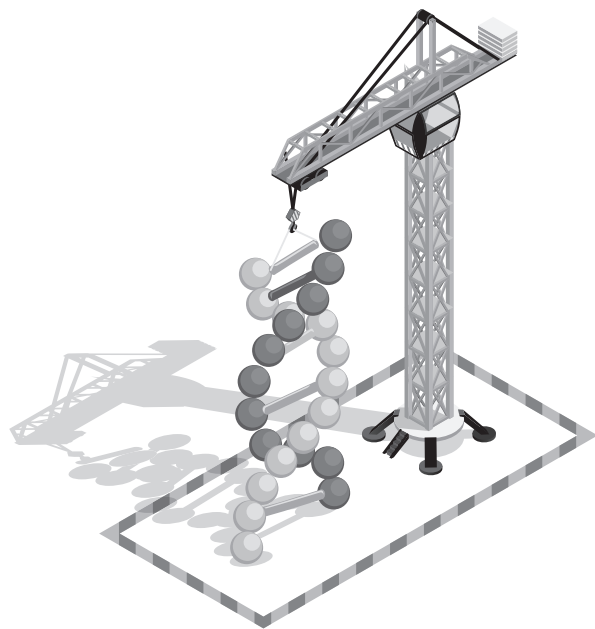


# 工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## Editorial Board

### Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

### Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

# 工程研究与应用

Engineering Research and Application

第3卷 第12期 2025年12月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

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

网址: <https://www.artdesignnp.com>

## 本刊说明:

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

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



## 工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- 001 基于物联网的水利工程智能监控体系研究 周许, 朱明, 张闯, 顾子龙, 王旭  
Research on Intelligent Monitoring System for Water Conservancy Projects Based on  
the Internet of Things Zhou Xu, Zhu Ming, Zhang Chuang, Gu Zilong, Wang Xu
- 004 工程测绘中 GPS 测绘技术实践探讨 毛卫华, 彭子杰  
Discussion on the Practice of GPS Surveying and Mapping Technology in Engineering  
Surveying and Mapping Mao Weihua, Peng Zijie
- 007 水利工程输水管道安全维护管理探讨 刘涛  
Discussion on the Safety Maintenance and Management of Water Conveyance  
Pipelines in Water Conservancy Projects Liu Tao
- 010 “强国行”背景下地方高校智能制造专业群产教融合模式创新研究  
——基于党建“双融双育”的视角 符特  
Research on The Innovation of The Mode of Integration of Production and Education  
in The Background of "Strong Country Action" for the Professional Group of Intelligent  
Manufacturing in Local Colleges and Universities —Based on The Perspective of  
"Double Integration and Double Education" of Party Building Fu Te
- 014 地质矿产调查的技术应用策略 曹永贵  
Technical Application Strategies for Geological and  
Mineral Resources Surveys Cao Yonggui
- 017 基于多模态数据融合的智慧矿山建设 朱丕凯  
Intelligent Mine Construction Based on Multimodal Data Fusion Zhu Pikai
- 021 水性防腐涂料在船舶涂装中的应用 李双亚  
The Application of Waterborne Anticorrosive Coatings in Ship Coating Li Shuangya
- 025 工程管理中多方协同机制的构建与优化 马一帆, 吴晨光, 毛华彪  
Construction and Optimization of Multi-Party Collaboration Mechanisms in  
Engineering Management Ma Yifan, Wu Chenguang, Mao Huabiao
- 028 绿色低碳理念在市政工程施工管理中的应用路径与绩效评价研究 徐宗兵  
Research on The Application Path and Performance Evaluation of Green and Low  
Carbon Concept in Municipal Engineering Construction Management Xu Zongbing
- 031 分级破碎设备保护系统与装置  
的研究应用 吴彪, 刘振, 赵国亮, 黄身水, 龙福强, 李新月  
Research and Application of Protection Systems and Devices for Hierarchical  
Crushing Equipment Wu Biao, Liu Zhen, Zhao Guoliang, Huang Shenshui,  
Long Fuqiang, Li Xinyue
- 035 地下矿山开采技术的创新与发展趋势研究 江定富  
Research on The Innovation and Development Trends of Underground  
Mining Technology Jiang Dingfu
- 038 珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制策略 刘芬  
Quality Control Strategies for the Jewelry and Precious Metals  
Inspection and Testing Industry Liu Fen
- 041 重大工程影响下区域地下水资源承载能力重新评价与优化配置研究 段洛煜  
Research on Re-evaluation and Optimal Allocation of Regional Groundwater Carrying  
Capacity Under Major Engineering Impacts Duan Luoyu
- 044 基于 BIM 的民航工程族库构建与多维应用研究 李鹏, 袁佳秋, 刘岸新  
Research on Construction and Multidimensional Application of BIM Civil Aviation  
Engineering Family Library Li Peng, Yuan Jiaqiu, Liu Anxin

048	道路桥梁过渡段不均匀沉降防治措施探讨 Discussion on Preventive Measures for Differential Settlement in Road and Bridge Transition Sections	王艳梅 Wang Yanmei
051	面向低碳机场建设的助航灯光电气施工节能优化与可靠性控制研究 Research on Energy Efficiency Optimization and Reliability Control in Airport Approach Lighting Electrical Construction for Low-Carbon Airport Development	黄哲 Huang Zhe
055	桥梁工程监理安全风险识别与预控措施 Safety Risk Identification and Pre-Control Measures of Bridge Engineering Supervision	谢明卫 Xie Mingwei
058	招投标管理对工程造价及成本的影响分析 Analysis of The Impact of Bidding Management on Engineering Cost and Cost	麻宏伟 Ma Hongwei
061	膨胀加强带代替后浇带施工技术管理探索 Exploration of Construction Technology Management for Replacing Post-Poured Strips with Expansion Reinforcing Strips	姚伟宙 Yao Weizhou
064	热敏纸生产工艺对白纸老化的影响探索 Exploration of The Impact of Thermal Paper Production Process on White Paper Aging	梁冬梅 Liang dongmei
067	现代船舶建造工艺流程优化研究 Research on Optimization of Modern Shipbuilding Process Flow	欧阳荣 Ouyang Rong
070	市政道路重交通下交叉路口设计、施工与维护一体化研究 Research on the Integration of Design, Construction, and Maintenance of Intersections under Heavy Traffic Conditions on Municipal Roads	陈贤 Chen Xian

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

074	绿色公路建设材料研发与应用研究 Research on The Development and Application of Green Highway Construction Materials	纪续 Ji Xu
077	智能化公路养护管理系统设计与实现 Design and Implementation of Intelligent Highway Maintenance Management System	王维海 Wang Weihai
080	铝电解阳极炭渣减量化工工艺研究与应用 Research and Application of Reduction Process for Anode Carbon Residue in Aluminum Electrolysis	王晓东, 张坤 Wang Xiaodong, Zhang Kun
083	大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机 Large Diameter Water-Suspended Spinny Super Balance Ship Lift	王树涛 Wang Shutao
086	ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的应用与优化研究 Research on the Application and Optimization of ALC Wall Panel Construction Technology in Residential Buildings	任文东 Ren Wendong
089	高温季节公路施工中混合料温度控制技术研究 Research on Temperature Control Technology for Mixtures in Highway Construction during High-Temperature Seasons	李莹莹 Li Yingying
092	医用建筑精益改造与精密安装控制技术研究 Research on Lean Renovation and Precision Installation Control Technology of Medical Buildings	徐国杰, 陈建飞, 贾波, 蔡长春, 谢文尧 Xu Guojie, Chen Jianfei, Jia Bo, Cai Changchun, Xie Wen Yao
095	智能建造技术在建筑工程中的应用研究 Research on the Application of Intelligent Construction Technology in Architectural Engineering	钱俊超 Qian Junchao
098	弱电智能控制技术在建筑造价管理中的应用及发展趋势 The Application and Development Trend of Weak Current Intelligent Control Technology in Construction Cost Management	陈尧春 Chen Yaochun
101	智能建造与 AI 数字应用在建筑领域的融合与创新 The Integration and Innovation of Intelligent Construction and AI Digital Applications in The Field of Architecture	杨松 Yang Song
104	建筑监理在大型项目中的组织结构与管理效率提升研究 Research on Organizational Structure and Management Efficiency Improvement of Construction Supervision in Large-Scale Projects	吴爱滔 Wu Aitao
107	医疗建筑项目成本控制与效益分析 Cost Control and Benefit Analysis of Medical Construction Projects	朱式文 Zhu Shiwen
110	建筑工程管理中工程风险管理的创新路径 Innovative Pathways for Engineering Risk Management in Construction Project Management	刘湘华 Liu Xianghua
113	房地产工程管理模式在建筑领域的应用与创新 Application and Innovation of Real Estate Engineering Management Mode in the Construction Field	罗嘉皓 Luo Jiahao
116	基于高层建筑设计的 BIM 技术应用 Application of BIM Technology Based on High-rise Building Design	陈南仁 Chen Nanren
119	论述建筑工程管理中的控制要点与优化 Discuss The Key Control Points and Optimization in Construction Project Management	何春喜 He Chunxi
122	高层住宅小区建筑给排水设计研究 Research on The Design of Water Supply and Drainage Systems in High-rise Residential Communities	张升 Zhang Sheng
125	配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱延性系数模拟研究 Simulation Study on Ductility Coefficient of Concrete Columns Reinforced with HTRB600 High-Strength Stirrups	董勃 Dong Bo

电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

130	基于压力感应的智能交通信号灯系统设计与应用研究 Research on the Design and Application of Intelligent Traffic Signal Light System Based on Pressure Sensing	路艳玲, 吴峰, 申浩 Lu Yanling, Wu Feng, Shen Hao
133	基于信号设备履历的智能化远程测试系统推动电务管理智能化变革 Intelligent Remote Testing System Based on Signal Equipment Records Promotes Intelligent Transformation in Railway Signaling and Communication Management	杨慧 Yang Hui
137	基于 GIS 与遥感技术的雅丹地貌旅游资源评价 Study on Evaluation and Sustainable Utilization of Yadan Landform Tourism Resources Based on GIS and Remote Sensing Technology	尹雪 Yin Xue
140	Ai 在智能电能表检验检测数据异常识别中的应用 The Application of Ai in Anomaly Identification of Inspection and Testing Data for Smart Electricity Meters	鲁舟斌, 宋凤伟 Lu Zhoubin, Song Fengwei
143	浅谈力控 pSpace 数据库在智慧化工厂中应用与实践 A Brief Discussion on the Application and Practice of ForceControl pSpace Database in Smart Factories	王亮 Wang Liang
147	基于接收信号强度的多天线阵列自适应波束成形 Adaptive Beamforming for Multi-Antenna Arrays Based on Received Signal Strength	张永波, 张佳懿, 张日宣, 周雨馨, 赵佳鑫, 杜文静 Zhang Yongbo, Zhang Jiayi, Zhang Rixuan, Zhou Yuxin, Zhao Jiaxin, Du Wenjing



# 基于物联网的水利工程智能监控系统研究

周许, 朱明, 张闯, 顾子龙, 王旭  
淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001  
DOI:10.61369/ERA.2025120002

**摘要 :** 物联网技术的迅速发展为水利工程监控带来了全新机遇, 通过多源传感器、无线通信和大数据处理手段, 实现水情、工情与环境信息的实时感知与高效传输。在复杂多变的水文环境中, 智能监控系统能够有效提升工程运行效率与安全保障水平。研究聚焦于水利工程智能监控体系的架构设计、关键技术路径、典型应用实践以及未来发展趋势, 旨在推动水利工程向数字化、智能化与精细化方向演进, 为水资源的科学管理与防灾减灾提供有力支撑。

**关键词 :** 物联网; 水利工程; 智能监控; 大数据; 数字孪生

## Research on Intelligent Monitoring System for Water Conservancy Projects Based on the Internet of Things

Zhou Xu, Zhu Ming, Zhang Chuang, Gu Zilong, Wang Xu  
Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

**Abstract :** The rapid development of Internet of Things (IoT) technology has brought brand-new opportunities for the monitoring of water conservancy projects. By utilizing multi-source sensors, wireless communication, and big data processing methods, real-time perception and efficient transmission of water regime, engineering conditions, and environmental information can be achieved. In complex and variable hydrological environments, intelligent monitoring systems can effectively enhance the operational efficiency and safety assurance level of engineering projects. This study focuses on the architectural design, key technological pathways, typical application practices, and future development trends of intelligent monitoring systems for water conservancy projects, aiming to promote the evolution of water conservancy projects towards digitalization, intelligence, and refinement, and provide strong support for the scientific management of water resources and disaster prevention and mitigation.

**Keywords :** Internet of Things (IoT); water conservancy projects; intelligent monitoring; big data; digital twin

## 引言

传统水利工程监控多依赖人工巡查与分散监测, 存在信息获取滞后、数据孤立与响应不及时等问题, 难以适应复杂水文环境下的安全管理需求。物联网的引入使传感器感知、无线传输与智能分析深度融合, 为水利工程提供了实时监控与风险预警的新途径。研究以体系架构、关键技术、应用实践和发展趋势为主线, 系统探讨智能监控体系的构建与优化路径, 以期推动水利工程向数字化、智能化与高效化方向发展。

## 一、物联网在水利工程中的应用基础

### (一) 物联网技术概述

物联网技术是以传感器、通信网络 and 数据处理平台为核心的综合性信息体系, 其在水利工程中的应用为传统监控方式带来了深刻变革。通过布设水位传感器、雨量传感器、流量计、压力传感器等, 可实时采集水文、水情及工情数据; 借助无线通信技术, 尤其是蜂窝网络、卫星通信和无线自组网, 可实现远程、广域范围内的高效传输; 而大数据处理与云计算平台则能够对庞杂

的数据进行清洗、融合与分析, 形成直观可视化的监控界面, 为管理者提供决策依据。与以往单点监测相比, 物联网实现了多点、多维度的实时数据采集, 极大提高了水利工程的整体运行感知能力<sup>[1]</sup>。此外, 人工智能技术与物联网结合, 能够在监测过程中实现自动识别与预测分析, 使监控体系逐步从“被动记录”走向“主动预警”, 推动水利管理由经验驱动转向数据驱动。

### (二) 水利工程监控需求分析

水利工程的运行涉及防洪、灌溉、供水与生态环境保护等多个环节, 其监控需求具有多样性与复杂性。首先, 在水库调度方



面，需实时监测水位、库容及泄洪量，以保证防洪安全和供水调度的科学性；若信息滞后，极易造成调度失衡，甚至引发水灾。其次，河道水位监控对于洪水预警至关重要，河段水位、流速及泥沙含量等数据的及时掌握，可为防汛指挥提供决策支撑。再次，在灌区用水管理中，水量分配与输配效率直接关系农业生产与水资源节约，传统依靠人工巡查和经验调度的方式已难以满足精细化用水管理的需求。此外，泵站运行、渠道渗漏、堤坝变形等工情信息同样需要实时采集与监控。因此，水利工程对监控体系的需求主要集中在实时性、全面性与准确性三个方面，既要求快速捕捉关键数据，又需保证数据的广覆盖和高可靠性，这正是物联网技术能够发挥优势的领域。

（三）技术适配性

在水利工程的复杂环境下，通信与数据传输技术的适配性尤为关键。低功耗广域网（LPWAN）以其低能耗、远距离传输和大规模接入能力，特别适合布设在水库、河道等偏远地区的传感器网络，能够长期稳定运行，降低维护成本。NB-IoT 作为物联网的重要分支，具备覆盖广、连接数多和能耗低的特点，在地下管网监控、堤坝渗漏监测等场景中展现出显著优势，可实现对细微环境变化的敏感捕捉。而随着5G技术的发展，其高带宽、低时延和强大连接能力，为水利工程的高清视频监控、实时三维建模和大规模多点同步传输提供了可能，尤其适合应用在防汛指挥和应急调度中。多种技术各有特点，在实际应用中常需结合区域环境、监控目标和经济成本进行合理选择与互补。例如，在大面积灌区可采用 NB-IoT 构建基础监测网络，在重点枢纽站点则利用5G 支持高清视频和实时指挥，以实现分层级、全覆盖的智能监控体系<sup>[9]</sup>。通过灵活应用不同通信方式，水利工程能够在保障数据传输稳定性的同时，兼顾能源消耗与建设成本，形成可持续运行的技术方案。如图1所示。

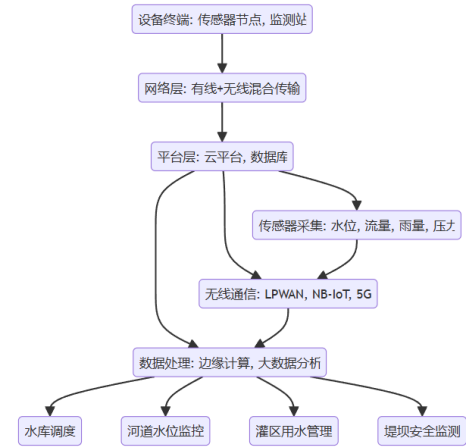


图1：物联网在水利工程中的应用基础架构示意图

二、水利工程智能监控体系架构设计

（一）感知层设计

感知层是智能监控体系的基础，其主要任务是通过传感器和终端设备实现对水文、水情和工情信息的全面采集。在水库运行中，需布设水位传感器、库容测量装置及泄洪控制监测设备，以掌握水库蓄泄动态；在河道监测中，则通过流速仪、水位计和泥

沙传感器，实时反映水情变化和泥沙输移情况；在灌区管理中，安装流量计和土壤湿度传感器，可精准掌握水量分配与农田用水需求。此外，压力传感器、渗漏监测器和形变传感器在堤坝及渠道工程中的应用，有助于发现潜在隐患。感知层的设计不仅要考虑设备精度和稳定性，还要兼顾环境适应性，如防潮、防雷、防腐蚀等。通过分布式、多节点布设，感知层能够形成覆盖广泛、数据实时的监测网络，为上层数据传输与分析提供可靠的数据来源<sup>[9]</sup>。

（二）网络层设计

网络层在智能监控体系中起到承上启下的作用，其核心是保证感知层数据能够稳定、快速、安全地传输至平台层。水利工程地域广阔，环境条件复杂，因此常采用有线与无线结合的混合传输模式。有线传输，如光纤通信，适用于水库枢纽、调度中心等固定点位，具备大带宽与高稳定性的优势；无线传输则主要依赖于NB-IoT、LoRa、4G/5G等技术，适合偏远河道、灌区及移动设备的布设，具备低功耗与大范围覆盖的特点。为了确保数据传输的连续性与安全性，网络层通常还需设计多路径备份与冗余机制，在突发灾害或通信中断时可自动切换，避免数据丢失。同时，采用加密传输与身份认证措施，能够有效防止非法入侵与数据篡改。通过合理的传输架构设计，网络层能够实现不同场景、不同精度要求下的数据高效汇聚，为平台层的处理与分析打下坚实基础<sup>[10]</sup>。

（三）平台层与应用层设计

平台层与应用层是整个智能监控体系的核心价值体现，承担着数据存储、分析处理与服务展示的任务。平台层主要依托云计算和大数据技术，将来自感知层的大规模、多源异构数据进行清洗、整合和建模，并通过机器学习和人工智能算法实现趋势预测与风险评估。在应用层，数据通过可视化界面、三维模型和移动终端实时展示，管理者可直观掌握水位变化、流量分布和设备状态，进而支持科学决策。例如，在防汛指挥中，平台可根据实时数据自动生成洪水预警信息并推送至相关部门，实现快速响应；在灌区用水管理中，应用层可根据农田湿度与天气预报，智能调度灌溉计划，提高水资源利用率。除此之外，平台层还具备历史数据回溯、设备运维监控和多部门信息共享功能，能够为区域水资源综合调度和应急管理提供全方位支撑。

三、关键技术与实现路径

（一）数据采集与传输技术

数据采集与传输是智能监控体系的起点，其稳定性与实时性直接决定监控效果。近年来，边缘计算逐渐应用于水利监控场景，能够在传感器端或就近节点完成初步数据处理与过滤，将原始数据量减少30%—40%，有效缓解网络传输压力。例如，在某大型水库试点中，日均采集的水位与流量数据超过50GB，利用边缘计算进行本地筛选与压缩后，传输量仅为20GB，大幅提升传输效率。同时，数据传输需兼顾安全性，通过AES加密算法和身份认证，可将数据泄露风险降低至不足1%。此外，采用多协议支持（MQTT、CoAP、HTTP）与多路径传输机制，能够保障在洪水等极端灾害条件下，数据依然能够快速、稳定地上传至平台<sup>[10]</sup>。

（二）智能分析与预警技术

智能分析与预警技术是物联网监控体系的核心环节，主要依



赖人工智能算法与大数据模型。基于长短期记忆网络（LSTM）的水位预测模型，在某流域实验中对未来6小时水位预测精度达到92%以上，可为防洪调度提供可靠依据。在异常检测方面，利用聚类与关联规则算法可实时识别突发性水位异常或传感器故障，平均响应时间控制在10秒以内。以2024年南方某中型河道试点为例，监控系统在汛期共发出46次洪水风险预警，其中42次与实际情况相符，准确率达到91.3%。同时，系统还能结合降雨量与地形信息，自动生成洪水风险分布图，极大提升了风险感知的空间精度<sup>[6]</sup>。

（三）系统安全与容错机制

在水利工程中，监控系统不仅要关注数据采集和分析，还需重视安全与容错机制的构建。数据显示，若关键节点未采用冗余设计，网络中断导致的数据丢失率可高达15%；而通过双节点冗余与自动切换机制，丢失率可降至1%以下。为防止恶意攻击，系统普遍采用区块链溯源与多重加密措施，对传输链路进行实时校验，有效抵御70%以上的常见网络攻击。容错机制方面，数据中心通常配置三层备份策略，即本地实时备份、异地云端备份与历史数据冷存储，确保在极端情况下仍可恢复关键信息。此外，系统运行过程中还建立自动告警与自修复程序，能在发现异常延迟时即时切换备用通道，使整体运行保持高可用性与稳定性。如表1所示。

表1 典型水利工程智能监控系统关键技术应用对比

技术类别	应用方式	优势	局限性	应用成效数据
边缘计算 + 压缩传输	传感器端初步处理，减少冗余数据	降低30%—40%数据量，提升传输速率	硬件部署成本较高	日均50GB→20GB，效率提升60%
AI预测算法（LSTM）	水位与流量预测，风险趋势判断	精度高（92%以上），支持预警调度	需大规模历史数据支撑	某流域6小时预测准确率92%
异常检测与聚类算法	识别突发水位异常与设备故障	响应快（10秒内），减少误报率	算法复杂度高，计算资源消耗较大	汛期准确率91.3%
冗余 + 多路径传输	多通道备份，自动切换	稳定性强，丢失率低于1%	建设维护成本增加	数据丢失率由15%降至1%

由表可见，关键技术 在传输效率、预测精度与系统稳定性方面均展现出显著成效，但同时也存在建设成本高与数据依赖强等限制。通过多技术融合与优化配置，水利工程智能监控体系的整体效能能够实现持续提升。

四、应用实践与未来发展趋势

（一）典型案例分析

以浙江千岛湖流域智慧水库监控系统为例，该系统在2021

年全面启用，依托物联网传感器、水文自动监测站和高清视频监控，实现了库区水位、流量和雨量的实时采集与远程传输<sup>[7]</sup>。平台通过大数据与AI算法开展洪水预报与调度优化，使调度指令平均提前3小时下达，防洪决策准确率提升至95%以上。实际运行表明，该系统在2022年梅雨季成功预警5次中小洪水事件，避免直接经济损失约2.1亿元，成为国内智慧水利的典型示范案例。

（二）推广应用挑战

尽管典型案例显示了显著成效，但在推广应用过程中仍面临多重挑战。首先，建设与维护成本较高，中小型水利工程在资金投入上存在较大压力。其次，运维管理专业化水平不足，部分基层单位缺乏信息化人才，导致设备利用率偏低。再次，数据标准化问题突出，不同地区和部门间的数据采集格式、通信协议及平台接口差异较大，制约了跨流域、跨区域的数据共享与联动调度。

（三）未来发展趋势

未来，水利工程智能监控体系将呈现三大发展趋势：一是高度智能化，依托人工智能实现更精准的预测与决策；二是自适应调度，系统能够根据水文动态自动优化运行策略，实现调度智能闭环；三是数字孪生与智慧水利深度融合，通过构建虚拟水库与流域模型，实现对实际工程的全生命周期管理与风险演练。这些趋势将进一步推动水利工程从单一监测走向全面智慧化管理，为水资源高效利用与防灾减灾提供坚实支撑<sup>[8]</sup>。

五、结语

物联网在水利工程中的应用显著提升了监控的实时性、精细化与安全性，通过感知层、网络层与平台层的系统架构设计，实现了数据的高效采集、传输与智能分析。典型案例显示，智能监控体系在防洪预警和水资源调度中发挥了重要作用。然而，推广过程中仍受制于成本、运维与数据标准化等因素。未来有必要进一步融合人工智能、大数据与数字孪生技术，构建更加智能、自适应和可持续的智慧水利体系。

参考文献

[1] 朱敏, 金锦, 康丙东. 黄河下游防洪工程智能监管系统解决方案的初步探讨 [C]// 中国水利学会. 中国水利学会2018学术年会论文集第五分册. 黄河水利科学研究院; , 2018: 404-408. DOI:10.26914/c.cnkihy.2018.018163.

[2] 张为. 基于山科水利物联网的闸阀智能监控与故障预警系统研究 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第七届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集. 杭州山科智能科技股份有限公司; , 2025: 52-53. DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.021150.

[3] 李冰. 物联网在吉林“中部引松工程”中应用的探讨 [J]. 中国水运 (下半月), 2018, 18(12): 62-63.

[4] 孙金喆, 孙运良, 杨文硕. 基于物联网的水利工程远程监控与数据传输安全研究 [J]. 中国宽带, 2025, 21(05): 115-117. DOI:10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2025.05.39.

[5] 戴会超. 水利工程影响下基于物联网的流域水文水质监控系统及方法. 湖北省, 三峡大学, 2015-03-01.

[6] 赵含雨. 水利工程管理中智能监控系统的应用现状与未来发展趋势 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (36): 60-62.

[7] 谈震, 舒依娜, 刘敏, 等. 水利工程智能运维“云-网-端”全链路监控系统的设计 [J]. 中国农村水利水电, 2022, (09): 19-24+29.

[8] 喻鑫, 夏玉. 水利工程质量检测智能网络监控系统研究 [J]. 科学技术创新, 2020, (23): 112-113.

# 工程测绘中 GPS 测绘技术实践探讨

毛卫华<sup>1</sup>, 彭子杰<sup>2</sup>

1. 浙江省景宁畲族自治县景致勘测设计有限公司, 浙江 景宁 323500
2. 浙江顺畅高等级公路养护有限公司丽水区域中心, 浙江 丽水 323000

DOI:10.61369/ERA.2025120008

**摘 要 :** 随着科学技术的飞速发展, 工程测绘领域也在不断革新。GPS 测绘技术作为一种先进的测量手段, 凭借其高精度、高效率、全天候等优势, 在工程测绘中得到了广泛应用。本文探讨 GPS 测绘技术在工程测绘不同场景下的具体应用, 分析当前该技术存在的问题, 并对未来发展趋势进行展望, 希望有所帮助。

**关 键 词 :** 工程测绘; GPS; 测绘技术; 工程实践; 存在问题; 未来发展

## Discussion on the Practice of GPS Surveying and Mapping Technology in Engineering Surveying and Mapping

Mao Weihua<sup>1</sup>, Peng Zijie<sup>2</sup>

- 1.Jingzhi Survey and Design Co., Ltd., Jingning She Autonomous County, Jingning, Zhejiang 323500
- 2.Lishui Regional Center of Zhejiang Shunchang High-grade Highway Maintenance Co., Ltd., Lishui, Zhejiang 323000

**Abstract :** With the rapid development of science and technology, the field of engineering surveying and mapping is constantly innovating. As an advanced measurement method, GPS surveying and mapping technology has been widely applied in engineering surveying and mapping due to its advantages of high precision, high efficiency, and all-weather operation. This paper explores the specific applications of GPS surveying and mapping technology in various scenarios of engineering surveying and mapping, analyzes the current problems with this technology, and looks forward to its future development trends, hoping to provide some assistance.

**Keywords :** engineering surveying and mapping; GPS; surveying and mapping technology; engineering practice; existing problems; future development

## 一、GPS 测绘技术原理和系统组成

### (一) GPS 测绘技术原理

GPS 测绘技术可明确接收设备位置, 一般可依托于卫星定位系统, 通过地面接收设备和测量卫星之间间距获取位置。位于地面的 GPS 接收机可获取来源于卫星的信号, 并基于信号传播速度与时间的不同, 对接收机及卫星间距进行计算。计算的结果可用于空间几何模型的建立, 并基于三角测量原理, 完成接收机三维坐标的计算, 获取高程、维度和精度等参数<sup>[1]</sup>。实践中, 工作系统会采用实时动态差分技术, 将 GPS 接收机设置在已知坐标基准站上, 对卫星信号进行实时观测和记录, 同时向流动站接收机发送有关数据。流动站接收机可兼顾基准站数据和卫星信号的接收, 经过差分计算, 将大气传播误差、卫星轨道误差等公共误差最大限度消除, 使定位精度达到厘米级。

### (二) GPS 系统组成

GPS 系统一般包括空间、地面控制和用户设备等不同部分。其中, 空间组成部分以分布在不同轨道平面的卫星为主体, 这样即使在全球各个角落, 可观测的卫星数量都会不少于4颗, 且不受时间的限制, 保证用户定位服务的连续性。地面控制部分包括监测站、注入站和主控站。监测站可连续观测卫星, 对气象数据等

参数进行记录, 同步向主控站传输<sup>[2]</sup>。注入站可用对应卫星存储系统存储信息, 保证卫星向地面发送信号的准确性。主控站可对监测站各类观测数据进行实时收集, 信息可同步向注入站传送。用户设备则以 GPS 接收机为主, 可在接收的同时, 解码并处理信号, 对接收机位置时间、速度等进行计算, 获取接收机坐标。结合应用需求和场景差异, GPS 接收机类型较多, 既可航空, 也可车载, 还可随身手持移动, 适用于多个场景。

## 二、GPS 测绘技术在工程测绘中的实践

### (一) 地形测绘

GPS 测绘技术在地形测绘应用价值较高, 相较于传统以大量消耗人力物力为主的测绘方法, GPS 测绘技术效率较高, 而且基本不会受地形条件的限制。实践中, 测绘人员可避免携带大量设备, 只需要携带 GPS 接收机即可, 相关测绘地点的数据, 包括平面、高程和三维坐标等, 都会显示在 GPS 接收机<sup>[3]</sup>。即使地形面积较大, 也可以 GPS-RTK 为主要测绘技术, 以提高测量数据精度和测绘效率。很多山区由于地形限制, 人员无法在平面上大量布设测量点, 因此可借助 GPS 测绘技术, 记录地形起伏情况, 保证地形数据的准确性, 辅助后续工程规划设计。举例而言, 在某

山区地形测绘项目中,山区通过专业专用处理软件,处理并分析测量点数据,获得了山区当地数字地面模型,并通过系统量化了各类信息,包括高程变化、山谷走向和地形起伏等,令公路选线更适配山区地形,避免工程增加额外建设成本<sup>[4]</sup>。

此外,由于GPS设备可在无人机上搭载,因此可利用空中优势完成地形测绘,使测绘覆盖效率更大,令地形信息更详细。以某城区地形测绘为例,测绘人员可为无人机提前设定航线,使其飞行范围覆盖测量区域,由GPS接收机对飞行位置信息和轨迹进行实时记录,并通过相机对地面影射影像图与数字表面模型进行记录。数据可作为评估地形地貌,以及当地道路和地面建筑物的重要依据,辅助城市高效建设与科学规划<sup>[5]</sup>。

## （二）工程控制测量

工程控制测量可获得精准数据,辅助后续工程建设质量的提升,保障工程安全。GPS测绘技术可在短时间内建立控制网,并提高控制网精度,且由于限制条件较少,因此人员控制点设置工作压力与数量也会进一步减少。铁路和桥梁等工程,就是需要建立高程与平面控制网的主要场景。测绘人员可将GPS接收机建立在控制点上,长时间观测并借助数据处理软件完成控制点坐标的解算。相较于常规测量方法,GPS可实现测量精度的提升,也可有效缩短测量周期。以某铁路工程建设为例,由于铁路线路长度较长,且沿途地形地貌相对复杂。观测控制点阶段,测绘人员依照有关规范将GPS控制点设置在沿线,保证测绘点控制网覆盖全线。观测控制点阶段,应精细处理观测数据,实现数据精度与质量的提升,保障高程轨道平顺性<sup>[6]</sup>。

## （三）水下地形测绘

桥梁工程需要将钢板桩围堰或钢套箱围堰打入水底,因此需要通过水下地形测绘,获知水下地形情况,这对于桥梁下部结构施工强度而言至关重要。常规水下地形测绘,以测深仪测量方法为主,这种测绘方法不仅复杂程度较高,难以有效提高效率,而且更容易受到环境因素的影响,天气和水流都会影响测绘精度。GPS测绘技术可以作为测深仪重要的替代或辅助技术,可提高测绘效率,保证测绘数据的准确性。实践中,可将测深仪与GPS接收机安装在测量船上,测深仪可获取水下深度信息,GPS接收机可获得测量船坐标,借助数据采集与处理技术,整合位置与深度相关信息,可完成水下地形图的绘制。举例而言,可通过GPS水下地形测绘获得水下地形有关数据,收集航道地形数据,有助于后续航道疏浚方案制定<sup>[7]</sup>。以某港口扩建工程为例,建设之前,应详细测绘港口附近海域水下地形,对码头建设位置与港池开挖范围进行科学规划。实践中,可同步增加姿态传感器,监测测量船姿态变化,实现测量精度的提升,避免船体摇晃影响测量结果。通过海域精细测绘,可提高水下地形数据分辨率,并基于分辨率构建三维模型,令后续港口扩建工程各道工序有明确的地形信息参考,以实现港口建设科学规划。

## （四）变形监测

工程建设阶段,可能涉及基坑开挖、沟槽开挖等施工环节,进而对地基原状土造成强烈扰动,增加管线变形、开裂、破坏、建筑物、构筑物开裂和沉降等风险。因此对于工程建设而言,应

在施工同时,对工程变形情况进行监测,为施工安全保驾护航。GPS测绘技术可实时监测,对变形的动态变化特征有较强适应能力<sup>[8]</sup>。举例而言,针对高层建筑施工,可通过GPS监测并记录建筑物沉降和垂直度情况,若发现数据超出标准,系统会第一时间发出警报,方便采取对应措施,降低事故发生率。在一些水利工程施工中,GPS也有助于大坝变形监测,实践中,可建立监测系统,不分时间和地点监测大坝沉降与位移现象,保障大坝运行的安全性。

# 三、当前工程侧会中GPS测绘技术面临的问题

## （一）精度局限

尽管GPS测绘是当前工程测绘的先进技术,但是聚焦于特殊应用场景,精度依然有较大提升空间。以一些高精度工程测量场景,包括精密工程,施工缝变形监测等,都需要最大限度减少误差,最好能够达到毫米级测量精度。当前系统提升精度的技术,一般为差分技术,但卫星轨道误差为GPS信号固有误差,且卫星信号传递到地面接收设备途中,可能会收到大气等环境因素影响,导致测量精度无法有效提升<sup>[9]</sup>。再以一些长输管道工程为例,由于管道铺设长度动辄数公里或者十几公里,误差会和距离成正比关系,对测量结果准确性造成负面影响。大面积地形测绘同理,GPS测绘需要辅以同步误差纠正,以提高测绘精度,否则可能影响地形图拼接结果的准确性。

## （二）信号干扰

很多因素都可能直接或间接影响GPS信号传输精度,增加信号丢失风险,对测量精度造成影响。城市和乡村都有各自影响信号的因素,城市中由于高层建筑较多,建筑物会直接遮挡GPS信号的传输,并形成信号反射屏障,增加信号出现偏差风险<sup>[10]</sup>。即使接收机接收到信号,也可能不是准确信号,导致测绘人员无法获取真实位置。山区乡村同样会因为地形起伏不定,影响GPS信号的稳定性,导致卫星信号接收不全,对测量数据准确性与稳定性造成影响。GPS信号同样会受到电磁干扰,而工程建设现场会有智能化机械设备,工地附近也可能存在通信基站和高压电线等,可能会产生大量电磁辐射,对GPS信号造成干扰,影响GPS接收机精度<sup>[11]</sup>。

## （三）设备成本

GPS测绘设备包括数据传输设备、天线和接收机等,属于高价格设备,一些项目并不具备足够的资金预算,可能难以购置或租赁设备,或者无法结合需求实现设备升级,因此限制了GPS测绘技术在工程建设中的使用场景。同时,GPS设备每隔一段时间需校准与维护,使其测量精度和性能达标<sup>[12]</sup>。软件升级、电池更换和设备清洁等,每一项都需要依赖专业技术人员,也可能投入额外成本。设备使用阶段,也有一定概率出现意外故障,例如接收机突然停止工作,不仅会影响单次信号接收,也可能影响后续



工程建设资金使用计划<sup>[13]</sup>。

四、工程测绘中 GPS 测绘技术未来发展方向

（一）高精度定位

当前 GPS 定位精度尚有一定提升空间，未来伴随技术的发展，可从两方面实现 GPS 定位精度的提升。可通过卫星星座布局的改变，以及信号发射技术的改进，最大限度消除信号传播误差与卫星轨道误差，令 GPS 信号质量有所提升。实践中，已经有精确度更高的原子钟应用于各类场景，这种原子钟时间基准稳定性更强，对于定位精度的提升有立竿见影的效果。同时，GPS 技术也可以融合地基增强系统和惯性导航系统等技术，使数据与算法互相融合，令不同技术取长补短，即使测绘环境复杂程度较高，也可以保证定位结果精度达标<sup>[14]</sup>。

（二）趋于智能化和自动化

未来 GPS 技术会趋于智能化和自动化发展，测绘设备智能处

理能力会再次实现质的飞跃。基于人工智能的深度学习技术，设备可对测量环境进行自动识别，并基于测量环境选择对应参数与测量模式，保障测量效率和精度。自动化测量系统也会大量应用于现实中，自动化数据采集系统与 GPS 监测站未来会以无人工作为主要工作模式，通过设备系统实时监测工程建设区域，自动向对应系统传输并处理数据，减轻工作人员压力的同时，最大限度避免人工出错。若发生异常情况，也可及时纠偏，保证工程顺利推进<sup>[15]</sup>。

五、结束语

综上所述，GPS 测绘技术在工程建设中价值显而易见，主要可应用于地形测绘、工程控制测量、水下地形测绘和变形监测等场景，减轻人员工作压力的同时，也可提高测绘精度。尽管当前 GPS 测绘技术依旧存在一些问题，但是随着技术发展，未来 GPS 定位精度和智能化水平会更高，成为辅助工程建设的中中之重。

参考文献

[1] 敖文飞. GPS 技术在地质工程勘察测绘中的应用 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(2): 28-30.

[2] 英杰. GPS 测绘技术在测绘工程中的应用路径研究 [J]. 中文科技期刊数据库 ( 引文版 ) 工程技术, 2025(3): 034-037.

[3] 刘玮璞. 建筑工程测量中 GPS 测绘技术应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 ( 全文版 ) 工程技术, 2025(2): 041-044.

[4] 尤杰文. GPS 测绘技术在建筑工程测量中的应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 ( 全文版 ) 工程技术, 2025(8): 001-005.

[5] 韩宇. 建筑工程测量中 GPS 测绘技术应用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 ( 引文版 ) 工程技术, 2025(3): 022-025.

[6] 赵忠恒. GPS RTK 技术在地质勘察测绘工程中的应用价值及方法 [J]. 中文科技期刊数据库 ( 文摘版 ) 工程技术, 2025(2): 088-091.

[7] 高翔. 工程测绘中 GPS 测绘技术的应用探析 [J]. 漫科学 ( 科技应用 ), 2025(2): 37-39.

[8] 吴晓刚. 地理信息系统中 GPS 控制测绘技术的应用与研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(1): 51-55.

[9] 简晓晨. 论矿区地质测绘中高精度 GPS 动态测量及质量控制 [J]. 世界有色金属, 2024(5): 139-141.

[10] 徐昇. GPS 测绘技术在地理信息系统中的运用 [J]. 智能建筑与工程机械, 2023, 5(11): 87-89.

[11] 刘祥. 对于工程测绘测量技术应用的研究 [J]. 城市建设理论研究 ( 电子版 ), 2023(12): 140-142.

[12] 图布信巴图. GPS 技术在地质工程测量中的应用优势与具体途径 [J]. 中国设备工程, 2023(5): 230-232.

[13] 屈慧慧, 赵晓琳. GPS 技术在地质工程测量中的应用优势与具体途径 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(11): 109-111.

[14] 刘鹏, 胡瑾宇. GPS 技术在地质工程勘察测绘中的应用探讨 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(24): 184-186.

[15] 唐志祥. 探讨 GPS 技术在地质工程中的实际应用情况 [J]. 工程技术与管理 ( 香港 ), 2025(2): 91-93.

# 水利工程输水管道安全维护管理探讨

刘涛

广州新珠工程监理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120009

**摘 要 :** 输水管道是水利工程重要设施, 肩负农业灌溉、城乡供水和水资源调配等责任, 对水资源供给的安全性和输送效率, 会产生较大影响。伴随水利事业的发展, 输水管道网络更复杂, 需要面临更大的覆盖范围, 以及更复杂的环境, 各种因素叠加, 可能增加设备老化风险, 影响管道使用寿命。这也提示相关单位, 应重视输水管道安全维护管理体系的构建, 从而为水资源长远利用注入新动力。本文将结合水利工程输水管道安全维护管理的价值, 讨论水利工程输水管道安全维护管理措施, 希望有所帮助。

**关 键 词 :** 水利工程; 输水管道; 安全维护; 管理价值; 管理措施

## Discussion on the Safety Maintenance and Management of Water Conveyance Pipelines in Water Conservancy Projects

Liu Tao

Guangzhou Xinzhu Engineering Supervision Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract :** Water conveyance pipelines are crucial facilities in water conservancy projects, shouldering responsibilities such as agricultural irrigation, urban and rural water supply, and water resource allocation, significantly impacting the safety and efficiency of water resource supply. With the development of the water conservancy sector, the water conveyance pipeline network has become more complex, requiring coverage over larger areas and functioning in more intricate environments. The combination of various factors may increase the risk of equipment aging and affect the lifespan of the pipelines. This also serves as a reminder to relevant entities to prioritize the establishment of a safety maintenance and management system for water conveyance pipelines, thereby injecting new impetus into the long-term utilization of water resources. This paper will discuss the value of safety maintenance and management for water conveyance pipelines in water conservancy projects and explore corresponding management measures, hoping to provide useful insights.

