节水资源的时空分布，为农业灌溉、城市供水、工业生产提供稳定水源，有效缓解区域水资源供需矛盾^[1]；其二，防洪减灾功能，凭借大坝壅高水位形成调洪库容，结合泄洪建筑物的精准调度，实现洪水的

拦蓄与错峰下泄，显著降低下游洪涝风险，保障沿岸居民生命财产安全；其三，综合利用功能，依托水库水体空间开展水力发电、航运、水产养殖及生态补水等多元化开发，兼顾经济效益、社会效益与生态效益，成为支撑区域可持续发展的重要基础设施。

（二）泄洪建筑物的作用与类型

泄洪建筑物作为水库枢纽抵御洪水风险的“安全阀门”，其核心功能在于洪水期迅速排泄超额水量、精准调控库水位，从而保障大坝及枢纽整体安全。根据结构形式与布置特点，其主要类型包括溢洪道、泄洪洞与泄洪闸。溢洪道属于敞开式泄洪结构，多依托天然地形或人工开挖构建泄洪通道，具备泄流能力强、运行管理灵活的优势，适用于洪水流量大且地形条件有利的枢纽区域；泄洪洞采用封闭式管道或隧洞结构，可在高库水位时通过闸门灵活调节泄流量，不仅能有效泄洪，还可实现水库放空，尤其适用于地质条件复杂、难以布置地表开放式泄洪设施的工程；泄洪闸通常与大坝一体化布置，通过精准启闭闸门控制下泄流量，兼具泄洪与水量调节双重功能，在需频繁进行水量调度的水利枢纽中应用广泛。

（三）消能工的工作原理与重要性

消能工程作为泄洪建筑物不可或缺的关键配套设施，其核心在于通过改变水流流态，将高速下泄水流蕴含的巨大动能转化为热能、势能或紊动能量，以此削弱水流对下游河道的冲刷破坏力。实际应用中，主要通过扩散水流（如面流消能、挑流消能）、加剧水体掺气碰撞（如消力池消能）或利用地形条件形成水跃等技术手段，实现对水流能量的高效耗散^[2]。这一设施的重要性不言而喻，未经消能的高速泄洪水流，会以强劲动能直接冲击下游河床与岸坡，不仅会造成河道剧烈冲刷、护岸结构损毁，甚至可能威胁大坝基础的稳定性。消能工的优化设计直接关乎泄洪建筑物的安全与经济性能——设计优良的消能工能够大幅降低下游防护工程的建设与维护成本，有效规避因水流冲刷引发的各类次生灾害，为水利枢纽的长期稳定运行筑牢防线。

二、消能工体型优化方法

（一）水力学模型试验

水力学模型试验是消能工体型优化的重要手段，基于流体力学相似准则，采用遵循重力相似的正态水工整体模型。试验需严格确定几何、流量、流速、糙率等比尺参数，如长溪水库溢洪道优化中，选定几何比尺1:30、流量比尺4929.50等。关键部位常用表面糙率低、易加工的有机玻璃制作，确保原型糙率换算合理、结果可靠^[3]。试验流程包括三阶段，依据工程实际设定水尺水位及下游边界条件；按《水工（常规）模型试验规程》制作安装模型，严控精度；测量水流流态、水面线、流速分布及消能效果等参数，为方案验证与优化提供依据，在消能工体型优化中成效显著。

（二）数值模拟技术

数值模拟技术在消能工体型优化研究中应用愈发广泛，其核心在于构建精准刻画复杂水流特性的数学模型。其中，RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型因可行性高、精确度强成为常用工具，该模型通过紊动能 κ 方程与紊动能耗散率 ϵ 方程，有效捕捉高速水流湍流特

征^[4]。如在某溢流坝下游泄洪消能防冲优化中，研究人员运用此模型搭建三维数值模型，并按实际地形构建1:1几何模型。模型构建时，进口速度、出口压力、固壁无滑移等边界条件的合理设定，是模拟准确的关键；挑坎段、消力池等水流复杂区域需加密网格以提升精度。

（三）其他优化方法

除水力学模型试验与数值模拟技术外，理论分析与经验公式修正也是消能工体型优化的重要方法。理论分析基于水力学与力学原理，通过求解水流运动和能量守恒方程推导优化理论解，但因实际水流条件复杂，需结合经验公式修正以增强适用性。如某水库泄流出口消能方案中，研究人员先通过理论分析确定消能器出水孔口参数，再结合模型试验优化孔口直径与开孔率，显著提升消能效果。随着智能化技术发展，智能优化算法通过构建多目标函数，综合消能效率、结构安全和经济成本等因素实现全局优化，但存在计算量大、收敛慢等问题，需进一步改进算法性能以提高优化效率。

三、消能工体型优化实例分析

（一）某水电站消能工体型优化

根据张曜、尹进步等人^[7]的研究，某水电站因河谷狭窄、消能区空间有限，原窄缝式消能工在运行中暴露出下泄水流主流集中于两岸的问题，导致左岸尾水渠严重冲刷，威胁河床稳定性。为解决这一难题，研究团队经水工模型试验，提出面流扩散式消能工优化方案，从多维度对消能工体型进行调整。

在具体优化措施上，一方面对跌坎与泄槽段参数进行修改，将明流段跌坎高度由3.0m降至2.0m，缩短高速水流跌落高差；泄槽段采用“双级斜坡+圆弧衔接”设计，前半段以1:10.0的坡度平缓过渡，后半段用1:2.5的坡度加速扩散，两段衔接处设置R=57m的大半径圆弧减少水流分离，末端端设R=15m圆弧挑坎缓冲下泄水流冲击。另一方面对流道结构进行改造，拆除泄槽内侧收缩边墙，并增设导流导墙，引导水流向消力池中央集中，将原本窄缝式消能的单侧收缩流态转变为对称扩散流态，消除两岸水流偏折现象^[6]。优化后的消能工经试验验证成效显著：水舌在泄槽段的横向扩散宽度从12m大幅增至28m，覆盖消力池宽度的85%，相比原方案的40%实现了质的提升；主流集中区冲刷深度从6.2m锐减至2.1m，下游河床最大流速从8.7m/s降至5.3m/s，低于河床基岩抗冲流速。同时，消能效率通过水流掺气监测显示提升18%，池内水跃长度缩短30%，形成稳定的三元扩散流态，彻底解决了原方案因水流集中导致的局部冲刷问题。

（二）某水库溢洪道消能工优化

根据贾洪全^[8]的研究，某水库溢洪道原设计中消力池与退水渠存在显著缺陷，消力池体型难以适配高速水流能量，致使水流漫溢至边墙顶部，威胁结构安全；退水渠因断面突变成水流壅塞，消能效率低下且加剧下游冲刷风险。

为此，研究团队借助水工模型试验，针对性提出优化方案。针对消力池，将池底由均匀平底改为“前低后高”的渐变式反坡，坡度从1:100渐变为1:50，并把直立边墙改造为向内倾斜15°的折线型扩散墙，墙顶增设0.5m挑流坎。这一调整使水跃位置从池尾前移至池身中部，形成稳定的三元水跃，在P=2%、

1%、0.1%等多种洪水工况下，漫溢现象彻底消除，水流掺气浓度从45%提升至68%，消能率由62%跃升至75%。在退水渠优化上，于与消力池衔接处增设12m长喇叭形渐变段，底宽从5.5m扩至7.0m，渠深从2.0m增加到2.5m，两侧边墙设置8°扩散角的导流翼墙。优化后，退水渠入口流速从6.8m/s降至4.2m/s，壅塞段水位下降1.2m，水流扩散均匀度提高40%，最大流速控制在1.1m/s以内，低于原设计1.3m/s的抗冲流速，有效规避渠底冲刷风险^[6]。经优化后的水工模型试验验证，在30年一遇设计洪水（ $Q=23.2\text{m}^3/\text{s}$ ）工况下，消力池水流稳定，无漫溢及折冲现象；退水渠水流平顺，出口断面流速分布均匀度达92%，较原方案提升35%。结构应力监测数据显示，消力池边墙动水压力峰值从0.85MPa降至0.52MPa，退水渠底板脉动压强幅值减少60%，显著增强溢洪道运行安全性。

四、消能工体型优化面临的挑战

（一）复杂水流条件下的力学分析方法

消能工体型优化面临高速水流引发的动水压力、剪切应力集中及掺气水流复杂流态的严峻挑战，这些因素致使结构受力不均，而高速水流的湍流效应与掺气现象改变流体物理特性，进一步加剧应力分析难度，传统理论难以精确预测其稳定性与耐久性，极易引发局部结构破坏。为此，可以采用多技术融合分析与精细化化学建模的策略加以应对。通过结合计算流体力学（CFD）数值模拟与水工模型试验，运用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型捕捉湍流特性，精确模拟流场速度、压强分布及涡结构演化，获取动水压力、脉动压强等复杂水流条件下的关键力学参数^[9]；同时引入有限元方法（FEM）构建消能工结构模型，将CFD模拟所得的水流荷载数据与之耦合，深入分析结构动态响应，针对性优化边墙、底板等关键部位的抗冲耐磨设计，从而有效提升消能工结构的安全性。

（二）多目标优化的平衡

消能工体型优化中，消能效率、结构安全与经济成本等目标间的矛盾关系成为棘手挑战，传统单目标优化方法难以兼顾多元需求。例如，为追求高效消能采用复杂体型设计，往往会导致施工难度攀升、成本显著增加，而过度侧重消能效率又可能损害结构耐久性，威胁工程长期安全。为化解这一困境，创新引入智能

优化算法并构建动态权重分配机制。一方面，借助遗传算法、粒子群优化算法等多目标优化技术，模拟自然进化机制在多维参数空间中搜寻帕累托最优解集，同步实现消能率提升、结构应力降低与混凝土用量减少等多元目标；另一方面，依据工程实际需求灵活设定目标权重，如防洪关键工程着重关注消能效率，高地震风险区域优先保障结构安全，并结合专家经验与数值模拟结果动态调整权重系数，确保优化方案兼具技术可行性与经济合理性，实现多目标间的动态平衡。

（三）环境因素的影响

地质条件与河道形态的复杂性为消能工体型优化带来显著挑战。软土地基承载能力弱、顺层边坡稳定性差，极大限制消能工基础设计；狭窄河谷阻碍水流扩散、浅水深河道难以形成有效消能水垫，传统消能工设计难以满足特殊地形的实际需求。对此，要从多维度提出应对策略，在地质适配方面，针对软基或高边坡区域，通过优化消力池边墙高度与基础埋深，采用桩基础或混凝土齿墙提升结构稳定性，于顺层边坡段设置导流翼墙或扩散消能工，削弱水流对边坡的冲刷破坏^[10]；在地形定制化消能上，依据河道形态特征，狭窄河谷采用“窄缝扩散+挑流消能”组合体型，通过增设导流导墙引导水流向中央扩散，浅水深河道则运用“消力池+护坦+海漫”联合消能方案，并借助水工模型试验反复验证不同地形条件下的水流流态与冲刷效果，确保消能工与地形环境高度契合；此外，在优化过程中融入生态理念，设计曲面边墙降低对鱼类洄游通道的影响，选用植被混凝土护栏兼顾抗冲刷性能与生态修复功能，实现工程效益与生态保护的有机统一。

五、结束语

本文聚焦水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化研究，明确其对水利工程安全运行的关键作用。通过综合运用水力学模型试验、数值模拟技术及智能优化算法等，解决消能工设计实际问题，某水电站和水库溢洪道优化案例验证了方案可行有效。针对复杂水流、多目标平衡及环境因素等挑战的应对策略，为后续工程设计提供参考。消能工体型优化关乎工程安全、经济及可持续发展，未来需深化复杂水流特性研究，加强智能算法与工程结合，探索生态友好设计，提升消能工设计水平。

参考文献

- [1] 刘斌. 三河口水利枢纽泄洪消能工体型优化试验研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 181-186.
- [2] 周旭锐. 新疆某水利枢纽工程泄洪闸水工模型试验研究 [J]. 陕西水利, 2019, 0(5): 126-128.
- [3] 崔忠. ATS水利枢纽1~深孔放空排沙泄洪洞消能工优化研究 [J]. 陕西水利, 2018, (3): 218-220.
- [4] 刘健. 某工程消力池体型优化研究 [J]. 吉林水利, 2019, (3): 5-8.
- [5] 邹忠卫. 关于水工模型优化溢洪道设计方法分析 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(3): 146-148.
- [6] 吕会娇; 禹胜颖; 袁淮中; 苏通. 某水库泄流出口消能方案模型试验研究 [J]. 水利水电工程设计, 2019, 38(1): 44-46.
- [7] 张曜; 尹进步; 吴西杰; 吴伟; 龚刚. 某水电站泄洪底孔消能工体型优化 [J]. 排灌机械学报, 2024, 42(4): 403-409.
- [8] 贾洪全. 基于水工模型试验的某水库溢洪道优化设计 [J]. 水利技术监督, 2024, (6): 150-154.
- [9] 吴伟伟; 李英勇; 史彬. 卡拉水电站泄洪消能型式研究 [J]. 大坝与安全, 2020, (4): 17-22.
- [10] 王继敏; 杨弘. 锦屏一级水电站泄洪消能关键技术研究 [J]. 人民长江, 2017, 48(13): 85-90.

水利工程施工管理的质量控制措施分析

赵文博

河南省水利第一工程局集团有限公司，河南 郑州 471200

DOI:10.61369/WCEST.2025010013

摘 要： 水利工程作为基础设施建设的重要组成部分，其质量直接关系到防洪、灌溉、供水等诸多方面，对区域经济发展和人民生命财产安全具有深远影响。本文深入分析了水利工程施工管理中存在的质量问题，从多个方面探讨了相应的质量控制措施，确保水利工程能长期稳定地发挥预期效益。

关 键 词： 水利工程；施工管理；质量控制；措施

Analysis of Quality Control Measures for Water Conservancy Engineering Construction Management

Zhao Wenbo

Henan Provincial Water Resources First Engineering Bureau Group Co., Ltd. Zhengzhou, Henan 471200

Abstract： As an important component of infrastructure construction, the quality of water conservancy projects directly affects many aspects such as flood control, irrigation, and water supply, and has a profound impact on regional economic development and the safety of people's lives and property. This article deeply analyzes the quality problems in the construction management of water conservancy projects, and explores corresponding quality control measures from multiple aspects to ensure that water conservancy projects can achieve expected benefits in the long run and stably.

Keywords： water conservancy engineering; construction management; quality control; measure

加强水利工程施工管理的质量控制，对于保障工程的安全性、可靠性和耐久性至关重要，这不仅能够避免因工程质量问题引发的安全事故和经济损失，还能更好地服务于社会经济发展需求，实现水资源的合理利用与调配^[1-3]。

一、水利工程施工管理的质量控制的重要性

水利工程在国家基础设施建设的宏伟蓝图中占据着极为关键的地位，是支撑国民经济稳健发展与保障民生福祉的重要基石，故而其施工管理中的质量控制意义非凡^[4]。水利工程的涵盖范围广泛，深度融入防洪、灌溉、供水、发电等众多与民生息息相关的领域，其质量状况犹如一把标尺，精准衡量着工程效益能否得以淋漓尽致地释放。

在防洪层面，高质量的施工管理质量控制，能够使水利工程构筑起坚不可摧的防线^[5-7]。通过科学合理的工程设计与精细入微的施工把控，让堤坝、水闸等防洪设施具备强大的抗洪能力，有效抵御洪水的凶猛侵袭，如同忠诚卫士一般，全力保障周边居民的生命财产安全，避免因洪水肆虐而导致的家破人亡、流离失所的悲剧发生^[8]。

从水资源调控视角而言，精准且严格的质量控制，使得水利工程能够高效、稳定地运行^[9-10]。一方面，为农业灌溉送去及时雨，滋养广袤农田，确保农作物茁壮成长，助力粮食丰收，夯实国家粮食安全根基；另一方面，为工业生产源源不断地提供生产

用水，保障工业生产的连续性与稳定性，推动工业经济蓬勃发展。同时，还能保障居民生活用水的稳定供应，满足居民日常生活用水需求，提升居民生活品质^[11]。如此一来，全方位支撑区域经济社会持续、健康发展。

二、水利工程施工质量影响因素

（一）人员因素

1. 施工人员素质

施工人员作为水利工程施工的直接践行者，其专业技能水平与质量意识的高低，犹如基石之于高楼，对工程质量起着决定性作用^[12]。以混凝土浇筑工作为例，这一环节对施工人员的操作熟练度要求极高。倘若混凝土浇筑工人技术生疏，在振捣过程中就难以把控振捣的力度、频率与时长，极易致使混凝土振捣不密实，从而在浇筑后的结构表面出现蜂窝、麻面等明显质量缺陷，这些缺陷如同建筑肌体上的“伤口”，不仅影响外观，更会削弱结构的耐久性与承载能力。

2. 管理人员水平

水利工程施工管理工作千头万绪，管理人员的管理能力与专业知识储备显得尤为关键。若管理人员缺乏高效的组织协调能力，在施工现场便难以妥善安排各施工班组的作业顺序与时间节点，导致施工进度拖沓，工序衔接不畅^[13]。同时，资源配置也会陷入不合理的困境，例如人力资源分配不均。

（二）材料因素

1. 原材料质量

水利工程施工涉及种类繁杂的原材料^[14]，像水泥、钢材、砂石料等，它们如同工程这座大厦的“细胞”，其质量优劣直接关系到工程结构的强度与耐久性。就拿水泥来说，作为混凝土的关键胶凝材料，若其强度等级未达设计要求，在混凝土硬化过程中便无法提供足够的粘结力，致使混凝土整体强度大打折扣，无法承受设计荷载，严重威胁工程安全。钢材亦是如此，若屈服强度和抗拉强度不足，在水利工程的钢结构部件受力时，钢材极易发生塑性变形，甚至出现断裂现象，这对于诸如桥梁、水闸等承受较大外力的结构而言，无疑是致命风险。

