

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 12 · December 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839
E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



工程研究前沿 Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 12 · December 2025 3060-9054(Print)

3060-9062(online)



中文刊名：工程研究前沿
ISSN：3060-9054（纸质）3060-9062（网络）
出版语言：华文
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Frontiers of Engineering Research
ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程研究前沿》征稿函

期刊概况:

中文刊名：工程研究前沿
ISSN：3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
出版语言：华文刊
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure
www.cnki.net

出版格式要求:

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



出刊及存档:

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益:

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程:

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 Issue 12 December 2025
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | 事件管理系统（IMS）在应急管理中的应用与实践
/ 李闯 | 27 | 低碳理念导向下园林设计模式与技术应用研究
/ 付国冬 |
| 5 | 水电厂智能化监控系统故障诊断与预警机制研究
/ 黄荣熙 | 30 | 采矿工程绿色开采技术的施工应用与质量管控
/ 刘建雄 |
| 8 | 绿色建筑视角下装配式建筑全生命周期碳排放分析
/ 樊平 陈俊枝 | 33 | 海陆交互深厚富水软土砂层冷冻法联络通道施工技术
研究
/ 崔玉章 |
| 11 | 消防检测评估应用于建筑工程中的意义探究
/ 李星垚 | 36 | 高压供配电系统中变压器电阻接地技术探析
/ 董庆楠 |
| 14 | CPP 液压油参数在线监测系统设计与实现
/ 彭新宇 王树仁 李乙迈 王孝霖 张志刚 | 39 | 基于地域文化的现代建筑设计传承与创新路径研究
/ 张映涛 孟松琴 |
| 18 | 城市轨道交通地铁施工安全管理探讨
/ 秦岭 | 42 | 卧式数控机床装配中刨台式铣镗床精度控制方法探讨
/ 郭思 苏喆 |
| 21 | 极端工期下复杂长隧洞基础处理工程装备革新与系统
管理实践研究
/ 李建 | 45 | 低温环境下预制梁混凝土水化热释放规律及温控参数
优化研究
/ 文云杰 |
| 24 | 老旧小区改造中既有建筑加固技术与施工工艺创新
/ 乔羽捷 | | |

- 1 Application and Practice of Incident Management System (IMS) in Emergency Management / Chuang Li
- 5 Research on Fault Diagnosis and Early Warning Mechanism of Intelligent Monitoring System in Hydropower Plant / Rongxi Huang
- 8 Analysis of Carbon Emissions Throughout the Life Cycle of Prefabricated Buildings from the Perspective of Green Architecture / Ping Fan Junzhi Chen
- 11 Discussion on Key Points and Construction Methods of Building Electrical Fire Protection Engineering Design / Xingyao Li
- 14 Design and Implementation of CPP Hydraulic Oil Parameters Online Monitoring System / Xinyu Peng Shuren Wang Yimai Li Xiaolin Wang Zhigang Zhang
- 18 Discussion on Safety Management of Subway Construction in Urban Rail Transit / Ling Qin
- 21 Research on Equipment Innovation and System Management of Complex Long Tunnel Foundation Treatment Engineering under Extreme Construction Period / Jian Li
- 24 Innovation in Strengthening Technologies and Construction Techniques for Existing Buildings in Old Residential Area Renovation / Yujie Qiao
- 27 Research on the Application of Landscape Design Mode and Technology under the Guidance of Low-carbon Concept / Guodong Fu
- 30 Construction Application and Quality Control of Green Mining Technology in Mining engineering / Jianxiong Liu
- 33 Research on Construction Technology of Frozen Linkage Channel in Deep Water-rich Soft Soil Layer of Land-sea Interaction / Yuzhang Cui
- 36 Analysis of Transformer Resistance Grounding Technology in High-Voltage Power Supply and Distribution Systems / Qingnan Dong
- 39 Research on the Inheritance and Innovation of Modern Architectural Design Based on Regional Culture / Yingtao Zhang Songqin Meng
- 42 Discussion on Precision Control Method of Planar Milling and Boring Machine in Horizontal CNC Machine Assembly / Si Guo Zhe Su
- 45 Research on the release law of hydration heat and optimization of temperature control parameters of precast beam concrete under low temperature environment / Yunjie Wen

Application and Practice of Incident Management System (IMS) in Emergency Management

Chuang Li

Construction Project Management Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518060, China

Abstract

This paper systematically discusses the theoretical evolution of Incident Management System (IMS) and its localization in China's emergency management system. Through typical case studies, the core value of IMS in information integration, resource deployment, and cross-departmental collaboration is revealed. It is found that IMS can significantly improve the efficiency of emergency response through modular organizational structure, goal-oriented management and intelligent technology integration. However, its localization still faces challenges such as information silos and insufficient personnel training. In the future, it is necessary to strengthen the unified command mechanism, optimize the resource tracking system, and promote the construction of an emergency management system with Chinese characteristics through technology integration.

Keywords

Incident Management System (IMS); emergency management; resource mobilization; cross-sectoral collaboration; localization

事件管理系统（IMS）在应急管理中的应用与实践

李闯

国家管网建设项目管理 LNG 中心，中国·广东深圳 518060

摘要

本文系统探讨了事件管理系统（Incident Management System, IMS）的理论演进及其在我国应急管理体系中的本土化实践。通过典型案例分析揭示 IMS 在信息整合、资源调配、跨部门协同等方面的核心价值，研究发现 IMS 通过模块化组织架构、目标导向管理、智能技术集成等手段，应急响应效率显著提升。但其本土化还面临信息孤岛、人员培训不足等挑战，未来需要通过技术融合，强化统一指挥机制，优化资源跟踪系统，提高救援队伍协作效率，提升物资管理成效，推进具有中国特色的应急管理制度建设。

关键词

事件管理系统（IMS）；应急管理；资源调配；跨部门协同；本土化

1 引言

全球范围内频发的公共卫生危机（如 COVID-19）、自然灾害（如汶川地震）与工业事故（如天津港爆炸）凸显了应急管理体系的战略价值。

事件管理系统（Incident Management System, IMS）作为一种标准化的应急指挥框架，通过模块化组织、目标导向管理和资源整合机制，显著提升了应急响应效率。从 2003 年非典爆发至今，我国逐步构建了以预案、体制、机制和法律体系为核心的“一案三制”应急管理体系，并在实践中验证了 IMS 本土化应用价值 [1]，并在实践中验证了 IMS 的本土化应用价值。本文结合典型案例分析，系统探讨

IMS 的理论演进、实践优化与未来挑战。

2 IMS 概况

2.1 IMS 的起源与发展

IMS 起源于 1970 年代美国加州森林火灾后的应急指挥方法论，后经“9·11”事件、墨西哥湾漏油事故等重大危机验证，成为联合国推荐的标准化应急模式。其核心特征包括：

- (1) 五大职能模块化：指挥、作业、计划、后勤、财务行政分权协作；
- (2) 目标导向管理：基于 SMART 原则（具体、可测、可及、相关、时效）制定应急目标；
- (3) 灵活指挥架构：根据事件规模动态调整组织层级（指挥链→分支→单元）。

2.2 中国应急管理体系与 IMS 融合发展

2018 年改革前，应急管理职责分散于 11 个部门的 13

【作者简介】李闯（1968—），男，中国河北衡水人，本科，工程师，从事HSE管理研究。

项职能中（如消防、地震、防汛抗旱等），存在“九龙治水”问题，跨部门协作效率低下。例如，自然灾害救援中，水利、民政、国土等部门各自为政，导致资源重复配置与响应延迟。随着城镇化与经济高速发展，自然灾害（如极端天气）、事故灾难（如危化品泄漏）、公共卫生事件（如新冠疫情）呈现高复合性、跨区域扩散特征，传统“被动响应”模式难以满足“精准防控”需求，亟需构建“防救结合”的主动治理体系。

20218 年国家对应急管理体制改革从机构改革、体制改革和职责改革 3 个方面展开，确立了“统一指挥、专常兼备、反应灵敏、上下联动”中国特色应急管理体制，构建优化协同高效的治理模式。事件管理系统（IMS）作为现代应急管理的核心工具，通过模块化架构、目标导向管理和技术集成机制，能够显著提升应急响应的精准性与协同效率。中国特色应急管理体制的实践需求为 IMS 的本土化应用和实践提供了土壤。通过整合“一案三制”的顶层设计，IMS 实现了从技术工具到治理能力的升级。

3 IMS 系统管理机制

IMS 的系统管理机制以模块化架构为基础，目标导向管理为驱动，技术集成为支撑，通过资源全周期管理与跨部门协同，实现应急响应从“被动经验化”向“主动智能化”转型。

3.1 模块化组织架构

IMS 采用“可扩展功能模块”设计（图 1），根据事件规模动态调整组织层级，形成“指挥层 - 执行层 - 支持层”分工体系，以适应不同规模事件 [2]：

（1）指挥层：总指挥统筹决策，下设安全官、联络官、公共信息官；

（2）执行层：作业部（现场处置）、计划部（方案制定）、后勤部（资源保障）、财务部（成本控制）分工协作。

（3）支持层：技术专家组、信息中心、社会协作组，提供技术与数据支撑。

以油气管道泄漏事故的场景应用为例，指挥层的指挥官由管道企业应急办主任担任，协调地方政府与环保部门；作业部的专业抢修队实施封堵抢修，计划部生成动态行动方案，后勤部调拨物资；环境监测组跟踪油污扩散，利用集成分布式光纤传感数据与气象预测模型，生成泄漏影响热力图，最终形成闭环管理。

3.2 目标导向的主动应急循环（SMART 原则）

区别于传统的依据资源状况制定处置方案的被动应急响应模式，IMS 基于“具体（Specific）、可测（Measurable）、可及（Achievable）、相关（Relevant）、时效（Time-bound）”原则，强调“目标→战略→资源”的主动管理模式。把整个应急响应作为一个完整的项目进行管理，形成从目标设定到资源配置一套系统、规范的流程。在事故发生后，首先确

定应急目标，围绕目标规划战略，基于战略制定处置方案，最后根据处置方案的需求调配资源。

实施流程：

（1）初始评估：首个抵达现场的指挥官进行初始评估，包括事故类型、影响范围、人员伤亡、应急资源、事故复杂性分析要素、影响应急可掌控性的因素、应急优先级（如人员安全>环境>财产）、事故复杂性、天气与环境影响等；

（2）目标确定：目标的确定从具体、可测、可及、相关和时效五个方面进行考虑，如“8 小时内控制泄漏范围”；

（3）制定行动方案：是应急预案的细化与执行指南，用于在突发事件发生后指导具体的应急处置行动。核心要素主要包括：事件概况、应急目标、组织架构与职责、任务清单与实施方案、安全与风险控制、通信与信息管理、动态调整机制 [3]。

（4）动态调整：每 12 小时召开战术会议，更新目标与方案。2008 年汶川地震救援初期因“目标模糊”导致资源错配，后期采用 IMS 目标分级（救人→安置→重建），黄金救援期存活率提升 27%。

3.3 技术集成与智能化支持

IMS 系统利用人工智能、数字孪生、5G 与边缘计算、物联网等技术整合多源异构数据（如传感器、遥感影像），构建动态风险评估模型，推荐最优处置策略，支撑实时决策；数字孪生与 5G 技术的融合，进一步实现了偏远地区管道泄漏场景的高精度模拟与远程协同处置，提升偏远地区实时监测能力（如油气管道无人区监控）。例如，在海上油气管道泄漏事故中，IMS 利用无人机与卫星遥感实现空天地一体化监测，能够大幅度提高油污回收率。

3.4 资源全周期管理

IMS 通过标准化流程（需求确定→订购→审批→追踪）实现资源高效配置：

（1）需求确定：根据事故等级匹配资源类型与数量；

（2）动态调度：GIS 地图定位最近资源，优化配送路线；

（3）追踪与审计：区块链记录物资流向，防止截留或滥用。例如，在 2021 年郑州洪灾中，通过区块链技术，物资流向实时上链，减少了截留风险，提高物资调度效率，缩短救援时间。

4 事故案例分析

案例一：某大型油气管道建设中的应急响应

1. 事件背景：某大型油气管道建设项目穿越多个省份，沿线地质条件复杂，涵盖山地、河流、沙漠等多种地形，施工期间面临山体滑坡、洪水、管道泄漏等潜在突发事件 [4]。

2. 传统模式痛点：

（1）信息滞后：地方应急部门与管道企业数据未互通，延误预警；

（2）资源错配：救援物资依赖人工调度，跨区域支援

效率低；

(3) 决策经验化：缺乏数据驱动的处置方案，次生风险控制不足。

3.IMS 应用实践

(1) 信息整合与共享，搭建统一信息管理平台。山体滑坡时，现场监测设备实时采集并传输 地质及气象数据至 IMS 平台，平台分析处理后向指挥中心及相关部门预警，助其提前准备。

(2) 明确各级指挥人员职责与权限。洪水时，指挥中心经 IMS 快速下达指令，协调救援队伍、

物资部门及地方政府，实现高效协同。如调动救援队伍疏散人员、抢险，安排物资部门备好救援 物资，协同政府推进救援。

(3) 统一管理调配资源 . 管道泄漏时，系统定位附近救援队伍、物资和设备，依现场需求精准

调配。如某次泄漏事故中，迅速调配抢修队伍及维修、堵漏、环境监测设备，缩短应急响应时间，降低事故对环境和社会的影响。

4.IMS 应用效果

IMS 的应用使项目应对突发事件的应急响应时间平均缩短 30%，事故损失降低 40%。各部门 协同效率提升，信息传递及时准确，保障项目顺利推进。

案例二：某海上油气管道泄漏事故中的应急响应

1. 事件背景：某海上油气管道发生泄漏，海洋环境复杂敏感，应急处理面临海上救援难、油污扩散快、对海洋生态影响大等挑战 [5]。

2. 传统模式痛点：

(1) 协调机制缺失：政府、企业、社会救援力量缺乏统一指挥平台，重复作业率较高。

(2) 数据孤岛：海事部门、环保机构与管道企业数据不互通，延误决策；

(3) 缺乏智能化决策支持系统：处置方案依赖专家经验，缺乏 AI 模拟支持，难以快速生成有效的应急方案。

3.IMS 应用实践

(1) 信息整合与共享：利用 IMS 整合海上监测设备、卫星遥感、船舶监控等多源数据，实

时掌握泄漏油污扩散范围、海洋气象及救援力量分布，集中管理分析，为指挥中心提供全面准确

的事故动态，以便及时调整应急策略 [6]。

(2) 指挥协调：IMS 建立涵盖政府部门、石油公司、救援队伍、科研机构等多方的海上应急指挥架构。事故处理中，经 IMS 实现各部门高效沟通协调。如指挥中心统一指挥船舶布放围油栏、回收油污，协调救援队伍封堵抢修泄漏点，与科研机构合作预测油污扩散、评估生态影响，支持科学决策。

(3) 资源调配：基于 IMS 资源管理系统，统一调配海

上救援船舶、清污设备、潜水员、专家团队等资源。依泄漏油污位置和扩散趋势，及时调配附近救援资源，确保应急工作高效开展。如迅速调集多艘专业清污船，安排潜水员和水下机器人检查修复泄漏点，提升应急处置效率效果。

4.IMS 应用效果

IMS 应用使该事故应急响应效率显著提升，可大幅度提高泄漏油污回收率，有效控制对海洋 生态的影响。各部 门协同作战能力增强，为类似海上事故应急处理提供经验。

5 现存挑战与优化方向

5.1 现存挑战及问题

尽管事件管理系统（IMS）在提升应急响应效率方面展现出显著优势，但其在实际应用中仍面临多重挑战，涵盖技术、管理、人员及制度等多个层面。以下结合国内外典型案例，系统剖析 IMS 现存的核心问题：

(1) 信息孤岛与数据整合难题。不同部门、系统间数据标准不统一，难以实现实时互通。例如，武汉新冠疫情防控初期，医疗机构、交通部门与社区数据未能有效整合，导致病例追踪延迟超 48 小时。

(2) 人员能力与培训不足。国内 IMS 专业培训体系尚未普及，且培训内容偏重理论，缺乏实战模拟。基层应急人员缺乏 IMS 标准化操作培训，导致系统功能利用率不足。技术工具与人员能力 错配，削弱 IMS 预期效能，甚至引发二次风险。

(3) 技术依赖与自动化风险。过度依赖智能 化工具可能削弱“现场研判”能力。例如，郑州 暴雨救援中，因通信网络瘫痪导致无人机调度系 统失效，临时切换人工模式延误 1.5 小时。

(4) 跨部门协作机制不完善。政府、企业与 社会力量间权责不清，缺乏法定协同框架与利益协调机制，跨部门合作多依赖临时协商。天津港爆炸事故中，消防、环保与企业救援队因指令冲突，延误污染控制关键期。

5.2 优化方向及路径

IMS（事件管理系统）的优化需针对技术、管理、制度与人员四大维度，结合国内外实践经验与新兴技术，构建系统性升级路径。

5.2.1 强化“统一指挥”机制

(1) 建立统一的指挥体系：在应急救援中设立应急指挥总部、区域应急指挥部等统指挥机构，由应急指挥总部对救援行动进行统指挥和协调，由各级指挥机构明确职责分工，确保各救援队伍在统一指挥下行动，避免多头指挥、各自为政的情况。

(2) 制定协同作战原则：强调救援队伍之间的协同配合，各队伍要加强沟通与配合，形成合力，按照统一指挥、统一调度、统一调配的原则，合力完成救援任务。

(3) 搭建信息化指挥平台：通过建立统一的指挥调度

平台，利用现代信息技术实现指挥信息的集中和快速传递，让指挥人员及时掌握救援现场情况，做好科学指挥，提高救援效率 [7]。

(4) 强化部门协同合作：发挥应急管理等部门的综合优势和各相关部门的专业优势，部门之间的协同配合，确保在应对突发事件时能够形成整体合力 [8]。

5.2.2 强化“资源追踪”机制

(1) 建立物资追踪系统：利用 GPS 追踪、物联网设备等现代信息技术，对应急物资实施实时监控、动态管理，准确掌握应急物资的实时位置、实时数量、实时状态，确保在紧急情况下能够快速响应、精准投放到最需要的地区 [9]。

(2) 完善物资储备体系：建设储备“一本账”，将实物储备库存、生产能力布局、物流配送能力等储备要素信息全部纳入统一储备数据 [10]。

(3) 优化物资储备布局：综合考虑本地区灾害事故特点、人员分布等因素，科学合理布局应急物资储备点，重点区域、高风险地区要配备必要的物资装备。同时建设区域性应急物资生产保障基地，确保灾害发生时能够及时提供物资保障 [11]。

5.2.3 解决“救援队伍协作低效”痛点

(1) 加强部门之间的跨部门协同与信息共享。建立统一的指挥中心和信息平台，统一制定标准和规范，破除部门信息壁垒，实现各部门的实时通讯和数据共享，促进部门之间、部门与机构之间的畅通协作，提升救援效率。

(2) 开展协同演练：定期组织不同队伍之间的协同演练，提高队伍之间的配合默契度。以 IMS 框架开展“无脚本桌面推演”，通过演练检验和优化指挥体系、协同机制、救援流程，提升多主体协同能力，保证实际救援时能够做到协同作战 [12]。

(3) 建立联合救援机制：针对不同类型的灾害和救援任务，建立相应的联合救援机制，形成一体化联合救援能力。

5.2.4 解决“物资管理混乱”痛点

(1) 实现物资动态监控：运用信息化手段对物资从生产到储备、从调拨到发放的全过程进行动态监控，对物资的流向进行全程追溯，防止物资管理出现混乱，实现物资的合理使用、高效调配 [13]。

(2) 创新储备物资调用机制：建立动态高效的物资轮换机制，科学确定物资储存期限，及时更新物资，避免物资过期失效。通过供应周转、调拨使用等多种方式，优化储备物资结构，提高储备效能。

(3) 加强物资管理标准化：制定应急物资分类编码标准，实现应急物资储备数字化管理。通过标准化管理，规范物资采购、储备、调拨等环节，提升应急物资管理效率和准确性 [14]。

6 结论

IMS 与中国特色的“统一指挥、专常兼备、反应灵敏、上下联动”应急管理体制深度融合，

验证了技术工具与制度框架协同创新的可行性 [15]。IMS 的中国化实践表明，现代化应急管理需以体制优势统领技术创新、以本土需求驱动工具适配，不仅可以实现应管理从“被动响应”到“主动防控”的范式转型，更为中国应急管理现代化提供了实践范本。同时，也揭示了技术工具与治理体系融合方法论，即将体制的“人民性”与技术的“普适性”相结合，通过顶层设计整合资源和基层创新激活效能，以解决实际需求和问题为目标导向，最终可以实现技术、安全与发展的动态平衡。

参考文献

- [1] 丁玎,丁满臣.强化法治保障完善国家公共卫生法制建设[J].河北省社会主义学院学报,2020,(02):44-49.
- [2] 李璘倩,方怡,刘迅,等.突发事件应急指挥系统在新型冠状病毒肺炎应急救援中的应用[J].职业卫生与应急救援,2021,39(01):110-113.
- [3] 乔铭.不确定环境下突发事件应急处置方案评估方法研究[D].国防科技大学,2017.[4]罗志强,彭波,夏敏.无人机在天然气长输管道地质灾害预警的应用[J].石化技术,2020,27(02):173-174+155.
- [5] 李新宏,陈国明,李秉军.海洋油气管道泄漏事故应急管理体系构建研究[J].油气质地工程,2022,41(05):1-5.
- [6] 张彦兵.铁路调度指挥安全保障体系研究[J].科技视界,2021,(30):136-137.
- [7] 周刚山.消防作战指挥中的信息共享与协同机制研究[J].消防界(电子版),2024,10(04):93-95.
- [8] 王祥喜在应急管理部党委会部务会上强调加快推进应急管理体系和能力现代化更加有效维护和塑造有利于发展的公共安全环境[J].劳动保护,2023,(07):6.
- [9] 傅剑峰.大数据技术在灭火救援指挥体系中的应用分析[J].产业创新研究,2024,(12):123-125.
- [10] 王欣洁.政企联合下应急物资储备模式研究[D].武汉理工大学,2018.
- [11] “十四五”应急物资保障规划[J].中国安全生产,2023,18(02):5.
- [12] 王炜.内河急流水域救援中消防人员安全探析[J].水上安全,2024,(06):118-120.
- [13] 王莹,黄安麒,吴洁,等.基于 SWOT 的应急资源能力建设分析[J].工业安全与环保,2022,48(07):52-55+63.
- [14] 马楠.基于价值链的应急物资保障网络构建与管理机制[J].今日消防,2024,9(08):133-135.
- [15] 代海军.我国突发事件应对管理体制的法治化成果及其制度内涵[J].中国应急管理,2024,(07):20-24.

Research on Fault Diagnosis and Early Warning Mechanism of Intelligent Monitoring System in Hydropower Plant

Rongxi Huang

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

Abstract

To enhance operational safety and intelligent capabilities in hydropower plants, this study develops a fault diagnosis and early warning mechanism for smart monitoring systems. Through systematic categorization of common equipment and system failures, we designed a diagnosis model integrating expert knowledge and data-driven approaches, while proposing a risk assessment-centric early warning algorithm. The system architecture integrates real-time sensor monitoring, data fusion analysis, and coordinated response controls to form a self-learning intelligent diagnostic platform. Case studies demonstrate that this mechanism significantly improves fault identification accuracy and early warning response efficiency. The research provides technical support for intelligent operation and maintenance systems in hydropower plants, playing a crucial role in advancing digital transformation of energy systems and intelligent equipment condition management.