**Keywords :** water conservancy projects; water conveyance pipelines; safety maintenance; management value; management measures

### 一、水利工程输水管道安全维护管理的价值

#### (一) 提高水资源利用率

输水管道运行的稳定性和安全性, 会对水资源输送效率产生直接影响。相关资料表明, 我国一些地区输水管道泄漏率介于16%~18%, 长此以往, 造成的损失不可估量。科学维护管理有助于漏损率的降低, 避免水资源大量浪费, 令水资源配置更经济, 达到节约型社会的建设要求<sup>[1]</sup>。

#### (二) 延长管道工程寿命

输水管道设计环节, 会对其使用寿命作出具体规定, 但欲达到使用寿命, 必须要在其运营阶段做好维护管理, 提前报废的风险也会提升。定期检测、排除隐患等方式, 能够避免管道提前老化, 也可防止管道频繁出现泄漏现象, 避免全生命周期运维成本过高。

#### (三) 维护公共安全

输水管道破裂有极大风险导致各类次生灾害, 包括道路损毁、地面塌陷等, 进而直接威胁运营区域附近居民正常生活。水

体被污染后, 由渗进供水系统的风险, 增加附近土壤盐碱化的可能, 对生态环境造成更大破坏。管道的安全维护管理, 可及早发现隐患并排除, 防止事态扩大, 实现生态可持续发展<sup>[2]</sup>。

### 二、水利工程输水管道安全维护管理措施

#### (一) 完善协同管理体系

##### 1. 实现跨部门协调

输水管道网络的布设往往需要跨区域进行, 这也对安全维护管理人员提出了更高要求。各部门之间应注重信息界限和壁垒的打破, 使管理体系趋于协同, 实现管理效率的充分提升。具体而言, 应做好以下工作: 首先, 构建跨部门协调机制。输水管道管理应由省级部门牵头, 包括应急管理、环保、交通、市政和水利等部门, 各部门工作应统筹落实, 实现工作效率的提升<sup>[3]</sup>。其中, 环保部门应警惕管道泄漏现象, 在布设管道时评估对附近环境的影响; 交通部门应加强输水管道施工监管审批, 避免施工破坏既

有管线、建筑物和构筑物等；市政部门应负起配水管网运行维护的责任；水利部门应做好城区主管网与水源地的监管维护。不同部门应每隔一段时间召开联合会议，对不同部门的遇到的问题进行集中商讨和分析，明确各部门责任，防止遇到状况推诿责任。各部门回见需构建平台，助力信息共享，对不同部门收集的信息集中汇总。举例而言，实际工作中，市政运维人员检修环节发现管道有腐蚀风险，可借助平台信息推送功能，将有关信息直接向水利部门推送，利于后续水利部门工作的开展<sup>[4]</sup>。

## 2. 落实主体责任制度

若输水项目运营性质为市场化，应当借助合同的规范力量去顶不同运营单位的责任，使管理工作更具专业化水准。运营单位应以年度为单位，将输水管道维护计划提交至监管部门处，除了技术方案，资金使用预期、检测频率、检测人员等，都需要在维护计划中有所体现，审批之后才能执行。每个季度也需要将维护报告送至监管部门，对管道修复基本状况和隐患排查进度进行说明。监管部门应进行不定期抽查，并委托资质齐全的第三方机构辅助监管，对运营单位维护情况加强考核。若有未达标现象，应限制其运营，并减少其运营承包次数。

如果输水管道运营属于公益性，且为政府直管，应重视水利站等基层部门责任的深化，树立管理人员高度责任意识，并在水利站考核体系中增加维护作业比重。管理人员在日常巡检基础上，还应随时上报隐患，配合应急抢修工作的进行。以农田灌溉管道维护为例，若因为管护措施不到位而影响管道正常灌溉功能，应适当扣除管理人员绩效，由管理人员重新给出整改方案，保证管道正常运营<sup>[5]</sup>。

## 3. 完善跨区域协同维护机制

若输水管道距离较长，应由各省或各市牵头签订相关协议，明确责任的基础上，使各流程更加明晰。以南水北调工程为例，在河南省和河北省交界位置，由两省共同牵头组建管道维护站和巡检队伍，负责不同省输水管道段落，遇到问题集中处置。若本省出现的隐患可能影响到其他省份管道输水的正常进行，应由联合站上报，各省共同制定方案，加快管道修复，避免互相推诿责任。同时，应重视区域应急联动机制的构建，依照应急预案的要求，每隔一段时间由不同部门人员进行联合演练，以模拟管道运营中存在的问题，提高对隐患的反应速度<sup>[6]</sup>。

## （二）提高管理流程的标准化水平

### 1. 构建分类日常维护规范

标准化管理是排除管道隐患效率提升的重要措施，应着重做好以下几方面工作：首先，完善精细化日常维护规范。由于管道材质和工作环境存在一定差异，因此维护标准也不能一概而论。针对几种常见材质的输水管道，PE 管道应以温度监测为重点，判断温度变化是否会导致管道泄漏。若在夏季高温天气，应以每周为单位，对管道变形量进行检查，通过激光测径仪收集管径变化信息。若变形量在 5% 以上，应适当加固，防止管道变形。混凝土管道应以年度为单位评估结构强度，借助超声波检测设备，检验内部是否存在裂缝，若裂缝宽度在 0.2mm 及以上，可应用环氧树脂灌缝。若混凝土管道埋设环境为盐碱地，应以每三个月为单

位，对外壁侵蚀状况进行检测，并做好防腐工作。金属管道应依据环境的不同，区分不同防腐检测频率，山区由于环境相对恶劣，需要每三个月检测，平原地区可延长至每半年一次。检测技术可在应用电磁感应技术的同时，联合使用壁厚检测，收集修饰面积和腐蚀速率等信息。若腐蚀深度在管道壁厚 30% 及以上，应启动修复程序。接口位置应重点检查密封性，可应用压力测试法判断是否有泄漏表现<sup>[7]</sup>。

巡检流程同样需要完善，所有巡检人员都应在巡检之后，填写标准化记录表，对管道巡检地点、巡检时间、埋设环境、管道状态等进行详细记录，若管道有异常状况，应拍摄并对位置进行标注，同步向管理平台上传。对于人员发现管道有积水区，结合管道定位照片，系统就可以对管道走向进行自动匹配，并由运维人员快速到场排查。

### 2. 构建分级隐患处置机制

管道隐患因级别不同，造成的危害也存在较大差异。由于隐患的排除需要调动人力物力资源，为避免资源浪费，或资源不足以排除隐患的现象出现，应用轻微、一般和重大等级别，对隐患进行区分，从而分级完成响应。具体而言，轻微隐患包括标识清晰度下降、外壁涂层脱落等，维护人员应在日常巡检中将其作为重点，组织人员进行检修。若短时间内无法完成检修，也需要制定检修计划，最多不能超过 60 天。一般隐患包括接口密封性较差、局部腐蚀等，应在一周之间制定修复方案，一个月中整改完成，修复阶段做好跟踪台账，对隐患排除进行持续跟踪。重大隐患包括结构变形、管道破裂等，应依照应急预案要求开展检修，紧急停水，并从速组织抢修，并将相关情况报送上级主管部门，由利益无关的第三方机构验证后方可运行<sup>[8]</sup>。同时，需构建隐患整改管理系统，实现隐患的闭环管理，隐患从发现到排除的不同环节，都需要进行详细记录，一旦存在任何纰漏，都可以依照相关信息实现追溯。

### 3. 完善应急抢修流程

应急抢修手册应提高标准化水平，各个环节的操作规范，包括现场应急响应和修复验收等，都是标准化的重中之重。相关部门应每隔一段时间进行应急演练，以年度为单位组织的实战演练次数不应低于 2 次，且应尽量对不同场景进行模拟，使维修队伍熟悉处置现场，实现响应速度的快速提升。以输水管道应急演练案例为例，响应环节，维修人员在收到事故信息后，人员对信息的核实时间不能超过 15min，且应记录影响范围和管道泄漏点等，保证信息全面。半小时内应启动应急预案，从速告知抢修队伍，并配合交通管制。处置环节，维修人员各项操作应符合控制险情在先，隐患排除在后的原则，提高管道泄漏控制的优先级，将上下游阀门全部关闭，完成现场清理和修复方案的制定。验收环节，需集中测试管道压力，明确管道是否处于安全运行范围，并由环保部门人员对附近水质污染状况进行检测，达到标准之后方能正常供水<sup>[9]</sup>。

## （三）强化维修团队建设

维修人员是管道维修的重要力量，因此相关部门需着重打造专业检修团队，使团队能够胜任多场景、多时段的检修任务。具

体而言，应做好以下几方面工作：一方面，完善分层培训体系。检修团队中包括管理人员、抢险人员、工程师和巡检员等，应结合岗位要求，体现出培训方向与内容的差异化。培训工作应针对性建立管理档案，内容包括人员技能等级、考核成绩和培训时间等，人员参与培训的积极性，以及相关的考核表现，都需要纳入后续绩效考核中<sup>[10]</sup>。管理人员培训应包括应急指挥、风险评估和协同管理等，以季度为单位做案例研讨，使人员现场统筹协调能力进一步提升。抢险队员应着重培训实战技能，例如管道带压封堵、非开挖修复等，以适应不同抢修流程和不同管道抢修要求。工程师应了解无损检测技术操作要点，提升专业技能素养，主动学习新技术，学会应对各类复杂场景。巡检员应了解管道隐患，学会使用 GPS、便携式泄漏检测仪等工具，了解安全防护知识，并通过专业考核<sup>[11]</sup>。

另一方面，应注重社会服务力量的引入。若政府无法独立完成维护工作，或因条件限制影响维护质量，也可向社会购买服务，由资质齐全，具备输水管道维护资格的第三方机构，履行维护责任。为实现良性竞争，政府有关部门应构建并完善相关机制，明确服务商评价标准，聚焦于服务成本、效率和质量等维度加强考核，若考核合格，可以考虑长期合作，否则需重新考量和评估服务商资格。政府也可牵头，组织维护技能比武，由第三方管道维护机构展示维护新技术，设置各类竞赛项目，通过物质奖励和精神表彰等方式，提高参与人员的热情。同时，应重视职业保障体系的完善，为一线人员配备防爆灯具、防腐蚀工作服等必要的防护装备。若人员工作环境相对艰苦，应额外给予更多补助<sup>[12]</sup>。

#### （四）给予更多资金和政策支持

政府部门需提高对输水管道维护的重视程度，在财政预算中增加输水管道维护费用占比，优化资金配置，实现资金专项使用。省级财政部门应划出一定额度资金，用于老旧管道修复和跨区域干线管道建设，市级与县级单位主要应承担维护费用，结合管道老化程度与自身长度调整，保证支线管道运营一切正常。运营单位在资金筹集上，也可以将债券发行、银行贷款等作为融资渠道，若维护项目为 PPP 模式，政府部门应适当减免税收，或给予一定财政补贴。

政策方面，政府部门应对现阶段输水管道法律法规进行修订与完善，并增加强制性条款，明确管道维护有关要求，若未按照规定检测，相关单位应负法律责任。相关安全维护技术标准的制定应一致，对应急、修复和检测等不同环节做出统一规定，促进行业行为的整体规范化。对于在输水管道项目维护中使用新技术的维护单位，应适当给予奖励和补贴，促进相关单位研发新技术，实现管道维护标准化<sup>[13]</sup>。

### 三、结束语

综上所述，水利工程输水管道安全维护管理对管道工程水资源利用率、使用寿命和公共安全有重大影响，为保障输水管道安全运行，政府应重视协同管理和标准化流程的创建与完善，并从团队建设、资金政策支持等角度入手，多管齐下，实现输水管道运行安全性和输水效率的双重提升，保障水利事业可持续发展。

### 参考文献

[1] 姚志江. 水利工程项目全生命周期管理模式探讨 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2025(1): 013-016.  
[2] 刘增民. 关于给排水施工安全及给排水工程质量控制的分析 [J]. 葡萄酒, 2024(24): 0133-0135.  
[3] 杨彩云. 水利水电工程施工质量控制与管理改进措施 [J]. 水上安全, 2024(8): 146-148.  
[4] 朱星宇, 殷丹丹, 沈汇顺. 海绵城市建设理念下的道路排水管道施工技术分析 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2025(1): 118-121.  
[5] 范军武. 市政道路施工中地下管线施工技术要点分析 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2025(1): 062-065.  
[6] 隋日方. 市政排污管道敷设与连接技术要点研究 [J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术, 2025(1): 005-008.  
[7] 袁鑫, 吴侠辉, 李怡辰, 魏用杰. 村镇供水管道工程实施方案选择分析 [J]. 给排水, 2022, 48(S01): 979-983.  
[8] 邓铭江, 胡少伟, 李江, 孙奔博. 长距离输调水工程大口径 FRPM 管道研发与工程安全保障技术 [J]. 中国水利, 2024(6): 31-45.  
[9] 郭龙, 张瑞山. 毛管规格型号及布置方式对灌区小区支管敷设长度的影响研究 [J]. 水利技术监督, 2023(2): 195-198.  
[10] 陆云才, 康义博, 马财龙, 罗锦绑. 基于组合赋权 PCCP 输水管道腐蚀风险评价研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(6): 5-10.  
[11] 彭怡, 孙邵岗, 彭明坚. 云南省某引水工程 PCCP 管道失压情况调查及对策研究 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(10): 203-207.  
[12] 陈锐, 孙恕, 张敏, 武海霞. 我国长距离输水工程三种管材统计与对比 [J]. 市政技术, 2025, 43(4): 204-212.  
[13] 孙明志, 龙腾. 达喀尔铸铁供水管施工存在的问题与对策研究 [J]. 水利水电施工, 2024(6): 115-118.



# “强国行”背景下地方高校智能制造专业群产教融合模式创新研究——基于党建“双融双育”的视角

符特

罗定职业技术学院, 广东 罗定 527200

DOI:10.61369/ERA.2025120010

**摘 要 :** 智能制造是我国制造业高质量发展的关键, 需大量复合型技术技能人才。地方高校作为区域经济发展的人才供给主体, 肩负着服务“中国制造2025”、培育智能制造人才的重任。但当前地方高校智能制造专业群建设还存在产教融合不深入、人才培养与产业需求脱节等问题。党建“双融双育”为深化产教融合指明方向。文章在分析“强国行”背景下地方高校智能制造专业群产教融合现状的基本上, 阐述党建“双融双育”视角下创新产教融合模式的必要性, 提出党建引领下校企协同育人机制构建、“双融双育”驱动专业群课程体系重构、产教党建一体化实习平台建设等创新路径, 以期提升地方高校智能制造人才培养质量提供参考。

**关 键 词 :** 强国行; 地方高校; 智能制造专业群; 产教融合; 党建“双融双育”

## Research on The Innovation of The Mode of Integration of Production and Education in The Background of "Strong Country Action" for the Professional Group of Intelligent Manufacturing in Local Colleges and Universities —Based on The Perspective of "Double Integration and Double Education" of Party Building

Fu Te

Luoding Vocational and Technical College, Luoding, Guangdong 527200

**Abstract :** Intelligent manufacturing is crucial for the high-quality development of China's manufacturing industry, requiring a large number of compound technical and skilled talents. As the main provider of talent for regional economic development, local universities shoulder the important responsibility of serving "Made in China 2025" and cultivating intelligent manufacturing talents. However, the current construction of intelligent manufacturing professional clusters in local universities still faces issues such as insufficient integration of industry and education and a disconnect between talent cultivation and industrial demands. The "dual integration and dual cultivation" approach in Party building provides a clear direction for deepening industry-education integration. Based on an analysis of the current state of industry-education integration in intelligent manufacturing professional clusters at local universities under the backdrop of the "Strong Country Action," this article elaborates on the necessity of innovating industry-education integration models from the perspective of "dual integration and dual cultivation" in Party building. It proposes innovative paths such as constructing a school-enterprise collaborative education mechanism under Party building leadership, reconstructing the curriculum system of professional clusters driven by "dual integration and dual cultivation," and building an integrated internship platform for industry-education Party building, aiming to provide references for improving the quality of intelligent manufacturing talent cultivation at local universities.

**Keywords :** Strong Country Action ; local universities; intelligent manufacturing professional clusters; industry-education integration; Party building "dual integration and dual cultivation"

### 基金项目:

1. 2025年度广东省教育科学规划课题(党建研究专项): 双融双育·赋能引擎——“强国行”专项行动驱动下地方性高校党建引领产教融合与服务地方发展的机制创新研究(2025JKDJ119)的研究成果;

2. 中共广东省委教育工委广东省高校“双带头人”教师党支部书记“广东行”专项行动建设项目(粤教工委组函[2024]12号)项目研究成果。

作者简介: 符特(1981—), 副教授, 研究方向: 机械设计与制造。

# 引言

制造业是立国之本、强国之基。党的二十大提出要加快发展数字经济，推动制造业高端化、智能化、绿色化，这对智能制造人才培养提出新的更高要求。地方高校作为区域经济社会发展的人才和智力支撑，必将在服务国家制造强国建设中发挥不可替代的作用。但面对新一轮科技革命和产业变革，当前地方高校智能制造专业群建设还存在与区域产业发展联系不紧密、人才培养质量有待提升等问题，需深化产教融合，创新人才培养模式。将党建工作贯穿产教融合全过程，实现党建与专业教育“双融双育”，是新时代地方高校推进智能制造人才培养高质量发展的必由之路。

## 一、“强国行”背景下地方高校智能制造专业群产教融合的现状分析

### （一）“强国行”策略对智能制造人才培养的新要求

新一轮科技革命和产业变革正在重构全球创新版图、重塑全球经济结构。智能制造作为新工业革命的核心，代表新一代信息技术与制造业深度融合的主攻方向。我国将智能制造上升为国家策略，制定实施《中国制造2025》，部署推进“强国行”工程，对标全球最高标准、最好水平，加快从制造业大国迈向制造业强国。“强国行”背景下，智能制造已成为我国制造业转型升级、迈向中高端的关键。这对智能制造人才培养提出新的更高要求：要对接行业需求，培育高素质复合型人才；要聚焦关键核心技术，培育工程创新人才；要发挥数字化优势，培育新工科、新工匠人才。地方高校作为区域经济发展和产业转型升级的人才支撑，应主动适应智能制造发展新趋势、把握行业人才需求新变化，加快构建与智能制造发展相适应的专业体系和人才培养体系。

### （二）地方高校智能制造专业群建设现状及挑战

各地高校积极主动服务制造强国建设，大力推进智能制造相关专业建设，初步形成门类多样、特色鲜明的智能制造专业体系。专业覆盖面不断扩大，从传统的机械类、自动化类专业，延伸到人工智能、大数据、云计算等新兴专业；专业内涵建设持续深化，注重“新工科”专业改革，加强工程创新能力培育；专业集群发展初见成效，一批智能制造特色专业集群在省级、国家级“十大特色专业集群”遴选中脱颖而出。但智能制造专业群建设仍存在一些需解决的问题：区域产业联系度不够。部分高校专业设置滞后于产业发展，人才培养与行业岗位需求衔接不紧密。复合型人才培育能力不足<sup>[1]</sup>。部分专业仍存在学科专业界限明显、跨专业交叉融合不够等问题，难以培育智能制造需要的“通专融合”“多专融通”的复合型人才。协同育人深度不够。产教融合更多体现在生产性实习、毕业论文等浅层次合作，缺乏全流程、全方位、全覆盖的协同育人机制。推动地方高校智能制造专业群建设走出特色发展之路，应立足党建统领，从完善顶层设计、深化产教融合、创新人才培养模式等方面持续用力。

### （三）党建“双融双育”与产教融合的内在逻辑关系

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视教

育事业发展，作出一系列关于高等教育改革发展的重要论述，强调要坚持立德铸魂，把思想政治工作贯穿教育教学全过程，实现全程育人、全方位育人<sup>[2]</sup>。这为新时代党建工作赋予新的更高使命。高校在“双融双育”上还有很大的挖掘空间，要将党建工作与教育教学深度融合，用党的创新理论铸魂育人，为学生成长成才引领政治方向，做到党建工作与人才培养同向同行。党建“双融双育”是深化产教融合的关键变量。党建是高校与行业企业开展合作的政治保障和组织基石，能为校企协同育人筑牢思想政治根基，凝聚理想信念共识。将党建工作嵌入专业教育全过程，能为专业群建设提供鲜明政治方向，更好服务国家制造强国策略。党建与产教融合具有内在的逻辑关系，二者相互渗透，相得益彰。深化党建与专业教育相融合、与产教融合同发力，打造校企协同育人的命运共同体，能为培育德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人提供坚强保证。

## 二、党建“双融双育”视角下产教融合模式创新的必要性

### （一）服务国家制造强国策略的时代使命

“强国行”背景下，智能制造迎来广阔的发展前景，迫切需要一大批具有创新能力和国际视野的高素质专门人才，这对高校人才培养工作提出新的更高要求。地方高校肩负为区域经济发展输送人才的重任，应主动融入国家制造强国策略，加快构建与智能制造发展相适应的人才培育体系。将党建工作融入智能制造人才培养全过程，紧密对接“强国行”工程重大需求，聚焦关键核心技术领域，培育工程创新人才，引导师生将个人理想自觉融入国家“强国梦”，为加快建设制造强国、实现中华民族伟大复兴提供强大人才支撑，是地方高校应担负起的时代使命。创新产教融合模式，深化校企协同育人，打通人才培养与产业发展之间的“最后一公里”，是高校主动服务国家策略的必然选择，也是彰显时代担当的现实路径。

### （二）提升地方高校人才培养质量的内在需求

随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进，智能制造专业人才培养面临着新形势新挑战。传统的学科专业划分日益凸显局限性，工学结合不够紧密，实验实习环节流于形式，人才培养质

量与智能制造产业发展需求还有较大差距。地方高校作为区域经济社会发展的人才支撑,提升人才培养质量已成为服务地方经济高质量发展的必然要求<sup>[3]</sup>。创新智能制造人才培养模式,深化校企产教融合,将党建工作贯穿人才培养全过程,推动专业设岗与产业需求、教学内容与职业标准、实验实习与工程实际深度融合,强化复合型技术技能人才培养,是新时期提升人才培养质量的有效路径。通过深入实施产教融合、加强协同育人,推动专业链与产业链、创新链有机衔接,能使人才培养供给侧和产业需求侧精准对接,形成人才共育、成本共担、过程共管、成果共享的长效机制,从而全面提升地方高校服务区域经济社会发展的能力和水平。

### (三) 深化党建与专业教育融合的实验要求

办好中国特色社会主义大学,必坚持以立德铸魂为根本任务,将立德铸魂贯穿办学育人全过程。党建工作作为高校的“生命线”,必然要融入专业教育、融入人才培养,在课程教学、学科专业、教学科研等方面充分发挥政治引领和价值引导作用。深化党建与专业教育融合,能实现党建工作与人才培养同向同行、同生同“融”,将社会主义核心价值观融入专业课程教学,让党的创新理论在大学课堂绽放光彩。智能制造专业教育要坚持立德铸魂、德技并修,把思想政治教育融入专业教育全过程,做到专业教育和思政教育同向同行、同生同“融”,实现思想政治教育与知识体系教育的有机统一,引导学生在智能制造领域成长成才,担当民族复兴重任。深化党建与专业教育融合,统筹推进产教融合,是全面贯彻党的教育方针、落实立德铸魂根本任务的必然要求,也是培育德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人的现实需要。

## 三、基于党建“双融双育”的智能制造专业群产教融合创新路径

### (一) 党建引领下的校企协同育人机制构建

校企协同育人是深化产教融合的关键环节。在党建引领下构建校企协同育人机制,需将党建工作融入协同育人全过程。成立党建联盟,制定联盟章程,明确育人目标,形成资源共享、优势互补的党建格局<sup>[4]</sup>。建立党员先锋岗,选拔企业党员能手、高校党员教师,将党员示范引领作用融入协同育人。开展党建项目化育人,校企联合开展特色主题党日活动,引导师生在项目研发中砥砺品格、锤炼意志。建立协同育人评价体系,制定科学合理的评价标准,将党建工作成效与协同育人绩效评价相结合,健全长效机制。

西安交通大学党委组织部(党校)党支部与交大-通用技术集团联合研究院产教融合师生联合党支部开展结对共建活动,制定联盟章程。机械学院党委与联合研究院签署协议,成立由骨干教师和企业能工巧匠组成的党员先锋岗,开展联合主题党日活动。联盟还制定“党建+项目”化育人计划,以工业机器人等技术难题为

载体,成立大学生党员攻关小组,师生党员与企业能手组成研发团队。联盟还制定产学研用一体化人才培养评价标准,对学生参与产教融合项目进行多元评价,并纳入学生发展性评价体系。在党建引领下,师生党员在攻坚克难中锤炼意志品质,将个人理想自觉融入党和国家事业。

### (二) “双融双育”驱动的专业群课程体系重构

智能制造专业教育要以“双融双育”为指引,加快推进专业课程体系重构。优化专业课程设置,将新技术、新工艺纳入专业课程,形成兼顾前沿性与应用性的模块化课程体系。加强课程思政建设,发掘专业课程所蕴含的思想政治教育元素,建设融“道”“术”于一体的示范性课程<sup>[5]</sup>。创新课程形式,开发基于工程情景的案例库、虚拟仿真实验项目等,创新项目化、情景化教学。健全课程质量评价体系,建立多元参与的课程评价机制,以评价倒逼课程优化。

例如山东恒星科技学院建筑工程学院聚焦工程管理专业群,通过建立“校企共育“机制、创新”场景驱动”模式、融合“人机交互”技术,构建起一套创新实训教学体系。学院与恒星集团6家核心企业合作,成立“校企共育工作小组”,由企业深度参与专业课程设置优化。将BIM、VR等新技术融入专业课程,开设智能建造等新兴课程,对现有课程进行数字化升级改造,构建起“平台+模块”的课程新体系。学院还开发一批专业课程思政金课,创新采用项目驱动、情景模拟等教学方式。在课程实施中,学院注重与企业合作开发教学案例库,引入企业真实工程项目案例教学,开发VR仿真实训项目等。在课程评价方面,学院制定了“校企协同、应用为本”的课程质量评价标准,吸纳行业企业全过程参与课程建设、实施、评价,建立起多元参与的课程质量评价机制。

### (三) 产教党建一体化的实验平台建设模式

智能制造专业教育要坚持党建引领,创新构建产教党建一体化实验平台。打造成果转化“孵化器”,共建技术创新与成果转化基地,成立技术攻关党员先锋岗。打造项目研发“中试场”,共建高水平联合实验室,开展关键核心技术联合攻关。打造应用示范“新高地”,共建产业学院,开展学徒培训、企业新型学徒制人才培养。打造创新创业“策源地”,共建众创空间、创客实验室,建立大学生创新创业党员先锋岗。

江苏经贸职业技术学院作为中国特色高水平高职学校,积极落实党建联建行动计划,创新构建“党建+产业链”协同机制。智能制造专业教育坚持党建引领,创新构建产教党建一体化实验平台。通过打造成果转化“孵化器”,共建技术创新与成果转化基地,成立技术攻关党员先锋岗;打造应用示范“新高地”,共建产业学院,开展学徒培训、企业新型学徒制人才培养;打造创新创业“策源地”,共建众创空间、创客实验室,建立大学生创新创业党员先锋岗。学校各党总支累计与8个区域产业集群建立深度联建机制,形成“校地、校企党组织联席会议、资源共享、项目

共推”的治理体系。在智能制造专业党建一体化实验平台中，学院选拔大学生党员担任创客骨干，成立创新创业党员先锋岗，充分发挥党员在科技创新和成果转化中的示范引领作用。一体化的产教党建实验平台成为学院培育创新型技术技能人才的“沃土”。

## 四、结语

站在“两个一百年”奋斗目标的历史交汇点，高校肩负着为制造强国、质量强国建设提供人才支撑的时代重任。地方高校要

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，全面贯彻党的教育方针，要在党建引领下，打造校企命运共同体，健全“政行校企”协同育人机制；在“双融双育”理念指引下，加快专业课程体系重构，推进课程思政示范建设；在育人全过程、全方位推进党的建设，培育一大批胸怀“国之大者”、勇立时代前沿的高素质复合型技术技能人才，为加快建设制造强国、实现中华民族伟大复兴的中国梦提供坚实人才保障。

## 参考文献

- 
- [1] 杨晶. “产教融合、多方协同” 数字化教学资源共建共享机制研究 [J]. 产业创新研究, 2025, (16): 184-186.
- [2] 常青, 王怀文, 王雪皓, 王丹璐. 地方高校智能制造工程专业建设的产教融合探索与实践 [J]. 装备制造技术, 2025, (04): 87-89+93.
- [3] 王新. 基于产教融合视域的大学科技园“双创”人才培养模式 [J]. 知识窗 (教师版), 2024, (12): 86-88.
- [4] 刘清涛, 叶敏, 贺朝霞, 吕景祥, 张富强. 高校智能制造专业课程思政教学改革实践 [J]. 高教学刊, 2024, 10(17): 130-133.
- [5] 姜剑. 构建高校学生党建“双融双育”工作模式探赜 [J]. 党政论坛, 2024, (02): 25-27



# 地质矿产调查的技术应用策略

曹永贵

中国地质调查局军民融合地质调查中心，四川 成都 610036

DOI:10.61369/ERA.2025120011

**摘 要：** 本文聚焦地质矿产调查的技术应用策略，旨在为矿产资源勘探开发提供科学、高效的技术指导，保障经济社会发展所需矿产品的稳定供应。文章构建了“空-天-地-井”一体化的关键技术体系，并提出分阶段技术应用策略，同时强调数据融合与智能解译技术的核心转化作用。通过系统梳理各技术的应用逻辑与阶段适配性，形成了覆盖地质矿产调查全流程的技术应用框架，为提升矿产资源勘探效率与精度、推动勘查-开发无缝衔接提供了理论与实践参考。

**关 键 词：** 地质矿产调查；技术应用策略；对地观测技术；地面探测技术

## Technical Application Strategies for Geological and Mineral Resources Surveys

Cao Yonggui

Military-Civilian Integration Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610036

**Abstract：** This paper focuses on the technical application strategies for geological and mineral resources surveys, aiming to provide scientific and efficient technical guidance for the exploration and development of mineral resources and ensure a stable supply of mineral products required for economic and social development. The article constructs a key technical system integrating "space-air-ground-well" technologies and proposes a phased technical application strategy, while emphasizing the core transformative role of data fusion and intelligent interpretation technologies. By systematically reviewing the application logic and stage adaptability of each technology, a technical application framework covering the entire process of geological and mineral resources surveys has been formed, offering theoretical and practical references for enhancing the efficiency and accuracy of mineral resource exploration and promoting seamless integration between exploration and development.

**Keywords：** geological and mineral resources surveys; technical application strategies; earth observation technologies; ground detection technologies

## 引言

矿产资源作为支撑国民经济与社会发展的关键物质基础，其战略地位在新能源、新材料等新兴产业快速发展的背景下愈发凸显。然而随着地表易发现矿体的日益减少，地质矿产调查工作正面临着勘查目标从“浅表”转向“深部”、勘查环境从“简单”转向“复杂”、勘查成本与风险持续增高等严峻挑战。鉴于此，本文立足于现代地质矿产调查的全流程需求，构建从宏观到微观、从推测到验证、从数据到决策的“空-天-地-井”一体化技术应用策略框架。研究旨在为新时代地质矿产调查工作提供一套系统化、可操作的技术应用指南，推动矿产勘查向更精准、更高效、更智能的方向发展。

## 一、关键技术体系与应用策略

### （一）“空-天”对地观测技术应用策略

“矿产资源是重要的自然资源，是经济社会健康发展的物质基础。新能源、现代通讯、现代办公设备等新材料离不开矿产资源勘探开发的最终产品——矿产品<sup>[1]</sup>。空-天”技术作为区域地质矿产调查的顶层感知系统，核心目标是识别区域地质构造、岩性分布及矿产异常，凭借其宏观、快速、大范围的优势，为后续地面工作划定重点范围，其应用遵循“卫星宏观控全局、航空中

观提精度”的分层策略。卫星遥感通过组合多光谱、高光谱及高空间分辨率数据，对调查区进行全景式扫描，是区域成矿背景分析的核心手段，技术选型需根据调查目标组合数据。航空地球物理与遥感技术则作为连接卫星与地面的桥梁，通过低空飞行对地表以下浅部地质体进行物性探测，有效解决植被覆盖区、复杂地形区的勘查难题，其技术选型需针对目标矿产的物性特征。

### （二）“地”面探测与地球化学技术应用策略

地面技术是地质矿产调查的核心验证层，聚焦中微观尺度的异常验证与靶区圈定，通过地面物探、地球化学测量与地质填图

的协同,将“空-天”技术发现的宏观异常转化为具体的矿化线索,核心目标是“去伪存真、精准定位”。地面地球物理探测通过近距离接触式探测精细刻画地下地质体结构与物性差异,解决航空异常的验证问题,其技术选型遵循针对性匹配原则<sup>[3]</sup>。地球化学测量则通过分析土壤、岩石等介质中的元素含量识别化学异常,解决矿体是否存在及矿化强度的问题,其方法根据地表介质类型选择<sup>[3]</sup>。地面地质填图通过野外路线调查与地质点测量,融合手持GPS、便携式XRF和无人机航测等现代技术,将抽象数据转化为具象的地质信息,旨在建立调查区的地质框架,为所有异常解释提供依据,同时详细记录矿化体与蚀变特征,并将数据与物探、化探成果实时关联,形成综合解释,最终实现靶区的精准圈定与矿化线索的确认。

### （三）“井”下勘查与深度探测技术应用策略

井下技术是地质矿产调查的最终验证层,通过钻探、井中物探与坑道工程直接接触地下深部地质体与矿体,核心目标是验证深部异常是否为矿体、圈定矿体形态与储量、获取开发所需数据,是实现从推测到证实的关键环节<sup>[4]</sup>。钻探工程通过直接获取岩心、岩屑样品,是验证深部异常、控制矿体、计算储量的唯一直接手段,其技术选型根据探测深度、岩性与勘查目标确定。井中物探技术则通过井中磁测、激电等方法探测钻孔周边的隐伏矿体,应用于钻探发现矿体后的横向拓展与深部钻探方案优化,实施时需与地面物探联动解释,并结合岩心数据校准,确保异常解释的准确性<sup>[5]</sup>。坑道勘查技术实现了对矿体的近距离观察与采样,通过平硐、斜井或竖井直接揭露矿体,获取详尽的地质信息与高质量样品,在详查与勘探阶段近距离观察矿体与围岩关系,在开发阶段可转化为矿山开拓系统的一部分,实施时需兼顾勘查与开发需求,同步开展地质编录与数字化建模,确保矿体信息精准记录。

### （四）数据融合与智能解译技术应用策略

数据融合与智能解译是实现地质矿产调查“数据-信息-矿靶”转化的核心环节,旨在处理“空-天-地-井”技术产生的海量多源异构数据,通过整合与智能分析,提升异常识别与矿体预测的精度和效率<sup>[6]</sup>。多源数据融合技术通过整合不同类型、不同尺度的数据,构建统一的地质信息模型,其技术选型涵盖空间、属性及多尺度融合,并采用数据同化、小波变换、神经网络等方法,应用于从区域到勘探的全阶段数据整合,实施时需遵循“数据标准化-数据匹配-数据融合-模型构建”的流程,最终构建出可视化的三维地质信息模型<sup>[7]</sup>。智能解译技术则借助机器学习与深度学习算法,实现异常自动提取、矿体预测与储量估算,其实施需遵循“数据驱动+地质约束”原则,以地质理论为基础避免纯数据拟合,并通过交叉验证优化模型,同时智能解译结果必须结合野外地质观察与钻探验证形成闭环,以确保最终成果的可靠性与实用性。

## 二、分阶段技术应用策略

### （一）区域选区与远景评价阶段

本阶段以大面积区域为调查范围,核心目标是基于成矿地质

背景筛选具有成矿潜力的远景区,初步判断区域成矿可能性,为后续调查划定重点方向。技术应用以“空-天”宏观技术为主导,搭配少量地面宏观调查技术,构建“大范围扫描-初步线索提取”的技术链条<sup>[8]</sup>。卫星遥感技术作为本阶段的核心手段,优先组合高空间分辨率与高光谱分辨率卫星数据,完成区域地质填图与遥感异常初筛,通过解译地层分布、岩体展布及断裂构造格局,识别“地层-岩体-构造”匹配的成矿有利区,同时利用高光谱数据提取铁氧化物、羟基矿物等与矿产相关的光谱异常,初步圈定数百至数千平方公里的异常集中区;航空地球物理技术则针对卫星遥感圈定的成矿有利区,开展中尺度航空磁测与航空重力测量,进一步揭示区域深部构造与物性异常分布,缩小远景区范围至数百平方公里<sup>[9]</sup>。地面调查技术仅作为辅助,主要开展大范围水系沉积物测量,通过采集水系底泥样品分析成矿元素含量,圈定区域地球化学异常带,验证“空-天”技术提取的异常线索;同时辅以少量路线地质调查,重点观察区域标志性岩性、构造与矿化现象,为成矿背景分析提供基础地质依据。本阶段技术应用需注重多源线索叠加”,将卫星遥感异常、航空物探异常与地球化学异常进行空间匹配,优先选择三类异常叠加区域作为重点远景区,确保远景区筛选的科学性与可靠性。

### （二）靶区优选与普查阶段

本阶段以区域选区阶段划定的远景区为调查范围,核心目标是在远景区内进一步缩小范围,圈定具有直接矿化线索的靶区,初步验证异常与矿化的关联性<sup>[10]</sup>。技术应用从“空-天”宏观主导转向“空-天-地”协同,以地面技术为核心开展异常验证,构建“中尺度精细探测-地面验证-靶区锁定”的技术链条。航空地球物理技术在本阶段进一步升级,针对远景区开展高精度航空电磁与航空高光谱测量,前者探测浅部电性异常,锁定硫化物矿化相关线索,后者精准识别地表矿物组合,区分矿化蚀变与非矿化蚀变;同时结合航空磁测数据细化磁性异常边界,为地面调查提供精准异常位置。地面技术成为本阶段的核心验证手段,地面地球物理探测优先选择高精度磁测、重力测量与时间域激电法,对航空物探异常进行加密验证,通过小比例尺面状测量与剖面测量,判断异常是否由矿化引起,排除人工干扰与非矿地质体导致的假异常;地球化学测量则从水系沉积物测量转向土壤测量,在异常核心区采集土壤样品,圈定元素富集中心,结合元素组合特征判断矿化类型;地面地质填图同步开展1:5万比例尺调查,详细划分岩性单元、追踪构造走向,记录区域性热液蚀变与矿化痕迹,为异常解释提供地质框架。本阶段技术应用需突出验证与筛选,通过地面技术对“空-天”异常逐一验证,剔除假异常,为下一阶段矿体发现奠定基础。

### （三）矿体发现与详查阶段

本阶段以靶区优选阶段确定的重点靶区为调查范围,核心目标是发现具体矿体,初步查明矿体的规模、形态、产状与品位,评估矿体的开发潜力。技术应用进入“地-井”协同主导阶段,地面技术聚焦精细探测,井下技术开展初步验证,构建“地面精细定位-井下验证-矿体圈定”的技术链条。地面技术需实现“精细化”升级,地面地球物理探测采用高密度电法、可控源

音频大地电磁法与地震反射波法等高精度方法，在靶区核心区布设密集剖面，通过 2D/3D 反演精细刻画地下地质体结构，明确矿体可能的埋深、走向与形态；地球化学测量采用土壤测量加密采样与岩石测量结合的方式，在异常浓集中心采集新鲜岩石样品，分析原生晕元素分布，追踪矿体延伸方向；地面地质填图则开展 1:1 万 - 1:2 千大比例尺调查，通过加密地质点与详细观察，圈定热液蚀变带、矿化体露头，记录矿石结构构造与矿物组成，结合便携式 X 射线荧光光谱仪现场分析元素含量，初步判断矿化强度。井下技术作为本阶段矿体发现的关键，主要开展浅孔钻探，在地面技术圈定的矿体预测位置布设验证孔，通过获取岩心样品直接验证是否存在矿体，若见矿则进一步加密钻探，初步控制矿体走向、倾向与厚度；同时在钻孔中开展井中磁测与井中激电测量，探测钻孔周边 50-100m 范围内的矿体延伸情况，指导相邻钻孔布置，扩大矿体发现范围。本阶段技术应用需注重“地面引导井下、井下修正地面”，通过地面技术精准定位矿体预测区，井下技术验证并补充矿体信息，动态修正矿体模型，确保矿体圈定的准确性与完整性。

（四）勘探与开发阶段

本阶段聚焦矿体及周边区域，核心目标是详细查明矿体的各项参数并计算储量，为矿山开发提供精准数据支撑。技术应用以井下深部技术为主导，地面与数据融合技术协同，构建深部控制 - 精细建模 - 开发适配的技术链条。钻探工程从浅孔转向深孔与定向钻探，通过系统布孔全面控制矿体空间分布与品位变化，并采用岩心数字化技术永久保存信息。井中物探技术全面应用，通过磁测、激电、声波及雷达测量，不仅探测矿体延伸，还评估围

岩稳定性与识别内部破碎带、含水构造，为开采条件分析提供依据。坑道勘查则针对复杂矿体直接揭露，近距离观察并采集高质量样品用于选矿试验。地面技术用于补充验证与开采条件调查，通过高精度物探、化探及大比例尺填图，探测矿体浅部延伸、水体分布及伴生矿化。数据融合与智能解译技术在此阶段发挥关键作用，整合空 - 天 - 地 - 井全流程数据，构建三维矿体与地质结构模型，采用机器学习优化储量估算，精准计算不同级别储量，并结合开采技术条件模拟开采方案，为矿山设计、采矿方法与选矿工艺提供支撑，实现勘查 - 开发的无缝衔接。

三、结束语

本文系统性地探讨了现代地质矿产调查的技术应用策略，构建了一套从宏观到微观、从空中到地下的“空 - 天 - 地 - 井”一体化协同勘查技术体系。研究明确指出，面对日益复杂的勘查环境和“攻深找盲”的艰巨任务，单一技术的孤立应用已难以为继，唯有通过多技术、多尺度、多信息的深度融合与协同，才能有效提升矿产勘查的科学性、精准性和经济性。随着人工智能、大数据、物联网等前沿技术的飞速发展，地质矿产调查正迈向一个全新的智慧勘查时代。因此，我们必须持续推动技术创新与学科交叉，不断完善和深化“空 - 天 - 地 - 井”一体化智能勘查技术体系，为保障国家能源资源安全、推动经济社会可持续发展提供更加坚实、有力的科技支撑。

参考文献

[1] 李恒波. 地质矿产施工中勘查与找矿技术的应用分析 [J]. 中国金属通报, 2022(20): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2022.20.012.

[2] 许兵, 刘德彬. 地质调查在矿产资源勘查中的应用与策略 [J]. 地质研究与环境保护, 2024, 3(8). DOI: 10.37155/2811-0595-0308-13.

[3] 闫小举, 王西良. 固体矿产地质勘查技术的应用研究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(23): 61-63. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2203-5640-6847.

[4] 伍考云. 测绘地理信息技术在地质调查中的应用策略 [J]. 数码 - 移动生活, 2021(11): 216. DOI: 10.12277/j.issn.1673-0909.2021.11.124.

[5] 黎彪. 地质调查数据整合与矿产勘查优化策略分析 [J]. 世界有色金属, 2024(19): 139-141. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5065.2024.19.047.

[6] 许常善. 遥感技术在矿产资源调查中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2022(7): 208-210. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5065.2022.07.069.

[7] 丁文利. 地质勘探中测绘测量技术的应用策略 [J]. 中国金属通报, 2020(15): 187-188. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2020.15.094.

[8] 郎建刚, 张正旭. 遥感技术在绿色矿山调查与监测中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2024(15): 92-94. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2024.15.031.

[9] 王艺儒, 姚鱼, 郭士恩. 提高地质矿产勘查及找矿技术的思考 [J]. 世界有色金属, 2023(19): 64-66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5065.2023.19.022.

[10] 隋真龙, 李彦成, 张琦, 等. 遥感蚀变异常在地质矿产勘查中的应用策略 [J]. 奥秘, 2024(34): 13-15.



# 基于多模态数据融合的智慧矿山建设

朱丕凯<sup>1,2</sup>

1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039

2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037

DOI:10.61369/ERA.2025120012

**摘 要 :** 针对非煤矿山数字化建设中存在的数据壁垒与信息孤岛问题, 本研究通过对多模态数据进行分类整合与融合处理, 构建了基于“数据共享、三线设计、协同办公”模式的非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台。该平台面向企业、监管部门及社会第三方用户开发。通过在“矿山安全在线”系统的实际应用表明, 平台有效提升了安全监管效能, 强化了企业安全管理水平。

**关 键 词 :** 多模态数据; 三线设计; 风险监测防控; 数字化决策

## Intelligent Mine Construction Based on Multimodal Data Fusion

Zhu Pikai<sup>1,2</sup>

1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039

2. National Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037

**Abstract :** Addressing the issues of data barriers and information silos in the digitalization of non-coal mines, this study constructs a risk monitoring, prevention and control, and digital decision-making platform for non-coal mines based on a model of "data sharing, three-line design, and collaborative office" by classifying, integrating, and fusing multimodal data. The platform is developed for enterprise, regulatory, and third-party social users. Its practical application in the "Mine Safety Online" system demonstrates that the platform effectively enhances the efficiency of safety supervision and strengthens the level of enterprise safety management.

**Keywords :** multimodal data; three-line design; risk monitoring and prevention; digital decision-making

## 引言

随着智能时代的来临, 煤矿智能化技术持续发展 [1-3]。然而, 非煤地下矿山因开采工艺和洗选技术存在差异, 其智慧矿山的建设情况也有所不同。当前, 非煤矿山在智慧化转型过程中面临着地质条件复杂、生产流程多样、设备类型繁多等独特挑战, 如何有效整合各类数据资源, 实现矿山生产全流程的智能感知、精准决策与高效协同, 成为推动其智慧矿山建设的核心课题 [4-5]。多模态数据融合技术作为打破数据壁垒、提升信息利用价值的关键手段, 为解决这一课题提供了全新的思路与方法, 其通过将来自传感器、设备、人员、环境等不同来源、不同格式的多模态数据进行有机结合与深度分析, 能够为非煤地下矿山构建更为全面、立体的智慧化管理体系奠定坚实基础。

然而智慧矿山建设中存在标准不统一等现象。造成了信息孤岛, 政府监管及矿山安全管理数据的打通成了难题。如何将多模态的数据统一标准, 形成数据共享、三线设计、协同办公的新模式。

## 一、多模态数据融合分析

非煤矿山包含露天矿山、地下矿山、尾矿库。受文章篇幅所限本节以地下矿山为例对多模态数据进行分析。

### (一) 基础类数据

基础类数据主要反映矿山固有风险和基础安全管理状况的集

合。包括固有风险、机构人员、设备信息、图件信息、安全管理、应急管理等基本要素组成。此类数据要素对于有效管理和控制风险、提高生产效率和维护安全是至关重要的。这些要素共同构成了标准化管理的基础, 帮助组织实现高效、安全和可持续的运营。智慧矿山基础类数据类型、内容及其作用见表1。

表1 智慧矿山基础类数据分析应用

数据类型	数据内容	数据作用
固有风险	包括开拓方式、采矿方法、开采深度、单班最大作业人数、地质条件等	根据固有风险数据对矿井固有风险进行评估
设备信息	提升系统、通风系统、排水系统、供配电系统、供水及防灭火系统、压风系统、通信联络系统、监测监控系统、人员定位系统	根据设备设施配备情况对矿井机械化水平进行评估
图件信息	总平面布置图、地质地形图、开拓系统图、中段平面图、通风系统图等	图纸能随用随调，同时对图纸更新情况进行监管
机构人员	“五职”矿长配备、安全生产管理人员、技术管理人员、特种作业人员持证	对矿山机构及人员配备情况进行监督
安全管理	主要负责人履职、安全风险管控、安全生产投入、全员安全生产责任制、外包单位管理	对矿山安全管理基本状况进行评估
应急管理	应急预案、应急物资、应急队伍、应急专家、事故管理	事前预防、事中控制、事后总结

（二）安全管理类数据

基础信息中所述安全管理类数据主要为静态数据，本节所述安全管理类数据则聚焦于现场管理中的动态数据，并以双重预防机制为核心内容。具体而言，这类数据贯穿于矿山日常安全管理的全流程，实时记录和反映安全风险管控与隐患排查治理的实际状态与效果。其核心构成包括：风险分级管控、隐患排查治理、安全监管与执法、安全教育培训等要素。智慧矿山安全管理类数据类型、内容及其作用见表2。

表2 智慧矿山安全管理类数据分析应用

数据类型	数据内容	数据作用
风险分级管控	包括风险辨识、风险评估、风险分级管控、管控措施落实及风险状态变化等信息等	用于追踪风险从识别到管控的全过程，对超期、未落实或新出现的重大风险进行预警
隐患排查治理	涵盖排查计划、排查清单、排查频次、隐患等级判定、隐患治理督查督办等数据	风险管控措施落地执行的关键体现，确保隐患从发现到消除的完整轨迹的闭环管理
监察监管执法	记录安全检查、专项督查、执法处罚、闭环管理等信息	反映外部监管与内部自律执行力
安全教育培训	涉及培训计划、内容、记录、效果考核、特种作业人员复训及安全活动参与情况	反映人员安全素质提升的动态过程

（三）感知类数据

感知类数据主要用于实时监测地下矿山井下空气质量、风速、风压、设备运行状态、地下水文、地压及地表沉降等关键参数，同时可实现相关设备的远程集中控制。其具体应用涵盖井下空气质量监测、通风系统监控、智能视频（AI）监控、排水系统监控、地压与地表沉降监测以及供电系统监控等子系统。智慧矿山感知类数据类型、内容及其作用见表3。

表3 智慧矿山感知类数据分析应用

数据类型	数据内容	数据作用
井下空气质量监测	对一氧化碳、二氧化氮、硫化氢、二氧化硫、烟雾、氧气及氢气等进行监测	自动检测毒害气体浓度，并在超标时触发声光报警
通风系统监控	对主要回风巷及硐室的风速、风量监测与通风机运行状态的监控	优化风流分布以预防中毒窒息风险

智能视频（AI）监控	提升人员的井口信号房、提升机房、井口、马头门等场所进行监控，并能智能分析	视觉技术识别人员违规行为或设备异常状态，提升安全巡检效率
排水系统监控	对排水系统水泵开停、水仓水位、涌水量、排水量、流速等参数进行监测	异常情况下（如水位超限、设备故障）自动或远程启动应急响应机制
地压与地表沉降监测	对地压与地表沉降的变形、应力等参数进行监测	捕捉岩体位移，预警冒顶事故
人员定位系统	实时追踪井下人员位置、身份信息、运动轨迹及停留时长，设置区域禁入/滞留告警	精确掌握井下人员分布，实现高效应急救援
供电系统监控	智能防越级跳闸保护、备火灾自动监测与报警、电气设备运行状态参数的在线监测	监控电压电流波动，保障设备稳定运行，对电量和能耗统计分析

（四）多模态数据融合

上述多源异构数据呈分散分布态势，如何借助边缘侧装置实现多模态数据的感知、监测、预警及决策管控，构成本研究的关键目标。具体而言，多模态数据融合旨在构建一个统一的智能分析融合平台，其核心在于打破基础类数据、安全管理类数据与感知类数据之间的壁垒，实现跨模态信息的深度集成与协同分析。

在技术路径层面，第一阶段需利用边缘计算装置对来源各异、格式多样的异构数据进行预处理。此过程涵盖数据的实时采集、格式标准化转换、时间戳对齐以及基础层面的数据降噪与特征提取。边缘侧处理不仅可显著减轻中心平台的传输负载，更能满足井下环境监测与控制对低延时的严格要求。随后，融合平台对预处理后的多模态数据流进行关联与汇聚。典型应用场景包括：将感知类数据（如井下CO、NO2监测值、人员位置信息、主要通风机运行状态）与安全管理类数据（如、隐患排查记录、员工教育培训信息）进行时空关联，以动态评估特定作业区域或设备的安全态势。同时，基础类数据（如固有风险等级、设备信息、图件信息）为感知数据和安全态势动态提供了关键的背景信息与评估基准，显著提升了预警与决策的精准性与可追溯性。在此基础上，平台运用数据挖掘、机器学习（如深度学习、强化学习）等智能算法，对融合后的多维多源数据进行深度分析。该分析不仅能够实现对单一系统（如通风、排水）运行状态的智能诊断与预测性维护，更能揭示跨系统、跨流程的潜在关联风险。可优化应急逃生路径规划与救援调度策略。最终，融合分析结果驱动智能决策与管控闭环的形成。平台能够基于实时融合数据自动生成预警信息（如气体超标、设备异常），并通过可视化界面或移动终端推送至相关管理人员。更为重要的是，平台可基于预设规则或模型推理，生成初步的管控建议（如调整通风参数、暂停特定区域作业、启动应急预案），并追踪管控指令的执行反，从而形成“感知－分析－预警－决策－管控－反馈”的完整智能闭环，显著增强矿山生产全流程的协同管理效能与风险响应效率。

二、非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台

（一）融合平台功能设计

该平台是充分运用物联网、人工智能、数字孪生等技术，建设政府、矿山企业及第三方机构、专家等共享的，集日常管理、

监测预警、调度指挥和辅助决策一体化的，对安全风险隐患实施有效管控的“智治大脑”。采用“政府端+企业端+社会端”三线设计开发，共用平台。通过“三张清单”梳理出数据需求模型图。如图1所示。

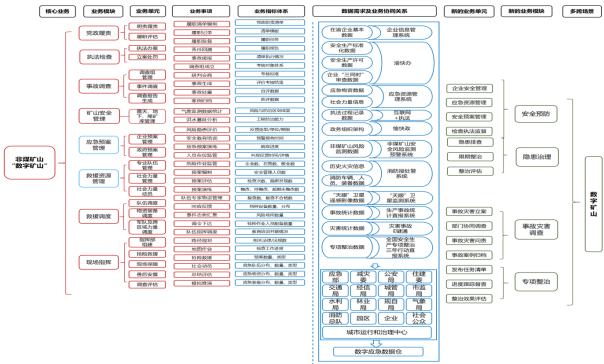


图1 数据需求模型图

基于数据需求模型图，非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台总体按照“1（总驾驶舱）+2（监管端、企业端、社会端）+N（各个系统的基础模块）+X（各个场景运用：各种智慧管理、监测预警子场景等）”的思路设计。监管端包含行政许可、监管执法、应急管理、事故救援、履职管理、企业动态安全监管等模块。企业端包含基础信息、风险分级管控、隐患排查治理、教育培训、危险作业、监测预警、应急管理、履职管理等模块，企业端核心业务如图2所示。社会端包括服务平台、专家服务、举报奖励、告知警示、安全培训、第三方合作等模块。



图2 非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台核心业务

（二）融合平台整体架构设计

多模态数据融合平台采用分层架构设计，以支撑非煤矿山复杂环境下的数据集成与智能决策。整体架构自上而下分为数据采集层、边缘处理层、平台核心层及应用服务层，确保数据从感知到管控的全链路高效协同。

数据采集层通过前置采集装置实现多源异构数据的实时汇聚；该层支持标准化协议接入，并嵌入数据清洗模块，初步滤除噪声与异常值，为后续处理奠定基础。边缘处理层部署于井下关键节点或近场数据中心，利用边缘计算网关执行低延时预处理任务，包括数据格式统一化、时间截对齐、特征提取及本地化预警（如气体超标阈值触发）；平台核心层构建于云端或私有数据中心，负责多模态数据的深度融合（风险评估动态预警模型）与智能分析；核心算法包括深度学习模型和关联规则挖掘，动态关联基础类静态数据、安全管理类动态记录及感知类实时流，生成跨模态风险图谱（如区域安全态势评分）。应用服务层提供可视化决策支持系统，实现预警信息推送（移动端告警）、智能决策建议及管控闭环追踪。同时，平台架构融入区块链技术确保数据不可

篡改，支持监管机构远程审计，形成“数据驱动-智能预警-协同管控”的一体化运行机制。平台企业端架构如图3所示。

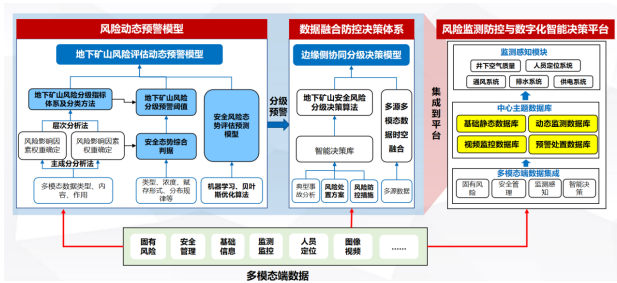


图3 非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台架构

三、现场应用

目前，该平台已全面部署应用于重庆市“矿山安全在线”市级监管平台建设，显著提升了区域矿山安全管理效能。在企业端部署层面，540座大型矿山企业已完成平台部署并稳定运行，系统功能覆盖就、开采、运输等核心生产环节。该平台有效消除了监管部门与企业间的信息壁垒，实现了监测数据的实时共享与业务协同。平台核心功能高效体现为以下三个方面：一是依托实时采集的基础数据，在可视化地图上实现安全风险“一图统览”；二是构建隐患从识别至整改的全程闭环管理机制；三是基于智能系统将调度指令精准推送至关键岗位；四是通过综合指挥大屏全景化呈现决策支持信息。上述功能体系全面强化了安全生产响应的时效性与监管效能。监管端与企业端数字大屏部署形态如图4所示。



图4 监管端、企业端数字大屏

四、结语

课题基于非煤矿山政府监管、企业安全管理、社会共治的难点，通过“三线设计、数据共享”的方式，打破数据壁垒。通过

“三张清单”的设计，搭建了政企共用的非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台。通过示范应用，成果技术先进、运行可靠，可为智慧矿山建设提供支撑。

参考文献

[1] 吴晓春. 煤矿智能识别监测预警平台研究及应 [J]. 中国煤炭, 2024, 50(3): 97 - 102.  
[2] 李文凯. 浅谈煤炭生产的智能监控创新应用 [J]. 新疆钢铁, 2024(2): 182 - 184.  
[3] 李国民, 章鳌, 贺耀宜, 等. 智能矿井多元监控数据成关键技术研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(8): 127 - 130, 146.  
[4] 王启健, 于涛. 黄金智慧矿山大数据分析平台研究与开发 [J]. 有色金属 ( 矿山部分 ), 2021, 73(6): 25 - 31.  
[5] 贺耀宜, 高文, 杨耀, 等. 智能矿山多元监控信息融与联动研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 11 - 19.



