

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Jian Zhao

Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological
Survey

Editorial Board Member

Jinze Fu

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

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

目录CONTENTS

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第8期 2025年8月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

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

网址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

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

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

- | | | |
|-----|---|--|
| 001 | 退耕还林还草工程对坡耕地土壤侵蚀与产流影响评估
Evaluation of the Impact of the Grain for Green Project on Soil Erosion
and Runoff Generation on Sloping Farmland | 钱昆
Qian Kun |
| 004 | 电控式吊具防摇功能的实现和对效率的影响
Realization of Anti-Sway Function of Electronically Controlled
Sling and Its Impact on Efficiency | 耿协东, 余智伟
Geng Xiedong, Yu Zhiwei |
| 007 | 高硫煤机组采用双塔串联脱硫系统的运行能耗分析与研究
Energy Consumption Analysis and Research on Dual-tower Series
Desulfurization System for High-sulfur Coal units | 白关锁
Bai Guansuo |
| 010 | 乡村振兴背景下小型水利工程管护策略研究
Research on Management and Maintenance Strategies of Small Water
Conservancy Projects in Rural Revitalization | 吴志宇
Wu Zhiyu |
| 013 | 水利水电工程河道治理存在的问题与管理措施研究
Research on Problems and Management Measures in River Channel Regulation for
Water Resources and Hydropower Engineering | 程文镖
Cheng Wenbiao |
| 017 | 水利水电工程的安全生产
与应急管理模式
Safety Production and Emergency Management Mode in Water Resources and
Hydropower Engineering | 张双林, 贺欣, 陈飞, 胥照, 倪一品
Zhang Shuanglin, He Xin, Chen Fei, Xu Zhao, Ni Yipin |
| 020 | 江西省高安市良山生态清洁小流域建设成效
Construction Achievements of the Genshan Ecological and Clean
Small Watershed in Gao'an City, Jiangxi Province | 张小生
Zhang Xiaosheng |
| 023 | 水利工程施工中环境保护与可持续发展的平衡研究
Research on the Balance Between Environmental Protection and Sustainable
Development in Water Conservancy Project Construction | 陈见青
Chen Jianqing |
| 026 | 水利工程中电气控制系统可靠性提升技术研究
Research on the Technology for Enhancing the Reliability of Electrical
Control Systems in Water Conservancy Projects | 宋杰
Song Jie |
| 029 | 水利工程中混凝土裂缝成因及防治措施研究
Research on the Causes and Preventive Measures of Concrete Cracks
in Hydraulic Engineering | 樊龙飞
Fan Longfei |
| 032 | 水利工程智能灌浆技术深度剖析与创新应用研究
In-depth Analysis and Innovative Application Research on Intelligent Grouting
Technology in Water Conservancy Projects | 赵曙繁, 曹学锐
Zhao Shufan, Cao Xuerui |
| 036 | 水利工程施工质量控制技术与管理
Quality Control Technology and Management of Hydraulic
Engineering Construction | 葛琳
Ge Lin |
| 039 | 水利工程施工中的施工技术和工程质量的保障措施
Construction Technology and Quality Assurance Measures in
Hydraulic Engineering Construction | 王建伟
Wang Jianwei |
| 042 | 水力平衡阀流动与阻力特性实验研究
Experimental Study on Flow and Resistance Characteristics
of Hydraulic Balancing Valves | 胡洪, 张伟程, 张博涵
Hu Hong, Zhang Weicheng, Zhang Bohan |

046	电力现货交易市场中的风险管理与对策研究 Research on Risk Management and Countermeasures in Spot Electricity Trading Market	刘涛 Liu Tao
049	基于化学 – 力学耦合损伤的高拱坝地震响应分析 Seismic Response Analysis of High Arch Dam Based on Coupled Chemo-mechanical Damage	杨景文, 王欢 Yang Jingwen, Wang Huan
054	灌区规划中新增耕地后备资源分析 Analysis of New Cultivated Land Reserve Resources in Irrigation District Planning	路豪杰 Lu Haojie
057	水利水电工程 EPC 总承包模式下的设计施工融合与风险管控实践 Design Construction Integration and Risk Control Practice under the Epc General Contracting Mode of Water Conservancy and Hydropower Engineering	李四发, 赵曙繁 Li Sifa, Zhao Shufan

退耕还林还草工程对坡耕地土壤侵蚀与产流影响评估

钱昆

景德镇市水控规划设计有限公司, 江西 景德镇 333000

DOI:10.61369/WCEST.2025080001

摘 要： 退耕还林还草工程是我国土地退化治理的重要措施之一，旨在改善生态环境、减少土壤侵蚀、提高水土保持能力。本文通过对坡耕地的退耕还林还草工程实施情况进行评估，探讨其对土壤侵蚀和产流的影响。通过实地调查和数据分析，结果表明，退耕还林还草显著降低了坡耕地的土壤侵蚀强度和产流量。具体来说，植被恢复程度、坡度以及管理措施等因素对土壤侵蚀和产流的影响较为显著。最后，本文提出了优化退耕还林还草工程的建议，以进一步提升其水土保持效益。

关 键 词： 退耕还林还草；坡耕地；土壤侵蚀；产流；水土保持

Evaluation of the Impact of the Grain for Green Project on Soil Erosion and Runoff Generation on Sloping Farmland

Qian Kun

Jingdezhen Water Control Planning and Design Co., Ltd., Jingdezhen, Jiangxi 333000

Abstract： The Grain for Green Project is one of the crucial measures for addressing land degradation in China, aiming to improve the ecological environment, reduce soil erosion, and enhance soil and water conservation capabilities. This paper evaluates the implementation of the Grain for Green Project on sloping farmland and explores its impact on soil erosion and runoff generation. Through field investigations and data analysis, the results indicate that the project has significantly reduced soil erosion intensity and runoff volume on sloping farmland. Specifically, factors such as the degree of vegetation restoration, slope gradient, and management practices have notable effects on soil erosion and runoff generation. Finally, this paper proposes recommendations for optimizing the Grain for Green Project to further enhance its soil and water conservation benefits.

Keywords： Grain for Green Project; sloping farmland; soil erosion; runoff generation; soil and water conservation

引言

坡耕地因其陡坡、裸露的土壤层和不合理的耕作方式，长期受到土壤侵蚀的困扰，导致水土流失严重。我国近年来实施了退耕还林还草工程，以减少水土流失、改善生态环境。该工程通过退耕、种植林草，恢复植被覆盖，达到防止土壤侵蚀和减少产流的目的。尽管该工程已在多个地区取得了一定的成效，但其对土壤侵蚀与产流的具体影响仍存在较大差异。本文通过对相关区域的实地调查和数据分析，评估退耕还林还草工程在不同条件下对坡耕地土壤侵蚀与产流的影响，并提出相应的改进措施。

一、退耕还林还草工程概述

（一）工程背景与政策支持

退耕还林还草工程是中国为解决严重的水土流失和生态环境退化问题，实施的一项重要生态保护与修复工程。我国许多地区，尤其是丘陵、山区，长期以来受限于过度耕作和不合理的土地利用，导致了土壤侵蚀严重、植被覆盖率低、生态环境恶化。为了改善这些问题，国家在1999年启动了退耕还林还草工程，旨在通过减少耕地面积，恢复植被覆盖，达到减少水土流失、改

善生态环境的目标。政策上，国家通过资金补贴、税收优惠等措施，鼓励农民将不适宜耕种的坡耕地退耕转为林地或草地，并提供技术指导与支持。随着工程的推进，政策也不断调整与优化，特别是在地方政府的具体实施过程中，加强了与农民的合作与培训，确保了工程的顺利进行。

（二）工程实施的主要措施

退耕还林还草工程的实施涉及多项技术和管理措施，旨在有效恢复生态系统并减少水土流失。首先，在植被种植方面，工程根据不同区域的气候、土壤类型及生态需求，选择适宜的植物进

行种植。为了迅速恢复地表植被覆盖度，通常选择速生树种或耐旱草种，这些植物不仅能够快速适应当地环境，还能有效提高土壤的稳定性。林草植被的恢复在减缓水土流失、提升生态环境质量方面发挥着关键作用。其次，土地平整与水土保持措施也是实施的重要内容。坡耕地由于其特殊的地形条件，容易遭受水土流失，因此工程通过对坡耕地进行适当的土地平整，降低坡地的坡度，减少水流的冲刷，进而提高土地利用率并减少水土流失。除此之外，还需要采取一系列水土保持工程措施，如修建梯田、石埂等，通过改变水流的流动方向和速度，减少水流对土壤的直接冲刷，从而有效保护土壤^[1]。

（三）工程的生态环境目标

退耕还林还草工程的主要生态环境目标是改善水土保持状况，恢复退化土地的生态功能，推动生态环境的可持续发展。通过植被恢复，工程增强了坡地的水土保持能力，能够有效减少因雨水冲刷带来的土壤流失，降低水土流失的风险，从而提高土地的生产力和稳定性。植被的恢复不仅有助于防止水土流失，还能够改善土壤结构，增强土壤的水分保持能力和透气性，为农业生产创造更好的条件。此外，退耕还林还草工程还致力于生态系统的修复与生物多样性的提升。通过恢复原生植被，提供更多栖息地，改善了当地动植物的生存环境，有助于维护生态平衡，促进物种多样性的回升。该工程还通过增加森林和草地的碳固定能力，起到缓解气候变化的作用，进一步增强了生态系统的稳定性和自我调节能力。

二、退耕还林还草对坡耕地土壤侵蚀的影响

（一）土壤侵蚀的基本概念

土壤侵蚀是指土壤因外部自然或人为因素的作用，被水流、风力等搬运走的过程。在坡耕地上，土壤侵蚀主要由降水、地表径流、风力及人为活动引起。坡地的坡度和土壤类型是影响土壤侵蚀的重要因素。降水量、降水强度及降水的持续时间对土壤侵蚀有直接影响，大雨会导致大量水流侵蚀土壤表层。坡度较大的坡地上，水流冲刷作用更为显著，且土壤的流失速率较快。坡耕地由于长期的耕作、施肥及过度开垦，土壤结构常被破坏，导致其抗侵蚀能力下降。土壤侵蚀的危害极为严重，不仅导致土壤肥力下降，还会引发水土流失、减少农田产量，甚至影响下游水质，带来生态与经济的双重损失^[2]。

（二）退耕还林还草对土壤侵蚀强度的影响

退耕还林还草工程通过恢复植被覆盖度来减少土壤侵蚀强度。研究表明，植被覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响显著，植被越密集，土壤侵蚀的强度越低。植被能够有效拦截雨滴，减少雨滴对土壤表面的直接冲击，降低水流的速度，从而减缓水土流失。不同的植被类型对土壤侵蚀的影响不同。例如，草地比裸土或低覆盖度的林地更有效地减少侵蚀。研究数据表明，植被覆盖率达到60%以上的坡耕地，土壤侵蚀强度通常会降低50%以上。此外，合理的土地管理措施，如修建梯田、增加土壤有机质含量，也能显著减缓土壤侵蚀。退耕还林还草的具体实施中，通过

选择适应性强的植物种类，并结合水土保持措施，能够有效降低坡耕地的土壤侵蚀^[3]。

（三）土壤保护效果分析

退耕还林还草工程在坡耕地上的土壤保护效果显著。植被恢复后，坡耕地的土壤侵蚀强度明显下降，土壤的结构逐步恢复，抗侵蚀能力提高。具体表现为，植被的根系有助于稳定土壤颗粒，减少表层土壤的流失，并通过增加土壤有机质改善土壤结构，从而提高土壤的水分保持能力和透气性。此外，植被的覆盖还能提高坡地的降水渗透性，减少地表径流量，进而降低因径流引起的侵蚀风险。研究数据显示，在实施退耕还林还草工程后的数年内，土壤侵蚀率普遍下降，部分地区的水土保持效果达到预期目标。总体来看，该工程不仅在减少水土流失方面取得了良好的效果，还在提升土壤质量、恢复生态功能方面发挥了积极作用，为坡耕地的可持续发展提供了重要保障^[4]。

三、退耕还林还草对坡耕地产流的影响

（一）产流的定义与影响因素

产流是指降水过程中，部分水分未被土壤吸收而在地表流动，形成地表径流的现象。特别在坡耕地，由于其地表土壤松散、疏松且坡度较大，降水后水分更容易形成地表径流，尤其是在降雨强度较大或连续降水的情况下，产流现象尤为显著。产流的形成过程受到多个因素的共同影响。降水量是最直接的影响因素，降水量越大，降水滞留在地表的时间越长，渗透到土壤中的水分就越少，导致更多水分沿地表流动，增加了产流量。坡度也是一个重要因素，坡度越陡，水流的流速越快，地表径流的产生量就越大，尤其在坡度较大的地方，水流冲刷作用强烈，造成水土流失。而土壤的性质，如土壤的渗透性和容水能力，对产流的影响也至关重要。土壤的颗粒结构和含水量越低，渗透性就越差，水分不易被土壤吸收，更多水分在地表形成径流。相反，土壤颗粒较大或渗透性较强时，水分能够迅速渗透到土壤中，从而减少了产流量。因此，降水量、坡度和土壤性质等因素共同决定了产流的强度与规模。

（二）退耕还林还草对产流量的影响

退耕还林还草工程通过增加植被覆盖，显著降低坡耕地的产流量。植被能够有效地减缓降水对土壤的冲击，增加水分的蒸发与吸收，从而减少地表径流的形成。在实施退耕还林还草工程后，植被恢复了坡地的自然水文过程，尤其是在降水较多的季节，植被覆盖能够显著减少产流量。研究表明，退耕还林还草区域的降水后径流量相比未处理区域降低了约40%–60%^[5]。植被恢复的过程中，树木和草本植物通过根系的作用增强了土壤的渗透性，使得降水更多地渗入土壤，而不是通过地表径流流失^[6]。同时，植被覆盖的增加也减少了水流的速度，有助于减缓径流的冲刷作用，降低水土流失的风险。结合土壤性质来看，土壤的有机质含量和结构得到改善后，水分的渗透性增强，进一步减少了地表产流。

（三）植被与产流量之间的关系

植被恢复对坡耕地产流量的调节作用显著，主要体现在植被

覆盖度和植被类型的选择上。植被的根系能够增加土壤的孔隙度和渗透性，从而减少水流在地表的流动。高密度的植被覆盖能够有效拦截降水，减少雨滴直接冲击土壤表面，降低土壤被侵蚀的可能性。同时，植被的蒸腾作用增加了土壤的水分消耗，进一步减少了径流量的生成。在植被类型方面，不同类型的植被对产流量的调节作用有所不同^[7]。例如，草地的覆盖对于减少径流较为显著，因为草本植物的根系网状结构在保水和增加土壤渗透性方面有较强的作用。而树林则在减少产流的同时，还能通过较大的树冠拦截降水，减缓降水的冲击。因此，合理选择适合本地气候和土壤条件的植被类型，是确保退耕还林还草工程对产流调节效果的重要因素。

四、退耕还林还草工程的优化措施与建议

（一）工程实施中的问题与挑战

退耕还林还草工程在实施过程中面临着多方面的挑战和问题。首先，管理难度较大，尤其是在大规模的区域性实施中，如何有效管理和监督各地的工程进展成为一大难题。地方政府和农民的参与程度不一，导致工程的执行效果存在差异。一些地区由于缺乏足够的技术支持和培训，未能正确选择适合的植被，或未能按时进行后期管理和养护，从而影响了植被恢复效果。其次，资金投入是另一个亟待解决的问题。尽管政府提供了初期的补贴和资金支持，但长期的资金持续投入仍然不足，尤其是在边远山区，资金的不足使得后期的养护和管理困难重重。再者，土壤条件的差异以及气候变化等不可控因素，也使得部分地区的植被恢复面临困难，导致水土保持效果不尽如人意。

（二）优化措施：技术与管理双管齐下

为了提高退耕还林还草工程的效果，必须采取科学的技术手段和合理的管理措施双管齐下。首先，在技术方面，应根据不同地区的气候、土壤和水文条件，科学选择植被种类和品种。例如，对于干旱地区，可以选择耐旱、抗风沙的植物；而在湿润地区，可以选择适应性强且有较好生态功能的本土树种和草种。此

外，应加强植被恢复的质量管理，确保植被的成活率和生长质量，避免单纯的数量扩张而忽视了质量的提高。其次，在管理方面，应加强工程实施的全过程监督，尤其是后期的养护管理工作，确保植被在恢复初期得到充分的保护。同时，建立长期的监测和评估机制，定期对植被恢复效果、水土保持效果进行检查和评估，及时调整策略^[8]。此外，应加强技术培训和政策宣传，提高农民和地方政府对工程的认知和参与度，使其积极投入到后期的管理和养护中。

（三）政策建议与可持续发展

从政策层面看，为了推动退耕还林还草工程的可持续发展，应进一步完善政策框架，并加大政策执行力度。首先，政府应加大资金投入和政策支持，特别是对边远山区和贫困地区的支持力度，可以通过设立专项资金，鼓励地方政府和农民参与工程的长期管理。其次，应推动社会资本和非政府组织的参与，通过多元化的资金来源和合作方式，减轻政府财政负担，提高工程的可持续性。此外，应加强政策的稳定性和长期性，避免因政策调整频繁导致地方政府或农民的信心动摇。最后，政策应注重生态效益与经济效益的结合，鼓励农民和地方政府在工程实施过程中探索与发展生态农业、生态旅游等可持续的经济模式，使生态保护与地方经济发展相辅相成，促进退耕还林还草工程的长效管理和可持续发展。

五、结语

退耕还林还草工程在改善生态环境、减少土壤侵蚀和产流方面取得了显著成效，但在实施过程中仍面临管理难度、资金不足和技术支持等挑战。为了进一步提高工程效果，应加强植被恢复质量、合理选择植物种类并完善后期管理。此外，政策支持与资金投入是推动该工程可持续发展的关键，政府应加大投入并完善相关政策，以实现生态保护与经济发展的双赢。通过技术与管理的双重优化，退耕还林还草工程将在促进生态文明建设中发挥更大作用。

参考文献

- [1] 李金梦, 祝宏辉, 胡芳榕, 等. “退耕还林还草”工程对干旱区生态系统服务的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(05): 298–307. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2025.05.006.
- [2] 王登绩. 内蒙古黄河南岸退耕还林还草区植被演变及其蒸散动态研究[D]. 内蒙古师范大学, 2025. DOI: 10.27230/d.cnki.gnmsu.2025.000038.
- [3] 李培, 蔡竹欣, 许文超. 总量目标型专项转移支付项目的执行偏向研究——以退耕还林工程为例[J]. 财贸经济, 2025, 46(03): 23–40. DOI: 10.19795/j.cnki.cn11-1166/f.2025.03.005.
- [4] 胡超, 凌仕全, 董加云. 退耕还林还草工程提质增效对策建议[J]. 林草政策研究, 2024, 4(04): 94–99.
- [5] 张谱, 易媛媛, 徐晋涛. 我国退耕还林还草工程实施后林草用地变化的时空特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(06): 1107–1122. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2024.081.
- [6] 赵彦伍. 山西省退耕还林还草工程提质增效探析[J]. 山西林业, 2024, (04): 10–11.
- [7] 安健吉, 员学锋, 杨悦, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(04): 2410–2427. DOI: 10.13227/j.hjks.202404097.
- [8] 谭志辉, 杨文静, 单凤娇, 等. 退耕还林工程实施效益、问题及对策建议——以阿坝州为例[J]. 四川农业科技, 2024, (03): 127–130.

电控式吊具防摇功能的实现和对效率的影响

耿协东, 余智伟

武汉港集装箱有限公司, 湖北 武汉 430415

DOI:10.61369/WCEST.2025080002

摘 要 : 在现代化工业生产中, 起重机械作为物料搬运的核心设备, 其运行效率和安全性直接关系到生产流程的连续性和人员设备的安全。吊具作为起重机械的关键部件, 其动态特性, 尤其是摇摆问题, 长期以来一直是制约起重作业效率和安全性的重要因素。传统的机械防摇方法虽然在一定程度上缓解了吊具摇摆, 但存在调整复杂、效果有限等缺点。随着电子技术和控制理论的快速发展, 电控式吊具防摇功能应运而生, 为解决吊具摇摆问题提供了更为高效、灵活的技术手段。本文旨在全面分析电控式吊具防摇功能的实现原理、实施方式及其对起重作业效率的影响, 并展望其未来发展趋势, 为相关领域的研究和实践提供参考。

关 键 词 : 电控式吊具; 防摇功能; 效率影响; 控制策略

Realization of Anti-Sway Function of Electronically Controlled Sling and Its Impact on Efficiency

Geng Xiedong, Yu Zhiwei

Wuhan Port Container Co., LTD., Wuhan, Hubei 430415

Abstract : In modern industrial production, lifting machinery serves as the core equipment for material handling, and its operational efficiency and safety are directly related to the continuity of production processes and the safety of personnel and equipment. As a key component of lifting machinery, the dynamic characteristics of lifting slings, especially the swinging problem, have long been an important factor restricting the efficiency and safety of lifting operations. Although traditional mechanical anti-sway methods have alleviated the swinging of lifting slings to some extent, they have drawbacks such as complex adjustments and limited effectiveness. With the rapid development of electronic technology and control theory, electronically controlled anti-sway functions for lifting slings have emerged, providing a more efficient and flexible technical means to solve the problem of sling swinging. This paper aims to comprehensively analyze the implementation principles, methods, and impact on lifting operation efficiency of electronically controlled anti-sway functions for lifting slings, and to preview their future development trends, providing a reference for research and practice in related fields.

Keywords : electronically controlled lifting device; anti-sway function; efficiency impact; control strategy

一、电控式吊具防摇功能的实现

(一) 防摇功能的工作原理

电控式吊具防摇功能的核心在于通过精确的电气控制系统实时监测并调整吊具的运动状态, 以减小或消除吊具的摇摆。该系统通常由传感器、控制器和执行机构三大部分组成, 各部分协同工作, 共同实现防摇效果。传感器: 传感器是电控防摇系统的“眼睛”, 负责实时检测吊具的摆动情况。常用的传感器包括加速度计、陀螺仪和位置传感器等。加速度计用于测量吊具的加速度变化, 陀螺仪用于检测吊具的角速度和方向, 而位置传感器则用于精确测定吊具的空间位置。这些传感器能够高精度地捕捉吊具的动态特性, 为后续的控制提供准确的数据支持。控制器: 控制

器是电控防摇系统的“大脑”, 根据传感器反馈的数据, 运用先进的控制算法计算出需要调整的起重机运行参数(如速度、加速度)和吊具姿态, 以抵消或减小吊具的摇摆。常用的控制算法包括PID控制、模糊控制、神经网络控制等。PID控制以其简单、可靠的特点广泛应用于工业控制领域; 模糊控制则能够根据实际情况自动调整控制参数, 适用于复杂多变的工况; 神经网络控制则具有强大的非线性映射能力, 能够自适应复杂多变的工况^[1]。执行机构: 执行机构是电控防摇系统的“手脚”, 根据控制器的指令调整起重机的运行状态和吊具的姿态。常见的执行机构包括变频器、伺服电机和液压缸等。变频器通过调整电机的频率和电压来控制电机的转速和转矩, 从而实现起重机的平稳运行; 伺服电机则具有高精度、高响应的特点, 能够精确执行控制器的指令;

液压缸则通过液压传动来实现吊具的姿态调整。

（二）防摇功能的实施方式

（1）基于运动学方程的控制

原理：通过建立精确的数学模型来描述吊具的运动特性，利用运动学方程预测吊具的未来状态，并据此调整起重机的运行参数以抵消摇摆^[2]。优点：控制精度高，适用于对控制精度要求较高的场合，如精密装配线、高价值货物搬运等。缺点：数学模型复杂，计算量大，对系统硬件要求较高。此外，模型的准确性也受到多种因素的影响，如吊具的负载变化、环境风速等。

（2）基于模糊逻辑的控制

原理：利用模糊集合和模糊规则来描述吊具摇摆与控制参数之间的复杂关系，通过模糊推理实现控制参数的自动调整。模糊逻辑控制不需要建立精确的数学模型，而是根据经验规则进行推理和决策。优点：无需建立精确的数学模型，能够根据实际情况自动调整控制参数，适用于复杂多变的工况，如户外作业、多风环境等。此外，模糊逻辑控制还具有较强的鲁棒性和抗干扰能力^[3]。缺点：控制精度相对较低，需要依赖经验丰富的工程师进行规则设计。此外，模糊规则的制定和调整也需要一定的时间和经验积累。

（3）基于神经网络的控制

原理：利用神经网络强大的非线性映射能力，通过训练学习吊具摇摆与控制参数之间的关系，实现控制参数的智能调整。神经网络控制能够自适应复杂多变的工况，通过不断学习和优化来提高控制精度和效率。优点：能够自适应复杂多变的工况，控制精度高。此外，神经网络控制还具有较强的泛化能力和鲁棒性，能够处理未知或不确定的输入信息。缺点：需要大量的训练数据和计算资源，训练过程可能较为复杂^[4]。此外，神经网络的性能也受到网络结构、训练算法等多种因素的影响。

（三）防摇功能的实际应用案例分析

在实际应用中，电控式吊具防摇功能已经取得了显著的效果。在集装箱码头作业中，吊具在小车移动过程中会产生不受控制的晃动，对于采用4绳钢丝绳的吊具，其晃动受惯性影响更为明显，在装卸过程中存在安全隐患，可能导致集装箱碰撞，砸坏车头、平板，集装箱箱损等问题，引入电控式吊具防摇系统，可有效防范上述问题。系统采用基于模糊逻辑的控制策略，结合高精度传感器和执行机构，实现了对吊具摇摆的实时监测和精确控制。具体来说，系统通过加速度计和陀螺仪实时检测吊具的摆动幅度和速度，控制器根据检测数据运用模糊逻辑算法计算出需要调整的起重机运行参数（如速度、加速度），并通过变频器和伺服电机执行调整指令，使吊具的运动轨迹趋于平稳。实施效果：改造后，起重机的搬运效率显著提高。吊具的摇摆幅度和时间大幅减少，操作人员可以更加准确地控制吊具的位置和姿态，减少了调整时间和操作难度^[5]。同时，由于吊具的稳定性增强，物料损坏和人员伤害的风险也显著降低。此外，系统的引入还降低了设备的磨损和维护成本，提升了作业的安全性。据企业统计，改造后起重机的作业效率提高了约20%，维护成本降低了约15%，安全事故率下降了约30%。

二、电控式吊具防摇功能对效率的多维度影响

（一）提高作业效率

电控式吊具防摇功能通过减少吊具的摇摆，显著提高了起重作业的效率。

具体表现在吊具摇摆的减少使得起重机能够更快速地完成物料的起升、移动和下降等动作，从而缩短了整个搬运周期。例如，在集装箱吊装过程中，采用吊具防摇装置能够极快稳定吊具的晃动，缩短小车移动和吊具对位的时间，可提高集装箱装卸效率约30%。减少调整时间：由于吊具的稳定性增强，操作人员可以更加准确地控制吊具的位置和姿态，减少了因吊具摇摆而需要的调整时间和操作难度。在传统的机械防摇方法中，操作人员需要花费大量时间来调整吊具的姿态以减小摇摆；而在电控防摇系统中，这一过程被大大简化，操作人员可以更加专注于物料的搬运任务^[6]。提高作业连续性：电控防摇系统的引入减少了因吊具摇摆导致的作业中断和事故风险，提高了作业的连续性和稳定性。在传统的机械防摇方法中，吊具的摇摆可能导致物料掉落或设备损坏，从而引发作业中断；而在电控防摇系统中，这些问题被有效避免，作业过程更加顺畅和高效。

（二）降低维护成本

电控式吊具防摇功能通过减少吊具的摇摆，有效降低了设备的维护成本。具体表现在以下几个方面：①吊具摇摆的减少降低了设备各部件之间的机械应力和摩擦，延长了设备的使用寿命。在传统的机械防摇方法中，吊具的摇摆会导致设备各部件之间的频繁碰撞和磨损；而在电控防摇系统中，这一问题被有效缓解，设备的使用寿命得到延长。②由于设备的稳定性增强，维护人员可以更加容易地进行设备的检查和维护工作，减少了维护时间和复杂度。在传统的机械防摇方法中，维护人员需要花费大量时间来检查和调整设备以减小摇摆；而在电控防摇系统中，这一过程被大大简化，维护人员可以更加专注于设备的日常保养和故障排除。③设备磨损的减少降低了备件消耗和更换频率，进一步降低了维护成本。在传统的机械防摇方法中，吊具的摇摆会导致设备各部件的频繁更换；而在电控防摇系统中，这一问题被有效缓解，备件的消耗和更换频率得到降低。

（三）提升作业安全性

作业安全性是起重作业中不可忽视的重要因素。电控式吊具防摇功能通过减少吊具的摇摆，显著提升了作业的安全性。具体表现在以下几个方面：①降低物料掉落风险^[7]。吊具摇摆的减少降低了物料在搬运过程中掉落的风险，保障了物料和设备的安全。②减少人员伤害风险。吊具摇摆的减少还降低了操作人员和其他工作人员因吊具摇摆而受到伤害的风险，保障了人员的生命安全。③提高应急响应能力。在紧急情况下，如突发风力增大或设备故障，电控防摇系统能够迅速响应，通过调整控制参数来抑制吊具的摇摆，防止事故的发生或扩大。这种快速的应急响应能力，是传统机械防摇方法难以比拟的，它极大地提升了作业现场的整体安全性。

三、电控式吊具防摇技术的挑战与解决方案

（一）传感器精度与可靠性问题

传感器作为电控防摇系统的“眼睛”，其精度和可靠性直接影响到系统的控制效果。然而，在实际应用中，传感器可能会受到环境干扰、老化等因素的影响，导致测量数据不准确或失效。为了解决这个问题，可以采取以下措施：选用高精度、高可靠性的传感器：在选购传感器时，应选择知名品牌、质量可靠的产品，并确保其满足系统的精度和可靠性要求。定期校准和维护传感器：定期对传感器进行校准和维护，确保其测量数据的准确性^[8]。同时，还应建立传感器的故障预警机制，及时发现并处理传感器故障。采用冗余设计：在关键部位采用冗余传感器设计，当某个传感器出现故障时，系统可以自动切换到备用传感器，确保系统的正常运行。

（二）控制算法优化问题

控制算法作为电控防摇系统的“大脑”，其性能直接影响到系统的控制效果。然而，随着工况的变化和吊具负载的不同，控制算法可能需要不断调整和优化。为了解决这个问题，可以采取以下措施：采用自适应控制算法：自适应控制算法能够根据工况的变化和吊具负载的不同，自动调整控制参数，实现最优控制效果。

引入智能优化算法：如遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，可以对控制参数进行全局优化，提高系统的控制性能。建立控制算法库：针对不同的工况和吊具负载，建立相应的控制算法库。在实际应用中，系统可以根据当前工况和负载情况，自动选择最合适的控制算法进行控制。

（三）系统集成与兼容性问题

电控防摇系统作为起重机控制系统的一部分，需要与其他系统（如自动导航系统、远程监控系统等）进行集成和协同工作。然而，由于不同系统之间的接口标准和通信协议可能存在差异，导致系统集成和兼容性问题。为了解决这个问题，可以采取以下措施：制定统一的接口标准和通信协议：在系统设计阶段，应制定统一的接口标准和通信协议，确保不同系统之间能够无缝集成和协同工作。采用中间件技术：中间件技术可以实现不同系统之间的数据交换和通信，解决系统集成和兼容性问题。进行系统联调与测试：在系统集成完成后，应进行全面的联调与测试，确保

各系统之间的协同工作正常、稳定。

四、电控式吊具防摇技术的未来发展趋势

（一）智能化发展

结合人工智能和机器学习技术，电控防摇系统将具备更强的自适应能力和学习能力。系统能够根据历史数据和实时数据，自动调整控制参数和策略，实现更优的控制效果^[9]。同时，系统还能够对吊具的运行状态进行智能诊断和预测，提前发现潜在故障并进行处理，提高系统的可靠性和稳定性。

（二）集成化发展

未来，电控防摇系统将与其他起重机控制系统进行更紧密的集成，形成一体化的控制系统。这将有助于实现起重机的全面智能化和自动化，提高作业效率和安全性^[10]。同时，集成化的发展还将促进起重机与其他物流设备的协同工作，实现物流作业的全程自动化和智能化。

（三）标准化和模块化发展

为了推动电控防摇技术的普及和应用，未来该技术将朝着标准化和模块化的方向发展。通过制定统一的标准和规范，可以降低系统的研发和制造成本，提高系统的通用性和可维护性。同时，模块化的设计也将使得系统的升级和扩展更加便捷和灵活。

（四）绿色化发展

随着环保意识的不断提高，未来电控防摇技术也将注重绿色化发展。通过优化控制算法和采用节能技术，降低系统的能耗和排放，减少对环境的影响。同时，绿色化的发展还将促进电控防摇技术与可再生能源的结合，实现更加环保和可持续发展。

五、结论

电控式吊具防摇功能显著提升了起重作业的安全性及效率，通过精确电气控制与先进策略减少摇摆，增强作业稳定性和准确性，同时降低维护成本、优化人力资源配置并促进智能化管理。但该技术也面临传感器精度、控制算法优化及系统集成等挑战。未来，随着电子技术和控制理论发展，电控防摇技术将更趋智能化、集成化等，相关企业与研究机构应加强合作，共同推动其发展，为工业自动化、智能化贡献力量。

参考文献

- [1] 王金龙, Alena Pevcheva. 新型智能井电控式井下流量控制阀设计 [J]. 新疆石油天然气, 2025, 21 (02): 73–81.
- [2] 王振涛, 梁亚南. 电机控制系统对电控硅油离合器风扇的影响因素及可靠性分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14 (07): 99–101.
- [3] 吕征, 李森, 张炼, 等. 商用车电控空气干燥器系统仿真分析及应用 [J]. 汽车工程师, 2024, (01): 30–36.
- [4] 曹曦文. 单起升岸桥双吊具上架通信链路冗余优化 [J]. 中国港口, 2025(10): 20–22.
- [5] 侯学祥, 解庆功, 陈国龙, 等. 多功能电磁吊具的设计及其应用. 科学技术创新 [J]. 2025(19): 66–69.
- [6] 耿丙念; 杨俊伟. 一种双机抬吊吊具的设计及应用. 设备管理与维修. 2025(13): 50–52.
- [7] 朱卫东. 江苏新龙港研发并制作的“一种高效率吊装装置”使装卸效率提高50%！获国家专利 [J]. 大陆桥视野, 2025(02): 15.
- [8] 张建. 岸边集装箱起重机吊具搁舱事故分析和预防措施 [J]. 港口装卸, 2024(06): 57–59.
- [9] 李维越. 起重机常用防摇系统分析 [J]. 起重运输机械, 2007(09): 51–53.
- [10] 卞永明; 黎光显; 金晓林. 集装箱吊具有阻尼 AMD 防摇装置的试验研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2007(03): 239–242+260.

高硫煤机组采用双塔串联脱硫系统的运行能耗分析与研究

白关锁

国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司, 内蒙古 锡林郭勒 026200

DOI:10.61369/WCEST.2025080003

摘 要 : 石灰石-石膏湿法脱硫工艺广泛应用于燃煤电厂, 脱硫系统能耗增加导致厂用电率降低。对于燃烧高硫煤的燃煤电厂, 这一影响更为显著。本文基于某 $2\times 660\text{MW}$ 超超临界机组, 对比分析了单塔与串联塔脱硫系统的运行能耗情况。结果表明: 相比于单塔脱硫系统, 串联塔脱硫系统在运行能耗方面优势明显, 满负荷工况下每年可节约运行成本932.4万元; 优化串联塔浆液循环泵配置也能够一定程度上降低脱硫系统的运行能耗。

关 键 词 : 石灰石-石膏湿法脱硫; 串联塔; 能耗; 烟气阻力

Energy Consumption Analysis and Research on Dual-tower Series Desulfurization System for High-sulfur Coal units

Bai Guansuo

Pithead Power Generation Branch of State Power Investment Corporation Limited Inner Mongolia Baiyinhua Coal Power Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia 026200

Abstract : The energy consumption of limestone-gypsum wet desulfurization system, which is widely used in coal-fired power plants, reduces the power supply efficiency of the power plant, especially for the high-sulfur coal-fired power plants. Based on the $2\times 660\text{MW}$ ultra-supercritical unit, this paper analyzed the energy consumption of the single absorption tower and series absorption towers desulfurization system. The results indicated that the series absorption towers desulfurization system has obvious advantages in terms of operating energy consumption compared with the single absorption tower desulfurization system, and at the full load condition, its annual operating cost could save about 9.324 million yuan. Meanwhile, optimizing the configuration of the slurry circulation pump could reduce the operating energy consumption of the desulfurization system.