2. 构配件质量

水利工程中的各类构配件，诸如闸门、启闭机等，堪称工程运行的“关节”与“动力源”^[15]，其质量状况直接左右工程的正常运转。一旦构配件的制造工艺存在瑕疵，质量不过关，将会引发一系列严重问题。例如，闸门若因制造精度不足，在安装后可能出现密封不严的情况，导致漏水现象，影响水利工程的蓄水、输水功能；而启闭机若在制造过程中零部件质量欠佳，运行时容易出现卡顿、失灵等故障，致使水闸无法按指令正常启闭，在洪水来临时无法及时发挥防洪作用，或者在灌溉时节无法精准调控水位，严重影响水利工程的综合效益。

（三）设备因素

1. 施工设备性能

先进且性能稳定的施工设备，是保障水利工程施工质量的有力武器^[16]。在大型土方施工中，土方施工设备的功率大小与稳定性直接决定施工质量。若设备功率不足，在进行大规模土方开挖时，就难以达到设计要求的开挖深度与坡度，影响后续基础施工；而在土方填筑环节，设备稳定性差会导致填土压实不均匀，密实度不达标，使得基础承载能力无法满足设计标准。混凝土搅拌设备同样至关重要，其搅拌效果直接关系到混凝土的和易性与强度。

2. 设备维护管理

施工设备的日常维护管理是确保设备持续稳定运行的关键。若维护管理工作不到位，设备就如同缺乏保养的汽车，故障频发。以混凝土振捣设备为例，在频繁使用过程中，若未能及时对设备进行清洁、润滑、紧固等维护保养工作，振捣棒的振动频率与振幅就会逐渐衰减，振捣效果大打折扣，在混凝土浇筑过程中极易出现漏振现象，使得混凝土内部形成空洞、疏松等缺陷，严重影响混凝土结构的整体性与强度。

（四）工艺因素

1. 施工工艺合理性

合理适配的施工工艺堪称水利工程施工质量的“指南针”^[17]。由于不同水利工程项目在地质条件、工程规模、功能要求等方面存在显著差异，其适用的施工工艺也大相径庭。以地基处理工艺选择为例，在面对软土地基时，需充分考量软土的特性与工程需

求。若盲目选用强夯法，不仅无法有效提高地基承载力，反而可能因强夯的巨大冲击力使软土地基结构遭到破坏，产生侧向挤出、隆起等不良现象，导致地基沉降过大，无法满足上部结构的稳定性要求，给整个工程质量带来严重威胁。

2. 工艺执行严格性

在实际施工过程中，严格遵循既定施工工艺是保障工程质量的“生命线”。然而，部分施工人员受经济利益驱使或为追求施工进度，往往心存侥幸，擅自更改施工工艺参数。比如在混凝土施工中，随意缩短混凝土的养护时间，混凝土无法充分水化，强度增长受限，耐久性降低；在防水层施工时，减少施工层数，防水效果大打折扣，极易引发工程渗漏问题。

（五）环境因素

1. 自然环境

水利工程施工大多在露天环境下展开，如同置身于大自然的“舞台”，受自然环境影响极为显著。在雨季施工时，充沛的降雨犹如一把双刃剑，处理不当便会引发诸多问题。雨水大量汇聚可能对基坑形成强大冲刷力，致使基坑边坡土体饱和、抗滑力降低，从而引发边坡坍塌事故，不仅危及施工人员生命安全，还会严重损坏已施工的基础结构，延误工期，增加工程成本^[18]。在低温环境下进行混凝土施工更是挑战重重，混凝土中的水分在低温下极易结冰膨胀，若不及时采取诸如暖棚法、蓄热法等有效的保温措施，混凝土内部结构将遭受不可逆的破坏，强度大幅降低，严重影响工程质量。

2. 施工环境

施工现场的环境条件，诸如场地狭窄、交通不便等，恰似施工进程中的“绊脚石”，对施工质量产生不容忽视的影响。当施工现场空间局促时，材料堆放区域难以合理规划，各类材料随意堆放、混杂，在取用过程中极易出现错拿错用的情况，例如将不同规格的钢材混用，导致结构受力性能改变，影响工程质量^[19]。再者，交通不便会严重制约施工设备与材料的及时供应，施工设备因零部件无法按时送达而长时间停机待修，材料供应中断导致施工被迫停滞，频繁的施工中断不仅打乱施工节奏，还会因施工缝处理不当等问题影响工程质量的连贯性与整体性。

三、水利工程施工质量控制措施

（一）人员培训与管理

施工人员培训：对施工人员进行专业技能培训，使其熟练掌握施工工艺和操作方法。例如，组织混凝土浇筑工人进行振捣技术培训，提高混凝土振捣质量。同时，加强施工人员的质量意识培训，通过质量事故案例分析、质量管理制度宣传等方式，提高施工人员对质量重要性的认识。

管理人员培养：加强对施工管理人员的培养，提高其管理能力和专业知识水平。定期组织管理人员参加行业研讨会和培训课程，学习先进的施工管理经验和技能。同时，建立健全管理人员绩效考核制度，将工程质量与管理人员的绩效挂钩，激励管理人员积极履行质量管理职责。

（二）原材料与构配件质量把控

供应商管理：建立严格的原材料与构配件供应商筛选和评估机制，选择质量可靠、信誉良好的供应商。对供应商的生产能

力、质量控制体系、产品质量稳定性等进行全面评估。定期对供应商进行审核，确保其持续供应符合质量要求的原材料与构配件。

材料检验：加强对原材料与构配件的进场检验，采用先进的检测设备和方法，对原材料与构配件的质量进行全面检测。建立原材料与构配件检验数据库，对每一批次的检验数据进行记录和分析，以便及时发现质量问题并追溯原因。

（三）设备维护与合理调配

设备维护保养：建立完善的施工设备维护保养制度，定期对设备进行日常保养、一级保养和二级保养。制定设备维护保养计划，明确维护保养的内容、时间和责任人。利用设备管理软件，对设备的运行状态、维护保养记录、故障维修记录等进行信息化管理。

设备合理调配：根据水利工程施工进度和施工工艺要求，合理调配施工设备。避免设备闲置或过度使用，提高设备利用率。例如，在土方开挖和填筑高峰期，合理调配挖掘机、装载机等设备，确保施工进度和质量。

（四）施工工艺优化

工艺设计优化：在水利工程施工前，根据工程特点和施工要求，对施工工艺进行优化设计。采用计算机模拟技术，对施工过程进行模拟分析，预测可能出现的质量问题，优化施工工艺参数和施工流程。例如，通过模拟混凝土浇筑过程中的温度场和应力场分布，优化混凝土浇筑方案，减少混凝土裂缝的产生^[20]。

工艺执行监督：在施工过程中，加强对施工工艺执行情况的监督检查。建立施工工艺执行检查制度，定期对施工工艺的执行情况进行检查和评估。对违反施工工艺要求的行为及时进行纠

正，确保施工工艺得到严格执行。

（五）施工环境监测与对应

自然环境监测：建立自然环境监测体系，对水利工程施工过程中的气象、水文等自然环境因素进行实时监测。例如，在雨季施工时，加强对降雨量和水位的监测，及时采取防洪、排水措施；在低温环境下施工时，监测环境温度，根据温度变化调整施工工艺和保温措施。

施工环境改善：针对施工现场的环境条件，采取相应的改善措施。例如，对狭窄的施工现场进行合理规划，设置材料堆放区 and 设备停放区，避免材料混用和设备碰撞；对交通不便的施工现场，改善交通条件，确保施工设备和材料的及时供应。

（六）质量检测与验收体系完善

质量检测：采用多种质量检测方法，对水利工程施工质量进行全面检测。包括原材料与构配件检测、工序质量检测、隐蔽工程检测、工程实体质量检测等。根据工程质量要求和标准，确定检测频率和验收标准。

验收管理：建立严格的工程验收制度，组织专业人员对水利工程进行验收。验收内容包括工程质量、施工资料、工程外观等。只有验收合格的工程才能交付使用。

四、结语

水利工程施工管理中的质量控制是保障工程质量、实现工程效益的关键环节。通过对质量影响因素的深入分析，采取科学有效的质量控制措施，能够显著提高水利工程施工质量，保障水利工程的安全运行。

参考文献

[1] 杨彩云. 水利水电工程施工质量控制与管理改进措施 [J]. 水上安全, 2024, (08): 146-148.
[2] 李翔. 水利工程施工中的质量控制与管理措施探讨 [J]. 美食, 2024, (14): 32-33.
[3] 莫灿荣. 水利工程施工管理特点及质量控制分析 [J]. 工程建设（维泽科技）, 2024, 7(07): 25-27.
[4] 邓渠江. 水利水电工程坝体混凝土施工质量管理分析 [J]. 低碳世界, 2024, 14(10): 103-105.
[5] 夏金阳. 关于水利水电工程施工安全控制的几点思考 [J]. 珠江水运, 2024, (08): 154-156.
[6] 卢来存. 水利工程施工管理质量和安全控制分析 [J]. 水上安全, 2024, (03): 148-150.
[7] 张建宁. 水利工程施工中的质量控制与管理措施 [J]. 工程建设与设计, 2024, (06): 218-220.
[8] 温迪. 水利工程施工中的质量控制与管理措施探讨 [J]. 治淮, 2024, (08): 50-52.
[9] 黄莹, 李增明. 浅谈水利工程施工进度管理的有效控制措施 [J]. 治淮, 2024, (08): 56-57.
[10] 何武振. 大型水利工程施工质量控制方法与实践研究 [J]. 城市建设理论研究（电子版）, 2024, (35): 220-222.
[11] 张迈, 王波. 水利工程施工监理质量控制存在的问题及建议 [J]. 治淮, 2024, (11): 17-18.
[12] 冯伟, 闻强. 水利工程施工中的质量控制与管理措施探讨 [C]// 中国国土经济学会 2024 年学术年会（一）论文集. 2024: 1-3.
[13] 王响生. 水利工程施工管理质量控制措施探索 [J]. 水上安全, 2024(13).
[14] 陈广忠. 水利工程施工管理的质量控制策略探讨 [J]. 水上安全, 2024(11).
[15] 高艺轩. 水利工程质量提升与安全生产管理路径探析 [J]. 中州建设, 2024(2).
[16] 张磊. 水利工程施工管理中质量控制探讨 [J]. 水上安全, 2024(5).
[17] 胡伟. 水利水电工程施工质量控制措施分析 [J]. 工程技术研究, 2024(11).
[18] 陈露. 水利施工管理中的质量控制与质量保证措施分析 [J]. 砖瓦世界, 2024(1).
[19] 胡家齐. 水利工程施工管理质量和安全控制分析 [J]. 低碳世界, 2024(5).
[20] 刘钊. 水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理 [J]. 水上安全, 2024, (16): 157-159.

水利水电工程施工中监理与检测的协同机制探究

陈和君

四川力合工程质量检测技术有限公司，四川 南充 637000

DOI:10.61369/WCEST.2025010014

摘要： 本文围绕水利水电工程监理与检测协同机制展开。阐述了监理制度、检测技术体系，分析了现行协同模式的问题，提出设置联合办公室等优化措施，还涉及制度协同创新、BIM平台构建、智能分析等内容，强调其对工程质量的重要性及未来发展方向。

关键词： 水利水电；监理与检测；协同机制

Study on the Coordination Mechanism of Supervision and Testing in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

Chen Hejun

Sichuan Lihetech Engineering Quality Testing Technology Co., LTD, Nanchong, Sichuan 637000

Abstract： This paper focuses on the collaborative mechanism between supervision and testing in water conservancy and hydropower projects. It elaborates on the supervision system and testing technology framework, analyzes the issues with the current collaborative model, and proposes optimization measures such as setting up a joint office. The paper also covers institutional innovation, BIM platform construction, and intelligent analysis, emphasizing their importance to project quality and future development directions.

Keywords： water conservancy and hydropower; supervision and testing; cooperative mechanism

引言

水利水电工程作为基础设施建设的重要组成部分，其质量、进度和投资的控制至关重要。2020年发布的《关于加强水利工程建设监理工作的意见》强调了监理工作的重要性及规范要求。在此背景下，监理制度在质量控制（原材料监督等）、进度控制和投资控制方面发挥核心作用，同时监理规划编制和现场监督实施需严格执行。质量检测技术体系涵盖材料、结构、安全监测等多方面，且有多种新技术应用。然而，现行监理与检测协同模式存在诸多问题，如职责界面模糊、信息传递滞后、技术标准不统一等。因此，对监理与检测协同机制的研究迫在眉睫，以提高工程质量和管理水平。

一、水利水电工程监理与检测理论概述

（一）工程监理职能与工作内容

水利水电工程监理制度具有明确的法律定位，是保障工程质量、进度和投资的重要制度安排^[1]。其核心职能包括质量控制，通过对原材料、构配件及施工过程的严格监督，确保工程符合质量标准；进度控制，制定合理的进度计划并监督执行，及时协调解决影响进度的问题；投资控制，审核工程费用，避免不合理支出。监理规划编制需综合考虑工程特点、法规要求等因素，明确监理目标、流程和方法。在现场监督实施过程中，监理人员要严格按照规划要求，对施工各环节进行实时监控，及时发现并处理违规行为和安全隐患，确保工程顺利进行。

（二）质量检测技术体系与标准

在水利水电工程中，质量检测技术体系涵盖多个方面。材料

检测技术体系包括对水泥、砂石等各类原材料的检测标准与方法，以确保其质量符合工程要求^[2]。结构检测技术体系注重对工程结构的强度、稳定性等进行检测，例如混凝土结构的抗压强度检测等。安全监测技术体系则针对工程运行过程中的安全状况进行实时监测。无损检测技术作为一种新兴技术，在不破坏结构的前提下对工程内部缺陷进行检测，已逐渐得到应用。物联网监测技术通过传感器等设备实现对工程数据的实时采集与传输，为工程质量监测提供了新的手段。这些技术体系和新技术的应用都遵循着相应的标准，以保障水利水电工程的质量和安

二、施工阶段监理检测协同现状分析

（一）现有协同模式调研

在水利水电工程施工中，现行的监理与检测协同模式主要包

括监理例会制度、检测数据共享机制以及联合验收程序等。监理例会制度为监理和检测人员提供了定期沟通的平台，各方能够及时反馈工程进展中的问题，但在一些案例中发现，部分参会人员未能充分准备，影响了会议效果^[3]。检测数据共享机制旨在确保各方能够获取准确、及时的检测数据，然而，实际操作中存在数据更新不及时、部分数据解读不一致等问题。联合验收程序是保障工程质量的关键环节，但由于参与方众多，协调难度较大，有时会出现验收标准执行不严格的情况。这些问题都在一定程度上影响了监理与检测协同的效果。

（二）协同机制现存问题

在水利水电工程施工阶段，监理与检测协同机制存在诸多问题。职责界面模糊是一大困扰，监理和检测工作范围存在交叉，导致工作推诿或重复劳动，影响工程进度和质量^[4]。信息传递滞后也较为常见，检测结果不能及时反馈给监理，监理无法迅速做出决策，对工程施工调整不及时。此外，技术标准不统一使得监理和检测在工作依据上存在差异，双方对工程质量的判定可能不一致，引发争议和矛盾，给工程管理带来困难。以某大坝工程为例，在施工过程中就出现了因职责不清导致部分工程环节无人监管，因信息传递不及时造成质量问题未及时发现，以及因技术标准差异产生的验收纠纷等情况，进一步验证了这些问题的存在。

三、全过程协同机制框架构建

（一）管理协同体系设计

1. 组织架构优化

为优化组织架构，提高水利水电工程施工中监理与检测的协同效率，可设置监理检测联合办公室。该办公室作为一个集中办公区域，方便监理人员与检测人员进行实时沟通与信息共享，及时解决施工过程中出现的问题^[5]。同时，建立包含设计、施工等多方的联席会议制度。通过定期召开联席会议，各方能够共同商讨工程进展中的关键问题，如设计变更对施工和检测的影响等。这种制度有助于打破部门之间的壁垒，促进各方在工程目标上达成共识，形成协同工作的合力，从而保障水利水电工程施工的顺利进行。

2. 制度协同创新

在制度协同创新方面，为确保水利水电工程施工中监理与检测的有效协同，需制定一系列配套管理制度。首先是检测计划预审制度，该制度要求检测单位在制定检测计划后，需提交给监理单位进行预审，监理单位从工程整体需求和质量把控角度提出意见和建议，确保检测计划的科学性和合理性^[6]。其次，监理见证取样规程的制定至关重要，明确监理在取样过程中的职责和操作规范，保证所取样本具有代表性和真实性。再者，建立检测结果联合评审办法，监理与检测单位共同对检测结果进行分析和评审，及时发现问题并采取措施解决，从而保障工程质量。

（二）技术协同平台建设

1. BIM协同平台开发

构建集成监理日志、检测数据和施工进度度的 BIM 管理平台，

需从多方面进行开发。首先是数据采集模块，要确保能准确获取监理日志中的关键信息、检测数据的精准值以及施工进度度的实时情况^[7]。接着是数据整合部分，将不同来源的数据进行标准化处理，使其能在同一平台上有效融合。然后是可视化模块的开发，通过先进的图形技术将整合后的数据以直观的方式呈现，如利用 3D 模型展示施工进度，用图表展示检测数据的变化趋势等。同时，要建立数据安全保障机制，防止数据泄露和篡改，确保平台的稳定运行。

2. 检测数据智能分析

在水利水电工程施工中，利用大数据技术构建混凝土强度增长预测模型以及开发质量风险预警算法模块是检测数据智能分析的关键。通过收集大量混凝土相关数据，包括原材料特性、配合比、养护条件等^[8]，运用数据分析算法挖掘数据间的关联，建立预测模型。该模型能够根据前期数据预测混凝土强度发展趋势，为施工进度安排提供参考。同时，质量风险预警算法模块可实时监测检测数据，当数据出现异常波动或偏离预设阈值时，及时发出预警，以便监理和施工方采取措施，保障工程质量。

四、协同机制实施路径与保障措施

（一）动态协调机制实施

1. 施工准备阶段协同

施工准备阶段，建立设计文件联合审查机制至关重要。监理单位与检测单位应共同参与，从不同专业角度对设计文件进行全面审查，确保设计符合工程实际需求和相关标准规范^[9]。同时，制定材料进场联合验收标准流程。明确双方在验收过程中的职责和工作内容，对材料的质量证明文件、规格型号等进行严格核对，对材料进行抽样检测，确保进场材料质量合格，为后续施工奠定良好基础。通过这些协同措施，能够有效提高施工准备阶段的工作质量和效率，避免后期因设计问题或材料质量问题导致的工程延误和质量事故。

