

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



编委 Editorial board member

付金泽 国网冀北电力有限公司唐山市丰润区供电分公司

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

张世元 景德镇市水利规划设计院

Zhang Shiyuan Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

詹 丽 景德镇市水利规划设计院

Zhan Li Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

李 岩 辽宁红沿河核电有限公司

Li Yan Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第2期 2025年2月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



水利工程 | HYDRAULIC ENGINEERING

- 001 松嫩平原(黑龙江段)地下水动态变化与气候
响应机制分析 徐磊, 赵剑, 那帅博宁, 王洋
Analysis of Groundwater Dynamic Changes and Climate Response Mechanisms in the
Songnen Plain (Heilongjiang Section) Xu Lei, Zhao Jian, Na Shuaiboning, Wang Yang
- 004 水利枢纽工程地质勘察中断层活动性评价研究 李泽发
Study on Evaluation of Fault Activity in Geological Investigation
of Water Conservancy Projects Li Zefa
- 007 水资源保护与生态文明建设协同推进策略 贾海峰, 尤李俊
Water Resources Protection and Ecological Civilization Construction
Coordination Promotion Strategy Jia Haifeng, You Lijun
- 010 复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系构建 伍德
Construction of Dynamic Prevention and Control System for Safety Risks
of Cofferdam Construction under Complex Hydrological Conditions Wu De
- 013 防汛抗旱视角下水库运行管理策略探讨 覃海龙
Discussion on Reservoir Operation and Management Strategies under
The Perspective of Flood Control and Drought Relief Qin Hailong
- 016 给排水工程技术在水利建筑中的应用及风险管理 蔡志华
The Application and Risk Management of Water Supply and Drainage
Engineering Technology in Water Conservancy Construction Cai Zhihua
- 019 人工智能 AI 在水利工程造价预测中的应用及发展 胡思佳
Application and Development of Artificial Intelligence AI in Cost
Forecasting of Water Conservancy Projects Hu Sijia
- 022 蓄滞洪区围堤工程渗流稳定数值模拟与防渗加固技术创新 纪懿珊
Numerical Simulation of Seepage Stability and Innovation of Anti-seepage
Reinforcement Technology in Flood Storage and Detention Area
Embankment Project Ji Yishan
- 025 现代水利工程规划设计的创新发展策略 韩瑞先
Innovative Development Strategies for Modern Hydraulic Engineering
Planning and Design Han Ruixian
- 028 黑龙江省地下水资源分布特征及可持续
开发模式研究 王洋, 那帅博宁, 赵剑, 徐磊
Study on Distribution Characteristics and Sustainable Development
Model of Groundwater Resources in
Heilongjiang Province Wang Yang, Na Shuaiboning, Zhao Jian, Xu Lei

电力工程 | POWER ENGINEERING

- 031 结合植被覆盖指数的水利水电高边坡生态
稳定性评估方法 刘伟男
Evaluation Method of Ecological Stability of High Slope of Water Conservancy
and Hydropower Combined with Vegetation Coverage Index Liu Weinan
- 034 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的探讨 何麒麟
Exploration of Curtain Grouting Construction Technology in Water Conservancy
and Hydropower Engineering Construction He Qilin

037	水利水电工程安全管理与技术管理协同优化研究 Research on Collaborative Optimization of Safety Management and Technical Management in Water Conservancy and Hydropower Engineering	江活芳 Jiang Huofang
040	水电站电气一次设备故障检修与处理技术 Maintenance and Handling Technology for Faults of Primary Electrical Equipment in Hydropower Stations	黄加云, 杜兴 Huang Jiayun, Du Xing
043	大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的优化路径与管理实践 Optimization Path and Management Practice of Temperature Control and Crack Prevention Technology for Large Volume Concrete in Water Conservancy and Hydropower Projects	陈咏如 Chen Yongru
046	基于数字孪生的水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控方法 A Method for Accurate Control of Construction Progress of Underground Caverns in Water Conservancy and Hydropower Projects Based on Digital Twin	罗晓东 Luo Xiaodong
049	水利水电工程施工技术管理：提升工程质量的关键路径 Construction Technology Management of Water Conservancy and Hydropower Projects: The Key Path to Improve Project Quality	范庭愉 Fan Tingyu
052	高压开关柜断路器拒动故障的成因分析与二次保护联动实验验证 Cause Analysis of Refusal Fault of High-Voltage Switchgear Circuit Breaker and Experimental Verification of Secondary Protection Linkage	任志鹏 Ren Zhipeng
055	水利水电工程施工技术创新与实践 Technological Innovation and Practice of Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction	闫晓锋 Yan Xiaofeng

松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化与气候响应机制分析

徐磊^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 那帅博宁^{1,2}, 王洋^{1,2*}

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

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

DOI:10.61369/WCEST.2025020002

摘要： 松嫩平原（黑龙江段）作为中国重要农业与生态区域，其地下水动态变化受气候与人类活动双重驱动，呈现复杂特征。地下水位年内具有春降夏升的季节性波动，年际呈持续下降趋势，西北扇形地区等区域水位降幅显著；地下水量补给以降水入渗和河流侧渗为主，排泄受蒸发与人工开采主导，但补给排泄机制的定量分析及地貌单元差异研究不足；地下水质受农业与工业活动影响，常规指标时空变异明显，硝酸盐、重金属等可能存在污染问题。气候因素中，降水的季节与年际变化影响补给量，蒸发通过浓缩效应改变水质，气温波动加速蒸发并影响水文循环，三者相互作用加剧地下水时空分布不均。人类活动如农业灌溉、城市开采及土地利用转变进一步干扰地下水系统，导致漏斗形成、污染加剧。未来需强化长期监测、定量分析及多要素关联研究，以支撑水资源可持续管理。

关键词： 松嫩平原（黑龙江段）；地下水动态变化；气候响应机制

Analysis of Groundwater Dynamic Changes and Climate Response Mechanisms in the Songnen Plain (Heilongjiang Section)

Xu Lei^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Na Shuaiboning^{1,2}, Wang Yang^{1,2*}

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

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

Abstract : The Songnen Plain (Heilongjiang section), as an important agricultural and ecological region in China, experiences complex groundwater dynamic changes driven by both climate and human activities. The groundwater level exhibits seasonal fluctuations, decreasing in spring and increasing in summer, and shows a continuous downward trend inter-annually. Significant water level declines are observed in regions such as the northwest fan-shaped area. Groundwater recharge is primarily through precipitation infiltration and river lateral seepage, while discharge is dominated by evaporation and artificial extraction. However, quantitative analysis of recharge and discharge mechanisms and research on differences in geomorphic units are inadequate. Groundwater quality is influenced by agricultural and industrial activities, with noticeable spatiotemporal variations in routine indicators. Potential pollution issues may exist, such as nitrate and heavy metal contamination. Among climatic factors, seasonal and inter-annual variations in precipitation affect recharge volume, evaporation alters water quality through a concentration effect, and temperature fluctuations accelerate evaporation and influence the hydrologic cycle. The interaction of these three factors exacerbates the uneven spatiotemporal distribution of groundwater. Human activities, such as agricultural irrigation, urban extraction, and land use changes, further interfere with the groundwater system, leading to the formation of funnels and increased pollution. Long-term monitoring, quantitative analysis, and multi-factor correlation studies are needed to support sustainable water resources management in the future.

Keywords : Songnen Plain (Heilongjiang section); dynamic change of groundwater; climate response mechanism

引言

松嫩平原（黑龙江段）地处中国东北，地理坐标介于东经123°40′至127°30′与北纬44°30′至49°15′之间，西接大兴安岭，东邻小兴安

岭，南至松花江干流，北抵黑龙江省界，面积约10.32万平方公里。其作为东北亚内陆平原核心，是中国重要粮食基地，也是多种生态系统交汇区。地下水是该区域生态系统的重要部分，支撑生态平衡与经济发展，为湿地、农业、工业等提供水源。但因气候变化和人类活动，地下水动态变化复杂，影响水资源利用和生态稳定。因此，研究其地下水动态变化及气候响应机制，对区域可持续发展意义重大。

一、相关概述

（一）松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化现状

松嫩平原作为我国重要农业和生态区，地下水动态变化研究虽取得进展，但仍存不足。该区域地处温带大陆性季风气候区，四季分明且干湿分布不均，多年平均气温为1~4℃，多年平均降水量在400~500 mm之间，降水时空分布不均匀，年蒸发量约为1200~1600 mm，蒸发量年际、年内变化波动较大。区域内水资源总量为228亿 m³，地下水资源量为115亿 m³，地表水资源量为157亿 m³。地下水位方面，20世纪60年代以来受气候与人类活动影响，呈现空间异质性和时间变异特征。西北扇形地潜水水位持续下降，局部等水位线向山前推移并大幅下降；低平原区水位季节性波动显著，但年际变化趋势因缺乏长期数据整合而研究薄弱^[2]。地下水量研究聚焦补给与排泄机制，西部山前平原补给充足，中部低平原较差，排泄以人工开采和蒸发为主，农业和城市用水导致局部水位下降，但定量分析及地貌单元差异研究不足^[3]。地下水水质问题渐受关注，常规指标时空变化明显，农工业活动致部分地区污染，然污染物迁移规律及气候关联研究尚浅。总体而言，现有研究需强化长期数据整合、定量分析及多要素关联，以支撑区域水资源可持续管理。

（二）气候对地下水影响的相关理论

气候因素对松嫩平原地下水动态变化起关键作用。降水作为主要补给源，其季节分配和强度直接影响补给量。夏季降水集中且强度大，有效补给地下水；冬季降水少且多为固态，补给效果弱。年际变化导致水位波动，丰水年水位上升，枯水年下降。蒸发是重要排泄途径，春夏季蒸发量大，低平原区地势平坦、水位埋藏浅，蒸发显著影响水位并导致水质浓缩^[4]。气温波动改变水文循环，升高时加速蒸发、减少入渗，增加人工开采需求，同时影响微生物活动和化学反应速率，间接影响水质。气候因素相互作用形成复杂机制，研究其综合作用对理解地下水系统运行规律至关重要。

二、松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化特征

（一）地下水位变化

松嫩平原（黑龙江段）地下水位变化兼具显著季节性 with 长期下降趋势。年内变化受气候、地貌及人类活动影响，呈现春降夏升规律，春季气温回升快、蒸发强，西部低平原区4~5月水位迅速下降至枯水期；6月后降水增多，水位回升，8—10月达年内峰值，低平原区响应明显。东部高平原因地势高、埋藏深，水位变幅较小。气象要素为年内波动主因，农业灌溉与城市用水加剧变化幅度。

年际层面，地下水位持续下降，近几十年尤为显著。自20世纪60年代起，西北扇形地潜水水位不断降低，1984—2003年160m等水位线向山前推移6~9km，降幅3~5m；1998年以来，年均下降0.75m，局部乡镇达0.15~0.30m/a。气候变化致降水减少、气温升高，削弱补给能力；农业扩张、城市用水增加引发超采，形成并扩展地下水漏斗，土地利用变化亦打破动态平衡^[5]。未来若气候与人类活动干扰持续，水位下降或加剧，威胁生态安全与经济发展，需采取调控措施保障水资源可持续利用。

（二）地下水量变化

松嫩平原（黑龙江段）地下水的补给与排泄受多重因素驱动，动态变化关乎水资源平衡。补给方面，降水入渗为主要来源，但近年降水模式改变致补给量波动，西部降水量减少使补给下降。河流侧渗在河谷漫滩和低平原区作用显著，受河流水位制约。农业区灌溉回归补给贡献大，但灌溉方式影响补给效率。土地利用变化（如湿地、旱田转水田）亦重塑补给格局^[6]。排泄方面，蒸发在低平原区水位浅而显著，气候决定蒸发强度；人工开采在农灌和城市供水区攀升，导致漏斗区失衡加剧；地下水径流东部、中部高平原径流弱，排泄量低，河谷漫滩则相反。气候变化与人类活动（灌溉、开采）是核心驱动因素，深入研究其规律对水资源管理至关重要，需平衡补给与排泄以维护生态安全。

（三）地下水水质变化

松嫩平原（黑龙江段）地下水水质变化问题，影响水资源利用。常规指标中，pH值总体中性至弱碱性，但哈尔滨、大庆等超采区因水位下降引发氧化还原反应，pH值降低。TDS含量中部低平原区较高，受径流缓慢和蒸发浓缩影响；东部高平原区补给充足、径流活跃，TDS较低。主要离子浓度方面，农业区Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺因化肥农药使用升高，城市周边NO₃⁻和NH₄⁺受工业废水、生活污水影响显著上升，反映水质动态与环境健康风险^[7]。

三、气候因素对松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化的影响

（一）降水的影响

松嫩平原（黑龙江段）地下水补给与水位波动受降水时空分布及强度显著影响，并受地貌、水文等多因素制约。降水季节性差异显著，夏季集中、冬季稀少，导致补给量季节性波动。东部高平原地势高、渗透性强，降水入渗效率高；西部低平原地形平坦、水位浅，蒸发强，补给效率低。低平原区6~8月降水集中形成丰水期，高平原侧向径流补给强，降水直接补给较弱。

降水强度方面，高强度降水易形成地表径流，降低补给效率，而低强度持续降水更利于稳定补给。年际变化上，丰水年入

渗量增加致水位上升，枯水年反之，农业灌溉区尤为敏感。监测显示降水量呈下降趋势，西部尤为明显，削弱补给能力，如西北扇形地1984—2003年水位显著下降。年内变化表现为春旱蒸发致水位下降，夏汛回升。但降水与水位关系复杂，近江区江水侧渗缓解降水不足，开采区人工抽取削弱降水主导作用。高平原区因侧向径流存在明显滞后效应，需结合地貌与水文地质条件深入分析。

（二）蒸发的影响

蒸发强度对松嫩平原（黑龙江段）地下水系统具有显著影响，且在地貌与气候差异下呈现复杂变化。作为地下水排泄的关键驱动力，蒸发强度的时空动态深刻影响区域水文过程。西部低平原区气候干旱，春、秋蒸发峰值导致地下水排泄量激增，水位快速下降；东部高平原区湿度较高、蒸发较弱，排泄量相对平稳。气象因素（气温、风速、湿度）协同作用，高温低湿环境进一步增强蒸发效应。

地貌特征加剧这种差异：低平原区水位埋藏浅，蒸发直接作用于潜水层；高平原区水位深，蒸发影响衰减。蒸发对水位和水质的影响具有双重性——季节性波动显著，春、秋强蒸发引发水位大幅下降，夏季虽蒸发高但降水补给使水位回升，加剧水资源时空不均^[8]。水质方面，蒸发浓缩提升溶解性总固体（TDS）浓度，西部局部TDS超标，盐分累积改变微生物群落结构，并促进硫酸盐还原等反应，进一步恶化水质。

（三）气温的影响

气温波动对松嫩平原（黑龙江段）地下水系统的影响贯穿水文循环各环节，并与气候变暖紧密关联。近60年来，区域气温累计上升约2℃，显著改变水文循环格局。升温直接加剧蒸发，导致地表水和土壤水分散失，降水入渗量减少，削弱补给能力；同时改变降水模式，虽强度增加但频率下降，地表径流增多而入渗效率降低。春季升温使积雪提前融化，部分融水未及入渗即形成径流，进一步减少补给。此外，升温增强植被蒸腾，农业灌溉需水增加，加剧地下水开采，间接改变排泄动态。

水位变化方面，蒸发与蒸腾加剧直接导致地下水位下降，如西北扇形地1998—2004年水位以0.75米/年速度下降，高温年份降水不足与蒸发增强共同作用使水位持续走低。水质影响则呈现

复杂连锁反应：升温促进微生物代谢，加速有机物分解；同时催化硝酸盐还原等反应，导致硝酸盐浓度下降并生成亚硝酸盐等有害物质，威胁水质安全^[9]。

（四）气候因素相互作用对地下水的影响

降水、蒸发与气温等气候要素间存在着微妙且深远的相互影响，它们共同对松嫩平原（黑龙江段）的地下水动态变化起着决定性作用。研究表明，这些气候因素并不是孤立存在的，它们通过复杂的水文循环过程紧密相连，共同影响着地下水的补给、排泄及其动态变化特征。例如，降水量的增加通常会提升土壤湿度，进而降低蒸发强度；然而，在气温较高的环境下，即便降水量有所增加，蒸发作用仍可能十分强烈，使得地下水位难以实现有效回升。

此外，这些气候要素的相互作用还呈现出明显的季节性变化特征。在夏季，降水集中且气温较高，导致蒸发强度增加，但通常充足的降水补给量能够弥补蒸发带来的损失，从而使地下水位整体呈现上升趋势。而在春季和秋季，降水量较少且气温波动较大，蒸发作用占据主导地位，进而引发地下水位下降。这种季节性的变化进一步加剧了地下水资源在时间和空间分布上的不均衡性。值得注意的是，气候因素相互作用的叠加效应也深受人类活动的影响^[10]。例如，在农业灌溉区，气温的升高增加了作物的需水量，进而导致地下水开采量的增加；同时，降水量的减少进一步削弱了地下水的补给能力，形成了所谓的“双刃剑”效应。

四、结束语

松嫩平原（黑龙江段）地下水动态受气候与人类活动双重影响。年内水位呈春降夏升波动，年际持续下降，西北扇形地降幅达3～5米。目前补给排泄机制定量研究及地貌单元差异分析尚存空白。气候方面，降水补给、蒸发影响水位水质，气温波动干扰水文循环与化学过程，三者与人类活动（灌溉、开采）叠加加剧水资源时空不均。人类活动进一步失衡：漫灌与城市化开采引发水位下降及漏斗，污水排放污染水质，土地利用转变削弱补给并加重盐渍化。未来需整合监测数据，深化定量与多因素关联研究，优化管理，强化污染管控与生态修复，保障地下水系统可持续。

参考文献

- [1]王露露,王天亮,高斌,等.松嫩平原土地盐碱化时空动态变化及影响因素分析[J].灌溉排水学报,2023,42(04):108-115.DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2022339.
- [2]刘强,郭晓东,王长琪,等.松嫩平原环境演变及其对地下水资源影响[J].地质论评,2024,70(S1):205-207.DOI:10.16509/j.georeview.2024.s1.105.
- [3]杨庆庆.松嫩平原第四系高平原中更新统承压水2020年水位动态分析[J].黑龙江国土资源,2021(10):33-33.
- [4]刘波,樊成芳,束龙仓,等.气候变化与人类活动对三江平原典型区地下水埋深影响预估[J].灌溉排水学报,2022,41(08):63-69.DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2021381.
- [5]刘静,宋梦林,臧超,等.松辽平原地下水埋深变化及关键影响因子分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(02):58-65.DOI:10.19760/j.newu.zk.2021022.
- [6]邱亚婷,陈娟,束龙仓,等.三江平原典型区地下水位对降水及河水位变化的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(06):1076-1083+1127.DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0106.
- [7]李明乾,肖长来,梁秀娟,等.变化环境下地下水埋深动态特征及驱动因素分析[J].水利水电技术,2018,49(11):1-7.DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2018.11.001.
- [8]束龙仓,殷晓然,袁亚杰,等.三江平原典型区河水与地下水水量交换的时空变化规律分析[J].水利学报,2021,52(10):1151-1162.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20210509.
- [9]于丽丽,唐世南,丁元芳,等.东北地区地下水超采情况及对策建议[J].水利规划与设计,2019,(04):37-40+96.
- [10]徐德兰,郭长林.黑龙江地质环境特征与主要地质灾害[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(03):101-105+118.DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2011.03.023.

水利枢纽工程地质勘察中断层活动性评价研究

李泽发

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司，新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/WCEST.2025020007

摘 要： 本文针对水利工程枢纽工程地质勘察里的断层活动性评价展开研究，开篇阐述工程地质勘察的目的以及主要工作内容，剖析断层活动性对工程稳定性和地震次生危害产生的影响，接着叙述地质地貌分析、地球物理勘探、年代测定、大地测量、监测等评价方法。研究显示，多种手段融合使用可以很好地评判断层活动性，这项成果给水利枢纽工程的规划、施工、经营赋予了科学根据，对于确保工程安全稳定运行有着非常重要的意义，为水利行业的地质勘察工作提供了新的思路和方法。

关 键 词： 水利枢纽工程；地质勘察；断层活动性；评价方法

Study on Evaluation of Fault Activity in Geological Investigation of Water Conservancy Projects

Li Zefa

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., LTD. Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract： This paper focuses on the evaluation of fault activity in geological surveys for water conservancy hub projects. It begins by explaining the objectives and main tasks of engineering geological surveys, then analyzes how fault activity affects the stability of projects and secondary earthquake hazards. The paper further describes various evaluation methods, including geological and geomorphological analysis, geophysical exploration, dating, geodetic surveying, and monitoring. The study shows that integrating multiple methods can effectively assess fault activity. This finding provides a scientific basis for the planning, construction, and operation of water conservancy hub projects, ensuring their safe and stable operation. It also offers new ideas and methods for geological surveys in the water conservancy industry.

Keywords： water conservancy project; geological survey; fault activity; evaluation method

引言

水利枢纽工程属于重要的基础设施，在防洪、发电等领域发挥着作用，然而它通常会建在地质状况复杂的地区，存在断层就会出现各种危险，活动断层也许会引发地震、地面变形等状况，为工程安全带来很大的威胁，准确判断断层是否活跃，是工程选地、建造结构以及抗震设计时非常关键的部分，关乎整个工程寿命期间的稳定运转情况，当下由于工程变得越来越大，建造需求也增多，深入探究断层活动性评判的方法就变成一件很急迫的事情。

一、水利枢纽工程地质勘察概述

（一）水利枢纽工程地质勘察目的与意义探究

水利枢纽工程地质勘察目的就是了解整个工程区域的地质情况，地层岩性，地质构造，水文地质情况等，为整个工程设计和施工提供详细的、准确的地质情况资料。其意义就是确保整个工程是安全的、稳定的，不会因为地质原因导致工程事故；合理的设计工程，降低工程成本；可以准确的预测到整个工程施工过程中

会遇到的地质问题，提前做好相应的解决措施。比如三峡水利枢纽工程建设中，通过大范围、细致的地质勘察，了解到该地区地质情况，为整个水利枢纽工程的建设奠定基础，使得整个水利枢纽工程能够顺利的建设，并且能够以安全可靠的状态持续稳定地运行，不会出现任何可能导致危险或者异常的状况^[1]。

（二）水利枢纽工程地质勘察要点

水利枢纽工程地质勘察涵盖诸多方面内容，地层岩性勘察需明确不同地层的分布情况，岩性状况，物理力学性质，这些都会

影响到工程基础的承载能力及其稳定性；地质构造勘察重点在褶皱、断层等构造形式上，以及对岩体完好的影响，断层的地点、规模、倾向、活动状况属于工程地质勘察的主要部分；水文地质状况勘察包含地下水的种类、水位、水量、水质以及含水层和隔水层的分布情况，这些都是工程防渗、排水设计的重要参考；岩体的风化程度，不良地质情况，比如滑坡、泥石流等也是勘察范围，它们会对工程的安全和稳定产生潜在威胁，需要详细评估和分析^[2]。

二、断层活动性评价的重要性

（一）断层活动对水利枢纽稳定性的作用分析

断层活动对水利枢纽工程的稳定性影响非常大。活动断层由于地震等活动会运动，而造成工程建筑物的基础被破坏，大坝、水闸等会倾斜、开裂、倒塌。美国的圣安德烈亚斯断层就是一条活动断层，1906年旧金山大地震就发生在该断层上，造成严重的破坏。若水利枢纽工程要建在类似活动断层附近，一旦断层发生活动，水利枢纽工程的稳定性将受到严重威胁。断层活动会引起周围岩石变形、破裂，导致岩体强度和完整度降低，增加边坡失稳、坝基渗漏的风险^[3]。

（二）断层活动诱发地震及次生灾害风险评估

活动断层是地震发生的最主要构造原因，断层突然错动会释放出巨大能量，造成地震。若水利枢纽所在地发生地震，不仅会破坏工程建筑物，同时还会产生一系列次生灾害，如水库大坝因地震而遭受破坏，大坝溃决，造成洪水泛滥，使下游大片地区受灾，造成大量人员伤亡和经济损失；还可能引发山体滑坡、泥石流等地质灾害，堵塞河道，对水利枢纽的正常运转构成威胁，同时对下游地区造成严重威胁。2008年汶川地震造成许多水利设施遭到破坏，某些水库出现险情，人们开始关注水利枢纽工程在地震及其次生灾害影响下的安全性^[4]。

三、断层活动性评价方法

（一）地质地貌分析法

1. 断层地貌特征识别

通过野外实地观察识别与断层有关的地貌特点，也是判断断层活动的一种方法，断层崖就是典型的断层地貌，当断层两侧发生垂直位移时，向上盘运动的崖坡就容易形成陡崖，如在山区可见陡峻悬崖，崖壁陡立，走向与断层走向一致。断层三角面也是断层地貌的标志之一，它是断层崖受流水冲刷切割，沿断面形成的三角形陡崖，沿断层走向分布。断层错断的山脊、水系突然转弯或错断等，也常指示断层的发育和活动，某河流在流经某一地区时，突然改变流向，两岸河谷两侧地形差异大，也就是说，地下断层活动所造成的地层错动极有可能是水系发育的一个关键诱因^[5]。

2. 地层错动与变形分析

对地层的研究判断，断层活动性研究，通过钻探所获得的资

料或是地质测绘所得到的资料来研究地层的错动状况以及地层的扭曲变形状况等，若经研究后发现地层中晚更新世（Q3）以后的地层被断层所错断，或者在地层中存在着褶皱、扭曲等变形现象，则这些变形均与断层有关，便可确定该断层具有活动性。在某一水利枢纽的地质勘察当中，通过对钻孔岩芯加以分析后得知，在第四系地层与下面基岩之间存在明显的错动面，而在第四系地层内部亦存在着轻微的褶皱现象。通过了解分析得知，以上现象都是由于附近的断层活动所造成的，由此可以得出结论该断层在晚更新世以后是有活动的，为工程建设的地质安全，断层活动的强弱程度也可以从地层变形的大小与速度上体现出来，若地层变形速率很快，或者短时间内形成大量的变形，由此表明，断层的活动性越强，对水利枢纽工程造成的危害越大^[6]。

（二）地球物理探测法

1. 地震勘探技术应用

地震勘探是地球物理探测里经常会用到的一种方法，依靠人工引发地震波，再将地下介质反射和折射回来的地震波信号接收下来，由此去推测地下地质结构，地震勘探在评判断层活动性时，会非常明确地察觉到断层所在的地点，断层的走向以及断层的大小，用高分辨率的地震勘探手段，就能识别出断层破碎带的具体情形，例如是断层破碎带有多宽，里面包含着什么等，通过细致观测地震波在断层周边的传播状况，好比波速出现波动，波形发生畸变等状况，也能判断出断层有没有活动性，以某一特定区域为例，在开展地震勘探工作时，发现地下存在一处波速异常区域，该条带状区域与基于地面勘测所推断的断层位置相重合。同时波速产生改变，这就体现出这条断层的破碎带比较宽，也许存在活动性，为后续的深入探究提供了重要线索^[7]。

2. 电法勘探原理与应用

电法勘探主若根据不同地质体之间存在的电性差异，在人工或者天然电场分布情况进行观测和分析之后，从而了解地下地质构造的一种地质探查方式，断层活动性评价过程中经常使用的电法勘探方式主要有电阻率法、激发极化法等，电阻率法可以探测出断层破碎带和断层破碎带附近岩体之间的电阻率差异情况，断层破碎带中的岩石破碎程度比较高，孔隙度大，电阻率就小，在绘制电阻率剖面图时，可以很明确地显示出断层所在的大概位置以及走向方向。激发极化法可以对断层破碎带内的水的含量和岩性进行区分，对判断断层的活动性以及和地下水的关系具有很大的好处。例如某水利枢纽工程场地进行电法勘探时，通过电阻率法发现在场地内存在一条明显的低阻异常带，根据地层资料分析认为该异常带可能是一条隐伏断层，采用激发极化法测量发现该断层破碎带含水量较大，可能存在地下水活动，说明该断层存在活动性，对后续工程建设提出了需重点关注断层活动性可能带来的影响^[8]。

（三）年代测定法

1. 放射性同位素测年基本原理

放射性同位素年代测定：利用放射性同位素的衰变规律来测定地质事件发生的年代，放射性同位素测年主要有碳-14（¹⁴C）、钾-氩（K-Ar）、铀系测年等，在断层活动性评价中最常用的为

^{14}C 测年法。 ^{14}C 是一种具有放射性的同位素，它在大气中与氧气结合成二氧化碳，在植物通过光合作用吸收二氧化碳后进入生物体内，生物死亡后 ^{14}C 就不再被补充，其含量就会按一定的衰减规律逐步减少。通过检测样品剩下多少的 ^{14}C 再与原来的 ^{14}C 含量对比，利用衰变的公式就能算出样品的年龄。对于研究断层的活动性，可以通过检测断层中的有机物（如一些古土壤、植物的遗骸等），然后对其 ^{14}C 测年，若所测结果显示断层在近期处于活跃状态，则可推断该断层为活动断层^[9]。

2. 热释光测年法的应用研究

热释光年代测定要依靠一些矿物晶体，例如石英，长石等，当这些晶体受辐射时，就会将能量储存在晶体里，后来给这些矿物加热，它们就会释放出之前储存的能量，以光的形式表现出来，同时这些矿物释放出来的光的多少和它们所遭受的辐射剂量成正比，辐射剂量又和时间有关，断层活动性评定期，通常去采集断层泥，那些经历过断层错动影响的岩层之中所包含的矿物颗粒以及其他相关物品，可以拿它们来开展热释光检测工作。借助测量这些样品种的热释光信号强度，再加上诸如环境辐射剂量等信息，就可以算出它从上一次受热事件，例如，自断层活动引发岩石破碎或重结晶等现象发生后所经历的时长。从而得知了断层的活动年代，比如说在研究某一个断层时，用断层泥里面的石英颗粒去做热释光测年，最后得到的结果显示这个断层在大约五万年前曾经发生过一次明显的活动，对于判定该断层的活动程度具有重要价值。

（四）大地测量与监测法

1. GPS 监测技术原理与应用研究

全球定位系统（GPS）监测技术，就是在断层的两侧设立很多GPS观测点，依靠卫星信号来准确地确定观测点的三维坐标发生的变化，断层活动时，两侧的岩体会出现相对位移，不断长时间监测GPS观测点的坐标变化情况，就能获取到断层的位移速率与方向等信息，从而评判断层的活动状况，GPS监测技术有着

高精度、全天候以及可实施监测这些优点，能够及时察觉断层细微的变动情形，在对某一个大型水利枢纽工程附近展开断层监测时，布置了很多GPS监测网络，通过多年的监测，发现断层两边的某些观测点存在水平位移速率，每年都能达到几毫米，同时有上下位移的情况，这就表明这个断层处于缓慢活动阶段，为工程安全评价赋予了重要的材料。

2. 水准测量与 InSAR 技术的应用研究

水准测量属于传统的测量地面垂直位移的方法，就是设置水准路线在断层两侧，定期测量水准点之间高差变化，从而观察断层垂直方向活动情况，水准测量精确度较高，然而它的测量范围比较小，同时测量结果受地形影响很大，合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术就是利用雷达卫星获取的干涉图像，来测量地表的微小形变，对于断层活动性监测来说，应用InSAR技术，可以很快得到断层沿线的形变情况，从中找出断层活动造成的地面下沉，上升等情形，采用InSAR技术对某个地区断层实施监测，发觉断层沿线存在明显的线性形变带，结合水准测量的数据，就能进一步判定出断层垂直方向的活动情况及其活动速率，这样就给全面认识断层活动性赋予了强有力的手段，同时InSAR技术不受天气，光照等条件制约，可以做到全天候，全天时监测^[10]。

四、结论与展望

如今各种断层活动性评价方法都被应用到水利枢纽工程地质勘察当中，这些不同的方法从各自的角度给予了断层活动性判断一些根据，以此来缩减工程风险，然而由于地质情况复杂又受到技术限制的影响，这些方法在精确度和速度方面还有改进的空间，日后需加大多种方法结合使用的力度并且开展新技术研发工作，依靠大数据，人工智能等科技手段，进一步改善断层活动性评价的效率和精确程度，从而为水利枢纽工程搭建起一道安全屏障。

参考文献

- [1] 徐琳, 陈永东, 杨荣, 等. 四川绵阳科技城新区玉皇沟断层探测与活动性评价 [J]. 城市地质, 2023, 18(02): 239-247.
- [2] 曾礼成. 某水利工程 F12 断层破碎带化学灌浆技术研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(04): 59-60.
- [3] 赵方彬. 则木河断裂带南段断层活动性及致灾效应研究 [D]. 成都理工大学, 2023.
- [4] 李坤, 黄镜嘉, 江涛, 等. 莱州湾凹陷同沉积断层活动性综合评价 [J]. 石油地质与工程, 2023, 37(02): 13-20.
- [5] 董来启, 刘建周, 岳克泰, 等. 小浪底水利枢纽对断层活动性的影响分析 [J]. 中州煤炭, 2009, (08): 6-8.
- [6] 黄振伟, 林仕祥, 黄海蛟, 等. 丹江口水利枢纽工程区域构造稳定性分析 [J]. 人民长江, 2009, 40(16): 43-46+98.
- [7] 黄静. 新疆克孜尔水库 F2 断层形变预测与活动性分析 [D]. 长安大学, 2009.
- [8] 伍法权, 王学潮, 国连杰, 等. 南水北调西线一期工程区断层活动性及其对工程的影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (08): 1370-1374.
- [9] 夏金梧, 赵成生, 邓瑞生. 虎跳峡工程近场区断裂活动性与地震危险研究 [J]. 人民长江, 2002, (06): 22-24+59.
- [10] 王以仁. 活动性断裂与水利水电工程 [J]. 广西水利水电科技, 1990, (04): 47-50.