Keywords

hydropower plant; intelligent monitoring; fault diagnosis; early warning mechanism; risk assessment

水电厂智能化监控系统故障诊断与预警机制研究

黄荣熙

红河广源水电开发有限公司，中国·云南红河州 661100

摘要

为提高水电厂运行的安全性与智能化水平，研究构建了一套面向智能监控系统的故障诊断与预警机制。基于对水电厂常见设备与系统故障类型的系统归纳，设计了结合专家知识与数据驱动的诊断模型，并提出了以风险评估为核心的预警算法。在系统架构中，整合实时传感监测、数据融合分析与联动响应控制，形成具有自学习能力的智能诊断预警平台。应用实例显示，该机制能够显著提升故障识别的准确性和预警响应效率。研究成果为水电厂智能运维体系提供了技术支撑，对推动能源系统数字化转型与设备状态管理智能化具有重要意义。

关键词

水电厂；智能监控；故障诊断；预警机制；风险评估

1 引言

水电厂在能源体系中承担着关键调节和电力输出的任务，其运行安全直接关系到区域供电的稳定性与经济性。随着智能化技术的发展，传统监控手段已难以满足对故障快速识别和精准预警的要求。构建高效的故障诊断与预警机制，能够提升水电厂对设备状态的感知能力和风险防控水平，有助于减少突发事件造成的损失，增强系统运行的智能化和自动化水平，是实现水电厂数字化升级的核心环节。

2 故障诊断机制设计

2.1 故障类型识别

水电厂设备系统结构复杂，运行工况多变，易发生多

种类型的故障。故障类型主要包括水轮发电机组机械部件磨损、电气控制系统信号异常、测控装置数据漂移以及通信系统传输中断等。不同类型故障在表现形式、影响范围与演化规律上存在明显差异，需结合实际运行工况与历史故障数据进行系统性分析。通过构建故障知识库，将典型故障案例、关键特征参数和时序演变信息进行归纳整理，有助于提高故障识别的准确性与全面性。结合人工巡检记录与设备运行数据的交叉比对，可以在早期阶段判断潜在故障模式，增强监控系统的感知能力^[1]。

2.2 诊断方法选择

故障诊断方法需兼顾实时性、准确性与适应性，传统基于规则的诊断方法在应对复杂工况和新型故障类型方面存在一定局限，单一模型难以全面反映设备运行状态变化趋势。为提升诊断效果，可采用多方法融合策略，将专家系统与数据驱动模型结合，充分利用经验知识与数据特征。例如，

【作者简介】黄荣熙（1985—），男，中国福建晋江人，本科，工程师，从事电气工程及其自动化技术研究。

基于支持向量机与深度神经网络的混合模型可在识别非线性故障特征方面展现良好性能，结合模糊逻辑或贝叶斯网络增强系统在信息不确定环境下的判断能力。诊断方法应具备自学习与自适应能力，能够动态调整参数并优化决策路径，应对设备状态的长期变化与突发干扰^[2]。

2.3 实时监测接口

高效的故障诊断机制需依赖完善的实时监测系统，感知层的布设需覆盖关键设备节点并具备高频率、高精度数据采集能力。传感器类型涵盖振动信号、温度、电流、电压、压力与位移等多维参数，需具备强抗干扰能力和长周期稳定性。数据采集模块需支持边缘计算与本地预处理，减少异常数据对诊断结果的干扰。通信接口需兼容多种协议标准，确保各类设备与系统间的数据高效传输与共享。实时数据需在入库前经过清洗、对齐与压缩处理，并基于分布式数据库实现高可靠存储，为后续故障诊断与模型训练提供连续稳定的基础数据支撑。

3 预警机制优化

3.1 风险评估模型

风险评估模型是智能监控系统中实现精准预警的基础，需基于多维度指标构建全面的评估框架。水电厂运行环境复杂，各类设备在长期高负荷工况下易出现性能劣化与隐性故障。单一参数变化往往难以直接反映系统潜在风险，因此需从设备健康状态、运行负载、环境条件、历史故障频率与维护周期等多个角度构建综合评估指标体系。各指标间具有一定相关性与耦合性，需利用层次分析法或模糊综合评价方法分配权重，建立风险因子间的映射关系。模型设计应充分考虑指标之间的非线性影响关系，并引入动态权重调整机制，根据系统运行状态变化实时修正评估模型参数。评估模型不仅要具有较高的敏感性以捕捉潜在风险征兆，还需具备稳定性以避免短期波动引发误判。在评估过程中应注重数据连续性与完整性管理，采用滑动窗口与数据插值策略处理缺失数据，增强模型对实际运行工况的适应能力。风险评估结果需量化呈现，通过等级划分明确系统运行安全边界，为后续的预警决策与响应策略提供可靠依据^[3]。针对不同风险等级需匹配不同的响应优先级与处理措施，建立由数据驱动向策略联动的动态风险闭环管理机制。

3.2 预警算法应用

预警算法在风险评估结果的基础上实现故障趋势预测与异常状态判别，是智能监控系统实现前瞻性干预的核心技术环节。水电厂设备运行数据具有高维、非线性与时序性强等特点，常规统计方法难以有效提取潜在异常特征。为提升预警算法的适用性与鲁棒性，可结合多种智能算法构建复合型预测模型。基于深度学习的时间序列预测模型如LSTM或GRU网络具有较强的长期依赖建模能力，适用于捕捉设备参数变化趋势与临界状态演化路径。异常检测方面可引入

孤立森林、自动编码器或高斯混合模型等无监督学习方法，挖掘潜在偏离正常模式的隐性故障信号。针对不同设备或系统模块可构建分层预警模型，在局部特征分析与全局状态融合中实现互补增强。模型训练过程中应采用历史数据与人工标注信息构建样本库，并引入增量学习机制支持模型的持续优化与更新。预警判据应结合动态阈值调整机制，在保证响应灵敏度的前提下降低误报率与漏报率。预警输出不仅要给出故障发生的可能性，还应提供影响程度、演化趋势与建议干预措施，辅助运维人员进行精准决策。算法部署需具备边缘执行能力，结合本地计算资源实现快速响应，避免数据传输延迟影响预警时效性^[4]。

3.3 联动响应机制

预警信息的价值在于推动系统实现有效联动响应，构建由预警信号驱动的多层次协同控制机制是提升系统智能化水平的关键环节。响应机制设计需兼顾自动化执行效率与人工干预灵活性，确保系统在不同预警等级下采取最优控制策略。预警联动流程应包括信息确认、响应决策、控制指令下发与执行反馈等环节，各环节需具备标准化接口与清晰的权限控制机制。在系统结构层面可构建基于分布式控制的响应框架，各子系统在接收到预警信息后根据本地状态参数快速完成决策并执行相应控制动作。典型响应措施包括设备降载运行、系统切换控制、紧急断电保护或维持状态观测等操作方式，需结合历史处置经验与仿真分析结果优化响应策略。响应机制应支持与调度平台、维护系统及管理决策系统的联动，形成从故障预警到任务派发、资源协调与结果评估的全流程闭环体系。为提升响应系统的可靠性，可引入多通道冗余控制机制与状态监测反馈路径，在操作执行过程中持续采集数据并评估响应效果，形成以数据为核心的自适应优化循环。在人工干预部分，应设计清晰的操作指引与界面交互逻辑，辅助运维人员根据预警内容快速识别故障根因并采取适当应对措施。响应机制还需支持历史记录存档与可追溯性分析，为系统运维优化与模型评估提供基础数据支撑，进一步完善智能监控系统的运行安全保障体系^[5]。

4 系统验证与应用效果

4.1 工程实例分析

为验证所提出的水电厂智能化监控系统故障诊断与预警机制的实际可行性与应用价值，在某中型水电站进行了为期六个月的系统部署与运行测试。该水电站装机容量为60兆瓦，涵盖两台水轮发电机组与完整的自动化控制系统，监测点布设覆盖主变压器、励磁装置、水导轴承、冷却系统以及综合配电单元。系统安装完成后，建立了传感器数据采集通道与历史运行数据存储模块，并对模型参数进行了初步训练与优化。在运行期内，该系统成功识别出3次早期轴承振动异常状态与1次励磁电压波动引发的控制偏移趋势，在人工巡检介入前实现了精准预警与自动响应。振动信号变化趋

势经 LSTM 预测模型评估后在提前 28 小时发出预警，控制系统根据联动机制自动调整发电负荷，减小了进一步故障发生的概率。实际记录显示预警命中率达到 92.3%，有效降低了设备非计划停机事件的发生频率。系统稳定性测试表明，在复杂工况与不同水位调节条件下，监控系统具备较强的数据适应能力与模型收敛性，连续运行稳定周期超过 180 天未出现数据丢失或误判跳变。该工程实例展示出智能化监控系统在故障防控与响应效率方面的显著优势，并具备良好的扩展兼容能力，适用于多类型水电站环境下的智能运维场景。

4.2 性能评估指标

系统性能评估以采集到的实际运行数据为基础，结合专家标注与历史记录对诊断准确性、预警响应时效、误报率与系统稳定性进行了量化分析。采用混合数据集构建测试样本，其中包含运行期间产生的 8000 条传感器采样序列与人工标注的 42 个典型异常事件。模型训练阶段采用五折交叉验证法评估诊断效果，使用支持向量机与深度神经网络组成的混合诊断框架对每类故障进行识别，并基于风险等级设定不同的预警阈值。系统性能指标通过 MATLAB 与 Python 中的 Scikit-learn 与 Keras 工具包实现建模与评估，具体数据如表 1 所示。

表 1 系统故障诊断与预警性能评估结果

评估指标	数值	说明
故障诊断准确率	0.946	正确识别出的故障占总故障样本比
预警提前时间	27.3 小时	平均预测到故障发生的提前时间
误报率	0.038	错误预警次数占总预警次数比例
漏报率	0.051	未能识别的故障占总故障样本比例
系统稳定运行周期	181 天	无故障连续运行时间

从表 1 数据可以看出，该系统在故障诊断方面具有较高准确率，达到了 94.6%，能够有效识别大部分异常状态，且平均预警提前时间为 27.3 小时，满足实际运行中对提前干预的需求。在误报率与漏报率控制方面表现优异，分别为 3.8% 与 5.1%，显著低于同类型传统监控系统的平均水平。系统在连续运行 181 天的周期内未发生数据中断或模型失效

问题，表现出良好的稳定性与实用性。这些结果表明，智能化监控系统在数据识别、异常预测与风险预控方面已具备工程应用条件，可有效支撑水电厂实现高效运行与运维智能化转型。

5 结论

本研究围绕水电厂智能化监控系统的故障诊断与预警机制展开，构建了基于多源数据融合、智能算法驱动与联动响应控制的系统架构，并在实际工程中验证了其有效性与可靠性。系统在故障识别准确性、预警响应时效性和运行稳定性等方面表现出良好性能，展现出广阔的工程应用前景。研究成果可为水电厂智能运维体系建设提供理论依据与技术支持，有助于推动电力行业的数字化与智能化转型。

参考文献

- [1] 莫宇. 水电厂自动化控制与智能监控系统融合技术研究[J]. 能源新观察, 2025,(06):92-93.
- [2] 毕晓为, 袁林. 智能水电厂一体化管控平台关键技术研究[J]. 仪器仪表用户, 2024,31(07):87-88+91.
- [3] 陈伏高, 万君, 孟繁欣. 基于智能水电厂架构的丰满水电站计算机监控系统的设计与实现[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会. 中国水力发电工程学会自动化专委会换届大会暨2023年全国水电厂智能化应用学术交流会论文集. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司; 松花江水力发电有限公司丰满大坝重建工程建设局;, 2023:27-30.
- [4] 马道荣, 朱希华. 智能巡检技术在小水电计算机监控系统运用的探析[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会. 中国水力发电工程学会自动化专委会2021年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会论文集. 南瑞集团有限公司南京南瑞水利水电科技有限公司;, 2021:415-417.
- [5] 刘佳, 陈龙, 喻洋洋, 等. 某水电厂计算机监控系统网络安全防护与智能应用[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会. 中国水力发电工程学会自动化专委会2021年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会论文集. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司;, 2021:421-424.

Analysis of Carbon Emissions Throughout the Life Cycle of Prefabricated Buildings from the Perspective of Green Architecture

Ping Fan Junzhi Chen

China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

As a key industry in global carbon dioxide emissions, the construction sector plays a pivotal role in achieving the “dual carbon” goals through its transition toward low-carbon development. Prefabricated construction, as an industrialized building method, remains controversial regarding its actual carbon emission performance throughout its entire lifecycle. Based on the principles of green building and the theory of life cycle assessment, this study establishes a targeted carbon emission accounting model. Comparative analysis between typical prefabricated concrete buildings and traditional cast-in-place buildings reveals that while prefabricated construction generates incremental emissions during the material production phase, its overall lifecycle carbon emissions significantly decrease due to improved construction efficiency and operational performance, demonstrating high recycling potential. The findings highlight the low-carbon attributes of prefabricated construction and provide critical directions for integrated design, industrial chain optimization, and circular economy models.

Keywords

Green building; Prefabricated building; Life cycle assessment; carbon emission

绿色建筑视角下装配式建筑全生命周期碳排放分析

樊平 陈俊枝

中国建筑科学研究院有限公司，中国·北京 100000

摘要

建筑业作为全球二氧化碳排放的关键行业，其向低碳方向转型对实现“双碳”目标意义重大，装配式建筑作为一种工业化的建造形式，其全生命周期的实际碳排放成效尚存在争议，研究依托绿色建筑理念与全生命周期评价理论，创建了有针对性的碳排放核算模型。经由典型装配式混凝土建筑与传统现浇建筑的对比剖析能够发现，装配式建筑虽说在材料生产阶段有增量产生，不过借助施工效率提高、运营性能改良的高回收潜能，其全生命周期的总碳排放量显著下降，研究发现呈现了装配式建筑的低碳属性，还为集成化设计、产业链优化及循环经济形态指明了关键方向。

关键词

绿色建筑；装配式建筑；全生命周期评价；碳排放

1 引言

全球气候的剧烈变化与资源环境的沉重压力，推动建筑业开展根本性的绿色转型，在这样的情境下，装配式建筑借助其标准化、工业化的特点，成为助力建筑产业现代化与可持续发展的关键载体，就其是否真正实现“绿色低碳”这一情况，业内持有不同的观点，特别是对其前期生产阶段的碳排放情况抱有疑虑，这需要设立一个科学、全面的评估架构加以梳理。

2 绿色建筑理论概述

绿色建筑理论发端于对环境危机的深度反思以及可持

续发展理念的普遍传播，其核心要义是谋求建筑在全寿命周期内最大程度地节约资源、保护生态环境并削减污染，意在为大众营造健康、适宜且高效的使用空间，实现人与自然的协调共生，该理论突破了传统建筑仅聚焦初始成本与功能性的桎梏，进而运用一种体系化、全局性的视角，把建筑作为一个与外部环境不断开展能量和物质交换的动态生命体。其评价体系一般包含节能、节地、节水、节材以及室内环境质量等多个层面，并且碳排放管控已成为贯穿这些层面的关键综合性指标，绿色建筑着重于从规划设计、施工建设、运营管理直至最终拆除再利用的全流程把控，提倡采用被动式设计、高效能源系统、可再生建材以及水资源循环利用等关键技术策略，绿色建筑理论并非仅仅是一套技术准则或评估工具，而是一种弘扬资源效率与环境责任的价值指引，它引领建筑业从线性消耗模式转变为循环发展模式，为应对气候变化和实现低碳转变提供了基础性的理论架构与实践途径^[1]。

【作者简介】樊平（1990—），男，中国河北张家口人，本科，工程师，从事装配式建筑、绿色建筑等研究。

3 装配式建筑各阶段碳排放源

3.1 材料与构件生产阶段

此阶段形成装配式建筑全生命周期碳排放的关键部分，其排放强度明显高于传统现浇建筑，主要归因于预制构件生产过程的集约化与工业化属性，碳排放最主要且极为突出的源头是建筑主体结构材料，尤其是水泥和钢材的工业化制造，水泥的煅烧流程会直接排出大量二氧化碳，然而钢铁冶炼却要耗费巨量煤炭，二者皆为典型的高能耗、高碳排放产业。尽管在设计环节或许对截面进行优化从而降低材料使用量，但构件工厂普遍运用的蒸汽养护工艺，为加快混凝土的硬化进程而消耗化石燃料，成为另一直接排放源头，生产线上推动模板拼接、钢筋加工、混凝土布料与振捣、构件吊运等流程的机械设备，要是其运行依赖的电力或者热能是来自非清洁能源，同样会产生相当可观的间接排放。该阶段还涵盖了各类辅助材料，像预埋件、保温层、装饰面层等在制造进程中的能源与资源损耗，必须着重说明的是，鉴于生产活动从分散的施工工地转移至集中的厂区，这部分排放虽说在空间上更为聚拢，但在统计方面更易于清晰把控，还为运用先进节能技术、选用低碳替代材料（如绿色水泥、再生骨料）以及集成可再生能源供电营造了有利环境，由此成为减排潜力发掘与技术攻坚的关键部分。

3.2 物流运输与现场建造阶段

该阶段的碳排放大多源自连接工厂与工地的“物流链条”以及高效的现场施工作业，一般被视作装配式建筑彰显其低碳优势的关键环节，物流运输所产生的碳排放与运输距离、负载率以及运输工具的能源效率直接相关，包含把原材料运至预制构件厂的起始运输，以及将标准化成品构件从工厂运到施工现场的主体运输。后者的排放属于装配式建筑特有的且需着重留意，特别是当构件厂的选址与项目所在地距离较远时，长途公路运输引发的柴油消耗将大幅提升碳足迹，步入现场施工安装的阶段后，碳排放便显现出明显的下降态势，这是鉴于大量高能耗的湿作业，像现场浇灌混凝土所要求的搅拌、振捣和养护，已被构件的精准吊装与机械连接所替代，所以现场施工机械的种类、数量以及运行时长显著减少。塔吊、吊车这类重型机械的能源消耗主要聚焦于高效的结构组装，然而传统工地上频繁的砂浆搅拌、焊接操作、模板安装拆卸以及材料在场地内的二次搬运所带来的排放却被大幅降低，施工工期的大幅缩减，也直接减少了整个建造阶段的现场临时设施能耗与管理人员通勤带来的间接排放，虽然物流环节或许会产生额外排放，但现场施工环节的体系性减排效益通常更为明显，一同促成了该阶段碳排放相较于传统方式的净削减^[2]。

3.3 运营维护与废弃处置阶段

该阶段贯穿建筑数十年的使用期限直至最终拆除完毕，其碳排放在传统建筑当中常常占据最大份额，而装配式建筑凭借其自身特性，在这一漫长时期中呈现出特有的减排潜能

与循环契机，在持续数十年的运营维护时段，碳排放大多源自建筑运行时的能耗，尤其是采暖、制冷、照明以及设备用电所产生的能源消耗。装配式建筑借助工业化制造，能够实现更高的构件尺寸精确水平与装配气密性能，进而有利于营造热工性能更好、冷热桥效应更低的建筑围护结构，从根本上增强建筑能源效能，减少长期的暖通空调负载，鉴于主体结构构件在工厂的标准环境里制作，其材料的均匀性和耐久性一般更出色，降低了因渗漏、裂缝等状况引发的频繁维护或局部返修需求，这在一定程度上减少了维护活动产生的材料与能源损耗。进入最后的废弃处置环节，碳排放源于拆除作业机械的能源消耗、废弃物分类处理的能源消耗以及运输至填埋场或回收厂的能源消耗，装配式建筑的突破性优势在此得以彰显，其“螺栓连接”或“干式连接”技术让主要结构构件在理论层面能够实现非破坏性拆除，大幅提升了主体材料的完整回收比例与直接再利用概率。该“建筑即资源库”的设计理念，把传统线性模式的“生产—使用—废弃”末端排放，转变为循环经济范畴下的“生产—使用—回收—再生产”模式，防止了新材料生产所产生的高额碳排放，进而在全生命周期的末尾发掘出关键的碳减排潜力。

4 绿色建筑视角下装配式建筑全生命周期的碳排放优化路径

4.1 设计源头的集成优化

从绿色建筑角度出发的碳排放优化，务必要从设计开端处开启，这属于一种系统性、前瞻性的根本性革新，这一路径的关键在于采用集成设计理念，把低碳目标融入建筑方案、结构体系与构件设计的全过程，而非事后弥补，首要举措是促进建筑实现“少费多用”与“被动优先”，也就是于设计阶段充分利用自然采光、自然通风以及太阳能得热的优势，凭借合理的体形系数、朝向与窗墙比调整，竭尽全力减少建筑在长期运行中对主动式能源系统的依靠，从源头降低全生命周期中占比最高的运营碳排放。基于这一情况，设计师应把装配式建筑当作一个完整的“产品系统”，联合结构、建筑、设备与内装专业，实施一体化、模数化与标准化的深度设计，这表明借助精准化计算和模拟仿真，在确保安全和功能得以实现的基础上，最大程度实现结构部件的轻型化与材料节约化，减少每个预制构件的混凝土及钢材的使用数量，直接减少高碳建材引发的物化碳排放。

一体化设计可精准地预留设备管道和内装接口，防止现场二次切割与凿洞引发的材料损耗和能效降低，设计须具备全生命周期的视角，主动考量未来空间功能转变的灵活性，借助大开间、灵活隔断的设计来延长建筑主体结构的使用年限；并以前瞻性视角引入“可拆解设计”理念，运用利于拆分的干式连接节点和标准化接口，为建筑在达到使用寿命之后构件的无损伤拆除、高效率回收与直接再利用创造有利条件，在设计规划阶段就锁定了末端处理阶段的巨大减碳

潜能^[3]。

4.2 生产建造的低碳转型

当设计与材料选取确定之后，生产及建造环节的低碳变革是决定减碳目标能否实现的实践核心，这一路径需求对传统粗疏的生产施工模式进行技术与管理双层面的深度变革，在构件生产阶段，务必驱动预制工厂向绿色化、智能化迈进升级，这不但涵盖了针对养护窑等关键高耗能设备开展节能改良，比如利用工业余热、太阳能或生物质能等清洁热源替换传统的燃煤锅炉蒸汽养护，更表明要在生产线全面设置自动化、精细化的控制系统，通过优化配合比例、降低生产废品产出率、实现边角料在厂内的循环再利用，从而实现资源与能源的最大化节约，工厂需主动探寻构建基于区块链或者物联网的碳足迹跟踪体系，给每一块出厂构件赋予明确的“碳身份”，促使上游供应链选用获得绿色建材认证的低碳水泥、再生骨料或绿色钢材。

而在物流与施工环节，优化着重于从系统层面提高效率以降低非必要排放，凭借科学的区域产业布局谋划，构建“分布式”预制工厂网络，试图使构件运输半径减至最小，并倡导使用新能源重型运输车辆，施工现场的管理变革同样关键，基于BIM的数字化精准建造管理平台，好似指挥一场震撼的交响乐演奏一样，精准规划每一块构件的进场时刻与吊装次序，实现“零库存”的准时化施工，全面杜绝现场堆放损耗和二次搬运现象。装配化施工致使现场作业人员数量、施工用水量、建筑垃圾（预计可降低70%以上）以及施工时长（缩减30%以上）实现全面大幅降低，本身便是极为直接、极为显著的减碳成果，推行机器人安装、智能监测等智慧建造技术，能够进一步提升安装的精确程度与质量水平，减少由人为差错造成的返工现象，进而在微观作业环节筑牢碳减排的根基^[4]。

4.3 运营维护的智慧赋能与性能提升

建筑的价值主要体现在运营层面，将装配式建筑工业化高质量优势转化成长久、稳定且低消耗的运营性能，是挖掘其全生命周期低碳价值的关键途径，装配式建筑鉴于构件精确程度高、衔接严密，天然拥有更卓越的气密性与结构稳固性，这为建筑实现超低能耗甚至近零能耗构筑了稳固的

物理根基。优化路径的关键，在于把这一先天优势与主动式绿色技术开展深度融合与智能化管理，这表明在建筑设计环节便系统地整合具备高性能的外保温体系、节能门窗、遮阳装置以及高效的热回收新风体系，并且充分运用建筑屋顶与外立面，大规模装设光伏发电系统，让建筑由单纯的能源消耗者转变为具备一定自我生产能力的“产消者”，直接冲抵部分运营碳排放。

最为关键的一点是，应当依靠物联网、大数据与人工智能技术，替建筑装上敏锐的“神经”与智慧的“大脑”，利用在建筑当中大范围设置传感器，实时监控室内外环境参数（温湿度、光照、CO₂浓度）和各分项能源消耗数据，接着基于机器学习算法构建建筑能耗模型，实现对供暖、通风、空调、照明等系统的自适应、预测性准确调控。智慧运维平台可察察能耗异常状况，自行诊断设备故障或者效率减退现象，把“被动维修”转变为“预防性维护”，进而在长达数十年的运营期间，始终让建筑能效维持于最佳水准。

结语：装配式建筑借助工业化生产与现场装配的深度融合，在全生命周期当中体现出结构性的低碳特性，其减排益处不仅呈现于施工时期的效率增进，更来自设计开端的系统改良、运营维护的性能支撑以及拆除时期的循环潜力，为全面激发这一潜能，未来要进一步推进建筑设计与低碳目标的深度契合，加快建造流程的绿色智能化转变，且搭建以构件再利用为核心的循环经济体系，装配式建筑不应只是建造方式的革新举措，而应作为引导建筑业迈向资源高效利用、环境友好型的全面性解决办法，为实现城乡建设绿色发展和碳中和目标提供核心支撑。

参考文献

- [1] 何东琦.论绿色建筑视角下装配式建筑的优势与发展[J].经济技术协作信息, 2024(7):0250-0252.
- [2] 张建国.绿色建筑背景下装配式建筑技术的应用分析[J].建筑·建材·装饰, 2024(18).
- [3] 范英洁,成嘉莉.绿色建筑背景下装配式建筑技术的应用与实践分析[J].住宅与房地产, 2023(14):104-106.
- [4] 张庆生.绿色建筑背景下装配式建筑技术的运用分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023.

Discussion on Key Points and Construction Methods of Building Electrical Fire Protection Engineering Design

Xingyao Li

Guizhou Leiteng Fire Equipment Co., Ltd., Zunyi, Guizhou, 563000, China

Abstract

With the acceleration of urbanization, the scale of construction projects has expanded and their structures have become increasingly complex, leading to a rising risk of fire safety hazards. It is urgent to strengthen fire safety management in engineering projects. This article focuses on the application scenarios of fire protection inspection and assessment in construction projects, explores its core value and practical significance, and provides theoretical and practical references for improving the fire safety level of construction projects and safeguarding people's lives and property.

Keywords

Fire Protection inspection “Evaluation; Construction engineering Meaning

消防检测评估应用于建筑工程中的意义探究

李星垚

贵州雷腾消防设备有限公司，中国·贵州遵义 563000

摘要

随着城市化进程加速，建筑工程规模扩大、结构趋复杂，消防安全风险攀升，强化工程消防管理刻不容缓。本文聚焦消防检测评估在建筑工程中的应用场景，探究其核心价值与实践意义，为提升建筑工程消防安全水平、保障人民生命财产安全提供理论与实践参考。

关键词

消防检测；评估；建筑工程；意义

1 引言

建筑工程的消防安全直接关系到社会公共安全与群众切身利益，是工程质量管控的核心环节。消防检测评估作为防范消防安全隐患的关键手段，能够精准识别工程消防设计、施工及运维中的薄弱环节。明确其在建筑工程中的应用意义，旨在推动消防检测评估体系的完善与落地，提升工程全生命周期消防管理效能，筑牢建筑消防安全防线。

2 消防检测评估在建筑工程中的应用意义

2.1 筑牢建筑安全底线 保障生命财产安全

消防检测评估从源头上构建起消防安全的防护屏障，通过对建筑消防设计方案的可行性核查、消防设施的性能检测以及疏散通道的合理性评估，确保建筑工程的消防系统能够满足火灾预防、初期控制和人员疏散的核心要求。建筑消防系统的完善性与可靠性直接关系到火灾发生时的应急处

置效果，消防检测评估通过对消防供水系统自动喷水灭火系统火灾自动报警系统等关键设施的技术性能校验，排查潜在安全隐患，确保各类设施在火灾场景下能够正常启动高效运行。同时，消防检测评估兼顾建筑疏散空间的布局合理性与通行能力，通过对疏散距离疏散宽度疏散楼梯设置等关键指标的评估，保障人员在火灾发生时能够快速有序撤离，最大限度降低人员伤亡和财产损失。

2.2 规范工程建设流程 强化质量管控效能

在设计阶段，消防检测评估提前介入对建筑消防设计方案进行合规性审查，确保设计方案符合现行消防技术标准，避免因设计缺陷导致后续工程返工或消防隐患。设计环节的消防评估重点关注建筑耐火等级与使用功能的匹配性消防系统选型的合理性以及与周边环境的消防兼容性，从源头把控消防设计质量。进入施工阶段，消防检测评估通过对消防工程施工工序施工材料施工工艺的动态核查，监督施工单位严格按照设计方案和技术标准施工，防止因施工不规范导致消防设施性能不达标。施工过程中的检测评估涵盖消防设施的安装精度管线连接质量设备调试效果等关键环节，通过阶段性检测及时发现并纠正施工偏差，保障消防工程施工

【作者简介】李星垚（1987-），男，中国贵州遵义人，从事消防工程研究。

质量。在验收阶段，消防检测评估作为工程竣工验收的核心环节，通过全面系统的检测评估出具专业检测报告，为工程验收提供科学依据。

2.3 提升长期运维效能 降低全生命周期成本

建筑消防系统在长期使用过程中会因设备老化部件损耗环境变化等因素导致性能下降，消防检测评估通过对消防设施使用寿命技术状态维护需求的评估，为运维单位制定针对性的维护保养方案提供依据。运维单位可根据检测评估结果明确维护重点，合理安排维护周期，及时更换老化部件修复故障设施，确保消防系统长期保持良好运行状态，避免因设施失效导致的重大安全风险和高额维修成本。同时，消防检测评估过程中形成的完整技术档案，详细记录了消防设施的型号参数安装位置检测数据等关键信息，为运维单位开展日常维护故障排查提供了完整的支撑，提升运维工作的效率和精准度^[1]。

3 消防检测评估应用于建筑工程中的策略

3.1 构建全周期检测评估管控体系

建筑工程消防安全关乎公共安全与社会稳定，其消防检测评估工作需突破传统阶段性检测的局限，构建覆盖工程全生命周期的管控体系。这一体系的构建能够实现消防安全风险的前置防控、过程把控与长效治理，为建筑工程消防质量提供全流程保障。以下从两个核心维度阐述体系构建的具体策略。其一强化规划设计阶段的前置检测评估。规划设计是建筑消防安全的源头环节，需将检测评估要求深度融入设计全过程。应明确设计单位的消防检测评估责任，要求其在方案设计阶段就对照消防技术标准开展自我评估，重点核查建筑防火间距防火分区划分消防设施配置等核心内容的合理性与合规性。同时引入第三方专业检测评估机构参与设计评审，从专业视角提出优化建议，及时纠正设计中存在的消防隐患。通过前置检测评估可从源头规避设计缺陷，减少后期施工阶段的整改成本，为后续消防工作奠定坚实基础。其二完善施工与运维阶段的动态检测评估机制。施工阶段是消防设施实体质量形成的关键时期，需建立同步性检测评估制度。检测评估机构应依据施工进度分阶段开展现场检测，重点核查消防设施材料的质量证明文件施工安装工艺的规范性等内容，对检测中发现的问题出具整改通知书，明确整改要求与时限，并跟踪核查整改落实情况形成闭环管理。进入运维阶段后需建立常态化检测评估机制，明确产权单位的主体责任，定期开展消防设施功能检测建筑消防安全性复核等工作。结合建筑使用功能的变化及时调整检测评估重点，更新评估结果，确保消防设施始终处于有效运行状态，保障建筑全生命周期的消防安全^[2]。