2. 施工过程动态管控

在施工过程动态管控方面，实施隐蔽工程联合验收制度至关重要。监理与检测机构应共同参与隐蔽工程验收，严格按照相关标准和规范进行检查，确保隐蔽工程质量符合要求^[10]。同时，构建质量问题追溯二维码系统，为每个关键施工部位或材料赋予唯一的二维码标识。通过扫码，可获取该部位或材料的详细质量信息，包括检测报告、监理意见等。一旦出现质量问题，能够迅速追溯到相关责任方和具体环节，实现质量问题的精准定位和有效处理，提高施工过程的质量管控效率和效果。

（二）标准化流程再造

1. 检测方案联合编制

在水利水电工程施工中，监理与检测的协同机制至关重要。对于检测方案联合编制，需明确监理参与检测频率确定及点位布设的技术审核程序。首先，监理应依据工程特点和相关规范，与检测方共同商讨合理的检测频率。这需要考虑工程关键部位、施工工艺以及材料特性等因素，确保检测频率既能有效监控工程质

量，又不过度增加成本和工期。其次，在点位布设方面，监理要对检测方提出的方案进行技术审核。审核过程要结合工程结构、地质条件等，保证点位布设具有代表性和科学性，能够全面反映工程质量状况，从而为水利水电工程施工质量提供可靠保障。

2. 协同工作文件体系

在水利水电工程施工中，监理与检测的协同工作需建立标准化的文件体系。应制定涵盖监理通知单、检测报告、整改通知等的标准化文档交互格式。监理通知单要明确指出施工中存在的问题及相关要求，格式规范统一，便于检测方了解情况。检测报告需详细、准确地呈现检测结果，包括各项指标数据及分析结论，其格式应符合行业标准及协同工作需求。整改通知则要针对检测出的问题，提出具体的整改措施和期限，且与监理通知单和检测报告相关联，形成一个完整的闭环文件体系，确保监理与检测工作能够高效协同，保障工程质量。

（三）保障体系建设

1. 人员能力提升

为提升人员能力，需设计复合型人才培训课程体系。该体系应涵盖检测技术与监理法规两方面内容。在检测技术方面，要包含水利水电工程施工中各类检测技术的原理、操作方法及数据分析等，使人员熟练掌握检测技能。对于监理法规，应深入讲解相关法律法规、行业规范以及监理工作的标准流程，确保人员具备依法依规开展监理工作的能力。通过这样的课程体系，培养出既精通检测技术又熟悉监理法规的复合型人才，为水利水电工程施工中监理与检测的协同机制提供有力的人员保障，提升工程质量

和管理水平。

2. 绩效考核机制

建立基于协同效率的量化考核指标是保障协同机制有效运行的关键。通过设定明确的考核指标，如检测报告及时性、监理指令执行率等，能够客观地衡量协同工作的成效。同时，实施检测监理双向评价制度，检测单位可对监理的工作配合度、指令合理性等进行评价，监理也能对检测的准确性、及时性给予反馈。这种双向评价机制有助于促进双方不断改进工作方法和态度，提高协同效率。为确保考核的公正性和客观性，应建立专门的考核小组，成员包括行业专家、项目业主代表等，定期对协同工作进行考核评估，并将考核结果与经济利益挂钩，激励双方积极参与协同工作，提升水利水电工程施工质量。

五、总结

水利水电工程施工中监理与检测的协同机制研究具有重要意义。通过系统归纳已有成果，明确其在多方面的实践价值。在工程质量管理上，协同机制能有效提升效能，确保工程质量符合标准。同时，可缩短验收周期，提高工程进度。然而，研究仍有发展空间。未来可基于区块链技术进行检测数据存证等方向的探索。这将进一步提高检测数据的真实性和可靠性，为监理与检测协同提供更有力的技术支持，从而推动水利水电工程施工质量的持续提升和行业的不断进步。

参考文献

[1] 李明超, 田丹, 沈扬, 等. 融入 Attention 机制改进 Word2vec 技术的水利水电工程专业词智能提取与分析方法 [J]. 水利学报, 2020, 51(07): 816-826.

[2] 魏鹏. 水利水电工程灌浆施工技术与质量管理的策略分析 [J]. 中国房地产业, 2020(23): 220.

[3] 杨振宇. 关于水利水电方面工程监理与工程管理的关系的探究 [J]. 数码设计, 2020, 9(16): 95-95.

[4] 范卫国. “海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究” 成果简介——获 2010 年中国水运建设行业协会科学技术特等奖 [J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 1.

[5] 李仲雄. 水利水电工程施工管理探究 [J]. 中国高新技术企业, 2015, (32): 119-121.

[6] 张岩. 水利水电工程中安全施工监理工作探究 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(24): 177-179.

[7] 王扬. 水利水电工程施工安全监理工作探究 [J]. 智能城市, 2020, 6(11): 240-241.

[8] 于继广. 环境监理在水利水电工程施工中的应用分析 [J]. 城市建筑, 2015, 12(26): 269-269.

[9] 邵继铎. 灌浆技术在水利水电工程大坝施工中的应用分析 [J]. 中国厨卫, 2024, 23(12): 226-229.

[10] 王鹏. 水利水电工程施工中的新技术及环境保护策略分析 [J]. 科技展望, 2017, 27(3): 24.

水利水电工程施工安全风险防控体系构建研究

唐恩棚

重庆钓鱼城建设监理咨询有限公司，重庆 401520

DOI:10.61369/WCEST.2025010015

摘要： 水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，施工过程具有环境复杂、技术难度高、安全风险大等特点。本文基于风险管理理论，系统分析水利水电工程施工安全风险的类型与成因，结合实际案例探讨风险识别、评估方法，并构建包含组织管理、技术防控、监测预警及应急处置的综合防控体系。通过引入信息化管理技术与动态评估机制，旨在提升工程安全管理水平，降低事故发生率。研究结果表明，系统化的风险防控体系可有效减少人为失误与环境因素导致的安全隐患，为水利水电工程施工安全提供理论与实践参考。

关键词： 水利水电工程；施工安全；风险防控；体系构建；信息化管理

Research on the Construction of Safety Risk Prevention and Control System for Hydraulic and Hydropower Engineering Construction

Tang Enpeng

Chongqing Diaoyucheng Construction Supervision and Consulting Co., Ltd. Chongqing 401520

Abstract： As an important part of national infrastructure construction, hydraulic and hydropower engineering has the characteristics of complex environment, high technical difficulty and great safety risks during the construction process. Based on the risk management theory, this paper systematically analyzes the types and causes of construction safety risks in hydraulic and hydropower engineering, discusses risk identification and assessment methods combined with practical cases, and constructs a comprehensive prevention and control system including organizational management, technical prevention and control, monitoring and early warning, and emergency response. By introducing information management technology and dynamic assessment mechanisms, it aims to improve the safety management level of projects and reduce the accident rate. The research results show that the systematic risk prevention and control system can effectively reduce safety hazards caused by human errors and environmental factors, providing theoretical and practical references for the construction safety of hydraulic and hydropower engineering.

Keywords： hydraulic and hydropower engineering; construction safety; risk prevention and control; system construction; information management

前言

水利水电工程是国家能源战略与水资源综合利用的核心工程，在防洪、发电、灌溉等领域发挥着不可替代的作用。然而，其施工过程涉及高边坡开挖、地下洞室掘进、大坝浇筑等高风险作业，且常面临复杂地质条件（如断层破碎带、岩溶发育区）、极端气候（暴雨、强风、冰冻）及多工种交叉作业的挑战。据《中国水利统计年鉴》数据显示，近五年水利工程施工安全事故中，高处坠落、坍塌、机械伤害占比超过60%，暴露出传统管理模式在风险防控中的局限性。

随着“双碳”目标推进与新型基础设施建设需求，水利水电工程规模持续扩大，施工技术复杂度不断提升。例如，白鹤滩水电站采用的百万千瓦水轮机组安装、乌东德水电站的混凝土双曲拱坝施工等，均对安全管理提出更高要求。在此背景下，传统“被动应对式”安全管理已难以满足工程需求，亟需构建科学、动态的风险防控体系，实现从“事后处理”向“事前预防”的转变。本文结合工程实践与风险管理理论，系统探讨水利水电工程施工安全风险防控的关键技术与实施路径^[1]。

一、水利水电工程施工安全风险特征与成因分析

（一）风险类型识别

1. 自然环境风险

自然环境风险是水利水电工程施工的首要威胁。根据中国地质调查局数据，我国70%以上的大型水电站位于地震活跃带与地质灾害高发区。例如，某水电站因雨季强降雨引发山体滑坡，导致施工道路损毁、设备掩埋；另一工程因未充分勘察地下暗河，在洞室开挖时发生突水事故，造成重大经济损失。此外，极端天气（如台风、暴雪）还可能影响高空作业、起重吊装等关键工序的安全实施。

2. 技术操作风险

技术操作风险贯穿施工全流程。在爆破作业中，因药量计算失误或警戒范围不足引发的爆炸事故时有发生；高边坡开挖若未严格执行“自上而下、分层开挖”原则，易导致边坡失稳；地下洞室支护不及时或支护结构设计不合理，可能引发塌方。据统计，技术操作类事故占比达35%，是安全防控的核心环节^[2]。

3. 设备材料风险

施工设备与材料质量直接影响工程安全。大型起重机械（如塔式起重机、缆索起重机）若存在机械故障或安装缺陷，可能引发倾覆、坠落事故；混凝土强度不达标、钢材韧性不足等材料问题，会降低结构承载能力。某水电站因缆机钢丝绳断裂导致混凝土吊罐坠落，造成多人伤亡，凸显设备维护与材料检测的重要性。

4. 管理组织风险

管理漏洞是安全事故的深层诱因。部分项目存在安全责任划分不清、制度执行流于形式的问题，例如安全员未落实每日巡检制度，或风险应急预案缺乏实战演练。此外，人员培训不足导致的操作失误也较为普遍，某工程因新员工未掌握爆破器材使用规范，引发意外爆炸。

（二）风险成因剖析

1. 人为因素

人的不安全行为是风险产生的直接原因。根据海因里希法则，每起严重事故背后平均存在300起违章行为。部分施工人员安全意识淡薄，存在冒险作业、违规操作现象；管理人员对风险评估不深入，过度追求施工进度而忽视安全措施落实^[3]。

2. 管理因素

安全管理体系不完善是核心矛盾。部分项目未建立动态风险评估机制，对新出现的风险（如设计变更后的潜在隐患）缺乏应对措施；安全投入不足，监测设备老化、防护设施缺失；此外，多方协作的工程模式下，参建单位间信息沟通不畅，导致风险防控出现盲区。

3. 环境因素

自然环境的不可控性加剧风险复杂性。地质勘察精度不足可能遗漏断层、溶洞等不良地质体；气象数据监测滞后导致极端天气预警失效^[4]。例如，某山区水电站因未及时获取暴雨预警，洪水冲毁临时围堰，造成重大经济损失。

二、水利水电工程施工安全风险防控体系构建

（一）组织管理体系

1. 责任制度建设

构建“企业-项目部-班组”三级责任体系，明确项目经理为安全第一责任人，技术负责人、安全员、班组长分别承担技术指导、现场监督、操作执行职责。通过签订安全责任书，将风险防控目标分解至岗位，并建立“谁主管、谁负责”的考核机制，对失职人员实行一票否决制。

2. 安全教育培训

实施分层分类培训：管理层需掌握风险评估与应急决策方法；技术人员需熟悉施工规范与安全操作规程；作业人员需接受基础安全知识、设备操作及应急逃生技能培训。采用VR模拟、事故案例分析等互动式教学，提升培训效果^[5]。某工程通过开展“安全技能比武”活动，使作业人员违规率下降42%。

3. 绩效考核机制

将安全指标纳入项目绩效考核，设置安全达标奖、隐患整改奖等激励措施，同时对违规行为进行经济处罚。建立安全积分制度，对累计扣分达标的人员进行再培训或调岗处理，形成“奖励-约束”双向管理机制。

（二）技术防控体系

1. BIM技术应用

利用BIM（建筑信息模型）技术进行施工全过程模拟，提前发现设计冲突与安全隐患。例如，通过模拟高边坡开挖过程，优化爆破方案与支护结构；对地下洞室群进行三维建模，规划合理的通风、排水及逃生通道，避免因空间布局不合理导致的安全事故。

2. 智能监测技术

部署物联网传感器对关键部位进行实时监测：在高边坡安装GNSS位移监测仪、测斜仪，动态跟踪土体变形；在混凝土坝体埋设应力应变传感器，监测浇筑温度与结构应力；利用无人机定期巡查施工区域，及时发现临边防护缺失、设备异常等问题。监测数据通过云平台自动分析，生成风险预警报告^[6]。

3. 标准化作业流程

针对高风险工序制定标准化操作手册。例如，深基坑开挖需遵循“分层分段、限时支撑”原则，每层开挖深度不超过2米，开挖后8小时内完成支护；爆破作业严格执行“一炮三检”（装药前、爆破前、爆破后检查）制度，确保警戒范围内无人员滞留。

（三）监测预警体系

1. 风险动态评估模型

基于层次分析法（AHP）与模糊综合评价法，构建多指标风险评估模型。将自然环境、技术操作、设备材料等因素细分为20项子指标，结合专家打分与历史数据确定权重，定期对施工区域进行风险等级评估（分为Ⅰ级严重、Ⅱ级显著、Ⅲ级一般、Ⅳ级低风险）。

2. 预警平台

搭建“感知-分析-预警”一体化平台：当监测数据超过阈值时，系统自动通过短信、APP推送预警信息，并联动现场声光报警器；结合气象、地质部门的预报数据，利用机器学习算法预测风险发展趋势，为决策提供支持。某工程通过该平台成功预警

边坡局部滑移，避免了重大事故发生^[7]。

（四）应急处置体系

1. 应急预案编制

针对坍塌、触电、淹溺等典型事故，制定专项应急预案，明确应急响应流程、人员疏散路线、救援物资储备清单。例如，坍塌事故预案要求在10分钟内启动应急救援小组，30分钟内完成伤员转移；同时与周边医院、消防部门建立联动机制，确保救援力量快速抵达。

2. 实战化演练

每季度开展1次综合应急演练，模拟真实事故场景。某水电站通过模拟大坝漫顶溃坝演练，检验了人员疏散、物资抢险、信息通报等环节的协同效率，发现并改进了3项流程漏洞，提升了应急处置能力^[8]。

三、案例分析与实施效果

以某特大型水电站工程为典型案例，该项目总装机容量达1200万千瓦，是能源领域的重点建设项目。在施工高峰期，现场作业人员规模超5000人，施工组织与安全管理面临巨大挑战。同时，工程涉及高边坡开挖、复杂地下洞室群施工、混凝土双曲拱坝浇筑等多项技术难度高、安全风险大的作业内容，任何环节出现疏漏都可能引发严重事故。为保障工程安全、高效推进，项目团队引入系统化的安全防控体系，并结合工程特点实施多项针对性措施，取得显著成效。

（一）在组织管理层面，项目团队创新性地建立了“安全积分制”管理模式

该制度将安全行为量化为积分，对违规操作、忽视安全规程的人员采取扣除积分、停工培训等措施。通过定期组织停工培训，累计覆盖230人次，培训内容不仅包括安全法规、操作规程，还结合实际案例开展警示教育，强化作业人员的安全意识。此外，项目组设立安全奖惩机制，对安全积分高的个人与班组给予物质奖励和荣誉表彰，形成“人人讲安全、人人守规范”的良好氛围，从人员管理源头筑牢安全防线。

（二）技术防控方面，项目团队充分利用数字化手段提升安全管理水平

通过应用BIM（建筑信息模型）技术，对地下洞室群施工方案进行三维建模与动态模拟，提前发现设计冲突与施工隐患，优化施工工序，大幅减少因设计变更导致的安全风险。同时，在高边坡、大坝等关键部位部署500余个智能传感器，实时监测位

移、应力、渗流等数据，构建起覆盖全工程的动态监测网络。这些传感器与数据采集系统相连，实现24小时不间断监测，为安全风险研判提供科学依据。

（三）监测预警环节，项目团队自主开发智能预警平台，集成物联网、大数据分析技术，实现对监测数据的智能分析与风险分级预警

根据风险程度，平台可自动发出黄色、橙色等不同等级预警信号，并同步推送至管理人员与现场作业人员终端。工程建设期间，平台累计发出黄色预警12次、橙色预警3次，均因预警及时、处置得当，成功避免事故发生。例如，在某次橙色预警中，系统监测到高边坡局部位移突变，项目组立即启动应急预案，疏散附近作业人员并采取加固措施，有效化解了滑坡风险^[9]。

（四）应急处置能力建设上，项目团队制定完善的应急预案体系，并定期开展实战化演练

针对坍塌、火灾等高发事故场景，累计组织6次综合应急演练，涵盖应急响应启动、人员疏散、抢险救援、医疗救护等全流程。通过演练，不断优化应急流程，磨合各部门协作机制，使应急响应时间从平均30分钟大幅缩短至12分钟，显著提升事故处置效率与救援成功率。

（五）工程竣工后，安全数据直观展现了防控体系的卓越成效

轻伤事故率从初始的0.8%下降至0.28%，降幅达65%；施工全过程未发生任何重大安全事故，安全生产目标圆满达成。同时，通过减少事故损失、降低返工成本，项目直接经济损失减少约3200万元。此外，系统化的安全管理措施还提升了工程建设效率，保障了工期进度，为同类大型水电工程的安全管理提供了可复制、可推广的成功经验，验证了防控体系在复杂工程场景下的科学性与有效性^[10]。

四、结论

水利水电工程施工安全风险防控需构建“组织－技术－监测－应急”四位一体的系统化体系。通过强化责任落实、引入智能化管理手段、完善预警与应急机制，可显著提升工程安全管理效能。未来研究可进一步探索AI技术在风险预测中的应用，推动水利水电工程安全管理向智能化、精准化方向发展。在行业持续发展过程中，需持续完善防控体系，保障工程建设安全、高效推进。同时，建议加强跨区域、跨部门的数据共享，建立全国性水利工程安全风险数据库，为行业安全管理提供更科学的决策依据。

参考文献

[1] 覃维；王星. 新建管道施工对近距离既有隧道的影响及安全风险评估 [J]. 交通科技, 2020(02).
[2] 王永泉；黄亚钟；韦芳芳；张辰泽. 基于 BIM 和遗传算法的网架工程施工进度－费用优化研究 [J]. 施工技术, 2020(06).
[3] 谭尧升；陈文夫；郭增光；林思德；林鹏；周孟夏；李俊平. 水电工程边坡施工全过程信息模型研究与应用 [J]. 清华大学学报（自然科学版）, 2020(07).
[4] 胡博；刘文渊；任彦华. 天津某软土地层施工缺陷支护桩的安全性评估及处理措施 [J]. 水利与建筑工程学报, 2020(02).
[5] 孟祥爱. BIM 技术在水利工程中的应用分析 [J]. 农业开发与装备, 2022(04).
[6] 鲜伟. BIM 技术在水利水电工程可视化仿真中的应用研究 [J]. 城市建筑, 2019(30).
[7] 闫晓虹. BIM 在水利水电工程施工中的应用 [J]. 工程技术研究, 2019(24).
[8] 段清道. 水利工程施工监理质量控制信息管理系统 [D]. DOAN THANH NGHI 黑龙江大学, 2013.
[9] 李自翔. 云南省水利水电工程有限公司发展战略研究 [J]. 云南大学, 2017.
[10] 张敬宏. 宁夏水利水电工程局发展战略研究 [J]. 宁夏大学, 2015.

