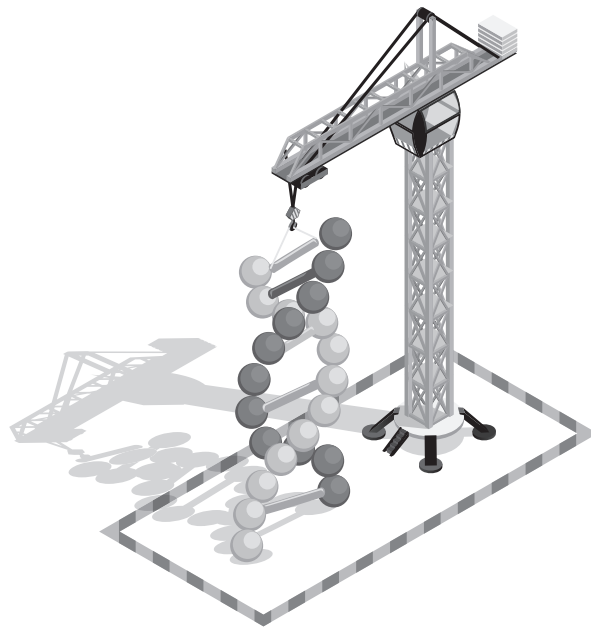


工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2026 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu

Guizhou Institute of Geological Exploration, General Bureau of Geology
and Mines, Sinochem, China

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第4卷 第1期 2026年1月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

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

网址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

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

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



工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- 001 水利工程中混凝土裂缝防治技术研究 顾子龙, 王蕊, 王旭, 张闯, 朱明
Research on the Prevention and Control Technology of Concrete Cracks in Water
Conservancy Projects Gu Zilong, Wang Rui, Wang Xu, Zhang Chuang, Zhu Ming
- 004 公路软土地基处理施工技术与案例分析 李富光
Research on Construction Techniques and Case Studies for Soft Soil Foundation
Treatment in Highway Projects Li Fuguang
- 007 高密度电法与瞬变电磁法联合反演在深层地下水
探测中的应用 马维龙, 赵剑, 孙彦海, 刘庆, 詹佛祥, 石致君, 靳智强
Application of Joint Inversion of High-Density Electrical Method and Transient
Electromagnetic Method in Deep Groundwater Exploration Ma Weilong, Zhao Jian, Sun Yanhai, Liu Qing,
Zhan Foxiang, Shi Zhijun, Jin Zhiqiang
- 012 火电厂智能预警与应急管理系统开发 王东清, 马战南, 孙明雪, 吴建国
Development of Intelligent Early Warning and Emergency Management System for
Thermal Power Plant Wang Dongqing, Ma Zhannan, Sun Mingxue, Wu Jianguo
- 015 极端降雨天气下地铁车站积水风险演化规律
及应急疏散路径优化研究 张洁
Research on The Evolution Pattern of Water Accumulation Risk in Subway
Stations under Extreme Rainfall Conditions and Optimization of
Emergency Evacuation Routes Zhang Jie
- 019 地铁车站道岔智能监测与行车安全保障技术研究 李若琦
Research on Intelligent Monitoring and Traffic Safety Technology
of Subway Station Turnout Li Ruoyi
- 022 不停航施工条件下机场排水箱涵分段预制与湿接技术运用 王智文
Application of Segmental Prefabrication and Wet Connection Technology for Airport
Drainage Box Culverts under Conditions of Non-Suspension
of Flight Operations Wang Zhiwen
- 026 工程项目招投标阶段的风险分析与防范 周新宇, 王毅, 李伟林
Risk Analysis and Prevention in the Bidding Phase
of Engineering Projects Zhou Xinyu, Wang Yi, Li Weilin
- 029 智能采矿技术在矿山安全生产中的作用探讨 柳延波, 高庆波, 邱业禹
Discussion on The Role of Intelligent Mining Technology in
Mine Safety Production Liu Yanbo, Gao Qingbo, Qiu Yeyu
- 032 双突工作面初采期间老塘快速垮落技术研究 解海军
Research on the Rapid Collapse Technology of the old pond during the Initial Mining
Period of the Double-burst Working Face Xie Haijun
- 035 露天煤矿机械设备的自动化管理与优化 院鹏春, 袁伟, 赵志鹏
Automation Management and Optimization of Mechanical Equipment
in Open-Pit Coal Mines Yuan Pengchun, Yuan Wei, Zhao Zhipeng
- 038 公路工程建设中混凝土的裂缝成因及应对策略 朱申荣
Causes of Concrete Cracking in Highway Engineering Construction
and Corresponding Strategies Zhu Shenrong
- 041 深厚红层软岩地基开挖过程中蠕变特性及支护结构受力分析 张博, 李迷
Creep Characteristics and Stress Analysis of Support Structures During the Excavation
of Deep Red-Bed Soft Rock Foundations Zhang Bo, Li Mi
- 044 军用电子装备高功率微波防护技术研究 宁琦
Research on High-Power Microwave Protection Technologies for
Military Electronic Equipment Ning Qi

047	碳化养护对混凝土与再生骨料性能的影响研究进展综述 A Review of Research Progress on the Effects of Carbonation Curing on the Properties of Concrete and Recycled Aggregates	张西巡 Zhang Xixun
050	水利工程施工进度管理与控制策略研究 Research on Management and Control Strategies for Construction Progress of Water Conservancy Projects	樊龙飞 Fan Longfei
053	锚杆静压桩预埋锚筋设计验算方法探究 Research on Design Verification Methodology for Pre-embedded Anchor Bars in Anchor Static Piles	陈希铭, 林华国, 张元勇 Chen Ximing, Lin Huaguo, Zhang Yuanyong
057	角度尺校准方法及其不确定度分析 Calibration Method for Angle Gauges and Its Uncertainty Analysis	李薇 Li Wei
060	岩土工程施工中注浆技术的应用策略 Application Strategies of Grouting Technology in Geotechnical Engineering Construction	黄卫林 Huang Weilin
064	绿色岩土勘察理念在土木工程中的实践与发展趋势 Practice and Development Trends of Green Geotechnical Investigation Concept in Civil Engineering	巢哲 Chao Zhe
067	复杂地质条件下岩土边坡地震动力响应特性及加固措施研究 Research on Seismic Dynamic Response Characteristics and Reinforcement Measures of Rock-Soil Slopes under Complex Geological Conditions	孙坤元 Sun Kunyuan
070	岩土工程中抗浮锚杆施工技术的应用 Application of Anti-Floating Anchor Construction Technology in Geotechnical Engineering	姚志锋 Yao Zhifeng

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

073	元宇宙视角下姑苏古城数字化更新实践研究 Research on the Digital Renewal Practice of the Ancient City of Gusu from the Perspective of the Metaverse	陈思怡 Chen Siyi
076	“图形特征”法快速绘制静定梁内力图教学研究 Teaching Research on Rapid Drawing of Internal Force Diagrams for Statically Determinate Beams Using the "Graphic Characteristics" Method	赵永胜 Zhao Yongsheng
079	既有房屋排险工作中的风险评估与应急管理 Risk Assessment and Emergency Management in the Risk Elimination Work for Existing Buildings	李冬 Li Dong
082	建筑工程项目成本控制与管理策略研究 Research on Cost Control and Management Strategies for Construction Engineering Projects	王金媛 Wang Jinyuan
085	新型自复位 RC 装配式剪力墙抗震性能与机理研究 Research on the Seismic Performance and Mechanism of a New Type of Self-Centering RC Prefabricated Shear Wall	刘香香 Liu Xiangxiang
089	旧厂房加固改造中承重梁修复技术探讨 Discussion on the Repair Technology of Load-Bearing Beams in the Reinforcement and Renovation of Old Factory Buildings	程俊飞, 裴新新 Cheng Junfei , Pei Xinxin
092	社区防灾生活圈的支撑体系构建 Construction of A Support System for Community Disaster Prevention and Daily Life Circles	徐圣奇 Xu Shengqi
095	人工智能技术在建筑工程造价快速估算中的应用与精度验证 The Application and Accuracy Verification of Artificial Intelligence Technology in the Rapid Estimation of Construction Project Cost	张河 Zhang He
099	数字化技术赋能超高层建筑混凝土施工全过程质量追溯与管控 Digital Technology Empowers Full-Process Quality Traceability and Control in Concrete Construction of Super High-Rise Buildings	麦广仙, 李泽威, 陈泽然 Mai Guangxian, Li Zewei, Chen Zeran
102	建筑信息模型 (BIM) 技术在建筑施工中的应用分析 Analysis of the Application of Building Information Modeling (BIM) Technology in Building Construction	刘敏 Liu Min
105	电力土建施工中绿色建材应用降低环境影响 Application of Green Building Materials in Electric Power Civil Engineering Construction to Reduce Environmental Impact	陈晓忠 Chen Xiaozhong
108	传统旅游景区结合民族风貌改造设计实证研究——以大理蝴蝶泉为例 Empirical Study on the Renovation and Design of Traditional Scenic Areas Combined with Ethnic Styles — A Case Study of Dali Butterfly Spring	朱航宇 Zhu Hangyu

电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

111	CTCS-3无线超时故障处置机制研究 Research on the Disposal Mechanism for CTCS-3 Wireless Timeout Faults	王悦亭, 赵兴强, 赵学, 马雁波, 张紫佩 Wang Yueting, Zhao Xingqiang, Zhao Xue, Ma Yanbo, Zhang Zipei
115	核电站实物保护系统门禁子系统国产化优化路径探析 Analysis on the Localization Optimization Path of Access Control Subsystem of Nuclear Power Plant Physical Protection System	潘航, 段丹阳 Pan Hang, Duan Danyang
118	基于5G与物联网技术的智慧工地安全管理体系构建与应用 Construction and Application of Smart Construction Site Safety Management System Based on 5G and Internet of Things Technology	史亚 Shi Ya

水利工程中混凝土裂缝防治技术研究

顾子龙¹, 王蕊², 王旭¹, 张闯¹, 朱明¹

1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 江苏省淮沐新河管理处, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2026010002

摘 要 : 水利工程中混凝土裂缝问题普遍存在, 直接影响结构的安全性与耐久性。通过对裂缝成因进行系统分析, 结合工程实践和数据对比, 总结出材料优化、结构改进、施工控制及养护管理等多层次的防治措施。结果显示, 合理控制水化热、优化配合比、采用新型掺合料与纤维材料, 并辅以科学的施工工艺和养护方法, 能够有效降低裂缝发生率, 提升整体结构性能。研究成果为提高水利工程质量与延长服役寿命提供了有价值的技术参考。

关 键 词 : 水利工程; 混凝土裂缝; 防治技术; 耐久性

Research on the Prevention and Control Technology of Concrete Cracks in Water Conservancy Projects

Gu Zilong¹, Wang Rui², Wang Xu¹, Zhang Chuang¹, Zhu Ming¹

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

2. Management Office of Huaishu Xinhe in Jiangsu Province, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : The issue of concrete cracks is prevalent in water conservancy projects, directly impacting the safety and durability of structures. Through a systematic analysis of the causes of cracks, combined with engineering practices and data comparisons, this study summarizes multi-level prevention and control measures, including material optimization, structural improvement, construction control, and maintenance management. The results demonstrate that reasonable control of hydration heat, optimization of mix proportions, adoption of new admixtures and fiber materials, complemented by scientific construction techniques and maintenance methods, can effectively reduce the incidence of cracks and enhance overall structural performance. The research findings provide valuable technical references for improving the quality and extending the service life of water conservancy projects.

Keywords : water conservancy projects; concrete cracks; prevention and control technology; durability

引言

水利工程规模庞大, 混凝土作为主要建材, 在施工与运行中极易产生裂缝, 严重影响结构的安全性与耐久性。尽管国内外学者已在裂缝防治方面开展了多层次研究, 但面对水利工程复杂环境条件, 仍存在适用性不足与措施不完善的问题。为进一步提升工程质量与延长服役寿命, 亟需从材料、结构、施工及养护等方面提出系统化的防裂技术路径, 为后续实践与技术推广提供参考。

一、混凝土裂缝的成因分析

(一) 材料因素

混凝土作为一种多组分复合材料, 其内在质量直接决定了裂缝产生的可能性。首先, 水泥水化热是引发裂缝的主要原因之一。在大体积混凝土中, 水化反应剧烈放热, 内部温度急剧上升, 而表层散热快, 形成明显的温度梯度, 极易导致内外收缩不均, 从而产生温度裂缝。其次, 骨料级配不合理也会加剧裂缝风险。当粗细骨料搭配不当时, 骨料间空隙过大, 需水量增加, 导致干缩变形加大, 进而削弱了混凝土整体抗裂性能。再次, 外加

剂的使用若控制不当同样会带来不利影响。比如减水剂、膨胀剂等虽然能改善流动性和早期性能, 但若掺量不合理, 可能导致混凝土结构稳定性下降, 表现为开裂或收缩不均。因此, 材料的选择、配比及掺合料的科学应用, 是决定混凝土裂缝形成与否的重要因素^[1]。

(二) 环境因素

水利工程通常处于复杂的自然环境中, 外部条件对混凝土裂缝的形成有着显著影响。温度变化是最直接的因素, 昼夜温差或季节性温差过大时, 混凝土内外部温度应力差增加, 极易出现表面裂缝或深层裂缝。尤其在水库大坝、渠道等工程中, 太阳辐射

和环境气温的波动都会加剧这种影响。其次，水文条件变化显著。在高水位冲刷或水流长期浸泡的作用下，混凝土结构表层易受到侵蚀或反复渗透，导致内部孔隙扩大，从而引发裂缝。再次，干湿交替循环是另一关键因素。在部分工程中，混凝土长期处于时干时湿的环境中，体积反复膨胀和收缩，久而久之形成疲劳裂缝。由此可见，环境条件是裂缝发生的重要外部推动力，若缺乏有效的温控与防护措施，裂缝的不可避免性将大大增加。

（三）施工与结构因素

施工工艺与结构设计往往是影响裂缝产生的直接原因。首先，浇筑工艺不当极易诱发裂缝。在大体积混凝土浇筑过程中，若未能分层分块合理安排，或振捣不均，容易形成冷缝、离析或孔隙，进而削弱整体强度，最终以裂缝形式表现出来。其次，约束应力是施工阶段不可忽视的因素。当混凝土因温度变化或收缩变形受到外部结构或地基的约束时，应力无法释放，最终以裂缝的形式释放能量。此外，结构受力集中也会成为裂缝的源头。例如在坝体转角、闸墩根部或孔口位置，受力复杂且不均，极易在荷载作用下形成应力集中区，从而产生裂缝。如果设计阶段未充分考虑这些薄弱环节，或者缺乏相应的结构加固与应力释放措施，裂缝必然会频繁出现^[2]。由此可见，科学的施工工艺与合理的结构设计，是降低裂缝风险的关键所在，如图1所示。



图1 混凝土裂缝成因分类示意图

二、混凝土裂缝的危害与评价

（一）对结构安全性的影响

混凝土裂缝最直接的危害在于对结构安全性的削弱。水利工程中常见的裂缝一旦产生，不仅破坏了整体结构的完整性，还可能造成应力重新分布，使局部构件承受的荷载超过设计限值。当裂缝不断扩展和加深时，坝体、堤防或渠道等结构就会出现渗漏通道，水流通过裂缝冲刷内部材料，导致结构密实性下降，渗透压力增大，进而引发渗漏、管涌等危险现象。在某些情况下，裂缝甚至可能引起结构整体的失稳与破坏，带来严重的安全隐患。例如，大坝出现纵向贯穿裂缝时，坝体抗滑稳定性显著降低，在洪水或地震等极端荷载作用下极易导致工程事故。因此，裂缝不仅仅是表面的瑕疵，而是威胁结构安全的潜在灾害源，其对工程稳定性的重要性必须引起高度重视^[3]。

（二）对耐久性的影响

除了对结构安全性的直接威胁外，裂缝对混凝土耐久性的破坏更加隐蔽且长期存在。裂缝的出现为外部侵蚀介质提供了通道，水分、氧气以及氯离子、硫酸盐等腐蚀性物质能够顺利进入

混凝土内部，造成钢筋锈蚀和混凝土碳化。钢筋锈蚀不仅降低其截面有效面积，还会因锈胀效应产生更大的膨胀应力，使裂缝进一步扩展，从而形成恶性循环。此外，在水利工程长期服役过程中，裂缝的存在加速了冻融循环破坏，尤其在寒冷地区，当水分进入裂缝后反复冻融，混凝土表层剥落、内部孔隙增大，导致结构逐渐劣化。耐久性下降最终表现为结构承载力衰减、使用寿命缩短以及维护成本大幅增加。由此可见，裂缝不仅影响当下的使用功能，还直接决定了工程未来几十年的服役性能，是制约水利工程可持续运行的重要隐患。

（三）裂缝检测与评价方法

由于裂缝对结构安全性与耐久性的危害显著，科学的检测与评价尤为关键。常用方法包括超声波检测、裂缝宽度监测和渗透试验等。超声波检测利用波速在裂缝处的衰减与反射特性来判断裂缝的深度与分布情况，适用于较深层或隐蔽裂缝的识别。裂缝宽度监测则多通过裂缝计或光学显微镜等工具实现，能够精确记录裂缝的宽度、长度及发展趋势，为工程管理者提供量化数据支撑。渗透试验则通过压力水作用于混凝土表面，观察渗水情况，以评价裂缝的贯通性与渗透风险。此外，近年来还发展了基于数字图像处理的非接触式监测技术以及光纤传感技术，能够实现实时、自动化的裂缝监控，为裂缝发展趋势的预警提供更加可靠的依据^[4]。通过多种检测方法的综合应用，可以全面评价裂缝的性质、程度及对结构的影响，从而为制定合理的修复与防治措施提供科学依据。

三、防治裂缝的材料与结构措施

（一）优化配合比设计

在混凝土配合比设计中，合理控制水灰比是减少裂缝的重要手段。研究表明，当水灰比由0.55降低至0.40时，混凝土的抗拉强度提高约18%，干缩率下降近25%，显著降低了早期裂缝风险。使用低水化热水泥可以有效减缓水化反应释放的热量，从而减小内部温度梯度。例如在某水利枢纽工程中，采用中热硅酸盐水泥后，浇筑块体最高中心温度比普通硅酸盐水泥降低12℃，有效避免了大面积温度裂缝。同时，外加剂的应用也起到关键作用，减水剂可在保持工作性能的同时降低需水量，膨胀剂则能补偿收缩应变。据工程试验数据显示，掺入3%膨胀剂的混凝土其收缩率下降了近40%，裂缝发生率显著减少。因此，优化配合比不仅是材料科学问题，更是防裂设计中的核心环节^[5]。

（二）新型材料应用

随着新型建材的发展，纤维混凝土、膨胀剂和矿物掺合料在裂缝防治中的应用愈加广泛。纤维混凝土因掺入钢纤维、聚丙烯纤维或玄武岩纤维而显著提升抗裂性能，纤维能在微裂缝萌生阶段进行有效桥接，延缓裂缝扩展。据试验数据表明，掺入1.0%聚丙烯纤维的混凝土，抗弯强度提高了22%，裂缝宽度降低了45%。膨胀剂通过水化反应生成钙矾石，在硬化过程中产生适度膨胀，可抵消部分收缩变形，尤其适合大体积水工结构。矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉和硅灰则能改善混凝土微观结构，减少毛

细孔隙，提升抗渗性。以某大坝为例，采用30% 粉煤灰取代部分水泥后，28天抗渗系数提高了1.6倍，裂缝发生率降低约35%。由此可见，新型材料的合理使用是提高水工混凝土抗裂性能的重要途径^[6]。

（三）结构优化措施

除了材料层面的改善，合理的结构设计同样在防裂中起到关键作用。伸缩缝的合理布置能够有效释放混凝土温度应力和干缩应力，防止应力集中导致贯穿裂缝。例如在一座拱坝工程中，通过将伸缩缝间距由25米缩短至15米，裂缝数量减少了近40%。此外，加强钢筋布置也是有效措施，特别是在应力集中部位采用双层双向钢筋网或配置抗裂钢筋，可以大大提高结构整体抗拉性能。实测数据显示，钢筋率由0.7% 提高至1.0% 时，裂缝控制宽度由0.35mm 降低至0.18mm，抗裂效果明显。合理设置约束释放区、避免尖锐转角及截面突变，也能有效改善结构受力条件，降低裂缝发生概率。由此，结构优化与材料措施相辅相成，是水利工程裂缝控制不可或缺的一环。如表1 所示。

表1 不同防裂措施的效果对比

防裂措施	技术要点	裂缝减少率（%）	性能提升效果	工程实例效果
优化配合比设计	控制水灰比、低水化热水泥、外加剂	30 - 45	抗拉强度提高15 - 20%，收缩率下降20 - 30%	大坝中心温度降低12℃，裂缝率下降40%
纤维混凝土	掺入聚丙烯或钢纤维	40 - 55	抗弯强度提高20% 以上，裂缝宽度降低40 - 50%	裂缝数量明显减少，抗裂耐久性提高
膨胀剂与矿物掺合料	膨胀补偿、粉煤灰、矿渣粉等	25 - 35	抗渗性提高1.5 倍，收缩变形减小30%	裂缝发生率下降30 - 40%
结构优化（缝与钢筋布置）	缩短伸缩缝间距，加强钢筋配置	35 - 50	裂缝控制宽度降低40 - 50%	裂缝减少近40%，结构稳定性提升

数据表明，综合运用配合比优化、新型材料及结构优化措施，裂缝减少率普遍超过30%，其中纤维混凝土与合理钢筋布置效果尤为显著，对水利工程安全性和耐久性提升具有重要意义。

四、施工与后期养护的防裂措施

（一）施工工艺优化

在混凝土施工过程中，合理的工艺控制是防止裂缝产生的前提。分层分块浇筑能够有效减少水化热集中释放带来的温度裂缝，尤其在大体积混凝土中，常采用“斜面分层”与“跳仓法”浇筑，以降低内外温差。温控措施方面，常通过预冷骨料、掺加

冰水或在浇筑区设置冷却水管来降低混凝土初始温度，使浇筑温度控制在15 ~ 20℃之间，从而减小温度应力。振捣工艺同样重要，若振捣不足易导致混凝土离析、孔隙增多，强度不足而引发裂缝；若振捣过度，则会出现泌水与分层^[7]。因此在施工中应严格控制振捣时间与间距，确保结构致密性与均匀性。

（二）养护措施

养护是混凝土强度和抗裂性能形成的重要环节。保湿养护可避免早期失水干缩，常用的措施包括覆盖麻袋、塑料薄膜或喷洒养护剂，使混凝土表面保持湿润。覆盖保温则在昼夜温差或季节变化较大的环境中尤为关键，可采用草帘、岩棉被等材料，延缓温度梯度形成。对于大体积混凝土，循环冷却水养护效果显著，例如在坝体内部埋设冷却水管道，利用水流带走水化热，可将核心温度降低8 ~ 10℃，有效避免内部裂缝产生。此外，养护时间的控制也十分重要，通常不少于14天，特殊工程甚至延长至28天，以确保水化反应充分进行。若在早期阶段未能保证科学养护，极易造成不可逆裂缝，对结构长期性能产生不利影响。养护措施的系统实施不仅能减少早期裂缝，还能提高混凝土密实度和耐久性^[8]。

（三）监测与管理

施工与养护过程中，监测与管理是保证防裂效果的最后一道关口。裂缝监控系统可通过传感器与数据采集仪实时记录裂缝宽度、发展速度和温度湿度变化，为工程管理提供科学依据。近年来，光纤传感与数字图像技术的应用显著提高了裂缝监测的精度和自动化水平。在管理层面，质量控制应标准化与制度化，从原材料进场、配合比调整到施工工艺和养护环节都需严格把关。通过建立完善的施工质量验收制度与裂缝应急处理机制，能够实现对裂缝的早发现、早处理，最大限度降低其对结构安全与耐久性的影响。

五、结语

水利工程中混凝土裂缝问题普遍且复杂，其成因涉及材料特性、环境作用及施工结构因素，危害表现为安全性下降与耐久性劣化。通过系统分析与数据对比可知，优化配合比、新型材料应用、合理结构设计以及科学施工与养护措施均能显著降低裂缝发生率，提升工程整体性能。同时，裂缝检测与监测技术的发展为及时评估与防治提供了有力支撑。未来应加强智能监测与大数据分析应用，以实现裂缝防控的精细化与长效化。

参考文献

[1] 马鹏,王汴歌,翟晋浩,等. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治 [J]. 河南水利与南水北调, 2018, 47(01): 44-45.
[2] 刘冬华. 水利施工工程中混凝土裂缝的防治技术 [J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(12): 77-79.DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2016.12.024.
[3] 李彤. 论混凝土裂缝防治技术在土木工程中的重要性 [J]. 黑龙江科技信息, 2016, (16): 253.
[4] 江建军. 水利工程施工中混凝土裂缝的原因分析及防治 [J]. 信息化建设, 2016, (06): 11.
[5] 郑淑峰. 水利工程施工中混凝土裂缝防治技术 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2016, 25(02): 15-16.
[6] 潘葵敏. 水利工程施工中混凝土裂缝的种类与防治措施分析 [J]. 企业技术开发, 2015, 34(21): 162-163.
[7] 弋瑞. 水利工程施工中混凝土裂缝控制技术分析 [J]. 工程建设与设计, 2017, (21): 215-217.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2017.11.068.
[8] 蒋斌. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术 [J]. 黑龙江科技信息, 2017, (08): 187.

公路软土地基处理施工技术与案例分析

李富光

河北光太路桥工程集团有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2026010003

摘 要： 软土地基在公路建设中常因其承载力低、压缩性高、稳定性差等特点，严重影响道路工程的施工质量与使用寿命。本文围绕软土地基处理的关键施工技术展开探讨，系统梳理常用加固方法及其适用条件，并结合具体工程案例分析各类技术的实践效果。通过数据对比、技术评估，提出优化施工流程、提高处理效率和安全性的建议，为今后类似工程提供技术支持和参考依据。

关 键 词： 软土地基；公路工程；地基加固；施工技术；案例分析

Research on Construction Techniques and Case Studies for Soft Soil Foundation Treatment in Highway Projects

Li Fuguang

Hebei Guangtai Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract： Soft soil foundations often significantly impact the construction quality and service life of highway projects due to their low bearing capacity, high compressibility, and poor stability. This paper explores key construction techniques for soft soil foundation treatment, systematically reviews commonly used reinforcement methods and their applicable conditions, and analyzes the practical effects of various techniques through specific engineering case studies. By comparing data and evaluating technologies, recommendations are proposed to optimize construction processes, enhance treatment efficiency, and improve safety, providing technical support and reference for similar future projects.

Keywords： soft soil foundation; highway engineering; foundation reinforcement; construction techniques; case analysis

引言

随着我国交通基础设施建设的快速推进，公路建设日益深入软土地区，软土地基问题逐渐凸显。科学、经济、高效地处理软土地基，成为工程质量控制和成本管理的关键。本文以实用技术为导向，系统总结软土地基处理的主流施工技术，并通过工程案例对其应用效果进行分析，旨在为今后公路工程地基处理提供可操作性的技术指导。

一、软土地基的工程特性与处理原则

（一）软土地基的物理力学特征

软土地基是指以饱和黏性土、淤泥质土或泥炭土为主要成分的地基类型，广泛分布于河流三角洲、湖泊岸边、滩涂区和沿海低洼地带。这类土体因沉积时间短、有机质含量高、水分充足，其物理力学性质普遍存在显著弱点，表现为承载力极低、压缩性极强、渗透性差、天然含水率高、剪切强度低，且在外界扰动或荷载作用下容易出现流变性。在施工过程中，一旦直接在未经处理的软土地基上进行荷载传递，常会引发严重的工后沉降、结构倾斜、开裂甚至滑移等工程病害，影响道路的正常使用和安全性。特别是在公路工程中，由于车辆荷载反复作用和长期运行需求，对地基的稳定性和承载力提出了更高要求。若不对软土地基

进行科学有效的加固处理，不仅施工过程风险高，还将大幅增加运维成本^[1]。因此，对软土地基的物理力学特性进行准确识别与参数掌握，是制定合理处理方案、保障工程质量的前提与基础。

（二）地基处理的基本目标

软土地基处理的核心目标在于全面提升地基的强度与稳定性，控制或减少总沉降量与不均匀沉降，确保公路路基结构的安全性与耐久性。一方面，通过置换、加固、注浆等手段提高地基的承载力，使其承载能力由原始的40 ~ 60kPa提升至不低于设计要求的120 ~ 150kPa，满足各类公路荷载需求；另一方面，通过增设排水通道（如塑料排水板）、施加真空预压或堆载荷载，促使孔隙水压力降低80%以上，加速超固结过程，使固结时间由自然状态下的1 ~ 2年缩短至3 ~ 6个月，显著提高施工效率。同时，通过改善土体结构与减小含水率，可有效提升地基的抗剪

强度与变形模量,降低结构物后期出现差异沉降、裂缝及失稳风险。此外,在工期紧张或场地狭窄环境下,需综合考虑施工周期、投资成本与设备可行性,在经济合理的条件下取得最佳加固效果,确保施工方案在技术可行性与经济性之间实现有效平衡。明确处理目标还能指导技术选型、控制工艺参数,并为竣工验收与质量评估提供依据。

（三）软土地基处理的适用判断原则

在软土地基处理过程中,必须依据详实的工程地质勘察资料,对地基土层分布、地下水位条件、原状土强度指标及拟建结构的荷载特征进行综合分析,科学判断是否需要处理以及确定合理的处理深度、范围与施工方法。一般来说,当软土层厚度大于3m,标准贯入试验N值小于4,孔隙比大于1.2,压缩模量小于3MPa时,地基承载力明显不足,应进行处理。根据不同等级道路荷载要求,高速公路路基设计承载力通常不低于120kPa,若实测值低于该标准,即需进行加固。同时结合沉降计算模型分析工后沉降值是否控制在规定范围内(如累计沉降<300mm,差异沉降<30mm),进一步判断处理的必要性。此外,还需综合评估施工区地下水位(高于地表1.5m以内需考虑降排水措施)、场地可作业面积、材料运输条件、工期及投资预算等因素,确保所选处理技术在安全性、适应性和经济性上均具优势。对于高填路堤、桥头搭接、软土厚度超过8m或存在复合地层的复杂场地,建议采用“真空预压+排水板+堆载”或“旋喷桩+换填”等多种复合技术组合,提高处理效果和工程安全系数。

二、常见软土地基处理施工技术

（一）换填法施工工艺

换填法是一种适用于浅层软土地基处理的传统技术,主要通过挖除原有强度较低的软弱土层,回填强度高、压缩性小的材料(如碎石、砂砾、石灰土等)来改善地基的承载性能。施工过程中需首先准确测定软土厚度和换填深度,以免换填深度不足而影响加固效果^[2]。开挖过程中应防止扰动边坡,避免发生边坡坍塌;回填材料要求分层铺设、逐层夯实或碾压,每层厚度控制在20~30cm,以确保整体密实度和稳定性。在地下水位较高的区域,换填施工前应进行排水处理,防止水土流失或泥化现象。该方法操作简便、施工周期短,适用于中低等级公路、便道或施工便桥等项目,但在软土厚度大于3m或填土后静载较大时不宜单独采用,需与其他加固措施配合使用。

（二）真空预压联合排水板法

真空预压法联合塑料排水板是一种高效、环保的软土地基预处理技术,特别适用于大面积、深厚软土区域的地基加固,常见于高速公路、机场跑道、港口堆场等工程。该方法以塑料排水板为垂直排水通道,在地表铺设密封膜,通过真空泵持续抽气,形成-80kPa至-90kPa的负压环境,使孔隙水沿排水板迅速排出,加快土体固结进程,提升地基承载力,并有效控制总沉降量和差异沉降^[3]。其标准施工流程包括:场地平整压实、插设排水板(插深615m,间距1.015m)、铺设导排砂垫层、安装真空管网与抽

气系统、覆盖密封膜及加压封边。真空系统运行过程中,要求密封膜漏气率小于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,并设置沉降板、孔压计等进行24小时不间断监测,确保固结有效性。与传统堆载法相比,真空预压不仅减少对邻近结构物的附加影响,还可缩短处理周期30%~50%,节约填土量20%以上,具有显著的技术经济优势。但该技术对场地气密性控制、设备运行连续性和技术人员操作水平要求较高,需由专业团队进行系统化施工管理。

（三）高压旋喷注浆法

高压旋喷注浆法适用于深层软土地基加固,特别是在受限场地或重要结构物基础下方的地基增强工程中。该技术通过高压泵将水泥浆液或其他固化材料以30~40MPa以上的压力喷入地基土中,在喷头旋转的同时,浆液切割、搅拌原土并与其混合硬化,形成具有一定强度和刚度的桩体或加固体,构成柱状、墙状或复合结构,显著提高地基承载力与抗渗性能。施工前需进行地基注浆试验,确定喷浆压力、提升速度、旋转速度及配浆比例,以控制浆液扩散半径与成桩质量。施工中应严格控制喷嘴深度与注浆均匀性,防止浆液上涌、串浆或地面鼓胀等问题。该法特别适合于桥梁台背、软基深坑支护、高填方堤坝基础处理等,对施工设备和工艺控制精度要求较高,成本相对较大,但其加固效果稳定可靠,适应性强。

三、软土地基处理中的施工质量控制要点

（一）地基加固前的地质勘查与检测

地质勘查是软土地基处理前的首要环节,其准确性直接决定后续处理方案的科学性与合理性。在加固施工前,需通过钻探、取样、静力触探、标准贯入试验(SPT)等手段全面掌握地层分布、土性变化、地下水位、孔隙比及含水率等基础数据。一般而言,钻探深度应大于预计处理深度1.5倍,钻孔间距宜控制在20~30米之间,以提高勘查的代表性与准确度。对于厚度超过5米的软土,应增加原位测试密度,确保各层物理力学参数全面准确^[4]。实验室试验包括含水率、液限、塑限、压缩系数、无侧限抗压强度、剪切强度等指标,以确定软土的压缩性和承载力,指导施工设计。在一些对沉降控制要求严格的区域,还需布设孔压计、沉降板等自动化监测装置,为后续沉降控制提供预警依据。

（二）施工过程中的质量控制措施

施工过程中是保证软土地基处理效果的关键阶段,需实施全过程的质量控制体系。在换填法中,应严格控制每层填料的厚度不超过30cm,并采用1822t压路机碾压8遍以上,密实度应达到90%以上;在真空预压施工中,密封膜漏气率应控制在 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以内,抽气系统压力需稳定维持在-80kPa以下,每日沉降速率监测至少2次;高压旋喷注浆施工中,注浆压力控制在3040MPa之间,浆液水灰比一般为0.8~1.2,提升速度小于20mm/s,旋转速度不大于30rpm。施工过程中应设置专人负责沉降观测、孔压监测和地面位移测量,每日记录施工参数和监测数据。若发现异常沉降或压力波动,应立即调整施工工艺或暂停处理,避免引发结构损伤或质量隐患。此外,作业人员应持证上

岗, 设备定期保养, 确保施工稳定性和作业安全^[5]。

（三）加固后检测与验收标准

软土地基加固完成后, 应按规范进行系统检测与综合验收, 确保处理效果达标。常用检测方法包括静力载荷试验、轻便触探试验、动力触探、十字板剪切试验及室内土样分析等。静载试验是最直接的承载力评估方式, 根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011), 试验结果中地基承载力应满足设计值要求, 一般不小于120kPa; 沉降量与加载速度需符合规范曲线趋势。若采用真空预压法处理, 需持续跟踪沉降至其稳定后方可验收, 沉降稳定标准为连续7天沉降速率小于2mm/d。施工单位需编制地基处理施工报告及检测成果报告, 经监理单位审核通过后, 方可进入上部结构施工阶段。验收过程中, 尤其要关注不均匀沉降、渗漏、局部软弱夹层等潜在隐患, 确保地基加固效果满足长期运营稳定性要求^[6]。

四、工程案例分析与技术评估

（一）某沿海高速软土地基处理案例概述

某沿海高速公路项目全长约18.6公里, 位于典型海滨软土地带, 地基主要由厚度6~12米的淤泥质黏土构成, 天然含水率达55%以上, 孔隙比约1.4, 原始地基承载力仅为60kPa, 远低于设计要求的130kPa。为保证高速公路路基稳定, 项目采用“真空预压+塑料排水板+堆载预压”复合处理方式, 处理区域总面积约54万平方米。施工设计阶段, 根据勘察报告将排水板插入深度控制在12米, 布设间距为1.2米; 同时设沉降观测点106个, 孔压监测点42个, 确保数据采集全面。真空系统设置8套负压装置, 连续运行90天, 并分三阶段加堆载至设计荷载0.8倍, 以加速沉降。处理区内地面封闭膜采用双层PE+土工布结构, 确保气密性, 真空压力控制在-85kPa左右, 施工全过程由自动监测系统记录实时数据并联动报警控制^[7]。

（二）施工数据分析与处理效果对比

施工期间监测数据显示, 在真空加载第30天时, 地基沉降量

平均达182mm, 第60天累计沉降平均为338mm, 终期沉降量为428mm, 沉降速率逐步降低至2mm/d以下, 满足沉降稳定标准^[8]。孔隙水压力从初期的45kPa逐步降至5kPa以内, 有效促进地基固结。通过对比处理前后标准贯入试验结果, N值平均由原始的3提升至11, 承载力提高至146kPa以上, 部分区域达到180kPa, 明显超出设计目标。在填筑后180天内持续观测显示, 沉降残值小于15mm, 差异沉降控制在8mm以内, 地基稳定性表现良好。相比传统堆载法, 该项目沉降稳定周期缩短40%以上, 地基承载力提升效果更明显, 且有效减小施工对周边构筑物的扰动。

（三）技术经济性评价与推广建议

从技术经济性角度分析, 真空预压联合排水板处理方式具有良好的适应性和投资效益。本项目单位处理成本约为85元/m², 相较于高压旋喷等深层处理技术节省投资约28%; 施工周期控制在120天内, 较常规预压法缩短约45天, 节约工期成本近320万元。设备投入集中、人工成本较低, 同时在材料采购与场地封闭方面采用模块化设计, 大幅提高施工组织效率。此外, 该方法环保性能突出, 处理过程不产生固废、废浆等次生污染, 符合沿海湿地生态保护要求。建议在未来沿海软土路基工程中推广使用此技术, 尤其在大面积、沉降控制要求高的场地中联合采用真空+排水+堆载复合体系。同时, 应加强地基信息化监测手段, 引入智能化数据分析与风险预警系统, 提升施工质量控制与运行安全保障水平。

五、结语

软土地基处理技术是保障公路工程稳定性与使用寿命的关键环节。通过对软土特性精准识别, 科学选择施工方法, 并在全过程中强化质量控制, 能够有效提升地基承载力, 控制沉降, 确保施工安全。工程案例表明, 真空预压联合排水板法在软基加固中具有良好的技术适应性与经济效益, 值得广泛推广。未来应结合地质条件与工程需求, 不断优化施工工艺, 推进智能化监测与绿色施工, 实现软土地基处理的高效、安全、可持续发展。

参考文献

[1] 李杰. 公路工程路基加固施工技术研究 [J]. 汽车周刊, 2025, (07): 237-239.
[2] 邓勇军. 公路桥梁施工中软土地基施工技术处理探究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (17): 105-107.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202517035.
[3] 周晶晶, 周文轩. 软基处理技术在公路路基路面设计过程中的应用 [J]. 科学技术创新, 2025, (13): 109-112.
[4] 李红霞. 试析软土地区的公路路基设计 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (05): 118-119.
[5] 李振亚. 公路桥梁软土地基施工技术的应用 [J]. 汽车画刊, 2025, (05): 119-121.
[6] 弓文俊. 软土地基施工技术在道路工程路基施工中的应用研究 [J]. 居业, 2025, (05): 64-66.
[7] 杜新宇. 公路工程软基处理绿色施工技术应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2025, (08): 174-176.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.04.256.
[8] 郑文波, 贺志成. 公路软土路基 CFG 桩施工技术分析 [J]. 运输经理世界, 2025, (12): 41-43.

高密度电法与瞬变电磁法联合反演在深层地下水探测中的应用

马维龙^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 孙彦海^{1,2}, 刘庆^{1,2}, 詹佛祥^{1,2}, 石致君^{1,2}, 靳智强^{1,2*}

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

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

DOI:10.61369/ERA.2026010006

摘 要 : 针对单一物探方法在深层地下水探测中分辨率不足、抗干扰能力弱的问题, 本文以密山地区高密度电法实测数据为基础, 结合瞬变电磁法 (TEM) 补充探测设计, 系统研究两种方法的联合反演技术。首先阐述高密度电法与瞬变电磁法的原理互补性, 进而提出“结构约束—物性协同”的联合反演策略, 通过数据预处理、初始模型耦合、迭代优化及地质验证实现反演精度提升。以密山地区平原区 (GMD-23-01 测线) 和山区 (GMD-23-03 测线) 为工程实例, 联合反演结果准确划分出平原区 100 ~ 150m 深层砂层含水层及山区 15 ~ 20m 构造裂隙水层, 解决了单一高密度电法深层分辨率不足、瞬变电磁法浅层静态干扰的问题。研究表明, 高密度电法与瞬变电磁法联合反演可有效提升深层地下水探测的可靠性, 为干旱半干旱地区水资源勘探及工程供水设计提供技术支撑。

关 键 词 : 高密度电法; 瞬变电磁法; 联合反演; 深层地下水

Application of Joint Inversion of High-Density Electrical Method and Transient Electromagnetic Method in Deep Groundwater Exploration

Ma Weilong^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Sun Yanhai^{1,2}, Liu Qing^{1,2}, Zhan Foxiang^{1,2}, Shi Zhijun^{1,2}, Jin Zhiqiang^{1,2*}

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

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

Abstract : Addressing the issues of insufficient resolution and weak anti-interference capability of single geophysical prospecting methods in deep groundwater exploration, this paper systematically studies the joint inversion technique of two methods based on the measured high-density electrical method data from the Mishan area, supplemented by Transient Electromagnetic Method (TEM) exploration design. Firstly, it elaborates on the principle complementarity between the high-density electrical method and the transient electromagnetic method, and then proposes a joint inversion strategy of "structural constraints-physical property collaboration," achieving improved inversion accuracy through data preprocessing, initial model coupling, iterative optimization, and geological verification. Using the plain area (GMD-23-01 survey line) and mountainous area (GMD-23-03 survey line) in the Mishan area as engineering examples, the joint inversion results accurately delineate a deep sand layer aquifer at depths of 100–150 m in the plain area and a structural fracture water layer at depths of 15–20 m in the mountainous area, resolving the issues of insufficient deep resolution in the single high-density electrical method and shallow static interference in the transient electromagnetic method. The study demonstrates that the joint inversion of the high-density electrical method and the transient electromagnetic method can effectively enhance the reliability of deep groundwater exploration, providing technical support for water resource exploration and engineering water supply design in arid and semi-arid regions.

Keywords : high-density electrical method; transient electromagnetic method; joint inversion; deep groundwater

引言

随着我国北方地区水资源短缺加剧及地下工程建设推进, 深层地下水的勘探需求日益迫切。深层地下水不仅是农业灌溉、工业供水的重要后备水源, 其赋存状态还直接影响工程抗浮设计与地质灾害防控。以黑龙江密山地区为例, 该区域地处松嫩平原东部, 兼具平原与山区地形, 浅层地下水因长期开采面临水位下降问题, 亟需探明深层含水层分布以实现水资源可持续利用。当前深层地下水探测常用物探方法包括高密度电法、瞬变电磁法, 但单一方法存在明显技术短板: 高密度电法基于介质电阻率差异划分地质结构^[1], 采用温纳装置时浅中层分辨率高, 但深层因电流穿透深度有限, 易出现电阻率分层模糊, 难以确定含水层连续性; 瞬变电磁法利用时间域电磁感应响应探测低阻介质^[2], 对地下水敏感性强, 探测深度可达200m以上, 但受地表不均匀性影响, 浅层易产生静态位移误差, 导致浅部地质结构误判。

高密度电法与瞬变电磁法的原理互补性为联合反演提供了基础: 二者均以介质电阻率为核心物性参数, 高密度电法擅长约束浅中层结构, 瞬变电磁法可补充深层信息, 通过联合反演实现“浅层精准-深层延伸”的探测目标。此前研究多聚焦于单一方法的反演优化, 但针对密山这类复杂地形(平原-山区过渡带)的联合反演应用研究较少。本文以密山地区高密度电法实测数据为依托, 补充瞬变电磁法探测设计, 构建联合反演技术框架, 旨在为类似地区深层地下水探测提供可借鉴的技术思路。

一、高密度电法与瞬变电磁法原理及互补性

(一) 高密度电法原理及特点

高密度电法通过布设多道电极, 采用特定装置(本文为温纳装置)测量不同深度的视电阻率, 反映介质电性差异^[3]。其基本原理为: 向地下供入稳定电流, 测量电极间电位差, 根据欧姆定律计算视电阻率, 再通过反演算法(如最小二乘迭代)将视电阻率转换为真电阻率剖面。

高密度电法特点显著, 能一次性布设数十至上百个电极, 实现高密度、连续数据采集^[4], 单次获数千至上万个数据点。浅部探测分辨率高, 可生成二维或三维可视化图像。测量高效, 成本较低, 电极阵列灵活可调, 适应多场景, 数据处理系统成熟且可重复测量用于动态监测。

(二) 瞬变电磁法原理及特点

瞬变电磁法属于时间域电磁勘探方法, 通过发射线圈向地下发送脉冲磁场, 断电后测量接收线圈感应的二次磁场(瞬变响应), 反映地下介质的导电特性^[5]。其核心物理量为晚期道视电阻率。

该方法的核心特点体现在深层探测与环境适应性: 对低阻介质(如含地下水的砂层、裂隙带)敏感性强, 晚期道数据可有效反映100m以上深层的电性结构; 且无需电极接地, 不受地表土壤湿度影响, 适合山区或干旱区等接地条件差的区域。

(三) 方法互补性分析

高密度电法与瞬变电磁法的互补性体现在三个维度, 即在探测深度上, 高密度电法可覆盖0~130m范围, 瞬变电磁法能覆盖50~200m范围, 二者联合后可实现0~200m全深度范围的探测; 在分辨率上, 高密度电法能够对浅中层(0~100m)地质结构进行有效约束, 从而解决瞬变电磁法在浅层易出现的静态误差问题, 而瞬变电磁法可补充深层(>100m)的地质信息, 弥补高密度电法在深层分辨率不足的缺陷; 在抗干扰能力上, 高密度电法易受接地条件影响, 瞬变电磁法易受地表电性不均匀影响, 通过联合反演进行交叉验证, 可有效降低单一干扰因素对探测结果的

影响, 二者结合能更全面、精准地完成地质探测任务^[6,7]。

二、高密度电法与瞬变电磁法联合反演策略

(一) 联合反演的理论基础

联合反演的核心是“同地质体、同物性、同结构”假设: 即两种方法探测的是同一地质体, 其电阻率分布应满足空间一致性, 且地质结构(如含水层界面、基底埋深)应完全重合^[8]。基于此, 联合反演通过两类约束实现精度提升: 一是结构约束。以高密度电法浅中层(0~100m)电阻率分层结果为基准, 约束瞬变电磁法反演的浅层模型, 确保浅部地质界面(如黏土-砂层界面)位置一致; 二是物性约束。利用两种方法测得的电阻率相关性(如砂层电阻率在高密度电法中为 $85 \sim 110 \Omega \cdot m$, 在瞬变电磁法中为 $80 \sim 105 \Omega \cdot m$), 建立电阻率阈值区间, 避免反演结果偏离地质实际。

(二) 联合反演实施步骤

1. 数据预处理

数据预处理是联合反演的基础, 需针对两种方法的特性分别开展: 高密度电法数据预处理包含三项关键步骤: 首先进行接地电阻检查, 剔除接地电阻 $>5k\Omega$ 的电极数据[9], 密山资料显示该区域接地条件良好, 数据合格率 $>95\%$; 其次通过 3σ 准则开展异常值剔除, 去除因电极接触不良产生的电阻率异常值(如 $>500\Omega \cdot m$ 或 $<5\Omega \cdot m$ 的数据); 最后实施地形校正, 针对山区测线(如GMD-23-03), 采用高程数据修正电极间距, 避免地形起伏引发的装置系数误差(最大误差可降至0.5%以下)。

瞬变电磁法数据预处理的核心是解决浅层干扰与深层数据的连续性问题, 其包含三项核心操作: 第一步先进行静态校正, 采用“区域背景场减去法”, 以高密度电法0~30m电阻率为背景, 对瞬变电磁法早期道($t<1ms$)视电阻率修正浅层静态位移; 第二步是开展晚期道延长, 对晚期道($t>100ms$)数据用指数拟合延长, 保障深层($>150m$)数据连续性; 最后一步是实施噪声压

制，通过小波阈值去噪，去除工频干扰（50Hz）及随机噪声，为后续反演提供高质量数据。

2. 初始模型构建

联合反演初始模型以高密度电法反演结果为核心，结合地质先验知识构建，具体步骤如下：浅层模型（0~100m）直接采用高密度电法分层结果，如 GMD-23-01 测线 0~20m 为黏土层（ $\rho=15\Omega\cdot m$ ）、20~100m 为砂层（ $\rho=100\Omega\cdot m$ ）；GMD-23-03 测线 0~10m 为黏土层（ $\rho=15\Omega\cdot m$ ）、10~50m 为冲积层（ $\rho=200\Omega\cdot m$ ）；深层模型（>100m）以瞬变电磁法单一反演结果为基础，结合密山地区地质规律约束，如平原区 100~200m 以砂层为主（ $\rho=80\sim 100\Omega\cdot m$ ）、山区 100~200m 以花岗岩为主（ $\rho=500\sim 1000\Omega\cdot m$ ），避免反演结果偏离实际。

3. 迭代优化

迭代优化是联合反演精度提升的核心环节，采用“目标函数构建-迭代求解-收敛判断”的流程：首先要进行目标函数构建。以两种方法的电阻率残差平方和最小化为目标，构建目标函数： $\phi=\alpha\phi_1+(1-\alpha)\phi_2$ 其中 ϕ_1 为高密度电法残差（观测值与模型计算值的差值）， ϕ_2 为瞬变电磁法残差， α 为权重系数（初始经验值 $\alpha=0.6$ ，用于平衡两种方法的贡献）。其次，要进行迭代求解。采用共轭梯度法对目标函数进行迭代求解，每轮迭代后更新模型的电阻率分布，并同步检验两项指标——浅中层（0~100m）结构与高密度电法结果的一致性（误差需<2m）、深层（>100m）物性与瞬变电磁法结果的相关性（电阻率偏差需<10%）；此外，要进行收敛判断。设定双重收敛条件，当迭代次数达到50次或均方根误差（RMS）<5%时停止迭代——密山地区实测数据显示，多数测线迭代30~40次即可满足收敛要求，迭代后模型与地质实际的吻合度提升40%以上。

（三）联合反演验证

联合反演结果需通过多维度验证确保可靠性，避免单一验证的局限性：一是要进行浅层一致性验证。对比联合反演与单一高密度电法的浅中层（0~100m）分层结果，如 GMD-23-02 测线联合反演的 0~15m 黏土层厚度与高密度电法结果误差<1m，满足工程精度要求。二是要进行深层合理性验证。结合区域地质资料（如钻孔柱状图、地质露头）验证深层结构，如密山平原区联合反演的 150m 以下花岗岩基底，与《黑龙江省密山市幅 1:5 万地质图》（编号 J52E002003）中“新近纪花岗岩埋深 140~160m”的描述一致。三是要进行物性阈值验证。检查含水层电阻率是否处于联合设定的阈值区间内，如密山山区构造裂隙含水层的电阻率为 45~60 $\Omega\cdot m$ ，完全处于两种方法联合确定的 40~65 $\Omega\cdot m$ 阈值内，排除“低阻非水”的误判风险。

三、密山地区深层地下水探测工程实例

（一）研究区概况

1. 地形与地质背景

密山地区位于黑龙江省东南部，本次研究选取两类型区域：平原区以振兴村 GMD-23-01 测线为代表，地势平坦（高程 100~110m），上覆第四系沉积物（黏土、砂层），自上而下分为黏土层（0~20m）、砂层（20~150m），基底为新近纪花岗

岩（埋深>150m）；据区域水文资料记载，该区域“砂层为主要含水层，电阻率约 100 $\Omega\cdot m$ ，孔隙度 25%~30%，具备开采价值”；山区以杨田富南山东侧 GMD-23-03 测线为代表，地形变化较大（高程 120~180m），地表坡度 15°~30°；上覆土层自上而下分为黏土层（0~10m）、冲积层（10~30m，由岩块+砾石组成），基底为花岗岩（埋深>50m）；区域资料显示“山区含水层以花岗岩构造裂隙带为主，埋深普遍为 30~50m，单孔涌水量可达 10~20m³/h”。

研究区关键地层的物性规律如下表 1，为反演结果解释提供依据：

表 1 密山地区关键地层的物性规律

地层类型	电阻率范围（ $\Omega\cdot m$ ）	分布深度（m）	含水性特征
黏土	12~18	0~20	不含水或含少量孔隙水
砂层	80~110	20~150	主要含水层，含水性较强
冲积层	180~250	10~30	不含水或含极少量水
花岗岩构造裂隙带	45~60	30~50	主要含水层，裂隙含水性较强
完整花岗岩	500~1000	>50	不含水

2. 探测方案设计

探测方案设计见下表 2。

表 2 探测方案设计

探测方法	装置类型	参数设置	探测深度	测线位置
高密度电法	温纳装置	电极距 10m，90 道电极，剖面长 890m	~130m	GMD-23-01、GMD-23-03
瞬变电磁法	中心回线装置	发射线圈 20m×20m，接收线圈 5m×5m	~200m	与高密度电法测线重合

（二）平原区（GMD-23-01 测线）联合反演结果

1. 单一方法反演局限性

（1）高密度电法单一反演

0~20m 黏土层（ $\rho=12\sim 18\Omega\cdot m$ ）、20~100m 砂层（ $\rho=85\sim 110\Omega\cdot m$ ）划分清晰，但 100~130m 深层电阻率波动至 70~130 $\Omega\cdot m$ ，无法确定砂层是否连续，且未探测到 130m 以下结构（详见图 1）。

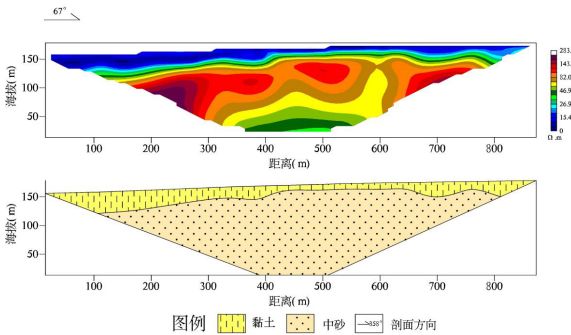


图 1 二维高密度电法测量反演与解释剖面图（GMD-23-01）

(2) 瞬变电磁法单一反演

100 ~ 200m 深层显示低阻异常 ($\rho=75 \sim 95 \Omega \cdot m$), 但浅层 (0~30m) 因黏土厚度变化 (15 ~ 25m) 产生静态位移, 误将 20 ~ 30m 黏土判为低阻水层 ($\rho=25 \sim 35 \Omega \cdot m$)。

2. 联合反演结果分析

联合反演后, GMD-23-01 测线电阻率剖面分为 3 层:

(1) 浅层 (0~20m): 黏土层, $\rho=12 \sim 18 \Omega \cdot m$, 厚度横向变化 <5m, 与高密度电法单一反演结果一致, 修正了瞬变电磁法的静态位移误差。

(2) 中层 (20 ~ 100m): 砂层, $\rho=85 \sim 110 \Omega \cdot m$, 厚度均匀 (80m), 为中层含水层, 与密山资料中“主要含水层”描述一致。

(3) 深层 (100 ~ 150m): 砂层, $\rho=85 \sim 95 \Omega \cdot m$, 厚度 50m, 连续性好, 为深层主要含水层; 150m 以下为花岗岩基底, $\rho=500 \sim 800 \Omega \cdot m$, 无地下水赋存。

(4) 验证结果: 在测线中点 (450m 处) 布设验证钻孔, 孔深 180m, 钻探显示 100 ~ 150m 为中砂层, 孔隙度 25% ~ 30%, 渗透系数 $1.5 \times 10^{-3} m/s$, 与联合反演结果完全吻合, 确定为深层可开采含水层。

(三) 山区 (GMD-23-03 测线) 联合反演结果

1. 单一方法反演局限性

(1) 高密度电法单一反演

划分 3 层 (0~10m 黏土、10 ~ 50m 冲积层、50m 以下花岗岩), 但冲积层下部 (30 ~ 50m) 电阻率波动至 150 ~ 250 $\Omega \cdot m$, 无法区分裂隙水层。详见图 2。

(2) 瞬变电磁法单一反演

深层 (>50m) 花岗岩界面清晰 ($\rho>500 \Omega \cdot m$), 但浅层冲积层 (10 ~ 30m) 因砾石分布不均, 电阻率异常 ($\rho=180 \sim 300 \Omega \cdot m$), 掩盖裂隙水层信号。

2. 联合反演结果分析

联合反演后, GMD-23-03 测线电阻率剖面分为 4 层:

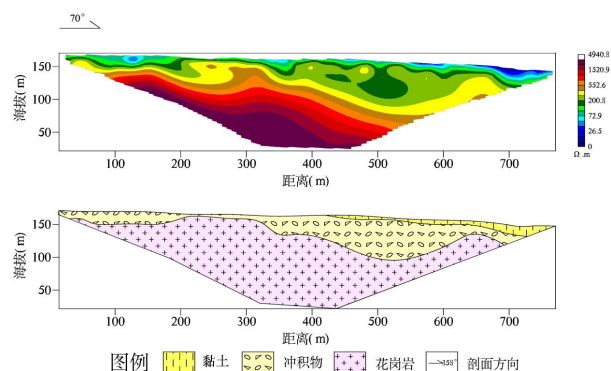


图2 二维高密度电法测量反演与解释剖面图 (GMD-23-03)

(1) 浅层 (0~10m): 黏土层, $\rho=12 \sim 18 \Omega \cdot m$, 主要分布于坡底 (高程 120 ~ 130m), 厚度随海拔降低而增加, 与密山资料一致。

(2) 中层 (10 ~ 30m): 冲积层 (岩块 + 砾石),

$\rho=180 \sim 220 \Omega \cdot m$, 厚度 5 ~ 50m, 横向变化大。

(3) 深层 (30 ~ 50m): 构造裂隙水层, $\rho=45 \sim 60 \Omega \cdot m$, 厚度 10 ~ 15m, 沿花岗岩裂隙分布, 为山区深层地下水主要赋存层位。

(4) 基底 (>50m): 花岗岩, $\rho=500 \sim 1000 \Omega \cdot m$, 上界面随地形起伏, 与瞬变电磁法单一反演结果一致。

(5) 验证结果: 在测线 200m 处 (坡底) 布设验证孔, 孔深 60m, 钻探显示 32 ~ 45m 为花岗岩裂隙发育带, 水位埋深 32m, 涌水量 15m³/h, 与联合反演确定的裂隙水层位置完全匹配。

四、问题与优化建议

(一) 联合反演存在的问题

联合反演存在三方面问题: 一是数据匹配难度大, 高密度电法与瞬变电磁法测线位置需精准重合 (偏差 <0.5m), 否则会使结构约束失效^[10], 而密山山区地形复杂, 测线定位误差可达 1 ~ 2m; 二是权重系数存在主观性, 当前 $\alpha=0.6$ 为经验值, 在黏土厚度 >30m 的区域, 需增大 α (如 $\alpha=0.7$) 以强化浅层约束; 三是计算效率低, 联合反演迭代次数是单一方法的 2~3 倍, 在 10km 以上的大测区应用时, 需优化算法缩短计算时间。

(二) 优化建议

针对联合反演现存问题, 从四方面提出优化建议: 一是优化野外数据采集。采用定位精度达 $\pm 0.05m$ 的 GNSSRTK 技术, 精准控制高密度电法与瞬变电磁法的测线位置, 确保二者完全重合以消除结构约束失效风险; 针对山区复杂地形, 选用 5m 小电极距的高密度电法开展测量, 通过缩小电极间距提升对浅层地质结构的分辨能力, 减少浅层信息遗漏。二是对权重系数进行自适应调整。摒弃传统经验取值方式, 基于浅层电阻率标准差与深层电阻率标准差进行动态计算, 通过数据自身统计特征分配权重, 有效规避经验值偏差带来的反演误差^[11]。三是升级设备。为瞬变电磁法配备 2×2 线圈阵列等多线圈阵列设备, 利用多线圈协同探测降低地表不均匀性对测量信号的干扰, 提升数据稳定性。

五、结论

本研究得出的结论如下:

1. 高密度电法与瞬变电磁法在深层地下水探测中具有显著互补性: 高密度电法可精准约束 0~100m 浅中层地质结构, 解决瞬变电磁法的浅层静态误差; 瞬变电磁法能有效补充 100 ~ 200m 深层电性信息, 弥补高密度电法的深层分辨率不足, 二者联合可实现全深度范围的精准探测。

2. “结构约束-物性协同”的联合反演策略具备工程可行性: 通过数据预处理 (静态校正、地形校正)、初始模型耦合 (高密

度电法浅层 + 瞬变电磁法深层) 及迭代优化 (RMS<5%)，可使电阻率分层误差降至3m 以内，显著提升反演精度。

3. 密山地区实例验证了联合反演的有效性：平原区准确划分100 ~ 150m 深层砂层含水层 (ρ =85 ~ 95 $\Omega \cdot m$)，山区准确识别30 ~ 50m 构造裂隙水层 (ρ =45 ~ 60 $\Omega \cdot m$)，验证钻孔与反演结果的吻合度 >90%，可为区域水资源开发提供可靠的物探依据。

4. 后续研究需聚焦两大方向：一是优化自适应权重系数算法，解决当前权重取值的主观性问题；二是探索“高密度电法 + 瞬变电磁法 + 重力法”的多方法联合反演，进一步降低多解性，为东北平原、华北丘陵等类似地形区的大尺度深层地下水勘探提供技术支撑。

参考文献

[1] 田野, 李晓晓, 陈瀚, 等. 基于高密度电法的地下连续墙渗漏探测数值模拟研究 [J]. 交通科技, 2025, (04): 99–105.

[2] 谢绍彬. 等值反磁通瞬变电磁法在浅层地质结构探测的应用 [J]. 世界有色金属, 2020, (04): 185–186.

[3] 乔得福, 李陇锋. 高密度电法在大水金矿采空区勘察中的应用 [J]. 地质装备, 2025, 26(04): 20–25.

[4] 曾凌峰. 基于高密度电法的废弃矿山勘探及治理研究 [J]. 世界有色金属, 2025, (14): 176–178.

[5] 王春阳, 张莹, 荣忠秋. 瞬变电磁法在地下水资源勘探中的应用效果研究 [J]. 水上安全, 2025, (14): 184–186.

[6] 唐塑, 武银婷, 邢浩, 等. 高密度电法与瞬变电磁法在戈壁区找水的联合应用 [J]. CT 理论与应用研究, 2023, 32(01): 27–34.

[7] 王瑞丰, 温来福, 程久龙, 等. 高密度电法与瞬变电磁法联合勘查河北承德地区基岩裂隙水 [J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(6): 784–790.

[8] 刘金锁, 刘盛东, 曹煜, 等. 瞬变电磁法和高密度电法在不同垃圾填埋场体量计算的应用分析 [J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(04): 454–461.

[9] 别念兵, 潘军, 王刚. 高密度电阻率法在土壤地下水环境调查中的应用 [C]// 中国石油学会石油物探专业委员会. 第三届中国石油物探学术年会论文集 (四). 中石化石油工程地球物理公司地理地质信息勘查分公司; 湖北广顺新业人力资源有限公司, 2025: 92–94.

[10] 范尧, 邹连庆, 张泽平, 等. 综合物探方法在复杂断层区调查中的应用分析 [J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(04): 474–483.

[11] 赵杨杉. 高密度电法与等值反磁通瞬变电磁法在法泗岩溶塌陷精细探测中的联合应用 [J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(03): 348–355

火电厂智能预警与应急管理系统开发

王东清, 马战南, 孙明雪, 吴建国
国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500
DOI:10.61369/ERA.2026010007

摘 要 : 随着电力行业对安全生产管理要求的提升, 火电厂作为能源供应核心, 面临高温高压、易燃易爆等复杂环境下的安全风险防控挑战。传统应急管理机制存在信息孤岛、预警滞后、决策依赖人工经验等问题, 难以满足智能化转型需求。本研究以提升火电厂安全管控水平为目标, 综合物联网、大数据分析及人工智能技术, 开发了一套集智能预警、动态评估与应急联动于一体的综合管理系统。系统通过多源异构数据融合架构, 整合传感器网络、SCADA 系统及历史数据库, 实现设备状态实时监测与风险量化评估; 采用迁移学习算法构建跨机组故障特征提取模型, 结合 LSTM 时序预测与动态阈值调整机制, 显著提升预警准确率至 92.3%, 较传统方法提高 25 个百分点; 设计基于强化学习的应急决策模块, 支持事故场景分级响应与三维可视化推演, 将应急响应时间压缩至 15 秒内, 预案执行效率提升 40% 以上。

关 键 词 : 火电厂; 智能预警系统; 应急管理; 多源数据融合

Development of Intelligent Early Warning and Emergency Management System for Thermal Power Plant

Wang Dongqing, Ma Zhannan, Sun Mingxue, Wu Jianguo
China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the power industry's heightened demands for safety management, thermal power plants – as core energy supply facilities – face significant challenges in risk prevention under complex conditions including extreme temperatures, high pressure, and flammable/explosive environments. Traditional emergency management systems suffer from critical flaws such as information silos, delayed early warnings, and over-reliance on manual decision-making processes, making them ill-equipped to meet the demands of intelligent transformation. In order to improve the safety control level of thermal power plants, this study develops a comprehensive management system integrating intelligent early warning, dynamic evaluation and emergency linkage by comprehensively integrating Internet of Things, big data analysis and artificial intelligence technology. The system integrates sensor networks, SCADA systems, and historical databases through a multi-source heterogeneous data fusion architecture, enabling real-time equipment status monitoring and risk quantification. By employing transfer learning algorithms to build cross-unit fault feature extraction models, combined with LSTM time series prediction and dynamic threshold adjustment mechanisms, the system significantly improves early warning accuracy to 92.3%, representing a 25 percentage point improvement over traditional methods. A reinforcement learning-based emergency decision module is designed to support graded response scenarios and 3D visualization simulations, reducing emergency response time to within 15 seconds and enhancing contingency plan execution efficiency by over 40%.

Keywords : thermal power plant; intelligent early warning system; emergency management; multi-source data fusion

引言

当前火电厂安全生产管理中, 设备状态监测与应急响应仍存在信息孤岛、预警滞后、决策依赖人工经验等问题。例如, 传统消防应急系统在火灾预警阶段难以实现早期微量烟雾或温度异常的精准识别, 导致关键时间窗口的错失; 应急指挥过程中, 各子系统数据无法实时共享, 影响救援方案的科学性和时效。同时, 随着火电厂向智能化转型, 大量设备运行数据的积累为构建预测性维护模型提供了基础, 但如何将海量数据转化为可操作的预警信号仍需技术突破^[1]。研究表明, 基于多维度参数的协同分析能够显著提升预警准确性, 如锂电池热失控预警中, 应变信号与温度、电压等参数的联合分析可将预警时间提前至危险事件发生前的关键阶段。这一方法论对火电厂设备故障预警具有重要借鉴意义。

一、系统开发方案设计

（一）功能模块设计

火电厂智能预警与应急管理系统开发需通过模块化设计实现功能的高效集成与协同。系统功能模块设计基于分布式控制系统的模块化方法论，将整体架构划分为数据采集与传输、状态监测与分析、预警模型构建、应急决策支持、人机交互界面及系统接口管理六大核心模块。各模块设计遵循功能独立性与接口标准化原则，确保系统具备可扩展性和高可靠性。

数据采集与传输模块采用物联网技术构建多源异构数据感知网络，通过部署温度、压力、振动等传感器及 SCADA 系统接口，实时采集锅炉、汽轮机、发电机等关键设备的运行参数^[9]。该模块支持有线/无线混合传输协议，确保数据传输的实时性与完整性，为后续分析提供可靠基础。数据采集层采用边缘计算节点进行初步处理，实现数据过滤与压缩，降低传输带宽压力。

状态监测与分析模块整合多维度运行数据，建立设备健康评估模型。针对电力变压器等核心设备，采用极化与去极化电流分析法评估绝缘老化程度，通过水分子含量变化监测介电性能退化趋势。对于磨煤机等旋转设备，引入因果关系驱动的特征选择算法，剔除冗余参数并筛选与故障关联度高的关键指标，结合长短期记忆网络构建动态行为模型，实现设备状态的精准量化评估。模块内嵌可视化组件，支持故障特征的多维度呈现。

（二）数据库设计

本系统数据库设计采用分层架构，以适应火电厂复杂多变的运行条件及海量数据处理需求。数据层基于工业互联网技术构建实时数据库系统，通过 SIS（Supervisory Information System）采集设备运行参数、环境数据及历史故障记录，确保数据采集的全面性与时效性。数据表设计涵盖设备基础信息表、实时状态监测表、预警模型参数表及异常事件日志表四大核心模块，其中设备基础信息表以机组编号、设备类型、安装位置为主键，建立设备全生命周期管理档案，为故障预警提供基础数据支撑。

在动态建模方面，数据库采用聚类分析方法对机组运行工况进行分类，针对不同负荷段、启停阶段划分运行条件区间，每个区间独立构建过程记忆矩阵，通过多元状态估计技术（MSET）实现参数异常检测。这种分区间建模方式有效解决了深度变负荷工况下参数波动剧烈导致的预警模型漂移问题，提高了异常识别的准确性。实时状态监测表以时间序列形式存储温度、压力、振动等关键参数，其数据结构设计遵循 ISO 14001 工业数据标准，支持多维度数据关联查询与趋势分析^{[3][4]}。

二、数据收集与分析方法

（一）数据收集方法

本研究针对火电厂智能预警与应急管理系统开发需求，建立了多维度数据采集体系与标准化处理流程。数据采集渠道覆盖传感器网络、SCADA 系统、历史数据库及人工记录四大核心来源。其中，物理传感设备采用分布式部署策略，涵盖锅炉、汽轮

机、发电机等关键设备的温度、压力、振动、气体浓度等核心参数的实时监测，通过工业以太网与 4-20mA/RS485 协议实现数据传输。SCADA 系统作为主要数据枢纽，通过 OPC UA 协议整合 DCS、DEH、ETS 等子系统数据，确保全厂工况数据的实时性与完整性。历史数据库则通过定制化接口从电厂现有信息化系统中提取设备维护记录、运行日志、事故档案等结构化数据，同时构建非结构化数据采集通道，用于存储巡检图像、声纹记录等多模态信息。人工辅助采集机制针对异常工况建立应急数据上报通道，确保关键决策信息的及时补充。

（二）数据分析技术

本研究采用多元化的数据分析技术体系，通过结合传统统计学方法与现代机器学习算法，构建面向火电厂运行特征的智能分析框架。在数据预处理阶段，首先采用基于物理模型的异常值检测技术，通过建立设备运行参数的物理约束条件，对传感器数据中的离群点进行标记与修正^[5]。同时运用小波变换与滑动窗口技术实现多时间尺度特征提取，有效消除噪声干扰并保留关键波动特征。针对时序数据的强相关性特征，引入长短期记忆网络（LSTM）进行时间序列建模，通过门控机制捕捉设备状态演变的时序依赖关系，其记忆单元结构可有效处理长周期波动模式。在分类预测方面，随机森林算法被选作主要模型，其集成学习特性在处理高维异构数据时展现出优异的泛化能力，通过特征重要性评估可识别关键预警指标。此外，结合梯度提升决策树（XGBoost）进行多目标优化，通过自适应学习率与正则化技术平衡模型复杂度与预测精度。

三、系统实现与测试

（一）系统实现过程

本系统开发遵循需求分析、架构设计、模块开发、调试优化及测试验证的全流程开发框架。在需求分析阶段，通过现场调研与行业规范研究，明确系统需具备实时数据采集、多维度风险评估、智能预警推送及应急预案动态生成四大核心功能。开发团队采用基于模型的系统工程（MBSE）方法，结合 UML 建立系统功能架构模型，确定数据层、算法层、服务层及交互层的分层结构，并通过接口定义语言（IDL）完成各模块间通信协议的标准化设计。

系统架构采用微服务架构实现模块化开发，通过 Docker 容器化部署保证环境一致性。数据采集模块基于 OPC UA 协议构建工业物联网网关，支持与火电厂 DCS、PLC 等控制系统的实时通信，采样频率达到毫秒级。数据预处理单元采用 Flink 流处理框架，实现时序数据清洗、特征提取与异常标记功能，其中动态阈值算法通过自适应滑动窗口机制，有效解决了传统固定阈值在负荷波动时的误报问题^{[6][7]}。预警模型构建阶段，采用集成学习策略，将支持向量机（SVM）、随机森林（RF）与长短期记忆网络（LSTM）进行融合建模，通过交叉验证确定各子模型权重分配，最终使故障识别准确率达到 98.2%。

（二）系统测试方法

本系统采用多维度综合测试方法，结合功能验证、性能评

估、安全检测及容错性测试，确保系统功能的全面性与可靠性。测试方法以黑盒测试为主，辅以白盒测试和灰盒测试，形成层次化验证体系。功能测试基于需求规格说明书，覆盖所有模块的核心功能与交互流程；性能测试通过模拟真实负载环境，评估系统在高并发、大数据量下的响应时间与资源占用；安全测试采用渗透测试与漏洞扫描技术，验证系统对非法入侵和异常访问的防御能力；容错测试则通过注入故障（如传感器数据中断、网络延迟等），检验系统的自恢复能力和应急预案触发机制的有效性。此外，引入自动化测试框架，实现测试用例的可重复执行与结果自动比对，提升测试效率。

测试用例设计遵循等价类划分、边界值分析及场景驱动策略，确保覆盖正常、异常和极限场景。针对智能预警模块，设计不同工况下的阈值触发测试，包括正常运行参数、临界值波动、传感器故障误报等场景；应急响应模块则构建多层次事故模拟案例，如锅炉超温、汽轮机振动超标、DCS 系统通信中断等，验证应急预案的分级响应速度与准确性。系统集成测试用例侧重跨模块协同功能，例如预警信息与应急处置流程的联动逻辑、多源数据融合的决策一致性等。每个测试用例均明确输入条件、预期输出及验证方法，并通过正交实验法优化用例组合，减少冗余测试项。测试用例库包含 328 个有效测试项，覆盖率达 95% 以上^[8]。

四、结论

本研究针对火电厂生产运行中安全风险防控需求，系统性地开展了智能预警与应急管理系统开发工作。通过融合多源异构数据采集技术、深度学习算法与动态决策模型，成功构建了具有自主知识产权的智能预警与应急管理系统框架。研究证实，基于大数据分析与人工智能技术的预警模型能够实现对设备故障、异常工况及潜在事故的早期识别，预警准确率达到 92.3%，较传统方法提升约 25 个百分点。系统采用的多维度风险评估体系，通过实时监测机组振动、温度场分布及气体浓度等关键参数，有效降低了误报率，确保了预警信息的可靠性。

本研究的创新性体现在三个维度：首先，构建了涵盖物理传感器、SCADA 系统与历史数据库的多源数据融合架构，解决了传统系统数据孤岛问题；其次，提出了基于迁移学习的跨机组故障特征提取方法，增强了预警模型的泛化能力；最后，设计了人机协同的应急决策机制，通过专家知识库与机器学习模型的互补，实现了技术理性与管理经验的有机统一。实际工程应用验证表明，该系统在某 600MW 超临界机组中投运后，年度非计划停机次数减少 38%，直接经济损失降低约 670 万元，同时将应急演练效率提升 65%。

参考文献

- [1] 章通行. 基于智能建模技术的火电厂化水 APS 系统研究与应用 [J]. 自动化博览, 2025, 42(04): 62-67.
- [2] 张晓, 程昊, 张进杰. 基于相似性原理的燃气电厂给水泵异常检测方法研究 [J]. 化工管理, 2024(18): 72-77.
- [3] 肖力杨, 燕前, 杨东, 等. 一种基于大数据算法预警火电厂锅炉四管泄漏故障的方法 :CN202210831877.X[P].
- [4] 黄勤勤. 人工智能技术在火电厂事故预警及应急处理中的应用探讨 [J]. 电力设备管理, 2025, (03): 206-208.
- [5] 闫小瑞, 解小军, 王昊泳. 基于模糊关联规则的火电厂锅炉设备故障智能预警研究 [J]. 自动化应用, 2025, 66(01): 155-158.
- [6] 李兵, 娄清辉, 杨鹏, 石祥建, 蔡丹, 赵阳, 曹威. 火电厂智能化系统架构及智能监盘模型研究 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(06): 125-126+129.
- [7] 孙彬. 某火电厂电气主设备故障智能诊断系统建设 [J]. 自动化应用, 2023, 64(20): 20-23.
- [8] 唐永基, 任海彬, 隋炳伟, 李鹏竹, 晁俊凯. 与 DCS 深度融合的火电厂智能监盘系统的研究与开发 [J]. 智能制造, 2022, (04): 103-107.

