

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.
(United States)

Editors-in-Chief

Jian Zhao

Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological
Survey

Editorial Board Member

Jinze Fu

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

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第4卷 第2期 2026年2月刊

主 管 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主 办 ART AND TECHNOLOGY 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: 263 S KENWOOD ST 560

CASPER,WY 82601

网 址: <https://arttechpress.com>

本刊说明:

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

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



水利工程 | HYDRAULIC ENGINEERING

- | | | |
|-----|--|--|
| 001 | 水工混凝土裂缝成因分析与耐久性提升关键技术研究
Research on the Causal Analysis of Cracks in Hydraulic Concrete and Key Technologies for Enhancing Durability | 麻旭光
Ma Xuguang |
| 004 | 县级水利工程建设项目质量监督工作重难点
Key and Difficult Points of Quality Supervision for Water Conservancy Projects at County Level | 谭周兵
Tan Zhoubing |
| 007 | 提高水利水电施工管理的创新策略方法探析
Analysis of Innovative Strategies and Methods for Improving Water Conservancy and Hydropower Construction Management | 周红波
Zhou Hongbo |
| 010 | EPC项目合同管理面临的风险及运用解析
Analysis of Risks and Applications in EPC Project Contract Management | 沈扬波
Shen Yangbo |
| 013 | 智慧河湖信息化监测体系构建与治理效能研究
Research on the Construction of Information Monitoring System and Governance Efficiency of Smart River and Lake | 靳美玲
Jin Meiling |
| 016 | 水利水电工程施工现场试验检测的相关问题分析
Analysis of Related Problems of Test and Inspection in Construction Site of Water Conservancy and Hydropower Engineering | 于燕
Yu Yan |
| 019 | 新建小区供水管道系统设计与施工技术研究
Research on Design and Construction Technology of Water Supply Pipeline System in New Residential Areas | 张杨, 苟焕宙
Zhang Yang, Gou Huanzhou |
| 022 | 农村水利基础设施长效运维管理体系构建研究
Research on Long-term Operation and Maintenance Management System Construction of Rural Water Conservancy Infrastructure | 何建阁
He Jiange |
| 025 | 智慧水务系统功能提升与运行优化研究——基于九江市工程实践为例
Research on Functional Enhancement and Operational Optimization of Smart Water Systems—A Case Study Based on Engineering Practice in Jiujiang City | 韩耀辉
Han Yaohui |
| 029 | 深部复合地层 TBM 分级掘进破岩机理及岩机相互作用规律研究
Study on Mechanism of Rock Breaking in Graded Tunneling of TBM in Deep Composite Strata and Law of Rock-Machine Interactions | 张彩凤
Zhang Caifeng |
| 034 | 黄河上游河岸根土复合体抗剪强度特性试验研究
Experimental Study on Shear Strength Characteristics of Shore Root-soil Complex in the Upper Reaches of the Yellow River | 陈欢欢, 张峻岭, 张子刚, 曾阳益, 吕娜, 丁云龙, 梁凯, 张鼎
Chen Huanhuan, Zhang Junling, Zhang Zigang, Zeng Yangyi, Lv Na, Ding Yunlong, Liang Kai, Zhang Ding |
| 038 | 土工袋护坡在河岸边坡工程中的稳定性分析与应用研究
Stability Analysis and Application Research of Geosynthetic Bag Slope Protection in Riverbank Slope Engineering | 丁云龙, 陈欢欢, 吕娜, 张哲, 曾阳益, 张峻岭, 张鼎
Ding Yunlong, Chen Huanhuan, Lv Na, Zhang Zhe, Zeng Yangyi, Zhang Junling, Zhang Ding |
| 042 | 城市滨水空间开放共享建设对策思考
Thoughts on Construction Countermeasures for Open and Shared Urban Waterfront Spaces | 王思远
Wang Siyuan |

045	水利水电工程防渗技术施工要点分析 Analysis of Construction Key Points of Seepage Prevention Technology for Water Conservancy and Hydropower Projects	尹润霞 Yin Runxia
048	乌鲁木齐河洪水传播特性及演进模拟研究 Study on Flood Propagation Characteristics and Evolution Simulation of Urumqi River	新素依尔·道恩德格 Xinsuyier-Daoendege
052	基于结构有限元分析的水闸健康监测及除险加固设计探讨 Discussion on Sluice Health Monitoring and Reinforcement Design Based on Structural Finite Element Analysis	邓国林, 撒招练, 易伟 Deng Guolin , Sa Zhaolian, Yi Wei
055	浅论南水北调高水位、长江枯水期低水位船闸的运调管理 Brief Discussion on the Operation and Scheduling Management of Ship Locks under High Water Level of the South-to-North Water Diversion Project and Low Water Level during the Dry Season of the Yangtze River	耿旭翔 Geng Xuxiang
058	新型智能排缆控制系统研究 Research on a New Type of Intelligent Wire Ropes Arranging Control System	徐晓岭, 韩林青 Xu Xiaoling, Han Linqing
062	河道整治工程堤防填筑施工工艺改进研究 Research on the Improvement of Construction Techniques for Embankment Filling in River Regulation Projects	聂蕊 Nie Rui
065	大口径给水管施工技术在城市道路工程中的应用 Application of Construction Technology for Large-Diameter Water Supply Pipes in Urban Road Engineering	郑晓峰 Zheng Xiaofeng
068	船舶管道布置合理性分析 Rationality Analysis of Ship Pipeline Arrangement	张建明 Zhang Jianming

电力工程 | POWER ENGINEERING

071	配电网节能降耗技术改造项目的实施与成效 Implementation and Effectiveness of the Technical Transformation Project for Energy Conservation and Loss Reduction in Distribution Networks	李全勇 Li Quanyong
075	新能源发电系统的可靠性评估与优化新能源电站的无功补偿装置优化配置 Reliability Evaluation and Optimization of New Energy Power Generation Systems, and Optimal Configuration of Reactive Power Compensation Devices in New Energy Power Plants	马鑫俊 Ma Xinjun
078	浅析交直流屏在智能化变电站中的重要性 Analysis of the Importance of AC/DC Panels in Intelligent Substations	米海军, 雷锦锋, 王正高 Mi Haijun, Lei Jinfeng,Wang Zhenggao
081	高压输电线路全过程机械化施工技术与要点 Whole Process Mechanized Construction Technology and Key Points of High Voltage Transmission Line	陶智鹏, 张鑫 Tao Zhipeng, Zhang Xin
084	高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术分析 Analysis of Lightweight Insulator Defect Detection Technology For High Voltage Transmission Lines	张鑫, 陶智鹏 Zhang Xin, Tao Zhipeng

水工混凝土裂缝成因分析与耐久性提升关键技术研究

麻旭光

保定市建筑安装工程处, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/WCEST.2026020003

摘 要 : 为解决水工混凝土裂缝诱发结构耐久性劣化的工程难题, 本文系统开展水工混凝土裂缝成因机理与耐久性提升技术研究。依据核心成因将水工混凝土裂缝划分为温度应力、体积变形、荷载与环境作用三类, 明确不同裂缝的形态特征、分布规律, 深入剖析水化热、环境温差引发温度应力裂缝, 干燥收缩、自生收缩等体积变形诱发裂缝的内在机制; 揭示裂缝作为有害介质传输通道, 通过优化传输路径、提升传输速率加速介质侵入, 进而诱发钢筋锈蚀、劣化混凝土抗渗性与抗冻性, 形成裂缝扩展-性能劣化恶性循环的影响机制; 从原材料优化与配合比设计、施工过程裂缝控制、裂缝修复与长效防护三个维度, 提出水工混凝土耐久性提升关键技术及核心控制指标。

关 键 词 : 水工混凝土; 裂缝成因; 耐久性劣化; 裂缝控制

Research on the Causal Analysis of Cracks in Hydraulic Concrete and Key Technologies for Enhancing Durability

Ma Xuguang

Baoding Construction and Installation Engineering Office, Baoding, Hebei 071000

Abstract : To address the engineering challenge of crack-induced durability degradation in hydraulic concrete structures, this paper systematically investigates the causal mechanisms of cracks in hydraulic concrete and explores key technologies for enhancing durability. Based on core causes, cracks in hydraulic concrete are classified into three categories: temperature stress, volume deformation, and load and environmental effects. The morphological characteristics and distribution patterns of different cracks are identified, and the internal mechanisms of temperature stress cracks induced by hydration heat and environmental temperature differentials, as well as cracks caused by volume deformations such as drying shrinkage and autogenous shrinkage, are thoroughly analyzed. The study reveals that cracks serve as pathways for harmful media transmission, accelerating medium intrusion by optimizing transmission pathways and increasing transmission rates, thereby inducing steel corrosion and degrading the impermeability and frost resistance of concrete, forming a vicious cycle of crack propagation and performance degradation. Key technologies and core control indicators for enhancing the durability of hydraulic concrete are proposed from three dimensions: raw material optimization and mix design, crack control during construction, and crack repair and long-term protection.

Keywords : hydraulic concrete; crack causes; durability degradation; crack control

引言

水工混凝土结构作为水利水电工程的核心组成部分, 涵盖大坝、水闸、渠道、水电站厂房等关键建筑物, 其长期安全稳定服役直接关系到流域防洪、水资源调配、能源供应等国计民生重大需求。目前学界与工程界对水工混凝土裂缝成因及耐久性提升已开展大量研究, 在单一裂缝类型防控、常规修复材料应用等方面取得了诸多成果, 但针对不同成因裂缝的系统分类解析、裂缝对耐久性劣化的耦合作用机制, 以及适配复杂服役环境的全流程耐久性提升技术体系构建等方面仍有待深化。基于此, 本文以水工混凝土裂缝为研究核心, 系统分析裂缝类型及成因机理, 揭示裂缝对结构耐久性的影响规律, 从原材料优化、施工控制、裂缝修复与防护等维度提出针对性关键技术, 旨在为水工混凝土结构抗裂防控、耐久性提升提供科学理论依据与工程实践支撑, 保障水利水电工程长期安全、高效运行。

一、水工混凝土裂缝类型及成因机理分析

（一）水工混凝土常见裂缝分类

大体积水工混凝土自浇筑开始，就要经受外界环境和其本身的各种因素的作用，使混凝土中任一点的位移和变形不断地变化，从而产生了应力。一般情况下，当应力超过了混凝土的极限强度，或其应力变形超过了混凝土极限变形值，由混凝土构成的结构物就要产生裂缝^[1]。水工混凝土裂缝是内部应力与材料抗拉强度相互作用的产物，可按多维度分类。结合工程服役特征，按核心成因可分为温度应力、体积变形、荷载与环境作用裂缝三类，三者在形态、产生部位及发展规律上差异明显^[2]。温度应力裂缝多为表面不规则缝或贯穿线性缝，常见于大坝等大体积混凝土结构，走向与温度梯度垂直，浇筑初期及温差较大阶段易产生；体积变形裂缝以收缩类表面细缝为主，可发展为深层缝，多分布于混凝土表层与施工缝附近，宽度小、分布广；荷载与环境作用裂缝形态关联荷载方向或侵蚀路径，荷载裂缝多贯穿，环境裂缝由表及里发展，严重时造成结构局部破损^[3]。按裂缝深度又可分为表面裂缝（ $< 50\text{mm}$ ）、深层裂缝（ $50\text{mm} \leq \text{深度} \leq 300\text{mm}$ ）、贯穿裂缝（ $> 300\text{mm}$ ），其中贯穿裂缝对结构承载与耐久性危害最大。

（二）温度应力裂缝成因分析

温度应力裂缝是水工大体积混凝土最常见裂缝类型，核心成因是混凝土在浇筑、硬化与运行中，温变引发的变形受约束，产生超出材料抗拉强度的应力而开裂^[4]。其产生受水化热、环境温度差、结构约束及材料热学性能等多重因素影响，水泥水化热是核心内因，大体积混凝土水化热量大、导热差，易形成显著内外温差，内外变形受约束产生应力，超出抗拉强度会引发表面裂缝，甚至发展为贯穿裂缝；环境温度波动是重要外因，周期性热胀冷缩产生交变应力，衰减混凝土抗拉性能，诱发或加速裂缝扩展；水库水位升降、水流冲刷引发的运行期局部温度突变，也会加剧该类裂缝的产生与发展。

（三）体积变形裂缝成因分析

体积变形裂缝是水工混凝土硬化或长期服役时，因干燥、自生、徐变收缩等体积变形受约束产生拉应力引发的裂缝^[5]。核心特征为细长三角线性裂缝、分布广泛，初期多为表面裂缝，严重时可发展为深层裂缝，其产生与混凝土材料特性、养护条件、施工工艺相关。干燥收缩是主要诱因，多发于浇筑后1~3个月早期，因混凝土内外湿度梯度引发收缩，受约束产生的拉应力超过其抗拉强度即开裂，且受环境温湿度、风速直接影响^[6]。自生收缩由水泥水化消耗内部水分引发，收缩量小、持续时间长达数年，高强水工混凝土因水泥用量大、水胶比小，该收缩更显著，受约束易开裂。徐变收缩为长期荷载下的塑性变形，受约束会引发应力重分布，诱发或加速裂缝扩展。养护条件对控制至关重要，养护不及时、时长不足会加剧收缩，大幅提升开裂概率。

二、水工混凝土裂缝对耐久性的影响机制

（一）裂缝与介质传输的关系

混凝土耐久性本质取决于其抵御外部有害物质侵入与内部性能劣化的能力，裂缝作为结构薄弱环节，是影响混凝土耐久性的

核心因素^[7]。完好混凝土依靠致密结构阻隔介质侵入，裂缝则会形成连通传输通道，降低介质传输阻力、加速渗透。其影响主要体现在传输路径优化与传输速率提升，裂缝打通混凝土内外连通通道，大幅缩短介质传输路径；同时裂缝的宽度、深度等参数会直接提升传输速率，裂缝宽度超 0.1mm 时水气渗透速率显著升高，超 0.2mm 时氯离子等有害物传输速率呈指数级增长。此外，裂缝扩展会加剧混凝土孔隙劣化，形成裂缝产生—介质侵入—性能劣化—裂缝扩展的恶性循环。

（二）裂缝加速钢筋锈蚀机理

钢筋锈蚀是水工混凝土结构耐久性劣化的主要形式，裂缝会通过破坏混凝土保护作用显著加速该过程，并形成恶性循环。完好水工混凝土的钢筋表面存在致密钝化膜，可隔绝腐蚀介质、抑制锈蚀；混凝土开裂后，裂缝成为氧气、水分、氯离子等的快速传输通道，水分与氧气构建电化学腐蚀条件，氯离子直接穿透破坏钝化膜，碳化作用则降低混凝土碱度使钝化膜失稳破裂，进而引发钢筋锈蚀^[8]。钢筋锈蚀产物体积为本体2~4倍，其膨胀产生的应力会形成锈胀裂缝，进一步拓宽裂缝、提升连通性，加剧腐蚀介质侵入，推动锈蚀加速^[9]。该恶性循环最终会造成钢筋截面减小、结构承载力降低，混凝土剥落破损，严重影响结构耐久性与安全性。

（三）裂缝对抗冻性与抗渗性的劣化

抗冻性与抗渗性是水工混凝土核心耐久性指标，直接决定结构使用寿命，而裂缝会显著劣化二者、降低结构耐久性储备并加速结构劣化。裂缝对混凝土抗渗性的劣化体现为破坏抗渗屏障，形成贯穿渗透通道，大幅削弱抗渗能力；裂缝宽度是关键影响因素，宽度超 0.1mm 抗渗等级下降1~2级，超 0.3mm 则抗渗能力基本丧失，同时裂缝连通性与分布密度越高，抗渗劣化越严重^[10]。裂缝对抗冻性的劣化与冻融循环体积膨胀应力相关，裂缝会使更多水分渗入混凝土内部，冻融时裂缝内水冰膨胀挤压壁面，扩大裂缝并破坏内部孔隙结构，进一步降低抗拉与抗冻性能；长期冻融下裂缝持续扩展，引发结构剥落、露骨、强度下降等劣化，带裂缝混凝土冻融寿命仅为完好混凝土的30%~60%，且裂缝宽度越大，抗冻性劣化越显著。

三、耐久性提升关键技术

（一）原材料优化与配合比设计关键技术

原材料性能是水工混凝土强度、耐久性及抗裂性的基础，配合比设计则通过优化组分比例提升性能。二者核心是选用优质原材料、掺加功能性外加剂与矿物掺合料，降低水化热、减少体积变形，保障抗裂性与耐久性。原材料优化，优先低水化热高标号水泥（如矿渣、火山灰质硅酸盐水泥）；选用级配良好、洁净的骨料（粗骨料选高强度岩石，细骨料选天然河砂，严控杂质与活性成分）；掺加缓凝高效减水剂、引气剂等外加剂及粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，改善性能。

配合比设计，严控水胶比（水工 ≤ 0.45 ，高强度 ≤ 0.35 ），合理确定胶凝材料用量（大体积 $300\sim 400\text{kg/m}^3$ ），优化骨料级

配；结合服役环境调整（如冻融环境提高含气量 4%~6%）。

（二）施工过程裂缝控制与耐久性保障技术

施工过程是水工混凝土裂缝产生的关键阶段，核心通过优化施工工艺、加强养护管理、实施精细化温控，减少裂缝产生，保障结构耐久性。其中，施工工艺优化方面，大体积混凝土采用分层浇筑（层厚 $\leq 500\text{mm}$ ）、插入式振捣（20~30s），避免漏振、过振，同时避开恶劣天气浇筑，高温环境下降低入模温度（ $\leq 30^{\circ}\text{C}$ ），严寒天气做好保温防冻措施（温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ），并规范处理施工缝（凿毛、铺同配比水泥砂浆）和伸缩缝，确保结合紧密、变形不受约束。养护管理强化方面，混凝土浇筑后及时覆盖保湿，初凝前进行二次抹压，普通混凝土养护时间不少于14d，大体积及高强度混凝土养护时间不少于28d，养护过程中控制表面温变速率，避免骤升骤降，保证表面与环境温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ，同时强化早期养护以抑制收缩、提高早期抗拉强度。精细化温控技术主要针对大体积混凝土，通过建立温度监测系统实时监控温变，预埋冷却水管循环降温以控制内部最高温，搭配表面覆盖保温材料控制降温速率，从而减少温度应力裂缝。

（三）裂缝修复与长效防护技术

对已开裂的水工混凝土结构，及时修复可阻介质侵入、抑裂缝扩展、恢复结构整体性与耐久性，长效防护能提升抗侵蚀能力、延长服役寿命。核心是结合裂缝参数（宽度、深度、分布）及服役环境，选适配材料与措施。裂缝修复按类型分类实施：表

面裂缝（宽 $< 0.2\text{mm}$ ）用环氧树脂砂浆等做表面封闭；深层裂缝（ $0.2\text{mm} \leq \text{宽} \leq 0.5\text{mm}$ ）采用压力注浆填充；贯穿裂缝（宽 $> 0.5\text{mm}$ ）需注浆+表面封闭，必要时粘贴加固材料。修复材料需满足耐久、粘结强等兼容要求。长效防护以表面防护为核心，常见技术为涂层防护（聚脲等）形成防护膜；渗透结晶型防护堵塞内部孔隙，适用于恶劣环境；阴极保护抑制钢筋锈蚀，适用于氯离子污染严重场景。同时需加强日常运维监测，及时处理新裂缝与劣化问题。

四、结束语

水工混凝土裂缝的防控与耐久性提升是保障水利水电工程长期安全服役的核心课题，其涉及裂缝成因解析、劣化机制揭示及多维度技术应用的系统性工作。本文通过对水工混凝土裂缝类型与成因机理的梳理，明确了温度应力、体积变形等核心致裂因素的作用规律，阐明了裂缝加速介质侵入、诱发钢筋锈蚀及劣化抗渗抗冻性能的内在机制，并构建了原材料优化-施工控制-裂缝修复防护全流程耐久性提升技术体系。研究成果可为工程实践中水工混凝土裂缝的精准防控、耐久性病害的高效治理提供直接参考，对延长水工建筑物设计使用寿命、降低运维成本、保障流域水安全与能源安全具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 张靖, 黄恩, 蒋孝成, 等. 水工混凝土裂缝 [J]. 广东建材, 2015(1): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4806.2015.01.018.
- [2] 赵玺. 水工混凝土裂缝的防止 [J]. 中国科技成果, 2007(12): 48-49. DOI: 10.3772/j.issn.1009-5659.2007.12.018.
- [3] 狄宜明. 水工混凝土裂缝成因及处理 [J]. 中国新技术新产品, 2011(7): 85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2011.07.078.
- [4] 刘小杏. 水工混凝土裂缝成因与修补 [J]. 内江科技, 2011, 32(8): 150-150, 176. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1436.2011.08.130.
- [5] 赵立云, 董伟, 胥姗姗. 水工混凝土裂缝成因及控制 [J]. 山西建筑, 2010, 36(9): 162-163. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2010.09.101.
- [6] 王铁龙. 水工混凝土裂缝成因与控制 [J]. 城市建设与商业网点, 2009(18): 117-118.
- [7] 郝广州. 水工混凝土裂缝成因及其防治 [J]. 科技创新导报, 2009(2): 68. DOI: 10.3969/j.issn.1674-098X.2009.02.057.
- [8] 乔丽, 李树春. 浅谈水工混凝土裂缝处理 [J]. 科技创新导报, 2008(5): 48-48. DOI: 10.3969/j.issn.1674-098X.2008.05.044.
- [9] 施养鑫. 水工混凝土裂缝成因及处理 [J]. 湖南农机, 2012, 39(3): 267-268. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8320.2012.03.154.
- [10] 黄家源. 水工混凝土裂缝的成因及控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(15): 5505-5505. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2016.15.505.

县级水利工程建设项目质量监督工作重难点

谭周兵

达州市通川区水利工程质量监督管理站, 四川 达州 635000

DOI:10.61369/WCEST.2026020004

摘 要 : 本文以县级水利工程建设项目为研究对象, 分析其项目类型多、工期短、工程量小的特点, 指出当前县级水利工程质量监督工作存在诸多问题: 监督机构存在组织不健全、经费不足、专业人员匮乏的问题, 参建单位存在法人组建不规范、质量体系缺失、人员履职不到位等问题, 过程管理则存在质量行为和管理操作不规范的情况。同时梳理出监督机制不顺、专业范围广、人员专业能力不足、被监督对象不配合、质量观念偏差等监督难点, 并明确质量行为核查和实体质量控制两大监督重点, 最后针对性提出加强追责问责、宣传质量意识、开展业务培训等对策建议, 为县级水利工程质量监督工作优化提供参考。

关 键 词 : 县级水利工程; 质量监督; 监督难点; 监督对策

Key and Difficult Points of Quality Supervision for Water Conservancy Projects at County Level

Tan Zhoubing

Water Conservancy Project Quality Supervision and Administration Station of Tongchuan District, Dazhou City, Dazhou, Sichuan 635000

Abstract : Taking county-level water conservancy construction projects as the research object, this paper analyzes their characteristics of various types, short construction periods and small project quantities. It points out many problems existing in the current quality supervision of county-level water conservancy projects: incomplete organization, insufficient funds and shortage of professional personnel in supervision institutions; non-standard legal person establishment, lack of quality system and inadequate performance of personnel duties in participating construction units; and non-standard quality behaviors and management operations in process management. Meanwhile, it sorts out the supervision difficulties such as unsmooth supervision mechanism, wide professional scope, insufficient professional competence of personnel, non-cooperation of supervised objects and deviation of quality concepts, and defines the two key supervision points: quality behavior verification and physical quality control. Finally, it puts forward targeted countermeasures and suggestions including strengthening accountability, publicizing quality awareness and carrying out professional training, so as to provide a reference for optimizing the quality supervision of county-level water conservancy projects.

Keywords : county-level water conservancy projects; quality supervision; supervision difficulties; supervision countermeasures

引言

水利工程是保障农业生产的命脉, 作为三农工作中的重要环节, 为乡村振兴、防灾减灾等提供基础保障, 建设质量关乎工程功能与群众利益^[1]。当前县级水利工程以小微项目为主, 类型多元、工期短、实施主体复杂, 使其质量监督面临机构滞后、专业人员匮乏、经费不足等问题, 叠加参建单位履职不规范、监督机制不顺等难点, 导致监督工作落地困难^[2-3]。做好县级水利工程质量监督, 是筑牢水利工程质量防线的关键^[4]。本文结合县级水利工程建设特点, 剖析监督工作的问题与难点, 明确监督重点并提出对策, 为提升监督实效、规范工程管理提供实践参考。

一、县级实施水利工程建设项目的特点

型水利工程^[5]; 从建设性质上来讲主要有新建水利工程、除险加固工程、提质增效工程; 从工程类别来讲主要分水库、堤防、电站、渠道、水工隧洞、村镇供水工程、山坪塘, 部分项目还会涉

从规模上来讲主要分为大中型水利工程、小型水利工程、微

作者简介: 谭周兵 (1977.01-), 男, 汉族, 四川达县人, 工程师, 本科, 从事水利工程质量监督相关工作。

及房建、交通、移民、水环保等项目^[6]；从招标投标来讲分招标项目（含政府采购）和非招标项目；从实施主体来讲分为县级水利系统、乡镇人民政府、村社区、其他部门。

根据笔者经验，县级新建大中型水利工程的机率一般来说较少，绝大多数地方主要建设实施的小、微型水利建设工程（病险水库除险加固工程、堤防工程、村镇供水工程、渠道、渡槽、山坪塘等），因此工期普遍在3个月-1年以内。

目前，我省实施的病险水库除险加固项目单座水库总投资一般按照小一型水库500万元/座、小二型水库160万元/座进行补助，堤防建设一般按照中小河流堤防整治500万元/公里、山洪沟按1200万元/条进行投资控制，按照轻重缓急原则，项目设计计划下达到各县市区，也就2-3座水库、一两条中小河流或山洪沟治理项目而已，因此，涉及工程量也相对较少，比如：部分项目涉及的混凝土工程不足500m³。

二、县级质量监督存在问题

（一）监督机构和参建单位存在问题

监督机构不健全，部分地方未单独设立质量监督机构，工作职能职责由其他股室兼并，无法集中精力开展监督^[7]；另一方面经费保障不足，仅能保障人员工资和普通仪器经费，高精仪器、监督检测经费缺失；还有专业人员匮乏，机构编制被转业人员等占用，且实行“退一进一”制度，难以补充专业技术人员，弱化了监督专业性。

笔者通过参加各地质量履职能力检查、质量和安全检查、水利项目稽查发现：一是项目法人组建不规范，专业技术人员数量、资质不足，存在混岗、一职多岗现象；二是质量体系不健全，多数未设专门质量机构，或仅设兼职质量负责人，制度流程缺乏操作性，实际执行与规范和技术标准脱节；三是人员到岗履职差，小微型工程管理人员存在“检查才到、场外签字”问题，现场人员与合同不符；四是主体资格不符，部分监理、检测单位无水利资质却开展相关业务。

（二）过程管理存在问题

1.质量行为不规范。一是材料设备报验不规范，在参加检查时发现部分项目施工单位在进行原材料、中间产品、设备报验时，有的仅拿一张报验单就向监理单位报验，未附原材料、设备的合格证、质量证明文件，监理单位就批了，进场原材料、中间产品、设备检验复验流于形式；二是施工方案审批不规范。如施工组织设计本应由施工单位技术负责人审批的由施工项目部技术负责人越权审批、部分需要做工艺试验的项目，未按规定标准要求提前组织进行工艺试验便凭以往施工经验擅自组织实施；三是单元（工序）工程检验验收不及时。施工单位不报验，监理单位不督促，默许施工，存在事后补报现象，质量控制无法完全到位；四是质量交底可操作性不强。施工现场质量交底主要是为了更好的指导施工班组和具体施工人员实际操作，但很多施工单位质量交底时引用很多的规范、标准，一搞就是几大篇，密密麻麻几百上千字，虽然也有相关人员的签字画押，估计没有几个

工人去认真看了的，存在应付检查、流于形式；五是现场操作不规范。如：混凝土浇筑时，作业现场未明确公示材料配合比及用量、搅拌时间，工人凭经验添加原材料，不按要求对混凝土拌合物的和易性进行检测和记录，没有具体的操作流程作指导。

2.过程管理不规范。一是督促检查不到位，当前，我省大部分县一级财政自给能力普遍不足，尤其是房地产市场持续低迷，部分依赖土地财政的地方尤为严峻，因此要实施水利项目更多的是积极争取上级项目支持，而上级下达的各类水利项目对进度要求又非常高，往往是刚下达项目实施计划就要求开工建设，在这种情况下，重建轻管形象就普遍存在，项目法人只管建设进度，对建设程序和规范标准的执行、人员的到岗履职等情况的检查往往是轻描淡写、一笔带过，说的多，落实的少。如：笔者在检查某水土保持治理项目，截至检查时该项目已完成建设任务的70%，但单元（工序）工程、分部工程验收一个都未完成；二是整改落实不彻底。项目法人与监督机构同朝为官，互为同事，抹不开情面，发现问题在整改方面敷衍了事，为了应付而应付，文字资料大于实际整改；三是奖惩处罚机制不健全。有的地方在合同中约定了奖惩制度和办法，但在真正出现了合同中约定触发惩罚条款时，往往会刻意规避，都来做好人，不愿做恶人，没有刚性措施，惩罚机制形同虚设^[8]。

三、县级质量监督难点

我省多数水利工程质量监督机构隶属于水行政主管部门，项目实施又多由同级水利平台或下属单位承担，形成同级监督、下级监督上级、跨部门监督的局面。各方同属一级党委政府领导，受行政干预影响大，监督意见难以有效落实，机构处境尴尬，无法对违法违规行为形成刚性约束^[9]。

水利工程涵盖水库、堤防、供水、隧洞、金属结构等多种类型，涉及水工、水文、地质、施工、造价、检测等众多专业，知识体系繁杂^[10]。而县级监督机构编制普遍偏少（多为2—5人），专业技术人员不足、结构不合理，部分人员缺乏施工和规范知识，难以全覆盖、高质量开展监督。

一方面，部分领导混淆主体责任与监督责任，简单将质量问题归咎于监督机构；另一方面，参建单位对监督工作不理解、不配合，存在抵触防备心理。加之监督人员专业能力有限，难以发现深层次质量问题，导致监督作用发挥不充分。

四、监督重点

严把准入关，核查参建单位及人员资质、原材料报验资料、施工方案审批的合规性与可操作性；紧盯建设程序，核查施工工艺、检验验收的逻辑性，杜绝工序时间错乱等问题；严查人员履职，核实管理人员到岗情况，重点检查监理巡视、旁站、见证等工作的记录完整性。

核查原材料、设备的检验复验资料和质量证明文件；检查检测检验资料的及时性、齐全性，确保检测项目、频率符合规范；

结合设计资料对现场实体抽样量测，重点复测隐蔽工程和关键部位尺寸、原材料、工艺措施等；核查施工与监理记录，甄别编撰行为，重点检查关键部位施工记录的规范性。

五、对策及建议

1.加强对行政主管部门的追责问责力度。不论水利工程最终实施主体是谁，其质量监督主体基本上都是由相应水行政主管部门主导，因为质量监督机构与水行政主管部门存在隶属关系，也就是说质量监督机构的监督意见始终绕不过水行政主管部门，但现实中就是在问责时，主要是监督机构首当其冲，很少能够震慑到水行政主管部门。

2.加强水利工程建设的质量意识宣传。我省县级水利部门质量监督机构成立时间普遍较晚，大多成立于2015年左右，以前主要是市级水行政主管部门才成立质量监督机构，这导致重建轻管的质量意识一直存在，即便后期县级质量监督机构成立以后，对质量监督机构具体职能职责也没有清醒认识，因此加强质量意识宣传很有必要，尤其是对水行政主管部门主管领导灌输质量意识更有必要。

3.加强对市县一级质量监督人员业务培训，尽管市县均已组建成立了质量监督机构，也充实了部分质量监督人员，但不可否认的是普遍不够专业，抓不住问题关键和重点，在施工现场很容易被施工、监理等单位牵着鼻子走，加强对市县一级质量监督人员业务培训刻不容缓。

4.市县统筹，统一执法。鉴于县一级质量监督人员偏少、缺乏拥有相关专业知识的人员，无法完整肩护一个项目全过程无死

角的质量监督工作，倒不如整合各县市区的监督力量，配齐相应专业人员，组建一个涵盖整个地级市的质量监督机构，这样就能更好的避免同级监督所产生的弊病。

5.进一步细化相关技术标准。目前，水利工程项目所采用的规范和技术标准基本上是按照大中型水工程等级标准制定，并且相关规范或技术标准条款中添加一个兜底条款就是其它水利工程参照执行，说是参照，实际就是全文执行，用高等级工程技术标准来要求低等个别工程照样执行，个人觉得有些浪费资源，建议省一级相关部门对适用小微水利工程的部分技术标准进一步细化。

六、结论

县级水利工程以小微型为主，工期短、工程量小、类型繁杂的特征，使其质量监督面临多重困境：监督机构存在组织、经费、人员短板，参建单位主体责任落实不到位，工程过程管理不规范，叠加监督机制不顺、专业覆盖难、质量观念偏差等问题，导致监督效力不足。做好县级水利工程质量监督，需紧抓质量行为和实体质量控制两大核心，从多方面综合施策：通过强化主管部门问责、普及质量意识，扭转重进度轻质量的观念；通过开展业务培训、市县统筹执法，弥补县级监督人员专业和数量不足的短板；通过细化小微工程技术标准，让监督工作有标可依。唯有多措并举，才能破解县级水利工程质量监督难题，理顺监督体系，明确各方责任，切实提升工程建设质量，保障水利工程发挥民生和生态效益。

参考文献

[1]张禹,花培,刁华辉.关于做好新时期水利工程质量监督工作的研究[J].水上安全,2025,(10):124-126.
[2]王彩宁,崔卫国.水利工程施工阶段质量监督的关键问题与对策[J].水上安全,2025,(05):178-180.
[3]马宜雷.浅谈基层水利工程质量监督管理工作[J].河南水利与南水北调,2025,54(02):64-65.
[4]徐安,王思腾,张瑞刚.水利工程质量监督检测实践研究[J].水利水电快报,2024,45(S2):78-81.
[5]郭燕雄,李加新.水利工程建设质量监督存在的问题及对策研究[J].东北水利水电,2024,42(11):53-56.
[6]李华春.水利工程质量监督档案管理的分析与思考[J].河北水利,2024,(08):27-28+32.
[7]马立平.水利工程质量检测信息化建设思考[J].海河水利,2023,(11):123-125+128.
[8]邹忠严.水利工程质量监督中的问题识别与风险防范研究[J].水上安全,2023,(13):131-133.
[9]秦静.水利工程项目质量监督探析[J].河南水利与南水北调,2023,52(09):108-109.
[10]胡瑶,余恣.小型水利水保工程的质量监督与管理研究[J].内蒙古水利,2023,(09):62-63.

提高水利水电施工管理的创新策略方法探析

周红波

河南明珠工程管理有限公司, 河南 三门峡 472000

DOI:10.61369/WCEST.2026020006

摘 要： 为进一步提升水利水电项目管理效能，构建全周期、全体系的项目运转模式，契合新时期公共基础设施开发要求。文章运用文献资料研究等方法，梳理水利水电项目施工管理的主体任务，概括施工管理突出问题，尝试从技术、管理、人才等维度出发，创新管理举措，优化管理体系，搭建管理架构，推动水利水电项目施工管理提质增效。

关 键 词： 水利水电；项目施工；管理体系；创新举措

Analysis of Innovative Strategies and Methods for Improving Water Conservancy and Hydropower Construction Management

Zhou Hongbo

Henan Mingzhu Engineering Management Co., Ltd., Sanmenxia, Henan 472000

Abstract： To enhance the efficiency of water conservancy and hydropower project management and establish a comprehensive, full-cycle operational framework that aligns with modern public infrastructure development needs, this study employs literature review and other methodologies. It systematically identifies key tasks in construction management, highlights critical challenges, and proposes innovative solutions across technical, managerial, and talent dimensions. By optimizing management systems and establishing structured frameworks, the research aims to elevate the quality and efficiency of construction management in water conservancy and hydropower projects.

Keywords： water resources and hydropower; project construction; management system; innovative measures

前言

水利水电项目在区域水资源调配、防洪减灾等方面发挥着关键作用，着眼水利水电项目的功能定位、服务场景，施工企业在开发建设环节，要注重做好现有管理方法、管理体系、管理流程的优化，旨在提升工程施工质量、降低建设成本，保障施工安全，推动水利水电行业高质量发展。

一、水利水电项目施工管理主要任务

（一）质量管理

质量管理是水利水电项目施工管理的核心任务，施工企业需要围绕工程设计标准与规范要求，构建全流程质量管理模式，重点把控施工原材料进场检验、施工工序规范操作、隐蔽工程验收核查、竣工质量综合评定等关键节点，杜绝各类质量隐患，确保水利水电项目能够长期稳定发挥防洪、供水、发电等核心功能，满足区域发展对水利水电工程的质量需求^[1]。

（二）安全管理

水利水电项目施工场景复杂，涉及高空作业、水下作业、大型设备运维等场景。施工企业通过建立健全全覆盖的安全管理机制，明确各岗位安全职责，强化施工人员安全培训与安全意识培

育，常态化开展安全隐患排查整治，规范高危作业操作流程，防范各类安全事故发生，保障施工人员人身安全、施工设备财产安全，确保项目施工全过程安全可控^[2]。

（三）成本管理

成本管理契合新时期公共基础设施开发的经济性要求，施工企业应当结合项目建设规模、施工工艺要求，制定科学合理的成本预算方案，优化人力、物力、财力等资源配置，严格控制施工过程中的各类成本消耗，减少资源浪费，规范成本核算流程，动态管控成本偏差，在保障工程质量与安全的前提下，实现项目建设成本的合理管控，提升项目经济效益与社会效益。

（四）进度管理

进度管理是确保水利水电项目按期竣工、及时发挥功能价值的关键手段。施工企业需要结合项目建设目标、施工条件及工序

衔接要求，制定精细化的施工进度计划，明确各施工环节的时间节点与工作任务，优化施工流程，协调各施工班组、各专业环节的衔接配合，动态跟踪进度执行情况，及时排查进度滞后问题并采取针对性整改措施，确保项目按照既定计划有序推进、按期交付使用。

二、水利水电项目施工管理现状分析

（一）施工管理目标定位不清晰

部分水利水电项目施工管理过程中，存在目标定位模糊、核心重点不突出的现实问题，没有紧密结合新时期公共基础设施开发的高质量要求与项目自身的功能定位、服务场景，科学界定质量管理、安全管理、成本管理、进度管理四大核心板块的具体目标、量化标准与实施路径^[9]。在实际施工管理实践中，部分项目存在“重进度、轻质量”“重建设、轻安全”的功利化倾向，过度追求施工进度的推进速度，忽视工程质量管控的关键环节与施工安全的底线要求，易引发各类质量隐患与安全事故。部分项目缺乏系统性的成本管控思维，未能结合项目建设规模、施工工艺复杂度制定精细化成本预算，导致施工过程中出现人力、物力、财力资源浪费现象，进而造成项目成本超支、效益下滑。部分项目的管理目标设定脱离工程实际施工条件、技术水平与资源禀赋，目标过高或过于笼统，缺乏可操作性与可落地性，难以有效指导施工管理实践，最终严重制约施工管理效能的提升，无法契合新时期水利水电项目建设的发展诉求。

（二）施工管理体系机制不健全

部分施工企业未能立足水利水电项目建设的全周期特性，构建起覆盖施工准备、现场施工、竣工验收、后期运维的全体系施工管理架构，管理流程设计繁琐冗余、衔接不畅，各部门、各岗位的权责划分不够清晰明确，存在交叉管理、责任空白与推诿扯皮等现象，导致施工管理指令传导不畅、执行效率低下^[10]。同时，缺乏完善的考核评价机制与激励约束机制，考核评价指标设置较为笼统，没有能够将施工质量、安全管控、成本控制、进度推进等核心管理任务细化为可量化、可考核的具体指标，考核结果与管理人员的绩效薪酬、岗位调整等关联度不高，难以发挥考核评价的导向作用^[5]。对施工管理环节的监督管理机制不够健全，监督方式较为单一，多以事后监督为主，缺乏事前预防与事中动态管控，导致部分管理规定流于形式，没能真正贯穿于施工全过程，进而造成施工管理秩序混乱、管理效能不足，难以适配新时期水利水电项目精细化、规范化的建设需求。

（三）施工管理技术路径不高效

部分施工企业仍沿用传统的施工管理技术与粗放式管理方法，技术应用滞后于行业发展趋势，未能充分借助数字化、智能化技术的赋能作用提升管理效能。在施工管理实践中，部分企业缺乏对先进管理技术的引进、研发与应用意识，施工过程中的数据采集、分析处理、流程管控等环节仍以人工操作为主，不仅管理效率低下，且易出现数据误差、管控不及时等问题，难以实现施工管理的精准化、精细化与智能化。同时，部分施工管理人员

的技术素养不足，缺乏对数字化管理工具、智能化管理平台的操作能力，即便引入先进技术，也难以充分发挥其应用价值，导致技术赋能作用未能有效释放^[6]。企业之间的技术交流与合作不足，缺乏对适配水利水电施工管理的特色技术、创新技术的推广应用，进一步制约了施工管理技术路径的优化升级，无法满足新时期水利水电项目高效管理、高质量建设的实际需求。

三、水利水电项目施工管理创新策略

（一）细化目标任务，明确责任划分

结合新时期公共基础设施开发的高质量要求与水利水电项目的功能定位、施工实际，进一步细化施工管理各项目标任务，构建“目标量化、标准明确、责任到人、管控到位”的目标管理体系。针对质量管理、安全管理、成本管理、进度管理四大核心板块，分别明确具体的量化标准、实施细则与验收要求，确保各项管理目标清晰具体、可落地、可考核、可追溯，坚决杜绝目标模糊、标准笼统的问题^[7]。按照“权责对等、分工明确、协同高效”的原则，进一步细化各部门、各岗位的管理职责，将各项管理任务层层分解、落实到具体个人，明确岗位职责、工作标准与考核要求，杜绝责任空白、交叉管理与推诿扯皮现象。同时，建立健全目标动态管控机制，定期对各项管理目标的执行情况进行跟踪、检查与分析，及时发现目标执行过程中存在的问题与偏差，结合施工实际情况调整优化目标方案，强化过程管控与闭环管理，确保各项管理目标有序推进、落地见效，推动施工管理效能持续提升。

（二）健全管理机制，完善工作体系

立足水利水电项目施工管理的全周期特性与实际需求，搭建全流程、全体系、全覆盖的施工管理架构，进一步优化管理流程，简化冗余环节，明确各环节的工作标准、衔接流程与时间节点，提升管理流程的顺畅性与高效性。健全完善施工管理考核评价机制，将施工质量、安全管控、成本控制、进度推进、流程执行等核心指标纳入考核体系，细化考核标准、量化考核指标，采用日常考核与定期考核相结合、定性评价与定量评价相结合的方式，确保考核评价的科学性、公正性与针对性。强化考核结果的运用，将考核结果与管理人员的绩效薪酬、岗位调整、评优评先等直接挂钩，充分发挥考核评价的导向作用与激励作用^[8]。同时，完善激励约束机制，对管理成效突出、目标完成优秀的个人与班组给予表彰奖励，对责任落实不到位、管理不力、未能完成目标任务的进行问责，激发施工管理人员的工作积极性、主动性与责任感，推动施工管理体系高效运转、规范运行。

（三）强化技术创新，推动智能管理

1. BIM技术的应用

BIM技术作为数字化施工管理的核心技术之一，可实现水利水电项目全生命周期的可视化、精细化管理，有效解决传统施工管理中设计与施工脱节、协同效率低等突出问题。在施工前期，依托BIM技术构建项目三维模型，整合设计图纸、地质勘察、施工工艺等各类数据信息，直观呈现工程结构、施工流程及关键节

点，助力施工方案的优化设计，提前排查设计漏洞与施工冲突，降低施工变更风险。在施工过程中，将 BIM 模型与施工进度、质量、成本等管理数据相关联，实现施工工序的可视化管控，精准把控各环节施工参数，指导现场施工规范开展^[9]。同时，借助 BIM 技术实现各施工班组、各专业环节的协同作业，打破信息壁垒，提升沟通效率，确保施工流程衔接顺畅。在竣工验收阶段，利用 BIM 模型开展数字化验收，对比施工实际与设计标准的差异，实现工程质量的精准核查与追溯，为后期运维管理提供详实的数字化基础，进一步提升水利水电项目施工管理的规范化、精细化水平。

2. 大数据技术的应用

水利水电项目施工周期长、涉及环节多、数据量大，大数据技术可实现施工管理数据的高效采集、分析与应用，为管理决策提供科学支撑，破解传统管理中数据碎片化、分析不精准的难题。在施工管理实践中，搭建大数据采集平台，整合施工过程中的各类数据，包括施工进度数据、质量检测数据、安全隐患数据、成本消耗数据、地质环境数据等，实现数据的全面收集与集中管理。通过大数据分析技术，对采集的数据进行深度挖掘与分析，识别施工过程中的潜在风险、进度偏差、成本异常等问题，生成针对性分析报告，为管理人员提供精准的决策依据^[10]。同时，利用大数据技术构建预测模型，对施工进度、质量隐患、成本变化等进行科学预测，提前制定防控措施，实现施工管理的事前预防与事中动态管控。通过大数据技术的应用，实现施工数据的共享与复用，推动施工管理向智能化、科学化转型，提升项目管理效能。

3. 智能监控技术的应用

构建全方位、全天候的施工监控体系，强化施工安全与质量的实时管控，契合新时期施工管理的安全管控要求。针对高空作

业、水下作业、大型设备运维、爆破作业等高危环节，安装智能监控设备，实现施工过程的实时可视化监控，实时捕捉施工违规操作、安全隐患等情况，及时发出预警信号，提醒管理人员及时处置，防范安全事故发生。在质量管控方面，利用智能监控技术对施工工序、原材料进场、隐蔽工程等关键环节进行实时监测，精准采集施工质量数据，对比质量标准，及时发现质量隐患，确保施工质量符合规范要求。同时，智能监控技术可实现施工数据的实时传输与存储，便于管理人员远程掌控施工动态，提升管理的及时性与高效性，为水利水电项目施工安全与质量管控提供坚实保障。

（四）组建专业队伍，保障任务落实

人才是推动施工管理创新、保障管理任务落地落实、提升管理水平的核心支撑，立足新时期水利水电施工管理的创新需求，着力组建一支专业素养高、实践能力强、创新意识足、责任担当强的施工管理队伍。结合施工管理岗位的实际需求，开展针对性的培训工作，重点围绕专业知识、管理方法、先进技术、安全规范等内容，定期组织管理人员开展培训学习，更新知识储备、提升专业技能与管理水平，适应施工管理创新发展的需求。建立健全人才引进机制，重点引进具备丰富水利水电施工管理经验、掌握先进管理技术与方法、具有较强创新意识的专业人才，优化管理队伍结构，弥补高端管理人才与技术型管理人才短缺的短板。

四、结语

水利水电项目施工过程中，相关企业应当坚持系统思维，结合项目实际，灵活运用各项创新策略，不断优化管理模式、提升管理水平，推动水利水电项目施工管理提质增效，为区域水资源调配、防洪减灾提供有力支撑，助力水利水电行业持续健康发展。

参考文献

- [1] 侯小勇. 水利水电施工管理的创新策略探析 [J]. 工程研究与实用, 2024 (4): 36-38.
- [2] 陆晟, 王晨. 水利水电施工管理的创新策略探析 [J]. 现代工程项目管理, 2024 (5): 96-99.
- [3] 乐武辉. 现代化水电施工技术管理应用分析 [J]. 水上安全, 2025 (4): 34-36.
- [4] 姬建美, 王明涛. 水利水电工程施工管理策略 [J]. 水利电力技术与应用, 2025 (14): 63-65.
- [5] 楚轩, 马凯文, 张小童等. AI+BIM 在水利水电工程施工安全管理中的应用 [J]. 水利水电技术与应用, 2025 (22): 32-34.
- [6] 柳勇. 论水利水电工程建筑的施工技术及管理 [J]. 现代工程项目管理, 2024 (19): 21-23.
- [7] 王斌强. 论水利水电工程的项目管理及施工措施 [J]. 建筑与施工, 2024 (23): 18-20.
- [8] 郭洪东, 刘汉印. 水利水电工程施工质量控制措施研究—以 XX 水电站为例 [J]. 建筑与施工, 2024 (13): 92-93.
- [9] 王冲. 水利水电工程中施工技术及管理措施研究 [J]. 工程建设与技术, 2024 (6): 23-25.
- [10] 祝成鹏. 水利工程施工监理技术的创新与发展 [J]. 建材发展导向, 2024 (4): 83-85.

EPC 项目合同管理面临的风险及运用解析

沈扬波

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.2026020007

摘 要 : 近年来,在我国建筑工程的发展中,很多项目都采用了 EPC 总包的形式进行建设。但是,EPC 总包形式在其实施工过程中会受到自身特点的影响而给总承包商带来一定的困难。基于此,本文主要以新疆喀什地区巴楚县红海水库为例,针对 EPC 项目合同管理面临的风险展开分析,并提出针对性管理措施,以期 EPC 项目顺利开展提供一定参考。

关 键 词 : EPC 项目; 合同管理风险; 总承包

Analysis of Risks and Applications in EPC Project Contract Management

Shen Yangbo

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

Abstract : In recent years, in the development of construction engineering in China, many projects have adopted the form of EPC general contracting for construction. However, the EPC general contracting form may be affected by its own characteristics during its implementation, which may bring certain difficulties to the general contractor. Based on this, this article mainly takes the Red Sea Reservoir in Bachu County, Kashgar Prefecture, Xinjiang as an example to analyze the risks faced by EPC project contract management and propose targeted management measures, in order to provide some reference for the smooth implementation of EPC projects.