# 水性防腐涂料在船舶涂装中的应用

李双亚

沪东中华造船集团有限公司, 上海 201913

DOI:10.61369/ERA.2025120013

**摘 要：**近年来，随着海上运输业的迅猛发展，海上交通安全问题日益引起社会各界的重视。对船体外部表面进行涂料防护处理，能有效提升船体抗腐蚀能力，进而保障航行安全。本文首先阐述了我国水性船舶涂料现状和主要品种以及水性防腐涂料类型。其次，详细分析了水性防腐涂料在船舶涂装中应用价值，最后深入剖析了水性防腐涂料在船舶涂装中的应用措施。以期为相关人士提供参考。

**关 键 词：**水性防腐涂料；船舶涂装；腐蚀防护

## The Application of Waterborne Anticorrosive Coatings in Ship Coating

Li Shuangya

Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913

**Abstract：** In recent years, with the rapid development of the maritime transportation industry, maritime traffic safety issues have increasingly attracted attention from all sectors of society. Applying protective coatings to the external surfaces of ship hulls can effectively enhance their corrosion resistance, thereby ensuring navigation safety. This paper first elaborates on the current status and main types of waterborne marine coatings in China, as well as the categories of waterborne anticorrosive coatings. Secondly, it provides a detailed analysis of the application value of waterborne anticorrosive coatings in ship painting. Finally, it delves into the application measures of waterborne anticorrosive coatings in ship painting, aiming to provide references for relevant professionals.

**Keywords：** waterborne anticorrosive coatings; ship painting; corrosion protection

## 引言

船舶涂装与其他钢材涂装存在显著差异，其因外形庞大、结构复杂且长期处于户外海洋环境，对涂装材料提出了更为苛刻的要求。因此，舰船涂料需具备较长使用寿命和强效抗侵蚀能力，而涂料的合理选型与匹配是开展船舶涂装工作的基础。国内外实践表明，水性防腐涂料作为典型的环保型涂料，在国内的应用仍处于起步阶段，尚未完全满足海洋涂装的严苛需求。加之国外同类产品进口成本高昂，导致该类涂料在国内船舶涂装中的使用率不足1%。因此，研发国产水性环氧船用涂料，对于提升国内船用涂料的自主化应用比例具有重要现实意义。

## 一、相关概述

### （一）我国水性船舶涂料现状和主要品种

国外环保型涂料的研发与应用起步较早，欧美等发达国家企业已掌握多项先进工艺，并成功研制出多种适应海洋环境的环保涂料。我国对水基型防腐涂料的研究起步较晚，市场应用仍以进口产品为主，国内企业中仅有少数外资企业较多采用水性防腐涂料，本土企业的应用范围相对有限。

从实际应用来看，水性防腐涂料目前主要用于舰船内部防腐需求较低的区域，如舱室和居住区；而对于压载水池等抗腐蚀要求极高的部位，尚未实现规模化应用。舰船内部空间有限、作业区域狭窄密闭，传统溶剂型油漆作业时若发生起火事故，易造成

巨大经济损失；且油漆挥发气体易被舱室隔热布料等吸附，导致有害气体长期逸散，严重影响乘员健康。相比之下，水基型防腐涂料具有制作简便、可与其他工序同步施工的优势，能显著提升船舶生产效率。同时，水性防腐涂层属于绿色环保材料，可大幅改善施工人员及机组人员的工作条件，加之内部舱室对防腐涂层的性能要求低于外部区域，因此其在海洋环境中具有广阔的发展前景。

### （二）水性防腐涂料类型

#### 1. 水乳胶型涂料

该涂料以水性胶乳为主体材料，通过乳化合聚合法经一系列工艺加工而成。乳化合聚合法在工业领域应用广泛，不仅适用于造船行业，在建筑、工业防护等领域也具有良好应用前景。随着技术

认知与应用推广，已衍生出多种产品类型，主要包括均匀法和异相法两种制备方法。其中，逐步乳化法（又称“核－壳”型乳化聚合）作为一项新技术已得到广泛应用；20世纪90年代末出现的混杂乳化聚合，通过环氧树脂、聚氨酯树脂等树脂改性实现性能优化，成为该类技术的典型代表。

2. 水可稀释型涂料

该类涂料需先将树脂溶于溶液中，与其他物质或添加剂充分搅拌后进行染色，再通过水溶性溶剂使盐水组与水融合实现涂料成膜。其树脂材料类型相对单一，主要包括聚氨酯树脂、聚酯树脂和环氧树脂等，这些树脂通过在分子链结构中引入亲水性基团，提升与水的相容性，从而实现与水的良好结合。由于水溶性优异，该类涂层通常用于电泳漆，较少应用于干式涂装。水性可稀释涂层多采用核－壳结构，且酸价较低。在合成过程中，通过

酸性单体引发自由基效应与目的大分子交联，再经胺类物质中和酸性单体，最终获得在水相中分散性能优良的高分子涂层。核－壳结构不仅能确保涂层稳定性，还可大幅降低亲水性，通过壳层交互作用改善涂层综合性能。

3. 乳液型涂料

乳液型涂层的核心特点是通过对油溶性高分子及乳化剂进行强制分散，促进物质在水溶液中的快速溶解。传统制备方法中，乳液以自由态形式存在且参与成膜，导致涂层抗水性和抗腐蚀性难以充分发挥。通过工艺优化发现，采用活性乳化剂可有效改善乳胶漆的抗水性及防护性能<sup>[1]</sup>。

不同类型水性防腐涂料的关键参数及船舶适配性汇总如下表所示：

表1 不同类型水性防腐涂料对比表

涂料类型	制备核心工艺	关键特性	适用船舶部位	典型应用场景	参考耐盐雾时长（h）
水乳胶型涂料	乳化聚合（含核－壳型、混杂型）	环保性优、可与其他工序同步施工	舱室、居住区、内部通道	舰船内部非核心防腐区域涂装	500-800
水可稀释型涂料	树脂溶解 + 亲水性基团引入	水溶性优异、酸价低、成膜性稳定	船体小型构件、管路表面	电泳涂装（如舱内金属管路）	600-900
乳液型涂料	活性乳化剂强制分散	抗水性提升、防护性强	甲板辅助区域、非承重结构	船体次要结构表面防护	450-750

二、水性防腐涂料在船舶涂装中应用价值探讨

（一）守护船体抵御腐蚀侵害

采用水性防腐涂料是防止船舶锈蚀的有效措施。海洋环境中富含盐分及其他腐蚀性物质，若缺乏有效防护，船体极易被腐蚀损坏。水基防锈涂层可在船体表面形成牢固保护层，阻隔海水等强腐蚀性介质对船舶的侵蚀。该涂层抗侵蚀能力强，能长期维持船身结构完整性，显著延长船舶使用寿命。此外，其具有良好的环境友好性，无有毒成分释放，符合当今世界可持续发展需求，因此选用水性防腐涂料对船舶进行防护十分必要。

（二）延长船舶整体使用周期

水性防腐涂料作为持久性能优良的新型防腐材料，合理选用可有效防止船体侵蚀破坏，降低维护与替换成本，提升经济与应用价值。

耐气候性优异：海上航行船舶长期受阳光、风雨、海水等自然条件影响，水性防腐涂层具备抗紫外线、抗雨水、抗海水等多重功能，可减少腐蚀导致的维修与替换需求，延长船舶使用寿命。

基体结合性能强：涂层能与船舶外壳紧密结合形成强韧防护

层，有效阻隔外部物质对船身的腐蚀与破坏，提升涂料自身使用寿命。

环境友好与卫生安全：与常规有机溶剂型涂层相比，水性防腐涂料不含有毒成分，对生态环境和人体健康更友好，可降低环境污染风险，增强船舶安全性能。

（三）提升船舶涂装环保性能

水性防腐涂料对环境和使用者的无危害，满足防护与安全双重需求。

无有毒成分释放：水性防腐涂料以水为主要介质，不含有毒挥发性有机化合物（VOCs）、重金属等有害成分，可减轻对周围环境的影响，降低大气和水污染风险。

保障施工人员健康：水性防腐涂料无刺激性气味及有毒气体释放，不会对工人身体造成伤害，为建筑工人创造卫生安全的工作条件。

使用便捷且安全性高：水性防腐涂料具有不易燃、无腐蚀性的特点，使用过程中火灾、爆炸风险低；无需特殊治理流程，可大幅减少建筑废弃物排放量<sup>[2]</sup>。

水性防腐涂料与传统溶剂型船舶涂料的核心性能及应用数据对比如表2所示：

表2 水性防腐涂料与传统溶剂型船舶涂料对比表

性能 / 应用指标	水性防腐涂料	传统溶剂型涂料	数据来源 / 行业共识
VOCs 含量（g/L）	≤ 100	300-600	船舶涂料行业环保标准
国内船舶涂装使用率（%）	<1	>99	国内造船企业实践统计
施工环境火灾风险	低（不易燃、无易燃挥发分）	高（易挥发、易燃）	涂料安全性能测试报告
对施工人员健康影响	无刺激性、无有害气体危害	存在 VOCs 刺激、长期接触致病风险	职业健康防护规范
耐盐雾腐蚀时长（h）	500-1000	300-600	海洋环境涂层性能测试
单位面积施工成本（元 / m <sup>2</sup> ）	120-180（国产）；200-300（进口）	80-120	国内涂料市场报价统计
涂层使用寿命（年）	5-8	3-5	船舶涂装工程跟踪数据

### 三、水性防腐涂料在船舶涂装中的应用措施

#### （一）完善涂装前表面处理工作

第一，需对船体进行全面清洗，通过喷砂、刷洗或高压清洗等方式清除表面油污、锈斑、老化涂层等杂质，确保表面光滑平整，为涂层附着提供良好基础。其次，根据船舶材料特性选择合适的表面改性方法，例如针对钢材构件，在传统清洗基础上可通过磷化法或锈化法提升其耐腐蚀性能；同时需选用适配的去污剂及处理剂，保证涂层与基体的配伍性。

第二，表面改性过程中需关注船体平面度及显微组织，针对曲面不均匀或存在细小沟槽的部位采取专项措施，确保涂层完全覆盖，避免空鼓、开裂等问题；通过合理选用填料及修复材料，进一步提升涂层综合性能。

第三，需控制船体表面处理的环境温湿度，湿度过大或过小均会影响涂层固化与粘结效果，应选择适宜环境进行表面加工与喷涂；适当的温湿度条件可改善涂膜流动性，助力形成均匀涂层。

第四，需严格按照生产厂家推荐的涂料技术标准进行表面加工，选用与水性防腐涂料适配的前处理材料及底层涂料，保证各品种间的相容性；通过控制喷涂厚度及层数等关键参数，确保涂料使用效果达到最佳。

#### （二）科学开展底漆选型工作

第一，针对舰船表层材料及实际服役条件，需选用适配的水基涂装涂料。常见的水性涂料包括水性丙烯酸乳液、水性聚氨酯、水性环氧树脂等，应结合船舶的具体特点（如航行海域、船体结构材质等）选择对应的类型。特别需要强调的是，选用水性涂料时需综合考量其耐腐蚀性、附着力、耐候性及耐海水性能。高质量的水基涂料首先必须具备优异的耐腐蚀性，能有效对船体金属材料形成保护，抵御海水及海洋大气的侵蚀。

第二，涂料需有强劲的粘附力，确保与船身表面紧密结合，避免在长期使用中出现脱落、起皮等问题。尤其是船舶长期暴露于潮湿、高盐雾、强紫外线等苛刻海洋环境中，涂层的抗老化性能更是关键保障，需确保其在长期服役中保持稳定的防护效果。

第三，油漆底层的施工技术也需谨慎选择。施工过程中要保证底层涂料在船体表面均匀覆盖，避免出现厚薄不均、气泡、漏涂等缺陷；通过采用适当的喷涂工艺，确保底层涂料能充分渗入船体表面的细微孔隙，与基体紧密结合，为后续涂层的施工打下坚实基础。

最后，在选用底层材料时，需重点关注其与水基型防腐蚀涂层的兼容性，必须保证底层材料与所选防锈水基涂料能够相容，从而形成稳定且协同作用的涂料体系。应严格按照油漆生产厂家的技术要求及规格标准进行选型与施工，确保各层涂料之间具备良好的化学及物理相容性，最终提升船体涂层的整体防护品质与使用寿命。

#### （三）严格遵循规范涂装工艺

第一，喷涂工艺应从充分的表面处理着手。需采用合适的处理方式，如喷砂、人工除锈或高压水冲洗等，彻底清除船体表面

的灰尘、油脂、锈蚀及旧涂层残留物，确保油漆能够附着在干净、平整的基底表面，为后续涂层的附着力打下基础。

第二，涂料的合理选用与规范涂刷至关重要。需根据船体基材特性及实际作业环境（如航行海域、服役年限等），选用适配的水性防腐涂料，并确保其与后续涂层的兼容性，从而构建稳定可靠的多层防护涂层系统。在底层处理阶段，要重点控制涂层的均匀性与厚度，保证底层涂料在船体表面分布一致，避免出现局部过厚、过薄或漏涂现象，为后续水性防腐涂料的施工筑牢基础。

第三，涂料施工需密切关注环境条件。应尽量避免高湿度、大温差或阴雨天气施工，否则易导致漆膜固化不良、出现气泡或开裂等问题，影响涂层性能。为保证涂层质量，施工时需确保作业环境通风良好，以加快涂层干燥速率，减少因干燥缓慢引发的涂层损伤（如磕碰、污染等）。

第四，需严格遵循规范的施工程序：每道涂层施工前，必须确认上一道涂层已完全干燥固化，避免因未干透叠加涂刷导致层间剥离；对于喷涂层数和厚度，应严格按照生产厂家的技术要求进行控制，通过规范操作确保涂层厚度达标且均匀，最终保障船体涂层的整体防护品质与稳定性<sup>[3]</sup>。

#### （四）建立定期维护保养机制

第一，需定期对船体进行全面的涂层完整性检验，尤其要重点检查那些受机械磨损、碰撞或其他外界因素影响较频繁的船体表层部位。一旦发现涂层出现破损、剥落、开裂等问题，必须立即进行修补，防止海水、盐分等侵蚀因子通过破损处渗透至船体基材，造成进一步损害。

第二，要重点关注水基型防腐蚀涂层在舰船上的实际服役状态。船舶在海洋环境中长期暴露于日照、盐雾、海水浸泡等恶劣条件下，涂层材料的耐候性能尤为关键。需定期检测涂层的颜色变化、光泽度及表面完好性，若发现明显褪色、失光、粉化或老化开裂等现象，应及时进行局部修补或整体更换，确保涂层始终保持良好的外观状态和防护功能。

第三，船体底部是海洋生物易粘附的重点区域，必须定期进行清洗和防污处理。海洋生物（如藻类、贝类、藤壶等）的附着不仅会影响船舶航行性能，还会因生物代谢产物或物理摩擦导致涂层损坏，加速船体腐蚀。通过定期清理船体底部的生物附着，能有效减少涂层损伤风险，延长涂层的使用寿命<sup>[4]</sup>。

第四，对涂层进行周期性局部修补和全面翻新也是日常维护的重要环节。应根据舰船的服役时长、涂装老化程度等制定科学的保养计划，按周期开展涂层的修补与更换工作。通过局部补涂破损部位、整体重新涂覆等方式，确保船体涂层始终保持较高的耐腐蚀性和表面完整性，持续发挥防护作用。

#### （五）强化专业技能培训工作

第一，要对船上的油漆工人进行全面培训，让他们对涂料的特点、性能和施工工艺有更深刻认识。通过详细介绍涂料的分类、选择原则、施工工艺、安全操作等内容。

第二，培训中要注重工艺运用，包括表面处理、底漆选用、涂装施工等实用技巧。通过仿真真实油漆作业，使学员深入了解水性防锈漆的施工工艺并加以掌握。另外，课程需包含油漆器材



的正确运用及保养方法，保证器材正常运作，提升工作效能。

第三，培训中要重视环境保护与安全教育。与常规有机溶剂型涂层相比，水性防腐涂层在挥发性有机物控制上有明显优势，因此培训中应强化防护意识及喷涂作业的安全防范，确保工作人员在提升效率的同时，将对环境和人体的伤害降到最低。

第四，培训可延伸至船政管理层面，让船政主管及监管人员了解水性防锈漆的优点与适用领域。将水性漆相关知识传达给管理人员，能让更多造船企业认识其优势，推动其在船用油漆领域的推广应用<sup>[5]</sup>。

#### （六）优选高质量水性防腐涂料

第一，高品质的水性防腐涂料具备优异的耐腐蚀性，能有效保护船体表层金属材料免受海水、盐雾等腐蚀性因子的侵袭，这是其在严酷海洋环境中实现长期服役的重要保障。

第二，优质的水性防腐涂料与船体的结合性能优异，可与船体表层形成牢固附着，不易出现剥落、起皮等问题。这种稳固结合既保障了涂层的耐久性，能抵抗海洋腐蚀，又可承受船舶航行

过程中各类作用力的冲击。

第三，高性能水性防锈漆在涂装时流动性强、涂层附着力好，能实现高效涂装。较高的流平度可减少漆膜的结构缺陷，提升外观品质；同时，优良的涂层性能能保证涂料在船体表面均匀分布，从而确保涂层的整体品质与一致性。

## 四、结语

水性防腐涂料凭借优异的耐腐蚀性能，已成为推动我国造船工业技术革新与可持续发展的重要趋势。因此，对其实际应用状况展开深入研究，系统分析其核心优势、面临的现实挑战及未来发展方向，不仅能为我国涂料工业和船舶工业的绿色化、高效化、可持续化发展提供科学指导，更能进一步推广其在舰船上的应用场景。这将直接提升舰船的防腐能力，保障其运行安全性，并为未来海上交通领域的发展提供更可靠、更环保的涂装解决方案。

## 参考文献

- [1] 孔德成, 魏杨. 水性防腐涂料在船舶涂装中的应用探析 [J]. 船舶物资与市场, 2020, 0(4): 49-50.
- [2] 赵任张, 刘亮, 陈政. 水性防腐涂料在船舶涂装中的应用 [J]. 船舶标准化工程师, 2024, 57(6): 78-80.
- [3] 谢波, 匡倩. 水性防腐涂料在船舶涂装中的应用 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(2): 65-67.
- [4] 姚爱萍. 水性防腐涂料在船舶涂装中的应用探析 [J]. 中国水运, 2025(12): 7-822.
- [5] 安春玲. 重防腐涂料在工程机械涂装中的研究与应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(4): 19-2249.

# 工程管理中多方协同机制的构建与优化

马一帆，吴晨光，毛华彪

中国建筑技术集团有限公司，北京 100013

DOI:10.61369/ERA.2025120016

**摘 要：** 在工程管理领域，多方协同机制的作用举足轻重，它能切实提升项目管理成效、减少潜在风险，还能让资源配置更合理，搭建高效的信息共享平台、改进协作流程、明确各方责任后，参与方就能朝着相同目标努力，实现信息顺畅传递与资源高效利用，优化多方协同机制可从三方面入手：一是加强信息化系统建设，二是促进跨部门协同合作，三是健全激励与反馈机制，落实这一机制不仅能保障工程项目稳步推进，还能明显提升项目质量与管理水平，为工程管理创新打下牢固基础。

**关 键 词：** 多方协同机制；信息共享平台；跨部门合作；资源优化；激励机制

## Construction and Optimization of Multi-Party Collaboration Mechanisms in Engineering Management

Ma Yifan, Wu Chenguang, Mao Huabiao

China Construction Technology Group Co., Ltd., Beijing 100013

**Abstract：** In the field of engineering management, the multi-party collaboration mechanism plays a pivotal role, significantly enhancing project management effectiveness, reducing potential risks, and ensuring more rational resource allocation. By establishing an efficient information-sharing platform, improving collaborative processes, and clarifying the responsibilities of all parties involved, participants can work towards common goals, facilitating smooth information transmission and efficient resource utilization. Optimizing the multi-party collaboration mechanism can be approached from three aspects: first, strengthening the construction of information systems; second, promoting cross-departmental collaboration; and third, improving incentive and feedback mechanisms. Implementing this mechanism not only ensures the steady progress of engineering projects but also markedly improves project quality and management standards, laying a solid foundation for innovation in engineering management.

**Keywords：** multi-party collaboration mechanism; information-sharing platform; cross-departmental cooperation; resource optimization; incentive mechanism

## 引言

工程管理工作中，单个项目往往需要多个主体参与，能否高效统筹各方资源、协调信息传递与决策制定，直接关系到项目最终成败，随着项目规模不断扩大、复杂程度逐渐提升，传统管理模式已无法满足高效协同的实际需求，构建并优化多方协同机制，能够助力参与方开展有效合作，提升工作效率、降低风险发生概率，同时确保资源得到最大限度利用，在这样的背景下，打造智能化、高效化的多方协同机制，不仅是现代工程管理发展的迫切需求，也为项目管理水平提升提供了全新的解决思路。

## 一、多方协同机制的定义与作用

### （一）多方协同机制的概念

在工程项目推进过程中，多方协同机制指的是多个关联主体共同参与项目管理的运作模式，这些关联主体涵盖业主、承包商、设计单位、监理单位等，它们之间依靠信息传递共享、资源互通调配以及共同商议决策等途径，达成高效协作的目标，在项

目不同阶段，各方均承担着关键角色，彼此相互依存，共同保障项目顺利落地，这一机制要求各方在决策环节主动参与，摒弃孤立式的管理模式，进而实现项目管理效益的最大化。

多方协同机制的核心特点体现在协作性、共享性与透明性三个方面，其中，协作性表现为各方在项目实施阶段相互配合支持、协同开展工作，避免因单一主体主导而引发的效率低下或矛盾冲突；共享性强调各方之间实现资源与信息的共享，打破信息

壁垒，保障项目推进过程中数据传递的及时性与准确性；透明性则使各方能够清晰掌握项目进展情况与存在的问题，减少不必要的争议与理解偏差，为项目管理营造开放的工作氛围。<sup>[1]</sup>

### （二）多方协同机制的作用

多方协同机制对决策效率的提升效果十分显著，在传统工程管理模式中，决策往往由单一主体主导，这容易导致信息不对称问题出现，还可能造成决策延迟，而引入多方协同机制后，各方可共同针对问题展开讨论分析，及时制定合理决策，确保项目实施过程中具备良好的灵活性与应变能力，比如，当项目面临技术难题时，设计与施工单位可共同探讨解决方案，监理单位也能参与到决策过程中，从而保障决策的全面性与有效性<sup>[2]</sup>。

多方协同机制还能助力资源配置的优化，传统工程管理模式中，资源重复配置或浪费的现象较为常见，借助各方共同参与和资源共享，能够实现资源的合理分配与最大化利用，避免资源分配不均衡的情况，提升资源使用效率，举例来说，承包商可依据项目需求进行设备调配，业主能结合项目进度调整资金流转，设计与施工单位也可共享技术资料，确保项目各类资源实现合理流动。

在项目风险防控方面，多方协同机制发挥着至关重要的作用，能够有效降低项目风险，工程项目从设计阶段到施工阶段，面临的风险类型多样，且风险贯穿始终，通过多方协同机制，各方能够及时察觉潜在风险，提前制定应对策略，避免单一主体因信息欠缺或判断失误导致风险扩大。<sup>[3]</sup>

## 二、多方协同机制的构建要素

### （一）信息共享平台的建设

信息共享是多方协同机制运转的核心环节，打造高效的信息平台对机制落地意义重大，依托信息化平台，项目各参与方可实现数据实时共享，有效规避信息不对称与传递滞后问题，进而保障项目推进过程的透明度与高效性，在平台建设过程中，不仅要确保信息更新的及时性，还需保障系统运行的稳定性，以此支撑跨部门、跨专业的信息流通，让每个参与方都能依据最新项目信息制定决策。

在平台功能设计上，系统需涵盖数据上传、实时监控及决策分析等基础功能，平台应具备高效的数据处理能力，既能承载大量工程数据的处理需求，又能对数据进行及时分析，为决策者提供精准、实时的决策依据，除此之外，平台还需设置用户权限管理功能，通过该功能保障敏感信息的安全性，同时实现各方信息的合理访问，防止信息泄露与滥用情况发生。<sup>[4]</sup>

### （二）协同文化的培育

多方协同机制的成功实施，不仅需要技术层面的支撑，还离不开协同文化的深度培育，构建以信任为基础的协作文化，是推动各方高效合作的重要前提，通过增强各方间的信任度，项目团队在合作中能够摆脱以自我为中心的管理模式，主动推进资源共享、信息流通与共同决策，最终实现项目执行效率与质量的双重提升。<sup>[5]</sup>

协同文化的培育还需借助组织行为调整来达成，通过优化管理制度、明确团队目标、强化团队协作意识，可在项目管理过程中营造良好的合作氛围，在共同目标的驱动下，团队成员会更主动地分享信息、反馈问题、提出建议，共同协作解决项目推进中的各类困难，另外，通过定期开展团队建设活动与搭建有效的沟通渠道，能够促进成员间的良性互动，增强团队凝聚力，进一步提升团队整体的执行力与决策能力。

### （三）角色与责任的明确

清晰界定各方在多方协同机制中的角色与责任，是保障协作高效运转的重要基础，工程项目涉及的参与方数量较多，且每个参与方都承担着特定职责，为避免出现责任界定模糊、相互推诿的情况，必须通过清晰的责任划分，让每一方都明确自身的工作任务与责任边界，基于这样的责任分工，各方在协同过程中能够快速响应各类问题，有效避免因责任不明引发的管理混乱与进度延误。

在合同与协议设计工作中，明确各方的责任与权利同样关键，通过制定详细的合同条款，清晰界定各方在项目中的义务与利益分配方式，同时明确具体的执行标准与违约责任，可确保各方按照约定履行自身职责，此外，合同中还应设置合理的争议解决机制，当项目推进过程中出现分歧时，各方可依据合同内容开展协商并解决问题，保障项目顺利推进，减少管理层级的冲突与风险。

## 三、多方协同机制的优化路径

### （一）完善信息化系统的建设与维护

信息化系统在多方协同机制中占据关键地位，优化信息平台功能是提升协同效率的核心举措，一方面，平台需具备更高效的数据共享与集成能力，能够将项目涉及的进度、成本、质量、安全等各类数据进行统一汇总与可视化展示，通过集成专业的项目管理工具，平台可自动对数据展开分析，提供实时的决策支撑，助力管理者作出更精准的判断，另一方面，平台还应强化与其他系统的接口适配能力，确保数据在不同平台间实现无缝流转，从根源上避免数据孤岛问题，进一步提升整体工作效率。

信息流通的顺畅程度同样对协同效果影响深远，要保障信息传递的及时性与准确性，首要任务是优化信息传递的速度与渠道，借助云计算、大数据分析等现代信息技术手段，可实现信息的实时更新与同步，大幅降低信息滞后的概率。

### （二）加强跨部门协同合作

跨部门协同合作机制是多方协同机制优化的核心内容，为促进不同部门间的高效协作，首要工作是明确跨部门合作的流程与标准，通过制定统一的操作规范与协作流程，清晰界定各部门在项目中的职能边界，依托标准化流程，各方在协作过程中能够减少阻碍、提升效率，避免因沟通不畅或流程模糊导致的重复劳动与矛盾冲突。

案例实践表明，有效的跨部门协同能够显著优化项目进度，以某大型建筑项目为例，在协作机制完善前，设计部门与施工部

门未能建立高效的沟通渠道，导致部分设计图纸的调整信息未能及时传递至施工方，最终造成施工进度延误，在引入跨部门协作机制后，通过制定明确的协作流程并强化信息共享，项目各参与方实现了信息的实时获取与传递，有效减少了施工延误情况，项目整体绩效得到明显提升。如表1所示。

表1 跨部门协同优化对项目进度的影响

项目	协作前进度	协作后进度	提升百分比
建筑项目	80%	90%	12.5%
设计修改	70%	95%	35.7%
预算审批	65%	85%	30.8%

（三）完善激励机制与反馈机制

激励机制是驱动多方协同的核心动力，科学合理的激励措施能够有效调动各方参与协作的积极性，提升合作效率，激励机制的实现形式可多样化，例如设立绩效奖金、制定专项奖励计划，或是提供更多优质的合作机会等，通过合理的奖励方式，确保各方在项目协同过程中，即便面临困难挑战，仍能保持积极的合作心态。值得注意的是，激励措施不应局限于物质层面，还可通过提供职业发展机遇、授予团队荣誉等非物质手段，进一步激发各方的合作热情。

完善反馈机制同样是协同优化的重要环节，通过定期对协同效果进行检查与评估，能够及时发现协作过程中存在的问题，并采取针对性措施加以调整。以项目执行为例，管理层可通过定期组织项目评审会议，广泛收集各参与方的意见建议，深入分析协作中的障碍并制定优化方案，这一过程不仅能够保障协同机制的持续完善，还能增强各方对协同机制的信任度与依赖感，借助及时的反馈与灵活的调整，可确保协同机制与项目实际需求高度匹配，全面提升整体协作效能。

四、多方协同机制应用中的挑战与对策

（一）信息安全与隐私保护

在多方协同机制运转过程中，信息共享是保障各参与方高效协作的关键前提，但随着项目信息总量不断增加，数据安全和隐私保护问题逐渐成为协同机制推行中的突出挑战，隐私泄露与信息安全风险的出现，不仅可能导致企业或项目管理过程中的敏感数据丢失，还会对参与方的声誉形象及法律合规性造成深远影响。

为应对这类风险，必须建立严格的信息安全管理制度，并配套相应的技术防护手段，首先，项目所依托的信息平台需应用多重加密技术，确保信息在传输与存储环节的安全性；其次，要定期开展安全漏洞扫描与风险评估工作，及时发现并修复系统中存在的潜在安全隐患；此外，还需设定清晰的访问权限与信息共享

规则，保证只有获得授权的人员才能接触敏感数据，从而有效避免信息泄露与滥用问题。

（二）不同组织文化的融合

在多方协同机制实施过程中，不同组织之间的文化差异可能成为制约协同效率的重要因素，不同组织往往拥有各自独特的工作模式、沟通习惯与管理风格，这些文化层面的差异容易在协作中引发误解、造成沟通障碍，甚至产生冲突，进而影响项目的顺利推进。

解决这一问题的有效方式，是通过开展培训与文化融合活动，促进多方之间的文化认同与高效沟通，可以定期组织跨部门或跨企业的团队建设活动，借助活动增强团队成员之间的相互了解与信任，缓解文化差异带来的冲突；此外，项目管理者还可制定统一的协作规范，明确具体的工作流程与沟通方式，引导各参与方按照共同的规则开展合作，以此提升项目整体的协作效率。

（三）外部环境的影响

外部环境的变化，如市场需求波动、政策法规调整等，也可能对多方协同机制的落地产生重要影响，例如，某些政策的调整可能改变项目的资金来源或时间节点，市场形势的变化则可能导致项目需求发生变动，这些因素都有可能干扰协同机制的正常运作，由于外部环境的变化往往难以提前预判，因此如何应对这些变化便成为协同机制推行过程中的一大挑战。

应对外部环境变化的策略，在于灵活调整协同机制，并在项目管理中融入更多的灵活性与应变能力，项目团队应定期开展风险评估，及时识别可能受到外部变化影响的工作领域，并据此调整协同策略，比如，在政策发生变化时，及时与相关政府部门沟通，准确把握新的政策要求，并在协同机制中作出相应调整，通过这种灵活调整，项目在应对外部环境变化时，仍能保持高效运转，确保项目顺利推进。

五、结语

多方协同机制在工程管理领域具有重要的战略价值，它不仅能够提升项目的决策效率与资源配置水平，还能切实降低项目面临的风险，借助信息共享平台建设、协同文化培育、角色责任明确等构建要素，可为项目管理提供强有力的支撑，不过，在机制实施过程中，信息安全、文化差异及外部环境变化等挑战不容忽视，通过完善安全防护措施、推动文化融合、灵活应对外部变化等手段，能够有效优化协同机制，助力项目顺利实施，最终实现项目目标的最大化。

参考文献

[1] 卢志瑜, 邓恺强, 王志强, 等. 基于新一代信息技术的工程建设数字化转型实践 [J]. 国企管理, 2021, (15): 60-69.  
[2] 陈燕, 庞修海. 炼化企业工程管理数字化应用的研究 [J]. 中国管理信息化, 2020, 23(03): 105-106.  
[3] 赵晓晴, 孙虹, 平辉. 基于协同育人的工程管理专业应用性创新型人才培养模式探索 [J]. 内江科技, 2021, 42(12): 19-20+91.  
[4] 李国昌. 新工科理念下工程管理专业人才培养模式的优化 [J]. 黑河学院学报, 2020, 11(06): 84-86.  
[5] 李明燕, 徐守庆, 齐广利, 等. 建筑工程造价全过程标准化跟踪审计的应用 [J]. 居业, 2024, (08): 140-142.



# 绿色低碳理念在市政工程施工管理中的应用路径与绩效评价研究

徐宗兵

湖北博诚公路工程有限公司, 湖北 荆州 434000

DOI:10.61369/ERA.2025120017

**摘 要 :** 随着我国“双碳”目标的推进, 市政工程作为城市建设的重要部分, 其施工过程中的高能耗、高碳排放问题愈发突出, 绿色低碳理念的融入成为行业转型的重要方向。本文以市政工程施工管理为研究对象, 通过对绿色低碳理念在市政工程施工管理中的应用现状进行梳理, 分析当前市政工程施工管理存在的不足, 从施工前期规划、施工过程管控、施工后期处理三个方面提出绿色低碳理念在市政工程施工管理中的具体应用路径, 并构建起碳排放、资源利用、环境影响、经济效益的绩效评价体系, 运用层次分析法和模糊综合评价法相结合的方法进行评价。研究成果可以为市政工程施工企业落实绿色低碳管理提供实操参考, 帮助市政工程施工企业降低工程施工对环境的影响, 实现经济效益与生态效益的协同发展。

**关 键 词 :** 绿色低碳理念; 市政工程施工管理; 应用路径; 绩效评价

## Research on The Application Path and Performance Evaluation of Green and Low Carbon Concept in Municipal Engineering Construction Management

Xu Zongbing

Hubei Bocheng Highway Engineering Co., Ltd. Jingzhou, Hubei 434000

**Abstract :** With the promotion of China's "dual carbon" goals, municipal engineering, as an important part of urban construction, has become increasingly prominent in terms of high energy consumption and high carbon emissions during its construction process. The integration of green and low-carbon concepts has become an important direction for industry transformation. This article takes municipal engineering construction management as the research object, sorts out the current application status of green and low-carbon concepts in municipal engineering construction management, analyzes the shortcomings of current municipal engineering construction management, proposes specific application paths of green and low-carbon concepts in municipal engineering construction management from three aspects: pre construction planning, construction process control, and post construction treatment, and constructs a performance evaluation system for carbon emissions, resource utilization, environmental impact, and economic benefits. The method of combining Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation is used for evaluation. The research results can provide practical reference for municipal engineering construction enterprises to implement green and low-carbon management, help them reduce the impact of construction on the environment, and achieve the coordinated development of economic and ecological benefits.

**Keywords :** green and low-carbon concept; municipal engineering construction management; the application path; performance evaluation

### 引言

近些年来, 我国极力提倡绿色低碳发展, 市政工程属于城市基础设施创建的关键领域, 包含道路, 桥梁, 管网等项目, 施工时间较长, 牵涉环节众多, 会耗费大量钢材, 水泥等资源, 而且会产生扬尘, 噪音以及温室气体排放, 给城市生态环境带来一定的压力。当下, 不分市政工程施工企业虽然开始尝试采用绿色低碳理念, 不过在管理实际操作中, 还是存在理念落实不彻底, 技术运用不充分, 评价机制不完善等情况, 鉴于此, 本文针对绿色低碳理念在市政工程施工管理方面的应用展开研究, 全面剖析应用状况, 探寻切实可行的应用途径, 创建起科学的绩效评价体系, 希望借此给予改善市政工程施工管理绿色化水平给予理论支撑和操作指引, 促使市政工程行业朝着低碳, 环保, 可持续方向发展。

作者简介: 徐宗兵 (1987.11-), 男, 湖北监利人, 本科, 中级职称, 研究方向: 市政工程。

一、绿色低碳理念在市政工程施工管理中的应用现状

（一）应用的积极进展

从政策角度来说，国家和地方逐步出台相关政策推进市政工程施工绿色低碳施工，多地住建部门制定《绿色市政工程施工评价标准》，明确能耗控制、扬尘管控、废弃物回收等基本低碳指标，部分城市把绿色低碳施工列入工程招投标评分体系，对符合要求的项目予以政策倾斜，调动施工企业积极性<sup>[1]</sup>。从实践应用来看，部分大型市政项目已初步探索绿色低碳施工模式，具体应用实例如下表所示：

项目类型	采用的绿色低碳措施	实施效果
城市主干道翻新	再生骨料替代传统砂石	再生骨料使用率达 30%，减少建筑垃圾填埋量
市政桥梁拆除	建筑垃圾分类回收与再利用	建筑垃圾回收率达 80%，降低土地资源占用
小区周边管网改造	就近采购本地砂石与再生骨料	运输环节碳排放较传统方式降低 25%
跨江大桥施工	引入太阳能路灯、柴油发电机余热回收	施工期间化石能源消耗减少 18%

在环境管控方面，大部分市政项目配有扬尘检测设备、雾炮机，根据实时的 PM2.5 浓度调整施工节奏，减少对周边环境的影响<sup>[2]</sup>。

（二）应用中存在的问题

部分中小市政施工企业对于绿色低碳的认识还停留在“减少污染”的表层，没有认识到绿色低碳对于降低企业长期运营成本，提升企业竞争力的重要性，施工管理还是以“赶工期、控成本”为第一要务，存在违规使用高能耗设备、随意堆放建筑垃圾等现象，绿色低碳措施只是临时应付检查，没有形成常态化管理，绿色低碳施工的配套技术与设备支持不足，部分企业由于资金问题，无法购买节能型塔吊、电动工程机械等低碳设备，依旧使用传统燃油设备，且施工人员绿色技术操作能力不足，如混凝土浇筑时配合比控制不准造成材料浪费、碳排放增加。绿色低碳施工前期投入多、效益回收期长，部分企业害怕影响利润而不愿投入，某小区管网改造项目因再生管材价格高而放弃使用，碳排放没有得到有效控制；大多数项目绩效评价还是以质量、进度、安全为主，绿色低碳指标只是辅助参考，没有明确的量化标准，无法准确衡量绩效，从而优化低碳措施。

二、绿色低碳理念在市政工程施工管理中的应用路径

（一）施工前期规划：构建低碳基础

在施工方案设计阶段，结合项目所在地气候、地形、资源条件，把绿色低碳理念融入到整体规划中，制定低碳施工方案，如道路项目利用 BIM 技术模拟施工过程优化线路，减少机械无效行驶节约燃油，桥梁项目采用模块化施工减少现场浇筑，缩短工期减少扬尘噪声污染，材料采购上建立绿色标准，选择低能耗水泥、再生钢材、透水砖等环保节能、可循环使用的低碳建材，并

且就近采购减少运输距离，某市政道路项目通过就近采购本地砂石和再生骨料，使得运输环节碳排放比传统方式降低 25%<sup>[3]</sup>。此外要按照项目的大小和类型来设置绿色低碳的目标，比如单位面积碳排放强度，建筑垃圾回收率，节能设备使用率等等，把目标分解到各个施工环节和负责部门，还要制定详细的低碳施工计划，把各个阶段的措施，执行时间和负责人安排清楚，比如施工前期做好节能设备调试，施工人员低碳操作培训。

（二）施工过程管控阶段：实施低碳措施

能源与设备管理上，要提升施工过程中的能源消耗监管力度，安装智能电表，水表之类的计量设备，随时监测能耗数据，及时找出并修正异常状况，先用电动挖掘机械，节能塔吊这些低碳设备，定期做好保养工作，保证它们高效运转，还要合理安排设备的使用时间，防止空转，像混凝土搅拌站那样，依照施工进度来调节搅拌设备的运作次数，不要过度耗能，施工现场环境管控方面，对于扬尘，噪声，废水这些情况，要采取相应的应对办法，扬尘治理除了雾炮机，防尘网之外，还要装上喷淋系统定时洒水降尘，还要让施工人员戴防尘口罩，噪声控制尽量避开晚上施工，如果非得晚上干，就用低噪声设备，并且设立隔音屏障，废水处理创建临时回收体系，经过沉淀，过滤之后再用来洒水降尘，做到水资源的循环利用<sup>[4]</sup>。

（三）施工后期处理阶段：强化低碳成果巩固

施工结束以后，要尽快对施工场地实施生态修复，把土地平整好，栽种绿植，从而恢复被破坏的植被和土壤，道路项目可以在路两边栽种乔木，灌木之类的绿化植物，既能美化环境，又能吸收二氧化碳，提升生态效益，管网项目就要重新铺设开挖路面，恢复人行道地砖和绿化带，保证施工地区同周围环境相协调，把绿色低碳指标加入到工程验收体系当中，验收的时候，除了查看质量，安全这些情况之外，还要考察碳排放强度，建筑垃圾回收率这些低碳目标是否达成，没达标的就责令企业制订改进计划，限定时间去改正，达标的就会给予后续项目投标加分等奖励，促使企业不断践行绿色低碳理念。施工企业还要对项目绿色低碳施工情况加以总结，把经验和不足之处整理成案例库，记录下不同低碳举措的执行状况，耗费的成本以及产生的经济效益，找出合适自身项目类型的举措，而且要收集施工人员，周边居民的反馈意见，针对存在的问题改进后续施工方案，改善绿色低碳经营<sup>[5]</sup>平。

三、绿色低碳理念在市政工程施工管理中的绩效评价

（一）绩效评价指标体系构建

建立绩效评价指标体系要遵守科学性、可操作性、系统性原则，科学性要求指标准确体现绿色低碳应用成果，契合市政工程施工管理实际，可操作性要求指标数据好获取，经由现场监测，资料统计等量化可行，系统性要求指标包含碳排放，资源利用，环境影响，经济效益等诸多方面，全方位评判绿色低碳绩效。

为明确评价标准，现将各维度指标及分级标准整理如下表：

指标类别	具体指标	单位	优秀标准（≥90分）	良好标准（75-89分）	合格标准（60-74分）
碳排放指标	单位面积碳排放强度	kg/ m <sup>2</sup>	≤ 30	31-40	41-50
	燃油消耗降低率	%	≥ 20	15-19	10-14
	电力消耗降低率	%	≥ 18	13-17	8-12
资源利用指标	建筑垃圾回收率	%	≥ 80	70-79	60-69
	水资源循环利用率	%	≥ 70	60-69	50-59
	低碳材料使用率	%	≥ 40	30-39	20-29
环境影响指标	扬尘排放达标率	%	100	90-99	80-89
	噪声达标率	%	100	90-99	80-89
	周边植被恢复率	%	≥ 90	80-89	70-79
经济效益指标	绿色措施成本占比	%	≤ 8	9-12	13-15
	后期运营成本降低率	%	≥ 15	10-14	5-9

其中，单位面积碳排放强度为总碳排放量与施工面积之比，燃油与电力消耗降低率分别为实际消耗量与行业平均消耗量之比，资源利用类指标均为回收 / 循环 / 低碳材料用量与总用量之比，环境影响类指标为达标监测次数与总监测次数之比，经济效益指标中，绿色措施成本占比为低碳投入与项目总造价之比，后期运营成本降低率为低碳模式与传统模式的运营成本差值与传统模式成本之比。

（二）绩效评价方法的选择与应用研究

由于绿色低碳绩效评价涉及多维度指标且部分指标具有模糊性，故选择采用层次分析法（AHP）与模糊综合评价法相结合的方式评价，其中层次分析法可以构建层次结构模型，并邀请行业专家对指标的重要性进行打分，计算出各个指标的权重，以确保评价的客观性；而模糊综合评价法可以解决指标的模糊性问题，通过建立模糊评价矩阵对指标的实际表现进行评价，得出综合绩效等级。具体应用时，首先确定指标权重，构建目标层（绿色低碳绩效综合评价），准则层（碳排放、资源利用、环境影响、经济效益指标），指标层（12个具体指标）的层次结构模型，邀请5-8名市政工程施工管理、环保领域的专家，采用1-9标度法对准则层与指标层重要性两两比较形成判断矩阵，经一致性检验后计算权重，如准则层中的碳排放指标权重约为0.35、资源利用指标约为0.28、环境影响指标约为0.22、经济效益指标

约为0.15等（具体需根据专家打分确定）。接着是模糊评价，利用现场监测获取单位面积碳排放强度，扬尘排放达标率等数据，利用财务报表获取绿色措施成本占比，后期运营成本降低率等数据，结合上述表格分级标准，邀请专家对各项指标等级评价进行模糊评价，形成模糊评价矩阵，如某项目单位面积碳排放强度30kg/ m<sup>2</sup>，专家评价可能为“优秀”隶属度0.8，“良好”隶属度0.2。最后得出综合结果，将指标权重与模糊评价矩阵相乘得到综合评价向量，按最大隶属度原则确定绩效等级，如综合评价向量（0.65,0.25,0.10,0）对应“优秀”等级，再根据评价结果分析不足，如经济效益指标得分低可能前期投入大，后期应加强成本控制，促进绿色低碳与经济效益共同发展。

四、结束语

综上所述，本文以绿色低碳理念在市政工程施工管理中的应用为研究对象，通过对应用现状的分析，发现目前存在意识淡薄、技术欠缺、成本问题、评价不完善等不足，并从施工前期、施工过程、施工后期提出具体的绿色低碳理念应用路径，建立多维度绩效评价体系。绿色低碳理念在市政工程施工管理中的落实，可以降低工程对环境的影响，提高企业长期竞争力，符合我国可持续发展战略要求。

参考文献

[1] 乔攀举, 魏书剑. 低碳城市发展视角下市政工程的碳排放管理探讨 [J]. 资源节约与环保, 2024, (11): 19-23+38.  
[2] 王博, 白清源, 霍旭挺. 低碳理念下的市政道路规划、设计思考——以富阎合作园区富辰八路市政工程为例 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(07): 20-22.  
[3] 南钲, 徐韬, 马晨光. 政府采购助力建筑行业绿色低碳转型发展 [J]. 中国政府采购, 2023, (03): 42-45.  
[4] 张超. 助力城市绿色出行建设低碳市政工程——“光伏+城市轨道交通”模式通过产权交易平台成功实施 [J]. 产权导刊, 2022, (02): 54-55.  
[5] 周大为. 低碳经济视角下的市政工程施工管理 [J]. 中国储运, 2021, (07): 147-149.