大口径 PCCP 管道在水利供水工程中的应用

王鑫

河北省承德市隆化县水务局, 河北 承德 068150

DOI:10.61369/WCEST.2025010019

摘要： 大口径 PCCP（预应力钢筒混凝土管）管道凭借其优异的承载能力、抗渗性能，被广泛应用在长距离工况下的水利工程中。基于此，本文将广东省某市东北部供水工程作为研究对象，注重分析大口径 PCCP 管道施工全过程。研究表明，严格按照标准化施工流程实施，有效控制地下水运动对于管道稳定性的影响，大幅度降低地基沉降带来的结构变形风险，全面提高土体和管道系统的协同工作性能。

关键词： 水利供水工程；大口径；PCCP 管道；安装施工

The Application of Large-Diameter PCCP Pipes in Water Conservancy Water Supply Projects

Wang Xin

Water Affairs Bureau of Longhua County, Chengde City, Hebei Province, Chengde, Hebei 068150

Abstract： Large diameter PCCP (prestressed steel cylinder concrete pipe) pipelines are widely used in hydraulic engineering under long-distance working conditions due to their excellent bearing capacity and impermeability performance. Based on this, this article takes the water supply project in the northeast of a city in Guangdong Province as the research object, focusing on analyzing the entire construction process of large-diameter PCCP pipelines. Research has shown that strictly following standardized construction procedures can effectively control the impact of groundwater movement on pipeline stability, significantly reduce the risk of structural deformation caused by foundation settlement, and comprehensively improve the collaborative performance of soil and pipeline systems.

Keywords： water conservancy and water supply project; large caliber; PCCP pipe; installation and construction

引言

近年来，随着南水北调、引滦入津、引黄入淀等国家级水利工程的持续推进，传统中小口径 PCCP 已经无法满足日益增长的输水需求，促使大口径 PCCP 管道成为主要的发展趋势，有效提高单线输水能力，延长管道运行周期，科学降低后期维护成本。但随着管径持续增大，施工技术难度同步提高，尤其在运输、基础处理、垫层铺设、吊装定位、接口密封等方面都需要进行精细化操作。基于此，本文结合广东省某市东北部水利项目实际应用情况，系统性分析大口径 PCCP 管道在各施工环节的技术要点，为同类工程提供实践参考。

一、工程概况

本工程为广东省东北部区域供水系统建设项目，主要任务是给现有水厂1~水厂5提供稳定水源，输水线路总长度达99.4 km，其中主供水管道全长64.5 km，支管长度34.9 km，取水点和各水厂间的距离为58.7 km。项目主要输水管材采用大口径预应力钢筒混凝土管（PCCP），有效提高高压工况下的输水效率。工程建设内容主要包括新建一座主水泵站、中途加压泵站、配水泵站，形成三级加压输送体系，保证长距离输水过程中的流量和扬程匹配的合理性。针对水厂5没有建设的实际情况，工程在设计阶段即

预留水泵接口，大幅度提高系统的扩展性。

二、施工工艺

（一）管道运输

为了保证管道在运输过程中不受到损伤，施工人员必须采取严格的防护措施，使用木楔进行防滑固定，防止管体在运输途中发生位移，同时控制单车装载量，保证运输车辆的承载能力符合道路运输规范，避免受到超重、超高等因素影响，从而引发严重的交通事故。在运输过程中，施工人员应采用专用车辆，减少管

体外壁受力不均现象,有效解决局部应力集中问题,实地踏勘运输路线,避开低矮桥梁、狭窄路段、电力线路密集区,有效保障运输作业的安全性。在装卸操作中,需要严格按照施工组织设计执行,禁止野蛮吊装,使用高强度尼龙吊带配合起重机械,加强吊点分布的合理性,防止受力不均造成严重的管体裂损。

（二）基础施工

本工程沿线部分区域为软土地基,存在天然含水量高、压缩性大、承载力不足等不利地质条件,如果不进行有效加固处理,容易出现管道基础沉降不均,严重影响到接口密封性能,从而引发结构破坏风险。为此,项目采用粉喷桩复合地基加固技术,结合碎石垫层优化管基受力状态,保证地基具备足够的承载力。在施工方案中,粉喷桩直径设定为0.5 m,桩体布置形式为梅花形排列,桩间距控制为1 m(±0.1 m),加固深度达10 m(±1 m),形成三维空间增强体系,大幅度提高地基抗剪强度。粉喷桩施工采用静压法成桩工艺,所用静压桩机最大加荷能力大于11 000 kN,持荷时间不低于1 min,在保证桩身充分密实的基础上,和周边土体形成良好咬合效应。经过专业人员检测,单桩竖向承载力特征值不低于230 kN,满足设计的复合地基承载力要求,桩顶铺设0.5 m厚级配碎石层(误差±0.1 m),作为管道基础的柔性过渡层,具有良好的排水性,降低差异沉降对于管道的影响,全面提高地基的承载性能。

（三）垫层施工

本工程结合软土地基处理成果,在加固完成的地基上铺设C25强度等级混凝土垫层,厚度控制为270 mm,采用全站仪进行精确放线,科学控制垫层面高程误差。在施工前,施工人员依据划线布设竹签作为标高控制桩,形成可视化基准,全面提高模板安装的精度。在混凝土配制中,采用普通硅酸盐水泥、天然砂、连续级配粗集料,添加适量粘合剂和外加剂,科学优化拌合物的流动性,加强水泥硬化后的抗压性能。在浇筑过程中,则要严格控制混凝土坍落度,使用平板振动器进行分段振捣,将密实度提高到95%以上,避免发生蜂窝、麻面等质量缺陷。垫层成型后,要保证垫层表面的平整度,并和管道底部轮廓进行相互贴合,防止应力集中造成管体受力不均(见图1)。

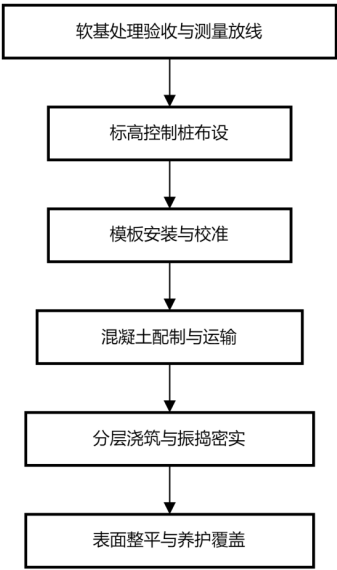


图1 垫层施工

（四）吊装

在本工程中采用PCCP管,内径3750 mm,单节长度6 m,质量逾50 t,对于吊装设备选型提出严格的技术要求。针对该类超大型管材,由于施工区域地势平坦,项目选用200T履带式起重机配合80T导装架进行吊装作业,结合钢板桩支护体系,在基坑一侧具有开阔作业条件的前提下实施精准吊装。吊装架由四条支腿和横梁组成,采用25b工字钢焊接成型,有利于提高结构的稳定性;系统配置4个20T垂直升降手拉葫芦,用于同步调整管道高度,从而实现管道的平稳就位;同时设置1个8T水平牵拉葫芦(位于管顶)和2个10T侧向牵引葫芦,将其分别布设于管体外侧两端,有利于控制管道横向位移,防止吊装过程中发生偏转问题。

在实际操作中,技术人员要严格根据《起重机械安全规程》和《大口径管道安装施工规范》,制定详细的吊装方案,严格执行安全交底制度,加强不同工序衔接的顺畅性。吊点布置按照力学平衡原则设定,避免应力集中造成管体变形问题;吊索具选用高强度尼龙吊带,减少管壁防腐层破坏。此外,吊装过程全程配备专人指挥,通过全站仪监测管道轴线位置变化,保证安装精度满足设计要求。

（五）安装

本工程中,PCCP管道内径达3750 mm,单节长度6 m,质量超过50 t,在安装过程中采用“基准管定位—外拉法对接—轴线复测—弯管合拢”的施工流程,全面提高工程对接的精度,加强整体管线受力的协调性。在定位环节,技术人员依据设计图纸及现场测量控制网,将第一节管道设定为基准管,统一承口端面朝向水流方向,基准管轴线和高程误差严格控制在1~3 mm区间,科学减少累计误差给后续安装带来的影响^[1]。

在管道对接过程中,该工程采用外拉法实施精准拼装,该方法通过布置牵引葫芦,让待安装管段沿着已经安装管道轴线平稳推进,加强承插口间隙周长的均匀性,保证中心线重合度达标。在操作时,由专业人员进行指挥,控制两侧拉进速度一致,避免受力不均产生接口错位。完成对接后,立即执行轴线、高程复测作业,检测点是以管道底部为基准,如果发现偏差超出允许范围,则需要及时进行调整,并且组织专业人员进行重新校核,直至符合规范要求。此外,管道最终合拢段设置于弯管区域,合拢管由原厂定制提供,实现其尺寸匹配和现场既有管道进行无缝衔接,在提高合拢精度的基础上,科学减少二次切割带来的质量风险^[2]。

（六）打压

在工程施工中,采用分阶段手动加压方式,打压检测每节管道接口,验证接口的密封性,加强整体系统结构的稳定性^[3]。在打压作业中,通常分为两个压力等级,第一阶段升压至0.2 MPa后停止加压,观察接口是否存在渗漏现象,确认无异常后进入第二阶段,继续升压至0.6 MPa,稳压5 min,如果压力一直保持稳定,则判定该接口为合格,否则需要拆解接口进行重新安装。此方法严格遵循《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268)相关要求,通过量化压力变化评估接口密封性能,大幅度提高检测结果的可操作性^[4]。

从实际打压记录来看,所列管号420至402的接头水压测试数

据表明,各段管道在不同高程条件下都能有效维持设定压力,水压值在0.15 ~ 0.36 MPa之间,符合设计要求的最低试验压力标准^[5]。同时,管道底高程误差控制良好,没有发现因沉降引起的局部应力集中问题。但值得注意的是,在打压过程中工作人员不仅要关注接口是否渗漏,还要同步复核管道标高,防止安装偏差影响到后续土体回填中的附加荷载,影响管道结构受力状态,所以在每一节新安装管道施工完成后,必须二次打压检测前一节已经安装管道接口,保证整个管线的连续密封性。

(七) 回填

大口径PCCP管道在完成打压验收后,采用黏性土作为主要回填材料,根据设计规范垫层至管顶及管顶以上500 mm范围内的关键区域,压实度不得低于93%,该部分作为管道近区约束层,对于控制差异沉降、增强土体、管道协同受力具有重要作用;而在管顶500 mm以上的远区回填段,压实度标准不低于90%,全面提高工程施工效率^[6]。为了提高回填质量,严格限定回填土成分,禁止混入淤泥、腐殖质、建筑垃圾、粒径超过10 cm的硬质石块,防止局部应力集中对于管道外壁造成损伤^[7]。在回填过程中采取分层摊铺、分层压实方式,每层厚度控制在20 ~ 30 cm,结合轻型压实机械,配合人工夯实工艺,避免重型设备直接碾压管道,产生管道变形问题。同时,回填土含水率应控制在最佳压实含水率±2%范围内,进一步提升压实效果,科学减少空隙比,不仅增强了管道结构的承载稳定性,也有效降低了外部荷载作用下的变形风险^[8]。

三、施工效果

在管道安装完成后,选取T₁至T₅共5个监测时间节点,时间间隔7天,连续观测施工区域地下水位及土体沉降情况,形成完整的数据记录。从图3所列数据可见,在T₁至T₅期间,地下水

位波动范围控制在-0.08 ~ +0.05 m之间,土体沉降变化值稳定于-1.36 ~ +2.16 mm区间,整体变化幅度均处于±3 mm以内,符合《给水排水管道工程施工及验收规范》中对管道周边地层变形控制的要求(见图2)。该数据变化表明,管道基础处理、垫层铺设、回填压实等工序执行到位,有效保障了管道结构和地基之间的协调变形能力,避免不均匀沉降引发接口渗漏风险^[9]。同时,地下水位未出现明显下降或上升趋势,说明管道密封性能良好,没有造成地下水流动路径改变,判定本次大口径PCCP管道安装质量达到预期标准^[10]。

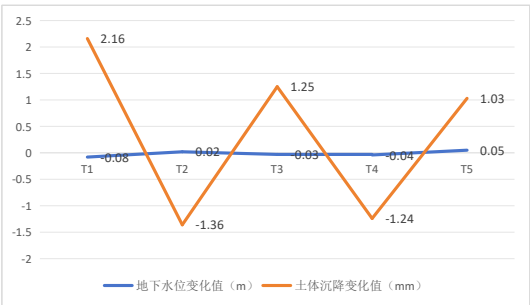


图2 地下水位与土体沉降变化

四、结语

本文基于广东省某市东北部水利供水工程实例,系统分析了大口径PCCP(预应力钢筒混凝土管)管道在施工全过程中的技术控制要点。研究表明,严格按照标准化施工程序实施,有效维持地下水动力平衡,科学降低土体沉降变化幅度,全面加强地基的稳定性。在未来研究中,研究人员应进一步融合智能监测手段,探索基于BIM的全生命周期质量追溯体系,推动PCCP管道在水利工程中的应用向智能化方向发展,加强管网系统的运维精度。

参考文献

[1] 潘家诚. 供水管道工程中顶管施工技术研究 [J]. 江西建材, 2023, (05): 351-352+355.
[2] 许琳林. 供水工程管道顶管施工设计及技术分析 [J]. 东北水利水电, 2017, 35(09): 12-14+71.
[3] 高学先. 水利工程供水管道安装施工中技术的应用 [J]. 中国储运, 2024(9).
[4] 王松, 田慧慧, 邹梓戈. 试论水利工程中城镇供水管道安装与管理措施分析 [J]. 商品与质量, 2022(37).
[5] 张炜, 张举华, 杨燕伟, 等. 管道供水工程基坑开挖变形规律及支护方案优化设计研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(21): 1-3, 12.
[6] 史爱华. 地下管线竣工测量技术在供水管道工程中的应用研究 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(8): 73-76.
[7] 顾晨浩. 基于工程实例的市政供水管道健康状态评估技术 [J]. 净水技术, 2024, 43(z1): 97-103.
[8] 焦广宇, 陈杨, 曹良, 等. 供水管道水平定向钻穿越航道关键技术研究——以闽江水水平定向钻穿越工程为例 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 46-55.
[9] 赵凯, 张虹, 张继来. 严埭泵站技术供水管道水下部分抢修案例 [J]. 江苏水利, 2024, (5).
[10] 尹茂栋. 市政工程的供水管道安装技术及应用 [J]. 砖瓦世界, 2024(17): 139-141.

水质中重金属元素对人体健康的潜在危害与影响机制

赵剑^{1,2}, 李昌^{1,2}, 国林^{1,2}, 胡宸^{1,2}, 凌昕^{1,2}, 赵思佳^{1,2}, 王旭^{1,2}, 高基景^{1,2}, 崔大鹏^{1,2}, 赵东来^{1,2}, 孙岐发^{1,2*}

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

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

DOI:10.61369/WCEST.2025010003

摘要 : 本文围绕水质中重金属元素对人体健康的潜在危害及影响机制展开。随着工业化和城市化推进, 水体重金属也伴随着一定污染, 污染源包括工业生产、农业活动、生活污水排放及大气沉降等, 在工业发达、人口密集地区污染明显。重金属对人体健康危害众多, 铅、汞等会损害神经系统、血液系统等多个部位, 还会增加患癌风险。其危害机制有干扰人体代谢、破坏器官组织、引发氧化应激和影响免疫系统功能等。为保障健康, 需减少水体中重金属含量, 加强监测治理, 并深入研究其影响机制, 推动污染防治技术发展。

关键词 : 水体重金属污染; 重金属元素; 人体健康危害

Potential Hazards and Impact Mechanisms of Heavy Metal Elements in Water Quality on Human Health

Zhao Jian^{1,2}, Li Chang^{1,2}, Guo Lin^{1,2}, Hu Chen^{1,2}, Ling Xin^{1,2}, Zhao Sijia^{1,2}, Wang Xu^{1,2}, Gao Jijing^{1,2},
Cui Dapeng^{1,2}, Zhao Donglai^{1,2}, Sun Qifa^{1,2*}

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

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

Abstract : This article focuses on the potential hazards and impact mechanisms of heavy metal elements in water quality on human health. With the advancement of industrialization and urbanization, heavy metal pollution in water bodies has become a significant issue. Sources of pollution include industrial production, agricultural activities, domestic sewage discharge, and atmospheric deposition, especially in industrially developed and densely populated areas. Heavy metals such as lead and mercury can cause numerous harms to human health, including damage to the nervous system, blood system, and other body parts, as well as increasing the risk of cancer. The mechanisms of these hazards include interfering with human metabolism, destroying organ tissues, triggering oxidative stress, and affecting immune system function. To protect health, it is necessary to reduce the content of heavy metals in water bodies, strengthen monitoring and management, and conduct in-depth research on their impact mechanisms to promote the development of pollution prevention and control technologies.

