

09
2025



工程设计与施工

Engineering Design and Construction

Volume 7 Issue 9 · September 2025 · ISSN 2705-070X(Print)

Engineering Design and Construction

工程设计与施工

Volume 7 Issue 9 · September 2025 · ISSN 2705-070X(Print)



Tel:+65 65881289

E-mail:info@nassg.org

Website:<http://ojs.nassg.org>



中文刊名：工程设计与施工

ISSN：2705-070X (纸质)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/edc>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Engineering Design and Construction

ISSN: 2705-070X (Print)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/edc>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程设计与施工》征稿函

期刊概况：

中文刊名：工程设计与施工

ISSN：2705-070X (Print)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/edc>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



CQVIP



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

出版格式要求：

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

出刊及存档：

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

作者权益：

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

评审过程：

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



Engineering Design and Construction

工程设计与施工

September · 2025 | Volume 7 · Issue 9 | ISSN 2705-070X (Print)

编委会

主 编

贾 西 圣 山东汇通建设集团有限公司

编 委

王 立 峰 通号（郑州）电气化局郑州铁路工程有限公司

马 利 东 北京诚通华亿房地产有限公司

谢 红 星 通号（郑州）电气化局有限公司

徐 舟 陕西航天建设集团有限公司

成 柏 璇 北京光谷创新置业有限公司

张 龙 沂源龙裕工贸有限公司

吕 泓 静 濮阳市住房和城乡建设事务中心

王 子 眇 百安木设计咨询（北京）有限公司

1	地下水封洞库勘察设计的技术创新与亮点 /董林恒 王斌 杨光 司磊	53	双层壳型网架拆改施工总结与应用研究 /季建国 曾杰军
4	地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略研究 /文翼 邓文杰 何孟舟 黄靖淇 晏屹	56	工程技术创新在施工管理中的应用 /赵中国
7	探讨风电项目风机设备吊装施工措施 /周超 计坤全	59	基于深度处理工艺的污水厂污水处理与提质增效探讨 /苗宏磊 王亚楠
10	全生命周期视角下公路项目成本动态控制模型及应用研究 /杜少博 郝飞 石英杰 杜春国 杨贝贝	62	镁合金薄板振镜激光焊焊接接头试验研究 /敖再航 王守武 施伟 尹福钟 符书豪
13	高标农田项目实施中的主体协同机制与效率提升路径研究 /魏立宽 郝瑞卿 母瑞强 刘子轩 宋慧蕾	65	作业分类码在项目进度管理中的应用初探——以某大型国际工程项目应用为例 /唐亮 李维 罗运涛
16	岩溶地区崩塌治理工程施工期地下水控制 /王瑶 徐彬赫	69	城市更新背景下市政基础设施改造技术研究 /芦万华
19	既有建筑暖通空调系统改造中的能效提升技术与方案研究 /姚庆节	72	社区嵌入式养老服务设施的集成化设计研究 /矫苏宁
23	地面铺装(块材)工程质量问题解析及改进 /仇玉江 郭志钧	75	藏式碉楼寺庙与罗曼式教堂的采光构造比较 /熊卫
26	BIM在工程造价领域中应用的研究现状与发展趋势 /冯占平	78	结构拆除工程静力无损切割拆除关键技术 /李公胜 刘泽旺
29	混凝土裂缝成因与控制策略研究 /张武一郎 吴小华	81	山区地形条件下公路线路交叉平纵线形协调设计及风险防控 /陈彦运
32	建筑消防设施智能化运维技术在航天建筑中的应用 /毛培 郑晗犁	84	复杂地质条件下隧洞围岩稳定控制及支护优化研究 /陈杨华
35	公路桥梁盖梁裂缝扩展控制与外包钢筋混凝土加固的结构安全评价 /张榄	87	绿色施工管理评价体系构建与应用分析 /丁明增
38	BIM技术在建筑施工进度动态管控中的应用研究 /蔡炜钰	90	输油管线腐蚀隐患防治与技术应用 /钟晓舟 逢超然 苏超
41	基于BIM技术的建筑智能化施工协同管理与效率优化研究 /高锡华	93	多源异构数据融合的装配式建筑对地产成本影响的研究 /王兰芬
44	电化学腐蚀原理在油气管道阴极保护控制中的创新应用 /艾敏飞 邹杰 王凌翔	96	装配式建筑电气自动化系统集成与优化控制策略 /罗琦
47	一起调相机励磁系统故障分析及措施建议 /刘生春 张杰 尚国斌 徐兵 马飞	99	城镇化进程中城乡结合部适老服务产业中的无障碍设计地化探索——以鄂尔多斯市为例 /张娜
50	浅海滩涂地区清淤施工技术研究 /范小亮	102	建筑机器人在主体结构施工中的作业效率与成本效益研究 /刘鑫

- 1 The technical innovation and highlight of groundwater sealing cavern design
/ Linheng Dong Bin Wang Guang Yang Lei Si
- 4 Research on seismic design optimization strategies for railway bridge and tunnel structures along the earthquake zone
/ Yi Wen Wenjie Deng Mengzhou He Jingqi Huang Yi Yan
- 7 Explore the hoisting construction measures of wind turbine equipment in wind power projects
/ Chao Zhou Kunquan Ji
- 10 Research on Dynamic Cost Control Model and Application of Highway Projects from the Perspective of the Entire Life Cycle
/ Shaobo Du Feishi Hao Yingjie Shi Chunguo Du Beibei Yang
- 13 Research on the main body collaboration mechanism and efficiency improvement path in the implementation of high standard farmland projects
/ Likuan Wei Ruiqing Hao Ruiqiang Mu Zixuan Liu Huilei Song
- 16 Groundwater control during construction of rock and soil collapse control project in karst area
/ Yao Wang Binhe Xu
- 19 Study on energy efficiency improvement technology and scheme in renovation of HVAC system of existing buildings.
/ Qingjie Yao
- 23 Analysis and improvement of quality problems of pavement (block) engineering
/ Yujiang Qiu Zhijun Guo
- 26 The research status and development trend of BIM application in the field of engineering cost
/ Zhanping Feng
- 29 Research on the Causes and Control Strategies of Concrete Cracks
/ Wuyilang Zhang Xiaohua Wu
- 32 Application of intelligent operation and maintenance technology of building fire control facilities in aerospace buildings
/ Pei Mao Hanli Zheng
- 35 Safety evaluation of crack propagation control and reinforced concrete reinforcement of highway bridge cap girder
/ Lan Zhang
- 38 Research on the application of BIM technology in the dynamic control of construction schedule
/ Weiyu Cai
- 41 Research on intelligent construction collaborative management and efficiency optimization of buildings based on BIM technology
/ Xihua Gao
- 44 Innovative application of electrochemical corrosion principle in cathodic protection control of oil and gas pipeline
/ Minfei Ai Jie Zou Lingxiang Wang
- 47 Fault analysis and proposed measures for adjusting the camera excitation system together
/ Shengchun Liu JieZhang Guobin Shang Bing Xu Fei Ma
- 50 Research on dredging construction technology in shallow beach and shoal areas
/ Xiaoliang Fan
- 53 Summary and Application Research on the Dismantling and Reconstruction Construction of Double-Layer Shell-Type Grid Structures
/ Jianguo Ji Jiejun Zeng
- 56 Application of engineering technology innovation in construction management
/ Zhongguo Zhao
- 59 Discussion on Wastewater Treatment and Quality Improvement and Efficiency Enhancement in Wastewater Treatment Plants Based on Advanced Treatment Processes
/ Honglei Miao Yanan Wang
- 62 Experiment Study on Welded joints of Magnesium Alloy Thin Sheets by Galvo Laser Weld
/ Zaihang Ao Shouwu Wang WeiShi Fuzhong Yin Shuhao Fu
- 65 Preliminary exploration of the application of task classification codes in project schedule management-Taking the application in a large-scale international engineering project as an example
/ Liang Tang Wei Li Yuntao Luo
- 69 Research on municipal infrastructure renovation technology under the background of urban renewal
/ Wanhua Lu
- 72 Research on integrated design of community embedded elderly care service facilities
/ Suning Jiao
- 75 A Comparative Study of Lighting Construction Tech-

- niques in Thick-walled Tibetan Watchtower Temples and Romanesque Churches / Wei Xiong
78 Key Technologies for Static Non destructive Cutting and Demolition of Structural Demolition Projects / Gongsheng Li Zewang Liu
81 Coordination design and risk prevention of horizontal and vertical alignment of highway intersections under mountainous terrain conditions / Yanyun Chen
84 Research on Stability Control and Support Optimization of Tunnel Surrounding Rock under Complex Geological Conditions / Yanghua Chen
87 Analysis on construction management evaluation system construction and application of green construction / Mingzeng Ding
90 Prevention and Technical Application of Corrosion Hazards in Oil Pipeline / Xiaozhou Zhong Chaoran Feng Chao Su
93 Research on the Impact of Prefabricated Buildings Based on Multi-source Heterogeneous Data Fusion on Real Estate Costs / Lanfen Wang
96 Integration and Optimization Strategies for Electrical Automation Systems in Prefabricated Buildings / Qi Luo
99 Exploring localized barrier-free design in elderly-friendly services in urban-rural fringe areas during urbanization: A case study of Ordos City / Na Zhang
102 Research on the Operational Efficiency and Cost-effectiveness of Construction Robots in the Construction of Main Structures / Xin Liu

The technical innovation and highlight of groundwater sealing cavern design

Linheng Dong¹ Bin Wang² Guang Yang³ Lei Si⁴

1.Petrochina Pipeline Materials and Equipment Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China

2.Hebei North China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China

3.Fourth Branch of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China

4.First Branch of China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

This paper summarizes nine technological innovations and highlights in China's first batch of large-scale underground petroleum reserve reservoirs. These include breakthroughs in geotechnical engineering survey techniques, overcoming challenges in water-sealing technology design, advancements in cavern stability analysis, the Q system rock classification method with corresponding Q support design, application of dynamic design technology, solutions to design challenges in large-volume concrete sealing plugs, and the proposal and implementation of full-cycle monitoring technology integrating geotechnical monitoring with hydrogeological studies.

Keywords

地下水; 洞库; 勘察设计; 技术创新

地下水封洞库勘察设计的技术创新与亮点

董林恒¹ 王斌² 杨光³ 司磊⁴

1. 中油管道物资装备有限公司, 中国·河北廊坊 065000

2. 河北华北石油工程建设有限公司, 中国·河北任丘 062550

3. 中国石油管道局工程有限公司第四分公司, 中国·河北廊坊 065000

4. 中国石油管道局工程有限公司第一分公司, 中国·河北廊坊 065000

摘要

结合我国第一批投入建设的大规模地下石油储备库, 总结了岩土工程勘察技术中的突破, 设计中水封技术难关的攻克, 洞室稳定性分析技术的亮点, Q系统岩体分类方法及对应的Q支护设计, 动态设计技术的运用, 大体积混凝土密封塞设计技术难关的攻克, 岩土监测和水文地质相结合的全周期监测技术的提出和应用等9项技术创新与亮点。

关键词

地下水; 封洞库; 勘察设计; 技术创新

1 引言

地下水封岩洞储油是指在低于地下水位的岩体中由人工挖掘形成的一定形状和容积的洞室, 利用地下水压力, 形成地下水封, 在岩洞内储存原油。目前北欧、韩国等国家的石油战略储备都采用了这种地下储存方式。地下水封岩洞储油主要具有安全、经济、环保效果好等可观优越性。

石油储备是保障国家能源安全的重要措施, 其中, 地下储备库已成为储备的主要方式。地下储备库是一种安全和节约的储备方式, 随着进口依存度的不断增大, 需重视和

加大地下储备技术的研发, 随着我国第一批大规模地下石油储备库正式进入建设阶段, 进一步总结地下水封洞库的在勘察与设计过程的技术创新与亮点变得十分必要(Xue et al. 2015)。

2 地下水封洞库储油的基本原理

地下水封储油库是通过人工在地下岩石中开挖形成的。其密封是通过地下水往洞内渗透实现的, 地下洞库必须建在稳定的地下水位线以下, 洞的埋深与所储存的介质压力有关, 以保证洞库周围的地下水压力大于洞内储存介质的压力; 为保证强度地下水封储气洞库一般修建在岩性较好的岩体中。

洞室开挖前, 地下水通过节理裂隙渗透到岩层的深部并完全充满岩层空隙, 洞室开挖形成后, 周围岩石中的裂隙

【作者简介】董林恒(1986-)男, 中国山东泰安人, 本科, 工程师, 从事项目采办管理研究。

水就向被挖空的洞室流动，并充满洞室。在洞室中注入石油后，洞室周围会存在一定油、水压力差，因而在任一相同水准面上，地下静水压力都大于洞内油压，这样，洞内石油就储存在这个封闭的压力场中。在水压力的作用下，岩体中的裂隙水不断地流入洞室中，而石油却不能从裂隙中泄漏。流入洞内的水沿洞壁汇集到洞底部形成水垫层，由于油比水轻、油水不相混，石油始终漂浮在洞室底部的水垫层上。通过油水介面检测仪监视其液位，待达到一定高度时，用装在洞内的潜液泵将水排出洞外。

3 地下水封洞库勘察设计的技术创新与亮点

由于地下水封洞库的特殊性，其在设计方面，从预可研、可研、初步设计到施工图，都与普通地上储罐存在较大不同，需掌握全面掌握勘察选址、大断面洞室群稳定性分析设计、水封设计、操作竖井工艺、仪表自动化设计、竖井金属构筑物防腐设计、施工期和运行期监测等地下水封岩洞储油项目关键设计技术，攻克了大断面洞室稳定性分析和支护，水封效果评价和竖井工艺安装等设计难题。我国已经建设的第一批地下水封洞库，已成功开创了行业设计先河，填补我国地下水封洞库设计技术的空白。

3.1 地下水封洞库岩土工程勘察技术中的突破

地下水封洞库设计已采取区域资料收集分析、工程地质测绘、工程物探、工程地质钻探、综合水文地质试验、地应力测试、波速测井、孔内超声波成像、地温测试、室内分析实验、开挖素描、超前地质预报分析等十多种手段，将地表测绘数据、钻孔数据、地层岩性、风化程度、RQD、节理裂隙数据、岩脉数据、岩体渗透系数等数据进行集中综合分析，为设计和施工提供了高精度、高质量、完整详实的工程地质资料和水文地质资料 (Li et al. 2023)。

3.1.1 三维地质综合分析技术的应用

该技术实现了钻探测试等数据的输入和处理、三维地质模型的展示、不连续面以及软弱带等地质条件分析研究，为高效的展现工程地质三维信息及其可视化综合分析开拓了一条有效的途径，为地下水封洞库项目论证及设计提供可靠的依据。

3.1.2 综合水文地质试验技术的提出和应用

综合水文地质试验技术包涵了综合压水试验、压水干扰试验、抽水干扰试验等一系列针对水封洞库的系统性水文试验及分析方法。该方法可适用于各种渗透性不同的地层，可取得不同深度、不同性质地层的渗透性指标，可反映渗透系数的各向异性分布规律、围岩的总体导水性、含水层特性。为水幕系统设计、渗水评估、水文监控系统设计提供可靠的设计依据。该技术填补了国内现有规范的空白。

3.1.3 孔内超声波成像测试技术的使用

位于我国北方的一处地下水封洞库，由于地表残积土覆盖较厚，基岩露头很少，地表工程地质测绘获取的结构面信息非常有限。针对这个难点，该工程勘察采用了孔内超声波成像系统在钻孔内进行结构面量测，原位获取地下岩体结

构面发育、产状、及组合关系的方法。为地下水封洞库设计，特别是注浆与支护设计提供了传统手段难以完成的丰富的工程地质资料，表现出了新技术的优越性，经济效益明显。

3.2 地下洞库设计中水封技术难关的攻克

3.2.1 大型地下水封洞库水幕系统设计技术

为确保良好的地下水渗流压力，大型地下水封洞库均设置了水幕系统，做为洞库密封性的保障。通过综合分析库区的工程地质、水文地质测绘和钻探资料，建立洞库的渗流场模型，运用数值模拟软件对地下水渗流场进行模拟，分析研究不同阶段、不同运营压力等不同工况下储油洞室周边地下水渗流情况，综合确定水幕系统的最佳设计方案，包括水幕巷道设计、水幕孔设计、水幕供水设计等。

3.2.2 水幕系统有效性现场试验验证优化技术

应用裂隙水的连通性试验来优化调整水幕系统设计，通过开展水幕孔之间连通性试验来验证已有水幕系统的水力连通性，检测可能存在的不良水文地质区域，优化调整未开挖前的水幕系统布置方案，在保证水封效果的前提下，提升水幕系统的利用效率。该技术解决了常规干扰试验不适用于水幕系统中裂隙水评价的问题，攻克了水封洞库地下岩体的不连续性、裂隙水的不可知性等固有属性造成水封效率难以评价的难题，形成了一套水幕系统连通性测试与评价技术 (Zhang et al. 2020)。

3.3 超大断面地下洞室稳定性分析技术的亮点

通过对岩体、节理力学参数取值进行研究，形成了基于 Hoek-Brown 广义破坏准则的岩体和基于 Barton-Bandis 破坏准则的节理力学参数取值方法；采用 Plaxis 软件考虑地下洞室合理洞型、埋深、间距的整体稳定性评价；采用 Flac3D 软件进行储油洞室和连接巷道交叉部位的局部三维稳定性分析；基于初步勘察获得的岩体节理、断层、岩脉等不连续结构面的信息，采用离散单元法进行地下洞室围岩稳定性分析，判断由结构面切割形成的块体失稳部位和破裂深度，为支护设计提供参考；采用蒙特卡洛法对围岩稳定性作以概率和数理统计理论为基础的地下工程结构可靠度分析，解决了勘察信息不确定性带来的工程风险。

通过施工阶段地下洞室开挖所取得的详实、准确工程地质信息，采用反分析方法，进一步修正初设阶段的数值模型，使其更准确的预测围岩开挖响应，为后续地下洞室施工提供指导。针对开挖施工中遇到的特定不良断层、岩脉，建立特定位置处的 UDEC 离散元分析模型，以评估该部位的支护强度。

形成模型建立、参数选取、结果分析到确定支护设计方案等的一整套设计方法。

3.4 Q 系统岩体分类方法及对应的 Q 支护设计

采用 Q 系统岩体分类方法，通过施工阶段地质素描，建立了 Q 系统与 RMR 之间的关系，获得了不同围岩等级下自稳时间，科学确定不同围岩等级的支护时机，确保工程建设安全奠定坚实基础 (Zhao et al. 2020)。

3.5 大体积混凝土密封塞设计技术难关的攻克

通过有限元数值模拟，确定了密封塞形状、厚度、配筋等关键设计参数，确保密封塞整体稳定性和接触面围岩稳定性；通过室内试块温度试验和设置冷却水循环系统，解决了大体积混凝土水化热产生的温度裂缝问题；采用有限元数值分析确定了密封塞的渗流路径，通过试验研究确定了密封塞界面注浆材料选择、注浆口布置、注浆压力确定等注浆关键技术。

3.6 岩土监测和水文地质相结合的全周期监测技术的提出和应用

在洞库建设前、建设过程中和运行期分别制定详细的监测项目、设备和频率要求。洞库建设前，设计地表水文监测网，动态监测库区的地下水位。洞库建设过程中，设计水幕巷道、主洞室内涌水量分开计量方案，用于协助控制运营期水幕系统水封效率和主洞室内的涌水量；设计地下压力计监测围岩裂隙水压力；设计多点位移计，监测库区围岩收敛情况。洞库运营期，各监测系统集成到站控室，实现对储油洞库全方位的健康监测和自动化控制，为运营期决策、判断储库运行状态、调整运行参数等提供基础信息。最终形成一套水封洞库监测系统设计技术 (Xue et al. 2021)。

3.7 地下水封工艺设计技术的亮点

3.7.1 库区地面工程及地下工程整体应力分析

分析过程将进出站管道、库区管网、地面相关工艺设备区、进出油竖井套管作为一个整体进行应力分析，考虑各种工况、地面气象条件以及地下环境参数，论证各工艺设施的安装可靠性及后期运行的稳定性。

3.7.2 泵坑流场模拟分析辅助设计

泵坑用于设置潜油泵、潜水泵以及相关监测仪表。如何确定泵坑内各种设备的安装位置以及确定油水液位是地下水封洞库项目设计的难点以及核心技术。采用 ANSYS 流场模拟分析手段进行辅助设计，可以为相关设计参数的确定及优化提供指导。

3.7.3 优化工艺过程控制及联锁方案

从本质安全的设计角度出发，科学确定温度、压力、流量、液位控制方案，合理设置全场的参数设定值、报警值以及连锁值，采用 DCS、SIS 等系统对所有设备进行状态监控及安全连锁，保证整个工艺装置操作方便、控制平稳、安全可靠。对于突发性工况，如突然断电、压力失控、液位超限、管线破裂等，专门设紧急移动供电设备、关键区域设置快速切断阀，以及实现全场控制系统连锁动作等措施来保障安全生产运行。

3.8 洞库运行期的长期安全性监测技术

由于地下水封洞库是在地壳浅薄处的基岩内挖掘出的洞库。围岩自身的裂隙、岩脉以及建设洞库时的人工爆破会对建设期和运行期间的洞库围岩稳定性产生破坏性影响。此外，自然地震、原油存储、抽采过程以及水封环境的压力变化都会造成洞库围岩应力场的变化，从而产生破坏。长期围

岩微小的形变的累积可能产生不可预测的后果。

微震技术能够提供给洞库管理者关于洞库围岩稳定性安全信息，特别是在长期运营期间。这些信息对判断地震类型和对洞库的破坏程度有着重要的参考价值。管理者通过这些信息，能够做出洞库整体安全性的及时、准确评估。如果围岩严重变形可能产生油品泄露，必须及时采取安全措施，降低对地面生产、生活人员以及环境的危害性。

通过技术攻关，建模计算，确定此类工程围岩破坏性震动的频段范围，并研究此类型工程微震检测与矿山震动检测的区别，确定非接触式的微震系统是能捕捉可能产生破坏围岩的唯一技术手段，并把定位误差限制在 12 米之内。微震技术首次在国内超大型地下水封原油储备库中使用，解决了地下洞室一旦被封就 50 年对其安全性全无了解的问题。

4 结语

大型地下水封储油洞库目前在国内还属于一种没有普遍使用的新型能源储备方式，在勘察和设计中也都还存在着出多难点。但是地下储备库具有地上储备库所无法代替的安全性和实用性，必将成为今后国家能源战略储备的重要方式。

因此，如何不断摸索地下水封洞库在设计中的技术特点，总结其勘察和设计中的技术创新和亮点，完善地下水封洞库的安全性和稳定性，更好的提高其使用效率和经济效益，就显得更加重要。

参考文献

- [1] Li, Y.T., Zhang, B., Wang, L., Xue, Y.G., Wang, H.X., Shi, L., Peng, Z.H., and Li, J.Y. 2023. Key issues in water sealing performance of underground oil storage caverns: Advances and perspectives. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 15(10): 2787-2802.
- [2] Xue, Y.G., Tao, Y.F., Qiu, D.H., Su, M.X., Li, Z.Q., and Zhang, X.L. 2021. Analysis of an Underground Water-Sealed Oil Storage Cavern: a Method of Surrounding Rock Classification Considering Hydrological Conditions. POLISH JOURNAL OF ENVIRONMENTAL STUDIES. 30(3): 2369-2379.
- [3] Xue, Y.G., Li, S.C., Qiu, D.H., Wang, Z.C., Li, Z.Q., Tian, H., Su, M.X., Yang, W.M., Lin, C.J., and Zhu, J.Y. 2015. A new evaluation method for site selection of large underground water-sealed petroleum storage depots. SCIENCE CHINA-TECHNOLOGICAL SCIENCES. 58(6): 967-978.
- [4] Zhang, Q.H., Liu, Q.B., and He, G.F. 2020. Reexamining the Necessity of Adding Water Curtain Borehole with Improved Understanding of Water Sealing Criterion. ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING. 53(10): 4623-4638.
- [5] Zhao, X.D., Lei, D., and Zhang, S.J. 2020. Stability analysis of underground water-sealed oil storage caverns in China:A case study. ENERGY EXPLORATION & EXPLOITATION. 38(6): 2252-2276.

Research on seismic design optimization strategies for railway bridge and tunnel structures along the earthquake zone

Yi Wen Wenjie Deng Mengzhou He Jingqi Huang Yi Yan

Chengdu Chengtiedian Project Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610081, China

Abstract

This paper focuses on seismic design optimization strategies for railway bridge and tunnel structures in earthquake-prone zones. First, it elaborates on the importance of seismic design for these structures and analyzes the destructive patterns and impacts of earthquakes. Subsequently, it delves into existing challenges in current seismic design from perspectives including design philosophy, structural selection, seismic calculation methods, and construction measures. The paper then proposes targeted optimization strategies, such as applying performance-based seismic design concepts, rational structural selection and layout, improved seismic calculation methods, enhanced construction measures, and consideration of new materials and technologies. These efforts aim to provide theoretical support for seismic design of railway bridge and tunnel structures in earthquake-prone zones, enhance their seismic resistance capabilities, and ensure the safety and smooth operation of railway transportation.

Keywords

earthquake-prone zones; railway bridge and tunnel structures; seismic design; optimization strategies

地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略研究

文翼 邓文杰 何孟舟 黄靖淇 晏屹

成都成铁工程项目管理有限公司，中国·四川成都 610081

摘要

本文聚焦于地震带铁路桥隧结构的抗震设计优化策略。首先阐述了地震带铁路桥隧结构抗震设计的重要性，分析了地震对铁路桥隧结构的破坏形式及影响。接着从设计理念、结构选型、抗震计算方法、构造措施等方面深入探讨了现有抗震设计存在的问题。然后针对性地提出了一系列优化策略，包括基于性能的抗震设计理念应用、合理结构选型与布置、改进抗震计算方法、完善构造措施以及考虑新材料与新技术应用等。旨在为地震带铁路桥隧结构的抗震设计提供理论支持，提高其抗震能力，保障铁路运输的安全与畅通。

关键词

地震带；铁路桥隧结构；抗震设计；优化策略

1 引言

铁路作为国家重要的基础设施和交通运输方式，在经济发展和社会生活中发挥着不可替代的作用。它承担着大量的客货运输任务，连接着各个地区，促进了区域间的经济交流和合作。然而，地震带地区由于地震活动频繁，对铁路桥隧结构的安全构成了严重威胁。铁路桥隧结构一旦在地震中遭受破坏，不仅会导致铁路运输中断，影响正常的经济活动和人民生活，还可能引发次生灾害，造成更大的人员伤亡和财产损失。因此，开展地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略研究具有重要的现实意义，是保障铁路运输安全、降低地

震灾害损失、促进铁路建设可持续发展的关键。

2 地震带铁路桥隧结构抗震设计的重要性

2.1 保障铁路运输安全

铁路桥隧结构是铁路线路的重要组成部分，其安全性直接关系到铁路运输的安全。在地震带地区，地震可能使桥隧结构出现裂缝、变形、倒塌等破坏。桥梁的上部结构可能因地震作用发生移位或落梁，导致列车脱轨；隧道的衬砌可能开裂，影响列车的通行安全。通过合理的抗震设计，可以提高桥隧结构的抗震能力，减少地震破坏的可能性，从而保障铁路运输的安全，确保旅客和货物的安全运输。

2.2 降低地震灾害损失

地震是一种破坏性极强的自然灾害，地震对铁路桥隧结构的破坏会导致铁路运输中断，给国家和人民带来巨大的

【作者简介】文翼（2000-），男，中国四川江油人，本科，从事土木工程（铁路、桥梁、隧道等）研究。

经济损失。一方面，铁路运输的中断会影响工业生产、商业贸易等活动的正常进行，造成直接的经济损失；另一方面，修复受损的桥隧结构需要投入大量的人力、物力和财力，增加了灾后重建的难度和成本。优化抗震设计可以使桥隧结构在地震中保持良好的使用功能，减少修复时间和费用，降低地震灾害造成的损失。

2.3 促进铁路建设可持续发展

随着铁路建设的不断发展，越来越多的铁路线路穿越地震带地区。合理的抗震设计是铁路建设可持续发展的重要保障。通过优化抗震设计策略，可以提高铁路桥隧结构的耐久性和可靠性，延长其使用寿命，减少后期维护成本。同时，良好的抗震性能可以增强公众对铁路运输的信心，促进铁路运输的发展，实现铁路建设的经济、社会和环境效益的统一。

3 地震对铁路桥隧结构的破坏形式及影响

3.1 桥梁结构的破坏形式及影响

3.1.1 上部结构破坏

地震可能导致桥梁上部结构出现梁体移位、落梁等破坏形式。梁体移位会使桥梁的线形发生改变，影响列车的行驶平稳性；落梁则会使桥梁失去承载能力，导致列车坠落，造成严重的人员伤亡和财产损失。

3.1.2 下部结构破坏

下部结构破坏主要包括桥墩折断、基础失效等。桥墩是桥梁的主要承重构件，在地震作用下，桥墩可能因承受过大的水平力和弯矩而发生折断。基础失效则可能是由于地震引起地基土的液化、沉降或滑移等原因导致的。下部结构的破坏会直接影响桥梁的整体稳定性，使桥梁无法正常使用^[5]。

3.1.3 支座破坏

支座是连接桥梁上部结构和下部结构的重要部件，其作用是将上部结构的荷载传递到下部结构，并允许上部结构在温度变化、列车荷载等因素作用下产生一定的变形。地震可能导致支座损坏、脱空等，使上部结构与下部结构之间的连接失效，导致结构受力不合理，进而引发其他部位的破坏。

3.2 隧道结构的破坏形式及影响

3.2.1 洞口破坏

隧道洞口是地震作用下容易发生破坏的部位。地震可能导致洞口边坡失稳，发生塌方，堵塞隧道进出口。洞口破坏不仅会影响列车的正常通行，还会给隧道的抢修带来困难。

3.2.2 衬砌开裂

地震作用会使隧道衬砌承受较大的动荷载，导致衬砌出现裂缝。衬砌开裂会降低隧道的防水性能，使地下水渗入隧道内部，影响隧道的使用功能。同时，裂缝的发展还可能导致衬砌结构的强度和稳定性降低，进一步影响列车的安全运行。

3.2.3 围岩失稳

地震可能引发隧道围岩的失稳，如围岩的松动、滑移等。围岩失稳会使隧道的支护结构承受更大的压力，导致支护结

构破坏，进而引发隧道整体塌陷。隧道整体塌陷是一种极其严重的破坏形式，会造成巨大的经济损失和人员伤亡，且修复难度极大。

4 现有抗震设计存在的问题

4.1 设计理念方面

4.1.1 传统设计理念局限

传统的抗震设计理念主要以保障结构在地震作用下的安全性为目标，侧重于结构的强度和刚度设计。这种设计理念认为，只要结构的强度和刚度足够大，就能够抵抗地震作用。然而，在实际地震中，结构往往进入非线性状态，传统的抗震设计理念难以准确评估结构的实际抗震性能。

4.1.2 缺乏性能目标细化

传统的抗震设计没有明确区分不同重要性结构的性能目标。对于铁路桥隧结构，不同的结构在铁路运输中具有不同的重要性，如大型桥梁和关键隧道的重要性要高于一般的小桥和短隧道。但在现有设计中，往往采用相同的设计标准和性能目标，没有根据结构的重要性进行细化，导致一些重要结构的抗震性能不能满足实际需求。

4.2 结构选型方面

4.2.1 忽视抗震性能

在铁路桥隧结构选型时，有时过于注重结构的经济性和施工便利性，而忽视了结构的抗震性能。一些结构形式在地震作用下容易出现薄弱环节，导致结构破坏。

4.2.2 缺乏综合考量

结构选型时没有充分考虑地震带的地质条件、地震动特性等因素。不同的地震带具有不同的地质特征和地震动参数，如软土地区的地震动放大效应明显，对结构的抗震要求更高。如果在结构选型时没有考虑这些因素，可能导致结构在地震中的抗震性能不佳。

4.3 抗震计算方法方面

4.3.1 弹性理论局限

现有的抗震计算方法大多基于弹性理论，对于结构在非线性状态下的抗震性能分析不够准确。在地震作用下，结构往往进入非线性阶段，此时结构的刚度和强度会发生变化，弹性理论无法准确反映结构的实际受力情况。

4.3.2 地震动参数简化

抗震计算中考虑的地震作用和结构模型与实际情况存在一定差异。地震动是一个复杂的随机过程，具有不确定性，而现有计算中通常采用简化的地震动参数，如采用单一的地震波或反应谱进行计算，不能充分考虑地震动的随机性和复杂性。同时，结构模型的简化也可能导致计算结果不准确，如忽略结构的非线性特性、土-结构相互作用等因素。

4.4 构造措施方面

4.4.1 细节处理不足

一些铁路桥隧结构的构造措施不完善，如钢筋的锚固长度不足、箍筋配置不合理等。这些细节问题在地震作用下可能引发结构的局部破坏，进而影响结构的整体抗震性能。

4.4.2 缺乏针对性措施

对于不同类型的地震破坏，缺乏针对性的构造措施。例如，对于隧道洞口的地震塌方问题，没有专门的构造措施来加强洞口边坡的稳定性；对于桥梁支座的地震破坏，没有有效的防脱空和减震措施。

5 地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略

5.1 应用基于性能的抗震设计理念

5.1.1 确定性能目标

基于性能的抗震设计理念是一种综合考虑结构在不同地震水平下的性能要求的抗震设计方法。该理念根据结构的使用功能和重要性，确定不同的性能目标，如“小震不坏、中震可修、大震不倒”。对于重要的铁路桥隧结构，如跨越大型河流或山谷的大桥、位于交通枢纽的隧道等，在大震作用下可以允许结构出现一定程度的损坏，但要确保结构不倒塌，保障人员生命安全；对于一般重要的结构，在中震作用下应能够快速修复，恢复使用功能^[1]。

5.1.2 选择设计参数

根据性能目标选择合适的设计参数和构造措施。例如，对于要求较高抗震性能的结构，可以采用更高的混凝土强度等级、更大的钢筋配筋率等设计参数；同时，合理设置结构的变形缝、伸缩缝等构造措施，提高结构的变形能力和耗能能力。通过基于性能的抗震设计，可以使结构在不同地震水平下满足预期的性能要求，提高结构的抗震可靠性和经济性。

5.2 合理进行结构选型与布置

5.2.1 桥梁结构选型

在选择桥梁结构形式时，应充分考虑地震作用的影响。对于地震带地区的桥梁，宜采用延性较好的结构形式，如连续梁桥、刚构桥等。这些结构形式在地震作用下能够通过塑性变形消耗地震能量，提高结构的抗震能力^[2]。同时，应合理选择桥墩形式，避免采用容易发生剪切破坏的桥墩形式，如矩形截面桥墩，可采用圆形或方形带配筋的桥墩，提高桥墩的延性和抗剪能力。

5.2.2 隧道结构选型

隧道结构应尽量选择地质条件较好的地段进行修建，减少围岩的不稳定性对隧道结构的影响。在隧道洞口段，应采取加强措施，如设置明洞、延长洞口缓冲结构等，提高洞口段的抗震能力。隧道衬砌结构应采用合理的断面形式和厚度，保证衬砌结构的强度和刚度。

5.2.3 结构布置优化

在铁路桥隧结构布置时，应尽量使结构的刚度和质量分布均匀，避免出现明显的薄弱环节。对于桥梁结构，应合理设置伸缩缝和支座，减少地震作用下结构的内力集中。

5.3 改进抗震计算方法

5.3.1 考虑非线性因素

在抗震计算中，应充分考虑结构的非线性特性，采用非线性分析方法，如静力弹塑性分析（Pushover 分析）和动力弹塑性时程分析等，准确评估结构在地震作用下的非线性

响应。通过非线性分析，可以了解结构在地震作用下的破坏机制和薄弱环节，为抗震设计提供依据。

5.3.2 考虑地震动的随机性

地震动具有随机性，不同的地震波对结构的影响差异较大。在抗震计算中，应采用多条地震波进行动力时程分析，考虑地震动的随机性，提高计算结果的可靠性。同时，应根据地震带的地震危险性分析结果，合理确定地震动的参数，如峰值加速度、反应谱等^[3]。

5.4 完善构造措施

5.4.1 钢筋锚固与连接

在铁路桥隧结构中，应确保钢筋的锚固长度满足规范要求，保证钢筋与混凝土之间的粘结性能。对于钢筋的连接，应采用可靠的连接方式，如机械连接或焊接，避免在地震作用下出现钢筋连接失效的问题。

5.4.2 篦筋配置

合理配置箍筋可以提高结构的抗剪能力和延性。在桥墩和隧道衬砌等结构中，应根据结构的受力特点和抗震要求，合理确定箍筋的直径、间距和加密区长度。加密区箍筋应能够有效地约束混凝土，提高混凝土的抗压强度和变形能力。

5.4.3 节点构造

结构节点是地震作用下容易发生破坏的部位，应加强节点的构造设计。对于桥梁结构，应保证梁柱节点的连接可靠，避免出现节点破坏导致结构整体失效。可以采用增加节点钢筋配置、设置节点加强板等措施提高节点的抗震性能。对于隧道结构，应加强衬砌节点处的钢筋连接和混凝土浇筑质量，提高节点的抗震性能^[4]。

6 结语

地震带铁路桥隧结构抗震设计复杂且重要。本文分析了地震对其的破坏形式及影响，指出当前抗震设计在设计理念、结构选型等方面存在的问题，并提出基于性能的抗震设计理念应用、合理选型与布置等优化策略，以提高其抗震能力，保障铁路安全畅通。今后设计应总结经验，完善理论方法，合理选策略，加强地震监测预警系统建设。同时，要关注新材料和新技术研发应用，融入抗震设计，推动其水平不断提高。

参考文献

- [1] 陈克坚,韩国庆,许敏.铁路混凝土桥梁抗震设计理论与试验研究 [M].西南交通大学出版社,2021.03.273.
- [2] 蒋韩华.铁路桥梁抗震设计思路分析[J].江苏科技信息,2021,38(31):39-41.
- [3] 张韬.地震作用下高速铁路桥隧搭接结构损伤效应研究[D].中南林业科技大学,2019.
- [4] 黄尚.高速铁路桥梁基于性能的抗震设计方法研究[D].中南大学,2011.
- [5] 陆中功.铁路桥梁下部结构抗震设计优化研究[J].中国铁路,2018,(06):51-55.

Explore the hoisting construction measures of wind turbine equipment in wind power projects

Chao Zhou Kunquan Ji

State Power Investment Corporation Wuling Electric Power Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China

Abstract

In wind power projects, the installation of wind turbines is a critical construction phase that significantly impacts both project quality and safety. It is essential to clarify technical key points in turbine equipment hoisting and strengthen technical control and management. This article focuses on this aspect, discussing multiple aspects including construction preparation, foundation acceptance, equipment selection and layout, process management, and quality inspection. The paper analyzes issues that require attention during hoisting operations. Through this exploration and analysis, we aim to provide relevant construction units with valuable references and insights, enhance technical management, improve construction quality, ensure safety, and guarantee the smooth progress and orderly implementation of wind power projects.

Keywords

wind power project; lifting construction; key points of construction

探讨风电项目风机设备吊装施工措施

周超 计坤全

国家电投集团五凌电力有限公司，中国·湖南长沙 410000

摘要

在风电项目中风机吊装施工是十分重要的施工环节，对于风电项目施工质量、安全都会起到至关重要的影响，明确风电项目风机设备吊装施工技术要点并加强技术控制和技术管理是十分必要的，本篇文章也将目光集中于此，从施工准备、基础验收、吊装设备选型与布置、过程管理、质量验收等多个方面展开论述，分析在吊装施工过程中需要注意的问题。希望通过本篇文章的探讨和分析可以为相关施工单位提供更多的参考与借鉴，加强施工技术管理，提高施工质量并保障施工安全，确保风电项目施工能够顺利推进、有序开展。

关键词

风电项目；吊装施工；施工要点

1 引言

经济社会的迅速发展及人们素质的不断提升使得现阶段人们对于环境保护及新能源开发问题给予的关注和重视变得越来越高，风力发电既可以满足人们的用电需求，同时风能为清洁能源，可以最大化地降低在发电过程中所产生的能源损耗及环境污染，因此风电项目建设规模越来越大，数量越来越多。而在风电项目建设中风机设备吊装施工是十分重要的施工工序，可从如下几点着手加强施工技术管控，提高施工质量和施工效率。

2 落实施工准备

在施工准备环节需抓住如下几个关键要点，为后续施

工工作的开展打下坚实基础。首先，需要做好技术准备工作，根据风机型号、重量、安装高度以及拟建区域的实际情况，来对吊装方案作出适当调节，在拟建区域实际情况分析的过程中应当紧抓。风速、地形、地质条件等相应要件进行数据分析，优化施工方案，如图 1 所示。此外，在施工技术分析确定以后还需通过多方会审的方式，共同分析施工技术的可行性、科学性和有效性，并找到其中的欠缺和不足，做出优化和调整。



图 1 技术准备中分析的要素

其次，需要做好人员准备和材料准备。按照施工设计

【作者简介】周超（1985—），男，苗族，中国贵州盘州人，硕士，工程师，从事新能源建设工程项目管理研究。

图纸做好人力资源协调，开展岗前培训，确保相关工作人员对于施工期间的组织规划及技术要点有较为全面的了解和认识，在此之后对主吊车、辅助吊车、索具等相应的仪器设备进行检查和调试，确保仪器设备处于最佳的运行状态。

最后，应通过场地平整与硬化落实现场准备工作，去除清理吊装作业区的障碍物，并根据吊车荷载要求做好地基硬化处理，必要的情况下可通过铺设路基箱、钢板等多种方式有效避免在吊装过程中出现设备的沉降问题。此外在准备环节还需要做好设备运输路线的规划，确保设施设备能够顺利抵达施工区域。

3 基础验收与处理

风机基础是吊装作业的重要承载结构，其施工质量是否达标将会直接影响后续吊装作业能否顺利开展。因此做好基础验收是十分必要的，可从基础外观与尺寸、基础环清理处理、接地系统检查三个方面来展开分析。在基础外观与尺寸验收的过程中可结合施工设计图纸分析基础表面平整度、强度是否达到指标，配合全站仪进行水平度检查，分析偏差范围是否在允许范围内，同时还需要对基础预埋件的位置、数量、规格进行检查。在基础环清理与处理的过程中需着重去除基础环内的杂物和积水，并通过水平度检测来检查基础环内施工质量是否达标。在接地系统检查的过程中需着重检测基础接地电阻是否超标。

4 吊装设备选型与布置要求

吊装设备是吊装施工中重要的物质基础，在吊装施工中做好吊装设备选型及布置是十分必要的。

4.1 吊装设备选型

在吊装设备选型的过程中需紧抓主吊车和辅助吊车两大关键要点明确设备要求。在主吊车选择的过程中应当根据施工设计图纸明确在吊装施工中最大部件的重量及安装高度和作业半径，在此之后对主吊装设备做出适当调整，确保其额定起重量能够满足后续吊装施工的吊装需求。而在辅助吊车选择的过程中则需要着重分析其与主吊车是否协同匹配、是否会在吊装作业过程中出现荷载分配失衡等问题，通过辅助吊机的科学选择为塔筒翻身叶片对接等相应作业的开展打下坚实基础^[1]。

4.2 吊装设备布置

在吊装设备布置的过程中需要着重引起关注和重视的则是明确主吊车、辅吊车的具体位置，并且做好索具配置。在主吊车站位选择的过程中除了需要根据施工设计图纸对站位作出适当调节以外，还需要充分考量该地区的地基承载力和视野是否开阔。在主吊车布置的过程中可通过铺设钢板或路基箱于支腿下方的方式来更好地保障受力均匀。在辅助吊车位置确定的过程中应根据主吊车做出适当调整，确保其与主吊车的距离安全，同时避免在作业过程中出现相互干扰的问题。在索具配置中应根据吊装部件的重量及形状来科学

选择钢丝绳、吊带或专用吊具，同时也需要引入橡胶垫等相应防护器材，有效避免在吊装过程中对设备表面造成损伤。

5 吊装作业

在风电项目中吊装作业可以从塔筒吊装、机舱与轮毂吊装、叶片安装等多个维度来展开分析，如图 2 所示。

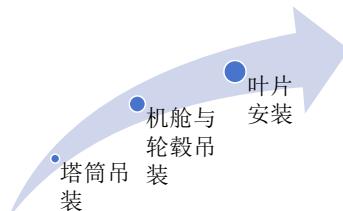


图 2 吊装作业流程

5.1 塔筒吊装

在塔筒吊装的过程中需尤为引起关注和重视的则是做好第一节塔筒的吊装，在吊装作业之前相关工作人员需落实清理工作，并且通过实际检验判断法兰面平整度及螺栓孔位置是否达到了设计标准。在此之后需安装临时操作平台和爬梯，为对接作业的开展提供更多的助力。在塔筒吊起过程中应通过主吊车配合专用吊具的方式来满足起吊需求，辅助吊车在这个过程中则应当配合主吊车，保障塔筒处于直立状态，然后脱钩。吊车则须以匀速将塔筒吊装至基础环上方，并通过全站仪等相应监测设施的有效应用来调节其垂直度，确保塔筒对准螺栓孔，然后临时固定。在临时固定以后去拆除吊具，然后安装永久螺栓并对称紧固，完成第一节塔筒安装。在后续塔筒吊装中，同样需要先做好法兰面的清理并涂抹密封胶，采用与第一节塔筒吊装相同的流程和方法，将塔筒对接到已安装塔筒的上方，控制对接精度，保障法兰面贴合严密。在对接结束以后同样需引入螺栓固定，在螺栓固定中需控制扭矩值，同时在每节塔筒安装结束以后需通过整体垂直度的测量来及时的发现问题并调整偏差^[2]。

5.2 机舱与轮毂吊装

机舱和轮毂是风机的核心部件，其重量大且安装高度相对较高，在吊装作业的过程中需要考量的要件也相对较多，在机舱吊装的过程中相关工作人员可从如下几点着手加强技术控制和管理。

首先，需要做好机舱内设备安装情况的检查并对容易松动的设备进行紧固，然后于机舱顶部安装吊耳和临时操作平台，并做好机舱底部法兰面的清理工作。其次，需利用主吊车配合专用吊具水平起吊，缓慢旋转，在达到安装角度以后提升至塔筒顶部上方，确保法兰与塔筒法兰对接准确，引入临时螺栓进行固定，并保障水平偏差在 0.5mm/m 以下，拆除吊坠后安装永久螺栓，根据设计图纸确定扭矩落实紧固工作，然后连接电缆、液压管路。

在轮毂吊装的过程中可以与发电机叶片整体吊装也可以单独吊装后进行叶片吊装，若采用单独吊装方式，相关工

作人员首先需要做好轮毂法兰与机舱输出轴的匹配性分析，落实清理工作以后涂抹润滑脂，然后利用主吊车吊起轮毂，辅助吊车负责调节吊装角度，缓慢移至机舱输出轴位置，对准法兰螺栓孔后穿入螺栓，在对称紧固的过程中严格按照设计扭矩落实紧固工作。最后安装密封件，保障轮毂与机舱连接紧密^[3]。

5.3 叶片安装

叶片安装是风机功能有效发挥的重要基石，也是风机的关键部位，其具有体积大、易变形等相应特质，安装难度也是相对较高的。而在叶片安装的过程中需着重引起关注和重视的则是叶片与轮毂的对接以及叶片固定与调整。

在叶片与轮毂对接的过程中相关工作人员在吊装前首先需要做好叶片表面的检查工作，分析叶片表面是否存在损伤，并且做好叶根法兰面的清理工作，然后引入专用吊具安装于叶片根部，由主吊车负责起吊，辅助吊车则需加强现场观察，配合主吊车起吊，避免出现叶片弯曲等相应情况。其次，将叶片调至轮毂对接位置，并调整叶片角度，确保叶根法兰和轮毂法兰对准，然后穿入连接螺栓。在该环节可采用专业测量工具来分析叶片安装角度是否与设计值一致，保障其偏差度在 0.5 度以下。

在叶片紧固与调整环节相关工作人员首先需要根据设计图纸的设计扭矩落实连接螺栓的紧固工作，然后做好法兰面密封性的检查。其次安装防雷接地线，保障其导电性良好。最后在三片叶片安装结束以后相关工作人员则需要通过专业测量工具来判断叶片角度偏差，是否符合预设计标准的要求，并通过螺栓松紧度调整的方式来进行修正，保证受力均匀^[4]。

6 吊装验收与现场整理

在吊装作业结束以后，为确保吊装质量达到施工设计标准和质量验收标准，还需落实全面验收工作，并在验收结

束以后做好现场清理。在验收工作开展的过程中相关工作人员需紧抓塔筒垂直度、法兰连接间隙、螺栓扭矩等相应关键要点进行检查。同时还需要分析机舱水平度、轮毂与机舱对接精度、叶片安装角度、连接螺栓紧固情况等相应关键要点分析质量是否达标，及时的发现质量问题并作出修正和处理。同时在安装质量检查的过程中还需要紧抓电气线路、液压系统进行检查，判断其是否存在松动、泄漏等相应情况，最后通过转动灵活性检测来保证施工质量。

在现场整理的过程中相关工作人员需要先拆除吊装索具、临时操作平台等相应辅助施工措施，然后清除现场杂物并落实吊装设备的维修养护工作，按照规定要求将其存放于指定位置。在此之后需要整合施工过程中的施工数据和技术资料，为后续调试及运营工作的开展提供更多的信息参考与数据支持^[5]。

7 结语

在风电项目中风机设备吊装的系统性强、技术性强且存在安全隐患相比较多，因此加强技术控制和技术管理是十分必要的，相关工作人员需要紧抓施工准备、基础验收与处理、设备选型与布置、塔筒、机舱、轮毂、叶片吊装以及验收整理等相应关键环节加强技术控制和施工管理，保障施工质量达到质量验收标准，提高施工水平。

参考文献

- [1] 边旭峰,刘强,魏永旭. 超高塔架风机吊装与起重设备选型策略研究 [J]. 建筑机械化, 2025, 46 (07): 6-12.
- [2] 李琪. 陆上风电设备吊装计算方法 [J]. 安装, 2025, (04): 82-84.
- [3] 张亚菲,马兆岭,张迪. 海上风机塔筒预组装技术研究 [J]. 电工技术, 2025, (06): 39-41
- [4] 杨超, 大兆瓦风机叶片全角度吊装设备研制. 河北省, 巨力索具股份有限公司, 2024-06-22.
- [5] 焦玉亮,周刘俊. 风机设备吊装技术研究 [J]. 中国高新科技, 2024, (06): 123-125.

Research on Dynamic Cost Control Model and Application of Highway Projects from the Perspective of the Entire Life Cycle

Shaobo Du Feishi Hao Yingjie Shi Chunguo Du Beibei Yang

Wufu Construction Group Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract

The highway construction industry is developing rapidly, with project scales increasing. Project cost control has become a key factor affecting its success. Traditional cost control mostly focuses on the initial budget of the project, but the cost of highway projects changes dynamically and covers multiple stages such as design, construction and operation. Based on this, a dynamic cost control model for the entire life cycle emerged, achieving optimized management through full-process cost control. This paper studies the dynamic cost management mechanism of highway projects from the perspective of the entire life cycle and proposes a dynamic cost control model based on the life cycle. This model builds cost control feedback mechanisms, risk management systems and information sharing platforms at each stage to ensure effective cost prediction and management. Through case analysis and verification, this model has achieved remarkable results when applied to highway project management. It can effectively enhance the level of cost management, reduce overall costs, and improve the economic benefits of the project.

Keywords

Highway projects; Cost dynamic control; Full lifecycle; Cost management; dynamic model model

全生命周期视角下公路项目成本动态控制模型及应用研究

杜少博 郝飞 石英杰 杜春国 杨贝贝

五富建设集团有限公司，中国·河北邢台 054000

摘要

公路建设行业快速发展，项目规模增大，项目成本控制成为影响其成功的关键因素。传统成本控制多聚焦项目初期预算，但公路项目成本动态变化，涵盖设计、施工、运营等多阶段。基于此，全生命周期成本动态控制模型出现，以全过程成本控制实现优化管理。本文从全生命周期视角，研究公路项目成本动态管理机制，提出一种基于生命周期的成本动态控制模型。该模型构建各阶段成本控制反馈机制、风险管理体系与信息共享平台，保障成本有效预测与管理。经案例分析验证，此模型应用于公路项目管理成效显著，能有效提升成本管理水平，降低整体成本，提高项目经济效益。

关键词

公路项目；成本动态控制；全生命周期；成本管理；动态模型

1 引言

公路项目作为基础设施建设的重要组成部分，其建设过程涉及多个环节，包括项目立项、设计、施工、运营等，且各个阶段的成本存在一定的动态变化。传统的成本控制方法往往侧重于项目初期的预算编制和成本控制，这种做法虽然在项目初期能够有效控制预算，但往往忽视了项目生命周期中各个阶段的成本变化。因此，如何对公路项目进行全生命周期的动态成本控制，成为当前公路建设领域亟待解决的一个重要课题。

全生命周期成本控制视角下，项目成本不仅仅是关注单一阶段的支出，还包括设计阶段、施工阶段、运营阶段及维护阶段的所有成本。随着项目周期的延长，成本的变动性逐步增加，尤其是在运营和维护阶段，常常由于信息不对称、技术更新、政策变化等因素导致成本的不可预测性。因此，如何通过建立有效的动态控制模型，对项目的各个阶段进行全面监控，成为提升公路项目管理效能的关键。

本文通过建立公路项目全生命周期成本控制的动态控制模型，分析了项目各阶段的成本控制关键点及其相互关系。该模型通过引入反馈机制、风险控制以及信息化管理手段，提升项目的成本预测与控制能力，确保项目各阶段的成本得到有效的优化管理，最终实现整体项目成本的最小化和效益的最大化。本文还通过案例分析，验证了该模型在公路

【作者简介】杜少博，男，中国河北邢台人，硕士，工程师，从事生态学研究。

项目管理中的应用效果，为后续的公路建设提供了有益的借鉴。

2 公路项目成本控制现状及问题分析

2.1 传统成本控制方法的局限性

传统的公路项目成本控制方法大多依赖于预算管理和阶段性成本控制，通常集中于设计和施工阶段。项目初期的预算编制和规划管理虽然能够为项目提供一定的成本框架，但并没有考虑项目实施过程中可能出现的外部变化，如市场波动、政策调整以及不确定的技术风险等。这种方法虽然能够在短期内实现成本的有效控制，但往往忽视了项目生命周期内的长期成本变化，导致项目在运营和维护阶段面临较高的成本风险。

此外，传统成本控制方法大多采用线性管理模式，缺乏灵活的调整机制。项目的实际执行过程中，成本会受到各种因素的影响，如原材料价格波动、劳动力成本变化等，传统控制方法往往缺乏及时的反馈机制，导致对实际成本变化的响应速度慢，无法实现动态的成本调整。因此，传统的成本控制方法无法满足复杂多变的公路项目管理需求，亟须一种能够动态调整、综合考虑生命周期各阶段成本的控制模型。

2.2 全生命周期成本控制的必要性

公路项目的生命周期从设计到施工再到运营和维护，跨越多个阶段，每个阶段的成本构成不同，且各阶段之间相互影响。尤其是在运营和维护阶段，项目的成本变动性更大，受到的影响因素更加复杂。如果仅在设计和施工阶段进行成本控制，容易忽视项目在后期运营阶段可能出现的风险和不确定性，从而影响项目的整体效益。因此，全生命周期成本控制能够帮助管理者全面、系统地掌控项目的全部成本，做到每个阶段的成本预测、评估与调整，确保项目各个阶段的成本得以优化，减少资金浪费，提升项目整体经济效益。

全生命周期成本控制不仅能够帮助管理者实现对单个阶段的成本控制，还能够通过建立各阶段之间的协调与反馈机制，使得各阶段成本的管理更加科学与精细。通过对项目实施全过程的动态监控，能够及时发现潜在的成本风险，采取相应的措施进行调整，确保项目的预算和实际支出保持在合理范围内。

2.3 公路项目成本动态控制的挑战

尽管全生命周期成本控制具有明显优势，但在实际应用过程中，仍面临一些挑战。首先，公路项目涉及的多个主体之间缺乏有效的信息共享和沟通，导致项目各阶段的成本数据不能及时传递，影响了成本控制的效率。其次，项目实施过程中经常会面临政策变化、市场波动等外部因素的影响，这些变化具有较大的不确定性，增加了成本控制的难度。此外，传统的成本控制手段无法实时监测和调整项目的实际成本，导致管理者难以及时发现问题并作出应对。因此，如

何建立一个灵活的、能够实时调整的动态控制机制，是提高项目成本控制效率的关键。

3 公路项目成本动态控制模型的构建

3.1 模型构建的理论框架

公路项目成本动态控制模型的核心在于建立一个全生命周期的成本管理体系，贯穿于设计、施工到运营和维护的各个阶段。该模型不仅关注项目的初期预算和施工成本，还涉及后期运营和维护阶段的成本控制，确保项目在全生命周期内的成本保持在合理范围内。

为了确保项目各阶段的成本能够得到全面和准确的控制，首先需要建立一个统一的信息平台，将项目实施全过程中的各类数据进行整合。包括但不限于成本数据、进度数据、质量数据以及施工过程中的变更数据等，通过信息化手段为各方主体提供数据共享的便利。通过实时更新和全面共享数据，可以确保所有相关方（如政府、项目管理团队、承包商及供应商等）能够及时获取最新信息，并做出合理的决策。信息共享的同时，还能避免信息孤岛现象，提高各方协作的效率，减少不必要的沟通和决策延误，从而为成本控制提供更加精确和有力的支持。

动态控制模型的另一个重要特点是建立反馈机制。在项目实施过程中，随着外部环境和内部因素的变化，成本数据可能会出现波动。通过实时跟踪各阶段的实际成本与预算成本之间的差异，模型能够及时发现并自动识别出偏差。当偏差超出预设的容忍范围时，系统会向项目管理团队发出警告并提供调整建议。项目经理可以根据反馈数据做出相应的调整措施，保证各阶段的成本始终处于可控范围内。例如，当施工过程中出现超支时，系统可自动触发调整措施，指示项目团队优化资源分配、重新评估风险等，从而避免项目成本的过度膨胀，确保预算和实际支出的一致性。

在实际的公路项目中，外部环境的不确定性如市场波动、政策变化等，可能导致项目成本波动。因此，模型需要建立一个完善的风险管理体系，以识别潜在的风险，评估其对项目成本的影响，并采取相应的预防措施。此外，设立预警机制也非常重要。通过定期评估风险指标，如原材料价格波动、人工成本变动等，及时采取调整措施，降低成本波动对项目的影响。例如，当某种关键原材料的价格突然上涨时，系统可以通过历史数据分析预测价格变化趋势，提前做出预警，并向项目管理者提供成本应对策略。

项目的未来成本变化通常难以准确预测，但通过分析历史数据、行业趋势以及外部环境的变化，采用一定的预测算法，可以为项目提供一定的成本预测支持。通过模拟不同情景下的成本变化，管理者能够提前做好规划和准备工作。模型不仅能为当前阶段提供预测，也能对项目未来几个阶段的成本进行评估，为项目决策提供多种优化方案。例如，采用敏感性分析、蒙特卡罗模拟等技术，项目管理者可以根据

不同的情景设定不同的决策路径，确保项目在任何阶段都能有应对突发变化的方案。

3.2 成本控制模型的应用实践

在公路项目的应用过程中，成本动态控制模型的实施可以分为几个阶段：预算控制阶段、实施过程中的实时控制阶段以及后期的运营维护阶段。每个阶段的成本控制重点不同，因此需要对成本管理过程进行细化与优化。通过模型的实施，能够确保每个阶段的成本得到有效监控和调整，提升项目实施的整体效能。

在项目初期，预算控制是至关重要的一环。预算控制阶段主要通过建立详细的预算模型来对设计、施工及预期运营成本进行系统的预算和规划。预算模型不仅包括各项直接成本，如人工费、材料费、设备费等，还需要考虑间接成本、管理费用、风险成本等因素，以确保预算全面、合理。该阶段的目标是预判项目可能面临的各种财务压力，制定合理的预算限额，避免不必要的资金浪费。通过动态控制模型，预算阶段可以通过历史数据和预测模型评估项目的潜在成本风险，确保项目在初期预算阶段就能对所有费用进行科学规划和调整，最大化项目的资金效益。

在项目实施过程中，成本动态控制模型的实时控制功能起着至关重要的作用。随着项目的推进，实际支出可能与预算存在偏差。在此阶段，系统通过实时监控各项成本支出情况，及时发现预算与实际支出之间的差异。当发现成本偏差时，系统能够自动触发预警，提醒项目管理者采取必要的调整措施。

项目完成后，进入运营和维护阶段，此时的成本控制重点是保证项目长期运营中的维护成本尽可能低，同时确保项目设施的长期使用寿命。在运营阶段，成本的变化主要体现在养护费用、维修费用及能源消耗等方面。通过动态调整与优化，系统可以帮助项目管理者分析运营阶段的成本构成，识别优化点。

3.3 模型的实施案例分析

通过对某公路建设项目的实际案例进行分析，验证了该动态控制模型的有效性。该项目在实施过程中，采用了全生命周期成本控制模型，涵盖了设计、施工、运营等各个阶段。在施工阶段，项目管理团队通过实时跟踪和反馈机制，

及时发现了施工过程中因材料涨价而超支的风险，并通过优化施工进度和调整部分设计，成功避免了成本的过度膨胀。在运营阶段，模型通过对养护和运营成本的实时数据监控，提出了合理的优化建议，帮助项目管理团队将运营成本控制在预期范围内。例如，项目团队通过调整养护策略和维护频次，减少了长期运营中的不必要支出，确保了公路项目的可持续发展。

4 结语

公路项目的成本控制是影响项目成败的关键因素之一，尤其是在项目的全生命周期内，成本的管理与控制面临着多种挑战。本文提出的基于全生命周期的成本动态控制模型，通过信息共享、反馈机制、风险管理与成本预测等手段，为公路项目提供了一种系统化的成本控制方法。该模型的实施，不仅能够提高项目实施过程中的成本控制效率，还能够在项目的各个阶段进行动态调整，确保项目成本保持在合理范围内。通过实际案例分析，验证了该模型的可行性和有效性，为未来公路项目的成本控制提供了有益的借鉴。随着技术的不断进步和管理模式的创新，全生命周期成本控制模型将在更多公路项目中得到推广应用，推动公路建设领域向更加高效、科学的方向发展。

参考文献

- [1] 王文伟.基于BIM技术的公路边坡全生命周期管理[J].大众标准化,2025,(08):167-169.
- [2] 王为勇.数字经济下工程造价的动态管理及控制[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第四届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.耀华建设管理有限公司临安分公司;,2025:335-337.
- [3] 孙清源.BIM技术在工程造价动态控制与优化中的应用研究[J].新城建科技,2025,34(02):166-168.
- [4] 肖鑫,焦震宇,唐孟,等.基于BIM的汉钢中厚板EPC项目全周期数字化技术应用[C]//中国图学学会.2024第十三届“龙图杯”全国BIM大赛获奖工程应用文集.中冶赛迪工程技术股份有限公司;中冶赛迪上海工程技术有限公司;,2024:179-188.
- [5] 张玉雪.基于业财融合视角的企业预算管理研究[J].商场现代化,2024,(24):141-144.