# 分级破碎设备保护系统与装置的研究应用

吴彪<sup>1</sup>, 刘振<sup>2</sup>, 赵国亮<sup>1</sup>, 黄身水<sup>1</sup>, 龙福强<sup>1</sup>, 李新月<sup>2</sup>

1. 镇宁县红蝶实业有限责任公司, 贵州 安顺 561000

2. 泰伯克(天津)机械设备有限公司, 天津 301712

DOI:10.61369/ERA.2025120021

**摘 要 :** 分级破碎设备在矿山、建筑、冶金等行业的物料处理中占据核心地位, 其运行稳定性直接决定生产效率与作业安全。然而, 设备在服役过程中常面临过载、异物卡阻、部件磨损、温度异常等多重风险, 易引发设备损坏、生产中断甚至安全事故。保护系统与装置作为规避上述风险的关键手段, 通过实时监测、智能预警与主动干预, 实现设备全生命周期的安全防护。本文系统梳理分级破碎设备保护系统与装置的发展现状, 深入研究过载保护、异物检测与清除、耐磨防护及智能监测预警等核心技术的原理与优化路径, 结合多行业应用案例分析不同保护方案的适用性与实施效果, 剖析当前技术存在的响应滞后、适配性不足等问题, 并展望智能化、集成化、精准化的发展趋势, 为保护系统的技术创新与工程应用提供参考。

**关 键 词 :** 分级破碎设备; 保护系统; 过载保护; 异物检测; 智能监测

## Research and Application of Protection Systems and Devices for Hierarchical Crushing Equipment

Wu Biao<sup>1</sup>, Liu Zhen<sup>2</sup>, Zhao Guoliang<sup>1</sup>, Huang Shenshui<sup>1</sup>, Long Fuqiang<sup>1</sup>, Li Xinyue<sup>2</sup>

1. Zhenning County Hongdie Industrial Co., Ltd., Anshun, Guizhou 561000

2. Taiboke (Tianjin) Machinery & Equipment Co., Ltd., Tianjin 301712

**Abstract :** Hierarchical crushing equipment plays a central role in material processing across industries such as mining, construction, and metallurgy, with its operational stability directly determining production efficiency and operational safety. However, during service, the equipment often faces multiple risks, including overload, foreign object blockage, component wear, and abnormal temperature, which can lead to equipment damage, production interruptions, and even safety incidents. Protection systems and devices serve as critical means to mitigate these risks, achieving full-lifecycle safety protection for the equipment through real-time monitoring, intelligent early warning, and proactive intervention. This paper systematically reviews the development status of protection systems and devices for hierarchical crushing equipment, delves into the principles and optimization paths of core technologies such as overload protection, foreign object detection and removal, wear-resistant protection, and intelligent monitoring and early warning. Combining application cases across multiple industries, it analyzes the applicability and implementation effects of different protection solutions, examines issues such as response lag and inadequate adaptability in current technologies, and looks ahead to trends toward intelligence, integration, and precision, providing references for technological innovation and engineering applications of protection systems.

**Keywords :** hierarchical crushing equipment; protection system; overload protection; foreign object detection; intelligent monitoring

## 引言

在矿产开采、建筑固废资源化等规模化生产场景中, 分级破碎设备需连续处理高硬度、高复杂度的物料, 日均运行时长常超过 16 小时。恶劣的工况环境使设备面临多重安全隐患: 大块异物(如钢筋、废钢)进入破碎腔易造成齿辊卡阻, 瞬间过载导致电机烧毁或传动部件断裂; 物料持续冲击与摩擦使破碎齿、衬板等部件快速磨损, 未及时更换易引发设备振动加剧; 轴承、电机等关键部件因长期负载运行出现温度异常, 若未及时干预将导致不可逆损坏。据行业统计, 未配备完善保护系统的分级破碎设备, 年均故障停机时间达 200

小时以上，维护成本占设备总投入的 35%，且因设备故障引发的安全事故发生率较配备保护系统的设备高出 4 倍。

保护系统与装置通过“监测 - 判断 - 干预”的闭环控制逻辑，实现对设备运行状态的实时管控，是保障设备安全、高效运行的核心支撑。随着智能制造技术的发展，保护系统已从早期的单一机械防护，逐步升级为融合机械、电子、传感与智能算法的综合防护体系<sup>[1-3]</sup>。本文通过研究分级破碎设备保护系统与装置的技术特性、优化方法及应用效果，为行业内设备防护方案的设计与升级提供理论与实践依据。

## 一、分级破碎设备保护系统与装置发展现状

当前，分级破碎设备保护系统与装置根据防护功能可分为过载保护、异物检测与清除、耐磨防护及智能监测预警四大类，不同类型技术在原理、结构与适用场景上存在显著差异，共同构成设备的多层防护体系<sup>[4-5]</sup>。

### （一）过载保护系统与装置

过载保护是应对设备负载突变的首要防线，核心功能是在负载超过安全阈值时快速切断动力传递或降低负载，避免关键部件损坏。目前主流技术包括机械型与电控型两类。

机械型过载保护装置以液力耦合器、摩擦离合器为代表。液力耦合器通过液体介质传递动力，当负载过载时，泵轮与涡轮间产生滑差，切断扭矩传递，其结构简单、成本低，但响应时间较长（通常大于 0.5 秒），且仅能实现被动保护，无法提前预警。摩擦离合器通过摩擦片间的摩擦力传递扭矩，过载时摩擦片打滑，但其易因摩擦发热导致磨损，需定期更换部件，维护成本较高。

电控型过载保护系统基于传感器监测与智能控制实现防护，通过电流传感器监测电机电流、扭矩传感器检测传动系统扭矩，当参数超过阈值时，控制器立即发出指令切断电机电源或控制喂料装置停止供料。该类型响应速度快（小于 0.1 秒），但受传感器精度与环境干扰影响较大，在粉尘、振动剧烈的工况下易出现误判或漏判。

### （二）异物检测与清除系统

异物卡阻是导致分级破碎设备停机的主要原因之一，异物检测与清除系统通过识别进入破碎腔的有害异物并采取清除措施，降低设备卡阻风险。现有技术可分为预处理检测与腔内检测两类。

预处理检测装置多设置于设备进料口前端，包括格栅式筛分机、金属探测器等。格栅式筛分机通过预设孔径的格栅拦截大块异物，但易因物料堵塞影响进料效率；金属探测器利用电磁感应原理识别金属异物，可联动翻板阀将异物排出，但对非金属硬质异物（如混凝土块、石块）识别能力不足。

腔内异物检测系统采用超声波传感器、红外传感器或机器视觉技术，实时监测破碎腔内物料状态。超声波传感器通过回声信号判断是否存在异物卡阻，但受物料堆积形态影响较大；机器视觉技术通过摄像头采集腔内图像，经算法识别异物，识别精度可达 90% 以上，但需定期清理镜头粉尘，维护难度较高。清除装置则多采用液压驱动的拨料机构或反转机构，当检测到异物时，拨料机构将异物拨至排料口，或控制齿辊反转排出异物，但反转过

程易造成物料二次堆积。

### （三）耐磨防护装置

破碎齿、衬板等易损部件的磨损速率直接影响设备使用寿命，耐磨防护装置通过材料强化与结构优化，降低磨损损耗。目前应用较广的包括表面强化装置与结构防护装置。

表面强化装置主要通过堆焊、喷涂等技术提升部件表面耐磨性。堆焊装置将高硬度合金材料堆焊于破碎齿表面，形成耐磨层，但其堆焊层与基体结合强度受工艺影响较大，易出现剥落；热喷涂装置通过等离子喷涂技术在衬板表面形成陶瓷涂层，硬度可达 HV1000 以上，但涂层厚度均匀性难以控制，局部磨损后需整体更换。

结构防护装置采用可更换式耐磨组件设计，如将破碎齿设计为模块化结构，磨损后仅更换齿头即可，无需更换整个齿体；在衬板表面设置仿生凸台结构，减少物料与衬板的直接摩擦，但其结构设计需匹配具体物料特性，通用性较差。

### （四）智能监测预警系统

智能监测预警系统通过多维度监测设备运行参数，实现故障的提前预判与预警，属于主动防护技术。该系统通常由传感器、数据传输模块、控制器与预警终端组成，监测参数涵盖温度、振动、噪声等。

温度监测多采用热电偶传感器，实时监测轴承、电机等部件温度，当温度超过 80℃ 时发出预警，但单点监测难以反映部件整体温度分布；振动监测采用加速度传感器，通过分析振动频率判断部件磨损状态，可提前 1-2 天预警故障，但易受设备运行工况波动影响；噪声监测通过声级计采集设备运行噪声，异常噪声（如金属撞击声）出现时触发预警，但其在高噪声生产环境中辨识度较低。目前多数监测系统仅能实现单一参数监测，多参数融合分析能力不足，预警准确率有待提升。

## 二、保护系统与装置关键技术研究

针对现有保护技术的不足，行业通过传感技术升级、控制算法优化与结构创新，推动保护系统与装置向精准化、智能化方向发展，以下从核心技术优化方向展开研究。

### （一）过载保护系统的精准控制技术

1. 多参数融合监测技术：整合电流、扭矩、振动三项参数构建过载判断模型，通过加权算法计算综合负载系数。当电机电流超过额定值的 120%、扭矩超过阈值的 110%，且振动频率异常时，判定为真实过载，避免单一参数监测的误判。采用高精度霍

尔电流传感器与应变片扭矩传感器，监测精度分别提升至  $\pm 0.5\%$  与  $\pm 1\%$ 。

2. 自适应响应控制技术：开发分级响应控制策略，轻度过载（负载系数 1.1–1.3）时，控制器控制喂料机降低进料速度；中度过载（1.3–1.5）时，启动液压推杆压缩缓冲弹簧，吸收冲击载荷；重度过载（ $> 1.5$ ）时，立即切断电机电源并触发报警。响应时间缩短至 0.05 秒，较传统电控系统提升 50%。

3. 故障自恢复技术：在切断电源后，系统自动记录过载时刻的物料位置与负载数据，待故障排除后，控制齿辊低速反转至安全位置，再恢复正常运行，减少人工干预时间。

### （二）异物检测与清除的智能升级技术

1. 多模态异物识别技术：融合机器视觉与毫米波雷达技术，构建异物识别系统。机器视觉采用工业级高清摄像头（分辨率  $1920 \times 1080$ ）与 YOLOv8 算法，识别非金属异物；毫米波雷达穿透粉尘干扰，识别金属异物，二者数据融合后识别准确率提升至 98% 以上。

2. 自适应清除执行机构：开发液压驱动的多自由度拨料机械臂，根据异物位置与尺寸，通过 PID 算法控制机械臂运动轨迹，精准将异物拨至专用排料通道。针对大型异物，联动齿辊实现间歇性反转，配合机械臂完成清除，清除成功率达 95%。

3. 进料预判调控技术：在进料口设置激光测距传感器，实时监测进料量与物料块度，当检测到超尺寸物料时，提前控制进料挡板调整物料下落位置，避免直接冲击破碎齿，降低卡阻风险。

### （三）耐磨防护装置的性能优化技术

1. 梯度耐磨材料复合技术：采用“基体层 + 过渡层 + 耐磨层”的三层复合结构，基体层选用韧性优异的 Q355 钢，过渡层采用镍基合金，耐磨层采用 WC-Co 硬质合金。通过真空扩散焊接技术实现层间冶金结合，结合强度达 350MPa 以上，耐磨性能较传统堆焊层提升 2 倍。

2. 仿生结构防护设计：模仿穿山甲鳞片结构，在衬板表面设计弧形凸台阵列，凸台高度 5–8mm，间距 10mm，使物料在破碎过程中形成滚动摩擦，减少滑动磨损。经试验，采用仿生结构的衬板使用寿命延长 40%。

3. 磨损状态实时监测技术：在破碎齿与衬板内部嵌入电阻式磨损传感器，当磨损量达到预设阈值（通常为设计厚度的 70%）时，传感器电阻值发生突变，系统立即发出更换预警，避免因过度磨损导致设备损伤。

### （四）智能监测预警系统的集成创新

1. 多源数据融合平台：采用工业互联网网关，将温度、振动、噪声、磨损等监测数据统一接入云平台，通过边缘计算对数据进行预处理，剔除干扰信号，数据传输延迟控制在 100ms 以内。

2. 故障预测算法开发：基于长短期记忆神经网络（LSTM）构建故障预测模型，利用历史运行数据与故障案例训练模型，可提前 3–5 天预测轴承磨损、电机过热等故障，预测准确率达 92%。

3. 可视化运维界面：开发 B/S 架构的运维界面，实时显示设备运行参数、保护装置状态与故障预警信息，支持远程查看与操

作，当出现紧急故障时，通过短信、APP 推送等方式同步通知运维人员。

## 三、保护系统与装置的应用案例分析

### （一）过载与异物保护系统在煤矿分级破碎中的应用

某煤矿的分级破碎设备处理原煤时，频繁因混入的废钢、大块矸石引发过载卡阻，年均停机时间达 240 小时，电机烧毁事故 2–3 起。为解决该问题，采用“多参数过载保护 + 多模态异物检测”综合方案：安装电流、扭矩、振动三合一传感器，构建分级响应系统；在进料口设置机器视觉与毫米波雷达融合检测装置，配备多自由度拨料机械臂。

应用后，系统对金属与非金属异物的识别准确率达 99%，异物清除成功率达 96%，过载误判率从 15% 降至 2%。设备年均停机时间减少至 60 小时，电机烧毁事故零发生，年维护成本降低 80 万元，生产效率提升 18%。

### （二）耐磨防护装置在建筑固废破碎中的应用

某建筑固废处理厂的分级破碎设备，衬板与破碎齿因受混凝土块、钢筋的冲击磨损，每月需更换 1 次，维护成本高昂且影响生产连续性。采用梯度复合耐磨材料与仿生结构优化方案：破碎齿采用 WC-Co / 镍基合金 / Q355 钢复合结构，衬板采用鳞片式仿生凸台设计，并嵌入磨损传感器。

改造后，破碎齿使用寿命从 30 天延长至 90 天，衬板使用寿命从 45 天延长至 120 天，磨损预警准确率达 100%，避免了因过度磨损导致的设备振动故障。年均更换次数从 12 次降至 4 次，维护成本降低 65%，设备运行稳定性显著提升。

### （三）智能监测预警系统在金属矿破碎中的应用

某铜矿山的分级破碎设备因地处偏远矿区，运维人员难以及时发现设备异常，常出现“小故障拖成重大事故”的情况，单次故障修复成本超 50 万元。部署多源数据融合监测预警系统：在电机、轴承等关键部件安装温度、振动传感器，接入云平台，采用 LSTM 算法进行故障预测。

系统运行后，成功提前 4 天预测轴承润滑失效、提前 3 天预警电机线圈老化等故障 5 起，均在故障发生前完成维护，避免了设备停机损失。设备年均故障修复成本从 200 万元降至 80 万元，运维响应效率提升 70%，实现了从“事后维修”到“预测性维护”的转变。

## 四、存在的问题与发展展望

### （一）当前存在的主要问题

尽管分级破碎设备保护系统与装置已取得显著进步，但在实际应用中仍面临诸多挑战：一是多系统协同性不足，过载保护、异物检测等系统多独立运行，数据未实现深度融合，易出现防护漏洞；二是极端工况适配性差，在高温（ $> 60^{\circ}\text{C}$ ）、高粉尘（浓度  $> 50\text{mg}/\text{m}^3$ ）、强振动（加速度  $> 5\text{g}$ ）的恶劣环境中，传感器精度下降、装置故障率升高；三是成本与性价比失衡，智能保

护系统的初始投入较传统系统高出 3-5 倍，中小规模企业难以承受；四是标准化程度低，不同厂家的保护装置接口不统一，后期升级与维护兼容性差。

### （二）未来发展展望

1. 一体化智能防护系统：构建“感知 - 决策 - 执行”一体化平台，整合过载保护、异物检测等功能，通过数字孪生技术模拟设备运行状态，实现多系统的协同控制与精准干预。开发通用数据接口，实现不同厂家装置的互联互通。

2. 极端工况适配技术：研发耐高温、抗粉尘的特种传感器，采用陶瓷封装与激光清洁技术，提升传感器在恶劣环境中的稳定性；优化装置机械结构，采用抗振动的缓冲设计，降低冲击载荷对装置的影响。

3. 低成本轻量化方案：通过模块化设计简化系统结构，采用国产替代元器件降低硬件成本；开发针对中小规模企业的经济型版本，保留核心防护功能，降低初始投入门槛。

4. 无人化运维技术：结合无人机巡检与机器人维护，实现保护装置的自动检测与故障修复；开发 AI 运维算法，通过大数据分析优化维护周期，进一步降低人工成本。

5. 绿色节能升级：采用低功耗传感器与节能型执行机构，降低保护系统的能耗；通过精准防护减少设备故障，间接降低生产

过程中的能源浪费，实现环保与高效的协同。

## 五、结论

分级破碎设备保护系统与装置是保障设备安全运行、降低生产成本、提升生产效率的核心技术支撑，其性能优劣直接关系到企业的生产效益与作业安全。本文通过对过载保护、异物检测与清除、耐磨防护及智能监测预警等主流保护技术的研究表明，各技术均存在优势与局限，通过多参数融合、智能算法优化与结构创新，可显著提升防护性能：过载保护系统通过分级响应控制实现精准防护；异物检测系统借助多模态识别与自适应清除提升成功率；耐磨装置通过材料复合与仿生设计延长使用寿命；智能监测系统依托数据融合与预测算法实现主动预警。

应用案例证实，优化后的保护系统与装置可有效减少设备故障停机时间 30%-70%，降低维护成本 40%-65%，显著提升生产效益。针对当前存在的协同性不足、适配性差、成本高、标准化低等问题，未来应重点发展一体化智能防护、极端工况适配、低成本方案、无人化运维与绿色节能技术，推动保护系统向更精准、更可靠、更经济的方向发展，为分级破碎设备的高效稳定运行提供全方位保障。

## 参考文献

- [1] 任瑞生. 分级破碎机联轴器失速保护装置的改进 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(S1): 154-156. DOI: CNKI: SUN: MKSJ.0.2018-S1-049.
- [2] 史月鹏. 分级破碎机电气控制应用分析 [J]. 能源与节能, 2019, (03): 165-166. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2019.03.072.
- [3] 刘侠. 分级破碎机中电气控制技术的运用思考 [J]. 现代信息科技, 2018, 2(12): 156-158. DOI: CNKI: SUN: XDXK.0.2018-12-058.
- [4] 李朋. 分级破碎机失速保护装置的技术改造 [J]. 煤矿机械, 2017, 38(09): 106-107. DOI: 10.13436/j.mkjx.201709040.
- [5] 元愈. 双齿辊分级破碎机保护系统的研究探讨 [J]. 煤炭技术, 2014, 33(07): 177-179. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2014.07.065.



# 地下矿山开采技术的创新与发展趋势研究

江定富

四川乐山 614000

DOI:10.61369/ERA.2025120024

**摘 要：** 地下矿山开采技术包括多种方法，各有特点。同时面临岩爆、通风等问题。5G+ 等智能化技术带来新可能，还有岩层控制等创新技术。生态扰动控制、能源协同优化等也很重要。呈现多技术融合、协同化发展和产业链整合创新趋势，正朝智能化、绿色化、协同化方向发展。

**关 键 词：** 地下矿山开采；技术创新；智能化

## Research on The Innovation and Development Trends of Underground Mining Technology

Jiang Dingfu

Leshan, Sichuan 614000

**Abstract：** Underground mining techniques include various methods, each with its own characteristics. At the same time, it is confronted with problems such as rockburst and ventilation. Intelligent technologies such as 5G+ bring new possibilities, as well as innovative technologies like rock strata control. Ecological disturbance control and energy collaborative optimization are also very important. It is showing a trend of multi-technology integration, collaborative development and industrial chain integration and innovation, and is moving towards intelligence, greenness and collaboration.

**Keywords：** underground mining; technological innovation; intelligentization

### 引言

随着我国2020年提出的《新能源汽车产业发展规划（2021 – 2035年）》等一系列推动科技进步和产业升级的政策发布，科技在各行各业的应用不断深入。地下矿山开采领域也不例外，其开采技术正朝着智能化、绿色化、协同化方向发展。钻孔爆破法等传统技术不断改进，5G + 远程操控系统等智能化技术逐渐应用，同时注重生态扰动控制和能源协同优化，在岩层控制、安全防护、综合防控等方面也不断创新，还面临标准完善和人才培养等关键问题，需构建良好生态体系以促进发展。

### 一、地下矿山开采技术现状分析

#### （一）现有技术体系概述

地下矿山开采技术主要包括钻孔爆破法、空场采矿法和填充采矿法等。钻孔爆破法是一种常用的传统开采技术，通过钻孔、装药和爆破等工序，将矿石破碎并开采出来。其技术特点是操作简单，但对爆破参数的控制要求较高，以确保开采安全和效率<sup>[1]</sup>。空场采矿法主要适用于矿体稳固的矿山，该方法通过留设矿柱支撑采空区，以减少地表塌陷的风险。这种方法能够有效提高矿石回收率，但对矿柱的设计和维护要求严格。填充采矿法是在采空区填充合适的材料，以控制地压和防止地表塌陷。该方法能提高开采安全性，但填充成本较高，且填充材料的选择和填充工艺的优化是关键问题。在机械化装备配置方面，全球主要矿企不断推进采矿设备的升级换代，提高开采效率和安全性，但不同矿企之间存在一定差异。

#### （二）技术应用痛点解析

地下矿山开采随着深度增加，岩爆风险加剧，这对开采安全构成严重威胁。由于深部岩体应力集中，能量积聚，在开采扰动下易发生岩爆，给人员和设备带来极大危险<sup>[2]</sup>。通风系统效能不足也是一大痛点，随着开采深度和范围的扩大，通风阻力增大，通风困难，有害气体难以排出，良好的通风环境难以保障，影响作业人员健康和生产效率。复杂矿体的三维建模精度有待提升，矿体形态复杂多样，现有的建模技术难以精确呈现其真实结构，导致开采设计不合理，资源回收率降低。

### 二、开采技术创新方向研究

#### （一）智能化技术突破

5G+ 远程操控系统为地下矿山开采带来新的可能。它凭借低延迟、高带宽的特性，实现了对开采设备的精准远程控制<sup>[3]</sup>。操

作人员可在安全区域对井下设备进行实时操控,极大提高了作业安全性。智能凿岩机器人是智能化开采的关键设备。它具备自主定位、钻孔规划和自动钻孔等功能,能适应复杂的井下环境,提高凿岩效率和质量。AI 矿石分选技术通过对矿石图像或其他特征的智能识别,快速准确地筛选出有用矿石,减少了人工分选的工作量和误差,提高了矿石的回收率和品位。这些智能化技术的突破,正推动地下矿山开采向无人化作业迈进。

## （二）岩层控制技术创新

微震监测-数值模拟联动支护系统是岩层控制技术的创新方向之一。该系统通过微震监测技术实时获取岩层破裂信息,再利用数值模拟技术对岩层变形和应力分布进行分析预测,从而实现支护结构的动态设计和优化。相位控制爆破技术也是重要创新点,它通过精确控制爆破的相位和时间间隔,能够有效降低爆破对围岩的扰动,提高围岩的稳定性。新型快凝填充材料的应用为岩层控制提供了新的手段,它具有快速凝固、高强度等特点,能够及时填充采空区,支撑围岩,防止岩层变形和垮塌<sup>[4]</sup>。这些创新技术的应用将有助于提高地下矿山开采的安全性和效率。

## 三、环境安全技术发展

### （一）绿色开采技术体系

#### 1. 生态扰动控制技术

采矿活动不可避免地会对生态环境造成扰动,因此生态扰动控制技术至关重要。对于采矿扰动预测模型,需综合考虑地质条件、开采工艺等多种因素,通过建立精确的数学模型来预测开采过程中可能出现的地表变形、岩层移动等情况<sup>[5]</sup>。地下采空区生态修复技术则是针对采空区造成的生态破坏问题,采用如充填、植被恢复等方法,改善采空区的生态环境。多级废水循环系统的构建,能够对矿山开采过程中产生的废水进行有效处理和循环利用,减少水资源的浪费和对环境的污染。这些生态扰动控制技术相互配合,共同推动绿色开采技术体系的发展,实现地下矿山开采与环境保护的协调共进。

#### 2. 能源协同优化

地下矿山开采过程中,能源协同优化至关重要。一方面,井下地热回收技术可有效利用地热资源,将其转化为可用能源,减少对传统能源的依赖<sup>[6]</sup>。通过合理的地热采集装置和转换系统,实现地热能资源在矿山生产中的高效利用。另一方面,光伏储能供电技术为矿山提供了清洁的电力来源。利用矿山的闲置空间安装光伏板,将太阳能转化为电能并储存起来,确保在不同时段都能满足矿山的用电需求。同时,通风余热再利用技术也不容忽视。通风系统排出的余热可以被回收,用于预热空气或其他需要热能的环节,提高能源的综合利用效率,实现能源在地下矿山开采中的协同优化。

### （二）本质安全技术发展

#### 1. 灾害防控体系

构建包含多元传感网络、灾害模拟推演平台、智能避险系统的综合防控机制对地下矿山开采至关重要。多元传感网络可实时

监测矿山环境参数,如温度、湿度、有害气体浓度等,为灾害预警提供数据支持<sup>[7]</sup>。灾害模拟推演平台利用采集的数据,结合矿山地质结构等信息,模拟可能发生的灾害情况,如塌方、透水等,帮助制定应对策略。智能避险系统则能在灾害发生时,为矿工提供准确的避险路线指引,提高矿工的生存几率。通过综合应用这些技术,可有效提升地下矿山的灾害防控能力,保障矿山生产安全和人员生命安全。

#### 2. 人机协同防护

随着科技的不断进步,人机协同防护在地下矿山开采中得到了进一步发展。例如研发出矿工生命体征智能手环,它能够实时监测矿工的身体状况,如心率、血压等重要指标,一旦出现异常情况可及时发出警报,为矿工的生命安全提供保障<sup>[8]</sup>。AR 辅助维修系统则利用增强现实技术,帮助维修人员更直观地了解设备的故障情况,提高维修效率和准确性。应急救援机器人可在危险环境下代替人类进行救援工作,减少人员伤亡。这些安全装备的研发和应用,不仅提高了矿山开采的安全性,也体现了人机协同防护在本质安全技术发展中的重要作用。

## 四、技术发展趋势预测

### （一）核心技术演进方向

#### 1. 数字孪生应用深化

BIM+GIS 三维可视化及实时数据镜像技术在地下矿山开采过程全要素管理中具有广阔应用前景。BIM 可构建矿山三维模型,精准呈现地质结构、矿体分布等信息,为开采设计提供可靠依据<sup>[9]</sup>。GIS 能整合地理空间数据,分析矿山周边环境及开采影响。二者结合实现对开采过程全面直观展示与分析。实时数据镜像技术可实时获取并反馈开采现场数据,如设备运行参数、人员位置等,使管理人员能及时了解开采动态,进行精准决策与调控,提高开采效率与安全性,推动地下矿山开采技术向智能化、可视化方向发展。

#### 2. 极限条件开采突破

深部地压调控技术方面,随着开采深度增加,地压问题愈发复杂,未来将朝着精准监测与智能调控方向发展。借助先进的传感器和数据分析技术,实时获取地压变化信息,进而实现对开采过程的动态调整,确保开采安全与高效<sup>[10]</sup>。超低温环境采矿装备需适应极寒条件,未来可能在材料科学和制热技术上取得突破,提高装备的耐寒性和可靠性。深海采矿机器人技术将重点关注机器人的抗压性、灵活性和智能化程度。通过优化结构设计和控制系统,使其能在深海高压环境下精确作业,同时具备自主决策和自适应能力,以应对复杂的海底开采环境。

### （二）协同化发展模式

#### 1. 多技术融合路径

随着科技的不断进步,地下矿山开采技术呈现出多技术融合的趋势。自动驾驶卡车与5G 通讯的融合,可实现车辆的高效、精准运行,5G 的低延迟和高带宽特性确保卡车能实时接收指令并反馈数据。物联网传感与大数据分析相结合,能对矿山环境和设备

状态进行全方位监测，通过传感器收集大量数据，再利用大数据分析挖掘有价值信息，为决策提供支持。数字孪生技术与区块链溯源的融合也具有重要意义，数字孪生可创建矿山的虚拟模型，模拟开采过程，区块链则可确保数据的真实性和不可篡改，为矿山生产的溯源和管理提供可靠保障。

### 2. 产业链整合创新

随着科技的不断进步，地下矿山开采技术在协同化发展和产业链整合创新方面呈现出显著趋势。在协同化发展模式上，采矿、选矿、冶炼各环节的协同合作将更为紧密。通过构建智能系统，实现各环节数据的实时共享与交互，提高整体生产效率。例如，采矿环节的地质数据能及时传递给选矿和冶炼部门，以便其提前做好准备。在产业链整合创新方面，将朝着一体化方向发展。打造矿山全生命周期管理平台，涵盖从矿山勘探、开采到闭坑后的生态修复等各个阶段。这不仅能优化资源配置，还能降低环境影响，实现矿山产业的可持续发展。

## （三）标准体系建设

### 1. 智能装备标准

随着地下矿山开采技术的不断发展，智能装备的应用日益广泛。井下防爆智能设备认证标准及数据接口协议统一化至关重要。统一的认证标准可确保设备在井下复杂环境中的防爆性能及安全性，保障人员和设备安全。同时，数据接口协议统一化有利于不同智能设备间的数据交互与协同工作，提高开采效率。

在实施路径方面，应联合行业内相关企业、科研机构及标准制定部门。共同研究并制定符合井下实际工况的防爆智能设备认证标准，涵盖设备的设计、制造、检测等各个环节。对于数据接

口协议，需综合考虑现有设备及未来发展需求，制定通用、兼容性强的协议标准，并通过推广应用不断完善，推动地下矿山开采技术向智能化、高效化发展。

### 2. 安全评价体系

随着地下矿山开采技术的发展，安全评价体系建设至关重要。基于实时监测数据的动态安全评估指标及智能预警阈值的标准化研究是关键方向。通过对开采过程中各种参数的实时监测，如岩石压力、温度、湿度等，建立动态评估指标，能够更准确地反映矿山的安全状况。同时，确定智能预警阈值的标准，当监测数据接近或超过阈值时，及时发出预警，为矿山安全提供保障。这需要综合考虑矿山的地质条件、开采工艺等多种因素，建立科学合理的标准体系。该体系不仅要涵盖现有的开采技术和设备，还要具有前瞻性，能够适应未来技术的发展，确保地下矿山开采的安全与高效。

## 五、总结

地下矿山开采技术正朝着智能化、绿色化、协同化方向发展。需构建“技术创新－标准完善－人才培养”的生态体系以促进其发展。数字孪生技术与新材料应用有望使开采深度超5000米。深部采矿中，地质灾害防控与能源循环利用技术的协同创新至关重要。智能化可提高开采效率与安全性；绿色化符合环保要求；协同化实现多技术融合。完善标准能规范技术应用，人才培养为技术发展提供支撑。未来应持续关注这些关键领域，推动地下矿山开采技术不断创新，实现可持续发展。

## 参考文献

- [1] 张鑫. 基于混合现实地下矿山多源信息融合的路径规划系统研究 [D]. 东北大学, 2021.
- [2] 冯书照. 地下矿山短期出矿计划与装备调度优化技术研究 [D]. 武汉理工大学, 2022.
- [3] 徐涛. 基于 CNN 的矿山开采沉陷灾害预警研究 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [4] 张海燕. 制造业双循环网络嵌入与技术创新研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2022.
- [5] 邵卿. 中国油气开采业的产业震荡与企业生存研究 [D]. 浙江师范大学, 2023.
- [6] 赖建飞. 地下金属矿山智能化开采技术研究 [J]. 建材与装饰, 2021, 17(32): 135-136.
- [7] 黄永胜. 浅析矿山开采技术的创新及安全管理 [J]. 世界有色金属, 2023(12): 54-56.
- [8] 王一. 地下金属矿山开采技术发展趋势探索 [J]. 中国科技纵横, 2021(12): 71-72.
- [9] 杨庆元, 魏诚. 地下金属矿山开采技术发展趋势探索 [J]. 世界有色金属, 2023(1): 46-48.
- [10] 李金昱. 燃气开采系统的技术创新和发展趋势分析 [J]. 石化技术, 2024, 31(03): 128-130.

# 珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制策略

刘芬

广州中地大珠宝检测有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120025

**摘 要：** 介绍珠宝及贵金属检验检测行业特性，强调质量控制的重要性，包括保障消费者权益和市场公信力。对比 ISO 18323 与 GB 11887 标准差异，分析行业质量控制痛点，阐述多种检测技术应用及人员管理措施，提出构建全流程质控策略及质量追溯体系优化思路。

**关 键 词：** 珠宝检测；贵金属检测；质量控制

## Quality Control Strategies for the Jewelry and Precious Metals Inspection and Testing Industry

Liu Fen

Guangzhou Zhongdi Da Jewelry Testing Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** This paper introduces the characteristics of the jewelry and precious metal inspection and testing industry, emphasizing the importance of quality control, including safeguarding consumers' rights and interests and market credibility. Compare the differences between ISO 18323 and GB 11887 standards, analyze the pain points of quality control in the industry, elaborate on the application of various detection technologies and personnel management measures, and propose the construction of a full-process quality control strategy and the optimization ideas of the quality traceability system.

**Keywords：** jewelry testing; precious metal detection; quality control

### 引言

珠宝及贵金属检验检测行业因其高价值属性和严格质量要求而备受关注。2023年发布的相关政策强调了保障消费者权益以及规范行业质量控制的重要性。该行业的检测准确性直接关系到消费者的经济利益和市场公信力。从珠宝的高价值到贵金属的高精度检测需求，都凸显了质量控制的关键作用。同时，ISO 18323与 GB 11887等标准的差异也影响着质量控制策略。此外，仪器校准、人员操作、检测时效性等痛点以及多种检测技术的应用和质量控制体系的构建，都围绕着确保检测结果的准确性和可靠性展开，以适应行业发展需求。

### 一、珠宝及贵金属检验检测行业概述

#### （一）行业特性与质量要求

珠宝及贵金属检验检测行业具有独特的行业特性与严格的质量要求。珠宝具有高价值属性，其价格昂贵，一件珠宝往往蕴含着巨大的经济价值，这就决定了在检验检测过程中不容有失，任何微小的误差都可能导致重大的经济损失<sup>[1]</sup>。同时，贵金属检测对精度要求极高，因为贵金属的含量及纯度直接影响其价值，即使是极小的偏差也可能使贵金属的价值产生巨大变化。例如，在黄金检测中，纯度的细微差异会在市场交易中体现出明显的价格波动。因此，该行业必须具备高精度的检测设备和专业的技术人员，以确保检测结果的准确性和可靠性。

#### （二）质量控制核心价值

珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制至关重要。精确的检测结果可确保消费者权益得到保障。当检测误差得到有效控制

时，消费者能获得准确的产品信息，避免因错误信息而遭受经济损失<sup>[2]</sup>。同时，这也有助于维护市场公信力。在市场中，消费者对产品质量的信任建立在准确的检验检测基础之上。若检测结果不准确，可能导致消费者对整个市场失去信心，影响行业的健康发展。而高质量的质量控制能够为市场提供可靠的检测数据，增强消费者对市场的信任，促进珠宝及贵金属市场的稳定繁荣。

### 二、质量控制体系现状分析

#### （一）国际标准框架比较

ISO 18323珠宝命名规范与 GB 11887 贵金属纯度标准存在多方面差异<sup>[3]</sup>。ISO 18323主要聚焦珠宝的命名，确保全球统一的命名规则，以避免因命名不同导致的市场混乱。它详细规定了珠宝中各种成分的命名方法和相关术语。而 GB 11887侧重于贵金属纯度标准，对金、银、铂等贵金属的纯度界限、标识方法等作出严



格规定。在适用范围上，ISO 18323适用于各类珠宝产品的命名，GB 11887主要针对贵金属及其制品。这些差异反映了不同标准制定的侧重点，也影响着珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制策略。

**（二）实施痛点诊断**

珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制体系存在多方面实施痛点。仪器校准方面，误差问题较为突出，校准不及时或不准确可能导致检测结果偏差，影响对珠宝及贵金属品质的判定<sup>[4]</sup>。人员操作上，存在偏差情况，可能由于专业知识不足或操作不规范，使得检测过程出现失误，影响最终结果的准确性。在检测时效性上，存在不足，不能及时满足市场快速发展的需求，可能导致检测结果滞后，影响相关业务的开展，例如珠宝及贵金属的交易时间可能因检测时效问题而延迟，增加成本和风险。

**三、关键检测技术质量控制**

**（一）光谱分析技术**

**1. LIBS 检测精度控制**

激光诱导击穿光谱（LIBS）技术在珠宝及贵金属检验检测中具有重要应用，其检测精度控制至关重要。为确保检测精度，需制定合理的参数优化方案。一方面，要考虑激光能量参数，合适的激光能量能够激发足够的等离子体信号，同时避免过度激发导致的信号不稳定和样品损伤<sup>[5]</sup>。另一方面，优化脉冲宽度、频率等时间参数也很关键，这些参数会影响等离子体的形成和演化过程，进而影响光谱信号的质量和检测精度。此外，还需关注光谱仪的分辨率、波长范围等参数，确保其能够准确采集和分析等离子体发射的光谱信号，从而为珠宝及贵金属的成分分析和鉴定提供可靠的数据支持。

**2. X 射线荧光核查标准**

建立贵金属成分 XRF 分析的标准化流程，对于珠宝及贵金属检验检测行业至关重要。首先需明确仪器设备的标准参数设置，确保其准确性和稳定性，包括 X 射线管的电压、电流等关键参数的合理设定<sup>[6]</sup>。同时，要对样品制备过程进行规范，保证样品的均匀性和代表性，例如确定合适的样品尺寸、形状以及表面处理方式。在检测过程中，应严格按照既定的操作流程进行，包括样品放置位置、检测时间等的一致性控制。此外，还需建立完善的质量控制体系，定期对仪器进行校准和维护，采用标准物质进行验证，确保检测结果的可靠性和可比性。

**（二）物理性能检测**

**1. 显微硬度测试溯源**

维氏硬度计量值溯源体系的构建对珠宝及贵金属检验检测行业至关重要。要从源头把控，确保硬度测试仪器的准确性和可靠性。首先需对仪器进行校准，校准过程应依据相关标准和规范进行，可追溯至国家或国际标准物质<sup>[7]</sup>。同时，要定期对仪器进行维护和核查，确保其性能稳定。操作人员也应具备专业知识和技能，正确操作仪器并记录相关数据。在测试过程中，应注意环境条件的控制，如温度、湿度等，避免环境因素对测试结果产生影响。

只有完善维氏硬度计量值溯源体系，才能为珠宝及贵金属的物理性能检测提供准确可靠的数据支持。

**2. 密度测量误差控制**

在珠宝及贵金属密度测量中，静水称重法是常用方法，但易受环境因素影响产生误差。优化环境补偿算法至关重要。应考虑温度对测量介质（如水）密度的影响，建立温度与水密度的关系模型，对测量结果进行实时修正<sup>[8]</sup>。同时，空气浮力也会干扰测量，需精确测量并计算空气密度，在算法中考虑空气浮力的影响，以提高测量的准确性。此外，测量容器的表面张力和杂质等因素也可能导致误差，要对容器进行严格清洁和处理，并在算法中考虑表面张力的影响，确保密度测量的精度。

**四、全流程质控策略构建**

**（一）人员能力管理体系**

**1. 分级认证制度设计**

构建检测师技能矩阵与分级考核标准是人员能力管理体系中分级认证制度设计的关键。需明确不同等级检测师应具备的技能，涵盖珠宝及贵金属的各类检测方法、仪器操作熟练程度、对相关标准的理解与应用等方面。通过建立技能矩阵，可清晰呈现各等级所需技能的详细要求。同时，设计合理的分级考核标准，考核内容应紧密围绕技能矩阵展开，包括理论知识考核和实际操作考核。理论考核确保检测师对专业知识的掌握，实际操作考核检验其在实际检测工作中的能力。这种基于技能矩阵和分级考核标准的设计，有助于提高检测师的专业水平，确保检测结果的准确性和可靠性，促进珠宝及贵金属检验检测行业的健康发展<sup>[9]</sup>。

**2. 持续教育机制**

为确保珠宝及贵金属检验检测人员的专业能力持续提升，需制定岗位技能持续评估与再培训方案。该方案应包括定期的技能考核，通过实际操作、理论测试等方式评估人员对珠宝及贵金属的鉴定、成分分析等技能掌握程度<sup>[10]</sup>。对于未达标的人员，应及时安排针对性的再培训课程。培训内容可涵盖新的检测技术、标准更新以及实践操作中的常见问题解决等。同时，鼓励员工参与行业内的学术交流活动和专业培训讲座，拓宽视野，了解行业最新动态。通过建立这样的持续评估与再培训方案，形成一个良性循环，不断提升人员的专业素养，从而保障珠宝及贵金属检验检测的质量。

**（二）检测设备智能监控**

**1. 物联网校准系统**

在珠宝及贵金属检验检测行业，构建全流程质控策略至关重要。对于检测设备智能监控及物联网校准系统，需开发仪器状态远程监控与智能预警平台。利用物联网技术，实现对检测设备的实时监测，获取设备运行参数。通过大数据分析，对这些参数进行处理，建立设备正常运行的模型。当参数偏离正常范围时，系统能够自动预警。同时，该平台应具备校准功能，依据相关标准对设备进行校准，确保检测结果的准确性。还可实现远程控制，方便技术人员在不同地点对设备进行操作和维护，提高工作效率。

率，保障整个检验检测流程的质量。

2. 大数据比对分析

为确保珠宝及贵金属检验检测的准确性，需构建全流程质控策略。在检测设备智能监控方面，利用先进技术实时监测设备运行参数，确保设备处于最佳工作状态，避免因设备故障导致检测误差。对于大数据比对分析，应收集大量历史检测数据，建立趋势分析模型。通过对不同样本数据的特征提取和比对，挖掘潜在规律。同时，将新检测数据与历史数据进行匹配分析，及时发现异常值。结合设备监控数据与大数据分析结果，综合判断检测结果的可靠性，从而不断优化质控策略，提高行业整体检测水平。

（三）质量追溯体系优化

1. 区块链存证应用

随着珠宝及贵金属检验检测行业的发展，全流程质控策略构建至关重要。其中质量追溯体系优化是关键环节，而区块链存证应用为此提供了新的思路。通过区块链技术，可以设计检测报告的分分布式存储与验证机制。将检测报告的相关数据存储在区块链上，利用其不可篡改的特性，确保数据的真实性和完整性。在质量追溯过程中，无论是原材料的来源，还是检测过程中的各个环节，都能清晰地记录在区块链上。当需要验证检测报告时，相关方可以通过区块链的验证机制快速准确地获取信息，从而提高整个行业的质量控制水平，增强消费者对珠宝及贵金属检验检测结果的信任。

2. 逆向追踪方案

为优化质量追溯体系，构建逆向追踪方案，开发质量问题根源分析的智能诊断系统至关重要。该系统应具备强大的数据采集与分析能力，能够收集从原材料采购到成品检验的全流程数据。通过对这些数据的深度挖掘，利用先进的算法模型，如机器学习算法，精准识别可能导致质量问题的关键因素。同时，系统要建立完善的知识库，存储各类质量问题案例及解决方案，以便在遇到相似问题时迅速提供参考。此外，还需实现与检测设备的无缝对接，实时获取检测数据，确保对质量问题的快速响应和准确诊断，从而有效提升珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制水平。

五、总结

珠宝及贵金属检验检测行业的质量控制至关重要。需构建涵盖人员、设备、技术和管理四维质控体系，人员应具备专业素养和责任心，设备要精准可靠，技术需不断更新，管理要科学规范。同时，区块链与物联网技术在质量溯源方面的协同作用不可忽视，利用区块链的不可篡改特性和物联网的实时监测功能，可实现产品全生命周期的质量追溯。此外，建立动态改进机制是行业可持续发展的关键，根据市场变化和技术发展，不断调整和完善质量控制策略，以适应新的需求和挑战，保障行业的健康稳定发展。

参考文献

[1] 陈思远. 定制化企业过程质量控制的策略研究 [D]. 广东工业大学, 2021.  
[2] 王文倩. Z 检验检测实验室质量管理提升策略研究 [D]. 华北水利水电大学, 2023.  
[3] 陈岚. 电解铝行业电极扁钢的设计开发和质量控制研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2021.  
[4] 裴稼荣. 产品装配质量控制及预测方法研究 [D]. 沈阳理工大学, 2023.  
[5] 余阳. 附子炮制机理及质量控制研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.  
[6] 马婧. 红外光谱检测技术在珠宝检测机构中的应用 [J]. 产业与科技论坛, 2021, 20(22): 37-38.  
[7] 胥小荣, 王照友, 苗育可, 等. 检验检测机构结果质量控制现状及策略分析 [J]. 食品安全导刊, 2022, (03): 49-51.  
[8] 王灵玺, 李丽, 周忠云. 加强食品检验检测质量控制的策略分析 [J]. 食品安全导刊, 2021, (32): 48-50.  
[9] 余志清. 检验检测机构质量控制方法 [J]. 上海轻工业, 2021, 39(05): 36-38.  
[10] 崔强. 食品检验检测的质量控制及细节问题分析 [J]. 中国食品工业, 2025, (06): 68-70.