Keywords : EPC project; contract management risk; general contracting

引言

在建筑行业中事先签订一个具有法律效力的合同,保证合同的有效性及其权威性。在工程建设过程中,应该严格按照合同中的相关条款来进行施工及全周期生命活动,企业的领导也应该根据合同来执行自己的工作任务。合同的内容应该是针对工程的实际状况而制定的,并且将每一个环节都进行详细说明,为能根据施工的实际条件做出相应的处理措施,做好合同管理工作才能提升整个工程质量,树立企业良好口碑形象,并维护各方面的利益,促进建筑行业的良好发展。

一、EPC 项目的模式与特点

(一) EPC 项目模式

工程总承包模式 (Engineering, Procurement and Construction) 是国际工程领域广泛采用的一种项目交付方式,其核心在于由单一承包商或联合体对工程项目的设计、采购、施工实施全过程、一体化的总承包,业主通常仅需明确项目的功能需求、技术标准及最终性能指标,而将具体的设计优化、设备材料选型采购、施工组织管理等复杂环节及伴随的绝大部分风险转移至总承包商承担^[1]。这种模式显著区别于传统的设计-招标-建造分离模式,其突出特点是强调承包商对项目全生命周期的集成管理责任,合同结构相对简化,合同界面大幅减少,业主的管理协调负担得以减轻。总承包商则凭借其整合设计、采购、施工各阶段资源的专业能力,通过深度交叉作业以优化工期,通过设计施工融合以控

制成本,通过固定总价合同锁定投资风险,最终向业主交付一个符合合同约定、具备完整使用功能的“交钥匙”工程。

(二) EPC 项目特点

EPC 模式显著区别于传统承包方式,展现出鲜明而复杂的特征体系。总承包商则凭借其跨阶段资源整合能力与专业技术优势,通过设计施工深度融合实现设计方案与施工可行性的同步优化,从而压缩工期降低造价,固定总价合同形式进一步强化了业主投资预算的刚性约束,将大部分项目执行风险,如设计缺陷、设备延误、施工超支、技术适用性等转移至承包商承担^[2]。然而该模式对承包商的技术集成能力、项目管控水平、供应链协调效率及抗风险韧性提出了近乎苛刻的要求,承包商需具备强大的工程设计优化能力、精准的采购成本控制、高效的现场施工组织及全局风险预判与应对能力,方能确保在固定总价框架下实现盈利。同时业主在享受管理便利与风险转移时,面临着对承包商过

程管控弱化的问题，若前期需求定义不清或技术标准模糊，极易在项目实施中引发范围争议与高额索赔，固定总价不等于投资无忧，承包商在高压下可能采用更保守的报价策略或潜在的质量妥协以平衡风险。

二、工程概况

红海水库位于新疆喀什地区巴楚县境内，距喀什市约275公里，距巴楚县城约6公里。水库总库容7200万立方米，死库容922万立方米，属Ⅲ等中型工程。该水库是以灌溉功能为主，兼具水产养殖和生态供水功能的中型引水注入式平原水库，可改善灌溉面积37.12万亩。水库正常蓄水位为1123.10米，死水位为1119.66米，主体建筑包括大坝、泄水闸、放水闸及引水闸等，其中大坝、引水闸、泄水闸、放水闸等主要建筑物级别均为3级，工程抗震设防烈度为8度。

为优质履行工程总承包合同约定的全部内容，全面达成合同制定的各项目标，将基于项目实际需求，充分发挥工程总承包在综合协调、全局管控及资源集成方面的核心作用，促进各部门高效协同运作。中标后，联合体将组建专业高效的设计施工与采购总承包项目部，采用分层建制的组织形式，设置决策层、管理层和执行层。决策层由项目总负责人领导，作为工程管理的核心决策机构，全面负责工程总承包管理工作。具体岗位配置包括：项目负责人1名、项目技术负责人1名、设计负责人1名、施工负责人1名、施工副经理2名、安全总监1名。

三、新疆喀什地区巴楚县红海水库 EPC 项目合同管理的风险

（一）合同管理风险认知不全面

在新疆喀什地区巴楚县红海水库工程中，各方对合同管理潜在风险的识别与理解普遍存在深度与广度的不足，这种认知的局限性贯穿于项目全周期。具体表现为对关键风险要素的识别疏漏、对风险影响深度预判偏差以及对风险传导机制的忽视。业主方在制定需求与技术规格书过程中，可能未能充分虑及该地区极端干旱与偶发融雪性洪水并存的气象特征对工程耐久性的双重挑战，与特殊地质构造对水工建筑物基础施工提出的超常规技术要求。各方在合同谈判阶段普遍未能充分重视环境与社会维度风险，库区移民安置的敏感性、少数民族聚居区用工协调的复杂性以及荒漠地带生态恢复的特殊性往往未被纳入合同风险分配框架进行系统考量，合同界面管理中对设计参数优化与施工可行性的耦合风险认识模糊，对设备供应商技术参数偏离与现场安装冲突的连锁效应估计偏弱。

（二）合同风险管理制度不完善

红海水库 EPC 项目在合同风险管理层面的系统性制度安排存在显著缺陷，未能构建起一套覆盖风险识别、评估、分配、应对与监控全流程的闭环管理体系，这种制度性不足深刻制约了项目风险管控效能。具体表现为缺乏统一规范的风险识别与评估框

架，项目各方未能在合同签订前依据巴楚县地域特征与红海水库工程特性建立科学的风险清单，尤其对南疆高烈度地震带潜在影响、河流水源保障的不确定性、极端干旱与短期强降水叠加的水文气象风险以及高盐碱土质环境下混凝土耐久性等关键风险点的量化评估不足，未能有效转化为合同条款的针对性约定。在风险分配机制上，尽管采用了固定总价 EPC 合同模式，但合同条款对风险责任的划分过于笼统或原则化，未能清晰界定极端恶劣气候条件变化、突发性地质隐患、政策性环保标准提升等不可预见事件的费用承担与工期顺延边界，导致后续执行中争议频发。在风险应对层面则缺乏有效的动态监控与预警响应机制，合同履行过程中未能建立常态化的风险跟踪与再评估制度，对现场已暴露的风险征兆如特殊地质钻孔困难、关键设备跨境运输迟滞、生态保护区施工限制等应对迟缓，未能及时触发合同约定的风险处理程序或变更指令，合同变更管理流程本身存在制度性漏洞，设计优化、技术替代或工程量调整的申请、审批及价款结算流程缺乏清晰时效与决策链条，导致变更累积成本难以控制，执行纠偏滞后带来连锁负面影响。

（三）招投标阶段施工标准模糊

该项目在招标文件编制环节对关键施工技术参数与质量验收标准的界定存在显著模糊性，具体表现为对特殊地质条件下的基础处理技术标准、极端干旱环境混凝土耐久性指标、跨境河流生态敏感区施工工艺限制等核心要素描述不够精准具体。招标技术规格书未能充分结合巴楚县高盐碱土质特征明确防腐蚀施工的具体技术路径与材料性能要求，对红海水库所处高烈度地震带影响下的抗震构造措施缺乏量化验收标准。对于利用跨境水源可能面临的突发性水质变化风险也未设定相应的水工建筑物防护等级标准，设计任务书对库区复杂地质构造的勘探深度要求语焉不详，导致投标单位在理解库盆防渗处理、坝基软弱层加固等关键施工方案时存在较大解释空间。招标图纸中部分关键节点如导流建筑物与永久结构的结合部、高边坡支护的细部构造等深度不足，未能清晰表达施工实现的边界条件，对特殊环境下的施工工艺如大体积混凝土温控标准、强风沙环境焊接作业质量保障措施等缺乏明确的技术规范指引。对于采用新材料新工艺应对高盐碱腐蚀的试验验证程序与验收标准也未能详细规定，这种模糊性导致投标方在报价阶段难以准确预估技术难度与实施成本，部分投标人为争取中标倾向于采用较低标准进行技术响应，埋下后期实施质量争议与成本超支的隐患。

四、新疆喀什地区巴楚县红海水库 EPC 项目合同风险管理对策

（一）深化合同管理风险认知

针对巴楚县高烈度地震带、极端干旱气候、高盐碱土质环境以及河流生态敏感区等独特风险因素，组织业主、设计单位、承包商及监理人员定期开展专项风险研讨会，系统解析风险成因、潜在影响及历史案例教训，确保各方对红海水库工程复杂性有全面、统一的认识基础。特别是在设计优化、施工工艺选择与政策

变更响应等环节提前预见风险联动效应，项目团队应建立常态化的风险认知反馈制度，如通过合同交底会议、现场风险识别演练和风险知识库共享等方式，将风险因素如地质勘探不足引发的基础处理问题、极端气候导致的工期延误成本、跨国界环保政策升级的设计变更责任等具体化、可视化，避免招投标阶段标准模糊或执行争议频发^[3]。同时融入项目全生命周期风险管理文化，高层管理者带头强调风险预控的重要性，推动从合同签订到竣工验收的每个决策环节都基于风险分析先行原则。例如对特殊工艺如高寒混凝土浇筑或生态保护区施工技术的风险容忍度进行共识强化，并通过定期风险评估报告与复盘机制，持续追踪风险认知提升的实际效果，确保深化认知过程转化为具体合同条款的优化与执行监督，为后续风险分配、应对策略奠定坚实基础，最终实现风险管理的主动性提升和项目整体履约目标的顺利达成。

（二）运用指标化管理方式完善合同风险管理制度

针对红海水库工程特有的高烈度地震、极端干旱、高盐碱腐蚀及生态敏感等核心风险点设计可量化监测的关键绩效指标，例如设定基础处理工程的地质参数符合度指标、混凝土结构耐久性关键参数达标率指标、生态敏感区施工活动合规性监测指标以及跨境水质突变应急响应时效指标等，将抽象风险转化为具体可测量的数据目标。在合同条款层面明确这些指标的定义标准、监测方法、责任主体及考核周期，建立风险预警阈值与分级响应机制，当指标监测值偏离预设范围时自动触发风险复核流程与应对预案，对承包商的设计质量实施指标化管控，重点关注设计图纸中基础处理方案、抗震构造细节、防腐工艺路径等关键技术的参数达标率与施工可行性指标，避免因设计深度不足导致后续变更风险。在施工阶段全面推行工序验收指标化管理，特别是针对高盐碱土质防腐施工、强震区结构节点处理、库盆防渗工艺等高风险作业，细化材料性能抽检合格率指标、工艺工法符合度指标以及隐蔽工程一次验收通过率指标，通过过程数据的实时采集与

分析实现风险动态管控，针对工期延误风险建立关键路径节点完成率指标与极端气候停工影响系数指标，并关联相应的成本补偿或惩罚机制，对环保政策变动风险设置政策追踪响应时效指标及生态保护措施落实度指标，降低政策合规性风险。

（三）完善合同调价条款与机制

将主要建材如钢材、水泥、专用防腐材料的市场异常波动纳入重点监控清单，设定明确的价格涨跌幅度阈值及调整周期，同时高度关注中亚地区跨境河流生态保护政策升级可能引发的强制性设计变更或施工标准提高事项，将其作为独立调价因素在合同中预先约定补偿原则与测算方法。并特别设计适用于高盐碱土质施工的抗腐蚀材料与特殊工艺的成本异动响应机制，明确因不可预见地质条件如深层盐岩层或古河道遗迹导致的基础处理方案重大变更所衍生的增量费用处理规则^[4]。建立基于权威信息价平台或第三方价格指数联动的调价公式模型，详细规定公式中的权重系数、基准价格取定期及调整生效节点，在合同中嵌入工期顺延与成本补偿联动的具体计算法则，严格规定承包商提交调价申请的程序性要件和时效限制，包括佐证资料的完整性要求和申报时限要求，设立多层级的调价审批流程，明确监理单位初核、业主成本部门复核、法律顾问合规性审查的权责边界与操作时限。

五、结语

综上所述，对于 EPC 工程总承包方式下的合同管理而言，确实存在着一些风险隐患的问题。因此，要想保证建筑企业的不断发展，就需要结合实际情况加强合同管理以降低风险，充分了解并认识合同风险因素，完善自身的风险防御体系；将合同风险控制方法进行量化管理，进而更好地实现 EPC 工程整体承包模式中的合同管理风险防范目标。

参考文献

- [1] 吴恭云, 王琳薇. EPC 模式在水利项目中的应用分析 [J]. 四川水利, 2026, 47(01): 111-114.
- [2] 韦宇笑. EPC 工程总承包模式下动态造价管理体系重构与路径优化 [J]. 中国建筑金属结构, 2026, 25(03): 151-153.
- [3] 闵恒. 工程项目管理中合同管理与风险防控机制分析 [J]. 城市开发, 2025, (S1): 103-105.
- [4] 周麟, 方文浩. 工程总承包 (EPC) 模式下合同管理风险防范研究 [J]. 中国房地产业, 2025, (29): 14-17.

智慧河湖信息化监测体系构建与治理效能研究

靳美玲

北京慧图科技（集团）股份有限公司乌鲁木齐分公司，新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/WCEST.2026020008

摘 要： 河湖是维系水资源、生态和群众生产生活安全的重要生态载体，目前我国河湖治理已经进入精细化、智能化的发展阶段，但是传统的管理模式还存在着数据孤岛、监测滞后、协同不足、履职支撑薄弱等明显的问题，严重制约了治理效能的提高。本文根据目前河湖管理共性问题，从智慧河湖信息化监测体系的构建入手，对智慧河湖信息化监测体系在提高河湖监管、协同治理、河长履职、决策制定等各方面的核心作用进行深入分析，为各级河湖管理部门开展智慧化建设、提升治理水平提供切实可行的理论和实践借鉴。

关 键 词： 智慧河湖；信息化监测体系；河湖治理；治理效能；数字化转型

Research on the Construction of Information Monitoring System and Governance Efficiency of Smart River and Lake

Jin Meiling

Beijing Huitu Technology (Group) Co., Ltd. Urumqi Branch, Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract： Rivers and lakes serve as vital ecological systems that sustain water resources, ecosystems, and public safety in production and daily life. China's river and lake governance has now entered an era of refined and intelligent development. However, traditional management models still face significant challenges, including data silos, delayed monitoring, insufficient coordination, and inadequate support for governance responsibilities, which severely hinder the improvement of governance efficiency. This paper addresses common issues in current river and lake management by constructing an intelligent monitoring system. It provides an in-depth analysis of the system's core functions in enhancing supervision, collaborative governance, river chief accountability, and decision-making. The findings offer practical theoretical and operational references for river and lake management departments at all levels to advance intelligent construction and elevate governance standards.

Keywords： smart river and lake; information-based monitoring system; river and lake governance; governance efficiency; digital transformation

引言

河湖是生态系统的重要组成，它关系到水资源安全、生态安全 and 人民群众的生产生活安全。目前，我国河湖治理已经进入精细化、智能化的发展阶段，但是传统的管理模式还存在着许多不足，数据孤岛、监测滞后、协同不足等问题影响着治理效能的提高。为破解上述难题，推进河湖治理的数字化、智慧化转型，创建科学高效的智慧河湖信息化监测体系，就成为必然的选择。本文根据目前河湖管理共性问题，研究信息化监测体系的构建途径，分析信息化监测体系对治理效能的提高作用，为各级河湖管理部门开展智慧化建设、提高治理水平提供理论和实践上的参考。

一、当前河湖管理的共性问题分析

（一）数据资源管理存在短板

一是乡镇、村级精细化空间数据缺乏，河湖信息大多由人工绘制而成，矢量数据较少且更新不及时，专题空间数据覆盖不全；二是数据共享机制不畅，跨部门、跨层级涉河数据缺少有效

的互通，已共享的数据只停留在查询展示的层面，没有进行深度挖掘和价值利用；三是数据质量难以保证，基础数据更新维护缺少标准化审核机制，部分数据权威性、准确性不高，不能给管理决策提供可靠的支撑。

（二）业务应用系统支撑不足

一是系统规划没有统筹，各个层级、各个部门的河湖管理系

作者简介：靳美玲（1989.01-），女，汉族，新疆托里县人，本科，中级工程师，研究方向：水利信息化。

统各自为政，数据标准不统一，造成信息孤岛，工作人员需频繁切换系统，增加事务性负担；二是功能模块适配性差，随着河湖治理政策的更新以及业务的拓展，现有的系统已经不能满足河湖健康评价、幸福河湖建设、山区河道管理等新的业务需求；三是系统关联性分析不够，各个业务模块各自为政，涉水要素、事件、部件之间缺少关联，不能实现对河湖问题的综合分析和溯源管理^[1]。

（三）监管与协同能力有待提升

传统监测手段有局限，人工巡查、定点监测等受时间、空间的限制，不能对河湖全域进行实时动态监管，对非法采砂、乱占乱建等涉河违法行为的发现和处置滞后。跨部门协同治理效率低，河长办同各个职能部门之间缺少有效的数据通路和业务协同机制，很多工作还依靠人工对接，河湖问题处置的闭环管理难以落实。系统性能不能满足要求，随着河湖管理用户量和数据量的不断增加，现有的系统算力资源不足、技术架构落后，在并发量、吞吐量、时效性等各方面存在的性能短板越来越明显^[2]。

（四）履职与决策支撑能力薄弱

各级河长履职情况缺少智能化的统计分析和可视化展现，不能直观掌握辖区河湖治理总体状况，河湖问题处置缺少科学的数据剖析与决策支撑，对问题出现的规律、原因难以深入探究，造成治理举措的靶向性及有效性欠缺，基层河长履职缺少便捷的信息化手段，巡河、核查、上报等流程繁杂，履职效率低。

二、智慧河湖信息化监测体系的构建路径

智慧河湖信息化监测体系的创建采用“区级统建、多级应用”的实施模式，创建“基础支撑—数据资源—业务应用—保障体系”的全方位架构，针对上述四大共性问题，构建具体路径：

表 1：监测体系构建维度与关键举措汇总表

体系构建维度	核心解决问题	关键举措
数据资源体系	数据孤岛、质量差、更新滞后	建统一数据库、补空间数据、促跨部门共享、强质量管控
业务应用体系	系统分散、功能适配差、关联性弱	整合系统、优化功能模块、打通数据壁垒、简化操作流程
基础支撑体系	监测局限、协同低效、性能不足	建全域感知网络、强化算力支撑、搭协同机制、完善预警
履职决策支撑	履职不便捷、决策无数据支撑	可视化展示、优化移动工具、建分析模型、完善档案

（一）完善数据资源体系，打破信息孤岛壁垒

数据资源是智慧河湖建设的主要因素，采用梳理、补充、整合、共享、提质五个步骤：一是创建标准统一、整体协调的河湖大数据资源库，有针对性地解决数据短板问题。整理完善基础数据，对河湖名录、河长体系、水库湖泊等基础信息进行复核校验，补充缺失信息，建立数据更新维护的审核机制，保证数据的权威性、准确性；二是丰富空间数据资源，完成河湖矢量数据制作、河湖管理范围划界成果上图，建立地、县、乡、村四级精细化空间数据底板，补齐空间数据薄弱短板；三是整合各类业务数据，归集河湖健康评价、幸福河湖建设、清四乱、河道采砂、水利风景区管理等业务数据，实现业务数据与空间数据的关联映

射；四是建立数据共享机制，制定统一的数据标准和接口规范，推动跨部门、跨层级涉河数据的互联互通和共享交换，实现数据的深度挖掘和价值利用^[3]。

（二）构建业务应用体系，实现智能高效管理

以河湖长制业务需求为出发点，对现有的功能模块进行优化完善，补充新增的特色应用，构建“一屏统览、一网通办、一体协同”的智慧河湖业务应用平台，解决系统支撑不足的问题。其一，统筹系统建设，整合各级、各部门分散的河湖管理系统，统一数据标准和技术架构，消除信息孤岛，减轻工作人员系统切换的负担；其二，优化功能适配性，增加河湖健康评价、幸福河湖建设管理、水利风景区管理、山区河道管理等模块，完善现有的基础功能，实现对河湖治理全业务的覆盖；其三，强化模块关联性，打通各业务模块数据壁垒，实现涉水要素、事件、部件的关联分析，提升河湖问题综合分析和溯源管理能力；四是优化操作流程，简化业务办理环节，实现巡河、问题上报、处置等流程的标准化、规范化^[4-5]。

（三）夯实基础支撑体系，提升监管协同效能

创建“空天地水”一体化感知监测网络以及高效的基础设施支撑，针对监管局限、协同不足、性能薄弱等状况展开有针对性的解决工作。首先，创建全域感知监测网络，将卫星遥感、无人机巡查、视频监控、水文水质自动监测站、移动巡检终端等监测手段整合，从而达成对河湖全域的全方位、立体化、实时化监测，冲破传统监测的时空束缚；其次，加强基础设施支撑，依靠政务云、高速通信网络等搭建起稳定的、高效的算力和网络支撑平台，改善系统并发量、吞吐量、时效性等性能短板，补齐系统性能短板；再者，创建跨部门协同机制，利用业务应用平台搭建联席会商决策模块，达成河长办同各职能部门的数据互通、业务协同，削减人工对接环节，推进河湖问题闭环管理；接着，改良监测预警机制，借助大数据分析完成对非法采砂、乱占乱建、水质异常等状况的自动预警，提升问题发现和处置的及时性变^[6]。

（四）强化履职决策支撑，提升治理精准度

根据各级河长履职、科学决策的需求，创建全方位、智能化的支撑体系，解决履职不便、决策不科学等问题。第一，搭建可视化履职展示模块，创建“河长履职—河湖管理”双主题可视化界面，清楚显示河长履职情况、河湖治理成果，从而达成对河长履职的动态监管和量化考核；第二，改进移动履职工具，改良河长通移动 APP，完备工作台、巡河、四乱核查等功能，达成巡河轨迹自动记载，问题及时上报，现场核查取证等，加强基层河长履职效率；第三，创建决策分析模型，运用大数据分析技术，挖掘河湖问题产生规律，成因机理和演变趋势，给治理措施的制订赋予科学支撑；第四，健全河湖档案管理，将河湖全方面信息整合，实行河湖档案电子化、智能化管理，给河长履职和决策赋予精确信息支撑；第五，创建决策反馈机制，对治理措施执行效果展开数据分析并作出反馈，促使治理决策得以动态调整和改善^[7-8]。

三、智慧河湖信息化监测体系对河湖治理效能的提升作用

（一）提升河湖监管的精细化与智能化水平

空天地水一体化的感知监测网络冲破了传统监测手段的时空束缚，达成对河湖全域的实时动态监管，能迅速察觉非法采砂，乱占乱建，水质异常等河湖问题，明显加强问题发现的及时性与准确性，借助 GIS 一张图，大数据分析这些技术，可对河湖问题展开空间定位，溯源剖析以及趋势预估，促使河湖监管由“人工巡查”向“智能监测”，由“全域漫巡”向“精准管控”转变，提升河湖监管的精细化程度。

（二）提升跨部门跨层级的协同治理效能

统一的业务应用平台和数据共享机制冲破了“信息孤岛”，达成河湖治理数据的互联互通以及业务流程的无缝衔接，联席会商决策模块给跨部门、跨层级协同处置河湖问题赋予了线上平台，达成问题的统一发起、分级督办、闭环管理，削减了人工对接环节，极大加快了河湖问题处置速度，经由系统的权限划分和功能配置，达成自治区、地、县、乡、村五级河长的分级应用和协同履职，推进河湖治理责任层层压实，塑造起“上下联动、左右协同”的河湖治理新格局^[9]。

（三）提升各级河长履职的规范化与高效性

信息化监测体系给各级河长履职赋予了全方位的支持，依靠移动 APP 完成巡河任务的智能派发、巡河轨迹的自动记载、问题的及时上报，规范了河长巡河履职的流程；智慧河湖可视化展示模块直观呈现河长履职情况和河湖治理成果，达成对河长履职的动态监管和量化考核，压实河长履职责任；借助河湖档案、实时

监测数据等信息的快速查询，为河长现场履职、问题处置赋予精准的信息支撑，改善河长履职的高效性、针对性^[10]。

（四）提升河湖治理决策的科学性与前瞻性

河湖大数据资源库汇集了河湖治理的方方面面的数据，借助大数据分析技术，可对河湖问题产生的规律、原因机理以及变化趋向进行深入探究，从而给河湖治理措施的制订赋予科学支撑；河湖健康评价、幸福河湖创建等模块，可对河湖生态健康状况及治理成效展开量化评定，能迅速找出河湖治理中的薄弱之处，给改进治理方案、调整治理策略给予参照，而且可凭借治理措施执行效果的数据剖析和反馈，达成河湖治理的动态调整和闭环改良，促使河湖治理决策由“经验判断”转向“数据决策”，提升河湖治理的科学性与前瞻性。

四、结论

本文主要研究智慧河湖信息化监测体系的构建以及治理效能的提高，从目前河湖管理数据、业务、监管、履职四个方面存在的共性问题出发，提出相应的体系构建路径，分析体系对治理效能的提升作用。研究表明，智慧河湖信息化监测体系将“空天地水”监测资源融合，消除数据共享障碍，改善业务应用流程，可明显加强河湖监管的智能化，协同治理的高效化，河长履职的规范化，决策制定的科学化。建立该体系是推进河湖治理现代化的重要举措，未来需不断改进标准规范、加强安全保障，促使体系不断更新，助力实现河湖长制提质增效和幸福河湖建设目标。

参考文献

- [1] 孙洪林, 蒋新新. 利用信息化技术提升河湖库智慧化管理水平 [C]// 中国水利学会, 西安理工大学. 2024 中国水利学术大会论文集 (第一分册). 水利部信息中心; 水利部南京水利水
文自动化研究所, 2024: 13-18.
- [2] 罗三强, 朱瑾, 赵涛, 等. 信息技术在河湖管理系统中的应用 [J]. 电子技术, 2024, 53(02): 399-401.
- [3] 狄俊明, 李洋. 河湖生态数字化、智慧化平台建设 [C]// 河海大学, 甘肃省水利学会. 2023 中国水资源高效利用与节水技术论坛论文集. 黄河水利委员会宁夏水文水资源局; 黄河水
利委员会中游水文水资源局; , 2023: 45-50.
- [4] 姜晴霞, 徐量. 智慧水利与河湖综合管理应用研究 [J]. 治淮, 2020, (01): 40-42.
- [5] 艾萍; 唐燕; 黄藏青. 水利信息化标准建设的探讨 [J]. 水利信息化, 2013(02).
- [6] 芮晓玲; 吴一凡. 基于物联网技术的智慧水利系统 [J]. 计算机系统应用, 2012(06).
- [7] 叶健. 江苏水利信息资源整合共享研究与实践 [J]. 水利信息化, 2018(05).
- [8] 贾智乐, 郭步天, 黄伟, 等. “天-空-地”监测技术在信阳市智慧河湖监管中的应用 [J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(01): 78-80.
- [9] 冯森林. 徐水区河湖长制河长协同管护策略探讨 [J]. 河北水利, 2025(12).
- [10] 赵继伟. 水利工程信息模型理论与应用研究 [D]. 中国水利水电科学研究院, 2016.

水利水电工程施工现场试验检测的相关问题分析

于燕

新疆博汇工程质量检测有限公司，新疆 阿克苏 843000

DOI:10.61369/WCEST.2026020009

摘 要： 为切实增强水利水电工程施工效能，实现质量问题、安全风险快速识别与精准处置，推动现场管理的体系化、规范化以及高效化，达成预期目标任务。文章以试验检测为基础，运用文献资料研究、案例分析等方法，概括水利水电工程施工现场试验检测的重要性，梳理试验检测的主要内容，总结面临的问题，尝试从制度要素、技术要素等维度出发，创新试验检测路径，形成一套完整的水利水电工程施工现场管理体系。

关 键 词： 水利水电；工程施工；现场试验检测；方法路径

Analysis of Related Problems of Test and Inspection in Construction Site of Water Conservancy and Hydropower Engineering

Yu Yan

Xinjiang Bohui Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Aksu, Xinjiang 843000

Abstract： To substantially enhance the operational efficiency of hydropower and water conservancy projects, this study aims to achieve rapid identification and precise resolution of quality issues and safety risks, while promoting systematic, standardized, and efficient on-site management to fulfill predetermined objectives. Grounded in experimental testing, the paper employs literature review and case analysis to highlight the critical role of on-site testing in construction projects. It systematically outlines key testing components, identifies challenges, and proposes innovative testing methodologies through institutional and technical dimensions, ultimately establishing a comprehensive on-site management framework for hydropower and water conservancy construction.

Keywords： water resources and hydropower; engineering construction; on-site testing and inspection; methodology and path

前言

试验检测作为施工管理体系的重要组成，通过数据的定向获取、科学分析，实现检测结果于质量标准的精准对比，辅助管理人员调整决策，进行针对性的现场作业。着眼水利水电工程特殊性，施工企业应当以试验检测为切入点，持续优化施工现场管理体系，推动质量问题的快速发现、高效反馈与精准处置，全面保障项目施工质量。

一、水利水电工程施工现场试验检测的重要性

（一）提升水利水电工程施工质量

施工现场试验检测作为质量管控的核心手段，贯穿水利水电工程施工全流程，通过对施工原材料、中间产品及实体工程的系统性检测，精准捕捉材料性能偏差、施工工艺缺陷等潜在质量隐患，为施工质量把控提供科学量化的数据支撑^[1]。依托试验检测获取的精准数据，针对性优化施工工艺、调整施工参数，及时纠正施工过程中的不规范操作，从源头规避质量漏洞，确保工程各分项、分部工程均符合设计标准及行业规范，推动工程施工质量实现标准化、精细化提升，保障工程长期稳定运行。

（二）防范水利水电工程施工风险

水利水电工程施工多处于野外复杂环境，受水文、地质、气候等自然因素影响较大，涉及地基处理、防渗施工、结构浇筑等多个环节，容易出现地基失稳、渗漏、结构强度不足等安全隐患。施工现场试验检测通过对地基承载力、防渗性能、结构强度等关键指标的实时监测与精准检测，可提前识别施工过程中的安全风险点，预判风险发展趋势，为风险防控提供科学依据。通过试验检测及时发现地基岩土性能不达标、防渗设施存在漏洞等问题，指导施工企业提前采取加固、防渗等针对性处置措施，将安全风险遏制在萌芽状态，降低施工安全事故发生率，保障施工人员人身安全及工程建设顺利推进，同时减少因风险处置不当造成

的工期延误与经济损失。

二、水利水电工程施工现场试验检测的主要内容

（一）地基岩土试验检测

地基岩土作为水利水电工程的基础承载部分，其性能直接影响工程整体稳定性，是试验检测的核心内容之一。该检测主要围绕地基岩土的基本物理力学性能开展，重点检测天然密度、含水率、孔隙比、压缩系数、抗剪强度及承载力特征值等关键指标，明确岩土的承载能力与变形特性^[2]。检测过程中结合工程实际地质条件，采用环刀法、灌砂法、平板载荷试验、标准贯入试验等科学检测方法，其中环刀法适用于黏性土和粉土的密度检测，灌砂法适用于砂类土和砾类土，平板载荷试验可直接确定地基承载力特征值，确保检测结果贴合现场实际工况。每个地基单元工程至少检测3个点，复杂场地适当增加检测频次，确保地基岩土性能符合工程设计要求，为地基处理、基础施工提供可靠技术支持。

（二）施工材料试验检测

施工材料是构成水利水电工程的核心要素，其质量直接决定工程结构的强度与耐久性，因此施工材料试验检测是现场质量管控的关键环节。检测范围覆盖工程所用全部主要原材料及中间产品，包括水泥、砂石骨料、钢筋、预应力钢材、土工材料等。其中，水泥重点检测强度、细度、凝结时间、安定性等指标，必要时检测化学成分；砂石骨料检测粒径、级配、含泥量、压碎值等参数，粗骨料额外检测针片状颗粒含量，细骨料检测细度模数；钢筋及预应力钢材主要检测化学成分与力学性能，预应力钢材还需检测松弛率、疲劳性能。检测过程严格遵循行业标准，采用抗折抗压试验、烘干法、力学性能测试等规范方法，确保材料质量达标，从源头杜绝因材料不合格引发的工程质量问题。

（三）防渗性能试验检测

水利水电工程的防渗性能直接关系工程运行安全，尤其是堤坝、防渗墙、渠道等关键部位，防渗失效易引发渗漏、溃坝等严重隐患，因此防渗性能试验检测至关重要。该检测主要针对防渗体材料、防渗结构的防渗效果开展，重点检测渗透系数、透水率等核心指标，涵盖土工膜焊接质量、防渗墙连续性、土料填筑防渗性能等检测内容^[3]。检测方法根据检测对象不同合理选择，借助土工膜焊接质量采用真空检测或充气检测，防渗墙采用钻孔取芯结合压水试验验证墙体连续性与抗渗性，土料填筑防渗性能采用现场注水试验或室内变水头渗透试验检测渗透系数。通过系统检测，确保防渗设施满足设计防渗要求，有效阻止水体渗漏，保障工程结构稳定。

（四）结构强度试验检测

结构强度是水利水电工程抵御外力、保障长期运行的核心保障，结构强度试验检测主要针对混凝土结构、砌体结构、金属结构等工程实体开展，重点检测抗压强度、抗拉强度、抗折强度等关键指标^[4]。混凝土结构检测采用超声回弹综合法、钻芯法等无损或微损检测方法，超声回弹综合法可以在不破坏结构完整性的前提下，结合超声传播速度与回弹值综合评定混凝土抗压强度，

如图1所示：

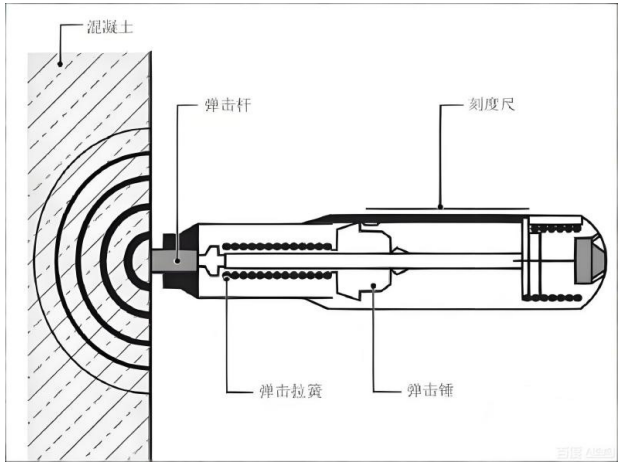


图1 超声回弹综合法示意图

钻芯法适用于对结构强度有怀疑的情况，每个构件钻取芯样数量不少于3个；砌体结构重点检测砂浆抗压强度，采用试块法检测，每250m³砂浆制作一组试件；金属结构主要检测焊接质量及力学性能，采用超声波与射线探伤等方法检测焊缝质量。通过精准检测，确保工程结构强度符合设计标准，能够抵御水文、地质等外力作用，避免出现结构开裂、失稳等问题。

三、水利水电工程施工现场试验检测面临的问题

（一）试验检测体系不健全

水利水电工程施工现场检测标准执行不到位，部分施工单位未结合工程实际制定针对性的检测方案，检测项目、检测频次、检测方法未严格遵循行业规范，存在取样位置随意、试件制作不规范、检测流程简化等问题，导致检测结果无法真实反映工程实际质量。检测管理制度不完善，缺乏明确的岗位职责划分，检测人员、设备、数据的管理缺乏系统性，检测记录填写不完整、数据审核流于形式，甚至出现后补记录、虚假数据等现象^[5]。同时，部分工程未建立完善的检测数据追溯机制，检测结果与工程实际施工环节脱节，难以实现对施工质量的全程追溯与闭环管控，制约了试验检测工作的权威性与有效性。

（二）试验检测技术不高效

试验检测技术的先进性直接影响检测效率与数据精度，当前部分水利水电工程施工现场试验检测技术仍较为落后，难以满足现代工程高质量、高效率的检测需求。检测设备配置滞后，部分施工现场仍使用老化、型号落后的检测设备，精度不足、抗干扰能力弱，无法满足新型材料、复杂工艺的检测需求，同时部分施工单位为控制成本，选用低配置检测设备，进一步降低了检测数据的可靠性。检测技术应用较为传统，智能化、信息化检测技术的应用范围有限，多数检测工作仍依赖人工操作，不仅检测效率低下，还易因人为操作误差导致检测数据失真。此外，检测人员对新型检测技术、智能化检测设备的掌握不足，无法充分发挥先进技术与设备的应用效能，难以实现检测数据的实时采集、传输与分析，制约了试验检测工作的高效开展。

四、水利水电工程施工现场试验检测效能提升策略

（一）细化试验检测标准

立足水利水电工程施工的特殊性，结合工程设计与行业规范，细化完善施工现场试验检测标准，确保检测工作有章可循、有据可依。针对不同类型、不同规模的水利水电工程，制定针对性的检测方案，明确检测项目、检测频次、检测方法及合格标准，细化取样、试件制作、养护、检测、数据分析等各环节的操作规范，避免检测流程的随意性^[9]。同时，结合新材料、新工艺、新技术的应用，及时更新检测标准，补充新型材料、复杂结构的检测要求，确保检测标准与工程施工实际同步。加强检测标准的宣贯与执行监督，组织检测人员、施工人员系统学习检测标准，明确各环节的技术要求，建立标准执行考核机制，对未严格执行检测标准的行为进行规范整改，确保检测工作规范化、标准化开展

（二）完善试验检测体系

构建覆盖检测全流程的完善试验检测体系，强化检测管理的系统性与规范性。明确岗位职责划分，建立“专人负责、层层管控”的管理机制，明确检测人员、设备管理人员、数据审核人员的具体职责，确保各项检测工作有序推进。二完善检测管理制度，规范检测设备、检测数据、检测流程的管理，建立检测设备全生命周期管理档案，定期对设备进行校准、维护与保养，确保设备处于最佳运行状态；规范检测记录与数据审核流程，确保检测数据真实、完整、可追溯，建立检测数据终身追溯机制，将检测人员信息与检测报告绑定，强化检测人员的责任意识。引入第三方监督机构，形成内部自查与外部监督的双重保障，定期对现

场试验检测工作进行抽查，重点核查检测流程合规性、数据真实性，及时发现并整改体系运行中的问题，提升试验检测体系的运行效能。

（三）创新试验检测技术

加大试验检测技术创新投入，推动检测技术向智能化、信息化、高效化转型，提升检测效率与数据精度。具体来看，推进检测设备智能化升级，逐步淘汰老化、落后的检测设备，优先选用自动化、高精度、抗干扰能力强的智能化检测仪器，如无线传输土压力盒、混凝土碳化深度仪、RTK测量仪、无人测量船等，减少人为操作误差，提升检测效率。同时，推广应用先进检测技术与信息化管理手段，引入遥感技术、无人机技术、物联网技术等，实现对工程现场的大范围、实时监测，利用智能化监测系统实现检测数据的实时采集、传输与分析，构建检测数据共享平台，实现不同部门、不同环节的数据共享，为施工决策提供快速、科学的支撑。同时，加强检测人员的技术培训，定期组织开展新型检测技术、智能化设备操作的培训活动，提升检测人员的专业素养与操作能力，充分发挥先进技术与设备的应用效能。

五、结语

试验检测作为水利水电工程施工现场质量管控与安全防控的核心手段，对提升工程施工质量、防范施工风险、推动工程规范化建设具有不可替代的作用。文章立足工程实际，通过细化检测标准、完善检测体系、创新检测技术等针对性策略，优化试验检测工作流程，提升检测工作的规范化、智能化水平，确保试验检测结果真实、精准、可靠。

参考文献

[1]王志瑞. 水利水电工程施工现场试验检测的相关问题分析[J]. 园林建设与城市规划, 2025 (4): 11-13.
[2]杨迪, 姜正权. 试论水利水电工程试验检测的关键点[J]. 水上安全, 2024 (6): 133-135.
[3]王明时. 水利水电工程施工现场试验检测的相关问题分析[J]. 工程施工与管理, 2024 (5): 23-25.
[4]高尧. 水利水电工程试验检测的要点分析[J]. 水利水电技术与应用, 2025 (5): 69-71.
[5]冯启林, 陶磊, 王磊. 水利水电工程试验检测工作要点分析[J]. 工程技术研究, 2025 (18): 99-101.
[6]王丽峰. 水利水电工程质量常见试验检测方式探讨[J]. 山东水利, 2025 (3): 50-52.
[7]张仕琪. 水利水电工程试验检测关键点探析[J]. 工程研究与实用, 2025 (9): 69-72.
[8]苏锋, 薛瑞. 水利水电工程试验检测的要点[J]. 水利电力技术与应用, 2024 (16): 36-37.
[9]何艳, 明雯, 周媛. 水利水电工程地基基础岩土力学试验检测技术[J]. 工程施工与管理, 2024 (3): 39-41.
[10]沈思. 水利工程试验检测常见问题概述[J]. 工程管理, 2025 (1): 190-191.

新建小区供水管道系统设计与施工技术研究

张扬¹, 苟焕宙²

1. 青岛引黄济青水务集团有限公司, 山东 青岛 266109

2. 青岛城阳水务有限公司, 山东 青岛 266109

DOI:10.61369/WCEST.2026020010

摘 要 : 城市的城市化进程持续推进, 新建的住宅区对供水体系的安全可靠以及节能高效方面有更为突出的重视了, 小区供水管网构成了基础设施当中的关键方面, 它的规划是否科学以及建造质量的好坏, 会深刻地影响到住户的用水体验以及水资源的利用效果。新建小区的供水系统拥有独特的特性, 对管网布局进行优化、把管道材料当作合适的来使用以及开展二次增压的规划工作, 构成了它的核心方面; 那么对管道敷设连接的工艺以及试压冲洗的环节开展了深入探讨, 结合典型的质量缺陷来提出防控对策, 从而为相似的工程提供实践方面的指引以及理论上的参照。

关 键 词 : 新建小区; 供水管道; 系统设计; 施工技术; 二次供水; 质量控制

Research on Design and Construction Technology of Water Supply Pipeline System in New Residential Areas

Zhang Yang¹, Gou Huanzhou²

1. Qingdao Yellow River Diversion to Qingdao Water Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266109

2. Qingdao Chengyang Water Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266109

Abstract : As urbanization continues to advance, newly constructed residential areas place greater emphasis on the safety, reliability, energy efficiency, and high performance of water supply systems. The water supply network in residential areas constitutes a crucial aspect of infrastructure, and its scientific planning and construction quality profoundly impact residents' water usage experience and the efficiency of water resource utilization. The water supply system in new residential areas possesses unique characteristics, with optimizing pipeline layout, selecting appropriate pipeline materials, and planning secondary pressurization constituting its core aspects. This paper delves into pipeline laying and connection techniques, as well as pressure testing and flushing procedures, and proposes preventive measures based on typical quality defects, thereby providing practical guidance and theoretical references for similar projects.

Keywords : newly constructed residential areas; water supply pipelines; system design; construction technology; secondary water supply; quality control

引言

近年来, 随着我国城镇化进程的持续深入推进, 城市人口不断集聚, 城市居住空间形态发生了显著变化。新建住宅小区日益呈现出建筑密度高、楼层高、功能复杂化的“两高一复杂”特征。这种居住形态的转变, 直接导致城市用水需求由单一的“有水用”向“用好水”“安全用水”和“绿色用水”发生了质的飞跃。现代居民对于供水系统的稳定性、水质的安全性以及系统的节能降耗性能提出了更为严苛的标准, 这使得传统的市政直供水或简单水箱供水模式在应对高层建筑群的水压保障、水量调配时显得捉襟见肘, 已无法满足当前规范化、精细化的管理要求。

一、新建小区供水管道系统设计要点

(一) 供水系统设计的基本原则

新建住宅区的水源供给方案, 其进行规划时需要把安全稳固、运行可靠、成本可控以及便于维护这四项核心准则当作根本

遵循来开展, 供水水质需要满足《生活饮用水卫生标准》也就是 GB 5749 的规定, 系统需要配备相关措施来防止水质遭受二次污染。小区居民日常用水需求需要开展对供水水量以及水压的保障工作, 同时, 消防用水等特殊工况也应当被纳入考量范围, 系统规划需要把绿色理念融合进来, 巧妙地凭借市政水压, 进而开展

削减能耗的工作。

（二）管网布局与优化

小区供水管网的布局形式会直接和供水的可靠性以及经济性产生关联，小区干管布局需要把环状管网构建起来，或者和城镇给水管道进行互联来构成环网，这样能够提高供水保障水平；管网一旦出现漏水就会造成大量的水资源浪费，对住宅小区的供水水压来说也会造成不良的影响。^[1]支管以及接户管适宜运用枝状布局，这样的安排有利于开展日常管理以及维护方面的工作。供水管线的布局需要贴近用水密集的区域，这样来缩短输送的距离，进而降低水头的损耗以及运行的费用。管网布局需要兼顾对其他地下管线开展的统筹安排工作，在开展给水管道的敷设工作时，要是它与其他管道处于平行或者交叉的状态，那就得保证净距能够契合最低标准，生活给水管道以及污水管交叉的时候，需要把给水管铺设在污水管的上面，并且需要避免接口出现重叠，这样来防止水质受到污染。供水管网是承压的管网，管道要有良好的封闭性，这是连续供水的基本保证。^[2]安庆泰和府小区在开展供水系统设计工作当中，运用了两路进水管并且在其内部形成了环状管网，极大程度上提高了供水保障能力。

（三）管材选型与技术要求

在开展供水系统的设计工作当中，对管材进行挑选属于核心环节，这就需要对强度、耐用程度、水力特性、卫生安全以及经济成本等多个方面进行全面权衡，鉴于潍坊市居民住宅供水工程技术规范，对于不同位置的管道，需要把相异的管材当作材料来使用埋地供水管道需要拥有耐腐蚀以及承受地面荷载的能力。可以运用带衬里的球墨铸铁管、塑料管、金属塑料复合管以及内衬不锈钢复合钢管。

泵房管道推荐把不锈钢材质或者内衬不锈钢复合管当作材料来使用，它的不锈钢等级应该不低于06Cr19Ni10即S30408。连接方式建议运用法兰连接或者沟槽连接来开展连接工作。室内供水管道，它的管材选用需要同时兼顾耐腐蚀的特性以及安装的便捷性。不锈钢管、铜管、塑料管以及金属塑料复合管，都是适宜的选择，高层建筑供水竖管应当避免把塑料材质当作材料来使用，从而去应对较大压力负荷。安庆泰和府小区在工程实践当中，鉴于管位差异把不同管材当作材料来使用。室外埋地加压管道选用了球墨铸铁管，室内则运用了PSP钢塑复合管以及PPR管，泵房的内部，把不锈钢材质当作管道来使用了。这样的策略实现了效能以及成本之间的平衡。

（四）二次供水系统设计

高层住宅的供水系统当中，开展二次设计工作是关键的一面，小区建筑的高度、市政供水的压力以及用户用水的规律，共同对二次供水方式的确立产生影响，工频水泵以及屋顶水箱会开展协同运作，再加上变频调速供水以及气压给水，这些构成了主要的供水方式。建筑高度以及设备性能会把供水分区的划分决定下来，这样就能防止低层用户出现压力过大的状况，泰和府小区运用集中泵房并联分区供水方式来开展供水工作，竖向把它划分为两个区域，其中104户进行加压供水，112户进行常压供水，这样分区压力的优化就得以实现了。泵房规划开展构成二次供水的关键环节的工作，那么泵房需要单独开展设立工作，它的入口应当直接和公共走道进行连通，适宜建造在住宅建筑的外部，要避免把它和卧室、客厅形成上下层或者紧邻的关系。泵房需要去安

装独立的水电计量设备，这样有利于开展后续的运营管理工作。

二、供水管道施工关键技术

（一）施工准备与放线

施工之前，供水管道需要开展完备的技术预备工作，施工团队需要制定出详尽的作业计划，并且确立质量以及安全管控的办法，管线放线需要把设计图纸当作参照，并且结合现场的实际状况来执行。在开展道路改造或者地下管线复杂方面的区域施工的时候，得开展细致的管线探测工作，从而精准地确定既有管线的具体位置以及延伸方向。新管道开展铺设工作时，需要和既有管线保持适宜的距离，建议超过1.5米。要基于原有分支连接情况来开展预留接口的工作，以保障旧系统在接入前能够持续供水。

（二）管道敷设与埋深控制

给水管道的埋设深度，需要结合土壤冻结的情况、外部压力以及管材性能等方面的要素来进行综合考量，在非冰冻区域，可以把管顶覆土的厚度设定为0.8米至1.2米；在冻土带当中，要把管道铺设深度控制在低于冻结层底部的位置。当穿越车道以及其他荷载较大的区域的时候，要把管道的埋深适当增加，或者选用套管来开展保护工作。这些管道多采用粗糙的施工方式，没有进行专业化的管网规划和合理的水压调节，导致一些区域常常出现水压过低或过高的问题。^[3]

管道基础的处理方式，对于管道能不能长久地保持稳定，会起到决定性的作用，把给水管道铺设在原状土层表面，这个土层需要保持未受到扰动的状态；要是地基是淤泥这类软弱土层，它的承载力通常很难契合工程方面的需求，这样的话就需要开展相应的地基加固工作；砂垫层铺设在了基岩表面，能够起到缓冲方面的作用。

（三）管道连接与附属设施安装

管道的材质是各不相同的，连接的方式需要进行相应的适配，球墨铸铁管通常选用承插式橡胶圈接口，这个接口拥有柔性，可以适应少量的不均匀沉降；小区内安装管道时往往没有系统的规划管道的敷设随楼房建设一段一段地进行施工使一些管道在小区内呈单一枝状延伸这种管道会增加很多不必要的水头损失影响小区的供水水压。^[4]钢管进行连接的时候，开展焊接操作是不可少，并且内表面和外表面都需要去实施防腐工艺；不锈钢管道适合把法兰或者沟槽当作连接方式来使用，也就是适宜采用这种方式来开展接合工作。开展附属设施的安装工作，是保障系统稳定运行的基础，阀门进行安置的时候，需要保证定位能够做到精确，并且开闭能够自如，主管道每隔500至1000米应当加装用于检修的阀门。排气阀需要安装到管道的最高位置，这样可以把内部气体排出；开展检修放空工作的时候，排水阀会被放置在管道的最低位置，消火栓设置的间距一般是在100到120米的范围当中，距离车行道的边缘不会超过2米，并且和建筑物的外墙要保持至少5米的距离。

（四）非开挖施工技术应用

城市地下管网网络日益复杂起来，新建住宅区的供水系统设计正在广泛运用非开挖施工方法来开展工作，地筋式微顶管技术也就是这种新兴的施工方法，呈现出作业高效、占地有限以及环境扰动轻微等比较突出的特性。郑州高新区朱碧安置房项目的水

源工程,成功地开展了直径200毫米给水过路管的铺设工作。此次施工运用了地箭式微顶管技术。这种口径的小型顶管作业,在全国范围内得以首次实现。这个工艺凭借液压系统来开展驱动工作,把导向管当作传输介质来使用,在末端开展螺旋出土装置以及扩孔切削部件的装配工作,沿着预设路径进行顶推从而实现管线敷设,特别适宜已建成道路下方的市政工程施工,施工过程中,对于周边交通以及环境所产生的影响得到了极大程度上的降低。

三、质量控制与验收要点

(一) 施工过程质量控制

供水管道的施工工作当中,它的质量管控工作必须要覆盖从开始一直到结束的每一个环节,管材、阀门以及其他物资在入场的时候,质量合格的证明文件务必要齐全,见证取样检测需要按照规定来开展。通过对老旧小区的管网图、路面翻新记录、管道维修档案进行分析,基本确定供水管道的潜在泄漏点、管道走向与管径等数据;^[6]在进行管道铺设工作时,像接口品质、管线倾斜度以及敷设深度这类关键参数,都需要开展严格的把控工作。

对隐蔽工程开展验收工作,构成了质量控制方面的关键环节,把管道敷设工作开展完成之后,在进行回填土方之前,需要对管道基础、接口连接处、防腐涂层以及各类附属设施的安装状况逐个开展核查工作,同时做好影像记录。压力管道需要去开展水压测试工作,以此来验证它的强度以及严密性能够契合设计规范。居民小区供水管道的性能必须符合一定的要求,达到维修简便、耐腐蚀性良好和抗火性能强等多项条件和标准,以避免选材不当而造成的额外损失。^[6]

(二) 冲洗消毒与水質保障

新建的供水管道在启用之前,需要去完成冲洗以及消毒的处理工作,要开展管道冲洗工作,得保证它内部是洁净的,并且水质清透,消毒过程通常会凭借含氯消毒剂来开展浸泡工作得以实现,然后用生活饮用水进行冲洗,保证水质契合《生活饮用水卫生标准》的规定。随着生活水平提高,如何改良供水管材来保证供水水质及供水安全显得尤为重要。^[7]

(三) 竣工验收标准

工程竣工之后,需要召集开发方、供水单位、设计以及施工方一起来开展验收工作,工程验收方面囊括了资料核验工作、开展实地质量考察工作、进行水质分析以及开展系统协同测试工作。中国华东区域出现大面积长时间极端低温气候,出现了较大面积的居民住宅小区水管冻结、冻裂现象,极大的影响了住宅小区的正常供水,并造成了水资源的大量流逝。^[8]要是供水管线以及配套设备设施在竣工验收的时候没办法达到建设标准,那么开发建设

参考文献

- [1] 李慧. 住宅小区供水有关问题探析 [J]. 门窗, 2019, (09): 166+169.
- [2] 崔国贞, 彭博. 城市及住宅小区供水管道管材的选择 [C]// 土木建筑学术文库 (第11卷). 河南绿地中原置业发展有限公司; 河南中辰工程咨询有限公司; , 2009: 496-497.
- [3] 钱磊, 李凯强, 杨金帅. 老旧小区供水管道改造优化措施分析 [J]. 住宅与房地产, 2025, (10): 105-107.
- [4] 陈云山. 浅析城市小区供水水压不足 [J]. 山西建筑, 2009, 35(35): 160-161. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2009.35.190
- [5] 刘俊良. 老旧小区供水管道改造中管道定位探测技术分析 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (11): 169-171.
- [6] 关腾飞. 居民小区供水管材选择与应用 [J]. 黑龙江科学, 2019, 10(02): 90-91.
- [7] 崔国贞, 彭博. 城市及住宅小区供水管道管材的选择 [C]// 土木建筑学术文库 (第11卷). 河南绿地中原置业发展有限公司; 河南中辰工程咨询有限公司, 2009: 496-497.
- [8] 俞宙. 居民住宅自来水管冻防的研究 [J]. 科技视界, 2016, (16): 255+233. DOI: 10.19694/j.cnki.issn.2095-2457.2016.16.190.
- [9] 赵杨, 张丽娟, 田帆. 城市小区供水系统存在若干问题的剖析 [J]. 林业科技情报, 2004, (04): 30-32.
- [10] 韩先明. 住宅小区供水有关问题的探讨 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊), 2015, (12): 118.

