

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Jian Zhao

Editorial Board Member

Jinze Fu

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

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

目录CONTENTS

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第6期 2025年6月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编 辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

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

网 址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

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

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

- 001 河道治理工程对生态环境修复的作用研究 张闯, 周许, 朱明, 王旭, 徐冉
Research on the Role of River Regulation Projects in Ecological
Environment Restoration Zhang Chuang, Zhou Xu, Zhu Ming, Wang Xu, Xu Ran
- 004 智慧水利在水资源管理中的实践与发展路径探讨 程妙真
Discussion on the Practice and Development Path of Smart Water Conservancy in
Water Resources Managemen Cheng Miaozhen
- 007 伊通县伊通河范家闸河段水系连通建设研究 于乾贤, 白忠亮, 陈春坤
Study on Water System Connectivity Construction of Yitong River Fanjia Lock Section
in Yitong Manchu Autonomous County Yu Qianxian, Bai Zhongliang, Chen Chunkun
- 010 基于数字孪生的水电站智能状态评估与故障预警系统研究 南江涛
Research on Intelligent Condition Assessment and Fault Early Warning System for
Hydropower Stations Based on Digital Twin Nan Jiangtao
- 013 基于BIM的水利工程施工管理与进度控制研究 王成
Research on Construction Management and Schedule Control of Water
Conservancy Projects Based on BIM Wang Cheng
- 016 水利工程中管道工程施工监理质量控制探究 刘涛
Exploration on Quality Control of Construction Supervision for Pipeline
Engineering in Water Conservancy Projects Liu Tao
- 019 海水淡化技术对不同类型海水适应性研究 王慧, 石茜, 王绍聪
Adaptation of Seawater Desalination Technology to
Different Types of Seawater Wang Hui, Shi Qian, Wang Shaocong
- 022 前弯式离心泵变速运行特性及相似定律偏差分析 胡洪, 张伟程, 张文杰
Analysis of Variable-Speed Operation Characteristics and Deviation from Similarity
Laws for Forward-Curved Centrifugal Pumps Hu Hong, Zhang Weicheng, Zhang Wenjie
- 026 智慧电厂5G通信网络架构设计与智能运维系统 邬惠佳, 白治宙, 田刚, 马战南, 菅晓丽
Smart Power Plant 5G Communication Network Architecture Design
and Intelligent Operation and Maintenance System Wu Huijia, Bai Zhizhou, Tian Gang, Ma Zhannan, Jian Xiaoli
- 029 高效节水技术在电厂给排水系统中的应用研究 石茜, 王慧, 谢一鸣
Application of High Efficiency Water Saving Technology in Power Plant Water
Supply and Drainage system Shi Qian, Wang Hui, Xie Yiming
- 032 水利工程大体积混凝土施工技术研究 李殿雄
Research on Construction Technology of Large Volume Concrete
in Water Conservancy Project Li Dianxiong
- 035 小流量监测与整编技术优化研究——以金沙江阿海站为例 普洪林, 朱朋
Research on Optimization of Small Flow Monitoring and Reorganization Technology
— A Case Study of Ahai Station on Jinsha River Pu Honglin, Zhu Peng
- 039 信息化背景下水利防汛技术的发展研究 扎西平措, 丁文翔
Research on the Development of Water Conservancy Flood Control Technology under
the Informationization Background Zhaxi Pingcuo, Ding Wenxiang

河道治理工程对生态环境修复的作用研究

张闯¹, 周许¹, 朱明¹, 王旭¹, 徐冉²

1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 淮安市淮泗涵闸管理所, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2025060001

摘 要 : 随着城市化和工业化的加速, 河流生态环境问题日益突出, 水质恶化、生境破坏和生物多样性下降成为普遍现象。河道治理工程通过疏浚整治、生态护岸、湿地修复等措施, 有效改善了水体环境, 削减污染负荷, 增强水体自净能力。同时, 水生植被与栖息地的恢复促进了物种多样性提升, 推动了生态系统结构与功能的重建。相关实践表明, 河道治理在实现防洪安全的同时, 对生态修复和可持续发展具有显著促进作用。

关 键 词 : 河道治理; 生态修复; 水质改善; 生物多样性; 可持续发展

Research on the Role of River Regulation Projects in Ecological Environment Restoration

Zhang Chuang¹, Zhou Xu¹, Zhu Ming¹, Wang Xu¹, Xu Ran²

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

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

Abstract : With the acceleration of urbanization and industrialization, the ecological environment issues of rivers have become increasingly prominent, with water quality deterioration, habitat destruction, and biodiversity decline becoming common phenomena. River regulation projects, through measures such as dredging and regulation, ecological bank protection, and wetland restoration, have effectively improved the water environment, reduced pollution loads, and enhanced the self-purification capacity of water bodies. Meanwhile, the restoration of aquatic vegetation and habitats has promoted the increase in species diversity and facilitated the reconstruction of ecosystem structure and function. Relevant practices indicate that river regulation not only achieves flood control safety but also significantly promotes ecological restoration and sustainable development.

Keywords : river regulation; ecological restoration; water quality improvement; biodiversity; sustainable development

引言

近年来, 受工业排放、农业面源污染及城市化扩张影响, 河流生态功能不断退化, 水质下降与生境破坏问题日趋严重。河道治理工程不仅是防洪与水资源调控的重要手段, 也是修复生态环境的关键路径。国外生态治理强调自然恢复与生态系统服务价值, 但在区域适应性和综合应用方面仍存在不足。结合国内实践, 亟需探索兼顾水安全与生态效益的治理模式, 以期为河流生态修复与可持续发展提供可行路径。

一、河道治理工程的生态功能定位

(一) 防洪与水资源管理的基础作用

河道治理工程最基本的功能在于保障防洪安全与水资源合理利用。通过对河床进行清淤疏浚、河道拓宽与护岸加固, 能够显著提升行洪能力, 有效降低洪峰水位, 从而减轻洪涝灾害对下游城镇、农田和基础设施的威胁。在水资源调控方面, 治理措施不仅能够改善河流的调蓄能力, 还能通过支流分洪、闸坝调节等方

式, 实现丰水期拦蓄、枯水期补水, 保障农业灌溉和生活用水的稳定供应。同时, 河道治理有助于增强水系之间的连通性, 使得湖泊、湿地与河流之间形成良性循环, 从而改善区域水文格局, 优化水资源配置效率^[1]。整体来看, 这一系列工程措施为生态修复提供了坚实的水动力与水资源基础, 是生态功能发挥的前提。

(二) 水质净化与污染削减

河道治理不仅在水量调控方面发挥作用, 更在水质净化和污染削减中扮演重要角色。沿岸缓冲带的修复能够有效拦截农田径

流和城市雨水中的氮、磷等污染物，减少进入水体的负荷。通过植被恢复与土壤改良，缓冲带还能吸收部分重金属与有机污染物，发挥天然过滤作用。人工湿地的建设则进一步提升水体净化能力，湿地植被和微生物群落共同作用，能够分解有机物、吸附悬浮颗粒，并通过氮循环过程降低氨氮浓度。同时，河道治理强调面源污染控制，例如通过生态护岸减少泥沙入河，通过农田排水渠改造降低农业化肥与农药的流失。综合而言，这些措施不仅提升了河流水体的透明度和溶解氧水平，还为水生生物营造了更适宜的生境条件。

（三）生态系统服务价值

河道治理在生态修复过程中所带来的系统性价值，远超单一的防洪与水质改善。首先，治理工程通过恢复水岸植被和河道景观，显著提升了城市与乡村的景观价值，为居民提供休闲、观光与科普教育的场所。河岸生态空间的重建，使得人类与自然之间的互动更加紧密，增强了公众的生态环境意识。其次，植被恢复和湿地建设能够改善局地小气候，调节空气湿度和温度，并通过光合作用实现碳固定，发挥重要的碳汇功能，这对应对气候变化具有积极意义。此外，河道治理与流域生态的协同提升，能够增强区域生态系统的稳定性和自我调节能力，为农业发展、城乡供水及旅游经济提供长期保障^[2]。通过实现生态、经济和社会效益的统一，河道治理在促进区域可持续发展中展现出不可替代的价值。

二、河道治理工程对水质改善的作用

（一）物理性措施对水体环境的改善

物理性措施是河道治理中最直观、见效最快的手段。首先，河床清淤能够去除长期淤积的污染泥沙，减少底泥中有机质和重金属向水体的二次释放。例如，在某中型河道清淤工程中，底泥总有机碳含量下降了约38%，直接降低了水体富营养化风险。其次，水体流速的调节对河道水质改善同样重要。通过适度拓宽或局部收窄河道断面，可提高水流交换速率，使水体自净能力增强。实践表明，当河道流速由0.05m/s提高到0.15m/s时，溶解氧含量可提升20%以上。再次，阻隔物的清除，如水草丛生区的过度堵塞、漂浮垃圾及阻水建筑物，不仅改善了河水流动性，还减少了局部死水区的形成。这些物理性措施为进一步的生物修复创造了良好的水动力条件^[3]。

（二）生物性修复措施

在物理改善的基础上，生物修复措施通过构建自然化生态系统，实现水质的长期优化。水生植被种植能够通过光合作用释放氧气，并利用根系吸收氮、磷等营养物质，有效降低水体污染水平。例如，沉水植物苦草种植密度达到每平方米40株时，氨氮去除率可提高至65%以上。微生物群落在水体净化中也发挥了重要作用，人工投放的硝化细菌和反硝化菌群可加速氮循环，使总氮浓度在一个月下降约30%。此外，鱼类与底栖动物的恢复改善了食物链结构，对藻类和有机碎屑形成有效调控。以鲢鱼、鳙鱼为例，在投放密度为每亩30公斤时，藻类生物量可下降约40%，显著抑制了水华发生频率。生物修复与物理措施的协同作用，使得河道治理实现了从单纯“清污”向“生态修复”的转变^[4]。

（三）水质改善效果评估

通过系统治理，河道水质指标普遍呈现出积极变化。治理后

COD（化学需氧量）、氨氮、总磷等主要污染物显著下降，水体透明度与溶解氧含量大幅提升。例如，在某城市河道治理工程完成一年后，COD下降了42%，氨氮降低了55%，总磷浓度减少了48%；透明度由原来的0.25米提高到0.8米，溶解氧平均浓度提升至6.5mg/L以上。以下为某治理案例的典型监测数据，如表1所示。

表1 河道治理前后主要水质指标对比表

指标	治理前数值	治理后数值	变化幅度
COD (mg/L)	65.0	37.5	-42.3%
氨氮 (mg/L)	4.2	1.9	-54.8%
总磷 (mg/L)	1.05	0.55	-47.6%
透明度 (m)	0.25	0.80	+220.0%
溶解氧 (mg/L)	3.2	6.5	+103.1%

表中数据显示，河道治理工程在改善水质方面成效显著。污染物浓度的下降和水体透明度、溶解氧的上升，说明物理措施与生物措施相互配合，有效恢复了水体生态环境，为生物多样性恢复和生态系统稳定运行奠定了坚实基础。

三、河道治理对生物多样性恢复的影响

（一）水生植被群落的恢复

河道治理过程中，水生植被的修复与重建是提升水域生态功能的关键环节。长期污染和河道硬化往往导致原生植被退化甚至消失，使得河流失去自我修复能力。通过人工种植与自然恢复相结合的方式，可促进优势物种的替换与群落演替，从单一化的藻类群落逐渐向沉水植物、挺水植物和漂浮植物共存的多样性群落转变。例如，在治理后的某城市河段，苦草、伊乐藻和荇菜逐渐取代劣势蓝藻群落，使沉水植被覆盖率由不足10%提高至45%。伴随群落结构的改善，多样性指数（Shannon-Wiener指数）在两年内提升了约1.2倍，水生植被对氮磷的吸收量提升了30%以上，显著增强了水体自净功能。典型物种如芦苇和香蒲的恢复，不仅改善了水体景观，还为鱼类产卵和鸟类筑巢提供了重要的生境^[5]。由此可见，水生植被的恢复不仅提升了河流的生态弹性，还为整体生物多样性重建奠定了基础。

（二）鱼类及底栖生物多样性

鱼类和底栖动物是河流生态系统健康状况的重要指示群体，其多样性和数量变化直接反映河道治理的成效。河道治理通过改善水体流动性和修复栖息地环境，为鱼类和底栖生物回归创造了条件。沉水植物的恢复为鱼类提供了产卵基质，清洁河床为底栖动物如螺类、虾类提供了栖息空间。例如，在某治理工程中，鱼类物种数由治理前的12种增加至治理后的27种，鲤鱼、鲫鱼等经济性鱼类资源逐步恢复；底栖动物的密度由每平方米95个体提升至210个体，种类数增加近一倍。指标物种如银鱼、鲃鱼的回归，显示出河道环境已具备支持高等水生动物繁衍的条件。这些改善不仅恢复了水域食物链的完整性，也为地方渔业经济的可持续发展提供了潜在动力^[6]。渔业资源的恢复还带动了周边社区的经济活动，展示了河道治理的社会价值与生态价值的有机统一。

（三）鸟类与两栖动物的生态效应

河道治理带来的生态修复，不仅体现在水生生物的改善，还体现在河岸带生态系统的重建上。随着湿地恢复与岸线植被修复，大量鸟类和两栖动物重新出现在治理区域。河岸湿地为水鸟

提供了丰富的觅食与栖息环境，例如苍鹭、白鹭和斑嘴鸭等鸟类数量显著增加，在部分治理区域鸟类种类数由20种增长到38种。两栖动物如青蛙、蟾蜍也因水质改善和岸边湿地的扩展而种群恢复，数量密度提升了约60%。这一过程不仅丰富了物种多样性，还修复了水域生态系统的食物链结构：水生昆虫和底栖动物为鸟类与两栖动物提供了稳定食物来源，鸟类的活动则进一步调控了鱼类和昆虫的种群数量，从而形成良性的生态平衡（如图1所示）。更重要的是，鸟类的回归成为公众直观感受到河道生态改善的标志，增强了生态治理工程的社会认同感与生态教育意义。



图1：河道治理前后生物多样性恢复对比示意图

四、河道治理的综合效益与发展趋势

（一）社会与经济效益

河道治理工程不仅改善了自然生态环境，也为社会与经济发展带来了显著效益。首先，水安全保障是最直接的成果。通过河道疏浚、堤防加固与生态护岸，行洪能力明显提升，洪涝灾害发生频率与强度有效降低，从而保障了下游城市和农村的安全。例如，在某省治理后的河段中，百年一遇洪水位较设计水位降低了0.6米，大幅减轻了洪灾风险。其次，治理后的水质改善直接提升了居民生活质量。河道两岸的污水得到控制后，饮用水源地更加稳定，水体恶臭和黑臭现象逐渐消失，居民生活环境显著优化。调查显示，超过80%的居民认为治理后的河道改善了社区宜居度。再次，治理工程带动了旅游与休闲产业的发展。清洁的河水和恢复的滨水景观吸引了大量市民休闲、观光与运动，部分地区还发展了水上旅游和生态农业，形成了新的经济增长点^[7]。由此可见，河道治理不仅是生态修复的工程，更是推动社会稳定和经济发展的重要举措。

（二）工程与生态结合模式

传统河道治理往往偏重“灰色工程”，如筑坝、硬质护岸、

渠道化整治等，虽然能在短期内提升防洪与排涝能力，但对生态系统破坏较大。近年来，治理模式逐渐向“灰色工程”与“绿色工程”融合转变。在这一模式下，工程措施与生态修复相结合，实现功能与环境的双赢。例如，在河岸防护中，采用透水驳岸与生态袋护坡，既能起到防冲刷作用，又能为植被生长和小型生物提供生境。同时，自然基础设施理念逐渐成为核心方向。通过恢复湿地、滩涂和自然河岸，不仅提高了河流的蓄洪和净化能力，还增强了生态系统的适应性与韧性。更为重要的是，河道治理与城市更新逐渐结合，城市在滨水区规划中引入生态绿廊、亲水空间和慢行系统，使河道成为城市公共生活的重要组成部分。这样的模式不仅改善了城市水环境，还提升了城市形象和竞争力，为可持续发展提供了新范式。

（三）未来发展趋势

随着科技进步和治理理念的更新，河道治理的发展趋势日益多元化。首先，智能化与大数据监测将在未来发挥重要作用。通过布设水质监测传感器、遥感影像和无人机巡查，可实时掌握水体污染动态、流量变化和生态恢复情况，实现精准治理与科学决策。其次，河道治理将更加注重与流域综合管理的结合。单一河段的治理难以根本解决生态问题，只有在流域尺度上统筹水资源调度、土地利用和生态保护，才能真正实现系统性修复^[8]。例如，跨区域建立流域管理平台，协调上下游、左右岸和不同利益主体之间的关系，从整体上提升水生态环境质量。最后，多元主体参与机制将成为趋势。政府、企业、科研机构与公众的共同参与，不仅能够拓宽资金来源和管理方式，还能增强治理的社会认同度与公众环保意识。通过建立公众参与的监督机制和企业的社会责任平台，河道治理将更具透明性和持续性。

五、结语

河道治理在保障防洪安全的同时，更在水质改善、生物多样性恢复和生态系统服务提升方面发挥了核心作用。通过物理措施与生物修复的协同应用，水体环境显著优化，植被、鱼类及鸟类种群逐步恢复，生态系统结构趋于稳定。治理模式正由单一工程导向转向生态优先与可持续发展路径，凸显了绿色基础设施的重要价值。未来需加强智能监测与流域统筹，推动多元主体协同参与，为实现人水和谐与区域可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 陈帅. 河道治理工程建设对沿岸农田生态环境的影响评估 [J]. 农业科技创新, 2025, (07): 65-67.
- [2] 韩进军. 生态水利技术在河道治理工程中的应用的探讨 [J]. 价值工程, 2024, 43(35): 142-144.
- [3] 冯宇涛. 河道治理工程中生态护坡的设计与应用探究 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(16): 183-185. DOI: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2023.0202.
- [4] 宋燕琴. 生态水利措施在河道治理工程中的应用初探 [J]. 农业科技与信息, 2019, (03): 47-48+50. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2019.03.018.
- [5] 王孟. 生态水利设计理念在城市河道治理工程中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2018, (12): 159. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.201812135.
- [6] 穆长军. 河道治理工程建设对环境的影响及对策分析 [J]. 水土保持应用技术, 2016, (04): 47-49.
- [7] 尤永良. 河道治理工程建设对生态环境的影响及应对措施研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(11): 147-149. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2023-11-49.
- [8] 王如雪. 汾河祁县段河道治理工程生态环境效益评价 [J]. 山西水利, 2023, (12): 22-24.

智慧水利在水资源管理中的实践与发展路径探讨

程妙真

嵩县水利局, 河南 洛阳 471400

DOI:10.61369/WCEST.2025060002

摘 要： 水资源管理是应对水资源污染，提高水资源利用效率，充分发挥水资源价值的必由之路，智慧水利则在水资源管理中发挥着重要的作用。文章基于此，首先概述了智慧水利的内涵，从水资源动态监测与精准计量、水资源智能调度与优化配置、水质监测与污染溯源、节水潜力分析与智慧灌溉四个方面，探讨了智慧水利在水资源管理中的实践策略，并从技术、应用、政策三个维度对智慧水利的发展做了展望。

关 键 词： 智慧水利；水资源管理；数字技术

Discussion on the Practice and Development Path of Smart Water Conservancy in Water Resources Management

Cheng Miaozen

Song County Water Conservancy Bureau, Luoyang, Henan 471400

Abstract： Water resource management is the inevitable path to address water resource pollution, enhance the efficiency of water resource utilization, and fully leverage the value of water resources. Smart water conservancy plays a significant role in water resource management. Based on this, the article first summarizes the connotation of smart water conservancy, and discusses the practical strategies of smart water conservancy in water resource management from four aspects: dynamic monitoring and precise measurement of water resources, intelligent dispatching and optimal allocation of water resources, water quality monitoring and pollution source tracing, and water-saving potential analysis and smart irrigation. It also makes prospects for the development of smart water conservancy from three dimensions: technology, application and policy.

Keywords： smart water conservancy; water resources management; digital technology

引言

水既是生命的源泉，也是工农业生产的重要资源。根据《中国大百科全书》，水资源管理指“通过法律、经济、行政和技术等综合措施对水资源的开发、利用、配置、保护等进行组织、监督和协调^[1]”。水利事业在水资源管理中，发挥着重要的作用。近年来，随着数字技术的不断发展，水利事业向着数字化、智慧化的方向转型。智慧水利能够打破水资源管理的信息壁垒与经验依赖，构建全周期、全要素的精细化管理体系。因此，要深刻认识到智慧水利的价值，做好智慧水利在水资源管理中的实践与发展。

一、智慧水利概述

智慧水利是数字技术与水利行业深度融合的产物，以数字化赋能、网络化联动、智能化决策为核心逻辑，包括感知层、传输层、数据层、应用层四个层次。感知层为数据源头，通过地面监测网络、空天地一体化监测及移动监测设备，实现数据的全要素、全场景采集。传输层依托通信技术传输数据，确保数据高可靠、低延迟、广覆盖。数据层通过存储、清洗、融合、分析四步流程，构建标准化水资源大数据平台，为数据应用奠定坚实基础。

应用层通过 AI 算法、数字孪生技术、可视化技术开发具体应用模块，提升径流预测、水质识别、水库调度等场景的智能化水平，为管理决策提供直观支持。

二、智慧水利在水资源管理中的实践策略

（一）水资源动态监测与精准计量

动态监测与精准计量是水资源管理的重要方面，智慧水利的发展，则为水资源的动态监测与精准计量提供了良好的外部环境。

境。地表水监测上，在干支流水系及水库，布设高灵敏度的智能监测设备，构建覆盖全流域的监测网络，同时，加强无人机、遥感等新技术的应用，提高数据采集频次与精度，实时掌握河道流量、水库蓄水情况，为水情研判提供数据支撑。地下水监测上，超采问题是地下水管理的难点，全国多个省区存在地下水超采现象。可在超采区域大规模布设监测井，并基于监测数据，采取关停自备水井、推广地表水替代灌溉等差异化的压采方案。生产用水量上，安装智能水表，实时监测用水量变化，并关联生产数据，触发异常预警后及时排查泄漏问题。居民用水量上，以具有远程监测、异常提醒功能的智能水表，取代传统水表，帮助用户及时发现漏水问题，减少水资源浪费。

（二）水资源智能调度与优化配置

水资源智能调度与优化配置是智慧水利的核心应用方向。针对水资源分布不均问题，整合水库、河道、地下水、再生水等多水源数据，构建供需耗排平衡模型，通过优化算法求解最优调度方案，最小化缺水率并最大化利用效率。跨区域调度中，以数字孪生技术模拟输水过程，为水利工程提供支撑，保障水资源稳定供应。应急调度中，结合旱涝防控的需要，构建数据驱动的智慧化应急调度机制。面对干旱时，通过监测数据掌握降雨量、水库蓄水量、作物受旱面积等信息，利用数字孪生模型模拟不同调度方案效果，选择最优策略缓解旱情。遭遇洪涝时，基于降雨数据与水文模型预测水位变化，通过仿真确定合理泄洪流量，联动水库与下游城市开展防控，减少经济损失。

（三）水质监测与污染溯源

随着社会经济的不断发展，我国水污染现象日益严重，并对社会经济的可持续发展形成了极大的制约。需发挥好智慧水利在水质监测与污染溯源中的作用，为水生态安全提供保障。首先，构建实时水质预警机制。在入湖河口、湖心区等关键点位布设水质传感器，高频采集 pH 值、溶解氧、氨氮等指标，结合 AI 模型识别异常数据并触发预警。建立快速响应机制，缩短水质异常处置时间，减少蓝藻爆发等生态风险。其次，推进污染溯源追踪。污染溯源追踪是水质治理与水生态保护的关键。需依托水文数据、地形数据与周边污染源信息，采用算法构建污染扩散模型，计算各污染源贡献度与概率，精准定位主要污染源。相比传统排查方式，基于智慧水利的污染溯源追踪，大幅缩短时间、提升准确率，为违法排污查处与水体治理提供了依据。