Research on the main body collaboration mechanism and efficiency improvement path in the implementation of high standard farmland projects

Likuan Wei Ruiqing Hao Ruiqiang Mu Zixuan Liu Huilei Song

Wufu Construction Group Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract

With the advancement of agricultural modernization, the national and local governments are continuously increasing their investment in the construction of high standard farmland. As an important project to promote sustainable agricultural development and improve agricultural production efficiency, the implementation of high standard farmland projects involves multiple stakeholders, including the government, agricultural enterprises, farmers, and research institutions. An effective subject collaboration mechanism is not only the key to successful project implementation, but also a necessary condition for improving project implementation efficiency. This article analyzes the main body collaboration mechanism in the implementation of high standard farmland projects, explores the current collaboration issues in project implementation, and proposes ways to optimize the main body collaboration mechanism and improve efficiency. Research has shown that establishing an information sharing platform, improving incentive mechanisms, strengthening technical support and training, and promoting collaborative cooperation among multiple stakeholders can effectively improve project implementation efficiency. This article provides theoretical support for the management and implementation of high standard farmland projects, and has strong practical guidance significance.

Keywords

High standard farmland; Subject collaboration; Efficiency improvement; Modernization of agriculture; collaboration mechanism

高标农田项目实施中的主体协同机制与效率提升路径研究

魏立宽 郝瑞卿 母瑞强 刘子轩 宋慧蕾

五富建设集团有限公司，中国·河北邢台 054000

摘要

随着农业现代化进程的推进，国家及地方政府不断加大对高标准农田建设的投入。高标农田项目作为促进农业可持续发展和提高农业生产效率的重要工程，其实施涉及众多主体，包括政府、农业企业、农民及科研机构等多方参与。有效的主体协同机制不仅是项目成功实施的关键，也是提升项目实施效率的必要条件。本文通过对高标农田项目实施中的主体协同机制进行分析，探讨了当前项目实施中的协同问题，提出了优化主体协同机制和提升效率的路径。研究表明，建立信息共享平台、完善激励机制、加强技术支持与培训、推动多方主体的协同合作，能够有效提升项目实施效率。本文为高标农田项目的管理与实施提供了理论支持，具有较强的实践指导意义。

关键词

高标农田；主体协同；效率提升；农业现代化；协同机制

1 引言

高标农田项目是国家推进农业现代化和农村振兴战略的重要组成部分，其目的是通过改善农业生产基础设施，提升农田的生产能力和生态环境，推动农业可持续发展。然而，在高标农田项目的实施过程中，涉及到政府、农业企业、农民、科研机构等多个主体的参与。这些主体各自具有不同的利益诉求和资源，如何实现有效的协同合作，是影响项目实

施效果的关键因素。

目前，许多高标农田项目在实施过程中出现了主体之间的信息不对称、责任不明确、资源配置不合理等问题，导致了项目实施效率低下，甚至影响了项目的最终成果。为了解决这些问题，研究如何优化各主体之间的协同机制，提升整体项目效率，成为亟待解决的课题。

本文旨在分析高标农田项目中各主体的角色与作用，探讨影响协同机制的因素，提出优化路径，旨在为高标农田项目的顺利实施提供可行的管理思路与策略。通过深入分析现有问题，结合实际案例，提出针对性的解决方案，期望为农业建设项目的管理和实施提供经验借鉴。

【作者简介】魏立宽（1988-），男，本科，中国河北邢台人，本科，工程师，从事安全工程研究。

2 高标农田项目的主体分析

2.1 政府部门的角色与职责

在高标农田项目实施中，政府部门是关键的推动力量。政府不仅负责制定相关政策、标准和法规，还承担着项目的资金投入、规划设计及监管职能。尤其是在政策引导和资金支持方面，政府起到了决定性的作用。政府的职责包括组织实施方案、统筹资源配置、监管项目进度和质量等。与此同时，政府还需要通过完善政策环境、加大财政补贴、提供贷款支持等措施，鼓励和引导农业企业和农民参与项目建设。

然而，当前部分地区政府在项目推进过程中存在政策执行力不足、资金使用不透明、监督机制不健全等问题，导致项目实施效果不理想。因此，如何优化政府的管理职能，提高决策效率和执行力，是提升项目效率的关键之一。

2.2 农业企业的作用与挑战

农业企业作为高标农田项目中的重要主体，承担着实际的建设和运营任务。这些企业通常具备较强的技术力量、资金支持和市场导向能力，是推动项目实施的重要力量。企业参与高标农田项目，通常通过技术引进、设备投资、生产管理等方式，提高农田的生产能力和生态环境。

然而，农业企业在参与过程中也面临诸多挑战，包括市场风险大、技术创新能力不足、农民参与度低等问题。企业在实际操作过程中常常存在与政府及农民的利益冲突，导致合作进展缓慢。因此，如何调动农业企业的积极性，充分发挥其优势，提升合作效率，是优化高标农田项目实施的一个重要课题。

2.3 农民的参与与合作意愿

农民作为农业生产的主体，在高标农田项目的实施中起着基础性作用。农民的参与程度直接影响项目的实施效果和可持续发展。农民在高标农田项目中的作用主要体现在土地流转、农田耕作、技术应用等方面。农民通过土地的流转参与项目建设，接受技术培训，提升农业生产技术，从而推动农业生产力的提升。

然而，由于一些农民缺乏参与项目的积极性，甚至对项目的长期效益缺乏信心，导致农民在项目中未能充分发挥其潜力。因此，提高农民的参与度，建立与农民利益的长效机制，是确保项目顺利实施的重要环节。

3 高标农田项目主体协同机制的现状与问题

3.1 协同机制存在的问题

高标农田项目的顺利实施依赖于多主体之间的协同合作，但在实际操作中，协同机制的不完善制约了项目的效率和效果。首先，信息不对称是主要问题之一。政府、农业企业和农民之间在项目实施过程中存在信息流通不畅、信息共享不充分的现象，导致决策延误、资源配置不合理等问题。其次，责任划分不清晰也是常见问题。在项目实施过程中，涉及多个主体的利益分配和责任界定模糊，导致各方缺乏紧密

合作，进而影响了项目推进的整体效率。此外，激励机制的不健全也在一定程度上抑制了各方主体的积极性，农业企业和农民往往难以得到足够的激励和支持，缺乏进一步合作的动力。

3.2 现有协同机制的不足

在现有的高标农田项目实施过程中，政府通常承担着主导作用，但过于依赖政府的干预和资金支持，导致了各方主体的积极性和合作意愿不足。政府往往缺乏与农业企业和农民之间的有效沟通与协作机制，导致决策和执行之间存在脱节。此外，农业企业通常缺乏与农民的深入合作，往往侧重于短期经济利益，忽视了农民的长期需求与技术培训，造成了农民对项目的参与积极性较低。

3.3 协同机制优化的方向

优化高标农田项目的协同机制，首先要加强政府、农业企业和农民之间的信息共享和沟通机制。政府可以通过建立统一的信息平台，整合各方资源，实现项目数据的实时共享和互动。通过信息化平台，政府能够实时监控项目的实施进度，及时反馈相关信息，确保各方主体之间的高效沟通和协作。同时，农业企业和农民也能通过该平台及时了解项目的最新动态和政策变化，减少信息不对称的问题。其次，要明确各方主体的责任和权利，建立明确的责任追溯机制。通过明确各方在项目实施过程中的职责和利益分配，能够保障各主体的合法权益，减少因责任不清导致的管理混乱和推诿现象，从而确保项目能够高效、顺利地推进。此外，建立科学的激励机制，调动各方主体的积极性，尤其是在农民参与方面，要加强技术培训和支持，提升其参与度和合作意愿。农民作为项目实施的直接参与者，其参与的积极性直接关系到项目的成效，因此，政府应通过培训、技术支持等方式，增强农民对项目的认同感与参与感。此外，还可以通过长期的利益共享机制，确保农民能够从项目实施中获得持续的经济收益，进一步增强他们的合作意愿。

4 提高高标农田项目实施效率的路径

4.1 建立多方协同的管理模式

为了提高高标农田项目的实施效率，建立一个多方协同的管理模式至关重要。在项目实施过程中，政府、农业企业和农民是三个主要主体，彼此之间的协同作用是确保项目高效执行的关键。政府应当在项目的政策引导、资金支持、监管管理等方面发挥主导作用。具体来说，政府不仅要制定清晰的政策框架，确保项目的顺利进行，还需要为农业企业和农民提供资金支持、税收优惠等激励措施。同时，政府部门还要通过监督管理确保项目的实施过程透明，保障各方利益，避免利益冲突和资源浪费。农业企业应通过技术创新、市场引导以及产业化经营，推动项目的建设和运营。农业企业不仅具备技术优势和资金支持，还能够为农民提供技术指导、设备支持等。农民则是项目的直接参与者，他们通过土

地流转、技术培训和生产管理等方式，积极参与项目建设与运营。农民的参与，能提高项目的可持续性，提升农业生产效益。在此基础上，政府、农业企业与农民三方要通过有效的沟通与合作，达成共识，形成协同合作的机制。通过共享资源、信息和技术，协调各方利益，确保项目的顺利推进和实施。具体来说，可以通过建立项目管理委员会，组织各方参与决策和实施，制定项目的阶段性目标，明确责任分工，确保各环节的顺利运行。

4.2 完善激励机制，调动各方主体的积极性

高标农田项目的顺利实施离不开各方主体的积极参与与共同努力。因此，建立科学合理的激励机制至关重要。激励机制的设计不仅需要关注农业企业和政府部门的积极性，也要激发农民的参与热情。在项目实施过程中，政府可以通过提供财政补贴、土地政策优惠、贷款扶持等方式，激励农业企业积极投入项目建设。此外，政府还可以采取税收优惠、绿色认证等手段，促进农业企业提供高质量的技术支持与设备，推动农业企业的技术创新与设备升级。与此同时，农民的参与是项目能否成功实施的重要因素。为了鼓励农民积极参与，政府可以通过补贴、奖励等方式，与农民建立长效的利益联结机制。例如，政府可以通过土地流转支付合理的补偿，激励农民将土地投入到高标农田建设中。农民通过参与项目，不仅能获得资金支持，还能通过技术培训提升农业生产水平，获得长期的经济回报。此外，项目实施过程中，还需要建立奖惩机制，对积极参与和贡献突出的主体进行奖励，而对未能履行职责的主体予以适当处罚。此举有助于促进各方主体的良性竞争，推动各方主体共同努力，从而确保项目的顺利推进和高效实施。通过完善激励机制，不仅能够调动各方的积极性，还能确保项目资源的高效利用，提升整体项目实施的效率与效益。

4.3 加强技术支持与培训

技术支持和培训是提升高标农田项目实施效率的另一个重要路径。现代农业的高效运行离不开先进的农业技术和科学管理。政府在推动高标农田项目实施时，应加大对农业技术研发和推广的投入。具体来说，政府可以加强对农业科技的投资，支持农业科技企业和科研院校在种植、灌溉、设备、机械化等方面的技术创新，推动新技术、新装备在农田中的应用。这些技术的应用能够有效提高农田的生产效率，减少农业生产过程中的资源浪费。同时，农业企业应与科研机构合作，为农民提供更为专业的技术支持。在项目实施的过程中，农业企业可以通过与科研机构的合作，向农民推广先进的生产技术、管理模式和信息化手段，帮助农民提升生

产技能，提高农作物产量和质量。为了提高农民的生产能力与管理水平，技术培训是不可或缺的环节。政府和农业企业应共同举办各种形式的培训班、研讨会、现场教学等，向农民传授先进的农业技术和科学管理方法。通过提高农民的技术水平，增强他们的生产积极性和参与项目的信心，进一步提升项目的实施效率。此外，在高标农田项目实施过程中，应根据不同地区和农民的需求，制定差异化的培训计划，确保培训内容符合农民的实际需求，提升培训效果。技术支持和培训不仅能提升农民的生产技能，还能帮助他们更好地适应农业现代化的需求，推动农业生产向更高效、可持续的方向发展。

5 结语

高标农田项目作为推动农业现代化的重要措施，涉及政府、农业企业、农民等多个主体的协同合作。如何优化主体协同机制，提高各方主体的参与度和合作效率，是确保项目成功实施的关键。通过建立多方协同的管理模式，完善激励机制，以及加强技术支持与培训，可以有效提升项目的实施效率和生产能力。未来，随着政策的完善、技术的进步及市场需求的变化，高标农田项目将逐步实现更高效、更可持续的目标，为农业现代化和农村振兴战略的实施提供强有力的支持。

随着农业现代化的不断推进，更多创新技术和管理模式将不断涌现，这为高标农田项目提供了巨大的发展空间和前景。在此过程中，政府、企业、农民之间的合作将更加紧密，信息共享和技术支持将成为项目成功实施的重要保障。通过构建更加完善的协同机制，整合各方资源，高标农田项目的实施效率和效益将得到进一步提升，进而推动我国农业生产方式的转型与升级，为农业的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 吴生华.调整思路强化措施加快山川秀美工程实施步伐[J].陕西政报,2000,(16):39-40.
- [2] 王天永,陈怀智.黄河流域黄土高原地区水土保持与生态环境建设途径的探讨[C]//中国生态经济学学会.中国生态经济学会第五届会员代表大会暨全国生态建设研讨会论文集.黄河水利委员会;黄河水利委员会;2000:381-385.
- [3] 任士福.高校林业科技成果转化创新机制的探索[J].林业科技管理,2001,(01):49-51.
- [4] 赖亚兰.重庆三峡库区高效生态农业可持续发展模式与机制研究[D].西南农业大学,2001.
- [5] 张鑫.城乡建设用地增减挂钩拆旧区复垦实践困境与生态补偿机制的构建[J].山西农经,2025,(13):139-141.

Groundwater control during construction of rock and soil collapse control project in karst area

Yao Wang Binhe Xu

Liaoning Province Geological Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110034, China

Abstract

Karst regions typically present complex geological conditions, where construction projects for landslide control face severe groundwater challenges such as sudden water surges, mudflows, and pipe gushing. These issues not only jeopardize construction safety and progress but may also trigger secondary geological disasters. This study investigates groundwater management during landslide control projects in karst areas. It first highlights the critical importance of groundwater management during construction phases, then analyzes the unique hydrogeological characteristics of karst regions and the specific challenges encountered. Subsequently, technical measures for effective groundwater control are explored. The research provides scientific guidance for managing groundwater during landslide control projects in karst areas, ensuring both construction safety and environmental stability.

Keywords

karst area; collapse control project; construction period; groundwater control; technical measures

岩溶地区崩塌治理工程施工期地下水控制

王瑶 徐彬赫

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司，中国·辽宁 沈阳 110034

摘要

岩溶地区的地质条件通常比较复杂，其崩塌治理工程的施工期面临着非常严峻的地下水问题，如突水、涌泥、管涌等等。上述问题不仅影响着施工安全与进度，甚至还可能引发次生的地质灾害。为此，本文针对于岩溶地区崩塌治理工程施工期的地下水控制展开了相关的研究，先阐述了施工期地下水控制的重要性，再分析了岩溶地区地下水的赋存特征及施工期面临的地下水挑战，随后探讨了施工期地下水控制的技术措施。本次研究的意义上为岩溶地区崩塌治理工程施工期的地下水控制提供科学的参考，保障工程的施工安全与环境的稳定。

关键词

岩溶地区；崩塌治理工程；施工期；地下水控制；技术措施

1 引言

岩溶地区的碳酸盐岩广泛分布，其经长期溶蚀作用形成了复杂的地下空洞、裂隙网络和暗河系统，此地区地下水的赋存与运移规律极具特殊性。而崩塌作为该区域常见的地质灾害，其治理工程施工往往需在破碎岩体、富水地层中进行，那么地下水的干扰便成为了影响工程顺利实施的关键因素。实际施工的过程中，若对于地下水的控制不当，就极有可能引发突水涌砂、边坡失稳、地基承载力下降等问题的出现，不但会延误工期、增加成本，更会对施工人员的安全构成严重的威胁。

2 岩溶地区地下水赋存特征及施工期地下水挑战

2.1 岩溶地区地下水赋存特征

岩溶地区地下水的赋存状态是漫长地质作用与水文过程共同作用的结果，其呈现出“空间分异显著、动态变化剧烈”的独特性。若从储存空间来看，碳酸盐岩经亿万年溶蚀形成的三维网络系统极具复杂性：在微观上，岩体中发育着密度达 10-50 条 / 米的毫米级裂隙，虽然这些裂隙的宽度多在 0.1-2mm 之间，但却构成了地下水渗透的主要通道；中观层面则存在直径 5-10 米的溶洞与溶沟，其中填充着粉质黏土或碎石，形成了局部富水囊；宏观上，存在大型的暗河系统纵横交错，甚至部分暗河宽度可达 5-20 米，流量随季节的波动可达 10-100m³/s。上述这种多级储水结构，导致同一钻孔在不同深度可能会出现“干 - 湿 - 干”的交替现象，哪怕相邻 5 米的两个监测点水位差也可达 10 米以上^[1]。

【作者简介】王瑶（1991），女，满族，中国山东定陶人，本科，工程师，从事工程地质研究。

地下水与地表水的水力联系则具有“双向快速交换”特征。当大气降水落到地表之后，约 30% ~ 60% 会通过落水洞、岩溶漏斗直接灌入地下，其补给速度是非岩溶区的 5-10 倍。贵州某监测数据显示，一次 50mm 的降雨可使地下水位在 2 小时内上升 3-5 米。同时地下水还会通过泉眼、暗河出口排泄至地表水体，进而形成“地表地下一体化”的水循环系统。在云南某岩溶流域监测中表明，流域内 80% 的地表径流均来自地下水排泄，而雨季时地表水体又会通过倒灌补给地下水，导致水位年变幅可达 15-30 米，旱季水位甚至可能低于地表 20 米以下。

而径流路径的“随机性与定向性并存”是另一显著的特征。像裂隙发育均匀的区域，地下水一般会沿多个方向缓慢地渗透，渗透速度通常为 0.1-1m/d，但当遇到连通性好的溶洞或暗河时，水流速度可骤增至 5-20m/d，一次呈现出“管道流”的特征。湖南某示踪试验显示，荧光剂在暗河系统中 12 小时内迁移了 15 公里，表明这种快速径流使得污染物能在短期内扩散至很远范围。此外因溶洞坍塌、泥沙淤积等原因，使得部分径流路径被周期性地阻断，形成了“暂时性滞流区”，致使地下水化学特征出现了剧烈的变化，如 pH 值在短距离内可从 6.5 升至 8.0。

2.2 施工期面临的地下水挑战

2.2.1 突水灾害

崩塌治理工程施工对岩溶地下水系统的扰动，可能会引发一系列的连锁反应，最终形成多维度的工程风险。其中，突水灾害的突发性与破坏性最为突出，因为施工开挖或爆破作业一旦触及未探明的富水溶洞或暗河，高压地下水便会瞬间突破岩体的约束，其涌水量可达数百甚至数千立方米每小时。

2.2.2 细颗粒迁移

地下水渗透所引发的“细颗粒迁移”问题，在实践当中直接威胁着工程结构安全。由于岩溶区覆盖层多为含砂率 30%-50% 的松散堆积物，因此当水头差超过 0.5m 时，地下水就会携带砂粒沿裂隙或孔隙流动，进而形成管涌。某抗滑桩施工当中，因桩孔底部遭遇了岩溶裂隙水，24 小时内涌出细砂达 80m³，导致桩底的沉渣厚度超标，施工团队不得不采用高压喷射注浆进行地基加固，额外增加了成本 120 万元。

2.2.3 环境连锁效应

施工排水带来的“环境连锁效应”同样地不容忽视。所谓“环境连锁效应”，是为了降低地下水位而采用大规模的抽水，然后形成直径数百米的降落漏斗，导致周边地下水补排平衡被打破。此外，岩溶地下水常溶解大量 CO₂，在抽水过程中气体逸出非常可能引发局部缺氧环境，而某些矿区附近的地下水甚至还含有 H₂S 等有毒气体，浓度可达 5-20mg/L，一旦突然被释放会危及施工人员的健康^[2]。

2.2.4 季节性水位波动

季节性水位波动对于施工进度的干扰具有“周期性与不确定性”。在雨季时，地下水位急剧上升可能会淹没基坑，迫使停工，而旱季水位的下降又可能导致原本封堵的裂隙重新开启，此时便会造成新的渗水通道。同时这种动态变化还会使钻孔灌注桩在成孔过程中出现“干孔 - 涌水干孔”的反复，影响到了混凝土的浇筑质量，增加了断桩的风险。

3 施工期地下水控制技术措施

3.1 超前探测与水文地质勘察

施工前的超前探测与水文地质勘察在目前是破解岩溶地下水“隐蔽性”难题的关键，其需构建“空—地—井”的立体探测体系。该体系的关键之一是物探技术的选型，需结合探测深度与精度要求分层进行实施。其中地表层采用无人机航测结合高分辨率遥感影像，用于识别落水洞、岩溶漏斗等宏观地貌标志，从中圈定地表汇水区域与潜在地下水补给通道；中浅层（0-50 米）则以地质雷达与高密度电法为主，地质雷达建议选用 100-500MHz 的天线，此方式对灰岩裂隙带与小型溶洞的分辨率可达 0.5 米，能清晰地识别充填型溶洞的界面特征，而高密度电法通过布设 2-5 米电极距的测线，能够生成电阻率剖面，一次将富水区（电阻率 < 50Ω · m）与相对贫水区（电阻率 > 200Ω · m）进行精准地划分；深层（50-200 米）则采用地震折射波法，即经由分析纵波传播速度的差异，来推断大型暗河与溶洞的分布范围，其探测误差一般可控制在 5% 以内。

另一关键则是钻探工作，应当执行“探采结合”的原则，即采用 XY-2 型岩芯钻机配 Φ130mm 金刚石钻头，实行“跟管钻进 + 孔内成像”工艺^[3]。展开来说：当钻进至溶蚀发育段时，就立即下入 Φ110mm 的套管隔离，目的是防止孔壁坍塌，同时通过孔内摄像头来观察溶洞充填物状态（如流塑状黏土、块石堆积或空洞），并测量地下水位埋深与水头压力。对于水文试验则需分阶段开展，一般初始阶段通过单孔稳定流抽水试验，采用 Thiem 公式计算出渗透系数，但若发现了多层含水层，则需要进行多孔干扰抽水试验，以此确定各含水层的水力联系。

3.2 排水降压技术

排水降压方案需遵循“分层控制、按需降压”的原则，需要根据地下水埋藏条件构建起多级的排水系统^[4]。首先是对于覆盖层厚度 < 5 米的浅层潜水，建议采用截水沟 + 集水井 + 移动式排水的系统，即沿施工区周边设置 0.8 米 × 1.0 米（宽 × 深）的梯形截水沟，沟内采用 M7.5 浆砌片石衬砌，沟底则铺设 20cm 厚级配碎石反滤层。同时在基坑四角布置直径为 1.2 米、深 3 米的集水井，内置 Φ150mm 潜水泵，但扬程不低于 10 米，单泵抽水量 ≥50m³/h，且要配备 2 台备用泵以应对突发涌水。其次针对岩溶裂隙承压水，应该实施管井集群 + 降压廊道进行联合控制，当中管井徐

采用 $\Phi 325\text{mm}$ 螺旋焊接钢管，滤水管段的长度也不小于 6 米，缠丝间隙为 0.5mm ，填砾粒径是 $2\text{-}5\text{mm}$ ，井深一定要穿透承压含水层底板 $3\text{-}5$ 米。而井群的布置需要采用“梅花形”布点，单井控制半径可通过抽水试验进行确定，一般为 $8\text{-}15$ 米，且单井出水量需达到设计涌水量的 1.2 倍以上。当含水层渗透系数 $< 10\text{m/d}$ 时，应先采用高压旋喷注浆形成厚度 ≥ 1.5 米的止水帷幕，要求旋喷桩搭接的宽度不小于 30cm ，浆液水灰比为 $1:1\text{-}1:1.5$ ，这样才能确保帷幕渗透系数 $\leq 10^{-6}\text{cm/s}$ ，再结合管井排水便形成了“内排外堵”的降压体系。最后是暗河系统的集中涌水，最优解是采用封堵 - 导流 - 分流的三段式处理，在暗河入口处浇筑 C25 的混凝土塞，将其嵌入基岩深度 ≥ 1.5 米，中部则预留 $\Phi 200\text{mm}$ 的钢质导流管，且管端安装闸阀用于控制流量。沿暗河走向则平行于施工导流隧洞，断面尺寸建议 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ （宽 \times 高），并采用喷锚支护将涌水引至施工区外 500 米以上的安全区域。此外还应在隧洞内设置分水闸，当涌水量超过设计值时，便通过支管分流至临时蓄水池，以避免直接排放引发的下游冲刷。

3.3 防渗堵水技术

防渗堵水离不开“地表 - 地下”立体的防护体系，该体系使得“源头控制、过程拦截”得以实现。就地表防渗而言，其重点在于处理汇水区域：在施工区上缘 5 米处设置截水天沟，断面则采用矩形设计，宽 \times 深 = $1\text{m} \times 0.8\text{m}$ ，采再用 C20 混凝土进行浇筑，每隔 10 米设伸缩缝，填缝材料建议采用沥青木丝板；对坡面松散层还需采用挂网喷浆进行处理，铺设 $\Phi 8\text{mm}$ 钢筋网，网格间距 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 为宜，喷射 C20 细石混凝土，厚度为 $8\text{-}10\text{cm}$ ，然后每隔 5 米设置 $\Phi 50\text{mmPVC}$ 排水孔，孔深是 $3\text{-}5$ 米且倾角 $10\text{-}15^\circ$ ，如此才能将坡面渗水集中进行导出。

在地下防渗方面则以注浆加固为核心，需要根据岩溶的发育程度选择差异化的工艺：对裂隙宽度 $0.5\text{-}5\text{mm}$ 的细微裂隙可采用超细水泥注浆，一般水泥细度 $45\text{ }\mu\text{m}$ 筛余 $\leq 5\%$ ，水灰比 $0.8\text{:}1\text{:}1$ ，注浆压力在 $1.0\text{-}1.5\text{MPa}$ 之中，进而通过劈裂作用填充裂隙网络；对宽度 $5\text{-}50\text{mm}$ 的中粗裂隙，建议采用水泥 - 水玻璃双液浆，其体积比为 $1:1\text{-}3:1$ ，初凝时间需控制在 $30\text{-}60$ 秒内，以确保能够快速地封堵水流通道；对直径 $> 50\text{cm}$ 的大型溶洞，则要采“级配骨料填充 + 注浆固化”的工艺，先填入 $5\text{-}20\text{cm}$ 块石至溶洞体积的 $2/3$ ，再注入水泥 - 粉煤灰浆液（掺量 30% ），注浆管应采用 $\Phi 108\text{mm}$ 的钢管，再分段提升注浆，每段高度为 1.5 米，如此便能确保浆液充分地填充了骨料间隙。

3.4 动态监测与应急处置

动态监测系统应具备“水量 - 水位 - 变形”多参数协同监测的功能，为此需要构建智能化的预警平台。具体来说：

监测点地布设需遵循“关键区域加密”原则，即在抗滑桩、挡土墙等结构物周边 5 米范围内，每 20 米设置 1 个自动水位监测仪，并采用 RS485 总线来传输数据，监测精度可达 $\pm 1\text{cm}$ ，采样间隔一般为 15 分钟。而在暗河入口、大型溶洞上方，应当设置超声波流量计，将测量范围控制在 $0\text{-}5\text{m}^3/\text{s}$ 内，精度为 $\pm 2\%$ ，用于实时地记录涌水量的变化。同时在施工区周边 1 公里范围内要布设 20 个沉降观测点，在其中采用 GNSS 监测技术，平面精度为 $\pm 3\text{mm}$ ，高程精度是 $\pm 2\text{mm}$ ，每日观测 1 次，以此捕捉地表变形的趋势^[5]。

上述监测数据均通过无线传输至监控中心，系统将自动地生成水位 - 时间曲线、涌水量变化直方图及沉降速率等值线图。一旦出现以下情况，便会触发预警：第一水位单日降幅 > 0.5 米、涌水量突增 30% 以上、沉降速率 $> 5\text{mm/d}$ ，针对该情况应在急物资储备当面实行“三级储备”制度，即现场储备 2 台备用潜水泵（流量 $\geq 100\text{m}^3/\text{h}$ ）、 5 吨速凝水泥、 200 条沙袋及 50 米帆布软管，项目部储则备注浆设备 1 套、柴油发电机 2 台，协作单位应储备长臂挖掘机 1 台、应急钻探设备 1 套，进而能够确保应急响应时间 < 1 小时。

4 结语

基于上述所述可知，岩溶地区崩塌治理工程施工期的地下水控制是一项复杂的系统工程，其需充分地认识岩溶地下水的赋存特征与施工扰动的相互作用。随后通过超前探测掌握水文地质条件，再采用排水降压、防渗堵水等技术措施，辅以完善的管理保障与动态监测，就能有效地应对施工期的地下水挑战。但实际工程中，应根据具体的地质条件制定个性化的方案，并要注重技术措施的协同应用与动态优化，同时还需兼顾环境保护要求。往后随着探测技术与数值模拟方法的发展，岩溶地区地下水控制将变得精准化、智能化，其将为崩塌治理工程的安全实施提供更有力的技术支撑，推动着岩溶地区地质灾害防治水平的整体提升。

参考文献

- [1] 张加桂.三峡地区泥灰质岩石斜坡带岩溶作用及其对工程稳定性的影响[J].地球学报,2005,26(06):565-569.
- [2] 李天雨.管道—裂隙型岩溶地下水水流场特征及径流通道参数辨识研究[D].山东省:山东大学,2022.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2022.006457.
- [3] 胡克.富水岩溶隧道涌水与围岩稳定性研究——以薄刀岭隧道为例[D].贵州省:贵州大学,2024.DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2024.000526.
- [4] 安小亮.水利水电工程施工场地地下水污染的控制与修复研究[J].环境科学与管理,2024,49(12):100-103+108.
- [5] 赵瑜,胡波,陈海林,等.岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J].土木建筑与环境工程,2018,40(05):1-8.DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.001.

Study on energy efficiency improvement technology and scheme in renovation of HVAC system of existing buildings.

Qingjie Yao

Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing, 400000, China

Abstract

The energy efficiency improvement of HVAC systems in existing buildings has become a crucial research direction in building energy conservation. Through comprehensive investigation and energy consumption analysis of an office building's HVAC system, this study systematically identified key issues including equipment aging, outdated control strategies, and low energy utilization efficiency. Based on measured data and theoretical analysis, a comprehensive renovation plan was proposed, encompassing high-efficiency equipment replacement, variable frequency technology application, intelligent control system upgrades, and waste heat recovery. Post-renovation, the system achieved a 32% improvement in overall energy efficiency ratio, saving 0.658 million kWh annually and reducing carbon emissions by 352 tons. The research findings demonstrate that existing building HVAC systems possess significant energy-saving potential through scientific integration of technologies and optimized design.

Keywords

existing buildings; HVAC; energy efficiency improvement; variable frequency technology; intelligent control; energy-saving renovation

既有建筑暖通空调系统改造中的能效提升技术与方案研究

姚庆节

重庆市计量质量检测研究院，中国·重庆 400000

摘要

既有建筑暖通空调系统能效提升改造已成为建筑节能领域的重要研究方向。本文通过对某办公建筑暖通空调系统的全面调研与能耗分析，系统诊断了设备老化、控制策略落后、能源利用效率低等关键问题。基于实测数据与理论分析，提出了包括高效设备更新、变频技术应用、智能控制系统升级、余热回收利用等在内的综合改造方案。改造方案使系统综合能效比提升32%，年节能量达到65.8万kWh，碳排放减少352吨。研究结果表明，通过科学的技术集成与优化设计，既有建筑暖通空调系统具有巨大的节能潜力。

关键词

既有建筑；暖通空调；能效提升；变频技术；智能控制；节能改造

1 引言

近年来，建筑物能源消耗占全社会能源消耗的比重不断上升，其中暖通空调消耗约占建筑物总能耗的40%~50%。目前大量建筑的在用暖通空调系统实际使用时间达到15年以上，运行效率不高、运行控制方法过时、能耗较高的情况十分常见。随着国家“双碳”战略的推进，对建筑物暖通空调系统进行节能改造是建筑领域推动碳减排的重要举措。随着既有建筑改造工作推进，技术方案选择多、投资回收期长、改造目标不能完全实现的风险大等因素制约其改造进程。如何在完全实现室内环境质量指标的前提下，通过改造采用新技术、优化系统设计配置，实现更大程

度上的节能降耗，成为广泛关注的重要技术课题。本文在既有工程实践应用的基础上，探讨并提出适合既有建筑的暖通空调系统节能改造技术路线及实施方案。

2 既有建筑暖通空调系统现状分析与能耗评估

2.1 案例建筑基本情况与系统现状分析

研究对象为一栋办公建筑，建筑面积14,600余平方米，地上12层，地下1层。建筑主要功能为办公用房，标准层层高3.6米，建筑外围护结构为铝塑板+玻璃幕墙体系。原暖通空调系统采用4组模块式风冷热泵机组加风机盘管的空气调节形式。冷源配置为4台额定制冷量462kW的模块式风冷热泵机组，机组设置于屋顶。空调水系统为一次泵定流量系统，采用开式逆流型。冷水供回水温度设计为7/12°C，热水供回水温度为45/40°C。末端采用风机盘管加新风的空调方式。

【作者简介】 姚庆节（1975-），男，中国重庆人，本科，高级工程师，从事工程管理研究。

2.2 既有系统能耗测试与数据采集

为准确掌握系统运行状况，需要建立了完整的能耗监测体系，在机组、水泵、空调水管网、末端设备等关键部位安装智能电表和流量计等，实现能耗数据的实时采集^[1]。监测周期应覆盖全年运行工况，数据采集频率为 15 分钟。通过连续监测，以获取了系统各部分的详细能耗数据进行分析。机组年运行小时数为 1800 小时，年耗电量为 205.9 万 kWh；冷冻泵年耗电量为 41.1 万 kWh；风机年耗电量为 16.1 万 kWh。表 1 展示了系统主要设备的能耗分布情况。

2.3 系统运行效率分析与问题诊断

通过对监测数据的深入分析，发现系统存在以下主要

问题：冷水机组实际运行 COP 仅为 2.1，低于设计值。主要原因包括：机组运行年限较长，换热器污垢严重，热组增大换热效率降低，压缩机内部磨损以及制冷剂泄漏导致机组效率下降。水系统时常维修导致机组经常在部分负荷下运行，实际负荷率常在 30% ~ 60% 之间，而定频机组在此负荷区间效率较低导致能效降低。同时水系统存在严重的大流量小温差现象，导致水泵输送能耗大幅增加。管网水力失衡严重，部分末端供冷不足，部分末端过冷，系统整体效率低下。控制系统采用简单的定时启停和手动调节方式，无法根据实际负荷需求进行优化控制。冷水机组、水泵、冷却塔之间缺乏联动控制，各自独立运行，能源浪费严重^[2]。

表 1 既有暖通空调系统设备能耗分布

设备类型	装机功率 (kW)	年运行时间 (h)	年耗电量 (万 kWh)	占比 (%)	设备类型
风冷热泵机组	450	1800	137.7	66.88	热泵机组
冷冻水泵	39	1800	41.1	19.96	冷冻水泵
风机	33	1800	16.1	7.82	风机
末端设备	92	1800	11	5.34	末端设备
合计	-	-	205.9	100	合计

2.4 改造前系统综合能效评价

通过分析计算全年运行参数发现系统综合性能系数较低；单位面积全年能耗值为 141kWh/m²，建筑暖通空调系统整体能耗偏高。经过能效计算还发现系统在过渡季节能消耗过大，经过调研走访了解到在春秋两季室外温度适中时由于各房间湿热负荷的差异，一些房间采用自然通风改善室内热舒适性，但此时暖通空调系统依旧采用夏季工况运行以改善湿舒适性，系统负担加重且造成了较多不必要的能源消耗。

气、排水技术，使得机组具有自动防喘震、防液击和自动排气的性能；全封闭无油系统，采用三级结构轴承设计。选用磁悬浮离心式冷水机组替换现有制冷机组，利用磁悬浮冷水机组的运行特点，可实现 6.4 以上的能源利用效率，能有效改善现有暖通系统的能效指标。系统所用的水泵全部改为变频调速，其中冷却水泵采用温差控制，控制系统通过传感器采集冷却水进水与出水温度，调节水泵驱动电机的工作频率改变叶轮转速来自动控制循环水流量。同时采用压差控制保障目前空调水系统的安全，能有效减少因管道泄漏导致的维修工作。冷热水循环泵出水流量 125 升 / 秒，水泵功率 11 千瓦，实测变频后运行频率 42.62Hz，节电率 45%。由图 1 变频水泵性能曲线图可知，运行频率在 33 ~ 36Hz 时水泵可实现最优能源利用效果。分析图 1 可知，系统负荷 50% 时，变频水泵功率仅为额定功率的 12.5%，节电效果非常明显。而定频水泵加阀门调节流量的方式在相同情况下水泵能耗仍然在额定功率的 70% 以上。

3 暖通空调系统节能改造技术方案设计

3.1 高效设备选型与变频技术应用

磁悬浮冷水机组采用无润滑油系统设计，因此可避免油摩擦问题^[3] 降低系统能耗水平。而且磁悬浮冷水机组的制冷量能与机组运行负荷同步变化，如冷冻水系统水流量及泵频率均可与流量线性匹配，制冷机组能够在 25% ~ 100% 的负荷范围内完成供冷任务。此外，磁悬浮冷水机组具备排



图 1 变频水泵能效特性曲线

3.2 系统控制策略优化与智能化升级

改造过程中可引入基于物联网技术和优化控制策略的冷站控制系统，使冷站设备级与系统级均可以实现优化，以提高整个系统的控制水平。设备级控制中，每台冷水机组配备一台专用的优化控制器，优化控制器根据负荷需求和冷水机组设备特性曲线调整运行策略，并基于机器学习对策略进行持续优化调整^[4]。系统级优化控制采用分层控制架构，分别是现场级、优化决策级和能源管理级。最底层的现场级控制负责设备数据读取与运行，中间层级的优化决策层根据负荷预测模型和能效模型生成优化策略，而顶层的能源管理层则对冷站运行的能耗进行监测、分析预判能源消耗趋势并生成报表以及对设备进行故障诊断以调整控制策略。系统还可引入负荷预测控制技术，通过对历史负荷数据的分析并结合外部数据源提供的天气状况以及建筑使用状态等负荷影响因素预测系统负荷可能的走势，提前规划并制定冷站机组的启停节点和不同时段运行参数，进一步提升暖通空调系统整体能效水平。

3.3 余热回收与热泵技术集成应用

余热回收是改善系统能效的常见措施。如在在冷水机组冷凝器出口处增加板式换热器来回收冷凝热预热生活热水，在夏季高峰期常能覆盖建筑生活热水负荷的

15% ~ 30%，其余时间如过渡季节可使用空气源热泵承担。目前空气源热泵 COP 可高达 4.0，相比传统电加热节约 75% 的能耗。设计系统时可以考虑将热泵与冷水机组组合运行，当两者均参与供冷供热时，可以节能及提高一次能源的利用率。余热回收装置设计应充分保证运行期间的安全，以防余热回收装置故障影响主机运行。具体措施包括增加旁通管路和自动切换阀门，在系统检测到预热回收装置出现故障时及时进行切换。

3.4 可再生能源集成与分布式供能

目前国内光伏发电系统发展势头迅猛，配合适当的储能系统可以满足空调机组辅助设备的用电需求。光伏系统应配置智能逆变器，具备防孤岛和低电压穿越功能。为了提升光伏发电的使用效率，在光伏系统中锂电池储能装置，在光伏发电量较多的时段存储多余电量，在用电高峰时段输出，用于削峰填谷。储能还可以作为备用电源，以提供可靠的设备供电^[5]。光伏储能系统能量流动示意图如图 2 所示。

该系统的运行可由能量管理系统(EMS)进行最优调度，EMS 可以根据电价机制、光伏电量预测、负载用电需求等进行能源最优化利用，峰电时段以光伏和储能电量优先，谷电时段从电网购电并为储能充电。

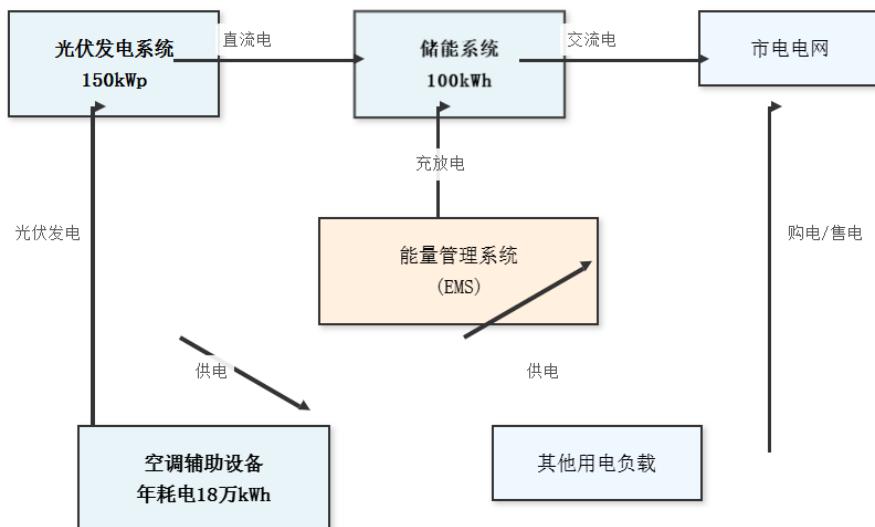


图 2 光伏储能系统能量流动示意图

4 改造工程实施与运行效果验证

4.1 改造工程施工组织与质量控制

为减少工程施工对运行系统的干扰，可采取按分区分步的施工方法。在施工组织上采取“先外围后核心部位、先附属后主体”的原则。工程质量管理应遵循设计、材料设备、施工和系统调试“全过程”控制的原则。施工过程的重点环节如：管道焊接、设备安装、电缆线束的敷设，应有详尽的

作业指导书。特别要注重施工过程中新旧设备改造交接的施工程序和风险控制，提前制定周密的施工方案。对建筑现状准确建模，以便利用 BIM 技术在设计阶段对管道设备进行碰撞检查，减少和避免现场的更改和调整。详细设计大型设备装拆的吊装方案，减少拆除旧设备对建筑物的破坏，降低大型设备在就位过程中的安装误差，避免可能的返工和新增维修工作。采用激光对中仪等措施安装水泵电机，以消除因对中不良引起的设备振动问题，降低工作时的噪声。

4.2 系统调试与性能测试

系统调试通常分为单机、联动和试运行 3 个阶段。改造项目的单机调试新建项目相似，主要检测运行参数是否达到技术文件给定要求。联动调试检测各个系统间运行配合情况，对于改造项目要特别关注新旧设备设施的配合情况，应特别关注管道系统安装产生的附加应力对设备运行的影响。试运行阶段要关注新旧系统数据传输、信号干扰和管道液击现象。要保证足够的试运行时间，完整测试系统在不同工况下的制冷量、能耗、COP 等指标的运行技术状态。因为就有系统的影响，改造项目的试运行调试往往比新项目更为复杂，调试期间碰到问题应多加分析，谨慎采取整改措施，避免影响对故障或状态偏离原因的准确判断。

4.3 运行监测与数据分析

改造后应建立长期运行监测制度对改造后系统运行进行监测。新系统与旧系统之间的协调性对系统运行效率和稳定性影响较大，发生故障时分析处理也更为复杂和困难。通过建立监测制度能够更为方便迅速地发现问题，有效提升系统运行参数和能耗知道的稳定性。

4.4 经济效益评估与环境影响分析

改造项目应综合考虑总投资、设备购置、工程费用、调试费用、运行期能耗情况等多方面因素，综合考虑设备折旧、运行维护成本以及政府补贴等因素来计算本项目生命周期经济效益。在环境效益方面，提升能效水平能够减少碳排放，同时减少了制冷剂的泄漏、臭氧层损耗和城市热岛效应等环境问题。

5 结语

既有建筑暖通空调系统的节能改造是建筑行业实现碳达峰与碳中和的重要途径。本项目采取了系统化调查、精细化设计、严格化施工的技术路线，实现了既有建筑暖通空调系统能效的大幅度提升。改造实践证明，采用变频技术、自动控制、余热回收以及新能源等技术，利用信息技术和计算机技术对既有系统进行充分有效利用，更重要的是根据建筑的特点选择合适的技术，提高系统的集成度，重视过程管控。未来既有建筑改造应加强全寿命周期内的经济性与实用性分析，研究合同能源管理等新商业模式，进一步扩大先进技术的应用范围。未来既有建筑暖通空调系统改造中，通过引入智能化、网络化、信息化技术，将使既有建筑暖通空调系统改造取得更大的发展。

参考文献

- [1] 陶生辉. 既有建筑绿色改造暖通空调自评估要点与评价分析[J]. 全面腐蚀控制,2024,38(06):115-118.
- [2] 辛亚娟,杨帆,张子正. 城市更新背景下既有商业建筑暖通空调系统改造设计策略分析[J].暖通空调,2024,54(S1):421-424.
- [3] 张天睿,杨辰,杨静. 既有公共建筑暖通节能及绿色改造现状分析 [J].科技与创新,2024,(05):166-168.
- [4] 贾珍. 既有建筑项目的节能改造分析[J].建筑施工,2019,41(12):2269-2271.
- [5] 孟冲,王清勤,朱荣鑫,等. 既有建筑暖通空调系统绿色改造综合评价[J].煤气与热力,2016,36(03):17-21.

Analysis and improvement of quality problems of pavement (block) engineering

Yujiang Qiu¹ Zhijun Guo^{2*}

1. Nanjing Deyinglonghua Real Estate Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211100, China

2. Lianyungang Zechang Construction Engineering Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

In indoor and outdoor ground paving projects, there are common engineering quality problems such as cracking, hollowing, and even large-scale loosening of the paving layer, and the causes are diverse. The author of this article has discovered and summarized from engineering practice, combined with the construction theories of different specialties, and even explored the standardized practices, thereby analyzing the design flaws and insufficient construction management reflected in the common quality problems of ground paving (block materials) projects. Furthermore, improve the design concept and strengthen the construction measures to enhance the quality of the pavement project and reduce the later maintenance costs. It can provide reference for the design and construction of similar projects to improve the quality of engineering.

Keywords

Analysis and Improvement of Ground paving Engineering quality

地面铺装（块材）工程质量问题解析及改进

仇玉江¹ 郭志钧^{2*}

1. 南京德盈龙华置业有限公司，中国·江苏南京 211100

2. 连云港泽昌建设工程有限公司，中国·江苏连云港 222000

摘要

室内外地面铺装工程普遍存在着铺装层开裂、空鼓甚至大面积酥松等质量问题，其原因是多种多样的。本文作者从工程实践中发现和总结，结合不同专业施工理论，甚至对规范的做法进行探析，从而解析出地面铺装（块材）工程常见质量问题反映出的设计缺陷和施工管理不足。进而改进设计构思和加强施工措施，达到提高铺装工程质量减少后期维护成本。可以对类似工程的设计、施工为改善工程质量提供借鉴。

关键词

地面铺装 工程质量 解析与改进

1 引言

地面铺装（块材）在市政工程、园林景观工程以及建筑工程地面使用非常广泛，但近年暴露出的质量问题比如面层下沉破裂、起层空鼓、唧泥松动等非常普遍（如图1、2、3），这严重影响地面的正常使用甚至引起交通事故。这种工程质量需要从工程设计，施工管理以及使用管理方面分析原因和改进以保证地面铺装得以正常使用。



图 1

【作者简介】仇玉江（1989-），男，中国江苏连云港人，本科，从事工程师建筑专业方向研究。

【通讯作者】郭志钧（1975-），男，中国江西湖口县人，本科，从事工程师建筑专业方向研究。



图 2



图 3

2 原因分析

2.1 设计因素

设计的使用荷载考虑偏小。在室外地面铺装设计时一般取值都偏小，比如人行道、广场等地面设计时认为只有行人荷载，但实际中园林保养车辆、三轮车等机动车也在上面行驶，这些车辆的自重有的达到1吨。室内地面也有电动汽车行驶或检修登高车（梯）荷载等都超过正常使用载荷。

使用环境因素考虑不周全。室内外的气候环境对地面铺装使用影响很大，比如夏季暴晒地面高温以及冬季的低温冰冻，室内空调地暖使用使得温度频繁变动都会带给地面铺装的热胀冷缩以及冻融破坏给基层和面层材料的破坏，以及地面各种不确定的酸碱化学试剂污染和腐蚀，设计没有全面的考虑。

没有进行必要的受力计算。室外地面铺装的底基层和基层以及面层材料没有根据使用情况进行受力分析，不清楚基层、底基层和面层材料需要的承载力情况。很多设计都是简单的套用图集做法，忽略了必要的承载力验算，没有对材料提出相应的力学性能指标要求。

2.2 施工因素

材料质量的好坏直接影响到工程质量。铺装工程的材料质量往往容易疏忽管理，特别是对基层、底基层以及胶粘材料质量的不重视，垫层以及回填材料不按照设计和规范要求施工是引起铺装工程质量的重要原因之一。

施工工艺不能按照要求严格执行也是引起铺装工程质量的原因。比如结合砂浆、灰土没有按比例搅拌均匀，结合面处理不到位，回填层密实度不够，排水放坡错误，伸缩缝留设错误等等。

成品保护是铺装工程最后一道关。由于铺装占地面积大影响后续工程施工，如果施工工序安排不当颠倒施工对成品破坏严重，或者是养护期不足就上去踩踏对铺装损伤大，还有养护措施不到位会也影响铺装质量。

2.3 使用管理原因

没有按设计要求使用。设计是行人道以及不上车辆的场地不能贸然上重型车辆，否则必须采取措施，不然必定对铺装产生破坏。对地面开挖后要及时恢复，回填层材料性能、强度、密实度要达到设计要求。保养管理不到位也容易引起铺装层破坏，比如伸缩缝失效没有及时梳理，地面积水没有

及时清理，植物根系对铺装层的破坏没有及时修复等等。

3 解决方案

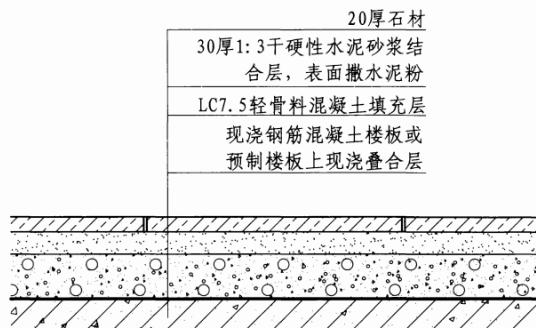
3.1 工程设计

按使用情况确定铺装工程使用荷载取值。比如既是小区园路又是消防通道的地面以及综合体周围地面要考虑后期有重型机械上去作业必须按照消防道路要求的承载能力设计铺装面层、垫层、基层、底基层。根据载荷及选用的面层材料验算各层材料力学要求，进行必要和合理的设计优化，尤其是面层材料的抗压强度、抗弯强度以及垫层材料强度和基层材料的配比与密实度，不是简单套用图集。必须考虑温度应力对铺装影响，合理设置变形缝。设置材料力学指标以便于材料检测。基层的管道设置也对整体面层有影响，要加强管道周壁材料强度设计和回填质量要求，以及管道的埋设深度要慎重设计。

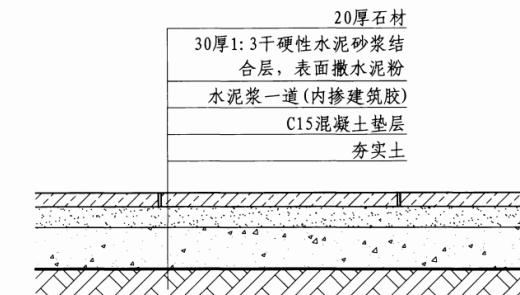
现行铺装工程常用做法如下：

编 号	厚 度	简 图	构 造 做 法
路5-3	260		1. 80厚花岗石板 2. 30厚1:3干硬性水泥砂浆 3. 150厚C20混凝土或250厚3:7灰土 4. 素土夯实,压实度>93%

13J502-3 内装修一楼（地）面装修



(A) 石材楼面



(B) 石材地面

05J909 工程做法

其中干硬砂浆材料质量不易控制。国家目前没有确切

的使用规范，人工现场拌制使用全凭经验无法控制质量。同样灰砂比的砂浆，干硬砂浆比湿拌砂浆强度低很多，且孔隙率大不耐冻害，损坏后形成糜烂软弱层。根据实践观察这是多数铺装工程损坏的主要原因，笔者不建议使用。应该优化铺装粘结层做法，建议采用砼垫层和塑性砂浆粘合剂铺贴，如果面层荷载大应该设置配筋垫层，混凝土强度等级要大于C30。

3.2 施工措施

把好材料质量关和做好材料性能检测。铺装的材料质量把关是保证工程质量的第一步，要重视进场材料的质量验收，不符合要求的材料不能使用，面层及胶粘材料界面剂、水泥、石灰等要做必要的抽样检测，合格后才能在工程使用。

安排好施工流程，编制好施工方案是关键。铺装工程特别是面层尽量安排在总工序的最后施工。室外铺装工程流程要安排好，市政管道安装等以及其他的基础工程完成后才能做铺装工程，避免流程的颠倒对铺装工程的破坏，如受条件限制可以把底基层和基层先行施工，面层在具备条件再施工。室内工程的预留、预埋也要安排在铺装工程施工前完成且做好隐蔽工程会签。要重视底基层、基层的施工质量，包

括材料选用、配比、拌制和压实度质量控制。对没有把握控制质量的需要做样板段以检测承载力和施工工艺。

3.3 使用管理

要有专门制度安排对地面铺装的维护检查，超过设计使用荷载及工况的情况要严格管控以免造成不必要的损害。及时修复小的损坏以免引起更大的破坏。加强积水排除以及植物根系清除，及时清理伸缩缝，以免失效。

4 结语

铺装工程质量好坏影响使用和形象，但实际中容易忽视质量管理。要搞好铺装工程质量就得思想上重视质量管理，从设计和施工工艺着手技术措施和管理措施到位，从实践中发现问题和研究解决问题的办法，才能做出适用优质的铺装工程。

参考文献

- [1] CJJ 169—2011 城镇道路路面设计规范
- [2] 13J502-3(替代03J502-3) 内装修楼(地)面装修
- [3] 15J012-1环境景观·室外工程细部构造
- [4] 05J909 工程做法
- [5] GB 50300—2013建筑工程施工质量验收统一标准

The research status and development trend of BIM application in the field of engineering cost

Zhanping Feng

Beijing Chaoyang Tianhua Construction Group Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

This paper aims to explore the application of BIM in the field of engineering cost. The research method is to comprehensively analyze the existing research results and practical applications in this field. The results show that in terms of research status, BIM has been gradually applied to all stages of engineering cost, but there are problems such as poor information transmission and difficult data sharing. In the development trend, BIM will be deeply integrated with the whole life cycle cost management to realize the seamless connection and dynamic control of each stage; in-depth integration with big data and artificial intelligence technology to achieve intelligent automation of cost management; the degree of standardization and normalization is continuously improved to solve the problem of data interaction; the application of green cost management is expanded to help the sustainable development of the construction industry. The conclusion shows that BIM has a broad application prospect in the field of engineering cost, and its development trend will promote the transformation of engineering cost management to an efficient, accurate and green direction.