3.2 强化智慧化技术赋能检测评估

智慧化技术凭借其感知全面响应迅速分析深入的优势，成为推动消防检测评估提质增效的重要支撑。强化智慧化技

术在建筑工程消防检测评估中的赋能作用，需立足行业实际构建系统完备的应用体系，具体可从以下两方面推进。

其一，推进多元感知技术与消防检测场景的深度融合。依托物联网技术构建全域覆盖的感知网络，将火灾探测器烟感温感设备消防设施运行传感器等终端设备与检测评估系统互联互通，实现对建筑消防设施运行状态火灾隐患风险点的实时监测。同时整合红外热成像技术激光扫描技术等先进检测手段，弥补传统人工检测在隐蔽空间复杂结构区域的检测盲区，提升对消防设施完好性火灾隐患排查的精准度，为检测评估工作提供全面客观的基础数据支撑。

其二，构建一体化智慧检测评估数据体系。搭建统一的消防检测评估数据平台，整合建筑工程全生命周期的消防相关数据，包括设计阶段的消防图纸信息施工阶段的消防设施安装记录日常运维的检测数据等，实现数据的集中管理与互通共享。运用大数据分析技术对收集的多维度数据进行深度挖掘，通过构建风险评估模型识别火灾隐患的演化规律与潜在风险点，为消防检测评估提供智能化决策支持。同时强化数据安全管理机制，保障数据采集传输存储全过程的安全可靠，确保智慧化检测评估体系的稳定运行。

3.3 健全多方协同的责任落实机制

由于建筑工程涉及主体多元，各参与方职责边界模糊易导致消防检测评估工作出现推诿扯皮、执行不到位等问题。因此，健全多方协同的责任落实机制，明确各主体在消防检测评估中的核心职责与协同要求，成为推动消防检测评估工作规范化开展的重要前提。

其一，需构建清晰化的责任体系。要立足建筑工程全生命周期，梳理建设单位、施工单位、设计单位、监理单位及消防检测评估机构的核心职责。建设单位应承担统筹协调责任，确保消防检测评估工作按规范流程推进，保障检测评估所需资源的足额投入。施工单位需履行施工质量主体责任，配合检测评估机构开展现场勘查工作，及时整改检测过程中发现的消防安全隐患。设计单位要对设计方案的消防安全合规性负责，为消防检测评估提供完整、准确的设计资料。监理单位应落实监督责任，对施工过程中的消防安全措施落实情况进行全程监督，同步监督消防检测评估工作的规范性与真实性。消防检测评估机构则需坚守客观公正原则，严格按照检测标准开展评估工作，确保检测结果真实可靠。

其二，要完善常态化的协同联动机制。建立多方主体协同沟通平台，定期召开消防检测评估工作推进会，通报工作进展情况，协调解决跨主体的难点问题。明确各主体间的信息共享要求，建设单位需牵头整合设计、施工、监理等环节的消防安全相关资料，及时提交给检测评估机构；检测评估机构应将检测过程中发现的问题及时反馈给相关责任主体，形成问题整改的闭环管理。同时，建立责任追溯机制，对在消防检测评估工作中存在失职渎职、弄虚作假等行为的主体，依法依规追究其相应责任，通过责任约束倒逼各主体

切实履行协同职责，保障消防检测评估工作的有效落实^[3]。

3.4 完善检测评估标准与动态运维机制

建筑工程消防检测评估的规范性与有效性直接关乎建筑消防安全底线。当前部分领域检测评估标准存在滞后性运维机制缺乏持续性等问题 制约了消防检测评估工作的质量提升。完善检测评估标准与动态运维机制 是夯实建筑工程消防安全基础 推动消防检测评估工作规范化长效化发展的关键举措 具体可从以下两方面推进。

其一，构建科学完备的检测评估标准体系。立足建筑工程行业发展趋势 结合不同类型建筑结构特点与消防安全需求 优化完善检测评估标准内容。明确检测评估的核心指标 范围流程与技术要求 弥补特殊建筑类型 新型消防设施检测评估标准的空白。强化标准的系统性与衔接性 推动检测评估标准与建筑设计施工验收等环节标准的协同统一 确保检测评估工作有章可循 有据可依。同时建立标准动态更新机制 跟踪消防技术发展前沿 及时吸纳先进技术成果 使标准始终适配行业发展与消防安全监管需求。

其二，建立全生命周期动态运维机制。将运维管理贯穿建筑工程消防设施全生命周期 明确建设单位施工单位运维单位的主体责任 构建权责清晰的责任体系。制定常态化运维管理流程 定期开展消防设施巡检维护与检测评估 及时发现并整改设施老化 功能失效等问题。搭建运维管理信息平台 整合运维过程中的各类信息 实现对消防设施运行状态的实时监控与动态追踪。强化运维监管考核 建立科学的考核评价指标 督促相关单位严格落实运维责任 保障消防设施持续稳定发挥防护效能。

4 消防检测评估在建筑工程中的实践价值体现

建筑工程的消防安全直接关系到公共安全与社会稳定，消防检测评估作为贯穿工程建设与使用全流程的关键技术手段，通过科学系统的检测与专业评估，为建筑消防安全提供全方位保障，其实践价值在工程建设各环节均有突出体现。以下从核心维度展开具体阐述。

其一 保障建筑消防设施质量与功能完整性。建筑消防设施是抵御火灾的基础防线，其质量与功能达标是工程消防安全的前提。消防检测评估通过对消防给水系统火灾自动报警系统自动喷水灭火系统防排烟系统等各类设施的性能参数进行精准检测，核验设施安装施工是否符合相关规范标

准，及时发现设施存在的质量缺陷或功能隐患。通过评估提出针对性整改建议，推动施工单位完善设施配置与安装工艺，确保消防设施在投入使用后能够正常发挥预警扑救疏散等核心功能，从源头上筑牢建筑工程消防安全基础。

其二 强化建筑工程全生命周期风险管控。建筑工程的消防安全风险贯穿设计施工验收使用等多个阶段，消防检测评估打破了传统消防安全管理的阶段性局限，实现了全生命周期的动态风险管控。在工程施工阶段，检测评估可提前预判施工过程中因材料选用不当施工工艺不规范等引发的消防安全风险，指导施工单位及时调整施工方案；在工程验收阶段，通过全面检测评估验证工程整体消防安全水平，确保工程符合投入使用的消防安全要求；在使用阶段，定期检测评估能够跟踪建筑消防设施的老化损耗情况，评估建筑使用功能变更带来的消防安全风险，为后续维护改造提供科学依据。这种全流程风险管控模式，有效降低了建筑工程各阶段的消防安全隐患，提升了建筑整体抗风险能力^[4]。

5 结语

消防检测评估在建筑工程中具有不可替代的保障价值，能够为工程消防安全提供全流程、精准化的技术支撑，有效降低安全风险，提升工程安全品质。未来，随着建筑技术与检测技术的融合发展，其应用场景将更加广泛，技术体系将更加完善，有望为构建更安全、可靠的建筑环境提供更强有力的支撑。当前消防检测需紧跟技术前沿，深化人工智能、物联网等新兴技术的融合应用，通过智能监测与数据分析提升检测精度与效率；同时推动行业标准动态更新，针对特殊建筑场景完善评估细则，加强专业人才培育与机构规范化管理，以技术升级、标准完善和管理强化的协同发力，为建筑工程消防安全筑牢更坚实的防线。

参考文献

- [1] 姚丽东. 信息化技术在建筑消防设施竣工检测监督工作中的应用 [J]. 散装水泥, 2025, (06): 120-122.
- [2] 魏文超. 高层建筑消防安全问题及对策研究 [J]. 散装水泥, 2025, (06): 189-191.
- [3] 孙胜伟,于水文. 高层建筑消防疏散照明与消防供排水系统的整合途径 [J]. 灯与照明, 2025, 49 (06): 50-52.
- [4] 刘宝润. 智能化技术在提升建筑消防监督管理水平中的应用 [J]. 建材发展导向, 2025, 23 (23): 58-60.

Design and Implementation of CPP Hydraulic Oil Parameters Online Monitoring System

Xinyu Peng Shuren Wang Yimai Li Xiaolin Wang Zhigang Zhang

China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin, Jiangsu, 214000, China

Abstract

The Variable Propeller (CPP) of marine main engines, renowned for its superior maneuverability and high propulsion efficiency, has been widely adopted across various vessel types. This propulsion system utilizes hydraulic systems to drive propeller rotation for both forward and reverse movement. However, the CPP hydraulic system exhibits relatively high failure rates due to its complex hydraulic architecture, flexible propeller operation management, and stringent pilot-machine coordination requirements. Notably, 75%-80% of CPP hydraulic system failures are attributed to degraded hydraulic oil quality. For marine applications, the primary causes of oil degradation include water ingress, emulsification, and functional failure. This study focuses on hydraulic oil emulsification in CPP systems, proposing an online monitoring system to achieve real-time quality assessment of hydraulic oil.

Keywords

CPP hydraulic system; hydraulic oil quality; monitoring system

CPP 液压油参数在线监测系统设计与实现

彭新宇 王树仁 李乙迈 王孝霖 张志刚

中国卫星海上测控部，中国·江苏江阴 214000

摘要

船舶主机的可调桨（CPP）具有操控性强、推进效率高等优点，已广泛应用于各类船舶。可调桨采用液压系统驱动桨叶旋转实现船舶的正车和倒车。但因液压系统相对复杂、桨叶工况管理灵活、驾机协同要求较高等特点，CPP液压系统故障率相对较高。在CPP液压系统中，75%-80%的故障是因液压油品质下降而造成的。对于船舶而言，造成液压油品质下降的主要因素是液压油进水乳化和失效造成的。本文以CPP液压系统液压油乳化为例，通过设计一套在线监测系统，实现对液压油品质实时监测。

关键词

CPP液压系统；液压油品质；监测系统

1 引言

可变螺距螺旋桨，它的桨叶与桨壳是分开的，桨叶用螺钉安装到桨壳上并能在桨壳上旋转，简称调距桨，又称 CPP (Changeable pitch propeller)。由于液压系统传动技术的运用，使变距桨易于实现遥控，并能在主机不停车亦无需换向的情况下，很容易地实现倒航。提高了船舶的机动性。

液压油的污染程度直接影响到液压系统的工作稳定性与安全性。液压油的主要污染物有固体类污染物、液体类污染物以及热量污染，液压油进水乳化就是典型的液体类污染故障。液压油乳化是当水进入到液压油中，使液压油中的含水量达到吸水饱和点，其中的微小水滴与液压油结合，在油液中形成悬浊液，形成类似牛奶状的混合液体，这种状态叫

做乳化。液压油发生乳化后，液压油内的各类添加剂会与水发生水解反应，加速油液氧化，形成胶状物质，堵塞阀芯或滤器；其中的水分会破坏油膜强度，降低液压油的润滑性能和防锈性能，引起密封件老化，最终导致液压系统漏油或内泄。而其中的游离水附着在液压元件的表面，使金属表面腐蚀，形成锈斑，加剧了液压系统各元器件的磨损，增加了其他金属等固态污染物。同时，液压系统内的金属生锈后，剥落的铁锈在液压系统管道和液压元件内流动，蔓延扩散后，将导致整个系统内部生锈，产生更多的剥落铁锈和氧化物，使液压设备出现故障，给船舶安全埋下隐患。

现阶段船舶应对液压油乳化的常用方法是通过使用新油置换的方式，缓解液压油乳化对设备造成的伤害。但在海上基本没有其他的应对措施，比较被动。某船舶对液压油品质的监测是主要通过 CPP 液压油高置油箱上的观察镜进行人为主观判断和定期取样化验，尽管已经提高观察和化验频次，但仍然无法做到在线监测液压油品质，不能尽快尽早发

【作者简介】彭新宇（1991-），男，中国河南南阳人，从事船舶电气与自动化研究。

现液压油乳化现象。为解决这一问题，设计制作了一套监测系统，对液压油品质进行监测。时刻关注液压油品质，尽快尽早发现并处置液压油乳化现象，可确保最大程度降低液压设备的故障概率，降低液压油乳化对设备造成的伤害^[1]。CPP 泵站系统示意图详见图 1 所示



图 1 CPP 泵站系统示意图

2 总体方案

本文采用实时监测液压油各项参数为研究对象，以西门子 S7-1200PLC 作为上位机，将采集的主要参数信号通过扩展模块的模拟量输入通道读取，由上位机程序控制实现 A/D 自动转换，然后转换的数据传回 PLC 内 b 部，经过 PLC 处理后，再通过触摸屏显示出来。系统总体设计图详见图 2 所示。

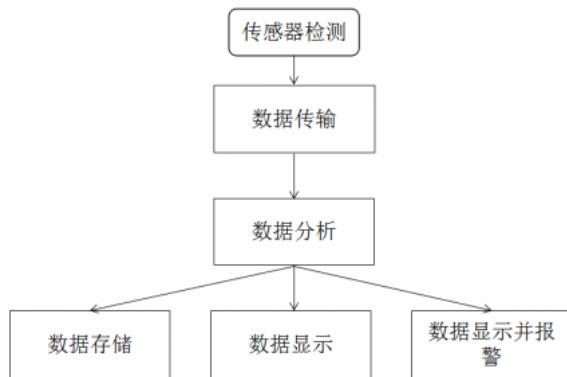


图 2 系统总体设计图

3 本监测系统采用的信号转换原理

本次监测系统涉及到标准的电流(模拟量)信号 4-20mA，即传感器信号的输出信号值；经由 PLC 采集后，通过模数(A/D)转换为对应的传感器的量程范围。我们将模拟量的范围假设为 (A0-Am)，模拟量的实际值假设为 A，传感器的量程范围假设为 (D0-Dm)，(A/D) 转换后的实际值假设为 D，根据模数(A/D)转换之间的线性关系，可用方

程表述为：

$$A = (D - D_0) \times (A_m - A_0) / (D_m - D_0) + A_0$$

依据上面的公式，我们可以根据采集的模拟量实际值 A 求出需要的实际值 D，则上述公式可变化为：

$$D = (A - A_0) \times (D_m - D_0) / (A_m - A_0) + D_0$$

4 监测系统的硬件组成

4.1 传感器选择

液压油的主要污染物有固体、液体及热量污染物，其中的主要因素有：水含量、含水率、磁性磨粒、介电常数、温度、粘度、密度等。结合 CPP 泵站此次设计采用了 6 种传感器实现监测目的。(金属磨粒传感器、激光颗粒计数器、油液水含量传感器、油液含水率传感器、油液温度、粘度、密度一体传感器、介电常数传感器等。)

磁性磨粒传感器的作用是检测液压油中的金属磨粒。当传感器检测液压油中的金属磨粒超过报警阈值时，监测系统发出声光报警。液压油中的磁性磨粒来源主要有两部分，一是系统内部管路锈蚀，产生的剥落铁锈和氧化物；二是液压系统内各元器件之间磨损导致，这可能是由于液压油品质下降，导致其润滑性能下降导致^[2]。

激光颗粒计数器可按照 NAS1638 标准进行油液清洁度检测，具有杜绝二次污染、取样量少、测试速度快、检测结果稳定等优点，用以检测液压油机械磨粒的存在，用以判断系统的机械损伤、磨损、腐蚀等情况。

水含量传感器与含水率传感器可以监测液压油中不同程度的水分，水含量传感器可测量 0-1000ppm 范围内的水含量；含水率传感器可测量 0.1-5% 范围内的含水率。

油液温度、粘度、密度一体传感器主要对液压油的基本性能参数进行实时监控，粘度和密度一定程度上反映了液压油品质的变化以及液压油的堪用性能。

介电常数传感器用于检测油液的介电常数值，可以反映由于进水、酸化、氧化、添加剂失效等因素导致的油液综合理化指标的变化，从而反映液压油的品质性能。CPP 泵站系统示意图详见图 3 所示

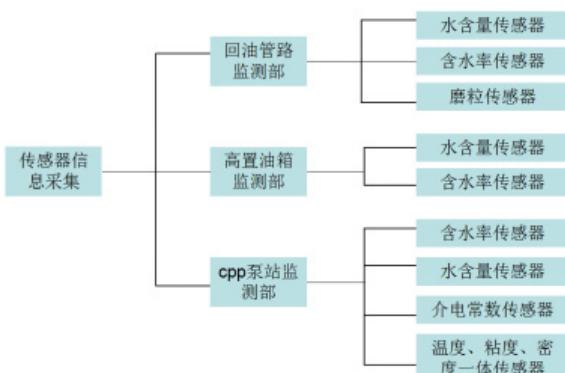


图 3 CPP 泵站系统示意图

4.2 安装位置选择

液压油在高置油箱中相对处于静态，因水的密度大于液压油的密度，经过一段时间后，水分会沉积在高置油箱底部，所以在此处监测水分效果最好。回油管路中的液压油在主机运行期间处于流动状态，在 CPP 泵站停止期间，高置油箱中液压油形成静压力，对螺旋桨桨毂起到密封作用。在此处设置水分传感器可以检测回油管路中是否存在水分，若是在泵站运行期间此处最先检测到水分，可初步判断为桨毂内部进水。此处进行水分监测的优点是：检测结果代表性高，可以准确反映出桨毂中液压油的含水状态；检测结果精度高，液压油中的水分不会因为沉聚，造成测量结果偏大^[3]。高置油箱和回油管路传感器位置安装示意图详见图 4 所示。

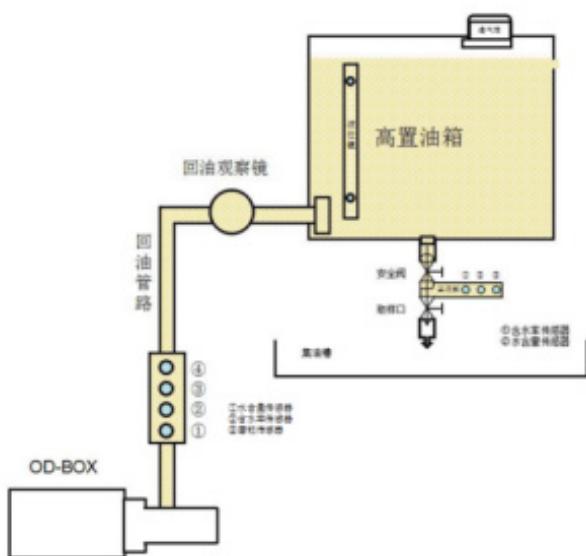


图 4 高置油箱和回油管路传感器位置安装示意图

船舶航行时海域状况复杂，纬度跨越大，环境温度与液压油温度的差异变化易导致 CPP 泵站油柜内部顶板产生凝水混入液压油，所以设置水含量传感器与含水率传感器监测不同程度的水分。CPP 泵站油箱传感器位置安装示意图详见图 5 所示

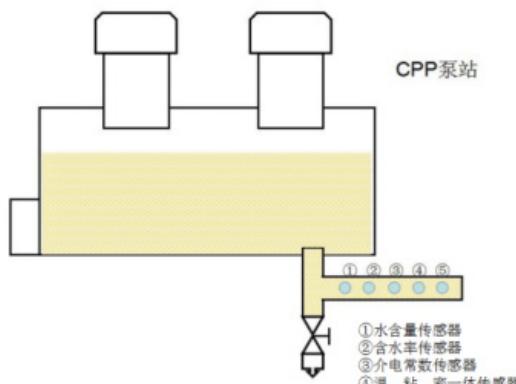


图 5 CPP 泵站油箱传感器位置安装示意图

4.3 PLC 及显示设备

本次电气方面设计主要采用传感器监测的同时将电信号传输至 PLC，并在 PLC 编写程序进行数据分析，分析后将结果传输至外接触摸屏，进行图形化显示以及报警。

目前在工业控制领域上常见的手段主要有继电器控制系统和可编程控制器（PLC）控制系统。本次研究涉及传感器模拟量信号的采集与处理，可编程控制器（PLC）控制系统具有成熟的信号采集与处理能力，并可与大多数传感器进行直接匹配。PLC 本身具有较强的抗干扰能力，可靠性高，且安装简单、维修较为方便，且采用模块化结构，使其具有体积小、重量轻的特点。PLC 初步选定使用西门子 1200PLC，该系列 PLC 指令丰富、功能强大、可靠性高、适应性好、结构紧凑、便于扩展，其 LAN 通信接口功能强大，可与其他 PLC 组网运行，可与触摸屏交互以及可将数据传输至计算机，进行显示。模拟量信号的采集模块采用的是与 1200PLC 配套的 SM1234 模块，该模块有 4 个模拟量输入通道，且通道类型可选择电流或者电压型^[4]。

触摸屏作为一种较新的电脑输入 / 输出设备，是目前最简单、方便、自然的一种人机交互方式。触摸屏由触摸监测部件和触摸屏控制器组成。触摸监测部件安装在显示器屏幕前面，用于监测用户触摸位置，接受后送至触摸屏控制器。而触摸屏控制器的主要作用是从触摸点监测装置上接收触摸信息，并将它转换成触点坐标，再送给 CPU，它同时能接收 CPU 发来的命令并加以执行。因触摸屏与 PLC 之间有良好的交互能力，目前市场配套产品成熟稳定，考虑选用与西门子系列 PLC 配套的 MCGS 系列触摸屏作为显示终端。

5 监测系统软件设计

在线监测系统采用西门子 PLC 作为主要控制和分析核心，通过模拟量输入模块采集传感器信息，即 4-20mA 电流信号和 0-10V 电压信号。将采集到的电流或电压信号通过 PLC 内部程序，进行 A/D 模数转换，输出十进制的数字信号，并寄存在 M 寄存器中。系统软件示意图详见图 6 所示

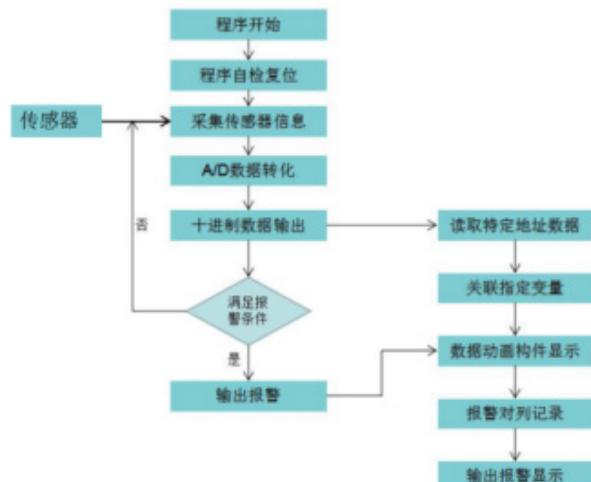


图 6 系统软件设计图

PLC 程序中设置对应传感器的阈值，当超过阈值时，PLC 给出一个报警输出，此报警输出与触摸屏动画构件进行交互，产生报警记录，并作出报警显示。

6 应用前景及主要创新点

6.1 应用前景

该研究成果适用于各类船舶在航行与码头停泊期间的液压油品质监测，提高了动力系统的安全性与稳定性，同时，对于采用液压调距桨的舰艇，亦具有较强的可借鉴意义。

6.2 主要创新点

设计并制作一套分布式液压油在线监测系统，通过多点位监测液压油数据，实现对液压油水含量等参数的动态监测，达到数据可视化监管的效果，为液压油乳化故障预警与

快速定位提供支撑；该系统能对监测对象的多个不同参数进行同时监测，系统硬件通用性强，主控单元功能多样，扩展性好，适用监测对象可灵活组态。

参考文献

- [1] 王洪权，西门子PLC电气设计与编程，北京：中国电力出版社，2015（2018）.
- [2] 王兆宇，一步一步学PLC编程（西门子），北京：中国电力出版社，2007.
- [3] 李世尘，船舶电气与自动化，大连：大连海事大学出版社，2013.
- [4] 蔡杏山，电气工程师自学成才手册，北京：电子工业出版社，2021.

Discussion on Safety Management of Subway Construction in Urban Rail Transit

Ling Qin

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

As a major urban infrastructure project, subway construction involves complex techniques and is predominantly buried deep underground, inherently introducing uncertainties that may lead to severe consequences if faults occur. This study systematically analyzes construction risks across three critical dimensions: risk prevention and control, construction of protective and main structures, and groundwater and stratum disturbance. Practical technical solutions and key control measures are proposed to enhance safety management at construction sites.