（四）节水潜力分析与智慧灌溉

我国为水资源贫乏国，智慧水利在节水潜力分析、智慧灌溉中的应用，能够提高水资源利用效率，有效缓解水资源短缺的问题。从节水潜力分析的角度而言，以往，工业领域的节水，以被动节水为主，效果欠佳。智慧水利能推动工业领域节水从被动节水向主动节水转变，提高节水效果。在生产线各节点，安装智能设备，全面采集各环节用水数据，依托 AI 算法，识别用水效率不匹配问题，计算节水潜力，并通过优化冷却系统、修复漏水点、推动废水回用等方式，实施技术改造，实现大幅节水，降低用水成本。从智慧灌溉的角度而言，农业为用水大户，根据水利部发布的《2024 年中国水资源公报》，2024 年，农业用水 3648.4 亿立

方米，占全国用水总量的 61.6%^[2]。可在农田布设墒情传感器、小型气象站，利用无人机遥感获取作物生长状况，基于 AI 模型，在数据融合的基础上，测算作物需水量，通过智能灌溉控制器实现按需供水。如此，既能提高灌溉用水效率，也能促进作物生产，一举两得。

三、智慧水利在水资源管理中的发展路径

（一）突破技术瓶颈，夯实发展基础

数字技术是智慧水利的核心，也是智慧水利在水资源管理中的关键支撑。针对技术层面的问题，应从多源数据融合、AI 算法优化、数字孪生模型构建等方面，采取措施，突破技术瓶颈，夯实发展基础。

首先，以多源数据融合破解数据孤岛问题。针对不同部门数据标准不统一导致共享困难，制定覆盖数据元、格式、传输协议、精度要求的统一规范，实现跨部门数据通采、通存、通用。构建国家级智慧水利数据共享中心，接入各省份水利数据并打通气象、农业、环保等部门数据接口，实现一次申请、全网共享。强化数据安全保障，采用分级保护与加密传输机制，对敏感数据脱敏处理，利用区块链技术实现数据溯源，定期开展网络安全演练，防范数据篡改与攻击风险。

其次，优化 AI 算法。水资源管理系统具有非线性、强耦合、不确定性等特征，对算法的鲁棒性有很高的要求。应从提升复杂场景适应性的角度出发，开发基于强化学习的自适应调度算法，将管理问题转化为智能体与环境的交互过程，通过不断尝试优化策略。结合不同算法优势构建多模型融合预测体系，提升径流、水质等预测精度。对 AI 算法进行轻量化改造，减少参数与计算步骤，使其可在边缘设备运行，解决基层水利部门算力不足问题，实现本地化预测与快速响应。

最后，提高数字孪生技术应用水平。数字孪生技术能综合利用物理模型、传感器数据、历史运行数据等，对物理实体进行多物理量、多尺度、多概率的仿真，在虚拟空间中生成实体的孪生体，是当前智慧水利的关键技术^[3]。需全面整合高精度地形、水文水力、工程设施数据，构建物理→数字→孪生实时交互系统，实现监测数据与数字孪生体的实时同步。拓展仿真场景至工程规划、风险评估、应急演练等领域，在工程建设前模拟不同方案的效益与成本，评估突发事件影响范围，开展防洪等应急演练提升处置能力。依托东数西算工程在水利枢纽附近建设算力中心，配备高性能计算设备，满足海量数据处理与实时仿真需求。

（二）深化场景落地，释放技术价值

水资源管理是一项系统性工程，当前，智慧水利已被广泛应用于动态监测、智能调度、水质治理、节水优化等多个领域，并取得了良好的效果。应从城乡供水一体化、生态流量保障两个方面，进一步拓展智慧水利的应用场景，充分释放技术价值。

城乡供水一体化方面，农村饮水安全是重要的民生问题，应推动智慧水利向供水末端延伸，在农村集中式饮用水源地布设监测设备，实时掌握水量与水质，确保符合生活饮用水卫生标准，

水位或水质异常时自动切换备用水源。对农村小型水厂进行智能化改造,安装智能加药设备、浊度监测仪与管网压力传感器,实现无人值守与远程控制,提升出水合格率并降低运营成本。在供水管网布设流量、压力传感器监测漏损,为居民安装智能水表支持便捷缴费与用水查询,通过数据分析推送设备故障提醒,保障农村居民用水安全。

生态流量保障方面,生态流量是维持河流生态功能的基础,水利部等部门2025年6月印发的《河湖生态流量管理办法(试行)》要求从生态流量保障实施方案制定、水资源调度管理、水利工程泄放管理、泄放设施建设和改造、取水管理等方面,加强生态流量保障^[4]。需将生态流量保障作为智慧水利应用的重要场景,在河流重要断面布设流量传感器,结合卫星遥感监测河道水面面积,验证生态流量保障效果。建立水库、河道生态流量联动调度机制,监测到断面流量低于最小生态流量时,自动向上游水库发送下泄指令调整流量。构建生态流量效益评估模型,从水质、生物、植被三个维度评估保障效果,形成年度报告,为生态流量标准调整提供科学依据,促进河流生态系统修复。

(三) 健全保障机制,强化支撑能力

大力发展智慧水利,是新时期提升水资源管理水平的必然要求。需从标准体系建设、跨部门协同、复合人才培养三个方面,健全保障机制,强化智慧水利发展的支撑能力。

首先,推进标准体系建设。标准体系具有规范智慧水利发展方向的作用。针对当前相关标准碎片化、滞后性的问题,应按技术环节与应用场景分类制定标准,覆盖感知层、传输层、数据层、应用层技术要求,以及农业智慧灌溉、工业智慧用水、城乡智慧供水等场景规范,形成横向到边、纵向到底的全产业链标准

体系。同时,通过试点示范总结可复制经验,定期组织标准培训解读内容与实施要求,推动标准落地,并建立动态更新机制,根据技术发展与实践需求每三年修订标准,确保先进性与适用性。

其次,构建跨部门协同机制。水资源管理涉及水利、气象、农业、环保、应急等多个部门。行政壁垒的存在对水资源管理以及智慧水利发展形成了阻碍。应成立由水利部门牵头、其他部门参与的智慧水利协同工作领导小组,定期召开协调会议解决数据共享、调度联动问题。制定突发事件联动处置流程,明确各部门在水质污染、干旱等事件中的职责,最大限度减少推诿扯皮的现象。将跨部门协同工作纳入绩效考核,对表现优秀的部门表彰,对拖延推诿的通报批评,确保协同机制有效运行。

最后,培养高素质复合型人才。智慧水利深刻改变了水资源管理的方式,并对从业人员的专业能力、综合素质提出了更高的要求。应推动高校开设智慧水利交叉学科专业,依托校企合作建立实训基地,提升学生实践能力,培养兼有水利工程、数字技术素养的复合型人才。针对水利工作人员,开展线上线下结合的技术培训,覆盖传感器操作、平台使用、AI 算法基础等内容,提升技能水平。制定人才引进计划,对高层次人才给予安家补贴与科研经费支持,吸引人才投身智慧水利领域,缓解人才缺口。

四、结语

在全球气候变化加剧、水资源供需矛盾日益突出的背景下,传统水利管理模式已难以应对复杂的水安全挑战。智慧水利的发展为数字源管理提供了新的思路,应加强智慧水利在水资源管理中的应用,并从技术、应用、政策三个维度,推动智慧水利发展。

参考文献

- [1] 中国大百科全书出版社总编委会. 中国大百科全书 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2009: 1447.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2024 年中国水资源公报 [EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202506/t20250610_1732735.html.
- [3] 程丹丹, 钮月磊, 刘创. 基于数字孪生的智慧水利系统的设计与应用 [J]. 现代信息科技, 2025 (02): 105-109.
- [4] 水利部等六部门印发实施《河湖生态流量管理办法(试行)》 [EB/OL]. http://zfs.mwr.gov.cn/szjc/202507/t20250704_1971795.html.

伊通县伊通河范家闸河段水系连通建设研究

于乾贤¹, 白忠亮¹, 陈春坤²

1. 吉林省水利科学研究院, 吉林 长春 130022

2. 长春工程学院水利工程学院, 吉林 长春 130012

DOI:10.61369/WCEST.2025060003

摘 要： 伊通满族自治县地处伊通河上游流域，为了做好伊通河重点流域水污染治理工作，提升河道水生态系统，启动了伊通河水环境综合治理工程。文章系统阐述了水系连通及水美乡村背景下伊通河上游流域范家闸河段存在的水质问题，分析了治理目标，并结合治理理念提出具体的工程措施，为同类工程提供参考与借鉴，对促进北方寒区水系连通工程的深入研究与广泛实践具有重要意义和应用价值，对推动乡村全面振兴，具有积极且良好的作用。

关 键 词： 伊通满族自治县；水系连通；人工湿地；措施

Study on Water System Connectivity Construction of Yitong River Fanjia Lock Section in Yitong Manchu Autonomous County

Yu Qianxian¹, Bai Zhongliang¹, Chen Chunkun²

1. Jilin Provincial Institute of Water Resources Science, Changchun, Jilin 130022

2. School of Hydraulic Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130022

Abstract： Situated in the upper reaches of the Yitong River basin, Yitong Manchu Autonomous County has launched the Yitong River Water Environment Comprehensive Management Project to address water pollution and enhance the river's aquatic ecosystem. This study systematically examines water quality issues in the Fanjia Lock section of the upper basin under the framework of water system connectivity and water-beautiful rural development. By analyzing governance objectives and proposing targeted engineering solutions, the research provides practical references for similar projects. The initiative holds significant academic and practical value for advancing water system connectivity studies in northern cold regions, while contributing to rural revitalization efforts.

Keywords： Yitong Manchu Autonomous County; water system connectivity; artificial wetland; measures

引言

水美乡村建设是当前美丽乡村建设和乡村振兴战略中的重要一环，其核心是通过系统治理乡村水系，改善水生态环境，进而带动整个乡村面貌的提升和产业发展。2025年初，国家生态环境部等九部门联合印发的《美丽乡村建设实施方案》，为乡村水环境治理设定了硬指标：要求梯次推进农村生活污水治理，并基本消除农村黑臭水体和较大面积劣V类水体。这意味着未来乡村的河流不仅要干净，还要逐步恢复生态功能，重拾“河里游泳、溪里捉鱼”的景象。

加强农村水系综合整治、推进水美乡村建设，是支撑乡村振兴战略实施、推动水利高质量发展的重要抓手和有效路径。近年来，水系连通与水美乡村建设试点工作受到广泛关注，在国内已开展了大量相关研究，系统总结了工程建设中的实践经验，并提出了具有针对性和创新性的思路与方案。黄华丹^[1]将宾阳县石狗江试点以“一廊一环四节点”为工程总体布局，实现河、塘、渠水系连通，进一步改善沿河农村居住环境。黄庆泽^[2]结合水利部数字孪生水利工程建设技术导则相关理念，构建永春县数字孪生智慧水利平台，为解决河流问题研判处理提供科学的数据支撑。尹振叶^[3]结合研究区域中的建设方案和功能价值进行探索，探索出一条水系连通综合治理助推乡村振兴的发展之路，为乡村河道的综合整治提供实践经验。杨志成^[4]对水系连通及水美乡村建设试点的经验进行总结，并对水美乡村建设中存在的问题进行逐一分析，旨在更好地完善水美乡村建设体系。

本文总结了伊通满族自治县伊通湿地水系连通建设试点的实践经验 and 治理思路，提出了适用于东北寒区水系连通工程的具体建设方案，对于促进推动改善河湖水环境及河道生态环境建设，进一步做好实现乡村振兴、促进生态文明建设具有一定借鉴意义。

项目信息： 本论文内容为吉林省水利科学研究院基本科研经费—寒区水美乡村季节性河流水系连通及生态修复技术研究（JLSKY-JBKYJF-2024-05）的研究成果。

作者简介：

于乾贤（1980—），男，汉族，辽宁庄河人，大学本科，高级工程师，主要研究方向：河道治理工程、水工结构工程等。

白忠亮（1986—），男，汉族，吉林长岭人，在职研究生，工程师，主要研究方向：农田水利工程、水工结构工程等。

陈春坤（2001—），男，汉族，福建大田人，硕士研究生，学生。

一、项目区概况

伊通河是松花江流域饮马河水系左岸支流，发源于哈达岭山脉吉林省伊通满族自治县东南部河源镇的大青顶子山西北侧，流经磐石、伊通、长春、德惠、农安五县市，于农安县靠山屯东汇入饮马河后注入松花江。河流全长342.5km，流域集水面积8440km²，位于伊通满族自治县境内河道长度75.029km，流域集水面积1080 km²。

本工程项目区域位于伊通满族自治县伊通河城区重点段三期（九开大桥——范家拦河闸）左岸滩地。其中范家拦河闸控制流域面积621km²，后小桥子河口以上控制流域面积597km²。项目用地现阶段为闲置状态，基本为空旷平整状态。

二、存在问题

“十三五”以来，为了做好伊通河重点流域水污染治理工作，提升河道水生态系统，伊通满族自治县启动了伊通河城区段三期治理工程，部分已建工程已逐步发挥作用，但城区污水尾水始终没能得到深度处理。伊通满族自治县三达污水处理厂厂区具体位于伊通满族自治县九开道路北，在伊通河重点段（三期）工程左岸堤防桩号 ZD43+856 位置堤防保护区内。根据2019年4月伊通河水质排查监测结果来看，建国大桥断面水质达地表水Ⅳ类，但到范家拦河闸位置水质已到劣 V 类标准，同时期污水处理厂出口监测数据可以看出，污水处理厂出水即属劣 V 类水质。同时依据2018年污水处理厂出口全年水质监测结果也可看出，氨氮值偏高多发生于2~5月枯水期。可见污水处理厂出水对伊通河水质影响很大且多发生于枯水期，且严重影响下游星光断面水质情况，因此对污水处理厂出水进行水质改善治理是必要的也是迫切的。

三、治理目标

《伊通满族自治县政府工作报告》明确指出：以生态文明建设为核心，绿色发展为方向，环境治理为依托，着力打造生态伊通。针对现状存在的污水尾水水质问题，利用人工湿地—稳定塘组合工艺处理伊通满族自治县三达污水处理厂尾水，改善污水出水水质，进而改善伊通河水质；以菖蒲为主要植物元素构建兼具水处理、生态、景观、休闲功能的人工湿地。具体建设治理清单见表1。

通过生态湿地的建设，在不破坏原有自然基底的基础上，对现有自然资源进行保护与修复，保留湿地滩涂，并合理分区利用，设计在伊通河自然淹没区内建立滩涂湿地生态带，作为水系连通的廊道。

湿地工程建成后，污水经过处理后可以减少每年进入伊通河的污染物总量，对于保护范家生态湖和周边水域的水环境质量起着重要的保护作用。尾水深度处理工程建设实施后对减轻下游新立城水库水质问题，对下游星光断面水质情况的改善起到明显的积极作用，对改善人民生活质量具有重要意义。

表1 伊通满族自治县伊通河左岸湿地水系连通工程建设治理清单

	部位	内容	规模	措施
湿地水域及建筑物工程	人工湿地	表面流湿地、水生植物塘	165121m ²	污水处理厂尾水依次经过11级表流湿地床及一级水生植物稳定塘、最后进入伊通河。水均利用势能形成自流。
湿地管理道路工程	河漫滩	园路、木栈道	24102m ²	采用透水砖、仿石砖、栈桥等。
滩地绿地工程	河漫滩	湿地绿地修复	331026m ²	栽植灌草带。
管理设施工程	河漫滩	管理房等	874 m ²	配套湿地管理房、厕所等。
铺装场地用地	河漫滩	场地硬化等	28843 m ²	修建小型作业场地等。
其他用地	河漫滩	现有排水沟、清淤路等	50874 m ²	

四、治理理念与相应措施

（一）治理理念

1. 环保至上，生态为先

处理污水处理厂尾水、保护周边地表水体是设计人工湿地的首要功能，湿地的建立必须遵守生态性原则。污水处理与生态构建相辅相成，前者为后者的稳定提供保障，而置于整体生态背景下的水处理工艺，不仅运行更加稳定高效，也摆脱了传统污水处理模式的刻板与单调。

2. 水力自流，立体湿地

湿地系统巧妙依托地形高程差实现水力自流，无需外加动力驱动；水流自上而下逐级跌落，不仅高效完成水质净化，更营造出层次分明、动静相宜的立体景观。这种“可感可触、可观可赏”的立体湿地，既体现了生态工程的自然智慧，又呈现出人与自然和谐共生的美学意境。

3. 协调配置，形神兼备

将菖蒲作为人工湿地的首要植物元素，同时引进多种具有净水、景观作用的其他植物，利用不同植物的株高、色彩、形状的差异和“点”“线”“面”结合的种植形式对植物进行优化配置。植物、水流等要素将陆地和水域有机串联起来，水陆相依的自然表现形式使得整个系统显得宽广、流畅。

4. 寓教于乐，人文乐园

静立于菖蒲掩映的栈道之上，漫步于潺潺流水间的汀步之中，人们不仅能深切感受到浓郁的自然气息与蓬勃的生态韵律，更易在静谧与流动之间，生发出内心的和谐安宁与豁然开朗的胸襟。此外，该湿地园的设计充分彰显环保与生态理念，不仅是一处生态修复的实践典范，更具有显著的环境教育与公众宣传价值。

（二）具体措施

1. 人工湿地—稳定塘建设

对伊通满族自治县伊通河城区重点段三期左岸闲置空旷滩

地，采用挖池建库的方式修建12级表面流人工湿地，自上向下分别布设湿地植物、表层土层、填泥层、砾石层、素土强夯五层。利用人工湿地—稳定塘组合工艺处理污水处理厂尾水，利用深度处理稳定塘接纳人工湿地的出水，能够更加有效地发挥其脱氮除磷的作用，进一步提升水体质量。

2. 引水工程

在伊通满族自治县三达污水处理厂厂房区域，于出口处砖砌检修井，出口涵管接入复合引水管至新建综合控制阀井内，一支接湿地，一支接暗管直排入伊通河。人工湿地正常运行时关闭伊通河暗管阀门，尾水经过多个串联人工湿地多级处理后，出水引导进入稳定塘，在稳定塘中停留一定时间后最终排入伊通河，实现生态系统良性循环。

3. 岸坡工程

当下，生态型护坡已经成为河道整治工程中护岸设计的重要理念，要求河道护岸不仅要具有良好的防洪功能，保证城区安全度汛，还需要有良好的生态景观功能^[6]。因此结合现状地形及周边环境，湿地池塘护岸结构采用拟自然生态护岸。在满足冲刷要求的前提下，主要采用挺水植物、浮叶植物等方式护岸，增加植物群落的多层次。由于工程位于河滩地上，为防止洪水破坏，本工程对水池四周岸坡根据距离主河槽远近不同情况采用不同的护砌形式，距离河岸较近侧采用抗冲能力较强的护砌形式：雷诺护

垫上敷土种植湿生植物。

4. 生态景观工程

本项目以自然式种植为主导，充分依托现有生态环境与自然植物群落，在确保泄洪防洪安全的前提下，遵循“适地适树”原则，科学合理地丰富植物种类，着力打造“三季有花、四季有景、季相分明、层次丰富”的滨水生态景观。各景观区域通过差异化植物配置，凸显各自独特的植物景观特色，同时兼具公共游憩、生态展示与休闲娱乐功能，不仅吸引游客驻足观赏，也为周边居民提供了一处亲近自然、放松身心的理想场所。

五、结语

本文探讨了水系连通及水美乡村背景下伊通满族自治县伊通河重点段三期左岸湿地水系连通工程项目通过采用人工湿地—稳定塘组合工艺，对三达污水处理厂尾水进行深度处理，有效改善出水水质，显著提升河湖水环境质量，助力打造“河畅、水清、岸绿、景美”的水美乡村，兼具显著的社会效益、生态效益和经济效益。该实施方案能够为同类工程作为参考，对促进北方寒区水系连通工程的深入研究与广泛实践具有重要意义和应用价值，对推动乡村全面振兴，具有积极且良好的作用。

参考文献

- [1] 黄华丹. 宾阳县石狗江水美乡村试点工程水系连通方案分析 [J]. 广西水利水电, 2024, (6): 74–76.
- [2] 黄庆泽. 永春县水系连通及水美乡村建设实践探索 [J]. 水利科技, 2024, (03): 6–8, 14.
- [3] 尹振叶. 金堤河流域水系连通综合治理助推乡村振兴的路径探究 [J]. 智慧农业导刊, 2025, (03): 103–106.
- [4] 杨志成. 水美乡村建设中水系连通治理的实践 [J]. 水上安全, 2024, (01): 76–78.
- [5] 李郑森, 王爽, 孙正天. 北方寒冷地区农村水系综合整治思路及要点 [J]. 水利改革, 2024, (10): 19–20, 24.

基于数字孪生的水电站智能状态评估与故障预警系统研究

南江涛

西藏大唐扎拉水电开发有限公司，西藏 山南 851299

DOI:10.61369/WCEST.2025060004

摘 要： 随着水电站规模与运行复杂度的提高，传统监测与维护模式已难以满足高效、安全运行的需求。本文提出基于数字孪生技术的水电站智能状态评估与故障预警系统。通过构建虚实融合的数字孪生模型，实现设备运行数据的实时感知、状态评估与预测性维护。系统结合大数据分析、人工智能与物理建模技术，对关键设备进行智能诊断与寿命预测。研究表明，该系统可显著提高水电站运行的可靠性与智能化水平，为数字化水电建设提供技术支撑。

关 键 词： 数字孪生；水电站；状态评估；故障预警；智能运维

Research on Intelligent Condition Assessment and Fault Early Warning System for Hydropower Stations Based on Digital Twin

Nan Jiangtao

Tibet Datang Zhala Hydropower Development Co., Ltd., Shannan, Tibet 851299

Abstract： With the increasing scale and operational complexity of hydropower stations, traditional monitoring and maintenance models have struggled to meet the demands for efficient and safe operation. This paper proposes an intelligent condition assessment and fault early warning system for hydropower stations based on digital twin technology. By constructing a digital twin model that integrates virtual and real elements, the system enables real-time perception of equipment operation data, condition assessment, and predictive maintenance. Combining big data analytics, artificial intelligence, and physical modeling techniques, the system performs intelligent diagnostics and lifespan predictions for key equipment. The research results indicate that this system can significantly enhance the reliability and intelligence level of hydropower station operations, providing technical support for the digital construction of hydropower.