Keywords : limestone-gypsum wet desulfurization; series absorption towers; energy consumption; flue gas pressure drop

引言

煤炭是我国主要能源之一^[1], 其燃烧过程产生的大量污染物对大气环境造成严重影响。尤其是近年来, 随着优质煤炭开采殆尽, 高硫煤在能源消费结构中占比不断提升^[2], 对大气环境的威胁不断加剧。为改善日益严重的大气环境污染问题, 多个关于大气污染物排放的政策和标准相继出台^{[3][4]}, 对燃煤电厂脱硫提出了更为严格的要求。

石灰石-石膏湿法脱硫是目前应用最为广泛的脱硫技术^{[1][2][5]}, 具有脱硫效率高、系统运行稳定、经济性良好等优点。然而, 湿法脱硫系统的运行需要持续耗能, 其总耗能量在电厂总发电量中占比可达 $1\sim 3\%$ ^{[2][6]}, 导致电厂煤耗增大, 加重了电厂运营压力^{[7][8][9]}, 脱硫系统的节能降耗是一个亟需解决的问题。本文通过对某 $2\times 660\text{MW}$ 超超临界机组脱硫系统进行研究, 对比单塔和串联塔湿法脱硫系统的能耗情况, 着重分析了关键设备能耗的影响因素, 并探讨了湿法脱硫双塔串联系统以及关键设备配置对系统节能降耗的影响。

一、研究对象及方法

(一) 能耗计算方法

脱硫系统中主要耗能设备按照运行状态可分为连续运行设备和间断运行设备^[10]。连续运行设备在脱硫系统投运时始终维持工作状态,主要包括浆液循环泵、氧化风机、增压风机(与引风机合并)、工艺水泵等;而间断运行设备在系统投运期间根据系统运行情况开启或关闭,如石灰石浆液泵和石膏排出泵等。

浆液循环泵对石膏浆液做功,使得浆液具备足够的压力运送至各喷淋层喷洒。脱硫系统浆液循环泵能耗计算公式如下:

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^n N_{cp,i} = \sum_{i=1}^n \frac{rgH_i Q_{cp,i} t_{cp,i}}{3.6 \times 10^6 \times 24 \times \eta_{cp,i}} \quad (2-1)$$

式中, N_{cp} 为脱硫系统浆液循环泵单日每小时平均电耗,单位 kWh/h; n 为系统中运行浆液循环泵的数量; $N_{cp,i}$ 为第 i 台浆液循环泵的单日每小时平均电耗,单位 kWh/h; ρ 为循环浆液密度,单位 kg/m^3 ; g 为重力加速度,单位 N/kg ; H_i 为第 i 台浆液循环泵的扬程,单位 m ; $Q_{cp,i}$ 为第 i 台浆液循环泵的流量,单位 m^3/h ; $t_{cp,i}$ 为第 i 台浆液循环泵单日运行小时数,单位 h ; $\eta_{cp,i}$ 为第 i 台浆液循环泵的效率。

脱硫系统新增的烟气阻力由引风机提供克服的动力。

$$N_{idf} = \sum_{i=1}^n N_{idf,i} = \sum_{i=1}^n \frac{VP_{idf,i} Q_{idf,i}}{3.6 \times 10^6 \times \eta_{idf,i}} \quad (2-2)$$

式中, N_{idf} 为脱硫系统引风机单日每小时平均电耗,单位 kWh/h; i 为脱硫系统中运行引风机的数量; $N_{idf,i}$ 为第 i 台引风机的单日每小时平均电耗,单位 kWh/h; $\Delta P_{idf,i}$ 为第 i 台引风机的全压升,单位 Pa ; $Q_{idf,i}$ 为第 i 台引风机的流量,单位 m^3/h ; $\eta_{idf,i}$ 为第 i 台引风机的效率。

脱硫系统总能耗可按下式进行计算:

$$N_{system} = N_{cp} + N_{idf} + N_{other} \quad (2-3)$$

式中, N_{system} 为脱硫系统单日每小时平均电耗,单位 kWh/h; N_{other} 为脱硫系统中其他设备单日每小时平均电耗,包括氧化风机、工艺水泵、除雾器冲洗水泵、石膏排出泵、石灰石浆液泵、集水坑泵以及各箱罐搅拌器等,单位 kWh/h。

(二) 研究对象

本文以某 $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界机组脱硫系统为研究对象,对比分析单塔和串联塔湿法脱硫工艺运行能耗。设计工况下,单台超超临界机组脱硫系统入口烟气流量为 $2311200\text{Nm}^3/\text{h}$ (湿基、实际氧),烟气温度 98.8°C , SO_2 浓度为 $5172\text{mg}/\text{Nm}^3$,脱硫系统出口烟气 SO_2 浓度不超过 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$,脱硫效率 99.6% 。

烟气在前塔与喷淋层浆液接触过程中会产生细小的浆液滴,如果不对烟气进行除雾,烟气夹带的浆液会带到前后塔之间的联络烟道,对其造成结垢、堵塞、腐蚀等问题,因此前塔设置了一级除雾器,除去烟气中的将液滴。串联塔湿法脱硫系统对前塔、后塔的 pH 值进行了分级,前塔 pH 值较后塔低,利于石膏结晶,因此石膏排出系统设置在前塔;后塔无石膏排出系统,为保证后

塔浆液池正常液位,后塔设置溢流管,浆液可通过溢流管溢流至前塔,后塔浆液池液位较前塔高 0.5m 左右。

二、运行能耗结果及分析

(一) 关键设备能耗分析

湿法脱硫系统总能耗中,浆液循环泵能耗占比最大,其次为克服系统阻力所需引风机新增能耗,两者之和明显大于其他设备能耗^[8]。

1. 浆液循环泵能耗

石灰石-石膏湿法脱硫反应过程中主要包括石灰石溶解、 SO_2 吸收、亚硫酸根氧化和石膏结晶等。这些过程的最佳反应 pH 值并不相同。其中,石灰石溶解、亚硫酸根氧化过程以及石膏结晶过程在 pH 值较低时更容易发生。经验表明石灰石的溶解速率与 pH 值呈指数增加关系,例如, pH 值为 4 的溶解速率比 pH 值为 6 时快 5 倍 [14]。pH 值在 $3.5 \sim 5.5$ 的范围内亚硫酸根的氧化速率较高,且变化不大, $\text{pH} > 5.5$ 时,氧化速率急剧下降,显然底 pH 值对亚硫酸根的氧化是有利的 [14]。

当 pH 值较高时,整个反应则以 SO_2 吸收过程为主。循环浆液的 pH 值越高吸收速率越高。理论分析表明,低 pH 值条件下烟气优先吸收 HCL 而非 SO_2 ,浆液 pH 值低于 2.2 时基本上无脱硫作用。对于喷淋吸收塔,在 pH 值为 $5.1 \sim 5.8$ 时,脱硫效率可从 $51\% \sim 93\%$,近似于 75° 的直线增长,当 pH 值大于 5.8 时,脱硫效率增加不明显,相反 CaCO_3 的溶解度降低,从而析出,会造成脱硫产物中过剩的 CaCO_3 比例急剧增加。提高循环浆液的 pH 值,一方面可提高循环浆液中溶解的碱性物质的浓度,另一方面也可提高未溶解的碱性物质的浓度,当其中已溶解的碱性物质耗尽时,未溶解的碱性物质及时溶解,从而保持循环浆液具有足够的碱度。当然,过高的 pH 值导致过高的过利率也是不经济的,而且也会影响到投资、能耗等因素,因此脱硫系统 pH 不宜高于 5.8。

对于单塔脱硫系统,上述反应过程均在一个塔内进行,故塔内 pH 值的设置需综合考虑脱硫效率、亚硫酸根的氧化反应、石灰石溶解、石膏结晶等因素, pH 值一般控制在 $5.2 \sim 5.6$ [14],系统脱硫效率无法达到最优。而串联塔湿法脱硫系统,对前塔、后塔的 pH 值进行了分级。前塔的 pH 值偏低,控制在 $5 \sim 5.4$,侧重于石灰石溶解、亚硫酸根氧化过程以及石膏结晶,提高石灰石利用率;后塔的 pH 值偏高,控制在 $5.4 \sim 5.8$,侧重于 SO_2 吸收反应,降低了系统液气比。因此,单塔脱硫的循环浆液量明显高于串联塔脱硫系统。同时,单塔改为串联塔后部分喷淋层的高度降低,浆液循环泵所需的扬程也降低。综合上述两个因素,串联塔的浆液循环泵能耗明显低于单塔。

对比串联塔方案一和方案二的浆液循环泵能耗情况还可以发现,串联塔浆液循环泵的数量增加 1 台后,其系统浆液循环泵总能耗降低了约 6.7%。方案二的浆液循环总量略小于方案一,导致前者的浆液循环泵能耗略低于后者。这一结果表明,充分优化串联塔浆液循环的配置,有利于脱硫系统进一步节能降耗。

2. 引风机能耗

在烟气流量一定的情况下，引风机新增能耗与脱硫系统阻力密切相关。计算公式如下：

$$\Delta P = K \frac{q_v p}{1000 \eta_{\text{tm}} \eta_g} - K \frac{q_v (p - \Delta p)}{1000 \eta_{\text{tm}} \eta_g} = K \frac{q_v \Delta p}{1000 \eta_{\text{tm}} \eta_g} = P \frac{\Delta p}{p}$$

式中， ΔP 为串联塔脱硫系统引风机相比单塔脱硫系统所降低的能耗，单位 kWh/h； K 为引风机电机的容量富裕系数； q_v 为引风机体积流量，单位， m^3/s ； p 为单塔脱硫系统对应的引风机全压，单位 Pa； η 为风机总效率； η_{tm} 为引风机传动效率； η_g 为引风机电机效率； ΔP 为串联塔脱硫系统总阻力与单塔脱硫系统总阻力之差，单位 Pa； P 为单塔脱硫系统对应的引风机能耗，单位 kWh/h。

单塔方案脱硫系统的总阻力为3650Pa，串联塔方案一总阻力为2850Pa，串联塔方案二总阻力为2845Pa，单塔明显高于串联塔脱硫系统。其中，单塔和串联塔系统的烟道阻力基本一致，其总阻力差异主要体现在吸收塔（含联络烟道）部分。吸收塔内的阻力与喷淋情况密切相关，在烟气流速一定时，浆液循环量越大，吸收塔内阻力越大[13]。由前述分析已知，单塔脱硫系统的浆液循环量高于串联塔，导致单塔阻力相比于串联塔双塔总阻力（含联络烟道）高出了约33%。

对比不同浆液循环泵配置的串联塔方案可知，方案一前塔阻力比方案二前塔阻力小135Pa，后塔阻力则高出140Pa。方案一前塔浆液循环量比方案二小13%，同时其后塔浆液循环量高出32%，这一趋势与两种方案的塔内阻力情况一致。而同时，由于方案一的前塔喷淋层数量小于方案二，导致喷淋密度也小，进一步扩大了两者前塔阻力差异。最终导致两种串联塔方案的系统总阻力相差无几。

根据阻力计算结果，以单塔脱硫系统引风机能耗为基准（对应引风机全压11000Pa，单台引风机能耗为6000kWh/h），折算可知，2台机组方案一的引风机能耗相比单塔减少1745kWh/h，而方案二则减少了1756kWh/h。由此可知，串联塔的引风机能耗优于单塔，而调整浆液循环泵配置对引风机能耗的影响甚微。

（二）脱硫系统能耗分析

单塔脱硫系统总能耗比串联塔方案一和方案二总能耗分别高出35%和39%左右。从图中可以看到，浆液循环泵能耗占系统总能耗比例最大，其次为引风机克服脱硫系统阻力新增能耗，两者之和总能耗占比超过70%。由前述分析可知，单塔脱硫系统的浆液循环泵能耗和引风机能耗均明显高于串联塔系统，同时单塔和串联塔系统氧化风机、真空泵及其他设备的能耗几乎没有差别，故单塔脱硫系统总能耗高于串联塔。对比不同浆液循环泵配置方案的串联塔系统总能耗可以看到，增加1台浆液循环泵后，串联塔系统的总能耗略有降低。

若按上网电价0.30元/kWh、年运行小时数5000h进行核算，与单塔脱硫系统相比，方案一系统可节约运行成本932.4万元/年，而方案二系统则可以减少1011.5万元/年的运行成本。

三、结论

本文基于某2×660MW超超临界机组脱硫系统，对串联塔湿法脱硫工艺的运行能耗进行分析研究，得出结论如下：

1. 单塔脱硫系统的浆液循环泵能耗比串联塔方案一和方案二分别高出4471kWh/h和4987kWh/h。这是因为在相同烟气流速、组份以及排放标准下，串联塔脱硫系统所需浆液循环量小于单塔，从而导致前者的浆液循环泵能耗较小。对于串联塔脱硫系统，增加1台前塔浆液循环泵后，其系统浆液循环泵总能耗下降6.7%。

2. 串联塔方案一和方案二的引风机能耗相比单塔分别减少了1745kWh/h以及1756kWh/h，这是因为串联塔方案塔内系统阻力明显小于单塔。优化浆液循环泵配置后，串联塔系统引风机能耗略微降低，但影响极小。

3. 综合分析脱硫系统总能耗可知，针对高硫分机组，串联塔脱硫系统在能耗方面明显优于单塔，每年可节约相当可观的运行成本。因此，采用串联塔脱硫工艺，同时优化浆液循环泵配置，有利于脱硫系统节能降耗，提高系统经济性。

参考文献

- [1] 邓建国，马子轲，李振，等. 不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响[J]. 环境科学，2019，40（8）：3457-3462.
- [2] 戎淑群，徐承亮. 燃煤电厂烟气净化中双塔串联脱硫技术应用研究与经济分析[J]. 能源研究与管理，2017，4：98-101.
- [3] 夏刚，吴其荣，周川雄等，燃煤电厂超低排放要求下的技术经济性分析[J]. 能源环境保护，2020，34（4）：68-75.
- [4] 田浩臣，蔡琳，蒋婷，张杰，陆继东. 电厂SCR脱硝系统与石灰石-石膏湿法脱硫系统故障分析[J]. 广东电力，2017，30（1）：11-16，21.
- [5] Wu X C, Zhao H F, Zhang Y X, et al. Measurement of slurry droplets in coal-fired flue gas after WFGD[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, 37(5): 915-929.
- [6] 史梦洁，石灰石-石膏湿法脱硫系统综合能效评估方法研究[D]. 华北电力大学，2014.
- [7] 徐钢，袁星，杨勇平等，火电机组烟气脱硫系统的节能优化运行[J]. 中国电机工程学报，2012，32（32）：22-29.
- [8] 邱国华，魏宏鸽，梁秀进等，火电机组脱硫超低排放运行能耗分析与节能运行展望[J]. 发电技术，2020，41（5）：510-516.
- [9] 杜振，朱跃，何胜等，石灰石-石膏法烟气脱硫系统厂用电率的分析与优化[J]. 华电技术，2012，34（5）：63-66，70.
- [10] 王岳宸，超低排放条件下湿法脱硫塔能效分析研究[D]. 山东大学，2018.

乡村振兴背景下小型水利工程管护策略研究

吴志宇

广西贵港市大藤峡灌区服务中心, 广西 贵港 537000

DOI:10.61369/WCEST.2025080004

摘 要： 在乡村振兴战略的背景之下，对农业水利工程实施有效的管护不但可以加快农业发展、改善生态环境，以及解决农村用水问题，而且在促进农村发展方面有很重要的意义。小型水利工程是农业生产、农村发展的基础支撑，管护质量好坏直接影响工程效益的发挥和乡村振兴推进成效，明确管护的意义可以创建工作价值认知的基础，建立多元化体系则是提高管护水平的重要途径。实践当中要从协同的角度出发，明确产权责任，强化技术支撑，健全制度保障，联动产业发展，优化资金配置，构建全方位的管护格局，为乡村振兴背景下的小型水利工程长效运行提供强有力保障。

关 键 词： 乡村振兴；小型水利工程；管护策略

Research on Management and Maintenance Strategies of Small Water Conservancy Projects in Rural Revitalization

Wu Zhiyu

Guangxi Guigang Datengxia Irrigation Service Center, Guigang, Guangxi 537000

Abstract： Under the rural revitalization strategy, effective management and maintenance of agricultural water conservancy projects not only accelerate agricultural development, improve ecological environments, and address rural water supply issues, but also play a crucial role in promoting rural development. Small-scale water conservancy projects serve as the foundational support for agricultural production and rural development. The quality of maintenance directly impacts the effectiveness of these projects and the progress of rural revitalization. Clarifying the significance of maintenance lays the foundation for establishing a value-oriented approach to project creation, while building a diversified system is a key pathway to enhance maintenance standards. In practice, a collaborative approach should be adopted: clarifying property rights responsibilities, strengthening technical support, improving institutional safeguards, coordinating industrial development, optimizing resource allocation, and establishing a comprehensive maintenance framework. These measures provide robust safeguards for the long-term operation of small-scale water conservancy projects under the rural revitalization initiative.

Keywords： rural revitalization; small water conservancy projects; management and maintenance strategies

引言

农田水利工程建设是农村基础设施建设的重要内容，对农业增效、农民增收、农村繁荣起着举足轻重的作用，随着国家对乡村振兴战略的不断推进，农田水利工程建设作为其中的重要组成部分，其关键性逐渐被人们所认识，农田水利工程建设不仅关系到农村水资源的合理开发利用，而且对实现农业现代化、促进乡村全面振兴具有一定价值。小型水利工程分布广、贴近民生，是农田水利体系的“毛细血管”，管护工作的好坏直接关系到水资源利用效率和农业生产稳定性，当前乡村振兴战略对农业生产条件、农村生态环境等提出了更高的要求，迫切需要依靠科学的管护来发挥小型水利工程的作用，解决传统管护中存在的潜在短板，为乡村振兴战略的实施筑牢水利基础。

一、乡村振兴背景下小型水利工程管护意义

（一）筑牢农业现代化的生产支撑根基

农业现代化的核心需求之一就是实现稳定高效生产和可持续

发展，小型水利工程就是满足这一需求的重要基础设施，小型水库、灌渠、泵站等设施直接为田间生产服务，稳定运行可以保证灌溉供水的及时性、均匀性，化解自然降水不均给农业生产带来的风险^[1]。科学管护工程设施，能够保证工程设施完好，从而实

现水资源在农田间的精准调配，满足规模化种植、集约化经营等现代农业发展模式对用水的需要。良好的管护能延长工程使用寿命，减少重复建设投入，为农业生产提供长期稳定的水利保障，促进农业由传统粗放式向精细高效式转变，推动农业现代化发展。

（二）搭建农村生态振兴的环境保障平台

乡村振兴不能只注重经济发展，而应该把生态宜居目标的实现放在重要位置上，小型水利工程管护在生态振兴中起着不可替代的纽带作用，小型水利工程集供水、排水、蓄水等功能于一身，通过系统的管护可以保证水体正常流动，改善水资源的调蓄能力，进而改进农村水域生态环境。管护过程中沟渠淤积疏浚、水库水质监测维护可减小水体污染，改良农村水资源质量，给农村生态循环提供支持^[2]。良好的水利设施可以防止水土流失，涵养地下水源，有利于农田生态和水域生态协调发展，形成良好的农村生态环境，这样才会实现农村生态振兴。

（三）凝聚乡村全面振兴的协同发展合力

小型水利工程管护不是单纯的技术性工作，它与农村经济、社会、生态等领域息息相关，其好坏直接影响到乡村全面振兴的协同推进。从民生来看，可靠的水利管护可以保证农村生活用水的安全，提升农民的生活质量，使群众有更好的获得感、幸福感；从产业上看，好的水利条件能带动特色种养、乡村旅游等多元化产业发展，拓宽农民增收渠道；从治理上讲，在水利管护工作中形成的政府、集体、农户三者参与的模式，有助于增强农村基层的治理能力，凝聚各方参与乡村振兴建设的共识^[3]。这样多向度的叠加效应，使得小型水利工程管护成了串联乡村各领域发展的关键节点，为乡村全面振兴积聚起巨大的力量。

二、乡村振兴背景下小型水利工程管护策略

（一）明晰产权责任，强化主体协同

产权明确是小型水利工程管护的前提条件，只有明确了所有权、管理权和使用权归属才能避免人人所有、人人不管的管护困境，管护工作要按照工程投资主体和受益范围来合理确定产权归属，个人投资的工程归个人所有，集体参与兴建的工程归村集体所有，跨区域的公益性工程归国家所有^[4]。比如由村集体出钱挖的灌溉渠，确定归村集体所有之后，村“两委”就具体怎么登记产权做了一份详细的文件，不再像以前那样和邻村闹使用权的纠纷。在此基础上构建起“产权主体为主、受益主体为辅”的管护责任体系，分别规定出每个主体的管护范围、管护责任、考核标准，具体到渠道淤积周期、泵站维护过程等^[5]。搭建起协同管护机制，使政府部门承担起监管指导的职能，定期开展产权核查以及管护培训，产权主体履行直接管护的义务，配备专职或者兼职的管护人员，受益农户参与日常的监督，设立村民管护监督员岗位，并给予适当的补贴。通过明确权责、细化分工、加强监督来形成权责清晰、分工明确、协同高效的管护格局，使管护责任落实到位，从而达到提高工程使用寿命的目的。

（二）依托产业联动，构建长效机制

把小型水利工程管护和乡村产业发展有机联动起来，是建立

长效管护机制的重要途径，对于那些有供水、灌溉等功能，并且和产业发展有着紧密关联的工程，可以利用产业链上下游利益联结的方式，使受益的产业主体承担起部分管护责任，进而形成一种“谁受益，谁管护”的良性机制^[6]。以供水工程为例，该镇特色水果种植基地用水靠镇内小型水库，当地协商由种植合作社承担水库周边植被养护、进水口过滤设施清理等日常管护，镇政府给予技术指导，合作社以比市场价低5%的价格获得灌溉用水，实现了双赢。灌溉工程可以依托工程发展起来的粮食种植大户、家庭农场联合成立管护小组，负责渠道疏通、闸门检修等工作。根据乡村产业融合发展趋势，将水利工程管护融入田园综合体、特色种养等项目建设中，例如田园综合体项目在规划时就将内部灌溉系统、景观水系的管护纳入到项目的运营方案中，由项目运营单位负责日常管护，既能保证水利工程的功能又能提升旅游体验^[7]。该产业联动模式既为工程管护提供了一个稳定的责任主体和资金支持，又通过工程的良好运行来保证产业的发展质量，形成工程管护促进产业发展，产业发展反哺工程管护的良性循环。

（三）强化技术支撑，提升管护效能

技术创新对提高小型水利工程管护专业化的水平起到支撑作用，要建立全流程的技术支撑体系，即监测、评价、维护。在监测环节中，抛弃传统的手工巡查方式，使用水位传感器、水质检测仪、视频监控等数字化的监测设备对工程运行状态、水质变化、水位波动等关键指标进行实时监测，并将数据实时传输到县级管护信息平台，实现异常情况自动报警，如某县在小型水库安装智能监测设备后，提前预警水位异常3次，避免溃坝。用水利工程专业评估软件，根据监测数据和现场采访情况，对工程的完好程度、效益发挥情况、隐患级别等进行评价，出具定量的评价报告，给管护决策提供依据，摆脱以往依靠经验判断的盲目性^[8]。在维护环节推广使用效果好、适应性强的管护技术和设备，例如对小型渠道的渗漏问题采用新的土工膜防渗技术；对老旧泵站实施变频节能改造，提高工程的稳定性和耐久性。对管护人员的技能培训也要加强，制定年度培训计划，邀请水利技术专家集中授课、现场实操指导，培训内容包含监测设备的操作、故障排查、维护技术等，提高管护人员专业操作水平和问题处理能力。通过技术赋能，推动管护模式从“被动抢修”向“主动预防”转变，实现管护效能的全面提升。

（四）健全制度保障，规范管护运行

完善的制度体系是小型水利工程管护规范化运行的根本保证，一定要建立包含规划、建设、管护、考核全过程的制度体系。建立健全管护标准体系，基于不同的工程类型，确定工程日常巡查的频次（小型水库每周至少巡查1次，雨季加密至每日1次），确定工程维护保养的流程（闸门每月润滑，泵站每季度检修），确定工程应急处置的响应时间（暴雨天气2小时内到达现场）等各个环节的操作规程和技术要求，编制《小型水利工程管护标准汇编》，确保管护工作有章可循。健全考核激励制度，把管护成效同责任主体的奖惩直接挂钩，建立包含工程完好率、水质达标率、群众满意度等指标的考核体系，每年开展两次专项考核；对管护成效突出的村集体或个人给予资金奖励、荣誉表

彰,对履职不力造成工程损坏、功能失效的,进行约谈问责并责令限期整改,情节严重的追究相关责任^[9]。健全资金保障制度,构建财政投入为主、社会补充为辅、资产运营反哺的多元资金筹措机制,县级财政每年安排专项管护资金,对社会资本参与管护的给予税收优惠,通过工程经营权租赁等资产运营方式筹集管护资金,明确资金使用范围和监管标准,保证“专款专用、专项审计”,确保资金全部用于工程管护。建立管护档案制度,为每一个工程建立电子和纸质两种档案,对工程建设图纸、产权证明、管护日志、考核结果等进行全程归档,为管护工作持续推进、问题追溯提供可靠的依据。

（五）结合民生需求，彰显管护价值

在乡村振兴的背景下,小型水利工程的管护要贴近民生,把水利工程的功能和村民的生产生活、生态环境改善相结合,使管护成果真正为乡村的发展服务。从农业生产角度出发,以农户灌溉需求为依据,在管护过程中重点保证灌溉渠道的畅通和泵站的正常运转,按照农作物的生长周期来调节灌溉供水的时间,例如在水稻扬花期、小麦灌浆期提前对灌溉设备进行检修,保证及时供水,促进粮食增产^[10]。从生活保障角度出发,围绕农村饮水安全,加大小型饮水工程的管护力度,定期对水源水质、输水管网进行检测维护,解决偏远村组季节性缺水、水质不稳定等饮水安

全问题。从生态改善方面来讲,将小型水利工程管护同乡村人居环境整治相融合,对塘坝、沟渠等进行生态化改造,种植水生植物净化水质,打造小微水景,提升乡村生态风貌。还要建立民生需求反馈机制,利用村民议事会、线上意见箱等形式收集村民对工程管护的意见建议,按需调整管护重点,使小型水利工程成为农业生产的“生命线”,也成为改善村民生活品质、促进乡村生态振兴的“幸福河”,实现管护价值与民生福祉同频共振。

三、结语

总而言之,小型水利工程是乡村振兴战略推进的基础设施,其管护质量关系到农业生产稳定、农村生态改善、乡村治理提升。在乡村振兴背景下,小型水利工程管护已经不再是单纯的技术性工作,而是成为了整合乡村各个领域发展的综合性工作,经由明确的意义来夯实认知,采用多种办法来改进管护方式,就能最大限度地发挥小型水利工程的综合效能,为农业现代化的发展带来帮助,给农村生态改善创建根基,唯有这样乡村全面振兴才能汇聚更多力量。小型水利工程管护长效推进需要各方主体齐心协力,用制度做保障、用技术作支撑,把管护效果转化为乡村振兴的强劲动力,促进乡村发展质量提高。

参考文献

[1] 张松照. 面向乡村振兴的小型水利工程：精准布局与长效管护模式探究 [J]. 电脑采购, 2024(29): 129-131.

[2] 郭芳. 乡村振兴进程中水利发展中心推进小型水利工程建管一体化模式研究 [J]. 水利电力技术与应用, 2025, 7(21).

[3] 赵峰. 乡村振兴背景下农村小型农田水利工程管理分析 [J]. 江西农业, 2025(20): 166-168.

[4] 王庆军. 乡村振兴背景下小型农田水利工程建设 [J]. 农家致富顾问, 2025(1): 51-52.

[5] 宋浩. 小型水利工程施工质量控制策略探讨 [J]. 标准生活, 2025(6): 176-178.

[6] 刘刚. 农业水利工程安全生产标准化建设研究 [J]. 江西农业, 2025(20): 134-136.

[7] 刘淑娟. 小型农田水利工程建设管理现存问题及应对策略研究 [J]. 农业工程与装备, 2024, 51(6): 25-26, 35.

[8] 马智云, 葛岚清. 小型农田水利工程可持续发展运行机制 [J]. 建筑与施工, 2025, 4(21): 172-174.

[9] 阿力木·买买提. 小型农田水利工程管理中的难点与突破策略探究 [J]. 建筑工程与管理, 2025, 7(6).

[10] 李淑贤. 新时代农村小型农田水利工程管理优化策略研究 [J]. 今日农业, 2025(9): 104.

水利水电工程河道治理存在的问题与管理措施研究

程文镖

云南龙猴建设工程有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/WCEST.2025080005

摘 要： 水利水电工程河道治理对于保障水资源合理利用、防洪安全及生态环境保护具有重要意义。本文深入分析了当前水利水电工程河道治理中存在的防洪能力不足、河道生态环境破坏及管理不规范等问题，提出了加强防洪能力建设、保护河道生态环境、完善管理制度及推广先进技术和经验等具体管理措施。通过宾川县河道治理工程的实践案例，验证了这些管理措施的有效性和可行性。研究结果表明，科学、系统的管理措施能够显著提升河道治理效果，促进水资源可持续利用和生态环境改善，为水利水电工程河道治理提供了有力支持。

关 键 词： 水利水电工程；河道治理；存在问题；管理措施

Research on Problems and Management Measures in River Channel Regulation for Water Resources and Hydropower Engineering

Cheng Wenbiao

Yunnan Longhou Construction Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract： River channel regulation in water resources and hydropower engineering is of great significance for ensuring rational utilization of water resources, flood control safety, and ecological environmental protection. This paper deeply analyzes the existing problems in current river channel regulation for water resources and hydropower engineering, such as inadequate flood control capacity, damage to the river ecological environment, and irregular management. It proposes specific management measures, including strengthening flood control capacity construction, protecting the river ecological environment, improving management systems, and promoting advanced technologies and experiences. Through a practical case study of the river channel regulation project in Binchuan County, the effectiveness and feasibility of these management measures are verified. The research results indicate that scientific and systematic management measures can significantly enhance the effectiveness of river channel regulation, promote sustainable utilization of water resources, and improve the ecological environment, providing strong support for river channel regulation in water resources and hydropower engineering.