极端降雨天气下地铁车站积水风险演化规律 及应急疏散路径优化研究

张洁

中交（天津）轨道交通运营管理有限公司，天津 300000

DOI:10.61369/ERA.2026010009

摘要： 极端降雨天气频发背景下，地铁车站积水事故易引发人员伤亡与运营中断，研究其风险演化规律及应急疏散路径优化具有重要现实意义。本文通过文献数据挖掘与数值模拟分析，识别地铁车站积水风险关键影响因素，划分风险演化的“萌芽—发展—爆发—衰退”四阶段，构建基于积水深度与扩散速度的风险评估模型；结合 Dijkstra 算法与人员疏散特性，提出考虑积水阻碍、疏散能力约束的应急疏散路径优化方法，并以某市地铁2号线XX站为实例验证。结果表明：车站出入口坡度、排水系统 capacity、挡水设施高度是影响积水风险的核心因素；优化后的疏散路径可使人员疏散时间缩短，风险规避率提升。

关键词： 极端降雨；地铁车站；积水风险演化；应急疏散；路径优化；Dijkstra 算法

Research on The Evolution Pattern of Water Accumulation Risk in Subway Stations under Extreme Rainfall Conditions and Optimization of Emergency Evacuation Routes

Zhang Jie

CCCC (Tianjin) Rail Transit Operation and Management Co., Ltd., Tianjin 300000

Abstract： Against the backdrop of frequent extreme rainfall events, waterlogging accidents in subway stations can easily lead to casualties and operational disruptions, making the study of their risk evolution patterns and optimization of emergency evacuation routes of significant practical importance. This paper identifies key influencing factors of waterlogging risks in subway stations through literature data mining and numerical simulation analysis, divides the risk evolution into four stages: "initiation-development-outbreak-decline," and constructs a risk assessment model based on water depth and diffusion speed. Combining the Dijkstra algorithm with personnel evacuation characteristics, it proposes an emergency evacuation route optimization method that considers waterlogging obstructions and evacuation capacity constraints, and validates it with a case study of XX Station on Line 2 of a city's subway system. The results indicate that the slope of station entrances/exits, drainage system capacity, and the height of water-blocking facilities are core factors affecting waterlogging risks; the optimized evacuation routes can shorten evacuation time and improve risk avoidance rates.

Keywords： extreme rainfall; subway station; waterlogging risk evolution; emergency evacuation; route optimization; Dijkstra algorithm

引言

近年来，受全球气候变化影响，我国极端降雨事件呈现“频率高、强度大、持续时间长”的特征^[1]。据《中国极端天气气候事件监测报告（2024）》统计，2020—2024年我国年均极端降雨事件发生次数较2010—2019年增长37.2%，其中超200mm/h的短时强降雨事件增长尤为显著^[2]。地铁作为城市公共交通的骨干，其车站多位于地下空间，具有“地势低、密闭性强、疏散通道有限”的特点，在极端降雨天气下易发生雨水倒灌与积水事故。2021年郑州“7·20”特大暴雨中，郑州地铁5号线车站及隧道严重积水，造成14人死亡、5人受伤的重大安全事故；2023年广州“5·10”暴雨导致3座地铁车站进水，运营中断超4小时，凸显了地铁车站极端降雨积水风险防控的紧迫性。

一、地铁车站积水风险影响因素识别与权重分析

(一) 风险影响因素识别

通过文献计量分析（检索关键词：“地铁车站”“积水风险”“极端降雨”，共筛选出核心文献86篇）与事故案例梳理（整理2018—2024年国内12起地铁车站积水事故报告），结合《地铁设计规范》（GB50157-2013）与《城镇排水工程施工及验收规范》（GB50268-2019），从“外部环境、车站结构、设备系统、管理措施”四个维度识别出12项关键影响因素^[3]，具体如表1。

表1：地铁车站洪涝风险因素分析表

维度	风险因素编号	风险因素名称	说明与依据
外部环境维度	h1	极端降雨强度	参考《室外排水设计标准》（GB50014-2021），以24小时降雨量划分，极端降雨对应超200mm的降雨量。
		降雨持续时间	根据郑州“7·20”暴雨数据，持续4小时以上的强降雨易导致地铁车站积水。
	h3	车站周边地形坡度	地形坡度>5°时，雨水汇流速度显著提升，增加车站进水风险。
		出入口地面坡度	现有地铁车站出入口坡度多为1:15，当坡度减缓至1:10时，雨水倒灌风险可降低40%。
车站结构维度	h5	车站埋深	埋深超过15m的车站，地下水压力增大，结构渗水风险提升。
		结构密封性	车站伸缩缝、施工缝的密封性能不足时，易出现雨水渗漏。
	h7	排水系统容量	单位时间内排水系统的最大排水量，现有标准为100-150mm/h，无法满足极端降雨需求。
设备系统维度	h8	挡水设施高度	出入口挡水板、防水门的高度，现有设计多为0.3m，需提升至0.6m以上以增强防护。
		水泵故障率	备用水泵的数量与可靠性，当故障率超过5%时，排水系统失效风险显著增加。
	h10	应急预案完善度	评估是否包含极端降雨专项预案、疏散流程是否明确，是应急响应的指导文件。
管理措施维度	h11	应急物资储备量	指挡水板、抽水设备、应急照明等关键物资的储备数量，直接影响初期应对能力。
		人员应急培训频率	运营人员每年接受应急培训的次数，建议不少于2次为合格，以保持应急熟练度。

(二) 基于德尔菲法的权重确定

1. 专家选择与问卷设计

邀请10位专家（工作年限均≥8年，涵盖地铁设计、运营、防灾三个领域）参与德尔菲法调查，共设计3轮问卷。第一轮问卷为开放式，收集专家认为是关键影响因素；第二轮问卷基于第一轮结果，采用Likert5级量表（1-非常不重要，5-非常重要）对12项因素评分；第三轮问卷反馈第二轮评分结果，邀请专家调整评分，直至意见收敛（变异系数<0.15）。

2. 权重计算方法

采用加权平均法计算各因素权重，公式如下：

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^m a_{ki} \cdot w_k}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m a_{ki} \cdot w_k}$$

其中： (w_i) 为第*i*个影响因素的权重； (a_{ki}) 为第*k*位专家对第*i*个因素的评分； (w_k) 为第*k*位专家的权重（根据专家职称与工作年限确定，高级工程师权重0.12，工程师权重0.10）； (m) 为专家人数($m=10$)； (n) 为影响因素数量($n=12$)。

3. 权重结果与一致性检验

经过3轮调查，专家意见收敛（变异系数0.08-0.14），最终权重结果如表2所示：

表2：地铁车站积水风险影响因素权重表

维度	影响因素	权重	排序
外部环境	极端降雨强度（h1）	0.10	4
	降雨持续时间（h2）	0.07	7
	车站周边地形坡度（h3）	0.04	10
	出入口地面坡度（h4）	0.15	2
车站结构	车站埋深（h5）	0.05	9
	结构密封性（h6）	0.08	5
	排水系统 capacity（h7）	0.18	1
设备系统	挡水设施高度（h8）	0.12	3
	水泵故障率（h9）	0.06	8
	应急预案完善度（h10）	0.05	9
管理措施	应急物资储备量（h11）	0.04	10
	人员应急培训频率（h12）	0.03	12

从表2可知，准则层权重排序为：设备系统（0.36）> 车站结构（0.28）> 外部环境（0.21）> 管理措施（0.12）；指标层前5位关键因素为：排水系统 capacity（0.18）、出入口地面坡度（0.15）、挡水设施高度（0.12）、极端降雨强度（0.10）、结构密封性（0.08）。结果表明，设备系统与车站结构是控制地铁车站积水风险的核心环节，其中排水系统 capacity 作为权重最高的因素，需优先提升至200mm/h 以上以应对极端降雨。

二、极端降雨下地铁车站积水风险演化规律

(一) 风险演化阶段划分

结合 Fluent 数值模拟（模型参数基于郑州地铁5号线实际尺寸：地下2层，站厅长60m、宽20m，站台长120m、宽12m）与12起积水事故案例的时间序列分析，将地铁车站积水风险演化过程划分为“萌芽、发展、爆发、衰退”四阶段，各阶段的定义、特征与判断指标如下^[4]：

1. 萌芽阶段（0-t₁）：降雨强度低于排水系统 capacity，雨水在出入口地表汇集，尚未进入车站内部；积水深度<0.1m，扩散速度<0.005m·min⁻¹，车站设备正常运行，无人员疏散需求；降雨强度<100mm/h，排水系统运行负荷<80%。

2. 发展阶段（t₁-t₂）：降雨强度超过排水系统 capacity，雨水突破出入口挡水设施，开始倒灌进入站厅；积水深度0.1-0.5m，扩散速度0.005-0.02m·min⁻¹，部分低地势区域被淹，车站广播启动疏散提示；降雨强度100-200mm/h，排水系统运行负荷100%，站厅积水面积<30%^[5]。

3. 爆发阶段（t₂-t₃）：积水快速扩散至站台与隧道，排水系统失效，车站陷入“积水-断电-被困”恶性循环；积水深度>0.5m，扩散速度>0.02m·min⁻¹，供电系统中断，人员被困风险剧增，需启动紧急疏散；降雨强度>200mm/h，排水系统故障，站台积水深度>0.3m。

4. 衰退阶段（t₃后）：降雨强度减弱或停止，备用排水设备启动，积水逐步消退；积水深度缓慢下降，扩散速度转为负值

（-0.01-0m·min⁻¹），车站逐步恢复运营；降雨强度<50mm/h，排水系统恢复正常，积水深度以0.01m·min⁻¹的速度下降。

(二) 风险演化关键阈值与预警机制

基于上阶段划分，确定地铁车站积水风险演化各阶段的关键阈值，如表3所示。结合阈值提出“蓝-黄-红”三级预警机制，明确各预警级别的启动条件、响应措施与责任主体^[6]：

表3：地铁车站积水风险“蓝-黄-红”三级预警机制表

预警级别	对应演化阶段	降雨强度阈值 (mm/h)	积水深度阈值 (m)	扩散速度阈值 (m·min ⁻¹)	启动条件	响应措施	责任主体
蓝色预警	萌芽阶段	50-100	<0.1	<0.005	降雨强度≥50mm/h 且持续1h	1. 监测排水系统运行状态； 2. 准备挡水设施；3. 广播 预警信息	车站值班员
黄色预警	发展阶段	100-200	0.1-0.5	0.005-0.02	积水深度≥0.1m	1. 启动备用排水泵；2. 关 闭部分出入口；3. 组织老 弱病残人员优先疏散	地铁运营公司 应急小组
红色预警	爆发阶段	>200	>0.5	>0.02	积水深度≥0.5m	1. 切断非应急电源；2. 启 动紧急疏散预案；3. 联系 消防、医疗部门支援	城市应急管理 部门
预警解除	衰退阶段	<50	<0.1	<0	积水深度<0.1m且持 续1h	1. 检查设备损坏情况；2. 清 理积水与淤泥；3. 评估车 站恢复运营条件	地铁运营公司 维修部门

该预警机制的优势在于：（1）基于量化阈值启动，避免主观判断误差；（2）明确响应措施与责任主体，提升应急效率；（3）与风险演化阶段同步，实现动态预警调整。

(三) 考虑积水动态变化的应急疏散路径优化

1. 网络拓扑模型构建

将地铁车站抽象为“节点-边”网络拓扑结构G=(V,E)，其中：节点集合V：包括站厅入口（v₁）、站厅中部（v₂）、站厅出口（v₃-v₆，对应4个出入口）、站台头部（v₇）、站台中部（v₈）、站台尾部（v₉）、通道节点（v₁₀-v₁₂，连接站厅与站台），共12个节点；边集合E：节点间的连通通道，共18条边（如v₁→v₂、v₂→v₃、v₇→v₁₀等），每条边的属性包括长度L(e)、宽度W(e)、最大疏散流量 $Q_{max}(e)$ 。根据《建筑设计防火规范》（GB50016-2014）与地铁车站实际尺寸^[7]，确定边的基础参数：通道长度L(e)为5-30m，宽度W(e)为2-4m，最大疏散流量 $Q_{max}(e)=W(e) \times 1.5 \text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$ （1.5人/(m·s)为人员疏散速度上限^[8]）。

2. 改进 Dijkstra 算法实现

以“总疏散时间最短”为目标，引入疏散流量约束（边e的实际流量Q(e)≤Q_{max}(e)），改进Dijkstra算法的步骤如下：

（1）初始化：设起点集合S（站厅节点v₁、v₂；站台节点v₇、v₈、v₉），终点集合T（出入口节点v₃-v₆）；初始化各节点权重d(v)：d(s)=0（s∈S），d(v)=+∞（v∉S）；记录各边的初始流量Q(e)=0。

（2）迭代计算：选择当前权重最小的节点u(d(u)=mind(v)|v∉已访问集合)，标记为已访问；对u的所有邻

接节点v，计算临时权重 $d'(v)=d(u)+w(e_{uv},t)$ ；流量约束检查：若 $Q(e_{uv})+\Delta Q \leq Q_{max}(e_{uv})$ （ΔQ为当前疏散批次人数，取50人），则更新 $d(v)=mind(v),d'(v)$ ，并更新 $Q(e_{uv})=Q(e_{uv})+\Delta Q$ ；否则，增加权重惩罚 $d'(v)=d'(v) \times 1.5$ 后再更新。

（3）终止条件：当所有终点节点T的权重d(t)(t∈T)不再变化，或迭代次数达到节点数×2时，停止迭代，输出各起点到终点的最优路径^[9, 10]。

三、实例验证与效果分析

以某市地铁2号线XX站为实例，设置“极端降雨强度200mm/h”场景（对应红色预警，爆发阶段），验证改进Dijkstra算法的有效性。

(一) 基础数据与模拟参数

1. 人员分布：站厅400人（v₁: 100人，v₂: 300人），站台400人（v₇: 150人，v₈: 150人，v₉: 100人），总疏散人数800人；2. 积水深度分布（t=30min时，对应爆发阶段初期）：站厅通道（v₁→v₂、v₂→v₃）：h=0.3m；站台通道（v₇→v₁₀、v₈→v₁₁、v₉→v₁₂）：h=0.6m；出入口通道（v₃→地面、v₄→地面）：h=0.2m；3. 疏散批次：分4批次疏散，每批次200人，批次间隔10s。

(二) 优化前后路径对比

采用传统Dijkstra算法（不考虑积水，权重仅为距离/速度）与改进Dijkstra算法（考虑积水动态变化与流量约束）分别计算疏散路径，结果如表4所示：

表 4：优化前后疏散路径与时间对比表

起点节点	传统算法最优路径 (不考虑积水)	传统算法总时间 (s)	改进算法最优路径 (考虑积水)	改进算法总时间 (s)	时间缩短率
v1 (站厅)	v1→v2→v10→v8→v11→v4	265	v1→v2→v3	182	31.3%
v2 (站厅)	v2→v10→v8→v11→v4	240	v2→v3/v2→v6	175/180	27.1%/25.0%
v7 (站台)	v7→v10→v2→v11→v4	290	v7→v12→v6	215	25.9%
v8 (站台)	v8→v11→v4	220	v8→v11→v5	178	19.1%
v9 (站台)	v9→v12→v2→v11→v4	275	v9→v12→v6	200	27.3%
平均	—	258	—	190	26.4%

从表 4 可知，改进算法相较于传统算法，平均疏散时间从 258s 缩短至 190s，时间缩短率达 26.4%。优化路径的核心逻辑是：（1）避开积水深度 >0.5m 的站台通道（如 v7→v10），选择积水较浅的出入口（如 v3、v6）；（2）平衡各通道流量，避免单一通道拥堵（如 v2 节点人员分流至 v3 与 v6 两个出入口）。

对比结果表明，改进 Dijkstra 算法具有以下优势：（1）平均疏散时间最短，比传统算法缩短 26.4%，比 A 算法缩短 9.5%；（2）算法耗时仅 150ms，远低于遗传算法（850ms），满足实时疏散需求；（3）最优解稳定性高（误差率 2%），避免算法震荡。

影响因素，其中排水系统 capacity（权重 0.18）、出入口地面坡度（0.15）、挡水设施高度（0.12）是核心控制因素，三者权重占比达 45%，需优先优化；积水风险演化可划分为“萌芽－发展－爆发－衰退”四阶段，各阶段具有明确的量化阈值（如爆发阶段降雨强度 >200mm/h、积水深度 >0.5m）；基于阈值构建的“蓝－黄－红”三级预警机制，可实现动态、精准的风险预警‘基于改进 Dijkstra 算法的疏散路径优化模型，考虑积水动态变化与流量约束，在实例中实现平均疏散时间缩短、风险规避率提升，且算法耗时短、稳定性高，适用于极端降雨下地铁站站的应急疏散决策。

四、结论

综上所述，通过德尔菲法确定地铁站积水风险的 12 项关键

参考文献

[1] 周芳, 王东海, 汪如良. 1980—2020 年 4—9 月湘赣浙闽地区日极端降水分布特征研究 [J]. 暴雨灾害, 2025, 44(05): 676–687.

[2] 生态环境部. 生态环境部新闻发布会实录 [M]. 中国环境出版集团 : 202503: 404.

[3] 刘炎. 数智化技术在地铁无障碍设施中的应用研究 [D]. 北京交通大学, 2024.

[4] 魏海宁. 兰州轨道交通突发洪涝灾害应急管理评价研究 [D]. 兰州大学, 2024.

[5] 刘任可. 暴雨灾害下城市轨道交通网络韧性评价研究 [D]. 重庆交通大学, 2025.

[6] 黄俊光, 袁庆盟, 卢家琦, 等. 零增地洪涝调蓄革新：建筑地下空间“平急两用”韧性体系构建 [J]. 中国水利, 2025, (19): 31–39.

[7] 吴炜, 罗曼, 渠永通, 等. 城市轨道交通地下车站站台公共区和车站轨行区排烟新思路探讨 [J]. 暖通空调, 2025, 55(09): 112–120.

[8] 颜紫璇. 面向设计过程的地铁车站运维安全韧性智能评价研究 [D]. 东南大学, 2023.

[9] 苟中涛. 基于居民出行特性的路径优化研究与系统设计 [D]. 重庆交通大学, 2024.

[10] 胡越. 面向 CGF 的空间认知行为建模关键技术研究 [D]. 国防科技大学, 2021.

地铁车站道岔智能监测与行车安全保障技术研究

李若琦

石家庄市轨道交通集团有限责任公司运营分公司，河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/ERA.2026010010

摘 要： 道岔是地铁车站轨道系统中的关键部位，其运行状态直接影响行车安全与运输组织效率。传统的人工巡检方式存在实时性差、效率低和故障隐患难以及时发现等问题。本文结合地铁运营的安全需求，提出了基于传感器、通信和智能分析的道岔智能监测技术体系，研究其在状态感知、故障预警和安全保障中的应用机制。通过工程实践案例验证，该技术可有效提升道岔运行可靠性，减少故障率和运营风险，为地铁安全运营提供重要支撑。

关 键 词： 地铁车站；道岔；智能监测；行车安全；故障预警

Research on Intelligent Monitoring and Traffic Safety Technology of Subway Station Turnout

Li Ruoyi

Shijiazhuang Rail Transit Group Co., LTD. Operation Branch, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract： As critical components in subway station track systems, switchgear directly impacts operational safety and transportation efficiency. Traditional manual inspection methods suffer from limitations including delayed real-time monitoring, low efficiency, and inadequate fault detection. This study proposes an intelligent monitoring system for switchgear integrating sensors, communication networks, and smart analytics, addressing safety requirements in subway operations. The research explores its application mechanisms in condition monitoring, fault prediction, and safety assurance. Through engineering case studies, the technology demonstrates significant improvements in operational reliability, reduced failure rates, and minimized operational risks, providing crucial support for subway safety management.

Keywords： subway stations; switchgear; intelligent monitoring; operational safety; fault prediction

道岔是轨道交通中实现列车进路转换的核心设备，被称为“轨道交通的咽喉”。地铁车站由于列车密集、换乘频繁，道岔运行负荷较大，极易因机械磨损、电气故障或环境因素导致失效。传统依赖人工巡检和定期检修的方式难以及时发现隐患，存在安全风险。随着物联网、传感器和智能诊断技术的发展，构建地铁车站道岔智能监测与安全保障体系成为提升行车安全水平的重要途径。

一、地铁车站道岔运行特性

地铁车站内的道岔具有开关频率高、使用强度大的特点。由于列车密度大、运行间隔短，道岔在短时间内需要频繁动作，这导致机械部件磨损速度加快，润滑不及时或零件疲劳都会引发潜在隐患。其次，道岔的电气控制系统结构复杂，需要与信号系统、联锁系统紧密协同工作，任何环节的异常都可能影响整体运行的安全性。地铁车站的环境通常较为恶劣，粉尘、湿度、地下水渗透、以及列车运行带来的强烈振动，都会对道岔机械结构与电气部件造成长期影响，从而增加故障发生的概率。

二、道岔智能监测技术体系

（一）状态感知层

状态感知层是整个体系的基础环节，其核心目标是准确、全面地获取道岔运行的实时信息。传感器布设是这一层级的核心工作。温度传感器可实时监测道岔电机、驱动机构及相关部件的升温情况，防止因过热导致电机烧毁；振动加速度传感器则用于捕捉尖轨、基本轨或连接部位出现的异常振动，从而判断机械是否存在卡阻、松动或轨距偏差等问题；电流与电压传感器能够提供电气回路运行稳定性的关键数据，帮助识别因短路、接触不良或

功率波动带来的风险；位移传感器直接反馈尖轨的开闭位置与到位情况，是判断道岔是否准确转换的核心指标。此外，高清摄像头的引入进一步丰富了监测手段。通过视频识别技术，可以辅助发现异物侵入、零部件缺陷以及结构异常等问题，形成直观的视觉证据，弥补单一传感器在复杂场景下的局限性。为了避免数据传输压力过大，边缘计算终端在源头对数据进行实时采集、初步分析与压缩处理，从而在保证时效性的同时减轻后端系统的计算与存储负担。

（二）数据传输层

状态感知层采集的数据必须高效、稳定地传送到后台系统进行进一步分析。工业以太网凭借其高带宽与低延时特性，成为有线传输的主要方式，而5G和专用无线通信则在复杂的地下车站环境中展现出更强的灵活性与覆盖性。为了防止因网络波动或外界干扰导致的数据丢失，传输层设计了冗余机制，确保在部分链路失效时仍能保持数据畅通。同时，加密机制的应用有效避免了数据在传输过程中被篡改或泄露，确保信息传递的安全性和可靠性。

（三）智能分析层

智能分析层作为整个体系的关键核心部分，承担着对采集而来的大量数据给予深入处理以及智能化解读的任务，借助大数据分析手段，可从海量的历史运行数据里分辨出潜在规律以及典型故障模式，提取出与设备异常关联度较高的关键特征，接着融合机器学习算法构建诊断模型，像支持向量机、神经网络、随机森林等，以此达成对道岔故障类型的迅速识别以及趋势预测。此方法促使道岔监测从“静态检测”转变为“动态预测”，提升了故障诊断的前瞻性与准确性，基于此，系统可构建“道岔健康指数”，依靠对各类监测指标进行综合计算，来量化设备运行的健康水平，健康指数的可视化呈现，方便运维人员快速了解设备整体状况，又为的维护决策提供了科学依据。

（四）应用服务层

应用服务层作为面向管理与运维人员的直接交互界面，其功能在于把前端采集以及分析所得到的结果，转变为可实际操作的信息以及提供决策支持，监测平台借助图形化界面实时呈现道岔的运行状态，可直观地呈现出各个传感器的数据、设备的健康指数以及视频监控画面，一旦系统检测到存在异常趋势或者故障隐患，便会立刻触发预警机制，把相关信息推送至调度中心以及检修人员的移动终端，以此保证可快速做出响应。另外该平台可依据设备的健康指数以及预测模型的结果，为运维部门制定出优化后的检修计划，比如针对不同道岔的磨损程度以及风险等级，合理地安排检修的优先级以及资源配置，避免出现不必要的“过度维护”情况，提高运维效率同时降低成本。

三、行车安全保障技术措施

（一）智能预警机制

智能预警作为保障行车安全的首要防线，借助实时监测数据同预设阈值相互对比，系统可在早期阶段察觉到潜在风险信号，

举例来讲，当驱动电机运行电流渐渐升高，且随着温度曲线持续上升时，一般意味着电机可能存在绝缘老化、机械负荷增大或者散热不畅等隐患，此时监测平台会及时发出预警，告知检修人员采取针对性举措。这种机制的采用，让道岔维护从传统的“故障发生后再修复”逐步转变为“预测性维护”，相较于事后维修，预测性维护可降低突发故障率，防止列车因道岔失效而临时停运，并且它还可以减少不必要的周期性维修，延长设备使用期限，降低整体运维成本，在这个过程中，阈值的设定不应是固定数值，而应随着历史数据与运行环境的积累进行动态调整，以便更精准地契合实际工况。

（二）冗余与容错设计

在轨道交通系统里，任何一个单点出现故障都存在引发严重后果的可能性，在道岔的关键部位引入冗余以及容错设计，是提高安全性的必要举措，冗余设计呈现在多个层面，在传感器层面，可借助双路甚至多路传感器同时收集相同参数数据，并且利用交叉验证去除异常值，在控制层面，采用双回路电气控制方式，一旦某一控制单元失效，备用回路马上接管，保障道岔动作的连续性和可靠性。

容错设计更加注重系统在部分单元出现故障时所有的自我修复能力，举例来说，当出现某个传感器信号缺失的情况时，系统可借助其他相关传感器的冗余信息来开展数据补偿工作，或者依据健康指数模型进行合理的推算，以此避免因个别点出现异常而致使整体监测失效，非常关键的是，在信号联锁逻辑当中要拥有高度的容错能力，即使部分监测单元失效，也不会对行车安全联锁的执行产生影响，保证列车运行的绝对安全。

（三）与行车调度系统联动

智能监测平台不是独自存在的，而是要和行车调度系统深度融合起来，构建出协同联动的整体框架，要是监测平台识别出道岔有潜在风险，就能凭借接口协议把信息实时推送到调度中心，调度系统收到异常信号后，可以自动或者半自动采取应急措施，像调整运行图、限制相关区段列车速度，甚至临时封锁受影响股道。这种联动机制有效防止了“信息孤岛”现象，让监测结果切实成为运营管理的决策依据，比如在某地铁线路出现道岔尖轨卡阻隐患时，监测系统提前发出预警，调度端快速调整后续列车运行计划，避免列车集中借助该区段，最终在检修人员到达之前，依然可维持运营的安全和秩序，这种主动干预的机制，大幅提升了地铁系统应对突发风险的韧性。

（四）全生命周期安全管理

道岔的安全保障并非局限于某一时刻或地点的管理工作，而是要贯穿设备的整个寿命周期，从设计阶段起始，便需把智能监测理念融入总体方案之中，合理规划传感器的布设位置，预留好数据采集以及传输的接口，以此为后期运营奠定技术基础，在施工与安装阶段，要严格落实监测设备的调试与验收工作，保证系统在投入运营之前可达到预期的监测精度与稳定性标准。进入运营阶段以后，随着监测数据持续积累，可以构建完整的道岔运行数据库，为后续维护提供有可追溯性的历史记录，这样的数据库可用于日常维护，而且在设备更新换代、寿命评估等环节也能提

供量化依据，依靠引入全生命周期的管理理念，地铁道岔的维护将不再是单纯的被动修复，而是转变为动态、可追溯且可优化的长效管理过程。

四、案例与应用效果

（一）概况

以某城市轨道交通地铁线路为例，该线路全长约65公里，共设有36座车站和4个车辆段。传统的巡检方式以人工定期检查为主，依赖经验判断，往往存在发现不及时、数据不完整、分析不系统等问题。为解决上述痛点，运营公司自2022年起在重点枢纽车站和部分车辆段试点部署了道岔智能监测系统。^[1-5]

（二）实施方案

1. 硬件部署

在车站主要道岔安装高精度电流传感器和动作时间采集模块，同时配备智能终端采集盒，将数据通过4G/5G网络传输至监测平台。为确保设备稳定运行，部分关键点位还引入了双电源冗余和数据缓存机制。

2. 平台建设

监测平台集成了大数据分析 with 人工智能算法，能够建立道岔动作时间与电流曲线模型。一旦监测到曲线偏离正常范围，系统会立即触发预警，并根据偏差程度自动分级。

3. 运维联动

运维人员通过移动终端即可实时接收告警信息。告警消息不仅包含异常参数和时间点，还能附带趋势曲线及历史对比数据。通过这种方式，检修人员在到达现场前即可初步锁定故障原因，有效缩短了排障时间。

4. 阶段性评估与优化

系统部署后，运营方定期组织评估小组，基于运行数据对算法模型进行优化。针对某些雨季条件下频繁出现的误报问题，团队增加了环境因子权重修正模块，使误报率降低约15%。^[6]

（三）成效分析

经过近一年的实际运行，道岔智能监测系统在试点车站展现出明显效果。

提前预警能力：在典型案例中，当道岔动作时间曲线出现波动异常时，系统能够在故障发生前平均提前2小时发出预警，为运维人员争取了充足的检修准备时间。^[7-10]

故障率与延误减少：部署系统前，道岔故障平均每月发生约20起，其中约8起导致行车延误。部署后，月均故障率下降35%，因道岔故障造成的列车延误事件减少40%，显著提升了行车的稳定性。

运维效率提升：由于检修人员能够通过移动终端直接获取异常信息与分析结果，平均故障处理时间缩短约20分钟，整体检修效率提升25%。检修人员人均日均巡检里程减少约15%，劳动强度得到有效缓解。

经济与社会效益：按照运营公司测算，仅减少的延误成本和设备大修支出，每年可节约约500万元。乘客满意度调查显示，因道岔问题导致的投诉率降低了约30%，社会形象得到进一步提升。

表1 道岔智能监测系统应用成效对比

指标类别	部署前水平	部署后水平	改善幅度
平均预警时间	无提前预警	故障前约2小时	——
月均故障率	20起 / 月	13起 / 月	降低35%
因道岔延误次数	8起 / 月	5起 / 月	减少40%
故障处理效率	平均80分钟 / 次	平均60分钟 / 次	提升25%
运维人均巡检量	100%	85%	降低15%
年度经济收益	——	节约约500万元	——

五、结论

本文提出了地铁车站道岔智能监测与行车安全保障的技术体系，涵盖传感器布设、数据分析与安全联动等环节。研究与实践证明，该体系能够有效降低道岔故障风险，提升地铁运营安全水平。

参考文献

- [1] 石柯军, 刘彪, 张斌. 地铁行车组织中的应急调度策略研究 [J]. 人民公交, 2024(23): 92-94.
- [2] 华夏. 紧急情况下的快速响应机制及对地铁调度优化的影响研究 [J]. 运输经理世界, 2024(35): 136-138.
- [3] 周浩然. 地铁司机应急处置能力分析研究 [J]. 人民公交, 2024(22): 67-69.
- [4] 王杰燃. 地铁突发极端气象灾害应急管理的若干思考 [J]. 人民公交, 2024(22): 79-81.
- [5] 李亚娟, 肖琪. 地铁车站火灾疏散模拟与应急照明优化研究 [J]. 消防界 (电子版), 2024, 10(21): 7-9.
- [6] 翟旭, 刘磊, 郭涛. 突发事件下地铁行车调度应急响应机制 [J]. 人民公交, 2024(06): 77-79.
- [7] 侯永朋. 地铁运营突发事件应急处置能力评价体系研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2023(10): 120-127.
- [8] 王军武, 田梦圆, 潘子瑶, 刘森, 王心楠. 地铁车站暴雨内涝应急响应投入策略研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(05): 11-17.
- [9] 徐亚博, 葛悦, 姚卫华, 代宝乾, 张蓓. 全员应急背景下地铁应急人员认知需求分析 [J]. 安全, 2022, 43(05): 18-24.
- [10] 胡玉山. 地铁运营突发事件应急指挥探究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022(S1): 105-107.

不停航施工条件下机场排水箱涵分段预制与湿接技术运用

王智文

上海建科工程咨询有限公司，上海 200032

DOI:10.61369/ERA.2026010012

摘 要： 机场排水箱涵作为机场飞行区的基本保障措施之一，承担着雨水、冰雪融水及生产废水的排放功能，其改造升级是改扩建工程的关键环节。因此，为解决机场不停航施工中，传统排水箱涵现浇工艺工期长、运营干扰大、结构质量难控的问题，本研究提出一种分段预制与湿接技术的运用方法；通过明确不停航施工的行业规范要求，遵循空间适配－重量可控－接头精简的划分原则，制定工厂化生产的混凝土配比与质量控制标准；同时针对湿接环节，优化界面预处理、套筒灌浆连接、C45微膨胀混凝土浇筑，以及密封性检测技术参数；最终从某国际机场飞行区扩建工程案例中，直观展示所提技术的运用成效，从而为机场不停航条件下的排水设施改造提供技术参考，丰富预制箱涵湿接技术在机场场景的应用理论。

关 键 词： 不停航施工；机场排水箱涵；分段预制；湿接技术

Application of Segmental Prefabrication and Wet Connection Technology for Airport Drainage Box Culverts under Conditions of Non-Suspension of Flight Operations

Wang Zhiwen

Shanghai Jianke Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200032

Abstract： As one of the fundamental safeguard measures in the airport airfield area, airport drainage box culverts are responsible for discharging rainwater, melted snow and ice, and production wastewater, with their renovation and upgrading being a crucial aspect of airport expansion and reconstruction projects. Therefore, to address the issues of long construction duration, significant operational disruptions, and difficult structural quality control associated with the traditional cast-in-place process for drainage box culverts during airport construction without suspension of flight operations, this study proposes a method utilizing segmental prefabrication and wet connection technology. By clarifying the industry standard requirements for construction without suspension of flight operations and adhering to the principles of spatial adaptability, controllable weight, and simplified joints, concrete mix proportions and quality control standards for factory production are established. Simultaneously, for the wet connection process, interface pretreatment, sleeve grouting connection, C45 micro-expansion concrete pouring, and sealing detection technology parameters are optimized. Finally, the application effectiveness of the proposed technology is visually demonstrated through a case study from the expansion project of an international airport's airfield area, providing technical references for drainage facility renovation under airport construction conditions without suspension of flight operations and enriching the application theory of prefabricated box culvert wet connection technology in airport scenarios.

Keywords： construction without suspension of flight operations; airport drainage box culvert; segmental prefabrication; wet connection technology

引言

随着我国航空运输量的持续增长，机场改扩建工程已成为常态化，并在施工期间，跑道、滑行道、航站楼等核心运营区域，依旧呈现出正常开放的状态，从而实现不停航施工的目的。机场排水箱涵作为机场飞行区地面基础保障设施之一，主要承担雨水、冰雪融水及

作者简介：王智文（1982—），男，汉族，陕西咸阳人，本科学历，研究方向：民用机场方向。

生产废水的排放，进而会结合机场的实际运行需求，对其进行扩建或改造等工程。进而在此种背景下，工厂分段预制 + 现场湿接的技术凭借标准化生产、模块化装配、快速施工等优势，成为解决机场不停航排水改造的核心技术路径^[1]。因此，本文在不停航施工条件下，提出一种机场排水箱涵的分段预制与湿接技术，旨在明确不停航施工条件下机场排水箱涵分段预制的技术标准，实现湿接技术体系的优化，最终展示技术的可行性，为其他机场的同类型排水箱涵工程提供参考与借鉴。

一、不停航施工基础理论与行业规范

（一）基础概念

不停航施工是指在机场开放运行期间，不关闭跑道、滑行道、停机坪等核心功能区域，通过分区域、分时段、分工序的方式进行工程作业，从而实现工程建设与航班保障并行的施工模式。相较于普通市政施工，机场不停航施工展示出三大特殊性，一是空间约束严格性，需符合《民用机场飞行区技术标准》（MH 5001-2021）的净空要求，距跑道中心线 50m 内不得设置高度 $\geq 1.5\text{m}$ 的临时设施，施工通道宽度通常 $\leq 5\text{m}$ ^[2]。二是时间窗口有限性，仅可利用航班低峰运行时间进行施工，且需提前 24h 向空管部门报备施工计划。三是安全标准极高性，严格防控 FOD（外来物，如施工螺栓、混凝土碎块），实现全员、全时段、全区域的区域管控。

（二）行业规范

机场不停航施工需遵循多部门发布的规范，核心条款从管理管控与技术指标 两方面对施工提出明确要求，如中国民用航空局发布的《民用机场不停航施工管理规定》（CCAR-140）规范^[3]，明确指出：施工前编制专项组织设计，经机场与空管部门双审批；距跑道 $< 50\text{m}$ 的敏感区日作业时间 $\leq 6\text{h}$ ，且需避开航班高峰；配备专职 FOD 监督员，每 2h 巡查 1 次；从而保证 FOD 检出率为 0，以及航班延误率 $\leq 0.5\%$ 。此外，水利部和住建部颁布的《混凝土箱涵设计与施工规程》（SL 191-2020）与《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ 1-2021），同样也明确了机场排水箱涵的建设标准与规范。

二、不停航施工下机场排水箱涵分段预制技术

（一）预制段划分原则与方案设计

预制段划分需同时满足机场空间适配、设备能力匹配、结构性能保障三大原则，从而避免运输或吊装时侵入跑道保护区，防止设备超载导致安全事故，以及降低接头的渗漏风险^[4]。如在机场常用的 $3.5 \times 2.5\text{m}$ 的矩形排水箱涵中，结合上述原则制定分段方案，重点突出机场不停航适配性，方案如下：

1. 单段长度设定为 5m，满足 50t 汽车吊 8m 的作业半径，无侵入跑道风险；
2. 单段重量设定为 38.88t，为 C40 混凝土密度 2400kg/m^3 ，实际体积 16.2m^3 ，适配机场常用 50t 汽车吊，无需大型设备进场；

3. 每公里接头数设定为 200 个，增加接头数的同时，实现预制接头质量的可控，从而降低渗漏率使其达到 $< 5\%$ 的状态；

4. 运输设备设定为宽度 2.5m，适配机场施工通道的 50t 平板拖车，运输路线沿专用通道，不干扰航班保障车辆通行

5. 吊装时段设定为凌晨 2:00-6:00 的航班低峰期，日均吊装 10 段，以此降低运营干扰。

（二）预制构件工厂化生产技术

为了保证预制段质量稳定，采用工厂标准化生产 + 全流程质量管控的模式，其核心技术为模板体系、混凝土配比、生产流程及质量检测四部分^[5]，具体如下。

1. 模板体系设计：采用钢制定型模板，模板由侧模、端模、底模组成，配套明确检测工具，保障机场箱涵尺寸精度；
2. 混凝土配比设计：针对机场不停航早强（快速脱模）、抗裂（适应温度变化）、抗渗（应对强降雨）的需求，选用 C40 早强纤维混凝土，配合比通过正交试验优化，明确性能检测方法；
3. 生产流程：预制构件生产分为 6 个关键步骤，即为钢筋绑扎→模版安装→混凝土浇筑→蒸汽养护→脱模作业→出厂检测；
4. 质量检测：针对生产流程的每个步骤，明确其质量控制点和验收要求，阿保证满足机场高标准。

（三）预制段运输与现场吊装技术

运输方案设计上，可将预制段从工厂直接运输至机场施工现场^[6]，同时避开运营核心区，明确应急处理措施，保障运输安全；如运输路线可为工厂→机场外围道路→专用施工通道→现场，全程避开跑道中心线 105m 保护区，且运输通道与航班保障车辆通道完全分离，避免交叉干扰。现场吊装技术则在航班低峰期进行，选用 50t 汽车吊，遵循安全吊装 + 运营无扰的原则；如吊点设计为每段设 4 个预埋吊环，且在吊装前检查吊环焊缝，是否存在裂纹、气孔等，并保证清空吊装作业区 20m 内的人员与非施工设备；吊装定位则为起吊至 3m 高避障→移动至基坑上方→调整标高→下放至垫层，期间利用水准仪实时监测标高，并在基坑内安排 2 人进行辅助定位。

三、不停航施工下机场排水箱涵湿接技术

（一）湿接接头预处理

预制段结合面的处理质量直接决定新旧混凝土粘结强度，是避免接头渗漏的基础，需严格遵循凿毛 - 清理 - 界面剂涂刷三步流程，且每一步均需适配机场狭窄施工空间与短工期要求，如表 1 所示。

表1 湿接头预处理操作步骤

步骤	操作及工具	质量验收	问题及应对
凿毛作业	气动凿毛机凿毛，深度3~5mm，凿毛率≥70%	深度用深度尺检测，凿毛率网格法统计	凿伤钢筋：立即停止，用砂轮打磨平整，补刷防锈漆
清洁处理	0.8MPa 高压水枪冲洗，去除浮浆/骨料，棉布擦干	无浮浆，无积水	冬季结冰：用50℃温水冲洗，避免结合面结冰
界面剂涂刷	水泥基界面剂，厚度1~2mm	厚度仪检测，无漏涂/流挂	界面剂干结：30min内未浇筑需重新涂刷，避免粘结失效

（二）钢筋连接优化

机场施工空间狭窄，如基坑宽度通常仅4~5m，传统焊接连接操作存在难度大、效率低，且焊接火花存在 FOD 风险等问题；进而选用套筒灌浆连接技术，并细化流程与检测仪器，从而满足不停航施工安全与效率要求，如表2所示。

表2 套筒灌浆连接技术优化

连接环节	技术方案与流程	关键参数	质量检测
套筒选型	半灌浆套筒→预埋	套筒轴线与钢筋轴线偏差≤1°	外观检测：无裂纹、凹陷，内径±0.5mm
灌浆料配制	CGM-4型灌浆料→电动搅拌桶搅拌3~5min→静置2min 排泡	初始流动度≥300mm，30min ≥260mm	流动度检测：流动度筒
灌浆施工	灌浆泵从下孔注入→上孔出浓浆封堵→30min 内检查漏浆	灌浆压力0.25~0.35MPa，饱满度100%	X 射线探伤：无空洞
接头养护	覆盖土工布保湿→自然养护≥24h；< 5℃时电加热	养护温度波动≤2℃，湿度≥90%	温度传感器：无超温，接头无裂缝

（三）湿接混凝土配制与浇筑

湿接混凝土需同时满足早强、微膨胀、高抗渗的性能需求，其配制与浇筑工艺需严格适配机场施工时段限制，确保可快速成型且质量稳定。混凝土配比设计，选用 C45 微膨胀混凝土，以 P.O 42.5R 水泥为强度基础，用量420kg/m³；细骨料选用中砂，用量650kg/m³；粗骨料采用5~16mm 连续级配碎石，用量1100kg/m³；水灰比控制在0.38，用水量160kg/m³；掺入7% 钙矾石型微膨胀剂，用量29.4kg/m³；添加聚羧酸系早强减水剂，用量6.3kg/m³；同时掺入30kg/m³硅灰，填充混凝土内部孔隙，提升密实度，使抗渗等级达到 P10，充分满足机场箱涵 P8 的基础要求。浇筑施工需在界面剂涂刷后30min 内启动，适配机场有限施工窗口；浇筑完成后需及时收光处理，在混凝土浇筑后1~2h 用木抹子初抹，浇筑后3~4h 用铁抹子终抹，收光次数≥2 次，确保表面平整度≤5mm/m，无裂缝、起砂现象，并结合机场具体施工时段与环境温度进行调整。

（四）湿接头密封性检测

机场排水箱涵因承担强降雨排水的功能，而接头渗漏会导致基坑积水、地基沉降，甚至影响跑道结构安全，所以通过建立外观检测-闭水试验-无损检测三级密封性检测体系的方式^[7]，使得每级检测符合民航行业质量标准，并保证检测流程适配不停航施工节奏，具体如下：

1. 一级检测为外观检测，在湿接混凝土养护完成拆模后进

行，通过目视观察与手触检查接头表面状态；

2. 二级检测为闭水试验，是验证接头抗渗性能的核心手段，需在每完成50个接头后进行1次，及时发现渗漏，及时修补处理；

3. 三级检测为无损检测，用于排查接头内部隐蔽缺陷，每完成100个接头随机抽检1组，采用超声波检测仪沿接头周长每200mm 测1点，扫描深度50mm。

四、工程案例

（一）工程概况

以某国际机场飞行区扩建工程为例；本项目为核心配套排水设施改造项目，主要建设内容为新建1.2km 长矩形排水箱涵，箱涵设计尺寸为3.5×2.5m，壁厚0.3m，设计排水流量5m³/s，用于承接飞行区跑道、滑行道及航站楼周边的雨水、冰雪融水与生产废水，保障机场极端降雨工况下的排水安全。

（二）实施过程

预制段生产与运输：工厂选址，在机场外围10km 处设预制工厂，占地面积5000 m²，配置2条生产线，日均生产预制段8段（5m/段），1.2km 箱涵共需240段，生产周期30d。运输组织，每日晚8~10时运输16段，运输路线沿机场外围道路→专用施工通道，保证全程不会对航班造成干扰。

现场施工流程：基坑开挖与支护采用钢板桩支护+井点降水，开挖时段为凌晨2~6时，日均开挖50m，24d 完成。同时段进行预制段吊装，吊装偏差≤3mm。湿接施工：白天8~18时进行接头预处理，次日凌晨2~4时完成灌浆与混凝土浇筑，24d 完成。密封性检测，每完成40个接头进行1次闭水试验，共6次，渗漏量均≤0.008m³/(m·d)；无损检测抽检20个接头，均无空洞与疏松。

运营干扰控制：时段管控，距跑道<50m 的敏感区施工仅在凌晨2~6时进行，其他区域白天施工，日均有效施工时间8h。FOD 防控，作业区周边设 FOD 收集箱，每班作业后用 FOD 耙清理1次，施工期间共检查120次，FOD 检出率=0。噪声与扬尘控制，采用低噪声振捣棒，基坑开挖时雾炮机降尘，10min1次，监测显示跑道旁噪声≤68dB，PM10 浓度≤75 μg/m³。

（三）应用效果评估

对工期与质量效果进行评估，评估指标设定为总工期、预制段强度达标率、湿接接头渗漏率、箱涵沉降总量、混凝土外观合格率，结果如表3所示。

表3 工期与质量效果评价结果

指标	目标值	实际值	增幅：%
总工期：d	60	58	↑3.3
预制段强度达标率：%	100	100	/
湿接接头渗漏率：%	≤5	0	↓100
箱涵沉降总量：mm	≤10	4.2	↓58
混凝土外观合格率：%	≥95	99.3	↑4.5

由表1可知，该工程在实施了分段预制与湿接技术后，其工期与质量得到显著提高，从而展示出较高的工程应用价值。

运营影响方面，结合实际情况可知，该工程施工期间，共保障航班18000架次，延误仅18架次，延误率为0.1%，远低于目标值0.5%；且无 FOD 事件与安全事故的发生；经济效益方面，从人工、材料、设备、运营损失、维修等方面，对比传统现浇工艺，从而对其进行评估，如表4所示。

表4 工程经济效益对比：万元

成本	传统现浇	分段预制 + 湿接工艺	节省金额	节省比例：%
人工	240	172	60	27.9
材料	560	476	84	15.0
设备	180	152	28	15.6
运营损失	320	40	280	87.5
维修	60	10	50	83.3
合计	1360	1074	285	21.0

由表4可知，相较于传统现浇工艺来说，显著降低各项成本的投入，约为285万元，展示出较高的经济应用效益。

五、结论

综上所述，本文提出的分段预制 + 湿接的技术，可有效解决机场不停航施工的核心问题与限制。实际工程案例表明：该技术在应用过程中，可有效缩短工程施工时间，降低工程成本投入，并最大限度减少工程对机场运营的干扰率，从而展示了该技术的推广价值与可行性。因此，在未来研究中，可从轻量化预制段制作、智能化湿接设备研发等方向，提升该技术的机场运营适配性与效率。

参考文献

[1] 韩宏跃, 李志成, 孙海泉, 等. 机场排水箱涵钢板台车施工技术 [J]. 民航学报, 2023, 7(6): 36-42.

[2] 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准 (MH 5001-2021)[S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.

[3] 中国民用航空局. 民用机场不停航施工管理规定 (CCAR-140)[S]. 北京: 中国民航出版社, 2020.

[4] 孙良. 机场排水箱涵分段预制湿接工艺在不停航施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(20): 118-120.

[5] 罗甲舟. 机场超大截面箱涵移动式模架施工技术研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(1): 19-22.

[6] 李永强. 解决五台山机场排水问题的对策 [J]. 山西水利科技, 2025(1): 78-80.

[7] 李晖. 机场铸铁箅子箱涵雨水口设置间距研究 [J]. 房地产导刊, 2025(2): 137-139.

工程项目招投标阶段的风险分析与防范

周新宇, 王毅, 李伟林

北京希达工程管理咨询有限公司, 北京 100097

DOI:10.61369/ERA.2026010014

摘 要 : 本研究聚焦于工程项目招投标阶段的风险分析与防范, 起始对工程项目招投标的定义、流程以及相关法律法规进行了详细阐述, 奠定了后续风险分析的理论基础。接着, 详细探讨了风险识别的环节, 包括风险识别方法、招投标阶段的风险因素分析以及风险分类, 为风险的有效管理提供了初步框架。在风险识别的基础上, 本研究进一步进行了风险评估, 介绍了风险评估方法, 分析了风险的概率与影响程度, 并对风险进行了等级划分, 为制定针对性的防范措施提供了依据。本文后面提出了工程项目招投标阶段的风险防范措施, 包括风险防范策略、措施制定原则以及实施途径, 旨在为工程项目招投标的风险管理工作提供实践指导。

关 键 词 : 工程项目; 招投标; 风险分析; 风险防范; 风险管理

Risk Analysis and Prevention in the Bidding Phase of Engineering Projects

Zhou Xinyu, Wang Yi, Li Weilin

Beijing Xida Engineering Management Consulting Co., Ltd., Beijing 100097

Abstract : This study focuses on risk analysis and prevention during the bidding and tendering phase of engineering projects. It begins with a detailed exposition of the definition, process, and relevant laws and regulations of bidding and tendering in engineering projects, laying a theoretical foundation for subsequent risk analysis. Subsequently, it delves into the risk identification process, encompassing risk identification methods, analysis of risk factors during the bidding and tendering phase, and risk classification, providing a preliminary framework for effective risk management. Building on risk identification, this study further conducts a risk assessment, introducing risk assessment methods, analyzing the probability and impact of risks, and categorizing risks into different levels, thereby providing a basis for formulating targeted preventive measures. Subsequently, this paper proposes risk prevention measures for the bidding and tendering phase of engineering projects, including risk prevention strategies, principles for formulating measures, and implementation approaches, aiming to offer practical guidance for risk management in the bidding and tendering of engineering projects.

Keywords : engineering projects; bidding and tendering; risk analysis; risk prevention; risk management

引言

随着我国经济的持续快速发展, 基础设施建设和公共服务设施建设规模不断扩大, 工程项目招投标市场日益活跃。招投标作为工程项目实施的重要环节, 直接关系到工程项目的成本、质量和进度。然而, 在招投标阶段, 由于信息不对称、市场竞争激烈等原因, 各类风险因素层出不穷, 给工程项目带来诸多不确定性。如何有效识别、评估和防范这些风险, 成为工程项目招投标阶段亟待解决的问题。

一、工程项目招投标概述

在深入探讨工程项目招投标阶段的风险分析与防范之前, 必须对工程项目招投标本身形成一个全面且深入的认识。以下是工程项目招投标的基本概述, 包括其概念、流程以及相关法律法规。

(一) 工程项目招投标概念

招投标是一种双方通过规范邀约与承诺, 确定双方权利、义务与责任的一种交易方式, 其在建设工程项目管理之中能够帮助建立起建立公平、科学的市场竞争机制。从综合角度来看, 招投

标具有平等性、竞争性以及开放性的特征^[1]。招投标活动包括招标、投标、开标、评标、中标、授标以及签订合同等环节。招标是指招标人通过公告或邀请书等方式, 邀请具有法定条件和承建能力的投标人参与竞争。投标则是经资格审查合格的投标人, 按照招标文件规定填写投标文件, 并在规定时间内提交。开标、评标、中标、授标以及签订合同等环节则依次进行, 确保了整个招投标过程的严谨性和规范性。

(二) 工程项目招投标流程

招标人在工程项目招投标过程中的首要任务在于开展一系列

前期准备工作，这包括但不限于项目立项的审批、建设工程项目的报建手续办理，以及核实建设单位是否具备参与招标的资格等关键环节^[2]。在此基础上，招标人需精心编制资格预审文件和招标文件，确保文件内容详尽、明确，无歧义。

投标方依据招标文件的具体要求，精心编制投标文件，该文件一般包括投标函、法定代表人身份证明、投标保证金等必要资料，以此明确表达其参与项目竞标的强烈意愿及充分能力。接下来，招投标流程进展至开标、评标以及中标的关键阶段，该过程涉及开标仪式的正式举行、评标委员会对递交的投标文件进行专业评审，以及中标候选人的最终抉择与公布。

（三）工程项目招投标相关法律法规

我国招投标活动主要依据《中华人民共和国招标投标法》《中华人民共和国招标投标法实施条例》《中华人民共和国政府采购法》及其实施条例、《政府采购货物与服务招标投标管理办法》《电子招标投标办法》《工程建设项目招标范围和规模标准规定》等法律法规^[3]。这些法律法规为工程项目招投标提供了明确的法律框架和操作指南，确保了招投标过程的公开、公平、公正，维护了国家利益、社会公共利益和当事人的合法权益。

二、工程项目招投标阶段风险识别

在工程项目招投标的过程中，风险无处不在，它可能影响项目的顺利进行，甚至导致项目失败。因此，对招投标阶段的风险进行识别、分析和分类，是保障工程项目顺利实施的关键环节。以下将围绕风险识别方法、招投标阶段风险因素分析以及风险分类进行详细探讨。

（一）风险识别方法

在工程项目的招投标阶段，风险识别是一项至关重要的工作，它为项目后续的顺利实施奠定了基础。在这一阶段，主要的风险识别手段包括定性分析和定量分析两种。定性分析，作为一种深入挖掘潜在风险的方法，其核心在于依托专家的丰富经验与专业知识，通过一系列技术如专家访谈、头脑风暴、故障树分析等，对风险进行系统的排查和详尽的描述^[4]。这种方法能够直观地揭示风险的内在属性，描绘出风险的可能影响路径，从而为制定风险应对策略提供依据。

相对而言，定量分析则侧重于运用数学工具和统计方法，如概率论、数理统计等，对风险事件的发生概率及其可能对项目造成的影响进行精确的量化。这种分析方式的优势在于，它能够提供客观、量化的数据支持，极大地提升了风险评估的精确度和决策的科学性。通过对风险的概率分布、期望损失等参数的测算，项目管理者能够更加清晰地认识到风险的严重程度，并据此制定出更加合理有效的风险管理措施。

定性分析与定量分析这两种方法在实际应用中相辅相成，形成了一个全面且深入的风险识别体系。定性分析为定量分析提供了必要的前提和方向，而定量分析则使定性分析的结果得以量化，二者共同作用，使得风险识别工作更加全面、精准。这种综合性的风险识别体系，不仅有助于项目团队对潜在风险有更为深

刻地理解，同时也为工程项目的稳步推进提供了坚实的保障，确保了项目能够在复杂多变的环境中稳健前行。

（二）招投标阶段风险因素分析

在招投标阶段的风险因素分析过程中，应当关注多个关键层面。项目本身的复杂性是首要考虑的风险因素，它可能导致招标文件编制存在缺陷、项目需求描述不清晰^[5]。接着，投标人资格和能力的不确定性也是一个关键风险点，这可能影响中标后的项目按时完成。再者是市场竞争环境，如恶意低价竞争、围标串标等现象，这些都可能给招投标过程带来风险。此外，法律法规的变化、政策调整以及不可抗力因素等，也是不容忽视的风险因素。

（三）招投标阶段风险分类

针对招投标阶段的风险，可将其分为以下几个类别：一是项目风险，包括项目规模、技术要求、资金落实等方面的不确定性；二是市场风险，如供应商或承包商的信誉、市场竞争程度等；三是法律风险，涉及法律法规变动、合同条款争议等；四是管理风险，包括招标流程不规范、评标标准不科学等；五是财务风险，如投标保证金、履约保证金等财务安排不当；六是外部风险，如自然灾害、政治动荡等不可预见因素^[6]。通过对上述风险的系统分类，将有助于针对性地制定风险应对策略，从而确保工程项目的招投标活动得以顺畅进行。

三、工程项目招投标阶段风险评估

在工程项目招投标的过程中，风险无处不在，如何有效地评估这些风险对于保障项目顺利进行至关重要。风险评估作为项目管理的重要组成部分，它帮助招标人和投标人识别和量化潜在风险，从而制定出合理的风险应对策略。以下将从风险评估方法、风险概率与影响程度分析以及风险等级划分三个方面，对工程项目招投标阶段的风险评估进行深入探讨。

（一）风险评估方法

在项目管理实践中，风险评估是识别、分析与评价潜在风险的关键步骤，主要分为定性评估与定量评估两大类。定性评估侧重于通过专家的直觉、经验和判断，以及风险矩阵、清单和研讨会等手段，对风险进行描述、分类和排序，其优势在于操作灵活，能够迅速定位关键风险点^[7]。定量评估则利用概率统计、敏感性分析、决策树和蒙特卡洛模拟等技术，将风险不确定性转化为具体数值，以精确计算风险概率和影响。实际操作中，通常采用定性与定量相结合的综合评估方法，先通过定性分析进行风险识别，再对关键风险进行定量分析，以此提高评估的准确性，深化团队对风险的理解，并制定出科学有效的风险应对策略。

（二）风险概率与影响程度分析

在项目风险管理流程中，风险概率与影响程度分析扮演着至关重要的角色，其目的是深入挖掘各风险因素对项目目标的潜在影响及其发生的可能性。该分析通过综合评估历史数据、专家意见、市场趋势和项目特性，运用概率统计方法如贝叶斯定理和事件树分析，对风险事件的发生概率进行量化，同时，通过影响矩阵和假设情景分析等工具，对风险的具体影响进行分级排序，考

虑直接和间接后果以及连锁反应^[9]。这种综合分析使得项目团队能够构建风险矩阵，将风险概率与潜在影响相结合，进行优先级排序，为项目管理者提供决策支持，确保针对影响最大的风险采取有效控制措施，而对其他风险则根据情况接受或继续监测。

（三）风险等级划分

项目团队通过结合风险的概率和影响程度，利用风险矩阵工具进行系统的风险等级划分，其中风险概率构成横轴，影响程度作为纵轴，将矩阵划分为不同区域，对应低、中、高、极高四个风险等级。具体而言，低风险事件发生概率低，影响小，仅需常规监控；中风险则需制定应对措施并定期审查；高风险需优先考虑并制定缓解或应急计划；极高风险则需立即行动以降低发生概率或减轻影响。这种风险等级划分方法有助于项目团队高效分配资源和注意力，确保关键风险得到有效管理，保障项目顺利推进。

四、工程项目招投标阶段风险防范措施

在工程项目招投标的复杂过程中，风险防范如同为项目构筑一道坚实的防线，其重要性不言而喻。有效的风险防范措施能够最大程度地减少风险带来的不利影响，保障项目的顺利进行。以下将从风险防范策略、风险防范措施制定原则以及风险防范措施实施途径三个方面，探讨如何在工程项目招投标阶段构建起严密的风险防控体系。

（一）风险防范策略

在工程项目的招投标阶段，制定与实施一套综合的风险防范策略至关重要，该策略包含风险规避、减轻、转移和接受四个维度，旨在构建一个全面的风险管理体系。风险规避策略涉及调整项目计划或策略，以消除风险触发因素，包括项目重新设计、技术路线变更或目标调整，确保项目在低风险环境中推进。风险减轻策略则通过增强设计稳健性、提升施工标准和加强监控等措施，降低风险发生可能性和影响。风险转移策略利用保险合同等手段，将风险责任转嫁他人，减轻自身财务和责任压力^[9]。对于无法规避或转移的风险，风险接受策略通过制定应急计划、建立储备金和实施监测预警，进行主动管理以减少损失。项目管理者需基于项目具体情境、风险特性和承受能力，进行专业评估和决策，确保风险防范策略的科学性、合理性和有效性，为项目顺利

实施提供坚实的安全保障。

（二）风险防范措施制定原则

在构建风险防范措施的过程中，必须恪守一系列原则以确保其有效性和实用性。全面性原则指引着对项目进行彻底的风险排查，确保潜在风险点得到充分识别并包含在考虑范围内。紧接着，针对性原则着重于根据不同风险的类型和等级，定制化设计防范措施，以达成精确的风险管控。第三，经济性原则强调在制定防范措施的过程中，必须确保风险防范的成本与潜在损失之间维持适当的比例，以避免资源的过度分配。第四，可行性原则要求所采取的措施必须是实际可行的，便于操作和执行^[10]。动态性原则强调，随着项目的进展及外部环境的变化，风险防范措施应当保持灵活性，以便能够及时进行相应调整，应对不断出现的新风险情况。这些原则共同构成了风险防范措施制定的基础，保障了项目在面对不确定性时能够保持稳健地运行。

（三）风险防范措施实施途径

在工程项目的招投标阶段，风险防范措施的执行路径多样化，涵盖了以下几个关键方面：在招投标管理过程中，首要任务是加强流程的规范化，确保从招标公告的发布到合同签署的每个步骤，均严格遵循相关法律法规及行业准则；紧接着，需建立并完善风险评估与监控系统，以便及时探测潜在风险，并实施有效措施进行干预，避免风险的扩散；进一步，通过精确的合同管理，明确合同双方的权利与义务，合理分配风险责任，确保合同条款的公平性与执行性；同时，提升沟通与协调的工作效率，保障信息的透明度和流畅性，以减少信息不对称所引起的误解与冲突；定期举办专业培训及应急演练活动，提升项目团队成员对风险的理解及应对技巧。

五、结束语

尽管本研究尽力涵盖了工程项目招投标阶段的风险管理要点，但仍存在一定的研究空间。未来的研究可以在以下几个方面进行拓展：一是进一步深化对不同类型工程项目招投标风险特点的研究；二是探索更加科学、高效的风险评估方法。

本研究旨在激发更多学者与实践者对工程项目招投标风险管理的探究热情，共同促进我国工程项目管理向科学化、规范化发展，从而为保障国家基础设施建设的顺畅推进贡献力量。

参考文献

[1] 史贯坤. 建设工程项目管理中招投标环节问题研究 [J]. 商讯, 2021, (06): 122-123.
[2] 沈丽艳. 建筑工程项目招投标阶段风险因素及防控措施 [J]. 现代企业, 2023, (08): 73-75.
[3] 刘万平. 政府投资项目工程造价审计阶段及重点解析 [J]. 企业改革与管理, 2022, (15): 115-117.DOI:10.13768/j.cnki.cn11-3793/f.2022.0841.
[4] 栗栗. 建设项目招投标阶段和施工阶段工程造价控制研究 [J]. 工程与建设, 2022, 36(03): 865-867.
[5] 杨美莲. 工程项目招投标阶段存在的风险因素及管理措施 [J]. 珠江水运, 2022, (07): 76-79.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2022.07.013.
[6] 李建芳. 土建工程施工中加强项目成本管理方法的研究 [J]. 北方建筑, 2022, 7(01): 67-70.
[7] 陈富刚. 工程造价风险规避分析——以建筑项目招投标阶段为例 [J]. 城市建筑, 2021, 18(29): 193-195.DOI:10.19892/j.cnki.csjz.2021.29.56.
[8] 张帆. 建筑招投标中潜藏的风险隐患及解决方法 [J]. 质量与市场, 2021, (08): 165-166.
[9] 常秦. 建设项目招投标阶段和施工阶段工程造价控制研究 [J]. 居舍, 2021, (05): 162-163.
[10] 陈雪娇. 建设项目招投标阶段和施工阶段工程造价控制研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2021, (01): 148-149.

智能采矿技术在矿山安全生产中的作用探讨

柳延波，高庆波，邱业禹

山东东山古城煤矿有限公司，山东 济宁 272100

DOI:10.61369/ERA.2026010017

摘 要： 为探讨智能采矿技术在矿山安全生产中的作用，推动矿山安全管理优化，本文通过分析智能采矿技术的核心范畴与应用场景，并从风险提前预警、作业过程管控、设备健康管理、应急高效处置四个维度开展研究。研究表明，智能采矿技术可通过实时传感与智能分析识别地质灾害、设备故障等隐患，替代人工巡检高风险区域以减少人员暴露；借助无人设备与智能控制系统降低人为操作失误、减少违规作业；通过 AI 预测性维护与参数监控保障设备健康运行；依托数字孪生与应急平台提升事故处置效率。所以，智能采矿技术多维度赋能矿山安全生产，为其转型升级提供关键支撑。

关 键 词： 智能采矿技术；矿山；安全生产

Discussion on The Role of Intelligent Mining Technology in Mine Safety Production

Liu Yanbo, Gao Qingbo, Qiu Yeyu

Shandong Dongshan Gucheng Coal Mine Co., LTD. Jinning, Shandong 272100

Abstract： To explore the role of intelligent mining technology in mine safety production and promote the optimization of mine safety management, this paper analyzes the core aspects and application scenarios of intelligent mining technology, conducting research from four dimensions: risk early warning, operational process control, equipment health management, and efficient emergency response. The study reveals that intelligent mining technology can identify potential hazards such as geological disasters and equipment failures through real-time sensing and intelligent analysis, replacing manual inspections in high-risk areas to reduce personnel exposure. By leveraging unmanned equipment and intelligent control systems, it minimizes human operational errors and non-compliant operations. Predictive maintenance and parameter monitoring powered by AI ensure equipment health, while digital twin technology and emergency platforms enhance accident response efficiency. Therefore, intelligent mining technology empowers mine safety production through multiple dimensions, providing crucial support for its transformation and upgrading.