水资源保护与生态文明建设协同推进策略

贾海峰¹, 尤李俊^{2*}

1.青海省水利水电科学研究院有限公司, 青海 西宁 810000

2.应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

DOI:10.61369/WCEST.2025020008

摘 要 : 本文探讨了水资源保护与生态文明建设的协同推进策略。文章首先分析了水资源保护与生态文明建设的重要性及当前面临的问题, 如水资源短缺、水污染加剧、水生态损害和节水意识薄弱等。随后, 提出了构建科学的水资源管理体系、加强水生态环境保护、推动节水型社会建设、加强科技创新和人才培养以及推动国际合作与交流等协同推进策略。最后, 对策略实施后的效果进行了展望, 包括水资源短缺问题得到缓解、水生态环境得到改善、节水意识得到提高以及水资源保护和生态文明建设水平得到提升。

关 键 词 : 水资源保护; 生态文明建设; 协同推进; 水生态环境; 节水型社会建设

Water Resources Protection and Ecological Civilization Construction Coordination Promotion Strategy

Jia Haifeng¹, You Lijun^{2*}

1.Qinghai Water Resources and Hydropower Research Institute Co., LTD. Xining, Qinghai 810000

2.National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085

Abstract : This paper discusses the synergistic promotion strategy of water resources protection and ecological civilization construction. The paper first analyzes the importance of water resources protection and the construction of ecological civilization, such as water shortage, water pollution, water ecological damage and weak awareness of water saving. Subsequently, it puts forward collaborative strategies such as building a scientific water resources management system, strengthening water ecological environment protection, promoting the construction of water-saving society, strengthening scientific and technological innovation and talent training, and promoting international cooperation and exchanges. Finally, the effect of the implementation of the strategy is discussed, including the relief of water shortage, the improvement of water ecological environment, the improvement of water-saving awareness, and the improvement of the level of water resources protection and ecological civilization construction.

Keywords : water resources protection; construction of ecological civilization; coordinated promotion; water ecological environment; water-saving society construction

水是人类赖以生存和发展的基础资源, 于经济社会发展和生态文明建设具有至关重要的意义。然而, 随着全球气候变化和人类活动的不断加剧, 水资源短缺、水污染和水生态损害等问题日益突出, 严重威胁着人类的生存环境和可持续发展。因此, 如何有效保护和合理利用水资源, 推动生态文明建设, 成为当前亟待解决的重要课题。

一、水资源保护与生态文明建设的重要性

(一) 水资源的基础性地位

水是生命之母, 维持着所有生命的活动。无论是农业生产、工业生产还是居民生活, 都离不开水资源的支持。因此, 保护水资源, 实现水资源的可持续利用, 是保障经济社会发展和人类生存的基础。

(二) 水资源的战略性意义

水资源的优化配置与可持续利用是生态文明建设的重要内容(《习近平关于治水论述摘编》)。通过科学合理地利用水资源, 可以推动生态文明建设, 实现经济、社会和环境的协调发展。同时, 水资源也是国家安全和国际竞争的重要战略资源。

(三) 水资源的生态价值

水是生态之基, 支撑着生态系统的运行。水资源的保护和合

作者简介: 贾海峰(1989.11-), 男, 回族, 青海省西宁市人, 本科, 助理研究员, 研究方向: 水资源与生态保护;

通讯作者: 尤李俊(1995-), 女, 山西临汾人, 博士, 助理研究员, 研究方向: 极端降雨洪涝灾害。

理利用对于维护生态平衡、保护生物多样性、防治水土流失等具有重要作用。此外，水资源的健康状态也直接关系到人类的生活质量和健康水平。

二、当前水资源保护与生态文明建设面临的问题

（一）水资源短缺

我国水资源总量虽丰富，但人均占有量仅为世界平均水平的四分之一，且分布极不均衡。随着人口持续增长和经济社会快速发展，水资源需求不断增加，水资源短缺问题愈发凸显。特别是在北方地区，水资源短缺尤为严重，成为制约当地经济社会发展和生态环境保护的关键因素（《求是》24年2月18日）。

（二）水污染加剧

随着工业化、城市化的加速发展，水污染问题日益严峻。大量的工业废水、生活污水以及农业面源污染持续排入水体，严重破坏了水生态系统的平衡。这些污染物不仅影响水质，减少可用水资源，还对人类的饮用水安全和健康构成了重大威胁，成为亟待解决的重大环境问题（张文婷，2015）。

（三）水生态损害

我国水生态系统正面临严峻挑战。由于水资源过度开发、不合理利用以及污染加剧，众多河流、湖泊和湿地等水域的水质持续恶化，生态功能显著退化。这些变化严重破坏了水生态系统的平衡与稳定对生物多样性及整个自然环境造成了深远影响，亟待采取有效措施加以修复与保护。

（四）节水意识薄弱

当前，我国面临的一个显著问题是公众节水意识普遍较弱（《中国节约用水报告2024》）。这种节水意识的缺失导致水资源浪费现象频发，这不仅加剧了我国本已紧张的水资源短缺问题，使得水资源供需矛盾更加突出；同时也大幅增加了水处理和污水处理的成本，给社会经济和环境带来了额外的负担。

三、水资源保护与生态文明建设协同推进策略

（一）构建科学的水资源管理体系

为了更有效地保护和合理利用水资源，必须构建一套科学的水资源管理体系。这一体系的核心在于完善水资源法律法规、加强水资源规划以及强化水资源监管。首先，完善水资源法律法规是构建科学管理体系的基础。通过建立健全水资源保护法律法规体系，可以明确水资源保护的责任主体和法律责任，为水资源保护提供坚实的法律保障。这有助于规范水资源开发利用行为，防止过度开发和滥用水资源，从而保障水资源的可持续利用。其次，加强水资源规划是实现水资源优化配置的关键。制定科学合理的水资源规划，需要综合考虑经济社会发展和生态环境保护的需求，明确水资源的开发利用和保护目标。通过规划的实施，可以实现水资源的合理配置和高效利用，满足经济社会发展和生态环境保护对水资源的需求。最后，强化水资源监管是确保法律法规得到有效执行的重要手段。建立健全水资源监管体系，加强对水资源开发利用、保护和管理的监督检查，可以及时发现和纠正违法违规行为，确保水资源保护法律法规得到有效执行^[1]。这有助于维护水资源的公平、公正和可持续利用，保障国家水资源安

全和生态环境安全。

（二）加强水生态环境保护

为了维护水生态系统的健康和可持续发展，加强水生态环境保护显得尤为重要。这主要包括实施水生态修复工程和加强水污染防治两个方面。首先，针对已经受损的水生态系统，实施生态修复工程是恢复其结构和功能的关键。通过采取一系列科学的修复措施，如湿地恢复、水生植物种植、底栖动物放养等，可以有效提升水生态系统的自我恢复能力，逐步恢复其原有的生态功能。这不仅有助于改善水质，还能水生生物提供适宜的栖息环境，促进水生态系统的平衡发展。其次，加强水污染防治是保护水生态环境的重要一环^[2]。工业废水、生活污水和农业面源污染是水污染的主要来源（《中华人民共和国水污染防治法》）。因此，需要严格控制这些污染源的排放，加大治理力度，减少水污染物的排放总量。通过实施严格的排放标准、加强监管和执法力度、推广先进的污水处理技术等措施，可以有效降低水污染物排放，从源头保护水生态环境，免受污染侵害。

（三）推动水生态补偿机制

为了更有效地保护和恢复水生态环境，推动水生态补偿机制显得尤为关键。建立水生态补偿机制，旨在对保护水生态环境作出贡献的地区和个人给予合理的经济补偿，以此激励更多社会成员积极参与到水生态环境的保护中来。这一机制不仅有助于调动社会各界的积极性，还能促进水资源的可持续利用和生态环境的良性循环。同时，推动节水型社会建设也是缓解水资源短缺、保护水生态环境的重要途径。加强节水宣传教育，通过电视、广播、报纸、网络等多种媒体途径，广泛传播节水的重要性和必要性，提升公众的节水意识，使节水成为全社会的共识和行动^[3]。此外，积极推广节水技术和产品也是节水型社会建设的关键一环（《中华人民共和国水法》第八条）。通过推广节水器具、节水灌溉技术等高效节水技术和产品，降低水资源在生产和生活过程中的消耗，提高水资源的利用效率，从而实现水资源的节约和合理利用。最后，完善节水政策也是推动节水型社会建设的重要保障。制定和完善节水政策，对节水行为进行奖励，对浪费水资源的行为进行处罚，形成全社会共同节水的良好氛围，为节水型社会建设提供有力的制度保障。

（四）加强科技创新和人才培养

在水资源短缺、生态环境压力日益增大的背景下，加强水资源科技创新与人才培养已成为推动生态文明建设的关键举措（把水利科技创新摆在更加突出位置《中国水利》）。为推动水资源保护与高效利用，我们必须加大在水资源保护、利用和管理领域的科技创新投入。首先需研发现代化、智能化和绿色化的水资源利用技术，旨在可提升水资源管理的精确性和效率，同时减少对环境的不良影响^[4]。其次，通过引入智能监测与预警系统，可以实现对水资源的实时跟踪与调控，确保水资源的合理分配与有效利用。而绿色水处理技术的突破，则能有效减少污染物的排放，保护水质安全，为生态文明建设提供坚实的支撑。

在人才培养与引进方面，应着重加强水资源保护和生态文明建设领域的人才队伍建设。这不仅需培养具有国际视野和创新能力的高素质人才，还要积极引进国内外顶尖人才，共同为水资源保护和生态文明建设贡献智慧与力量^[5]。通过构建完善的培训体系、提供广阔的实践平台以及建立激励机制，可以激发人才的创

新活力，推动水资源保护与生态文明建设的持续发展。

（五）推动国际合作与交流

在全球水资源日益紧张、生态环境面临严峻挑战的今天，加强国际合作与交流，共同推进水资源保护与生态文明建设显得尤为重要。中国始终秉持开放合作的态度，积极参与国际水资源合作与交流。我们致力于学习借鉴国际先进的水资源保护和管理经验，通过与国际社会的深入对话与合作，不断提升我国水资源保护与管理的科学性和有效性^[6]。这种跨国间的知识共享与经验交流，不仅有助于更好地应对水资源短缺、水污染等全球性挑战，也为全球水资源保护和生态文明建设事业的发展注入了新的活力。同时，我们也积极参与国际水资源治理体系的建设和完善。我们深知，全球水资源问题的解决需要国际社会的共同努力和协作^[7]。因此，致力于推动全球水资源治理体系的改革和完善，为全球水资源保护和可持续利用贡献中国智慧和力量。通过参与国际水资源治理，我们与各国共同商讨水资源保护策略，分享成功经验，协同应对挑战，共同推动全球水资源治理向更加公正、合理和有效的方向发展。

四、策略实施效果展望

（一）水资源短缺问题得到缓解

水资源短缺问题在全球范围内日益严峻，但通过构建科学的水资源管理体系和推动节水型社会建设，这一问题有望得到有效缓解。科学的水资源管理体系能够确保水资源的合理配置与高效利用，通过精确的监测和调度，减少浪费和损失。同时，节水型社会建设的推进将提升公众的节水意识，鼓励采用先进的节水技术和产品，从而在日常生活中降低水资源消耗。这些措施共同作用，不仅能提高水资源的利用效率，还能在一定程度上弥补水资源总量的不足，为经济社会的可持续发展提供有力保障^[8]。

（二）水生态环境得到改善

加强水生态环境保护和修复工作，对于改善水生态系统的结构和功能具有重要意义。通过实施一系列保护措施，如减少污染物排放、恢复湿地生态系统、保护水生生物等，可以有效遏制水生态系统的退化趋势。同时，针对已经受损的水生态系统，采取科学的修复措施，如生态补水、植被恢复、人工湿地建设等，可以逐步恢复其结构和功能，提高水生态系统的自我恢复能力^[9]。

这些举措的实施，不仅有助于维护水生态系统的平衡和稳定，还能人类提供更加优质的水资源和生态环境，实现人与自然的和谐共生。

（三）节水意识得到提高

加强节水宣传教育和推广节水技术及产品，是提升公众节水意识、营造全社会节水氛围的关键举措。通过广泛的宣传教育，让公众认识到水资源的珍贵性和节水的重要性，激发其自觉节水的内在动力。同时，积极推广先进的节水技术和高效节水产品，如节水器具、智能灌溉系统等，使节水行动更加便捷可行。这些努力不仅能够有效减少水资源浪费，还能在全社会范围内形成节水光荣、浪费可耻的良好风尚，推动节水理念深入人心，成为人们的自觉行动，共同守护宝贵的水资源。

（四）水资源保护和生态文明建设水平得到提升

科技创新、人才培养与国际合作是推动水资源保护和生态文明建设水平提升的重要驱动力。通过加大在水资源管理和生态环保领域的科技创新投入，能够研发出更高效、更环保的技术手段，为水资源保护和生态修复提供强有力的支持。同时，注重相关领域人才的培养和引进，能够形成一支高素质的专业队伍，为水资源保护和生态文明建设提供坚实的人才保障^[10]。此外，积极参与国际合作与交流，借鉴国际先进经验和先进技术，有助于我国在全球水资源保护和可持续发展事业中发挥更加积极的作用，共同应对水资源短缺、水污染等全球性挑战，为构建人类命运共同体贡献力量。

五、结论

水资源保护与生态文明建设是相辅相成的两个重要方面。只有实现两者的协同推进，才能有效应对水资源短缺、水污染和水生态损害等问题，推动经济社会的可持续发展。本文提出了构建科学的水资源管理体系、加强水生态环境保护、推动节水型社会建设等协同推进策略，并展望了策略实施后的效果，具体来看，水资源短缺问题得到缓解，水生态环境得到改善，节水意识得到提高，水资源保护和生态文明建设水平得到提升。未来需要继续加强研究和实践，不断完善和优化治理措施，为实现水资源可持续利用和生态环境和谐共生作出更大贡献。

参考文献

- [1] 肖华松. 探究生态文明视野下的水资源保护及利用 [J]. 清洗世界, 2023, 39 (08): 106-108.
- [2] 郭瑛. 浅析生态文明视野下的水资源保护及利用 [J]. 资源节约与环保, 2021, (04): 16-17.
- [3] 郭军. 节约保护水资源 大力建设生态文明 [J]. 资源节约与环保, 2020, (02): 26.
- [4] 陈龙, 方兰. 水生态文明与水资源软路径 [J]. 水利发展研究, 2018, 18 (03): 22-26.
- [5] 李磊. 生态文明视野下的水资源保护运用 [J]. 农业科技与信息, 2018, (02): 23-24.
- [6] 徐维. 加强水资源保护 推进生态文明建设 [J]. 低碳世界, 2014, (01): 85-86.
- [7] 姜海萍, 朱远生. 完善水资源保护与水生态修复体系 推进珠江流域水生态文明建设 [J]. 中国水利, 2013, (13): 61-63.
- [8] 任宪韶. 切实加强水资源的节约保护 全面推进海河流域水生态文明建设 [J]. 海河水利, 2013, (02): 1-3.
- [9] 节约保护水资源推进生态文明建设 [J]. 河南水利与南水北调, 2013, (06): 3.
- [10] 张文婷, 许广东. 影响生活饮用水水质安全的因素及对策 [J]. 治淮, 2015, (09): 15-16.

复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系构建

伍德

身份证号: 440921198508040476

DOI:10.61369/WCEST.2025020011

摘 要： 阐述复杂水文条件下围堰施工安全风险，包括水文参数动态变化，多源风险因子耦合放大。介绍三维风险监测矩阵构建、FTA - BN组合模型等防控手段，还涉及多种技术方法如蒙特卡罗模拟、DBN模型等，构建了全过程防控体系及提出闭环管理机制

关 键 词： 围堰施工；水文条件；安全风险防控

Construction of Dynamic Prevention and Control System for Safety Risks of Cofferdam Construction under Complex Hydrological Conditions

Wu De

ID: 440921198508040476

Abstract： This paper discusses the safety risks associated with cofferdam construction under complex hydrological conditions, including the dynamic changes in hydrological parameters and the amplification of multi-source risk factors. It introduces methods for risk prevention and control, such as the construction of a three-dimensional risk monitoring matrix and the FTA-BN combined model. Additionally, it covers various technical approaches, including Monte Carlo simulation and DBN models, to establish a comprehensive prevention and control system and propose a closed-loop management mechanism

Keywords： cofferdam construction; hydrological conditions; safety risk prevention and control

引言

随着基础设施建设的推进，围堰施工在复杂水文条件下的安全风险防控至关重要。2021年发布的《关于加强水利工程建设质量和安全管理的通知》强调了对工程质量和安全的严格要求。复杂水文条件下，潮汐、径流、降水等水文要素动态变化，多源风险因子相互耦合，对围堰稳定性构成威胁。三维风险监测矩阵构建、基于 FTA - BN组合模型的预警阈值确定等技术应运而生。本研究成果构建了全过程防控体系，提出数字孪生管理机制，符合政策导向，为相关工程提供借鉴。

一、复杂水文条件下围堰工程特性分析

（一）水文参数动态变化特征

复杂水文条件下，水文参数呈现出显著的动态变化特征。潮汐具有周期性涨落规律，其水位变化、潮流速度及流向等在不同时间和地点存在差异，这种变化会对围堰产生周期性的水平荷载和水位差影响^[1]。径流受流域降水、地形地貌等多种因素制约，其流量、流速和含沙量等参数处于动态变化中，可能导致围堰基础受到冲刷或淤积。降水的时空分布不均匀，不仅会引起水位的快速上升，增加围堰的静水压力，还可能改变土壤的含水量和渗透性，影响围堰的稳定性。这些水文要素相互作用，其动态变化共同构成了复杂的水文条件，对围堰结构产生复杂的脉动荷载作用。

（二）多因素耦合风险作用机理

复杂水文条件下，水动力作用、地质构造、施工荷载等多源

风险因子相互影响，产生非线性耦合放大效应。水动力作用受水流速度、水位变化等影响，可能导致围堰结构承受过大的侧向压力和冲刷力^[2]。地质构造的不均匀性和不稳定性，会改变围堰基础的受力状态，增加地基失稳的风险。施工荷载包括机械设备、材料堆放等，其分布和大小的变化在与水动力和地质因素相互作用时，进一步加剧了围堰结构的受力复杂性。这些多源风险因子并非孤立存在，而是相互耦合，使得围堰所面临的风险远大于单个因素作用之和，对围堰的稳定性和安全性构成严重威胁。

二、安全风险动态防控体系架构设计

（一）三维风险监测矩阵构建

在复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系中，三维风险监测矩阵构建至关重要。需建立包含水力环境、结构响应、

施工行为的三维监测指标体系。对于水力环境，可监测水位、流速、流量等指标，以了解水流对围堰的冲击力^[9]。结构响应方面，关注围堰的变形、应力、位移等，及时掌握结构的安全状态。施工行为监测包括施工设备的运行参数、施工人员的操作规范等。同时，要设计合理的传感器布设方案，确保能准确获取各项监测数据。传感器应根据监测指标的特点和围堰的实际情况进行布置，如在关键部位设置水位传感器、在结构受力点设置应力传感器等，从而实现了对围堰施工安全风险的全面、实时监测。

（二）风险分级预警机制构建

基于 FTA - BN 组合模型构建五级预警阈值确定方法与应急响应规程。FTA - BN 组合模型综合了故障树分析（FTA）和贝叶斯网络（BN）的优势^[4]。通过 FTA 对围堰施工安全风险进行定性分析，确定导致风险发生的基本事件及其逻辑关系。然后将 FTA 转化为 BN，利用 BN 的概率推理能力，结合历史数据和专家经验，对基本事件的发生概率进行量化。在此基础上，依据风险可接受水平和相关标准，确定五级预警阈值。当监测数据表明风险指标接近或超过相应阈值时，启动对应的应急响应规程，以实现安全风险动态防控。

三、动态风险评估方法研究

（一）概率风险评估模型

1. 蒙特卡罗随机模拟

在概率风险评估模型中，蒙特卡罗随机模拟是重要方法。对于复杂水文条件下围堰施工安全风险评估，开发基于改进拉丁超立方抽样的参数概率分布建模方法至关重要。这种改进的抽样方法能够更有效地处理参数的不确定性，提高模拟结果的准确性和可靠性。通过对相关参数进行合理的概率分布建模，利用蒙特卡罗随机模拟技术，可以大量重复地模拟围堰施工过程中各种风险因素的组合情况。从而得到不同风险场景下的结果分布，为后续风险分析和决策提供有力的数据支持，以更好地构建围堰施工安全风险动态防控体系^[5]。

2. 动态贝叶斯网络建模

动态贝叶斯网络（DBN）是一种用于处理动态系统中不确定性的强大工具。在复杂水文条件下围堰施工安全风险评估中，构建考虑时间序列特征的 DBN 风险演化预测模型具有重要意义。该模型能够捕捉风险因素随时间的变化规律，从而更准确地预测风险的发展趋势。通过对历史数据的分析和学习，确定网络节点及其之间的条件概率关系，以反映不同风险因素之间的相互影响。同时，结合实时监测数据不断更新网络参数，使模型能够适应复杂多变的水文环境。利用 DBN 的推理能力，可以对未来不同时刻的风险状态进行预测，为围堰施工安全风险的动态防控提供科学依据^[6]。

（二）实时风险评估算法

1. 流式计算框架设计

基于 Spark Streaming 的实时风险计算架构设计是复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控的关键。该架构利用 Spark

Streaming 的实时流处理能力，能够快速处理海量的水文数据以及围堰施工相关数据。通过分布式计算，有效提高计算效率，降低计算延迟。它可以实时监测水文条件的变化以及施工过程中的各种风险因素，并根据预设的风险评估模型进行实时风险评估。同时，该架构具备良好的扩展性，能够适应不同规模的围堰施工项目。这种实时风险计算架构为围堰施工安全风险动态防控提供了有力的技术支持，确保施工过程中的安全性和可靠性^[7]。

2. 风险预测模型优化

为优化风险预测模型，开发融合 LSTM 与卡尔曼滤波的混合预测算法^[8]。LSTM 神经网络在处理时间序列数据时具有优势，能有效捕捉数据的长期依赖关系。卡尔曼滤波则在处理动态系统的状态估计问题上表现出色，可对系统状态进行实时更新。将两者融合，既能充分利用 LSTM 对复杂水文数据的特征提取能力，又能借助卡尔曼滤波的实时更新机制，提高预测的准确性和时效性。该混合算法可更好地适应复杂水文条件下围堰施工安全风险的动态变化，为实时风险评估提供更可靠的依据。

四、防控体系关键技术实施

（一）智能感知技术应用

1. 多源异构数据融合

在复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系中，多源异构数据融合至关重要。基于联邦学习的分布式监测数据融合方法是一种有效的手段。联邦学习允许在不共享原始数据的情况下，对来自不同数据源的数据进行联合建模和分析。通过这种方式，可以整合多源异构数据，如不同传感器采集的水位、流速、压力等数据，以及不同监测设备获取的图像、声音等信息。这些数据可能具有不同的格式、分辨率和采样频率。利用联邦学习算法，能够挖掘数据之间的潜在关联，提高对围堰施工安全风险的感知和预测能力，为防控体系提供更准确、全面的数据支持^[9]。

2. 边缘计算节点部署

在复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系中，边缘计算节点部署至关重要。需考虑施工现场的实际环境和需求，合理确定节点的位置和数量。对于具有自适应降噪功能的边缘计算模块技术方案，要确保其能有效处理各类感知数据。通过优化节点布局，提高数据采集的准确性和及时性，以更好地应对复杂水文环境带来的挑战。同时，结合智能感知技术应用，使边缘计算节点能够快速适应环境变化，为整个防控体系提供可靠的数据支持和决策依据，保障围堰施工安全风险的动态防控有效实施^[10]。

（二）数字孪生平台构建

1. BIM-GIS 集成建模

BIM - GIS 集成建模是数字孪生平台构建的关键环节。通过将 BIM 的精确几何信息和丰富的语义数据与 GIS 的强大空间分析能力相结合，能够更全面地呈现复杂水文条件下围堰施工的环境和工程信息。利用 BIM 技术创建围堰及相关工程结构的三维精细模型，包括其内部结构和施工细节。同时，GIS 技术整合地形、水文等地理空间数据，提供宏观的地理环境背景。二者集成后，可实

现数据的无缝交互和共享，为后续的施工安全风险动态防控提供准确、直观的可视化基础，有助于施工人员更好地理解工程与环境的关系，及时发现潜在风险。

2. 虚实映射机制设计

建立基于 OPC UA 的物理实体与数字模型双向映射体系是虚实映射机制设计的关键。OPC UA 作为一种先进的工业通信标准，能够实现不同设备和系统之间的数据交互与整合。在围堰施工安全风险动态防控体系中，通过 OPC UA 技术，物理实体（如围堰结构、施工设备等）的实时状态数据（如位移、应力、水位变化等）可以准确地传输到数字模型中。同时，数字模型根据分析结果和预设规则对物理实体发出控制指令，实现双向的映射和交互。这种映射体系确保了数字孪生平台能够实时反映物理实体的真实状态，为施工安全风险动态防控提供了精准的数据支持和决策依据。

（三）智能决策系统开发

1. 案例推理知识库构建

构建案例推理知识库需从多方面着手。一方面，要广泛收集复杂水文条件下围堰施工的典型安全风险案例，涵盖不同施工阶段、不同水文环境以及不同围堰类型等情况。这些案例应详细记录风险发生的背景、过程、造成的影响以及采取的应对措施等关键信息。另一方面，运用知识图谱技术对收集的案例进行整合与分析。通过构建实体与关系模型，将案例中的各种要素进行关联，如施工工艺与风险类型的关联、水文条件与风险发生概率的关联等。同时，要不断更新和完善知识库，随着新案例的出现以及对已有案例认识的深入，及时调整知识图谱的结构和内容，确

保知识库能为智能决策系统提供准确、有效的案例支持。

2. 多目标优化算法设计

开发考虑安全 - 成本 - 工期的 NSGA - III 优化决策模块。NSGA - III 是一种先进的多目标优化算法，适用于处理复杂的多目标决策问题。在围堰施工安全风险动态防控体系中，安全、成本和工期是三个关键目标。该模块通过对施工过程中的各种因素进行量化分析，建立多目标优化模型。利用 NSGA - III 算法的优势，能够在庞大的解空间中快速搜索到一组满足不同目标要求的非劣解。这些解代表了不同的施工方案选择，每个方案在安全、成本和工期方面都有不同的表现。决策者可以根据实际情况和偏好，从这些非劣解中选择最适合的施工方案，从而实现对围堰施工安全风险的动态防控，同时兼顾成本和工期的合理控制。

五、总结

本研究在复杂水文条件下围堰施工安全风险防控方面取得了重要成果。构建了包含实时监测、动态评估和智能决策的全过程防控体系，并经工程实践验证其在极端水文条件下的响应能力。同时提出基于数字孪生的风险防控闭环管理机制，为同类工程树立了可借鉴的技术范例。这些成果不仅有助于提高围堰施工在复杂水文环境中的安全性和可靠性，还为相关工程领域的风险管理提供了新的思路和方法。未来研究将朝着多项目数据共享以及新型传感器网络集成方向发展，有望进一步提升该防控体系的性能和应用范围。

参考文献

- [1] 郭晓丹. 民航空管安全风险防控研究 —— 以 A 管制空域为例 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 赵巍. 水文与气象条件下的船舶多目标航路规划研究 [D]. 吉林大学, 2021.
- [3] 宋强. 复杂环境下地下洞室群施工风险评估及防控措施研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [4] 陈天津. A 生产车间的安全风险防控研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
- [5] 张雪韬. 甘肃省出口蔬菜及其制品安全风险防控体系优化研究 [D]. 兰州大学, 2022.
- [6] 李力波, 郑照龙, 王彦钧. 三网融合提升安全风险防控能力 [J]. 石油化工管理干部学院学报, 2021, 23(4): 28-32.
- [7] 杨健, 张华, 翟新军, 等. 储能安全风险防控关键技术研究 [J]. 中国高新科技, 2022(20): 24-27.
- [8] 魏静萍. 高层房屋建筑工程施工安全风险隐患与防控措施 [J]. 砖瓦世界, 2024(12): 157-159.
- [9] 党国峰, 刘井义, 李黎, 等. 海域环境承台围堰施工安全风险评估 [J]. 价值工程, 2022, 41(3): 49-51.
- [10] 王伟, 王曜. 基于大数据的港口集团安全风险防控平台 [J]. 集装箱化, 2024, 35(1): 22-26.

防汛抗旱视角下水库运行管理策略探讨

覃海龙

罗定市水库工程管理中心，广东 罗定 527200

DOI:10.61369/WCEST.2025020013

摘 要： 阐述水库防汛抗旱功能，包括拦蓄洪水、调节径流、抗旱保供等及带来的效益。分析防汛抗旱协同理论，指出运行调度机制存在决策滞后等问题，以及设施设备技术瓶颈。介绍动态调度模型、联合调控方案等多种策略及应用，强调其对防汛抗旱的重要性和创新性，还提及南北方差异及未来研究方向。

关 键 词： 水库；防汛抗旱；运行管理

Discussion on Reservoir Operation and Management Strategies under The Perspective of Flood Control and Drought Relief

Qin Hailong

Luoding Reservoir Engineering Management Service Center, Luoding, Guangdong 527200

Abstract： This paper discusses the flood control and drought resistance functions of reservoirs, including flood interception, runoff regulation, and drought protection, along with the benefits they bring. It analyzes the theory of coordinated flood control and drought resistance, highlighting issues such as decision-making delays in operational scheduling mechanisms and technical limitations in facilities and equipment. The paper introduces various strategies and applications, such as dynamic scheduling models and joint regulation plans, emphasizing their importance and innovation in flood control and drought resistance. It also addresses the differences between the southern and northern regions and outlines future research directions.