Keywords： water resources and hydropower engineering; river channel regulation; existing problems; management measures

引言

随着全球气候变化和城市化进程的加速，河道作为水资源的重要载体和生态系统的重要组成部分，面临着前所未有的挑战。水利水电工程河道治理不仅关系到防洪安全、水资源合理利用，还直接影响到周边生态环境的健康与稳定。然而，当前河道治理中普遍存在防洪能力不足、生态环境破坏及管理不规范等问题，严重制约了河道治理效果的发挥。因此，如何科学、有效地进行河道治理，成为亟待解决的重要课题。本文旨在通过分析水利水电工程河道治理中存在的问题，提出针对性的管理措施，并结合宾川县实践案例进行验证，以期河道治理提供科学指导和实践参考。

一、水利水电工程河道治理存在的问题

（一）防洪能力不足

许多河道的护岸结构单薄，年久失修，淤泥堆积严重，导致河道宽度变窄，边坡裂缝频发，蓄水能力大幅下降。这些问题在

雨季尤为突出，河道往往难以承受大量雨水的冲击，防洪能力严重不足。例如，某河流域因长期缺乏维护，护岸结构单薄，导致在一次暴雨中多处发生决堤，造成周边地区严重洪涝灾害。又如，另一地区河道因淤泥堆积严重，河道宽度大幅缩减，雨季时水流速度加快，直接冲击河岸，造成多处崩塌，防洪形势十分严峻。^[1]

（二）河道生态环境破坏

在河道治理过程中，往往忽视了生态环境的保护。过度的疏浚、护岸硬化等措施破坏了河道的自然形态和生态平衡，导致水生生物栖息地丧失，水质恶化。例如，某城市为拓宽河道，进行了大规模的疏浚工程，结果破坏了原有的水生生态系统，导致鱼类等水生生物大量死亡。又如，某地区在河道治理中采用硬质护岸，虽然短期内提高了防洪能力，但长期来看却破坏了河道的自然净化能力，导致水质持续恶化，影响了周边居民的生活用水安全。

（三）管理不规范

河道治理过程中存在管理不规范的问题，一些地方缺乏科学的治理规划和有效的监管机制，导致治理措施实施不到位，甚至引发新的环境问题。例如，某地区在河道治理项目中，由于缺乏科学的规划，导致治理措施与实际情况脱节，不仅未能达到预期效果，反而加剧了河道淤积问题。又如，另一地区在河道治理过程中，监管机制不健全，导致一些企业违法倾倒垃圾至河道内，严重污染了水质，影响了周边生态环境。此外，还有部分地区在河道治理后缺乏持续的维护和管理，导致治理成果难以持久。

二、水利水电工程河道治理的管理措施

（一）加强防洪能力建设

针对防洪能力不足的问题，必须采取一系列有效措施来加强对河道护岸的加固和修复工作。首先，可以引入组合式生态挡墙、生态护坡等新型结构，这些结构不仅能够有效提高河道的防洪能力和稳定性，还能与周边环境相融合，减少对生态环境的影响。例如，在某河流域的治理中，采用了组合式生态挡墙，成功抵御了多次洪水的冲击，确保了周边地区的安全。同时还应定期开展河道疏浚工作，清理淤泥和杂物，确保河道畅通无阻，这一过程可以通过机械疏浚和人工清理相结合的方式进行，以提高工作效率。在某城市河道治理项目中，通过定期的疏浚工作，有效解决了河道淤积问题，提高了河道的泄洪能力。^[2]

（二）保护河道生态环境

在河道治理过程中，必须坚持生态优先的原则，采取生态化的治理措施来恢复河道的自然生态功能。一方面，可以种植水生植物，如芦苇、香蒲等，这些植物能够吸收水中的营养物质，净化水质，同时为水生生物提供栖息地。在某湿地公园的建设中，通过大面积种植水生植物，成功改善了水质，吸引了大量鸟类栖息，形成了良好的生态景观。另一方面，可以建设湿地，通过湿地的自然净化作用来处理污水，减少对河道的污染。在某地区，通过建设人工湿地，有效处理了周边工业废水和生活污水，保护了河道的水质安全。此外还应加强对河道周边环境的保护，减少污染排放，改善水质。例如，可以建立严格的排污许可制度，对排放污染物的企业进行严格监管，确保其达标排放。

（三）完善管理制度

为了加强河道治理的管理，必须建立健全河道治理的管理制度。首先，要明确责任主体和监管机制，确保治理工作的顺利开

展。在某地区河道治理项目中，由于责任主体不明确，导致治理工作进展缓慢。后来，通过明确责任主体和监管机制，加强了各部门的协作和配合，治理工作取得了显著成效。其次，要制定科学的治理规划和实施方案，确保治理措施的有效实施。在某城市河道治理规划中，充分考虑了河道的自然形态和周边环境，制定了科学合理的治理方案，有效保护了河道的生态环境。^[3]同时，要加强对治理过程的监督和评估，及时发现和解决问题。在某地区河道治理过程中，通过定期的监督和评估，及时发现了治理中存在的问题，并采取了相应的措施进行整改，确保了治理效果。

（四）推广先进技术和经验

为了提升我国河道治理的整体水平，还要积极引进和推广先进的河道治理技术和经验。一方面，可以利用现代科技手段，如遥感监测、大数据分析等，提高治理效率和准确性。^[4]在某地区河道治理中，通过遥感监测技术，及时发现了河道淤积和污染问题，为治理工作提供了有力的支持。另一方面，可以加强与国际先进地区的交流与合作，借鉴其成功经验。例如，可以邀请国际专家来华交流指导，分享先进的治理理念和技术；同时，也可以组织国内专家赴国外考察学习，了解国际河道治理的最新动态和发展趋势，通过这些措施的实施不断提升我国河道治理的技术水平和管理能力。

三、宾川县水利水电工程河道治理管理措施方案

（一）项目背景

宾川县桑园河乔甸镇上段治理工程。工程位于宾川县乔甸镇，治理起点土官村水库大坝下游，终点海稍水库入口，治理河长7.53公里，新建堤防13.77公里，配套相应建筑物，投资1870万元。设计防洪标准10年一遇，堤防工程级别为5级，防洪保护人口0.35万人，耕地0.55万亩。宾川县宾居河治理工程。工程位于宾川县大营镇、宾居镇，治理起点大营镇头村，终点宾居镇龙庇路跨河桥，治理河长14.26公里，新建堤防6.07公里，护岸4.93公里，配套相应建筑物，投资2790万元。设计防洪标准10年一遇，堤防工程级别为5级，防洪保护人口1.02万人，耕地1.31万亩。宾川县炼洞河治理工程。工程位于宾川县鸡足山镇，治理起点鸡足山镇上沧村委会，终点炼洞村委会与新川村委会交界，治理河长9.53公里，新建堤防7.56公里，护岸0.1公里，配套相应建筑物，投资2000万元。设计防洪标准10年一遇，堤防工程级别为5级，防洪保护人口0.72万人，耕地0.84万亩。宾川县平川大河治理工程。工程位于宾川县平川镇，治理起点孟获洞，终点康宁村委会福柳村小桥，治理河长6.42公里，新建堤防1.01公里，加固堤防1.88公里，护岸3.63公里，配套相应建筑物，投资1340万元。设计防洪标准10年一遇，堤防工程级别为5级，防洪保护人口1.02万人，耕地1.43万亩。宾川县清水河治理工程。工程位于宾川县拉乌乡，治理起点核桃谷等入口，终点新田村委会子姑莫，治理河长15.91公里，新建堤防1.93公里，护岸18.93公里，配套相应建筑物，投资3390万元。设计防洪标准10年一遇，堤防工程级别为5级，防洪保护人口0.35万人，耕地0.36万亩。

宾川县作为云南省大理州的重要组成部分，其水利水电工程河道治理对于保障当地人民生命财产安全、促进农业稳定发展具有重要意义。针对宾川县桑园河乔甸镇上段、宾居河、炼洞河、平川大河及清水河等河道的治理需求，提出一套科学、合理、完善的管理措施，以提升河道防洪能力，保护生态环境，促进可持续发展。

（二）防洪能力建设

针对宾川县桑园河乔甸镇上段治理工程的实际地理和数据情况，做好防洪能力建设的关键在于全面而精细的规划与执行。该工程位于宾川县乔甸镇，治理河长7.53公里，自土官村水库大坝下游起始，至海稍水库入口结束，这一区域因其独特的地理位置，防洪任务尤为艰巨。为确保防洪能力，首先需加强堤防建设，依据数据，新建堤防总长达13.77公里（或依据不同规划方案可能包含新建11.65公里及加固0.69公里的部分），这些堤防应严格按照设计防洪标准（10年一遇）进行施工，采用高强度、耐久性好的材料，确保堤防结构稳固，能够有效抵御洪水侵袭。同时，需配套建设相应的防洪设施，如防洪闸、排水泵站等，以增强河道的调蓄能力和排涝效率。此外，针对桑园河特定的水文条件，还应考虑采用生态护岸技术，如种植根系发达的水生植物，既能加固河岸，又能提高水质净化能力，形成生态与防洪并重的综合治理体系。在防洪能力建设过程中，还需强化河道的日常维护与监管，确保堤防无破损、无堵塞，同时，建立完善的预警系统，实时监测河流水位，确保在洪水来临前能够迅速启动应急预案，保护周边农田、道路及居民的安全。通过上述措施的综合实施，可以显著提升宾川县桑园河乔甸镇上段的防洪能力，为当地经济社会的可持续发展提供坚实保障。

（三）生态环境保护

该工程地处宾川县乔甸镇，治理河段长7.53公里，这一区域不仅承载着防洪排涝的重要功能，也是当地生态系统的重要组成部分。为有效保护生态环境，需采取一系列科学措施：首先应充分利用河道周边自然条件，通过种植多样化的水生植物，如芦苇、香蒲等，构建生态缓冲区，这些植物不仅能吸收水体中的营养物质，净化水质，还能为水生生物提供栖息地，促进生物多样性；其次要建设人工湿地系统，利用湿地的自然净化能力，进一步提升水质，同时人工湿地还能作为休闲娱乐场所，提升周边居民的生活质量；再者还要加强对河道周边工业、农业和生活污染源的监管，严格控制污染物排放，确保水质达标，对于已受污染的河段，应采取生态修复技术，如底泥疏浚、生态浮岛等，逐步恢复水体生态功能；最后要建立长期的生态监测机制，定期对河道水质、生物多样性等指标进行监测和评估，及时发现并解决生态环境问题，确保治理工程的生态效益得以持续发挥。通过这些综合措施的实施，宾川县桑园河乔甸镇上段治理工程不仅能够有效提升防洪能力，还能促进生态环境的持续改善，实现人与自然的和谐共生。

（四）管理制度完善

该工程地处乔甸镇，治理河段长达7.53公里，涉及新建堤防、生态修复、污染源控制等多方面内容，因此，管理制度的完

善需从以下几个方面入手：首先明确责任主体，确立地方政府、水利部门及项目管理单位的具体职责，确保各项治理措施得到有效执行；其次要制定详尽的治理规划与实施方案，明确治理目标、时间节点、预算分配等关键要素，同时建立项目监督机制，定期对工程进度、质量、资金使用情况进行检查，确保治理工程按计划推进；再者，加强法律法规建设，依据国家及地方相关法规，制定适用于桑园河乔甸镇上段治理的规章制度，对河道管理、污染控制、生态保护等方面作出具体规定，增强制度约束力；此外，建立公众参与机制，鼓励周边居民、环保组织等利益相关方参与治理决策与监督，提高治理工作的透明度和公众满意度；最后更要强化后续管理与维护，建立长效管理机制，确保治理成果得以长期保持，通过定期的生态监测与评估，及时调整管理策略，应对可能出现的环境问题。^[5]

（五）施工组织设计

施工准备细化。进一步细化施工图纸会审流程，包括图纸自审、会审记录整理、问题反馈及解决机制。同时，编制详细的施工组织设计和专项施工方案，明确各分项工程的施工方法、技术措施及质量保证措施。详细规划施工场地布置，包括临时设施搭建、施工道路修建、水电供应系统布置等。特别强调对周边环境的保护，如设置围挡、洒水降尘等措施。

施工进度计划优化。采用 Project 等项目管理软件编制详细的施工进度计划，明确各阶段的关键节点和里程碑。设置合理的工期缓冲，以应对不可预见因素导致的工期延误。建立施工进度动态监控体系，定期对比实际进度与计划进度，及时分析偏差原因并采取调整措施。

（六）质量与安全管理

为强化质量管理措施，需完善质量管理体系，明确各级管理人员和施工人员的质量职责，工程中建立质量责任追溯制度，并加强对原材料、构配件和设备的质量检验，严格执行见证取样制度，对关键工序和隐蔽工程实施旁站监督；同时，落实“三检”制度（自检、互检、交接检），确保每道工序合格后方可进入下道工序，并组织专项验收，邀请业主、监理单位参与，保证验收公开透明、结果公正。

在安全管理方面，需完善安全管理制度，建立健全安全生产责任制，明确安全职责并签订责任书，定期开展安全教育培训活动，特别是对新进场工人进行三级安全教育；同时，建立定期和专项安全检查制度，每周进行全面检查，针对高处作业、临时用电等危险性较大的工程开展专项检查，及时发现并消除安全隐患。

（七）技术推广与交流

在治理过程中要积极引进国内外先进的河道治理技术和经验，如遥感监测、大数据分析等，提高治理效率和准确性。例如，可以安装高清摄像头，利用4G信号传输信息，通过手机APP平台对河道进行全天候、全方位的监控。这种技术不仅可以有效监控河道周边的乱扔乱倒垃圾行为，还可以对非法捕捞、垂钓等行为进行24小时预警、监控与跟踪，实现早预防、早发现、早处理。同时加强与国内外先进地区的交流与合作，分享治理经验和成果，提升宾川县河道治理的整体水平。

四、结束语

水利水电工程河道治理是一项复杂而艰巨的任务，涉及防洪安全、水资源利用和生态环境保护等多个方面。面对当前河道治理中存在的问题和挑战，必须采取科学、系统的管理措施，加强防洪能力建设、保护河道生态环境、完善管理制度并推广先进技术和经

验。通过宾川县河道治理工程的实践案例可以看出，这些管理措施能够显著提升河道治理效果，促进水资源可持续利用和生态环境改善。未来，应继续加强研究和探索，不断创新治理理念和方法，提高河道治理的科学性和实效性，为水利水电工程的健康发展贡献更多智慧和力量。同时，加强国际合作与交流，借鉴国际先进经验和技术成果，推动我国河道治理事业不断向前发展。

参考文献

-
- [1]王诗蕊. 水利工程河道治理常见问题及对策 [J]. 科学技术创新, 2021(28): 112-113.
 - [2]张蕾. 水利工程河道治理护岸防护施工技术 [J]. 科学技术创新, 2022(27): 114-115.
 - [3]石伟栋. 小型农田水利工程中河道治理对策 [J]. 工程技术研究, 2020, 4(17): 235-236.
 - [4]赵俊龙. 生态水利 engineering 理念在河道治理中的应用 [J]. 农家参谋, 2019(16): 189.
 - [5]马欣. 水利工程河道治理措施及生态水利的应用 [J]. 吉林农业, 2023(16): 74.

水利水电工程的安全生产与应急管理模式

张双林¹, 贺欣², 陈飞³, 胥照³, 倪一品⁴

1. 淮安市淮泗涵闸管理所, 江苏 淮安 223001

2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

3. 淮安市清晏园, 江苏 淮安 223001

4. 淮安市城市水利工程管理中心, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2025080006

摘 要 : 本文探讨了水利水电工程中的安全生产管理与应急管理模式, 分析了当前工程建设过程中面临的安全生产风险, 并提出了有效的应急管理策略。通过对水利水电工程安全管理体系的分析, 本文结合实际操作, 研究了安全生产标准化、应急预案的制定与实施以及风险评估与监控技术, 提升水利水电工程的安全保障能力。

关 键 词 : 水利水电工程; 安全生产; 应急管理; 风险评估; 应急预案

Safety Production and Emergency Management Mode in Water Resources and Hydropower Engineering

Zhang Shuanglin¹, He Xin², Chen Fei³, Xu Zhao³, Ni Yipin⁴

1. Huaisi Sluice Management Office of Huai'an City, Huai'an, Jiangsu 223001

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

3. Qingyan Park of Huai'an City, Huai'an, Jiangsu 223001

4. Urban Water Conservancy Project Management Center of Huai'an City, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : This paper explores the safety production management and emergency management mode in water resources and hydropower engineering, analyzes the safety production risks faced during the current project construction process, and proposes effective emergency management strategies. Through an analysis of the safety management system for water resources and hydropower engineering, this paper, combined with practical operations, studies the standardization of safety production, the formulation and implementation of emergency plans, as well as risk assessment and monitoring techniques, to enhance the safety guarantee capabilities of water resources and hydropower engineering.

Keywords : water resources and hydropower engineering; safety production; emergency management; risk assessment; emergency plan

引言

水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 其安全生产与应急管理直接影响到工程的顺利推进及施工人员的生命安全。在水利水电工程建设中, 面临的风险因素复杂多变, 涉及到工程结构、施工技术、自然灾害等多个方面。安全生产管理和应急管理作为保障工程安全、减少事故发生的重要手段, 已逐渐成为水利水电工程管理的核心内容。本文将结合具体的安全生产管理模式与应急管理策略, 探讨如何在施工过程中有效规避风险, 提高应急响应能力。

一、水利水电工程安全生产管理模式

(一) 安全生产管理体系建设

水利水电工程的安全生产管理体系是确保施工现场安全的基础。首先, 安全生产管理的组织架构需要明确责任分工, 通常由项目经理作为安全生产的第一责任人, 下设专门的安全管理部

门, 负责日常安全监督和管理工作。同时, 现场各级管理人员要承担具体的安全责任, 从技术人员到操作人员, 都需要明确各自的安全职责, 确保每个环节都能落实到位。此外, 安全生产责任制的落实需要建立健全的奖惩机制, 确保责任到人、奖惩分明。通过制定并执行严格的安全生产标准, 水利水电工程能够有效规避潜在的安全风险, 从而保证工程施工的顺利进行。

在标准化实施方面，制定统一的安全操作规程和技术标准，并严格按照国家和行业的安全生产标准执行，能够保证全体工作人员在相同的规范下开展工作，避免因操作不规范而引发事故。水利水电工程中的标准化工作应覆盖到每一个施工环节，从设计、施工到竣工验收，每一环节都需要按照统一的安全标准进行管理。

（二）安全风险评估与监控技术

在水利水电工程中，安全风险评估是预防事故发生的关键。通过科学的风险评估方法与工具，如故障树分析（FTA）和事件树分析（ETA），可以提前识别出潜在的安全隐患，并评估其可能造成的后果与发生的概率，进而采取有效的防范措施。这些评估工具可以帮助工程管理人员全面了解各类风险，制定出具有针对性的风险控制计划。

安全监控系统的构建与运行同样至关重要。通过安装实时监测设备，如视频监控、气体检测仪、温湿度传感器等，能够对施工现场的安全状况进行24小时监控。这些设备通过数据采集与传输，为现场管理人员提供实时的安全数据支持，并且通过系统化的管理平台，将各类安全信息汇集与分析，为决策提供可靠依据。

实时数据监测与分析在安全管理中的作用也不可忽视。通过大数据分析技术，能够对大量的实时监控数据进行处理，迅速识别出安全隐患并及时预警。利用人工智能算法，还可以预测潜在的风险点，提前进行干预和调整，从而避免安全事故的发生。

（三）安全生产培训与教育

水利水电工程的安全生产培训与教育工作至关重要。员工的安全意识是防范安全事故的第一道防线，因此提升员工的安全意识至关重要。通过定期开展安全培训，教育员工了解并掌握相关的安全知识、操作规程和紧急应对方法，可以有效降低人为失误带来的安全风险。

安全操作规程的培训与考核是确保员工能够按照标准化流程执行任务的有效手段。在培训过程中，应重点强调操作中的注意事项与安全措施，确保每个员工都能够熟练掌握并严格遵守。同时，定期进行考核，检验员工是否能够在实际工作中做到安全操作，一旦发现问题，要及时整改并重新培训。

定期的应急演练与反馈机制也是提升安全生产水平的重要手段。通过模拟各种可能发生的紧急情况，如水库溃坝、设备故障等，进行实战演练，能够使员工在危急时刻迅速做出正确的应对。而演练后的总结与反馈，可以帮助改进应急响应流程，确保未来应急管理更加高效。

二、水利水电工程应急管理模式

（一）应急预案的制定与实施

应急预案是确保水利水电工程在突发事件中能够快速应对的关键文件。预案应包括事件判断标准、应急响应组织架构、资源调配方案、人员分工、应急处置措施及事故恢复计划等。针对不同事故类型（如水库溃坝、滑坡、设备故障等），应设计专项应急措施，确保各方人员能够在紧急情况下迅速执行预定响应。

应急预案的动态调整与修订是提高管理效果的关键。随着项目进展和风险变化，预案需根据新的情况进行更新。新设备投入使用时，响应流程可能需要优化。定期演练帮助发现问题，并及时修订预案，确保其在实际应用中的有效性。

预案实施中的关键环节包括信息快速传递、现场指挥体系的建立与措施落实。明确责任与分工是确保预案顺利执行的前提。所有工作人员需明确职责，并在事故发生时迅速响应，避免责任不清导致混乱。

（二）应急响应机制的建立与运作

应急响应机制是水利水电工程中应急管理核心，它决定了突发事件的处理效率。应急指挥体系的构建是确保各项应急措施能够迅速有效实施的基础。指挥体系应包括项目经理、安全负责人、各类专业人员等，他们负责在发生突发事件时迅速进行决策，并指导现场操作。指挥体系应具备灵活性，能够根据不同类型的事故，快速调整指挥资源。

应急响应流程的优化与简化也是提升应急效率的关键。在实践中，应急响应流程往往由于步骤繁琐而影响了响应速度。因此，应优化流程，减少不必要的环节，确保信息和指令能够迅速流通，缩短响应时间。此外，应急响应流程应具有明确的时间节点和责任分配，确保各项任务能够按时完成。

资源调配与人员配备的合理性在应急响应中具有决定性作用。水利水电工程通常面临复杂的工况，因此必须根据实际情况合理配置资源，如设备、人员和物资储备。应急响应时，人员的配备应做到科学规划，根据事故的严重程度和性质，及时调配相应的应急小组进行处理。如图1所示。

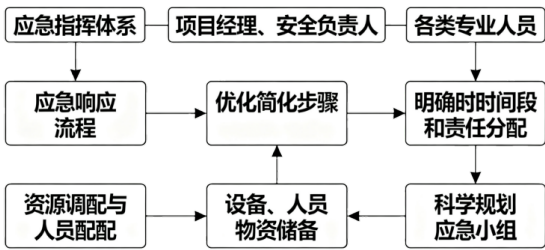


图1 应急响应机制

（三）应急演练与事故应对

应急演练是检验应急预案和提升应急处置能力的重要手段。针对不同事故类型，制定相应的演练计划，例如水库溃坝演练侧重模拟水位上涨和溢洪道失效，设备故障演练则关注设备修复和抢修流程。通过演练，员工能够熟悉应急流程，发现预案中的不足，提高反应速度，并优化应急流程。演练中暴露的问题应及时总结，并纳入预案修订，以不断提高应急管理水平。

事故发生后，迅速处置是减少损失的关键。事故调查有助于找出根本原因并为后续处理提供依据。通过分析事故原因，可以有效避免类似事件的发生，调查过程应公正、透明，并及时向相关人员反馈，以加强安全防范和应急管理。

三、水利水电工程中的安全生产技术支持

（一）安全生产监控技术的应用

在水利水电工程中，安全生产监控技术通过布设传感器实时采集环境、设备和结构数据，并通过无线系统汇总至中央平台，实现数据可视化，提升预警能力。结合视频监控与无人机巡检技术，可灵活巡视高空和偏远区域，及时发现结构问题并减少人工

巡检风险。同时，大数据分析机器学习算法可多维度分析监测数据，预测风险并触发报警，为管理人员提供决策支持，推动“预防为主、防控结合”的安全管理目标。

（二）安全防护技术的创新

水利水电工程施工环境复杂，安全防护技术要求高。常见的防护设备包括防坠落装置、边坡防护网、智能安全帽和红外安全警示系统等，这些设备与传感器系统联动，实现对施工人员的实时监控与警示。例如，智能安全帽能监测心率、姿态和环境气体浓度，异常时自动报警并发送定位信息。

结构安全监测与预警系统对于大型水工建筑至关重要，通过布设应变计、位移计、渗压计等监测设备，实时监控坝体、隧洞等结构的应力与变形，超出阈值时立即发出预警，确保结构安全。防灾减灾技术通过建立防洪演算模型、泥石流模拟系统等，提高灾害预测与应对的科学性和准确性。技术应用评估表明，这些技术能显著缩短反应时间，提升防灾能力。

（三）安全生产技术的标准化与规范化

为了有效实施安全生产技术，必须建立完善的标准化管理体系，涵盖设计、施工到运行维护的各个环节，明确设备配置、监测参数和应急处置流程。统一的安全标准有助于消除技术差异引发的安全漏洞。

标准化检查与隐患排查技术是确保安全的重要手段。通过移动终端和智能巡检系统，管理人员可迅速识别并记录隐患，生成整改清单，并通过数据分析为后续决策提供依据。

技术创新在安全生产中愈发重要，人工智能、物联网和数字孪生技术的应用推动了水利水电工程安全管理的智能化与精细化，提升了监控精度和管理效率，从“被动防护”向“主动防控”转变，提供了坚实的技术保障。

四、水利水电工程应急管理的技术保障

（一）信息化应急管理平台的建设

信息化应急管理平台是提升水利水电工程应急响应效率和决策支持能力的关键。该平台通过集成传感器数据、视频监控和其他监测设备，实时获取施工现场及周边环境的安全数据，提供即时情况分析、风险评估，并支持决策者制定应急响应策略。平台应具备跨部门、跨专业的数据共享功能，确保信息快速流通，避免滞后或断层，以高效调度应急资源和人员。

然而，信息化平台在应用中面临一些挑战。数据的实时性与准确性问题，尤其是在极端天气或灾难时，可能导致网络中断或

数据传输延迟。平台的稳定性和易用性也至关重要，需要确保在复杂的应急环境下能够快速响应并避免操作复杂。因此，平台需不断优化和更新，确保其在应急状态下能够高效运作。

（二）应急物资与设备的配置与管理

应急物资的种类与配置标准是确保应急管理有效性的基础。在水利水电工程中，应急物资包括防护设备、应急救援工具、药品、消防器材、照明设备和通信设备等。根据项目特点，物资种类和数量应精确配置，以应对水库溃坝或设备故障等突发事件。物资储备需符合标准化要求，定期检查和更新清单，确保质量和有效期，以避免因物资短缺或失效影响应急响应。

物资管理与存储的科学性确保物资能及时调度。仓库应按区域分类管理，物资应靠近施工现场或通过高效运输网络保证快速到位。信息化平台可实时监控物资存储、使用及运输路径，优化资源调度方案，确保在紧急情况下能够迅速投入使用，提高应急响应效率。

（三）应急通信与指挥系统

应急通信网络的搭建与维护是应急管理中的关键技术保障。通信网络需具备高可靠性、广覆盖性和快速恢复能力，确保在复杂环境下提供稳定支持。特别是灾害发生时，传统通信设施可能受损，因此，需要采用卫星通信、无线电、应急通信车等手段，确保在极端条件下依然能够实现指挥与协调。

远程指挥与调度系统的应用能显著提高应急管理效率。通过远程指挥平台，管理人员可以实时查看现场情况并调度应急资源，迅速调整策略并传递决策。同时，应急通信保障系统需具备优先通信功能，确保关键人员和设备的通信畅通，以便快速集结救援力量、调度物资资源，进行高效指挥。此类系统需要定期维护，以确保在突发情况下发挥最大效能。

五、结语

水利水电工程的安全生产与应急管理模式对于保障工程顺利进行、提高应急响应效率具有重要意义。通过科学的安全生产管理模式与完善的应急管理机制，可以有效规避潜在风险，并在紧急情况下迅速响应，最大程度地减少事故损失。在未来的工程建设中，随着技术的不断进步，安全生产与应急管理的模式也需不断优化与完善。建立完善的安全管理体系与应急预案，不仅有助于工程的高效推进，也为施工人员的生命安全提供了坚实保障。

参考文献

[1]王婷,姚亚亚,卫舒春.水利水电工程安全生产管理体系构建与安管人员培训策略[J].四川水利,2025,46(02):125-129.
[2]曹福彬,张建斌.水利工程施工阶段安全管理有效性对策研究[J].农业开发与装备,2024,(09):135-138.
[3]中国水利工程协会.水利工程建设安全生产管理[M].中国水利水电出版社:202202:221.
[4]童君辉.水利水电工程施工质量与安全管理[J].价值工程,2022,41(02):60-62.
[5]杨婷婷,杨明.水利工程施工中安全生产应急管理浅析[J].海河水利,2021,(S1):46-49.
[6]顾爱军.水利水电工程安全生产管理的问题分析[J].农家参谋,2020,(08):171.
[7]朱玉春.水利水电工程本质安全化建设[J].河北农机,2021,(04):17-18.
[8]张美新.水利工程施工安全技术[M].中国水利水电出版社:202408:306.

江西省高安市艮山生态清洁小流域建设成效

张小生

高安市水利局，江西 高安 330800

DOI:10.61369/WCEST.2025080007

摘 要： 高安市艮山生态清洁小流域通过系统性治理，成功探索出生态效益与经济社会发展协同共进的模式。整合多部门资金，实施水土保持、水系连通及人居环境整治等工程，治理水土流失面积868公顷，水土保持率达91.63%，林草覆盖率达85.82%，出水水质稳定达到Ⅲ类标准，显著提升了区域生态功能。在经济效益方面，小流域依托明清古建筑群和生态资源，发展乡村旅游，年接待游客约2.5万人次，带动当地人均增收5000余元，实现了“绿水青山”向“金山银山”的转化。社会层面，古建保护、基础设施提升和人居环境改善共同促进了乡村和谐振兴，成为南方丘陵地区可复制的典范。

关 键 词： 生态清洁小流域；生态治理；治理成效；高安市

Construction Achievements of the Genshan Ecological and Clean Small Watershed in Gao'an City, Jiangxi Province

Zhang Xiaosheng

Gao'an Water Conservancy Bureau, Gao'an, Jiangxi 330800

Abstract： Through systematic governance, the Genshan ecological and clean small watershed in Gao'an City has successfully explored a model that achieves synergistic progress in ecological benefits, economic development, and social advancement. By integrating funds from multiple departments, the implementation of projects such as soil and water conservation, water system connectivity, and human settlement environment improvement has resulted in the treatment of 868 hectares of soil erosion, achieving a soil conservation rate of 91.63%, a forest and grass coverage rate of 85.82%, and stable water quality meeting Class III standards, significantly enhancing regional ecological functions. In terms of economic benefits, the small watershed has leveraged its Ming and Qing ancient architectural complexes and ecological resources to develop rural tourism, attracting approximately 25,000 visitors annually and boosting local per capita income by over 5,000 yuan, thereby realizing the transformation from "green mountains and clear waters" to "invaluable assets." Socially, the protection of ancient buildings, improvement of infrastructure, and enhancement of the human settlement environment have collectively promoted harmonious rural revitalization, serving as a replicable model for hilly regions in southern China.

Keywords： ecological and clean small watershed; ecological governance; governance achievements; Gao'an City

引言

高安市位于江西省会南昌的西部，地处鄱阳湖平原西缘锦江下游，东邻南昌，西接上高和宜丰，南与樟树、丰城相连，北邻奉新，距离南昌市约42公里。高安市地理位置优越，素有“赣中明珠”之称。该地区年平均降水量为1560毫米，年平均气温为17.7摄氏度，全年无霜期为276天，适宜农业发展。得天独厚的自然条件为高安市的生态环境建设和农业发展提供了有力支撑。

高安市积极推进生态清洁小流域建设，项目实施显著改善了水质并有效保护了水土资源，为农业的可持续发展提供了保障。同时，生态清洁小流域的建设还推动了农村经济的多元化发展，特别是通过发展生态旅游、生态农业等新兴产业，增加了农民的就业机会和收入来源。此外，流域治理项目改善了农村人居环境，提升了居民的生活质量，促进了居民健康水平和幸福感的提升，为农村社会稳定和经济发展提供了强有力的支持^[1]。

一、艮山小流域项目区概况

艮山生态清洁小流域位于江西省高安市西北部，属于华林山镇境内，地理位置优越，交通便捷。该流域距离高安市城区约55公里，处于鄱阳湖平原的西缘，交通便利，四通八达。流域东接高安市伍桥镇，南邻龙潭镇，西北与奉新县上富镇相连，北接奉新县会埠镇。该区不仅有昌九昌赣、武吉、昌铜等四条高速公路交汇，还拥有贯穿流域的219省道，为流域的交通和物资流通提供了便捷条件。流域所在的地区是外界与流域之间的重要门户，为区域内经济发展和生态建设提供了有力支持^[2]。

艮山小流域的土地总面积为32.82平方公里，涵盖了艮山村、东溪村等多个村庄。流域的地理坐标大致位于东经115°10'11"至115°05'14"之间，北纬28°34'40"至28°38'05"之间，中心地理坐标为东经115°08'06"，北纬28°36'16"。流域内的地貌类型以山地为主，整体地形呈现北高南低、山川交错、丘陵起伏的特点，流域呈东北至西南方向狭长分布。海拔变化较大，从最低80米到最高814米，形成了丰富多样的地形和自然景观。这些地形特征为水源涵养、生态保护和农业发展提供了多样的资源和条件。

气候方面，艮山小流域属于亚热带季风性湿润气候，年均降水量为1576毫米，降水充沛，适宜农业生产。年平均气温为17.7摄氏度，全年无霜期约为276天，这为农业活动提供了稳定的气候保障。土壤类型以红壤为主，具有较好的水分保持能力和较高的肥力，为农业生产提供了优质的土壤条件。流域内的自然植被主要为亚热带常绿阔叶林，这些植被不仅丰富了流域的生态资源，还在水土保持、空气净化和生态平衡方面发挥着重要作用，确保了流域生态环境的稳定性和可持续发展。

二、小流域治理举措

（一）多部门资金协同建设

高安市艮山生态清洁小流域的治理工程依托政府的资金整合与跨部门协作，充分发挥了各部门的优势，推动了小流域的全面治理。自2011年起，水利部门陆续实施了中小河流治理项目，并在2017年进行了相关项目的升级与优化。2014年启动的水生态文明村建设项目，以及2020年实施的水系连通和农村水系综合整治项目，是这一系列举措的核心部分。此外，整合了2014年和2015年财政涉农扶贫资金，以及农业部门的美丽乡村建设资金，总共筹集了2.6亿元，保障了流域治理的顺利开展。通过实施水库移民、新农村建设、农村水系综合治理和人居环境提升等多项措施，不仅提升了流域的水资源管理水平，还为生态修复和经济发展提供了坚实的资金保障^[3]。

通过这些跨部门的合作，艮山生态清洁小流域的治理取得了显著进展，特别是在水土保持和生态修复方面。依托林长制和河长制的实施，流域内的生态保护工作得到了加强。这些制度的落实有效促进了水资源的科学管理和区域生态系统的恢复，为推动小流域可持续发展奠定了坚实基础。

（二）水土保持措施

为了提高艮山生态清洁小流域的水土保持能力，项目团队根据流域的地理特点精心设计与实施了多项水土保持工程。通过因地制宜的技术手段，布设了覆盖、拦挡、截排水、沉沙等措施，有效减缓了水土流失的速度。全流域治理水土流失面积达868hm²，其中包括136hm²的经果林种植和732hm²的封禁治理。这些措施大大降低了土壤流失速度，增强了水源涵养能力，保护了土地资源。此外，通过实施水土保持工程，流域内水土保持率得到了显著提升，确保了水土资源的可持续利用^[4]。

流域内还建设了多个重要的生态设施，为长期生态保护提供了坚实基础。包括5个蓄水池、2个封禁碑牌和5处宣传栏，进一步提升了生态防护体系的完备性。同时，村内道路绿化达到了12000米，进一步改善了流域内的生态环境。此外，还在流域内建设了7处污水处理设施、3600米的生态停车场、3800米的游步道和1400米的河堤等基础设施，为流域的长期发展提供了保障。通过生态挡墙和拦沙堰等设施的建设，流域的水土保持能力得到了进一步增强，不仅有效防止了土壤流失，还改善了流域的环境质量，为生态功能的提升提供了有力支持^[5]。

（三）生态林修复与环境整治

艮山小流域的治理工作注重区域生态的整体修复，通过封育封禁、补植补种等措施提升区域的生态质量和稳定性。流域内进行了大规模的生态林修复，恢复了大量的森林覆盖，使得生态系统的质量得到了显著提升。通过这些生态修复措施，区域内的水土流失得到了有效控制，区域生态功能进一步增强。这不仅改善了流域内的生物多样性，还为流域提供了良好的水源涵养功能，保障了生态平衡^[6]。

同时，在环境整治和提升方面，艮山小流域根据当地的生态和文化特点，结合传统村落的特色，开展了村庄整治和水生态文明建设。特别是在艮山村，流域治理注重保持青砖灰瓦、飞檐翘角和小桥流水等传统民居风格，进行了110幢房屋的维护和改造。对村内的古石巷进行了修复，打造了水街，并在村内沿河建设了河道。这些举措不仅提升了人居环境，还使得村庄的文化特色得到了更好的保存，形成了生态与文化融合的良好模式。

（四）治河疏水与水质提升

为了提升流域的水质和改善水系环境，艮山小流域还在治河疏水方面做出了诸多努力。通过清淤清障、修复堤防、建设生态调节坝和人工湿地等措施，有效改善了苏溪河的水流状况和水质。清理河道沉积物、修复破损的堤防和加强河道管理，极大地提升了河流的通水能力，保障了水体的流动性和水质的稳定。生态调节坝和人工湿地的建设进一步加强了水体的自净能力，提高了水质达标水平，为流域的生态清洁小流域建设提供了有力支持。

这些措施不仅改善了河道的生态环境，还为流域的可持续发展提供了坚实的基础。通过治理河流、提升水质，艮山小流域在保护生态环境、提升水资源利用效率方面取得了显著成效，为其他地区的水系治理提供了有益的经验 and 示范。

三、治理成效

（一）生态效益方面

通过实施一系列水土保持措施，艮山生态清洁小流域显著改善了水土流失问题，并大大增强了流域的生态稳定性。流域内水土流失面积得到了有效控制，水土保持率达到了91.63%，显著高于高安市的平均水平。这一成效归功于多项水土保持工程的实施，如拦挡、截排水、沉沙等技术手段，它们有效减少了土壤侵蚀，增强了水源的涵养能力，并有效提高了流域的防洪抗旱能力。此外，通过地表径流的拦蓄和入渗，减少了泥沙的流失，有效地减少了泥沙进入下游河道，提升了水体的水质和流域环境，保障了流域生态系统的良性循环。

艮山小流域的林草覆盖率已达到85.82%，远高于高安市的40%水平，这对提升区域的生态功能和生物多样性起到了积极作用。通过林草植被恢复和生态林修复措施，流域内的绿化程度大幅提升，进一步改善了空气质量，并为水土保持和生物栖息地的恢复提供了支持。这些措施不仅增强了流域生态系统的稳定性，也为区域内的生物多样性提供了良好的栖息环境。水质方面，出水口水质稳定达到了Ⅲ类水标准，满足了生态清洁小流域的水质要求，为流域的生态健康提供了强有力的保障^[7]。

（二）经济效益方面

艮山生态清洁小流域的建设充分利用了当地丰富的旅游资源，成功推动了乡村旅游业的发展。随着流域内环境的改善和生态建设的推进，艮山村逐渐成为都市人向往的休闲旅游目的地。每年，成千上万的游客来到这里避暑、休闲和进行康养旅居，流域的生态美景和文化资源吸引了大量游客，成为当地经济增长的新亮点。伴随着旅游业的蓬勃发展，艮山村的人均收入增加了约5000元，显著提高了当地农民的生活水平。小流域治理项目不仅改善了生态环境，还通过为当地提供更多的就业机会，带动了农业、旅游和服务业等多个行业的共同发展，形成了良性循环，促进了经济和社会的双重发展。

此外，生态旅游的兴起进一步促进了当地特色产业的发展，特别是生态农业和农村手工业的创新与振兴。随着乡村旅游的不断发展，生态农业成为了当地农民的重要收入来源，提供了更多就业机会，同时也促进了农业技术的进步和绿色发展的理念。农村手工业也因旅游的带动而复兴，吸引了游客对地方特色产品的青睐，增加了当地的经济收入。通过旅游和乡村特色产业的发

展，小流域建设为农村经济注入了新的活力，推动了乡村振兴战略的实施^[7]。当地居民通过参与旅游、农业和手工业等产业，不仅获得了更多的收入来源，也为乡村经济的多元化发展奠定了坚实基础。

（三）社会效益方面

艮山小流域建设注重文化遗产的保护与传承，尤其是对明清古建筑群的修复与保护。这些历史建筑不仅承载着深厚的文化底蕴，还成为当地的文化象征。通过精心的修复与保护，古建筑群成功保留了其历史风貌，成为游客参观和学习的重要文化遗产。艮山村借此将历史与现代相结合，展现出独特的文化魅力。这一举措不仅增强了村民对传统文化的认同与自信，还进一步提升了艮山村的文化影响力，为当地带来了更多的文化旅游资源，吸引了大量游客，推动了乡村文化的复兴与繁荣。

在基础设施建设方面，艮山小流域通过改善人居环境和提升公共设施，显著提升了村民的生活质量。村内的道路绿化、污水处理设施、生态停车场等设施的建设，为居民提供了更加舒适和便利的生活条件。这些基础设施的完善改善了村民的日常生活环境，使得乡村的居住条件得到了明显提升。同时，生态清洁小流域建设也增强了防洪抗旱能力，有效减少了自然灾害对当地的影响，为社会的稳定和经济的持续发展提供了保障。整体而言，艮山小流域的建设不仅提升了农民的生活水平，还推动了社会的和谐与乡村振兴，展现了生态与社会效益的良性互动。

四、结束语

高安市艮山生态清洁小流域建设的成功实践，展示了生态保护与经济社会发展的有机融合。通过整合多部门资金，实施一系列水土保持、生态修复和基础设施建设等措施，艮山小流域在提升生态功能、促进经济增长和推动社会和谐方面取得了显著成效。水土流失得到有效控制，水质得到改善，生态系统功能得到增强，同时，乡村旅游和特色产业的发展带动了农民收入的提高，推动了区域经济的多元化发展。此外，文化遗产的保护与传承也为流域增添了独特的文化魅力。艮山小流域的成功经验为其他地区提供了可借鉴的模式，推动了生态清洁小流域建设的可持续发展。未来，继续加强生态治理和社会经济的协调发展，必将为实现绿色、可持续的乡村振兴提供重要支持。

参考文献

- [1] 廖瑞钊, 邓桂如, 刘艳, 钟伟伟, 等. 推进生态清洁小流域建设助力乡村振兴战略实施 [J]. 中国水土保持, 2019 (7): 8-10.
- [2] 周光辉, 王平涛, 景园园. 鲁山县鹤鸽吴生态清洁小流域治理成效 [J]. 中国水土保持, 2025 (2): 72-73.
- [3] 祖文华. 镇宁自治县生态清洁型小流域治理的实践与探索 [J]. 水上安全, 2024, (10): 91-93.
- [4] 刘晔, 张守红, 李华林, 等. 中国生态清洁小流域综合治理研究进展 [J]. 生态学报, 2025, 45(05): 2042-2057. DOI: 10.20103/j.stxb.202404190874.
- [5] 顾建, 魏琳, 刘文娟. 上海崇明生态清洁小流域村落水体治理方案研究 [J]. 水利规划与设计, 2023, (02): 14-16+39.
- [6] 李万荣. 河曲县南沟河生态清洁小流域综合治理工程初步设计 [J]. 山西水利, 2022, (09): 41-42+48.
- [7] 乔殿新, 王力, 郭莹莹. 论新阶段水土保持生态清洁小流域发展 [J]. 中国水利, 2022, (14): 34-37.