单位就得开展整改工作。整改完成并且合格之后,才可以办理移交和接管方面的手续,供水系统经过检验并且达到标准之后,才可以和市政管网来实现最终的连接,并且投入运行。

四、常见质量问题与防控措施

(一) 管道漏水问题

管材质量存在缺陷、接口焊接不够牢固、基础出现沉降、覆土没有进行分层夯实等。严格把控进场材料,开展外观查验以及二次检测工作;隐蔽工程的验收工作需要加强开展,回填土当中要杜绝石块、砖头混入,管道两侧以及管顶0.5米的区域应当进行人工逐层压实。泄漏不仅使得宝贵的水资源大量浪费,也会影响供水管网的安全可靠性,还是供水系统水压不足的原因之一。^[9]

(二) 水质二次污染

管道内壁出现了锈蚀的情况,水箱清洗工作存在着滞后现象,管网末端的水体长时间处于停滞状态。我国众多住宅小区供水方面都存在着一定的问题,必须要及时的找寻有效的措施对其进行改善,为人们提供一个稳定的用水环境,改善生活质量。^[10]防控举措当中,优先把不锈钢或者耐腐蚀的PE管材当作管材来使用;排气阀以及排泥阀的配置工作需要来进行审慎的考量;二次供水设施需要开展规范的运行管理工作,同时应当建立定期清洗消毒的制度。

(三) 噪音问题

管道当中的流体速度比较高,水泵减震装置的效能不太好,固定支架出现了松动的情况。开展了水力计算的优化工作,把流速控制在了合理区间当中;在泵房当中安装减震基座来开展安置设备的工作,在管道穿过楼板的位置进行了套管的加装,并且在其内部填充了柔性材料。

五、结论与展望

新建住宅区的给水管网开展设计以及安装工作,需要设计方以及施工方进行紧密协作,那么管网布局需要开展优化工作,管材选型要进行科学的选择,二次供水应当开展分区工作;施工环节当中需要严格去控制管线铺设的品质,优先把非开挖等前沿工艺当作工具来使用,以此保障工程的整体质量。

未来,智慧水务的不断演进,会引领新建住宅的供水体系朝着智能化以及信息化的路径来前行,智能水表得以广泛安装,对管网压力开展实时监控工作,对二次供水进行远程调控工作,借助这些技术手段有力地保障了供水系统的安全运行以及精细化管理工作的开展。对分质供水以及高品质供水等新型供水模式开展的探索工作,给供水管道系统的设计和施工方面提出了更加严格的要求。

农村水利基础设施长效运维管理体系构建研究

何建阁

新疆维吾尔自治区拜城县水资源总站, 新疆 阿克苏 842300

DOI:10.61369/WCEST.2026020011

摘 要 : 农村水利基础设施是支撑农业发展、提升农村生活质量、促进乡村振兴的基础性工程, 包括小型水库、灌排渠道、泵站、塘坝等一系列设施, 在农民日常生活中起着重要作用。本文基于农村实际情况并结合基层管理工作现状, 对当前农村水利基础设施运行维护中存在的主要问题及其原因进行剖析, 探讨建立“权责明确、有稳定资金来源、群众广泛参与、监督有力”的长效运维机制, 提出切实可行的具体措施建议, 以期解决好农村水利管护难题, 使农村水利基础设施更好地发挥其应有的作用。

关 键 词 : 农村水利基础设施; 长效运维; 管护责任; 群众参与

Research on Long-term Operation and Maintenance Management System Construction of Rural Water Conservancy Infrastructure

He Jiange

Baicheng County Water Resources Station, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Aksu, Xinjiang 842300

Abstract : Rural water infrastructure serves as a cornerstone for agricultural development, improving rural living standards, and promoting rural revitalization. It encompasses facilities such as small reservoirs, irrigation/drainage channels, pumping stations, and ponds, which play vital roles in farmers' daily lives. Based on rural realities and current grassroots management practices, this study analyzes major operational challenges in rural water infrastructure maintenance and their root causes. It explores the establishment of a sustainable maintenance mechanism featuring "clear accountability, stable funding sources, broad public participation, and robust oversight," while proposing actionable recommendations to address rural water management challenges and enhance the effectiveness of water infrastructure systems.

Keywords : rural water infrastructure; long-term operation and maintenance; management and maintenance responsibilities; public participation

引言

农村水利基础设施是农村经济社会发展“生命线”, 与农田灌溉、防洪排涝以及农村饮水安全等密切相关, 也是实施乡村振兴战略的基础支撑。近年来, 在国家加大对农村水利建设投资力度下, 各类农村水利设施得到广泛铺设, 有效提升了广大农民群众生产生活水平^[1]。但是, 在实际使用中, 由于缺少一套合理有效的长效运维管理制度, 很多水利设施在建成后出现“一建而弃、有损即修”现象, 造成巨大浪费的同时也给农业生产带来不利影响并降低农民生活水平。目前, 针对农村水利基础设施运维管理还存在一些符合基层实际情况的问题亟待解决, 需要结合当地具体情况制定出切实可行、便于操作并且长久有效的运维管理办法来解决问题, 使农村水利基础设施真正发挥其应有的作用成为助力乡村发展的坚强后盾。

一、农村水利基础设施运维管理的现状及突出问题

(一) 运维责任模糊, “多头管、没人管”现象突出

农村水利基础设施类型多样、数量众多, 小至田间地头灌溉沟渠, 大至村级小型水库等, 管理责任不明晰是一个普遍现象。一些地方出现“政府管不到、村集体管不好、群众不愿管”, 县级水利部门主要负责大型水利工程维护工作, 对于村级小型工程

缺少有效监督; 乡镇政府虽然承担属地管理职责, 但是缺少专职人员以及时间进行日常养护工作, 一般流于形式; 而村集体是最基层也是最直接管理者, 在没有明确责任划分及奖惩措施情况下, 大多采取被动态度, 一旦发现问题就延缓维修或者向上级单位申请经费, 很少主动去处理这些问题。特别是涉及多个村庄之间或者一个村庄内部不同小组之间的水利工程, 责任更加难以界定, 出现问题时各村、各组互相推委, 造成这些设施长期得不到

修缮，例如有的跨组灌溉渠道被泥沙堵塞无法疏通，影响周围农田灌溉。

（二）运维资金短缺，管护保障能力不足

资金不足是影响农村水利基础设施运行维护管理的主要障碍，也是基层面临的重大困难。农村水利基础设施运行维护经费主要来源于上级财政拨款，而地方政府财力有限，而且拨款一般用于大中型工程或者抢修等，对小型村级水利工程日常维护几乎没有资金支持。村集体自身经济实力较弱，大部分村没有稳定集体经济收入，无力承担对水利设施进行定期检查、清淤以及维修所需费用^[9]。此外，由于缺少有效融资渠道，社会力量和个人参与积极性不高，难以实现多方共同出资的局面。很多村庄因为缺少维修经费而导致小问题变成大问题，例如小水泵坏了不能及时修理，在灌溉季节造成农田缺水；塘坝漏水而不及及时处理，慢慢失去蓄水作用，不仅影响农业生产，还有一定的安全风险。

（三）群众参与度低，“用而不管”问题普遍

农村水利基础设施的受益对象是广大农民群众，但是目前群众参与维护管理的积极性普遍较低，“只受益、不参与”，“用而不管”。一方面一些农民群众缺乏对水利工程设施进行保护的思想观念，认为水利工程属于国家或者集体所有，维修养护的责任与自己无关，看到工程出现损毁也不及时报告，甚至有的人为破坏，如向灌溉沟渠中倾倒垃圾，在沟渠上修建违章建筑等造成沟渠淤塞。另一方面缺少有效奖励措施，群众参与看护得不到相应回报，无论是义务看护还是出工出力，都不能激发起大家的热情。同时由于部分村庄青壮年劳动力外出打工，留在家中大多是老人和孩子，无力承担看护任务，也造成群众参与看护的人手严重不足。

（四）监管机制不完善，管护效果难以保障

农村水利基础设施维护管理工作缺少有效监督措施，监督缺位、考核宽松软，造成养护工作敷衍了事。县水利局对村内水利工程进行维修养护管理缺少常态化手段，一般采取突击检查的方式，不能及时发现问题并解决问题；乡镇政府无专职人员负责此项工作，对于村级维修养护工作督促指导流于形式，往往是一句话的事情，没有任何实质性约束力。同时，缺少合理的养护标准以及考评办法，对于养护人员的工作绩效无据可依，做好做坏都一样，使得养护人员责任心缺失，在日常巡检中马虎大意，在抢修时拖延时间，很难保证良好的养护效果。另外一些地方还存在“重考核、轻落实”的问题，考核结果与奖惩措施相脱钩，起不到应有的警示震慑作用^[10]。

二、农村水利基础设施长效运维管理体系构建的核心原则

（一）立足实际，贴合农村现状

农村水利基础设施种类繁多、分布广泛、单体较小，各地的水利工程状况、经济发展水平以及村民的需求各不相同，在进行维修养护管理时不能简单复制城市的水利工程或者是大型水利工程管理模式，要根据实际情况出发，针对每个村的具体情况来确

定适合本村的管理办法。一方面要满足工程的实际运行要求，另一方面也要兼顾到农村自身的经济实力以及村民的积极性，防止设定过高或者过严的要求，保证措施切实可行，使村委会及村民能够认可并愿意配合。

（二）责任明晰，权责统一

落实管护责任是建立长期有效的运行管理机制的前提，要改变“多头管、无人管”的状况，“谁受益、谁管护”，“谁主管、谁负责”，明确各方的责任，做到权责一致。县水利局、乡镇政府、村委会、村民等各负其责，划定各自管护区域、管护任务、管护要求，使每一件工程都有人管、有人负责，出现问题可以迅速追责到人，及时处理。在此基础上，要建立和完善监督考核制度，把管护效果作为对有关责任人的年终考评内容之一，进行不定期的联合检查和评价工作，防止出现“有其名无其实”的现象^[11]。同时也要尝试多种方式进行管理养护，比如让政府购买服务、委托第三方单位或者设置公益性岗位等方法来提高管理水平。加大财政支持力度，统筹安排各类涉农资金，拓宽融资渠道，形成稳定的养护经费保障机制。

（三）群众主体，共建共享

农民群众是农村水利基础设施最直接受益者，也是运维管理重要力量，在建立长效运维机制过程中要充分尊重群众意愿，发挥群众作用，做到“共建、共治、共享”。通过建立健全奖惩制度、开展宣传教育等方式使群众明白维护好水利设施对自己有利，从而自觉地对水利工程进行检查、养护、维修等，把“被管理者”转变为“管理者”，让群众真正成为水利设施管护主体。建立健全的质量监督管理机制，明确各级监督部门的职责与权限，确保监督工作有章可循。引入第三方监督机构，增强监督工作的独立性和公正性，避免利益冲突。

（四）量力而行，可持续发展

建设农村水利基础设施长效运维管理体系要结合当地经济发展状况和实际情况量力而行，防止盲目攀比造成财力浪费，在筹资方式、管理模式以及人员配备上既要保证基本运行又要符合村集体实际承受能力，研究低成本高效管护方案使维护工作长久开展下去，从而达到水利工程良性运转的目的。

三、农村水利基础设施长效运维管理体系的构建路径

（一）健全责任体系，明确管护主体

落实各级主体管护责任，形成“县级统筹、乡镇负责、村级落实、群众参与”的四级责任体系，做到责任到人、管护到位。县级水利部门负责全县农村水利基础设施运维管理工作总体方案制定、管护标准设定以及技术指导等，统一调配全县运维资金并对各乡镇、村进行监督检查与业务指导；乡镇政府设立专职水利管护机构并配有专人从事该项工作，负责辖区内所有农村水利基础设施管理工作包括日常巡检及考核评比等工作内容，在工作中遇到难题时积极主动向有关部门寻求帮助和支持；村委会是第一线也是最重要的一环，要组建本村水利管护队伍并确定具体人员承担起对本区域内各类水利工程设施进行定期检查维护、清理淤

积物以及其他小修小补的任务，并做好相关记录以备查阅；还要让广大群众参与到其中来，教育他们爱护自家附近的灌溉渠道等公共设施，一旦发现有损坏现象立即报告相关部门处理，也可以参加一些公益活动性质的维修活动。对于涉及多个村庄或者自然屯之间的共用工程设施，则需指定一个主要负责单位和几个协助单位共同完成这项任务以免互相推委^[5]。

（二）完善资金保障机制，破解资金瓶颈

结合当地实际情况，采取“上级补助、地方配套、村集体自筹、群众自愿、社会参与”的多种渠道筹集资金方式解决资金不足问题，保障运维管理工作的顺利开展。一是积极向上级申请财政资金支持，主动与县水利局、农业农村局等部门沟通协调，争取农村水利运维专项资金用于小型设施维修、管护人员补贴等方面；二是加大地方财政投入力度，在乡镇政府年度财政预算中安排一定数额的资金作为对辖区内水利设施数量及管护需求的补充；三是动员村集体出资，有集体经济收入的村庄从集体经济收入中拿出一部分钱用于水利设施维护保养工作，无集体经济收入的村庄采取一事一议的方式发动村民捐款捐物来弥补小修小补所需费用；四是吸纳社会各界力量参与其中，邀请本地企业和爱心人士捐款捐物参与到农村水利设施建设维护当中去，形成多元化投资格局。同时建立健全相关制度规定加强对这些钱物使用的监督力度防止被截留或者挪用现象发生从而提升其使用效益^[6]。

（三）强化群众参与，激发管护活力

坚持群众主体地位，采取宣传引导、激励措施、能力建设等方式调动群众参与运维管理的积极性主动性创造性，激发管护活力。做好宣传教育工作，在各村利用大喇叭、宣传栏、微信群、村民大会等形式向群众宣传农村水利基础设施的重要作用以及相关管理养护知识和规定政策，使群众明白维护好水利设施就是保障自己的生产生活安全，从而树立正确的观念并积极履行相应的义务；建立健全奖惩制度，对于积极参与水利工程管理和及时报告工程存在问题或主动出资出力的村民予以一定物质精神奖励如发放生活用品或者公开表扬等手段来调动大家积极性；对在工作中表现优异村级管理人员适当增加其工资待遇以增强他们责任感^[7]。

（四）健全监管考核机制，保障管护效果

建立健全“常态化监管、科学化考核、严格化奖惩”监管考核制度，切实做好运维管理各项工作并取得良好效果^[8]。一方面要完善常态化监管体系，在县一级水利局定期开展对乡镇以及村屯管护工作的检查的同时，各乡镇也要有专人负责对所辖各村屯的水利工程进行日常巡检，村级管护队伍每天做好巡查日志，第一时间发现问题及时处理，形成“县级抽查、乡镇巡查、村级自查”的三级联动模式；另一方面要设定合理的考核标准，根据实际情况制定适合基层的具体管护考核指标，主要考察设施完好率、巡查记录完整性、维修时效性、群众满意度等方面内容，防止考核指标过于笼统、不易执行；最后就是落实奖惩措施，把考核结果同村级管护经费、管护人员工资福利待遇、村级集体荣誉结合起来，对于考核良好的村集体及管护人员予以一定的物质奖励和精神鼓励；而对于考核差劲的，则责令其限时改正，整改无效者则削减甚至停发其运维专项资金补助，促使他们履行好自身职责^[9]。此外还要拓宽社会监督途径，发动广大民众参与到水利工程维护工作中来，敢于向那些不尽职责履责或者有令不行的人和事说不，保证这项工作阳光下运行^[10]。

四、结论

农村水利基础设施长效运维管理体系建立是解决好农村水利“重建设、轻管护”问题，使农村水利基础设施长久良好运行的有效途径也是促进乡村振兴的有效手段。目前农村水利基础设施运维管理中存在职责不清、缺少经费、群众参与少、缺乏监督等问题，这些问题都切合农村实际情况，严重制约着广大农民群众的生活生产。要搞好农村水利基础设施长效运维管理工作就要结合农村实际，把握好“立足实际、责任明确、群众主体、可持续发展”的原则，在完善责任制度、落实资金投入、发动群众力量、加强监督检查上做文章，采取切实可行措施，理顺各方关系，破解资金难题，调动群众积极性，加强监督管理考核工作，使农村水利基础设施真正起到服务农业生产、优化农村环境面貌、推进乡村振兴的作用。

参考文献

[1] 刘浩然. 崇信县农田水利基础设施建设现状问题及对策 [J]. 南方农业, 2025, 19 (24): 184-186.
[2] 陈景泉. 会宁县农田水利节水灌溉存在的问题及其对策 [J]. 南方农业, 2025, 19 (24): 197-199.
[3] 孔元杰. 农村水利基础设施防洪减灾能力提升对策 [J]. 农村科学实验, 2025, (24): 94-96.
[4] 余玫芳, 陈景祥. 基于乡村振兴背景下 AI 技术在农村水利基础设施领域中的应用研究 [J]. 价值工程, 2025, 44 (32): 159-162.
[5] 丁田桂. 农村水利基础设施建设对粮食生产的经济贡献测度 [J]. 棉花科学, 2025, 47 (10): 117-119.
[6] 郑传迅. 浅谈农田水利发展的现状及对策研究 [J]. 农业开发与装备, 2025, (10): 202-204.
[7] 高彩霞. 农村水利基础设施现代化转型研究——融合数字技术与管理创新的系统性解决方案 [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18 (03): 289-291.
[8] 李耀基. 甘肃地区农田水利智慧化建设的路径 [J]. 农业开发与装备, 2025, (04): 42-44.
[9] 苏长荣, 贺利云, 沙日娜, 敖特更达赖, 郭长富. 农田水利基础设施建设中的质量控制与管理要点 [J]. 农业机械, 2025, (03): 139-141.
[10] 李祥林, 陈丰照, 王世尧, 杜杰, 杨佳慧, 孙浩. 农田水利建设助力徐州市农业发展对策探讨 [J]. 南方农业, 2025, 19 (04): 172-174.

智慧水务系统功能提升与运行优化研究 ——基于九江市工程实践为例

韩耀辉

上海宏波工程咨询管理有限公司, 上海 201799

DOI:10.61369/WCEST.2026020012

摘 要 : 本文以九江市中心城区水环境系统综合治理二期项目及智慧水务系统建设为实践背景, 针对水务运维工作中监测覆盖不足、数据分散、调度滞后及运维效率低等实际技术难题, 在关键管段布置水位、水质、流量、雨量等智能监测设备, 采用智能井盖, 在易涝点、排口设置视频监控, 实现排水系统在线监测和动态分析, 及时发现污水偷排、外水入侵、管网堵塞、内涝、冒溢等问题, 构建一体化感知网络、多源数据融合平台、水动力仿真模型与智能调度体系, 实现排水设施的“一张图”可视化管理。工程应用后, 设备运维效率显著提高, 运维工作量明显降低, 城市水环境监管能力大幅提升。本文结合项目全过程实施经验, 总结关键技术与应用成效, 为同类型智慧水务建设提供可借鉴的工程经验。

关 键 词 : 智慧水务; 智能监测; 一体化调度; 运行优化; 智慧运维

Research on Functional Enhancement and Operational Optimization of Smart Water Systems — A Case Study Based on Engineering Practice in Jiujiang City

Han Yaohui

Shanghai Hongbo Engineering Consulting Management Co., Ltd., Shanghai 201799

Abstract : This paper takes the Phase II Comprehensive Treatment Project of the Water Environment System in the Central Urban Area of Jiujiang City and the construction of a smart water system as the practical backdrop. It addresses real-world technical challenges in water operation and maintenance, such as insufficient monitoring coverage, scattered data, delayed scheduling, and low operational efficiency. Intelligent monitoring devices for water level, water quality, flow rate, and rainfall are installed at key pipeline sections, smart manhole covers are adopted, and video surveillance is set up at flood-prone spots and drainage outlets to enable online monitoring and dynamic analysis of the drainage system. This facilitates the timely detection of issues such as illegal sewage discharge, external water intrusion, pipeline blockages, waterlogging, and overflow. An integrated sensing network, a multi-source data fusion platform, a hydrodynamic simulation model, and an intelligent scheduling system are constructed to achieve visual management of drainage facilities on a "single map". After the implementation of the project, the efficiency of equipment operation and maintenance has significantly improved, the workload of operation and maintenance has notably decreased, and the regulatory capacity for the urban water environment has been substantially enhanced. This paper summarizes key technologies and application outcomes based on the entire project implementation experience, providing referenceable engineering insights for similar smart water system constructions.

Keywords : smart water systems; intelligent monitoring; integrated scheduling; operational optimization; smart operation and maintenance

引言

当前城市水务管理正从传统人工巡检、经验调度向数字化、智能化方向转型。九江市城区面临老旧管网复杂、雨污混接错接、管道淤堵、易涝点多、水井冒溢、污水偷排、污染溯源困难等现实问题, 水环境治理与调度决策的复杂性。依靠人工记录、分段管理、被动处置的模式已难以满足安全运行、高效管控与环境治理要求。因此, 本文以实际工程为依托, 重点阐述如何通过技术改进解决实际问题, 提升系统整体运行能力。

一、项目概况及特点难点分析

（一）项目概况

九江市中心城区水环境系统综合治理二期项目为九江市中心城区水环境综合治理，包括河湖排水口整治、两湖水环境整治、污泥集中处置、中心城区现状管网改造修复、城市智慧水务系统建设等一系列治理工作，涵盖城市主干排水管网、污水厂、泵站、调蓄设施、河道及重点易涝片区，服务范围约80km²。其中智慧水务系统建设目标为实现“全面感知、数据共享、模型仿真、智能调度、精细运维”，在关键管段布置水位、水质、流量、雨量等智能监测设备，采用智能井盖，在易涝点、排口设置视频监控，实现排水系统在线监测和动态分析，及时发现污水偷排、外水入侵、管网堵塞、内涝、冒溢等问题，构建一体化感知网络、多源数据融合平台、水动力仿真模型与智能调度体系，实现排水设施的“一张图”可视化管理。提升城市排水防涝、污水收集输送、水环境监管一体化水平。

（二）项目特点

本项目覆盖范围广、设施类型多，涉及管网、泵站、污水厂、河道及调蓄设施等多类设施。同时由于城区建设年代跨度大，管网老旧且历史资料不全，雨污混接错接、污水偷排、污染源分散，管道关系复杂。本工程通过清污分流（混接改造）等综合措施，实现污水、清水各行其道，提高污水厂进水浓度，实现污水处理提质增效。在运行层面，要及时发现排水系统管道淤堵、内涝、检查井冒溢、污水偷排、外水入侵等问题并及时解决问题难度不小，且水力条件变化复杂，防汛排涝、应急指挥调度、泵站的开启、管网疏水量及各污水处理厂处理量的联合调度、水资源调度等调度难度大。此外，项目的业务链条长，涉及监测、控制、调度、运维、应急、考核多环节。对实用性的要求较高，必须贴合现场的实际工况，模型与算法要与本地化适配。需同时满足政府监管、企业运维、公众安全多重需求，对系统协同能力要求高。

（三）项目实施的难点

（1）治理标准高，实现很有难度，当前污水处理厂进水量大而BOD浓度低，污水处理厂运行效率低，而雨水管网有污水混入，排水BOD浓度不能达标，污水没有得到充分处理。本工程改造目标为雨污分流改造后污水处理厂进水BOD浓度达到75mg/L，COD浓度达到132mg/L，要实现该目标就需要摸清排污点，实现彻底雨污分流，并监测水质防止后续接入的管道再发生雨污混接错接。而老旧管网复杂、雨污混接错接、污水偷排、污染源分散，污染溯源困难，导致摸清排污点，实现彻底雨污分流难度大，监测水质防止后续接入的管道再发生雨污混接错接的难度也大。

（2）城市下垫面复杂，原有给排水、天然气、通讯、电力等管线及（构）筑物错综复杂，铺设管道施工过程中常遇到各种障碍物，难以按施工图纸施工，经常需要设计变更。

（3）智慧水务系统建设需求识别难度大，若前期未能准确确定干系人的需求并明确建设目标。易导致项目实施过程中就难免

会有新的需求出现，进而导致较多的变更，给实施项目的投资和进度带来不利影响。项目前期就准确的确定需求，并通过系统开发建设很好的实现，使系统建成后具备实用性与可操作性。

二、优化设计

（一）现状诊断

通过系统调研发现，现状排水系统主要存在感知能力不足、数据资源分散、调度方式粗放及运维效率低下等问题：一方面监测点布局不合理，关键节点监测缺失，数据断续、点位不合理，无法支撑实时监控。另一方面厂、站、管网、河道数据分属不同系统，无统一平台，标准不统一，单点监测设备运行，单设备上传为主，数据分散在PLC、视频、台账、Excel表格中，无法联动分析，难以融合应用。同时数据采集主要依靠人工经验，预警滞后、调度不精准。调度依靠经验判断，降雨期间易出现响应慢、调度乱、处置被动等问题。此外，运维仍以人工巡检为主，存在故障发现慢、巡检路线不合理、维护成本高，定期报表、实时性差、误差大等问题。整体影响了排水系统运行效率。

（二）技术改进思路

以“问题导向、数据先行、模型支撑、平台统一”为原则，开展全面摸排设施底数，完善管网、泵站、河道、排口拓扑关系。开展监测需求分析，确定必测点、优化点、补测点。制定统一数据接口与传输标准，打通各子系统。搭建总体架构确定感知层、网络层、数据层、应用层技术路线。通过这四步进行改进。

（三）改进技术应用

通过人工勘察、遥感探测、CCTV检测、水质检测分析等方法进行管线探测、资料校核、现场复核，摸清排水系统存在多处雨污混接情况，摸清污水入湖、雨水入厂的情况，为后续模型计算提供准确基础。

重视系统需求分析。全面识别项目干系人，并登记成册。识别哪些干系人能够提供需求方面的信息。访谈干系人，调查干系人管理制度、工作流程等，跟随运维工作人员观察各岗位如何执行工作（或任务）和实施流程，围绕干系人业务流程发掘干系人对系统的期望和需求。在初步识别和记录干系人的需求后，组织干系人和本行业专家召开研讨会，引导大家进行互动式讨论，分析各项需求的必要性、实现的可行性、经济性，剔除必要性不大、实现难度大、投资大、经济效益差的冗余需求，避免华而不实的技术堆砌，筛选出与运维业务紧密相关的、可以显著提升运维效率的需求，确定产品和服务的特性、功能和特征。

智慧水务系统开发根据工程建设需要分优先级，优先开发排水管网校核建库、入库及功能，在项目实施前期就尽早将现有的地下管网、管线数据和本项目设计管网数据入库，实现管网三维建模，进行碰撞试验和管网数据分析、校核，尽可能在管道铺设前发现管道碰撞、上下游反坡等问题，避免在施工过程中遇到问题导致返工，造成经济和进度的损失。在管道铺设过程中遇到障碍物时，也可以利用管网三维模型帮助变更决策、解决问题。利用水力模型模拟不同降雨情景，确定液位、流量、雨量、视频最

优布点方案，减少无效投资，提升覆盖效率。数据标准统一，制定物联网传输协议、数据字典、编码规则，实现设备统一接入。

三、系统建设

（一）智能感知体系建设

针对监测盲区与数据不稳定问题，构建“空—地—网”一体化感知网络。通过雨量监测站实现区域分钟级降雨数据采集。在关键节点、易堵段、合流段布设智能监测设备，包括流量计、雷达水位计、UVCOD计、视频监控、智能井盖报警器等感知设备，对管网液位、流量、水质、检查井冒溢、内涝等情况进行监测。针对泵站的运行监测，对电流、电压、水位、开停状态、流量全面采集。面对河道与排口的监测，做到水位、流量、视频监控联动。利用视频智能分析，对积水、溢流、异常排水进行自动识别。

表 1 感知系统建设前后对比（实测数据）

指标	建设前	建设后	提升效果
监测覆盖率	55%	98%	提高 43 个百分点
数据采集频率	15—30 分钟	1—5 分钟	实时性大幅提升
数据在线率	75%	96%	稳定性显著改善
异常告警响应	人工发现	自动实时告警	响应时间缩短 80%

（二）数据中心与平台集成

在数据整合过程中，建立统一数据中心，实现多源数据汇聚、清洗、存储、共享。实现历史数据迁移、格式转换、关联匹配，消除数据孤岛。搭建智慧水务综合管理平台，实现一张图展示、一平台管理。建设过程中重点解决多设备协议不兼容问题，实现不同品牌监测设备、PLC 系统、视频系统统一接入，数据接入成功率稳定在 96% 以上。

（三）模型系统建设与本地化率定

搭建管网水动力模型、内涝仿真模型、厂网联动调度模型三大核心模型。根据区域地形、管网管径坡度、泵站参数开展模型构建。利用实测降雨、液位、流量数据反复率定参数。形成适用于本地区的仿真模型，支撑预警与调度。经实测验证，模型内涝预警准确率达到 90% 以上，可提前 1—3 小时提供积水范围、深度、消退时间预测。

四、运行调度

（一）内涝防控智能调度

系统投入运行后，形成“降雨—监测—模拟—预警—调度—处置—复盘”闭环。实时汇聚雨量、管网液位、河道水位、易涝点视频。模型自动计算，推送预警等级、影响范围。联动泵站、调蓄设施优化运行，提前预降水位、加大抽排。调度指令自动推送至责任人，形成闭环记录。智慧调度闭环流程：降雨监测→模型推演→预警发布→泵站联动调度→现场处置→数据回传→效果评估。实际运行中，调度响应时间由原来平均 40 分钟缩短至 10 分钟以内，重点区域积水消退时间平均缩短 30% 以上，调度更加科学精准。

（二）厂网河一体化运行优化

根据污水厂处理负荷、管网液位、泵站状态，自动推荐泵组开启策略。避免管网高水位运行、减少溢流风险，提升污水收集效率。实现能耗优化，在保证排水安全前提下降低运行电耗。工程实测表明，一体化调度实施后，泵站无效运行时间减少，综合能耗下降约 12%—18%，管网拥堵、高位运行情况明显改善。

（三）应急调度

系统内置应急预案库，并支持不同降雨情景下的调度推演，为应急决策提供辅助支撑。平台支持视频会商、队伍物资管理、应急指令下发、处置过程留痕。在多次降雨应对中，实现指挥人员、运维人员、现场人员信息同步，处置效率明显提升。

五、后期运维管护

项目后期运维实行设备全生命周期管理，建立一物一码，记录安装、调试、维护、更换全过程。形成智能告警与自动派单结合，数据离线、超限、设备异常自动告警，自动生成工单并就近派单。利用移动运维 APP 现场打卡、拍照上传、维修记录、实现流程闭环。定期开展校准与预测性维护，根据运行趋势提前预判电池亏电、传感器漂移、设备老化，提前维护。

九江智慧水务依托 AI 大模型搭建多元耦合内涝水淹模型与水动力水质耦合模型并完成率定验证，排水运行预警诊断模型可结合气象数据模拟积水时空分布，动态分析实时数据，预判内涝、爆管、污水超标等风险并精准预警；实现城区雨污水工况与内涝风险预警、内河水质预警预报；排水追溯诊断模型集成多类子模型，实现污水厂进水水量平衡分析、管网外水入渗分区诊断及工业企业排放在线监管；多元耦合内涝水淹模型与水动力水质耦合模型评估调度预案效果，支撑厂站网系统态势评估、预测预报与优化调度，制定一体化调度方案，保障排水系统全局稳定运行、污水进出水水质达标，防控内涝与溢流风险。

建立常态化更新机制：管网改造、设施调整后及时更新 GIS 与模型；定期利用新监测数据率定模型，保证系统持续可用、准确可靠。

表 2 运维模式优化对比（实测数据）

指标	传统运维	智慧运维	改善效果
故障发现方式	人工巡检为主	自动实时告警	漏判率大幅降低
平均处置时间	2—4 小时	30—60 分钟	效率提升约 70%
巡检工作量	重复多	优化路线、重点巡检	人力成本降低约 30%
设备在线率	75%—85%	95% 以上	稳定性显著提升

六、实施效果及经验总结

感知能力从局部单点监测升级为全域覆盖、实时在线、稳定可靠。数据能力从分散孤立升级为统一接入、融合共享、标准规范。调度方面从经验调度升级为模型驱动、智能预警、协同联动。运维能力从被动抢修升级为主动预警、精细管理、闭环管控。通过项目的实践，城市内涝应对能力增强，居民出行与城市

运行更安全；水环境监管更加精准，污染溯源、溢流管控更高效。管理更数字化，考核与决策更具科学性。设施运行效率得到了提升，能耗与人力成本下降，综合效益明显。

从本项目的实践明白，智慧水务不是技术堆砌，要优先解决最突出的痛点。数据质量决定成败，管网拓扑、监测数据、设备状态必须准确可靠。必须立足实际问题，照搬通用参数无法满足实际调度需求，建设与运维同样重要。

七、结语

本文基于九江市智慧水务工程实践，围绕复杂水系及滨江城

市排水特点，从前期诊断、建设实施、运行调度到后期运维，系统阐述功能提升路径与技术优化方案。通过智能感知、数据融合、模型仿真、智能调度、智慧运维等措施，有效解决了传统水务管理中监测弱、数据散、调度粗、运维慢等问题，系统实用性、可靠性与智能化水平显著提升。智慧水务建设是持续优化的过程，后续可进一步深度开发 AI 智能大模型，作为智慧系统升级的核心引擎，通过数据训练实现自我优化，不断提升系统自动化与智能化水平，达成“越使用越智慧”，为城市水务安全高效运行提供更强支撑。

参考文献

-
- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇内涝防治技术规范 GB51222-2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [2] 王浩. 城市智慧水务建设与运行管理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [3] 李田. 城市排水系统模型及应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2019.
- [4] 张金松, 林峰, 张炜博. 水务数字经济: 技术赋能、价值重塑与创新实践 [J]. 给水排水, 2025, 51 (11): 169-174.
- [5] 邓颖. AI技术在智慧水务中的应用与前景 [J]. 办公室业务, 2026, (04): 63-65.

深部复合地层 TBM 分级掘进破岩机理 及岩机相互作用规律研究

张彩凤

安徽水利水电职业技术学院, 安徽 合肥 230601

DOI:10.61369/WCEST.20260200144

摘 要 : 水利工程地下智能建造是新时代水利基础设施建设的核心发展方向, 而深部复合地层条件下全断面岩石隧道掘进机 (TBM) 掘进面临着风险高、效率低、刀具磨损严重、岩爆与塌方频发等技术瓶颈, 严重制约了水利地下工程的智能化、高效化建设进程。本文以深部复合地层 TBM 分级掘进过程为研究对象, 聚焦分级掘进岩石破裂机理与岩机相互作用规律这一关键科学问题, 系统提出深部复合地层 TBM 分级掘进方法, 厘清分级掘进下岩石破裂演化机制与破坏模式, 探明刀盘-刀具-围岩动态相互作用规律, 旨在突破传统单一掘进模式的技术局限, 为水利工程深部地下隧洞安全、高效、智能掘进提供理论支撑与技术指引。研究成果可有效提升 TBM 对复杂地质的适应性, 降低掘进风险与施工成本, 推动水利地下工程建造技术向深部化、智能化、绿色化转型升级。

关 键 词 : 水利工程; 深部复合地层; TBM 分级掘进; 岩石破裂机理; 岩机相互作用

Study on Mechanism of Rock Breaking in Graded Tunneling of TBM in Deep Composite Strata and Law of Rock-Machine Interactions

Zhang Caifeng

Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei, Anhui 230601

Abstract : Underground intelligent construction of water conservancy projects is the core development direction of water conservancy infrastructure construction in the new era. However, the tunneling of full-face rock tunnel boring machine (TBM) under deep composite stratum conditions faces technical bottlenecks such as high risk, low efficiency, severe tool wear, and frequent rock bursts and collapses, which seriously restrict the intelligent and efficient construction process of water conservancy underground projects. This paper takes the graded tunneling process of TBM in deep composite strata as the research object, focuses on the key scientific issues of rock breaking mechanism and rock-machine interaction law in graded tunneling, systematically proposes the TBM graded tunneling method in deep composite strata, clarifies the rock fracture evolution mechanism and failure mode under graded tunneling, and explores the dynamic interaction law of cutterhead-tool-surrounding rock. The purpose is to break through the technical limitations of the traditional single tunneling mode, and provide theoretical support and technical guidance for the safe, efficient and intelligent tunneling of deep underground tunnels in water conservancy projects. The research results can effectively improve the adaptability of TBM to complex geology, reduce tunneling risks and construction costs, and promote the transformation and upgrading of water conservancy underground engineering construction technology to deep, intelligent and green.

Keywords : water conservancy project; deep composite stratum; TBM graded tunneling; rock breaking mechanism; rock-machine interaction

引言

(一) 研究背景与意义

随着我国水利工程建设向西部山区、地层深部不断地推进, 一大批距离长、埋深大、高地应力的地下输水隧洞、地下厂房等地下工程陆续开工建设, 此类工程的主要地质环境是深部复合地层。深部复合地层通常具有地应力高、渗透压高、温度高、各向异性强、软硬岩交互、断层破碎带发育等典型特征, 地质条件非常复杂, 这给 TBM 掘进施工工作带来了极大的挑战。传统的 TBM 掘

基金项目:

2023 年度安徽省高等学校科学研究项目 (自然科学类), 项目编号: 2023AH053032, 项目名称: 深部复合地层 TBM 分级掘进破岩机理及岩机相互作用规律;

2022 年高校优秀青年骨干教师国内访问研修项目 项目编号: gxgnfx2022173, 项目名称: 高校优秀青年骨干教师国内访问研修项目。

进施工采用单一掘进参数与破岩模式，用这种掘进模式对深部复合地层施工时，很容易出现刀盘卡机、刀具异常磨损、围岩大变形、岩爆、突水突泥等工程灾害。频繁发生的工程灾害会导致掘进的效率大幅降低，施工周期延长，还会引发严重的安全事故，造成巨大的经济损失。如何提高掘进效率，预防控制工程灾害成为制约水利工程地下智能建造的核心难题。

当前，水利工程地下智能建造以数字化、智能化、无人化为核心发展目标，这就要求 TBM 具备自适应不同地质条件、自主决策掘进参数、智能调控破岩过程的能力^[1]。要实现这一目标，前提是明晰深部复合地层下 TBM 的破岩机理与岩机相互作用的本质。分级掘进作为一种适配复杂地质的新型掘进理念，根据地层特性划分掘进等级，匹配差异化的掘进参数、破岩方式与支护策略，可以有效地缓解单一掘进模式与复杂地质的不匹配问题，大幅提升掘进安全性与效率。因此，开展深部复合地层 TBM 分级掘进破岩机理及岩机相互作用规律研究，破解现有掘进方式风险大、效率低的瓶颈，对于完善水利地下工程 TBM 施工的理论体系，推动深部水利工程智能建造的技术突破，保障国家重大水利工程顺利实施具有重要的理论价值与工程实践意义。

（二）国内外研究现状

国内外学者针对 TBM 破岩机理与岩机相互作用开展了大量研究。在单一的均质硬岩地层中，滚刀的挤压破岩、剪切破岩机理已较为成熟。围绕滚刀的贯入特性、岩石破碎坑形成、刀群组合破岩效应等方面也取得了丰富成果。在复合地层 TBM 施工方面，现有研究多集中于软硬不均地层、破碎地层的掘进参数优化、刀具磨损预测、围岩稳定性控制等，提出了部分地质适应性的掘进策略^[1]，但大多针对浅部地层，未能充分考虑深部高地应力、高渗压的耦合作用^[2]。

在分级掘进的研究领域，现有的成果大多聚焦于施工工艺层面的分段掘进，针对不同围岩等级制定简单的参数调整方案，缺乏从岩石破裂机理—岩机相互作用—分级控制策略的系统性研究，尚未形成适配深部复合地层的 TBM 分级掘进理论体系。现有研究对深部复合地层岩石在分级荷载、动态扰动下的破裂演化规律，以及刀盘—围岩动态耦合作用机制的认识尚不清晰，难以支撑智能掘进的精准决策与调控。当前的研究无法满足水利工程深部地下智能建造的技术需要，需要开展有针对性的系统研究，解决深部复合地层 TBM 分级掘进的核心科学问题。

（三）研究内容与技术路线

本文围绕水利工程地下智能建造中深部复合地层 TBM 分级掘进的核心科学问题，设定三大核心研究内容：（1）提出适配深部复合地层的 TBM 分级掘进方法，明确分级指标、分级标准与各等级掘进策略；（2）厘清分级掘进过程中深部复合地层岩石破裂机理，揭示岩石破裂演化过程、破坏模式与能量释放规律；（3）探明深部复合地层 TBM 分级掘进岩机相互作用规律，建立刀盘—刀具—围岩相互作用的力学模型与参数匹配关系。

采用室内试验、理论分析、数值模拟、工程验证相结合的技术路线。通过室内物理模拟试验，还原深部复合地层分级掘进破岩过程。基于断裂力学、岩石力学等力学理论，构建岩石破裂力学模型。利用离散元—有限元耦合的数值模拟，分析岩机相互作用的动态演化规律。结合水利工程现场 TBM 施工的掘进数据，验证研究成果的合理性与实用性。通过以上研究，形成完整的深部复合地层 TBM 分级掘进理论与技术体系。

（一、深部复合地层 TBM 分级掘进方法提出

（一）分级掘进的核心思路

深部复合地层 TBM 分级掘进的核心思路是以地质条件为基础，以破岩效率与围岩稳定性为控制目标，将掘进过程划分为不同等级，实现“一地一策、一级一法”的精准掘进。区别于传统单一的掘进模式，分级掘进模式充分考虑了深部复合地层的空间变异性与力学特性差异，通过精准地识别地层参数，动态划分掘进等级，通过匹配对应的刀盘转速、推进力、贯入度、刀具倾角、支护时机等参数，实现破岩过程与地质条件的高度适配，最大限度地降低围岩扰动，减少刀具磨损^[2]，提升掘进地效率与安全性。

（二）分级指标体系构建

构建科学合理的分级指标体系是实现 TBM 分级掘进的基础。结合水利工程深部复合地层特征，综合考虑地质指标、力学指标、工程指标三大类核心因素，建立多维度分级指标体系^[3-5]：

1. 地质指标：包括岩石单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、围岩完整性系数、地应力大小、渗压系数、岩层倾角、断层破碎带宽度等，反映地层本身的地质与力学属性。

2. 力学指标：包括围岩变形速率、岩爆倾向性、刀具—岩石接触应力、刀盘扭矩、推进阻力等，反映掘进过程中的力学响应特征。

3. 工程指标：包括掘进速度、破碎比能、刀具磨损率、围岩塌落风险等级等，反映掘进工程效果与风险程度。

采用层次分析法与熵权法相结合的方式，确定各项指标的权重，通过量化评分，将深部复合地层 TBM 掘进等级划分为Ⅰ级（稳定软岩 / 软硬互层低应力）、Ⅱ级（较稳定中硬岩）、Ⅲ级（高应力硬岩）、Ⅳ级（破碎地层 / 强岩爆地层）共四个等级，明确各等级的临界阈值与判定标准。

（三）各等级掘进策略制定^[4]

针对不同的掘进等级，制定不同的掘进控制策略，实现破岩方式、掘进参数和支护措施的协同优化（见表1）：

表 1 分级掘进策略			
掘进等级	地质条件	掘进模式	掘进策略
I 级掘进 ^[6]	稳定软岩 / 软硬互层低应力	高效掘进模式	提高刀盘转速与贯入度，降低推进力，减少破岩能耗，加快掘进速度，采用滞后支护方式，提升施工效率
II 级掘进	较稳定中硬岩	均衡掘进模式	合理地匹配刀盘转速与推进力，优化刀群布局，保证岩石均匀破碎施工过程中实时监测围岩变形，适时进行超前支护
III 级掘进 ^[7]	高应力硬岩	低扰动破岩模式	降低贯入度与刀盘转速，增大推进力，采用预裂破岩辅助手段，释放围岩应力，抑制岩爆发生，加强围岩应力监测
IV 级掘进	破碎地层 / 强岩爆地层	安全优先掘进模式	严格控制掘进速度与贯入度，减小刀盘推力，避免围岩剧烈扰动，通过超前预支护与超前地质预报，及时地进行封闭支护，防止塌方与突水突泥
建立掘进等级动态切换机制，通过实时监测地质参数与掘进响应数据，来实现掘进等级的自动识别与掘进策略的快速调整，从而适配深部复合地层的动态变化。			

二、分级掘进过程中深部复合地层岩石破裂机理

（一）岩石破裂的物理过程与演化特征

深部复合地层岩石受到高地应力、TBM 掘进动态扰动、分级荷载耦合作用，岩石的破裂过程与浅部地层的破裂过程存在着本质差异。本文利用室内大尺度相似的模拟试验与离散元数值模拟，还原了分级掘进^[4]下岩石破裂的全过程，我们将其划分为以下四个阶段见表 2：

表 2: 岩石破裂过程表		
裂纹阶段	破碎过程	破碎状态
微裂纹萌生阶段	TBM 刀具贯入初期，岩石内部应力集中，原生微裂纹被激活，新生微裂纹在刀具接触区附近萌生，岩石处于弹性变形阶段	无宏观破碎
裂纹扩展贯通阶段	随着刀具持续贯入，微裂纹沿最大主应力方向扩展、延伸，不同岩性界面处裂纹发生偏转、分叉，软硬岩交界面出现应力集中	裂纹快速贯通形成裂隙带
宏观破碎形成阶段	裂隙带持续发育，岩石承载能力下降，在刀具挤压、剪切与地应力共同作用下，形成“V”型破碎坑，岩石发生块状剥落	单次破岩完成
围岩损伤稳定阶段	破碎完成后，周边围岩产生损伤区，高地应力作用下损伤区持续演化，分级掘进参数的调整可控制损伤区发展范围，避免围岩失稳破坏。	

不同掘进等级下，岩石破裂演化速率、破碎块度、损伤范围存在显著差异：I 级地层岩石破碎以塑性破坏为主，裂纹扩展缓慢，损伤范围小；III 级高应力硬岩岩石破碎以脆性破坏为主，裂纹瞬间贯通，能量快速释放，易引发岩爆^[8]；IV 级破碎地层岩石破碎以松散坍塌为主，易出现大范围围岩失稳。

（二）岩石破坏模式与力学机制

基于断裂力学与损伤力学理论，分析分级掘进下深部复合地层岩石破坏模式，主要分为剪切破坏、张拉破坏、劈裂破坏、界面剥离破坏四种类型（见表 3）：

表 3：岩石破坏模式表		
破坏模式	发生地层	破坏特征
剪切破坏	中硬岩地层（II 级）	刀具的挤压作用下，岩石内部产生剪切应力，当剪切应力超过岩石抗剪强度时，产生剪切裂纹，岩石会沿剪切面破碎，是常规掘进的主要破坏模式。
张拉破坏	高应力硬岩地层（III 级）	刀具贯入所产生的拉应力与高地应力叠加，应力值超过岩石的抗拉强度，产生张拉裂纹。裂纹向垂直于最小主应力的方向扩展，岩石会呈块状、板状破裂，容易诱发岩爆。
劈裂破坏	完整硬岩地层	刀具在垂直贯入时，岩石的内部会产生平行于掘进方向的劈裂应力，形成劈裂带，岩石沿劈裂面发生破碎，破碎块度较大。
界面剥离破坏	软硬岩交互地层（I 级）	刀具的扰动下，岩性界面处会产生应力差，出现界面剥离和错动，岩石会沿界面破碎，容易导致刀具偏磨与掘进失衡。

通过建立分级掘进岩石破裂的力学模型，考虑高地应力、渗流力和刀具动态荷载的耦合作用，推导出岩石破裂临界应力与裂纹扩展的速度公式。揭示分级参数对岩石破坏模式的调控机制，明确不同掘进等级下岩石破坏的主控因素与力学条件。

（三）岩石破裂能量释放规律

深部复合地层中岩石的破裂过程伴随着能量的积聚与释放，这是引发掘进灾害的核心诱因。研究表明，分级掘进可有效调控岩石破裂能量释放速率与规模。以下为不同掘进等级下岩石的能量特征及控制措施（见表 4）：

表 4: 不同掘进等级下岩石的能量特征及控制措施表		
掘进等级	岩石能量特征	控制措施
高应力硬岩（III 级）	岩石会积聚大量弹性应变能，传统单一掘进模式下，能量瞬间释放，易引发强烈岩爆	分级掘进通过降低贯入度、分步破岩，使能量缓慢释放，大幅降低岩爆风险
破碎地层（IV 级）	岩石自身的储能较低，但是围岩松散，掘进扰动容易引发势能释放，从而导致塌方	分级掘进通过减小掘进扰动，控制围岩变形，抑制能量的突然释放
软岩与中硬岩（I、II 级）	能量释放平缓	分级掘进通过优化破岩的参数，降低岩石的破碎比能，来提升能量的利用效率，减少能耗损失

我们通过监测岩石破裂过程中的声发射、电磁辐射信号，分析能量释放与裂纹演化的对应关系，建立能量释放预测模型，为分级掘进的参数优化与灾害预警提供理论依据。

三、深部复合地层 TBM 分级掘进岩机相互作用规律

（一）岩机相互作用的力学特征

TBM 分级掘进过程中的岩机相互作用的本质是刀盘 - 刀具系统与围岩之间的动态力学耦合过程。掘进过程涉及推进力、扭矩、刀具接触应力、围岩反力、渗流力等多种力的耦合作用。

不同耦合状态下的力学特征和控制策略 (见表5):

表5: 不同耦合状态下的力学特征和控制策略		
耦合状态	力学特征	控制策略
刀具 - 岩石的局部相互作用	刀具在贯入岩石时, 会产生法向应力与切向应力。	调整推进力与刀盘转速, 改变刀具 - 岩石接触应力大小与分布, 适配不同地层的破岩需求
	法向应力主导岩石压碎与裂纹萌生, 切向应力主导岩石剪切与剥落	
刀盘 - 围岩的整体相互作用	刀盘旋转掘进时, 与围岩形成动态接触界面, 高地应力下围岩对刀盘产生反向挤压力, 易导致刀盘变形与卡机	针对不同的地层调整刀盘支撑压力与掘进姿态, 通过减小刀盘与围岩的相互挤压, 降低卡机风险
多场耦合作用 ^[9]	在深部高渗压环境下, 地下水渗透力改变了岩石的力学性质与岩机接触面的摩擦特性	结合地层渗流特征, 调整破岩参数与密封策略, 减少渗流对岩机相互作用的不利影响

(二) 掘进参数与岩机响应的关联规律

通过数值模拟与现场试验, 对不同分级掘进参数下的岩机响应特征进行分析, 建立掘进参数 - 力学响应 - 破岩效果的关联模型。通过控制推进力、刀盘转速和贯入度来提高破岩效率。

1. 推进力: 增大推进力, 刀具贯入度增加, 岩石的破碎量大大提升, 但过大的推进力会导致刀具磨损加剧、围岩扰动增强。针对软岩地层 (I 级) 采用低推进力, 针对硬岩地层 (III 级) 需适当提高推进力, 保证有效贯入。
2. 刀盘转速: 加快刀盘转速, 掘进效率提升, 但转速过高会导致刀具冲击荷载增大, 岩石破碎不均匀。破碎地层 (IV 级) 需降低转速, 减小围岩扰动, 中硬岩地层 (II 级) 可采用适中转速, 实现高效破岩。
3. 贯入度: 贯入度直接决定岩石的破碎深度, 高应力硬岩需控制小贯入度, 避免脆性破碎与岩爆, 软岩可适当增大贯入度, 提升掘进速度。

另外 探明刀具磨损、刀盘振动、围岩变形等岩机响应指标与掘进参数的定量关系, 明确各等级掘进下的最优参数区间, 从而实现掘进参数的精准匹配。

(三) 岩机相互作用动态调控机制^{[9][10]}

基于岩机相互作用规律, 构建深部复合地层 TBM 分级掘进岩机动态调控机制:

1. 实时感知: 通过搭载应力传感器、位移传感器、声发射监测等实时感知设备, 实时获取围岩力学参数、刀具荷载、刀盘姿态等岩机相互作用数据。
2. 智能决策: 基于分级掘进指标体系与岩机关联模型, 根据监测数据智能识别当前掘进等级, 自动匹配最优的掘进参数。
3. 动态调控: 根据实时监测的数据, 通过快速调整推进力、刀盘转速、贯入度等参数 来优化刀群破岩姿态, 实现岩机相互作用的动态平衡, 保证掘进过程稳定高效。

四、研究方法与技术手段

(一) 室内物理模拟试验

通过研制深部复合地层 TBM 分级掘进物理模拟试验平台,

模拟高地应力、高渗压、软硬岩交互等复杂地质条件^[6], 开展不同分级掘进参数下的破岩试验。通过监测岩石破裂过程、刀具荷载、围岩变形、能量释放等数据, 分析岩石破裂机理与岩机相互作用特征。

(二) 理论分析方法

结合岩石力学、断裂力学、损伤力学、接触力学理论, 构建深部复合地层岩石破裂的力学模型和岩机相互作用的力学模型, 推导出岩石破裂临界条件、裂纹扩展方程、掘进参数优化公式, 建立分级掘进的理论体系。

(三) 数值模拟分析

采用有限元 (FEM) - 离散元 (DEM) 耦合数值模拟方法, 还原 TBM 分级掘进全过程。模拟岩石从微裂纹萌生到宏观破碎的演化过程, 分析刀盘 - 刀具 - 围岩动态相互作用, 预测不同掘进等级下的破岩效果与围岩稳定性, 优化掘进参数与策略。

(四) 工程现场验证

选取水利工程深部隧洞 TBM 施工项目, 开展现场试验。采集掘进参数、地质数据、工程灾害等信息, 验证分级掘进方法、岩石破裂机理与岩机相互作用规律的准确性, 优化研究成果并形成工程应用技术指南。

五、研究创新点

1. 提出适配深部复合地层的 TBM 分级掘进方法: 构建多维度分级指标体系与四级掘进模式, 突破传统单一掘进模式的局限, 实现地质条件与掘进策略的精准匹配, 为水利工程深部 TBM 智能掘进提供全新技术路径;
2. 厘清高地应力耦合作用下分级掘进岩石破裂机理: 揭示深部复合地层岩石多模式破坏机制与能量释放规律, 明确分级参数对岩石破裂过程的调控作用, 完善深部岩石力学破岩理论;
3. 探明深部复合地层 TBM 岩机动态相互作用规律: 建立多场耦合下^[11] 岩机相互作用力学模型与参数关联关系, 构建岩机动态调控机制, 为 TBM 智能掘进决策提供理论支撑。

六、研究成果应用价值与展望

(一) 工程应用价值

本研究成果可直接应用于水利工程深部输水隧洞、地下厂房等地下工程 TBM 施工, 有效解决深部复合地层掘进风险大、效率低、灾害频发的难题: 一是提升 TBM 掘进效率 30% 以上, 降低刀具磨损与施工成本; 二是大幅减少岩爆、塌方、卡机等工程灾害, 提升施工安全性; 三是为 TBM 智能控制系统研发提供核心理论依据, 推动水利工程地下智能建造技术升级。同时, 研究成果可推广应用于交通、矿山等领域的深部地下工程 TBM 施工, 具有广泛的工程适用性。

(二) 未来研究展望

后续研究将进一步结合数字孪生、人工智能技术, 构建深

部复合地层 TBM 分级掘进数字孪生模型^[12]，实现掘进过程的实时可视化、智能预警与自主调控；开展超长距离隧洞分级掘进连续性研究，优化长距离掘进参数匹配策略；研发适配分级掘进的新型 TBM 刀具与刀盘结构，进一步提升装备对深部复杂地层的适应性，推动水利地下工程建造向全智能化、无人化方向发展。

七、结论

本文针对水利工程地下智能建造中深部复合地层 TBM 掘进的核心瓶颈，围绕分级掘进岩石破裂机理与岩机相互作用规律开展系统研究，得出以下结论：

1. 构建了包含地质、力学、工程指标的多维度分级指标体

系，将深部复合地层 TBM 掘进划分为四个等级，提出了差异化的分级掘进方法，实现了掘进策略与复杂地质的高度适配；

2. 厘清了分级掘进下深部复合地层岩石破裂演化过程与四种破坏模式，揭示了高地应力耦合作用下岩石破裂力学机制与能量释放规律，明确了分级参数对岩石破裂的调控作用；

3. 探明了 TBM 刀盘－刀具－围岩动态相互作用力学特征，建立了掘进参数与岩机响应的关联规律，构建了岩机相互作用动态调控机制，为智能掘进提供了技术支撑。

本研究突破了现有 TBM 掘进方式的技术瓶颈，完善了深部复合地层 TBM 破岩理论体系，为水利工程深部地下智能建造提供了重要的理论与技术保障，对推动我国深部水利工程建设高质量发展具有重要意义。

参考文献

[1] 刘泉声，黄兴，潘玉丛.TBM 在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展 [J]. 煤炭科学技术，2023,51(01):242–260.