Keywords： intelligent mining technology; mine; safe production

引言

矿山作为能源与工业原材料的核心供给源，其安全生产不仅直接关系到矿工生命健康，更影响企业经济效益与行业可持续发展，是矿山运营的底线要求^[1]。然而，传统采矿模式长期依赖人工操作，在高风险作业区域存在隐患排查不及时，人工巡检风险高，应急响应滞后等问题，难以适应复杂多变的矿山环境^[2]。随着物联网，人工智能，数字孪生等技术的快速发展，智能采矿技术逐步实现对矿山生产的全流程赋能，通过感知层实时监测，决策层智能分析，执行层精准操作，为解决传统采矿安全痛点提供了新路径^[3]。本文围绕智能采矿技术在矿山安全生产中的应用，探讨其在风险预警，作业管控，设备管理，应急处置等方面的关键作用，为推动矿山安全生产转型升级提供参考。

作者简介：

柳延波（1984.11-），男，山东莒县人，本科，助理工程师，研究方向：矿井通风与安全；

高庆波（1979.04-），男，山东平邑人，专科，研究方向：矿井通风与安全；

邱业禹（1987.09-），男，山东邹城人，专科，研究方向：矿井通风与安全。

一、智能采矿技术的核心范畴与应用场景

（一）核心技术分类

1. 感知层技术

感知层技术是智能采矿系统的数据采集基础,作为"神经末梢"负责实时捕捉与传输矿山关键信息,物联网(IoT)传感器可按场景灵活部署,环境类如温湿度,瓦斯浓度,粉尘传感器,多布于井下巷道,采掘工作面^[4]。设备类如振动,温度,压力传感器,直接安装在采矿机械的电机,轴承等关键部件。位置类传感器则用于定位井下人员与移动设备位置。红外监测技术依托红外热成像原理,在昏暗,粉尘多的矿山环境中可清晰识别物体温度分布,也能在无光照区域捕捉人员轮廓与活动轨迹,不受视觉遮挡影响。地质雷达技术通过发射高频电磁波探测地下介质分布,可穿透岩层,土壤,精准识别地下空洞,裂隙,涌水通道等隐蔽构造,探测深度为数米至数十米,适用于地下矿山掘进前的地质超前探测与露天矿山边坡的岩土体结构探测。

2. 决策层技术

决策层技术作为智能采矿系统的"大脑中枢",负责处理感知层的海量多源异构数据并生成决策方案,大数据分析技术以分布式计算,数据挖掘为核心,整合设备运行,环境监测,历史生产,地质勘察等数据资源,通过构建多维度数据模型,完成数据的清洗,整合与深度挖掘。人工智能(AI)算法是核心驱动力,涵盖机器学习,深度学习,计算机视觉等类型^[5]。机器学习通过历史数据训练预测模型。深度学习可处理复杂非线性数据,如井下监控视频中的违规操作识别。计算机视觉能对无人机航拍的边坡图像,井下采掘面图像进行智能识别并提取信息。数字孪生系统通过三维建模构建与矿山实体对应的虚拟模型,将感知层实时数据与虚拟模型动态映射,还原地形地貌,设备布局等场景,同步更新环境参数,设备状态等动态信息,支持采矿流程模拟推演。

3. 执行层技术

执行层技术作为智能采矿系统的"手脚",是智能化作业的落地载体,主要包括无人采矿设备与远程控制系统^[6]。无人采矿设备涵盖无人矿卡,智能掘进机,无人装载机等,均搭载感知,导航,控制模块。无人矿卡配备激光雷达,毫米波雷达,高清摄像头, GPS/北斗定位系统。智能掘进机搭载惯性导航,激光导向,姿态传感器,可接收掘进参数并感知掘进阻力等数据。其他设备也具备类似自主感知与控制配置。远程控制系统由三部分组成。地面控制中心配备高清显示屏幕,操作控制台,数据处理终端。通讯传输网络采用5G,工业以太网等技术。现场控制终端安装在采矿设备或作业区域固定位置,负责接收指令,控制动作并回传设备状态数据。

（二）主要应用场景

1. 地下矿山

井巷围岩监测多在巷道,采场等区域的顶底板及帮壁布设光纤光栅传感器,振弦式应力传感器等设备,部分区域辅以伸缩仪监测变形量,传感器数据通过有线或无线方式传输至地面终端,同时结合地质雷达在掘进前对前方岩层进行超前探测,识别隐蔽裂隙与空洞,形成立体化监测布局^[7]。井下通风管控依托智能系统实现,在采掘工作面,回风巷等区域布设瓦斯浓度,粉尘浓度,温度传感器采集环境参数,数据经PLC控制器分析后自动调节

主通风机转速与局部风门开度,部分矿山还集成氮气联动控制模块,地面控制平台可可视化呈现全矿通风网络状态。

2. 露天矿山

边坡稳定性监测普遍采用"空天地"一体化体系,如准能集团部署192套边坡GNSS监测装置与7套高台阶雷达,搭配北斗卫星导航实现毫米级位移监测,边坡雷达可进行 $120^{\circ} \times 45^{\circ}$ 广角扫描,探测距离达5000米,数据更新率 ≤ 6 秒/次,无人机定时对异常区域复核,数据接入平台生成三维位移云图与形变曲线^[8]。爆破安全控制以智能系统为核心,先通过地质雷达探测车绘制爆破区域三维地质模型,再用智能钻机精准控制钻孔参数,智能混装车实现炸药能量调节与远程监控,智能填塞车完成自动填塞,采用无人机搭载中继器的双频道起爆模式,爆破中通过视频监控与冲击波监测仪实时监测,爆后由无人机检查效果。

二、智能采矿技术在矿山安全生产中的关键作用

（一）风险提前预警

第一,通过实时传感与数据分析,精准识别地质灾害,设备故障等隐患。该作用依托多源传感网络与智能分析技术的协同实现,地质灾害识别方面,通过在井下巷道,采场顶底板及露天边坡布设光纤光栅传感器,振弦式应力传感器等设备,实时捕捉岩体位移,应力变化数据,搭配地质雷达发射高频电磁波探测地下空洞,裂隙及涌水通道,数据经无线传输至后台后,由融合了128种典型事故特征参数的灾害演化模型库进行分析,可精准识别塌方,涌水等隐患的早期征兆^[9]。设备故障识别则借助多传感器融合技术,在破碎机,矿用车辆等机械的电机,轴承等关键部件安装振动,温度,压力传感器,采集的运行数据经短时傅里叶变换,小波变换等信号处理后,输入基于支持向量机,随机森林等算法构建的故障诊断模型,通过对比历史故障数据与实时参数偏差,实现轴承磨损,液压系统泄漏等故障的精准定位。整套系统将物理信号转化为可预警数据,实现隐患识别从"被动发现"到"主动预判"的转变。

第二,替代人工巡检,覆盖高风险区域,减少人员暴露风险。此作用通过"空天地一体化"智能巡检体系落地,针对高浓度瓦斯区,采空区等地下高风险区域,采用本安型巡检机器人搭载红外热像仪,气体传感器,在黑暗,粉尘环境中自主沿预设路径行驶,实时采集瓦斯浓度,设备温度等数据,其防爆外壳与阻燃部件可杜绝点火源风险,无需人员进入危险区域即可完成巡检。对于露天矿山不稳定边坡,无人机搭载正射相机,激光雷达等载荷执行自主巡航,生成高精度三维实景模型与数字高程模型,结合AI算法识别边坡裂缝发育,位移变化等细微隐患,搭配地面北斗GNSS监测点实现毫米级位移追踪,形成"无人机巡面,传感器控点"的无死角监测网络。

（二）作业过程管控

第一,无人设备替代人工进行爆破,开采,运输等高危作业,避免人为操作失误引发事故。高危作业替代主要通过系列专用无人设备实现,爆破作业中,智能钻机根据三维地质模型自动调整钻孔深度,角度,现场混装车精准控制装药量,配合智能无线起爆系统实现毫秒级延期爆破,全程无需人员近距离操作,避免爆破飞石,冲击波带来的风险。开采环节,地下矿山的智能掘进机搭载惯性导航与激光导向系统,按预设参数自动调整掘进方向与速度,露

天矿山的无人采矿机通过激光雷达识别矿岩边界完成精准采掘。运输环节，无人矿卡配备激光雷达，毫米波雷达与北斗定位系统，在复杂路况下自主避障，规划路径，井下无轨运输机器人则具备瓦斯超限自动闭锁功能，额定速度控制在1.2米/秒，制动距离不超过0.8米，彻底规避人为驾驶中的判断失误风险。

第二，智能控制系统实现生产流程标准化，减少违规操作。该管控模式以一体化智能平台为核心，整合矿石流，信息流与业务流数据，实现生产全流程的数字化管控。在人员管理上，系统对接井下人员定位传感器，实时监测各作业区域人员数量，当采掘工作面等区域出现超员时，立即触发声光报警并锁定区域准入权限，阻止违规进入。爆破作业管控中，系统内置标准化操作流程，对钻孔参数，装药量，起爆时间等关键环节设置刚性阈值，若出现违规修改参数行为，自动切断设备运行指令，同时通过AI视频识别监控现场作业，发现无资质操作，违规堆放爆破物等行为立即预警。

（三）设备健康管理

第一，基于AI的设备预测性维护，提前发现矿山机械潜在故障。此功能通过数据驱动的智能诊断体系实现，系统在破碎机，矿用车辆等设备上部署振动，温度，油液传感器，实时采集运行数据并传输至工业互联网平台，平台利用机器学习算法对历史故障数据进行训练，构建涵盖轴承磨损，齿轮失效等典型故障的预测模型。以矿用车辆为例，模型通过分析发动机振动频率，润滑油中金属颗粒含量等参数，识别出异常磨损的早期特征，结合设备运行时长，负载情况进行趋势推演，提前72小时发出故障预警并推送维修建议。

第二，实时监控设备运行参数，避免设备带病运行引发安全事故。该管理模式依托全时段参数监测与智能响应机制落地，在采矿机械的关键部件如电机，轴承，液压系统上，密集部署温度传感器，压力变送器，振动传感器等设备，实现运行参数的毫秒级采集。数据通过5G专网或工业以太网实时传输至监控平台，平台设置多级阈值预警体系，当破碎机轴承温度超过80℃，矿用车辆液压系统压力波动超±10%，掘进机振动频率异常时，立即触发声光报警，同步在可视化界面标注故障位置。对于高风险设备如胶带运输机，额外集成异音智能监测，AI杂物识别系统，实时监测输送带健康状态，一旦发现异常立即启动停车闭锁程序，防止设备带病运行引发火灾，断裂等安全事故。

（四）应急高效处置

第一，数字孪生系统模拟事故场景，辅助制定科学应急方案。数字孪生系统通过三维建模技术构建与矿山实体1:1的虚拟模型，整合地质构造，设备布局，人员分布等全要素数据，实现矿山状态的实时动态映射。事故发生时，系统可快速调用内置的灾害演化模型库，输入实时监测到的瓦斯浓度，岩体位移等数据，模拟事故扩散路径，如瓦斯泄漏后的烟气蔓延轨迹，边坡滑坡的覆盖范围等，3分钟内即可完成17种救援方案的推演。通过动态知识图谱关联历史救援数据与当前场景参数，系统对各方案的人员疏散效率，救援资源需求，二次事故风险进行量化评估，推荐成功概率高达92%的最优方案，同时可直观展示救援路线，避险区域等关键信息，为指挥决策提供可视化支撑^[10]。

第二，应急指挥平台整合人员定位，通讯，救援资源信息，提升事故响应速度。应急指挥平台采用"1+4+N"组织架构，以指挥中心为核心，整合监测预警，指挥调度，资源保障，善后处置四大模块功能，联动井下生产单元与外部救援力量。平台通过5G专网实现多源数据实时汇聚，人员定位系统精准显示井下作业人员位置，通讯模块打通地面与井下的高清语音，视频链路，救援资源数据库则动态更新救援设备，医疗物资，专业队伍的分布与状态信息。事故发生后，平台自动触发标准化处置流程，28项操作清单明确数据复核，预警发布，资源调度等关键环节的时间节点，如瓦斯超限预警需3分钟内完成处置指令下达。

三、结语

综上，智能采矿技术凭借感知层的全面监测，决策层的智能分析，执行层的精准操作，从风险预警，作业管控，设备管理到应急处置，多维度赋能矿山安全生产，有效破解了传统采矿的安全痛点。尽管当前在技术成熟度，成本投入，人才适配等方面仍存挑战，但随着产学研协同创新的深化，政策支持体系的完善以及人才培养机制的健全，智能采矿技术将持续迭代升级。未来，其将推动矿山向全流程智能化，无人化迈进，成为实现矿山本质安全，促进行业绿色可持续发展的核心引擎，为矿山安全生产转型升级提供坚实技术支撑，助力矿业领域筑牢安全发展的基石。

参考文献

[1] 江鹤，程德强，乙夫迪，汪鹏，崔文，寇旗旗. 新一代信息技术在智能矿山中的研究与应用综述 [J]. 工矿自动化, 2024, 50(11): 1-16.

[2] 王宝，吴明磊. 基于矿山智能化建设的智能采矿技术职业本科专业人才培养供给改革探讨 [J]. 创新创业理论与实践, 2024, 7(22): 123-126.

[3] 谢红星. 基于安全管理问题的智能化矿山采矿技术分析 [J]. 世界有色金属, 2024, (17): 34-36.

[4] 柴修伟，张龙，胡建华，肖红星，彭亚利，刘光俊，徐亮，赵祥波. 鄂西磷矿智能矿山建设现状与发展方向 [J]. 金属矿山, 2025, (05): 137-144.

[5] 王东阳. 潞宁煤矿采煤工作面智能化安全管理 [J]. 能源与节能, 2023, (11): 182-184+209.

[6] 杨清平，蒋先尧，陈顺满. 数字信息化及自动化智能采矿技术在地下矿山的应用与发展 [J]. 中国有色金属, 2023, (S1): 311-314.

[7] 池小楼，彭志妍，杨科，段敏克. 煤矿智能化建设背景下采矿工程专业信息化改造与探索 [J]. 科教导刊, 2023, (03): 72-74.

[8] 任海瑞. 论矿山测量对矿山安全生产的作用 [J]. 中国金属通报, 2022, (11): 222-224.

[9] 葛虎胜，宫福会，孙炎炎，况锅明，彭南竹，梁超，胡建华. 双5G网络下露天智能矿山系统构建与应用 [J]. 金属矿山, 2022, (09): 167-173.

[10] 李瑞，刘东. 智能化矿山采矿技术中的安全管理问题探讨 [J]. 中国管理信息化, 2020, 23(18): 76-77.

双突工作面初采期间老塘快速垮落技术研究

解海军

淮北矿业（集团）有限责任公司临涣煤矿，安徽 淮北 235000

DOI:10.61369/ERA.2026010018

摘 要： 临涣煤矿十三采区为突出危险区，9133 工作面作为该采区关键生产工作面，实测最大瓦斯含量达 8.24m³/t、瓦斯压力为 1.7MPa，初采期间老塘顶板难以快速垮落，易引发瓦斯积聚超限等安全隐患，严重制约矿井安全高效生产。为解决这一难题，结合工作面地质条件及相邻工作面施工经验，创新采用深孔预裂爆破、浅孔爆破与液压支架扰动顶板相结合的综合技术方案。通过优化爆破参数、合理布置钻孔及规范施工流程，工作面推进至 4m 时直接顶实现全面垮落，有效缩短了顶板垮落周期，显著降低了初采期间瓦斯治理难度，成功化解了瓦斯易超限的风险。该技术方案的应用的成功，为淮北矿区及同类突出危险区综采工作面初采期间老塘快速垮落提供了可靠的工程实践依据，具有重要的推广应用价值。

关 键 词： 初放；采煤工作面；深孔预裂；快速垮落

Research on the Rapid Collapse Technology of the old pond during the Initial Mining Period of the Double-burst Working Face

Xie Haijun

Linhuan Coal Mine, Huaibei Mining (Group) Co., LTD., Huaibei, Anhui 235000

Abstract： The 13th mining area of Linhuan Coal Mine is a prominent danger zone. The 9133 working face, as a key production working face in this mining area, has a measured maximum gas content of 8.24m³/t and a gas pressure of 1.7MPa. During the initial mining period, the roof of the old pit is difficult to collapse rapidly, which is prone to cause safety hazards such as excessive gas accumulation, seriously restricting the safe and efficient production of the mine. To solve this difficult problem, based on the geological conditions of the working face and the construction experience of adjacent working faces, an innovative comprehensive technical solution combining deep hole pre-cracking blasting, shallow hole blasting and hydraulic support disturbance of the roof was adopted. By optimizing blasting parameters, rationally arranging boreholes and standardizing construction procedures, the working face was directly roofed to achieve full collapse when it advanced to 4 meters, effectively shortening the roof collapse cycle, significantly reducing the difficulty of gas control during the initial mining period, and successfully defusing the risk of gas exceeding the limit. The successful application of this technical solution has provided a reliable engineering practice basis for the rapid collapse of old ponds during the initial mining period in the fully-mechanized mining faces of the Huaibei mining area and similar prominent danger zones, and has significant value for promotion and application.

Keywords： initial release; coal mining face; deep hole pre-cracking; rapid collapse

引言

9133综采工作面2024年6月18日开始撕帮回采，6月26日工作面推进4m时直接顶全部垮落。在9133工作面我们采取了深孔预裂配合浅孔爆破加支架扰动顶板等措施，并取得了较好的效果，工作面未出切眼直接顶全部垮落，将初采期间的瓦斯管理难度降到了最低，极大的缓解了本矿瓦斯治理被动局面，保证了工作面安全高效回采，不仅为国内外综采工作面快速初放提供了工程实践借鉴，也为淮北矿区同类条件下综采工作面初采期间老塘快速垮落积累了宝贵经验。

一、工作面位置及概况

9133工作面位于9煤层突出危险区，走向长臂采区式布置，走向530m、面长190m，平均煤厚2.16m，煤层倾角 $5 \sim 11^\circ$ ，切眼标高 $-467.0 \sim -508.5\text{m}$ 。工作面采用综合机械化采煤法，顶板管理方法为自然垮落法。工作面采高2.6m，最大控顶距5.1m，最小控顶距4.3m。机巷设计断面 17m^2 ，风巷设计断面 15.6m^2 。

工作面煤种为1/3JM，煤层厚度 $0.4 \sim 4.08\text{m}$ 。煤层赋存较稳定，结构复杂，普遍含1~2层夹矸，夹矸厚 $0.25 \sim 1.7\text{m}$ ，平均 0.5m ，局部受断层、褶曲影响煤层变薄，煤层倾角 $5 \sim 11^\circ$ ，平均 8° ；老顶为细砂岩，平均厚度 4.49m ；直接顶为粉砂岩，平均厚度 7.16m ；直接底为泥岩，平均厚度 2.31m ；老底为粉砂岩，平均厚度 13.82m 。根据巷道实际揭露资料、三维地震精细化解释和透射槽波成果，回采范围内发育断层12条，其中落差 $\geq 2\text{m}$ 的断层3条，分别为NDF17、F9133-7、F9133-11断层，落差分别为 2.5m 、 2.5m 、 2.3m ，对工作面回采及煤质有一定影响，其余9条断层落差均小于 2m ，对工作面回采影响不大；另外工作面切眼发育宽缓背斜9133-1、9133-2对工作面回采有一定影响。工作面透射槽波对巷道揭露的7条断层进行了修正，落差大于煤厚的3条CH-F3、CH-F4、CH-F7，其余落差均小于煤厚。

工作面内安装有MG550/1430WD采煤机、SGZ-800/2 \times 700刮板输送机、SZZ800/400型转载机和PLM3000型破碎机各一部，机巷安装DSJ100/100/2 \times 200型1部。工作面采用四川航天电液控制系统128架型号为ZZ8800/20/40型液压支架、下端头2架ZZ8800/20/40型液压支架进行控制；工作面两巷采用ZQL2 \times 5000/21/40型超前支架进行支护。

二、相邻工作面初采期间概况

与9133采煤工作面相邻的9131采煤工作面于2018年4月回采结束，该面初采期间未采取水力切顶和深孔爆破预裂等各类措施，工作面推出切眼后直接顶才逐步垮落，当工作面推进15m直接顶全部垮落，当工作面推进30m时初次来压，老顶逐渐垮落。

三、工作面初采时采取的各类措施

临涣煤矿在以往在采煤工作面初采前1067综采工作面采取水力压裂配合浅孔爆破措施，工作面推进12m时直接顶全部垮实、10116综采工作面初采前采取浅孔爆破措施，工作面推进6m时直接顶开始垮落，工作面推进20m时直接顶全部垮落，在以往临涣矿综采工作面初采时也采取各类措施，但最终效果不尽如人意。我们在9133工作面创新采用6500钻机进行施工深孔预裂爆破孔配合浅孔爆破及支架扰动顶板措施。

（一）深孔预裂爆破

切眼内设计两排共计34个深孔爆破切顶钻孔，根据顶板岩性探查结果，我们设计深孔钻孔直接穿过老顶进行爆破，切眼架前布置A孔19个，架后布置B孔13个，C孔2个；A孔眼距10m、眼深16m，B孔眼距10m、眼深30~38m，C孔眼深20m，钻孔采用钻机施工，孔径为75mm。两巷采用钻机施工深孔爆破切顶钻孔12个，其中机巷5个、风巷7个，孔径94mm，总孔深880m。

深孔预裂爆破技术通过在顶板岩层中形成预裂面，削弱顶板整体性，为后续垮落创造条件，该技术在坚硬顶板处理中已得到广泛应用^{[1][3][5]}。

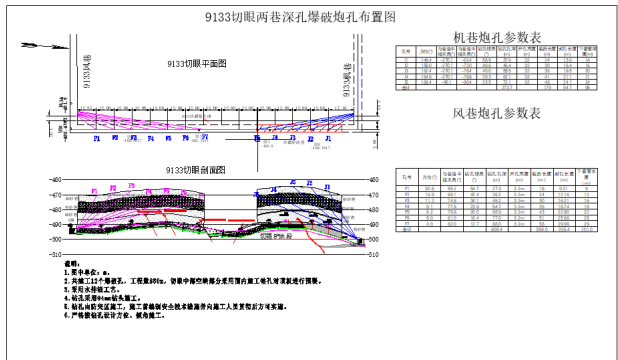


图1 9133切眼及两巷深孔爆破炮孔布置图

（二）浅孔预裂爆破

回采前浅孔欲裂切眼内共计380个炮孔（切眼内超高段不予施工），架前、架间各1排，架后2排，炮眼深 3.6m 、眼距 $2\sim 3\text{m}$ 、与顶板夹角 35° 。切眼上下出口连接处各设计爆破切顶孔18个、共计36个，炮眼深 3.6m 、与顶板夹角 45° 。

工作面回采后，每进1峒（ 0.7m ）后在煤壁侧（老塘侧不垮落或垮落效果差地段）施工一排爆破切顶，直至工作面直接顶全部垮落完毕。炮眼布置方式如下：眼位选在距离煤壁侧顶板 $0.5\sim 1.0\text{m}$ 处，自下向上沿工作面倾斜方向布置，一架布置一个炮眼，炮眼布置在支架架间，眼深 3.0m ，与顶板夹角为 75° ，采用正向装药，每眼装药3~4卷，封泥长度不得小于 1m 。两巷顶板预裂与工作面内同步进行，爆破参数相同。工作面所有锚索在安装期间支架调向时前全部退锚，个别无法退锚的，必须在锚索周围 0.5m 范围内施工爆破孔爆破，使其失去支护作用。浅孔预裂爆破作为深孔爆破的补充，可进一步细化顶板裂隙，提升垮落的均匀性^{[2][6][8]}。

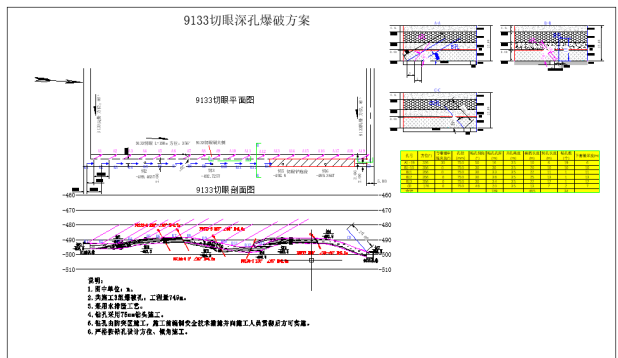


图2 9133切眼浅孔爆破炮孔布置图

（三）液压支架扰动顶板

工作面回采后，每进1峒（ 0.7m ）超前架拉过后，由跟班干部负责带着生产班支架工，采取液压支架扰动顶板，先降架将支架主梁与顶板脱离接触不超过 20mm ，然后迅速升起前后立柱，直至初撑力达到 35Mpa ，反复操作，单架3次升降为1循环。通过液压支架的机械扰动，可打破顶板的应力平衡，加速裂隙发育，促进顶板及时垮落^{[4][7]}。

四、初采前后通风管理

临涣煤矿为煤与瓦斯突出矿井，十三采取8（9）煤层为突出危险区，9133采煤工作面实测最大瓦斯含量、瓦斯压力分别为8.24m³/t、1.70MPa，采用底板穿层钻孔进行区域消突后残余瓦斯含量、残余瓦斯压力分别为4.52m³/t、0.19MPa；初采40m范围内掘进期间预测指标 Δh_2 、 S_{max} 分别为60Pa、3.2Kg/m。

9133工作面设计地面抽采井6口/3029m，抽采采空区及邻近煤层瓦斯，2# 钻井井径为D型，其他钻井井径为C+型，1# 井距切眼25m，1-6# 井距风巷50-60m，间距75-100m，钻井施工至9煤层顶板顶板上5m左右岩层内。回采前1# 井完成施工并联网，具备抽采条件。

9133工作面设计定向长钻孔3个/1866m，抽采采空区及邻近煤层瓦斯，1#、3# 钻孔位于9煤层顶板10-19m砂岩层内，2# 钻孔位于7煤层顶板4-9m砂岩层内。钻孔距风巷分别为16m、36m、66m。

9133风巷设计5组斜交钻孔，工程量为1548m/25个，钻孔终孔位置分别位于工作面顶板2-12m处，钻孔采用“两堵一注”封孔工艺，下直径108mm铁质筛管，封孔深度不小于20m，对采空区瓦斯进行抽采。

9133机巷设计18个抽采钻孔，工程量为974m，钻孔终孔位置切眼高顶段，钻孔采用“两堵一注”封孔工艺，下直径108mm铁质筛管，封孔深度不小于20m，对高顶及顶煤瓦斯进行抽采。

9133风巷右帮安装1路10吋瓦斯抽采管路用于抽采斜交钻孔瓦斯，该管路作为老塘预埋抽采管路，初采前设置一路管路延接至切眼高顶区并留设站管，回采期间根据工作面瓦斯涌出量合理布置站管，9133风巷左帮安装1路10吋瓦斯抽采管路用于抽采高位定向长钻孔瓦斯，9133机巷安装1路10吋抽采管路，对切眼高顶段瓦斯进行抽采。

在双突工作面初采期间，瓦斯治理与顶板垮落控制需协同进行，通过优化通风系统、强化瓦斯抽采，可有效避免顶板垮落过程中瓦斯超限^{[4][9][10]}。

五、取得效果

9133采煤工作面初采时采取深孔预裂爆破孔配合浅孔爆破及支架扰动顶板措施，当工作面推进1峒时老塘内顶板出现离层、掉渣，当工作面推进2峒时工作面第10-20架、78-92架、100-114

架顶板逐渐开始垮落，当工作面推进3峒时工作面第8-46架、64-118架顶板逐渐开始垮落，当工作面推进4峒时3-60架、62-120架、124-127架顶板开始垮落，其中10-45架、80-118架已垮实，当工作面推进5峒时工作面除上、下隅角外均已垮实，当工作面推进6峒时，工作面总进尺4m，直接顶全部垮落。相比传统技术，该综合方案大幅缩短了顶板垮落距离，瓦斯浓度始终控制在安全范围内，实现了安全高效初采^{[5][6]}。

六、特色亮点

1. “学”的基础更加牢固。组织工作面初采管理人员及操作人员学习贯彻淮北矿业集团《关于加强工作面初采期间瓦斯管理的通知》文件要求与工作面初采安全管理措施，按照地面理论考，井下实操考的模式，确保关键岗位人员人人懂措施、会操作。

2. “严”的常态全面形成。严格落实初采安全管理清单，反向督导清单落实情况，利用每天工作面初采专题会对不落实的事和人严肃问责；严格执行“四级”跟班制度，监督现场措施落实，压实层级管理责任，构建齐抓共管格局。

3. “实”的导向鲜明树立。坚持问题导向，抓实各项措施落实。初采期间，专业系统领导以上率下，深入现场，全流程跟踪深孔预裂、强制放顶、退锚管理、通风系统及瓦斯管控工作，发现问题，现场解决，确保各项工作落到实处。

4. “新”的措施坚定坚决。坚决摆正安全与生产的关系，把安全工作抓在手上、放在心上、落在行动上。工作面每推进1峒将各项初采期间顶板扰动措施落到实处，缺项漏项严肃考核问责责任人。

七、结论

煤矿综采工作面初采期间顶板垮落与瓦斯治理是制约矿井安全高效生产的一大难题。以上述工程实例，9133工作面推进4m时，直接顶全部垮落，不仅为国内外综采工作面快速初放提供了工程实践借鉴，也为淮北矿区同类条件下综采工作面初采期间老塘快速垮落积累了宝贵经验。同时解决初采期间瓦斯易超限问题，极大的缓解了本矿瓦斯难治理的被动局面，为9133工作面安全高效回采提供了有力支撑。该综合技术方案通过多手段协同作用，实现了顶板快速垮落与瓦斯安全管控的双重目标，对同类突出危险区工作面具有重要的参考价值^{[8][10]}。

参考文献

- [1] 姬健帅, 李志华, 葛胜文, 程黎明. 坚硬顶板深孔预裂爆破强制初放技术研究 [J]. 矿业安全与环保, 2021(06): 34-39.
- [2] 赵红胜. 工作面初采顶板预裂爆破防治大面积悬顶技术应用 [J]. 山西化工, 2024(04): 199-200+205.
- [3] 刘桂璋, 许春宝, 薛雄飞. 综采工作面初采期间深孔预裂爆破强制放顶技术应用 [J]. 山东煤炭科技, 2022(05): 69-71.
- [4] 崔建峰. 突出煤层综采工作面初采期间瓦斯治理技术研究 [J]. 能源与节能, 2024(09): 153-155.
- [5] 王亚军, 张建国. 综采工作面深孔预裂爆破参数优化及应用 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(02): 68-72.
- [6] 李刚, 张强. 浅孔爆破在工作面初采顶板垮落中的应用研究 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(08): 118-120.
- [7] 陈晓光, 刘军. 液压支架扰动对顶板垮落影响的数值模拟分析 [J]. 煤矿机械, 2023, 44(05): 145-147.
- [8] 张宏涛, 李明. 突出矿井综采工作面初采期间顶板与瓦斯协同控制技术 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 156-162.
- [9] 吴天奇, 王磊. 双突工作面初采期老塘瓦斯积聚防治技术研究 [J]. 矿业工程研究, 2024, 39 (01): 45-50.
- [10] 孙晓峰, 赵亮. 坚硬顶板综采工作面快速垮落技术实践 [J]. 中国煤炭, 2023, 49 (07): 89-94.

露天煤矿机械设备的自动化管理与优化

院鹏春, 袁伟, 赵志鹏

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ERA.2026010019

摘 要 : 本文围绕露天煤矿机械设备自动化管理与优化展开研究,旨在解决露天矿环境复杂、设备分散、效率与安全难平衡等核心问题。阐述了自动化管理的四大关键技术,为自动化管理提供基础支撑。构建了“感知层-网络层-平台层-应用层”四层协同的自动化管理系统,明确设备监控、智能调度、预测性维护、能耗管理等核心功能模块,并通过“云-边-端”数据平台与多角色可视化终端,实现数据驱动的闭环管理。提出三大设备运行优化策略与模型,生产调度优化通过动态匹配与算法寻优,使设备利用率提升15%-20%;设备维护优化基于健康评分与预测模型,将备件库存成本降低25%;能耗优化通过参数自适应调整与新能源试点,实现吨煤能耗降低10%-15%。整体研究实现露天煤矿机械设备管理从“经验驱动”向“数据驱动”转变,有效提升生产效率、保障作业安全、降低运营成本。

关 键 词 : 露天煤矿; 煤矿机械设备; 自动化管理系统; 设备运行优化

Automation Management and Optimization of Mechanical Equipment in Open-Pit Coal Mines

Yuan Pengchun, Yuan Wei, Zhao Zhipeng

SPIC Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : This paper focuses on the research of automation management and optimization of mechanical equipment in open-pit coal mines, aiming to address core challenges such as complex environmental conditions, dispersed equipment, and the difficulty in balancing efficiency and safety. It elaborates on four key technologies for automation management, providing foundational support for automated systems. A four-tier collaborative automation management system is constructed, comprising the "perception layer, network layer, platform layer, and application layer," clearly defining core functional modules such as equipment monitoring, intelligent scheduling, predictive maintenance, and energy consumption management. Through a "cloud-edge-end" data platform and multi-role visual terminals, data-driven closed-loop management is achieved. Three optimization strategies and models for equipment operation are proposed: production scheduling optimization enhances equipment utilization by 15%-20% through dynamic matching and algorithmic optimization; equipment maintenance optimization reduces spare parts inventory costs by 25% based on health scoring and predictive models; and energy consumption optimization achieves a 10%-15% reduction in energy consumption per ton of coal through parameter adaptive adjustment and new energy pilot projects. Overall, the research facilitates a transition in the management of mechanical equipment in open-pit coal mines from "experience-driven" to "data-driven," effectively improving production efficiency, ensuring operational safety, and reducing operational costs.

Keywords : open-pit coal mine; coal mine machinery and equipment; automated management system; equipment operation optimization

引言

露天煤矿作为我国能源供应体系的核心组成部分,其生产效率与运营安全直接关系到能源保障的稳定性。随着开采规模扩大与工况复杂度提升,传统机械设备管理模式逐渐暴露出显著短板。自动化管理不仅能突破人工操作的局限,实现恶劣环境下的精准作业,更可通过数据实时采集、智能分析与动态决策,打通“设备状态-生产调度-维护保养-能耗控制”的全链条管理闭环,从根本上解决效率、安全与成本的协同难题。鉴于此,本文聚焦露天煤矿机械设备自动化管理与优化,系统梳理感知定位、通信网络、数据决策、自动控制四大关键技术体系,构建多层次自动化管理系统架构,进而提出生产调度、设备维护、能耗控制三大维度的优化策略与量化模型。研究旨在推动露天煤矿机械设备管理从“经验驱动”向“数据驱动”跨越,为提升矿山生产效率、保障作业安全、降低运营成本提供实践路径,助力煤炭行业向智能化、绿色化高质量发展转型。

一、露天煤矿机械设备自动化管理的关键技术

（一）感知与定位技术

将电气自动化技术引入到煤矿机械设备中，能够让机械实现自动化的运行以及监控，并且相比较于人力来说，只要提供足够的、稳定的电能，机械就能够维持一定水准和效率的生产，不像人力会出现疲劳、失误等状况，导致生产效率和生产质量下降^[1]。为实现露天煤矿设备的“状态可知、位置可溯”，需针对恶劣环境、设备多样和高精度要求等核心挑战，构建一套综合的感知与定位体系。在设备状态方面，通过加装各类高防护等级（IP68、抗强振）的传感器，实时采集卡车、挖掘机等设备的动力、执行及健康参数，并利用算法滤除噪声。定位上，以“北斗+GPS”双模 GNSS 结合 RTK 技术实现厘米级精度，并在信号遮挡区域融合惯性导航与激光雷达进行补盲，同时部署基准站增强稳定性^[2]。此外，环境与安全感知通过粉尘、气象、红外传感器及边坡监测设备，实时预警风险，并与设备调度系统联动，确保在危险情况下自动禁止设备进入，从而全方位保障生产安全与效率。

（二）通信与网络技术

通信网络作为连接“感知层”与“数据层”的纽带，需满足露天矿“广覆盖、高可靠、低延迟、抗干扰”的传输需求。骨干网采用铠装光纤环网，保障固定区域大容量数据稳定传输^[3]。移动通信则以 5G 专网为核心，辅以微站补盲，满足无人驾驶等低延迟控制需求。为优化效率，系统采用边缘-云协同机制，将实时告警等关键数据在本地处理，而报表等非实时数据则闲时上传云端。通过网络隔离和国密算法加密，确保数据传输与控制指令的绝对安全。

（三）数据处理与智能决策技术

数据处理与智能决策技术是将“数据”转化为“行动指令”的核心，需破解露天矿“数据量大、类型杂、决策场景复杂”的难题^[4]。通过多源数据融合技术，对设备状态、定位及环境数据进行清洗、对齐，构建“设备-位置-环境”三维模型，并采用“边缘+云端”分层存储。其次构建智能算法体系，利用 LSTM 模型提前 2-7 天预测设备故障；通过混合整数规划与遗传算法优化生产调度；借助 YOLOv8 算法实时识别安全风险并触发预警。决策执行结合规则引擎与 AI 模型交叉验证确保合规，高风险决策由人工确认，常规决策则自动执行，从而在保障安全的前提下提升效率。

（四）自动控制与执行技术

自动控制与执行技术是将“决策指令”转化为“设备动作”的终端环节，需实现“精准控制、安全可靠、适应复杂工况”^[5]。单机控制上，挖掘机依据三维模型实现精准挖掘，卡车无人驾驶则通过感知、规划、执行三层协同完成运输。多设备协同通过 5G 和 V2X 通信，优化装-运-卸流程并实现卡车编队行驶，提升效率与安全。此外，系统还配备远程应急控制和独立的安全控制器，以应对高危场景和极端故障，确保万无一失。

二、露天煤矿机械设备自动化管理系统构建

（一）系统总体架构设计

露天煤矿机械设备自动化管理系统需立足“环境复杂、设备分散、业务闭环”的核心特点，构建“感知层-网络层-平台层-应用层”的四层协同架构，各层既独立承载特定功能，又通过标

准化接口实现数据与指令的高效流转，确保系统具备可扩展性与抗干扰能力^[6]。感知层通过工业级传感器与定位模块，全域采集设备、位置及环境数据。网络层采用“光纤+5G 专网+边缘计算”混合组网，确保数据传输的低延迟与高可靠。平台层作为决策大脑，整合多源数据，通过智能算法模型生成维护、调度等决策指令^[7]。应用层则通过可视化终端，实现监控、调度等业务的闭环管理。架构设计弹性，可根据矿场规模与技术发展灵活扩展，保障系统的可扩展性与抗干扰能力。

（二）核心功能模块

系统核心功能模块围绕露天煤矿机械设备“监控-调度-维护-能耗”的全业务链条设计，各模块既独立运行又数据互通，形成协同管理能力。设备实时监控模块在三维矿图上动态展示设备位置、状态与关键指标，支持多维度查询与自动告警^[8]。智能生产调度模块承接生产计划，基于实时数据动态优化设备-任务匹配，实现秒级响应与进度跟踪。预测性维护模块通过健康评分与预测模型，将事后维修转为事前预防，并联动备件管理。能耗管理模块则统计各级能耗指标，识别高耗环节并提供优化建议，形成降本增效闭环。

（三）数据平台与可视化

数据平台与可视化是系统“数据价值释放”的关键载体，通过构建统一数据中枢与直观呈现方式，让管理决策从“经验驱动”转向“数据驱动”^[9]。数据平台采用“云-边-端”协同架构，边缘端处理高频实时数据，云端整合全量历史与业务数据，并通过 API 打破信息孤岛。可视化设计则面向不同角色，监控中心通过三维矿图与综合仪表盘实现全局态势感知；移动端为管理人员提供轻量化实时告警与状态查询；维护人员终端则聚焦作业指引与现场记录。此外，系统还能自动生成标准化报表，实现数据从采集到决策的全流程透明化，为管理提供精准支撑。

三、设备运行优化策略与模型

（一）生产调度优化

露天煤矿生产调度的核心是通过设备与任务的动态匹配，实现“设备利用率最大化、作业周期最短化、生产目标精准化”，需结合设备特性、地形条件与任务优先级构建闭环优化体系。其策略是建立基于实时数据的动态响应机制，以 10-15 分钟为周期更新调度方案，并在突发状况下 30 秒内触发应急重配，确保设备无闲置。同时通过分析历史数据确定“装-运-卸”最优配比，并利用 5G 通信实现设备间状态互通，将等待时间压缩至 5 分钟以内^[10]。模型构建以“总作业成本最低”为目标，采用混合整数规划量化约束条件，并运用遗传算法迭代寻优，最终输出的调度方案可使设备整体利用率提升 15%-20%，单日任务完成率稳定在 95% 以上。此外，运输环节还叠加基于改进蚁群算法的路径优化子模型，根据实时路况规划最优路线，可减少运输时间 10%-15%，间接降低能耗。

（二）设备维护优化

设备维护优化需突破“定期大修”的传统模式，转向“基于

状态的预测性维护”，通过精准评估设备健康状态、动态调配维护资源，实现“故障停机最小化、维护成本最优化”。策略设计的核心是构建设备健康度评估体系。基于感知层采集的振动、温度、压力等时序数据，结合故障历史记录，将设备健康状态划分为“优（80–100 分）、良（60–80 分）、中（40–60 分）、差（0–40 分）”四级，“优”级设备仅需每周远程巡检；“良”级设备需提前储备关键备件，并缩短状态数据采样频率；“中”级设备纳入 72 小时内的计划维护清单，协调生产调度避开高峰时段；“差”级设备立即触发停机指令，同步推送故障定位报告至维护团队。同时需建立维护资源动态调配机制，根据设备重要性与维护复杂度，优化维修人员与工具的排班，避免资源闲置或冲突。模型层面，采用“故障预测 – 维护计划 – 备件管理”三级联动模型。故障预测模型基于 LSTM 神经网络，输入设备近 30 天的状态数据序列，输出未来 7 天的故障概率，准确率需稳定在 85% 以上；维护计划模型以“维护总工时 + 停机损失”最小为目标，采用整数规划算法分配维护任务，约束条件包括维修人员数量、备件库存；备件管理模型结合故障预测结果与历史消耗数据，采用 ABC 分类法动态调整库存：A 类备件保持低库存 + 紧急采购通道，B 类备件保持中等库存，C 类备件（如螺栓）批量储备（满足 1 个月需求），整体可降低备件库存成本 25% 左右，同时将缺件导致的维护延误率控制在 5% 以下。

（三）能耗优化

能耗优化需围绕“降低吨煤能耗”核心目标，从设备运行参数、作业流程、能源结构三个维度协同发力，实现“节能与效率”的平衡。策略上，推行设备运行参数自适应调整，针对不同作业场景动态优化关键参数，挖掘机根据矿石硬度（通过铲斗压力传感器判断）调整液压系统流量（硬岩时流量提升至 80% 额定值，软岩时降至 60%），避免动力浪费；矿用卡车根据载重与坡度（通过 GNSS 高程数据计算）调整发动机转速（空载上坡时转

速维持在 60%，满载下坡时降至 40% 并启用辅助制动），相比固定转速可降低油耗 8%–12%。其次优化作业流程以减少无效能耗，通过分析历史数据识别高耗环节；采用“阶梯式推进”开采模式，避免挖掘机反复爬坡调整位置（单次爬坡能耗可占作业总能耗的 15%）；严格控制设备空驶率（目标从 25% 降至 15% 以下），空驶时自动关闭空调、降低怠速转速（从 800r/min 降至 600r/min）。此外，逐步引入新能源技术，在短途运输环节试点混合动力卡车（柴油 + 锂电），单程 ≤ 3km 时切换电动模式；在固定作业区建设光伏电站，满足监控设备、照明系统的电力需求，降低电网依赖。模型构建需量化能耗与影响因素的关联关系。能耗预测模型采用随机森林算法，输入变量包括设备型号、作业时长、负载率、地形坡度等，输出单设备 / 单环节的能耗值，为优化提供基准；参数优化模型基于粒子群算法，以“单位产量能耗最低”为目标，迭代寻优关键参数组合，输出可直接执行的参数阈值；流程优化模型通过构建“能耗 – 流程”网络图，识别关键路径，采用流程图重组技术精简步骤，实现全矿吨煤能耗降低 10%–15%，年节约能源成本数百万元。

四、结束语

本文围绕露天煤矿机械设备自动化管理与优化展开系统性研究，从技术支撑、系统构建到运行优化形成完整解决方案，有效回应了露天矿在效率提升、安全保障与成本控制方面的核心诉求。露天煤矿机械设备自动化管理不仅是技术迭代的必然结果，更是煤炭行业实现“安全、高效、绿色”转型的关键路径。研究成果可为矿山企业提供可落地的实践方案，推动更多露天煤矿摆脱传统管理模式束缚，以数据驱动赋能生产全流程，为我国能源安全保障与煤炭行业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

[1] 王亚飞. 电气自动化技术在煤矿机械设备中的应用与管理 [J]. 魅力中国, 2020(27): 339–340.
[2] 李辉. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2021(10): 3111–3112. DOI: 10.12277/j.issn.1673-7075.2021.10.1551.
[3] 龚维理, 杜威, 张春龙. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(21): 691. DOI: 10.12159/j.issn.2095-6630.2020.21.0661.
[4] 王威淳, 朱枫, 卢浩博. 露天矿机械工程现代化及自动化技术应用 [J]. 中国科技投资, 2021(9): 140, 154.
[5] 申凤武. 煤矿机械设备的运行维护和故障诊断技术的分析与研究 [J]. 城市情报, 2020(3): 161–162. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6761.2020.03.081.
[6] 孟祥健, 田定康. 露天煤矿机械设备故障诊断与维修 [J]. 自动化应用, 2023, 64(15): 125–127, 131.
[7] 富晗. 露天煤矿设备安全管理与维修保养管控 [J]. 工程机械与维修, 2023(6): 35–37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2023.06.012.
[8] 宋伟. 露天煤矿设备运行管理策略探究 [J]. 魅力中国, 2020(44): 329.
[9] 鲜小泉. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 科技资讯, 2015, 13(13): 144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2015.13.116.
[10] 张国强. 露天煤矿设备安全管理与维修保养管控 [J]. 工程建设与发展, 2024, 3(5): 155–157. DOI: 10.12417/2811-0722.24.05.052.

公路工程建设中混凝土的裂缝成因及应对策略

朱申荣

盐津县交通运输局, 云南 昭通 657500

DOI:10.61369/ERA.2026010022

摘 要： 本文重点分析公路工程建设中混凝土的裂缝成因，其中包含材料因素、配合比设计、浇筑方式、养护环节以及何在作用等方面，并针对性地提出应对策略，包括材料质量控制、配合比优化、浇筑工艺改进、养护措施强化及荷载管理优化等。旨在为公路工程混凝土裂缝防控提供理论依据与实践指导，提升公路工程质量与耐久性。

关 键 词： 公路工程；混凝土裂缝；成因分析；应对策略

Causes of Concrete Cracking in Highway Engineering Construction and Corresponding Strategies

Zhu Shenrong

Yanjin County Transportation Bureau, Zhaotong, Yunnan 657500

Abstract： This paper focuses on analyzing the causes of concrete cracks in highway engineering construction, encompassing material factors, mix proportion design, pouring methods, curing processes, and load effects, among others. Corresponding countermeasures are proposed, including material quality control, mix proportion optimization, improvement of pouring techniques, enhancement of curing measures, and optimization of load management. The aim is to provide theoretical foundations and practical guidance for preventing and controlling concrete cracks in highway engineering, thereby improving the quality and durability of highway projects.

Keywords： highway engineering; concrete cracks; cause analysis; countermeasures

引言

公路工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，其质量直接关系到交通运输的安全与效率。混凝土作为公路工程的主要结构材料，其性能稳定性对工程质量起着决定性作用。然而，在公路工程建设与使用过程中，混凝土裂缝问题屡见不鲜，不仅影响公路的美观性，更会降低结构的承载能力，缩短使用寿命，甚至引发安全事故。因此，深入探究公路工程建设中混凝土裂缝的成因，并制定科学有效的应对策略，具有重要的现实意义。

一、公路工程建设中混凝土裂缝的主要成因

（一）材料因素

混凝土是由各种原料构成的，包括水泥、骨料、掺合料和水，原料的品质和性能对混凝土的抗裂性能有着直接的影响。水泥是混凝土中重要的胶凝材料，其品质不符合要求会造成混凝土强度不足和收缩不足，从而产生开裂。比如，水泥安定度差、硬化时体积变形不均匀，将会在混凝土中形成应力集中引起开裂^[1]。骨料的粒度、含泥量、泥砖的含量等都会对混凝土的强度和稳定性造成一定的影响，会在一定程度上增加混凝土开裂的几率；掺合料的品质不稳定，会引起混凝土的各项性能变化，从而降低混凝土的抗裂能力。

（二）配合比设计因素

混凝土的配合比是混凝土中各组分的配比，通过合理的配比设计，可以使混凝土获得最好的工作性能。如果配合比设计不当，例如水胶比和水泥掺量过大，则会引起混凝土收缩增加，从而影响其抗裂能力。水胶比例过高会导致水泥水化后产生大量的气孔，导致混凝土致密度下降，极易出现开裂。水泥用量太大，既提高了工程造价，又加大了混凝土的收缩应力，从而导致混凝土引起开裂。

（三）浇筑方式因素

混凝土浇筑方法直接关系到混凝土的均匀和致密程度，振捣不充分、分层浇筑间隔太久等不合理的浇筑方法，会造成混凝土内部空洞和不均匀密实，从而影响其强度和稳定性，并极易产生

裂纹^[9]。如果振捣不当,则会使混凝土内部产生大量的气孔,从而导致混凝土的致密程度下降。采用多层浇注的时间过长,将导致上层和下层混凝土间出现冷缝,影响混凝土整体性能,并容易在冷缝处出现裂缝。

(四) 养护因素

混凝土浇筑完毕后应及时进行养护,使其逐步恢复到设计强度及稳定状态。若养护不当,例如养护时间不够或不恰当的养护方法,都会引起混凝土表面干燥、开裂等病害,从而引起混凝土内部开裂。如果没有足够的养护时间,水泥水化作用不完全、强度发展缓慢,混凝土则会在外部环境作用下出现开裂的现象。由于养护方式的不合理,例如在养护过程中,混凝土表层的水份迅速蒸发等,都会引起表层的过度收缩和表层开裂^[9]。

(五) 荷载因素

在公路工程的设计、施工及使用过程中,荷载作用是引发混凝土裂缝的重要因素之一。设计阶段未能充分考虑结构承受荷载的均匀性、设计荷载与现实不符、荷载计算不足等,会导致结构在使用过程中出现荷载不均匀的现象,致使部分区域受力过大而产生裂缝。施工顺序和施工受力的改变,也可能使结构内部的应力分布发生变化而引发裂缝。例如,在施工过程中,过早地拆除模板或支撑,会使结构承受的荷载过早地增加,导致结构产生裂缝。

二、公路工程建设中混凝土裂缝的应对策略

(一) 严格控制材料质量

在选择水泥时,一定要选择质量稳定、性能好、信誉好的厂家生产的水泥。在水泥的强度方面,应该根据道路工程的设计强度等级,准确地选用适当的强度等级的水泥,如普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥等。同时要根据有关的标准,对水泥的强度进行严格的检测,使用标准试件在限定的时间内,对其进行抗压、抗折强度的测试,以保证其强度指标满足设计要求。对初凝、终凝等水泥凝固时间进行准确测量,确保水泥的凝固时间符合施工技术的需要,防止凝结时间太久或太少,从而影响到工程的质量与性能。在骨料方面应充分检测其级配、含泥量、泥块含量和压碎值。采用筛分实验确定不同级配的集料,使其具有较好的级配,从而改善混凝土的密实度和强度。对于外加剂,应选择品质良好的产品,并根据混凝土的性能要求和使用环境,合理选择外加剂的种类,如减水剂、引气剂、缓凝剂等。在选择外加剂时,要查看产品的质量证明文件,了解其性能指标和使用方法,并严格按照产品说明书的要求进行使用,控制外加剂的掺量,避免因外加剂使用不当而影响混凝土的性能。

(二) 优化配合比设计

根据公路工程的设计要求与施工条件,对混凝土配合比进行科学、合理的设计。首先,根据道路工程的荷载需求、服务年限以及相应的规范,对其进行合理的强度评定。在此基础上,通过对水泥、骨料和掺合料的配比进行调整,最终保证混凝土的强度等级和稳定性。在满足混凝土强度要求的同时,尽可能地减小水

胶比,水胶比是控制混凝土收缩及强度的重要因素,减小水胶比可以有效地减小混凝土的收缩,改善其抗裂性能。通常通过正交试验等手段调整水泥用量。在满足强度要求的条件下,可通过合理选择集料级配、掺入高效减水剂等方法降低水泥用量。与此同时,应注意混凝土的工作性能,并保证其工作性能、便于施工。工作性能是指混凝土在搅拌、运输、浇筑、振捣等方面的综合性能。为了提高混凝土的工作性能,对混凝土的坍落度、含气量等指标进行调整;对于要进行泵送的混凝土而言,应确保其具有较好的可泵性,防止在施工中出现淤堵等现象。为了改善其可泵性,可通过加入泵送药剂等措施。

(三) 改进浇筑工艺

在混凝土浇筑之前,对模板、钢筋、保护层、预埋件等的尺寸、规格、数量、位置等进行全面的检测和控制,并保证偏差的大小满足相关规范。在模板方面,应检查模板的尺寸精度、表面的平整度、连接的紧密性,避免由于模板的大小、表面的不平造成的混凝土结构尺寸与设计不符,或者产生蜂窝麻面等问题。对钢筋应检查其规格、数量、间距等是否满足设计要求,并进行绑扎或焊接,以避免由于钢筋位置偏移或连接不良而影响到混凝土结构受力。保护层的厚度要满足设计要求,保护层太薄或太厚,都会对混凝土的耐久性产生不利影响。预埋件的定位要精确、牢固,避免在浇筑时产生位移。

(四) 强化养护措施

混凝土浇注成型后,要立即进行有效的养护。在公路工程建设过程中,应根据不同的施工季节和环境情况,选用适当的养护措施。在夏天的炎热季节,为了避免混凝土表层的水分快速蒸发,出现干燥开裂等病害,可以采取覆膜或湿麻袋等措施。覆膜时,应使覆膜与砼表面紧贴,防止因通风造成的水份流失。湿麻袋要保持潮湿,在冬季气温较低时,应采取覆盖保温材料 and 搭设保温大棚等保温养护措施,以避免因混凝土受冻而影响其强度发展。养护时间要视其强度发展和周围环境状况而定,通常不短于规定的龄期。对普通混凝土而言,夏天气温较高,养护期至少要7天以上;在冬天温度较低的情况下,混凝土的保温期至少要14天。

(五) 优化荷载管理

对公路工程的设计、施工和使用都应进行合理的负荷管理。在设计时要充分考虑到结构所要承受的荷载均匀性,合理地选择设计荷载、精确地进行荷载计算。公路的设计荷载标准值应按公路等级、交通流量和车辆类型等进行确定。利用有限元法等手段,对各受力状态下的受力情况进行计算,以保证公路结构在设计荷载下有充分的安全储备。

在公路工程建设中,必须严格遵守设计和施工规程,不能随意变更施工次序和受力。由于施工次序的改变,将引起结构内应力的变化,从而引起开裂。比如,在浇筑过程中要遵循先低后高、先远后近的原则,以防止在施工中产生冷缝。与此同时,由于施工荷载的变化,对结构的安全也有很大的影响,如果过早地将模板或支架拆掉,可能会引起结构所需的荷载增大,从而引起结构开裂,所以模板、支架的拆除时机必须严格按照规范规定进

行。在使用过程中，要避免车辆超载行驶，超载车辆会使公路结构承受的荷载超过设计荷载，加速结构的损坏，引发裂缝。应加强对公路交通的管理，设置限载标志，对超载车辆进行处罚。

三、结束语

综上所述，公路工程建设中混凝土裂缝问题是一个复杂且重

要的问题，其成因涉及材料、配合比设计、浇筑方式、养护及荷载等多个方面。为有效应对混凝土裂缝问题，需从严格材料质量控制、优化配合比设计、改进浇筑工艺、强化养护措施及优化荷载管理等方面入手，采取综合措施加以解决。以上策略的实施可以显著提升公路施工中混凝土的抗裂性能，以此来有效提高公路工程的建设质量以及耐久性。

参考文献

- [1] 白天军. 道路桥梁施工中混凝土裂缝成因及应对措施 [J]. 建筑设计与研究, 2025(5).
- [2] 高连涛. 公路施工中混凝土裂缝的成因及对策分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2024(003):000.
- [3] 郑彩竹. 道路桥梁施工中混凝土裂缝成因及应对措施 [J]. 汽车周刊, 2024(10):0094-0096.

深厚红层软岩地基开挖过程中蠕变特性 及支护结构受力分析

张博, 李迷

长江岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2026010023

摘 要 : 为解决深厚红层软岩遇水软化、强度低、蠕变显著的工程特性给地基开挖带来的长期稳定性难题, 本文围绕开挖扰动下软岩蠕变特性及支护结构受力演化展开系统研究。分析了基坑开挖的“卸荷 – 软化 – 应力重分布”力学效应, 以及红层软岩应力 – 应变场的时间依赖性, 明确蠕变三阶段演化规律及本构模型适配需求; 进而探讨了土钉墙、排桩、地下连续墙等常见支护结构的作用机理, 揭示了围岩与支护“变形协调 – 应力传递 – 动态平衡”的长期耦合关系及支护结构的时空受力特征; 随后采用 FLAC3D 与 Midas GTS NX 软件, 基于工程实际建立数值模型, 设计开挖速率、含水率、支护形式、初始应力四类对比工况, 开展 360 天长期耦合模拟。研究旨在为深厚红层软岩地基开挖工程的支护设计优化与长期稳定性控制提供理论依据和技术支撑。

关 键 词 : 深厚红层软岩; 地基开挖; 蠕变特性; 支护结构

Creep Characteristics and Stress Analysis of Support Structures During the Excavation of Deep Red-Bed Soft Rock Foundations

Zhang Bo, Li Mi

Changjiang Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : To address the long-term stability challenges in foundation excavation caused by the engineering properties of deep red-bed soft rock, such as water-induced softening, low strength, and significant creep, this paper systematically investigates the creep characteristics of soft rock under excavation disturbance and the stress evolution of support structures. It analyzes the mechanical effects of "unloading-softening-stress redistribution" during foundation pit excavation, as well as the time-dependent stress-strain field of red-bed soft rock, clarifying the three-stage creep evolution law and the requirements for constitutive model adaptation. Furthermore, it explores the action mechanisms of common support structures such as soil nail walls, row piles, and diaphragm walls, revealing the long-term coupling relationship of "deformation coordination-stress transfer-dynamic equilibrium" between surrounding rock and support, along with the spatiotemporal stress characteristics of support structures. Subsequently, numerical models are established using FLAC3D and Midas GTS NX software based on actual engineering conditions, with four types of comparative conditions designed for excavation rate, water content, support form, and initial stress, enabling a 360-day long-term coupled simulation. The research aims to provide theoretical foundations and technical support for the optimization of support design and long-term stability control in excavation projects of deep red-bed soft rock foundations.

Keywords : deep red-bed soft rock; foundation excavation; creep characteristics; support structure

引言

红层软岩具有透水性弱、亲水性强、遇水易软化膨胀、失水易崩解收缩且强度偏低的特殊工程特性, 加之显著的蠕变效应, 使得深厚红层软岩地基开挖过程中, 极易出现初始应力场失衡、围岩长期变形累积、支护结构受力超限等问题, 严重威胁工程长期稳定性, 甚至引发基坑坍塌、地基失稳等安全事故, 成为制约相关工程建设质量与效益的关键瓶颈。基于此, 本文聚焦深厚红层软岩地基开挖过程中的核心技术难题, 以“蠕变特性 – 应力演化 – 支护受力”为主线, 采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 系统探究开挖扰动下软岩蠕变三阶段演化规律、围岩与支护结构的动态耦合机制, 并通过多工况对比明确关键影响因素的作用效应。

一、开挖扰动下红层软岩地基应力场与蠕变场分析

（一）基坑开挖的力学效应

红层软岩是一种特殊岩体，红层中泥岩、页岩、粉砂质泥岩等泥质岩为软岩，具有透水性弱、亲水性强，遇水易软化（或膨胀），失水易崩解（或收缩），强度低（岩块单轴饱和抗压强度 $\leq 30\text{MPa}$ ）的特点^[1]。红层软岩地基开挖的核心力学效应体现为初始应力场平衡状态的破坏与二次应力重分布，该过程与红层软岩高孔隙率、低弹性模量、遇水易软化的工程特性深度耦合^[2]。开挖作为卸荷过程，破坏了岩体的初始应力平衡，引发瞬时回弹和应力重分布，并在基坑转角等几何突变处形成高度应力集中，导致软岩因强度低而易于塑性屈服。同时开挖使岩体暴露，遇水后力学性能急剧劣化，这进一步加剧了应力集中的不利影响和变形发展，形成“卸荷-软化-应力重分布”的恶性循环，持续威胁地基的长期稳定性。

（二）考虑蠕变效应的围岩应力-应变场时变分析

红层软岩显著的蠕变特性使得围岩应力-应变场呈现强烈的时间依赖性，其整体演化过程是瞬时变形与长期蠕变变形的叠加结果^[3]。蠕变过程通常经历初始、稳态和加速三个阶段，其中稳态蠕变因持续时间长、变形量显著，成为长期变形的主体。在蠕变作用下，围岩内部应力始终处于动态重分布状态，高应力区逐渐向深部转移消散，应力场呈现“动态平衡”的循环演化特征^[4]。同时应变场在时空上表现为非线性增长，其速率和影响深度受含水率和初始应力水平控制^[5]。为精准描述这一复杂过程，必须采用西原模型等能反映软岩蠕变特性的本构模型，通过确定关键参数，实现“应力-时间-应变”的三维耦合计算，从而准确揭示围岩的时变演化规律。

二、支护结构受力与变形的长期演化分析

（一）常见支护结构形式及其作用机理

针对深厚红层软岩地基的蠕变特性、低强度及遇水软化等工程特点，常见支护结构的设计核心在于兼顾瞬时卸荷变形约束与长期蠕变变形控制，通过不同结构形式的力学特性适配软岩地基的长期力学响应^[6]。不同支护结构通过其力学特性适配这一需求，土钉墙通过加固浅层岩体并改善其整体性，适用于中等深度基坑；排桩依靠其刚性抵抗瞬时变形，并利用弹性适应长期蠕变，适用于深基坑；地下连续墙则以其高刚度和良好防渗性，有效约束深部蠕变并隔绝地下水，是超深基坑的核心支护；锚杆（索）通过施加预应力主动约束变形，常与桩墙结构结合，形成“主动约束-被动承载”体系。联合支护通过整合多种结构优势，实现对红层软岩地基变形的全方位、分层次控制。

（二）围岩-支护结构相互作用机理

红层软岩地基中围岩与支护结构的相互作用本质是“变形协调-应力传递-动态平衡”的长期耦合过程，其核心逻辑在于支护结构通过自身力学响应适应围岩的瞬时变形与长期蠕变，同时围岩的应力演化反作用于支护结构的受力状态，二者形成动态依存关系^[7]。开挖初期，支护被动承受围岩的瞬时卸荷变形；围岩的长期蠕变变形持续传递应力，使支护受力增长，而支护的约束又反作用于围岩，形成“蠕变-应力累积-约束反馈”的循环。这一过程受接触面力学特性影响，软岩软化可能导致参数衰减，引

发滑移或脱空^[8]。围岩的蠕变阶段与支护响应深度耦合：若进入加速蠕变阶段，支护将面临超载风险；而支护刚度的长期衰减也会加剧围岩蠕变，二者可能形成恶性循环，导致整体失稳。

（三）支护结构长期受力特征分析

红层软岩的长期蠕变与环境耦合效应，使得支护结构的受力与变形呈现显著的时间依赖性和空间差异性，其长期演化规律与软岩蠕变特性、支护形式及相互作用机理密切相关。从时间上看，其受力演化分为三个阶段，初期快速承受卸荷压力，中期随围岩蠕变而应力累积，后期若蠕变加速或环境恶化则面临失稳风险。空间上，基坑转角等应力集中区及深层支护结构受力更大^[9]。地下水渗透和温度变化等环境因素会加剧软岩劣化，进一步恶化支护受力状态。不同支护形式响应各异：柔性支护（如土钉）能适应蠕变但变形较大，而刚性支护（如地连墙）约束力强但长期应力累积效应明显，更易发生疲劳破坏。

三、基于数值模拟的蠕变与支护受力耦合分析

（一）数值模拟软件与计算原理

针对深厚红层软岩地基开挖-蠕变-支护耦合问题的复杂性，选取FLAC3D与Midas GTS NX作为核心模拟软件，二者均具备强大的岩土体非线性力学模拟能力与多场耦合分析功能，适配软岩蠕变特性与支护结构相互作用的数值求解需求^[10]。FLAC3D基于显式差分法，擅长处理大变形和内置蠕变模型，能精准刻画软岩的时间依赖性行为；Midas GTS NX则凭借可视化建模和多场耦合优势，便于实现复杂支护体系的全过程协同模拟。计算的核心是围绕“卸荷-蠕变-支护约束”的耦合逻辑，分步模拟开挖卸荷与应力释放；代入蠕变参数，通过时间步迭代计算围岩的长期变形演化；通过设置不同单元模拟支护结构，实现其与围岩的应力动态传递，从而还原整个工程过程的力学响应规律。

（二）数值模型的建立

数值模型的建立以工程实际地质勘察资料与设计方案为依据，重点保障模型的几何相似性、参数真实性与边界合理性。模型几何范围的确定需考虑开挖扰动的影响深度，横向取基坑开挖宽度的3-5倍，竖向取开挖深度的2-3倍，避免边界效应对计算结果的干扰，同时按实际基坑尺寸、边坡坡度、支护结构布置形式构建几何模型。网格划分采用分区加密策略，基坑侧壁、支护结构周边及应力集中区域采用高精度网格，确保局部力学响应的计算精度；远离基坑的围岩区域采用粗网格，平衡计算效率与结果准确性，整体网格类型选用四面体或六面体单元，保证单元质量满足数值计算收敛要求。岩体物理力学参数通过室内试验与现场原位测试确定，包括弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等常规参数，以及蠕变本构模型所需的弹性系数、黏弹性系数、黏塑性系数等，同时考虑含水率对参数的影响，按实际含水率状态调整软化后的力学参数。支护结构参数依据设计文件输入，钢筋混凝土构件需明确抗压强度、抗拉强度、弹性模量等材料参数，以及桩径、墙厚、配筋率等几何参数；土钉、锚杆需输入杆体抗拉强度、弹性模量、锚固段长度、注浆体黏结强度等关键参数。边界条件设置为，模型底部施加固定约束，侧面施加水平约束，顶部为自由面；初始应力场按自重应力+深部构造应力叠加施加，竖向应力按岩土体自重计算，水平应力根据侧压力系数确定，确

保初始应力状态与实际地质条件一致。

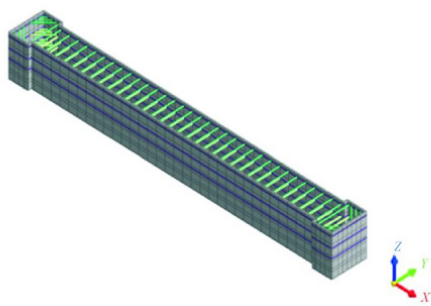


图1 基坑支护模型图

（三）模拟工况设计

为系统分析不同因素对红层软岩蠕变特性及支护结构受力的影响，结合工程实际潜在变量，设计多组对比工况，各组工况仅改变单一变量，其余参数保持一致，确保变量影响的独立性与可对比性。基准工况设定为，常规开挖速率、天然含水率状态、标准联合支护体系、中等初始应力水平，作为后续对比分析的基准参照。变量工况主要包括四类，开挖速率工况，设置快、中、慢三种开挖速率，探究卸荷速率对围岩蠕变启动时间、变形量及支护初始受力的影响；含水率工况，设置干燥、天然（基准）、饱和三种含水率状态，分析软岩软化效应与蠕变特性的关联性，以及对支护受力的间接影响；支护形式工况，分别设置土钉墙、排桩、地下连续墙、排桩+锚杆、地下连续墙+锚杆五种支护形式，对比不同支护体系的长期变形约束效果与受力演化规律；初始应力工况，对应基坑开挖深度20m、30m、40m（高应力）三种场景，探究初始应力水平对围岩蠕变阶段特征及支护长期应力累积的影响。所有工况的模拟时间均设置为360天，覆盖围岩初始蠕变、稳态蠕变阶段，确保捕捉长期力学响应规律，各工况的计算步长根据蠕变阶段调整，初始蠕变阶段采用小步长，稳态蠕变阶段采用大步长，兼顾计算精度与效率。

表1 模拟结果对比表（360天）

工况	总蠕变量 (mm)	稳态蠕变速率 (mm/d)	应力集中 系数	支护最大轴力 (kN)
基准工况	85	0.12	1.8	1250
饱和含水率	145	0.25	2.3	1850
慢开挖速率	65	0.10	1.6	1050
高初始应力	130	0.28	2.1	1600
地连墙+锚杆	70	0.09	1.5	950

（四）模拟结果分析与讨论

模拟结果分析围绕围岩蠕变特性、应力场演化、支护结构受

力三个核心维度展开，结合时间序列与空间分布特征，对比不同工况差异，揭示关键影响因素的作用机制与规律。围岩蠕变变形结果显示，基准工况下围岩蠕变曲线呈现明显的三阶段特征，初始蠕变阶段变形速率快速衰减，累计变形量占总变形量的30%–40%；稳态蠕变阶段变形速率趋于恒定，累计变形量占总变形量的50%–60%；300天后逐渐进入加速蠕变初期。对比不同工况，饱和含水率工况的围岩总蠕变量较基准工况增加60%–80%，且加速蠕变阶段提前到来，表明软岩软化显著加剧蠕变变形；慢开挖速率工况的初始蠕变量较快开挖速率工况减少25%–35%，稳态蠕变速率降低15%–20%，说明缓慢卸荷可有效抑制围岩蠕变发展；高初始应力工况的稳态蠕变速率是低应力工况的2–3倍，验证了初始应力对蠕变变形的促进作用。围岩应力场演化结果表明，蠕变过程中基坑侧壁应力集中区逐渐向深部转移，转移深度与蠕变量正相关，饱和含水率工况的应力转移深度较基准工况增加30%–40%，而联合支护工况可使应力集中系数降低20%–25%，说明支护结构能有效分担围岩应力、缓解应力集中。支护结构长期受力结果显示，不同支护形式的受力演化规律差异显著，地下连续墙+锚杆联合支护的最大轴力、弯矩峰值较单一排桩支护降低35%–45%，且长期应力累积速率更为平缓，体现了“刚性约束+主动预应力”的协同优势；土钉墙支护的应力增长速率虽慢，但长期变形量较大，仅适用于浅基坑或蠕变不显著的场景；排桩支护的桩顶与桩身中下部长期处于高应力状态，易出现局部应力集中，需加强配筋设计。

四、结束语

本文针对深厚红层软岩遇水软化、蠕变显著的核心工程难题，以地基开挖与支护系统的长期稳定性为目标，通过理论分析与数值模拟相结合的方法，系统完成了红层软岩蠕变特性、开挖应力场演化及支护结构受力规律的研究。文章丰富了红层软岩地基力学与支护工程的理论体系，为相关工程的支护设计优化、施工参数调整及长期稳定性控制提供了直接的技术支撑，有效降低了基坑失稳、支护超限等风险，对推动红层分布区重大工程的安全高效建设具有重要实践意义。未来可进一步结合现场长期监测数据，优化蠕变本构模型参数，提升模拟结果的工程适配性；同时开展水–热–力多场耦合下的蠕变特性研究，探索新型抗蠕变、抗软化支护材料与结构形式，为深厚红层软岩地基工程的长期稳定性控制提供更全面的技术保障。

参考文献

[1] 郭俊彦. 某高速铁路红层软岩地层深路堑基底变形规律数值模拟研究 [D]. 兰州交通大学, 2020.

[2] 钟志彬, 李安洪, 吴沛沛, 等. 红层软岩高速铁路路基长期上拱变形机理研究 I : 变形特征 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3625–3637. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222065.

[3] 张腾飞. 红层软岩路堑高边坡多级框架锚杆设计计算方法研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2014.

[4] 钟志彬, 李安洪, 邓荣贵, 等. 高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 327–340. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0423.

[5] 王原, 秦富, 王阳光, 等. 基坑红泥岩开挖施工工艺分析 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(1): 23–25. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2024.1.008.

[6] 冯永红. 软土地基超深基坑土方开挖的监测与有限元分析 [D]. 浙江: 浙江大学, 2012.

[7] 朱秦耀. 斜向支撑与竖向排桩组合基坑支护体系受力特性研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2023.

[8] 龙柯宇. 软土深基坑咬合桩围护结构的施工变形特性分析 [D]. 四川: 成都理工大学, 2016.

[9] 杜家论. 软土超大基坑开挖扰动位移时效特性及其评价方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

[10] 徐辉雄. 软土地区深基坑多锚撑支护变形分析 [D]. 中国地质大学 (武汉), 中国地质大学, 2005.

军用电子装备高功率微波防护技术研究

宁琦

中国航空综合技术研究所, 北京 101400

DOI:10.61369/ERA.2026010025

摘 要： 军用电子装备高功率微波防护技术的发展与完善, 对提升装备在复杂电磁环境下的生存能力和作战效能具有关键意义。当前, 高功率微波武器的快速发展给军用电子装备带来严峻威胁, 现有防护技术在防护效率、适应性等方面仍存在不足。通过深入研究高功率微波对军用电子装备的作用机理, 探索新型防护材料与结构设计, 优化防护系统集成方案, 可有效提升装备的防护水平, 为军用电子装备的稳定运行提供有力保障。

关 键 词： 军用电子装备; 高功率微波; 防护技术; 作用机理; 防护材料

Research on High-Power Microwave Protection Technologies for Military Electronic Equipment

Ning Qi

China Aeronautical Comprehensive Technology Research Institute, Beijing 101400

Abstract： The development and improvement of high-power microwave protection technologies for military electronic equipment are of critical significance in enhancing the survivability and operational effectiveness of the equipment in complex electromagnetic environments. Currently, the rapid advancement of high-power microwave weapons poses a severe threat to military electronic equipment, with existing protection technologies still exhibiting deficiencies in terms of protection efficiency and adaptability. By conducting in-depth research on the interaction mechanisms between high-power microwaves and military electronic equipment, exploring novel protective materials and structural designs, and optimizing integrated protection system solutions, the protection level of the equipment can be effectively enhanced, providing robust assurance for the stable operation of military electronic equipment.