水利工程施工中环境保护与可持续发展的平衡研究

陈见青

江苏省昆山市水务工程质量与安全监督站, 江苏 昆山 215300

DOI:10.61369/WCEST.2025080008

摘 要： 水利工程施工活动会经由水体扰动、栖息地破碎、污染物累积等路径，对流域生态系统持续形成压力，而区域防洪、供水等发展需求又对工程建设进度提出刚性约束。环境容量有限性和发展需求紧迫性在时间周期、空间分布、成本分摊层面构成结构性冲突。平衡机制要建立环境阈值分区分管控体系来匹配施工强度与生态承载力，选择高效环保技术缩短处理周期以保障工期与环保双达标，构建多方协同的利益平衡框架来实现环境－经济－社会效益统筹。

关 键 词： 水利施工；环境容量；发展约束；动态阈值；协同机制

Research on the Balance Between Environmental Protection and Sustainable Development in Water Conservancy Project Construction

Chen Jianqing

Water Conservancy Project Quality and Safety Supervision Station of Kunshan City, Jiangsu Province, Kunshan, Jiangsu 215300

Abstract： Water conservancy construction activities exert continuous pressure on the river basin ecosystem through pathways such as water body disturbance, habitat fragmentation, and pollutant accumulation. Meanwhile, regional flood control and water supply development demands impose rigid constraints on the construction progress. The limited environmental capacity and the urgency of development needs constitute structural conflicts in terms of time period, spatial distribution, and cost allocation. The balancing mechanism should establish a zonal control system based on environmental thresholds to match construction intensity with ecological carrying capacity, select efficient and environmentally friendly technologies to shorten the treatment cycle to ensure both construction schedule and environmental protection standards are met, and build a multi-party collaborative framework for interest balance to achieve the integration of environmental, economic, and social benefits.

Keywords： water conservancy construction; environmental capacity; development constraints; dynamic thresholds; collaborative mechanism

引言

水利工程属于流域防洪、供水、灌溉的基础设施，其建设规模和强度在不断持续扩大，施工活动所引发的水体浊度激增、土壤扰动、栖息地占用等环境问题日益突出。然而流域经济社会发展对于水资源保障、防洪能力提升的需求又要求工程按期投产，这种矛盾集中体现为环境系统承载容量有限且恢复周期长，施工活动需要在特定时空窗口内集中推进。平衡点的寻找不能依靠单向让步，而要构建基于环境阈值的精准管控机制，在保证生态安全底线的前提下实现发展目标^[1]。

一、施工活动的环境扰动与发展需求传导机制

（一）水环境扰动的累积效应与传导路径

水利工程施工活动对水环境的扰动有明显累积性和传导性特点。基坑开挖时土方作业让大量泥沙进入水体，使得悬浮物浓度短时间内急剧上升且浊度峰值持续时间长，这些悬浮物会随水流向下游扩散，扩散距离和流速、水深密切相关，影响范围能到施

工点下游数公里。混凝土浇筑阶段释放的碱性物质使局部水体 pH 值明显升高，碱性物质在水中经稀释、中和和反应逐步降解，但完全恢复背景水平需较长周期。施工废水若未经处理直接排放，其携带的悬浮物等污染物在河道水库中不断累积，累积量超水体自净容量时会引发水质持续恶化，影响下游灌溉供水功能正常发挥。

（二）陆域生态扰动的空间传递特征

施工场地占用之后直接让原有植被被清除，土壤结构也因此

作者简介：陈见青，男，汉族，江苏昆山人，工程师，大专，研究方向：工程建设质量安全监督。

遭到了破坏。施工占地范围以内，表层腐殖质土壤由于机械碾压、临时堆放丧失肥力，土壤有机质含量大幅下降，裸露地表在降雨冲刷的时候形成径流，携带土壤颗粒朝着周边区域扩散，导致施工区外围一定范围出现沉积层，覆盖原有植被根系影响其正常生长。运输通道开辟以后切断了原有动物迁徙路径，夜间施工照明、车辆噪声迫使对声光敏感鸟类、小型哺乳动物放弃原有栖息地向外迁移。弃土场要是选址在坡地，堆弃土方在重力作用下可能发生滑坡、泥石流等次生灾害，影响范围沿坡向扩展威胁下游农田、村庄安全。施工振动通过地层进行传播，对施工点周边地表建筑物、地下管线产生持续应力作用，加速其老化进程。

（三）可持续发展需求的刚性约束表现

流域防洪安全给水利工程按期完工定下了刚性时间要求，汛前必须完成关键防洪设施的建设工作，施工窗口期通常被压缩到枯水季的短短数月时间。这种时间约束迫使施工强度有了大幅提高，单位时间内土方开挖量和混凝土浇筑量成倍增长，随之而来的环境扰动强度也出现了相应放大。

区域供水保障要求工程能够尽早发挥出效益，水库和引水渠道需在供水紧张期到来前投入运行，施工进度压力直接传导到了环保措施执行环节，当工期与环保要求之间产生冲突的时候，部分环保工序被迫进行简化或延后实施。农业灌溉季节性需求让灌区改造工程必须避开春耕和秋收关键农时，施工时段选择的余地变得越来越小，若遭遇异常气候导致工期出现延误情况，赶工期与生态保护之间的矛盾会更加突出。流域经济发展对水电开发和航运改善的需求持续增长，这些发展诉求转化成对施工规模和建设标准的更高要求，进而增加了施工活动对周边环境的扰动压力。

（四）环境阈值与发展需求的临界耦合点

水体自净能力是构成环境容量的刚性边界，河流在自然状态下降解污染物的能力有限，当施工排放的悬浮物负荷超过水体稀释容量时，水质就会出现恶化拐点且下游断面浊度超标，这将对鱼类繁殖造成威胁。生态敏感期和施工高峰期时间重叠会形成风险窗口，春季作为多数水生生物繁殖期进行高强度水下作业，持续浊度升高和噪声干扰会使鱼类产卵场废弃且繁殖成功率显著下降。候鸟迁徙季节若与土方集中作业期重叠，大型机械噪声和人员活动会迫使候鸟绕道或缩短停歇时间影响体能储备。

施工成本中环保投入的经济平衡点决定环保措施实施深度，环保设施投资占比过低末端治理能力难满足达标排放要求，植被恢复和土壤熟化通常需数个生长季，而工程竣工验收往往在施工结束短期内进行，验收时生态指标难以达预期目标形成时间缺口。

二、环境保护与可持续发展的失衡机制

（一）时间维度的周期错配

施工活动的时间安排跟生态系统敏感期存在天然冲突，水利工程为赶在汛期前完成导流截流等关键节点，施工高峰通常集中在春季枯水期这个时段，而此时恰好是鱼类产卵洄游以及水鸟筑巢繁殖的关键窗口。高强度水下作业产生的浊度扰动和围堰施工造成的河道阻隔，直接破坏鱼类繁殖场水质条件和连通性，导

致鱼类种群繁衍受到阻碍^[2]。

环境修复进程与工程验收节奏的错位加剧了这种失衡状况，植被重建需要经历多个生长季才能形成稳定群落，土壤微生物恢复和有机质积累更是一个缓慢的过程，而工程管理要求在施工结束后短期内完成验收交付。这种时间错配迫使施工单位采取突击式生态修复措施，通过密集种植和客土回填等手段快速达到表观绿化效果，遇到干旱洪水等极端气候时便会出现大面积退化现象。

（二）空间维度的容量冲突

局部区域里有限环境容量和集中施工强度的矛盾特别突出，河道整治以及水库建设通常要在特定河段集中布置多个作业面，泥浆分离、混凝土拌合和钢筋加工等工序会同步推进，污染物堆放在空间上呈现高度叠加的状态。局部水域的纳污容量本身就比较有限，多点源污染物汇入后会迅速突破水体自净阈值，就算单个排放口达到了标准，叠加效应仍有可能造成区域性水质恶化。

弃土场选址面临生态保护和经济成本的两难博弈局面，远离施工现场虽能减轻对核心区域的直接扰动，但运输距离增加会导致成本攀升且运输过程产生的扬尘和尾气排放会形成新的污染源，若就近选址则可能侵占河岸缓冲带和湿地等生态敏感区域，压缩野生动物的生存空间。

（三）经济维度的成本分摊失衡

环保投入和工程预算存在结构性矛盾，这制约着环保措施深入实施。施工企业在投标阶段为获取项目日常常压低报价，中标后便面临成本控制的压力，环保设施作为非直接产出环节常被当作支出负担。当环保设施投资挤占主体工程资金时，施工单位会倾向于选择低成本且见效快的末端治理方式，对源头减排、工艺优化等需长期投入的措施缺乏积极性。

工期延误引发的间接成本难以进行量化分摊，为满足环保要求调整施工方案、增设处理设施导致工期延长，使施工企业承担额外机械设备闲置费、人员窝工损失，可这些成本在合同中往往没有明确补偿机制。生态修复责任主体界定模糊加剧了成本转嫁现象，施工结束后的长期生态监测、补植养护等持续性投入，在建设单位、施工企业、运营单位之间缺乏清晰责任划分，导致生态修复工作在移交环节出现断档。

三、基于双赢目标的动态平衡策略

（一）环境容量约束下的施工强度分区管控

施工强度管控的关键之处在于把环境容量的刚性约束转变为可操作的分区准入标准以及动态调控机制，借助科学评估区域生态承载力来建立差异化的施工活动管理体系，达成环境保护底线坚守和工程建设有序推进的协调统一。

1. 生态敏感度分级与施工活动准入清单

区域生态敏感度评估要综合考量水生生物分布、珍稀物种栖息以及水源保护功能等多个维度的因素。核心保护区要明确禁止高扰动作业类型，像水下爆破、大规模清淤这类可能造成不可逆影响的施工活动，需改用低扰动工艺来替代。缓冲区可以设定施

工活动的时间窗口，在鱼类产卵期、候鸟迁徙季节实施临时性管控，非敏感期允许按照规范强度开展作业。一般区域则着重对污染物排放总量进行控制，在满足达标排放的前提条件下，施工单位能够根据工程进度需求灵活安排作业计划。比如在南水北调中线工程丹江口库区施工过程中，把水源一级保护区划定为禁止施工区，二级保护区仅允许在枯水期进行必要的护岸工程，通过分级管控既保障了水源安全，又为工程建设预留了合理空间。

2. 污染物排放的时空动态分配机制

施工现场多个作业面同步推进的时候，污染物排放在空间上的叠加效应要通过总量动态分配来化解，根据受纳水体的流量变化和自净能力波动情况，按日或者按周去调整各个施工点的排放额度。丰水期水体的稀释能力比较强，可以适当提高单点的排放上限，枯水期则需要收紧相关控制指标，必要的时候错峰安排高排放的工序。泥浆处理以及混凝土养护废水等高浓度污染源要优先分配处理设施资源，生活污水等常规污染物可采用简易的处理方式，通过优先级排序提高环保设施利用效率。排放时段的精细化管理同样十分关键，要避开水生生物摄食和繁殖的活跃时段，选择水体流动性较强的时间窗口排放，利用自然稀释降低生态方面的影响。

3. 关键环境指标的实时监测与阈值预警

在线监测系统的部署把静态管控转变为动态响应机制，在施工点上下游布设水质监测断面来实时采集浊度、溶解氧、pH值等关键指标数据，并且设置注意值、警戒值、限制值这三级预警阈值。当监测值达到注意阈值的时候，施工单位需要加密巡查频次并排查潜在风险源，若触及警戒阈值就要启动应急预案并减少同时作业的工作面数量，要是超过限制阈值就必须立即停工且要等水质恢复之后才可以复工。这种分级响应机制给施工管理赋予了弹性调整空间，避免了一刀切式停工对工程进度造成过度冲击，同时通过阈值约束确保环境安全底线不会被突破。

（二）发展需求导向的环保技术优选路径

环保技术选择需要同时兼顾处理效率和工程进度保障。传统沉淀池存在占地面积大且泥沙沉降周期长的问题，难以适配高强度开挖所产生的泥浆处理需求。采用絮凝剂强化沉淀技术能够把泥沙分离时间缩短至自然沉降的三分之一，在使上清液达标排放的同时避免因泥浆池容量不足导致施工停滞^[4]。模块化环保设施灵活配置可匹配施工强度的阶段性变化，基坑开挖高峰期增设临

时处理单元，土方回填阶段则撤除部分设备以降低运行成本。这种弹性配置方式既能满足高峰期处理能力需求，又能避免设施长期闲置造成资源浪费。

生态修复工序与主体工程同步推进可有效压缩总工期，边坡开挖后立即进行挂网喷播，利用施工便道运输苗木同步完成绿化种植。相比竣工后集中修复，同步修复能让植被提前进入生长期，验收时生态指标更易达标。就像黄河小浪底水利枢纽工程在施工过程中，将表层腐殖质土壤单独剥离堆存，待土方回填完成后原位覆盖，配合本土植物种子直播，既保留了土壤微生物群落，又缩短了植被恢复周期，施工结束一年内植被覆盖度即恢复至周边自然水平。

（三）环境-经济-社会协同的综合保障机制

构建多方协同机制要打破设计施工监管环节信息壁垒，环保专业人员驻场参与施工方案动态优化，当地质条件变化需调整开挖方式时环保工程师同步评估新方案环境影响并提出泥浆处理边坡防护配套调整措施，以此避免方案变更后环保设施滞后导致达标风险^[5]。激励约束机制应体现对称性原则，把环保绩效纳入工程款支付条件并让月度环境监测达标率与进度款拨付比例挂钩，对提前完成生态修复目标的施工单位给予奖励系数形成环保投入正向激励。

统筹生态补偿资金与区域发展收益需建立跨部门协调平台，从水利工程发电收益供水收费中提取一定比例用于流域生态修复，让周边社区因生态改善获生态旅游特色农业增收反哺工程环保投入，构建利益共享机制消解环保成本在单一主体的集中压力。

四、结语

施工活动对环境扰动存在累积性，加上可持续发展需求有刚性，这俩一起构成水利工程建设双重约束。失衡是因为时间周期错配、空间容量冲突、成本分摊不清这三个维度有结构性矛盾。动态平衡策略依靠环境容量分区管控来明确施工强度上限，借助技术优选达成环保与工期协同，通过多方协同机制来理顺利益分配。平衡的实质是在生态承载力边界之内优化资源配置，让环境保护成为提升工程质量内生动力而非外部约束。

参考文献

[1] 薛静. 水利工程施工中的环境保护与可持续发展策略 [J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(06): 25-26.
[2] 张小龙. 港口水利工程施工中环境保护与生态恢复 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(11): 33-35.
[3] 刘德玖. 水利工程施工及生态环境保护措施探讨 [J]. 中华建设, 2025, (03): 91-93.
[4] 周明旭. 水利工程绿色施工技术与生态环境保护 [J]. 人民黄河, 2024, 46(S1): 60-61+63.
[5] 马莉. 水利工程绿色施工与生态环境保护的协同研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41(03): 107-109.

水利工程中电气控制系统可靠性提升技术研究

宋杰

贵港市润港工程勘察设计有限责任公司, 广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025080009

摘 要 : 本文聚焦水利工程中电气控制系统可靠性提升技术研究,从硬件、软件、通信网络三大核心模块剖析故障机理,构建融合故障树分析(FTA)、失效模式与影响分析(FMEA)等传统方法与模糊故障树(FFTA)、贝叶斯网络(BN)的多层次可靠性分析体系,并基于MATLAB/Simulink、OPNET等工具实现多领域协同仿真评估,验证了模型与实测数据的一致性(误差4.8%)。提出硬件冗余设计(双PLC热备切换 $\leq 50\text{ms}$)、抗干扰优化及全生命周期管理,软件模块化容错编程与实时调度优化,通信网络三级冗余拓扑与全链路防护的一体化提升技术。构建“硬件-软件-环境”三位一体状态监测体系,融合机器学习与深度学习实现智能故障诊断,并建立“数据-模型”双驱动的预测性维护机制,形成数字化智能运维方案。技术可显著提升系统平均无故障工作时间(MTBF达8600h)与应急响应能力,为水利工程电气控制系统的可靠性设计、优化及运维提供了理论支撑与技术参考。

关 键 词 : 水利工程; 电气控制系统; 可靠性提升; 冗余设计

Research on the Technology for Enhancing the Reliability of Electrical Control Systems in Water Conservancy Projects

Song Jie

Guigang Run'gang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract : This paper focuses on the research of technology for enhancing the reliability of electrical control systems in water conservancy projects. It analyzes the failure mechanisms from three core modules: hardware, software, and communication networks, and constructs a multi-level reliability analysis system that integrates traditional methods such as Fault Tree Analysis (FTA) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) with Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) and Bayesian Networks (BN). Furthermore, it achieves multi-domain collaborative simulation evaluation based on tools such as MATLAB/Simulink and OPNET, verifying the consistency between the model and measured data (with an error of 4.8%). The paper proposes integrated enhancement technologies including hardware redundancy design (with dual PLC hot standby switching time $\leq 50\text{ms}$), anti-interference optimization, and full lifecycle management; software modular fault-tolerant programming and real-time scheduling optimization; and communication network three-level redundant topology with full-link protection. It constructs a "hardware-software-environment" trinity state monitoring system, integrates machine learning and deep learning for intelligent fault diagnosis, and establishes a "data-model" dual-driven predictive maintenance mechanism, forming a digital intelligent operation and maintenance solution. The technology can significantly improve the system's Mean Time Between Failures (MTBF reaching 8600h) and emergency response capability, providing theoretical support and technical references for the reliability design, optimization, and operation and maintenance of electrical control systems in water conservancy projects.

Keywords : water conservancy projects; electrical control systems; reliability enhancement; redundancy design

引言

随着“数字水利”“智慧水利”战略的深入推进,电气控制系统已从传统的“设备驱动型”升级为“智能中枢型”,成为实现水利工程自动化调度、精准控制及高效运维的核心载体。然而水利工程多地处偏远流域、河口海岸等复杂环境,电气控制系统长期面临高湿度、强振动、电磁干扰、温度剧烈波动等极端工况考验,同时需承受防洪汛期、供水高峰期等周期性高负荷运行压力。当前学界与工程界已针对电气控制系统可靠性开展初步研究,但现有技术仍存在明显局限。基于此,本文以水利工程电气控制系统可靠性提升为核心目

标,剖析系统耦合故障机理并建立多维度可靠性评估体系;从硬件、软件、通信网络三大维度提出一体化提升技术;构建状态监测与智能运维系统,实现从“被动抢修”到“主动防控”的转变。研究成果旨在破解复杂环境下系统可靠性不足的瓶颈,为水利工程的安全稳定运行提供技术支撑,助力智慧水利建设向更深层次推进。

一、系统故障机理分析与可靠性评估方法

(一) 典型故障模式与机理研究

电气控制系统涉及领域较多,相关技术有计算机技术、网络智能技术等,在电气控制系统中对成熟技术的应用使得水利工程领域的电气控制系统实际应用

效果得到了很大提高,为水利水电工程自动化的实现提供了有力的保障^[1]。水利工程电气控制系统的故障与环境深度耦合,其复合型特征可从三大核心模块系统剖析。硬件作为物理载体,故障占比最高,主要源于环境适应性不足和元器件老化,潮湿、振动和电磁干扰分别导致电路腐蚀、机械磨损和信号失真,而供电波动则易引发电源损坏乃至系统瘫痪^[2]。软件作为逻辑核心,其故障多因设计缺陷与动态工况不匹配,缺乏应急逻辑、联锁保护和异常处理机制,可能导致闸门失控、设备危险运行,同时接口不兼容与代码冗余也分别造成“信息孤岛”和指令延迟^[3]。通信网络作为数据传输的纽带,其故障与链路环境和结构缺陷相关,线缆易受物理破坏,无线信号受干扰衰减,高负载下易数据碰撞,而缺乏冗余的单链路设计一旦中断,便会引发控制失联的连锁反应。

(二) 可靠性分析方法

为应对水利工程电气控制系统故障的复杂性与不确定性,需构建一个融合传统方法与创新技术的多层次可靠性分析体系^[4]。该体系应用成熟的故障树分析(FTA),以自上而下的方式分解系统失效,通过最小割集量化“轴承磨损”、“线圈过载”等关键底事件的重要度,为预防提供明确靶点;同时结合失效模式与影响分析(FMEA),对各部件的潜在失效模式按风险优先数(RPN)排序,优先改进“传感器信号失真”等高风险项,有效降低故障率;并利用马尔可夫模型量化双PLC热备份等冗余设计对系统平均无故障工作时间(MTBF)的提升效果^[5]。为克服传统方法在复杂工况下的局限,体系进一步引入创新技术,通过模糊故障树分析(FFTA)将难以量化的故障概率描述为模糊数,计算顶事件的模糊失效概率区间;借助贝叶斯网络(BN)强大的概率推理能力,动态更新故障概率,在监测到异常时快速定位最可能的致因;并开展多因素耦合分析,综合考虑环境、设备状态与运行负荷的交互作用,建立耦合失效模型,从而为可靠性设计与优化提供更全面、动态且精准的决策支持。

(三) 基于仿真的系统可靠性评估

为高效评估水利电气控制系统可靠性,采用“硬件-软件-通信”多领域协同仿真思路,借助MATLAB/Simulink、PSPICE、OPNET等工具构建模型^[6]。硬件层面,通过PSPICE搭建控制器、传感器等电路模型,并结合Simulink模拟电机、闸门动力学,注入元器件老化与环境干扰等故障;软件层面,基于

μC/OS-II构建调度模型,模拟任务执行与异常处理,并注入逻辑漏洞与数据错误;通信层面,利用OPNET和NS3构建工业以太网与无线传感网络模型,模拟链路中断与电磁干扰。评估体系结合了可靠度、MTBF等核心指标与数据传输成功率、指令响应时间等辅助指标^[7]。通过设计单一故障、多故障耦合及极端环境等多维度仿真场景,可验证冗余设计有效性(如备用控制器切换≤50ms)和应急处理能力,并通过参数敏感性分析(如通信带宽提升)为系统优化提供量化依据。将仿真结果(如MTBF为8600h)与现场实测数据(8200h,误差4.8%)对比以验证模型准确性,从而明确系统薄弱环节,为可靠性提升提供技术方向。

二、关键可靠性提升技术研究

(一) 硬件层面可靠性提升技术

为提升水利工程电气控制系统的硬件可靠性,需从冗余设计、抗干扰优化及全生命周期管理三方面构建综合体系。在冗余设计上,对控制器、电源和传感器等关键部件实施多重备份策略,如采用双PLC热备实现50毫秒内无缝切换,电源系统N+1冗余配置确保负载均衡,关键传感器则通过三取二表决机制提升数据可信度^[8]。抗干扰优化则针对高湿、强振动和强电磁环境,通过电路板分区布局、选用工业级元器件、IP67及以上防护等级外壳、内置防潮加热模块以及三级防雷击体系来保障硬件稳定运行。全生命周期管理贯穿始终,从选型阶段优先采用军品级和工业级元器件,到入库前进行高温高湿老化筛选,再到运维阶段建立数据库预测寿命并实施预防性更换,从而系统性地避免元器件老化与突发失效。

(二) 软件层面可靠性提升技术

为提升软件系统作为控制“逻辑中枢”的可靠性,需构建一个集容错编程、实时优化与全流程测试于一体的综合保障体系^[9]。该体系通过模块化设计与异常处理双重机制实现容错,将控制逻辑拆解为独立模块,在故障发生时进行隔离并调用备用算法,同时利用CRC-32等多重校验确保数据传输的完整性,并针对传感器断线等常见故障设计数据预测算法。在实时性方面,系统采用FreeRTOS等实时操作系统,通过抢占式调度为关键任务分配最高优先级,并结合“主算法+快速响应子程序”架构,在工况突变时激活简化流程以实现即时响应。通过构建“单元测试-集成测试-现场测试”三级验证体系,并结合软件版本管理与远程升级功能,形成从开发到运维的闭环管理,确保系统在各种异常下均能稳定运行,为水利控制提供坚实保障。

(三) 通信网络可靠性提升技术

为提升通信网络可靠性,需通过拓扑优化、传输强化和无线

适配三大技术路径综合解决链路中断、数据丢包及抗干扰能力弱等问题^[10]。拓扑上,构建“现场设备层-控制层-监控层”三级架构,现场层采用RS485总线,控制层通过工业以太网环形冗余实现故障快速切换,监控层则利用光纤保障远距离传输,并配备工业级冗余交换机将故障恢复时间控制在毫秒级。传输上,从物理层到应用层构建全链路防护,采用屏蔽双绞线与铠装光纤等高性能介质,结合时分多路复用(TDM)技术为不同数据分配专属通道,并引入数据重传与流量控制机制确保可靠传输,同时利用VPN加密和工业防火墙保障网络安全。针对布线困难区域,则引入适配性无线技术,远距离低速率场景采用LoRa,近距离高速率场景采用5G,并通过高增益天线与跳频技术优化信号,同时在关键节点构建有线与无线冗余备份机制,保障数据传输的连续性与稳定性。

三、基于状态监测的智能运维技术

(一) 系统状态监测体系构建

为构建水利工程电气控制系统状态监测体系,需以故障特性为导向,通过“硬件-软件-环境”三位一体的参数体系,实现对设备运行状态的全面感知与精准采集。该体系聚焦于电机温度与振动、控制器CPU占用率、软件任务周期偏差及现场温湿度等核心指标。传感器部署采用“固定监测+移动补盲”的立体化方案,在关键设备上嵌入式安装专用传感器,同时在分散区域利用太阳能移动终端进行数据补充。数据采集与传输系统采用“分布式采集-混合传输-边缘预处理”架构,分布式节点就近对传感器信号进行滤波放大等调理,通过光纤与工业以太网保障核心数据毫秒级传输,并利用LoRa技术上传偏远区域数据,辅以4G/5G备用链路。最终,数据经边缘节点滤波压缩后,存入云端时序数据库,为智能诊断与维护提供可靠的数据支撑。

(二) 智能故障诊断技术

智能故障诊断技术融合数据与知识驱动方法,实现对故障的精准识别、定位与分析。在特征提取阶段,系统针对不同监测数据差异化提取统计、频谱和能量熵等多维特征,以区分轴承磨损、传感器漂移等故障。诊断模型采用“机器学习+深度学习”融合方案,对样本少的典型故障使用SVM和随机森林,对复杂故障则用CNN与LSTM捕捉时空演化规律,并结合迁移学习解决现

场样本稀缺问题。同时,故障诊断专家系统整合专家经验与历史案例,通过正反向推理相互验证,提升结果可靠性。最终,系统通过可视化界面实时展示故障详情并自动推送维修方案,指导运维人员快速处理。

(三) 预测性维护与健康管理

预测性维护与健康管理以设备剩余寿命预测为核心,通过“数据驱动+模型驱动”的混合方法实现从“事后维修”到“事前预防”的转变。数据驱动方法利用LSTM等深度学习算法分析电机等复杂设备的监测数据,而模型驱动方法则基于物理模型计算电容等简单元器件的老化速率,两者相互补充形成全面的寿命预测体系。基于此,系统综合考虑设备重要性、寿命与成本,通过多目标决策算法为核心设备触发即时预警,为非核心设备制定经济计划,并自动生成规范化维护方案。所有功能集成于健康管理平台,通过可视化大屏以红黄绿三色直观展示设备健康状态,自动发送预警,并在紧急时触发应急联动,同时提供数据分析以支撑系统优化。作为数据传输“纽带”的通信网络,其可靠性通过拓扑优化、传输强化和无线适配三大路径提升:构建“现场-控制-监控”三级冗余网络,采用环形以太网和光纤实现断点自愈与远距离稳定传输;选用屏蔽线缆和铠装光纤,并结合时分复用与数据重传机制实现全链路防护;针对布线困难区域,按需部署LoRa或5G无线技术,并通过天线优化与有线无线备份确保通信连续性。此外,VPN加密与工业防火墙等网络安全措施同步推进,共同推动水利工程电气控制系统运维的数字化与智能化升级。

四、结束语

本文围绕复杂环境下该系统可靠性不足的核心痛点,从故障机理、评估方法、提升技术及智能运维四个维度开展系统性研究,形成了覆盖“问题诊断-方案设计-落地保障”的全链条技术体系,为破解传统系统运行瓶颈提供了理论与实践支撑。未来可结合长期实地监测数据,优化预测性维护模型的寿命评估精度;融合数字孪生技术,构建虚实联动的可靠性仿真平台,实现故障场景的全流程复现与技术验证;推动多工程数据共享,建立电气控制系统可靠性数据库,为通用化、标准化提升方案的制定提供支撑。

参考文献

- [1] 俞娟. 基于高耦合逆变补偿的水利工程电气控制系统设计[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 70-76. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.009.
- [2] 曾庆祥. 水利工程电气自动化系统的信息安全防护技术[J]. 水上安全, 2024(18): 5-7.
- [3] 戴萱, 伏杰, 徐书洋. 电气工程中的智能控制系统设计与优化研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(10): 239-241. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2024.10.074.
- [4] 张小伟. 基于智能水利工程电气自动化系统优化设计与实践[J]. 现代建筑工程技术, 2025, 1(2). DOI: 10.37155/3041-0819-0102-15.
- [5] 贾军利. 闸门液压启闭机电气控制系统设计[J]. 区域治理, 2018(9): 164. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4595.2018.09.151.
- [6] 焦丹丹, 王阳, 那宏壮, 等. 水利工程电气自动化系统分析[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(20): 124-125. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2021.20.054.
- [7] 任杰, 周开欣, 严维. 如何加强电气自动化工程控制系统建设[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(36).
- [8] 王泽忠, 高莹, 胡安静, 等. 水电站电气系统设计分析研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(2): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2025.02.006.
- [9] 吴琴琴, 洪波. 某大型水利工程国产电机控制系统设计 and 应用[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 69-70, 73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-182X.2017.12.030.
- [10] 李作琴. 水利工程电气自动化及其电气一次设计研究[J]. 今日自动化, 2021(7): 19-21.

水利工程中混凝土裂缝成因及防治措施研究

樊龙飞

张家港市水利建设工程有限公司，江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/WCEST.2025080010

摘 要： 水利工程中，混凝土作为基础结构材料，其裂缝问题严重影响工程质量和使用寿命。本文通过分析水利工程中混凝土裂缝的成因，结合实际案例，探讨了常见的裂缝类型及其发生机制，提出了相应的防治措施。研究表明，混凝土裂缝的产生主要与施工质量、设计不当、环境因素以及混凝土材料的特性有关。通过改进施工工艺、优化设计方案、采用高性能混凝土材料及加强养护管理，可以有效防止和减少裂缝的发生。

关 键 词： 混凝土裂缝；水利工程；成因；防治措施；施工质量

Research on the Causes and Preventive Measures of Concrete Cracks in Hydraulic Engineering

Fan Longfei

Zhangjiagang Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract： In hydraulic engineering, concrete, as a fundamental structural material, is plagued by cracking issues that significantly compromise the quality and service life of projects. This paper analyzes the causes of concrete cracks in hydraulic engineering, explores common crack types and their mechanisms through practical cases, and proposes corresponding preventive measures. Research indicates that the occurrence of concrete cracks is primarily related to construction quality, improper design, environmental factors, and the properties of concrete materials. By improving construction techniques, optimizing design plans, utilizing high-performance concrete materials, and enhancing maintenance management, the occurrence of cracks can be effectively prevented and reduced.