Keywords

construction safety; risk source pre-positioning; stability management; safety coordination

城市轨道交通地铁施工安全管理探讨

秦岭

中国水利水电第七工程局有限公司，中国·四川成都 610213

摘要

地铁工程属于大型的城市基础设施建设项目，由于施工工艺复杂，且大部分处于深度掩埋状态，这就导致了施工过程本身就存在不确定因素，一旦出现故障问题容易造成严重损失。为此，我们从风险防控、围护结构与主体结构施工、地下水与地层扰动施工等层面梳理施工风险问题，并提出可落实的技术方案与控制要点，旨在提升施工现场的安全管理水平。

关键词

施工安全；风险源前置；稳定性管理；安全协调

1 引言

在中国城市化建设深化推进的背景下，社会大众对于交通出行工具的需求量不断上涨，地铁作为城市轨道交通枢纽的核心要素，承载着十分重要的运输任务，由于地铁的施工建设周期长、需在地下运用复杂多样的施工技术，使得地铁施工建设过程中容易出现一些安全问题，造成十分严重的后果，为了能够最大程度上规避安全问题的发生，应采取切实可行的施工安全管理措施。

2 城市轨道交通地铁施工安全的概念

城市轨道交通地铁施工安全管理是指在车站、区间隧道、车辆段等新建、扩建、改建过程中，对车站主体结构、区间隧道主体结构、附属设施和车辆段土建结构，开展建设周期内安全管理活动，旨在保证工程建设期间人员、设备、环境和工程本体安全。不同于以往仅仅是以“不出事故”为

目的地被动式管理，而是将传统的工程技术学、管理科学和行为科学有机融合形成一种前瞻性、动态化的管理模式。从实质来看，就是根据具体的工程特点以施工组织设计、专项施工方案为基础，将风险评价结果转化成现场可操作的控制措施，并通过分级负责，将各项措施落实到各个岗位、每道工序的过程。相较于一般市政工程，城市轨道交通地铁施工除了针对场地、地质的变化控制外，还需要重点关注围护结构变形、地下水扰动、有限空间作业条件等方面，形成事前预测、事中控制、事后总结的管理模式，将风险完全控制在施工阶段。

3 城市轨道交通地铁施工安全管理必要性

构建和加强城市轨道交通地铁施工安全管理体系是出于内部高风险、外力严苛和后果惨重三方面的考虑。首先，基于项目本身的性质而言，地铁是大型的地下工程，既受到地质水文（软土、砂层、承压水、断裂带）的影响，还要面对周围构筑物和地下管线复杂的相互关系，在技术风险和作业风险交织重叠的背景下，容易造成坍塌、涌水涌砂、机械伤害等不可控式连锁灾害，因此需要前置化、过程化管理手

【作者简介】秦岭（1989—），男，中国四川成都人，本科，工程师，从事城市轨道交通施工及管理研究。

段驱动“事后治理”向“事前预防”转变^[1]。其次，从法律和社会责任视角出发，随着建设方、施工方承担的责任界定日趋清晰，不管是安全生产责任制落实不到位还是安全生产监管不到位，一旦出现问题都免不了行政处罚、经济赔偿和刑事责任，可见实施安全管理的必要性。再者，此类项目大部分地处城市中心区域，由于开挖所产生的扰动会对城市生命线、文物古迹等造成破坏，同时也给市民生活、生产秩序带来一定危害，如果出现重大安全事故，不仅会破坏城市整体运作功能，导致交通停滞、交通瘫痪以及公用事业瘫痪，还会引发社会公共危机，动摇民众对安全保障的公信力。因此，安全管理工作不再是一项单纯意义上的成本项，更是确保国家重大战略项目开展，保证城市安全有序运行以及承担起企业作为社会公民责任的重要抓手。

4 城市轨道交通地铁施工安全管理要点探讨

4.1 基于施工阶段划分的风险源前置识别与控制

对于城市轨道交通地铁施工现场管理而言，在施工阶段对风险源开展前置识别、控制更契合一线施工组织与管理的实践需求。一是将施工阶段作为风险排查的基本单元，遵循一种施工方法抓牢一条线原则，弱化主要矛盾：在明挖阶段重点关注基坑开挖顺序、支撑安装的及时性和地下水控制情况；在暗挖阶段重点关注掌子面稳定、初支封闭质量和超前支护落实情况；在盾构阶段重点关注始发接收条件、土压控制及同步注浆效果。分阶段管理更容易聚焦关键风险，规避形式上的风险识别，直接作用于现场施工^[2]。二是把风险源识别前置到施工准备和工序交接之前，在施工方案交底或班前教育期间，告知班组长本阶段需要关注的风险点和应该采取的风险控制措施，使现场作业人员在进场前就了解到哪些施工节点是不能违规、不能偷懒的，现场管理人员也可以根据计划有针对性地核查作业条件，由被动发现问题向主动识别转型。三是按风险等级实施分级管控，重点把控高风险工序（例如深基坑开挖、暗挖的关键步序、盾构的始发和接收），设置专人旁站并严格履行工序审批手续。例如，一般风险工序通过检查作业条件及巡场监控措施实施管控，确保有限的管理资源集中在危险性大的环节。除此之外，还要将风险控制要求融入到施工流程当中，避免出现工序转换的管理真空时段，只有在每个阶段转换之前对风险清单进行确认，满足支护到位、监测到位、防护到位方可进入下一道工序，实现安全管理、施工进度双同步，这样更符合城市轨道交通地铁工程连续作业、工序串联的特点。

4.2 围护结构与主体结构施工过程的稳定性管理

围护结构及主体结构施工过程的稳定性构建，在于将安全要求落实到具体的施工操作上，而不是仅停留在管理制度中。首先，在围护结构成槽施工方面，需要突出工序控制的稳定效果，严格遵守设计所规定的深度、宽度以及垂直度，施工过程中可利用测量复核和工班自检来控制槽壁质量，防

止槽段发生偏斜或塌槽的情况，进而让整体受力不受影响。值得注意的是，在整个施工过程中，应当保持钢筋笼下放和混凝土灌注的连续性，以防出现冷缝和夹泥情况，为基坑开挖提供良好的边界条件。其次，要将支撑体系当作稳定管理的重点，现场需要按照“分层开挖、及时支撑”的施工组织方式，在支撑安装时着重检查各节点焊缝是否完好、螺栓是否紧固以及轴线是否偏离等，同时结合轴力监测调整开挖节奏；支撑拆除则严格遵守自下而上、先下后上的顺序进行，避免因卸载速度过快或不对称造成局部的大面积位移。最后，加强主体结构的稳定性管理，紧抓模板支模、脚手架架设等施工工序的质量，通过控制模板支模间的距离、立杆基础平整度，以及先浇筑边侧竖向结构——再浇筑中间结构的方法来提升主体结构可靠性，当浇筑高度和速度到达一定程度后，现场管理人员还要按需调整工期和浇筑任务，避免支护受力不均^[3]。

4.3 地下水与地层扰动条件下的施工行为约束

地下水位高、地层复杂是地铁车站施工普遍面临问题，现场管理人员应当根据实际情况制定合理的施工行为约束，以保障现场施工符合地质条件需求。第一，地下水控制。在具体作业过程中，要落实好降排水和止水措施，明确降排井点数量、开挖井点时间以及需要持续运转的要求，在整个现场作业不能随意停止降排工作或减少降排力度。其次施工管理人员要密切关注现场降排水情况、基坑是否存在漏水等问题，确保基坑内外水位差趋于稳定后，才能进行后续施工，防止降排水强度不足导致基坑内部水位迅速上升带来的土壤塌陷、涌砂风险。第二，地层扰动控制。在施工过程中，要根据技术规范和图纸文件要求执行分层、分段开挖，明确每次开挖的深度及距离，不允许一次性过度开挖，严格依据实际监测结果及土体情况不断调整开挖速度，当发现围护结构出现较大变形或地面出现较大沉降时，应放缓进度或实施弥合措施后再推进施工。第三，要以行为约束保证支护、加固工序有效衔接，明确每次开挖后相应支护施工需及时完成，并严禁长时间存在裸露土体情况。注浆、支撑施工要严格按照设计参数进行，不得简化流程，以防受地下水和地层条件变化影响而出现施工安全事故。

4.4 人员作业组织与交叉施工条件下的安全协调

从地铁施工人员作业组织及交叉施工条件下的安全协调入手，根据一线施工实践，从以下几个方面展开论述：第一，基于现场施工环境合理组织人员作业，即：结合现场具体条件，针对某一时段内或某一小组开展具体工作，合理安排人员，考虑到地铁施工是在地下或者密闭性较强的场所展开，具有活动范围受限与多工种交叉施工特点。所以在施工时需要按照基坑、区间阶段划分不同的区块，并以区块为单元进行人员分配，确保每个小组拥有各自固定的作业场地和范围，避免人员随意流动造成施工混乱。此外，基于工期、人员安全等考量，建议将可能存在危险的流程做到错峰作

业，同时规避高风险工点在同一作业面上同时展开，避免人员拥挤造成的安全隐患^[4]。第二，通过施工交底及现场沟通明确作业重点和配合关系。交底包括施工前的技术交底及现场的安全交底：组织相关技术人员到现场交底，依据当天作业的具体要求告知各班人员作业顺序、需注意的事项，以及相互间需要避让及配合的细节，让作业人员清楚哪些区域可以进入、哪些操作需要提前沟通，在交叉作业期间由现场安全员进行监督。同时在施工期间利用班前会、现场喊话、重点位置设置明显标示牌等方式，做好各工种规定的提醒工作，使应急反应在潜移默化中成为日常的工作习惯，避免因疏忽、沟通不到位或未严格遵照方案执行，引起工人自行违章。第三，根据现场变化及时调整作业组织方式。众所周知，地铁施工受地下水、地层条件及工序进度等因素影响，使原先安排的作业有可能与现场实际情况不匹配。在此背景下，现场管理人员要加强巡查，在充分了解作业面进展、人员密集情况下，依据现场的施工风险判断是否需要调整人数或作业顺序，如暂停局部作业、分段施工或者错峰作业等，防止人员长时间聚集于高风险区。这种根据实际变化调整作业秩序的协调方式，不仅实现了不同工种在小范围内有机协作，还确保施工过程整体的安全可控。

4.5 施工现场应急处置条件的实化与演练

在地铁施工现场，应急处置条件要以“现场能不能用、工人会不会做”去实化、去演练。以下对具体操作步骤进行详细说明：一是将应急处置条件落实到施工工序，分清不同的施工工序所需要的应急处置条件；二是将不同的施工工序结合现场常见风险，使应急预案中晦涩难懂的原则性规定转为可直接使用的操作指引，也就是在现场出现渗水、围护变形、支撑异位、机械伤人等情况时，现场的第一发现者要“怎么做、上报哪里、要怎么拉警戒和处置等”。只有演化应急预案，现场人员才能正确判断“这个条件下应该先干什么，再干什么，由谁来干”；三是在日常施工过程中将相关的应

急演练和工程同步进行，根据正在施工的工序开展针对性演练，并非按照老一套的综合性演练模式，而是要按照具体的施工工艺流程来进行真实的应急情况处置演练，让参加演练的人员掌握如何迅速组织参建人员在真实的应急事件中安全有效地规避伤害，并及时展开处置，使现场集合路线、设备的停止方法、人员的撤离方法一目了然。此外实操演练还包括如何相互配合实施简单的急救和互救等技能。最后，将演练中存在的问题及时运用到施工管理，这样以来，当日施工任务与演练内容相互响应，就拿通讯不畅、工人缺位或者物料归位不正确等问题为例，通过导师制度，可组织人员对现场的布置、各岗位的职责和交接制度等进行调整，这并不仅是一次书面记录，而是通过连贯演练构建完整的处置流程，对提升施工人员的安全管理意识产生积极作用。

5 结语

总而言之，城市轨道交通地铁施工安全管理是一个环环相扣、结合实地情况的系统性管理体系。只有扎根施工一线，从施工阶段的划分、结构稳定性控制、地下水及地层扰动控制、人员组织协调、应急处置措施等方面入手，才能把安全管理要求落到每一道工序、每一个作业环节。实践证明，做好安全管理不是依赖制度来堆砌，而是依靠动态调整、不断核查和加强规范性操作实现。

参考文献

- [1] 王庆伟.城市轨道交通地铁施工安全管理分析[C]//新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集（一）.2025.
- [2] 张龙斌.城市轨道交通工程施工组织管理研究[C]//中国电力企业管理创新实践（2022年）.2024.
- [3] 郭鹿鸣.城市轨道交通地铁施工安全管理探究[J].科海故事博览,2025(3).
- [4] 许立杨.智慧工地系统在地铁施工现场安全管理中的应用研究[J].现代城市轨道交通,2024(6).

Research on Equipment Innovation and System Management of Complex Long Tunnel Foundation Treatment Engineering under Extreme Construction Period

Jian Li

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

A major water diversion project faced extreme constraints in foundation treatment, including complex geological conditions, massive engineering volume (approximately 540,000 meters of consolidation grouting and 250,000 square meters of backfill grouting), and a compressed construction period from 6 to 1.5 years. Traditional construction methods were inefficient, posed high safety risks, and lacked quality control, particularly failing to address the challenge of long-distance slurry transportation averaging over 3 kilometers. The project adopted a systematic approach to drive full-chain innovation, establishing a mechanized collaborative construction system centered on “single-arm hydraulic rock drilling platforms, tracked aerial work platforms for assistance, and mobile automated grouting vehicles.” This system successfully overcame the key technology of stable slurry transportation over ultra-long distances.

Keywords

Water diversion project; Foundation treatment; Extreme construction period; Equipment innovation; Mechanized coordination

极端工期下复杂长隧洞基础处理工程装备革新与系统管理实践研究

李建

中国水利水电第七工程局有限公司，中国·四川成都 610213

摘要

某大型引水工程基础处理面临地质复杂、工程量大（固结灌浆约54万米、回填灌浆约25万平方米）、工期从6年压缩至1.5年的极端约束。传统施工模式效率低、安全风险高、质量可控性差，尤其无法解决平均3公里以上的浆液长距离输送难题。项目以系统思维推动全链革新，构建了以“单臂液压凿岩台车钻孔、履带式登高平台车辅助、移动式自动化灌浆台车注浆”为核心的机械化协同施工体系，并攻克了超长距离浆液稳定输送关键技术。

关键词

引水工程；基础处理；极端工期；装备革新；机械化协同

1 引言

1.1 工程背景与战略意义

某引水工程，是国家着眼于长远发展战略、优化区域水资源配置格局的重大基础设施项目。其隧洞工程规模宏大，地质条件错综复杂，位居世界同类工程前列。在此如此庞大的地下洞室群建设中，基础处理工程，特别是针对围岩加固的固结灌浆和针对衬砌背后脱空填补的回填灌浆，是确保隧洞长期保持结构稳定、抵御高水头压力、防止渗漏危害的基石性技术环节，被业内形象地喻为隧洞工程的“生命线”与“安全阀”。

【作者简介】李建（1983—）男，中国四川乐山人，本科，高级工程师，主要从事水利水电工程施工及管理工作。

1.2 核心问题界定与研究紧迫性

按照初始的、相对合理的施工组织设计，本项目基础处理工程预留的工期约为6年。然而，由于项目前期洞挖开挖遭遇未预见的不良地质体、衬砌混凝土施工受多重因素制约等，关键路径上的前置工序出现了严重滞后。这导致最终

“压茬”传递至基础处理阶段的净有效工期被极端压缩至仅有1.5年。这意味着，日均需完成的灌浆工程量激增至原计划的数倍，施工强度提升了约300%。传统的施工模式——依赖大量人工搭设满堂脚手架或简易钢台车作为作业平台，使用手风钻或轻型潜孔钻进行钻孔，再采用分散、半机械化的方式进行灌浆——在此极端条件下暴露出系统性短板^[1]。

1.3 研究框架与方法论

本研究采用行动研究法与案例研究法相结合。笔者作为项目经理，主导并全程参与了本次技术与管理变革。本文将从“挑战分析 - 体系构建 - 关键技术突破 - 实施成效 - 理

论启示”的逻辑主线展开，旨在系统总结一套经过实践检验的、可在行业内推广的复杂工程解决方案。

2 极端约束下的工程核心挑战与系统性破局思路

2.1 多维约束的深度解析

T (时间) 约束：1.5 年工期是刚性约束，传统方法无法满足线性进度要求。

Q (质量) 约束：隐蔽工程特性要求质量过程必须精准可控、全程可追溯。

S (安全) 约束：高强度、多工序交叉、有限空间作业，安全风险叠加。

C (成本与物流) 约束：需在控制成本前提下，解决平均 3 公里超长距离浆液高性能稳定输送的世界级难题。

2.2 系统性应对思路：以装备革新为引擎驱动全链条重构

项目组确立“以机械化、自动化、信息化装备替代人海战术与落后工法”的核心战略。这不仅是设备的简单更换，更是以装备能力为牵引，对施工工艺、组织流程、管理方法进行全链条、系统性重构的深刻变革。

3 机械化协同施工新体系的系统性构建

3.1 核心装备集群的精准选型与集成优化

3.1.1 钻孔作业革命：单臂液压凿岩台车

选用高性能单臂钻，其技术优势在于：①高效精准：液压系统提供持续大冲击功，钻孔速度是风钻的 5-8 倍，集成激光导向系统，孔位、角度误差控制在厘米级；②灵活自适应：自带行走机构，对作业平台无依赖，可快速转场，适应多变洞线；③低扰动：液压缓冲机制减少对围岩与衬砌的二次扰动。

3.1.2 高空作业平台革新：专用履带式登高平台车

替代满堂脚手架与简易钢台车。其价值体现在：①本质安全：提供符合国家标准的全封闭、带护栏升降平台，彻底消除脚手架坍塌风险；②机动高效：履带行走适应洞内不平地面，展开收起快速，工作面转换效率提升 70% 以上；③人机工效优：为工人提供稳定、宽敞的作业面，降低劳动强度^[2]。

3.1.3 灌浆作业革新：移动式自动化灌浆台车

该设备是质量与效率控制的中枢，集成：①精准制浆系统：基于质量流量计的自动配料与高速搅拌，保证浆液均质性；②智能泵送系统：变频控制大流量灌浆泵，压力、流量无级精确调节；③全参数记录与传输系统：实时采集并无线传输压力、流量、密度、注浆量等数据，形成不可篡改的电子档案。

3.2 关键技术的重大突破：超长距离浆液稳定输送系统

针对平均 3km、最大超 5km 的输送距离，项目开展专项攻关：

浆材配方优化：通过复配高效减水剂、稳定剂和微膨胀剂，研发出低粘度、高分散性、低析水率、长稳定时间($\geq 4\text{h}$)的专用灌浆材料。

输送系统设计：采用“大功率高压(30MPa)柱塞泵 +

主输送钢管”的配置。通过水力计算，确定最优管径（减少摩阻）与泵压，并在中途设置中转站。

在线监测与防堵控制：在管道关键节点布设压力与流量传感器，建立“压力 - 流量 - 时间”关联模型。系统可实时诊断管路状态，一旦出现异常压降（预示可能堵管），自动预警并启动反冲洗程序。

管路维护标准化：制定严格的“施工作业后全线冲洗、定期全线巡查、关键阀门备品备件现场储备”制度，确保输送系统可靠性超过 99%。

3.3 施工组织与管理系统的深度协同重构

先进的装备和技术必须嵌入优化的组织与管理框架中，才能发挥最大效能。

3.3.1 基于流水施工的工艺流程再造

打破了传统“一孔一钻一灌”的串行作业模式，创新性地建立了“分区流水、钻灌分离、专业协作”的新型工艺流程。

分区管理：将数十公里长的隧洞划分为若干个合理的施工段（如每 500-1000 米为一个管理单元）。

流水作业：在每个施工段内，组织“单臂液压凿岩台车集群”进行突击钻孔，形成钻孔作业面；钻孔完成后，由“登高平台车班组”快速跟进，负责清孔、安装灌浆塞等准备工作；最后，由“移动式自动化灌浆台车梯队”进行连续、循环的注浆作业。三个专业班组像流水线一样依次推进，互不干扰又紧密衔接，实现了空间占满、时间连续的高效施工。

3.3.2 全生命周期精益成本管控体系

新体系虽然初期设备投入较大（约比传统模式增加 25%），但通过精细化管理实现了全生命周期的成本最优。

设备资产效能最大化：推行设备全生命周期成本管理，通过加强预防性维护、提高单台设备利用率、降低故障停机时间，来快速摊薄较高的固定折旧成本。

数字化物料消耗精准控制：自动化灌浆系统实现了浆液配比的精确控制和注入量的准确计量，将传统模式下因人工操作误差、管路残留、跑冒滴漏造成的材料损耗率从大约 15% 显著降低至 5% 以内，仅此一项就节约了大量材料成本。

隐性成本与风险成本规避：大幅减少了脚手架搭拆、大量人工投入等直接成本；更重要的是，通过保障工期、提升质量、确保安全，完全避免了因工期延误可能产生的巨额违约金、质量缺陷处理的天价费用以及安全事故带来的直接与间接损失，项目的最终利润率达到了预期目标，实现了经济效益与社会效益的统一。

4 实施成效的多维度综合评估

4.1 施工效率的量化跃升

钻孔效率：单臂液压凿岩台车平均台班效率稳定在 350-400 延米，是传统潜孔钻设备效率的 4-5 倍，实现了钻孔工序的“提速”。

灌浆效率：自动化灌浆台车可实现多孔连续、循环作业，单台设备日灌浆量较传统分散灌浆方式提升 3 倍以上，实现了灌浆工序的“增效”。

整体工期保障：凭借各工序效率的倍增和流水化组织的无缝衔接，项目成功在极端压缩的1.5年有效工期内，完成了全部54万米固结灌浆和25万平方米回填灌浆的施工任务，所有关键路径节点均按期或提前完成，节点按期完成率达到100%。

4.2 工程质量的卓越表现

过程质量100%受控：自动化灌浆系统记录的灌浆压力、流量、配比等关键参数合规率达到100%，杜绝了人为篡改和记录错误，实现了过程质量的数字化精准管控。

实体质量优良率高企：工程完成后，通过系统性的检查孔压水试验检测，所有测试段的透水率（吕荣值）均优于设计标准。最终评定的单元工程优良率高达98.5%，远超合同要求的质量目标。

质量可追溯性革命：项目生成了超过50万条结构化的灌浆过程数据链，任何一孔、一段的施工详情均可随时调阅。一旦出现疑问，可在分钟级时间内精准定位到施工时间、操作人员、设备参数，实现了质量问题溯源从“大海捞针”到“精准定位”的根本转变。

4.3 安全与综合效益的全面丰收

安全绩效创优：在整个项目建设期间，得益于登高平台车的本质安全替代和现场作业人员的减少，未发生一起机械伤害、高空坠落等可记录的安全事故，百万工时伤害率(LTIFR)为零，创造了在极端高强度施工条件下的安全奇迹。

经济效益显著：尽管初期设备投资增加，但通过节省巨额脚手架费用（约1200万元）、减少直接人工成本约30%、大幅降低材料损耗，并确保了工期零延误，项目整体成本可控，最终利润率符合预期，证明了高技术投入带来的高价值回报。

管理效益提升：现场施工人员总数减少了约40%，将管理人员从以往疲于奔命的人员调度、质量检查、安全监督等繁琐事务中解放出来，使其能够更专注于施工技术的持续优化、重大风险的超前预控和更高层次的资源协调，提升了项目管理的整体效能与战略价值。

5 讨论与理论启示

5.1 对项目管理理论的延伸思考

本项目的成功实践，对经典的项目管理“铁三角”理论（时间、成本、质量相互制约）在超大型复杂工程中的应用提供了新的注解。在极端约束条件下，传统的平衡往往被打破，陷入“按下葫芦浮起瓢”的困境。本项目通过主动引入并强化“技术能力”作为第四个核心维度，以革命性的装备技术创新为支点，撬动了整个项目系统的升级，不仅满足了极端工期要求，同时实现了质量、安全、成本的协同优化。这验证了在当代复杂工程管理中，技术创新能力不再是辅助性因素，而可以成为驱动项目成功、打破传统约束的核心主导变量和战略资源。

5.2 对行业技术演进方向的示范意义

本案例是中国长隧洞及类似地下工程基础处理施工技术从“半机械化、劳动密集型”向“高度机械化、自动化、

信息化集成”转型升级的一个标志性实践。它不仅仅提供了几台先进设备，而是输出了一套完整的、经过验证的“技术包”：包括高性能专用施工装备的选型集成方案、特殊工况下的材料研发路径、智能化过程控制系统、以及与之匹配的协同施工组织管理模式。这为行业应对未来更复杂、更艰巨的工程建设任务提供了可借鉴的模板，具有重要的行业示范与推广价值。

5.3 创新体系推广的适应性分析

本研究总结的机械化协同施工体系，其优势在长大深埋隧洞、工期异常紧张、质量与安全要求极高的基础处理工程中尤为突出。在向其他工程推广时，需进行专业的适应性分析，不能简单照搬。应结合具体工程的规模体量、地质水文条件、投资预算、设备资源可获得性等因素，对装备配置规格、输送系统方案、施工分区大小等进行调整优化。然而，该体系所蕴含的核心思想——即用系统性的装备与技术解决方案，去应对系统性的工程挑战，并通过管理重构实现“硬技术”与“软管理”的深度融合——具有普遍的指导意义和适用性^[3]。

5.4 未来研究与技术展望

基于本次实践，未来的研究与应用可以朝着更智能、更绿色、更数字化的方向深化：

装备智能化升级：探索基于随钻测量、地质雷达等超前地质预报信息，开发自适应钻孔与灌浆参数的AI决策支持系统，实现“感知-决策-执行”的闭环智能施工。

材料绿色化与高性能化：进一步研发工业固废资源化的绿色灌浆材料，以及适用于更高压力、更复杂地质条件的高性能、多功能灌浆材料。

全过程数字孪生：构建从设计、施工到运维的全生命周期数字孪生模型，在虚拟空间中预先进行施工模拟与优化，实现真正的智慧建造与精益管理。

6 结论

面对某引水工程基础处理项目极端工期、复杂地质、超大工程量与超长物流距离的四重严峻挑战，项目团队以巨大的勇气和智慧，摒弃传统路径依赖，实施了一场以装备集群革新为引领的深刻技术与管理变革。通过构建“单臂液压凿岩台车钻孔、专用登高平台车辅助、移动式自动化灌浆台车注浆”的机械化协同施工体系，并攻克了超长距离浆液稳定输送关键技术，成功实现了施工效率的倍增、工程质量的卓越、安全生产的零事故以及综合成本的有效控制。本研究表明，在重大基础设施工程领域，面对前所未有的挑战时，以系统性创新思维，推动技术创新与管理创新的双轮驱动，是突破常规约束、实现多目标优化的根本途径。

参考文献

- [1] 汪晓峰, 周厚贵. 大型隧洞工程水泥灌浆技术现状与发展趋势[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 1-10.
- [2] 张可能, 刘志强. 复杂地质条件下超长隧洞施工关键技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 陈政新, 等. 自动化灌浆记录与监控系统研究及应用[J]. 水力发电, 2021, 47(5): 88-92.

Innovation in Strengthening Technologies and Construction Techniques for Existing Buildings in Old Residential Area Renovation

Yujie Qiao

Ningxia Yucheng Construction Engineering Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750001, China

Abstract

With the acceleration of urbanization, many old residential areas built in the last century have exposed prominent problems such as structural aging, weak seismic capacity, and functional degradation. The reinforcement and renovation of existing buildings have become an important task to improve urban livability, ensure residents' safety, and achieve sustainable renewal. This paper sorts out the mainstream technical routes for reinforcing existing buildings in old residential area renovation, and focuses on discussing reinforcement methods such as external steel wrapping, carbon fiber composite materials, steel mesh shotcrete, and planting bars with adhesive steel, as well as innovations in construction techniques, combined with engineering examples. From the perspectives of construction management, material selection, quality control, and information management, the paper analyzes the role of technological innovation in improving reinforcement efficiency and safety. Through case comparisons, the applicable conditions and advantages and disadvantages of different reinforcement schemes are summarized. The research shows that scientific and reasonable technical selection and process innovation are key to improving the quality and efficiency of renovation and promoting high-quality renewal of existing urban buildings.