Keywords： digital twin; hydropower station; condition assessment; fault early warning; intelligent operation and maintenance

引言

近年来，数字孪生技术在工业领域的应用迅速发展，为复杂系统的智能管理提供了新思路。水电站作为能源系统的重要组成部分，其设备数量多、工况复杂，迫切需要智能化管理手段。本文从数字孪生的视角出发，研究水电站智能状态评估与故障预警系统的关键技术与实现路径，旨在提升水电站的安全性、经济性和运维效率。

一、数字孪生技术概述与理论基础

（一）数字孪生的概念与发展历程

数字孪生（Digital Twin）是指在虚拟空间中构建与现实物理实体相对应的数字模型，通过实时数据交互实现虚实映射与同步演化的技术体系。该概念由美国密歇根大学教授 Grieves 于 2003 年提出，并首次应用于 NASA 航天器健康管理。随着物联网、人工智能与大数据的发展，数字孪生已成为智能制造与智慧能源的

重要支撑技术。在制造领域用于设计、监控与全生命周期管理，在能源领域广泛应用于电网、风电及水电站的智能监测与优化控制。其发展正由单体孪生向系统级、群体级演进，并与云计算和边缘计算融合，推动能源行业数字化与智能化转型。

（二）数字孪生的关键组成与实现机制

数字孪生系统主要由物理实体、虚拟模型、数据交互与服务平台四个核心部分构成。物理实体是现实中可感知、可测量的对象，如设备、系统或环境；虚拟模型则是基于物理实体特征建立

的高精度数字化映射模型，通过数学建模、有限元分析和数据驱动算法相结合，形成可实时仿真的数字副本。数据交互层是虚实连接的关键环节，通过传感器网络、工业互联网和边缘计算技术，实现数据的高频采集、传输与动态更新；服务平台则承担着模型运算、数据存储、状态分析与可视化展示等功能，为系统的智能运维与决策支持提供基础。实现机制上，数字孪生依托于实时数据驱动模型更新，通过反馈与预测形成闭环控制，使虚拟模型能够动态反映物理实体的运行状态，并通过智能算法实现预测性分析与自适应优化，从而达到虚实同步、智能决策的目标。

（三）数字孪生在水电站中的应用价值

在水电站领域，数字孪生技术的引入为设备状态监测与运行优化带来了革命性变化。通过构建水轮机、发电机组及辅助系统的数字孪生体，可实现对关键设备的多维度实时监控与健康评估，及时发现潜在故障风险。基于孪生模型的仿真分析，可在虚拟环境中预测不同工况下设备的性能变化与能量损耗，从而优化运行调度方案，提升水电站的能效与安全性。同时，数字孪生结合人工智能算法，可实现设备的寿命预测与智能维护，减少非计划停机时间。其在水电站群的远程集中监控与协同调度中也展现出显著优势，为实现智慧水电与绿色能源管理提供技术支撑。

二、水电站智能状态评估模型构建

（一）系统结构与功能设计

水电站智能状态评估系统的总体架构通常由数据采集层、模型层与应用层三部分构成，形成一个从信息感知到智能决策的闭环体系。数据采集层是系统的基础部分，主要负责实时收集设备运行状态、环境参数和监测信号，包括水轮机振动、温度、压力、电气参数等信息。该层通过传感器网络、工业物联网及SCADA系统实现多源数据的高频采集与传输，为上层分析提供丰富的数据支撑。模型层是系统的核心，承担数据建模、状态分析与健康评估等功能。通过构建设备的物理模型与数据驱动模型，实现虚实融合的运行状态映射。该层利用大数据分析、人工智能与数字孪生技术对采集数据进行动态仿真与特征建模，实时评估设备健康状态。

（二）运行数据融合与特征提取方法

在水电站复杂的运行环境中，多源异构数据的融合是实现精准状态评估的关键。数据主要来源于传感器网络、SCADA系统、历史运行记录以及设备维护日志等，不同来源的数据在采样频率、格式及精度上存在显著差异。为此，系统采用数据清洗、时间同步与统一编码技术，确保多源信息的一致性与可比性。融合过程中引入特征工程思想，对关键运行参数进行统计分析并降维处理，通过主成分分析（PCA）、小波变换及相关性分析等方法提取代表设备运行状态的核心特征。针对复杂设备的动态特性，还可利用深度学习中的自编码器或卷积神经网络对高维时序数据进行特征自动提取与模式识别。

（三）状态评估算法与指标体系

水电站智能状态评估的核心在于建立科学的评估模型与指标

体系，以量化方式反映设备的健康水平。首先，在指标体系设计上，应根据设备类型与运行特征设置多维评估指标，包括机械性能、电气稳定性、热特征、振动信号、能效指标等，形成分层分权的综合评价体系。算法层面上，常采用模糊综合评估法实现多因素的综合分析，通过隶属度函数与权重矩阵计算设备的健康等级。其次，引入机器学习方法如支持向量机（SVM）、随机森林、梯度提升树等，对历史数据进行训练，实现对设备异常趋势的预测与识别。针对大规模数据环境，可利用深度神经网络（DNN）与长短期记忆网络（LSTM）建立动态评估模型，从而对复杂非线性关系进行自学习与优化。

三、故障预警机制与实现技术

（一）故障数据建模与模式识别

水电站设备运行过程中，故障往往以隐蔽、渐变的形式出现，因此建立精准的故障数据建模与模式识别机制至关重要。故障数据建模以时序监测数据为核心，通过对振动、温度、电流、电压、流量等参数的动态采集与分析，构建设备运行状态的多维数据特征空间。为了捕捉故障早期征兆，系统利用滑动窗口法对时间序列进行分段建模，并通过差分分析、趋势拟合与频谱分析识别异常变化。异常检测算法在该过程中发挥关键作用，常用方法包括统计阈值检测、孤立森林（Isolation Forest）、主成分分析（PCA）降维异常识别以及基于重构误差的自编码器检测等。这些算法能够有效区分正常波动与异常行为，从而识别潜在故障模式。

（二）预警模型的训练与优化

故障预警模型的核心在于利用机器学习与深度学习方法，从大量历史数据中挖掘故障发生的规律与演变趋势。首先在模型训练阶段，需对历史故障样本进行标注与平衡处理，避免类别不平衡导致模型偏差。传统算法如支持向量机（SVM）和随机森林在小样本场景下表现稳定，而在大规模数据环境中，深度学习方法如卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）表现出更强的时序特征捕捉能力。LSTM尤其适用于处理非线性、长周期的运行信号，可通过记忆门结构提取故障演化特征，实现对未来状态的趋势预测。同时，贝叶斯推理方法可在模型中引入不确定性评估，对预测结果进行置信度量化，从而提升预警决策的可靠性。模型优化过程中可采用交叉验证、超参数调优与特征选择等技术手段，确保模型在不同运行工况下的泛化能力。

（三）预警系统的可视化与决策支持

预警系统的最终目标是将复杂的分析结果以直观、可操作的方式呈现给运维人员，从而辅助科学决策。系统可视化平台通过集成三维数字孪生模型、数据面板与告警中心，实现对设备运行状态、健康趋势与故障风险的动态展示。预警结果通过颜色标识、风险等级图与趋势曲线的方式呈现，使运维人员能够迅速识别异常部位及风险程度。同时，系统提供多层次的决策支持功能，包括自动生成预警报告、智能推荐维护策略与基于历史案例的知识推理。通过融合专家规则与机器学习预测结果，系统可实现多源信息的综合判断，形成智能化辅助决策机制。在应急响应

方面，平台可通过移动终端或控制中心实时推送告警信息，并结合地理信息系统（GIS）定位故障设备，指导维护人员快速处置。该可视化与决策支持体系不仅提高了预警响应效率，还为水电站实现智能化、可视化和协同化管理提供了有力保障。

四、系统开发与工程应用验证

（一）数字孪生系统平台架构设计

数字孪生水电站系统平台的整体架构以“感知—孪生—决策—优化”的逻辑构建，融合硬件、软件与数据交互三大体系。硬件部署方面，系统主要由多类型传感器、工业控制终端、边缘计算节点及高性能服务器组成。传感器布设于关键设备与运行环境中，实现对振动、温度、流量、压力、电能质量等信息的实时采集；边缘计算节点承担数据预处理、过滤与初步分析任务，减轻中心服务器的计算压力。软件模块层包括数据管理模块、模型仿真模块、状态评估模块、预警分析模块与可视化展示模块。数据管理模块负责数据清洗、同步与存储；模型仿真模块构建基于物理规律与数据驱动的混合孪生模型；状态评估与预警模块实现设备健康评估与风险预测；可视化模块通过三维建模与动态图表，实现设备运行状态的实时展示。数据交互方面，系统利用工业物联网（IIoT）与云平台技术建立多层通信机制，采用 MQTT 与 OPC-UA 等标准协议，确保信息传输的高可靠性与低延迟。平台还通过 API 接口与调度系统、SCADA 平台进行数据互联，实现虚实融合与智能闭环控制，为水电站提供全面、实时的运维支撑。

（二）工程案例与应用效果分析

以西南地区某大型水电站为工程案例，系统在机组监测、运行优化与故障预警方面取得显著成效。在部署过程中，通过对主机设备、进水口闸门、冷却系统及电气控制设备的全面传感监测，构建了完整的数字孪生体，实现了物理实体与虚拟模型的双向映射。系统通过实时数据流监控，实现设备健康状态可视化与异常自动识别。当监测到机组振动幅值异常上升时，系统通过预警模型及时识别出轴承磨损趋势，并提前 15 小时发出维护警报，

避免了一次可能的停机事故。在运行优化方面，系统根据历史运行数据与仿真结果，动态调整水轮机导叶开度与负荷分配，使发电效率提升约 3.7%。此外，平台的可视化监控界面极大提高了运维人员的工作效率，实现了从人工巡检到智能巡检的转变。通过对应用效果的分析，该系统在故障预测准确率、设备利用率与维护成本控制等方面均表现优异，验证了数字孪生技术在水电领域的工程可行性与经济效益。

（三）技术挑战与未来发展方向

尽管数字孪生技术在水电站智能化建设中取得了显著进展，但仍面临若干技术挑战。首先，数据安全与隐私保护问题亟需解决，海量运行数据的实时传输与云端存储容易遭受网络攻击与信息泄露风险，需要通过加密通信、访问控制与多重身份验证来保障系统安全。其次，模型泛化与自适应能力不足是当前数字孪生在复杂工况下应用的瓶颈。由于水电站工况变化频繁，不同流域、不同机型的特征差异较大，现有模型往往缺乏跨场景迁移能力。未来可通过引入联邦学习与自进化模型技术，实现模型在不同站点间的协同优化与知识共享。此外，系统的实时性与计算效率仍需提升，如何在保证高精度的同时实现低延迟计算，是数字孪生落地的关键。展望未来，数字孪生将与人工智能、大数据分析 & 边缘计算深度融合，构建多层协同的智能水电体系，实现从单站管理向流域级智慧调度的跨越，为清洁能源的高效、安全与可持续运行提供核心动力。

五、结语

本文围绕基于数字孪生的水电站智能状态评估与故障预警系统展开研究，构建了集数据采集、模型仿真、智能分析与决策支持于一体的综合体系。研究结果表明，数字孪生技术能够有效提升水电站设备运行的可视化、智能化与安全性，实现从被动维护向主动预测的转变。通过工程应用验证，该系统在运行优化与风险防控方面展现出显著优势。未来，将进一步加强模型自适应学习与多站点协同优化，推动智能水电的持续发展与实践落地。

参考文献

- [1] 肖楚生. 水电站机电设备智能运维系统的关键技术与应用展望 [J]. 小水电, 2025, (04): 64-69. DOI: CNKI: SUN: XSDI.0.2025-04-016.
- [2] 刘钰琦, 王瑞清, 肖权, 等. 水电站调速器数字孪生系统建设探索与研究 [J]. 水电站机电技术, 2025, 48(03): 30-36+135. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2025.03.008.
- [3] 孙雨欣. 水电机组状态预警与健康评估研究及其数字孪生运维系统设计 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001983.
- [4] 杨洋. 面向数字孪生的水电站调速系统状态评估关键技术研究 [D]. 三峡大学, 2024. DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2024.000470.
- [5] 李井林. 基于 BIM 的曲线梁桥参数化建模及智能运维应用研究 [D]. 西华大学, 2024. DOI: 10.27411/d.cnki.gscgc.2024.000886.
- [6] 王栋. 空天地感知数据驱动下高拱坝混凝土智能振捣研究 [D]. 天津大学, 2022. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.004266.
- [7] 陈曦, 曹波. 数字技术在水库大坝智能设计中的应用 [C]// 中国大坝工程学会, 巴西大坝委员会, 西班牙大坝委员会, 美国大坝委员会. 建造安全韧性绿色的国家水网之“结”. 长江水利水电开发集团 (湖北) 有限公司; , 2024: 119-123. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.030885.
- [8] 唐一中. 水电机组状态识别与故障诊断研究及其数字孪生运维平台开发 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001913.
- [9] 刘雷. 面向数字孪生的水轮发电机转子故障诊断模型研究 [D]. 三峡大学, 2024. DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2024.000587.
- [10] 余栋. 基于多源信息融合的水电机组智慧运维研究 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.000542.

基于 BIM 的水利工程施工管理与进度控制研究

王成

江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223005

DOI:10.61369/WCEST.2025060005

摘 要 : BIM技术在水利工程施工管理中发挥着重要作用,尤其在进度控制方面,能够有效提升项目管理的精确度和效率。通过将BIM与施工进度计划结合,能够实现施工全过程的动态监控与优化调度。利用BIM的三维可视化和数据集成能力,施工进度的各项参数可以实时获取并进行调整,从而避免进度滞后和资源浪费。基于BIM的进度控制方法不仅加强了项目各方的协同合作,还提高了施工的可视化与可控性,促进了工程按时、按质完成。该技术的应用,不仅优化了水利工程的施工管理流程,还为类似工程项目提供了宝贵的管理经验与技术支持。

关 键 词 : BIM技术; 水利工程; 施工管理; 进度控制; 可视化管理

Research on Construction Management and Schedule Control of Water Conservancy Projects Based on BIM

Wang Cheng

Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223005

Abstract : BIM technology plays a crucial role in the construction management of water conservancy projects, particularly in schedule control, effectively enhancing the accuracy and efficiency of project management. By integrating BIM with construction schedules, dynamic monitoring and optimized scheduling can be achieved throughout the entire construction process. Utilizing BIM's three-dimensional visualization and data integration capabilities, various parameters of the construction schedule can be obtained and adjusted in real-time, thereby avoiding schedule delays and resource wastage. The BIM-based schedule control method not only strengthens collaborative efforts among all project stakeholders but also improves the visualization and controllability of construction, ensuring timely and high-quality project completion. The application of this technology not only optimizes the construction management process for water conservancy projects but also provides valuable management experience and technical support for similar engineering projects.

Keywords : BIM technology; water conservancy project; construction management; schedule control; visual management

引言

随着水利工程规模的不断扩大和施工管理复杂度的增加,传统的施工管理方法面临诸多挑战,尤其是在进度控制方面的难题日益突出。BIM技术凭借其强大的数据整合与可视化能力,为水利工程施工管理带来了新的突破。通过精确的进度预测、资源优化配置和协同工作,BIM不仅提升了施工效率,还有效减少了成本和时间浪费。将BIM应用于水利工程施工管理中,不仅推动了工程进度控制的智能化与精准化,也为其他领域的施工管理提供了可借鉴的经验。

一、BIM技术概述及其在水利工程中的应用

(一) BIM技术概述

BIM(建筑信息模型)技术是一种基于数字化工具的技术手段,旨在通过创建虚拟模型来进行建筑项目的设计、施工、运营和管理。BIM模型不仅包含建筑的三维几何信息,还涵盖了项目生命周期中的所有数据和信息,如材料、设备、成本、时间进度

等。这种技术通过将不同学科的专业信息融合在一个平台上,实现了多方协同工作,提高了设计和施工过程的效率与质量。

BIM的工作流程通常包括三个主要阶段:设计阶段、施工阶段和运营阶段。在设计阶段,BIM帮助团队进行可视化设计、冲突检测和优化方案的模拟。在施工阶段,BIM技术通过时间进度和成本的集成,实现进度控制与资源的合理分配。运营阶段,BIM可为建筑物的维护提供精确的数据支持。BIM的核心技术包

括三维建模、数据管理、协同工作平台等，这些技术的集成实现了建筑行业的数字化转型^[1]。

（二）BIM在水利工程中的特点与优势

水利工程通常具有规模庞大、施工周期长、涉及多学科协作等特点。项目的复杂性使得传统的施工管理方法难以应对其进度控制和资源调度的挑战。水利工程涉及的专业领域广泛，包括土木工程、机械设备、电力设施等，施工过程中需要多个专业团队紧密配合，确保各环节的协调和顺利推进。传统的管理模式往往导致信息滞后、沟通不畅，从而影响项目的进度和质量。

BIM技术通过数字化模型将各专业的设计与施工信息有效整合，为水利工程提供了一个集中的信息平台。通过BIM，项目管理者可以实时掌握项目进度和资源状况，从而及时发现问题并进行调整。此外，BIM的三维可视化功能使得项目团队能够直观地理解施工过程，提前发现设计冲突，减少返工和资源浪费，提升施工效率。BIM的协同工作平台也增强了各专业间的沟通，减少了因信息孤岛产生的管理问题^[2]。

（三）BIM在水利工程施工中的实际应用案例

在某大型水库建设项目中，BIM技术在设计、施工和管理的各个阶段均得到了广泛应用。在设计阶段，BIM技术被用来处理复杂的地形数据，将其转化为三维可视化模型。这不仅使设计团队能够准确地了解地形特点，还为施工方案的优化提供了科学依据，减少了设计中的潜在风险。在施工阶段，BIM技术将项目的工程进度与资源管理进行高度集成，确保了施工资源的合理调度，并实现了进度的实时监控。项目管理人员能够通过BIM平台实时查看施工现场的进展，及时发现进度滞后或资源不足的问题，进行调整，确保项目按计划推进。通过BIM，施工团队能够有效协调各专业的工作，避免了设备与结构冲突，减少了返工和资源浪费，从而保证了施工过程的顺利进行。

此外，BIM技术在水利工程的后期管理中同样发挥了至关重要的作用。在项目的运营阶段，BIM模型为水库设施的日常维护与管理提供了全面的数字化数据支持。运营人员可以通过BIM模型随时访问水库的实时数据，进行设备状态监控、故障诊断以及维护计划的安排。这种精确的数据支持不仅提高了维护工作效率，也帮助设施管理团队提前预见潜在问题，制定相应的预防措施，延长了设施的使用寿命。该项目的成功应用证明了BIM技术在水利工程中的巨大潜力，为未来类似项目的顺利实施提供了宝贵的经验和参考。

二、基于BIM的水利工程施工管理研究

（一）BIM与施工计划的集成

BIM技术为施工计划的管理提供了强有力的支持，特别是在施工进度精确制定与跟踪方面。通过将施工进度与BIM模型相结合，项目管理人员能够在三维虚拟环境中直观地展示整个施工过程，确保每个施工阶段的时间安排得以精确规划。这种可视化的方式让所有参与方能够更清楚地了解施工的每个步骤，及时识别潜在的进度偏差或风险。BIM系统通过动态链接施工进度、资

源使用和实际工程进展，实现了实时的反馈机制。这样，项目经理可以随时获取到工程进度的最新数据，并根据实时反馈调整施工计划，避免了因进度滞后或资源不足造成的施工延误^[3]。

在施工计划集成过程中，BIM不仅仅限于时间安排的管理，它还通过与其他施工管理信息系统的整合，如物资采购、设备调度、人员配置等，建立了一个高度集成的施工管理系统。通过这种信息整合，BIM能够将设计、施工、资源管理等各个方面的数据汇聚到一个统一的平台中，确保施工各环节之间的无缝衔接。这种集成化管理方式有效减少了传统施工管理中由于信息不对称而产生的沟通成本和误差，优化了施工流程。借助BIM，管理人员可以精确掌控项目进度与资源分配，确保各项任务按时完成，进一步提升施工效率和工程质量。

（二）BIM在施工资源管理中的作用

施工资源管理是工程项目中至关重要的一环，尤其对于水利工程项目而言，涉及的建筑材料、机械设备和劳动力资源种类繁多，管理难度较大。BIM技术通过数字化建模的方式，能够将施工现场的所有资源信息进行集成和管理。通过建立三维模型，BIM可以实时监控各类资源的存量、位置、使用情况等重要数据，从而帮助管理人员精准掌握每一项资源的实时状态，确保资源调配的高效性。这种集成化的信息管理方式不仅提高了资源调度的准确性，还减少了因信息滞后或沟通不畅带来的管理漏洞。

BIM技术能够帮助项目管理者避免资源浪费，并优化资源配置。通过实时采集和分析施工现场的数据，BIM能够识别出施工过程中存在的低效环节。例如，BIM可以实时监控设备的使用情况，发现设备闲置或频繁冲突的问题，进而优化设备的使用时间和安排，最大化其使用效益。此外，BIM还能精确计算每个施工阶段所需的材料数量，避免过量采购或材料短缺的现象，确保施工进度不受资源限制。

在人力资源管理方面，BIM同样发挥着重要作用。通过对施工现场的实时数据分析，BIM能够精准预测不同阶段所需的劳动力数量和配置方案。项目经理可以根据这些数据合理安排劳动力分配，避免了因人员配置不当导致的施工延误。同时，BIM还能帮助施工团队协调各方需求，确保各工序按计划进行，提高施工效率，降低因资源管理不当带来的额外成本。

（三）协同工作与多方参与

BIM技术在水利工程中的协同工作与多方参与方面具有显著优势。水利工程项目通常需要设计方、施工方、监理方及项目管理方等多个专业团队的紧密合作。传统的工程管理模式中，各方往往使用不同的信息系统，导致信息无法实时共享，沟通效率低下，容易产生误解或延误。而BIM技术通过构建一个统一的数字化平台，能够将所有参与方的设计、施工和管理数据集成到一个共享的模型中，确保了各方能够实时访问和更新信息。这种数据共享机制打破了信息孤岛，提升了各方的协作效率，为决策提供了准确、及时的信息支持，避免了因信息不对称而带来的不必要问题^[4]。

此外，BIM的协同功能不仅体现在信息共享上，它还通过模拟施工过程、提前识别潜在问题和预测工程风险，进一步提高了

各方的沟通和协调能力。在施工过程中，各团队可以在 BIM 模型中实时查看工程进度、质量问题、设备状况等信息，从而及时进行调整，避免了因沟通不畅或误解而导致的施工延误。通过这种高效的协作模式，项目各方能够同步推进工作，减少了传统施工管理中因各方不协同而造成的资源浪费与时间滞后。这种优化的协同工作方式显著提升了水利工程项目的施工效率和质量，确保了项目能够按时、按质完成。

三、基于 BIM 的水利工程进度控制研究

（一）进度控制的传统方法与局限性

水利工程的进度控制通常依赖于传统的计划管理方法，如甘特图和关键路径法（CPM）。这些方法通过手工或简单的计算软件，按照预设的时间节点安排施工任务，并监控各项工作的进度。甘特图通过时间轴展示各项任务的执行顺序和工期，而关键路径法则着重分析项目的关键任务，确保项目按时完成。然而，这些传统方法往往存在一些局限性。首先，甘特图和关键路径法无法动态响应复杂施工过程中可能出现的突发问题，如材料供应延误或天气原因导致的停工，这使得进度控制较为死板。其次，这些方法在项目实施过程中无法充分考虑资源之间的相互依赖关系，可能导致资源利用不均衡和进度调整不及时^[6]。

另外，传统的进度控制方法缺乏对施工现场的实时监控和数据反馈，通常依赖人工记录和现场汇报，信息传递滞后，容易造成决策延迟。这些局限性使得水利工程项目在实际操作中容易出现进度偏差，甚至影响项目的整体完成时间和质量。

（二）BIM 在进度控制中的优势

BIM 技术通过其强大的三维建模和数据集成能力，解决了传统进度控制方法的多个局限性。在 BIM 环境下，施工进度不仅仅是一个静态的时间表，而是通过三维模型与实际施工过程的实时数据相结合，形成动态的进度控制体系。BIM 技术能够实时显示施工现场的进展情况、资源使用状况及各工序之间的相互关系，使得管理者能够全面了解项目的进度和潜在问题。例如，项目经理可以通过 BIM 模型直观地查看各个施工阶段的实际完成情况，并与原定计划

进行对比，及时发现进度滞后或资源不足的问题^[6]。

此外，BIM 的可视化展示功能为施工团队提供了更清晰的进度控制工具。在施工过程中，施工人员和管理者可以通过虚拟现实（VR）等技术对施工现场进行实时查看，并进行进度模拟。这种可视化效果不仅增强了施工人员对工作任务的理解，也为决策者提供了更直观的施工状态，从而大大提高了进度控制的精度与效率^[7]。

（三）进度预测与优化

BIM 技术在进度预测与优化方面也表现出明显优势。通过与施工进度、资源分配、施工环境等数据的结合，BIM 能够帮助项目团队进行更加精确的进度预测。通过对历史数据和实时施工情况的分析，BIM 能够自动识别施工过程中的潜在风险，并对进度滞后的部分进行提前预警。比如，在施工过程中，BIM 能够分析不同工序之间的依赖关系，并预测出可能影响项目进度的关键因素，从而为项目团队提供优化建议^[8]。

更为重要的是，BIM 技术还能够进行进度的动态优化。在施工过程中，随着项目的推进，新的问题和挑战会不断出现，传统的进度控制方法无法及时应对这些变化。而 BIM 通过实时监控项目进度，并根据现场反馈数据进行动态调整。例如，当施工进度出现延误时，BIM 系统可以自动调整资源配置、优化施工顺序、调整施工人员和设备的安排，确保项目能够在最短的时间内恢复进度。这种灵活、实时的进度控制方法不仅提升了施工效率，也确保了项目按时完成，并最大限度地减少了因延误带来的额外成本。

四、结语

基于 BIM 的水利工程施工管理与进度控制研究展示了 BIM 技术在提升施工效率、优化资源管理和精确控制工程进度方面的巨大潜力。通过将 BIM 技术与施工计划、资源管理及进度控制紧密结合，能够实现项目全过程的数字化、可视化和智能化管理。与传统方法相比，BIM 不仅解决了信息滞后和协作不畅的问题，还通过实时监控和动态优化有效避免了进度滞后。未来，随着 BIM 技术的进一步发展，其在水利工程领域的应用将更加广泛，为提升工程质量、缩短建设周期和降低成本提供更为有力的支撑。

参考文献

- [1] 鲁智国. 水利工程施工中的进度控制与成本管理研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(03): 155-157. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.03.052.
- [2] 卢文清, 王鹏, 马冬丰. 水利工程施工质量管理研究 [J]. 内蒙古水利, 2025, (04): 27-28. DOI: CNKI: SUN: NMSL.0.2025-04-011.
- [3] 邹良. 水利工程中电力施工技术与管理分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (11): 212-214. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202511068.
- [4] 余玫芳, 陈景祥, 刘辉. 基于 BIM 技术的水利工程施工管理研究 [J]. 价值工程, 2024, 43(29): 159-162. DOI: CNKI: SUN: JZGC.0.2024-29-047.
- [5] 刘超. 水利工程供水管道施工技术与质量管理 [J]. 水利技术监督, 2025, (05): 5-8+12. DOI: CNKI: SUN: SLJD.0.2025-05-002.
- [6] 白慧玲. 水利工程质量安全管理与施工进度控制 [J]. 水上安全, 2025, (04): 121-123. DOI: CNKI: SUN: SSXF.0.2025-04-041.
- [7] 江涛, 梁林, 李成. BIM 技术在水利工程施工管理中的应用研究 [J]. 内蒙古水利, 2024, (03): 98-100. DOI: CNKI: SUN: NMSL.0.2024-03-046.
- [8] 鲁智国. 水利工程施工中的进度控制与成本管理研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(03): 155-157. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.03.052.