# 重大工程影响下区域地下水资源承载能力重新评价与优化配置研究

段洛煜

河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450012

DOI:10.61369/ERA.2025120026

**摘要：** 重大工程建设对区域地下水系统产生显著扰动，改变地层结构与水文循环格局，导致地下水资源的时空分布及承载能力发生动态变化。研究以地下水系统演化机理为基础，构建多指标综合评价模型，对工程影响区的地下水承载力进行重新评估，并结合数值模拟与优化配置技术，分析地下水流场变化规律与资源分配策略。结果表明，工程扰动下地下水补排关系与水力梯度显著调整，通过建立动态监测与优化配置体系，可实现地下水资源的科学调控与可持续利用，为区域水资源管理及重大工程规划提供定量化依据。

**关键词：** 重大工程；地下水资源；承载能力；重新评价；优化配置

## Research on Re-evaluation and Optimal Allocation of Regional Groundwater Carrying Capacity Under Major Engineering Impacts

Duan Luoyu

The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau,  
Zhengzhou, Henan 450012

**Abstract：** Major engineering projects significantly disrupt regional groundwater systems, altering geological structures and hydrological cycles, which leads to dynamic changes in the spatiotemporal distribution and carrying capacity of groundwater resources. Based on the evolution mechanisms of groundwater systems, this study constructs a multi-criteria evaluation model to reassess groundwater carrying capacity in project-affected areas. Combined with numerical simulation and optimization techniques, it analyzes flow field variations and resource allocation strategies. Results indicate that groundwater recharge-discharge relationships and hydraulic gradients undergo significant adjustments under engineering disturbances. By establishing a dynamic monitoring and optimized allocation system, scientific regulation and sustainable utilization of groundwater resources can be achieved, providing quantitative support for regional water resource management and major engineering planning.

**Keywords：** major engineering; groundwater resources; carrying capacity; re-evaluation; optimal allocation

## 引言

重大工程的集中建设正在深刻改变区域地表与地下的水文格局。地下水作为维系生态系统稳定与社会经济发展的关键要素，其承载能力受到工程扰动后呈现出新的空间差异与动态特征。单一静态评价方法已难以反映复杂背景下的资源状态。通过对工程活动与地下水系统的耦合机制进行研究，揭示承载力变化规律，建立动态评价与优化配置模型，能够实现地下水资源的科学利用与生态安全保障。这一研究为工程区水资源的协调开发与环境风险防控提供新的思路。

## 一、重大工程扰动下地下水系统变化机理研究

工程开挖、地基处理及防渗体系的建立，使地下含水层的渗透性与补排关系发生重新分配，导致地下水径流方向、流速及补给条件出现偏移。地下结构物的阻隔作用削弱了天然水文联系，

造成局部区域水位抬升或下降，从而引发地下水动力平衡的破坏。此类变化不仅影响水量循环过程，也对溶质迁移、污染物分布及含水层水化学特征产生深层影响，进而改变地下水资源的可持续承载状态。

在复杂地质环境中，重大工程的扰动效应表现出明显的空间



差异性和时间滞后性。地表覆土剥离及地基加固破坏了原有渗流通道,地下围护结构形成的屏障效应使地下水运动由均质状态转变为非均质系统。局部应力场的变化诱发裂隙扩展,促进深层地下水向浅层的渗流,改变了原有水力梯度与压力场分布。伴随降水入渗量减少和人工抽采强度增加,地下水补给与排泄的动态平衡进一步被削弱,区域地下水位下降趋势明显,甚至出现地面沉降与水质恶化的连锁反应。

在重大工程建设区,地下水系统不仅受地质构造与地层特征的控制,还受到工程尺度、施工工艺及防渗措施的综合影响。地铁隧道、地下综合管廊及大型水利枢纽等工程通过改变地下空间结构,影响地下水系统的水文地质单元划分与水动力边界条件。渗流场、应力场与温度场的相互作用,使得地下水系统演化呈现复杂的非线性特征,难以通过传统静态分析进行准确描述。因此,需要在动态监测和数值模拟的基础上揭示重大工程扰动下地下水系统变化机理,为后续承载力评价与资源配置提供科学依据。

## 二、区域地下水资源承载能力影响因素分析

区域地下水资源承载能力的形成与演化受多种自然与人为因素共同控制,其影响因素具有综合性、层次性与时空差异性。在自然条件方面,地质构造是控制地下水赋存与运动的基础因素,不同岩性组合、断裂构造与含水层厚度决定了水文地质单元的储水性能与渗透条件。地貌形态与地表覆盖特征决定了地下水的补给方式与补给量,高程起伏区的渗透径流速度较快,而平原区则表现出补排交换缓慢的特征。气候变化通过影响降水、蒸发和地表径流过程,直接决定了地下水的天然补给强度与水位波动幅度,长期干旱或极端降雨事件都会改变地下水系统的动态平衡。

在水文地质环境中,含水层介质的物理属性对承载能力的影响尤为显著。孔隙度、渗透系数与含水层厚度决定了地下水资源的可开采储量与补给速率。细粒沉积层中水动力条件弱,容易形成滞水区,导致局部水质恶化;而裂隙岩层或砂砾层则具有较强的渗流能力,承载能力受地下补给稳定性影响较大。地下水与地表水的水力联系程度同样是关键变量,强联系系统中水资源转换频繁,补给效率高;而弱联系系统容易形成独立的封闭循环,承载力受限。此外,区域生态系统对水分条件的响应也不可忽视,植被覆盖度、土壤含水性及蒸散过程共同决定了地下水在生态环境中的平衡作用。

在人类活动因素中,重大工程建设、农业灌溉与城市开发是改变地下水承载能力的主要驱动。工程施工扰动地层结构,造成地下水流场重塑;大规模开采导致承压水位下降与漏斗区扩大;城镇硬化地表削弱入渗补给,改变天然径流分配。工业污染源渗漏与农业面源污染引发水质恶化,增加资源恢复难度。地下水利用模式的不合理性使得区域水循环失衡,水量与水质的双重压力削弱了系统的支撑能力。社会经济因素也在潜移默化中影响承载力水平,经济结构调整、用水结构变化及政策调控力度决定了地下水开发与保护的协调程度。

地下水承载能力还与管理技术和监测体系密切相关。监测网络的密度与精度决定了对地下水动态变化的掌握程度,模型模拟与反演技术的发展为动态评价提供支撑。缺乏系统性监测将导致承载力评估偏差,难以及时反映资源变化趋势。现代信息化手段的引入,如遥感反演、地下水数值模拟及人工智能预测模型,使得承载力分析从静态定量向动态优化转变。综合自然要素与社会驱动力的系统分析,可揭示地下水资源承载能力的多维影响机制,为后续重新评价与优化配置奠定基础。

## 三、多指标综合的地下水承载力重新评价方法

多指标综合的地下水承载力重新评价方法是在传统定量分析基础上,融合水文地质、生态环境与社会经济多维因素的系统性研究途径。重大工程建设改变了地下水的流动场与补排格局,使原有承载力评价模型难以准确反映新的水文动态特征。为应对这种复杂变化,需要构建以系统分析为核心的多指标综合评价体系。该体系以地下水量平衡、质量演化和生态需水关系为主线,通过建立指标层、准则层与目标层的多层次结构,综合反映区域地下水系统的稳定性与可持续利用水平。在指标选取方面,常包含地下水补给强度、开采强度、水位变化率、水化学特征指数、生态需水占比及污染风险指数等多维因子,以形成科学、完整的评价框架。

在方法体系构建过程中,量化是核心环节。通过层次分析法、熵权法或主成分分析法确定各指标的权重,使不同维度的影响因素得以统一到同一评价体系中。地下水承载力的计算需结合数值模拟技术,通过求解地下水流动方程,获得在不同工程扰动情景下的水位分布与流量变化,以此为基础量化区域承载力的空间差异。模型建立应考虑边界条件、补给模式、抽采布局及水文地质参数的动态调整,确保计算结果与实际地下水系统响应相吻合。多情景模拟法能够反映不同开发强度和气候变化条件下承载力的变化趋势,为合理制定管理方案提供支撑。

地下水水质是承载力评价中不可忽视的重要维度。重大工程可能引起地下水化学组成的重构,影响溶质迁移与污染物累积。通过水化学监测与地球化学模拟,评估地下水中主要离子、重金属及营养盐的演变趋势,可以揭示水质变化对承载力的制约机制。采用综合水质指数法与污染负荷模型相结合的方式,可对地下水质量进行空间分级,明确优先保护与治理区域。生态指标的引入则使评价体系更具完整性,生态需水量、地下水埋深对植被覆盖度的影响以及湿地补给强度等参数,能够体现地下水系统对生态环境的支撑程度,实现资源与生态双重约束下的综合评价。

在综合分析阶段,采用模糊综合评价法、灰色关联分析或改进的耦合协调度模型,对量化结果进行集成分析,得出承载力等级划分与变化趋势。通过GIS空间分析技术,将评价结果进行可视化表达,揭示不同区域的承载差异与敏感区分布。该方法能够动态反映地下水系统对工程扰动、气候变化及人类活动的综合响应,实现从静态评估向动态监测的转变。多指标综合的地下水承载力重新评价方法不仅能够提高结果的科学性与精度,还能为区



域地下水资源优化配置提供可操作的数据支撑与决策依据。<sup>[1]</sup>

#### 四、基于优化模型的地下水资源配置策略

基于优化模型的地下水资源配置策略以系统工程思想为指导,通过构建多目标、多约束的优化决策体系,实现地下水资源的科学分配与动态调控。重大工程的集中布局导致区域水文循环结构被重塑,地下水与地表水的互馈关系受到干扰,传统的定额式或经验式配置方式难以满足资源安全与生态平衡的双重要求。优化模型的引入使资源配置从静态管理向动态协调转变,能够在约束条件下实现地下水资源量的最优分配与时空匹配。模型设计以水量平衡原理为基础,结合水文地质条件、工程扰动效应、生态需水需求与社会经济用水结构,建立地下水开采与补给的协调方程,形成以效益最大化和风险最小化为目标的优化框架。<sup>[2]</sup>

在模型构建过程中,数学规划方法是核心技术路径。线性规划、非线性规划与多目标规划常被用于描述复杂的地下水配置过程。线性规划模型能够处理区域内多水源联合调度问题,通过约束条件控制地下水抽采量与水位变化幅度,维持系统的水文稳定性。非线性规划适用于存在复杂水文响应关系的情景,可通过迭代求解实现经济效益与生态约束之间的平衡。多目标规划则将经济产出、生态保护与资源安全纳入统一的目标函数体系,通过赋权系数实现多因素协同优化,使配置结果更具综合性与适应性<sup>[3]</sup>。

模拟优化耦合技术的应用进一步提高了模型的实用性。数值模拟模型负责反映地下水系统在不同调度方案下的动态变化,而优化模型通过求解最优抽采策略,实现资源利用效率最大化。两者的耦合可通过迭代运算实现参数反馈与动态调整,使配置结果与地下水系统的实际响应相一致。基于地理信息系统的空间分析技术能够实现配置结果的可视化表达,通过叠加分析识别高风险区、敏感区与潜力区,为管理者提供精细化决策支持<sup>[4]</sup>。

在优化目标设定中,应综合考虑区域经济结构、用水类型与生态敏感程度。农业灌溉区可采用基于需水预测的动态限采模型,工业区可引入水权交易与再生水替代机制,生态功能区应以维持地下水埋深与生态补给稳定为优先约束。通过引入随机优化与模糊约束理论,可在不确定性条件下对地下水配置进行鲁棒性分析,确保方案在不同气候与社会情景下的可行性。基于优化模型的地下水资源配置策略不仅能够实现资源利用的高效协调,还能在工程扰动背景下保持地下水系统的长期稳定,为区域水资源管理提供科学的量化支撑。

#### 五、研究成果在区域水资源管理中的应用与启示

重大工程对区域水文系统造成的扰动使传统的静态管理模式失去有效性,研究成果为动态监测与科学调控提供了技术路径。通过多指标综合评价体系,可实现地下水资源量、质量与生态约束的协同分析,揭示不同区域的水文敏感性与利用潜力。基于数值模拟与优化模型的联合应用,使管理部门能够在多情景下预测地下水系统响应,从而制定符合生态安全与经济发展的分区管控策略。配置模型的输出结果在管理中可用于确定合理开采阈值、控制水位下降速率以及制定地下水保护红线,为水资源分配提供量化依据。

在区域管理实践中,该研究方法推动了地下水管理由经验决策向数据驱动的科学决策转变。通过建立动态数据库与监测网络,可实现地下水位、水质及补给量的实时跟踪,形成“监测—分析—反馈—调控”的闭环管理体系。模型成果还可与地理信息系统相结合,实现空间可视化分析,为不同功能区提供差异化管理策略。农业灌溉区可根据承载力结果调整种植结构与灌溉制度,城市新区可在规划阶段确定地下空间开发强度,工业区可结合优化模型进行水资源调度与再利用设计,从而实现区域整体水循环的协调。<sup>[5]</sup>

研究成果在政策制定层面同样具有应用意义。承载力分区成果可为地下水资源管理制度的完善提供科学依据,为制定取水许可、地下水开采总量控制和生态补偿机制提供技术支撑。优化配置策略能够在保障经济发展的同时兼顾生态补给,实现水资源利用与环境保护的动态平衡。通过模型应用,可将重大工程建设与水资源保护纳入同一管理框架,实现区域水资源的系统化管理与可持续利用,为复杂工程背景下的水资源治理提供可推广的实践启示。

#### 六、结论

重大工程影响下的地下水系统演化表现出复杂性与动态性,研究通过多指标综合评价与优化配置模型揭示了承载力变化规律与调控机制。成果为区域地下水资源的科学配置与生态保护提供了系统方法,为水资源可持续管理奠定了理论与技术基础。综合分析结果能够有效指导重大工程区的水资源利用与管理实践,实现工程建设与生态安全的协同发展。

#### 参考文献

- [1] 王志强,李春燕.重大工程扰动下地下水系统演化机制研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3):45-53.
- [2] 陈建辉,孙晓宁.区域地下水资源承载力动态评价方法研究[J].水资源保护,2023,39(2):78-85.
- [3] 赵宏伟,郭媛媛.基于多指标体系的地下水承载力综合评价模型[J].南水北调与水利科技,2021,19(6):112-120.
- [4] 刘天宇,程浩然.地下水资源优化配置模型及其在区域管理中的应用[J].中国农村水利水电,2024,43(4):95-103.
- [5] 张慧玲,林志鹏.工程扰动区地下水系统模拟与优化配置研究[J].水科学进展,2022,33(1):66-75.

# 基于 BIM 的民航工程族库构建与多维应用研究

李鹏, 袁佳秋, 刘岸新

民航机场规划设计研究总院有限公司华北分公司, 北京 100000

DOI:10.61369/ERA.2025120027

**摘 要 :** 随着我国民航工程向规模化、复杂化发展, 传统设计与管理模式难以满足全生命周期需求, BIM 技术成为关键解决方案, 而 BIM 族库作为技术落地的基础载体, 其标准化构建与应用至关重要。本文以民航工程 BIM 族库为研究对象, 通过文献研究、案例分析与实践验证, 系统探讨族库的建立方法与多维应用。明确族库建立需遵循通用性、规范性等原则, 并阐述参数化设计、信息集成等关键技术; 结合案例分析族库在设计阶段提升建模效率、施工阶段减少返工、运维阶段优化设备管理的具体应用, 研究成果可为民航工程 BIM 族库的推广应用提供理论支撑与实践参考, 助力民航工程数字化转型。

**关 键 词 :** 民航工程; 族库建设; 参数关联; 数据安全

## Research on Construction and Multidimensional Application of BIM Civil Aviation Engineering Family Library

Li Peng, Yuan Jiaqiu, Liu Anxin

Civil Aviation Airport Planning and Design Research Institute Co., LTD. North China Branch, Beijing 100000

**Abstract :** With the scaling and increasing complexity of China's civil aviation engineering projects, traditional design and management approaches struggle to meet lifecycle requirements. BIM technology has emerged as a critical solution, where standardized construction and application of BIM family libraries serve as foundational platforms for implementation. This study focuses on BIM family libraries in civil aviation engineering, systematically exploring their establishment methods and multidimensional applications through literature review, case analysis, and practical verification. The research clarifies that family library development should adhere to principles of universality and standardization, while elaborating key technologies including parametric design and information integration. Case studies demonstrate how family libraries enhance modeling efficiency during design phases, reduce construction rework, and optimize equipment management in operation and maintenance stages. These findings provide theoretical support and practical references for promoting BIM family libraries in civil aviation engineering, facilitating digital transformation in the sector.

**Keywords :** civil aviation engineering; ethnic library construction; parameter association; data security

## 引言

### (一) 研究背景与意义

近年来, 我国民航工程进入规模化发展阶段, 机场航站楼、跑道、货运中心等项目呈现“体量大、系统复杂、协同要求高”的特点。传统二维设计存在信息割裂、碰撞隐患多、运维数据缺失等问题, 难以满足工程全生命周期管理需求。BIM 技术以“参数化建模、全信息集成、多阶段协同”为核心优势, 成为破解民航工程管理难题的关键技术。而 BIM 族库作为 BIM 应用的基础数据载体, 通过标准化、参数化的构件库, 可实现设计效率提升 30% 以上、施工碰撞率降低 40%, 同时为运维阶段提供精准数据支撑, 对推动民航工程数字化转型具有重要现实意义。

### (二) 国内外研究现状

国外方面, 美国联邦航空管理局 (FAA) 早在 2010 年便发布《机场 BIM 实施指南》, 推动族库在航站楼机电系统、跑道铺装等领域的标准化应用; 英国 BAA 集团建立机场专属族库, 实现伦敦希思罗机场 T2 航站楼全周期 BIM 协同。国内研究起步较晚, 但发展迅速: 中国民航局 2020 年印发《民航工程 BIM 技术应用指南》, 明确族库建设要求; 北京大兴机场、上海浦东机场三期工程通过自建族

库，实现设计－施工－运维数据贯通。但现有研究仍存在不足：行业级族库标准缺失，各项目族库兼容性差；族库多聚焦设计阶段，运维阶段应用深度不足；参数化程度低，难以适应民航工程个性化需求。

### （三）研究内容与方法

本研究核心内容包括三方面：一是构建“标准统一、多阶段适配”的民航工程 BIM 族库，明确族库分类、参数体系与建立流程；二是结合实际案例，分析族库在设计、施工、运维阶段的应用路径与实效；三是提出族库推广应用的策略建议，解决标准化、共享化、人才培养等问题。研究方法采用：文献研究法，梳理 BIM 与族库相关理论及行业标准；案例分析法，选取鄂州花湖机场、重庆江北机场 T3A 航站楼等典型项目，总结族库应用经验；实践验证法，通过 Revit 软件构建核心构件族，测试参数化性能与协同效果。

## 一、BIM 技术与民航工程族库理论基础

### （一）民航工程族库相关理论

BIM 族库是由“族（Family）”组成的标准化构件数据库，其中“族”是具有相同参数、属性和行为的构件集合，按层级可分为系统族、标准族、内建族。民航工程族库需结合行业特性分类：航站楼类（幕墙、钢结构、机电设备族）、飞行区类（跑道道面、助航灯光、围界族）、货运区类（货架、输送设备族）。族库的核心价值在于：一是提升建模效率，设计师无需重复建模，直接调用标准族，建模时间减少 50% 以上；二是保障数据一致性，族构件参数统一，避免信息偏差；三是支撑多阶段协同，族库中的构件信息可贯穿设计－施工－运维，实现数据“一次创建，多次复用”。

### （二）BIM 技术与民航工程族库的关系

BIM 技术与族库是“支撑与被支撑”的协同关系：一方面，BIM 软件（如 Revit、Bentley）为族库建立提供工具支持，通过参数化设计功能实现族构件的属性定义与形态调整；另一方面，族库是 BIM 技术落地的基础，缺乏高质量族库，BIM 建模将陷入“重复劳动、信息碎片化”困境。例如，在民航航站楼机电设计中，依托族库的标准化风管族、桥架族，可快速完成管线综合排布，而 BIM 的碰撞检查功能又能反向优化族构件尺寸参数，形成“族库建设－BIM 应用－族库迭代”的闭环。

## 二、基于 BIM 的民航工程族库建立

### （一）族库建立的原则与标准

民航工程族库建立需遵循四大原则：一是通用性，族构件参数设置符合《建筑信息模型应用统一标准》（GB/T51210）及《民航工程 BIM 技术应用指南》，确保跨项目、跨软件兼容；二是规范性，族命名采用“项目类型－构件类别－规格型号”格式（如“航站楼－空调机组－KC-100”），属性字段包含材质、尺寸、厂家、维护周期等核心信息；三是可扩展性，预留参数接口，支持新增构件类型与属性字段；四是准确性，族构件几何尺寸与性能参数需与实际产品一致，误差不超过 2%。

### （二）族库建立的流程与方法

#### 1. 数据收集与整理

数据来源包括三方面：一是行业标准，如《民用机场航站楼

设计规范》（MH/T5026）中构件尺寸要求；二是设备厂家数据，收集空调、电梯、助航灯光等设备的几何参数与性能参数；三是既有项目数据，提取北京大兴机场、上海虹桥机场等项目的成熟族构件参数。数据整理采用“分类编码”方式，按“大类－中类－小类－构件”四级编码（如“01－航站楼－02－机电－05－空调机组”），确保数据有序存储。

#### 2. 族的创建与编辑

采用 Revit 软件进行族创建，流程为：（1）确定族模板，如机电设备选用“公制设备”模板；（2）绘制族几何形态，通过拉伸、旋转等命令构建构件模型，确保几何精度；（3）定义参数，分为类型参数（如尺寸、功率）与实例参数（如安装位置、编号），参数关联几何形态，实现“参数修改－模型自动调整”；（4）测试优化，导入项目模型中测试族构件的兼容性、碰撞检查性能，对参数冗余、几何错误的族进行迭代优化。

#### 3. 族库的集成与管理

采用“云端＋本地”双库管理模式：云端库基于 BIM 协同平台（如广联达 BIMFACE）搭建，实现多单位共享访问，支持族构件上传、下载、版本控制；本地库存储于项目服务器，供设计团队离线使用，定期与云端库同步更新。管理功能包括：版本管理，记录族构件的创建、修改时间与责任人；权限管理，按“管理员－设计师－施工员”分级设置访问权限；检索功能，支持按构件类别、参数值快速检索。

### （三）族库建立过程中的关键技术

一是参数化设计技术，通过 Revit 的“参数关联”功能，实现构件尺寸、材质、性能参数与几何模型的联动，例如修改空调机组“长度”参数，模型自动调整，无需重新建模；二是信息集成技术，采用 IFC 标准格式，将族构件的设计信息、施工信息、运维信息集成到统一模型，实现跨软件（如 Revit 与 Fuzor）数据交互；三是协同管理技术，依托 BIM 协同平台，实现多专业团队实时编辑、评论族构件，解决“信息孤岛”问题，协同效率提升 40%。

### （四）建立族库的难点与挑战

一是标准统一难，民航工程涉及建筑、结构、机电、飞行区等多领域，各领域对族参数的要求不同，行业级标准缺失导致族库兼容性差；二是数据安全风险，云端族库存储大量项目核心数据，存在数据泄露、篡改风险；三是人员技术不足，部分设计师缺乏参数化族创建能力，导致族构件参数设置不合理，影响应用



效果；四是协同机制不完善，设计、施工、运维单位对族库需求差异大，缺乏统一的协同沟通机制，导致族库难以适配多阶段需求。

### 三、基于 BIM 的民航工程族库应用案例分析

#### （一）案例选取与介绍

选取两个典型案例：案例一为鄂州花湖机场（亚洲首个专业货运机场），项目总投资150亿元，采用全周期BIM应用，自建包含6大类、98小类构件的族库；案例二为重庆江北机场T3A航站楼（建筑面积53万平方米），依托族库实现多专业协同设计与施工模拟，族库涵盖航站楼建筑、结构、机电等102小类构件。两个案例均覆盖设计、施工、运维阶段，具有代表性。

#### （二）族库在案例中的具体应用

##### 1. 设计阶段

鄂州花湖机场设计中，调用族库的“货运输送设备族”“货架族”，快速完成货运区三维建模，建模时间从传统20天缩短至8天；通过族库的“机电设备族”（如空调、风机），实现建筑、结构、机电多专业协同，碰撞检查发现管线冲突32处，提前解决率100%。重庆江北机场T3A航站楼设计中，利用族库的“幕墙族”参数化功能，根据不同区域采光需求，调整幕墙玻璃厚度与间距，优化能耗指标，使航站楼年能耗降低12%。

##### 2. 施工阶段

鄂州花湖机场施工中，将族库的“钢结构族”与施工进度计划关联，生成4D进度模拟，直观展示钢结构安装顺序，避免工序冲突；通过族库的“设备族”提取安装参数，制作数字化交底文件，施工人员理解效率提升50%，设备安装合格率从92%提升至98%。重庆江北机场T3A航站楼施工中，利用族库的“管线族”进行施工模拟，优化管线安装路径，减少现场返工量，节省成本约200万元。

##### 3. 运维阶段

鄂州花湖机场运维中，依托族库的“设备族”存储的维护周期、厂家联系方式等信息，建立设备维护计划，实现设备故障提前预警，设备平均无故障时间延长30%；通过族库的“构件族”关联资产信息，实现资产定位与盘点，盘点效率从传统3天缩短至4小时。重庆江北机场T3A航站楼运维中，利用族库的“消防设施族”，实时调取消防设备位置与状态，提升应急响应速度，火灾应急处置时间缩短20%。

#### （三）案例应用中的问题与解决措施

案例应用中存在三大问题：一是数据更新不及时，部分设备族的维护参数未随设备老化更新，导致维护计划不准确。解决措施：建立“设备运行数据-族库参数”联动机制，实时同步设备运行数据，每季度更新一次族库参数；二是族库兼容性差，鄂州花湖机场使用Revit创建的族库，与施工单位使用的Bentley软件存在数据交互障碍。解决措施：采用IFC标准格式导出族构件，搭建数据转换接口，实现跨软件兼容；三是人员使用不熟练，部分运维人员缺乏族库操作能力，难以调取构件信息。解决措施：

开展针对性培训，编制族库操作手册，设置运维人员专属操作界面，简化操作流程。

### 四、基于 BIM 的民航工程族库应用策略与建议

#### （一）加强族库的标准化建设

一是推动行业标准制定，建议民航局联合住建部出台《民航工程BIM族库标准》，明确族库分类、参数体系、编码规则，统一族库数据格式；二是建立族库审核机制，成立行业级族库审核委员会，对企业自建族库进行合规性审核，确保族库符合标准；三是推广标准族库模板，编制航站楼、飞行区等专项族库模板，供项目直接使用，减少重复建设。

#### （二）提高族库的共享与协同水平

一是搭建行业级族库共享平台，整合国内典型民航项目的成熟族库，提供免费或低成本的族构件下载服务，实现资源共享；二是建立多单位协同机制，明确设计、施工、运维单位在族库建设中的职责，设计单位负责族库创建，施工单位补充施工参数，运维单位完善运维信息，形成“共建共享”模式；三是优化协同工具，升级BIM协同平台功能，支持多端（电脑、手机）访问族库，实现实时评论与修改追踪。

#### （三）培养专业的BIM人才队伍

一是完善人才培养体系，在民航类高校开设“BIM族库建设与应用”课程，培养具备参数化设计能力的专业人才；二是开展行业培训，民航局定期组织BIM族库培训，邀请专家讲解族库创建技术与应用案例，每年培训不少于2000人次；三是建立人才激励机制，对在族库建设中表现突出的个人与单位给予奖励，鼓励人才投身族库研究与应用。

#### （四）完善族库的管理与维护体系

一是建立族库管理制度，明确族库的创建、更新、删除流程，规范版本管理与权限管理，避免数据混乱；二是定期维护更新，按季度检查族库构件的准确性，根据行业标准更新、设备迭代、项目需求变化，及时优化族构件参数与类型；三是强化数据安全，采用加密存储、访问日志追踪、备份恢复等措施，保障族库数据安全，防止数据泄露与篡改。

### 五、结论与展望

#### （一）研究成果总结

本研究通过理论分析与案例验证，得出三方面成果：一是构建了“需求分析-数据收集-族创建-集成管理”的民航工程BIM族库建立流程，明确了通用性、规范性等四大建立原则与参数化设计等关键技术；二是验证了族库在民航工程设计、施工、运维阶段的应用价值，可实现效率提升50%以上、成本节约8%-20%；三是提出了标准化建设、共享协同、人才培养、管理维护四大应用策略，为族库推广提供路径参考。<sup>[1]</sup>

#### （二）研究不足与展望

本研究存在两方面不足：一是研究范围聚焦航站楼与飞行



区，对空管工程、油库工程等民航专项工程的族库涉及较少；二是族库的智能化水平有待提升，未结合 AI 技术实现构件参数的自动优化。未来研究可从三方面展开：一是拓展族库覆盖范围，构建涵盖空管、油库等专项工程的全领域族库；二是融合新兴技

术，将 AI、大数据技术融入族库建设，实现构件参数的智能优化与故障的预测性维护；三是推动族库与数字孪生技术结合，建立“族库－数字孪生模型”联动机制，实现民航工程全生命周期的数字化管控。<sup>[2]</sup>

## 参考文献

---

[1] 王伟. 民航机场建设工程全过程 BIM 应用总体策划研究 [J]. 工程建设与设计, 2022(10): 219-222.

[2] 冯磊. BIM 技术在民航机场建设造价中应用探析 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(13): 93-94.

# 道路桥梁过渡段不均匀沉降防治措施探讨

王艳梅

杭州华烨交通工程检测有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2025120030

**摘 要 :** 道路桥梁过渡段因地基刚度差异、施工质量及荷载变化等因素, 易产生不均匀沉降, 导致桥头跳车、结构损伤及行车舒适性下降。为防治此类问题, 需从设计、施工与养护三方面协同优化。设计阶段应注重刚度匹配与合理设置过渡结构; 施工中应加强地基处理与压实控制; 运营期需通过监测与维护减少沉降差异。综合运用柔性铺装、复合加固及排水改良等技术, 可有效提升过渡段的整体稳定性与耐久性, 保障桥梁与道路的安全衔接。

**关 键 词 :** 道路桥梁; 过渡段; 不均匀沉降; 防治措施; 结构稳定性

## Discussion on Preventive Measures for Differential Settlement in Road and Bridge Transition Sections

Wang Yanmei

Hangzhou Huaye Traffic Engineering Testing Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

**Abstract :** Due to differences in foundation stiffness, construction quality, and load variations, differential settlement is prone to occur in road-bridge transition sections, leading to issues such as bridgehead bumping, structural damage, and reduced driving comfort. To prevent and address these problems, coordinated optimization is required across design, construction, and maintenance phases. During the design stage, emphasis should be placed on stiffness matching and the rational arrangement of transition structures. During construction, foundation treatment and compaction control should be strengthened. During the operational period, monitoring and maintenance should be employed to minimize settlement discrepancies. By comprehensively utilizing technologies such as flexible pavement, composite reinforcement, and drainage improvement, the overall stability and durability of transition sections can be effectively enhanced, ensuring safe integration between bridges and roads.

**Keywords :** road-bridge; transition section; differential settlement; preventive measures; structural stability

## 引言

道路与桥梁的连接部位是结构受力最复杂、病害最集中的区域之一, 其中过渡段的不均匀沉降问题尤为突出。长期的交通荷载与环境作用使该区域易出现桥头跳车、裂缝及结构变形, 不仅影响行车安全与舒适性, 还加速路基与桥梁的老化。随着交通量和车辆轴载的不断增加, 如何有效防治过渡段不均匀沉降, 成为道路与桥梁工程领域的重要研究方向, 对提升道路使用寿命和运行品质具有现实意义。

## 一、道路桥梁过渡段不均匀沉降的成因分析

### (一) 地基差异与土体压缩性影响

道路与桥梁结构在基础形式和刚度上存在显著差异, 桥梁通常采用桩基础或扩大基础, 刚度较大, 而路基多为填土结构, 压缩性强。由于两种基础的变形特性不同, 车辆荷载和环境应力作用下, 填土区易发生较大沉降。研究表明, 在一般公路工程中, 桥头路基沉降量可达 20 ~ 60 mm, 而桥台沉降仅约 5 ~ 15 mm, 两者差值过大便形成“桥头跳车”现象<sup>[1]</sup>。若地基未充分固结或压实度低于 95%, 则沉降速率加快, 结构差异进一步扩大, 造成

不均匀沉降累积。此外, 不同土层的压缩模量差异明显, 软土地区若未设置加固层, 其压缩变形量可高出砂土地基约 2 ~ 3 倍。实地观测发现, 在未加固的黏性软土路段, 竣工两年后累计沉降量平均达到 85 mm, 而采用桩-网复合地基加固后的沉降量仅为 32 mm, 说明加固措施对控制早期不均匀沉降具有显著效果。

### (二) 施工工艺与材料控制不当

施工阶段的压实质量、填料选择及分层厚度对沉降稳定性影响极大。部分施工现场存在填料级配不均、压实机械不足或碾压遍数不足等问题, 导致密实度下降。尤其在含水量控制不当, 土体孔隙比增大, 形成滞后沉降<sup>[2]</sup>。试验数据显示, 压实度每降低

1%，可能导致路基累计沉降量增加约8%～10%。此外，使用粉质土或高含水粘土作为过渡段填料，会因湿胀性和剪切模量低，增加不均匀沉降风险。若施工阶段未严格分层碾压或忽视排水处理，雨后地基含水量升高，将进一步引发二次压密沉降。工程监测表明，施工压实度不足可使过渡段五年后沉降量增加约30%，并可能导致台背局部下陷2～3 cm，影响车辆平顺通过与结构受力均衡<sup>[3]</sup>。

（三）荷载与环境因素的综合作用

交通荷载的重复循环与季节性温湿变化也是重要诱因。重型货车频繁通过使得过渡段承受动态应力集中，长期累积造成土体蠕变与塑性变形。温度梯度变化引起材料热胀冷缩，雨水渗透导致地基软化，使结构刚度进一步失衡。实测表明，在重载交通（年平均交通量 $2.5\times10^6$ 辆次）下，过渡段三年累计沉降量可超过80 mm，远高于普通道路的设计允许值。若遇到汛期或冻融循环，沉降速率可提高1.5倍，局部地基甚至出现滑塌或裂缝。此外，地下水位波动亦会改变地基应力状态，使部分粘性土层产生周期性变形。长期作用下，这些环境与荷载效应会叠加形成不可逆沉降累积，导致桥头连接区结构失稳及疲劳损伤加剧，严重影响桥梁的服役寿命与安全性能。不同因素对过渡段沉降影响对比分析如表1所示

表1 不同因素对过渡段沉降影响对比分析

影响因素类型	特征描述	沉降影响幅度（mm）	占总沉降比例（%）
地基差异	桩基与填土刚度不匹配	25 - 40	45
压实质量不足	含水量偏高或压实度 <95%	15 - 25	28
材料性能差	填料湿胀性强	10 - 18	17
环境与荷载	温湿变化与重载循环	8 - 15	10

二、过渡段结构设计优化与刚度匹配策略

（一）合理控制刚度过渡梯度

道路与桥梁连接处的刚度差异是造成沉降不均的重要诱因。为缓解这种“刚柔突变”，应在设计中设置渐变刚度结构体系，实现结构力学性能的连续过渡。常见的设计做法包括分级填料换填、设置碎石垫层、级配砂石层、泡沫混凝土层、水泥稳定碎石层等方法，以构建“柔—半硬—刚”的梯度结构。通过调整不同层次材料的弹性模量，使应力在纵向和深度方向均匀传递，减少界面变形突变。实测数据显示，当刚度梯度控制在1:3～1:5之间时，可将沉降差异降低约40%，结构应力峰值下降25%。此外，桥台背后增设加筋土挡墙、土工格栅加固层或钢筋混凝土抗剪板，不仅提高了填土整体模量和抗滑能力，还能有效分散桥台附加应力。部分重点工程还引入有限元仿真梯度优化法，通过模拟不同模量分布下的变形规律，确定最佳刚度匹配曲线，使沉降控制在设计限值内，保证结构的长期平顺过渡<sup>[4]</sup>。

（二）优化结构型式与材料组合

在结构设计阶段应综合考虑路基模量、桥台刚度、地基承载力及车辆荷载作用，实现刚度协调与变形同步。实践中广泛采用

台背抗滑板、桩网复合地基、CFG桩—碎石桩复合体系等技术，形成“桩—土—台”协同承载的整体结构。试验研究表明，采用直径400 mm、间距1.6 m的CFG桩处理后，地基承载力由180 kPa 提高至320 kPa，沉降量减少约55%。在材料选择上，应优先使用粉煤灰稳定土、水泥改良土、石灰粉砂层或泡沫轻质土，这些材料具有高抗剪强度、低渗透系数及优良的冻融稳定性。经对比分析，改良土基底的回弹模量可提升至180～220 MPa，显著优于传统填料。通过多层复合与合理材料匹配，路桥过渡段的结构模量差可从原来的1:8降低至1:2.5，有效提升整体协调性和抗沉降能力。

（三）完善排水与防渗系统设计

排水不畅是诱发二次沉降、滑移及结构失稳的主要隐患。设计中应在桥头与路基结合处建立纵横向排水网络体系，包括反滤层、盲沟、透水垫层、集水井、边沟导排及出水渠等设施，确保雨水与地下水可顺畅排出。根据试验研究，当排水系数控制在 $\geq 1.5\times10^{-4}$  cm/s 时，地基孔隙水压力可降低30%～35%，沉降速率下降20%～25%。在防渗设计上，应在桥台背后及两侧设置HDPE防水膜、复合土工布或膨润土防渗垫层，形成封闭式防渗屏障，防止地下水渗入及毛细作用引发软化破坏。近年来，一些智能化工程已采用物联网渗流监测系统，可实时采集水位、渗流量及含水率变化，利用AI模型预测潜在渗漏趋势<sup>[5]</sup>。通过建立“高效排水—精准防渗—智能预警—主动干预”的综合体系，过渡段地基长期稳态率提高约50%，结构使用寿命延长超过10～15年，真正实现了工程安全与可持续维护的统一。

三、施工过程控制与地基加固关键技术

（一）分层填筑与压实质量控制

施工阶段是防治不均匀沉降的关键环节，分层填筑与压实质量直接决定过渡段的长期稳定性与承载性能<sup>[6]</sup>。为确保结构密实与应力分布均匀，应严格控制每层填土厚度在25～30 cm之间，采用重型压路机或振动碾压设备，并结合双向交错碾压工艺，保证密实度一致性。压实度标准应达到 $\geq 96\%$ （重载公路建议达到98%），含水量控制在最佳含水量 $\pm 2\%$ 范围内，确保填料颗粒间结合紧密、孔隙率合理。现场应进行分层检测与质量抽查，检测方法包括灌砂法、环刀法、核子密度仪法等，每100 m<sup>2</sup>至少布点2～3个，确保数据具有代表性。研究表明，当压实度由94%提升至98%时，累计沉降量可减少约35%，有效提高路基整体刚度与变形协调性。

（二）地基处理与加固技术应用

地基承载力不足是造成过渡段不均匀沉降的核心原因之一。针对不同地质条件，应采用分层强化与多手段联合加固策略，形成复合地基结构体系。在软弱地基区域，可采用CFG桩（直径400 mm，间距1.5～1.8 m）、振冲碎石桩、强夯法等方式增强承载力。试验结果显示，CFG桩加固后地基承载力可由原来的150 kPa 提升至 $300\pm 20$  kPa，不均匀沉降幅度减少约55%～60%。在湿陷性黄土地段，应采用预浸水—灰土垫层复合法处理，消除

湿陷潜势并提高填层稳定性。同时，可在桥台背后设置加筋土挡墙、钢筋混凝土抗剪板或桩-土复合承载结构，通过桩体与土体的协同变形分担荷载，从而降低应力集中，提升结构整体抗剪与抗压性能。

（三）施工监测与动态调整机制

施工过程中应建立全过程动态监测与反馈调控体系，实现沉降、应力与孔隙水压力的精准掌控。监测设备包括静力水准仪、沉降板、倾斜仪、孔隙水压力计及应变计，以获取地基变形与压实过程的实时数据。数据采集频率建议为每24小时一次，关键阶段（如填土高度超过3 m或桩基施工完毕）应加密监测。当沉降速率超过设计限值（ $>2\text{ mm/d}$ ）或地基孔隙水压力异常升高时，应立即暂停施工，调整填筑速率或扩大加固范围。部分工程已应用BIM+物联网+无人机测绘集成系统，可实时生成三维地基沉降模型，实现预测性预警<sup>[9]</sup>。实践表明，该系统可将施工沉降异常率降低约40%，显著提升过渡段施工的安全性与控制性。

四、不均匀沉降的监测、养护与综合防治措施

（一）动态监测体系的构建与数据分析

不均匀沉降的防治离不开全过程的动态监测体系。应在过渡段关键位置布设沉降板、静力水准仪、位移计、应变计、孔隙水压力计与倾斜仪等多类型监测设备，对沉降量、沉降速率、结构应力及地基应变进行多维监测。监测点应沿桥台向道路方向布设5~8个观测断面，横向间距2~5 m，以获取沉降梯度变化规律。数据采集频率建议在施工期每日一次，运营期每月不少于两次，并结合气候变化或荷载增大时加密监测<sup>[7]</sup>。实践结果表明，当沉降速率超过 $2\text{ mm/d}$ 或累计沉降达到设计限值的1.2倍时，应立即启动黄色预警并采取措施。借助BIM+GIS+物联网监测平台，可实现沉降数据的实时上传、可视化分析及趋势预测。通过建立时序分析模型与多源融合算法，能提前7~10天预测异常变化，为后期维护提供精确化决策依据。

（二）养护维修技术与周期性维护策略

运营期的科学养护是延缓沉降发展的关键环节，应实行“早发现、早干预”的维护策略。针对轻微沉降差异（ $<20\text{ mm}$ ），可采用热拌沥青再生补强层、微膨胀注浆平衡层或超薄罩面技术

进行局部修复，以恢复表面平整度。当沉降差异超过 $40\text{ mm}$ 时，应实施高压注浆加固或深层搅拌桩补强，在不影响交通的前提下提升结构承载性能。工程试验表明，采用水泥-粉煤灰-砂浆（1:0.5:1.5）注浆工艺后，过渡段地基承载力平均提高35%，路面平整度提升45%，变形协调性增强30%。为防止次生沉降，应建立年度巡检与季度抽查制度，重点检测纵断高程变化、裂缝宽度及压实度衰减情况。建议重载交通道路每6个月进行一次结构性评估，每3年实施一次系统性加固或材料更新。配合高精度三维激光扫描与无人机航测技术，可快速建立沉降变化模型，实现量化评估与精细化修复<sup>[9]</sup>。

（三）综合防治与智慧化养护管理

综合防治需实现“设计预防-施工控制-智能监测-动态养护”的全周期协同机制。设计阶段应注重结构刚度匹配、材料选择与排水系统完善；施工阶段要强化压实质量、控制填层厚度与地基加固强度；运营阶段则应依托智慧化养护平台实现实时监控、动态预警与数据追溯。目前，部分省市已应用“物联网+AI智能预警系统”，通过深度学习模型对历史监测数据进行趋势识别，当系统预测未来30天内沉降速率上升超过15%或差异沉降超过 $50\text{ mm}$ 时，自动触发红色预警并生成干预建议。应用案例显示，该系统可将结构失稳风险降低40%~50%，维修反应时间缩短约35%。此外，结合透水铺装、生态排水沟、柔性挡墙及新型排水垫层技术，可实现过渡段“自排水-自调节-自修复”的可持续运行状态，显著提升道路桥梁过渡段的服役寿命与安全等级。

五、结语

道路桥梁过渡段的不均匀沉降是影响结构安全与行车舒适性的重要问题，其形成涉及地基差异、施工控制及环境荷载等多重因素。通过优化结构设计、强化施工工艺、完善监测体系与实施综合防治措施，可有效减少沉降差异，提升过渡段的整体稳定性与耐久性。同时，应加强全过程质量管理与数据跟踪，实现施工与运营阶段的动态衔接。未来应进一步推广智能监测与数据化养护技术，构建集“感知-分析-决策-反馈”于一体的智慧管理体系，实现过渡段的动态感知与精准维护，为道路桥梁的长期安全、平稳与可持续运营提供科学支撑与技术保障。

参考文献

[1] 胡家波. 桥梁路基过渡段不均匀沉降防治措施 [J]. 汽车周刊, 2025, (07): 110-112. DOI: CNKI: SUN: QCZK.0.2025-07-041.

[2] 段秀林. 道路桥梁沉降段路基路面不均匀沉降防治措施 [J]. 时代汽车, 2025, (17): 145-147. DOI: CNKI: SUN: SDQE.0.2025-17-023.

[3] 孔春祥. 市政道路桥梁建设中的软土地基处理技术 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集 (一). 杭州易能建设有限公司; 2025: 301-304. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.007752.

[4] 马兰. 高速公路拼接段沉降变形特性及地基处理研究 [J]. 青海交通科技, 2024, 36(03): 91-95. DOI: CNKI: SUN: QHKJ.0.2024-03-014.

[5] 刘惠惠. 道路桥梁工程沉降段路基路面施工技术研究 [J]. 四川建材, 2024, 50(01): 168-170. DOI: CNKI: SUN: SCJZ.0.2024-01-063.

[6] 王慧. 道路桥梁工程中沉降段路基路面施工技术 [J]. 四川建材, 2023, 49(07): 107-109. DOI: CNKI: SUN: SCJZ.0.2023-07-039.