Keywords

Old residential area; Existing building; Structural reinforcement; Construction technique; Technological innovation; Urban renewal

老旧小区改造中既有建筑加固技术与施工工艺创新

乔羽捷

宁夏雨成建设工程有限公司，中国·宁夏 银川 750001

摘要

随着城市化进程加快，众多上世纪建成的老旧小区暴露出结构老化、抗震能力弱和功能退化等突出问题。既有建筑的加固与改造已成为提升城市宜居性、保障居民安全与实现可持续更新的重要任务。本文梳理了老旧小区改造中既有建筑加固的主流技术路线，结合工程实例，重点探讨了外包钢、碳纤维复合材料、钢筋网喷射混凝土、植筋粘钢等加固方法及施工工艺创新，并从施工管理、材料选择、质量控制、信息化管理等角度分析工艺创新对加固效率和安全性的提升作用。通过案例对比，总结不同加固方案的适用条件与优缺点。研究表明，科学合理的技术选择和工艺创新是提升改造质量与效率、推动城市既有建筑高质量更新的关键。

关键词

老旧小区；既有建筑；结构加固；施工工艺；技术创新；城市更新

1 引言

近年来，老旧小区改造已成为我国城市更新和民生工程的重点内容。大量既有建筑因建设年代久远、设计标准低、维护管理不到位等原因，普遍存在结构安全隐患和功能落后等问题。为满足人民日益增长的美好生活需要，提升城市空间品质，既有建筑的科学加固与功能提升显得尤为重要。与新建工程不同，既有建筑加固面临着原结构复杂、住户干扰

大、施工场地有限等诸多实际挑战，这对加固技术与施工工艺提出了更高要求。本文将从加固技术发展现状、典型施工工艺创新、质量与安全保障、智能化管理等角度，系统分析老旧小区改造中既有建筑加固的主要问题及其解决路径，旨在为城市存量建筑改造提供理论基础与实践借鉴。

2 老旧小区既有建筑加固的必要性与技术发展现状

2.1 老旧小区既有建筑加固的社会背景与现实意义

随着我国城市住房存量规模的不断扩大，老旧小区成为城市空间结构的重要组成部分。大量建成于上世纪六七十年代的老旧小区，由于建设标准较低，存在墙体开裂、屋面漏水、管道老化等问题，严重影响居民的生活质量。同时，老旧小区的基础设施老化，如供水、排水、供电、供气等设施，无法满足现代生活需求。因此，老旧小区改造势在必行，既有利于改善居民居住环境，也有利于提升城市整体形象。

【作者简介】乔羽捷（2000-），女，中国宁夏银川人，本科，初级，从事土木工程及项目管理研究。

年代及之前的住宅楼，由于年代久远、标准偏低、抗震性能不足、建筑材料老化及长期超负荷使用，导致结构承载力下降和安全隐患突出。老旧小区居民多为弱势群体，对居住安全与生活品质要求持续提高。通过科学加固提升既有建筑的安全性与耐久性，实现对城市空间的再利用，为城市高质量发展提供坚实基础。

2.2 既有建筑结构安全问题的典型表现及成因

老旧小区建筑结构问题主要表现在混凝土劣化、钢筋锈蚀、楼板裂缝、基础沉降、节点连接薄弱等方面。结构病害的形成原因多样，包括设计荷载标准偏低、使用功能变化、施工质量波动、环境侵蚀影响及维护管理滞后等。部分建筑在抗震、抗风、抗冲击等极端作用下存在明显短板，且缺乏有效的结构加固措施。此外，随着居民对楼房扩容、改造需求的增加，部分业主自发改造导致结构体系被破坏，进一步加剧了安全隐患。对于老旧小区而言，科学诊断结构病害、因地制宜选择加固技术，是保障工程质量与居民安全的基础环节。

2.3 加固技术发展与政策驱动的现状分析

近年来，随着《建筑结构加固设计规范》《既有建筑鉴定与加固通用规范》等标准的出台，既有建筑加固逐步走向规范化、科学化。外包钢加固、碳纤维布加固、钢板粘贴加固、增设支撑构件、植筋加固及混凝土喷射等多种技术日益成熟。各地通过财政补贴、税收优惠、产权激励等政策措施，积极引导老旧小区加固工程的实施。部分城市还结合智慧城市建设，推动既有建筑加固的数字化管理和智能化升级。总体来看，既有建筑加固已形成多元化、集成化、智能化的发展趋势，为城市更新提供了坚实的技术支撑和政策保障。

3 常用加固技术体系及其工程适应性分析

3.1 外包钢加固与钢板粘贴技术

外包钢加固法是对承重柱、梁等结构构件外部包裹钢板并通过高强螺栓或焊接固定，以提升构件的承载力和延性。该技术操作简便，适用于提升竖向承重力不足、节点薄弱和地震易损结构的加固。钢板粘贴加固则以高强结构胶将钢板粘贴于混凝土表面，增强其抗弯、抗剪和抗压能力。两者常结合应用于老旧混凝土结构、楼梯间梁柱、剪力墙等薄弱部位。实际工程中，外包钢和粘贴钢板加固可显著提升结构承载力，工期短、干扰小，适合居住区有限场地施工。缺点在于耐久性受环境影响较大，需做好防腐蚀处理，部分节点细部施工难度较高。综合来看，外包钢与钢板粘贴技术是当前老旧小区加固的主流手段，具有较高推广应用价值。

3.2 碳纤维复合材料加固的原理与优势

碳纤维复合材料因其高强度、轻质量、耐腐蚀等优点，在既有建筑加固中得到广泛应用。碳纤维布加固适用于受弯、受剪、受拉等多类承载需求，通过环氧树脂将碳纤维布粘贴于混凝土表面，可大幅提升构件承载力与延性，减少加

固后自重和体积增量。其施工简便、成型美观，对原有结构破坏小，特别适合空间受限和对美观有要求的改造项目。碳纤维加固也便于后期检测和维护，适用于梁、板、柱、剪力墙等多种结构类型。限制因素在于材料成本较高，对施工环境和工人操作技术要求较高。随着材料技术进步和施工规范完善，碳纤维加固将持续拓展其在老旧小区改造中的应用领域。

3.3 钢筋网喷射混凝土及植筋加固技术

钢筋网喷射混凝土技术主要用于修复墙体、楼板及楼梯等表面结构病害。该技术通过设置钢筋网片并喷射高强混凝土层，提升构件整体性和耐久性。喷射混凝土可快速覆盖大面积结构面，施工周期短、工艺成熟，特别适合大规模病害修复和抗震加固。植筋加固则通过钻孔、清孔、灌注胶结材料，将新钢筋锚固于原有混凝土内，恢复和提升连接节点的受力性能。两者可根据不同结构病害进行灵活组合，实现力学性能与耐久性能的双重提升。实际应用中，需重视工艺细节与材料选用，确保锚固效果和界面粘结强度，为后续改造施工创造有利条件。

4 施工工艺创新与现场管理优化

4.1 信息化管理与智能检测技术的引入

随着老旧小区加固项目体量的持续增加，传统施工管理模式已难以满足高质量、精细化的工程需求。信息化管理和智能检测技术的广泛应用，为加固工程的全流程控制和科学决策提供了坚实基础。通过BIM（建筑信息模型）技术建立既有建筑的三维数字模型，不仅能够对结构现状进行准确还原，还能模拟不同加固方案的空间布局与工艺流程，有效避免因设计与实际不符导致的返工和浪费。智能传感器及无损检测设备的集成部署，使结构内部应力、变形、裂缝及混凝土强度等关键参数实现实时在线监控。检测数据经信息化平台自动采集、存储与分析，实现对工程进度、材料消耗、工序衔接、施工质量等多维信息的集成管理和动态预警，为项目管理者及时调整资源配置和优化工艺流程提供数据支持。全过程的信息化管理不仅提升了加固工程的透明度和可追溯性，还促进了施工工艺从传统手工作业向数字化、智能化方向转型，为实现“智慧工地”奠定了技术基础。随着物联网、云计算、大数据等前沿信息技术的持续发展，老旧小区加固项目的精细化管控和智能决策能力将进一步提升，助力工程质量与施工效率的同步提升。

4.2 绿色建造与节能环保技术创新

绿色建造理念的全面渗透，推动老旧小区加固工程在工艺、材料和管理等多个环节实现节能降耗与环保创新。当前，加固材料优先选用高强度、低碳排放、可再生资源型产品，如高性能混凝土、环保型结构胶及可回收利用的金属材料等。这些新型材料不仅显著提升结构的耐久性和环保性能，也减少了对环境的负面影响。施工现场严格落实围挡隔离、降噪降尘及废弃物分类管理措施，采用静音设备、喷雾

降尘、绿色防护网等措施最大限度降低对居民日常生活的干扰。同时，注重施工废弃物的资源化利用，如废弃钢筋、混凝土碎块等进行分拣、回收和再利用，减少建筑垃圾排放。工艺流程上，通过优化工序衔接，避免高峰期大面积动工，合理安排昼夜施工时间，进一步提升施工现场的生态友好性。绿色建造不仅响应了国家“双碳”战略目标和可持续发展要求，也提升了加固工程的社会认同度和业主满意度。未来，绿色施工技术和环保材料的创新应用将成为老旧小区既有建筑加固领域的重要发展方向，为城市更新和生态文明建设提供更强动力。

4.3 复杂环境下的精细化施工与安全保障措施

老旧小区改造工程往往面临空间受限、住户密集、交通不畅等多重复杂环境，精细化施工与全方位安全保障成为项目顺利实施的核心要素。施工组织需充分结合现场实际，通过科学划分作业区、合理安排工序衔接，减少对居民生活的影响和施工干扰。加固施工与临时支护同步推进，有效防范结构变形、下沉或倒塌等安全风险。在高空、有限空间及复杂节点部位作业时，必须制定专项安全技术措施，完善安全防护设施，加强施工人员的岗前培训和应急演练，定期开展隐患排查与动态风险评估。项目团队应与社区、物业建立高效的沟通与协作机制，及时通报施工进展和风险防控措施，完善应急预案，确保突发事件能迅速响应与有效处置。通过精细化管理与规范化流程，既可显著提升工程安全水平，也为保障居民正常生活和社区和谐稳定创造有利条件。高标准的安全管理不仅体现工程管理者的社会责任，也为老旧小区加固工程的高质量发展打下坚实基础。

5 典型工程案例分析与经验总结

5.1 结构体系加固与功能提升的综合改造案例

以某上世纪80年代建成的多层住宅楼为例，该项目原有结构为砖混体系，存在楼板裂缝、墙体开裂、节点脱空等问题。通过外包钢与碳纤维布加固相结合，增强了主要承重构件的抗弯和抗剪性能，喷射混凝土修复大面积墙面病害，植筋加固解决了节点薄弱难题。加固后通过内外装饰升级、管线优化，实现了建筑结构安全性与功能性的双提升。项目中信息化管理平台贯穿全流程，提升了施工组织效率，精细化管理降低了扰民程度。改造效果良好，居民满意度高，具备良好的示范推广意义。

5.2 加固施工工艺创新与难点攻克实例

某老旧小区加固工程受制于场地狭小、地下管线密布、

邻近高层建筑影响，传统加固方法难以全面实施。项目团队结合BIM技术与无人机巡检，对结构受力薄弱部位进行精确诊断，采用高强轻质复合材料加固，既减少了施工周期，也降低了对原结构的破坏。全流程引入智能监测与移动管理终端，实现数据实时共享和工程动态预警。项目过程中通过与社区多方协调，合理安排施工时段，最大程度减少对居民日常生活的影响。此类工艺创新与管理优化，有效提升了加固施工的适应性和安全性，为类似复杂环境下的改造工程积累了宝贵经验。

5.3 多技术集成与工程全周期质量管控实践

针对某大型老旧小区分批次加固改造项目，工程采用外包钢、碳纤维、植筋、喷射混凝土等多技术集成，依据建筑结构状况与功能需求灵活组合。项目引入第三方质量检测，结合全过程BIM管理与物联网智能监控，对材料进场、工序衔接、节点施工和成品保护进行全周期动态管控。项目后评估显示，多技术集成与信息化质量管理有效提升了加固工程的一致性、可追溯性与耐久性，减少了返工和质量事故，保障了工程整体效益与长远运行安全。通过典型案例分析，总结出多工艺集成、信息化管理和全周期质量控制是提升既有建筑加固工程成功率的重要保障。

6 结语

老旧小区改造中既有建筑加固技术与施工工艺创新，是城市存量建筑高质量更新和可持续发展的重要抓手。通过科学诊断结构病害、因地制宜选择加固方案、集成应用多种技术体系，并结合信息化管理与绿色建造理念，能够有效提升加固工程的安全性、耐久性与施工效率。面对城市更新的复杂需求，既有建筑加固要紧密结合城市规划与社区发展，注重居民参与与社会协同，实现工程与社会环境的和谐统一。未来，应持续推动加固技术创新与标准化进程，深化智能化、绿色化施工工艺研究，加强多学科协作与行业交流，提升工程全周期管理水平。通过多元化创新实践，既有建筑加固将在城市更新、灾害防御和宜居环境提升等领域展现更大价值，为城市的可持续发展提供坚实基础和广阔空间。

参考文献

- [1] 杜月胜.既有建筑居住环境提升工程综合技术的研究——以老旧小区改造为例[J].居业,2025,(06):128-130.
- [2] 张成龙,许明华.老旧小区建筑外墙加固与保温改造施工工艺研究[J].住宅与房地产,2025,(16):108-110.
- [3] 于欢.基于地基基础加固的老旧小区加装电梯改造研究[J].普洱学院学报,2022,38(03):28-30.

Research on the Application of Landscape Design Mode and Technology under the Guidance of Low-carbon Concept

Guodong Fu

Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd. Chengdu Branch, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Against the backdrop of the continuous advancement of the “dual carbon” goals and the accelerated transformation toward urban green development, landscape design, as an integral component of urban ecosystems, has increasingly taken on low-carbon attributes as a key criterion for evaluating design quality and overall value. Focusing on landscape design models and technical applications guided by low-carbon principles, this study conducts a systematic examination of conceptual shifts in landscape design, adjustments in spatial organization, and the selection of technical pathways, clarifying the inherent logic and functional mechanisms through which low-carbon concepts are embedded in landscape planning, design, and implementation. By integrating design approaches centered on ecological priority, resource conservation, and system coordination, the study analyzes low-carbon plant configuration strategies, providing theoretical support and practical references for enhancing emission reduction performance, ecological service capacity, and the sustainable development level of landscape design.

Keywords

low-carbon concept; landscape design; design model; technical application; sustainable development

低碳理念导向下园林设计模式与技术应用研究

付国冬

武汉市市政工程设计研究院有限责任公司成都分公司，中国·四川成都 610000

摘要

在“双碳”目标持续推进与城市绿色转型加速背景下，园林设计作为城市生态系统的重要组成部分，其低碳属性逐渐成为衡量设计水平与综合价值的重要尺度。围绕低碳理念导向下园林设计模式与技术应用问题，从园林设计理念转变、空间组织方式调整及技术路径选择等方面展开系统梳理，阐明低碳理念在园林规划、设计与实施过程中的内在逻辑与作用机制。本文通过整合生态优先、资源节约与系统协同等设计思路，分析低碳植物配置，为提升园林设计的减排效能、生态服务能力与可持续发展水平提供理论支撑与实践参考。

关键词

低碳理念；园林设计；设计模式；技术应用；可持续发展

1 引言

随着城市建设规模持续扩大，能源消耗与碳排放问题日益凸显，传统园林设计在资源利用效率与生态响应能力方面逐渐暴露出局限性。园林作为连接自然生态与城市空间的重要载体，其设计方式不仅影响景观形态与使用功能，也直接关系到城市生态系统的稳定性与碳循环过程。在低碳发展目标引导下，园林设计亟需从单一景观营造转向兼顾生态效益与减排目标的综合体系构建。通过引入低碳理念，优化空间结构、技术配置与运行方式，有助于降低园林建设与维护过程中的能源消耗与环境负荷。基于此，对低碳理念导向下

园林设计模式与技术应用进行系统研究，对于推动园林设计理念更新、促进城市生态环境质量提升具有现实意义。

2 低碳理念导向下园林设计的理论基础与价值内涵

2.1 低碳发展目标对园林设计理念的内在要求

低碳发展目标对园林设计理念提出了系统性与前瞻性的内在要求，园林设计不再局限于景观审美与休闲功能塑造，而是被赋予降低资源消耗、减少碳排放与提升生态服务能力的综合使命。在设计理念层面，需要将碳排放约束纳入园林规划的核心考量，通过全过程视角审视园林从建设到运行的能源投入与环境反馈关系。低碳目标要求设计活动尊重自然演替规律，强调材料选择、结构构成与空间组织对能源使用效率的影响，使园林空间在满足使用需求的同时具备良

【作者简介】付国冬（1983—），女，中国四川达州人，本科，高级工程师，从事市政园林规划设计研究。

好的环境适应性。通过理念层面的转变，园林设计能够在城市发展过程中发挥调节碳循环、缓解环境压力的重要作用。

2.2 园林系统在城市低碳转型中的功能定位

在城市低碳转型进程中，园林系统承担着生态调节与环境缓冲的关键功能，其作用已超越传统绿化配置范畴，成为城市碳管理体系的重要组成部分。园林空间通过植被固碳、微气候调节及雨洪调蓄等方式，对城市能源消耗结构产生间接影响，并在改善人居环境质量方面形成长期效应。合理构建园林系统，有助于增强城市生态系统的自我调节能力，降低高密度开发带来的环境负荷。园林系统在空间尺度上连接自然要素与城市建成区，在功能层面整合生态、景观与社会需求，为城市低碳转型提供稳定的生态支撑与空间保障。

2.3 低碳理念融入园林设计的基本原则

低碳理念融入园林设计应遵循以生态效益为导向、以资源节约为核心的基本原则，强调设计行为对环境影响的可控性与可持续性。在原则层面，需要关注设计方案在全生命周期内的能耗水平与维护成本，避免高消耗、高排放的景观形式。园林设计应注重因地制宜，根据区域自然条件与资源禀赋确定适宜的空间结构与技术路径，提升设计的环境适配度。通过坚持简约、耐久与高效的设计取向，使园林空间在长期运行中保持稳定的低碳表现，形成兼顾生态价值与社会效益的设计体系^[1]。

3 低碳理念导向下园林空间设计模式构建

3.1 基于碳减排目标的园林空间结构优化模式

以碳减排目标为导向的园林空间结构优化模式，强调空间组织对能源利用效率与生态过程的引导作用。在结构设计中，通过合理控制园林用地布局与空间尺度，减少不必要的硬质铺装比例，增强绿地系统的连续性与完整性，有助于提升整体固碳能力。空间结构优化还体现在功能分区的科学配置上，使生态保育、公共活动与景观展示形成协调关系，降低重复建设与资源浪费。通过结构层面的优化调整，园林空间能够在满足多样化使用需求的基础上，实现碳排放水平的有效控制。

3.2 面向生态循环的园林功能复合配置模式

面向生态循环的园林功能复合配置模式，注重不同功能单元之间的协同关系，通过复合化设计提升资源利用效率。园林空间不再采用单一功能分区方式，而是将生态修复、休闲活动与环境调节等功能进行有机整合，使空间在使用过程中形成良性循环。功能复合配置有助于减少重复设施建设，降低材料与能源消耗，同时增强园林系统对外部环境变化的适应能力。通过构建多功能叠加的园林空间结构，可以有效提升园林设计在低碳转型中的综合效益与运行稳定性。

3.3 顺应自然过程的园林整体布局模式

顺应自然过程的园林整体布局模式强调尊重地形地貌、

水文条件与植被演替规律，将自然要素作为空间组织的重要依据。在布局过程中，通过保留原有生态格局，减少大规模人工改造，有助于降低建设阶段的能源投入与生态扰动。整体布局注重空间的开放性与渗透性，使自然过程在园林系统中得以延续，从而增强生态系统的自我调节能力。通过顺应自然的布局方式，园林设计能够在长期运行中保持较低的资源消耗水平，实现低碳目标与景观品质的协同提升。

4 低碳理念导向下园林设计关键技术路径

4.1 低碳植物配置与本土植被应用技术

低碳植物配置强调以生态适应性与长期稳定性为导向，通过科学选择植物种类与配置方式降低园林系统运行过程中的能耗与维护强度。本土植被在气候适应、水分需求及病虫害抵御方面具有明显优势，其应用能够减少人工养护投入与外源资源依赖，降低整体碳排放水平。植物配置过程中注重群落结构的合理构建，通过乔灌草多层次组合提升生态系统的自我调节能力，使园林空间在季相变化与生长演替中保持良好景观效果。低碳植物配置技术不仅提升了园林的生态服务功能，也为实现景观长期低碳运行提供了稳定基础^[2]。

4.2 节能型园林水系统与雨水利用技术

节能型园林水系统以提高水资源利用效率为核心，通过优化水循环路径与减少能耗实现低碳目标。在园林设计中，将雨水收集、下渗与再利用过程纳入整体水系统构建，有助于降低对外部水源与能源的依赖。雨水利用技术通过地形引导与设施配置，使降水在园林空间内完成调蓄与净化，满足景观灌溉与生态补水需求。节能型水系统强调系统运行的稳定性与适应性，在减少运行成本的同时，增强园林对极端气候条件的应对能力，从而提升整体环境效益。

4.3 园林硬质景观低碳材料与结构技术

园林硬质景观的低碳材料与结构技术着重控制建设阶段的资源消耗与环境负荷，通过材料选择与结构优化实现减排目标。低碳材料在生产能耗、使用寿命及可再利用性方面具有显著优势，其应用能够有效降低园林建造过程中的碳排放强度。结构技术层面强调简约化与模块化设计，减少复杂构造带来的材料浪费与施工能耗。通过合理控制硬质景观比例，使其与绿地系统形成协调关系，有助于提升园林整体的生态表现与低碳属性。

5 低碳理念导向下园林设计运行与管理技术应用

5.1 园林建造阶段的低碳施工技术应用

园林建造阶段是项目能源消耗与碳排放最为集中的时期，其施工方式与管理水平直接影响整体低碳目标的实现程度。低碳施工技术的应用贯穿施工组织、工序安排与现场管理全过程，通过系统化设计降低单位工程量的能耗强度。在施工组织层面，合理统筹土方调配、工序衔接与设备使用频次，通过强化现场规范化操作与过程控制，减少临时性调

整带来的能源损耗。低碳施工技术并非单一技术措施的简单叠加，而是通过管理优化与技术协同，实现施工过程能耗水平的整体控制。

5.2 园林养护阶段的节能减排管理技术

园林养护阶段具有周期长、持续性强的特点，其运行能耗在园林全生命周期中占据重要比重。节能减排管理技术的核心在于通过科学管理降低长期运行过程中不必要的能源与资源投入。养护管理应以植物生长特性与生态需求为依据，减少高频、高强度的人为干预，避免因管理方式粗放导致能耗持续累积。通过优化灌溉、修剪与补植等养护环节的管理节奏，使资源投入与实际需求保持动态匹配，有助于降低水、电及人工消耗强度。节能减排管理技术强调养护行为的精细化与标准化，通过规范操作流程，提高单位投入所产生的生态与景观效益。

5.3 园林运行过程的碳效能监测与调控技术

在园林运行过程中，引入碳效能监测与调控技术，是实现低碳管理由经验判断向数据支撑转变的重要手段。通过对能耗结构、运行强度及生态效益等指标的持续监测，可以系统掌握园林运行状态及其碳排放变化特征，为管理决策提供客观依据。碳效能监测并非单纯的数据采集，而是围绕关键运行环节形成动态识别机制，及时发现能耗异常与管理偏差。在此基础上，通过调控技术对运行方式进行适应性调整，使园林系统在不同季节、不同使用条件下保持合理的资源消耗水平。监测与调控的协同应用，有助于提升园林运行管理的前瞻性与精准性，避免过度维护或资源配置失衡。

6 低碳理念导向下园林设计综合效益评估与优化

6.1 园林设计低碳效益评价指标体系构建

园林设计低碳效益评价指标体系的构建，应以定量分析为基础，围绕碳排放控制、资源利用效率与生态服务能力形成多维度评价结构。在碳排放层面，可将园林建设与运行全过程纳入核算范围，单位面积年均碳排放强度控制在 $0.8 \sim 1.5 \text{ t CO}_2/\text{ha} \cdot \text{a}$ 区间，以反映设计方案对减排目标的响应程度。在资源利用层面，引入能源消耗强度指标，将园林运行阶段综合能耗维持在 $12 \sim 18 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$ ，同时设置水资源利用效率指标，使雨水回用比例稳定在 $35\% \sim 55\%$ 。在生态效益层面，可通过植被覆盖率 $60\% \sim 75\%$ 、年均固碳量 $5.0 \sim 9.0 \text{ t CO}_2/\text{ha}$ 等参数衡量园林系统对碳汇功能的贡献^[3]。通过对上述指标的综合权重配置，使评价体系既能反映低碳技术应用效果，又能体现园林设计在生态与社会层面的综合价值。

6.2 园林设计技术应用的减排效果分析

园林设计技术应用的减排效果体现在不同技术环节对

碳排放结构的持续影响之中。低碳植物配置技术在长期运行中可显著降低养护阶段能耗，当本土植物应用比例提高至70%以上时，人工灌溉与施肥频次可减少30%~45%，相应降低养护能耗约 $6 \sim 8 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$ 。节能型水系统投入使用后，园林年均外源供水量可由 $2200 \sim 2500 \text{ m}^3/\text{ha}$ 降至 $1400 \sim 1700 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，配套设施运行电耗下降18%~25%。在建造阶段，低碳材料与简化结构技术使单位造价碳排放由 $1.9 \text{ t CO}_2/\text{万元}$ 降低至 $1.3 \sim 1.5 \text{ t CO}_2/\text{万元}$ 。多项技术协同作用下，园林项目全生命周期综合减排率可稳定在28%~40%，体现出技术路径在低碳目标实现中的实际成效。

6.3 园林低碳设计模式的持续优化路径

园林低碳设计模式的持续优化，需要依托量化评估结果对空间结构、技术配置与运行管理进行动态调整。在空间层面，将绿地连续度指数组提升至0.65以上，可使区域微气候降温幅度达到 $1.2 \sim 2.0^\circ\text{C}$ ，间接降低周边建筑能耗约5%~8%。在技术层面，通过优化植物群落结构，使乔灌草比例保持在4:3:3左右，有助于将单位面积固碳效率提高10%~16%。在管理层面，引入精细化调控措施后，当智能管理覆盖率达到70%时，园林年均能耗可再下降12%~18%^[4]。通过持续跟踪关键数据并进行反馈修正，低碳设计模式能够在运行过程中不断完善，实现减排效益、生态质量与景观功能的协同提升。

7 结语

低碳理念导向下的园林设计，是顺应城市绿色转型与生态文明建设要求的重要实践方向。通过将低碳目标系统融入园林规划、空间构建、技术应用及运行管理全过程，园林设计在降低资源消耗与碳排放的同时，有效提升了生态服务功能与环境韧性水平。研究表明，合理的设计模式与技术路径能够在保障景观品质与使用功能的前提下，实现园林系统减排效益与运行效率的同步提升。随着相关技术的不断完善与管理手段的持续优化，低碳园林设计将在城市可持续发展进程中发挥更加稳定而长效的支撑作用，为构建人与自然协调共生的城市环境奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 季晓蕾.基于低碳理念的风景园林景观设计分析[J].居舍,2025,(28):126-128.
- [2] 闫海焦.风景园林建设中低碳环保理念的贯彻与实施[J].中国林业产业,2025,(06):119-120.
- [3] 王琢.低碳生态技术在园林景观设计中的应用与实践[A].2025智慧设计与建造经验交流会论文集[C].中国智慧工程研究会:2025:76-78.
- [4] 加强园林绿化低碳新材料新技术推广应用[J].北京观察,2025,(06):17.

Construction Application and Quality Control of Green Mining Technology in Mining engineering

Jianxiong Liu

Shanxi Xinzhou Shenda Liangjia Moraine Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 036500, China

Abstract

Traditional mining methods are often accompanied by problems such as surface subsidence, vegetation destruction, disturbance of groundwater systems, accumulation of solid waste and air pollution. With the global sustainable development strategy and increasingly strict environmental regulations, the mining industry must undergo fundamental reforms. Green mining is a systematic solution that emerged in such a large environment. This is not merely a technological improvement, but rather a conceptual innovation faced throughout the entire process from exploration, planning, construction to production, closure and recycling. By analyzing the core elements of this technical system, exploring its application examples in specific construction scenarios, and conducting systematic research on the corresponding full-process quality control system, theoretical references and practical guidance are provided for the high-quality and sustainable development of China's coal industry.