水利工程中管道工程施工监理质量控制探究

刘涛

广州新珠工程监理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025060006

摘 要： 水利工程是影响国家经济和民生水平的重点工程，管道工程作为其重点分部分项工程，和工程排涝、防洪、水资源输送效率有直接关联，施工质量会对工程运行稳定性和安全性产生较大影响。对此，相关参建单位应格外重视施工质量的控制。监理作为水利工程管道工程施工质量控制不可或缺的重要工作，可为工程质量提供坚实保障，最大限度减少工程风险。基于此，本文将结合水利工程中管道工程施工监理质量控制的重要性，讨论施工监理质量控制的措施，希望可以为相关人士带来一定参考价值。

关 键 词： 水利工程；管道工程；施工监理；质量控制；重要性；控制措施

Exploration on Quality Control of Construction Supervision for Pipeline Engineering in Water Conservancy Projects

Liu Tao

Guangzhou Xinzhu Engineering Supervision Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Water conservancy projects are pivotal undertakings that significantly impact the national economy and people's livelihoods. Pipeline engineering, as a critical component of these projects, is directly related to the efficiency of drainage, flood control, and water resource transportation. The construction quality of pipeline engineering exerts a substantial influence on the operational stability and safety of the entire project. Therefore, relevant participating units should place particular emphasis on controlling construction quality. Supervision, as an indispensable aspect of quality control in pipeline engineering construction for water conservancy projects, provides a solid guarantee for project quality and minimizes project risks to the greatest extent. Based on this, this article will discuss the importance of quality control in construction supervision for pipeline engineering within water conservancy projects and explore measures for construction supervision quality control, hoping to offer valuable reference for relevant professionals.

Keywords： water conservancy projects; pipeline engineering; construction supervision; quality control; importance; control measures

一、水利工程中管道工程施工监理质量控制的重要性

（一）令工程质量达到要求

水利工程管道工程施工环境相对复杂，对技术要求更高，施工团队若专业技能不过关，很可能导致某一环节产生质量问题，连带影响整个工程质量。监理人员自身经验和专业素养同样应达到工程要求，需要监督施工全过程，并结合国家有关规范和标准，把控施工工序规范性、施工工艺合理性和管道材料质量等。举例而言，管道材料运抵施工现场后，监理人员应核查材料相关文件，包括产品合格证、质量说明书和厂家检验记录等，并按照批次和规格等抽样送检，保证材料和设计要求相符。管道安装阶段，监理人员也会监督各个关键环节，包括压力试验、坡度设置、接口处理等，发现有任何不符合施工规范之处，都会及时纠正，使工程质量与相关规定高度相符^[1]。

（二）减少工程安全隐患

水利工程管道工程施工阶段，各类安全隐患和施工风险层出

不穷，常见的注入管道渗漏、破裂、基坑坍塌等，都可能增加地质灾害风险。监理人员会实时监控施工全过程，可对安全隐患进行识别与评估，同时采取有效措施处理有关问题。举例而言，开挖管道沟槽时，监理人员会审查测量人员边坡监测数据，判断边坡稳定性和安全性是否达标，开挖前则会检查管道沟槽和管道自身是否经过严密的支护，防止沟槽和管道坍塌。管道压力试验阶段，监理人员监督试验过程，保证试验过程符合标准要求，以提高试验结果的说服力，降低管道破裂风险。监理工作落到实处，可最大限度减少安全隐患，保证工程施工安全性^[2]。

（三）实现工程经济效益的提升

监理人员施工阶段处理需控制工程质量，还需要监督成本和进度是否一切正常。通常情况下，监理人员会结合合同工期要求，对施工计划进行合理安排，在已有施工方案中，选择兼顾安全和效率的施工方案，并协调不同施工单位、施工专业的进场时间、次序，保证现场施工一切正常，令施工效率得到明显提升。监理人员还需要审核工程费用，保证资金使用的科学性和合理

性,减少自愿浪费现象。此外,水利工程管道工程时常会因为业主要求变化、施工条件不满足等因素,出现工程变更的现象,监理人员需要对工程变更的可执行性、经济性等进行严格审核,将工程变更产生的成本影响控制到最低,实现工程经济效益的整体提升^[3]。

二、水利工程管道工程施工监理质量控制措施

(一)完善监理工作制度

监理工作制度的完善,有助于监理工作的规范和细节工作质量的提升,因此欲提升监理工作质量,应着眼于监理工作制度的完善,使工作流程更明细,职责更明确。具体而言,应做好以下工作:首先,构建质量责任制,以个人为单位,明确监理人员义务与职责,使质量控制工作落实到实处。一旦出现任何质量问题,应依照监理工作制度,对有关人员责任进行追究。其次,应细化监理实施细则和规划,包括监理工作目标、内容、范围、程序与方法等。监理规划的编制,需要以工程实际状况为依据,保证编制内容的可执行性与针对性。监理实施细则应贯彻具体化要求,包括分项工程质量控制细则、验收标准细则等,使相关要求一目了然,对监理工作起到有效的指导作用^[4]。另外,应进一步完善质量验收制度,质量程序与标准应更加完善。施工阶段,监理人员所有验收工序都需要以标准要求为基准,紧前工作通过验收后,才能进行紧后工作的进场施工。若项目未通过验收,则需要下达整改通知,明确质量问题和不合格原因,由施工单位系统整改,后续重新组织验收。最后,重视管理资料。监理资料管理制度应更加规范,包括收集、整理与归档等各个环节。所有资料都应当准确、全面和真实,应能够通过资料,了解监理工作状况,并将资料作为后续工程问题追溯的重要依据。

(二)加强施工单位监督管理

水利工程管道工程需要以施工单位为主体完成,因此,施工单位是否具有较强烈的质量意识,会对工程各环节及整体质量产生较大影响。监理人员应重视监督管理工作的落实,实现施工单位质量意识的提升。具体而言,首先,应审查施工单位资质,判断施工单位人员是否有上岗施工的资格,施工人员应持证上岗,并在上岗操作之前经历过培训和考核,同时应针对工人进行体检,工人不能有不适合岗位操作的疾病^[5]。若施工单位与人员没有施工资质,应避免其施工。其次,施工单位施工工艺与方案也需要严格监督,施工单位应以施工规范与设计文件为依据,完成施工方案的制作,施工需要以施工方案为基准。若施工工艺与方案不合理,或现场没有施工条件,监理人员应反馈施工单位,并提出修改意见,由施工单位重新制定方案。此外,应强化管道施工设备与材料的质量控制。材料运抵施工现场之后,对各类材料进行抽样送检。若材料与设备不合格,应避免其进入施工现场。监理人员也应随时对正在使用的设备和材料进行监督,使其能够满足正常使用的要求。最后,应构建考核机制,树立施工单位质量意识,并每隔一段时间考核施工单位质量。施工单位评优、工程款支付等,都需要将考核结果纳入考量因素中,以强化质量管理

效果^[6]。

(三)强化全过程质量控制

施工全过程质量控制也是施工监理质量控制要点,应聚焦于施工准备、施工过程和竣工等环节。施工准备环节,监理人员应对施工现场准备,起到重要的协助作用,对施工单位出具的施工组织设计、设备配置、人员配备情况进行检查。监理人员也需要参加建设单位组织的图纸审查会,了解设计技术要求,一旦发现存在异常状况,应及时通过建设单位,将相关修改要求反馈至设计单位。施工环节,监理人员应做好旁站监理,并在关键施工节点巡视检查,对施工质量问题进行纠正,避免施工质量不达标。举例而言,应焊接管道接口时,监理人员应判断焊接质量、焊接工艺等是否符合焊接操作规程。管道回填阶段,应对回填材料质量、回填压实度和厚度等级进行检查。所有监理工作状况都需要详细记录,以便及时追溯相关问题。竣工阶段,监理人员主要负责协助建设单位验收工程的工作,依照验收程序与标准完成验收工作,具体应包括功能性试验、外观质量等,并保证资料完整性^[7]。验收阶段若发现问题,应对施工单位下达整改意见,整改通过验收之后,才能重新组织验收。验收之后应形成书面报告,后续才能和业主办移交手续。

(四)强化监理人员团队建设

监理工作质量受到监理人员主体的影响,因此监理人员队伍质量的提升,以及队伍建设工作,同样值得监理单位高度重视。一般可以聚焦于以下几方面工作:首先,构建并完善准入制度,使监理人员资格审查更严格,保证监理人员执业资格符合监理工作要求,专业知识也达到素质标准。外部在进行监理人员招聘时,相关单位应对其职称证书、学历证书等有关证件进行检查的同时,还需要重点考核专业素养和实践经历,最好具备同类型施工监理经验,减少对新工作环境和要求的适应时间^[8]。其次,应重视监理人员教育培训跟进。监理单位应重视监理人员素质的提升,针对新入职的监理人员,应通过定期组织的培训和交流会议,或以老带新的方式,使人员能够快速积累有关工作经验,掌握新工艺、新材料和新技术要求。培训内容应包括监理工作方法、质量验收标准和水利工程管道施工技术,也可以聘请业内专家到单位内举办讲座,通过实际工程案例的分享,增强专业素养。最后,考核方面,监理单位应使考核机制更健全,每隔一段时间考核监理人员职业素养、专业能力和工作状况等,监理人员职位晋升和薪酬绩效等,都需要将考核结果纳入计算,使监理人员工作积极性得到有效提升。若监理人员考核结果不合格,应重新组织培训和考核,通过后方可上岗。若依然不合格,则应排除出监理团队^[9]。

(五)降低外部环境因素负面影响

一些水利工程管道敷设的场地,地质和水文条件相对恶劣,容易积累更多外部环境隐患,影响施工的安全性。因此,监理人员应提前应对,并采取行之有效的措施,实现施工质量提升。具体而言,首先,应重视施工环境监测与调查。施工之前,应详细勘察施工现场地质条件与自然环境,针对性制定应急预案,以便在遇到危险状况时,可以根据应急预案要求快速反应并排除风

险。举例而言，若管道敷设恰逢雨季，应提前完善施工现场排水设施建设，避免地表水流入沟槽。沟槽一旦积水，则需要用水泵将水抽出，避免沟槽大量积水。若地质条件复杂程度较高，则应在做好支护的同时方能开挖，以减少沟槽坍塌风险^[10]。

（六）强化信息化建设

当前正是信息技术飞速发展的时代，监理单位也应当拥抱信息技术，认识到信息技术的优势，强化信息化建设。首先，应依照监理技术要求，着力打造信息管理系统，通过系统提高监理资料的收集和管理效率。借助信息管理系统功能，监理人员管理效率会进一步提升，收集和整理资料的工作压力会降低，成功归档的资料也可通过系统功能查询，实现资料追溯^[11]。信息管理系统同样可流程化管理监理工作，使监理工作各环节操作更具规范性。其次，信息化技术中的远程监控技术，可实时监控施工现场。实践中，可将监控设备安装在施工现场，即使监理人员身在办公室，也可实现对现场情况的实时查看，并第一时间发现现场存在的安全隐患，加快反应速度，避免监理人员在现场虚耗更多时间。远程监控技术同样可以辅助实时跟踪施工进度，令施工进度控制措施有的放矢，进一步提升管理效率。最后，可应用 BIM 技术，实现工程可视化。BIM 技术有助于三维立体模型的构建，使管道布置、连接方式、尺寸等，使监理人员从三维角度上加深对设计意图的认识，快速发现设计图纸中存在的问题。施工阶段，BIM 技术同样可实现碰撞检测，对管道工程和土建工程，以及其他建筑物、构筑物之间存在的冲突现象做出标记，最大限度减少施工阶段返工与浪费现象^[12]。

（七）强化各参建单位间沟通协调

水利工程管道工程参建单位较多，不同参建单位因工作方式和利益的不同，若无协调配合，很可能对工程造成意外负面影响。监理人员应作为沟通桥梁，使参建单位精诚合作。首先，应每隔一段时间招考监理例会，工程施工进度应及时告知相关单位，收集不同单位的意见和建议，加速施工问题的协调解决。监理例会应产生书面记录，方便会议内容追溯，并指导后续工作落实。其次，应强化和建设单位间的交流，管道工程施工状况应使建设单位了如指掌。针对工程中存在的诸多问题，也应获得争取建设单位配合。另外，应强化和施工单位间的交流。若发现施工单位有违规施工的现象，应坚持原则，秉公办事，并配合解释说明，提高施工单位整改的主动性和积极性，实现施工质量全方位提升。最后，应强化和设计单位的交流。对于设计图纸中存在的问题，以及后续工程建设中可能存在的设计变更现象，应做好信息反馈和沟通，并监督施工单位按图施工，以实现设计意图^[13]。

三、结束语

综上所述，水利工程管道施工监理质量控制是保障工程安全与效益的核心环节。面对当前诸多问题，需通过强化队伍建设、规范工作流程、全过程管控等措施系统应对。唯有监理单位切实履行职责，协同各方形成质量管控合力，方能筑牢管道工程质量防线，为水利事业的可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]唐智杰.水利工程监理施工阶段的质量控制措施探究[J].四川建材,2023,49(10):202-203.
- [2]郝青青,范广超.水利工程管道施工技术与管理策略分析[J].微型计算机,2024(7):163-165.
- [3]段菲菲.水利工程施工中安全生产双重预防机制的问题优化策略[J].中国公共安全,2024(7):70-72.
- [4]刘道霞.水利工程施工阶段质量控制与安全保障措施分析[J].水上安全,2025(9):131-133.
- [5]徐翠婷.水资源调度算法在复杂水利工程管理中的应用与优化研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(12):250-253.
- [6]罗龙辉.水利工程施工中的质量控制与管理措施研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(3):066-069.
- [7]杨德新.水利工程施工阶段监理有效控制浅议[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(2):033-036.
- [8]徐栋,周鹏程,徐小军.水利工程施工中土方填筑质量控制与技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(2):106-109.
- [9]杨森.水利工程施工中的质量控制与安全管理方式分析[J].中国科技期刊数据库 工业 A,2025(7):108-111.
- [10]王明时.水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理分析[J].门窗,2025(13):184-186.
- [11]李树新,郭腾科.水利工程施工中的质量控制要点研究[J].现代工程科技,2025,4(13):81-84.
- [12]李璇,邢永杰.中小水利工程施工全过程的质量控制要点分析[J].中国厨卫,2025,24(3):238-240.
- [13]梁士雄.水利工程施工质量控制与优化策略[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(2):009-012.

海水淡化技术对不同类型海水适应性研究

王慧, 石茜, 王绍聪

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013

DOI:10.61369/WCEST.2025060007

摘 要 : 随着全球淡水资源的日趋紧张, 海水淡化作为获得淡水的重要方式之一, 其技术应用范围越来越广泛。然而, 不同海域的水质特征存在显著差异, 这会对淡化技术的选择、运行效果以及成本造成影响。本文系统分析了高盐度、高硬度、高碱度以及高污染、高油度等不同类型的海水的水质特征, 介绍了反渗透、多效蒸馏、多级闪蒸等主流海水淡化技术的原理。在此基础上, 重点探究了不同淡化技术对于不同水质海水的适应状况, 并且有针对性地给出了改良思路, 涵盖预处理工艺优化、关键参数调整, 再到运行维护策略完善等多个层面, 旨在为提高海水淡化技术在不同应用场景里的效能与可靠度供应理论参照。

关 键 词 : 海水淡化; 水质特性; 反渗透; 多效蒸馏; 适应性; 优化策略

Adaptation of Seawater Desalination Technology to Different Types of Seawater

Wang Hui, Shi Qian, Wang Shaocong

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD., Jinan, Shandong 250013

Abstract : With the increasing scarcity of freshwater resources worldwide, seawater desalination has become a crucial method for freshwater acquisition, with its technological applications expanding significantly. However, the water quality characteristics of different marine environments exhibit notable variations, which impact the selection of desalination technologies, operational effectiveness, and cost considerations. This study systematically analyzes the water quality characteristics of seawater with high salinity, hardness, alkalinity, pollution levels, and turbidity. It introduces the principles of mainstream desalination technologies including reverse osmosis, multi-effect distillation, and multi-stage flash evaporation. Building on this foundation, the research focuses on evaluating the adaptability of different desalination technologies to varying seawater conditions, proposing targeted improvement strategies that encompass pretreatment process optimization, parameter adjustments, and operational maintenance enhancements. The study aims to provide theoretical references for improving the efficiency and reliability of seawater desalination technologies across diverse application scenarios.

Keywords : seawater desalination; water quality characteristics; reverse osmosis; multi-effect distillation; adaptability; optimization strategies

引言

水资源的可持续供给是全球发展的严峻挑战, 海水淡化是开拓新的水源渠道的重要手段, 其技术可靠程度直接关系到供水安全^[1]。然而, 自然海水并不是成分均一的介质, 其盐度、硬度、浊度以及污染物含量等因地理环境和人类活动的影响而呈现出显著的地域性差异。这种水质多样性限制了淡化技术的选取、系统运转效能以及全生命时段成本。如果技术应用与具体水品质状况不匹配, 就会导致耗资提升、膜组件或设备结垢侵蚀等一系列问题。因此, 系统研究主流海水淡化技术对不同类型海水的平衡能力, 对于优化不同特性的海水平衡工艺设计、提升运行稳定性、推动该技术科学合理发展具有指导意义^[2]。本文旨在开展此项研究, 为实践提供理论参考。

一、海水的类型及水质特征

(一) 高盐度海水的水质特征

高盐度海水一般是指盐度远高于全球平均海水平均盐度的水

体, 多见于红海、波斯湾等蒸发量远远大于降水量的封闭或半封闭海域。其主要特征是水中溶解性总固体含量很高。

高盐度表示水中钠离子, 氯离子, 硫酸根离子, 钙离子, 镁

离子等主要离子的浓度高。这种高离子强度不仅直接增大了淡化

的难度和能耗，也对材料的耐腐蚀性提出了更高的要求。在高盐度环境里，设备的腐蚀风险显著增加。除此之外，高盐度往往伴随着更高的渗透压，这对于依靠半透膜进行分离的反渗透技术来说是一大难题，因为需要更高的操作压力才能克服渗透压，使水分子透过膜。

（二）高硬度高碱度海水的水质特性

海水的硬度主要是由海水中钙离子和镁离子的浓度构成，而碱度则是由碳酸氢根、碳酸根和氢氧根的浓度构成^[3]。高硬度、高碱度海水具有较大的结垢风险。高硬度意味着钙、镁离子浓度高，它们是碳酸钙、硫酸钙和氢氧化镁等垢体的主要阳离子。高碱度表明水体对pH改变的缓冲能力较强，碳酸根、碳酸氢根离子浓度较高，为碳酸钙垢的产生供应了较多的阴离子。当水温升高或者pH值发生变化的时候，这些微溶盐类易因溶解度降低而析出，从而形成硬质的垢层。

（三）高污染高浊度海水的水质特征

高污染、高浊度的海水常见于近岸及河口或受工业、农业、生活污水排放等影响的区域。此类水质特征复杂，含大量悬浮固体和胶体，导致水体浑浊，并富有有机物、油、藻类及其产物，甚至包括细菌、病毒等微生物。高浊度主要是由于泥沙、黏土、藻类等悬浮颗粒物含量高引起的，高浊度海水会直接导致膜污染或者热交换器表面堵塞从而影响传热效率^[4]。溶解性有机物、胶体物质等则会在膜面或设备内壁上形成难以清除的凝胶层或者滤饼层，造成不可逆污染。生物污染是此类水质的另一大难题，微生物在系统里滋生会形成生物膜，既阻碍水流又影响传质，也许还会引发微生物腐蚀。

二、主流海水淡化技术原理探析

（一）反渗透技术原理

反渗透技术是一种压力驱动膜分离过程，利用只允许水分子透过而截留溶解盐类、有机物、细菌等杂质的半透膜实现分离。在自然渗透现象里，水分子会自发由低浓度溶液侧透过半透膜向高浓度溶液侧迁移，直至两侧化学势平衡。反渗透过程则是通过向高浓度盐侧施加高于本身渗透压的外界压力，迫使水分子反方向迁移，从而实现盐分和水的分离。其中渗透的水称作渗透液，被浓缩成的盐水称为浓盐水。反渗透装置的性能主要取决于所选半透膜的选择性、透水性及操作压力、温度、回收率等因素^[5]。

（二）多效蒸馏与多级闪蒸技术原理

多效蒸馏和多级闪蒸都属于热法淡化，其本质就是通过加热海水使其蒸发，再把产生的水蒸气冷凝成淡水。多效蒸馏系统由若干个蒸发器串接而成，上一级蒸发产生的蒸汽成为下一级蒸发的热源，下一级的蒸发室压力较低，所以海水可以在较低温度下沸腾。如此，输入系统的热能可以在多个效体当中重复利用，从而显著提高热效率。整个蒸发和冷凝过程都是在比较稳定的状态下展开的。多级闪蒸则是把海水先加热到一定的温度，再将其送入一系列压力逐级降低的闪蒸室中。由于每一个闪蒸室的压力都低于被加热后的饱和蒸汽压，因此将有一部分海水平稳地汽化（也

称“闪蒸”）。产生的蒸汽在各级的冷凝管上冷凝为淡水，剩余的海水温度逐级降低。多级闪蒸主要是靠压力的分段下降来实现多次蒸发。

（三）其他淡化技术原理概述

除了反渗透以及主流热法以外，还有其它一些淡化技术存在。电渗析利用选择性离子交换膜，在直流电场影响下，使海水中各种带不同电荷的离子产生定向移动现象以达到分离淡室和浓室的目的，但该种技术对非带电物质去除效果差。膜蒸馏是一种利用膜的热驱动蒸发过程将膜技术与蒸发结合的技术。膜蒸馏中使用一种疏水微孔膜，仅允许水蒸汽穿过而阻隔液态水，在膜两侧蒸汽压力差的推动下进行传质并实现冷凝。正渗透技术则是利用汲取液和海水的渗透压差做为动力源使水分子自发由海水侧透过半透膜进入汲取液中，然后在稀释后的汲取液中析出淡水^[6]。

三、淡化技术的水质适应性分析

（一）反渗透技术在不同海水类型中的适用性

反渗透技术处理高盐度海水时面临很多问题，盐度过高会直接导致渗透压提高，为维持所需的产水量需要提高操作压力，导致能耗增加，而对高压泵以及膜壳、管道等的压力承受能力要求更高^[7]。膜元件的盐透过率也会随着盐浓度的增加而略微上升，影响产水水质。对于高硬度、高碱度海水，反渗透膜易发生严重结垢，特别是碳酸钙垢和硫酸钙垢，所以必须依靠有效的预处理和严格投加阻垢剂来控制结垢，否则会造成膜污染、清洗频繁和使用寿命缩短。但是反渗透膜对离子型杂质具有很强的截留能力，其产水水质一般都非常好。面对高污染、高浊度的海水，反渗透系统的前置预处理十分重要。悬浮物、胶体以及有机物极易对膜表面造成不可逆的污染，使通量大幅度下降、压差上升及清洗频率提高。