Keywords

BIM ; engineering cost ; development trend

BIM 在工程造价领域中应用的研究现状与发展趋势

冯占平

北京市朝阳田华建筑集团公司，中国·北京 100000

摘要

本文旨在探讨BIM在工程造价领域的应用情况。研究方法为综合分析该领域现有的研究成果与实践应用。结果显示，在研究现状方面，BIM已逐步应用于工程造价各阶段，但存在信息传递不畅、数据共享困难等问题。在发展趋势上，BIM将与全生命周期造价管理深度融合，实现各阶段无缝衔接与动态控制；与大数据、人工智能技术深度结合，达成造价管理智能化自动化；标准化与规范化程度不断提高，解决数据交互难题；绿色造价管理应用拓展，助力建筑行业可持续发展。结论表明，BIM在工程造价领域应用前景广阔，其发展趋势将推动工程造价管理向高效、精准、绿色方向转变。

关键词

BIM；工程造价；发展趋势

1 引言

在建筑行业朝着数字化方向转型的趋势下，BIM 也就是建筑信息模型技术，依靠自身强大的信息整合以及可视化方面的优势，变成了推动工程造价领域发生变革的关键要素，当下工程造价管理存在着信息不连贯、效率不高、精准程度不够等一系列挑战，对 BIM 在工程造价领域的应用展开深入剖析，对于提高造价管理水平、优化资源分配、提高企业竞争力有着关键价值。本文将系统梳理 BIM 在工程造价领域的应用研究现状，并展望其未来发展趋势，以期为行业发展提供参考。

【作者简介】 冯占平（1968-），男，中国北京人，从事工程造价研究。

2 BIM 在工程造价领域中应用的研究现状

近年来，BIM 技术在工程造价领域的应用研究成为热点，取得了较为丰富的成果。

在理论研究领域，不少学者针对 BIM 技术对工程造价管理模式的变革作用展开了深入剖析，研究显示，BIM 技术改变了传统造价管理各阶段信息相互割裂的状况，达成了从项目决策、设计、施工直至竣工结算全生命周期的造价数据集成与共享，为精准的造价控制给予了理论支持，基于 BIM 的造价估算、预算编制等理论方法持续完善，借助建立三维模型与造价信息的关联，提升了造价计算的准确性以及效率。在实践应用方面，诸多大型工程项目已着手尝试运用 BIM 技术开展造价管理，比如在设计阶段，借助 BIM 模型进行多方案比较与选择，对设计方案给予优化降低成本，在施工阶段，借助 BIM 模型实时监测工程进度和成本，及

时察觉偏差并采取措施加以调整，部分企业还研发了基于 BIM 的造价管理软件，使 BIM 技术与造价业务深度融合，提高了造价管理的信息化水平。

当前 BIM 技术于工程造价领域的运用虽说呈现出了颇为可观的潜力，然而却也遭遇了不少迫切需要去解决的问题，其中 BIM 标准未能实现统一乃是最为首要的难题，不同地区、企业以及软件之间所存在的标准差异颇为较大，致使模型与数据难以达成兼容共享的状态，这无疑增加了协作成本以及错误风险。数据交互方面存在着妨碍，各个阶段、各个专业之间的信息传递并不顺畅，无法构建起连贯的数据链，对造价计算的准确性以及及时性产生了影响。未来，随着技术的不断发展和行业标准的逐步完善，BIM 在工程造价领域的应用将更加广泛和深入，推动工程造价管理向精细化、智能化方向发展。

3 BIM 在工程造价领域中的发展趋势

3.1 全生命周期造价管理深度融合

传统的工程造价管理一般会把项目划分成决策、设计、招投标、施工以及竣工结算等不一样的阶段，每个阶段由不同的主体来负责，信息传递过程中存在滞后以及失真的情况，使得造价管理很难达成精准和动态控制，BIM 技术的出现为全生命周期造价管理给予了有力的支持，未来它和全生命周期造价管理的融合会更加深入。

在项目决策这个阶段，BIM 模型可整合众多的历史项目数据以及市场信息，借助数据分析与模拟，给业主提供更为精准的项目投资估算，比如说，运用 BIM 的参数化功能，依据不同的建设方案迅速调整模型参数，随即生成相应的造价数据，帮助业主在诸多方案里挑选出经济合理的方案。在设计阶段的时候，设计师可借助 BIM 模型开展多方案比选，从造价方面对设计方案给予优化，BIM 软件可以自动计算各个方案的工程量，并且结合造价数据库生成详尽的造价清单，让设计师在契合功能需求的条件下，尽量降低工程造价。

当工程项目步入施工阶段，将 BIM 模型与施工进度计划相互结合，构建出 4D 模型，借助此模型可对工程进度以及成本执行状况展开实时监控，凭借把实际进度和计划进度给予对比，可及时察觉偏差并剖析原因，采取对应的措施加以调整，BIM 模型还可与材料管理系统、设备管理系统等实现集成，以此达成对材料和设备的精准采购以及动态管理，防止出现浪费和积压现象，降低施工成本。在竣工结算阶段，BIM 模型覆盖了完备的工程信息，如工程量、材料价格、施工工艺等，可迅速且精准地生成竣工结算资料，减少结算过程中的纠纷，提升结算效率。

随着 BIM 技术持续完善以及数据共享机制得以建立，全生命周期造价管理可达成真正意义上的无缝对接，各个参与方可于同一个 BIM 平台之上协同开展工作，及时共享项目相关信息，达成造价管理的动态把控以及精细化管理，如

此一来会对提高项目的整体经济效益有所帮助，降低工程造价，提升建筑行业的竞争力。

3.2 与大数据、人工智能技术深度结合

大数据和人工智能技术的飞速发展，为 BIM 在工程造价领域的应用带来了新的机遇。未来，BIM 将与大数据、人工智能技术深度结合，实现造价管理的智能化和自动化。

大数据技术可给 BIM 给予丰富的数据支撑，借助收集以及整理诸多的历史项目造价数据、市场价格信息、材料性能参数等内容，构建起庞大的造价数据库，BIM 模型可直接从该数据库里获取所需的数据，以此提升造价计算的准确性以及效率，比如在开展工程量计算工作时，BIM 软件可依据模型的几何信息与属性信息，自动匹配数据库中的计价规则与单价，生成详细的造价清单。数据分析还可对造价数据展开挖掘，找出数据背后的规律与趋势，为造价决策提供科学的依据，举例来说，借助剖析不同地区、不同类型项目的造价数据，预测未来市场价格的变化趋势，帮助业主和承包商提前做好成本控制与风险管理^[1]。

人工智能技术可给 BIM 赋予智能分析以及决策的能力，机器学习算法可针对大量的造价数据展开训练与学习，构建造价预测模型以及风险评估模型，在项目前期阶段，借助这些模型可对项目的造价作出精准预测，为投资决策提供一定参考，在项目实施进程中，依靠对实时数据给予监测与分析，可及时发现造价风险因素，并且给出相应的预警以及建议。比如当材料价格波动超出一定范围时，系统可自动发出预警，提示相关人员采取措施去调整采购计划或者合同条款，另外人工智能技术还可达成造价文件的自动审核以及智能纠错，借助对大量标准造价文件进行学习，系统可自动识别文件里的错误以及不合理之处，提升审核效率与准确性。

随着大数据和人工智能技术的不断进步，BIM 与它们的结合将更加紧密。智能化的 BIM 造价管理系统将成为主流，能够自动完成造价计算、分析、预测和决策等工作，大大减轻造价人员的工作负担，提高造价管理的质量和效率。

3.3 标准化与规范化程度不断提高

当前阶段，BIM 于工程造价领域的运用依旧遭遇诸多问题，如标准未能达成统一状态、数据格式不符合规范要求等情况，这些问题为不同软件之间的数据交互以及共享造成了妨碍，对 BIM 技术的广泛应用形成了限制，在未来时期，随着行业持续发展以及技术逐步进步，BIM 于工程造价领域的标准化以及规范化程度会持续提升^[2]。

在模型标准范畴，会着手制定统一的 BIM 模型创建规范以及交付标准，详细明确模型的精细度要求、信息分类以及编码规则等内容，以此保障不同专业、不同阶段的模型可精准对接并集成，举例来说，针对建筑结构模型，规定墙、梁、板等构件的几何尺寸、材质属性等信息的表达形式，让设计、施工和造价等各方可依据统一的模型展开协同工作。在数据标准领域，会构建标准化的造价数据格式与交换标准，界定

数据字段的含义、数据类型、数据精度等方面，达成造价数据在不同软件系统之间的无缝传输与共享，比如制定统一的工程量清单数据格式，使得BIM软件、造价软件和财务软件等可相互读取并处理数据，防止数据重复录入以及格式转换错误。行业主管部门和行业协会会强化对BIM标准和规范的制定与推广工作，组织开展相关培训与宣传活动，提升行业人员对标准的认识以及应用能力，建立标准认证机制，对符合标准的BIM软件和项目进行认证与标识，引导市场选用符合标准的产品和服务，另外还会加强与国际标准的接轨，积极参与国际标准的制定与交流，推动我国BIM技术在工程造价领域朝着国际化方向发展。

标准化以及规范化的BIM环境可给工程造价管理带来更高效率与质量，不同参与方可于统一标准框架之下开展协作，以此减少信息传递误差以及沟通成本，达成造价管理的协同化与一体化^[3]。

3.4 绿色造价管理应用拓展

随着全球对环境保护和可持续发展的重视，绿色建筑理念逐渐深入人心。绿色造价管理作为绿色建筑的重要组成部分，旨在通过合理控制工程造价，实现建筑项目的经济效益和环境效益的双赢^[4]。未来，BIM在绿色造价管理中的应用将不断拓展。

在绿色建筑的设计阶段，BIM模型可将建筑的能耗分析、采光分析以及通风分析等功能给予集成，帮助设计师对建筑方案加以优化，以此降低建筑的能源消耗以及对环境所造成的影响，借助对不同绿色建筑材料和设备展开造价分析，挑选出性价比高的产品，达成绿色建筑的经济性目标。比如说，运用BIM模型针对太阳能光伏系统的安装位置以及发电效率开展模拟分析，再结合光伏系统的造价与发电收益，评估其经济可行性，为绿色建筑的设计提供决策方面的依据，在绿色建筑的施工阶段，BIM模型可与施工过程模拟技术相结合，对施工方案进行优化，减少施工过程里的资源浪费以及环境污染情况。凭借模拟施工过程，合理安排施工顺序以及施工进度，防止施工机械出现闲置以及材料出

现二次搬运的现象，降低施工成本以及对环境的影响，并且BIM模型还可对施工过程中的废弃物进行管理与监控，实现废弃物的分类回收以及再利用，提升资源利用效率，在绿色建筑的运营阶段，BIM模型可为建筑的设施管理以及能源管理提供支持。借助集成建筑的设备运行数据以及环境参数，达成对建筑设备的实时监控以及智能控制，降低能源消耗以及运营成本，例如利用BIM模型对建筑的空调系统进行优化控制，依据室内外温度、湿度等参数自动调节空调的运行状态，提高能源利用效率。

随着绿色建筑市场持续拓展以及绿色造价管理理念推广，BIM于绿色造价管理里的应用会变得日益广泛，它可给绿色建筑全生命周期造价管理给予全面且准确的信息支撑，促使建筑行业朝着绿色、可持续的方向迈进^[5]。

4 结语

综上所述，BIM在工程造价领域的应用已取得一定成果，有效改善了传统造价管理的弊端。展望未来，全生命周期造价管理深度融合、与新兴技术结合、标准化规范化提升以及绿色造价管理拓展等趋势，将为工程造价管理带来质的飞跃。建筑行业各方应积极拥抱BIM技术，加强合作与创新，共同推动工程造价领域向智能化、精细化、绿色化方向发展，以适应日益复杂多变的市场环境。

参考文献

- [1] 蔡明俐,马玉会. 数字化背景下BIM技术在建筑工程全过程造价管理中的应用 [J]. 城市建筑, 2025, 22 (16): 126-128.
- [2] 钟诗睿,朱逸夫. 地铁工程造价咨询中BIM技术的应用与效益评估 [J]. 工程建设与设计, 2025, (15): 163-165.
- [3] 丰倩倩. BIM技术在建筑工程造价数字化应用的探索与实践 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (21): 37-39.
- [4] 王静仪,徐枫. 住宅建筑工程造价审核方法研究——基于BIM 5D技术 [J]. 中国招标, 2025, (07): 187-189.
- [5] 姚金环. BIM技术赋能工程造价管理的多维度分析与应用探索 [J]. 价值工程, 2025, 44 (19): 110-113.

Research on the Causes and Control Strategies of Concrete Cracks

Wuyilang Zhang Xiaohua Wu*

1. Rugao Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226500, China
2. Rugao Municipal Water Conservancy Hub Management Center, Nantong, Jiangsu, 226500, China

Abstract

Concrete cracking is one of the common problems in construction engineering, which seriously affects the safety and durability of structures. This article combines specific engineering examples to systematically analyze the causes of concrete cracks from five dimensions: design, materials, mix proportion, construction and maintenance, and use. Targeted control measures such as design optimization, material selection, mix proportion adjustment, and construction management are proposed. Research has shown that through the coordinated implementation of multiple links and the implementation of comprehensive control strategies, the occurrence rate of concrete cracks can be effectively reduced, providing reliable references for the prevention and control of concrete cracks in engineering practice and having important significance for ensuring engineering quality.

Keywords

concrete cracks; Cause analysis; Control measures; engineering application

混凝土裂缝成因与控制策略研究

张武一郎 吴小华*

1. 如皋市水利建筑工程有限公司, 中国·江苏南通 226500
2. 如皋市水利枢纽管理中心, 中国·江苏南通 226500

摘要

混凝土裂缝是建筑工程中常见的问题之一, 这一现象的产生严重影响结构的安全性与耐久性。本文结合具体工程实例, 从设计、材料、配合比、施工养护及使用五个维度, 系统地分析混凝土裂缝的成因, 针对性地提出设计优化、材料优选、配合比调整、施工管控等一系列控制措施。研究表明, 通过多环节协同落实以及综合控制策略的实施, 可有效降低混凝土裂缝的发生率, 为工程实践中混凝土裂缝的防治提供可靠参考, 对保障工程质量具有重要意义。

关键词

混凝土裂缝; 成因分析; 控制措施; 工程应用

1 引言

在建筑工程中, 混凝土因抗压强度高、可塑性强、成本较低而广泛应用, 但其裂缝问题普遍存在, 据统计, 多数混凝土结构在施工或服役初期会出现不同程度裂缝。这些裂缝不仅破坏外观, 还削弱结构密实性, 使水分、腐蚀性介质侵入, 加速钢筋锈蚀与混凝土劣化, 降低结构承载能力和耐久性, 缩短工程寿命。如皋多座涵闸除险加固工程中, 裂缝问题尤为突出。涵闸作为水利关键构筑物, 长期受水压力、

温度变化、地基沉降等作用, 裂缝易引发渗漏、结构损坏。本文结合该工程实际, 梳理裂缝成因并提出控制策略, 为同类工程提供支撑与指导。

2 混凝土裂缝成因分析

混凝土裂缝是设计、材料、配合比、施工养护及使用等因素共同作用的结果, 不同成因导致的裂缝在形态、分布及危害程度上存在差异, 明确具体成因是采取有效控制措施的前提。

2.1 设计原因

混凝土结构裂缝多源于设计疏漏, 结合如皋涵闸工程案例, 核心成因如下:

应力集中: 构件尺寸突变、转角无过渡致局部应力集中, 超混凝土抗拉强度引发裂缝, 如闸室构件因断面过渡不合理出现该类裂缝;

【作者简介】张武一郎(1988-), 男, 中国江苏南通人, 本科, 工程师, 从事工程施工、工程技术管理等水利相关工作研究。

【通讯作者】吴小华(1978-), 男, 江苏南通人, 汉族, 本科, 工程师, 从事水利工程生产运行管理方面的研究。

预应力不当：预应力位置偏心、应力值失衡破坏内部平衡，涵闸启闭机房预应力梁因设计偏心，施工后出现纵向裂缝；

构造钢筋不合理：构造钢筋不足或过粗，降低对混凝土收缩的约束，涵闸部分墙板因钢筋不足，表面现细小收缩裂缝；

收缩变形考虑不足：混凝土硬化收缩时，未设伸缩缝、后浇带，约束产生内应力超抗拉强度致裂；

混凝土等级过高：盲目选高等级增水泥用量，提升水化热与收缩量，增加裂缝风险。

2.2 材料原因

原材料质量直接影响混凝土性能，材料问题会显著增加裂缝概率，结合如皋涵闸案例进行分析，总结原因如下：

集料含泥量与级配问题：集料含泥量高吸附水分、级配不良(如间断级配)增空隙，均需更多水泥浆，加收缩诱裂，涵闸初期部分集料含泥量超标致表面收缩裂缝；

骨料粒径与形态影响：骨料粒径小、比表面积大，或针片状含量高，会增水泥用量、降密实性，加大收缩与裂缝可能；

外加剂与掺和料不当：外加剂类型/掺量错、掺和料质量/掺量不合理，影响混凝土稳定性，如某批次因外加剂掺量高现异常收缩裂缝；

水泥品种与等级影响：矿渣硅酸盐水泥收缩大于普通硅酸盐水泥，涵闸用前者的构件裂缝率更高；水泥等级高、细度细，或混凝土强度等级高，水化热大、脆性强，更易开裂。

2.3 混凝土配合比设计原因

混凝土配合比不合理会直接降低抗裂性，其中存在的主要问题如下：

水泥选用不当：未依工程特点选水泥，如大体积混凝土用快硬高等级水泥，易因水化热高引发温度裂缝；

水灰比过大：降低密实性与强度，增收缩量，且施工中部分班组擅自调大，致质量下降开裂；单方水泥/用水量高：前者水化热与收缩大，后者降强度增干燥收缩，均提裂缝概率；砂率与和易性失衡：砂率不当、水灰比不合理，致混凝土离析、泌水，增收缩引发裂缝；

膨胀剂掺量错：过少难补偿收缩，过多致混凝土膨胀过大，产生膨胀裂缝。

2.4 施工及现场养护原因

施工过程与现场养护是裂缝产生的关键环节，操作不当或养护缺失会直接诱发裂缝，问题总结如下：

振捣质量不佳：振捣棒插入不当、漏振、过振或抽撤过快，影响混凝土密实性与均匀性。漏振致局部密实度不足、强度降低，过振使集料下沉、水泥浆上浮形成分层，均易引发裂缝，涵闸部分构件因振捣不规范出现蜂窝、麻面及伴随裂缝；恶劣环境下浇筑：高空浇筑时风速大、烈日暴晒，加速表面水分蒸发，造成内外收缩不均，产生表面收缩裂缝；大体积混凝土未二次抹面：浇筑后表面因水分蒸发产生塑性收缩，未二次抹面无法消除早期微裂缝，后续易扩展为宏

观裂缝；温度控制不到位：大体积混凝土水化热计算不准、降温及保温措施不足，致内部温度过高或内外温差过大，产生温度应力，超抗拉强度时引发深度甚至贯穿性裂缝，涵闸部分大体积混凝土底板因此出现多条温度裂缝；养护措施缺失：浇筑后未及时覆盖、浇水养护，导致早期脱水、表面水分快速散失，产生收缩裂缝；养护时间不足也会影响强度与抗裂性能；模板拆除不当：拆模过早（强度未达标），构件无法承受荷载易生拆模裂缝；拆模顺序、操作不合理，致构件受力不均引发裂缝；预应力张拉不当：现场超张、张拉位置偏心，使构件内部应力分布不均，超抗拉强度引发张拉裂缝。

2.5 使用原因（外界因素）

混凝土结构服役期受外界因素影响易生裂缝，结合案例总结如下：

基础不均匀沉降：地质差异、地基处理不当致基础沉降不均，构件产生附加应力超抗拉强度，多为斜向/竖向贯通裂缝，如皋部分涵闸因长期使用基础沉降，闸室构件出现此类裂缝；**使用荷载超负：**实际荷载超设计值，构件内力增大，如涵闸启闭设备长期超载，承重构件出现弯曲裂缝；**野蛮装修改造：**拆承重墙、凿洞等破坏受力体系，局部应力集中引发裂缝，危及结构安全；**周围环境侵蚀：**长期处于酸、碱、盐环境，介质侵入与水泥石反应，致强度降、体积变，水利涵闸因水质腐蚀易生侵蚀裂缝；**意外事件影响：**火灾高温使混凝土脱水、强度降，产生温度裂缝；轻度地震致构件受冲击，产生振动裂缝，均影响结构安全。

3 混凝土裂缝控制措施

针对上述裂缝成因，需从设计、材料选择与配合比设计、现场操作等多环节入手，采取综合控制措施，降低裂缝发生率，保障混凝土结构质量。

3.1 设计方面控制措施

设计是预防混凝土裂缝的源头，需通过优化方案提高结构抗裂性能：

避免应力集中，优化结构断面：设计尽量规避断面突变，无法避免时增设加强筋、设过渡圆弧。如皋涵闸后续对闸室构件突变部位加加强筋，大幅降低应力集中裂缝率；

推广补偿收缩混凝土技术：掺膨胀剂以膨胀效应补偿收缩，减少收缩裂缝，需依工程特点选膨胀剂类型与掺量，实践抗裂效果显著；

重视构造钢筋配置：充分发挥构造钢筋抗裂作用，尤其楼面、墙板等薄壁构件，按尺寸、受力与收缩特性选合适直径和数量，增强收缩约束；

优化混凝土强度等级与龄期：大体积混凝土用 60 天龄期强度设计，可比 28 天龄期少单方用灰量，降水化热与收缩；同时掺有效掺和料，改善性能提抗裂力。

3.2 材料选择和混凝土配合比设计方面控制措施

原材料质量与配合比设计直接决定混凝土性能，需严格把控：

合理选择水泥：依结构要求、环境及施工条件选水泥，避免用早期强度高、水化热大的品种。如大体积混凝土宜用低热矿渣硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥以降低水化热；对早期强度要求低的构件，可选粉煤灰水泥减少收缩。

优选集料：选级配优良的砂、石，严控含泥量达标。粗集料用连续级配，细集料用中砂，提升混凝土密实性、减少收缩。如皋涵闸后续施工选用此类集料，裂缝发生率显著降低。

科学选用外加剂与掺和料：二者可改善混凝土性能，掺和料能降水泥用量、减水化热，外加剂可优化和易性、调凝结时间、提抗裂性。设计配合比时，需按工程需求选类型，通过试验定最佳掺量。

精准控制膨胀剂掺量：补偿收缩混凝土中，需考量膨胀剂品种与掺量的膨胀效果，经大量试验确定最佳值，确保有效补偿收缩且不因膨胀过大生裂缝。

动态调整配合比：设计人员深入现场，结合浇捣工艺、操作水平、构件截面选合适坍落度；依砂、石质量变化及时调施工配合比，保证混凝土性能稳定，同时协助做好养护，助力强度发展与抗裂性能提升。

3.3 现场操作方面控制措施

现场施工操作是控制混凝土裂缝的关键，需规范流程、强化质量管控：

规范混凝土浇捣：浇捣时振捣棒应快插慢拔，根据混凝土坍落度掌握振捣时间，避免过振或漏振。提倡采用二次振捣、二次抹面技术，二次振捣可排除内部水分和气泡，提高密实性；二次抹面可消除表面早期微裂缝，减少收缩裂缝。如皋涵闸工程后续施工中，全面推行该技术，混凝土表面裂缝明显减少。

加强混凝土养护：混凝土早期养护对预防裂缝至关重要。浇筑完成后，应及时采取覆盖、浇水等养护措施，保证混凝土早期少产生收缩。养护时间根据混凝土类型和环境条件确定，一般为 14-28 天；大体积混凝土有条件时宜采用蓄水或流水养护，通过水的热传导作用控制内外温差，减少温度裂缝。

做好温度控制：厚大体积混凝土施工前，需准确计算水泥水化热，制定合理温度控制方案。施工中可采取埋设散热孔、通水排热等降温措施，避免水化热高峰集中，降低内部最高温度；浇捣成型后，及时采取蓄水、覆盖薄膜、湿麻袋等保温措施，防止内外温差过大引发温度裂缝。

避开恶劣天气浇筑：避免在雨中或大风中浇灌混凝土。雨天浇筑会增加用水量，降低混凝土强度；大风天气会加速表面水分蒸发，产生收缩裂缝。若遇恶劣天气，应暂停浇筑，待天气好转后继续，并对已浇筑混凝土做好防护。

及时回填地下结构：地下结构混凝土强度达设计要求后，尽早进行回填土施工。回填土可对混凝土结构起到约束作用，减少收缩变形，有利于减少裂缝产生。

控制夏季浇筑温度：夏季气温高，混凝土入模温度和

内部温度易升高，增加温度裂缝风险。施工中应控制浇捣温度，采用低温入模、低温养护措施，必要时用冰块降低骨料、拌合水温度，从而降低入模温度，减少温度裂缝。

4 工程实践应用效果

以皋境内某涵闸除险加固工程为例，该工程初期施工因未重视混凝土裂缝控制，部分闸室底板、闸墩等构件出现不同程度收缩裂缝和温度裂缝，影响工程质量与结构安全。针对这一问题，工程团队结合前文裂缝成因分析与控制措施，对后续施工进行全面优化：

设计上，闸室构件断面突变部位增设加强筋，混凝土强度以 60 天龄期值为设计依据，大体积混凝土推广补偿收缩混凝土技术。材料选择上，选用级配优良、含泥量达标的集料，优先用普通硅酸盐水泥，掺适量粉煤灰掺和料与缓凝型外加剂。配合比设计中，优化水灰比与单方水泥用量，通过试验确定膨胀剂最佳掺量。现场操作时，规范振捣工艺，推行二次振捣与二次抹面，加强早期养护，大体积混凝土埋设冷却水管并覆盖保温控温。实施后，涵闸后续施工的混凝土构件裂缝发生率大幅降低，仅出现少量宽度 < 0.1mm 的表面微裂缝，且后期养护可自行闭合。工程完工运行监测显示，无新裂缝产生，结构性能稳定，满足设计与使用要求，印证了针对性综合控制措施能有效解决混凝土裂缝问题、保障工程质量。

5 结语

随着建筑行业发展与技术创新，混凝土裂缝控制技术将不断进步。未来可从三方面深入研究与实践：一是加强自修复混凝土、纤维增强混凝土等新型抗裂混凝土材料的研发与应用，通过提升材料性能从根本上提高混凝土抗裂能力；二是引入智能化监测技术，在混凝土结构中植入传感器，实时监测内部温度、应力、应变等参数，及时预警裂缝风险，实现动态控制与管理；三是推动建筑信息模型（BIM）技术在混凝土裂缝控制中的应用，通过 BIM 模型模拟优化混凝土浇筑、养护等施工过程，提前发现潜在裂缝风险，制定更科学合理的施工方案。通过持续技术创新与实践探索，混凝土裂缝问题将得到更有效解决，为建筑工程质量提升和行业可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] GB 50496-2018, 大体积混凝土施工规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2018.
- [2] 王立杰，混凝土施工中裂缝成因及控制措施研究[J].城市开发 . 2025 (08) : 141-143
- [3] 李世昌，翟炜，陈东，陈秋香，田晓阳，超长环形混凝土结构温度控制对混凝土裂缝影响的分析[J].建筑技术 . 2022 ,53 (07) : 861-864.
- [4] 张鲁妹，农田水利工程混凝土裂缝原因及处理措施分析[J].农业开发与装备 . 2021 (06): 85-86.

Application of intelligent operation and maintenance technology of building fire control facilities in aerospace buildings

Pei Mao Hanli Zheng

China Aerospace Construction Group Co., Ltd., Beijing, 00071, China

Abstract

With the advancement of aerospace engineering, the scale and functionality of aerospace buildings have become increasingly complex, imposing higher demands on the reliability and operational efficiency of fire protection systems. This paper explores the application of intelligent operation and maintenance (O&O) technology in aerospace architecture, analyzes the unique characteristics of fire safety systems in these facilities and the limitations of traditional maintenance methods, and elaborates on the technical framework and key technologies including IoT, big data, and artificial intelligence. Practical case studies demonstrate the effectiveness of these technologies, while future development trends are outlined. Intelligent O&O technology can significantly enhance the reliability and operational efficiency of fire protection systems in aerospace buildings, ensuring robust fire safety compliance.

Keywords

space architecture; fire control facilities; intelligent operation and maintenance; Internet of Things; big data

建筑消防设施智能化运维技术在航天建筑中的应用

毛培 郑晗犁

中国航天建设集团有限公司，中国·北京 100071

摘要

随着航天事业的发展，航天建筑的规模和功能日益复杂，对消防设施的可靠性和运维效率提出了更高要求。本文探讨了建筑消防设施智能化运维技术在航天建筑中的应用，分析了航天建筑消防特点及传统运维的不足，阐述了智能化运维技术架构及关键技术，包括物联网、大数据、人工智能等，并结合实际案例说明其应用效果，最后对未来发展趋势进行了展望。智能化运维技术能有效提升航天建筑消防设施的可靠性和运维效率，保障航天建筑的消防安全。

关键词

航天建筑；消防设施；智能化运维；物联网；大数据

1 引言

航天建筑是航天科研、生产和试验的关键场所，其内部按照使用功能或安装有许多精密的仪器、珍贵的科研器材，部分建筑内使用或存储航空燃料等易燃易爆品。航天建筑具有价值高、风险大、功能复杂特性。如果发生火灾等事故，不仅会给人员生命带来无法估计的伤害，还会给我国的航天事业带来巨大的影响。所以，保证航天建筑的防火安全具有十分重要的意义。建筑消防设施是防火的重要保证，它的正常运转与有效维护，对预防与扑救火灾具有重要意义。

【作者简介】毛培（1979–），男，中国陕西宝鸡人，本科，工程师，从事安全咨询、评估和评价研究。

2 航天建筑消防特点及传统运维的不足

2.1 航天建筑消防特点

2.1.1 建筑结构与功能复杂性

航天建筑涉及航天器总装车间、发射控制中心、航天研发实验室等不同类型，其建筑形态具有特殊性，空间布局复杂，内部功能分区细化等特点。比如，空间大、结构复杂的航天器总装车间多为装配和调试场所；而发射与控制中心，由于其对电子设备的工作环境有着苛刻的要求，所以设置了许多精密的控制室。由于建筑与功能的复杂性，导致了火灾过程中烟气与火的传播路径难以准确把握，增加了消防救援的难度。

2.1.2 消防安全性要求极高

航天建筑中的科学研究活动，不仅涉及众多高科技设备，还包含着大量的科学研究资料与危险性较大的航天燃料

等等。一旦发生火灾，不但造成重大的经济损失，更有可能摧毁数年来的研究成果，严重时还会对我国的航天战略部署产生重大的影响。比如，在试验过程中，火箭发动机试验台周围贮存着大量的高能推进剂，如果发生火灾，其爆炸强度及火灾传播速度都会大大超过一般建筑物，对周围的设施及人身安全造成巨大的危害。所以，航天建筑的消防安全需求比一般的建筑物要高得多^[1]。

2.1.3 消防设施种类多且技术先进

为了适应航天建筑对防火安全的要求，必须配置多种类型、技术先进的消防设施。除传统的火灾自动报警系统、消火栓系统、自动喷水灭火系统之外，气体灭火系统（例如七氟丙烷灭火系统用于电子设备机房的防护）、细水雾灭火系统（适合水渍损失严重的地区）和专用的航天特种燃料的灭火设备。同时，该系统通常与空间内其它自动化系统（环境控制、设备监测等）紧密结合，构成了一个复杂的、一体化的消防控制系统。

2.2 传统消防设施运维存在的问题

2.2.1 人工巡检效率低且准确性有限

传统的航天建筑消防设备运行维护以人工方式进行。巡查员要按规定的线路，一个一个的检查每一个消防设施，其中有检查仪器的外观是否完好，仪器读数是否正常，是否有手动试验的功能。但空间建筑规模大，消防设施分布广、类型多，人工巡视工作量大，极易造成巡检人员疲劳，造成漏检、误检等问题。比如，在大型空间飞行器总装车间，对火灾设施进行一次全方位的巡视，往往要花上几个小时甚至更久的时间。

2.2.2 故障发现与处理不及时

在传统的运行管理方式下，消防设备的故障往往是由巡检人员及时发现，或在设备出现重大故障并发出警报时才能发现。由于消防管线的内部腐蚀和线路内的隐性短路等隐蔽的故障，人工巡检难以发现。此外，一旦出现问题，必须由巡查员层层上报，并由专门的维护人员赶赴现场检修，这一过程往往耗费大量时间，且在不能及时抢修的情况下，消防设备可能会出现故障或局部故障，从而使火灾风险大大增加。例如，某航天研发实验室的火灾自动报警系统中的一个烟雾探测器出现故障，但由于未及时发现，在一次小型电气火灾初期未能及时发出报警信号，险些造成更大损失^[2]。

2.2.3 缺乏有效的设施运行状态监测与评估

传统的运维管理模式很难实时、全面地监测消防设施的工作状态，不能精确把握设备的性能变化规律。巡检人员仅能获得某个时间点上的设备状态信息，而不能获得设备在各种工作状态下的动态操作数据。目前，我国消防安全管理水平普遍偏低，且缺乏有效的管理手段，导致了火灾事故的发生和发展。这不但会加大维护费用，而且由于设备的故障，也会造成火灾安全的隐患。比如，在传统的工作方式下，消防泵作为消防给水系统的核心部件，不能对其流量、压力、

电机电流等进行实时监测，很难对其工作状态进行准确的判断，从而导致其在火灾过程中故障，从而降低了灭火效果。

3 建筑消防设施智能化运维技术架构

3.1 感知层

感知层负责对消防设备的各种操作及环境信息进行收集，是智能维护与维护的关键。在航天建筑中，许多防火设备都是通过在火灾现场安装大量的传感器来完成的。比如，将压力传感器、流量传感器和振动传感器安装在消防水泵上，对泵的出口压力、流量和振动进行实时监控，以此来确定泵的运行状态，有没有汽蚀、叶轮磨损等问题。将温度、烟雾、瓦斯等传感器集成到探测器中，不但可以精确地检测到火灾时的温度、烟气浓度及有害气体组成的变化，还可以监控探测器自身的工作状况，例如是否有灰尘遮挡，电池电量是否足够等。

3.2 传输层

传输层主要是将感知层获取的数据安全快速地传送给数据处理中心。在航天建筑的智能维护管理系统中，一般都是通过各种通信技术进行组合构成的。对距离较近、数据传输量较大的传感器节点，比如同一楼层或同一区域内的消防设备，可以通过以太网络的方式与之相连。但是，有些传感器的分布比较分散，布线也比较困难，例如，在厂房的高处或者偏僻的地方，就需要使用无线网络、蓝牙、LoRa 等无线通信技术。在这些应用中，无线网络适合小范围、高速率数据传输的场合；蓝牙技术可以在小范围、小功率的设备中进行数据传输，比如某些便携式火灾探测装置和移动电话应用程序等；LoRa 具有远距离、低功耗、大容量等优点，可在大面积区域进行无线通信，特别适用于航天建筑等边远地区的灭火设备的数据传输。

3.3 数据层

数据层是智能维护与管理的核心部分，其功能是存储、管理、分析来自传输层的数据。在航天建筑消防设施的智能运维管理中，利用分布式文件系统（HDFS）、NoSQL 数据库（如 MongoDB）等大数据存储技术，实现对消防设备运行状态及相关环境数据的有效存储。HDFS 可以在多个结点上分布式地存储数据，并且容错能力强，易于扩充，适用于大规模结构化或无结构化数据的存储；同时，MongoDB 还具备了灵活的数据模式，以及良好的查询效率，可以较好地解决消防设备在运行中所产生的各类复杂的数据。通过采用数据清洗和预处理等方法，对数据进行去噪、去重、格式转换等处理，改善数据品质，为下一步的数据处理奠定坚实的数据基础。然后，利用大数据分析与机器学习等方法，对消防设施运维数据进行深度挖掘与分析。

3.4 应用层

应用层提供了直观、便捷的操作接口，并提供了大量的功能性服务，从而达到了对消防设备进行智能维护和管理

的目的。在航天建筑中，应用层主要由消防设备监测平台、故障诊断预警系统、维护管理系统和应急指挥系统组成。通过可视化的接口，可以将消防设施的运行状况、地理位置分布和工作参数等信息显示出来，使用者可以在任何时候通过计算机、平板、手机等终端设备，随时了解消防设施的运行状况。

同时，该系统还可以对故障进行智能化的分析，给出维护意见及解决方法，极大地减少了故障的处理周期。维护管理制度是对消防设备维护计划的制定，维护任务的分配，维护记录的管理。该系统能够依据设备的工作状态和维护周期，自动产生维护方案，并向相关的维护人员进行维护工作，在维护结束后，将维护记录输入到系统中，从而达到对维护工作的信息化管理。

4 智能化运维关键技术

4.1 物联网技术在消防设施监测中的应用

物联网将各类消防设备接入到一个巨大的网络中，可以对各个消防设备进行全方位的监测与监控。在航天建筑中，将各种消防设施的传感器、控制器等设备，如消防自动报警系统、消火栓系统、自动喷水灭火系统、气体灭火系统等，都与物联网相连接。比如，在消防栓系统中，可以将智能监控设备安装到消火栓箱中，并通过物联网技术与监控中心相连，对消火栓的阀门状态、水压状态和是否被非法开启等进行实时的监控。一旦发现消防栓的阀门关闭或出现压力异常，该系统可即时将警报消息传送给有关人员，以便于对消防栓的检修与处置，保证消火栓系统在发生火灾时仍能正常工作^[3]。

4.2 大数据分析助力消防设施故障预测与健康管理

大数据分析是航天建筑消防设备智能维护的重要手段。采用数据挖掘、机器学习等方法，对消防设施的运行状态、维护记录、故障历史等进行采集与分析，构建火灾设施故障预警与健康管理系统。比如，通过长时间的监控与分析，对消防泵的启动次数、运行时间、流量、压力、电机电流等参数进行长时间的监控与分析，并利用时间序列分析、回归分析等方法，寻找各参量间的内在联系与变化规律。在水泵运行过程中，如果发现一些参数发生了不寻常的变化，或者超出了正常值，那么就可以对泵的运行状态进行预报，比如电机过热、叶轮磨损、轴承损坏等。

同时，通过对火灾现场监测数据的分析，实现对火灾现场火灾环境的监测，为火灾事故的预防与控制提供科学依据。对运行状态较好、故障风险小的设备，可适当延长维护时间，减少维护费用；对一些运行状态差、故障频繁的设备，

也要加大监控与维护的力度，以保证设备的安全性、可靠性。

4.3 人工智能技术实现消防设施智能决策与控制

随着人工智能技术的不断发展，航天建筑消防设备维护管理工作取得了突破性进展。在消防设施的决策和控制中，人工智能可以进行智能化的判定、自动化控制，从而提升消防设备在面对火灾等突发事件时的快速反应与处置能力。比如，在火灾自动预警系统中，采用人工智能的图像识别与深度学习等方法，对视频监控图像进行实时分析，不但可以对火灾的特征进行快速、准确的辨识，而且可以对火灾的规模、发展趋势等做出预测。与传统的火警报警系统相比，该方法更加准确、可靠，可以降低误报率。

同时，当火灾发生时，通过对火灾地点、规模、人员分布等的分析，实现对火灾的最优控制。通过与消防设施的联动控制，使对应的灭火装置（如喷水灭火系统、气体灭火系统等）及疏散指示装置（如紧急照明、疏散指示标志等）的智能化开启，并针对实际情况进行动态调整，从而达到有效灭火、疏散疏散的目的。另外，将人工智能技术运用到消防设备的日常巡视、维护等工作中，具有广阔的应用前景。采用智能机器人或者无人机，携带各种探测装置，根据预先设定的路径和步骤，巡视消防设施，采用人工智能的图像识别与数据分析技术，对设施外观是否完好、有无故障等进行自动检测，并将试验结果及时传送至监测中心。该方法不但可以有效地提高检测的效率与精度，而且可以减少人员的劳动强度与风险^[4]。

5 结语

在航天建筑的实际应用中，已经证明了智能运维管理的价值，构建智能感知和数据驱动的运行维护系统，实现对消防设施状态的实时监控、故障的精确预警和快速处理。在未来，随着人工智能和物联网技术的不断迭代，智能运维的智能化和协同性将会不断地提升，从而不断地优化火灾管理的效率和准确性。同时，加强专业人员培训、健全标准规范，促进相关技术与航天建设全寿命周期的深度匹配，为我国航天事业的安全发展提供更加可靠的消防保障。

参考文献

- [1] 吴天昊. 建筑消防设施管理缺位问题分析及对策[J]. 中国消防, 2023, (S1):169-171.
- [2] 王占国. 高层建筑消防设施监督检查中的优化策略[J]. 水上安全, 2023, (10):136-138.
- [3] 王寒月. 加强建筑消防监督管理研究[J]. 消防界(电子版), 2023, 9(16):58-60.
- [4] 李树超, 建筑防火及消防设施快速智能化检查方法研究. 天津市, 应急管理部天津消防研究所, 2021-12-30.

Safety evaluation of crack propagation control and reinforced concrete reinforcement of highway bridge cap girder

Lan Zhang

湖北省级交通规划院有限公司，武汉，430051，中国

Abstract

With the extended service life of road and bridge structures, beam cracks in highway bridge girders have become increasingly prevalent, posing critical challenges to structural safety and durability. This study focuses on crack control technologies and external wrapped reinforced concrete (ECRCC) reinforcement techniques. The research begins by analyzing root causes of cracking, including material properties, environmental factors, and load effects. Advanced monitoring technologies are then employed to dynamically track crack propagation, enabling real-time assessment of crack development and formulation of targeted solutions. ECRCC technology has gained widespread adoption due to its operational convenience and cost-effectiveness. Field application studies demonstrate that ECRCC reinforcement significantly enhances girder load-bearing capacity and extends service life. Experimental verification confirms that this method effectively improves girder performance, ensuring more durable service.

Keywords

高速公路；盖梁；裂缝扩展控制；外缠钢筋混凝土；结构安全评价

公路桥梁盖梁裂缝扩展控制与外包钢筋混凝土加固的结构安全评价

张榄

湖北省交通规划设计院股份有限公司，中国·湖北 武汉 430051

摘要

随着道路桥梁使用周期的拉长，公路桥梁盖梁裂缝现象越来越多，已成为影响桥梁结构安全性和耐久性的关键因素。本文主要研究盖梁裂缝控制技术和外缠钢筋混凝土加固技术。首先分析引起裂缝的根源因素，例如材料性质、环境因素、荷载影响等。然后采用前沿的监控技术对裂缝生长情况进行动态监测，以实现第一时间了解裂缝变化，提出对应解决方案。其次，由于外缠钢筋混凝土加固技术应用起来方便并且经济性好，所以得到广泛使用。通过各种现场应用实例研究试验，得出外缠钢筋混凝土加固方法提升盖梁承载能力和增加使用寿命的效能。最终检验结果表明外缠钢筋混凝土加固方法切实提升了盖梁承载能力，让盖梁的使用更耐久。

关键词

公路桥梁；盖梁；裂缝扩展控制；外包钢筋混凝土；结构安全评价

1 引言

随着中国高速公路的建设越来越多，作为交通基础设施部分的桥梁重要性愈加凸显，对于桥梁结构稳定度和使用可靠性的要求也越来越高。桥墩属于主要的桥梁结构元素，对桥墩抗力、耐久性的要求直接关乎桥梁结构的整体安全。桥墩在长期使用过程中，受多种环境因素影响，会出现裂缝，破坏桥梁结构功能，加大后期养护维修难度。因此，对裂缝的进一步发展进行外包钢筋混凝土方法的应用和加强变得十分必要。这种方法简洁通用，已经成为当前处理此类

问题的主要方法。本文主要进一步研究桥墩裂缝扩大的控制方法，说明外包钢筋混凝土的效果，并对此方法应用于建筑物安全的影响做综合评估，为实际工程中的应用提供基础和指导。

2 研究背景与意义

2.1 公路桥梁盖梁的功能及重要性

在现代交通中，没有任何结构像桥梁公路如此重要，桥的首要功能就是作为车辆及行人从地形地貌（河、溪、交叉路口等）间的通行保障。盖梁是公路桥梁墩柱顶部的关键水平构件，主要功能是支承、分布和传递上部结构（如主梁）传来的荷载，将其分散至下部墩柱和基础。其为上下部结构的连接枢纽，直接决定了支座的位置和桥梁的净空，影响桥

【作者简介】张榄（1987-），男，中国湖北襄阳人，硕士，高级工程师，从事桥梁养护与加固设计研究。

下通行能力。盖梁的强度和刚度保证了桥梁整体结构的稳定性和行车平顺性，是承受并传递车辆载荷的关键受力部位，其安全性与耐久性对全桥至关重要。随着交通量及车量的增大，使得公路桥梁受到的荷载及环境的负荷也在不断提高，对公路桥梁进行研究，加深对公路桥梁盖梁作用及特点的认识，从而提高公路桥梁的耐久性和安全性是非常必要的。

2.2 公路桥梁盖梁的影响与研究现状

在施工实践工作中，日益关注公路桥梁的设计工作，随着公路桥梁的建设越来越受到社会各界广泛重视，对公路桥梁盖梁施工、运营过程中存在的各项问题更加关注。根据近年来相关运营及检测资料可见，公路桥梁盖梁的施工质量好坏直接决定其各项性能，例如抗震性能、抗冲击性能、承载力等方面。因此，对于公路桥梁盖梁实际应用工作中产生的问题，例如开裂变形、下沉等问题，相关的研究也在不断深入发展。目前对桥梁盖梁的研究主要集中于材料性能、设计方案、施工方式等方面。同时，新检测技术的进步也给我们带来了关于桥梁健康状况研究的新思路与新方法。但还需要深入分析桥梁盖梁长时间运营期间性能衰减与其影响因素的问题，进而更好的提升桥梁的安全性能与耐用性能^[1]。

3 裂缝扩展控制

3.1 裂缝产生的原因

3.1.1 材料特性对裂缝的影响

一般情况下，对于桥面的建造使用来说，大多数都是由水泥、沙子等材质构建的。前期在选材、配比、物理化学特性等都会成为导致裂纹的因素。例如，混凝土的强度、弹性模量、收缩性、耐腐蚀性等等，它们均与裂缝的发生直接相关。若对不合适的材质选择或是施工过程中的不精细等原因，也会使得混凝土在凝结过程中出现非对称收缩性，从而产生缝隙。一旦材料的老化导致其自身的物理性能逐渐降低，也会提升裂缝发展的程度。因此，深入了解材料并恰当的选择就是有效地控制裂缝的有效方式^[2]。

3.1.2 环境因素与荷载影响

除去物质因素之外，其自身的自然条件起着重要的作用，如环境温度、湿度的改变、化学的腐蚀等都会损伤桥梁结构。而环境温度的迅速变化会让混凝土出现胀缩，会出现应力集中，导致开裂。加之车辆荷载对桥体的影响，在车流量特别是货车流量较大的地段，桥梁结构所承担的动静荷载较大，多数普通国道重载车辆长期处于超载状态，造成桥梁局部应力超限，使得混凝土表面出现裂缝等病害，所以考虑上述影响条件对预防结构物裂缝出现起着举足轻重的作用。

3.2 裂缝监测方法

3.2.1 传统监测手段

传统的裂缝检测方法主要有目测、测量裂缝大小以及深度、用裂缝尺等。虽然这种方法操作起来简单，而且十分

实用，但其准确性与公正性或多或少会受到人的主观性而影响。再加上这种方法通常只适用于定期维修过程中，并不具备及时的实时监测数据，因此对裂缝缺乏及时性监测，也因为这一系列因素让很多潜在的裂缝问题没有及时发现与及时维修，使得桥梁的安全性问题大大增加。

3.2.2 现代监测技术

随着科技的发展，一些新型的检测工具和技术应用到桥梁裂缝检测领域。无线传感器网络、光纤传感器、无人机技术应用到桥梁检测当中，可实现全天候实时监测覆盖，采用高精度方式检测出微裂变化，并将信息高效传输到监测中心。其中光纤传感器灵敏度高，对杂音有较强的耐受力，是检出裂缝变化重要的传感器。此外，无人机的应用，可实现人员投入量减少，检测效果增加。这种先进的检测技术对早期的察觉、掌握裂缝具有积极作用，必将成为以后桥梁检查、养护、管理的主要手段^[3]。

4 外包钢筋混凝土加固技术

4.1 外包加固技术的原理

外包钢筋混凝土加固技术是指根据“结构补强”的理念，在原混凝土构件的外部增加一定的钢筋及混凝土，提高原混凝土结构的强度以及开裂荷载限值。此外外包钢筋混凝土加固技术所具备的优点是方法简单、施工操作便捷，对环境影响较小，可以在较小程度上维持建筑物主体结构不被破坏的基础上改善其功能，并使建筑物满足现阶段建筑安全性、强度标准的承载力要求，除了用于桥梁隧道等大体量构筑物的维修之外，还可以用于房屋或商业用房等房屋建筑基础的改建、加固。

4.1.1 加固设计原则

加强设计的基本原则有适用性、安全性和经济性。首先，通过对原结构现状进行分析与评估，找到它的承载力状态以及存在的问题，为后续加固设计提供相关基础数据。其次，设计时要考虑荷载方式、应力特征及外界条件对设计的影响，以确保加固效果的可靠与加固体系的稳定，还要对造价进行核算，选择较为适合的材料及施工工艺等以确保方案的经济性。再次，最终通过对以上原则的综合应用，可以提升加固方案的可调性与可靠性^[4]。

4.1.2 施工技术要求

在运用外包技术的时候，良好的质量管理是保证强化该工程质量达标的前提，在施工前将基础工作做足，如清理基础以及材料的检查，以此来查验相关技术指标，了解是否可以达标。按照设计方案来进行钢筋铺设和水泥浆的灌注。在进行搅拌水泥浆时，必须要调节比例及流程，保证水泥浆的强度及密度达标。对天气温度、湿度变化也会给外包裹强带来一定的影响，如养生不到位可能导致裂缝产生或者其他保质问题。可见，项目的质量管理工作对于外包强化的质量影响至关重要，要采取合理措施保证强化工作的顺利进行。

4.2 应用实例分析

4.2.1 案例选择与分析

为了对该种外部混凝土加固使用效果进行更深入地研究，项目选择了一处真实案例进行验证，在某城市中一处运营达30年的桥梁，该桥梁某桥墩为过渡墩，其盖梁因为长时间的运营以及受交通量增加在盖梁大、小桩号侧出现严重的竖向、环向裂缝，其结构承载力大幅下降。经过相关检测、设计单位评估，专家组表示采取外部加强的方式进行加固可以恢复其功能，保证其耐久性。依据检测结果制定修复方案，发现采取在外部加钢筋混凝土的方式，对其提升抗拉以及抗剪力的效果。整个建设工程按照设计的施工规范开展工作，确保每一个环节做到严控质量^[5]。

4.2.2 加固效果评估

在加固项目完成后，还要对加固项目成果进行检查，检测所采用的方法的合理性及其应用的有效性，主要采用应力测试和裂纹检测等方法，来整体检测桥梁的承重能力和变形情况。通过该试验可以发现，桥梁经过加强后其承载能力大幅度提高，桥梁裂纹的增加情况得到了有效遏制，使桥梁的整体稳定性得到了显著的加强，经过收集该桥梁之后运营数据及定期对其检测结果，证明经过加强的桥梁完全可以接受当今的交通量，其整体功能也能够达到预期的效果。通过研究该案例，可以证明通过外部的钢筋混凝土加固的方法是可行性的，效果较好，其也能够被广泛地应用于提高桥墩盖梁耐久性等方面。

5. 结构安全评价

5.1 评价指标体系

5.1.1 结构性能指标

结构功能参数是建筑物结构安全性评价的根本点，主要包括结构的承受能力、刚度、弹性变形等。其中承受能力是最重要的结构安全性指标，通常采用若干个载荷作用下的试验结果进行评价；刚度反应的是一组在受力过程中出现的构件的变形量；而弹性变形能力反映了极端状态下结构的变位情况。抗震性能主要是指工程结构经受地震等突发性事件的评估。以上指标都能让工程师对结构在不同的环境条件下都能有所了解，对以后对其进行加强及保养奠定基础。

5.1.2 安全性分析方法

除此之外，安全性研究方法也是决定建筑安全的重要部分之一。关于安全性研究的方法比较常用的有极限状态法、可靠度分析法以及损伤鉴定法等。极限状态法主要是以结构所能承受的荷载来确定安全范围的同时，改变材料强度的比例与安全系数；可靠度分析法主要是运用统计学方法来分析结构在随机载荷下是否具备足够的稳定性，通过分析得出关于该结构崩溃的可能性以及产生风险的大小等各个方面问题的详细分析；损伤鉴定法主要是针对结构的健康进行

研究，对已存在的损伤进行定量分析。综合多种研究方法进行结构安全的客观评价与分析提供依据和测量标准。

5.2 实证研究

5.2.1 案例分析方法

对于既有结构试验来说，如何选取具有代表性意义的案例进行解析是极其重要的问题。本文选择了大桥中一处已经进行了加强的结构作为研究对象，首先进入基本数据信息的获取和评价阶段，比如设计文件、使用年限、现有的病害情况、维护现状及其后期的处治结果等；其次用前文讲述的评价功能参数和安全性的分析手段，对改造前和后的构造物进行一系列功能指标的全面分析，对比二者载荷性能和弹性性能等各项安全性能的提高情况。通过研究验证该加固处治方案的可靠性外，也能为将来的提升工程提供一定的借鉴。

5.2.2 结果与讨论

通过对实例研究，可以看到，通过外包加固的桥梁盖梁的荷载强度和抗剪能力都有明显增加，整个桥梁结构的稳定性也有显著提升，同时多年监测结果也表明，修缮以后的桥梁运行状态良好，没有新增裂缝和变形，这值得在今后类似项目开展中参考借鉴。而在本文的研究中，也对修缮期间的一些关键因素例如材料、施工方法与设计合理性等进行了探讨，并提出了在实际运作中要注重这些要点从而以达到最好的修缮效果，而针对今后的结构安全诊断与加固技术研究，还要有更多的先进且合理的手段来解决更加复杂的课题。

6 结语

通过对公路桥墩盖梁裂缝增长监控和外包钢筋混凝土加强的研究，得出：第一，由于其构造、环境、荷载等因素的影响，造成裂开的因子较多，因此，全方位、针对性的监控成为发现和控制早期裂缝的关键。第二，外包钢筋混凝土加强有效控制了裂缝扩展，提高了结构的安全度，可大幅提升桥墩盖板承载力和寿命。第三，本课题的研究结果为以后桥墩盖梁的检养和加固提出了参考依据，也对今后深入进行相关研究提出了建议。

参考文献

- [1] 孙浩然,张婉儿,刘志强.公路桥梁裂缝监测技术研究[J].建筑结构学报,2023(15): 78-82.
- [2] 王晓东,李海峰,陈丽华.外包钢筋混凝土加固技术在桥梁中的应用[J].土木工程与管理,2023(21): 45-50.
- [3] 赵明亮,杨紫馨,朱思敏.裂缝扩展行为对桥梁结构安全性的影响分析[J].结构工程,2024(3): 12-16.
- [4] 刘勇,谢雅琴,孙子辰.加固技术在桥梁维护中的实践研究[J].现代建筑工程,2023(19): 55-60.
- [5] 陈鸿铭,梁佳妮,魏建国.钢筋混凝土结构裂缝控制与加固方法探讨[J].工程建设与管理,2024(6): 88-92.

Research on the application of BIM technology in the dynamic control of construction schedule

Weiyu Cai

China Coal Special Borehole Co., Ltd., Anhui, Hefei, 230001, China

Abstract

In the digital transformation of the construction industry, the need for refined construction progress control has become increasingly prominent. Traditional methods relying on 2D drawings and manual management suffer from information gaps and delayed responses, leading to significant project schedule risks. This paper explores the practical value of BIM technology in dynamic construction progress control. The theoretical analysis examines how BIM's visualization and integration capabilities align with real-time management requirements. Practical applications demonstrate four-dimensional (4D) progress modeling, real-time data tracking, deviation alerts, and multi-party collaboration. Through a super high-rise project case study, BIM technology is validated to effectively shorten timelines, reduce costs, and enhance coordination efficiency. Targeted optimization strategies are proposed to address cost, talent, and standardization bottlenecks in technical implementation, providing practical references for advancing digital upgrades in construction progress management.