Keywords： concrete cracks; hydraulic engineering; causes; preventive measures; construction quality

引言

水利工程中，混凝土结构广泛应用于水坝、渠道、桥梁等重要设施的建设中，确保其长期稳定性与安全性至关重要。随着水利工程规模的不断增大和复杂性的提高，混凝土裂缝问题逐渐成为影响工程质量的突出问题。混凝土裂缝不仅会降低结构的承载能力和抗渗性能，还可能引发结构的损坏和使用寿命的缩短。因此，了解裂缝的成因及防治方法，采取有效的预防和修复措施，是水利工程施工和管理中的重要课题。

一、混凝土裂缝的成因分析

（一）施工质量问题

施工质量是影响混凝土裂缝产生的关键因素之一。混凝土的浇筑过程中，如果混凝土的均匀性不足或振捣不充分，容易导致混凝土内部存在较大的孔隙，这些孔隙会随着时间的推移形成裂缝。特别是在高温环境下，混凝土水分蒸发较快，若未及时进行适当养护，水泥浆体会快速干结，容易发生收缩裂缝^[1]。此外，混凝土施工过程中未严格按照设计要求进行，尤其是对材料的配比和混凝土强度等级未做严格控制，可能导致混凝土的应力分布不均，进而引发裂缝。施工时，若施工工艺不当，如不合理的施工顺序和不合适的施工条件，也容易使混凝土产生不均匀的应力

分布，导致裂缝的出现。因此，在混凝土施工阶段，严格控制工艺规范和操作细节，对防治裂缝具有至关重要的作用。

（二）材料因素

混凝土的原材料质量直接决定了混凝土的性能和抗裂能力^[2]。水泥的品种、质量以及砂石骨料的粒径和含水量都对混凝土的最终质量有显著影响。例如，水泥中矿物成分的差异、掺合料的选择和配合比的合理性，都会影响混凝土的水化过程，从而影响混凝土的体积稳定性。骨料的质量不合格，特别是含有杂质或颗粒不均匀，会导致混凝土的密实性差，增加收缩和膨胀的不均匀性，最终形成裂缝^[1]。另外，外加剂的使用也是影响混凝土裂缝的一个重要因素。使用不当的外加剂会导致混凝土的耐久性下降、抗裂性差，从而容易形成裂缝。在混凝土的设计中，材料

的选择和配比应该充分考虑到环境、强度、耐久性等多重因素，确保材料的稳定性和混凝土的抗裂性能。

（三）环境因素

环境因素对混凝土裂缝的产生也起着重要作用。在水利工程中，混凝土常常暴露在不同的自然环境条件下，如极端的温度变化和湿度波动，这些因素会导致混凝土在硬化过程中产生较大的内外部应力差异，进而诱发裂缝。例如，温度变化可能会导致混凝土发生膨胀或收缩，而不同部位的温度差异可能引发温差裂缝，尤其是在大坝、桥梁等大型水利工程中，温差对混凝土的影响尤为显著^[9]。湿度的变化也同样影响着混凝土的体积稳定性。特别是在水位频繁变化的区域，混凝土的膨胀和收缩会引起裂缝的产生。随着混凝土逐渐吸水或失水，其体积会发生变化，而这种体积变化如果未得到合理控制，极易导致裂缝^[4]。此外，外部气候因素如风速、降雨等也会影响混凝土表面水分的蒸发速度，进一步加剧裂缝的发生。因此，在水利工程施工中，应采取相应的防护措施，控制温湿度的变化，降低环境因素对混凝土结构的负面影响。

二、常见裂缝类型与发生机制

（一）收缩裂缝

收缩裂缝是混凝土结构中最常见的裂缝类型之一，通常发生在混凝土硬化过程中。当水泥水化反应进行时，水分蒸发会导致混凝土体积收缩。特别是在湿度较低或高温环境下，水分的蒸发速度加快，导致混凝土表面收缩的速度较快，而内部水分未能均匀释放，造成了内部应力。此应力逐渐积累，当超过混凝土的抗拉强度时，便会产生裂缝。收缩裂缝通常较浅，宽度较小，主要出现在混凝土表面^[5]。这些裂缝对结构的直接影响较小，但在某些要求较高的结构中，如水坝、池塘和地下工程，裂缝的出现可能会导致渗水问题，影响结构的耐久性。此外，随着外界环境因素的变化，收缩裂缝可能逐渐扩展，甚至对整体结构的稳定性产生潜在威胁。

（二）裂缝的分布与特征

混凝土裂缝的分布具有一定规律，通常在承重部位、结构转折处或应力集中区域较为常见。这些区域由于受力较大或应力分布不均，容易形成裂缝。裂缝的宽度、深度和走向是判断裂缝严重性的重要依据。裂缝宽度较大时，通常表明裂缝对结构的影响较为严重，尤其是对于水密性要求较高的结构。深度较大的裂缝则可能影响混凝土的整体强度，降低结构的承载能力。裂缝的走向和形态也能反映其产生的原因^[6]。例如，垂直于荷载方向的裂缝往往是由于温度变化或湿度波动引起的收缩裂缝，而沿着荷载方向的裂缝通常是由于混凝土受力过大。通过对裂缝的分布特征进行详细分析，不仅可以有效识别裂缝的成因，还能为后续的修复工作提供依据，确保选择最合适的修复方法和技术。

（三）水化热裂缝

水化热裂缝主要由混凝土内水化反应释放的热量过多引起。水泥在水化过程中会释放热量，尤其在大体积混凝土浇筑时，水

化热的积累容易使混凝土内部温度升高。温度差异较大的情况下，混凝土内部的应力无法均匀分布，便会形成温差裂缝^[6]。这种裂缝通常在大体积混凝土浇筑中尤为明显，特别是在大量使用水泥的情况下，水化热更难控制。若未能有效采取降温措施，裂缝的形成几乎是不可避免的。水化热裂缝不仅影响混凝土的外观，还会降低其强度和抗渗透性能，进一步可能影响整个结构的安全性^[4]。因此，在大体积混凝土施工过程中，采取有效的降温措施，如分层浇筑、冷却管道的使用，或采用低热水泥，能够有效缓解水化热带来的影响，减少裂缝的产生，确保混凝土结构的稳定性与持久性。

三、混凝土裂缝的防治措施

（一）改进施工工艺

优化施工工艺是防止混凝土裂缝产生的有效手段之一。混凝土浇筑过程中，控制浇筑的速度和进度至关重要。过快的浇筑速度可能会导致混凝土在未能充分凝固的情况下，受到外力作用而产生裂缝。例如，若混凝土在未达到足够的初凝强度时就受到振动或外部荷载，容易产生裂缝。因此，合理控制浇筑速度，避免急促施工，是保证混凝土结构稳定性的基础之一。合理选择振捣方式也是减少裂缝的重要因素。通过采用适当的振捣工具和技术，可以确保混凝土中的气泡被完全排除，减少内部的空隙和孔洞，从而避免因气泡或空隙导致的裂缝发生^[7]。振捣过程还需要根据混凝土的类型、浇筑的厚度和温度等因素进行适时调整，确保混凝土密实。除此之外，控制混凝土的配比和水灰比，确保其均匀性和强度，是防止裂缝的关键。过高的水灰比会导致混凝土过度水化，进而引发收缩裂缝。合理选择水泥、骨料和外加剂的比例，有助于改善混凝土的抗裂性能，降低裂缝发生的可能性^[1]。对于特殊环境下的施工，还应采取降温措施。例如，在高温环境下施工时，采用夜间施工、设置冷却水管或使用低热水泥，可以有效降低混凝土表面的温度，减轻水化热的影响，防止温差裂缝的产生。

（二）采用高性能混凝土

选用高性能混凝土是减少裂缝发生的重要手段。高性能混凝土具有较高的强度、低收缩、良好的抗渗透性和耐久性，这些特性使其在防止裂缝方面具有明显的优势。特别是在一些要求较高的水利工程中，使用高性能混凝土能够有效减少因材料性能不合格而导致的裂缝。例如，采用低收缩混凝土材料，可以有效抑制因干燥收缩引起的裂缝，尤其是在干燥环境中，裂缝的产生风险较高。高性能混凝土的抗渗透性较强，可以有效防止水分的侵入，降低由水分引起的裂缝扩展，从而确保工程结构的长期稳定性和耐久性^[2]。在此基础上，使用适当的外加剂，如减水剂、引气剂等，可以进一步改善混凝土的抗裂性能。外加剂不仅能减少混凝土内部水分的挥发速度，还能改善其密实性，提高混凝土的强度和耐久性，从而显著降低裂缝的风险。合理搭配不同外加剂，还可以优化混凝土的工作性，使其更加适应复杂的施工环境。

（三）加强养护管理

混凝土养护是确保其质量和防止裂缝的关键环节。混凝土的养护不仅影响其强度，还直接关系到其耐久性和抗裂性能。适当的养护有助于降低混凝土的收缩，避免因过早干燥导致裂缝的产生。养护过程中，应保持混凝土表面适宜的湿度和温度，以防止水分过快蒸发。若养护措施不到位，混凝土表层容易失水，从而导致表面收缩裂缝的形成。特别是在高温或干燥环境下，混凝土表面的水分蒸发速度加快，养护工作需要特别关注。在这种情况下，常采取覆盖物、喷雾养护或使用养护膜等方式，来减少水分的流失，保持混凝土的湿润状态。同时，避免过高温度和过快的温度变化也是裂缝形成的重要原因^[6]。高温下的施工会导致混凝土内部水分蒸发过快，从而引发裂缝。为了避免这种情况，养护过程需要确保温度的稳定，避免混凝土在施工初期出现强烈的热膨胀以及随后的收缩。通过加强养护管理，不仅可以确保混凝土的强度和密实性，还能有效防止裂缝的形成，保障工程质量和结构安全。

四、裂缝修复与维护管理

（一）裂缝修复技术

对于已经形成的混凝土裂缝，及时采取有效的修复技术是确保结构安全和延长使用寿命的关键。常见的裂缝修复方法包括灌浆修复、裂缝封闭和表面涂层处理等。灌浆修复是一种广泛应用的修复方法，通过注入适当的修补材料（如环氧树脂、聚氨酯、硅酸盐水泥等），将裂缝填充，从而恢复混凝土的整体性和承载力。灌浆修复不仅可以有效填补裂缝，还能增强混凝土的密实性和抗渗性能，防止水分和其他有害物质侵入混凝土内部，进一步加剧裂缝的扩展^[6]。对于表面裂缝，裂缝封闭技术通过使用密封胶或特殊涂层材料对裂缝进行封闭，能够有效阻止水分渗透，避免对混凝土造成进一步的破坏。表面涂层处理则是在混凝土表面涂上防水、抗裂的保护涂料，形成一层保护膜，不仅能够防止外界环境对混凝土结构的侵蚀，还能有效延缓裂缝的扩展。每种裂缝的修复方法需要根据裂缝的具体类型、位置、宽度和深度来选择，以确保修复效果达到最佳，进而提高修复的经济性和效益。

（二）监测与评估

裂缝修复后的效果评估和长期监测同样至关重要，它能够有效判断修复效果，并及时发现新的裂缝或潜在问题。裂缝的监测可以采用多种手段，包括视觉检查、裂缝宽度测量、红外线成像和应变计等。视觉检查是最常见、最直观的检查方法，适用于裂缝较大的情况，但对细微裂缝的检测能力有限。裂缝宽度测量能精确确定裂缝的扩展趋势，通过定期测量裂缝宽度，能够有效判断裂缝是否加剧。红外线成像技术通过检测温差分布，能够发现裂缝区域的热传导异常，从而精确定位裂缝的具体位置及其深度，尤其在难以观察到的隐蔽裂缝中具有独特的优势^[4]。应变计则可以实时监测混凝土内部的应力状态，通过数据分析，能够预测裂缝的发生和扩展趋势，进一步为裂缝的修复提供科学依据。

（三）日常维护管理

裂缝修复只是防治裂缝问题的一个环节，定期的检查和日常维护同样至关重要。建立健全的维护管理制度，有助于在裂缝出现初期就能发现并处理隐患，防止小裂缝发展成更大的结构问题。定期检查混凝土结构，特别是在结构转折处和受力集中的地方，能够及时发现微小裂缝并进行处理，防止裂缝扩展至其他部位，从而减少后期的修复难度和成本^[3]。除了定期检查外，日常的养护管理同样重要，尤其是在寒冷或干燥的季节，应采取适当的保温和加湿措施，以避免因温差和湿度变化造成的裂缝，尤其是冬季施工时需要特别关注混凝土表面的温度变化。混凝土的老化也是一个不可忽视的因素，因此定期的维护和修复对于延长结构的使用寿命、提高工程质量至关重要。

五、结语

混凝土裂缝问题在水利工程中普遍存在，影响着工程的质量和使用安全。通过分析混凝土裂缝的成因，本文提出了一系列防治措施，包括改进施工工艺、采用高性能混凝土、加强养护管理等。这些措施可以有效减少裂缝的发生，提升水利工程的质量和使用寿命。然而，混凝土裂缝的防治仍需要持续的研究与技术创新，以应对日益复杂的施工环境和工程需求。

参考文献

- [1] 李明. 水利工程中混凝土裂缝成因及防治措施 [J]. 农村科学实验, 2025, (11): 105–107.
- [2] 闫娜. 水利工程中混凝土裂缝产生的原因及防治措施 [J]. 中国水泥, 2025, (05): 76–78.
- [3] 高古帅. 水利工程施工中混凝土裂缝防治措施分析 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(17): 145–147.
- [4] 王立群. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治措施 [J]. 水上安全, 2024, (14): 196–198.
- [5] 刘爱华. 水利工程中混凝土裂缝的成因与防治 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(06): 44–46+115.
- [6] 全正芳. 水利工程施工中混凝土裂缝的成因及有效防治措施 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(23): 130–132+152.
- [7] 赵健. 水利工程施工混凝土产生裂缝成因及防治措施 [J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(06): 92–93.
- [8] 贺关清. 水利工程中混凝土裂缝产生原因及防治措施研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(13): 157–160.

水利工程智能灌浆技术深度剖析与创新应用研究

赵曙繁，曹学锐

云南省水利水电工程有限公司，云南 昆明 650000

DOI:10.61369/WCEST.2025080011

摘 要： 水利工程智能灌浆作为水利数字化的关键一环，融合传感器、人工智能、大数据与自动控制，使灌浆过程得以实时监测并动态调整。本文梳理其理论、系统架构与核心算法，结合东庄水利枢纽、杨房沟水电站等案例，量化评估其在质量、效率与安全上的提升数据显示，为行业升级提供理论与工程参照。

关 键 词： 智能灌浆；水利工程；人工智能；自动化控制；数字孪生

In-depth Analysis and Innovative Application Research on Intelligent Grouting Technology in Water Conservancy Projects

Zhao Shufan, Cao Xuerui

Yunnan Water Resources and Hydropower Engineering Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

Abstract： As a critical component of water conservancy digitalization, intelligent grouting in hydraulic engineering integrates sensors, artificial intelligence, big data, and automatic control, enabling real-time monitoring and dynamic adjustment of the grouting process. This paper reviews its theoretical foundations, system architecture, and core algorithms, while quantitatively evaluating improvements in quality, efficiency, and safety through case studies such as the Dongzhuang Water Conservancy Project and the Yangfanggou Hydropower Station. The data provides theoretical and engineering references for industry advancement.

Keywords： intelligent grouting; hydraulic engineering; artificial intelligence; automated control; digital twin

引言

灌浆技术的可靠性直接决定了大坝、隧洞等水工建筑物能否长期保持稳定，传统灌浆中约35%的质量缺陷源于人为操作；在岩溶发育、宽大裂隙等复杂地层，这一比例甚至超过一半。智能灌浆技术借助多参数传感器、物联网与人工智能算法，形成“感知-决策-执行”的闭环控制。

本文梳理近年国内外智能灌浆的研究与工程案例，围绕理论、系统、关键技术、应用及前景展开系统剖析，为行业升级提供参考。

一、智能灌浆技术的理论基础与体系架构

（一）技术原理与核心算法

智能灌浆技术把闭环控制作为理论支点：系统一边感知现场状态，一边即时分析并给出决策，再精确驱动执行端，形成循环。其关键原理可概括为以下几种方法：

1. 瑞士学者隆巴迪提出的GIN法，即灌浆强度值法，把控制目标锁定在压力P与注入体积V的乘积上：只要让这一乘积始终低于预设临界值，就能在浆液充分灌入岩体裂隙的同时，把因压力过高诱发岩体劈裂的风险压到最低，其关系式为：

$$GIN=P \times V \leq K$$

其中，K为根据岩体特性确定的常数。莱索托波哈利大坝工

程将该方法与智能灌浆系统联合部署，在复杂地质条件下实现了灌浆参数的精准控制。

2. 三峡建设管理有限公司等机构提出的三区五阶段P-Q-C-t联动智能控制模型，是整套系统的技术核心。它将灌浆全程拆成快速升压、稳定灌浆和灌浆风险三个区，再细分为A-E五个阶段，通过实时联动监测压力P、注入率Q、浆液密度C及历时t，实现一体化智能识别与调控各阶段典型特征见表1。

表1 三区五阶段灌浆控制模型特征

阶段	压力特征	注入率特征	控制目标	智能调控策略
A阶段（充填）	无压或低压	无回浆或低注入率	浆液填充钻孔管路	低压慢灌，确保充分填充
B阶段（升压）	0.1Pd以上（Pd为设计压力）	达到最大允许值Qmax	压力稳步上升	匀速升压，监测注入率变化

C阶段 (稳定灌浆)	逐渐上升至设计压力 Pd	小于 Qmax 但高于结束标准	维持设计压力稳定灌浆	压力-注入率联动控制
D阶段 (屏浆)	达到并保持设计压力 Pd	$Q_{end}-\beta$ 范围 (β 为调整系数)	确保密实填充	压力维稳, 持续时间优化
E阶段 (结束)	保持 Pd 直至结束	$\leq Q_{end}$ (结束注入率)	达到结束标准	自动判断并执行停灌

3. 人工智能预测算法是智能灌浆技术的前沿方向。借助随机森林等机器学习模型, 可对裂隙岩体的灌浆过程进行预测; 配合体素化技术, 将裂隙网络离散为体素单元, 把浆液扩散问题转化为单元灌注概率的估计。

(二) 系统架构与功能模块

智能灌浆系统采用分层架构, 由数据采集、传输、处理和应用四层组成, 其结构见图1。

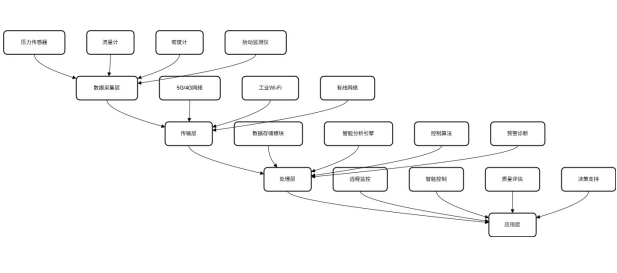


图1 智能灌浆系统架构示意图

1. 数据采集层由布设在灌浆设备、钻孔和岩体内的多类传感器构成, 涵盖压力、电磁流量、浆液密度及抬动监测等类型, 可对灌浆全过程的关键指标进行连续、实时记录。其中, 压力传感器量程0—10 MPa, 精度 $\pm 0.5\%$; 电磁流量计精度 $\pm 1.0\%$; 浆液密度计精度 $\pm 0.01\text{ g/cm}^3$ 。

2. 传输层把采集层的数据稳定、快速地送到处理中心。面对环境复杂、作业面分散的局面, 通常把有线与4G/5G、Wi-Fi等无线方式混用。东庄水利枢纽借助“云边端”协同, 在1000多个监测点同时处理数据, 传输成功率达到99.9%。

3. 处理层(云平台)作为智能灌浆系统的“大脑”, 云平台负责存储、分析数据并作出决策, 核心由数据存储与管理、智能分析引擎、预警与诊断三部分组成。杨房沟水电站的系统结合三维地质模型和施工大数据, 可提前对不同地层的灌浆方案进行预判与优化, 将参数匹配精度提高到90%以上。

4. 应用层直接面向用户, 整合了灌浆控制、质量评估与进度管理界面。借助智能灌浆管理系统 iGM 和智能灌浆单元机 iGC, 水泥灌浆实现一键闭环控制; 管理人员通过电脑或移动终端即可远程查看各作业面的进度、质量与设备状态, 管理效率随之提升。

二、智能灌浆系统架构与关键技术突破

(一) 系统硬件架构与传感技术

智能灌浆系统的硬件架构由制浆系统、输浆系统、灌浆泵站和监测网络四大部分组成, 形成了完整的灌浆作业闭环。

1. 制浆系统依托自动化控制, 水泥、水与外加剂的比例被实

时精准调节, 浆液质量因此保持长期稳定。东庄水利枢纽的实测数据显示, 密度波动被压缩在 $\pm 0.02\text{ g/cm}^3$ 以内, 密度计不间断采集浆液密度并与设定值比对, 水灰比随之自动修正, 确保浆液性能始终符合设计要求。

2. 输浆系统浆液经管网直达各灌浆面, 配有流量自动称重装置与压力调节机构, 一泵可同时向4-6个孔口供浆, 效率集中。

3. 灌浆泵站是系统的执行单元, 配有变频控制系统和参数传感器, 可按指令实时调整泵送压力与流量。智能灌浆单元机(iGC)作为现场控制终端, 将压力、流量、密度传感器与数据采集控制模块集成于一体, 实现灌浆过程的现场自动化。

4. 监测网络构成系统的感知层, 由多款高精度传感器组成, 其性能指标列于表2。

表2 智能灌浆系统核心传感器性能指标

传感器类型	测量范围	精度	抗干扰能力	特殊功能
压力传感器	0-10 MPa	$\pm 0.5\%$ FS	抗浆液腐蚀、防震	温度补偿、过载保护
电磁流量计	0-200 L/min	$\pm 1.0\%$ RD	抗磁干扰、防结垢	双向测量、自清洁
浆液密度计	1.0-2.5 g/cm ³	$\pm 0.01\text{ g/cm}^3$	耐磨损、防堵塞	在线校准、温度补偿
抬动监测仪	0-50 mm	$\pm 0.1\text{ mm}$	抗振动、防水	多点监测、趋势预警

(二) 系统软件平台与数据分析

智能灌浆系统的软件平台通常采用云架构设计, 云架构集成数据采集、存储、分析与可视化等功能模块。

数据采集模块系统以轮询方式采集数据, 面对现场复杂环境, 记录仪会反复向监控中心发送同一条数据, 直至收到确认回复才停止重发并转入下一条。

云存储模块依托可扩展的PC集群, 由主控服务器、存储服务器和客户端代理三部分构成。两台主控服务器以主备方式运行, 实现双机热备, 无需人工干预即可保障系统持续可用。

数据分析模块具备以下核心功能:

1. 系统持续跟踪灌浆参数, 压力突变或注入率异常时即刻报警并启动应对。

2. 质量评估系统提取P-Q-t曲线的关键特征, 再比对预设标准, 最后以量化分值反映灌浆效果。

3. 系统完整记录灌浆全过程, 可随时调取历史数据开展分析, 为质量事故追溯与工艺改进提供可靠依据。

4. 将专家知识与经验嵌入系统, 为异常工况提供决策支持。

可视化模块以图形、图表及三维模型等方式, 将灌浆过程与结果直观呈现。

(三) 关键技术创新与突破

智能灌浆技术在以下几个方面实现了重要创新与突破:

1. 智能止浆技术为水平钻孔灌浆带来关键突破。引江补汉工程首次把智能止浆塞系统用于水平孔, 解决浆液反渗和压力失稳等老问题, 使水平段密封效率显著提高。

2. 高压后退式灌浆技术该技术首次在水利工程中于12 MPa高压环境下完成水平段后退式精准灌浆。高压力与大注入量协同作

用，使浆液扩散更均匀，形成连续致密的加固帷幕。

3.数字孪生技术正被引入灌浆环节，用于可视化展示与提前预判。通过为灌浆工程建立数字孪生体，可在虚拟空间同步映射现场作业，并开展仿真与预测，进而支持更早阶段的优化决策。

三、智能灌浆技术的工程应用与实效分析

（一）东庄水利枢纽：大规模防渗工程的智能化管理

东庄水利枢纽库坝区防渗工程被誉为“国内单体防渗第一标”，设计灌浆总量约百万米，规模约为常规水电站的3—4倍。针对灰岩岩溶强烈发育、左岸岩层裂隙宽大等复杂地质，工程全程引入智能灌浆技术。

技术实施方案：

- 1.采用“网络记录+集中管控+远程指令”的灌浆管理新模式，搭建了覆盖整个工区的智能灌浆系统。
- 2.多参数传感器与人工智能模型协同工作，对灌浆压力、流量和浆液密度等关键指标进行实时监测与动态分析。
- 3.建立云端数据库，实现灌浆施工全过程智能化管理。

应用成效：

- 1.智能灌浆系统曾创下单月钻进5.7万米的纪录，效率明显高于人工操作。
- 2.灌浆参数合格率超过95%，全部数据可回溯，为质量管控提供了可靠依据。

- 3.人工成本降低30%以上，材料浪费率从传统工艺的15%降至5%以下。

（二）杨房沟水电站：人工智能与5G融合应用

杨房沟水电站是我国首个采用EPC总承包模式的百万千瓦级水电工程。其智能灌浆系统融合了三维地质建模、人工智能和工业5G等先进技术。

技术特色：

- 1.一键智能灌浆：按下启动键后，制浆站自动配浆、输浆装置同步称重，单泵即可把浆液送往四至六个灌浆点，配浆与变浆全程无需人工干预。
- 2.智能抬动预警系统实时跟踪岩体变形，一旦位移超限立即报警并自动停灌，为灌浆作业和坝体结构提供双重安全保障。
- 3.专家智库支持：系统内置专家库，可在施工遇到难题时提供针对性建议。

应用效果：

- 1.灌浆效率提升25%，人力成本降低30%。
- 2.灌浆合格率达到98%，岩体抬动控制在0.2mm以内。
- 3.通过精准预判浆液需求量，材料浪费率从传统工艺的15%降至5%以下。

（三）技术经济性综合对比分析

为系统衡量智能灌浆技术的整体效益，本文汇总并比较了若干工程案例的数据，结果列于表3。

表3 智能灌浆与传统灌浆综合性能对比分析

评价指标	传统灌浆	智能灌浆	提升幅度	数据来源
人工成本占比	35%~40%	20%~25%	降低30%以上	东庄枢纽
单月进尺峰值	3.5万~4万米	5.5万~6万米	提升40%~50%	东庄枢纽
浆液浪费率	10%~15%	3%~5%	降低60%以上	杨房沟电站
质量合格率	85%~90%	95%~98%	提升10%以上	多个工程统计
压力控制精度	±10%~15%	±5%以内	精度提高2~3倍	实验数据
数据可追溯性	纸质记录，不完整	全流程电子化、云端存储	实现完全可追溯	系统功能说明
安全风险	较高，依赖人员经验	低，系统自动预警和干预	事故率降低80%	工程报告

表3显示，智能灌浆技术在所有性能指标上均优于传统方法，其中压力控制精度、施工效率和质量合格率的差距尤为突出。

根据工程数据统计，智能灌浆技术的投资回报率(ROI)分析如图2所示：

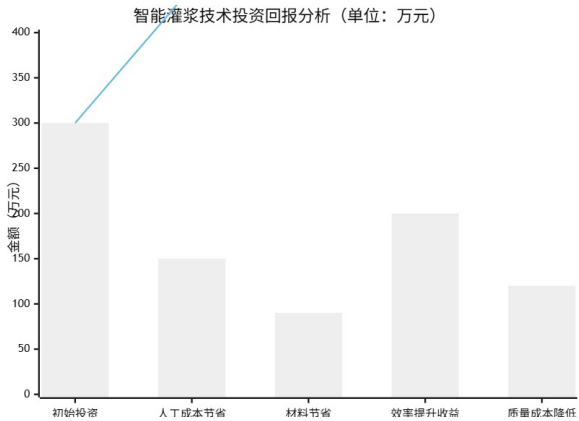


图2 智能灌浆技术投资回报分析

图2显示，智能灌浆系统的前期投入约300万元，但凭借人工费用压缩、材料损耗下降、作业效率提高以及质量成本节约，整体经济效益显著。投资预计在中期即可回收，项目全周期回报率超过187%。

四、智能灌浆技术面临的挑战与未来发展趋势

（一）当前面临的技术挑战

尽管智能灌浆技术取得了显著进展，但在广泛应用中仍面临多方面挑战：

- 1.地质适应性不足已成为最棘手的问题。在深层岩溶或巨厚覆盖层这类极端复杂地层里，智能模型的判断精度不足，一旦遭遇涌水，系统对浆液扩散路径的预测可能出现偏差。
- 2.传感器可靠性和耐久性问题。灌浆环境振动强、浆液腐蚀重、湿度高，长期运行下传感器精度极易漂移。
- 3.技术标准化缺失拖慢了推广脚步。设备接口、数据格式和

系统集成规范尚未统一，不同厂商的系统难以互通，形成信息孤岛。

4.复合型人才短缺智能灌浆技术推广受阻，系统运行需要既懂灌浆工艺又熟悉信息技术的跨界人员，而这类人才在行业内缺口巨大。

（二）未来发展趋势

智能灌浆技术正朝着更智能、更集成、更规范的方向演进，具体表现可从以下维度观察。

1.数字孪生技术深度融合将成为智能灌浆技术的重要演进方向。通过构建灌浆工程的数字孪生体，可以在虚拟空间中模拟和优化灌浆方案，实时映射和预测实际灌浆过程。

2.算法持续迭代将显著增强系统的自主决策水平。机器学习与深度学习模型将深度嵌入灌浆参数调优、异常识别及效果预测环节，使平台能够自我更新并随工况调整。

3.区块链为质量追溯提供支撑，可形成无法篡改的灌浆档案，为审计与问责留存可信数据。

4.绿色低碳材料与工艺智能灌浆技术要持续演进，离不开低能耗、低排放的灌浆材料。将这类绿色材料接入智能系统，可精准掌控资源用量。

表4 智能灌浆技术未来发展趋势与预期效益

发展趋势	技术特征	预期效益	实现时间表
数字孪生融合	虚拟与现实交互映射	方案优化，质量预测	2026-2028年
人工智能深化	自主学习，智能决策	复杂地质适应性 强	2027-2030年
区块链质量追溯	数据不可篡改，可追溯	质量透明，责任明确	2025-2027年
机器人化装备	自动化，无人化操作	提高安全性，降低人工	2028-2030年
绿色材料应用	低碳，环保	减少碳足迹，可持续发展	2025-2028年

五、结论与展望

智能灌浆技术把现代信息系统嵌入传统灌浆流程，使整个过程由数据主导并精确可控，已成为水利工程地基处理的主流演进方向。本文通过对智能灌浆技术的系统分析，得出以下主要结论：

智能灌浆技术已构建起较为完备的理论框架与技术体系，GIN算法、三区五阶段模型等核心算法逐步成熟，足以覆盖大多数工程场景的需求。

借助多参数传感、实时监测与智能决策，灌浆系统可即时调节浆液压力与流量，把波动幅度压至 ± 5% 以内，工程各段强度差异随之缩小，整体一致性明显提升。

重大水利工程的实践显示，引入智能灌浆后，经济回报尤为突出。

数字孪生、人工智能与区块链等前沿技术交汇，使灌浆系统具备实时感知与学习能力，正朝着自适应调控、过程透明和绿色低碳的方向持续演进。

未来，智能灌浆技术带来的不仅是质量与速度的同步提升，更把行业推向更智能、更绿色、更可持续的未来。要加快智能灌浆技术的落地，行业需尽快出台统一的技术规范，系统培养既懂工程又懂算法的复合型人才，并搭建跨学科、跨企业的创新平台，让这项技术在我国水利高质量发展中释放更大潜能。

参考文献

[1]王志娟 尹建飞.智能灌浆控制系统设计与研究 [J]. 信息记录材料, 2025, 26(05):83-85.
[2]陕西东庄水利枢纽库坝区防渗工程智能灌浆进尺突破60万米 [R]. 中国水利报社, 2025-07-12.
[3]2025-2027年中国水工灌浆管理系统产业研究报告 [R]. 中国产业发展研究网, 2025.
[4]张帆 詹程远等.灌浆施工全过程智能监测数据云存储与深度分析系统研究 [J]. 长江技术经济, 2023,7 (01):93-97
[5]2025-2030年中国灌浆料市场前景调研及未来发展趋势预测报告 [R].2025.

水利工程施工质量控制技术与管理

葛琳

阜城县水利局, 河北 衡水 053700

DOI:10.61369/WCEST.2025080013

摘 要 : 为健全水利工程质量管理体系, 防范安全风险, 延长使用寿命, 降低后续运维成本。文章着眼水利工程施工特性, 运用文献资料研究等方法, 系统分析施工环境、专业要求及任务协同的主要特点, 从工程勘察、材料管控、工艺优化及过程监测等维度出发, 完善施工质量控制技术体系, 健全施工质量管理体系, 持续提升区域水资源调控能力。

关 键 词 : 水利工程; 施工质量; 控制技术; 管理策略

Quality Control Technology and Management of Hydraulic Engineering Construction

Ge Lin

Fucheng County Water Resources Bureau, Hengshui, Hebei 053700

Abstract : To enhance the quality management system of water conservancy projects, mitigate safety risks, extend service life, and reduce subsequent operation and maintenance costs, this paper examines the construction characteristics of water conservancy projects. Through literature review and other research methods, it systematically analyzes the key features of construction environments, professional requirements, and task coordination. By focusing on engineering surveys, material control, process optimization, and process monitoring, the study aims to improve the construction quality control technology system, refine the construction quality management framework, and continuously enhance regional water resource regulation capabilities.