Keywords

Mining Engineering Green mining technology Construction application; Quality control

采矿工程绿色开采技术的施工应用与质量管控

刘建雄

山西忻州神达梁家碛煤业有限公司，中国·山西 忻州 036500

摘要

传统的矿山开采方式常伴随着地表沉陷、植被破坏、地下水系统扰动、固体废物堆积和空气污染等问题。随着全球可持续发展战略和越来越严格的环境规制，矿业必须进行根本的改革。绿色采矿就是在这样的大环境下诞生的一种系统的解决方案。这不只是一项技术上的改进，更是一种从勘探、规划、建设到生产、关闭到回收利用的整个过程中所面临的一种观念上的革新。通过对该技术体系的核心要素进行分析，探索其在特定建设情景下的应用实例，并对与之相适应的全过程质量控制体系进行系统性的研究，为中国煤炭行业的高质量和可持续发展提供理论借鉴和现实指导。

关键词

采矿工程；绿色开采技术；施工应用；质量管控

1 引言

矿产资源作为工业发展的核心支撑，其开采规模伴随经济增长持续扩大，但传统粗放式采矿模式引发的地表塌陷、含水层破坏、煤矸石堆积等生态环境问题日益凸显。据统计，中国每开采万吨煤炭造成的塌陷面积平均约 3.6 亩，每年产出的煤矸石达 6 亿 t 以上，约占全国大宗固废的 18.3%，矿区生态修复与环境治理已成为制约矿业可持续发展的关键瓶颈。在此背景下，绿色开采技术以“减损、增效、环保”为核目标，通过采充平衡、覆岩控制、固废资源化等创新路径，实现采矿活动与生态环境的协调发展，成为落实国家绿色发展理念、推进绿色矿山建设的核心举措。

【作者简介】刘建雄（1985—），男，中国山西忻州人，本科，工程师，从事采矿工程研究。

2 采矿工程绿色开采技术的施工应用

绿色开采是一个多维度的技术集成体系，其施工应用覆盖了从井下到地面、从资源获取到生态恢复的各个环节。以下几项是当前实践中至关重要且应用广泛的核心技术方向：

2.1 采空区高效充填技术

该技术利用适宜的充填材料，在矿物采出后及时充入采空区，支撑上覆岩层，显著减轻甚至避免地表变形。根据材料与工艺不同，主要分为：

废石 / 尾砂胶结充填：将分选后的废石或磨细的尾砂与水泥等胶凝材料混合，形成具有一定强度的充填体。此技术实现了固体废弃物的井下资源化处置，减少了地面尾矿库的占地与风险。施工中，需精确控制料浆浓度、配比和输送流速，确保充填体强度满足设计要求并实现管道安全输送。**高水速凝材料充填：**采用高水灰比、速凝特性的特种材料，能

在短时间内凝固并承载。该工艺适用于需要快速形成承载能力的接顶充填或抢险充填场景。3) 膏体充填: 将全尾砂等细颗粒物料制备成不析水、牙膏状的稠密膏体进行泵送。其流动性好、不离析, 充填体密实度高, 对地下水污染风险低, 但对制备与泵送设备要求较高^[1]。

2.2 煤与瓦斯协调开采及瓦斯综合利用技术

在施工层面, 这包括规划先行: 在采区设计阶段, 即统筹规划瓦斯预抽、采动卸压抽采和采空区抽采的时空布局, 形成“先抽后采、采抽协同”的工程布置。精细施工: 采用定向长钻孔、顶板高位裂隙钻孔、穿层钻孔等先进钻进工艺, 精确构建瓦斯抽采网络。高效利用: 建设地面瓦斯浓缩、提纯或发电设施, 将抽采出的瓦斯转化为电力、化工原料或民用燃料, 实现“变害为宝”。例如, 山西某高瓦斯矿井通过构建井上下联合抽采系统, 年抽采瓦斯量超过数亿立方米, 发电装机规模达数十兆瓦, 在保障安全的同时创造了显著的经济与环境效益。

2.3 保水开采与水资源保护技术

保水开采与水资源保护技术关键路径包括: 1) 限高开采与条带开采: 通过控制开采厚度或保留部分矿体作为支撑煤柱, 维系关键隔水层的稳定性, 保护上部含水层。2) 充填开采: 如前所述, 充填体可有效抑制导水裂隙带高度, 是保水开采最有效的技术之一。3) 地下水疏排水的净化与复用: 建立完善的矿井水收集、处理和回用系统。经过混凝、沉淀、过滤、消毒乃至深度处理(如反渗透)后, 矿井水可用于井下防尘、地面灌溉、工业冷却乃至生活杂用, 极大减少了新鲜水取用量和废水外排量。内蒙古某大型露天矿通过建设大规模的矿区水循环处理中心, 实现了生产用水的闭路循环, 年节约新水数百万吨。

2.4 露天矿绿色施工与生态即时修复技术

在施工组织中: 内排土工艺优化: 优先采用内部排土场, 缩短运距, 减少外排占地, 并为后续复垦创造地形条件。排土作业遵循“分层堆放、压实”的原则, 确保边坡稳定。表土单独剥离与存放: 在剥离初期, 将珍贵的表层土壤单独剥离、集中堆放并加以保护, 作为后期复垦的优质植生土源。生态即时修复: 在达到最终边坡或形成稳定平台的区域, 立即进行土壤重构、植被重建。选择适应当地气候、耐贫瘠的先锋植物种, 采用客土喷播、生态袋等技术进行快速绿化。智能调度与抑尘: 运用智能调度系统优化设备运行, 减少空载; 同时采取洒水、喷洒抑尘剂、设置防风抑尘网等多重措施, 严格控制采、运、排过程中的粉尘污染^[2]。

2.5 智能化与数字化赋能

以物联网、大数据、人工智能、数字孪生等为基础, 建立“智慧矿山”的“大脑”。具体表现为精细采矿: 通过地质建模和智能感知, 引导采矿设备进行矿石-岩石的自动辨识和分选, 提升资源回收率、减少贫化程度。智能通风节能: 通过对气体浓度、风量、设备布置等的实时监控, 对通

风系统进行动态调节, 达到在保证安全性的同时, 达到“随需送风”的目的, 显著减少通风能耗。装备群的智能化调度: 针对电铲、卡车、钻机等大型装备的整体优化调度, 缩短排队时间, 提升产能, 减少单位能源消耗和污染物排放量。实时环境监控与预警: 在矿区及周边建立一套涵盖大气、水质、噪声、边坡变形等多源在线监测系统, 并将相关数据实时上传到监控平台, 以达到对环境风险的及早预警和快速反应。

3 与绿色开采技术全流程深度融合的质量管控体系

然而, 若缺乏严格的质量控制, 则会降低其环保效益, 甚至带来新的风险。为此, 需要建立一套能够与整个生产过程进行深度融合的质量控制系统。这个系统应该按照“计划-执行-检查-处理”的PDCA循环进行:

3.1 前端设计阶段的质量策划与标准建立

在项目可行性研究与初步设计中, 应把“绿色采矿”指数纳入到工程可研和初步设计中。因此, 现阶段的企业质量规划的首要工作就是构建一套科学的、科学的、定量的绿色业绩评价指标体系。这不是一句空话, 而是要根据矿山的特殊地质条件、生态环境和社会经济条件, 经过严格的论证和仿真计算才能确定。核心指标应该包括以下几个方面: 在资源观上, 要确定资源回收率的下限, 避免浪费; 在能量层面上, 通过确定每吨矿石总能量消耗等综合能耗指标, 驱动节能技术和过程的优选。在环境层面, 重点研究水分循环利用率(最大程度的闭环循环)、固体废弃物的综合利用率(确定矿井中矸石、尾矿等的比例)、地表沉降控制准则(最大下沉、倾斜变形等)。在生态修复方面, 应事先确定退耕还林后的复垦率、植被覆盖率和土壤生产力恢复阶段指标。这三个指标合起来就是一个“设计值”, 它可以作为以后各项建设活动的依据。

同时, 需编制详细的《绿色开采施工组织设计与专项方案》, 对每一项绿色技术的施工工艺、材料规格、设备选型、验收标准做出明确规定, 形成质量管控的纲领性文件^[3]。

3.2 施工过程的全方位动态监控

材料与工艺控制: 对充填材料的粒径、级配、胶凝材料性能进行入场检验与过程抽查; 对钻孔的轨迹、深度、封孔质量进行检测; 对复垦用土的理化性质进行化验。关键参数实时监测: 利用传感器网络, 实时监测充填管路压力与浓度、瓦斯抽采浓度与流量、矿井水处理各环节水质指标、边坡位移与应力等, 确保工艺运行在设计参数范围内。隐蔽工程与旁站监理: 对钻孔施工、充填接顶、防渗层铺设等关键隐蔽工序, 实行严格的旁站监理与影像记录, 确保施工质量可追溯。数字化交付与数字孪生: 施工过程中产生的各类数据(地质、设计、施工、检测)应同步录入统一的数字孪生平台, 形成与物理矿山同步生长、虚实互映的“数字矿山”, 为过程质量分析与优化提供支撑。

3.3 基于多元数据的综合效果评估与闭环反馈

绿色开采的效果评估不应仅限于工程实体质量，更应扩展到环境、资源与生态维度。需要建立周期性的评估机制，通过实地调查、取样监测、遥感解译等手段，系统评估：岩层移动与地表变形是否在预测范围内？地下水水位与水质变化情况如何？复垦区域的土壤肥力、植被群落演替是否达到预期？资源综合利用指标是否完成？

取得这些评估数据后，核心工作在于将其与项目初期的规划目标、理论模型进行细致的对照分析，从而找出实际效果与预期之间存在差距的具体原因。更重要的是，这一分析结论绝不能仅仅形成一份报告，而必须切实地反馈给一线的生产指挥与工程施工管理部门。这些来自实践的反馈，将成为优化下一阶段开采布局、调整具体工艺参数、或是加强某项管理措施的直接依据。如此一来，整个管理过程便形成了一个从现场监测、到效果评估、再到反馈应用于优化决策的完整循环，使得绿色开采在实践中得以持续改进，不断趋近设定的综合目标^[4]。

3.4 全周期档案管理与后评估制度

从开工至闭坑结束的整个过程中，有关绿色采矿的设计文件、施工记录、监测数据、评价数据、图像数据等，均要进行系统的存档，并形成完善的绿色采矿技术文件。尤其是煤矿关闭后，要设置适当的生态保护期限（一般为5-10年或更久），在此过程中，要对生态环境进行持续的监测和修复，并对其进行定期的后评价，以保证该地区的生态系统处于稳定和可持续的状态。这一要求不仅是对企业所承担的社会责任的见证，更是对该行业的科技发展与经验的总结。

4 未来展望

展望未来，煤矿绿色采矿技术的演化，必将是深层次的整合和不断的创新。在具体的技术途径上，将深化“无废开采”的内涵，在今后的发展中，可实现矸石、尾矿等固体废弃物的全成分回收和高值化，真正实现废弃物的资源化。与此同时，“能源协同”的开采方式也会越来越多，如矿井地热资源的有效利用和分布式光伏的建设，为矿区的生产和生活提供洁净的能源，促进矿井向近零碳排放的运行方式转

变。另外，“生态矿场”概念也将由概念转化为现实，通过对矿区关闭后的土地进行生态改造，使其成为市民休闲的生态公园，农业生产的用地，新的能源设施的用地，使土地焕发出新的活力。

在管控层次上，智能技术的深入应用是大势所趋。人工智能算法已不仅仅是一种辅助手段，其已深入到流程优化、安全风险预警和生产决策支持等关键环节。借助区块链独特的不可篡改和可追踪性，可以建立一个完整的绿色开采过程中的数据存证和信用机制，既可以保证环境数据的真实性，又可以让真正的绿色矿产资源在市场上得到应有的评价^[5]。

5 结语

综上所述，绿色开采技术及其质量管控体系的构建与实施，是采矿工业应对环境挑战、实现可持续发展的必由之路。它从被动治理转向主动防控，从单一资源获取转向资源-环境-社会系统协调，代表了矿业工程发展的新范式。其成功应用，不仅依赖于持续的技术创新与成熟的工程实践，更有赖于一套科学、严谨、贯穿全周期的质量管控体系作为保障。唯有将绿色理念内化于每一个设计决策、每一道施工工序、每一次管理行为之中，方能真正推动矿业迈向高效、安全、环保的绿色发展新时代，在获取自然资源的同时，守护好我们赖以生存的生态环境，为后代留下可持续发展的基础。这条转型之路任重道远，但方向已然明确，步伐必须坚定。

参考文献

- [1] 王国锋. 绿色开采技术在采煤工程中的应用[J]. 钻岩机械气动工具, 2025, 51(10): 228-230.
- [2] 许广安. 绿色开采技术在采煤工程中的运用研究——以深水潭-红旗沟为例[J]. 世界有色金属, 2025, (16): 118-120.
- [3] 吴光冰, 赵彦鹏, 靳顺奇. 采煤工程的采矿技术与施工安全研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (13): 88-90.
- [4] 闫四化. 新形势下有色金属矿产地质勘查及绿色开采技术创新 [J]. 世界有色金属, 2025, (05): 196-198.
- [5] 赵国军. 采煤工程中绿色开采技术的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (03): 144-146.

Research on Construction Technology of Frozen Linkage Channel in Deep Water-rich Soft Soil Layer of Land-sea Interaction

Yuzhang Cui

Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, Chin

Abstract

The advancement of socio-economic development and the growing transportation demands have driven the refinement of underground rail transit networks. The safe and efficient construction of inter-tunnel connection passages has become a critical focus in the construction industry. Under complex geological conditions such as saturated soft soil and sandy soil, the construction of these passages presents significant challenges. The application of the horizontal freezing method can enhance construction quality and efficiency while ensuring safety. This approach emphasizes four key phases: preparatory stage, freezing system installation and active freezing, excavation and permanent structure construction, and maintenance of freezing and settlement control. This paper analyzes the key aspects of the freezing method in connection passage construction, strengthens technical oversight, and improves construction quality.

Keywords

freezing method; connection passage; construction technology; construction quality

海陆交互深厚富水软土砂层冷冻法联络通道施工技术研究

崔玉章

广州地铁建设管理有限公司，中国·广东广州 510000

摘要

经济社会的发展以及人们交通需求的不断上升推动地下轨道交通网络完善。盾构隧道间联络通道的安全、高效施工也成为了施工界十分关注的焦点问题。而饱和软土、砂土等相应复杂地质条件下，联络通道施工难度是相对较高的，这时则可通过水平冻结法的应用提高联络通道施工质量和效率，保障施工安全，可紧抓施工前期准备阶段、冻结系统施工与积极冻结阶段、开挖与永久结构构筑阶段、维护冻结与融沉控制阶段四个关键阶段，分析冷冻法在联络通道施工中的应用要点，加强技术控制，提高施工质量。

关键词

冷冻法；联络通道；施工技术；施工质量

1 引言

随着城市轨道交通向沿海、沿江地区延伸，隧道联络通道常需穿越典型的“海陆交互富水砂层”地质。该类地层具有高渗透性、高含水率、地层不均匀、受潮汐或地下水活动影响大等特点，传统工法风险极高。人工地层冻结法作为一种“绿色”的临时加固工法，通过将地层中的水冻结成冰，形成高强度、不透水的冻土帷幕，是解决此类富水软土工程难题的最有效方法之一。海陆交互环境的特殊性和富水砂层的高流动性，使得冻结过程、冻土墙形成与维护、施工风险与传统内陆环境有显著差异，亟需进行针对性研究。

水平冻结法又称冷冻法，是通过人工制冷的方式将隧

道周边含水地层冻结成强度高、渗透性低的冻结壁，为开挖构筑作业的开展提供良好的基础，是一种“以冻代撑、以冻代堵”的临时支护与止水方法。合理应用冷冻法可更好地提高联络通道施工的施工质量和施工效率，保障施工安全。尤其在海陆交互富水砂层中，该工法能有效解决传统施工面临的高渗、高流、含盐等难题。相关单位需紧抓以下关键阶段，加强技术控制和技术管理。

2 施工前期准备阶段

需全面查明地层及水文关键参数，不仅包括地下水位、水流速度、方向、含水率、孔隙比、导热系数、土层分布，还需重点明确地下水流动方向、水力联系、盐度分布及潮汐影响规律，同时排查地下障碍物、空洞、透镜体、承压水层等特殊情况，为冻结方案设计提供精准依据。为确保勘查结果准确客观，应采用物探与钻探技术联合应用的方式：先通过高密度电法、地质雷达等技术了解地下地层分布及异常体

【作者简介】崔玉章（1981—），男，中国河南汝南人，本科，高级工程师，从事轨道交通建设管理研究。

情况，再借助钻探技术获取样品，通过室内试验获得物理力学参数，尤其需测试含盐地层的冻结特性参数（如冰点、未冻水含量等）。按照《土工试验方法标准》(GB50123-2019) 和《非金属固体材料导热系数的测定热线法》(GB10297-2015) 测定土壤导热系数，采用 ISOMET 热导仪测定土壤导热系数及比热按照《土工试验方法标准》(GB50123-2019)，采用 XT5201FST 冻土冻结温度测定仪测定土壤的结冰温度试验。

表 1：土壤导热、比热及结冰温度实验结果

序号	岩性	导热系数 λ [w/(m · k)]		比热 [kJ/kg · K]		结冰 温度
		20°C	-10°C	20°C	-10°C	
1	4N-2 粉质粘土	1.239	1.913	1.18	0.732	-0.56
2	4-2BG 固结淤泥质土	1.197	1.68	0.806	0.793	-0.65
3	3-1 粉细砂	1.725	2.01	1.035	0.85	-0.79
4	3-2 中粗砂	1.558	1.978	1.058	1.102	-0.58
5	3-3 砂砾	1.221	1.928	0.873	0.977	-0.27

在此之后则需要进行冻结方案设计。在冻结方案设计中，应紧抓冻结壁设计、冻结孔布置、制冷系统选型和监测系统设计四大关键要点来展开分析。冻结壁设计需根据水土压力，具体问题具体分析，对冻结壁的厚度、平均温度、强度要求作出明确规定，这其中需要尤为引起关注和重视的是分析平均温度，一般多将平均温度设置为 $-10^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 之间，这可以更好的保障冻结壁的抗压强度和抗渗透性，一般情况下冻结壁的厚度可通过力学计算确定，分析其是否能够有效应对土压力、水压力以及施工过程中的开挖扰动，若底层为饱和软土地层，需确保其厚度在 1.2m 以上。而在冻结孔设计的过程中需从数量、位置、角度来展开分析。一般情况下，可将冻结孔按单排或双排梅花形布置在隧道管片上，在联络通道开挖轮廓线外侧确定具体位置，孔间距可以设置在 $0.8\text{m} \sim 1.2\text{m}$ 之间，为后续冻土柱能够有效搭接奠定良好的基础。在制冷系统选型中，应根据冻结壁的总热负荷，确定制冷量，在此基础之上，对制冷机组进行选择，确定盐水循环泵、冷却塔及配套管道系统的设计。最后需设计实时监控系统，更好地明确冻结过程、地层变形、结构安全等相应信息^[1]。

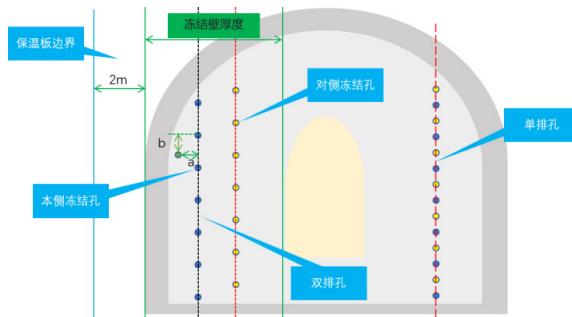


图 1：冻结示意图

在方案设计的过程中，需注意不同地质条件下，冻结

方案中冻结孔间距、冻结管直径、积极冻结时间和冻结壁平均温度都是存在鲜明差异的，必须坚持具体问题具体分析的原则，对方案参数作出适当调节，如表 1 所示。例如砂土的导热系数是相对较高的，因此相较于其他土质，砂土的冻结速度快，但是在使用冷冻法过程中也很有可能会因水分迁移活跃出现冻胀问题。再例如黏土的导热系数较低，因此冻结速度更慢，但是其塑性强，冻胀融沉的变形会更大，因此应根据前期的勘测数据，明确不同地区的地质特点，针对性的分析可能出现的问题，并对冻结方案参数作出科学调整，始终保障冻结方案的可靠性、针对性和适切性，进而有效提升施工质量。

3 冻结系统施工与积极冻结阶段

在冻结系统施工与积极冻结阶段，需紧抓冻结孔施工、制冷系统安装与调试、积极冻结与过程监测三大关键要点，加强技术控制。在冻结孔施工的过程中，需关注盾构隧道中作业面狭小的问题，可采用专用仪器设备，定向施工钻好冻结孔，在施工建设的过程中，应严格按照设计图纸，确定钻孔的角度及深度。一般多使用水平定向钻机，保障施工精度达标，符合设计要求。在钻孔结束以后，可下入无缝钢管作为冻结管，同时孔口与管片之间的间隙应采用高压注浆进行密封，避免出现地下水流入或盐水渗漏的问题^[2]。

在制冷系统安装与调试的过程中需要根据设计图纸明确制冷机组、盐水箱、循环泵等相应设施设备的安装位置，并且根据设计图纸布设盐水循环管道，形成闭合回路。在安装结束以后可通过压力测试和全面调试工作的落实，确保所有设备及管道能够正常使用。

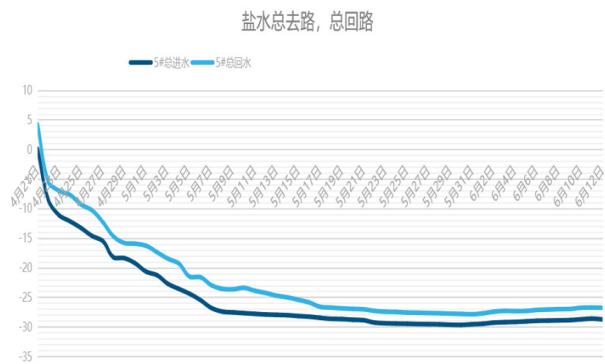


图 2：积极冷冻盐水总去路、总回路

在积极冻结与过程监测的过程中需先启动制冷机组，将氯化钙盐水溶液冷却至 $-25^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ ，通过循环泵压入冻结管中，形成冻结壁。通过冻结系统监测、冻结壁监测和环境与结构监测，动态调整制冷系统参数。但需要明确监测频率及技术要求，保障监测结果可靠，可应用于运行参数调整当中，如表 2 所示。在冻结系统监测中，应紧抓盐水温度、流量、压力及制冷机组运行参数等相应关键要点进行监测，盐水温度、流量和压力应每小时监测一次，而制冷机组运行参数则

需要持续监测，确保出口温度、压力稳定，流量均匀无堵塞且电压、电流、油温、油压等参数正常。在冻结壁监测中应紧抓温度场和壁厚进行监测，确保冻结壁的温度均匀且达到设计标准，同时保障冻结壁的厚度符合要求。环境与结构监测中可以着重监测地表沉降 / 隆起问题、临近隧道管片位移问题及邻近地下管线变形问题，一般情况下地表沉降 / 隆起的速率应在 3mm/ 天以下，管片收敛值、径向位移值以及邻近地下管线变形量都需要做出特殊规定，明确安全限值^[3]。

4 开挖与永久结构构筑阶段

在正式落实开挖作业之前相关工作人员需要通过钻芯取样的方式展开室内实验，了解冻结壁的实际强度，分析其是否达到了设计标准。与此同时，还需要在开挖面中心位置打一个探查孔，用于分析冻结壁的密闭性是否达到标准和要求。若探查口中并无明显水流，则代表冻结壁隔水效果达标，后续开挖作业可以进行^[4]。

在开挖中需要分步开挖并做好临时支护工作，这可以最大限度地降低对冻结壁产生的扰动和影响。一般情况下，在开挖作业开展的过程中，应坚持“短进尺、多循环”的原则。例如，相关工作人员可以先完成上半断面的开挖作业，在贯通结束以后，落实下半断面的开挖，每次循环的开挖进尺可以控制在 0.5~1m 之间。在开挖作业结束以后，应当立刻通过架设钢拱架、铺设钢筋网、喷射混凝土的方式，完成初期支护，支撑暴露的冻结壁，避免因温度回升导致其强度下降。

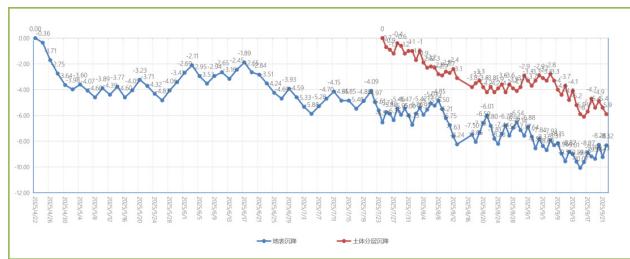


图 3：开挖期间监测数据

在此之后进行永久结构施工，先完成防水层铺设，然后绑扎钢筋、立模，最后完成防水混凝土的浇筑作业。在浇筑作业开展的过程中应当坚持分层对称的原则，同时在混凝土浇筑结束以后应当振捣密实，以此来保障结构的密实度和耐久性。然后落实混凝土养护作业，当混凝土的强度达到设计标准和要求时，则可以拆除临时模板^[5]。

5 维护冻结与融沉控制阶段

在永久结构施工结束以后，还需做好冻土融化问题的

预测、分析和处理。在混凝土养护期间，需做好冻结维护，保障制冷功率达标，进而确保冻结壁的稳定性。只有当混凝土的强度达到设计标准和要求，能够独立承受水土压力以后，才可以停止制冷。

在此之后则需要进行人工解冻和融沉控制。在制冷结束以后，冻结壁会出现自然融化，这时土体体积会收缩，引发地面沉降及融沉风险，影响施工质量。为此，在该环节，相关工作人员应当严格控制融化速度，通过逐步提高盐水温度或分段停止冻结管供冷的方式，缓慢、均匀地解冻。这样融化水则可以被周围土体吸收，也可以通过排水系统排出。然后工作人员则需要跟踪注浆，即在冻结孔施工时，应当预埋注浆管，在解冻的过程中，根据监测数值，了解地表沉降状态，然后向融化区的土体中注入水泥浆或化学浆液，用于填补空隙，补偿土体的体积损失，进而将地面沉降控制在允许范围内^[6]。

6 结束语

在联络通道施工过程中，冷冻法的应用可有效保障施工质量和安全，尤其在海陆交互富水砂层这类极端复杂地质条件下，其优势更为显著。该类工程是“水文地质是基础，冻结设计是核心，过程控制是关键，风险防控是保障”的系统工程，需聚焦水流与盐分两大核心影响因素，通过理论分析、数值模拟、现场试验与智能监控相结合的手段，攻克关键技术难题。相关工作人员需严格把控施工前期准备、冻结系统施工与积极冻结、开挖与永久结构构筑、维护冻结与融沉控制四大阶段，强化精细化勘察、针对性设计、智能化监测、精准化控制，全面提升施工技术水平，为类似极端复杂地层条件下的地下工程建设提供安全、可靠、经济的解决方案。

参考文献

- 陈铭辉. 侧壁式冷冻法联络通道施工技术研究 [J]. 建设监理, 2024, (09): 111-114.
- 高民富. 非对称异性隧道联络通道冷冻法施工技术 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (03): 157-162.
- 赵杰. 地铁运营线路冷冻法施工联络通道沉降后道床结构整治施工技术分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (02): 55-57+136.
- 王巍. 钱塘江冲海粉砂地层联络通道冷冻法施工技术研究 [J]. 四川水泥, 2024, (01): 16-18.
- 武相坤, 豆红尧, 张元师, 等. 冷冻法施工技术在盾构区间联络通道施工中的应用研究 [J]. 价值工程, 2023, 42 (34): 93-95.
- 赵王飞. 冷冻法联络通道地面注浆改良地层施工技术 [J]. 中国新技术新产品, 2022, (03): 123-125.

Analysis of Transformer Resistance Grounding Technology in High-Voltage Power Supply and Distribution Systems

Qingnan Dong

China National Petroleum Power Supply Company, Daqing, Heilongjiang, 163000, China

Abstract

The high-voltage power supply and distribution system takes the power transformation, distribution and power receiving links on the user side as the main line, distributing the energy of the upper-level power grid to various loads through main transformers, busbars, switchgear and feeders, and bears the constraints of short-circuit endurance, insulation coordination and grounding safety during operation. In Chinese practice, the design of overvoltage protection and insulation coordination for electrical installations ranging from 6kV to 750kV needs to take into account the selection of grounding methods and the matching of equipment insulation levels. Based on this, this paper discusses the engineering boundaries and key parameters of transformer resistance grounding, summarizes practical design and verification methods, and provides key points for testing and operation.