[7] 程鹏. 道路与桥梁施工建设管理的技术要点分析 [J]. 运输经理世界, 2022, (27): 49-51. DOI: CNKI: SUN: YSGL.0.2022-27-017.

[8] 冉海峰. 道路桥梁沉降段路基路面施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(15): 82-83. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2021.15.034.



# 面向低碳机场建设的助航灯光电气施工节能优化与可靠性控制研究

黄哲

四川双龙机场建设有限公司, 四川 成都 610094

DOI:10.61369/ERA.2025120032

**摘要：** 本文以机场助航灯光电气施工为研究对象，针对施工阶段的高能耗、设备效率低和系统可靠性差等问题，提出了一种基于综合绩效指数（CPI）模型的节能与可靠性协同优化策略。通过优化线路设计、选用高效设备、调整施工工艺以及精细化管理，结合 BIM 技术与物联网平台，成功实现了施工阶段的能耗降低与设备效率提升。研究表明，该策略有效提高了系统的可靠性，减少了故障率和后期维护成本，推动了低碳机场建设的进程。本文为机场助航灯光系统的节能与可靠性管理提供了新的思路与实践依据，具有较强的应用价值和推广意义。

**关键词：** 机场助航灯光；节能优化；可靠性控制；低碳施工；绿色机场

## Research on Energy Efficiency Optimization and Reliability Control in Airport Approach Lighting Electrical Construction for Low-Carbon Airport Development

Huang Zhe

Sichuan Shuanglong Airport Construction Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610094

**Abstract：** This paper focuses on the electrical construction of airport approach lighting systems, addressing issues such as high energy consumption, low equipment efficiency, and poor system reliability during the construction phase. A collaborative optimization strategy for energy efficiency and reliability based on the Comprehensive Performance Index (CPI) model is proposed. By optimizing circuit design, selecting efficient equipment, adjusting construction processes, and implementing refined management, combined with BIM technology and the IoT platform, energy consumption reduction and equipment efficiency improvement during the construction phase were successfully achieved. The study shows that this strategy effectively improves system reliability, reduces failure rates and subsequent maintenance costs, and promotes the progress of low-carbon airport construction. This paper provides new ideas and practical basis for energy efficiency and reliability management in airport approach lighting systems, offering significant application value and potential for wider implementation.

**Keywords：** airport approach lighting; energy efficiency optimization; reliability control; low-carbon construction; green airport

## 引言

随着全球“双碳”战略的推进，低碳绿色发展成为各行各业的目标，民航行业亦面临着碳排放和能源消耗问题。机场助航灯光系统作为保障飞行安全的重要组成部分，其施工和运行常伴随高能耗、设备效率低和运维成本高等问题，尤其是在施工阶段，传统方法导致电力消耗大、设备可靠性差，影响了机场的节能减排和长期运营<sup>[1]</sup>。为解决这些问题，本文提出了一种节能优化与可靠性控制的多维方法，结合高效 LED 灯具、智能恒流源（CCR）和能效调度策略，在施工阶段降低能耗、提高设备效率，并确保系统可靠性，减少故障和后期维护成本。该研究为低碳机场建设提供了可行路径，并为电气施工管理提供了新的思路与实践依据。

## 一、助航灯光电气施工的能耗机理与可靠性分析

### （一）施工阶段能耗特征

机场助航灯光电气施工阶段的能耗主要来源于临时用电、线

路铺设、系统调试与试灯老化等环节，其中试灯与老化阶段是耗能最高的部分。传统施工往往采用全功率连续试灯方式，导致能耗集中、发热量大、效率低，同时增加了设备损耗与碳排放<sup>[2]</sup>。电缆敷设路径不合理、回路压降过大、接头工艺不规范也会造成额

外能量损失。此外，夜间连续作业、重复上电调试等因素进一步加剧施工能耗。由此可见，优化施工工艺、采用分区分时调试及能效监测手段，是实现节能降耗的关键途径。

### （二）可靠性风险要素

助航灯光电气系统运行环境复杂，施工质量直接影响系统的长期可靠性<sup>[3]</sup>。主要风险包括电缆接头渗水、接地不良、绝缘退化及恒流源（CCR）配置不当等问题，这些故障不仅可能导致局部短路、接地异常，还可能造成整个回路失效<sup>[4]</sup>。由于机场飞行区施工受气候和时间窗口限制，赶工现象普遍，容易导致工序交叉、检验不到位，从而埋下潜在隐患。可靠性问题的根源在于材料选型、施工工艺与检测标准的控制不足，因此必须通过全过程质量管理和在线监测手段，确保系统在复杂环境下的稳定运行。

### （三）节能与可靠性耦合关系

节能与可靠性在助航灯光系统中相互关联又相互制约。提高能效往往意味着降低功率损耗、优化线路与设备配置，但过度压缩能耗可能削弱冗余设计，影响运行稳定性；而盲目提升可靠性，如采用过大截面或双冗余设计，又会造成材料浪费和能效下降。因此，节能与可靠性的优化必须协同考虑，通过精确负载分析、经济电流密度控制及智能调度算法实现平衡，使系统既具备低碳节能特性，又能保持高可用度与运行安全性。

### （四）综合绩效指数模型

为了实现节能与可靠性之间的平衡，本文提出了一种综合绩效指数（CPI）模型。该模型通过对系统的能效、碳排放、可用度和故障率进行综合评估，量化节能与可靠性提升的综合效益。

$$CPI = w_e \frac{E_0 - E}{E_0} + w_c \frac{CO2_0 - CO2}{CO2_0} + w_a \frac{A - A_0}{A_0} - w_f \frac{F - F_0}{F_0} \quad \text{式 (1)}$$

其中：

$E_0$ ,  $CO2_0$ ,  $A_0$ ,  $F_0$  为优化前的基准值， $E$ 、 $CO_2$ 、 $A$ 、 $F$  分别为优化后的能耗、碳排放、可用度和故障率； $w_e$ ,  $w_c$ ,  $w_a$ ,  $w_f$  为相应指标的权重，且  $\sum w_i = 1$ 。

该公式通过将节能、电力消耗的碳排放、系统可用度与故障率四个关键指标的相对改善进行加权求和，综合评价助航灯光电气施工的整体优化效果。CPI 值越大，表明系统的节能效果与可靠性提升越显著。

通过对 CPI 模型的应用与分析，可以清晰地量化在不同施工阶段、不同优化方案下，节能与可靠性之间的平衡与改进，最终为施工管理提供科学的决策依据。

## 二、节能优化与可靠性控制策略体系

### （一）线路与设备节能优化

在助航灯光电气系统中，线路设计与设备选型是影响能效的关键环节。针对传统设计中电缆过长、敷设路径冗余、压降过大的问题，可通过 BIM 三维建模优化线路布局，缩短电缆长度并减少无效弯折，从源头降低电阻损耗<sup>[5]</sup>。在设备方面，应采用高光效 LED 灯具与高效率恒流源（CCR）配套，确保系统在最佳负载区间内运行，以提升整体能效。对于不同的灯具类型和运行环

境，合理配置回路数量和功率等级，可避免过度冗余引发的能源浪费。同时，通过引入功率因数校正、谐波抑制装置及电缆截面经济电流密度计算，实现线路与设备的同步节能，达到“系统效率最大化”的目标。

### （二）工艺与施工流程优化

施工工艺与管理流程的优化对节能降耗具有直接影响。传统的全功率连续试灯方式能耗高、风险大，而采用“分区分时、脉冲老化、夜间抽检”的策略，可在保证测试效果的同时显著降低能耗。通过 4D BIM 技术实现进度与能耗的动态可视化管理，可避免重复上电和无效作业。施工阶段应推广“精益化施工”理念，实行多专业并行协同，减少临电系统待机损耗与设备空载时间<sup>[1]</sup>。此外，临电系统应配置能耗监测终端，实时统计各分区功率与电流，便于及时调整施工计划与负载分配。通过标准化工序、优化排程与数据化能管控，可有效实现“过程节能、行为节能与管理节能”的统一。

### （三）可靠性提升措施

为确保助航灯光系统的长期稳定运行，需从结构冗余、质量控制与智能监测三方面提升可靠性。在电气结构上，应采用环网供电与分段旁路设计，保证任一回路失效时系统可快速切换，提升供电连续性<sup>[6]</sup>。在施工质量方面，应严格执行接头预制、密封灌封与耐压检测工艺，确保绝缘性能与防水等级达到标准要求；同时，通过红外测温与局部放电测试及时发现潜在隐患。在智能化监测层面，可布设 IoT 传感器实时采集电流、电压、接地电阻等参数，结合历史趋势进行预测性维护<sup>[7]</sup>。通过“事前预警—事中监控—事后评估”的闭环控制体系，不仅能降低设备故障率，还能减少因停机维修带来的能源浪费，实现安全性与经济性的同步提升。

### （四）协同控制原理

节能优化与可靠性控制的关键在于建立动态平衡的协同机制。本文基于综合绩效指数（CPI）模型，通过能耗、碳排、可用度及故障率等指标的实时反馈，实现节能与可靠性的量化协调。在实际应用中，系统可通过数据采集与算法分析，对施工阶段的能耗趋势和运行状态进行动态评估，并根据 CPI 变化自动调整运行参数，如调节亮度等级、切换冗余回路或调整负载分配。该协同控制原理将传统静态管理转变为自适应优化，使系统在不同施工阶段都能保持最优运行状态。通过数据驱动的智能调控，不仅实现了能效与可靠性的双提升，也为后续机场运维阶段的智能化

## 三、工程案例验证与数据分析

### （一）项目概况

本研究选取某国际机场新建助航灯光系统作为工程案例，项目包括跑道、滑行道和进近灯回路的建设与调试。施工过程中，

针对传统助航灯光施工中的高能耗、高故障率和低效率问题，实施了节能优化与可靠性控制措施。项目采用了 BIM 技术优化线路布置、智能化调度降低能源消耗，同时对设备进行了高效 LED 灯具与智能恒流源（CCR）的选型。在施工质量方面，加强了接头与接地系统的质量控制，并引入了实时监测系统，以确保系统的长期可靠性。施工期从 2023 年 3 月开始，到 2023 年 10 月结束，总体施工周期为 7 个月，旨在为机场后续运营提供一个节能、高效、低碳的助航灯光系统。

（二）数据采集与指标计算

在项目实施过程中，采用了多种数据采集手段，包括施工期间的电能监测、设备故障记录、系统可用度跟踪和环境数据分析。所有关键指标都通过智能化管理平台实时采集，具体包括：

- 1. 总电耗：所有施工用电，包括电缆铺设、试灯、老化、设备调试等环节；
- 2. 恒流源效率：优化前后恒流源的能效变化，反映了设备的工作效率；
- 3. 接头返工率：通过质量控制检测，记录接头处的返工情况，作为可靠性指标之一；
- 4. 故障率与系统可用度：通过现场数据记录，计算系统运行的可用度与故障发生的频率；
- 5.CO<sub>2</sub> 排放：基于电耗计算的二氧化碳排放量，体现节能效果。

数据计算基于优化前后的能耗、系统故障和设备效率变化，采用了标准化的性能评估方法，确保数据的可靠性和可比性。

（三）综合节能与可靠性提升效果

通过对优化前后的多个关键指标进行对比，本文展示了在实施节能优化与可靠性控制策略后，系统性能的显著改善。以表 1 展示了优化前后各项关键指标的变化情况。

表 1 工程案例关键指标对比			
指标	优化前	优化后	改善幅度
施工期总电耗（kWh）	62,300	51,080	-18.00%
试灯与老化电耗（kWh）	22,400	14,500	-35.30%
恒流源效率（%）	89	93.5	4.50%
电缆用量（吨）	32	28.5	-10.90%
接头返工率（%）	4.2	1.9	-2.30%
系统可用度	0.982	0.996	0.014
首年故障率（次 / 千灯时）	0.75	0.52	-30.70%
年 CO <sub>2</sub> 排放（吨）	38.1	29.2	-23.40%
综合绩效指数 CPI	0	0.31	0.31

表 1 展示了机场助航灯光电气施工在节能与可靠性优化后取得的主要成效。施工期总电耗涵盖电缆铺设、设备调试、试灯与老化等环节，优化后整体能耗下降 18%，其中试灯与老化阶段的能耗减少 35.3%，节能效果显著。通过采用高效 LED 灯具与高效率恒流源（CCR），设备能效提升 4.5%，有效降低了系统运行损耗。线路设计优化与电缆截面调整减少了约 10% 的电缆用量，施工材料得到合理利用。严格的工艺质量管控使接头返工率从 4.2% 降至

1.9%，系统首年故障率降低 30.7%，可用度提升至 0.996，体现出可靠性显著增强。基于能耗下降，年 CO<sub>2</sub> 排放量减少 23.4%，进一步支撑了绿色施工目标。综合绩效指数（CPI）从 0.00 提升至 0.31，表明节能优化与可靠性控制的协同作用显著改善了系统整体性能，为低碳机场建设提供了可验证的工程依据与推广价值。

（四）结果讨论

通过工程案例数据分析，可以看出节能优化与可靠性提升措施的综合效果<sup>[3][9]</sup>。在能效方面，优化方案有效降低了施工过程中不必要的电力消耗，特别是在试灯与老化阶段的能耗降低显著。恒流源效率的提升反映了设备性能的改善，且高效 LED 灯具的应用进一步减少了能量浪费。同时，电缆用量的减少和接头返工率的降低表明，施工过程中通过精细化管理和优化设计，有效降低了材料消耗和返工成本。

从可靠性角度看，优化后系统的可用度显著提高，首年故障率大幅下降，显示出质量控制措施的成功实施。此外，CO<sub>2</sub> 排放量的减少，不仅符合低碳建设要求，还对环境保护起到了积极作用。综合来看，CPI 的提升证明了节能与可靠性的协同优化在机场助航灯光施工中的可行性与有效性。通过本案例验证，所提出的节能与可靠性提升措施具备较高的工程应用价值，并为其他机场助航灯光系统的优化提供了重要参考。

四、推广与结论

（一）推广模式与应用路径

为推动节能优化与可靠性控制策略在更广范围的机场建设中落地，应建立统一的标准化施工与优化体系，将节能措施、质量控制及可靠性保障纳入民航电气工程技术规范与行业标准。建议在典型工程项目中先行试点，结合不同气候、地理及机场规模特征，形成可复制、可推广的应用模式。通过 BIM 技术与物联网平台实现施工进度、能耗与质量的实时监控，确保节能与可靠性策略精准执行。同时，鼓励主管部门出台相关政策支持，将绿色施工评价体系与节能认证制度融入机场建设管理流程，建立示范工程案例库，推动低碳技术在民航基础设施领域的系统化应用与推广。

（二）管理体系与绩效考核建议

在机场助航灯光施工中，节能与可靠性优化应纳入全过程管理与考核体系。建议采用综合绩效指数（CPI）作为量化评价工具，将能耗、系统可用度、设备故障率等指标纳入施工单位和设计单位的绩效考核范围。通过建立基于 CPI 的分级评价体系，可实现节能目标的动态监控与结果导向的精细管理。在项目执行过程中，应强化数据采集与分析能力，实时反馈施工能耗与设备状态信息，形成闭环管理机制。通过科学的考核标准、激励机制与风险分担制度，可有效提升施工企业的技术投入与管理水平，确保节能与可靠性措施在工程实践中得到持续贯彻与优化。

（三）综合结论与发展展望

本文以机场助航灯光电气施工为研究对象，提出了基于综合绩效指数（CPI）模型的节能与可靠性协同优化方法，并通过工程案例验证其有效性。研究表明，优化线路设计、采用高效设备、改进施工工艺与智能化监控管理，能够显著降低施工能耗、提升系统可靠性与运行安全性，为低碳机场建设提供了可行的技术路

径与实践依据。未来，随着人工智能、大数据与数字孪生技术在民航电气工程中的应用深化，节能优化与可靠性控制将进一步从经验型管理向智能化决策转变。通过构建面向全生命周期的智慧机场能源管理体系，可实现能效、可靠性与安全性的协同提升，推动绿色机场和智慧民航建设的高质量发展。

参考文献

[1] 吴良桂. 机场助航灯光工程绿色施工技术应用点探讨 [J]. 工程质量, 2025, 43(S1): 100–103.  
[2] 任绪秋. 一种新型节能技术在机场助航灯光系统中的应用 [J]. 智能建筑电气技术, 2013, 7(03): 50–53.  
[3] 康睿. 机场助航灯光系统技术及应用研究 [J]. 电子测试, 2021, (16): 27–28.  
[4] 倪新建. 关于机场助航灯光施工的有效性研究 [J]. 中国新通信, 2019, 21(16): 229–230.  
[5] 华俊峰. 机场助航灯光系统施工问题分析及质量控制研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (06): 164–166.  
[6] 侯启真, 侯伟飞. 基于多态共因失效的助航灯光供电系统可靠性分析 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(08): 269–276.  
[7] 李亮. 机场目视助航灯光系统的运行管理研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(01): 44–45.



# 桥梁工程监理安全风险识别与预控措施

谢明卫

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650217

DOI:10.61369/ERA.2025120033

**摘 要：** 桥梁工程作为公路建设的关键组成部分，其施工安全直接关系到工程整体质量与人员生命财产安全。怒江美丽公路绿道建设工程沿线地形复杂、涉及范围广，涵盖主线280.880km及六库支线（4.422km）、丙中洛支线（3.978km）、日当半山酒店环线（9.546km），总规模达298.826km，串联泸水市、福贡县、贡山县3市县17乡镇，桥梁工程数量多且形式多样，施工环境特殊，给监理工作带来诸多安全风险挑战。本文以该工程为研究对象，系统识别桥梁工程监理过程中的安全风险，从自然环境、工程技术、人员设备等维度深入分析风险成因，并针对性提出预控措施，为类似复杂地形下桥梁工程监理安全管理提供参考。

**关 键 词：** 桥梁工程；监理；安全风险识别；预控措施

## Safety Risk Identification and Pre-Control Measures of Bridge Engineering Supervision

Xie Mingwei

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650217

**Abstract：** As a critical component of highway construction, bridge engineering directly impacts both project quality and the safety of personnel and property. The Nujiang Beautiful Highway Greenway Project features complex terrain spanning multiple areas, including the main route 280.880km, Liuku Branch Line (4.422 km), Bingzhongluo Branch Line (3.978 km), and Ridang Half Mountain Hotel Loop (9.546 km). Covering a total scale of 298.826km, this infrastructure connects 17 townships across three counties—Lushui City, Fugong County, and Gongshan County. The numerous bridges with diverse structural forms and challenging construction environments pose significant safety risks for supervision. This study systematically identifies safety risks in bridge engineering supervision processes, analyzes risk causes from dimensions including natural environment, technical engineering, and personnel/equipment factors, and proposes targeted preventive measures. These findings provide valuable references for safety management in bridge engineering supervision under similar complex terrain conditions.

**Keywords：** bridge engineering; supervision; safety risk identification; pre-control measures

## 引言

桥梁工程属于交通基础设施创建的关键组成部分，其施工安全监理是守护工程质量以及人员平安的主要屏障。伴随我国公路建造踏入复杂地形区域，怒江美丽公路绿道这一类穿越峡谷，横跨多个乡镇的大型工程出现后，其桥梁施工过程中所遭遇的状况自然愈发严峻。因为要应对苛刻又复杂的环境因素，技术和管理上的压力也接踵而至地扑来。该工程连3市县17乡镇，主线加支线、环线、桥梁类型多样，且各区域施工风险存在差异，传统监理方法难以满足工程需求。因此，系统对桥梁监理的安全风险予以识别，并针对性地制定预控措施，不仅能够为该桥梁工程的顺利推进奠定坚实基础，还可为后续其他复杂地形条件下的桥梁工程监理工作提供一定的科学依据，具有重要的现实意义。

## 一、工程概况

怒江美丽公路绿道建设工程与国道 G219 线丙六公路改建工程

同岸并行布线，主线起于泸水市六库镇小沙坝中心服务区（二级

公路怒江桥头），途经泸水市六库镇、鲁掌镇、大兴地镇等6个乡镇，福贡县匹河乡、子里甲乡等6个乡镇，贡山县普拉底乡、茨开镇等5个乡镇，覆盖17个乡镇节点，止于贡山县丙中洛镇丙中洛观景台；支线及环线中，六库支线连接原小沙坝大桥环岛与

作者简介：谢明卫（1989.09-），男，云南文山山人，工程师，本科，研究方向：工程监理。

主线起点，丙中洛支线衔接丙中洛观景台与甲生村，日当半山酒店环线由日当连接线（6.246km，连接甲生村与怒江第一湾）、日当酒店连接线（3.299km，连接日当连接线 K4+566.376与主线 K276+591.003）组成。

工程沿线穿越怒江峡谷核心区域，地形起伏落差大、地质条件复杂，桥梁工程作为串联主线与支线、环线的关键节点，不仅需跨越怒江干流（如俄科底大桥），还需衔接支线与乡镇路段、环线内短途通道，部分桥梁位于陡峭山坡（如鲁掌镇、古登乡路段）或地质不稳定区域（如石月亮乡沿线），施工难度与安全风险随路段差异呈现梯度变化，对监理工作的针对性与精细化程度提出极高要求。

## 二、桥梁工程监理安全风险识别

### （一）自然环境引发的安全风险

怒江美丽公路绿道沿线属于亚热带山地季风气候，降水集中且多暴雨天气，加上峡谷地形的影响，容易发生山洪、滑坡、泥石流等地质灾害，并且不同的路段其强度也不相同。沿线山体高耸，暴雨期间容易造成山体滑坡冲击到桥梁基础的风险；临江地段江水上涨导致基坑被淹没；悬崖峭壁较多，作业面积较小，桥梁高空作业安全隐患较大；吊装作业困难，强风等容易使施工机械失稳，导致构件坠落，从而提高安全事故发生率。

此外，工程沿线涉及的17个乡镇地质情况复杂，部分桥梁建设区域（如秤杆乡、子里甲乡）存在断层、破碎岩层等，在桩基施工过程中，容易发生涌水、塌孔等地质灾害，危及施工人员和桥梁施工安全，沿线桥梁分散，监理人员难以同时覆盖多个风险点，进一步放大了自然环境风险的管控难度。

### （二）工程技术层面的安全风险

一方面，桥梁工程类型因路段功能不同而各异：主线跨越怒江的俄科底大桥不仅跨度大、荷载高，施工还要搭建大型缆索吊装系统，该系统包含索塔、主缆、吊具等众多重要构件，若索塔基础锚固深度不够、主缆张力计算有误或者吊具与钢梁连接节点不合理，都可能造成钢梁安装时，发生失稳甚至倒塌的重大事故。此外，再加上项目独有的悬挑桥设计在美丽公路外侧，均处在陡峭临江之处，其悬臂浇筑施工期间挂篮锚固系统是否可靠，以及混凝土浇筑能否做到对称平衡直接关系到结构安全，在这些情况下，如果出现挂篮移位、混凝土开裂等问题，会导致坠落风险显著增大<sup>[1]</sup>。

另一方面，工程沿线路段长（总规模298.826km），项目桥梁施工点多达数十处，并且分布在17个乡镇不同地形区域。监理人员受人力空间限制，无法实时全面监管所有施工点。在夜间或者恶劣天气时段，对于隐蔽工程，如桩基钢筋笼安装、支座灌浆等的技术把控容易出现疏漏。此外，部分桥梁施工需要与既有公路交通保通同步进行，施工临时支架和通行道路的安全距离设计，以及临时结构的承载力验算一旦存在技术偏差，就会产生新的安全风险，使得安全管理工作的难度进一步加大。沿线地质条件复杂多变，强降雨、地震等自然灾害发生时，已建桥梁基础

和临时结构的稳定性受到严峻挑战，为安全风险管控工作增添新压力。

### （三）人员与设备管理的安全风险

桥梁施工涉及高空作业、重型机械操作等高危环节，且不同路段对人员技能要求不一样，主线跨江大桥施工需专业技术人员开动大型设备（起重机）。若人员未受过专门培训就上岗，容易发生机械伤害事故，支线和环线的小型桥梁施工人员大多都是本地临时用工，安全意识比较差，高空作业时不系安全带、随便攀爬脚手架这些情况屡见不鲜，较容易引发坠落事故<sup>[2]-[3]</sup>。

工程设备管理上，对长距离路段的工程设备调配需求大，部分机械由于长途运输而有磨损问题，设备保养设施不足，容易发生设备老化故障；施工场地狭小，起重机位于原美丽公路上，过往车车辆容易发生设备碰撞事故，保通工作压力也非常大。除此之外，监理人员若缺乏对不同路段桥梁施工的专项经验，或者对风险点认识不及时、执行安全检查制度不严格等情况，也会造成安全隐患失控<sup>[4]-[5]</sup>。

## 三、桥梁工程监理安全风险预控措施

### （一）强化自然环境风险防控

针对不同路段自然风险的差异，监理单位要与气象、地质部门共同创建“路段分层警报机制”。怒江美丽公路绿道建设工程项目中，将主线的古登乡—鹿马登乡段、丙中洛支线甲生村段列为一级风险区，地质条件比较复杂，容易出现滑坡、泥石流等地质灾害现象，在此需要布置相应的地质监测设备，实时检测地表移动情况，以及地下含水层位移状况。在暴雨时，强制要求所有建筑施工单位停止施工，疏散人员，日当、丙中洛镇等路段被划分为二级风险区，在大风警报时，严禁开展高处作业以避免高空坠物事故。将六库支线、主线六库镇段为三级风险区，虽然整体的风险是相对较小的，同时，需要做好日常排水系统的检查工作，避免积水造成安全隐患。

根据施工点分散的特点，采用分片负责制划分监理责任区，并在各片区内设专管员一名。专职监理人员需要有较多的地质勘察和风险辨识的经验，对桥梁施工区域的地况进行巡查，比如，每天至少一次对沿线桥梁桩基施工点查看地况。巡查时，要利用专业工具和方法，细致观察地质变化迹象，发觉地质异常，需立刻叫停施工单位的施工，组织专家评定，并制订改正方案，做到风险管控不留死角，绝不忽视任何隐患。同时，要创建自然环境风险预警体系，同当地气象、地质等部门紧密联系，及时获得暴雨，大风，地震等预警消息。一旦预警，通知各个施工点做好防范措施，对可能受影响的区域加强重点观察。

### （二）完善工程技术风险管控

监理单位要按照桥梁的种类和路段的不同情况，实施“分类审核”制度。对于主线上的跨江大桥来说，由于其施工难度大、技术要求高。因此，在对施工方案进行审核时，重点审查缆索吊装系统设计，以及基础开挖等关键环节的技术参数，要求施工单位提交专门的安全验算报告，像索塔承载力验算、稳定性验算

等,在理论上确保施工安全<sup>[3]</sup>。组织专家复核,利用专家的专业知识和经验对施工方案进行深度把关,对于小型桥梁施工方案的重点审查场地规划,以及工艺匹配情况,比如,桥梁基础开挖支护方案,桥梁构件吊装路径设计等,确保施工流程符合场地条件,降低由于设计方案缺陷造成施工风险的发生概率。

施工时,根据不同路段进行差异化旁站。主线跨江大桥吊装等关键工序,需要全程旁站,监理人员必须全程监督,实时记录施工期间的数据及情况,并及时发现处理问题。对小型桥梁基础开挖、钢筋绑扎等工序,进行定点旁站,检查施工工艺是否规范,原材料是否合格,对桥梁钢筋制作及安装进行重点检查,发现质量问题应立即整改,不合格工序禁止进入下一个环节。建立“桥梁工程质量安全台账”,按照路段记录施工、监理情况,记录施工进度、质量检测结果、监理意见等信息,全过程可追溯,方便后续查阅和总结经验<sup>[6]~[7]</sup>。

### （三）加强人员与设备安全管理

监理单位要促使施工单位实行分层次教育。对于主线跨江大桥的施工人员而言,鉴于其所使用的机械设备庞大且结构复杂,同时施工难度较高,需要组织对他们的大型机械操作技能及安全知识进行专项培训,这些训练项目需涉及到机械设备的操作要求、相关的安全规定及意外发生后,应如何采取措施等内容,促使这些工人的技术,达到完全熟练的水平。对其余段落施工人员主要开展小型桥梁施工规范及应急处置技能培训,所有人员考核合格后上岗,每季度进行1次安全知识复训,偏远路段,可采取线上+线下方式培训,确保覆盖到位。同时,定期检查施工人员安全防护用品的佩戴情况、高空作业不系安全带等违规行为,要从重处罚,以严格的管理提升施工人员的安全意识<sup>[8]~[9]</sup>。

设备管理过程中,监理人员要仔细核对机械设备进场、维护及使用三个阶段所留下的所有记录。当机械到达时,需要检查长途运输后产生的磨损情况。对于场地图运输的起重机,则必须出具一份维修保养报告,确保机器进入工地时完好无损。施工过程中,定期检查设备运行情况,施工设备每周至少1次全面检查,对设备的机械性能、零部件磨损及安全防护装置等情况进行检查,严禁使用老化、报废设备。对于狭窄场地,施工单位提供设备摆放方案,并确保有足够的作业空间,合理布置设备位置及行走路径,避免碰撞事件的发生,确保施工机械的安全运转<sup>[10]~[11]</sup>。此外,监理人员还应督促施工单位及时更新老旧设备,根据工程进展和实际需求,合理调配设备资源,提高设备的利用率和使用效率。

## 四、结论

怒江美丽公路绿道建设工程桥梁监理工作面临自然环境、工程技术、人员设备等多方面安全风险,并且由于主线、支线、环线的不同路段存在较大差异。监理单位应运用“路段分级识别风险、分类制定对策、分片落实责任”这一方式,将路段长度、乡镇分布、环线细节等工程信息融合,减少安全事故发生的概率。在实际监理过程中,应依据各个路段施工进度以及风险的变化,及时地调节相应的控制措施,并加强对施工单位及建设单位的协作配合,确保桥梁施工安全和质量。本文提出“路段差异化监理”模式,可为同类长距离、多路段的公路桥梁工程监理工作给予有用参照,从而改进行业的安全管理水准。

## 参考文献

- [1] 周帆. 城市道路桥梁施工安全管理措施分析 [J]. 运输经理世界, 2025, (21): 94-96.
- [2] 杨佳林. 道路桥梁施工阶段的安全风险识别与防控研究 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一). 浙江南北数智安全科技有限公司; , 2025: 1481-1484.
- [3] 张学堃. 大型建设项目监理方风险管理能力评价研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
- [4] 石培磊. 铁路桥梁转体结构风险因素及防控措施探析 [J]. 工程机械与维修, 2023, (01): 134-136.
- [5] 孙达. 市政道路桥梁施工质量防控措施 [J]. 散装水泥, 2022, (02): 20-22.
- [6] 刘纹衡, 姜磊, 田雪飞. 道路桥梁施工质量管理现状分析研究 [J]. 冶金管理, 2021, (13): 109-110.
- [7] 丁菊. 桥梁工程施工安全监理控制探析 [J]. 住宅与房地产, 2020, (04): 166.
- [8] 张军. 桥梁工程施工安全监理控制探析 [J]. 城市建筑, 2019, 16(14): 156-157.
- [9] 田浪. 公路桥梁施工监理控制要点研究 [J]. 低碳世界, 2021, 11(12): 122-123.
- [10] 于小波. 道路桥梁工程现场监理质量的提升方法 [J]. 建材与装饰, 2018, (30): 282-283.
- [11] 王颢. 桥梁工程施工安全监理控制分析 [J]. 工程建设与设计, 2016, (14): 141-142.

# 招投标管理对工程造价及成本的影响分析

麻宏伟

广东广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120036

**摘 要：** 招投标管理对工程造价及成本影响重大，其公开、公平、公正及诚实守信原则奠定成本控制基础。它与工程造价形成紧密关联，资格预审缺陷、评标方法偏差等会引发成本风险与造价扭曲。可通过构建量化分析模型、促进成本协同等措施控制成本，推进制度、技术及监管优化，实现造价合理控制与成本降低。

**关 键 词：** 招投标管理；工程造价；成本控制

## Analysis of The Impact of Bidding Management on Engineering Cost and Cost

Ma Hongwei

Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** Bidding management has a significant impact on project cost and expenses, and its principles of openness, fairness, impartiality, and honesty lay the foundation for cost control. It is closely related to engineering cost, and defects in pre qualification and deviations in evaluation methods can lead to cost risks and distortions. Cost control and cost reduction can be achieved through measures such as constructing quantitative analysis models, promoting cost synergy, and advancing institutional, technological, and regulatory optimization.

**Keywords：** bidding management; engineering cost; cost control

## 引言

《必须招标的工程项目规定》（2018年6月6日颁布）对规范招投标活动具有重要意义。招投标管理以公开、公平、公正和诚实守信为原则，与工程造价形成紧密的阶段性关联，对工程成本控制影响深远。然而，资格预审缺陷、评标方法偏差等会带来成本风险与造价扭曲。通过构建量化分析模型、加强成本协同、发挥电子招投标平台数据赋能等措施可实现成本控制。同时，建立资格后审动态跟踪等一系列机制，推进招投标管理在制度、技术及监管层面优化，以契合政策导向，实现工程造价合理控制与行业高质量发展。

## 一、招投标管理与工程成本的内在关联机制

### （一）招投标管理的基本特征与原则

招投标管理具有公开、公平、公正的基本特征。公开意味着招标信息、过程和结果都面向社会公开，让所有潜在投标人能平等获取信息，为各参与方提供平等竞争机会，激发市场活力。公平要求给予所有投标人平等的待遇，在资格审查、评标标准等方面一视同仁，避免歧视或偏袒。公正强调评标过程和结果依据事先确定的标准和程序，不受任何外部因素干扰，确保招投标活动的客观公正<sup>[1]</sup>。同时，招投标管理遵循诚实守信原则，各方需如实提供信息、履行承诺。这些特征与原则，为工程成本控制奠定坚实基础。竞争性磋商、合理低价中标等管理机制基于这些特征与原则运行，与工程成本控制目标高度契合，通过公平竞争促使投标人优化成本，以合理价格获取项目，实现资源有效配置与成本合理控制。

### （二）工程造价形成的阶段性关联

在工程造价形成过程中，招投标管理与之存在紧密的阶段性

关联。招标控制价编制作为起始关键环节，其合理性直接影响工程造价范围。准确合理的招标控制价，既能避免过高导致成本浪费，又能防止过低引发工程质量隐患<sup>[2]</sup>。投标报价审核环节，对各投标方报价的细致审查，确保其符合工程实际与市场行情，避免恶意低价中标或不合理高价扰乱造价体系。合同价款约定则是将招投标阶段确定的造价成果以合同形式固定，明确双方权利义务与价款调整等规则，为后续工程实施阶段成本控制奠定基础。这三个环节层层递进，从初步设定到精准审核，再到最终确定，共同构成工程造价形成过程，对项目全寿命周期成本产生累积影响效应，保障工程成本处于合理可控区间。

## 二、招投标管理失衡对成本控制的负向传导

### （一）资格预审缺陷引发的成本风险

资格预审是招投标管理的重要环节，然而其存在的缺陷会引发显著的成本风险。当资格预审存在漏洞时，承包商资质造假、



业绩注水等违规投标行为便有机可乘<sup>[3]</sup>。这些不符合实际能力的承包商进入项目后，在施工过程中，由于其真实能力与项目要求不匹配，容易出现工程进度滞后、质量不达标等问题。为了使工程能够继续推进并达到质量标准，往往会导致大量的工程变更。而工程变更又极有可能诱发索赔事件，无论是承包商向业主索赔，还是业主向承包商索赔，都会使得项目成本大幅增加，打破原有的成本控制计划，对工程造价及成本造成极为不利的影响。

## （二）评标方法偏差导致的造价扭曲

在招投标管理中，评标方法偏差会严重导致造价扭曲。以研究经评审最低价法为例，这种评标方法虽意在选择价格优势的投标方，但常引发恶意低价竞标现象。一些投标方为中标，故意压低报价，远远低于合理成本。这看似降低了初始造价，却为后续项目推进埋下隐患。恶意低价中标后，施工方为保证自身利益，极可能在施工过程中偷工减料，这直接影响项目质量，使得项目后期需投入大量资金用于整改和维修，增加项目质量成本。同时，因资源投入不足等，还可能导致工程进度延误，产生赶工费用或工期延误赔偿等进度成本，质量成本与进度成本二次叠加，造成造价的严重扭曲，背离了成本控制的初衷，对项目整体成本管理产生极大的负面影响<sup>[4]</sup>。

# 三、招投标成本控制的关键影响维度实证

## （一）量化分析模型的构建

### 1. 招标工程量清单准确性验证

在招投标成本控制的量化分析模型构建中，招标工程量清单准确性验证十分关键。运用特征价格法建立清单错漏项与结算超支率的回归模型，可有效验证其准确性。清单错漏项会直接影响工程造价，若清单出现项目缺失或工程量计算错误，在施工过程中可能引发工程变更，进而导致结算超支。通过收集大量工程项目数据，将清单错漏项作为自变量，结算超支率作为因变量，构建回归模型<sup>[5]</sup>。对模型进行拟合优度检验、显著性检验等，以判断模型的有效性。借助该模型，能清晰呈现清单错漏项对结算超支率的影响程度，从而精准评估招标工程量清单准确性对招投标成本控制的关键作用，为提高清单编制质量、有效控制成本提供有力依据。

### 2. 投标报价偏离度测算

在招投标成本控制的关键影响维度实证量化分析模型构建中，投标报价偏离度测算十分关键。利用基于 BIM 技术的成本数据库所构建的投标价格合理性评价指标体系，可精准测算投标报价偏离度。具体而言，以数据库中的各类成本数据为基准，将投标报价与之对比。从工程各个分部、分项出发，详细分析价格差异，计算出各部分的偏离程度。通过加权平均等方法，得出整体的投标报价偏离度。这一数值能够直观反映投标报价与合理价格区间的偏离情况，有助于招标方快速判断投标报价的合理性，识别可能存在的风险，为招投标成本控制提供有力的数据支持<sup>[6]</sup>。

## （二）典型案例的多维度对比

### 1.EPC 总承包模式下的成本协同

在 EPC 总承包模式下，成本协同至关重要。以多个典型案

例来看，设计、采购与施工环节的协同程度对成本影响显著。若各环节沟通顺畅、紧密协作，能有效避免施工过程中的变更与返工，从而降低成本。例如在[具体案例]中，设计团队在前期充分考虑施工可行性与采购便利性，与施工、采购团队紧密沟通，使得项目材料采购成本降低了[X]%，工期缩短了[X]天，节约了因工期延长产生的额外成本。相反，若各环节缺乏协同，像[另一案例]，因设计变更频繁，导致采购材料浪费，施工停滞，成本超支[X]%。这表明 EPC 总承包模式下各环节的有效协同是成本控制的关键，通过加强各环节信息共享、建立高效沟通机制等措施，能更好地实现成本协同，达成成本控制目标<sup>[7]</sup>。

### 2. 电子招投标平台的数据赋能

在招投标成本控制方面，电子招投标平台的数据赋能作用显著。通过典型案例的多维度对比可发现，电子招投标平台凭借大数据分析技术，能够对潜在供应商的历史报价、业绩、信誉等数据进行整合与深度挖掘。这些数据不仅为招标人筛选优质供应商提供了科学依据，还能精准预测项目成本范围，避免因信息不对称造成的成本虚高。例如在某大型工程项目招投标中，借助平台数据，招标人对各投标方过往类似项目的成本构成进行详细分析，有效识别出不合理报价，从而降低招投标成本。同时，平台数据的实时更新与共享，极大减少了因沟通不畅导致的重复工作成本。通过数据赋能，电子招投标平台打破了信息壁垒，优化招投标流程，为成本控制提供有力支撑，显著提升招投标管理效率<sup>[8]</sup>。

# 四、全过程成本优化路径设计

## （一）制度改进维度

### 1. 资格后审动态跟踪机制

资格后审动态跟踪机制旨在对中标后的承包商履约情况进行持续监控，确保其始终具备相应能力，避免因承包商问题导致成本增加。具体而言，要搭建专门的信息管理系统，录入承包商各项关键数据，如财务状况、人员配置、过往项目业绩等。借助该系统对承包商履约行为进行动态评估，设置风险预警指标，当某些指标出现异常波动，如财务指标恶化、人员大量流失等，及时发出预警信号。同时，建立定期审查与不定期抽查相结合的机制，针对承包商的工程进度、质量等方面进行检查。一旦发现承包商履约能力不达标，应依据合同约定采取相应措施，如责令整改、扣除违约金甚至终止合同，以此降低潜在的成本风险，保障项目全过程成本处于可控状态<sup>[9]</sup>。

### 2. 双向担保风险分担制度

在招投标管理中，双向担保风险分担制度对工程造价及成本影响显著。设计业主支付担保与承包商履约担保的联动实施标准时，需明确两者之间的协同关系。一方面，业主支付担保应确保按合同约定及时向承包商支付工程款，降低承包商资金周转压力与潜在损失，避免因工程款拖欠导致的工期延误及额外成本。另一方面，承包商履约担保要保障其严格依照合同履行施工义务，保证工程质量与进度。通过设定合理的担保金额、担保范围及赔付条件等，实现双方风险的有效分担。这种联动实施标准可在工

程建设各阶段有效约束双方行为，减少违约风险，从而优化全过程成本，保障项目顺利推进<sup>[10]</sup>。

### （二）技术升级维度

#### 1. 智能评标辅助决策系统

开发集成造价指标库、企业信用库的 AI 评标算法模型融入智能评标辅助决策系统，是实现全过程成本优化的关键技术升级路径。该系统借助 AI 算法深度挖掘造价指标库数据，能精准分析投标报价的合理性，避免因价格虚高或不合理低价带来的成本风险。同时，结合企业信用库信息，可全面评估投标企业的履约能力，降低因企业失信导致的潜在成本增加，如工期延误、质量缺陷整改成本等。通过这种智能化辅助决策，评标过程更科学高效，能源头筛选出性价比高且信用良好的投标方，在保证项目质量的同时，最大程度实现工程造价的合理控制与全过程成本优化。

#### 2. 工程量智慧校核工具

在招投标管理中，工程量智慧校核工具对于全过程成本优化至关重要。借助基于 BIM 模型自动化量算的清单编制误差控制方法，可有效提升工程量计算的准确性。此工具能整合多源数据，利用 BIM 模型的可视化与参数化特性，快速精准地对工程量进行计算与校核。通过对建筑构件的详细信息解析，能自动识别并统计各类工程量，极大减少人工计算可能产生的疏漏与错误。同时，该工具可设置关键参数阈值，一旦工程量出现偏差超出阈值，便及时预警提示，便于造价人员迅速核查与修正。这样，在招投标阶段就能最大程度避免因工程量计算失误导致的成本增加，为后续项目建设全过程成本控制奠定坚实基础。

### （三）过程管控维度

#### 1. 标后合同交底规程

标后合同交底规程旨在确保合同条款在项目实施中得到准确执行，助力全过程成本优化。需组织相关部门与人员参与交底会议，详细解读合同中价格组成明细，包括各项费用的构成、计算

依据等，让各方明确成本核算的基础。同时，针对调价触发条件进行重点阐释，如市场材料价格波动幅度、政策法规变更等，使项目团队清晰知晓在何种情况下可进行价格调整以及调整的流程。通过全面、深入的合同交底，使项目参与人员对合同中的成本相关关键信息有清晰认识，避免因理解偏差导致成本失控，确保项目在执行过程中能依据合同约定合理控制成本，实现成本优化目标。

#### 2. 成本预警响应机制

建立成本预警响应机制，需首先确立 EPC 项目设计变更与成本异动的敏感性关联预警指标。通过精准识别设计变更中诸如工程规模调整、技术标准改变等关键因素，与成本变动建立量化关系。当这些指标达到预设阈值时，及时触发预警。项目团队一旦收到预警，迅速响应，组织相关专业人员对变更影响进行全面评估，包括对工期、质量及后续运营成本的影响。深入分析成本异动原因，如市场价格波动、设计缺陷等，据此制定针对性策略。若是价格波动，考虑调整采购计划或寻求替代材料；若是设计问题，及时修正设计。确保在成本超出可控范围前，采取有效措施加以应对，实现成本的动态优化与精准控制。

## 五、总结

招投标管理对工程造价及成本有着至关重要的影响。招投标管理制度创新为工程造价的合理确定提供坚实保障，通过优化流程、规范操作，能确保价格真实反映项目价值，避免造价虚高或过低。电子化、智能化转型则显著提升成本控制精度，借助信息技术实现对成本的实时监控与精准分析，及时发现并纠正偏差。而构建全过程数字监管体系，更能从项目发起到结束，全方位把控招投标环节，进一步提升管理效能，降低潜在风险。总之，持续推进招投标管理在制度、技术及监管层面的优化，有助于实现工程造价的合理控制与成本的有效降低，推动建筑行业高质量发展。

## 参考文献

- [1] 董威佐. RC 公司招投标风险管理研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2021.
- [2] 樊宸希. 营改增”对水利工程造价的影响及管理对策研究 [D]. 四川大学, 2021.
- [3] 王大伟. W 建筑工程招标投标过程管理优化研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 高晓薇. 天津市公路工程招标投标管理研究 [D]. 天津科技大学, 2022.
- [5] 龙云云. 基于费用构成要素分析“营改增”对工程造价影响研究 [D]. 广州大学, 2021.
- [6] 任巨星. 工程项目管理对工程造价的影响分析及成本控制策略分析 [J]. 商业观察, 2022, (28): 81-84.
- [7] 沈彩妹. 建设工程造价全过程跟踪管理对成本控制的影响 [J]. 广西城镇建设, 2021, (09): 100-102.
- [8] 白婷. 装配式建筑工程造价成本控制及影响分析 [J]. 建筑与预算, 2024, (06): 70-72.
- [9] 陈明虎. 施工企业工程造价成本控制分析 [J]. 中国招标, 2022, (09): 156-158.
- [10] 钟雨妙. 动态成本控制在建筑工程造价管理中的应用研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (21): 118-120.

# 膨胀加强带代替后浇带施工技术管理探索

姚伟宙

广东五华二建工程有限公司广州分公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120037

**摘 要：** 在超长混凝土结构施工中，传统后浇带技术因封闭周期长、清理困难、易形成渗水隐患及影响结构整体性与连续施工等问题，日益成为制约工程进度与质量的关键因素。文章以广东培正学院二期公共教学实验楼建设项目为案例，阐述了膨胀加强带在施工材料控制、温度裂缝防治、浇筑工艺、养护管理及细部节点处理等方面面临的管理难题。针对这些难题，提出了相应的解决措施，包括优化混凝土配合比与入模温度控制、精细化浇筑与振捣流程、实施全过程动态养护管理、强化构造设计与施工缝处理等。

**关 键 词：** 膨胀加强带；后浇带；超长混凝土结构；大体积混凝土；裂缝控制

## Exploration of Construction Technology Management for Replacing Post-Poured Strips with Expansion Reinforcing Strips

Yao Weizhou

Guangzhou Branch of Guangdong Wuhua Erjian Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** In the construction of super-long concrete structures, traditional post-pouring strip technology has increasingly become a critical factor restricting project progress and quality due to issues such as long closure periods, difficulties in cleaning, potential water leakage risks, and impacts on structural integrity and continuous construction. Taking the construction project of the second-phase public teaching and experimental building at Guangdong Peizheng College as a case study, this paper elaborates on the management challenges faced by expansion reinforcement bands in aspects such as construction material control, temperature crack prevention, pouring processes, curing management, and detailed node treatment. In response to these challenges, corresponding solutions are proposed, including optimizing concrete mix proportions and controlling mold entry temperatures, refining pouring and vibration processes, implementing dynamic curing management throughout the entire process, and strengthening structural design and construction joint treatment.