Keywords

BIM technology; construction; schedule control; dynamic management; collaborative optimization

BIM 技术在建筑施工进度动态管控中的应用研究

蔡伟钰

中煤特殊凿井有限责任公司，中国·安徽 合肥 230001

摘要

在建筑行业数字化转型进程中，施工进度管控的精细化需求日益凸显。传统模式依赖二维图纸与人工管理，存在信息断层、响应迟缓等问题，导致大量项目面临工期延误风险。本文聚焦BIM技术在施工进度动态管控中的实践价值，从理论层面解析其可视化、集成化特性与动态管控需求的适配性，结合实际应用场景阐述4D进度建模、实时数据追踪、偏差预警及多方协同等应用路径。通过超高层项目案例验证，BIM技术可有效缩短工期、降低成本并提升协同效率，同时针对技术应用中存在的成本、人才、标准等瓶颈，提出针对性优化策略，为推动建筑施工进度管理数字化升级提供实践参考。

关键词

BIM技术；建筑施工；进度管控；动态管理；协同优化

1 引言

建筑施工进度管控是项目管理的核心环节，直接影响工程质量、成本与效益。传统进度管控依赖二维图纸、Excel 计划表及人工巡检，存在信息割裂、可视化不足、变更响应滞后等问题，易导致计划与实际脱节、返工率高、工期延误等风险。据住建部数据，我国建筑项目中约 60% 存在不同程度的工期延误，其中进度管控方式落后是主要诱因之一。BIM 技术的出现为摆脱这一困境提供了可能。作为一种集成化数字建模技术，BIM 通过构建包含几何信息、材料属性、施工工艺等多维数据的三维模型，实现了建筑全生命周期的信息共享与协同管理。在施工阶段，BIM 与时

间维度结合形成的“4D 进度模拟”，可直观展示进度计划与实际进展的偏差，为动态管控提供数据支撑。近年来，随着 BIM 技术在国内建筑行业的推广，其在进度管控中的价值逐渐凸显，但实践中仍存在技术应用不深入、协同机制不完善等问题。基于此，本文将对 BIM 技术在建筑施工进度动态管控中的应用展开研究。

2 BIM 技术与建筑施工进度管控的理论基础

2.1 BIM 技术的核心特性

BIM 技术的核心优势体现在三个方面。一是可视化与参数化，通过三维模型直观呈现建筑构件的空间关系，模型参数可动态关联，实现“一处修改、全局更新”，减少信息传递误差^[1]。二是信息集成与共享，模型整合设计、施工、设备等多专业数据，形成统一信息平台，支持各参与方实时获取所需数据，打破“信息孤岛”。三是模拟与分析能力，

【作者简介】蔡伟钰（1998-），女，中国安徽淮北人，本科，助理工程师，从事数字化建造技术应用研究。

结合时间维度（4D）、成本维度（5D）进行进度模拟与成本分析，可提前预判施工冲突、资源瓶颈，为决策提供依据。

2.2 施工进度动态管控的核心需求

动态管控强调“计划—执行—检查—调整”的闭环管理，其核心需求包括实时性、协同性与预见性。实时性要求及时获取现场施工数据，对比计划进度，快速识别偏差；协同性旨在实现业主、施工、监理等多方高效沟通，确保变更指令快速落地；预见性则通过历史数据与模拟分析，提前预警潜在工期风险，主动优化计划。这三方面需求相互关联，共同构成了动态管控的基础框架，也是 BIM 技术应用的重要切入点。

3 传统建筑施工进度管控的痛点分析

3.1 计划编制与实际脱节

传统进度计划基于二维图纸编制，依赖经验判断，难以考虑复杂构件的施工逻辑与空间冲突^[2]。例如，某高层建筑项目中，因钢结构吊装计划未考虑混凝土浇筑的养护周期，导致工序衔接延误 15 天。计划调整需人工修改多张表格，效率低下且易出现数据不一致，使得计划始终滞后于现场实际情况，难以发挥指导作用。

3.2 信息传递效率低下

施工过程中，设计变更、材料进场、工序验收等信息通过纸质文件或邮件传递，存在滞后性与失真风险。据调研，某市政工程中因监理方未及时收到设计变更通知，导致管道铺设返工，直接损失超 50 万元。这种信息传递方式不仅延误决策时间，还可能因信息解读差异引发多方争议，影响项目推进效率。

3.3 进度偏差难以及时预警

传统管控依赖人工巡检记录进度数据，数据汇总周期长，偏差发现时已造成不可逆影响。例如，某住宅项目砌体工程因工人技能不足导致进度滞后，但直至月度检查时才被发现，延误工期 7 天。这种事后管控模式无法满足动态调整需求，往往导致小偏差累积为大问题，最终引发工期延误。

3.4 多参与方协同困难

业主、施工单位、分包商等多方因信息平台不统一，对进度节点的理解存在差异。如某商业综合体项目中，机电安装分包与土建单位对“楼板浇筑完成时间”认知偏差 3 天，导致机电管线预埋滞后^[3]。各方沟通依赖会议与文件传递，信息不对称现象普遍，难以形成管控合力，影响整体进度目标的实现。

4 BIM 技术在施工进度动态管控中的应用路径

4.1 基于 BIM 的 4D 进度计划编制与优化

以设计阶段 BIM 模型为基础，施工方补充施工工艺、资源配置等信息，形成施工 BIM 模型；通过 Navisworks 等软件将 WBS 任务与模型构件关联，赋予每个构件“计划开始时间”“计划完成时间”等时间参数，构建 4D 进度模型。

4D 模型可动态演示施工全过程，直观展示各工序的空间衔接关系，例如在深基坑施工中，通过 4D 模拟可提前发现土方开挖与支护作业的交叉冲突，优化工序顺序，缩短工期 5~7 天。同时，基于 4D 模型可对不同进度计划进行模拟，结合资源投入数据，选择工期最短、成本最低的最优方案，某办公楼项目通过 4D 模拟对比，将传统“先主体后装修”模式优化为“主体与装修交叉作业”，总工期缩短 20 天。

4.2 施工进度实时跟踪与数据集成

通过 BIM+ 物联网技术采集实际进度数据，例如在钢结构施工中，每个构件粘贴 RFID 标签，吊装完成后通过读卡器自动更新 BIM 模型中该构件的“实际完成时间”；无人机每日拍摄现场全景，通过图像识别技术统计各区域施工进度，数据实时同步至 4D 模型^[4]。BIM 平台整合设计变更、材料进场、质量验收等数据，形成进度管理数据库，当某批次钢筋因质量问题延迟进场时，系统自动关联受影响的混凝土浇筑工序，标记进度风险点。施工人员通过手机 APP 上传每日完成的工程量，监理方在线审核，数据直接更新至 BIM 模型，实现“现场—模型—管理端”的实时联动，某地铁项目应用该技术后，进度数据更新周期从 3 天缩短至 1 小时，数据准确率提升至 98%。

4.3 进度偏差分析与动态预警

4D 模型自动对比“计划进度”与“实际进度”，通过颜色标注直观展示偏差区域，例如某住宅楼项目通过模型发现 3 层砌体工程滞后计划 2 天，点击红色区域可查看滞后原因及影响范围。系统结合历史数据、实时数据分析偏差原因，例如通过关联气象数据，自动判断雨天对室外作业的影响程度，量化工期延误风险。同时设置偏差阈值，当实际进度超出阈值时，系统自动向项目经理、施工队长发送预警信息，并提供调整建议，某商业项目通过该机制，成功提前预警 5 次重大进度风险，避免工期延误累计 15 天。

4.4 变更管理与进度动态调整

当发生设计变更时，通过 BIM 模型修改相关构件参数，系统自动计算变更对后续工序的影响范围与工期延误量，例如某酒店项目中，业主提出增加一层宴会厅，BIM 模型快速测算出需额外投入 30 天工期，为业主决策提供数据支持。基于变更影响评估，4D 模型自动生成调整后的进度计划，重新分配资源，并模拟调整后的施工流程，确保新计划的可行性，某医院项目通过该功能，在设计变更后 24 小时内完成进度重排，较传统方式（72 小时）效率提升 67%。此外，BIM 平台记录所有变更的发起时间、原因、审批流程及对进度的影响，形成可追溯的变更档案，避免责任纠纷。

4.5 多参与方协同进度管控

搭建基于云技术的 BIM 协同平台（如 BIM360、广联达协同平台），业主、施工方、监理方、分包商通过权限管理访问模型数据，实时查看进度计划、实际进展及变更信息，减少沟通成本^[5]。通过模型共享功能，各方在虚拟会议室

中基于 4D 模型讨论进度问题，直观标注争议区域，某 EPC 项目应用该模式后，周进度会议时间从 2 小时缩短至 40 分钟，决策效率提升 60%。同时在 BIM 模型中为各分包商分配任务区域与责任节点，系统自动统计其进度完成率，作为考核依据，某产业园项目通过该机制，分包商工期履约率从 75% 提升至 92%。

5 案例应用：某超高层办公楼项目

5.1 项目概况

该项目总建筑面积 12 万平方米，地上 38 层，地下 4 层，结构形式为钢—混凝土混合结构，合同工期 720 天。项目涉及土建、钢结构、机电、幕墙等 12 个专业，施工复杂度高，传统进度管控难度大，亟需通过数字化技术提升管理效率。

5.2 BIM 应用方案

以设计院提供的 Revit 模型为基础，施工单位导入 Project 进度计划，通过 Navisworks 建立 4D 模型，将 382 个 WBS 任务与模型构件关联，明确各工序的时间节点与资源需求。在数据采集方面，在钢结构构件、大型设备上安装 RFID 标签，使用移动端 APP “智慧工地”记录每日完成工程量，无人机每周拍摄现场全景，数据自动同步至 BIM 平台。偏差管控机制上，设置关键线路偏差预警值，非关键线路，平台每日生成进度对比报告，通过模型颜色标注滞后区域，并推送至相关负责人。同时搭建云协同平台，业主、监理、各分包商实时查看进度数据，线上审批变更单，通过模型进行技术交底，确保信息传递的及时性与准确性。

5.3 应用效果

项目实际工期 690 天，较计划提前 30 天，其中 4D 模拟优化工序节约 15 天，偏差预警避免返工节约 10 天，协同管理提升效率节约 5 天。在成本方面，减少因进度滞后导致的机械闲置费、人工窝工费约 86 万元，变更管理效率提升降低返工成本约 52 万元，合计节约 138 万元。协同效率显著提升，各专业交叉作业冲突从平均每月 8 次降至 2 次，变更审批时间从 5 天缩短至 1.5 天，充分验证了 BIM 技术在进度管控中的应用价值。

6 BIM 技术应用的挑战与对策

6.1 主要挑战

BIM 技术在应用过程中面临多重挑战，首先是技术成本较高，BIM 软件（如 Revit、Navisworks）授权费用高，云平台维护成本大，中小型企业难以承担，限制了技术的普及应用。其次是专业人才短缺，既懂施工管理又掌握 BIM 技术的复合型人才不足，导致技术应用深度不够，多数项目

仅停留在模型可视化层面，未发挥其数据集成与分析功能。再是标准体系不完善，行业缺乏统一的 BIM 数据标准，不同软件模型兼容性差，信息传递易出现断层，影响协同效率。最后是协同机制不健全，业主、施工方、分包商对 BIM 的认知差异大，协同平台使用积极性低，难以形成常态化的协同管理模式。

6.2 优化对策

针对上述挑战，需从多方面采取优化对策。在降低成本方面，推广国产 BIM 软件（如广联达、天正），政府补贴中小企业技术投入，鼓励软件厂商推出按需付费模式，减轻企业经济压力。加强人才培养，高校增设 BIM 相关课程，企业开展“BIM+ 施工管理”培训，建立持证上岗制度，逐步构建专业人才梯队。完善标准体系，由住建部牵头制定《建筑施工 BIM 应用标准》，规范数据格式、模型深度及协同流程，确保信息传递的顺畅性。建立激励机制，将 BIM 应用纳入项目评优指标，业主在合同中明确 BIM 应用要求，对按时履约的参与方给予奖励，提升各方应用积极性，推动技术落地见效。

7 结语

BIM 技术为建筑施工进度动态管控带来了范式革新，其通过多维信息整合与可视化管理，有效破解了传统模式中的信息孤岛、协同低效等痛点。从理论构建到案例验证可见，4D 进度模拟、实时数据集成等应用不仅能提升进度管控的精准度，更能通过提前预警与动态调整降低工期风险。尽管当前在成本控制、人才储备等方面仍面临挑战，但随着国产技术推广、标准体系完善及协同机制健全，BIM 技术的应用深度与广度将持续拓展。未来，随着与 AI、数字孪生等技术的融合，建筑施工进度管控将迈向智能化、自动化新阶段，为行业高质量发展注入持续动力。

参考文献

- [1] 陈松洁,周强.BIM技术在超大单体建筑施工进度管控中的应用[J].江西建材,2025(1):227-229.
- [2] 李浩然.BIM技术在建筑施工进度控制中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(6):120-123.
- [3] 王旭,崔明杰,李凯,韩子奥.BIM技术在建筑施工进度管理中的应用研究[J].门窗,2025(9):229-231.
- [4] 杨春.基于BIM技术的建筑施工进度精准管控研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(4):058-061.
- [5] 李伟.基于BIM技术的建筑工程施工进度精细化管控策略研究[J].中国地名,2025(7):0217-0219.

Research on intelligent construction collaborative management and efficiency optimization of buildings based on BIM technology

Xihua Gao

Yunnan Construction Investment Seventh Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

In the intelligent transformation of construction industry, the increasing complexity of multi-party collaboration, cross-disciplinary coordination, and multifaceted challenges during construction phases has rendered traditional collaborative management models inadequate for enhancing project efficiency. Leveraging its core strengths in visualization, parametric design, and collaborative workflows, BIM technology has emerged as a pivotal solution to break down construction coordination barriers and optimize management efficiency. This study focuses on intelligent construction practices in the context of building automation, exploring BIM's application pathways for collaborative management and efficiency enhancement. Addressing current challenges in construction coordination systems, the paper systematically outlines BIM implementation strategies across organizational collaboration, information sharing, process optimization, as well as progress, quality, and cost control management. By analyzing the current status and pain points of construction coordination, this research provides both theoretical foundations and practical guidance for construction enterprises to leverage BIM technology in elevating collaborative management capabilities and achieving operational efficiency upgrades.

Keywords

BIM technology; construction; collaborative management; efficiency optimization; intelligent construction

基于 BIM 技术的建筑智能化施工协同管理与效率优化研究

高锡华

云南建投第七建设有限公司，中国·云南昆明 650000

摘要

在建筑业的智能化转型进程中，施工阶段多参与方、多专业、多要素的协同矛盾日益突出，使得传统协同管理模式难以满足工程效率提升的需求。此时BIM技术凭借自身可视化、参数化、协同化的核心优势，成为了破解施工协同壁垒、优化管理效率的关键技术支撑。本文便以建筑智能化施工为研究背景，聚焦于BIM技术在协同管理与效率优化中的应用路径。基于当前建筑施工协同管理的现状与痛点，文章从协同管理体系构建与施工全流程效率优化两个层面，系统地阐述了BIM技术在组织协同、信息协同、流程协同及进度、质量、成本管控中的具体应用策略。希望此次研究能够为建筑企业借助BIM技术提升施工协同管理水平、实现效率升级提供理论与实践两方面的支持。

关键词

BIM技术；建筑施工；协同管理；效率优化；智能化施工

1 引言

建筑施工是一个涉及了建设、施工、监理、设计、分包商、供应商等多个参与方的系统工程，其中涵盖了结构、机电、装饰等多专业交叉作业等复杂的过程。现阶段，随着超高层建筑、大型综合体等工程规模不断地扩大，依赖于纸质图纸、线下会议、经验沟通的传统协同管理方式，极其容易导致信息传递失真、专业冲突频发、资源调度低效等问题出现，严

重地制约着施工效率与工程质量。而 BIM（建筑信息模型）技术通过构建包含几何信息、属性信息、过程信息的三维数字化模型，实现了施工过程的可视化呈现、信息的集成共享及多参与方的协同工作，该技术为施工管理从“分散式”向“一体化”转型提供了技术载体。在当前，如何能将 BIM 技术与施工协同管理进行深度地融合，探索出科学有效的效率优化路径，是建筑企业提升核心竞争力的重要课题。本文便围绕基于 BIM 技术的建筑智能化施工协同管理与效率优化展开研究，以期可以为行业实践提供有益的借鉴。

【作者简介】高锡华（1986-），男，汉族，云南牟定人。

高级工程师，研究方向：建设智能化建造技术。

2 基于 BIM 技术的建筑施工协同管理体系构建

2.1 构建多方联动的协同管理架构

组织协同是协同管理的基础，借助 BIM 技术便能通过搭建层级化的协同组织架构，进而明确各参与方的职责与协同机制，实现高效地联动。首先需建立以建设单位为核心的协同决策层，以此统筹设计、施工、监理等参与方，再通过 BIM 协同平台定期地召开线上协同会议，在会议中针对施工方案优化、设计变更、进度调整等重大问题进行集体决策，旨在缩短决策周期^[1]。其次设立施工单位主导的协同执行层，于此整合土建、机电、装饰等分包商及材料供应商，且基于 BIM 模型明确各分包商的施工范围、工序衔接节点与质量要求。如在机电安装分包中，可以通过 BIM 模型标注管线安装的时间节点与空间范围，有效地避免与土建施工发生冲突。再次应当配置专业的协同协调员，其主要负责统筹各专业之间的协同工作。像在管线综合施工中，协调机电各专业基于 BIM 模型进行管线优化排布，可以解决专业冲突。

2.2 搭建“模型驱动”的信息共享平台

信息协同在建筑项目的协同管理体系里占据着核心地位，BIM 技术具有独特的“模型 + 数据”融合模式，因此能够精准地剖析施工全流程的信息需求，为施工团队搭建起一座高效运转的信息共享平台。当前在搭建统一的 BIM 协同管理平台时，广联达 BIMFACE 与鲁班工程管理平台等工具脱颖而出，成为了众多项目的优质之选。原因是这些平台具备强大的整合能力，它们能够将设计阶段精心构建的 BIM 模型、施工进度计划中详细的时间节点安排、质量检测数据里的各项指标以及资源信息中的人力、物力储备等多源内容进行汇聚，以此为参与项目的设计单位、施工单位、监理单位等各方主体，提供了一个统一且便捷的信息访问渠道。不仅如此，这些平台还支持实时交互与动态更新，能够及时地同步项目变更信息，进而减少了信息滞后与偏差，有效地提升了各参与方的沟通效率。

以某大型商业综合体项目为例，项目筹备初期设计单位便将设计 BIM 模型上传至该平台。此模型中不仅包含了建筑的外观设计、内部空间布局，还对每一处结构细节、装饰装修风格都进行了精确地呈现。当施工单位接收模型之后，就可借助平台的模型在线浏览功能，以 3D 视角全方位地查看设计方案，提前熟悉项目的整体情况，有效地避免了因对设计理解不清晰而导致的施工错误。同时平台的批注功能也发挥了重要的作用，施工人员在浏览模型时，若发现某些设计在实际施工中可能存在着难度，一般可以直接在模型上进行批注说明。之后设计单位收到批注后，还能及时地与施工单位沟通并对设计方案进行优化调整^[2]。

2.3 实施“前置优化”的专业协同流程

专业协同作为解决建筑施工中交叉作业冲突的关键手段，对于保障项目顺利推进起着举足轻重的作用。管线综合优化则是施工准备阶段的首要任务，通常在这一过程中，需

要将结构、机电、暖通、给排水等专业的 BIM 模型进行整合。此时 Navisworks 等碰撞检测软件会对整合后的全专业模型进行细致地检测，进而梳理出管线与结构、管线与管线之间的碰撞点，并生成详细的碰撞检测报告。而施工工序协同模拟同样也是确保多专业施工有序进行的重要环节。在该环节需结合 BIM 模型与施工进度计划，以动态模拟的方式推演多专业工序的衔接过程。例如在超高层建筑核心筒施工中，土建施工、机电安装、装饰装修等多个专业的施工工序紧密交织，其中任何一个环节出现问题都可能会影响到整个项目进度。但通过 BIM 模拟，就能够清晰地展示出钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑与机电预留预埋等工序的先后顺序与时间节点，识别出当中存在的工序交叉冲突问题。面对于钢结构吊装、深基坑支护、超高模板搭设等较为复杂的施工环节，可以组织施工、监理、设计、设备供应商等多方基于 BIM 模型进行协同论证^[3]。以钢结构吊装为例，在 BIM 模型中能够对吊装顺序、起重机站位与构件运输路线进行模拟，经由模拟不同的吊装方案，对比分析出各方案的优缺点。如不同起重机站位对吊装效率与安全性的影响、构件运输路线是否合理等，从而确定出最优的方案。同时在模型中还可以明确各方的职责，通常施工单位负责具体吊装操作、监理单位监督施工过程、设计单位的任务是确保吊装方案符合设计要求、设备供应商需保障设备的正常运行。

3 基于 BIM 技术的建筑施工全流程效率优化路径

3.1 施工进度管控

施工进度管控无疑是建筑项目效率优化的核心内容，它像项目的生命线一般，直接关系到项目能否按时进行交付。BIM 技术凭借其强大的进度模拟、动态跟踪与偏差调整功能，直接为施工进度的精准把控提供了有力的支持。而构建 BIM-4D 进度模型是实现进度精准管控的基础。这一过程需要将 Project、P6 等专业项目管理软件编制的施工进度计划与 BIM 三维模型进行深度地关联。通常可以按时间维度为 BIM 三维模型中的构件赋予施工进度属性，使得每一个构件都承载着时间信息，从而生成包含了“三维模型 + 时间进度”的 4D 进度模型。该模型能够直观地展现出从基础施工、主体结构到机电安装等各阶段、各工序的开始与完成时间。借助便是施工进度的动态跟踪与调整环节，施工人员可以借助先进的技术手段实时地获取实际施工进度数据。即现场人员通过移动端上报施工进展情况，物联网设备则自动地采集施工现场的各类数据，最终这些实际进度数据均会被实时地传输至 BIM-4D 进度模型中，与计划进度进行对比分析，然后生成详细的进度偏差分析报告。

3.2 施工质量管控

如果没有质量保障，那么项目的一切努力都将付诸东流，也就是说施工质量管控是建筑项目效率优化的基础前

提。而 BIM 技术通过植入质量标准、监测过程及追溯问题，在实践中为施工质量的全程管控打造了一套严密的保障体系。其中建立 BIM 质量标准体系是施工质量管控的首要任务。此体系的建立需要将国家规范、行业标准及企业内部的质量要求全面融入到 BIM 模型之中，再为每个构件、每个工序设定明确且具体的质量控制指标。像混凝土强度需达到 C30 等级、钢筋保护层厚度应控制在规定范围内、管线安装坡度必须符合设计的要求等^[4]。对于施工过程的质量监测则需借助 BIM 技术与智能检测设备的融合之力，此时可以借助激光扫描仪这一先进的检测设备，高精度地扫描混凝土结构，然后将扫描数据与 BIM 模型进行比对，便可精确地检测结构的平整度与垂直度。而质量问题的协同处置部分，在现场发现质量缺陷时，施工人员可通过移动端将问题照片、位置信息关联至 BIM 模型，并同步推送至监理单位与施工班组。监理单位在收到信息后，需要立即地对问题进行评估，且明确整改责任人与整改期限。

3.3 施工成本管控

施工成本管控是建筑项目效率优化的关键目标，此部分内容直接影响着项目的经济效益。目前 BIM 技术经由精准核算、动态控制与优化，为施工成本的高效管理提供了创新的解决方案，构建 BIM-5D 成本模型就是施工成本管控的核心环节。基于 BIM-4D 进度模型的基础，BIM-5D 成本模型进一步整合了工程量清单、材料价格、人工成本、机械租赁费用等成本数据，得以形成包含了“三维模型 + 时间 + 成本”的 5D 成本模型。该模型就如同一个项目的精准计算器，可实现对施工各阶段、各分项工程成本的精确核算。若在施工过程中实时地采集材料消耗量、人工工时、机械使用费用等实际成本数据，再将这些实际成本数据与 5D 成本模型中的计划成本进行对比分析，便能深入地探究成本出现偏差的原因。比如发现材料价格上涨导致成本超支，便需及时地调整采购策略，积极地寻找更具性价比的供应商；若因材料浪费导致成本增加，则需加强施工现场管理，迅速制定出更为严格的材料使用规范。在此基础上，基于 5D 成本模型与历史数据结合大数据算法还能对可能出现的成本风险进行预测。例如，通过分析市场趋势与历史价格波动数据，可以预测材料价格出现大幅波动的可能性，以及根据项目的变更情况，来评估工程量变更导致的成本超支风险。

3.4 资源调度管控

资源需求精准地预测需基于 BIM-4D 进度模型与详细

的施工方案。结合主体结构的施工来说，通过对 BIM 模型的分析，能够准确地预测对钢筋工、木工等人员的需求数量与时间节点。同时对塔式起重机、混凝土泵车等设备的需求，以及对钢筋、混凝土等材料的需求也能进行精确地预测。而构建资源协同调度平台是实现资源高效调度的关键。因为该平台整合自有资源、租赁资源、供应商资源等信息，以此建立全面的资源数据库，并与 BIM 模型进行关联，便能实现资源状态的可视化展示。以塔式起重机为例，在平台上可实时地查看其运行状态，当中包括了是否正在作业、作业位置、设备维护情况等，对于材料堆场的库存情况也能一目了然。随后根据资源需求计划与实时状态，平台还能自动地生成科学合理的资源调度方案。另外资源动态优化调整是根据实际进度和工况变化进行的必要操作^[5]。实际施工过程当中，若某工序提前完成，便可借助 BIM 模型实时地更新资源需求，进而减少该工序的人员配置，并将多余人员调配至其他滞后的工序，有助于提高人员的利用率。

4 结语

现阶段 BIM 技术凭借其搭建信息共享平台、优化专业协同流程的独特优势，已然从进度、质量、成本、资源四个核心维度，彻底地重塑了传统的建筑施工管理模式。其可视化、动态化、精准化的特性，有效地解决了传统施工中信息壁垒森严、协同不畅、管控粗放等长期存在的顽疾。展望未来，随着 BIM 与物联网、大数据、人工智能等前沿技术的深度融合，其在施工管理中的应用场景将得到进一步地拓展。

参考文献

- [1] 王恒.基于BIM技术的高层建筑群施工管理案例分析[D].内蒙古自治区:内蒙古科技大学,2023.DOI:10.27724/d.cnki.gnmgk.2023.001012.
- [2] 张妍睿.智能建造技术在土木工程施工中的应用与前景展望[J].中国住宅设施,2025,(01):241-243.
- [3] 王昊天.BIM与智能物联技术在装配式建筑设计优化中的运用[J].建筑与工程,2025,1(01):28-30.
- [4] 陈婉清,刘峰,焦传奇.基于BIM技术的装配式建筑施工节点信息化管理与优化研究[J/OL].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2025(9)[2025-08-19].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010653104958341376.
- [5] 郭鹏飞.基于三维重建技术与BIM协同的建筑施工进度管理研究[D].重庆市:重庆大学,2022.DOI:10.27670/d.cnki.gcqu.2022.002013.

Innovative application of electrochemical corrosion principle in cathodic protection control of oil and gas pipeline

Minfei Ai Jie Zou Lingxiang Wang

Huazhong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Qianjiang, Hubei, 433100, China

Abstract

This study focuses on the oil and gas pipelines operated by China Pipeline Network Group Central China Company (Wuhan, Hubei Province), exploring innovative applications of electrochemical corrosion principles in cathodic protection control. By integrating electrochemical corrosion mechanisms with polarization theory, it identifies challenges in traditional cathodic protection systems, including potential imbalance, lagging regulation, and stray current interference. Three novel approaches are introduced: 1) Dynamic potential threshold setting based on corrosion current density ensures precise protection potential alignment; 2) Adaptive regulation of cathodic protection current through soil resistivity monitoring enhances real-time adjustment responsiveness; 3) Suppression of stray currents caused by multi-electrode coupling maintains stable protection potentials. Quantitative analysis using Tafel equations and polarization resistance formulas establishes control parameters validated by field data. These innovations significantly improve the compliance rate of pipeline cathodic protection potentials, providing an efficient and intelligent technical solution for corrosion prevention in oil and gas pipelines.

Keywords

electrochemical corrosion; cathodic protection; polarization theory; dynamic control

电化学腐蚀原理在油气管道阴极保护控制中的创新应用

艾敏飞 邹杰 王凌翔

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司，中国·湖北潜江 433100

摘要

本研究以国家管网集团华中公司（湖北武汉）的油气管道为核心，着重研究阴极保护控制里电化学腐蚀原理的创新性运用，结合电化学腐蚀的反应机制与极化理论，指出传统阴极保护控制面临的难题，如电位不均衡、调节滞后以及杂散电流的干扰现象。引入三项创意应用，借助对基于腐蚀电流密度的动态电位阈值的设定，做到保护电位精准契合；结合土壤电阻系数实现阴极保护电流的自适应调控，提高电流调整的及时程度；抑制多电极耦合产生的杂散电流干扰，实现保护电位有效稳定。运用塔菲尔公式、极化电阻公式等开展量化，推导控制参数，再结合实际应用数据做验证，创新办法让管道阴极保护电位达标比例得以提高，为油气管道腐蚀防护供应了高效且智能的技术途径。

关键词

电化学腐蚀；阴极保护；极化理论；动态控制

1 引言

国家管网集团华中公司位于湖北武汉，承担着保障该区域能源输送的重要使命，其管理的油气管道遍布湖北且影响周边区域，管道总里程数超过数千公里，在能源战略布局里起到关键作用，因湖北地区地质状况复杂，油气管道遭遇严重的电化学腐蚀难题。

电化学腐蚀作为油气管道失效的重要致因之一，其根本是金属在电解质环境里进行的氧化还原反应。作为控制电化学腐蚀的关键手段，借助给管道施加外部电流或者牺牲阳

极，让管道电位极化到无腐蚀范围，以此有效降低腐蚀的速率。传统阴极保护控制大多采用固定电位阈值与人工定期调节的方式，难以契合管道沿线复杂多变的腐蚀环境，往往会出现保护不充分或过度保护的状况，而且应对杂散电流干扰时能力有限，对阴极保护效果造成严重阻碍。本文从电化学腐蚀的原理出发，探究创新型阴极保护控制办法，对增强华中公司油气管道的安全与可靠程度有重大现实价值。

2 油气管道电化学腐蚀核心原理

2.1 电化学腐蚀的电极反应机制

因湖北地区土壤电解质环境呈现复杂态势，油气管道金属（以 Fe 为例）会生成大量微小的腐蚀原电池，阳极部位出现金属氧化溶解反应，这是造成管道腐蚀的源头，该反应的式子为：

【作者简介】艾敏飞（1983-），中国湖北仙桃人，本科，助理工程师，从事管道腐蚀控制研究。



Fe^{2+} 离子进入土壤电解质，导致管道金属不断损耗，形成腐蚀坑。

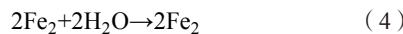
不同的还原反应会在阴极区域按照土壤的酸碱性发生，鄂北地区以中性土壤为主，吸氧还原反应如下：



而在鄂南部分酸性较强的土壤中，析氢还原反应更为显著：



总反应如下：



生成的 Fe_2 进一步被氧化为 Fe_3 ，指的是普遍可见的铁锈，因其结构疏松有孔隙，无法遏制腐蚀的继续，加快了管道毁坏。

2.2 极化理论与阴极保护原理

按照电化学极化理论，当向管道施加外部阴极电流，管道充当阴极会出现阴极极化现象，电极电位向负向偏移，此情况造成阳极氧化反应（公式 1）的活化能提升，反应速度急剧下降，若管道电位极化达到 -0.85V - -1.20V（针对硫酸铜参比电极 CSE）的免蚀区间，阳极的溶解速率近乎为零，达成有效防护。

极化过程中，管道腐蚀电流密度 i_{corr} （反映腐蚀速率）与极化电位满足塔菲尔公式：

$$\Delta E = \beta_c \lg \left(\frac{i_{app}}{i_{corr}} \right) \quad (5)$$

其中， ΔE 为阴极极化电位（V）， β_c 为阴极塔菲尔斜率（V/dec，华中公司管道在湖北地区实测值为 0.12V/dec）， i_{app} 为施加的保护电流密度（A/m²）， i_{corr} 为管道自腐蚀电流密度（A/m²）。

由公式（5）可知，增大 i_{app} 可使 ΔE 升高，降低 i_{corr} ，但当 ΔE 超过一定范围（如电位 < -1.20V/CSE），会引发过度保护，导致管道涂层剥离或氢脆等问题，所以精准调控 i_{app} 与 ΔE 的匹配关系至关重要。

2.3 腐蚀速率与极化电阻的关联

管道腐蚀速率 v （mm/年）与自腐蚀电流密度 i_{corr} 遵循法拉第定律，结合极化电阻 R_p （反映电极表面极化难易程度），可通过极化电阻公式量化腐蚀速率^[1]：

$$v = \frac{K \cdot i_{corr} \cdot M}{\rho \cdot n} \quad (6)$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (7)$$

公式（6）中， K 为常数 ($3.27 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{A}/(\text{m} \cdot \text{年})$)， M 为 Fe 的摩尔质量 (55.85g/mol)， ρ 为 Fe 的密度 (7.87g/cm³)， n 为电极反应转移电子数 ($n=2$ ，对应公式 1)。

公式（7）中， B 为常数 ($B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)}$)， β_a 为阳极塔菲尔

斜率，华中公司管道 β_a 实测值为 0.08V/dec，计算得 $B=0.024\text{V}$ ）， R_p 为极化电阻 ($\Omega \cdot \text{m}^2$)。

通过测量极化电阻 R_p ，可反推腐蚀电流密度 i_{corr} 与腐蚀速率 v ，为阴极保护控制提供量化依据，这也是后续创新控制方案的理论基石。

3 传统阴极保护控制的痛点与问题

3.1 固定电位阈值导致保护精度不足

传统阴极保护控制采用了单一且固定的电位阈值，未考量湖北地区土壤环境参数存在的明显差异。选取华中公司湖北东部与西部的管道作例，东部平原区域的土壤呈现高含水量、低电阻率（约 $10\Omega \cdot \text{m}$ ）的特性，当电位固定为 -1.0V/CSE 时，实际的保护电流密度达到 $25\text{A}/\text{m}^2$ ，大幅超出了 $15\text{A}/\text{m}^2$ 的需求，引发了过度防护，导致 2021 年该区域部分管道出现涂层鼓包与剥离状况^[2]。西部山区土壤干燥且电阻率高，于相同电位时，保护电流密度仅达 $6\text{A}/\text{m}^2$ ，低于所需的标准值 $10\text{A}/\text{m}^2$ ，处于保护缺失的情形，腐蚀速度达 $0.18\text{mm}/\text{年}$ ，远高于行业安全界限。

3.2 人工调节无法匹配动态腐蚀工况

传统控制方式需人工按月到现场定时测量电位，手动调节保护电流，难以即刻响应腐蚀状况的动态变动。2022 年夏天，湖北历经连续强降雨，武汉周边区域土壤含水率自 18% 陡然上升至 35%，致使土壤电解质的导电性能增强。管道自腐蚀的电流密度自 $0.06\text{A}/\text{m}^2$ 迅速涨至 $0.15\text{A}/\text{m}^2$ ，然而人工调控延迟近 20 天，此阶段管道腐蚀速度从 $0.05\text{mm}/\text{年}$ 猛增到 $0.12\text{mm}/\text{年}$ ，一些管段有局部腐蚀穿孔现象。

3.3 杂散电流干扰导致保护电位波动

华中公司的部分管道经过城市变电站和轨道交通线路等区域，遭受杂散电流的强烈干扰。以武汉市某段管道为例，因周边地铁施工牵引电流作用，管道保护电位在 -0.6V 到 -1.4V/CSE 范围大幅波动，每日平均波动次数达 30 次以上，这种起伏使管道时而处于保护不足状态，时而保护过度。2021 - 2022 年期间，此段管道因腐蚀故障维修了 7 次，累计维修费用超 800 万元。

4 基于电化学原理的阴极保护控制创新应用

4.1 基于腐蚀电流密度的动态电位阈值设定

4.1.1 核心逻辑

基于塔菲尔公式（公式 5）和极化电阻公式（公式 7），构建“极化电阻 $R_p \rightarrow$ 腐蚀电流密度 $i_{corr} \rightarrow$ 最优保护电流密度 $i_{app,opt} \rightarrow$ 动态电位阈值 E_{set} ”的量化推导链，实现电位阈值随实时腐蚀工况自动变动，做到保护电位的精准契合。

4.1.2 公式推导与参数设定

算出腐蚀电流密度值，通过在管道周边布置的 RD - 6 型无线极化电阻探头实时获取极化电阻数据，代入公式（7）计算腐蚀电流密度 $i_{corr} = \frac{B}{R_p}$ ；

确定最优保护电流密度，以将腐蚀速率 v 控制在

0.01mm/年以下为目标，代入公式(6)可得 $i_{corr,max}=0.008A/m^2$ 。再结合公式(5)，令 $i_{corr,max}=0.008A/m^2$ 为自腐蚀电位，华中公司管道在湖北地区实测值约为-0.5V/CSE)，推导得出：

$$i_{app,opt}=i_{corr} \cdot 10^{\frac{E_{corr}-E_{set}}{\beta_c}} \quad (8)$$

当 $i_{corr}=0.1A/m^2$, $\beta_c=0.12V/dec$ 时，代入 E_{set} 目标区间(-0.85V~1.20V/CSE)，计算得到 $i_{app,opt}=10A/m^2$ 。

动态调整电位阈值，根据计算得到的 $i_{app,opt}$ 与现场实测的 i_{app} 的偏差，实时修正 E_{set} ，确保 $i_{app}=i_{app,opt}$ ，实现保护电位的动态优化^[3]。

4.1.3 华中公司应用实践

对“西气东输”湖北段(200公里)进行布置，安装30套极化电阻传感器，同时把动态电位阈值算法整合进阴极保护控制柜。2023年应用数据表明，电位阈值会依据实时状况动态改变，取值覆盖-0.90V至-1.18V/CSE，能精确契合不同土壤段的防腐蚀要求。处于-0.85V~1.20V/CSE的管道保护电位达标率由82%大幅提高至97%，超量保护区的占比由15%急剧降至3%，涂层剥落等问题被有效抑制。

4.2 融合土壤电阻率的阴极保护电流自适应调节

4.2.1 核心逻辑

保护电流的分布与传输受土壤电阻率影响大(数值越低，电流越易扩散，传统控制手段忽略其动态变化，造成电流调节延迟，按照欧姆定律，搭建保护电流与土壤电阻率之间的关联模型，达成保护电流的自动调节，以便适应不断变化的复杂土壤环境。

4.2.2 公式推导与模型构建

保护电流与土壤电阻率的关联：阴极保护系统的总保护电流 I_{total} (A)与土壤电阻率 ρ_s (Ω·m)、管道长度L(m)、保护电位 E_{set} 的关系为^[4]：

$$I_{total}=\frac{2\pi L(E_{set}-E_{ref})}{\rho_s \ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \quad (9)$$

其中， E_{ref} 为参比电极电位(-0.25V/CSE，硫酸铜电极)， r 为管道半径(0.3m，华中公司天然气管道规格)；

自适应调节算法通过FRS-2型土壤电阻仪(每5分钟采集一次 ρ_s)实时获取土壤电阻率数据，将实时代入公式(9)计算 $I_{total,opt}$ ，并利用PID控制器自动调整阴极保护电源输出电流，使 $I_{total}=I_{total,opt}$ ，实现保护电流的动态自适应调节。

4.2.3 华中公司应用实践

在湖北荆州到荆门180公里长的原油管道上设置25套土壤电阻率传感器，2023年汛期阶段(由于土壤含水率上升，土壤电阻率从25Ω·m降到8Ω·m，系统按公式(9)自动把总保护电流从75A调低至30A，有效防止出现过度保护现象，管道的腐蚀速率从每年0.12mm明显降低至每年0.06mm，阴极保护系统能耗下降40%，每年节省电费大约280万元，达成了节能与防腐的双重功效。

4.3 多电极耦合的杂散电流干扰抑制

4.3.1 核心逻辑

管道受杂散电流侵入，会产生局部阳极区域，使保护电位的均匀状态被破坏，利用在管道沿线设置“辅助阳极-参比电极”耦合部件，实时检测杂散电流干扰的强度，主动注入补偿电流I以抵消杂散电流的影响，消除杂散电流干扰，保障保护电位的稳定性。

4.3.2 公式推导与补偿策略

杂散电流干扰强度计算，杂散电流导致的管道电位偏移量 ΔE_{stray} 与 I_{stray} 的关系为：

$$\Delta E_{stray}=I_{stray} \cdot R_{pipe} \quad (10)$$

其中， R_{pipe} 为管道-土壤接触电阻(Ω·m，华中公司实测值0.5Ω·m)；

补偿电流计算，为使 $\Delta E_{stray}+\Delta E_{comp}=0$ (ΔE_{comp} 补偿电流导致的电位偏移)，即：

$$I_{comp}=-I_{stray} \cdot \frac{R_{pipe}}{R_{aux}} \quad (11)$$

其中， R_{aux} 为辅助阳极-土壤接触电阻(Ω·m，华中公司采用高硅铸铁阳极， $R_{aux}=0.2\Omega \cdot m$)，负号表示补偿电流方向与杂散电流相反^[5]。

4.3.3 华中公司应用实践

在武汉市区某段受地铁施工杂散电流严重干扰的天然气管道上，布置了5套“辅助阳极-参比电极”耦合单元，2023年该系统对杂散电流干扰开展实时监测，按照公式(11)精准地注入补偿电流，让管道保护电位的波动区间从±0.4V缩减至±0.1V。从2022年到2023年，腐蚀维修次数由6次降至1次，维修成本削减85%，有力维护了管道的安全平稳运行。

5 结语

基于腐蚀电流密度的动态电位阈值，借助塔菲尔公式和极化电阻公式开展量化推导，让保护电位能依管道自腐蚀工况实时调整，消除固定阈值引发的欠保护或过度保护状况，三项创新性应用从理论推导过渡到现场应用落地，构建起“原理-模型-控制-验证”的完备技术链条，为油气管道电化学腐蚀防治提供可复制推广的实践范例。未来研究可进一步构建跨区域电化学腐蚀数据库和控制算法的共享体系，按照不同土壤类型来优化模型的参数，打造覆盖华中整个区域的阴极保护智能控制网络。

参考文献

- [1] 刘阳舟.油气管道运输中的腐蚀与防护[J].流程工业,2025,(01):71-73.
- [2] 苏强.油气管道腐蚀与防护技术研究[J].石化技术,2024,31(12):193-195.
- [3] 安鹏飞.探究埋地钢制油气管道的防腐蚀策略及其实践[J].全面腐蚀控制,2024,38(12):16-18.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2024.12.016.03.

Fault analysis and proposed measures for adjusting the camera excitation system together

Shengchun Liu¹ Jie Zhang² Guobin Shang¹ Bing Xu¹ Fei Ma¹

1. Qinghai Dehong Electric Power Technology Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Science Research Institute , Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

Synchronous phase-shifting camera is essentially a device that operates without mechanical load and no-load. The active power absorbed from the power grid during its operation is only used to supply the motor's own losses, such as iron core losses and winding copper losses. Therefore, it always operates under conditions close to zero electromagnetic power and zero power factor. Its core function is to optimize the reactive power balance of the power grid and improve the quality of system power supply. The power supply and its ancillary equipment that supply the excitation current of the synchronous generator together constitute the excitation system. Among them, the automatic excitation regulator plays a significant role and is crucial for improving the stability of parallel units in the power system. With the continuous development of modern power systems, the stability limit of units is decreasing, which further promotes the continuous innovation of excitation technology to better adapt to the operational needs of the power grid and ensure reliable power supply of the system.

Keywords

adjust the camera; Excitation; Measures

一起调相机励磁系统故障分析及措施建议

刘生春¹ 张杰² 尚国斌¹ 徐兵¹ 马飞¹

1. 青海德泓电力科技有限公司，中国·青海 西宁 810000

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院，中国·青海 西宁 810000

摘要

同步调相机本质是一台不带机械负载、空载运行的设备，其运行过程中从电网吸收的有功功率，仅用于供给电机自身的损耗，如铁芯损耗、绕组铜损等，因此它始终在接近零电磁功率、零功率因数的工况下运行，核心功能是优化电网无功功率平衡，改善系统供电质量。而供给同步发电机励磁电流的电源及其附属设备，共同构成了励磁系统。其中，自动励磁调节器作用显著，对提升电力系统并联机组的稳定性至关重要。随着现代电力系统不断发展，机组稳定极限呈降低趋势，这一变化也进一步推动励磁技术持续革新，以更好适配电网运行需求，保障系统可靠供电。

关键词

调相机；励磁；措施

1 引言

同步调相机实际上是一台不带机械负载(空载)运行的。它从电网吸收的有功功率仅供给电机本身的损耗，因此同步调相机总是在接近于零的电磁功率和零功率因数的情况下运行。调相机是一种特殊的“发电机”，但它不发有功功率，仅“发出”无功功率。励磁系统一般由励磁功率单元和励磁调节器两个主要部分组成。励磁功率单元向同步发电机转子提供励磁电流；而励磁调节器则根据输入信号和给定的调节

准则控制励磁功率单元的输出^[1]。

2020 年 × 月 × 日，某站 2 号调相机并网运行时，调变组保护 A、B 屏励磁变过流动作，2 号机出口断路器跳闸，现场检查发现励磁系统 #3 整流柜损坏，柜内三相母排熔断。

2 故障现象

故障前，2 号调相机并网运行，无功出力为滞相 24Mvar；故障发生后 12ms，励磁系统检测到励磁变低压侧电流异常升高，励磁调节器触发角度由 86 度调整到 150 度逆变角；202ms，励磁变过流保护动作，发出跳并网断路器和磁场断路器指令；253ms，500kV 侧并网断路器断开；263ms，灭磁回路跨接器闭合，灭磁电阻投入；325ms，磁

【作者简介】 刘生春（1983-），男，中国青海大通人，工程师，从事高电压与绝缘技术研究。

场断路器断开，励磁系统闭锁触发脉冲并退出运行，调相机进入惰转状态；522ms，励磁绕组过负荷反时限动作，此时并网断路器和磁场断路器已分断；5.6s，机端电压衰减到0，励磁变低压侧电压随之衰减到0，故障电流消失。由于调相机开路瞬变时间常数达7.5s，且故障期间1、2号整流柜正常运行，因此在励磁变过流保护动作之前调相机未见明显异常，转子电流由770A减小至672A，无功出力由滞相24Mvar变化为进相6.8Mvar，无功波动为30.8Mvar，未出现失磁现象；故障期间1号调相机运行正常，无功出力未有波动，此次2号调相机励磁系统故障对电网及调相机本体影响有限。

3 现场检查情况

3号整流柜正面，-B相散热器与晶闸管阳极接触部分有灼伤痕迹，-B相晶闸管陶瓷外壳裂开，+B、-B相晶闸管外挡板脱落，其余5只晶闸管无明显异常。

3号整流柜背面，-A、-B、-C相快熔开裂，交直流侧隔离刀闸、交直流铜排有熏黑痕迹，脉冲板及屏后二次线损毁，#3整流柜与#2整流柜连接处三相交流铜排熔断。



图 1 3号整流柜正视图

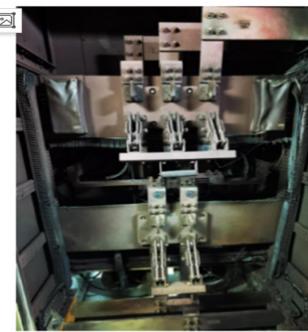


图 2 3号整流柜背视图

4 励磁系统故障原因分析

3号整流柜-B相晶闸管关断承受反压时被击穿，随着-C相晶闸管正常导通，整流桥BC相间短路。

-A晶闸管被提前触发。故障发生后，-B相晶闸管上承受的反向电流迅速增大，短路电流由阴极流向阳极的过程中，在阴极和门极之间产生电压差，一部分短路电流经由脉冲变压器副边的二极管形成通路，将脉冲变副边的铜箔烧断并向-A晶闸管门极放电，造成-A晶闸管提前触发，导致两相短路发展为三相短路^[2]。BC相间发生短路后，由于快熔断器I_{2t}值超标，未能在晶闸管损坏之前迅速熔断，无法保护晶闸管。故障发生后，抽取该批次未损坏的6只快熔断器在上海电器设备检测有限公司进行第三方检测。检测报告显示，快熔断器的弧前I_{2t}+熔断I_{2t}为10.6*106A2s（快熔厂家对此款熔断器未开展相关实际I_{2t}测试的型式试验，其出厂值7.29*106A2s为厂家理论计算值），超过设计值(7.29*106 A2 s)约45%，大于5STP 26N6500晶闸管(10.125*106 A2 s)的I_{2t}，使得快熔断器动作滞后，

无法有效保护晶闸管，使得-A、-C相晶闸管因严重过流而击穿。-A相快熔在通过大电流、内部燃弧后，未能在内部彻底灭弧，快熔破裂喷出的导电物质降低了柜内绝缘水平，引发-A、-B、-C三相熔断器对晶闸管散热器的固定螺栓时间放电（图3和图4），形成电弧。电弧使得快熔内侧（朝绝缘板）铜板烧蚀缺损，瓷管釉面烧熔，瓷管呈碎裂状；而外侧（朝后门）铜板无烧蚀变形，瓷管裂纹长而少。

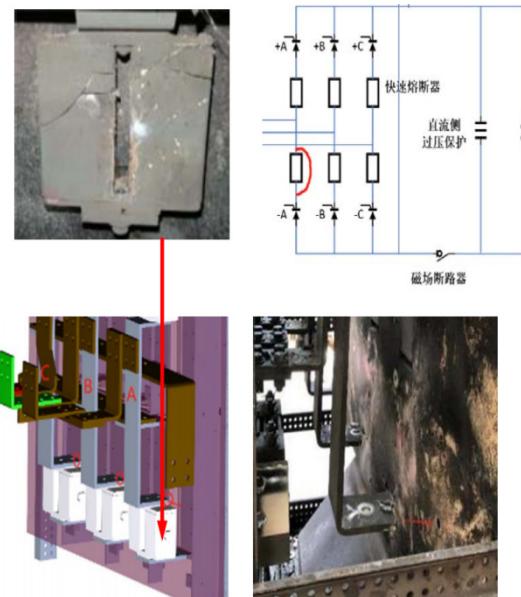


图 3 快熔破裂导致柜内产生电弧

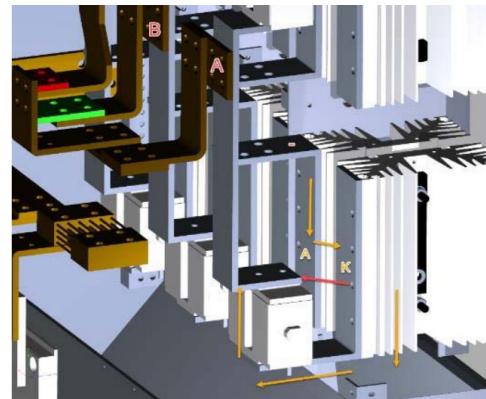


图 4 放电过程示意图（隐去了绝缘板）

电弧在柜内蔓延，经由交流母排的最薄弱部位（汇流铜排支撑处，铜排对地间距25mm（图5），且没有绝缘套管）放电，引发铜排三相短路，使得故障蔓延和扩大化。励磁母排安装到机柜采用了环氧板、不饱和树脂板，均属于有机绝缘，对于I级污秽等级，交流电压1545V需要满足的对地爬电距离不小于 $16 \times 1.545 = 24.72\text{mm}$ ，屏柜交接处（母排支撑）的铜排对地最小爬电距离为25mm，裕度过小，且未有绝缘措施，所以当屏柜内出现拉弧现象，屏柜内部有电离时，此处为最薄弱部位最容易发生放电短路，引起铜排三相短路造成了故障扩大。

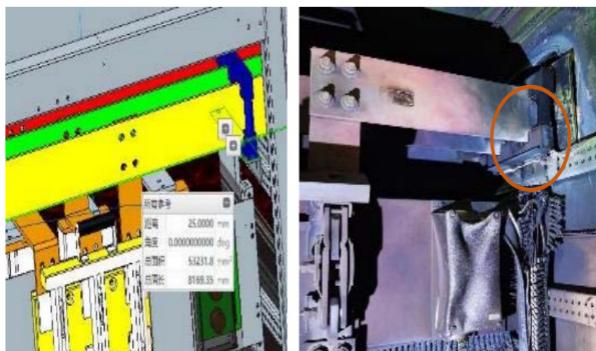


图 5 母排支撑与铜排的间距

6 后备过流保护在故障发生 200ms 后正确动作。由于调相机直轴开路瞬变时间常数约 7.5 秒，并网断路器和磁场断路器分断后，机端电压缓慢下降，无法立即阻断短路电流。长时间的短路电流作用于交流铜排相间短路点（图 6），造成励磁系统烧毁。

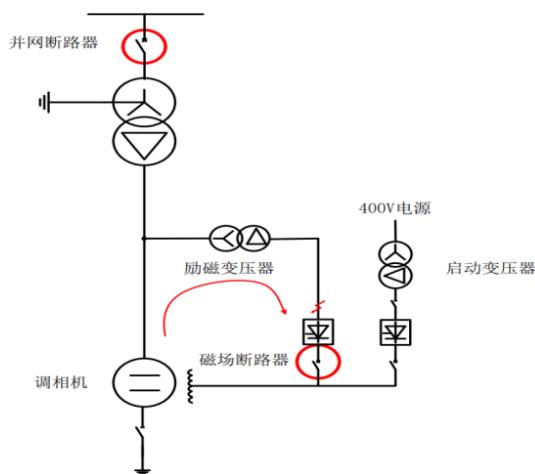


图 6 过流保护动作后的短路电流

5 处理措施和建议

开展晶闸管应用筛选测试，保证供货晶闸管的合格率。所有调相机站励磁系统应提供晶闸管的出厂时间、投入使用时间、出厂报告及复测试验报告，如有不满足质控要求的，

应予以更换。目前励磁系统晶闸管只测试了通态电压、反向断态电流、门极触发电流和门极触发电压等少数参数，应开展更加全面的筛选测试，涵盖断态电压临界上升率、维持电流、擎住电流、通态电流临界上升率、通态浪涌电流、门极控制开通时间等参数^[3]。

优化脉冲触发回路走线方式，提高脉冲触发回路抗干扰能力。工程中应严格禁止在励磁系统屏柜内出现强弱电共槽盒的情况，防止出现信号干扰情况，影响设备运行。

快速熔断器应通过型式试验并提供试验报告。部分型号快速熔断器规格书中的 I_{2t} 参数为推算值，第三方试验发现实测值和推算值的差距达到 45%，造成产品选型不正确，快熔无法起到保护晶闸管的作用。调相机在用励磁系统的快速熔断器应通过型式试验并提供试验报告，实测 I_{2t} 参数应与晶闸管参数相配合，确保熔断器具备可靠的保护能力。不满足要求的，应予以更换。

一次回路应做好绝缘防护措施。南瑞科技和西门子的裸露金属铜排无相关的绝缘措施，存在人员触电和金属短路的风险，所有的励磁系统裸露金属铜排增加绝缘护套，完善绝缘措施。绝缘间隙较小的晶闸管散热器的固定螺丝等位置，应增加绝缘螺帽。

修改励磁变过流保护动作时间，在 200ms 的基础上进一步缩小。在主保护快速熔断器失效的情况下，可通过调变组保护迅速跳开并网开关和磁场断路器，以减少故障持续时间，从而减小对电网和设备的影响。

参考文献

- [1] 国电南瑞科技股份有限公司,国电南瑞南京控制系统有限公司."一种大型调相机启动并网过程中的励磁控制方法."CN107979096B.2021-10-01.
 - [2] 姚辉.同步发电机励磁实时仿真测试系统研究[D].西安理工大学,2005.
 - [3] 王永骥,张丽胜,涂健.同步发电机组励磁系统实时仿真研究[C]//中国机械工程学会.Proceedings of the 4 ~ (th) International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing.华中理工大学控制系;华中理工大学控制系;华中理工大学控制系;.2000:780-786

Research on dredging construction technology in shallow beach and shoal areas

Xiaoliang Fan

China Electric Power Construction Group Fifteenth Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

This paper takes the dredging project in the shallow coastal beach area as the research object, focusing on the suction dredger construction, systematically analyzing its process characteristics, parameter optimization and environmental adaptability. Through measured data and case verification, the construction parameter combination and process improvement scheme of the suction dredge suitable for beach area are proposed. The results show that in muddy beach, when the cutter speed is controlled at 15-20r/min, the mud concentration is at 15%-20%, and the discharge distance is optimized to 3-5km, the comprehensive efficiency is increased by more than 30%. At same time, the impact of construction on the environment can be reduced and the survival rate of benthic organisms and the water quality can be guaranteed by ecological barriers, flocculant and other measures. The research results take into account the construction efficiency and ecological protection, and can provide technical reference for the same type of shallow coastal beach dredging project.

Keywords

shallow beach shoal; cutter suction dredger; dredging process; parameter optimization;

浅海滩涂地区清淤施工技术研究

范小亮

中国水电建设集团十五工程局有限公司，中国·陕西西安 710000

摘要

文章以浅海滩涂地区清淤工程为研究对象，聚焦绞吸式挖泥船施工技术，系统分析其工艺特点、参数优化及环境适应性。通过实测数据与案例验证，提出适用于滩涂区域的绞吸船施工参数组合与工艺改进方案。研究表明，在淤泥质滩涂中，绞刀转速控制在15-20r/min、泥浆浓度保持15%~20%、排距优化至3-5km时，综合效率提升30%以上。同时，通过生态围隔、絮凝剂添加等措施，可降低施工对环境的影响，保障底栖生物存活率与水体质量。研究成果兼顾施工效率与生态保护，可为同类浅海滩涂清淤工程提供技术参考。

关键词

浅海滩涂；绞吸式挖泥船；清淤工艺；参数优化

1 引言

浅海滩涂作为海陆交互敏感带，淤积问题严重制约其生态调节与经济开发功能。绞吸式挖泥船因连续作业、精准控制等优势，成为该区域清淤主流设备，但浅水区潮汐变化、淤泥质地质及高生态敏感性，对施工提出特殊要求。本文以浅海滩涂清淤工程为对象，结合实测数据与案例，聚焦绞吸式挖泥船工艺特点、参数优化及环境适应性，构建适配技术体系，旨在兼顾施工效率与生态保护，为同类工程提供参考。

2 浅海滩涂环境特征与清淤挑战

2.1 水文地质特征

水文条件复杂多变：浅海滩涂平均水深仅0.5-3m，属典型浅水区，直接限制大型设备吃水深度，传统清淤设备难以适配。区域内潮差达2-4m，潮汐涨落导致水深短时间剧烈波动——涨潮时水流速度骤增至0.3-1.2m/s且方向周期性反转，易造成绞吸船定位偏差、泥浆输送不稳。更棘手的是，水体悬浮泥沙含量高达2-5kg/m³，既遮挡观测设备视线、降低作业精度，又与绞刀切削泥浆混合后难以控制浓度，浓度过高易堵管，过低则降低效率，大幅增加施工参数调控难度。

地质组成以淤泥为主：地质以淤泥为核心，粒径<0.075mm的细颗粒占比达60%-90%，兼具粉砂（0.075-0.005mm）与贝壳碎屑。粉砂形成局部致密夹层，贝壳碎屑加速绞刀磨损，破坏地质均一性。物理特性上，地质松散高含水、孔隙率大、黏结力弱，抗剪强度仅<10kPa（远低于

【作者简介】范小亮（1988-），男，中国陕西咸阳人，本科，工程师，从事水利、港航、铁路、桥梁、公路等研究。

常规水域）。施工中，细颗粒淤泥易黏附绞刀形成“糊刀”，需频繁停机清理；同时，松散地质承载力不足，绞吸船易下陷倾斜，不仅影响作业精度，更可能因过度接触导致设备损坏，威胁施工安全。

生态系统敏感性高：作为海岸带生物多样性关键区，浅海滩涂是底栖生物核心栖息地。若施工扰动过大，绞刀会破坏底栖生物洞穴与附着基质，导致生物窒息或迁移；泥浆扩散覆盖植被根系，阻碍其呼吸与养分吸收，最终打破生物与植被的共生关系，引发生态失衡。

2.2 清淤工程难点

设备适应性不足：传统绞吸式挖泥船的最小吃水深度普遍 $\geq 1.5m$ ，而浅海滩涂平均水深仅 $0.5\sim 3m$ ，且受潮汐影响水深波动大，易出现设备搁浅风险，导致施工中断；同时，传统设备的绞刀功率、泥泵扬程等参数难以适配淤泥质地层的切削与输送需求，易出现“切削效率低”“堵管”等问题。

施工效率波动显著：潮汐涨落是影响浅海滩涂施工的

关键因素——涨潮时水深增加但水流速度快，可能导致绞刀定位偏差；落潮时水深骤减，设备易陷入淤泥或搁浅。综合来看，潮汐作用导致每日有效作业时间仅为 6-8 小时，远低于常规水域施工时长，严重制约工程进度。

生态风险管控难度大：清淤过程中，绞刀切削与泥浆输送易导致水体中悬浮颗粒物浓度骤升，使水体浊度(NTU)超过 500，遮挡阳光照射，影响水生植物光合作用；同时，扩散的泥浆可能覆盖底栖生物栖息地，导致生物窒息死亡；若泥浆中携带污染物，还可能造成二次污染，进一步加剧生态破坏。

3 绞吸式挖泥船施工技术体系

3.1 设备选型与改造

基于浅海滩涂“浅水深、软地质、高生态敏感”的特点，绞吸式挖泥船的参数选型与结构改造需围绕“浅水适配、高效切削、精准定位”三大目标展开，具体优化参数及依据如下表所示：

参数	优化值	依据
绞刀功率	200-400kW	适配淤泥质地层的切削需求：功率过低易导致“切不动”或“糊刀”，功率过高则造成能耗浪费，200-400kW 可实现高效切削与能耗平衡
泥泵扬程	25-35m	匹配 3-5km 的优化排距：根据流体力学计算，25-35m 扬程可确保泥浆在 3-5km 排距内保持稳定流速 (2.5-3.0m/s)，避免堵管
船体吃水	$\leq 1.2m$ (平底船型)	提升浅水适应性：采用平底结构减少船体对地质的压力，避免下陷；吃水 $\leq 1.2m$ 可适配大部分浅海滩涂的低潮位水深，降低搁浅风险
定位系统	GPS+ 声呐双模定位	保障施工精度：GPS 定位可实现平面位置精准控制 (精度 $\pm 0.1m$)，声呐系统可实时探测地质变化与水深，避免绞刀触碰硬质夹层 (如贝壳层)。

3.2 施工工艺流程

为实现“高效清淤、精准控污”的目标，将绞吸式挖泥船施工流程划分为前期准备、核心工序、质量控制三个阶段，各阶段关键操作如下：

3.2.1 前期准备

前期准备是保障施工顺利开展与生态保护的基础，核心任务包括地质勘察与生态防护：

地质勘察：采用多波束测深仪对施工区域进行全覆盖扫描，绘制 1:500 高精度地质分布图，明确淤泥厚度、硬质夹层（如贝壳层、粉砂层）的分布范围与深度，为后续绞刀参数调整（如切削厚度、转速）提供依据，避免设备损坏。

生态防护：在施工区域周边布设生态围隔，围隔材料采用高强度 PE 膜（厚度 $\geq 0.5mm$ ）搭配浮筒固定，形成封闭的施工区域，将泥浆扩散范围严格控制在 50m 以内，减少对周边水体与生物栖息地的影响。

3.2.2 核心工序

核心工序是清淤施工的关键环节，涵盖绞刀切削、泥浆输送、吹填调控三个步骤，需通过参数精准控制实现高效作业：

绞刀切削：采用闭式螺旋绞刀（直径 800-1200mm），以扇形轨迹缓慢推进，单次切削厚度控制在 200-300mm。扇形轨迹可提高切削覆盖度，避免漏挖；200-300mm 的切

削厚度既能适配淤泥质地层的抗剪强度，又可防止因切削过厚导致泥浆浓度过高、堵管风险增加。

泥浆输送：泥泵真空度维持在 -80kPa 至 -60kPa 之间，确保泥浆吸入效率；同时将管道内泥浆流速控制在 2.5-3.0m/s，该流速既能避免泥浆在管道内沉积（流速过低易沉积堵管），又能减少管道磨损（流速过高磨损加剧）。

吹填调控：在泥浆输送至吹填区前，按 0.1-0.3kg/m³ 的用量添加聚丙烯酰胺 (PAM) 絮凝剂，加速泥浆中颗粒的沉降，降低吹填区出水的悬浮物浓度，减少二次污染；同时，通过调整吹填管出口流量，避免泥浆在吹填区局部堆积，确保吹填平整度。

3.2.3 质量控制

质量控制需贯穿施工全过程，通过实时监测与精准复核确保清淤效果与生态安全：

泥浆浓度监测：采用 γ 射线密度计对管道内泥浆浓度进行实时监测，监测精度 $\pm 1\%$ ，确保泥浆浓度稳定在 15% ~ 20% 的优化区间—浓度过低会降低清淤效率（单位时间内有效淤泥量减少），浓度过高则易导致管道堵塞。

清淤高程复核：每完成一个施工单元（面积约 50m × 50m），采用差分 GPS 对清淤区域的高程进行复核，确保清淤后高程误差 $\leq \pm 0.3m$ ，避免出现“超挖”（破坏基底结构）或“欠挖”（清淤不达标）问题。

4 施工参数优化与案例分析

为验证绞吸式挖泥船施工技术体系在浅海滩涂的适用性，以印尼沿海城市浅海滩涂清淤工程为案例，通过正交试验与生态监测，分析关键参数对施工效率的影响及工程的生态效益。

4.1 案例背景

该工程位于印尼爪哇岛沿海浅海滩涂区域，施工面积 156 万 m^2 ，清淤总量 630 万 m^3 ，地质以淤泥为主（粒径 $<0.075mm$ 颗粒占比 82%），抗剪强度 6-8kPa，平均水深 1.2-2.5m，潮差 3.2m，周边分布有少量红树林植被。工程采用优化后的绞吸式挖泥船（平底船型，吃水 1.1m，绞刀功率 350kW，GPS+ 声呐定位），施工周期 700 天。

4.2 关键参数敏感性分析

通过正交试验设计，选取绞刀转速、横移速度、排距三个关键参数，分析其对清淤效率（单位时间清淤量）的影响，试验结果如下：

绞刀转速：当绞刀转速从 10r/min 提升至 15r/min 时，清淤效率逐渐提高；转速超过 15r/min 后，效率增长放缓，且能耗显著上升—15r/min 时的切削效率较 25r/min 提高 18%，同时能耗降低 23%。这是因为过高的转速会导致绞刀与淤泥的摩擦加剧，部分淤泥被“打碎”后随水流流失，反而降低有效切削量。

横移速度：横移速度直接影响绞刀的覆盖度，当横移速度为 5m/min 时，控制绞刀切削轨迹的重叠率为 30%，可完全避免漏挖；若横移速度提升至 8m/min，重叠率降至 15%，漏挖率超过 12%，需二次返工，反而降低整体效率。

排距影响：排距与清淤效率呈负相关，排距每增加 1km，清淤效率下降 12%。这是因为排距增加会导致管道阻力增大，需提升泥泵功率以维持流速，而功率提升会增加能耗且易导致设备过载。结合效率与能耗平衡，排距应控制在 3-5km，并根据排距匹配相应的管径与泥泵功率，具体匹配关系如下表所示：

排距 (km)	推荐管径 (mm)	泥泵功率 (kW)
≤3	500	300
3-5	600	400
>5	700	500

4.3 生态效益评估

为评估工程的生态影响，在施工前、施工中、施工后分别对水体浊度、底栖生物存活率、吹填区土壤含水率进行监测，结果如下：

水体浊度恢复：施工期间，生态围隔内水体浊度 (NTU) 最高达 480，但围隔外水体浊度始终低于 80；施工结束后，围隔内水体浊度在 24h 内恢复至施工前水平 (NTU<50)，远快于传统施工工艺的 72h 恢复时间，说明生态围隔与絮凝剂的应用有效控制了泥浆扩散。

底栖生物存活率：在施工区域周边设置对照组（未施工区域）与监测组（施工影响区），结果显示监测组底栖

生物存活率 ≥85%，而传统施工工艺下的对照组存活率仅为 40%，表明优化后的施工参数与生态防护措施显著降低了对底栖生物的扰动。

吹填区土壤改良：吹填区经 PAM 絮凝剂处理后，土壤含水率从初始的 65% 降至 45%，土壤孔隙度与结构稳定性显著提升，满足后续红树林植被重建的土壤条件（植被生长适宜含水率为 40% ~ 50%），实现了“清淤-改良-生态修复”的衔接。

5 技术优化方向

尽管优化后的绞吸式挖泥船施工技术体系在浅海滩涂清淤中取得了较好的效果，但结合行业发展趋势与工程需求，未来仍需从智能化、绿色化、轻量化三个方向进一步升级：

智能化升级：开发基于机器学习的绞吸船自适应控制系统，通过实时采集地质硬度、水流速度、泥浆浓度等数据，构建参数预测模型，实现绞刀转速、横移速度、泥泵功率的动态调整，避免人工参数设定的滞后性，进一步提升施工效率与精度。

绿色清淤技术推广：目前采用的 PAM 絯凝剂虽能加速泥浆沉淀，但仍存在少量化学残留风险。未来可推广生物酶泥浆固化技术，利用生物酶的催化作用促进泥浆颗粒团聚，减少化学药剂使用，同时提升固化后土壤的生态兼容性，更适配浅海滩涂的生态修复需求。

装备轻量化研发：针对潮间带（涨潮时水深 <1m，落潮时裸露）等极端浅水环境，研发模块化绞吸船——将船体、绞刀、泥泵等核心部件设计为可拆分模块，通过小型船舶运输至现场组装，同时优化船体结构，使吃水深度 ≤0.8m，实现潮间带区域的高效清淤，拓展技术应用范围。

6 结语

文章围绕浅海滩涂清淤工程，深入研究绞吸式挖泥船施工技术，明确该设备在浅滩环境中的适配性关键。通过分析水文地质特征与清淤难点，优化设备参数与施工流程，结合案例验证：当绞刀转速 15-20r/min、泥浆浓度 15% ~ 20%、排距 3-5km 时，综合效率提升超 30%，且生态围隔等措施可降低环境影响。研究构建了兼顾效率与生态的技术体系，为同类工程提供参考。未来需进一步推进智能化控制与绿色清淤技术融合，助力浅海滩涂清淤向精细化、可持续方向发展。

参考文献

- [1] 王博,叶宁波,黄伟,王涛,孙立斌.浅海滩涂地区高桩承台吊箱法施工关键技术研究——以杭甬高速复线宁波一期工程滨海高架桥施工为例[J].工程技术研究,2022,7(06):1-7.
- [2] 李莉,吴莹莹,宋娴丽,邱兆星.浅析山东省滩涂贝类养殖现状与技术发展对策[J].水产养殖,2020,41(10):78-80.
- [3] 浅海滩涂和浅海资源[J].能源与节能,2020,(03):5.
- [4] 刘风学,代永辉,冯浩,王志强,高源.GPS 中继站在浅海地形测量中的实际应用[J].水利科学与寒区工程,2019,2(06):96-99.