（二）热法技术对不同海水类型的适应性研究

热法技术对于进水盐度变化的敏感性相对较低，其主要依靠相变过程来进行处理，可以处理各种不同盐度的海水，甚至适用于浓缩高盐废水。高盐度对蒸发效率影响有限，却会加剧设备的腐蚀。高硬度、高碱度是热法技术的主要制约因素，加热表面易结垢，特别是硫酸钙等硬垢一旦生成就很难去除，会显著影响传热效果，增加能量损耗，甚至造成设备毁坏。因此，严格的水质软化预处理以及不间断的防垢措施是热法技术应用的必要条件。

高污染、高浊度海水中悬浮固体与胶体会沉积于热交换器表面，干扰传热过程，但对比反渗透膜而言，热法设备对进水水质波动的耐受性通常更强，其预处理较为简化，主要目的在于除浊与防垢。但有机物热分解或藻类的问题可能会造成新的运行问题。

（三）其他技术对海水类型的适应性研究

电渗析技术去除非带电物质的能力较弱，适合用于处理含盐量不高的苦咸水淡化过程，用于高盐度海水的能耗比较高，且对硬度结垢比较敏感，膜污染的情况不同于反渗透^[8]。膜蒸馏理论上可以接近100%的截留非挥发性物质，适合高盐度水处理，可利

用低品位热源，但是膜润湿和污染问题仍需要解决。正渗透技术驱动压力需求低、膜污染倾向较轻、对高污染水质可能具一定适应性，但其高性能汲取液的开发与回收仍是技术难点。这些技术目前应用的规模不大，其适应性仍在探索中。

四、技术适应性优化方向

（一）预处理工艺的针对性优化

针对高盐度海水，预处理应着重控制微生物和胶体污染，保护反渗透膜，并选用耐腐蚀、耐污染的预处理材料^[9]。对于高硬度、高碱度海水，预处理重点在于软化除硬，可以使用化学软化、离子交换或者纳滤预处理等办法降低钙、镁等离子的浓度，并精确控制阻垢剂投放量。面对高污染、高浊度海水，应构建多层屏障式的预处理流程，以混凝、沉淀、介质过滤等常规手段为基础，加强超滤、微滤等膜法预处理技术的应用，有效地清除悬浮物、胶体以及部分大分子有机物质。对特定的污染物如藻类、油类，需要加入气浮、高级氧化等特殊的预处理单元。

（二）核心工艺参数的适应性优化

针对反渗透系统而言，处理高盐度海水时要改善操作压力和回收率，在能耗和产水率之间达成平衡。对于高结垢倾向的水质来说，应选择更加保守的系统回收率，以防止膜表面浓度过高，并且要改善阻垢剂的品种及投加量。清洗周期以及清洗配方也需根据实际污染情况进行调整。热法技术则须按照水质来调整顶值温度、流量等参数以减轻结垢现象，例如多级闪蒸就可以控制最高加热温度低于硫酸钙的结垢温度。各级操作压力及温度分布的优化也属于提升适应性及能效的内容之一。

（三）系统运维策略的优化

建立基于实时水质监测的预警系统十分重要，通过监测浊度、盐度、硬度、污染指数等参数的变化情况来动态调整预处理及主工艺运行参数，实现超前控制。推行预测性维护，定期开展膜性能检测、设备状况评价工作，避免被动处理故障。制定科学、高效的清洗规程是保障长期稳定运行的基础，需针对不同类型的垢质及污染物开发不同的化学清洗剂与物理清洗方法。加强运行人员培训，提升其对不同水质条件下系统运行特性的理解和应急处置能力，也是优化适应性的重要环节。

五、结语

海水淡化技术的有效利用，依赖对原水水质特点的深入认知和针对性应对策略^[10]。高盐度、高硬度碱度以及高污染浊度等不同类型的海水对反渗透以及热法蒸馏等主流技术带来不一样的挑战和要求。反渗透技术对盐度、污染比较敏感，但是产水水质较好；热法技术对于盐度的容忍度较高，但是容易结垢、腐蚀。未来的海水淡化技术的发展，会愈发重视工艺的精细程度和适应性。在不断更新预处理技术创新、智能优化核心工艺参数、完善运行维护策略的基础上，有望发明更经济、更高效率且可靠的海水淡化技术，能够更好地应对不同复杂海水水质带来的挑战，为全球的水资源安全提供强有力的支持。

参考文献

- [1] 陈周蕾, 陈亦云. 海水淡化产品水的水质特性及用途分析 [J]. 门窗, 2019, (09): 168-169.
- [2] 何雁鸣, 江洁颖. 海水淡化反渗透膜化学清洗技术分析 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(06): 47-49.
- [3] 吴水波. 海水淡化厂水质管理方法研究 [J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(05): 49-53+84.
- [4] 张胜梅. 海水淡化技术的分类及成本分析 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(06): 57-59.
- [5] 杨华, 韩韵佳, 杜聪. 海水淡化技术的应用 [J]. 科技与创新, 2024, (08): 175-177+181.
- [6] 丁旭东. 反渗透海水淡化技术的现状与发展 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S1): 29-31+47.
- [7] 江润霞. 海水淡化反渗透膜法工艺的应用 [J]. 山东工业技术, 2019, (02): 48.
- [8] 马朝勤, 李玉磊. 海水淡化联合处理技术 [J]. 科技创新导报, 2017, 14(26): 84+89.
- [9] 郑高, 吴旭. 船用海水淡化技术发展现状和趋势 [J]. 机电工程技术, 2022, 51(09): 43-47.
- [10] 邱明英. 浅析我国海水淡化技术 [J]. 中国环保产业, 2018, (03): 58-60.

前弯式离心泵变速运行特性及相似定律偏差分析

胡洪¹, 张伟程¹, 张文杰²

1. 上海建筑设计研究院, 上海 200041

2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093

DOI:10.61369/WCEST.2025060009

摘 要 : 搭建前弯式离心泵性能试验台, 测试六种不同转速对比实验, 通过逐步调节出口阀门开度 (从全开到全闭), 获得不同转速及流量下对应的扬程、轴功率及效率数据, 绘制出性能曲线; 并验证相似定律在泵变速运行中的适用性。结果表明: 扬程-流量 ($H-Q$) 曲线、轴功率-流量 ($P-Q$) 曲线及效率-流量 ($\eta-Q$) 曲线均随转速呈现规律性变化。相似定律对其扬程预测的相对误差在4%以内, 对轴功率预测因机械损失等因素影响出现偏差, 且在低转速下偏差显著增大。因此, 当转速基准值偏离越小, 相似定律对泵轴功率的预测结果越具有参考意义。

关 键 词 : 性能曲线; 相似定律; 相对偏差

Analysis of Variable-Speed Operation Characteristics and Deviation from Similarity Laws for Forward-Curved Centrifugal Pumps

Hu Hong¹, Zhang Weicheng¹, Zhang Wenjie²

1. Shanghai Architectural Design & Research Institute, Shanghai 200041

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

Abstract : A performance test rig for forward-curved centrifugal pumps was established to conduct comparative experiments at six different rotational speeds. By gradually adjusting the outlet valve opening (from fully open to fully closed), data on head, shaft power, and efficiency corresponding to different rotational speeds and flow rates were obtained, and performance curves were plotted. The applicability of similarity laws in variable-speed operation of the pump was also verified. The results indicate that the head-flow rate ($H-Q$) curve, shaft power-flow rate ($P-Q$) curve, and efficiency-flow rate ($\eta-Q$) curve all exhibit regular variations with rotational speed. The relative error in head prediction by similarity laws is within 4%, while deviations occur in shaft power prediction due to factors such as mechanical losses, with significant increases in deviation at low rotational speeds. Therefore, the smaller the deviation from the reference rotational speed, the more meaningful the shaft power predictions by similarity laws become.

Keywords : performance curves; similarity laws; relative deviation

前言

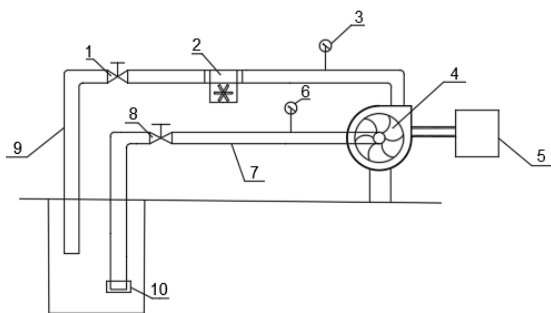
离心泵是现代生产生活中实现能量转换和流体输运的流体机械, 具有大流量、低扬程、高效率 and 运转可靠等特点, 在石油、化工、电力和冶金等行业均广泛应用。离心泵的性能通常以额定转速下的特性曲线来描述。然而, 在工程应用中, 为适应不同运行需求, 常用变频调速的方式进行调节。但现有研究多集中于额定工况下的性能特性, 其在变频运行条件下的性能变化规律尚缺乏系统研究, 因此有必要实验研究前弯式离心泵在变速调节过程中的运行特性, 进一步验证前弯式离心泵在变速条件下的水力特性是否符合相似定律的理论预期。

一、实验装置及方法

(一) 实验装置

如图1所示, 离心泵试验台由变频离心泵、管路系统、进出口阀门、进出口压力传感器和涡轮流量计等组成。变频离心泵为一款单级单吸蜗壳式离心泵^[1], 配备半开前弯式叶轮, 额定设计参

数为: 转速1800r/min、流量9m³/h、叶轮直径16.51cm、叶片数12片。为精确地监测和分析泵的性能, 利用可编程自动化控制器 (Programmable Automation Controller, PAC) 承担数字与模拟信号的转换。再通过数据采集模块对流量、压力等基本性能参数进行记录, 并将数据实时上传到上位机, 用于后续分析。



1 出口阀门；2 涡轮流量计；3 出口压力传感器；4 前弯式离心泵；5 上位机；6 进口压力传感器；7 进口管道；8 进口阀门；9 出口管道；10 止水阀

图1 离心泵性能试验台示意图

(二) 实验方法

通过上位机程序将转速设定到1800r/min，调节阀门开度使体积流量按照0.4542m³/h等差递减，从最大流量逐渐减小至流量几乎为零^[2]。运行稳定后，记录工况点的流量、进出口压力、电功率等性能数据。再将转速降低200r/min进行实验测定，直至800r/min。根据记录的实验数据，计算每个工况点的扬程、轴功率和效率，绘制不同转速下的H-Q、P-Q和 η -Q曲线图^[3]。

二、数据处理

(一) 扬程(H)的测定^[4]

在离心泵进口压力传感器和出口压力传感器之间，根据流体能量方程：

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + z_2 - z_1 + \frac{u_2 - u_1}{2g} \quad (1)$$

其中， $z_2 - z_1$ 为泵进口和泵出口之间的高度差，0.3m； P_1, P_2 分别为离心泵流体进、出口压力(kPa)； ρ 为流体密度(kg/m³)； g 为重力加速度，9.81m/s²； u_1, u_2 分别为离心泵流体进、出口流速(m/s)； z_1, z_2 分别为离心泵进出口传感器的安装高度(m)。

(二) 轴功率的测定

离心泵由变频电动机直接驱动，传动效率 k 取0.95，轴功率的计算公式为：

$$N = N_{\text{电}} \times k \quad (2)$$

其中， $N_{\text{电}}$ 为电动机功率，kw。

(三) 效率 η 的计算

离心泵有效功率 N_e 与轴功率 N 的比值为离心泵效率 η ：

$$N_e = HQ\rho g \quad (3)$$

$$\eta = \frac{N_e}{N} \quad (4)$$

其中， H 为离心泵的理论扬程(m)； Q 为离心泵流量(m³/s)。

三、特性曲线及数据分析

数据处理后，绘制出不同转速下的离心泵H-Q、N-Q和 η -Q曲线。图2所示，前弯式离心泵H-Q曲线在不同转速下均呈现出随着流量增加扬程逐渐下降的趋势，观察到曲线前半段扬程下降较为平缓，运行相对稳定，后半段则出现明显下降，且随着转速的增大，该区段的下降趋势愈显著。因此，在应用中，离心泵在中等流量区间运行有利于维持扬程的稳定性，提高运行效率。

从泵N-Q曲线图可得出：在恒定转速下，随着流量的增加，轴功率呈递增趋势。在相同的流量点上，转速越高，轴功率的需求也越高。与泵的性能特征相一致。在泵 η -Q曲线图中各个转速呈现先上升后下降的驼峰状，最佳效率点的流量值会随着转速的升高而增大。例如，在1800r/min时，效率峰值出现在流量为10m³/h，且效率达到45%；而在800r/min时，效率峰值出现在流量为5m³/h，且最高效率不足30%。因此泵的最佳效率点随转速增加向大流量方向移动，且整体效率水平也随转速提高而显著改善，符合泵的运行特性。

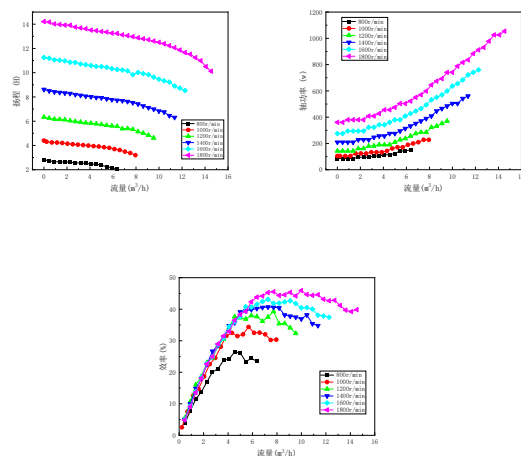


图2 前弯式离心泵特性曲线

四、相似定律验证

(一) 验证方法

以额定转速下的实测性能曲线作为基准。根据相似定律将不同转速下的实验数据折算至额定转速下的等效流量、扬程和功率，各参数符合方程(5)-(7)，并绘制相应的H-Q曲线与N-Q曲线的叠加图，以便于直观对比相似定律^[5]预测结果与实测数据之间的一致性。

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (7)$$

同时,为量化分析计算折算值与实测值的偏差,绘制 H-Q 偏差图与 N-Q 偏差图。步骤为:对额定转速下的 H-Q 曲线和 N-Q 曲线分别进行多项式拟合^[6]。式 (8)-(9) 为拟合关系式:

$$H = 14.02955 - 0.03302q_v - 0.01349q_v^2 \quad (8)$$

$$N = 360.79629 + 9.56285q_v + 1.44724q_v^2 + 0.3004q_v^3 - 0.01427q_v^4 - 0.0000505078q_v^5 \quad (9)$$

拟合相关系数的平方 R^2 均达到 0.99 以上,拟合度精度高,可代替实测曲线在离心泵实际应用中。随后,将折算得到的预测流量点与拟合曲线上对应的扬程和轴功率进行比对,计算其扬程与轴功率相对误差,以量化不同转速下相似定律的适用性与偏离程度。

扬程相对误差:

$$\delta_H = \frac{|H_{pre} - H_{act}|}{H_{act}} \times 100\% \quad (10)$$

其中, H_{pre} 是各个转速下折算至额定转速下的预测流量值, H_{act} 是各个转速下折算至额定转速下的预测流量点对应拟合曲线上的实测扬程值。

轴功率相对误差:

$$\delta_N = \frac{|N_{pre} - N_{act}|}{N_{act}} \times 100\% \quad (11)$$

其中, N_{pre} 为各转速下折算至额定转速下的预测轴功率值, N_{act} 为各个转速下折算至额定转速下的预测流量点对应拟合曲线上的实测轴功率值。

(二) 扬程验证与结果分析

图3表明由相似定律折算后的不同转速实验数据点(800r/min至1600r/min)在 H-Q 曲线上均较好地重合于基准转速下的参考曲线。整体趋势:随流量增加,扬程逐渐下降。不同转速折算后的曲线与基准曲线吻合度较高,表明前弯式离心泵在变速条件下的实测扬程基本符合相似定律的理论预期。

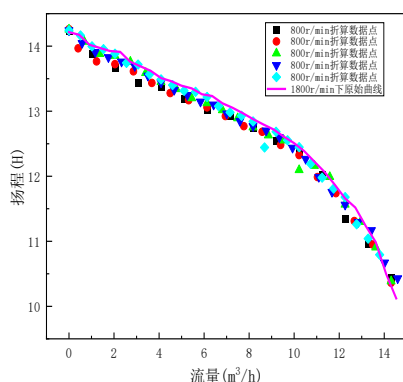


图3 不同转速换算至额定转速的 H-Q 曲线对比图

图4展示了不同转速折算至基准转速下的扬程与实测参考曲线之间的相对偏差。整体而言,误差幅度控制在 $\pm 4\%$ 以内,大部分流量区间误差集中在 0-2%,验证了相似定律对该泵变速性能预测

的有效性。

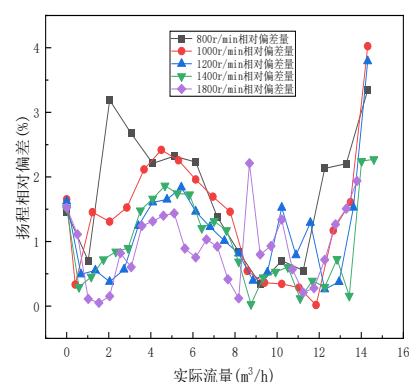


图4 扬程相对误差随流量的变化曲线

(三) 轴功率验证与结果分析

如图5,随着转速升高,折算曲线与基准曲线的重合度逐渐改善,整体偏差减小,通过图6表明转速越接近基准转速,误差越小。其中转速1600r/min,多数点落在约5%-12%范围内,1400r/min多在约10%-20%,而其他转速下偏差显著偏大。表明相似定律在高流量区域且近邻基准转速下具有良好的适配性。相反,在低转速和小流量区,受雷诺数与损失非相似等影响,偏差明显增大。

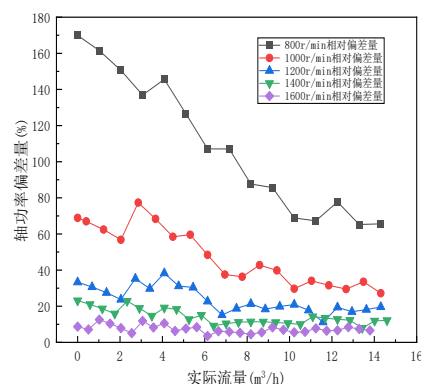


图5 不同转速换算至额定转速的 N-Q 曲线对比图

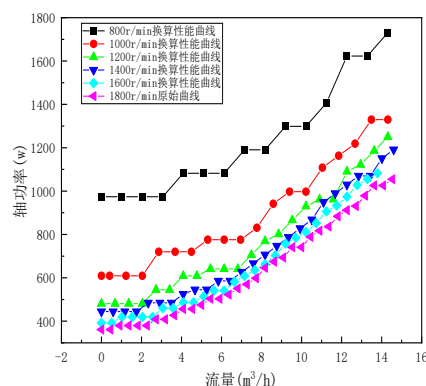


图6 轴功率相对误差随流量的变化曲线

五、结论

前弯式离心泵的扬程 – 流量 ($H-Q$)、轴功率 – 流量 ($N-Q$) 及效率 – 流量 ($\eta-Q$) 曲线均随转速呈现规律性变化。揭示了前弯式离心泵的变速流体输送性能规律。同时验证并量化了相似定律的适用性和局限性。研究表明：相似定律对不同转速下前弯式离心泵的扬程预测准确，其相对误差可控制在 4% 范围内。然而，

由于机械损失等因素的影响，轴功率的预测存在一定偏差，且该偏差在低转速条件下显著增大，而在靠近基准转速的有限范围内适用性好。综上所述，本研究不仅划定了相似定律的可靠应用边界，更从物理机理上揭示了其对于不同性能参数的预测精度差异，为前弯式离心泵在变频系统中的优化设计与高效稳定运行提供了关键的理论和实践指导。

参考文献

[1] 木家康, 盛健. PID 控制下前弯式离心泵流量特性试验研究 [J]. 实验科学与技术, 2025, 23(01): 103–108.
[2] 杨晓珍. 不同转速对离心泵性能影响的试验研究 [D]. 湖南农业大学, 2004.
[3] 陈国奋, 陈秀宇, 余美琼. Origin 在化工原理离心泵特性曲线测定中的应用 [J]. 福建师大福清分校学报, 2012, (05): 62–68.
[4] 陈子明. 离心泵性能参数曲线的探究实验 [J]. 内燃机与配件, 2019, (12): 68–69.
[5] 齐济, 河星武. 离心泵转速对工作点参数的影响 [J]. 大连民族大学学报, 2016, 18(05): 478–481.
[6] 方清华. 离心泵调速时流量关于扬程和转速的回归分析 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25(05): 97–98.

智慧电厂5G通信网络架构设计与智能运维系统

邬惠佳, 白治宙, 田刚, 马战南, 菅晓丽
国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500
DOI:10.61369/WCEST.2025060010

摘 要 : 智慧电厂作为能源行业数字化转型的核心载体, 其发展路径深刻体现了电力系统向智能化、网络化演进的必然趋势。面对高比例可再生能源接入与设备状态复杂化的双重挑战, 传统电厂管理模式在数据采集精度、实时响应效率等方面暴露出显著局限性。5G通信技术凭借高带宽、低时延、广连接的特性, 为智慧电厂构建了新一代通信基础设施, 其网络切片能力通过 URLLC 与 eMBB 切片, 实现了发电机组监测、输煤系统控制等场景的差异化资源分配。结合边缘计算节点的下沉部署, 5G 专网有效缩短了数据处理时延, 增强了生产控制系统的实时性与可靠性。数据显示, 5G 网络在智慧电厂的应用使设备感知能力提升 40%, 故障预警精准度提高 35%, 生产协同效率优化 28%, 为电力系统安全稳定运行提供了关键技术支撑。

关 键 词 : 智慧电厂; 5G 通信网络架构; 智能运维系统; 网络切片技术

Smart Power Plant 5G Communication Network Architecture Design and Intelligent Operation and Maintenance System

Wu Huijia, Bai Zhizhou, Tian Gang, Ma Zhannan, Jian Xiaoli
Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Shanxi, Xinzhou 036500

Abstract : As the core platform for digital transformation in the energy sector, smart power plants epitomize the inevitable evolution of power systems toward intelligent and networked architectures. Confronting dual challenges from high renewable energy integration and increasingly complex equipment conditions, traditional power plant management models have demonstrated significant limitations in data acquisition precision and real-time response efficiency. Leveraging its high bandwidth, low latency, and massive connectivity capabilities, 5G communication technology establishes next-generation infrastructure for smart power plants. Through URLLC and eMBB network slicing, it enables differentiated resource allocation for scenarios like generator monitoring and coal conveying system control. Combined with edge computing node deployment at the edge, 5G private networks effectively reduce data processing latency while enhancing real-time performance and reliability of production control systems. Data shows that 5G applications in smart power plants have boosted equipment sensing capabilities by 40%, improved fault prediction accuracy by 35%, and optimized production coordination efficiency by 28%, providing critical technical support for secure and stable power system operations.