[2] Richardson M，Rostami J. A new model for predicting TBM cutter wear in hard rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2019，89：103–112.

[3] 赵星光，邱士利，蔡美峰. 深部高地应力岩体工程灾害机理及控制研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报，2022,41(01)：1–22.

[4] 蒋喆.TBM 盘形滚刀破岩机理的试验与模拟研究 [D]. 中南大学，2014.

[5] 李建斌，张魁，夏毅敏. 深部硬岩 TBM 破岩机理及岩机相互作用研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2020,39(S2):3456–3468.

[6] 刘宝林，杨春和，郭志. 软岩地层 TBM 推进速度与围岩变形耦合规律研究 [J]. 岩土力学，2022，43(06)：1567–1576.

[7] 黄兴，张蒙祺，王茜.TBM 滚刀与岩石相互作用研究方法综述 [J]. 河南科技，2021,40(14)：114–120.

[8] 严红，吴林，李桂臣，等. 煤矿岩巷 TBM 快速掘进研究进展与展望 [J]. 煤炭工程，2025，57(1)：1–7.

[9] 陈馈，周建军，李建斌. 复合地层 TBM 施工技术 [M]. 北京：中国铁道出版社，2019.

[10] 冯夏庭，李邵军，张传庆.TBM 掘进过程岩机相互作用实时监测与智能调控 [J]. 岩土工程学报，2023，45(03)：456–465.

[11] 谢和平，周宏伟，高明忠. 深部岩体多场耦合理论与工程应用 [M]. 北京：科学出版社，2020.

[12] 吴圣智，王梦恕，张弥. 隧道工程智能建造技术现状与展望 [J]. 中国工程科学，2023，25(04)：89–98.

黄河上游河岸根土复合体抗剪强度特性试验研究

陈欢欢, 张峻岭, 张子刚, 曾阳益, 吕娜, 丁云龙, 梁凯, 张鼎

四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072

DOI:10.61369/WCEST.2026020015

摘 要 : 为探究黄河上游河岸草本植物根系对边坡浅层土体的加固机理, 定量揭示含水率与含根率对根土复合体抗剪强度的影响规律, 本文以狗牙根根系和砂质粉土为研究对象, 采用室内应变控制式直接剪切试验, 设置4组含水率梯度、5组含根率梯度, 在50~300kPa四级法向应力下开展试验测试, 剖析根土复合体应力-位移特征、抗剪强度演化规律及抗剪强度指标响应特性。结果表明: 素土与根土复合体应力-位移曲线均呈应变硬化型, 狗牙根根系可有效提升土体抵抗变形能力; 含水率与含根率均存在最优值, 含水率20% (接近土样最优含水率18.3%)、含根率0.75%时根系加筋效果最佳, 抗剪强度最大增幅达44.17%; 含水率和含根率对复合体黏聚力影响显著, 对内摩擦角扰动较小, 黏聚力最大增幅可达83.39%, 草本根系主要通过提升土体黏聚力实现固土护坡效果。研究成果可为植被护坡工程的参数设计与稳定性评估提供试验依据。

关 键 词 : 根土复合体; 狗牙根; 抗剪强度; 含水率; 含根率; 直剪试验; 植被护坡

Experimental Study on Shear Strength Characteristics of Shore Root-soil Complex in the Upper Reaches of the Yellow River

Chen Huanhuan, Zhang Junling, Zhang Zigang, Zeng Yangyi, Lv Na, Ding Yunlong, Liang Kai, Zhang Ding

Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610072

Abstract : To investigate the reinforcement mechanism of root systems of herbaceous plants on the upper Yellow River riverbanks on shallow soil layers and quantitatively reveal the influence patterns of moisture content and root content on shear strength of root-soil composite, this study focused on foxtail millet root systems and sandy silt. Using strain-controlled direct shear tests in laboratory conditions, four moisture content gradients and five root content gradients were established, with experimental measurements conducted under four-stage normal stress ranging from 50 to 300 kPa. The study analyzed stress-displacement characteristics, shear strength evolution patterns, and response characteristics of shear strength indicators in root-soil composite systems. Results demonstrated that both native soil and root-soil composite exhibited strain-hardening stress-displacement curves, with foxtail millet roots significantly enhancing soil deformation resistance. Optimal values were identified for moisture content (20% vs. 18.3% optimal soil moisture content) and root content (0.75%), where root reinforcement achieved maximum shear strength increase of 44.17%. Moisture and root content significantly influenced composite cohesion while causing minimal disturbance to internal friction angles, with maximum cohesion enhancement reaching 83.39%. Herbaceous root systems primarily stabilized slopes by increasing soil cohesion. These findings provide experimental evidence for parameter design and stability assessment in vegetation slope protection engineering.

Keywords : root-soil complex; polygonum aviculare; shear strength; moisture content; root content; direct shear test; vegetation slope protection

引言

边坡浅层失稳是岩土工程与生态防护领域的常见病害, 土体抗剪强度不足是诱发滑坡、坍塌的核心诱因。传统刚性护坡技术虽能提升边坡稳定性, 但易破坏生态环境、造价偏高, 而植被护坡作为生态友好型防护技术, 凭借植物根系的加筋作用、固土作用, 可有效改善浅层土体力学性能, 兼具工程效益与生态效益。草本植物根系密集发达、分布浅层, 能快速与土体形成复合结构, 是边坡生态护坡的优选植被类型^[1]。

基金项目: 水利部重大科技项目《黄河上游生态脆弱区防洪治理工程关键技术研究》(SKS-2022023)。四川省省级科研院所基本科研项目(2025-SKY-ZXKY-03)。

作者简介: 陈欢欢(1995.12-), 女, 汉族, 广西来宾人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程设计、咨询与管理工作。

目前学界针对根土复合体力学特性已开展大量研究，Wu、Waldron、Gray^[2-4]等学者先后构建垂直根系、倾斜根系固土力学模型，奠定了根系加筋理论基础。植物根系对土壤抗剪强度的增强效应主要通过根土复合体直剪试验、三轴剪切试验以及原位剪切测试等方法进行评估^[5]。大量室内外试验证实，植物根系可通过抗拉、摩擦作用分担土体剪应力，提升复合体抗剪强度，但含水率、含根率、根系类型等因素均会影响加固效果。狗牙根作为多年生草本植物，具有存活率高、适应性强、须根致密、力学性能优异等特点，广泛应用于边坡护坡工程^[6]，但针对砂质粉土地质条件下，根土复合体抗剪强度随含水率、含根率的定量演化规律仍有待深入研究。基于此，本文通过室内直剪试验，系统分析不同工况下根土复合体抗剪强度特性，揭示根系固土力学机制，为植被护坡工程设计提供理论支撑。

一、草本植物根系固土力学机制

（一）根土复合体作用原理

草本植物根系多分布于边坡浅层土体，密集的根系在土体孔隙中穿插、缠绕、包络土颗粒，形成整体性较强的根土复合结构，可将根系视作天然加筋材料，将根土复合体等效为加筋土。土体自身抗压强度高、抗拉性能差，而植被根系抗拉性能优异，两者优势互补可显著提升复合体抵抗变形与破坏的能力。土体受剪过程中，根系与土颗粒接触面产生摩擦作用，将土体剪应力转化为根系拉应力，根系通过抗拉作用承担部分剪切力，根系力学性能越优，分担剪应力能力越强。

（二）根系固土力学模型

Waldron率先提出垂直根系固土模型，假定根系与剪切面垂直，土体受剪时剪应力传递至根系，界面摩擦力将剪应力转化为根系拉力，拉力可分解为平行剪切面的水平应力与垂直剪切面的法向应力。在此基础上，Gray等针对倾斜根系工况，推导了根系与剪切面斜交时的抗剪强度增量公式，完善了单根固土力学模型，如图1所示。

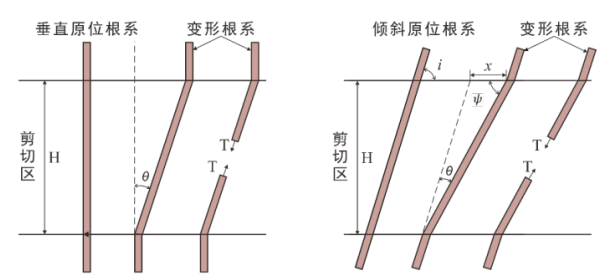


图1 根土剪切力学模型

基于单根模型，将其推广至多根系实际工况，假定土体中含 n 个根系，其中垂直根系 m 个，斜交根系 $n-m$ 个。综合垂直根系与倾斜根系抗剪强度增量公式，推导得到根系加筋土体总抗剪强度增量 S_r ，进而得出根土复合体抗剪强度计算公式：

$$s'=s+s_r=c+\sigma\tan\phi+s_r \tag{1}$$

式中：为根土复合体抗剪强度（kPa）； s 为素土抗剪强度（kPa）； s_r 为根系加筋抗剪强度增量（kPa）； C 为土体黏聚力（kPa）； ϕ 为剪切面法向应力（kPa）； δ 为土体内摩擦角（°）。

二、室内直剪试验设计

（一）试验材料

试验选用狗牙根的根系作为加筋材料。该植被为多年生草

本，须根致密、根径均匀，抗拉抗剪性能优异，环境适应性强。试验用土为砂质粉土，依据《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）、《土的工程分类标准》（GB/T 50145-2007）测试土样基本物理指标，结果如表1所示；土样颗粒级配采用筛分法测定，结果如表2所示。

表1 试验土样基本物理指标

土样类型	比重	最优含水率 / %	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	液限 / %	塑限 / %
砂质粉土	2.65	18.3	1.58	26.1	20.2

表2 试验土样颗粒级配

土颗粒粒径分布				
>0.2mm	0.25 ~ 2.0mm	0.05 ~ 0.25mm	0.005-0.05	< 0.005
19.5	48.7	13.5	3.8	14.5

（二）工况与仪器设计

含水率、含根率计算公式如下：

$$\omega=\frac{m_w}{m_s}\times100\% \quad \rho_r=\frac{m_r}{m_s}\times100\% \tag{2}$$

式中： ω 为含水率（%）； m_w 为水分质量（g）； m_s 为干土质量（g）； ρ_r 为含根率（%）； m_r 为根系质量（g）。

试验采用四川大学土工实验室 ZJ型应变控制式直剪仪，剪切速率设定为4r/min，法向应力设置50kPa、100kPa、200kPa、300kPa四级。为控制变量、定量分析影响规律，设置4组含水率梯度（10%、15%、20%、25%）、5组含根率梯度（0.00%、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%），共划分20组试验工况，具体试验组别与变量梯度如表3、表4所示。

表3 直剪试验变量梯度表

试验变量	I	II	III	IV	V
含水率	10%	15%	20%	25%	/
含根率	0.00%	0.25%	0.50%	0.75%	0.10%

表4 直剪试验组别

试验组别	试样含水率 / %	组内编号	试样含根率 / %
I	10%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%
II	15%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%

Ⅲ	20%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%
Ⅳ	25%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%

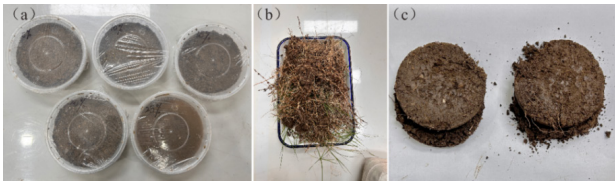
(三) 试样制备与试验步骤

试验采用室内重塑试样，具体流程为：①将试验用土过2mm筛，放入105℃烘箱烘干12h，碾碎后按设计含水率喷洒水分，充分搅拌并浸润1~2天；②采集狗牙根根系，洗净风干后剪至20mm长度，按设计含根率称重备用；③将根系与土样均匀拌合，压实密封静置24h，装入环刀并刮毛、二次压实；④将试样装入直剪仪，按照土工试验标准开展直接剪切试验，记录剪应力与剪切位移数据。



(a) ZJ型应变控制式直剪仪；(b)烘箱

图2 直剪试验仪器设备



(a) 配制不同含水率试样；(b) 狗牙根根系；(c) 最终剪环试样

图3 试样制作

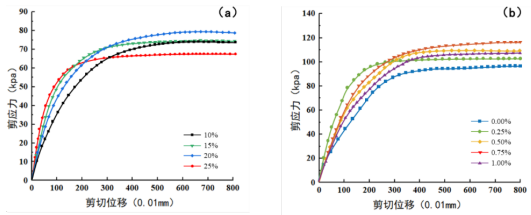
三、试验结果与分析

(一) 应力-位移曲线特征

由于不同含根率、含水率水平下的应力-位移曲线类似，故以含根率0.75%、法向应力100 kPa及含水率20%、法向应力200 kPa为例，将相应的应力-位移曲线分别绘制如图4所示。由图4(a)可知，试样剪切呈应变硬化型：在剪切初始阶段，剪应力随剪切位移增大均呈近似线性上升，随着位移增加剪应力增量逐渐减小，最终趋于一定值。相同含根率及法向应力条件下，不同含水率曲线对应的剪应力峰值不同，当含水率为20%时，土体剪应力峰值最大。

由图4(b)可知，素土及加筋土试样剪切均呈应变硬化型。剪切过程中，素土试样的初始增长速率最大，剪应力峰值最小。随着剪切的进行，在同一剪切位移下，根土复合体试样的剪应力

大于素土，且剪应力差值与含根率有关，也就是说，在相同剪应力水平下，加筋土试样的剪切位移小于素土试样，说明狗牙根根系的存在能够提升土体抵抗变形的能力，且抵抗剪切变形能力的增长幅度与含根率有关。



(a) 含根率0.75%、法向应力100kPa；(b) 含水率20%、法向应力200kPa

图4 不同含水率情况下应力-位移曲线

(二) 抗剪强度变化规律

将不同含水率、含根率试样在各法向应力下的抗剪强度数据进行整理，如图5、图6所示。由图5可知，同一法向应力下，随着含水率的增大，试样抗剪强度总体上呈现先增后减的规律，拐点在含水率15%~25%之间、含水率20%附近。由图6可知，相比于10%、15%、25%的含水率，含水率为20%时，各含根率下的根土复合体试样相对于素土试样的抗剪强度增幅最大。当含水率为20%、含根率为0.75%时，各法向应力下对应的抗剪强度增幅最大，分别为44.17%、32.60%、23.08%、22.21%。试验所用土样的最优含水率为18.3%，说明当试样含水率接近最优含水率时，抗剪强度提升幅度最大，根系加筋效果最佳。

由图6(d)可知，相较于其他含水率，当试样含水率为25%时，无论含根率大小，试样抗剪强度的提升幅度均较为有限。考虑其原因可能是：根系主要通过根土摩擦发挥自身的抗拉强度来抵抗受剪破坏，而当试样的含水率较高时，在根土接触面上存在着大量的水分，使得根系与土颗粒间的摩擦力下降，此时根系可能会直接被拔出而非拉断。因此，相比于根系对土壤的加固作用，含水率对土壤抗剪强度的影响更大，当土壤含水率较高时，根系对土壤抗剪强度的增强作用会大大削弱。

由图6可知，根土复合体的抗剪强度因根系的加入而提升，说明根系能够在一定程度上提升土体抗剪强度。且含水率一定时，不同含根率、同一围压下，根土复合体的抗剪强度增幅不同，表明不同含根率对于抗剪强度的提升效果不同。如图6所示，随着含根率增大，各围压下的抗剪强度增幅大体上呈现先增大而减小的规律，当试样的含根率为0.5%和0.75%时，在各含水率下其抗剪强度提升幅度最显著。

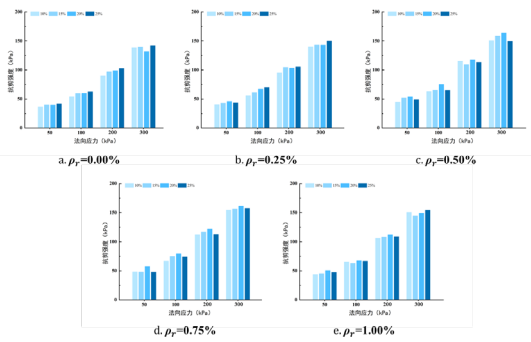


图5 各法向应力下含水率对试样抗剪强度的影响

当含根率较小时,根土复合体的抗剪强度增幅较小,普遍在0%~10%范围内,表明含根率较低时加筋效果不佳。考虑是因为根系较少时,重塑试样中根系对土体的包络与结合程度不高,因此抗剪强度提升幅度较小。当含根率较大时,一部分根系不能与土体接触,而形成根-根接触面,使得摩阻力变小,导致黏聚力和抗剪能力降低,因此1.00%含根率试样的抗剪强度增幅较0.75%含根率试样有所下降。综上,存在某个最优含根率使得根土复合体试样抗剪强度增幅最大,且各法向应力所对应的最优含根率不同。

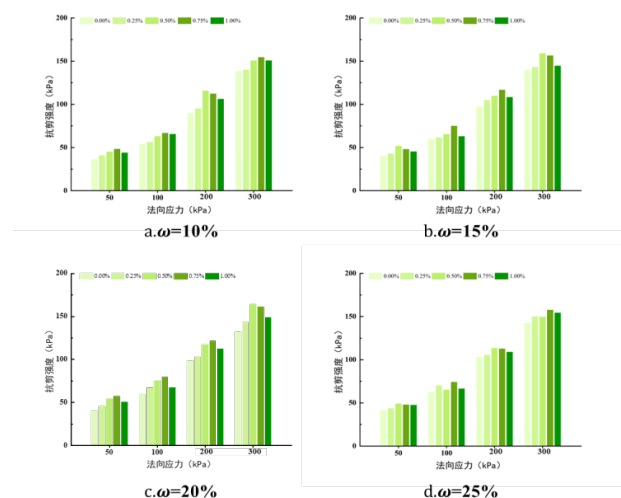


图6 各法向应力下含根率对试样抗剪强度的影响

(三) 抗剪强度指标演化特性

采用最小二乘法拟合抗剪强度与法向应力数据,拟合相关系数 R^2 均大于0.95,拟合精度较高,证明素土与根土复合体抗剪强度均遵循摩尔-库仑定律。由图7可知,各含水率水平下,黏聚力随着含水率的增大而先增后减,含水率为20%时黏聚力达到峰值,黏聚力增幅在10%~85%区间,可见含水率能够显著地影响黏聚力。内摩擦角在较小范围内上下波动,变化幅度范围为-0.09%~17%,说明在试验设计的含水率梯度之内,含水率对内摩擦角的影响较小。含水率在15%~25%范围内时,黏聚力对含水率变化最为敏感,且黏聚力峰值所对应的含水率均为20%。

由图8可知,各含水率水平下,随着含根率的增加,试样黏聚力数值随含根率增加先增大后减小,因此加筋土中存在一个最

优含根率;试样内摩擦角数值上下波动,变化幅度较小。本研究中,当含根率为0.75%时,试样的黏聚力达到最大值。与素土相比,加筋土的黏聚力增长较为显著,各含水率水平下根土复合体试样的黏聚力分别最多提升了83.39%、46.33%、51.32%、27.7%,且对应的含根率均为0.75%。因此,植物根系能有效提高黏土颗粒间的胶结作用以及表观黏聚力,而含根率对内摩擦角的影响相对较小,影响规律并不显著。

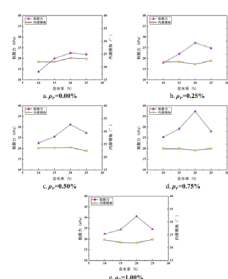


图7 含水率对抗剪强度指标的影响

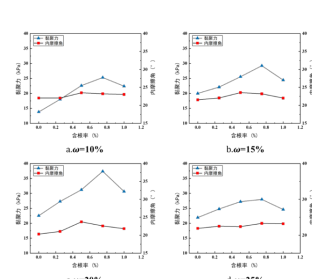


图8 含根率对抗剪强度指标的影响

四、结论

本文通过室内直接剪切试验,系统研究了不同含水率、含根率下根土复合体抗剪强度特性,揭示了根系固土力学机制与强度演化规律,得出主要结论如下:

- (1) 在50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa法向应力下,素土和根土复合体的应力-位移曲线均呈应变硬化型。相同剪应力下,含根加筋土的剪切位移较小,表明根系增强土体抗变形能力,且增强幅度与含根率相关。
- (2) 含水率和含根率影响根土复合体抗剪强度,各有一个最优值使增幅最大。不同法向应力下最优含根率不同。含水率影响更为主导,高含水率削弱根系增强效果。
- (3) 根土复合体试样的抗剪强度随法向应力的增加而呈线性增长,两者关系符合摩尔库仑定律。
- (4) 含水率和含根率显著影响根土复合体的黏聚力,但不影响内摩擦角。黏聚力随含水率增加先增后减,在含水率20%时达峰值,增幅10.47%~83.35%。黏聚力也随含根率增加先增后减,最优含根率为0.75%。草本植物根系主要通过提升黏聚力增强土体抗剪强度,有利于边坡稳定。

参考文献

- [1]周云艳.植物根系固土机理与护坡技术研究[D].中国地质大学,2010.
- [2]Wu,TH,Watson,et al.In situ shear tests of soil blocks with roots[J].Canadian Geotechnical Journal, 1998.
- [3]Waldron L J .The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil[J].Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5):843-849.
- [4]Gray H D ,Ohashi H .Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand[J].Journal of Geotechnical Engineering,1983,109(3):335-353.DOI:10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335).
- [5]卢海静,王磊,翟国良,等.植物根-土复合体原位剪切试验研究现状及其进展[J].中国水土保持,2013(7):5.
- [6]王华,赵志明,何刘.不同植被类型根系固土效应的试验研究[J].铁道建筑,2009(11):3.

土工袋护坡在河岸边坡工程中的稳定性分析与应用研究

丁云龙, 陈欢欢, 吕娜, 张哲, 曾阳益, 张峻岭, 张鼎

四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072

DOI:10.61369/WCEST.2026020016

摘 要 : 为解决河岸边坡失稳破坏问题, 探究土工袋护坡技术的工程适用性与稳定控制机理, 本文系统研究了土工袋护坡的稳定性分析方法, 明确了土工袋护坡体的主要破坏形式及影响因素, 通过平面滑动法建立了土工袋护坡体稳定性计算模型, 结合简化 Bishop 法引入土工袋压坡效应, 分析了压坡体宽度、坡高、坡比对边坡安全系数的影响规律; 同时采用费伦纽斯条分法、复合型滑动面分析法分别计算了无砌护、土工袋砌护工况下河岸边坡的稳定系数。研究结果表明: 土工袋护坡体主要存在滑动、塑性、断裂、水平滑移 4 种破坏形式, 其稳定性关键受土工袋抗拉强度、层间摩擦系数及填料内摩擦角影响; 相同坡高和压坡体宽度下, 边坡安全系数随坡比增大而减小, 相同坡高和坡比下, 安全系数随压坡体宽度增大而提升, 相同坡比和压坡体宽度下, 安全系数随坡高增加而降低; 相较于无砌护工况 (安全系数 1.05), 土工袋砌护后河岸边坡安全系数提升至 1.56, 边坡稳定性显著提高。研究成果可为土工袋护坡技术在河岸边坡工程中的设计与应用提供理论依据和工程参考。

关 键 词 : 土工袋护坡; 河岸边坡; 稳定性分析; 压坡效应; 安全系数; 条分法

Stability Analysis and Application Research of Geosynthetic Bag Slope Protection in Riverbank Slope Engineering

Ding Yunlong, Chen Huanhuan, Lv Na, Zhang Zhe, Zeng Yangyi, Zhang Junling, Zhang Ding

Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610072

Abstract : To address slope instability issues along riverbanks and investigate the engineering applicability and stability control mechanisms of geotextile bag slope protection technology, this study systematically examines stability analysis methods for geotextile bag slopes. It identifies primary failure modes and influencing factors of geotextile bag slope structures, establishes a stability calculation model using the planar sliding method, and incorporates geotextile bag pressure effects through simplified Bishop's method to analyze the impact of slope width, height, and gradient on slope safety factors. The Frenius strip method and composite sliding surface analysis were employed to calculate stability coefficients for unlined and geotextile bag-lined riverbank slopes. Results demonstrate four predominant failure modes (sliding, plastic deformation, fracture, and horizontal displacement), with stability critically influenced by geotextile bag tensile strength, interlayer friction coefficients, and filler internal friction angles. Under identical slope height and pressure width conditions, slope safety factors decrease with increasing gradient; increase with pressure width at constant slope height and gradient; and decrease with height at fixed gradient and pressure width. Compared to unlined conditions (safety factor 1.05), geotextile bag lining elevates riverbank slope safety factors to 1.56, significantly enhancing slope stability. These findings provide theoretical foundations and engineering references for designing and applying geotextile bag slope protection technologies in riverbank engineering projects.

Keywords : geosynthetic bag slope protection; riverbank slope; stability analysis; slope compression effect; safety factor; strip method

引言

河岸边坡易受水流冲刷、土体自重等因素影响而失稳, 威胁河道安全和生态环境, 是世界范围内面临的主要自然灾害之一^[1]。传统防护技术如混凝土砌护刚性大、适应性差, 且施工效率低、成本高、生态破坏明显。土工袋护坡作为新型柔性技术, 采用土工材料填充岩土后分层码放, 具备良好抗剪、抗滑性能及变形协调能力。该技术施工简便、经济环保, 应用广泛, 凭借生态兼容、造价低和就地取

基金项目: 水利部重大科技项目《黄河上游生态脆弱区防洪治理工程关键技术研究》(SKS-2022023)。四川省省级科研院所基本科研项目(2025-SKY-ZXKY-03)。

作者简介: 丁云龙(1992.04-), 男, 甘肃省张掖人, 汉族, 技术员, 大学本科, 主要从事水利水电工程设计、咨询与管理工作。

材等优势^[2]，已逐渐取代传统护岸。董宗炜等^[3]建立了一种针对于塔里木河防洪抢险历程的土工袋护岸结构，刘斯宏等^[4-6]专注于土工袋技术在基础加固领域的应用研究，并开展了大量系统性的科研工作。

边坡稳定性是土工袋护坡工程设计与应用的核心问题，其分析方法和计算模型直接决定防护方案的合理性和工程安全性。目前边坡稳定性分析方法主要分为定性分析和定量分析，定量分析中的极限平衡法、数值模拟法是工程中最常用的方法，但针对土工袋柔性护坡的特殊性，现有分析方法未充分考虑土工袋与边坡土体的相互作用及压坡效应，难以准确反映土工袋护坡体的稳定机理。基于此，本文以土工袋砌护的河岸边坡为研究对象，系统分析土工袋护坡体的破坏形式与影响因素，建立考虑压坡效应的土工袋护坡稳定性计算模型，通过室内计算与工况分析，揭示土工袋护坡对河岸边坡稳定性的提升规律，为该技术的工程推广提供理论支撑。

一、边坡稳定性分析方法

（一）极限平衡法

极限平衡法是边坡稳定分析中经典且广泛采用的方法。极限平衡法的优势在于模型简单、计算公式简洁，易于工程设计人员掌握和应用，但该方法也存在明显局限性：（1）预设滑动面形态与位置，可能与实际情况偏差；（2）忽略土体与支护结构相互作用，难以展现协同机制；（3）缺乏位移计算能力，无法呈现变形过程。

（二）数值模拟分析法

数值分析方法是目前边坡稳定性分析中最普遍的方法，主要包括有限元法、有限元强度折减法、FLAC法、边界元法、离散元法等，其中有限元法及强度折减法在土质边坡分析中应用最广泛。有限元强度折减法由 Zienkiewicz 于 1975 年提出^[7]，将极限平衡原理、有限元计算原理和强度折减理论相结合，通过逐渐增大强度折减系数，分析坡体的特征值和特征点，最终将坡体失稳时对应的折减系数定为边坡安全系数。

二、土工袋护坡体结构的稳定性计算分析

（一）土工袋护坡体的主要破坏形式

土工袋护坡体采用柔性叠筑结构，其破坏机理与刚性护坡有明显区别。根据工程实践和理论分析，该类护坡结构主要存在四种破坏模式：（1）滑动破坏；（2）边坡土体塑性破坏；（3）土工袋断裂破坏；（4）水平滑移破坏。

（二）护坡体稳定性的影响因素

影响土工袋护坡体破坏形式和稳定性的因素较多，核心影响因素为土工袋自身性能和填料物理力学性质，主要包括：（1）土工袋的抗拉强度和延伸率，直接决定袋体抵抗拉裂、滑移的能力；（2）土工袋之间的摩擦系数，影响层间抗滑力大小，是防止水平滑移和滑动破坏的关键；（3）土工袋内填充材料的内摩擦角，决定填料的抗剪强度，影响护坡体整体抗滑稳定性。

（三）基于平面滑动法的稳定性计算模型

土工袋护坡体极少出现圆弧滑动破坏，通常表现为沿层间的折线式破坏，因此可将滑动面简化为平面，土工袋护坡体在缓坡

下稳定性更优。

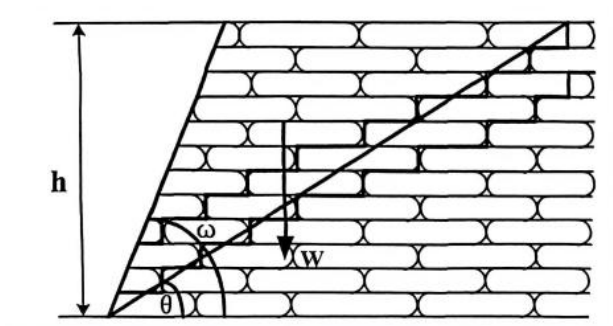


图1 土工袋护坡体结构破坏简图

（W为土工袋的重量；h为土工袋堆砌高度； θ 为滑坡面倾角； ω 为坡面倾角）

三、考虑压坡效应的土工袋护坡稳定性分析

（一）土工袋压坡体的受力平衡分析

土工袋组合体具有柔性，能适应坡体胀缩变形，其压坡作用增强边坡稳定性。本研究将土工袋加筋体视为压坡体，并假定无相对滑动。二者同步破坏，结合简化 Bishop 法引入压坡效应，建立考虑土工袋压坡的边坡稳定性计算模型。

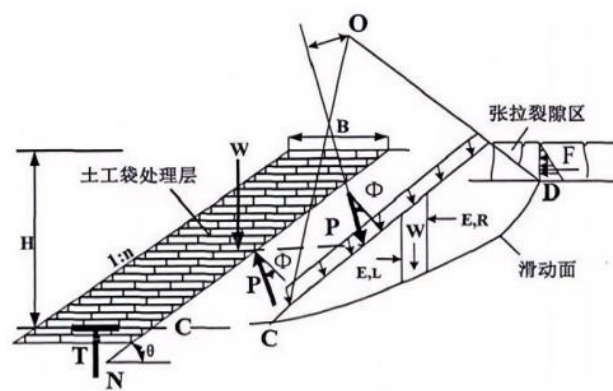


图2 土工袋压坡体及其后边坡土体作用力示意图

（W为土工袋的自重；P为边坡土体对土工袋的作用力；N为土工袋底面的垂直力；T为土工袋底面的抗滑力； θ 为坡脚； ϕ 为土工袋与边坡间摩擦角）

（二）压坡效应的影响规律分析

为研究土工袋压坡对边坡稳定性的影响，研究选取三种坡比

(1:2.5、1:2、1:1.5)、三种坡高(1.0m、1.5m、2.0m)和四种压坡体水平宽度(0m、0.8m、1.2m、1.6m)进行工况计算。各工况边坡安全系数计算结果见表1。

表1 不同压坡体宽度、坡比和坡高条件下的坡体安全系数

坡比	坡高 (m)	压坡体水平宽度(m)		
		0m	0.8m	1.2m/1.6m
1:2.5	1.0	2.66	2.84	2.95/3.01
1:2.5	1.5	1.94	2.04	2.12/2.18
1:2.5	2.0	1.52	1.57	1.62/1.66
1:2.0	1.0	2.37	2.59	2.72/2.81
1:2.0	1.5	1.70	1.81	1.91/1.98
1:2.0	2.0	1.31	1.36	1.41/1.46
1:1.5	1.0	2.06	2.31	2.49/2.58
1:1.5	1.5	1.45	1.57	1.68/1.77
1:1.5	2.0	1.09	1.15	1.20/1.25

由表1计算结果可知,土工袋压坡体对边坡稳定性的提升存在明显规律:

(1)同等坡高和坡宽条件下,安全系数与坡角呈现负相关,如坡高1.0m、压坡体宽度1.6m时,坡比1:2.5、1:2、1:1.5对应的安全系数分别为3.01、2.81、2.58,表明陡坡条件下边坡稳定性更差,需增大压坡体宽度提升稳定性;

(2)同等坡高和坡比条件下,安全系数与坡宽呈现正相关,如坡高2.0m、坡比1:1.5时,压坡体宽度从0m增至1.6m,安全系数从1.09提升至1.25,增幅达14.7%,但压坡体宽度增大到一定程度后,安全系数增幅逐渐放缓,存在最优经济宽度;

(3)同等坡比和坡宽条件下,安全系数与坡高呈现负相关,如坡比1:2、压坡体宽度1.2m时,坡高1.0m、1.5m、2.0m对应的安全系数分别为2.72、1.91、1.41,表明高边坡需采取更宽的压坡体或分层防护措施。

四、河岸边坡不同砌护模式下的稳定性对比分析

以某河道试验段岸坡为研究对象,选取坡高H=3m、坡比1:1.5的典型断面,分别采用费伦纽斯条分法、复合型滑动面分析法计算无砌护、土工袋砌护工况下的边坡稳定系数,对比分析土工袋护坡的工程效果。试验段边坡土体参数:粘聚力 $c=10\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=20^\circ$,重度 $\gamma=19\text{kN/m}^3$;河道底部1m处存在软弱流沙层,流沙层粘聚力 $c=7.5\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=16^\circ$,重度 $\gamma=19\text{kN/m}^3$ 。

(一) 无砌护工况下边坡稳定性分析

无砌护河岸边坡为粘性土坡,失稳时滑动面近似为圆柱面,采用费伦纽斯条分法(圆弧滑动面法)进行稳定性计算,考虑河

道渗流影响,采用等代法将渗流作用等效为静水压力和土体重度的变化。将滑动土体划分为8个土条,通过CAD作图确定土条几何参数和受力特征,采用Excel计算确定最危险滑动面圆心位置,土条受力计算结果如表2所示。

表2 无砌护边坡最危险滑动面条分法计算表

序号	土条宽度(m)	土条滑动弧段的倾角($^\circ$)	土条的重量(kN/m)	滑动面的长度(m)	静水压力(kN/m)
1	1	-12.07	11.02	1.10	5.59
2	1	-0.59	29.83	1.02	12.54
3	1	10.87	44.65	1.00	15.88
4	1	22.81	55.67	1.02	16.95
5	1	35.99	60.99	1.09	15.48
6	1	52.32	51.87	1.24	11.07
7	1	67.99	33.44	1.64	2.84
8	0.42	79.82	4.56	1.12	0.00
合计	-	-	281.38	9.23	80.36

(二) 土工袋砌护工况下边坡稳定性分析

土工袋砌护时,护坡体支撑基础未深入河道底部软弱流沙层,边坡滑动面为圆弧与直线构成的复合型滑动面。采用简化分析法,取坡肩、坡脚至软弱流沙层的脱离体为研究对象,考虑脱离体自重G、滑动面抗滑力R、法向支持力N及朗肯主动/被动土压力 E_a 、 E_p ,根据水平方向力的平衡和强度条件,推导出复合型滑动面边坡安全系数计算公式:

$$K=\frac{E_p+G\tan\phi+cL}{E_a} \tag{1}$$

式中:L为滑动面长度,m; E_a 、 E_p 分别为朗肯主动、被动土压力,按朗肯土压力理论公式计算。

代入流沙层和边坡土体参数,计算得朗肯主动土压力 $E_a=82.5\text{kN/m}$,被动土压力 $E_p=45.3\text{kN/m}$,结合滑动面几何参数,最终计算得土工袋砌护工况下边坡安全系数 $K=1.56$,相较于无砌护工况提升48.6%,表明土工袋护坡能有效约束边坡土体变形,抵抗软弱夹层的滑移作用,显著提升河岸边坡的稳定性。

五、结论

本文通过理论分析、模型建立和工况计算,系统研究了土工袋护坡在河岸边坡工程中的稳定性机理和应用效果,得出以下主要结论:

(1)土工袋护坡体的主要破坏形式为滑动、边坡土塑性、断裂和水平滑移破坏,其稳定性关键受土工袋抗拉强度、层间摩擦系数、填料内摩擦角影响,折线式滑动是最常见的破坏形式,可采用平面滑动法建立其稳定性计算模型;

(2) 土工袋压坡效应能显著提升边坡稳定性, 边坡安全系数随压坡体宽度增大而提升、随坡高和坡比增大而降低, 压坡体宽度增大至一定程度后安全系数增幅放缓, 工程设计中需选取最优经济宽度;

(3) 无砌护河岸边坡(坡高3m、坡比1:1.5)的安全系数仅为1.05, 处于基本稳定状态; 土工袋砌护后, 边坡滑动面变为复合型, 安全系数提升至1.56, 稳定性提高48.6%, 土工袋护坡技术对河岸边坡的稳定控制效果显著。

参考文献

[1] 吴小军. 水利工程水闸除险加固施工工艺研究 [J]. 科学技术创新, 2020, (31): 129-130.

[2] 徐解刚, 杭天飞, 厉凯, 等. 基于土工袋的河岸防护应用研究 [J]. 陕西水利, 2021, (04): 48-50+56.

[3] 董宗伟, 徐生武, 王相峰. 塔里木河干流土工袋护岸边坡稳定分析 [J]. 东北水利水电, 2022, 40(08): 20-23+72.

[4] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2267-2273.

[5] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用 [J]. 岩土工程技术, 2007(05): 221-225.

[6] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术 [J]. 岩土力学, 2007(08): 1665-1670.

[7] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975. DOI:10.1680/geot.1975.25.4.671.

城市滨水空间开放共享建设对策思考

王思远

北京市凉水河管理处, 北京 100069

DOI:10.61369/WCEST.2026020017

摘 要：近年来,随着我国经济的快速发展,城市居民对高品质公共空间的需求不断增加。城市滨水空间是城市公共环境中的重要组成部分,在维护生态安全、展现城市风貌、保护文化遗产等多个方面都发挥着重要的作用,也因此成为了高品质公共空间建设中的重要内容。文章针对城市滨水空间开放共享建设对策进行了思考,在开放共享环节融合人与自然共生的理念,促使滨水空间效果更加理想,旨在为相关工作提供一定的参考,为城市的可持续发展保驾护航。

关 键 词：城市滨水空间; 开放共享; 建设对策

Thoughts on Construction Countermeasures for Open and Shared Urban Waterfront Spaces

Wang Siyuan

Liangshui River Management Office, Beijing 100069

Abstract： In recent years, with China's rapid economic development, urban residents have shown growing demand for high-quality public spaces. Urban waterfront areas, as vital components of urban public environments, play crucial roles in maintaining ecological security, showcasing urban landscapes, and preserving cultural heritage, making them key elements in high-quality public space development. This paper explores strategies for open and shared waterfront space construction, integrating the concept of human-nature symbiosis into the sharing process to enhance spatial effectiveness. The findings aim to provide actionable references for related initiatives and support sustainable urban development.