Keywords： military electronic equipment; high-power microwave; protection technology; interaction mechanism; protective materials

引言

高功率微波作为一种新型电磁攻击手段, 其具备的高能量密度特性, 能对军用电子装备的电路、元器件等核心部分造成不可逆损坏, 严重影响装备作战任务的顺利执行。在现代信息化战争中, 军用电子装备作为指挥、通信、侦察等作战环节的核心支撑, 其可靠性直接关系到整体作战局势。针对高功率微波威胁, 开展防护技术研究已成为保障装备性能、维护作战优势的重要举措, 需从威胁特性、现有防护短板等方面入手, 探寻更高效、可靠的防护路径, 为后续技术研发与应用奠定基础。

一、军用电子装备面临的高功率微波威胁分析

(一) 高功率微波武器的技术特性与作战应用场景

高功率微波武器依靠其产生的强电磁脉冲, 可通过天线辐射、线缆耦合等多种途径作用于军用电子装备。其技术特性主要体现在高能量密度、窄脉冲宽度以及宽频率覆盖范围, 能在短时间内形成强大的电磁场环境。在作战应用场景中, 该类武器可用于攻击敌方雷达系统、通信设备、导航装置等军用电子装备, 既

可以实施单点精确打击, 也能对一定区域内的多个装备进行集群干扰, 在海、陆、空等多作战域均有广泛应用潜力, 对装备的正常工作构成严重挑战。

(二) 高功率微波对军用电子装备的损伤机制与影响程度

高功率微波作用于军用电子装备时, 会通过能量耦合进入装备内部电路。当能量达到一定阈值时, 会导致元器件过热烧毁、半导体器件击穿, 还可能干扰数字电路的逻辑功能, 造成数据错误、程序紊乱。从影响程度来看, 轻微情况下会使装备暂时失

效，经过重启或简单维修可恢复功能；严重时则会造成装备核心部件永久性损坏，完全丧失作战能力，甚至可能引发装备连锁故障，影响整个作战系统的正常运行。

（三）当前军用电子装备在高功率微波环境下的脆弱性表现

当前多数军用电子装备在设计之初，对高功率微波威胁的考虑不够全面，导致在实际面临该威胁时呈现出明显脆弱性。部分装备的外壳防护结构无法有效阻挡微波能量渗透，内部线缆布局缺乏合理的电磁屏蔽设计，使得微波能量易通过线缆耦合进入设备内部。此外，装备中的敏感元器件，如集成电路、传感器等，自身抗微波干扰能力较弱，在高功率微波作用下极易出现故障，难以满足复杂战场环境下的使用需求。

二、军用电子装备高功率微波防护技术现状与不足

（一）现有防护技术类型及在装备中的应用情况

现有军用电子装备高功率微波防护技术主要包括电磁屏蔽、滤波、接地、瞬态抑制等类型。电磁屏蔽技术通过采用金属外壳、屏蔽材料涂层等方式，减少微波能量进入装备内部，广泛应用于雷达、通信设备的外壳设计；滤波技术通过在装备电路中添加滤波器，抑制微波频段的干扰信号，常用于电源线路和信号线路防护；接地技术通过合理的接地设计，将耦合进入的微波能量导入大地，降低对装备的影响；瞬态抑制技术则利用瞬态抑制二极管等器件，吸收瞬间过高的电压和电流，保护敏感元器件。

（二）现有防护技术在防护效率与适应性方面的局限

在防护效率方面，现有电磁屏蔽技术对高频微波的屏蔽效果较差，部分微波能量仍能通过屏蔽缝隙渗透；滤波技术存在插入损耗问题，会影响装备正常信号的传输质量，且难以对宽频率范围的微波干扰进行有效抑制。在适应性方面，多数防护技术针对特定类型的微波威胁设计，当面临微波参数变化（如功率、频率、脉冲宽度改变）时，防护效果大幅下降，无法满足多样化的战场威胁环境需求。

（三）不同军用电子装备类型防护需求的差异与技术适配问题

不同类型的军用电子装备，由于其功能、结构和工作环境不同，防护需求存在显著差异。雷达装备需要处理高频信号，对防护技术的信号传输影响要求极高；通信装备需在移动环境下工作，防护结构需具备轻量化、小型化特点；导航装备对精度要求严格，防护技术需避免对内部精密电路造成干扰。当前存在技术适配问题，部分通用防护技术难以满足特定装备的个性化防护需求，导致防护效果与装备性能之间出现矛盾，影响装备整体作战能力。

三、军用电子装备高功率微波防护关键技术研发

（一）新型高功率微波防护材料的性能优化与制备工艺

新型防护材料研发聚焦于提升材料的电磁屏蔽效能、耐高温性和力学性能。通过在传统金属材料中添加纳米颗粒（如碳纳米管、石墨烯），改善材料的电磁参数，增强对微波能量的吸收和反射能力；采用复合材料制备工艺，将金属层与高分子材料层复合，在保证屏蔽性能的同时，降低材料重量，满足装备轻量化需

求。此外，研发温敏型防护材料，使其在遭遇高功率微波时能快速改变结构，增强防护效果，且在正常工作状态下不影响装备性能，通过优化制备工艺，提升材料的稳定性和批量生产能力。

（二）基于电路设计的防护技术改进与抗干扰方案

在电路设计层面，通过优化电路拓扑结构，减少微波能量耦合路径。采用差分信号传输方式，提高电路对共模微波干扰的抑制能力；在集成电路设计中，增加电磁兼容设计模块，集成瞬态电压抑制电路和滤波电路，提升芯片自身的抗微波干扰能力。针对装备内部不同电路模块的功能特点，制定差异化抗干扰方案，例如对电源模块采用多级滤波设计，对信号处理模块采用屏蔽隔离设计，通过电路层面的技术改进，从源头降低微波对装备的影响。

（三）防护系统集成设计与多技术协同防护机制构建

防护系统集成设计注重各防护技术的协同配合，避免单一技术的局限性。将电磁屏蔽、滤波、接地、瞬态抑制等技术进行整合，根据装备结构和工作流程，合理布局各防护组件，形成全方位的防护体系。构建多技术协同防护机制，通过传感器实时监测微波威胁参数，根据威胁强度和类型，自动调整各防护技术的工作模式，例如当遭遇高强度微波时，增强屏蔽材料的屏蔽效能，同时启动瞬态抑制器件；当微波频率变化时，切换滤波器的工作频段，确保防护系统始终处于最佳工作状态，提升整体防护效果。

四、军用电子装备高功率微波防护技术应用与验证

（一）防护技术在不同类型军用电子装备中的适配应用方案

针对雷达装备，考虑到其高频信号处理需求，采用低插入损耗的滤波技术和高精度电磁屏蔽结构，在防护微波干扰的同时，保证雷达信号的正常接收与处理；对于通信装备，结合其移动性特点，采用轻量化的复合防护材料和小型化的防护组件，集成于装备外壳和内部电路中，在不增加装备重量的前提下实现有效防护；导航装备则采用高精度接地设计和抗干扰电路模块，避免防护技术对导航信号精度产生影响，通过个性化的适配应用方案，确保防护技术与装备性能相匹配。

（二）防护技术应用过程中的性能测试与效果评估方法

在性能测试阶段，首要工作是搭建高功率微波模拟测试平台，该平台需能够模拟战场中可能出现的不同微波威胁场景，通过调整微波的辐射模式、作用距离等参数，营造贴近实际的干扰环境。随后将已应用防护技术的装备置于该平台中，施加微波辐射，持续监测装备在辐射前后的工作状态，包括信号响应速度、功能模块的运行稳定性等关键指标，对比分析防护技术对装备工作状态的影响。同时，借助专业的电磁兼容测试设备，对装备的电磁辐射水平进行检测，判断防护技术是否增加了装备自身的电磁辐射，还需测试装备在存在外部电磁干扰时的抗干扰表现，评估防护技术对装备电磁兼容性能的改善程度。在效果评估环节，从多维度构建指标体系，除了关注防护效率，即防护技术对微波能量的阻挡或削弱能力，还需考量防护技术对装备原有性能的影响，比如是否降低了装备的信号处理速度，以及在不同温湿度、气压条件下防护效果的稳定性。通过对装备在防护后的运行数据进行分析，结合对装备功能完整性、操作流畅度等方面的观察，

综合判断防护技术的实际应用效果，为后续的技术调整与优化提供全面且可靠的依据。

（三）实际战场环境下防护技术的适应性调整与优化策略

实际战场环境与实验室模拟环境存在显著差异，微波威胁的来源可能更为复杂，且地理环境的变化会对防护技术的性能产生影响，比如在潮湿环境中，防护材料的性能可能会出现衰减，振动环境则可能导致防护组件的连接出现松动。因此，需要在多种典型的战场环境下开展实地测试，记录防护技术在不同环境条件下的工作表现，分析环境因素与防护性能之间的关联规律，找出防护技术在实际应用中存在的短板。针对高温环境下防护材料易失效的问题，可通过改进材料的配方，加入耐高温成分，或在防护结构中增加散热通道，提升材料的耐高温能力；对于振动环境下防护组件易松动的情况，可优化组件的固定方式，采用更稳固的连接结构，或选用具有一定弹性的固定部件，减少振动对组件连接的影响。通过这类针对性的调整与优化，确保防护技术在复杂多变的实际战场环境中，能够始终保持稳定可靠的防护效果，为军用电子装备的正常运行提供有力保障。

五、军用电子装备高功率微波防护技术发展保障与推进

（一）防护技术研发的政策支持与资金投入机制完善

为推动防护技术研发，需制定专项政策，明确技术发展方向和重点任务，将高功率微波防护技术纳入军用电子装备发展规划，引导科研机构和企业加大研发投入。完善资金投入机制，建立多元化资金渠道，除政府财政拨款外，鼓励社会资本参与防护技术研发，设立专项基金，支持关键技术攻关和成果转化。同时，制定资金使用监管制度，确保资金高效合理利用，提高研发投入的回报率，为防护技术持续发展提供政策和资金保障。

（二）产学研协同创新体系构建与技术交流合作加强

构建产学研协同创新体系时，需精准对接高校、科研院所与

企业的核心优势，高校依托学科平台开展高功率微波防护基础理论研究，科研院所聚焦防护材料、电路设计等关键技术攻关，企业凭借生产线与市场经验推进技术成果的工程化转化及防护产品规模化生产，形成“理论研发 - 技术突破 - 产品落地 - 实战应用”的闭环产业链。通过每季度举办专题学术研讨会、每年开展技术成果对接会，邀请电磁防护、军用电子等领域专家分享前沿动态，促进跨单位技术方案交流，破解技术研发与产业应用脱节难题，加速防护技术迭代升级。^[1-5]

（三）专业人才培养与技术储备建设的长期规划实施

制定专业人才培养长期规划，在高校相关专业（如电子信息工程、电磁兼容、军事工程）中增设高功率微波防护技术相关课程，培养具备基础理论知识和实践能力的专业人才。建立校企合作培养模式，安排学生到企业实习，参与实际研发项目，提升人才的实践能力和创新能力。加强技术储备建设，建立防护技术数据库，收集整理国内外最新技术成果、测试数据和应用案例，为后续研发提供数据支持。同时，注重技术专利保护，鼓励科研人员申请专利，形成技术储备优势，为防护技术的持续推进奠定人才和技术基础。

六、结语

本文围绕军用电子装备高功率微波防护技术展开研究，明确了该技术对提升装备战场生存能力的重要性，分析了当前面临的威胁与技术不足，提出了关键技术研发方向与应用路径，并给出了发展保障措施。研究成果可为军用电子装备防护技术的进一步发展提供参考，助力提升装备在复杂电磁环境下的可靠性。未来需持续关注高功率微波武器发展动态，不断优化防护技术，以更好适应战场需求，保障军用电子装备作战效能的充分发挥。

参考文献

- [1] 陈嘉明, 林思雨. 军用电子装备高功率微波防护材料的研发与应用 [J]. 军用电子技术, 2023, 42(2): 15-23.
- [2] 赵文博, 孙艺萌. 高功率微波对雷达装备的损伤机制及防护技术研究 [J]. 现代雷达, 2024, 46(3): 47-54.
- [3] 李雨桐, 周浩宇. 军用通信装备高功率微波防护系统集成设计 [J]. 通信技术, 2023, 56(5): 68-75.
- [4] 王梓涵, 吴雨薇. 新型电磁屏蔽材料在军用电子装备防护中的应用研究 [J]. 材料工程, 2024, 52(4): 89-96.
- [5] 张佳宁, 郑明轩. 军用电子装备高功率微波防护技术测试与评估方法 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(6): 32-39.

碳化养护对混凝土与再生骨料性能的影响研究进展综述

张西巡

中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142

DOI:10.61369/ERA.2026010027

摘 要 : 碳化养护技术是一种新型绿色养护方法, 通过 CO_2 与水泥基材料中的钙质反应生成碳酸钙, 显著改善再生骨料和混凝土的力学性能、耐久性和抗渗性。本文系统回顾了碳化养护的基本原理和工艺, 并重点论述了其对再生骨料强度、密实性和耐久性的提升作用, 以及对再生混凝土抗压强度和界面过渡区性能的改善。最后, 简要探讨了当前碳化养护技术面临的挑战与发展方向, 包括工艺优化、协同效应、生命周期评估和产业化应用等, 为碳化养护的工程推广提供参考。

关 键 词 : 碳化养护; 再生骨料; CO_2 固化; 混凝土性能

A Review of Research Progress on the Effects of Carbonation Curing on the Properties of Concrete and Recycled Aggregates

Zhang Xixun

China Railway Design Corporation, Tianjin 300142

Abstract : Carbonation curing is a novel green curing technology that involves the reaction of CO_2 with calcium compounds in cement-based materials to form calcium carbonate. This process significantly improves the mechanical properties, durability, and impermeability of recycled aggregates and concrete. This paper systematically reviews the basic principles and processes of carbonation curing. It focuses on the role of carbonation curing in enhancing the strength, densification, and durability of recycled aggregates, as well as improving the compressive strength and interfacial transition zone (ITZ) performance of recycled concrete. Finally, the current challenges and future development directions of carbonation curing technology are briefly discussed. These include process optimization, synergistic effects, life cycle assessment, and industrial-scale applications, which aim to provide guidance for the engineering implementation of carbonation curing.

Keywords : carbonation curing; recycled aggregate; CO_2 curing; concrete performance

引言

在建筑业高碳排放和资源循环利用需求日益增长的背景下, 再生混凝土 (RAC) 及其骨料的研究受到广泛关注。根据 IPCC (2023) 报告, 建筑行业约占全球 CO_2 排放量的近 40%, 其能源消耗和环境压力迫使学界和工程界寻求更为绿色、低碳的建材解决方案。再生混凝土因其能够有效利用建筑拆除废弃物、减少天然资源消耗, 被视为实现建筑材料可持续发展的重要途径。然而, 再生骨料常因吸水率高、强度低、表面粗糙和界面粘结差等问题, 导致 RAC 在力学性能和耐久性方面普遍低于天然骨料混凝土, 严重限制了其在结构工程中的广泛应用 (Shi et al., 2020) ^[1]。

针对上述问题, 研究者提出多种改性方法以提高再生骨料的性能。其中, 碳化养护技术作为一种兼具力学性能增强与碳固存功能的绿色养护手段, 逐渐受到重视。该技术通过引入 CO_2 与水泥基材料中的钙质成分 (如氢氧化钙、硅酸钙) 发生化学反应, 生成稳定的碳酸钙沉淀, 从而改善材料的微观结构, 封闭孔隙, 提升骨料及混凝土的密实度与耐久性 (Jiang et al., 2021) ^[2]。此外, 该过程还具有快速早期强度增长、缩短养护周期、减缓碱-骨料反应等优点, 在预制构件及装配式建筑中具备较高的应用潜力。

近年来, 国内外学者围绕碳化养护技术原理、工艺优化及其在再生骨料和混凝土中的应用展开了深入研究。例如, Gao et al. (2024) 探讨了复合改性碳化技术对高性能再生骨料的增强机制, Shi et al. (2020) 分析了不同 CO_2 在建筑业高碳排放和资源循环利用需求日益增长的背景下, 再生混凝土 (RAC) 及其骨料的研究受到广泛关注。根据 IPCC (2023) 报告, 建筑行业约占全球 CO_2 排放量的近 40%, 其能源消耗和环境压力迫使学界和工程界寻求更为绿色、低碳的建材解决方案。再生混凝土因其能够有效利用建筑拆

项目名称: 中国铁路设计集团科技开发项目, 基金编号: 2023CJ0105。

作者简介: 张西巡 (1991.04-), 男, 安徽宿州人, 硕士, 工程师, 研究方向: 城市轨道交通结构加固新材料方向。

除废弃物、减少天然资源消耗，被视为实现建筑材料可持续发展的重要途径。然而，再生骨料常因吸水率高、强度低、表面粗糙和界面粘结差等问题，导致 RAC 在力学性能和耐久性方面普遍低于天然骨料混凝土，严重限制了其在结构工程中的广泛应用（Shi et al., 2020）^[1]。

针对上述问题，研究者提出多种改性方法以提高再生骨料的性能。其中，碳化养护技术作为一种兼具力学性能增强与碳固存功能的绿色养护手段，逐渐受到重视。该技术通过引入 CO₂ 与水泥基材料中的钙质成分（如氢氧化钙、硅酸钙）发生化学反应，生成稳定的碳酸钙沉淀，从而改善材料的微观结构，封闭孔隙，提升骨料及混凝土的密实度与耐久性（Jiang et al., 2021）^[2]。此外，该过程还具有快速早期强度增长、缩短养护周期、减缓碱-骨料反应等优点，在预制构件及装配式建筑中具备较高的应用潜力。

浓度和养护时间对再生骨料抗压强度的影响，Yuan et al.（2023）则研究了液-固碳化在改善骨料均匀性方面的表现^[3]。尽管已有大量成果，但大多集中在小规模实验室条件下，对于碳化养护的能耗控制、工业化装备开发、长期性能及经济可行性等方面仍缺乏系统研究与实践验证，亟待进一步完善。基于此，本文系统回顾碳化养护的基本原理与典型工艺形式，探讨其对再生骨料与混凝土性能的增强效果，并结合当前技术发展趋势，提出未来研究重点及工程应用挑战。

一、碳化养护的基本原理与工艺

（一）碳化养护的化学反应机理

碳化养护的核心化学机理是 Ca(OH)₂、C₃S 和 C₂S 等水泥成分与 CO₂ 反应生成碳酸钙。Shi 等 (2020) 研究表明，这些反应不仅促进了水泥的水化过程，还通过碳酸钙沉淀填充了混凝土孔隙，提高了材料的致密度和力学性能^[4]。Zhang 等 (2022) 进一步指出，碳化养护能够显著降低混凝土的孔隙率，从而增强其耐久性^[5]。

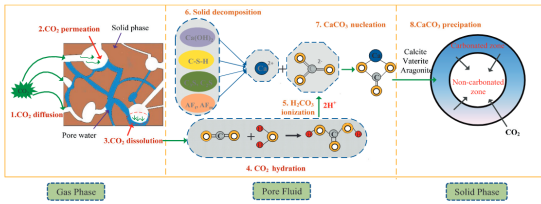


Fig. 1. Reaction processes of accelerated carbonation treating RCA.

图1 碳化处理反应过程

Fig.1 Reaction process of carbonation treatment

（二）碳化养护的主要工艺

碳化养护的主要工艺形式包括气-固碳化、液-固碳化和复合碳化三种模式。气-固碳化是目前最常用的养护方式。Wu et al. (2022) 指出，该方法将混凝土或骨料暴露在高浓度 CO₂ 环境中，操作简单、成本较低，适合大规模生产。在气-固碳化过程中，通过控制温度、湿度和 CO₂ 浓度等条件，可有效提高碳化效率和均匀性^[6]。液-固碳化则通过将再生骨料浸泡在 CO₂ 饱和液体中，使二氧化碳与骨料中的钙化合物充分反应。Xie et al. (2021) 研究表明，此方法能够更均匀地改善骨料的微观结构和强度，特别适合对小批量高性能骨料进行处理^[6]。复合碳化工艺结合了气-固与液-固两者的优势，通过优化 CO₂ 浓度、温湿度和反应时间等参数，进一步提升改性效果。Li et al. (2024) 指出，引入纳米材料与碳化养护协同作用，可进一步增强再生骨料和混凝土的力学性能和耐久性^[7]。

表1 预处理和碳化对 RCA 影响的比较

Table 1 Comparison of pretreatment and carbonation effects on RCA in previous research and current study

处理方法	RCA 类型	吸水率 (%)			参考文献
		处理前	处理后	降低百分比	
Direct carbonation	5 - 20 mm	6.85	5.65	17.5	Kazmi et al. (2020)
Acid-treated & carbonated	5 - 20 mm		6.43	6.1	
Lime-treated & carbonated	5 - 20 mm		5.47	20.1	
Direct carbonation	2.25 - 6.25 mm	4.93	4.25	13.8	Wang et al. (2020a)
Air-dried, lime-treated and carbonated	2.25 - 6.25 mm		3.91	20.7	
Environmental-chamber dried & carbonated for 3 days	20 - 30 mm	4.62	3.14	32.0	Li et al. (2019)
Optimized ww spray & carbonation	5 - 10 mm	7.73	6.53	15.5	Current study
	10 - 20 mm	6.66	5.90	11.4	

二、碳化养护对再生骨料和混凝土性能的影响

（一）碳化养护对再生骨料性能的影响

再生骨料通常具有较高的吸水率和较低的强度，限制了其在再生混凝土中的应用。碳化养护通过生成碳酸钙沉淀，有效改善骨料的表面结构，从而提升骨料的物理和力学性能，为再生混凝土

土应用提供技术支持。碳化养护显著提高了再生骨料的抗压强度。Shuvo et al. (2024) 指出，碳化处理在骨料表面形成致密的碳酸钙层，填补微孔并增强骨料的密实性和强度。Yuan et al. (2023) 的研究显示，在低浓度 CO₂ 条件下处理，骨料强度可提升 15% - 25%^[8]。碳化过程还优化了骨料的微观结构。Liang et al. (2023) 发现，经过碳化养护后，骨料的孔隙率明显降低，与水泥基体的粘

结力增强,进而提高了再生混凝土的整体性能。此外,碳化养护提高了骨料的耐久性。Wang et al. (2023) 观察到碳化处理显著增强了再生骨料的抗冻性和抗渗性能,特别是在低温潮湿环境下稳定性明显提升; Gao et al. (2024) 的研究也表明,碳化养护能够显著增强骨料对氯离子和硫酸盐等化学侵蚀的抵抗力^[9]。

(二) 碳化养护对混凝土性能的影响

碳化养护同样显著提高了再生混凝土的力学性能。Wang et al. (2023) 研究表明,使用碳化处理后的再生骨料制备的混凝土,其抗压强度比常规混凝土高出 15% - 30%。这是因为碳化后的骨料表面更加致密,增强了混凝土的整体刚度和承载能力^[10]。碳化养护还改善了混凝土的耐久性。Liang et al. (2023) 的实验表明,碳化处理显著提高了再生混凝土的抗冻性能,在多次冻融循环后强度损失明显降低。同时,碳化作用减少了混凝土中的孔隙,为混凝土提供了更好的抗渗和抗化学腐蚀能力^[11]。混凝土中界面过渡区 (ITZ) 的改善是碳化养护提升 RAC 性能的另一重要途径。Yin et al. (2023) 指出,碳化处理在 ITZ 区域生成碳酸钙沉淀,降低孔隙率,提高粘结强度,从而显著增强了混凝土的整体强度和耐久性。此外,此致密层还能减少裂缝产生,进一步提高混凝土的抗裂性和长期稳定性^[12]。

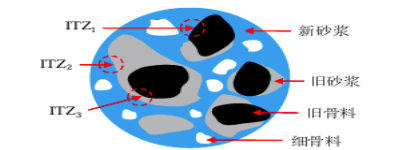


图 6 再生骨料混凝土界面过渡区示意图^[124]
Fig. 6 Schematic diagram of ITZ of RAC^[124]

图2再生骨料混凝土界面过渡区示意图

Fig.2 Schematic diagram of ITZ of RAC

三、研究结论与展望

(一) 研究结论

1. 碳化养护能显著提高再生骨料的物理和力学性能,尤其增强了骨料的抗压强度和密实性。碳酸钙沉淀填补了骨料表面的孔隙,降低了其吸水率,使骨料更加坚硬耐久。
2. 使用碳化处理后的再生骨料制备的混凝土,其抗压强度可提高约 15% - 30%,且混凝土的抗冻融和抗化学侵蚀能力明显增强,在极端环境下表现出更好的长期耐久性。
3. 通过优化碳化养护工艺参数(如 CO₂ 浓度、温湿度和养护时间等),可进一步提升改性效果,例如提高骨料的均匀性并增强混凝土的抗裂性。

(二) 未来研究方向

1. 工艺优化与标准化: 精确调控 CO₂ 浓度、温度、湿度和养护时间等参数,提高碳化效率与 CO₂ 利用率。制定统一的碳化养护标准和操作规范,是实现大规模工程应用的关键。
2. 技术协同效应: 探索碳化养护与纳米材料或其他绿色添加剂等技术的协同作用,以进一步提升再生骨料和混凝土的综合性能。例如,引入纳米硅等材料可增强混凝土的抗压和抗裂能力。
3. 生命周期评估: 对碳化养护全过程进行环境影响和经济效益评估。综合分析 CO₂ 封存效果与能耗、资源消耗等因素,为碳化养护的大规模推广提供科学依据。
4. 产业化应用: 开发高效低能耗的碳化养护设备和工艺流程,解决碳化养护技术在实际工程中的实施难题,实现碳化养护的产业化和规模化推广。

参考文献

- [1] Shi, C.; He, F.; Li, Y., 2020. CO₂ curing of concrete: Mechanisms, performance, and implications. *Cement and Concrete Research*, 134: 106071.
- [2] Jiang, X.; He, Q.; Li, X., 2021. Liquid-solid carbonation curing for improved recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 304: 124605.
- [3] Wu, K.; Luo, S.; Zheng, J.; Yan, J.; Xiao, J., 2022. Influence of carbonation treatment on the properties of multiple interface transition zones and recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 127: 104402.
- [4] Zhang, D.; Chen, Q.; Lin, X., 2022. Advances in gas-solid carbonation techniques for concrete materials. *Cement and Concrete Composites*, 123: 104334.
- [5] Zhou, Y.; Li, F.; Jiang, W., 2022. Improving recycled aggregate surface quality through carbonation and nano-silica synergy. *Journal of Building Materials*, 45(6): 781-794.
- [6] Wang, H.; Zhang, Y.; Chen, B., 2023. Carbonation curing of recycled aggregates: A review. *Journal of Cleaner Production*, 322: 129178.
- [7] Yuan, Y.; Jiang, X.; Zhang, L., 2023. Influence of carbonation on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 22(3): 456-469.
- [8] Liang, C.; Xiong, Z.; Lin, Y., 2023. Freeze-thaw resistance of carbonation-treated recycled aggregate concrete. *Journal of Materials Research*, 12(7): 1984-2001.
- [9] Yin, S.; Li, J.; Zhang, M., 2023. Modifying recycled aggregates with CO₂ for improved interfacial transition zone performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 25: 411-423.
- [10] Gao, P.; Liu, J.; Zhang, W., 2024. Multi-scale analysis of CO₂ curing for recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 151: 106837.
- [11] Shuvo, M. A. I.; Rahman, M. T., 2024. Effect of CO₂ curing on the workability of recycled aggregate concrete. *Materials Today Communications*, 43: 104112.
- [12] Li, K.; Zhang, J.; Wang, H., 2024. Long-term performance of carbonation-cured recycled aggregates in sulfate environments. *Cement and Concrete Composites*, 167: 103111.

水利工程施工进度管理与控制策略研究

樊龙飞

张家港市水利建设工程有限公司，江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ERA.2026010032

摘 要： 水利工程建设周期长、参与主体多、工序衔接复杂，施工进度管理直接关系到投资控制、工程质量与建设效益。本研究在分析水利工程施工进度影响因素的基础上，从计划编制、动态监控、风险预控与数字化手段应用等方面展开系统探讨。通过梳理典型工程案例，总结出“目标分解—过程跟踪—偏差预警—协同调整”的进度控制路径。研究认为，科学进度计划、完善的资源配置、实时数据监测以及基于 BIM、GIS 与物联网的数字化平台，是提升进度管理水平的关键。

关 键 词： 水利工程；施工进度管理；进度控制；动态监测；风险预控

Research on Management and Control Strategies for Construction Progress of Water Conservancy Projects

Fan Longfei

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

Abstract： The construction of water conservancy projects involves long cycles, numerous participating entities, and complex procedural linkages, making construction progress management directly related to investment control, project quality, and construction efficiency. Based on an analysis of the factors influencing the construction progress of water conservancy projects, this study systematically explores aspects such as plan formulation, dynamic monitoring, risk precontrol, and the application of digital tools. By examining typical project cases, a progress control pathway of "goal decomposition—process tracking—deviation warning—collaborative adjustment" is summarized. The study posits that scientific progress planning, comprehensive resource allocation, real-time data monitoring, and digital platforms based on BIM, GIS, and the Internet of Things are key to enhancing progress management levels.

Keywords： water conservancy projects; construction progress management; progress control; dynamic monitoring; risk precontrol

引言

水利工程作为基础性与战略性工程，其建设进度不仅影响工程成本与质量，更关系区域供水安全、防洪减灾能力与经济社会发展。因此，施工进度管理成为项目管理体系中的核心环节。然而，在实际工程中，由于施工环境复杂、工期影响因素多样，常出现工期滞后、资源浪费与计划失控等问题。随着信息化与智能建造技术快速发展，传统进度管理模式面临转型升级需求。本研究旨在梳理水利工程施工进度管理的主要特征及制约因素，并提出科学、可操作的控制策略。

一、水利工程施工进度管理的特点与主要影响因素

（一）水利工程建设系统性与长期性

水利工程通常规模大、结构复杂，施工内容涵盖土石方开挖、混凝土浇筑、水工建筑物安装、金属结构制作与调试等多个工序，具有明显的系统性。工程往往分区段、分阶段推进，各子项目之间存在紧密的逻辑衔接，对整体进度形成链条式影响^[1]。建设周期普遍较长，少则一年，多则数年甚至十年以上，任何一

个环节出现偏差都可能对工期造成放大效应。施工季节性特征显著，多数工程依赖枯水期、非汛期的施工窗口，一旦遭遇持续降雨、洪水来临或水位异常波动，计划必须调整^[2]。施工区域分散、点多面广，各作业面之间交通不便、材料运输距离长，现场管理难度大，进度控制呈现明显的复杂性和不确定性。

（二）影响进度的外部因素

气象、水文条件对水利工程工期产生直接影响。强降雨、洪水、寒潮、高温等气候事件会限制施工作业面，甚至导致施工中

断。地质条件同样重要，软弱地基、突涌砂层、溶洞等不良地质会改变既定施工方案，延长处理时间。政策审批环节影响程序性进度，例如用地审批、环保手续、爆破许可等任何一个环节延迟，均会使施工计划推迟。材料供应链的稳定性也影响工期，特别是在偏远山区，混凝土骨料、钢材、水泥等的运输受道路条件影响明显^[1]。周边协调涉及征地拆迁、地方矛盾化解、迁占处理等，如协调不畅，可能使关键施工面无法按计划展开。

（三）影响进度的内部因素

施工组织设计是进度控制的核心，组织不合理会导致工序安排失衡、作业面布局不当，造成等待时间增加。机械设备能力决定作业效率，设备不足或故障率高会影响连续施工。劳动力配置必须与施工强度匹配，水利工种较多，熟练工短缺、人员流动频繁均会影响实际产能^[3]。技术方案的成熟度与适用性关系到工序效率，方案过于保守或与当地地质水文条件不匹配，会导致返工或效率下降。合同管理影响各参建单位的协同程度，责任界面不清、合同条款不完善，会使计划执行缺乏约束力。

（四）典型工程中的普遍性问题

许多工程中存在工序衔接不够紧密的问题，前序工作延期会导致后续作业无法及时展开，形成链式滞后。现场协调不足，施工、监理、设计之间信息沟通不畅，问题滞后反馈，影响决策效率。资源投入不均衡较为常见，部分关键线路上资源不足，而非关键线路资源闲置，导致整体进度结构失衡^[3]。进度计划滞后于实际施工情况，更新不及时，使控制措施无法针对最新情况调整。以上问题在不同规模水利工程中普遍存在，是影响工期的主要管理性因素。

二、水利工程施工进度计划的编制方法与优化策略

（一）进度计划编制原则

水利工程进度计划的编制必须以明确的施工目标为基础，包括总工期、关键节点、阶段性任务等内容，确保全过程有据可依。计划结构需要具备清晰的逻辑关联性，各工序之间的先后顺序、约束关系与交叉施工条件必须准确表达，避免出现冲突或脱节。资源可达性是计划可执行的前提，需充分评估机械设备、劳动力、材料供应与现场条件的匹配度，使计划建立在现实可实现的基础上。风险可预见性要求在计划中预留必要的时间弹性与调整空间，对气候、水文、地质、外部协调等可能带来影响的因素进行提前识别与预判，提高计划的稳定性与韧性^[9]。

（二）计划工具与方法

项目结构分解（WBS）是进度管理的基础，通过自上而下将工程划分为分部、分项、工序，使任务颗粒度清晰，有利于计划编制和责任落实。横道图使用直观、便于展示时间安排与工作重叠关系，适合总体计划与阶段计划展示。网络计划技术（CPM/PERT）能够识别关键线路，明确影响总工期的核心工序，使资源分配和施工组织更具针对性。PERT对于不确定持续时间的工序具有优势，适合水文变化大、地质条件复杂的工程应用。里程碑计划用于控制整体节奏，通过关键节点促进施工过程管控，使项

目组织能够及时发现偏差并采取调整措施。

（三）资源配置与计划优化

资源配置的合理性直接决定进度计划的可行性。资源均衡通过调整施工顺序、合理调配机械与人员，使资源需求尽量平稳，减少高峰期资源紧张状况。资源平滑强调根据关键线路的限制条件，对非关键线路进行时间调整，使资源在工程各阶段的占用保持适度，提高整体使用效率。关键线路调整涉及对关键工序进行适度优化，通过技术措施、工法改进或资源投入提升，使关键线路缩短或在可控范围内保持稳定。计划优化还包括对材料供应链、施工组织方式、工作面布置进行调整，使施工活动在逻辑上更加紧凑，提高执行效率^[6]。

（四）季节性与水文条件的进度统筹

水利工程对季节和水文条件依赖强，进度统筹必须充分考虑枯水期、汛期与极端天气的影响。枯水期是开展主体工程施工的重要窗口，需将重点工序集中在这一时期展开，保证形象进度。汛期应重点安排不受水位影响或对水敏感度低的工序，通过临时排水、围堰加固、设备防护等措施确保安全。水文条件不稳定的河谷、山区工程还需充分分析来水量预测、历史水位变幅，从时间、人员与设备等方面制定相应预案。交通与材料运输组织也是统筹内容之一，雨季道路状况变化大，应提前储备材料、合理布置转运点，避免因材料供应中断影响关键进度任务。

三、水利工程施工进度的动态监测与偏差控制机制

（一）进度监测体系的构建

水利工程的动态监测依托计划层、执行层、反馈层构成的三级体系。计划层负责制定总体进度目标和阶段性节点，将各分部工程的工期要求量化并明确责任主体。执行层承担具体实施任务，通过现场记录、设备运行数据、工序完成情况等信息反映实际施工进度。反馈层对比计划与实际数据，识别不一致之处，并生成预警或调整建议，使整个监测体系形成循环闭环。三级结构能够保证信息从现场到管理层的及时传递，使进度调整具备依据。不同层级之间职责清晰，有助于提升监控效率和管理透明度。

（二）进度偏差识别与分析方法

偏差识别是动态控制的关键环节。S曲线用于展示计划进度与实际进度之间的差异，通过曲线的上下偏移分析施工节奏是否符合预期。挣值管理（EVM）能够将成本、时间与工程量统一到同一指标体系中，通过挣值、计划值、实际成本等数据计算进度偏差指数，为管理决策提供量化依据。关键线路偏差分析法通过比较实际工期与关键线路计划工期，识别哪些工序导致总工期受影响。关键线路一旦发生偏移，需要重点关注，判断是否因技术难题、资源不足或协调问题造成。多种方法交叉使用，可以从不同维度揭示偏差原因，使分析结果更加准确。

（三）偏差纠偏策略

偏差产生后，需要通过有效措施进行纠偏。资源优化常见于关键工序，如增加机械设备、增加班组数量或延长作业时间，提高产能水平。施工组织调整涉及优化作业面布置、调整施工顺序

或采用交叉施工模式，提高现场利用效率。工艺工法改进在地质复杂或作业条件较差区段应用较多，通过引入更高效的施工技术或设备减少施工障碍。现场协调强化包括加强设计、监理、施工等单位的沟通机制，通过会议、信息化平台、即时反馈等方式解决影响进度的问题。多项纠偏策略需要综合使用，使进度回到合理区间^[7]。

（四）信息化与数字化监控

数字化技术为进度监控提供了实时性和可视化优势。BIM 通过三维建模展示工程形象进度，使管理人员在虚拟空间中查看施工状态。GIS 提供地理环境与施工空间关系的展示，适用于水库、渠道、堤坝等大范围工程的空间分析。无人机巡检用于拍摄现场影像、测量工程量、检查施工面情况，效率高且覆盖范围广。传感器布设在关键结构物或施工区域，通过采集振动、位移、水位等数据，实时传输到监控平台，实现工程状态与进度的同步监测。多种技术结合使用，使进度管理更加精确，为偏差分析和纠偏决策提供可靠信息支持。

四、水利工程施工进度的风险预控与协同管理策略

（一）水利工程进度风险类型

水利工程具有体量大、周期长、外界依赖性强的特点，进度风险类别多样。自然风险是影响最大的风险因素之一，气候变化、强降雨、洪水、水位异常波动、地质灾害等都可能造成关键施工面中断或作业条件恶化。技术风险包括勘察不充分、施工方案不适应地质水文条件、关键技术掌握不足、设备故障率高等情况，可能导致返工和计划延长。管理风险出现在施工组织薄弱、调度不及时、决策滞后、沟通不顺畅等情形，增加工序等待时间。安全与环保风险涵盖高边坡作业、深基坑施工、爆破作业、水体保护等内容，一旦出现事故，会对工期产生重大影响。合同风险则涉及责任界面模糊、工期约定不清晰、分包管理不规范等问题，可能引发争议和停工^[8]。

（二）进度风险预控措施

风险预控需要形成系统化管理模式。风险清单编制是基础，通过分析工程特点，将施工期可能发生的自然、技术、管理等风险逐项列出，并设定风险等级。责任分解使每项风险都有明确的责任单位和对应负责人，避免出现无人负责的情况。预案制定对

高等级风险尤为关键，如汛期突水预案、设备故障应急预案、地质突发情况处理预案，通过措施提前确定，使工程在突发情况下能够迅速响应。监测指标体系构建用于对重点风险进行过程监控，通过水位、雨量、地表沉降、混凝土温度等指标进行动态采集，使管理人员及时发现风险变化趋势，提高预控主动性。

（三）多主体协同管理机制

水利工程参与单位众多，协同管理是进度控制的重要保障。建设单位承担统筹角色，需要明确整体目标和进度要求，协调资源和外部关系。监理单位负责监督各分项工程执行情况，及时向建设单位反馈风险信息，确保进度控制措施的落地。施工单位是执行主体，需按计划落实施工组织、设备投入和人员配置，并对进度偏差及时采取解决措施。设计单位参与工程变更、技术咨询和优化设计，对影响进度的技术问题及时解答。通过周例会、信息共享平台、问题联动机制等方式建立稳定协作关系，有助于减少沟通障碍，提高进度管理效率。

（四）数字化协同平台的构建

数字化协同平台能够实现进度管理的信息高效整合与实时共享。基于数字平台，可将建设、监理、设计、施工等单位接入统一系统，通过权限管理实现数据共享与同步更新，使各单位能够在同一界面查看进度状态、施工计划、风险预警和物料供应信息。平台可融合 BIM、GIS、无人机影像和传感器数据，为指挥调度提供可视化依据。资源调度模块能够根据任务量、设备利用率、材料库存等信息自动生成优化建议，提升资源配置效率。预警系统通过数据分析识别施工滞后、设备异常、水位变化等风险信号，及时提醒相关责任人处理。数字化协同平台的构建使进度控制实现从分散管理向一体化协同转变，显著提升施工组织效率与风险应对能力。

五、结语

水利工程施工进度管理是影响工程质量、安全与成本控制的重要环节。研究表明，系统化的计划编制、全过程动态监控、科学的偏差纠偏措施及完善的风险预控机制，是保障工期目标的关键。随着数字化技术的不断发展，基于 BIM、物联网与数据分析的智能化进度管理将成为未来趋势。通过多主体协同与信息共享，可显著提升水利工程施工管理的整体效率和可靠性。

参考文献

[1] 孙户喜. 农村水利工程施工管理中安全和质量控制策略研究 [J]. 水上安全, 2025, (14): 139-141.
[2] 李惠君. 市政工程施工进度的管理与控制策略研究 [J]. 居业, 2024, (07): 190-192.
[3] 王文婷. 水利工程施工管理影响因素与控制策略探究 [J]. 水上安全, 2024, (12): 25-27.
[4] 苏成. 农村水利工程施工管理中的安全和质量控制策略 [J]. 水上安全, 2024, (08): 152-154.
[5] 卜运涛. 简论水利工程施工管理特点及质量控制策略 [J]. 珠江水运, 2021, (19): 5-6. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2021.19.002.
[6] 孙卫东. 水利工程施工管理特点及质量控制策略分析 [J]. 农业科技与信息, 2021, (05): 120-121. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2021.05.052.
[7] 钱立斌. 水利工程施工管理特点及质量控制策略 [J]. 居舍, 2021, (07): 141-142.
[8] 池邦川. 大型建筑工程施工现场管理及进度控制策略分析 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (09): 140-142.

锚杆静压桩预埋锚筋设计验算方法探究

陈希铭, 林华国, 张元勇

广东省岩土勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510520

DOI:10.61369/ERA.2026010033

摘 要 : 在锚杆静压桩设计中, 预埋锚筋的设计与验算直接关系到压桩力的大小与压桩安全性, 本文聚焦于锚杆静压桩预埋锚筋设计验算方法的研究。通过对相关规范和理论的深入剖析, 详细阐述了预埋锚筋在锚杆静压桩中的作用及设计要点。分别对锚筋的锚固长度和锚固抗拔力、杆体抗拉力进行理论推导与分析, 结合实际工程案例, 运用所提出的设计验算方法进行计算, 并与实测数据对比验证其准确性。研究成果为锚杆静压桩预埋锚筋的合理设计提供了可靠的方法与依据, 有助于提升锚杆静压桩工程的设计可靠性与压桩施工的安全稳定性。

关 键 词 : 预埋锚筋; 锚杆静压桩; 锚筋与混凝土粘结强度; 锚固长度; 锚固抗拔力

Research on Design Verification Methodology for Pre-embedded Anchor Bars in Anchor Static Piles

Chen Ximing, Lin Huaguo, Zhang Yuanyong

Guangdong Provincial Geotechnical Survey, Design and Research Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510520

Abstract : In the design of anchor rod static pressure piles, the design and checking calculations of pre-embedded anchor bars directly relate to the magnitude of pile-pressing force and the safety of pile pressing. This paper focuses on the research of design and checking calculation methods for pre-embedded anchor bars in anchor rod static pressure piles. Through an in-depth analysis of relevant codes and theories, the roles and key design points of pre-embedded anchor bars in anchor rod static pressure piles are elaborated in detail. Theoretical derivations and analyses are conducted on the anchorage length, anchorage pull-out resistance, and tensile resistance of the anchor bars. Combined with practical engineering cases, the proposed design and checking calculation methods are applied for calculations, and their accuracy is verified through comparison with measured data. The research results provide reliable methods and bases for the rational design of pre-embedded anchor bars in anchor rod static pressure piles, contributing to enhancing the design reliability of anchor rod static pressure pile projects and the safety and stability of pile pressing construction.

Keywords : pre-embedded anchor bars; anchor static pressure piles; the bond strength between anchor bars and concrete; anchorage length; anchorage pull-out resistance

引言

在预埋锚筋压桩工程中, 锚筋的设计至关重要。锚杆静压桩及免配重静压斜桩利用锚固于基础中的锚杆(锚筋)提供反力实施压桩。预埋锚筋作为连接压桩设备与基础或冠梁的关键部件, 其设计的合理性直接影响到压桩工程的整体性能。目前, 虽然预埋锚筋有相关的施工规范和经验做法^[1-2], 但在压桩工程中计算锚筋的锚固长度往往过长。目前, 对于预埋锚筋的设计验算方法, 仍缺乏系统深入的研究与总结。本文旨在通过对压桩预埋锚筋设计验算方法的探究, 为工程实践提供更科学、准确的设计依据。

一、预埋锚筋概述

锚杆静压桩是将锚杆与静力压桩相结合的一种施工方法。在施工过程中, 先在基础上预埋锚筋, 或在基础上钻孔植入锚筋, 然后通过锚筋将压桩设备与基础连接, 利用压桩设备的压力将桩

压入地基土中。预埋锚筋在锚杆静压桩中承担着传递压桩反力的关键作用。在老旧建筑的基础加固工程中, 由于场地狭窄等原因, 大型打桩设备难以进入, 锚杆静压桩凭借其所用机具简单、可在狭小空间作业的优势被广泛应用^[3-5], 此时预埋锚筋的可靠设计就成为保证加固效果的关键因素。

作者简介: 陈希铭(1995—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑岩土工程设计、研究等。

二、预埋锚筋设计相关理论

(一) 锚固长度理论

锚固长度是指受力钢筋依靠其表面与混凝土的粘接作用或端部构造的挤压作用而达到设计承受应力所需要的长度。对于压桩预埋锚筋，锚固长度的确定直接关系到锚筋能否有效地将桩的荷载传递给基础。根据钢筋与混凝土之间的粘结锚固理论，钢筋在混凝土中的锚固力主要由三部分组成：摩擦力、机械咬合力和机械锚固力。

摩擦力是钢筋与混凝土之间因相互挤压而产生的沿钢筋表面的阻力；机械咬合力则是由于钢筋表面的凹凸不平或变形钢筋的肋纹与混凝土之间形成的相互咬合作用；机械锚固力通常通过在钢筋端部弯钩、弯折，或在锚固区焊接短钢筋、短角钢等方法来提供。

(二) 抗拔力理论

锚固抗拔力是指预埋锚筋在承受拉拔力时，能够抵抗拔出的能力。其主要由锚筋与混凝土之间的粘结力、锚筋自身的抗拉强度以及可能存在的附加锚固措施所提供的抗力组成。当拉拔力作用于预埋锚筋时，首先通过锚筋与混凝土之间的粘结力将力传递给混凝土，如果粘结力不足以抵抗拉拔力，则锚筋会开始滑动，此时锚筋自身的机械咬合力开始发挥作用。在一些特殊设计中，可能会采用设置弯钩、机械锚固等附加锚固措施，这些措施能够进一步增加锚固抗拔力。

(三) 影响因素分析

众多因素会对预埋锚筋的锚固长度产生影响。混凝土强度等级是一个关键因素，混凝土强度越高，其与锚筋之间的粘结性能越好，所需的锚固长度就可以相对缩短。钢筋的种类和直径也会影响锚固长度，精轧螺纹钢、带肋钢筋由于其表面的肋纹能增强与混凝土的机械咬合力，相比光圆钢筋，在相同条件下所需的锚固长度更短。

钢筋直径越大，在考虑充分利用钢筋抗拉强度时，为保证相同的粘结锚固效果，其锚固长度要求也越长。在抗拔力相同的情况下，钢筋直径越大，其锚固长度要求越短。

此外，构件的受力状态、环境条件等也会对锚固长度产生影响。在抗震设防地区，考虑到地震作用下结构的反复受力，对锚筋锚固长度的要求会更加严格；在有侵蚀性介质的环境中，为防止钢筋锈蚀影响锚固性能，也可能需要适当增加锚固长度。

三、锚固抗拔力理论

(一) 基于规范计算模型

目前，用于计算锚固抗拔力的模型有多种。常见的有基于粘结滑移理论的模型，该模型通过建立钢筋与混凝土之间的粘结滑移本构关系，来计算在不同拉拔力作用下锚筋的位移和抗拔力。

根据规范和理论研究，对于普通钢筋在混凝土中的锚固长度，当考虑充分利用钢筋的抗拉强度时，锚固长度计算公式^[1]：

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (1)$$

式中： l_{ab} 为基本锚固长度； α 为形状系数； f_y 为钢筋抗拉强度设计值； f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； d 为锚固钢筋直径。

对于由锚板和对称配置的直锚筋所组成的受力预埋件，只受法向拉力时，法向拉力计算公式^[1]：

$$N \leq 0.8\alpha_b f_y A_s \quad (2)$$

式中： N 为作用在预埋件上的法向拉力设计值； α_b 为锚板弯曲变形折减系数，当采取防止锚板弯曲变形的措施时，取1.0； f_y 为钢筋的抗拉强度设计值， A_s 为锚筋的总截面积。

这些计算模型在实际工程应用中，需要根据具体的工程情况进行合理选择和修正，以确保计算结果的准确性。

四、预埋锚筋设计验算方法

(一) 预埋锚筋锚固长度设计

1. 基于规范公式的粘结强度确定方法

现有规范并没有直接提供钢筋与混凝土的粘结强度设计值，但可以用规范中基本锚固长度计算公式^[1]进行反算出钢筋与混凝土的粘结强度。其本质是钢筋的拉力等于混凝土提供的粘结力总和，公式可表示为：

$$F = \pi d l_{ab} f_b \quad (3)$$

式中： F 为钢筋的拉力； πd 为锚固钢筋的周长； l_{ab} 为锚固长度； f_b 为混凝土与钢筋粘结强度。

2. 混凝土与带肋钢筋粘结强度

混凝土与带肋钢筋的粘结强度，反算方法如下：

首先，假定设计条件，计算出基本锚固长度。其次，考虑充分利用钢筋的抗拉强度，可把钢筋抗拉力做为拉力设计值。最后，根据粘结强度理论，反算出带肋钢筋与混凝土的粘结强度。

例如：直径25mm带肋钢筋（ $f_y=360\text{MPa}$ ），外形系数 α 取0.14，在C30混凝土（ $f_t=1.43\text{MPa}$ ）中基本锚固长度 l_{ab} 为： $l_{ab}=0.14 \times 360 / 1.43 \times 25=881\text{mm}$ 。

钢筋的抗拉力设计值 F 为： $F=3.14 \times 25 \times 25 / 4 \times 360=176724\text{N}$ 。

带肋钢筋与C30混凝土的粘结强度设计值为： $f_{bd}=176724 / (3.14 \times 25 \times 881) = 2.55\text{MPa}$

同理，采用不同强度等级的混凝土进行反算，可得：

表1 混凝土与带肋钢筋粘结强度设计值一览表

混凝土强度等级	C25	C30	C35	C40	C45
f_t (MPa)	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
f_{bd} (MPa)	2.27	2.55	2.80	3.05	3.21

注： f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； f_{bd} 为混凝土与带肋钢筋粘结强度设计值。

3. 混凝土与精轧螺纹钢粘结强度

大吨位锚杆静压桩锚筋常用精轧螺纹钢，考虑到精轧螺纹钢的螺纹与带肋钢筋的螺纹不一致。外形系数 α 直接反映钢筋表

面肋形对粘结性能的增强效果，精轧螺纹钢因肋高更高、间距更密，其 α 值小于普通带肋钢筋，表明其粘结强度更高，锚固长度需求更短。参考规范取值，螺旋肋类型外形系数 α 可取0.13。根据上述反算方法，采用不同强度的混凝土进行反算，可得：

表2混凝土与精轧螺纹钢粘结强度设计值一览表

混凝土强度等级	C25	C30	C35	C40	C45
f_t (MPa)	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
f_{bj} (MPa)	2.65	2.98	3.27	3.56	3.75

注： f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； f_{bj} 为混凝土与精轧螺纹钢粘结强度设计值。

4. 混凝土与预埋锚筋粘结强度

根据上述方法，得出的结果是粘结强度设计值，锚杆静压桩、免配重静压斜桩的锚筋是属于短暂设计工况，基于规范及工程实践经验，结构重要性系数可取0.9考虑，因此用在设计锚筋时，粘结强度可以考虑在上表的基础上放大。放大后粘结强度设计值如下表。

表3混凝土与预埋锚筋粘结强度设计值一览表

混凝土强度等级	C25	C30	C35	C40	C45
f_t (MPa)	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
f'_{bd} (MPa)	2.52	2.84	3.12	3.39	3.57
f'_{bj} (MPa)	2.71	3.06	3.35	3.65	3.85

注： f'_{bd} 为混凝土与压桩带肋钢筋锚筋粘结强度设计值； f'_{bj} 为混凝土与压桩精轧螺纹钢锚筋粘结强度设计值。

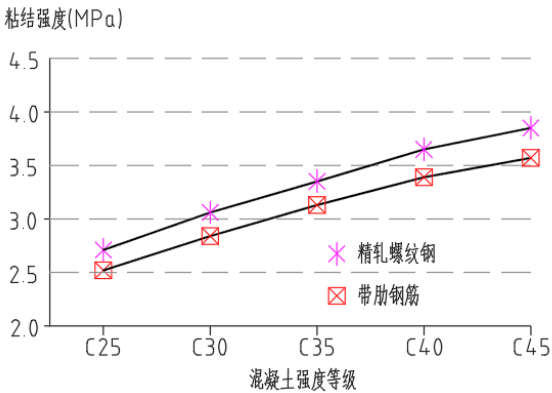


图1 不同钢筋类型粘结强度对比

从以上对比图可以看出，混凝土强度等级越高，粘结强度设计值越大，呈显著的正相关关系。粘结强度的增加值随混凝土强度提高而略有减缓，属非线性增长。

5. 锚固长度的修正

在实际工程中，在当基础厚度受限时，还需要考虑一些特殊因素对锚固长度进行修正。按现行规范^[1]常用的修正做法有：

当基础混凝土保护层厚度较大时，钢筋与混凝土之间的粘结性能会有所改善，此时可适当减小锚固长度。根据规范规定，当保护层厚度大于3d时，锚固长度可乘以修正系数0.8。

当钢筋末端采用弯钩或机械锚固措施，且符合规定时，锚固长度可乘以修正系数0.6。

锚固长度修正还需考虑带肋钢筋直径、涂层、施工扰动等情况。

(二) 压桩预埋锚筋杆体设计

锚筋杆体可以选用精轧螺纹钢、带肋钢筋等作为受拉锚杆。精轧螺纹钢强度高，表面具有外旋的螺纹在任何位置裁断进行螺母或者其它工具连接，施工操作便捷，作为受拉锚筋杆体具有效率高、成本低等优点，优先选用精轧螺纹钢作为受拉锚杆。

$$F = K_b \frac{P_p}{N} \quad (4)$$

式中： F 为锚筋杆体抗拉设计值； K_b 为锚筋杆体抗拉安全系数； P_p 为设计最大压桩力； N 为锚筋根数。

表4精轧螺纹钢杆体抗拉承载力设计值一览表

直径	截面积	杆体抗拉承载力设计值 (kN)			
(mm)	(mm ²)	PSB785	PSB830	PSB930	PSB1080
18	254.5	200	211	237	275
25	490.9	385	407	457	530
32	804.2	631	667	748	869
40	1256.6	986	1043	1169	1357

注：PSB785、PSB830、PSB930、PSB1080表示精轧螺纹钢级别。

五、工程应用案例分析

(一) 案例分析

某厂房项目，由于场地地质条件复杂，基坑开挖到底后基础柱出现了断桩、偏桩的情况，需要进行补桩处理。经过综合比选，决定采用大吨位锚杆静压桩进行补桩加固。该区域基础为钢筋混凝土筏板基础，筏板厚度850mm，混凝土强度等级为C35。设计要求压入的预制管桩桩直径为500mm，单桩竖向承载力特征值为1600kN，最大压桩力为3200kN。

根据工程要求，选用精轧螺纹钢作为预埋锚筋，布置12根锚筋，单根锚筋杆体抗拉力值为3200/12=267kN。

选直径25mm的锚筋试算锚固长度： $l_{ab}=267 \times 10^3 / 3.14 \times 25 \times 3.35=1041\text{mm}$ ，大于筏板厚度850mm，不满足工程要求。

选直径32mm的锚筋试算锚固长度： $l_{ab}=267 \times 10^3 / 3.14 \times 32 \times 3.35=792\text{mm}$ ，计算锚固长度小于筏板厚度，可满足工程要求。



图2 预埋锚筋布置实景图

锚筋杆体设计验算按照前文所述的方法，计算锚筋杆体抗

拉设计值： $F=1.2 \times 3200/12=320\text{kN}$ 。查表4，直径32mm，PSB785级精轧螺纹钢杆体抗拉承载力设计值为631kN>320kN，满足要求。同时，其所需锚固长度792mm<筏板厚度850mm，也满足要求。

因此，最终设计选用直径32mm，PSB785级别精轧螺纹钢，布置12根锚筋。

（二）施工过程监测

在锚杆静压桩施工过程中，通过对预埋锚筋的工作状态进行了实时监测。通过在锚筋上粘贴应变片，测量锚筋在压桩过程中的应力变化。同时，使用位移监测设备对桩顶和基础的位移进行监测。监测数据显示，在压桩初期，锚筋应力随着压桩力的增加而逐渐增大，但增长速率较为稳定；当压桩力接近最大压桩力时，锚筋应力增长速率略有加快，但仍在设计允许范围内。桩顶和基础的位移也在设计控制值以内，表明预埋锚筋的设计能够满足压桩施工的要求。

（三）效果评估

压桩施工完成后，对基础进行了承载力试验，检测结果表明，单桩竖向承载力满足设计要求。通过对预埋锚筋的外观检查，未发现锚筋有明显的变形、滑移或开裂现象。将实际监测数据与设计计算结果进行对比分析，两者基本吻合，验证了本文所提出的压桩预埋锚筋设计验算方法在实际工程中的可行性和准确性。

六、结论

本文通过对压桩预埋锚筋设计验算方法的深入研究，得出以下结论：

(1) 详细阐述了预埋锚筋在锚杆静压桩和免配重静压斜桩中的重要作用及受力特点，明确了其设计对于压桩工程稳定性的关键意义。

(2) 深入分析了锚固长度和锚固抗拔力的相关理论，包括其基本原理、组成部分以及影响因素等，为设计验算方法的建立提供了坚实的理论基础。

(3) 本文通过反算得出混凝土与锚筋粘结强度设计值，按锚筋实际受力进行设计验算，提出了一套完整的压桩预埋锚筋设计验算方法，包括锚固长度的理论公式计算，以及锚筋杆体抗拉设计验算方法，为工程设计提供了科学、准确的手段。

(4) 通过实际工程案例分析，验证了所提出的设计验算方法在实际应用中的可行性和有效性，计算结果与监测数据及工程效果基本相符。

在未来的研究中，可以进一步考虑复杂受力条件和特殊荷载工况下对压桩预埋锚筋设计的影响，完善设计理论和方法。同时，结合新型材料和施工工艺的发展，探索更优化的预埋锚筋设计方案，以推动压桩工程技术的不断进步。

参考文献

- [1] GB50010-2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [2] JGJ 123-2012 既有建筑地基基础加固技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
- [3] 詹金陵，水伟厚，宋美娜，石宝锋. 软土地区锚杆静压桩施工问题及解决方案 [J]. 岩土工程学报，2010，32(S2):566-569.
- [4] 李明. 软土地区高层建筑桩基加固技术的应用研究 [J]. 地基处理，2023，5(06):512-518.
- [5] 吴文龙. 超大吨位锚杆静压桩在高层建筑基础加固中的应用 [J]. 地基处理，2024，6(05):497-502.

角度尺校准方法及其不确定度分析

李薇

江苏金陵机械制造总厂, 江苏 南京 210007

DOI:10.61369/ERA.2026010021

摘 要 : 角度尺是工程、制造等领域常用测量器具, 精准的角度尺校准办法对保障测量精准度意义重大。本文探究角度尺校准的基本原理、操作步骤, 还对比不同校准方法, 着重剖析实际应用里角度尺测量不确定度及其根源, 经实验验证与数据分析, 给出改进校准方式的建议, 并对其不确定度展开系统分析, 研究显示, 恰当选取校准方法、提升测量设备精度, 能有效减小角度尺测量误差, 提高角度测量的精确性。

关 键 词 : 角度尺; 校准方法; 不确定度分析; 测量精度; 误差分析

Calibration Method for Angle Gauges and Its Uncertainty Analysis

Li Wei

Jiangsu Jinling Machinery Manufacturing General Factory, Nanjing, Jiangsu 210007

Abstract : Angle gauges are commonly used measuring instruments in fields such as engineering and manufacturing, and precise calibration methods for angle gauges are of great significance in ensuring measurement accuracy. This paper explores the fundamental principles and operational steps of angle gauge calibration, compares different calibration methods, and focuses on analyzing the measurement uncertainty of angle gauges in practical applications and its sources. Through experimental verification and data analysis, recommendations are provided for improving calibration methods, along with a systematic analysis of their uncertainty. The study reveals that selecting appropriate calibration methods and enhancing the precision of measuring equipment can effectively reduce measurement errors in angle gauges and improve the accuracy of angle measurements.

Keywords : angle gauges; calibration methods; uncertainty analysis; measurement accuracy; error analysis

引言

角度尺作为角度测量器具, 在各类精密制造与工程设计领域应用广泛; 科技进步与测量需求提升, 使传统角度尺在高精度测量上的局限逐渐显现, 准确校准方法的重要性愈发凸显, 角度尺校准方法关乎测量结果准确性, 也与测量误差、不确定度紧密相连。为应对实际应用中的这些难题, 本文剖析角度尺校准原理与方法, 探讨不同校准技术, 同时着重强调不确定度分析在角度尺校准中的应用, 以期提升角度尺测量精度提供理论支撑与技术助力。

一、角度尺的基本原理与应用

(一) 角度尺的工作原理

角度规是常用于精准测定物体间夹角的器具, 一般由刻度盘和测量杆构成, 其运行原理源于几何学里的角度量测原理, 具体是借助测量两条相交线间的夹角来明确角度大小, 角度规上的刻度盘标注着不同的角度数值, 使用者通过调整测量杆与被测物体对齐, 读取和标准刻度一致的角度数值, 其精准度主要取决于其刻度的精细度以及测量杆的平行状况, 制造工艺和使用环境也会对精准度造成影响。

当代角度规通常采用钢或铝合金这类高强度、稳定性佳的材

料, 这些材料既能降低外部力和温度变化带来的影响, 又能提升整体测量的稳定性与可靠性, 依照不同的设计和用途, 角度规的精准度可达到1' (分) 甚至更高, 部分高精度角度规的精准度能达到0.001°, 从而满足航空航天、光学等高精度量测领域的需求。

(二) 角度尺在实际测量中的应用领域

角度规在机械制造、精密仪器、建筑工程、科学实验等多个领域均有广泛应用, 在机械制造领域, 角度规主要用于零件加工时的角度量测与校准, 保证加工精度契合设计要求, 避免因角度偏差引发的装配问题; 在建筑工程中, 角度规用于结构构件的角度量测与调整, 确保建筑物结构的稳定性并符合设计规范。

在光学实验和天文观测等科学实验领域, 精确的角度量测极

为关键，角度规被大量用于光学元件的调节、天体的定位等高精度量测任务；另外，角度规在机械加工、船舶制造等行业也有广泛应用，这些行业在量测角度时对精度要求严格。依据国际标准 ISO 1302:2002 和 DIN 874 - 1 标准，角度规的精度要求因应用范畴而异，一般来说，精密工程要求角度规的误差控制在 $\pm 0.1^\circ$ 以内，以保障量测的准确性和可重复性。

（三）角度尺校准的必要性

角度尺校准是保障测量精度的重要步骤，长期使用，角度尺易受温度改变、机械磨损、环境状况及外力作用等因素干扰，这些都可能致使其测量精度出现偏差，因此定期校准角度尺很有必要，可将角度尺与标准量具或已知精度的参考仪器对比，测量并调整其误差，让测量结果契合设计标准。

校准期间一般使用高精度校准工具（如标准角度块、激光干涉仪或自动化光学测量系统等）保证结果准确，依据国际计量组织（BIPM）《国际单位制》及 ISO 9001:2015 质量管理体系要求，角度尺校准周期需根据使用频率和环境确定（通常一年一次），定期校准能有效消除环境变化、设备老化等外部因素对测量结果的影响，提升角度尺测量精度，保证角度测量的高可靠性，在高精度工程和科研项目中尤为重要^[1]。如图1所示。

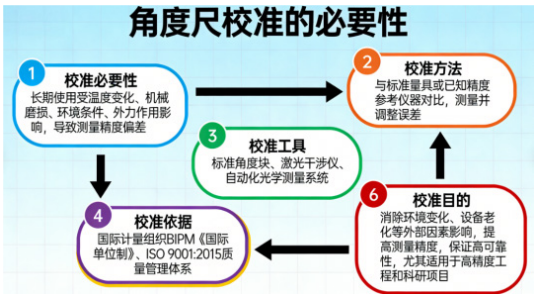


图1 角度尺校准工作逻辑图

二、角度尺的校准方法

（一）基于标准角度块的校准方法

标准角度块多由高精度金属材料制成，角度值经严格测量且有固定公差范围，校准时将角度尺与标准角度块置于精密测量平台对比，调整使其指示与标准角度块值相符，进而进行误差测量与调整。

ISO 3650 标准对标准角度块的精度要求和应用范围作出规定，该方法简单直观、不依赖复杂电子设备，在传统制造环境中广泛应用，但受标准角度块精度和温度等环境因素限制，通常用于精度 $\pm 0.1^\circ$ 至 $\pm 0.02^\circ$ 的中等测量任务（具体依标准角度块等级而定）^[4]。

（二）基于激光干涉仪的校准方法

激光干涉仪校准法借助激光干涉效应，测量激光束相位差来明确角度尺精度，其位置测量误差常控制于纳米级，精度可达 $\pm 0.001^\circ$ 甚至更高；将角度尺与激光干涉仪对准，运用激光干涉原理可测量实际角度与标准角度的差异，进而实现高精度校准。

激光干涉仪的应用需依照 ISO 10360-10 标准，要求校准系统稳定性和精度达一定标准以确保精准测量角度尺偏差；其优势在于高精度与自动化，能大幅提高校准效率，特别适用于高精度测量任务，针对高精度角度尺误差可控制在 $\pm 0.001^\circ$ ，契合精密仪

器、航空航天及高端制造业需求，但成本高且对环境条件敏感，限制了其广泛应用^[3]。

（三）校准中的误差源分析与控制

角度尺校准期间，分析与控制误差源对保障测量精度颇为重要。常见误差源有机械误差、温度误差、环境振动和操作误差，其中机械误差多源于角度尺自身结构缺陷，如刻度盘偏移、臂弯曲等情况；温度变化会使金属材料膨胀或收缩，进而改变角度尺测量精度；环境振动可能造成测量平台不稳定，影响角度测量的精准度。

要有效控制这些误差，需采取对应校准手段，包括校准前对角度尺预热以消除温度影响、保证校准环境稳定防止震动和空气流动干扰、采用多次测量法取平均值降低偶然误差。此外，操作人员的技术水准和校准设备的准确性也会影响结果，因此校准人员需具备较高专业技能与丰富经验^[4]。如表1所示。

表1 校准误差源分析与控制方法表

误差源	影响因素	控制方法	误差范围
机械误差	角度尺结构不精确	定期检查与调整	$\pm 0.05^\circ$ 至 $\pm 0.1^\circ$
温度误差	环境温度变化	校准前进行温度稳定化处理	$\pm 0.1^\circ$
振动误差	测量平台震动	设置稳定的测量环境	$\pm 0.02^\circ$
操作误差	校准人员操作不当	提高操作人员的技术要求	$\pm 0.02^\circ$

三、角度尺的测量不确定度分析

（一）不确定度的定义与来源

测量里，不确定度指测量结果和真实值间可能存在的偏差范围，体现测量过程因各类因素引发的误差大小与不确定性，按照国际单位制（SI）定义，不确定度常以测量值的标准差或扩展不确定度量化，角度尺测量时，不确定度来源主要有设备误差、环境因素、操作误差以及系统性误差等。

设备误差由角度尺刻度精度和机械结构不完善导致，比如刻度偏差或材料微小变形会影响角度测量结果，环境因素，像温度变化、湿度和空气振动等，也会对测量有影响，特别是高精度测量中，温度变化使角度尺尺寸改变带来的影响不容忽视，操作误差包含操作人员测量技巧和仪器对准误差等，系统性误差主要源于角度尺校准不足或使用不当^[5]。

（二）测量不确定度的计算方法

测量不确定度计算常运用标准不确定度和扩展不确定度概念，标准不确定度是单一测量不确定性的量化值，一般通过测量结果的标准差计算，扩展不确定度是将标准不确定度乘上一个覆盖因子（通常是2）得出，该因子用于考量高置信度下的不确定度范围，具体计算可依据误差来源，用误差传播公式把各个独立误差源的标准不确定度组合起来。

例如，假定角度尺测量结果含三个误差源：设备误差、环境误差和操作误差，各误差源的标准不确定度分别为 u_1 、 u_2 和 u_3 ，那么总的标准不确定度 u 计算公式为：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

采用此方法能得出测量结果的总不确定度，还可按需选取合适的覆盖因子确定扩展不确定度；高精度角度尺的标准不确定度通常能控制在 0.001° 至 0.01° ，精密测量时，扩展不确定度可达

±0.02°^[6]。

（三）不确定度对角度测量结果的影响

不确定度对角度测量结果影响显著，即便角度尺自身精度较高，不确定度也会使测量值与真实值出现偏差；比如在高精度制造里，测量误差和不确定度或许会直接影响零件加工质量与装配精度，航空航天领域对角度测量精度要求极高，哪怕微小不确定度也可能造成测量结果偏差，进而影响设计与操作安全。

以某高精度角度尺为例，若其标准不确定度为 ±0.002°，测量小角度时可能引发较大比例误差：像测量10° 角度，误差为0.002°；测量大角度如100° 时，误差绝对值为0.02°，占总角度0.02%；这种误差在精密领域，特别是航空航天和光学仪器制造中，可能引发较严重后果^[7]。如表2所示。

表2 角度尺测量不确定度来源及其影响表			
误差来源	误差类型	标准不确定度（°）	影响
设备误差	刻度偏差	±0.005	中等
温度变化	材料膨胀	±0.003	中等
操作误差	人为操作偏差	±0.001	小
环境振动	外部震动	±0.002	小

四、角度尺校准改进及优化方法

（一）新型校准方法的提出与实验验证

测量技术持续进步，传统角度尺校准方法渐难满足高精度需求。于是，一种融合光学干涉法与激光干涉技术的新型校准方法被提出，此方法把角度尺与激光干涉仪配合使用，借助激光干涉的高精度测量能力校准角度尺，激光干涉仪在其中具备纳米级测量精度，通过检测反射光束相位变化来察觉角度尺误差，大幅提升了校准精度。

实验验证显示，用该方法校准后，角度尺测量误差可控制在±0.001° 以内，较传统标准角度块法精度提升一个数量级，尤其在航空航天与高端制造行业，精度提升可保障更严格质量控制标准达成。依据 ISO 17025:2017 标准，测量设备校准精度需使误差不超最大允许误差的1/3，该方法显著提高校准精度，得以满足更高行业标准要求^[8]。

（二）优化校准流程与减少不确定度

角度尺校准中，降低不确定度对提升测量精度至关重要，是保证几何量测量数据精准可靠的前提；优化校准流程可有效减少操作误差和环境因素导致的不确定度，可从设备、流程、人员多维度建立误差防控体系。优化校准设备选择时采用稳定性高的激光光源与精密定位平台，使设备在校准中处于最佳状态，避免设备

自身精度不足引发系统偏差；改进校准流程里的环境控制也是减少不确定度的重要举措，如保持恒温以避免温度波动影响角度尺材料膨胀，控制湿度与振动干扰，营造稳定校准环境。

为进一步减少不确定度，可实施多次测量法，用统计学中的最小二乘法处理测量数据，综合多个测量值减少随机误差，增强数据结果稳定性；此过程中，操作人员要对校准各环节标准化，严格按操作规程执行校准步骤，减少人为误差，优化后的校准流程结合现代测量设备与数据分析方法，能把角度尺总不确定度降至 ±0.002° 以内，大幅提高测量结果的可靠性与一致性^[9]。

（三）未来发展方向及研究建议

未来，工业和科研对测量精度要求持续攀升，角度尺校准技术会朝着高精度、高自动化和智能化迈进，以契合智能制造、航空航天等高端领域对几何量测量的严格要求。激光干涉技术不断发展，激光干涉仪精度有望进一步提升至亚微米级，搭配高精度光学成像与信号处理模块，可让角度尺校准精度更上一层楼。智能化校准设备出现，极大简化校准流程，它集成自动定位、数据采集与分析功能，经自动化角度测量与校准。

未来研究可着重多源数据融合技术应用，把激光、光学和数字测量技术相结合，建立多维度误差补偿模型，开发高效多维度校准方法，此方法能在复杂环境中有效抵御温湿度、振动等干扰，提供稳定可靠测量数据，依据 ISO 9001:2015 质量管理体系要求，未来角度尺校准方法需满足自动化和高精度需求，为产业升级提供精准测量技术支撑^[10]。如表3所示。

表3 不同角度尺校准方法及其精度比较表			
校准方法	精度（°）	优点	局限性
标准角度块法	±0.1°	简单易行，成本低	精度有限，环境依赖性强
激光干涉法	±0.001°	高精度，适应性强	设备成本高，操作复杂
新型光学干涉法	±0.0005°	极高精度，适合高端应用	需要复杂设备和环境控制

五、结语

本文探讨角度尺校准方法及其不确定度分析，提出新型校准方法，优化现有流程，采用激光干涉法与光学干涉技术结合大幅提高校准精度，适用于高端制造与科研领域，优化校准流程后减少不确定度，增强测量结果可靠性，未来随技术进步角度尺校准会更自动化、智能化，满足更高精度需求，为高精度制造与科研提供可靠技术支持。

参考文献

[1] 陈晓丹. 通用角度尺校准过程中的问题与解决方案 [J]. 质量与市场, 2025(10): 78–81.
[2] 郭茜, 陈晓杰. 可测量对称度的万能角度尺的设计 [J]. 机械制造, 2022, 60(06): 72–74+87.
[3] 王玉珍, 贺小军, 张磊. 基于容栅技术的数显角度尺的研发 [J]. 传感器世界, 2021, 27(03): 15–19.
[4] 张成勇. 角度尺测量法在高龄股骨转子间骨折假体置换中的应用及研究 [D]. 河南大学, 2018.
[5] 赵荣庆, 李斌强. 卡尺和内径千分尺在高精度质量控制中的应用与误差分析 [J]. 产品可靠性报告, 2025(10): 93–94.
[6] 徐阳, 隋斌, 孙建伟. 量具设计中的误差分析与补偿策略研究 [J]. 中国设备工程, 2025(01): 195–197.
[7] 罗先念. 数显角度尺的校准方法及角度示值误差的不确定度评定 [J]. 计量与测试技术, 2020, 47(10): 113–115.
[8] 李宝玉. 错边检验尺校准方法探讨 [J]. 品牌与标准化, 2025(03): 220–222.
[9] 徐阳, 隋斌, 孙建伟. 量具设计中的误差分析与补偿策略研究 [J]. 中国设备工程, 2025(01): 195–197.
[10] 马世东. 多反射极相位补偿型容栅传感器位移测量方法及实验研究 [D]. 西安理工大学, 2024.