Summary and Application Research on the Dismantling and Reconstruction Construction of Double-Layer Shell-Type Grid Structures

Jianguo Ji¹ Jiejun Zeng²

1. China State Construction Harbor Construction (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China
2. China Minmetals 23冶 Construction Group Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract

With the development of urbanization, grid structures are widely used in various roof structures, and the quantity and structural forms of grids are constantly increasing. As an important form of long-span spatial structures, current grid projects mainly focus on new construction and reinforcement, and there are few cases of dismantling and reconstructing the original double-layer shell-type grid structures. Currently, there are no specific construction specifications in China for the dismantling and reconstruction of double-layer shell-type grid structures. The technical levels of construction teams vary, and some projects adopt a rough management approach of “dismantling while inspecting.” This paper summarizes and conducts application research on construction techniques, construction processes, quality, safety, and other aspects based on completed construction cases.

Keywords

Double-layer shell-type grid structure; Dismantling and reconstruction construction; Temporary support; BIM technology

双层壳型网架拆改施工总结与应用研究

季建国¹ 曾杰军²

1. 中建港湾建设（深圳）有限公司，中国·广东 深圳 518000
2. 五矿二十三冶建设集团有限公司，中国·湖南 长沙 410000

摘要

随着城市化发展，网架结构广泛应用于各种工程，网架的数量与结构形式不断增多。双层壳型网架作为大跨度空间结构的重要形式，目前网架工程主要以新建和加固为主，部分网架结构需要进行功能调整，需要对原有网架进行拆除和改造。对原有双层壳型网架进行拆除和改造的案例很少。目前国内尚无专门针对双层壳型网架拆改的施工规范，施工队伍技术水平参差不齐，部分项目存在“边拆边验”的粗放式管理。通过已施工案例对施工工艺、施工流程等方面进行总结并应用研究。

关键词

双层壳型网架；拆改施工；临时支撑；BIM 技术

1 引言

双层壳型网架以其跨度大、自重轻、造型灵活的特点，广泛应用于体育场馆、展览中心等大型公共建筑。然而，随着既有建筑老龄化及城市更新需求的增加，20世纪90年代建设的大量网架结构面临功能升级与安全性改造的挑战。目前国内网架拆改施工缺乏专项规范，多依赖《钢结构加固技术规范》（CECS 77）和《既有建筑鉴定与加固通用规范》（GB 55021），存在“边拆边验”的粗放式管理现象，亟需形成系统化的施工工法。本文提出一套涵盖结构检测、

临时支撑设计、分步骤拆改、智能监测及环保回收的完整施工总结，通过技术总结实现网架拆改的安全性、经济性与环保性统一。

2 应用领域

本工法适用于双层壳型网架杆件更换、节点加固或小范围开洞等局部拆改、拆除整片网格并替换为新型子结构等区域重构、全屋面网架加固或曲面形态调整等整体升级。

3 技术原理

双层壳型网架通过上下层曲面网格与腹杆形成空间受力体系，荷载传递路径为“上层网架→腹杆→下层网架→基础”。拆改工法基于结构力学分析，明确杆件受力状态：先拆除次要杆件，后拆除主要受力杆件，同时在关键节点设

【作者简介】季建国（1971—），男，中国江苏泰兴人，硕士，工程师，从事建筑施工技术研究。

置临时支撑（如满堂脚手架或液压顶升系统），确保部分结构拆除后剩余体系的刚度与稳定性。双层结构形式使得网架具有较大的刚度和稳定性。在拆改时，通过合理安排拆除顺序和临时支撑措施，确保在部分结构拆除后，剩余结构仍能保持足够的刚度和稳定性，防止结构发生过大变形或失稳。施工全过程监测，监测发现问题时及时进行调整和控制。改造完成后对整体网架进行检测，检测合格后进行临时支撑架子的拆除。

4 施工流程

前期准备→拆改定位→临时支撑→分步拆除→新结构安装→节点处理→支撑卸载→检测验收

5 操作要点

前期准备：结构检测与评估：对原网架进行三维扫描、材料性能检测（如焊缝、螺栓、杆件锈蚀情况）、荷载复核。
BIM 模型建立：利用 BIM 技术建立原结构模型，模拟拆改过程，优化施工方案。
临时支撑设计：根据拆改区域设计临时支撑体系（如满堂脚手架或液压顶升系统），确保结构稳定性。
拆改区域定位：通过全站仪或激光定位技术，精确标定需拆除或改造的杆件、节点位置。
临时支撑安装：在拆改区域周边搭设临时支撑架，确保荷载转移路径连续，避免结构变形。

分步拆除作业：顺序控制：遵循“对称、均衡、分块”原则，自上而下或由外向内逐步拆除。杆件切割：采用等离子切割或气焊切割技术，避免振动对周边结构造成损伤。
节点处理：保留关键节点时需局部加固，防止应力集中。

新结构安装：杆件替换：新杆件材质、截面需与原设计匹配，采用高强螺栓或焊接连接。曲面拟合：通过三维坐标调整新网架曲面，确保与原结构平滑过渡。

连接节点处理：焊接工艺：采用 CO₂ 气体保护焊，控制热输入以减少残余应力。螺栓紧固：按规范要求进行初拧、终拧，并做扭矩值检测。

临时支撑卸载：采用分级卸载法，同步监测结构变形，确保卸载后网架内力分布符合设计要求。

检测与验收：进行焊缝无损检测（UT/RT）、整体挠度测量及荷载试验，验收合格后移交。

6 材料与设备

涉及的材料与设备主要为制作或更换网架的杆件、节点的钢构件、高强度螺栓、普通螺栓、螺母、垫圈、焊条、焊丝、焊剂、防锈漆、防火涂料、钢管、扣件、钢筋、电锤、钻机、火焰切割机、等离子切割机、砂轮切割机、手工电弧焊机、气体保护焊机、千斤顶、葫芦吊、吊车、电动扳手、2m 靠尺、铁锤、全站仪、经纬仪、水准仪、超声波探伤仪、磁粉探伤仪等，以及操作人员必需的劳保用品等。

7 质量控制

7.1 施工前质量控制

7.1.1 图纸会审与技术交底

组织设计单位、施工单位、监理单位等相关人员对双层壳型网架拆改的设计图纸进行会审。检查图纸是否完整、准确，有无矛盾或不明确之处，对设计意图、技术要求、施工难点等进行深入理解和沟通。

施工单位技术负责人向施工人员进行详细的技术交底，明确拆改的工艺流程、质量标准、安全注意事项等，确保施工人员熟悉施工要求和操作规范。

7.1.2 材料质量检验

对用于网架拆改的钢材、焊接材料、螺栓等主要材料，严格检查其质量证明文件，如出厂合格证、质量检验报告等，确保材料的品种、规格、性能等符合设计要求和相关标准。

对钢材进行抽样检验，包括力学性能试验（如拉伸试验、弯曲试验等）和化学成分分析，对焊接材料进行焊接工艺评定，对螺栓进行扭矩系数或预拉力检验，严禁使用不合格的材料。

7.1.3 设备与仪器校准

对施工所需的切割设备、焊接设备、吊装设备等进行全面检查和调试，确保设备性能良好，运行正常。

对测量仪器（如全站仪、水准仪、经纬仪等）和检测设备（如超声波探伤仪、磁粉探伤仪等）进行校准和标定，保证测量和检测数据的准确性和可靠性。

7.2 施工过程质量控制

7.2.1 拆除过程质量控制

严格按照拆除方案进行操作，先设置好可靠的临时支撑，确保网架结构在拆除部分杆件或节点时的稳定性。临时支撑的布置、强度和稳定性应经过计算和验算。

控制拆除顺序，遵循先次要后主要、先外后内的原则，避免因拆除顺序不当导致结构失稳或变形。对拆除的杆件和节点进行标识和记录，以便后续检查和分析。

在拆除过程中，加强对网架结构的变形监测，及时发现并处理异常情况。如发现结构变形超过允许范围，应立即停止拆除作业，分析原因并采取相应的加固措施。

7.2.2 加工与制作质量控制

对于需要加工制作的杆件和节点，严格按照设计图纸和工艺要求进行加工。控制杆件的长度、截面尺寸、弯曲度等精度，保证节点的构造和连接尺寸符合要求。

对焊接部位进行严格的质量控制，包括焊接工艺参数的控制（如电流、电压、焊接速度等）、焊缝外观质量检查（如焊缝尺寸、表面平整度、有无气孔、裂纹等缺陷）和内部质量检测（如超声波探伤、磁粉探伤等）。对不合格的焊缝及时进行返修处理。

对螺栓连接部位，确保螺栓的安装方向正确，拧紧力矩符合设计要求。采用扭矩扳手进行拧紧力矩的检查和控

制，对重要部位的螺栓连接进行抽样检验。

7.3 安装过程质量控制

网架部件安装前，对基础进行复查，确保基础的坐标、标高、平整度等符合设计要求。对基础表面进行清理和处理，保证网架与基础的连接牢固可靠。

控制网架部件的安装顺序和位置，按照设计图纸和安装方案进行吊装和就位。在安装过程中，使用测量仪器及时调整网架的位置、标高和垂直度，确保安装精度符合要求。

对网架的连接节点进行重点检查，确保节点连接牢固、密封良好。对焊接节点，按照焊接质量控制要求进行检查和验收；对螺栓连接节点，检查螺栓的拧紧情况和防松措施。

7.4 施工后质量控制

7.4.1 结构验收

网架拆改完成后，按照相关标准和规范进行结构验收。检查网架的外观质量，包括杆件的平直度、节点的连接情况、防腐和防火涂层的质量等。

对网架的几何尺寸进行测量，包括跨度、高度、网格尺寸等，与设计图纸进行对比，确保符合设计要求。测量网架的变形情况，如挠度等，变形值应在允许范围内。

对网架进行荷载试验（如有要求），检验结构的承载能力和变形性能。根据试验结果评估网架结构的安全性和可靠性。

7.4.2 资料整理与归档

收集、整理施工过程中的各种质量资料，包括材料检验报告、施工记录、测量记录、检测报告、隐蔽工程验收记录等。

对质量资料进行审核和归档，确保资料的完整性、准确性和可追溯性。这些资料将作为工程质量评定和验收的重要依据，同时也为后续的维护和管理提供参考。

通过以上全面的质量控制措施，可以有效保证双层壳型网架拆改工程的质量，确保网架结构的安全性和可靠性。

8 安全控制

双层壳型网架拆改施工有安全风险，需全面有效安全控制措施保障施工人员安全和工程顺利进行。以下是安全控制要点：

8.1 人员安全管理

安全教育培训：对参与施工人员进行公司级、项目级和班组级三级安全教育培训，内容含安全法规等，考核合格上岗。特种作业人员管理：特种作业人员如焊工等须持有效特种作业操作证，严禁无证上岗，定期考核评估。安全防护用品配备与使用：为施工人员配合格防护用品，监督正确佩戴使用，高空作业系好安全带并设安全绳和网。

8.2 施工过程安全控制

拆除作业安全：拆除前检查结构，确定顺序方法，制定方案，遵循拆除原则；设临时支撑和防护设施，监测结构

变形；及时清理拆除杆件构件，吊运防止坠落。

焊接与切割作业安全：作业前清理易燃易爆物，配灭火器材；焊工遵守规程，设备接地良好；切割用合格设备，控制参数，清理余料。

吊装作业安全：作业前检查维护吊装设备，选合适设备吊具；设警戒区，指挥持证上岗；严禁超载，试吊无误后起吊，异常情况停止作业。

脚手架作业安全：脚手架由专业人员按规范搭设，验收合格使用；作业设防护栏杆和网，禁超载堆放和嬉戏；定期检查维护，恶劣天气后全面检查。

设备与设施安全管理：机械设备定期检查维护，故障及时维修；电气设备安装使用维护符合规范，接地并设漏电保护器；临时设施合理布局，定期检查维护。

安全应急管理：制定安全应急预案，明确组织职责和处置程序；定期组织应急演练；储备应急物资设备并定期检查维护。

9 节能与环保

采用预制装配技术，拆除时可通过逆向工艺分离网架单元，保留钢材、连接件等材料的完整性，回收率可达85%以上，减少新材生产能耗（钢铁行业碳排放占全球7%）。通过局部加固或替换受损构件，避免整体拆除重建，降低70%以上的材料消耗。改造中采用高强度钢或复合材料（如碳纤维），减少结构自重，降低后续使用阶段的荷载能耗。通过建筑信息模型模拟拆改方案，减少返工率和无效运输，缩短工期20%~30%，间接降低能源消耗。使用水性防腐涂料替代溶剂型涂料，减少VOC释放。通过隔音屏障、静音设备（如电动液压剪）将施工噪音控制在65dB以下，符合《建筑施工场界环境噪声排放标准》。

10 结语

双层壳型网架拆改施工工法通过结构力学分析、BIM技术模拟及预制装配创新，构建了一套安全、高效、环保的拆改体系。工程实践表明，该工法在既有网架结构的功能升级与安全性改造中具有显著优势，尤其适用于杆件更换、节点加固及曲面形态调整等场景。

未来可进一步探索智能监测技术（如无人机巡检、物联网传感器）与绿色建材（如高强度耐候钢）的应用，推动网架拆改施工向数字化、低碳化方向发展，为城市更新中的空间结构改造提供更优解决方案。

参考文献

- [1] 钢结构加固技术规范（CECS 77）[S]. 北京：中国计划出版社，2011.
- [2] 既有建筑鉴定与加固通用规范（GB 55021）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2021.
- [3] 钢结构施工规范（GB 50755）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

Application of engineering technology innovation in construction management

Zhongguo Zhao

General Technology Group Engineering Design Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

As a vital component of the national economy, the construction industry plays an indispensable role in driving socioeconomic development. This paper explores the significance of engineering technology innovation in construction management, analyzing how technological advancements in this field have become crucial for enterprises to gain competitive advantages amid social progress and intensified market competition in the new era. The article elaborates on innovations in management philosophies, operational models, and organizational structures within construction practices, while introducing the application of BIM information technology. Furthermore, it provides in-depth research into the latest developments in concrete engineering, steel structure technology, and waterproofing construction techniques. Through comprehensive analysis of these aspects, this study aims to offer systematic theoretical references and technical support for relevant fields.

Keywords

engineering technology innovation; construction management mode; BIM information technology; construction project quality control

工程技术创新在施工管理中的应用

赵中国

通用技术集团工程设计有限公司，中国·山东 济南 250000

摘要

工程建设行业作为国民经济的重要组成部分，在推动经济社会发展进程中扮演着不可或缺的角色。本文探讨了工程技术对施工管理的重要性，分析了新时代背景下，随着社会进步和市场竞争加剧，施工管理及技术的创新成为企业获取竞争优势的关键。文章详细论述了施工管理理念、模式以及组织机构的创新，并介绍了BIM信息技术的应用；同时，深入研究了混凝土、钢结构和防水施工技术领域的最新进展。通过这些方面的综合阐述，旨在为相关领域提供系统的理论参考和技术支持。

关键词

工程技术创新；施工管理模式；BIM信息技术；建筑工程质量控制

1 引言

随着我国经济快速发展和社会全面进步，传统的施工管理模式已难以满足现代社会对于效率、质量和安全性的更高要求。在此背景下，探索并实践新型施工管理方法和技术手段成为行业发展的必然选择。为了适应生产力的发展，满足市场的多元化需求，同时契合企业自身品牌建设与文化传承的要求，必须引入一系列创新措施以提升施工管理水平和技术实力。本论文将从多个维度深入剖析技术创新在施工管理中的具体应用，力图揭示其内在规律和发展趋势，为业内人士提供有价值的思考路径^[1]。

2 工程施工管理及创新技术的必要性

2.1 新时代的基本要求

进入 21 世纪以来，中国经历了前所未有的城市化进程，建筑规模不断扩大，项目复杂度显著提高，这不仅考验着施工单位的技术能力，更对其管理水平提出了新的挑战。面对日益增长的城市人口压力，政府和社会各界对基础设施建设和公共设施完善寄予厚望，期望通过高效的施工管理确保各类工程项目按时保质完成，从而促进城市的可持续发展。此外，随着环保意识深入人心，绿色建筑理念逐渐普及，如何在保证工程进度的同时减少资源消耗、降低环境污染也成为新时代赋予施工企业的责任之一。因此，积极探索适合当前国情和发展阶段特点的施工管理创新技术，既是顺应时代潮流之举，更是履行社会责任之需。

【作者简介】赵中国（1991-），男，本科，工程师，从事建筑工程技术研究。

2.2 社会进步的必然趋势

随着科技革命浪潮席卷全球，信息技术、自动化技术和新材料等新兴科技成果不断涌现，并广泛应用于各行各业之中。建筑业也不例外，近年来，诸如建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）、无人机航拍监测、物联网智能监控等一系列先进技术正逐步改变传统施工方式。这些新技术的应用不仅提高了工作效率，减少了人为错误的发生概率，更重要的是实现了数据共享与协同工作，使得跨部门之间的沟通更加顺畅高效。

2.3 争取竞争优势的关键

在全球化竞争日益激烈的今天，建筑市场呈现出高度分散且竞争异常激烈的特点。众多国内外知名建筑企业在争夺有限市场份额的过程中，纷纷寻求差异化竞争优势。一方面，他们加大科研投入力度，致力于研发具有自主知识产权的核心技术和专利产品；另一方面，则注重内部管理机制改革，力求构建一套科学合理、灵活高效的管理体系。值得注意的是，施工管理创新不仅仅是单纯追求速度或降低成本，而是要综合考虑项目的全生命周期成本效益最大化问题。例如，通过对施工流程进行优化设计，提前识别潜在风险点并制定相应的预防措施，不仅可以有效避免后期可能出现的各种麻烦，还能大大缩短工期，进而为企业赢得更多商机。由此可见，在日趋白热化的市场竞争环境下，能否率先掌握先进的施工管理技术和理念，已经成为衡量一家建筑企业是否具备核心竞争力的重要标志。

3 工程施工管理及创新的原则

3.1 施工管理的创新要适应生产力的发展

生产力水平决定了生产关系的形式，同样地，施工管理创新也应紧跟生产力发展的步伐。具体而言，这意味着要在充分理解现有技术水平的基础上，积极引进国内外先进设备和工艺，持续改进施工工艺流程，不断提高劳动生产率。与此同时，还要密切关注新材料的研发动态，及时评估其在实际工程中的适用性和经济性，为后续推广使用奠定坚实基础。此外，考虑到现代工程项目往往涉及多专业交叉作业，因此还应当加强各部门间的协作配合，打破传统壁垒，形成合力共同解决问题^[2]。

3.2 施工管理的创新要适应市场的需要

市场需求是推动施工管理创新的根本动力。为了更好地满足客户多样化的需求，建筑企业必须时刻保持敏锐的市场洞察力，准确把握市场变化趋势。一方面，针对不同类型的工程项目，如住宅小区、商业综合体、工业厂房等，应分别制定个性化的施工方案，突出特色亮点，增强项目吸引力；另一方面，则要加强与上下游产业链的合作交流，建立长期稳定的战略合作伙伴关系，实现资源共享、优势互补。特别是在当前互联网+的时代背景下，借助电子商务平台拓展销售渠道，开展线上营销活动，已经成为一种新的商业模式。

而这一切的前提在于，施工管理创新必须紧密围绕市场需求展开，既要符合宏观经济发展方向，又要贴近微观个体的实际诉求，真正做到以人为本，服务至上。

3.3 施工管理的创新要符合企业自身品牌及文化的要求

企业文化作为一种无形资产，在塑造企业形象、凝聚员工力量方面发挥着至关重要的作用。因此，施工管理创新不仅要着眼于短期经济效益，更要重视长远的品牌建设和文化传播。从这个角度出发，企业在推进技术创新过程中，应该始终坚持“质量第一”的原则，严格把控工程质量关，树立良好口碑；同时，也要倡导绿色环保理念，践行社会责任，积极参与公益活动，努力营造和谐共融的社会氛围。此外，还可以通过举办技能竞赛、表彰先进典型等方式激发全体员工的积极性和创造力，使每个人都成为品牌文化的传播者和践行者。

4 工程在施工管理方面创新

4.1 施工管理理念创新

施工管理理念的创新首先体现在观念转变上，即从传统的经验型管理向基于数据驱动的科学决策转变。这一过程涉及到大量的数据分析工作，包括但不限于成本估算、进度安排、资源配置等方面。通过建立完善的数据库系统，收集整理历年来积累的各种资料，并运用统计学方法对其进行深度挖掘，可以为管理层提供更加精准可靠的决策依据。其次，在组织架构层面，打破层级分明的传统模式，推行扁平化管理，鼓励基层员工参与企业管理事务，拓宽意见反馈渠道，提高决策透明度。再次，强化风险管理意识，建立健全的风险预警机制，定期开展风险评估，提前制定应急预案，确保一旦发生突发事件能够迅速响应，将损失降到最低限度。最后，强调人文关怀，关注员工身心健康，营造良好的工作环境，以此来提升团队凝聚力和战斗力，为实现企业长远发展目标奠定坚实的人才基础。

4.2 施工管理模式创新

在施工管理模式创新方面，主要表现为以下几个方面：一是实施总承包制，整合设计、采购、施工等多个环节为一体，实现一体化运作，简化中间环节，提高工作效率；二是引入精益建造理念，以客户需求为导向，精简不必要的工序，消除浪费现象，最大程度地节约资源；三是推广装配式建筑技术，预制构件在工厂内完成加工制作后直接运至施工现场组装，既加快了施工进度，又保证了产品质量；四是采用信息化管理工具，如 ERP（Enterprise Resource Planning）企业资源计划系统、PMS（Project Management System）项目管理系统等，实现对人财物等要素的全方位管控，提升精细化管理水平；五是探索 PPP（Public-Private Partnership）公私合营模式，政府与社会资本合作共同投资建设运营公共设施项目，充分发挥双方优势，达到互利共赢的目的。

4.3 施工组织机构创新

施工组织机构创新是指根据项目具体情况调整内部结构设置，使之更加贴合实际需求。例如，针对大型复杂工程项目，可设立专门的技术攻关小组，集中力量解决关键技术难题；对于工期紧迫的任务，则组建突击队，实行轮班作业制度，确保按期完工。另外，还可以根据不同专业领域划分若干个专项工作组，各自负责特定范围内的任务，相互之间既有分工又有协作，形成有机整体。再者，随着信息化程度的不断提高，远程办公、视频会议等形式逐渐普及开来，这就要求施工企业在组织架构设计时充分考虑到这些因素，预留足够的弹性空间，以便于灵活应对各种突发状况。

4.4 建立健全过程管理机制及 BIM 信息技术

建立健全的过程管理机制是确保施工顺利进行的重要保障。该机制涵盖从项目立项到竣工验收全过程的各个环节，每个阶段都有明确的责任主体和工作标准。例如，在前期准备阶段，要做好现场勘查、图纸审查等工作，确保设计方案合理可行；在施工过程中，则要加强监督检查力度，严格按照规范操作，杜绝违规行为；到了后期收尾阶段，要及时组织验收，认真整改存在问题，确保工程交付使用后不会出现质量问题。与此同时，BIM 信息技术的应用也为过程管理带来了全新的变革。利用三维建模软件创建虚拟建筑模型，直观展示建筑物内外部结构及其相互关系，便于各参建方之间进行沟通协调；同时，结合 RFID 射频识别技术、二维码扫描技术等现代化手段，实现对建筑材料、机械设备等实物资产的实时追踪管理，进一步提升了工程管理的精细化程度^[3]。

5 工程施工技术方面的创新

5.1 混凝土施工技术创新

混凝土施工技术作为建筑工程中最基本也是最重要的组成部分之一，近年来取得了长足的发展。高性能混凝土材料的研发成功，不仅增强了混凝土的强度和耐久性能，而且降低了水化热反应产生的裂缝风险，延长了建筑物使用寿命。此外，自密实混凝土的应用解决了传统振捣方式容易造成孔洞缺陷的问题，提高了施工效率。预应力混凝土结构则是在普通钢筋混凝土基础上增加了预加应力，使得结构构件在承受外荷载之前就已经处于受压状态，从而大大提高了承载能力和抗裂性能。还有就是大体积混凝土浇筑技术，通过优化配合比设计、控制入模温度、采用冷却水管降温等措施，有效防止了因温差过大而导致的混凝土开裂现象。这些技术创新不仅改善了混凝土的质量特性，同时也为其他相关领域提供了有益借鉴。

5.2 钢结构施工技术创新

钢结构因其高强度、轻质化、工业化程度高等优点，在现代建筑工程中得到了广泛应用。近年来，钢结构施工技

术不断创新，主要表现在以下几个方面：一是新型连接节点的设计开发，如栓钉连接、摩擦型高强度螺栓连接等，相比传统焊接方式，前者安装方便快捷，后者连接可靠稳定，均能显著提高施工速度；二是计算机辅助放样切割技术的应用，借助专用软件生成精确的构件形状尺寸图，然后按照图纸指令操控数控机床进行自动切割下料，大大提高了加工精度；三是高空散装法和地面拼装法相结合的吊装工艺，前者适用于超高层建筑，后者则更适合于中小型企业，两者有机结合可以充分利用各自优势，确保吊装安全顺利完成；四是涂装防腐技术的进步，采用环氧富锌底漆、聚氨酯面漆等新型涂料，配合热喷涂金属涂层工艺，形成了多层次防护体系，极大地增强了钢材表面的耐腐蚀能力。

5.3 防水施工技术创新

防水施工技术直接关系到建筑物的整体防水效果，关乎居民生活品质和财产安全。目前，防水施工技术创新主要集中在材料选择和施工工艺两个方面。就材料而言，新型高分子合成橡胶卷材、改性沥青防水卷材等防水材料凭借优异的物理化学性能脱颖而出，它们具有良好的柔韧性、粘结力强等特点，能够很好地适应基层变形，不易老化失效。至于施工工艺方面，热熔法、冷粘法、机械固定法等多种铺设方式各有千秋，其中热熔法适用于寒冷地区冬季施工，冷粘法则更有利于夏季高温季节作业，而机械固定法则是针对特殊部位采取的一种加固措施。除此之外，还有一些辅助性技术也被引入进来，比如采用排水板引导地下水排出、设置排气管排除屋面积水等，这些做法可以从源头上减少渗漏隐患的发生几率。

6 结语

综上所述，技术创新在施工管理中的应用是一个系统而复杂的课题，它涵盖了从理念更新到模式转变，再到具体技术突破等多个层面的内容。通过引入先进的管理思想和技术手段，不仅可以有效提升施工效率、保证工程质量，还能显著增强企业的市场竞争力。尤其是在当今全球化竞争加剧的大背景下，建筑企业要想在激烈的市场竞争中占据有利地位，就必须坚定不移地走创新驱动发展之路。为此，相关部门和单位应加大对科研工作的支持力度，鼓励和支持企业积极开展技术创新活动，为我国建筑行业的高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1] 关于建筑工程施工管理及创新技术的应用分析[J]. 李素;陈晓婷.居舍,2019(08)
- [2] 探析建筑工程施工管理及创新技术的应用[J]. 李新;胡波.建材与装饰,2019(05)
- [3] 浅析建筑工程质量保证保险风险管理服务与监理服务的区别[J]. 饶晓燕.建设监理,2019(06)

Discussion on Wastewater Treatment and Quality Improvement and Efficiency Enhancement in Wastewater Treatment Plants Based on Advanced Treatment Processes

Honglei Miao Yanan Wang

Shandong Light Industry Design Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250014, China

Abstract

In the context of the continuous intensification of water resource shortage and the gradual acceleration of urbanization, sewage treatment systems are playing an increasingly crucial role in promoting the recycling of water resources and ensuring water environmental security. In the field of nitrogen, phosphorus and trace pollutant removal, traditional secondary treatment processes have exposed certain limitations. It is quite difficult for them to meet the requirements of high-standard discharge and water quality reuse. Advanced wastewater treatment processes that integrate physical and chemical enhancement, biological enhancement, and green resource utilization can effectively reduce residual pollutants in tail water and promote the comprehensive recovery of nutrients and energy from sludge. It not only provides renewable raw materials for downstream industries and agriculture, forming a multi-dimensional cycle model of water, matter and energy, but also optimizes the effluent quality, reduces the load of nutrients and greenhouse gas emissions.

Keywords

Sewage treatment plant; Advanced processing technology; Sewage treatment; Improve quality and increase efficiency

基于深度处理工艺的污水厂污水处理与提质增效探讨

苗宏磊 王亚楠

山东省轻工业设计院有限公司，中国·山东 济南 250014

摘要

在水资源紧缺问题不断加剧以及城镇化进程逐步加快的情况下，污水处理系统在促进水资源循环利用以及保障水环境安全方面发挥着愈发关键的作用。在氮磷及微量污染物去除领域，传统二级处理工艺暴露出了一定的局限性，想要满足高标准排放以及水质回用的要求对其而言颇具难度。通过集成应用物理化学强化、生物强化以及绿色资源化途径的深度污水处理工艺能够有效削减尾水中残余污染物，推动污泥营养物以及能量的综合回收。其不但能够为下游工业和农业提供可再生原料，形成水—物—能的多维循环模式，还优化了出水水质降低营养物负荷以及温室气体排放。

关键词

污水厂；深度处理工艺；污水处理；提质增效

1 引言

居民生活以及工业生产所产生的污水排放量，伴随城市化进程的持续加快呈现出不断上升的趋势，因为污水内含有许多氮、磷以及难降解有机物，如果不能彻底处理，不但会对水体生态平衡造成影响，而且还会严重威胁区域水资源安全与人居环境。在深度脱氮除磷微污染物去除及出水水质稳定性等方面，传统污水处理工艺仍存在不足，探索并推广深度处理工艺，因此成为提升污水厂运行效率与水质达标水平的重要路径^[1]。

2 深度处理工艺的必要性

2.1 应对更严格的排放标准

地方政府及国家近年来不断加大水环境治理力度，对污水厂出水水质给出了更高标准要求。在氨氮总磷以及化学需氧量等关键指标方面，城镇污水处理厂污染物排放标准相较以往标准更为严苛，这就要求处理设施拥有更高的稳定性，以及污染物削减能力。然而面对总氮总磷及新兴污染物的深度去除，传统二级生物处理工艺主要以去除可生化有机物和悬浮物为主，存在局限。在地表水Ⅳ类甚至Ⅲ类水体功能区划逐步推广下，污水厂必须通过深度处理环节实现对氮磷的精准削减以及难降解有机物的高效分解，以保证出水稳定达标并满足区域水环境功能要求。

【作者简介】苗宏磊（1986—），男，中国山东日照人，本科，工程师，从事给排水研究。

2.2 水资源循环利用的需求

在城市化迅猛推进以及水资源时空分布不均衡的大环境下,污水再生回用正逐步演变成提高供水保障水准的关键路径。在传统工艺之上深度处理工艺增添了对病原微生物、重金属离子以及溶解性有机物的去除能力,以保证回用水拥有更高的适用性与安全性。再生水经过深度处理后,可在市政绿化、道路清洗、景观补水以及部分工业生产环节中广泛应用,这不但缓解了对天然水源的依赖情况,而且降低了因取用地表水或地下水所带来的生态压力。

2.3 提升污水厂运行效益的驱动

随着污水处理行业的运行成本逐年攀升,单纯依靠传统工艺常出现能耗偏高以及水质波动等状况,这不仅加重了运营负担还对设施的服务能力产生了影响。在实施深度处理过程中能够深层次分解有机物以及高效除磷脱氮,能够避免因为水质不达标而引发的环境风险,实现环境治理处罚与二次处理成本的减少。虽然膜过滤和高级氧化技术等深度处理工艺需要再前期投入大量资金,不过在具体运营时能够借助自动化调控与高效物质转化能够达成单位能耗的降低^[2]。不仅如此,污水厂运行效率因工艺集成化与智能化程度提高而得到提升,在保障水质达标的资源回收利用途径也愈发多样,这能够有效推动污水处理系统的整体经济性与稳定性的提高。

3 污水深度处理的主要工艺路径

3.1 物理化学深度处理技术

在污水深度处理里物理化学工艺是应用颇为成熟的路径,主要包括混凝沉淀、砂滤膜分离以及活性炭吸附等方式,其主要原理是借助物理分离以及化学反应来削减常规生化工艺难以去除的污染物。其中,混凝沉淀技术主要是通过使用铝盐、铁盐或有机高分子药剂,让溶解性磷与胶体颗粒相结合形成絮体,进而在重力作用下沉降以效降低总磷浓度和浊度。砂滤技术主要是使用不同类型滤料来进行表层截留与孔隙过滤,将微小悬浮物及部分有机物去除,保证水质的稳定。活性炭凭借其发达的孔隙构造以及较大的比表面积来实施吸附,对水体里的色度分子、可溶性有机物以及部分金属离子具备高效的吸附能力,在深度脱色以及去除异味方面颇为适用。超滤、纳滤和反渗透等都属于膜分离工艺,悬浮颗粒与大分子有机物可被超滤截留,纳滤在保留有机物之际,对二价及多价离子有着良好的去除效果,而反渗透几乎能够把所有离子和微生物都去除掉,达成高纯度水的制备。不过该项技术存在能耗偏高以及膜污染等问题,为了增强处理的持续性与经济性,需采取周期性清洗、对运行参数加以优化以及运用新型膜材料等手段。

3.2 生物强化深度处理技术

在传统活性污泥系统的基础之上,生物强化深度处理技术借助引入特定生物反应单元以及改善反应条件的方式来

高效削减氮磷。反硝化深床滤池作为典型工艺,滤料表面有反硝化菌群附着,凭借外加碳源充当电子供体,让硝酸盐氮还原成氮气逸出,达成总氮浓度降低。而且滤料自身具备截留悬浮物功能,可让出水愈发澄清,生物滤池进行反硝化时把生物反应和物理过滤流程相结合,凭借循环运行模式来保持好氧环境与缺氧环境交替出现^[3]。这一方式增强了氮素的去除效率,还能兼顾对部分有机物的削减。近年来人工湿地成为污水深度处理重要补充,它凭借植物根系对氮磷的直接吸收,基质对污染物的吸附固定以及微生物群落的分解转化作用,构建起多途径协同机制,能持续降低尾水中的氮磷和残余有机物。人工湿地与传统单一生物工艺比起来有着运行能耗低,生态景观价值高等特性,在中小规模污水处理厂的尾水净化以及再生水利用环节有着极高的适用性。

3.3 高级氧化技术 (AOPs)

在污水深度处理里处理痕量污染物的重要手段之一是高级氧化技术,其凭借在水中生成具备强氧化性的羟基自由基,来对难降解有机物开展断链以及矿化操作。其中最为成熟的一项技术是臭氧氧化工艺,在水中臭氧分解会产生高活性物种,这些物种能够快速地破坏有机分子的双键以及芳香环结构,对在色度异味物质还有部分药物残留,臭氧氧化工艺具备良好的去除效果。活性炭联合臭氧运用过程中,活性炭能够对臭氧的分解产物展开进一步的吸附以及催化分解操作,如此一来能防止一部分中间产物在水中出现累积情况进而提高整体的处理效率。此外,在光催化氧化技术里半导体催化剂(像 TiO₂)被光源激发,产生了电子—空穴对,从而形成许多大量羟基自由基和超氧自由基,以达到有效降解新兴污染物抗生素、激素类物质以及农药残留等目的。在近些年里电化学氧化技术同样获得了关注,凭借阳极反应而生成的强氧化剂,能够在较短的时间当中对持久性有机物予以分解而且具备较高的反应速率。即便上述工艺能够有效削减污染物,不过依旧需要采取工艺集成、催化剂改进和能效优化等方式来解决其能耗高、副产物控制以及设备投资大等问题。

3.4 组合工艺的集成化应用

单一深度处理技术通常难以发挥出显著的污水处理效率、能耗降低等作用,组合多种工艺成为污水处理的发展趋势。而使用频率较高的组合是“生物滤池 + 臭氧氧化 + 膜过滤”,其中生物滤池负责进行氮磷及可生化有机物的削减,臭氧氧化主要是进行难降解污染物的分解,膜过滤负责保障出水的稳定性与安全性,部分对水质有着严苛要求的场景也能适用。此外,较为常见的模式还有“混凝沉淀 + 砂滤 + 人工湿地”,其具备处理功能与生态景观功能,主要是运用混凝沉淀来迅速除掉颗粒物以及磷负荷,借助砂滤截留细小的悬浮物,之后通过湿地系统对氮磷以及有机物展开深度削减。近几年,越来越多地应用到了膜生物反应器与高级氧化组合,前端膜分离提供高效固液分离,后端氧化单元降解痕

量污染物，可以同时提高整体运行的稳定以及出水质量。组合工艺的设计主要是以模块化理念为基础，借助自动化与智能化运行系统实现各工艺环节的高效衔接，同时依据进水质特征以及出水要求灵活调整单元配置，不但能有效确保水质，还能实现运行成本的控制。

4 污水厂提质增效的实现路径

4.1 优化工艺运行管理

各处理单元的精确控制以及协调调度是支撑污水厂深度处理工艺稳定运行的运行。第一，建设多参数在线监测系统来动态采集进出水的 COD、氨氮、总氮、总磷等重要指标，以此实现对各处理单元运行状态展开连续监控。并且根据检测数据构建所得工艺模型，能够有效优化水质波动预测和运行参数，为曝气量污泥回流比及药剂投加量的精细调控予以可靠的技术支持，促进脱氮除磷和有机物去除效率地提升。第二，科学协同调度不同的工艺单元。在不同运行阶段，通过对反应器水力负荷停留时间以及循环方式予以优化，让生物反应器沉淀池和膜分离单元始终维持最佳状态，有效降低水质波动对出水稳定性所产生的影响，保证整体系统的稳定^[4]。并且还可将智能控制算法引入，对曝气搅拌以及回流系统进行自动调节，达成好氧缺氧以及厌氧环境的动态平衡状态，确保生物反应效率和水力条件相匹配。第三，全面优化设备维护与运行管理，结合远程监控和预警系统，建立分级巡检与周期性维护制度，针对膜污染曝气器故障以及泵阀异常等问题展开早期干预，以此减少非计划停机状况和能耗损失。同时对历史运行数据展开分析，识别潜在故障趋势，优化维护计划让工艺参数稳定性设备可靠性以及运行经济性同步得到提升。

4.2 强化能源回收与资源化利用

在污水处理流程里有机物以及污泥蕴含着充足的化学能与热能，借助系统化回收手段，能够达成能源利用的最大化。第一，借助污泥厌氧消化技术，达成能源回收。污泥中的有机质可通过厌氧消化分解产生甲烷气体，此气体经收集净化后能直接应用在厂区的供热或发电系统，为污水处理提供部分自供能源。这样一来污泥处置体积得以降低，后续处理负荷也随之减轻。并且还要对反应器温度、停留时间及进料浓度进行优化，且借助微生物群落管理来保持高效的甲烷生成活性，以实现消化效率的提高。第二，采用废热及气体余能的回收系统，提高能源利用率。在曝气机械混合以及污泥脱水等环节，污水厂会产生大量低品位热能。借助热交换器对热量予以回收，来进行污泥预热或者进水温度调节，

降低外部能源消耗。并且对厌氧消化生成的生物气予以高效回收并压缩，将其与热电联产装置相结合，能够在厂区内部达成电力和热能的综合运用提升整体的能效比。第三，资源化利用污水中的可回收物质，运用生物吸收或者化学沉淀技术对总磷予以回收，以此生成能够应用在农业的磷肥产品。并且还可提取污水副产物里的氮钾等元素，并达成循环利用，让资源综合利用水平得到增强。

4.3 推动绿色低碳发展

第一，对能耗结构予以优化，针对污水处理中如曝气、混合以及污泥脱水等环节引入智能泵阀调节、精确曝气和变频控制等手段除确保水质处理达标外，还可有效降低单位水量的能耗。同时对能源消耗展开动态调控以及分项监控，让辅助能源、蒸汽与电力的使用效率实现最大化，减少不必要运行峰值促使污水厂构建起系统能耗的精细化管理模式^[5]。第二，污水处理与可再生能源的耦合推动污水处理厂绿色低碳发展，一方面结合太阳能光伏及地源热泵等可再生能源接入，同时回收厌氧消化产生的沼气用在厂区发电或供热，建立起多能源互补模式以此达到污水处理过程的部分能源自给供应。第三，资源循环利用和绿色化工艺的有机结合，污水厂实施磷回收、氮资源化或是污泥制备有机肥(生物燃料)方式形成水—物—能的多维循环，同时在尾水处理环节则采用微藻培养以及生物膜技术这类绿色工艺，不仅可为下游工业或者农业提供可再生原料，同时也能进一步削减营养物负荷与温室气体排放，最终促使污水处理厂资源综合利用水平和环境适应性提升。

5 结语

污水深度处理工艺既是当前日趋严苛环保标准下现实选择，同时也是实现水资源循环利用以及绿色低碳发展的重要举措。今后污水厂提质增效进程里除了要着重在工艺技术的集成应用和创新外，还应加强资源化利用与运营管理，以此到环境保护、社会价值以及经济效益的统一。

参考文献

- [1] 梁仁礼,胡勇,谢天.广东某污水处理厂氧化沟工艺提质增效改造工程设计[J].水处理技术, 2024, 50(2):153-156.
- [2] 方圆,刘晓钰.污水处理厂灰绿协同策略研究与实践[J].中国给水排水, 2025(10).
- [3] 郭阳,袁芬.污水处理厂扩建升级工程设计优化研究[J].中国建筑金属结构, 2025(10).
- [4] 马路遥,孙伟,张红要,等.广州某污水处理厂提质增效探索与实践[J].中国给水排水, 2024, 40(16):110-115.

Experiment Study on Welded joints of Magnesium Alloy Thin Sheets by Galvo Laser Weld

Zaihang Ao¹ Shouwu Wang² WeiShi¹ Fuzhong Yin¹ Shuhao Fu¹

1. Guizhou Aerospace Tianma Electromechanical Technology Co., Ltd., Zunyi, Guizhou, 563000, China

2. Unit of the Chinese People's Liberation Army, Zunyi, Guizhou, 563000, China

Abstract

This study conducts experimental research on the weldability of magnesium alloy thin sheets, taking the butt welded joints fabricated by galvo laser welding of extruded magnesium alloy (AZ31B) thin sheets with a thickness of 1.5mm as the research object. This paper carries out an analysis on the causes, influencing factors and preventive measures of porosity and voids generated during the galvo laser welding process. The microstructures and defect morphologies of the welded joints were analyzed using analytical tools such as optical metallographic microscopes, scanning electron microscopes (SEM), and energy dispersive spectrometers (EDS). The experiment revealed the presence of hydrogen pores and keyholes in the welded joint. The heat-affected zone(HAZ) was relatively narrow, with significant aggregation of aluminum(Al) elements at the grain boundaries in the fusion zone. The weld metal microstructure consisted of fine equiaxed grains, and there was no obvious tendency of preferential aggregation for any elements in the weld zone.

Keywords

Magnesium alloy thin plate; Galvanometer laser welding; Microstructure; Porosity; Preventive measures

镁合金薄板振镜激光焊焊接接头试验研究

敖再航¹ 王守武² 施伟¹ 尹福钟¹ 符书豪¹

1. 贵州航天天马机电科技有限公司, 中国·贵州遵义 563000

2. 中国人民解放军 93147 部队, 中国·贵州遵义 563000

摘要

本文围绕镁合金薄板的焊接性开展试验研究,采用厚度为1.5mm的挤压变形镁合金(AZ31B)薄板材料在振镜激光焊下制得的对接焊接接头作为研究对象。针对振镜激光焊接过程中气孔、空隙的产生原因、影响因素及防止措施展开分析。利用金相显微镜、电子扫描显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)等分析工具对焊接接头进行微观组织和缺陷形貌分析。试验发现焊接接头中存在氢气孔及空隙,焊缝及热影响区宽度均较窄,熔合区晶界Al元素有较大的聚集,焊缝组织为细小的等轴晶组织,焊缝区各元素无明显的偏向聚集倾向。

关键词

镁合金薄板; 振镜激光焊; 微观组织; 气孔; 防止措施

1 引言

随着装备轻量化的需求越来越多,且又要保持较高的力学性能,因此镁合金作为一种高比强度的轻量化材料,近年来在汽车、数码等领域的应用越来越广泛。但是由于镁合金具有活性高、热导率高、密度低等特点^[1],给镁合金的焊接带来较大的难度,同时镁合金焊接过程中熔池变化不易观察,这些难题都在一定程度上影响镁合金在更多领域的应用范围。因此,为进一步了解镁合金焊接过程及相关要求,提高焊接接头的致密性及抗裂性,提出焊接各环节具体的控制

要求及防治措施。

2 试验方法及过程

2.1 试验方法

2.1.1 试验材料

本试验所用试板材料为变形镁合金 AZ31B, 焊接材料为直径Φ1.6 AZ31B 焊丝, 镁合金试样尺寸均为150mm×20mm×1.5mm。

2.2 焊接接头设计

2.2.1 焊接工艺参数选择

本试验工艺参数(激光功率: 1600W; 振荡幅度: 0.6mm; 振荡频率: 1884:HZ; 送丝速度: 1.5m/min; 电流: 100A; 焊接速度: 2m/min; 保护气体: 99.99 氩气)。

【作者简介】敖再航(1990-),男,中国贵州绥阳人,本科,工程师,从事材料成型及控制工程研究。

2.2.2 试验过程

焊前清理。镁合金化学性质比较活泼，材料表面容易氧化。在焊接前将母材表面的氧化膜及油污用砂纸打磨后，用酒精擦拭清洗干净。

焊接过程。由于本试验采用的母材试板比较薄，对接焊时用压块将试板固定后焊接。

金相制备。垂直于试板长度方向，用线切割设备从焊缝中心截开制取焊接接头金相试样。先后用 50 目、100 目、200 目、400 目、800 目、1000 目、1200 目的水磨砂纸依次打磨至表面无痕。打磨后在抛光机上抛光，依次选用 3 号和 1.5 号的金刚石研磨抛光膏进行抛光。试样抛光完成后进行腐蚀，本试验采用苦味酸溶液腐蚀剂（苦味酸 4.2g，酒精 70ml，蒸馏水 10ml），腐蚀时间为 30-50 秒。腐蚀完毕后用吹风机吹干。采用光学显微镜和 SEM 扫描电镜观察焊缝形貌和缺陷特征。

2.3 镁合金的焊缝成形

2.3.1 焊接接头宏观形貌

试验中得到的镁合金激光焊焊接接头成形良好，焊缝狭窄，肉眼观察下表面连续均匀，变形小，无表面缺陷。图 1.1 (a) 是焊接接头的焊缝宏观图。从图可以看出，在该工艺参数下获得的焊接接头，肉眼观察未发现任何可视裂纹和气孔。从图中可见，焊缝表面存在一定交错的纹路，这是由于引入了振荡作用产生的。焊缝细窄，焊缝熔宽小，这是因为振镜激光焊接的能量集中。图 1.1 (b) 是对接接头 50 倍下的截面图，从图中可以看出，在焊缝中部处存在有一定数量的气孔。

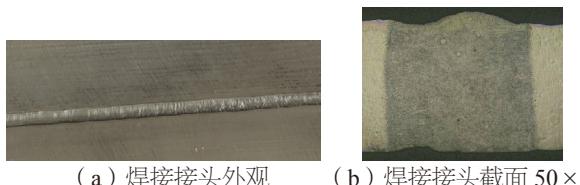


图 1.1 焊接接头宏观形貌

2.3.2 焊接接头微观形貌

图 1.2 是 AZ31B 镁合金激光焊对接接头下的焊缝横断面显微金相图。由图可以看出，镁合金激光焊焊缝狭窄，热影响区比较小。这是因为采用激光焊接方法时，激光束能量集中，能量密度大，焊后冷却速度快，焊接时所需要的热输入小，同时，由于焊接过程中激光与材料的作用时间大大缩短，所以形成的热影响区较小。

母材区：如图 1.2 (a) 所示，母材区均为等轴晶组织，组织中有散状分布大小不一的黑色颗粒，这些颗粒是由于合金成分偏析等原因形成的第二相粒子。

熔合区：如图 1.2 (b) 所示，熔合区的微观结构复杂，宽度较为狭窄。母材热影响区附近的晶粒较为粗大且比母材的晶粒还要大，而熔合线处又有细小的等轴晶，还有一些杂

乱的不规则晶粒组织。

焊缝区：如图 1.2 (c) 所示，焊缝区为细小的等轴晶组织。激光焊能量集中，镁合金热导率大，熔池的冷却速度和结晶速度较快，促进了焊缝区金属的细化。从组织分布来看，焊缝中的柱状组织呈交错状分布，这是由于激光振荡引入激光束的周期性摆动导致熔池温度场波动剧烈，增大了过冷度，熔池内的液态金属流动受到影响从而在凝固过程中晶粒以随机的方向生长，搅拌作用促进了非均匀形核形成方向交错的等轴晶组织。这些等轴晶的生长方向没有明显的规律性，各个方向均有分布。

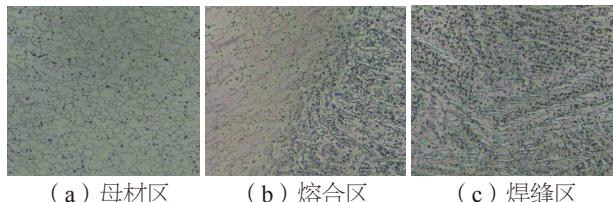


图 1.2 焊接接头组织图 500×

2.3.3 焊接接头化学成分分布

采用 SEM 扫描电镜 + 能谱 (EDS) 对母材区、熔合区及焊缝区开展成分扫描及分析。

母材区：如图 1.3 (a) 所示，母材区主要是 α -Mg 基体。图中出现有亮点，其大小不一，形状不定，在晶界以及晶内均有分布。从元素分布来看，Zn 元素分布均较为均匀，Al 及 Mn 元素整体分布均匀，但是在局部几个点出有一定的聚集，且聚集处均在亮点处，因此可以认为亮点处应当是 Al-Mn 相。通过分层面扫总数谱图结果表明，Mg、Al、Mn、Zn 的原子比为 95.67:3.69: 0.28:0.36，在母材材料的成分范围内。

熔合区：如图 1.3 (b) 所示，从元素分布来看，Al 元素在熔合线处较其它区域相比有一定的增多，Mg、Zn 及 Mn 元素整体分布均匀无明显聚集。在熔合区晶界上点扫发现，Mg、Al、Mn、Zn 的原子比为 55.59: 34.00: 9.38: 1.03，元素原子比发生较大的变化，Mn、Al 元素含量明显提升；而晶界上 Mg、Al、Mn、Zn 的原子比为 95.61:3.77:0.10:0.52，与母材材料成分接近。

焊缝区：如图 1.3 (c) 所示，在焊缝区可以看到组织类似于无规律的分布，在晶界处有白色亮点或线状分布。在母材中出现的亮点 (Al-Mn 相) 消失，Al、Mg、Mn、Zn 元素整体分布均匀，这是由于高频振荡作用对焊缝区进行搅拌，各类元素在凝固前被打散。通过分层面扫总数谱图结果表明，Mg、Al、Mn、Zn 元素的原子比为 95.43:3.86:0.30:0.41，Al 元素含量略高于母材。对晶界处进行点扫发现，Mg、Al、Mn、Zn 元素的原子比为 92.51:6.66:0.21:0.62，Al 元素在晶界上的含量高于母材材料的成分，因此在晶界处 Al 元素仍有聚集倾向。

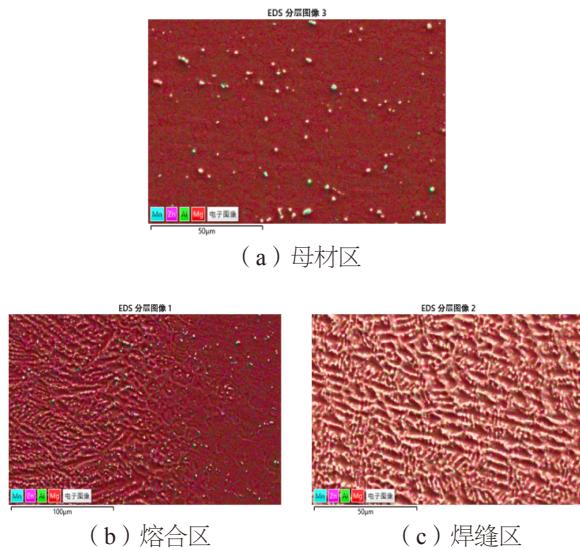


图 1.3 焊接接头 SEM-EDS 图像

3 镁合金振镜激光焊气孔问题分析

3.1 焊缝气孔特征

对镁合金振镜激光焊的试验中发现，在焊接接头焊缝区存在气孔。气孔形态主要为椭圆形和不规则空穴状。从气孔在焊接接头中的分布位置来看，气孔主要出现在焊缝中心区域（如图 1.1（b）所示），根据气孔的形状推断出图 1.4（a）中是氢气孔，通过尺寸测量直径约为 $10\mu\text{m}$ ；而图 1.4（b）中是匙孔，其形状不规则，从外观上看类似于坍塌状，通过尺寸测量直径约为 $20\mu\text{m}$ 。相较于传统激光焊接，振镜激光焊制得的焊接接头中气孔数量较小及尺寸较小^[2]。

3.2 气孔形成机理分析

氢气孔产生的原因：在焊接过程中母材及焊丝表面吸附的水汽在焊接过程中带入熔池中，水汽在高温下分解为氢原子和氧原子并有一部分溶解在熔池中，随着焊接过程的推移，镁合金焊接接头熔池因为导热率快的原因，快速由液态逐步转变为固态，但镁合金密度非常低，因此其对 H 原子的排斥能力较弱，氢原子来不及逃逸就聚集形成氢气孔。

空穴产生的原因：在振镜激光焊接过程，高能量的激光束就向高压水枪冲洗的水池一样，会将金属熔池冲击向下坍塌、回卷，熔化的金属汽化形成金属蒸汽不断排开液态金属，当空穴内部与外部压力平衡时，熔池凝固后就形成空穴。

3.3 镁合金振镜激光焊气孔防止措施

氢气孔及空穴的的防止措施：①焊前保温预热：焊前对母材及焊材低温烘烤保温，使其表面的水汽充分散去；②焊前去氧化膜：焊接前采用钢丝球、锉刀等对待焊处进行清理；③合适的工艺参数：本试验采用的 1884HZ 振荡频率过高，热源的作用时间过短，空穴来不及充分暴露，采用合适的工艺参数（振荡参数、焊接电流、振荡幅度、保护措施）

对气孔的产生有较大的影响。

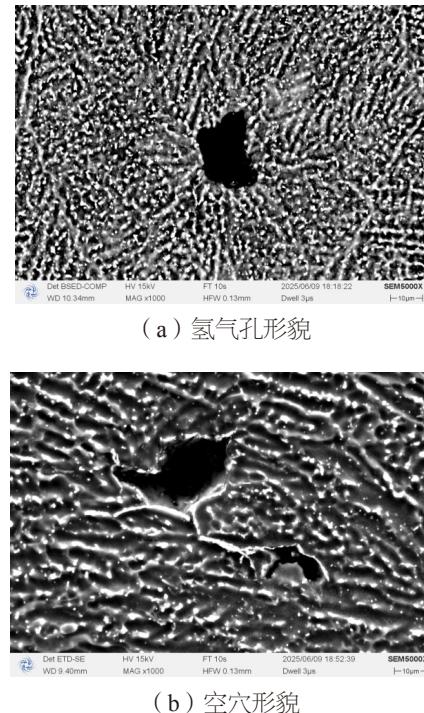


图 1.4 气孔形态特征 5000 ×

4 结语

本文以变形镁合金 AZ31B 薄板材料为研究对象，采用振镜激光焊方法，围绕焊接过程中气孔的产生原因、影响因素及防止措施。得出的结论如下：

采用振镜激光焊焊接变形镁合金 AZ31B 薄板，在理想试验参数下得到的接头肉眼观察下焊缝表面及背面连续、均匀，无可视裂纹和气孔。对接头试样进行剖面高倍显微镜观察，焊缝及热影响区窄均很窄，熔合区晶界 Al 元素有较大的聚集，焊缝组织为细小的等轴晶组织，焊缝区无明显的偏向聚集倾向。观察发现在该焊接条件下得到的 AZ31B 焊缝内部有气孔存在，未发现裂纹存在。

AZ31B 中焊缝中的气孔均分散存在，气孔大多出现在焊缝中心区域。气孔呈圆形，也有少数不规则空穴，气孔内壁光滑，呈现出氢气孔的特征，观察到匙孔引起的气孔。分析认为，激光焊中气孔主要是氢气孔和匙孔空穴，振镜激光焊的振荡作用对匙孔的出现有一定的影响。

参考文献

- [1] 邓玉勇, 朱江, 李立. 新型金属材料镁合金的发展前景分析 [J]. 化工技术经济, 2002 (8), 20 (4): 9-13.
- [2] 邓彩萍. 镁合金薄板激光焊气孔及裂纹形成机理研究[D]. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2010 (5): 20-21.