Keywords： urban waterfront space; open sharing; construction strategies

引言

水是生命的源泉,孕育了大自然中丰富多样的生命,同时也是促进城市发展的重要力量。一直以来,人们都喜欢“逐水而居”,这样的居住理念深深地烙在了人们的心中,现已成为城市文化中的重要组成部分^[1]。现阶段,我国的各大城市都在不断地更新与转型,滨水空间成为了城市更新与转型中的重要内容。对城市滨水空间开放共享建设对策进行思考具有重要的意义,可以总结出有效经验并进行推广,以此大幅提高建设成效,进一步改善城市面貌,提升人们生活的舒适度。

一、城市滨水空间理念

新的时代背景下,为了满足人们的生产及生活需求,同时实现环境人与人的和谐相处,城市发展规划中适当融入了滨水空间理念,主张打造出和谐优美共生的环境,让人们在理想的空间感知到自然气息,促使自然与人完美相融。城市滨水空间通常指的是城市中与河流、湖泊、海洋等水体相接触的自然环境、人造环境,包含着自然、社会、空间等多种要素。滨水空间是比较重要的景观,有的滨水空间甚至成为一个城市的标志景观,同时,成为了外地游客到城市旅游不可缺少的打卡地^[1]。另外,滨水空间还是城市居民的重要活动场所,人们在那里散步、聊天、钓鱼、

交友等,为人们休闲娱乐以及社交活动提供了良好的空间。城市滨水空间和城市中的其他区域相比,在空间区域优势方面非常显著,在多个方面都发挥着积极的作用,如能够在一定程度上解决城市空间匮乏的问题、能够有效增加城市空间容量、能够大幅提升城市环境水平等,这些优势是城市的其他区域所无法比拟的。因此,需要高度重视城市滨水空间的合理建设。

二、项目概况

凉水河发源于石景山,流经海淀、西城、丰台、大兴、朝阳、亦庄、通州,全长68.41km,总流域面积651km²。2022年

启动了“点靓凉水河”专项行动，治理范围为凉水河丰台段，全长约11km^[2]，目的在于高品质建设城市蓝绿空间体系，让凉水河成为一个景观带、文化带、休闲带、产业带。其中，“点靓凉水河”一期一凉水河石榴庄段滨水空间提升及水生态修复工程长1.44Km,面积48.86公顷，2025年5月建设完成，投入运行。

石榴庄段滨水空间的做法可以总结为：1条生态安全的弹性河道，3片调蓄雨洪、提供安全亲水空间的生态湿地，5类水上－林间－空中的立体游憩系统，N多点绣花式更新，植入新功能新业态，如图1。

1条生态安全的弹性河道指的是将右岸长约1公里的巡河路外移，提高河道防洪安全，同时释放出更舒缓的滨水岸线空间；滨河区域形成连续的浅滩湿地，提高河道的自净能力，也为野生动物提供更多样化的栖息地；步道、亲水平台等临水设施均采用耐水淹、易维护的材料，适应频繁的水位变化。

3片调蓄雨洪、提供安全亲水空间的生态湿地指的是水岸之间增加3片“水上森林”湿地，3.2万平米，蓄水量约4.3万方，雨季蓄滞片区雨水，缓解河道排洪压力，非雨季引河水经由湿地净化循环，为市民提供亲水嬉戏空间；场地结合雨水边沟、雨水花园等一系列海绵化改造，增强河道沿线绿地斑块的生态调蓄功能。

5类水上－林间－空中的立体游憩系统指的是1.4公里水上休闲游线+6处停靠点，支持各类型水上活动；3.6公里亲水漫步道，贯通河岸上下，支持全线亲水畅行；3.1公里林间“浪漫骑行”道，支持巡河路及园路融合之后的骑行体验；9.8公里林间步道，依托现状林下空间改造更新；“舟桥”+“听风桥”+“凉亭”的设施搭配，丰富立体的观景体验。

N多点绣花式更新，植入新功能新业态指的是林间空地更新为6类16个“森林球场”、3个亲子乐园及多点健身活动场地、3处公厕服务点、多处弹性碎石场地；优化桥下空间，贯通6处桥下慢行道，增加1处“桥下乐园”、1处桥下停车场；引入龙舟竞渡、森林球赛、水岸文化艺术节、林下演唱会等业态及活动，形成“生态+消费+品牌+活动”的全时段微度假目的地。

在治理过程中，突破传统治水的工作方法，坚持以人为本的营城导向，实现了蓝绿交融、水城互动，提升了环境品质，突显生态、社会、经济、可持续发展，传承了历史文脉，激发了地区活力^[3]。



图1 凉水河一期石榴庄段

三、城市滨水空间开放共享建设对策思考

城市滨水空间开放共享建设阶段，应着重分析实际情况，同时还要结合区域位置综合考量，确保可持续发展的目标圆满完

成。前期应落实好现状分析工作，详细了解情况，制定应对方案，顺应自然法则，传承文化记忆，不断优化场景设施，将城市艺术魅力充分体现，为人们营造出美好生活的空间。

（一）城市滨水空间的当前现状

如今城市对滨水空间的开发已经进入到一个全新的阶段，即可持续发展阶段。现阶段，居住在城市中的人们物质文化需求在不断增长，而当前滨水空间的现状显然无法满足人们的需求。具体表现在以下几个方面：

第一，部分城市中的滨水空间缺乏地域特色和文化氛围，如有的城市中的滨水空间只是简单地照搬其他城市中的滨水空间，没有将该城市的特色融入其中；第二，部分滨水空间的基础设施比较陈旧，如有的滨水空间中的座椅款式过于陈旧，与现代城市生活的氛围格格不入。又如有的滨水空间中的路灯设施十分陈旧，晚上灯光过暗，影响人们的安全。另外，也存在驳岸形式单一、亲水性缺失等问题；第三，部分滨水空间的沿线被各类用地隔断，在连续性方面比较缺乏，这种情况的存在影响了滨水空间功能的发挥。另外，部分滨水空间与城市腹地割裂突出，可达性、易达性都比较缺失，如有的城市的滨水空间距离市中心过远，所以只能供居住在附近的人们使用。

基于此，应结合城市定位加以判断，确定科学化的建设思路，从开放共享视角着手，设定出一系列实践活动，促使城市开发更加到位。

（二）城市滨水空间开放共享建设对策

1. 顺应自然法则、彰显生态之美

在建设过程中，需要着力发挥滨水空间在多个方面的重要作用，如水源涵养、雨洪调节、土壤保持、生物多样性保护等，达到人与自然和谐共生的理想境界^[4]。我们可以全面地、深入地、仔细地分析河流独有的水文生态特征，为各类生物提供理想的栖息环境，如各种鸟类、鱼类、哺乳类、两栖类等生物。可以精心设计木栈道与亲水平台，然后将其置于树林间，这样便能使人们漫步其中时感受到独特的城市风情，感受到大自然的神奇与美好。对于滨水沿岸巨大高差所形成的消落带景观，可以有效识别出最有特色的生态场景，如“草海”“石滩”“冲沟入江口”等，可以设计不同材质的低干扰、耐冲击路径，这样便能够直观地、生动地展现“荒野”之美、自然之力。在这个过程中，城市居民便拥有了一片对自然进行美好体验的良好空间，城市中的学校也因此拥有了一片对学生进行自然教育的天然教室。我们需要始终将绿色作为底色，对水的生态规律进行不断地、深入地研究，将其作为城市滨水空间开放共享建设的重要基础。

2. 传承文化记忆、展开时空对话

在城市的发展过程中，滨水空间是重要的见证者。因此，城市滨水空间镌刻着深厚的历史文化印记。在城市滨水空间开放共享建设过程中，需要充分挖掘有效的历史文化信息，提炼合适的历史文化信息，并使其与人们的日常生活相融。设计师需要在思想上有明确认识，挖掘并提炼历史文化信息是滨水空间开放共享建设的精神内核。如在一些传统工业城市的滨水空间开放共享建设过程中，可以保留码头、厂房、仓库等重要工业遗存，然后通

过艺术化的手法赋予其在新时代的新功能,便能够将厚重的历史感与时尚的艺术氛围做到有机融合^[5],如图2。设计是一项具有伟大力量的活动,通过设计的力量,可以使滨水空间成为重要的传承历史文脉、彰显城市品格的新载体,从而使生活在城市中的人们以及到城市中旅游的人们在流淌的水流中感受古韵新风。

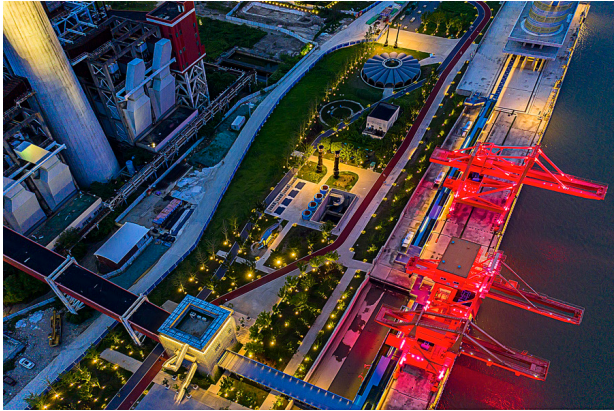


图2 上海杨浦发电厂遗址公园

3. 营造丰富场景、传递艺术魅力

城市滨水空间是呈现城市形象、展示城市风貌特色的重要窗口。在城市滨水空间的开放共享建设中,设计师可以灵活运用艺术和设计手法将水岸高差进行巧妙化解,这样便能够将原本单一的工程岸坡形式转变为层次丰富的立体空间,从而增强人们的全感官体验,并使城市拥有靓丽的景观风貌。在我国一些城市中,设计师将原本普通的水泥堤坝神奇地化身为休闲观光带。艺术与设计的融入,使人们“心中的山水”与“自然的山水”真正做到相联相融,如图3。

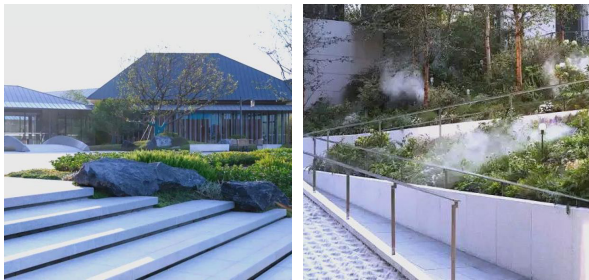


图3 滨水空间设计中对水岸高差的处理

4. 激发城市活力、营造美好生活

随着时代的不断发展,城市滨水空间也在不断地适应人们的新生活方式,不断调整自身的功能与定位^[6]。在城市的滨水空间开放共享建设中,除了需要设计湿地、喷泉、观演广场等重要设施外,在条件允许的情况下,还可以将科技展厅纳入设计范围内,这样便能够使人们在休闲的过程中增进对科技的了解,进而为科技的发展提供大力支持。另外,设计师可以将部分沿岸空间改造成为餐厅、小酒馆、咖啡馆等,从而增强滨水空间对青年人的吸引力。随着城市滨水空间的不断更新,许多水体俨然已经成为代表着新的社会治理理念和治理模式的重要片区。

四、结语

综上所述,滨水空间是城市环境中的重要组成部分,在城市转型的过程中,需要重视滨水空间的开放共享建设工作。为了提升开放共享建设成效,可以采用顺应自然法则、彰显生态之美,传承文化记忆、展开时空对话,营造丰富场景、传递艺术魅力,激发城市活力、营造美好生活等对策,维护城市生态安全,提升城市形象风貌,促进城市旅游业、文化业、零售业等产业发展,从而达到人水和谐、水城共融的目标。

参考文献

- [1] 杨苏燕,高晓龙,吴东敏,郑善文,吴琼. 重塑人水关系:城市更新背景下滨水空间可持续公共产品供给策略[J]. 水利发展研究, 1-7.
- [2] 陈超. 气候韧性导向下的城市滨水空间重构策略——基于海绵城市与生态廊道的耦合设计[J]. 绿色建造与智能建筑, 2026, (01): 158-161.
- [3] 龙冰淳. 历史文化遗产与现代城市空间再造:上海苏州河与墨尔本雅拉河滨水区更新的比较研究[J]. 上海文化, 2025, (12): 14-21.
- [4] 赵钧, 吴威霖. 公众运动需求导向下的城市滨水空间更新设计研究——以夏季沈阳奥林匹克生态公园为例[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2025, 27 (06): 550-557.
- [5] 程相占, 丛佳琪, 汪洁琼, 陈俊延. 基于自然美学的城市滨水空间秋季景观公众自然感知评价——以上海市黄浦江为例[J]. 风景园林, 2025, 32 (11): 120-129.
- [6] 李雪, 陈飞. 城市滨水空间复兴的比较研究:洛杉矶河与北京“海绵城市”建设的实践与启示[J]. 建筑与文化, 2025, (10): 125-127.

水利水电工程防渗技术施工要点分析

尹润霞

福贡县架科底乡人民政府综合保障和技术服务中心, 云南 福贡 673403

DOI:10.61369/WCEST.2026020018

摘 要 : 针对云南福贡地区高山峡谷地形、地质构造复杂、裂隙与断层较为发育及雨季降水集中的实际情况, 对水利水电工程防渗技术施工要点进行了分析。结合区域自然地理特征与地质条件, 归纳了灌浆防渗、防渗墙、土工膜及复合防渗、混凝土防渗等主要施工技术的适用特点, 重点阐述了施工前勘察与方案设计、关键工序控制、质量检验及雨季特殊环境施工管理等内容。

关 键 词 : 水利水电工程; 防渗技术; 施工要点

Analysis of Construction Key Points of Seepage Prevention Technology for Water Conservancy and Hydropower Projects

Yin Runxia

Fugong County Jiake Di Township People's Government Comprehensive Support and Technical Service Center,
Fugong, Yunnan 673403

Abstract : This study analyzes key construction techniques for seepage prevention in hydropower projects, addressing the complex mountainous canyon terrain, intricate geological structures, well-developed fractures and faults, and concentrated monsoon rainfall in Fugong, Yunnan Province. By integrating regional natural geographical features and geological conditions, the research summarizes the applicability of major construction technologies including grouting seepage prevention, seepage walls, geomembrane and composite seepage barriers, and concrete seepage prevention. Special emphasis is placed on pre-construction surveys and design planning, critical process control, quality inspection, and construction management under monsoon season conditions.

Keywords : water conservancy and hydropower engineering; seepage prevention technology; construction key points

随着山区水利水电工程建设规模不断扩大, 复杂地质与特殊环境条件对防渗技术提出了更高要求。云南福贡地区位于高山峡谷地带, 地形起伏大, 河谷深切, 断层、裂隙及破碎带较为发育, 加之降雨量较大、雨季持续时间较长, 容易形成渗漏通道, 增加了防渗施工难度。因此, 有必要结合福贡地区工程建设条件, 系统分析水利水电工程常用防渗技术及其施工要点, 从勘察设计、工艺应用、质量控制和特殊环境管理等方面提出针对性措施, 为类似山区峡谷地带水利水电工程建设提供参考。

一、云南福贡地区水利水电工程建设条件分析

(一) 区域自然地理特征

云南福贡地区处于怒江峡谷腹地, 地貌以高山峡谷为主, 山高坡陡且河谷深切, 地形起伏程度十分明显。该区域内水系发育完善, 河流落差较大, 水能资源较为丰富, 这也为水利水电工程建设提供了良好条件。不过, 受地形因素, 工程布置空间相对有限, 施工道路修建难度较大, 机械设备和材料运输成本也比较高。与此同时, 福贡区降水充沛, 雨季持续时间较长, 地表径流与地下水活动十分频繁, 很容易对基坑开挖边坡的稳定性以及防渗施工造成不利影响。所以说, 该区自然条件既具备开

发优势, 同时也增加了工程建设与防渗处理的复杂性。

(二) 地质条件特征

福贡地区地质构造比较复杂, 受区域构造运动影响, 其表现十分明显。断层、节理以及裂隙发育数量较多, 局部岩体破碎现象也较为突出。工程区域内常见岩土体类型多种多样, 既有比较完整的基岩, 同时也存在风化层较厚且稳定性较差的松散堆积体。这样就会使地基条件呈现出很强的不均匀性。部分区域地下水埋藏较浅, 岩体透水性较强, 非常容易形成渗流通道, 这会给工程基础防渗工作带来较大压力。与此同时, 高边坡以及深切河谷环境很容易诱发滑坡、坍塌等地质灾害, 还会增加施工过程中的安全风险以及技术难度。所以说, 福贡区水利水电工程建设

必须重视地质勘察以及基础处理工作^[1]。

（三）对防渗施工的不利影响

受自然地理以及地质条件共同作用，福贡区水利水电工程防渗施工面临着较多不利因素。复杂地层中断层、裂隙以及破碎带很容易形成隐蔽渗漏通道，导致常规防渗措施难以一次性达到理想效果。高山峡谷地形会使施工场地变窄，设备布置和材料运输都会受到限制，进而影响防渗施工效率。此外，雨季降水集中会造成基坑积水、边坡失稳以及施工面含水率升高，不利于开展灌浆、防渗墙以及土工膜铺设的施工质量控制工作。除此以外，山区气候变化较快，也会对混凝土防渗结构的浇筑养护以及裂缝控制产生不利影响。所以，在该区开展防渗施工工作必须突出因地制宜以及全过程质量控制要求。

二、云南福贡地区防渗技术施工要点分析

（一）施工前勘察与方案设计要点

在开展云南福贡区水利水电工程防渗施工之前，要把勘察以及方案设计当作首要环节来对待，要结合工程区形貌以及水文条件，布设钻孔探槽和物探点，对坝基岸坡以及含水层开展系统调查工作，一般来说，钻孔间距宜控制在 20 ~ 50 m，而重点破碎带或者断层影响区钻孔间距，就可以缩小至 10 ~ 20 m；钻孔深度要进入相对完整基岩 5 m 以上，这样才能查明裂隙发育下水埋深以及渗流通道分布情况，要开展压水试验渗透试验以及必要抽水试验，去准确判定岩体透水率和防渗处理范围，对于透水性较强部位，可以优先考虑采用帷幕灌浆或者防渗墙方案，其中帷幕深度通常要超过主要透水体底板 3 ~ 5 m，在方案设计过程中，还需要结合当雨季长边坡陡施工场狭窄等特性，合理确定防渗轴线施工顺序以及排水措施，同时预留出不少于 0.5 m 作业平台宽度，通过“勘察—分析—设计”一体化控制，就能为后续防渗施工质量提供可靠保障^[2]。

（二）灌浆防渗施工要点

在云南福贡区开展灌浆防渗施工工作时，应当充分考虑高山峡谷型岩体裂隙发育以及地下水活动较强等特性，科学确定灌浆参数以及施工工序。灌浆孔布置工作应当依据其透水性、断层分布以及防渗标准来综合确定。常规孔距宜控制在 1.5 ~ 3.0 m，排距宜为 2.0 ~ 3.0 m；如果是裂隙密集带、断层破碎带等重点区域，那么孔距可以缩小至 1.0 ~ 1.5 m。钻孔孔径一般选用 $\phi 75 \sim 110$ mm，孔深应当进入相对完整基岩 5 ~ 10 m，以保证帷幕连续性。在施工中应当坚持“先试验后施工，分序加密，分段灌浆”原则。灌浆段长一般控制在 3 ~ 5 m，特殊破碎带可以缩短至 1 ~ 2 m。灌浆压力需要结合覆盖层厚度和岩体完整程度来合理控制，通常基岩帷幕灌浆压力可取 0.3 ~ 1.0 MPa，要避免压力过大而引起抬动、冒浆或者串浆现象。浆液水灰比应当根据吸浆情况来动态调整，常用配比可以从 2:1、1:1 逐步过渡至 0.8:1 或者 0.5:1，以提高裂隙充填密实度。在施工过程中还应当加强压水试验吸浆量记录以及终孔检查，当单位吸水率明显降低并且达到设计标准之后才可以结束灌浆工作。如果是雨季施工，应当提

前设置排水沟、集水井以及临时防护棚，防止孔口进水而影响浆液稳定性。只有通过严格控制孔位、孔深、压力以及浆液配比，才能够有效提升福贡区灌浆防渗效果。

（三）防渗墙施工要点

福贡区地质构造复杂并且局部覆盖层较厚，运用防渗墙技术时要重点控制成槽质量、墙体连续性以及接头处理效果。在施工准备阶段要把防渗轴线准确放样出来，轴线偏差一般要控制在 ± 20 mm 以内，导墙厚度宜为 0.3 ~ 0.5 m，高度宜为 1.0 ~ 1.5 m，这样才能保证成槽设备稳定运行。防渗墙厚度通常会根据工程等级以及防渗要求来确定，常见取值为 0.4 ~ 0.8 m，至于高水头或者深厚覆盖层段还可以适当增至 0.8 ~ 1.0 m。槽孔深度要穿透强透水层并且进入相对隔水层或者完整基岩 0.5 ~ 1.0 m 以上，以确保形成连续封闭防渗体系。在成槽施工中要严格控制槽孔垂直度，偏斜率宜小于 0.3%，同时还要合理使用泥浆护壁，泥浆比重一般控制在 1.05 ~ 1.20 g/cm³，黏度控制在 18 ~ 25 s，这样就能防止塌槽、缩颈或者夹层情况出现。墙体浇筑宜采用导管法连续灌注，导管埋深通常保持在混凝土面以下 2 ~ 6 m，避免出现离析和断桩现象。对于槽段接头部位，要预留可靠搭接宽度，一般不小于 20 ~ 30 cm，防止接缝发生渗漏。施工结束后还需要借助取芯、超声检测或者渗透试验等方法去检查墙体完整性。因为福贡区雨季降水集中，施工中必须同步做好排水和边坡防护工作，防止表水进入槽内，进而影响护壁稳定和墙体成型质量^[3]。

（四）土工膜及复合防渗施工要点

土工膜以及复合防渗技术适用于福贡区部分渠道、调蓄池边坡以及辅助建筑物的防渗处理工作。这项技术的施工关键，包括基层处理、膜材铺设焊接质量以及保护层设置这几个方面。

在进行膜材铺设之前，必须把基层整平压实，基层表面高差宜控制在 ± 20 mm 以内，而且基层上面不能存在尖石、树根、铁器这类硬质杂物。如果有必要，还可以铺设 5 ~ 10 cm 厚细砂或者土工布作为垫层。常用土工膜厚度一般为 0.5 ~ 1.5 mm，复合土工膜单位面积质量大多为 300 ~ 800 g/m²，应该依据水头、基条件以及使用部位来合理选用合适的膜材类型。

膜材铺设应该顺着坡顺着水流方向来展开，()还要预留出 1.5% ~ 3.0% 松弛量，这样就能适应温度变化以及不均匀沉降带来影响，膜与膜之间搭接宽度一般不能小于 10 cm，热熔焊缝双焊道宽度宜为 2 × 10 mm，而且焊缝中间要形成可以检测空腔，这样就方便进行气压检漏工作，焊接施工环境温度宜控制在 5 ~ 35 ℃，如果遇到大风暴雨天气，就应该暂停作业，对于转角锚固沟和穿墙管这些薄弱部位，还要进行附加层补强处理，锚固沟宽度和深度一般可以取 30 cm × 30 cm 或者 40 cm × 40 cm，膜材铺设完成之后，应该马上施工保护层，保护土层厚度通常不能小于 20 ~ 30 cm，这样就能防止后续施工过程中出现踩踏暴晒老化或者机械损伤膜材情况。

最后，结合福贡区形陡降雨多特性，同时还要强化排水系统以及边坡稳定措施，这样才能保证土工膜防渗层可以长期安全运行^[4]。

（五）混凝土防渗施工要点

云南福贡区水利水电工程，会在坝体、闸室、引水渠以及附

属建筑物当中广泛运用混凝土防渗技术，其施工质量会直接关系到工程整体抗渗性能。要根据工程部位以及防渗要求，合理选用混凝土强度等级与抗渗等级。一般可以把 C25 ~ C35 抗渗混凝土当作材料来使用，抗渗等级最好不要低于 P6 ~ P8。要是针对长期受高压作用部位，就可以把它提高至 P10 及以上。在原材料方面，要严格控制水灰比，通常宜把它控制在 0.40 ~ 0.50 之间。同时还要参加适量粉煤灰、减水剂或是膨胀剂，以此来提升混凝土密实性以及抗裂性能。在浇筑之前要做好模板拼缝封闭以及基层湿润处理工作，这样就可以防止出现漏浆以及界面脱空问题。混凝土分层浇筑厚度一般要控制在 30 ~ 50 cm，要是运用插入式振捣器来振捣的话，振捣间距宜为 30 ~ 40 cm，单点振捣时间大概在 10 ~ 20 s，要以混凝土表面泛浆不再出现明显下沉状态为准，以此来避免出现漏振或是过振情况。对于施工缝、伸缩缝以及后浇带这类容易出现渗漏部位，要设置止水带或是遇水膨胀止水条。常用橡胶止水带宽度为 250 ~ 350 mm，它埋设位置应当居中，偏差宜控制在 ± 10 mm 以内。在浇筑完成之后，要马上开展保温保湿养护工作，养护时间一般不能少于 14 d。要是处于高温、低温或是昼夜温差较大环境当中，就要采取覆盖洒水或是采取保温毯等措施，防止产生温度裂缝以及收缩裂缝。鉴于福贡区山区昼夜温差较大、湿度变化明显特性，混凝土防渗施工必须突出“控裂、密实养护”这两个关键环节，这样才可以有效保障结构长期防渗效果^[5]。

（六）雨季与特殊环境施工要点

福贡区降雨量较大，雨季持续时间长，再加上高山峡谷地形复杂，给水利水电工程防渗施工带来了明显挑战。由此可见，

必须针对雨季以及特殊环境，采取专门技术措施。要在雨季施工前，把现场排水系统完善起来，沿着基坑边坡以及施工道路设置截水沟、排水沟以及集水井。排水沟底宽一般宜为 0.3 ~ 0.5 m，深度宜为 0.4 ~ 0.8 m，集水井间距可以控制在 20 ~ 30 m。并且还要配备足够功率的抽排设备，确保在降雨后 2 ~ 4 h 之内，可以把施工区域积水基本排除干净。灌浆防渗墙以及混凝土施工区域，应搭设临时防雨棚或者覆盖防水布，防止雨水直接进入孔口槽孔或者浇筑面。土工膜铺设施工，要避开 4 级风以上以及持续降雨天气，防止膜材出现漂移、污染或者焊缝失效情况。对于高边坡以及松散覆盖层段，应同步采取锚杆挂网、喷射混凝土等支护措施。锚杆长度一般可取 3 ~ 6 m，喷射混凝土厚度宜为 80 ~ 120 mm，以此来提高边坡稳定性。在特殊环境，如低温、浓雾或者交通受限条件下，还要合理安排工序衔接以及材料储备。水泥、土工膜、外加剂等材料，应存放于干燥仓库内，距离地高度不宜小于 0.20 m。

三、结束语

综上所述，云南福贡地区水利水电工程防渗施工受自然地理条件、地质构造特征及雨季环境影响显著，施工难度和质量控制要求均较高。灌浆防渗、防渗墙、土工膜及复合防渗、混凝土防渗等技术各具适用范围，实际应用中应根据工程地基条件、渗漏特征和施工环境进行科学选取与组合。防渗效果的实现不仅取决于技术类型本身，更取决于前期勘察的准确性、方案设计的合理性、施工工艺的规范性以及全过程质量管理的严密性。

参考文献

- [1] 马洋, 陈焕凤, 马卫, 等. 水利水电工程防渗施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(8): 72-74.
- [2] 蒙飞花. 水利水电工程防渗施工技术 [J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7(12): 22-24.
- [3] 龚定松, 王彪. 水利水电工程防排水结构优化设计与实施技术 [J]. 工程机械与维修, 2025(2): 100-102.
- [4] 张光磊. 水利水电工程防渗施工技术分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2025, 13(17): 163-165.
- [5] 陈慧慧, 朱倩, 于梦丽. 水利水电工程防渗施工技术探索 [J]. 奥秘, 2025(17): 46-48.

乌鲁木齐河洪水传播特性及演进模拟研究

新素依尔·道恩德格

新疆维吾尔自治区乌鲁木齐水文勘测中心, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/WCEST.2026020019

摘要： 乌鲁木齐河作为天山北麓重要水源，其洪水传播演进规律对区域水资源管理与生态安全至关重要。本文根据实测资料，对径流洪水传播演进影响因子与区间汇流影响进行分析。结果表明河沟汇入补给（HR）与下渗损失（SS）是关键控制因子，据此得到简化流量方程；研究将大西沟水库坝址至乌拉泊水库入口干流划分为上、中、下三段，构建了径流、洪水传播演进的一维模型；针对大西沟水库坝址至青年渠渠首之间的中段区间汇入情况，构建了区间引水平移模拟模型。上述成果为揭示乌鲁木齐河径流传播规律，实现流域水资源的合理利用与科学管理具有重要意义。

关键词： 传播演进；影响因子；模型构建

Study on Flood Propagation Characteristics and Evolution Simulation of Urumqi River

Xinsuyier · Daoendege

Urumqi Hydrological Survey Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract： As a critical water source in the northern foothills of the Tianshan Mountains, the flood propagation patterns of the Urumqi River are essential for regional water resource management and ecological security. Based on field measurements, this study analyzes influencing factors of runoff flood propagation and interzone convergence effects. Results indicate that river channel recharge (HR) and infiltration loss (SS) serve as key control factors, leading to the derivation of a simplified flow equation. The research divides the main stream from the Daxigou Reservoir dam site to the Wulapo Reservoir inlet into upper, middle, and lower sections, establishing a one-dimensional model for runoff and flood propagation. A horizontal migration simulation model for interzone convergence was developed for the middle section between the Daxigou Reservoir dam site and the Qingnian Canal head. These findings provide significant insights into understanding Urumqi River runoff dynamics, facilitating rational utilization and scientific management of watershed water resources.

Keywords： transmission evolution; impact factor; model construction

引言

乌鲁木齐河是天山北麓重要的河流，对乌鲁木齐市及其周边地区水资源供给，区域经济发展、生态平衡维护和居民生活保障等方面发挥着不可替代的作用^[2]。近年来，随着城市化进程的加快和经济的迅速发展，对水资源的需求量不断增加^[4]。因此水资源的合理调配和高效利用成为亟待解决的问题。同时，全球气候变化导致降水模式和气温发生变化，加剧了河径流变化的复杂性。本文通过对乌鲁木齐河流洪水传播演进分析，构建传播演进模型，揭示其径流传播演进规律，为乌鲁木齐河水资源的科学管理和可持续利用提供理论支持^[1]。

一、径流传播演进背景

乌鲁木齐河发源于天山山脉依连哈比尔尕山天格尔峰胜利达坂的一号冰川，下行约42km。经后峡、过大西沟水库、抵达原英雄桥水文站及大西沟渠首后，接纳西白杨沟和东白杨沟，行至青年渠渠首再行39km至乌拉泊水库。此后进入和平渠渠系，流经乌

鲁木齐市区输送至下游灌区。

自1950年以来，流域先后建成有红雁池水库、乌拉泊水库、大西沟水库及引水工程。1947年起，大西沟水库至乌拉泊水库之间设有多个水文、水管站。在人类活动影响下与地质条件影响，该河段径流损耗显著。大西沟渠首和青年渠渠首引水，加之水库蓄水，加剧了水量损耗。河段上部为径流形成区，下部为径流散

作者简介：新素依尔·道恩德格（1990.08—），男，蒙古族，新疆和布克赛尔蒙古自治县人，本科，中级工程师，研究方向：主要从事水文水资源监测评价，工程水文分析计算、水文地质与地下水监测、洪水影响评价、水资源论证及水利工程建设管理等方面的专业技术工作。

失区,受洪积扇及巨厚的第四系覆盖层影响,河流沿程入渗损失严重;地表、地下径流路径存在差异,乌拉泊水库难以拦截径流。河道径流损失起始点距离大西沟水库坝址约9.9km,距离青年渠渠首的河道距离约11km,距乌拉泊水库约50km。干流流经青年渠渠首约8km后,流向由北偏东转为西南—东北流向,相对转角约达30°,部分水流在弯弯子一带越过分水岭流出流域^[2]。

据地形图与卫星图分析,乌鲁木齐河干流从大西沟水库坝址至乌拉泊水库坝址约60.72km,区间流域面积约1786km²,乌拉泊水库入库口以上流域面积约1329km²,区间汇流流域面积约443km²。河段自上而下分三段,沿途有多条支沟汇入,其中西白杨沟、东白杨沟为主要长流水支沟。青年渠渠首至乌拉泊水库段长39km,有18条较大沟河汇入。乌拉泊水库另有5条泉水沟直接汇入,芨芨槽子沟为主要常流水沟;梯匈河以地下水形式补给,出山口以上流域面积370km²。该区间支沟间接汇入干流、直接入库两种形式,受径流散失区影响,除芨芨槽子沟外,其余多以地下水及泉水形式补给水库^[3]。

二、传播演进分析

(一) 传播演进影响因子分析

1. 传统径流传播演进影响因子

在天然状态下,径流传播主要受河段内沿程河沟汇入补给(HR)、沿程地下溢出补给(DB)、沿程河道降雨补给(YB)、沿程河道下渗损失(SS)、沿程填洼初损(TW)、沿程河道蒸发损失(ZF)等有关因素影响;洪水传播额外受沿程河道槽蓄量(CX)、沿程坦化(TH)等因素影响;人类活动影响下,还需考虑沿程蓄水(XS)、引水(YS)、灌区排水(PS)等因素^[4]。

若以流量(Q)计,河段的径流洪水传播方程如下:

$$QO=QI+QHR+QDB+QYB-QSS-QTW-QZF-QXS-QYS+QPS$$

洪水传播方程:

$$QO=QI+QHR+QDB+QYB-QSS-QTW-QZF-QXS-QYS+QPS\pm QCX\pm QTH$$

2. 乌鲁木齐河径流传播演进分析

大西沟水库至乌拉泊水库坝址间干流河道纵坡较大,平均坡降13.77‰,河段槽蓄量变化可忽略;选择逐日流量过程进行洪水演进计算时,在纵坡大、流程较短,洪水波坦化因素亦可忽略,则径流与洪水传播方程为同一方程。该河道无蓄水水库工程,水面面积小,则沿程蓄水(XS)、河道降雨补给(YB)、河道蒸发损失(ZF)可忽略;无排水进入干流河道,灌区排水(PS)也可以忽略;若考虑畅流情况,河道填洼初损(TW)、地下溢出补给(DB)亦可以不考虑。

通过上述分析,干流的径流、洪水传播的流量方程可简化为:

$$QO=QI+QHR-QSS-QYS$$

乌鲁木齐河干流青年渠渠首至乌拉泊水库之间,河长约39km,区间面积约235.0km²。该区间内有9条较大的沟河汇入,左岸有卡亚沟等5条沟直接汇入干流;右岸有阴沟等4条沟经黄草梁子灌区汇入。该河段虽有青年渠二次引水和西山潜坝渠首引水,鉴于青年渠二次引水系列仅从2002年起有记录且不连续,引水量不足1m³/s,多在0.6m³/s以下;后者引水规模与青年渠二次相似,故从资料精度角度考虑,亦予以忽略^[5]。因此,该河段是各项因子影响最小河段,相关的径流、洪水传播的流量方程又可简化为:

$$QO=QI+QHR-QSS$$

该河段传播方程经过简化后,径流洪水传播的主要影响因子仅剩沿程河沟汇入补给(HR)、沿程河道下渗损失(SS)。可借助历年相关资料,通过分析方法推导出该河段的一维传播演进模型^[6]。

(二) 区间汇流影响分析

大西沟水库坝址到乌拉泊水库干流入口地处天格尔峰北麓暴雨区边缘,天气系统过境时易受山地辐合抬升形成大范围降雨,1996年7月中旬多地水文站刷新降雨记录,引发乌鲁木齐河前峡出山口上下游发生洪水。该河段长度60.72km,坡降约为13.92‰,远大于河中游段3—6‰的坡降,河道槽蓄与洪水波坦化作用可忽略。按通常河流流速4m/s计,洪水的汇流时间约4小时,无水量增减时,上下游逐日流量过程基本一致。

若仅考虑下渗损失且无引水、无区间汇流影响,乌拉泊水库入口流量小于坝址流量。若叠加坝址至青年渠渠首、青年渠渠首至乌拉泊入口区间产流,则入口流量会大于大西沟水库坝址沿干流传播到乌拉泊水库入口的流量。综上,该区间面积较大,降雨及产汇流作用明显,区间汇入量不可忽视。河道坡陡流急,洪水传播约4小时,英雄桥站与乌拉泊入口逐日流量过程同步,下游滞后一日概率低。受区间产流叠加,乌拉泊水库入口流量大于坝址下传流量。

三、模型构建

(一) 乌鲁木齐河洪水传播演进模型

乌鲁木齐河大西沟水库坝址至乌拉泊水库入口干流区间,河道总长59.88km,有4处饮水节点,其中主要有2处引水节点。青年渠河道下泄断面距乌拉泊水库入口约39.0km,大西沟渠首下泄断面距下游青年渠下泄断面约6.38km;南台子暨河道径流损失起始点距大西沟渠首下泄断面约4.62km、距青年渠下泄断面约11.0km。因大西沟水库坝址至南台子河段河床为基岩河床,故不考虑该河段的河道损失。

1. 乌鲁木齐河径流传播演进分析

为简便模型建立,本次将大西沟渠首虚拟上提至南台子处河道径流损失的起始点,大西沟水库坝址至南台子段按河道无损失

处理,将该河段分为上中下3段。上段为大西沟水库坝址到虚拟的大西沟渠首(南台子),中段为虚拟的大西沟渠首位置到青年渠渠首,下段为青年渠渠首到乌拉泊水库入口(干流路由、青年渠路由2条水流路由)。

因资料所限,中段天然的径流洪水传播演进关系按相似于下段的传播演进关系考虑,假设中段的沿程河道损失与下段的沿程河道损失相似,结合下段河长为39km,中段河长11km,由下段的传播演进关系导出中段的传播演进关系,可得乌鲁木齐河大西沟水库坝址至乌拉泊水库入口河段中段的传播演进关系,可得南台子处径流损失的起点(虚拟的大西沟渠首位置)到青年渠河段的传播演进关系如下。

大西沟渠首河道下泄流量大于 $17.3\text{m}^3/\text{s}$ 时,青年渠引水道:

$$Q_{\text{青道}} = 0.9124Q_{\text{西渠泄}} - 0.7835$$

大西沟渠首河道下泄流量小于 $17.3\text{m}^3/\text{s}$ 时,青年渠引水道:

$$Q_{\text{青道}} = 0.8942Q_{\text{西渠泄}} - 0.4861$$

上两式中: $Q_{\text{青道}}$ ——青年渠引水道日平均流量(m^3/s);

$Q_{\text{西渠泄}}$ ——大西沟渠首以下河道下泄日平均流量(m^3/s)。

2.不同河段传播演进模型

将大西沟水库坝址至乌拉泊水库入口干流区间,划分为上、中、下3个河段,各河段入口断面作为控制或分流节点,构建径流与洪水传播演进的一维模型。如下:

(1)上段河段传播演进模型:入口断面流量: $Q_{\text{西库泄}}$,出口断面流量: $Q_{\text{西渠道}} = Q_{\text{西库泄}}$

(2)中段河段传播演进模型:入口断面流量: $Q_{\text{西渠泄}} = Q_{\text{西渠道}} - Q_{\text{西渠引}}$

出口断面流量: $Q_{\text{西渠泄}} \geq 17.3\text{m}^3/\text{s}$ 时, $Q_{\text{青道}} = 0.9124Q_{\text{西渠泄}} - 0.7835$

出口断面流量: $Q_{\text{西渠泄}} < 17.3\text{m}^3/\text{s}$ 时, $Q_{\text{青道}} = 0.8942Q_{\text{西渠泄}} - 0.4861$

(3)下段河段传播演进模型,干流路由:

入口断面流量: $Q_{\text{青渠泄}} = Q_{\text{青道}} - Q_{\text{青渠引}}$;出口断面流量: $Q_{\text{青渠泄}} \geq 15.0\text{m}^3/\text{s}$ 时,

$$Q_{\text{河坝}} = 0.6597Q_{\text{青渠泄}} - 3.0445$$

出口断面流量: $Q_{\text{青渠泄}} < 15.0\text{m}^3/\text{s}$ 时,

$$Q_{\text{河坝}} = 0.5804Q_{\text{青渠泄}} - 1.9274$$

(4)下段河段传播演进模型,青年渠路由:

入口断面流量: $Q_{\text{青下输}}$

出口断面流量: $Q_{\text{青入库}} = 0.8202Q_{\text{青下输}} - 0.0213$

式中, $Q_{\text{西库泄}}$ 为大西沟水库出库下泄日平均流量(m^3/s); $Q_{\text{西渠道}}$ 为大西沟渠首河道来水日平均流量(m^3/s); $Q_{\text{西渠泄}}$ 为大西沟渠首引水后下泄日平均流量(m^3/s); $Q_{\text{西渠引}}$ 为大西沟渠首引水日平均流量(m^3/s); $Q_{\text{青渠引}}$ 为青年渠渠首引水日平均流量(m^3/s)。

(二)区间引水平移模拟模型

大西沟水库坝址至青年渠渠首之间乌鲁木齐河干流,有东白杨沟、西白杨沟、英雄桥沟、南台子沟等常流水沟汇入,且以东、西白杨沟为主要汇入。东白杨沟汇口距离下游青年渠渠首的河道距离为5.38km,西白杨沟汇口距离下游青年渠渠首的河道距离为5.15km,两者位于乌鲁木齐河大西沟水库坝址到乌拉泊水库入口河段中段。若将东、西白杨沟汇入口,视为在青年渠引水道节点汇入,则可作为中段出口断面流出的径流组成部分。

选择英雄桥水文站与青年渠引水道的流量过程作为中段河段的入流与出流过程,经逐年过程比对可以看出,两者之间往往存在较大差异,青年渠引水在汛期6-8月往往偏低,受灌溉引水和河道入渗损失影响较大。

乌鲁木齐河干流大西沟水库坝址至青年渠渠首之间的中段区间汇入的区间径流、洪水以降雨径流为主具有降雨径流特征。年内降雨多孤立且断续分布,相应降雨径流过程线呈孤立且断续形态,在相应的径流过程线上,地表径流与浅层地下水部分趋近于零。若无区间损耗,上下游站同期逐日流量在谷值区域或稳定退水段数值接近。

选择英雄桥水文站与青年渠引水道的逐日流量过程,作为大西沟水库坝址到乌拉泊水库入口河段中段的汇入项与出流项,6月-9月中旬,根据水量平衡原理,两者在谷值或稳定退水段区域,建立水量平衡方程:

$$Q_{\text{英}} = Q_{\text{青道}} + Q_{\text{河损}} + Q_{\text{西渠引}}, \text{ 即 } Q_{\text{西渠道}} = Q_{\text{青道}} + Q_{\text{河损}} + Q_{\text{西渠引}}$$

式中, $Q_{\text{英}}$ 为英雄桥站断面逐日流量过程(m^3/s); $Q_{\text{青道}}$ 为青年渠引水道断面逐日流量过程(m^3/s); $Q_{\text{河损}}$ 为中段区间干流河道损失逐日流量过程(m^3/s); $Q_{\text{西渠道}}$ 为大西沟渠首河道来水逐日流量过程(m^3/s); $Q_{\text{西渠引}}$ 为大西沟渠首引水逐日流量过程(m^3/s)。

6-8月灌区引水流量相对稳定,呈平顶特征。可将其视为主要引水时段的众值引水流量,通过下游站流量叠加中段河道损失并平移固定流量,粗略模拟6-9月中旬的众值引水量。

本次假定大西沟渠首12-2月枯期不引水,采用河段中段的传播演进模型、将枯期英雄桥站流量演算至青年渠引水道断面,以实测流量减去演算值得到区间枯期基流补给量。在扣除不合理差值关系后,1965-1966年及1978-2011年数据反映,该河段冬季多年平均流量约为 $0.75\text{m}^3/\text{s}$,与中段河道损失值基本接近。

按汛前期、汛期、汛后期划分模拟时段,初步构建区间引水平移模拟模型^[7-8],按来水比例引水的思路,分析引水比例关系,模拟汛期引水量,确定各期划分的时间节点,开展大西沟渠首引水模拟实验。

经反复比对,确定模拟时段:11月5日-3月31日为枯期、4月1日-5月31日为汛前期、6月1日-9月中旬为汛期,9月中旬-11月4日为汛后期,构建区间引水平移模拟模型。模型以中段传播演进模型为基础,采用英雄桥站逐日流量为入流,演算至青

年渠断面得到河道损失量；汛前期引水量为英雄桥流量的0.2倍；汛后期取流量的0.3倍；汛期手动模拟值为6-9月中旬众值引水流量，获得中段河段区间引水平移二级模型。

模型中，有关方程如下：区间枯期基流： $Q_{\text{区基}} = 0.75\text{m}^3/\text{s}$ ；
汛前期大西沟渠首引水流量： $Q_{\text{西渠前引}} = 0.2Q_{\text{英}}$
汛后期大西沟渠首引水流量： $Q_{\text{西渠后引}} = 0.3Q_{\text{英}}$
枯期拟合： $Q_{\text{青道拟}} = Q_{\text{英}} - Q_{\text{河损}} + Q_{\text{区基}}$
汛前期拟合： $Q_{\text{青道拟}} = Q_{\text{青道}} + Q_{\text{河损}} + Q_{\text{西渠前引}}$
汛期拟合： $Q_{\text{青道拟}} = Q_{\text{青道}} + Q_{\text{河损}} + Q_{\text{西渠汛引}}$
汛后期拟合： $Q_{\text{青道拟}} = Q_{\text{青道}} + Q_{\text{河损}} + Q_{\text{西渠后引}}$ 式中，
 $Q_{\text{区基}}$ 为大西沟坝址至青年渠枯期区间基流逐日流量过程（ m^3/s ）； $Q_{\text{西渠前引}}$ 为大西沟渠首汛前期引水逐日流量过程（ m^3/s ）； $Q_{\text{西渠后引}}$ 为大西沟渠首汛后期引水逐日流量过程（ m^3/s ）； $Q_{\text{西渠汛引}}$

为大西沟渠首汛期引水逐日流量过程（ m^3/s ）； $Q_{\text{青道拟}}$ 为拟合的青年渠引水道逐日流量过程（ m^3/s ）。

四、结论

通过对传播演进影响因子和区间汇流影响分析，明确了河道沿程的河沟汇入补给（HR）与下渗损失（SS）是洪水传播的关键因子，得出简化的径流、洪水传播的流量方程，同时确定干流洪水、径流的沿程区间汇入量较大，不容忽视；将大西沟水库坝址至乌拉泊水库入口干流区间划分为上、中、下三段，构建了径流、洪水传播演进的一维模型；针对坝址至青年渠渠首之间的中段区间汇入情况，构建了区间引水平移模拟模型。

参考文献

[1] 方神光, 张文明, 周若里, 等. 西江中游洪峰演进特性研究 [J]. 人民珠江, 2015, 36(06): 30-34.
[2] 卡米兰·阿布力克, 杨涵. 乌鲁木齐河流域植被覆盖度变化及驱动力研究 [J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(02): 96-105.
[3] 刘娟, 廖茂均, 蒋显忠, 等. 乌鲁木齐河流域地质生态环境变化趋势研究 [J]. 新疆地质, 2023, 41(03): 403-410.
[4] 李曼, 郭俊莉, 刘焕才. 乌鲁木齐河流域中下游生态系统服务价值动态变化 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(03): 48-54.
[5] 刘燕, 刘友存, 焦克勤, 等. 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(04): 958-967.
[6] 刘燕, 刘友存, 焦克勤, 等. 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(04): 958-967.
[7] 李扬. 山区河道土石坝溃坝洪水演进特性研究 [D]. 重庆交通大学, 2021.
[8] 王颖. 大凌河下游洪水演进分析 [J]. 水利技术监督, 2019(06).

基于结构有限元分析的水闸健康监测 及除险加固设计探讨

邓国林, 撒招练, 易伟

昭通市水利水电勘测设计研究院, 云南 昭通 657000

DOI:10.61369/WCEST.2026020020

摘 要 : 水闸作为水利工程的重要组成部分, 在水流和水位控制方面发挥了重要作用, 其稳定运行和系统管理是提高水资源利用效率的关键。但闸墩裂缝等一系列质量问题对水闸的安全稳定运行影响显著, 强化健康监测并优化除险加固设计尤为重要。对此, 本文结合某水闸工程实例, 引入有限元分析软件构建仿真模型, 对水闸结构参数进行系统收集与分析, 重点探究裂缝的成因, 提高健康监测效能, 为水闸的除险加固设计提供可靠参考, 提高工程运维管理水平。

关 键 词 : 水闸; 有限元分析; 健康监测; 除险加固设计

Discussion on Sluice Health Monitoring and Reinforcement Design Based on Structural Finite Element Analysis

Deng Guolin, Sa Zhaolian, Yi Wei

Zhaotong Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, Zhaotong, Yunnan 657000

Abstract : As an important part of water conservancy project, sluice plays an important role in flow and water level control. Its stable operation and system management are the key to improve the efficiency of water resources utilization. However, a series of quality problems such as pier cracks have a significant impact on the safe and stable operation of the sluice, so it is particularly important to strengthen health monitoring and optimize the reinforcement design. In this regard, combined with a sluice project, this paper introduces the finite element analysis software to build a simulation model, systematically collects and analyzes the structural parameters of the sluice, focuses on the causes of cracks, improves the health monitoring efficiency, provides a reliable reference for the reinforcement design of the sluice, and improves the engineering operation and maintenance management level.

Keywords : sluice; finite element analysis; health monitoring; danger removal and reinforcement design

引言

水闸在水利工程体系中占据重要地位, 兼备防洪、灌溉及航运等功能, 作为维系社会经济稳定发展的关键基础设施, 保障工程稳定运行具有重要现实意义。裂缝是工程施工建设和后期投入使用环节的常见质量问题, 对结构可靠性和工程使用寿命影响明显。水闸的闸墩裂缝问题多出现在浇筑后, 使得渗漏可能性提高, 且导致裂缝的原因复杂, 如温度、混凝土性能等, 加强工程健康监测尤为必要。有限元分析 (FEA, Finite Element Analysis) 是一种前沿模拟分析技术, 具体指通过采用近似数学的方法模拟真实物理系统, 可以与 CAD 软件等建模技术无缝衔接, 具备强大的网格处理性能, 目前在机械制造、材料加工、土木建筑等诸多领域应用广泛, 在项目设计优化方面作用显著。但该项技术在水闸工程健康监测和设计中的应用研究较少, 其应用价值仍有待明确。本文结合工程实例, 在全面采集健康监测数据信息的基础上, 系统探究裂缝成因, 并引入有限元分析软件, 对结构设计优化效果进行分析。

一、工程概况及裂缝分析

某水闸项目位于某市运河流域范围内, 是当地重要的水利工程项目, 承担区域防洪、灌溉及水资源调配等重任。闸墩是水闸项目的关键部件, 主要用于支撑闸门等, 使两岸稳定连接的为边墩, 位于中间部位的为中墩。其作为重要部件, 承担水闸整体结

构的重量, 闸墩质量对水闸结构的综合性能有直接影响。本项目在闸墩的结构使用方面, 以钢筋混凝土结构为主, 严格按照相关规范标准进行结构设计, 确保其能够抵御一定量级的洪水。同时, 结合水流条件和闸墩的综合规模明确设计高度、宽度等参数, 闸墩的结构形式主要为重力式, 底部和底板有效固结, 上部为自由端。另外, 闸墩的两侧设有门槽, 为平面闸门安装提供便

利,并实现对水流通过的有效控制。

在工程项目长期运行阶段,受一系列内外部因素影响,水闸闸墩的裂缝问题愈加凸显。进一步观察裂缝的特征,其主要分布于闸墩的迎水面和侧向表面,走向表现为垂直于底板和水流方向,一些裂缝则延伸至门槽边缘部位。另外,现场调查结果显示,闸墩下游处裂缝表现为向下倾斜,经测量倾斜角约 45° ,具有显著的斜向延伸特点,钻孔时可见渗出物,呈白色。进一步分析原因,受环境温度变化、地基沉降等一系列因素影响,导致闸墩裂缝问题凸显。另外,水闸底板多数部位和闸墩有效连接,整体受力结构相对复杂,底板尺寸、荷载条件等一系列因素均会产生影响,并且和地基变形密切相关^[1]。这一问题的发生不仅直接影响闸墩的外观,同时对结构性能造成严重威胁。为了加强对工程项目的运维管理,全面分析裂缝成因并优化加固设计方案,本项目引入有限元分析软件,在全面收集项目健康数据的基础上,系统分析裂缝成因,运用专业软件分析加固设计方案的应用效果。

二、基于结构元分析的健康监测与加固设计

(一) 健康数据监测

为了全面掌握闸墩的健康状况,建立了包含多种参数的监测系统。监测的内容为裂缝监测、应变监测、温度监测、水位监测。裂缝监测使用高精度裂缝计,可以实时测量裂缝宽度的变化,精度达到 0.01mm ;应变监测采用振弦式应变计,可以准确地反映混凝土内部的应变状态,测量范围广,稳定性好;温度监测采用数字式温度传感器,可以实时得到闸墩混凝土内部的温度分布;水位监测采用压力式水位计,可以准确测量闸前水位的变化。

监测点布置要全面覆盖,突出重点。对于已经出现的裂缝,在裂缝宽度较大和延伸方向的关键位置布置裂缝计,来实时跟踪裂缝的发展情况。应变监测点主要布置在闸墩迎水面、侧向表面、门槽附近,这些部位是应力集中区,容易出现应力异常造成裂缝。温度监测点在闸墩的不同高度、深度处均匀布置,以获得混凝土内部温度梯度信息。水位监测点设在闸前合适位置,保证能真实反映闸前水位变化对闸墩的作用^[2]。

监测系统采用自动化数据采集的方式,数据采集仪可以对各个监测参数进行实时的数据采集,然后将数据传送到监控中心进行存储和分析。用专业的数据分析软件处理采集到的数据,绘制裂缝宽度变化曲线、应变时程曲线、温度分布云图等,直观地展示闸墩的健康状况。通过对历史数据进行分析发现闸墩裂缝宽度变化同温度变化、水位变化、混凝土应变状态之间存在着一定的关系。温度突然下降时裂缝宽度明显增大,闸前水位升高时闸墩迎水面应变增大,裂缝发展速度加快。

(二) 水闸混凝土应力场分析

为了研究闸墩混凝土的应力场分布,使用有限元结构分析软件建立闸墩的三维有限元模型。模型严格按照闸墩的实际尺寸、结构形式进行建模,考虑混凝土材料的非线性特性,采用合适的

本构模型来描述混凝土在不同应力状态下力学行为。另外对闸墩和闸底板连接处、门槽等重要部位进行精细化建模,使模型较好地反映闸墩实际受力情况。

完成模型构建后,为模型添加结构自重、水压力、温度荷载等关键参数。结构自重根据混凝土密度、体积计算得出,均匀施加到闸墩的各个部位。水压力根据闸前水位变化情况用静水压力公式计算,施加在闸墩迎水面。温度荷载考虑混凝土内部温度梯度的影响,根据健康监测数据得到温度分布情况,把温度场作为体荷载施加到模型上。边界条件上闸墩底部与闸底板固结,约束其所有方向的位移;闸墩顶部为自由端,不施加约束;两侧根据实际情况设置相应的约束条件,模拟闸墩在实际工程中受力状态。

采用有限元计算得到闸墩混凝土在各种工况下应力场分布云图。分析可知闸墩应力分布有明显的区域性。迎水面受水压力作用,混凝土承受较大的压应力,压应力随水位升高而增大。由于温度变化和混凝土收缩的影响,在侧向表面容易产生拉应力集中现象,在门槽附近和闸墩、闸底板的接缝处拉应力值最大。当拉应力大于混凝土的抗拉强度时就会产生裂缝,并使裂缝不断扩大。另外温度梯度引起的应力也是造成闸墩裂缝的重要因素之一,在温度骤降的时候,闸墩表面混凝土的收缩受到内部混凝土的约束,产生很大的拉应力,从而加速了裂缝的发展。因此,通过有限元结构模型可知温度应力是水闸结构的主要影响因素,是导致裂缝问题的主要原因。具体而言,光照辐射强度、当地环境温度等复杂的环境因素以及在内部结构本身温度影响下,可导致闸墩外露部位和水下部位出现明显的温度梯度变化。同时,长期与短期温度变化对闸墩温度应力分布的影响有所差异,在施工建设阶段,其应力变化相对明显,稳定性不佳,所以需要重点探究水闸运行阶段的温度应力特征^[3]。在长期温度影响方面,由于当地全年气温变化呈现稳定趋势,对地基结构的影响通常在混凝土强度区间内,具有可控性,所以短期温度是关键影响因素。有限元分析软件具有完备的功能模块,能够满足高精度模型的建立和处理等需要,在建筑工程中的结构优化、施工模拟等方面适用性强。在实际应用过程中,需要根据裂缝性质合理选择系统,全面采集项目健康数据,包括材料性能、结构强度等,运用软件功能构建高精度模型进行分析。

(三) 开裂工况设计及监测分析

根据健康监测数据和应力场分析结果来设计出各种可能造成闸墩开裂的工况。主要是温度骤降工况、高水位工况、温度与水位联合作用工况。温度骤降工况模拟寒潮袭击等极端天气条件下闸墩表面温度迅速降低的情况,在模型中施加较大的温度梯度来模拟。高水位工况是闸前水位达到设计洪水位时,闸墩受到较大水压力的工况^[4]。温度和水位联合作用工况考虑的是温度变化和水位变化对闸墩的共同影响,更接近实际工程中复杂的受力状态。具体监测结果见图1。

在预设的开裂工况下对闸墩进行实时监测。用仪器监测裂缝宽度的变化,用应变计监测混凝土内部的应变状态。根据监测结果可知,在不同的工况下闸墩的裂缝发展情况有所差异。温度骤

降时裂缝宽度迅速增大,在闸墩表面和门槽附近裂缝发展速度更快。高水位工况下闸墩迎水面应变增大,但是裂缝宽度变化不大。温度和水位同时作用的时候,裂缝的发展最为明显,裂缝宽度、应变值均达到最大值,说明温度、水位联合效应对闸墩的破坏作用最大。

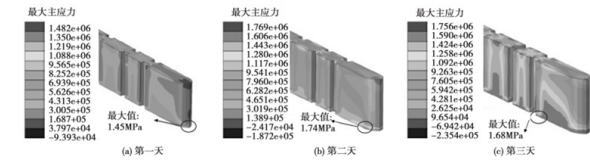


图1 闸墩拉应力监测情况

三、水闸健康监测及加固设计结果分析

短期温度应力变化为闸墩裂缝问题的发生提供了良好环境条件,同时受地基沉降因素影响,加快裂缝发展进程,使裂缝的长度与宽度增加。所以在加固设计方案优化方面,应在尽量不改变施工量、不影响结构力学的基础上进行设计。根据闸墩裂缝问题、健康监测数据和有限元分析结果来制定出一套综合的加固设计方案。主要有表面封闭处理、裂缝灌浆加固、增设预应力锚索和增大混凝土厚度等几种方法。表面封闭处理用环氧树脂砂浆对闸墩表面的裂缝进行封闭,防止水分、有害物质渗入裂缝内部,减缓裂缝的发展速度。裂缝灌浆加固是采用高压灌浆的方式,将环氧树脂灌浆材料注入裂缝中,填充到裂缝的空隙当中,从而提高裂缝部位的混凝土强度以及整体性。在闸墩关键部位增设预应力锚索,施加预应力改善闸墩应力状态,减小拉应力集中,提高闸墩抗裂能力。增加混凝土厚度在闸墩迎水面及侧向表面增加一定厚度的混凝土,提高闸墩的承载能力及抗裂性能。

为了检验加固设计的效果,在加固后重新建立闸墩的有限元模型进行分析。在模型中考虑加固措施的影响,即预应力锚索的预应力作用、新拌混凝土的力学性能等。通过有限元计算得到加固后闸墩的应力场分布及变形情况。加固之后闸墩应力状态明显得到改善,拉应力集中现象被有效地缓解。温度骤降工况、高水位工况下闸墩裂缝发展被控制,裂缝宽度、应变值均减小。增设

预应力锚索、增加混凝土厚度等加固措施,明显改善了闸墩的抗裂性能和承载能力,加固设计达到了预期的目的^[5]。

另外,加固工程完成后继续对闸墩进行健康监测。通过对比加固前后监测数据来检验加固设计的效果。根据监测数据可知,加固后闸墩的裂缝宽度基本不变,没有明显的发展趋势(见图2)。应变监测数据显示闸墩内部应变状态有所改善,拉应变值减小,证明加固措施提高了闸墩的结构强度和稳定性。同时健康监测系统可以及时发现闸墩运行中出现的新问题,给后续的维护管理提供依据。

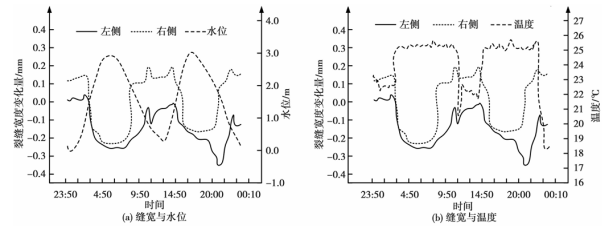


图2 裂缝宽度与水位、温度的变化曲线

四、结语

健康监测是保障水闸工程安全稳定运行的关键基础,而除险加固设计则是进一步保障项目安全运行、延长使用寿命的重要举措。本文结合工程实例,引入有限元分析软件进行设计方案的优化,通过结果可知,方案中最大拉应力分布于闸墩和灌浆材料表层部位,同环境温度具有高度关联性。在除险加固设计方案优化方面,基于对裂缝成因的系统分析,借助有限元结构分析软件模拟不同工况条件下闸墩的应力场分布特征,通过采取表面封闭、调节混凝土厚度等一系列措施,对改善闸墩应力状态的作用明显,强化其抗裂性能与承载性能。因此,在项目健康数据监测和加固设计优化中应用结构有限元分析技术的效果确切,能够提高项目运维管理水平,保障水闸的安全稳定运行。另外,随着科技的发展与进步,需要持续完善软件功能模块,注重技术创新,使其更准确地模拟复杂工况条件下的闸墩力学性能,为工程稳定运行提供有力支持。

参考文献

[1] 叶礼坡,汪力,黄盛辉.基于监测资料和模糊综合评判的水闸安全状态研究[J].云南水力发电,2025,41(6):157-162.
[2] 周松.水闸闸门卡阻自动监测保护系统的研究与应用[J].云南水力发电,2025,41(11):52-56.
[3] 李伟鹏,赵晨晨,朱建传,等.苏州城市中心防洪工程水闸除险加固设计研究[J].水利科技与经济,2025,31(1):84-88.
[4] 虞世华,杜锦智.金塔县平交拦水闸除险加固设计方案选择[J].水利技术监督,2020(4):207-211,227.
[5] 李华卢.小型水闸加固技术及有限元分析[J].中国新技术新产品,2024(21):105-107.