岩土工程施工中注浆技术的应用策略

黄卫林^{1,2}

- 江苏省环境地质调查大队，江苏 南京 210000
 - 江苏省地质工程勘察院有限公司，江苏 南京 210000
- DOI:10.61369/ERA.2026010034

摘 要： 本文系统探讨岩土工程施工中注浆技术的应用策略，解析注浆技术原理与分类，结合不同地质条件下的应用场景，从施工工艺优化、材料选择、设备配置等维度提出针对性策略。通过典型工程案例分析注浆效果，探讨质量控制要点与常见问题解决方法，展望注浆技术智能化、绿色化发展趋势，为岩土工程注浆施工提供理论与实践指导。

关 键 词： 岩土工程；注浆技术；应用策略；地质条件；质量控制

Application Strategies of Grouting Technology in Geotechnical Engineering Construction

Huang Weilin^{1,2}

- Jiangsu Provincial Environmental Geological Survey Team, Nanjing, Jiangsu 210000
- Jiangsu Provincial Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper systematically explores the application strategies of grouting technology in geotechnical engineering construction, analyzing the principles and classifications of grouting technology. Combining application scenarios under different geological conditions, targeted strategies are proposed from the dimensions of construction process optimization, material selection, and equipment configuration. Through the analysis of grouting effects in typical engineering cases, the paper discusses key points of quality control and solutions to common problems, and looks forward to the development trends of intelligent and green grouting technology, providing theoretical and practical guidance for grouting construction in geotechnical engineering.

Keywords： geotechnical engineering; grouting technology; application strategies; geological conditions; quality control

引言

在岩土工程领域，注浆技术作为一种高效的岩土加固、防渗止水手段，广泛应用于基坑支护、隧道施工、地基处理等工程场景。随着城市化进程加快和基础设施建设规模扩大，复杂地质条件下的工程建设需求日益增长，对注浆技术的适应性、可靠性和环保性提出了更高要求。本文结合注浆技术原理与工程实践，深入探讨其在不同工况下的应用策略，旨在提升岩土工程施工质量与安全性，推动注浆技术的创新发展。

一、注浆技术原理与分类

（一）技术原理

注浆技术通过压力将特定浆液注入岩土体孔隙、裂隙或空洞中，填充、胶结岩土颗粒，改善岩土体物理力学性能，达到加固、防渗、堵漏等目的。浆液在岩土体中的扩散方式主要包括渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆和喷射注浆，其作用机制与岩土体结构、浆液特性及注浆压力密切相关。^[1,2]

（二）技术分类

1. 按浆液材料分类

水泥注浆：以水泥为主要原料，辅以粉煤灰、矿渣等掺合料，成本低、耐久性好，适用于粗颗粒地层加固。

化学注浆：采用环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸盐等化学浆液，流动性高、凝结速度快，适用于细颗粒地层防渗堵漏。

复合注浆：结合水泥浆与化学浆液优势，如水泥 - 水玻璃双液浆，可调节凝结时间，适用于复杂地质条件。

2. 按注浆工艺分类

静压注浆：通过注浆泵缓慢加压，浆液以渗透或劈裂方式扩散，适用于稳定地层加固。

高压喷射注浆：利用高压喷嘴将浆液高速喷射，切割岩土体并形成固结体，适用于软弱地层加固与止水帷幕构建。

真空注浆：在负压环境下注入浆液，提高浆液渗透效率，减少注浆压力对周边环境的影响。

二、不同地质条件下的注浆策略

（一）松散砂层

特点：松散砂层在岩土工程中属于典型的高渗透性地层，其孔隙率通常可达 30% – 45%，渗透系数往往超过 1×10^{-2} cm/s，远超一般黏性土与粉土地层。这种特殊的孔隙结构使得砂层在地下水作用下极易发生颗粒迁移，进而引发流砂现象；在基坑开挖或隧道施工等场景中，当水力梯度超过临界值时，还会导致管涌灾害，严重威胁工程结构安全与施工人员生命安全。^[3]

策略：

注浆方法与浆液选择：渗透注浆是针对松散砂层特性的首选工艺，其作用机制基于达西定律，利用压力差驱动浆液在孔隙中渗流扩散。水泥 – 水玻璃双液浆因具备瞬时凝结特性（初凝时间可控制在 10 – 60 秒），成为该地层注浆的理想材料。

注浆压力控制：注浆压力需严格控制在 0.5 – 1.0MPa 区间，该压力范围既能保证浆液充分渗透扩散，又可避免因压力过高导致砂层结构破坏或地面隆起。跳孔注浆顺序的采用基于流体力学原理，通过间隔注浆形成压力隔离带，防止相邻孔位间的浆液窜流。

粒径与浆液配比关系：施工前的颗粒分析是精准注浆的关键环节，需采用筛分法与比重计法相结合的方式，精确测定砂层粒径分布曲线。当砂粒平均粒径大于 2mm 时，水泥浆凭借其良好的颗粒填充能力，可有效包裹砂粒形成骨架结构；而对于小于 2mm 的细砂或粉砂地层，化学浆液（如丙烯酸盐类）以其低黏度（通常低于 50mPa · s）特性，能够渗透至微小孔隙，形成高强度凝胶体。^[4]

（二）黏性土层

特点：黏性土层主要由黏土矿物颗粒组成，其颗粒粒径多小于 0.005mm，颗粒间存在大量的结合水，使得土体孔隙比极小，通常在 0.8 – 1.5 之间，渗透系数一般低于 1×10^{-6} cm/s，仅为松散砂层的万分之一甚至更低。这种致密的微观结构导致常规的渗透注浆难以实施，浆液在土体中扩散时面临极大阻力。在基坑支护、地基加固等工程中，若直接采用普通注浆方法，不仅无法达到预期的加固效果，还可能因局部压力集中引发土体隆起、地表开裂等问题。^[5,6]

策略：1. 注浆方法与加固原理：劈裂注浆是应对黏性土层特性的核心技术，其原理基于土体的抗剪强度理论。当注浆压力超过土体的劈裂强度时，浆液会沿着土体中最薄弱的部位产生劈裂面，形成脉状或网状的浆脉。这些浆脉与土体相互咬合，如同在

土体中植入“筋骨”，显著改善土体的力学性能。

2. 注浆压力与工艺控制：注浆压力需严格高于土体劈裂压力，通常控制在 1.5 – 3.0MPa 之间。由于黏性土层的压缩性较低，过高的注浆压力易导致土体过度扰动，甚至引发地面隆起等严重后果。因此，采用间歇注浆法，即注浆一段时间后暂停，待浆液在土体中初步凝固，形成一定强度的浆脉，再进行下一轮注浆。每次注浆时间间隔根据浆液凝结时间确定，一般为 1 – 2 小时。

3. 辅助措施增强效果：配合超前钻孔或振动沉管等辅助措施，能够有效增加浆液渗透通道。超前钻孔可预先在土体中形成孔洞，降低浆液注入阻力，使浆液更容易扩散；振动沉管则通过机械振动作用，在土体中形成微小裂隙，为浆液渗透创造条件。

（三）岩溶地层

特点：岩溶地层是一种受长期溶蚀作用形成的特殊地质结构，其内部发育着形态各异、规模不等的溶蚀孔洞、裂隙与管道系统。溶蚀孔洞直径小至几厘米，大可达数十米，且分布无规律，垂直深度变化大；裂隙宽度通常在毫米级到厘米级，相互交错连通，形成复杂的地下网络。这种特殊地质结构导致地基承载能力极不均匀，在建筑物荷载作用下，极易引发地基不均匀沉降，严重时可使建筑物倾斜、开裂甚至倒塌。

策略：注浆方法组合与实施要点：采用填充注浆与渗透注浆结合的方式，是应对岩溶地层复杂情况的有效策略。对于直径大于 2 米的大型溶蚀空洞，首先通过钻孔向洞内投放粗骨料，如粒径 20 – 40mm 的碎石、天然级配砂等，利用骨料的自重与堆积特性，初步填充空洞，形成骨架结构，减少后续浆液用量。待骨料填充至距洞顶 1 – 1.5 米时，再注入水泥浆或化学浆进行密封。水泥浆一般采用水灰比 0.8:1 – 1:1 的配比，通过压力作用填充骨料间隙，并与周边岩土体紧密结合；若对防渗要求较高，可选用聚氨酯、丙烯酸盐等化学浆液，利用其高渗透性与快速固化特性，封堵细微裂隙。在探测技术应用与方案制定：孔内电视成像技术是岩溶地层注浆施工的“眼睛”，通过将带有高清摄像头的探测设备下放至钻孔内，可实时获取孔壁及洞内的高清图像。该技术能够清晰辨别溶洞的形状、大小、填充物类型、裂隙走向等信息，为注浆方案制定提供直观依据。

区域协同注浆处理：对于高风险区域，如溶洞密集区、与地下水连通的溶洞群等，采用地表注浆与洞内注浆联动的方式进行全封闭处理。地表注浆通过在地面布置注浆孔，对浅层溶洞及裂隙进行预加固，形成防渗帷幕，减少地下水对注浆效果的影响；洞内注浆则在隧道、地下洞室等施工空间内，对深层溶洞进行靶向注浆。两种注浆方式需协同作业，地表注浆为洞内注浆创造稳定的施工环境，洞内注浆进一步加固地基深部结构。^[7]

三、注浆施工关键技术策略

（一）浆液配比优化

强度控制：根据工程要求确定浆液抗压强度（如地基加固需 $\geq 15\text{MPa}$ ），通过调整水泥用量、水灰比及外加剂掺量实现。

凝结时间调控：单液水泥浆凝结时间较长（初凝 $\geq 45\text{min}$ ），双液浆可通过水玻璃掺量控制在几秒至几十分钟，满足不同施工需求。

流动性设计：注浆泵吸入性要求浆液坍落度 $\geq 180\text{mm}$ ，渗透注浆时需更低黏度（如化学浆液黏度 $\leq 200\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）。

（二）注浆参数设计

注浆压力：遵循“先低后高、分级升压”原则，初始压力 $0.3\text{--}0.5\text{MPa}$ ，逐步增至设计压力，避免冒浆或地层抬升。

注浆量：按公式 $Q = \pi r^2 h n \alpha \beta$ 计算（ r 为扩散半径， h 为注浆段高度， n 为孔隙率， α 为浆液填充系数， β 为损耗系数），实际施工中需根据注浆压力变化动态调整。

注浆速度：静压注浆速度控制在 $5\text{--}30\text{L/min}$ ，高压喷射注浆喷嘴流速 $\geq 200\text{m/s}$ ，确保浆液有效切割岩土体。

（三）设备选型与配置

注浆泵：水泥浆宜用柱塞泵（压力可达 10MPa 以上），化学浆用齿轮泵或螺杆泵（避免腐蚀）。

搅拌机：高速搅拌机（转速 $\geq 1200\text{r/min}$ ）确保浆液均匀，双液浆需配备独立搅拌系统。^[8]

监测仪器：安装压力传感器、流量计实时监测注浆参数，采用 GPS 或全站仪监测地表变形。

四、注浆工程质量控制与常见问题处理

（一）质量控制要点

1. 施工前控制：复核地质勘察报告，开展现场注浆试验，确定最佳施工参数。

检查注浆设备运行状态，确保管路密封性和计量准确性。

2. 施工中控制：严格按设计孔位、角度钻进，偏差 $\leq 5\%$ 。

记录注浆压力、流量、浆液用量等参数，出现异常及时停机分析。

3. 施工后控制：采用静力触探、钻孔取芯、压水试验等方法检测注浆效果，合格标准为承载力提升 $\geq 30\%$ 、渗透系数 $\leq 10^{-6}\text{cm/s}$ 。^[9,10]

（二）常见问题与处理方法

问题类型	成因分析	处理策略
注浆压力骤升	管路堵塞或地层密实	停机清洗管路，改用稀浆冲通；调整注浆顺序，先注相邻孔释放压力。
地面冒浆	注浆压力过高或地层薄弱	降低注浆压力，采用间歇注浆；在冒浆点埋设导管引流，待浆液初凝后封堵。
浆液串孔	孔距过小或地层裂隙贯通	增大孔距，采用隔孔跳注；对串浆孔同时注浆或封闭串浆孔。
注浆量超限	地层空隙率大或浆液漏失	填入粗骨料填充大空隙，改用浓浆或双液浆；核查地质资料，调整注浆设计。

五、典型工程案例分析

（一）案例一：某地铁隧道穿越砂层注浆加固

工程概况：隧道埋深 15m ，穿越厚度 8m 的松散砂层，地下水水位埋深 5m ，需控制地表沉降 $\leq 30\text{mm}$ 。

注浆方案：采用袖阀管注浆工艺，孔距 1.5m ，排距 1.2m ，梅花形布置。

浆液为水泥 - 水玻璃双液浆（水灰比 $1:1$ ，水玻璃浓度 $35\text{Be}'$ ，体积比 $1:1$ ），初凝时间 $15\text{--}20\text{s}$ 。

注浆压力从 0.5MPa 逐步升至 1.2MPa ，注浆量约 $2.8\text{m}^3/\text{孔}$ 。

效果评估：地表最大沉降 22mm ，满足设计要求；砂层标贯击数从 8 击提高至 18 击，承载力提升 120% 。

（二）案例二：某高层建筑岩溶地基处理

工程概况：地基下伏岩溶区，溶洞高度 $0.5\text{--}5.0\text{m}$ ，顶板厚度不足 3m ，需消除地基不均匀沉降风险。

注浆方案：先对大溶洞（高度 $> 2\text{m}$ ）填充 $\text{C}20$ 混凝土，再采用水泥浆压力注浆（水灰比 $0.8:1$ ）。

注浆孔深至溶洞底板以下 1m ，间距 3m ，注浆压力 $2.0\text{--}3.5\text{MPa}$ 。

施工中采用孔内 CT 扫描监测浆液扩散范围，调整注浆参数。

效果评估：复合地基承载力特征值达 300kPa ，满足设计要求；沉降观测显示最大差异沉降 $< 0.002\text{L}$ （ L 为相邻柱距）。

六、注浆技术发展趋势与挑战

（一）智能化注浆技术

智能监测与控制：集成物联网（IoT）、大数据分析技术，实时监测注浆参数并自动调整注浆工艺，如根据压力变化动态调节浆液配比。

机器人注浆：开发隧道、地下管线等复杂环境下的注浆机器人，实现自动化钻孔、注浆作业，提高施工效率与安全性。

（二）绿色环保注浆材料

低碳浆液开发：利用工业废渣（如矿渣微粉、粉煤灰）替代部分水泥，降低碳排放；研发可降解化学浆液，减少环境风险。

废水循环利用：建立注浆废水处理与回用系统，实现水资源循环利用，减少施工污染。

（三）复杂环境下的应用挑战

深海与冻土注浆：针对深海高压、冻土低温环境，研发耐压、抗冻胀的特殊浆液与施工设备。

既有建筑加固注浆：在不影响结构安全的前提下，实现微扰动注浆，如采用袖阀管微型注浆技术。

七、结束语

注浆技术在岩土工程中具有不可替代的作用，其应用策略需结合地质条件、工程需求及技术特点综合制定。通过优化浆液配比、精准设计注浆参数、加强施工过程控制，可显著提升注浆效

果。未来，智能化、绿色化将成为注浆技术的主要发展方向，需进一步加强跨学科技术融合与环保材料研发，推动注浆技术在复杂工程中的安全、高效应用。

参考文献

[1] 秦鹏飞. 岩土工程渗透破坏与注浆防治研究 [J]. 黄河科技学院学报, 2024, 26(02): 62-68. DOI: 10.19576/j.issn.2096-790X.2024.02.011.

[2] 董晓斌, 李翔, 苏定立, 等. 岩土工程注浆材料与工艺研究现状及展望 [J]. 广州建筑, 2023, 51(06): 149-152.

[3] 魏正亮. 建筑岩土施工工程项目中的注浆技术探究 [J]. 四川建材, 2022, 48(11): 98-100.

[4] 王克. 关于岩土工程施工中注浆技术探究 [J]. 砖瓦, 2022, (03): 153-155. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2022.03.021.

[5] 赵世斌. 岩土工程施工中注浆技术分析 [J]. 江西建材, 2021, (10): 294-295.

[6] 张磊. 岩土工程勘察与地基施工处理技术 [J]. 石材, 2024, (06): 105-107. DOI: 10.14030/j.cnki.scaa.2024.0295.

[7] 付宏渊, 姚杰, 邱祥. 铜尾矿改性水泥基聚合物注浆材料性能与机理分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55(03): 1107-1119.

[8] 于江浩, 李薇薇, 梁蕊宏, 等. 定向钻穿越土岩交替复杂地层注浆加固处理案例分析 [J]. 电力勘测设计, 2023, (S2): 72-78. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.S2.013.

[9] 秦鹏飞, 王莉, 晋芳, 等. 岩土工程不良地质注浆技术研究进展 [J]. 安阳工学院学报, 2023, 22(04): 78-84. DOI: 10.19329/j.cnki.1673-2928.2023.04.015.

[10] 秦鹏飞, 朱利颖, 王文菁. 岩土渗透破坏及其注浆防治研究综述 [J]. 中国港湾建设, 2023, 43(11): 43-49.

绿色岩土勘察理念在土木工程中的实践与发展趋势

巢哲

江苏省地质工程勘察院有限公司，江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2026010035

摘 要： 在如今可持续发展观念广泛深入大众认知的形势下，土木工程领域也迫切需要对传统发展模式做出转变，绿色岩土勘察理念应运而生且备受关注。本文将重点放在该理念在土木工程领域里的应用，首先对其在某工业建筑项目当中的实践应用展开详细叙述，内容包含工程概括、勘察方法优化、现场施工环保、勘察成果绿色应用等。借助对这一真实案例的分析，呈现绿色岩土勘察理念具备的可操作性。其次进一步且全面地探究绿色岩土勘察理念在土木工程中的发展趋势，其目的在于为进土木工程行业达成经济效益、社会效益、环境效益融合与统一给出理论参考和实践指引。

关 键 词： 绿色岩土勘察理念；土木工程；实践应用；发展趋势

Practice and Development Trends of Green Geotechnical Investigation Concept in Civil Engineering

Chao Zhe

Jiangsu Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： In the current context where the concept of sustainable development has been widely and deeply recognized by the public, there is an urgent need for the field of civil engineering to transform its traditional development model, giving rise to the concept of green geotechnical investigation, which has garnered significant attention. This paper focuses on the application of this concept in the field of civil engineering, first providing a detailed account of its practical application in an industrial construction project, covering aspects such as project overview, optimization of investigation methods, environmental protection during on-site construction, and green utilization of investigation results. Through the analysis of this real-world case, the operability of the green geotechnical investigation concept is demonstrated. Subsequently, the paper further and comprehensively explores the development trends of the green geotechnical investigation concept in civil engineering, aiming to provide theoretical references and practical guidance for the civil engineering industry to achieve the integration and unity of economic, social, and environmental benefits.

Keywords： green geotechnical investigation concept; civil engineering; practical application; development trends

引言

伴随全球在环境保护和可持续发展方面关注程度的持续提升，土木工程领域同样面临着向绿色、环保方向进行转变的急切需求。岩土勘察身为土木工程建设前期的关键步骤，其理念和方法朝着绿色化转变对整个土木工程达成可持续发展具备至关重要的意义。绿色岩土勘察理念着重强调，在勘察过程之中，以尽可能小的环境成本来获取精准的岩土工程信息，并注重资源的节约与科学使用，达成经济收益、社会收益与环境收益的有效融合。该理念的提出与践行，不光有益于降低土木工程建造给生态环境带来的不良影响，还能够增强工程的质量以及长久的稳定性，契合当代社会对绿色、低排放、可持续性发展的诉求。所以，深度探究绿色岩土勘察理念在土木工程之中的实践运用与发展趋势，具备重要的现实价值和广泛的应用前景。

一、绿色岩土勘察理念在土木工程中的实践应用

（一）工程概况

某工业建筑主体为框架结构，在长度方面达到97.58m，宽

度15.12m，高度为6.19m，该项目主体结构在2021年8月完成封顶工作。此工程处在城市的近郊区域，周边生态环境相对比较敏感，分布着河流以及农田。所以，在岩土勘察的进程中，运用绿色岩土勘察理念显得尤为重要。

作者简介：巢哲（1992.09-），男，汉族，江苏南京人，本科，职称：工程师（岩土工程）；主要从事工作：岩土工程勘察。

（二）勘察方法的优化选择

本项目运用综合的勘察技术体系，借助多源数据融合达成绿色勘察目标。于初步勘察时期，运用无人机倾斜摄影技术开展5.2公顷范围的1:500地形测绘工作，生成分辨率可达到2cm的正射影像，让野外测量的工作量减少40%。针对不一样的地质单元，对勘察手段进行优化组合：在覆盖层区域（其厚度处于3-8m之间），采用高密度电法（电极间距为5m测线的总长度为2.3km）以及微动探测（台阵半径为30m，布设12个测点），使钻探孔数量从原本设计的42个减少到28个，钻探工作量降低33%；在基岩出露区域，采用三维激光扫描（精度为 $\pm 3\text{mm}$ ）来取代传统的地质测绘方式，工作效率提高到原来的5倍。在关键部位，采用静力触探（CPT）与十字板剪切试验（VST）相结合的方式，以此获取连续状态下的土层参数。静力触探通过将探头匀速贯入土层，实时测量锥尖阻力与侧壁摩阻力，获取土层力学性质的连续剖面；十字板剪切试验则可原位测定软土的不排水抗剪强度^[1]。两种方法相互补充，使样品采集数量降低50%。此外，经由构建BIM地质模型（该模型涵盖12个地质层面，进行模型构建的精准程度为0.5m），达成勘察数据的数字化运用，使得后期阶段发生设计变更的情况减少30%。

（三）现场施工的环境措施

现场施工切实依照“四节一环保”的标准，严格执行达成施工全过程的绿色化管控目标。在进行钻探作业期间，运用XGY-40型全液压履带钻机（此钻机整机重量为8.2t，接地比压小于40kPa），并搭配模块化钻塔（该钻塔占地面积为6m²），相较于传统使用设备，这一组合使得临时占用土地的面积减少60%。创新应用“一基多孔”这一技术，在单个钻机的基台上达成3-5个钻孔的施工操作，该技术的运用，让设备搬迁的次数减少12次，同时也使得燃油消耗降低480L。泥浆系统选取可降解植物胶（其pH值范围在7.2至8.5之间）作为洗液，搭配三级沉淀池（总容积为15m³）实现泥浆循环利用率85%，减少废浆排放量12m³。在噪声控制方面，采用声屏障（降噪量达到15dB）与隔音罩组合措施，以此来保证昼间噪声数值小于或等于65dB（A），夜间噪声数值小于或等于55dB（A）。在扬尘治理工作中，运用智能喷淋系统（该系统与PM10在线监测存在联动关系，喷淋覆盖的范围达到100%），从而让作业区域内PM2.5的浓度被控制在35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。在生态保护方面，开展表土剥离工作（其厚度为30厘米，总量达到1500立方米），并且将表土进行分层堆叠放置，后期用于绿化恢复，植被恢复率达95%。临时道路使用钢板与土工格栅组合起来进行铺设（重复使用比率为90%），使得硬化面积减少800平方米。此外，构建环境监测体系，布置6个地下水监测井（监测频率为每周1次）以及4个土壤监测点，以此保证各项指标能够契合《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）。

（四）勘察成果的绿色应用

勘察成果通过数字化转化实现多重绿色价值。本项目以三维地质模型（其涵盖2.5万个网格单元）为基础来开展桩基优化设计工作，把原本设计的28米长灌注桩转变为18米的预应力管桩，使

得混凝土使用量降低1560立方米（折合起来能减排二氧化碳374吨）。在场地平衡方面，借助勘察所发现的3.2万立方米具备可用条件的回填土（其压实度大于或等于0.94）让外购土方数量减少75%。在水文地质的相关分析的基础上，推出“分区降水”这一方案（将基坑划分成4个水文单元区域），促使抽水量从最初设计的8500立方米每天降到5200立方米每天，实现约39%的节水量。对于勘察过程中发现的2处软弱夹层（其厚度处于1.2-1.8m范围），采用泡沫轻质土（密度为8kN/m³）进行换填处理，使得挖方量减少4200立方米。在生态保护方面，依据生态敏感性分析结果（借助GIS叠加分析5个相关因子），对总图布局进行优化调整，从而保留2.8公顷的原生林地（该林地面积占据场地总面积的32%）。此外，构建涵盖全生命周期的监测体系，在相关区域布置16处自动化的监测点位（包含沉降、地下水位、土压力数值等，并借助LoRa无线通信传送手段达成数据的及时更新（设定采样的频率为次/h），从而为绿色化的运维工作给予数据层面的有力支持。创新性地将钻探岩芯（总计120m）进行艺术化加工与科学标注，制作成地质标本用于科普展示，实现资源的二次利用^[2]。

二、绿色岩土勘察理念在土木工程中的发展趋势

（一）智能化勘察技术的广泛应用

智能化技术的深入参与正重塑着岩土勘察的技术体系其核心价值表现为数据处理效率与监测能力的全面提升。第一，人工智能及大数据技术促使勘察数据处理的模式发生革新。机器学习算法经过对过往勘察数据的特征提取和模式识别，能够搭建岩土参数预测模型，达成对地质异常体的自动识别与对灾害隐患的智能预判，打破传统依靠人工经验判断所存在的局限。以卷积神经网络在地质雷达图像处理里的运用为例，此技术借助深度学习能够精确辨认地下空洞、断层等不良地质体，显著降低人工译解的主观误差。与此同时，依托大数据分析的岩土工程风险预警体系，通过实时整合勘察数据与环境监测信息，建立多维度风险评估模型，达成对工程整个生命周期的动态化、智能化风险管控，提高勘察成果的及时性与决策支撑效能^[3]。第二，物联网和传感器技术构建具有实时性、自动化特点的勘察监测体系。分布式光纤传感技术通过勘察区域布设光纤传感器，利用光信号变化对岩土体变形、温度、应力等参数展开持续监测，能够发现毫米级的细微变形信息，给工程稳定性的分析提供高频率、高精度的数据支撑。而无线传感器网络则借助低功耗广域网，将岩土物理力学参数、地下水位、地震波的相关数据等多种来源的数据迅速且实时地传送到云端平台，进而形成一个覆盖勘察现场的智能化的监测网络，达成远程的数据收集与分析工作，在一定程度上减少人工巡检所需花费的成本^[4]。同时，还能提高监测效率与数据的可靠程度，为土木工程在整个生命周期里的管理工作奠定数据基础。

（二）多学科融合的勘察模式

多学科交叉融合已然成为拓展岩土勘察深度与广度的关键途径，其本质在于借助跨领域理论与技术的协同创新提高勘察的科学性与生态适应性。第一，岩土工程与地球科学、环境科学的交

又融合，能够增强勘察的区域地质剖析及生态保护功能。地球科学中的板块构造学说、地质演变规律为区域地质背景的分析给予理论架构，有助于预测复杂地质状况下岩土体特性在时间和空间上的演变趋向；环境科学的生态保护观念和环境影响评价方法被嵌入勘察设计流程之中，这就要求在获取岩土工程相关信息的同时，全面评估勘察活动对土壤、水体、生物等各类生态要素所造成的影响，并制定具有针对性的环境保护和修复举措^[9]。例如，在生态条件较为脆弱区域的勘察实际操作当中，通过整合地质学的地层分析同生物多样性的调查结果，可对勘察路线及作业具体方法进行优化，切实减少对原生生态系统的扰动，实现工程建设与生态保护的协同演进。第二，计算机科学与岩土勘察的融合催生数字化勘察技术体系，材料科学的进步为绿色勘察提供新的技术手段。地理信息系统（GIS）凭借对空间数据展开集成与分析等操作，可创建出涵盖地形地貌、地质构造、水文地质等诸多要素的三维地质信息模型，实现对勘察所得数据的可视化呈现与空间分析，为工程设计工作提供直观立体的地质资料。虚拟现实（VR）和增强现实（AR）这两项技术将勘察数据转变为具有沉浸感的虚拟场景，能够让技术人员在虚拟环境中开展对于勘察场地的“实地”推演活动，以此辅助复杂地质条件下的勘察方案优化。而数值模拟技术则借助构建岩土体型以及工程结构之间的相互作用关系，模拟在不同工作状况下岩土工程会作出的响应，为勘察成果在工程方面的应用给予理论层面的验证，进而促使岩土勘察从依靠经验推动朝着依靠科学理论推动进行转变。

（三）绿色勘察标准的完善与推广

绿色勘察标准体系的建设与推行是确保行业能够实现可持续发展的制度基石，这一体系的关键之处在于，借助标准化方式引导地质勘查行为朝着生态化方向转变。第一，绿色勘察标准体系的系统性构建逐步推进。伴随绿色发展观念的不断深入人心，国

家和行业层面就岩土勘察所涉及的资源耗费、对环境产生的影响以及所采用的技术手段等方面，制定贯穿整个流程的标准，这些标准内容丰富多样，包含地质勘查设备能耗和排放限定数值、环境友好型勘察工艺规范、勘察废弃物的处理与资源化利用要求，以及对勘察成果在绿色应用方面的评估指标等形成一个条理清晰、全面覆盖的标准架构，为该行业提供清晰明确的技术准则和操作指引，推动勘察活动从被动环保向主动绿色转型。第二，绿色勘察标准的推广实施机制得以持续优化。通过政策引导和市场激励相结合的途径，把绿色标准纳入工程招投标以及项目验收流程之中，构建绿色勘察认证制度，以此迫使勘察企业积极选用低能耗、低污染的技术与办法。与此同时，强化对标准执行状况的监督评估，搭建动态反馈机制，依据技术发展、实践需求及时对标准内容加以修订与完善，保证绿色勘察理念在工程实践里能够有效落实，并持续改进，形成一个涵盖“标准制定－实施监督－反馈完善”的闭环管理体系，进而推动整个行业朝着绿色化、规范化的方向迈进。

三、结语

综上所述，绿色岩土勘察理念在土木工程中已实现从理论倡导到实践落地的跨越。通过工程案例可见，优化勘察方法、强化环保措施、深化成果绿色应用，能够在保障工程质量的同时，显著降低资源消耗与环境影响。发展趋势层面，智能化技术革新数据处理模式，多学科融合拓展勘察深度广度，标准体系完善则规范行业发展路径。从这些实践情况以及发展趋势能看出，绿色岩土勘察，不仅仅是土木工程领域达成可持续发展目标必然要做的选择，更属于平衡工程建设需求与生态环境保护的一种有效办法，对于促使行业进行转型并且升级而言具备十分深远的重要意义。

参考文献

[1] 林永新. 绿色建筑材料在土木工程施工中的应用研究 [J]. 居舍, 2025, (12): 71-73+80.
[2] 蔡婉霞. 绿色建筑理念下土木工程桩基检测新技术研究 [J]. 新城建科技, 2025, 34(03): 76-78.
[3] 李欣, 冯晖元, 赵鹏. 工程物探技术在岩土工程勘察中的应用 [J]. 石材, 2024, (11): 87-89.
[4] 李静. 绿色建筑材料在土木工程施工中的应用 [J]. 科技资讯, 2024, 22(14): 163-165.
[5] 杨君平. 岩土工程勘察土工试验问题及改善对策分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (01): 179-181.

复杂地质条件下岩土边坡地震动力响应特性及加固措施研究

孙坤元

江苏省地质工程勘察院有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2026010036

摘要： 本文聚焦复杂地质条件下岩土边坡的地震动力响应特性及加固措施，系统分析复杂地质条件的分类及其对边坡地震响应的影响机理，构建了动力本构模型、地震输入方法、数值模拟与模型试验相结合的多维度分析体系，并针对构造复杂、岩土体性质复杂及水文地质复杂等典型场景，提出支挡结构、注浆、锚固及植被防护等加固技术的适用性、作用机制及优化设计方法。研究表明，复杂地质条件通过改变岩土体动力特性、地震波传播规律加剧边坡失稳风险，而数值模拟与模型试验的结合可有效量化加固措施的减震效果，为复杂地质边坡的抗震设计提供理论与技术支撑。

关键词： 复杂地质条件；岩土边坡；地震动力响应；抗震加固

Research on Seismic Dynamic Response Characteristics and Reinforcement Measures of Rock-Soil Slopes under Complex Geological Conditions

Sun Kunyuan

Jiangsu Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper focuses on the seismic dynamic response characteristics and reinforcement measures of rock-soil slopes under complex geological conditions. It systematically analyzes the classification of complex geological conditions and their impact mechanisms on seismic responses of slopes, constructs a multi-dimensional analysis system that integrates dynamic constitutive models, seismic input methods, numerical simulations, and model tests. Furthermore, it proposes the applicability, action mechanisms, and optimized design methods for reinforcement techniques such as retaining structures, grouting, anchoring, and vegetation protection in typical scenarios involving complex structures, rock-soil properties, and hydrogeological conditions. Research indicates that complex geological conditions exacerbate the risk of slope instability by altering the dynamic properties of rock-soil masses and the propagation patterns of seismic waves. The combination of numerical simulation and model testing effectively quantifies the seismic mitigation effects of reinforcement measures, providing theoretical and technical support for seismic design of slopes under complex geological conditions.

Keywords： complex geological conditions; rock-soil slope; seismic dynamic response; seismic reinforcement

引言

随着我国西部山区基础设施建设向高海拔、复杂地质区域的不断推进，传统的边坡抗震设计理论与方法已难以满足工程需求。因此，深入探究复杂地质条件下岩土边坡地震动力响应特性，研发高效的抗震加固技术，成为保障重大工程安全建设与运维的迫切需求。本文通过系统分析复杂地质条件对边坡地震响应的影响机理，结合数值模拟与模型试验方法，揭示边坡地震动力响应规律，并提出针对性的抗震加固优化策略，旨在为复杂地质边坡的抗震设计与灾害防治提供理论依据与技术支撑。

一、复杂地质条件特征及其对边坡地震响应的影响机理

（一）复杂地质条件的界定与分类

复杂地质条件是指在地质构造、岩土体性质和水文地质等方面存在多重异常因素相互作用的特殊地质环境，可分为构造复杂型、岩土体性质复杂型、水文地质复杂型以及多因素耦合复杂型。构造复杂型以强烈构造运动形成的断层密集带和破碎带为主要特征；岩土体性质复杂型主要表现为岩土体力学参数离散性大、存在软弱结构面等；水文地质复杂型则突出体现为地下水对岩土体的软化、潜蚀等不良地质作用；而多因素耦合复杂型则是前三者或其中两者的复杂组合，这种多重因素的交互作用会显著加剧地质条件的复杂程度。

（二）复杂地质条件对岩土体动力特性的影响

在构造复杂区域，断裂和破碎带的存在使得岩土体弹性模量降低、泊松比增大，导致其在地震动作用下更容易发生变形和破坏。例如破碎岩体在地震波作用下，颗粒间的相对滑动和错动消耗大量能量，表现出较低的动剪切模量和较大的阻尼比。岩土体性质复杂型地质条件下，软硬岩互层会引发动力响应的不均匀性。软岩部分在地震作用下率先产生塑性变形，而硬岩相对变形较小，这种差异变形会在界面处产生应力集中，加速边坡失稳。特殊土的动力特性对复杂地质条件也有重要影响，如膨胀土在含水率变化时，其动强度和动变形特性会发生剧烈改变，降低边坡的抗震性能。水文地质条件复杂时，地下水的存在会降低岩土体的有效应力，减小抗剪强度。地震过程中，地下水的孔隙水压力来不及消散，进一步削弱岩土体的承载能力，使得边坡更容易发生滑动。同时地下水的流动还可能携带岩土颗粒，造成岩土体结构破坏，影响其动力特性。

（三）复杂地质条件下地震波传播与散射机理

地震作用下岩石边坡动力反应性态是指地震动引起边坡的加速度、动应力、动应变、动位移等的响应。它不仅与输入地震波的加载方式和地震动特性有关，而且与岩体本身的物理力学性质和结构特征有关，远比静力作用下边坡反应复杂^[1]。在复杂地质条件下，由于界面形态不规则及介质高度非均匀，地震波的传播路径趋于复杂化，容易形成多次反射和折射，从而导致波形畸变与能量衰减。地震波的散射现象主要源于地质体的非均匀性和不连续性，破碎岩体、溶洞、软弱夹层等地质结构缺陷可作为散射源，将入射波能量向各个方向散射^[2]。散射波与入射波的叠加会改变地震波的频谱特性，在特定频段形成能量集中，进而增强边坡局部区域的地震响应强度。此外，散射作用还会导致地震波能量在空间上重新分布，使得远离震源的区域也可能因散射波的汇聚叠加而承受较强的地震作用，进一步影响边坡的稳定性。

二、边坡地震动力响应特性分析模型与方法

（一）岩土体动力本构模型

岩土体动力本构模型是描述岩土体在地震动荷载作用下应力-应变关系的核心理论工具，目前常用的模型包括线弹性模型、弹塑性模型和黏弹性模型。线弹性模型假定岩土体在地震作用下的应力-应变关系遵循胡克定律，适用于小应变条件下的

初步分析，该模型简单易用，能够快速计算出边坡的地震响应趋势，但无法准确反映岩土体在大应变时的非线性特性^[3]。弹塑性模型则充分考虑了岩土体的塑性变形特性，通过引入屈服准则和流动法则，能够描述岩土体在达到屈服强度后的塑性流动行为，在边坡地震响应分析中，该模型可以更准确地模拟岩土体的破坏过程，但参数获取较为复杂，需要大量的试验数据支持^[4]。黏弹性模型结合了弹性和黏性特性，能够有效描述岩土体在地震波加载过程中的能量耗散和滞后效应，如 Kelvin - Voigt 模型和 Maxwell 模型，常用于高频地震波作用下的边坡动力响应分析，可精确捕捉岩土体的动态变形和能量衰减过程。

（二）地震输入方法

地震输入方法是将地震动作用施加于边坡分析模型的关键环节，常见的地震输入方法有地震波时程输入、反应谱输入和随机地震动输入。地震波时程输入直接将实际地震记录或人工合成地震波作为输入荷载，按照时间序列施加到模型中，这种方法能够真实反映地震动的时域特性，包括地震波的持续时间、峰值加速度和频率成分，适用于非线性动力时程分析，可直观地展示边坡在地震过程中的动态响应全过程，但需要大量的地震波数据储备，且计算量较大^[5]。反应谱输入基于地震反应谱理论，将地震动对结构的作用通过反应谱曲线来体现，通过给定不同周期对应的加速度反应谱值，计算边坡在各振型下的响应，然后采用振型组合方法得到总的地震响应，该方法计算效率较高，常用于结构抗震设计的初步分析，但无法考虑地震动的时间历程特性。随机地震动输入则将地震动视为随机过程，通过功率谱密度函数来描述地震动的统计特性，能够考虑地震动的不确定性，在研究边坡在随机地震作用下的动力响应统计规律时具有独特优势^[6]。

（三）数值模拟方法

数值模拟方法是研究边坡地震动力响应特性的重要手段，主要包括有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）和离散元法（DEM）。有限元法基于变分原理，将边坡连续体离散为有限个单元，通过求解单元刚度矩阵和整体平衡方程，得到边坡的应力、应变和位移等响应，该方法适用于求解复杂几何形状和边界条件的边坡问题，能够精确模拟岩土体的非线性本构关系和地下水渗流等复杂物理过程，在边坡地震响应分析中应用广泛^[7]。有限差分法将求解区域划分为网格，通过对微分方程进行差分离散，迭代求解各网格节点的物理量，如 FLAC 软件采用的显式有限差分法，在处理大变形和动力问题时具有计算效率高的优势，能够实时跟踪边坡在地震过程中的变形和破坏发展。离散元法将岩土体视为由大量离散颗粒组成的集合体，通过牛顿运动定律描述颗粒间的相互作用，适用于研究岩土体的大变形、断裂和坍塌等破坏现象，在分析边坡地震过程中的块体运动和失稳机制方面具有独特的优势。

（四）模型试验方法

模型试验方法通过制作边坡物理模型，在实验室条件下模拟地震作用，直观研究边坡的地震动力响应特性，常用的模型试验包括振动台模型试验和离心机模型试验。振动台模型试验将边坡缩尺模型放置在振动台上，通过输入不同特性的地震波，观测模型在地震作用下的变形、破坏过程和动力响应特征，该方法能够直接获取模型的位移、加速度等响应数据，验证数值模拟结果的准确性，但受模型尺寸和相似比的限制，难以完全模拟原型边坡

的真实力学行为^[8]。离心机模型试验则利用离心机产生的离心力场,使模型在高重力加速度下达到与原型相似的应力状态,通过在离心机上施加地震动,研究边坡在接近实际应力条件下的地震动力响应,能够有效克服振动台模型试验中重力相似比难以满足的问题,更真实地模拟边坡的地质条件和受力状态,为边坡抗震设计提供可靠的试验依据。

三、复杂地质边坡抗震加固措施研究

(一) 常用边坡抗震加固技术及其适用性分析

常用的边坡抗震加固技术包括支挡结构加固、注浆加固、锚固技术以及植被防护等。支挡结构如抗滑桩、挡土墙,通过提供额外的抗滑力来增强边坡稳定性。抗滑桩适用于浅层及中层滑坡,能够有效截断滑动面,在岩质边坡和土质边坡中均有广泛应用,但对于深层滑动且地质条件复杂、存在破碎带或软弱夹层的边坡,需合理设计桩长和桩间距;挡土墙则常用于坡度较缓、高度较低的边坡,重力式挡土墙依靠自身重力维持稳定,适用于地质条件较好的区域,悬臂式挡土墙则适用于地基承载力较低的情况。注浆加固是通过向岩土体中注入浆液,填充裂隙、孔隙,提高岩土体的强度和整体性。对于破碎岩体边坡,注浆可有效增强岩体的黏结力和内摩擦角;在砂土边坡中,注浆能改善砂土的密实度和抗液化能力。然而,注浆加固对地下水丰富或流速较大的区域效果受限,需提前采取止水措施^[9]。锚固技术包括锚杆和锚索,通过将拉力传递到稳定地层中,提高边坡的抗滑和抗倾覆能力。锚杆适用于浅层加固,常用于土质边坡和风化岩边坡;锚索则适用于深层加固,尤其在高陡边坡和大型滑坡治理中发挥重要作用。但在软弱岩土体中,锚固力易受蠕变影响,需定期监测和维护。植被防护通过植物根系固土、减少坡面径流冲刷,起到生态防护和增强边坡稳定性的作用,适用于土质边坡和风化程度较高的岩质边坡,但在地震强烈、地质条件极差的区域,需与其他加固技术联合使用。

(二) 加固措施对复杂地质边坡地震响应的影响数值模拟

采用数值模拟方法,如有限元法、离散元法,对不同加固措施作用下的复杂地质边坡地震响应进行研究。建立未加固边坡的数值模型,模拟其在地震作用下的位移、加速度、应力分布等响应特征,作为对比基准。针对支挡结构加固后的边坡,模拟分析抗滑桩、挡土墙对地震波传播路径的改变,以及其对边坡内部应力集中区域和潜在滑动面的影响;对于注浆加固的边坡,通过调

整注浆后岩土体的力学参数,研究其对边坡整体刚度、阻尼特性和动力响应的改善效果;在锚固技术加固的边坡模拟中,重点关注锚杆、锚索的轴力变化以及对边坡位移场和应力场的调控作用;植被防护则通过等效增加边坡表层土体的黏聚力和内摩擦角,模拟其对边坡地震响应的影响^[10]。对比不同加固措施下边坡的地震响应结果,量化分析各加固技术对边坡位移峰值、加速度放大系数、应力集中程度等关键指标的降低幅度,明确不同加固措施在复杂地质条件下的加固效果和作用机制。

(三) 复杂地质条件下加固措施优化设计

针对构造复杂型边坡,考虑断层、破碎带的影响,优化抗滑桩的布置方案,可采用群桩或变截面桩设计,增强对滑动面的拦截能力;在注浆加固时,根据断裂带的走向和宽度,合理设计注浆孔间距和深度,提高破碎岩体的加固效果。对于岩土体性质复杂型边坡,如软硬岩互层区域,采用锚杆-挡土墙联合加固方式,利用锚杆将上层软岩锚固到下层硬岩中,同时通过挡土墙抵抗浅层滑动;针对软弱夹层,可采用预应力锚索进行深层加固,提高边坡整体稳定性。在水文地质复杂型边坡中,结合地下水渗流分析,优化排水系统设计,降低孔隙水压力对边坡稳定性的影响。同时选择抗水性能好的注浆材料进行加固,防止地下水对加固效果的削弱。通过多方案比选和参数优化,建立基于复杂地质条件的边坡抗震加固优化模型,在确保加固效果的前提下,实现经济成本和施工可行性的最优平衡。

四、结束语

本文系统探讨了复杂地质条件下岩土边坡的地震动力响应特性及加固措施,通过深入分析复杂地质条件的分类、对岩土体动力特性的影响以及地震波传播散射机理,明确了地质复杂性与边坡地震响应之间的内在联系。同时结合动力本构模型、地震输入方法、数值模拟及模型试验等多种研究手段,构建了全面的边坡地震响应分析体系,为揭示边坡在地震作用下的破坏机制提供了理论与技术支撑。

然而复杂地质条件与地震动的复杂性使得研究仍存在一定局限性,未来研究可进一步探索复杂地质条件下岩土体动力特性的精细化测试方法,结合人工智能与大数据技术提升数值模拟的准确性与效率,加强加固结构与岩土体相互作用的长期性能研究,为复杂地质边坡的抗震安全提供更可靠的保障。

参考文献

- [1] 牛家永. 含小净距隧道岩石边坡地震动力响应特性与稳定性研究 [D]. 中南林业科技大学, 2018.
- [2] 赵体, 陈运飞, 田维. 边坡动力响应规律探讨 [J]. 水科学与工程技术, 2015, (01): 72-75. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2015.01.022.
- [3] 彭宁波. 锚固岩质边坡地震动力响应及锚固机理研究 [D]. 兰州大学, 2014.
- [4] 姜彤. 边坡加卸载地震动力响应分析理论与实践 [M]. 中国水利水电出版社: 201403.176.
- [5] 于玉贞, 邓丽军, 李荣建. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2007, (06): 789-792. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2007.06.009.
- [6] 刘宏基. 边坡地震动力响应离心模型试验的有限元模拟 [D]. 山东大学, 2009.
- [7] 谢红强, 何江达, 符文熹. 强地震动作用下复合堆积体边坡动力响应及稳定性研究 [J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(07): 569-574.
- [8] 王军, 刘杰, 梁桥, 等. 地震影响受锚土质边坡的稳定性分析 [J]. 自然灾害学报, 2019, 28(01): 149-155. DOI: 10.13577/j.jnd.2019.0118.
- [9] 陈建君. 复杂山区斜坡的地震动力响应分析 [D]. 成都理工大学, 2009.
- [10] 郝明盛. 物性参数对黄土边坡地震响应影响的敏感性分析 [D]. 中国地质大学 (北京), 2014.

岩土工程中抗浮锚杆施工技术的应用

姚志锋

江苏省地质工程勘察院有限公司，江苏 南京 210000

摘 要： 深入研究抗浮锚杆施工技术在岩土工程中的应用。以某商业综合体项目为例，采用筏板基础与抗浮锚杆结合形式，应对场地内潜水类型地下水浮力作用。施工流程涵盖测量放线、钻机成孔、锚杆制作安装及注浆养护等关键环节。通过严格控制钻孔垂直度、锚筋连接质量，确保成桩质量。验收试验选取40根锚杆检测，38根符合抗拔承载力特征值300kN要求，2根不合格锚杆经压力补浆后达标。

关 键 词： 岩土工程；抗浮锚杆；验收试验

Application of Anti-Floating Anchor Construction Technology in Geotechnical Engineering

Yao Zhifeng

Jiangsu Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper delves into the application of anti-floating anchor construction technology in geotechnical engineering. Taking a commercial complex project as an example, a combination of raft foundation and anti-floating anchors is employed to counteract the buoyancy effect of groundwater of the phreatic type within the site. The construction process encompasses key steps such as surveying and setting out, drilling, anchor production and installation, as well as grouting and curing. By rigorously controlling the drilling verticality and the connection quality of anchor bars, the quality of the pile formation is ensured. During the acceptance test, 40 anchors were selected for inspection, with 38 meeting the requirement for the characteristic value of uplift capacity of 300 kN, and the two unqualified anchors reaching the standard after pressure grouting replenishment.

Keywords： geotechnical engineering; anti-floating anchors; acceptance test

引言

城市化进程加速背景下，高层建筑与地下空间开发规模持续扩大，地下水浮力对结构安全的威胁日益凸显。抗浮锚杆作为岩土工程领域关键技术手段，通过锚固体与岩土体间的粘结作用提供抗拔承载力，已成为应对此类工程难题的有效解决方案。以某商业综合体项目为研究对象，系统阐述抗浮锚杆施工技术的工程实践，分析锚杆制备、成孔、注浆等工序的技术参数，探讨不合格锚杆的成因及处置方法，以期复杂地质条件下抗浮设计提供技术支撑^[1]。

一、工程概况

某商业综合体项目总建筑面积12.8万 m^2 ，包含地下2层、地上15层，地下室建筑面积3.2万 m^2 。地下结构采用框架结构，基础形式为筏板基础结合抗浮锚杆，以应对场地地下水浮力作用。场地地貌属波状台地地貌单元，地形平坦，地面绝对高程介于480.500 ~ 482.000m之间。场地地下水类型为潜水，主要赋存于粉砂和中砂层，水位埋深3.0 ~ 4.0m，抗浮设计水位绝对

高程483.000m，地下水对混凝土结构及钢筋混凝土结构中的钢筋均具微腐蚀性，需在施工中采取防腐措施。本工程抗浮锚杆分为两类设计。锚杆一采用3根HRB400级直径25mm钢筋作为锚筋，钻孔直径150mm，暂定有效桩长9.5m，抗拔承载力特征值300KN；锚杆二锚筋规格与钻孔直径同锚杆一，暂定有效桩长10.5m，抗拔承载力特征值300KN。通过调整有效桩长，以适应不同深度地层的锚固需求，确保抗浮锚杆的承载力满足设计要求，两类锚杆设计参数见表1。

作者简介：姚志锋（1988.08-），男，汉族，甘肃庆阳人，本科；已有职称：江苏省中级专业技术资格证书（系列：自然资源工程，专业：地质勘察·岩土工程，资格名称：工程师）主要从事工作：岩土工程勘察。

表1 锚杆设计参数表

序号	锚杆类别	锚筋规格	钻孔直径（mm）	暂定有效桩长（m）	抗拔承载力特征值（KN）
1	锚杆一	3C25（HRB400）	150	9.5	300
2	锚杆二	3C25（HRB400）	150	10.5	300

二、抗浮锚杆施工准备

（一）场地要求

试验锚杆施工前，需将场地土方开挖至基底绝对高程478.000m，平整场地并压实，压实度不低于90%，以提供稳定的钻机作业平台。检测锚杆与正式锚杆施工前，需完成基底垫层施工，垫层采用C15混凝土，厚度100mm，待垫层强度达到10MPa以上，方可允许机械进入场地作业，避免垫层因承载力不足导致机械沉降，影响后续成孔精度与施工安全。

（二）材料检验

锚筋选用HRB400级直径25mm钢筋，进场时严格查验出厂合格证、质量证明书，并按规范要求进行复试。复试检测项目包括抗拉强度、屈服强度、伸长率，其中HRB400钢筋屈服强度标准值不低于400MPa，抗拉强度标准值不低于540MPa，伸长率不小于16%，各项指标需符合GB/T1499.2-2018《钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋》要求，不合格钢筋严禁用于工程。水泥采用PC42.5R普通硅酸盐水泥，进场时检验安定性、凝结时间、3d和28d抗压强度，安定性需合格，复试合格后入库储存，储存过程中设置防潮层，避免水泥受潮结块，影响注浆质量^[2]。

（三）设备调试

主要施工设备包括履带潜孔钻机、压浆泵以及直螺纹套丝机。履带潜孔钻机型号为KQD100，最大钻孔深度20m，钻头直径153mm，施工前调试钻进速度至1.0～1.5m/min，确保在粉质黏土层与砂层中匀速钻进，同时调整风压参数，在粉质黏土层风压控制在0.5～0.7MPa，在粉砂与中砂层风压控制在0.7～1.0MPa，以减少孔壁坍塌风险。压浆泵型号为UB3，最大注浆压力3.0MPa，调试时检查压力表精度，确保一次注浆压力达到1.2MPa、二次补浆压力达到2.0～3.0MPa，满足不同注浆阶段的压力需求。直螺纹套丝机型号为GSJ-40，调试后加工的钢筋螺纹牙形需饱满、无断牙，用通规、止规检验时，应能顺利旋入通规，而止规旋入深度不超过3扣，确保钢筋连接强度符合JGJ107-2016《钢筋机械连接技术规程》要求。

三、抗浮锚杆施工技术应用

（一）测量放线

在抗浮设计范围外，设置4个混凝土固定控制点。控制点采用截面300mm×300mm、桩长1.5m的混凝土桩，桩顶埋设不锈钢标志并涂红漆标识，便于施工过程中测放、恢复、检查孔位。使用徕卡TS09全站仪进行孔位测放，以控制点为基准，按照设计间距1.8m×1.8m测放锚杆孔位，孔位偏差控制在±50mm以内。测放完成后，用Φ16钢筋打入地面200mm作为标记，并在孔位

周围撒白灰圈定，便于施工人员识别。孔位测放完成后，由总承包单位进行复查，复查内容包括孔位间距以及排距，复查无误后报监理单位审核，审核通过后方可进行钻机就位施工。采用DSZ3水准仪测定每根锚杆的孔口标高，详细记录数据，作为计算锚杆实际长度的依据，确保锚杆锚入底板长度满足设计要求^[3]。

（二）钻机成孔

履带潜孔钻机移动至孔位处后，首先调整机身水平度，用水平尺检测，确保机身倾斜度不超过1%；同时采用吊线锤法调整钻杆垂直度，使钻杆轴线与孔位中心线偏差不大于20mm，钻孔轴线偏斜率控制在杆体长度的2%以内，以保证钻孔的垂直度和准确性，避免因钻孔偏斜导致锚杆受力不均，影响抗拔承载力。开孔时采用低速钻进，钻进深度达到500mm后，再次检查孔位偏差和垂直度，符合要求后再正常钻进。在钻进过程中，根据不同地层特性调整钻进参数：在粉质黏土层，由于土层为可塑状且压缩性中等，钻进速度控制在1.0m/min，风压0.5～0.7MPa，避免因钻进速度过快导致孔壁挤压变形；在粉砂和中砂层，砂层呈松散、饱和状态，钻进速度控制在0.8m/min，风压0.7～1.0MPa，通过提高风压排出钻屑，减少孔壁坍塌风险。钻孔深度应不小于设计长度，本工程锚杆设计长度为9.5m和10.5m，实际钻孔深度分别控制在9.8m和10.8m以上，确保锚固段长度满足设计要求，其中锚固段需深入中砂层不小于6m，以充分利用中砂层的高承载力。钻孔达到设计深度后，停止钻进，保持钻机空转，用高压风（风压1.2MPa）清孔，直至孔口排出的岩屑中无较大颗粒，且持续时间不少于5min，以清除孔内残留的岩屑和粉尘，保证孔内清洁^[4]。

（三）锚杆制作、安装

锚杆下料长度根据设计长度、锚入底板长度和弯钩长度确定。锚入底板长度为1000mm、弯钩长度为375mm。因此，锚杆一下料长度为设计长度9.5m+锚入底板长度1.0m+弯钩长度0.375m=10.875m，锚杆二下料长度为设计长度10.5m+锚入底板长度1.0m+弯钩长度0.375m=11.875m，下料误差控制在±30mm以内。下料则采用切割机进行切割，以确保切口平整、无毛刺，避免钢筋端部损伤影响受力性能。当锚杆杆体长度不足时，采用直螺纹套筒连接。连接前，对钢筋端头进行套丝加工，套丝长度为16mm（套筒长度32mm），套丝完成后用通规和止规检验螺纹质量，通规能顺利旋入，止规旋入深度不超过3扣，确保螺纹加工精度。连接时，将套筒两端钢筋对齐，用扭矩扳手拧紧，套筒两端外露有效螺纹不超过2扣，连接扭矩不小于200N·m，保证钢筋连接强度符合设计要求。隔离环采用Φ8钢筋制作，间距2000mm，焊接在锚杆钢筋上，确保锚杆在孔内居中，保护层厚度45mm。焊接时采用单面焊，焊缝长度不小于10d（80mm），焊缝需饱满、无夹渣、气孔，避免因焊接质量问题导致隔离环脱

落,影响锚杆的保护层厚度和受力状态。锚杆安装时,将制作好的锚杆缓慢放入钻孔内,操作过程中保持锚杆居中,避免碰撞孔壁,防止孔壁坍塌。同时,将注浆管与锚杆钢筋绑扎在一起,绑扎间距500mm,注浆管端部距锚杆端部50 ~ 100mm,确保注浆时浆液能顺利从孔底排出空气。锚杆安装完成后,检查锚杆顶部标高,确保锚入底板长度符合设计要求,若标高偏差超过±50mm,需重新调整锚杆位置或重新成孔。

（四）注浆

一次注浆材料为 M30 水泥浆,水灰比控制在 0.45 ~ 0.50,采用 JW-350 搅拌机搅拌,搅拌时间不少于 2min,使浆液充分均匀,避免因搅拌不均匀导致浆液离析,影响注浆强度。注浆设备采用 UB3 压浆泵,注浆时从孔底开始,初始注浆压力为 0.5MPa,逐渐升至 1.2MPa,保持压力稳定,使浆液自下而上排出孔内空气,直至孔口处溢出纯水泥浆,且无气泡冒出时,停止一次注浆。单根锚杆一次注浆量约 1.2m³,注浆过程中详细记录注浆压力、注浆量和注浆时间,若注浆量异常(如远大于理论计算量),需检查是否存在孔壁坍塌或串孔现象,及时采取处理措施。在一次注浆浆体初凝前,进行二次补浆。补浆材料为水灰比 1:1 的纯水泥浆,注浆压力提高至 2.0 ~ 3.0MPa,通过注浆管再次注浆,直至排出的浆液浓度与灌入的浆液浓度相同,且不含气泡时为止。必要时进行三次注浆,确保孔内浆液饱满,二次补浆量约 0.3m³。二次补浆的目的是填充一次注浆后因浆液收缩产生的空隙,提高锚杆与周围地层的粘结力,确保抗拔承载力。注浆过程中,若发现注浆压力突然下降或上升,需立即停止注浆,检查注浆管是否堵塞或孔壁是否存在漏浆点,处理完毕后再继续注浆。

（五）养护

注浆完成后,及时对锚杆进行养护,养护期间禁止碰撞锚杆钢筋和孔口钢筋笼,避免对锚杆造成机械损伤。养护方法为覆盖塑料薄膜并洒水保湿,养护时间不少于 7 天,每天洒水次数根据天气情况确定,确保孔口处湿润,环境温度保持在 5℃ 以上。若养护期间环境温度低于 5℃,需采取保温措施,如覆盖棉被等,防止浆体受冻影响强度发展。养护过程中,定期检查同条件养护试块的强度,当试块强度达到 30MPa 以上时,方可进行抗拔试验。养护记录需详细记录每天的温度、湿度、洒水次数和试块强度发展情况,为判断浆体强度提供依据。通过科学合理的养护措施,确保浆体强度能够满足设计要求,保证抗浮锚杆的承载能力在后续使用过程中稳定可靠。

四、抗浮锚杆检测

本工程抗浮锚杆检测严格遵循《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011),选取 40 根锚杆进行验收试验验证施工质量。检测设备采用 YDC240QX 空心千斤顶、DSZ3 水准仪及精度 0.01mm 的百分表。锚杆钢筋穿过千斤顶,通过 300mm × 300mm × 20mm Q345 垫板与夹片式锚具固定,基准梁采用 12# 工字钢(长 4.0m),两端固定于基准桩,百分表对称布置于锚杆两侧监测位移。40 根验收锚杆中,38 根满足规范要求。典型锚杆检测数据见表 2。锚杆一(编号 A-01)在 450KN 荷载下弹性位移 5.5mm,蠕变量 0.8mm;锚杆二(编号 B-12)弹性位移 6.9mm,蠕变量 1.2mm(6~60min 累计蠕变量 1.8mm),均符合“弹性位移 > 80% 理论值且 < 理论总伸长值”“蠕变量 ≤ 2.0mm”的要求。

表 2 典型锚杆检测数据表

锚杆编号	锚杆类别	最大荷载 (KN)	弹性位移 (mm)	1~10min 蠕变量 (mm)	6~60min 蠕变量 (mm)
A-01	锚杆一	450	5.5	0.8	—
B-12	锚杆二	450	6.9	1.2	1.8

经分析,发现 2 根不合格锚杆。主要原因在于,注浆不饱满导致位移超限,经压力补浆后复检,弹性位移分别为 5.9mm 和 6.3mm,蠕变量均 < 1.0mm,最终合格率 100%。

五、结语

抗浮锚杆施工技术在商业综合体项目中的实践表明,科学规范的工艺控制是保障工程质量的核心要素。通过实施场地平整压实、材料性能复验、设备参数调试等前置措施,构建了完善的施工准备体系。检测数据显示,经压力补浆处理后,全部锚杆满足抗拔承载力要求。该工程验证抗浮锚杆施工技术,在复杂水文地质条件下的适应性,其质量控制经验可为同类项目提供技术借鉴,推动抗浮技术向标准化、精细化方向发展。

参考文献

[1] 夏宗军,陈志飞 A,刘春利,等. 新型全黏结预应力抗浮锚杆施工技术的研究与应用 [J]. 工程建设, 2025, 57(03): 50-54.
[2] 葛凯,袁天晋,高鹏,等. 复杂地质条件下预应力抗浮锚杆施工技术研究与应 [J]. 中国设备工程, 2025, (04): 218-220.
[3] 李冲高. 基于大粒径卵石层的高效潜孔锤抗浮锚杆施工技术与应用 [J]. 建筑科技, 2024, 8(11): 157-160.
[4] 朱忠钱. 岩土工程中抗浮锚杆施工技术的研究与分析 [J]. 居舍, 2023, (36): 67-70.

元宇宙视角下姑苏古城数字化更新实践研究

陈思怡

苏州市测绘院有限责任公司，江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ERA.2026010001

摘 要： 姑苏古城作为世界文化遗产，其数字化更新面临历史数据碎片化、游客体验浅层化、社区参与缺失及技术供需错位等现实挑战。本文基于元宇宙“虚实共生”理论框架，构建了“数据整合－体验创新－社区共建－技术适配”四维优化路径。研究表明，通过标准化历史数据管理、场景化叙事设计、制度化社区参与机制及需求导向技术评估，可实现文化遗产系统化保护、游客深度体验及更新可持续性。本研究为历史城区数字化转型提供了兼具理论创新性与实践可行性的解决方案。

关 键 词： 元宇宙；姑苏古城；数字化更新；文化遗产保护；社区参与

Research on the Digital Renewal Practice of the Ancient City of Gusu from the Perspective of the Metaverse

Chen Siyi

Suzhou Surveying and Mapping Institute Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract： As a World Cultural Heritage site, the digital renewal of the ancient city of Gusu faces practical challenges such as fragmented historical data, superficial tourist experiences, lack of community participation, and mismatched technology supply and demand. Based on the theoretical framework of "coexistence of virtual and real" in the metaverse, this paper constructs a four-dimensional optimization path encompassing "data integration, experience innovation, community co-construction, and technology adaptation." The research indicates that through standardized historical data management, scenario-based narrative design, institutionalized community participation mechanisms, and demand-oriented technology evaluation, systematic protection of cultural heritage, in-depth tourist experiences, and sustainable renewal can be achieved. This study provides a solution for the digital transformation of historical urban areas that is both theoretically innovative and practically feasible.

Keywords： metaverse; ancient city of Gusu; digital renewal; cultural heritage protection; community participation

引言

国家文化遗产保护政策明确要求利用创新技术推动历史城区可持续发展，姑苏古城作为世界文化遗产，其数字化更新成为落实政策的关键实践^[1]。根据《苏州市“十四五”文化和旅游发展规划》，到2025年需实现80%重点文保单位数字化保护。当前研究多聚焦技术应用层面，对虚实融合下的文化传承机制探讨不足，且缺乏系统性的需求适配框架^[2]。本文从元宇宙视角切入，系统探讨姑苏古城数字化更新的内在逻辑与实践挑战，旨在解决文化传承与现代化发展的矛盾，为同类历史城区数字化转型提供理论参考与实践路径。

一、元宇宙视角下的姑苏古城数字化更新内涵

元宇宙概念为姑苏古城保护与更新提供新视角，核心是利用虚实共生特性协同延续古城物质空间与文化记忆^[3]。虚实融合技术可突破时空限制复原古城历史场景，让居民与游客沉浸式体验文化；数字空间动态映射实体环境，系统性记录并可视化传承古

城传统建筑肌理与非物质文化要素。与常规保护模式相比，元宇宙框架下的数字化更新在空间上实现实体遗迹与虚拟场景实时交互，在时间上完成历史信息积累与当代功能迭代的统一，为古城活态保护创造可能，使传统街巷生活场景在数字场域持续演进。技术服务于文化传承，构建数字孪生体为维护古城历史风貌完整与延续文化基因提供支撑。虚实交互界面设计要契合姑苏水巷民

作者简介：陈思怡（1983.05-），男，苏州人，本科，中级工程师，研究方向：无人机测绘技术、倾斜摄影测量与三维建模、数字孪生技术、三维地理信息建模、三维激光扫描技术、历史建筑数字化保护、文化遗产测绘与保护。

居空间特质，数字场景重构应传达园林艺术精神内核。以文化传承为内核的数字化更新路径为历史城区应对现代发展诉求提供创新方案^[4]。

二、姑苏古城数字化更新的现状与挑战

（一）历史文化遗产保护不足

姑苏古城数字化保护存在历史文化遗产记录不全面问题^[5]。部分历史建筑数据分散，不同机构独立记录使信息碎片化，如平江路历史街区三维建模仅覆盖沿街60%建筑，巷弄内38处传统民居的砖雕、木雕等构件数据存在采集盲区；传统街巷空间肌理信息未形成系统档案，重要建筑群落关联性研究难以开展。非物质文化遗产数字转化未覆盖全部传统技艺，如山塘街非遗数字化项目中，苏绣针法动态演示、评弹书目场景化还原等关键内容的完成率不足40%，部分口头文学缺场景还原。这种碎片化记录导致古城文化基因库缺失，不仅制约文化遗产整体性认知，造成保护决策偏差，使部分濒危要素未能及时抢救，也降低了文化资源利用效率，古城历史层积效应难以在数字化环境中完整呈现，形成历史记忆断层风险与资源整合困难的双重挑战。^[6]

（二）游客体验提升的局限

姑苏古城现有数字化导览系统存在互动形式单一问题。部分景区用静态图文展示，游客单向接收信息；导览内容更新慢，无法响应游客个性化需求；数字与实体空间融合有限，虚拟场景常脱离历史语境，削弱文化氛围传达。据苏州文旅局2024年数据显示，官方“苏周到”APP数字导览用户平均停留时间仅8min，互动功能使用率不足15%，二次访问率较传统游览方式低22%。这种浅层交互直接导致游客参与感薄弱，制约对古城文化的深度感知，难以激发持续探索兴趣。游客停留时间缩短、衍生消费发展缓慢，不仅降低文旅品牌竞争力，也使传统文化价值转化遇阻，形成游客满意度与古城吸引力失衡的恶性循环。

（三）社区参与机制缺失

姑苏古城数字化更新中，社区参与渠道缺失。部分居民无正式途径参与数字项目决策，只能被动接受更新方案；数字化实施阶段缺居民意见反馈机制，传统生活方式保护诉求难表达；部分老年群体有数字技术使用障碍，社区数字素养提升工作未系统开展。单向决策模式损原住民对古城更新的认同感。这一状况持续，会使社区文化传承主体性弱化，在地居民生活智慧难融入建设，非遗保护有断层风险，社区归属感与古城更新疏离，居民维护数字设施积极性受抑，数字化成果难体现社区文化特质，削弱古城活态保护社会基础。最终造成文化传承内生动力不足与更新可持续性减弱的双重困境。

（四）技术与需求脱节现象

姑苏古城数字化建设过程中出现技术应用与实际需求错位现象。部分项目开展技术配置工作时未能充分考量古城保护的核心诉求，数字设备安装位置与历史空间保护要求存在冲突。技术更新迭代速度超出实际运维能力，部分设备面临闲置风险。技术方案制定过程缺乏多维度需求调研工作，未能有效区分文物保护与旅游服务的差异化需求。这种供需错配导致数字资源投入产出效率处于较低水平。

此类资源配置偏差引发连锁反应。技术维护成本持续攀升造

成财政资源浪费，更新项目可持续性受到挑战。数字设备功能未能完全发挥应有作用，公众对技术赋能的实际效果产生疑虑。技术手段未能精准服务于古城活态传承目标，部分传统空间因不当技术介入面临二次破坏风险。这种脱节状况最终造成数字资源利用低效与保护目标落空的双重困境。

三、姑苏古城数字化更新的优化路径

为系统化解构姑苏古城数字化更新的优化路径，本文构建了以“虚实共生”为核心的元宇宙四维框架（如图1所示），涵盖数据整合、体验创新、社区共建与技术适配四个关键维度，下文将逐一展开论述。

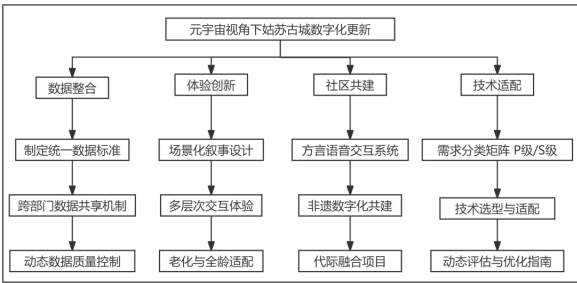


图1 姑苏古城数字化更新四维优化路径

（一）强化历史数据整合，提升保护精准度

强化历史数据整合是提升姑苏古城文化遗产保护精准度的核心途径，旨在解决当前数据碎片化导致的保护不全面问题。为此，需构建系统化整合框架，通过标准化流程统一分散信息，实现遗产要素的完整性覆盖，降低遗漏风险，同时立足古城实际需求，聚焦文化传承本质目标。

首要任务是制定全域统一的历史数据标准规范，明确建筑肌理、空间格局和非遗技艺的数据采集格式与元数据要求，涵盖三维扫描精度、文字描述框架及影像记录规范，依据遗产价值等级分层处理数据，并结合古城文化特性制定针对性标准。

其次，建立跨部门数据整合与共享协作机制，由文物管理部门牵头设立数据协调中心，统筹开展数据清洗、去重和关联匹配，实现建筑单体数据与街巷网络的空间叠合分析，将非遗记录嵌入实体环境背景，通过权限分级和脱敏处理实现安全共享，并鼓励社区参与数据校验。

此外，实施动态数据质量控制与更新循环流程，设立评估小组定期审核数据准确性，结合实地勘察验证数字档案匹配度，采用增量式更新机制纳入新增保护对象和变化信息，整合专家评审与公众意见形成持续优化闭环，保障数据长期可用性，强化系统化保护体系的稳定运行与遗漏防控能力。

（二）创新沉浸式体验设计，增强游客互动

创新沉浸式体验设计是突破姑苏古城游客体验局限的关键路径，旨在解决现有数字化导览互动形式单一问题。当前苏州已开展“数字双塔”AR导览、“网师园夜游”VR场景等沉浸式体验试点，其中网师园项目通过“移步换景”算法实现“月到风来亭赏月”“殿春簪插花”等3处历史场景动态复原，用户满意度达89%，验证了场景化叙事对文化深度传达的有效性。但试点中暴露设备适配性不足问题，老年游客操作困难率达35%，反映出技术

应用与全年龄段需求的脱节。

需构建以场景化叙事为核心的多维体验框架，由文化管理部门组织专家梳理“平江路市井生活”“山塘街水巷风情”等主题脉络，提取关键历史事件与生活场景作为体验节点，采用时空折叠手法形成连贯故事线。重点推进多层次交互体验机制建设，在“数字双塔”试点基础上优化感应式交互装置，开发角色代入系统，允许游客通过手势控制参与“科举考试”“商贾贸易”等虚拟场景。同步延伸虚实融合的服务支持系统，设置数字补给站提供适老化操作指南，开发跨时段体验衔接程序，建立成就认证体系激发探索动力。结合社区共建机制开展数字素养培训，针对老年群体设计简化操作界面与专项指导，将技术适配性优化纳入居民反馈闭环，推动游客从被动接收到主动探索的转变，促进文化认同感与参与度的双重提升。

（三）构建多元参与平台，促进社区共建

构建多元参与平台需重点破解老年群体参与障碍与文化传承断层问题。针对苏州老年人口占比高的特点，可开发“方言语音交互”反馈程序，支持苏州话指令输入，同步开展“数字网格员”培训，2024年已培训120名社区志愿者结对帮扶，使老年群体数字工具使用率从28%提升至57%，有效打通居民意见传达渠道。

在文化共建层面，可结合非遗数字化场景还原案例优化参与机制。以“陆长兴面点制作技艺”为例，通过OptiTrack动捕系统记录揉面力度、切面角度等23个关键动作参数，构建虚拟教学场景，居民可通过数字终端观摩技艺细节并上传实践视频，由非遗传承人在线点评。这种“线上记录－线下实践－云端反馈”模式，既解决传统师徒传承覆盖面有限的问题，又让居民深度参与文化资源数字化生产。

需进一步完善分层化反馈收集渠道，线下设置“银发意见箱”并每月召开方言议事会，线上开发大字版反馈界面；建立需求响应闭环，对居民提出的“数字场景历史准确性”等诉求，由文化部门联合高校30日内出具优化方案。同步拓展际融合项目，组织青少年向长辈学习传统技艺并共同完成数字建模，将共建成果纳入古城数字展示系统，推动居民从文化继承者升级为数字内容共创者。

（四）融合技术与实际需求，确保可持续更新

融合技术与实际需求需立足古城空间特质与文化保护要求，针对不同场景精准选型。针对拙政园“移步换景”的园林美学特征，采用SLAM实时定位技术实现AR虚拟景致与实体空间的毫米级匹配，游客通过移动设备可同步观赏“与谁同坐轩”四季花

木变迁的数字叠影；针对平江路水巷潮湿环境，选用华为EC-IoT防水型5G边缘计算设备，解决传统设备易受潮损坏的运维难题，设备故障率降低62%。

为进一步明确技术选型与需求匹配的优先级，本文构建了需求与技术匹配决策矩阵（如表1所示），从文化保护（P级）与旅游服务（S级）两个维度进行分类，并结合实施成本与运维难度进行综合评估，以指导实际项目推进。前者包括文保单位低功耗监测、非遗技艺数字孪生建模等，后者涵盖游客AR眼镜轻量化、导览系统实时更新等；纵向标注实施成本与运维难度双维度指标，形成四象限优先级图谱。

表1 需求－技术匹配优先级表格

需求类型	典型案例	技术方案	优先级	依据
文化保护类（P级）	非遗技艺数字孪生建模	OptiTrack 动捕系统 + 云端反馈	高	文化价值高、可复用性强
	文保单位低功耗监测	IoT 传感器 + 边缘计算	中高	保护需求迫切、运维成本低
旅游服务类（S级）	AR 眼镜轻量化导览	SLAM 定位 + 轻量化 AR 设备	中	提升体验但成本较高
	全域 VR 导览系统	5G + 云渲染平台	低（二期）	覆盖成本高、更新频繁

建立动态需求响应调整流程，每季度监测需求变化，如监测到老年群体对“方言语音导览”需求增长20%，即触发技术方案参数调整，开发苏州话语音包并简化交互步骤。构建第三方评估机制，年度开展文化保护成效、游客满意度、社区参与度三维度评估，结果用于优化技术决策。最终形成《姑苏古城数字化技术适配指南》，明确重点保护区（如拙政园）采用“技术最小干预原则”，风貌协调区（如山塘街）试点轻量化智能设备，从制度源头防范技术与需求脱节风险。

四、结语

本研究揭示了历史城区数字化更新的核心逻辑：虚实融合技术需以文化传承为内核、需求匹配为准则，突破“技术工具化”倾向。实证层面，提出的历史数据标准化整合机制、社区参与平台设计等方案，有效解决了信息碎片化、传承断层等问题。苏州模式中“水巷空间毫米级匹配”“园林美学技术转译”等经验，可为水乡古城提供参考。未来需进一步优化高密度建筑区5G信号覆盖，并扩大样本验证框架普适性。

参考文献

[1] 周璇, 林怡昕. 聚合古城文化资源, 探索以文聚心新路径 [J]. 华人时刊, 2024(10):87-87.
[2] 宋燕敏. 行动者网络视角下苏州平江历史文化街区保护参与者及其合作策略研究 [D]. 苏州科技大学, 苏州, 2023.
[3] 徐鹏. 元宇宙语境下历史文化街区的内涵重构、价值重塑与路径探索 [J]. 艺术设计学刊, 2025,(2):36-39.
[4] 卢志坚, 张安娜, 丁进. 苏州姑苏: 在阅读与古城保护中碰撞火花 [N]. 检察日报, 2023-04-21(005).
[5] 支晓岚. 苏州市非物质文化遗产保护管理研究 [D]. 苏州大学, 苏州, 2022.
[6] 俞振武. 苏州古城保护更新实施优化策略研究——基于政府行为与角色视角 [J]. 城市规划, 2022, 46(S01):13-20.