Keywords : water conservancy project; construction quality; control technology; management strategy

前言

水利工程在水文、地质以及气候等因素的影响下, 建筑结构出现渗漏、开裂等质量问题的机率较高。文章从多个层面出发, 创新水利工程施工质量控制技术, 构建科学高效质量管理体系, 确保防洪灌溉、蓄能发电等功能的实现, 降低后期维护成本, 旨在为工程质量管控提供的可行性方案, 推动水利工程建设行业的高质量发展。

一、水利工程施工主要特点

(一) 施工环境的复杂性

水利工程建设选址多与水域紧密关联, 常分布于江河沿岸、湖泊周边及水库区域, 这些区域的水文条件呈现出显著的动态变化特征。例如, 在汛期时段, 水位短时间内急剧上升, 水流速度加快, 不仅会干扰正常施工进度, 还可能对施工临时设施造成冲击; 进入枯水期后, 河床大面积裸露, 土层结构松散, 给地基开挖作业带来极大挑战^[1]。同时, 施工区域的地质状况差异明显, 部分工程穿越软土路基、岩石断层等复杂地质构造, 极易引发基坑坍塌、地基不均匀沉降等安全隐患。以广西平陆运河工程为例, 该工程始于南宁横州市西津库区平塘江口, 经钦州灵山县

陆屋镇沿钦江进入北部湾, 沿线地质涵盖河谷冲积层、风化岩层等多种复杂构造, 且青年枢纽等关键区域处于咸淡水交汇环境, 地下水位受潮汐影响频繁波动。施工团队针对性采用“分段降水+固化处理”组合方案, 对河床段软土地基进行深层搅拌桩加固, 仅地质勘察与基础处理方案的专项论证和实施就耗时5个月, 充分体现施工环境复杂性对水利工程建设的影响。

(二) 施工要求的专业性

水利工程承担着防洪排涝、农业灌溉、城市供水、水力发电等多项重要功能, 不同功能定位对工程结构设计和施工技术提出了极为严格的专业标准。在防渗工程施工中, 根据工程的防渗等级和实际工况选择适宜的技术方案^[2]。以土石坝防渗体施工为例, 为确保防渗效果, 将土料压实度严格控制在95%以上, 且每

层压实厚度不得超过30cm。混凝土防渗墙施工时，墙体垂直度偏差必须控制在1/1000以内，墙体连接部位采用接头管法或拔管注浆工艺进行处理，有效避免渗漏通道的形成。在水利工程金属结构安装环节，闸门、启闭机等设备的安装精度要求极高，施工过程中借助全站仪、水准仪等高精度测量仪器进行定位校准，同时要求施工人员必须具备金属结构安装专业资质证书，熟练掌握设备安装工艺流程和质量验收规范。

（三）施工任务的综合性

水利工程施工并非单一工种或工序的独立作业，而是涵盖土建施工、设备安装、电气调试、生态保护等多个领域的综合性系统工程，需要多个专业施工团队协同配合、交叉作业。以平陆运河工程为例，作为西部陆海新通道骨干工程，其建设涵盖马道、企石、青年三个梯级枢纽，施工任务既包括134.2公里航道的土石方开挖、船闸主体混凝土浇筑等土建工程，涉及总重量超6万吨的金属结构制造安装，其中仅青年枢纽安装4扇645吨级人字门，且同步开展通航调度系统调试、咸淡水区域防腐处理等专项作业。在施工衔接中，船闸混凝土浇筑精准预留金属结构埋件安装位置，埋件安装精度又直接影响后续闸门调试效果，土建与金结团队每日召开协同会议核对进度，仅首扇人字门安装就要协调制造、运输、吊装、测量等8个专业班组配合。

二、水利工程施工质量控制技术应用路径

（一）工程施工勘察技术

工程施工勘察是水利工程质量控制的首要环节，其核心目的是全面、准确掌握施工区域的自然条件和地质状况，为工程设计方案制定和施工技术选择提供可靠的数据支撑^[3]。在勘察工作开展过程中，根据工程类型、规模和施工要要求，灵活运用多种勘察技术手段。对于河道整治、跨河桥梁等河床段水利工程，采用地质雷达探测技术，该技术能够对河床覆盖层厚度、地层岩性分布情况进行无损检测，分辨率可达厘米级，有效识别地下空洞、软弱夹层等潜在地质隐患。针对大坝、水电站等重要建筑物的坝基勘察，采用钻孔取芯与原位测试相结合的方式，通过压水试验检测岩体渗透性，确定坝基防渗处理的范围和深度。

（二）施工材料管控技术

施工材料质量是决定水利工程质量的关键因素，从材料采购、进场验收、存储保管到现场使用的全流程实施严格管控。在材料采购环节，建立完善的供应商准入机制，对水泥、钢筋、砂石等主要建筑材料的供应商进行资质审核和实地考察，优先选择具备生产许可证、产品质量检测报告齐全且市场信誉良好的供应商^[4]。材料进场时，严格执行“抽检+见证取样”双重检测制度，钢筋进场后，施工企业要检测屈服强度、抗拉强度、伸长率等力学性能指标，砂石料检测颗粒级配、含泥量、有机质含量等指标，对于检测不合格的材料，坚决禁止入场使用。在材料存储管理方面，根据材料特性采取分类存储措施，水泥应存储在防雨、防潮的密闭仓库中，堆放高度不得超过10袋，防止水泥受潮结块影响强度。砂石料采用分区隔离堆放方式，不同粒径的砂石

料之间设置隔离墙，避免出现混杂现象。例如，施工企业建立了材料二维码追溯系统，如图1所示：

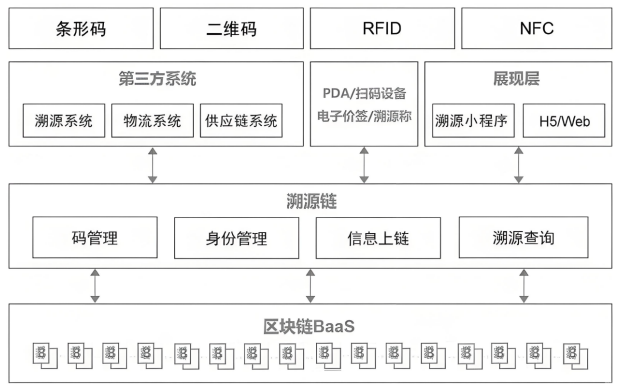


图1 建筑材料二维码追溯系统示意图

将材料采购合同、质量检测报告、使用部位等信息录入系统，管理人员通过扫描二维码即可快速查询材料全生命周期信息，实现了材料质量的可追溯管控。

（三）关键工艺控制技术

关键施工工艺的质量控制直接关系到水利工程结构安全和使用性能，要针对不同施工工艺的特点制定专项质量控制方案。在混凝土浇筑施工中，应严格遵循“分层浇筑、振捣密实”的施工原则，根据混凝土初凝时间确定合理的分层厚度，一般控制在30–50cm之间，同时采用插入式振捣器进行振捣作业，振捣时间以混凝土表面出现浮浆、不再下沉为宜，有效避免因漏振或过振导致的蜂窝、麻面、露筋等质量缺陷^[5]。对于大坝、溢洪道等大体积混凝土施工，重点做好温度控制工作，通过在混凝土内部预埋冷却水管、浇筑完成后覆盖保温被等措施，将混凝土内外温差控制在25℃以内，防止因温度应力引发裂缝。在防渗墙施工过程中，采用液压抓斗成槽技术，严格控制成槽速度和槽段垂直度，槽段接头处采用铣削工艺进行处理，确保接头部位混凝土结合紧密。以华东某堤防加固工程为例，通过采用上述防渗墙施工工艺，使防渗墙渗透系数降至10⁻⁷cm/s以下，完全满足工程防渗要求。

（四）施工过程监测技术

施工过程监测是及时发现质量隐患、保障水利工程施工质量的重要手段，通过实时采集施工过程中的各类数据，实现对工程质量风险的动态管控。在边坡工程施工监测中，采用GNSS位移监测与测斜仪相结合的监测方式，GNSS监测点根据边坡长度和地形条件合理布设，间距一般为50–100m，实时监测边坡水平位移和垂直位移情况，当位移量超过预警值时，立即启动应急处置措施。测斜仪埋设于边坡内部不同深度位置，用于监测深层土体位移变化，准确判断边坡稳定性状态。在混凝土结构施工监测中，利用无线传感器网络技术，在混凝土内部预埋温度传感器、应变传感器，实时采集混凝土养护温度、结构应力变化数据，通过对监测数据的分析处理，及时调整养护措施和施工参数，确保混凝土强度满足设计要求。以华中某渡槽工程为例，施工单位在渡槽混凝土浇筑过程中布设了200余个无线传感器，实现了对混凝土温度和应变的实时监测，根据监测数据及时调整浇筑速度和养护方案，有效避免了渡槽结构出现温度裂缝。

三、水利工程施工质量管理的基本方法

（一）健全质量管理体系

施工企业结合水利工程建设特点和相关法律法规、技术标准，明确各参与方的质量职责和管理流程。建立“建设单位主导、施工单位负责、监理单位监督、设计单位配合”的质量管理体系，签订质量责任状，将质量目标分解落实到各个部门和岗位，例如施工单位项目经理作为工程质量第一责任人，对工程质量负全面责任，监理工程师对混凝土浇筑、防渗工程等关键工序进行旁站监督，只有在监理工程师签字确认合格后，方可进入下一道工序施工。制定完善的质量管理制度，依托《施工质量验收细则》《质量问题整改管理办法》《隐蔽工程验收制度》等文件，明确质量验收标准、检测频率和问题整改流程，例如隐蔽工程验收经过施工单位自检、监理单位验收、建设单位复核三级审核确认，确保隐蔽工程质量可追溯。

（二）加强管理人员培训

为提升管理人员的专业能力和质量意识，施工企业构建分层分类的管理人员培训体系，全面提升管理人员综合素质。针对项目管理层，重点开展质量管理体系、相关法律法规和项目管理能力培训，组织学习系列政策文件，邀请行业专家进行质量风险管控案例讲解，提升管理层的统筹协调能力和质量风险决策能力。对于现场技术管理人员，侧重于专业技术和质量检测技能培训，开设混凝土配合比设计、防渗工程施工工艺、质量检测仪器操作等实操课程，通过现场演示、实操考核等方式，确保技术管理人员熟练掌握质量控制要点和检测方法。建立培训考核与岗位任用挂钩机制，将培训考核成绩作为管理人员岗位晋升、绩效评定的

重要依据，充分激发管理人员的学习积极性和主动性。

（三）提升风险管控能力

在水利工程施工过程中，施工企业应当建立“风险识别－风险评估－风险应对－风险监控”的全流程风险管控机制，提前防范和化解质量风险。在风险识别阶段，结合工程地质条件、施工工艺特点、环境因素等，采用专家调查法、故障树分析法等方法，全面梳理可能存在的质量风险点，建立详细的风险清单。在风险评估阶段，采用定性与定量相结合的方式，对识别出的风险进行发生概率和影响程度评估，划分风险等级，针对不同等级的风险制定专项应对措施，对于重大风险，施工企业需要制定详细的应急预案，配备充足的应急物资和设备，一般风险则制定日常管控措施；在风险监控阶段，建立风险动态监测台账，定期更新风险状态，对高等级风险进行重点跟踪监测，确保风险始终处于可控范围内。

四、结语

水利工程施工质量控制是一项系统性、复杂性的工作，要充分结合工程施工特点，以先进的技术手段为支撑，以科学的管理方法为保障，实现对工程质量的全流程、全方位管控。文章深入分析水利工程施工环境、专业要求和任务协同的主要特点，从工程勘察、材料管控、关键工艺控制和施工过程监测四个维度梳理了施工质量控制技术应用路径，同时提出了健全质量管理体系、加强管理人员培训、提升风险管控能力的质量管理基本方法，为水利工程施工质量管控提供了切实可行的实践方案。

参考文献

- [1] 张守成. 水利工程施工质量控制技术研究 [J]. 人民黄河, 2024 (2): 147-148.
- [2] 张双娟. 水利工程施工中的质量控制与管理措施探讨 [J]. 工程建设与技术, 2024 (12): 96-99.
- [3] 林素婷. 新时代背景下水利工程施工管理特点及质量控制措施 [J]. 工程与建设, 2025 (3): 715-716.
- [4] 夏坚, 饶品涛, 吴琼. 水利工程施工质量管理与控制体系研究 [J]. 水利电力技术与应用, 2025 (7): 201-202.
- [5] 曹如, 张志阔, 宗海军. 水利工程施工技术难点和质量控制对策 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023 (4): 31-33.

水利工程施工中的施工技术和工程质量的保障措施

王建伟

阜城县水利局, 河北 衡水 053700

DOI:10.61369/WCEST.2025080014

摘 要 : 为提升水利工程施工能力, 发挥其在防洪、灌溉、发电等方面的关键作用, 文章运用文献资料研究等方法, 结合相关案例, 系统性总结水利工程施工技术的应用路径, 归纳技术应用要点与操作规范, 全面性梳理工程质量保障举措, 完善施工流程管控体系, 旨在防范质量风险, 增强建设效能, 助力水利工程项目建设行业的高质量发展。

关 键 词 : 水利工程; 施工技术; 工程质量; 保障举措

Construction Technology and Quality Assurance Measures in Hydraulic Engineering Construction

Wang Jianwei

Fucheng County Water Resources Bureau, Hengshui, Hebei 053700

Abstract : To enhance the construction capabilities of water conservancy projects and leverage their critical roles in flood control, irrigation, and power generation, this paper employs literature review and case studies to systematically summarize the application pathways of water conservancy construction technologies. It outlines key technical application points and operational standards, comprehensively reviews quality assurance measures, and improves the construction process control system. The aim is to prevent quality risks, boost construction efficiency, and promote high-quality development in the water conservancy project construction industry.

Keywords : water conservancy engineering; construction technology; engineering quality; guarantee measures

前言

水利工程作为我国公共基础设施体系的重要组成部分, 在保障民生、服务发展等方面发挥重要作用。根据相关部门公布的数据, 2024年各级政府先后投入13529亿元, 用于46967个水利工程项目开发建设。施工企业在水利工程施工环节, 应当调整思路, 坚持质量为本的目标定位, 通过技术工艺的创新性使用与建设流程的科学化管控, 有效保障工程施工质量, 满足新时期水利工程开发建设要求。

一、水利工程施工技术应用路径

(一) 地基处理技术

地基作为水利工程的承载基础, 其稳定性直接决定工程整体安全。在地基处理中, 施工企业应当结合工程地质勘察数据, 明确地基土的类型、承载力及压缩性等参数, 针对不同地质条件精准选用技术方案^[1]。具体来看, 对于承载力低于120kPa的软土地基, 换填法施工时, 回填级配砂石需满足粒径5-31.5mm颗粒含量占比60%-80%, 压实度控制在93%-96%, 且分层回填厚度不超过30cm, 每层碾压次数不少于6遍; 排水固结法中, 塑料排水板的等效孔径应 $\leq 0.1\text{mm}$, 渗透系数 $\geq 5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 砂井间距需根据固结度要求计算确定, 通常控制在1.5-3.0m, 施工后地基

承载力需提升至200kPa以上。复合地基处理采用水泥土搅拌桩时, 水泥掺入比不低于15%, 桩身无侧限抗压强度 $\geq 1.5\text{MPa}$, 桩位偏差 $\leq 50\text{mm}$, 垂直度偏差 $\leq 1\%$, 成桩后需通过平板载荷试验验证复合地基承载力, 确保满足设计要求。

(二) 导流施工技术

导流施工是水利工程施工中的关键环节, 其目的是在施工期间将河道水流导向预定的泄水建筑物, 为主体工程施工创造干地作业条件。导流方案需根据工程所在流域的水文条件、地形地貌、工程规模及施工进度要求进行合理设计, 常见的导流方式包括分期导流、明渠导流、隧洞导流及涵管导流等。具体来看, 在分期导流工程中, 一期围堰挡水标准应按5-10年一遇洪水设计, 二期按10-20年一遇洪水设计, 施工企业可以使用频率分析法,

对导流进行计算，确保过流能力满足施工期最大洪峰流量要求，如表1所示：

表1 导流分期信息统计表

导流分期	围堰挡水标准 (洪水重现期)	导流流量计算方法	核心要求
一期	5-10 年	频率分析法	1. 确保导流建筑物过流能力满足施工期最大洪峰流量要求；2. 结合施工工序、场地布置等实际情况，合理确定计算边界条件
二期	10-20	频率分析法	1. 同频率分析法下，匹配二期更高挡水标准，提升过流能力冗余；2. 考虑一期工程对流域水文条件的影响，修正流量计算参数；3. 保障二期关键施工节点受洪水干扰

明渠导流的渠道纵坡宜为0.2%-0.5%，断面采用梯形或矩形，边坡系数根据土壤类型确定，黏性土边坡系数取1.0-1.5，砂性土取1.5-2.0，渠底糙率控制在0.022-0.025，避免因水头损失过大影响导流效果。隧洞导流的洞径需根据水力计算确定，流速控制在2.0-4.0m/s，洞身衬砌混凝土强度等级不低于C30，抗渗等级≥P8，衬砌厚度根据围岩类别计算，Ⅳ类围岩衬砌厚度不小于50cm，施工中需对隧洞轴线偏差进行实时监测，每50m检测一次，偏差不得超过10cm。

（三）围堰施工技术

围堰作为临时挡水建筑物，在水利工程施工中用于围护施工区域，防止水流进入作业面，为主体工程施工提供保障，施工企业应当根据工程地质、水文条件、施工工期及材料供应情况确定围堰类型^[2]。具体来看，土工膜防渗施工环节，土工膜厚度不小于1.5mm，拉伸强度≥15MPa，撕裂强度≥50kN/m，铺设时接缝搭接宽度≥10cm，采用热熔焊接，焊接强度不低于母材强度的80%。混凝土围堰浇筑时，混凝土强度等级不低于C25，抗冻等级≥F200，浇筑分层厚度根据振捣设备确定，采用插入式振捣器时分层厚度≤50cm，振捣时间控制在20-30s，避免漏振或过振，施工缝处理需凿毛并清除浮浆，铺设2-3cm厚同配合比水泥砂浆，确保结合紧密。钢板桩围堰的钢板桩长度根据水深确定，水深5-10m时选用12-18m长钢板桩，锁口处需涂抹黄油密封，打入时垂直度偏差≤0.5%，相邻钢板桩锁口贴合度需达到95%以上，防止渗漏。

（四）土方施工技术

地基作为水利工程的承载基础，其稳定性直接决定工程整体安全。在地基处理中，施工企业应当综合分析工程地质勘察数据，评估地基土类型、承载力及压缩性等参数，制定相应的土方施工技术方案，避免出现超挖或者欠挖等问题^[3]。土方开挖前需确定开挖坡度，根据土壤类别和开挖深度，黏性土开挖深度5-10m时坡度取1:0.5-1:1.0，砂性土取1:1.0-1:1.5，开挖过程中需对边坡稳定性进行监测，位移监测频率为1次/天，位移量超过5mm/d时需采取支护措施。基坑开挖采用分层开挖，每层开挖深度不超过2m，开挖至设计标高以上20-30cm时改用人工开挖，避免扰动基底土，基底验收时，地基承载力需满足设计要求，偏差不得超过5%。堤坝填筑采用分层碾压，土料含水率控制

在最优含水率±2%，压实度根据工程等级确定，一级堤防压实度≥96%，二级堤防≥94%，碾压机械选用20t以上振动压路机，行驶速度控制在2-4km/h，碾压次数不少于8遍，每填筑1000m³需取样检测压实度，检测合格率需达到100%。河道疏浚采用绞吸式挖泥船时，挖泥深度误差≤30cm，疏浚宽度误差≤50cm，泥浆浓度控制在20%-30%，疏浚土方需运至指定弃土场，弃土场边坡坡度取1:2-1:3，防止水土流失。

（五）混凝土施工技术

混凝土作为水利工程主体结构的主要材料，其施工质量对工程的强度、耐久性及抗渗性至关重要。在混凝土施工前，需根据工程结构的使用要求与环境条件，设计合理的混凝土配合比，确保混凝土的强度等级、抗渗等级、抗冻等级等性能指标达标，严格控制原材料质量，水泥、砂石、外加剂等参数符合相关标准。混凝土配合比设计应当满足强度、抗渗、抗冻等要求，大坝混凝土强度等级通常为C15-C25，抗渗等级≥P6，抗冻等级≥F150，水胶比控制在0.45-0.60，砂率取35%-45%，粉煤灰掺量不超过30%，外加剂掺量根据性能要求确定，减水剂掺量通常为0.5%-1.0%。混凝土搅拌采用强制式搅拌机，搅拌时间不少于90s，确保拌和物均匀，坍落度偏差控制在±20mm，出机温度夏季不超过30℃，冬季不低于10℃。运输时间不超过1.5h，若超过需掺入缓凝剂，浇筑时采用分层浇筑，分层厚度根据振捣设备确定，采用平板振捣器时分层厚度≤20cm，插入式振捣器≤50cm，振捣间距不超过振捣半径的1.5倍，避免漏振。养护采用覆盖洒水养护，养护时间不少于14天，高温天气需增加洒水次数，保持混凝土表面湿润，冬季采用保温养护，确保混凝土表面温度不低于5℃，防止出现裂缝，混凝土浇筑完成28天后需进行强度检测，合格率需达到100%，强度平均值不低于设计值的1.1倍。

二、水利工程质量保障举措

（一）做好施工技术交底

施工技术交底过程中，为提升信息共享能力，减少技术盲区，施工企业可以借助“三级交底”方式，畅通沟通渠道，强化施工协作能力。具体来看，项目总工程师向施工班组负责人进行一级交底，明确工程整体技术要求、质量目标及关键工序控制要点，交底内容需要涵盖施工图纸解读、施工方案说明、技术规范要求等，形成书面交底文件，双方签字确认并存档^[4]。班组负责人向施工人员进行二级交底，结合具体施工任务，细化工序操作流程，明确技术参数标准，如地基处理中的压实度要求、混凝土施工中的坍落度控制等，同时针对常见质量问题进行案例分析，提出预防措施。技术人员向一线作业人员进行三级交底，通过现场示范、操作培训等方式，确保施工人员熟练掌握操作技能。

（二）加强施工现场管理

着眼水利工程施工技术特点，为确保技术活动的稳妥有序开展，施工企业现场管理需要建立“全过程管控”机制，施工前需要对施工图纸进行会审，组织技术、质量、施工等部门人员，核查图纸中的设计缺陷与矛盾，及时与设计单位沟通解决，确保图

纸符合施工要求^[5]。施工过程中，设置质量控制点，对关键工序如地基处理、混凝土浇筑、钢筋绑扎等进行重点监控，实行“三检制”，施工人员自检合格后，班组进行互检，互检合格后由质量管理人员进行专检，专检合格方可进入下一道工序，每道工序需要形成质量检查记录，存档备查。材料管理方面，建立原材料进场检验制度，所有进场材料需要提供出厂合格证、检验报告等质量证明文件，同时按规定进行抽样送检，不合格材料严禁进场使用，材料存放需要分类存放，设置标识牌，注明材料名称、规格、进场时间、检验状态等，防止混用。设备管理方面，定期对施工机械设备进行维护保养，制定维护保养计划。例如，搅拌机应当每周清理一次，振捣器每月检查一次电机运行状况，确保设备性能稳定，设备操作人员持证上岗，严格按照操作规程操作，严禁违章操作，设备使用前需要进行试运行，检查设备运行正常后方可投入使用。

（三）创新施工管理方法

施工企业在工程质量管理环节，为确保管理手段的有效性与针对性，可以借助数字化管控手段，构建水利工程施工质量管理信息系统，通过整合施工进度、质量检测、材料管理等数据，实现数据实时共享与动态监测。运用 BIM 技术建立工程三维模型，在施工前进行虚拟施工，模拟施工过程中地基处理、混凝土浇筑等关键工序，提前发现施工中的碰撞与冲突，优化施工方案，减少施工返工。采用物联网技术，在施工现场布置传感器，如混凝土温度传感器、地基沉降监测传感器等，实时采集施工数据，混凝土温度传感器每 30 分钟采集一次数据，地基沉降监测传感器每天采集一次数据，数据实时传输至管理平台，管理人员通过平台

远程监控施工质量，当数据超出预警值时，系统自动发出警报，及时采取措施整改。

（四）组建专业管理团队

在专业管理团队组建过程中，施工企业需要遵循“专业化、高素质”原则，团队成员选拔需要注重专业背景与从业经验，项目经理需要具备水利工程专业一级建造师资格，拥有 5 年以上大型水利工程管理经验，熟悉工程施工流程与质量管控要求。技术负责人需要具备水利工程相关专业高级职称，拥有 10 年以上技术管理经验，能够解决施工中的复杂技术难题；质量管理人员需要具备水利工程质量检测资格，拥有 3 年以上质量管控经验，熟悉质量验收标准与检测方法。团队组建后，进行岗前培训，帮助其熟悉施工技术规范、质量管理制度、安全操作规程等专业知识，提升团队的专业素质与管理能力。定期组织团队成员参加行业培训与交流活动，学习先进的施工技术与管理经验，不断提升团队整体水平，确保能够有效应对水利工程施工中的各类质量挑战。

三、结语

水利工程施工技术的科学应用与工程质量的有效保障，是推动水利工程建设行业高质量发展的核心支撑。文章通过梳理地基处理、导流、围堰、土方及混凝土等施工技术的应用路径，补充专业技术参数，明确各技术环节的操作标准。从施工技术交底、施工现场管理、管理方法创新及专业团队组建四个维度，构建了完善的质量保障体系，为水利工程施工提供了全面的技术与管理指导。

参考文献

- [1] 劳溪钢. 水利工程施工质量保障措施研究 [J]. 现代工程项目管理, 2025, 4(11).
- [2] 石龙梅. 水利工程施工技术与施工技术管理现状及创新改革措施分析 [J]. 水上安全, 2024 (17): 126-128.
- [3] 杨彩云. 水利水电工程施工质量控制与管理改进措施 [J]. 水上安全, 2024(8): 146-148.
- [4] 陈庚. 水泥土垫层施工技术要点及质量控制措施的探讨 [J]. 四川水泥, 2025 (1): 133-135.
- [5] 乔思晗. 高位水池工程施工管理中的安全和质量控制措施 [J]. 内蒙古水利, 2024 (9): 97-99.

水力平衡阀流动与阻力特性实验研究

胡洪¹, 张伟程¹, 张博涵²

1. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041

2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093

DOI:10.61369/WCEST.2025080015

摘 要 : 实验测试分析了 MSV-D 静态平衡阀与 AB-QM 动态平衡阀在不同压差和开度下的流动与阻力特性。结果表明: 静态平衡阀的调节性能受阀前与阀后的压差影响显著, 流量随开度增大由等百分比型向快开型转变; 动态平衡阀则展现出优异的压差无关特性, 在不同压差下均能保持稳定流量, 且全开度范围内呈现理想线性特性。在阻力特性方面, 两种阀门的流阻系数均随开度增大而减小, 但动态平衡阀表现出更高的一致性。研究结论为暖通空调变流量水系统中水力平衡阀的科学选型提供了实验依据。

关 键 词 : 水力平衡阀; 流动特性; 阻力特性; 压力无关

Experimental Study on Flow and Resistance Characteristics of Hydraulic Balancing Valves

Hu Hong¹, Zhang Weicheng¹, Zhang Bohan²

1. Shanghai Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200041

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

Abstract : This study experimentally tests and analyzes the flow and resistance characteristics of the MSV-D static balancing valve and the AB-QM dynamic balancing valve under different pressure differentials and valve openings. The results indicate that the regulating performance of the static balancing valve is significantly influenced by the pressure differential before and after the valve, with the flow rate transitioning from an equal percentage type to a fast-opening type as the valve opening increases. In contrast, the dynamic balancing valve demonstrates excellent pressure differential independence, maintaining a stable flow rate under varying pressure differentials and exhibiting ideal linear characteristics across the full range of valve openings. Regarding resistance characteristics, the flow resistance coefficients of both valves decrease with increasing valve opening, but the dynamic balancing valve exhibits higher consistency. The research findings provide experimental evidence for the scientific selection of hydraulic balancing valves in variable flow water systems in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) applications.

Keywords : hydraulic balancing valve; flow characteristics; resistance characteristics; pressure-independent

引言

在中央空调水系统中, 水力失调是影响水系统能效与稳定性的关键问题^[1-2]。为改善系统性能, 水力平衡阀作为核心调节设备被广泛应用。根据水力调节原理, 平衡阀主要分为静态与动态两类: 前者通过预设开度实现稳态流量分配, 适用于定流量系统; 后者则能在外界压力波动时自动调节, 维持流量或压差稳定, 更适用于变流量系统。

目前, 针对平衡阀工程选型与控制策略的研究较多, 但对其流动与阻力特性的实验对比分析仍较为缺乏, 难以为阀门性能评估提供充分依据。为此, 选取丹佛斯 MSV-D 型静态平衡阀与 AB-QM 型动态平衡阀为研究对象, 按国家标准规定试验方法测定二者在不同工况下的流量系数与流阻系数^[3], 分析其流动与阻力特性, 以期为工程中的科学选型与系统优化提供实验支撑。

一、实验方案

图1为平衡阀流动与阻力特性测试实验装置,主要包括循环水系统、数据采集系统和待测阀门测试段三部分,各设备通过卡盘卡箍快装连接。实验流体为常温水。流经阀门的水流量通过电磁流量计测量;阀门的流阻由安装在阀门前后的压力传感器测量;水温由温度传感器测量,所有数据信号连接到数据采集仪并记录。

实验程序及实验系统中各装置之间的安装间距均按 GB/T 28636-2012《采暖与空调系统水力平衡阀》的规定设置。

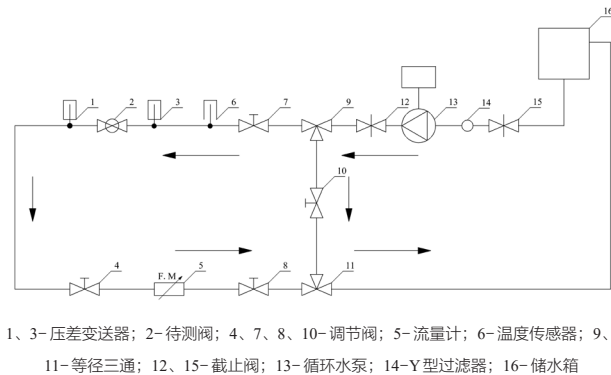


图1 平衡阀性能测试实验系统图

实验装置主要部件参数和技术指标见表1,待测阀门具体参数见表2,主要设备参数见表3。

表1 测试实验台主要部件参数

参数名称	技术指标	参数名称	技术指标
快装直管	Φ25 卡盘 Φ50.5 L=300mm	截止阀	Φ51/ 卡盘 Φ64mm
编织网软管	Φ32 卡盘 Φ50.5 L=500mm	调节阀	Φ25/ 卡盘 Φ50.5mm
等径三通	Φ51 厚度 1.5/ 卡盘 Φ64	Y型过滤器	Φ51 卡盘 Φ64mm
水箱尺寸	1000×1000×1000mm	开关电源	24V AC/DC

表2 待测阀门具体参数

类型	材质	公称直径 / mm	最大压差 / kPa	最大流量 /m ³ /h	控制方式
静态平衡阀	CW617N	25	250	9.5	手动设定
动态平衡阀	CW602N	25	600	1.7	电动执行器

表3 主要设备参数

辅助设备	型号	量程范围（额定参数）	精度
循环水泵	PX404ER型	750W、32m、4m ³ /h	/
数据采集仪	Keysight DAQ970A DAQM901A	20通道温度 2通道模拟量	/
电磁流量计	OPTIFLUX4100C 型	0 ~ 3.0 m ³ /h	± 0.5%
压差变送器	LDG-SUP型	3.0 ~ 35.0m ³ /h	± 0.5%
温度传感器	OHR-M2G型	0 ~ 1.6Mpa	± 0.5%
信号发生器	TY2511型	-50 ~ 150℃	± 0.3%
信号发生器	SIN-C703型	4 ~ 20mA	± 0.2%
电动执行器	AME-110-NLX 型	24V	± 20%

二、实验方法及数据处理

（一）实验方法

通过实测两种不同类型水力平衡阀的性能参数,对比分析流动与阻力特性。具体如下:

①在平衡阀两端不同压差条件下,测量并计算不同相对开度下的流通能力与流量系数,从而评价并对比两种平衡阀的流量调节特性。

②在平衡阀两端不同稳定压差条件下,测量并计算不同相对开度下的阻力系数,从而评价并对比两种平衡阀的阻力特性。

实验测试原理见图1。通过调节平衡阀的相对开度,测量平衡阀前后的压差及流过阀门的流量。对于静态平衡阀,其相对开度通过阀门上的数字设定值确定;对于动态平衡阀(实验时配备相应执行器),其相对开度通过信号发生器向电动执行器输出标准信号来调节,实际开度由阀芯上的百分比刻度盘读取。

实验时,通过调节测试段待测平衡阀前后的调节阀以调整平衡阀入口与出口之间的压差并稳定在预设值(静态、动态平衡阀压差分别选定为10、20、30、40kPa;10、15、20、25、30kPa)。待流量稳定后,分别设定两种平衡阀的相对开度(25%、43%、55%、67%、84%、97%、100%;20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%)进行测试。每种实验条件(即固定的压差与相对开度组合)均进行3次重复测试,最终取平均值作为该工况下的有效数据。

平衡阀前后净压差 $\Delta p^{[1]}$ 计算

$$\Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_2$$

式中: Δp 平衡阀的净压差, kPa; Δp_1 平衡阀前取压点压差, kPa; Δp_2 平衡阀后取压点压差, kPa。

（二）数据处理

平衡阀的数据处理涵盖流量系数、流通能力、流阻系数等关键参数。其中,前两个是评判阀门流动性能的核心指标,而流阻系数则是评估阀门阻力性能的指标。根据 GB/T 30832-2014《阀门流量系数和流阻系数试验方法》^[12]的要求并基于实验数据的采集,进一步得出不同压差下平衡阀流量系数、流通能力、流阻系数随相对开度的变化。

1. 流动特性的数据处理

(1) 流量系数 K_v 计算^[4]:

$$K_v = 10 \times Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p \times \rho_0}} \quad (1)$$

式中: K_v —平衡阀流量系数, m³/(h·kPa^{1/2}); Q —测量水流量, m³/h; Δp —平衡阀前后压差, kPa; ρ —水的密度, kg/m³; ρ_0 —15℃时水的密度, kg/m³, 本实验中 ρ / ρ_0 的比值取1。

(2) 流通能力 C 计算^[5]:

$$C = 316 \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (2)$$

式中: C 流通能力, m³/h; Δp 平衡阀的净差压, Pa; Q —通

过平衡阀的介质流量, m³/h。

2. 阻力特性的数据处理

(1) 流阻系数 ζ 计算^[6]:

$$\zeta = \frac{2000\Delta p}{\rho \times v^2} \quad (3)$$

式中: v —测试段中水的平均流速, m/s。

(2) 流速 v 计算^[1]

$$v = \frac{4 \times Q}{\delta \times d^2} \quad (4)$$

式中: d —测试段的内径, m。

三、实验结果与分析

(一) 流动特性数值分析

阀门的流动特性, 即固有流量特性, 是评估其调节性能优劣的关键指标, 通常不受外部管路阻力影响。典型的流量特性主要包括直线型、等百分比型及快开型^[7]。其中, 直线型阀门指流量与阀门开度呈线性关系, 即在整个开度范围内具有良好的控制精度与灵敏度; 等百分比型阀门指单位行程变化引起的流量变化率与当前流量成正比, 即在小开度时灵敏度高, 大开度时调节能力强; 而快开型阀门指阀芯微小位移即可使流量急剧增大, 特性曲线初始段斜率极大, 因此仅适于关断, 不宜用于调节。

流量系数是衡量阀门流通能力的关键指标。一般而言, 流量系数与流通能力正相关, 数值越大, 流通能力越强。平衡阀流动特性数据如表4和5所示。

表4 静态平衡阀流动特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa			
		10	20	30	40
流量系数 / m ³ /(h·kPa ^{1/2})	25	1.90	1.79	1.77	1.76
	43	3.13	3.04	3.05	3.05
	55	4.08	3.94	4.01	4.00
	67	5.67	5.81	5.25	4.99
	84	7.85	6.82	6.14	6.09
	97	8.28	7.13	6.79	6.74
流通能力 / m ³ /h	100	8.28	6.99	6.89	6.84
	25	1.90	1.78	1.77	1.75
	43	3.13	3.03	3.04	3.05
	55	4.08	3.94	4.01	4.00
	67	5.66	5.81	5.25	4.99
	84	7.85	6.81	6.14	6.08
	97	8.27	7.13	6.79	6.73
	100	8.27	6.98	6.89	6.83

表5 动态平衡阀流动特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa				
		10	15	20	25	30
流量系数 / m ³ /(h·kPa ^{1/2})	20	0.47	0.42	0.37	0.33	0.31
	30	0.95	0.90	0.80	0.72	0.66
	40	1.46	1.36	1.23	1.12	1.02
	50	1.99	1.87	1.71	1.56	1.44
	60	2.64	2.45	2.28	2.11	1.95
	70	3.19	2.98	2.78	2.58	2.37
	80	3.55	3.40	3.13	2.95	2.74
	90	3.83	3.70	3.44	3.25	3.05
	100	4.03	3.91	3.67	3.45	3.27

流通能力 / m ³ /h	20	0.46	0.42	0.37	0.33	0.30
	30	0.95	0.90	0.80	0.72	0.66
	40	1.46	1.36	1.23	1.12	1.02
	50	1.99	1.87	1.71	1.56	1.44
	60	2.63	2.45	2.28	2.11	1.94
	70	3.19	2.98	2.78	2.58	2.37
	80	3.55	3.40	3.12	2.95	2.74
	90	3.83	3.69	3.44	3.25	3.04
	100	4.03	3.91	3.66	3.45	3.26

根据表4和5中的数据绘制出不同压差下, 静态平衡阀与动态平衡阀的流量系数 (K_v) 及流通能力 (C) 随相对开度的变化关系, 分别如图2和3所示。

两种平衡阀呈现出截然不同的流动特性: 静态平衡阀的 K_v 与 C 均随相对开度增大而显著提升, 且在相同开度下, 数值随阀门前后压差的增大而明显增加, 表明流动特性受系统压差影响显著; 从曲线形态来看, 在20% ~ 50%相对开度时, 特性曲线呈轻微下凹, 介于直线与等百分比型之间, 调节灵敏度较高, 而当开度超过50%后, 曲线转为上凸, 表现出快开特性, 调节精度有所下降。与此形成鲜明对比的是, 动态平衡阀在不同入口压差 (10 kPa~30 kPa) 下, 其同一开度对应的 K_v 与 C 基本保持一致, 曲线几乎重合, 这充分验证了其电动执行器有效抵消了外部压力波动, 具备优异的压差无关特性; 其流量特性曲线在整个开度范围内更接近理想的直线型, 从而保证了在全行程内具有稳定、可预测的调节性能。综上所述, 静态平衡阀的调节性能与工作压差和开度均密切相关, 而动态平衡阀因其压力无关设计, 在各种压差下均能保持流动特性的高度一致与稳定, 在变流量系统中展现出更优越的调节保障能力。

(二) 阻力特性数值分析

流阻系数由阀门自身的结构、尺寸及内腔形状所决定, 并直接决定了阀门对流体产生的阻力大小, 流阻系数与流体通过阀门时的阻力呈正相关。平衡阀阻力特性数据如表6和7所示。