Keywords : water heavy metal pollution; heavy metal elements; human health hazards

引言

水是生命之源, 然而随着工业化和城市化的快速发展, 容易引发水体重金属污染问题。重金属元素在水体中的存在和积累, 不仅能够破坏水生态的平衡, 而且通过食物链进入人体, 对人体健康造成潜在的威胁。因此, 深入研究水质中重金属元素对人体健康的潜在危害与影响机制具有重要的现实意义。

一、重金属污染研究与水环境的新挑战

水质重金属污染研究涵盖多方面, 包括调查污染现状, 明确

在不同水体的空间分布和污染程度; 分析工业、农业、生活等重金属来源; 探究在水体、水-土界面的迁移转化以及在生物体内的富集传递规律; 研究沉淀、化学沉淀、生物修复等物理、化

运维项目: 国家地下水监测网运行维护(哈尔滨中心)(编号: DD20251292)资助。

作者简介: 赵剑, 男, 助理工程师, 主要从事水文地质与水资源调查工作。

通讯作者: 孙岐发, 邮箱: 152468435@qq.com。Email: 570006630@qq.com。

学、生物治理技术；开展健康和生态风险评估，并据此制定管理政策、建立监测预警体系以保障水体环境质量和生态安全。

随着人民生活水平提高，在工业化与城市化快速发展进程中，水环境面临严峻挑战，重金属污染成为威胁人类健康的关键因素。工业废水含重金属、有机物等，农业和畜牧业的农药、畜禽废弃物，以及城市化进程中大量城市生活垃圾和污水，都能够严重影响水质，欠发达地区因基础设施落后，水污染现象更加严峻。新污染物如持久性有机污染物、微塑料等涌现，我国在新污染物治理上存在监测技术手段少、防护治理措施不完善等难题。

2023年8月26日，山西省长治市沁河流域上游支流乔龙沟河突发水污染事件，一时间，河水水质恶化，生态系统遭受重创。经调查，这起严重水污染事件是由某能源有限公司。其涉案人员在清楚知晓行为违法违规的情况下，为了一己私利，私自使用水泵、消防水管等工具，将企业污水处理站调节池中含高浓度氨氮的污水偷排入外环境。

高浓度氨氮污水的肆意排放，对乔龙沟河及周边生态环境产生了毁灭性的影响。河流水质急剧恶化，水体发臭，大量水生生物死亡，周边土壤也受到污染，生态平衡被严重打破。这不仅破坏了当地的自然景观，还对居民的生活和健康造成了潜在威胁。

工业废水不仅关系着我国饮用水安全，而且直接威胁到人民群众身体健康和生态环境安全。更重要的是由于工业废水具有复杂性，难降解及富集性的特点，其进入自然水体对水质安全及人体健康可能产生的影响很难估算，且损失不可衡量^[1]。

二、重金属元素对人体健康的潜在危害

（一）铅

铅对人体健康危害多面。神经系统上，它干扰神经递质的合成、代谢和释放，影响神经信号传导。研究表明，儿童长期接触铅污染水体，血铅每升高10 $\mu\text{g/dL}$ ，智商或降3-5分，还会出现注意力不集中、记忆力减退等行为异常，严重时可能引发帕金森病或阿尔茨海默病。

血液系统中，铅进入血液后与红细胞结合，抑制血红蛋白合成。它抑制血红素合成关键酶ALAD的活性，阻碍血红素合成，减少红细胞生成，还降低红细胞膜稳定性，缩短红细胞寿命，引发溶血。血铅浓度达50 $\mu\text{g/dL}$ 时，人可能出现贫血症状，铅作业职业人群贫血发生率高于常人^[2]。

在肾脏方面，铅在肾脏蓄积，引发肾小球硬化、肾间质纤维化等病变，干扰肾脏细胞代谢，影响其调节水、电解质和酸碱平衡的功能。长期接触铅的人群肾脏疾病发病率高，会出现蛋白尿、血尿等症状。研究发现，铅污染地区居民慢性肾脏病患病率高于非污染地区，且病变严重程度与铅暴露水平正相关。

（二）汞

汞能够穿越血脑屏障进入中枢神经系统，直接对神经细胞造成损害，进而干扰神经递质的代谢并影响其功能。若长期暴露在汞污染的水体环境中，人体可能会出现诸如头痛、头晕、失眠、记忆力下降、肢体麻木以及共济失调等症状。情况严重时，甚至

会引发汞中毒性脑病，对生命安全构成威胁^[3]。

当汞进入人体后，消化系统会首当其冲受到影响。汞会直接作用于胃肠黏膜细胞，引发炎症反应，造成组织损伤。它会破坏胃肠黏膜的屏障功能，致使胃肠道对有害物质的吸收增多，同时干扰胃肠道正常的蠕动和消化功能^[4]。因此，患者可能会出现恶心、呕吐、腹泻、食欲不振等症状，长期暴露在汞污染环境中还很有可能引发慢性胃炎、肠穿孔等疾病。在一些汞污染较为严重地区的居民，消化系统疾病的发病率显著高于其他地区，而且病情通常更为严重。

（三）镉

镉对肾脏具有直接的毒性作用，倘若长期暴露在含镉环境中，极有可能引发肾功能损害、肾结石，甚至肾衰竭。研究发现，长期饮用含镉的水，镉在肾脏中的蓄积量约占全身蓄积量的三分之一，肾皮质中的镉浓度更是全肾脏的1.5倍，这很可能导致慢性肾脏疾病，比如肾小管功能障碍、肾小球肾炎等^[5]。

镉还会干扰钙在骨骼中的正常代谢进程，致使骨密度下降，引发骨软化或骨质疏松等骨骼疾病。它能够抑制成骨细胞的活性，同时促进破骨细胞的功能，使得骨吸收的速度大于骨形成的速度。而且，镉还会与骨组织中的胶原蛋白相结合，破坏骨组织的结构和力学性能。历史上著名的日本“痛痛病”事件，就是因为当地居民长期饮用被镉污染的水，从而患上了严重的骨软化和骨质疏松症，患者饱受全身骨骼疼痛、骨折等症状的折磨，身心承受了极大的痛苦^[6]。

（四）铬

铬存在三价和六价两种形态，其中六价铬毒性较强，被视为致癌物，可能诱发肺癌、胃癌、皮肤癌等多种癌症。美国国家环境保护局（EPA）的数据显示，成年人每天摄入六价铬的量不应超过0.0004毫克/千克体重。若长期接触含有六价铬的水体，铬会在人体内不断蓄积，进而增加患癌风险^[7]。

六价铬化合物具有很强的氧化性和腐蚀性，一旦接触皮肤，就可能引发皮肤瘙痒、红斑、水肿、溃烂等症状。要是长期接触，还可能导致铬鼻病、暴露性皮炎和皮肤铬溃疡等皮肤黏膜性疾病。

（五）砷

长期饮用含砷的水，砷会在人体内逐渐蓄积，对皮肤造成显著损害。砷会干扰皮肤细胞的正常代谢，致使皮肤出现色素沉着、角化过度、疣状增生等病变，情况严重时甚至会发展成皮肤癌。在一些砷污染较为严重的区域，居民皮肤病变的发生率相对较高。以我国台湾地区的部分砷污染地区为例，当地居民因长期饮用含砷的井水，皮肤癌的发病率显著上升。

砷是一种已被确认的致癌物，长期摄入含砷的水会增加患肝癌、肺癌、膀胱癌等多种癌症的风险。砷能够通过多种途径诱导细胞发生癌变，比如干扰DNA的甲基化过程、影响基因表达、诱导氧化应激反应等。在一些砷污染严重的地区，居民患癌症的发病率明显高于其他地区，并且癌症的发病年龄也相对较早^[8]。研究显示，砷暴露与肝癌的发生关系密切，长期饮用含砷的水会使肝癌的发病风险增加数倍。

三、重金属元素对人体健康的影响机制

（一）干扰人体正常代谢过程

重金属进入人体后，会与体内的多种生物大分子，如酶、蛋白质、核酸等发生特异性结合，改变其结构和功能，从而干扰人体的正常代谢过程。以铅为例，铅可抑制 δ -氨基- γ -酮戊酸脱水酶（ALAD）的活性，该酶是血红素合成过程中的关键酶，其活性受到抑制后，会导致血红素合成障碍，进而引起贫血。此外，重金属还可以干扰细胞内的能量代谢过程，影响细胞的正常功能。例如，汞可以抑制线粒体呼吸链中的酶活性，减少细胞的能量生成，导致细胞功能受损。

（二）破坏人体器官和组织的结构与功能

重金属在体内蓄积后，会对人体的各个器官和组织产生直接的毒性作用，破坏其正常的结构和功能。镉在肾脏中的蓄积可导致肾小管上皮细胞变性、坏死，影响肾脏的重吸收和排泄功能，导致肾功能衰竭。汞在中枢神经系统中的蓄积可损害神经细胞，导致神经细胞的形态和功能发生改变，引起神经系统功能障碍。此外，重金属还可以影响心脏、肝脏、肺等器官的正常功能，导致心血管疾病、肝脏疾病、肺部疾病等的发生^[9]。

（三）引发氧化应激反应

重金属可诱导人体细胞产生氧化应激反应，导致体内活性氧自由基（ROS）的生成增加，而抗氧化防御系统的功能相对不足，无法及时清除过多的ROS。ROS具有很强的氧化性，可攻击细胞内的生物大分子，如DNA、蛋白质、脂质等，导致细胞损伤和死亡。例如，六价铬可通过细胞膜上的转运蛋白进入细胞内，在细胞内被还原为三价铬的过程中会产生大量的ROS，引发氧化应激反应，导致细胞膜脂质过氧化、蛋白质氧化修饰、DNA损伤

等，从而对细胞造成损伤。长期的氧化应激反应还可能导致慢性炎症、细胞凋亡和癌变等。

（四）影响人体免疫系统功能

重金属可干扰人体免疫系统的正常功能，导致免疫细胞的活性和数量发生改变，使人体的免疫防御能力下降。镉暴露可抑制T淋巴细胞的增殖和分化，降低机体的细胞免疫功能，使人体对病原体的抵抗力减弱，容易感染各种疾病。铅暴露可影响B淋巴细胞的抗体分泌功能，导致体液免疫功能异常，使人体对病原体的特异性免疫应答能力下降^[10]。此外，重金属还可以影响巨噬细胞的吞噬功能、自然杀伤细胞的活性等，进一步削弱人体的免疫系统功能。

四、结束语

水质中的重金属元素会对人体健康造成严重的潜在威胁。这些重金属进入人体后，其影响机制十分复杂，会干扰人体正常的代谢过程，破坏人体器官和组织的结构与功能，引发氧化应激反应，还会影响人体免疫系统的正常功能。

为保障人体健康，必须采取有效措施降低水体中的重金属含量，还应加大对水体重金属污染防治技术的研发和应用，而生物修复技术在水体重金属污染治理中具有广阔前景。未来，随着生物技术的不断发展，有望开发出更多高效、适应性强的生物修复材料和技术。例如，利用基因工程技术培育超富集植物新品种，使其具备更强的重金属吸收能力和环境适应性；研发新型微生物制剂，提高微生物对复杂污染水体的修复能力。同时，加强生物修复技术与其他治理技术的融合，构建更加完善的水体重金属污染治理体系，实现水环境的可持续发展。

参考文献

- [1] 高秋凤. 工业企业废水排放对城市污水处理厂运行影响的研究 [D]. 扬州大学, 2023. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2023.002748.
- [2] 吴佳玲, 毛德华. 湘江流域水体重金属污染及健康风险评价 [J]. 人民珠江, 2023, 44(03): 94-103.
- [3] 李伟伟. 环境水质分析中重金属检测技术的应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(01): 144-146.
- [4] 黄卫巍, 刘敏, 刘晓维. 化妆品汞超标致人身损害法医临床鉴定分析 [J]. 中国司法鉴定, 2023, (01): 93-96.
- [5] 刘树函. 论水质重金属分析检测技术研究与应用 [J]. 世界有色金属, 2022, (21): 136-138.
- [6] 许候杰, 漆燕琴, 冯志刚. 重金属检测技术在水质分析中的应用 [J]. 科技风, 2022, (19): 79-81. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202219027.
- [7] 任晓亮, 施羽露, 廖河庭, 等. 水产环境污染现状及治理策略 [J]. 农学报, 2022, 12(05): 42-46.
- [8] 徐峥. 重金属污染水体的环境保护处理技术分析 [J]. 信息记录材料, 2021, 22(09): 235-237. DOI: 10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2021.09.111.
- [9] 李雨恒, 韦盼, 黄葵, 等. 我国地表水环境质量现状及污染修复技术研究 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(02): 195-197.
- [10] 黄惠, 张永波. 山底河流域重金属污染特征分析 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(07): 49-52.

风力发电机组电气与控制系统快速检修思路研究

赵海琦

海南金盘智能科技股份有限公司，海南 海口 570100

DOI:10.61369/WCEST.2025010007

摘 要： 风力发电是清洁能源的重要支柱正承担着日益关键的供电责任，风电机组的电气与控制系统处于核心位置，具备着能量转换以及运行调控这双重的功能。当下，风电场大多分布在环境颇为恶劣的偏远之地，频繁出现的电压波动情况、机械振动现象以及温湿度的变化状况，使得电气元件的老化速度不断加剧。传统的检修模式存在着不少缺陷，如响应方面滞后，诊断精度有所不足等，这样的模式难以达到现代风电行业针对设备可用率所设定的严苛要求标准。如何去实现对故障进行精准的定位以及快速的修复操作，已经变成了制约风电运维效率获得提升的一个关键瓶颈。

关 键 词： 风力发电机组；电气与控制系统；快速检修；思路研究

Research on Quick Maintenance Approach for Electrical and Control Systems of Wind Turbines

Zhao Haiqi

Hainan Jinpan Intelligent Technology Co., Ltd., Haikou, Hainan 570100

Abstract： Wind power, as an important pillar of clean energy, is assuming an increasingly critical role in power supply. The electrical and control systems of wind turbines occupy a central position, performing dual functions of energy conversion and operational control. Currently, most wind farms are located in remote and often harsh environments. Frequent voltage fluctuations, mechanical vibrations, and changes in temperature and humidity accelerate the aging of electrical components. Traditional maintenance models have several flaws, such as delayed response and insufficient diagnostic accuracy, making them inadequate to meet the stringent equipment availability requirements set by the modern wind power industry. Achieving precise fault localization and rapid repair has become a critical bottleneck restricting the efficiency of wind power operation and maintenance.

Keywords： wind turbine generator system; electrical and control system; quick maintenance; research approach

引言

风力发电机组作为将风能转化为电能的核心载体，它的电气与控制系统承担着能量传输、并网控制和设备保护等关键任务。在单机容量突破10兆瓦级别以及海上风电规模化开发的进程中，系统集成度与运行复杂度以几何级数的态势增长起来，整机停机甚至连锁反应极有可能因任何微小故障而被引发。现今的检修体系大多是依靠定期维护与事后维修相互结合的被动模式运行，在故障预判能力、应急处置效率以及资源调配合理性等方面，都存在着明显短板。本文聚集在电气控制系统的故障特征与运行规律上，通过构建多维联动的快速响应机制来对状态监测数据与智能诊断算法加以整合，目的在于突破传统检修在时间与空间方面受到的限制。

一、风力发电机组电气与控制系统概述

（一）风力发电机组的组成

风力发电机组是将风的动能转换为电能的系统，发电机组包括风轮、发电机；风轮中含叶片、轮毂、加固件等组成；它有叶片受风力旋转发电、发电机机头转动等功能。风力发电电源由风

力发电机组、支撑发电机组的塔架、蓄电池充电控制器、逆变器、卸荷器、并网控制器、蓄电池组等组成。风力发电机组进行发电时要保证输出电频率恒定。这无论对于风机并网发电还是风光互补发电都非常必要。要保证风电的频率恒定，一种方式就是保证发电机的恒定转速，即恒速恒频的运行方式，因为发电机由风力机经过传动装置进行驱动运转，所以这种方式无疑要恒定风

力机的转速，这种方式会影响到风能的转换效率；另一种方式就是发电机转速随风速变化，通过其它的手段保证输出电能的频率恒定，即变速恒频运行。

（二）电气与控制系统的作用

在风力发电机组运行过程中，电气与控制系统承担着能量形态转换与设备协调控制的双重使命，它的核心价值体现在将风轮捕获的旋转机械能经变流装置转化为稳定可控的三相交流电，同时根据风速变化动态调节发电机转矩与桨距角度以维持最佳叶尖速比。该系统内置的多层级保护机制持续监测电网电压频率波动、齿轮箱油温异常、绝缘电阻下降等关键参数，在检测到越限风险时自动触发断路器动作或启动冗余回路，有效阻断故障扩散路径防止设备连锁损坏。功率优化模块通过实时追踪最大功率点动态调整变流器输出特性，使发电量在风况波动条件下始终逼近理论产能曲线，而并网控制单元则需精确匹配电网调度指令与机组实际出力，在满足低电压穿越技术要求的前提下实现平滑功率输送^[1]。