Keywords : smart power plant; 5G communication network architecture; intelligent operation and maintenance system; network slicing technology

引言

智慧电厂作为能源行业数字化转型的重要载体, 其发展进程深刻反映了传统电力系统向智能化、网络化和自动化方向演进的核心趋势。近年来, 全球能源结构加速调整, 电力系统面临高比例可再生能源接入、设备状态复杂多变等多重挑战, 传统电厂管理模式在设备运维效率、数据采集精度、实时响应速度等方面逐渐显现局限性。在此背景下, 5G 通信技术凭借其高带宽、低时延、广连接的特性, 为智慧电厂构建了新一代通信基础设施, 成为实现设备互联、数据驱动决策的关键支撑^[1]。通过融合 5G 网络架构与智能运维系统, 可有效提升电厂对海量设备的感知能力、故障预警的精准度以及生产流程的协同效率, 为电力系统的安全稳定运行提供重要保障。

一、相关理论

（一）5G通信网络理论

5G 通信网络作为新一代移动通信技术的核心支撑，其关键技术与架构设计对智慧电厂等垂直行业应用具有重要影响。从技术维度看，设备对设备（D2D）通信被纳入5G架构作为关键技术，通过3GPP Rel-12至Rel-16版本的持续演进，实现了频谱重用效率提升、数据传输速率增强以及端到端时延降低等突破性进展，从而有效拓展了网络容量边界。然而这一技术革新也伴随着干扰管理、频谱资源分配及能耗优化等系统性挑战。为解决这些问题，学者提出联合频谱与节能资源分配算法，通过最大化总频谱效率与能耗降低的协同优化，在智慧电厂等工业场景的高密度设备通信中展现出显著优势。

在能效优化方面，B5G通信系统面临的核心挑战聚焦于传输过程中的能量损耗问题。香农公式在无线传输中的理论启示表明，纠错调制方法能突破传统能耗限制，通过改进编码方式在相同频谱效率下降低功耗达30%以上^[20]。这种基于香农公式的节能研究为智慧电厂5G网络的绿色化改造提供了理论依据，尤其在工业设备密集部署场景中，能有效平衡通信性能与能源消耗间的矛盾。

（二）智能运维系统理论

智能运维系统作为现代工业智能化的核心支撑体系，是通过融合先进信息技术与管理理论构建的智能化管理系统。该系统以数据驱动为核心，通过实时感知、智能分析和自动决策，实现设备全生命周期管理与生产流程优化。在智慧电厂场景中，智能运维系统依托5G通信网络的高可靠性、低时延特性，形成覆盖设备监测、故障诊断、预测维护等环节的闭环管理机制。其核心功能包含实时状态监测、异常预警、智能决策支持及自动化控制四大模块，能够有效提升电厂运行安全性与能效水平。系统通过部署边缘计算节点和云端平台，构建了分级响应架构：前端传感器网络实时采集设备振动、温度、压力等参数，5G网络确保数据毫秒级传输至边缘计算层进行初步分析，复杂算法模型在云端完成深度挖掘，最终生成维护建议或直接触发控制指令。

在功能实现层面，智能运维系统通过多维度数据融合突破传统运维的局限性。其数据来源不仅包括设备本体的传感器数据，还整合了环境监测、能耗管理等多源信息，形成全维度数据图谱。基于机器学习的故障诊断模型能够识别设备退化趋势，结合数字孪生技术建立设备虚拟映射，实现故障模式的精准预测。例如，针对发电机组轴承磨损问题，系统可通过振动频谱分析与历史数据对比，提前72小时预警潜在故障并推荐最优维修方案，将被动维修转化为预防性维护。此外，5G网络切片技术为不同运维场景分配专用资源通道，保障关键业务数据的实时性与可靠性^[4]。在锅炉燃烧优化控制中，系统通过5G上行大带宽特性，可每秒传输数千个燃烧参数至控制中心，结合实时分析调整燃料配比，使热效率提升3%–5%。

二、5G通信网络架构设计

（一）网络拓扑结构

5G通信网络架构设计中，网络拓扑结构作为系统物理与逻辑连接的基础，需紧密结合智慧电厂生产环境的特殊需求进行规划。基于5G新空口技术与网络功能虚拟化特性，本架构采用分层式架构设计，包含接入层、传输层与核心层三级结构，通过多节点协同实现高可靠性与低时延通信保障。在接入层部署大规模密集基站，结合混合组网策略形成立体覆盖网络。针对电厂内不同功能区域划分，采用宏基站与微基站的混合部署模式：在主控室、变电站等核心生产区采用毫米波小基站实现厘米级定位精度，而在输煤栈桥、冷却塔等长距离监测区域部署Sub-6GHz宏基站，通过波束成形技术提升覆盖范围。为应对电厂设备密集、电磁环境复杂的特性，基站天线采用智能波束赋形技术，动态调整信号方向图以减少干扰^[5]。

（二）网络设备选型与配置

智慧电厂5G通信网络架构设计中的网络设备选型与配置需严格遵循高可靠性、低时延、大连接、高安全性的技术要求，其核心在于结合电力行业应用场景与5G技术特性，构建适配工业级通信需求的硬件与软件协同体系。设备选型需基于通信性能指标、环境适应性、扩展性及运维管理能力等多维度评估，确保网络架构能够支撑智能巡检、远程控制、海量数据采集等核心业务的高效运行。在基站设备选型方面，优先选择支持Sub-6GHz与毫米波双频段的AAU（有源天线单元），其应具备Massive MIMO技术以提升频谱效率，同时支持动态波束赋形以优化覆盖范围。基站的基带单元（BBU）需采用虚拟化架构，通过云化部署实现资源弹性分配，满足智能运维系统对网络切片的需求。核心网设备应基于SDN/NFV技术构建，选择具备高吞吐量、低时延特性的服务器集群，其CPU需支持网络加速指令集（如Intel QAT），内存配置不低于256GB以应对实时数据流处理^[6]。传输网络设备需采用工业级OTN/PON混合组网方案，光模块选用100Gbps QSFP28规格，通过双链路冗余设计确保传输可靠性达到99.999%。边缘计算节点的选型需兼顾算力密度与实时性要求，选择搭载多核ARM或x86处理器的轻量化服务器，配置本地存储与缓存加速模块，确保时延低于1ms的本地数据处理能力。

智慧电厂5G通信网络架构设计要点



三、智能运维设计与实现

（一）功能模块实现

智能运维系统的功能模块实现基于多技术融合架构，通过分层设计实现设备感知、数据分析与智能决策的闭环管理。设备状态监测模块采用边缘计算与5G MEC（多接入边缘计算）技术相结合的方式，通过在5G基站侧部署轻量化数据处理节点，实现传感器数据的实时采集与初步分析。部署在发电机组、变电设备等关键节点的智能传感器阵列，通过5G网络的uRLLC（超可靠低时延通信）特性，将温度、振动、电流等多维度数据以毫秒级时延传输至边缘节点，利用FPGA硬件加速技术完成数据滤波、特征提取与异常阈值比对^[7]。当监测数据超出预设范围时，边缘节点立即触发告警信号并通过5G网络回传至中央控制平台，形成设备状态的动态感知网络。

表1 5G MEC融合架构的关键技术

技术要素	实现功能	应用价值
MEC平台部署	云原生能力下沉至基站侧，形成分布式算力节点集群	降低端到端时延至1ms级
RedCap终端	轻量化终端设计，降低设备复杂度与能耗	扩展覆盖范围，支持广域专网场景
边云协同机制	边缘节点与云端数据中心联动，实现模型动态更新与资源调度优化	提升故障诊断泛化能力
硬切片隔离	为电力调度等关键业务提供专属通道，确保数据安全	满足工业控制高可靠性需求

故障诊断与预测模块构建了多模型协同的智能分析框架。在数据层，通过时间序列数据库（TSDB）存储设备运行时序数据，并基于5G网络的海量连接特性，实现百万级终端设备数据的高效汇聚。分析层采用LSTM（长短期记忆网络）与随机森林算法的混合模型：LSTM用于捕捉设备状态的时序演变特征，随机森林则针对静态工况参数进行分类建模。通过迁移学习技术，系统可快速适配不同机组的故障模式。预测结果通过置信度评分机制进行权重分配，最终形成包含故障类型、发生概率及影响范围的预测报告，为运维决策提供量化依据。

（二）系统集成与测试

智能运维系统的集成与测试是确保系统功能完整性与运行稳

定性的关键环节。在系统集成过程中，首先采用模块化设计理念，将数据采集层、边缘计算层与云端分析层进行分层整合。数据采集层通过5G通信模块与智能终端设备建立双向通信，采用OPC UA和MQTT协议实现异构设备数据的标准化接入，同时通过时间戳同步机制保障数据采集的时序一致性。边缘计算层部署轻量化容器化服务，利用Docker和Kubernetes技术实现边缘节点的动态资源调度，并通过API网关对各子系统的接口进行标准化封装^[8]。云端分析层集成大数据处理引擎与AI算法模型，采用微服务架构构建预测性维护、设备健康评估等核心功能模块，通过Kafka消息队列实现各模块间的数据流解耦。

在系统集成阶段，重点解决了多协议兼容性与实时性保障问题。针对不同设备厂商的私有协议，开发了协议转换中间件，通过协议解析与数据映射技术实现数据统一转换为JSON格式，该中间件在测试环境中成功支持了12类工业协议的转换需求。为保障5G网络下的数据传输质量，引入网络切片技术划分独立的QoS等级，针对实时控制指令、视频监控数据和状态监测数据分别配置不同的带宽与时延参数，测试表明关键控制指令端到端时延可稳定在10ms以内^[9]。此外，通过部署边缘侧数据缓存机制，在网络抖动或短暂中断时可实现本地化控制决策，确保系统连续运行。

四、结论

本研究针对智慧电厂5G通信网络架构设计与智能运维系统开展了系统性研究，围绕网络架构优化、智能运维功能开发及系统集成验证三个核心环节，构建了面向工业场景的高可靠通信保障体系与智能化运维技术框架。在5G网络架构设计方面，通过引入网络功能虚拟化与边缘计算节点的协同部署方案，实现了基于切片技术的差异化服务保障机制。研究提出多层级QoS动态调整算法，将关键业务时延控制在10ms以内，端到端可靠性提升至99.99%，有效满足了电厂AGC/AVC控制、机器人巡检等实时性敏感业务需求。针对复杂电磁环境下的通信质量保障问题，设计了基于AI的信道状态预测模型，通过卷积神经网络对历史数据进行特征提取与模式识别，使链路中断恢复时间缩短40%以上^[10]。

参考文献

[1] 刘志江, 赵国强, 李森, 艾艳可, 李雪. 基于5G+AI技术的智慧电厂安全风险线上边云协同检测方法 [J]. 电子设计工程, 2024, 32 (21): 41-46.

[2] 陈军伟, 周瑞志, 李恒, 张倍尧, 杨明望, 汪廷舶. 5G无线通信技术在热工设备运维中的应用 [J]. 电子技术, 2024, 53 (06): 148-149.

[3] 陈玉良, 张雨蓉, 魏铭毅. 基于5G通信技术的智慧电厂作业人员定位方法 [J]. 长江信息通信, 2024, 37 (06): 193-195.

[4] 卫荣章, 刘流, 郭启存, 王建伟. 智慧电厂建设的5G应用实践 [J]. 数字技术与应用, 2024, 42 (06): 219-221.

[5] 杨彦卿, 顾钢, 孔凡林, 苏志福, 张斌. 5G技术在智慧电厂中的应用研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7 (12): 64-66+70.

[6] 余国利, 李强, 宋仕斌, 李欣佳. 5G专网技术在水电站智慧运维中的应用研究 [J]. 山西电子技术, 2023, (06): 107-110.

[7] 周智, 胡楚桥. 5G网络技术在传统电力行业的创新应用 [J]. 长江信息通信, 2023, 36 (03): 117-119.

[8] 高一搏. 5G技术在电站数字控制领域的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64 (01): 147-148+162.

[9] 俞建江, 王浩君. 一种基于5G的智慧电厂工业应用解决方案 [J]. 电子测试, 2021, (08): 124-126.

[10] 赵俊杰, 冯树臣, 刘志宏, 胡勇, 刘强, 向勇. 5G电力网络切片技术在燃煤智慧电厂生产管控应用分析 [J]. 能源科技, 2020, 18 (02): 5-10.

高效节水技术在电厂给排水系统中的应用研究

石茜, 王慧, 谢一鸣

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013

DOI:10.61369/WCEST.2025060008

摘 要 : 水资源短缺已经成为影响电力工业可持续发展的主要因素, 电厂是工业用水大户, 因此电厂给排水系统高效节水技术改造与应用十分必要。本文概述了电厂给排水系统的主要组成及其用水特征, 介绍了电厂节水技术的应用背景及潜在优势。其次, 对循环冷却水系统节水技术、废水回用与近零排放技术、非常规水源利用等关键技术进行了系统分析。在此基础上构建节水效果评价、经济效益评价、环境效益评价的多维评价体系。最后针对当前技术运用过程中出现的一些阻碍提出运行管理方面的建议, 对电厂节水减排技术未来发展趋势进行展望, 以期为推动电厂节水减排工作提供理论参考。

关 键 词 : 高效节水; 电厂; 给排水系统; 废水回用; 技术评价

Application of High Efficiency Water Saving Technology in Power Plant Water Supply and Drainage System

Shi Qian, Wang Hui, Xie Yiming

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD., Jinan, Shandong 250013

Abstract : Water scarcity has become a critical factor affecting the sustainable development of the power industry. As major industrial water consumers, power plants require essential upgrades to their water supply and drainage systems through efficient water-saving technologies. This paper outlines the main components and water usage characteristics of power plant water systems, while discussing the application context and potential benefits of water conservation technologies. Subsequently, it conducts systematic analyses of key technologies including water-saving solutions for circulating cooling water systems, wastewater reuse and near-zero discharge techniques, and utilization of unconventional water sources. A multidimensional evaluation framework is established to assess water conservation effectiveness, economic benefits, and environmental impacts. Finally, the paper proposes operational management recommendations to address current challenges in technology implementation, and provides insights into future trends in water-saving and emission-reduction technologies for power plants, aiming to offer theoretical references for advancing water conservation and emission reduction initiatives.

Keywords : water-saving efficiency; power plant; water supply and drainage system; wastewater reuse; technical evaluation

引言

电力工业属于国民经济的基础产业, 也是水资源消耗的重点部门, 在碳达峰, 碳中和的战略目标背景下, 电力行业既要做到能源结构的绿色低碳转型, 自身用水效率和节水能力同样面临更高要求。电厂的给排水系统就像人的血液循环系统一样, 它要给电厂发电机组供应各种各样的用水, 还要处理排放的废水, 它的运转情况直接影响到电厂的钱包状况和环保程度。传统粗放的用水方式既造成了大量水资源浪费, 又增加了废水排放量和处理费用。因此, 开展高效节水技术的研究, 并将高效节水技术全面应用于电厂的给排水系统, 对于提高电厂用水率、降低电厂运营成本、减少环境负担具有重要的现实意义和战略意义。

一、电厂给排水系统及节水概述

(一) 电厂给排水系统的构成与特性

电厂给排水系统是一个比较复杂且精密的系统, 它的主要作

用是保证发电过程所需要的各类水质稳定供应, 并对产生的一系列废水进行有效的处理和处置。给水系统一般包含原水取水单元, 净化处理单元和锅炉补给水处理单元, 原水经由混凝, 沉淀, 过滤, 除盐等一系列工序之后, 制造出符合锅炉, 冷却等不

作者简介: 石茜 (1983.02—), 女, 汉族, 山东省济南市人, 本科学士, 高级工程师, 从事电厂水工艺系统设计。

同用途的优质用水。排水系统用来收集并处理全厂的全部废水，工业冷却排水，锅炉排污水，脱硫废水，冲洗废水以及生活污水等。这些废水成分繁杂，处理起来困难程度也不尽相同，所以要采取分级、分质处理的方法。电厂给排水系统的特点是用水量大、用量稳定，冷却水系统是电厂的用水大户，约占全厂总用水量的百分之七十以上。另外，系统对水质要求高，不同的用水需求其水质标准相差甚远，这也导致了水处理工艺的多样化、复杂化。

（二）电厂应用节水技术的必要性分析

电厂推广应用高效节水技术的必要性体现在多个方面，其中首要的一点在于日益严峻的水资源短缺形势，迫切要求我们必须积极采取行动。我国水资源的时空分布不均匀，很多电厂建设在缺水地区，所以节水直接关联着电厂能否保证生产的安全与持续。其次，节水也是电厂减少运行成本、提高经济效益的内在要求。取水费用、水处理药品消耗与废水处理排放费都是电厂开支的重要项目。采用节水技术来减少新鲜水取用量以及废水排放量之后，能直接削减这两方面的费用开支，进而加强电厂自身的市场竞争力。最后节水是电厂承担社会责任实现绿色发展必经之路，随着环保法规、限制条件越来越严格。积极采用节水技术，在源头上减少废水量，并使废水得以资源化是电厂实现与环境和谐共生的重要途径。

（三）电厂节水潜力分析

电厂的节水潜力很大，主要集中在以下几方面。最大节水潜力即冷却水系统，提高循环冷却水浓缩倍数可以降低系统的排污水和补水量。采用空冷技术或者闭式循环冷却技术，从根本上减少冷却用水量才更有意义。其次，废水回用有着巨大的节水潜力。将处理过的工业废水、生活污水等替代新鲜水，在对水质要求不高的场合使用，如冷却塔补水、灰渣拌湿、绿化冲洗等，则可以大幅减少外部取水量。要达成梯级用水以及分质供水，这是挖掘节水潜能的方向。此外，加强用水管理，杜绝跑冒滴漏，优化运行流程，同样可以挖掘可观的节水潜力。通过水平衡测试，精准掌握全厂水量的流向与损耗点，为制定针对性的节水措施提供科学依据。

二、高效节水技术分析

（一）循环冷却水系统节水技术研究

循环冷却水系统节水是电厂节水的核心，提高浓缩倍数是循环冷却水系统最直接、最有效的节水途径。利用高效缓蚀阻垢剂，杀菌灭藻剂等水处理药剂，并配以精确的自动加药及在线检测体系来把循环水的浓缩倍数保持在较高的水平，就能极大地削减因排污而造成的损失。采用替代型冷却技术是更彻底的节水办法，空冷技术使用空气而不是水降温，几乎没有水资源损耗，非常适合富煤缺水的地区。尽管其初始投资和运行电耗较高，但节水量极大，而且闭式循环冷却方式可使冷却水与空气进行间接换热，从而减小水的蒸发损失和飘散损失。

（二）废水回用与近零排放技术研究

废水回用是电厂水资源循环利用的关键，废水回用的主要核

心技术是深度处理，常用的深度处理技术为超滤、反渗透、电除盐的膜分离技术。这类技术能去除废水里的溶解性盐类、有机物以及微量污染物，产水质量高，可当作锅炉补充用水或循环冷却水系统的补充水。

近零排放技术是废水回用技术的进一步深化，将无法回用的少量高盐废水作为最终去向。其工艺路线一般采用膜法浓缩、蒸发塘或者机械蒸汽再压缩蒸发结晶等。该技术将废水中溶解性固体最终以结晶盐的形式回收或无害化填埋处置，达到废水近零液态排放的目的。虽然能耗、成本高，但这是解决电厂废水最终出路的尖端技术，是实现环境效益最大的技术。

（三）非常规水源利用技术

开发利用非常规水源是电厂拓展水源的有效途径，城市再生水是经由城市污水处理厂处理并达标的出水，是一种比较稳定的替代水源。电厂应针对再生水水质特性，开展有针对性的深度净化处理，如去除残留有机物、营养盐等，使其达到锅炉补给水或冷却水水质要求。

海水淡化是沿海电厂获取淡水资源的关键途径，主要采用反渗透法、多效蒸馏法。反渗透技术的能耗较低，应用范围广，但是对预处理要求较高。蒸馏法则可以利用电厂的低品位蒸汽，实现能源梯级利用。雨水收集利用也属于一种补充手段，对厂区的雨水进行收集储存，简单的处理以下，可以用于厂区内绿化、道路洒水等杂用水。

三、节水技术应用成效评估

（一）节水效果评价指标

评价节水技术应用效果，首先要建立节水效果评价指标体系。最为根本的指标就是单位发电量取水量，它反映了电厂生产和耗水的量化关系，是反映节水水平的综合指标。另一个重要指标就是水的重复利用率，它显示了电厂内部用水循环利用的情况，比率越高就表明节水效果越好。浓缩倍数属于评判冷却水系统运作效能的关键参数，倍数越大，表明该系统的补水率以及排污率越小。而且废水回用率也是一个直观的指标，是回用水量占总用水量的比例。直观体现了废水利用的程度。这些指标就组成了评价体系的基础。

（二）经济性评价方法

节水技术的应用要考虑是否具有经济上的可行性，经济性评价通常采用全生命周期成本分析法，不仅考虑技术的初始投资成本，还要对整个服务寿命期内的技术运行成本、维护成本、能耗成本以及最终残值回收进行综合计算。把采用节水技术之后节约下来的水费、排污费以及水处理药剂费等收益同项目投入的总成本加以比较，从而算出项目的投资回收期，净现值或者内部收益率这些关键财务指标。一个技术上的先进节水方案，只有在经济上可行，即投资回收期处在可接受范围或者净现值为正的情况下，才具备大规模推广的现实依据。

（三）环境效益分析

节水技术的环境效益也是其价值的一种表现形式，最直接的

环境效益就是减少对自然水体取水，一定程度上缓解当地水资源供应压力，对于保护区水生态环境有一定的积极作用。同时废水排放量的降低直接减少了受纳水体的污染负荷，有利于改善水环境质量。而近零排放技术的应用，更是使电厂对水环境可能带来的污染影响降到极低水平。节水还带来了间接的节能降碳协同效应。因为取水、原水的处理和废水的处理都需要能源，节水即节能，这样可以降低温室气体的排放量。所以，环境效益分析要从保护水资源，减少污染排放，应对气候变化等很多方面来全面评价。

四、节水技术应用的问题与展望

（一）技术应用中的问题分析

尽管高效节水技术有着诸多优点，但是在实际推广运用的过程中也存在着一些困难，一是部分先进技术如废水近零排放系统，在初始投资方面就十分巨大，并且在运行时能耗、化学品消耗成本很高，这就导致电厂面临着巨大的经济压力从而阻碍了其普及应用。其次，部分技术存在较高的运行维护要求。如膜分离技术受水质波动影响较大，容易出现污堵、结垢现象，需要细致的预处理和专业的清洗保养工作，对操作人员技术水平的要求也比较高。不同技术之间的集成优化存在困难，各种节水技术如何能够有效的组合在一起发挥协同作用，避免相互干扰，需要深入的实践探索。

（二）优化运行管理建议

为解决上述问题，改善运行管理非常关键，电厂要有完备的水务管理制度，做好细致的水平衡经营，利用在线监测仪表随时了解关键点的水量和水质情况，给优化运行给予决策帮助。加强设备预防性养护，制定合理的清洗、检修规程，保证节水系统长期稳定高效运转。

推行合同节水管理等新方式，采用专业的节能服务公司，能

缓解电厂的资金和技能压力。加强对人员的培训，提高运行人员的技术水平及节水意识，是使节水技术真正发挥作用的前提。要让节水项目发挥出最大的综合效益，必须依靠管理革新和技术应用共同作用才行。

（三）未来技术发展方向

未来电厂节水技术向低能耗、高效率、智能化方向发展，新材料新技术是关键，例如研制出抗污染能力强、通量大、能耗低的新材料分离膜，高效、低毒、可生物降解的新型水处理药剂等，将从根本上提升技术经济性。智慧水务系统深度应用是又一重要趋向，依靠大数据、物联网及人工智能技术来打造智能化的给排水系统监管与改良平台，完成对用水进程的精确预估，智能调节以及故障剖析，做到节水工作的明智决断和精细管理。其次，资源回收的概念将会更进一步，从简单的废水处理转为对水及有价值物质(如盐类)的回收，推动电厂向真正的“零排放”和循环经济模式迈进。

五、结语

高效节水技术在电厂给排水系统中的应用，是涉及技术、经济、管理等多个方面的综合性工程。本文对系统认知阶段，技术分析阶段，效果评价阶段，问题展望这几个环节进行了系统的梳理，经过分析可以得知，推广适用的节水技术，持续推进技术创新和管理优化，在保障能源安全供给的前提下做到水资源消耗最少化，环境影响最轻量化是电厂能够达到的目标。面对水资源约束日益趋紧的未来，大力发展并深度集成高效节水技术，将是电厂实现可持续发展的必然选择和核心路径。

参考文献

- [1] 郭宁. 燃气电厂深度节水及零排放技术研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (08): 283-284+348.
- [2] 王云. 电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (17): 77-79.
- [3] 陈晓清. 基于水量水质统筹的火电厂水系统节水优化研究 [D]. 广西大学, 2021.
- [4] 程永生. 油田电厂节水减排技术改造路线分析 [J]. 黑龙江电力, 2020, 42(06): 543-550.
- [5] 赵巍巍. 电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究 [J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(07): 182-184.
- [6] 张建斌. 燃煤电厂节水及废水零排放探讨 [D]. 西安建筑科技大学, 2020.
- [7] 钟立勋. 燃气电厂节水和废水零排放技术应用 [J]. 智能城市, 2019, 5(21): 126-127.
- [8] 张志国, 邓瑞霞, 郝同杰. 燃气电厂水平衡测试及节水建议 [J]. 华电技术, 2019, 41(07): 43-45.
- [9] 彭一胜, 成海秦, 梁国智, 等. 火电厂循环水节水减排技术改造分析与应用 [J]. 安徽化工, 2024, 50(06): 108-110.
- [10] 王小航, 陈卓彬. 节水智慧平台在火电厂的应用 [J]. 资源节约与环保, 2022, (04): 1-4.