浅论南水北调高水位、长江枯水期低水位船闸的运调管理

耿旭翔

扬州港航事业发展中心芒稻船闸运行中心, 江苏 扬州 225299

DOI:10.61369/WCEST.2026020021

摘 要 : 芒稻船闸由于其独特的地理位置, 给船闸现场运行管理工作带来了挑战。本文具体分析了芒稻船闸运行管理中潜在的四种安全隐患, 就可能造成的危害程度、其产生的原因、及相对应的管理预控对策进行分析和探讨, 总结出芒稻船闸安全运行管理对策, 以期对其他船闸类似问题提供借鉴。

关 键 词 : 船闸; 运调管理; 管理对策

Brief Discussion on the Operation and Scheduling Management of Ship Locks under High Water Level of the South-to-North Water Diversion Project and Low Water Level during the Dry Season of the Yangtze River

Geng Xuxiang

Mangdao Ship Lock Operation Center, Yangzhou Port and Shipping Development Center, Yangzhou, Jiangsu 225299

Abstract : Due to its unique geographical location, the Mangdao Ship Lock poses challenges to on-site operation and management. This paper specifically analyzes four potential safety hazards in the operation and management of the Mangdao Ship Lock, examining the extent of harm they may cause, their underlying causes, and corresponding management pre-control strategies. It summarizes management strategies for the safe operation of the Mangdao Ship Lock, aiming to provide references for similar issues in other ship locks.

Keywords : ship lock; operation and scheduling management; management strategies

前言

芒稻船闸上游连接京杭大运河, 下游连接长江三江营口, 东连南水北调源头引江枢纽。芒稻河是京杭运河水上货物运输的一个重要分流航道, 同时也是南水北调东线工程的源头。水利工程关乎民生大计, 芒稻船闸更是集四个功能: 行船、调水、引洪、排涝于一身, 其作用不可忽视, 运行安全更是重中之重。作为连接京杭运河水上运输通江达海的重要通道, 芒稻船闸极大的促进了运河经济带和长江乃至沿海经济带的水上沟通纽带。芒稻河作为国家南水北调东线工程的源头河, 常年承担向京津冀地区调水任务, 正常调水期流量为 $400\text{m}^3/\text{s}$ 左右, 年输水量132.45亿 m^3 。尤其到农忙季节受周边县市地区农业用水的影响, 还会加大输水流量, 这就导致芒稻船闸上游航道水位变化频繁且波动较大, 当夏季汛期来临时芒稻节制闸、金湾节制闸、万福节制闸三闸又同时开闸泄洪排涝, 又造成了芒稻船闸上游的反向水流, 泄洪的同时也给下游待闸区形成横向水流。冬季长江枯潮期下游航道由于泄洪冲刷回流导致泥沙淤积, 使得可行船通道变狭窄。一年四季不同水情的变化给芒稻船闸的安全运行带来了挑战, 这就需要我们现场操作调度人员认真分析, 在不同时段及时采取相应措施和控制策略。现就芒稻船闸运行管理中潜在的四种安全隐患进行危害、原因、控制管理对策进行分析^[1]。

一、南水北调大流量下单向水流调度的安全管理

(一) 造成危害

当引江枢纽四座泵站开机抽水北调同时闸室又在输水, 这就造成了引航道致闸口段产生转流, 导致调度进入引航道待闸区船舶易发生断缆、漂移、冲撞闸门等安全隐患。尤其是船队正在进入引航道时, 如遇上闸室输水极易漂移致引江输水通道内, 造成碰撞和搁浅的船损事故发生。

(二) 原因分析

芒稻船闸上游航道紧靠南水北调源头江都引江枢纽的四座抽水泵站, 当农忙季节时四座抽水泵站同时开机流量高达 $400\sim 530\text{m}^3/\text{s}$, 使得调度进入引航道的待进闸船舶无法准确停靠导航桥墩, 有很大的安全隐患。

(三) 控制及管理对策

1. 船闸操作调度人员应在闸室涨落水时加强宣传频次, 及时提醒已进入引航道靠船墩的待闸船舶带好前后缆绳, 未进入或

即将进入引航道的船舶放缓速度，避免输水时因速度过快发生断缆、漂移冲撞闸门事故的发生。

2. 芒稻节制闸、万福闸同时泄洪时下行的流量较大，船队进入引航道靠船墩时必须分批、多船头拖带进入引航道。靠好后及时带好前后缆绳并留值守拖头帮靠以防发生断缆冲撞闸门。

3. 强化船舶进出闸过程中的现场动态指挥管理，严禁船舶超越安全警戒线停靠，防止发生冲撞事故。同时坚持做到闸室内头档船必须停靠到位、帮齐，各自带好前后缆绳，严禁帮靠带缆，以免泄水速度过快时发生断缆碰撞事故的发生。

4. 船闸现场操作调度人员应加强值班，密切注意涨落水时船舶动态安全。开闸门时注意观察是否真的水平了，避免涨潮时输水回流造成假性水平的误判，坚持水平不开门。

二、长江冬季枯水期时重载船舶过闸安全管理

（一）造成危害

1. 下游长江冬季枯水期航道淤积，导致船舶在停靠待闸时受潮汐影响，落潮时造成船舶搁浅。

2. 下游枯水期货轮航行时螺旋桨叶经常被水下异物缠绕，导致在航行过程中失去动力，船舶不受控制。

3. 船队在枯水期抛锚待闸时锚头容易钩上石头，进入引航道和进闸起锚时锚头上石头滑落到闸口和闸室，造成船舶搁漏事件发生。



图1 闸门轨道捞锚作业

4. 船队在枯水期时倒锚有起不到位的情况发生，导致进闸时锚下滑，拉闸门轨道导致变形，有严重的安全隐患。

（二）原因分析

芒稻船闸下游航道紧靠芒稻节制闸、连接长江三江营口，受长江潮汐影响冬季水位较低，最低达-0.80米（设计最低下游通航水位-0.17米）。由于芒稻节制闸夏季泄洪导致下游航道部分地域泥沙淤积，长江下游平均含沙量 $0.53\text{kg}/\text{m}^3$ ，南水北调东线工程每年引 $92.64\text{亿}\text{m}^3$ 的长江水，每年增加491万吨泥沙进入芒稻下游行船区，导致冬季航道变狭窄容易造成船舶搁浅。

（三）控制及管理对策

1. 现场操作调度人员在冬季枯水期间船舶调入待闸区之前利用甚高频、电话等手段加强沟通，大吨位重载船舶严禁落潮时进入待闸区，在待闸区外停靠等待调度。

2. 现场操作调度人员熟练掌握每天长江潮汐变化时间表，及

时调整大吨位重载船舶集中放行时间，充分利用涨潮时间段放行大吨位重载船舶。

3. 枯水期放行大吨位重载船舶下行时，进入闸室严禁帮靠，调度时大小吨位船舶搭配帮靠，避免造成出闸时相互吸流卡档，导致无法出闸的现象发生。

4. 枯水期放行船队时，当班操作调度人员必须反复提醒船队驳船倒锚起到位，每条驳船都要有船员值班检查倒锚是否起到位，避免因锚起不到位钩挂闸门轨道事故的发生，船队在枯水期出闸时必须要求单帮拉出闸室。

5. 当长江枯水期遇上南水北调送水时，芒稻船闸上、下游水位落差接近8米，这时现场操作调度人员在水位落差较大的情况下就需要采取两次分级提闸的安全措施，控制输水的水量。一是避免因输水过快导致闸室内船舶断缆碰撞闸门，二是避免输水过快导致下游引航道船舶断缆、漂移、搁浅。

三、碰撞船闸助导航设施险情管理

（一）造成危害

1. 空载船舶容易碰坏闸室挡浪墙护栏，造成挡浪墙护栏变形、倒塌，闸门护栏损坏变形等后果。



图2 空载船舶碰撞护栏

2. 浮筒式系缆钩一旦遭受撞击容易导致系缆钩卡死、脱落、导轨变形，造成极大的安全隐患。

（二）原因分析

芒稻河上游不同季节，不同时段高低水位变化较大。在高水位状态下，航道水面到闸室挡浪墙顶部距离一般都超过4米，闸室挡浪墙高度为1.3米，因近几年内河船舶大型化发展趋势，经过芒稻船闸的大多数船舶总吨位在400-600之间，载重吨位在1000-1500吨。且此类船舶数量不断增加，如果这些大型船舶处于空载状态，船舷距离水面高度往往都接近4米左右，而芒稻船闸闸室挡浪墙为不锈钢护栏加浮筒式系缆钩相结合的形式，承受碰撞能力较差。空载船舶特别是空载船队驳船进出闸时，船上的机驾人员和值班水手配员不足，又疏于观察、不及时带舵调整航向，常常会因为弯曲半径大而发生刮擦、碰撞。进而损坏闸室挡浪墙护栏、爬梯、警示标牌、监控杆、闸门护栏等助通航设施^[2]。

（三）控制管理对策

1. 船闸操作调度人员必须严格遵守“船在闸室、人在室外”的操作规范，加强主动巡查监管，遇到大型空载船舶进出闸时，要提前开展针对性宣传，联系到位。及时提醒船员加强瞭望，单

帮慢速进出闸,并做到稳妥停靠及时系缆^[3]。

2.在遇到突发大风、暴雨、团雾等特殊恶劣天气时,应采取果断措施控制大型空载船舶暂时不要通过船闸。

3.因芒稻船闸在改扩建时受地理位置的限制,上游引航道助导航条件较为不利。船队出闸时都采用曲线出闸的方式,因此操作调度值班人员应加强宣传指挥,要靠前指挥。让过闸船队驳船必须由拖头拖带,同时要单帮慢速出闸,及时转舵调整弯曲半径,有效缩小出闸整队弯度,减小碰撞概率。货轮进出闸时必须做到保持单帮,严禁抢档超越,确保船体与船闸建筑物和助通航设施保持一定的安全距离。

4.对每一闸次预调度船舶超前预判、沟通,特别是放行货轮时应遵循大船先进,不易控制的船舶先进的原则。逐闸次认真优化调整货轮进闸档位图,做到提前预判、科学调度、合理安排、预防在先。

5.在遇到险情后及时留存影像资料,并及时与养护部门技术人员沟通。在具备条件时争取项目对易发生碰撞的助通航设施,集合影像资料进行科技创新和技术改造,尽可能消除安全隐患。

四、碰撞闸门、闸首限高杆险情管理

(一)造成危害

由于船舶吨位大、惯性大,一旦碰撞闸门,导致闸门面板变形,破坏闸门支撑结构、裙边、护栏等撞得变形、断裂,引起闸门重心偏移,影响闸门运行。闸门的停航修复工程量大、周期长、损失大、影响也大。



图3 船舶碰撞闸门后闸门变形图片

(二)原因分析

芒稻船闸北联京杭大运河,南联长江三江营口常年为双向水流,设计水头正向设计水头差8.50米,反向设计水头差1.31米。特征水位:上游设计最高通航水位8.33米,上游设计最低通航水位6.39米,下游设计最高通航水位4.94米,下游设计最低通航水

位-0.17米。芒稻船闸承受双向水流的压力闸门设计门型为钢质横拉门,同时在上下游闸门两侧留有修理门槽,闸门高度设计上游闸门8.6米,下游闸门13.7米。随着水运市场的飞速发展,船舶越来越大型化,通过芒稻船闸的大型货轮和驳船型深达4.5米左右,空船甲板面以上达3.6米。高水位情况下,船首高出闸门顶部3米左右。驾驶员在船舶进出闸中,在接近闸门时正常是看不见闸门的,形成了盲区。安全放闸的基本规则又是大船先进、空船先进,往往第一排进出闸的都是大型空载货轮,驾驶员在高水位的情况下下稍有不慎,就会碰撞闸门和上闸首宁启铁路桥限高杆^[4]。

(三)控制管理对策

1.严格执行船闸安全放闸的规范、制度,坚持“船在闸内,人在室外”的原则,加强瞭望、管理,坚持开闸门时,闸门不到边,船不出闸的原则,加强管控。

2.加强安全宣传、教育,将安全宣传走向船头,提醒大型空载船舶在进出闸时要服从管理、听从指挥、减速慢行。进出闸前要经常检查机器运转情况,以防机器突然失灵、船舶失控、碰撞闸门,值班水手要加强瞭望,准确报送船舶进出闸的进度。

3.船闸管理所在上下游闸门和宁启铁路桥限高杆迎船面及顶部安装反光警示灯和贴反光膜等安全防护预警设施,提前提醒船员加强防范、管控,有条件时加装防撞预警系统^[5]。

五、结论

综上所述,作为船闸管理单位,我们还应从宏观上做好以下四个方面的工作,使其常态化,以积极应对长期高水位运行和水位频繁变化的复杂形势。

一是应加强对过往船舶的宣传。利用便捷过闸APP、微信公众号、甚高频语音、手机短信等方式向及时发布水位水情信息,使广大船员在过闸前,就了解掌握船闸的实时水情,做到心中有数。

二是应加强对上、下游航道的管理。船闸监控和航政艇密切配合定期或不定期上航巡视,及时纠正船舶的违章停靠行为,维护好待闸区船舶的停靠秩序,确保航道安全畅通。

三是应加大对故意瞒报吃水、净高船舶的管理力度。对发现瞒报惩戒情况依据《江苏省内河航道产波过闸信用管理办法》及时予以处罚,有力震慑那些忽视安全、心存侥幸,试图恶意瞒报船舶尺度的船员。

四是应强化与地方水利和海事部门的协调沟通。互通信息、科学决策,三方联动,共同维护好上、下游航道的通航秩序,共渡高水位、枯水期间船舶过闸安全管理的难关。

参考文献

- [1]吉顺利, 航闸技术 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2023: 176-206.
- [2]郑红娟, 航道基础知识 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2023: 6-20.
- [3]《江苏省航道管理条例》. 2010年9月29日, 江苏省第十一届人民代表大会常务委员会第十七次会议通过. 2010年11月1日起施行.
- [4]《江苏省内河航道船舶过闸信用管理办法》. 2021年8月1日起施行.
- [5]廖鹏, 丁天平. 基于船型尺度的内河船型标准化指标研究 [J]. 《水运工程》. 2009年4月第4期 (426期).

新型智能排缆控制系统研究

徐晓岭, 韩林青

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

DOI:10.61369/WCEST.2026020023

摘 要： 由于传统钢丝绳卷绕作业中存在人工排缆强度大、精度低，排缆装置适应性差、缺乏动态控制诸种问题，因此本文设计了一种智能排缆控制系统，将摆轮、液压驱动系统、操作台及多种传感器合理集成，并具有手动模式、自动模式及应急释放等完备功能，更重要的是采用了位移、角度双传感器监测、PID闭环控制及奇偶层差异化控制策略，由此自然、妥帖地解决了钢丝绳卷绕的高精度排缆问题。实验及应用结果清楚地验证了所设计系统能将钢丝绳叠压率严格控制在3%以内，排缆位置偏移量控制在5mm以内，故而钢丝绳寿命延长，设备运行更安全，也极好地满足了海洋工程、起重机械诸种场景对钢丝绳卷绕的需求。

关 键 词： 钢丝绳卷绕；PID控制；奇偶层策略

Research on a New Type of Intelligent Wire Ropes Arranging Control System

Xu Xiaoling, Han Linqing

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

Abstract： Aiming at the problems of high labor intensity and low precision in traditional manual wire ropes winding, as well as insufficient adaptability and lack of dynamic control wire ropes arranging devices, this paper designs an intelligent wire ropes arranging control system based on hydraulic drive. The system integrates swing wheel, hydraulic drive system, operation platform and various sensors, and has functions such as manual mode, automatic mode and emergency release. Through dual sensor monitoring of displacement and angle, PID closed-loop control and differentiated control strategies for odd and even layers, high-precision and highly adaptable wire ropes arranging. Experimental and application verification show that the system can control the wire ropes overlapping rate within 3% and the arranging position deviation within 5mm, effectively improving the service life of wire ropes and the safety of equipment operation, and adapting to the winding needs of marine engineering, hoisting machinery and other scenarios.

Keywords： wire rope winding; PID control; odd and even layer strategy

引言

钢丝绳卷绕作业是海洋工程、起重机械中极其重要的基础工序，排缆精度及效率直接关系到设备运行安全及钢丝绳使用寿命，故而实际作业中人工排缆存在明显问题：劳动强度大、作业效率低，钢丝绳叠压率高达15%以上，长期如此极易导致钢丝绳磨损、断裂等重大安全隐患，进而造成设备停机。目前虽然已有若干排缆装置实现自动化，但是毋庸置疑，其机械结构仍有两大明显缺陷：第一，装置仅能适配固定直径钢丝绳（误差范围 $\pm 5\text{mm}$ ），不能自然兼容不同规格的钢丝绳，场景适应性极差。第二，系统按预设机械轨迹运行，对卷筒转速变化、钢丝绳张力波动等复杂工况不能及时、可靠地修正排缆位置偏差（常见偏移量 $> 10\text{mm}$ ），因此常需停机进行手动调整。更值得重视的是，近几年虽有技术尝试用光电传感器监测排缆层数，但尚未突破摆轮系统与电控算法协同优化的根本瓶颈，且传感器的加装也带来了系统维护成本的增加^[1]。因此，研发一款高精度、强适应性、低成本、运行稳定的智能电控排缆系统，是解决当前钢丝绳卷绕作业诸种痛点，推进行业技术升级的必然要求。本文以液压驱动技术及智能电控算法为基础，从系统软硬件一体化的角度出发，系统、严谨地设计了一种集多传感器监测、PID闭环控制、奇偶层差异化调控于一身的智能排缆系统，继而对其整体架构、核心部件、控制逻辑及异常校正策略予以详细阐述，最终给出切实可行的钢丝绳卷绕作业智能化升级方案^[2]。

一、系统总体设计

（一）设计目标

由于本系统是以解决传统排缆作业诸种痛点为出发点的，因此很自然、合理地提出了三大明确、层次分明的设计目标：第一是高精度排缆，把钢丝绳叠压率严格控制在5%以内，排缆位置偏移量 $\leq 8\text{mm}$ ，第二是强适应性，能处理直径5 - 50mm各种规格的钢丝绳，第三是高稳定性、高经济性，有手动/自动双模式及应急功能，故长期运行成本极低^[3]。

（二）系统组成

系统整体采用“液压驱动+电控核心+多传感器监测”的一体化架构，由1个摆轮、1套液压驱动系统、1个操作台及若干传感器合理构成，因而能十分自然、可靠地实现钢丝绳卷绕的智能排缆控制。具体而言，摆轮是核心执行机构，用左右支撑运动油缸的伸缩来调节摆轮角度，从而直接控制钢丝绳的横向排缆运动，故其角度调整决定了排缆精度及稳定性。因此摆轮本体上安装有若干限位传感器，实时、准确地采集各油缸的运动位置及状态，作为系统控制最直接的基础数据支撑。液压驱动系统是系统动力源，由液压油箱、液压泵站、阀组及驱动摆轮的液压油缸诸部分组成，其液压驱动方式有扭矩大、响应快、运行平稳诸种突出优点，由此极好地适应卷筒转速变化、钢丝绳张力波动等复杂工况，切实保证摆轮运动的精度。操作台集成HMI（人机交互界面），既接收手动速度调节、模式切换、应急释放等运行指令，又实时显示液压温度、液压油位、系统压力、单个油缸压力诸种参数，同时自动记录运行数据，及时进行故障预警，真正把作业安全落到实处。传感器模块是系统高精度控制功能实现的关键，限位传感器安装于摆轮本体，用来采集各油缸运动位置及状态，实现油缸行程的严格限位保护，编码器安装于目标卷筒轴侧，直接、可靠地测量卷筒转速、旋转方向及钢丝绳位移，为排缆位置计算提供最关键的数据支持，而液压压力传感器、温度传感器等则对液压系统进行全面监控，防止液压系统异常带来的风险^[4]。

（三）核心功能设计

这套系统一共配备三项核心运行功能，可以适配不同作业场景的使用需求。

手动调速模式：作业人员利用操作台手动调整排缆的运行速度，适合用在对卷绕作业精度要求较高的场景中；

自动恒张力控制模式：系统利用重量传感器收集的张力反馈数据，自动调整液压输出参数和摆轮运行速率，全程让钢丝绳张力保持在恒定范围，避免钢丝绳出现过度松弛或者张拉过紧的问题，**手动应急解锁功能：**要是设备突发故障，作业人员可以借助操作台启动应急释放程序，快速完成钢丝绳卸载操作，以此保障设备本身和现场人员的安全。

二、关键硬件与传感器技术应用

（一）液压驱动系统优化

由于液压驱动的稳定性对排缆作业的可靠性有直接影响，因

此系统选用了高压重载型液压泵站，阀组采用电液比例阀来精确控制管路流量和压力，又在液压油箱中设置了过滤及温控装置，保证液压油清洁度及温度都处于理想状态^[5]。

（二）高精度传感器监测

由于要保证排缆精度的双重可靠性，因此本系统采用了“油缸位移传感器+角度传感器”的双监测方案。

由于油缸位移传感器能可靠、直接地测出左右油缸的实际伸缩位置，故其测量信号送入专用传感器仪表后转换成4 ~ 20mA标准模拟量信号输入PLC，而安装于摆轮旋转轴处的角度传感器实时采集摆轮角度信息，也以4 ~ 20mA模拟量信号形式反馈PLC，作为排缆位置的二次校验数据。因此双传感器联动监测可以自然、合理地消除单一传感器的测量误差，使系统对摆轮位置及卷筒运动状态的检测都十分准确，也由此为高精度排缆打下良好基础^[6]。

（三）软启动技术集成

在液压驱动设备启动阶段，电机启动冲击电流大，易对配电系统造成负荷冲击，同时加剧电机及传动部件的机械应力。本系统采用软启动，实现电机平稳启停；降低电机启动电流，减少配电系统增容投资，提升系统经济性；减小传动部件机械应力，延长使用寿命；避免直接启动引发的喘振等问题，保障液压系统运行平稳。

三、系统控制逻辑设计

（一）液压驱动系统的启动

系统启动时，首先需要进行重载问询状态的确认。只有当配电板允许重载运行后，各指示灯信号才会亮起，标志着液压泵站已开始按照预定的排量和压力要求进行运行。确保液压系统在工作中能够提供充足稳定的动力^[7]。

（二）摆轮运动控制与油缸动态调节

在整个作业过程中，摆轮系统的核心作用在于根据钢丝绳的状态和卷筒运行数据实现精确的角度控制。具体过程如下：

1. 数据采集与位置计算

系统通过编码器实时监控卷筒的转速、旋转方向以及钢丝绳的实际位移。PLC通过预设的算法及计算块，将钢丝绳当前所在理想位置与实际位置进行比对，并通过数学模型转换为对应的摆轮角度。

2. 运动指令下达

根据计算结果，PLC将期望摆轮所需的角速度与左右油缸的伸缩行程进行匹配。通过将所得到的角度数据转换为具体的油缸行程指令，系统对左右油缸分别进行控制，使其达到预期的伸缩状态^[8]。

3. PID 闭环调控

由于要对油缸运动加以精确控制，故PLC对油缸动态位置采用了PID算法进行实时调节，即先由PID控制模块求取修正信号，再把该信号转换成相应的模拟量，直接输给油缸液压比例阀，因此油缸能按设定轨迹十分平稳地运动。

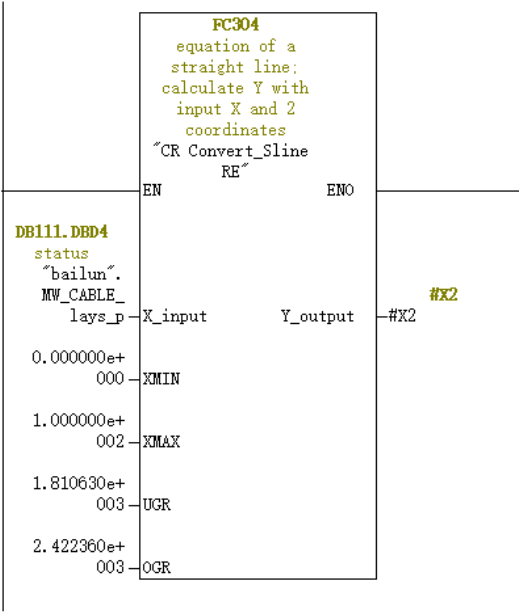


图1 摆轮位置计算块

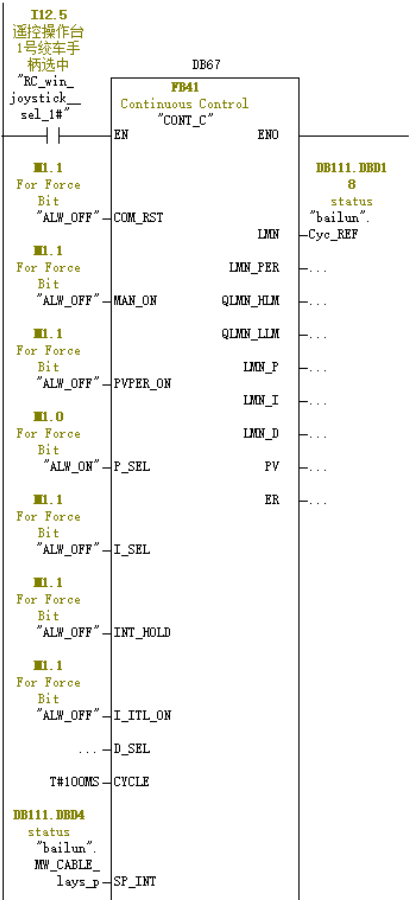


图2 PID控制模块

(三) 奇偶层操作策略

针对钢丝绳在卷筒不同层次的收放过程，系统设计了如下操作策略以适应不同的运动方向需求：

1. 奇数层作业

由于奇数层收缆时卷筒排缆方向自左向右，故奇数层收缆时油缸的动作与卷筒运动一致：左侧油缸伸长，右侧油缸回缩。相应地，放缆时控制逻辑把方向反过来，即右侧油缸伸长，左侧油缸回缩，由此自然、合理地实现钢丝绳的调整。

2. 偶数层作业

由于卷筒处在偶数层收缆状态时排缆方向是从右向左，所以此时右侧油缸伸长、左侧油缸回缩，放缆时控制逻辑把动作方向恰如其分地反转，即左侧油缸伸长、右侧油缸回缩。而卷筒奇偶层状态又是由编码器采集的数据准确、可靠地计算得出的，故整个过程自动化水平很高^[9]。

3. 构建卷筒运动学模型：

$$v = \omega \times R(n)$$

式中：n为缆层数， $R(n)=R_0+(n-1)d$

通过增量式编码器(分辨率 0.1°)实时采集 ω 和转向，经PLC解算得出理论摆角 $\theta=\arctan(v/\omega L)$ 。执行机构根据层数奇偶性执行差异化控制策略：

表1 奇偶性控制工况简介

工况	排缆方向	执行机构动作	油缸状态矩阵
奇层收	左→右	相位角 + $\Delta\theta$	[L+, R-]
奇层放	右←左	相位角 - $\Delta\theta$	[L-, R+]
偶层收	右←左	镜像相位角 + $\Delta\theta$	[R+, L-]
偶层放	左→右	镜像相位角 - $\Delta\theta$	[R-, L+]

四、钢丝绳置位与异常校正策略

(一) 钢丝绳置位功能设计

为确保卷绕作业初始状态精准，系统预留钢丝绳置位功能，应用场景包括：

卷绕作业前：通过手动或自动方式，将钢丝绳实际位置与摆轮当前角度精确匹配，完成初始定位，避免初始位置偏差引发的后续排缆误差；

作业中断后：系统恢复运行前，通过置位功能重新校准钢丝绳位置，确保后续排缆连续性。

置位功能支持手动干预与自动校正两种模式，操作人员可根据现场工况灵活选择，提升系统适配性。

(二) 异常校正机制

由于作业过程中传感器能可靠、及时地检测钢丝绳位置异常（即偏移量超阈值、钢丝绳松弛等），因此系统对此类情况有十分明确、合理的自动校正措施：首先由操作台向操作人员发出故障预警提示，继而系统自动启动校正程序，以PID调控方式控制摆轮运动来纠正常规位置，若异常不能自动消除，就自动停机，等待人工检查处理后再恢复运行，由此自然地避免钢丝绳磨损。

五、系统性能验证与分析

为验证系统性能，选取海洋工程钢丝绳（直径20mm）、起

重机械钢丝绳（直径8mm）、船舶重工钢丝绳（直径40mm）三类典型规格进行测试，记录系统排缆精度、叠压率、维护成本等指标，并与传统人工排缆、机械式排缆装置进行对比^[10]。

验证结果表明：由于钢丝绳叠压率控制在3% 以内，排缆位置偏移量控制得十分稳定，即5mm,因此比传统方案中15% 的叠压率及 > 10mm的偏移量有极大改进，又因能兼容直径5 – 50mm 各种钢丝绳而毋需更换机械部件，故维护成本比现有光电传感器方案低25%，且不需要频繁停机调整，故作业效率提高了40% 以上。更难得的是连续运行72小时无任何故障，液压系统与电控算法相得益彰，摆轮运动极其平稳。

六、应用价值

由于本系统很好地解决了传统钢丝绳卷绕作业中精度低、适应性差、维护困难诸种问题，因此能切实提高设备运行的安全性，延长钢丝绳使用寿命，又有利于降低劳动强度、降低经济成本，故而很自然地适用于海洋工程、起重机械、船舶重工各领域，市场前景十分广阔。

参考文献

[1] 徐纪中. 桥式起重机筒卷筒多层缠绕工艺的质量控制研究 [J]. 工程技术 (全文版), 2025(4): 187–190.
[2] 陈明. 数字化智能排缆器的设计 [J]. 工矿自动化, 2014(5): 78–81.
[3] 中船重工集团公司第七一一研究所. 一种平行折线式卷筒及其制作方法 :CN106081967A[P]. 2016–11–09.
[4] 上海振华重工集团股份有限公司. 一种高效稳定卷筒排缆装置 :CN202511928708.0[P]. 2025–06–12.
[5] 鞍钢钢丝绳有限责任公司. 一种粗直径耐磨损多层缠绕钢丝绳 :CN202021765432.9[P]. 2020–09–11.
[6] 戴小琴, 施湧, 孙远韬, 等. 一种双折线卷筒爬台结构的设计方法 :CN112374403B[P]. 2022–06–03.
[7] 周大乔, 丛海军, 王亚斌, 等. 一种机械式排缆器 :CN107458977A[P]. 2017–12–12.
[8] 丛海军, 王亚斌, 王晓帅, 等. 一种摩擦双卷筒的钢丝绳保护系统 :CN107445087A[P]. 2017–12–08.
[9] 丛海军, 王亚斌, 钟明, 等. 一种用于疏浚船的横移绞车 :CN107458974B[P]. 2023–11–21.
[10] 上海振华重工 (集团) 股份有限公司. 一种多层缠绕式卷筒排缆装置 :CN222684143U[P]. 2025–03–28.

河道整治工程堤防填筑施工工艺改进研究

聂蕊

林西县大井镇人民政府，内蒙古 赤峰 025250

DOI:10.61369/WCEST.2026020025

摘 要： 堤防填筑是河道整治工程的核心工序，其施工质量直接决定河道防洪排涝能力与长期运行安全。针对传统堤防填筑施工中存在的含水率控制粗放、压实精度不足、接缝处理薄弱、施工效率与环保性难以兼顾等痛点，本文结合堤防工程施工规范与工程实践，从土料预处理、智能摊铺碾压、接缝处理、绿色施工四个维度对传统施工工艺进行系统性改进。通过工程实例验证，改进后的工艺可将填筑压实度合格率提升至 99% 以上，施工效率提升 30% 以上，同时有效控制不均匀沉降与环境影响，可为同类河道整治堤防填筑工程提供技术参考。

关 键 词： 河道整治工程；堤防填筑；施工工艺；工艺改进；质量控制

Research on the Improvement of Construction Techniques for Embankment Filling in River Regulation Projects

Nie Rui

Dajing Town People's Government, Linxi County, Chifeng, Inner Mongolia 025250

Abstract： Embankment filling is the core process in river regulation projects, with its construction quality directly determining the flood control and drainage capacity of the river channel as well as its long-term operational safety. Addressing the challenges in traditional embankment filling construction, such as imprecise moisture content control, inadequate compaction accuracy, weak joint treatment, and difficulties in balancing construction efficiency with environmental protection, this paper systematically improves traditional construction techniques from four dimensions: soil pretreatment, intelligent paving and compaction, joint treatment, and green construction. These improvements are based on construction specifications and engineering practices for embankment projects. Verified through engineering examples, the improved techniques can elevate the qualification rate of filling compaction to over 99%, enhance construction efficiency by more than 30%, effectively control uneven settlement and environmental impacts, and provide technical references for similar river regulation embankment filling projects.

Keywords： river regulation projects; embankment filling; construction techniques; technique improvement; quality control

引言

随着我国水利基础设施建设体系的不断完善，河道整治工程已成为流域防洪安全、水生态保护与水资源高效利用的核心载体。堤防作为河道整治工程的关键构筑物，其填筑施工质量直接关系到堤防的边坡稳定性、抗渗性能与长期服役能力。近年来，极端强降雨事件频发，对河道堤防的防洪标准提出了更高要求，传统堤防填筑施工中质量管控粗放、参数控制精度低、施工效率不足等问题日益凸显，已成为制约堤防工程建设质量提升的核心瓶颈^[1]。

一、传统堤防填筑施工工艺的核心痛点与技术要求

（一）堤防填筑施工的核心技术要求

根据 SL 260-2014《堤防工程施工规范》，堤防填筑施工需满足四大核心技术要求：一是填筑材料性能达标，土料有机质含量不大于 5%，黏粒含量适配填筑要求，含水率需控制在最优含

水率 $\pm 2\%$ 范围内；二是压实度满足设计标准，1 级、2 级堤防压实度不低于 96%，3 级及以下堤防不低于 94%；三是结构整体性达标，分段施工的接缝、新旧堤结合部无薄弱带，抗渗性能满足设计要求；四是沉降与稳定性可控，堤防完工后不均匀沉降量需控制在设计允许范围内，边坡抗滑稳定安全系数不低于规范要求^[2]。

（二）传统施工工艺的核心痛点

传统堤防填筑施工多采用“人工配合机械”的粗放式作业模式，全流程存在四大核心痛点，直接影响施工质量与效率：

第一，土料预处理工艺粗放，含水率控制精度不足。传统工艺多采用现场人工翻晒、洒水闷料的方式调控含水率，缺乏精准的检测与调控手段，常出现含水率偏差超过 $\pm 4\%$ 的情况，导致土料压实度无法达标。同时，对不合格土料的改性处理缺乏标准化流程，易出现改性不均、强度不足的问题。

第二，摊铺与碾压工序参数管控失准。传统摊铺作业多依靠操作手经验控制分层厚度，常出现厚度偏差超过 5cm、摊铺不平的问题；碾压作业的行进速度、激振力、碾压遍数等参数全凭经验确定，易出现漏压、过压、压实不均的现象，导致局部压实度不合格，为堤防渗漏、滑坡埋下隐患^[3]。

第三，接缝处理工艺存在先天缺陷。传统分段施工的横向接缝多采用简单平接方式，纵向接缝搭接宽度不足，新旧堤结合部仅采用简单坡面清理，未做界面增强处理，导致接缝处成为堤防结构的薄弱带，高水位运行时易出现集中渗漏、边坡失稳等问题。

第四，施工效率与环保要求难以兼顾。传统施工工艺土料翻晒、闷料周期长，施工效率低下，工期难以管控；同时，土方开挖、运输、摊铺过程中扬尘污染严重，不合格土料外运量较大，余料利用率低，不符合当前绿色水利工程的建设要求。

二、堤防填筑施工工艺的系统性改进方案

（一）土料预处理工艺的精细化改进

针对传统土料预处理的痛点，构建“室内试验－现场快速检测－闭环调控－标准化改性”的精细化预处理工艺，实现土料性能的精准管控。

第一，提前开展室内土工试验，确定填筑土料的最优含水率、最大干密度、颗粒级配等核心参数，明确土料适配性，对有机质含量超标、黏粒含量不适配的土料提前制定改性方案，严禁不合格土料进场。

第二，引入含水率闭环调控系统，现场采用便携式快速含水率检测仪，实现土料含水率 10 分钟内快速检测，替代传统烘干法，大幅提升检测效率。针对含水率过高的土料，采用带旋耕功能的智能翻晒机，配合气象监测数据精准控制翻晒深度与频次；针对含水率过低的土料，采用带雾化喷淋装置的洒水车，配合翻耕作业实现均匀闷料，将土料含水率偏差严格控制在最优含水率 $\pm 1.5\%$ 范围内，远超规范要求。

第三，制定不合格土料标准化改性工艺，针对高含水率、高塑性黏土，采用掺加石灰、水泥的改性方案，通过室内试验确定最优掺量，现场采用专用拌合设备实现均匀拌合，拌合后静置时间不小于 24 小时，确保改性效果；针对砂性土，采用掺加黏土的方式改善其保水性 with 压实性能，杜绝随意改性的粗放作业^[4]。

（二）智能摊铺与碾压工艺的数字化改进

融合 BIM 技术与 GNSS 定位技术，对摊铺与碾压工序进行智能化改进，实现施工参数的精准管控与全过程可追溯。

第一，基于 BIM 技术构建堤防填筑三维模型，提前划分填筑分区、分层厚度与施工顺序，将分层厚度、高程等参数导入智

能摊铺设备。采用带 GNSS 实时定位系统的智能摊铺机，通过机载控制系统自动调整摊铺厚度与平整度，将分层厚度偏差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内，杜绝超厚摊铺问题。同时采用“阶梯式分段摊铺”模式，每个作业段长度控制在 100–200m，为后续碾压作业预留充足空间，实现摊铺与碾压工序的无缝衔接^[5]。

第二，引入智能碾压控制系统，在振动压路机上加装 GNSS 定位模块、压实度实时监测模块与数据传输模块，实时监测碾压行进速度、激振力、碾压遍数与压实度数据，通过机载显示屏实时反馈给操作手，对漏压区域、压实度不足区域进行声光预警。通过现场试验段正交试验，确定最优碾压参数组合：碾压行进速度控制在 2–3km/h，先静压 2 遍，再弱振 2 遍，强振 2–4 遍，最后静压 1 遍收面，碾压轮迹搭接宽度不小于 $1/3$ 轮宽，杜绝漏压、过压现象。

第三，构建施工全过程数字化管控平台，将摊铺、碾压的实时数据上传至平台，实现施工数据的实时存储、追溯与分析，监理单位可通过平台实时查看施工质量，实现“事中管控”，替代传统的“事后检测”模式，大幅提升质量管控效率。

（三）接缝处理工艺的优化与界面增强改进

针对传统接缝处理的薄弱问题，提出“阶梯式搭接＋界面增强＋错缝施工”的改进工艺，全面提升堤防结构的整体性。

第一，横向接缝处理优化，堤防分段施工的横向接缝严禁采用平接方式，全部采用 1:5 的斜坡阶梯式搭接，每个台阶高度与填筑分层厚度一致，宽度不小于 1m，确保接缝处分层厚度与整体填筑一致。接缝处摊铺前，先对已填筑的台阶坡面进行凿毛处理，清除表面浮土，涂刷一层水灰比 0.5 的水泥净浆，再进行新土料的摊铺与碾压，碾压范围超出接缝处不小于 2m，确保接缝处压实度达标。

第二，纵向接缝处理优化，采用错缝摊铺工艺，上下相邻填筑层的纵向接缝错开距离不小于 3m，严禁出现通缝。纵向接缝搭接宽度不小于 1m，搭接处采用跨缝碾压方式，碾压轮迹跨越接缝两侧各不小于 0.5m，确保接缝处压实均匀。对于堤防加宽工程的纵向新旧堤结合部，先对旧堤坡面进行清表、凿毛处理，按分层厚度开挖台阶，植入直径 16mm、间距 1.5m 的拉结钢筋，再进行新堤填筑，提升新旧堤的整体性。

第三，制定接缝处理质量验收标准，每道接缝处理完成后，采用灌砂法对接缝处的压实度进行专项检测，检测点间距不大于 20m，合格率需达到 100%，未达标区域需重新处理，杜绝薄弱带产生。

（四）绿色施工配套工艺改进

响应绿色水利工程建设要求，对堤防填筑全流程进行绿色化改进，实现施工质量与生态保护的协同提升。

第一，扬尘污染全流程管控，土方开挖、运输、摊铺环节采用“围挡＋雾炮＋土工布覆盖”的综合降尘方案，运输车辆全部采用密闭式车厢，出场前对车轮进行冲洗；土料堆放区采用土工布全覆盖，翻晒作业时同步开启雾炮降尘，确保扬尘排放符合环保标准。

第二，土方资源循环利用，对河道清淤、基坑开挖产生的土方进行分类筛分，符合填筑要求的土料分类堆放、妥善保管，直接用于堤防填筑；不符合要求的土料经改性处理达标后二次利用，大幅减少土方外运量与外购土料量，将土料利用率提升至

95% 以上。

第三，生态防护一体化施工，堤防填筑完成后，边坡防护摒弃传统浆砌石、混凝土硬护坡，采用生态袋 + 植被混凝土的生态防护方案，在实现边坡稳定防护的同时，修复河道水生态环境，兼顾防洪安全与生态保护。

三、工程应用实例与效果验证

（一）工程概况

选取华北地区某河道整治工程为应用实例，该工程为流域防洪提升重点项目，堤防总长 12.3km，设计防洪标准为 50 年一遇，堤防等级为 2 级，设计填筑高度 6.2~8.5m，设计压实度不低于 96%，填筑总方量约 128 万 m³。工程所在地土料以粉质黏土为主，局部存在高塑性黏土，地下水位较高，传统施工工艺易出现含水率控制难、压实度不足、不均匀沉降等问题。本工程分为两个标段，1 标段采用本文改进后的施工工艺，2 标段采用传统施工工艺，开展对比验证。

（二）应用效果对比分析

通过施工全过程的质量检测与数据统计，改进后的工艺在施工质量、效率、环保性等方面均实现显著提升，具体对比结果见表 1。

表 1 改进工艺与传统工艺应用效果对比			
对比指标	改进工艺（1 标段）	传统工艺（2 标段）	规范要求
压实度合格率	99.2%	88.7%	≥ 96%
含水率控制偏差	± 1.2%	± 4.3%	± 2%
单工作日最大填筑量	1.28 万 m³	0.97 万 m³	-
完工后 3 个月不均匀沉降量	3.2cm	12.6cm	≤ 15cm
土料利用率	95.6%	81.2%	-
标段总工期	142 天	178 天	180 天

从对比结果可以看出，改进后的工艺完全满足规范要求，核心指标远超传统工艺：一是压实度合格率从 88.7% 提升至 99.2%，全部满足 2 级堤防设计要求，彻底解决了局部压实度不合格的问题；二是含水率控制精度大幅提升，为压实质量提供了基础保障；三是施工效率提升 31.9%，工期缩短 20.2%，有效降低了施工成本；四是不均匀沉降量控制在 3.2cm，远低于设计允许值，堤防结构稳定性显著提升；五是土料利用率提升 14.4 个百分点，扬尘排放达标率 100%，实现了绿色施工目标。

本工程完工后经历了 2 个汛期的高水位考验，堤防未出现渗漏、滑坡、变形超标等问题，运行状态良好，验证了改进工艺的长期可靠性。

四、改进工艺的质量控制与保障措施

为确保改进工艺的落地应用，需构建“事前 - 事中 - 事后”全流程质量控制体系，同时完善安全保障措施。

事前控制：严格执行原材料进场检验制度，对每批次进场土料开展土工试验，不合格土料严禁进场；正式施工前开展长度不小于 100m 的试验段施工，确定最优施工参数，形成作业指导书；对施工人员、机械操作手开展专项培训，考核合格后方可上岗。

事中控制：严格执行“一层一检”制度，每填筑一层，对土料含水率、摊铺厚度、碾压参数进行全面检测，合格后方可进行下一层填筑；压实度检测采用灌砂法与核子密度仪相结合的方式，检测频率符合规范要求，不合格区域立即返工处理；利用智能管控平台的实时预警功能，对施工参数偏差第一时间整改，实现质量问题动态清零。

事后控制：堤防填筑完成后，开展为期不少于 6 个月的沉降观测，每 15 天观测一次，对沉降数据进行分析；开展堤防全断面渗漏检测与边坡稳定性检测，确保各项指标满足设计要求；完善施工全过程资料归档，实现施工质量全流程可追溯。

同时建立健全安全生产责任制，明确各岗位安全职责；机械作业区域设置警示标识，安排专人指挥，避免交叉作业风险；严格控制填筑速率，雨天停止填筑作业，雨后复工前重新检测土料含水率；完善临时排水设施，避免雨水冲刷填筑坡面、浸泡堤基，确保施工期堤防稳定。

五、结论

本文针对河道整治工程堤防填筑传统施工工艺的核心痛点，从土料预处理、智能摊铺碾压、接缝处理、绿色施工四个维度，提出了一套系统性的工艺改进方案，并通过工程实例验证了其应用效果，得出以下结论：精细化的土料预处理工艺可实现含水率的精准管控，将含水率偏差控制在 ± 1.5% 以内，为堤防填筑压实质量提供了核心基础保障；基于 BIM+GNSS 的智能摊铺与碾压工艺，可实现施工参数的精准管控与全过程可追溯，将压实度合格率提升至 99% 以上，同时大幅提升施工效率；阶梯式搭接 + 界面增强的接缝处理工艺，可有效解决接缝薄弱带的问题，显著提升堤防结构的整体性与抗渗性能；改进后的工艺兼顾了施工质量、效率与环保性，可有效缩短工期、降低施工成本，适配当前水利工程高质量、绿色化的建设要求，具有广泛的推广应用价值。

参考文献

[1] 水利部 . SL 260-2014 堤防工程施工规范 [S]. 北京：中国水利水电出版社，2014.
[2] 张丙印，李全明，付俊峰 . 堤防工程填筑施工质量控制关键技术研究 [J]. 水利学报，2018，49 (S1): 112-118.
[3] 王仁坤，陈生水 . 河道整治工程堤防填筑施工工艺优化与应用 [J]. 水利水电技术，2020，51 (6): 127-134.
[4] 刘小生，赵尚传 . 水利工程堤防填筑压实质量智能控制技术研究与应用 [J]. 中国水利，2022 (12): 45-48.
[5] 李军，张伟 . 绿色水利工程堤防填筑施工工艺改进实践 [J]. 水资源与水工程学报，2021，32 (4): 210-215.