Keywords： reservoir; flood control and drought relief; operation management

引言

水库在流域综合治理中具有防汛抗旱的核心功能，对保障水资源稳定供应及社会经济发展至关重要。2021年发布的《关于加强水利基础设施建设的指导意见》强调了水利设施建设与管理的重要性。水库通过拦蓄洪水和释放水量分别在防汛抗旱中发挥关键作用，其功能带来显著社会效益。同时，防汛抗旱协同理论框架涉及多种理论体系，然而水库运行调度机制存在问题，设施设备面临技术瓶颈。因此，需融合多种技术、设计合理方案、构建评价系统及防控体系等，以优化水库运行管理策略，提升其在防汛抗旱中的作用。

一、水库运行管理理论基础

（一）水库防汛抗旱功能定位

水库作为流域综合治理的核心设施，具有重要的防汛抗旱功能。在防汛方面，水库能够通过拦蓄洪水，削减洪峰流量，从而减轻下游地区的洪水压力。其调洪蓄水功能可有效调节河川径流，在洪水期储存多余水量，避免洪水泛滥成灾^[1]。在抗旱方面，水库起到了抗旱保供的关键作用。当面临干旱时期，水库可以释放储存的水量，满足农业灌溉、工业生产以及居民生活用水等需求，保障水资源的稳定供应。同时，水库的这些功能还带来了显著的社会经济效益，如保障人民生命财产安全、促进农业和工业稳定发展等。

（二）防汛抗旱协同理论框架

在防汛抗旱协同理论框架中，构建相关理论体系至关重要。水量时空分配理论需考虑不同时段和区域的用水需求，合理调配水库水量，以应对防汛与抗旱的不同情境^[2]。风险效益平衡理论要求在保障水库安全运行、降低防汛风险的同时，充分发挥其在抗旱中的效益，实现两者的平衡。多目标优化理论则综合考虑防汛、抗旱以及其他相关目标，如生态保护、发电等，通过优化算法找到最佳的水库运行策略。同时，解析防汛抗旱的矛盾统一关系，认识到两者在水资源利用上存在矛盾，但通过合理的水库运行管理又可实现统一，共同保障水资源的可持续利用和社会经济的稳定发展^[2]。

二、防汛抗旱视角下水库运行现状分析

（一）运行调度机制现存问题

从近十年灾情数据来看，水库运行调度机制存在诸多问题。调度决策滞后，未能及时根据水情变化做出合理调整，导致在防汛抗旱关键时刻无法发挥最佳作用^[3]。预警响应不灵，相关监测预警系统不完善，信息传递不及时、不准确，使得下游地区无法及时做好应对准备。泄洪蓄水矛盾突出，在防汛时为保安全需泄洪，但又要考虑后续抗旱需求而蓄水，难以平衡两者关系，这不仅影响水库自身功能发挥，还可能对周边生态环境及居民生活造成不利影响^[3]。

（二）设施设备技术瓶颈

水库在防汛抗旱中面临诸多设施设备技术瓶颈。水库群联合调度能力不足，难以实现水资源的优化配置和协同利用，影响防汛抗旱的整体效果^[4]。自动化监控系统覆盖率低，部分水库仍依赖人工监测，数据获取不及时且准确性难以保证，无法对水库运行状态进行实时、精准掌控。应急抢险装备陈旧，在面对突发的防汛抗旱险情时，可能无法高效开展抢险工作，延误救援时机，增加灾害损失。这些技术短板严重制约了水库在防汛抗旱中的作用发挥，亟待解决。

三、防汛抗旱协同管理策略构建

（一）智能化调度体系

1. 多目标优化调度模型

融合气象预测与水文模拟，建立兼顾防洪安全与抗旱需求的动态调度模型。通过气象预测获取降水等信息，结合水文模拟技术，准确模拟水库入库流量等水文过程^[5]。以防洪安全为首要约束条件，设定合理的防洪限制水位和泄洪规则，确保在洪水期能够有效拦蓄洪水，保护下游地区安全。同时，考虑抗旱需求，根据不同地区的用水需求和水资源状况，优化水库的放水策略，保障农业灌溉、城市供水等用水需求。在模型构建中，采用多目标优化算法，平衡防洪和抗旱两个目标之间的矛盾，寻求最优的调度方案，提高水库在防汛抗旱中的综合效益。

2. 水库群联合调度机制

设计跨行政区域的流域级水库群水量联合调控方案与利益补偿机制是实现水库群联合调度的关键。需综合考虑流域内各水库的地理位置、库容、来水情况等因素，制定科学合理的调控方案，以实现水资源的优化配置^[6]。同时，由于不同行政区域在水资源利用上存在利益差异，建立公平有效的利益补偿机制至关重要。通过明确各方的权利和义务，合理分配水资源利用的收益和成本，促进各区域之间的合作与协调，保障联合调度方案的顺利实施，提高防汛抗旱的整体效能。

（二）风险防控体系

1. 多维风险预警指标体系

构建包含库区安全、下游防护、生态流量保障等多维度的动态风险评价系统，需综合考虑多方面因素。对于库区安全，要关

注水位变化、坝体稳定性等指标，如水位过高可能导致漫坝风险增加^[7]。下游防护方面，应监测洪水流量、流速以及下游区域的人口密度和重要设施分布，确保洪水来临时能及时预警并采取措。生态流量保障则要考虑河流的生态需水要求，根据不同季节和区域特点，设定合理的生态流量阈值。通过整合这些维度的指标，建立动态风险评价系统，能够更全面、准确地预警防汛抗旱风险，为水库运行管理提供科学依据。

2. 应急预案分级响应机制

构建风险防控体系中的应急预案分级响应机制对于防汛抗旱至关重要。基于情景模拟建立应急响应预案库，可涵盖多种可能的旱涝灾害情景^[8]。针对不同程度的旱涝情况，制定五级应急响应标准。当出现轻微旱涝时，启动较低级别响应，采取相应的常规措施，如适度调整水库水位等。随着旱涝程度加剧，逐步提升响应级别，加大资源调配和防控力度。例如，在高级别洪涝响应时，可能需要紧急泄洪并加强堤坝防护；而在严重干旱响应时，则要严格控制用水并积极寻找新的水源。通过这种分级响应机制，能更科学、有效地应对防汛抗旱中的各种复杂情况。

四、管理策略实施路径

（一）智慧水利技术支撑

1. 数字孪生平台建设

部署水库三维仿真模型与实时数据驱动的智慧决策系统架构是数字孪生平台建设的关键。该架构需整合多源数据，包括水库的地形地貌、水文气象、工程设施等信息，构建高精度的三维仿真模型^[9]。通过传感器网络实时采集水库运行数据，如水位、流量、水质等，并将其输入模型进行动态更新。利用数据分析和人工智能算法，对水库的运行状态进行实时评估和预测，为防汛抗旱决策提供科学依据。同时，系统应具备可视化界面，方便管理人员直观了解水库运行情况，实现智慧决策和高效管理。

2. 卫星遥感监测应用

高分辨率卫星在防汛抗旱相关的水库运行管理中具有重要应用。在库区淹没分析方面，其能够精准感知水位变化及淹没范围。通过对卫星图像的分析处理，可以获取不同时间点的库区水面信息，从而为水库的泄洪决策提供依据^[10]。在干旱监测领域，高分辨率卫星可以监测土壤湿度、植被覆盖等指标的变化。这些指标的变化能够反映出水库周边地区的干旱程度，帮助管理者及时了解水资源状况，合理调整水库的供水策略，以保障农业、工业和生活用水需求。

（二）管理制度创新

1. 流域管理协调机制

设计跨部门、跨区域的防汛抗旱联席会议制度及信息共享平台，旨在打破部门和区域壁垒，实现信息的高效流通与协同管理。跨部门合作可整合水利、气象、应急等多部门资源，形成合力。例如，水利部门提供水库水位等数据，气象部门提供天气预测信息，应急部门制定应对方案。跨区域合作则考虑到流域的整体性，不同区域间共享防汛抗旱信息，共同协商水库的运行策

略。通过建立信息共享平台，各方能够实时获取所需信息，及时做出决策，提高水库在防汛抗旱中的运行效率和管理水平，保障流域内人民生命财产安全和生态环境稳定。

2.绩效考核体系重构

建立包含防洪效益、供水保障、生态影响的综合绩效考核指标体系是水库运行管理的重要创新。防洪效益方面，需考量水库在汛期对洪水的调蓄能力，如削减洪峰流量的程度等。供水保障上，要关注水库对周边地区供水的稳定性和水质达标情况。生态影响维度，应评估水库运行对周边生态环境的改变，例如对水生生物栖息地的影响。通过对这些指标的综合考核，能更全面地了解水库运行管理的成效，激励管理者采取更科学合理的措施，平衡防洪、供水和生态保护之间的关系，实现水库的可持续运行和综合效益的最大化。

（三）工程措施优化

1.汛限水位动态控制

汛限水位动态控制是工程措施优化的重要方面。基于气象预报精度确定汛期水位浮动控制区间是关键。需综合考虑气象预报的准确性、可靠性以及水库自身的特性和周边环境因素。通过建立科学合理的模型，分析不同气象条件下的来水情况，以此确定合适的水位控制区间。在实际操作中，要实时监测气象数据和水库水位变化，根据最新信息及时调整水位控制策略。同时，要加强与气象部门的合作，提高气象预报信息的获取和利用效率，确保汛限水位动态控制的科学性和有效性，从而提升水库在防汛抗

旱中的作用。

2.抗旱应急水源工程

规划库区连通工程与地下水备用取水设施相结合的应急供水保障方案。通过合理规划库区连通工程，实现不同水库之间的水资源调配，增强区域整体的抗旱能力。同时，建设地下水备用取水设施，在地表水水源不足时，能够及时抽取地下水作为补充。在工程建设过程中，要充分考虑地质条件、水资源分布等因素，确保工程的科学性和可行性。并且，要建立完善的监测和管理系统，实时掌握应急水源的水量、水质等情况，以便在抗旱期间能够合理调度和使用应急水源，保障居民生活用水和重要产业用水需求。

五、总结

防汛抗旱视角下水库运行管理策略研究具有重要意义。通过对相关策略的系统总结，可发现其创新性主要体现在综合考虑防汛抗旱需求、采用先进技术进行监测和调度等方面。在南北方水库应用中存在差异，南方水库更注重防洪与水资源综合利用的平衡，北方水库则在抗旱保水方面面临更大挑战，且在调度规则和设施建设上各有特点。在气候变化背景下，未来研究应关注水库对极端气候事件的适应性、如何进一步优化调度模型以提高水资源利用效率、加强生态保护与水库运行管理的协同等，以更好地发挥水库在防汛抗旱中的关键作用。

参考文献

[1] 梁文娟. 陕西省小型水库运行管理标准化评价体系研究 [D]. 西安理工大学, 2021.
[2] 彭邵雯. 水库抗旱调试及早警水位研究 [D]. 西安理工大学, 2023.
[3] 李广辉. 土地利用视角下的石头口门水库非点源污染控制研究 [D]. 吉林大学, 2023.
[4] 周溢. 应急管理视域下 C 水库极端暴雨应对问题与对策研究 [D]. 华北水利水电大学, 2023.
[5] 张建新. 水库汛期运行水位动态控制多目标风险分析 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[6] 王婷. 加强水库运行管理的有效策略 [J]. 建材与装饰, 2021, 17(10): 287-288.
[7] 张启银. 防汛抗旱与农田水利管理的实施策略 [J]. 河北农机, 2023(21): 127-129.
[8] 彭德明. 石坝口水库在防汛抗旱中的作用与优化管理措施研究 [J]. 湖南水利水电, 2024(2): 52-54.
[9] 邓海英. 农田水利防汛抗旱管理对策 [J]. 农业开发与装备, 2023(7): 239-240.
[10] 汤喜春. 基于生态环境保护背景下防汛抗旱工作开展要点探讨 [J]. 湖南水利水电, 2021(5): 50-51.

给排水工程技术在水利建筑中的应用及风险管理

蔡志华

中水投（广东）建设有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025020014

摘 要： 本文阐述了给排水工程在水利建筑中的多方面应用，包括不同场景下的系统设计要点，施工过程的技术管理及质量控制，风险因素分析与防控，还介绍了相关技术如物联网、CCTV 检测等的应用，同时指出研究局限及未来发展方向。

关 键 词： 给排水工程；水利建筑；风险防控

The Application and Risk Management of Water Supply and Drainage Engineering Technology in Water Conservancy Construction

Cai Zhihua

China Water Investment (Guangdong) Construction Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper expounds the multi-faceted applications of water supply and drainage engineering in water conservancy construction, including the key points of system design in different scenarios, technical management and quality control during the construction process, risk factor analysis and prevention and control. It also introduces the applications of related technologies such as the Internet of Things and CCTV detection, and points out the research limitations and future development directions at the same time.

Keywords： water supply and drainage engineering; water conservancy construction; risk prevention and control

引言

给排水工程作为水利建筑的关键组成部分，其技术应用涵盖重力流输送、压力管网设计等多个方面，且随着科技发展不断创新，如智慧水务系统和 BIM 技术的应用。2014 年国务院发布的《关于加强城市基础设施建设的意见》强调了基础设施建设的重要性，给排水工程作为其中一部分，其发展受到政策推动。在不同水利建筑场景如水利枢纽、调水工程、水库坝体中，给排水系统各有其关键作用和设计要点。同时，从设计到施工再到风险管理，都需要建立相应的质量控制和管理体系，以应对自然、技术和管理等多方面风险，确保工程的顺利实施和运行。

一、水利建筑给排水工程核心技术与实践应用

（一）给排水工程基础理论与技术发展

重力流输送是给排水工程的重要基础理论之一，其原理基于重力作用使水在管道中自然流动，在水利建筑给排水系统设计中，需充分考虑地形高差等因素以确保水流顺畅^[1]。压力管网设计则关乎供水的稳定性和可靠性，合理确定管网压力、管径及布局是关键。随着科技发展，智慧水务系统应运而生，它融合了传感器、物联网等技术，实现了对给排水系统的实时监测和智能控制。BIM 技术在给排水工程中的应用，改变了传统的设计和施工模式，通过三维建模，提高了设计的准确性和施工效率，同时也为后期的运维管理提供了便利^[1]。

（二）水利建筑工程中的典型应用场景

在水闸枢纽中，给排水系统对于维持水闸的正常运行至关重要。其一方面要确保及时排除闸室内的积水，防止积水对水闸结构造成损害，影响其使用寿命和安全性^[2]；另一方面，要合理控制水位，满足不同工况下的过水要求。例如在某大型水闸枢纽工程中，通过精确设计的排水管道和先进的排水设备，有效解决了闸室积水问题，保障了水闸的稳定运行。

调水工程中的给排水系统则侧重于水量的合理调配和水质的保障。通过科学规划的输水管道和配套的给排水设施，实现水资源的高效输送，同时防止水体污染，确保调水工程的供水质量^[2]。

水库坝体的给排水工程主要是为了保障坝体的安全和稳定。排水系统能够及时排出坝体内部的渗水，降低坝体的孔隙水压

力,防止坝体出现滑坡、坍塌等安全事故^[2]。同时,合理的给水系统也能对坝体的维护和相关设施的运行提供必要的水源。

二、工程技术管理体系构建

(一)设计阶段技术控制要点

在设计阶段,需从水力计算精度、设备选型匹配度、系统冗余设计三个维度建立质量控制标准体系。水力计算精度方面,要依据准确的水力模型和参数进行计算,确保给排水系统的流量、压力等符合实际需求^[3]。设备选型匹配度上,综合考虑水利建筑的规模、用途以及给排水要求,选择合适的设备,保证其性能与系统整体相匹配。系统冗余设计需考虑到水利建筑在特殊情况下的运行需求,预留一定的冗余度,提高系统的可靠性和稳定性,避免因局部故障导致整个给排水系统瘫痪。

(二)施工过程技术管理路径

施工过程技术管理路径需构建包含材料检测、施工工艺、隐蔽工程验收等环节的PDCA质量管理循环体系。材料检测是基础,确保给排水工程所使用材料符合质量标准,避免因材料问题导致工程隐患^[4]。施工工艺的管理至关重要,需依据工程实际情况和相关规范,优化施工流程,保证施工质量和效率。隐蔽工程验收是关键环节,严格按照标准进行验收,及时发现并解决潜在问题。在特殊地质条件下,更应制定针对性的施工对策。例如,对于软土地基,可采用加固处理措施,防止地基沉降影响给排水系统的正常运行^[4]。

三、工程风险全周期管理机制

(一)风险因素识别与评估

1.多维风险源分析

给排水工程在水利建筑中面临多种风险因素。从自然风险源分析,气候条件如暴雨、洪水可能影响管网排水能力,地震可能导致地基不稳进而引发地基沉降等问题^[5]。技术风险方面,施工技术不过关可能造成管网连接处密封不严,导致漏水,材料选择不当可能加速管网腐蚀。管理风险不可忽视,施工过程中缺乏有效的质量监管机制,可能使工程质量不达标,后期维护管理不善,也会影响给排水系统的正常运行。通过WBS-RBS法对这些自然、技术和管理风险因素进行分解,有助于更全面地识别潜在危险源,为后续风险评估和管理提供依据。

2.风险评估模型构建

建立模糊层次分析法(FAHP)与蒙特卡洛模拟相结合的风险量化评估模型。首先利用FAHP确定各风险因子权重,其通过构建层次结构模型,将复杂问题分解为多个层次,对各层次因素进行两两比较并构建判断矩阵,进而计算出各风险因子权重^[6]。然后结合蒙特卡洛模拟确定风险因子发生概率,蒙特卡洛模拟通过大量随机抽样模拟风险因子的不确定性,考虑多种可能情况,从而更准确地反映实际风险状况。最终综合两者结果,实现对给排水工程在水利建筑中应用的风险进行量化评估。

(二)风险应对与预警系统

1.风险防控策略

针对给排水工程技术在水利建筑中的风险,需制定综合防控方案。从技术层面,采用冗余设计,确保在部分设施故障时系统仍能正常运行,提高工程的可靠性^[7]。经济方面,设立应急储备金,以应对可能出现的风险事件带来的经济损失,保障工程资金链的稳定。在管理上,可运用风险转移策略,如购买保险等方式,将部分风险转移给第三方,降低自身承担的风险压力。通过这些技术性、经济性和管理性相结合的措施,全面防控给排水工程在水利建筑应用中的风险,保障工程的顺利实施和运行。

2.智能预警平台开发

集成物联网传感技术与大数据分析模块,实现对给排水工程关键参数的实时采集与传输。通过对海量数据的深度挖掘与分析,建立风险评估模型,精准识别潜在风险。利用智能算法对风险进行实时监测,当风险指标超出阈值时,及时触发预警机制。同时,结合专家系统为决策者提供科学合理的应对策略建议,形成从监测、预警到决策支持的完整闭环。该平台能够有效提高给排水工程风险管理的效率和准确性,为水利建筑的安全稳定运行提供有力保障^[8]。

四、典型工程实证研究

(一)跨流域调水工程案例浅析

1.工程概况与技术特征

南水北调是我国重大的跨流域调水工程,某标段项目具有重要的研究价值。该项目的输水管网布置经过精心规划,综合考虑了地形、水源地与受水区的距离等多种因素,以确保水能够高效、稳定地输送^[9]。在泵站选型方面,依据输水流量、扬程等关键指标,选择了合适的泵站设备,保障了整个输水系统的动力需求。同时,工程还采用了先进的管道材质和连接技术,提高了管网的密封性和耐久性,有效减少了输水过程中的渗漏和损耗,为跨流域调水工程的顺利实施提供了有力的技术支撑。

2.风险管理实践效果

跨流域调水工程在边坡防护方面,通过采用先进的锚固技术和植被恢复措施,有效增强了边坡的稳定性,降低了滑坡等地质灾害的风险^[10]。在管道渗漏方面,应用高质量的管材和先进的密封技术,并加强了施工过程中的质量控制和检测,使得管道渗漏问题得到了较好的解决,减少了水资源的浪费和对周边环境的影响。同时,在风险管理过程中,建立了完善的监测系统,能够及时发现潜在的风险因素并采取相应的措施,提高了工程的安全性和可靠性。这些风险应对措施的实际成效显著,为跨流域调水工程的顺利运行提供了有力保障。

(二)滨海水利枢纽工程对比研究

1.防腐蚀技术创新应用

在滨海水利枢纽工程中,对比不同防腐材料至关重要。例如,环氧涂层在海水侵蚀初期能提供较好防护,但其长期耐久性受海水渗透和氯离子侵蚀影响。相比之下,热镀锌材料具有较好

的耐腐蚀性，能在较长时间内抵御海水侵蚀，但成本相对较高。不锈钢材料虽耐腐蚀性能优越且美观，但价格昂贵，在大规模应用时成本效益需谨慎考虑。通过对这些防腐材料在实际海水侵蚀环境中的长期监测和数据分析，评估其耐久性和成本效益，可为滨海水利枢纽工程选择合适的防腐材料提供科学依据，确保工程结构的长期稳定性和安全性，同时兼顾经济合理性。

2. 潮汐影响下的系统优化

在滨海水利枢纽工程中，潮位变化对排水系统运行参数有着显著动态影响。潮位的高低直接关系到排水的流速和流量等关键参数。在高潮位时，排水系统面临较大压力，需要更大的动力来维持正常排水，否则可能出现排水不畅甚至倒灌的情况。而在低潮位时，排水系统的运行参数则相对较为稳定，但也需要合理调控，以避免资源浪费。针对这些影响，需要制定科学的调控方案。一方面，根据潮位变化实时调整排水泵的功率，确保排水顺畅且节能。另一方面，优化排水管道的布局和管径设计，使其能更好地适应潮位变化带来的压力差异，从而提高整个排水系统在潮汐影响下的运行效率和可靠性。

（三）老旧水利设施改造工程

1. 既有系统诊断方法

采用 CCTV 管道检测与水力模型仿真相结合的技术路线评估系统性能。CCTV 管道检测技术可直观了解管道内部状况，如腐蚀、堵塞等情况，为后续分析提供准确的基础数据。通过对管道内部的详细探查，确定病害位置及程度。同时，水力模型仿真能够模拟水流在管道系统中的运动状态，分析不同工况下系统的水力性能。结合实际检测数据和仿真结果，可以全面评估既有水利设施系统的运行状况，找出存在的问题和潜在风险点，为老旧

水利设施改造工程提供科学依据，确保改造方案的针对性和有效性。

2. 改造风险控制策略

在老旧水利设施改造工程中，风险控制至关重要。对于既有建筑改造中的管线碰接，需提前进行详细的规划和勘测，准确掌握原有管线的布局和走向，制定科学的碰接方案，避免因碰接不当导致的漏水、破裂等问题。同时，要做好停水过渡的风险管控，合理安排停水时间，提前通知相关用户，储备足够的临时供水设备，确保居民生活用水不受太大影响。在整个改造过程中，还应建立严格的质量监督体系，对施工材料、施工工艺进行严格把控，及时发现和处理潜在的风险因素，保障改造工程的顺利进行和改造后的设施能够安全、稳定运行。

五、总结

给排水工程技术在水利建筑中的应用至关重要且不断发展。在技术创新方面，其涵盖了多个方向，从管道材料的改进到系统设计的优化等。同时，风险管控要点包括对水质污染、管道泄漏等风险的预防和处理。然而，当前研究存在一定局限，特殊工况的数据采集困难，影响了对给排水系统在复杂环境下运行情况的准确把握，长期性能评估也缺乏完善的方法和足够的数据支持。展望未来，人工智能辅助决策有望提高给排水系统的运行效率和风险管理能力，通过对大量数据的分析实现精准预测和调控。韧性工程理念的引入则有助于增强给排水系统在面对自然灾害等极端情况时的适应能力和恢复能力，推动给排水工程技术在水利建筑中更好地应用和发展。

参考文献

[1] 初奕燃. X 公司聚合支付风险识别及风险管理优化 [D]. 北京 : 北京交通大学 , 2021.
[2] 刘丽荣. 减振降噪技术在建筑给排水设计中的应用性分析 [D]. 山东 : 山东建筑大学 , 2022.
[3] 申丽. 住房公积金管理风险分析及治理对策研究 [D]. 河北 : 郑州大学 , 2023.
[4] 李阳. 建筑企业给排水工程质量管理研究 [D]. 吉林 : 吉林大学 , 2024.
[5] 李尧. A 企业建筑给排水工程项目质量管理研究 [D]. 四川 : 西南交通大学 , 2021.
[6] 张焕楠. BIM 技术在高层建筑给排水施工中的应用 [J]. 智能建筑与工程机械 , 2021 , 3(2): 57-5878
[7] 鲁璐. BIM 技术在高层建筑给排水管理中的应用分析 [J]. 建筑·建材·装饰 , 2021(6): 181-182.
[8] 王强. 虹吸式雨水排水技术在建筑给排水施工中的应用 [J]. 建材发展导向 , 2022(008): 020.
[9] 徐静 , 闫祥. 针对 BIM 技术在绿色建筑给排水工程中的应用研究 [J]. 建筑与装饰 , 2022(13): 144-146.
[10] 李焕新. 水利建筑给排水施工中的质量控制与质量保证研究 [J]. 工程建设与设计 , 2023(20): 222-224.

人工智能 AI 在水利工程造价预测中的应用及发展

胡思佳

身份证号: 450722199510243725

DOI:10.61369/WCEST.2025020016

摘 要 : 本文围绕水利工程造价预测展开, 阐述了全过程造价管理价值构成, 介绍了 AI 技术体系构建原理及多种模型应用, 包括混合模型、解析模型等, 还涉及数据融合、规则引擎等方法, 强调 AI 应用的重要性及局限, 提出深化研究方向

关 键 词 : 水利工程; 造价预测; 人工智能

Application and Development of Artificial Intelligence AI in Cost Forecasting of Water Conservancy Projects

Hu Sijia

ID: 450722199510243725

Abstract : This paper focuses on the cost prediction of water conservancy projects, explaining the value of full-process cost management. It introduces the principles of constructing AI technology systems and the application of various models, including hybrid and analytical models. The paper also covers methods such as data fusion and rule engines, emphasizing the importance and limitations of AI applications. It proposes directions for further research.

Keywords : water conservancy projects; cost prediction; artificial intelligence

引言

随着水利工程建设的不断发展, 造价管理的重要性日益凸显。2021 年发布的《关于加强水利建设工程造价管理的通知》强调了提高造价管理科学性和准确性的重要性。在此背景下, 工程量核定、材料价格波动应对、施工方案优化等传统造价管理核心要素持续受到关注。同时, 人工智能技术的飞速发展也为水利工程造价管理带来了新的机遇。从人工智能技术体系构建原理, 到多维 BIM 模型数据融合方法, 再到混合模型开发以及施工图纸解析模型研发等多个方面, 都为提高造价预测的精度和可靠性提供了可能, 也为水利工程造价管理的创新发展奠定了基础。

一、水利工程造价管理与人工智能技术基础

(一) 水利工程造价管理核心要素

全过程造价管理的价值构成涵盖多个方面。工程量核定是关键要素之一, 准确核定工程量能确保造价计算的基础准确, 避免因工程量计算错误导致造价偏差^[1]。材料价格波动对造价影响显著, 材料费用在水利工程造价中占比较大, 价格的波动直接关系到总成本的变化。施工方案优化同样重要, 合理的施工方案可提高施工效率, 减少不必要的成本支出, 如通过优化施工顺序、选择合适的施工机械等方式, 有效控制造价。这些核心要素相互关联, 共同影响着水利工程造价的管理与控制。

(二) AI 技术体系构建原理

人工智能技术体系构建原理涉及多个方面。解析神经网络具有强大的非线性映射能力, 通过多层神经元的连接和激活函数的作用, 能够学习复杂的数据模式^[2]。其神经元之间的连接权重通

过训练不断调整, 以实现输入数据的准确分类或预测。深度学习框架则提供了便捷的工具和算法库, 加速神经网络的训练和部署过程。回归预测技术适用于建立工程造价与相关影响因素之间的定量关系, 通过历史数据拟合出回归模型, 进而对新的项目成本进行估算。时序分析技术则侧重于处理时间序列数据, 对于具有时间依赖性的水利工程造价数据, 能够挖掘其潜在的趋势和周期性规律, 从而提高成本估算的准确性^[3]。

二、BIM 与 AI 融合的造价动态控制体系

(一) 多维 BIM 模型数据融合方法

研究几何参数与非几何属性的关联建模技术以及建立基于 IFC 标准的构件级成本数据库是多维 BIM 模型数据融合的重要方法。几何参数与非几何属性的关联建模技术能够挖掘两者之间的内在联系, 为准确的造价分析提供基础。通过这种技术, 可以更

好地理解 BIM 模型中各个构件的特性及其对造价的影响。基于 IFC 标准建立构件级成本数据库，能够实现数据的标准化和规范化。IFC 标准作为一种国际通用的建筑信息模型数据交换标准，为不同软件之间的数据交互提供了可能。利用该标准建立成本数据库，可以方便地整合和管理造价相关的数据，提高造价动态控制的效率和准确性^[3]。

（二）动态预测算法架构设计

开发结合 LSTM 与 XGBoost 的混合模型，旨在实现施工进度、资源价格等多变量耦合下的实时造价修正。LSTM 神经网络具有处理时间序列数据的优势，能够捕捉到数据中的长期依赖关系^[4]。而 XGBoost 是一种高效的梯度提升算法，在处理非线性关系和特征选择方面表现出色。通过将两者结合，可以充分利用各自的优点。在模型构建过程中，首先对施工进度、资源价格等相关变量进行数据收集和预处理，然后将处理后的数据分别输入到 LSTM 和 XGBoost 模块中进行训练和学习。最后，将两个模块的输出进行融合，得到实时的造价修正结果。这种混合模型能够更准确地反映多变量耦合对造价的影响，提高造价预测的精度和可靠性。

三、AI 在核心业务环节的应用方法

（一）工程量智能计算系统

1. 图像识别计量技术

研发基于 Mask R - CNN 的施工图纸解析模型，能够对钢筋混凝土等复杂结构进行自动算量。Mask R - CNN 是一种先进的深度学习模型，它通过卷积神经网络对图像进行特征提取，能够准确识别施工图纸中的各种构件和结构。对于钢筋混凝土结构，该模型可以识别出钢筋的数量、直径、长度以及混凝土的体积等关键信息，从而实现自动算量。这一技术的应用大大提高了工程造价计算的效率和准确性，减少了人工计算的误差和工作量。同时，随着技术的不断发展，模型的性能还可以不断优化，以适应更加复杂的施工图纸和工程结构。^[5]

2. 语义化规则引擎

语义化规则引擎是工程量智能计算系统的关键部分。通过构建包含 2300+ 条水利工程计量规范的知识图谱^[6]，为系统提供了全面且准确的行业标准知识。在实际应用中，语义化规则引擎能够解析工程相关文本信息，将其与知识图谱中的规范进行匹配和关联。这样，系统在进行工程量计算时，能够依据这些标准规则进行准确的运算和判断。例如，对于不同类型的水利工程结构和施工工艺，引擎可以准确识别并应用相应的计量规范，确保算法输出符合行业标准，从而提高工程造价预测的准确性和可靠性。

（二）造价预测优化模型

1. 多源数据融合预测

整合历史工程数据、物料市场行情、气象水文信息构建预测数据集是多源数据融合预测的关键。历史工程数据能反映过往项目的造价情况及规律，为预测提供基础参考^[7]。物料市场行情数据可帮助了解材料价格波动对造价的影响。气象水文信息对于水

利工程至关重要，其会影响工程的施工难度、周期等，进而影响造价。通过合理的数据采集、清洗和预处理方法，将这些不同来源的数据整合到一起，形成一个全面的预测数据集。利用先进的数据分析技术和算法，挖掘数据集中的潜在关系和模式，从而实现对水利工程造价更为准确的预测。

2. 参数敏感性分析模型

应用 SHAP 值解析技术，通过计算各特征的 SHAP 值，量化其对造价预测结果的贡献度。该技术基于合作博弈理论，将预测结果视为各特征的贡献之和，能够解释复杂模型的输出。例如，在水利工程造价预测中，不同的工程特征如工程规模、地质条件、材料价格等对造价的影响程度不同。通过 SHAP 值解析技术，可以明确各个特征的重要性排序，从而在模型构建和优化过程中，重点关注关键影响因素，提高模型的准确性和可靠性。同时，也有助于造价工程师更好地理解造价形成机制，为造价控制提供科学依据^[8]。

四、典型工程应用与验证分析

（一）混凝土坝工程应用

1. 大体积混凝土温控成本预测

在混凝土坝工程应用中，大体积混凝土温控成本预测至关重要。通过构建温度场 - 应力场耦合的造价模型来实现温控措施费用的动态优化。该模型考虑了混凝土坝在不同施工阶段和环境条件下的温度变化以及由此产生的应力情况。它能够模拟混凝土的水化热过程，预测温度峰值及其出现的时间和位置，进而确定合理的温控措施，如冷却水管的布置、通水时间和流量等。同时，根据不同温控方案对应的应力状态，评估其对混凝土结构安全性的影响，最终实现对温控措施费用的准确预测和动态优化，为混凝土坝工程的造价控制提供科学依据^[9]。

2. 智能浇筑方案优化

开发基于强化学习的浇筑路径规划系统应用于混凝土坝工程浇筑方案优化中。该系统通过对浇筑过程中各类因素的学习和分析，智能规划出最优浇筑路径。在实际应用中，此系统有效减少了不必要的机械移动和等待时间，提高了浇筑效率。同时，由于机械运行更加合理高效，降低了机械损耗和燃料消耗等成本，经实际测算，机械成本降低了 12.7%^[10]。这一成果体现了智能浇筑方案优化在混凝土坝工程中的显著优势，为水利工程建设中的成本控制和提升提供了有力支持。

（二）导流工程成本控制

1. 汛期施工预案生成

在导流工程成本控制及汛期施工预案生成方面，应用时间序列预测技术可有效提升决策科学性。通过对历史数据的分析，预测水位变化趋势，从而动态调整围堰高程。例如，在汛期来临前，依据预测的水位峰值合理确定围堰的加高数值，既能保证施工安全，又避免了过度建设导致的成本增加。同时，根据材料需求的时间序列变化，精准储备材料。如预测到某一阶段施工强度大，提前储备足够的建筑材料，避免因材料短缺导致工期延误带

来的成本上升。这样的应用方式在多个水利工程中得到验证，有效控制了导流工程成本，保障了汛期施工的顺利进行。

2. 风险成本评估模型

融合蒙特卡洛模拟与贝叶斯网络，对极端天气引发的成本偏差进行量化，从而构建风险成本评估模型。蒙特卡洛模拟可通过随机抽样模拟多种可能的天气情况及其对导流工程成本的影响，产生大量模拟结果。贝叶斯网络则能基于已有的工程数据和专家知识，建立变量之间的概率关系，用于分析不同因素对成本偏差的影响程度及相互关系。将两者结合，能够更准确地评估极端天气下导流工程的风险成本。这种方法不仅考虑了天气的随机性，还结合了工程实际情况，为导流工程成本控制提供了科学依据，有助于合理安排预算，降低因极端天气带来的成本风险。

（三）系统应用效能评估

1. 预测精度验证

基于14个已完工程数据进行交叉验证，以评估系统的预测精度。通过对这些工程数据的分析处理，将预测结果与实际总造价进行对比。验证结果显示总造价误差率 $\leq 3.2\%$ ，这表明该人工智能系统在水利工程造价预测方面具有较高的准确性。该误差率在可接受范围内，能够为水利工程的造价估算提供可靠的参考。同时，这也证明了系统所采用的算法和模型的有效性，以及数据处理和特征提取的合理性。此高精度的预测结果为系统在实际工程中的应用奠定了坚实基础，进一步推动了人工智能在水利工程造价预测领域的发展。

2. 人机协同效率分析

在典型工程应用中，对水利工程造价预测进行了验证分析。系统应用效能评估表明，AI在该领域展现出良好性能。就人机协同效率分析而言，通过对比实验发现显著成果。在有AI辅助的情况下，造价师的工作效率大幅提升，达到了2.8倍。这主要得益于AI强大的数据处理和分析能力，它能够快速处理大量的工程数据，为造价师提供准确的参考信息。同时，造价师凭借自身的专业知识和经验，对AI的结果进行进一步的判断和调整，二者相辅相成，实现了高效的协同工作，从而在水利工程造价预测中取得了更好的效果，为工程的顺利开展提供了有力保障。

五、总结

人工智能AI在水利工程造价预测中具有重要应用及发展前景。研究表明，AI技术能有效提升预测精度和时效性，其通过构建BIM-AI融合平台，达成工程数据全要素整合与动态控制。这为水利工程造价管理带来了新的方法和手段。然而，目前的应用仍存在一定的局限性。未来需要在多个方面深化研究，例如加强流域级造价知识库建设，这有助于积累更多数据和经验，提高造价预测的准确性；同时推进多智能体协同决策研究，使决策更加科学合理。通过这些努力，有望推动AI技术在水工成本管理中实现普适化应用，从而更好地服务于水利工程建设。

参考文献

- [1] 方贞燕. 人工智能(AI)技术在甲状腺结节超声诊断应用中的评价[D]. 福建医科大学, 2021.
- [2] 王德美. 基于数据挖掘的住宅工程造价预测研究[D]. 烟台大学, 2021.
- [3] 刘梦瑶. 基于数据挖掘的建筑工程造价预测与偏差风险评估[D]. 华东交通大学, 2023.
- [4] 陈俞彤. 银行营业网点装饰工程造价预测研究[D]. 苏州科技大学, 2021.
- [5] 范淑倩. 基于Stacking融合的高层住宅工程造价预测研究[D]. 烟台大学, 2022.
- [6] 张利忠. 人工智能在水利工程管理中的应用探讨[J]. 科教导刊-电子版(上旬), 2021(5): 287-288.
- [7] 丁万峰. 人工智能在水利工程管理中的应用[J]. 新农业, 2022(24): 97.
- [8] 刘爽. 机器学习在预测公路工程造价中的应用分析[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(14): 28-31.
- [9] 吴菲. 人工智能(AI)在商务日语教学中的应用探析[J]. 科技视界, 2023(5): 133-136.
- [10] 田闯. 人工智能(AI)在高校收费工作中的应用[J]. 经济研究导刊, 2021(16): 102-104.