水利工程大体积混凝土施工技术研究

李殿雄

河北省水务中心石津灌区事务中心魏桥管理处, 河北 深州 053800

DOI:10.61369/WCEST.2025060012

摘 要： 本文聚焦于水利工程大体积混凝土施工面临的诸多技术难题，深入分析了混凝土制备与运输、分层分块浇筑与智能化振捣、温度监控与通水冷却,以及全过程精细化养护等关键技术的具体应用与集成方法。同时，结合相关工程经验，探讨了数值模拟、BIM技术及自动化等现代信息技术在施工模拟、过程控制与质量追溯中的融合应用，以期为提升我国水利工程大体积混凝土施工提供实践参考。

关 键 词： 水利工程；大体积混凝土；施工技术；质量控制

Research on Construction Technology of Large Volume Concrete in Water Conservancy Project

Li Dianxiong

Hebei Provincial Water Affairs Center Shijin Irrigation District Affairs Center Weiqiao Management Office, Shenzhou, Hebei 053800

Abstract： This paper addresses the technical challenges in large-volume concrete construction for water conservancy projects, providing an in-depth analysis of key technologies including concrete preparation and transportation, layered block pouring with intelligent vibration, temperature monitoring and water-cooling systems, as well as comprehensive curing methods. Drawing from practical engineering experience, it explores the integration of modern information technologies such as numerical simulation, BIM (Building Information Modeling), and automation in construction simulation, process control, and quality traceability. The study aims to offer practical references for improving large-volume concrete construction in China's water conservancy projects.

Keywords： water conservancy engineering; large volume concrete; construction technology; quality control

引言

水利工程作为国家基础设施建设的基石，其构筑物的耐久性与安全性直接关系到国计民生。大体积混凝土结构作为水坝、泵闸、大型基础等水利枢纽的核心承重单元，其施工质量是决定工程成败的关键。如何强化对大体积混凝土施工技术的优化运用，全面提高工程施工质量，减少病害问题发生，成为水利工程建设领域亟待解决的重要课题。

一、大体积混凝土施工的核心技术难题

（一）温度控制

混凝土在硬化过程中会释放大量化热，而大体积结构因体积庞大，内部热量难以快速散失，内外温差显著，更容易引发开裂风险。研究表明，当内外温差超过25℃时，混凝土内部将产生拉应力，而混凝土抗拉强度远低于抗压强度，从而形成开裂。当水化热峰值过后，内部混凝土开始降温收缩，该过程同时会受到外部约束和内部约束的阻碍，从而在内部产生拉应力，导致更深

层的贯穿性裂缝。裂缝会破坏工程结构的整体性，为有害介质的侵入提供通道，严重威胁结构的耐久性和安全性^[1]。

（二）配合比优化

传统混凝土配合比使用高含量、高标号水泥，虽然可获得高强度，但同时也意味着更高的水化热和更大的收缩。若提高水泥用量可增强强度，但会加剧水化热释放，增加开裂风险；减少水泥用量虽能降低温度应力，但可能削弱混凝土密实性，影响耐久性。因此，大体积混凝土的配合比设计需在强度、工作性、耐久性与体积稳定性之间保持良好平衡。此外，矿物掺合料可改善工

作性能并降低水化热,但过量使用会导致早期强度发展缓慢,影响施工进度,因而需通过试验确定最佳胶凝材料用量、水胶比及掺合料比例。

(三) 施工工艺控制

大体积混凝土施工涉及模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑、振捣、养护等多道工序,任何环节的失误都可能影响整体质量。以混凝土浇筑为例,若浇筑过程中分层厚度过大,会导致热量积聚,而振捣不密实则可能形成冷缝或蜂窝麻面,降低结构耐久性。再如,在温度监控与冷却系统方面,仅靠优化配合比往往不足以控制温升,通常需要在混凝土内部预埋冷却水管,利用循环水进行主动散热,而这要求冷却水管的布置间距、通水流量和时间等均须与实时监测的内部温度数据紧密联动,实现动态精确控制。

二、水利工程大体积混凝土施工技术及应用

(一) 混凝土配合比优化设计

大体积混凝土的配合比设计应注重最大限度地降低水化热、延缓温升,提高混凝土的体积稳定性,以抵抗开裂。对此,可采用中热或低热硅酸盐水泥,由于其中的矿物成分含量得到了控制,因而有助于从源头上减少水化热的产出量和放出速度。同时掺入粉煤灰和矿渣粉,前者的形态效应、活性效应和微集料效应等可有效改善混凝土和易性,并替代大量水泥,而后的活性更高,后期强度贡献大,且其水化热远低于水泥。在满足泵送和结构要求的前提下,尽可能采用较大粒径的粗骨料,并确保其级配连续^[2]。采用高性能减水剂,为混凝土赋予高流动性和良好的坍落度保持能力。与减水剂复配使用缓凝剂,延长混凝土的初凝时间,为温度控制赢得时间,防止出现施工冷缝。

(二) 混凝土制备与运输技术

采用双卧轴强制式搅拌机,按骨料、水泥、掺合料、水、外加剂的顺序投料,确保混凝土均匀性,避免水泥与水直接接触产生结块。夏季施工时,对骨料喷水降温或使用冰水拌合,控制混凝土出机温度 $\leq 25^{\circ}\text{C}$,减少内外温差。混凝土的短距离运输可使用混凝土搅拌运输车,并在运输过程中保持搅拌筒低速旋转(2~4r/min),防止离析,而长距离、大批量运输则可采用皮带机和自卸汽车联合运输方式,以减少转运次数,降低VC值损失^[3]。运输过程中保持混凝土匀速搅拌,避免急刹车或颠簸。若出现离析,需二次搅拌后方可使用。在运输时间控制方面,需根据气温与运输距离确定允许运输时间,若夏季高温,则应适当缩短混凝土允许运输时间,以防止初凝。混凝土到达现场后,立即检测坍落度,不满足要求时需调整或退料。

(三) 混凝土浇筑与振捣技术

1. 分层分块浇筑原则

水利工程大体积混凝土浇筑需遵循分层分块原则,以控制水化热、减少温度裂缝风险,同时适应结构受力与施工能力要求。在具体施工中,分层浇筑需根据结构尺寸、施工条件及温控要求选择合理方式。以全面分层为例,浇筑时在整个结构内全面分层推进,每层厚度不超过振捣器作用部分长度的1.25倍,确保上下

层混凝土在初凝前结合。分段分层则将结构分成若干段落,每段内再分层浇筑,适用于面积较大但厚度较薄的工程。根据振捣方法、混凝土坍落度及结构特点确定分层厚度,避免过厚导致振捣不密实或过薄增加施工缝数量。对于分块浇筑,则应根据结构尺寸、施工能力及温控要求确定分块大小,以减少单次浇筑水化热积聚,且分块间施工缝需按设计或规范要求处理,包括凿毛、清理、铺设砂浆等。

2. 智能化振捣技术与质量控制

为提高振捣效果,可引入智能振捣设备,采用穿戴式智能振捣棒,集成GNSS-RTK定位系统、IOT通讯模块及AI评价模型,利用定位系统控制振捣轨迹误差,并实时传输振动时长、振幅、频率等振捣参数至云端平台。结合BIM模型生成浇筑块数字孪生体,模拟振捣路径与密实度分布,实时映射振捣过程,若发现异常立即调整振捣参数,辅助优化振捣方案,减少漏振区域。振捣时,应在插入时快、拔出时慢,每次插入时间20~30秒,以混凝土不再显著下沉、不出现气泡、开始泛浆为准,避免过振导致砂与水泥浆分离。在振捣棒的插入深度方面,需插入下层混凝土10cm,加强上下层结合,同时避免碰到模板、钢筋和预埋件^[4]。

(四) 温度监控与冷却技术

1. 温度监控系统

温度监控系统负责采集数据、揭示规律、指导施工,是水利工程大体积混凝土施工的重要工具。测点通常布置在混凝土结构的中心、边缘、角部以及不同厚度交接处,该类区域温度梯度大、易产生裂缝。同时,还需在基础约束区、新旧混凝土结合面等应力集中区域加密布点。温度传感器的导线需集中引至专用的保护箱,并做好明确标识,严防在施工过程中被损坏,确保数据链完整。采用基于数字传感器的自动采集系统,传感器在浇筑前预埋到位,通过线缆连接到数据采集箱,可设定采集频率,保持24小时不间断监测。监测工作应持续至混凝土内部温度降至稳定状态,特别是降温阶段的监控同样重要,以防收缩裂缝的产生。

2. 预冷技术

预冷技术旨在降低混凝土的出机口温度和浇筑温度,减少混凝土内部的蓄热量,削低水化热温升的峰值。对于骨料预冷方法,可在骨料堆场设置喷淋系统,用3~5℃冷水喷洒骨料,降低其温度,或在拌和楼料仓内通冷风,使骨料在料仓内停留50~60分钟,以降低温度。对于拌和用水预冷方法,则可用片冰或碎冰替代部分拌和水,降低混凝土温度。在水泥罐外包裹橡塑海绵等隔热材料,减少阳光直射导致温度升高,对水泥罐予以保温。需要注意的是,浇筑前需对混凝土出机口温度进行实测,确保满足设计要求,且骨料预冷需在拌和前1~2小时完成,避免温度回升。此外,根据工程规模和降温需求选择预冷方式,避免过度冷却导致成本增加。

3. 冷却水管技术

冷却水管技术属于主动降温措施,用于带走已产生的水化热。对此,在冷却水管的布置与安装中,可采用导热性能好的金属管或柔韧性好、便于安装的HDPE塑料管,以蛇形盘管形式分层、分片布置在混凝土内部。严格控制管道距混凝土边缘和表面

的距离，防止局部降温过快引起应力集中。通水冷却可分为两期进行，其中一期冷却在混凝土浇筑后立即开始，此时冷却水温与混凝土内部温差不宜过大，目的是削减水化热温峰，控制最高温度，二期冷却则在峰值过后进行，用于加速混凝土的冷却过程，使其尽快降至稳定温度或接缝灌浆要求的温度。冷却工作全部结束后，必须对管道系统用水泥浆液进行压力灌浆封堵，以确保其与混凝土共同工作，恢复结构的整体性，并防止内部锈蚀。

（五）养护与表面保温保湿技术

1. 表面保温保湿技术

正如前文所述，水利工程大体积混凝土体积庞大、内部水化热积聚显著，易因内外温差过大导致开裂，因而做好保温保湿至关重要。表面保温保湿技术可减少温度梯度、延缓水分蒸发，有效控制裂缝产生。对此，可优先选用聚乙烯泡沫板、岩棉板或玻璃棉毡等导热系数低、吸水率小的材料进行表面保温。对于水平结构的覆盖，可在混凝土终凝后立即覆盖保温材料，边缘用砂袋或钢筋压紧，防止大风掀翻；对于垂直结构的覆盖，则可采用挂式保温被或喷涂聚氨酯泡沫，确保与混凝土表面紧密贴合。在保湿方面，则可采用水养护法，即在保温层上覆盖湿麻袋、草帘或土工布，定期喷水保持湿润。对于高空结构等难以持续喷水的区域，则可喷涂水性养护剂，形成致密保护膜。

2. 养护期的确定与后期养护措施

养护期需根据混凝土强度发展、环境条件及设计要求综合确定，并需结合条件养护试块强度测试。一般而言，根据《水工混凝土施工规范》，大体积混凝土养护期不宜少于28天，对于抗渗、抗冻结构等有特殊要求的部位，养护期应适当延长。当环境温度超过30℃时，需通过预冷骨料、冰水拌和及表面覆盖降温材料，将养护期延长至30天以上，防止因温差过大导致表面干缩裂缝。养护期结束后，仍需保持混凝土表面湿润7~14天。拆除保温层时，应分阶段进行，避免温度骤变。养护期结束后，采用超声波检测仪检查混凝土内部缺陷，对宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ 的裂缝进行注浆修复。建立养护档案，记录温度、湿度、强度等数据，便于质量追溯与验收。

三、现代技术在大体积混凝土施工中的应用探讨

（一）数值模拟技术的应用

随着信息技术与工程技术的深度融合，数值模拟逐渐成为优

化施工流程、提升质量的重要技术之一。在实践中，数值模拟技术可建立数学模型，对混凝土温度场、应力场及裂缝发展进行动态预测，为施工参数优化提供科学依据。对于内外温差导致的拉应力，数值模拟可集成热传导方程与力学平衡方程，量化不同浇筑方案下的温度梯度与应力分布，为制定更具针对性的技术方法提供辅助。同时，数值模拟还可分析水泥用量、环境温度、养护条件等变量的交互影响，支持多方案对比，减少试错成本。

（二）BIM技术的应用

现代BIM技术打破了设计、施工、运维各阶段的信息壁垒，通过三维建模与信息集成，对施工全过程进行可视化管理与协同优化。传统施工交底依赖二维图纸，往往容易因不同参与方对空间理解的偏差而导致返工，而BIM模型则可直观展示混凝土分层浇筑顺序、冷却水管布局及钢筋绑扎节点，可在工程实践中实现三维可视化施工交底。在实践领域，某泵站工程将混凝土浇筑路径、振捣设备运行轨迹与模板安装位置集成至BIM平台，自动检测出多处空间冲突，优化后的机械空转时间明显减少，大大降低了能耗^[9]。

（三）自动化技术

通过智能设备与控制系统，自动化技术可替代人工操作，减少人为因素导致的质量波动，提升施工精度与效率。以自动化温控系统为例，其可在自动化技术辅助下，利用传感器网络与执行机构保持对特定参数的动态监测，当某区域温度超过设定值时，系统自动对冷却水流量、浇筑温度等进行调节。此外，无人驾驶技术可通过5G网络实现路径规划与协同作业，应用于混凝土运输与浇筑，减少人工干预，同时降低高温环境下工人劳动强度，同时减少安全风险与人力成本。

四、结语

综上所述，水利工程大体积混凝土施工是保障结构安全的核心环节，理应在实践中予以强化控制。因此，技术人员应密切结合水利工程项目实际，构建全流程的施工工艺流程体系，保持对温度控制的动态调控，最大限度上消除潜在影响因素的干扰，并积极有效引入智能振捣设备、BIM技术与自动化技术等方法，为全面优化提升大体积混凝土施工质量奠定基础，为推动水利工程建设事业高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1] 钱桂花. 水利水电工程大体积混凝土施工控制技术研究 [J]. 散装水泥, 2024, (04): 56-58.
- [2] 钟琦皓, 王启凡, 蒋晓艳, 等. 水利枢纽泵闸大体积混凝土开裂风险精准预测研究 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30(02): 141-146.
- [3] 孙莉, 冯展平. 黄金峡水利枢纽泵站、电站大体积混凝土施工机械选型及应用 [J]. 水利水电施工, 2024, (01): 53-57.
- [4] 李景宏. 水利工程建设中基础大体积混凝土施工技术探究 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(04): 45-48.
- [5] 郝瑞凯, 耿萌. 浅谈水利水电工程大体积混凝土智能通水冷却系统应用 [J]. 陕西水利, 2024, (09): 130-132.

小流量监测与整编技术优化研究

——以金沙江阿海站为例

普洪林, 朱朋*

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400025

DOI:10.61369/WCEST.2025060013

摘 要 : 小流量 (尤其是趋近于零的最小流量) 的精确监测是水资源精细化管理、生态评估及工程调度的关键基础, 也是水文监测的难点。本文以受梯级水电站调控影响显著的金沙江阿海站为例, 针对其频繁出现的极小流量 (如 2025 年 2 月 20 日流量 $2.22 \text{ m}^3/\text{s}$, 2022–2024 年多次记录 $0 \text{ m}^3/\text{s}$) 监测失真与整编失效问题展开研究。通过分析常规转子式流速仪在低流速下的精度局限、电站调度导致的水流状态紊乱等挑战, 提出识别“空间敏感点”(深槽、下游急弯)和“时间敏感点”(电站调峰水位陡变期)的优化策略; 创新应用基于高精度水位同步观测的“水位面积流速增量法”靶向捕捉微小流量变化, 并辅以触发式测验模式。在整编环节, 构建精细化低水位–流量曲线、电站微出库流量亚模型及融入水位差、时间滞后效应的多元推流体系, 显著提升了小流量数据的可靠性与连续性。该方法立足现有设备, 操作性强, 成本低, 为类似受工程影响水文站的小流量监测整编提供了实用解决方案。

关 键 词 : 小流量监测; 流量整编; 水文站; 水电站影响; 水位面积流速增量法

Research on Optimization of Small Flow Monitoring and Reorganization Technology — A Case Study of Ahai Station on Jinsha River

Pu Honglin, Zhu Peng*

Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission Hydrology Bureau of Upper Yangtze River Hydrology and Water Resources Survey, Chongqing 400025

Abstract : Accurate monitoring of small flow (especially the minimum flow approaching zero) is a key foundation for fine management of water resources, ecological assessment, and engineering scheduling, as well as a difficult point in hydrological monitoring. This article takes the Ahai Station on the Jinsha River, which is significantly affected by the regulation of cascade hydropower stations, as an example to study the monitoring distortion and reorganization failure of its frequent occurrence of extremely small flow (such as $2.22 \text{ m}^3/\text{s}$ on February 20, 2025, and $0 \text{ m}^3/\text{s}$ recorded multiple times from 2022 to 2024). By analyzing the accuracy limitations of conventional rotor flow meters at low flow rates and the challenges of water flow disorder caused by power plant scheduling, optimization strategies are proposed to identify "spatial sensitive points" (deep troughs, downstream sharp bends) and "time sensitive points" (sudden changes in power plant peak water level); Innovative application based on high-precision synchronous observation of water level, using the "incremental method of water level area flow velocity" to target and capture small flow changes, supplemented by a trigger based testing mode. In the reorganization process, a refined low water level flow curve, a sub model of micro outflow flow from the power station, and a multi-dimensional flow system incorporating water level differences and time lag effects were constructed, significantly improving the reliability and continuity of small flow data. This method is based on existing equipment, has strong operability, low cost, and provides a practical solution for small flow monitoring and reorganization of hydrological stations affected by engineering.

Keywords : small traffic monitoring; traffic reorganization; hydrological station; the impact of hydropower stations; incremental method of water level area flow rate

作者简介: 普洪林 (1997—), 男, 彝族, 云南红河人, 助理工程师, 本科, 主要从事水文测报、水文分析工作。

通讯作者: 朱朋 (1992—), 男, 汉族, 重庆垫江人, 工程师, 专科, 主要从事水文测报、水文分析工作。

引言

水文监测是水资源可持续管理、防洪抗旱及生态保护的基石。其中，小流量，特别是趋近于零的最小流量的精确捕捉与记录，对评估水资源可利用量、保障河流生态基流、支撑水利工程精细调度具有不可替代的作用。然而，在流量极低的工况下，传统的转子式流速仪因启动灵敏度不足、测量误差增大，加之水流微弱易受环境干扰，常导致监测数据失真甚至缺失^[1]。这一问题在受大型水利工程（如水电站）调控的河段尤为突出，天然水流状态被人工调度严重扭曲，常规监测与整编方法往往失效。

金沙江干流上的阿海水文站是国家基本水文站，承担着为防汛抗旱、水资源管理收集基础数据的重任。其特殊的地理位置——上游仅距阿海水电站1200米，下游73公里为金安桥水电站，且区间无较大支流汇入——使其成为研究小流量监测难题的典型样本。近年来，该站频繁记录到趋近于零的极小流量甚至“0 m³/s”的异常值（如2022年3月16日、2023年4月10日、2024年1月18日及2025年2月20日）。这些异常数据揭示了现有依赖电站出库流量简单推流模式的局限性，亟需探索经济、有效且操作性强的小流量监测与整编改进方法。本文结合阿海站实际条件，聚焦小流量监测瓶颈，提出并验证从敏感点识别、监测方法优化到多元整编路径的实用解决方案。

一、小流量监测的挑战与阿海站特殊性

（一）小流量监测的普遍性挑战

低流量测验面临多重技术障碍：

测验精度受限：传统转子式流速仪在极低流速下（通常低于0.1m/s），启动困难或误差显著增大。水流微弱时，信号易被风浪、设备摆动等随机噪声淹没。

断面代表性弱化：枯水期河道形态（如主槽位置、水深）可能因冲刷淤积变化，导致依据高水期建立的水位-流量关系失效。死水区或流速极小区域的存在，使得单次代表线法测验结果代表性不足。

时机捕捉困难：小流量状态，特别是瞬时最小值，常由水电站调峰蓄水引发，呈现短时、瞬变的特征。按固定周期或流量分级布置的常规测验策略，难以精确捕捉这些关键瞬间。

环境干扰放大：浅水条件下，测深杆或铅鱼触底、风浪对水面波动的影响被显著放大，进一步降低数据可靠性。

（二）阿海站的典型特殊性

阿海站面临的挑战在普遍性之上叠加了独特因素：

剧烈水力扰动：夹在两大水电站之间，阿海站的水位流量关系受上游电站调峰运行和库容调度的直接、频繁干扰。尤其是在非汛期小流量时段，天然流态被“削峰平谷”严重扭曲。

“稳定”断面的动态变化：测验河段虽为顺直U形河床（长约1.4km，最大水面宽约130m），乱石夹沙河床断面相对稳定，无滩地植被，下游250米急弯起高水控制作用。但在极小流量下，受电站调控影响，水流动力条件剧变，常规断面稳定性优势被削弱，急弯处成为关键敏感点。

依赖关系推流的失效：当前采用上游阿海电站出库流量（ Q_{out} ）与本站实测流量（ Q ）建立单一相关关系进行整编推流^[2]。当电站泄放微小生态流量、检修放水或接近“零出库”（实际存在渗漏）时， Q_{out} 与 Q 的相关性极不稳定甚至断裂，导致推流结果严重失真，无法反映真实的极小流量动态。

测次响应滞后：依据 Q_{out} 分级布控流量测次，在 Q_{out} 落入极小流量区间时，响应可能不够及时，错过捕捉瞬时最小流量

的时机。

二、小流量敏感点识别与优化监测方法

针对阿海站缆道转子式流速仪在极小流量下“测不准、测不到”的核心问题，关键在于精准锁定微小水流存在的时空位置并改进观测手段。

（一）敏感点识别是前提

1. 空间敏感点定位：

深槽核心区：分析历史测流资料和断面地形图，识别在极低水位下仍能维持流动水体的区域，通常是主槽最深槽线或河床深坑。阿海站左岸深槽是首要靶区。

水力控制点：下游250米处的急弯，在特定低水位级对小流量水流形态仍可能产生控制或汇集作用，是重要的辅助监测区。

2. 时间敏感点捕捉：

调度规律关联：紧密跟踪上游电站运行计划，特别是发电低谷期（负荷低，下泄流量小）、库水位大幅波动期（蓄水或集中泄水前后）以及生态调度试验期。

水位过程预警：密切关注本站高精度水位计数据，当水位过程线出现急速下降或上升趋势（斜率陡变）时，预判极小流量可能出现的窗口期，并复盘历史“0 m³/s”记录日的具体水位变化过程。

（二）优化监测方法是核心

立足阿海站现有缆道设施，提出经济实用的补充监测策略：

水位面积流速增量法（核心创新）：在预判的小流量时段（特别是疑似趋零过程），同步强化基本水尺断面和其上游28m流量测验断面的水位观测（需高精度毫米级、分钟级采样的自记水位计支持）。

精确测量空间敏感点（如左岸深槽）的过水断面面积（ A ），可使用手持激光测距仪辅助。利用两断面间距（ $\Delta x=28m$ ）和实测的连续水位变化率（ dh/dt ），通过公式 $\Delta V \approx (dh/dt) * (A / \Delta x)$ 估算该局部区域的流速增量。此方法对微小水流变化极其敏感，可作为转子式流速仪数据的有效补充和关键校验，尤其在传统仪器失