根据表6和7中的数据绘制出不同压差下, 动态平衡阀的流阻系数 (ζ) 随相对开度的变化, 如图4所示。

静态平衡阀与动态平衡阀的 ζ 均随相对开度的增大而呈现减小趋势, 但与 K_v 的变化规律相反。静态平衡阀在相对开度小于55%时, 其 ζ 受系统压差与雷诺数的共同影响较为显著, 不同压差下的数值差异明显; 而当开度超过55%后, ζ 曲线趋于聚拢, 数值稳定且变化微小, 表明此时阀门内部流道已充分发展, 阻力主要受 v 主导。相比之下, 动态平衡阀在不同压差 (10 kPa~30 kPa) 下的 ζ 曲线在整个开度范围内彼此更为接近, 尤其在70% ~ 100%大开度区间内基本重合, 这与电动执行器有效稳定阀芯前后压差、削弱外界波动影响的机制密切相关, 体现出高度一致的阻力性能。综上所述, 静态平衡阀在小开度时阻力大且易受压差干扰, 在大开度时趋于稳定; 而动态平衡阀则在全开度范围内均表现出良好的阻力一致性。在工程实践中, 为降低系统运行能耗并避免高流阻阀门成为水力“瓶颈”, 宜优先选用在常用工况下 ζ 较低且稳定的平衡阀。

表6 静态平衡阀阻力特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa			
		10	20	30	40
流阻系数	25	1.74	1.96	2.00	2.03
	43	0.64	0.68	0.67	0.67
	55	0.38	0.40	0.39	0.39
	67	0.19	0.19	0.23	0.25
	84	0.10	0.13	0.17	0.17
	97	0.09	0.12	0.14	0.14
	100	0.09	0.13	0.13	0.13

表7 动态平衡阀阻力特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa				
		10	15	20	25	30
流阻系数	20	2.89	3.58	4.54	5.61	6.71
	30	0.69	0.78	0.98	1.21	1.44
	40	0.29	0.34	0.41	0.50	0.60
	50	0.16	0.18	0.21	0.26	0.30
	60	0.09	0.10	0.12	0.14	0.17
	70	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
	80	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08
	90	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07
	100	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06

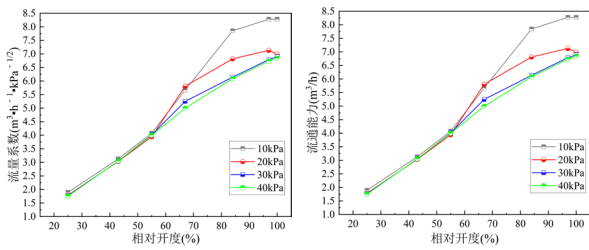


图2 静态平衡阀相对开度与流量系数、流通能力之间的关系

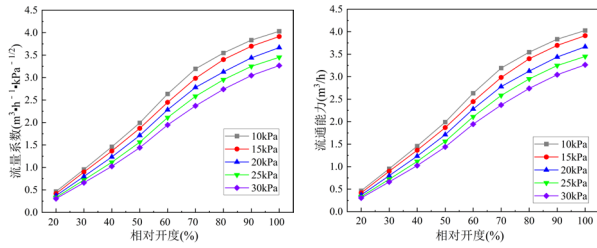


图3 动态平衡阀相对开度与流量系数、流通能力之间的关系

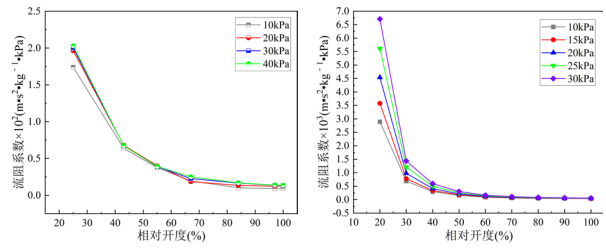


图4 平衡阀相对开度与流阻系数之间的关系

四、结论

通过对不同压差和开度下两类平衡阀流动与阻力特性进行分析, 得出以下结论:

(1) 对于流动特性, MSV-D静态平衡阀的调节性能易受系统压差影响, 在20%~50%开度时具有较高调节灵敏度, 但大开度下特性趋于快开, 精度下降; 而 AB-QM动态平衡阀凭借其压差无关特性, 在不同压差下均保持流量稳定, 且全开度范围内呈现理想的直线特性, 调节性能更优。

(2) 对于阻力特性, 两种阀门的流阻系数均随开度增大而减小。MSV-D静态平衡阀在小开度时流阻系数受流体流态影响显著, 大开度后趋于稳定; AB-QM动态平衡阀则在全开度范围内均表现出高度一致的阻力特性, 进一步验证了其内部压差控制机制的有效性。

(3) 对于工程应用, 静态平衡阀适用于工况稳定的系统, 而动态平衡阀因其卓越的稳定性和节能潜力, 是实现变流量系统精确水力平衡的更优选择。

参考文献

- [1] 陈颂. 供热系统水力失调和水力平衡的分析 [J]. 硅谷, 2012, (04): 177-178.
- [2] 罗军, 李乐, 鲍金平. 中央空调系统水力平衡分析 [J]. 国外建材科技, 2005, (05): 79-82.
- [3] 王改, 樊越胜, 张婧, 等. 静态平衡阀流量特性和阻力特性的实验研究 [J]. 煤气与热力, 2016, 36(05): 9-12.
- [4] 全国阀门标准化技术委员会 (SAC/TC 188). 阀门 流量系数和流阻系数试验方法: GB/T 30832-2014[S]. 中国标准出版社, 2014.
- [5] 全国暖通空调及净化设备标准化技术委员会 (SAC/TC 143). 采暖与空调系统水力平衡阀: GB/T 28636-2012[S]. 中国标准出版社, 2012.
- [6] Chern M J, Wang C C, Ma C H. Performance test and flow visualization of ball valve[J]. Experimental thermal and fluid science, 2007, 31(6): 505-512.
- [7] 隋忠伟. 动态平衡阀调节特性分析与实验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.

电力现货交易市场中的风险管理与对策研究

刘涛

国能锦界能源有限责任公司, 陕西 榆林 719319

DOI:10.61369/WCEST.2025080016

摘 要 : 文章以电力现货交易市场为研究对象, 深入分析其交易特征及价格、市场、电网运行、信用四类风险的表现与成因, 结合陕西等地区市场实践数据, 提出完善市场机制、运用金融工具、加强电网管理、强化信用监管四方面方法, 为市场参与者提供科学风险管理手段, 助力电力市场平稳运行与产业健康发展。

关 键 词 : 电力现货交易市场; 风险管理; 对策分析

Research on Risk Management and Countermeasures in Spot Electricity Trading Market

Liu Tao

Guoneng Jinjie Energy Co., LTD., Yulin, Shaanxi 719319

Abstract : This study examines the electricity spot trading market, conducting an in-depth analysis of its trading characteristics and the manifestations and causes of four types of risks: pricing, market dynamics, grid operations, and credit risks. Drawing on practical market data from regions like Shaanxi, the paper proposes four key strategies: improving market mechanisms, utilizing financial instruments, strengthening grid management, and enhancing credit supervision. These measures provide market participants with scientific risk management tools to support the stable operation of the electricity market and the healthy development of the industry.

Keywords : electricity spot market; risk management; countermeasure analysis

引言

当前我国电力现货交易市场逐步建立并扩大试点范围, 在优化电力资源配置、反映市场供需关系方面发挥重要作用。但该市场交易周期短至日前、日内甚至实时, 电价受供需、气象、新能源出力等多因素影响波动剧烈。同时, 市场机制不健全、电网安全约束、主体信用问题等叠加, 导致发电、售电、用电企业面临显著运营不确定性。在此背景下, 系统研究电力现货交易市场风险类型与管理对策, 对化解市场风险、保障电网安全、推动电力产业可持续发展具有重要现实意义。

一、电力现货交易市场特点

(一) 交易周期短, 时效性要求高

电力现货交易市场为适配电力实时供需平衡需求, 将交易周期拆解为日前、日内及实时多个层级, 与中长期电力市场相比周期大幅压缩, 部分地区还需在预测当天45分钟后的负荷变化基础上开展交易安排。这种短周期特性要求市场主体快速完成交易申报、撮合匹配与交割结算全流程, 无论是发电企业调整出力计划, 还是售电企业优化购电策略, 都需在极短时间内响应市场动态, 任何环节的延迟都可能影响交易效率与电网供需稳定。

(二) 电价波动大, 实时性特征显著

电力现货电价受供需关系、电源结构及外部条件多重因素影响, 呈现出极强的实时波动特性, 如部分地区夜间低谷时段平均电价与负荷高峰时段平均电价差距明显, 夏季高峰时段电价甚至

可能达到正常水平的三倍以上, 而风电旺季夜间低谷期电价又可能降至近零。新能源发电的间歇性与随机性、火电燃料价格波动等, 进一步加剧了电价波动幅度, 使得电价无法维持固定水平, 需根据市场实时情况动态调整, 给市场主体成本控制与收益预测带来挑战。

(三) 与系统运行紧密关联, 安全约束强

电力现货交易需以电网安全稳定运行为前提, 与电力系统实时运行状态深度绑定, 受到输电线路容量、节点电压稳定性等多重安全约束限制。部分地区为保障电网安全, 运用调度有功智能控制系统实时监测电网断面潮流, 按合理原则分配风电、光伏出力, 若现货交易计划与电网安全约束冲突, 如导致输电线路过载, 就需强制调整或撤销交易。新能源大规模接入后出力的随机波动, 也增加了电网调频调压难度, 进一步强化了安全约束对现货交易的影响^[1]。

二、电力现货交易市场风险类型

（一）价格风险

电力现货市场中电价受多重因素交织影响易产生剧烈波动，形成显著价格风险。电力无法大规模高效存储的特性使其供需需实时平衡，当用电负荷激增而发电侧响应不及时，或电力供应过剩时，电价会出现大幅涨跌，部分地区夏季高峰电价可达正常水平三倍以上，风电旺季夜间低谷电价近零。同时，新能源发电的间歇性与随机性、火电占比高地区的燃料价格波动，进一步放大电价波动幅度，给市场主体成本控制与收益预测带来极大不确定性。

（二）市场风险

电力现货市场因机制建设不完善与外部环境变化，面临多维度市场风险。部分地区交易制度不健全、品种单一、价格形成机制透明度不足，制约市场功能发挥，不合理的准入门槛与缺失的退出机制，易导致市场秩序混乱或低效主体滞留^[2]。大型市场主体还可能利用支配地位操纵市场，且新能源补贴调整、环保标准升级等政策变动，会直接影响市场供需与价格走势，增加市场主体运营的不确定性。

（三）电网运行风险

电力现货交易的正常开展高度依赖电网安全运行，各类电网相关问题构成显著运行风险。电网存在输电线路容量、节点电压稳定性等安全约束，若交易计划与之冲突，需强制调整或撤销交易，给市场主体造成经济损失。电网设备故障、台风暴雨等自然灾害，会扰乱交易秩序，而新能源大规模接入带来的出力波动，加大电网调频调压难度，进一步提升电网运行风险与现货交易的不确定性。

（四）信用风险

电力现货交易各环节中市场主体违约行为引发的信用风险，对市场秩序与效率影响显著。发电商可能因设备故障、燃料短缺无法按约供电，用电企业可能因经营或资金问题拖欠电费，导致交易对方利益受损。当前市场缺乏统一权威的信用评价标准与信息共享平台，市场主体难以全面了解交易对手信用状况，且信用监管与惩罚机制不完善、违约成本低，无法有效约束主体行为，增加了信用风险发生概率^[3]。

三、电力现货交易市场风险管理对策

（一）完善市场机制

1. 健全交易规则，丰富交易品种并明确价格计算方式

在电力现货交易规则体系搭建中，需细化从交易申报、匹配撮合到交割结算的全流程标准，明确市场参与者的报价时间窗口、数据格式及修改权限，避免因规则模糊引发交易争议。除传统电能交易外，重点拓展调峰、调频、备用等辅助服务交易品种，适配新能源大规模接入后的电网调度需求，例如针对风电、光伏出力波动特性，设计短时调峰交易产品。针对日前、日内、实时不同交易时段，明确日均价、实时价、日结算价的具体计算

逻辑，结合发电成本、负荷变化及新能源出力数据确定计算参数，引入基于边际成本的定价方法以精准反映用电缺电量，同时设置合理的电价涨跌幅限制，避免出现类似部分地区夏季高峰电价达正常水平三倍以上或风电旺季夜间低谷电价近零的极端情况，保障市场价格平稳运行。

2. 优化准入退出机制，严格审核标准并明确退出流程

针对发电企业，建立多维度审核体系，综合评估装机容量、设备技术水平、环保达标情况及财务稳定性，例如对火电企业重点核查燃料储备能力与机组运维记录，对水电企业则考核库区调节能力、来水预测精度及历史出力稳定性，确保进入市场的主体具备持续、可靠的供电能力。对售电企业，重点审查市场运作经验、客户服务团队配置、风险准备金规模及信用记录，防范资质不足的企业扰乱市场秩序。明确市场退出条件，对长期亏损且无法保障供电安全、存在欺诈或恶意违约行为的主体，启动强制退出程序，同步制定债务清偿方案与用户用电转移计划，保障用户权益不受损失；将退出企业的失信信息纳入信用档案并向市场公示，强化对现有市场主体的约束作用，维护市场公平竞争环境。

（二）运用金融工具对冲风险

1. 推广电力期货与期权，帮助主体锁定收益与成本

推动电力期货市场规范发展，引导发电企业根据自身发电计划、成本结构及市场需求预期，签订对应周期的电力期货合约，例如火电企业可结合煤炭采购成本与机组发电效率，锁定未来半年至一年的售电价格，避免后续电价下跌或燃料涨价导致的收益波动；工业用电企业则可根据生产计划，通过购买电力期货合约确定年度购电成本，稳定生产成本预算，减少电价上涨对生产经营的冲击^[4]。完善电力期权交易制度，允许市场主体依据自身风险偏好选择看涨或看跌期权，当预测电价可能大幅上涨时，用电企业可购买看涨期权，以约定价格购电降低支出；当预测电价可能下跌时，发电企业可购买看跌期权，按约定价格售电保障收益，通过期货与期权工具的灵活组合，实现对价格风险的精准对冲，提升市场主体的经营稳定性。

2. 推行差价合约，保障新能源企业稳定收益并平抑价格波动

针对新能源发电出力受天气影响大、波动性强的特点，组织新能源企业与购电方签订差价合约，明确合约基准电价与结算周期。当电力现货市场价格低于合约基准电价时，购电方按照基准电价与现货电价的差额向新能源企业进行补偿，确保风电、光伏企业在出力高峰但市场供过于求导致电价低迷时，仍能获得稳定的收益，避免因短期市场波动影响企业长期投资信心；当现货市场价格高于基准电价时，新能源企业将差额部分返还给购电方，平衡购电方的用电成本。通过差价合约的双向调节机制，不仅能减少新能源出力波动对现货市场价格的冲击，缓解电价大幅震荡，还能为新能源企业提供可预期的收益保障，促进新能源产业持续健康发展，助力能源结构转型。

（三）加强电网运行风险管理

1. 优化电网规划建设，适配新能源接入并提升传输能力

在电网规划阶段，充分结合新能源资源分布特征与接入需求，合理布局输电线路与变电站，例如针对新能源集中的河西地

区,规划建设专用输电通道,减少与援疆电力输送通道的共用冲突,缓解主网架阻塞问题,提升新能源消纳能力。加大特高压电网、智能电网等先进传输技术的研发与应用力度,利用特高压输电容量大、传输距离长、电能损耗低的优势,实现新能源集中区域与负荷中心的高效电力输送,优化区域间电力资源配置,缓解局部地区电力供需失衡。同步推进电网智能化改造,部署先进的传感设备、通信系统与控制平台,实现对电网断面潮流、设备运行状态的实时监测与动态调控,为电力现货交易提供灵活、可靠的电网支撑,减少因传输能力不足或网架结构不合理导致的交易调整风险。

2.完善安全保障机制,建立监控预警体系与应急方案

构建全方位的电网安全运行监控与预警体系,整合电网设备运行数据、负荷预测数据、新能源出力数据及气象数据,运用人工智能、机器学习等技术分析数据规律,识别设备潜在故障与电网运行风险,提前发出预警信号并推送至运维团队。制定详细的电网应急预案,明确设备故障、自然灾害等突发事件的处置流程,划分调度中心、运维单位、抢修队伍的职责分工,例如针对极端天气导致的输电线路倒塔或短路,预设负荷转移路径、备用电源启动顺序及抢修人员调配方案。定期组织电网应急演练,模拟不同故障场景下的应急处置流程,提升运维人员的协同响应能力与实战水平;加强与气象、应急管理部门的信息共享与联动协作,及时获取灾害预警信息,提前采取线路加固、负荷调整、备用机组启停等预防措施,最大限度降低突发事件对电网运行及电力现货交易的影响。

(四)强化信用风险管理

1.构建信用评价体系,设定多维度指标并建立信息数据库

设计覆盖市场主体全经营周期的多维度信用评价指标体系,针对发电企业,重点考核出电完成率、供电可靠度、电费结算及时性、设备运维质量等指标,全面反映其履约能力与服务水平;针对售电企业,围绕合同履约率、客户满意度、市场合规性、风险应对能力等维度开展评估。采用量化评分与定性评价相结合的

方式,将市场主体信用等级划分为 AAA、AA、A-、B- 等不同级别,同时建立统一的信用信息数据库,实时采集、整理市场主体的经营数据、履约记录、违规信息及信用评价结果,实现信用信息的实时更新、共享查询与动态管理,帮助市场参与者在交易前全面、准确了解交易对手的信用状况,减少信息不对称引发的信用风险^[5]。

2.加强信用监督奖惩,利用技术手段监管并实施差异化激励

建立常态化的信用核查与监管机制,定期对市场主体的信用状况进行复核评估,引入区块链技术记录信用信息,确保信用信息的不可篡改、可追溯,提升信用监管的透明度、公信力与效率。对信用等级高的市场主体,实施差异化激励政策,在市场准入时简化审核流程、缩短审批时间,降低交易保证金缴纳比例,优先推荐参与跨区域电力交易或辅助服务交易,为其提供更多市场机会;在金融支持方面,协调银行等金融机构给予更低的贷款利率、更宽松的融资条件。对存在轻微违约行为的主体,及时进行约谈提醒,要求限期整改;对严重失信的主体,列入“失信黑名单”,取消其市场交易资格,限制其未来一定期限内重新进入市场,并依法追究其违约责任,要求赔偿交易对手的经济损失。通过明确的奖惩措施,提高市场主体的违约成本,引导其重视信用建设,营造诚实守信、公平有序的电力现货交易市场环境。

四、结语

电力现货交易市场风险管理是一项系统工程,需结合市场特点与风险成因精准施策。通过落实完善市场机制、运用金融工具等对策,可有效降低各类风险对市场运行的冲击。未来随着技术进步与改革深入,还需持续优化风险管理理论与方法,提升风险评估精度,借鉴先进经验,进一步增强电力现货交易市场稳定性与抗风险能力,为我国电力工业高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] 祁彪. 电力现货交易市场中的风险管理与对策研究 [J]. 消费电子, 2025, (18): 80-82.
[2] 李重春. 电力市场环境下的电力交易风险管理研究现状与对策 [J]. 消费电子, 2025, (19): 236-238.
[3] 艾云涛, 周立辉, 于洋, 等. 我国电力市场现货交易分析及研究 [J]. 智慧中国, 2023, (11): 88-90.
[4] 李志鑫. 电力市场环境下的电力交易风险管理分析 [J]. 电力系统装备, 2021, (23): 147-148.
[5] 陆哲婷. 电力现货交易中的风险控制策略 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 经济管理, 2024(1): 0105-0108.

基于化学－力学耦合损伤的高拱坝地震响应分析

杨景文^{*}, 王欢

中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东, 广州 510610

DOI:10.61369/WCEST.2025080017

摘 要 : 通过引入孔隙率和损伤参数, 构建耦合化学－力学的混凝土损伤分析模型, 同时结合某高拱坝工程, 对比分析了不同运行期下的地震响应。计算结果表明: 与建成时相比, 运行25、50、100年后地震作用下坝顶位移极值向上游分别增加7.43%、15.5%、23.3%, 向下游分别增加7.07%、14.3%、19.6%; 上游面由于混凝土刚度退化, 地震反应剧烈程度减小, 峰值拉应力分别下降4.46%、9.75%、17.27%; 拱冠梁塑性区范围明显扩大, 塑性应变水平增加; 说明随着运行年限增加拱坝的抗震安全性是下降的, 在实际工程设计中应注重提高坝体上游面混凝土强度和抗渗等性能。

关 键 词 : 化学－力学耦合; 地震响应; 高拱坝; 损伤

Seismic Response Analysis of High Arch Dam Based on Coupled Chemo-mechanical Damage

Yang Jingwen^{*}, Wang Huan

China Water the Pearl River Planning, Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610

Abstract : A coupled chemical-mechanical concrete damage analysis model is constructed by introducing porosity and damage parameters. Meanwhile, combining with a high arch dam project, the seismic responses under different operation periods are comparatively analyzed.. The calculation results show that compared with the completion time, the maximum displacement of the dam crest under seismic action increase by 7.43%, 15.5%, and 23.3% upstream and 7.07%, 14.3%, and 19.6% downstream after 25, 50, and 100 years of operation, respectively; due to the degradation of concrete stiffness on the upstream side, the intensity of seismic response decreases, and the peak tensile stress decreases by 4.46%, 9.75%, and 17.27%, respectively; The plastic zone of the arch crown beam expands significantly, and the level of plastic strain increases. This indicates that the seismic safety of arch dams decreases with the increase of operation years, in practical engineering design, attention should be paid to improving the strength and impermeability of the concrete on the upstream face of the dam body.

Keywords : chemistry-mechanics coupling; seismic response; high arch dam; damage

引言

近20年来我国先后建成了许多达到300m级的拱坝, 例如溪洛渡、小湾、锦屏、乌东德、白鹤滩, 这些高拱坝的共同特点是处于我国地震活动频繁且烈度高的西南地区, 一旦发生溃坝灾变, 后果将不堪设想^[1]。国内众多的研究人员在坝基－水库动力相互作用、地基辐射阻尼、非均匀地震输入和水库压缩性效应等^[2~3]多方面取得了实质性进展, 但是以上的地震安全研究中未考虑长期复杂水环境影响作用下化学侵蚀造成混凝土退化对坝体抗震性能的影响。

引起混凝土材料和耐久性退化的长期复杂化学侵蚀作用有: 钙溶蚀、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环、碱集料反应和碳化等。混凝土作为一种以水泥基为基本骨架的多孔介质材料, 在多因素耦合作用下容易发生化学损伤。服役多年的大坝、水库混凝土和码头等建筑物, 受环境水作用的化学侵蚀较为普遍, 甚至一些服役较短时间的混凝土结构也出现了侵蚀现象^[4]。通过对服役多年的多座大坝进行了调研, 结果发现, 丰满、古田溪、南告、新安江、梅山、云峰等混凝土坝体, 均存在不同程度的化学损伤问题。拱坝长期受高应力、高渗压作用, 其不仅存在化学损伤问题, 也存在力学损伤的问题, 混凝土单一化学损伤或力学损伤演化模型不能合理地描述荷载和环境因素耦合作用下混凝土的性能退化规律。高拱坝的规模大, 地震动力响应高, 设计合理使用年限长达100年甚至要求更长, 长期的化学侵蚀引起拱坝抗震安全性能下降的问题不容忽视。目前, 该方面的分析研究较少, 本文在现有学者对化学与力学对混凝土材料的耦合作用研究基础上, 结合某高拱坝为例, 开展了化学－力学耦合作用下的地震响应分析。

作者简介 (第一作者兼通讯作者): 杨景文 (1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事研究水工结构等工作。

一、耦合化学—力学的混凝土损伤模型

混凝土在长期服役期间,既有外荷载引起的力学损伤,又有化学侵蚀作用所引起的化学损伤。Kuhl等^[5-6]通过总孔隙率来研究了混凝土的化学—力学的损伤,总孔隙率表达为:

$$\phi = \phi_0 + \phi_c + \phi_m \quad (1)$$

式中: ϕ_0 为初始孔隙率, ϕ_c 为化学作用引起的孔隙率变化值, ϕ_m 为力学损伤对应的孔隙率变化值。

化学作用引起孔隙率增加随时间是个不断累积过程,本文引入退化因子表征化学作用孔隙率的时间相关性, $\gamma=0$ 表示新浇筑的混凝土, $\gamma=1$ 表示完全退化的状态,退化过程的演变方程可表示为^[21]:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\tau_a}(1-\gamma) \quad (2)$$

当 $\tau_a \rightarrow 0$ 时 $\gamma=1$, $\tau_a \rightarrow \infty$ 时 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, 通过积分变换可得到与时间相关的退化指标:

$$\gamma = 1 - e^{(-t/\tau_a)} \quad (3)$$

因此,化学作用引起的结构孔隙率变化用下式来表示:

$$\phi_c = \phi_{c\max} \left[1 - e^{(-t/\tau_a)} \right] \quad (4)$$

式中: $\phi_{c\max}$ 为化学作用下完全退化的最大孔隙率值; τ_a 为特征时间量,可取结构的设计使用年限。

力学损伤对应的孔隙率 ϕ_m 是由于外荷载作用下混凝土微裂纹和微小孔隙数量发生变化所引起的,由 Kuhl^[5] 推导用下式来表示:

$$\phi_m = (1 - \phi_0 - \phi_c) d_m \quad (5)$$

式中: d_m 为力学损伤量的标量损伤参数。

d_m 与加载相关,分受拉、受压行为描述力学荷载作用引起的混凝土力学损伤演化规律,受拉行为的损伤参数 d_{mt} 演化可以用下式来确定^[9]:

$$d_{mt} = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2(\varepsilon/\varepsilon_{t,r})^5) & \text{if } (\varepsilon/\varepsilon_{t,r}) \leq 1 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_t (\varepsilon/\varepsilon_{t,r} - 1)^{1.7} + \varepsilon/\varepsilon_{t,r}} & \text{if } (\varepsilon/\varepsilon_{t,r}) > 1 \end{cases} \quad (6)$$

受压行为的损伤参数 d_{mc} 演化可以用下式来确定:

$$d_{mc} = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + (\varepsilon/\varepsilon_{c,r})^n} & \text{if } (\varepsilon/\varepsilon_{c,r}) \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (\varepsilon/\varepsilon_{c,r} - 1)^2 + \varepsilon/\varepsilon_{c,r}} & \text{if } (\varepsilon/\varepsilon_{c,r}) > 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\rho_t = f_{t,r}/(E \cdot \varepsilon_{t,r})$ 、 $\rho_c = f_{c,r}/(E \cdot \varepsilon_{c,r})$

式中: d_{mt} 、 d_{mc} 分别为受拉、受压损伤演化参数; α_t 、 α_c 分别为混凝土单轴受拉、受压应力—应变曲线下降段控制参数; $f_{t,r}$ 、 $f_{c,r}$ 分别为混凝土单轴抗拉强度、抗压强度代表值; $\varepsilon_{t,r}$ 、 $\varepsilon_{c,r}$ 分别为混凝土峰值拉应变、峰值压应变。

故损伤后的混凝土骨架有效体积率可以表述为:

$$1 - \phi = (1 - \phi_0 - \phi_c)(1 - d_m) \quad (8)$$

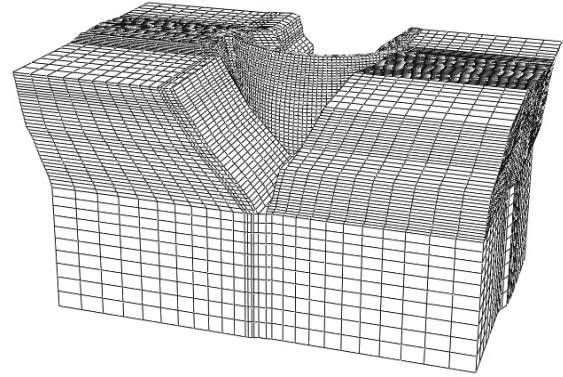
基于损伤变量与孔隙率的面积折减率等效的概念,耦合化学—力学混凝土损伤的应力应变关系表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \mathbf{E} : (\varepsilon - \varepsilon_p) \\ \mathbf{E} &= [(1 - \phi_0 - \phi_c)(1 - d_m)] \mathbf{E}_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

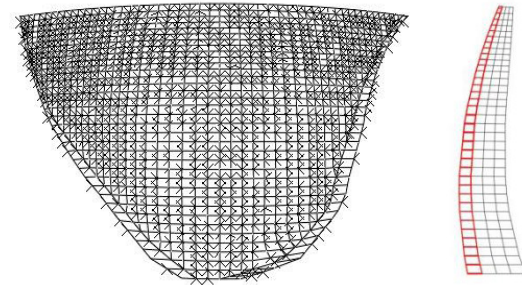
二、地震动力响应分析

(一) 模型与参数

某拱坝最大坝高305m,坝顶弧长552.25m,坝顶宽度16m,坝底厚度63m。有限元模型计算范围:以拱坝中心线为基准,坝顶原点为基准,向上、下游方向各取750m,左右岸方向各取900m,建基面以下取了700m,忽略地基的惯性和阻尼效应,假定为无质量刚性地基。动水压力采用附加质量法模拟。



(a) 拱坝整体有限元模型
(a) Overall finite element model of arch dam



(b) 坝体有限元模型 (× 为附加质量的单元、红色部分表示耦合损伤区域)
(b) Finite element model of dam (× elements with additional mass, red part represents coupled damage area)

图1 有限元模型

Fig1 finite element model

拱坝上游面长期与水接触,参考文献^[10],耦合损伤区域仅限于上游表面。考虑混凝土动态强度的标准值可较其静态标准值提高20%,在初始状态即拱坝刚建成时,坝体弹性模量38.19GPa,泊松比0.167,重度24.0kN/m³,初始孔隙率选 $\phi_0=0.05$ 。对于化学损伤的孔隙率 ϕ_c 在缺少实际数据下,其变化较难确定的,参考文献^[10],认为化学侵蚀引起的最大孔隙率 $\phi_{c\max}=0.32$,则运行100年时 $\phi_c=0.20$ 。混凝土的抗拉、抗压强度与弹性模量之间存在正相关的关系,本文取混凝土的强度与弹性模量的平方根成正比关系。

运行年限 (年)	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
建成	3.22	32.16	38.19
25	3.09	30.94	35.34
50	3.00	29.95	33.13
100	2.85	28.53	30.06

不同运行期拱坝耦合损伤区的应力应变关系曲线如图2所示，曲线明显出现软化，混凝土峰值抗拉强度和抗压强度降低。

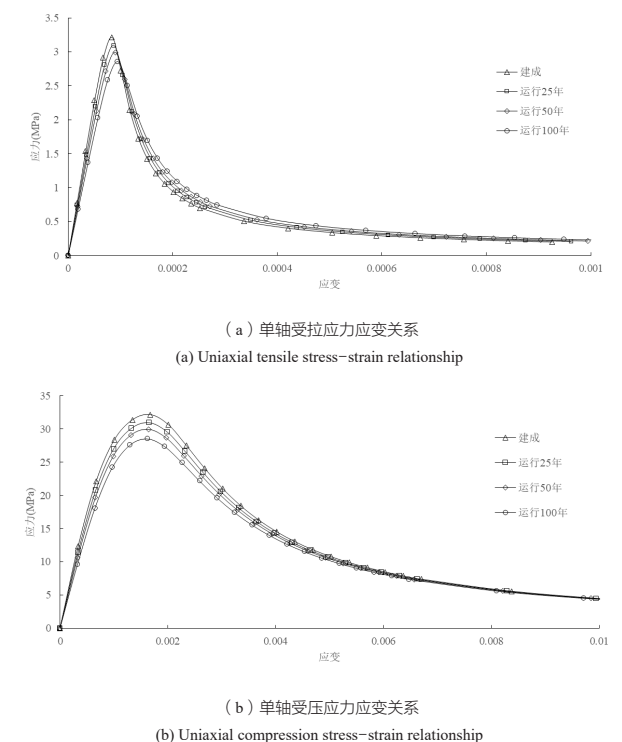
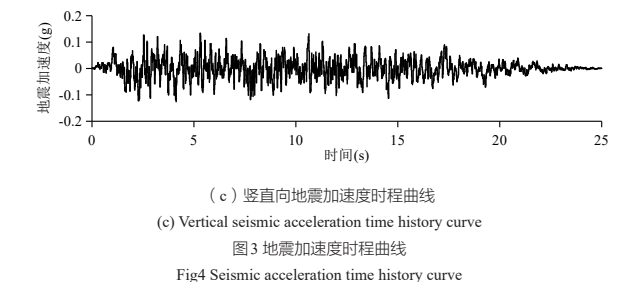
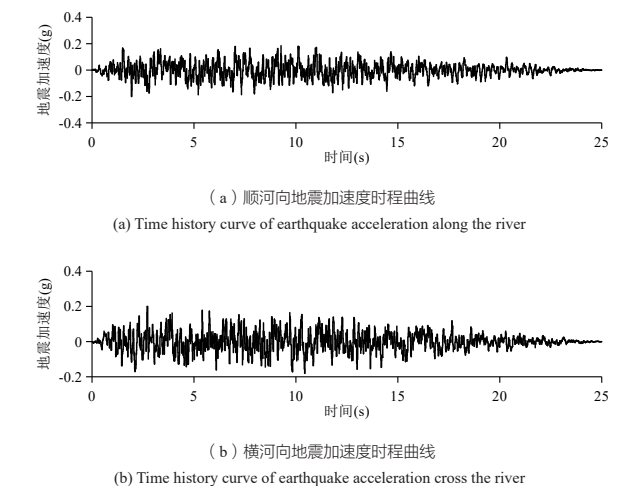


Fig3 Stress strain relationship curve of concrete at different operating periods

地震烈度为Ⅷ度，通过标准反应谱生成的地震的时程曲线见图3，地震持时25s，顺河向和横河向的地震峰值加速度为0.2g，竖直向的地震峰值加速度为0.167g。



(二) 结果及分析

1. 动态位移

不同运行期拱坝向上游发生极值位移时刻在地震11.4s左右，向下游的发生极值位移时刻在地震3.2s左右，随着运行年限增加，坝体位移极值增加。由于拱坝坝体非对称，位移极值位置发生在坝中心偏左侧位置。不同运行期向上游的坝顶位移极值分别为59.2mm、63.6mm、68.4mm、73.0mm，与建成时相比，运行25、50、100年分别增加7.43%、15.5%、23.3%；拱冠梁向上游的位移曲线呈现中下部向下游变位，中上部向上游变位。向下游的坝顶位移极值分别为131.5mm、140.8mm、150.3mm、157.3mm，与建成时相比，运行25、50、100年分别增加7.07%、14.3%、19.6%。分析其原因是上游面坝体材料退化导致混凝土的刚度减小，柔性增大，地震动力作用下坝体摆动幅值增大。

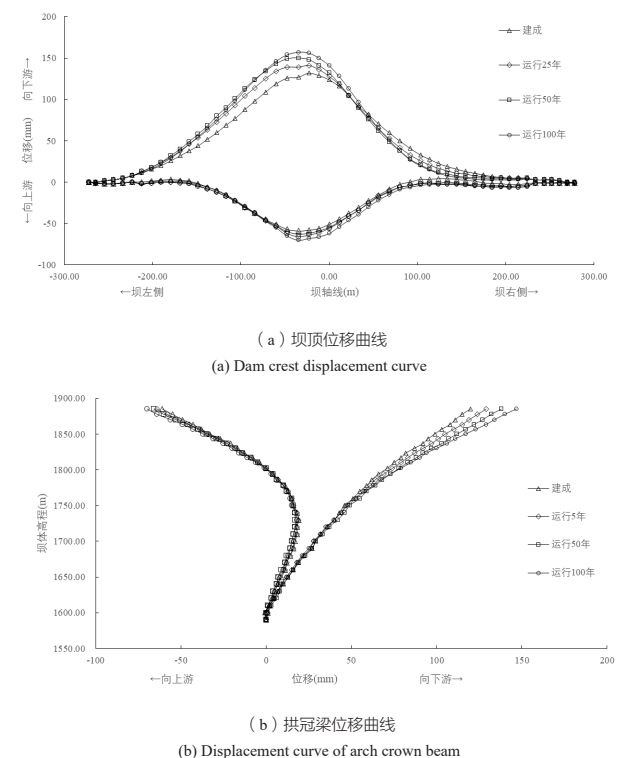


Fig5 Displacement curve of arch dam at maximum displacement moment

2. 上游面拉应力

不同运行期拱坝上游面发生峰值应力时刻在5.1s左右，如图5所示，灰色区为受压区，彩色区为受拉区，应力的分布规律基本类似，拉应力集中发生在坝体的上部三分之一以及坝肩两岸