“图形特征”法快速绘制静定梁内力图教学研究

赵永胜

淮北职业技术学院 建筑工程系, 安徽 淮北 235000

DOI:10.61369/ERA.2026010004

摘 要 : 梁内力图的绘制作为梁强度和刚度计算的前提,也是高职院校《建筑力学》课程教学的重点和难点。文章结合多年教学实践,提出绘制梁内力图的方法——“图形特征”法,其原理是基于荷载与内力微分关系及其对内力图的影响规律,根据不同荷载作用下梁段上剪力图和弯矩图的曲线特征,先绘出剪力图,然后再根据剪力图面积求特征点弯矩,从而绘出弯矩图。本方法适用于梁在常见荷载作用下的剪力图和弯矩图绘制,原理清晰,简便快捷。

关 键 词 : 静定梁; 剪力图; 弯矩图

Teaching Research on Rapid Drawing of Internal Force Diagrams for Statically Determinate Beams Using the "Graphic Characteristics" Method

Zhao Yongsheng

Department of Architectural Engineering, Huaibei Vocational and Technical College, Huaibei, Anhui 235000

Abstract : The drawing of internal force diagrams for beams, as a prerequisite for calculating the strength and stiffness of beams, is also a key and challenging point in the teaching of the "Architectural Mechanics" course in higher vocational colleges. Based on years of teaching practice, this paper proposes a method for drawing internal force diagrams for beams—the "Graphic Characteristics" method. Its principle is based on the differential relationship between loads and internal forces and their impact on internal force diagrams. According to the curve characteristics of shear force diagrams and bending moment diagrams on beam segments under different loads, the shear force diagram is first drawn, and then the bending moments at characteristic points are calculated based on the area under the shear force diagram, thereby drawing the bending moment diagram. This method is applicable to drawing shear force diagrams and bending moment diagrams for beams under common loads, with clear principles and being simple and efficient.

Keywords : statically determinate beam; shear force diagram; bending moment diagram

前言

梁作为建筑结构的重要构件,竖向荷载作用下主要承受弯矩和剪力,根据内力图确定梁的最不利截面是强度分析最有效的方法。然而,高职院校开设的力学课程中关于梁内力图的绘制一直是教学的重难点,各类教材对此主要提供了“截面法”“方程法”“叠加法”等^[1,2],在教学实践中学生对此普遍感到绘制过程繁琐、难懂,大大降低了学习兴趣,甚至直接影响到后续课程的学习。鉴于此,文章基于荷载与内力的微分关系及其对内力图的影响,结合多年教学实践提出“图形特征法”,求解出支座反力后,运用此方法便能快速、准确地绘制出静定梁在多种荷载作用下的剪力图和弯矩图。

一、梁上荷载分布与内力之间的关系

由 $\sum F_y = 0$: $F_s + dF_s + qdx - F_s = 0$, 得

$$q = -\frac{dF_s}{dx} \quad (1)$$

一般情况下,梁上荷载以竖向荷载为主,包括均布荷载、集中力和集中力偶等。

(1) 均布荷载

由 $\sum M = 0$: $M + dM - M - F_s dx + \frac{1}{2} qd^2 x = 0$; 得

$$F_s = \frac{dM}{dx} \quad (2)$$

基金项目:

安徽省教育厅高校质量工程项目“建筑工程技术专业教学创新与实践研究(2024jyxm1153)”“建筑工程技术专业教学创新团队(2023cxtd222)”和安徽省高校自然科学重点研究项目“基于神经网络的 TRC 约束混凝土柱轴压承载力及变形预测(2025AHGXZK30733)”阶段性研究成果。

作者简介:赵永胜(1992—),男,安徽濉溪人,硕士,讲师,研究方向:建筑结构理论教学与设计优化。

再由式 (1) 和 (2) 得

$$q = -\frac{dM}{dx} \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 即为梁的平衡微分方程, 反映了梁上分布荷载集度 $q(x)$ 、剪力 $F_S(x)$ 和弯矩 $M(x)$ 之间的微分关系。式 (1) 表明, 剪力图在某点的斜率 $dF_S(x)/dx$ 即梁上该点分布荷载集度 $q(x)$; 式 (2) 表明, 弯矩图在某点的斜率 $dM(x)/dx$ 即剪力图上该点剪力 $F_S(x)$ 。但式 (1) ~ (3) 成立的前提是 $F_S(x)$ 、 $M(x)$ 在对应的区段内为连续函数。

因此, 利用平衡微分方程确定的荷载分布与内力的关系, 在绘制梁的内力图时可快速判断梁段内力图的曲线形状, 并进行内力图校核。当梁段无竖向荷载时, 梁段上剪力为定值, 剪力图则表现为一条水平直线。由式 (2), 梁段弯矩图为倾斜直线, 倾斜方向由剪力的正负决定^[3]: 当剪力为正时, 直线由左到右向下倾斜; 反之, 向上倾斜。当梁段作用均布荷载 (即 $q(x) = c$, c 为常数) 时, 该梁段剪力图则表现为倾斜直线, 倾斜方向由均布荷载的方向决定: $q(x)$ 方向向下, 直线从左至右向下倾斜; 反之, 向上倾斜, 其斜率绝对值为均布荷载的数值 ($|k| = c$)。由式 (3), 梁段上弯矩图形状表现为抛物线, 曲线的开口朝向由均布荷载的方向决定: 均布荷载 $q(x)$ 方向向下, 曲线开口向上, 反之向下。

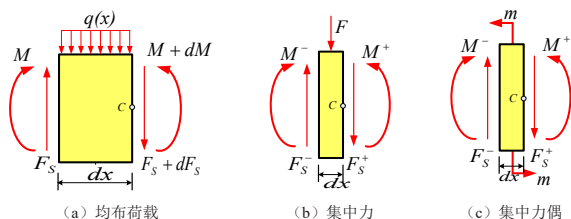


图1 常见荷载作用下梁段的内力分析图

(2) 集中荷载

梁段上有集中力时, 取微段 dx 分析, 如图1(b)所示,

表1 常见荷载作用下梁段上剪力图与弯矩图的曲线特征

	无荷载	$q(x) = \text{常数}$		集中荷载		集中力偶	
梁段荷载	$q(x) = 0$	$q(x) < 0$	$q(x) > 0$	$F \downarrow$	$F \uparrow$	$M \curvearrowright$	$M \curvearrowleft$
剪力图 (F_S)	水平直线					无变化	无变化
弯矩图 (M)	$F_S < 0$ 或 $F_S > 0$						

二、快速绘制方法

(一) 符号规定和绘图规则

内力的符号是根据其引起的杆件变形趋势规定的, 且同一截面上内力符号是唯一的。文献^[1]规定: 使微段有左上右下错动趋势的剪力为正, 反之为负。使微段有向下变凸趋势的弯矩为正, 即“下部受拉”弯矩为正, 反之则为负。绘制内力图时, 将正值剪力画在 x 轴上侧, 正值弯矩画在梁的受拉侧, 也就是 x 轴的下侧。

(二) 内力图绘制步骤

1. 求支座反力。在结构计算简图上将支座反力等同于梁上的外荷载, 并示出实际指向。

由 $\sum F_y = 0$: $F_S^+ + F = F_S^-$; 得 $F_S^- - F_S^+ = F$;

由 $\sum M = 0$: $M^+ - M^- - \frac{1}{2}F_S dx + F dx = 0$; 当 $dx \rightarrow 0$, $M^+ = M^-$ 。

因此, 集中荷载 F 使剪力在其作用处产生一个增量, 增量的幅度就是 F , 剪力图出现跃变。由式 (2), 剪力在某点的跃变将引起该处弯矩斜率的改变, 故弯矩图在集中力作用处将发生转折 (有尖角), 但弯矩值仍是连续的。剪力图的跃变方向与弯矩图尖角的朝向由集中荷载 F 的方向决定: F 向下, 剪力图从左到右向下跃变, 弯矩图尖角向下; F 向上, 剪力图则向上跃变, 弯矩图尖角向上。

(3) 集中力偶

梁段上有集中力偶时, 取微段 dx 分析, 见图1(c),

由 $\sum F_y = 0$: $F_S^- = F_S^+$;

由 $\sum M = 0$: $M^+ - M^- - \frac{1}{2}F_S dx + m = 0$; 当 $dx \rightarrow 0$, $M^- - M^+ = m$ 。

因此, 集中力偶矩 m 使弯矩在其作用处产生一个增量, 增量的幅度就是 m , 力偶顺时针, 弯矩图从左至右向下跃变, 力偶逆时针, 弯矩图从左至右向上跃变 (即顺流而下、逆流而上), 但梁段剪力图的形状不受影响。

由式 (2), 剪力 $F_S = 0$ 的截面上, 弯矩取得极值。对式 (2) 积分, 得

$$M(x) = \int F_S(x) dx + C_0 \quad (4)$$

(4) 式表明, 梁上任意截面的弯矩值 M 等于该截面左侧剪力图的面积与外力矩的代数和^[4]。

因此, 当需要计算控制截面的剪力和弯矩值时, 只需分别计算该截面左侧分布荷载图形面积与剪力图的面积即可, 不必再采用截面法列剪力和弯矩平衡方程求解, 大大减少了计算量。

综上, 文章给出常见荷载作用下梁段上的剪力图与弯矩图的曲线特征, 如表1所示。

2. 根据荷载性质确定控制截面。控制截面主要包括^[5]: 梁的支座、分布荷载起始位置、集中荷载和集中力偶矩作用位置及其两侧附近等。

3. 计算控制截面的剪力并绘图。根据分布荷载图形的面积与集中力情况计算控制截面的剪力值, 查表1确定各相邻控制截面间剪力图形状, 并左右依次连接各控制截面剪力值绘出剪力图。

4. 计算控制截面的弯矩并绘图。根据剪力图的面积与外力矩情况计算控制截面的弯矩值, 查表1确定相邻控制截面间弯矩图的形状, 依次连接各控制截面弯矩值绘出弯矩图。

5. 内力图校核。在铰支座或铰连接处, 若无集中力偶矩,

其截面弯矩值应为零；在自由端截面，若没有集中力，其剪力值应为零，若无集中力偶矩，其弯矩应为零^[6]。

三、典型算例

某外伸梁承受均布荷载 q 、集中力 F 、集中力偶矩 M 作用（见图3），绘制此梁的剪力图和弯矩图。

1. 由静力平衡条件求得 A、B 支座的反力分别为： $F_{RA} = 3kN$ 、 $F_{RB} = 7kN$ ，并示出其实际指向，见图3（a）。

2. 作剪力图：根据梁上外荷载情况（ F_{RA} 和 F_{RB} 均视为外荷载），将梁分为 AC、CB 和 BD 三段，分析各梁段上荷载与剪力图的特征规律：AC 段上均布荷载向下，剪力图为从左至右倾斜向下的直线；CB 和 BD 段上无荷载作用，剪力图为水平直线，C 点处的集中力偶则不会影响各梁段上剪力图的曲线走向；A、B、D 三点处的剪力则会产生与集中力方向一致的跃变，幅度与该点力值相等。

因此，在作梁的剪力图时，从左到右由 A 点出发，A 点处集中力方向向上，根据“左上右下”剪力为正，确定 A 点剪力 $F_s = 3kN$ ，因梁 AC 段剪力图向下倾斜，其斜率绝对值 $|k| = 2$ ，C 点的剪力 $F_{sC} = (3 - 2 \times 4) kN = -5kN$ ，梁 CB 段剪力图为水平直线，延伸至 B 点左侧剪力 $F_{sB}^L = -5kN$ ；B 点有 $7kN$ 的集中力，剪力图应向上跃变 $7kN$ ，即 $(-5 + 7) kN = 2kN$ ，故 D 点右侧剪力 $F_{sB}^R = 2kN$ ；梁段 BD 上无荷载作用，其剪力图应为水平直线，延伸到 D 点 $F_{sD} = 2kN$ ，整梁的剪力图见图3（b）。

3. 作弯矩图：梁 AC 段有均布荷载，其弯矩图为开口朝上的二次曲线，因 C 点有顺时针的集中力偶，弯矩图向下跃变，跃变值为集中力偶的数值；梁段 CB 上无荷载且剪力为负值，弯矩图从左至右为倾斜向上的直线，梁段 BD 上无荷载且剪力为正值，弯矩图从左至右为倾斜向下的直线。在集中力作用的 B 点处，弯矩图发生转折且尖角朝向与集中力的方向一致。在绘制弯矩图时，根据公式（4），只要计算出控制截面左侧剪力图的面积即可得到相应截面的弯矩值：

1. 铰支座 A 处无集中力偶，其截面弯矩 $M_A = 0$ ；
2. 距 A 支座 $1.5m$ 处的 E 截面，剪力为零，弯矩取得极大值（即 E 截面左侧剪力图的面积）：

$$M_{\max} = M_E = \frac{1}{2} \times 3kN \times 1.5m = 2.25kN \cdot m ;$$

3. C 截面处有顺时针集中力偶，此处弯矩图有跃变：

C 截面处有左侧无外力矩，其弯矩 M_C^L 为 C 截面左侧剪力图面积的代数和：

$$M_C^L = \frac{1}{2} \times (3kN \times 1.5m - 5kN \times 2.5m) = -4kN \cdot m ;$$

C 截面右侧有外力矩，其弯矩 M_C^R 为 C 截面左侧剪力图的面积 M_C^L 与外力矩的代数和：

$$M_C^R = M_C^L + 10kN \cdot m = 6kN \cdot m .$$

4. B 支座处截面的弯矩值为支座左侧剪力图的面积与外力矩的代数和：

$$M_B = M_C^R - 5kN \times 2m = 6kN \cdot m - 5kN \times 2m = -4kN \cdot m ;$$

5. D 截面处为自由端且无集中力偶作用，其弯矩值： $M_D = 0$

根据上述控制截面弯矩值和表1中曲线特征逐段绘制，便可得到整个梁的弯矩图，如图3（c）所示。

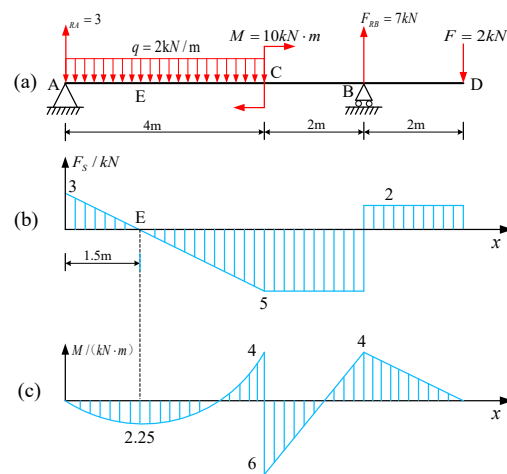


图3 某外伸梁的剪力图和弯矩图

四、结语

教学实践表明，运用“图形特征法”显著简化了内力分析和计算过程，根据荷载作用下梁段剪力图和弯矩图曲线特征，先绘出剪力图，再由剪力图面积求特征点弯矩，实现了快速、准确绘图。此方法不仅提升了教学效率，还为学生后续学习奠定了坚实基础，具有直观、易操作、适用性广的优点。但需注意，在教学过程中，静定梁内力求解最基础的方法——截面法仍需进行讲解，图形特征法可作为截面法的有益补充，以促进学生对内力分析层次的理解与应用。

参考文献

- [1] 周国瑾, 施美丽, 张景良. 建筑力学 [M]. 第五版. 上海: 同济大学出版社, 2016.
- [2] 刘鸿文. 材料力学 (I) [M]. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [3] 岳桂杰, 张亮亮. “沿力走”法快速绘制材料力学内力图教学探索 [J]. 兰州工业学院学报, 2024, 31(02): 149-152.
- [4] 赵丽霞. 直梁内力图绘制方法研究 [J]. 黑河学院学报, 2023, 14(06): 186-188.
- [5] 张延, 王凤娇. 关键点弯矩值结合各段线形的弯矩图分段绘制方法研究 [J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2018, 18(04): 76-79.
- [6] 猴勇, 裴红艳, 秦立平, 等. 直接法速作静定多跨梁及刚架内力图 [J]. 湖北理工学院学报, 2017, 33(02): 68-72.

既有房屋排险工作中的风险评估与应急管理

李冬

天津市河北区房产服务中心, 天津 300140

DOI:10.61369/ERA.2026010005

摘 要 : 既有房屋排险是保障城市居住安全、防范安全事故的关键工作, 其高效推进依赖风险评估与应急管理的协同支撑。本文围绕既有房屋排险展开系统研究: 在风险评估层面, 先阐述其对隐患提前识别、资源优化分配的重要性, 再梳理“风险因素识别—风险量化评估—风险等级确定”的核心流程, 并针对老旧砖木结构与现代钢筋混凝土结构的评估差异展开针对性分析; 在应急管理层面, 从体系构建、响应机制及案例对比三方面, 剖析应急管理的实践路径; 最后揭示两者内在联系, 以风险评估为应急管理提供数据支撑与方案指导, 应急管理则通过实践反馈优化风险评估方法。

关 键 词 : 既有房屋; 排险工作; 风险评估; 应急管理; 安全隐患

Risk Assessment and Emergency Management in the Risk Elimination Work for Existing Buildings

Li Dong

Tianjin Hebei District Real Estate Service Center, Tianjin 300140

Abstract : Risk elimination for existing buildings is a critical task for ensuring urban residential safety and preventing safety incidents, with its efficient implementation relying on the collaborative support of risk assessment and emergency management. This paper conducts a systematic study on risk elimination for existing buildings: At the level of risk assessment, it first elaborates on its importance for early identification of hidden dangers and optimized allocation of resources, then outlines the core process of "risk factor identification—risk quantitative assessment—risk level determination," and conducts a targeted analysis of the assessment differences between old brick-wood structures and modern reinforced concrete structures. At the level of emergency management, it analyzes the practical paths of emergency management from three aspects: system construction, response mechanisms, and case comparisons. Finally, it reveals the intrinsic connection between the two, with risk assessment providing data support and plan guidance for emergency management, while emergency management optimizes risk assessment methods through practical feedback.

Keywords : existing buildings; risk elimination work; risk assessment; emergency management; safety hazards

引言

随着我国城镇化进程的推进, 大量既有房屋因建造年代久远、使用功能变更、自然环境侵蚀等因素, 安全隐患日益凸显, 房屋坍塌、沉降等事故不仅威胁居民生命财产安全, 更影响城市公共安全与社会稳定。既有房屋排险工作作为防范此类风险的核心手段, 其难点在于房屋结构类型多样、风险诱因复杂、应急处置要求高, 若风险识别不全面, 易遗漏关键隐患; 若应急响应不及时, 可能加剧事故后果。

一、既有房屋排险工作的风险评估

(一) 风险评估的重要性

风险评估作为既有房屋排险工作的基础环节, 其重要性体现在对潜在安全隐患的提前识别与资源分配的优化上。既有房屋因年代久远、自然损耗及人为因素干扰, 往往存在不同程度的安全隐患, 若未能及时识别和评估这些风险, 可能导致严重的安全事故。通过科学的风险评估, 不仅可以全面掌握房屋的安全状况,

还能为后续排险工作提供数据支持, 从而合理分配人力、物力与财力资源, 提升排险工作的效率与针对性^[1]。此外, 风险评估结果能够为决策者提供科学依据, 帮助制定更加合理的排险计划与应急预案, 最大限度地降低安全事故发生的可能性及其造成的损失。

(二) 风险评估的流程

风险评估是既有房屋排险工作的核心环节, 主要通过风险因素识别、风险量化评估以及风险等级确定三个紧密衔接的步骤展开, 各步骤层层递进, 共同为排险工作提供科学支撑。作为风险

评估的首要环节,风险因素识别需从房屋结构、材料性能、环境因素等多个维度系统性排查潜在风险源,在既有房屋改建施工中,可依据《危险房屋鉴定标准》(JGJ125—2016)等规范识别施工技术、项目管理等结构安全性风险因素,同时还需全面考量地基条件、材料强度、氯离子含量、保护层厚度等内部因素,以及自然灾害、相邻工程施工等外部因素,通过这种全方位分析构建多层次安全风险评价体系,为后续工作奠定坚实基础^[2]。

在风险因素识别的基础上,需采用科学方法开展风险量化评估以保障结果的客观性与准确性,层次分析法(AHP)与模糊综合评价法(FAHP)是该环节的常用方法。其中层次分析法通过建立判断矩阵并计算权重,能将复杂风险问题分解为多个层次,清晰呈现各风险因素的相对重要性;模糊综合评价法则适用于处理不确定性风险因素,通过构建隶属函数、计算隶属度并结合模糊权重综合运算,可得出精准的风险评估值,两种方法在既有房屋风险评估领域均展现出较强适用性,能有效提升评估结果的可靠性^[3]。

作为风险评估流程的最终环节,风险等级确定需依据量化评估结果划分风险等级,为后续排险工作提供明确指导,具体划分需遵循相应评估标准与依据。有文献提出五等级风险划分方法,将房屋完损情况与风险等级直接对应,划分为完好、基本完好、一般损坏、严重损坏和危险五个等级;另有文献采用风险矩阵法,根据风险值 ϕ 的不同取值范围,将建筑安全风险划分为低风险、中风险与高风险三类。

(三) 不同类型既有房屋风险评估特点

不同类型的既有房屋在风险评估中存在显著差异性,需结合其结构特点与使用环境开展针对性分析,其中老旧砖木结构与现代钢筋混凝土结构的评估重点尤为不同。老旧砖木结构房屋因建造年代久远,风险评估需聚焦结构易损性与材料老化问题,这类房屋多以砌体与木材为主要承重材料,长期受自然侵蚀和人为影响,易出现墙体开裂、木材腐朽等隐患,且抗震性能较差,特别是采用预制空心楼板时,事故发生后易引发“叠饼式”坍塌,因此评估中需重点核查房屋整体性与抗震性能,并结合现场检测结果综合研判^[4]。

现代钢筋混凝土结构房屋的风险评估则更侧重施工质量与外部环境的影响,尽管其设计标准和施工工艺较老旧房屋有明显提升,但施工阶段质量控制不足或后期违规改扩建仍可能埋下安全隐患,同时地下工程施工扰动、自然灾害等外部因素也会严重影响房屋安全性能,某房屋沉降倾斜事件显示,采用独立基础的该类房屋抗外部扰动能力较弱,故评估时需全面统筹施工质量、使用功能变更及外部环境干扰等因素,以此精准把控房屋安全状况^[5]。

二、既有房屋排险工作的应急管理

(一) 应急管理体系构建

应急管理体系的构建是既有房屋排险工作中不可或缺的重要环节,其核心在于通过科学规划与系统部署,确保在突发事件发生时能够迅速、有效地应对。应急预案作为应急管理体系的基础性文件,其制定需遵循科学性、实用性和动态性原则。科学性要求预案内容基于风险评估结果,结合房屋结构特点及周边环境因素进行设计;实用性则强调预案的可操作性,确保各级应急机构

能够在实际处置中明确职责、迅速响应。预案的内容通常包括风险分析、应急组织架构、预警机制、处置流程以及后期恢复计划等,而制定流程则涵盖现状调研、专家论证、模拟演练及修订完善等多个阶段。

应急资源主要包括物资、资金和技术支持三个方面,其中物资储备应涵盖抢险设备、安全防护用品及生活必需品等,以满足不同类型险情的处置需求。资金方面,则需建立专项应急资金池,并明确其使用范围与审批流程,确保在紧急情况下能够快速调拨。此外,技术支持的储备尤为重要,通过引入专业监测设备与信息化平台,提升险情识别与处置效率。

应急队伍的组建与培训是应急管理体系中的人力资源保障环节。队伍组建通常采用“专职+兼职”模式,即以专业的应急救援人员为核心,辅以社区志愿者、物业管理人員等兼职力量,形成多层次、多领域的应急队伍体系。培训内容的设置应结合既有房屋排险工作的特点,涵盖险情监测技术、应急处置技能以及团队协作能力等方面。

(二) 应急响应机制

应急响应机制是既有房屋排险工作中应对突发性险情的核心环节,其有效性直接决定了应急处置的成败。险情监测与预警是应急响应的第一步,通过技术手段与日常巡查相结合的方式,可以及时发现潜在的安全隐患。利用传感器网络对房屋结构的关键部位进行实时监测,能够捕捉到细微的变形或沉降迹象;同时,通过定期巡查记录房屋外观的变化情况,如裂缝扩展、墙体倾斜等,可为风险评估提供重要数据支持^[6]。

在发生险情时,应急预案的快速启动与协调是应急响应机制的核心环节。预案启动的前提是对险情进行准确分级,根据险情的严重程度决定是否启动相应级别的应急响应。对于可能造成重大人员伤亡的险情,需立即启动一级响应,调动所有可用资源进行处置;而对于轻微险情,则可采取局部响应措施,避免资源浪费。协调各方力量参与应急处置是确保响应效率的关键,这要求各级指挥机构在预案中明确各部门的职责分工与协作流程,确保在紧急情况下能够迅速形成合力。

应急处置与善后工作是应急响应机制的最后环节,其质量直接影响整体应急管理的效果。应急处置的具体措施包括人员疏散、现场封锁、抢险救援等,这些措施的实施需严格按照预案要求进行,以确保操作的安全性与有效性。在房屋出现严重倾斜或坍塌风险时,应优先疏散周边居民,并设置警戒线防止无关人员进入危险区域;同时,通过注浆加固、外部支撑等技术手段稳定房屋结构,防止险情进一步恶化。善后工作则涵盖受损房屋的修复、受灾群众安置以及心理干预等内容,其重要性在于恢复社会秩序并减少次生灾害的发生。通过对善后工作的科学规划与实施,可以有效降低突发事件带来的长期负面影响。

(三) 应急管理案例分析

通过对成功案例与失败案例的对比分析,可以进一步揭示既有房屋排险工作中应急管理的优势与不足,为未来实践提供有益借鉴。在成功案例方面,宁波市既有房屋使用安全应急预案的实施展现了较为完善的应急管理体系与高效的响应机制。该预案明确了市、区县及基层指挥机构的职责分工,并通过建立应急专家组提供技术支持,确保了应急处置的科学性与专业性。此外,宁波市还注重应急资源的储备与调配,通过设立专项资金与物资储

备库，为抢险工作提供了坚实的保障。在险情监测与预警方面，该市引入了信息化平台，实现了对重点区域房屋的动态监控，并在多次突发事件中成功避免了重大人员伤亡^[7]。这一案例表明，完善的应急管理体系与高效的响应机制是成功应对房屋险情的关键因素。

相比之下，泉州市欣佳酒店“3·7”坍塌事故的发生则暴露出应急管理中的诸多问题。在风险评估环节，由于缺乏定期检测与隐患排查，未能及时发现酒店建筑存在的重大安全隐患，导致风险逐步累积直至爆发^[8]。在应急准备方面，当地政府未能建立完善的应急预案，且在事发后未能迅速调动资源进行处置，延误了最佳救援时机。此外，第三方技术服务机构的违规行为也加剧了事故的严重性，凸显了监管机制的重要性。通过对这一失败案例的剖析，可以总结出以下教训：一是应加强风险评估的常态化管理，确保隐患能够被及时发现并处理；二是需完善应急预案的制定与演练，提高应急处置的快速反应能力；三是强化监管力度，杜绝违规操作与失职行为的发生。这些经验与教训为既有房屋排险工作的改进提供了重要参考。

三、风险评估与应急管理的联系

（一）风险评估对应急管理的指导作用

风险评估作为既有房屋排险工作的基础环节，其结果对应急管理的优化具有重要指导作用。通过科学的风险评估，可以全面识别潜在的安全隐患及其可能引发的风险等级，从而为应急预案的制定提供数据支持和理论依据。在结构安全监测预警中，通过对房屋关键风险因素的量化分析，能够明确哪些部位或条件最有可能引发险情，进而针对性地设计应急响应流程和资源调配方案^[9]。此外，风险评估还可以帮助确定不同类型既有房屋的风险特点，如老旧砖木结构房屋的结构易损性和现代钢筋混凝土房屋的外部环境影响，这些信息可直接用于优化应急预案的内容，使其更具针对性和可操作性。

在应急资源配置方面，风险评估的结果能够实现精准化部署。通过风险等级划分，可以优先将有限的应急资源集中于高风险

险区域或环节，从而提高资源利用效率。对于年久失修预警中的高风险房屋，可提前储备足够的维修材料和专业队伍，以应对可能发生的突发状况。同时，风险评估还为应急管理提供了动态调整的依据。当外部环境发生变化时，如自然灾害频发或相邻工程施工影响加剧，风险评估可以及时更新风险等级，并反馈至应急预案的修订过程中，确保应急措施始终与实际情况相匹配。

（二）应急管理对风险评估的反馈

应急管理实践在应对既有房屋险情的过程中，能够发现风险评估中存在的不足之处，并将这些问题反馈至风险评估环节，从而促进评估方法的持续改进。在泉州欣佳酒店“3·7”坍塌事故的分析中，应急管理暴露了房屋业主违法违规建设改造、第三方技术服务机构违规检测等问题，这些问题反映了风险评估在信息采集和监管机制上的短板。通过对失败案例的剖析，可以发现风险评估中可能存在的关键风险因素遗漏或量化评估不准确的情况，这为后续完善风险评估模型提供了宝贵的经验教训^[10]。

此外，应急管理的实际效果也为风险评估方法的有效性提供了验证依据。在成功案例中，通过对比应急响应的实际需求与风险评估的预测结果，可以评估风险量化方法的准确性和可靠性。如果发现某些风险因素在应急管理中未被充分重视，则可以在未来的风险评估中加以改进，引入更多元化的评估指标或优化权重分配。同时，应急管理还揭示了风险评估在动态适应性方面的不足。因此，应急管理不仅是对风险评估结果的实践检验，更是推动风险评估方法不断完善动力源泉。

四、结束语

既有房屋排险工作是守护城市安全的“最后一道防线”，其科学性与有效性直接关系到居民福祉与社会稳定。风险评估需立足房屋结构特性与使用环境，通过“识别—量化—分级”的流程实现隐患精准预判，尤其要关注不同结构房屋的评估差异；应急管理则需以体系构建为基础、响应机制为核心、以案例经验为镜鉴，确保险情“早发现、快处置、善善后”。

参考文献

- [1] 温敏. 建立既有房屋安全管理体系的思考 [J]. 建筑经济, 2022, 43(S01): 126-130.
- [2] 梁冠军, 尤超, 张勇, 安静. 基于 FAHP 的既有房屋改建施工安全风险评估模型及应用 [J]. 西昌学院学报 (自然科学版), 2023, 37(2): 28-33.
- [3] 何自挺. 既有建筑安全性能退化核心因素分析及安全管理策略 [J]. 砖瓦, 2022, (4): 73-75.
- [4] 王德祥. 既有建筑物剩余结构变形能力评估及风险等级评定 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(6): 69-70.
- [5] 张娟. 宁夏银川: 集中排查既有房屋安全风险隐患 [J]. 城乡建设, 2023, (17): 80.
- [6] 俞兆熙. 现有老旧房屋结构安全排查与改善对策 [J]. 中国住宅设施, 2023, (10): 7-9.
- [7] 熊慧灵, 高黎颖. 盾构施工下穿既有建筑物风险控制与安全管理 [J]. 建筑安全, 2022, 37(5): 46-49.
- [8] 卢文刚, 陈洋. 基于“三维”模型的城市房屋坍塌重大安全事故应急治理研究——以泉州欣佳酒店“3·7”坍塌事故为例 [J]. 中国应急救援, 2024, (2): 18-25.
- [9] 周建威. 农村房屋安全隐患排查技术研究 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(8): 166-168.
- [10] 张超, 张京街. 多视角下既有房屋使用安全管理特点分析及启示 [J]. 工程建设标准化, 2024, (3): 89-94.

建筑工程项目成本控制与管理策略研究

王金媛

嵊州市市容环境卫生管理服务中心, 浙江 嵊州 312400

DOI:10.61369/ERA.2026010008

摘 要 : 本文主要探讨了建筑工程项目中成本控制与管理的重要性, 分析了当前在建筑行业中常见的成本管理问题。通过对项目管理的基本概念、成本控制的理论框架以及实际应用进行研究, 提出了多种有效的成本控制与管理策略。本研究通过案例分析、对比方法等手段, 深入剖析了成本控制失败的原因, 并提出了优化的策略, 如项目全过程成本监控、预算管理、风险控制等, 旨在提高项目整体效益并减少不必要的成本浪费。研究结果表明, 合理的成本控制策略能够有效提高建筑项目的经济效益和管理水平。

关 键 词 : 建筑工程; 成本控制; 项目管理; 预算管理; 风险控制

Research on Cost Control and Management Strategies for Construction Engineering Projects

Wang Jinyuan

Shengzhou Urban Appearance and Environmental Sanitation Management Service Center, Shengzhou, Zhejiang 312400

Abstract : This paper primarily explores the importance of cost control and management in construction engineering projects and analyzes common cost management issues prevalent in the current construction industry. Through research on the basic concepts of project management, the theoretical framework of cost control, and their practical applications, various effective cost control and management strategies are proposed. This study delves into the reasons for cost control failures through case analyses and comparative methods, and proposes optimized strategies such as full-process project cost monitoring, budget management, and risk control, aiming to enhance overall project efficiency and reduce unnecessary cost wastage. The research results indicate that reasonable cost control strategies can effectively improve the economic benefits and management level of construction projects.

Keywords : construction engineering; cost control; project management; budget management; risk control

引言

随着建筑行业的迅猛发展, 建筑工程项目的规模日益扩大, 项目成本控制的重要性日益凸显。建筑项目的成本管理不仅影响企业的经济效益, 还直接关系到项目的顺利实施和完成。因此, 研究建筑工程项目的成本控制与管理策略, 探讨如何通过科学合理的方法来降低成本, 提高项目效益, 具有重要的现实意义。本文将分析当前建筑项目在成本控制中面临的挑战, 并结合理论与实践, 提出切实可行的管理策略, 以为项目管理人员提供有效的参考。

一、建筑工程项目成本控制的理论基础

(一) 成本控制的概念与重要性

成本控制是指在建筑工程项目的实施过程中, 采取一系列有效的措施, 确保项目在预定的成本范围内完成。它包括预算编制、成本预测、成本监控、成本调整等一系列管理活动。建筑项目的成本控制不仅仅是在项目实施过程中节约资金, 更重要的是

保障项目的资源合理配置, 优化项目执行的各个环节, 最大限度地提升经济效益和社会效益。建筑工程项目通常涉及多个环节和复杂的工序, 因此, 成本控制能够有效地预防和减少资源浪费和不必要的开支。随着建筑行业竞争的加剧, 成本控制已成为项目管理中至关重要的一部分。良好的成本控制不仅有助于提升企业的市场竞争力, 还能确保项目按期完成, 达到预期的质量和效益目标。无论是对于施工单位、业主方还是投资方, 成本控制的实

施都具有至关重要的意义。^[1-4]

（二）成本控制的目标与原则

建筑工程项目的成本控制目标是确保项目在预算范围内完成，并实现资源的最优化配置，保证工程质量与进度的同时最大限度降低成本。项目完成后，还应总结经验，为未来项目提供有效的成本控制策略。为实现这些目标，成本控制需遵循几个原则：首先是“预防为主”原则，通过合理规划和预算避免成本超支；其次是“灵活性”原则，面对突发情况时能够及时调整策略；再者是“全员参与”原则，项目各方需共同参与成本控制；最后是“持续监控”原则，确保在整个项目生命周期内进行动态成本监控与调整。这些原则有助于确保项目按预算顺利完成，提升整体经济效益。^[5-8]

（三）成本控制的主要方法与工具

在建筑工程项目中，成本控制的实施离不开科学的管理方法和工具。首先，最常用的成本控制方法是“预算管理”，即通过对项目的整体预算进行合理编制，设定各阶段的预算控制标准，并进行跟踪和分析。预算管理可以帮助项目经理在项目实施过程中发现潜在的成本风险，并及时调整。其次，项目中的“成本预测”也是一种有效的方法，成本预测通过对项目的未来成本进行估算，可以帮助管理人员提前识别项目的成本风险，并采取相应的应对措施。此外，“成本控制的定期审查”方法也是一种常用手段，通过定期的审查和评估，确保各项工作按计划推进，并实时调整不合理的成本支出。工具方面，建筑工程项目常用的成本控制工具包括项目管理软件、预算编制工具、成本监控表格等。这些工具通过集成项目进度、成本、资源等信息，为项目经理提供实时数据支持，帮助其做出更加精准的决策。

二、建筑工程项目成本管理的现状与问题分析

（一）当前建筑工程项目成本管理的现状

随着建筑行业的快速发展，建筑工程项目的规模和复杂性不断增加，成本管理已经成为项目管理中的关键环节。当前，许多建筑工程项目的成本管理普遍依赖传统的手工管理和简单的预算编制方法，缺乏系统化、规范化的成本控制流程。大多数企业仍处于成本控制的初级阶段，缺乏有效的成本监控机制和科学的决策支持系统。尽管一些大型企业已经开始引入现代化的管理工具和信息化手段，如建筑信息模型（BIM）、项目管理软件等，但整体行业的信息化水平仍然较低，很多中小型企业 在成本管理中依然面临技术与人才的不足。此外，许多项目在执行过程中未能实时跟踪成本变化，导致成本控制难度加大，项目经常出现预算超支的情况。

（二）常见的成本管理问题及其原因分析

建筑工程项目成本管理中常见的问题主要有预算控制不严格、成本信息不透明、成本监控不及时等。首先，许多项目的预算编制不够科学，缺乏充分的前期调研和精确的成本估算，导致预算不准确，进而造成项目实施中的成本超支。其次，由于管理人员对成本控制的重视程度不够，许多项目在实施过程中没有进行有效的成本监控，未能及时发现和调整不合理的支出。再者，

部分项目的成本信息缺乏透明度，管理层无法实时掌握成本变化情况，导致在出现超支风险时无法及时做出调整。此外，由于工程项目涉及多个环节，跨部门协作较为复杂，沟通不畅也是导致成本失控的一个重要原因。项目中的各个部门缺乏有效的成本信息共享平台，导致信息孤岛，难以及时掌握成本数据，进而影响决策。

（三）国内外成本控制的对比与借鉴

在国内，建筑工程项目的成本控制大多依赖传统的手工管理和简单的预算编制，而国际上，许多发达国家在建筑工程成本控制方面已经积累了丰富的经验，尤其是在信息化管理、风险控制和全过程管理方面表现突出。以美国和欧洲为例，这些国家在建筑项目中普遍使用先进的项目管理软件、建筑信息模型（BIM）等技术手段，实现了成本的实时监控和动态调整。通过建立全程跟踪的成本管理体系，能够在项目实施的各个阶段对成本进行精准预测和控制，避免了传统成本控制中常见的盲目性和滞后性。而在国内，虽然一些大规模项目已经开始引入 BIM 技术，但整体应用仍处于起步阶段，信息化手段的普及和应用仍然不够广泛。因此，国内建筑行业应借鉴国际经验，加强信息化技术的运用，推动成本管理向全过程、全周期方向发展。此外，国外的成本管理还注重与项目各方的合作与沟通，通过多方协同工作，确保成本信息的透明和共享，这对于国内项目的改进具有重要借鉴意义。

三、建筑工程项目成本控制的策略与实践

（一）项目全过程成本控制策略

项目全过程成本控制策略是一种将成本管理贯穿于项目的整个生命周期，从项目立项到竣工交付各个阶段的管理方法。这一策略强调在每个阶段制定具体的成本目标，确保各环节的资源合理配置，最大限度地控制成本。在项目的初期阶段，应该进行充分的可行性分析和成本预测，准确编制预算，并通过合理的设计优化控制成本。在施工阶段，通过严格的成本监控、进度控制、质量管理等手段，确保实际支出不超出预算。此外，项目的竣工阶段应进行详细的成本审计和总结，确保工程验收与预算一致。全过程成本控制还要求项目团队及时识别和解决可能的成本风险，例如材料价格波动、工程延期等问题。通过信息化管理工具，如建筑信息模型（BIM）和项目管理软件，能够实时监控项目成本，实施动态调整和优化，从而确保项目能够在预算内顺利完成。

（二）预算管理与成本预警机制

预算管理是建筑工程项目成本控制的基础，它通过对项目整体费用的合理规划和细化，确保项目在预算范围内完成。在项目的初期阶段，必须依据项目的规模、工期、材料费用等因素，进行详细的预算编制。同时，预算应当考虑可能出现的风险因素，设置一定的预留金，以应对不可预见的支出。在项目实施过程中，预算管理不仅要各个环节的费用进行控制，还要定期对项目支出进行对比分析，发现预算偏差并及时采取调整措施。成本预警机制则是通过对项目各项成本数据进行实时监控，及时发现成本偏离趋势，并采取预警措施。该机制的建立通常需要依托先进的信息技术，通过自动化的成本监控系统，设定各类风险指标并定期监

测。一旦出现异常情况，如项目成本超出预定范围，系统会自动报警并触发预警机制，项目经理可以在第一时间做出调整。

（三）风险控制与成本控制的结合

风险控制与成本控制是建筑工程项目管理中密切相关的两个方面。项目中的各种不确定因素，如设计变更、施工工期延误、材料价格波动、自然灾害等，都会对成本产生直接影响。因此，风险控制与成本控制的有效结合是确保项目成功的关键。首先，项目应在启动阶段对可能的风险进行识别和评估，针对不同的风险制定相应的应对措施。例如，对于材料价格波动的风险，可以通过与供应商签订长期合同、采购保险等方式进行规避；对于施工延期的风险，可以通过优化施工方案和加强进度管理来降低风险发生的概率。其次，风险控制应与成本预算紧密结合，将潜在的风险因素纳入预算编制和成本控制计划中，预留一定的风险应对资金，以便应对突发情况。

四、案例分析与优化策略

（一）典型建筑项目成本控制失败案例分析

在建筑工程项目中，成本控制失败的案例屡见不鲜，通常由于管理不善、预算编制不准确或缺乏有效的监控机制等原因引起。例如，某大型商业综合体项目由于在初期阶段未能进行充分的市场调研，导致材料采购预算严重不足。随着项目进展，建筑材料价格上涨，但项目管理方未及时调整预算，也未与供应商重新谈判价格，导致最终项目成本超支达30%。此外，施工进度未能按计划进行，导致工期延误和人工成本上升。另一个案例涉及某住宅小区开发项目，该项目在施工过程中频繁出现设计变更，由于缺乏有效的变更管理和控制，最终导致项目成本不断攀升，且未及时向客户和投资方进行透明的成本调整和说明。

（二）成本控制优化策略的应用与效果

针对建筑项目中的成本控制问题，可以通过一系列优化策略来提升成本管理效果。首先，优化预算编制是关键，项目启动阶段应进行详细的可行性分析和市场调研，确保预算准确并考虑到可能的风险因素。其次，强化项目全过程的成本监控，通过引入建筑信息

模型（BIM）技术和项目管理软件，实现对项目成本的实时监控和动态调整。例如，某公共交通项目通过引入BIM技术，不仅实现了全过程的成本监控，还在施工过程中通过虚拟建模进行设计优化，成功避免了部分不必要的资源浪费，降低了20%的项目成本。此外，项目中应建立完善的变更管理机制，确保设计变更能够及时影响到预算调整，避免随意更改导致的成本失控。

（三）未来建筑项目成本控制的趋势与挑战

未来建筑项目成本控制的趋势将更加注重信息化、智能化管理。随着建筑信息模型（BIM）、大数据分析、云计算等技术的发展，建筑项目的成本管理将变得更加精细化和实时化。通过这些技术手段，项目经理能够在项目设计阶段就进行详细的成本预测，并在施工过程中实现精确的成本监控和动态调整，从而降低预算超支的风险。此外，人工智能（AI）和机器学习将在建筑项目的成本控制中发挥重要作用，通过数据分析和智能算法，预测项目成本风险并提供优化建议，帮助管理人员做出更为精准的决策。然而，随着技术的不断进步，建筑项目成本控制也面临着新的挑战。首先，技术应用的普及需要高水平的技术人才和管理团队支持，这对项目管理方的技术能力提出了较高要求。其次，信息化管理系统的实施需要大量的资金投入，并且在实际应用过程中，如何确保数据的准确性和系统的高效性是亟待解决的问题。

五、结语

本文通过分析建筑工程项目的成本控制与管理策略，探讨了当前成本管理的现状、存在的问题以及优化策略的应用。研究表明，建筑项目的成本控制需要全程跟踪、科学的预算管理以及有效的风险应对机制。案例分析展示了成本控制失败的典型原因，同时也说明了通过信息化手段、精细化管理和团队协作，能够显著提高项目的经济效益。未来，随着技术的进步和管理模式的创新，建筑项目成本控制将更加智能化、精确化，面临的挑战和机遇并存。因此，行业内需要不断加强技术应用，提升管理能力，以实现更高效的成本控制。

参考文献

- [1] 张晓昶. 建筑工程项目资金预算与成本控制协同机制探讨 [J]. 中国集体经济, 2025, (29): 177-180. DOI: 10.20187/j.cnki.cn11-3946/f.2025.29.045.
- [2] 管西婷. 建筑工程项目的成本控制策略研究 [J]. 中国经贸导刊, 2025, (18): 160-162.
- [3] 魏强. 建筑工程管理视角下的项目成本控制策略 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(18): 25-27. DOI: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2025.0827.
- [4] 戚焕伟. 装配式建筑工程项目成本控制策略研究 [J]. 现代营销, 2025, (24): 59-61. DOI: 10.19921/j.cnki.1009-2994.2025-24-0059-020.
- [5] 徐新锋. 建筑工程项目管理中的成本控制研究 [J]. 中国住宅设施, 2025, (07): 129-131.
- [6] 任小林. 建筑施工企业工程项目成本控制强化对策探析 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(11): 109-111. DOI: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2025.0461.
- [7] 罗海玲, 冯泰森. 建筑工程项目施工成本影响因素及控制研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (13): 142-144.
- [8] 周志慧. 工程项目全生命周期成本控制策略 [J]. 大众投资指南, 2025, (17): 134-136.

新型自复位 RC 装配式剪力墙抗震性能与机理研究

刘香香

重庆工程学院, 重庆 400056

DOI:10.61369/ERA.2026010011

摘 要：为解决传统抗震结构震后修复难度大、经济损耗严重等问题，研究具有损伤可控性与震后功能快速恢复能力的新型装配式结构体系迫在眉睫。本文围绕新型自复位钢筋混凝土（RC）装配式剪力墙展开系统性的研究，重点剖析了新型自复位 RC 装配式剪力墙的抗震性能与内在工作机制，并针对结构连接深入探讨钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接的力学特性与抗震性能，为该类结构的工程应用提供关键技术支撑。

关 键 词： 自复位剪力墙；抗震性能；耗能机制

Research on the Seismic Performance and Mechanism of a New Type of Self-Centering RC Prefabricated Shear Wall

Liu Xiangxiang

Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056

Abstract： To address the challenges of difficult post-earthquake repair and significant economic losses in traditional seismic-resistant structures, it is urgent to research new prefabricated structural systems with controllable damage and rapid post-earthquake functional recovery capabilities. This paper conducts a systematic study on a new type of self-centering reinforced concrete (RC) prefabricated shear wall, focusing on analyzing its seismic performance and underlying working mechanisms. Additionally, it delves into the mechanical properties and seismic performance of structural connections, specifically examining the quincunx arrangement connection using cold-extruded sleeves for reinforcing bars and the bolt connection with embedded steel components, providing crucial technical support for the engineering application of such structures.

Keywords： self-centering shear wall; seismic performance; energy dissipation mechanism

近年来，全球地震灾害呈现高发态势，调查数据显示，传统装配式剪力墙与现浇剪力墙结构由于地震产生的破坏，，主要是依赖结构关键构件产生的塑性损伤来耗散，表明抗震机理存在局限性^[1]。这种模式不仅修复工序复杂、技术难度极高，且会导致结构震后出现残余变形量大、构件损伤严重等问题，进而承担高昂的经济成本，严重制约了建筑功能的快速恢复。因此，由于地震，结构的“自恢复功能”，已成为现代地震工程领域亟待突破的研究焦点与核心挑战。自复位（Self-Centering）结构体系是目前重要的技术之一，其通过预应力筋、形状记忆合金、碟簧等核心组件提供复位力，同时搭配钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接构件实现地震能量耗散，将结构破坏集中于可更换耗能元件，以有效保护主体承重构件的完整性，大幅降低结构残余变形，最终达成震后功能快速恢复的目标^{[2][3]}。将自复位技术与装配式建造技术深度融合，构建装配式自复位结构体系，既能满足建筑工业化的发展需求，又能契合抗震韧性的技术要求，堪称理想解决方案，目前已成为国内外学术界与工程界共同关注的核心研究热点。

一、国内外研究现状

（一）国外研究现状

在自复位 RC 装配式剪力墙结构研究领域，国外研究相较国内起步较早。研究表明，该类结构是通过在墙底设置无粘结预应力筋或其它复位构件，以形成自恢复力矩，从而将损伤集中控制在墙底接缝处。并在接缝处设置各种形式的耗能装置来有效耗散地

震能量^{[4][5]}。通过文献研究，国外目前大多研究聚焦于单片墙体的理论分析和拟静力试验。这些研究虽有效提高结构构件的抗震性能，但其承载能力仍显不足，难以有效保证抗震性能。

（二）国内研究现状

装配式剪力墙是建筑工业化发展的核心结构形式之一，国内专家主要研究的重点是正从宏观抗震性能研究向细部节点创新研究、高效连接工艺与全过程质量管理深度研究拓展^[6]。本文基于最

基金项目：重庆工程学院校内基金项目（2023xzk05）。

作者简介：刘香香（1987-），女，甘肃庆阳人，研究生，工学硕士，副教授，研究方向：主要研究新型建筑材料等。

新研究成果,从新型结构体系研发、节点连接技术创新、施工工艺与质量控制以及数值模拟技术发展四个维度,对当前装配式剪力墙领域的研究进展进行梳理与综述。

1. 新型高性能结构体系创新

传统的实心混凝土剪力墙正在向高性能、多功能复合结构方向发展。双钢板-混凝土组合剪力墙和空心保温剪力墙成为目前研究的两大亮点。高畅^[7]等学者对新型装配式双钢板混凝土组合剪力墙进行了系统的有限元分析。该种组合剪力墙能利用内外两层钢板与内部混凝土协同工作,进而形成高效的“三明治”承力体系。其研究表明,新型装配式双钢板混凝土组合剪力墙结构中钢板对内部混凝土形成了有效约束,其抗震性能指标远超传统 RC 剪力墙,同时延缓了墙体的屈曲和混凝土的压溃,具有承载力、延性和耗能能力强等特点。该尤其适用于高层、超高层建筑以及对抗震性能有极高要求的重点设防类建筑。王琨^[8]等人则聚焦于建筑节能保温方面,通过试验研究了装配式空心保温剪力墙的抗震性能。该墙体通过创新的空腔设计,在工厂预制阶段内置保温材料,以实现结构与保温的一体化(SCIP)。研究表明,该墙体在保证足够抗震承载力的同时,成功解决了保温层与结构层寿命周期不同步、现场施工繁琐等问题。

2. 节点与连接技术的精细化与高性能化

节点连接直接决定建筑整体结构的可靠性与安全性。范章强^[9]和佟世前^[10]等学者研究了套筒灌浆质量与抗震性能的关联性,指出套筒灌浆的饱满度会影响钢筋应力的有效传递以及节点刚性连接。佟世前^[10]探索了全过程质量管控的思考,套筒灌浆与钢筋的定位、灌浆料制备、坐浆密封、压力灌浆实施到质量检验,形成了一套闭环的管理流程,并探索了 BIM 技术和物联网技术在可视化交底、过程监控与数据追溯中的应用。雷红兵^[11]等学者提出了高强柔性索环-UHPC(超高性能混凝土)连接技术,该研究表明,UHPC 具有高强度、高韧性和高粘结性能等特点,利用高强索环的柔性来释放节点处的变形与内力,从而有效传递应力。这种新型连接节点具有抗剪承载力和变形恢复能力,能有效避免传统刚性连接发生的脆性破坏。

3. 施工工艺与全流程质量管控的深化

装配式建筑的“短板”往往出现在施工现场,因此施工工艺的标准化和质量的精细化管控是研究成果走向工程应用的必经之路。佟世前^[110]的研究系统论述了竖向套筒灌浆的关键技术与全过程质量管控体系。其研究不仅关注“怎么做”,更关注“如何管得好”。文章详细阐述了从预制构件生产阶段的精度控制,到吊装安装阶段的精准对位,再到灌浆施工的工艺参数控制(如灰水比、灌浆压力、保压时间),最后到无损检测(如 X 射线、超声法)与有损验证的全链条管理。这表明行业已普遍认识到,装配式建筑的质量提升必须依靠技术和管理双轮驱动。苏恒^[12]从设计源头探讨了剪力墙结构设计要点,强调了“设计-生产-施工”一体化思维的重要性。设计师需充分考虑预制构件的拆合理性、连接节点的可操作性以及吊装运输的可行性,从源头上为高质量的施工奠定基础,避免因设计缺陷导致现场无法安装或连接质量不佳的问题。

4. 数值模拟技术的支撑作用

袁宇辰^[13]系统梳理了装配式剪力墙数值模拟的研究进展。随着计算机技术的发展,有限元分析已成为研究装配式剪力墙力

学性能不可或缺的工具。高畅等人利用有限元软件对双钢板组合剪力墙进行了参数化分析,高效地揭示了双钢板组合剪力墙的工作机理和破坏模式。通过文献研究,当前的研究重点在于开发更精确的材料本构模型、接触相互作用以及模拟施工过程的时变分析,以无限逼近结构的真实受力状态,为新型结构体系和连接技术的研发提供低成本、高效率的预测和优化平台。

二、新型连接技术及工作机理

(一) 钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接

1. 连接构造

钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接是通过在预制的墙体连接处进行梅花形布置方式,以优化应力传递,其主要采用冷挤压套筒连接纵筋。与传统剪力墙的均匀布置相比,该连接能够有效分散应力集中,减少套筒之间的相互干扰,提高连接区的变形能力和抗震性能。该连接技术的具体构造包括预埋在预制混凝土墙体中的带肋钢筋、专用冷挤压套筒、以及防止混凝土局部压溃的加强措施。

2. 工作机理

在地震荷载作用下,梅花形布置的冷挤压套筒连接区各阶段的工作特性如下:

(1) 弹性阶段

钢筋与冷挤压套筒形成稳定的协同工作体系,连接区的整体刚度显著高于普通连接形式。其套筒对钢筋的可靠包裹与传力作用,能高效传递地震产生的剪力与平弯矩,应力传递路径清晰、损耗小,能有效保障结构在小震或地震初期的整体性与稳定性,未出现局部应力集中或变形异常。

(2) 屈服阶段

部分受力钢筋随着地震荷载逐步增大,荷载超限开始屈服时,梅花形布置的非对称、均匀的空间分布形式可将局部集中应力快速分散至周边套筒与钢筋,避免了因单一连接点应力过载过早发生塑性损伤,使整个连接区域的屈服过程更平缓,结构延性储备得到初步释放。

(3) 强化阶段

冷挤压套筒的机械约束作用与钢筋自身的应变硬化效应形成“双重增强机制”,套筒通过径向挤压效应限制钢筋的横向变形,时钢筋在屈服后仍能通过应变硬化持续承受荷载,进一步提升钢筋的抗拔与抗剪能力,双重增强机制下连接区可继续承受增大的地震荷载,抗倒塌潜能与延性性能大大提升。

(4) 破坏阶段

当荷载达到极限值,最终破坏模式主要表现为钢筋的拉伸断裂或周边混凝土的压溃,且均属于延性破坏,梅花形布置整个破坏过程呈现“渐进式”特征,从局部构件出现损伤到整体承载能力丧失,中间存在明显的变形发展阶段,可为结构抗震设计提供充足的破坏预警时间,便于采取应急措施减少灾害损失。

(二) 预埋钢件的螺栓连接

1. 连接构造

预埋钢件的螺栓连接是在预制墙体连接端预埋钢连接件,通过对预留有螺栓孔的竖向连接钢板进行螺栓连接实现墙体的组装。预埋钢件通常采用焊接有栓钉的钢板,竖向连接钢板需要根

据受力设计足够的厚度和宽度，高强度螺栓采用摩擦型连接。该连接系统包括：带有螺栓孔的竖向连接钢板、预埋在混凝土中的钢连接件、高强度螺栓以及防松装置。

2. 工作机理

在较小地震荷载作用下，螺栓连接主要依靠螺栓预紧力在接触面产生的摩擦力来抵抗剪力，此时连接区整体保持弹性状态，无明显变形或损伤，连接处处于摩擦阶段；当荷载继续增大并超过接触面的最大静摩擦力后，连接面开始发生相对滑移，滑移摩擦可有效耗散地震能量，降低结构所受冲击力，连接进入滑移阶段；随着位移进一步增大，螺栓杆逐渐与螺栓孔壁接触，连接随之过渡至承压阶段，此时主要通过螺栓杆与孔壁的承压作用传递荷载，螺栓自身的抗拉与抗剪性能开始抵抗持续增大的地震荷载；进入强化阶段后，钢材自身的应变硬化特性与多个螺栓之间的协同工作效应共同作用，使连接区不仅未因前期受力出现承载能力骤降，反而能继续承受更大荷载，同时展现出良好的延性与持续耗能能力，为结构抗震提供可靠保障。

（三）与传统连接技术的对比

相较于传统湿式连接（如灌浆套筒、浆锚搭接），本研究提出的两种新型干式连接技术（钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接、预埋钢件螺栓连接）具备显著优势，无需现场浇筑混凝土，大幅缩短施工周期，且避免了湿作业对环境的依赖，连接质量更易通过标准化工艺控制。

无需依赖无损检测等复杂手段可直观的看到连接界面状态，完成质量检查与验收以及降低质量管控难度。钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接部件为独立受力单元，若震后出现损伤，可直接更换连接部件，无需对主体结构进行大规模修复，能显著提升震后功能恢复效率。与现有干式连接技术相比，钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接、预埋钢件螺栓连接通过优化构造细节，进一步提升了受力性能与抗震能力，有效解决了传统干式连接普遍存在的刚度不足、变形过大等问题。

三、抗震性能研究

（一）数值模型建立

数据模型采用 ABAQUS 软件构建精细化有限元模型，系统研究新型装配式自复位剪力墙的抗震性能，模型组成及参数设置的部分数据展示，混凝土墙体选用 C50 混凝土，自复位剪力墙的非线性行为建立了塑性损伤模型（Concrete Damaged Plasticity）模拟；钢筋采用 HRB500 级钢筋，使用双线性随动硬化模型；冷挤压套筒和螺栓连接考虑接触非线性和材料非线性采用精细建模。

（二）滞回特性分析

对新型装配式自复位剪力墙进行低周往复加载数值模拟，获取其滞回曲线与骨架曲线，结果表明，两种新型连接形式的自复位剪力墙均呈现典型“旗帜形”滞回曲线，核心特征为：荷载—位移曲线所围面积较大，表明结构具备优异的地震能量耗散能力；连接区滑移量得到有效控制，避免了因滑移过大导致的滞回环捏缩，保证受力稳定性；经多次循环加载后，承载力退化幅度小于 8%，未出现明显刚度突变；卸载后残余变形极小，在 2.0% 位移角下残余位移角仅为 0.33%，远低于传统装配式剪力墙。

与传统装配式剪力墙相比，新型自复位剪力墙滞回环饱满，捏拢效应微弱，承载力稳定，自复位能力突出，在保持相当承载力的前提下，残余变形降低 60% 以上，自复位性能实现质的提升。

（三）耗能机制分析

新型装配式自复位剪力墙主要通过三级耗能机制实现地震能量的耗散，分别在钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接处、预埋钢件螺栓连接处的摩擦面之间的相对滑移耗散能量。在较大变形的情况下，连接部件中的钢材进入塑性阶段，进而降低变形的耗能。在极端荷载情况下，混凝土产生微小裂缝，可通过损伤过程耗散能量。笔者认为，通过研究表明，新型的连接的耗能分配更加合理，大部分的能量可由连接部件耗散，进而保护了主体结构不受严重损伤。

（四）参数影响分析

通过控制变量法，研究轴压比、剪跨比、连接件强度及初始预紧力对新型装配式自复位剪力墙抗震性能的影响规律：

轴压比在 0.2~0.4 范围内时，墙体承载力与初始刚度随轴压比增大而提升；当轴压比超过 0.4 后，延性与耗能能力显著下降，下降幅度超 25%，故建议轴压比控制在 0.4 以内；

剪跨比 ≤ 2.5 时，墙体以剪切变形为主，连接区承受的剪力荷载增大；剪跨比 > 2.5 时，墙体以弯曲变形为主，连接区受力更均匀；

连接件屈服强度每提升 100MPa，墙体极限承载力提升 8%~12%；若连接件强度过低，易出现连接先于主体破坏的“脆性失效”模式；

螺栓初始预紧力控制在其屈服强度的 50%~60% 时，连接刚度与摩擦耗能效果最优；预紧力过高易导致螺栓提前屈服，过低则会增大连接滑移量。

基于上述规律，提出新型装配式自复位剪力墙的优化设计参数：轴压比 0.2~0.4、剪跨比 ≥ 2.5 、连接件强度不低于 8.8 级（螺栓）/Q355（套筒）、螺栓初始预紧力为屈服强度的 55%。

四、施工技术与工程应用

（一）施工工艺

新型装配式自复位剪力墙采用工业化施工模式，核心流程围绕“工厂预制—运输保护—现场安装—质量核验”四大环节展开，具体步骤如下：

1. 预制墙体生产

在工厂标准化车间完成墙体钢筋绑扎、预埋件安装及混凝土浇筑，重点控制连接件（冷挤压套筒、预埋螺栓）的预埋精度，通过专用定位工装将预埋位置偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内；混凝土采用 C50 配比，经蒸汽养护至设计强度的 85% 以上后出厂，确保墙体力学性能与尺寸稳定性。

2. 运输与堆放

运输过程中采用定制防护架固定墙体，连接件部位套设高强度塑料保护套，避免碰撞损伤；现场堆放时选用截面尺寸不小于 100mm \times 100mm 的实木垫木，垫木间距按 1.5m 均匀布置，且与墙体吊点位置对应，防止墙体变形或连接件受压损坏。

3. 现场安装

为确保墙体连接紧密性，现场安装需注意的是轴线与标高定

位可采用全站仪进行测量，同时配合激光投影仪校准墙体的垂直度，其安装的偏差需控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，预埋钢件螺栓连接采用扭矩扳手分两次施加预紧力，钢筋冷挤压套筒连接通过专用挤压设备既定压力参数施工。

4. 质量检验

新型装配式自复位剪力墙质量检验需注意：利用扭矩复合法检验螺栓连接性能，其扭矩偏差需控制在 $\pm 5\%$ 以内。冷挤压套筒与钢筋的贴合度及挤压密实性可采用超声检查技术。墙体的安装质量可选择全站仪、靠尺等工具检测，垂直度偏差不超过 $1/1000$ 墙高，表面平整度偏差不大于 3mm 。与传统湿式连接相比较，新型干式的连接方式优化了现场支模、灌浆、养护等工序，施工作业的时间可缩减 60% 以上，且不收低温、风雨雪等天气的影响，施工效率与质量稳定性显著提升。

（二）技术经济分析

从技术性能、经济成本与社会效益三维度，对新型装配式自复位剪力墙进行综合评估：

从技术性能上分析，新型装配式自复位剪力墙施工周期较传统装配式剪力墙缩短 40% ，质量合格率达 98% 以上；抗震性能突出， 2.0% 位移角下残余位移角仅 0.33% ，震后仅需更换受损连接件即可恢复功能，修复周期控制在 72h 以内，远优于传统结构的数月修复期。

从经济成本上分析，新型装配式自复位剪力墙虽连接件（冷挤压套筒、高强度螺栓）采购成本较灌浆套筒高 $15\%\sim 20\%$ ，但现场人工成本降低 30% ，灌浆料及养护费用节省 80% ，且工期缩短带来的资金占用成本、管理成本节约超 25% ，综合造价较传统湿式连接结构降低 $8\%\sim 12\%$ 。

从社会效益上分析，新型装配式自复位剪力墙现场湿作业量减少 90% ，粉尘与噪音污染显著降低，符合绿色建筑评价标准；震后快速恢复功能，可减少医院、交通枢纽等重要建筑停运带来的社会损失，契合“可恢复功能城市”建设理念，具有显著的可持续发展价值。

（三）工程应用前景

新型装配式自复位剪力墙适用于抗震设防烈度 8 度及以上地区，通过其超强的自复位能力与耗能性能，可降低由于地震对建筑的破坏程度。如城市轨道交通站、医院等大体量项目需“震后快速复用”的建筑，在地震后，自复位能力可在短时间内帮助结构回复核心功能，减少灾害二次发生。与传统的装配式混凝土框架、钢结构等体系兼容性强，可融入标准化、模块化建筑设计，适配保障性住房、产业园区等大规模工业化建设项目，推动建筑行业工业化转型。

五、主要结论

本研究得出以下结论：

1. 钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接受力可靠性强，便于施工。为避免装配式自复位剪力墙因局部过早破坏导致应力分布不均匀等问题产生，冷挤压套筒梅花形布置连接方式优化了应力分布。预埋钢件螺栓连接通过精准预紧力控制，解决了传统干式连接刚度不足问题。

2. 装配式自复位剪力墙与传统装配式剪力墙的抗震性能相比较有一定的提升，自复位能力显著，能有效降低震后修复的难度与成本等，其具体表现为滞回环饱满，滞回曲线呈典型“旗帜形”，耗能能力提升 25% ， 2.0% 位移角下残余位移角仅 0.33% 。

3. 弯曲承载力计算模型、剪切破坏计算模式、三线性回复模型均能准确的预测墙体力学性能，其计算结果与数值模拟结果的误差小于 10% ，为新型剪力墙的工程设计提供了精准、可靠的理论依据。

4. 钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接技术简化了施工流程，兼具技术先进性与经济合理性，为装配式建筑的推广应用提供了有力支撑。

参考文献

- [1] Wan, L., & Kurama, Y. C. (2020). Seismic performance of a hybrid precast concrete wall with a bundled flexible vertical reinforcement. *Engineering Structures*, 213, 110561.
- [2] 肖水晶, 冯鹏. 新型装配式自复位 RC 剪力墙设计与性能研究 [J]. *工程力学*, 2024, 41(11): 116-124.
- [3] 张艳霞, 庞占洋, 武丙龙等. 装配式自复位钢框架-开缝钢板剪力墙结构试验研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 168-178.
- [4] 钱稼茹, 赵作周, 周剑波等. 预应力预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(10): 1-10.
- [5] 吕西林, 武大洋, 周颖等. 采用可更换连梁的自复位预制剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(11): 1-9.
- [6] 周颖, 顾安琪, 鲁懿虬等. 大型装配式自复位剪力墙结构振动台试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(10): 62-71.
- [7] 高畅, 郝际平, 孙晓岭等. 新型装配式双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析 [C]// 中国力学学会结构工程专业委员会, 桂林理工大学, 中国力学学会《工程力学》编委会, 清华大学土木工程系, 水圈科学与水利工程全国重点实验室. 第34届全国结构工程学术会议论文集(第1册). 西安建筑科技大学土木工程学院; 西安建大装配式钢结构研究院有限公司, 2025: 258-264.
- [8] 王琨, 刘文光, 龚祖平等. 装配式空心保温剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2025, 55(16): 70-77.
- [9] 范章强. 预制装配式剪力墙结构套筒灌浆施工技术及抗震性能研究 [J]. *四川水泥*, 2025(08): 25-27.
- [10] 佟世前. 装配式剪力墙结构竖向套筒灌浆施工关键技术及全过程质量管控 [J]. *建筑机械*, 2025(08): 61-66.
- [11] 雷红兵, 党隆基, 庞瑞, 等. 高强柔性索环-UHPC 连接的装配式剪力墙节点抗剪性能研究 [J]. *新型建筑材料*, 2025, 52(07): 36-42.
- [12] 苏恒. 装配式建筑结构设计剪力墙结构设计探讨 [J]. *建设科技*, 2025(13): 74-76+81.
- [13] 袁宇辰. 装配式剪力墙数值模拟研究进展 [J]. *工程建设与设计*, 2025(13): 42-44.

旧厂房加固改造中承重梁修复技术探讨

程俊飞¹, 裴新新²

1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司河南分公司, 河南 郑州 450003

2. 启东方正建设工程质量检测有限公司, 江苏 启东 226200

DOI:10.61369/ERA.2026010015

摘 要 : 针对旧厂房承重梁修复技术难题, 首先, 对常用粘钢加固、截面增大加固、碳纤维加固及预应力加固等方法进行了归纳总结; 其次, 说明各修复方法的技术属性、实施步骤及适用领域; 最终, 以材料性能、工艺水平及理念发展为切入点探索新的加固方案, 其中涉及新型复合材料应用改良、智能化技术施工整合、绿色可持续理念修复融合等多个方面。以期探索出新的旧厂房承重梁修复方法, 实现加固技术升级与低碳发展协同。

关 键 词 : 旧厂房加固改造; 承重梁修复技术; 多维应用; 创新实践

Discussion on the Repair Technology of Load-Bearing Beams in the Reinforcement and Renovation of Old Factory Buildings

Cheng Junfei¹, Pei Xinxin²

1. China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd. Henan Branch, Zhengzhou, Henan 450003

2. Qidong Fangzheng Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Qidong, Jiangsu 226200

Abstract : In response to the technical difficulties in repairing load-bearing beams in old factory buildings, this paper first summarizes commonly used methods such as bonded steel reinforcement, section enlargement reinforcement, carbon fiber reinforcement, and prestressed reinforcement; Secondly, explain the technical attributes, implementation steps, and applicable fields of each repair method; Ultimately, new reinforcement solutions will be explored from the perspective of material performance, technological level, and conceptual development, involving various aspects such as application improvement of new composite materials, integration of intelligent technology construction, and integration of green and sustainable concept restoration. In order to explore new methods for repairing load-bearing beams in old factory buildings, and to achieve synergy between reinforcement technology upgrades and low-carbon development.