Keywords

Electricity High-voltage power supply and distribution system Transformer; Resistance grounding technology Analysis

高压供配电系统中变压器电阻接地技术探析

董庆楠

中油电能供电公司，中国·黑龙江 大庆 163000

摘要

高压供配电系统以变电、配电与用户侧受电环节为主线，将上级电网的能量经主变、母线、开关设备与馈线分配到各类负荷，并在运行中承担短路承受、绝缘配合与接地安全等约束。中国实践中，6kV至750kV电气装置的过电压保护与绝缘配合设计需统筹接地方式选择与设备绝缘水平匹配。基于此，本文围绕变压器电阻接地的工程边界与关键参数展开讨论，归纳可落地的设计与校核方法，并给出试验与投运要点。

关键词

电力；高压供配电系统；变压器；电阻接地技术；探析

1 引言

进入新时期以来随着经济社会迅猛发展，供电系统的复杂和承载负担的增加，实现电力稳定运行和安全的难度越来越高。变压器电阻接地技术对于电力行业的安全生产和传输有着相当重要的意义^[1]。有鉴于此，文章通过对相关文献查阅以及结合自身实践情况下，针对高压供配电系统中变压器电阻接地技术展开探析，以供参考。

2 高压供配电系统概述

高压供配电系统是指在用户侧或区域配电侧，采用交流标称电压高于1kV的电能接入、变换与分配的成套系统，常见电压等级为10kV、35kV，部分地区上接110kV电网。系统通常由高压进线（架空或电缆）、开关柜/环网柜、母

线及联络、主变或配变（典型为10/0.4kV）、无功补偿与滤波、计量与继电保护、接地装置及二次通信等组成。实践中常见受电电压为35kV及110kV，向下通过主变降至10kV或6kV形成中压配电，再由配变供给0.4kV末端负荷。一次接线多采用单母线分段、双母线或环网结构，配合联络开关实现检修转供与故障隔离，并需结合地区雷电活动强度选取避雷与绝缘水平。系统设计需要在短路电流、过电压水平、供电可靠性与检修可达性之间做平衡，其中系统中性点接地方式直接影响单相接地故障电流、暂态过电压与保护判据，因此在绝缘配合设计规范框架内应作为基础参数先行确定^[2]。

3 高压供配电系统中变压器电阻接地重要性

在中国6kV至35kV用户侧与配网侧系统中，中性点常处于非有效接地工况，单相接地故障的持续运行与过电压风险一直是现场关注点。变压器中性点经电阻接地能够把接地故障电流限定在设计值附近，既避免直接接地导致的过大短路热冲击，又可将零序电流提高到保护装置的可靠动作区

【作者简介】董庆楠（1988—），男，中国浙江诸暨人，本科，从事发电及供配电研究。

间，使故障线路具备明确的跳闸判据。电阻接地还可压低弧光接地的间歇性重燃幅值，减少暂态过电压对主变中性点绝缘、出线电缆终端与互感器的反复应力，便于按绝缘配合规范进行统一校核。中国不少工矿企业 10kV 配电以电缆线路占比高、对供电连续性要求强为特点，电阻接地能把隐蔽的单相接地由长时间带故障运行转为短时可切除事件，从而降低电缆屏蔽层发热、接地网电位抬升与触电电压波动的不可控因素。对站内选择性而言，合适的接地电阻使接地电流不至于牵动上级相间短路容量，却能支撑分级整定与分段切除，减少全站停电范围，并便于按继电保护技术规程组织零序保护与告警逻辑配置。

4 高压供配电系统中变压器电阻接地技术探析

4.1 阻值与容量校核

确定电阻接地方案时应以系统对地电容电流、允许触电电压与保护灵敏度为约束开展阻值计算，当主变中性点未引出或需与上级系统隔离时，可采用接地变压器配接地电阻形成独立中性点。第一，阻值计算先建立对地电容电流清单，按母线分段、主变检修、外电源倒送等运行方式分别统计电缆分相长度、并联电容器与其他对地电容，必要时按测试规程组织实测并用实测值修正。随后以 $U_\phi = U_N / \sqrt{3}$ 换算相电压，按 $R \approx U_\phi / I_g$ 取初选阻值并与阻值档位匹配，例如 10kV、20kV 系统常在 10Ω 或 16Ω 档位内选取。再反算 I_g 与 I_c 关系，保证单相金属性接地时故障电流既能稳定灭弧又能覆盖末端最小故障的保护灵敏度，并对远景电缆化和新增出线按增长系数留裕度^[3]。第二，容量校核以故障持续时间为主线，将主保护、后备保护及检修通流时间分别作为工况，按最大可能 I_g 计算 P_t 并计算吸收能量 $W = I^2 R t$ ，核对电阻片温升、绝缘耐热等级与柜体散热条件。通流时间应与保护定值表逐项对照，避免试验时长或后备切除延时超出电阻短时热容量。引出导体、端子与连接件按短时热稳定和动稳定选型，转角处用软连接释放热胀冷缩，必要时多片并联分流以降低单片电流密度，并以额定相电压作为工作电压基准统一校核。第三，阻值偏差应把制造公差、温度系数与老化漂移叠加成 R_{min} 、 R_{max} 两端点。用 R_{max} 得到最小 I_g 校核零序保护起动值与灵敏系数，用 R_{min} 得到最大 I_g 校核接地网地电位升高及站内接触、跨步电位差允许值，接地网电阻宜按 $R \leq 2000/\sqrt{3}$ 控制，并按 U_t 、 U_s 计算式以 t_s 为等效持续时间进行复核。第四，在母线合环、主变并列和接地变切换时，需明确电阻投入点与并列等效规则，禁止两套电阻长期并联造成等效阻值过低。运行逻辑宜采用先退出后投入并设置机械延时，母联合闸前应具备仅允许一侧中性点接地投入的闭锁条件，必要时将接地投入状态纳入母联合闸闭锁链条。切换过程中控制中性点悬浮时间并保留可见断开点，接地变不宜兼作站用变，投入回路配置断线监视与过温闭锁，便于故障快速退出。

4.2 电阻器与接地回路配置

在电阻接地系统中，电阻器与接地回路的构型决定故障电流通道的可控性与检修隔离的确定性。第一，电阻器宜布置在主变中性点或接地变附近的独立间隔，按短时热量释放、巡检通行和安全距离确定柜体朝向与风道，柜体采用金属封闭结构并设置带联锁的防触及隔板，内部将电阻片分段支撑并预留抽拉检修空间，辅以过温触点、柜内温升指示与元件开路监视端子，使熔断、断线或接触不良能以一次告警方式被及时识别，同时对引出端子采取防松与防振措施以抑制运行热循环导致的接点劣化。第二，中性点至电阻器的连接导体以单相接地电流的 P_t 为主线校核热稳定，并复核冲击电动力下的动稳定和支撑绝缘裕度，跨越电缆沟、门洞或桥架处设置绝缘支座与防震夹具限制摆动，转角与设备连接点采用软连接或编织带释放热胀冷缩应力，电阻器前配置专用隔离开关并具有明显断开点，隔离开关与柜门实施机械闭锁，且在一次回路两端设置试验接线柱或试验端子，便于按交接与预试规程完成电阻值、绝缘与回路连续性检查。第三，接地回路并入主接地网时应坚持单独引下线和多点连接的做法，接地干线在不同两点及以上与接地网可靠相连，禁止将多台设备串接在同一接地线中，焊接搭接长度按扁钢宽度的 2 倍或圆钢直径的 6 倍控制并做防腐封涂。电阻器引下线宜短直并避开人行通道与通信电缆集中区，必要时穿金属保护管并设置地表隔离与警示标识，以缩小故障时转移电位、接触电位差与跨步电压的暴露范围。第四，户外电阻器需结合地区污秽与气候等级落实防雨、防盐雾与防凝露措施，通风口设置防虫网并保证风道截面不被缩减，进出线套管按污秽等级选取爬电距离并对金具采取耐蚀处理，柜体底部设置排水与防积水构造，寒冷或湿热地区可配置防凝露加热器并与温湿度控制触点配合，接线端子采用双螺母或弹垫结构防松并定期复紧，同时将运行中温升、异响与端子发热检查纳入巡视项目，确保在高温季节长时投运条件下不出现虚接与局部过热^[4]。

4.3 保护配合与动作判据

在中性点经电阻接地的高压供配电系统内，保护配合需围绕零序量的选择性、灵敏度与级差展开。其一，动作判据宜以零序电流为主并引入零序电压闭锁作为工况判别，馈线侧配置零序过流一段跳闸与二段后备，母线或接地变侧设置零序过流作母线接地后备，上级电源侧保留相应后备段，使单相接地从支路到电源逐级覆盖，各层跳闸出口应校核断路器分闸时间与失灵启动逻辑，失灵时改由上一级扩大切除范围，并对重合闸采取接地闭锁或缩短检同期等待，避免故障扩展。第二，定值整定应以设计接地电流 I_g 为基准并按线路末端最小接地电流核算灵敏系数，馈线一段启动值宜按 I_g 的比例取值并留出互感器比差与二次回路压降裕度，同时以最大接地电流校核速断不越级，二段宜以躲过本线路电容电流和最大不平衡电流为前提，结合相邻线路一段不

灵敏区进行配合，并复核 CT 饱和、二次负荷变化对零序量的偏移，对接地变零序保护需与馈线定值成梯度，必要时提高其启动值以躲过两回线同相接地时零序叠加引起的误动。第三，电缆出线占比高时零序测量宜优先采用专用零序电流互感器，安装时仅穿过三相相导体并将电缆屏蔽层接地引下线置于互感器外侧，防止屏蔽电流被误采样，若采用三相电流合成方式，应统一 CT 极性并按最不利负荷不平衡校核零序残量，二次电缆应屏蔽并在保护屏内单点接地，端子排处设置试验短接与开路告警触点，降低二次回路开路导致的误动风险。第四，时间配合应以一次分段边界为依据建立级差，馈线一段按就地快速切除原则取最小延时，二段与母线后备及上级后备间留足级差并计入断路器机械分闸与继电器固有时间，变更分段点或投退接地电阻时同步切换定值区并完成压板核对，当接地电阻退出或旁路投入时，应将零序定值、闭锁逻辑及重合闸策略成套切换，防止接地方式变化后仍沿用原定值造成拒动或越级。

4.4 试验投运与状态验证

高压供配电系统中变压器的电阻接地装置从交接到投运的试验与状态验证，应围绕一次回路真实、热稳定可承受与保护动作一致形成闭环。第一，交接阶段依据 GB 50150 等交接试验要求对主变中性点引出回路、隔离开关、接地变压器及接地电阻器分段核对，绝缘电阻在中性点侧、柜内侧和接地网侧分别取点并结合吸收比判别受潮与污秽，回路电阻在可见断开点两侧重复测量以定位触头压降异常，并对隔离开关开距、位置指示及接地刀闸联锁状态进行核对，同时复核接地变压器变比、极性、相序与绕组直流电阻，工频耐压或感应耐压试验前明确短接与接地边界并落实反送电隔离，试验后对引下线、连接排、柜体保护接地做导通复测，并测量接触电位差与跨步电压，排除断股与隐蔽腐蚀。第二，投运前对接地电阻器实施通流或等效热试验，通流电流按设计单相接地电流选取，持续时间覆盖主保护与后备切除时间并留裕度，记录阻值漂移与温升曲线，重点检查电阻片焊点、母排搭接面、端子压接处的温升梯度，出现局部热点先核查紧固力矩与接触面氧化，再检查风道遮挡、滤网堵塞与柜体

百叶开度，随后逐项验证过温告警、断线告警、门禁联锁与机械闭锁的动作次序和复归条件^[5]。第三，保护投运阶段以单相接地模拟配合二次注入核对动作链条，先按相量关系校验零序 CT 极性与二次单点接地位置，再核验跳闸出口、信号回路、母线侧闭锁条件与分段后备逻辑，模拟电流覆盖最小故障工况以验证灵敏度，各级动作电流与时限逐项核对并校验级差，定值区切换与检修方式切换需形成可追溯记录，必要时附加 CT 饱和与二次负荷影响校核，防止误闭锁或越级。第四，运行期按 DL/T 596 等预防性试验规程建立周期复测并按电压等级与环境分级确定间隔，重点复测接地电阻器绝缘、阻值偏差与外观裂纹，对端子、母排与引下线连接处实施红外测温并做趋势对比，发现虚接热斑在停电窗口复紧并复验回路电阻，同时检查瓷套放电痕迹、柜体防腐层破损与进风口积尘，必要时对接地网连接点开挖复核焊口与防腐质量，及时处置异常。

5 结语

综上所述，电阻接地并非简单加装一只电阻器，而是牵动中性点形成方式、接地回路热稳定、保护判据与试验验证的系统工程。工程实施中应以接地电流边界与绝缘配合为主线，把阻值、容量、接线与整定用同一组数据闭环校核，并在交接与预试环节固化关键记录。通过上述技术路径，可将单相接地故障的电气量与动作行为稳定在可预测区间，支撑高压供配电系统安全运行。

参考文献

- [1] 曲文浩,秦海停.经电阻接地系统风电场接地变压器保护的整定[J].电工技术,2023(2):158-161.
- [2] 张国刚.浅谈高压供配电系统中变压器电阻接地技术[J].中国房地产业,2020(3):1.
- [3] 郭瑞.系统单相接地故障下接地变压器的运行特性分析[J].大市场,2020, 000(007):P.108-108,110.
- [4] 罗城辉.电力变压器的接地保护技术研究[J].轻松学电脑, 2021, 000(001):P.1-1.
- [5] 李海成.供配电系统中的防雷与接地技术应用初探[J].建筑设计与研究, 2024(19).

Research on the Inheritance and Innovation of Modern Architectural Design Based on Regional Culture

Yingtao Zhang Songqin Meng

Zhongchengyuan (Beijing) Environmental Technology Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract

Against the backdrop of rapid globalization and urbanization, modern architectural design faces the challenge of losing regional cultural identity, with the “one-size-fits-all” phenomenon becoming increasingly prominent. Cultural inheritance should not be reduced to superficial symbol stacking or formal imitation, nor should innovation mean abandoning local traditions. Instead, it requires a deep understanding of regional cultural essence, combined with contemporary living needs, technological advancements, and design philosophies, to achieve organic integration between regional heritage and modern architecture. As the core spiritual foundation of architectural design, regional culture’s preservation and innovation play a vital role in shaping architectural uniqueness and sustaining urban continuity. This paper systematically explores the intrinsic connections between regional culture and modern architectural design, investigates scientifically sound approaches to cultural inheritance and innovation, and provides support for advancing regionally distinctive modern architecture.

Keywords

regional culture; modern architectural design; inheritance path; innovation and development; cultural continuity

基于地域文化的现代建筑设计传承与创新路径研究

张映涛 孟松琴

中城院（北京）环境科技股份有限公司，中国·北京 100120

摘要

在全球化与城市化快速推进的背景下，现代建筑设计面临着地域文化特色缺失的困境，“千城一面”的现象日益凸显。传承并非简单的符号堆砌与形式模仿，创新也不是对地域文化的彻底背离，而是在深刻理解地域文化核心内涵的基础上，结合现代生活需求、技术手段与设计理念，实现地域文化与现代建筑的有机融合。地域文化作为建筑设计的核心精神内核，其传承与创新对塑造建筑独特性、延续城市文脉具有重要意义。本文基于这一核心问题，系统梳理地域文化与现代建筑设计的内在关联，探索科学合理的传承与创新路径，为推动具有地域特色的现代建筑发展提供支撑。

关键词

地域文化；现代建筑设计；传承路径；创新发展；文脉延续

1 引言

建筑是“凝固的音乐”，更是地域文化的物质载体与视觉表达。从黄土高原的窑洞到闽南的土楼，从北京的四合院到皖南的徽派民居，每一种建筑形式都深深镌刻着当地自然环境、民俗风情与历史文脉的印记。然而，随着全球化浪潮的冲击与现代建筑技术的普及，许多城市在建设过程中盲目追求西方设计风格与标准化模式，忽视了本土地域文化的挖掘与融入，导致建筑失去了独特的文化身份，城市记忆逐渐模糊。在此背景下，如何在现代建筑设计中实现地域文化的有效传承与创新，成为建筑学界与设计界亟待解决的重要课题。

【作者简介】张映涛（1976—），中国河北衡水人，本科，正高级工程师，从事建筑学研究。

2 地域文化在现代建筑设计中传承的价值与现实困境

2.1 传承的核心价值

地域文化在现代建筑设计中的传承具有重要的文化价值、社会价值与经济价值。从文化价值来看，建筑作为地域文化的物质载体，其对地域文化的传承能够有效延续城市文脉，保护文化多样性，增强人们的文化认同感与归属感。例如，黄山市生活垃圾综合处理厂通过对徽派建筑在现代工业建筑的应用与创新，成为展现文化特色的标志性建筑，让徽派建筑在当代得到了新的传播与发展。

从社会价值来看，融合地域文化的现代建筑能够更好地适应本地的自然环境与生活习惯，提高人们的生活质量与幸福感。同时，具有地域特色的建筑能够塑造独特的城市风貌，提升城市的辨识度与吸引力，增强城市的凝聚力。从经

济价值来看，地域文化与现代建筑设计的融合能够催生具有文化特色的建筑产品与旅游资源，推动文化产业与旅游业的发展，为城市经济增长注入新的动力。例如，云南丽江的纳西族传统建筑与现代旅游设施的融合，带动了当地旅游业的繁荣发展^[1]。



图 1：黄山市生活垃圾综合处理厂

2.2 现实困境

2.2.1 全球化与标准化的冲击

全球化背景下，西方现代建筑设计理念与风格在全球范围内广泛传播，许多设计师盲目追捧西方设计潮流，忽视了本土地域文化的挖掘与融入。同时，建筑设计的标准化与模块化生产模式，使得建筑形态与功能趋于统一，难以体现地域文化特色，导致“千城一面”的现象日益严重。

2.2.2 对地域文化的理解流于表面

部分设计师对地域文化的理解仅停留在传统建筑的符号与形式层面，缺乏对地域文化核心内涵与精神实质的深入挖掘。在设计过程中，简单地将传统建筑元素（如马头墙、斗拱、雕花等）进行堆砌与复制，导致建筑作品缺乏文化内涵与时代活力，形成“形似神不似”的尴尬局面。

2.2.3 技术与文化的融合不足

现代建筑技术的快速发展为建筑设计提供了新的手段，但部分设计师在应用现代技术时，忽视了技术与地域文化的融合，导致技术应用与文化表达相互脱节。例如，一些建筑采用了先进的钢结构与玻璃幕墙技术，但在形态与风格上与地域文化毫无关联，无法体现地域特色。

3 基于地域文化的现代建筑设计传承与创新的核心原则

3.1 地域适应性原则

地域适应性原则是现代建筑设计传承地域文化的首要原则，要求建筑设计必须尊重当地的自然地理环境与人文社会环境，实现建筑与地域环境的和谐共生。在自然适应性方面，建筑设计应充分考虑当地的气候条件、地形地貌与自然资源，选择适宜的建筑材料与结构形式，提高建筑的生态适

应性。例如，西藏的现代建筑设计多采用当地的石材与木材，结合传统的藏式建筑结构，既适应了高原寒冷干燥的气候条件，又体现了地域特色^[2]。

3.2 文化内涵转译原则

文化内涵转译原则强调对地域文化的传承不应停留在形式模仿层面，而应深入挖掘地域文化的核心内涵与精神实质，通过现代设计手法将其转译为建筑语言。这种转译不是简单的符号提取与复制，而是对文化元素的提炼、抽象与重构，使建筑作品既具有地域文化基因，又符合现代设计理念。

例如，贝聿铭设计的苏州博物馆新馆，没有直接复制苏州园林的传统形式，而是通过对园林空间布局、山水意境与色彩元素的提炼，采用现代的几何形态与材料，打造出“以壁为纸，以石为绘”的山水庭院，实现了苏州园林文化内涵的现代转译，使传统园林文化在当代得到了创新表达。

3.3 可持续发展原则

可持续发展原则是现代建筑设计的重要理念，也是地域文化传承与创新的必然要求。地域文化中蕴含着丰富的生态智慧，如传统建筑的通风采光设计、材料循环利用等，为现代建筑的可持续设计提供了借鉴。基于地域文化的现代建筑设计应结合这些生态智慧，采用绿色建筑技术与环保材料，实现建筑的节能减排与生态环保。

例如，徽派建筑元素在现代工业建筑中的运用，借鉴了徽派建筑的马头墙、天井等元素，通过天井的自然通风与采光设计，减少了建筑的能源消耗；同时，采用当地的青砖、黛瓦等环保材料，实现了建筑材料的循环利用，既传承了徽派文化，又符合可持续发展要求。



图 2：徽派建筑

4 基于地域文化的现代建筑设计传承与创新路径

4.1 从“形式模仿”到“内涵传承”

理念转型是实现地域文化在现代建筑设计中传承与创新的前提。设计师应转变传统的设计理念，从对地域文化的“形式模仿”转向“内涵传承”，深入挖掘地域文化的核心

价值与精神内涵。

首先,应加强对地域文化的调研与研究,通过实地考察、文献梳理、民俗访谈等方式,全面了解当地的自然环境、历史文脉、民俗风情等内容,建立地域文化资源库,为建筑设计提供丰富的素材。其次,应树立“文化自觉”意识,明确地域文化在建筑设计中的核心地位,避免盲目跟风西方设计风格。

在设计过程中,将地域文化的精神内涵与现代设计理念相结合,使建筑作品既具有文化深度,又具有时代特色。例如,广州大剧院的设计,以广州“圆润双砾”的地域意象为灵感,将岭南文化中“水”的灵动与包容融入建筑形态,既体现了地域文化内涵,又展现了现代建筑的艺术魅力^[3]。

4.2 构建“元素提取—抽象重构—融合创新”的设计方法体系

方法革新是实现地域文化传承与创新的核心手段,应构建“元素提取—抽象重构—融合创新”的系统化设计方法体系。第一步是元素提取,从地域文化资源中提取具有代表性的文化元素,包括自然元素(如地形、植被、水文等)、人文元素与技术元素。例如,从陕北窑洞文化中可提取“穴居”空间理念、黄土材料、拱券结构等元素。

第二步是抽象重构,对提取的文化元素进行抽象、简化与重构,去除传统元素中的冗余部分,保留其核心特征与文化寓意,并将其转化为现代建筑语言。例如,将传统建筑的坡屋顶抽象为现代的折线形屋顶,将传统雕花图案简化为建筑立面的装饰线条。

第三步是融合创新,将重构后的文化元素与现代建筑的功能需求、技术手段相结合,实现文化元素与建筑形态、空间布局、功能设计的有机融合。

4.3 依托数字技术推动地域文化的精准表达与创新

数字技术的发展为地域文化在现代建筑设计中的传承与创新提供了强大的技术支撑,应依托数字技术实现地域文化的精准表达与创新。一方面,利用BIM技术、三维扫描技术等数字化手段,对传统建筑进行精准建模与保护,建立传统建筑数字档案,为地域文化的传承提供技术保障。例如,对故宫等传统建筑的数字化建模,不仅实现了传统建筑的保护与修复,还为现代建筑设计提供了详细的参考资料。

另一方面,利用参数化设计、算法生成等数字设计技术,实现地域文化元素的创新表达。参数化设计能够将地域文化中的自然规律与文化逻辑转化为设计参数,通过算法生成具有地域特色的建筑形态与空间结构。例如,北京凤凰中心的设计,以“莫比乌斯环”为基本形态,结合中国传统建筑的“通高空间”理念,通过参数化设计技术实现了建筑形态的有机流动,既体现了地域文化内涵,又展现了现代数字技术的创新魅力^[4]。

5 案例分析——以福建土楼文化在现代建筑设计中的传承与创新为例

5.1 福建土楼文化的核心内涵与建筑特色

福建土楼是闽南地区客家文化的典型代表,其核心内涵体现为“聚族而居、团结互助”的宗族文化与“防御为先、适应自然”的生存智慧。

5.2 现代建筑设计对土楼文化的传承与创新实践

近年来,许多现代建筑设计借鉴了福建土楼的文化内涵与建筑特色,实现了土楼文化的传承与创新。例如,福州大学厦门工艺美术学院新校区的图书馆设计,以福建土楼为设计原型,传承了土楼聚合式的空间布局与文化寓意。图书馆以圆形为基本形态,中心为开放的中庭空间,象征土楼的祖堂,周围环绕书架与阅读区,营造出“聚心向学”的学习氛围,体现了土楼“聚合”的文化内涵。

在建筑形态与技术上,该图书馆并未简单复制土楼的夯土墙形式,而是采用现代的钢筋混凝土结构与玻璃幕墙材料,通过参数化设计技术优化建筑形态,使建筑既具有土楼的地域意象,又展现了现代建筑的轻盈与通透。

5.3 案例启示

福建土楼文化在现代建筑设计中的传承与创新实践,为我们提供了以下启示:一是地域文化的传承应注重核心内涵的挖掘,而非形式的模仿,只有深入理解土楼文化的聚合精神与生存智慧,才能实现文化的有效传承;二是现代技术为地域文化的创新表达提供了可能,通过数字技术与绿色技术的应用,能够使传统地域文化元素在现代建筑中焕发出新的活力。

6 结论

地域文化作为现代建筑设计的核心精神内核,其传承与创新对塑造建筑独特性、延续城市文脉具有不可替代的作用,基于地域文化的现代建筑设计,并非简单的传统元素堆砌,而是在深入理解地域文化核心内涵的基础上,通过理念转型树立文化自觉,通过方法革新实现文化元素的现代转译,通过技术赋能推动文化的精准表达,通过实践落地构建多主体参与的实践模式,最终实现地域文化与现代建筑的有机融合。

参考文献

- [1] 黄现庆,邢亚童.地域性文化传承在现代建筑工程设计中的应用探索[J].中原文化与旅游,2024,(17):46-48.
- [2] 熊清华,魏凯.蒙古传统建筑装饰在室内设计中的地域文化表达[J].中国建筑装饰装修,2024,(22):48-51.
- [3] 张翊婧.地域文化元素在现代建筑设计中的融入与表达[J].四川建材,2024,50(11):51-53.
- [4] 于安澜,郭讯.地域性现代建筑设计探索——以西安热雪奇迹室内冰雪乐园为例[J].城市建筑空间,2024,31(04):21-27.

Discussion on Precision Control Method of Planar Milling and Boring Machine in Horizontal CNC Machine Assembly

Si Guo Zhe Su

Shenyang Machine Tool Zhongjie Friendship Factory Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110142, China

Abstract

As the primary machining unit in horizontal CNC machine tools, the turntable milling-boring machine's assembly accuracy critically determines the overall machining precision and operational stability. In-depth research on its assembly precision control methods, enhanced calibration of key components, and precise process parameter management are essential to meet the demands of high-end manufacturing sectors like aerospace and automotive molds. These measures not only improve machining consistency and product yield rates but also reduce equipment maintenance costs. Furthermore, they provide critical technical support for upgrading domestic horizontal CNC machine tools to advanced levels, facilitating the transformation and upgrading of China's equipment manufacturing industry and strengthening its global competitiveness.