Preliminary exploration of the application of task classification codes in project schedule management-Taking the application in a large-scale international engineering project as an example

Liang Tang Wei Li Yuntao Luo

Wuhuan Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430223, China

Abstract

To address the challenges posed by the complexity of management tasks in large-scale engineering projects and the diverse management needs of various stakeholders, the design and application of activity classification codes will significantly enhance the efficiency of project schedule planning and tracking, providing innovative strategies for progress management in large projects. This paper, drawing on the author's practical exploration and innovation in the field of large-scale engineering project management, systematically examines the design of activity classification codes and their application in various aspects of project management, including project planning, project schedule planning, execution, and maintenance management. It effectively addresses issues such as interface management among multiple consortia and differences in needs among various stakeholders, significantly improving the efficiency of schedule planning and tracking. The aim is to provide practical references for Chinese engineering companies to achieve "digital management" and comprehensive improvement in project management levels.

Keywords

engineering management; schedule management; Primavera P6; activity classification code

作业分类码在项目进度管理中的应用初探——以某大型国际工程项目应用为例

唐亮 李维 罗运涛

中国五环工程有限公司，中国·湖北 武汉 430223

摘要

为解决大型工程项目管理工作任务复杂、参与各方管理需求多样的难题，作业分类码的设计和应用将显著提升项目进度计划编制与跟踪效率，为大型项目进度管理提供创新策略。本文结合作者在大型工程项目管理领域的实践探索与创新，系统性地研究了工程项目管理过程中作业分类码的设计及其在项目策划、项目进度计划编制、执行与维护管理等多个环节的应用，可有效解决多联合体界面管理、不同相关方需求差异等问题，显著提升了进度计划编制与跟踪效率，以期为中国工程公司“管理数字化”和项目管理水平全面提升提供实践参考。

关键词

工程管理；进度管理；Primavera P6；作业分类码

1 引言

本文结合作者在大型工程项目管理领域的实践探索与创新，基于分类编码理论的面分类法（ISO 12006-2），系统性地研究了工程项目管理过程中作业分类码在各维度的应用组合，实现进度管理数据的标准化组织设计，以及其在

项目策划、项目进度计划编制、执行与维护管理等多个环节的应用，以期为中国工程公司“管理数字化”和项目管理水平全面提升提供实践参考。

2 项目背景

北非地区某化工领域大型工程项目，建设全工艺流程的氮肥、磷肥等主装置及全套公用工程及辅助设施，由中国知名工程公司、欧洲知名工程公司、以及当地大型建筑企业组成联合体承包建设，当地企业负责施工，两家工程公司分别负责不同装置的设计、采购、开车工作，由国际管理咨询

【作者简介】 唐亮（1981-），男，中国河南商城人，硕士，工程师，从事项目管理、项目进度管理和项目材料管理研究。

公司担任 PMC。该项目采用国际标准进行项目设计及建设，项目合同对于过程管理也严格按照国际项目管理要求，界面管理标准高。

该项目在执行难度及管理要求复杂性方面显著提升。一方面工艺装置数量繁多，工艺流程长，土建、设备、管道、电仪等多专业交叉作业；另一方面，多层次界面管理问题突出，涉及联合体成员内部协同、联合体成员之间项目的工作衔接，以及联合体与业主方的权责划分，导致项目进度管理面临多维度协调难题。这种复杂的项目管理架构对传统进度管理模式提出了严峻考验。

在项目初期进度策划阶段，项目管理承包商（PMC）基于项目整体管控目标，对进度计划体系提出系统性要求：项目进度计划完整性与标准化。项目进度计划层级化与结构化。进度控制动态适应性。

该项目合同条款及管理要求凸显了项目进度管理对创

新性技术工具与方法论的迫切需求。根据 Freeman 的干系人权力 / 利益矩阵^[1]，该项目中业主方（高权力 - 高利益）、PMC（监督者）、施工联合体（执行者）的需求差异，属于干系人管理理论中的“多元诉求协调”问题。作业分类码的多维度视图设计，正是对该理论中“定制化沟通策略”的实践响应。

3 作业分类码体系构建与应用

3.1 作业分解结构 WBS 与作业分类码

在项目进度计划编制的过程中，创建工作分解结构 WBS（以下简称 WBS 结构）是一项基础工作。它是指把项目的可交付成果和项目工作分解成较小、更易管理的组件的过程，这一过程为后续进度计划的编制提供了基本架构^[2]，是确保项目各项工作有序开展的重要前提，WBS 结构创建流程详见下图一。

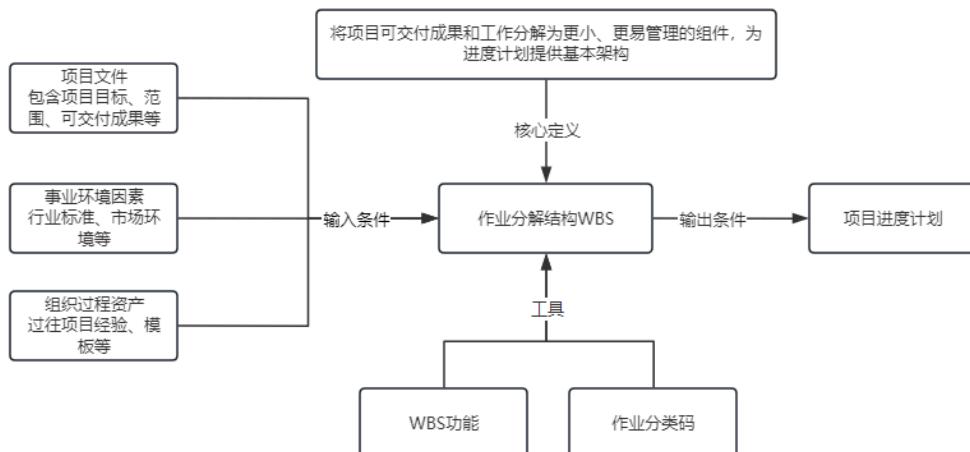


图 1 WBS 结构创建流程图

在使用 P6 编制进度计划创建 WBS 结构时，存在两种不同的工具。传统的工具是使用 P6 自带“WBS 功能”，采用这种方法在进度计划策划初期就需要明确多项内容：首先要确定 WBS 结构和编排方法，这直接关系到后续工作分解的逻辑和合理性；然后按照自上而下的顺序逐层对工作进行细化分解，确保每个分解的层级都能明确对应项目的某一项工作；最后要为 WBS 结构的组成部分制定和分配标识编码，以便对各组件进行识别和管理。

WBS “100% 规则”要求工作分解需覆盖全部项目内容，但传统 WBS 在国际工程中常因结构层级固定导致挣值管理（EVM）的数据归集效率低下。作业分类码通过“动态维度组合”（如：项目装置 × 项目阶段），为 EVM 的控制账户（Control Account）编码提供了更灵活的载体。

本文作者结合以上项目执行实践创新性的采用作业分类码来创建 WBS 结构。具体分为三个步骤：首先创建项目级作业分类码，以适应特定项目的需求；其次调用企业级作业分类码，保证项目与企业整体管理的协调性；最后初步确

定 WBS 结构层级，为后续的工作安排奠定基础。利用作业分类码创建 WBS 结构说明见下图 2。

传统 WBS 功能和作业分类码创建 WBS 结构存在诸多不同：

WBS 结构层级：使用 WBS 功能创建时，WBS 结构层级需要一次确定，然后按照逐层分解的方式进行；使用作业分类码创建时，WBS 结构的层级是初步确定的，且上下层级可以灵活调整，能更好地适应项目执行过程中的变化以及企业级计划标准化管理要求。

WBS 结构输入：WBS 功能的使用受项目文件、事业环境因素的影响较大，当不同项目存在差异时，很难实现统一的管理和操作；而作业分类码由于其 WBS 结构层级的灵活可调性，使得在创建过程中仅需专注于计划本身，减少了外部因素的干扰。

WBS 结构编码：使用 WBS 功能创建时，需要根据企业编码规定，逐项作业按照标准编制标识编码，过程相对繁琐；而使用作业分类码创建时，可以直接调用企业级数据，

保证编码的统一性，仅项目级编码需要进行自定义，可有效提高编码的效率和一致性。

从信息架构理论（IA）看，传统 WBS 采用“自上而下”的层级导航模式，而作业分类码通过“标签系统”实现“任意维度直达”的信息检索（如图 2 所示），这与 IA 设计中的“用户场景导向”原则高度契合，可显著降低干系人获取进度信息的认知负荷。

作业分类码作为 P6 灵活编码体系的核心支撑，是进行

多维度数据可视化分析的基础工具^[7]。通过自定义分类维度与编码值对任务进行标注，使项目进度计划可依据项目阶段、专业、装置工序或采购包编号等要素对项目进度计划内容按需进行排序、筛选与分组。这种定制化的编码分类既保留了传统 WBS 架构的逻辑性，又能精准适配项目场景，帮助项目团队满足不同相关方的管理需求，以场景化信息架构强化协同沟通效率。

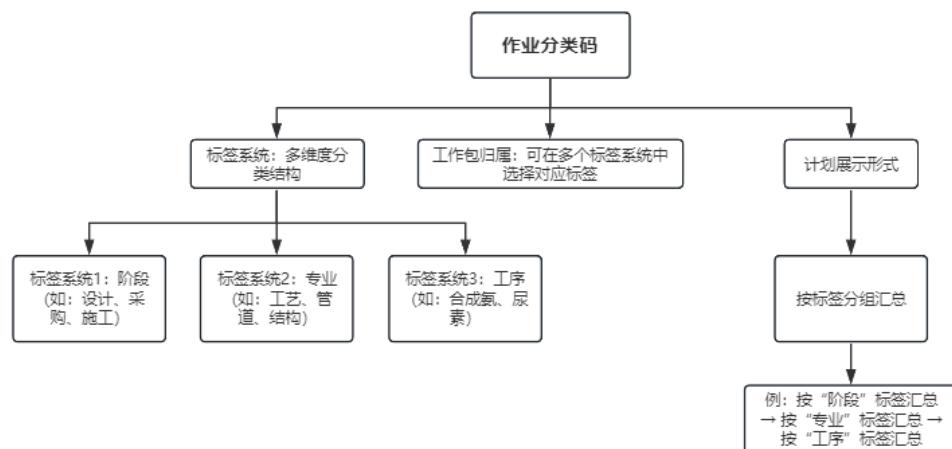


图 2 使用作业分类码创建 WBS 结构说明

3.2 建立作业分类码结构

3.2.1 作业分类码结构适用范围

作业分类码位于 P6 软件的企业选项卡中，分为全局、EPS、项目三个等级，各自具有不同的适用范围。

全局分类码：可供本数据库下所有的 EPS 和项目集、单个项目使用，具有广泛的通用性，可用于企业级统一的分类码使用，规范数据格式，方便数据管理。

EPS 分类码：适用于 EPS 下的所有项目集、单个项目，但在实际操作中，除非涉及项目集应用，否则较少使用，实践中通常习惯为不同项目建立不同数据库。

项目分类码：项目级的分类码，针对不同项目建立不同的分类码。项目分类码可向全局或 EPS 转换，从而成为可供多项目使用的分类码，而全局分类码可直接在数据库中所有项目使用。结合使用全局分类码与项目级分类码，既能实现企业的标准化数据结构管理，又能满足项目的个性化定制需求。

3.2.2 作业分类码结构应用

在项目策划阶段，一般建立四至五个分类码即可满足基本项目管理使用需求，包括装置、工序、主项、建设阶段和参与专业。这些分类码之间并无严格的先后顺序，以该项目为例，在策划阶段建立了四个分类码结构，分别为装置、工序、建设阶段和参与专业，作为项目进度计划编制的基

3.2.3 进度计划编制阶段作业分类码加载

建立作业分类码结构后，就可以正式开始项目进度计

划编制工作。因作业分类码和传统 WBS 功能不同，作业分类码是 P6 进度计划任务作业的标签，在编制项目进度计划之前，需要设置好栏位以及视图，才能更有效的开展进度计划编制及过程管理。

将前一阶段建立的装置、工序、主项、阶段、专业等分类码加载到栏位，确保在编制进度计划时能够清晰显示每项作业的分类码信息。由于提前设置了栏位和视图，在该层级建立新作业时，系统会自动添加相应层级的分类码；若使用剪切、复制、粘贴操作移动或复制作业至其他分组，分类码也会自动更新。通过视图调整和筛选功能，可以利用自动填充按钮进行作业级作业分类码的批量加载。

3.3 作业分类码的视图应用

3.3.1 项目各干系人管理视图需求差异

在项目执行阶段，业主方、PMC、项目执行团队等重要干系人由于管理需求视角各异，通常对项目进度计划的层级架构要求不尽相同，以该项目为例说明项目主要干系人执行团队、业主方的需求差异。

多维度视图的动态组合本质上是复杂系统理论中“涌现性”的体现—单个分类码（如“装置”“阶段”）仅承载单一维度信息，但其交互组合（如“尿素装置 × 施工阶段”）可涌现出传统 WBS 无法实现的跨专业协同视角，作业分类码的应用为复杂系统的分层管控提供了实践支持。

3.3.2 针对项目执行团队

常用的进度计划层级结构一般依托项目 WBS 规划，相

应的计划 WBS 结构层级为项目—建设阶段—装置—工序—主项—参与专业。

项目团队为满足该项目管理实际需求，对于团队内部执行的项目控制基准进度计划执行层级分别为：设计阶段采用参与专业—装置—工序的层级架构，采购阶段采用参与专业—装置—采购包的层级架构，施工阶段采用装置—主项—参与专业的层级架构。

3.3.3 针对业主方

为深入了解每个装置或者装置向下以工序 / 主项为单元的执行进展情况，对计划 WBS 结构层级要求为项目—装置—工序（施工单元）—建设阶段—参与专业。

针对不同干系人的管理诉求，如果采用 P6 软件自带的 WBS 功能建立的 WBS 结构，不能灵活调整视图层级，即使使用作业筛选或者视图设置均不能快速灵活的满足不同干系人的需求^[3]。采用作业分类码的建立的 WBS 结构则可以仅仅通过视图配置即可满足多维度管理的视图要求。此外，通过特定视图设计，可以在项目控制基准进度计划中快速定位特定作业信息，也能按照参建各方以及各参与专业分类整理各自负责的工作任务，清晰呈现项目整体安排的同时也能直接展示所需要的专项进度计划。

3.4 作业分类码其他应用场景

在大型工程项目中，项目进度计划的任务作业数量可能达到数千甚至数万项，使得进度计划的编制与进度计划执行与维护面临巨大的挑战。任务的复杂性导致仅依靠单一的 WBS 结构进行管理变得困难，耗时且效率低下。在项目实际执行过程中，往往难以辨识进度计划关键作业，从而导致项目控制核心任务或者事项不明确。对于项目执行团队，因缺乏对进度计划的深入了解，通常难以理解项目进度计划的具体内容。而通过建立进度计划作业分类编码系统，可以实现对作业的快速筛选，依据不同干系人的个性化需求整理出各类专项计划，为项目各相关方提供定制化的信息内容。

3.4.1 施工单元筛选

该项目的 EPC 合同执行施工联合体模式，所有的施工工作均由当地的一家施工单位执行，每一个施工单元（工序级）的设计、采购与施工的界面关系需要重点关注。在与施

工单位进行施工进度计划谈判和确认过程中，可基于每个施工单元（工序级）的施工图纸提交时间确定界面时间，通过作业分类码配套相应的筛选器，可快速筛选出特定施工单元的任务作业信息^[4]。

3.4.2 专项计划筛选

在工程项目执行过程中，需要编制和维护各种专项进度计划。针对各类专项计划管理需求，如界面管理计划、钢结构专项计划、大件吊装专项计划等，可以分别增加相应的作业分类码，并使用特定筛选器和视图。作业分类码的灵活结构可有效避免传统管理模式下因单独编制多个专项计划所造成的数据流转不一致问题，从而更好地满足项目各干系人的管理需求。

3.4.3 专业、岗位工作执行情况筛选与管理

在项目执行过程中，项目经理或者生产科室管理者需要查看特定参与专业的工作任务完成情况，也可以利用分类码快速通过筛选功能得到所需的内容。

4 结语

在大型工程项目特别是大型海外工程项目进度计划策划阶段，如果采用 P6 软件编制进度计划建立 WBS 结构，相较于传统的 WBS 功能，作业分类码的应用展现了更高的灵活性和适应性，更有效地满足了项目管理中各干系人的多样化管理需求，并且能够预防因需求变更而产生的管理困境，为大型工程项目的进度计划执行与维护提供更高效的解决策略。

参考文献

- [1] 张成英、姜涌、官名昊、林 澎、陈禄阳、辛鲁超. 建设工程数字化管理的建筑信息模型构件编码标准及应用 [J]. 深圳大学学报理工版, 2025 (1), 4-7.
- [2] Freeman (1984) 《Strategic Management: A Stakeholder Approach》.
- [3] PMBOK. A Guide to the project management body of knowledge-2023 edition [M]. Project Management Institute, 2023.
- [4] Oracle Primavera P6 Professional User Guide-2024 edition [M]. Oracle Corporation, 2024..

Research on municipal infrastructure renovation technology under the background of urban renewal

Wanhua Lu

Xi 'an Western Airport Group Construction Engineering Co., Ltd., Xi' an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Against the backdrop of accelerating urban renewal, the functional limitations and aging of traditional municipal infrastructure have become increasingly prominent, emerging as key bottlenecks restricting urban spatial regeneration and high-quality development. Municipal infrastructure such as roads, pipelines, energy supply, and drainage systems often suffers from dispersed layouts, insufficient capacity, high energy consumption, and poor adaptability, making it difficult to support the intensive development and multifaceted functional demands arising from urban renewal. A systematic diagnosis of the current status of municipal infrastructure, combined with the higher requirements of urban renewal for infrastructure load-bearing capacity, adaptability, and sustainability, highlights the need to explore comprehensive renovation approaches that are intensive, efficient, eco-friendly, and resilient. By implementing integrated spatial planning, coordinated underground pipeline systems, embedding green ecological facilities, and building intelligent management platforms, the overall performance of municipal infrastructure can be significantly enhanced, providing a solid foundation for urban renewal.

Keywords

urban renewal; municipal infrastructure; renovation technology; ecological resilience; intelligentization

城市更新背景下市政基础设施改造技术研究

芦万华

西部机场集团建设工程(西安)有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

在城市更新进程不断加速的背景下,传统市政基础设施的功能局限性与老化问题日益突出,已成为制约城市空间再生与高质量发展的关键瓶颈。市政道路、管网、供能、排水等基础设施普遍存在布局分散、容量不足、能耗高、适应性差等问题,难以支撑城市更新带来的高强度开发与复合功能需求。通过对市政基础设施现状的系统诊断,结合城市更新对基础设施承载力、适应性与可持续性的更高要求,需探索集约高效、生态友好、韧性安全的综合性改造技术路径。通过空间统筹规划、地下管网协同、绿色生态设施嵌入及智慧化平台建设,可实现市政基础设施的整体性能提升,为城市更新提供坚实的底座支撑。

关键词

城市更新; 市政基础设施; 改造技术; 生态韧性; 智慧化

1 引言

近年来,随着城市化进程的深入推进,我国大中城市普遍进入存量更新阶段,城市更新已成为推动空间结构优化与经济转型升级的重要途径。然而,大量建于上世纪的市政基础设施普遍存在设施陈旧、容量不足、功能单一等问题,难以满足城市复合功能与高密度开发的需求,制约着城市更新的纵深推进。同时,基础设施在能耗、碳排放、生态安全等方面也暴露出显著短板,不利于实现绿色低碳的发展目标。城市更新不仅要求重塑建筑与土地空间结构,更需以系

统性思维推动市政基础设施的整体改造升级,提升其综合承载力、运行效率与可持续性,从而为新型城市空间的构建提供坚实支撑和技术保障。

2 市政基础设施改造的总体规划与布局优化

2.1 城市更新背景下的功能区重构与空间统筹

在城市更新背景下进行功能区重构需要基于城市空间结构与土地利用效率的综合评估,协调生活、生产与生态空间的布局比例。通过对现有用地性质、人口分布、产业集聚度和公共服务设施覆盖率等指标的系统分析,可发现老旧区域普遍存在职住失衡、公共设施不足和空间利用率偏低等问题。功能区重构需在保留历史文化风貌的前提下,引入复合型用地模式,通过垂直叠加、多层利用等方式提高空间承载

【作者简介】芦万华(1987-),男,中国甘肃武威人,本科,从事民航机场工程研究。

能力，并通过完善道路、绿地、水系等市政要素的衔接来提升区域整体功能联动性。

2.2 综合交通体系优化与道路网格化改造设计

综合交通体系的优化应立足城市更新带来的出行需求增长和交通流向转变趋势，通过交通枢纽再布局和多模式衔接提升交通网络的整体通达性。城市中心区道路密度普遍不足，需要通过道路网格化改造增加路网密度与连通性，减少交通盲区与拥堵节点。轨道交通、公交专用道、自行车道等多层次交通方式的集成有助于形成复合型出行体系，分担核心区交通压力。道路改造中应同步完善排水、照明、管线廊等附属设施，形成“路-网-廊”一体化系统，提升道路网络的综合承载力和使用寿命，为城市更新区域提供高效的交通支撑^[1]。

2.3 地下市政管线系统的协同规划与空间复合利用

地下管线系统在城市更新中承载着供水、排水、供电、通信、燃气等多元功能，其布局混乱、交叉频繁的问题限制了城市空间开发潜力。管线协同规划需依托城市地下空间详查成果，构建统一管线数据库，实现多专业管线的空间协调与时序统筹。采用共同沟或综合管廊方式集约布设可显著减少占地，提高检修和扩容的便捷性，并降低开挖频次带来的交通扰动与地面沉降风险。空间复合利用应通过竖向分层布局，将主干管线置于深层，支线及接入管线布于浅层，实现功能分区明确、维护互不干扰的立体化管网体系。结合智慧化监测技术可实现对管线运行状态、载荷与风险的动态感知，提升地下管网的安全性与运行韧性，为城市更新区域建设提供高效稳定的基础支撑。

3 市政给排水与供能系统的更新改造技术

3.1 老旧供水管网更新与智能化调控系统建设

老旧供水管网普遍存在漏损率高、水质衰减和能耗偏大的问题，影响城市更新区域的生活品质与用水安全。更新改造需采用高强度耐腐蚀的新型管材，优化管径与环网布局，提高水力平衡与输配效率。通过增设分区计量与压力调控设施，可实现精细化分区管理，降低爆管风险和非收益水比例。智能化调控系统的建设可引入流量、压力、水质等多参数传感器，实现实时监测与远程调度，并利用模型算法动态优化泵站启停策略以降低能耗。系统平台可联通城市用水大数据，基于用水负荷预测进行前瞻性调度，提高供水保障能力与运营管理效率，为城市更新区域提供清洁稳定供水支撑。

3.2 排水防涝系统的雨污分流与蓄排结合改造

城市更新区域普遍面临排水系统设计标准偏低、内涝风险频发的问题，雨污混接导致污水处理负荷加重与环境污染加剧。雨污分流改造需通过改建排水管网、设置截流井与检查井来实现雨水与污水独立收集输送，并结合流量调控阀门防止倒灌。蓄排结合系统的构建可利用地下蓄水池、调蓄

管道和地面下凹式绿地实现雨水削峰，缓解短时暴雨冲击负荷，减轻管网溢流压力。改造过程中应统筹道路翻建、绿化恢复和管线综合布设，以减少施工扰动并提升系统整体协同性。通过布设在线水位监测与自动启泵排涝设备，可形成动态化调度体系，提升极端降雨条件下的排水安全保障能力。

3.3 市政供电、供气等能源系统的安全韧性升级

城市更新区域用能密度显著提升，老旧能源系统存在容量不足、布设分散、风险冗余性差等问题，亟需通过系统性升级提升安全韧性。供电系统可采用双回路供电、环网接线和分布式能源互补模式，提高供电可靠性并降低长距离输电损耗。老旧变电站和配电房需进行扩容改造，增设智能监控与故障隔离装置，实现对电网运行状态的实时掌控与快速切换。燃气系统方面应推进高压主干管入地与中压支管分区布设，增加切断阀门和泄压装置，降低事故风险并增强突发事件下的隔离能力。能源系统升级中引入能源管理平台，可实现用能负荷监测、供需平衡调节与应急调度联动，保障城市更新区域在高负荷与极端环境下的能源安全供给。

4 城市环境与生态设施的改造提升路径

4.1 城市绿地系统修复与生态渗透网络构建

城市更新过程中需通过绿地系统修复提升生态功能与景观品质，改善因高强度建设造成的生态破碎化格局。可依据城市热环境、空气流通和生物栖息地连通性等因子，重构绿地空间廊道与生态节点，形成绿楔、绿环、绿网互联的复合生态结构。对于硬质铺装区域，可进行透水改造并引入植被隔离带，增强地表渗透与雨水调蓄能力，缓解地表径流压力。城市绿地系统中融入原生植物群落可提升生态稳定性与低维护性，并在季节更替中形成多样化景观效应。通过多层次绿化空间复合利用，可实现景观与生态双重效益，为城市更新区域营造宜居、低碳、可持续的生态环境支撑体系^[2]。

4.2 海绵城市理念下的雨水调蓄与透水设施改造

城市更新区域地表硬化率普遍偏高，导致雨水下渗不足与地表径流量激增，需引入海绵城市理念对雨水系统进行系统性改造。可通过建设雨水花园、下凹式绿地、透水铺装、生态植草沟等设施，实现雨水的就地滞蓄、渗透与净化，削减径流峰值并延缓汇流时间。道路与广场区域可铺设高孔隙率透水材料，提高入渗率并减少地表水膜形成，降低内涝风险。屋顶绿化与雨水收集设施的结合可实现建筑雨水的二次利用，补充景观水体或绿化灌溉需求。系统化布设雨水调蓄与透水设施不仅能缓解排水系统负荷，还能改善城市小气候，提升生态系统服务功能，为城市更新区域提供绿色低碳的排水解决方案。

4.3 城市噪声、废气、固废治理配套设施更新

在城市更新过程中，环境污染问题因建设密度提升与功能复合化而趋于复杂，原有的环境治理配套设施普遍存在规模不足、布局不合理、技术落后等缺陷，难以应对新型城

区高强度开发带来的环境压力。针对噪声污染，可在城市快速路、轨道交通沿线及工业边界等敏感区域增设高效声屏障、声学吸能墙体及立体绿化隔声带，并在道路铺装中应用低噪声沥青材料，通过降低车辆行驶噪声源强度和传播路径来改善周边声环境。结合智慧噪声监测系统，可实时采集声压级数据并进行空间分布分析，为噪声防控设施的精准布设提供支撑。针对废气污染，可在交通密集区、建筑密集区布设微型空气净化站，采用高效颗粒物过滤与光催化氧化技术降低PM_{2.5}和臭氧浓度，固废治理方面，可推广地下真空管道收运系统和密闭式垃圾中转站，实现生活垃圾无中转堆积直运处理，减少二次扬尘与异味扩散；在社区与公共空间布设智能分类投放装置，通过称重识别、积分激励等机制提高分类投放准确率，并与后端资源化处理系统无缝衔接，形成闭环式固废管理。

5 智慧化技术在市政基础设施改造中的应用

5.1 基础设施全生命周期数字化管理平台建设

市政基础设施在建设、运营与养护阶段存在信息分散、数据孤岛与协同不足等问题，制约改造效率与管理水平。全生命周期数字化管理平台可整合规划、设计、施工、运维等阶段数据，构建涵盖地理信息、构件属性、运维记录等内容的统一数据库，实现信息全程贯通。平台可支持BIM、CIM等模型的协同管理，将管网、道路、桥梁等基础设施的结构状态与空间位置精确映射至数字空间，便于多专业协同设计与施工冲突预判。基于平台的数据分析功能，可实现施工进度、成本消耗、质量风险的动态监控与预警，提升决策响应速度与资源配置效率。运维阶段可通过接入实时监测数据，对设施老化状态与载荷水平进行长期跟踪，实现预防性养护与全周期资产管理，降低运营成本并延长设施寿命^[3]。

5.2 传感监测与物联网系统在施工及运维中的嵌入

在市政基础设施改造过程中嵌入传感监测与物联网系统，可实现对施工安全与运营状态的实时感知与动态调度。施工阶段可在关键结构节点、基坑支护、管线接口等位置布设应力、位移、沉降和渗压等多参数传感器，构建无线传输网络实现高频采集与远程传输，辅助施工风险识别与动态控制。运维阶段可通过在道路、管网、桥梁等设施中布设结构健康监测传感器，实现运行状态与荷载响应的连续监测，并通过云端平台实时分析异常数据，自动生成维护工单与风险

预警。系统与视频巡检、无人机巡查等手段联动，可实现对大范围设施的快速覆盖与智能巡检，提升城市更新区域基础设施的管理效率与安全保障能力。

5.3 大数据驱动的设施性能评估与预测性维护

市政基础设施运行过程中会积累大量状态监测、维修记录与环境负荷等多源数据，大数据分析可为设施性能评估与预测性维护提供科学依据。通过建立设施性能评价指标体系，将结构完好度、使用年限、运行负荷、维修频率、能耗水平等要素进行量化，利用机器学习算法分析历史数据与实时监测数据间的关联，预测潜在故障位置与劣化趋势，实现主动干预与计划性维修^[4]。数据平台可集成GIS空间信息，对设施运行状况进行分区可视化展示，辅助管理部门优化维护资源投配。基于大数据的预测性维护模式能够降低突发故障率与停运损失，延长设施寿命并提升运行安全性，为城市更新区域的市政基础设施提供持续稳定的运营保障机制。

6 结语

城市更新进程中，市政基础设施的系统性改造不仅是改善城市功能布局与提升公共服务水平的关键环节，更是推动城市可持续转型的重要支撑。通过统筹规划布局、优化交通网络、完善给排水与能源系统、提升生态环境设施，并引入智慧化管理平台，可显著增强基础设施的承载力、韧性与适应性，满足高密度开发和多元化功能需求。面向未来，市政基础设施改造需以全生命周期管理为导向，构建集绿色低碳、安全高效、智能协同于一体的综合技术体系，实现城市空间品质与运行效能的同步提升，为城市更新注入持久的发展动力与结构支撑。

参考文献

- [1] 杨贤利.城市更新背景下市政道桥改扩建工程管理模式研究[J].现代工程科技,2025,4(16):181-184.
- [2] 唐文娟.城市更新背景下市政道路提升优化工程的实施策略 [A].2025年第三届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会论文集[C].广西大学广西县域经济发展研究院:2025:181-183.
- [3] 郑志超,王彤.城市更新背景下市政专项规划设计及关键技术研究[J].建设科技,2025,(07):78-80.
- [4] 陶晓聪.城市更新背景下市政道路改造工程的难点与对策[A].人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集（三）[C].重庆市大数据和人工智能产业协会:2025:824-826.

Research on integrated design of community embedded elderly care service facilities

Suning Jiao

Guangzhou Urban Construction Vocational College, Guangzhou, Guangdong, 510925, China

Abstract

As China transitions from mild to moderate aging, the pressure on elderly care services continues to intensify. Community-embedded elderly care services, which integrate home-based, community-based, and institutional care resources, have gained prominence for their personalized, convenient, and efficient nature. The Lingnan region, characterized by high urban density, a pronounced humid-heat climate, and accelerating population aging, has made integrated design of community-embedded elderly care facilities a crucial breakthrough for meeting its aging population's needs. This paper explores systematic integration pathways for spatial and functional coordination in community-embedded elderly care facilities, drawing on Lingnan's distinctive community-based elderly care features and practical experiences.

Keywords

community; embedded elderly care services; facilities; integrated design; key points

社区嵌入式养老服务设施的集成化设计研究

矫苏宁

广州城建职业学院，中国·广东广州 510925

摘要

随着我国由轻度老龄化迈进中度老龄化阶段，养老服务压力进一步加大。社区嵌入式养老服务凭借着整合居家养老、社区养老和机构养老的优势，提供更加个性化、便捷和高效的养老服务备受瞩目。而岭南地区呈现出城市高密度状态，湿热气候显著且人口老龄化现象加剧等特点，社区嵌入式养老服务设施的集成化设计已然成为满足其养老需求的重要突破口。对此，文章结合岭南地区的社区养老地域特征与实践，针对社区嵌入式养老服务设施的集成化设计探讨设施空间与服务功能进行系统性整合的路径。

关键词

社区；嵌入式养老服务；设施；集成化设计；要点

1 引言

根据第七次全国人口普查的结果，目前我国 60 岁及以上的老年人口已达到 2.64 亿，占总人口的 18.70%，占比相较于十年前上升 5.44 个百分点，人口老龄化程度进一步加深，在这种情况下养老服务逐渐成为了社会热点问题。基于此，文章就社区嵌入式养老服务设施的集成化设计展开研究，以供参考。

2 社区嵌入式养老服务概述

在养老服务相关领域，“嵌入”一词指资源嵌入、功能嵌入、主体多元、运作多元的养老服务模式。社区嵌入式养老服务模式是机构养老、社区居家养老模式的补充和整

合，即以社区为载体，通过竞争机制在社区内嵌入一个市场化运营的养老方式，整合周边养老服务资源，为老年人就近养老提供专业化、个性化、便利化的养老服务^[1]。

3 社区嵌入式养老服务设施的集成化设计要点

3.1 基于“五分钟生活圈”的服务设施嵌入

在岭南地区，受高密度居住格局以及交通承载压力给老年群体带来的出行限制情况，社区嵌入式养老服务设施开展集成化设计时，必须严格依照“五分钟生活圈”理念把高频需求节点融入日常路径体系之中。医疗照护环节，要在社区卫生服务站内合理嵌入慢病咨询室、康复训练位以及简易理疗区，配备基础医疗器械与康复辅具，以此满足高龄人群随访以及即时护理方面的需求。同时辅以动线优化，达成与常规诊疗空间的无缝衔接。日常采买路径环节，则应把助餐点和短时休憩区嵌入菜市场外围或临街过渡空间。为此应采取模块化布局，这样能将包括可移动桌椅、冷热餐配餐台以

【作者简介】 矫苏宁（1981—），女，中国辽宁丹东人，本科，副教授，从事建筑设计及其理论研究。

及遮阳通风构件等整合进有限空间内，且须在地面铺设耐防滑砖材以提升安全性。社区文化活动中心环节，应设置具备照护与健康监测功能的辅助空间，其中涵盖血压、血糖自测设备，低强度运动辅导以及临时照料等区域。同时还须通过合理设计隔音与通风设施，保证文化活动与健康服务功能能够互不干扰同步开展^[2]。



图 1

3.2 照护与康复设施的多层级空间植入

针对岭南地区的社区嵌入式养老服务中照护与康复设施的多层级空间植入重点在于集成化设计理念应用。核心康复空间应设在社区综合服务楼或街区枢纽节点，室内布置根据需要配备电动康复训练装置，低频理疗床平或是衡步态矫正设备等，同时再配以可调式照明、无障碍洗浴间使得康复训练与基础理疗能够持续进行。在住宅底层闲置用房或者临时活动室中，适宜嵌入次级护理单元。从空间配置方面应设置慢病信息记录台、简易血压与血糖检测站，以及可调式护理床，且配置独立排风与防滑地面，以此来满足日常照护以及慢病管理的常规操作需求。临时照护点宜采用模块化轻型构筑体系，在材料挑选方面铝合金框架与可拆装复合板材可作为优先考虑对象，这样能保障便捷搭建以及具备良好的耐候性能。其可布置于楼间空地、公共庭院或者社区入口的灰空间均可，且内部设置可折叠护理椅，便携式洗手装置和急救药品柜以此来满足短时停留和突发照护的需求。设备接口与家具尺度的标准化统一，供电及给排水节点预设这些都是

空间植入系统性要求的体现，目的在于确保功能模块在不同场景间能够快速部署与替换。对电梯改造而言，应以医疗担架与轮椅通行为尺度基准，针对没有电梯的社区则增设缓坡或升降平台，坡度不能超过 1:12 且要保证转弯半径能满足 1.5m 轮椅的回转空间。在水平流线部分地面要选用耐磨防滑材料，走廊的净宽需控制在 1.5m，而且在转角处要加设扶手连续带来提升安全性以及通达性。在严谨的尺度控制与构造策略助力下，照护与康复设施的多层级空间植入形成了分布式体系，兼具专业康复基础护理和临时支撑功能，最终促使社区嵌入式养老服务设施在高密度城市肌理里的有效融入。

3.3 物联网与医联网融合下的智慧健康服务集成设计

社区嵌入式养老服务设施的集成化设计需要以物联网与医联网的深度融合为技术支撑，将多元化健康数据采集、传输与应用体系嵌入日常照护环节。首先，在硬件方面，做好不同类型传感终端，包括血压计、血糖仪、智能手环等的设置工作，以连续监测老年人心率、血压、血氧及睡眠状态，监测数据实时上传至医联网平台，让社区医疗机构能够动态掌握个体健康状况。其次，在系统层面构建跨机构的数据互通机制，借助统一的数据接口协议让社区卫生服务中心可以迅速调用实时信息，开展健康干预与远程问诊提高健康服务的精细化水平以及反应速度。再者，在平台设计领域能够把低成本物联网照护保健服务平台的优化举措引入进来，借助开源 API 技术去构建社区级健康数据平台，开发与之配套的居家养老 APP。该 APP 把健康监测以及用药提醒功能进行集成，借助智能手环来获取个体数据。同时将社区药房系统与之相结合，达成处方跟购药的自动匹配，削减线下环节里的人力投入使运营成本得以降低。在后续阶段为逐步完善老年群体的健康支持体系平台结构，注重模块化扩展将康复训练指导营养膳食推荐等服务功能予以整合。此外，在应用模式方面，社区嵌入式养老服务设施要构建起“家庭—医疗机构—社区”这样一种三重联动模式，穿戴设备与 APP 被家庭端用来完成数据采集及初步反馈。社区端设立数据管理和健康干预中心，针对高风险群体开展日常随访以及异常警报响应工作，医疗机构端借助医联网开展专业诊疗，并进行用药指导。



图 2

3.4 无障碍连续动线与界面细化

在社区嵌入式养老服务设施集成化设计上，面向弱势群体的无障碍连续动线与界面细化须按照节点—路径—界面一体化原则，并依据老年群体身体机能特点、岭南地区气候特征以及建筑空间密度实施。路径设计环节构建连续且坡度低的步行体系，在关键的转折和交叉节点设置带微凹槽排水沟和高摩擦系数缓冲带，以此在雨季降低湿滑风险；沿路径布设可触识别的导向条与低障碍界面节点，同时地面选择微结构陶瓷砖或磨砂耐磨复合材料以确保在潮湿条件下拥有稳定的摩擦系数。室内门槛与出入口采取隐埋式且低于12mm处理，或者以可折叠坡道进行衔接，门的净宽需不低于900mm，在门扇和门框的交接地方设置圆弧收口，以此来降低轮椅以及助行器的碰撞风险。室内功能界面按“可达半径”布局策略来组织，餐饮区、活动室以及候诊区要预留出轮椅转弯空间。卫生间需配置规格为1200mm×1500mm的操作位，并设置可拆装扶手挂接节点，洗手台、座椅和扶手三者高度统一设定在700~800mm范围，其中座椅的倾角和高度需符合人体工学测算标准以满足老年人不同体型及握力差异，而扶手端部要做弧形处理^[4]。固定构筑物与辅助设施地布置应当遵循可视性、触觉识别两方面要点，因而扶手直径、栏杆间距以及座椅间距都经过了精细化的计算，以此来确保无障碍操作路径具备连续性。采用模块化可拆装构件以便于快速更换及周期性检修，明确扶手紧固件、地面防滑层及门扇铰链的定期检查与替换标准。另外，连续动线与界面布局要和社区康复训练、临时照护以及社交活动功能节点衔接，这样一来在有限空间里嵌入式养老服务设施仍可实现连续可达性与操作便捷性。

3.5 防滑与排水一体化地面系统设计

针对岭南地区社区嵌入式养老服务设施地面系统的建设，为确保老年人高频使用环境的安全性与连续性关键在于防滑与排水功能一体化。针对户外活动广场以及主要通道，要选用经过高摩擦系数处理的透水砖或者陶土砖，它们的湿态摩擦系数必须符合国际标准安全阈值，甚至要高在该阈值，并且采取砖面微凸纹理与错缝铺排的方式以形成多方向摩擦力增强结构，这样在雨季或是回南潮湿天气老年人安全行走。入口及门厅前沿区域坡道应设置格栅井与线性排水沟，将排水坡度控制在2%-3%的范围内，把雨水迅速沿设定流向引导至次级收集系统。排水构件的边缘与表面应采用

耐磨及抗腐蚀材质，以此延长使用寿命。在雨棚滴水口、绿化带边缘，或者小型广场低洼点这类局部易积水区域，除布置植草沟以及透水混凝土外，还可进行微地形调整，以此构建短时蓄水及快速渗透，从而降低因水膜形成而产生滑倒风险。整体铺装过程中应运用地面构件模块化设计理念，其中涉及到防滑条、排水格栅和透水砖块等部分，一方面利于长期运营阶段能够进行拆卸更换操作，另一方面则便于后续开展定期清理冲洗工作或者局部修复。同时针对行铺装施工环节采取分区分层方式。底层排水砂垫以及透水层的厚度应当依据局部负荷和降雨强度来加以计算，以此兼顾排水效率与结构承载能力，并且为防止因渗水导致基层遭到破坏，砖缝以及格栅接口必须进行密封处理^[5]。坡道跟广场交接之处等衔接点设计时，建议采用微凸缓冲带和防滑过渡带，通过这种设置形成一个连续的防滑界面，以此来保障老年人步行的平稳性以及空间无障碍通行的连续性，同时这也为地面维护提供具有可操作性的模块化节点布局，满足长期可维护性与安全管理方面的要求。

4 结语

综上所述，为有效应对城市高密度、湿热气候以及空间有限的现实养老服务困境，针对岭南地区的社区嵌入式养老服务设施的集成化设计是一项重要举措。该地区的基层养老体系借助于集成化设计对设施空间以及服务功能展开系统性整合，实现“就近照护、连续服务”的目标，同时通过防滑排水、通风以及遮阳等环节强化进一步增强了设施的环境适应性，最终为老年人提供安全、舒适且便捷的养老环境。

参考文献

- [1] 邢泽坤,倪茜.面向社区共生的嵌入式养老服务规划设计模式——以西安市民航社区为例[J].规划师, 2023, 39(5):111-116.
- [2] 刘涵月,于瑶,玉素朴江·图尔荪,等.基于离散选择实验的广州市老年人社区嵌入式养老服务偏好研究[J].中国卫生事业管理, 2024, 41(10):1097-1102,1173.
- [3] 王禹洲 宣炜.嵌入式养老设施适应性设计研究[J]. 2024.
- [4] 白凯,黄卫东,王鼎凯,等.优势视角下社区嵌入式养老服务研究进展[C]//中国老年学和老年医学学会2023年学术大会.长春中医药大学护理学院, 2023.
- [5] 禹佳景.城市社区“嵌入式”养老服务模式研究——以成都市为例[J].现代管理, 2023, 13(2):8.

A Comparative Study of Lighting Construction Techniques in Thick-walled Tibetan Watchtower Temples and Romanesque Churches

Wei Xiong

Lhasa Municipality Design Group Co., Ltd., Lhasa, Xizang, 850032, China

Abstract

As tangible embodiments of human spiritual beliefs, the lighting design of religious architecture profoundly reflects different civilizations' wisdom in constructing sacred spaces. Tibetan watchtower temples and Romanesque churches, as typical representatives of Eastern and Western religious architecture respectively, both employ thick-walled structures as their main framework yet exhibit striking contrasts in lighting techniques and cultural expressions. Comparative analysis reveals that these findings not only deepen our understanding of the technological history of religious architecture but also provide cross-cultural inspiration for contemporary sustainable design: Technically, emphasis should be placed on optimizing the synergy between regional environments and structural systems; Culturally, it is essential to establish correspondence between spatial forms and spiritual aspirations, ultimately achieving an organic integration of functional efficiency, technical rationality, and cultural value.

Keywords

Tibetan-style watchtower temple; Romanesque church; thick wall lighting; structure-cultural dual dimension; light environment of religious buildings

藏式碉楼寺庙与罗曼式教堂的采光构造比较

熊卫

拉萨市设计集团有限公司，中国·西藏 拉萨 850032

摘要

宗教建筑作为人类精神信仰的物质载体，其采光构造深刻反映了不同文明对神圣空间的营造智慧。藏式碉楼寺庙与罗曼式教堂作为东西方宗教建筑的典型代表，虽均采用厚重墙体作为结构主体，却在采光技术路径与文化表达上形成鲜明对比。通过比较分析，这些发现不仅深化了对宗教建筑技术史的理解，更为当代可持续设计提供了跨文化的创新启示：在技术层面应注重地域环境与结构体系的协同优化，在文化维度需建立空间形式与精神诉求的对应关系，最终实现功能效率、技术理性与文化价值的有机统一。

关键词

藏式碉楼寺庙；罗曼式教堂；厚重墙体采光；结构-文化双维度；宗教建筑光环境

1 引言

宗教建筑作为人类精神信仰与空间艺术的有机统一体，在建筑历史发展中始终占据着独特地位；通过空间营造与光环境的巧妙设计，既能充分体现神圣宗教仪式的功能，又能通过光影的象征性语言为人与神灵的沟通搭建物质媒介。尽管藏式碉楼寺庙和罗曼式（Romanesque）教堂都以其厚重的墙体作为主要建构特征，但两者对采光构造的处理却表现出不同的技术智慧和文化表达。文章从结构、功能、文化符号、心理等维度逐层解析并比较了两者的差异。

2 结构维度

宗教建筑厚重墙体的采光构造实质上是结构力学与光学需求的矛盾统一体。藏式建筑通过“收分墙体+密梁系统”实现结构稳定，其底部墙体厚度常达 1.5 至 2.5 米，顶部收至 0.6 至 0.8 米，形成天然的光线导引斜面。罗曼式教堂则发展出“扶壁体系+肋拱”的解决方案，典型的罗曼式外墙（厚 1.8 米）可安全开设直径 1.2 米的圆窗而不影响整体稳定性。采光开口的形态设计遵循最小扰动原则：藏式的梯形天窗（平均尺寸 $0.6 \times 0.9m$ ）长边平行于密梁，将荷载有效传递至承重墙。罗曼式的半圆窗采用双层拱石砌筑，上部荷载通过拱券形态自然分解。

两者在厚重墙体采光构造上的结构差异主要源于两种建筑对力学性能与材料特性的不同适应策略。藏式收分墙体

【作者简介】熊卫（1983-），男，工程师，建筑师，从事建筑设计及理论研究。

与罗曼式扶壁墙体在开洞率与空间利用率都达到了矛盾统一。此外，藏式梯形窗洞的荷载扩散效应使窗角应力集中系数显著优于罗曼式拱券结构，这得益于收分墙体自重分布的渐变特性与窗洞形态的力学优化设计。

在建造材料应用层面，罗曼式建筑依赖石灰砂浆构建拱券体系，其材料特性是抗拉强度较小，要求通过拱脚支撑与扶壁柱去实现结构稳定；而藏式“边玛墙”则通过红柳束夯土技术突破材料限制，较大的抗拉强度使其能在夯土墙体中直接实现悬挑构件。这种材料选择差异也是进一步影响光环境的表现：石灰墙体高反射率形成均匀漫射光场，藏式夯土墙体产生较小的反射率，两者所产生的方向性光影形成鲜明对比：前者营造出模糊空间边界的神圣氛围，后者则通过强烈光影对比强化建筑体量感。

结构遮阳体系的差异化设计则体现了功能与形式的高度融合。罗曼式教堂通过连续拱廊形成水平遮阳系统，在夏季实现有效遮阳的同时维持冬季采光需求；藏式建筑则发展出檐遮阳的垂直遮挡体系，其深挑檐与墙体形成的阴影角度精确控制，既抑制直射阳光，又保留天空漫射光。罗曼式拱券体系则依靠推力传递原理，将荷载沿曲线路径转移至支撑墙体；藏式多层梁架系统通过纵横交错的木构件将窗洞荷载分散至墙体，形成多点支撑网络。

力学与材料特性的协同作用最终塑造出两种截然不同的光环境特征：罗曼式教堂的石灰墙体通过多次反射实现光强均匀化，藏式寺庙的夯土墙体则因低反射率形成明暗对比强烈的戏剧性光影效果。

罗曼式墙体的构造逻辑本质上是材料性能、结构力学与环境控制的多维整合；其复合墙体通过不同材料的层间协同作用，既满足了重型结构的荷载需求，又实现了热工性能的精准调控。扶壁系统与拱券体系构成的双重支撑网络，使墙体能够安全地开设大面积采光口，而几何优化与光压平衡策略则确保了功能与美学的和谐统一。而藏式碉楼寺庙的墙体系统展现了独特的建筑哲学与技术智慧，其构造特征在力学性能与光环境控制之间实现了精妙平衡，梁架在地面投射的几何光影与曼荼罗图式存在对应关系，其投影网格在空间中构建出具有宗教象征意义的光域界面，实现了物理结构与精神空间的统一；这种将天文数据、光学原理与宗教符号学深度融合的构造智慧，充分体现了藏式建筑“天人合一”的设计哲学^[1]。

3 功能维度

两类建筑采光构造的功能逻辑深刻地体现了各自所处的宗教仪式不同所带来的社会生活的深刻差异。借助独特的“时辰光效”系统的运用，罗曼式的教堂就不仅将宗教仪式的时间顺序化了，而且将其巧妙的构造成一个精确的、具有极强象征意义的昼夜光序网络，使得其在建筑空间形象中充分体现了对自然的模仿和对宗教的虔诚。晨祷时，阳光经

棱镜玻璃折射形成漫射光斑，配合了经卷阅读的需求；而晚祷时段，夕阳直射光则强化唱诗班的声场空间感。罗曼式教堂的“季节光调”系统通过墙体内部的阶梯式窗井实现了分层采光控制，冬季下层28°入射角的低窗系统配合厚墙蓄热，使室内温度日较差控制在±2°C以内；夏季65°入射角的气窗系统则通过高侧窗的烟囱效应实现自然通风。

藏式寺庙的“法会光控”法则现出更强的场景适应性，比如可调节的天窗系统通过木板倾斜角度而实时调整，在诵经阶段形成均匀的照度环境，在辩经环节则通过开启天窗格栅形成定向光源，显著增强辩经者的眼神交流强度。藏式寺庙的“气候响应性构造”展现出了更高效的环境应答机制，部分地区的寺庙采用了防风雪格栅系统，通过菱形镂空比例的计算（开孔率45%±3%），在保证一定自然采光效率的同时实现较高的风雪拦截率。这种差异本质上源于建造哲学的分野：罗曼式体系追求永恒的时间秩序象征，而藏式体系则强调与瞬息万变的高原环境的动态平衡^[2]。

4 文化维度

宗教哲学的根本差异深刻塑造了两种建筑体系的采光理念。“基督教”道成肉身”的教义体系要求通过物质形式具象化神圣存在，这种具象性诉求直接导向罗曼式教堂精确的光路控制。圣塞尔南教堂的采光设计通过几何投影计算，将日出时的光线以不超过0.5°的误差精确投射在祭坛，这种对光线轨迹的量化控制体现了经院哲学对自然规律的理性解构。藏传佛教“缘起性空”的哲学观则孕育出迥异的采光逻辑，大昭寺金顶的散射铜镜系统使光线在空间内呈现布朗运动式的随机分布。铜镜表面经特殊氧化处理形成的微坑结构，使入射光发生多次漫反射，最终形成无明确指向的弥散光环境，这种设计策略暗合了佛教对“空性”本质的诠释—光不应具有确定性指向，而应成为阐释因果关系的媒介。

在空间序列的光学处理层面，两种体系呈现出对宗教仪式的不同响应机制。罗曼式教堂通过纵向光梯度强化朝圣进程的仪式感，从入口处到圣坛区域的照度渐变，配合建筑轴线的连续拱券序列，形成“渐进启示”空间体验。藏式寺庙则构建垂直光层系统，底层经堂的基础照度与顶层佛殿的高照度形成强烈对比，这种垂直维度的光差分布对应《俱舍论》记载的欲界、色界、无色界三层次宇宙观。空间中的光强度随高度递增，使朝圣者在拾级而上的过程中经历从物质到精神的渐进转变。

基督教将光的神圣性与神学思想直接关联，这种超越性的光信仰，在罗曼式教堂的空间实践中通过精密的定向采光系统获得物质性实现。藏传佛教对光的诠释则呈现出截然不同的哲学维度：底层殿顶采用完全封闭的无直射光环境，通过压抑的黑暗营造俗世的混沌意象；中层侧向漫射光系统形成光影交错的过渡空间，隐喻修行者突破迷障的渐进过程；而顶层中央天井的垂直光束则构成绝对光明的顿悟象

征，完成从“无明”到“解脱”的宗教叙事闭环^[3]。

罗曼式教堂通过精确的天文定向与彩玻过滤，藏式碉楼通过分层遮蔽与天井透光，都在避免完全开放的自然光环境，这种“控制性采光”的共同选择，印证了宗教符号学的核心命题：神圣光效的建构本质是通过物质手段对自然现象进行象征性转化，使其脱离物理属性而成为精神真理的载体。两者差异化的建构策略，既源于各自宗教经典对宇宙观与修行论的独特诠释，也反映出不同文明对“神圣空间”与“尘世空间”关系的认知分野。在建筑学层面，宗教符号学理论为解读厚重墙体的采光构造提供了超越功能主义的技术分析框架，揭示出建筑形态背后的文化基因与信仰逻辑。

5 环境心理

宗教建筑光环境对信徒心理的塑造遵循特定的认知机制与生理反应规律。罗曼式教堂的空间序列通过墙体厚重性、开口限制采光、开口的精密控制，构建出具有仪式感的光环境梯度，形成的光影层次构建出动态的光环境空间序列；侧廊区域的低照度与圣坛区的高照度形成强烈视觉对比，这种光影张力能极大触发信徒的敬畏感。藏式经堂顶部开口形成的较小的平均照度具有独特的“天启式”照明特征，并利用碉楼墙体的热情性与顶部开口的遮阳构造，在维持室内热舒适的同时创造独特的动态光环境。

光照的时空节奏对宗教体验具有显著调节作用。罗曼式建筑的采光系统通过墙体开口的方位与尺寸控制，使光线在空间中的移动轨迹与宗教仪式时间表精确同步。藏式寺庙的“季节光变”设计则通过墙体开口与建筑坐向的天文计算，使光影变化与藏历节气周期形成对应。两者对均匀照明的共同摒弃，实质是基于环境心理学的理性选择^[4]。

两种建筑类型对均匀照明的共同摒弃，实质是基于环境心理学的理性选择。罗曼式教堂通过墙体厚重性与开口限

制形成的光影层次，构建出符合动态光环境的空间序列；藏式经堂利用碉楼墙体的热情性与顶部开口的遮阳构造，在维持室内热舒适的同时创造动态光环境。这种设计智慧既满足宗教仪式对心理氛围的需求，又通过墙体的物理特性实现环境控制，强调了功能与形式的统一。

6 结语

通过对藏式碉楼寺庙与罗曼式教堂采光构造的系统比较，不仅揭示了两类建筑在技术策略上的明显差异，也揭示了两者在文化表达与功能适应上的共性特征，从其更深层的根源更是体现了基督教的“线性救赎”观念与佛教的“轮回解脱”观念之间空间诠释的深刻差异；罗曼式教堂通过几何精确性实现神圣秩序的物质化，藏式建筑则以环境适应性完成自然与超验的对话，这种差异本质上是“线性时间观”与“轮回时间观”的空间转译。两种构造在基础性能参数上形成技术对位，但抗震与承重体系的差异，反映出地域环境对结构设计的根本影响。采光构造成为宗教哲学的物质载体，两者传统建造的多元路径体现了不同文明的技术路径选择，也充分地体现了两者各自独特的文化取向和哲学本源。两者均是达到了地域环境与结构体系的协同、空间形式与精神诉求的对应，最终实现了结构、功能、文化、心理的有机统一。

参考文献

- [1] 徐宗威.西藏建筑艺术的审美特征[J].城乡建设, 2020 (09) ; 77-81.
- [2] 黄磊.从“怪异罗马式”到“罗曼”、“罗马风”——一种建筑风格的汉译史[J].建筑史, 2017 (01) ,189-201.
- [3] 李蓓,刘焰火.宗教符号的“主观”功能,第一届东亚符号学国际会议;第二届东亚符号学国际会议, 1992;137-138.
- [4] 迈克尔·卡米尔, 钱文逸.“纽约盗走了罗曼式艺术的理念” 梅耶·夏皮罗艺术理论中的中世纪、现代与后现代, 新美术 2022(06),4-22.

Key Technologies for Static Non destructive Cutting and Demolition of Structural Demolition Projects

Gongsheng Li Zewang Liu

China Construction Eighth Engineering Division Zhejiang Construction Co., Ltd., Jiangsu Business Unit, Nanjing, Jiangsu, 200092, China

Abstract

Against the backdrop of rapid urban renewal, existing building renovation projects are facing prominent challenges such as complex structural forms, tight construction schedules, and safety risk control. This article takes the Nanjing Youth Olympic City Living Room Project as the research object, and systematically studies the key technical system of static non-destructive cutting demolition for the special demolition requirements of steel-concrete and steel frame hybrid structures.