二、风力发电机组电气与控制系统检修现状

（一）面临的主要挑战

设备智能化程度提升与系统复杂性加剧之间的矛盾日益凸显，新型机组集成化程度显著增强导致故障溯源难度增大，多学科交叉融合背景下传统检修方法难以精准定位隐蔽性故障，例如变流器内部多层级电路耦合引发的异常信号常因检测手段滞后而延误判断周期。极端气候环境对电气设备稳定性的侵蚀构成持续性威胁，沿海地区高湿度与盐雾腐蚀加速电气元件老化，内陆风电场昼夜温差引发的材料膨胀收缩效应导致接线端子松动或绝缘层龟裂，此类环境应力累积效应往往在常规巡检中难以被及时发现。运维人员技术能力与设备更新速度之间的断层现象逐渐显现，新型数字孪生控制系统对检修人员的数据分析能力和跨领域知识储备提出更高要求，部分现场技术人员面对异构数据平台时存在操作迟疑或误判风险。供应链波动对备件管理带来的不确定性影响检修效率，进口核心元器件供货周期延长导致非计划停机时间增加，国产化替代过程中不同厂商产品的兼容性问题可能引发二次故障，这种多因素交织的局面使得检修决策面临更复杂的变量干扰。

（二）传统检修方法的局限性

在风力发电机组电气与控制系统检修实践中，传统方法往往受制于固定周期的计划性维护模式，难以精准捕捉设备状态的非线性劣化特征，导致维护窗口期与实际故障潜伏期存在显著错位。依赖人工经验判断的故障诊断方式易受检修人员技术水平的个体差异影响，对于变流器谐波畸变、绝缘介质损耗等隐蔽性缺陷的识别存在主观性和滞后性，难以适应高比例电力电子设备接入带来的新型故障图谱。现有技术手段对运行数据的处理停留在离线分析与片段式记录层面，缺乏对发电机轴承温升趋势、电容老化速率等动态参数的连续性追踪能力，无法构建反映设备真实健康状态的预测模型，致使部分潜在风险在例行检查间隙持续累

积^[2]。

三、风力发电机组电气与控制系统快速检修思路

（一）建立快速响应机制

检修团队需要制定标准化的故障响应预案，明确从故障报警触发到现场处置各环节的时间节点与责任分工，将变流器跳闸、电容漏液等典型故障的处理流程固化为可重复执行的操作指南。技术平台需整合 SCADA 系统实时数据与历史检修记录构建知识库，开发具备自学习能力的智能诊断模块，对发电机绕组温度异常升高、控制信号断续丢失等潜在风险进行多维度交叉验证，提前生成风险等级评估报告推送至移动终端。运维人员依据预警信息携带专用测试仪器赶赴现场，优先使用红外热像仪扫描电气柜连接点温度分布，采用绝缘电阻测试仪分段检测电缆老化程度，结合控制面板的故障代码快速定位问题根源，避免因盲目拆卸设备延长停机时间。检修团队定期开展典型故障的模拟推演与复盘总结，针对海上风电场盐雾腐蚀、高原地区昼夜温差大等特殊环境制定差异化处置方案，同步更新应急预案库中的技术参数与处置要点。技术平台运营商需持续优化数据采集频率与算法匹配精度，在确保网络安全的前提下开放部分数据接口供检修人员调取关键波形图与参数曲线，辅助其判断设备状态演变趋势^[3]。

（二）优化检修流程与方法

检修人员需要将日常巡检与专项排查相结合形成动态化工作模式，定期对主控柜线路连接状态进行逐项筛查，重点观察电缆表皮是否存在老化开裂现象，针对柜体内外温差过大的情况需及时调整通风散热装置运行参数。维护团队应当建立常见故障特征图谱库，将变桨系统通讯中断、变频器过流报警等典型问题的现场表现与处理步骤形成可视化操作指南，遇到同类异常时可直接调用历史案例缩短诊断时间。现场作业需配备多功能检测仪器，利用相位检测功能核对发电机绕组接线顺序，通过绝缘电阻测试锁定存在漏电风险的电气节点，发现接触器触点氧化碳化时优先采用专业清洁剂处理而非直接更换部件。电气柜内部清洁必须按照从上至下的顺序操作，使用防静电刷具清除积尘后需复查母排固定螺栓的扭矩数值，对于频繁报错的信号回路可采取临时跨接方式验证线路通断状态。检修结束前必须执行三次以上的空载试运行，观察各子系统指示灯与触摸屏参数是否处于稳定状态，确认无误后方可恢复机组并网发电。

（三）引入智能化诊断技术

智能化诊断技术的落地应用需要运维团队与技术平台形成深度协作，技术人员应当将变流器运行日志、振动频谱数据与历史故障案例导入算法模型，训练系统识别齿轮箱轴承磨损初期产生的特定频率谐波特征。设备供应商需在控制柜内预装嵌入式传感器阵列，实时捕捉母线排温度梯度变化、绝缘子表面放电强度等微观参数，借助边缘计算设备对异常信号进行本地化预处理，减少数据传输延迟对故障判断时效性的影响^[4]。现场检修人员手持智能终端扫描设备二维码调取三维可视化模型，参照高亮显示的发热区域或电流畸变相位快速锁定问题模块，替代传统模式下逐

级拆解排查的繁琐流程。技术平台运营商定期更新故障特征数据库，将叶片覆冰引发的功率曲线偏移、盐雾腐蚀导致的接触电阻升高等地域性典型问题纳入学习样本，使诊断模型适应不同环境条件下的设备劣化规律。设备制造商应当在设计阶段预留标准化的数据接口，便于后续加装无线测温贴片、局放监测仪等智能感知元件，为诊断精度的持续提升提供硬件扩展空间。

（四）加强预防性维护措施

维护团队需要定期清理电气柜散热滤网并复核柜体密封条完整性，尤其对处于沙尘区域的机组，应当缩短滤网更换周期并在沙暴过后立即检查接触器触点是否存在积碳现象，操作人员打开柜门时必须同步检测柜内湿度是否超出元器件耐受阈值。技术人员应当建立基于历史故障数据的特征数据库，针对变桨系统编码器信号跳变或偏航电机过流报警等重复性故障制定专项检测流程，例如在每月维护时使用专用测试仪模拟极限工况下的变桨电机响应曲线。备件管理员需结合季节变化规律调整库存策略，在雷雨频发期前备足避雷器模块与接地线缆接头，对于国产化替代的功率器件需提前在备用机组上进行连续72小时的负载测试以验证兼容稳定性。现场班组执行预防性维护时应将目视检查与仪器诊断相结合，检查齿轮箱冷却风扇时既要观察扇叶表面油污附着情况又要测量三相电流平衡度，清理塔筒底部控制柜时必须使用防静电刷逐一清扫继电器触点并记录氧化程度分级。设备制造商需要为风电场提供定制化的维护日历，将全年维护任务分解为不同气候条件下的标准化操作包，例如在高温季节重点核查变流器水冷系统管箍紧固状态与冷却液 pH 值衰减幅度^[5]。

（五）提升检修人员专业能力

在日常维护中，检修团队应建立常态化技能提升机制，培训部门应当设计模块化课程体系，重点讲解变流器功率模块热循环规律、控制信号传输路径衰减特性等核心原理，使技术人员理解

故障代码背后隐含的物理过程。经验丰富的老师傅可以定期整理典型故障案例，将叶片角度传感器漂移、电容组均压失效等高频问题的现场处置细节制作成三维动画教程，帮助新人建立故障现象与设备结构的空间对应关系。技术骨干应当牵头开展月度实战演练，模拟齿轮箱油温突变、电网电压骤降等突发场景，要求检修人员在限定时间内完成绝缘测试仪接线、示波器波形捕获等标准化操作流程，强化肌肉记忆与应急反应速度。运维管理部门可以建立技能等级与岗位权限挂钩的考核制度，要求技术人员在取得变流器拆装认证后才能操作功率模块更换作业，降低误操作导致二次损坏的风险。检修班组内部应当推行“缺陷随手拍”制度，鼓励成员上传现场发现的线缆表皮龟裂、接插件氧化等细微异常，由专业工程师分类归档后形成预防性维护知识库。人力资源部门需与职业院校合作开发定向培养课程，安排学员在模拟舱内反复练习控制柜布线规整、接地电阻测试等基础技能，缩短新员工独立上岗的适应周期。

四、结语

基于状态感知去构建快速检修体系，可显著提升风电运维的经济性与安全性。通过融合边缘计算与数字孪生技术，电气系统隐性缺陷的早期识别得以实现；借助建立标准化故障代码库与专家决策系统，故障研判时间能够缩短80%以上。建议重点发展模块化检修装备与远程协作平台，推行预防性维护和预测性维修相结合的混合模式。伴随5G通信与人工智能技术的深度应用，未来风电检修会朝着全自动诊断、机器人作业以及云端协同的方向不断演进，进而推动运维模式从“被动抢险”朝着“主动防御”完成转型。

参考文献

[1] 周国旭. 风力发电机组电气与控制系统快速检修思路研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (14): 68-69.
[2] 张倩. 风力发电机组电气控制系统检修分析 [J]. 时代农机, 2019, 46(12): 60-62.
[3] 杨继光. 风力发电机组电气控制系统检修分析 [J]. 设备管理与维修, 2022, (15): 61-62.
[4] 徐卓雅. 风电电气工程自动化中存在的问题及对策分析 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(12): 37-39.
[5] 高晨, 赵勇, 汪德良, 等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 30-42.

电价政策调整对电力营销稽查重点的影响与应对

徐琛苑，侯家乐

国网句容市供电公司，江苏 句容 212400

DOI:10.61369/WCEST.2025010016

摘要： 电价政策调整通过引导用户用电行为与资源配置，对电力营销稽查的职能执行提出新要求。政策调整后，稽查范围需覆盖新增工商业与新能源用户等新场景，标准因峰谷时段、补贴规则变动需动态更新，对象因用户用电模式多样化导致特征模糊，风险从设备故障等显性问题转向规则利用型隐蔽问题。针对这些变化，需建立政策—业务联动的范围更新机制，构建跨部门政策解读指南与培训体系，基于用户用电模式与政策关联度实施分级分类管理，通过风险指标库与动态监测实现稽查关口前移，最终提升稽查精准性与政策执行保障能力。

关键词： 电价政策调整；电力营销稽查；稽查重点；优化策略

The Influence and Response of Electricity Price Policy Adjustment on the Focus of Electricity Marketing Inspection

Xu Chenyuan, Hou Jiale

State Grid Jurong Power Supply Company, Jurong, Jiangsu 212400

Abstract： Adjustments to electricity pricing policies guide user behavior and resource allocation, imposing new requirements on the enforcement of power marketing inspection functions. After these adjustments, the scope of inspections must cover new industrial and commercial users and new energy users. Standards need to be dynamically updated due to changes in peak and off-peak hours and subsidy rules. The characteristics of inspection targets have become more ambiguous due to the diversification of user consumption patterns. Risks have shifted from visible issues like equipment failures to hidden risks related to rule utilization. To address these changes, a mechanism for updating the scope of policy and business linkage must be established. A cross-departmental policy interpretation guide and training system should be developed. Based on the correlation between user consumption patterns and policies, a graded and categorized management system should be implemented. By using a risk indicator database and dynamic monitoring, the inspection checkpoint can be moved forward, ultimately enhancing the accuracy of inspections and the ability to ensure policy enforcement.

Keywords： electricity pricing policy adjustment; power marketing inspection; key inspection areas; optimization strategies

引言

“双碳”目标推进与电力市场化改革深化，推动电价政策进入动态调整周期，阶梯电价优化、分时电价推广、绿电价格机制完善等成为政策调整的核心方向。电力营销稽查是根据国家有关法律法规进行的监督检查^[1]，其职能执行需与政策调整同步响应，但现有研究多聚焦传统稽查模式，对政策动态调整背景下稽查重点的变化特征及适应性策略探讨不足。在此背景下，如何准确识别电价政策调整对电力营销稽查重点的影响，并提出针对性优化策略？本文拟从政策与稽查的内在关联切入，系统分析调整后的稽查重点变化特征，进而提出覆盖范围、执行标准、管理方式、风险防控的全流程优化路径，为电力企业提升稽查效能、保障政策精准落地提供理论支撑与实践参考。

作者简介：

徐琛苑（1996.09-），女，汉族，江西人，学历：研究生，研究方向：电力营销稽查，现任职务：业务质量管控高级经理，现任职称：中级。

侯家乐（2000.11-），女，回族，江苏镇江人，学历：大学本科，研究方向：营销服务，现任职务：营销服务经理，现任职称：助理工程师。

一、电价政策调整下电力营销稽查重点的变化特征

（一）稽查范围的扩展趋势

随着电力对国民生活的重要程度越来越高，电价和电费管理稽查工作也面临着巨大的挑战^[2]。传统电力营销稽查的覆盖范围主要聚焦于存量用户群体，包括大工业用户、普通居民用户及部分长期稳定的工商业用户，核查内容以电量计量准确性、基础电价执行合规性为主。随着电价政策调整，新增工商业用户、新能源用户被纳入政策覆盖范围，其用电场景呈现出“多电源互补”“参与电力市场交易”等新特征，对应的业务场景扩展至绿电交易结算、分布式光伏余电上网电价执行、充电设施分时电价匹配等领域。

（二）稽查标准的动态调整

在电力营销的工作中电力营销稽查是比不可少的一个环节，在进行电力营销稽查工作的过程中需要明确营销风险，并且完善相关的系统，而后在工作过程中找出相关的收费准则，以帮助电力营销工作更好的完成，其中电力营销工作直接关系到电价科学性^[3]。旧版电价政策下，稽查标准主要围绕固定峰谷时段、稳定补贴额度等静态指标定，核查重点集中于计量装置是否正常、电费计算是否与公示电价表一致。随着政策调整，新的峰谷时段划分更趋灵活、补贴标准动态挂钩市场，稽查需重点关注计量装置时间同步性、电费计算公式匹配度等动态指标。

（三）稽查对象的复杂程度提升

政策调整后，用户用电行为呈现显著变化：部分用户主动参与需求响应，根据分时电价动态调整用电时段；多电源供电模式逐渐普及，用户从单纯“用电方”转变为“产用一体”的复合型主体。这些变化使得稽查对象的用电模式从“单一化”转向“多样化”，传统基于“用户类型”“供电方式”的分类标准难以准确界定新对象特征，混合电价用户的费用分摊边界模糊，部分用户的用电数据交叉重叠，导致稽查人员难以快速明确其应适用的具体电价政策。

二、适应政策调整的电力营销稽查优化策略

（一）动态界定范围，提升覆盖精准性

作为电力营销中的关键部分，稽查工作直接关系电力线路运行的效率和质量，因此，在实际的电力营销管理中需特别注重电力稽查工作的落实^[4]。动态界定稽查范围以提升覆盖精准性，核心在于构建政策与业务紧密联动的动态调整机制，使稽查范围能够随电价政策的变化实时响应，避免因范围滞后导致的监管盲区或资源浪费。这一机制的落地需从以下几个关键环节展开。

首先，组建跨部门政策-业务联动工作组，为范围界定提供组织保障。工作组应涵盖营销部门、稽查部门、法律合规部门，成员需包括政策研究专员、一线稽查骨干及合规审核员。例如，营销部门负责每月收集国家及地方最新电价政策文件，稽查部门同步反馈当前范围覆盖的遗漏点，法律合规部门则对新增稽查项的依据合法性进行审核。这种多角色参与的机制，能确保政策要

求与业务实际需求被同步纳入范围界定的考量。其次，建立“月度梳理-季度校准”的政策跟踪机制，明确新增稽查项的识别标准。每月由联动工作组召开专题会议，对照新出台的电价政策，从“用户类型扩展”“业务场景变化”“监管重点转移”三个维度梳理需纳入稽查范围的新内容：用户类型扩展方面，若政策新增对“电动汽车充电设施运营企业”的电价优惠，需将其纳入工商业用户稽查清单；业务场景变化方面，若政策推广“绿电交易结算”，需将该场景下的合同签订、电量核对等环节纳入核查范围；监管重点转移方面，若政策强调“分布式光伏余电上网电价执行”，需将该类用户的计量装置准确性核查提升为常规稽查项。每季度末，工作组需对前三月梳理的新增项进行校准，剔除因政策调整已失效的旧项，确保范围清单始终与当前政策重点匹配。最后，建立“执行-反馈-优化”的闭环验证机制，确保范围界定的精准性。每月由稽查部门统计新增项的核查覆盖率、问题发现率，形成执行效果报告反馈至联动工作组。这种动态验证机制，如同给稽查范围安装了“校准仪”，能持续优化覆盖的精准度。

（二）强化政策解读，确保执行一致性

强化政策解读以确保执行一致性，核心在于解决因政策条款理解差异导致的稽查标准不统一问题，通过构建“多部门协同-标准化解读-常态化培训”的闭环机制，使稽查人员对政策的理解与应用保持高度一致。这一目标的实现需从以下环节展开。

第一，组建跨部门政策解读专项小组，奠定统一理解的基础。小组成员应涵盖营销部门、财务部门、法律合规部门，并吸收一线稽查骨干。小组每月召开1次专题会议，重点针对新出台或调整的关键政策条款进行联合研讨：营销部门负责解析政策制定的初衷，财务部门梳理条款涉及的具体计算参数，法律合规部门明确条款的执行依据，一线稽查人员则提出过往因解读偏差导致的典型问题。这种多视角碰撞的研讨模式，能有效消除单一部门解读的局限性。第二，编制标准化政策解读指南，形成可操作的执行依据。在小组研讨基础上，以“条款原文-核心要点-执行要点-常见误区”为框架编制解读指南。例如，针对“分时电价峰谷时段调整”条款，指南中需明确：条款原文、核心要点、执行要点、常见误区。指南需以简明图表辅助文字说明，并标注“需重点关注”的关键环节，确保一线稽查人员能快速掌握核心要求。第三，开展分层分类培训，提升政策理解的转化能力。培训对象分为“骨干层”与“执行层”：骨干层需参加季度深度培训，内容包括政策背景解析、解读指南编制逻辑、典型争议案例研讨，重点培养其“政策-业务”的转化能力；执行层则通过月度线上微课与季度现场演练进行培训，线上微课聚焦“如何用指南核对用户用电数据”“常见误区的识别方法”等实操要点，现场演练设置“用户声称装置未更新导致时段记录错误”“补贴用户虚报用电量”等模拟场景，由骨干层成员扮演用户，执行层成员按指南流程核查并反馈，通过实战提升应用能力。