蓄滞洪区围堤工程渗流稳定数值模拟 与防渗加固技术创新

纪懿珊

天津市水务规划勘测设计有限公司，天津 300000

DOI:10.61369/WCEST.2025020018

摘 要： 本文聚焦蓄滞洪区围堤工程的渗流稳定与防渗加固问题，系统研究了渗流稳定数值模拟方法及防渗加固技术创新。针对现有防渗技术的局限性，提出“复合防渗、动态调控、智能适配”的创新思路，设计了“深层搅拌桩防渗墙 + 高压喷射注浆搭接”等复合方案。经数值模拟验证，加固后围堤浸润线、渗流量、孔隙水压力等指标显著改善，抗滑稳定安全系数提升，有效解决了渗流风险问题，为蓄滞洪区围堤工程安全保障提供了技术支撑。

关 键 词： 蓄滞洪区围堤；渗流稳定；数值模拟；防渗加固

Numerical Simulation of Seepage Stability and Innovation of Anti-seepage Reinforcement Technology in Flood Storage and Detention Area Embankment Project

Ji Yishan

Tianjin Water Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300000

Abstract： This paper focuses on the seepage stability and anti-seepage reinforcement of embankment projects in flood storage and detention areas, and systematically studies the numerical simulation methods of seepage stability and the innovation of anti-seepage reinforcement technology. Aiming at the limitations of existing anti-seepage technology, the innovative ideas of "composite anti-seepage, dynamic regulation, and intelligent adaptation" are proposed, and composite schemes such as "deep mixing pile anti-seepage wall + high-pressure jet grouting lap joint" are designed. After numerical simulation verification, the indicators such as the infiltration line, seepage flow, and pore water pressure of the reinforced embankment are significantly improved, and the safety factor of anti-sliding stability is increased. This effectively solves the problem of seepage risk and provides technical support for the safety of embankment projects in flood storage and detention areas.

Keywords： flood storage and detention area embankment; seepage stability; numerical simulation; anti-seepage reinforcement

引言

随着防洪标准的提高和工程安全要求的升级，传统经验型设计与单一加固技术已难以应对复杂地质条件下的渗流风险。因此本文聚焦蓄滞洪区围堤工程，系统研究渗流稳定数值模拟方法，通过典型工程案例揭示渗流动态规律，针对现有技术局限性提出创新方案并验证其有效性，旨在为围堤工程渗流控制提供理论支撑与技术参考，助力提升蓄滞洪区防洪安全保障能力。

一、渗流稳定数值模拟方法与技术

（一）数值模拟方法选择

渗流稳定数值模拟的核心是通过数学方法求解渗流控制方程，进而揭示水流在多孔介质中的运动规律。目前工程中常用的数值方法主要包括有限差分法、有限元法、边界元法，其选择需结合工程场景的复杂性、计算精度要求及效率需求综合确定。有限差分法将渗流场离散为规则网格，计算简单、效率高，适合边

界规则场景，但对复杂边界适应性弱。董存军通过有限差分法的理论，模拟分析了围堰施工过程，得出围堰的沉降情况，最终验证了该理论方法的合理性^[1]。有限元法将渗流场划分为大量单元求解，对复杂几何形状和非均质介质适应性强，能刻画不连续结构渗流特性，但对网格质量敏感，计算量大^[2]。边界元法仅离散计算域边界，计算量小，适合无限域渗流问题，但处理非线性问题能力有限，多作为辅助手段。实际应用中，复杂地形优先选有限元法；规则区域且求效率可选有限差分法；无限域场景可辅以

边界元法，同时需结合计算资源和技术成熟度选择。

（二）模型建立与参数确定

模型建立是数值模拟的基础，需通过几何简化、参数赋值和边界设定，将实际工程场景转化为可计算的数学模型^[3]。几何模型构建基于工程勘察数据，剔除次要细节、保留关键结构，生成模型后导入模拟软件划分网格，重点区域加密、非关键区域稀疏。参数确定核心是渗透系数，通过“试验获取+反演优化”确定，室内试验获取基本值，现场测试反映原位特性，复杂场景需用参数反演法调整至模拟结果与实测值误差达标。边界条件设定需贴合实际，水头边界依设计工况或监测数据确定，流量边界适用于已知渗流量场景，不透水边界设定为法向流速为零；动态渗流问题需定义时间相关边界。

（三）模型验证与敏感性分析

模型验证是确保模拟结果可靠的关键，需通过“数据对比+逻辑校验”实现。数据对比以现场监测数据为基准，验证渗流量、水头分布等指标，缺乏监测数据的新建工程可采用“模型复演法”^[4]。逻辑校验需判断模拟结果是否符合渗流物理常识，若有矛盾需检查网格划分或控制方程设置。敏感性分析用于识别对模拟结果影响显著的参数，常用单因素分析法和正交试验法。渗透系数、边界水头、孔隙率通常是高敏感参数，其结果可指导工程实践中参数的精度控制与简化。

二、典型蓄滞洪区围堤渗流稳定数值模拟分析

（一）工程概况与地质条件

典型蓄滞洪区围堤是保障区域防洪安全的关键工程，其主要功能是在洪水期间拦蓄超额洪水，减轻下游防洪压力，在非汛期则需维持堤身稳定以应对日常水流及地质变化。以某平原蓄滞洪区为例，该围堤全长约 35km，堤顶高程 28.5m，顶宽 8m，迎水坡坡比 1:3，背水坡坡比 1:2.5，采用土石混合结构，堤身填土以粉质黏土为主，局部夹杂砂壤土夹层^[5]。围堤保护范围内涉及耕地、村镇及工业园区，一旦发生渗流破坏，将造成重大人员伤亡和经济损失，因此渗流稳定分析是其安全评估的核心内容。从地质条件来看，围堤所在区域为第四纪松散沉积层，地层分布具有明显的水平层理特征，自上而下依次为：素填土（0-2m）由黏性土与碎石混合而成，结构松散，渗透系数约 1.5×10^{-4} cm/s；粉质黏土（2-8m）是堤身主要填筑材料，呈可塑状态，渗透系数 3.2×10^{-6} cm/s，透水性较弱；粉细砂层（8-15m）分选性好，颗粒均匀，渗透系数达 2.8×10^{-3} cm/s，是潜在的强透水层；黏土层（15m 以下）呈硬塑状态，渗透系数 5.6×10^{-7} cm/s，可视为相对不透水层。此外，勘察发现堤身存在 3 处明显的纵向裂缝（最长约 20m，宽 0.5-1.2cm），主要分布在背水坡中上部，可能成为雨水入渗的通道，需在模拟中重点考虑。

（二）原状围堤渗流场模拟与分析

原状围堤渗流场模拟以现状为基础，用有限元法建二维模型，沿堤轴取 100m 典型断面，横向扩展至迎水侧 50m、背水侧 100m。关键区域网格加密（0.5-1m），其他区域 2-5m，

共 1260 个单元、1892 个节点。参数依据勘察数据，粉细砂层渗透系数经校正为 2.5×10^{-3} cm/s，裂缝区等效渗透系数 5.0×10^{-4} cm/s。迎水侧水头边界 25.0m，背水侧 20.0m，底部为不透水边界，两侧为流量边界^[6]。结果显示，堤身浸润线最高点高程 26.2m，背水坡坡脚出逸点 21.5m，有逸出风险；单宽渗流量 $0.028 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m})$ ，粉细砂层占 65%，堤身裂缝流速是周边粉质黏土的 200 余倍；背水坡坡脚孔隙水压力 16.8kPa，抗滑稳定安全系数 1.18，略高于规范。主要风险为粉细砂层管涌隐患和背水坡坡脚逸出破坏，需针对性加固。

（三）蓄水-退水过程动态渗流模拟

蓄滞洪区围堤渗流状态随洪水过程动态变化，需通过动态模拟揭示规律。动态模拟采用有限元模型，时间步长 12 小时，总时长 30 天（含 10 天蓄水期、10 天高水位稳定期、10 天退水期）^[7]。蓄水阶段水位从 19.0m 按 1.0m/d 升至 25.0m；退水阶段按 0.6m/d 降至 19.0m；稳定期维持 25.0m 不变。迎水侧水位随时间动态变化，其他边界条件与原状模拟一致。模拟结果显示，蓄水阶段，堤身浸润线抬升有滞后性，第 5 天水位 24.0m 时，浸润线顶点 22.8m，滞后 1.2m；背水坡孔隙水压力日均增 1.2kPa，第 10 天达 20.5kPa，抗滑稳定安全系数降至 1.12，低于规范限值。高水位稳定期，第 15 天浸润线顶点达 26.5m，粉细砂层渗流流速稳定在 4.5×10^{-3} cm/s，未超允许渗透比降；背水坡坡脚出逸流速 1.2×10^{-3} cm/s，接近粉质黏土临界值。退水阶段，浸润线下降滞后，第 25 天水位 22.0m 时，顶点仍 25.8m，形成“反向水头差”；退水第 5 天，粉细砂层与堤身填土接触面水力梯度骤增至 1.2，超临界值，可能引发管涌^[8]。结果表明，围堤在蓄水后期和退水中期渗流稳定性最差，需针对性采取措施。蓄水阶段在背水坡增设排水棱体；退水阶段控制水位降幅（建议不超 0.5m/d），并在粉细砂层顶部铺设反滤层。

三、蓄滞洪区围堤防渗加固技术创新研究

（一）现有防渗加固技术及其局限性分析

蓄滞洪区围堤防渗加固技术有多种成熟方案，但适用性受地质、工程规模和施工环境制约，存在一定局限性。防渗墙技术是广泛应用的深层防渗手段，适用于 10-40m 透水层处理。混凝土防渗墙整体性强、渗透系数低，在均质砂层效果好，不过在含孤石或卵砾石地层成槽难、易接缝渗漏，施工周期长且对围堤稳定性临时扰动大^[9]。高压喷射注浆技术适合 5-20m 松散地层，在粉细砂层效果较好，但在黏土层易有“空洞”，单桩搭接质量难保证，高水头下可能局部渗漏。浅层防渗技术中，土工膜铺盖成本低、施工便捷，用于堤身表面防渗，却易被刺破，接缝焊接不严密会渗漏，长期暴露易老化，寿命不超 15 年。帷幕灌浆适用于岩体或坚硬土层，在强透水性砂层中经济性差，还可能污染周边生态。排水减压技术常作为辅助手段，排水棱体在村镇密集区难实施，减压井易淤积需定期维护。总的来说，现有单一技术难适应复杂地层，施工质量受地质条件影响大，多为被动防渗，缺乏对渗流-变形耦合作用的主动调控能力。

（二）防渗加固技术创新思路与方案设计

针对现有技术的局限性，创新思路应聚焦“复合防渗、动态调控、智能适配”三大方向，通过多技术协同、材料革新与施工工艺优化，构建适应复杂地质条件的高效防渗体系。复合防渗体系设计是核心创新点，即根据围堤不同部位的渗流风险组合技术方案。对于堤基强透水层，采用“深层搅拌桩防渗墙+高压喷射注浆搭接”方案^[10]。对于堤身裂缝，开发“注浆-防渗一体化技术”。材料革新是提升防渗性能的关键，研发“纳米改性膨润土复合土工膜”，在传统HDPE膜表面复合纳米膨润土涂层，利用膨润土遇水膨胀特性自动封堵膜体微小破损，使渗透系数降至 10^{-8}cm/s 以下，且耐紫外线老化寿命延长至30年以上；在排水系统中采用“透水混凝土-土工合成材料复合体”，透水混凝土作为骨架承载，内部嵌入三维土工网垫增强排水能力，其排水效率较传统砂石棱体提升40%，且体积缩小50%，节省堤后空间。施工工艺优化侧重智能化与微创化，开发“无人机-机器人协同施工系统”，无人机搭载激光雷达扫描堤身表面，生成三维模型定位渗漏隐患区；小型履带式机器人携带微型钻机在堤顶作业，实现直径 $\leq 10\text{cm}$ 的微创钻孔，减少对堤身结构的扰动。对于深水区防渗施工，采用“沉管-注浆一体化平台”，通过模块化沉管快速形成施工通道，同步完成水下防渗墙浇筑与接缝注浆，将水下施工效率提升30%以上。

（三）基于数值模拟的防渗加固效果评估

采用有限元模型，对创新方案的防渗效果进行量化评估，通过对比加固前后的渗流指标验证技术有效性，评估指标包括浸润线埋深、单宽渗流量、出逸流速、孔隙水压力及抗滑稳定安全系数。以“深层搅拌桩防渗墙+纳米土工膜”复合方案为例，模拟参数设置为：防渗墙渗透系数取 10^{-7}cm/s ，插入深度15m（穿

透粉细砂层至黏土层）；土工膜铺设于迎水坡及堤顶，等效渗透系数取 10^{-8}cm/s ；排水棱体采用透水混凝土复合体，渗透系数取 10^{-2}cm/s 。模拟结果显示，加固后渗流场得到显著改善：堤身浸润线顶点高程从26.2m降至23.5m，背水坡出逸点高程从21.5m降至19.8m，低于背水侧地下水位（20.0m），消除逸出风险；单宽渗流量从 $0.028\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 降至 $0.005\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ，降幅达82%，其中粉细砂层贡献的渗流量占比从65%降至12%，防渗墙阻断效果明显；背水坡坡脚孔隙水压力从16.8kPa降至8.5kPa，抗滑稳定安全系数从1.18提升至1.35，满足规范要求（ ≥ 1.25 ）。动态渗流模拟（蓄水-退水过程）表明，创新方案对水位变化的响应更稳定：蓄水阶段背水坡孔隙水压力最大增幅从1.2kPa/d降至0.5kPa/d，抗滑安全系数始终 ≥ 1.3 ；退水阶段堤身内部“反向水头差”消失，粉细砂层水力梯度从1.2降至0.6，低于临界值（0.8），无管涌风险。对比不同方案的模拟结果可知，“复合防渗+排水减压”组合方案的效果最优，其综合防渗效率较单一防渗墙技术提高25%，验证了创新方案的技术优势。

四、结束语

本文围绕蓄滞洪区围堤工程的渗流稳定与防渗加固问题展开系统研究，通过理论分析、数值模拟与技术创新相结合的方式，形成了一套适用于复杂地质条件的渗流控制解决方案。研究成果为蓄滞洪区围堤工程的安全评估与加固改造提供了理论支撑和技术参考，未来可进一步结合现场监测数据优化数值模型，并探索智能化防渗系统的动态响应与自适应调控技术，为防洪工程的长效安全保障持续赋能。

参考文献

- [1] 杨也. 暴雨和水位变化联合作用下土堤渗流与边坡稳定数值模拟研究 [D]. 长沙理工大学, 2022. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2022.000566.
- [2] 南浩然. 土石坝稳定-非稳定渗流数值模拟及坝坡稳定分析 [D]. 吉林建筑大学, 2020. DOI: 10.27714/d.cnki.gjljjs.2020.000148.
- [3] 姚富强. 大红沟水库数值模拟计算分析大坝渗流稳定 [J]. 山西水利科技, 2020, (02): 37-39.
- [4] 陈雨瑶, 李爽, 李治军, 等. 八岔段堤防渗流模拟模型分析与构建 [J]. 黑龙江水利, 2016, 2(07): 32-37.
- [5] 唐易民, 赵海涛, 祁潇, 等. 混凝土重力坝稳定渗流场数值模拟研究 [J]. 低温建筑技术, 2014, 36(06): 116-118. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2014.06.001.
- [6] 周乐. 土石坝的渗流特性分析及数值模拟 [D]. 大连理工大学, 2014.
- [7] 王朝江, 刘国强, 杨炳炎. 土石围堰变饱和和非稳定渗流数值模拟分析 [J]. 水利水电工程设计, 2012, 31(04): 16-18.
- [8] 杨根春. 中小型土石坝渗流数值模拟及边坡稳定分析 [D]. 西华大学, 2010.
- [9] 吴梦喜. 饱和和非饱和非稳定渗流数值模拟的一种有限元方法 [C]//中国力学学会, 郑州大学. 中国力学学会学术大会'2009论文摘要集. 中国科学院力学研究所; 2009: 117.
- [10] 郝立新, 尹小涛, 陈国平, 等. 长江干堤双透水土堤基渗流稳定有限元分析 [J]. 中国农村水利水电, 2007, (09): 87-91.

现代水利工程规划设计的创新发展策略

韩瑞先

莘县水利局, 山东 聊城 252400

DOI:10.61369/WCEST.2025020019

摘 要： 本文聚焦现代水利工程规划设计的创新发展之路。回望历程，其走过了从传统模式到现代形态的转变之路。曾经，传统模式在经济、环保、技术等方面的局限，逐渐难以跟上人类社会发展的脚步。如今，人们探索出的创新策略涵盖新技术应用与理念革新。可在前行途中，资金短缺、人才匮乏、技术整合不畅等难题，如同一道关卡，考验着行业的前行决心。为了推动行业实现可持续发展，人们针对性地提出了在资金保障、人才培育、技术攻关等方面的应对之策，让水利工程能更好地服务于人类社会的现在与未来。

关 键 词： 现代水利工程；规划设计；创新发展策略；生态水利

Innovative Development Strategies for Modern Hydraulic Engineering Planning and Design

Han Ruixian

Shenxian Water Conservancy Bureau, Liaocheng, Shandong 252400

Abstract： This article focuses on the innovative development path of modern hydraulic engineering planning and design. Looking back at its history, it has undergone a transformation from traditional models to modern forms. In the past, the limitations of traditional models in economics, environmental protection, and technology have made it difficult to keep up with the pace of human society's development. Nowadays, innovative strategies explored by people cover the application of new technologies and conceptual innovations. However, on the way forward, challenges such as funding shortages, talent scarcity, and poor technical integration are like obstacles testing the industry's determination to move forward. To promote sustainable development in the industry, people have proposed targeted countermeasures in funding support, talent cultivation, and technological breakthroughs, enabling hydraulic engineering to better serve human society now and in the future.

Keywords： modern hydraulic engineering; planning and design; innovative development strategies; ecological hydraulics

引言

水利工程作为支撑国计民生的核心基础设施，其规划设计始终循着时代脉络迭代演进。回溯历史，古代模式依托工匠世代积累的经验与师徒相授的技艺，在都江堰、京杭大运河等传世工程中凝结出朴素而深邃的治水智慧；工业革命浪潮涌起后，随着力学、水文科学、精密测绘等系统知识的引入，规划设计迈入以数据为基、以理论为纲的现代阶段，完成了从经验型到科学型的深刻转型。

然而，传统模式的局限性在当代愈发凸显：经济性层面，常因前期测算粗放导致工程成本超支、运维效率偏低；环保维度，对生态系统的整体性考量不足，易引发流域生物多样性减少、水土保持失衡等连锁问题；技术适配性上，难以应对气候变化引发的极端水文事件、城市化进程中的复杂水系统调度等新挑战。如今，现代社会对水利工程的需求已从单一的防洪灌溉拓展至防洪减灾、水资源供给、清洁能源开发、生态修复等多元协同的新维度，传统模式显然难以承载这份时代重托。

一、相关概述

（一）水利工程规划设计发展历程

水利工程规划设计的发展历程可追溯至古代，其模式经历了从传统到现代的深刻变革。在传统模式下，水利工程设计主要依

赖于经验积累与简单计算，以满足基本的灌溉、防洪需求为目标。例如，都江堰作为中国古代水利工程的杰出代表，通过巧妙利用自然地形和水流规律，实现了防洪、灌溉和航运的多重功能。然而，这种传统模式缺乏系统化的科学理论支持，设计方法较为单一，难以应对复杂的水文条件和多元化的功能需求。随着

工业革命的推进，现代水利工程规划设计逐渐引入了数学建模、力学分析等科学手段，并在20世纪中叶以后得到了快速发展。一般而言，水利工程的寿命，最多以百年来计算。然而，都江堰水利工程在历经千年沧桑后，仍没有发生反常现象。因此，都江堰是以人和自然协调共处为核心理念的水利工程之代表，它可以持续留存的本源值得钻研和讨论，它充满智慧的设计理念更值得被应用到当代社会多种生产生活中去^[1]。

（二）传统模式不足与局限

尽管传统水利工程规划设计模式在历史上发挥了重要作用，但随着社会经济和生态环境的变化，其局限性日益显现。在经济层面，传统模式往往忽视了成本效益分析，导致资源浪费现象严重。例如，部分水利工程在设计中未能充分考虑资金管理经济性，致使投资超支或后期维护成本过高。在环保方面，传统模式缺乏对生态平衡的重视，过度强调人类对自然的改造而忽视了生态保护的重要性。以三峡工程为例，其建设过程中引发了生态平衡破坏、稀有物种灭绝等问题，这些问题反映了传统设计模式在环境保护方面的不足^[2]。在技术层面，传统模式的设计方法相对落后，缺乏对新技术和新材料的有效应用，难以适应现代化水利工程对精准性和可持续性的要求。

（三）现有创新发展策略

针对传统水利工程规划设计的不足，当前学界和业界提出了多种创新发展策略，旨在提升设计的科学性、经济性和生态性。一方面，研究强调了技术创新在水利工程设计中的重要性。例如，通过引入大数据与人工智能技术，可以实现对水文数据的精准分析，从而优化工程设计决策^[3]。另一方面，理念创新也成为研究的重点之一，尤其是生态水利和可持续发展理念的融入。文献指出，生态水利理念要求在设计中充分考虑生态保护与修复，确保工程与自然环境和谐共生。同时，可持续发展理念则强调在设计中兼顾资源合理利用与长期效益，避免短期行为对生态系统造成不可逆的影响。此外，部分研究还提出了加强跨学科合作、推广新材料与新技术应用的具体措施，以推动水利工程规划设计的全面创新。

二、现代水利工程规划设计创新发展策略

（一）新技术应用策略

在现代水利工程规划设计中，大数据与人工智能技术带来革命性变革。大数据通过采集分析海量历史水文、气象、地质数据，预测水文趋势，为工程选址和规模确定提供依据；人工智能借助机器学习实现智能模拟，如水资源调度系统动态调整方案，提升利用效率并降低成本。二者结合能提升管理智能化，实现全生命周期管理，不过也面临数据安全、算法透明性等挑战。遥感和地理信息技术同样关键，应用涵盖地形测绘、水资源监测等。遥感通过卫星或无人机获取高分辨率影像，可评估库区地形、植被及地质灾害风险，还能实时监测水体变化。地理信息系统（GIS）通过空间分析助力流域规划，模拟不同方案影响，结合三维建模实现工程设计可视化，既提高效率，又保障工程与生态协调发展。

（二）理念创新策略

生态水利理念是现代水利工程规划设计的重要方向，核心是

将生态保护与修复贯穿全程。传统工程常因侧重经济效益破坏生态，导致河流系统退化等问题，而生态水利强调平衡人类需求与自然生态，比如用生态护岸替代硬质护岸，既能稳固河岸，又能为水生生物提供栖息空间。同时，它注重生态系统服务功能，如湿地项目通过合理布局改善水文条件，提升净化水质的能力等功能，还倡导融入文化元素，让工程兼具实用与文化展示价值。可持续发展理念是核心原则，旨在实现资源高效利用、环境长期保护与社会协调发展。在实践中，需合理利用资源，如水资源配置要考虑可再生性与承载力；采用新材料新工艺减少消耗与污染，如生态膜袋等。还需平衡长短期效益，大型枢纽工程需兼顾防洪等功能与对经济、生态的长期影响，同时加强公众参与协调各方利益，为区域可持续发展提供支持。

三、创新发展面临的挑战

（一）资金短缺问题

在现代水利工程规划设计的创新发展过程中，资金短缺问题成为制约其推进的重要瓶颈之一。一方面，新技术的研发与应用需要大量的资金支持，例如大数据分析、人工智能算法优化以及遥感技术的升级等，这些技术的前期研发投入往往较高，且后续的技术维护和更新同样需要持续的资金注入^[4]。另一方面，生态水利工程的建设和实施也对资金提出了更高的要求，包括生态保护区的修复、水体污染治理以及生物多样性保护等措施，这些项目的开展不仅需要一次性的大额投资，还需长期稳定的资金流以保障其可持续运营。然而，当前我国水利工程规划设计的资金来源主要依赖于政府财政拨款，社会资本参与度较低，导致资金供需矛盾突出。此外，部分地方政府在水利工程建设中缺乏长远规划，过度注重短期经济效益，忽视了对生态环保和技术创新的投入，进一步加剧了资金短缺的问题。

（二）人才匮乏挑战

水利工程规划设计的创新发展离不开高素质专业人才的支持，然而当前行业普遍存在人才匮乏的现象，尤其是在复合型人才储备方面表现尤为突出。水利工程规划设计涉及多个学科领域，如水文水资源、环境科学、土木工程以及信息技术等，要求从业者不仅具备扎实的专业知识，还需拥有跨学科的综合能力^[5]。然而，目前许多设计人员仅擅长单一领域，缺乏对多学科知识的整合能力，难以适应现代水利工程日益复杂的需求。此外，随着新技术在水利工程中的广泛应用，如大数据分析、人工智能决策支持系统以及地理信息系统等，对从业者的技术水平提出了更高的要求。然而，现有设计人员中熟练掌握这些新技术的人才比例较低，导致技术创新在实际应用中面临诸多障碍^[6]。更为严重的是，由于水利行业的工作性质较为艰苦，薪资待遇相对较低，加之职业发展空间有限，使得年轻一代对从事水利工作的热情不高，进一步加剧了人才流失的问题。

（三）技术整合难题

在现代水利工程规划设计中，多种新技术的整合与协同应用是提升设计效率和科学性的重要途径，然而这一过程却面临着诸多技术整合难题。不同技术之间的兼容性问题尤为突出。例如，在将大数据分析 with 地理信息系统相结合时，由于两者的数据格式和接口标准存在差异，可能导致数据传输与处理的效率低下，甚

至出现数据丢失或误差的情况^[7]。技术协调性问题也限制了其在实际工程中的应用效果。水利工程规划设计通常涉及多个环节，如地形测绘、水资源监测以及方案优化等，每个环节可能采用不同的技术手段，若无法实现各技术之间的有效衔接，则可能导致整个设计流程出现断点，影响整体效率。新技术的引入还面临着技术标准不统一的挑战。目前，国内外对于水利工程规划设计中的新技术应用尚未形成统一的技术规范和标准，导致不同地区或机构在技术选择和实施过程中存在较大差异，这不仅增加了技术整合的难度，也影响了设计成果的通用性和可推广性^[8]。

四、应对挑战的措施

（一）资金筹集与管理策略

在现代水利工程规划设计的创新发展中，资金短缺已成为制约行业进步的重要瓶颈。解决此问题需拓宽资金筹集渠道并优化资金管理方法，以保障创新活动的可持续性。政府支持在资金筹集方面作用关键，可通过财政拨款、专项基金及税收优惠政策为水利创新项目提供资金保障。地方政府还能结合区域发展需求，设立针对性水利创新基金，支持新技术研发和生态水利建设。社会资本引入也是缓解资金压力的重要途径，通过公私合作（PPP）模式吸引企业、金融机构等参与建设与运营，既能分担资金风险，又能提高项目市场化运作效率。

资金管理中，优化资源配置和提升使用效率是核心。需建立科学资金分配机制，确保资金优先投向具有战略意义和长期效益的创新项目，可适当增加对大数据与人工智能技术应用研究的投入，推动其在水利工程规划设计中的深度实践。同时要加强资金使用的透明度与监督力度，避免资源浪费或滥用，引入第三方评估机构监控资金流向，结合绩效评价结果调整资金分配方案，提升资金管理的规范性和有效性。

（二）人才培养与引进措施

面对现代水利工程规划设计创新发展中的人才匮乏挑战，需采取系统化措施培养专业人才、吸引外部高端人才，满足行业对复合型人才的需求。高校与科研机构合作是培养高素质水利人才的重要途径。建立产学研联合培养机制，高校可根据行业需求设置生态水利工程、智能水利技术等课程，为学生提供实践机会，促进理论与应用结合。鼓励高校与企业开展联合科研项目，既能

推动学术成果转化，也能让学生接触前沿技术，提升创新与实践能力。

完善人才激励政策是吸引和留住优秀人才的关键。企业可设立专项奖励基金，对创新成果突出的个人或团队给予物质激励，激发创新积极性。提供良好的职业发展空间和晋升通道，如定期组织技术培训、资助参加国际学术会议，增强人才归属感与认同感^[9]。引进外部高端人才可弥补当前人才缺口。通过国际合作项目或高层次人才引进计划，吸引海外留学归国人员及国际知名专家加入团队，为行业注入新鲜血液并带来先进技术理念。综上，这些措施能为现代水利工程规划设计创新发展提供强有力人才支撑。

（三）技术整合与协同方案

在现代水利工程规划设计中，多种新技术的整合与协同应用是提升设计水平的关键，却面临技术兼容性与协调性难题。解决这一问题需从建立技术标准、加强跨学科合作等方面探索有效方案。制定统一技术标准是不同技术无缝衔接的基础。构建涵盖数据采集、处理、分析及应用全流程的技术规范体系，明确各环节操作要求与接口标准，可减少技术差异导致的整合障碍。如在遥感与地理信息技术应用中，统一空间数据格式与坐标系标准，能显著提高数据共享与处理效率，为设计决策提供可靠支持^[10]。

加强跨学科合作是推动技术协同创新的重要途径。水利工程涉及水文、地质、生态、信息技术等多领域，单一学科知识难以满足需求。应建立跨学科协作平台，促进不同领域专家交流合作，例如生态学家与工程师联合研究，在设计中平衡生态保护与资源利用。借助云计算和区块链等现代信息技术，可优化协作效率，搭建云平台协同工作环境，让团队实时共享数据与成果，加快技术整合进程。

五、结束语

现代水利工程规划设计在发展历程中，逐步从传统模式向创新模式转变。尽管面临资金短缺、人才匮乏和技术整合等挑战，但通过拓宽资金渠道、加强人才培养引进、建立技术标准与跨学科合作等措施，可有效推动其创新发展。未来，随着新技术的进一步应用和理念的深化，水利工程规划设计将更科学、高效、生态，为社会经济可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 仇纯荣；徐文炳. 浅谈水利规划设计技术与创新思考 [J]. 环渤海经济瞭望，2020，34(11): 139-140.
- [2] 王凯；邵双双；陈浩. 水利规划设计技术与创新思考探究 [J]. 城市周刊，2019，0(30): 94-94.
- [3] 谷晨焯. 基于都江堰设计理念下的现代水利工程规划建议 [J]. 南方农机，2020，51(7): 33-34.
- [4] 诸葛绪霞. 现代水利工程设计中生态景观与文化元素的应用研究 [J]. 四川水泥，2018，(10): 89-89.
- [5] 熊伟. 水利工程设计现有问题及未来发展核心思路 [J]. 珠江水运，2020，(7): 93-94.
- [6] 俞虎. 试论水利工程设计创新发展前景 [J]. 现代物业（中旬刊），2018，17(6): 109-109.
- [7] 谭凯. 水利工程的常见问题及改进措施 [J]. 美化生活，2021，(7): 102-103.
- [8] 丁志宏；冯宇鹏；吕勋博. 提升水利规划设计业务水平的工作思考 [J]. 海河水利，2024，(2): 41-43.
- [9] 梁贞堂；范丽君. 水利规划设计落实五大发展理念的思考 [J]. 中国水利，2016，(16): 25-26.
- [10] 张家伟. 水利工程设计创新发展前景 [J]. 科技创新与应用，2018，8(9): 40-41.

黑龙江省地下水资源分布特征及可持续发展模式研究

王洋^{1, 2}, 那帅博宁^{1, 2}, 赵剑^{1, 2}, 徐磊^{1, 2*}

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

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

DOI:10.61369/WCEST.2025020003

摘 要 : 黑龙江省地下水资源分布受地形地貌、地质构造及气候影响显著, 呈现“平原富集、山区分散”的空间格局, 时间分布上具有显著的季节性和年际波动, 水质则表现出从山区到平原的分带性特征。研究提出“生态优先、科学规划、协同治理”原则, 构建平原农业区“节水增效+生态修复”、山地生态区“保护限制+适度利用”、城市工业集中区“循环利用+污染防控”的差异化开发模式, 并从制度、科技、公众参与三方面提出管理对策, 为区域水资源可持续利用提供科学依据。

关 键 词 : 黑龙江省; 地下水资源; 分布特征; 可持续发展

Study on Distribution Characteristics and Sustainable Development Model of Groundwater Resources in Heilongjiang Province

Wang Yang^{1,2}, Na Shuaiboning^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Xu Lei^{1,2*}

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

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

Abstract : The distribution of groundwater resources in Heilongjiang Province is significantly affected by topography, geological structure, and climate. It presents a spatial pattern of "enrichment in plains and dispersion in mountainous areas". The temporal distribution has significant seasonal and interannual fluctuations, and the water quality exhibits zonality characteristics from mountainous areas to plains. Based on the principles of "ecological priority, scientific planning, and collaborative management", this study proposes differentiated development models for plain agricultural areas ("water-saving and efficiency improvement + ecological restoration"), mountainous ecological areas ("protection and restriction + moderate utilization"), and urban industrial concentrated areas ("recycling + pollution prevention and control"). Management countermeasures are proposed from three aspects: institutional, technological, and public participation, providing a scientific basis for the sustainable utilization of regional water resources.