大口径给水管施工技术在城市道路工程中的应用

郑晓峰

上海浦东给排水建设工程有限公司, 上海 200125

DOI:10.61369/WCEST.2026020013

摘 要 : 随着城市基础设施建设的不断推进,城市道路工程中大口径给水管的敷设需求日益增加。大口径给水管作为城市供水系统的重要组成部分,其施工质量直接关系到城市供水系统的安全与稳定运行。针对城市道路环境下施工空间受限、地质条件复杂及工序交叉频繁等特点,本文以上海浦东顾唐路 DN1800 给水管排管工程为依托,围绕大口径给水管在城市道路工程中的施工应用,系统分析了深沟槽开挖与支护、钢管焊接、球墨铸铁管接口连接、管道测量控制及回填施工等关键技术措施。相关施工技术在城市道路复杂环境中具有良好的适用性,对大口径给水管施工的工程应用具有参考意义。

关 键 词 : 给水管;城市道路施工;技术;安装

Application of Construction Technology for Large-Diameter Water Supply Pipes in Urban Road Engineering

Zheng Xiaofeng

Shanghai Pudong Water Supply and Drainage Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 200125

Abstract : With the continuous advancement of urban infrastructure construction, the demand for laying large-diameter water supply pipes in urban road engineering has been on the rise. As a crucial component of the urban water supply system, the construction quality of large-diameter water supply pipes directly relates to the safety and stable operation of the system. In response to the challenges posed by limited construction space, complex geological conditions, and frequent overlapping processes in urban road environments, this paper, based on the DN1800 water supply pipe laying project on Gutang Road in Pudong, Shanghai, systematically analyzes key technical measures for the construction and application of large-diameter water supply pipes in urban road engineering. These measures include deep trench excavation and support, steel pipe welding, ductile iron pipe joint connection, pipeline measurement and control, and backfilling construction. The relevant construction techniques demonstrate good applicability in complex urban road environments and provide reference for the engineering application of large-diameter water supply pipe construction.

Keywords : water supply pipe; urban road construction; technology; installation

随着城市人口密集度和用水需求的持续增长,城市供水系统面临着供水能力不足、管网老化及施工难度加大的挑战。城市道路工程中大口径给水管的敷设需求也在日益增加。基于此,结合上海浦东顾唐路 DN1800 给水管排管工程的实际应用情况,本文围绕大口径给水管在城市道路工程中的施工技术展开分析,从关键施工环节入手,总结其在复杂环境下的技术应用特点,为类似工程提供可参考的施工技术方式。

一、项目概况及工程难点

顾唐路新建 DN1800 给水管排管工程,是上海浦东地区一项重要的城市基础设施建设工程项目,主要目的是提高区域供水能力,满足不断增长的用水需求。本工程起点为金海水厂,终点为锦绣东路,全线铺设大口径给水管, DN1800 钢管 384 米、DN1800 球墨管 313 米、DN600 球墨管 55 米,安装 DN1800、DN1600 双盘蝶阀各 1 只、2 只,砌筑相应规格阀门井。工程沿途包含绿化带、人行道、沥青路面、碎石路面等各种地形,管面覆土深度不小于 2.0 米,对施工技术的要求很高。结合工程实际条件

及大口径给水管施工特点,本项目的施工难点主要集中在以下几个方面:

1. 深沟槽稳定控制难度大:本工程管道覆土深度不小于 2.0m,局部沟槽开挖深度较大,且沿线地层呈现软土、填土与碎石层交错分布的特征,土体稳定性差。同时施工区域位于城市道路路范围内,邻近既有道路及地下管线,受空间限制明显。在此条件下,传统单一支护形式难以兼顾安全性与经济性,如何根据不同地质分区合理选择支护形式,并实现沟槽变形的动态控制,是本工程沟槽施工的核心技术难点。

2. 大口径钢管焊接质量控制难: DN1800 钢管具有管径大、

管壁厚、自重大等特点，对焊接工艺稳定性要求极高。焊接过程中易产生气孔、未熔合及焊接变形等质量问题，尤其在转角段及桥管段，焊接精度直接影响管道整体线形及运行安全。此外，大口径管道焊缝检测难度大，如何通过焊接参数控制与无损检测手段，实现焊缝质量全过程可控，是本工程的重要技术难点之一。

3. 球墨铸铁管接口密封可靠性控制难：球墨铸铁管采用承插式连接形式，在大口径条件下，接口安装精度要求显著提高。施工过程中易出现橡胶圈翻转、错位或受力不均等问题，从而导致接口渗漏隐患。在长距离连续铺设条件下，如何通过精细化安装工艺与过程检测手段保证接口密封性能，是影响工程质量的关键技术难点。

4. 管道轴线与标高精度控制难：本工程穿越绿化带、人行道及既有道路结构，施工环境复杂，多工序交叉作业频繁，可能造成测量控制基准扰动，导致管道轴线及标高出现累计误差。对于大口径给水管而言，轴线与标高偏差将直接影响接口质量及结构受力状态，因此，如何实现施工全过程的精确测控与动态纠偏，是本工程的重要技术控制难点。

二、施工技术分析

（一）深沟槽开挖与支护技术

针对本工程沿线地质条件复杂、地下管线密集及城市道路空间受限等特点，深沟槽开挖与支护技术需兼顾安全性、稳定性及施工适应性。本项目管道埋深不小于2.0m，且沿线地层以软土、填土与碎石层交错分布为主，土体物理力学性质差异较大，整体稳定性不足。同时，施工区域位于既有城市道路范围内，周边存在既有市政管线及构筑物，对施工扰动敏感。因此，在支护形式选择上需结合不同地段的工程条件进行针对性设计与实施。在实际应用中，本工程根据不同区段地质条件与周边环境，将沟槽划分为不同控制等级，并优先在软弱地层及地下水影响较大的区域采用钢板桩支护体系。该支护形式能够通过连续锁口结构形成整体挡土及止水体系，有效适应本工程地下水位波动及土体稳定性差的特点。同时，针对城市道路狭窄、机械作业空间受限的特点，施工过程中采用分层分段开挖方式，并配合“随挖随支”的施工节奏，减少土体暴露时间，降低沟槽失稳风险。对于局部承载能力不足的区域，通过增设内支撑体系提高支护结构整体刚度，从而适应复杂工况下的受力变化。

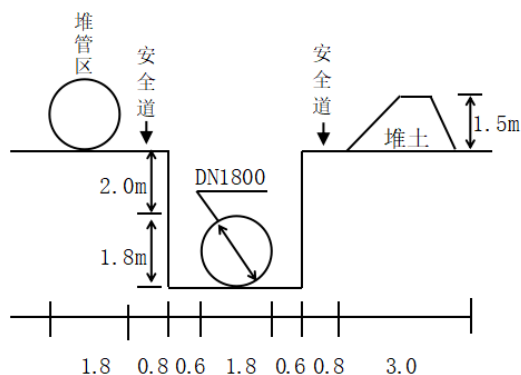


图1 管道铺设工作立面示意图

（二）大口径管道安装与连接技术

针对本工程 DN1800 大口径给水管道理设于城市道路下、施工空间受限、管道长度较大及接口数量多等特点，在安装与连接过程中需重点控制焊接质量、接口密封性及安装精度，以满足给水管道路长期安全运行要求。本工程钢管与球墨铸铁管混合敷设，且管道穿越不同功能区域（绿化带、人行道及道路结构层），对管道整体线形及接口稳定性提出较高要求。因此，在施工过程中需结合不同管材特性分别采取相适应的连接与控制措施。

（1）钢管焊接应用技术

针对 DN1800 钢管管径大、管壁厚及现场焊接环境复杂的特点，本工程采用手工电弧焊工艺，焊条采用 E4303 型焊条，并通过控制焊接参数及焊接方式，适应大口径管道现场拼接需求。在本项目中，由于管道多为现场对接焊接，焊缝数量多且分布范围广，焊接质量直接关系到管道整体承压能力及运行安全。因此采用分层施焊方式以适应厚壁钢管的熔透要求，从而保证管道线形满足设计要求。同时，针对桥管段及转角段空间条件复杂、安装精度要求高的特点，通过合理安排焊接顺序及对称施焊方式，减小结构应力集中对管道几何形态的影响，使焊接施工更好地适应本工程复杂安装环境。

（2）球墨铸铁管接口安装应用技术

本工程球墨铸铁管采用滑入式 T 型橡胶圈接口，桥管采用 Q235A 碳素钢板螺旋缝焊接钢管。主要用于与钢管过渡及局部管段敷设，其承插式接口在长距离连续铺设条件下对安装精度及密封性能要求较高。结合本项目施工环境中接口数量较多、空间受限及管道轴线控制难度大的特点，在接口施工中重点控制插入过程的同轴度及插入力，避免因偏心受力导致密封圈变形或翻转。通过采用人工配合吊车进行管节对接，使接口在受控状态下完成插入过程，并通过标志线及探尺检查控制插入深度，从而保证接口在本工程复杂线路条件下仍能保持良好的密封性能与结构稳定性。

（3）管道轴线与标高控制应用技术

本工程管道沿线穿越多种地面结构类型，且施工过程中多工序交叉作业，易对测量控制体系产生干扰。因此，轴线与标高控制在本项目中属于关键技术控制内容。结合大口径管道埋深较大、单节管长度较长的特点，在施工过程中采用分段控制与逐段复核的方法，避免误差累积对整体线形产生影响。通过对沟槽底部找平层进行精细化处理，使管道在安装时能够快速达到设计标高要求。同时，在弯头、三通及转角等关键节点位置加密测量控制点，提高测量频率，以适应本工程线路变化复杂的实际情况，从而保证管道整体轴线顺直、标高连续稳定。

（三）管沟回填与压实技术

针对本工程管道埋设于城市道路下、回填后需恢复道路结构及对沉降控制要求较高的特点，回填与压实施工需重点控制材料选择、分层厚度及压实方式，以保证回填体与既有道路结构协调一致。结合本项目管径大、沟槽断面宽及回填量大的特点，在管道两侧及管顶一定范围内采用原土或砂性材料进行分层回填，以适应管道受力特性并减少局部集中荷载。在城市道路恢复段，为

满足道路长期使用性能要求，回填后通过分层压实逐步形成稳定结构体系，使回填土与原有路基形成整体受力体系，从而适应本工程“管道+道路”复合结构的实际工况。

三、应用效果分析与经验总结

（一）应用效果分析

顾唐路新建 DN1800 给水管排管工程通过将各分项技术有机组合，本工程形成了适用于大口径给水管施工的成套技术体系，其核心特点在于针对不同施工环节的关键控制点进行精准技术匹配。从沟槽施工到管道安装，再到回填恢复，各施工阶段均采用与之对应的控制技术，实现了从“基础稳定—结构安装—整体成型”的全过程技术衔接。尤其是在大口径管道施工中，焊接质量控制与接口密封控制作为影响系统安全性的关键环节，通过工艺参数控制与检测手段相结合的方式，实现了质量可控、过程可追溯。同时，在复杂城市道路环境下，测量控制技术与施工过程的结合，使管道安装精度能够适应多工序交叉施工带来的干扰，体现出较强的环境适应能力。回填阶段通过材料选择与压实方式的优化，使管道结构体系与外部道路结构实现协调受力。同时，在回填过程中引入信息化监测手段，对回填区域的沉降变化进行连续观测，并通过监测数据对回填效果进行反馈验证，使沉降发展趋势能够在施工过程中得到及时反映，从而为判断回填密实状态及管道受力稳定性提供依据。总体来看，本工程所采用的技术体系在适应复杂地质条件、大口径管道特性及城市道路施工约束方面具有良好的适用性，能够为类似工程提供技术参考。

（二）经验总结

从本工程的实施过程来看，大口径给水管在城市道路复杂环境中的施工，并非单一技术的简单叠加，而是多种施工技术在特定工况下的适配与耦合结果。由于沿线地质条件变化较大，且施工空间受城市既有道路与地下管线制约，沟槽开挖阶段对支护体

系的稳定性提出了较高要求；在此背景下，支护形式的合理选取直接关系到后续工序的实施条件。同时，大口径钢管本身具有管壁厚、刚度高的特点，焊接质量受施工操作影响较大，焊接质量不仅影响单个接口的可靠性，还会对整体管线线形产生累积影响，因此需要在工艺上兼顾强度与变形控制之间的平衡。对于球墨铸铁管承插接口而言，其连接方式对安装精度具有较强依赖性，接口的密封性能在很大程度上取决于插入过程中的受力状态与同轴程度，说明柔性接口在大口径条件下对施工操作的精细化程度要求较高。在管道测量与安装过程中，由于施工环境复杂、干扰因素较多，单次测量结果难以完全反映实际状态，需通过多次校核来减小偏差对整体线形的影响。回填阶段则体现出土体与管道共同作用的特征，不同回填材料及压实方式会直接影响管道受力条件及后期沉降表现。总体来看，本工程的实施表明，大口径给水管施工的关键在于对各施工环节技术特性的理解与针对性控制，通过在不同阶段采取相匹配的技术手段，使管道结构能够在复杂外部环境中保持稳定的受力状态与良好的运行条件。

四、结束语

顾唐路新建 DN1800 给水管排管工程的圆满竣工，不仅显著增强了区域供水能力，更在城市供水基础设施建设领域树立了技术创新与质量控制的标杆。面对复杂地质条件与高难度施工挑战，项目成功克服了沟槽开挖稳定性、大口径管道焊接与连接精度、管沟回填密实度控制等一系列技术难题。总体而言，大口径给水管在城市道路工程中的施工，应充分考虑其结构特点与环境约束，将沟槽支护、管道连接、测量控制及回填施工等关键技术进行有机结合，从而实现施工过程的稳定可控与成型质量的可靠保证。本工程的实施为类似城市道路条件下大口径给水管施工技术的应用提供了实践依据。

参考文献

- [1] 张芳. 城市市政给水管网优化技术措施研究 [J]. 科学技术创新, 2026, (01): 166–169.
- [2] 朱金田. 深埋管廊给水管入廊风险及水锤防护措施 [J]. 工程建设与设计, 2025, (24): 53–55.
- [3] 孙志文. 市政给排水管道施工中数字信息化技术运用分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (33): 187–189. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202533061.
- [4] 毛伟明, 白涛, 严晓菊. 县城市政给水管网设计方案优化研究 [J]. 节能, 2025, 44(07): 135–138.
- [5] 胡欣逸. 城市给排水管网改造技术研究 [J]. 水上安全, 2025, (11): 188–190.

船舶管道布置合理性分析

张建明

上海中远海运重工有限公司, 上海 200122

DOI:10.61369/WCEST.2026020026

摘 要： 为满足船舶机舱及舱室管路系统布置要求，在介质流向合理、空间层次合理、支吊架设置合理、检修便利性和安全距离的基础上，考虑影响管系布置的主要因素对管路走向以及各管件位置进行优化设计。通过提高管系布置密度、牢固度以及便于维修，可以避免相互干扰和局部流体阻力过大，提高施工速度及运行安全性，同时也便于后期检修工作并节约总体造价。

关 键 词： 船舶管道；布置优化；空间协调；检修可达性；运行安全

Rationality Analysis of Ship Pipeline Arrangement

Zhang Jianming

COSCO Shipping Heavy Industry (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200122

Abstract： To meet the layout requirements for ship engine rooms and cabin piping systems, the pipeline routing and positions of various fittings are optimized by considering the primary factors influencing piping arrangement, based on rational medium flow direction, appropriate spatial hierarchy, proper support and suspension bracket placement, ease of maintenance, and safety distances. By increasing the density and structural integrity of the piping layout while facilitating maintenance, mutual interference and excessive local fluid resistance can be avoided, thereby enhancing construction efficiency and operational safety, simplifying subsequent maintenance tasks, and reducing overall costs.

Keywords： ship pipelines; layout optimization; spatial coordination; maintenance accessibility; operational safety

引言

船舶管道系统贯穿动力、压载、消防、冷却以及生活保障等各个部分，在保证船舶正常航行中起着举足轻重的作用。而随着船舶功能日益复杂，舱室越来越小、设备越来越多、专业交叉越来越多，管路布局混乱、局部冲突严重、难以维修、间距不够等问题也越来越明显。管路布置好坏对造船进度、使用性能乃至后期保养都有很大影响，所以很有必要研究其布置特点及改善方法。

一、船舶管道布置的基本原则

（一）满足系统功能要求

船舶管道布置首先必须满足系统的功能要求，在设计工况下保证介质按指定的方向流动并且具有一定的流速、流量以及压降、温升等要求。燃油、滑油、冷却水、压载水、消防水及生活供水等管系由于其特性不同以及工作压力等级和是否连续工作等因素存在较大区别，在布置时要根据介质粘性大小、允许最大压降、局部阻力系数及其高度差来决定它们的走向。主干管应较短且尽量直线，避免过多弯头、三通和改变口径，因为弯头越多就会造成更大沿途以及局部阻力从而降低水泵工作效率并导致最后端供料不稳定；对于吸水管还要注意防止阻力过大以免发生气穴现象造成流量不稳定甚至机器震动等问题。对于机舱集中区域一般还需要根据设备接口标高、阀门位置、放残、放气的要求等做进一步优化设计，保证系统能够在满载、不同工况以及故障情况

下都能正常工作^[1]，如图1所示。

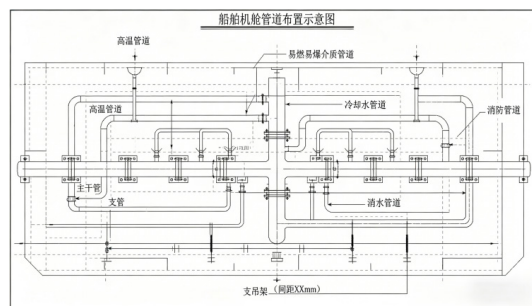


图1 船舶机舱管道布置示意图

（二）满足安全与规范要求

船舶管道布置不仅要满足功能需求，还要符合船级社的相关规定、防火分区的要求以及船舶建造一般规定，对于高温、高压、易燃、易爆或者有腐蚀性的管路要进行更为严格地隔离与保护，在机舱内燃油管、滑油管、蒸汽管、排气相关的附件还有电

缆桥架等都是比较集中的，如果间距太小或者防护不到位就容易造成泄露起火、热传导叠加以及检修过程中误触等问题，因此高温管路应该做好保温或者隔热，燃油管不能靠近高温物体布置，穿过重要的舱壁、甲板或者防火分隔的地方应当采取封严强化等措施。对于承压管系，还要考虑其设计压力、试验压力、材质以及补偿方式等进行核算，保证其连接部位、法兰、支座等在振动、冲击和温差变化时的安全性。规范化布置并非仅是“装得下”，而是在整个服役期内可接受的风险水平以及有足够的裕量。

（三）兼顾建造与维护便利性

船舶管道是多专业交叉最频繁的一个系统，布置是否得当对分段预制质量、现场安装速度以及后续维修费用都有很大关系，在设计时就要考虑到制造、吊装、焊接、试压、除锈涂漆、阀门更换等要求，防止过分紧凑而使焊接位置无法操作、法兰不能够拆解、阀门手轮碰到的情况出现一般情况下，阀门、过滤器、流量计、压力表、液位仪、取样口等都应该布置在人能够到达的地方并且要有足够的空间供工作人员进行工作以及拆卸的空间；对于那些需要经常清理或者更换部件，则要更加注重其检修路径畅通无阻。同时，管道支吊架间距、固定点位置以及补偿段长度也应考虑施工方法，避免安装后发生下垂、附加荷载过大或者振动超限等现象。综合考虑建设和维修的方法可以降低返工率，提高一段完整性以及安装精度，并有利于船舶日后运营^[2]。

二、船舶管道布置中存在的主要问题

（一）管路走向不合理，空间利用率偏低

某些船舶管路布置过于曲折，弯道、三通较多，造成管路过长，局部阻力增大，增加了机器负担以及系统的压降。而在机舱、泵舱及双层底等狭小区域内，如果主干管与支管布置不合理，则会导致该处管路堵塞，影响舱室使用面积，不利于人员行走与设备安装检修。另外，在实际施工过程中，由于管路转弯过多或者高度不当而产生的排气不良、积水无法排出、排水不畅等问题，在冷却水、压载水和燃油供给方面尤为突出。如果忽略管路流动性和压力降的设计，则易发生设备损坏或者效率低下。这些问题一旦到现场进行安装，则需要重新制作支架、重新排列短节或者进行局部返工等，降低预制精度与施工效率，延长工期以及提高费用最终造成船舶延迟交付并且增加成本^[3]。

（二）管道与设备、结构之间干涉较多

船舶舱室内部一般需同时布置管道、电缆桥架、通风风管、设备基础、平台扶梯以及船体骨架等，相互之间位置关系十分复杂，在前期未进行充分协调的情况下，容易发生硬干涉和软干涉现象。所谓硬干涉即指管道与肋骨、纵桁、舱壁加强材、设备外壳相撞；而软干涉主要是指占据检修空间、妨碍阀门操作范围、缩小过道尺寸或是制约吊装路径，给后期维修带来诸多问题。特别是对于狭小舱室，如果管道设计不当，则会影响到设备拆卸和更换，甚至使某些重要系统不能正常工作。尤其是在主机周围、辅机集中区以及消防总管附近，如果忽视设备振动位移、拆装边界和人机操作空间问题，则虽然可以勉强布置，但是在以后的使用

过程中会出现检修不便、观察受限、局部改造困难等情况，造成整个布局不合理性和可行性差，从而提高维修费用、延长船舶停泊期。

（三）支撑与附件设置不完善

一些船舶管路虽然已经实现空间上的连接，但是从支吊架的选择到固定点的位置，从滑动补偿到附件的安装等都存在问题，造成管子承受的载荷与其工作条件不符。长距离直管如果支承距离较大就会产生较大的挠度以及局部下垂；而泵出口、压缩机附近或者有较大波动的地方如果刚性不够则会引发振动传递以及连接部位松动；高温管路如果没有足够的余量用于热膨胀就容易引起在法兰、焊缝或弯头处产生额外的热应力。另外，如果阀门、过滤器、补偿器或仪表等安装不合理也会造成局部阻力增大并且给拆卸以及测量带来困难。支撑与附件体系不完善虽然不一定在安装时就出现，但是由于长期运行以及波浪载荷、交变振动等因素影响，在以后使用中容易发生渗漏、裂纹或者疲劳损伤等问题^[4]。

三、船舶管道布置合理性的分析重点

（一）分析管道路径的经济性与流动性

管道的走向对系统所用材料及流动阻力有影响，在设计上合理地布置管道尽可能短一些，少一些弯头、三通以及变径等部件可以减少阻力损失同时增加通过量，比如船上燃油管路和冷却水管路由直线而不弯曲可以大大节约动力。而按国际船用管道设计规范 ISO 13703 规定，每缩短一根管道一米大约能节约百分之一二左右的材料费和安装费；一般情况下减少一个四十五度弯头可以减少约两百分比的流动阻力。所以在布置管道时要考虑到材料、施工、运行等方面的因素^[5]。

（二）分析空间协调性与可达性

管道布置不仅是“可安装”，还要考虑其在运行期间便于检修及通行的要求，在舱室空间、设备布置、通道尺寸等方面都要综合考虑，使管道与其周围设备、船体结构以及其他系统之间关系良好。标准化的空间布置要符合船级社的相关规定，比如 DNVGL-RU-02-0205 规定设备与管道之间的净距不应小于 30 cm 以便发生问题后能够及时修理或者更换，如果管道布置不合理导致设备难以拆卸或者管道不能方便地到达，则日后维护、管理工作的费用会大大升高。合理的设计和足够的空间可以提高船舶运维效率及安全性。

（三）分析运行安全性与耐久性

管道的安全性和耐久性对船舶的正常航行至关重要。比如高温蒸汽管道以及燃油管道等，在设计上要充分考虑振动问题、热膨胀补偿及防腐等工作。而高温管道如蒸汽管一般需要设置热膨胀补偿器并且其支承距离不应大于 4m 以防由于温度引起的变形；而对于有腐蚀性的介质，则要涂覆防锈漆并且使其腐蚀速度不大于规定的限值，依据《船舶管道设计规范》（GB/T 15510-2019）的要求，蒸汽管道的腐蚀率不得超过 0.2 mm/a 从而保证其具有较长的工作寿命。为了保证管道安全，在管道热膨胀、压力

变化、振动等方面考虑问题并进行相应的计算，在设计时进行校核^[6]，如表1所示。

表 1 船舶管道布置优化前后对比

项目	优化前	优化后	改善幅度
管道总长度（米）	350	320	8.6%
弯头数量（个）	45	35	22.2%
系统压降（Pa）	2500	2000	20%
维修可达性评分	70	85	21.4%
热膨胀补偿设置（次）	4	2	50%

四、提高船舶管道布置合理性的优化措施

（一）加强前期综合设计与统筹规划

船舶管道布置优化是从开始进行总体设计时就应考虑的问题，特别是对于舱室设备布置、船体结构以及系统功能等各方面情况都要有所了解。在设计之初就需要对各个系统之间进行协调，考虑各种系统之间相互影响、管道与设备之间关系，在早期发现潜在问题并解决，以免造成后期返工带来较大费用开支以及时间损失。依据国际上有关船舶设计标准 ISO 13703规定，管道布置准确性是保证船舶建造顺利进行重要条件。舱室设备布置合理性也是需要布置设计过程中考虑到与结构设计、通风系统和电气布线之间关系，防止由于设计不到位而产生地方性变更。使用数字化设计软件，例如 AutoCAD、Revit等可快速制作及交流三维设计图纸，降低设计错误率以及返工次数，提升一次设计合格率以及施工质量^[7]。

（二）优化关键区域的分层分区布置

对于船舶机舱、泵舱以及设备集中的地方等重要部位的管路，要根据介质性质、管路作用以及日后维修频次进行分层、分区和分级布置。对于高压、高温、易燃等危险介质的管路，应独立设置路径和支架，不能和其他一般性管路并列布置以免发生事故。比如船舶冷却系统的主冷却水管、消防管、气体管等都应在布置上按各自工作压力、流量和用途进行分层布置。依据《船舶管系设计规范》（GB/T 15510-2019）规定，管路与设备之间距离不得少于300mm以便检修并且不使设备互相影响。主干管道位

于中间，支管、辅助管道位于外侧，便于以后检修及维护工作。通过对分层、分区进行合理安排，有利于提高舱室内有效面积以及管道系统有序性和安全性^[8]。

（三）提高数字化与标准化设计水平

数字化设计以及标准化布置有利于提高船舶管道布置合理性。利用三维建模及管系综合排布方法可以极大提高设计水平，在设计初期就可以发现可能存在的问题，从而防止后续施工过程中出现返工、浪费时间等现象。目前，许多现代化船舶设计都采用计算机辅助设计（CAD）及建筑信息模型（BIM）软件来对管道进行三维建模并检查是否存在冲突，以达到各个管道、设备、支墩之间相互匹配的目的。在船舶管道设计上，合理的支撑布置及管道布置方式不仅可以加快施工进度还可以方便日后维修工作。依据国际船舶标准 ISO 13623规定，支吊架间距是按照管道尺寸以及承受载荷确定，在管道直径小于50mm情况下，一般支吊架最大距离不会超过2m；但是当管道直径大于500mm时，支吊架最大允许间距可放宽至4m。这样有利于避免管道系统发生振动或者断裂等安全隐患问题，保证船舶建造质量以及安全运行。

以上所述改进方法可以使船舶管道布置符合要求的同时，在船运过程中也具有更高的安全性和经济性以及高效性。而数字化设计及标准化布置可以保证船舶管道系统的整个寿命周期内具有良好的可靠性和可维修性，从而提高船舶的建造质量和经济效益。

五、结语

船舶管道布置合理与否直接影响船舶的安全性和经济性以及后期维修保养工作的便利性和工作效率，在当前船舶日趋复杂的工程背景下，管道布置需考虑各专业的配合、空间利用以及系统的正常工作要求，通过合理的管线走向、良好的空间规划、适当的支承等方式可以节约施工费用、提高系统的可靠性和安全性。而科学合理的管道布置方案是保证船舶良好运转的前提条件，也是船舶能够长久地发挥其作用的重要基础。

参考文献

[1] 郝方方. 船舶海水管道腐蚀的原因及其防护研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2022, (06): 113-115.
[2] 高宏伟, 李明, 银美秀. 船舶管路系统液体泄漏监测仪的设计与开发 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(08): 118-121.
[3] 王莉, 张素萍. 船舶载流管道涡激振动数值模拟方法 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13): 53-56.
[4] 柳勇. 船舶高能管道微漏预警与安全防护和评估关键技术及应用. 湖北省, 中国船舶重工集团公司第七一九研究所, 2022-07-18.
[5] 徐敏, 方至伟, 翁翠丽. 新型船舶布风管道装置设计 [J]. 广州航海学院学报, 2022, 30(03): 26-30.
[6] 闵振. 海底管道不停输带压开孔船舶施工解析 [J]. 航海技术, 2022, (06): 47-52.
[7] 孙耀峻, 侯宗宗. 船舶管道过滤器过滤特性的数值模拟 [J]. 船舶工程, 2021, 43(S1): 303-306.
[8] 杨宇超. 基于 CATIA 的船舶管道布置系统开发 [D]. 大连理工大学, 2022.

配电网节能降损技术改造项目的实施与成效

李全勇

国网昌吉供电公司昌吉市供电分公司, 新疆 昌吉 831100

DOI:10.61369/WCEST.2026020001

摘 要 : 配电网作为电力系统连接电源与用户的关键枢纽, 其能耗水平直接影响电力资源利用效率、供电经济性及能源产业绿色发展进程。当前, 配电网在长期运行中面临线路损耗偏高、设备能效不足、运行方式不合理等问题, 制约了电力系统节能降耗目标的实现。基于此, 配电网节能降损技术改造项目成为破解能耗瓶颈、优化供电质量的重要举措。本文结合配电网运行现状, 围绕改造项目的前期筹备、核心实施、质量管控、成效评估及长效运维五个关键维度, 系统阐述项目实施的完整流程与核心要点, 分析技术改造对配电网能耗优化、效能提升的积极作用, 探讨改造过程中存在的共性问题及应对思路, 为同类配电网节能降损技术改造项目的开展提供理论参考与实践指引, 助力电力系统实现绿色低碳、高效经济运行。

关 键 词 : 配电网; 节能降耗; 技术改造; 实施路径; 运行效能

Implementation and Effectiveness of the Technical Transformation Project for Energy Conservation and Loss Reduction in Distribution Networks

Li Quanyong

Changji Power Supply Branch, State Grid Changji Power Supply Company, Changji, Xinjiang 831100

Abstract : Implementation and Effectiveness of the Technical Transformation Project for Energy Conservation and Loss Reduction in Distribution Networks Li Quanyong Changji Power Supply Branch, State Grid Changji Power Supply Company, Changji, Xinjiang 831100 Abstract: As a crucial hub connecting power sources and users in the power system, the energy consumption level of distribution networks directly affects the efficiency of power resource utilization, the economy of power supply, and the progress of green development in the energy industry. Currently, distribution networks face issues such as high line losses, inadequate equipment energy efficiency, and unreasonable operation modes during long-term operation, which restrict the achievement of energy conservation and consumption reduction goals in the power system. Based on this, the technical transformation project for energy conservation and loss reduction in distribution networks has become an important measure to break through energy consumption bottlenecks and optimize power supply quality. This paper systematically elaborates on the complete process and core points of project implementation by focusing on five key dimensions: preliminary preparation, core implementation, quality control, effectiveness evaluation, and long-term operation and maintenance of the transformation project, considering the current operational status of distribution networks. It analyzes the positive effects of technical transformation on optimizing energy consumption and enhancing efficiency in distribution networks, explores common issues encountered during the transformation process and proposes solutions, providing theoretical references and practical guidance for similar technical transformation projects for energy conservation and loss reduction in distribution networks, and contributing to the realization of green, low-carbon, and efficient economic operation of the power system.

Keywords : distribution network; energy conservation and loss reduction; technical transformation; implementation path; operational efficiency

引言

随着能源结构转型不断深化, 绿色低碳发展已成为电力行业高质量发展的核心导向, 节能降损作为电力系统节能减排的关键抓手, 受到行业内外的广泛关注。配电网覆盖范围广、线路分支多、运行环境复杂, 长期以来, 受设备老化、网架结构不合理、负荷分布不均

等因素影响，其线损率一直处于相对偏高的水平，不仅造成了大量电力资源的浪费，也增加了电力企业的运营成本，不利于能源资源的高效利用。为响应国家节能减排政策号召，提升配电网运行的经济性与稳定性，破解配电网能耗偏高的突出问题，各地电力企业逐步推进配电网节能降耗技术改造项目，通过采用先进的节能技术、优化网架结构、更新高效设备等方式，全方位降低配电网损耗。

一、精准谋划：配电网节能降耗技术改造前期筹备

（一）全面排查配电网运行现状

前期筹备阶段的核心任务是摸清配电网运行底数，为技术改造方案的制定提供科学依据。通过对配电网线路、变电设备、配电装置等核心设施进行全面排查，梳理当前配电网运行中存在的能耗隐患，明确损耗偏高的关键环节与核心原因。重点排查线路老化、导线截面不合理、设备能效等级偏低、无功补偿不足等问题，同时梳理配电网负荷分布情况、运行方式合理性及现有节能措施的实施效果，形成全面、系统的排查报告，明确改造的重点区域、核心内容与优先级，为后续改造工作的有序推进奠定基础。

（二）科学制定改造方案

基于配电网运行现状排查结果，结合节能降耗总体目标，科学制定技术改造方案，确保方案的针对性、可行性与经济性。改造方案需明确改造的总体目标、核心任务、实施步骤、技术选型、时间节点及资源配置等内容，结合配电网长期发展规划，避免短期改造与长期发展脱节。在技术选型上，优先选用成熟、高效、节能的技术与设备，兼顾技术先进性与成本可控性，避免盲目追求高端技术导致改造成本过高；同时，结合配电网运行环境特点，优化改造方案细节，确保改造后设备能够适应现场运行条件，充分发挥节能降耗作用。

（三）完善前期保障体系

为确保技术改造项目顺利启动，需建立完善的前期保障体系，统筹协调人力、物力、财力等各类资源。明确项目实施主体、责任分工及工作机制，成立专门的项目筹备小组，负责方案论证、技术调研、资源协调等工作；做好资金统筹规划，合理安排改造资金，确保资金及时到位、规范使用；加强技术培训，提升相关工作人员对节能技术、改造工艺及设备操作的掌握水平，同时做好现场施工前的准备工作，清理施工场地、梳理施工流程，排查施工过程中可能存在的安全隐患，为项目开工建设做好全方位准备。

二、精准施策：配电网节能降耗技术改造核心实施

（一）网架结构优化改造

网架结构不合理是导致配电网损耗偏高的重要原因之一，因此，网架结构优化改造成为技术改造的核心内容。通过梳理配电网线路布局，优化线路路径，缩短供电半径，减少线路传输过程

中的损耗；针对导线截面偏小、传输容量不足的线路，进行导线升级改造，选用截面更大、导电性能更好的导线，降低线路电阻损耗；合理增设配电节点，优化负荷分配，避免部分线路负荷过重、部分线路负荷闲置的情况，实现配电网负荷均衡分布，提升网架运行的合理性与经济性，从源头降低配电网损耗。

（二）高效节能设备更新替换

设备能效不足是配电网能耗偏高的关键症结，通过更新替换高效节能设备，可有效提升设备运行能效，降低设备损耗。对运行年限较长、老化严重、能效等级偏低的变压器、断路器、接触器等设备进行全面替换，选用节能型变压器、高效断路器等设备，减少设备自身的能耗损失；在配电环节加装无功补偿设备，优化配电网无功功率平衡，降低无功损耗，提升电力资源利用效率；推广应用智能配电设备，实现对设备运行状态的实时监测与精准调控，及时发现并处理设备运行中的能耗隐患，确保设备始终处于高效运行状态。

（三）节能技术集成应用

结合配电网运行特点，集成应用多种节能技术，构建全方位、多层次的节能降耗体系，提升改造效果。推广应用线路无功补偿技术、谐波治理技术，减少无功损耗与谐波损耗，改善配电网电能质量；采用智能调度技术，优化配电网运行方式，根据负荷变化实时调整供电方案，避免无效供电损耗；应用线路绝缘化改造技术，提升线路绝缘性能，减少线路漏电损耗，同时降低线路故障发生率，提升配电网供电可靠性；整合各类节能技术，实现技术优势互补，最大限度发挥节能降耗作用，推动配电网能耗水平持续下降。

三、精准管控：配电网节能降耗技术改造质量把控

（一）建立全流程质量管控机制

质量是技术改造项目发挥节能降耗成效的关键，需建立覆盖项目实施全流程的质量管控机制，确保改造工作规范、有序推进。明确质量管控标准与要求，将质量管控责任落实到每个岗位、每个环节，从施工材料进场、施工过程操作到项目竣工验收，进行全方位质量监督与检查；建立质量巡检制度，安排专业人员定期对施工现场进行巡检，及时发现并纠正施工过程中存在的质量问题，避免因施工质量不达标导致改造效果不佳或后期出现安全隐患。

（二）强化施工过程规范管理

施工过程的规范程度直接影响改造质量，需强化施工过程规

范管理，严格按照改造方案与施工标准开展施工工作。规范施工流程，明确各施工环节的操作要求与技术要点，确保施工人员严格按照操作规程施工；加强对施工人员的管理与培训，提升施工人员的质量意识与操作技能，避免因操作不规范导致质量问题；严格把控施工材料质量，对进场的施工材料、设备进行严格检验，杜绝不合格材料、设备投入使用，从源头保障施工质量。

（三）完善质量验收标准

项目竣工验收是质量管控的最后一道关口，需完善质量验收标准，规范验收流程，确保改造项目达到预期节能降耗目标。制定详细的验收方案，明确验收内容、验收标准、验收流程及验收责任，验收工作需由专业人员组成验收小组，严格按照验收标准对改造项目进行全面验收；重点验收网架结构优化效果、设备运行能效、节能技术应用效果等核心内容，对验收过程中发现的问题，责令相关责任方限期整改，直至验收合格，确保改造项目质量符合要求，能够长期稳定发挥节能降耗作用。

四、精准评估：配电网节能降耗技术改造实施成效分析

（一）能耗水平显著优化

节能降耗是技术改造项目的核心目标，通过网架结构优化、高效设备更新、节能技术应用等一系列改造措施，配电网能耗水平得到显著优化。线路传输损耗、设备自身损耗、无功损耗等各类损耗均得到有效降低，配电网线损率大幅下降，电力资源利用效率显著提升，有效减少了电力资源的浪费，实现了电力资源的高效合理利用，契合绿色低碳发展理念，为电力系统节能减排目标的实现提供了有力支撑。

（二）供电效能持续提升

技术改造项目不仅降低了配电网能耗，还进一步提升了配电网供电效能。通过网架结构优化与设备更新替换，配电网供电半径缩短、负荷分配均衡，供电稳定性与可靠性显著提升，线路故障发生率大幅下降，减少了停电时间，提升了用户供电体验；智能节能技术的应用，实现了配电网运行状态的实时监测与精准调控，提升了配电网调度运行的科学性与高效性，确保配电网始终处于最优运行状态，为用户提供安全、稳定、高效的电力供应。

（三）综合效益全面凸显

配电网节能降耗技术改造项目的实施，带来了显著的经济、社会与环境综合效益。从经济效益来看，损耗的降低减少了电力企业的电力资源浪费与运营成本，提升了电力企业的盈利能力，同时降低了用户用电成本，实现了企业与用户的双赢；从社会效益来看，供电可靠性的提升为各行各业的正常生产经营提供了有力保障，推动了地方经济社会的稳定发展，同时践行了国家节能减排政策，提升了电力行业的社会形象；从环境效益来看，电力资源利用效率的提升减少了电能生产过程中的能源消耗与污染物排放，助力实现

“碳达峰、碳中和”目标，推动能源产业绿色低碳转型。

五、精准长效：配电网节能降耗技术改造后续运维与优化

（一）建立常态化运维机制

技术改造项目的顺利完成只是节能降耗工作阶段性目标的达成，而非终结。为了确保改造成效能够得到长期维持，必须建立起一套常态化的运维机制。这包括制定一套完善的设备运维管理制度，明确划分运维责任和流程，确保运维工作的有序进行。在此基础上，应安排专业化的运维人员对改造后的线路和设备进行定期的巡检、维护和检修。通过这种定期的检查，可以及时发现并处理设备运行中可能出现的故障和能耗隐患，从而避免因设备老化或性能下降而导致的损耗反弹。同时，加强运维人员的培训也是至关重要的。通过提升运维人员的专业技能和节能意识，可以确保运维工作的规范性和高效性，从而为配电网的稳定运行和持续节能降耗提供坚实的人力保障。

（二）推进运维技术智能化升级

为了提高运维效率和质量，同时降低运维成本，我们必须推进运维技术的智能化升级。通过引入和应用智能技术，我们能够实现配电网运维的精准化和高效化。具体措施包括：广泛推广使用智能监测设备，这些设备能够对配电网的线路和设备运行状态进行实时监测和数据采集，通过高效的数据分析，我们可以及时预判设备运行趋势，提前发现并排查潜在的能耗隐患，从而实现故障的早期发现和及时处理。此外，我们还将搭建一个智能运维管理平台，该平台能够整合各类运维数据，实现运维工作的信息化和规范化管理。这样的平台不仅提升了运维调度的科学性和高效性，还为配电网的节能降耗提供了强有力的技术支撑。通过这些智能化手段，我们能够全面提升配电网的运维水平，确保电力系统的稳定运行和能源的有效利用。

（三）持续优化节能降耗方案

在能源结构转型的大背景下，配电网的运行环境和需求正经历着深刻的变化。为了适应这些变化，我们必须不断优化节能降耗方案，确保这些方案始终与配电网的实际运行情况紧密结合。这就要求我们定期对配电网的运行状态和改造效果进行系统评估，识别并梳理改造过程中出现的不足和问题。基于配电网的长远发展规划和既定的节能降耗目标，我们需要及时调整和优化改造方案及运维策略，以实现更高的节能降耗效果。同时，我们应密切关注行业内的先进节能技术和设备的发展动态，积极引进和应用这些新技术、新设备，以此推动配电网的节能降耗水平持续提升。通过这样的努力，我们不仅能够有效降低能源消耗和损失，还能够促进配电网的整体高质量发展，为构建绿色、高效的能源体系贡献力量。

六、结束语

配电网节能降耗技术改造项目是电力系统实现节能减排、绿色低碳发展的重要举措，也是提升配电网运行经济性、稳定性与可靠性的关键路径。本文通过对配电网节能降耗技术改造项目的前期筹备、核心实施、质量管控、成效评估及后续运维五个关键维度的系统阐述，明确了项目实施的完整流程与核心要点，分析了改造项目带来的能耗优化、效能提升与综合效益凸显等积极成

效，探讨了实现改造成效长效保持的运维与优化思路。配电网节能降耗工作是一项长期、系统的工程，并非一蹴而就，需要电力企业精准谋划、精准施策、精准管控、精准评估、精准长效，持续推进技术改造与运维升级，不断优化配电网运行状态，降低能耗水平。未来，随着智能电网技术、节能技术的不断发展，配电网节能降耗技术改造将朝着更智能、更高效、更绿色的方向发展，为电力系统高质量发展与“碳达峰、碳中和”目标的实现提供更有力的支撑。

参考文献

- [1] 于邦业. 低压配电网 AI 自适应节能降耗技术体系关键技术及其应用 [J]. 光源与照明, 2025, (12): 230-232.
- [2] 邵其霞. 配电网节能降耗与电能质量管理研究 [J]. 大陆桥视野, 2025, (12): 106-108.
- [3] 譙书. 10kV 配电网中电力变压器节能降耗技术研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (11): 229-231.
- [4] 赵敏. 电力配电线路节能降耗技术要点分析 [J]. 中国信息界, 2025, (04): 49-51.
- [5] 张洋. 电力配电网的节能降耗技术分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14 (12): 180-182.

新能源发电系统的可靠性评估与优化新能源电站的无功补偿装置优化配置

马鑫俊

国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100

DOI:10.61369/WCEST.2026020002

摘 要 : 随着新能源发电技术的快速普及, 新能源发电系统的稳定运行与供电可靠性成为行业发展的核心诉求, 而无功补偿装置作为保障电站电压稳定、提升发电效率的关键设备, 其优化配置直接影响新能源发电系统的整体性能。本文结合新能源发电系统的运行特性, 探讨系统可靠性的评估思路与优化路径, 重点研究新能源电站无功补偿装置的优化配置原则、方法及实施要点, 分析可靠性评估与无功补偿优化之间的内在关联, 提出针对性的技术优化策略, 为新能源发电系统的高效、稳定、可靠运行提供理论参考与技术支持, 推动新能源发电行业的高质量发展。

关 键 词 : 新能源发电系统; 可靠性评估; 无功补偿装置; 优化配置; 运行优化

Reliability Evaluation and Optimization of New Energy Power Generation Systems, and Optimal Configuration of Reactive Power Compensation Devices in New Energy Power Plants

Ma Xinjun

Changji Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji, Xinjiang 831100

Abstract : With the rapid proliferation of new energy power generation technologies, the stable operation and power supply reliability of new energy power generation systems have become core demands for industry development. Reactive power compensation devices, as key equipment for ensuring voltage stability and enhancing power generation efficiency in power plants, have their optimal configuration directly influencing the overall performance of new energy power generation systems. This paper explores the evaluation approaches and optimization paths for system reliability by considering the operational characteristics of new energy power generation systems. It focuses on the principles, methods, and implementation essentials for optimizing the configuration of reactive power compensation devices in new energy power plants, analyzes the intrinsic relationship between reliability evaluation and reactive power compensation optimization, and proposes targeted technical optimization strategies. These efforts provide theoretical references and technical support for the efficient, stable, and reliable operation of new energy power generation systems, thereby promoting the high-quality development of the new energy power generation industry.