Keywords

planer-type milling and boring machine; horizontal CNC machine tool; assembly process; precision control

卧式数控机床装配中刨台式铣镗床精度控制方法探讨

郭思 苏喆

沈阳机床中捷友谊厂有限公司，中国·辽宁 沈阳 110142

摘要

刨台式铣镗床是卧式数控机床的主要加工单元，刨台式铣镗床的装配精度影响整机的加工精度和运行稳定性。对其装配精度控制方法检修深入的研究，加强关键部件装配校准与工艺参数精准控制，满足航空航天、汽车模具等高端制造领域对精密零部件加工的要求，提高整机加工的一致性及产品合格率，降低设备后期调试与维护成本有重要的现实意义，同时为国产卧式数控机床技术升级与高端化发展提供关键技术支撑，助力我国装备制造业转型升级、增强国际市场竞争力。

关键词

刨台式铣镗床；卧式数控机床；装配工艺；精度控制

1 引言

随着现代制造业向高精度、高效率的方向迅猛发展，数控机床的加工性能要求也不断提高。在众多的机床类型中，刨台式铣镗床是进行复杂曲面、高精度孔系和平面加工的核心设备，其最终加工能力不是由设计决定，而是由装配环节所能达到的精度水平决定。装配过程是将分散的精密零件变成稳定、可靠、高精度的运动系统的重要集成阶段，其间牵涉到机械、材料、环境、控制等诸多因素的复杂耦合。因此，对装配精度的影响机理进行系统的分析，并建立科学、可控的精度保障体系，已成为突破高端刨台式铣镗床性能瓶颈、赋能先进制造不可缺少的工作。

2 刨台式铣镗床装配精度的影响要素

2.1 基础部件加工精度的影响

基础部件是刨台式铣镗床的装配载体。由床身、立柱、主轴箱、工作台等主要构件组成。基础部件的加工精度是决定装配精度的先天条件。床身导轨直线度、平行度几何公差误差会直接传递给后面装配环节。使工作台移动轨迹偏离理想轨迹。立柱与床身垂直度偏差会造成主轴的空间几何定位精度偏差。进而造成工件加工的形位公差超标。滑枕导轨面粗糙度超标准。会增大运动副的摩擦副阻力。造成运行时产生激振现象。破坏加工稳定性。工作台的平面度误差会造成工件装夹定位基准偏差。加工尺寸一致性失效。基础部件加工时。由于材料热处理工艺不当引起的残余应力变形问题。也会给后期的装配精度造成不可逆转的影响。

2.2 装配工艺参数的影响

装配工艺参数是否合理。是保证刨台式铣镗床精度的重要因素。装配时所用零部件的连接方法、配合公差、预紧力等参数的设定都会影响到装配精度。零部件连接时。螺栓

【作者简介】郭思（1988-），男，中国辽宁沈阳人，本科，工程师，从事机械制造研究。

紧固的扭矩值过大或者过小。都会使连接部位产生应力应变或者松动。破坏部件间的位置精度基准。运动副间隙配合过大。会造成运行时产生间隙振动。降低加工精度。配合间隙过小。会增大运动阻力。加快部件表面磨损和刚度衰减。主轴系统装配时。轴承预紧力控制不好。会影响主轴的回转运动精度。造成加工表面出现波纹度超差。进给系统中滚珠丝杠和螺母的装配间隙太大。就会使反向间隙增大。进而影响定位精度、重复定位精度。装配顺序混乱也会造成精度累积误差叠加。不同的装配顺序下部件间的干涉情况不同。最终形成的整机精度状态也存在较大差异。

2.3 环境因素的干扰

环境因素对刨台式铣镗床装配精度的影响是隐蔽的、持久的。很容易被装配工艺环节所忽略。装配车间温度变化会引起零部件热胀冷缩的温漂效应。金属材料热膨胀系数有差异。各部件温度变化下线膨胀量不同。导致部件之间的相对位置精度被破坏。车间湿度超标会造成零部件表面产生电化学锈蚀。影响运动副的配合精度公差。锈蚀产生的杂质会侵入装配间隙。增大部件的磨粒磨损。装配过程中由于车间其它设备运行造成的环境振动。人员操作引起的冲击振动等都会造成定位基准偏移。影响装配精度稳定性的保持。车间中的粉尘杂质会附着在零部件加工表面上。造成装配间隙产生偏差。使运动副的运动精度和使用寿命同步降低。

3 刨台式铣镗床装配精度控制的核心原则

3.1 基准统一原则

基准统一原则是刨台式铣镗床装配精度控制的基础。核心就是整个装配过程使用同一工艺定位基准。防止因为基准转换引起的误差累积叠加。装配时应选择稳定性好、精度高的基础部件作为基准件。一般以床身导轨作为装配基准。后续立柱、主轴箱、工作台等部件的装配均以此为基准进行定位调整。基准件必须经过严格的精度复测检验。保证其精度满足装配设计的要求。在装配过程中还要对基准件进行防护。防止基准面出现磕碰、磨损等基准面损伤问题。采用基准统一规范。可以保证各个部件之间位置精度的准确对接。减小基准转换误差。为整机精度控制打下工艺基础。

3.2 误差补偿原则

误差补偿原则就是通过主动调整或者技术手段。对装配过程中产生的误差进行误差抵消或者修正。从而达到提高装配精度的目的。装配时由于零件的加工误差、装配间隙等原因无法完全消除。采用误差补偿的方法可将误差控制在公差允许范围内。误差补偿分为硬件补偿和软件补偿。硬件补偿主要是改变垫片厚度、更换调整件等手段来修正部件之间的位置偏差量。立柱与床身连接处用不同厚度的调整垫片使立柱达到设计垂直度要求。软件补偿是在数控机床控制系统中。对加工过程中出现的误差进行实时闭环补偿。按照装配检测的数据。在控制系统的输入端输入补偿参数。修正主轴运动轨迹偏差。误差补偿要依靠准确的检测数据。根据误差

的种类和幅值大小来选择适合的补偿方式。保证补偿效果达到要求。

3.3 全程检测原则

全程检测原则。就是对刨台式铣镗床装配各个工序环节进行全流程精度检测。及时发现和处理精度偏差问题。防止误差逐级积累。装配前应检查所有零部件的精度。剔除超差不合格件。保证装配原材料的精度满足设计要求。装配过程中每完成一个关键工序都要进行工序精度检测。床身与立柱装配完成后检测两者的垂直度。主轴装配完成后检测主轴的回转精度。检测工作要采用高精度的检测设备。比如激光干涉仪、三坐标测量仪、百分表等来保证检测数据的量值准确性。检测数据要详细建档。建立精度检测台账档案。为以后的误差分析、工艺改进提供数据支撑。全程检测可以对装配精度进行动态控制。保证最终的整机精度达到设计标准的要求。

4 卧式数控机床装配中刨台式铣镗床精度控制的具体方法

4.1 基础部件的装配精度控制

基础部件装配是刨台式铣镗床精度控制的开端。主要控制部件定位、连接紧固两个工艺要点。部件定位时以床身导轨为基准。用精找平找正的方式调整立柱、工作台等部件的空间位置。用激光干涉仪检测部件的直线度、平行度、垂直度。根据检测结果进行微量精调。保证各部件的位置精度符合设计要求。连接紧固时用扭矩扳手控制螺栓的紧固扭矩。按照预设的扭矩值标准化操作。防止由于扭矩过大或者过小引起的应力变形或者松动失效问题。对需要调整间隙的运动副用塞尺测间隙值。根据检测结果调垫片厚度。使间隙值在设计公差内。基础部件装配完毕之后要进行二次精度复检。精度状态达到要求后才能进入下一道装配工序。

4.2 主轴系统的装配精度控制

主轴系统是刨台式铣镗床的主要运动系统部件。它对整个机器的最终加工精度起着关键作用。主轴和轴承的装配要严格控制配合精度公差。在恒温恒湿的环境中进行装配作业。减少温度变化对配合间隙的影响。装配前要对主轴和轴承进行超净清洗。去除表面的杂质和油污。轴承装配时使用专用装配工具。防止敲击造成轴承滚道损伤。精确控制轴承预紧力。通过测量主轴回转精度来匹配调整预紧力大小。使主轴在回转时径向圆跳动、轴向窜动都在公差允许范围内。主轴、滑枕的装配要保证两者同轴度公差达标。用百分表检测主轴的径向跳动。根据检测结果调整滑枕的装配位置。实现同轴度的精确控制。主轴系统装配完成后要进行空运转磨合试验。在不同的转速档位下检测主轴的振动值、温度变化。保证主轴运转平稳可靠。

4.3 进给系统的装配精度控制

进给系统装配精度决定刨台式铣镗床定位精度、重复定位精度的主要指标。滚珠丝杠、螺母装配时严格控制同轴

度、预紧力。装配前对滚珠丝杠进行精度检验。保证丝杠直线度、螺距累积误差满足设计要求。用专用夹具定位。确保丝杠与导轨平行度符合要求。螺母的预紧力用垫片厚度来调节。预紧力大小要严格符合设计规范。预紧力过大时会增大运动阻力。预紧力过小时会产生反向间隙误差。导轨和滑块的装配要保证导轨面的贴合精度。用人工刮研的工艺方法对导轨面做精细加工。去除表面的毛刺、高点。使滑块与导轨的贴合接触率达到设计要求。进给系统装配完毕后。用激光干涉仪检测定位精度和重复定位精度。根据检测结果在控制系统中进行参数补偿修正。提高进给系统的运动精度。

4.4 整机调试阶段的精度控制

整机调试是刨台式铣镗床装配的最后一个精度控制关键环节。要对整机几何精度和工作精度进行全方位的检测校验。几何精度检测包括床身导轨直线度、立柱垂直度、主轴回转精度、工作台平面度等核心项目。用专业检测设备按照国家标准检测标准规范操作。对检测出的精度偏差。通过调整垫片、补偿参数等方法进行精确修正。工作精度检测采用试切工件验证的方式。选择标准试件。按照预先设定好的加工工艺进行试切加工。检测试件的尺寸精度、形位公差、表面粗糙度等。根据检测结果调整加工参数和装配精度。直至试件精度达到要求。整机调试完成之后。需进行长时间空运转稳定性试验。检验整机运行工况。保证精度长期稳定可靠。

5 精度控制的质量保障措施

5.1 装配人员的技能培训

装配人员的专业技能是保证刨台式铣镗床精度控制的主要人为因素。企业要创建起完善的装配人员技能培训体系。展开理论知识和实操技能双轨培训。理论知识培训包含数控机床结构、装配工艺规范、精度检测原理等内容。实操技能培训采取师徒结对的传帮带方式。由资深技师现场实操指导。提高装配人员的实操工艺水平。定期对装配人员进行技能等级考核。考核内容主要集中在装配工艺执行规范性、精度检测数据准确性等主要方面。考核结果同薪酬绩效相挂钩。调动装配人员的工作积极性以及岗位责任心。强化全员质量意识教育。使装配人员充分认识精度控制的核心重要性。严格按照装配工艺要求开展标准化作业。

5.2 检测设备的精准校准

高精度的检测设备是精度控制的硬件前提。企业要建立完善的检测设备校准制度。定期对激光干涉仪、三坐标测

量仪、扭矩扳手等设备进行量值溯源校准。保证设备的测量精度符合计量规范。校准工作由具有资质的专业计量机构来完成。校准结束后出具正式的校准报告。不合格的设备及时进行维修或者更换。检测设备使用严格按操作规程进行。操作人员必须经过专门培训。熟练掌握设备的使用方法及维护保养技能。防止由于操作不当造成设备精度衰减。同时加强检测设备的日常保养和维护。定时清洁检测设备表面。巡检设备运转工况。延长检测设备使用寿命周期。

5.3 装配流程的标准化管理

标准化的装配流程对保证精度控制的一致性稳定性起着重要的作用。企业需要编制完整的刨台式铣镗床装配作业指导书(SOP)。对各个装配工序的操作步骤、工艺参数、检测标准、质量要求等做出明确规定。指导装配人员按标准进行标准化操作。建立装配过程质量追溯系统。对每台设备的装配全过程进行记录。包含零部件批次、装配工位、检测数据等关键信息。发生质量问题的时候可以迅速回溯原因。加强装配车间现场管理。实行5S精益管理模式。保持车间环境整洁有序。减少环境因素对装配精度的影响。对装配工艺实施定期评审改进。依据生产实践中出现的工艺问题。行业技术发展趋向。及时调整装配工艺参数。操作方法。不断改善装配精度控制水平。

6 结语

刨台式铣镗床装配精度控制是卧式数控机床整机质量保证的重要环节，其牵涉到基础零件加工、装配工艺实施、环境条件控制、关键部件精准定位、装配间隙量化控制等。该技术精准实施之后，可以大幅度提高设备加工精度和运行稳定性，满足航空航天、重型机械等高端领域复杂零部件加工需求，还可以降低设备后续运维成本、延长服役寿命，从而有效提高生产效率与产品竞争力。

参考文献

- [1] 马骋,邵佳煊.卧式五轴数控机床电主轴的动态特性分析及振动抑制优化[J].制造技术与机床,2024,(06):177-182.
- [2] 杨凯,胡兴平,冯常喜,张宁,吴飞,赵志虎.华中数控卧式四轴机床坐标系自动补偿研究[J].制造技术与机床,2023,(01):78-82.
- [3] 曾大庆,陈海源,贺立峰,吴雨春,胡世衡.六轴卧式数控镗铣机床的研究与开发[J].机电工程技术,2022,51(12):244-247+252.
- [4] 唐霖,郑雅泽,张利峰,李欧.大型卧式数控电解加工机床导电轴的分析及试验[J].西安工业大学学报,2021,41(06):635-643.

Research on the release law of hydration heat and optimization of temperature control parameters of precast beam concrete under low temperature environment

Yunjie Wen

China Railway Third Bureau Group Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030031, China

Abstract

The production of prefabricated beams for bridge engineering in cold regions faces significant temperature control challenges in winter. Low temperature conditions weaken the hydration reaction rate of concrete, leading to insufficient early temperature rise and delayed strength growth, which has become a common problem. In construction environments where the temperature remains consistently below 5 °C, even dropping to -10 °C to -15 °C, traditional insulation steam curing systems are difficult to achieve effective hydration heat accumulation and temperature regulation. This study indicates that by optimizing the implementation of the system, the peak hydration temperature can be increased by 8–12 °C, the early strength growth rate can be significantly accelerated, the risk of surface cracks induced by temperature differences can be significantly reduced, and the overall production cycle can be effectively shortened. This study provides a scientific basis for the engineering application of prefabricated bridge beams in winter construction in cold regions.

Keywords

precast beam; Low temperature environment; Hydration heat; Temperature field; Temperature control optimization

低温环境下预制梁混凝土水化热释放规律及温控参数优化研究

文云杰

中铁三局集团建筑安装工程有限公司，中国·山西 太原 030031

摘要

寒冷地区桥梁工程的预制梁生产在冬季面临显著的温控挑战。低温条件削弱混凝土水化反应速率，使早期温升不足与强度增长滞后成为常见问题。在温度始终低于 5 °C，甚至降至 -10 °C 至 -15 °C 的施工环境中，传统的保温—蒸汽养护体系难以实现有效的水化热积聚与温度调控。本研究表明，通过优化体系的实施，水化峰值温度可提升 8–12 °C，早期强度增长速率显著加快，温差诱发的表层裂纹风险大幅降低，整体生产周期得到有效缩短。本研究为寒区桥梁预制梁冬季施工提供可工程化应用的科学依据。

关键词

预制梁；低温环境；水化热；温度场；温控优化

1 引言

随着中国基础设施建设向高海拔、高纬度和严寒地区持续推进，预制梁场冬季施工已从季节性难题转变为常态化技术需求。混凝土早期性能高度依赖温度条件，而低温不仅削弱水化热积聚，还可能造成局部冻结，使材料微结构在尚未胶前即遭受损伤。本文的研究目标在于通过实验观测、模型推导与工程监测相结合的方法，深入揭示低温条件下预制梁水化热的时空演化过程，明确温控措施对水化热动力学

的调节作用，并进一步构建科学、高效且可实施的温控参数优化体系。研究结果对寒冷地区桥梁建设具有直接的应用价值。

2 低温条件下预制梁内部温度场的演化特征与水化热响应规律

预制梁浇筑后的温度场演化受多重因素共同控制，包括水化热释放过程、梁体几何特征、模板与保温层的热工性能、外界温度变化与风速扰动等。在低温环境下，这一演化过程呈现显著的非对称性：内部温度虽然随水化反应上升，但其峰值幅度低、上升速度慢；而表面温度因对流散热增强而迅速下降，形成极大的表里温差。

【作者简介】文云杰（1984—），男，中国山西孝义人，本科，高级工程师，从事桥梁工程研究。

大量监测数据显示,当环境温度为 -10°C 时,预制梁表层温度在浇筑 4 小时后便可降至接近环境温度,而内部温度却仍未进入水化加速期,导致梁体截面存在超过 20°C 的温差。随着水化反应缓慢启动,内部温度在 18~22 小时达到低峰值,但此时表层温度仍保持极低状态,温度梯度持续拉大。这种“表冷心弱”的模式使梁体在早龄期呈现高度应力敏化特征,尤其是翼缘板和腹板交界区域,由于几何突变与散热增强,更容易产生裂缝。模板体系对温度场分布的影响在低温环境中被极大放大。金属模板的高导热性使其成为结构表面散热的主要通道;若未采取有效保温措施,模板可带走超过 50% 的内部热量,使内部水化反应难以达到自升温条件。因此,在低温环境中,温控措施的核心任务之一便是限制模板散热,从而为水化热积聚创造条件。

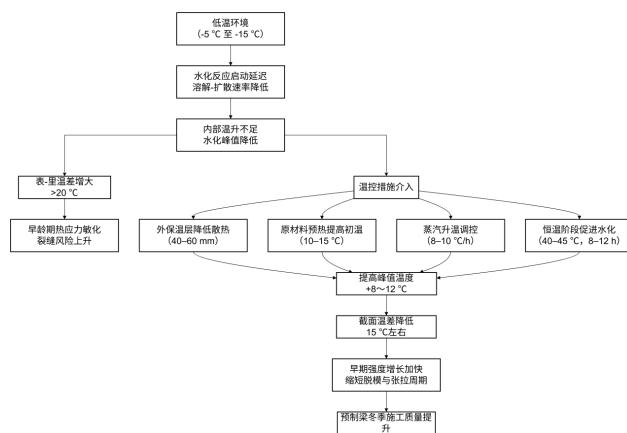


图 1 温控条件下预制梁水化热与温控过程机理示意图

图 1 展示了低温条件下预制梁混凝土水化热释放过程中的关键影响因素及温控措施介入后的作路径。可以看到,温控体系通过调节初始温度、抑制模板散热与构建稳定的恒温区间,使水化反应得以维持连续且高效的能级状态,从而有效改善峰值温度、截面温差及早龄期力学性能。

3 温控体系对水化热演化的调节作用及关键参数分析

3.1 温控措施对水化热释放过程的调节机理

在低温环境下,混凝土早期水化行为呈现出峰值低、启动慢、过程滞后的明显特征,使预制梁内部温度难以维持水化反应所需的温度。温控体系的作用并不仅限于提高混凝土的初始温度,而在于通过改变材料初始能级、控制外界散热与调整水化反应的能量平衡,使内部温度场在早龄期形成相对稳定的热环境。水泥水化属于放热过程,而低温条件下溶解-扩散-成核的动力被显著削弱,导致放热强度不足以抵抗外部散热,因此外保温、骨料预热与模板预热在启动阶段起着改变反应初始条件的关键作用。实践表明,当混凝土拌和物入模温度由 5°C 提高至 12°C 左右时,诱导期显著缩短,水化反应更快进入加速阶段,内部温度上升曲线也呈现

更陡的增长趋势,为后续的蒸汽升温与恒温调控奠定基础。

在温控体系中,外保温层承担了防止结构表面快速散热的首要功能。预制梁的钢模板具有较高的导热性,使其在低温环境下成为热量流失的主要通道;若无保温覆盖,混凝土表层温度在浇筑数小时内即可下降至接近环境温度,而核心区水化尚未充分启动,截面温差迅速拉大,导致热应力集中。外保温层通过降低模板-空气界面的换热系数,使表层温度保持在水化反应可持续进行的区间,为内部热量的积聚创造必要条件。温控体系的综合调节效果体现在水化热峰值高度、峰值出现时刻及截面温差等多个响应指标中。通过对不同温控方案的对比发现,保温、预热与升温制度的组合不仅可以将峰值温度提高 $8\sim12^{\circ}\text{C}$,还可将峰值时间提前 4~6 小时,使混凝土早期强度增长曲线发生显著改善;同时,由于表层温度得到有效维持,截面温差由未温控时的 25°C 以上下降至 15°C 左右,使热应力敏感性显著降低。可以看出,温控体系对水化热演化的调节并非单一措施的线性叠加,而是通过在不同阶段改变能量输入与散失模式,使水化反应从低温抑制状态转入可控的升温-恒温-降温路径,形成更适宜强度发展的热环境^[1]。

3.2 关键温控参数的敏感性特征与优化方向

在低温施工条件下,温控体系涉及的参数众多,且不同参数对温度场的影响程度差异显著。保温层厚度、原材料预热温度、蒸汽升温速率、恒温温度与恒温时长等因素共同塑造了水化热演化的时空特征,而参数之间存在明显的耦合关系,使温控过程呈现高敏感性与高非线性。研究表明,在 -10°C 环境中,保温厚度每增加 10 mm ,内部峰值温度可提高 $2\sim4^{\circ}\text{C}$;但当厚度超过 60 mm 后,温升增益逐渐趋缓。这说明保温层存在合理区间,其作用机理在于控制模板的散热强度,使内部水化释放的热量能够维持温度增长,从而推动反应持续向前。对于预制梁这种表面散热显著的结构类型,适宜的保温厚度往往比普通构件更高,实际工程中 $40\sim60\text{ mm}$ 区间具有较强适用性^[2]。

原材料遇热的敏感性同样突出。骨料和拌和水作为混凝土的主要热容量组分,其温度直接决定了入模温度的初始水平;入模时温度每提升 5°C ,峰值温度可提升 $3\sim5^{\circ}\text{C}$,峰值时间提前 2~3 小时。然而若预热温度过高,表层可能因快速散热形成倒置温差,反而增加裂缝风险,因此预热策略需在提高初始能级和控制温差之间取得平衡。蒸汽升温制度在整个温控体系中具有最高的灵活性,其升温速率、恒温阶段的设定温度以及加热持续时间直接影响水化反应的能量输入方式。当升温速率控制在 $8\sim10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时,内部温度曲线平稳且温差可控;升温过快则易导致外冷内热的不均衡现象,使应力积累加剧。恒温阶段的设置可以显著提升水化反应强度,使峰值温度在低温环境中重新获得可控性,恒温温度维持在 $40\sim45^{\circ}\text{C}$ 的范围内可使水化反应进入最有效的能量转化区间。

4 温控参数优化体系构建及工程化应用验证

4.1 温控参数优化的理论依据与综合评估方法

在严寒环境下，预制梁混凝土温度场的调控属于典型的多变量耦合问题，其温控效果既取决于单项措施的有效性，也依赖于各参数之间的协同关系。由于水化热释放过程受温度驱动的特性十分明显，只要任一环节在时间或空间上出现不连续，都会使反应路径被迫重构，从而影响整体温升与早期强度增长。因此，温控参数优化的核心在于构建一种能使入模期、升温期、恒温期与降温期之间保持热过程连续性的动态调控体系。在前期研究中，通过大量温度场监测数据与热力耦合模型的拟合，可以明确不同参数对峰值温度、峰值时间及截面温差的敏感性规律，为参数优化提供量化依据^[3]。

温控参数的优化不能仅依赖传统经验判断，而需基于系统的综合评估方法。在实际过程中，可将峰值温度的可达性、温差的可控性、强度增长的充分性以及能耗水平纳入同一评价框架中，通过构建具有权重差异的指标体系实现不同方案的比较。理论上，当内部峰值温度维持在40℃以上、峰值时间不超过18小时、截面温差保持在20℃以内时，混凝土的早期强度与体积稳定性均能保证达到工程要求。为了使优化过程更具可操作性，需将保温厚度、原材料预热温度、升温速率、恒温温度与恒温时长等五类关键参数纳入多目标调控模型，通过寻求一组在热工、安全与能耗之间取得平衡的参数组合来实现优化目标。

从大样本数据分析可以看出，当外保温厚度处于40–60mm区间、原材料预热温度维持在10–15℃之间、升温速率控制在8–10℃/h、恒温温度保持在40–45℃时，结构内部的水化反应可以维持稳定且连续的释放模式，温度曲线呈现平缓上升、适度峰值与缓降过程，使结构处于最有利的热环境中。实践中通过在梁端及翼缘薄弱部位配置可控加热装置，可以使表层温度不再出现早期骤降现象，从而显著降低表层裂缝的敏感性。由此可见，温控参数优化需要在整体性调控框架下实现动态匹配，而并非对单一措施进行强化。

4.2 工程化实施策略与应用效果分析

温控参数的工程化实施不仅要求理论可行，更依赖于现场资源条件、施工组织方式与梁场生产节奏的多重制约。为确保优化参数能够在严寒环境下稳定落地，必须构建一套

具备可重复性、可调节性与安全性的实施策略。在实际工程中，预制梁场通常采用定槽蒸汽养护系统作为主控手段，而保温体系与原材料预热体系则与其形成互补关系，使温控过程从混凝土拌和开始，到脱模与张拉结束的全过程均具有可控性。以某寒冷地区高铁项目梁场为例，当冬季最低气温降至-15℃时，通过实施优化后的温控组合措施，使混凝土的入模温度稳定在12℃左右，在升温阶段达到较为均匀的增长速度，恒温阶段保持在42℃上下波动，从而使内部温度峰值顺利达到41–43℃的目标范围。

在工程应用过程中，优化参数的实施效果不仅体现在温度曲线的改善上，更体现在早期强度增长速率、裂缝控制表现以及生产节奏的提升上。监测数据显示，优化措施实施后，混凝土在24小时龄期的抗压强度比未优化前提高超过60%，并可在30–32小时达到张拉要求，使梁体的周转周期明显缩短。更为重要的是，梁体表层裂缝发生率显著下降，翼缘板边缘等易裂部位的温度梯度得到有效控制，使结构的体积稳定性明显提升。

5 结语

低温环境下预制梁混凝土水化热释放过程具有峰值低、滞后明显、温差大和早期强度缓慢等特征，使冬季施工在质量控制和施工效率方面面临严峻挑战。本文从水泥水化动力学出发，揭示了低温对水化机理与温度场演化的系统性影响，并通过大量监测数据和模拟分析明确了水化热演化的关键规律。在此基础上，构建的温控参数优化体系能够有效提升内部温升、降低截面温差并加速早期强度增长，工程验证证明该体系具有显著的可实施性与经济价值。未来可将数字孪生技术、智能传感与自动化控制引入温控体系，实现温度场预测、能耗优化与过程自适应调控，为寒冷地区预制梁全生命周期质量管理提供更加先进的技术支撑。

参考文献

- [1] 刘林田,林家兴,杨彤薇,等.掺粉煤灰、石灰粉对大体积混凝土水化热性能影响分析[J].建筑技术开发,2025,52(03):142-144.
- [2] 侯艳娟,单世龙,李正宁,等.玻化粉煤灰微珠混凝土基本力学性能及水化热释放研究[J].铁道勘察,2023,49(04):7-12+34.
- [3] 代金鹏.钻孔灌注桩混凝土水化热与冻土环境耦合作用下时变温度场研究[D].兰州交通大学,2020.