部位,说明拱坝顶部和坝肩区域是地震危险区域,容易发生拉伸破坏。坝体上游面最大拉应力极值分别为3.59MPa、3.43MPa、3.24MPa、2.97Mpa,峰值应力是呈下降趋势,与建成时相比,运行25、50、100年分别下降4.46%、9.75%、17.27%。分析原因是混凝土刚度的降低使得地震作用下能量耗散更均匀,反应剧烈程度减小。

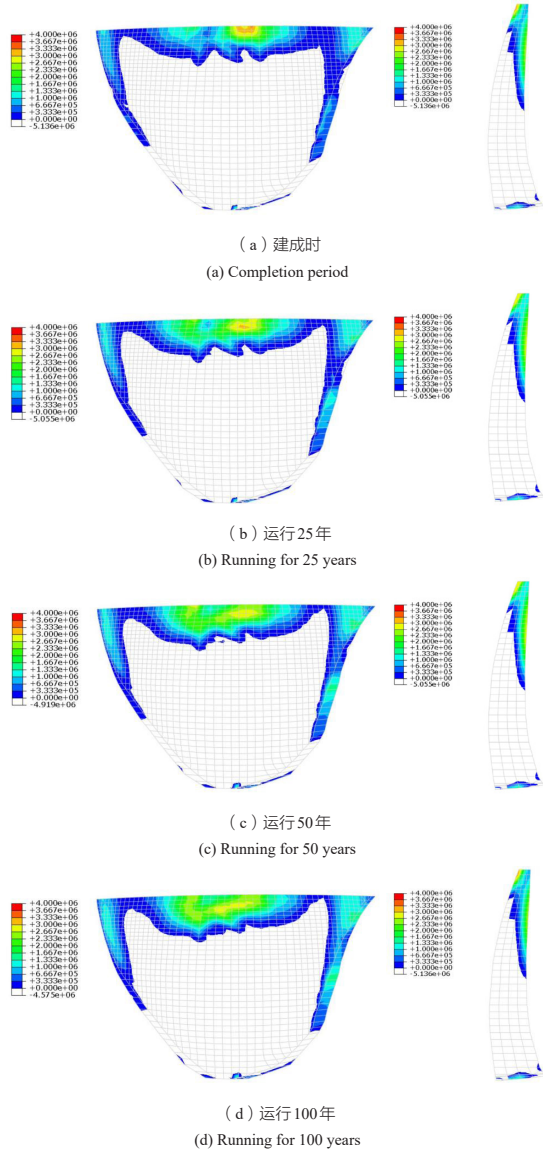


图5 最大拉应力时刻坝体应力分布

Fig5 Stress distribution of the dam body at the moment of maximum tensile stress

3. 塑性应变

坝体上游面都是率先在拱冠梁顶部附近出现塑性区,随着运行年限增加,地震作用下的塑性区向下扩大。上游面最大塑性应变值分别为0.04E-3、0.09E-3、0.67E-3、1.48E-3。拱坝建成时和运行25年时,仅在坝顶偏左侧位置出现局部塑性区,塑性变形水平极低,抗震能力较好。运行50年后地震作用下的上下游面塑性区均有所扩大,但水平仍较低。而当运行100年后,拱冠梁

顶部上游面和下游面均出现了更大范围的塑性区和更高的塑性应变值,说明抗震能力下降较多,拱冠梁顶部易开裂,影响拱坝的运行安全。

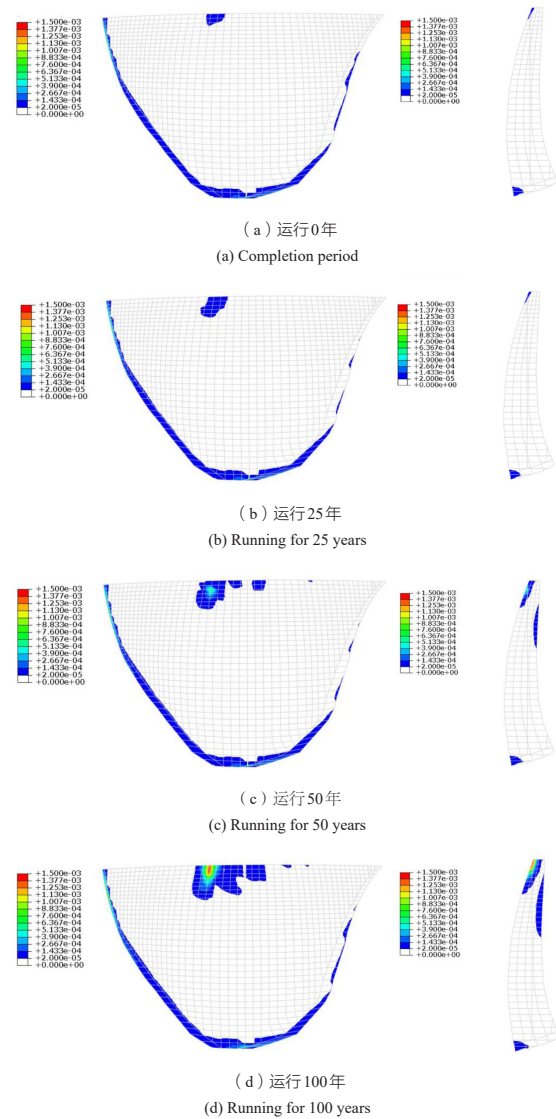


图6 塑性应变分布

Fig6 Plastic strain distribution

三、结论

本文构建耦合化学-力学损伤的模型来模拟混凝土的退化作用,对不同运行期的拱坝进行地震响应分析,得出以下结论:
a.在化学侵蚀影响下,拱坝上游面的混凝土弹性模量退化,峰值抗拉强度和抗压强度降低,削弱了拱坝有效承载能力。
b.长期运行的高拱坝地震响应发生了明显变化,动态位移和塑性应变增加、上游面峰值拉应力下降,运行初期拱坝具有较好的抗震性能,但随着化学侵蚀的影响期抗震性能不断降低,尤其注意拱冠梁顶部是最薄弱位置。

参考文献

- [1]陈灯红,胡昊文.基于随机比例边界有限元法的高混凝土坝地震响应不确定量化分析[J].工程力学,2024.

- [2] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 高拱坝的有限元分析方法和设计判据研究 [J]. 水利学报, 1997(8).
- [3] 潘坚文, 王进廷, 张楚汉. 超强地震作用下拱坝的损伤开裂分析 [J]. 水利学报, 2007(2).
- [4] 邢林生, 聂广明. 混凝土坝坝体溶蚀病害及治理 [J]. 水力发电, 2003(11): 60-63.
- [5] Kuhl D, Bangert F, Meschke G. Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials. Part I : Modeling[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(1): 15-40.
- [6] Kuhl D, Bangert F, Meschke G. Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials. Part II : Numerical methods and simulations[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(1): 41-67.
- [7] 张研, 张子明, 邵建富. 混凝土化学-力学损伤本构模型 [J]. 工程力学, 2006, 23(9): 153-156.
- [8] Nguyen V H, Colina H, Torrenti J M, et al. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: Part I: Experimental results[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(20): 2083-2089.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] Wang J T, Jin F, Zhang C H. Seismic safety of arch dams with aging effects[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(3): 522-530.

灌区规划中新增耕地后备资源分析

路豪杰

中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222

DOI:10.61369/WCEST.2025080018

摘 要 : 大中型灌区是农产品的重要生产基地,是保障国家粮食安全的重要基础,在水土资源具备的地区规划新建大中型灌区对新增灌溉面积、保障国家粮食安全具有重要意义。规划新建灌区可为新增耕地创造良好的灌溉条件,耕地后备资源作为耕地资源的重要“储备库”,是灌区规划中需重点考虑的新增灌溉面积方向。本文以湖南省株洲市洣水灌区为例,以耕地后备资源数据库中地块图斑为评价单元,通过对耕地后备资源适宜性评价因素的分析,构建适宜性评价指标体系,评价了灌区内耕地后备资源的适宜性,并划分高、中、低三个适宜等级,将高适宜与中适宜的耕地作为灌区规划中新增耕地的开发对象。此方法为灌区规划中合理开发耕地后备资源提供了参考。

关 键 词 : 灌区;耕地后备资源;适宜性评价

Analysis of New Cultivated Land Reserve Resources in Irrigation District Planning

Lu Haojie

China Water Resources Bei Fang Investigation, Design and Research Co., LTD., Tianjin 300222

Abstract : Large and medium-sized irrigation districts are important production bases for agricultural products and a crucial foundation for ensuring national food security. Planning and building new large and medium-sized irrigation districts in areas with abundant water and soil resources is of great significance for increasing irrigated areas and ensuring national food security. Planning new irrigation districts can create favorable irrigation conditions for newly added cultivated land. As an important "reserve pool" of cultivated land resources, the reserve resources of cultivated land are the key directions for the newly added irrigated area that need to be considered in the planning of irrigation districts. This paper takes the Taoshui Irrigation District in Zhuzhou City, Hunan Province as an example, and uses the plot plots in the database of cultivated land reserve resources as the evaluation unit. Through the analysis of the evaluation factors of the suitability of cultivated land reserve resources, a suitability evaluation index system is constructed to evaluate the suitability of cultivated land reserve resources in the irrigation district, and it is divided into three suitability grades: high, medium and low. Take highly suitable and moderately suitable cultivated land as the development targets for the newly added cultivated land in the irrigation district planning. This method provides a reference for the rational development of reserve resources of cultivated land in irrigation district planning.

Keywords : irrigation district; reserve resources of cultivated land; suitability evaluation

引言

灌区是具有一定保证率的水源和统一的管理机构、由完整的灌溉排水工程系统控制及其保护的区域^[1]。我国人口基数大、人均耕地少、水资源条件差,据第三次全国国土调查,我国耕地面积约19.18亿亩,人均耕地1.37亩,仅是世界人均耕地面积的37.6%^[2];目前,大中型灌区耕地灌溉面积占全国总耕地面积的24.8%,而生产的粮食约占全国总产量的50%左右。大中型灌区是农业和农村经济发展的重要基础设施,是我国农产品的重要生产基地,是保障国家粮食安全的重要基础。因此,在水土资源具备的地区规划新建大中型灌区对新增灌溉面积、保障国家粮食安全具有重要意义。

规划新建灌区是提升区域农业生产能力、保障粮食安全的重要举措,而耕地后备资源作为耕地“储备库”,其合理开发利用与灌区规划的衔接,直接关系到灌溉效益的最大化与耕地资源的可持续供给。在我国耕地刚性需求与生态保护约束日益凸显的背景下,灌区规划中对耕地后备资源的开发利用,既是缓解耕地供需矛盾的有效途径,也是实现农业可持续发展的关键抓手——通过完善灌溉设施,将

适宜开发的耕地后备资源转化为优质耕地，能够显著提升区域耕地质量和产出效率，为农业规模化、现代化发展奠定基础。

然而，耕地后备资源往往集中在生态环境相对脆弱的区域，如西北干旱半干旱地区的荒漠草原、西南喀斯特地貌区的石漠化土地等。若脱离生态承载力盲目开垦，必然引发一系列生态问题：粗放的开垦方式会破坏地表植被，导致水土流失加剧、土地沙化退化；不合理的灌溉可能引发土壤盐渍化，破坏地下水资源平衡；栖息地的破坏还会造成生物多样性减少，打破区域生态系统的稳定性，最终形成“开发—破坏—治理”的恶性循环，反而制约农业长远发展。因此，灌区规划中对耕地后备资源的开发利用，必须建立在“生态优先、绿色发展”的基础上，实现开发与保护的动态平衡。

要实现这一目标，首先需开展科学的前期评估，结合国土空间规划、生态保护红线、水资源承载力等刚性约束，对耕地后备资源进行精准分类——明确适宜开发、限制开发和禁止开发的区域，坚决杜绝在生态脆弱红线内开展开垦活动。其次，应采用生态友好型开发模式，将灌溉工程与生态保护工程同步规划、同步实施，例如在灌溉系统设计中融入节水技术，减少水资源浪费；在开垦区域周边构建防护林体系，提升生态缓冲能力；结合水土保持措施，改善区域生态环境。同时，需强化技术支撑与动态监管，利用遥感监测、大数据分析等技术，实时跟踪开发过程中的生态变化，建立“开发—监测—调整”的闭环机制，及时发现并解决潜在生态风险。此外，还应注重利益相关方的协同参与，统筹考虑当地群众的生产生活需求，通过生态补偿、绿色农业扶持等政策，引导农户采用生态种植模式，实现生态效益与经济效益的双赢。

综上，灌区规划中耕地后备资源的开发利用，绝非简单的“造地”工程，而是一场关乎资源、生态与农业可持续发展的系统谋划。唯有坚持生态优先、科学规划、精准施策，才能在保障耕地供给的同时守护生态屏障，实现“以灌促农、以农护生”的良性循环，为区域经济社会高质量发展提供坚实支撑。

一、基于层次分析法的耕地后备资源评价

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）是一种用于解决多目标、多准则、多方案的决策方法，由美国运筹学家匹兹堡大学教授萨蒂（T.L.Saaty）最早提出，该方法首先将决策目标分解为多级因子，并通过定性指标模糊量化的方法确定每个影响因子间的相对重要性并计算权重^[3-4]。

鉴于耕地后备资源在灌区规划中新增灌溉面积的重要意义，而耕地后备资源地形坡度、土壤、图层厚度、地块条件每块均不同，需要通过对地块各特性指标采用定量与定性相结合的方法进行综合评价，针对性地选择最适合的地块作为新增耕地的对象。本文采用层次分析法对耕地后备资源库中各地块的多种条件进行评价，得出最佳的新增耕地地块建议。

二、湖南省株洲市洣水灌区耕地后备资源分析

（一）工程概况

洣水灌区位于湖南省株洲市境内，灌区范围涉及株洲市的茶陵县、攸县2个县，15个乡镇，6个街道。灌区开发任务为农业灌溉，为保障国家粮食安全、促进乡村振兴和改善生态环境创造条件。设计灌溉面积58.40万亩，其中保灌面积24.30万亩，改善灌溉面积4.70万亩，新增灌溉面积19.20万亩，恢复灌溉面积10.20万亩。

洣水灌区工程以洣水大型水库，青年水库、茶安水库、岩口水库等3座中型水库作为骨干水源，通过改/扩/新建71条骨干渠/管道，其中通过新建洣水水库总干渠，自流向岩口灌片、洣东灌片和洣北灌片补水；新建青枣总干渠和清湖干渠，自流向茶安灌片、洣南灌片以及湖口灌片补水；使其与灌片内水源互联互通，整个灌区形成“南水北调”“多源互补”和“网络型”灌溉工程布局。

考虑灌区的灌溉系统、干支渠道分布、河流分界、中型水库

控制面积、行政区划等因素，将灌区范围划分为12片，其中新增耕地面积主要集中在岩口、湖口、茶安、洣南、洣东、洣北5个灌片内。

（二）评价对象选择

在现有自然及经济技术条件下，通过开发、复垦或整理等土地整治措施能够转化为耕地的土地资源。一般耕地后备资源包括可开发的未利用地和可复垦的建设用地两类，可开发的未利用地指在一定的经济技术条件下，通过采取工程、生物或综合等整治措施可转化为耕地的土地资源，包括裸土地和其他草地；可复垦的建设用地指因生产建设活动或自然灾害损毁，通过采取综合整治措施，使其达到可耕种状态的建设用地，包括采矿用地、中低产田及废弃的建设用地等。因采矿用地、自然灾害破坏或废弃的建设用地一般存在不同程度的土地污染，且地块间存在较大差异，无法做到全面客观评价，因此灌区规划中优先将可开发的未利用地作为评价对象。

根据茶陵县和攸县最新版耕地后备资源数据库数据与三区三线数据，扣除在生态红线和城镇开发边界内的不合规地块，本项目内可开发的未利用地共1.51万亩，其中裸土地0.38万亩，其他草地1.13万亩。

（三）确定评价单元

灌区耕地后备资源评价单元采用筛选后的可开发未利用地块，利用ArcGIS空间分析方法中的叠置法划分评价单元，即从相关部门收集到的基础图件数字化后，统一投影坐标系统，将土壤调查数据、高程、坡度等信息叠加到可开发未利用地块中，得到一定数量的地块图斑，作为评价单元。

（四）选择评价指标

在充分调查灌区现状的基础上，根据《全国耕地后备资源调查评价技术方案》中所推荐的指标，结合收集到的灌区资料，选取涉及地形地貌、土壤条件、地块条件三方面影响因素，具体包括高程、坡度、土层厚度、有机质含量、土壤质地、地块集中连

片程度等6个评价因子^[5]。

（五）赋值评价指标

通过咨询灌区内自然资源管理机构、农民意见，经过综合考虑，6个评价指标按高、中、低三级设置评价等级，每个等级分别赋值100分、70分、30分。各评价指标不同特征具体赋值见表1。

（六）确定评价指标权重

由于各评价指标之间相对重要性不同，对耕地后备资源的适宜性评价结论也不同，因此需确定权重用以反映各指标的重要程度。本文采用专家、农民打分的方式，综合归纳各指标间的权重。

表1 适宜性评价指标分级及评价指标权重表

影响因素	评价指标	特征	评价等级	评价赋值	权重值
地形地貌	高程	125-200m	高适宜	100	0.18
		200-250m	中适宜	70	
		250-300m	低适宜	30	
	坡度	0-15°	高适宜	100	0.17
		15-20°	中适宜	70	
		20-25°	低适宜	30	
土壤条件	土层厚度	110cm 以上	高适宜	100	0.22
		80-110cm	中适宜	70	
		< 80 cm	低适宜	30	
	有机质含量	>8	高适宜	100	0.10
		6-8	中适宜	70	
		<6	低适宜	30	
地块条件	土壤质地	砾石含量 < 5%	高适宜	100	0.16
		砾石含量 5-10%	中适宜	70	
		砾石含量 10-15%	低适宜	30	
	集中连片程度	地块形状规则，连片地块一般在50 亩以上	高适宜	100	0.17
		地块形状比较规则，连片地块一般在20-50 亩之间	中适宜	70	
		地块形状不规整，连片地块一般在20 亩以下	低适宜	30	

三、评价结果及新增耕地

（一）评价结果

基于上述评价指标的赋值及权重，按照加权总和的分析方法，分别计算各评价地块的综合评分，并按高度适宜、中度适宜、低度适宜三级进行划分，评分在70-100分的为高度适宜，50-70分之间为中度适宜，50分以下为低度适宜。

（二）新增耕地

为进一步落实新增耕地来源，灌区通过调查，首先根据渠道

走向和渠底标高，对照地形图和现状图，以村为单位，对坡度适宜，灌溉范围内集中连片的其他草地等非耕地作为耕地后备资源调查对象，然后进行灌区土低适宜性评价和新增耕地潜力测算，把高适宜与中适宜的耕地作为本次土地开发的对象。

通过统计，灌区内可进行土地开发建设规模为1.51万亩，并综合考虑地方的实施能力与投资强度等因素，选择全部高度适宜0.74万亩以及中度适宜0.38万亩作为土地开发范围，最终确定灌区土地开发建设规模为1.12万亩。

表2 灌区内各片区土地开发规划

序号	灌片	耕地后备资源（亩）	适宜性评价（亩）			新增耕地（亩）
			高适宜	中适宜	低适宜	
1	岩口片	913	433	247	233	680
2	湖口片	445	207	124	113	332
3	茶安片	4986	2555	1161	1271	3715
4	涿南片	5480	2739	1345	1397	4083
5	涿东片	1285	598	359	328	958
6	涿北片	1955	907	550	498	1456
7	合计	15064	7440	3786	3840	11224

四、结语

为科学精准筛选灌区规划中适宜开发的耕地后备资源地块，实现开发利用与生态保护的协同推进，本文以耕地后备资源数据库中的地块基础信息为核心支撑，严格遵循《耕地后备资源调查评价技术规程》的规范要求，选取自然条件（如地形坡度、土壤质地、水源保障能力）、生态约束（如生态保护红线距离、水土流失风险）、开发潜力（如整理难度、投入产出比）等关键指标，构建多层次、多维度的综合评价指标体系。在此基础上，引入层次分析法量化各指标的权重优先级，通过系统梳理指标间的逻辑关系、层层分解评价目标，对数据库内的每一块耕地后备资源地块进行全面的量化评分与综合评估排序，最终精准识别出开发潜力突出、生态风险可控、与灌区规划适配性强的最佳新增耕地地块。

该评价方法兼具系统性与实操性，一方面能够实现对耕地后备资源数据库的全覆盖评估，确保筛选结果的全面性与客观性；另一方面通过权重分配突出生态保护、资源适配等核心约束，有效提升评价结果的针对性与科学性。其得出的最佳新增耕地地块信息，可为灌区规划中耕地后备资源的精准开发、合理布局提供坚实的数据支撑与科学的决策参考，助力规划者精准把握开发重点、规避盲目开垦带来的生态破坏风险，推动灌区耕地后备资源开发利用与生态安全保障的有机统一。

参考文献

[1]SL56—2013, 农村水利技术术语 [S].
[2]朱博融. 基于 GIS 的延安市吴起县耕地后备资源开发潜力评价 [D]. 长安大学, 2013.
[3]T. L. 萨迪, 鞠彦兵, 等. 网络层次分析法原理及其应用: 基于利益、机会、成本及风险的决策方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
[4]许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
[5]中华人民共和国自然资源部. 自然资源部办公厅关于开展全国耕地后备资源调查评价工作的通知 (自然资办发 [2021]47 号) [S].

水利水电工程 EPC 总承包模式下的设计施工融合与风险管控实践

李四发, 赵曙繁

云南省水利水电工程有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/WCEST.2025080012

摘 要 : 当前水利水电工程向规模化、复杂化发展, 传统分散管理模式难以适配工程统筹需求, 国家积极推动建设模式改革, 大力鼓励一体化总承包模式应用。本文阐述 EPC 一体化总承包模式的核心内涵与发展价值, 分析设计施工融合的三大路径, 系统研究全周期风险管控体系。为水利水电工程高效推进提供切实可行的实践指引, 有效助力行业实现转型升级, 进一步提升相关企业的市场竞争力, 推动水利水电领域技术与管理经验的输出与推广。

关 键 词 : 水利水电工程; EPC 总承包模式; 设计施工融合; 风险管控; 一体化管理

Design Construction Integration and Risk Control Practice under the Epc General Contracting Mode of Water Conservancy and Hydropower Engineering

Li Sifa, Zhao Shufan

Yunnan Water Resources and Hydropower Engineering Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Currently, water conservancy and hydropower projects are developing towards scale and complexity. The traditional decentralized management model is difficult to adapt to the overall needs of the project. The country actively promotes the reform of construction models and strongly encourages the application of integrated general contracting models. This article elaborates on the core connotation and development value of the EPC integrated general contracting model, analyzes the three major paths of design and construction integration, and systematically studies the full cycle risk control system. To provide practical guidance for the efficient promotion of water conservancy and hydropower projects, effectively assist the industry in achieving transformation and upgrading, further enhance the market competitiveness of related enterprises, and promote the output and promotion of technology and management experience in the field of water conservancy and hydropower.

Keywords : water conservancy and hydropower engineering; EPC general contracting mode; integration of design and construction; risk control; integrated management

引言

水利水电工程是国家水资源优化配置、防洪减灾及清洁能源开发的关键基础设施, 其建设质量与效率直接关系国计民生^[1]。随着工程规模扩大与技术复杂度提升, 传统管理模式设计、施工等环节割裂的问题日益凸显, 易导致工期延误、质量隐患等问题。在此背景下, EPC 总承包模式凭借一体化管理与责任主体唯一的优势, 逐渐成为行业主流。本文围绕该模式下设计施工融合与风险管控展开研究, 旨在为解决工程建设痛点、提升项目管理水平提供可行方案。

一、水利水电工程 EPC 总承包模式的核心内涵

在水利水电工程领域, 一体化总承包模式是整合设计、采购、施工等环节的工程管理模式, 核心是打破传统工程各环节割裂状态, 由单一主体对项目全周期负责^[2]。

从模式特征看, 一体化管理, 从项目初期设计规划、中期设备材料采购到后期现场施工, 全环节由总承包方统筹协调, 避免传统模式下多主体各自为政的衔接问题, 且一体化覆盖前期方案论证与后期竣工验收, 形成完整责任链条; 责任主体唯一性, 传统模式中设计、施工、采购分属不同主体, 易出现质量问题或进

作者简介: 李四发 (1991.01-), 男, 白族, 云南大理人, 本科学历, 工程师, 研究方向为水利工程施工。

度延误后的责任推诿，而该模式下总承包方需对项目质量、安全、进度、成本等全部指标承担最终责任，既要求总承包方具备更强统筹能力与风险意识，也为业主减少协调成本，业主仅需与总承包方单一对接即可掌握项目整体进展^[9]。水利水电工程的行业特性对该模式有特定适配要求：这类工程建设周期长，需应对季节变化、政策调整等不确定因素，该模式的一体化管理能通过设计与施工提前衔接，减少工期延误；技术复杂度高且各环节关联性强，该模式下设计与施工深度融合，施工方可更早参与设计并提出适配建议，避免技术脱节导致的返工；多位于自然环境敏感区域，该模式下总承包方可从设计阶段融入环保理念，在施工方案中制定针对性环保措施，实现工程建设与生态保护协同推进。

二、水利水电工程采用 EPC 模式的发展价值

从政策导向与行业趋势看，近年国家推动水利水电工程建设模式改革，鼓励采用一体化总承包模式，核心是提升工程效率与质量，适配工程规模化、复杂化需求。随着水资源优化配置、防洪减灾等战略推进，大型项目增多，传统分散管理难满足统筹需求，该模式通过整合资源、优化流程，成为行业转型升级关键。且国际上该模式是大型基建主流，有助于我国水利水电企业提升国际竞争力，参与海外项目并输出技术管理经验^[4]。实际应用中，该模式对效率与质量提升显著：效率上，一体化管理缩短环节衔接时间，总承包方可在设计初期同步推进采购与施工策划，实现平行作业压缩工期，如某大型灌区项目借此将渠道施工工期缩短四个月，保障灌溉季投用；质量上，责任主体唯一让管控更高效，总承包方可从设计源头把控标准，避免传统模式下的质量理解偏差，还能通过设计优化控成本，如某水电站优化坝体结构减少混凝土用量，兼顾质量与成本。长远看，该模式推动行业专业化分工与资源整合，促使总承包方培育专业团队，推动行业从“分散作业”向“集约管理”转型，同时促进技术创新，如引入 BIM 技术实现全周期数字化管理，提升工程精准度。

三、水利水电 EPC 总承包模式下的设计施工融合路径

（一）组织架构融合：构建协同管理团队

设计与施工的融合需以组织架构为支撑，构建“设计 - 施工”协同管理团队是基础。团队组建时，总承包方要打破设计与施工部门的行政壁垒，成立跨部门项目管理小组，成员涵盖设计工程师、施工技术人员、质量管理人员、进度计划专员等，明确各岗位职责，确保设计与施工环节信息直接传递。如某水电站项目的协同管理团队设“设计 - 施工对接岗”，由兼具双重经验的人员担任，专门协调图纸与现场施工衔接，避免部门沟通不畅导致信息滞后。沟通机制建设上，需搭建常态化跨部门沟通平台：除定期项目例会外，可建线上沟通群组、设现场沟通办公室，实现设计与施工人员实时交流。关键技术问题采用“联合评审”机制，由双方共同参与方案论证，例如大坝基础处理方案设计中，施工

团队依现场地质勘察数据，提出基础开挖深度、支护方式等调整建议，设计团队结合技术规范优化，形成既符设计标准又具施工可行性的方案^[5]。此外，还需建信息共享机制，通过项目管理信息系统，实时上传图纸、施工方案、进度计划、质量检测数据等信息，供双方随时查阅，确保信息一致，减少决策偏差。

（二）技术流程融合：设计阶段融入施工可行性分析

技术流程融合是设计施工融合的核心，关键是让施工可行性分析提前融入设计阶段，避免方案脱离现场实际。施工工艺前置方面，设计团队开展初步设计时，需邀请施工技术人员参与评估工艺可行性。如大型渡槽设计中，设计团队初定整体预制吊装工艺，施工团队结合现场运输与吊装设备能力，提出分节预制、现场拼接建议，设计团队兼顾结构安全调整方案，既降低施工难度，又减少吊装风险。同时设计需充分考虑施工环境，如水利水电工程常涉及水下、高空作业，方案需明确安全防护措施，避免因设计疏漏引发安全事故。设备选型协同上，设计团队选大型设备时，需与施工、采购团队共同调研，综合考量技术参数、供货周期、安装条件、运维成本。如水电站发电机组选型，设计团队依装机容量定技术规格，施工团队提供安装空间要求，采购团队反馈供货周期与售后能力，三方评估后选定设备，避免选型不当致安装困难或后期运维问题。注重新技术、新工艺协同应用，设计团队引入新型材料或结构时，需与施工团队共同开展技术交底与培训。如某水利枢纽项目用新型透水混凝土护坡，施工团队提前参与研发，掌握配比与浇筑工艺，保障施工质量达标。

（三）进度计划融合：制定联动进度表

进度计划融合是保障设计与施工有序推进的关键，核心是制定“设计 - 施工”联动进度表，实现设计节点与施工工序精准匹配。编制阶段，总承包方组织设计与施工团队分析项目关键路径，明确影响施工启动的设计关键节点，如地质勘察报告提交、主要构筑物图纸交付等，将其与施工工序启动时间关联，避免设计延误致工期滞后。如渠道工程中，设计团队需在开挖前一个月交付断面图纸，施工团队据此制定方案。因水利水电工程受自然条件影响大，雨季无法开挖、汛期需暂停河道施工等情况频发，进度计划需动态调整。总承包方建立进度跟踪机制，定期对比偏差并分析原因：设计变更致延误则双方共定调整方案；施工条件变化需调设计则施工团队及时反馈。如某山区水电站因雨季延长致大坝基础开挖滞后，总承包方组织双方评估，将部分坝体浇筑提前与开挖平行作业，保障总工期可控。需注重进度计划与资源配置协同，依联动进度表安排人员、设备、材料等资源。如图纸集中交付阶段增设计人员，施工高峰期提前调配设备与人员，避免资源不足致进度延误。

四、水利水电 EPC 总承包模式下的风险管控体系

（一）风险识别：全周期梳理潜在风险

风险识别是风险管控的基础，需覆盖水利水电一体化总承包项目全周期，从设计、施工到全周期协同环节，全面梳理潜在风险。设计阶段常见风险有：设计方案不合理，如水文地质勘察数

据不准致坝体结构设计偏差，或未考虑现场施工条件致方案无法实施；图纸交付延迟，因设计人员不足、技术难题未解决等，导致施工工期延误；技术标准不符，设计方案不符合规范或业主需求，后期需变更增加成本；还可能面临环保合规风险，方案未充分考虑当地环保要求，易致审批受阻或施工整改。施工阶段风险更复杂：施工安全事故风险突出，工程涉及高空、水下作业及大型设备吊装，防护不到位易发生坠落、溺水、设备倾覆等事故；进度延误风险受自然条件、人员设备配置、材料供应影响，如汛期暂停河道施工或人员技能不足致效率低；成本超支风险因材料涨价、工程量增加、返工等出现；还需应对质量风险，如混凝土配合比不当致强度不达标、钢筋安装不符合要求，以及环境合规风险，废水废渣处理不当易污染环境遭处罚。全周期协同环节风险源于衔接不畅与外部变化：设计与施工衔接断层，如技术交底不及时或现场问题反馈滞后；供应链不稳定，设备材料供货延迟或质量不合格影响进度与质量；政策变更风险需关注，新建设标准、环保或税收政策可能致方案调整、成本增加或审批变化。

（二）风险管控方法：构建全流程防控机制

针对识别出的风险，需建立全流程防控机制，通过风险评估工具、应对策略与监控机制实现有效管控。风险评估可构建水利水电一体化总承包项目风险量化模型，借助权重分析明确风险因素重要程度，结合概率 - 影响矩阵评估发生可能性与影响程度，划分高、中、低三个等级。例如用专家打分法确定设计方案不合理、施工安全事故等风险权重，结合历史数据与现场调研评估概率及损失，同时兼顾自然环境、地质条件等行业特性，保障评估精准。风险应对需按等级与类型差异化防控：高等级风险以预防为主，如设计风险引入第三方评审、强化水文地质勘察，施工安全风险完善制度、开展培训并设专人监护高危作业；中等级风险采用预防与应急结合，如进度延误风险备设备选方案，成本超支风险建立动态监控机制；低等级风险侧重应急，如小型设计变更简化审批流程。可通过购买工程保险、与分包商签风险分担合同转移部分风险。风险监控需搭建动态跟踪平台，收集设计图纸交付、施工安全检查等信息建立数据库，设置预警指标与阈值，指

标超标自动预警。同时每月或每季度重新评估风险，依项目进展与外部环境变化调整措施，确保管控措施适配。

（三）风险管控实践与优化：结合案例完善体系

从海外水利水电一体化总承包项目实践来看，风险管控面临更多挑战，尤其是合同风险与地缘风险。某跨境水电站项目建设中，项目所在国法律政策频繁变更，导致合同约定的税收条款、环保要求与当地最新政策不符，项目需承担额外税收支出与环保整改成本。对此，总承包方在项目初期组建专业法律与政策研究团队，实时跟踪当地法规变化，签订合同时加入“政策变更调整条款”，明确当地政策重大变更时可调整项目成本与工期，还与当地政府密切沟通，提前获取政策变更信息以调整项目方案。该项目还面临地缘政治风险，所在国社会不稳定可能影响施工安全与材料运输，总承包方通过与当地安保公司合作加强现场安保，材料采购中建立多元化供应链，避免依赖单一供应商或运输路线，保障项目建设。国内水利水电此类总承包项目风险管控仍有需优化的问题，中小项目风险意识薄弱较为突出。部分中小项目采用此类模式后，仍沿用传统风险管控方式，未建专门风险管控团队，对项目全周期风险识别不全面，导致建设中频繁出现风险事件。如某小型水库加固项目，因未充分识别施工阶段地质风险，施工中出现坝体渗漏，需紧急处理，既增加成本又延误工期，针对此需加强对中小项目的风险管控指导。

五、结语

综上所述，EPC 总承包模式为水利水电工程管理革新提供了有效路径，其一体化特性不仅能通过组织架构、技术流程、进度计划的深度融合，打破设计与施工的壁垒，还能依托全周期风险管控体系，精准应对各环节潜在风险。海外与国内项目实践表明，该模式在提升效率、保障质量、控制成本方面成效显著，但中小项目风险意识薄弱等问题仍需改进。未来需进一步推广该模式应用，优化管控机制，助力水利水电行业高质量发展。

参考文献

- [1] 王罗斌. 云南富民抽水蓄能电站 EPC 管理模式探讨 [J]. 四川水力发电, 2025, 44(04): 138-140+151.
- [2] 刘建波, 封官斌. 基于风险管控的 EPC 项目三维质量体系研究 [J]. 工程管理学报, 2025, 39(01): 83-88.
- [3] 杨香东, 刘大洋, 熊壮. 湖北 EPC 总承包水利项目现场管控的探索与实践 [J]. 水利建设与管理, 2022, 42(01): 43-46+71.
- [4] 张社荣, 姜佩奇, 吴正桥. 水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展——数字孪生应用模式探索 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(01): 1-12.
- [5] 段云辉. EPC 模式下的工程建设成本控制研究 [J]. 建筑机械, 2019, (06): 100-103.