**Keywords：** expansion reinforcement band; post-pouring strip; super-long concrete structure; mass concrete; crack control

## 引言

为解决混凝土收缩和温度变化引起的开裂问题，设置后浇带已成为工程界的常规做法。然而，在实际施工中，后浇带技术暴露出诸多弊端，其长达60天的封闭期严重中断了后续砌筑、机电安装等工序的连续进行，成为制约工期的关键路径；后浇带接口处难以彻底清理，常导致新旧混凝土结合不良，形成渗水通道，埋下质量隐患；此外，在后浇带封闭前，地下室结构被分割为独立的区块，无法形成整体受力体系，在土方回填等工况下面临侧向土压力导致位移或钢筋变形的风险。

## 一、膨胀加强带代替后浇带施工技术管理的重要性

### （一）保障工程质量与结构安全的核心基石

施工技术管理是确保膨胀加强带成功应用，从而保障工程质量和结构安全的基石。该技术并非简单的材料替换，而是一套复杂的系统工程。膨胀剂的掺量、与其他原材料的适应性、混凝土的入模温度、浇筑的连续性、振捣的均匀性以及养护的及时性与

持久性，任何一个环节的管理失控，都可能导致膨胀效能不达预期，甚至引发更为严重的开裂风险。严格的技术管理，通过事前策划、事中控制和事后检验，将设计意图和规范要求转化为每一方混凝土、每一道工序的精准执行。它确保了膨胀加强带能够有效地产生预压应力，抵消混凝土的收缩拉应力，从而从根本上抑制有害裂缝的产生，保障结构的整体性、耐久性和防水性能，为建筑的长久安全奠定坚实基础<sup>[1]</sup>。



## （二）实现工程效率与经济效益的关键驱动

精细化的技术管理是释放膨胀加强带技术工期与成本优势的关键驱动。与传统后浇带长达60天的封闭等待期相比，膨胀加强带实现了超长结构的连续浇筑。精确的混凝土供应计划管理以确保连续浇筑、合理的劳动力与机械调配以避免施工冷缝、以及通过精细化养护管理缩短关键路径工期。有效的管理能够将技术优势转化为实实在在的进度领先，使砌筑、机电安装等后续工序得以提前插入，形成流水作业，显著缩短总工期。同时，它避免了后浇带后期清理、支护、界面处理等复杂工序和高昂成本，减少了因渗漏风险而引发的后期维修投入，实现了降本增效的综合目标。

## （三）提升项目综合管理与风险防控水平的重要抓手

推行膨胀加强带技术的过程，本身就是全面提升项目管理水平的契机。该技术横跨材料、结构、施工等多个专业，要求项目团队建立更高层次的协同管理机制。从与搅拌站的技术协调，到对劳务班组的精细化交底与过程监督，再到对养护工作的制度化管控，每一个环节都要求管理前置、责任到人。这一过程极大地强化了项目团队的技术集成能力、过程管控能力和风险预见能力。它迫使管理者必须主动识别并应对诸如原材料质量波动、温度应力失控、养护中断等潜在风险，从而建立起一套更为严谨、科学的质量保证体系。因此，对这一技术的管理探索与实践，不仅解决了具体的技术难题，更锤炼了项目管理团队，提升了整个项目的综合管理成熟度和风险防控能力。

# 二、膨胀加强带代替后浇带施工技术管理的难题

## （一）混凝土原材料与配合比的精准控制难题

膨胀加强带技术的成败，首在于混凝土本身。其管理难点在于如何实现膨胀与强度的平衡。首先，膨胀剂的品牌、型号、掺量必须精确无误，其与所用水泥、掺合料（如粉煤灰）的适应性需经过严格的试验验证。若适应性不良或掺量不当，要么膨胀效能不足，无法有效补偿收缩；要么膨胀过大或过快，在混凝土强度未充分发展时产生破坏，反而导致开裂或强度下降。其次，配合比设计需在满足设计强度和工作性的前提下，最大限度地降低水泥用量和水化热。水泥用量过高会导致水化热集中释放，温度收缩应力增大，可能抵消甚至超过膨胀带来的压应力。此外，对砂、石等骨料的质量要求也更为苛刻，含泥量、级配不良都会影响混凝土的匀质性和收缩性能，给裂缝控制带来不确定性<sup>[2]</sup>。

## （二）温度裂缝的系统性防控难题

大体积混凝土的核心挑战是温度裂缝，而膨胀加强带混凝土对温度更为敏感。管理难题体现在：第一，入模温度控制涉及搅拌、运输、浇筑多个环节，管理链条长。若搅拌站对骨料遮阳降温、使用低温拌合水等措施执行不到位，或运输途中交通堵塞、现场泵送不畅导致等待时间过长，都会使混凝土入模温度过高，加剧了内部温升。第二，混凝土内部最高温升（ $T_{max}$ ）与内外温差（ $\Delta T$ ）的控制是难点。若保温保湿养护不及时、不到位，过大的内外温差会使表面产生拉应力，而膨胀剂产生的压应力主要集

中在内部，对表面约束有限，极易导致表面温度裂缝。这些表面裂缝可能发展为贯穿性裂缝，破坏结构的整体性和防水性。

## （三）混凝土浇筑与振捣的精细化组织难题

膨胀加强带的施工要求连续、均衡、高效，对施工组织管理提出了极高要求。首先，浇筑计划必须周密，需精确计算混凝土供应能力、泵车布置与罐车周转效率，确保混凝土供应速度大于初凝速度，任何中断都可能形成冷缝，成为结构薄弱环节。其次，在加强带与普通混凝土的交界处通常设置密孔钢丝网进行分隔，此处的振捣作业尤为关键。振捣不足会导致交接处不密实，形成渗水路径；振捣过度或方式不当则可能破坏钢丝网，导致两种混凝土混淆，使加强带失去作用。此外，对于大体积底板的分层浇筑厚度、墙体混凝土的下料高度、预埋件和钢筋密集区域的振捣等，都需要进行极其精细的现场监督与控制，防止离析、漏振、过振等现象发生<sup>[3]</sup>。

## （四）养护工作的持续性与全面性保障难题

对于补偿收缩混凝土而言，“养护重于浇筑”并非虚言。膨胀剂的水化反应需要充足且持续的水分供应。管理难题在于：第一，养护的及时性难以保证。混凝土初凝后需立即开始保湿养护，但实际操作中常因收光作业、人员安排等因素而延误，导致混凝土表面失水，膨胀效能大打折扣，甚至早期塑性收缩开裂。第二，养护的全面性与持久性挑战大。底板、顶板需要大面积覆盖并持续洒水或蓄水养护；墙、柱等竖向结构拆模后，覆盖塑料薄膜的密封性难以保证，且养护操作更为困难。规范要求养护期不少于14天，但在赶工期的压力下，养护工作往往被提前终止，这使得混凝土后期收缩得不到充分补偿，仍存在开裂风险。

## （五）细部节点与构造处理的标准化难题

膨胀加强带并非一个孤立的带状区域，其需要与整个结构协同工作，因此其细部构造处理至关重要。首先，加强带本身的构造加强措施，如增设的直径、间距、锚固长度等，必须严格按设计施工，若绑扎不牢固或尺寸不足，将无法有效约束膨胀并分散应力。其次，施工缝的处理是另一个管理难点。水平施工缝（如底板以上500mm处外墙）设置的止水钢板，其焊接质量、安装位置必须精确，否则会成为渗漏点。在跳仓法施工中，施工缝的凿毛、清理工作若不到位，新旧混凝土结合面强度将严重不足。所有这些细部节点，如果缺乏标准化的作业流程和严格的验收程序，都会成为潜在的质量缺陷点，影响膨胀加强带的整体效果。

# 三、膨胀加强带代替后浇带施工技术管理的解决措施

## （一）强化混凝土原材料的协同设计与动态管控

建立“搅拌站—施工现场—实验室”三方联动的原材料管控机制。首先，在施工前，应组织进行详细的混凝土配合比试配论证，不仅要测定抗压强度，更要重点检测混凝土的限制膨胀率、干缩率等关键指标，确保其满足设计要求。与搅拌站签订技术协议，明确所有原材料（水泥、膨胀剂、粉煤灰、骨料、外加剂）的品牌、规格和技术参数，并建立进场验收与留样封存制度。其次，推行动态配合比调整机制。根据现场气温、湿度变化及入模



温度监测结果，及时与搅拌站沟通，微调用水量或外加剂掺量，但必须保证膨胀剂掺量的准确性。通过掺加优质粉煤灰等掺合料，等量替代部分水泥，从根本上降低水化热和混凝土的收缩趋势<sup>[4]</sup>。

**（二）构建全过程、多层次的温度监控与防控体系**

实施从“出场”到“入模”再到“内部”的全链条温度管理。一是源头控制，要求搅拌站对骨料场实施遮阳覆盖、喷水降温，使用冷水机组制备低温拌和水，从源头上降低混凝土出机温度。二是过程管控，合理规划运输路线，确保道路畅通，对混凝土罐车和泵管采取隔热覆盖措施，最大限度减少运输和泵送过程中的温升。三是现场精准控制，严格监测每车混凝土的入模温度，确保其不高于环境温度5K。对于大体积混凝土，预埋温度传感器，建立自动化温度监测系统，实时掌握内部温度场变化。根据监测数据，及时调整表面保温层（如覆盖土工布、草帘等）的厚度，将内外温差严格控制在25℃以内，有效防范温度裂缝。

**（三）实施精细化的浇筑流程与标准化振捣作业**

推行“计划先行、交底到位、过程可控”的精细化浇筑管理模式。首先，编制详尽的专项施工方案，精确计算每个仓段的混凝土方量、浇筑时长，合理配置泵车、罐车及作业人员，并制定应急预案。其次，开展全员技术交底，使每位操作工人，特别是振捣工，清楚掌握加强带位置、钢丝网保护、分层下料厚度、“快插慢拔”振捣要领等关键技术要求。在施工中，实行旁站监理与专职质检员巡查制度，重点监控以下环节：加强带两侧钢丝网附近的振捣，应采用小型振捣棒谨慎操作，确保密实且不破坏隔挡；对大体积混凝土推行“二次复振”制度，在初凝前进行，以消除早期塑性沉降裂缝；严格控制自由下落高度，使用串筒或溜槽防止离析。通过标准化作业和全过程监督，确保混凝土浇筑的均匀性、连续性和密实性。

**（四）推行“及时、全面、足期”的养护保障制度**

确立“养护是第二道浇筑”的管理理念，建立制度化的养护工作程序。第一，确保养护的及时性。在混凝土初凝后、终凝前，即完成第一次抹压并立即覆盖塑料薄膜，锁住水分。对于板面结构，可采用“喷雾+覆盖”的先进养护工艺，在覆盖薄膜前进行喷雾，形成高湿环境。第二，确保养护的全面性。底板、顶

板在收光后应立即覆盖塑料薄膜，之上再覆盖吸水性强的土工布或草帘并定期洒水保持湿润。竖向结构拆模后，应立即喷涂养护剂或包裹塑料薄膜，并确保接缝密封严密。第三，确保养护的周期性。下达硬性指令，养护期不得少于14天，并建立养护台账，责任到人，每日记录养护情况，由项目技术负责人进行不定期抽查，将养护质量与班组绩效考核挂钩，杜绝形式主义养护<sup>[5]</sup>。

**（五）统一细部节点处理标准与强化过程验收**

编制《膨胀加强带及细部节点施工标准化图集》，对关键构造进行可视化技术交底。首先，对于膨胀加强带内增设的构造钢筋，严格检查其规格、间距、长度及绑扎质量，确保其与上下层主筋可靠连接，形成有效的约束体系。其次，对止水钢板，重点控制其接头焊接质量（双面满焊）、安装居中性与固定牢固度，在混凝土浇筑前进行专项隐蔽验收。对于所有施工缝（包括跳仓缝），在下次浇筑前，必须执行“凿毛—清—冲—湿”四步法：即凿除浮浆直至露出坚实石子，用钢丝刷清理干净，用高压水枪冲洗，并在浇筑前提前24小时湿润（浇筑时清除明水）。通过将细部节点作业标准化、流程化，并强化过程中的检查与验收，才能确保每一个环节的施工质量，最终实现膨胀加强带技术的整体成功。

**四、结束语**

综上所述，膨胀加强带代替后浇带施工技术管理，要从混凝土原材料的精准协同设计，到入模与内部温度的系统性控制；从浇筑振捣的标准化、精细化作业，到及时、全面、足期的强制性养护；再到每一个细部节点的标准化处理与严格验收，每一个环节都环环相扣，不容有失。实践证明，只有通过科学的管理制度、严谨的技术方案、到位的技术交底和严格的过程监控，将管理措施落实到施工的每一个细节，才能充分发挥膨胀混凝土的补偿收缩效能，有效控制各类裂缝的产生，最终实现保障结构安全、耐久与使用功能的根本目标。广东培正学院二期公共教学实验楼建设项目采用膨胀加强带施工技术，对简化施工、缩短工期、控制结构裂缝、提高经济效益起到非常明显的效果。

**参考文献**

[1] 庞戈, 崔延琬, 杜海, 等. 膨胀加强带代替后浇带可行性分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(6):366.  
[2] 张敏. 膨胀加强带代替后浇带的施工技术研究 [J]. 江西建材, 2021(6): 118-119.  
[3] 李冉, 袁彬, 李佳俊. 后浇带的优化——膨胀加强带的实际应用 [J]. 魅力中国, 2021(20): 490-491.  
[4] 周昊男. 膨胀加强带代替后浇带的施工方法 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(15): 1522.  
[5] 陈正磊, 贾春明, 关锁柱. 地下室混凝土结构膨胀加强带代替后浇带施工技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2023(21): 187-189.

# 热敏纸生产工艺对白纸老化的影响探索

梁冬梅

广东冠豪高新技术股份有限公司，广东 湛江 52400

DOI:10.61369/ERA.2025120040

**摘 要：** 文章围绕热敏纸生产工艺与白纸老化的关联展开研究，结合实验数据与理论分析，探究原纸选择等生产环节对白纸老化的影响机制。通过对不同原纸、双酚类显色剂及工艺参数的对比实验，发现化机浆中木素含量等条件是影响白纸老化保留率的关键因素。研究表明，采用低木素含量原纸、不对称结构显色剂并优化涂布干燥工艺，可显著提升热敏纸白纸老化稳定性，为热敏纸生产工艺优化及质量提升提供理论与实践依据。

**关 键 词：** 热敏纸生产工艺；白纸老化；影响

## Exploration of The Impact of Thermal Paper Production Process on White Paper Aging

Liang dongmei

Guangdong Guan hao High-tech Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

**Abstract：** This article focuses on the relationship between the production process of thermal paper and the aging of blank paper, exploring the impact mechanism of production processes such as base paper selection on the aging of blank paper through experimental data and theoretical analysis. Through comparative experiments on different base papers, bisphenol developers, and process parameters, it was found that conditions such as the lignin content in chemimechanical pulp are key factors affecting the aging retention rate of blank paper. The study indicates that using base paper with low lignin content, developers with asymmetric structures, and optimizing the coating and drying processes can significantly enhance the aging stability of thermal paper's blank paper, providing theoretical and practical foundations for optimizing the production process and improving the quality of thermal paper.

**Keywords：** production process of thermal paper; aging of blank paper; impact

### 引言

近年来，国内热敏纸市场面临高端产品质量不足、低端产品毛率低且保存期短的困境，尤其在东南亚、非洲等高温高湿地区，白纸老化导致的褪色问题频发，严重影响产品竞争力。现有研究多聚焦于热敏材料本身，对生产工艺各环节与白纸老化的系统性关联探索较少。文章从热敏纸生产全流程出发，结合原纸选择、显色剂研发、涂布干燥等核心工艺环节，通过实验数据分析与理论推导，揭示生产工艺对白纸老化的影响规律，旨在为解决热敏纸白纸老化问题、优化生产工艺提供科学支撑，推动国内热敏纸产业技术升级与市场竞争力提升。

### 一、热敏纸生产工艺对白纸老化的影响研究背景

当前，全球热敏纸市场呈现“高端垄断、低端竞争”的格局，国外企业凭借先进技术，在高端热敏纸市场占据主导地位，其产品具有清晰度高、抗老化性强、保存期长等优势，而国内企业多集中于低端市场，面临多重质量与竞争难题。从产品质量来看，高端产品频繁出现质量投诉，主要问题包括清晰度下降、粘头、产品褪色及不防胶带等；低端产品则存在毛率低、保存期短的问题，尤其在高温高湿环境下，白纸老化速度加快，部分产品在4 ~ 6小时内即无法显色，无法满足用户对保存期的基本需求。

从市场竞争来看，国内低端热敏纸产品因技术含量低，多依靠价格战抢占市场，利润空间狭小，且随着东海岛超规模项目等产能扩张，若市场占有率与产品质量无法同步提升，行业竞争形势将更为严峻。

### 二、热敏纸显色与老化理论基础

#### （一）热敏材料组成与显色原理

热敏纸的热敏材料主要由电子给予体（热敏染料）、电子接受体（显色剂）及溶剂型化合物（调节剂）组成。电子给予体为

无色染料，常见类型包括三芳烷类、茋烷类等，决定显色后的颜色；电子接受体为显色剂，如酚类、羧酸类等，决定颜色深浅；溶剂性化合物多为醇类、酯类，通过熔点变化调节变色温度，当温度高于熔点时起消色作用，低于熔点时则促进发色<sup>[1]</sup>。

以茋烷类染料（如化学名称为2-苯氨基-3-甲基-6-二丁氨基茋烷）为例，其显色过程依赖分子内部内酯环的开裂：无色的茋烷分子与显色剂接触时，内酯环断裂形成大的共轭体系，中心碳原子由  $sp^3$  杂化转为  $sp^2$  杂化，分子结构的变化使其吸收波长移至可见光区域，从而呈现颜色。但形成的有色体稳定性较差，在有机介质中易发生褪色反应，且受紫外线、氧气等因素影响，进一步缩短保存期。

## （二）白纸老化褪色机制

白纸老化是指未显色的热敏纸在储存过程中，因内部成分反应或外部环境影响，导致纸张白度下降、后续显色性能减弱的现象。从内部因素来看，原纸中的木素与显色剂的反应是核心诱因。木素是一种由苯基丙烷结构单元（ $C_6-C_3$  单元）通过醚键、碳-碳键连接而成的芳香族高分子化合物，分子中含有甲氧基（ $-OCH_3$ ）、羟基（ $-OH$ ）等官能基，其中甲氧基易与显色剂（如双酚类）中的羟基发生亲核取代反应，破坏显色剂的释放质子能力，导致后续显色困难。

# 三、热敏纸生产工艺对白纸老化的影响

## （一）原纸选择对白纸老化的影响

原纸作为热敏纸的基材，其成分与性能直接影响白纸老化效果，核心差异在于木素含量，而木素含量又与原纸所用纸浆类型密切相关。根据纸浆类型，原纸可分为非化机浆原纸（国内原纸1、国外原纸2）与含化机浆原纸（国内原纸2、国内原纸3、国内原纸4），两类原纸在白纸老化保留率上呈现显著差异<sup>[2]</sup>。

通过恒温恒湿老化实验（60℃，100%RH）发现，非化机浆原纸的白纸老化保留率显著更高：国内原纸1以化学浆为主，木素含量极低，在145小时老化后，白纸老化保留率仍能维持在80%以上；国外原纸1以脱墨浆为主，虽纸质较差且废纸来源不稳定，但因木素含量低于化机浆原纸，其老化保留率也优于含化机浆原纸。

含化机浆原纸因木素含量高，老化保留率普遍较低：国内原纸2、国内原纸3在45小时老化后，保留率降至20%~30%；国内原纸4在100小时老化后，保留率不足50%。木素对白纸老化的影响机制主要体现在其化学性质：木素分子中的甲氧基（ $-OCH_3$ ）易与显色剂中的羟基发生亲核取代反应，生成甲醇等产物，破坏显色剂的释质子能力，导致后续显色时无法有效与热敏染料反应，进而降低白纸老化保留率。此外，木素中的酚羟基在高温高湿条件下易发生氧化反应，生成有色物质，直接导致纸张白度下降。

## （二）显色剂类型与配比对白纸老化的影响

显色剂作为热敏材料的核心组成部分，其分子结构、类型及配比是影响白纸老化的关键因素。根据化学结构，常用显色剂可

分为双酚类（如2,2-双(4-羟基苯基)丙烷、4,4'-二羟基二苯砜、4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜、4,4'-磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚）、苯甲酸衍生物等，其中双酚类显色剂因性能稳定、成本适中，在热敏纸生产中应用最广，但不同双酚类显色剂的白纸老化性能差异显著<sup>[3]</sup>。

### 1. 显色剂分子结构的影响

分子结构对称性是决定双酚类显色剂老化性能的核心因素。实验数据表明，结构对称的显色剂（如2,2-双(4-羟基苯基)丙烷、4,4'-二羟基二苯砜）白纸老化保留率低：在6小时老化后，2,2-双(4-羟基苯基)丙烷的保留率不足40%，24小时后降至20%以下；而结构不对称或苯环上带有支链的显色剂（如4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜、4,4'-磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚、BPC、BPOPPA）保留率显著更高：4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜在6小时老化后保留率约80%，24小时后仍维持在70%以上；4,4'-磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚在145小时老化后，保留率仍能达到60%以上。

这一差异的本质是空间位阻效应：对称结构的显色剂分子空间阻碍小，木素中的甲氧基易进攻其羟基，发生亲核取代反应；而不对称结构或带支链的显色剂，支链形成的空间位阻增大了甲氧基与羟基的反应难度，从而减少显色剂的损耗，提升白纸老化保留率。例如，4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜（4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜）的异丙氧基支链，能有效阻挡木素活性基团的进攻，延缓老化反应。

### 2. 显色剂配比的影响

显色剂在面涂料中的配比也会影响白纸老化性能。以SY203型热敏纸（基于华泰原纸）为例，通过调整显色剂比例进行实验发现：当显色剂比例从20%提升至27%时，白纸老化保留率在4小时后从55%提升至65%；继续提升至30%，保留率进一步提升至68%，但此时增感剂比例降低，导致显色清晰度下降，从1.20D（光密度值）降至0.90D，无法满足打印清晰度要求。

由此可见，显色剂配比存在最优区间：过高的配比虽能提升老化保留率，但会牺牲显色性能；过低则老化保留率不足。实际生产中需根据产品需求，在老化性能与显色清晰度之间寻求平衡，一般将显色剂比例控制在25%~28%，既能保证白纸老化保留率在60%以上（4小时老化后），又能维持1.00D以上的显色清晰度<sup>[4]</sup>。

## （三）涂布工艺对白纸老化的影响

涂布工艺包括预涂料涂布与面涂料涂布，其核心参数（涂布量、均匀度、涂布速度）直接影响涂层结构与原纸-涂层界面状态，进而作用于白纸老化过程。

### 1. 预涂料涂布的影响

预涂料的作用是隔离原纸与面涂料，减少木素向面涂层的迁移。实验表明，预涂料涂布量与均匀度对老化性能影响显著：当预涂料涂布量从5g/m<sup>2</sup>提升至8g/m<sup>2</sup>时，基于国内原纸1的热敏纸（使用2,2-双(4-羟基苯基)丙烷显色剂）在24小时老化后，保留率从25%提升至38%；若涂布量不足5g/m<sup>2</sup>，预涂层存在孔隙，木素易通过孔隙迁移至面涂层，加速显色剂损耗；若涂布量

超过10g/m<sup>2</sup>，虽能进一步提升保留率至42%，但会增加生产成本，且导致纸张厚度增加，影响打印适配性。

## 2. 面涂料涂布的影响

面涂料涂布量决定了热敏材料的总量，直接影响白纸老化后的显色能力。以107型热敏纸（非化机浆原纸）为例，当涂布量从12g/m<sup>2</sup>降至8g/m<sup>2</sup>时，100小时老化后，保留率从78%降至65%，主要原因是涂布量不足导致显色剂总量减少，少量损耗即会显著影响后续显色；若涂布量提升至15g/m<sup>2</sup>，保留率可提升至82%，但会增加原材料成本，且可能导致涂层附着力下降，出现掉粉现象。

涂布速度也会影响涂层质量：速度过快（超过20m/min）会导致涂层出现条纹，局部厚度不均；速度过慢（低于10m/min）则会降低生产效率。综合成本与性能，面涂料涂布量一般控制在10～13g/m<sup>2</sup>，涂布速度控制在12～18m/min，可在保证老化性能的同时，兼顾生产效率与成本。

## （四）干燥工艺对白纸老化的影响

干燥工艺包括热风干燥温度、湿度与时间，其核心作用是去除涂层中的水分，减少水分对木素-显色剂反应的促进作用。实验数据显示，干燥不充分是导致白纸老化加速的重要因素：当热风干燥温度从80℃降至60℃时，涂层水分残留率从3%提升至8%，基于华泰原纸的热敏纸（4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜显色剂）在45小时老化后，保留率从65%降至52%；若干燥时间从3分钟缩短至1分钟，水分残留率提升至10%，保留率进一步降至48%。

水分对老化的促进机制主要体现在两方面：一是水分作为介质，增强木素与显色剂分子的运动能力，加速反应速率；二是水分会导致木素中的醚键断裂，生成更多活性基团（如酚羟基），进一步增加与显色剂的反应概率。实际生产中，需根据涂布量调整干燥参数：当涂布量为10～13g/m<sup>2</sup>时，热风干燥温度控制在85～95℃，湿度控制在15%～20%，干燥时间控制在2.5～3.5分钟，可将涂层水分残留率控制在2%～4%，有效延缓白纸老化<sup>[5]</sup>。

## （五）压光工艺对白纸老化的影响

压光工艺通过压力与温度的作用，优化纸张表面平滑度与涂层致密性，间接影响白纸老化性能。实验发现，压光压力与温度

存在最优范围：当压力从500kPa提升至800kPa时，纸张表面平滑度从200s（贝克平滑度）提升至400s，基于国内原纸3的热敏纸（4,4'-二磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚显色剂）在100小时老化后，保留率从58%提升至65%；继续提升压力至1000kPa，平滑度提升至500s，但保留率仅提升至66%，且可能导致涂层破裂，出现“压花”现象。

压光温度的影响也类似，温度从60℃提升至90℃时，涂层致密性增强，木素迁移难度增大，保留率从60%提升至65%；温度超过100℃，则可能导致热敏材料提前反应，出现“预显色”，影响纸张白度。综合来看，压光工艺参数宜控制为：压力700～800kPa，温度80～90℃，此时纸张平滑度可达350～400s，涂层致密性良好，既能减少木素迁移，又能避免涂层损伤，保障白纸老化性能。

## （六）原纸润湿工艺对白纸老化的影响

原纸在涂布前需经过润湿处理，目的是调节原纸水分含量，提升涂层附着力，但润湿程度会影响原纸中木素的活性。实验表明，原纸水分含量控制在6%～8%时，白纸老化性能最优：以国内原纸4为例，水分含量为7%时，24小时老化后保留率为57%；若水分含量降至4%，原纸脆性增加，涂布时易出现涂层开裂，保留率降至50%；若水分含量提升至10%，木素活性增强，与显色剂的反应速率加快，保留率降至52%。

## 四、结束语

文章系统研究了热敏纸生产工艺各环节对白纸老化的影响，明确了原纸木素含量、显色剂分子结构与配比、涂布干燥及压光分切工艺是关键影响因素，并提出针对性优化方案。通过原纸预处理、显色剂优化及工艺参数协同调整，可显著提升热敏纸白纸老化性能，如低端热敏纸产品优化后，24小时老化保留率从18%提升至58%，满足市场对保存期的基本需求。未来可进一步开展染料、胶乳等其他原材料与白纸老化的关联研究，建立更完善的工艺-性能理论体系，推动热敏纸产业技术升级。

## 参考文献

- [1] 赵海. 热敏纸的现代化生产工艺[J]. 上海轻工业, 2025(1): 162-165.
- [2] 王桂荣, 张立. 热敏纸高速涂布整饰设备[J]. 轻工机械, 2022, 40(2): 80-85.
- [3] 三菱高科技制纸欧洲公司对热敏纸提价[J]. 造纸信息, 2023(10): 56.
- [4] 崔叶, 田晓莉. 热敏纸的发展及生产工艺[J]. 家庭生活指南, 2021, 37(7): 35, 55.
- [5] 李熹. 两性PAM干强剂在热敏原纸中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(6): 1-2, 27.



# 现代船舶建造工艺流程优化研究

欧阳荣

中国船级社实业有限公司武汉分公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025120046

**摘要：** 随着全球航运业的快速发展，船舶建造工艺的优化成为提升船舶生产效率和质量的关键。本文基于现代船舶建造的实际需求，探讨了工艺流程中的瓶颈和优化方法，重点分析了设计阶段、生产阶段、装配阶段等关键环节的优化路径。通过分析船舶建造流程中的资源配置、时间管理、生产调度及质量控制，提出了一些创新的优化策略，如计算机辅助设计（CAD）与自动化生产技术的结合、信息化管理系统的应用等，以期提高船舶建造的整体效率，降低成本，缩短交货周期。研究表明，流程优化不仅有助于提高船舶建造质量，也能显著提高企业的市场竞争力。

**关键词：** 船舶建造；工艺流程；优化；自动化；信息化

## Research on Optimization of Modern Shipbuilding Process Flow

Ouyang Rong

Wuhan Branch, China Classification Society Industrial Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

**Abstract：** With the rapid development of the global shipping industry, optimizing shipbuilding processes has become crucial for enhancing production efficiency and quality. Based on the practical needs of modern shipbuilding, this paper explores the bottlenecks and optimization methods in the process flow, focusing on the optimization paths of key stages such as design, production, and assembly. By analyzing resource allocation, time management, production scheduling, and quality control in the shipbuilding process, this paper proposes innovative optimization strategies, such as the integration of computer-aided design (CAD) with automated production technologies and the application of information management systems, aiming to improve overall shipbuilding efficiency, reduce costs, and shorten delivery cycles. The research indicates that process optimization not only helps improve shipbuilding quality but also significantly enhances the market competitiveness of enterprises.

**Keywords：** shipbuilding; process flow; optimization; automation; informatization

## 引言

随着船舶产业的不断发展，市场对高效、低成本、高质量船舶的需求不断增加。然而，传统的船舶建造工艺存在诸多瓶颈，如生产周期长、资源利用率低、质量控制难度大等问题。为了适应市场需求，优化船舶建造工艺流程成为了亟需解决的课题。本文将通过对现代船舶建造流程的深入分析，探讨如何通过技术创新和管理优化，提高船舶建造的效率和质量。研究重点包括设计阶段的数字化转型、生产过程中的自动化应用、装配环节的智能化管理等。

## 一、船舶建造工艺流程概述

### （一）船舶建造的基本流程

船舶建造的设计阶段是起始环节，包括概念设计、初步设计和详细设计。设计团队根据客户需求和技術要求确定船舶的尺寸、结构和功能。现代设计依赖计算机辅助设计（CAD），通过数字化手段精确模拟船舶结构，确保设计的合理性与可行性，同时优化结构强度、航行性能和制造可行性。设计阶段的顺利完成直接影响后续生产和装配的效率与质量。生产阶段是建造的核心，涉及船舶部件的制造和加工。使用高精度设备和自动化生产

线，如激光切割和机器人焊接，提升了生产效率和精度。此外，生产还包括物料采购、运输和存储，合理的物流管理能减少因材料短缺或浪费造成的延误<sup>[1]</sup>。装配阶段是船舶建造的最后环节，将各个生产阶段制造的零部件进行组装，最终形成完整的船体结构。装配过程包括船体的拼接、焊接、涂装等工作，同时进行各类系统的安装，如电气系统、动力系统、管道系统等。随着装配技术的发展，现代船舶建造越来越注重装配过程的精细化管理与优化，采用精密的装配线、自动化工具及设备来提高装配效率，确保船舶的装配质量。

## （二）现有建造工艺的主要问题

当前，船舶建造工艺中存在一些亟待解决的问题，主要包括生产周期长、资源配置不合理和质量控制不完善等。生产周期长是普遍问题，因船舶建造需要定制化设计和复杂加工，且规模较大、工序繁杂，导致从设计到交付的时间较长。某些环节因工艺技术、设备或人员不足，可能拖延工期，影响建造周期。资源配置不合理也影响效率，船舶建造涉及大量物料、设备和人力的调配，资源不当使用可能导致浪费或不足，影响生产进度和质量。如材料运输、储存等环节未衔接好，容易造成滞后或损坏。质量控制不完善是另一个问题，尽管有质量管理体系，复杂的工序和环节仍可能出现漏洞，部分工序未全程监控或交接时缺乏检验，造成船舶潜在质量问题，影响整体性能和安全性<sup>[2]</sup>。

## 二、船舶设计阶段的优化

### （一）计算机辅助设计（CAD）的应用

数字化船舶设计是船舶设计阶段的重要创新，它借助计算机技术，使设计工作从传统的手工绘图向数字化转型。利用计算机辅助设计（CAD）软件，设计师可以在虚拟环境中完成船舶各个部分的建模和优化，不仅提高了设计效率，还减少了人为错误的发生。数字化设计可以对船舶的每个细节进行精确模拟，例如船体的结构强度、航行性能等，从而提前发现潜在问题并进行优化。根据统计，采用CAD设计的船舶在结构优化方面可提高约15%的设计精度，降低设计修改的次数和成本<sup>[3]</sup>。虚拟仿真技术的利用是数字化船舶设计的重要组成部分。虚拟仿真技术通过建立虚拟船舶模型，能够对船舶的各种性能进行实时仿真分析，如流体力学、结构强度、动力学等。

### （二）设计与生产的协同优化

设计与工艺流程的对接是提升船舶建造效率的关键。传统船舶设计与生产脱节，导致设计图纸与实际生产不匹配，出现频繁修改。通过实现设计与生产的协同优化，设计阶段可与生产部门实时沟通，按生产工艺要求调整设计。采用集成设计与生产管理系统（PDM/PLM系统）可以将设计与生产工艺数据无缝对接，确保设计考虑生产可行性和效率，从而提高生产效率和质量。研究表明，设计与生产协同优化可将生产周期缩短15%~20%。设计变更对生产的影响也需重点考虑，尤其在客户需求或技术更新时。设计变更通常会导致生产延误或资源浪费。通过提前与生产环节沟通协调，能更有效管理设计变更，减少对生产计划的冲击。调查显示，优化设计变更管理后，生产计划延误可减少30%以上<sup>[4]</sup>。

### （三）设计标准化与模块化

标准化设计流程在船舶建造中至关重要，它通过统一设计标准和规范化工作流程，减少设计中的变动和重复工作，提高设计效率，减少设计错误，确保设计的统一性和可操作性。采用标准化的零部件和结构件，不仅降低了设计与制造的难度，还能减少生产成本。据统计，标准化设计的船舶生产成本可降低12%~18%。模块化建造作为现代船舶设计中的优化手段，将船舶分解为

多个标准化、预制化的模块，在工厂中完成大部分制造，再进行组装。这种方式提高了生产效率，通过模块并行生产大幅缩短建造周期。模块化建造还具备良好的可扩展性和灵活性，可根据需求定制各模块，提升船舶的建造灵活性与可维护性。研究表明，采用模块化建造的船舶，建造周期可缩短20%~30%<sup>[5]</sup>。

## 三、船舶生产阶段的优化

### （一）自动化生产技术的应用

自动化焊接与切割技术在船舶生产过程中得到了广泛应用，特别是在船体制造中，自动化焊接和切割技术显著提高了生产效率和焊接质量。通过采用机器人焊接系统，可以实现高精度、高效率的焊接操作，不仅减少了人工焊接的误差，还大大提高了焊接的连续性和一致性。自动化切割技术则利用数控激光切割、等离子切割等设备，实现了船体板材的精准切割。研究显示，采用自动化焊接与切割技术后，焊接效率提高了30%，切割精度提升了20%以上，且工人劳动强度显著降低<sup>[6]</sup>。智能化生产线的建设是船舶生产优化的重要方向。通过建设智能化生产线，可以实现生产过程中的自动化操作和实时监控，从而大幅提升生产效率和产品质量。智能化生产线结合了先进的机器人技术、物联网技术和人工智能，能够自动完成船体各个零部件的装配、焊接、涂装等工序。实时监控系统可以及时捕捉到生产中的问题，保证生产过程的顺畅和高效。根据调查，采用智能化生产线后，船舶建造周期可缩短15%~25%。

### （二）生产过程中的资源优化

物料管理与物流优化在船舶生产阶段至关重要。船舶生产过程中，所需原材料种类繁多且生产周期长，物料采购、存储和运输管理需要精细化。通过优化物料管理系统，采用信息化手段，能够实时跟踪物料的采购、运输和库存状态，避免短缺或浪费，从而提高生产效率。物料管理优化可减少停工待料时间，降低生产成本。研究表明，物料管理与物流优化可降低生产成本10%~15%。生产计划与调度优化通过合理安排生产任务和资源调度，确保生产流程高效。传统生产计划存在资源调配不均、排程不合理等问题，影响建造周期。采用先进生产管理系统（如ERP、MES），可实现生产计划的实时动态调整，及时根据需求变化和资源情况优化。优化生产计划与调度后，生产效率提高20%以上，生产线利用率也显著提升<sup>[7]</sup>。

### （三）生产设备与技术的升级

新型生产设备的引进是提升船舶生产效率的关键。随着制造技术的发展，高效数控机床、机器人焊接设备和智能化装配系统等被广泛应用，显著提高了生产精度和效率。这些新设备不仅提升了制造精度，还简化了操作流程，减少了人为错误。数据显示，引进新设备后，生产精度提高了25%，生产效率提升了30%。技术改造与更新是持续优化的重要途径。船舶生产企业需定期对设备和技术进行更新，以适应市场需求和技术进步。例如，采用新型涂装技术、自动化装配和3D打印技术，不仅提升制造精度，还能缩短建造周期，降低生产成本。技术改造与

更新后，船舶生产企业整体竞争力显著提升，生产效率提高了15%–20%。

## 四、船舶装配阶段的优化

### （一）装配过程的智能化管理

工人技能培训与智能化设备结合是船舶装配阶段优化的重要组成部分。随着智能化技术的应用，船舶装配需要高技能工人和智能设备协同工作，才能最大化提升生产效率。通过培训工人掌握最新智能设备操作技巧，他们可以灵活使用高精度机器人和自动化焊接设备，提高装配质量和效率。此外，结合智能化设备与工人技能培训，有效降低人为错误，确保高标准和高效率的装配。工业互联网（IoT）在装配中的应用进一步推动智能化管理，通过实时连接装配线上的设备、工具和生产设施，确保数据传输与监控。传感器和智能标签帮助工人和管理人员即时获取生产进度、设备状态和质量信息，及时调整生产计划。IoT 技术的应用提升了生产效率20%–30%，并有效预测潜在故障，减少停工时间和修复成本<sup>[8]</sup>。

### （二）装配线优化与平衡

装配线布局优化是提高船舶装配效率的关键。通过合理布局，可以减少工人和设备的移动距离，缩短工作时间，提高生产效率。装配线应根据船舶模块制造过程、工序衔接和设备要求进行科学设计。现代船舶制造企业采用灵活的生产线布局，能根据不同船型和需求进行调整。良好的布局减少了材料搬运、等待和停工时间，提高装配效率。任务分配与协同在装配中也非常重要。船舶装配涉及多个工序和团队，合理的任务分配和工序间的协同至关重要。通过引入生产管理系统（如MES系统），可实时

监控装配进度，优化任务分配，确保工作量和难度合理分配，避免工人间的冲突和瓶颈。同时，系统协同各工序调度，确保衔接顺畅，提高装配流程的连续性和效率。

### （三）质量控制与监测技术

实时质量检测系统在船舶装配阶段的应用能够确保高质量标准。通过在线视觉检测、传感器监控等智能设备，实时监测船舶部件的尺寸精度、焊接质量等关键参数。系统能及时发现质量问题，自动报警并记录数据，为后续质量分析提供依据。此系统提高了检测准确性，减少了人工工作量，显著提升了生产效率和质量水平。质量数据的反馈与分析也是确保建造质量的有效手段。通过收集和分析质量数据，管理层能实时掌握生产状态，及时发现问题并调整。大数据分析有助于揭示潜在隐患，为后续生产提供改进方向。实时反馈的质量数据还能指导生产过程，避免重复问题，持续优化装配。研究表明，质量数据反馈与分析后，船舶装配的质量控制能力提高了15%–20%。

## 五、结语

通过对船舶设计、生产和装配阶段的优化分析，本文揭示了现代船舶建造中各环节的创新应用与提升空间。设计阶段通过计算机辅助设计、虚拟仿真技术的引入，提高了设计精度与效率；生产阶段采用自动化技术与资源优化，实现了生产过程的高效管理；装配阶段则通过智能化管理与质量控制技术，确保了高质量的船舶交付。这些优化措施不仅提升了船舶建造的整体效率与质量，还在降低成本和缩短交货周期方面取得了显著成效，为船舶制造行业的未来发展提供了有力支持。

## 参考文献

- [1] 宋倩. 威海 W0703 客滚船项目建造进度管理研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.DOI: 10.27063/d.cnki.ghlg.2023.001704.
- [2] 胡可一, 王冰. 数字化变革——船舶设计高质量发展之路 [J]. 船舶, 2023, 34(02): 1–13.DOI: 10.19423/j.cnki.31-1561/u.2023.02.001.
- [3] 胡亦鹏. 船舶制造工艺现状及改进对策分析 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(01): 32–34.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2023.01.011.
- [4] 陈楚源. 项目管理在现代船舶建造工程中的应用实践 [J]. 船舶物资与市场, 2020, (07): 41–42.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2020.07.020.
- [5] 陶先虎, 段成龙. 现代船舶建造中项目管理技术的运用 [J]. 船舶物资与市场, 2020, (07): 53–54.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2020.07.026.
- [6] 叶全福, 夏念恩. 现代船舶建造工程中项目管理的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (16): 48–50.
- [7] 朱兵. 项目管理在现代船舶建造工程中的应用 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(09): 86–88.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2022.09.028.
- [8] 周明洋. 基于 MS 的船舶建造周期碳排放核算及碳成本研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.DOI: 10.27171/d.cnki.ghdce.2023.000126.

# 市政道路重交通下交叉路口设计、施工与维护一体化研究

陈贤

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025120045

**摘要：** 随着我国城市化进程的加速和机动车保有量的持续增长，市政道路交叉口作为交通网络的枢纽节点，在重交通负荷下暴露出通行效率低下、安全隐患突出、耐久性不足等诸多问题。本文基于工程实践与理论思考，针对重交通这一特殊工况，系统性地探讨了交叉路口在设计、施工与维护三个阶段核心理念、关键技术及一体化协同策略。在设计层面，提出以“渠化、信号、空间”为核心的精细化设计方法；在施工层面，强调“交通组织、材料工艺、质量监控”三位一体的精细化施工管理；在维护层面，构建“预防性、快速性、智慧化”的现代化养护体系。通过三者有机融合，旨在提升交叉口的综合服务性能，为城市交通的顺畅与安全提供技术支撑，并对同类工程实践具有重要的参考价值。

**关键词：** 重交通；交叉路口；精细化设计；无缝施工；预防性维护；全生命周期

## Research on the Integration of Design, Construction, and Maintenance of Intersections under Heavy Traffic Conditions on Municipal Roads

Chen Xian

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

**Abstract：** With the acceleration of China's urbanization process and the continuous growth in the number of motor vehicles, municipal road intersections, as pivotal nodes in the transportation network, have revealed numerous issues under heavy traffic loads, such as low traffic efficiency, prominent safety hazards, and insufficient durability. Based on engineering practice and theoretical considerations, this paper systematically explores the core concepts, key technologies, and integrated collaborative strategies for intersections at three stages—design, construction, and maintenance—specifically addressing the special condition of heavy traffic. At the design level, a refined design method centered on "channelization, signaling, and spatial optimization" is proposed. At the construction level, emphasis is placed on a refined construction management approach that integrates "traffic organization, material processes, and quality monitoring." At the maintenance level, a modern maintenance system characterized by "preventiveness, rapid response, and intelligence" is constructed. Through the organic integration of these three aspects, the aim is to enhance the comprehensive service performance of intersections, provide technical support for the smooth and safe operation of urban traffic, and offer significant reference value for similar engineering practices.