（三）优化分类管理，增强应对灵活性

随着科学技术和用电需求量的不断增加，使得电力营销稽查工作开展难度也呈现出明显增加的趋势^[5]。而优化分类管理

以增强应对灵活性，核心在于打破“一刀切”的稽查模式，通过对用户用电模式与政策关联度的精准识别，将有限的稽查资源优先投入高风险、高关联领域，实现“重点用户重点查、一般用户高效查”的目标。这一目标的实现需从以下关键步骤展开。

首先，建立“用电模式+政策关联度”的多维分类标准，为差异化管理提供依据。用电模式维度可划分为三类：大工业用户、居民用户、新能源用户；政策关联度维度则根据用户是否享受补贴、是否执行特殊电价分为“高关联”“中关联”“低关联”三级。例如，同时属于新能源用户且享受补贴的用户，归为“高关联-新能源模式”；大工业用户但仅执行常规电价的，归为“低关联-大工业模式”。这种双维度交叉分类，能更精准地反映用户与当前电价政策的互动程度。其次，制定分级差异化稽查方案，匹配不同类别的管理需求。针对“高关联”用户，采取“高频次+深度核查”策略：每月至少开展1次现场抽查，重点核查补贴申请材料真实性、计量装置与政策要求的匹配度；针对“中关联”用户，采用“双月巡检+数据比对”策略：每两月进行1次现场巡检，同步通过用电信息系统比对其峰值时段用电量与申报数据的一致性；针对“低关联”用户，实施“季度抽检+自助申报”策略：每季度随机抽取10%用户进行现场核查，其余用户通过线上平台自助上传用电信息，系统自动校验合规性。最后，强化分类管理的执行反馈，持续优化方案有效性。每月由稽查部门统计不同类别用户的问题发现率，形成分类管理效果报告。若某类用户的问题发现率显著高于预期，需评估是否因分类标准过粗导致稽查力度不足，必要时细化该类用户的子分类；若某类用户的问题发现率长期低于5%，可考虑进一步降低稽查频次，释放更多资源用于高风险领域。

（四）完善预警机制，降低违规发生概率

完善预警机制以降低违规发生概率，核心在于将稽查工作从“事后纠错”转向“事前预防”，通过构建“指标识别-动态监测-分级响应-持续优化”的全流程预警体系，提前捕捉潜在违规风险，减少政策执行偏差的发生。这一目标的实现需从以下四个关键环节展开。

第一，基于历史数据与政策重点构建风险指标库，明确预警“观测点”。首先，整理近三年稽查发现的违规案例，按政策类型和违规类型分类统计，筛选出高频违规场景。其次，结合当前政策重点，为每类场景设定具体风险指标：分时电价用户的“异常时段用电占比”、补贴用户的“月用电量波动阈值”、阶梯电价用户的“多人口证明有效性”。指标库需标注“触发条件”和“风险等级”，为后续监测提供量化依据。第二，建立常态化数据监

测机制，实现风险“早发现”。监测对象覆盖所有与政策关联的用户，监测频率根据用户关联度调整：高关联用户实行“周监测”，通过用电信息系统自动提取其用电量、时段分布等数据，与指标库阈值比对；中关联用户实行“双周监测”，重点关注其峰值时段用电量的稳定性；低关联用户实行“月度监测”，主要核查阶梯电价分档的合规性。监测数据由稽查部门专人汇总，每周生成《风险预警简报》，标注“高风险用户清单”和“风险特征描述”，为后续响应提供明确指向。第三，制定分级响应流程，推动风险“快处置”。根据风险等级设定差异化处置措施：高风险用户需在2个工作日内启动现场核查，重点核对其用电设备运行记录、补贴申请材料原件，若确认违规，立即暂停补贴发放并启动追补程序；中风险用户需在5个工作日内发送《风险提示函》，要求用户自查用电行为并提交情况说明，稽查部门同步抽查其计量装置设置；低风险用户通过短信或线上平台推送政策提醒，引导用户主动更正。这种“风险等级-处置时效-措施强度”的对应设计，确保了有限资源被优先用于高风险领域。第四，建立预警机制动态优化闭环，提升预警“精准度”。每季度由稽查部门联合营销部门对预警效果进行评估：统计“预警风险实际违规转化率”、“违规行为提前发现率”，分析指标库中“无效指标”和“遗漏指标”。根据评估结果，修订指标库阈值、补充新指标，并同步更新监测频率与响应流程。这种“监测-响应-评估-优化”的闭环，如同给预警机制安装了“智能校准器”，使其能随政策变化和用户行为演变持续提升精准性。

三、结语

本研究揭示了电价政策调整与电力营销稽查的“设计-执行”协同逻辑，明确了政策调整通过扩展稽查范围、动态更新标准、复杂化对象特征、演变风险类型四个维度对稽查重点产生影响的具体机制，提出的动态界定范围、强化政策解读、优化分类管理、完善预警机制等策略，为解决传统稽查模式与政策调整不匹配的问题提供了实践路径。相较于既有研究对传统稽查场景的关注，本文更聚焦政策动态调整下的新特征与新需求，增强了研究的时效性与针对性。研究表明，通过上述策略可有效提升稽查覆盖精准性、执行一致性、应对灵活性与风险防控能力，对保障电价政策引导资源配置、促进能源转型的目标具有现实意义。需说明的是，本研究未深入探讨不同地区政策差异对稽查重点的影响，未来可结合区域政策实践，进一步细化策略的适应性调整，以完善电力营销稽查的动态优化体系。

参考文献

[1] 徐志春. 如何做好电价与电费管理稽查工作 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(15):1892.
[2] 纪冰洁. 如何做好电价与电费管理稽查工作 [J]. 越野世界, 2021, 16(8):121.
[3] 许书源. 如何做好电价与电费管理稽查工作 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(26):3179.
[4] 王振亚, 鲍凡. 基于数据挖掘的电力稽查技术研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(z2):101-103.
[5] 渠爱霞. 数据挖掘视域下电力营销稽查业务监管系统的设计分析 [J]. 电气技术与经济, 2023(9):265-267.

基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾 预警防控系统

张贵龙¹, 何俊杰¹, 陈从禹², 刘国正²

1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610000

2. 四川天微电子股份有限公司, 四川 成都 610200

DOI:10.61369/WCEST.2025010017

摘要 : 目前的风力发电场的火灾防控主要基于火灾发生后的处置, 而对风电机组的火情隐患提前进行预警成为了越来越重要的研究课题。本文介绍的基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统, 便是一种新型的风电火情提前预警系统。该系统主要包含热阵列成像仪, 紫外火花探测器, 风电智能主控器, 灭火装置, 风电场火情预警智慧管理软件等。通过对采集的数据进行分析, 并结合机器学习算法, 能够对风电机组的火情隐患进行早期的预警以及处置。

关键词 : 风电; 热阵列; 紫外火花探测; 机器学习; 早期预警

Wind Power Fire Early Warning and Prevention System Based on Thermal Array and Ultraviolet Spark Detection Mechanism

Zhang Guilong¹, He Junjie¹, Chen Congyu², Liu Guozheng²

1. Yalong River Basin Hydropower Development Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

2. Sichuan Tianwei Electronics Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610200

Abstract : Currently, the primary focus of fire prevention and control in wind farms is on post-incident response. However, early warning systems for potential fire hazards in wind turbines are becoming increasingly important. This paper introduces a new wind power fire early warning system that uses thermal arrays and UV spark detection technology. The system includes a thermal array imager, an UV spark detector, an intelligent wind power controller, a fire extinguishing device, and smart management software for wind farm fire warnings. By analyzing collected data and using machine learning algorithms, the system can provide early warnings and effective responses to potential fire hazards in the wind turbine nacelles.

Keywords : wind power; thermal array; ultraviolet spark detection; machine learning; early warning

引言

本世纪二十年代以来,我国的风力发电行业继续保持快速发展的趋势。而陆上风电场一般位于草场或者山地,一旦发生火灾,就会造成难以估量的损失。风电机组最容易发生火灾的轮毂、机舱距离地面有上百米左右,加上交通不便等因素,都制约着火灾发生后人员及消防设备的及时到达和处置。对风电机组的火情隐患进行预警便成为了重要的研究课题。

雅砻江流域水电开发有限公司与四川天微电子股份有限公司成立了联合课题组,合作开发了“基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统”。雅砻江流域水电开发有限公司属下的腊巴山二期风电场,位于四川省凉山州德昌县。腊巴山风电项目是国家首批大型风电光伏基地之一,共安装48台风力发电机组。我们选取了其中1台风电机组,加装该风电火灾预警系统,作为试点工程。

目前常用的风电消防手段是安装火焰烟雾探测器(简称烟感)和火焰高温探测器(简称温感),以及舱内配置手提式泡沫灭火剂,通过探测火灾后期的间接产物进行火灾告警。如何通过先进的探测手段、有效的数据分析和智能的预警技术手段,提前发现风电火灾隐患发现,预留充分的处置时间,将火灾隐患消灭在萌芽阶段,便成为很重要的课题。

一、火花的生产及探测原理

火花形成的原因有多种，常见的包括电线老化、电力电路接触不良、静电放电、电容式感应等。在风电机舱内有电气柜、发电机组、电力传输装置、电力传输线缆等多种电气设备，发电机组的刹车盘会由于摩擦而产生火花，电器线缆老化、破裂会产生电火花。另外环境中会存在机油或者润滑油，这些都是易燃性物质，当连续的火花溅射到这些可燃性物质上时，被引燃的概率会相当大，发生火灾的可能性非常高。为了预防火灾，在火灾发生初期，对火花的监测是发现火情隐患的一个重要手段。

物质燃烧会产生可见光辐射、不可见光辐射，火花也具备这些特性。从光辐射来讲，燃烧所形成的光和热会形成紫外光（UV）、可见光（VIS）、红外光（IR），它们拥有各自的光辐射波长：

紫外－辐射波长：185～260nm；

可见光－辐射波长：400～700nm；

近红外－辐射波长：0.7～1.1μm；

宽频红外－辐射波长：0.7～7μm；

窄频红外－辐射波长：4.3～4.4μm；

燃烧时的火焰（火花）光谱如图1所示：

从图上可看出火花从紫外光谱一直到红外光谱都会有电磁波辐射，而太阳光在可见光谱段和红外光谱段同样有电磁波的辐射，太阳光光谱如图2所示：

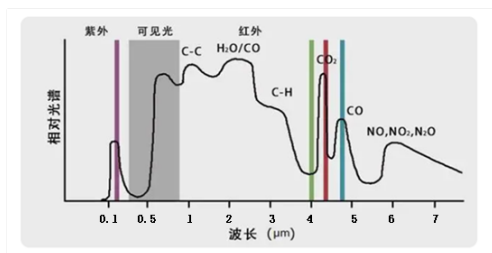


图1：燃烧时的火焰（火花）光谱

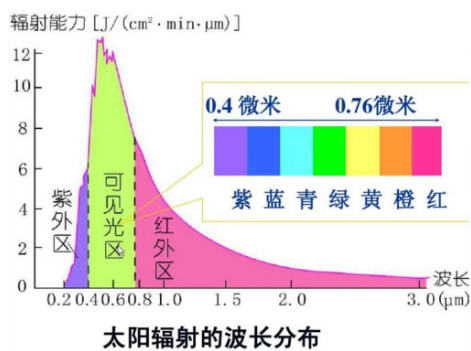


图2：太阳光光谱图

从光谱图可以看出到达地面的太阳光和作为电光源的非紫外透明材料发出的光波都大于300nm，因此火花探测采用220nm至280nm的紫外波段进行监测，这一波段属于太阳光谱盲区（日盲区）和日常大部分光源盲区，通过对这一波段的紫外线检测可大大降低干扰，提高火花监测的准确度。

当可燃物质燃烧或爆炸刚点燃的瞬间，会以极快的速度（3～4毫秒）辐射出较强能量的紫外线。在这个时间紫外线传感

器就可以探测到火花的生产，具有灵敏度高、响应速度快的优点。这种用紫外光谱测量火焰的测量方法是基于光谱学原理^[1]。

二、风电火灾预警系统整体设计

如图3所示，风电火灾预警系统主要包括：热阵列双光红外成像仪、紫外火花探测器、风电智能主控器、智能灭火装置、风电场火情预警智慧管理软件等。

风电火灾预警系统的工作原理是：风电机舱内的热阵列成像仪、紫外火花探测器等采集的数据实时上报到风电智能主控器，由后者进行处理。根据采集数据进行分析判断，一旦达到灭火条件，便给灭火装置下达指令。通过触摸式液晶屏进行信息展示、人机交互，以及系统设置。

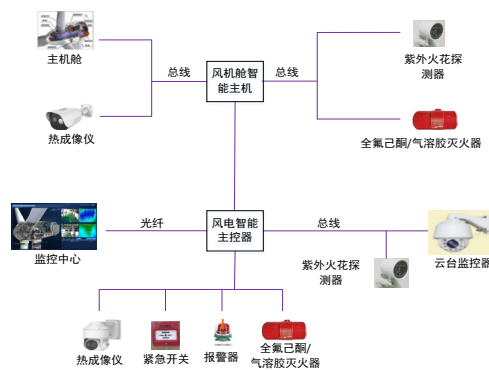


图3：风电火灾预警系统整体架构图

三、系统各组成模块设计

（一）热阵列双光红外成像仪

通过红外热像仪，可以将物体温度差异以不同颜色的图像标识^[2]。温度越高，辐射能量就越大。热阵列双光红外热成像仪基于红外成像的原理，对目标温度进行实时呈现和测量。采用双光（可见光、红外）功能模式，既能实现温度点、线、面的数据化呈现，也能进行视频证据保全和视野画面监控。风电机舱内的轮毂、齿轮箱、刹车盘等关键设备通过安装热阵列双光红外热成像仪，可以将设备温度的变化趋势进行数据化、图像化呈现，结合深度学习算法^[3-4]，就可以对目标的火灾隐患提前预警，便于监控人员对火灾隐患进行处置，避免火灾的发生，如图4。



图4：热阵列双光红外成像仪实物图

（二）紫外火花探测器

紫外火花探测器是利用光敏元件将紫外线信号转换为电信号的传感器，它的工作模式通常分为两类：光伏模式和光导模式。光伏模式是指不需要串联电池，串联电阻中有电流，而传感器相当于一个小电池，输出电压，但是制作比较难，成本比较高；光导模式是指需要串联一个电池工作，传感器相当于一个电阻，电阻值随光的强度变化而变化，这种制作容易，成本较低。

采用只对185nm ~ 260nm 狭窄范围内的紫外线响应，而对其它频谱范围的光线不敏感的紫外线传感器，同时它是光子检测手段，因而信噪比高，具有极微弱信号检测能力。利用它可以对火花中的紫外线进行检测。其工作原理示意图如图5所示：

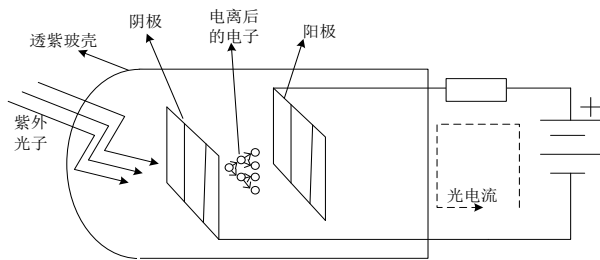


图5：紫外管工作原理示意图

紫外火花探测器核心器件采用四川天微电子股份有限公司自主研制的紫外光电管，该型紫外光电管具有结构牢固、探测距离远、工作状态稳定、寿命长等特点。紫外光电管的工作原理是金属的光电效应^[5]，如上图所示。在阳极和阴极之间加上电压，就在两极之间建立了电场。紫外线射到光电阴极上时，阴极材料自由电子获得紫外光子能量后，超出材料逸出功临界值而发生电子跃迁释放光电子，在电场作用下向光电管阳极移动，产生光电发射效应。

（三）风电智能主控器

风电智能主控器如图6所示：



图6：风电智能主控器

风电智能主控器包含：微控制器(MCU)、液晶显示屏、主备电切换及充放电管理、主备电源、电源电路、通讯电路、驱动控制电路、存储电路等。

微控制器(MCU)选用GD32F103RET6，集成了ARM Cortexm-M3 32位处理器内核，工作频率微108兆赫。提供高达3MB的片内闪存，和96 KB的RAM。增强型I/O和外设连接到两条APB总线。另外还能提供3个12位ADC、2个12位DAC、10个通用16位定时器、2个基本定时器、以及2个脉宽调制高级控制定时器，如图7。

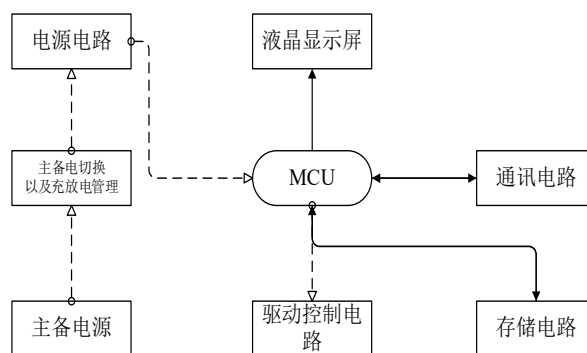


图7：风电智能主控器电路组成图

风电智能主控器外部输入电源是220VAC，经过电源适配器转换后得到24V，然后DC/DC转换成12VDC，再由LDO转换后得到3.3V电压。其中，24V转12V采用芯片TPS5430进行转换。

TPS5430的默认输入启动电压为5.3V（典型值）。ENA引脚可用于禁用TPS5430，将电源电流降低至18μA。当ENA引脚悬空时，内部上拉电流源实现运行。TPS5430包括内部慢启动电路，此电路可在启动期间减慢输出上升时间，以减少浪涌电流和输出电压过冲。最小输出电压为内部1.221V反馈基准。通过过压保护(OVP)比较器最大限度地减少输出过压瞬变。激活OVP比较器时，关闭高侧MOSFET，直至输出电压低于所需输出电压的112.5%。内部逐周期过流保护限制集成式高侧MOSFET中的峰值电流。对于连续过流故障情况，TPS5430将进入断续模式过流限制。热保护可防止器件过热。