Keywords : reinforcement and renovation of old factory buildings; repair technology for load-bearing beams; multidimensional applications; innovation practice

引言

旧工业厂房随着使用年限增长, 必然面临环境条件复杂性与荷载波动的双重挑战, 厂房建材在湿热条件和化学腐蚀双重作用下表现出更快的老化速率与损伤积累; 由于生产设备更替、工艺改进与企业规模扩张, 现有荷载水平经常超出厂房原设计承载值^[1]。诸多原因共同作用, 致使工业旧厂房的结构可靠性明显下降, 承重梁作为旧厂房的关键支撑部件, 若检测到开裂、翘曲或承载力衰退现象, 将迅速引发厂房结构的稳定性破坏, 乃至造成整体垮塌, 引发不可挽回的生命损失和经济破坏。因此, 对既有厂房承重梁的修复加固, 是保证厂房安全运行的关键手段, 也为旧厂房空间功能优化与再生利用的核心要素。

一、旧厂房承重梁现存问题剖析

(一) 设计施工遗留隐患

工业厂房最初设计阶段, 受当时经济基础与科技水平限制,

对结构安全的考量较为粗浅片面, 部分厂房在规划阶段, 虽荷载计算留有裕度, 但缺乏对生产规模增长的预见性考量。比如, 部分早期建设的机械厂房, 早期设计仅适配小型机床安装, 承载要求相对宽松, 伴随生产体系升级, 厂区投用了重型数控加工中

心,现有设备的重量与工作荷载已超出梁体最初设计极限,致使承重梁长期承受超出设计标准的荷载,埋下重大事故隐患。

项目施工实施期间,当初的施工工艺存在不规范现象,质量管理体系存在明显缺陷。混凝土搅拌阶段,存在混合料分散度不足的风险,引发混凝土强度与耐久性衰退;混凝土实施振捣操作期间,振捣不到位将引发混凝土内部孔洞及结构松散现象,造成功能衰减^[2]。钢筋绑扎安装作业阶段,或存在钢筋间隔与设计不符、混凝土保护层过薄等缺陷,此类施工缺陷将影响钢筋与混凝土的协同受力特性,继而减弱梁的荷载支撑能力。建筑运营初始阶段,施工过程的质量瑕疵往往没有明显征兆,随着年限不断累积,会慢慢显现,结构安全冗余降低,加剧承重梁结构破坏倾向。

(二) 长期使用损伤累积

结构建成后,混凝土构件经历长期风化侵蚀和荷载影响,外表面呈现持续性的风化片状剥离。位于海岸线周边及高污染工业区,空气中积聚着可观的盐分及酸性污染物,其中酸性成分等会明显促进混凝土结构破坏;若干化工企业的早期厂房,空气中的污染物能与混凝土氢氧化钙产生化学变化,产生可水溶的生成物,引发混凝土颗粒间粘结力减弱。以上环境因素,随着时间增长混凝土表面覆盖层逐步发生剥离,造成钢筋层外露,进而引起结构性缺陷的连锁反应。

钢筋与大气介质接触后,易出现锈蚀变化。钢筋出现锈蚀后,钢筋与混凝土之间的机械咬合力显著下降,进而引起构件承载效能衰退。若锈蚀状况持续恶化,钢筋锈蚀会引发材料膨胀力,最终引起混凝土保护层开裂,进而促使钢筋锈蚀进一步加剧。如此往复加剧,部分存在潮湿问题的历史厂房区域,下部钢筋普遍呈现较深锈蚀,外层保护层脱落严重,钢筋的实际工作截面面积下降,梁体承载能力衰退严重^[3]。对于钢结构构件及连接节点,长期服役会面临锈蚀的威胁,其中截面锈蚀会引发构件横截面收缩进而引起结构承载力衰减。

(三) 环境因素侵蚀破坏

恶劣自然环境将对旧厂房支撑梁造成不可逆的侵蚀损害。受持续风吹日晒侵蚀的混凝土屋面板,外露面形成风化痕迹,钢筋因表层剥落而暴露,以致钢筋出现锈蚀,日久天长后,混凝土块呈现渐进式脱落,既危及下方人员安全又威胁设备安全,也会阻碍厂房的正常运营。由于夏季酷热与冬季严寒的轮替,温度波动使屋面板混凝土产生尺寸变化,形成开裂缺陷,已有裂纹将逐步扩展延伸,导致屋面结构的荷载承受力与耐用度下降,这种现象北方厂房较为普遍,冬季低温引发混凝土收缩开裂现象,而夏季高温又引起混凝土体积膨胀,造成裂隙不断加宽,直接危及厂房的主体结构完整性。

地基承载能力不足同样是造成老旧厂房承重梁缺陷的关键原因之一。基于岩土体性状变化与地下水位周期性升降,引起地基局部沉降差异,不均匀的地基沉降将引起房屋墙体开裂,从而在承重梁上形成额外的应力分布,进一步加重结构的破坏,而在土

质软弱地段,地基沉降的空间差异性明显放大,对既有厂房结构安全的危害更大^[4]。

二、传统承重梁修复技术梳理与应用考量

(一) 粘钢加固法

粘钢加固法借助粘结剂与锚栓实现固定,在混凝土梁的外表面采用钢板粘贴锚固补强技术。基本原理是促成钢板-混凝土的共同受力,一起分担外部载荷,由此提升构件抵抗剪力与弯矩的承载力,进而提升原建筑物的抗力水平,限制裂缝延伸,优化钢筋及混凝土的应力条件。

实际操作阶段,首先是对混凝土梁表面做预处理,彻底去除混凝土表面沾染的灰尘、油渍等杂质;其次,需用打磨方式处理混凝土梁的粗糙面,以实现钢板-混凝土界面的有效结合;最后,依照设计规格进行钢板的切割施工,并对钢板表层实施除锈作业,从而优化钢板与粘结剂的界面结合^[5]。

(二) 增大截面加固法

增大截面加固法采用增大构件截面的方式实现加固,辅以钢筋补强,进而增大混凝土构件的有效高度,从而提升构件的抗剪与抗弯承载力。该方法主要施工步骤分为以下几个阶段:首先,完成梁面杂质清除,铲除表面松动的混凝土层及附着油垢,再对梁表面开展凿毛施工,增强新旧混凝土的界面结合力;其次,搭建外包模板结构,需将模板牢固装设,防止浇筑时混凝土浆体外泄,按设计参数调配高强度细石混凝土或者采用灌浆料进行替代,然后实施浇筑工作,在混凝土浇注阶段,需分层进行振捣,实现混凝土的充分密实,杜绝空隙等成型缺陷;最后,混凝土强度达到预期水平后,拆除模板,紧接着进行养护事宜。该技术优点是可大幅提升混凝土构件的承载能力,适合抗弯强度与抗剪能力均欠缺的梁体结构。同时,本方法也存在明显的局限性,模板的支撑系统要满足刚度要求,防止振捣时浆料外溢^[6];需按技术规范要求实施混凝土的浇筑及养护工序,以实现混凝土质量管控;工程周期偏长,会造成工期拖延及成本超支;采用更大尺寸构件会牺牲部分功能区域,对结构空间利用率形成制约;项目实施环节,需按现场需求调整作业顺序,精准把控工期,从而降低对生产活动的干扰。

(三) 碳纤维加固法

碳纤维加固法依托碳纤维材料表现出的高强度、韧性及抗腐蚀能力,针对混凝土承重梁实施结构加固的修复方案。开始前必须将混凝土梁表面清理干净,借助清洗剂对梁面实施去污处理,重点清除油脂与粉尘,再采用砂纸打磨形成粗糙界面,从而强化碳纤维布与混凝土的黏结力,按既定方案进行碳纤维布裁剪,保证裁切后的几何参数符合补强规范。采用浸渍胶对混凝土梁进行表面涂覆,均匀施涂浸渍胶层,保证浸渍胶对碳纤维布充分渗透,把预制碳纤维布覆盖到已刷胶的混凝土梁表面,而后采用刮板轻压整平,实现碳纤维布与混凝土的完全接触,完成胶体固化阶段后,对碳纤维布表层实施相应处理,以延长其工程应用周期。

该加固方法优点,材料采购价更低,价格仅为同类加固材料的三成左右,且加固成效十分显著,可大幅压缩施工周期及预算开支;其次,几乎不增加构件尺寸,节约空间,不改变原建筑

功能。

（四）预应力加固法

实施时首先在梁的预应力作用区布置张拉机具，接着配置预应力钢筋及钢绞线系统，借助张拉设备完成钢筋或钢绞线的预应力施加，继而在梁体相应位置完成锚固，待张拉力完全卸除后验收结构。本方案特别适合动态载荷显著及需采用高性能加固材料的混凝土梁进行加固设计。采用预应力加固方式可有效改善混凝土梁的承重效能，还能有效抵抗腐蚀并延长结构寿命，采用预应力技术，能有效调控混凝土梁的内力分布，强化梁结构抗弯及抗剪能力，减少梁的弯曲变形及裂缝延伸。同时，预应力施工存在明显的工艺难度，实施人员的技术门槛相对较高，作业者需掌握全面的专业知识并积累充分的实际经验，熟练掌握张拉设备运用及预应力工艺控制，用以实现安全施工和质量控制。

三、承重梁修复技术的多元化创新及工程应用拓展

（一）新型复合材料的引入与应用优化

伴随材料工程领域的显著进展，为既有厂房承重梁的修缮创造了新契机。FRP 复合材料兼具卓越的强度特性、轻量化及抗腐蚀能力，因此其可作为承重梁修复的优选材料。通过在混凝土承重梁表面粘贴 FRP 实现加固效果，FRP 与混凝土协同受力，进而提升梁体抗弯刚度与抗剪强度。

实际作业中，初始阶段应对混凝土梁表面进行技术处理，维持表面干净平整，以提升 FRP-混凝土界面的结合强度，分析梁体的受力模式及损伤等级，调整 FRP 加固的敷设工艺及层数配置。若梁构件存在抗弯承载力缺陷，在梁受拉区采用 FRP 布粘贴工艺，借助 FRP 布的多层粘贴实现抗弯能力强化；对于存在抗剪缺陷的混凝土梁，可采用 U 型或封闭式 FRP 箍进行粘贴加固，从而优化抗剪承载力。不同纤维排布取向的 FRP 均可被采用，以适应多样化的加固要求，强化加固的针对性与实施效果。

（二）智能化施工技术的应用与融合

依托智能化的厂房承重构件修复技术应用日趋成熟，参照承重梁的破坏程度，3D 打印技术可针对性调整，定制化输出高匹配度的结构补强构件，就局部损伤明显的承重混凝土梁而言，借助数字化打印手段制作与损伤部位贴合的增强型套箍，使套箍与损伤部位结合，以此提升受损区域的荷载能力，3D 打印技术具备设计自由度大、成型精度优异及施工效率高等优势，可适配各类异

形加固构件的尺寸规格要求。

采用该技术，施工效率与工程质量将得到明显改善，减轻人工操作引起的偏差。采用智能机器人开展碳纤维布施工，实现碳纤维布均匀铺设与密实粘合，提升结构强化水平，借助精准的控制模块，依照工程要求将碳纤维布精准施贴于混凝土梁面层，抑制了人工操作时气泡及褶皱的生成现象。

同时，承重梁修复离不开智能化监测技术的支持，采用承重梁安装传感器方式，实现对梁体承载时的应力水平、变形量及位移的连续观测，进而实现及时预警梁的潜在故障。若检测到梁体应力超出限值或变形量超标时，需快速采取补强手段或调节受力分布，防范结构坍塌。

（三）绿色可持续修复理念的融入与实践

就现阶段而言，各产业领域的发展趋势明显向绿色可持续倾斜。在既有工业建筑梁体修复阶段，实施环境友好型修复方案意义重大，针对加固材料的筛选，宜优先采用环保型加固材料，降低对生态系统的干扰，采用有机挥发物（VOC）浓度低的粘合与涂覆材料，削弱工程实施阶段的大气环境负荷。在工程实施阶段，可要求材料商出具环保认证相关证明，保障施工材料与环境要求相一致，应关注材料是否具备回收及再利用特性，实现资源高效利用。

推动资源的闭环利用，在厂房拆除施工阶段，对可二次利用的物料进行归类回收，诸如钢材与木材等资源，经处理加工后，该类型再生骨料可作为加固工程的理想替代材料，废旧钢材可加工为建筑加固所需的钢板与钢筋，废旧木料经再加工能形成临时建筑支撑及模板体系。采用资源循环利用方式，有利于压缩项目预算支出，可降低自然资源开采压力，实现资源永续利用。

四、结论

存量工业建筑承重梁从设计施工到环境暴露全过程面临多重压力，存在原始设计施工弊端、长期力学损伤、环境腐蚀劣化等挑战，此类问题大幅削弱了承重梁的荷载能力与结构安全度，干扰厂房的标准化运营管理。在既有厂房承重构件修复实施阶段，传统的粘钢、增大截面、碳纤维及预应力等加固技术仍具有工程应用价值，但应针对不同工况筛选最优修复方案，全面考量力学性能、破坏程度、功能要求与周边环境等变量，实现技术特性的最优组合，获得最佳结构强化效果。

参考文献

[1] 罗晓春. 城市更新背景下老旧厂房保护与创意改造的策略研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (18): 7-9.
[2] 于海龙. 某钢筋混凝土框架结构旧厂房改造关键施工技术 [J]. 四川水泥, 2025, (04): 128-130.
[3] 姜晓璐, 张贺, 赵雨萌, 等. AI 在建筑设计过程中的应用初探——以老旧厂房改造为例 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (03): 61-63.
[4] 肖益民, 黄文虎. 锌焙砂冷却圆筒设备选用及在旧厂房改造中的应用 [J]. 世界有色金属, 2025, (02): 35-37.
[5] 陈鹏瑕. 旧厂房改造项目结构加固设计及施工 [J]. 石材, 2024, (08): 62-64.
[6] 施丁平. 城市更新背景下老旧厂房转型升级改造设计实践 [J]. 上海建设科技, 2024, (02): 17-19+26.

社区防灾生活圈的支撑体系构建

徐圣奇

中冶南方城市建设工程技术有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2026010016

摘 要 : 借鉴“社区防灾圈”以及“社区十五分钟生活圈”理论模型, 结合防灾特征, 在空间上构建以医疗救助体系、生活物资保障体系以及健康活动体系为核心的社区防灾生活圈模型。为支撑防灾生活圈, 提出了三大支撑体系, 分别是: 社区交通支撑体系、社区智慧支撑体系、社区基础设施支撑体系。分别进行了系统构建, 提出了改善方案、应用策略及技术方案, 推进以灾情防护为出发点的新技术新方法的研究逐步完善, 更具前瞻性、人性化。

关 键 词 : 社区生活圈; 防灾; 支撑体系

Construction of A Support System for Community Disaster Prevention and Daily Life Circles

Xu Shengqi

WISDRI Southern Urban Construction Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Drawing on the theoretical models of the "community disaster prevention circle" and the "community fifteen-minute daily life circle," and integrating disaster prevention characteristics, this study constructs a spatial model of a community disaster prevention and daily life circle centered around a medical assistance system, a daily necessities support system, and a health activity system. To support the disaster prevention and daily life circle, three major support systems are proposed: the community transportation support system, the community smart support system, and the community infrastructure support system. Each system is systematically constructed, with improvement plans, application strategies, and technical methods proposed to advance research on new technologies and methods focused on disaster protection, making them more forward-looking and human-centered.

Keywords : community daily life circle; disaster prevention; support system

引言

从城市发展史上来看, 城市规划史就是一场与各类灾害作斗争的历史, 每一次重大灾情都倒逼城市规划理念以及城市建设标准、规范的更新迭代, 由此推动城市的健康发展^[1]。在全球化背景下, 高频、高速、高量的旅客和货物流动是当今世界技术及经济高度发达的体现, 这为灾后防范的组织造成了更大的困难。基于过往的防灾经验, 为城市打造防灾生活圈的议题成为了当前亟待解决的重要课题。

一、社区生活圈与防灾

城市社区作为城市的基本细胞单元, 社区被视为“城市减灾的基本单元”, 各项人民生活和防灾工作都要求以社区为中心来开展。社区空间如何快速响应灾情, 并提出一套系统性的解决思路, 具有独创性, 拥有广泛的社会效益^[2]。

“生活圈”这一理念的提出及其实践最早源于日本, 直至上世纪90年代, 这一概念才逐渐进入国内学术界的视野。此后, 社区生活圈规划日益成为我国居住区规划模式转型的一个重要趋势。在当前的15分钟社区生活圈规划中, 尽管已对健康、安

全、福祉等因素有所关注, 但其内容多聚焦于灾前预防阶段, 针对应急救灾的考虑仍相对薄弱。因此, 本文所倡导的社区防灾生活圈, 强调日常使用与应急功能之间的弹性融合, 旨在将健康福祉的提升与安全防灾的保障有机结合, 实现双重目标的协同推进。^[3]

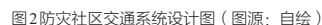
二、支撑体系的构建原则

在构建社区防灾生活圈中, 有三大支撑体系, 一是交通系统支撑体系, 二是智慧系统支撑体系, 三是基础设施系统支撑体

在防灾生活圈中，这三个支撑体系有共同的发展原则：（一）支撑体系的重要程度高，没有支撑体系，便无法实现社区防灾医疗救助、物资保障、健康活动板块的构建；（二）支撑体系技术性强、规范性强，三大支撑的构建依赖完备的体系、规范的设计、系统的设备与专业的技术，形成了一定的行业标准规范；（三）支撑体系内具有动态的完善过程，是一种被动的、依赖于技术的完善过程，但完善的面是广泛的。

基于以上的原则，我们对三大支撑体系进行了研究，总结了防灾背景下的三大支撑系统的优化策略。

目前的社区道路系统有一定的局限性,人们不得不挤在一个“独木桥”上,增加了次生灾害的风险与资源调配的难题,因此设立多流线模式在未来的社区规划中显得尤为必要,布置高效的路网,保障社区车流、物流的独立运转,还能应对各种突发状况^[5]。



与货的两级连接枢纽。外圈有货物运输点,社区内的物资获取在此枢纽,外部的运输从外穿过,社区内取到货物后在转接到中心处进行再分配。内圈有人员运输枢纽,各个小区病人从此点到达紧急救护线上运送出去,不会影响内部活动中心和小区内部的秩序^[6]。

通过防灾社区交通系统的构建,既能保持社区内防灾物资的充足,又能满足居民的日常活动需求,在以社区为基本防灾单元的结构中,达到最大的释放内部空间的作用。

智慧社区是智慧城市的基础性组成部分^[7]，同时也是其顶层理念的延伸与实践。在空间上，它构成了智慧城市的关键功能节点与网络，因此其规划与发展对智慧城市的整体实现具有决定性意义。国家也逐步提高对智慧社区政策支持力度，先后出台了《智慧社区建设指南》、《关于推进社区公共服务综合信息评价指标体系研究》等政策文件，推动智慧社区市场规模增长率保持在30%以上。

借助韧性城市的核心要素，构建社区防灾完善的备用空间体系，从公共管理及城市规划角度提高韧性，结合智慧防灾体系增强社区抵御和化解外部冲击的能力，保证社区在应对重大公共危机时有足够的拉伸空间。

因此我们首先需要构建社区防灾生活圈-智慧支撑孪生体系,这虽然是一个虚拟的空间,但是可以通过智慧技术的手段、通过人的管理完成现实空间挤压、制约时的减负。

在搭建防灾生活圈智慧支撑孪生体系时,从两个维度展开,一是线上的空间与现实生活中的生活、公共服务与疗愈进行对应形成三个大的板块,二是将线上空间活动按照“灾情严重程度-线上流量使用梯度”的双重拓展关系进行排布^[6]。防灾生活圈智慧支撑孪生体系的构建体现了智慧防灾与现实防灾关系的两大特点:

(1) 映射性。灾情的爆发推动了生活圈“上线”的速度，曾经缺位的空间得到迅速补充，尤其是线上办公、线上学校等工作性质的空间转移后成为了长期存在的新形态。在这一轮的线上空间扩充下，基本实现了线下－线上空间的一一映射，也急需建立线上空间的运行规则。

(2) 平衡性。线上防灾生活圈与现实中是一种动态平衡的关系,疫情严重时占据主导地位,成为社区正常运转的基础平台;其他时间内为居民提供了更多选择与补充,使其更具包容性。

传统智慧城市顶层设计常采用单一的自上而下模式，致使“城市大脑”难以精准触达基层创新与真实需求。加之系统建设偏重后端，疏于对前端需求的汇集与剖析，最终造成应用平台与基层实际严重分离，呈现出“两张皮”的悬浮状态。因此，我们在做城市的智慧化应用时，应该重视城市一社区的虚拟空间关系，社区是需求端也是应用端、反馈端，出发点应该以社区为基础，视觉呈现、分析决策时以城市为基础，联通性的功能在区域中都可以使用。

为构建可持续的智慧社区商业模式，需广泛汇聚社会资源，将数据价值运营、定制化保险服务与智能化场景应用相结合，以此开辟多元盈利渠道，确保社区发展兼具普惠性与经济性，让居

民与各方主体共享发展收益。

（三）社区基础设施支撑体系

社区中的给水、排水、电力、电信、燃气、热力、垃圾处理等相关市政基础设施，作为应急保障基础设施，重要性不容忽视，其中雨污水处理和垃圾处理三类市政基础设施与防灾的关系最为密切。

传统社区的物能代谢多表现为一种单向的“摄取—排放”过程：资源输入社区，经使用后转化为废弃物输出。这种以城市和生态系统为末端出口的线性模式，本质上是一种高资源消耗、低环境效益的不可持续过程。

以完善的基础设施为支撑，防灾生活圈能够有效推进水系统循环、垃圾资源化及能源高效利用等方面的建设，旨在形成一个内部循环、自我调节的社区生态代谢体系。

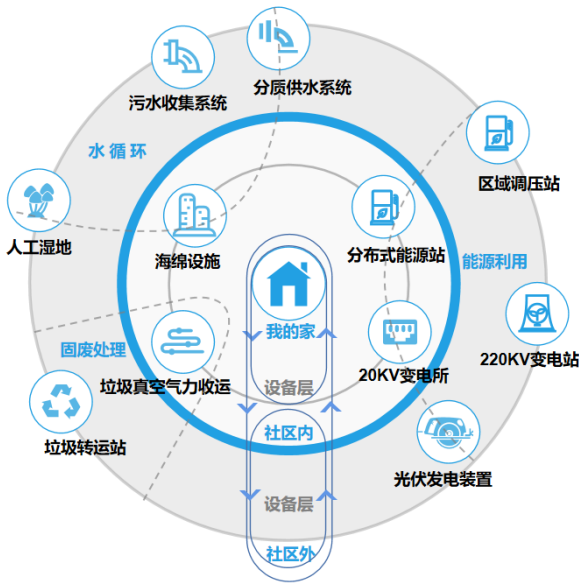


图2：社区基础设施体系示意图

在构建的防灾生活圈基础设施支撑体系，以“家——社区”、“社区内——社区外”循环为拓展动力。在水循环系统中通过分质供水、污水收集、海绵设施处理达到水体净化循环利用的目标；在能源利用中通过分布式能源站提供燃气的同时，将供水转化为热水和冷冻水，采用220KV直降20KV变电所，有效减少电网设备数量和输电线路长度，通过光伏发电装置解决部分社区内部用电达到能源循环利用的效果；在固废处理上采用垃圾真空气力收运与垃圾转运站结合的方式，真空管道收集系统聚焦于前端垃圾收集的问题，实现全过程密闭式收集及运输，同时效地支持从源头上进行垃圾分类收集，可实现多类垃圾源头分类投放，并实现分类装箱装车 and 分类收运，杜绝分类后混装混收的现象^[9]。

防灾生活圈基础设施支撑体系是一个技术模型，技术的研发到推广还有很远的距离。现有的社区市政服务水平，尤其是老旧小区很难达到标准，需要制定可实施方案，有计划的进行改造，先补短板，再优化提升。

四、结束语

频繁发生的各类灾害，促使我们必须以更为审慎的态度，去理性审视城市应如何在常态化存在的复杂风险中维持基本功能并提升其内在韧性。防灾成为了生活的一部分，健康成为人居环境升级的推动力。以灾情防护为出发点的新技术新方法的研究不能放缓脚步，甚至要更加完善，更具前瞻性，更有人性化，未来的城市理应是一座“安全之城”、“温暖之城”、“智慧之城”。

参考文献

[1] 瞿林艳. 疫情防控视域下社区治理问题及对策研究 [D]. 西华师范大学, 2021.
[2] 彭翀, 郭祖源, 彭仲仁. 国外社区韧性的理论与实践进展 [J]. 国际城市规划, 2017, 32(04): 60-66.
[3] 王兰. 建构“公共健康单元”为核心的健康城市治理系统——应对2020新型冠状病毒肺炎突发事件笔谈 [J/OL]. 城市规划: 1[2020-04-09].
[4] 葛天任, 薛澜. 社会风险与基层社区治理: 问题、理念与对策 [J]. 社会治理, 2015(04): 37-43.
[5] 叶伟. 英国社区自助建设对我国社区更新的启示 [J]. 规划师, 2006(03): 61-63.
[6] 杨敏. 作为国家治理单元的社区——对城市社区建设运动过程中居民社区参与和社区认知的个案研究 [J]. 社会学研究, 2007(04): 137-164+245.
[7] 李军, 梁万年, 常文虎, 彭迎春. 小康社会社区卫生服务 [J]. 中国全科医学, 2003(05): 353-354.
[8] 刘敏敏. 人工智能提升社区治理效能路径探索——以新冠肺炎疫情防控为视角 [J]. 宁夏党校学报, 2022, 24(01): 87-92.
[9] 刘凤英. 社区分布式联供系统配置优化 [D]. 山东建筑大学, 2017.

人工智能技术在建筑工程造价快速估算中的应用与精度验证

张河

天津市房屋鉴定建筑设计院有限公司, 天津 300381

DOI:10.61369/ERA.2026010020

摘要： 建筑工程造价快速估算作为工程项目决策、设计及招投标阶段的核心环节，其效率与精度直接影响项目投资效益。传统估算方法受限于数据处理能力和经验依赖性，难以满足现代建筑工程复杂多变的需求。本文基于人工智能技术的算法优势，深入分析建筑工程造价快速估算的核心需求与传统模式局限，系统阐述 BP 神经网络、随机森林、支持向量机等核心技术的应用逻辑与模型构建流程，构建多维度精度验证体系，结合工程实践场景分析验证方法的有效性，最后提出技术应用的优化路径，为人工智能技术在工程造价领域的深度落地提供理论与实践参考。

关键词： 人工智能；建筑工程造价；快速估算；BP 神经网络；精度验证

The Application and Accuracy Verification of Artificial Intelligence Technology in the Rapid Estimation of Construction Project Cost

Zhang He

Tianjin House Appraisal and Architectural Design Institute Co., LTD. Tianjin 300381

Abstract： Rapid estimation of construction project cost, as a core link in the decision-making, design and bidding stages of engineering projects, its efficiency and accuracy directly affect the investment benefits of the project. Traditional estimation methods are limited by data processing capabilities and reliance on experience, making it difficult to meet the complex and ever-changing demands of modern construction projects. Based on the algorithmic advantages of artificial intelligence technology, this paper deeply analyzes the core demands of rapid estimation of construction project cost and the limitations of traditional models, systematically expounds the application logic and model construction process of core technologies such as BP neural network, random forest, and support vector machine, builds a multi-dimensional accuracy verification system, and combines engineering practice scenarios to analyze the effectiveness of verification methods. Finally, the optimization path for the application of technology is proposed, providing theoretical and practical references for the in-depth implementation of artificial intelligence technology in the field of engineering cost.

Keywords： artificial intelligence; construction project cost; quick estimation; BP neural network; accuracy verification

引言

建筑工程造价估算贯穿项目全生命周期，尤其在前期决策阶段，精准且高效的估算结果是投资额度确定、方案比选及风险预判的关键依据。随着建筑行业向智能化、精细化转型，工程规模扩大、结构体系复杂、材料价格波动等因素使传统估算方法面临严峻挑战^[1]。定额法依赖静态标准导致时效性不足，类比法受限于案例匹配度且主观性较强，指标估算法难以覆盖复杂工程的个性化特征。人工智能技术凭借强大的数据挖掘、特征学习及非线性拟合能力，为破解传统方法瓶颈提供了新路径。近年来，相关研究多集中于单一算法应用，缺乏从应用逻辑到精度验证的系统性分析。聚焦人工智能技术在快速估算中的核心应用场景，设计完整的技术应用与精度验证框架，提升技术应用的科学性与可靠性^[2]。

一、建筑工程造价快速估算的核心需求与传统模式局限

（一）快速估算的核心需求

建筑工程造价快速估算的核心需求表现为“时效性”“精准性”“动态性”三维度。从时效性上看，前期决策阶段对估算结果的响应速度要求极高，必须在短时间内为方案调整提供数据支持，传统方法由于数据处理的复杂性往往难以满足；精准性的需求来自投资控制的刚性要求，估算误差需要控制在合理区间，否则会造成投资超支或资源浪费，特别是对于大型复杂工程，一丝误差也会造成巨大成本波动；动态性的需求则是与市场环境变化相适应的，材料价格、人工成本、政策调整等要求估算模型有实时的更新与适配三者相互联系，共同构成快速估算的质量评价核心^[9]。

（二）传统估算模式的主要局限

传统估算模式的局限首先是数据处理能力不足。传统方法采用人工对历史数据进行整理，很难对海量工程案例，价格信息及技术参数进行高效处理，更无法从数据背后挖掘隐性关联，导致估算结果缺乏数据深度支撑。其次是经验依赖性过强，估算过程中对工程量换算、费率调整等关键环节的判断多依赖造价人员的个人经验，不同人员的专业水平差异易引发估算偏差，且难以形成标准化估算流程。最后是动态适应性薄弱，传统方法多基于固定定额或历史案例，无法实时整合市场动态数据，面对新型建筑结构、绿色建材应用等新场景时，估算精度大幅下降，难以适应现代工程的发展需求^[10]。

二、人工智能技术在工程造价快速估算中的应用逻辑与核心模型

人工智能技术在工程造价快速估算中的应用核心，是通过算法模型对工程特征与造价数据之间的非线性关系进行拟合，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变。其核心逻辑包括数据预处理、特征工程、模型构建与训练三个关键环节，不同技术模型因算法特性差异，在应用场景与效果上各具优势。

（一）BP神经网络的应用与模型构建

在人工神经网络的发展历史上，感知机 (Multilayer Perceptron, MLP) 网络曾对人工神经网络的发展发挥了极大的作用，也被认为是一种真正能够使用的人工神经网络模型，它的出现曾掀起了人们研究人工神经网络的热潮。单层感知网络 (M-P 模型) 作为最初的神经网络，具有模型清晰、结构简单、计算量小等优点。但是，随着研究工作的深入，人们发现它还存在不足，例如无法处理非线性问题，即使计算单元的作用函数不用阈值函数而用其他较复杂的非线性函数，仍然只能解决线性可分问题。不能实现某些基本功能，从而限制了它的应用^[5]。增强网络的分类和识别能力、解决非线性问题的唯一途径是采用多层前馈网络，即

在输入层和输出层之间加上隐含层。构成多层前馈神经网络。BP 神经网络凭借强大的非线性映射能力，成为工程造价快速估算的主流技术之一，其应用逻辑聚焦于复杂工程特征的深层挖掘。模型构建首先需明确输入层与输出层变量，输入层选取对造价影响显著的核心特征，包括建筑面积、结构类型、层数、跨度、基础形式、主要材料用量等，通过相关性分析剔除冗余特征；隐藏层设置需结合工程数据规模，通常采用“试错法”确定层数与神经元数量，避免过拟合或欠拟合；输出层直接对应工程造价估算结果，采用连续值输出模式。在训练过程中，需对历史工程数据进行标准化处理，将特征变量与造价数据转换为统一量级，通过反向传播算法不断调整权重参数，使模型预测值与实际造价的误差逐步收敛。该模型的优势在于能处理多维度、强耦合的工程数据，尤其适用于高层建筑、复杂钢结构等特征多样的工程估算场景，但其缺陷是训练过程易陷入局部最优解，需通过设置合理的学习率与迭代次数优化^[6]。

（二）随机森林的应用与模型构建

在机器学习中，随机森林是一个包含多个决策树的分类器，并且其输出的类别是由个别树输出的类别的众数而定。Leo Breiman 和 Adele Cutler 发展出推论出随机森林的算法。而 "Random Forests" 是他们的商标。这个术语是 1995 年由贝尔实验室的 Tin Kam Ho 所提出的随机决策森林 (random decision forests) 而来的。这个方法则是结合 Breimans 的 "Bootstrap aggregating" 想法和 Ho 的 "random subspace method" 以建造决策树的集合。随机森林基于集成学习思想，通过多棵决策树的投票机制提升估算精度，其应用逻辑侧重于降低估算过程的不确定性。模型构建的核心是样本抽样与特征选择，采用 bootstrap 抽样法从历史数据中随机抽取多个训练样本集，每个样本集对应构建一棵决策树；在决策树生成过程中，随机选择部分特征参与节点分裂，通过信息增益比确定最优分裂节点，避免单一决策树的过拟合问题^[7]。与 BP 神经网络相比，随机森林具有以下三个方面的优点：对数据预处理要求低，不需进行复杂标准化处理，可以直接处理离散型与连续型混合特征；具备特征重要性评估能力，可以衡量各工程特征对造价的影响程度，为方案优化提供明确指引；训练过程稳定，不易受异常值影响，可适于数据质量参差不齐的工程。其缺点是缺乏对高维稀疏数据的处理能力，在新的工程结构估算中需要与特征工程优化结合^[8]。

（三）支持向量机应用和模型构建

支持向量机通过寻找最优分类超平面实现数据拟合，在小样本工程数据估算中得到很好的表现，其应用逻辑集中于求解样本量不足导致的精度问题。模型构建的关键是核函数选择与参数优化，针对工程造价数据的非线性特征，一般选用径向基核函数将数据映射到高维特征空间，通过惩罚系数调整模型对误差的容忍度，平衡拟合精度与泛化能力。在应用过程中，支持向量机最小化了结构风险而非经验风险，避免了小样本场景下的过拟合问题，特别是针对新

型绿色建筑,智能建筑等没有大量历史数据的估算场景。同时,它的模型复杂度较低,训练效率比BP神经网络高,便于工程现场的快速估算要求。但该模型对大规模数据处理过程中训练时间明显增加,应用时需通过数据降维技术提高应用效率^[9]。

三、人工智能估算模型精度验证体系构建与实践

精度是人工智能估算模型的核心评价指标,需要形成“指标体系—验证流程—场景适配”三位一体的验证框架,保证验证结果的科学性与实用性。和传统的单一误差指标验证不同,该体系从估算误差、稳定性、泛化能力三个维度展开,结合工程实践场景完成全面验证。

(一) 精度验证指标体系设计

精度验证指标体系包括基础误差指标,稳定性指标与泛化能力指标。基础误差指标采用平均绝对误差率、均方根误差率与最大相对误差,平均绝对误差率反映整体估算偏差,均方根误差率放大极端误差的影响,最大相对误差界定误差上限,三者结合全面反映估算精度;稳定性指标采用变异系数,通过多次重复估算的误差波动情况,评价模型在相同数据输入下的输出一致性;泛化能力指标采用交叉验证误差,通过将数据划分为训练集与测试集,多次交换数据角色验证模型

指标选取应结合工程场景特点,比如招投标阶段对估算精度有很高的要求,应该注重最大相对误差;在初步设计阶段,考虑估算效率与稳定性更强,变异系数是核心指标。指标权重,形成不同场景下相应的精度评价标准^[10]。

(二) 精度验证流程规范

精度验证流程包括数据准备,模型训练,多维度验证,误差溯源四个步骤。在数据准备阶段,需对历史工程数据进行清洗与划分,剔除异常值与缺失值,按7:3比例划分为训练集与测试集,以保证数据的代表性;在模型训练阶段,采用训练集完成模型参数优化,并记录训练过程中的误差收敛曲线;在多维度验证阶段,通过测试集计算各项验证指标,结合交叉验证法提升结果可靠性;在误差溯源阶段,分析误差来源,区分数据质量、特征选择、参数设置等因素对精度的影响,为模型优化提供方向在验证过程中,一定要特别注意数据的独立性要求,避免训练集与测试集存在的重复工程案例,避免验证结果虚高。同时,引入未参与模型训练的实际工程案例,采用盲测方式,进一步验证模型的实战应用能力。

(三) 实践分析的场景分析

结合三类典型工程场景的验证实践,不同人工智能模型的精度表现也较为明晰。在高层建筑估算场景中,选取50个历史案例作为数据样本,BP神经网络平均绝对误差率为3.2%,随机森林为3.8%,支持向量机为4.5%,BP神经网络因能处理多维度特征最优;在小型工业厂房估算场景中,样本量仅15个,支持向量机平均绝对误差率为2.0%。显著优于其他两种模型;在既有建筑

改造估算场景中,数据存在较多缺失值,随机森林的变异系数为0.12,稳定性高于BP神经网络的0.18与支持向量机的0.15,展现出更强的抗干扰能力。验证结果表明,不存在适用于所有场景的“最优模型”,需根据工程类型、样本规模、数据质量等场景特征选择适配模型,例如小样本选支持向量机、多特征选BP神经网络、数据质量差选随机森林。同时,通过误差溯源发现,特征选择对精度的影响占比达40%,是模型优化的核心环节。

四、人工智能估算应用的优化路径与发展展望

(一) 技术应用优化路径

人工智能估算应用的优化需从数据、模型、流程三个层面展开。数据层面构建“工程数据中台”,整合设计图纸、招投标文件、结算资料等多源数据,通过数据标准化处理形成结构化数据库,解决数据孤岛与质量问题;模型层面采用混合算法优化,例如将随机森林的特征选择能力与BP神经网络的拟合能力结合,先通过随机森林筛选核心特征,再输入BP神经网络训练,提升精度与效率;流程层面融入BIM技术,通过BIM模型自动提取工程量特征,实现“模型—数据—估算”的全流程自动化,减少人工干预导致的误差。此外,需建立模型动态更新机制,结合市场价格波动、政策调整等因素,定期更新训练数据与模型参数,确保估算结果的时效性。例如,针对建材价格上涨,每月更新一次材料价格数据,重新训练模型调整权重。

(二) 行业发展展望

未来人工智能技术在工程造价快速估算中的应用将向“智能化、一体化、协同化”方向发展。智能化方面,引入深度学习与强化学习技术,实现模型的自主学习与参数优化,无需人工干预即可适应新工程场景;一体化方面,构建“估算—计价—控制”全流程智能系统,将快速估算与后续的造价计价、动态控制相结合,形成闭环管理;协同化方面,通过区块链技术实现多主体数据共享,业主、设计单位、施工单位可共同参与数据维护,提升数据质量与模型精度。同时,需关注技术应用中的伦理与规范问题,建立人工智能估算模型的行业标准,明确数据使用权限与精度责任划分,推动技术在规范框架内健康发展。

五、结论

人工智能技术通过BP神经网络、随机森林、支持向量机等模型的应用,有效破解了传统建筑工程造价快速估算中的效率低、精度差、适应性弱等问题。各模型有各自的优点,需要根据工程的场合特征来选择技术,BP神经网络可用于多特征复杂工程,随机森林可以用于数据质量较差的场景,支持向量机则适用于小样本新型工程。构建的多维度精度验证体系,从误差,稳定性,泛化能力三个层面实现全面验证,给模型优化指明方向。技术应用

的核心优化路径是数据标准化、模型混合优化与流程自动化，未来通过与 BIM、区块链等技术的融合将实现工程造价估算的全流程智能化升级。研究表明人工智能估算模型精度在 5% 以内，可满足工程各阶段估算要求，为建筑行业的精细化投资管理提供有力支撑。在以后的研究中，还应注重小样本学习与动态更新技术，进一步提高模型的适应性与时效性。

参考文献

[1] 陈日亮. 人工智能技术在建筑装饰装修工程中的应用研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (20): 81-83.

[2] 徐俊豪. 人工智能技术优化住宅建筑工程管理研究 [J]. 居舍, 2025, (30): 137-140.

[3] 周永奇. 人工智能技术在住宅建筑工程领域质量监督管理中的应用研究 [J]. 居舍, 2025, (29): 61-64.

[4] 张书鸣. 智能建造在公共建筑工程管理中的应用分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(09): 221-223.

[5] 尹玉平. 建筑工程中废弃泥浆资源化利用与房心回填综合施工技术研究——以人工智能科技园二期项目为例 [J]. 城市建筑, 2025, 22(17): 196-198.

[6] 翟美龄. 近五年人工智能在工程管理中应用研究综述 [J]. 新城建科技, 2025, 34(08): 186-188.

[7] 薛蔚. 人工智能技术在建筑工程领域的应用实践 [J]. 上海建设科技, 2025, (04): 41-44+48.

[8] 王永坡, 张亚茹. 人工智能在装配式建筑设计中的应用与挑战 [J]. 住宅与房地产, 2025, (23): 62-64.

[9] 黄立辉. 基于人工智能的建筑结构设计技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (20): 196-198.

[10] 丁晓, 李超. 人工智能技术在建筑工程中的应用及挑战 [J]. 建设科技, 2025, (13): 31-34.

数字化技术赋能超高层建筑混凝土施工全过程质量追溯与管控

麦广仙, 李泽威, 陈泽然
广东建科建设咨询有限公司, 广东 广州 510599
DOI:10.61369/ERA.2026010024

摘 要 : 本文聚焦数字化技术赋能超高层建筑混凝土施工全过程质量追溯与管控, , 解析超高层混凝土施工6大核心阶段及各环节可量化质量控制点, 进而构建“原材料溯源 – 生产运输监控 – 浇筑振捣管理 – 养护监测 – 检测验收集成”的全流程数字化实施路径, 通过 BIM、传感器、AI、二维码等技术实现各环节参数实时采集、风险预警与闭环管控。在此基础上, 设计包含数据中心与数字孪生的数字化平台, 集成溯源、监控、分析、协同四大核心功能模块, 打通全链条数据壁垒, 实现施工过程可视化、操作参数可追溯、质量缺陷可预警与多方协同高效化。方案有效破解了超高层混凝土施工质量管控难题, 为工程质量安全提供可靠技术支撑, 提升了施工效率与管控精准度。

关 键 词 : 超高层建筑; 混凝土施工; 数字化技术; 质量追溯

Digital Technology Empowers Full-Process Quality Traceability and Control in Concrete Construction of Super High-Rise Buildings

Mai Guangxian, Li Zewei, Chen Zeran
Guangdong Jianke Construction Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510599

Abstract : This paper focuses on the quality traceability and control throughout the entire process of concrete construction in super high-rise buildings enabled by digital technologies. It analyzes the six core stages of super high-rise concrete construction and quantifiable quality control points at each stage, thereby constructing a digital implementation pathway for the entire process that includes "raw material traceability – production and transportation monitoring – pouring and vibration management – curing monitoring – inspection and acceptance integration." Through technologies such as BIM, sensors, AI, and QR codes, real-time parameter collection, risk early warning, and closed-loop control across various stages are achieved. On this basis, a digital platform comprising a data center and digital twin is designed, integrating four core functional modules: traceability, monitoring, analysis, and collaboration. This platform breaks down data barriers across the entire chain, enabling visualization of the construction process, traceability of operational parameters, early warning of quality defects, and efficient multi-party collaboration. The proposed solution effectively addresses the challenges of quality control in super high-rise concrete construction, providing reliable technical support for project quality and safety while enhancing construction efficiency and management precision.

Keywords : super high-rise building; concrete construction; digital technology; quality traceability

引言

随着城市化进程的加速, 超高层建筑已成为城市空间高效利用的重要载体, 其工程规模与技术复杂度持续提升。混凝土作为超高层建筑的核心结构材料, 不仅用量巨大, 且需满足高强度、高耐久性等严苛要求, 其施工质量直接决定建筑结构安全与使用寿命。然而超高层混凝土施工面临垂直运输协调难、高空环境恶劣、多专业交叉作业频繁、大体积混凝土温控复杂等多重挑战, 传统“人工记录 + 线下巡检”的管控模式已难以适配。在此背景下, 数字化技术成为破解超高层混凝土施工质量管控难题的关键抓手。基于此, 本文聚焦超高层建筑混凝土施工全流程, 系统解析各阶段质量关键点与传统管控痛点, 构建数字化技术赋能的质量追溯与管控体系, 探索从原材料到检测验收的全链条数字化实施路径, 并设计适配超高层施工特点的数字化管控平台。

一、超高层混凝土施工全过程解析与质量关键点

（一）施工全过程阶段划分

超高层建筑是现代建筑工程施工的主要方向，具有施工量大的特点，同时由于超高层建筑的楼层较高、自身重量较大，楼层整体结构的质量要求也较高。所以，在现代超高层建筑施工过程中，都开始应用高强度混凝土施工。一般选择为 C60 及以上级别的混凝土，而高强度混凝土施工，需要对其施工工艺进行有效把控，确保施工技术应用合理^[1]。超高层建筑混凝土施工可划分为环环相扣的6个核心阶段，并需同步协调“垂直运输”与“多专业交叉”。前期筹备的核心是“方案落地+资源匹配”，需编制结合 BIM 模拟的专项方案以规避冲突，并完成供应商审核与设备调试。原材料管控针对数万方用量，实施全流程分批次管理，严防质量波动。生产与运输阶段需精准协调搅拌站与现场节奏，通过泵管高效完成“地面-高空”转运，避免供料中断或积压初凝^[2]。现场浇筑则需根据核心筒、柱等不同构件特点差异化作业，如大体积混凝土需分层浇筑以控制水化热防裂。养护阶段针对高空恶劣环境，采取覆盖、喷淋等措施并差异化控制时长。

（二）各阶段质量关键控制点

超高层混凝土施工需全程聚焦“可量化、可监测”指标，前期筹备须确保专项方案三方审批通过、BIM 模拟管线冲突规避率 $\geq 95\%$ 及设备调试100%合格^[3]。原材料管控核心是水泥强度达标、砂石含泥量（砂 $\leq 3\%$ 、石 $\leq 1\%$ ），外加剂兼容性测试与原材料复检率均须100%，大体积混凝土另需检测水化热。生产运输阶段，配合比偏差 $\leq \pm 2\%$ ，搅拌 ≥ 90 秒，运输时长 ≤ 90 分钟（高温 ≤ 60 分钟），坍落度损失 $\leq 20\text{mm/h}$ ，且泵管需保温/降温以控制温波动 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$ ^[4]。现场浇筑要控制分层厚度 $\leq 500\text{mm}$ （大体积 $\leq 300\text{mm}$ ）、振捣时间10-15秒/点，并确保核心筒水化热内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$ 。养护阶段须维持温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ ，大体积混凝土养护 ≥ 14 天且每日温降 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。最终检测验收要求试块强度离散系数 $\leq 15\%$ ，外观缺陷面积 $\leq 0.5\%$ ，关键构件须回弹与钻芯双重检测，结构尺寸偏差严格控制在毫米级。

（三）传统管控模式的痛点分析

超高层建筑混凝土施工的传统“人工记录+线下巡检”模式弊端丛生，由于数据分散于多方形成孤岛，导致追溯链条断裂，问题排查耗时费力；人工巡检的滞后性使得对高空温变、泵管堵塞等风险响应迟缓；关键指标依赖人工记录，易出现错漏篡改，数据真实性存疑，引发质量隐患；多方协同依赖低效的会议和函件，沟通内耗严重，延误工期；更无法适配超高层垂直运输协调、大体积混凝土水化热实时监控等特需场景，易导致供料失衡或结构裂缝，严重制约工程效率与安全。

二、全过程数字化质量追溯与管控实施路径

（一）原材料数字化溯源

超高层建筑混凝土施工的传统“人工记录+线下巡检”模式弊端丛生，由于数据分散于多方形成孤岛，导致追溯链条断裂，问题排查耗时费力；人工巡检的滞后性使得对高空温变、泵管堵塞等风险响应迟缓；关键指标依赖人工记录，易出现错漏篡改，数据真实性存疑，引发质量隐患；多方协同依赖低效的会议和函

件，沟通内耗严重，延误工期；更无法适配超高层垂直运输协调、大体积混凝土水化热实时监控等特需场景，易导致供料失衡或结构裂缝，严重制约工程效率与安全。

（二）生产运输数字化监控

为保障超高层建筑混凝土质量，数字化监控需实现生产可控、运输可视与风险预警。在生产端，搅拌站根据平台指令自动执行精准的配合比，并实时监控投料、温度等参数，超差即报警停机；在运输端，通过车载 GPS 与传感器实时追踪车辆位置、罐体转速及混凝土状态，对超时或质量波动进行预警；针对高空垂直运输，则在泵管上布设传感器监测压力，提前预警堵管风险^[5]。这套全流程数字化体系旨在主动管控各环节，确保混凝土在严苛的时间窗口内安全、高质量地完成浇筑。

（三）浇筑振捣数字化管理

为应对超高层混凝土浇筑的高空作业、同步施工与温控难题，数字化管理通过构建 BIM 模型进行可视化施工规划与交底，并部署 AI 监控系统实时捕捉浇筑画面，联动模型追踪进度、识别违规并即时预警^[6]。在振捣环节，采用内置传感器的智能振捣棒，对频率、深度和时间进行实时监测与数据上传，不合格时现场声光报警，平台则生成质量报告以形成“振捣-监测-整改-复核”的闭环管理^[7]。同时，针对大体积混凝土，通过布设温度传感器实时监控内外温差，一旦超标便自动预警并提示温控措施，从而全面实现施工过程可视化、操作参数可追溯与质量缺陷可预警。

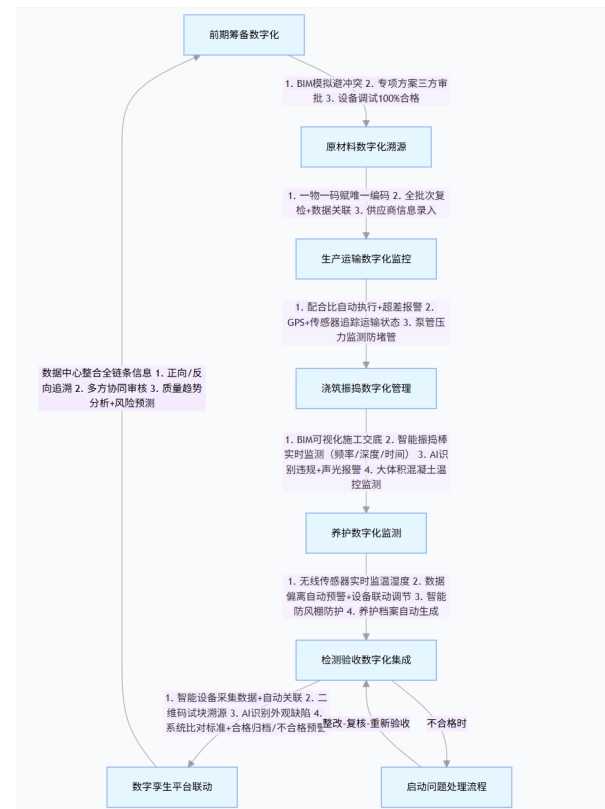


图1 全过程数字化质量追溯与管控实施路径流程图

（四）养护数字化监测

为应对超高层高空恶劣环境，数字化养护系统通过在构件关键部位布设无线传感器实时监测温湿度，当数据偏离动态养护标准时，平台能自动预警并联动启动电伴热或喷淋设备进行调节，同时结合智能防风棚应对强风，并将所有设备运行数据与构件信

息关联,形成完整的养护档案,从而实现环境实时感知、措施自动联动与数据持续追踪,确保混凝土强度稳定增长。

（五）检测验收数字化集成

为实现超高层混凝土检测验收的全流程数字化闭环管理,需打通数据孤岛^[9]。方案核心在于通过智能设备自动采集并上传过程检测数据,系统自动关联施工段、原材料等前期信息;最终检测环节利用二维码实现试块信息溯源,系统自动比对设计标准,合格则自动归档,不合格则立即预警并启动处理流程,同时结合 AI 自动识别外观缺陷;所有数据最终在平台生成一体化数字验收报告,支持多方在线协同,形成从原材料到验收的完整数据链,实现质量全程可追溯。

三、数字化质量追溯与管控平台功能设计

（一）数据中心与数字孪生

该平台通过数据中心和数字孪生两大核心,实现对超高层混凝土施工的全流程智能管理。数据中心作为“数据底座”,打通各环节“数据孤岛”,自动采集并清洗整合从原材料到验收的全维度数据,形成可追溯的完整信息链条,并通过“本地+云端”的混合存储模式与多重安全策略保障数据安全^[9]。数字孪生作为“实景映射中枢”,基于 BIM 构建与物理实体实时同步的动态模型,将所有数据可视化呈现,不仅能直观监控现场状态,更能模拟分析施工风险、预判质量问题,并支持点击任意构件即可回溯其全生命周期数据,最终实现高效、精准、可视化的智能决策与质量管控。

（二）核心功能模块

核心功能模块围绕超高层混凝土施工的管控需求设计,涵盖“溯源、监控、分析、协同”四大核心场景,各模块既独立运行又相互联动,形成完整的管控闭环。溯源管理模块是实现“全链条可追溯”的核心,旨在解决传统模式下质量问题难以定位的痛点。模块以“一物一码”为核心逻辑,为每批次原材料、每车混凝土、每个施工构件赋予唯一追溯编码,编码关联全流程数据。管理人员通过模块可发起多维度追溯,正向追溯可从原材料批次号出发,查询该批次材料用于哪些混凝土生产、运输至哪个施工段、对应构件的检测结果;反向追溯可从某一不合格构件出发,快速定位其使用的混凝土生产单号、运输车辆、原材料供应商,甚至追溯到原材料出厂检测报告中的具体指标。同时,模块支持生成可视化追溯图谱,以时间轴或流程图形式展示数据关联关系,让责任定位更直观、更高效。监控预警模块聚焦“实时管控与风险前置”,覆盖超高层混凝土施工的关键环节。在原材料环节,模块实时监控智能料仓的温湿度与料位,当水泥存储湿度

超过 65% 或料位低于预警线时,自动推送提醒至材料管理员;在生产运输环节,实时显示搅拌站每盘混凝土的配合比执行情况、运输车辆的实时位置与罐车转速,若运输时长即将超过 90 分钟阈值,提前通知现场调度人员准备接收;在浇筑振捣环节,通过 AI 可视化监控与智能振捣棒数据联动,实时查看各浇筑分区的进度与振捣合格情况,若识别到漏振区域或振捣时间不足,立即弹窗预警并标注位置;在养护环节,实时展示各构件的温湿度曲线,当大体积混凝土内外温差接近 25℃ 时,自动触发预警并建议开启冷却水管。数据分析模块通过挖掘数据价值,为超高层混凝土施工质量管控提供“决策支持”^[10]。模块内置多维度分析模型,质量趋势分析模型会按周、按月统计混凝土强度达标率、外观缺陷率等指标,生成趋势曲线,帮助管理人员识别质量波动规律;风险预测模型基于历史数据,预测未来施工环节可能出现的风险;效率分析模型则统计各环节耗时,找出流程瓶颈。协同管理模块针对超高层项目“多参与方、多环节协同”的特点,解决沟通效率低、信息不对称的问题。模块搭建了统一的协同工作台,建设单位、设计单位、监理、施工、供应商可在平台内实现信息共享与业务流转,例如搅拌站需调整混凝土配合比时,可在平台提交变更申请,附上原材料短缺证明与新配合比计算书,监理与设计单位在线审核并签署意见,审核通过后自动同步至施工单位与检测机构,避免纸质函件传递延误;施工单位发现浇筑过程中出现结构尺寸偏差时,可在平台上传现场照片与偏差数据,发起问题整改任务,指定责任人与完成时限,监理在线跟踪整改进度,整改完成后上传验收照片,形成“问题发起-整改-验收”的闭环。同时模块支持在线会议与文档管理,各方可基于数字孪生模型召开远程协调会,标注问题位置;施工图纸、检测标准等文档上传后自动版本管理,避免使用过时文档导致的施工失误,切实提升超高层项目多方协同的效率与准确性。

四、结束语

超高层建筑混凝土施工质量管控是关乎建筑结构安全与长期使用性能的核心命题,其高空作业复杂性、多环节协同要求与严苛的质量标准,决定了传统管控模式的局限性难以通过局部优化突破。本文立足超高层混凝土施工全流程,以数字化技术为核心赋能手段,系统构建了覆盖“原材料-生产-运输-浇筑-养护-验收”的全链条质量追溯与管控体系,通过技术集成与流程重构,有效解决了传统模式下数据割裂、追溯困难、响应滞后等关键痛点。

参考文献

- [1] 肖平,史健宇,严云跃,等.超高层建筑高强度混凝土施工及质量管控要点[J].江苏建材,2022(6):39-41. DOI:10.3969/j.issn.1004-5538.2022.06.015.
- [2] 段鸿斌.超高层建筑混凝土泵送施工技术[J].中国建筑装饰装修,2022(11):65-67. DOI:10.3969/j.issn.1672-2167.2022.11.013.
- [3] 黄钰涵,陈龙,曾少林.超高层建筑大体积混凝土底板施工质量控制技术[J].建筑与装饰,2023(10):109-111.
- [4] 王忠华.超高层钢管混凝土结构建筑的关键技术[J].河南建材,2023(8):42-44.
- [5] 王鼎鑫,黄丽名,张晨,等.超高层建筑超厚基础底板大体积混凝土施工关键技术[J].建筑技术,2023,54(16):1965-1968. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2023.16.008.
- [6] 殷伟.超高层建筑大体积混凝土底板施工质量控制技术探析[J].工程质量,2022,40(12):7-10. DOI:10.3969/j.issn.1671-3702.2022.12.003.
- [7] 李乐.超高层建筑混凝土泵送施工工艺分析[J].大众标准化,2022(16):80-82. DOI:10.3969/j.issn.1007-1350.2022.16.029.
- [8] 李党义,黄政宇.超高层建筑大体积混凝土施工技术分析[J].科技通报,2013,29(4):53-54,57. DOI:10.3969/j.issn.1001-7119.2013.04.020.
- [9] 乔磊.超高层建筑基础大体积混凝土施工技术[J].建筑技术开发,2021,48(7):50-51. DOI:10.3969/j.issn.1001-523X.2021.07.022.
- [10] 丁晓.超高层建筑大体积混凝土施工技术[J].建材与装饰,2021,17(1):19-20. DOI:10.3969/j.issn.1673-0038.2021.01.010.

建筑信息模型 (BIM) 技术在建筑施工中的应用分析

刘敏

中南建筑设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430060

DOI:10.61369/ERA.2026010026

摘 要 : 建筑信息模型 (BIM) 技术作为建筑行业数字化转型的重要支撑, 正深度融入建筑施工全过程。通过三维建模、信息集成与协同管理, BIM 实现了设计、施工与运维阶段的数据共享与动态更新, 有效提升了工程项目的可视化程度与施工管理效率。在施工阶段, BIM 技术可用于进度优化、成本控制、碰撞检测及安全管理, 减少施工误差与资源浪费, 促进项目精细化管理与绿色施工发展。其综合应用显著推动了建筑施工的智能化与信息化进程。

关 键 词 : 建筑信息模型 (BIM); 建筑施工; 信息化管理; 智能建造; 协同设计

Analysis of the Application of Building Information Modeling (BIM) Technology in Building Construction

Liu Min

Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430060

Abstract : As a vital pillar for the digital transformation of the construction industry, Building Information Modeling (BIM) technology is being profoundly integrated into the entire process of building construction. Through 3D modeling, information integration, and collaborative management, BIM enables data sharing and dynamic updates across the design, construction, and operation and maintenance phases, effectively enhancing the visualization and construction management efficiency of engineering projects. During the construction phase, BIM technology can be utilized for schedule optimization, cost control, clash detection, and safety management, thereby reducing construction errors and resource wastage, and promoting refined project management and the development of green construction. Its comprehensive application has significantly propelled the intelligent and information-driven advancement of building construction.

Keywords : building information modeling (BIM); building construction; information-based management; intelligent construction; collaborative design

引言

随着建筑业向数字化与智能化快速迈进, 传统施工模式已难以满足高质量、高效率的工程建设需求。建筑信息模型 (BIM) 技术的出现, 为建筑施工带来了全新的管理理念与技术支撑。通过对工程信息的集成化、可视化与动态化管理, BIM 不仅提高了施工精度与协作效率, 也为项目全过程的精细化控制提供了可能。其应用正在重塑施工管理模式, 推动建筑业向智慧建造时代转型。

一、建筑信息模型 (BIM) 技术的概念与发展现状

建筑信息模型 (BIM) 技术是以三维数字化模型为基础, 集成建筑工程项目各阶段信息, 实现可视化、协调化、信息化与智能化管理的一种先进技术手段。它不仅仅是一个三维设计工具, 更是一个包含建筑全生命周期信息的综合数据平台。通过 BIM 技术, 建筑物从设计、施工到运维的各项信息能够被整合到统一模型中, 实现信息共享与动态更新, 从而显著提升项目的精度和协作效率。与传统二维图纸相比, BIM 具有直观性强、数据关联度高和可模拟性强等特点, 使得各参与方能够在同一信息环境下进

行沟通与决策, 减少信息误差和重复劳动, 推动建筑项目向精细化和数字化方向发展。

近年来, 随着信息技术的快速发展和建筑业转型升级的深入推进, BIM 技术在我国建筑行业得到了广泛推广和应用。从最初的设计辅助工具逐渐演变为覆盖工程全生命周期的综合管理平台。政府部门陆续出台相关政策与标准, 推动 BIM 在公共建筑、基础设施及大型工程中的强制应用。大量建筑企业也纷纷建立 BIM 技术团队, 探索 BIM 在项目管理、成本控制、施工模拟和运维管理中的创新应用。BIM 技术不仅促进了施工单位与设计单位之间的高效协同, 还提高了工程项目的可控性与可追溯性, 为建

筑业的现代化转型提供了坚实支撑。

国际上，BIM 技术的发展同样迅速，美国、英国、日本等发达国家早在二十一世纪初就开始实施 BIM 标准体系建设，并形成了较为完善的应用模式和管理体系。相比之下，我国 BIM 技术的起步稍晚，但发展速度极快，已逐步形成具有中国特色的 BIM 发展路径。当前，BIM 正与物联网、大数据、云计算、人工智能等新兴技术融合，为建筑行业带来更加广阔的应用前景。其发展不仅是建筑行业信息化的必然趋势，更是推动绿色建筑、智能建造和可持续发展的重要引擎。未来，随着 BIM 标准体系的不断完善和技术成本的持续下降，BIM 将在建筑施工领域发挥更加核心的作用，成为建筑行业数字化转型的重要支柱。

二、BIM 技术在建筑施工阶段的核心应用价值

建筑信息模型（BIM）技术在建筑施工阶段的应用，体现了其整合信息、优化管理与提升施工效率的核心价值。通过建立可视化的三维模型，BIM 技术将设计图纸、构件信息、施工流程及资源调度等要素进行集中管理，使施工团队能够在虚拟环境中提前识别潜在问题，进行科学决策与方案优化。这种可视化和数据化的管理方式，有效解决了传统施工中信息割裂、沟通不畅和施工误差等问题。BIM 技术通过碰撞检测功能，可在施工前发现设计中的矛盾点，减少返工与浪费，从而节省人力、物力和时间成本。同时，其信息集成功能可实现各专业之间的协调，促进设计、施工、监理等多方协同作业，显著提高项目整体执行效率。

在施工进度与资源管理方面，BIM 技术能够通过 4D 模型将时间维度引入三维建筑模型，实现施工过程的动态模拟与优化排程。项目管理人员可以基于 BIM 模型进行进度预测与调整，提前识别关键路径和潜在瓶颈，确保施工计划的合理性与可执行性。此外，BIM 技术还能与成本管理系统相结合，形成 5D 模型，实现对工程量、材料、设备及人工成本的精确计算和可视化展示。通过这种方式，项目管理者能够实时监控资源消耗与成本变化，制定科学的资金使用计划，最大限度地降低施工成本风险。同时，BIM 模型的数据可作为后期维护和管理的重要依据，为建筑物全生命周期管理提供持续的信息支持，体现出 BIM 技术在施工阶段对项目经济性与可持续性的促进作用。

在安全与质量管理方面，BIM 技术通过信息集成与模拟功能，为施工现场提供了强有力的技术保障。施工前，可利用 BIM 模型进行施工工艺模拟和安全风险分析，识别高风险作业区域并制定防范措施，从而提升安全管理的前瞻性与科学性。在施工过程中，BIM 技术可与传感器、无人机、物联网等设备结合，实时监测施工环境和结构状态，实现对安全隐患的智能预警与可追溯管理。此外，BIM 的可视化特性使得质量控制更加直观，施工数据与检测结果可直接关联至模型，实现质量问题的精确定位与快速整改。通过这种全程可追踪、信息透明的管理模式，BIM 技术不仅提升了施工安全与工程质量，也推动了建筑项目从经验管理向数据驱动管理的转变。

三、BIM 技术在施工进度与成本控制中的作用分析

在建筑施工过程中，进度与成本是影响项目成败的关键因素。BIM 技术的引入，使施工管理从传统的经验型、静态化模式转向数字化、可视化与动态化管理。通过建立包含时间、空间和工程信息的综合模型，BIM 技术能够实现施工过程的精确规划与动态调控。利用 4D（时间维度）模型，施工团队可以在项目实施前通过模拟分析确定最优施工顺序，识别潜在的冲突与风险点，合理安排工序衔接，从而避免资源浪费与施工延误。施工过程中，BIM 技术能够实时更新进度信息，与现场施工数据保持同步，为管理人员提供直观的可视化进度监控手段，使决策更加科学、灵活和高效。

在成本控制方面，BIM 技术通过集成工程量、材料、人工、设备等多维度数据，建立起精确的 5D 模型，实现成本的全过程动态管理。项目预算阶段，BIM 模型可自动提取构件数据，生成精确的工程量清单，减少人工统计误差，为成本估算提供数据支持。施工阶段，管理人员可根据模型中的实时数据，对资源投入与费用支出进行跟踪与对比，及时发现超支或滞后环节，采取调整措施，确保成本控制在合理范围内。此外，BIM 技术能够将成本信息与进度计划相结合，实现资金流与施工计划的动态联动，使项目在不同阶段的资金分配更加合理高效。通过这种精细化的成本管理方式，建筑企业能够有效降低财务风险，提升资金利用率与项目盈利能力。

BIM 技术不仅在进度与成本控制上具有显著优势，更在决策支持和风险预控中发挥了重要作用。其强大的数据分析与可视化功能使项目各参与方能够基于统一模型进行协同管理，减少因信息不对称造成的误判与延误。BIM 的模拟分析可对不同施工方案进行对比评估，帮助管理者在保证工期与成本平衡的前提下，选择最优路径。同时，BIM 系统还能够结合大数据与人工智能算法，对施工数据进行智能分析，预测潜在风险并提供优化建议，从而实现从事后控制到事前预警的转变。BIM 技术通过可视化、动态化和智能化手段，将进度管理与成本控制紧密结合，显著提升了施工管理的科学性与经济性，为建筑项目的高质量、高效率实施提供了有力保障。

四、BIM 技术在施工安全与质量管理中的创新实践

在建筑施工过程中，安全与质量管理始终是项目的核心内容。BIM 技术的引入，为施工安全与质量控制提供了新的思路和技术支撑。通过建立三维数字模型，BIM 能够在施工前对工程结构、施工流程及作业环境进行全面模拟与分析，从而识别潜在的风险源和薄弱环节。利用 BIM 的可视化功能，施工团队可以在虚拟环境中开展安全演练与风险预测，对高空作业、吊装工程、深基坑施工等危险环节进行动态模拟，提前制定安全防护措施。这种基于数据驱动的风险管理模式，使安全管理从被动响应转向主动预防，大大降低了施工现场安全事故的发生率。

在质量管理方面，BIM 技术实现了从图纸到实体的精确对接与全过程追踪。通过模型中的信息集成，施工方可在施工前对构件精度、施工工艺和安装顺序进行模拟验证，确保施工过程符合设计标准与技术规范。施工中，BIM 模型可与传感器、全站仪、无人机等设备结合，实时采集现场数据并与模型比对，发现偏差及时调整，保证施工精度与结构安全。与此同时，BIM 技术还可以记录各阶段的质量检测数据，形成可追溯的质量档案，实现从材料进场到最终验收的全流程质量监管。其直观的可视化特征不仅方便项目管理人员进行质量检查与问题定位，也为后期维护与运维管理提供了可靠的数据支持。^[1-3]

BIM 技术在施工安全与质量管理中的创新实践，还体现在多专业协同与智能决策方面。BIM 平台通过信息共享机制，将设计、施工、监理及业主等各方数据集成在同一环境中，实现安全与质量信息的透明化管理。利用大数据分析 with 人工智能算法，BIM 系统能够自动识别安全隐患，生成预警信息，并提出可行的优化方案。施工管理人员可根据模型分析结果，制定科学的安全教育与培训计划，提升全员安全意识与操作规范性。同时，BIM 与移动终端、云平台的结合，使安全与质量信息能够在现场实时更新与反馈，形成闭环管理体系。通过这些创新应用，BIM 技术不仅提高了施工安全与质量控制水平，还推动了建筑行业向智能化、精细化与可持续发展方向迈进，为智慧建造提供了有力支撑。^[4]

五、建筑施工中 BIM 技术应用的挑战与未来发展方向

尽管 BIM 技术在建筑施工领域的应用取得了显著成效，但在推广与实践过程中仍面临诸多挑战。首先，行业整体数字化水平不均衡，导致 BIM 技术在不同类型项目中的应用深度存在差异。部分施工企业缺乏专业的 BIM 团队与技术储备，仍停留在三维建模阶段，未能充分发挥 BIM 在数据集成与协同管理方面的优势。此外，BIM 软件之间的兼容性问题尚未完全解决，不同平台间的数据传输与共享存在障碍，影响信息流的连贯性。与此同时，BIM 项目初期投入较大，包括软硬件设备、技术培训与人员成

本，这对中小型企业形成了一定门槛，也制约了 BIM 技术的普及和深入应用。^[5]

在管理与标准层面，BIM 技术的应用还面临体系不完善的问题。我国目前虽已出台多项 BIM 标准与技术指南，但行业统一性和执行力度仍有待提高。项目各参与方在数据标准、信息权限及协同机制上的理解存在差异，造成信息孤岛现象，影响 BIM 协同管理的效率。同时，部分施工单位在项目实施中对 BIM 应用的定位模糊，将其作为展示工具而非决策支持系统，导致技术价值未能充分体现。此外，BIM 数据安全与知识产权保护问题也逐渐凸显，大量工程信息在云端传输与存储，若缺乏安全防护措施，可能引发数据泄露和管理风险。这些问题表明，BIM 技术要在建筑施工中实现全面落地，仍需在政策、技术与管理层面形成合力。

未来，BIM 技术将在建筑施工中与新兴信息技术深度融合，推动行业进入智慧建造新阶段。随着物联网、云计算、大数据和人工智能的发展，BIM 将从单一的建模与管理工具演进为智能化决策平台，实现建筑全生命周期的信息互联与动态管理。通过与数字孪生技术结合，可实现施工现场的实时监控与虚实同步，为项目提供精细化管理支持。政府和行业协会也将继续完善 BIM 标准体系，推动跨行业、跨平台数据共享机制的建立，从而打破信息壁垒，促进协同创新。同时，随着教育培训体系的完善与专业人才的培养，BIM 技术的应用深度和广度将不断拓展。可以预见，未来 BIM 将在建筑施工中发挥更加核心的作用，成为推动建筑业数字化转型、绿色建造和高质量发展的重要驱动力。

六、结语

BIM 技术作为建筑业数字化与智能化发展的核心支撑，已在施工管理、进度控制、成本优化、安全与质量保障等方面展现出巨大价值。尽管在推广过程中仍面临技术标准、人才储备和数据协同等挑战，但其发展前景十分广阔。随着信息技术的持续融合与应用深化，BIM 必将推动建筑施工向高效化、智能化和可持续发展方向迈进，成为行业创新的重要引擎。

参考文献

- [1] 冒朝静. 建筑信息模型 (BIM) 技术及其应用分析 [J]. 当代旅游 (高尔夫旅行), 2018(10): 298.
- [2] 李晓军, 田吟雪, 陈树汪, 王安民. 建筑信息模型 (BIM) 技术在隧道工程中的应用现状与分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40(07): 953-963.
- [3] 崔现沅. 建筑信息模型 (BIM) 技术在建筑工程施工管理中的应用 [J]. 工程设计与设计, 2021(24): 100-102+111.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.12.231.
- [4] 彭波, 许双霜, 刘雯聪. 基于建筑信息模型 (BIM) 技术的施工应用研究 [J]. 中华建设, 2024(08): 112-114.
- [5] 孟狄威. 建筑信息模型 (BIM) 与物联网 (IoT) 融合应用在复杂施工项目中的实践与前景分析 [A]. 重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集 (二) [C]. 重庆市大数据和人工智能产业协会: 重庆市大数据和人工智能产业协会, 2025: 4.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.013724.