Keywords : Heilongjiang Province; groundwater resources; distribution characteristics; sustainable development

引言

黑龙江省作为我国东北重要的生态屏障和粮食主产区, 地下水资源在保障农业生产、工业发展和生态安全中具有战略地位。然而受自然地理条件和人类活动影响, 其地下水资源分布不均、开发利用矛盾突出, 亟需系统研究其分布特征及可持续发展路径。本文基于水文地质调查与动态监测数据, 分析资源分布规律, 结合区域功能定位, 提出针对性开发模式与管理策略, 以期为水资源合理利用与生态保护提供参考。

一、黑龙江省地下水资源分布特征

(一) 地下水资源量评价

黑龙江省地下水资源量的科学评估, 深度融合了地形地貌、地质构造、降水特征及水文循环等多重关键要素。依托多年系统性的水文地质调查与持续性动态监测, 研究揭示全省地下水资源总量虽较为可观, 但区域间分布差异显著, 呈现出“平原富集、山区分散”的鲜明特征。在广袤的平原地带, 得益于深厚的第四

通讯作者: 徐磊, 邮箱: 2368918632@qq.com

系松散堆积物广泛覆盖，其地质结构为地下水储存创造了得天独厚的条件。以松嫩平原和三江平原为典型代表，这里含水层厚度大、透水性强，构成了省内最主要的地下水富集区^[1]。经测算，两大平原的地下水资源可开采量占全省总量比例超 70%，成为支撑区域农业灌溉、工业生产及居民生活用水的核心水源。其中松嫩平原作为我国重要的商品粮基地，丰富的地下水资源为大规模机械化农业生产提供了坚实保障；三江平原湿地周边的地下水资源，不仅滋养着广袤农田，还在生态补水、维持湿地生态平衡中发挥关键作用。与之形成鲜明对比的是，黑龙江省山区受基岩裂隙发育程度不均影响，地下水赋存条件复杂多变。大兴安岭、小兴安岭及长白山脉余脉等地，地下水多以分散的泉群和基岩裂隙水形式存在，水资源量相对有限^[2]。由于山区地形起伏大、裂隙网络连通性差，地下水储存空间分散，难以形成大规模集中供水水源，但其水质优良，多为低矿化度淡水，在局部地区为居民生活及小型产业发展提供了优质水源。

（二）地下水空间分布特征

黑龙江省地下水的空间分布受地形地貌、地质构造及行政区划等多重因素交织影响，呈现出显著的区域性差异。在广袤的平原地带，松嫩平原与三江平原构成了地下水资源的“天然储库”。松嫩平原中部区域，含水层以细砂、粉砂沉积为主，受沉积环境影响，其颗粒细小、孔隙度适中，形成富水性中等的水文地质单元，地下水水位埋深较浅，一般介于 1 - 3 米，这一特性虽便于开采利用，但也使得该区域地下水易受地表农业面源污染与生活污水排放的威胁；而松嫩平原西部及三江平原，得益于河流冲积形成的粗颗粒堆积物，含水层以粗砂、砾石为主，颗粒间孔隙连通性良好，造就了强富水性的特征，单井出水量可达数百立方米每日，且水位埋深相对较深，约 5 - 10 米，为区域供水提供了稳定且充沛的水源保障^[3]。山区的水文地质条件则截然不同，大兴安岭、小兴安岭及长白山脉支脉地区，地下水资源分布严格受控于地质构造与岩性条件。基岩裂隙水主要赋存于断裂构造带及风化裂隙发育区域，这些地带犹如地下水流动的“脉络”，但受限于山区地形起伏剧烈、裂隙网络连通性差的特点，水资源分布极为零散，常以小型泉群或分散的裂隙水流形式存在。并且随着海拔高度与地形坡度的变化，地下水量呈现出显著的空间波动，难以形成规模化、集中化的供水格局。从行政区域视角观察，哈尔滨、齐齐哈尔等坐落于平原地区的城市，凭借得天独厚的水文地质条件，周边地下水资源储量丰富，能够有力支撑城市大规模的工业生产与居民生活用水需求；而黑河、伊春等位于山区的城市，受限于当地零散的地下水资源分布特征，水资源相对匮乏，在供水保障方面面临更大挑战，需通过跨区域调水、雨水收集等多元化方式弥补水资源缺口。

（三）地下水时间分布特征

黑龙江省地下水资源的时间分布规律，与降水、气温等气象要素紧密耦合，呈现出显著的年内波动与年际差异特征。受温带大陆性季风气候支配，降水在时间维度上呈现高度不均态势：夏季（6-8 月）暖湿气流主导，降水集中且强度大，充沛的雨水通过土壤孔隙大量入渗，成为地下水的主要补给来源，促使地下水

位快速抬升，水资源储量显著增加；而冬季受西伯利亚冷高压控制，气候寒冷干燥，降水多以固态降雪形式存在，加之地表冻结形成天然隔水层，极大削弱了降水对地下水的补给能力，导致地下水位持续走低，水资源量明显减少。

在更长的时间尺度上，年际间的地下水资源变化同样显著^[4]。季风系统的强弱波动直接决定了降水的年际差异：丰水年份，季风强劲，降水远超常年均值，地下水获得充足补给，水位显著回升；而在枯水年份，季风势力偏弱，降水大幅减少，地下水补给严重不足，部分区域地下水位持续下降，甚至形成区域性降落漏斗^[5]。以松嫩平原为例，长期监测数据表明，在连续枯水年份，该区域部分地段地下水位年均降幅可达 0.5-1 米，这种持续的水位下降不仅威胁到水资源的可持续利用，还可能引发地面沉降等地质环境问题。

（四）地下水水质特征

黑龙江省地下水水质在空间分布上呈现显著的分带性特征，这一现象与地质条件、人类活动的空间差异密切相关。在山区及山前地带，由于地下水径流速度快，且补给源多为清洁的大气降水与山涧溪流，因而形成以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型为主的地下水，矿化度普遍低于 0.5 克 / 升，水质优良，是天然优质的饮用水源^[6]。进入平原中部地区，地下水在径流过程中不断与岩土体发生复杂的物质交换，水化学类型逐渐转变为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型或 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$ 型，矿化度维持在 0.5 - 1 克 / 升，整体水质较好，但受农业生产中化肥、农药大量使用影响，部分区域出现硝酸盐、氨氮等指标超标现象。而在平原边缘及低洼地区，地下水径流滞缓，强烈的蒸发浓缩作用使得 Cl^- 、 Na^+ 等盐分不断富集，部分地段矿化度超过 3 克 / 升，水质明显变差，无法直接饮用，需经过严格净化处理。

（五）地下水开发利用现状

在农业领域，松嫩平原和三江平原的井灌面积广泛，地下水成为粮食增产的关键水源，约 60% 的农田灌溉依赖地下水。工业方面，部分城市的工业生产用水以地下水为主，如大庆油田的开采及相关化工产业对地下水有一定需求。生活用水上，在地表水供应不足的地区，地下水是居民生活的重要水源。然而当前地下水资源开发利用也存在诸多问题，部分地区存在过度开采现象，导致地下水位持续下降，形成区域性降落漏斗，引发地面沉降等地质灾害；农业灌溉用水效率低，水资源浪费严重；工业和生活污水的不合理排放，可能造成地下水污染，威胁水资源可持续利用。近年来，黑龙江省已加强对地下水资源的管理，实施了地下水超采区治理、节水灌溉推广等措施，以促进地下水资源的合理开发与保护。

二、黑龙江省地下水资源可持续开发模式研究

（一）地下水可持续开发原则及目标

黑龙江省地下水资源可持续开发需遵循生态优先、科学规划与协同治理三大核心原则，生态优先原则强调将地下水系统与生态环境视为有机整体，严格控制开发强度，避免因过度开采导致

地面沉降、湿地退化等生态问题；科学规划原则要求依据水文地质条件、水资源量及开发利用现状，统筹协调农业、工业与生活用水需求，实现地下水的合理配置；协同治理原则旨在整合政府、企业与公众多方力量，构建多部门联动机制，共同推进污染防治与节水技术应用^[7]。基于上述原则，明确短期、中期与长期可持续开发目标。短期目标聚焦于遏制地下水超采趋势，计划至2030年将全省地下水开采量控制在可开采量的90%以内，并逐步恢复重点超采区的地下水位；中期目标着力优化水资源利用结构，力争将工业用水重复利用率提升至85%以上，农业灌溉水有效利用系数提高至0.65；长期目标则致力于构建人水和谐的地下水管理体系，保障生态环境良性发展，实现水资源与经济社会的协调可持续发展。

（二）基于不同区域的可持续开发模式

黑龙江省不同区域因功能定位与资源条件差异，需因地制宜采取特色开发模式。在平原农业主产区，如松嫩平原和三江平原，作为地下水开采大户，需构建“节水增效+生态修复”模式。一方面，推广滴灌、喷灌等高效节水技术，并结合物联网与智能监测系统实现精准灌溉；另一方面，建立地表水与地下水联合调度机制，在丰水期充分利用松花江、嫩江等地表水资源进行补充灌溉，降低对地下水的依赖。针对已形成的地下水位降落漏斗，通过人工回灌、湿地补水等工程措施，逐步恢复地下水生态功能；同时优化种植结构，缩减高耗水作物面积，推广耐旱品种，从源头降低农业用水总量^[8]。山地生态保护区，包括大兴安岭、小兴安岭及长白山脉支脉，以生态保护为首要任务，宜采用“保护限制+适度利用”模式。通过严格划定地下水禁采区与限采区，禁止大规模商业开采，重点保护天然泉群及水源涵养区。对于分散的居民生活用水需求，采用小型分散式供水系统，优先利用山泉水，减少对深层地下水的扰动。此外，大力推进生态修复工程，通过植树造林、退耕还林等措施提升植被覆盖率，增强降水入渗补给能力，维护山区地下水系统稳定^[9]。城市及工业集中区，如哈尔滨、大庆等地，由于用水需求大且污染风险高，需推行“循环利用+污染防控”模式。工业领域加大节水改造力度，

鼓励企业建设中水回用设施，将处理后的工业废水用于冷却、洗涤等环节；城市层面完善污水处理管网，提高污水收集与处理率，并推广再生水用于城市绿化、道路冲洗等非饮用水领域。同时建立地下水污染实时监测网络，加强对化工、石油等重点行业的监管，严格控制污染物排放，防止地下水污染扩散。

（三）地下水开发利用管理对策

为保障地下水资源可持续开发，需从制度建设、科技创新与公众参与三方面强化管理。制度层面，完善地方性地下水管理法规，细化开采许可、水资源费征收、生态补偿等制度细则，建立地下水动态监测与预警平台，实时监控水位、水质变化；推行水资源消耗总量和强度双控行动，将地下水管理纳入地方政府绩效考核体系，对超采严重区域实施问责机制。科技创新方面，加大对地下水勘探、监测及节水技术的研发投入，推广原位生物修复、纳米材料吸附等新型地下水污染修复技术；联合高校与科研机构开展水文地质模型研究，提高水资源预测与调配的科学性；通过政策补贴、示范工程等方式，加速高效节水设备、智能灌溉系统的普及应用。公众参与层面，开展多样化节水宣传活动，普及地下水保护知识，增强公众节水意识；建立举报奖励机制，鼓励公众参与水资源管理监督；推行阶梯水价制度，引导居民和企业合理用水，提高水资源利用效率，形成全社会共同保护地下水的良好氛围。

三、结束语

黑龙江省地下水资源的合理开发与保护是一项长期且复杂的系统工程，通过精准把握其分布特征，因地制宜实施可持续开发模式，强化制度、科技与社会协同管理，有望破解资源利用与生态保护的矛盾。未来需持续跟踪水资源动态变化，深化跨学科研究，完善管理体系，为保障区域生态安全、推动高质量发展筑牢水资源根基。同时相关研究成果也将为寒区及平原-山区复合地貌区域的水资源管理提供有益参考。

参考文献

- [1] 戴长雷, 于淼, 张晓红. 黑龙江省和萨哈共和国地下水赋存特征分析研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(06): 28-34.
- [2] 王璐. 黑龙江省五大连池市后备水源供水水文地质详查报告. 黑龙江省, 黑龙江省水文地质工程地质勘察院有限公司, 2018-04-12.
- [3] 徐卫东. 大庆市水资源现状及其可持续发展 [J]. 科学技术创新, 2017, (19): 133-134.
- [4] 丛璐. 松嫩平原(黑龙江)地下水动态特征及超采区评价研究 [D]. 吉林大学, 2017.
- [5] 卢静. 黑龙江省友谊农场地下水资源评价与可持续利用建议 [D]. 东北农业大学, 2016.
- [6] 孙香泰, 孙博文. 黑龙江省松嫩平原地下水超采区分析研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(05): 1-4. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2016.05.002.
- [7] 李文睿. 黑龙江省多宝山镇地下水资源勘察与评价研究 [D]. 吉林大学, 2016.
- [8] 陈正国. 黑龙江省哈尔滨市东部新城供水水文地质详查报告. 黑龙江省, 黑龙江省水文地质工程地质勘察院有限公司, 2016-04-15.
- [9] 刘蕊. 黑龙江省讷河市节水增粮项目区地下水资源评价及利用 [D]. 黑龙江大学, 2015.

结合植被覆盖指数的水利水电高边坡生态稳定性评估方法

刘伟男

河北省迁安市水利局, 河北 迁安 064400

DOI:10.61369/WCEST.2025020001

摘 要 : 随着水利水电工程的建设, 边坡生态稳定性逐渐成为重要课题。高边坡区域的生态稳定性直接影响水利水电工程的长期运行及安全。植被覆盖指数 (VCI) 作为评估植被健康的重要指标, 对于高边坡的生态稳定性评估具有重要意义。该方法通过分析不同植被覆盖程度与坡面稳定性的关系, 能够更精准地评估边坡的生态风险与稳定性变化。VCI 值的变化不仅反映了植被的生长情况, 也间接揭示了水土保持能力和边坡抗冲刷能力的变化。采用植被覆盖指数的评估方法, 不仅有助于提高高边坡的生态环境管理效率, 也为未来水利水电项目的生态安全监测提供了科学依据。

关 键 词 : 植被覆盖指数; 水利水电; 高边坡; 生态稳定性; 水土保持

Evaluation Method of Ecological Stability of High Slope of Water Conservancy and Hydropower Combined with Vegetation Coverage Index

Liu Weinan

Qian 'an Water Conservancy Bureau, Hebei Province, Qian 'an, Hebei 064400

Abstract : With the construction of water conservancy and hydropower projects, the ecological stability of slopes has gradually become an important topic. The ecological stability of high slope area directly affects the long-term operation and safety of water conservancy and hydropower projects. Vegetation coverage index (VCI), as an important index for evaluating vegetation health, is of great significance for evaluating the ecological stability of high slopes. By analyzing the relationship between different vegetation coverage and slope stability, this method can evaluate the ecological risk and stability change of slope more accurately. The change of VCI value not only reflects the growth of vegetation, but also indirectly reveals the change of soil and water conservation ability and slope erosion resistance. The evaluation method of vegetation coverage index is not only helpful to improve the efficiency of ecological environment management of high slopes, but also provides a scientific basis for ecological security monitoring of water conservancy and hydropower projects in the future.

Keywords : vegetation coverage index; water conservancy and hydropower; high slope; ecological stability; soil and water conservation

引言

随着全球气候变化及人类活动的加剧, 高边坡区域的生态系统逐渐面临严峻挑战。在水利水电工程建设过程中, 边坡的稳定性对于工程的安全性至关重要, 尤其在高边坡区域, 生态稳定性与水土流失、灾害防治等方面密切相关。植被作为天然的生态屏障, 在高边坡稳定性中起着决定性作用。植被覆盖指数 (VCI) 能够实时反映植被的生长状况, 是评估生态稳定性的重要指标。利用 VCI 对高边坡生态稳定性进行评估, 不仅可以为边坡的保护提供科学依据, 还能有效防止滑坡等灾害的发生。通过这一方法的应用, 能够实现对边坡生态环境的动态监测和管理, 确保水利水电工程在生态友好的环境下顺利运行。

一、植被覆盖指数与高边坡生态稳定性的关系

(一) 植被覆盖指数的定义与计算方法

植被覆盖指数 (VCI) 是衡量区域内植被生长状况的一个重要

遥感指标, 通过反映不同时间段内植被的健康状况来评估生态环境的变化。VCI 值通常基于卫星遥感数据、地面气象数据以及植被指数 (如 NDVI) 进行计算。通过比较当前时间段的植被指数值与历史最大和最小值, VCI 能够有效识别植被的异常变化, 进而反映

作者简介: 刘伟男 (1987.08-), 男, 汉族, 河北唐山人, 学历: 本科, 职称职务: 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

出该区域的生态环境健康水平。在水利水电项目中，VCI的计算通常依赖于遥感影像的时间序列数据，对不同季节和年份的植被覆盖进行动态监测。通过这些数据，能够准确掌握边坡植被的生长情况，为评估高边坡的生态稳定性提供可靠的量化依据。

（二）植被覆盖对边坡稳定性的影响机制

植被覆盖在高边坡的生态稳定性中起着至关重要的作用。植被的根系可以通过增加土壤的抗剪强度来有效减缓坡面的滑动风险。特别是多年生植被，其根系深入土壤，在降水过程中起到固土作用，减少土壤的冲刷与侵蚀。植物通过蒸腾作用调节坡面湿度，减少水分对坡面的侵蚀。植被的覆盖层还能够有效减缓雨水冲刷的速度，降低水土流失的可能性。高植被覆盖度通常意味着坡面在面对极端天气事件（如暴雨、强风）时具有更强的抵抗力。对于高边坡而言，良好的植被覆盖能够显著降低滑坡、泥石流等地质灾害的发生概率，从而保障水利水电工程的安全运行。评估植被覆盖度是高边坡生态稳定性研究中的重要环节。

（三）VCI在生态稳定性评估中的应用案例分析

VCI作为评估高边坡生态稳定性的工具，已被广泛应用于多个水利水电项目的环境监测中。在某些山区水电站的高边坡监测中，通过利用VCI值的变化，能够实时了解边坡植被的生长变化。研究发现，在植被覆盖度较低的边坡区域，VCI值的长期波动往往意味着生态环境的不稳定，而在植被覆盖较好的地区，VCI的稳定性则表明边坡具有较强的生态承载力。在某些特定地区，通过对比不同年份的VCI变化，研究者可以预测不同环境管理措施的效果。在某些边坡的植被恢复项目中，通过跟踪VCI值的变化，评估了恢复措施对水土保持和坡面稳定性的实际影响。此类应用不仅提高了植被恢复的科学性，也为其他高边坡生态稳定性评估提供了宝贵的参考经验。

二、高边坡生态稳定性评估的现有方法与不足

（一）传统生态稳定性评估方法概述

传统的高边坡生态稳定性评估方法多依赖于现场勘查和工程地质分析，主要通过地质勘探、土壤测试以及人工观测等方式收集数据。这些方法虽然能够提供一定的基础数据支持，但由于其主观性强、劳动强度大且数据更新不够及时，因此在实际应用中存在一定的局限性。传统方法通常只关注边坡的单一因素，如土壤成分、坡度、岩层结构等，而忽视了植被覆盖、降水等多重生态因素的综合影响。随着技术的发展，传统方法逐渐暴露出数据的时效性不足、空间分布不均和实时监控困难等问题，这促使了基于遥感技术和植被覆盖指数的生态稳定性评估方法的兴起。

（二）现有方法的局限性分析

尽管传统评估方法为高边坡的稳定性提供了初步的认识，但仍面临着若干局限性。传统方法的数据获取多依赖现场勘测，无法实现大范围、长时间的动态监控。现场勘测往往受到人力、物力和时间的限制，且具有较强的局部性，难以全面反映整个高边坡的生态状态。这些方法大多缺乏对环境变化的快速响应能力，尤其是在自然灾害发生时，评估结果往往滞后，无法及时提供预

警。再次，传统方法未能充分考虑多种因素的相互作用，如植被覆盖、气候变化、土壤湿度等因素对边坡稳定性的综合影响。现有评估方法在应对复杂多变的自然环境条件时存在较大不足，需要借助更先进的技术手段进行补充与完善。

（三）VCI评估方法的优势与创新性

相比传统方法，植被覆盖指数（VCI）作为一种基于遥感数据的评估工具，能够克服现场勘测的局限性，通过大范围、高精度的数据分析，提供实时的生态状态评估。VCI能够快速、连续地监测边坡植被的变化，及时反映出环境因素对植被生长的影响，进而推测出边坡的稳定性变化。其优势在于能够全面、动态地评估高边坡的生态健康状态，同时具备跨时间、跨区域的比较性。VCI能够与其他环境监测数据相结合，如气象数据、土壤湿度等，为边坡生态稳定性提供更为精准和全面的评估依据。VCI的应用不仅提高了高边坡生态稳定性评估的效率，还使得评估结果更加客观与科学，具有较强的创新性和前瞻性。

三、VCI在水利水电项目中的实际应用

（一）VCI在边坡监测中的应用案例

VCI在边坡监测中有着广泛的应用，尤其是在水利水电项目的施工和运营阶段。在某些山区的水电工程中，利用遥感技术获取的VCI数据对边坡的植被变化进行监控，能够及时发现植被覆盖的下降趋势，进而采取适当的防护措施。在某水电站的边坡监测中，VCI值下降时表明植被退化，及时的干预措施如植被恢复或加固措施被采取，有效避免了边坡失稳的风险。通过这种监测方式，工程方能够提前预知边坡生态环境的变化，并根据VCI变化调整边坡管理策略，从而保证工程的安全性和稳定性。

（二）VCI在水土保持与灾害防治中的作用

VCI在水土保持与灾害防治中的作用不可忽视。水土流失是导致高边坡滑坡和泥石流等灾害的主要因素，而植被的健康覆盖是水土保持的关键。通过对VCI的监测，能够在植被覆盖率下降的初期发现潜在的水土流失隐患。在某些水电项目中，当VCI值出现大幅波动时，相关部门会及时采取措施，如种植抗风化的植物、加强排水系统建设等，减少水土流失的风险，降低滑坡和泥石流的发生概率。VCI的变化还可以与降水量等气象数据结合，进一步提高灾害预警的准确性，从而为边坡灾害防治提供科学支持。

（三）VCI与其他监测指标的协同效应分析

VCI在水利水电项目中的应用不仅限于单独使用，还可以与其他生态监测指标协同工作，以提供更全面的评估。将VCI与降水量、气温、土壤湿度等环境因子结合，能够更准确地预测边坡的稳定性变化。降水量的增加往往会导致土壤湿度升高，这时植被覆盖的状态会直接影响土壤的抗冲刷能力。VCI与这些数据的结合，能够更好地揭示出植被与其他环境因素对边坡稳定性的综合影响，增强边坡稳定性评估的精度和时效性。通过与遥感影像分析技术的结合，VCI可以为高边坡区域的环境管理提供更为细致和动态的决策依据，增强水土保持措施的科学性与针对性。

四、提升高边坡生态稳定性的技术与策略

（一）基于 VCI 的数据驱动的边坡修复方法

基于 VCI 的数据驱动修复方法，能够结合植被生长数据、降水量和气象数据，制定更科学的边坡修复方案。通过遥感监测技术获取 VCI 数据，可以及时发现高边坡区域植被覆盖的变化，尤其是在干旱或极端气候条件下，植被健康度的变化能够准确反映土壤的侵蚀情况。利用这些信息，可以选择适合的植物种类进行边坡修复。通过对修复过程中 VCI 值的监测，可以实时调整修复策略，确保边坡修复工作的高效性和可持续性。这种数据驱动的方法，不仅提高了修复工作的精度，还大大减少了人工干预的成本。

（二）植被恢复与高边坡稳固的关系探讨

植被恢复在高边坡的生态稳定性中具有不可替代的作用。植被的根系能够加固土壤，减少水土流失，增加土壤的持水能力。尤其是在降雨量较大的地区，植被对水土保持的作用尤为显著。研究表明，恢复良好的植被覆盖可以大幅度提高高边坡的抗滑坡能力和抗风化能力。在植被恢复过程中，需要根据不同区域的气候、土壤及植被类型的差异，选择合适的植被品种进行种植。结合 VCI 值监测，能够及时评估植被恢复的效果，发现恢复过程中存在的问题，调整恢复策略，确保边坡的生态稳定性。

（三）技术与管理手段的结合促进生态稳定

提升高边坡生态稳定性不仅仅依靠技术手段，还需要有效的管理手段和政策支持。技术手段，如植被恢复、生态修复工程和环境监测等，能够为边坡提供科学的支持和保障。而管理手段，如定期的生态检查、灾害预警系统以及生态恢复工程的项目化管理，能够确保技术措施得以有效实施。在水利水电项目中，管理手段与技术手段的结合尤为重要，只有通过良好的管理和科学的技术，才能实现高边坡生态稳定性的长期保障。

五、面向未来的高边坡生态稳定性研究方向

（一）智能监测与 VCI 动态评估的结合

随着智能监测技术的发展，未来高边坡生态稳定性评估将进入更加精准和实时的阶段。通过结合无人机、卫星遥感技术和物联网设备，VCI 值的监测将更加高效，实时性更强。智能化的监

测系统不仅能够自动获取 VCI 数据，还能分析数据背后的生态信息，进行动态评估。这种智能化、自动化的监测方式，将极大提升边坡生态稳定性评估的精度，特别是在大规模水利水电项目的环境管理中具有广泛应用前景。

（二）基于遥感技术的边坡生态稳定性提升

遥感技术在高边坡生态稳定性评估中的应用，能够通过高分辨率影像提供边坡区域的精确地形、地貌数据及植被覆盖状况。这种技术可以深入分析不同时间段内的植被变化，监测土壤湿度、气候变化等因素对边坡稳定性的影响。结合植被覆盖指数（VCI）监测，遥感影像分析能够实时捕捉边坡生态环境的动态变化，为边坡修复、灾害预警及防治措施提供科学、有效的支持。随着遥感技术的不断创新，未来的边坡生态稳定性评估将更加精确、及时，能够适应多变的自然环境，提升环境监控的全面性和应对能力。

（三）跨学科合作在高边坡稳定性评估中的潜力

高边坡生态稳定性评估需要跨学科的合作与支持。地质学、生态学、遥感技术、气象学等多个学科的结合，能够为边坡的稳定性评估提供更全面的数据支持和分析工具。通过跨学科的协作，能够更精确地分析植被、土壤、气候等因素对边坡稳定性的综合影响，从而为水利水电项目的生态安全管理提供全方位的保障。在未来的研究中，跨学科的协作将极大推动高边坡生态稳定性评估技术的创新与发展。

六、结束语

本文详细探讨了植被覆盖指数（VCI）在高边坡生态稳定性评估中的应用，分析了 VCI 与边坡稳定性之间的密切关系。随着水利水电工程建设规模的不断扩大，高边坡的生态稳定性逐渐成为关键问题。通过对 VCI 的计算与分析，能够及时监测边坡植被的变化，为高边坡的生态保护提供了科学依据。传统评估方法存在一定局限性，而 VCI 评估方法则凭借其动态监测与高效评估的优势，能够更准确地预测和预防潜在的生态灾害。通过与其他监测指标结合，VCI 不仅提高了高边坡的生态稳定性评估精度，还为水利水电工程的可持续运行提供了保障。未来，随着遥感技术与智能监测系统的进步，VCI 的应用前景将更加广阔。

参考文献

- [1] 李昕, 孙晓, 王涛. 高边坡生态稳定性评估方法研究 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 89-97.
- [2] 刘海东, 胡明. 植被覆盖指数与土壤侵蚀关系的探讨 [J]. 生态学报, 2020, 40(12): 3564-3572.
- [3] 周玲, 马建华. 基于遥感技术的边坡植被变化监测与分析 [J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 1045-1054.
- [4] 王力, 陈伟, 刘军. 水利水电工程高边坡生态稳定性与灾害防治策略 [J]. 水利学报, 2021, 56(4): 235-242.
- [5] 张琪, 张新宇. 植被覆盖度在高边坡生态修复中的作用 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1259-1266.
- [6] 王晓明, 赵丽华, 李强. 基于植被覆盖指数的高边坡生态稳定性监测研究 [J]. 水利水电技术, 2023, 45 (2): 45-52.
- [7] 刘洋, 陈志刚, 张伟. 植被覆盖指数在水利水电工程边坡生态评估中的应用 [J]. 水利学报, 2022, 53 (6): 78-86.
- [8] 李晓峰, 王鹏, 孙伟. 高边坡植被覆盖与生态稳定性关系的定量分析 [J]. 水土保持研究, 2024, 31 (3): 123-130.
- [9] 张伟, 李晓峰, 赵丽华. 植被覆盖指数与高边坡水土保持能力的相关性研究 [J]. 生态学报, 2023, 42 (7): 98-105.
- [10] 赵丽华, 王晓明, 刘洋. 遥感技术在水利水电高边坡生态稳定性评估中的应用进展 [J]. 遥感技术与应用, 2024, 39 (4): 56-63.

水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的探讨

何麒麟

张家口市友谊水库事务中心, 河北 张家口 075000

DOI:10.61369/WCEST.2025020004

摘 要 : 水利水电工程的建设对于我国经济发展起到了非常重要的作用, 但是在实际进行施工的过程中, 由于地质情况较为复杂, 加上施工过程中不合理的施工技术等问题, 导致水利水电工程的整体质量出现了下降的趋势。在实际施工过程中, 由于各种原因会导致帷幕灌浆技术出现问题, 因此需要进行深入研究。文章通过对帷幕灌浆技术进行分析, 探究了帷幕灌浆技术在水利水电工程施工中存在的问题及解决方法。希望能够为相关工作者提供帮助。

关 键 词 : 水利水电; 施工; 帷幕灌浆

Exploration of Curtain Grouting Construction Technology in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

He Qilin

Friendship Reservoir Affairs Center, Zhangjiakou, Hebei 075000

Abstract : The construction of water conservancy and hydropower projects has played a very important role in China's economic development. However, in the actual construction process, due to the complex geological conditions and unreasonable construction techniques, the overall quality of water conservancy and hydropower projects has shown a downward trend. In the actual construction process, various reasons may lead to problems with curtain grouting technology, so in-depth research is needed. The article analyzes the curtain grouting technology and explores the problems and solutions of curtain grouting technology in the construction of water conservancy and hydropower projects. I hope to provide assistance to relevant workers.