Keywords

structural demolition; Non destructive cutting; Static dismantling; Steel reinforced concrete; Load control

结构拆除工程静力无损切割拆除关键技术

李公胜 刘泽旺

中建八局浙江建设有限公司江苏事业部，中国·江苏南京 200092

摘要

在城市更新快速推进的背景下，既有建筑改造工程面临结构形式复杂、工期紧张及安全风险控制等突出难题。本文以南京青奥城市客厅项目为研究对象，针对型钢混凝土与钢框架混合结构的特殊拆除需求，系统研究了静力无损切割拆除的关键技术体系。

关键词

结构拆除；无损切割；静力拆除；型钢混凝土；荷载控制

1 引言

随着我国城市化进程的持续深化，截至 2025 年，城市更新行动已进入提质增效的关键阶段。既有建筑改造作为城市更新的重要组成部分，其结构拆除工程面临着前所未有的技术挑战。南京青奥城市客厅这类兼具公共功能与历史价值的建筑，其改造过程不仅需要满足现代使用需求，还需兼顾结构安全、施工效率与环境保护等多重目标。

本研究以南京青奥城市客厅项目为实践载体，针对 5310 m² 混合结构在 45 天工期内的特殊拆除需求，重点解决三个核心问题：一是大截面型钢混凝土梁（550 × 2350 mm）的应力释放控制，二是 300 mm 厚泳池板等异形构件的无损分离，三是临时支撑体系与动态荷载的协同调控。通过系统整合绳锯切割、等离子焊割等工艺，旨在建立一套适用于复杂混合结构的标准化拆除技术体系。研究成果将为同类工程提供技术参照，推动建筑拆除领域向精细化、低碳化方向

转型。

2 关键技术体系与工艺优化

2.1 绳锯分块切割与等离子型钢分段切除技术融合

在混合结构拆除工程中，绳锯分块切割与等离子型钢分段切除技术的协同应用是解决异质材料分离难题的核心突破点。南京青奥城市客厅项目的实践表明，两种工艺的有机融合需重点解决界面识别、时序控制与应力协调三个关键问题。

针对混凝土与型钢的界面识别，在绳锯切割混凝土保护层前，采用钢筋探测仪并进行预打孔来判断型钢埋设位置，避免金刚石绳锯直接接触钢材导致异常磨损；对于复杂节点区域，辅以磁粉探伤技术精确定位剪力栓钉分布，确保了切割路径的精确规划，将传统工艺中常见的钢筋误切率降低显著。

工艺时序的精准控制是保障施工效率的关键。针对 550 × 2350 mm 大截面梁的拆除，创新采用“三阶段渐进式”作业流程：第一阶段用绳锯沿梁长方向每 1.5 米分块切割混凝土，保留跨中 10% 截面作为临时应力支撑；第二阶段采

【作者简介】李公胜（1993-），男，中国山东聊城人，本科，从事城市更新研究。

用等离子设备在型钢预设切口位置进行分段切除，每段长度控制在 0.8 米以内以减小荷载突变；第三阶段对剩余混凝土块体实施补充切割，最终完成构件分离。这种分步工艺既避免了整体切割导致的瞬时应力释放风险，又通过工序重叠将单根梁的拆除时间缩短明显。

应力协调方面，通过建立“切割 - 支撑”动态响应机制实现荷载平稳转移。在泳池区 300mm 厚楼板拆除过程中，当绳锯完成混凝土块体切割后，暂不吊离构件而是保持其原位支撑状态，待等离子设备完成周边型钢焊缝切除后，再同步移除外侧临时支撑与切割块体。这种“切割完成即形成新支撑点”的策略，使得结构内力重分布过程更为平缓。

该技术体系在城市更新项目中展现出独特优势：对于需要保留历史风貌的改造工程，其微扰动特性可最大限度保护原有结构；在商业综合体等工期紧张场景下，平行作业模式能大幅缩短拆除周期。随着智能传感技术的发展，未来可通过在切割头集成视觉识别系统，实现混凝土与钢材界面的自动判别与工艺切换，进一步提升混合结构拆除的智能化水平。

2.2 动态荷载控制下的分步拆除工艺设计

在混合结构拆除过程中，荷载的动态变化是影响施工安全的核心因素。南京青奥城市客厅项目通过创新设计“混凝土剥离 - 型钢切割 - 跨中回顶”分步工艺，实现了拆除过程中结构受力的平稳过渡。

针对型钢混凝土梁的拆除，首先采用绳锯对混凝土保护层进行纵向分块切割。每切割完成一段混凝土后，保留跨中部分截面作为临时支撑点，形成“多点悬吊”的受力状态。这种设计有效避免了混凝土一次性剥离导致的型钢突然失稳风险。现场观察发现，分块切割后的混凝土构件虽已与主体分离，但其自重仍能通过未切割的跨中区段传递至支撑体系，为后续型钢切除创造了稳定的作业条件。

等离子切割型钢阶段采用“对称分段”策略。从梁端向跨中方向依次切除型钢段，每段长度严格控制在合理范围内。当切除某段型钢时，其承担的荷载会立即转移至相邻未切割段及临时支撑系统。通过预先在支撑点布置液压千斤顶，可根据应变监测数据实时补偿荷载损失。例如在泳池区大梁拆除时，当监测显示某支撑点荷载增加超过预警值，立即启动对应位置的千斤顶进行力值平衡，将结构变形量始终控制在允许范围内。

“跨中回顶”作为工艺的最终保障环节，其核心是把握介入时机。回顶过早会阻碍结构应力的自然释放，导致残余应力积聚；回顶过迟则可能引发不可逆变形。项目团队通过建立“双指标”判断标准：一是监测跨中挠度变化速率，当增速超过设定阈值时触发回顶；二是检查相邻支撑点荷载分配比，当某点承担荷载超过总量 60% 时启动补偿。这种动态调控机制使得 550 × 2350mm 大截面梁的拆除过程未出现突发性垮塌事故。

临时支撑体系的优化设计是工艺成功实施的基础。不同于常规拆除工程的均布支撑方案，本项目采用“关键点强化”布置原则。通过有限元分析确定结构在分步拆除过程中的内力重分布规律，在弯矩最大处（如悬挑端部、跨中区域）加密支撑点，并采用盘扣架与型钢柱组合支撑形式。

施工组织方面采用“时空置换”法化解效率与安全的矛盾。将拆除区域划分为泳池区、大厅区、塔楼区三个流水段，各段按“切割混凝土→切除型钢→吊运废料”的固定工序推进，确保同一时段内不同工种在不同区域作业。这种安排既避免了设备集中使用导致的相互干扰，又通过工序衔接实现了动态荷载的分散转移。项目实践证明，该工艺使整体拆除效率提升显著，同时将支撑体系的最大变形量控制在极低水平。

该工艺的创新价值主要体现在三个方面：首先，通过分步释放荷载的方式，解决了混合结构拆除中的“多米诺骨牌”效应难题；其次，利用结构自身残余承载力参与受力体系，降低了临时支撑的材料消耗；最后，动态调控机制实现了安全与效率的平衡，为城市更新项目中的快速拆除需求提供了可行方案。随着智能监测技术的发展，未来可通过植入光纤传感器实时感知结构应力状态，进一步提升分步拆除工艺的精准性与可靠性。

3 工程应用与效果验证

3.1 南京青奥项目施工组织与流程实施

南京青奥城市客厅项目的施工组织与流程实施充分体现了静力无损切割技术在复杂混合结构拆除中的系统性应用。针对 5310 m² 拆除面积及 45 天工期的严格要求，项目团队采用“分区流水、立体交叉”的作业模式，将工程划分为泳池区、大厅区、塔楼区三个独立施工段，各段按“四 / 三层拆除→四层复建→五层拆除”的核心路线推进。这种组织方式既保证了工序衔接的连续性，又通过空间隔离避免了不同工种间的相互干扰。

施工流程设计遵循“先支撑后切割、先次要后主要”的基本原则。在泳池区 300mm 厚楼板拆除中，首先搭设盘扣架临时支撑体系，立杆间距根据楼板承载力模型计算确定，最大荷载处采用双立杆加强。随后采用绳锯沿预先放样位置进行分块切割，每块尺寸控制在 2m × 2m 以内，切割完成后暂不吊离混凝土块，使其继续承担支撑功能。待相邻区域型钢等离子切割完成后再统一移除，这种“切割块体暂代支撑”的工艺创新显著减少了临时支撑材料的用量。正如黄柳君指出，“无损静力拆除法在拆除过程中不会引起结构振动，保证保留构件的稳定性”。

型钢混凝土梁的拆除采用“三段式”标准化流程：第一阶段用绳锯剥离梁两侧混凝土保护层，保留跨中 10% 截面作为应力过渡区；第二阶段采用等离子设备分段切除外露型钢，每段长度不超过 0.8 米；第三阶段对剩余混凝土实施

补充切割并吊离。针对 $550 \times 2350\text{mm}$ 特大截面梁，增设液压千斤顶进行荷载补偿，通过实时监测应变数据动态调整支撑力，确保拆除过程中的结构安全。施工记录显示，该流程使单根大梁拆除时间缩短明显，且未出现预期外的结构变形。

施工进度控制采用“双线并行”管理方法。主线跟踪混凝土切割与型钢切除的关键路径，支线协调废料清运与临时支撑调整等辅助工序。每日召开跨专业协调会，根据激光扫描获取的现场三维模型动态调整作业计划。特别在体育区拆除时，通过承载力计算明确临时坡道 5.57t 的限载条件，指导设备行走路线规划，既保障了施工效率又避免了支撑体系超载风险。

该项目的成功实施表明，针对混合结构特点量身定制的施工组织方案，能有效协调静力切割技术的精度要求与城市更新的效率需求。其经验可归纳为三点：一是通过分区流水实现资源优化配置；二是依托工艺创新化解复杂工况挑战；三是借助信息化手段提升过程管控水平。这些实践为同类工程提供了可复用的管理范式，也为静力无损切割技术的标准化应用积累了宝贵案例。

3.2 拆除效率、安全指标与资源回收率分析

南京青奥城市客厅项目的实施效果验证了静力无损切割技术在拆除效率、安全控制与资源回收方面的综合优势。通过系统分析施工全过程数据，该技术体系展现出显著的应用价值。

在拆除效率方面，项目采用的“分区流水”作业模式与标准化工艺显著提升了施工进度。绳锯切割混凝土的效率达到行业先进水平，特别是针对 300mm 厚泳池楼板的切割作业，通过优化分块尺寸与切割顺序，单台设备日均完成面积较传统方法提升明显。型钢切除环节采用等离子分段工艺，配合可旋转式切割臂的应用，使复杂节点部位的施工周期缩短显著。

安全控制指标表现突出，主要体现在三个方面：一是结构变形控制，通过“混凝土剥离-型钢焊割-跨中回顶”的分步工艺，将 $550 \times 2350\text{mm}$ 大梁拆除时的跨中挠度变化严格限制在安全范围内；二是支撑体系稳定性，基于承载力模型优化的盘扣架系统最大立杆荷载始终低于设计值，关键节点变形量维持在极低水平；三是作业环境安全，静力切割工艺产生的振动与噪音较传统机械破碎大幅降低，周边区域监测数据均符合城市施工标准。刘志峰的研究也证实，静力切割技术具有“安全性高、对环境影响小”的显著优势。

资源回收效益显著，主要体现在材料循环利用与施工废弃物减量两方面。混凝土构件采用精准分块切割工艺，使 90% 以上的废料保持完整块状，便于分类回收再利用；

型钢材料通过等离子低温切割，避免了热影响区性能劣化，重复利用率达到行业领先水平。项目特别设置分类堆放区，实现不同规格钢材与混凝土的分级回收，不仅降低了处理成本，更减少了建筑垃圾外运量。这种绿色施工模式符合城市更新工程可持续发展要求。

该项目的实践为混合结构拆除提供了可复用的技术方案，其核心经验可归纳为：科学计算是安全控制的基础，精细管理是资源回收的保障。随着智能化技术的发展，未来可通过在切割设备集成视觉识别系统，进一步提升特殊构件拆除的精准性与自动化水平，推动城市更新工程向更高效、更安全、更环保的方向发展。

4 结语

本研究以南京青奥城市客厅项目为工程背景，系统研究了型钢混凝土与钢框架混合结构的静力无损切割拆除关键技术，提出的“混凝土剥离-型钢焊割-跨中回顶”分步施工方法，通过荷载动态调控机制，有效解决了混合结构拆除中的稳定性控制难题，显著提升了特殊构件的拆除效率。绳锯分块切割与等离子型钢分段切除的工艺组合，不仅实现了施工过程低振动、低噪音的环保要求，更使混凝土回收率超过 90%，为城市更新中的绿色拆除提供了示范案例。

未来研究可在以下方向深入探索：一是智能化切割设备的集成应用，通过机器视觉与自动路径规划技术提升异形构件拆除的精准度；二是数字化拆除模拟技术的开发，结合 BIM 与有限元分析实现施工过程的虚拟预演与风险预判；三是新型切割工具的研发，针对超厚混凝土与特殊钢材开发更高效的切割工艺。本研究成果不仅适用于体育场馆等大跨度混合结构，也可为医院、交通枢纽等复杂公共建筑的改造拆除提供技术参考，对提升我国城市更新中的拆除工程水平具有积极意义。

参考文献

- [1] 叶春华.静力拆除技术在混凝土结构拆除工程中的应用[J].《中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术》,2017,(2):00206-00206.
- [2] 李永胜.深基坑钢筋混凝土内支撑梁无损静力切割拆除施工技术研究与应用[J].《科技与创新》,2016,(8):153-154.
- [3] 黄柳君.钢筋砼结构无损静力拆除施工工艺[J].《中国科技期刊工业C》,2016,(6):00199-00199.
- [4] Chao Zhang.Structural Modal Parameter Recognition and Related Damage Identification Methods under Environmental Excitations: A Review[J].《Structural Durability & Health Monitoring》,2025,(1):25-54.
- [5] 王帅.热室退役重混凝土结构切割拆除研究[J].《核动力工程》,2024,(3):224-228.

Coordination design and risk prevention of horizontal and vertical alignment of highway intersections under mountainous terrain conditions

Yanyun Chen

Gansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China

Abstract

This article studies the coordinated design and risk prevention of horizontal and vertical road intersections in mountainous areas. Firstly, the importance of mountainous highways for regional development and the design difficulties and risks brought by complex terrain are discussed. It is clear that literature research, case analysis, and field research methods are used, and there are innovations in humanized design and multi-source information fusion risk assessment. Further analyze the impact of mountainous terrain (with large undulations, complex geology, and variable climate) on the design of horizontal and vertical alignment, as well as the key points of each alignment design. Take a mountain road at the edge of the southwest the Yunnan-Guizhou Plateau as a case to optimize the original design and verify its improvement in safety, comfort, economy and environmental protection. Then identify four types of risks and establish a risk assessment system using AHP and FTA. Finally, prevention and control measures are proposed from three aspects: engineering technology, management, and emergency response. The research shortcomings are pointed out, and the prospect is to deepen research by combining GIS, GPS, and other technologies.

Keywords

mountainous roads; Risk prevention and control; Case optimization; Emergency rescue system

山区地形条件下公路线路交叉平纵线形协调设计及风险防控

陈彦运

甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司，中国·甘肃 兰州 730030

摘要

本文研究山区公路线路交叉平纵线形协调设计及风险防控。先述山区公路对区域发展的重要性与地形复杂带来的设计难度、风险，明确用文献研究、案例分析、实地调研法，且在人性化设计与多源信息融合风险评估上有创新。再析山区地形（起伏大、地质复杂、气候多变）对平纵线形设计的影响及各线形设计要点。以西南云贵高原边缘某山区公路为案例，优化原设计，验证其在安全、舒适、经济、环保上的提升。继而识别四类风险，用 AHP、FTA 建风险评估体系。最后从工程技术、管理、应急三方面提防控措施，指出研究不足，展望结合 GIS、GPS 等技术深化研究。

关键词

山区公路；风险防控；案例优化；应急救援体系

1 引言

我国山区公路是区域发展关键纽带，能破解交通瓶颈、开发资源、促进经济与社会协调，但地形复杂使平纵线形设计难度大，设计不当易致行车安全隐患，且建设面临地质灾害、施工安全等风险，故平纵线形协调设计与风险防控是亟待解决的关键问题，可兼顾经济、社会与环境效益。研究用文献研究法奠定理论基础，案例分析法提炼实践经验，实地调研法获取一手数据。创新在于设计上以驾驶员体验为核心融入人性化理念，优化线形参数；风险防控上提出多源信息

融合评估法，结合大数据、AI 建动态预警模型，搭配个性化防控措施形成体系。

2 山区地形对公路线路平纵线形设计的影响

山区地形具复杂性与独特性，核心特征为地形起伏大、地质复杂、气候多变，深刻影响公路平纵线形设计。地形起伏大表现为山峦连绵、沟壑纵横（如横断山区相对高差达数百至数千米），需频繁调整路线高程与方向，增加设计复杂度，且加大坡度与坡长，对行车安全要求更高；地质复杂体现在岩石种类多、构造复杂（断裂、褶皱频发），软岩等不良地质易引发滑坡、泥石流，增加工程难度与造价，需先详勘保障稳定；气候多变表现为气温随海拔骤变、昼夜温差大，易现低温、积雪、冰冻，降水不均致暴雨、山洪，强风、

【作者简介】陈彦运（1990-），男，中国甘肃白银人，本科，工程师，从事公路总体路线设计及互通式立交设计研究。

浓雾常见，对路线、路面及安全设施有特殊要求。地形对平面线形设计影响显著：直线虽方向明确、距离短，但适配性差，强行使用需深挖高填，破坏地貌、诱发灾害，还易致驾驶员疲劳提速，增加事故与造价；圆曲线能灵活适配地形，需按《公路路线设计规范》结合地形、车速等定半径（离心力与半径成反比、与车速平方成正比，过小易侧滑，复杂路段可通过超高、加宽平衡）^[1]。缓和曲线衔接直线与圆曲线，凭曲率连续变化优化视觉、保障安全，长度需结合行车速度等计算。地形对纵断面线形设计影响关键：纵坡（坡度、坡长）直接影响安全、速度与造价，坡度过大易致重载车爬坡难、下坡制动失效，需按《公路工程技术标准》控最大坡度（如 80km/h 公路一般 $\leq 5\%$ ），过长坡长加剧车辆负荷，规范对不同坡度设最大坡长限制（如 60km/h、6% 坡度路段 $\leq 700m$ ），设计需平衡安全与经济；竖曲线设于直线坡段转折点，可改善线形、提升舒适安全（凸形增视距、凹形缓颠簸），半径需结合设计速度等确定，长度需满足行车平稳与停车视距要求，符合规范。

3 山区公路线路交叉平纵线形协调设计案例分析

本研究选取西南地区云贵高原边缘某山区公路为案例，该公路地处典型山区，地势起伏剧烈（高差超 1000 米，坡度多 $20^\circ - 60^\circ$ 且部分超 60° ），地质复杂（含砂岩、页岩等，断裂褶皱发育，岩溶、滑坡等不良地质常见），是连接乡镇与外界干线的重要通道，承担农产品运输、旅游开发及居民出行任务，因区域经济与旅游业发展，交通需求增长，原设计不合理需优化。

原设计方案存在多方面问题，平面线形上多处直线与曲线衔接不畅，部分过长直线直接连小半径圆曲线且无缓和曲线，相邻圆曲线半径变化大，增加操作难度与事故风险，纵断面线形上部分纵坡超规范最大值，连续上下坡路段问题突出（上坡重载车动力不足致拥堵，下坡制动频繁易失效），竖曲线半径小致视距受阻（凸形竖曲线顶部视距不足增追尾风险），平纵线形组合也不协调，出现“平包竖”或“竖包平”等不合理形式，重合段长度不当，影响视觉判断与行车安全。针对这些问题，优化方案从三方面入手，平面线形上调整直线与曲线长度及衔接方式，过长直线插缓和曲线，相邻圆曲线设缓和曲线，复杂路段用卵形曲线、S 形曲线适配地形，纵断面线形上严控纵坡坡度与坡长，调整超规范纵坡，连续上下坡路段设爬坡车道与避险车道，合理确定竖曲线半径和长度（凸形增大半径扩视距，凹形保证缓冲颠簸），平纵线形协调上遵循“平包竖”原则，在平面曲线起终点附近设竖曲线协调变化趋势，控制重合段长度，还利用计算机辅助设计软件建模分析以调整问题。

对比优化前后方案，效果显著，安全性上减少驾驶员操作难度与视觉疲劳，降低事故风险，保障重载车行驶安全，

舒适性上线形更连续流畅，减少颠簸晃动与离心力影响，经济性上虽初期成本可能增加，但长期因提升行驶效率、减少事故与养护成本，综合效益提升，环保性上通过合理选线与施工措施，减少山体开挖、植被破坏及水土流失，该案例充分证明优化方案的有效性，为其他山区公路设计改造提供参考。

4 山区公路线路交叉平纵线形设计风险防控措施

4.1 工程技术措施

山区公路地质灾害防治措施中，抗滑桩采用钢筋混凝土制成，通过在滑坡体钻孔浇筑将下滑力传至稳定地层，设计需依滑坡规模、滑动面位置等定直径、长度、间距与布置形式，如某项目针对滑坡隐患设直径 1.2 米、长 20 米、间距 3 米的梅花形抗滑桩，经监测有效稳定滑坡体；挡土墙可防土体坍塌，重力式靠自身重力稳定（适用于小型滑坡与填方路段，某填方路段设 3-5 米高块石砌筑重力式挡土墙，基础埋深不小于 1 米），悬臂式与扶壁式适用于高填方及差土质路段，设计需算高度、厚度与基础埋深；完善排水系统也关键，地面排水靠边沟（路基边缘集排雨水）、截水沟（山坡上方拦水）、排水沟（引水至桥涵或自然水系），地下排水用盲沟、渗沟（透水性材料填充配排水管）降地下水位，合理布置可减地质灾害风险。气候灾害应对上，防滑路面材料（防滑沥青加骨料改性、防滑地砖用特殊纹理、刻槽路面增粗糙度）能增摩擦力，如陡坡弯道铺菱形纹理防滑地砖降事故率；冬季防雪设防雪棚（钢结构或混凝土框架配透明顶棚，某高海拔路段设 500 米长钢结构阳光板防雪棚）与防雪栅栏（依风雪地形定高度间距）阻积雪结冰；大风路段设防风屏障（金属或复合材料，某风口路段设 2 米高百叶窗式金属屏障）保车辆稳定；暴雨应对需强化排水，设计大管径管道与陡坡边沟，路肩设横坡引雨水入边沟，定期清理维护防排水不畅。施工技术保障方面，隧道用盾构法（某项目 8 米直径盾构机日掘进 10-15 米，扰山小、周期短）、TBM 法（适用于硬岩）高效施工；桥梁用悬臂浇筑法（逐段对称浇筑梁段）、转体施工法（如跨越深谷桥梁分半幅浇筑后转体就位，避搭支架难题）解复杂地形建设问题；施工方案需优化，高边坡分层分段开挖并及时设锚杆、锚索等支护，填方路段严控填料质量与压实度，且施工中依实际调整方案保安全高效^[2]。

4.2 管理措施

山区公路设计阶段风险管理中，需综合地质、地形、气候、交通流量等因素，用层次分析法、故障树分析法等定性定量结合的方法做全面风险评估，识别潜在风险并评估发生可能性与影响程度，确定关键风险因素为设计优化提供依据，如某项目借层次分析法明确滑坡、泥石流及暴雨、冰冻为关键风险需重点关注；同时建立严格设计审查制度，组织专家审查平纵线形设计的合理性、安全性与环境协调性，

依规范提意见，设计单位优化方案，如某项目审查中专家指出部分路段平曲线半径小的隐患，建议增大半径并设缓和曲线，修改后提升了公路安全与舒适性。施工阶段风险管理以施工安全管理为核心，需健全安全生产制度、明确安全职责、加强安全教育培训，现场设警示标志、隔离防护危险区域，定期检查维护施工设备，对高风险作业制定专项方案，如某项目加强隧道施工安全管理，定操作规程、培训演练，严控通风照明支护与有害气体检测^[3]。施工质量控制需建质量管理体系，严检原材料构配件，按规范操作并加强工序检验，如某桥梁施工中严控钢筋水泥等原材料与混凝土配合比，监控模板钢筋安装及浇筑质量；施工进度管理需制定合理计划、跟踪分析进度、及时调整偏差，合理调配资源并协调参建单位，如某项目因地质与天气滞后进度，经调计划、增人力设备、优工艺及强协作后，进度得到控制并按时完工。运营阶段风险管理需建公路运营监测系统，用传感器、信息技术等实时监测路面状况、桥隧结构、交通流量，分析数据及时发现隐患，如某项目监测系统发现桥梁桥墩轻微位移裂缝后预警，相关部门及时检测加固避免事故；同时制定详细计划定期检查维护公路，清扫修补路面、检测维护桥隧结构、检修安全设施，如某公路定期灌缝路面、更换桥梁伸缩缝、维护隧道通风照明，延长使用寿命；还需健全应急响应机制，遇事故或突发事件可迅速启动预案、采取措施降低损失^[4]。

4.3 应急措施

针对山区公路可能面临的地质灾害、气候灾害和交通事故等突发事件，制定完善的应急预案至关重要，预案需明确应急组织机构（含应急指挥中心、抢险救援组、医疗救护组、交通疏导组、后勤保障组）及职责分工，指挥中心统筹协调、定救援方案，抢险组清理滑坡体等，医疗组救治转运伤员，交通组管制疏导，后勤组保障物资设备，确保突发事件时各部门协同响应；还需详细规定应急响应流程，突发事件后现场人员立即报指挥中心，中心启动预案并依事件性质组织救援（如地质灾害需勘查评估、清理加固，气候灾害需防滑除雪排水，交通事故需救治伤员、管制交通防二次事故），同时包含后期处置措施，如事故调查查因追责、总结改进，损失评估算伤亡与财产损失，恢复重建定方案复公路运营；应急救援体系建设中，关键是建专业应急救援队伍，

队伍需有丰富经验与专业技能，定期培训（含救援知识、技能、防护知识）和演练（模拟各类突发事件）以提能力，如某项目定期组织培训、邀专家授课，年多次模拟滑坡等场景演练，显著提升响应速度与效率；应急物资设备储备是重要保障，需依突发事件类型规模储备抢险工具、照明通信设备、医疗器材、食品及挖掘机、救护车等，定期检查维护并建管理制度明确调配流程，如某储备库储备充足物资设备且定期维保；还需完善应急响应机制，建24小时应急值班制、与周边地区的应急联动机制（如签合作协议调集力量），借信息技术建应急信息平台实现信息共享传递，如某项目与周边交通、消防、医疗部门联动，建信息平台，以此提应急效率与协同能力，保障山区公路安全畅通。

5 结语

本研究聚焦山区公路线路交叉平纵线形协调设计及风险防控，明确平纵线形设计要点（如直线慎用、圆曲线半径合理确定、纵坡与竖曲线控制）及“平包竖”等组合原则；通过西南山区公路案例优化设计，提升安全、舒适、经济与环保性。同时识别地质、气候、施工、运营四类风险，用层次分析法等构建评估体系，从工程技术（如抗滑桩、防滑材料）、管理（各阶段管控）、应急（预案与救援体系）三方面提出防控措施。不足在于未深入研究复杂地质下平纵线形关键技术及新型风险（如极端天气、智能交通新风险）。未来将应用GIS、GPS等技术精准勘察，深化协调设计理论；加强新型风险研究，结合大数据、AI建监测预警系统，创新防控技术，开展跨学科研究推动山区公路可持续发展。

参考文献

- [1] 李建坤.山区复杂条件下公路线形设计要点分析[J/OL].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2024(1)[2024-01-01].<https://www.cqvip.com/doc/journal/201022886389687296>.
- [2] 谢玮.山区公路改扩建设计要点分析[J].河南科技,2025,52(09):79-83.DOI:10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2025.09.015.
- [3] 楚峰.复杂地质条件下山区公路路基施工安全与质量控制如何做[J].交通建设与管理,2021,(04):46-49.
- [4] 何洋.山区高速公路施工便道路线平纵设计[J].工程建设与设计,2023,(03):86-88.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.02.024.

Research on Stability Control and Support Optimization of Tunnel Surrounding Rock under Complex Geological Conditions

Yanghua Chen

Foshan Miaohui Engineering Design Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528100, China

Abstract

Against the backdrop of infrastructure construction advancing towards complex geological regions, the stability of tunnel surrounding rock has become a key factor affecting engineering safety and quality. Under complex geological conditions, the mechanical properties of surrounding rocks are characterized by significant nonlinearity, anisotropy and uncertainty, which can easily lead to disasters such as deformation, collapse and water gushing, threatening the safety of construction and operation. This paper systematically analyzes the types and causes of rock instability in complex geological tunnels, sorts out the deformation characteristics and disaster evolution laws under the action of multiple coupling, and assesses the adaptability and deficiencies of conventional and new support technologies. Based on theoretical research, numerical simulation and engineering cases, a stability control strategy centered on advanced prediction, zoned and graded support, information management and dynamic adjustment is proposed. Research shows that fine geological analysis and adaptive support optimization are the key paths to enhancing the safety and economy of complex geological tunnel projects.

Keywords

Complex geological conditions; Tunnel engineering; Stable surrounding rock; Support optimization; Numerical simulation

复杂地质条件下隧道围岩稳定控制及支护优化研究

陈杨华

佛山市森汇工程设计有限公司，中国·广东 佛山 528100

摘要

在基础设施建设向复杂地质区域推进的背景下，隧道围岩稳定性已成为影响工程安全与质量的关键。复杂地质条件下，围岩力学特性非线性、各向异性和不确定性显著，易引发变形、坍塌、涌水等灾害，威胁施工和运营安全。本文系统分析了复杂地质隧道围岩失稳的类型及致因，梳理了多元耦合作用下的变形特征与灾害演化规律，评估了常规与新型支护技术的适应性与不足。基于理论研究、数值模拟与工程案例，提出以超前预报、分区分级支护、信息化管理和动态调整为核心的稳定控制策略。研究表明，地质精细分析和自适应支护优化是提升复杂地质隧道工程安全与经济性的关键路径。

关键词

复杂地质条件；隧道工程；围岩稳定；支护优化；数值模拟

1 引言

近年来，随着西部大开发、“一带一路”等重大工程建设的推进，我国隧道工程建设规模与技术水平持续提升，大量隧道穿越高地应力、断层破碎带、富水软岩、膨胀岩等复杂地质区域。复杂地质条件导致围岩结构力学性能剧烈变化，力学环境高度不确定，施工扰动易致围岩大变形、滑移、坍塌与涌水等灾害，严重影响工程进度与安全，增加维护成本。传统支护理念与技术在复杂地质条件下常面临适应性不足、响应滞后等挑战，亟须理论创新和技术优化。本文以复

杂地质条件下隧道围岩稳定控制及支护优化为核心，聚焦于围岩工程地质特性分析、稳定性影响机制、支护技术对比与优化、信息化施工与智能监测等关键环节，旨在为复杂地质隧道工程的设计、施工与维护提供理论依据与技术参考，提升工程本质安全和经济性。

2 复杂地质条件下围岩失稳的类型与机理

2.1 围岩失稳的主要类型

复杂地质条件下，隧道围岩失稳类型多样，表现为不同的灾害特征和破坏机理。其中，大变形主要出现在深埋软岩和膨胀岩地段，拱顶下沉、侧壁收敛和衬砌推移等现象突出。结构面滑移则常发生在断层、裂隙、节理等结构面发育区域，拱部和侧壁局部支护失效频发，严重时可引发大范围

【作者简介】陈杨华（1993-），男，中国湖南永州人，本科，助理工程师，从事水利水电工程设计。

滑坡与坍塌。岩爆是高地应力环境中的典型失稳类型，短时能量释放对作业安全构成极大威胁，需高度重视监测与防控。塌方、突泥和涌水等灾害则多见于富水破碎带、不良地质体及软弱夹层分布区，这些灾害不仅影响施工进度，还对隧道后期运营安全构成潜在威胁。不同类型失稳现象往往呈现空间重叠和相互转化，需要在设计与施工中针对性采取多元化的防控与加固措施。^[1]

2.2 失稳致因的多元耦合作用

复杂地质环境下，围岩失稳常常是多种内外因素叠加作用的结果。首先，原岩应力场的扰动是失稳的基础，当隧道开挖导致应力重新分布时，围岩承载力显著下降，结构面与节理弱化进一步削弱岩体整体性。地下水活动也是不可忽视的重要因素，水力作用会软化岩体、削弱结构面黏结力，诱发滑移、突泥和涌水等灾害。岩体力学参数的空间波动和非均质性，使得局部薄弱区成为失稳的高发部位。施工工法的不当选择与动态扰动，还会加剧微裂隙扩展和结构面剪切，提升宏观破坏概率。在高地应力与强降雨、突水等偶发极端事件叠加时，失稳风险呈非线性跃升，亟须动态风险评估和实时干预。^[2]

2.3 复杂地质对支护设计的特殊要求

在复杂地质区域，隧道支护设计与传统均质地层存在本质区别。首先，需针对不同围岩区段进行分区分级设计，准确识别高风险区域，科学配置支护结构与参数。支护体系不仅要具备足够的强度以抵抗变形和压力，还须具备良好的延性与适应性，能够应对突发的大变形、涌水等极端情况。设计过程中应强调地质超前预报、分步加固、信息化监测与动态反馈调控，实现从静态设计到动态响应的转变。支护结构材料选择也需兼顾韧性、耐腐蚀和可持续性，确保支护体系在全寿命周期内的安全与经济效益。通过“预报一分区—动态调整—反馈优化”一体化理念，最大限度降低复杂地质条件下围岩失稳风险，提升隧道工程的本质安全与可持续发展能力。

3 围岩工程地质特性分析与变形规律

3.1 围岩物理力学特性与分区分级

复杂地质条件下的隧道围岩常表现出高度的非均质性和各向异性，其物理力学特性受岩性、结构面、风化程度、水文地质条件等多重因素影响。不同区段的围岩在强度、弹性模量、渗透性及节理特征等方面差异显著，决定了其变形与失稳的响应模式。为科学评估围岩稳定性及合理配置支护措施，工程实践中通常采用分区分级的方法。依据 RQD（岩芯质量指标）、Q 值、节理密度、剪切强度和结构面几何参数等多维度指标，对围岩进行工程地质分类，识别出高、中、低风险区段。高风险区不仅要加强监测与数据采集，还需根据分区特性优化支护形式和加固措施，保证整个隧道结构的安全与经济性。这一分区分级策略能够精细化指导支护设计

与施工管理，提升工程的本质安全水平。^[3]

3.2 围岩变形特征及灾害演化

复杂地质环境下，围岩变形具有显著的空间不均一性和时序突变性。软弱岩层因结构松散、承载力低，通常表现为持续性大变形和长期蠕变；而膨胀岩类受地下水影响，容易发生剧烈膨胀和收缩，导致衬砌结构推移和变形。断层破碎带由于结构面滑移、剪切破坏等因素，常常引发阶段性或突发性的围岩失稳。地下水渗流会加速围岩软化、降低有效应力，进而诱发裂隙扩展、局部塌方等灾害。围岩灾害通常经历“微裂隙扩展—局部失稳—宏观破坏”的链式演化过程，具有突发性和难以预判性。为有效防控围岩灾害，需构建以高密度监测与过程干预为基础的动态管理机制，实现早期识别、实时预警和快速处置，提升隧道工程的抗风险能力。

3.3 工程地质信息获取与超前预报

在复杂地质条件下，获取高精度的工程地质信息是科学决策和风险控制的前提。应充分利用钻探取芯、地质编录、物探（如地震波、地电、地质雷达）、超前地质钻孔等多元技术手段，对隧道前方及周边岩体的结构特征、力学参数与水文地质状况进行全面调查，建立精细化三维地质模型。随着地质雷达、反射地震、红外热像等超前预报技术的发展，工程师可在隧道推进过程中实时监控前方岩体变化，及时识别断层、破碎带、富水体等不良地质体及灾害隐患。^[4]

4 支护体系技术发展与优化对策

4.1 常规支护技术的应用现状

在隧道工程领域，传统支护技术以喷射混凝土（喷锚）、钢拱架和初期混凝土衬砌为核心，形成了较为成熟的支护体系。这些技术在均质、稳定地层中表现出良好的经济性与施工便捷性，能有效抵抗常规围岩压力，防止局部坍塌与变形。然而，面对高地应力、大变形、富水或破碎带等复杂地质环境，常规支护体系逐渐暴露出适应性不足和耐久性有限的问题。例如，钢拱架和喷锚体系易在强变形区出现失稳、屈服，混凝土衬砌在渗水强烈或膨胀岩环境下易失效。

4.2 新型支护材料与结构的探索

随着复杂地质条件下工程需求的提升，新型支护材料与结构体系的研发与应用成为行业热点。柔性支护技术如钢带网、弹性连接件等，通过分散变形与缓释应力，有效应对大变形及局部不均匀收敛。高分子复合衬砌和钢纤维混凝土具备更高的延性和耐腐蚀能力，提升了整体结构的稳定性与寿命。智能锚索、主动控制拱架等创新技术则集成了监测与反馈功能，能够在受力和变形异常时自动调节锚固力或结构刚度，实现实时响应。新型支护材料与结构体系通常与监测装置协同工作，形成“感知—分析—调整”的闭环，有助于在复杂地质条件下实现支护的自适应与最优配置。这些前沿技术的应用，不仅提高了隧道工程的本质安全性，也为工程降本增效和可持续发展提供了重要支撑。

4.3 支护参数优化与动态调整机制

复杂地质条件下的隧洞支护设计已逐步从静态、单一的参数配置转向基于分区分级、动态优化的自适应体系。信息化施工平台和数值模拟技术的结合，使得设计人员能够在施工过程中实时获取围岩变形、应力分布与支护受力等多源数据。通过对监测数据的动态分析，可及时识别地质环境与工程响应的异常，进而对支护参数如锚杆长度、间距、预应力和衬砌厚度等进行适时优化调整。建立以“预测—监测—反馈—调整”为核心的动态支护机制，有效减少了因支护滞后或过度设计带来的风险和资源浪费。同时，支护参数的动态优化促进了材料与结构的合理配置，提高了工程安全性和经济性。^[5]

5 信息化与智能化隧洞施工管理

5.1 信息化施工平台建设

在复杂地质条件下隧洞施工过程中，信息化施工平台的建设已成为提升工程管理效率和决策科学性的核心手段。通过BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）、物联网等数字化技术，实现了地质资料、支护参数、监测数据等多源信息的集成与共享。平台能够实时采集和整合围岩变形、地表沉降、支护结构受力等关键数据，为设计优化与动态调整提供科学依据。与此同时，信息化平台支持全过程数据可视化，便于各参与方协同与问题追溯，有效减少信息孤岛和管理盲区。在多工序、跨学科的复杂隧洞项目中，这种一体化管理体系不仅提高了工程透明度和决策的时效性，也为后续运营期的风险管理与维护提供了数据基础，实现了隧洞全生命周期的信息支撑和智能管理。

5.2 智能监测技术的集成应用

面向复杂地质条件，隧洞工程的安全监测已从单一手段向多源集成、智能化方向发展。现代项目广泛应用激光扫描、全站仪、自动收敛计、分布式光纤、智能传感器等多种监测设备，形成高密度、全方位的动态数据采集网络。各类传感器能够实时反馈隧洞围岩变形、衬砌应力、地下水变化等信息，极大提高了异常现象的发现与响应速度。结合大数据分析与AI模型，可对历史与实时监测数据进行深入挖掘，构建变形趋势判识、异常预警和灾害风险量化模型，提前发现不稳定隐患，实现从被动响应到主动预防的转变。监测数据还可反向驱动支护设计与施工调整，形成“监测—分析—

反馈—优化”的智能闭环，大幅提升隧洞施工与运行的本质安全水平。

5.3 全过程风险管理与应急响应

复杂地质条件下隧洞工程的风险管理已不再局限于事后补救，而强调全过程、全要素的系统管控。应建立以信息化平台和智能监测为基础的动态风险评估机制，覆盖项目设计、施工、运营各阶段。通过对地质变化、施工扰动、环境影响等关键风险点进行分级管理，实时识别潜在危险，实现分级预警与风险闭环管控。同时，应完善应急响应预案，搭建多部门协同的应急管理平台，实现风险识别、预警、决策与资源调度一体化。快速响应和科学联动可在异常事件发生初期有效控制险情，最大程度减少人员、财产与社会损失。全过程风险管理与高效应急响应不仅提升了工程安全管理的主动性和系统性，也是推动复杂隧洞项目可持续、高质量建设与运营的重要保障。

6 结语

复杂地质条件下隧洞工程面临的围岩稳定与支护问题，是多学科交叉、理论与工程高度融合的综合性课题。研究与实践表明，只有依托高精度地质调查、分区分级科学支护、信息化动态施工和智能监测预警等多维创新措施，才能有效提升隧洞围岩的稳定性和支护体系的适应性，实现安全、经济与可持续发展的目标。未来，随着地质工程大数据、AI辅助设计及新材料新技术的持续发展，复杂地质隧洞工程的智能化、精细化与绿色化水平将不断提升。应继续加强理论创新与工程应用结合，推动围岩稳定控制与支护优化的技术进步，为基础设施高质量建设和运营提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 宋茜.深埋隧道穿越活动断裂带施工期围岩稳定性研究[D].山东大学,2022.
- [2] 李垂泉.地下空间岩体质量评价及围岩稳定性分析[D].南京理工大学,2020.
- [3] 杨永香.特殊地质条件下龙潭隧道的围岩稳定性数值研究[D].中国科学院研究生院（武汉岩土力学研究所）,2006.
- [4] 夏勇,赵恒,何建华.高地应力及复杂地质条件耦合下大型地下洞室群围岩稳定分析[J].四川水力发电,2025,44(S1):118-122+134.
- [5] 孟尧.大理深水工隧洞钻爆开挖围岩稳定有限元分析[J].云南水力发电,2025,41(07):52-54.

Analysis on construction management evaluation system construction and application of green construction

Mingzeng Ding

Rizhao Tiantai Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276800, China

Abstract

As a crucial implementation of sustainable development concepts in the construction industry, green construction has become a pivotal measure driving the sector's green transformation and high-quality development. To address pressing issues such as environmental pollution and excessive resource consumption in the construction industry, establishing a scientific, systematic, and actionable green construction management evaluation system has become imperative. This paper examines China's current progress in green construction, outlines the theoretical foundations and practical requirements for management evaluation, explores principles for constructing evaluation index systems, indicator selection methods, and weighting allocation techniques, and proposes a system design based on Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method (FCEM). Through real-world engineering case studies, this research demonstrates the effectiveness of the evaluation system in project management and green performance enhancement. The findings indicate that a scientifically grounded green construction management evaluation system can significantly improve project sustainability levels, providing robust support for industry-wide green development initiatives and policy formulation.

Keywords

Green Construction; Management Evaluation; Indicator System; Sustainable Development; Engineering Case Studies

绿色施工管理评价体系构建与应用分析

丁明增

日照天泰建筑安装工程有限公司，中国·山东 日照 276800

摘要

绿色施工作为可持续发展理念在建筑行业的重要实践，已成为推动建筑业绿色转型和高质量发展的核心举措。针对当前建筑行业存在的环境污染、资源消耗高等问题，构建科学、系统、可操作的绿色施工管理评价体系已势在必行。本文结合我国绿色施工发展现状，梳理了管理评价的理论基础与实际需求，探讨了评价指标体系的构建原则、指标筛选及权重分配方法，提出了基于层次分析法和模糊综合评价法的体系设计。通过实际工程案例应用，分析评价体系在项目管理和绿色绩效提升中的成效。研究结果表明，科学的绿色施工管理评价体系能够显著提升项目绿色管理水平，为行业绿色发展和政策制定提供有力支撑。

关键词

绿色施工；管理评价；指标体系；可持续发展；工程案例

1 引言

随着绿色发展理念的深入推进，建筑行业作为资源消耗与环境影响最为显著的产业之一，亟需实现施工管理模式的转型升级。绿色施工不仅关注工程实体的质量安全，更强调全过程的环境友好、资源节约与生态保护。在政策引导、市场需求与技术创新的多重驱动下，绿色施工管理逐步从理念共识走向体系化、标准化的实践探索。然而，现阶段绿色施工在项目推进中仍存在评价标准不统一、管理体系不完

善、绩效考核机制缺失等突出问题，制约了绿色技术和管理措施的推广应用。构建科学、系统、动态可调的绿色施工管理评价体系，不仅是完善行业管理标准、规范企业绿色行为的重要基础，也是推动建筑业高质量、低碳转型的关键路径。本文将从绿色施工管理的理论基础出发，分析评价体系构建的核心要素，探讨指标体系的构建与应用，并结合实际工程案例，系统评价绿色施工管理评价体系的推广效果与未来发展趋势。

2 绿色施工管理评价体系的理论基础

2.1 绿色施工管理的内涵与发展需求

绿色施工是指在施工全过程中，全面考虑节能降耗、环境保护、材料循环利用和施工安全等目标，通过科学管理

【作者简介】 丁明增（1977—），男，中国山东日照人，本科，工程师，一级建造师，从事建筑工程施工管理技术施工研究。

与技术创新，降低资源消耗和环境污染，实现工程建设与生态环境的和谐发展。随着国家“双碳”战略和生态文明建设进程加快，绿色施工已从被动应对环境约束转变为主动提升核心竞争力的重要抓手。绿色施工管理强调以科学评价和全过程控制为基础，注重多目标协调、系统性管理和绩效导向，推动企业从“要我绿色”向“我要绿色”转变。现代绿色施工不仅要求施工企业提升绿色管理水平，还要求监管部门和项目参与各方建立协同机制，共同保障绿色目标的实现。

2.2 绿色施工管理评价的理论支撑

绿色施工管理评价体系的构建，既要遵循可持续发展理论、生态系统管理理论，也需结合建筑项目实际需求。可持续发展理论强调经济、环境、社会三维目标的协调统一，要求绿色施工兼顾经济效益、环境效益与社会效益。系统管理理论要求施工过程作为一个多要素、多阶段的有机整体，评价体系需体现全过程、全环节的动态管理。绩效评价理论则聚焦于量化绿色管理成效，强调目标设定、过程监控与结果反馈的闭环机制。这些理论共同为绿色施工管理评价体系的科学性、系统性和操作性提供坚实基础。

2.3 绿色施工评价体系构建的国际经验

国际上，欧美、日韩等发达国家在绿色施工管理与评价体系建设方面积累了丰富经验。例如，美国 LEED、英国 BREEAM 等评价体系强调绿色管理全生命周期管控，突出绿色施工环节的量化考核和标准化管理。日本 CASBEE 体系则注重工程项目对环境、社会及经济综合影响的定量评价。国际经验表明，绿色施工评价体系的科学构建不仅要注重技术标准、管理流程的明确，还需结合本地政策环境和产业发展阶段，动态调整评价重点与方法，提升体系的适应性与前瞻性。

3 绿色施工管理评价指标体系的构建

3.1 评价指标体系的构建原则

科学完善的绿色施工管理评价指标体系，首先应当遵循系统性、科学性、可操作性和动态性等核心原则。系统性要求指标体系能够覆盖绿色施工的全过程与各环节，从项目策划、设计、施工到竣工验收，实现目标的全过程管控，保证管理链条无缝衔接。科学性体现在指标设定需紧密结合行业技术发展、国家政策导向与环境保护要求，既反映绿色施工管理的核心内涵，也契合未来绿色建造发展的趋势。可操作性则强调指标应具备明确的量化标准和易于监测、评估的特征，便于管理人员进行现场监督和过程控制，确保评价体系能够真正落地执行。动态性原则要求指标体系具备自我调整和持续优化能力，能够根据行业政策调整、技术进步和项目实践不断完善升级，保证评价内容和方法始终保持先进性和实用性。这些原则共同保障了评价体系的科学有效和长远适应性。

3.2 绿色施工管理评价指标的筛选

绿色施工管理评价指标的筛选，是保障评价体系科学

性和可操作性的核心环节。指标筛选过程中，需从行业政策、技术标准、项目实际等多维度入手，综合运用专家咨询、层次分析、文献调研等方法，对绿色施工的目标分解出可量化、可监控的具体指标。具体内容应涵盖环境保护、资源节约、能源利用、污染控制、施工安全、作业人员健康等多个维度，既确保指标体系的覆盖全面，又突出节能减排、循环利用、生态修复等核心领域。指标设计要避免冗余和重复，既体现全过程绿色管理的系统性，也突出管理重点和实际成效。此外，指标还需考虑项目类型、规模、区域特点等现实因素，确保体系的普适性与灵活性，为不同类型工程项目的绿色管理提供科学、有效的评价支撑。

3.3 指标权重与评价方法的确定

在科学构建评价指标体系的基础上，合理分配各项指标的权重、选择适宜的评价方法，是保证评价结果科学公正、具有实践指导意义的关键。指标权重可采用层次分析法（AHP）、德尔菲法等方法，结合行业专家判断和实际数据分析综合确定，准确反映各指标在绿色施工管理中的相对重要性。对于具体评价过程，可以灵活结合模糊综合评价、灰色系统评价等多元方法，实现定性与定量分析的有机统一。科学的权重分配和评价方法设计，不仅提升了体系的公信力和操作性，还便于对企业绿色管理水平进行全面量化分析，为持续改进和管理创新提供精准的数据支撑。评价结果亦可为绿色施工绩效考核、项目激励和行业政策调整等提供科学依据，推动绿色建造的高质量发展。

4 绿色施工管理评价体系的应用实践

4.1 项目管理中的绿色评价应用

绿色施工管理评价体系在现代工程项目管理中扮演着战略性工具的角色。项目启动阶段，通过系统化指标体系的导入，可以科学界定绿色施工目标、管理要点及关键绩效指标，避免了目标设定的随意性与片面性，为后续绿色管理工作的高效执行奠定基础。在施工组织和实施环节，评价体系提供了明确的管理基准与监控手段，支持对节能环保措施、污染控制工序及安全健康管理等关键节点进行实时监测与动态调整，确保绿色目标不流于形式而能落到实处。竣工验收阶段，体系又作为绩效考核依据，对全过程绿色管理措施的有效性进行定量评估，帮助企业总结经验，提炼创新做法，推动管理模式的优化升级。这一闭环管理模式实现了绿色施工全生命周期的目标管理和持续改进，为企业积累了可复制、可推广的绿色管理经验，有效提升了项目和企业的核心竞争力。

4.2 绿色绩效提升与资源优化利用

以评价体系为抓手的绿色施工管理，有效促进了项目绿色绩效和资源利用效率的提升。在项目实施过程中，关键绩效指标如节能降耗、废弃物资源化利用、用水效率提升、施工污染物减排等均纳入全过程动态监控。通过建立科学的评价与预警机制，项目管理团队能及时发现并纠正资源浪费

和环境管理薄弱环节，实现资源的最优配置和环境负担的最小化。评价结果不仅是企业争创绿色标杆项目和申报绿色建筑认证的重要依据，也是政策激励和市场竞争中的核心支撑。持续优化下，企业绿色管理水平和技术创新能力不断增强，推动形成了以绿色绩效为导向的管理文化。同时，良好的绿色绩效也极大提升了企业社会责任形象，为企业赢得政策扶持、市场认可和行业声誉奠定坚实基础。

4.3 典型工程案例分析

为进一步检验评价体系的实际应用成效，本文选取了大型市政基础设施项目与绿色住宅工程进行系统案例研究。在市政工程中，评价体系贯穿项目策划、材料采购、现场施工到竣工验收各环节，对噪声控制、土壤与水体保护、节能环保技术应用等指标进行全过程跟踪与分析。结果显示，该体系有力推动了绿色工艺的落地，提升了项目的环境绩效和管理标准化水平。在绿色住宅项目中，体系通过对新型建材利用、能源消耗监控、生活垃圾分类等环节的考核，强化了绿色管理措施的执行力，推动绿色生活理念的普及。案例反馈表明，科学的绿色施工评价体系不仅实现了绿色目标的可量化、可追溯，还提升了项目管理的规范性和精细化水平，对于推动绿色建筑和生态文明建设具有重要示范价值。

5 绿色施工管理评价体系的优化与发展

5.1 评价体系动态调整与持续优化

绿色施工管理评价体系的生命力在于其与时俱进的动态优化能力。随着绿色建造领域新材料、新工艺、新技术的不断涌现，以及政策导向与行业标准的持续升级，评价体系必须根据实际发展需求及时进行梳理与调整。一方面，应定期对现有指标体系进行科学评估，识别其中已不适应新形势的落后或冗余指标，并结合行业发展方向，及时引入创新性指标，如碳足迹评估、智能建造应用等，保证体系评价内容的前瞻性和实效性。另一方面，需加强对工程项目实际运行数据的系统收集与深度分析，建立多层次、多渠道的反馈与修正机制，实现指标设定与应用效果的闭环管理。通过动态优化和持续迭代，绿色施工管理评价体系能够持续提升科学性、适应性和引领性，更好地指导和规范绿色施工实践，推动行业高质量发展。

5.2 智能化评价技术的集成应用

伴随着信息化与智能建造技术的快速进步，绿色施工管理评价体系正加速向智能化、数字化方向转型升级。借助大数据、物联网和人工智能等先进技术，可实现对施工过程环境指标、资源消耗、碳排放等核心参数的自动化采集与智

能分析。智能化评价体系通过实时监测与动态预警，实现对绿色绩效全过程、全要素的精准把控，极大提升了评价工作的效率和准确性。同时，基于数据驱动的决策支持，管理者可以及时识别绿色施工中的薄弱环节与优化空间，调整施工方案和管理策略，促进资源配置最优化。智能评价不仅拓展了绿色施工管理的技术边界，也为企业精准管理、政策监管和行业创新提供了坚实的技术保障，推动绿色施工管理迈向高度集成、智慧协同的新阶段。

5.3 行业推广与政策激励建议

要实现绿色施工管理评价体系的广泛落地和持续升级，必须加强行业推广和政策激励双轮驱动。一方面，应完善绿色施工评价标准的体系建设和规范化管理，推动其在不同类型、不同规模工程项目中的普及应用。积极开展行业交流与技术培训，提升企业、项目团队对绿色评价体系的认知与执行力。另一方面，建议政府相关部门出台更具针对性的激励政策，对绿色绩效优秀的项目和企业给予荣誉、资金、税收等多元化支持。同时，鼓励科研院所、行业协会与企业协作，建立共建共享的绿色管理创新平台，汇聚多元资源和智慧，形成绿色施工管理评价体系协同创新的良性生态。通过多措并举，进一步推动绿色施工理念深入人心，提升全行业的绿色发展水平和国际竞争力。

6 结语

绿色施工管理评价体系的科学构建与有效应用，是推动建筑业可持续发展和绿色转型升级的重要基础。本文系统分析了绿色施工管理评价体系的理论依据、指标构建方法与实际应用成效，论证了科学评价体系在提升项目管理水平、优化资源利用、增强环境绩效等方面的重要作用。未来，绿色施工管理评价体系将与智能建造、数字化管理等新技术深度融合，不断完善指标体系与评价方法，推动建筑业实现高质量、低碳、生态友好的发展目标。通过科学评价、动态优化和智能管控，绿色施工管理将在行业创新和生态文明建设中发挥更加关键的引领作用。

参考文献

- [1] 王永洛.绿色建筑工程施工管理体系的构建及评价[J].黑龙江科学,2023,14(09):155-157.
- [2] 许彬,张雅莉,孙建飞,等.基于绿色理念施工管理模式评价体系研究[J].河北建筑工程学院学报,2020,38(02):102-105.
- [3] 巩牧华,付佳佳,高莉莉.我国绿色施工管理及评价体系的研究[J].门窗,2017,(02):36.
- [4] 宋义仲,山东省绿色施工管理评价技术研究与体系构建.山东省,山东省建筑科学研究院有限公司,2021-03-30.

Prevention and Technical Application of Corrosion Hazards in Oil Pipeline

Xiaozhou Zhong¹ Chaoran Feng² Chao Su³

1. Sinopec Huizhou Huade Petrochemical Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516300, China
2. Shenzhen Xuntong Intelligent Equipment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China
3. Ruibang Intelligent Equipment (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266071, China

Abstract

In the process of oil and gas transportation, scaling, blockage, corrosion, and wax deposition are the three major hazards, especially in water injection and blending pipelines. Non excavation repair and protection technology for pipelines has played a huge role in the field of oil and gas fields in recent years, with significant economic and social benefits, and has attracted increasing attention. This article combines the application of the “rotating airflow method” non excavation repair technology in oil and gas pipelines to analyze its economic and social benefits, in order to provide reference for enterprises to save energy, reduce consumption, control hidden dangers, and strengthen safety and environmental management.