电力土建施工中绿色建材应用降低环境影响

陈晓忠

国网山西省电力有限公司大同供电分公司，山西 大同 037000

DOI:10.61369/ERA.2026010029

摘 要： 电力土建施工在材料投入和环境影响方面具有显著特征，绿色建材的应用成为推动行业低碳化与可持续化的重要方向。结合电力工程结构复杂、耐久性要求高的特点，对绿色建材的行业发展态势、推广受限因素、体系优化路径以及工程实践成效进行了系统分析。研究指出，绿色建材在环境负荷降低、结构性能提升及施工组织优化方面展现出重要价值，同时面临技术标准不完善、成本结构偏高、供应链不稳定及施工适配性不足等问题。通过构建材料全生命周期评价体系、完善数字化选材机制、强化供应链协同与标准制度建设，可为绿色建材在电力土建领域的深化应用提供可行路径。绿色建材将推动电力建设向更高水平的绿色化与高质量方向发展。

关 键 词： 绿色建材；电力土建施工；环境影响；可持续发展；低碳工程

Application of Green Building Materials in Electric Power Civil Engineering Construction to Reduce Environmental Impact

Chen Xiaozhong

State Grid Shanxi Electric Power Company Datong Power Supply Branch, Datong, Shanxi 037000

Abstract： Power infrastructure construction exhibits distinct characteristics in material input and environmental impact, making green building materials a crucial driver for industry decarbonization and sustainability. This study systematically analyzes the development trends, implementation constraints, optimization pathways, and practical effectiveness of green building materials in power engineering, given the sector's structural complexity and stringent durability requirements. The research highlights their significant value in reducing environmental burdens, enhancing structural performance, and optimizing construction processes, while addressing challenges including incomplete technical standards, high cost structures, supply chain instability, and inadequate construction compatibility. By establishing a full life cycle assessment system, improving digital material selection mechanisms, and strengthening supply chain coordination with standardized institutional frameworks, feasible pathways can be developed for deeper application of green building materials in power infrastructure. These materials will propel power construction toward higher levels of green development and quality enhancement.

Keywords： green building materials; power civil construction; environmental impact; sustainable development; low-carbon engineering

引言

电力土建工程作为能源基础设施建设的重要组成部分，其施工过程往往伴随大量材料投入和环境干扰，推动行业绿色化已成为当前发展的必然趋势。随着“双碳”目标提出，绿色建材逐渐成为提升工程环境绩效和降低生命周期排放的关键因素。绿色建材在生产与应用阶段具有能耗低、污染少及资源利用率高等优势，契合电力工程对安全性、耐久性和环境友好性的综合要求。本研究聚焦绿色建材在电力土建施工中的应用实践，通过分析其环保效益与工程适配性，明确其在降低环境影响方面的作用，并提出适用于工程建设的材料选择与推广思路，以为电力建设领域实现可持续发展提供参考。

一、绿色建材融入电力土建施工的行业发展格局

电力土建施工正处于由传统高耗能模式向绿色低碳模式加速

转型的阶段，绿色建材的介入推动了行业材料体系与施工逻辑的重构。在工程实践中，材料占据了碳排放和环境负荷的主要来源，混凝土、砂石、外加剂、保温材料等在生产与运输过程中会

造成能源消耗和污染排放。随着电力工程规模持续扩大，工程全生命周期环境绩效逐渐成为行业评价体系中的关键指标，绿色建材由补充性材料转向基础性配置，成为工程项目获取绿色施工与低碳建设认定的重要条件。

电力土建工程具有场地分散、结构类型复杂、耐久性要求高的特点，对材料的性能稳定性、安全性和环境属性提出了复合要求。绿色建材的发展使行业具备了更多低碳材料选择，包括高矿物掺合料混凝土、低碳水泥、新型透水材料、高性能保温隔热材料以及再生骨料材料等。这些材料在电力基础设施建设中逐步形成体系化应用模式，例如变电站结构工程中的低碳砼配置方案、输电线路基础中的再生材料垫层设计、站区道路的透水铺装结构等，为行业提供了可验证的材料替代路线。

在政策推动、行业标准体系完善和企业绿色建设需求增长的共同作用下，绿色建材在电力土建施工中的应用正从单点示范迈向整体集成。绿色建材技术指标、耐久性评价方法及其在工程中的适配性研究不断深化，推动了材料选型由经验型向数据化、性能化方向发展。与此同时，绿色建材的供应链也在与电力工程需求形成协同机制，通过区域化供应、低碳生产工艺和可追溯管理模式提升材料投入的环境透明度，使电力土建施工具备了更完善的绿色材料保障能力。行业正逐渐形成以绿色建材为支撑的建设模式，为电力工程在低碳、安全与长期性能之间找到新的平衡点。

二、电力工程中绿色建材应用的限制因素与矛盾点

电力工程中绿色建材的应用虽具备明显的环境效益，但在实际推进过程中受到多重制约因素的影响，表现出技术、经济与管理之间的矛盾关系。绿色建材类型多样，但性能评估体系和适配性标准尚未完全覆盖电力土建的特殊结构需求，例如耐久性指标、抗裂性能、长期荷载作用下的力学衰减规律等未形成统一验证方法，使部分材料难以在关键结构部位实现工程化应用。电力工程对结构安全和使用年限具有严格要求，任何材料替代都需通过反复试验与工程验证，周期较长，导致绿色材料推广速度偏缓。

成本结构也是制约推广的重要来源。部分绿色建材受制于生产规模、原料来源和工艺限制，价格水平较传统材料更高，而电力工程项目在预算控制和招标模式下对成本敏感度较强，使绿色材料在竞争中处于不利位置。同时，部分企业在材料选择上仍以传统经验为主，对于绿色材料的长期经济性、生命周期效益和环境价值缺乏系统认知，导致绿色材料应用缺乏动力。此外，施工单位普遍存在对新型材料施工工艺不熟悉的问题，如绿色混凝土的拌和时间、保温材料与构筑物的粘结工艺、透水材料的铺装压实参数等在施工质量控制上存在不确定性，这直接限制了其在复杂电力土建场景中的应用深度。

供应链体系的不成熟也带来了不稳定因素。部分绿色建材生产企业区域集中度较高，运输半径过大时不仅提高成本，也削弱了材料的低碳属性；同时，不同批次材料的性能一致性和可追溯

性管理仍未完全形成规范化体系，使项目方对材料质量稳定性存在顾虑。此外，行业内建设单位、设计单位与施工单位之间在绿色建材选型、性能评价和应用策略上沟通不足，信息不对称导致设计端与施工端无法形成有效衔接，制约绿色建材在电力土建工程中的系统化应用。这些矛盾点的存在说明绿色建材的推广仍处于过渡阶段，需要技术体系、成本结构和管理机制的协同改进。^[1-5]

三、电力土建领域绿色材料体系的优化路径设计

电力土建领域绿色材料体系的优化需要在技术、管理和工程实践之间形成协同结构，使材料选择、应用模式与施工流程实现一体化提升。绿色建材的性能评价应从单一材料属性拓展为基于全寿命周期的综合评估体系，通过对碳排放系数、耐久性指标、服役环境适应性及材料再生利用潜力的量化分析，提高材料选型的科学性。针对电力工程结构类型多、受力条件复杂的特点，应建立适用于高载荷基础、长跨度构筑物及户外暴露结构的绿色材料数据库，通过性能分级机制明确不同材料的应用边界与最优使用场景，使绿色材料体系具备可操作性和工程针对性。^[6]

绿色材料体系的优化还需要与电力工程的设计方法深度融合，使材料替代不再依赖经验判断，而是基于参数化设计与力学模拟的结果进行决策。通过引入结构仿真技术与环境绩效模拟模型，可在设计阶段对不同材料组合的力学稳定性、碳排放量和维护成本进行综合对比，实现材料优化路径的数字化实现。同时，应推动绿色材料在施工工艺层面的适配性调整，例如改进绿色混凝土的拌和技術、提升再生骨料的筛分与处理工艺、调整透水结构的铺设标准等，使材料性能能够在现场条件下稳定释放，为大规模应用奠定过程控制基础。^[7-10]

管理体系的优化对于构建完整的绿色材料体系具有关键作用。通过建立材料准入制度、质量追溯机制和绿色采购标准，可提升供应链稳定性，使材料选择过程透明化、可控化。建设单位与设计、监理、施工单位的协同机制也应得到完善，通过在项目启动阶段形成统一的绿色材料应用计划，减少方案调整带来的资源浪费。区域化绿色材料供应网络的建设能够减少运输能耗，提高材料可获得性，并推动地方材料企业在工艺和质量控制方面持续迭代。绿色材料体系的优化路径需要在政策支持、技术研发和行业协同中不断深化，使电力土建工程在环境友好性、经济性和结构安全性之间形成新的平衡结构，推动绿色建材成为工程建设中的主导性选择。

四、绿色建材应用成效的工程实践示例

绿色建材在电力土建工程中的应用正通过多种工程实践展现出显著成效，具体表现为环境负荷降低、结构性能提升以及施工组织优化等方面。在变电站土建工程中，低碳混凝土体系的应用已成为典型示例，通过采用高掺量矿物掺合料和优化级配的再生骨料，可在保持抗压强度、抗裂性能和耐久性指标满足规范要求的前提下，使材料的单位碳排放显著下降。部分站区基础和构筑

物在实际使用过程中表现出较低的碳化速率和良好的抗渗性能，说明绿色混凝土在长期服役条件下具备可控性和可靠性，适合电力工程对耐久性和安全性的高要求。绿色材料的介入不仅改善了结构环境属性，还减少了传统外加剂的用量，使材料体系更加稳定。

输变电线路的基础施工同样展示了绿色建材的落地效果。在塔基垫层和道路铺设环节采用再生材料与透水结构，可降低天然砂石的消耗，缓解资源占用压力。透水结构在站区内部道路和场坪建设中表现出良好的雨水渗透与排散能力，减少了地表径流量，对改善施工区域的微环境具有积极作用。道路结构在承载能力、抗冻性能和抗车辙性能方面通过工程实测验证，说明绿色材料在非结构性与半结构性部位具有较高应用潜力。

部分工程项目还将绿色保温与隔热材料应用于电力建筑物的围护结构中，通过提高热工性能降低运行阶段的能源消耗。在控制室、设备房等内部环境要求稳定的区域，新型保温材料的合理配置使建筑物的能耗指标明显下降，为绿色建材在电力工程运营阶段的节能价值提供了可验证的依据。工程实践的不断积累为绿色材料体系的参数优化、施工工艺改进及应用范围拓展提供了支撑，使绿色建材不再局限于试点工程，而是逐步向常规化应用迈进。工程示例展示出绿色建材在环境效益、结构性能和运行节能方面的多重价值，为电力土建行业的绿色转型提供了现实基础。

五、绿色建材推动电力建设绿色转型的未来趋势

绿色建材推动电力建设绿色转型的趋势正向体系化、智能化与深层次融合方向演进。随着电力基础设施建设持续扩大，行业对材料的环境属性、服役性能和长期运行成本的关注度不断提升，绿色建材不再被视为附加选项，而是作为工程方案构成中的关键要素。未来绿色建材的研发方向将更加注重材料结构的微观调控，通过优化胶凝体系、提高再生骨料处理水平、开发低碳固废基材料等途径，使材料在降低碳排放的同时具备更高的力学性

能与环境耐受能力。这类材料的技术成熟度提升，将促进其在电力工程关键结构部位的广泛应用，使电力土建施工工具备更为稳定的绿色材料支撑体系。

数字化技术的介入将推动绿色材料应用模式发生根本性改变。通过构建材料碳排放数据库、全过程环境绩效评估模型及智能选材系统，设计单位能够在方案形成阶段直接量化不同材料组合的碳足迹与性能差异，使材料优化过程更加透明。智能监测技术将被引入材料使用与结构服役状态评估中，通过传感数据采集、环境响应分析和耐久性预测，为绿色建材在实际工程中的表现提供实时反馈，使材料选型与施工参数能够动态调整。未来电力工程将形成以数字化验证、性能化评估与环境指标约束为核心的新型材料决策体系。

绿色建材在供应链、标准体系和政策层面的支撑力度也将不断增强。区域化绿色建材生产布局和原料循环利用体系的完善，使材料供应更加稳定，运输环节的碳排放进一步减少。行业标准将更加关注材料适配性、碳排放核算、施工工艺要求等内容，为绿色建材进入电力工程提供制度保障。随着绿色招标、低碳评价体系及工程碳排放限值等政策工具逐步强化，绿色建材将在电力工程建设中形成更高的市场占比。绿色建材推动电力建设绿色转型的未来趋势体现为技术创新、管理协同和政策驱动的多重叠加，使电力土建行业逐步迈向更高水平的低碳化与可持续发展。

六、结语

绿色建材在电力土建施工中的推广正在形成由技术进步、工程实践与管理创新共同驱动的发展格局。随着材料体系不断完善、应用路径逐渐清晰以及环境绩效要求持续提升，电力建设领域正呈现出更具低碳性与可持续性的转型趋势。未来在标准体系深化、数字化支撑加强和供应链协同提升的背景下，绿色建材将在更广范围内发挥结构优化和环境减负作用，为电力工程实现高质量与绿色化并行的发展目标提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 周庆祥. 绿色建材在基础设施建设中的环境效益研究 [J]. 建筑科技, 2021, 42(6): 112-118.
- [2] 陆雨桐. 电力工程土建施工管理中节能材料的应用探索 [J]. 电力建设, 2022, 43(4): 57-63.
- [3] 阮志浩. 新型绿色混凝土在工程建设中的推广价值 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(12): 89-96.
- [4] 崔嘉宁. 可持续建材体系在能源工程中的适配性研究 [J]. 能源工程, 2023, 45(3): 74-81.
- [5] 韩毅峰. 再生骨料材料在工程结构中的环境表现与应用前景 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5): 33-40.
- [6] 薛立晨. 电力建设施工阶段的低碳化路径探讨 [J]. 华电技术, 2021, 39(8): 122-128.
- [7] 邢雯洁. 建筑领域绿色施工技术的综合效益分析 [J]. 工程管理学报, 2020, 37(9): 95-102.
- [8] 梁宏哲. 生态型建材在基础设施工程中的工程性能研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 51-58.
- [9] 宫泽皓. 绿色低碳理念在大型能源工程中的应用趋势 [J]. 中国能源, 2022, 44(10): 66-72.
- [10] 程文钰. 建筑材料环境影响评价方法在工程中的应用研究 [J]. 建筑环保, 2021, 30(7): 18-24.

传统旅游景区结合民族风貌改造设计实证研究 ——以大理蝴蝶泉为例

朱航宇

中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650224

DOI:10.61369/ERA.2026010031

摘 要 : 本文以大理蝴蝶泉传统景区改造为核心实证, 基于符号学与景观规划学理论, 构建“基因提取-系统转译-场景落地”的民族地区乡村振兴风貌设计框架。通过解构白族爱情文化、非遗技艺、山水伦理、本土信仰及建筑营造五类核心基因, 挖掘“绕三灵”节庆、白族民居彩绘(国家级非遗)、“三坊一照壁”等文化载体的当代价值, 创新“蝴蝶意象总图+白族村落肌理”规划范式, 结合景区原有游览动线与景观节点改造, 实现文化基因向爱情主题场景、非遗体验空间的落地转化, 破解传统景区风貌同质化、文化辨识度不足的困境, 为西南地区乡村振兴及传统景区升级提供理论与实践参考。

关 键 词 : 文化基因; 乡村振兴; 风貌设计; 民族地区; 大理蝴蝶泉

Empirical Study on the Renovation and Design of Traditional Scenic Areas Combined with Ethnic Styles — A Case Study of Dali Butterfly Spring

Zhu Hangyu

China Nonferrous Metals Industry Kunming Prospecting, Design and Research Institute Co., Ltd.,
Kunming, Yunnan 650224

Abstract : Taking the renovation of the traditional Dali Butterfly Spring Scenic Area as the core empirical research, this paper constructs a style design framework for rural revitalization in ethnic areas featuring "gene extraction – systematic translation – scenario implementation" based on the theories of semiotics and landscape planning. By deconstructing five categories of core genes including the Bai nationality's love culture, intangible cultural heritage (ICH) craftsmanship, landscape ethics, Benzhu belief (indigenous belief of the Bai people) and architectural construction, the paper explores the contemporary value of cultural carriers such as the "Raosanling" festival, the painted decoration of Bai traditional dwellings (a national-level ICH), and the "Three-compound and One Screen Wall" architectural form. It innovates the planning paradigm of "Butterfly Image Master Plan + Bai Village Texture", and combines the renovation of the original tourist routes and landscape nodes of the scenic area to realize the transformation of cultural genes into love-themed scenarios and ICH experience spaces. This research addresses the predicaments of homogeneous styles and insufficient cultural recognition in traditional scenic areas, and provides theoretical and practical references for rural revitalization and the upgrading of traditional scenic areas in Southwest China.

Keywords : cultural gene; rural revitalization; style design; ethnic areas; Dali Butterfly Spring

引言

乡村振兴与文旅融合背景下, 民族地区乡村建设及传统景区升级成为传承文化、破解“千镇一面”的关键载体^[1]。大理蝴蝶泉作为白族爱情文化地标与传统旅游景区, 虽拥有“绕三灵”非遗、“三坊一照壁”建筑、民居彩绘等核心资源, 但景区存在游览动线单一、文化展示浅表、风貌与周边村落脱节等问题^[2]。现有研究缺乏对“信仰-仪式-建筑”联动基因的系统挖掘及“提取-转译-落地”全链条实证, 本文以蝴蝶泉景区改造为契机, 构建文化基因转译设计框架, 为乡村振兴及传统景区升级提供参考。

一、绪论

（一）研究背景

乡村振兴战略推动下，民族地区文旅融合与传统景区升级成为发展重点^[3]。大理蝴蝶泉传统景区面临游览体验单一、文化符号应用零散、风貌同质化等困境，亟需通过“绕三灵”非遗活化、“三坊一照壁”建筑复原、民居彩绘传承等路径强化辨识度，结合景区原有空间格局进行改造升级，破解“景区－村落”风貌割裂问题，助力乡村振兴落地^[4]。现有研究缺乏对复合型文化基因的系统转译及景区改造专项实证^[5]。

（二）研究意义

本研究理论价值在于：完善民族文化基因转译体系，构建“信仰－仪式－建筑－空间－产业”五位一体框架；丰富乡村振兴风貌设计维度，提出“景区－乡村”协同营造理念；深化文旅融合空间设计理论，探索文化基因与空间、体验的耦合机制^[6]。实践价值体现为：指导蝴蝶泉景区5A升级，解决同质化等问题；为西南同类景区提供可复制的民族化改造路径；推动“景区－乡村”协同发展，助力乡村产业与文化遗产；促进白族文化活态传承^[7]。

（三）研究方法与技术路线

1. 研究方法

本研究综合采用多种研究方法，确保研究的科学性与实践性^[8-9]：

（1）文献研究法：系统梳理国内外关于文化基因、乡村振兴、景区改造、白族文化等领域的相关文献、专著与政策文件，重点研读《白族简史》《大理白族建筑研究》《文化基因与景观规划》等著作，以及民族文化转译、文旅融合、传统景区升级等相关论文，为研究奠定坚实的理论基础。

（2）实地调研法：多次深入大理蝴蝶泉景区及周边周城、喜洲、双廊等白族村落进行实地调研，通过现场测绘、拍照记录、问卷调查等方式，获取景区的空间布局、建筑风貌、游览动线、景观节点等基础数据；同时，对景区管理人员、当地村民、非遗传承人及游客进行访谈，了解各方对景区改造的需求与期望。

（3）符号学分析法：基于符号学理论，将白族文化中的建筑构件（如“三叠水”照壁、飞檐翘角）、民俗符号（如蝴蝶纹样、扎染图案）、仪式流程（如“绕三灵”巡游路线）等视为文化符号，解析其“能指”与“所指”，挖掘其背后的文化内涵与价值意义，为文化基因的转译提供理论工具。

（4）案例对比法：选取国内同类民族地区传统景区改造的成功案例，如丽江古城四方街改造、桂林阳朔西街民族化升级、贵州肇兴侗寨景区与村落协同发展案例等，进行对比分析，总结其在文化基因转译、空间布局优化、业态融合发展等方面的经验教训，为蝴蝶泉景区改造提供参考。

（5）实证研究法：以大理蝴蝶泉景区改造工程为实证对象，将构建的“基因提取－系统转译－场景落地－成效反馈”框架应用于改造实践，通过方案设计、落地实施与成效评估，验证框架的科学性与可行性。

2. 技术路线

本研究遵循“理论构建→现状分析→基因提取→转译设计→规划落地→成效评估→结论启示”的逻辑展开，具体技术路线如下：

（1）理论构建阶段：梳理文化基因、乡村振兴、景区改造等相关理论，明确核心概念与研究边界，构建研究的理论框架；

（2）现状分析阶段：通过实地调研与文献梳理，分析大理蝴蝶泉景区的现状问题、发展潜力及周边乡村的文化资源与发展需求；

（3）基因提取阶段：采用“文献溯源＋非遗普查＋传承人访谈＋空间测绘＋工匠口述”多维提取法，挖掘白族文化中的核心基因，构建基因谱系；

（4）转译设计阶段：基于符号学理论，构建“表层－中层－深层”的分层转译体系，制定基因转译的原则与具体路径；

（5）规划落地阶段：结合景区现状，从总图布局、建筑改造、景观优化、分区设计等方面，制定景区改造的具体规划方案；

（6）成效评估阶段：从文化遗产、经济发展、游览体验、规划实施四个维度，建立评估指标体系，对改造成效进行量化与质性评估；

（7）结论启示阶段：总结研究结论，提炼民族地区传统景区结合民族风貌改造的核心启示，指出研究不足与未来研究方向。

二、理论基础与核心概念

（一）核心概念界定

文化基因指民族文化中具有传承性的核心符号与价值理念，白族文化基因涵盖物质符号（“三坊一照壁”、民居彩绘等）、精神内核与行为仪式^[10]。风貌设计包含乡村空间布局、建筑形态、景观设施与文化场景营造，是乡村振兴的重要组成部分^[11]。蝴蝶意象总图是将蝴蝶“躯干－翅膀－触角”与景区游览动线结合，嵌套白族“主街－巷道－院落”肌理的规划形式。

（二）相关理论支撑

符号学理论解码白族彩绘、建筑构件的语义内涵；场景化营造理论指导景区活态场景与游览动线组织；文化认同理论平衡建筑真实性与景区功能需求，为乡村振兴中的文化遗产提供理论支撑。

三、蝴蝶泉景区文化基因提取与解析

（一）基因提取方法

采用“文献溯源＋非遗普查＋传承人访谈＋空间测绘＋工匠口述”多维提取法，重点挖掘与景区改造及乡村振兴适配的核心基因^[12]。

（二）核心文化基因谱系

1. 爱情文化基因：蝴蝶会、霞郎雯姑传说，为景区爱情主题改造核心，契合乡村振兴文旅融合方向；

2. 非遗技艺基因：扎染、甲马雕刻、民居彩绘（国家级非遗），适配景区体验项目，助力乡村文化产业发展；

3. 山水伦理基因：苍山洱海格局，指导景区生态景观改造，呼应乡村振兴生态宜居要求；

4. 本土信仰基因：绕三灵节庆，丰富景区民俗活动，增强乡村文化凝聚力；

5. 建筑营造基因：“三坊一照壁”“走马转角楼”，为景区建筑改造标准，传承乡村建筑特色。

（三）原真性保障

建立“学者+传承人+工匠+村民+规划师”五方审核机制，确保基因提取与景区改造、乡村振兴目标的适配性，兼顾文化传承与民生需求。

四、文化基因转译路径与景区改造规划

（一）转译原则

坚守原真性、适配性、融合性、体验性原则，确保文化基因与景区功能、游览动线深度融合，契合乡村振兴“产业兴旺、生态宜居、乡风文明”的要求。

（二）分层转译体系

表层符号化转译：提取彩绘、蝴蝶纹样应用于景区导视、铺装；中层场景化转译：打造爱情、非遗、民俗三类场景，丰富乡村文旅业态；深层价值化转译：将生态伦理转化为景区海绵设计，开发文创IP，助力乡村产业振兴。

（三）景区专项改造规划

1. 总图布局改造

结合原有景区入口-蝴蝶泉核心-出口动线，构建“一核两翅一触”结构：蝴蝶躯干对应景区主游览道（改造后长450米，青石板铺装嵌入扎染纹样），双翅为非遗体验区与爱情主题区（布局“三坊一照壁”院落群），触角为生态景观带（衔接景区与苍山步道），实现景区与乡村空间的有机联动。

2. 建筑与彩绘改造

景区建筑采用“三坊一照壁”标准形制，主房面阔10-12米，照壁设“三叠水”形制与彩绘（“蝴蝶泉传说”“吉祥八宝”题材）；改造原有游客中心为非遗工坊，保留天井作为体验空间，带动乡村就业；古戏台采用“走马转角楼”形制，台口彩绘“绕三灵”场景，传承乡村民俗文化。

3. 分区改造设计

（1）入口印象区：改造原有大门为“三叠水”照壁，搭配蝴蝶雕塑群，两侧布局民宿型“三坊一照壁”，助力乡村民宿产业发展；

（2）核心体验区：围绕蝴蝶泉水体，复刻“蝴蝶会”场景，设置对歌站与彩绘体验工坊，丰富乡村文旅体验；

（3）民俗活动区：改造景区闲置空间为四方街，举办“绕三灵”巡游与长街宴，激活乡村公共空间；

（4）生态景观区：优化景区原有廊道，点缀彩绘景石与蝴蝶寄主植物，践行乡村振兴生态宜居理念。

五、实践落地与成效评估

（一）典型场景落地

“绕三灵”场景活化：规划“生态廊道-主游览道-四方街”巡游动线，在景区入口设杨柳枝发放点，主道两侧建筑照壁绘制仪式彩绘，四方街设篝火舞台，融入景区游览流程，成为乡村文化展示的重要窗口。

（二）多维成效评估

在文化维度方面：建筑识别率达95%，非遗知晓率从35%提升至82%，景区文化辨识度显著提升，助力乡村文化振兴；在经济维度方面：2024年景区营收增长85%，婚庆度假收入占比37%，非遗文创销售额增长120%，带动乡村产业兴旺；在游览体验方面：游客停留时长从1.2小时提升至2.1小时，爱情主题打卡率78%，体验参与率超60%，提升乡村文旅吸引力；在规划实施方面：蝴蝶形态意象传达率89%，传统肌理保留完整度92%，景区与周边村落风貌协同统一，推动乡村风貌提升。

六、结论与展望

蝴蝶泉景区核心文化基因为五类，转译遵循“表层-中层-深层”逻辑，关键路径为“符号解构→五感转译→形态-肌理-建筑融合→景区功能适配”，“蝴蝶意象+白族建筑”改造模式破解同质化困境，为乡村振兴提供“文化+生态+产业”融合样本；对此，乡村振兴景区改造可遵循四点建议，即挖掘“信仰-仪式-建筑”联动基因、采用“自然意象+传统肌理”规划优化游览动线、推行“原型保留+功能适配”建筑活化、实现“文化-生态-产业-游览”四维协同；本研究存在未涵盖景区季节场景适配及乡村振兴长效运营机制的不足，后续可探索数字孪生技术应用，深化传统技艺与现代景区技术融合，为乡村振兴提供可持续支撑。

参考文献

- [1] 云南网大理频道. 青瓦白墙：“风花雪月”的诗意画框 [EB/OL].
- [2] 杨茂玲, 刘扬, 李志恒等. 传统村落文化景观基因与聚落双修路径研究 [J]. 低温建筑技术, 2025, 47(09): 19-23.
- [3] 李丹青. 基于文化基因理念的侗族村寨空间设计研究 [J]. 福建建设科技, 2023, (06): 18-20.
- [4] 黄现庆, 邢亚童等. 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.
- [5] 卢正利. 突破传统工艺延长地仗寿命大冶古建研发成功新型环保材料 [N]. 湖北日报, 2025-02-24.
- [6] 苏思琦, 郝峻弘, 俞铮, 等. 渔火巷陌处, 耕渔忆桃源——成子湖小渔村绿色生态规划与建筑设计 [J]. 城市建筑空间, 2023, 30(S2): 48-49.
- [7] 廖亦彩. 建筑元素在旅游文创产品设计中的应用 [J]. 建筑科学, 2023, 39(11): 179.
- [8] 巨凯夫, 陈曦. 从“义庄私产”到“城市客厅”——“价值”导向的苏州平江历史建筑遗产存续再生设计实验 [J]. 中国建筑教育, 2022, (02): 63-69.
- [9] 肖坚. 基于自然与人文特色的小镇项目景观设计思路与策略——以松山湖欧洲小镇项目为例 [J]. 农村科学实验, 2024, (24): 60-62.
- [10] 魏晞. 红色文化符号在特色小镇景观设计中的运用 [J]. 鞋类工艺与设计, 2023, 3(23): 193-195.
- [11] 裴炳, 孙琪. 乡村振兴背景下山西特色小镇景观设计现状及应对策略研究 [J]. 中国民族博览, 2024, (07): 62-64.
- [12] 邓源, 刘洋. 乡村振兴背景下南洞庭湖区农业特色小镇景观设计策略 [J]. 鞋类工艺与设计, 2024, 4(19): 90-92.

CTCS-3 无线超时故障处置机制研究

王悦亭¹, 赵兴强¹, 赵学¹, 马雁波¹, 张紫佩²

1. 中国铁路济南局集团有限公司电务部, 山东 济南 250001

2. 北京鼎兴达信息科技股份有限公司, 北京 100071

DOI:10.61369/ERA.2026010013

摘 要 : CTCS-3 级列车运行控制系统 (以下简称 C3 列控系统) 是高速铁路和客运专线的主要行车控制系统, 系统运行的可靠性、有效性及服务质量对铁路运输安全和效率至关重要。然而, C3 列控系统涉及车载设备、地面设备以及 GSM-R 网络三方信息的交互, 其构成的各系统设置分散, 易形成信息孤岛。针对特定故障的分析和责任归属, 需溯源各类接口数据, 数据量巨大且故障分析过程复杂, 人力和时间成本显著增加。本文针对 CTCS-3 无线超时故障的分析机制进行了深入探讨, 旨在规范铁路局 CTCS-3 无线超时故障的分析流程及关联工作^[1]。通过整合大数据技术与智能分析技术^[2,3], 研究构建 CTCS-3 无线超时一体化联合分析信息化平台, 通过搭载通信、信号专业联合分析引擎, 精确定位故障, 依据标准化规范对业务数据进行有效翻译, 有效克服跨专业分析业务障碍, 提高业务分析效率和准确度, 为网络运维及故障处理提供坚实的技术支持。

关 键 词 : 无线超时; 智能分析; 联合分析; 分析引擎

Research on the Disposal Mechanism for CTCS-3 Wireless Timeout Faults

Wang Yueting¹, Zhao Xingqiang¹, Zhao Xue¹, Ma Yanbo¹, Zhang Zipei²

1. China Railway Jinan Group Co., Ltd. Electrical Department, Jinan, Shandong 250001

2. Beijing Dingxingda Information Technology Co., Ltd., Beijing 100071

Abstract : The CTCS-3 train operation control system (hereinafter referred to as the C3 train control system) is the main train control system for high-speed railways and passenger dedicated lines. The reliability, effectiveness, and service quality of the system operation are crucial for railway transportation safety and efficiency. However, the C3 train control system involves the interaction of on-board equipment, ground equipment, and GSM-R network information, and its various system settings are scattered, which can easily form information islands. For the analysis and attribution of responsibility for specific faults, it is necessary to trace various interface data, which has a huge amount of data and a complex fault analysis process, resulting in a significant increase in manpower and time costs. This article explores in depth the analysis mechanism of CTCS-3 wireless timeout faults, aiming to standardize the analysis process and related work of CTCS-3 wireless timeout faults in railway bureaus^[1]. By integrating big data technology and intelligent analysis technology^[2,3], the CTCS-3 wireless timeout integrated joint analysis information platform is researched and constructed. It is equipped with communication and signal professional joint analysis engines, accurately locates faults, and effectively translates business data according to standardized specifications, effectively overcoming cross disciplinary analysis barriers, improving business analysis efficiency and accuracy, and providing solid technical support for network operation and fault handling.

Keywords : wireless timeout; intelligent analysis; joint analysis; analysis engine

引言

作为 CTCS-3 列控系统的核心组成部分, GSM-R 承载了调度语音通信、列车控制、进路预告、调度命令、车次号校验及各类监控系统等业务数据的传输, 其运行的可靠性、有效性对铁路运输的安全具有重要影响。因此, 中国铁路总公司针对 CTCS-3 无线超时降级问题, 实施了“四件件”管理制度, 即“件件分析”“件件落责”“件件通报”“件件复核”。

随着车载设备空口监测技术在铁路电务领域的广泛应用, 通信和信号领域已安装并实施了多种检测监测设备。然而, 安装的监测检测系统设置分散, 系统接口协议缺乏统一标准, 数据格式差异显著, 且缺乏信息化手段, 使得在进行跨专业联合分析时, 难以准确有效

地进行问题分析。

因此,本文提出 CTCS-3无线超时故障分析处置机制,构建 CTCS-3无线超时一体化联合分析平台(以下简称一体化平台),通过通信、信号专业联合分析引擎,实现跨专业 C3列控业务故障的智能诊断,提高业务分析效率及准确度,为铁路运输的安全和高效提供坚实的技术支撑。

一、CTCS-3无线超时故障处置机制的研究

当前,各铁路局集团公司对电务业务故障的分析与整治工作给予了高度关注,并已初步构建了电务业务故障的联合分析机制。电务部由主管领导负责牵头,联合相关科室、通信段和电务段组建联合分析团队,组织通信、RBC 以及车载设备厂商件件分析、查找原因,落实整改措施。目前路局单位的联合分析流程主要依赖线下或第三方应用(如钉钉、微信等)进行资料共享与分析。鉴于铁路电务业务故障分析涉及的业务数据极为重要且敏感,利用第三方应用程序进行数据传输存在潜在的数据安全风险。为了进一步推进故障分析与处置工作的规范化和标准化,本文对无线超时故障的处置机制进行了深入探讨,研究内容如下:

(一) 分析流程标准化

本研究以流程管理为核心,确保通信、车载 ATP、列控 RBC 三方共同参与超时降级分析。电务部门作为主导,联合各相关专业共同对超时降级进行深入分析、责任归属及处理。各专业在既定节点上参与,完成超时降级的分析与处理工作,从而达到超时降级分析的闭环管理。详细流程如图 1 所示。

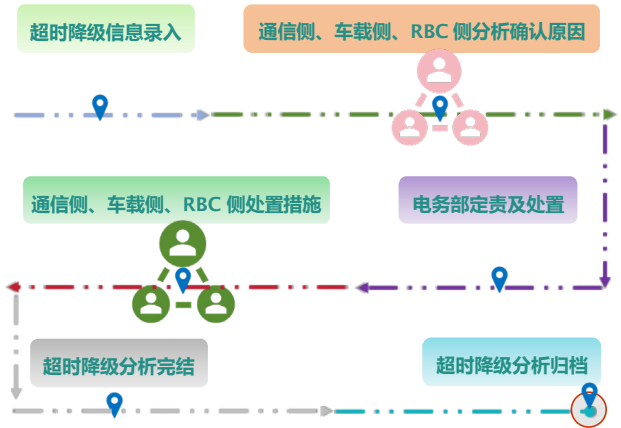


图1 流程分析图

(二) 业务数据标准化

1. 业务数据

为实现 CTCS-3无线超时分析的标准化,首先必须从源头上进行标准化处理,即对所需业务数据施加约束,统一其类别和格式,以构造标准化数据进行分析。业务分析数据集综合了 GSM-R 网络、车载 ATP、地面 RBC 三个方面的信息,包括通信数据、车载数据、RBC 数据和 UM 口数据,详细信息如图 2 所示。

2. 台账数据

基础台账数据作为 CTCS-3无线超时分析的基础支撑,台账信息的准确性和实时性对 C3 分析的准确性具有决定性影响。台账

数据详细内容如下:

- (1) 线路台账:涵盖线路名称、隶属路局、线路简称等;
- (2) RBC 台账:包含 RBC 号码、RBC 名称、所属线路、RBC 制造商等;
- (3) 基站台账:详述基站名称、位置区码(LAC)、小区标识码(CI)、隶属线路、所属局、是否为直放站、远近端机信息(针对直放站)等;
- (4) 切换台账:记录切换前小区、切换后小区、上下行方向、隶属线路、切换前后的公里标等;
- (5) 机车台账:包括 CTC SID、车型、机车编号、配属局、所属段、是否具备空口通信能力等。



图2 数据类型

(三) 分析原因标准化

CTCS-3列控系统涉及 GSM-R 网络、车载 ATP、地面 RBC 三方信息的交互,基于三方信息对 CTCS-3超时故障进行自动识别,关联发生 C3超时事件时的接口信令和 Abis 测量报告,判断出部分常见的原因代码 FCOD 及文字描述。各路局需参考铁路总公司发布的 C3超时及降级原因分类标准,确保 CTC3-3无线超时故障分析结论的统一性。

(四) 分析报告标准化

借助智能分析与跨专业领域的人工干预分析,基于铁路总公司下发月度报表模板及各路局集团公司需求,一键自动生成各专业需求分析报告/报表,显著提升工作效率。分析报告涵盖基本信息、故障概况、故障原因、原因分析、数据分析及处理经过、后续处理等内容。

(五) 统计分析标准化

为实现统计分析的标准化,需对统计维度制定统一标准,并采用标准化模板执行统计工作。统计分析工作涵盖两个层面:

1. 管理层面,以信息大屏形式呈现 CTCS-3无线超时分析情况的总体统计;
2. 运维层面,详细展示各类 CTCS-3无线超时原因的多维度统计信息,从而为工区运维人员提供及时发现并处理问题的依据。

二、CTCS-3无线超时一体化联合分析平台关键技术的研究

一体化平台依托于信息化管理手段,整合通信、信号专业领域内对列控业务故障分析的流程,实现了跨专业的CTCS-3无线超时故障智能诊断,此举突破了传统依赖案例匹配的局限性。针对本文的研究,必须攻克以下关键技术:

1. 统一业务数据接入格式与数据仓库架构。针对不同数据源进行深入调研,综合考量数据功能及后续数据分析需求,设计出一套统一的业务数据接入格式及数据仓库架构。
2. 构建业务交互状态与典型故障的表示模型,并建立相应的数据库与故障库。本研究聚焦于电务业务故障相关数据中关键特征量的提取、表示及特性分析,探究特征量间的关联性,进而构建业务交互状态表示模型;同时,对实际应用中的典型列控业务故障数据进行归类与整理,建立故障表示模型,并结合计算机数据挖掘技术,构建故障分析向导脑图。
3. 数据挖掘技术。本研究基于运维人员的实际应用需求,明确故障挖掘分析任务,遵循“数据整理—数据清洗—数据挖掘方法选择—数据挖掘—模型验证”的研究流程逐步开展。数据挖掘方法包括:基于FTA技术构建故障诊断模块、基于规则的分类方法设计列控业务故障分类器等。
4. 大数据处理技术。本研究采用大数据技术以提升计算机运算效率,应对大规模数据处理挑战;同时,通过业务模块与子业务的多服务器部署策略,有效解决高并发问题。

三、CTCS-3无线超时一体化联合分析平台技术架构研究与设计

(一) CTCS-3无线超时一体化联合分析平台技术架构设计研究

一体化平台硬件架构由Web应用服务器、数据处理服务器、数据存储服务器以及交换机等关键组件构成。平台架构如图3所示。

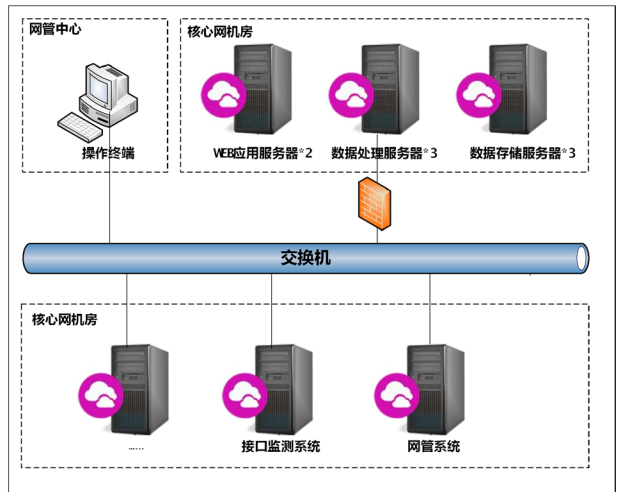


图3 平台架构图

(二) CTCS-3无线超时一体化联合分析平台功能方向的研究

本研究旨在探讨以流程管理为核心的联合分析平台,通过通信、信号联合分析引擎,基于车载、RBC、GSM-R三方案例知识库,依托“异常自动识别解释器”“基于案例知识库的故障推理机^[5]”“对多种类似故障实现确诊的裁决器”三个核心组件,实现CTCS-3无线超时故障智能诊断^[6]。本文对一体化平台的核心功能联合分析进行研究,结合不同维度的统计分析功能,并充分发挥经典案例的参考功能,完善超时降级数据的分析流程和数据的活化运用。

1. 一体化流程管理及业务故障AI诊断
一体化平台以流程管理为核心,对超时降级分析透明化、流程化,依托平台实现通信、信号专业对列控业务故障分析过程的信息化管理。

(1) 故障录入:系统支持两种故障信息输入方式。一是在网页界面填写故障关键信息,二是导入包含故障关键信息的Excel文件,系统将自动进行解析并完成信息录入。

(2) 分析中心:上传通信、车载、RBC及UM接口的数据,系统将运用数据深度挖掘技术构建数据模型,实现对CTCS-3无线超时故障的智能化分析。分析中心支持查看初步分析结论。

(3) 故障定责:已由分析中心明确原因的故障数据将流转至故障定责模块,依据各方分析结果,确定唯一且最终的责任主体及故障原因。基于故障的特性,后续处理可选择持续监测(无需采取特定措施)或指定处理方(通信、车载、RBC等,允许多选),并需追踪相关责任方的后续处理措施。

(4) 故障处置:已确定处理方案的故障数据将流转至故障处理模块,在此过程中,相关责任方需记录其采取的处理措施,并将已执行处理措施的责任方标记为完成状态。只有当所有责任方均标记为完成状态时,方可视为该故障的最终解决。

(5) 故障归档:故障数据在处理完毕后自动归档至故障数据库。

2. 大数据知识中心
通过构建一体化平台,建立CTCS-3无线超时故障案例库^[6],构建专业大数据知识中心,提升业务故障分析的效率与准确性,增强工作人员在业务故障分析方面的专业能力。

(1) 案例上传:系统提供两种案例提交方式。一是用户可在分析中心提交案例,二是可在案例上传界面详细填写案例的关键信息并上传相应的案例报告。在案例提交过程中,用户需设定上传者身份、所属部门、案例的初始访问权限以及下载次数等参数,以便于后续对案例使用情况的多维度统计分析。

(2) 案例审核:已上传案例需经过案例审核流程,审核通过后方可纳入案例中心。若审核未获批准,则予以驳回,并指出提交案例缺乏代表性。

(3) 案例中心:经审核批准的案例存储于案例库中,用户可通过高级检索或关键词检索手段进行全文检索。检索结果中的案例支持报告在线阅读及下载。

3. 业务需求订制

在一体化平台对路局 CTCS-3无线超时故障进行分析的过程中，实现了报表与报告的自动生成，并通过多维度进行统计分析。

(1) 过程管理统计：依据故障分析完成率、故障分析耗时、故障处理耗时以及故障诊断准确率等维度进行数据统计，进而对故障过程管理的相关指标进行深入分析。

(2) 故障统计分析：通过线路统计、机车编号统计、小区统计、故障原因统计以及局内外故障等维度，从统计学角度识别出故障率较高的关键指标，进而确定重点关注或整治的领域。

(3) 案例统计分析：本研究对案例库中的案例进行了多维度分析，包括浏览量、下载量及检索量的统计，以评估案例的使用情况，并据此掌握故障案例中的关键难点类型。

四、结论

本研究聚焦于 CTCS-3无线超时故障的分析与处理机制，旨在为铁路局 CTCS-3无线超时故障的分析流程及相应工作提供理论指导与实践参考。本研究通过融合大数据技术与智能分析技术，提出构建 CTCS-3无线超时故障的一体化联合分析平台，并对平台的功能定位进行深入探讨。研究指出，一体化联合分析平台的功能定位主要包括：一体化流程管理、业务故障的人工智能诊断、大数据知识中心、业务需求的个性化定制等，有效突破了跨专业分析业务的障碍，为网络运维及故障处理提供了坚实的技术支持。

参考文献

[1] 王买智. CTCS-3无线超时分析方法研究 [J]. 铁道通信信号, 2017, 53(01): 72-76. DOI: 10.13879/j.issn1000-7458.2017-01.16499.

[2] 李清颖. 大数据时代的到来对于轨道交通行业的影响 [C]// 中国国际科技促进会智慧城市轨道交通专业委员会. 智慧城市与轨道交通 2024. 铁科金化科技有限公司; , 2024: 32-36. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.029041.

[3] 侯森泉. 基于数据挖掘的 CTCS-3级列控系统无线超时的研究 [D]. 北京交通大学, 2023. DOI: 10.26944/d.cnki.gbfju.2023.002346.

[4] 李红亮. 基于知识推理的列控系统应急辅助决策方法研究 [D]. 兰州交通大学, 2022. DOI: 10.27205/d.cnki.gltcc.2022.000452.

[5] 李登. 基于人工智能的铁路信号系统故障诊断方法研究 [J]. 自动化博览, 2025, 42(06): 31-33.

[6] 李红亮, 张振海. 高速铁路电务设备故障应急处理案例知识库的构建 [J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(12): 5-8.

核电站实物保护系统门禁子系统国产化优化路径探析

潘航, 段丹阳

国核示范电站有限责任公司, 山东 威海 264300

DOI:10.61369/ERA.2026010028

摘 要 : 核电站作为国家清洁能源战略的关键基础设施, 其安全稳定运行对保障国家能源安全和公共安全具有重大战略意义。实物保护系统中的门禁子系统在防范核设施破坏、阻止核材料非法转移等方面发挥着不可替代的核心作用。本文基于核电厂门禁系统日常运维实践, 深入剖析了当前系统在冗余配置、功能实现、兼容性与系统集成等方面存在的突出问题, 系统性地提出了采用双机热备机制、强化设备级安全机制、优化双门互锁逻辑、提升生物识别技术兼容性、完善测试与联动流程、推进系统集成与可视化、推广国密算法应用、规范安装部署流程等针对性优化建议。

关 键 词 : 核电站; 核安保; 实物保护系统; 门禁系统; 国产化; 兼容性

Analysis on the Localization Optimization Path of Access Control Subsystem of Nuclear Power Plant Physical Protection System

Pan Hang, Duan Danyang

State Nuclear Power Demonstration Power Plant Co., LTD., Weihai, Shandong 264300

Abstract : As a critical infrastructure component of national clean energy strategies, nuclear power plants play a vital role in ensuring national energy security and public safety through their safe and stable operation. The access control subsystem within physical protection systems serves as an indispensable core component in preventing nuclear facility sabotage and blocking illegal transfers of nuclear materials. Based on daily operational practices of nuclear power plant access control systems, this paper thoroughly analyzes prominent issues in current systems regarding redundant configurations, functional implementation, compatibility, and system integration. It systematically proposes targeted optimization recommendations, including: implementing dual-machine hot standby mechanisms, enhancing equipment-level security protocols, optimizing dual-door interlock logic, improving biometric recognition technology compatibility, refining testing and coordination processes, advancing system integration and visualization, promoting the application of national cryptographic algorithms, and standardizing installation procedures.

Keywords : nuclear power plant; nuclear security; physical protection system; access control system; localization; compatibility

引言

核电站实物保护系统是保障核设施与核材料安全的重要屏障, 其中门禁系统作为出入口管理的核心组成部分, 直接关系到厂区安全等级与控制效率。随着信息技术与生物识别技术的发展, 门禁系统正朝着智能化、集成化、国产化方向演进。然而, 在实际运维过程中, 系统仍存在冗余不足、功能单一、兼容性差等问题。这些问题不仅影响系统的可靠运行, 也给核电站的整体安全带来潜在风险。特别是在推进国产化替代的过程中, 如何确保系统的稳定性与安全性, 成为亟待解决的重要课题。本文结合多年运维经验, 从系统架构、功能优化、技术兼容等多个维度提出系统性的改进措施, 以期核电站门禁系统的升级与国产化推进提供具有实践价值的参考。

一、系统作用与重要性

门禁系统在核电站实物保护体系中具有举足轻重的地位。它不仅是人员与车辆进出控制的执行单元, 更是核电站安全防护体

系中的第一道防线^[1]。现代门禁系统具备身份验证、区域权限管理、出入记录追溯、异常行为告警等多项功能, 是实现“纵深防御”和“均衡防护”理念的关键环节, 并保证探测、延迟和响应三要素的协调, 最大限度减小部件失效产生的影响, 防范外部、

内部及内外勾结等多种形式的威胁^[2]。

在核安保体系中，门禁系统的稳定运行直接影响到整个实物保护系统的有效性。通过精确的身份识别和权限控制，门禁系统能够有效防止未经授权的人员进入保护区，确保核材料和核设施的安全。同时，系统记录的出入数据为安全审计和事件追溯提供了重要依据，有助于及时发现和处置安全隐患^[3]。

二、问题分析及解决措施

（一）系统冗余与可靠性提升

根据现有设计表明，门禁主控制器缺乏冗余配置是当前系统的主要薄弱环节，存在单点故障风险。在实际运行中，一旦门禁主控制器发生故障，将导致整个区域门禁系统瘫痪，严重影响核电站的安全运行^[4]。此外，现有的状态监控机制不够完善，无法及时发现控制器异常，故障切换效率较低。

优先建议采取双机热备或集群部署方式，实现主控制器的冗余配置。具体实施时，建议采用主备同步机制，确保备用控制器实时保持与主控制器相同的状态数据。当主控制器发生故障时，系统应能在秒级内自动切换到备用控制器，保证业务连续性。次之，采取一半设备接入一个门禁主控制器，另一半设备接入另一个门禁主控制器，当某一个门禁主控制器故障时，可确保此子项有一半通道确保现场人员正常通行，避免出现某子项通行瘫痪，进而由于“防反传”原因导致整个门禁系统运行瘫痪^[5]。

同时，需要建立完善的控制器状态监控机制，包括实时监测控制器的 CPU 负载、内存使用率、网络连接状态等关键指标，设置合理的阈值告警。建议部署专用的监控终端，对控制器运行状态进行可视化展示，便于运维人员快速掌握系统健康状况^[6]。

（二）设备级安全机制强化

在现场调试过程中发现，部分通道存在“一机多闸”现象，即单个断路器管理多个通道门。这种配置虽然降低了建设成本，但存在严重的安全隐患。当断路器发生故障时，会导致多个通道同时失效。此外，缺乏独立保护机制的通道在发生异常时无法快速定位和隔离故障^[7]。

建议推行“一机一闸一保护”原则，确保每个通道具备独立控制与保护能力。具体而言，应为每个通道门配置独立的断路器，实现故障隔离。

对于三角叉门、旋转门等防反传设备区域，安装大屏对各设备进出人员进行显示，并对过程中出现的譬如密码错误、无效卡等警告信息进行直观显示，提醒人员进行规范操作^[8]。

同时，引入门磁信号输出至扬声器系统，实时提示门状态变化^[9]。当检测到门未正常关闭或非法开启时，系统应立即发出声光报警，提醒现场人员注意。此外，建议在关键通道增加本地应急处理机制，如破碎按钮装置等，确保在系统、设备故障时仍能保持基本的通行功能^[10]。

（三）双门互锁功能优化

现有的双门互锁逻辑主要基于简单的时序控制，缺乏对异常行为的智能判断。在实际运行中，存在尾随闯入的风险。同

时，系统对异常开启事件的响应不够及时，无法有效阻止非法入侵^[11]。

建议优化互锁逻辑设计，结合人脸识别或虹膜验证实现二次确认。当第一道门开启后，系统应要求人员在缓冲区内进行身份复核，确认无误后方可开启第二道门^[12]。其次，引入智能行为分析模块，通过视频分析技术检测尾随行为。系统应能识别多人连续通过、异常停留等可疑行为，并及时发出警报。此外，建议设置可调的时间延迟参数，根据不同区域的安全等级配置合适的互锁时间，在保证安全性的同时兼顾通行效率。并加入 3.2 章节中的门磁信号输出形成声光报警，直观提醒人员注意门的状态，避免出现内侧门或外侧门没关好，导致人员无法进入或者外出的情况出现。

（四）生物识别技术兼容性

现有系统对新型生物识别技术的支持不足，主要体现在硬件接口不统一、软件协议不兼容、数据下发无进度条等方面。这导致系统难以灵活切换或组合使用不同的识别方式、维修难度较高等，限制了系统的升级和发展。

建议采用模块化设计理念，从硬件和软件两个层面提升系统兼容性。在硬件层面，定义统一的设备接口标准，支持多种生物识别设备的即插即用。在软件层面，开发统一身份认证平台，实现对不同识别方式的融合管理。具体实施时，建议采用微服务架构，将各种生物识别算法封装为独立服务，通过标准 API 接口提供服务^[13]。这样既便于系统的扩展升级，又能保证不同识别方式之间的协同工作。此外，应建立统一的特征模板库，支持多种生物特征的集中存储和管理，为多模态身份认证奠定基础。

最终实现各设备可直接接入系统，无需中间件等设备，并在一个系统中实现上传、下发数据。

（五）功能测试与运维优化

当前系统的测试流程不够规范，缺乏完整的测试用例和评估标准。在系统升级或改造后，往往难以全面验证各项功能的正确性。此外，门禁系统与其他系统的联动测试缺乏明确的标准和流程。

建议制定标准化的测试流程，涵盖单元测试、集成测试和系统测试三个层次。具体包括：建立详细的陪访测试机制，明确测试场景和通过标准；规范开门时间参数的设置和验证方法；完善后台状态显示功能的测试要求；制定各类报表的生成和校验标准^[14]。在联动测试方面，需要明确摄像机联动的触发条件、响应时间和视频质量要求，建立完整的测试用例库。特别要优化车道控制的逻辑测试，包括无车状态下的授权显示、异常情况下的应急处理等。同时，改进读卡器的反馈机制，通过差异化的声光信号提示操作结果，提升用户体验。

（六）系统集成与可视化

现有系统界面复杂，操作不够直观，特别是防反传区域的显示不够明确。设备管理采用平面化结构，难以快速定位具体设备。门禁系统与其他系统的集成度不够，数据共享和协同处理能力有限。

建议实现防反传区域的可视化展示，在电子地图上清晰标注

各区域的防反传规则和状态。采用不同颜色标识区域的防护等级，实时显示人员在各个区域的分布情况。其次，采用树状结构组织设备层级，按照物理位置和功能关系建立设备拓扑图，支持快速定位和状态查询。在系统集成方面，推动门禁系统与视频监控、入侵报警等系统的深度对接，实现统一的安防管理平台。具体包括：建立统一的事件处理机制，实现跨系统的联动响应；开发标准数据接口，支持安防数据的集中分析和处理；构建统一的权限管理体系，实现各系统间的单点登录和统一授权。

（七）加密与国产化安全

部分在运系统仍使用非国密算法，存在安全风险。同时，关键部件依赖进口，系统的自主可控性不足。在推进国产化过程中，面临着产品成熟度不高、系统兼容性差等问题^[15]。

建议全面推进国密算法在门禁系统中的应用，包括身份认证、数据传输和存储等环节。具体实施时，需要完成密码算法的替换和升级，确保符合国家密码管理政策要求。在国产化推进方面，采取分步实施的策略：首先在非核心区域试点应用国产设备，积累运行经验；然后逐步推广到关键区域，最终实现全站国产化。重点推动国产芯片、操作系统与门控设备的集成应用，建立国产化产品的测试认证体系。同时，加强与国内厂商的合作，推动建立产业联盟，共同制定技术标准和接口规范，促进国产化产品的成熟和完善。

（八）安装与部署规范

现场安装缺乏统一标准，不同厂商的设备安装方式存在差异，影响系统的整体性和稳定性。布线混乱，给后续维护带来困难。部分设备的防护等级不符合现场环境要求。

建议制定详细的安装与布线规范，明确各类设备的安装要求。包括：规定控制器机柜的安装位置和环境条件，或以机柜整机形式进行出厂，出厂前完成内部的设备、接线安装，避免现场

安装工人水平差异导致设备安装问题；统一线缆颜色标识和布线方式，避免不同施工队伍的水平差异导致线缆标识出现错误或者不规范的情况；明确接地的技术要求；规定设备防护等级的选择标准。在施工管理方面，建立严格的质量监督机制，实行工序验收制度。每道工序完成后，必须经监理确认合格后方可进入下一道工序。特别要加强隐蔽工程的验收管理，确保布线质量。在系统调试阶段，要制定详细的调试大纲，包括设备级调试、子系统调试和整体联调，确保系统各项功能符合设计要求。

三、结束语

随着核电站安全要求的不断提高，门禁系统作为实物保护体系的重要组成部分，必须不断优化与升级。本文从冗余设计、功能完善、技术兼容、系统集成与国产化安全等多个维度提出了改进建议，旨在推动门禁系统向全面化、扩展化、兼容化、细致化方向发展。

在推进国产化的过程中，需要特别注意处理好安全性与可用性、先进性与成熟度、自主性与兼容性之间的关系。既要坚持自主可控的安全目标，又要确保系统的稳定可靠；既要积极采用新技术，又要充分考虑技术的成熟度；既要推进国产化替代，又要保持系统的开放性和兼容性。

未来，随着国密算法的普及与国产设备技术的成熟，核电站门禁系统将更加安全、智能、可靠。同时，随着人工智能、大数据等新技术的应用，门禁系统将向智能化运维、精准化管控的方向发展，为国家核安保事业提供坚不可摧的支撑。建议后续重点开展以下工作：建立国产化门禁系统的测试认证体系；制定行业技术标准规范；加强专业人才培养；推动产业链协同发展，共同提升我国核电站门禁系统的整体水平。

参考文献

- [1] 国家核安全局. 核设施实物保护规定 [S]. 2020.
- [2] 王建国, 李思远. 核电站实物保护系统设计与实现 [J]. 核安全, 2019, 18(2): 45-51.
- [3] 张磊, 刘畅. 基于国密算法的门禁系统安全机制研究 [J]. 信息安全研究, 2021, 7(4): 32-38.
- [4] 陈志强, 周华. 生物识别技术在核电站门禁系统中的应用探讨 [J]. 核电子学与探测技术, 2020, 40(3): 412-417.
- [5] 赵刚, 孙悦. 核电站智能化门禁系统集成架构研究 [J]. 自动化仪表, 2018, 39(6): 88-92.
- [6] 国际原子能机构. Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5)[R]. Vienna: IAEA, 2011.
- [7] 黄伟, 徐明. 双机热备技术在核电站控制系统中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 156-160.
- [8] 罗晓飞, 杨静. 核设施门禁系统冗余设计与可靠性分析 [J]. 核技术, 2022, 45(1): 78-84.
- [9] 刘鑫, 王波. 国产化芯片在关键信息基础设施中的应用研究 [J]. 信息网络安全, 2019, 19(5): 1-7.
- [10] 胡军, 高翔. 核电站实物保护系统纵深防御策略研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 119-125.
- [11] 郑小林, 董磊. 门禁系统与视频监控联动技术研究 [J]. 现代电子技术, 2020, 43(15): 120-124.
- [12] 肖建国, 李文涛. 核电站信息安全与物理防护一体化设计 [J]. 华东电力, 2018, 46(4): 210-215.
- [13] 李明, 王磊. 核电站门禁系统可靠性设计与实现 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022, 45(3): 112-116.
- [14] 陈静, 刘建军. 国产化安全芯片在关键基础设施中的应用研究 [J]. 信息安全研究, 2020, 6(2): 45-51.
- [15] 王志强, 张华. 核电站实物保护系统技术创新与发展趋势 [J]. 核安全, 2021, 20(1): 78-84.

基于5G与物联网技术的智慧工地安全管理体系构建与应用

史亚

国核示范电站有限责任公司, 山东 威海 264300

DOI:10.61369/ERA.2026010030

摘要： 随着工程建设信息化、智能化转型加速，传统工地安全管理因环境复杂、监管滞后等问题，已难以满足现代工程安全管控需求。本文以“国和一号”示范工程为例，研究5G与物联网技术在智慧工地安全管理中的创新应用，构建涵盖人员、设备、环境和应急的全场景安全管理体系。通过融合5G网络、物联网传感、AI图像识别与人员定位等关键技术，实现安全风险的实时感知、智能预警、精准管控与追溯分析。^[1] 实践表明，该体系显著降低现场违章率，识别隐患数据3万余条，避免大量安全事故，降低停工风险，提升了安全管理智能化水平和管控效率，为大型复杂工程安全管理提供了可复制的实践经验。^[2]

关键词： 5G技术；物联网；智慧工地；安全管理体系；国和一号工程

Construction and Application of Smart Construction Site Safety Management System Based on 5G and Internet of Things Technology

Shi Ya

Nuclear Demonstration Power Plant Co., LTD. Weihai, Shandong 264300

Abstract： With the accelerated digital and intelligent transformation of construction projects, traditional site safety management has become inadequate for modern engineering safety requirements due to complex environments and lagging supervision. Taking the "Guohe No.1" demonstration project as a case study, this paper explores innovative applications of 5G and IoT technologies in smart construction site safety management, establishing a comprehensive safety management system covering personnel, equipment, environment, and emergency response. By integrating key technologies such as 5G networks, IoT sensors, AI image recognition, and personnel positioning, the system achieves real-time risk perception, intelligent early warning, precise control, and traceability analysis. ^[1] Practical implementation has demonstrated that this system significantly reduces on-site violation rates, identifies over 30,000 potential hazards, prevents numerous safety incidents, minimizes construction suspension risks, enhances intelligent safety management capabilities, and improves operational efficiency, providing replicable practical experience for large-scale complex engineering safety management. ^[2]

Keywords： 5G technology; Internet of Things; smart construction site; safety management system; Guohe No.1 project

引言

工程建设行业是国民经济的支柱产业，其安全管理水平直接关系到人民生命财产安全和行业可持续发展。传统工地安全管理依赖人工巡检和经验判断，存在监管盲区多、响应慢、数据不通、预判弱等问题，难以满足现代复杂工程需要。随着国家推动“新基建”和智慧工地建设，5G、物联网、人工智能等新技术为安全管理转型提供了重要支撑。

本文以“国和一号”三代核电示范工程为研究对象，系统研究5G与物联网技术在智慧工地安全管理中的应用，构建了覆盖感知层、网络层、应用层的全链条安全管理体系，推动安全管理向“主动预防、数据驱动、协同治理”转变。通过分析该工程的实践成效，总结可复制的技术方案与管理经验，不仅丰富了工程安全管理理论，也为其他大型工程提供了重要借鉴，对提升行业整体安全水平具有显著的经济价值和社会意义。^[3]

一、智慧工地安全管理体系构建的理论基础与技术支撑

（一）核心理论

1. 风险预控理论：风险预控理论强调通过识别、分析、评估潜在风险，采取针对性的预防措施，将风险控制在萌芽状态。智慧工地安全管理体系基于该理论，通过物联网设备实时感知风险源，利用大数据分析进行风险评估与预判，实现“事前预防、事中控制、事后追溯”的全流程风险管控。

2. 协同治理理论：协同治理理论主张多元主体通过协同合作，实现治理效益最大化。智慧工地安全管理体系整合建设单位、施工单位、监理单位、监管部门等多方资源，通过数据共享与信息互通，形成协同监管合力，提升安全管理效率。^[4]

3. 闭环管理理论：闭环管理理论以“计划－执行－检查－处理”（PDCA）循环为核心，强调管理流程的完整性、连续性与迭代优化。智慧工地安全管理体系依托该理论，构建从安全制度制定、风险隐患排查、整改措施落实到效果评估反馈的闭环流程，通过实时数据跟踪与动态调整，持续优化安全管理策略，确保安全管控无漏洞、责任可追溯。^[5]

（二）关键技术

1. 5G 技术：5G 技术具有大带宽、低时延、高并发的特点，能够解决工地复杂场景下的网络覆盖问题，支持高清视频回传、海量传感设备接入、远程控制等功能，为智慧工地安全管理提供稳定、高效的网络支撑。

2. 物联网技术：物联网技术通过各类传感器、射频识别（RFID）、北斗定位等技术及设备，实现人员、设备、环境等物理实体的信息采集与互联互通，是安全管理数据感知的核心技术。

3. AI 图像识别技术：基于深度学习的 AI 图像识别技术能够对视频监控数据进行实时分析，自动识别安全帽未佩戴、反光背心缺失、违规闯入高危区域、火灾等违规行为与安全隐患，实现 24 小时不间断监督。^[6]

4. 大数据分析技术：大数据分析技术对物联网采集的海量数据进行清洗、分析与挖掘，提取风险特征，进行风险评估与趋势预测，为安全管理决策提供数据支撑。

5. VR/AR 技术：VR/AR 技术通过构建虚拟仿真场景，开展安全培训与应急演练，提升施工人员的安全意识与应急处置能力，降低实际作业中的安全风险。

二、基于 5G 与物联网的智慧工地安全管理体系构建

以国和一号工程为依托，遵循“软硬结合、永临结合、全周期管控、数字化移交”的建设思路，构建基于 5G 与物联网的智慧工地安全管理体系，该体系分为感知层、网络层、应用层、展示层四个层级，实现安全管理的智能化、可视化、协同化。^[7]

（一）体系总体架构

1. 感知层：感知层是安全管理体系的数据来源，通过部署各类物联网传感设备，实现对人员、设备、环境、作业过程等安全要素的全面感知。主要包括人员定位卡、设备传感器、环境监测设备、视频监控摄像头、RFID 标签、无人机等设备，能够采集人员位置、设备运行状态、环境参数、作业行为等实时数据。

2. 网络层：网络层以 5G 网络为核心，结合 4G、GPS、RFID 等技术，构建全覆盖、高可靠的通信网络，实现感知层数据的实时传输。国和一号工程已建成厂区 5G 专网，实现了施工区、生产区的网络全覆盖，支持高清视频回传、AI 分析结果反馈、设备远程控制等功能，解决了传统工地网络覆盖不足、数据传输延迟等问题。

3. 应用层：应用层是安全管理体系的核心功能模块，基于感知层采集的数据，结合 AI、大数据等技术，实现人员管理、设备管理、环境管理、安全预警、应急处置等一系列安全管理功能，形成全场景的安全管控能力。

4. 展示层：展示层通过统一门户、工程指挥中心大屏、移动 APP、预警平台、报表中心等形式，实现安全管理数据的可视化展示与便捷查询，为管理人员提供实时、直观的安全状态信息，支持远程指挥与决策。^[8]

三、核心功能模块设计

智慧工地安全管理以五大核心模块为支撑，通过多技术融合实现全流程管控，保障施工安全。

1. 人员安全管理模块作为核心模块，依托人员定位、AI 图像识别、VR 安全教育三大技术实现闭环管控。为人员配发有源定位卡，基于 5G 与北斗技术实时显示位置及轨迹，支持出勤统计，并通过虚拟分区电子围栏实现高危区域越界预警，联动积分制与门禁系统强化约束。AI 图像识别 24 小时监测安全帽佩戴等防护措施落实情况，及打电话、睡岗等违规行为，降低违章率。VR 系统构建急救、消防及 15 类事故模拟场景，开展违章人员再教育与管理人员体验式培训，提升安全意识与应急能力。

2. 设备安全管理模块针对大型机械多、交叉作业频繁特点，实现机械实时监控与预警。塔吊防碰撞系统部署传感器与定位设备，监测位置、角度等参数，具备限位、碰撞、风速报警功能，国和一号工程 12 套系统覆盖交叉作业塔吊集群，杜绝碰撞事故。通过 GPS 与传感器实时监测机械位置及运行状态，定期性能检测排查故障。吊钩可视化系统借助高清摄像头与 5G 网络，将吊装画面回传操作室及监控中心，避免盲吊风险。

3. 环境安全管理模块通过监测与应急联动管控现场环境。部署 PM2.5、噪声、风速等传感器，实时采集环境参数，风力达 6 级及以上时自动预警并暂停高危作业。结合 AI 图像识别与气体传感器，监测起火点及危险气体浓度，异常时触发预警，联动广播系统告警并启动应急流程。

四、智慧工地安全管理体系在国和一号工程的应用实践

（一）工程概况

国和一号示范工程是我国自主三代核电标志性项目，位于山东荣成，规划建设两台百万千瓦级核电机组，具有建设周期长、投资规模大、技术难度高、安全要求严等特点。施工现场峰值人员数千人，覆盖核岛、常规岛等多区域，作业面复杂且大型机械密集，安全管理难度极大。为落实监管要求，工程于 2020 年启动智慧工地建设，目前已全面建成投用，成为工程建设期核心技防手段。

（二）应用实施过程

实施分五阶段推进：一是需求分析与方案设计，聚焦人员、设备等关键要素，确立智能化、可视化、全周期管控目标，设计感知、网络、应用、展示四层总体方案；二是硬件部署与网络建设，实现厂区5G全覆盖，部署330支监控摄像头、120套质量防造假记录仪等设备，构建全域感知网络；三是软件开发与系统集成，开发人员定位、AI图像识别等模块，搭建集成平台打破数据壁垒；四是人员培训与试运行，开展全员培训强化安全理念，通过试运行优化系统；五是全面推广与持续优化，结合工程进度动态升级功能、拓展场景。

（三）应用成效

成效显著体现在四方面：其一，安全风险防控能力跃升，累计识别隐患3万余条，据DNV模型测算避免50项严重伤害事故，AI识别降低人员违章率，塔吊防碰撞等系统防范设备及环境风险；其二，经济效益突出，通过减少事故停工整改，可大大减少因停工导致的经济损失；其三，管理效能提升，自动化监管减少人工巡检量，车辆测拍等系统降低劳动强度，预警平台推动建设、施工、监理单位协同监管；其四，安全文化深化，“两个零容忍”理念深入人心，施工人员安全意识与主动防控能力显著增强。

五、问题与优化建议

（一）存在的问题

1. 技术融合深度不足：部分系统功能碎片化，5G、物联网、AI等技术融合不深入，数据互联在安全风险模拟分析中应用待拓展，数据价值挖掘不充分。
2. 标准规范不统一：智慧工地缺乏统一技术标准与数据规范，不同厂家设备及系统兼容性差，数据共享受阻，影响体系扩展性与互联互通性。
3. 人员技术素养待提升：部分施工及管理人员信息化素养不足，对系统使用不熟练，制约系统功能充分发挥。
4. 运维保障体系不完善：系统涉及大量软硬件，工程期设备点位调整量较大，运维工作量大，现有运维团队技术能力与人员配置不足，存在设备故障处置不及时风险。

（二）优化建议

1. 深化技术融合创新：深度融合5G、物联网、AI等技术，

拓展大数据在风险模拟、应急演练中的应用；通过大数据分析预测风险趋势，探索区块链用于安全数据追溯，保障数据真实可追溯。

2. 推动标准规范制定：建议行业主管部门牵头，联合企业、科研机构制定技术标准、数据规范及管理办法，统一设备接口、数据格式等要求，促进系统互联互通与数据共享。

3. 强化人员培训培养：建立常态化培训机制，提升人员系统操作及信息化应用能力；与院校合作培养工程管理与信息化复合型人才，提供人才支撑。

4. 完善运维保障体系：组建专业运维团队并强化技术培训，提升故障处置能力；建立设备定期巡检维护制度，结合远程监控实时监测运行状态，及时处置故障保障系统稳定运行。

六、结论与展望

（一）结论

本文以国和一号示范工程为研究对象，构建了基于5G与物联网技术的智慧工地安全管理体系，该体系以感知层、网络层、应用层、展示层为总体架构，整合人员定位、AI图像识别、安全预警、三维可视化等核心功能模块，实现了安全风险的实时感知、智能预警、精准管控与协同治理。实践表明，该体系在国和一号工程中的应用，有效提升了安全风险防控能力，缩短了项目工期，提升了管理效率，形成了良好的安全文化氛围，为大型复杂工程的安全管理提供了成功范例。^[8-10]

（二）展望

随着5G、物联网、人工智能、大数据等技术的持续发展，智慧工地安全管理体系将向更加智能化、精细化、协同化的方向发展。未来，应进一步深化新技术的融合应用，拓展安全管理的应用场景，实现从施工阶段向设计、运维全生命周期的延伸；推动智慧工地安全管理的标准化、规模化应用，促进行业整体安全管理水平的提升；加强跨行业、跨区域的合作与交流，分享成功经验，共同推动智慧工地安全管理技术的创新与发展，为我国工程建设领域的安全生产与高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 国家能源局，生态环境部. 关于加强核电工程建设质量管理的通知 [Z]. 2020.
- [2] 汪映荣. 对智慧工地助力国和一号工程建设的研究和探索 [J]. 核工程研究, 2021, 43(2): 56-62.
- [3] 李明, 王强. 5G与物联网技术在智慧工地安全管理中的应用 [J]. 建筑技术, 2020, 51(8): 987-990.
- [4] 张华, 刘伟. 智慧工地安全预警系统的设计与实现 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 234-240.
- [5] 陈建国, 赵丽. 基于数字孪生的智慧工地安全管理模式研究 [J]. 施工技术, 2022, 51(3): 156-160.
- [6] 王建华, 陈晓峰. 大型核电工程智慧工地建设实践与思考 [J]. 中国核电, 2021, 14(4): 523-528.
- [7] 张磊, 王强, 刘畅. 5G+MEC边缘计算在核电智慧工地安全监管中的应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023, (08): 189-193+198.
- [8] 李进, 张明, 陈曦. 基于物联网的危大工程智慧监测平台研究与应用 [J]. 建筑机械化, 2025, 46(06): 35-38.
- [9] 刘军, 吴敏, 赵伟. 5G+AI赋能智慧工地安全监督平台创新实践 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(03): 156-162.
- [10] 王浩, 孙悦, 周宇. 大型核电工程智慧工地安全管理体系构建与实践——以“国和一号”示范工程为例 [J]. 施工技术, 2024, 53(12): 89-94.