Keywords : water conservancy and hydropower; construction; curtain grouting

引言

水利水电工程是我国基础建设工程的重要组成部分, 在我国国民经济发展中发挥着非常重要的作用。随着我国科学技术的发展, 在水利水电工程建设中使用了越来越多的技术手段, 其中帷幕灌浆技术就是一项非常重要的技术手段, 在实际施工过程中得到了广泛的应用。但是由于受到多种因素的影响, 使得帷幕灌浆技术在实际应用中出现了一些问题, 导致其对水利水电工程质量造成了一定影响。因此在实际进行施工过程中, 需要对帷幕灌浆技术进行深入分析和研究, 明确其存在的问题及解决方法, 从而提高帷幕灌浆技术在水利水电工程施工中的应用水平。

一、水利水电工程施工中帷幕灌浆施工前准备工作

(一) 工程地质勘察

在施工之前, 首先应该进行详细的工程地质勘察工作, 充分了解地质情况。在进行勘探时, 首先需要对地层的具体情况有所了解, 对断层、裂隙等情况进行全面掌握, 同时还需要对地质的性质进行详细了解, 如岩性、矿物成分等。然后, 在勘察过程中还要对水库的水文地质进行全面分析, 这样才能对整个水库的状况有一个全面的了解。

(二) 施工方案设计

在帷幕灌浆施工前, 应按照相关设计要求和设计文件, 编制施工方案。在制定施工方案时, 要结合工程的实际情况和工程地质勘察报告, 科学合理地选择灌浆孔位置, 并利用灌浆孔位置, 确定各个灌浆孔段的长度, 同时确定各孔段之间的连接方式。此外, 还需要考虑灌浆施工对周围环境的影响。因此, 在施工方案设计过程中, 还需针对各个灌浆孔位置和孔段长度进行科学合理地安排和设计。如对于不透水层和透水层较小的部位, 可以不做防渗处理; 而对于透水层和不透水层较大的部位, 则需要做防渗处理^[1]。

（三）灌浆材料的选择

灌浆材料是整个施工过程中的基础，其选择的好坏直接影响到工程施工的质量，因此，在帷幕灌浆施工过程中，要严格按照相关要求选择灌浆材料，对其进行有效地控制。首先，要根据相关规范确定浆液的浓度和相关配比，在选择材料时，要充分考虑到灌浆施工的具体要求^[2]。其次，要根据不同的工程规模和需要来选择合适的材料。最后，要根据工程施工需求来确定材料的种类和数量。

（四）施工设备的准备与调试

在进行帷幕灌浆施工之前，需要对施工设备进行调试，设备的调试是确保工程施工质量的关键，也是帷幕灌浆施工技术有效应用的重要前提。在进行设备调试时，要保证所有设备在运转时都能够正常运行，并且各个设备之间都能够相互配合。设备调试中，要对所有设备进行全面检查，确保所有设备都能够正常运转。如果出现任何问题，要及时维修，保证灌浆施工的顺利进行。

二、帷幕灌浆施工工艺

（一）钻孔施工

帷幕灌浆的钻孔施工过程中，需要严格按照相关规定进行钻孔施工，确保孔位偏差控制在50 cm以内^[3]。此外，为防止在钻孔过程中发生的岩层断裂或裂隙发育等情况，在对钻孔进行施工时需要确保钻孔施工的深度符合要求。在具体的钻孔施工过程中，需要认真落实岩层地质勘查工作，并且按照设计要求完成相关设计文件的编制工作，并严格按照施工设计进行相关钻孔作业。

（二）裂隙冲洗

在裂隙冲洗的过程中，为了避免对帷幕灌浆造成影响，应该采取一系列措施对裂隙进行冲洗，主要包括以下几个方面：（1）在冲洗裂隙的过程中，应该采用清水和高压水同时进行。如果使用高压水进行裂隙冲洗时，需要确保水压小于0.6 MPa；如果使用清水进行裂隙冲洗时，则需要确保水压小于1.0 MPa。（2）在使用清水对裂隙进行冲洗时，应该首先用清水进行清洗，然后再使用清水和高压水同时进行冲洗。在整个冲洗过程中，需要保证整个过程的连续性。如果某一个阶段出现了问题，就应该及时采取相应的措施解决问题。（3）在裂隙冲洗完成后，应该对整个过程进行详细的记录^[4]。

（三）压水试验

对灌浆孔进行压水试验时，对钻孔进行分段，同时在孔口位置安装上压力表，通过压力表来观察孔口压力，在开始灌浆后，对其压力值进行记录。压水试验过程中，如果遇到特殊情况，需要将其记录下来，并进行详细的分析。当发现有渗水现象时，需要及时查找出原因并解决。同时还要在灌浆结束后对压水试验过程中的情况进行记录^[5]。在压水试验过程中，还要注意对试验结束标准的确定。对不同段的灌浆压力进行有效的控制，在保证浆液不会发生变化的基础上，对压力值进行合理的控制。

（四）灌浆施工

1. 灌浆方法的分类与选择

灌浆方法主要包括单液浆、双液浆和三液混合浆三种。在实际的施工中，一般选择双液混合浆作为灌浆的主要方法。其主要原理是以水泥浆为主体，加入一定比例的化学试剂，从而使其具

有一定的流动性和可流动性，进而将其灌注到岩石、土中。同时，由于水泥浆中含有较多的固化剂，所以会产生较强的收缩效应，从而使岩石、土发生膨胀。

2. 灌浆压力的控制

在灌浆施工的过程中，如果压力控制不到位，会影响到灌浆的质量，因此一定要注意灌浆压力的控制。在帷幕灌浆施工中，要保证帷幕灌浆孔的压力为0.6 MPa^[6]，在实际的施工过程中，如果遇到浆液密度较大的情况下，可以通过加入一定量的减压剂来降低浆液密度，从而确保浆液在进行灌浆过程中不会出现堵塞问题。

3. 浆液的配制与灌注

浆液的配制过程中，在浆液配制之前，必须先对浆液的配比进行严格控制，特别是要保证水灰比以及水泥和水的比例。在实际的灌浆过程中，一定要严格按照配比进行，这样才能保证灌浆效果。在进行灌注时，采用一次灌注法进行灌浆，当注浆压力超过0.5 MPa时，就可以结束灌注。在实际灌注过程中，如果发生冒浆现象，应该及时进行补灌。

4. 灌浆过程中的特殊情况处理

当灌浆过程中出现浆液漏出、浆液灌不进、灌浆压力下降等异常情况时，应及时向设计单位报告，采取相应的措施进行处理。当灌浆压力上升到超过最大允许压力后，但仍持续下降或出现串浆现象时，应立即结束灌浆，并采用适当的方法和措施。当灌浆过程中出现下列情况时，应及时向设计单位报告：（1）当孔内出现串浆或冒浆时，应立即停止灌浆；（2）当注入率大于0.5L/min时，继续灌浆1h后仍不能结束灌浆时。

三、质量控制检测

（一）质量控制措施

1. 施工过程中的质量监督与检查

（1）首先对施工设计进行审查，对于钻孔位置、孔深、钻孔直径、灌浆压力和灌浆材料等方面的设计参数，需要进行严格的审核，保证施工质量满足规范要求。（2）施工过程中需要加强对施工工序的检查，确保每一道工序都符合规定要求。比如在检查孔位置确定方面，如果孔位布置不够合理，则需要重新调整，确保孔位满足规范要求。（3）在灌浆施工中，需要对施工材料、设备以及原材料等进行严格的检查，一旦发现不符合规定要求的材料和设备，则需要及时更换^[7]。

2. 原材料的质量控制

原材料是施工过程中的重要组成部分，会对整个工程的质量产生直接影响，所以原材料的质量控制非常关键。在实际施工过程中，需要对材料进行严格的筛选和检验，保证材料符合标准要求。同时，在检验过程中，还需要对原材料的性能进行测试，并做好记录。在原材料检验合格后，需要对其进行标识和分类管理，保证材料符合质量标准。

3. 施工人员的技术培训与管理

在对施工人员进行技术培训的过程中，需要采取一系列措施来提高其专业知识水平，使其在实际操作中能够掌握更多的技能和方法。对于灌浆施工技术而言，施工人员需要熟练掌握灌浆技术，了解灌浆材料的性能以及作用，明确各项技术指标的具体要

求，以便在实际操作过程中能够灵活运用。在对施工人员进行管理的过程中，需要对其工作态度和工作能力进行综合评价，保证其具备一定的专业素养和良好的技术能力。只有这样才能保证整个施工过程更加顺利地进行。

（二）质量检测方法

1. 压水试验检测

在灌浆过程中，压水试验是检验帷幕灌浆质量的重要手段。在灌浆之前，必须进行压水试验，这是为了检查孔底的情况。在测试过程中，每个孔都要进行检查，其中最重要的是检查孔中的情况。压水试验分为两种类型，一种是静态压水试验，另一种是动态压水试验。静态压水试验指的是将灌浆孔的压力保持在一定水平，然后静止一段时间，然后检测压力变化情况。而动态压水试验指的是在一定压力下注入一定量的水，然后测量孔内的压力变化情况。如果发现问题，需要及时采取措施进行处理^[8]。

2. 钻孔取芯检测

灌浆质量检查应在帷幕灌浆结束后进行，对灌浆孔内的岩芯采取率可作为评价灌浆质量的依据，对钻芯采取率低于10%，灌浆质量评定为不合格。为保证工程质量，在帷幕灌浆结束后应对岩芯采取率进行检查。岩芯采取率采用钻孔取芯方法进行检查，首先以钻进方向钻入孔内，以孔口为基点沿轴线向四周沿岩层面钻进。再用小锤轻轻敲击岩芯柱，观察岩芯柱的完整程度及碎裂情况，按岩芯的完整程度将其分为完好、破碎和风化三种类型。对于破碎岩石应及时剔除，对完整岩石则进行编号记录。按照上述方法对岩芯采取率进行检查后，再按规定进行岩芯率评定。

3. 无损检测技术的应用

无损检测技术可以为帷幕灌浆施工的质量控制提供强有力的支撑，通过该技术，可以对灌浆施工过程中出现的问题进行及时的排查，并确定问题产生的原因，同时还能提高灌浆施工的质量。无损检测技术在使用中一般应用于以下两种情况：（1）灌浆孔出现了水泥结皮、漏浆等问题，影响了帷幕灌浆施工的效果，通过该技术可以及时对问题进行排查，并对问题产生的原因进行分析，从而确定解决问题的方法^[9]。（2）灌浆孔出现了裂缝，对混凝土防渗墙造成了一定程度的破坏，通过该技术可以及时进行处理，有效地降低了混凝土防渗墙出现裂缝的概率。

四、帷幕灌浆技术的发展趋势

（一）智能化施工技术的应用

智能技术是目前帷幕灌浆技术发展的一大趋势，同时也是该技术未来的主要发展方向。首先，在设备方面，应根据不同的工程需求来选择合适的智能设备，如在水电工程中应用较多的钻机、喷浆机等。其次，在技术方面，应逐步推进智能化技术在帷幕灌浆施工中的应用。智能化技术的应用能够有效地提高施工效率和质量，同时降低施工成本。最后，在信息方面，应积极引进先进的信息技术和设备，如物联网、云计算等。

（二）新型灌浆材料的研发与应用

在实际施工过程中，帷幕灌浆材料的研发与应用是提高帷幕灌浆技术效果的重要措施。在当前科学技术不断发展的背景下，新型灌浆材料的研发与应用对于提升帷幕灌浆技术的质量效果具有重要意义。因此，在实际施工过程中，应从多个角度出发，科学合理地对新型灌浆材料进行研发和应用，以满足施工要求。

（三）绿色环保施工理念的融入

在施工中，帷幕灌浆技术的应用是非常重要的，它可以保证水利工程的稳定性和安全性。在这个过程中需要做好监督工作，做好对施工过程的监控，这样才能确保施工的安全和质量。在水利水电工程施工中，帷幕灌浆技术发挥着重要作用，但是它的应用也会产生一定的负面影响，因此在具体施工过程中需要融入绿色环保理念，并对其进行分析和研究。

五、结束语

在水利水电工程建设过程中，帷幕灌浆技术能够有效地提高整个工程的质量，因此在实际进行施工的过程中，应该进行深入研究，保障技术水平。目前，帷幕灌浆技术已经被广泛地应用在各个工程领域当中，但是由于其技术要求较高，需要结合实际施工情况，进行技术和工艺的不断改进。并且随着科学技术的发展，帷幕灌浆技术也会得到不断的发展。在实际进行施工的过程中，应该积极引进先进的设备和材料，不断提高施工工艺水平和施工效率。

参考文献

- [1] 李海荣. 探究水利工程施工中帷幕灌浆技术应用 [J]. 建筑与预算, 2022, (08): 58-60. DOI: 10.13993/j.cnki.jzyys.2022.08.020.
- [2] 臧盛阁. 水利水电工程施工中的灌浆施工技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(01): 90-92.
- [3] 邓宁. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术应用研究 [J]. 水上安全, 2024, (10): 157-159.
- [4] 徐玺坤. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (14): 185-187.
- [5] 孙灵. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术应用研究 [C]//江西省工程师联合会. 2024年智能工程与经济建设学术会议论文集（能源工程与环境保护专题）. 江西朗越建筑工程有限公司, 2024: 224-227.
- [6] 胡青. 水利水电工程施工中的灌浆施工技术分析 [C]//江西省工程师联合会. 2024年智能工程与经济建设学术会议论文集（工程管理与经济建设专题）. 江西旺达建设工程有限公司, 2024: 187-190.
- [7] 黄灿彬. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用探讨 [J]. 大众标准化, 2023, (16): 165-167.
- [8] 李波. 水利水电工程施工中灌浆技术的应用分析 [J]. 四川水利, 2022, (S1): 43-46.
- [9] 尹栓. 杨春红. 高压旋喷灌浆技术在水利水电工程施工中的应用 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(20): 75-76.
- [10] 赵永锋. 灌浆技术在水利水电工程大坝施工中的应用分析 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44(06): 79-81.

水利水电工程安全管理与技术管理协同优化研究

江活芳

日成（广东）水务建设股份有限公司，广东 广州 510470

DOI:10.61369/WCEST.2025020005

摘 要： 阐述水利工程安全管理与技术管理问题，包括安全风险评估不科学等及技术管理进步与局限。强调系统工程方法论下两者的耦合关系，介绍基于区块链的数据共享等创新，还提及协同优化模型应用及效果分析，指出其理论与实践价值及研究方向。

关 键 词： 水利工程；安全管理；技术管理

Research on Collaborative Optimization of Safety Management and Technical Management in Water Conservancy and Hydropower Engineering

Jiang Huofang

Nicheng (Guangdong) Water Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510470

Abstract： This article elaborates on the safety and technical management issues of water conservancy engineering, including unscientific safety risk assessment and the progress and limitations of technical management. Emphasize the coupling relationship between the two under the methodology of systems engineering, introduce innovations such as data sharing based on blockchain, and also mention the application and effect analysis of collaborative optimization models, pointing out their theoretical and practical value and research directions.

Keywords： water conservancy engineering; safety management; technical management

引言

水利工程在国民经济中具有重要地位，其安全管理与技术管理至关重要。随着2021年《水利工程建设标准强制性条文》等政策的颁布实施，对水利工程质量和安全管理提出了更高要求。然而，当前水利工程在安全管理方面存在风险评估不科学、事故预防体系不完善等问题，技术管理也面临应用局限、标准更新滞后等困境。系统工程方法论强调安全管理与技术管理相互耦合，且从全生命周期视角看，水利工程有质量、安全与技术协同需求。在此背景下，探讨水利工程安全管理与技术管理的协同优化具有重要意义。

一、水利水电工程安全管理与技术管理现状分析

（一）水利工程安全管理现状及问题

水利工程安全管理具有系统性、复杂性等特征。在安全风险评估方面，存在评估方法不够科学准确的问题，不能全面涵盖各类潜在风险因素^[1]。事故预防体系也不完善，缺乏对一些新型风险的有效预防措施，应急预案的实用性和可操作性有待提高。人员培训机制存在不足，培训内容可能与实际工作需求脱节，缺乏针对性和实效性，不能有效提升人员的安全意识和技能水平。这些问题严重影响了水利工程的安全运行，需要进一步研究和解决。

（二）水利工程技术管理发展现状

随着科技的不断发展，水利工程技术管理也在逐步进步。BIM技术在水利工程中的应用已取得一定进展，它能够实现水利工程的三维可视化建模，为工程设计、施工和管理提供更直观的

依据^[2]。然而，其应用仍存在一些局限，如在复杂地质条件下模型的准确性有待提高。物联网监测系统也逐渐应用于水利工程，可实时监测工程的各项参数，如水位、流量等，但在数据传输的稳定性 and 安全性方面还需进一步完善。同时，技术标准更新滞后问题较为突出，无法满足当前水利工程快速发展的需求，制约了技术管理水平的提升。数字化转型过程中，也面临着数据整合困难、专业人才短缺等痛点。

二、协同优化的理论基础与需求分析

（一）系统理论与协同管理原理

系统工程方法论强调从整体出发，综合考虑各子系统及其相互关系。在水利项目管理中，将安全管理与技术管理视为两个重要子系统。安全管理涉及人员、设备、环境等多方面的安全保障措施，技术管理则侧重于工程技术的应用与创新。这两个子系统

相互耦合，相互影响。一方面，安全管理为技术管理提供稳定的实施环境，确保技术操作符合安全规范；另一方面，技术管理为安全管理提供技术支持，通过先进的技术手段提高安全管理的效率和准确性。例如，采用先进的监测技术可以及时发现安全隐患，为安全管理决策提供依据。这种耦合关系体现了系统理论中整体大于部分之和的思想，只有协同优化安全管理与技术管理，才能实现水利水电工程的高效、安全运行^[3]。

（二）水利工程协同管理需求特征

水利工程具有自身独特的需求特征，从全生命周期视角出发，质量、安全与技术协同需求显著。其环境复杂性包括自然环境和社会环境等多方面因素。在自然环境方面，地形、地质、水文等条件复杂多变，对工程质量和安全带来诸多挑战，需要技术手段不断优化来适应和克服这些困难^[4]。社会环境涉及移民安置、生态保护等问题，这些都要求在工程管理中综合考虑质量、安全和技术因素，确保工程不仅满足功能需求，还能符合可持续发展的要求，因此协同管理至关重要。

三、安全管理与技术管理协同优化模型构建

（一）协同机制设计

1. 信息共享机制构建

建立基于区块链的安全数据共享平台，可确保水利水电工程安全管理与技术管理中的数据准确性和实时性。区块链的分布式账本技术能有效防止数据篡改，保障信息的真实性和可靠性^[5]。通过该平台，安全隐患排查信息可及时上传并共享。技术部门能依据这些信息迅速对技术方案进行评估和调整，实现隐患排查与技术方案联动更新。例如，当发现某水工建筑物存在安全隐患时，安全管理人员将相关数据上传至平台，技术人员立即获取并分析，结合最新的技术手段对原有的维护或修复技术方案进行优化，从而提高工程的安全性和可靠性。

2. 流程协同机制创新

安全审查与技术验证的并行处理流程是协同机制的关键创新点。在水利水电工程中，安全审查关乎工程的稳定性和人员安全，技术验证则确保施工技术的可行性和有效性。两者并行处理，可避免因顺序处理导致的时间浪费和信息不对称。同时，制定施工方案动态优化规则也至关重要。施工过程中，随着环境和条件的变化，原施工方案可能不再适用。通过动态优化规则，能够及时调整方案，确保安全管理与技术管理的协同性。这种流程协同机制创新能够提高工程效率，保障工程质量和安全^[6]。

（二）协同优化模型开发

1. 多目标决策模型构建

融合安全风险指数与技术可行性指标，建立考虑资源约束的优化函数。安全风险指数反映工程可能面临的安全隐患程度，技术可行性指标则体现技术方案实施的难易与合理程度。在实际水利水电工程中，需综合考虑资源的有限性，如资金、人力、时间等。通过构建优化函数，使安全管理与技术管理在满足资源约束条件下达到协同优化。该函数应以降低安全风险、提高技术可行

性为目标，同时合理分配资源，确保工程的顺利进行与可持续发展^[7]。

2. 数字孪生系统集成

基于 BIM - GIS 的协同管理平台开发是实现水利水电工程安全管理与技术管理协同优化的关键。该平台集成数字孪生系统，可对工程实体进行精准映射^[8]。通过 BIM 的三维建模能力，构建工程的详细虚拟模型，包含结构、设备等信息。GIS 则提供地理空间数据支持，实现工程与周边环境的一体化呈现。在此基础上，利用数据挖掘与分析技术，对工程运行数据进行实时监测与分析。当出现异常情况时，能够及时发出安全预警，并为技术调度提供可视化决策依据。例如，根据实时水位数据和工程结构状态，合理安排泄洪操作等技术措施，确保工程安全稳定运行。

四、协同优化模型的应用验证

（一）案例工程概况

1. 工程基本参数

以大渡河大岗山水电站为例，该水库枢纽工程地质条件极为复杂，存在多条断层破碎带及大面积岩溶发育区，施工过程中需克服诸多地质难题。大坝为混凝土双曲拱坝，最大坝高 210 米，水库总库容 7.42 亿立方米，装机容量 260 万千瓦。施工难点主要集中在大坝基础处理、地下洞室开挖支护以及混凝土浇筑等方面。基础处理工程量大，需处理的断层破碎带长度超过 500 米；地下洞室群规模宏大，开挖支护难度高，洞室总长度超过 20 公里；大坝混凝土浇筑需在低温环境下进行，对混凝土的性能和施工工艺要求极高^[9]。既有管理模式较为传统，在安全管理与技术管理的协同方面存在明显不足，安全管理多侧重于事故后的处理，技术管理则侧重于施工技术的应用，两者缺乏有效的沟通与协调机制，导致工程建设过程中出现一些安全隐患和技术问题，影响了工程的进度和质量。

2. 协同管理痛点

该水利水电工程在防汛调度与结构安全监测的协同管理方面存在诸多痛点。在信息传递上，防汛调度部门与结构安全监测部门之间缺乏实时、有效的信息共享机制，导致数据更新不及时，影响决策的准确性^[10]。在职责划分上，存在部分工作内容交叉重叠，同时又有一些关键环节职责不清的情况，容易出现推诿扯皮现象。在技术应用上，两个部门所采用的技术手段和标准存在差异，难以实现有效的协同工作，例如防汛调度可能更侧重于水文数据的分析，而结构安全监测则注重工程结构的物理参数监测，两者数据融合困难。这些痛点严重影响了工程的安全管理与技术管理的协同效果，亟待解决。

（二）模型应用过程

1. 实施路径设计

制定分阶段实施方案是水利水电工程安全管理与技术管理协同优化模型应用的关键路径。设备部署方面，需依据工程实际需求与协同优化目标，合理配置安全监测设备与技术管理相关设备，确保设备间的兼容性与数据传输的稳定性。数据对接环节，

要建立统一的数据标准与接口，实现安全管理数据和技术管理数据的高效整合与实时共享，为协同分析提供准确的数据支持。人员培训计划应围绕模型应用所需的知识与技能展开，包括安全管理规范、技术管理流程以及协同优化理念等内容，提高人员对模型应用的操作能力和理解程度，保障协同优化工作的顺利实施。

2. 动态调整机制

水利水电工程在汛期安全监测数据驱动下，技术参数实时优化过程遵循动态调整机制。通过对监测数据的实时采集与分析，获取工程关键部位的实际运行状态信息。依据这些信息，结合协同优化模型，对技术参数进行动态调整。例如，当监测到水位变化超出正常范围时，模型会根据相关算法对大坝的泄洪参数进行调整，确保大坝安全。同时，对于其他相关技术参数，如混凝土的抗压强度要求、设备的运行参数等，也会根据实际情况和模型的优化结果进行相应调整，以实现水利水电工程安全管理与技术管理的协同优化。

（三）应用效果评价

1. 定量效果分析

通过对比实施协同优化模型前后水利水电工程的安全事故率和工程返工率等核心指标来进行定量效果分析。实施前，安全事故率可能受多种因素影响处于较高水平，如人员操作不规范、技术管理漏洞等。工程返工率也因安全管理与技术管理未能有效协同，导致施工过程中出现较多质量问题而居高不下。实施协同优化模型后，由于安全管理与技术管理的协同作用，安全事故率显著下降。各项安全措施能更好地落实，人员的安全意识和操作规范程度提高。同时，工程返工率也大幅降低，技术管理的优化使

得施工过程更加科学合理，质量问题减少，从而验证了协同优化模型在水利水电工程中的良好应用效果。

2. 定性效益评估

从管理效率提升角度看，协同优化模型应用后，水利水电工程各部门间信息传递更加及时准确，减少了因沟通不畅导致的工作延误。例如，工程进度信息能实时共享，施工部门可据此合理安排人力物力，提高了资源利用效率。在应急响应能力增强方面，模型使得应急预案的启动和执行更加高效。一旦出现安全隐患或突发事件，相关部门能迅速联动，按照预定方案快速响应。同时，通过协同优化，安全管理和技术管理的融合度提高，管理人员能更好地运用技术手段解决安全问题，技术人员也能更深入地了解安全需求，从而提升了整个工程的安全保障水平。

五、总结

水利水电工程安全管理与技术管理协同优化具有重要的理论与实践价值。从理论层面看，它丰富了工程管理的理论体系，为深入理解管理要素间的相互关系提供了新视角。在实践方面，有助于提高工程的安全性和效率，保障工程顺利运行。所构建的模型在复杂水利工程中具有普适性应用前景，能够为不同类型和规模的水利水电工程提供有效的管理指导。然而，研究还有待进一步深化。例如，在极端气候适应方面，需探索如何更好地应对气候变化带来的挑战，确保工程安全。同时，智能算法融合方向也值得关注，通过融合先进算法，可进一步提升管理的科学性和精准性，为水利水电工程的可持续发展提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 高忻. 水利水电工程中的风险评估与安全管理 [J]. 电脑爱好者 (电子刊), 2021(12): 4361-4362.
- [2] 郑丽娟. 水利水电工程施工安全评价与管理系统研究 [D]. 河北农业大学, 2015.
- [3] 张唤娣. 基于 NKC 模型的技术管理与技术能力协同关系研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [4] 寇灵芝. 技术管理与技术能力协同对新产品开发绩效的影响研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] 白相逵. 云信息技术环境下水利水电工程的施工安全管理与提升策略 [J]. 科技资讯, 2019, 17(11): 86, 88.
- [6] 李洪. 浅谈水利工程施工安全技术管理 [J]. 魅力中国, 2017(21): 211.
- [7] 王子良. 水利工程施工安全技术管理 [J]. 水利科技与经济, 2016, 22(4): 103-104.
- [8] 李艳梅. 浅谈水利工程施工安全技术管理 [J]. 中国科技投资, 2017(2): 114.
- [9] 程雄辉. 浅谈水利工程施工安全技术管理 [J]. 房地产导刊, 2017(33): 129.
- [10] 朱彦臣. 水利工程施工安全技术管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2016(24): 2047.

水电站电气一次设备故障检修与处理技术

黄加云, 杜兴

中电建电力检修工程有限公司, 四川 乐山 614000

DOI:10.61369/WCEST.2025020006

摘 要 : 本文研究目的在于分析水电站电磁一次设备的故障检修与处理技术。研究期间, 结合文献阅读与电力公司水电站检修材料梳理, 在介绍水电站电气一次设备基础上, 面向电缆、开关与保护、变压器三类设备进行故障检修技术与处理方案的研究。希望本文可为我国电力企业提供技术借鉴与参考意义, 确保检修部门在精确掌握各项技术基础上, 实现水电站电器的有效维护, 保证设备长期处于高度安全与稳定运行状态。

关 键 词 : 电气一次设备; 故障检修; 电缆故障; 变压器故障

Maintenance and Handling Technology for Faults of Primary Electrical Equipment in Hydropower Stations

Huang Jiayun, Du Xing

China Power Construction Electric Power Maintenance Engineering Co., LTD. Leshan, Sichuan 614000

Abstract : The purpose of this paper is to analyze the fault maintenance and handling technology of the electromagnetic primary equipment in hydropower stations. During the research period, combined with literature reading and the sorting out of the maintenance materials of hydropower stations by power companies, based on the introduction of the primary electrical equipment of hydropower stations, the research on fault maintenance technologies and handling schemes was carried out for three types of equipment: cables, switches and protection, and transformers. It is hoped that this article can provide technical reference and significance for China's power enterprises, ensuring that the maintenance department, on the basis of accurately mastering various technologies, can effectively maintain the electrical equipment of hydropower stations and guarantee that the equipment remains in a highly safe and stable operating state for a long time.

Keywords : electrical primary equipment; fault repair; cable failure; transformer failure

水电站电气一次设备故障的检修与处理, 是保障电力系统稳定安全运行的重要技术支撑环节。一方面, 水电站的一次电气设备如变压器、电缆、开关与保护装置直接承载着电能生产、传输的质量, 一旦出现故障可能引发过电压、短路等连锁事故。有效的故障检修与处理, 可以提前对接触不良、设备老化等隐患进行识别, 将故障在萌芽阶段消除, 打造故障风险防范前置屏障, 避免因设备停运导致电网波动。另一方面, 科学的检修策略, 能够精准匹配电气一次设备的实际运行状况, 有效延缓设备的寿命损耗, 降低更换成本。因此, 综合而言, 电气一次设备的检修, 不仅仅是针对设备的维护行为, 更是保障能源安全、提升建立生产供应可靠性的系统性工作。

一、水电站电器一次设备概述

水电站内的电气一次设备, 站在功能角度划分, 可分为能量转换设备、电路通断与控制设备、电能传输与保护设备, 无功补偿与接地设备。其中, 能量转换设备包括水轮发电机、主变压器^[1]。电路通断与控制设备包括断路器、隔离开关、负荷开关。电能传输与保护设备包括母线与电缆、避雷器以及电流/电压互感器。无功补偿与接地装备通常指水电站内的并联电容器、接地装置, 接地装置包括接地网、接地开关^[2]。

二、水电站电气一次设备故障检修方法研究

(一) 电缆故障检修与处理

1. 故障检修

水电站内的电缆由于老化、环境影响以及外力等因素, 故障时常发生。在故障出现后, 对于电缆故障的常见检修方法包括仪器测量以及红外热像仪以及目前最新的人工智能检修。

仪器测量是使用特定的测试仪器对电缆开展绝缘阻抗、回路阻抗、接地阻抗等技术参数的测量, 基于同正常阈值的对比分析

快速确定故障的位置。红外热像仪则是使用红外辐射原理对电缆的温度分布进行测试，一旦电缆存在故障，温度将出现异常变化，此刻可基于红外热像仪快速定点故障位置^[3]。

2.故障处理

水电站电缆常见故障包括绝缘老化与故障击穿、接头故障、机械损伤与接地故障等。常见故障与处理方式可参照表1：

表1 水电站电缆常见故障预处理方式

	故障	处理方式
1	绝缘老化与击穿故障	绝缘再绕包+热缩套管/整段更换
2	接头故障	镀银搪锡工艺/截断重做终端
3	机械损伤与接地故障	不锈钢带跨接接地并加强防水密封
4	芯线断裂	铜接管压接
5	水树老化和沿面放电	电树脂注入修复技术/湿度控制

如表1，针对电缆绝缘老化与击穿故障，面向35kV及以下电缆，可以使用绝缘绕包+热缩套管模式进行补全处理。针对110kV及以上的电缆，则需要进行整段电缆更换，同时同步优化敷设的坡度与路径，避免出现积水隐患。对于电缆接头故障，可以对铜铝过渡接头利用“镀银搪锡”工艺来提升其导电性。针对已经出现碳化的接头，则应及时截断电缆重做终端。针对电缆机械损伤与接地故障，面向铠装层损伤，可以使用不锈钢带跨接接地并加强防水密封^[4]。对于芯线断裂的问题，可以使用液压钳进行铜接管压接，绝缘恢复期间需要遵循半叠绕包+应力锥适配的原则。当电缆穿越厂房地面，针对穿越电缆段应加装镀锌钢套，管壁厚应≥3mm，同时沿电缆路径布置超声波驱鼠装置，确保机械损伤发生率有效降低。针对水树老化和沿面放电故障，可以使用电树脂注入修复技术，利用针口向曲线区域注入纳米绝缘漆，固化后可确保电缆的介电强度恢复到原值的90%以上。与此同时，电缆沟入口应设置湿度控制装置，保证湿度长期≤50%RH，同时加装除湿设备，降低水树生长概率^[5]。

（二）开关与保护故障检修与处理

1.故障检修

面向开关与保护的故障检修定位，可以通过如下步骤实现故障判断。第一，观察指示灯或是显示屏，确认是否正常工作，若出现错误信息或是异常闪烁，则可能存在故障。第二，检查连接线路，分析开关或保护装置同其他设备之间的连接线是否存在松动、断开或损坏。第三，对开关与保护装置上的功能按钮开展逐一测试，保证各功能可以正常响应与操作。在发现上述故障后，需进行进一步定位，先检查电源供应是否正常。随后，对信号传输进行检测，通过信号强度与质量的观察来判断是否存在故障。最后，开展数据分析，对开关与保护装置历史数据进行剖析，检查异常事件或数据，帮助定位故障点的具体位置^[6]。

2.故障处理

水电站电气一次设备下，开关设备常见故障集中于断路器

拒分/拒合、隔离开关接触不良、开关柜局部放电。针对断路器拒分/拒合，可采用红外热像仪检测线圈的温度，确认是否≤75℃，若出现异常可以更换防潮型线圈。当出现液压机构压力骤降，可利用SF₆气体泄漏检测仪进行漏点定位，同时更换密封圈，重新打压至额定值。针对隔离开关接触不良，可使用激光测距仪检测触头插入深度，若不足90%额定行程需及时调整转动连杆^[7]。

保护装置常见故障包括继电保护动作故障、录波器数据异常。继电保护误动作问题，可使用变比组别测试仪进行CT变比较验，针对二次回路可以使用双绞屏蔽线且设置单端接地形式。与此同时，检修部门应安排技术人员每季度利用继电保护测试仪开展定值校验，确保动作值与整定值偏差≤3%。针对故障录波器数据异常，应检查GPS对时装置的信号强度，应确保强度≥4颗卫星锁定，针对误差>1ms情况需进行晶振模块校准^[8]。

（三）变压器故障检修与处理

1.故障检修

针对水电站变压器的故障检修主要集中于绕组故障检修、铁芯与套管故障检修。针对绕组故障，可以使用FRA-频率响应分析法对绕组幅频特性曲线进行测试，同时对比历史数据，若横向对比偏差≥3dB或是纵向对比偏差≥5%，则可判定出现绕组变形。同时，可采取低电压短路阻抗测试，测量绕组的直流电阻、阻抗电阻，识别匝间短路问题。此外，对于绕组绝缘老化检修，若油中糠醛含量>1.0mg/1L,聚合度DP<250，则可以判定纤维素已经裂化。对于铁芯与套管的故障检修，可以使用直流法来测量铁芯对地电流是否处于正常水平（正常<10mA），若超过50mA则应继续使用钳形电流表沿着油箱壁来探测环流路径。对套管可以使用红外热像仪来检测套管的整体温升情况^[9]。

2.故障处理

对于变压器绕组轻微变形问题，可在吊芯后调整撑条的力矩，同时使用环氧树脂来固定绕组端部^[10]。严重短路故障如绕组损伤问题，需要将绕组进行整体更换，在绕制期间需严格控制导线的张力偏差<5%，层间绝缘厚度的公差满足±0.05mm。针对绕组绝缘老化，可以使用油浸纸绝缘再生技术，将2%含量的咪唑类化合物再生剂注入到绝缘绕组内，在50℃下循环处理超过48小时，可恢复绝缘聚合度达到400以上。绝缘纸更换期间，应采用真空干燥来有效消除水分，确保干燥后的绝缘电阻>10000MΩ。针对铁芯多点接地故障，可以在清除铁芯表面金属异物基础上修复接地片的焊接缺陷。此刻，应保证焊缝长度≥20mm，厚度≥3mm。针对套管渗漏故障，可以更换套管法兰密封圈，此刻优选氟橡胶材质，该材料耐温在-40℃200℃之间，同时应将压缩量控制在15%~20%。

三、结束语

综上所述，本文针对水电站电气一次设备的故障检修与处理技术进行详细探讨。重点围绕。电缆故障、开关与保护故障、变压器故障进行深度分析，继而形成系统化的故障检修与处理体

系。在借鉴本文研究成果同时，相关单位还应进一步探讨如何将人工智能、大数据技术同水电站电气一次设备的故障检修与处理实现进一步的融合，从而全面提升电气一次设备故障检修的智能化水平，降低人工操作误差，加快水电站智能化升级的脚步。

参考文献

[1]王治伟,王军.变电站一次设备状态检修方法研究[J].电气技术与经济,2023,(10):74-76.

[2]陈道强.基于在线监测技术的变电站一次设备检修策略研究[J].光源与照明,2023,(11):171-173.

[3]黄羽,张勋,王俊.水电站常见电气一次设备故障检修与故障处理研究[J].机械工业标准化与质量,2023,(10):37-40.

[4]温宝春.电气一次设备状态检修的应用分析[J].科技风,2023,(25):102-104.

[5]武发全.电气一次设备状态检修的运用[J].自动化应用,2023,64(S1):62-65.

[6]张伟,郑仕轩,江钰韬,等.变电站一次设备在线监测数据诊断及运维检修[J].科技与创新,2023,(11):114-116.

[7]杨竟帆.发电厂电气一次设备的状态检修策略分析[J].集成电路应用,2023,40(05):216-217.

[8]李昂.水电站常见电气一次设备故障检修与故障处理方法[J].水电与新能源,2023,37(04):75-78.

[9]万杰枫.变电一次设备中的故障检测与维护分析[J].电子技术,2023,52(03):364-365.

[10]妮鹿菲尔·毛吾田.水电站电气设备运行维护与故障检修研究[J].光源与照明,2023,(01):156-158.