图8为风电智能主控器在液晶显示屏上的人机交互界面：



图8：风电智能主控器人机界面

（四）全氟己酮/S型脉冲式热气溶胶智能灭火装置

风电火灾预警系统中使用的灭火剂基于全氟己酮或者S型脉冲式热气溶胶。

S型脉冲式热气溶胶灭火剂具有高效、无毒无害、安全、绿色环保的特点^[6]。适用于通讯机房及计算机房、风电舱、电池舱、发动机舱、电池箱等相对封闭的场所。全氟己酮是一种新型灭火剂，具有环保、无色、无毒的特点。标准大气压下的沸点为49.2℃，凝固点为-108℃，介电强度≥110KV，绝缘性很高。

智能灭火装置通过总线与风电智能主控器连接。灭火装置接收到风电智能主控器发出的指令后，启动灭火操作。

（五）风电场火情预警智慧管理软件

风电场火情预警智慧管理软件安装于监控中心，图9为风电场

火情预警智慧管理软件的界面。

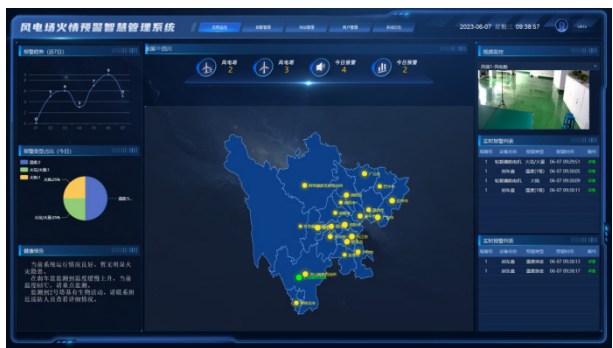


图9：风电场火情预警智慧管理软件界面

风电场火情预警智慧管理软件主要实现对轮毂、风电舱、塔筒、塔基室外四个部位内安装的紫外火花探测器、热阵列双光红外成像仪等探测的数据进行统一搜集、管理和分析，通过大数据建模和分析，实现对风电塔内关键设备火情状态的预警分析，同时通过预警分析结果实现三方面的处置与管理：其一，风电塔关键设备火情隐患预警，便于风电维护和管理人员提前对隐患单元进行处置和处理；其二，根据采集的数据分析，实现设备健康诊断，方便设备日常维护管理；其三，根据监测结果与风电智能主控制器实现信息交互，并将交互信息提炼进行展示与回查。

风电场火情预警智慧管理软件同时具备操作权限设置、预警

阈值参数设置、设备管理、实时报警、远程预警等基本功能，还具备远程监控双光视频窗口实时展示功能。

四、运行结果

根据位于四川凉山州德昌县腊巴山二期风电场试点工程的运行，该风电火灾预警系统具有如下的特色及优势：

（1）军转民用的紫外火花探测技术，结合热阵列双光成像等技术，可以提前快速探测、预警、并处置火情，减少乃至杜绝火灾的发生；

（2）通过红外热成像的深度学习，以及大数据平台，对火灾异常征兆以及危险点进行分析，实现电火灾风险感知及诊断；

（3）基于全氟己酮或 S 型脉冲式热气溶胶的智能灭火装置，使得灭火更加高效，实现快速灭火并防止复燃。同时对人员、环境更加环保无污染。

五、结论

课题组研制的“基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统”通过试运行，实现了火情早期预警的功能。根据试运行的结果，今后可在其他的风电场或者风电机组上进行推广。

参考文献

[1] 乔伊·贾罗辛斯基. 燃烧现象－火焰形成、传播和熄灭机制 [M]. 科学出版社，2021.

[2] 常本康，蔡毅. 红外成像阵列与系统 [M]. 科学出版社，2006.

[3] 白帆，曹昭睿. 基于深度学习的白光－热成像双通道图像识别系统设计 [J]. 科学技术与工程，2018，18(21)：264–267.

[4] 陈鹏，秦伦明. 基于深度学习的电力设备红外图像识别 [J]. 上海电力大学学报，2021，37(3)：217–220

[5] 郑冬梅，闫迎利. 光电效应与光电器件的应用 [J]. 现代物理知识，2006，18(2):2.

[6] 卞建峰，郭鸿宝. 气溶胶灭火机理及应用探讨 [J]. 消防科学与技术，2001(4):3.

智能工业厂房低压供配电系统可靠性分析

张盼, 杜飞扬

重庆机场集团有限公司动力能源分公司, 重庆 401120

DOI:10.61369/WCEST.2025010018

摘要： 本文针对智能工业厂房低压供配电系统的可靠性展开论述，并说明了电力负荷分类、供电要求和应急电源的选择、供配电系统的方案及供电线路的安全要点。通过分析智能化监测及管理系统应用、定期维护检修、人员培训和应急演练等多重因素对于供配电系统的综合影响，获得上述因素在提高系统可靠性方面的发挥作用的机理。研究发现：根据相应的供电需求科学合理地构建供电系统、选择匹配的应急电源、做好供电线路管理并采取综合性的改善措施，能够保证系统的稳定运行，为工业生产的正常开展提供强有力的支持。

关键词： 智能工业厂房；低压供配电系统；可靠性分析；应急电源

Reliability Analysis of Low-Voltage Power Supply and Distribution System in Intelligent Industrial Factory

Zhang Pan, Du Feiyang

Chongqing Airport Group Co., Ltd. Power and Energy Branch, Chongqing 401120

Abstract： This paper focuses on the reliability problem of the low-voltage power supply and distribution system in smart industrial factory, systematically expounds the classification of power load and power supply requirements, deeply analyzes the selection of emergency power supply, power supply and distribution system scheme and safety key points of power supply lines. Through exploring the application of monitoring and management system, regular maintenance and inspection, personnel training and emergency drills and other comprehensive measures, it reveals the influence mechanism of each element on the reliability of the system. The shows that reasonable planning of system architecture, selection of appropriate emergency power supply, strengthening line safety management and implementing comprehensive improvement measures can effectively guarantee the stable operation of power supply and distribution, and provide a solid power support for industrial production.

Keywords： smart industrial factory; low-voltage power supply and distribution system; reliability analysis; emergency power supply

工业生产高度智能化的背景下，智能工业厂房是现代工业生产的重要载体和基础，做好工业生产厂房的低压供配电系统可靠性的分析就变得极为重要。工业厂房供配电系统要稳定运行才能保证工业生产的连续性与高效性，与工业生产的经济效果、安全生产关系甚为重要。任何一个供配电系统故障都会影响工业生产的正常进行、引起设备的破坏，甚至造成安全事故与灾难性的重大经济损失。因而加强对工业生产厂房低压供配电系统可靠性的分析，就能保障智能工业生产厂房的生产稳定、高效运行，意义颇为重大。

一、电力负荷分类与供电要求

在智能化工业厂房中，不同生产装置、不同生产环节对应的一类负荷、二类负荷、三类负荷有所不同^[1]。例如一类负荷通常为关键生产设备、消防设备、应急照明设备等，对于该类型负荷如果发生中断供电的情况，将会带来重大经济损失或者严重安全事故。例如在电子芯片生产厂房中，其车间内的部分高精度加工设备对于供电稳定性要求极高，属于一类负荷。一类负荷中增设应急电源，并严禁其他负荷接入应急供电电源，在任何情况下不中断供电。二类负荷在中断供电以后会造成一定经济损失或生产

秩序较大混乱，比如厂房内的部分辅助生产设备、部分办公区用电等负荷。对于该类负荷应实现双回路供电，可以提高供电的可靠性。三类负荷对供电可靠性的要求一般比较低，只需采用单回路供电就能够达到相应的要求，比如厂房内的部分非重要照明设施等。

二、应急电源的选择与应用

选用合理的应急电源是智能工业厂房低压供电可靠性配置的重要组成部分，在智能工业厂房低压供配电系统中广泛应用的应

急电源有柴油发电机组、EPS 应急电源和 UPS 电源，这些应急电源都有其各自的特征和适用范围。

柴油发电机组的输出功率大，能够持续供电较长时间，在供电需求容量大、允许中断供电时间略长的场所可选用^[2]。正常中型的智能工业厂房中柴油发电机组功率一般为 200—500kW，在大多数场合能够满足厂房中一级负荷中断市电后较为长时间的用电需求，其启动时间一般为 10—30s，可以为厂房中重要的用电设备提供更长时间的应急电力支持。

EPS 应急电源系统一般的备用供电时间为 30—120 分钟，适用于消防设备、应急照明等对供电时间要求不是特别长的负荷。例如，在智能工业厂房中，用于防火卷帘的水幕泵在火灾时应满足持续工作时间为 3 小时，对于此类设备，EPS 应急电源可在市电故障时维持其供电可靠性，保证在规定时间内供电的连续性。但需要注意的是，EPS 应急电源不是长时间性质的备用电源，对于正常电源供电可靠性较差的场所，不能用作常用设备的备用电源。

UPS 电源能进行快速切换（切换时间通常为毫秒级），适合对供电连续性有要求的自动化控制设备，比如计算机控制自动化、计算机数据处理等设备。智能工业厂房自动化控制系统中应用 UPS 电源，在市电瞬间中断的情况下，控制的计算机系统数据不丢失，自动化设备不中断工作^[3]。

三、供配电系统方案分析

工业厂房常用的单母线分段双回路+一台柴油发电机组接线系统方案和双电源 TN-C-S+一台柴油发电机组接线系统方案各具长短，对方案的选择会不同程度地影响供配电系统的可靠性。

方案 1：此方案采取单母线分段双回路接线方式，低压母线独立运行，变压器与柴油发电机组之间没有联络点，正常运行时两段母线互不影响，分别承担各自的供电子区，此种方式简化了操作复杂度，不需要复杂的连锁控制逻辑，大大降低了人为误操作而导致故障的风险，更重要的是柴油发电机不可能给市电倒送电，也保护了市电网。但是缺点也很突出：一旦市电停电，则只有Ⅲ段母线提供给重要的负载用电；而非关键性的设备都会停止工作，导致生产断流；而且Ⅲ段母线长时间处于没有电压的工作状态，对于电气设备潜伏的问题不能进行及时发现和排除，存在一定隐患。

方案 2：采取从变压器低压母线引出一路独立电源专供Ⅲ段母线平时不通电问题的办法。即市电正常情况下，保证有一组特定的母线是带电的，把这条电缆一直接到生产二期东面主控楼中间走道东端的操作母线上，以保证这一操作母线及其所带的设备都长期处在带电状态。但是在市电突然停电的时候就暴露出了它的局限性：只有一路通过发电机组供电，而且柴油发电机的供电范围也仅限于生产通用动力等不能间断供电负荷，很多辅助设备以及办公用房用不了电，致使产线的供电受到了很大的局限，即会造成产线内的部分生产不能正常开展工作，同时也会在用电需求多变的情况下，很难保证产线的正常生产工作秩序，在供电的灵

活度及全面性方面还有较大的提升空间。

方案 3：当平时市电停电时，在一般负荷不设专用母线的情况下，柴油发电机与变压器母线共用，以最大限度地发挥柴油发电机的作用。但该方案存在明显缺陷，在 TM1 变压器检修或故障、QL 断开、3QF 合闸的情况下，由于 QL 断电，柴油发电机不能供电给一级负荷，如果恰逢市电停电，则柴油发电机自启动。

方案 4：设置一级负荷母线段Ⅲ的柴油发电机专用电源，即使面临 TM1 变压器检修或故障导致 QL 主动断开的特殊工况，只要 3QF（联络开关）处于合闸状态，系统仍需维持“QL 失压断开→柴油发电机启动”的控制逻辑。柴油发电机自启动就可以为一级负荷供电，这使得一级负荷供电可靠性大大提高。通过对比分析不同方案，市电可靠时可选方案 1、2，柴油发电机容量依变压器定；选 3、4 需配更大容量机组；一级负荷含特重要负荷时，1、2、4 适用，3 不可选。

四、供电线路的安全要求与可靠性保障

低压供配电系统有利于智能工业厂房的可靠性，对智能工业厂房内的布线系统、布线系统布置线路，以及布线的布线线路敷设到智能工业厂房内，都应使布线系统敷设和使用的安全性得到有效保证，多方规避外界应力的影响，避让布置热源并和它相隔一定的距离，防止出现因高温造成的线缆影响；经常性的清理集聚着大量灰尘的地方，阻止大量灰尘淤积导致电线处出现静电或者加快设备磨损，选择耐腐蚀的线缆，并加上保护性防护层，同时注重环境检测和清洁^[4]。

智能工业厂房对消防用电设备电源的配电也需要严格设计与施工，使消防设备可以在火灾等事故发生时发挥有效功能。其次，电气产品尽量选择技术先进的、品质可靠的产品，如使用自带智能监测、智能保护的断路器、接触器等，实时监测线缆的电流、电压、温度等参数，在发生异常时及时断开电路，防止故障的扩展。良好的接地设计可有效防止电气设备外表面漏电带来的人身安全隐患；防雷措施能有效防范线路、电气设备因雷电而受损；抑制高次谐波能优化电力设备的运行效能，延长设备的使用寿命，保障供电设备的正常运行。

五、提升智能工业厂房低压供配电系统可靠性的综合措施

（一）智能化监测与管理系统应用

智能工业厂房低压供配电系统可靠性管理体系由智能化监测管理系统提供基础和支撑，是对供配电系统的传感器技术应用、物联网技术以及大数据技术应用的运用和展示，对供配电系统进行全面有效实时监测及准确管理。

作为系统的传感子系统，传感设备应根据各设备的特点以及其重要性，有针对性地在重要点位安装。如在变压器中，传统的油温监测方法中温度传感器测量的是油面上的温度，与油本身的流动效率相关联，在变压器内部测取的油面油温并不能真实反映

绕组等主体部位的温度，而传感系统直接把传感器接在绕组、铁心等重要节点，通过光的原理，把光传回变压器，可以实时、真实地测得其内部温度的波动，规避因为油循环流速不畅引起读数失真所带来的影响，使对变压器热故障的判断更加科学和有依据。在断路器中，振动传感装置可以在断路器运行中实时监测变压器的分合闸过程中的机械部件产生振动，从而从振动频率、振动大小等参数信息可以实时检测出相关机械故障点，如断路器触头接触点磨损、弹簧疲劳；局部放电传感装置可以针对设备的内部绝缘部位异常而产生在绝缘上产生的一些局部的微弱放电信号，可以将这些异常点作为绝缘老化、绝缘劣化的重要辅助判断依据，即早发现潜在的断路器内部缺陷故障。工业以太网拥有更大的信息传输带宽、更低的延迟性、更好的抗干扰能力等，从而取代现有的供配电自动化系统原有的一次设备与调度、变电所控制终端的有线连接模式，采用以太网通信，把大量的实时数据通过传感单元采集后传输到系统监控中心。

巡检与保养是实现智能工业厂房低压供配电系统持续稳定运行中的重要环节，是对供配电系统进行合理维护保养制度的制定以及后续实施过程中的管理和督导。供配电设备的巡检保养应当综合设备的使用寿命、运行情况和运行年限、以往的历史故障信息以及标准的制度规范等等，同时在进行巡检时应注意观察变压器油位、油色、油温、套管外部情况、呼吸器等相关问题，一些细节变化、问题及指示都有可能是设备可能出现故障的前期征兆。例如变压器油色谱分析能够根据对油内溶解氢气、乙炔、一氧化碳等气体成分比例、含量等内容的分析和比较，有效的查找变压器出现内部短路、内部元件出现局部放电等潜在故障问题。例如变压器运行中如果油中乙炔成分含量持续上升，则主要提示了变压器运行中出现了电弧性故障，则应通过进一步测试绕组直流电阻、变比等项目，具体问题具体分析。

（二）人员培训与应急演练

人是智能工厂低压供配电系统运行和维护的核心，员工对智能工厂低压供配电系统知识的掌握程度以及对突发事件或问题的

应急处理技能是影响智能工厂低压供配电系统安全稳定运行的主要原因。培训过程中基础培训阶段主要以电工基础知识、供电知识和原理、供配电装置的结构、原理等为主，使学员能了解系统基本概念及相关供配电设备的工作原理；实操培训阶段以模拟工作状态将学员带入设备的安装、调试、操作、维护中，让学员感受、了解设备的操作规范、安全操作注意事项等。以变压器倒闸操作培训为例，安排学员在模拟系统环境中严格按照倒闸操作工作流程及顺序完成停送电、验电、挂接地线、切换开关等倒闸操作任务，通过多次练习掌握操作要点、解决故障方法等，在真实工作中能够完成正确的操作流程。选取一些本专业发生过的典型故障，采用案例教学法组织学员一起分析讨论。从现象着手，引导学员通过应用所学知识和技能并应用观察、测量、测试等分析手段逐步排查故障成因，得出结论、提出解决办法并实践操作加以验证。通过虚拟仿真技术为学员创建一个变化不定的故障环境，模拟故障环境的各种组合情况，使学员在虚拟故障环境中进行诊断和处理训练，真实感受处理过程中可能发生的各种突发状况，培养学员应变以及分析问题和解决问题的能力。学员通过演练可对不同排查思路、方法以及所采取的处理措施进行总结，可以不断提升学员应对故障处理的能力和水平。

六、结论

智能工业厂房低压供配电系统可靠性的影响因素之间相互联系，是一个复杂的过程。其中电力负荷的类别决定了最基础的供电方案选择，应急电源的选择确保了极端情况下电力的不间断供给，供配电系统方案选择各有优劣，供电线路安全是系统可靠稳定的支撑，智能化监控管理、定期的维护检修和人员培训应急演练等综合手段是从技术、管理和人员等全方位的综合保障，上述要素只有统筹考虑，协同推进，才能有效地提高系统可靠性，满足工业生产对电能连续稳定供给和安全可靠的严格需求，实现智能工业厂房的高效运行。

参考文献

- [1] 杨子江,程琦.低压配电系统断路器可靠性聚类分析方法[J].电工技术,2024,(23):160-163+166.
- [2] 王蕾,雷崇,王德发,等.城轨低压配电系统可靠性评估研究[J/OL].铁道标准设计.2024.
- [3] 杨立鑫,王玉亮.高层建筑电气设计及低压供配电系统可靠性分析[J].光源与照明,2024,(03):207-209.
- [4] 陈静.智能工业厂房低压供配电系统可靠性研究[J].智能建筑与智慧城市,2021,(10):140-141.