效的低流速区。

靶向式流速测量强化：集中有限测验资源，在识别出的空间敏感点（深槽线）使用现有转子式流速仪进行加密垂线、测点测量。若有条件，可引入灵敏度更高的微型流速传感器或接触式探头专攻深槽小流量。

触发式瞬态流量捕捉：建立“24小时待机+触发测验”机制。基于高精度水位实时数据流，预设极小流量触发条件（如水位连续下降速率超过阈值）。一旦触发，立即启动流量测验，确保捕捉瞬时最小流量状态。

三、小流量数据的实用化整编路径

打破单纯依赖 Q_{out} 推流的单一模式，构建融合多种信息源的多元整编体系：

（一）精细化低水位－流量关系定线

数据筛选与扩充：单独汇集所有小流量（如 $Q < 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ）的实测数据。重点纳入通过水位面积流速增量法、靶向测量、触发式测验获取的新数据点，特别是那些揭示“趋零”非断流状态的值。

独立低水定线：仅针对低水段点据进行定线分析（可采用对数坐标轴、折线等）。严格检核“ $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ”记录：

若原始水位记录显示当日水位有变化（非水平线），则“0”极可能是测不到所致。此时利用新方法估算值或水位变化反推微小流量进行修正。

若确系电站断流检修或河道干涸，需明确标注原因并记录水位特征。

评估下游控制作用：分析下游急弯在不同低水位级对水流的控制效果，评估其对稳定低水 H - Q 关系的贡献，为定线提供物理依据^[3]。

（二）构建多元相关推流模型

主流关系改良（ Q_{out} vs Q ）：维持 Q_{out} 与 Q 的主相关关系，但针对 $Q_{out} <$ 极小阈值（如 $1\text{--}2 \text{ m}^3/\text{s}$ ）的“微出库区间”，单独建立亚模型（如线性回归、幂函数拟合），专门描述电站泄放微小流量或接近零出库时的推流规律^[4-5]。

引入水位差（ H ）辅助：将本站水位（ H ）或其动态特征（如小时平均水位、日变幅）作为辅助变量，构建 $Q = f(Q_{out}, H)$ 形式的复相关关系。 H 能反映电站调度引起的瞬时水力状态，在小流量下显著提升模型的适应性与精度。

考虑时间滞后效应（ τ ）：分析电站出库流量变化传播至本站的滞后时间 τ （小流量时传播可能更慢）。尝试建立 $Q(t) = f(Q_{out}(t - \tau))$ 模型，或直接在模型中引入时间滞后变量。

（三）零值数据的合理性校验与处理

当我们发现整编后的流量数据中出现“ $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ”（即完全断流）的记录时，绝不能直接采信，必须严格进行以下四步核查：

第一步：回溯原始水位变化

翻查当天原始水位记录：水位线是否上下波动过？

重点看：波动幅度是否超过 ± 1 厘米？哪怕微小变化也可能

说明有水在流动。

第二步：查证天气干扰

强风影响：是否出现6级以上的大风？强风可能把水面压低，导致测流不准。

降水/蒸发：当天是否下过雨（哪怕是小雨）？高温晴空下水面蒸发量是否异常增大？这两点都会干扰真实流量。

第三步：核实工程调度

查水电站公告：是否发布过“零出库”调度令？（部分电站会短期关闸蓄水）

检查设备日志：流量计是否处于检修状态？管道阀门是否被临时关闭？

第四步：查验实测记录

翻现场测流报告：当天有没有人工测量？

看垂线布点：测量点位是否覆盖了河道关键断面？

特别注意：测量员是否备注过“传感器异常”或“杂物堵塞探头”？

处理与修正方法：

若核查发现水位有波动、下过雨、无检修通告或测量覆盖不全，则“0”值很可能是误记！这时需采用以下技术手段修正：

水位增量推算法：根据水位变化幅度+河道横截面数据，倒推实际流量（比如水位涨2cm时，流量应至少为 $X \text{ m}^3/\text{s}$ ）。

多因子关联模型：结合天气、工程调度等多重因素，重新计算可能性最高的流量值。

关键操作：

所有修正值必须替换原始“0”记录。

在数据表备注栏逐条写明原因，例如：

“2023-07-15 记录 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ 已修正为 $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。依据：当日实测水位波动3.5cm + 降雨记录5mm + 无电站关闸通告。”

四、应用展望与推广价值

本研究聚焦金沙江阿海站小流量监测与整编难题，提出的解决方案核心在于：

理念创新：通过时空“敏感点”识别，引导有限的监测资源精准投向微小水流最可能存续的区域和时段。

方法实用：“水位面积流速增量法”巧妙利用高精度水位数据和基本断面信息推算微小流速变化，设备依赖低（仅需提升水位监测精度），操作性强，有效弥补了传统流速仪的不足。

整编多元：摒弃僵化的单因子推流，建立包含精细化低水定线、微出库亚模型、水位差辅助及滞后效应的多元推流体系，显著提升小流量数据还原的真实性与连续性。

立足现实：充分利用阿海站现有缆道、流速仪、水位计等基础设施，通过优化方法逻辑和数据分析实现性能提升，无需大规模设备更新，成本效益高。

该方案具有广泛的推广价值，特别适用于以下类型的水文站：

受水利工程强烈调控的站点：如水库库区、大坝下游、梯级

电站间的水文站，其天然流态被工程调度扰乱，小流量失真问题普遍。

河床相对稳定但流量变幅巨大的站点：枯汛流量差异大，低水测验难度高，需针对性解决方案。

推进自动化、智能化监测的站点：高精度水位传感器、实时数据传输系统可与“敏感点识别+触发测验”逻辑无缝集成，实现小流量的高效、自动捕捉。

五、结论

小流量的精确监测与可靠整编，是实现水资源精细化管理、保障河流生态健康、支撑水利工程科学调度不可或缺环节^[6-8]。以金沙江阿海站为代表的两坝间水文站，受梯级电站密集调控影响，常规流量监测方法在小流量（尤其是趋近于零）工况下面临严峻挑战，导致监测数据失真、整编推流失效，多次记录到异常的“0 m³/s”。

本研究紧扣阿海站实际问题，揭示了转子式流速仪在低流速下的技术局限、电站调度引发的天然流态紊乱以及单一相关推流模型在小流量区间的脆弱性等核心症结。创新性地提出基于时空“敏感点”识别的优化监测策略，尤其是利用高精度水位同步观测数据进行“水位面积流速增量法”计算，为捕捉微小流量变化提供了经济、实用、可靠的技术补充。在整编环节，通过建立精细化低水位-流量关系^[9-11]、针对电站微出库流量构建亚模型、融入本站水位辅助信息及时间滞后效应，形成了多元、灵活、适应性强的实用化推流体系，有效修正了“趋零流量”的异常记录，显著提升了小流量数据的连续性和可信度。

整套方案立足阿海站现有测验条件，方法逻辑清晰，操作性强，实施成本低，为解决水电站高度影响下河道枯水期水文资料质量问题提供了有效途径，对提升同类受工程影响水文站的小流量监测与整编能力具有重要的实践价值和推广前景。未来可结合物联网、大数据分析技术，进一步提升敏感点预警、触发响应和模型自优化的智能化水平。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流量测验规范:GB 50179-2015[S]. 中国计划出版社, 2015.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水文资料整编规范:SL/T 247-2020[S]. 奔腾电子音像出版(北京)有限公司, 2020.
- [3] 李江艳, 刘洁, 王莉莉. 提高水文资料整编质量的分析与研究[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(06): 44-45.
- [4] 李荣圳. 飞来峡水文站低(枯)水期流量与飞来峡水利枢纽出库流量比测分析[J]. 广东水利水电, 2015, (11): 16-18.
- [5] 商云笛, 韩先宇, 吴文勇. 二滩水电站枯水期尾水水位流量关系研究[J]. 大坝与安全, 2021, (06): 14-16+27.
- [6] 丁俊凯. 云南中小河流水文监测系统水文测验方式研究[J]. 云南水力发电, 2016, 32(05): 11-13.
- [7] 谢学成, 杨庆, 杜慧敏. 低流速条件下转子式流速仪测量误差分析与改进[J]. 水文, 2021, 41(3): 78-82.
- [8] 郭文献, 王龙, 徐梦瑶. 水电工程影响下河道生态流量监测与调控研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 1-7.
- [9] 胡宝怡, 张金萍, 陈求稳. 基于高精度水位传感器的微流量监测方法研究[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 980-988.
- [10] 冯娟, 刘年, 周念来. 受水利工程扰动的水文站流量整编方法优化[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 95-99.
- [11] 刘晋, 黄强, 赵静. 智能传感与大数据在水文监测整编中的应用展望[J]. 水利信息化, 2023, (2): 15-20.

信息化背景下水利防汛技术的发展研究

扎西平措, 丁文翔*

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400025

DOI:10.61369/WCEST.2025060014

摘 要 : 在信息化背景下, 水利防汛技术正经历从被动应对到智能防控的深刻变革。通过系统梳理当前关键技术进展, 认为信息化显著增强了防汛工作的感知、预测、调度和抢险能力, 但仍面临数据质量不足、模型适用性有限、系统协同不畅等挑战。为此, 需加强数据标准化建设、推动模型融合发展、破除信息壁垒, 最终构建起感知灵敏、预报精准、调度智能的现代智慧防汛体系, 为防洪安全提供坚实支撑。希望本次研究可以为未来的水利防汛技术发展提供思路指导。

关 键 词 : 信息化技术; 水利防汛技术; 勘测; 技术支持

Research on the Development of Water Conservancy Flood Control Technology under the Informationization Background

Zhaxi Pingcuo, Ding Wenxiang*

Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission Hydrology Bureau of Upper Yangtze River Hydrology and Water Resources Survey, Chongqing 400025

Abstract : In the context of digital transformation, water conservancy flood control technology is undergoing a profound evolution from passive response to intelligent prevention and control. Through systematic analysis of current technological advancements, this study demonstrates that informatization has significantly enhanced the capabilities of flood control in perception, prediction, scheduling, and emergency response. However, challenges remain, including insufficient data quality, limited model applicability, and inadequate system coordination. To address these issues, it is imperative to strengthen data standardization, promote integrated model development, and break down information barriers. The ultimate goal is to establish a modern intelligent flood control system characterized by sensitive perception, precise forecasting, and smart scheduling, thereby providing robust support for flood safety. This research aims to offer strategic guidance for the future development of water conservancy flood control technologies.

Keywords : information technology; water conservancy and flood control technology; survey; technical support

一、现代水利防汛技术的分类

当前的水利防汛技术正经历着从被动抵御到主动防控、从经验判断到智能决策的深刻变革, 这场以科技创新为驱动的转型, 使我国防汛工作呈现出全域感知、精准预警、智能调度和科学抢险的新特征。在全球化气候变化导致极端天气事件频发的背景下, 传统依赖人工巡堤、沙袋堵漏的防汛模式已难以应对日益复杂的防汛形势, 而多种新技术的深度融合, 正重塑着防汛减灾的技术体系与实践路径^[1-4]。

(一) 一体化立体网络的发展

天空地一体化监测体系通过多源数据融合, 实现了对雨情、水情、工情的全天候、全方位监控。在高空, 卫星遥感技术特别是合成孔径雷达卫星, 能够穿透云层持续监测流域降水量、土壤湿度和地表水体变化, 甚至通过干涉测量技术捕捉堤坝工程的毫米级形变, 为洪涝风险评估提供宏观视野。在中低空, 无人机搭

载高清摄像、激光扫描等设备, 可快速巡查人员难以抵达的险工险段, 实时传回高精度影像数据, 为险情识别提供直观依据。在地面, 物联网传感器密布于河道、水库、闸坝等关键部位, 实时采集水位、流量、渗压、应力等数据, 并通过5G网络实现毫秒级传输, 形成防汛决策的“神经末梢”。在水下, 声呐探测器和无人潜航器能够探查坝基、护岸等水下工程的隐患, 弥补了传统巡查的视觉盲区。这种立体化监测网络如同为防汛工作装上了“千里眼”和“顺风耳”, 显著提升了风险早期识别能力^[5-8]。

(二) 数字孪生流域建设的发展

数字孪生流域的建设通过在数字虚拟空间中构建与物理世界一一对应的流域模型, 实现了防洪调度的前瞻性预演与科学决策。这一系统集成地理信息、水利工程、实时监测数据和预报模型, 形成可以模拟现实流域水循环全过程的“虚拟实验室”。当预报有强降雨过程时, 决策者可以在数字孪生平台上运行多种调度方案, 预演不同雨量情景下的洪水演进路径、淹没范围和工程

作者简介: 扎西平措 (1996.12—), 男, 藏族, 西藏波密人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 主要从事水文测报、水文分析工作。

通讯作者: 丁文翔。

响应效果，从而选择最优调度策略。例如，面对流域性洪水，系统能够模拟上游水库群如何联合调度以实现精准拦洪、削峰、错峰，中游蓄滞洪区何时启用最为合理，下游河道水位如何控制才能兼顾防洪与航运需求。这种“预报-预警-预演-预案”的四预机制，将防汛工作从被动应急转向主动风险管理，大幅提升了决策的科学性和前瞻性^[9-10]。

（三）水文水动力模型构建的发展

传统基于物理机制的水文模型在不断优化，能够更精确地模拟从降雨产流到洪水演进的全过程；而机器学习算法则能从海量历史数据中挖掘出复杂的非线性规律，弥补传统模型在某些环节的不足。例如，利用深度学习技术分析雷达回波序列，可以提升短临降雨预报的准确性；通过神经网络模型处理多源观测数据，能够实时校正洪水预报结果。这种机理模型与数据驱动模型的结合，使洪水预报的精准度和预见期均得到显著提升，为防汛决策赢得了宝贵时间。

（四）智能调度与应急抢险技术的革新

在现代通信技术的支撑下，水库、闸坝、蓄滞洪区等工程设施可实现远程自动控制与联动调度。当预警信息发出后，系统能够根据预设规则或实时研判结果，生成优化调度方案并快速执行，极大提高了工程体系的响应速度与协同效能。在应急抢险环节，一系列高科技装备正在改变传统人海战术的抢险模式。水下机器人可执行坝体排查和障碍物清除任务；无人测绘艇能快速获取溃口区域的水下地形；应急动力舟桥可在短时间内架设水上通道，保障救援力量及时投送；无人机不仅能巡堤查险，还可投送救生装备，为被困人员提供紧急援助。这些智能装备的应用，既提高了抢险效率，也降低了抢险人员的风险。

二、信息化背景对水利防汛技术发展的帮助

（一）信息化背景为水利防汛构建了全方位感知体系

在传统防汛模式下，信息获取主要依赖人工巡查和有限站点的水位尺、雨量筒，存在数据零散、时效滞后、盲区众多等局限。而现代信息技术则通过“空天地水工”一体化的监测网络，实现了对雨情、水情、工情、险情的全天候、全要素、全过程监控。在天空，遥感卫星特别是合成孔径雷达卫星，能够穿透云层，大范围、高频次地监测降雨云系移动、地表水体变化、土壤湿度饱和程度，甚至通过干涉测量技术捕捉堤坝边坡的毫米级形变，为洪涝风险早期识别提供了宏观视野。在空中，无人机搭载高清摄像、激光雷达与热成像仪，可灵活机动地巡查险工险段，快速生成高精度三维模型，精准识别管涌、裂缝、滑坡等隐患。在地面，基于物联网技术的各类传感器，密布于河道、水库、闸坝、蓄滞洪区，实时采集水位、流量、渗压、应力等数据，并通过5G等高速通信网络实现毫秒级传输，形成了防汛决策的“神经末梢”。在水下，无人潜航器与声呐探测系统则能探查水下地形地貌和工程基础状况，弥补了传统巡查的视觉盲区。这种立体感知网络使得整个流域的运行状态变得高度透明，为精准预报和科学决策奠定了坚实的数据基石。

（二）信息化背景提升了水利防汛的预测预报与模拟分析能力

面对多源、异构、海量的防汛大数据，传统的数据处理方法已难以胜任。大数据技术能够对历史水文资料、实时监测信息、气象预报产品、地理空间数据等进行高效的清洗、整合与挖掘，揭示出隐藏在海量数据背后的规律。人工智能技术，特别是机器学习和深度学习算法，则能够从这些数据中挖掘出复杂的非线性关系，有效弥补传统物理模型的不足。例如，利用深度学习模型分析雷达回波序列，可以提升短期临近降雨预报的精度；通过神经网络模型融合多源信息，能够对河道洪峰流量和到达时间进行更为精准的预测。而“数字孪生流域”的构建，则是信息化赋能防汛决策的集中体现。它是在数字虚拟空间中，创建一个与物理世界一一对应、虚实交互、动态演进的流域镜像。当接收到降雨预报后，系统可以在数字孪生平台上，驱动耦合了物理机制与数据驱动模型的水文水动力模型，对洪水演进的全过程进行高保真、可视化的“预演”。决策者能够在这个“数字沙盘”上，反复试验和比较不同的水库调度方案、蓄滞洪区启用时机、堤防防守重点等，直观地看到每一种决策可能引发的后果，从而筛选出最优的防洪调度方案。这种“预报-预警-预演-预案”的“四预”工作模式，将防汛决策从以往依赖个人经验和零散信息的“艺术”，转变为一门基于全息数据和模型模拟的“科学”，实现了从被动应对到主动调控的革命性转变。

（三）信息化背景改变了防汛的应急抢险模式

在传统的防汛会商中，各方信息汇集慢，指挥决策链条长，协同联动效率低。如今，基于云计算的智慧水利平台，集成了所有监测数据、预报成果、预演方案和资源信息，形成了“防汛作战一张图”。指挥人员可以通过可视化大屏，实时掌握全局态势，进行跨部门、跨区域的远程协同会商。调度指令可以直接下达到前端智能控制设备，实现水库闸门的远程自动启闭、泵站智能联调，反应速度从小时级缩短至分钟级，极大地提升了工程体系调度的精准性和时效性。在应急抢险环节，信息化技术同样带来了颠覆性改变。险情发生时，无人机可迅速飞抵现场，将高清视频实时回传指挥中心；基于北斗系统的应急通信装备，可在公网中断的情况下保障指令畅通；智能抢险设备，如无人挖掘机、水下机器人等，可在危险环境下替代人工作业，既提高了效率，也保障了人员安全。此外，预警信息的发布也因信息化而变得更加精准高效。基于精准的地理围栏技术，系统能够通过手机短信、APP、社交媒体、应急广播等全媒体渠道，将预警信息与具体的避险措施、转移路线，像“巡航导弹”一样靶向发送给风险区域内的每一个受影响人员，有效解决了信息传递“最后一公里”的难题，极大提升了社会公众的自主避险能力。

三、信息化背景下水利防汛技术存在的问题及对策

（一）采集数据的完整性、准确性和一致性仍面临挑战

在空间分布上，监测站点在东部经济发达地区与西部偏远山区之间存在显著差异，山区、无人区等关键区域的监测盲区依然

存在，导致对小流域突发性山洪的监测能力不足。在数据质量方面，传感器在极端恶劣天气下容易出现故障或数据失真，不同厂家设备之间的兼容性问题导致数据格式不一、标准各异，形成一个个“数据孤岛”。更为深层的是，海量数据并未完全转化为有效信息，数据挖掘与价值提炼能力不足。大量的视频监控、遥感影像数据仍依赖人工判读，智能化分析程度不高，难以为决策提供即时、精准的支撑。解决这些问题，需要构建统一标准的数据采集体系，制定水利传感器数据接口、通信协议的国家标准，推动设备制造的规范化。同时，应加强数据质量控制机制建设，建立数据清洗、校验、修复的全流程管理体系，利用人工智能算法对异常数据进行自动识别与修正。在数据应用层面，需要深化大数据分析技术，开发专门针对水利数据特性的智能分析模型，实现对多源异构数据的深度融合与价值挖掘，真正让海量数据“活起来”、“用起来”。

（二）模型预报的精确度与复杂现实情境之间存在不同

尽管水文模型、水动力模型不断优化，数字孪生流域概念火热，但在实际应用中，模型的可靠性仍受限于多种因素。一方面，我国幅员辽阔，不同流域的下垫面条件、产汇流特性千差万别，而现有模型多为基于特定流域开发，普适性不强，在移用于其他流域时常出现“水土不服”。另一方面，模型参数的率定往往依赖历史数据，在气候变化导致极端天气频发、下垫面因人类活动而剧烈变化的背景下，模型的外推预报能力面临严峻考验。特别是对中小河流、城市内涝等突发性强、预见期短的洪涝灾害，现有模型的预报精度和时效性仍难以满足精准防控的需求。解决这一难题，需要走机理模型与数据驱动模型融合发展的技术路线。一方面，继续深化对水循环物理机理的认识，发展更具普适性的分布式水文模型，加强参数自适应优化技术研究。另一方面，充分利用人工智能技术的优势，发展基于深度学习的预报校正模型，通过机器学习历史误差规律，实时修正机理模型的预报结果。特别重要的是，要建立“预报－预警－预演－预案”的闭环反馈机制，通过每一次实战检验模型的性能，不断迭代优化，

形成“实践－检验－改进－再实践”的良性循环，持续提升模型在复杂现实情境中的适用性与可靠性。

（三）技术应用的协同性与业务需求的深度融合存在不足

当前许多地方在推进智慧水利建设时，存在重硬件投入、轻软件配套，重系统建设、轻应用效果的现象。各部门、各层级之间的信息系统互不联通，形成大量“信息烟囱”和“数据壁垒”，导致防汛决策难以获得全方位的立体信息支撑。例如，气象部门的降雨预报、水利部门的水文监测、自然资源部门的地质灾害信息、应急部门的救援资源信息等，往往分散在不同系统中，缺乏有效的协同共享机制。在系统设计上，许多平台功能繁杂但用户体验不佳，操作流程复杂，与基层防汛人员的实际工作习惯脱节，导致“先进技术”与“传统业务”两张皮，难以在关键时刻发挥应有作用。解决这一问题，需要从体制机制层面打破壁垒，建立跨部门、跨层级的水利数据共享交换平台，制定统一的数据共享目录和交换标准，通过制度保障和技术手段双管齐下，推动数据的互联互通。在系统设计上，应坚持以用户为中心的理念，深入调研基层防汛工作的实际需求，简化操作流程，优化界面设计，开发移动端应用，让技术真正服务于业务，提升系统的实用性和易用性。

四、结论

综上所述，信息化为水利防汛技术发展带来了历史性机遇，但也伴随着诸多挑战。这些问题涉及技术、管理、人才、安全等多个维度，相互关联、相互影响，必须采取系统性的解决方案，真正发挥信息技术在防汛减灾中的赋能作用，构建起一个感知灵敏、预报精准、调度智能、应对高效的新一代智慧防汛体系，为保障人民群众生命财产安全和经济社会可持续发展提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 许继军, 陈桂亚, 袁喆. 智慧水利框架下的数字孪生流域构建关键技术探讨 [J]. 水利学报, 2022, 53(1): 1-10.
[2] 李丹, 吕娟, 刘荣华. 天空地一体化水利监测体系构建与应用研究 [J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 889-898.
[3] 刘志雨, 杨文发. 水文预报技术进展: 从物理模型到人工智能 [J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 771-784.
[4] 张建云, 雷晓辉, 王银堂. 智慧水利发展与展望 [J]. 水利水运工程学报, 2021, (1): 1-9.
[5] 王光谦, 王国强, 钟德钰. 水利大数据研究与应用展望 [J]. 水力发电学报, 2019, 38(4): 1-11.
[6] 王宗志, 程亮, 刘克琳. 智慧水利背景下水文监测技术发展展望 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 1-7.
[7] 刘俊, 张行南, 陈晓. 基于物联网的防汛智能感知与预警系统研究 [J]. 水文, 2019, 39(2): 15-20.
[8] 胡健, 吕振平, 王福. 数字孪生技术在流域防洪调度中的应用初探 [J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(4): 37-42.
[9] 彭瑞, 王忠静, 李铁键. 人工智能在水文预报中的应用研究进展 [J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 137-149.
[10] 陈敏, 张永勇, 夏军. 智慧水利体系架构与关键技术探讨 [J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1029-1038.