Keywords

corrosion; Scaling; analysis; Rotating airflow technique; Repair and reconstruction; Hidden danger management; Energy conservation and consumption reduction; economic benefits

输油管线腐蚀隐患防治与技术应用

钟晓舟¹ 逢超然² 苏超³

1. 中石化惠州华德石化有限公司，中国·广东惠州 516300
2. 深圳市迅通智能装备有限公司，中国·广东深圳 518000
3. 瑞邦智能装备（青岛）有限公司，中国·山东青岛 266071

摘要

在油气输送过程中，结垢、堵塞、腐蚀为三大公害，尤其注水及掺输管道尤为严重，管道非开挖修复保护技术近年来在油气回收领域发挥着巨大作用，其经济效益和社会效益显著，越发引起重视，本文结合油气回收管道应用“旋转气流法”非开挖修复技术应用，分析其经济和社会效益，以期为企业节能降耗、隐患治理、强化安全环保管理提供借鉴。

关键词

腐蚀；结垢；分析；旋转气流法技术；修复再造；隐患治理；节能降耗；经济效益

1 油田注水、掺输管道腐蚀因素分析

1.1 注水管道腐蚀因素

溶解气体 O₂、H₂S、CO₂引起腐蚀。

氯离子含量高，水对管材的腐蚀也是相当严重的。结垢倾向严重，致使大部分管因结垢而报废。

硫酸盐还原菌的腐蚀。

1.2 掺输油管道腐蚀因素分析

在影响油田掺输管网腐蚀的诸多介质中，CO₂ 和 H₂S 是最常见和最有害的两种腐蚀气体介质，它们的作用会导致所谓酸性腐蚀(sour corrosion)和甜腐蚀(sweet corrosion)。

另一种是以 CO₂+H₂S+Cl⁻等气体和介质共存的情况下

造成的腐蚀。

油田用水所产生的问题主要是由于地质结构不同，油田采出水水质差异很大，常常使油井和集输系统产生严重腐蚀和结垢，其中油田用水产生严重结垢是油田生产中不可避免的问题，且随着原油开发进入中后期，综合含水的不断提升，产出水对油井及设备的腐蚀日趋严重，输油、注水管道的使用寿命大大缩短，频繁作业井急剧增多，作业维修费用显著增大。

所以，针对在服役的油田管道，特别临近服役期的管道，腐蚀比较严重，泄漏风险较大，传统办法只能是更换。若将老旧管网延长使用寿命，从经济效益和企业节能降耗角度出发，采用非开挖修护的办法，对管道进行彻底清除锈垢，内壁缺陷进行修复，整体内部进行防腐蚀才能达到长期服役的预期目的。

【作者简介】 钟晓舟（1982-），男，中国广东惠州人，本科，工程师，从事设备防腐蚀研究。

表1 部分油田水质情况

油田	水型	总矿化度, mg/l	Cl-, mg/l
大庆油田	NaHCO ₃	6000-9000	1600-3500
胜利油田	CaCl ₂ , NaHCO ₃	15000-200000	14000-128000
辽河油田	NaHCO ₃	1500-6100	100-1300
中原油田	CaCl ₂	30000-180000	13000-100000
华北油田	NaHCO ₃ , CaCl ₂	1300-19000	490-11000
青海油田	CaCl ₂	1000-170000	60000-100000
克拉玛依油田	NaHCO ₃ , CaCl ₂	7000-49000	200-20000
顺北油气(新疆)	CaCl ₂	85824.06	51662.17
塔河油田自配模拟水	CaCl ₂	214739.9	131489.2



图1 注水管道结垢腐蚀情况



图2 输油管道结垢腐蚀情况

2 国内外非开挖修复技术

考量国内外非开挖技术应用经济性，结合油田管网腐蚀及工况环境情况，分析技术应用的可行性。

管固化原位修复：作业面要求较大，进入内置工具及穿插内固化衬套需作业面3米左右，且管固化材料目前仅用于市政排水，给水，能否抗酸性腐蚀无案例考证存在技术应用风险。

软衬套法：内壁净化要求较高，对注水管道、输油管道油蜡垢，传统工艺净化难度较大情况下工艺很难达到技术要求。且工艺受转弯变径制约。

空穴射流及通球工艺：除垢达不到涂层防腐标准，且受弯头、变径、管道通径影响，实施难度较大。

“旋转气流法”技术：“旋转气流法”是国内首创技术，其原理是在管道内激发气旋做功的技术，通过研制的旋流激发设备对管道持续输入不同压力的气流，差压气流在管道内相互作用形成“龙卷风”一旋转气流，并以此气流为载体，可以完成在管道密闭空间内多种做功过程，实施完

成管道内壁净化及涂膜防腐。

高速旋转的气流作为载体夹带相应磨料做功高速撞击、高速旋转研磨，把附着在管道内壁上的水垢、水锈、化学反应附着物、沉积物等清理掉。然后再利用高速气旋夹带相应的涂料，均匀涂衬在管道内壁上，固化形成附着力很强的内涂薄膜，完成管道内壁保护。

技术特点：

物理方法，作业面小，不受管道复杂连接方式限制；污垢自行回收，无排放、无污染；内壁清除彻底，达到国家涂层标准，可达到Sa2.5。

表2 几种非开挖修复技术对比

工艺方法 实施对比	旋转气流法	空穴射流及 通球	光固化及软衬 套法
弯头及缩颈	无需拆除或 切断	需要破拆	需要破拆
破拆地面	无需	作业面 4mX3m	每口井周边 4mX3m
设备能耗	低	高	高
效率	高	低	低
工程材料	较低	昂贵	昂贵
人工	4-5人	10以上	10以上

3 旋转气流法技术应用性

3.1 新建管道预防腐

清理管道：旋风气流对新敷设管道投产前净管，除渣除锈更彻底，效率更高。

快速干燥：旋风气流可快速将管道内水汽吹出，快速风干管道内壁。

防腐施工：新铺设管线进行涂膜防腐，原位将普通钢管改造为优质复合管道。

3.2 老旧管道清垢防腐

管道清理：高速旋转气水流夹带磨料，在目标管段内形成“旋风柱”，磨料不断撞击、剪切、研磨管壁硬质垢锈层，污物由尾端持续排入回收箱，清垢除锈效果可达Sa2.5级以上。管道涂装：除锈清管达到涂装标准后，根据管输介质技术指标，选择适合的防护涂料，用旋风气流带动液态涂料涂覆管道内壁，原位将管道改造为优质。

3.3 旋转气流法的技术优势

环境友好：非开挖闭环工艺，配有污物回收装置，对环境无不良影响。

保护性强：管线整体内壁防护，替代传统管线维护管理方式，提高管线功效延长使用寿命，节能降耗。作业时间短：工艺不受管道垂直、转弯、变径、分支、闸阀等复杂连接限制，可以根据管线实际情况选择作业距离，最长作业距离达2Km以上。综合成本低：物理方法，无需添加特殊药剂及装置，综合施工成本与更换新管相比降低50%以上。装备智能：自动化、智能化、集成化装备，适应复

杂地形状况。

4 旋转气流法技术的实际应用

近年来旋转气流法技术在石油化工管道修复项目上，为企业节能降耗、降本增效发挥了优势作用。

4.1 吉林油田输油、注水管道清洗涂装项目

施工时间：2018年。工程性质：在役管道除锈除垢、部分内防腐。

技术效果：恢复初始流量，涂装降低维修率80%以上。



图 3 注水管道除垢效果

4.2 中原油田地埋注水、输油管道清洗涂膜项目

施工时间：2023年。

工程性质：在役注水管道除锈除垢、输油管道涂膜防腐项目。



图 4 明 10 号站 201 注水线除垢效果



图 5 输油管道除垢效果



图 6 输油管道涂膜后效果

工艺实施效果满足生产工艺技术要求，为企业在役老旧管道非开挖修复提供可靠技术支持。

清垢检测：清垢标准 Sa2.5；

涂层检测：湿膜厚度 270 μm；干膜厚度 240 μm，附着力检测 1 级。

4.3 中石化惠州华德石化公司油库

新铺设管线内涂层防腐项目：

工程性质：新铺设钢制管线内涂层防腐。

管道类型：原油输送管道。

效果：涂层保护，杜绝腐蚀。

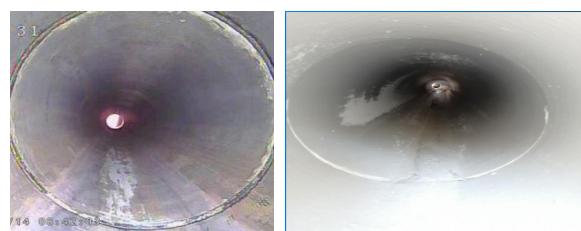


图 7 输油管道涂膜后效果

5 旋转气流法技术工艺实施效益效果分析

清垢、涂膜综合有效作业时间短，非开挖封闭作业污垢自行回收，不污染环境。有效工作效率较高，对锈垢堵塞特别严重管道效果、效率显著，涂层管道清垢、涂层检测达到技术标准要求；清垢效果：各管段达到通径 99.9%；工艺实施不受管道弯头制约限制，影响较小；经济效益：经济效益显著，极大降低了油田注水管道服役时间过长、锈垢严重更换管道成本，估算节约更换管道成本 50% 左右，提高的介质传输效率，降低综合能源消耗 24% 左右。

6 结语

本文简述的“旋转气流法”技术是国内集管道内壁净化与管道内壁护壁一体化修复技术，其非开挖技术属性和不受管道复杂安装方式（转弯、变径等）限制，可原位将管道修复改造成复合管道，有效杜绝了管道腐蚀问题，渗漏问题，延长管道使用寿命 10 年以上，为企业降低了开挖换管、硬化路面修复节约了大量成本。

技术适应工况环境强，效率高，可适应多种工艺管道，如：输油、输气、消防、排水、给水、循环水等。技术的普遍采纳将为企业节能降耗做出不可估量的贡献

参考文献

- [1] 秦国志 丁良棉 田志明编著《管道防蚀技术》，化学工业出版社，2003年7月，P13.
- [2] 秦国志 田志明编著《防腐蚀技术及应用实例》，化学工业出版社，2002年4月，P28.
- [3] 周本省编著，工业冷却水系统中金属的腐蚀与防护[M],北京：化学工业出版社，1993年，P28~29；
- [4] 南京化工学院等合编。金属腐蚀理论及应用 北京：化学工业出版社，1984；
- [5] 王巍.钛纳米聚合物涂料在炼油厂设备防腐蚀中的应用[J].石油化工设备技术,2007,02: 34-37+22.
- [6] 王巍钛纳米聚合物涂料在埋地管道不开挖防腐蚀技术中研究与应用 石油化工设备技术,2007,02: 34-37+22.

Research on the Impact of Prefabricated Buildings Based on Multi-source Heterogeneous Data Fusion on Real Estate Costs

Lanfen Wang

Hangzhou Xinzhu Real Estate Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

Prefabricated buildings, as an important development direction of the modern construction industry, have gradually attracted the attention of the real estate industry due to their advantages of high efficiency, greenness and standardization. With the rapid development of information technology, the integrated application of multi-source heterogeneous data provides new ideas and methods for the cost management of prefabricated buildings. Based on the theory of multi-source heterogeneous data fusion, this paper systematically analyzes the mechanism of prefabricated buildings in the cost control of real estate projects and explores how data fusion technology optimizes cost prediction, risk management and control, and resource allocation. Through the integration and analysis of data on the production, transportation, installation and management of prefabricated buildings, the substantive impact on reducing real estate costs is revealed. Combining typical cases and empirical research, the application effect and existing challenges of multi-source heterogeneous data fusion are demonstrated.

Keywords

Multi source heterogeneous data; Prefabricated buildings; Real estate costs; Data fusion; Cost Management

多源异构数据融合的装配式建筑对地产成本影响的研究

王兰芬

杭州新筑置业有限公司，中国·浙江 杭州 310000

摘要

装配式建筑作为现代建筑业的重要发展方向，以其高效、绿色和标准化的优势逐渐受到房地产行业的关注。随着信息技术的飞速发展，多源异构数据的融合应用为装配式建筑的成本管理提供了新的思路和方法。本文基于多源异构数据融合理论，系统分析装配式建筑在地产项目成本控制中的作用机制，探讨数据融合技术如何优化成本预测、风险管控和资源配置。通过对装配式建筑生产、运输、安装及管理等环节数据的整合与分析，揭示其对降低地产成本的实质性影响。结合典型案例与实证研究，论证多源异构数据融合的应用效果与存在的挑战。

关键词

多源异构数据；装配式建筑；地产成本；数据融合；成本管理

1 引言

近年来，装配式建筑作为实现建筑工业化的重要途径，成为推动建筑业转型升级的关键力量。与传统现浇建筑相比，装配式建筑通过工厂预制构件、现场快速组装，显著提高了施工效率，减少了现场作业时间，降低了环境污染。房地产行业对成本控制的需求不断加剧，使得装配式建筑以其成本优势逐步获得广泛应用。然而，装配式建筑涉及设计、生产、物流、安装及管理等多个环节，产生的数据来源多样且异构，如何有效整合这些多源异构数据，实现精细化成本

管理，是当前研究和实践中的难题。多源异构数据融合技术能够将结构化、半结构化和非结构化数据进行深度整合，提取有价值的信息，辅助科学决策，为装配式建筑的成本优化提供技术支持。本文旨在基于多源异构数据融合视角，系统探讨装配式建筑对地产成本影响的机理及应用路径，分析当前存在的问题及未来发展方向，为相关领域提供理论参考和实践指导。

2 多源异构数据融合技术概述与装配式建筑数据特点

2.1 多源异构数据融合技术概述

多源异构数据融合是一项核心技术，旨在将来自不同来源、格式、结构及语义的数据通过先进的技术手段进行集

【作者简介】王兰芬（1983-），女，中国浙江江山人，本科，工程师，从事工程造价研究。

成和处理，以实现数据的互操作性和价值最大化。随着信息化时代的到来，建筑行业中的数据来源变得越来越多样化，数据类型的异构性问题日益突出，如何有效整合这些数据成为提升项目管理、生产调度和质量控制等关键领域的核心问题。

多源异构数据融合技术涵盖了多个重要环节，包括数据预处理、格式转换、语义统一、数据挖掘和知识发现等。在建筑行业，数据的异构性不仅体现在数据的来源和格式上，还涉及数据的结构、语义、时间戳等方面。例如，建筑行业的主要数据包括 CAD 图纸、BIM（建筑信息模型）模型、传感器数据、视频监控等，每一种数据类型都具有独特的格式和结构，如何有效融合这些数据成为关键任务。具体来说，融合技术需要解决的数据问题包括数据冗余、不一致性以及数据质量差等问题，确保数据能够无缝地互操作。

高效的数据融合系统能够通过动态更新与实时共享，提升建筑项目的整体管理水平。特别是在装配式建筑的生产调度、进度监控、质量控制等环节，数据融合技术的应用能够显著提高管理效率，促进实时数据反馈，优化决策过程。因此，数据融合技术的有效应用不仅能够帮助建筑行业提高生产效率，还能在项目管理、资源调配、风险控制等方面起到至关重要的作用。

2.2 装配式建筑的数据类型及其异构性

装配式建筑作为现代建筑行业的一种重要发展方向，其数据来源广泛且复杂。装配式建筑的整个生命周期，包括设计、生产、施工和运维，都涉及到大量的数据。这些数据既包括结构化的数据库记录，也包括半结构化的设备日志和非结构化的图像、视频等多媒体信息。由于数据来源的广泛性与复杂性，装配式建筑的数据具有显著的异构性，主要表现在数据格式、语义层次和更新频率等方面的差异。

在设计阶段，数据主要来自 BIM 模型和 CAD 图纸，提供了建筑的三维结构、设计方案、施工图纸等基础信息。生产阶段的数据通常包括机械设备状态、生产工艺参数以及生产过程中的各类传感器数据，涉及产品制造的精准控制。物流数据是另一类重要的数据来源，它记录了建筑材料的运输路径、运输时间节点及相关的供应链信息，确保材料的及时配送和有效使用。施工数据则主要涉及施工现场的动态信息，包括施工环境、施工进度、施工工人的操作情况等，形成实时的施工监控数据。

每一类数据的格式和结构都存在显著差异。设计数据通常为结构化数据，如 BIM 和 CAD 文件，以图纸和模型的形式存储和呈现；生产数据和物流数据则可能是来自传感器和机械设备的实时监测数据，格式更为多样化，且包括大量的时间序列数据；现场施工数据可能涉及大量的非结构化数据，如视频监控记录、照片等。为了实现有效的数据融合，需要跨越技术和业务的壁垒，使得这些数据能够相互关联、共享，并进行深入的分析与应用。

2.3 数据融合技术在装配式建筑中的应用价值

通过应用多源异构数据融合技术，装配式建筑可以实现设计、生产、施工和运维各个环节的无缝衔接，从而优化生产计划、资源配置和项目管理。数据融合技术在装配式建筑中的应用价值主要体现在以下几个方面：

2.3.1 优化设计与施工衔接

通过将设计数据与生产数据、施工数据进行有效融合，能够实时监控建筑设计的实施情况，确保设计方案与施工过程的高度契合。这种融合能够有效减少设计与施工之间的信息断层，避免由于设计偏差或施工问题导致的返工，从而提高整体工程效率和质量。

2.3.2 动态监控项目进度与质量

数据融合技术能够实现对项目进度的实时监控，通过将各个阶段的数据整合分析，及时发现项目进度中的潜在问题，如材料供应延迟、生产进度滞后等，做到早期预警。这一技术不仅能够提高进度控制的精准度，还能够确保工程质量得到有效保障。通过实时数据反馈，项目管理人员能够更快速地做出决策，调整资源配置，避免项目延期或质量问题的发生。

2.3.3 提升协同效率和成本控制

在装配式建筑中，多个团队和部门往往需要协同工作，数据融合技术能够促进各部门之间的数据共享，增强信息的透明度，提升团队协作效率。同时，融合后的数据为地产企业提供了准确的成本预测和风险评估，企业能够更好地掌握项目的实际成本，优化资源配置，减少浪费和返工，提高整体成本效益。

2.3.4 建筑生命周期的全面管理

数据融合技术使得建筑从设计到施工、运维等各个阶段的所有数据都能够有效连接，形成完整的信息链条。企业能够基于全流程的数据，进行更加精准的成本核算、资源调度和风险控制，推动建筑生命周期的科学管理。通过准确的项目数据预测和成本分析，企业能够更好地预测项目成本的变动趋势，减少项目风险，提高经济效益。

2.3.5 精准优化供应链管理

通过融合各类生产、物流和现场数据，地产企业能够全面优化供应链管理。通过分析数据，企业能够更精准地预测材料需求、运输时间和供应链瓶颈，减少库存压力，提高生产效率和资源利用率。此外，数据融合还能够帮助企业在项目实施过程中优化采购和调度策略，进一步降低项目成本。

3 装配式建筑对地产成本影响的路径分析

3.1 装配式建筑生产环节对成本的影响

装配式建筑生产环节依赖高度标准化和机械化，工厂化生产显著降低了原材料浪费和工时成本。通过数据融合，可以实现生产设备的状态监控与维护预测，提高生产效率和产品质量。融合设计数据与生产数据，优化构件制造流程，

缩短生产周期，降低生产成本。同时，实时监控生产过程中的异常状况，有效减少次品率和返工率，降低生产风险和额外开支。这种以数据驱动的精细化管理，极大提升了装配式构件的制造效益，推动地产项目成本控制向精益化方向发展。

3.2 物流与运输环节的成本控制

装配式建筑构件体积大、运输要求高，物流环节的效率直接影响成本水平。多源异构数据融合帮助整合运输车辆GPS数据、路线规划信息、仓储管理系统等，实现对物流全流程的实时监控和动态优化。结合路况信息和天气数据，智能调整运输方案，避免运输延误和资源浪费。通过数据分析预测运输瓶颈，合理调配运输资源，降低车辆空驶率和燃油消耗，减少物流成本。此外，精准的物流数据还支持供应链协同，缩短运输周期，提高施工现场材料供应的及时性和准确性，为成本控制提供保障。

3.3 现场安装与施工环节的成本优化

现场安装环节是装配式建筑成本控制的重点，涉及人工、机械和时间管理等多方面。多源异构数据融合能够集成施工进度数据、工人考勤、设备运行及环境监测等信息，实现施工现场的智能管理。通过对施工任务的动态调整和资源调配，优化作业顺序，避免重复作业和时间浪费。数据融合技术还支持施工安全监控，降低事故风险和停工成本。施工数据与设计和生产数据的关联分析，促进信息透明与共享，减少沟通误差和技术变更，提升施工效率和质量水平，从而有效降低整体成本。

4 多源异构数据融合在地产成本管理中的应用实践

4.1 成本预测与预算管理

通过融合设计方案、市场价格、历史施工数据等多源信息，构建数据驱动的成本预测模型，提高成本预算的准确性和科学性。融合数据帮助地产企业实时调整预算，监控资金使用情况，识别超支风险。基于大数据分析，支持动态预算管理，提升资金配置效率，避免资源浪费。

4.2 风险识别与控制

装配式建筑项目风险包括设计变更、供应链中断、施工延误等。多源数据融合实现对关键风险指标的实时监测与预警。融合现场监控、供应链状态及市场环境数据，有效识别潜在风险，指导企业及时采取应对措施，降低风险引发的额外成本。

4.3 资源配置与优化

融合劳动力、材料、设备及资金等多方面数据，实现

资源配置的科学决策。通过数据分析优化资源使用效率，避免闲置或短缺。数据驱动的资源管理提升装配式建筑项目整体运行效率，降低不必要的开支。

5 存在问题与发展建议

5.1 数据融合技术瓶颈与挑战

当前，装配式建筑多源数据异构且量大，数据质量参差不齐，融合过程面临技术复杂性和计算负担。数据安全和隐私保护也是亟需解决的问题。缺乏统一的数据标准和平台，限制了融合效果和应用推广。需要加强数据标准制定，推动跨部门和企业间的数据共享机制建设，提升融合技术的智能化水平。

5.2 企业应用能力与管理体系建设

部分地产企业技术投入不足，缺乏专业的数据管理团队和融合应用经验，导致技术难以有效转化为管理优势。企业应加大信息化建设力度，培养复合型人才，完善成本管理体系，将数据融合作为重要战略资源，推动技术与管理深度融合，提升成本控制能力。

6 结语

多源异构数据融合技术为装配式建筑的地产成本管理带来了革新机遇。通过高效整合设计、生产、物流及施工等环节的数据，实现了成本的精准预测、动态管控和优化配置，显著提升了成本管理水平。研究表明，数据融合不仅提升了装配式建筑的经济效益，也推动了地产项目管理的智能化转型。然而，融合技术的复杂性及应用环境的多样性带来挑战，需要从技术创新、标准体系建设及企业能力提升多方面协同推进。未来，随着数据融合技术的不断成熟和应用深化，装配式建筑将在地产行业中展现更大成本优势，为建筑产业的高质量发展注入强劲动力。强化跨界合作与持续创新，将是实现装配式建筑与地产成本管理深度融合的关键。

参考文献

- [1] 董嘉诚.基于数字孪生的装配式建筑管理系统研究[D].西安理工大学,2022.
- [2] 车茂然.政府政策对装配式建筑的激励效应与优化仿真研究[D].重庆交通大学,2022.
- [3] 杨宇沫.基于BIM的装配式建筑智慧建造管理体系研究[D].西安科技大学,2020.
- [4] 尹娟.基于BIM的装配式建筑质量精细化管理研究[D].中南林业科技大学,2020.
- [5] 李长福.沈阳惠民新城装配式建筑成本效益分析与综合评价研究[D].沈阳建筑大学,2015.v

Integration and Optimization Strategies for Electrical Automation Systems in Prefabricated Buildings

Qi Luo

China Resources (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518055, China

Abstract

Prefabricated buildings are rapidly developing under the wave of industrialization and digitalization, with their electrical automation systems becoming a critical technological link due to high integration and complex control logic. This paper explores integration and optimization pathways for electrical systems in prefabricated buildings from three dimensions: system architecture, control strategies, and information management. By integrating BIM and IoT, a closed-loop information system covering the entire lifecycle of “design-manufacturing-construction-operation” is established to achieve multi-system coordination and dynamic control. Through project implementation and simulation verification, the results show that this solution can reduce comprehensive energy consumption of electrical systems by approximately 18%, shorten construction cycles by 20%, and improve control response time by 25%. The research provides technical support and engineering references for intelligent integration and industrial promotion of electrical automation systems in prefabricated buildings.

Keywords

prefabricated construction; electrical automation; system integration; control strategy; BIM

装配式建筑电气自动化系统集成与优化控制策略

罗琦

华润（深圳）有限公司，中国·广东深圳 518055

摘要

装配式建筑在工业化与数字化浪潮下快速发展，其电气自动化系统因集成度高、控制逻辑复杂而成为关键技术环节。本文从系统架构、控制策略与信息化管理三个维度探讨装配式建筑电气系统的集成与优化路径。基于BIM与物联网融合，构建“设计—制造—施工—运维”全生命周期信息闭环，实现多系统协同与动态控制。通过项目实践与仿真验证，结果显示该方案可使电气系统综合能耗降低约18%，施工周期缩短20%，控制响应时间提升25%。研究为装配式建筑电气自动化的智能化集成与产业化推广提供了技术支撑与工程参考。

关键词

装配式建筑；电气自动化；系统集成；控制策略；BIM

1 引言

建筑业数字化转型与工业化建造并行推进，使装配式建筑成为建筑生产方式变革的关键方向。与传统现浇建筑相比，装配式建筑在结构设计、机电系统、施工组织与运维管理等方面具有明显的模块化、信息化与高效化特征。其中，电气自动化系统作为建筑能源供给、信息交互与安全管理的核心载体，其集成质量直接影响建筑运行的安全性与经济性。当前，装配式建筑电气系统在设计、施工与运维环节中仍存在诸多挑战，如系统接口复杂、构件标准不统一、数据割裂与控制策略缺乏协调等。随着BIM、物联网与人工智能技术的深入应用，电气系统从“设备自动化”迈向“系统

智能化”，形成多层次信息交互与控制优化的新格局。本文基于系统集成理论与智能控制方法，探讨装配式建筑电气自动化的集成模型与优化策略，以期构建高可靠性、低能耗、可拓展的建筑电气自动化体系。

2 装配式建筑电气自动化的特征与构成

2.1 系统特征与功能定位

装配式建筑电气自动化系统以数字化、智能化控制为核心，构建涵盖供配电、照明控制、消防联动、环境监测及能耗管理的综合体系。系统以模块化结构和标准化接口为基础，通过可视化调度平台实现多系统的协调运行与信息共享。各子系统在统一数据标准下实现互联互通，形成能源流、信息流与控制流的综合管控平台。依托BIM技术支撑，系统可在设计阶段实现构件参数化建模，在施工阶段实现布线优化与碰撞检测，在运维阶段实现实时监测与性能追踪，从

【作者简介】罗琦（1987-），男，中国江西吉安人，本科，自动化工程师，从事电气自动化研究。

而实现建筑电气系统从设计到运维的全过程数字化与可追溯管理，显著提升系统的安全性、可靠性与智能化水平^[1]。

2.2 系统集成结构与技术路线

装配式建筑电气系统采用三级集成架构：现场控制层、网络通信层与管理决策层。现场层由传感器、执行机构与可编程控制单元组成，负责实时数据采集与动作控制；通信层以工业以太网、无线 Mesh 与光纤环网为骨干，实现多设备间的高速互联；管理层则以 BAS 与 BIM 融合平台为核心，实现建筑运行状态监控、能耗优化及决策支持。技术路线遵循“信息集成—智能决策—动态反馈”的逻辑，通过 PLC、DCS 与 IoT 网关实现多协议数据融合与跨系统协同，最终构建具有自适应调控与智能响应能力的电气自动化集成体系^[2]。

2.3 关键设备与通信技术发展

随着边缘计算、AIoT 与 5G 通信的深度融合，装配式建筑电气系统在实时性、稳定性与智能化方面得到显著提升。智能断路器、数字化配电柜、可寻址照明模块及无线传感终端的应用，使系统具备自学习、自诊断与远程控制能力。通信层技术正由传统 Modbus 与 BACnet 向 TSN（时间敏感网络）与 MQTT 协议演进，实现毫秒级数据同步与跨平台互联。边缘节点的部署有效分担云端压力，确保系统在复杂网络环境下依旧具备高鲁棒性与安全性，为装配式建筑电气系统的智能升级提供坚实技术基础。

3 系统集成的实现路径与关键技术

3.1 BIM 驱动的设计与施工一体化

在装配式建筑电气自动化系统集成过程中，BIM（Building Information Modeling，建筑信息模型）技术是实现设计、生产与施工全流程协同的核心工具。通过参数化建模与三维可视化设计，电气系统的设备布置、线路走向及接口位置可在虚拟空间中进行精确模拟与优化。设计人员可基于模型开展碰撞检测与可达性分析，提前识别照明、电缆桥架、给排水及暖通管线之间的空间冲突问题，减少施工现场变更。BIM 系统还可自动生成施工图纸、材料清单及加工数据，实现设计数据与生产设备之间的无缝衔接。在项目实践中，BIM 辅助设计使电气施工冲突数量减少 80% 以上，预制构件安装精度提升至 $\pm 5 \text{ mm}$ ，整体工期缩短约 15%。此外，BIM 模型在施工阶段可实时关联进度与成本信息，为项目管理提供多维决策依据，实现从虚拟建造到实际装配的全过程可追溯管理^[3]。

3.2 模块化装配与标准化接口

模块化与标准化是装配式建筑电气系统高效施工的关键基础。系统通过功能模块划分，将配电、照明、弱电通信及智能控制等单元在工厂预制为标准化模块，现场仅需快速拼装与接口连接。模块化设计采用统一规格的接插件、管线接口及布线通道，实现“工厂生产—现场装配—系统调试”

一体化施工流程。通过插拔式连接和智能识别技术，系统在装配阶段可自动检测模块状态与连通性，显著降低人工接线错误。研究表明，该模式使电气系统安装效率提升 40%，现场调试时间缩短约 25%。同时，标准化接口为后期扩容与维护提供便利，可在不影响主体结构的前提下实现系统升级或更换。模块化装配不仅提高了施工安全性与一致性，还促进了建筑工业化生产的精益化与可复制化发展，为电气系统的全生命周期管理奠定了基础。

3.3 智能控制与信息集成平台建设

装配式建筑电气系统的智能化核心在于信息集成与协同控制平台的构建。通过将建筑设备监控系统（BAS）、消防系统（FAS）、安防系统（SAS）、能源管理系统（EMS）等子系统接入统一数据平台，实现系统间的互联互通与协同运行。信息平台通过物联网网关汇聚现场传感数据，并利用云计算与大数据分析技术对运行状态进行综合评估，实现“感知—分析—控制—优化”的闭环管理。平台可依据实时负载数据进行能耗预测与动态调度，自动平衡各系统间的运行功率，防止能源浪费与设备过载。通过异常检测算法，系统能提前识别潜在故障并发出预警，支持运维决策的智能化。实践案例显示，基于信息集成平台的智能控制策略使建筑整体能效提升约 18%，设备运行稳定性显著增强。该体系实现了从单一设备控制向全系统智慧调度的跨越，是推动装配式建筑迈向数字化与智能化的重要支撑路径^[4]。

4 电气自动化的优化控制策略

4.1 基于多目标优化的能耗控制

装配式建筑在运行过程中，照明、空调及配电系统往往占据总能耗的主要比例，约为 70% ~ 75%。为提升整体能效水平，可引入多目标优化算法构建能耗控制模型，综合考虑用户照度需求、设备运行寿命与经济运行成本等因素。通过遗传算法对参数空间进行全局搜索，结合模糊逻辑控制实现动态能量分配，使系统在舒适性与节能性之间取得平衡。系统可根据时间段、人员密度及自然光照强度实时调整照明输出与空调功率，避免长期高负载运行造成的能源浪费。实际应用表明，采用该优化控制策略后，建筑综合能耗平均下降约 18%，设备使用寿命延长 12%，运行维护成本明显降低。该方法不仅实现了能效管理的动态最优控制，还为装配式建筑节能运营提供了可持续的技术路径。

4.2 基于数据驱动的故障诊断与预测维护

装配式建筑电气自动化系统在运行阶段存在设备数量多、运行环境复杂及维护难度高的问题。传统的人工巡检与定期维护模式难以实现精准诊断与高效管理。基于大数据与人工智能的故障诊断模型能够对传感器数据、控制日志与运行参数进行多维融合分析，识别潜在故障特征。利用卷积神经网络（CNN）与长短时记忆网络（LSTM）等算法，可捕捉设备运行中的异常波动趋势，实现早期预警。系统在模型

训练阶段通过自学习机制不断优化识别阈值，可在故障发生前 48 小时发出预警信息，指导运维人员提前干预。项目实践结果显示，预测性维护使设备故障率下降 30%，平均维护响应时间缩短 40%，停机损失显著减少。该策略推动建筑电气系统从“被动维修”向“主动诊断”转变，构建了智能化、可持续的运维模式^[5]。

4.3 智能调度与协同控制策略

在装配式建筑中，电气系统往往涉及照明、空调、电梯及安防等多子系统协同运行。为了实现整体能效与运行稳定性的统一，应建立基于分布式架构的协同控制机制。系统依托边缘计算节点对局部数据进行实时处理，通过云端集中优化与边缘自主决策相结合的方式，构建“中心协调—局部自治”双层控制体系。智能调度算法综合分析负载变化、气候条件与用户行为，动态调整设备运行策略，实现能源分配与任务调度的自适应优化。例如，当检测到高峰时段人员集中于办公区域，系统自动提升局部照明与空调功率；而在夜间或低使用率时段，则进入低功耗模式。实验数据表明，该策略使系统平均响应时间缩短 25%，运行稳定性与舒适度显著提高，进一步验证了智能调度在多系统协同运行中的技术优势与节能潜力。

5 系统集成与优化控制的工程实践

5.1 智能住宅项目集成应用

在某大型智能住宅装配式建筑项目中，电气自动化系统的集成以 BIM 建模和物联网平台为核心，实现了从设计、生产到安装、运维的全过程协同管理。项目在设计阶段通过 BIM 模型完成电气设备布置、管线碰撞检测及安装节点预演，确保施工阶段预制构件与配电管线的精准对接。施工环节采用预制化线缆与模块化配电箱装配技术，使安装工序标准化、模块化，整体施工周期缩短 20%。系统投入运行后，通过 IoT 平台实现数据的实时采集与远程调控，用户可通过手机端应用自主调节灯光亮度、室内温度及安防状态。能耗监测数据显示，系统优化后综合电能消耗下降 15%，家庭用电分时段管理与峰谷电价响应效果显著，体现了智能控制在节能与舒适性兼顾方面的综合优势。

5.2 绿色办公建筑的能源优化实践

在一座大型绿色装配式办公楼中，电气自动化系统与建筑能源管理系统（BEMS）实现深度融合。系统通过多源传感网络实时监测照度、温湿度及人员活动密度，采用模糊逻辑控制算法对照明与空调系统进行动态调节。当室内自然

光强度或人员密度变化时，系统可自动调整灯具输出功率与空调风量，实现“人走灯灭、区域控温”的智能化节能模式。运行数据表明，项目投入使用一年后，建筑单位能耗下降 19%，运行成本明显降低，且室内舒适度指数保持在 85% 以上。通过 BIM 与能耗管理平台的联动，管理人员能够对能耗数据进行分区分析与异常预警，支持节能决策与设备优化维护，实现了节能、舒适与安全的动态平衡。

5.3 信息化质量管理与安全保障

为提升装配式建筑电气自动化系统施工与运维的规范化水平，项目引入了基于云平台的质量信息化管理系统，对设计、安装、调试及运行全过程进行数字化记录。施工阶段利用 RFID 与二维码技术实现设备与构件的身份标识与全程追踪，确保每一节点均可溯源。系统结合视频监控与现场数据审计，实现质量巡检自动提醒与隐患闭环整改。在调试与运维阶段，系统自动采集关键参数（如回路电流、电压、温度）并生成趋势分析图，为设备老化评估与维护决策提供依据。此外，数据与图像资料统一归档形成数字化安全档案，提升了工程质量透明度与后期管理可追溯性。

6 结语

装配式建筑电气自动化系统的集成与优化控制是建筑工业化与智能化发展的关键环节。研究表明，基于 BIM 与物联网技术的系统集成模式能有效实现电气系统的协同控制与能效提升，显著改善施工效率与运行性能。未来应进一步推进人工智能、边缘计算与数字孪生在装配式建筑电气系统中的融合应用，构建开放、安全、可持续的智能控制体系。通过标准化接口、信息化管理与智能算法的协同创新，可实现装配式建筑从“自动化施工”向“智能化运维”的跨越，为建筑业高质量发展提供技术支撑与示范路径。

参考文献

- [1] 张晓禹,肖百齐,杨志坚.智能建筑电气自动化系统集成控制网络分析[J].智能建筑与智慧城市,2021,(06):138-139.
- [2] 于隆,高树祥.建筑电气工程及其自动化、智能化技术研究[J].房地产世界,2022,(08):90-92.
- [3] 李璟.电气自动化技术在智能建筑电气工程中的应用研究[J].居舍,2020,(21):40-41.
- [4] 管立东.关于建筑电气自动化控制技术的若干思考[J].建材与装饰,2017,(31):181-182.
- [5] 陈康.建筑电气自动化控制技术及应用实践之研究[J].科技创新导报,2017,14(24):55-57+59.

Exploring localized barrier-free design in elderly-friendly services in urban-rural fringe areas during urbanization: A case study of Ordos City

Na Zhang

College of Fine Arts and Design Jining Normal University, Ulanqab, Inner Mongolia, 012000, China

Abstract

During the 14th Five-Year Plan period, national policies have promoted the transformation of elderly care services from “basic guarantee” to “inclusive sharing”. In response to this strategy, Ordos City has issued relevant action plans to build a multi-level elderly care service network, providing diversified services for the elderly in urban-rural fringe areas. As a transitional zone between urban expansion and rural transformation, the urban-rural fringe of Ordos presents complex characteristics such as spatial fragmentation, population mobility and fragmented service supply. Existing barrier-free facilities suffer from the problem of “isolation”, while existing research has paid insufficient attention to this area. In line with the consensus in the field, barrier-free design needs to break through the limitations of standardized norms, and localized adaptation is the key to resolving the contradiction between resource constraints and diverse needs in urban-rural fringe areas. Based on the framework of “design-side solutions - demand-side segmentation - industry-side collaboration”, this study adopts interdisciplinary methods such as field surveys and case studies to construct a modular and low-cost barrier-free design and elderly-friendly service system, providing a systematic practical path for solving relevant problems in the urban-rural fringe of Ordos.

Keywords

Urban-rural fringe; Barrier-free design; Elderly-friendly service; Localized adaptation; Ordos

城镇化进程中城乡结合部适老服务产业中的无障碍设计在地化探索——以鄂尔多斯市为例

张娜

集宁师范学院美术与设计学院，中国·内蒙古 乌兰察布 012000

摘要

“十四五”时期，国家政策推动养老服务从“兜底保障”向“普惠共享”转型，鄂尔多斯市响应战略出台相关行动计划，构建多层次养老服务网络，为城乡结合部老年人提供多元服务。作为城市扩张与农村转型的过渡地带，鄂尔多斯城乡结合部呈现空间混杂、人口流动、服务供给碎片化等复合特征，现有无障碍设施存在“孤岛化”问题，而现有研究对该区域关注不足。结合领域研究共识，无障碍设计需突破标准化规范的局限，在地化适配是破解城乡结合部资源约束与需求多元矛盾的关键。本研究立足“设计侧方案—需求侧细分—产业侧协同”框架，通过实地调研、案例分析等跨学科方法，构建模块化低成本的无障碍设计与适老服务体系，为鄂尔多斯城乡结合部解决相关问题提供系统性的实践路径。

关键词

城乡结合部；无障碍设计；适老服务；在地化适配；鄂尔多斯市

1 引言

进入 21 世纪第三个十年，中国步入中度老龄社会，老

【基金项目】2025 年度鄂尔多斯市社会科学课题结项，课题名称《城镇化进程中城乡结合部适老服务产业中的无障碍设计在地化探索》（项目编号：2025S123）。

【作者简介】张娜（1989-），女，硕士，讲师，从事环境设计研究。

年人口规模扩大，养老服务需求呈多样化、个性化趋势。国家通过顶层设计与政策引导，推动养老服务体系建设向高质量发展转型。鄂尔多斯市作为内蒙古经济重要增长极，在人口结构转型、城市化加速背景下，养老服务需求凸显。鄂尔多斯将生态修复、产业转型、智慧升级、民生改善视为有机整体，实现系统协同与机制创新，有效探索可推广的可持续城市建设模式。市政府出台《推进基本养老服务体系专项行动计划（2023—2025 年）》，提出构建城乡多层次服务网络，通过街道养老服务中心、社区驿站与村级互助点联动，为老人

提供就近、便捷的服务。

城乡结合部成为老年人生活的重要空间载体，城市更新推动工业厂区与城中村改造，农村则受土地流转、居民回迁影响，其空间形态、人口结构与社会治理呈现显著的复杂性与动态性。这一区域既包含城中村、拆迁安置社区、工业配套小区，也涵盖牧区转居点、失地农民集中居住区等多种类型。老年人群体构成多元，包括随子女进城的随迁老人、因土地征用而失地的老人、从牧区迁入城镇的蒙古族老人，以及本地老龄居民。这些群体在出行方式、生活习惯、文化需求、健康状况等方面存在显著差异，对无障碍设施与适老服务提出了多元化、差异化的需求。

然而，无障碍设计与适老服务研究多针对城市成熟社区或传统农村，对城乡结合部关注不足。标准化设计规范难适配该区域空间混杂与需求多元，单一主体改造模式难形成可持续运营机制。周燕珉团队指出，城乡结合部需突破传统规范，探索低成本、可适配、可持续的在地化改造路径。鄂尔多斯市已有一定实践经验，如准格尔旗“一键呼”系统等，但城乡结合部高频节点仍存在无障碍通道缺失等问题。本文说明，在地化适配是解决城乡结合部无障碍设计难题的关键。

2 鄂尔多斯市城乡结合部适老服务产业中无障碍设计的核心矛盾

调研表明，城乡结合部存在三个较为突出的问题：其一为设施的“孤岛化”现象。部分节点内部虽符合无障碍标准，但节点之间缺乏连续可达的通行路径，尤其是在穿越机动车道、跨越排水沟以及通过临时市场时，老年人往往需要他人提供协助。其二是服务的“碎片化”问题。由不同部门负责的助餐、助医、助洁、助急等服务，缺乏统一的平台进行调度，老年人反馈存在求助难寻责任人以及重复登记等情况。其三是文化的“脱嵌化”状况。导向系统与语言需求不匹配，活动内容缺乏民族文化元素，导致蒙古族老人参与度较低。从而体现出其三大核心矛盾。

2.1 空间维度：由混杂性引发的改造矛盾

城乡结合部空间形态多样，有传统街巷的狭窄曲折和现代小区的规整宽阔，路面有平坦水泥和起伏砖石。这种混杂性使“一次性、整体化”标准化改造难推行。如坡道建设，国家规定坡比不大于1:12，部分老旧社区因空间受限难达标。三轮车、电动代步车通行需更宽空间和大转弯半径，传统轮椅坡道无法满足。此外，该区域地下管线复杂、地面沉降频发，改造后易二次破损，维护成本高。城乡结合部建筑产权多元，改造涉及业主、物业、商户等多方利益，协调难度大。部分商户因担心设施占经营空间而抵触改造，且公共与私人空间界限模糊，改造权责划分不明。

2.2 需求维度：多元性引发的适配矛盾

城乡结合部涵盖城中村、回迁社区、工业配套小区、

牧区转居点等多种类型，其街巷尺度、地面铺装及建筑密度存在显著差异。老年人群体包括随迁老人、失地老人、牧区转居老人、蒙古族老年人以及外来务工家庭中的隔代抚养者，他们呈现出多元化特征。不同群体需求差异显著，随迁老人初入城市，需清晰导向标识、便捷信息渠道和社交活动；失地老人收入受限，关注低成本、高性价比服务；蒙古族老人期望语言、饮食、文化活动获尊重认同；独居与高龄老人行动不便、慢性病多，对紧急呼叫、上门照护和医疗保障需求迫切。现有服务与设施多采用平均供给模式，缺乏针对性与精准度。如导向标识仅用汉语，蒙古族老人阅读难；配餐口味单一，不符少数民族老人习惯；文化活动以广场舞、太极拳为主，随迁老人难融入。

2.3 资源与产业维度：投入有限性与运营持续性的矛盾

城乡结合部改造牵涉多主体。政府财政承担兜底保障职责，但资金有限，难满足所有需求。企业与社会组织参与意愿低，因缺乏稳定盈利模式与回报机制。项目一次性投入完成后，后续维护资金缺口大，设施闲置率高。社区专职工作者少、志愿者流动性大，服务持续性难保障。此外，适老产品与服务市场发展不充分。本地缺专业化无障碍设施生产企业，多依赖外地采购，成本高、周期长且售后难。标准化产品难适配复杂场景，定制化产品价格贵。产业链不完整，设计、生产、安装、维护各环节脱节，影响供给质量与效率。

3 无障碍设计在地化的解决方案与实践路径

3.1 设计层面：低成本、适配性改造方案

3.1.1 基于行程链导向的系统设计

以老年人日常出行的完整行程链作为基本单元，对家门口一楼门—街巷—公交站—菜市场—卫生服务站—养老服务—中心—返回这一行程进行系统梳理，识别其中的断点与瓶颈，优先打通高频节点之间的关键路径。通过点一线一面的渐进式改造方式，逐步构建连续可达的无障碍网络。

3.1.2 模块化低成本设施体系

研发具备标准化、装配式特点的无障碍设施构件，以降低改造成本和技术门槛。具体内容如下：

装配式坡道模块：具备可调节坡比（范围为1:8至1:15）以及可拼装平台的特性，能够适配不同的高差与空间条件。采用铝合金和复合材料制造，具有轻便耐用、安装快捷的优势。**门槛跨越模块：**针对商铺、公共建筑入口的台阶与门槛，设计可拆装的过桥板，配备橡胶防滑面层，以适配三轮车与轮椅通行。将三轮车、电动代步车的尺寸与性能参数纳入设计基线。三轮车宽度通常为1.2—1.5米，转弯半径≥2.5米，在坡道通行时需考虑动力不足问题，建议坡比≤1:10。相应调整候车区、停车位、通道宽度，以实现多种交通工具的共容。**可移动扶手与转弯拓展板：**在狭窄路口、门厅等受限空间，提供临时或季节性的辅助支撑，并在冬季增设防滑措施。

代步车友好节点包：包含加宽停车位（单车位宽度 ≥ 1.5 米）、低位充电桩（高度 ≤ 1.2 米）、轮挡以及地面防滑处理等设施，以满足三轮车、电动代步车的停放与充电需求。安全与导向组件包：设置低位照明（高度0.5—1.0米）、对比色地面引导线、双语及图形化标识，以提升环境的可感知性与可理解性。在主要节点设置紧急呼叫按钮，并与“暖城颐养”平台实现联动。

在地材料与简易工法：优先选用本地可获取材料（如砖石、木材、再生塑料），采用简易工法（如干挂、卡扣式连接），降低施工难度与成本。

数字化与安全系统整合：将“一键呼”紧急呼叫、视频监控等技术整合至“暖城颐养”平台，形成人、设施、平台闭环系统。老年人或家属可通过手机、穿戴设备呼叫，平台自动定位派单，社区工作者或志愿者快速响应；

3.2 需求层面：基于群体细分的精准服务

构建老年人需求数据库：通过入户调研、问卷收集和平台数据解析，构建涵盖基本信息、健康状况等多维度数据库并动态更新，支持生成个性化画像。随后，将需求画像转化为设施与服务参数，如蒙古族老年人群体对应“双语导向+民族配餐+传统节日活动”服务包，独居高龄老年人群体对应“夜间照明+紧急呼叫+每日巡访”服务包，随迁老年人群体对应“社区融入活动+信息导览+子女联络”服务包，借助规则引擎自动匹配，实现精准供给。

围绕高频生活场景，设计“全流程、一站式”服务包：助医链服务包涵盖预约挂号、接驳出行、通道引导、陪诊协助、药品配送、复诊提醒；助餐链服务包包含口味登记、营养配餐、厨房配送、优化取餐动线、餐后评价；社交链服务包有融入性活动、邻里互助、志愿者结对、线上线下联动；安全链服务包包括居家评估、设施改造、紧急呼叫、定期巡访、信息推送。在导向系统、设施色彩、活动组织、饮食配餐中融入蒙古族文化元素，如导向标识用蒙汉双语并增设图形标识，配餐提供传统食品，文化活动涵盖传统项目，养老中心设文化展示与交流空间。同时尊重宗教信仰与生活习惯，增强归属感与认同感。

3.3 产业层面：多元协同的可持续发展机制

治理协同方面，构建由住建、民政、卫健、交通、市场监管等部门组成的跨部门协调专项工作小组，统筹城乡结合部适老化服务与无障碍设计工作，制定统一清单、联合评审、同步验收及绩效考核流程以破除部门壁垒，同时由街道办事处统筹辖区资源，协调社区、物业、企业、社会组织等多方参与；平台与数据方面，以“暖城颐养”智慧养老平台为基础，接入设施台账、需求画像等功能模块，达成数据采集、分析等闭环管理，为动态优化与精准治理提供支撑，并

对接医疗、社保、公安等系统以提升信息共享与协同效率。

4 案例实证与效果分析

研究团队协同某街道在两个典型社区（A社区为拆迁安置回迁小区，B社区为城中村更新改造区域）开展试点工作。在“家门口—菜市场—公交站—卫生站—养老服务站”五段路径设置装配式坡道等设施。搭建平台整合社区养老专员、街道养老服务站与第三方服务公司资源，实现线上派单与巡检。

试点评估采用定量与定性结合的方法：一是测量行程时间等指标；二是开展老年人满意度调查与深度访谈；三是跟踪平台数据。结果显示：试点区域老年人前往卫生站平均时间缩短28%，无障碍链路断点从14处减至5处，设施完好率超90%；呼应回应时间缩至10分钟内，服务完成率提升至93%。不同类型老人反馈良好，如随迁老人社区活动参与度提升，蒙古族老人有归属感，独居老人认可夜间照明与门前坡道。虽项目面临志愿者流失、平台数据共享不充分等问题，但初步验证在地化模块化策略有推广价值。

5 结语

鄂尔多斯城乡结合部适老服务与无障碍设计核心矛盾是空间混杂、需求多元、资源约束多维叠加。本文提出设计侧模块化、需求侧精准化、产业侧协同化路径，通过行程链梳理、模块化设施建设、需求数据库搭建、平台联动等举措，缓解了设施孤岛化、服务碎片化、文化脱嵌等问题。

未来研究可从三方向深化：一是扩大试点范围，构建长期数据监测体系，评估四季气候和人口结构变化对设施性能的影响；二是推动民族文化与数字技术深度融合，探索硬件设施、软件服务、社区文化三位一体适老生态模式；三是完善标准体系与产业链条，形成两级标准（自治区、市级）与三级导则（街道、社区、节点）组合模式，保障在地化方案可复制与可持续。通过持续实践迭代，鄂尔多斯有望在城乡结合部构建普惠性与文化多样性兼具的无障碍适老服务新范式。

参考文献

- [1] 刘海英,王强.新质生产力赋能资源型城市高质量发展的思考——以鄂尔多斯市为例[J].北方经济,2025,(08):52-56.
- [2] 内蒙古自治区宏观经济研究中心“推进实现共同富裕研究”课题组,董淑彦,杜勇锋,等.鄂尔多斯市建设共同富裕典范城市实践范例——乌审旗推进共同富裕主要做法经验[J].北方经济,2025,(05):11-14.
- [3] 李欢倪.鄂尔多斯：构建全民共享的可持续城市未来[J].可持续发展经济导刊,2025,(07):59-63.

Research on the Operational Efficiency and Cost-effectiveness of Construction Robots in the Construction of Main Structures

Xin Liu

Qingdao Guoxin Construction Investment Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract

Currently, the construction industry is confronted with issues such as labor shortage, low efficiency in the construction of main structures, and great difficulty in cost control. Intelligent construction has become the core direction of industry transformation. However, the efficiency and cost-benefit mechanism of construction robots in this field has not yet been systematically recognized. This paper discusses the application scenarios and core technologies of construction robots in the construction of main structures. It analyzes the mechanism of improving operation efficiency from three aspects: technical characteristics, process optimization, and collaborative mechanism. It constructs a cost-benefit mechanism for dynamic cost optimization and benefit transformation, and explores the cost-benefit improvement mechanism, with the aim of providing a reference for construction enterprises to apply construction robots.

Keywords

Construction robot; Main structure construction; Work efficiency; Cost-effectiveness

建筑机器人在主体结构施工中的作业效率与成本效益研究

刘鑫

青岛国信建设投资有限公司，中国·山东 青岛 266000

摘要

当前建筑行业面临劳动力短缺、主体结构施工效率偏低及成本管控难度大等问题，智能建造成为行业转型的核心方向，但建筑机器人在该领域的效率与成本效益作用机制尚未形成系统认知。本文论述了建筑机器人在主体结构施工中的应用场景与核心技术，分别从技术特性、流程优化、协同机制三方面解析作业效率提升机理，构建成本动态优化与效益转化的成本效益机制，并探讨了成本效益的提升机制，以期为建筑企业应用建筑机器人提供参考。

关键词

建筑机器人；主体结构施工；作业效率；成本效益

1 引言

近年来，国家《“十四五”智能建造与新型建筑工业化发展规划》明确将建筑机器人列为重点推广的智能装备，要求加快其在主体结构等关键施工环节的应用；同时，建筑行业劳动力老龄化加剧，45 岁以上从业者占比持续上升，传统人工施工不仅效率低，还面临高空作业等安全风险，行业对智能化装备的需求愈发迫切。此外，BIM、激光 SLAM 导航等技术与建筑机器人的融合，为主体结构施工智能化提供了技术支撑，但当前对机器人在该领域的效率提升逻辑与成本效益机制研究不足，难以指导企业实践。因此，进行建筑机器人在主体结构施工中的作业效率与成本效益研究具有十分重要的现实意义。

【作者简介】刘鑫（1983-），女，中国山东青岛人，本科，从事工程技术研究。

2 建筑机器人在主体结构施工中的应用概述

2.1 应用场景分类

在主体结构施工中，建筑机器人的应用场景可依据主体结构核心工序划分为三大类，各类机器人精准匹配特定施工工序，明确功能定位以契合工序技术标准。混凝土施工类机器人涵盖地面整平机、收面机器人及高频振捣机器人，适配于混凝土浇筑后的收面处理及密实度控制关键工序，承担基层整平、表面压光及振捣密实任务，确保混凝土强度及表面平整度达标。钢筋作业类机器人聚焦于钢筋工程中的原材料加工及骨架绑扎关键环节，其中钢筋切割机器人负责钢筋切断、弯箍等原材料加工，绑扎机器人执行钢筋骨架的精准绑扎作业，满足钢筋工程的尺寸精度及绑扎密实度要求。模板施工类机器人服务于模板支撑体系的安装定位及加固锁定核心工序，模板安装机器人执行模板吊装对位，螺杆拉拔机器人完成模板加固后的拉拔检测，保障模板支撑体系的整体刚度及定位精度。

2.2 核心技术与装备特性

建筑机器人的技术支撑体系由硬件配置与软件系统共同构成，两者协同作用赋予设备特定作业特性以适配主体结构施工需求。硬件配置中的柔性机械臂能够根据施工部位的形状与尺寸调整作业姿态，适配主体结构中复杂构件的加工需求。3D 视觉传感器可实时捕捉施工环境信息与构件位置，为精准作业提供环境感知支持。磁吸式移动底座能稳固吸附于钢结构或混凝土表面，满足不同作业高度与场景的移动需求^[1]。软件系统中的 BIM 技术可将建筑设计数据转化为机器人可执行的作业指令，确保操作与设计标准一致，激光 SLAM 导航技术支持机器人在复杂施工现场自主定位与路径规划，避免碰撞并提升移动效率，云端工艺库则为不同施工环节提供标准化作业参数，保障操作规范性。

3 建筑机器人在主体结构施工中的作业效率提升机理

3.1 技术特性驱动的效率提升

建筑机器人在主体结构施工中，技术特性驱动效率提升的逻辑可从作业精度、持续作业能力、环境适应性三个核心维度展开分析。

第一，建筑机器人通过激光标定技术与视觉定位系统的协同作用，能够精准捕捉施工构件的位置、尺寸及安装基准信息，实现毫米级的施工精度控制，从而减少因精度偏差导致的返工操作，降低返工耗时对整体施工效率的影响。第二，依托内置的自动化控制系统与稳定的动力供给模块，无需像人工施工那样受生理疲劳、作息时间及精力集中度的限制，在保障设备运行安全与维护需求的前提下，能够实现 24 小时连续作业，大幅延长有效作业时长^[2]。第三，借助针对施工现场复杂环境设计的特殊防护结构，如防水、防尘外壳，以及适配不同作业面的全地形移动方案，能够在雨雪、大风等恶劣天气条件下保持相对稳定的作业状态，降低恶劣天气对施工进程的干扰，进一步保障施工效率的稳定性。

3.2 施工流程优化的效率增益

在主体结构施工流程优化层面，建筑机器人通过对工序衔接、资源配置、进度管控三个关键环节的优化产生效率增益，各环节优化需结合其技术功能与施工实际场景展开。

第一，建筑机器人按照预先设定的标准化作业流程执行施工操作，每道工序的操作步骤、衔接节点均有统一规范，这能显著减少因人工操作差异导致的工序切换间隙，同时配合智能调度系统可合理规划多台设备的作业时段与区域，实现多设备协同作业以避免工序重叠或等待。第二，基于 BIM 模型的任务规划功能，该功能能根据主体结构施工的整体进度与各环节工作量，精准分配机器人、辅助工具及物料的使用计划，避免出现人力过剩、设备长时间闲置或物料供应脱节的情况。第三，在作业过程中会持续采集施工进度相关数据并实时传输至管理系统，管理人员可依据这些数

据及时识别进度滞后的环节，通过调整机器人作业参数或补充任务安排实现施工进度动态调整，提前规避可能引发工期延误的问题。

3.3 协同作业机制的效率放大效应

在主体结构施工中，建筑机器人协同作业机制的效率放大效应主要通过多机器人分工配合与同智能管理系统深度融合两方面实现，二者分别从作业执行与管理调度层面强化效率提升效果。

第一，多机器人协同作业会依据主体结构施工的工序逻辑进行任务拆分，例如在钢结构施工流程中，焊接机器人专注完成构件焊接作业，安装机器人同步开展螺栓连接操作，不同机器人各司其职且同步推进，避免单一机器人承担多任务时的切换等待时间，从而形成高效作业流水线^[3]。第二，建筑机器人与智能管理系统融合时，系统能够实时获取各机器人的作业位置、进度及设备运行状态等信息，再结合整体施工计划动态调整机器人的作业安排，比如当某区域机器人完成任务后，系统可及时调度其支援其他待作业区域，减少设备闲置时长，进一步放大整体作业效率优势。

4 建筑机器人在主体结构施工中的成本效益提升机制

4.1 成本构成的动态优化路径

在建筑机器人应用于主体结构施工的成本构成动态优化中，需按初始投资成本与运营成本两大类别解析具体路径，两类成本的优化方式分别对应不同控制逻辑以实现整体成本下降。

第一，初始投资成本优化可通过申领政策补贴实现，各地针对智能建造装备的扶持政策能直接抵扣部分购置资金，采用设备租赁模式可避免一次性大额资金占用，而通过批量采购机器人及配套部件还能凭借采购规模与供应商协商议价，进一步降低单台设备的初始投入金额。第二，运营成本优化可借助多维度措施推进，用机器人替代主体结构施工中的高危岗位能减少人工薪酬支出与安全防护设备采购成本，通过能耗监测与智能调节技术降低作业过程中的能源消耗，提升维护效率可缩短设备停机维修时长并减少维护物料消耗，且机器人精准作业能减少施工材料的无效损耗，间接降低材料补充采购带来的额外运营成本。

4.2 直接效益的转化机制

在建筑机器人应用于主体结构施工的直接效益转化机制中，需从人工成本节约、材料损耗降低、工期收益提升三个核心维度展开分析，每个维度均通过机器人的特定作业能力实现经济效益的直接落地。

第一，人工成本节约的转化主要依托建筑机器人对现场作业人工的替代作用，机器人可持续承担主体结构施工中的重复作业与高强度任务，减少完成同等工作量所需的作业人员数量，进而降低企业需支付的人工薪酬、社会保险及相

关福利费用，同时避免因人工流动、请假产生的招聘与技能培训等额外成本。第二，材料损耗降低的转化借助建筑机器人的精准作业能力实现，机器人在混凝土浇筑、钢结构焊接等环节能严格依照设计参数规范操作，避免人工操作中可能出现的配料偏差、切割过量或安装失误等问题，减少施工材料的无效损耗，无需为补充损耗材料进行额外采购，直接降低项目的材料采购成本^[4]。第三，工期收益提升的转化源于建筑机器人对施工效率的提升，机器人高效作业可缩短主体结构施工的整体工期，不仅能减少项目建设期间的资金占用成本，如贷款利息、设备租赁延期费用等，还能让建筑提前达到交付条件，产生额外收益，例如商业建筑提前出租的租金收入或住宅项目提前销售的资金回笼收益。

4.3 间接效益的辐射效应

在建筑机器人应用于主体结构施工的间接效益辐射效应中，需从安全成本降低、品牌价值提升、环境效益转化三个维度解析实现机制，各维度通过机器人的技术特性与施工场景适配形成综合价值。

第一，安全成本降低的辐射效应通过建筑机器人承担高危作业实现，主体结构施工中的高空作业、焊接作业等易发生安全事故的环节由机器人替代人工后，可减少工伤事故发生概率，进而降低企业因事故产生的医疗赔付、设备损坏维修、项目停工整改等相关安全成本，同时减少对作业人员安全保障措施的额外投入。第二，品牌价值提升的辐射效应依托建筑机器人带来的智能化施工能力形成，采用机器人开展主体结构施工能体现企业在智能建造领域的技术实力，帮助企业在市场竞争中树立技术先进的品牌形象，吸引更多注重施工品质与效率的合作项目，甚至在项目合作中获得更高的议价空间与合作优先级。第三，环境效益转化的辐射效应借助建筑机器人的低碳施工模式达成，机器人作业过程中能通过精准操作减少施工废料产生，部分电动机器人还可降低传统施工设备的燃油消耗与碳排放，这种低碳施工模式契合绿色建筑政策导向，使企业有机会获取碳交易相关收益，或在政策支持下获得绿色施工项目的补贴与资质认定优势。

4.4 成本效益的评估模型与投资回收期分析

为精准测算建筑机器人在主体结构施工中的投资收益回报水平，需构建涵盖静态成本效益指标与动态财务评价指

标的成本效益评估模型，为投资决策提供量化支撑。

第一，静态指标核心包含单位面积成本节约额与现场作业人员替代率：前者基于分部分项工程成本台账，对比机器人施工与传统人工施工的单位面积直接成本差值测算；后者结合工序人工配置标准，核算机器人替代的作业人员数量占比，直观反映短期成本节约成效。第二，动态指标采用净现值（Net Present Value, NPV）与投资回报率（Return On Investment, ROI）：NPV 纳入资金时间价值系数（如基准收益率），将项目全生命周期内各期成本节约额、额外收益折算为评估基准日现值，判断项目财务可行性。ROI 通过计算初始投资总额与年均净收益的比值，量化长期投资盈利水平。第三，建筑机器人投资回收期测算需结合主体结构施工的项目体量、工序复杂度及机器人配置方案，先归集机器人购置/租赁费用、配套系统部署成本等初始投资总额，再统计运营阶段的人工成本节余、材料损耗降低额、工期缩短收益等年均净收益。

5 结语

综上所述，通过系统梳理建筑机器人在主体结构施工中的应用场景与技术体系，揭示了技术特性驱动、施工流程优化、协同机制赋能的多维度作业效率提升机理，探讨了涵盖成本动态优化、直接与间接效益转化的成本效益提升机制，进而有助于推动建筑机器人在主体结构施工中应用的不断深入。未来，可进一步探索 AI 自主决策、数字孪生技术与建筑机器人的深度融合，完善行业层面的技术标准与成本评估规范，推动建筑机器人从单点应用向多工序集成化应用发展，为建筑行业实现高质量、智能化发展提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1] 邹子昊, 杨笑笑, 申爱君, 等. BIM+建筑机器人的智能化建筑工程方案应用探索[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (08): 99-101.
- [2] 陈子龙. 基于建筑机器人协同的住宅施工全过程智能控制研究[J]. 中国住宅设施, 2025, (07): 90-92.
- [3] 赵峥, 刘通. 智能建筑机器人与装配式建筑施工的结合探析[J]. 科学技术创新, 2025, (15): 200-203.
- [4] 陈金宝, 王健. 基于人机合作背景简析建筑机器人的施工方法[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (14): 87-89.