Keywords : new energy power generation system; reliability evaluation; reactive power compensation device; optimal configuration; operational optimization

引言

无功补偿装置作为调节新能源电站无功功率、稳定节点电压、降低网损的核心设备, 其配置合理性直接关系到电站运行效率与系统可靠性。当前, 部分新能源电站存在无功补偿装置选型不当、容量配置不合理、控制策略滞后等问题, 不仅无法充分发挥无功调节作用, 还可能影响发电系统的稳定运行, 甚至引发电网故障。因此, 开展新能源发电系统可靠性评估与新能源电站无功补偿装置优化配置研究, 明确可靠性评估指标与优化方向, 完善无功补偿装置的配置方案, 对提升新能源发电系统运行稳定性、促进新能源电力高效消纳具有重要的现实意义。

一、新能源发电系统可靠性核心内涵与影响因素解析

（一）新能源发电系统可靠性核心内涵

新能源发电系统的可靠性是指系统在规定的运行条件下、规定的时间内，完成规定供电功能的能力，其核心涵盖系统的连续性、稳定性与安全性三个维度。与传统火力发电系统相比，新能源发电系统的可靠性具有显著特殊性，其不仅取决于设备自身的运行状态，还受到自然环境、电网接入条件、控制策略等多种外部因素的影响，且由于新能源出力的随机性与波动性，系统可靠性的评估与优化难度更大。新能源发电系统可靠性的提升，既能减少停电事故的发生，保障电力用户的正常用电需求，也能提升新能源电力的消纳能力，推动新能源产业的规模化发展。

（二）新能源发电系统可靠性主要影响因素

新能源发电系统可靠性的影响因素较为复杂，可分为设备自身因素与外部环境因素两大类。设备自身因素主要包括发电设备、输电设备、控制设备及无功补偿设备等的运行状态，设备的老化、故障、维护不当等，都会直接降低系统的可靠性，其中无功补偿设备的性能与配置合理性，对系统电压稳定与可靠性的影响尤为突出。外部环境因素主要包括自然条件与电网接入条件，自然条件的变化会直接影响新能源出力的稳定性，而电网接入容量、接入方式及电网运行状态，会影响新能源电力的输送效率与系统的协同运行能力，进而影响系统可靠性。此外，控制策略的科学性与运维管理的规范性，也会间接影响新能源发电系统的可靠性。

（三）可靠性评估与无功补偿优化的内在关联

新能源发电系统的可靠性评估与无功补偿装置优化配置之间存在密切的内在关联，二者相互支撑、相互促进。可靠性评估是无功补偿装置优化配置的前提与基础，通过对系统可靠性的全面评估，能够明确系统在运行过程中存在的薄弱环节，尤其是电压波动、无功功率失衡等影响系统可靠性的关键问题，为无功补偿装置的优化配置提供明确的目标与方向。而无功补偿装置的优化配置，能够有效解决系统无功功率失衡、电压不稳定等问题，减少因电压波动、设备过负荷等引发的系统故障，进而提升新能源发电系统的可靠性水平。因此，开展二者的协同研究，实现可靠性评估与无功补偿优化的有机结合，是提升新能源发电系统整体运行性能的关键。

二、新能源发电系统可靠性评估体系与方法创新

（一）可靠性评估体系构建原则

新能源发电系统可靠性评估体系的构建，需遵循科学性、系统性、针对性与可操作性的原则。科学性原则要求评估指标与评估方法能够客观反映系统的实际运行状态，符合新能源发电系统的运行特性；系统性原则要求评估体系能够全面涵盖影响系统可靠性的各类因素，形成完整的评估框架，避免出现评估漏洞；针对性原则要求评估体系能够聚焦新能源发电系统的特殊性，重点关注出力波动、无功失衡等核心问题对可靠性的影响；可操作性原则要求评估指标易于获取、评估方法简便可行，能够为实际工程应用提供便捷的技术支撑，避免过于复杂的评估流程与方法增加评估难度。

（二）新型可靠性评估指标体系设计

结合新能源发电系统的运行特性，突破传统可靠性评估指标的局限，设计一套新型的可靠性评估指标体系，涵盖系统出力可靠性、电压可靠性、设备运行可靠性三个核心维度。出力可靠性指标主要用于评估新能源出力的稳定性与连续性，反映系统应对出力波动的能力；电压可靠性指标主要用于评估系统电压的稳定程度，重点关注电压波动范围、电压偏差等关键参数，而这一指标的优化与无功补偿装置的配置直接相关；设备运行可靠性指标主要用于评估发电设备、输电设备、无功补偿设备等的运行状态，反映设备故障对系统可靠性的影响。通过多维度的评估指标，能够全面、准确地反映新能源发电系统的可靠性水平。

（三）可靠性评估方法优化路径

针对传统可靠性评估方法在新能源发电系统中适应性不足的问题，结合系统运行特性与评估指标体系，提出可靠性评估方法的优化路径。摒弃过于依赖历史数据与经验模型的传统评估思路，融合概率统计方法与智能算法，构建兼顾随机性与准确性的可靠性评估模型，能够有效应对新能源出力波动带来的评估误差。同时，简化评估流程，提升评估方法的可操作性，结合系统实时运行数据，实现可靠性的动态评估，及时发现系统运行过程中存在的可靠性隐患，为后续的优化工作提供及时、准确的支撑。

三、新能源电站无功补偿装置优化配置核心原则与思路

（一）无功补偿装置优化配置核心原则

新能源电站无功补偿装置的优化配置，需遵循适应性、经济性、稳定性与协同性的核心原则。适应性原则要求无功补偿装置的选型与容量配置，能够适应新能源出力的随机性与波动性，满足不同运行工况下系统对无功功率的需求，确保装置能够稳定发挥调节作用；经济性原则要求在保障补偿效果的前提下，合理控制无功补偿装置的投资成本与运行成本，实现经济效益与技术效益的统一；稳定性原则要求无功补偿装置具备良好的运行稳定性与调节性能，能够快速响应系统无功功率的变化，避免因装置故障影响系统的稳定运行；协同性原则要求无功补偿装置的配置与新能源发电系统、电网运行实现协同，确保装置的调节作用与系统整体运行需求相匹配。

（二）无功补偿装置选型优化思路

无功补偿装置的选型是优化配置的基础，需结合新能源电站的类型、运行特性与电网接入条件，进行针对性的选型优化。根据新能源电站的出力特点与无功调节需求，合理选择无功补偿装置的类型，兼顾装置的调节速度、补偿精度与运行稳定性，避免选型不当导致补偿效果不佳或设备浪费。同时，注重装置的兼容性与扩展性，确保所选装置能够与系统现有设备协同运行，且能够适应新能源电站规模化发展的需求，便于后续的扩容与升级，为系统的长期稳定运行提供保障。

（三）无功补偿容量与安装位置优化思路

无功补偿装置的容量与安装位置，直接影响补偿效果与系统运行效率，是优化配置的核心内容。结合新能源发电系统的可靠性评估结果，针对系统电压波动、无功功率失衡等薄弱环节，合

理确定无功补偿容量，确保容量配置既能满足系统不同运行工况下的无功需求，又能避免容量过大导致的投资浪费与容量不足导致的补偿效果不佳。在安装位置的选择上，结合电站的布局、输电线路的分布与电网接入节点的电压特性，优先选择能够最大化发挥补偿作用的位置，减少无功功率的传输损耗，提升系统电压稳定性，进而促进新能源发电系统可靠性的提升。

四、新能源发电系统可靠性与无功补偿优化协同实施策略

（一）建立协同优化管控机制

实现新能源发电系统可靠性与无功补偿装置优化的协同，首要任务是建立完善的协同优化管控机制。明确可靠性评估与无功补偿优化的责任主体与工作流程，将可靠性评估结果纳入无功补偿装置优化配置的核心依据，定期开展系统可靠性评估工作，及时更新评估数据，根据评估结果动态调整无功补偿优化方案。同时，建立协同监测机制，实时监测系统运行状态、可靠性指标与无功补偿装置的运行参数，实现二者的实时联动，确保优化方案能够及时适应系统运行工况的变化，充分发挥协同优化效果。

（二）优化系统控制策略

系统控制策略的优化是实现二者协同的关键手段，结合新能源发电系统的运行特性与无功补偿装置的调节性能，优化系统的整体控制策略。构建基于可靠性目标的无功补偿控制策略，将系统可靠性指标作为无功补偿装置调节的核心目标，实现无功功率调节与可靠性提升的有机结合。同时，优化新能源出力控制策略，减少出力波动对系统无功功率与电压稳定的影响，协调无功补偿装置与发电设备的运行，提升系统的协同运行能力，进而实现系统可靠性与运行效率的同步提升。

（三）强化设备运维与管理

设备运维与管理的规范化，是保障可靠性评估与无功补偿优化协同实施效果的重要支撑。建立健全新能源发电设备与无功补偿装置的运维管理制度，定期开展设备巡检、维护与检修工作，及时发现并处理设备老化、故障等问题，确保设备始终处于良好的运行状态，减少设备故障对系统可靠性的影响。同时，加强运维人员的专业培训，提升运维人员对可靠性评估方法、无功补偿装置优化配置及系统控制策略的掌握程度，确保协同优化方案能够得到有效落实，充分发挥技术优化的实际效果。

五、行业发展趋势与优化工作展望

（一）新能源发电系统可靠性评估发展趋势

随着新能源发电技术的不断进步与电网智能化水平的提升，

新能源发电系统可靠性评估将呈现智能化、动态化与协同化的发展趋势。智能化方面，将进一步融合人工智能、大数据等先进技术，优化可靠性评估模型，提升评估的准确性与效率，实现评估过程的自动化与智能化；动态化方面，将结合系统实时运行数据，实现可靠性的实时动态评估，及时响应系统运行工况的变化，为优化工作提供更及时的支撑；协同化方面，将实现可靠性评估与新能源发电、电网运行、无功补偿优化等工作的深度协同，构建全方位的协同评估体系，提升系统整体运行性能。

（二）无功补偿装置优化配置发展方向

未来，新能源电站无功补偿装置的优化配置将朝着高效化、智能化与多元化的方向发展。高效化方面，将研发与应用调节速度更快、补偿精度更高、运行效率更好的无功补偿装置，提升补偿效果，降低运行成本；智能化方面，将结合智能控制技术，实现无功补偿装置的智能调节与自适应运行，能够根据系统运行工况的变化自动调整补偿策略，提升装置的运行稳定性与适应性；多元化方面，将结合新能源电站的类型与运行需求，构建多元化的无功补偿体系，融合不同类型的补偿装置，实现优势互补，进一步提升系统的无功调节能力与电压稳定性。

（三）优化工作重点与实施建议

结合行业发展趋势，未来新能源发电系统可靠性评估与无功补偿装置优化配置的工作重点，应聚焦于技术创新、机制完善与人才培养三个方面。在技术创新方面，加大对可靠性评估方法、无功补偿装置及智能控制技术的研发投入，突破核心技术瓶颈，提升技术水平；在机制完善方面，进一步完善协同优化管控机制与设备运维管理制度，确保优化工作的规范化、常态化开展；在人才培养方面，加强专业人才培养，培养一批兼具可靠性评估、无功补偿优化与系统控制能力的复合型人才，为优化工作的实施提供人才保障。同时，加强行业交流与合作，借鉴先进的技术经验，推动新能源发电系统可靠性与无功补偿优化水平的整体提升。

六、结束语

新能源发电系统的可靠性评估与新能源电站无功补偿装置的优化配置，是保障新能源发电系统高效、稳定、可靠运行的核心环节，也是推动新能源产业高质量发展的重要支撑。本文结合新能源发电系统的运行特性，系统探讨了可靠性评估的体系构建、方法优化，以及无功补偿装置的优化配置原则、思路与协同实施策略，分析了二者之间的内在关联，展望了行业发展趋势与优化工作重点。新能源发电系统的可靠性提升与无功补偿优化是一项长期、系统的工作，需要结合技术发展与行业需求，不断完善评估体系、优化配置方案、强化协同管控。

参考文献

- [1]王飞. 新能源风力发电系统中的储能技术探究 [J]. 电力设备管理, 2025, (22): 131-133.
- [2]袁斌华. 新能源发电储能系统数字孪生的能效管理与优化调度 [J]. 财富时代, 2025, (11): 74.
- [3]杨杰传. 新能源发电系统热工控制中的快速响应技术研究 [J]. 中国高科技, 2025, (22): 83-84+87.
- [4]廖福堂. 新能源风力发电系统主从博弈经济调度方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (11): 58-60+63.
- [5]胡楠. 新能源接入下电力系统电压稳定控制优化 [J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 9 (11): 88-90.

浅析交直流屏在智能化变电站中的重要性

米海军, 雷锦锋, 王正高

陕西北元化工集团股份有限公司, 陕西 榆林 719319

DOI:10.61369/WCEST.2026020005

摘 要： 本文深入探讨了交直流屏在智能化变电站中的重要性。交直流屏作为变电站的核心供电设备，通过交流屏的双电源切换与直流屏的模块化设计，为变电站的关键设备提供稳定可靠的供电保障。其供电原理围绕冗余备用、智能切换与稳定输出展开，确保供电的连续性与稳定性。交直流屏不仅通过冗余设计和故障自诊断功能保障供电可靠性，避免电网故障，还通过过压、过流、绝缘监测等措施保护设备，降低运维成本。此外，交直流屏的智能化特性与远程监控功能显著提升了运维管理效率，为电网的稳定运行和变电站的精益化管理提供了重要支撑。

关 键 词： 智能化变电站；交直流屏；供电可靠性；运维管理

Analysis of the Importance of AC/DC Panels in Intelligent Substations

Mi Haijun, Lei Jinfeng, Wang Zhenggao

Shaanxi Beiyuan Chemical Industry Group Co., LTD., Yulin, Shaanxi 719319

Abstract： This paper thoroughly examines the critical role of AC/DC panels in smart substations. As the core power supply equipment, these panels deliver stable and reliable power to critical substation devices through dual power switching for AC panels and modular design for DC panels. Their power supply principles focus on redundancy, intelligent switching, and stable output to ensure continuous and stable power delivery. The AC/DC panels not only guarantee power reliability through redundant design and fault self-diagnosis to prevent grid failures, but also protect equipment via overvoltage, overcurrent, and insulation monitoring measures, thereby reducing maintenance costs. Furthermore, the intelligent features and remote monitoring capabilities of AC/DC panels significantly enhance operational efficiency, providing crucial support for grid stability and lean substation management.

Keywords： intelligent substation; AC/DC panel; power supply reliability; operation and maintenance management

在电力系统智能化转型中，智能化变电站作为核心节点，其运行的可靠性与稳定性直接决定区域电网的供电质量。交直流屏作为变电站的核心供电设备，为二次设备和一次设备操作提供“能量中枢”，其功能完善性和运行稳定性对变电站效能至关重要。智能化变电站依赖数字化采样、网络化通信和智能化控制技术，实现设备实时监测与精准控制，交直流屏通过合理设计和冗余机制，为保护装置、测控设备、断路器操作机构和通信系统提供交流与直流供电保障，降低供电中断风险。本文基于交直流屏的技术特性与运行原理，结合智能化变电站需求，系统阐述其重要作用，为技术与工程应用提供参考。

一、交直流屏的基本功能与组成

（一）交流屏的用途

交流屏是智能化变电站交流供电系统的核心，为各类需交流电源的设备提供稳定可靠的电能。其负载包括高压配电柜照明、加热器、测控装置交流模块、通信设备交流接口等，这些设备的正常运行直接关系到变电站的日常运维。交流屏接收低压配电室多路交流输入，通过智能双电源转换开关实现故障时的快速切换，保障不间断供电^[1]。

同时，配备微机检测装置和监测仪表，实时采集运行参数，

提供准确的供电状态信息，便于运维人员及时处理异常。在智能化变电站架构中，交流屏与站内监控系统联动，实现远程监测与控制，提升智能化管理水平^[2]。

（二）直流屏的作用与组成

直流屏是智能化变电站直流供电系统的核心，为控制、保护、监控及断路器操作机构等关键设备提供稳定纯净的直流电源，满足高精度供电需求，保障设备协调工作。直流屏高度集成化与模块化，主要由充电柜、电池柜、馈线柜、多功能监控装置、高频开关电源模块、绝缘监测仪等部件组成。充电柜通过高频开关电源模块将交流输入转换为直流输出，具备多种充电模

式，确保蓄电池处于最佳状态^[3]。

电池柜内的蓄电池组作为备用电源，在交流输入停电时提供不间断供电。馈线柜负责直流电源分配，实现精准供电与故障隔离。多功能监控装置实时监测运行参数，具备多种功能，并通过通讯接口实现数据交互。绝缘监测仪实时监测绝缘状态，及时发出报警信号^[4]。此外，还配备降压硅链、隔离二极管、输出保险等辅助部件，确保系统安全运行。

（三）交直流屏的供电原理

交直流屏的供电原理围绕“交流供电保障”与“直流供电保障”展开，核心逻辑是“多路输入、智能转换、稳定输出、冗余备用”。交流屏以双电源切换为核心，正常运行时由主用电源供电，异常时自动切换至备用电源，确保交流负载不间断供电。双电源转换开关分为PC级与CB级，适用于不同场合，微机检测装置实时采集参数并上传至监控系统，实现全程监控。直流屏的供电涉及交流-直流转换、蓄电池充放电、直流电源分配等环节，通过多种机制确保供电的稳定性和可靠性^[5]。

二、交直流屏在智能化变电站运行中的核心价值

（一）供电可靠性保障

供电可靠性是智能化变电站运行的核心要求，任何形式的供电中断都可能导致严重后果。交直流屏通过多重冗余设计、快速故障切换与备用电源自动投入等技术手段，为智能化变电站提供全方位供电可靠性保障，是变电站安全稳定运行的“生命线”。在交流供电方面，交直流屏采用双电源输入与智能切换机制，两路交流电源分别取自低压配电室不同母线段，彼此独立、互不影响^[6]。正常运行时主用电源为交流负载供电，备用电源处于热备用状态；当主用电源出现故障时，双电源转换开关在毫秒级完成备用电源切换，确保交流负载不间断供电。

同时，交流屏配备过流保护、短路保护等装置，当负载回路发生故障时，迅速隔离故障点，避免故障蔓延至整个交流供电系统，保障其他负载正常供电。

在直流供电方面，直流屏的冗余设计更为完善。充电模块采用多模块并联运行方式，正常情况下多台模块同时工作、均分负载电流，单一模块故障时，其余模块自动分担故障模块负载，确保直流输出稳定连续。蓄电池组作为备用电源，具备大容量、长寿命特性，在交流输入完全中断时，能为直流负载提供数小时甚至数十小时持续供电，为运维人员处理故障、恢复交流供电争取充足时间^[7]。监控模块实时监测蓄电池电压、电流、温度等运行参数，通过智能充电管理策略避免蓄电池过充、过放，延长蓄电池使用寿命，确保其在应急情况下可靠投入运行。此外，交直流屏具备完善的故障自诊断与报警功能，实时监测供电系统运行状态，当出现异常情况时，及时发出声光报警信号，并通过通讯接口将故障信息上传至站内监控系统与调度中心，便于运维人员快速定位故障位置、分析故障原因并采取针对性处理措施，最大限度缩短故障处理时间，降低供电中断风险^[8]。

（二）设备安全防护功能

智能化变电站内集中了大量高精度、高价值电力设备，其安全运行直接关乎变电站整体运行安全。交直流屏凭借多重安全防护技术，为站内设备提供全方位保障，有效避免供电异常引发的

设备损坏、性能下降等问题，延长设备使用寿命，降低运维成本。过压保护是其关键安全防线：交流输入过压时，交流屏立即切断故障回路、切换备用电源，防止绝缘击穿、元件烧毁；直流输出过压时，开关电源模块自动停止输出并锁定，故障排除后重启，保护控制装置、断路器操作机构等敏感设备。

过流与短路保护是交直流屏重要的安全防护功能。交流屏输出回路配置空气开关、熔断器等元件，负载过载或短路时可快速切断故障回路，避免设备过热、烧毁。直流屏充电模块与馈线回路均设有过流保护，电流超标时模块自动保护，或馈线元件动作隔离故障^[9]。例如，开关电源模块过流时会点亮指示灯并间歇运行，防止内部元件损坏；直流馈线保险在短路时快速熔断，避免故障波及直流系统，保障蓄电池及其他负载安全。绝缘监测与接地保护对直流系统尤为关键。直流屏通过绝缘监测仪实时监测母线与支路绝缘状况，一旦出现绝缘降低、单点或多点接地故障，立即报警并精准定位故障支路，方便运维人员及时处置，确保直流系统安全稳定运行。

在智能化变电站中，直流系统绝缘故障可能导致保护装置误动作、断路器误分合闸等严重后果，绝缘监测仪的应用有效降低了此类风险。同时，交直流屏柜体接地良好，能将设备外壳感应电荷与故障电流及时导入大地，避免人员触电与设备损坏，保障运维人员人身安全与设备运行安全^[10]。

三、交直流屏对智能化变电站系统的影响

（一）支撑电网稳定运行

交直流屏为智能化变电站内关键设备提供稳定、可靠供电，间接支撑电网稳定运行，在电网故障隔离、负荷调整、应急恢复等过程中发挥重要作用。电网正常运行时，交直流屏确保保护装置、测控设备等实时监测电网运行参数，及时发现异常。当电网出现故障时，保护装置在交直流屏支撑下快速判断故障类型与位置，发出跳闸指令，避免故障扩大。若交直流屏供电中断，保护装置无法工作，可能导致故障蔓延，引发大面积停电。

交直流屏的备用供电能力为电网应急恢复提供保障。当变电站交流电源中断时，直流屏蓄电池组可立即投入，为关键设备供电，支撑运维人员完成故障隔离、线路重合闸等操作，加快电网恢复速度。同时，交直流屏与智能化变电站具备协同控制功能，监控模块与站内监控、电网调度中心实时通信，上传供电状态，助力调度人员制定科学策略，优化资源配置，提升电网稳定性与经济性。在新能源大规模并网的复杂环境下，交直流屏通过优化供电拓扑、提升电源转换效率、增强故障自诊断与自愈能力，为智能化变电站稳定运行提供坚实支撑。

（二）提升运维管理效率

交直流屏的智能化特性与站内监控系统的深度融合，为提升变电站运维管理效率提供重要支撑，降低运维成本，减轻运维人员工作负担，推动变电站运维向精益化、高效化转型。

1. 远程实时监测，打破时空限制

交直流屏配备的高性能监控模块可实时、精准采集各类运行

参数，包括交流输入电压电流、直流输出电压电流、蓄电池组的端电压充电电流以及模块运行温度等关键数据。这些参数通过专用通讯接口同步上传至站内监控系统与远程运维平台，实现数据的实时共享与同步更新。运维人员无需抵达变电站现场，只需通过办公终端或移动运维设备登录对应平台，即可全方位、多角度掌握交直流屏的运行状态，精准捕捉设备运行过程中出现的细微异常，提前预判潜在安全隐患。这种远程监测模式彻底打破了传统运维工作的时空限制，替代了以往人工现场巡检的繁琐流程，实现了对交直流屏设备的全天候无死角监控，有效减少了巡检盲区，大幅提升了运维工作的及时性与有效性，为变电站运维工作的高效开展奠定了坚实基础。

2. 故障自诊断定位，缩短处置周期

交直流屏内置完善的故障自诊断系统，与监控模块深度联动，能够对供电系统运行过程中的各类异常情况进行快速识别与分析。当系统出现过压过流绝缘下降模块故障等异常时，监控模块可在极短时间内诊断出具体故障类型，精准判定故障等级，同时启动声光报警机制，及时提醒运维人员关注处理。系统可准确定位故障发生的具体位置，明确故障支路或故障模块，并结合设备运行历史数据提供针对性的故障处理建议，为运维人员的检修工作提供清晰指引。这种故障自诊断与定位功能，有效避免了运维人员在检修过程中的盲目排查，减少了故障排查的时间成本，显著缩短了故障处理周期，大幅提升了检修工作的效率与质量，确保供电系统快速恢复正常运行。

3. 智能自动控制，降低劳动强度

交直流屏集成了全面的智能自动控制功能，涵盖自动充电管理自动电源切换运行参数自动调整等核心模块，实现了运维工作的自动化升级。在充电管理方面，系统可根据蓄电池组的运行状态自动切换充电模式，确保蓄电池始终处于最佳工作状态，延长蓄电池使用寿命。在电源供应方面，当主用电源出现异常时，系统可自动切换至备用电源，无需人工干预即可保障供电连续性。在参数调控方面，系统可根据负载变化和运行环境自动调整输出参数，维持供电稳定性。这些智能自动控制功能，无需运维人员

频繁前往现场进行手动操作，有效减少了日常运维的工作量，降低了人工操作过程中可能出现的失误风险，同时也减轻了运维人员的工作负担，让运维人员能够将更多精力投入到设备隐患排查和优化提升工作中。

4. 优化运维投入，管控运维成本

交直流屏的智能化升级的显著优势在于能够优化运维投入，实现运维成本的精准管控，提升变电站运维的整体经济效益。依托远程实时监测功能，运维人员可通过线上平台掌握设备运行状态，有效减少了巡检人力投入和巡检过程中的交通耗材等相关费用。同时，故障自诊断与定位功能实现了故障的早发现早处置，避免了小故障扩大为大隐患，减少了设备因故障损坏造成的更换维修成本。此外，设备的智能自动控制和智能化保护功能，降低了设备的损耗，延长了使用寿命，减少了更换频次，进一步压缩了运维成本。通过多维度的运维优化，交直流屏有效降低了变电站运维的人力物力财力投入，实现了运维成本的精细化管控，为变电站的高效稳定运行提供了经济保障。

四、总结

交直流屏作为智能化变电站的核心供电设备，其功能完善性、运行可靠性与技术先进性直接决定变电站的安全稳定运行与运维管理效率。交流屏通过双电源切换与智能分配，为交流负载提供稳定供电；直流屏凭借模块化设计与智能控制，为关键设备提供纯净可靠的直流电源，两者协同构建全方位供电保障体系。其供电原理围绕冗余备用、智能切换、稳定输出展开，确保供电连续性与稳定性。交直流屏通过冗余设计、快速切换与故障自诊断功能，提供高供电可靠性，避免电网故障；过压、过流、绝缘监测等安全防护措施有效保护设备，降低运维成本。交直流屏为变电站关键设备提供坚实供电支撑，保障电网稳定运行，其智能化特性与远程监控功能大幅提升运维管理效率，实现运维工作的高效化与精益化，为变电站精益化管理提供重要支撑。

参考文献

- [1] 曹轩, 田兴隆, 王龙. 一种应用于变电站的交直流掉电监测装置的研究 [J]. 电力系统装备, 2019, 28 (1): 2-5.
- [2] 汪成. 两种现行直流屏供电系统的优缺点分析及改进方法 [J]. 电工技术, 2019, 50 (12): 79-81.
- [3] 杨品哲. 变电站交直流屏电源远程监控系统的应用 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021, 15 (18): 1023-1025.
- [4] 刘先进. 变电站直流屏的维修 [J]. 电气时代, 2019, 48 (11): 58-59.
- [5] 刘俊峰, 武清焱, 张庆庆, 等. 一种变电站智能直流屏 [P]. 中国: CN201920113769.2, 2020-12-29.
- [6] 苏卫强, 李祥, 杜思宇, 等. 自动控温式变电站直流屏柜防尘降温装置 [P]. 中国: CN201910181227.3, 2019-08-23.
- [7] 韩明学, 陈帅, 韩东, 等. 一种多功能电源的调压供电控制方法及系统 [P]. 中国: CN202510797501.5, 2023-06-15.
- [8] 孙兴泉. 一起变电站直流系统接地故障的处理 [J]. 农村电工, 2022, 30 (5): 54-56.
- [9] 蒋叶峰. 变电站直流屏蓄电池参数和容量选择 [J]. 中国水泥, 2019, 42 (3): 98-100.
- [10] 付荣. 智能化变电站运行维护技术分析 [J]. 工程技术 (文摘版), 2021, 18 (23): 202-204.

高压输电线路全过程机械化施工技术要点

陶智鹏, 张鑫

宁夏超高压电力工程有限公司, 宁夏 银川 750000

DOI:10.61369/WCEST.2026020022

摘 要 : 随着电网建设规模不断扩大与输电线路工程复杂程度提高, 传统以人工为主的施工方式在效率、安全与质量控制方面逐渐受到限制。全过程机械化施工通过引入专业施工装备与系统化作业组织, 使基础施工、杆塔组立以及导地线展放等环节实现机械设备主导作业, 在提升施工效率的同时降低劳动强度与安全风险。机械化施工推动输电线路工程施工组织方式与技术体系持续优化, 为提升工程施工质量与效率提供技术支撑, 并促进输电工程施工模式向更加高效、安全与规范方向发展。

关 键 词 : 高压输电线路; 机械化施工; 杆塔组立; 导地线展放; 施工技术

Whole Process Mechanized Construction Technology and Key Points of High Voltage Transmission Line

Tao Zhipeng, Zhang Xin

Ningxia Ultra High Voltage Power Engineering Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750000

Abstract : With the continuous expansion of power grid construction scale and the improvement of the complexity of transmission line engineering, the traditional manual construction method is gradually limited in efficiency, safety and quality control. Through the introduction of professional construction equipment and systematic operation organization, the whole process of mechanized construction can realize the leading operation of mechanical equipment in the links of foundation construction, tower assembly and ground wire laying, so as to improve the construction efficiency and reduce the labor intensity and safety risk. Mechanized construction promotes the continuous optimization of the construction organization mode and technical system of the transmission line project, provides technical support for improving the quality and efficiency of the project construction, and promotes the development of the construction mode of the transmission line project in a more efficient, safe and standardized direction.

Keywords : high voltage transmission line; mechanized construction; tower assembly; conductor and ground wire spreading; construction technology

引言

高压输电线路是电力系统实现跨区域能源输送的重要基础设施, 其建设质量直接关系到电网运行的安全性与稳定性。近年来, 随着电网工程建设范围不断向山区、丘陵及复杂地形区域延伸, 施工环境条件与工程组织难度明显增加, 传统依赖人工和简易设备的施工方式在效率、安全以及施工质量稳定性方面逐渐难以满足工程建设需求。机械化施工技术的应用为输电线路工程施工模式带来新的变化, 通过利用专业施工机械、运输设备与张力放线装置等装备, 可以在多个施工环节中实现机械主导作业, 使施工过程更加规范有序。机械设备在施工中的广泛应用不仅能够减少高强度人工作业, 也有助于提升施工过程的安全保障水平。在电网工程规模持续扩展的背景下, 系统梳理输电线路机械化施工的关键技术与实施要点, 对于提升工程施工效率、优化施工组织管理以及推动电网建设技术水平提升具有现实意义。

一、高压输电线路全过程机械化施工的技术基础

(一) 输电线路机械化施工的发展背景与技术内涵

随着电网建设规模不断扩大, 高压输电线路工程在山区、丘陵以及跨越复杂地形区域中的建设任务逐渐增多, 施工环境条件更加复杂, 对施工效率与安全管理提出更高要求。传统输电线路

施工方式多依赖人工配合简易机械设备完成, 施工周期较长, 劳动强度较大, 在复杂地形环境中容易受到多种条件限制。机械化施工技术的推广应用, 使施工过程逐渐由人工作业为主转向设备作业为主, 通过专业施工装备参与基础施工、杆塔组立与导地线展放等关键环节, 形成较为稳定的施工技术体系。机械化施工不仅改变了施工组织方式, 也推动输电工程施工逐渐向标准化与专

业化方向发展，在保障工程质量的同时提高整体施工效率。

（二）全过程机械化施工体系的构成要素

全过程机械化施工体系由施工设备系统、施工技术方案以及施工组织管理机制共同构成。施工设备系统主要包括基础施工机械、吊装设备、张力放线设备以及运输设备等，不同设备在施工阶段承担不同功能，通过合理配置能够形成较为完整的施工装备体系。施工技术方案是机械化施工顺利实施的重要基础，需要根据地形条件、线路长度以及杆塔结构形式进行科学设计，使设备配置与施工流程之间保持协调关系^[1]。施工组织管理则对施工过程中的设备调度、人员协作与施工进度进行统一安排，通过建立稳定的作业流程，使机械设备在不同施工阶段能够保持连续作业状态。多种要素相互配合构成完整的机械化施工体系，为输电线路工程施工提供技术支撑。

（三）机械化施工与传统施工模式的差异

机械化施工模式与传统施工方式在作业组织、施工效率以及安全管理方面存在明显差异。传统施工模式中，大量施工环节需要依赖人工完成，施工人员在搬运、吊装与线缆展放等过程中承担较大体力劳动，作业效率与人员经验存在较大关联。机械化施工通过专业设备承担主要施工任务，使人工作业逐渐转向设备操作与技术管理，施工过程更加规范。机械设备能够在短时间内完成较大规模作业任务，在复杂地形条件下仍能保持较稳定的施工效率。机械化施工也有助于减少高空与高强度人工作业，使施工过程中的安全风险得到一定程度控制，整体施工质量与效率随之提升。

二、高压输电线路全过程机械化施工关键技术

（一）基础工程机械化施工技术

基础工程是输电线路施工的重要环节，其施工质量直接影响杆塔结构稳定性。机械化基础施工通常利用旋挖钻机、挖掘设备以及混凝土搅拌设备等机械装备完成基坑开挖与混凝土浇筑作业。机械设备在施工中能够保持较稳定的作业精度，使基坑尺寸与深度符合设计要求。机械化施工在混凝土浇筑环节能够实现连续作业，有利于提高混凝土结构的整体质量。在部分复杂地形区域，通过合理布置施工平台与设备作业路径，可以使机械设备顺利进入施工区域，减少人工挖掘所带来的效率限制，使基础施工过程更加高效。

表1 输电线路机械化施工主要设备及功能

施工环节	主要机械设备	主要功能	技术特点
基础施工	旋挖钻机、挖掘机、混凝土搅拌设备	完成基坑开挖与基础浇筑	提高基础施工效率与精度
杆塔组立	汽车吊、履带吊、抱杆起重装置	完成塔材吊装与塔体组立	吊装稳定性高、作业效率高
导线展放	张力放线机、牵引机、放线滑车	控制导线张力并完成展放	防止导线磨损与变形
材料运输	工程运输车、履带运输车	运输塔材与施工设备	适应复杂地形运输

为更加直观地反映输电线路全过程机械化施工中常用设备类型及其作用，可对不同施工环节所使用的主要施工装备进行归纳整理，如表1所示。

（二）杆塔组立机械化施工技术

杆塔组立是输电线路施工中的关键工序，其施工难度较高，对设备性能与施工组织要求较为严格。机械化组塔技术主要依靠起重设备与专用吊装设备完成杆塔构件的吊装与安装作业。施工过程中，通过合理选择吊装设备类型以及吊装方式，使杆塔构件能够在稳定状态下完成安装。设备操作人员根据施工方案对吊装角度与吊装高度进行控制，使杆塔结构在组装过程中保持稳定。机械化组塔技术在大型输电工程中应用较为广泛，通过设备协同作业能够减少高空人工操作，使施工效率与安全性得到明显提升。

（三）导线展放机械化施工技术

导线展放是输电线路施工中的重要环节，其施工质量直接影响线路运行性能。机械化展放技术通常采用张力放线设备与牵引设备进行作业，在放线过程中通过控制张力值与牵引速度，使导线在展放过程中保持稳定状态^[2]。张力放线设备能够有效避免导线在展放过程中与地面或障碍物发生接触，从而减少导线损伤的风险。

在导线线机械化展放过程中，导线张力控制是保证施工质量的重要技术环节。张力过大会增加导线受力并可能影响导线结构稳定性，张力过小则容易造成导线弧垂过大或与地面发生接触，因此需要根据线路档距与弧垂条件进行合理计算。导线张力关系通常可表示为：

$$T = \frac{wL^2}{8f}$$

式中：T为导线张力（N），w为导线单位长度重量（N/m），L为线路档距长度（m），f为导线弧垂（m）。通过对导线张力参数进行合理计算与控制，可使导线在展放过程中保持稳定受力状态，从而提高导线施工质量与安全水平。在长距离输电线路施工过程中，机械化张力放线设备能够保持连续作业状态，使导线展放效率得到明显提升，同时减少人工干预程度，使施工过程更加规范稳定。

（四）施工运输与设备协同作业技术

输电线路工程施工区域往往分布在跨度较大的区域，施工材料与设备运输成为影响施工效率的重要因素。机械化施工通过建立完善的运输体系，使材料运输与施工设备运行形成协调关系。施工现场通常采用运输车辆、履带式设备以及简易运输设施完成材料转运任务，使施工材料能够及时到达作业区域。设备协同作业技术通过合理安排设备作业顺序，使不同施工环节之间保持衔接关系。运输系统与施工设备之间形成稳定配合，有助于提高施工效率并减少作业等待时间。

三、全过程机械化施工的组织管理与技术控制

（一）施工方案设计与机械设备配置

机械化施工顺利实施需要依托科学合理的施工方案。施工方案设计过程中需要综合考虑线路走向、地形条件以及施工设备性能，使施工方案具有较强的可操作性。设备配置是施工方案的重

要组成部分，不同施工阶段需要选择适合的施工机械，使设备性能能够满足施工要求。设备数量与作业能力之间需要保持合理匹配，使施工过程保持连续性。通过科学配置设备资源，可以使施工效率得到有效保障。

（二）施工过程质量控制与技术管理

机械化施工虽然依赖设备完成主要作业，但施工质量仍需要通过严格技术管理进行控制。施工单位在工程实施过程中需要建立完善的技术管理制度，对基础施工、杆塔组立以及导线展放等关键环节进行质量检查^[3]。设备操作过程需要严格按照施工规范进行，使设备运行状态保持稳定。技术管理人员通过现场检查与数据记录，对施工过程中的关键技术参数进行监控，使工程质量符合设计标准。规范化管理能够使机械化施工在效率提升的同时保持稳定质量水平。

（三）施工安全管理与风险控制机制

输电线路工程施工过程中存在高空作业、设备吊装以及复杂地形作业等多种风险因素，安全管理在施工组织中具有重要地位。机械化施工通过设备替代部分高风险人工作业，使施工风险得到一定程度降低。施工单位需要建立安全管理制度，对设备运行状态进行定期检查，使设备在安全条件下运行。施工人员需要接受安全培训，掌握设备操作规范与应急处理方法。在施工现场通过安全监督与风险评估，使潜在风险能够得到及时识别与控制。

四、高压输电线路机械化施工技术应用优化路径

（一）施工装备智能化与信息化融合应用

随着电力工程施工技术持续发展，施工装备逐渐呈现出智能化与信息化融合的趋势。传统机械设备多依赖人工操作与经验判断，设备运行状态与施工参数难以形成系统记录，而智能化施工装备能够通过传感系统与数据采集模块，对设备运行状态、施工进度以及关键技术参数进行实时监测。施工管理人员通过信息平台能够及时掌握施工现场设备运行情况，对施工进度与施工质量进行动态管理。部分大型吊装设备与张力放线设备已经逐步引入自动控制与远程监测功能，使设备操作更加稳定，施工过程更加可控。信息系统在施工管理中的应用，使施工数据能够形成持续积累，为后续工程建设提供经验参考，也有助于推动输电线路施工逐渐向数字化管理模式转变。

（二）施工流程标准化与协同管理机制

全过程机械化施工的顺利实施离不开稳定的施工流程体系。

通过建立标准化施工流程，可以使不同施工阶段之间形成清晰的衔接关系，使施工活动保持连续性与稳定性。在施工组织过程中，需要对基础施工、杆塔组立以及导线展放等关键环节进行流程细化，使设备操作步骤、质量检查内容以及技术控制要求形成统一规范。标准化流程不仅有助于提高施工效率，也能够减少施工过程中由于操作方式差异所带来的质量波动。机械化施工通常涉及多种设备与多个作业小组，协同管理机制在施工组织中具有重要作用。通过加强设备管理人员、技术管理人员以及施工班组之间的信息沟通，可以使施工任务在不同阶段实现有效衔接。协同管理能够减少施工等待时间，使设备利用率保持较高水平，从而提升整体施工效率。

（三）机械化施工效率与资源配置优化

在输电线路工程建设过程中，机械化施工效率不仅取决于设备性能，还与施工资源配置方式密切相关。施工单位需要结合工程规模、线路长度以及施工环境条件，对设备、人员与运输资源进行统筹安排，使施工资源能够在不同阶段发挥合理作用^[4]。设备配置需要根据施工任务进行动态调整，在基础施工阶段重点配置土方设备与混凝土施工设备，在杆塔组立阶段加强吊装设备投入，在导线展放阶段合理安排张力放线设备与牵引设备。通过对施工进度进行持续跟踪，可以及时发现设备利用效率变化情况，并根据实际施工需求进行资源调配。合理的资源配置方式能够减少设备闲置与重复调度现象，使施工过程保持较高效率。在长期工程建设实践中，逐渐形成稳定的设备配置经验，有助于进一步提升机械化施工水平，使输电线路工程建设在效率、安全与质量方面保持良好平衡。

五、结语

随着电网建设规模不断扩大与施工环境日益复杂，输电线路施工方式逐渐由传统人工作业向机械化施工模式转变。全过程机械化施工通过将专业施工装备与规范化施工组织相结合，使基础施工、杆塔组立以及导地线展放等环节形成稳定高效的作业体系，在提升施工效率的同时降低高强度人工作业比例，为工程安全与施工质量提供更加可靠的技术保障。随着智能装备与信息化技术不断融入工程建设实践，机械化施工将在施工效率、质量控制与安全管理方面发挥更加显著作用，对推动输电线路工程建设水平提升具有积极意义。

参考文献

- [1] 李坚, 李聪. 输电线路全过程机械化施工关键技术应用研究 [J]. 灯与照明, 2025, 49(02): 160–162+168.
- [2] 罗崇盛. 高压输电线路施工技术与检修方法分析 [J]. 通讯世界, 2024, 31(11): 94–96.
- [3] 刘宏志, 赵英琦, 刘克, 文婷, 张灿. 架空输电线路机械化施工方案造价分析 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2024, 27(05): 65–69+74.
- [4] 曹远, 孟昭显, 管良. 高压输电线路施工技术与检修策略研究 [J]. 电子测试, 2019, (23): 105–106+83.

高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术分析

张鑫, 陶智鹏

宁夏超高压电力工程有限公司, 宁夏 银川 750000

DOI:10.61369/WCEST.2026020024

摘 要 : 为切实解决以往我国高压输电线路中, 轻量化绝缘子缺陷隐蔽性强、传统检测手段效率低等现实挑战, 本文将围绕绝缘子缺陷检测技术的优化路径开展分析讨论, 根据轻量化复合材料、绝缘子缺陷的演化规律, 提出非接触感知、边缘计算、AI推理等技术的应用策略。并基于工程案例, 验证技术实施效果, 最终发现, 该技术体系可实现缺陷检出率提升90%以上, 运维成本降低60%, 能够为同类工程提供技术参考。

关 键 词 : AI推理; 绝缘子缺陷检测; 边缘计算; 分级预警

Analysis of Lightweight Insulator Defect Detection Technology For High Voltage Transmission Lines

Zhang Xin, Tao Zhipeng

Ningxia Ultra High Voltage Power Engineering Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750000

Abstract : In order to effectively solve the practical challenges of strong concealment of lightweight insulator defects and low efficiency of traditional detection methods in China's high-voltage transmission lines in the past, this paper will analyze and discuss the optimization path of insulator defect detection technology, and propose the application strategies of non-contact perception, edge computing, AI reasoning and other technologies according to the evolution law of lightweight composite materials and insulator defects. Based on the engineering case, the implementation effect of the technology is verified. Finally, it is found that the technical system can improve the defect detection rate by more than 90% and reduce the operation and maintenance cost by 60%, which can provide technical reference for similar projects.

Keywords : AI reasoning; insulator defect detection; edge calculation; hierarchical early warning

引言

轻量化绝缘子是指, 基于硅橡胶复合、轻质高强瓷等轻质材质制成, 重量相较于传统陶瓷降低50%左右的新型绝缘器件。它在高压输电线路中, 主要承担导线机械悬挂、高压电位隔离等作用, 具有抗污闪、易安装等优势, 适配大跨度输电场景。但此类绝缘子在使用中, 容易受强电场、机械应力等工况的影响, 进而产生劣化破损缺陷, 很容易造成绝缘失效、闪络跳闸。因此, 只有及时开展缺陷检测工作, 才能第一时间排查隐患, 维护电网安全运行。

一、高压输电绝缘子缺陷特征与检测原理

(一) 缺陷分类特征

轻量化绝缘子通常采用芯棒、护套、金具的一体化结构, 相关组件分别负责: 承担机械载荷; 绝缘防护; 线路连接。各部件的协同失效, 则是缺陷产生的核心诱因, 为此, 本文将结合实际工况特性以及失效机理, 将常见缺陷分为以下几类: 外观显性缺陷, 具体表现为伞裙开裂、粉化、端部密封胶脱落、金具锈蚀松动等。此类缺陷的形成原因为紫外线老化、酸雨侵蚀等外部因素引发, 缺陷位置主要集中在伞裙表面、金具连接部位; 内部隐性缺陷, 是指难以用肉眼识别的潜伏性缺陷, 主要包括芯棒开裂、

气泡、界面脱粘等, 多由生产工艺瑕疵、机械疲劳等因素导致, 缺陷初期无明显表征, 但在后期会快速引发绝缘击穿等重大事故; 性能劣化缺陷, 属于介于显性与隐性间的渐进式缺陷, 主要表现为绝缘电阻下降、介损增大等, 通常由长期电老化、热老化导致, 缺陷发展相对缓慢但不可逆。

(二) 缺陷检测核心原理

为保证上述缺陷的准确识别, 企业通常会针对不同类型缺陷的信号特性, 融合多物理场检测原理, 实现非接触、全覆盖检测, 具体原理可分为以下几类: 多模态光学视觉检测, 常用于检测外观显性缺陷, 利用可见光成像、红外热成像的协同感知, 捕捉缺陷触发的光学信号异变。其中, 可见光成像可直接依靠高清

相机，拍摄绝缘子表面图像，识别伞裙破损、金具松动等宏观缺陷。而红外热成像，则可基于缺陷部位绝缘性能下降，产生的温度场异常，捕捉温差超过2℃的热像特征，以此判别零值绝缘子与内部发热缺陷；超声无损检测原理，该方法常用于识别内部隐性缺陷，主要利用超声波在不同介质界面的反射、透射特性，实现内部缺陷定位。当超声波传入轻量化绝缘子内部，并遇到芯棒裂纹、脱粘等缺陷后，会迅速产生特异性反射回波，借助分析回波幅值、时延的方式，便可判定缺陷位置、类型。考虑到轻量化复合材料本身具有的声阻抗特性，在检测时，更适合采用低频超声脉冲回波技术，其优势在于，穿透深度可达50mm以上，且对绝缘子结构无损伤，高度适配高空在线检测场景；边缘端智能判别，该技术是现阶段应用最广，是实现轻量化检测的核心支撑，通过将预处理后的光学、超声等信号特征输入轻量化AI模型，依靠特征匹配、分类判别，完成缺陷类型、等级的自动识别。且AI模型，也能基于轻量化神经网络架构，进一步压缩冗余参数，从而适配嵌入式硬件的算力限制，保证端侧的动态推理，规避数据回传的延时问题，因此，本文将以该技术作为研究对象，深入探讨技术具体应用要点与流程。

二、高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术的具体应用路径

根据上述分析可知，边缘端智能判别的推广度最高，且技术应用相对成熟，缺陷检测效率高，因此，本文将以该技术作为核心，在充分衡量高压输电线路运维场景、轻量化绝缘子缺陷特征后，构建五层递进式应用体系，保证各环节紧密衔接、协同联动，确保研究成果兼顾技术专业性和工程实用性。

（一）适配场景的信号采集

在缺陷检测作业开始前，操作人员需要优先梳理高压输电线路不同巡检场景，比如平原、山区、高海拔等，并集中部署轻量化、低功耗的感知设备，充分考虑设备重量大小、检测精度以及场景适配性，防止因设备过载，影响巡检效率。具体的部署模式可分为以下三种。

低空无人机轻量化挂载巡检，该方法是当下主流部署方式，主要针对轻量化绝缘子重量轻、杆塔分布广的特点，基于多旋翼无人机，并在此基础上，搭载轻量化多模态感知模块，比如可见光高清相机、红外热像仪、微型超声传感器等，模块总重量可控制在1.5kg以内，高度适配无人机续航与载重限制。通过由技术人员预先规划好巡检航线，依照杆塔定位、绝缘子串扫描、定点拍摄、数据存储的作业流程，可实现全自动巡检，巡检半径接近5km。针对山区等复杂场景，可凭借悬停聚焦检测模式，对疑似缺陷部位实施微距拍摄，进一步提升信号采集精度；

杆塔固定式传感部署模式，该方法本质上可归属为在线实时监测手段，需要操作人员在关键线路、高危杆塔的绝缘子串两端，部署微型电场传感器、温湿度传感器等，设备需依靠太阳能供电，采取低功耗传输设计形式，其体积大小仅有传统传感器的30%，因此安装更加便捷，也不会影响绝缘子机械性能。在数据

采集时，由传感器获取绝缘子运行参数，每10分钟上传一次数据，对缺陷进行24小时不间断监测，适用于人口密集区的常态化监测。

手持便携终端巡检模式，该方式简单来说，属于人工辅助补检，只适用于上述两种方式无法检测的死角区域，比如无人机无法覆盖的转角杆塔或是变电站内侧绝缘子。此时，需要运维人员携带轻量化手持检测终端，并确保其集成光学、超声检测功能，在近距离收集缺陷信号，此类终端设备的重量往往不足0.8kg，操作更加简便，可实现缺陷点位的精准定位^[1]。

（二）高效降噪与轻量化传输

在完成数据采集后，操作人员需要认识到此时整合的光学、超声、电场数据本身存在较高的冗余度，且噪声干扰较大，数据量极为庞大，若采取直接回传的方式，必然会造成带宽拥堵、延时过高。为解决此类问题，需要打造边缘端预处理、轻量化传输、云端汇聚的技术体系，推动数据的高效流转，以此高度适配高压输电线路的通信环境。

在边缘预处理阶段，操作人员要在无人机、杆塔传感器，部署嵌入式芯片，该芯片的主要作用在于，数据降噪、特征提取与冗余剔除。对于图像数据来说，可依靠高斯滤波+直方图均衡化算法，去除雾霾、抖动等噪声，强化缺陷特征。对于超声、电场数据，则更适合依靠小波变换算法，剔除电磁干扰、环境噪声，实现缺陷特异性特征的直接提取。同时，该芯片还可凭借数据降维、压缩编码的方式，将原始数据量压缩60%左右，在充分保留核心缺陷特征的基础上，降低传输负荷。

至于在轻量化传输阶段，则要考虑输电线路的通信条件，实施分层传输策略。比如：对于无人机巡检数据，可优先选择5G蜂窝网络传输，基于5G大带宽、低延时特性，实现高清图像、视频的实时回传；对于固定式传感器，则要采用窄带物联网传输，其优势在于低功耗、广覆盖，可实现常态化监测结果的稳定上传；而对于偏远无通信信号区域，则应使用北斗短报文传输，该方法是指用北斗卫星导航系统独有的卫星通信功能，凭借北斗卫星中转，实现终端与管控端的双向简短数据、文字信息传输，能够保障数据不丢失。传输期间应借助加密协议，避免数据泄露，并设置优先级机制，让缺陷预警数据优先传输^[2]。

（三）轻量化AI缺陷识别模型部署

为避免因高压输电线路边缘端算力有限、缺陷小目标识别难度大等问题，影响缺陷的正常发现与处理，电力技术人员应积极学习国内外成功的工程案例，引入先进的数字化技术与设备，着手构建端侧轻量推理+云端模型迭代的AI部署策略。简单来说，便是需要技术人员采用改进RT-DETR、YOLOv8-Slim轻量化神经网络，融合量化剪枝、知识蒸馏等技术，将模型参数压缩至原来的1/5，以此降低模型的算力需求。该方法可高度适配无人机、传感器的嵌入式芯片。并在此基础上，打造绝缘子缺陷专属数据集，涉及不同工况、不同类型的缺陷样本，依靠数据增强、迁移学习，提升模型对微小缺陷、隐蔽缺陷的识别能力。而在端云协同部署上，则应由边缘端，实现推理，将前端预处理后的数据，输入轻量化模型，完成缺陷初步判别，标记疑似缺陷点位，生成

预警信息。由云端完成复核与模型迭代，接收边缘端上传的疑似缺陷数据，经模型复核后，修正判别结果，补充缺陷样本，持续优化模型参数^[3]。

（四）缺陷分级预警与闭环管控

在完成上述作业后，需要技术人员根据缺陷危害程度、发展速度，打造预警机制，结合电网运维管理体系，实现预警、派单、处置的闭环管控，防止缺陷扩大，避免引发安全事故。具体的缺陷分级标准为：一级（普通缺陷），比如伞裙轻微粉化、表面轻微污秽，不会影响线路正常运行，可将问题纳入常规巡检计划当中；二级（严重缺陷），比如伞裙局部开裂、金具轻微松动，需72小时内处置；三级（危急缺陷），比如芯棒开裂、绝缘电阻骤降，需立即停电处置。同时，AI模型可自动判定缺陷等级，基于数据库、专家系统，自动生成包含缺陷位置、类型、图片、处置建议的预警工单。预警工单在推送至对应运维班组后，由运维人员前往现场处置。直至处置结束后，上传复核检测数据，由系统自动比对处置前后缺陷特征，确认缺陷是否消除。若未彻底处置，则系统会再次派单，直至闭环。

（五）长效防控与技术迭代

在确定上述缺陷检测技术的实施路径后，电力企业也要进一步完善、改进轻量化绝缘子周期管理机制，致力于从源头降低缺陷发生率，大幅提升技术的应用长效性。比如设计与生产阶段，将缺陷检测数据反馈至生产厂家，让其针对性优化材质配方与生产工艺，尽可能减少内部瑕疵。在安装阶段，则用检测技术开展出厂检测、现场验收，杜绝不达标产品入网。在运行阶段，则落实常态化检测，设计缺陷演化数据库，预测缺陷发展趋势，实现预防性运维。在报废阶段，则凭借检测技术，判定绝缘子剩余寿命，筛选报废产品，避免过度更换与带病运行。与此同时，还要积极整合检测结果，迭代优化感知设备、AI模型，提升技术适配性与专业性^[4]。

三、案例验证

（一）案例概况

为验证上述方法的可行性与适用性，文章将以某省级电网

220kV 高压输电线路作为研究对象，根据实际调查发现，该线路全长126km，累计部署轻量化硅橡胶复合绝缘子826串，途经山区、重污秽区域，缺陷发生率较高。以往在采用传统人工巡检时，年均发现缺陷32处，漏检率超过25%，且巡检周期较长、成本支出偏高。为此，经技术团队综合讨论后，决定本次采用本文提出的轻量化绝缘子缺陷检测技术应用路径，累计部署无人机巡检模块3套、传感器46套，并基于人工智能算法、云计算、数据库，搭建了云端运维管理平台，开展为期6个月的工程验证。

（二）技术实施流程

具体技术应用路径表现为：前端感知设备部署，制定无人机巡检航线，每日自动巡检2条线路，传感器执行24小时实时监测任务；搭建边缘预处理与传输系统，保证数据的实时交互与回传；部署轻量化 AI 识别模型，完成专属数据集训练与端云协同调试；对接电网运维平台，构建分级预警机制；打造周期台账，同步优化运维流程。

（三）检测效果与性能分析

经6个月工程验证后，发现该技术路径可以完成全覆盖检测，共检出各类缺陷97处，缺陷检出率达96.2%，漏检率降至2.1%。而危急缺陷预警延时始终控制在5分钟以内，年均运维成本降低62%，巡检效率提升近8倍。由此可见，相较于传统检测技术来说，该路径对轻量化绝缘子微裂纹等隐藏缺陷的识别能力更高，可完全契合高压输电线路运维需求。

四、结论

综上所述，通过对高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术的实现路径开展分析讨论，借助前端轻量化感知部署，保证信号完整采集。依靠数据传输机制与边缘预处理，完成数据高效流转，提取缺陷特异性特征。结合 AI 缺陷识别模型，明确缺陷类型、位置。搭配缺陷分级预警与运维策略，维持输电线路的安全使用，显著提升输电线路安全水平。

参考文献

- [1] 韩旭，武警，吕肖飞.融合上下文信息的无监督图像重建绝缘子缺陷检测方法[J].信息化研究，2025,51(06):191-194.
- [2] 江浩田，任柳清，潘雄，等.基于 ResNeSt 和 RPN 的绝缘子缺陷检测方法[J].中国新技术新产品，2025,(14):17-20.
- [3] 刘梓良，尼鹿帕尔·艾克木，伊力哈木·亚尔买买提，等.面向嵌入式设备的绝缘子缺陷检测算法研究[J].电子测量技术，2025,48(14):74-85.
- [4] 陈永，安卓奥博，周建宇.基于扩散模型检测的高铁接触网绝缘子缺陷语义描述方法[J].电工技术学报，2025,40(13):4100-4111.