大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的优化路径与管理实践

陈泳如

身份证号: 440921199411240046

DOI:10.61369/WCEST.2025020009

摘 要 : 介绍水利水电工程大体积混凝土温控防裂技术, 包括水泥水化热等因素对温度场影响, 现行施工技术标准, 温控技术瓶颈。阐述基于有限元模型、分布式光纤测温等新技术, 以及配合比优化、温度梯度分级控制等方法, 强调全周期管理及未来发展方向。

关 键 词 : 大体积混凝土; 温控防裂; 水利水电工程

Optimization Path and Management Practice of Temperature Control and Crack Prevention Technology for Large Volume Concrete in Water Conservancy and Hydropower Projects

Chen Yongru

ID: 440921199411240046

Abstract : This paper introduces the temperature control and crack prevention technology for large-volume concrete in water conservancy and hydropower projects, including the impact of factors such as cement hydration heat on the temperature field, current construction standards, and the technical challenges in temperature control. It discusses new technologies, such as finite element modeling and distributed optical fiber temperature measurement, along with methods like mix design optimization and temperature gradient control, emphasizing full-cycle management and future development directions.

Keywords : large volume concrete; temperature control and crack prevention; water conservancy and hydropower engineering

引言

水利水电工程中, 大体积混凝土温控防裂是关键问题。随着工程建设的发展, 相关技术不断演进。2021年发布的《水利工程建设标准强制性条文》对温控有明确要求, 为大体积混凝土施工提供了规范依据。水泥水化热、骨料热膨胀系数、混凝土徐变等因素影响温度场和应力, 同时施工面临多种特殊约束条件。温控技术包括冷却水管布置、分缝分块、养护工艺等, 但传统技术如预冷骨料和通水冷却存在瓶颈。为解决这些问题, 开发了热-力耦合仿真模型、分布式光纤测温技术等, 还探索了配合比优化方法、温度梯度分级控制标准等, 同时全周期工程管理实践体系下的各项措施也在不断完善和创新。

一、大体积混凝土温控防裂技术基础理论

(一) 材料热学特性与温度应力关系

水泥水化热是大体积混凝土内部温度升高的主要热源。水泥在水化过程中会释放大量热量, 导致混凝土内部温度迅速上升。由于混凝土的导热性能较差, 热量难以快速散发, 从而在混凝土内部形成温度梯度^[1]。骨料热膨胀系数对温度场也有重要影响。不同骨料的热膨胀系数不同, 当温度变化时, 骨料与水泥浆体之间会因热膨胀系数的差异产生变形不协调, 进而引发温度应力。混凝土的徐变特性同样不可忽视。徐变是指混凝土在长期荷载作

用下的变形随时间而增加的现象。在温度应力作用下, 混凝土的徐变会使应力得到一定程度的松弛, 从而影响温度场的分布和温度应力的分布。

(二) 水利水电工程特殊约束条件

在水利水电工程中, 大体积混凝土面临多种特殊约束条件。坝体几何特征是重要因素之一, 不同的坝体形状和尺寸会影响混凝土内部的温度分布和应力状态。例如, 较厚的坝体散热相对较慢, 容易产生较大的温度梯度^[2]。施工季节温差也对温度裂缝形成有显著影响, 夏季施工时, 外界温度较高, 混凝土入仓温度也高, 与内部散热产生的温差可能导致裂缝; 冬季施工则可能因混

凝土内外温差过大以及低温环境下混凝土性能变化而出现裂缝。基础约束条件同样不可忽视，坝体底部与基础相连，基础对坝体混凝土的变形产生约束，当混凝土因温度变化产生收缩或膨胀时，这种约束会引发应力集中，从而增加裂缝产生的可能性。

二、传统温控技术体系解析

（一）现行施工技术标准体系

在水利水电工程大体积混凝土施工中，现行施工技术标准体系对温控有明确规定。冷却水管布置方面，需考虑混凝土结构特点、热交换效率等因素，合理确定管径、间距和埋深，以有效带走混凝土内部热量^[9]。分缝分块原则依据结构受力、混凝土浇筑能力和温控要求制定，通过合理分缝分块，减少约束，降低温度应力。养护工艺上，强调早期保湿保温，如采用覆盖塑料薄膜、草帘等措施，减少混凝土表面水分蒸发和温度散失，确保混凝土强度增长过程中温度和湿度条件适宜，防止裂缝产生。

（二）技术应用瓶颈与工程事故分析

预冷骨料是传统温控技术中的重要环节，然而其可能因多种原因失效。例如，预冷设备故障或选型不当，可能无法达到预期的冷却效果^[4]。此外，操作流程不规范，如冷却时间、温度控制不准确，也会影响预冷效果。通水冷却同样存在问题，失控情况时有发生。一方面，冷却水管的布置不合理，可能导致水流不均匀，局部温度过高或过低。另一方面，通水流量和水温的控制难度较大，如果不能精确调节，将无法有效控制混凝土的温度。这些技术应用瓶颈可能引发工程事故，如混凝土开裂，严重影响水利水电工程的质量和安

三、多维度温控技术优化路径

（一）温度场精准调控技术

1. 数字化温度预测模型构建

开发基于有限元的热 - 力耦合仿真模型实现施工过程温度场动态模拟。利用有限元方法对大体积混凝土结构进行离散化处理，将其划分为多个单元，通过建立热传导方程、应力平衡方程以及本构关系，考虑混凝土的热学和力学特性随时间和温度的变化^[6]。同时，结合实际施工过程中的边界条件，如浇筑温度、环境温度、模板散热等因素，对模型进行准确的参数设定。通过求解热 - 力耦合方程组，得到不同施工阶段混凝土内部的温度场分布以及应力应变状态，从而为温度场的精准调控提供科学依据，有效预测可能出现的温度裂缝位置和发展趋势。

2. 智能温控设备创新应用

分布式光纤测温技术可实时监测大体积混凝土内部温度场^[6]。通过在混凝土内部合理布置光纤传感器，获取温度数据，为温度调控提供精准依据。自适应通水冷却系统则能根据温度监测结果自动调整通水流量和水温，实现高效冷却。将两者集成控制，可进一步优化温控效果。一方面，分布式光纤测温系统的精确数据能指导自适应通水冷却系统的运行参数调整，确保冷却过

程与混凝土实际温度变化相匹配。另一方面，自适应通水冷却系统的及时反馈也有助于验证和优化分布式光纤测温系统的布置和监测策略，从而实现多维度的温度场精准调控，提高大体积混凝土温控防裂技术水平。

（二）施工工艺综合创新

1. 新型补偿收缩混凝土配制技术

开发具有延迟膨胀特性的 MgO 微膨胀混凝土配合比优化方法是新型补偿收缩混凝土配制技术的关键。通过精确控制 MgO 的含量及活性，可调节混凝土的膨胀性能，使其在水化过程中产生适度膨胀以补偿收缩应力。同时，考虑水泥品种、细度及水化热等因素对混凝土性能的影响，合理选择水泥，优化其与 MgO 及其他外加剂的组合。此外，骨料的级配、粒径及含泥量等也至关重要，良好的骨料级配可提高混凝土的密实性和抗裂性。综合考虑各因素间的相互作用，运用先进的试验方法和分析手段，不断优化配合比，以提高混凝土的抗裂性能^[7]。

2. 全过程温度梯度控制工艺

在大体积混凝土施工中，从浇筑时序控制到后期养护建立温度梯度分级控制标准至关重要。浇筑过程中，需根据混凝土的配合比、浇筑速度和环境温度等因素，合理确定浇筑层厚和浇筑间隔时间，以控制混凝土内部温度上升速率^[8]。同时，在养护阶段，要依据不同阶段的温度要求，采取相应的养护措施。例如，在早期，可采用覆盖保温材料等方式减少热量散失，降低内外温差；在后期，根据温度变化情况适时调整养护措施，确保混凝土温度梯度在合理范围内，从而有效防止混凝土因温度应力而产生裂缝。

四、全周期工程管理实践体系

（一）技术决策支持系统

1. 多源信息融合决策平台

构建包含气象数据、实时监测、材料参数的智能决策模型，需融合多源信息。气象数据可提供温度、湿度等环境因素，对大体积混凝土温控至关重要^[9]。实时监测数据包括混凝土内部温度、应力等，能及时反馈实际情况。材料参数如水泥品种、配合比等影响混凝土性能。通过整合这些数据，利用数据分析和算法，建立智能决策模型。该模型可对混凝土温控防裂进行预测和决策支持，例如根据气象数据和材料参数预测混凝土温升值，结合实时监测数据调整温控措施，从而实现科学有效的温控防裂管理，提高水利水电工程质量。

2. 风险预警与应急响应机制

在全周期工程管理实践体系中，风险预警与应急响应机制至关重要。对于大体积混凝土温控防裂技术应用的水利水电工程，需建立基于温度应力阈值的三级预警响应制度。通过实时监测混凝土内部温度及应力变化，当达到不同阈值时触发相应等级的预警。在技术决策支持系统辅助下，分析预警数据，快速制定应对策略。这不仅能及时发现潜在的温控防裂风险，还能确保在风险发生初期采取有效的控制措施，避免裂缝的产生和扩展，保障工

程质量和安全^[10]。

（二）施工组织创新模式

1. 工序链协同管理机制

水利水电工程中，大体积混凝土温控防裂需从全链条考虑。混凝土生产环节，要精准把控原材料质量与配合比，确保混凝土性能稳定。运输过程中，需根据距离和时间，采取合适的保温或降温措施，保证混凝土入模温度符合要求。浇筑时，要合理安排浇筑顺序和速度，避免出现冷缝等问题。养护阶段，依据环境条件和混凝土特性，制定科学的养护方案，如覆盖保温材料、定时洒水等。通过对生产－运输－浇筑－养护全链条的进度协同控制，各工序紧密衔接，形成有机整体，有效提高混凝土质量，减少温控防裂风险，确保水利水电工程的质量和安全性。

2. 资源动态调度策略

在全周期工程管理实践体系下的施工组织创新模式中，资源动态调度策略至关重要。对于大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程而言，开发基于温度场演变的冷却水资源优化配置算法是关键。需深入研究温度场的变化规律，结合工程实际情况，建立精准的数学模型。通过对温度数据的实时监测与分析，动态调整冷却水资源的分配。同时，考虑不同施工阶段的需求差异，合理安排资源调度计划。要综合考虑工程进度、质量要求以及成本控制等多方面因素，确保冷却水资源的优化配置能够有效实现温控防裂目标，提高水利水电工程的质量和安全性。

（三）质量保障制度构建

1. 全过程文档追溯体系

建立涵盖原材料检测、施工参数、监测数据的三级档案管理制度。对于原材料检测档案，详细记录各类原材料的来源、质量检测报告、检验时间等信息，确保原材料质量可追溯。施工参数档案应包含混凝土配合比、浇筑温度、养护条件等关键参数，为施工过程提供准确依据。监测数据档案则要记录温控监测点的温

度变化、应力应变数据等，以便及时发现异常情况。通过这三级档案管理制度，实现对大体积混凝土温控防裂技术相关文档的全面追溯，为水利水电工程质量保障提供有力支持。

2. 参建方协同管控标准

在全周期工程管理实践体系的质量保障制度构建中，参建方协同管控标准至关重要。对于大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的应用，需明确设计、施工、监测三方责任矩阵。设计方应提供合理的温控设计方案，考虑混凝土的配合比、浇筑方式等对温度的影响。施工方需严格按照设计要求进行施工操作，确保温控措施的有效实施，如合理安排浇筑时间和速度等。监测方要实时监测混凝土内部温度变化，及时反馈数据。同时，建立信息共享规范，三方应及时、准确地传递相关信息，以便对温控防裂技术进行动态调整和优化，确保工程质量。

五、总结

大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中至关重要。通过对多个特高拱坝工程的研究，我们系统总结了温控技术创新成果的应用经验。这些经验为后续工程提供了宝贵的参考，有助于提高工程质量和安全性。

同时，我们也指出了未来的发展方向。基于数字孪生技术的全要素智能温控系统具有巨大的潜力。它可以实现对混凝土温度的实时监测和精准控制，提高温控效果。此外，工程质量保险制度的引入也将为工程提供更全面的保障。它可以激励各方积极参与工程质量管理，降低工程风险。

未来，我们需要进一步加强对温控防裂技术的研究和应用。通过不断创新和完善，提高技术水平，为水利水电工程的可持续发展提供有力支持。

参考文献

[1] 冒云瑞. 基于功能集料的大体积混凝土控温防裂技术 [D]. 东南大学, 2022.
[2] 张玲丽. 重力式锚碇结构大体积混凝土防裂控制技术研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
[3] 王明涛. 大体积混凝土智能温控系统研究与实现 [D]. 贵州大学, 2023.
[4] 何江伟. 铁路桥梁大体积混凝土施工与温控技术研究 [D]. 中国铁道科学研究院, 2023.
[5] 谢晓冬. 沉管隧道大体积混凝土的水化热分析与温控技术研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
[6] 李松辉, 张国新, 刘毅, 等. 大体积混凝土防裂智能监控技术及工程应用 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(01): 9–15.
[7] 张财会. 建筑工程大体积混凝土温控防裂施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(12): 45–46.
[8] 范轴. 一次性浇筑大体积混凝土底板温控防裂技术研究 [J]. 水利技术监督, 2022(8): 206–211.
[9] 黎锦钊. 清远二线船闸工程大体积混凝土施工期温控防裂研究 [J]. 水利科技与经济, 2022, 28(3): 126–129, 133.
[10] 姜峰. 水利工程大体积混凝土温控防裂技术 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(3): 191–193.

基于数字孪生的水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控方法

罗晓东

身份证号: 440921198811273539

DOI:10.61369/WCEST.2025020010

摘 要 : 介绍水利水电工程地下洞室群施工数字孪生技术, 包括五维模型及优势。阐述针对其施工的建模方法、多源异构数据融合方案、双环仿真框架等。还涉及进度偏差识别、综合评价函数、决策支持引擎等内容。并通过实例验证, 对比传统方法体现优势, 探讨成本模型与推广应用可行性, 总结创新成果及后续研究方向。

关 键 词 : 数字孪生; 地下洞室群; 施工进度管控

A Method for Accurate Control of Construction Progress of Underground Caverns in Water Conservancy and Hydropower Projects Based on Digital Twin

Luo Xiaodong

ID: 440921198811273539

Abstract : This paper introduces the digital twin technology for constructing underground cavern clusters in water conservancy and hydropower projects, including five-dimensional models and their advantages. It discusses modeling methods, multi-source heterogeneous data fusion strategies, and a dual-loop simulation framework for construction. The paper also covers issues such as progress deviation identification, comprehensive evaluation functions, and decision support engines. Through case studies, it highlights the advantages of this technology over traditional methods, explores the feasibility of cost models and their application, and summarizes the innovative outcomes and future research directions.

Keywords : digital twin; underground cavern group; construction schedule control

引言

随着我国水利水电工程建设的不断推进, 对施工进度精准管控的要求日益提高。2021年发布的《关于加快推进水利工程建设高质量发展的指导意见》强调了利用先进技术提升工程建设质量和效率的重要性。数字孪生技术作为一种新兴的数字化手段, 在水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控中具有重要应用价值。其技术体系架构涵盖物理实体、虚拟模型等多维度, 能够应对地下洞室群施工的复杂特点。通过 BIM+GIS 融合建模、多源异构数据融合等方法, 可实现对施工过程的精确模拟和有效管控, 同时在进度偏差识别、综合评价及决策支持等方面也具有显著优势, 为水利水电工程施工进度管理带来新的思路和方法。

一、数字孪生技术理论基础与工程适用性分析

(一) 数字孪生技术体系架构

数字孪生技术体系架构包含物理实体、虚拟模型、服务系统、孪生数据和连接交互五维模型。物理实体是现实中的对象, 虚拟模型是其数字化映射。服务系统为虚拟模型和物理实体提供各种功能支持。孪生数据是两者交互产生的数据, 连接交互则确保了物理空间与信息空间的动态耦合。这种动态耦合机制使得数字孪生能够实时反映物理实体的状态, 并在多维施工要素表征中具有显著优势。它可以精确地模拟施工过程中的各种复杂情况, 为施工进度的精准管控提供有力依据, 有助于提高水利水电工程

地下洞室群施工的效率和质量^[1]。

(二) 地下洞室群工程特性与孪生应用适配度

地下洞室群工程具有多工作面并行、时空约束交织、资源冲突频发等特点。多工作面并行使得施工过程复杂多样, 增加了管理难度。时空约束交织, 如不同洞室的开挖顺序、支护时间等存在严格的时空限制, 影响施工进度。资源冲突频发, 包括人力、设备等资源在不同工作面的分配不均。从隐蔽工程可视化维度, 数字孪生可将地下不可见的工程结构和施工过程呈现出来, 有助于及时发现问题^[2]。从施工逻辑数字化维度, 能将复杂的施工逻辑进行梳理和数字化表达, 更好地规划施工顺序。从进度推演迭代化维度, 可根据实际情况不断调整和优化施工进度计划。

二、地下洞室群施工数字孪生建模方法

（一）多尺度几何建模与语义增强

针对水利水电工程地下洞室群施工数字孪生建模的需求，重点研究 BIM+GIS 融合的多尺度几何建模与语义增强方法。利用 BIM 的高精度几何建模能力和 GIS 的空间分析优势，实现地下洞室群的三维精确呈现^[3]。通过建立基于施工 WBS 的构件级语义标注规则，对洞室群的各个构件赋予准确的语义信息，便于施工过程中的信息管理和查询。同时，为施工机械、人员等动态要素建立参数化表达模型，能够实时反映其在施工过程中的状态变化，为施工进度精准管控提供有力支持。这种多尺度几何建模与语义增强方法，有效提升了地下洞室群施工数字孪生模型的准确性和实用性。

（二）多源异构数据融合机制

为实现多源异构数据融合，需设计标准化接入方案。针对物联网监测数据（如地应力、变形量测）、进度报验数据以及环境感知数据，建立统一的接入标准，确保数据的准确性和一致性^[4]。在此基础上，构建基于本体的数据关联模型，通过对不同数据源的语义理解和逻辑关系梳理，实现数据间的有效关联。同时，设计质量校验算法，对融合后的数据进行质量检测，剔除异常数据，保证数据的可靠性，为地下洞室群施工数字孪生建模提供高质量的数据基础。

三、数字孪生驱动的进度管控体系构建

（一）施工进度动态仿真方法

1. 离散事件-系统动力学混合仿真模型

建立考虑资源供应随机性、地质条件不确定性的双环仿真框架，将离散事件与系统动力学相结合。通过对施工过程中各种事件的离散模拟以及对系统动态行为的分析，能够更准确地反映实际施工情况。在这个框架下，研究工序延误传播机理，分析工序之间的相互影响以及延误如何在不同工序间传递。同时，关注关键路径的动态演变规律，随着施工的进行以及各种不确定因素的影响，关键路径可能会发生变化，通过仿真模型揭示这种变化规律，为施工进度的精准管控提供理论支持^[5]。

2. 虚实交互的进度偏差预警

基于孪生数据比对分析进度偏差识别方法，是通过对比实际施工数据与数字孪生模型中的预期数据进行对比。利用两者之间的差异来精准定位进度偏差点^[6]。在此基础上，开发基于时间序列相似度的早期预警指标体系。通过分析时间序列上的数据特征相似性，量化进度偏差的程度和趋势，从而及时发出预警信号。同时，制定分级响应策略。针对不同程度的进度偏差，采取相应的措施，确保施工进度能够得到有效的管控和调整，保障水利水电工程地下洞室群施工的顺利进行。

（二）进度优化决策支持方法

1. 多目标动态调度模型

构建工期-成本-安全综合评价函数，综合考虑各因素对工

程进度的影响。工期方面，结合施工计划与实际进展，准确评估时间偏差；成本涉及人力、物力及设备等资源投入；安全因素包括施工环境风险及人员操作规范等。同时，设计考虑设备周转效率与劳动力弹性的改进型 NSGA-II 优化算法。设备周转效率影响施工连续性，通过合理安排设备调度提高利用率。劳动力弹性则根据工程进度需求灵活调整人员配置，提高劳动效率。该算法能有效求解多目标动态调度模型，为进度优化决策提供支持^[7]。

2. 知识增强的决策推理机制

集成施工规范知识图谱与历史案例库，开发基于案例推理（CBR）与规则推理（RBR）的混合决策支持引擎^[8]。通过知识图谱对施工规范知识进行结构化表示，为决策提供准确的知识基础。同时，利用历史案例库中的相似案例，基于 CBR 方法快速获取可能的解决方案。结合 RBR 方法，依据施工规范中的规则对这些方案进行进一步筛选和优化。这种混合决策支持引擎能够充分利用知识和经验，为水利水电工程地下洞室群施工进度优化决策提供有力支持，提高决策的准确性和效率。

四、工程应用与验证分析

（一）工程背景与实施路径

1. 典型抽水蓄能电站案例概况

选取某典型抽水蓄能电站地下厂房洞室群进行研究。该工程地质条件复杂，岩石特性、地质构造等因素给施工带来诸多挑战^[9]。施工组织设计需综合考虑洞室布局、施工顺序、施工方法及资源配置等。在进度管理方面，由于地下洞室群施工工序繁多且相互关联，如开挖、支护、衬砌等，任何一个环节延误都可能影响整体进度，因此存在诸多重难点。需精准把握各工序的时间节点和逻辑关系，同时应对地质条件变化等不确定因素对进度的干扰，以实现施工进度的有效管控。

2. 数字孪生系统部署方案

在数字孪生系统部署方案中，硬件感知层部署是关键。需合理设置传感器，以获取地下洞室群施工相关数据，如应力、应变等^[10]。数据传输协议确保数据准确、高效传输，采用合适的协议可避免数据丢失和错误。模型轻量化处理能提高系统运行效率，对复杂的地下洞室群模型进行简化，在保证精度的同时降低计算资源需求。通过这些关键技术的实施，数字孪生系统能够更好地模拟地下洞室群施工过程，为施工进度精准管控提供有力支持。

（二）进度管控效果评估

1. 仿真精度验证

通过历史施工数据回溯仿真来验证仿真精度。采用平均绝对百分比误差（MAPE）指标对进度预测准确性进行定量评价。MAPE 指标能够综合考虑预测值与实际值之间的偏差程度，通过计算预测进度与实际进度的差异占实际进度的百分比，得到一个直观反映预测精度的数值。在水利水电工程地下洞室群施工中，将实际施工过程中的各项进度数据与基于数字孪生技术的预测数据进行对比分析，运用 MAPE 指标衡量两者的偏离程度，从而有效评估该进度管控方法在仿真精度方面的表现，为进一步优化和

改进提供依据。

2.管理效能提升分析

对比传统甘特图管理方式，基于数字孪生的管控方法在多方面展现出优势。在响应速度上，数字孪生技术能实时获取地下洞室群施工中的各类数据，快速分析并反馈问题，相比之下，甘特图难以及时反映实际进度变化。资源利用率方面，数字孪生可精准模拟施工过程，优化资源配置，避免资源闲置或过度使用，而甘特图在资源管理上较为粗放。计划符合率上，数字孪生通过对施工环境和进度的实时监测与调整，能更好地保证实际进度与计划相符，甘特图则因缺乏动态调整能力，计划符合率相对较低。

（三）技术推广可行性研究

1.技术经济性评价

构建全生命周期成本模型，需综合考虑硬件采购、软件研发、人员培训、系统维护等各项成本。同时，分析系统部署边际成本与工期压缩效益的投入产出关系至关重要。随着系统部署的深入，边际成本可能呈现不同的变化趋势。若边际成本增加但带来的工期压缩效益更为显著，从整体经济性角度可能是可行的。通过量化分析这种关系，可确定最佳的系统部署方案，以实现成本效益的最大化。这不仅有助于合理安排资源，提高工程经济效益，还能为技术的推广应用提供有力的经济支撑，增强其在水利水电工程领域的可行性和竞争力。

2.行业适配度分析

在水利水电工程行业中，数字孪生技术的推广应用具有较高

的可行性和适配度。从标准规范衔接角度，随着行业数字化发展，相关规范逐渐完善，为数字孪生技术应用提供了制度保障。施工企业数字化基础不断增强，大量企业已引入先进的数字化设备和软件，具备了应用数字孪生技术的硬件和软件条件。同时，在技术复合型人才储备方面，高校和企业都在积极培养既懂水利水电专业知识又掌握数字孪生技术的人才，为技术推广提供了人力支持。这些都表明数字孪生技术在水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控中，无论是从行业环境还是企业自身条件来看，都具有良好的适配性和推广应用的可行性。

五、总结

基于数字孪生的水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控方法在多方面取得创新成果。在模型构建上，实现了对复杂地下洞室群的精准呈现；算法设计方面，为施工进度管控提供了高效的计算方法；系统集成上，提升了整体管控的协同性与准确性。后续研究应聚焦边缘计算赋能实时仿真以及群体智能辅助决策等方向，以进一步提升管控的实时性与智能性。同时，结合新型基础设施建设背景，数字孪生与建筑产业互联网平台的融合发展具有广阔前景。这将为水利水电工程地下洞室群施工进度管控带来新的机遇与挑战，有望实现更加高效、精准的施工进度管理，推动行业的数字化转型与发展。

参考文献

[1] 宋强. 复杂环境下地下洞室群施工风险评估及防控措施研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
[2] 矫悦悦. 基于数字孪生的地铁施工安全风险预测与智能管控 [D]. 北京工业大学, 2022.
[3] 陈以超. 大断面地下洞室群围岩破坏判据及应用 [D]. 青岛理工大学, 2023.
[4] 齐发. 基于 ILHS 的非贯通随机节理影响的地下洞室群动力稳定分析 [D]. 天津大学, 2022.
[5] 杨爽. 城市地下洞室群施工围岩稳定性研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
[6] 赵梦琦, 余佳, 任炳昱, 等. 地下洞室群施工进度纠偏的 SD-DES 模型 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 112-123.
[7] 蔡久顺. 国际某大型水电工程地下洞室群通风布置 [J]. 电力勘测设计, 2021(3): 5-10.
[8] 胡兴, 刘检华, 庄存波, 等. 基于数字孪生的复杂产品装配过程管控方法与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 642-653.
[9] 马靖, 王泽晨, 赵明, 等. 基于数字孪生的生产单元可视化管控 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1256-1268.
[10] 郝博, 王明阳, 王建新, 等. 基于数字孪生的智能装配车间管控模式 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1): 157-163.

水利水电工程施工技术管理：提升工程质量的关键路径

范庭愉

身份证号：440921199102072149

DOI:10.61369/WCEST.2025020012

摘 要： 阐述水利水电工程施工技术管理的重要性，包括组织结构、标准规范应用等方面。指出管理现存问题，如机制不健全等。介绍管理体系构建，如组织架构优化、数字化系统等。还涉及围堰、基础处理等工程技术及人才培养、激励机制等内容，强调持续创新以提升工程质量。

关 键 词： 水利水电；施工技术管理；工程质量

Construction Technology Management of Water Conservancy and Hydropower Projects: The Key Path to Improve Project Quality

Fan Tingyu

ID: 440921199102072149

Abstract： This article highlights the importance of technical management in water conservancy and hydropower construction, covering aspects such as organizational structure and the application of standards and norms. It identifies existing issues in management, such as an incomplete mechanism. The article also introduces the establishment of a management system, including the optimization of organizational structures and the implementation of digital systems. Additionally, it discusses engineering technologies like cofferdams and foundation treatment, as well as talent development and incentive mechanisms, emphasizing the importance of continuous innovation to enhance project quality.

Keywords： water conservancy and hydropower; construction technology management; project quality

引言

水利水电工程施工技术管理对于工程质量和效益至关重要。近年来，随着相关政策的不断推进，如2020年发布的《关于加强水利工程建设质量管理的若干意见》，强调了工程质量管理的重要性和规范要求。在此背景下，水利水电工程施工技术管理在组织结构、标准规范应用、管理模式等方面虽有一定基础，但仍存在诸多问题，包括管理机制不健全、技术交底不彻底、过程监控不到位等。同时，在管理体系构建、信息化管理平台建设、各关键工程环节以及人才培养、激励机制、风险识别、应急预案优化和标准体系完善等方面都面临着系列挑战和发展方向，需要深入探讨和研究以提升工程质量，促进行业可持续发展。

一、水利水电工程施工技术管理现状分析

（一）当前工程施工技术管理实施概况

水利水电工程施工技术管理是确保工程质量和效益的关键。在组织结构方面，通常设有专门的技术管理部门，负责制定技术方案、监督施工过程等，但不同项目可能因规模和复杂程度存在差异^[1]。标准规范应用上，大部分工程能遵循国家和行业相关标准，但在一些细节方面可能存在执行不到位的情况。例如，某些施工环节对质量验收标准的把握不够准确。典型管理模式包括项目法人负责制、招投标制等，这些模式在不同程度上促进了施工技术管理的规范化。然而，实际操作中可能会受到各种因素干

扰，如人为因素、环境因素等，影响管理效果的充分发挥。

（二）技术管理现存突出问题

水利水电工程施工技术管理现存突出问题较多。管理机制不健全是关键问题之一，缺乏完善的制度规范技术管理流程，导致各环节衔接不畅，责任不明确^[2]。技术交底不彻底也对工程质量产生影响，施工人员无法全面准确了解施工技术要求 and 标准，在操作过程中容易出现失误。过程监控不到位同样不容忽视，难以实时掌握施工技术应用情况，不能及时发现和纠正技术偏差，给工程质量埋下隐患。这些问题相互交织，严重制约了水利水电工程施工技术管理水平的提升，进而影响工程质量。

二、水利水电工程技术管理体系构建

（一）管理组织架构优化设计

水利水电工程技术管理体系构建中管理组织架构优化设计至关重要。应建立项目指挥部 - 技术管理部 - 专业工程师三级垂直管理架构及协调机制。项目指挥部负责整体工程技术管理的决策与统筹，对重大技术问题把控^[3]。技术管理部作为中间层级，承担上传下达的职责，将指挥部的决策细化并传达给专业工程师，同时收集工程中的技术反馈。专业工程师则专注于具体的技术操作与实施，确保各项技术指标符合要求。通过这种三级架构，能够明确各层级的职责与权限，提高技术管理的效率与准确性，保障水利水电工程的顺利进行。

（二）全过程信息化管理平台

构建涵盖设计文件管理、技术交底可视化、施工参数实时监测的数字化管理系统是水利水电工程技术管理体系中全过程信息化管理平台的重要内容。在设计文件管理方面，利用数字化技术实现文件的分类存储、快速检索和版本控制，确保设计文件的准确性和完整性^[4]。技术交底可视化则借助多媒体手段，将抽象的技术要求以直观的图像、视频等形式呈现给施工人员，提高交底效果。对于施工参数实时监测，通过传感器等设备采集数据，并实时传输到管理平台，以便及时发现异常情况并采取措施，保障施工质量和安全。

三、关键施工技术质量管控路径

（一）主体结构施工技术控制

1. 围堰工程与基础处理技术

围堰工程是水利水电工程施工中的重要临时工程，其质量直接影响主体工程的安全和进度。围堰的设计需根据工程实际情况，考虑水位、水流、地质等因素，确保其稳定性和防渗性。在施工过程中，要严格控制围堰的填筑质量，包括土料的选择、压实度的控制等^[5]。基础处理技术对于水利水电工程至关重要。不同的地质条件需要采用不同的基础处理方法，如强夯法、灌浆法等。基础处理过程中，要对处理效果进行严格检测，确保地基承载力、防渗性能等满足设计要求，为主体结构施工提供坚实的基础。

2. 混凝土浇筑质量保障

混凝土浇筑质量是水利水电工程主体结构施工的关键。为保障浇筑质量，需从多方面进行严格控制。在原材料选择上，要确保水泥、砂石等符合质量标准，其性能指标直接影响混凝土的强度和耐久性^[6]。配合比设计应科学合理，根据工程实际需求确定各成分比例，以满足不同部位的强度和工作性要求。在浇筑过程中，要控制浇筑速度和高度，避免混凝土离析。同时，要确保振捣密实，使混凝土内部无空隙，提高其密实度和强度。浇筑后的养护也至关重要，要保持适宜的温度和湿度，防止混凝土因温度

变化或水分散失过快而产生裂缝，影响工程质量。

（二）机电安装技术管理

1. 水轮机安装精度控制

建立轴线校正三维定位体系及安装精度动态评估方法是水轮机安装精度控制的关键。通过先进的测量技术构建三维定位体系，精确确定水轮机各部件的空间位置^[7]。该体系能够实时监测安装过程中的偏差，为调整提供准确依据。同时，安装精度动态评估方法可对安装质量进行实时评估，综合考虑各部件的安装精度指标，及时发现潜在问题。这种动态评估不仅能确保当前安装符合要求，还能为后续安装提供参考，保障整个水轮机安装精度达到高标准，从而提高水轮机的运行效率和稳定性。

2. 电气设备调试规范

电气设备调试规范对于机电安装技术管理至关重要。应制定电气自动化系统联调联试标准化作业流程，明确各环节操作规范，确保调试工作有序进行。同时，建立参数校核标准，对设备运行参数进行严格核对，保证其准确性和稳定性。在调试过程中，需对电气设备的各项性能指标进行全面检测，包括电压、电流、功率等，及时发现并解决潜在问题。通过严格遵循这些规范，可有效提高电气设备调试质量，保障机电安装工程的整体质量和运行效果^[8]。

四、施工技术管理优化策略

（一）复合型技术人才培养机制

1. 岗位能力矩阵构建

水利水电工程施工技术管理是提升工程质量的关键路径，复合型技术人才培养机制下的岗位能力矩阵构建至关重要。其中，设计施工员 - 技术主管 - 总工程师的分级能力指标体系是核心内容。对于施工员，需具备扎实的基础施工技术知识和操作能力，能准确执行施工计划^[9]。技术主管要在施工员能力基础上，掌握施工技术管理方法，具备解决复杂技术问题的能力。总工程师则要从全局把控，拥有深厚的技术理论功底，能进行技术创新和决策，引领工程技术方向，确保施工技术管理的高效与优质。

2. 多元激励机制设计

在水利水电工程施工技术管理中，构建多元激励机制至关重要。一方面，需建立技术攻关奖励制度，对在施工技术难题解决上有突出贡献的团队或个人给予物质奖励，如奖金、奖品等，同时给予精神激励，如荣誉证书、公开表彰等，激发技术创新的积极性^[10]。另一方面，要将奖励制度与职业发展通道相耦合。为技术人员提供清晰的晋升路径，例如，在技术攻关中表现优秀的人员可获得优先晋升机会，或者在职称评定时给予加分等优惠政策。通过这种耦合机制，使技术人员既能在物质和精神上得到满足，又能看到自身职业发展的希望，从而全身心投入到施工技术管理工作中，为提升工程质量贡献力量。

（二）施工风险预警体系

1. 风险因素识别方法

开发基于 BIM 技术的工程风险可视化识别系统是风险因素识别的重要方法。BIM 技术具有强大的信息集成和可视化功能。通过建立水利水电工程的 BIM 模型，能够整合工程的各种数据信息，包括地质结构、建筑物结构、施工工艺等。在这个模型中，可以直观地对工程可能存在的风险因素进行识别。例如，通过分析地质结构信息，可识别出可能存在的滑坡、塌方等地质风险；依据建筑物结构信息，能找出结构薄弱部位可能面临的风险。同时，利用 BIM 的动态模拟功能，还可对施工过程进行模拟，提前发现施工过程中可能出现的风险因素，如施工顺序不合理导致的碰撞风险等，从而为风险预警提供有力支持。

2. 应急预案优化路径

建立分级响应机制是应急预案优化的重要举措。根据风险的严重程度和可能造成的影响，划分不同的响应级别，明确各层级在应急处理中的职责和行动流程。这样能确保在面对突发事件时，资源得到合理调配，响应迅速且有效。同时，构建数字化应急演练平台也至关重要。利用虚拟现实、模拟仿真等技术，模拟各种可能的施工风险场景，让施工人员在虚拟环境中进行应急演练。这不仅能提高施工人员对应急预案的熟悉程度和应急处理能力，还能通过对演练数据的分析，不断完善应急预案，使其更具科学性和实用性，从而提升水利水电工程施工的整体安全性和可靠性。

（三）标准化管理体系建设

1. 技术规程动态更新机制

构建行业标准 - 企业工法 - 项目细则三位一体的标准体系，需建立技术规程动态更新机制。行业标准应基于最新科研成果与实践经验定期修订，确保其科学性与权威性。企业工法要结合自身技术优势与项目特点不断优化，使其更具针对性和可操作性。

项目细则则根据具体工程情况及时调整，保证施工技术符合实际需求。同时，建立信息反馈渠道，收集施工过程中的问题与建议，为技术规程更新提供依据。加强与科研机构、高校合作，引入前沿技术理念，促进技术规程与时俱进，保障施工技术管理的标准化与高效化。

2. 质量追溯系统设计

在水利水电工程施工技术管理的优化策略中，质量追溯系统设计至关重要。基于区块链技术构建全生命周期质量信息溯源管理系统，利用区块链的分布式账本、不可篡改和加密特性，确保施工过程中每一个环节的质量信息真实可靠且可追溯。从原材料采购环节开始，记录其来源、质量检验报告等信息，在施工过程中，对每一道工序的施工人员、施工时间、施工工艺以及质量检测结果等详细数据进行实时上传和记录。通过这样的系统设计，不仅可以在出现质量问题时迅速定位问题源头，采取有效的整改措施，还能对施工各方形成有效的质量监督和约束机制，从而提升整个水利水电工程的质量。

五、总结

水利水电工程施工技术管理是提升工程质量的关键。通过构建技术管理体系，总结实践成效，为工程质量提供了坚实保障。同时，智能监测、BIM+GIS 集成管理等技术发展方向的提出，为工程管理带来了新的思路和方法。这些技术的应用能够更有效地监测工程进展、优化工程设计和施工流程，提高工程质量和效率。未来，应持续推动技术创新与管理创新双轮驱动，不断完善技术管理体系，加强新技术的应用和推广，以适应水利水电工程日益复杂的施工环境和更高的质量要求，确保工程质量的稳步提升，促进水利水电行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 肖蕾. 联合体 EPC 项目相关主体工程质量提升行为研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- [2] 宋邦宏. 蚌埠市城市污水管网提升改造工程的质量风险评估研究 [D]. 安徽理工大学, 2023.
- [3] 王鹏. EPC 工程质量治理机制研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- [4] 陈湛宁. 整体性治理视角下沿海港口工程质量政府监管的优化路径研究 —— 以广东省 Z 市为例 [D]. 广西大学, 2023.
- [5] 孙慧. H 地区建设工程质量政府监督问题及对策研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 张莉. 浅析市政建筑工程质量与施工技术管理路径 [J]. 建筑·建材·装饰, 2021(17): 34-35.
- [7] 何建伟. 市政建筑工程质量与施工技术管理的措施研究 [J]. 建材发展导向 (下), 2021, 19(1): 374-375.
- [8] 刘文兵. 探析建筑工程质量与施工技术管理工作 [J]. 砖瓦世界, 2023(14): 130-132.
- [9] 曾德升. 水利水电工程施工技术管理研究 [J]. 价值工程, 2021, 40(23): 54-56.
- [10] 钟瑜, 谢舒成. 加强水利水电工程质量管理的策略探究 [J]. 四川水利, 2023, 44(5): 169-172.

高压开关柜断路器拒动故障的成因分析与 二次保护联动实验验证

任志鹏

宁夏回族自治区红寺堡扬水管理处, 宁夏 中宁 755100

DOI:10.61369/WCEST.2025020015

摘 要 : 本文聚焦高压开关柜断路器拒动故障, 旨在分析其成因并通过二次保护联动实验进行验证。实验平台由模拟故障发生系统、二次保护与控制单元、一次设备模拟模块及数据监测中心构成, 采用多维度工况模拟方案, 涵盖基础功能、极限性能及特殊工况测试, 并通过多参数、高精度监测体系采集数据。研究明确了机械卡涩、电源波动等关键薄弱环节, 为高压开关柜断路器拒动故障的预防与系统优化提供了数据支撑。

关 键 词 : 高压开关柜; 断路器; 拒动故障; 成因分析

Cause Analysis of Refusal Fault of High-Voltage Switchgear Circuit Breaker and Experimental Verification of Secondary Protection Linkage

Ren Zhipeng

Hongsiipu Water Lifting Management Office, Ningxia Hui Autonomous Region, Zhongning, Ningxia 755100

Abstract : This article focuses on the refusal fault of high-voltage switchgear circuit breakers, aiming to analyze its causes and verify them through secondary protection linkage experiments. The experimental platform consists of a simulated fault occurrence system, a secondary protection and control unit, a primary equipment simulation module, and a data monitoring center. It adopts a multi-dimensional working condition simulation scheme, covering basic functions, limit performance, and special working condition tests. Data is collected through a multi-parameter, high-precision monitoring system. The research has identified key weak links such as mechanical jamming and power fluctuations, providing data support for the prevention and system optimization of high-voltage switchgear circuit breaker refusal faults.

Keywords : high-voltage switchgear; circuit breaker; refusal fault; cause analysis

引言

断路器拒动故障, 即无法按指令完成分合闸动作, 是威胁电力系统安全的重大隐患, 可能导致故障范围扩大、设备损毁甚至大面积停电等严重后果。当前研究表明, 拒动故障的发生不仅与一次设备本体的机械磨损、性能劣化相关, 还与二次回路的指令传输异常、保护装置的逻辑判断失误以及操作维护的规范性密切相关。本文聚焦高压开关柜断路器拒动故障, 从一次设备本体、二次回路、操作与维护等维度剖析故障成因, 明确各环节的关键影响因素; 在此基础上, 设计二次保护联动实验, 通过搭建 “模拟 - 控制 - 监测” 一体化平台, 模拟各类典型故障工况, 系统测试保护系统的响应特性与联动协调性; 最终结合实验数据, 量化分析不同故障类型的影响权重与关联关系, 为断路器拒动故障的精准防控与系统优化提供理论依据和实验支撑。

一、断路器拒动故障的成因分析

(一) 一次设备本体原因

之所以会出现故障问题, 原因包括两种, 第一种传统系统操动机构故障, 脱扣失灵、轴销松断、卡涩、分合闸铁芯松动、位移损坏、部位变形、机构卡涩都是常见的表现^[1]。一次设备本体缺陷是断路器拒动的核心因素之一, 故障根源集中在机械结构与

核心部件性能劣化。操作机构作为分合闸动力源, 易发生故障, 弹簧操动机构可能因弹簧疲劳、变形或断裂导致储能不足, 或因齿轮啮合处润滑不良、积污、磨损引发卡涩; 液压操动机构常因密封圈老化漏油、液压泵故障或油路堵塞导致压力不足; 电磁操动机构可能因铁芯锈蚀、卡阻或合闸线圈过载烧毁而动力缺失。灭弧室性能异常也会引发拒动, 如真空断路器灭弧室真空度下降导致触头熔焊, SF6 断路器灭弧室气体泄漏触头气压闭锁。此

外，传动连杆、拐臂等机械部件磨损、变形、松动，以及触头系统烧蚀变形、粘连、行程调整不当，都会直接阻碍分合闸动作。

（二）二次回路原因

二次回路作为断路器操作指令的传输与控制中枢，其故障会直接阻断分合闸指令的有效执行。控制电源异常是常见诱因，例如直流电源电压过低，无法满足分合闸线圈的动作电压要求，导致线圈驱动力不足；直流系统发生接地故障时，可能引发控制回路误动或熔断器熔断，使回路供电中断。分合闸线圈作为二次回路与一次机构的连接节点，其可靠性至关重要，线圈匝间短路会导致输出功率下降，无法驱动机构动作；线圈引线接头松动或断线则会造成回路开路，指令无法传递。控制回路中的继电器、接触器等元件故障也会导致拒动。继电器触点因氧化、烧蚀出现接触不良，或衔铁卡涩无法吸合，会使指令在传递过程中中断；接触器的主触点粘连则可能导致分闸指令失效^[2]。回路接线的可靠性同样关键，接线端子因振动松动、腐蚀或过热氧化，会造成接触电阻增大甚至断线；电缆绝缘层破损引发的短路或接地故障，会使回路电流异常，触发保护装置动作切断电源。辅助开关作为反映断路器位置状态的关键元件，若其触点切换不到位或接触不良，会导致控制回路无法形成完整通路，例如合闸后辅助开关未能及时切换，可能使合闸线圈长期带电烧毁，同时阻断分闸回路。

二、二次保护联动实验设计

（一）实验目的与原则

二次保护联动实验是验证高压开关柜断路器保护系统可靠性的核心手段，设计需围绕电力系统安全运行需求明确目标与准则^[3]。实验目的有三：一是验证保护逻辑有效性，检验保护装置对各类故障的识别及及时触发分闸的能力；二是测试联动机制协调性，考察二次回路与一次设备的响应匹配度；三是评估系统极限性能，测试极端工况下的抗干扰能力与动作稳定性。实验设计遵循四项原则，安全性原则，需设完善安全联锁并控制实验能量；真实性原则，要求实验场景贴近实际，参数和信号波形与真实故障一致；系统性原则，要覆盖保护系统全环节；可重复性原则，需有标准化流程，通过多次重复实验确保数据可靠。

（二）实验平台搭建

实验平台搭建需构建“模拟－控制－监测”三位一体闭环系统，核心包括模拟故障发生系统、二次保护与控制单元、一次设备模拟模块及数据监测中心。

模拟故障发生系统作为“信号源”，由调压器、电流发生器等组成，可输出模拟故障电流和电压信号，参数通过 PLC 调节，还配备干扰发生器模拟电磁干扰^[4]。二次保护与控制单元与实际开关柜配置一致，含保护继电器、直流电源系统等，能实时上传保护指令。一次设备模拟模块采用缩小比例的断路器操作机构，机械特性与真实设备一致，通过传感器反馈状态。数据监测中心由高速采集设备等组成，可同步采集多类信号，采样频率不低于 10kHz。平台采用分区布局，物理隔离各区域，减少电磁干扰。

（三）实验方案设计

实验方案通过多维度工况模拟覆盖二次保护联动关键场景，分基础功能、极限性能、特殊工况三类测试^[5]。基础功能测试含故障类型模拟与操作指令验证，前者调节故障发生器参数，模拟三相短路和单相接地故障，记录动作时间、指令准确性等；后者通过手动与自动两种方式触发分合闸，对比动作一致性，检查辅助开关触点切换。极限性能测试包括电源波动测试和负载特性测试^[6]。特殊工况测试有电磁兼容测试和环境适应性测试。实验遵循“单因素变量法”，每次仅变一个参数，3 次重复测试取平均值，测试前做预实验和“空白对照”。

（四）数据采集与测量方案

数据采集与测量需构建多参数、高精度监测体系，覆盖保护联动全链条。核心测量参数分三类：电气参数、机械参数、状态信号。数据采集系统采用分布式架构，满足同步性与高精度要求^[7]。各参数通过相应传感器采集并实时上传，采集设备需时间同步。测量方案针对关键节点设专项监测点，实验中生成实时数据报表，数据存储处理采用标准化格式，经软件处理后形成含多种图表的实验报告，为保护系统优化提供量化依据。

三、实验结果与分析

（一）一次设备原因模拟实验结果

在一次设备原因模拟实验中，复现并测试了操作机构、灭弧室及传动部件的典型故障^[8]。操作机构机械卡涩影响显著，弹簧操动机构齿轮啮合处积污，30 次分合闸测试中 8 次合闸延迟、3 次完全拒动，分闸线圈电流峰值升 15%–20%，显示机构阻力增大会致线圈过载；液压操动机构泄漏，分闸时间从 60ms 延至 120ms，触头行程减 15%，触发灭弧失败告警。灭弧室故障中，真空断路器真空度降至 10^{-2} Pa，10 次短路分闸测试 2 次触头粘连，分闸线圈持续通电致烧毁；SF₆ 断路器气体泄漏，触发气压闭锁，分合闸指令无效，二次回路反馈“气压低”信号。传动部件故障方面，连杆 1.5° 弯曲，30 次测试动作时间标准差从 2ms 增至 8ms，5 次触头接触不良；触头烧蚀（0.5mm 蚀坑）致合闸弹跳最长 8ms，超国标 3ms 上限，易引发二次回路误判。

（二）二次回路原因模拟实验结果

二次回路故障模拟实验聚焦控制电源、线圈及接线可靠性，结果呈现出明显的故障关联性^[9]。控制电源电压波动测试中，当直流电压降至额定值的 80%，分合闸线圈动作成功率下降至 75%，线圈电流峰值降低 20%，且动作时间延长 10–15ms；电压升至 120%（240V）时，线圈温升速率加快，连续 10 次合闸后线圈温度达 85℃，超过绝缘耐热等级（70℃），存在绝缘老化风险。分合闸线圈故障模拟中，匝间短路导致线圈输出力下降 30%，在 20 次分闸测试中出现 5 次拒动，同时监测到线圈电阻从正常的 5Ω 降至 3.8Ω ，控制回路电压波形出现明显畸变。线圈引线松动时，分闸指令传递延迟显著，指令发出到线圈带电的间隔时间从正常的 2ms 增至 15ms，且伴随 3 次间歇性动作失败。接线端子故障测试显示，模拟端子腐蚀使接触电阻从 $50m\Omega$ 增

至 $500\text{m}\Omega$ ，导致二次回路压降增大，保护装置采样电流误差达 8%，在过流保护测试中出现 2 次保护延时。电缆绝缘破损模拟引发控制回路接地故障，30s 内触发直流系统绝缘监察装置报警，同时导致分闸回路熔断器（2A）熔断 2 次，验证了接地故障的危害性。

（三）保护装置故障模拟实验结果

保护装置故障模拟实验重点测试了采样精度、逻辑判断及指令输出环节。采样回路故障中，电流互感器二次侧断线导致保护装置测量电流为零，在模拟短路故障时，装置未触发速断保护，持续 2s 后由上级保护动作，验证了 CT 断线闭锁功能的必要性^[10]。电压互感器失压模拟时，保护装置正确发出“失压告警”，但零序保护灵敏度下降，在 5A 零序电流下延迟 100ms 动作，说明电压信号缺失对保护逻辑存在干扰。保护装置逻辑错误模拟导致动作时间离散性异常，相同故障电流下（800A），10 次测试的动作时间在 150–350ms 间波动，标准差达 80ms，远超设计的 10ms 上限。指令输出插件接触不良模拟中，20 次分闸指令有 6 次未送达二次回路，故障时监测到插件引脚电压波动，触发装置内部“出口异常”自检告警。抗干扰测试显示，当高频干扰信号注入保护装置时，采样精度下降，电流测量误差从 1% 增至 5%，但未出现误动或拒动；干扰场强升至 20V/m 时，装置出现 2 次误发合闸指令，验证了电磁兼容设计的临界阈值。

（四）二次保护联动实验结果

二次回路故障模拟实验聚焦控制电源、线圈及接线可靠性，结果显露出明显故障关联性。控制电源电压降至额定 80%（160V）时，分合闸线圈动作成功率 75%，电流峰值降 20%，动作时间延 10–15ms；升至 120%（240V），线圈温升加快，连续 10 次合闸后达 85℃，超 70℃耐热等级，有绝缘老化风险。分合闸线圈匝间短路使输出力降 30%，20 次分闸测试 5 次拒动，线圈电阻从 5Ω 降至 3.8Ω ，回路电压波形畸变；引线松动致分闸指令

延迟，伴 3 次间歇性失败。接线端子腐蚀后接触电阻从 $50\text{m}\Omega$ 增至 $500\text{m}\Omega$ ，二次回路压降增大，保护装置采样电流误差达 8%，过流保护 2 次延时；电缆绝缘破损引发接地故障，30s 内触发报警，分闸回路熔断器熔断 2 次。

（五）综合实验数据分析

实验数据显示，不同故障对断路器拒动影响差异显著，一次设备机械故障占比 42%，二次回路故障占 35%，保护装置故障占 23%。动作时间上，机械故障平均延迟 50ms，二次回路接触不良平均延迟 30ms，保护装置故障影响较小（平均 10ms）。故障树分析显示，“操作机构卡涩 + 控制电源电压低”组合故障虽概率仅 0.3%，但后果最严重，需重点防控。相关性分析表明，分闸线圈电流峰值与机构动作时间负相关（系数 - 0.82），二次回路电阻与指令传输延迟正相关（系数 0.76）。

四、结束语

本文围绕高压开关柜断路器拒动故障展开了系统的成因分析与二次保护联动实验验证。通过对一次设备本体、二次回路、操作与维护等方面的深入探究，明确了机械结构劣化、回路传输异常、操作维护不当等是引发拒动的核心因素，并通过构建“模拟 - 控制 - 监测”实验平台，模拟各类典型故障工况，量化分析了不同故障类型对断路器动作可靠性的影响权重与关联关系。实验结果不仅验证了“一次设备 - 二次回路 - 保护装置”联动机制的复杂性，还揭示了机械卡涩、电源波动、采样精度等关键薄弱环节，为拒动故障的精准排查与防控提供了数据支撑。研究表明单一故障的影响可通过系统性防护措施缓解，而复合故障虽概率较低但危害极大，需在运维中重点关注，通过强化定期检修、优化联动逻辑、提升抗干扰能力等手段降低风险。

参考文献

- [1] 李宁钢. 高压开关柜常见故障和检修维护 [J]. 价值工程, 2020, 39(05): 244–245. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2020.05.103.
- [2] 李尚坤, 王尚斌. 10kV 高压开关柜常见故障和对策分析 [J]. 南方农机, 2019, 50(20): 225.
- [3] 李炼. 供电系统中高压开关柜常见故障分析与处理 [J]. 企业科技与发展, 2018, (09): 172–173.
- [4] 张天军, 张伟虎. 10kV 高压开关柜常见故障及对策分析 [J]. 技术与市场, 2015, 22(08): 213.
- [5] 朱波, 罗少军, 孙宏志. 矿井高压开关柜防拒动、防误动装置研究与应用 [J]. 山东煤炭科技, 2014, (09): 122+125.
- [6] 全光荣. 基于高压开关柜常见故障和改进对策的分析 [J]. 通讯世界, 2014, (20): 166–167.
- [7] 孟宪丽, 柴国旭. KYN28 型高压开关柜二次回路的优化 [J]. 电器工业, 2022, (08): 63–65.
- [8] 范寿忠. 浅谈高压开关柜二次回路设计 [J]. 中国科技信息, 2014, (23): 169–170.
- [9] 范文波, 韩伟, 赵珊等. 高压开关柜二次失压保护电路的改进 [J]. 城镇建设, 2020, (2): 363.
- [10] 邓永新, 邓人杰. 煤化工生产装置中高压开关柜的常见故障及处理措施 [J]. 氮肥与合成气, 2021, 49(4): 40–41. DOI: 10.19910/j.cnki.ISSN2096-3548.2021.04.013.

水利水电工程施工技术创新与实践

闫晓锋

身份证号: 610122198404136910

DOI:10.61369/WCEST.2025020017

摘 要 : 本文回顾水利水电工程施工技术发展, 从古代到现代, 介绍核心技术迭代及面临挑战, 如复杂地质条件、生态保护等问题。阐述绿色高性能材料等创新应用, 及 BIM+GIS 等智能化技术。还提及多工程实践案例及效益评估等, 强调创新与实践对行业发展的重要性。

关 键 词 : 水利水电工程; 施工技术; 创新与实践

Technological Innovation and Practice of Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

Yan Xiaofeng

ID: 610122198404136910

Abstract : This article reviews the development of construction technology in water conservancy and hydropower projects, from ancient times to the present, highlighting the core technological advancements and challenges faced, such as complex geological conditions and ecological protection. It discusses the innovative application of green high-performance materials and intelligent technologies like BIM+GIS. The article also presents multiple practical cases and benefit assessments, emphasizing the importance of innovation and practice in the industry's development.

Keywords : water conservancy and hydropower engineering; construction technology; innovation and practice

引言

水利水电工程施工技术的发展对我国基础设施建设和能源保障具有重要意义。随着2021年我国发布《“十四五”水利科技创新规划》, 强调了科技创新在水利工程中的核心地位, 进一步推动了施工技术的进步。从古代到现代, 施工技术不断演进, 在核心技术迭代中呈现出高效、安全、环保的趋势。然而, 在复杂地质、生态保护和全生命周期管理等方面仍面临挑战。为此, 绿色高性能材料、生态友好型防渗材料、装配式工艺等创新方向以及 BIM+GIS 等智能化技术应用不断涌现, 同时三峡、南水北调等工程的实践也为技术创新提供了经验, 这些都为水利水电工程施工技术的进一步发展奠定了基础。

一、水利水电工程施工技术发展现状

(一) 技术发展历程与特征

水利水电工程施工技术经历了漫长的发展过程。从古代简单的筑坝引水技术, 到近代逐渐采用混凝土等材料进行工程建设, 再到现代的高科技施工方法, 其发展呈现出明显的特征。传统工艺注重人力和简易工具的使用, 如土坝的人工夯筑等。随着科技进步, 现代化工法不断涌现。碾压混凝土技术从早期的低强度、低效率发展到如今的高强度、快速施工, 其配合比设计、施工工艺不断优化^[1]。帷幕灌浆技术也从最初的简单灌注发展到精确控制浆液扩散、提高防渗效果的先进技术, 在钻孔设备、灌浆材料和施工工艺等方面都有了重大突破^[1]。这些核心技术的迭代反映了

水利水电工程施工技术不断追求高效、安全、环保的发展趋势。

(二) 当前技术体系存在的问题

在复杂地质条件下, 现有施工技术面临诸多挑战。例如在岩溶地区或深厚覆盖层区域, 施工时可能出现基础稳定性不足等问题, 传统处理方法难以有效解决且成本较高^[2]。生态保护方面, 部分施工技术未能充分考虑对周边环境的影响。一些水利水电工程施工过程中, 会对河流生态系统造成破坏, 如改变水流形态影响水生生物生存环境, 且缺乏有效的生态修复技术与之配套。在全生命周期管理上, 现有技术体系对工程长期运行监测和维护的支持不足。施工完成后, 对于一些潜在的安全隐患和性能退化问题难以及时发现和处理, 影响工程的可持续使用。

二、水利工程施工技术创新的核心方向

（一）新型材料与施工工艺开发

绿色高性能混凝土材料在水利工程中具有重要应用前景。其通过优化配合比设计，提高混凝土的强度、耐久性和抗渗性等性能，满足水利工程复杂环境下的使用要求^[3]。生态友好型防渗材料的研发是另一个关键方向，这类材料在保证防渗效果的同时，注重对生态环境的保护，减少对周边生态系统的负面影响。装配式施工工艺的创新为水利工程施工带来了新的思路。它通过在工厂预制构件，然后在现场进行组装，不仅可以提高施工效率，还能保证施工质量的稳定性，减少现场施工对环境的干扰。

（二）智能化施工技术应用

构建基于BIM+GIS的施工管理系统是智能化施工技术应用的重要方面。BIM技术可实现水利工程的三维可视化建模，为施工过程提供精确的空间信息和数据支持，有助于优化施工方案和进度安排^[4]。GIS技术则能对工程所处的地理环境进行详细分析，为施工场地规划、资源调配等提供决策依据。同时，无人机巡检技术的应用可高效、准确地获取工程现场的实时图像和数据，及时发现施工中的问题和隐患。智能碾压机器人能够实现碾压过程的自动化和精准控制，提高施工质量和效率。这些数字化施工装备的集成应用，将推动水利工程施工向智能化方向发展。

三、技术创新的工程实践案例分析

（一）典型工程施工创新

1. 三峡工程大坝施工技术创新

三峡工程三期碾压混凝土围堰施工面临诸多挑战，其中温控和机械化作业是关键问题。在温控技术方面实现了创新，通过采用先进的温控材料和合理的温控措施，有效解决了大体积混凝土在浇筑过程中的温度裂缝问题^[5]。同时，对机械化作业体系进行了优化，引入了高效的施工机械设备，并对其作业流程进行了科学合理的编排，提高了施工效率，保证了施工质量。这些创新技术和优化措施的应用，使得三期碾压混凝土围堰能够快速、高质量地完成施工，为三峡工程的顺利进行奠定了坚实基础。

2. 南水北调渠道施工技术突破

南水北调工程中，膨胀土处理技术和全断面衬砌机械化施工方案取得了显著突破。膨胀土具有特殊的工程性质，在渠道施工中是关键难题。通过研究创新的处理技术，有效解决了膨胀土可能导致的渠道变形等问题，保障了渠道的稳定性和输水安全^[6]。全断面衬砌机械化施工方案的应用，大大提高了施工效率和质量。机械化设备能够精准地进行衬砌操作，减少了人工误差，确保衬砌的平整度和密实度，同时加快了施工进度，为南水北调工程的顺利实施提供了有力的技术支撑。

（二）区域性工程创新集成

1. 高海拔水电站冬季施工技术

在高海拔水电站冬季施工技术方面，低温环境给施工带来诸多挑战。其中混凝土温控养护体系与供氧保障系统的综合技术创

新至关重要。低温会影响混凝土的性能，通过温控养护体系可有效解决这一问题，如采用合适的保温材料和温控设备，确保混凝土在适宜的温度下凝结硬化，提高其强度和耐久性^[7]。同时，高海拔地区氧气稀薄，会影响施工人员的工作效率和身体健康，以及一些施工设备的正常运行。供氧保障系统的创新能够为施工提供充足的氧气，保障施工的顺利进行。这些技术创新集成应用，提高了高海拔水电站冬季施工的质量和效率。

2. 滨海地区防腐蚀技术体系

在滨海地区，防腐蚀技术体系至关重要。海洋环境下结构耐久性设计创新是关键方面。考虑到海水的腐蚀性等因素，设计需综合多方面。例如采用合适的材料和结构形式，以增强抗腐蚀能力^[8]。阴极保护技术在工程中也有重要应用。通过对金属结构施加阴极电流，使其电位低于周围环境，从而抑制腐蚀反应的发生。这种技术可有效保护滨海地区水利水电工程中的金属设施，如闸门、管道等。合理应用这些技术，能够构建完善的滨海地区防腐蚀技术体系，保障工程的长期稳定运行，减少因腐蚀带来的维护成本和安全隐患。

四、技术创新应用效果评估体系

（一）工程质量评估维度

1. 结构安全性能检测方法

结构安全性能检测是工程质量评估的关键维度。在水利水电工程中，可利用物联网技术实现实时、精准的检测。通过在关键结构部位安装传感器，可获取应力、应变、位移等数据^[9]。这些数据能够反映结构在不同工况下的受力状态，为评估结构安全性能提供依据。同时，结合数据分析算法，对采集的数据进行处理和分析，可及时发现潜在的安全隐患。例如，通过对大坝结构的长期监测，能够提前预警可能出现的裂缝、变形等问题，以便采取相应的措施进行修复和加固，确保工程结构的安全性和稳定性。

2. 耐久性评估指标体系

耐久性评估指标体系应构建包含材料性能退化、环境作用因子等参数的多维度评价系统。材料性能退化是关键因素之一，需考虑材料在长期使用过程中的强度、韧性等性能的变化^[10]。环境作用因子包括温度、湿度、水质等，这些因素会对工程结构产生腐蚀、侵蚀等影响。通过对这些参数的综合评估，可以更准确地判断水利水电工程的耐久性。同时，还应考虑不同材料和结构在不同环境条件下的相互作用，以全面评估工程的耐久性。这种多维度评价系统能够为工程质量评估提供更科学、准确的依据，有助于及时发现潜在问题并采取相应措施，保障水利水电工程的长期稳定运行。

（二）工程效益分析系统

1. 经济效益动态测算模型

开发考虑技术溢价与全周期维护成本的投入产出分析工具，需要综合多方面因素。首先明确技术溢价部分，考虑新技术在提升工程质量、效率等方面带来的增值效益。这涉及到与传统技术

对比，评估新技术在减少施工时间、提高工程稳定性等方面的优势所对应的经济价值。同时，全周期维护成本是关键因素，包括设备更新、材料更换以及后期运行中的维护费用等。通过建立动态测算模型，对不同阶段的成本和收益进行量化分析。以水利水电工程为例，考虑新技术应用对发电量提升的影响（技术溢价）以及设备长期维护成本，综合评估其经济效益，为工程决策提供科学依据。

2. 社会生态效益量化评估

水利水电工程社会生态效益量化评估需综合多方面要素。对于移民安置，应评估安置点的基础设施完善程度、移民的生活水平恢复及提升情况、就业机会创造等。通过对比移民前后的生活质量指标，如收入水平、教育资源可及性、医疗保障覆盖率等进行量化。生态流量保障方面，要监测工程运行前后河道生态需水量的满足程度，分析对水生生物生存环境的影响，包括鱼类栖息地的面积、水质变化对生物多样性的影响等。同时，考虑对周边生态系统的整体影响，如植被覆盖变化、土壤侵蚀情况等，综合这些因素制定科学合理的综合效益评价标准。

（三）技术可持续性评价

1. 低碳施工技术评估标准

施工过程碳足迹追踪系统应涵盖施工材料生产运输、施工设备运行、施工工艺执行等各环节的碳排放数据收集与分析。通过精准的监测设备和科学的计算方法，确定每一个环节的碳排放量。减排效果验证机制则需对比采用低碳施工技术前后的碳足迹数据，同时考虑工程规模、施工环境等因素的影响。设定合理的减排目标，依据实际减排量与目标的契合度来评估技术的有效性。还应综合考虑技术的成本效益，确保在实现低碳目标的同时，不会因过高的成本影响技术的推广应用。此外，要评估技术对工程质量和进度的影响，只有在保证工程质量和进度不受影响的前提下，低碳施工技术才具有实际应用价值。

2. 技术推广可行性研究

技术创新应用效果评估体系需综合考量多方面因素。对于技术可持续性评价，要分析技术在长期使用过程中的稳定性、可靠性以及对环境的影响。评估其是否能在不同工程规模和地域特征下持续发挥作用，是否符合可持续发展的理念。在技术推广可行性研究方面，需考察技术在不同地区的适用性，包括地质条件、气候条件等。不同工程规模对技术的要求也不同，要研究技术能否满足大型、中型和小型水利水电工程的施工需求。同时，还要考虑经济成本因素，包括技术应用的前期投入和后期维护成本，确保技术推广在经济上是可行的。

五、总结

水利水电工程施工技术的创新与实践至关重要。通过凝练关键路径，明确了技术体系创新的方向。数字化与生态化转型成为必然趋势，数字化技术可提升施工效率与精度，生态化理念确保工程与环境和谐共生。建立产学研协同创新机制，能整合各方资源，加速技术研发与应用。完善技术标准体系，为施工提供规范指导，保障工程质量。这些举措相互关联，共同为水利水电工程施工技术的进步奠定基础，不仅推动行业技术水平提升，还将促进水利水电工程更好地服务于社会经济发展和生态环境保护，为可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李雨晨. 长江上游大中型水利水电工程全生命周期碳足迹核算 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [2] 王金黄. 《水利水电工程概论》(节选) 翻译实践报告 [D]. 华北水利水电大学, 2023.
- [3] 饶鑫. 建筑工程施工合同汉英翻译实践报告 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 蒋大双. 技术并购与企业技术创新: 影响与机制 [D]. 上海师范大学, 2023.
- [5] 王雅琦. 企业 ESG 表现与绿色技术创新 [D]. 内蒙古财经大学, 2023.
- [6] 唐成方, 杨林. 水利水电建筑工程施工技术的应用 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(9): 37-38.
- [7] 陈小明. 关于水利水电建筑工程施工技术的探讨 [J]. 水上安全, 2023(6): 166-168.
- [8] 刘耀. 水利水电工程施工技术管理探究 [J]. 江西建材, 2021(6): 162-163.
- [9] 陈黔星. 探究水利水电工程施工技术和管理措施 [J]. 砖瓦世界, 2023(12): 166-168.
- [10] 李青旺, 廖欢, 刘安富, 等. 探究水利水电工程施工技术和管理措施 [J]. 红水河, 2022, 41(5): 113-116.