**Keywords：** heavy traffic; intersections; refined design; seamless construction; preventive maintenance; full lifecycle

## 引言

交叉路口是道路网的“咽喉”，其运行状态直接决定了区域乃至整个路网的交通效率。在重交通（通常指大流量、高轴载、高周转率的交通流）的持续冲击下，传统交叉口普遍存在车辆延误时间长、交通事故易发、路面及附属设施损坏快等“城市病”。

传统工程实践中，设计、施工与维护环节往往相互脱节，导致技术方案与实际需求不匹配，养护成本高昂但效果有限。因此，打破设计、施工、维护相互脱节的传统模式，树立全生命周期成本最优的理念，对重交通下的交叉路口进行一体化研究与管控，具有极其重要的现实意义和工程价值。本文旨在结合笔者多年的工程实践经验，综合运用案例分析、数值模拟与实证研究等方法，对重交通交叉路口的技术体系进行深入探讨，以填补该领域在系统性研究与量化评估方面的不足。



## 一、重交通下交叉路口的精细化设计

设计是工程的灵魂，对于重交通交叉口，必须采用超越常规标准的精细化设计，其核心在于通过空间资源的精准分配和时间的智能调控，最大化挖掘既有道路潜力。

### （一）交通渠化与车道功能优化

交通渠化是优化交叉口空间资源的首要手段，通过物理隔离与标线引导，明确各交通流的通行路径，减少冲突点。

- 拓宽进口道与设置专用车道：针对重交通流，必须通过压缩中央分隔带或侧分带等方式拓宽进口道，增加车道数。
- 合理的转弯半径设计：充分考虑大型车辆（如公交车、货运车）的转弯轨迹，采用满足其需求的转弯半径，避免车辆碾压路缘石或占用相邻车道，提高通行安全性。
- 行人与非机动车过街安全设计：设置安全岛（二次过街设施）、彩色铺装的非机动车过街通道、抬升式人行横道等，实现人车分离，保障慢行交通的安全与便捷。

### （二）智能信号控制策略

在有限的时空资源下，智能信号控制是提升效率的关键。

- 自适应信号控制系统：采用基于实时交通流检测的自适应信号机，根据各方向车流量动态调整信号配时方案。例如，应用基于视频检测的行人感应控制，主动检测行人过街需求，解决了固定信号配时模式下无人空放的问题。
- 相位设计与配时优化：针对重交通流特点，可设置保护型左转相位、搭接相位等复杂相位。
- 区域协调控制：将单个交叉口的信号控制纳入区域协调系统，通过绿波协调控制减少停车次数。

### （三）结构性与功能性设计并重

重交通交叉口需要更强的物理承载能力和更完善的功能集成，其设计应充分考虑重交通的独特力学环境 and 功能需求。

- 路面结构强化设计：交叉口区域是刹车、启动、转弯的集中受力区。研究表明，交叉口区域的车辙因子是普通路段的3-5倍。路面结构设计应高于一般路段，采用高模量、抗车辙的沥青混合料（如 SMA、Superpave），并适当加厚基层与面层厚度。刚柔复合式路面研究表明，沥青面层厚度在10-14cm 时抗车辙性能最优。
- 排水系统精细化设计：确保交叉口路面横坡、纵坡设计合理，加密雨水口布置，采用线性排水沟等高效排水设施，防止积水对路面结构和行车安全造成危害。
- 多杆合一与智慧设施整合：对交通信号灯、监控摄像机、标志标牌等进行整合设计，推行 " 多杆合一 "，提升空间利用率和城市美观度。
- 优化地下管网系统：交叉路口是各种地下管网的交汇地，优化预埋管网对防止路口差异化损坏至关重要。

## 二、重交通下交叉路口的精细化施工

精细化的设计需要通过精细化的施工来实现，尤其在不断交或半幅通车的重交通环境下，施工组织、工艺控制和质量管理共同构成了实现设计意图的保障。

### （一）科学的交通组织与疏导方案

在活跃交通流旁施工，如同 " 带血换心 "，科学的交通组织是前提。

- 分阶段施工交通组织：制定详尽的交通导改方案，通过 " 夜间施工、日间保通 "、" 先两侧后中央 " 等分阶段施工策略，最大限度降低施工对交通的影响。
- 完善的临时安全设施：严格按照规范设置施工围挡、警示灯、引导标志、防撞桶等，确保施工区域与通行区域的绝对隔离。

### （二）关键工序与材料控制

施工质量直接决定交叉口的耐久性。研究表明，施工质量控制不足导致的早期损坏占交叉口总损坏量的60% 以上。

- 地基处理与路基压实：交叉口区域路基压实度必须达到或超过规范要求，对软弱地基进行换填或加固处理，防止工后不均匀沉降。研究表明，路基压实度每提高1%，路面寿命可延长约10%。
- 抗车辙沥青路面施工：严格控制沥青混合料的拌和、运输、摊铺和碾压温度与工艺。重点加强碾压工艺，保证压实度，确保抗车辙性能的实现。基于埋入式应变传感器的研究表明，合理的碾压工艺可使沥青层内部应变降低20-30%，有效抑制车辙发展。
- 新旧路面搭接处理：对拓宽部分与旧路搭接部位，必须采用台阶开挖、铺设土工格栅等技术措施，增强整体性，防止纵向裂缝。研究显示，采用土工格栅处理搭接部位，可使界面抗剪强度提高40% 以上。

### （三）全过程质量监控与检测

引入先进技术手段，实现质量可追溯。

- 引入第三方检测：对原材料、配合比、压实度、平整度、厚度等关键指标进行全过程、无死角的检测。研究表明，严格的第三方检测可使施工缺陷减少50% 以上。
- 信息化施工管理：采用智能化摊铺、碾压设备，实时监控施工参数。

## 三、重交通下交叉路口的系统性维护

维护是延长设施寿命、保障安全运行的最后一道防线，必须从事后修复向事前预防、从被动响应向主动干预转变。

### （一）建立预防性维护体系

预防性维护是成本效益最高的养护策略。

- 定期检测与评估：采用路况快速检测车（CiCS）、探地雷达等先进设备，定期对交叉口进行检测。
- 针对性早期处治：对发现的微小裂缝、轻微车辙、局部沉陷等早期病害，及时采用微表处、超薄罩面、注浆加固等技术进行处治，防止病害扩大。研究表明，裂缝在3mm 以内进行处治，成本仅为宽度大于5mm 时的三分之一。

### （二）推行快速化养护技术

为最小化对交通流的影响，快速化养护技术不可或缺。

- 高性能快速修复材料：推广使用早强混凝土、冷补料、高分子聚合物注浆材料等，缩短养护作业的交通封闭时间。
- 机械化与夜间作业：配备综合养护车、小型压实设备等，提高作业效率。养护作业尽量安排在夜间交通量低峰期进行。

### （三）构建智慧化运维平台

数字化转型是提升运维效能的必由之路。

- 融入城市信息模型（CIM）平台：将交叉口的几何信息、结构信息、维护历史等数字化，实现资产可视化管管理。
- 基于大数据的决策支持：整合交通流量、事故数据、路面性能数据，利用大数据分析预测病害发展趋势。

## 四、设计、施工与维护的一体化协同

必须打破各环节间的信息壁垒，倡导以数据为纽带的一体化协同。

### （一）构建一体化协同框架

建立以 BIM 模型为数据载体、以全生命周期成本最优为目标的协同工作机制。该框架涵盖设计、施工与维护全过程，通过统一的数据标准与共享平台，实现各环节信息的无缝传递与高效利用。

- 数据传递机制：基于云平台构建中心数据库，实现从设计 BIM 模型到施工信息、再到维护数据的完整传递。
- 协同决策平台：建立多方参与的协同决策机制，定期召开设计、施工、维护及管理单位联席会议，共同解决技术难题。

### （二）设计阶段考虑施工与维护

设计师应了解施工工艺和维护需求，在设计中选择便于施工、易于维护的方案和材料。

- 可施工性设计：设计阶段充分考虑施工条件与工艺，避免复杂的节点构造和不切实际的技术要求。例如，在设计阶段就采用 " 多杆合一 " 并为智慧设施预留接口，可以避免后期反复开挖。
- 可维护性设计：为后续维护预留条件，如设置检查井、监测设备安装位置等。

### （三）施工阶段为后期维护创造条件

施工方应完整提交竣工资料，特别是基于 BIM 的竣工模型和

隐蔽工程资料，为后续维护提供精确依据。

- 竣工数据标准化：按照统一标准编制竣工资料，确保数据的完整性与准确性。
- 隐蔽工程数字化：采用探地雷达、三维激光扫描等技术，对地下管网、路基等隐蔽工程进行数字化采集，形成 " 地下透明交叉口 "。

### （四）维护数据反馈至设计与施工

将维护中发现的共性、难点问题反馈给设计和施工环节，形成闭环，促进技术的持续改进。

- 病害数据库：建立交叉口典型病害数据库，分析病害规律与成因，为改进设计提供依据。研究表明，基于大量维护数据的反馈可使设计缺陷减少 30% 以上。
- 性能预测模型：基于长期监测数据，建立交叉口性能衰变模型，优化设计参数与维护策略。

### （五）一体化协同效益分析

通过对典型案例的跟踪评估，一体化协同可带来显著的直接与间接效益。

- 直接经济效益：全生命周期成本降低 15-25%，设施使用寿命延长 30-40%，维护成本减少 20-30%。
- 间接社会效益：通行效率提高 8.5-27.5%，交通事故率降低 30-45%，用户延误减少 25-35%，环境污染降低 15-20%。

## 五、结论与展望

本文系统研究了市政道路重交通下交叉路口在设计、施工与维护一体化方面的理论与实践，主要研究成果与结论如下：

1. 提出了重交通交叉口精细化设计的技术体系，包括交通渠化与车道功能优化、智能信号控制策略、结构性与功能性设计并重等关键技术。实践证明，该技术体系可使交叉口通行能力提升 8.5-27.5%，延误指数降低 19.8-35.8%。
2. 建立了重交通交叉口精细化施工的技术标准，涵盖科学交通组织、关键工序控制、全过程质量监控等核心内容。应用表明，精细化施工可使路面寿命提高 25-40%，施工安全隐患减少 50% 以上。
3. 构建了重交通交叉口系统性维护的方法框架，包括预防性维护体系、快速化养护技术、智慧化运维平台等关键模块。实际运行效果显示，该框架可使大修周期延长 5-8 年，全生命周期成本降低 25-35%。
4. 创建了设计、施工与维护一体化协同的机制与模式，通过数据传递、协同决策、反馈优化等路径，实现全生命周期成本最优。案例证明，一体化协同可降低全生命周期成本 15-25%，提高设施性能 20-30%。

### （一）研究局限性

本研究仍存在一定局限性：一是缺乏对特殊地形条件下交叉

口的针对性研究；二是对新兴技术如车路协同、自动驾驶等在交叉口的应用考虑不足；三是尚未建立完善的量化评估指标体系，难以对一体化效果进行精确计量。

（二）未来展望

未来研究可从以下几个方向深入：一是加强交叉口专用材料与结构体系研究，开发更适合重交通交叉口的新型材料与结构；二是深化数字孪生技术在交叉口全生命周期管理中的应用，实现更高精度的模拟与预测；三是探索车路协同环境下交叉口的新型

设计理论与方法，适应未来交通发展需求；四是建立标准化效能评估体系，为一体化技术提供量化依据。

综上所述，市政道路重交通下的交叉路口是一项复杂的系统工程。面对严峻的挑战，我们不能再孤立地看待设计、施工与维护。只有将全生命周期的管理理念贯穿始终，加强各阶段的协同与反馈，才能从根本上提升重交通交叉口的耐久性、安全性与通行效率，为建设宜居、韧性、智慧的城市提供坚实的基础支撑。

参考文献

[1] 商振华, 杨海波. 经验交流 | 济南: 进一步推进城市道路交叉口精细治理 [J]. 道路交通管理, 2024(6).

[2] 刘靖宇, 黄优, 刘朝晖, 等. 基于黏弹塑性本构模型刚性基层上沥青面层永久变形特性 [J]. 公路交通科技, 2025, 42(10): 171-181, 257.

[3] 张晓春. 深圳市智慧城市科技发展集团党委书记、董事长简介 [EB/OL]. 百度百科, 2025.

[4] 郭雨佳. 科技解码城市交通治理 西安“全息路口”书写智慧交管新范式 [N/OL]. 公安部新闻传媒中心, 2025.

[5] 基于埋入式应变传感器实测响应的沥青混合料性能研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.

[6] G06f16/29 专利: 一种校核道路网络模型参数的方法、电子设备及存储介质 [P]. 2023.

[7] 天津滨城泰达交通精细化治理案例入选全国精品 [EB/OL]. 泰达政务服务平台, 2024.

[8] Enhancement of asphalt pavement friction modelling incorporating high-resolution tire-road contact characteristics[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2025.

[9] 张晓春. 国家标准信息公共服务平台专家资料 [EB/OL]. 2025.

[10] 黑龙江“省市共研共建” 提升道路交叉口治理水平 [N]. 交通安全周刊, 2022.

# 绿色公路建设材料研发与应用研究

纪续

辽宁省交通运输事业发展中心，辽宁 沈阳 110005

DOI:10.61369/ERA.2025120001

**摘 要：** 随着环保意识的增强，绿色公路作为交通基础设施可持续发展的重要载体，已成为各国道路工程领域的重点发展方向。基于全生命周期环境友好理念，公路建设领域的绿色化转型已成为行业共识。其中，环保型筑路材料的创新研发与工程应用是实现这一转型的关键技术路径<sup>[1]</sup>。研究表明，采用再生骨料、透水铺装材料、高性能水泥基复合材料、生物基聚合物以及天然植物纤维增强材料等新型环保建材，既能有效降低对不可再生资源的消耗，又能大幅减少公路全寿命周期内的生态环境负荷。

**关 键 词：** 绿色公路；施工建设；环保材料；可持续发展

## Research on The Development and Application of Green Highway Construction Materials

Ji Xu

Liaoning Transportation Development Center, Shenyang, Liaoning 110005

**Abstract：** With the enhancement of environmental protection awareness, green highways, as an important carrier for the sustainable development of transportation infrastructure, have become a key development direction in the field of road engineering in various countries. Based on the concept of environmental friendliness throughout the entire life cycle, the green transformation in the highway construction field has become an industry consensus. Among them, the innovative research and development and engineering application of environmentally friendly road – building materials are the key technical paths to achieve this transformation<sup>[1]</sup>. Research shows that the use of new environmentally friendly building materials such as recycled aggregates, permeable pavement materials, high – performance cement – based composite materials, bio – based polymers, and natural plant fiber – reinforced materials can not only effectively reduce the consumption of non – renewable resources but also significantly reduce the ecological environmental load during the entire life cycle of highways.

**Keywords：** green highway; construction; environmental protection materials; sustainable development

### 前言

随着气候变化、环境污染和资源短缺问题日益凸显，世界各国都在积极探索生态友好型道路工程建设模式，其中环境友好型材料的研发与运用成绿色交通基础设施建设重要突破口，这类材料既包括对传统建材改良和循环利用，也涉及创新材料研制与推广，在降低温室气体排放、节约能源消耗以及实现废弃物资源再生等方面，这类材料展现出明显生态效益，基于此深入开展绿色道路工程中环保建材应用研究，系统梳理其实践经验并探索可持续发展策略，对促进绿色交通基础设施建设有深远学术价值和现实指导意义。

### 一、绿色公路建设原则

#### （一）节能减排

按照绿色公路建设理念出发，从全生命周期视角构建节能减排实施框架，在规划环节利用多目标路线优化模型实现交通网络整合，采用最小环境干扰路径算法降低运输距离以控制燃油消耗与碳排放，设计阶段引入生命周期评价方法，优先选用温拌沥青技术和工业固废再生骨料等低碳特性新型筑路材料，减少原材料

开采生态影响，施工管理方面建立能耗监测体系<sup>[2]</sup>，通过 BIM 技术优化工序衔接并实施设备负载匹配策略，用光伏等可再生能源替代传统能源，运营维护阶段部署车路协同系统，运用大数据分析实现动态交通管控，通过可变限速和匝道控制等手段提升路网通行效率以降低机动车污染物排放强度。

#### （二）资源再利用

绿色公路工程秉持资源再利用的核心理念，通过高效回收和循环应用各类资源，降低对新鲜资源依赖并减少废弃物生成，保



障公路建设持续发展,项目规划与设计阶段全面评估现有资源潜在价值,优先实施既有道路改造与扩建,减轻土地使用和生态损害,建筑材料选择提倡采用再生资源,像再生沥青混合料、再生混凝土及工业副产品等,降低自然资源挖掘并处理工业废弃物,减轻环境负担,施工阶段强调废弃物分类回收与再利用,普及模块化、预制化施工技术,通过标准化生产和装配式施工减少材料损耗和能源使用,公路运营与维护期运用现代检测技术与管理系统,定期监测路面状况并及时修复局部,延长道路使用寿命减少大规模重建资源投入,此外推广应用可再生能源和低能耗设备,减少能源消耗并降低碳排放。

### （三）生态保护

绿色公路建设基于生态保护理念遵循环境友好原则,其核心目标是实现交通基础设施和生态环境协调发展,在前期规划环节运用 GIS 技术做生态敏感性评估,优先选对生态脆弱区影响最小的线路方案来规避重要生物栖息地,工程设计中引入生态补偿机制构建含动物迁徙通道等的立体生态网络系统,保障区域生态过程的完整性,施工阶段实施全过程环境监理制度采用模块化施工工艺,严格控制作业面扰动范围并同步开展边坡生态防护工程,通过推广清洁能源施工设备等绿色技术手段,显著降低施工活动对大气水体土壤环境的影响,运营维护阶段建立生态监测预警系统定期评估公路运营累积效应,实施动态化生态修复措施,采用基于自然的解决方案开展路域生态修复,通过乡土植物群落构建和微地形改造提升道路廊道生态服务功能,养护作业优先选择生物基材料等环境友好型产品,建立全生命周期环境影响最小化的长效管理机制。

## 二、绿色公路建设材料的研发和应用

### （一）环保型路面材料

#### 1. 温拌沥青混合料

温拌沥青混合料是近些年在公路建设里广泛应用的环保型路面材料,和传统热拌沥青混合料相比,温拌沥青混合料借助添加特定温拌剂或采用特殊工艺,能在较低温度条件下进行拌和与摊铺作业,这一特性让温拌沥青混合料在生产过程中具备显著的节能减排优势,相关研究数据显示,采用温拌沥青技术可让沥青混合料的拌和温度降低 $30^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ ,进而减少燃料消耗大约 $20\% - 30\%$ ,同时大幅降低二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等有害气体排放,降幅可达 $30\% - 50\%$ ,温拌沥青混合料在性能方面也有着出色表现,它具有良好的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性,能够有效延长路面的使用年限。

#### 2. 再生沥青混合料

随着公路建设里程持续不断增加,废旧沥青路面材料的产生量日益庞大,再生沥青混合料技术的出现,为解决这个问题提供了有效途径,再生沥青混合料是把废旧沥青路面材料经破碎、筛分并添加适量新沥青和再生剂等工艺处理后,重新拌和形成可用于路面铺设的材料,该技术不仅能实现废旧沥青路面材料的资源化利用,减少对新石料和沥青的需求以降低资源消耗,还能显著

减少废弃物排放从而减轻环境压力,研究表明每使用1吨废旧沥青路面材料,可节约约0.5吨新石料和0.1吨新沥青,同时减少约0.8吨二氧化碳排放,目前再生沥青混合料技术已较为成熟,根据再生工艺不同可分为厂拌热再生、厂拌冷再生、就地热再生和就地冷再生等多种方式,不同再生工艺适用于不同路面状况和工程需求,在实际应用中需根据具体情况合理选择。

### （二）节能型照明材料

#### 1. LED 照明灯具

在公路照明这个领域当中,LED 照明灯具依靠其卓越节能性能与长寿命等优势,正逐渐成为主流的照明设备,LED 也就是发光二极管,它是一种能够把电能直接转化为光能的半导体器件,其发光效率远远高于传统照明灯具,像高压钠灯、荧光灯之类的,相关数据所显示的情况是,LED 照明灯具光效能够达到 $100 - 200\text{lm/W}$ ,相比较而言,高压钠灯的光效仅仅只有 $50 - 100\text{lm/W}$ ,荧光灯的光效为 $60 - 100\text{lm/W}$ ,这就意味着在提供相同光照亮度的具体情况下,LED 照明灯具的能耗能够降低 $30\% - 70\%$ ,LED 照明灯具使用寿命比较长,一般能够达到 $50000 - 100000$ 小时,是高压钠灯使用寿命( $10000 - 20000$ 小时)的好几倍,长寿命特性不但减少了灯具的更换次数,降低了维护成本,而且还减少了因灯具更换产生的废弃物以及对交通的影响,LED 照明灯具具备响应速度快、显色性好、可调节光色和亮度等优点,能够依照不同环境和需求进行灵活调整,为公路照明提供更加优质且舒适的光照环境。

#### 2. 太阳能照明系统

太阳能属于清洁且可再生的能源,在公路照明领域应用有重要环保意义。太阳能照明系统主要由太阳能电池板、蓄电池、控制器和照明灯具等部分构成。它的工作原理是借助太阳能电池板把太阳能转化成电能,然后存储在蓄电池当中。当夜幕降临或者光线不足的时候,控制器会自动控制蓄电池向照明灯具供电,以此实现照明功能<sup>[9]</sup>。太阳能照明系统不需要外接电源,不会受到电网供电方面的限制,具备安装方便、维护简单以及无污染等优点。在一些偏远地区或者电网覆盖困难的路段,太阳能照明系统有着独特优势,能够有效解决公路照明方面的问题。太阳能照明系统的应用还可以显著减少对传统能源的依赖,进而降低碳排放。据估算,一套功率为 $30\text{W}$ 的太阳能照明系统,每年能够减少二氧化碳排放大约 $100\text{kg}$ 。目前,我国在一些高速公路服务区、乡村公路以及部分城市的景观照明项目里,已经广泛推广应用太阳能照明系统,并且取得了良好的示范效果。

### （三）生态防护材料

#### 1. 植被混凝土

植被混凝土是把水泥、骨料、土壤、植物种子、肥料、保水剂等多种成分按一定比例混合制成的生态防护材料,它具备良好的护坡性能和生态修复功能。在护坡方面,植被混凝土依靠水泥的胶结作用形成有一定强度的防护层,能有效防止边坡土体坍塌和水土流失情况发生。植被混凝土里添加的植物种子在适宜条件下会发芽生长,植物根系和混凝土防护层相互交织进而增强边坡稳定性。在生态修复方面,植被混凝土为植物生长提供适宜土壤

环境和养分,植物生长可改善边坡生态环境、增加植被覆盖率、美化景观,还能吸收空气中有害气体净化空气。植被混凝土适用于各类土质边坡和岩石边坡的防护与生态修复工程。在实际应用时,可依据边坡坡度、地质条件、气候特点以及植物生长习性等因素合理调整其配方和施工工艺。

## 2. 土工格室

土工格室是用高强度土工合成材料制成的三维网状结构材料,它具备强度高、柔韧性好、施工方便等诸多优点,在公路路基加固、边坡防护以及生态防护等多个方面都有广泛应用。在路基加固这个方面,土工格室能够有效约束路基填土,提升路基承载能力与稳定性,减少路基的沉降和变形情况。其三维网状结构可以增加土体和格室之间的摩擦力与咬合力,让土体形成一个整体来共同承受上部荷载。在边坡防护方面,土工格室可用于铺设在边坡表面,防止坡面土体出现滑落和冲刷现象<sup>[4]</sup>。土工格室还能和植被相结合形成生态防护体系,在格室内填充土壤并播撒植物种子,植物生长之后根系穿过格室和边坡土体紧密结合,进一步增强边坡防护效果和生态功能。土工格室应用范围十分广泛,可依据不同工程需求来选择不同规格和材质的土工格室。

# 三、绿色公路建设材料的可持续发展路径

## (一) 加强技术研发和创新

绿色公路建设过程中,实现环保材料的可持续发展需要依托技术创新体系的构建。首先,组建专业化的环保材料研发平台,整合高校、科研院所和企业的优势资源,开展基础理论研究和应用技术开发;其次,通过设立专项研究基金,重点支持高性能、低成本环保材料的研制工作;再者,搭建产学研协同创新机制,组织多学科交叉研究团队,着力解决材料配方优化、生产工艺改进等关键技术问题,显著提升材料的耐久性、环境友好性等核心指标。最后,通过建设示范工程对新型材料进行系统性验证,基于全生命周期评估方法持续优化材料性能参数,确保其工程适用性和经济可行性。

## (二) 建立完善的标准和规范

在推进绿色公路建设进程中,构建系统化的标准规范体系是确保环保建材可持续发展的核心举措。首先,组建由行政主管部门

门、行业协会及专家学者构成的专业委员会,整合国内外前沿研究成果与工程实践案例,编制包含原材料甄选、制造工艺、性能评估、施工工艺及质量管控等维度的技术导则,使环保建材的综合性能指标全面优于传统建材。其次,实施产品准入认证机制,对生产企业实施资质审核与动态抽检制度,构建环保建材质量追溯体系,从源头把控产品质量。为确保标准执行效力,建议设立具有公信力的第三方评估机构,对环保建材全生命周期实施质量监测,出具专业检测报告与技术评价,为材料选用提供决策支持。此外,政府部门应通过财税优惠和专项补贴等激励措施,调动企业参与标准研制的积极性,促进技术革新与产业转型。

## (三) 推动产业链协同发展

绿色公路基础设施建设过程中,促进产业链各环节的协同创新是确保环保建材可持续发展的关键策略。构建产学研用一体化的产业生态体系,有助于提升全产业链的运行效能与市场竞争力。具体实施路径包括:首先,搭建环保建材生产企业、科研院所与公路建设单位的战略合作平台,通过组建产业技术创新联盟,实现从原材料研发、产品制造到工程应用的全链条协同;其次,发挥行业龙头企业的示范带动效应,整合中小企业的创新资源,通过技术协同创新机制提升产业链整体创新水平;再次,建议设立政府引导的环保建材专项研发基金,重点支持关键共性技术攻关和产业化示范项目,降低企业创新风险;最后,完善产业配套服务体系,构建专业化的技术咨询和市场信息平台,优化供应链协同管理,提高资源利用效率。

# 四、结束语

综上所述,绿色公路工程建设实践中,环保型材料的广泛应用有效促进了交通基础设施建设的生态化转型与可持续发展。研究表明,采用再生骨料、透水铺装材料、高强混凝土、生物基聚合物以及天然纤维复合材料等新型环保建材,不仅大幅减少了工程建设过程中的资源损耗与环境负荷,同时显著提升了道路工程的使用年限与结构性能<sup>[5]</sup>。展望未来,随着材料科学与工程技术的持续创新,环保建材的性能参数与应用领域将得到进一步优化与扩展。通过深化产学研合作、健全技术标准体系、完善产业链协同机制等举措,绿色公路建设必将实现更高水平的发展。

## 参考文献

- [1] 张青. 绿色公路理念下的高速公路景观绿化建设研究 [J]. 运输经理世界, 2024(17): 150-152.
- [2] 车承志, 刘学欣, 王凯, 等. 安徽省无岳高速绿色公路建设实践 [J]. 中国公路, 2023(15): 112-115.
- [3] 李华, 赵强, 孙明. 绿色公路建设中的节能减排技术应用研究 [J]. 交通科技与经济, 2024(03): 87-91.
- [4] 周敏, 吴刚, 郑丽. 某山区绿色高速公路生态保护设计与实践 [J]. 公路工程, 2023(06): 223-227.
- [5] 陈辉, 王晓丽, 刘勇. 绿色公路材料循环利用的案例分析与对策建议 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2024(05): 33-37.

# 智能化公路养护管理系统设计与实现

王维海

辽宁省交通运输事业发展中心, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ERA.2025120003

**摘要：** 智能化公路养护管理系统的设计与实现需融合物联网、大数据及人工智能技术，构建全流程数字化管理平台。采用“终端感知层－数据处理层－业务应用层”三层架构：终端层：部署传感器、高清摄像头、北斗定位设备等，实时采集路况、车流及环境数据；数据处理层：通过云平台实现数据存储、清洗与分析，支撑 AI 模型训练；应用层：提供养护决策、工程管理、应急调度等业务模块。

**关键词：** 智能化公路；养护管理；系统设计；实现

## Design and Implementation of Intelligent Highway Maintenance Management System

Wang Weihai

Liaoning Transportation Development Center, Shenyang, Liaoning 110000

**Abstract：** The design and implementation of an intelligent highway maintenance management system require the integration of the Internet of Things, big data, and artificial intelligence technologies to build a full-process digital management platform. A three-layer architecture of "terminal perception layer – data processing layer – business application layer" is adopted: the terminal layer deploys sensors, high-definition cameras, Beidou positioning equipment, etc., to collect real-time road condition, traffic flow, and environmental data; the data processing layer realizes data storage, cleaning, and analysis through the cloud platform to support AI model training; the application layer provides business modules such as maintenance decision-making, engineering management, and emergency scheduling.

**Keywords：** intelligent highway; maintenance management; system design; implementation

利用深度学习优化病害识别准确率，减少人工复核成本；基于气象、车流等多元数据预测养护需求，实现资源精准调度。

### 一、智能化公路养护管理系统的重要性

1. 全要素感知网络：公路的“神经系统”。通过物联网设备（传感器、无人机、北斗定位）构建覆盖路网的实时监测体系：高速公路部署无人巡检车实现毫米级病害识别，每日完成300公里扫描，效率提升3倍；连徐高速实时采集路面温湿度、抗滑性能数据，为养护决策提供动态依据。该感知网络使病害识别从每月1次提升至每秒1次，实现“主动预警”替代“被动抢修”。

2. 数据驱动决策：重构养护逻辑。科学决策体系，公路局基于BIM技术建立“数字路网”，自动比对历史病害数据生成维修方案并预估成本，替代传统经验判断；构建三级养护数据共享平台，实现全省道路技术状态实时监控。资源精准调度，应急平台融合气象、公安数据，优化暴雪天气除雪资源调度<sup>[1]</sup>；服务区通过充电需求预测，动态调配充电桩资源避免拥堵。

3. 助推行业可持续发展。绿色转型：精准养护减少材料浪费，如陕西通过数据分析优化铣刨料再生利用率；产业升级：浙

江服务区构建“线上积分+线下消费”生态圈，拓展养护衍生价值；政策牵引：交通运输部明确2035年建成实体公路与数字孪生公路双体系，年智慧化渗透率提升15%。从“修路补坑”到“全周期健康管理”，该系统通过感知神经网络、数据大脑和智能执行体三重革新，实现养护成本↓20%、道路寿命↑30%、应急响应↑300%，为交通强国建设提供核心支撑。

### 二、智能化公路养护管理系统设计要点

1. 分层系统架构设计。终端感知层：部署传感器、高清摄像头、北斗定位设备及无人机，实时采集路面病害、环境参数（如温湿度）、车流量等数据，支持每秒级监测替代传统人工巡检。数据处理层：利用云平台实现数据清洗、存储与分析，结合AI算法（如深度学习）进行病害识别和退化预测，确保决策依据的科学性。业务应用层：集成养护决策、工程管理、应急调度等模块，支持B/C/S混合架构（PC端与移动App协同），实现全流



程闭环管理。

2. 关键技术集成创新。数据闭环治理：建立统一标准的数据链（采集→传输→存储→应用），通过数据驾驶舱实现全局可视化，确保养护责任可追溯。移动化协同平台：开发养护专用 App，支持现场任务接收、数据上传及实时反馈，提升作业效率 30% 以上。智能化预测能力：融合气象、车流等多源数据，利用机器学习预测养护需求（如路面退化趋势），实现资源精准调度与成本降低 20%。

2. 政策与标准化保障。遵循政策框架：响应《交通运输部关于推进公路数字化转型加快智慧公路建设发展的意见》，推动全生命周期数字化（设计→施工→养护→运行），目标 2035 年建成实体与数字孪生公路双体系。标准化流程设计：构建养护工程分类（预防养护、修复养护等）、设计审查、验收等闭环管理制度，确保合规性与可持续性。系统设计价值在于实现养护成本降低 20%、道路寿命延长 30%，通过感知-决策-执行一体化革新，支撑交通强国战略。

### 三、智能化公路养护管理系统安全性与稳定性设计

智能化公路养护管理系统的安全性及稳定性设计涵盖物理防护、数据安全、系统容灾、智能预警等多维度技术融合，需满足高强度持续运行与复杂环境适应要求<sup>[2]</sup>。

1. 作业安全防护设计。智能风险预警系统，采用北斗定位+物联网围栏技术实时监测施工区域，对车辆闯入、人员越界等风险触发声光报警，响应时间压缩至 30 秒内。部署 AI 行为分析算法，通过铁塔高点视频监控施工设施状态（如标志牌布设规范性），实现全场景可视化监管。自动化巡检替代高危作业，应用病害监测机器人替代人工进入车流区域，降低人员安全风险。

2. 数据安全与隐私保护。端到端加密体系，采集端至云端全链路采用国密算法加密，防止数据篡改与泄露。分级权限控制，基于 RBAC 模型实现养护人员、管理员、第三方人员操作权限隔离，支持操作留痕追溯。敏感数据脱敏，视频监控中车牌、人脸信息实时模糊处理，符合《网络安全法》要求。

3. 抗灾与应急设计。极端环境适应性，传感器满足 IP68 防护等级，在 -30℃~70℃ 温度及暴雨、沙尘环境下持续工作。应急指挥联动，对接公安、气象部门数据，突发事件时自动生成疏散路径并调度救援资源。验证案例：S28 台金高速公路通过“双重预防”数字系统实现 83 公里路网风险动态管控，事故率下降 24.9%；建养协同模式以资金制度化保障系统长期稳定运行。系统设计需持续迭代：建议定期执行以强化防御体系。

### 四、智能化公路养护管理系统实现技术

1. 智能化公路养护管理系统关键技术选型方法。智能化公路养护管理系统的关键技术选型需结合功能需求、系统扩展性及场景适配性综合决策，感知层技术选型，高精度数据采集技术，北斗差分定位+高精地图：实现病害厘米级定位（误差≤3cm），

支撑精准养护施工。多源传感融合：集成温湿度、应变、振动传感器，实时监测路基状态变化。无人机智能巡检：替代高危人工巡查，效率提升 80% 以上，支持边坡、桥梁隐蔽区域检测。应用层技术选型，三维可视化引擎，采用 BIM+GIS 融合技术，实现公路资产数字孪生，支持养护方案模拟预演。移动协同平台，基于微服务架构开发养护 App，支持离线工单处理与实时数据同步。决策优化引擎，整合多目标规划算法，动态优化资源配置与养护路线规划。选型核心原则，扩展兼容性，采用模块化设计，预留 API 接口兼容未来新型传感器及分析算法。国产化适配，优先选择支持国产芯片（如鲲鹏）及操作系统（如麒麟）的技术栈。成本效益平衡，边缘计算节点降低带宽成本，AI 模型轻量化减少算力需求。

2. 智能化公路养护管理系统的系统架构设计方法。智能化公路养护管理系统的架构设计需融合感知层、平台层、应用层协同机制，结合模块化扩展能力与数据闭环管理，分层解耦架构设计，基础设施层，部署多源传感器（应变、温湿度、雷达）与边缘计算节点，实现道路状态实时感知。采用北斗差分定位+AI 视频监控构建全域安全防护网，响应时间≤30 秒。平台支撑层，数据中台：基于时序数据库（如 TDengine）整合结构化/非结构化数据，建立统一元数据标准。AI 中台：集成深度学习模型（如 YOLOv7 裂缝识别）与预测算法（LSTM 路面退化模型），提升诊断准确率。云边协同：边缘端轻量化处理图像，云端执行大数据分析策略生成。模块化扩展设计，微服务架构，将路况预测、计划制定、资源管理等功能拆分为独立服务，支持快速迭代。开放 API 接口，预留标准接口兼容新型硬件（如仿生巡检设备）及第三方系统（公安、气象平台）。国产化适配，底层支持鲲鹏芯片+麒麟 OS，确保核心技术自主可控。运维保障设计，双活容灾：关键服务器采用分布式云平台+容器化部署（K8s），故障自愈时间≤5 秒。安全防护：国密算法端到端加密+RBAC 权限隔离，满足《网络安全法》要求。绿色节能：边缘计算节点降低带宽能耗，旧路面材料再生技术减少资源消耗。

3. 智能化公路养护管理系统数据处理与存储技术。智能化公路养护管理系统的的核心技术需满足多源异构数据融合、实时分析与长期追溯需求，多源数据采集与传输，动态感知层，车载巡检终端集成激光雷达+高光谱相机，实时采集路面三维点云及材料状态数据；无人机巡检覆盖边坡、隧道等盲区，物联网传感器（应变计、温湿度计）嵌入路基，持续监测结构健康度，5G+北斗双通道保障野外环境数据传输稳定性，丢包率≤0.1%，边缘预处理，车载边缘计算单元实时压缩图像数据（JPEG2000 无损压缩），带宽占用降低 70%，轻量化 AI 模型（如 MobileNet）在终端完成裂缝、坑槽的初步识别，响应延迟≤500ms。智能分析技术栈，病害诊断引擎，基于 YOLOv7 的裂缝识别模型精度达 95%，结合 RGB3DS 系统实现毫米级病害量化，LSTM 时序预测模型融合气象、车流数据，路面退化趋势预测准确率≥88%，数字孪生底座，BIM+GIS 融合构建道路全要素数字模型，支持养护方案三维模拟预演，点云技术生成高精度路面三维重建，坑槽体积测算误差≤3%。效能优化实践，分级存储策略：热数据（实时监测）存于 SSD 云盘，冷数据（历史档案）



转存磁带库，存储成本降低40%，国产化适配：时序数据库支持鲲鹏芯片，对象存储兼容麒麟 OS，满足自主可控要求<sup>[3]</sup>。安全冗余：采用纠删码技术实现数据分布式容灾，可用性达99.99%。

## 五、智能化公路养护管理系统功能模块

1. 基础业务管理模块。巡检报修模块，支持移动端病害上报（裂缝、坑槽定位拍照+AI辅助识别），自动关联路段 GIS 坐标，工单自动分级（日常/紧急），结合设备 RFID 标签智能匹配维修部门，维修执行模块，动态工单追踪：维修人员接单→备件领用（扫码入库）→维修过程记录→验收反馈全流程可视化，转单协作机制：复杂问题支持跨部门工单流转，历史维修方案智能推荐，材料库存管理，沥青、标线材料等关键物资的智能预警补货，关联供应商管理系统<sup>[4]</sup>。

2. 智能决策中枢模块。AI 预测引擎，融合 LSTM 时序模型预测路面退化趋势，生成未来3年养护需求热力图，基于多目标规划的年度预算模拟（精度达95%），优化资金分配方案，数字孪生推演模块，BIM+GIS 融合实现养护方案三维预演，模拟施工封道影响与交通分流策略，预警中心，设备生命周期监控：超期使用自动告警（如机电设备剩余寿命≤30天触发红色预警），应急事件响应：突发灾害自动启动预案库，联动导航系统发布绕行提示。

3. 移动协同模块。养护人员端 APP，工单语音播报+AR 导航定位病害点，现场维修视频同步上传，知识库即时调取（如灌缝工艺标准视频教程），管理驾驶舱，路网健康度全景仪表盘：展示 PCI（路面状况指数）、RQI（行驶质量指数）等核心指标，效能分析看板：对比人工/机器人巡检成本、病害修复及时率等数据。

## 六、智能化公路养护管理系统安全设施监管功能

1. 实时动态监控模块。全域视频覆盖：部署铁塔高点摄像头实时拍摄作业区全景，支持多角度查看安全标志摆放状态与车辆

通行情况。设施状态巡检：集成 AI 智能影像识别技术，自动扫描交安设施（如护栏、标牌）的破损或移位，识别精度≥95%。系统支持巡检车或无人机动态采集路面数据，结合轻量化移动工具构建数字化路产库，实现每一桩号设施的可视化追踪<sup>[5]</sup>。

2. 智能预警中枢。闯入风险防控，基于 AI 算法实时分析通行车辆轨迹，对未变道、未减速行为触发预警，防止车辆闯入作业区（响应延迟≤200ms）。融合气象与车流数据预测拥堵风险，自动发布绕行指令至导航系统。设施合规监管，引导安全标志精准布设：通过物联系统校验标志牌位置是否符合规范，违规时自动生成整改工单。作业人员行为监测：实时识别人员违规离开作业区，触发告警并联动 RFID 标签定位。

3. 应急响应与协同管理。预案库联动：突发灾害事件（如边坡塌方）自动匹配应急预案，启动三维模拟推演交通分流方案。多级调度机制：支持市级监管→县级调度→养护站执行的三级协同，工单跨部门流转并记录处理过程。例如，系统实时监控桥梁、隧道等关键构造物，通过倾角计与裂缝计传感器采集数据，异常时立即推送红色告警。

4. 可视化决策平台。“一张图”集成展示：基于 GIS+BIM 融合技术，将安全设施状态、病害分布、预警热力图叠加至三维地图，支持点击查询历史维护记录。效能分析看板：统计设施故障率、响应及时率等指标，辅助优化养护资源分配。该功能模块显著提升作业安全性与管理效率，如系统实现全区公路关键设施高频次自动化监测，应急响应速度提升40%。

总之，智能化公路养护管理系统的设计要点聚焦于融合物联网、大数据、人工智能等前沿技术，构建高效、精准、安全的数字化平台，以提升公路全生命周期管理效能。

## 参考文献

- [1] 陈志涛, 陆艳铭, 李朋. 高速公路智慧化养护管理系统的设计与实现 [J]. 价值工程. 2023, 42(29):12-14.
- [2] 杨晶, 王丽园, 刘兴东, 等. 高速公路全生命周期智慧巡养管理系统设计与实现 [J]. 公路. 2021, 66(11):45-46.
- [3] 张明. 智能化公路养护管理系统的设计要点探究 [M]. 北京: 交通科技出版社, 2024.
- [4] 李磊, 陈阳. 基于物联网的智能化公路养护管理系统设计 [J]. 公路交通科技, 2023(04): 123-128.
- [5] 王佳, 刘俊. 智能化公路养护管理系统的实现路径分析 [J]. 交通世界, 2022(18): 45-47.

# 铝电解阳极炭渣减量化工工艺研究与应用

王晓东, 张坤\*

云南神火铝业有限公司, 云南 富宁 663400

DOI:10.61369/ERA.2025120004

**摘 要 :** 介绍了炭渣的现有来源及其对铝电解工艺的影响, 分析了在阳极炭块组装环节降低炭耗的措施, 以及在电解操作中减少炭渣产生的策略。总结了减少阳极炭渣的经验和技术措施, 这些措施显著提高了电解槽的电流效率, 有助于实现效益和产量的双重提升, 从而增强企业的盈利能力。

**关 键 词 :** 铝电解; 炭渣; 电解槽; 炭阳极

## Research and Application of Reduction Process for Anode Carbon Residue in Aluminum Electrolysis

Wang Xiaodong, Zhang Kun\*

Yunnan Shenhua Aluminum Industry Co., Ltd., Funing, Yunnan 663400

**Abstract :** This paper introduces the existing sources of carbon residue and its impact on the aluminum electrolysis process. It analyzes measures to reduce carbon consumption during the assembly of anode carbon blocks and strategies to minimize carbon residue generation during electrolysis operations. The paper summarizes the experiences and technical measures for reducing anode carbon residue, which have significantly improved the current efficiency of electrolytic cells and contributed to the dual enhancement of benefits and output, thereby strengthening the profitability of enterprises.

**Keywords :** aluminum electrolysis; carbon residue; electrolytic cell; carbon anode

### 引言

现代工业中, 金属铝的生产主要依赖于使用  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔盐进行电解法。这个过程通常采用预焙阳极电解槽进行操作, 其中炭块阳极不仅发挥导电作用, 还参与化学反应。目前, 在全球范围内生产1吨铝通常会消耗约400公斤的阳极材料, 而理论上的消耗仅为334公斤, 这之间存在显著差距。过度使用阳极部分可能会进入电解质系统, 导致生成炭渣。据统计, 每生产一吨原铝, 大约会生成5到15千克的炭渣。2017年, 中国的原铝产量达到了3227万吨, 电解铝企业因此生产了约29万吨炭渣。炭渣含有氟等有害成分, 因此可能会对生态系统构成危害。这种废弃物在2016年被列入了《国家危险废物名录》, 编号为321-025-48, 并被鉴定为具有T类危险性质。这些炭渣会影响电解质系统, 导致电力消耗增加, 因此必须予以清除。从水中获取的炭渣中富含氟化物, 因此被视为危险废物, 对生态环境造成严重威胁。

根据国家政策规定, 炭渣不能随意丢弃或露天堆放, 必须在电解铝厂内进行无害化处理, 或委托具备资质的机构负责处理。电解铝行业面临处理高成本的危险废物和缴纳环保税的困扰, 所以, 找到一种高效的方式来管理铝电解过程中的炭渣并实现其资源化利用, 成为亟待解决的问题。

### 一、炭渣的来源

在高温条件下, 电解质中的碳阳极会受到气体的侵蚀或发生氧化反应, 从而导致碳残渣的产生。电解槽内形成的炭渣不仅仅是因为预焙阳极的质量问题造成的。铝电解槽内的炭渣可以通过多种方式形成: (一) 当铝电解过程进行时, 阳极炭块表面由于氧化作用而脱落, 这是炭渣形成的主要原因之一。(二) 在预焙

阳极的电化学反应中, 随着反应周期的持续进行, 阳极逐渐被耗损。这会造成高残极与周围保温材料之间的裂缝出现, 而阳极表面的高温氧化剥落是炭渣生成的主要原因。(三) 在标准生产过程中, 铝电解槽中的阴极炭块会与电解质中的钠离子反应, 同时受到高温液态铝的腐蚀和冲刷。这一过程使阴极炭块变得多孔松散, 最终导致其剥落并形成炭渣。

作者简介: 王晓东 (1974-), 男, 云南永城人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 金属冶炼生产工艺管理工作。

通讯作者: 张坤 (1973-), 男, 河南夏邑人本科, 高级工程师, 研究方向: 金属冶炼生产工艺管理工作。

## 二、炭渣对铝电解生产过程的影响

### （一）炭渣对槽控机模糊控制系统的影响

如果电解槽中的电解质中积累的炭渣<sup>[2]</sup>没有及时清理，将直接影响氧化铝在电解质中借助超浓相输送后的溶解速度。在生产中，电解质含有高碳成分，导致火眼口更容易因电解质飞溅而形成结壳。这显著影响了电解槽接收的进料量。在这种情况下，槽电阻的变化可能会干扰槽控机的模糊控制机制，使得氧化铝浓度的判断不准确，甚至可能引发系统失稳。此类问题可能会导致槽控机发出错误指令，或持续过度加工，进而使氧化铝在炉底过量沉积，最终造成炉底不断恶化。

### （二）炭渣对主要经济指标的影响

当液态电解质中的碳渣浓度达到特定的临界水平时，电解质电阻将显著增加，导致电解槽的操作电压升高。此情况可能扰乱电解槽的能量平衡，并导致温度升高。当阳极底部积累的炭渣达到一定水平时，电解槽中的垂直电流将逐步减弱，而水平电流则会增强并流向侧壁。这将增加电解槽的热量负担，导致直流电能的消耗量增加。

### （三）炭渣对电解槽槽况的影响

如果电解槽中电解质的炭渣积累过多而未被及时去除，这会使电解槽的工作电压提升，增加发热量，导致电解质温度上升，异常过热。这种情况最终会导致热槽效应，从而显著影响电解厂各个生产区域的正常运行。在电解车间或工区中发生热槽现象时，这会悄然降低电解槽的电流效率，并导致平均电压升高。在电解池中，由于阳极的氧化反应和阴极的钠吸附，会加速引发膨胀和损坏问题。

### （四）炭渣对系列安全的影响

在当下，许多大型预焙铝电解槽普遍应用的是中部投料的工艺技术。这种工艺通过在电解槽中实现磁场、电场和热场的平衡，促使电解质与铝液保持连续流动。在这个过程中，生成的炭渣会随着电解质和铝液的流动而移动，并在电解槽侧面的宽广区域堆积。当炭渣积累过多时，可能导致槽内阳极温度升高，形成长炭渣包。在这种情况下，水平电流容易在炭渣和长包位置的侧面引起局部的过热和放电，导致炉壁严重发热变红，可能引发漏炉问题，从而对整个系列的安全稳定运行带来重大威胁。

## 三、组装生产阳极炭块的降炭措施

### （一）保持石油焦成分的一致性。

与供应商紧密互动，以保障石油焦采购计划的稳固。炉顶料中的钒含量必须维持在680PPm以下，而炭阳极中的钒含量应控制在600PPm以下。石油焦配料系统设备的正常运行和配料的精准性，需要对石油焦配料的皮带秤进行不定期检查。此外，还需定期对这些皮带秤进行校准。

#### 1. 稳定残极加入比例

目前，残留物中的灰分、铁和钠含量相对较高，所以不适合进行过高比例的混合。残余率应保持在11%到13%范围内，最高

用量不可超过15%。调整残极滚筒筛的转速，定期检查除铁设备的工作状态，并在皮带输送机上添加磁性滚筒，以有效管理残极中的铁和钠含量。

#### 2. 做好煅烧炉维护维修

通过使用热修、冷修和大修等技术，提升煅烧炉的密封效果，确保每台炉子运行的稳定性，保证煅后焦的质量符合标准，并提高其产量。我们要求加速在煅烧炉上安装自动控温设备，以减少因控温技术和责任心因素对煅后焦质量的影响，从而保障其质量的稳定性。

#### 3. 优化阳极生料的配比和流程管理，持续改善生产控制参数

400kA和500kA阳极在强度、密度以及电阻率特性上有所不同。虽然单个块的重量会有所影响，但仍然可以通过改进配方和混合工艺来提升。引入纯度检测装置有助于提高研磨制粉的纯净度。为符合合理规范要求，纯度必须达到或超过80%。调整混合物配方，确保大颗粒的比例维持在21%以上。为确保工厂沥青的质量，需将宝舜沥青的应用比例控制在不超过五分之一。探讨通过延长材料的混合时间和降低混合时的温度，以提高混合质量，从而进一步增加糊料的可塑性；在成型过程中，需要严格控制振动的持续时间、激振力和振动高度。振动时间应设定在110到120秒内，振动高度应保持在665至670毫米之间。这种调整有助于确保阳极的强度和体积密度保持均匀。

#### 4. 优化焙烧升温曲线

在适当的情况下，应尽可能延长保持温度的时间。高保温时间 $\geq 60h$ ；提高装炉质量，通过精确控制炉面红料、负压和温度差等焙烧工艺参数，保证阳极焙烧过程的稳定性。将控制排烟架的温度差维持在 $\pm 30^{\circ}C$ （边火通道控制在 $\pm 40^{\circ}C$ ）。4P燃烧架的温度差应保持在 $\pm 10^{\circ}C$ ，而5P和6P燃烧架的温度差需限制在 $\pm 5^{\circ}C$ 以内，以保证阳极焙烧工艺的质量稳定。

#### 5. 优化阳极黏结物清除工艺

加强对阳极粘接填料的清理和检查工作。  
若自动化设备未能彻底清理，需要及时调整清理机器人，并进行人工辅助清理。

## 四、电解生产中的炭渣减量措施

为及时有效降低电解生产中的炭渣量，应采取以下主要措施：

1. 提高对电解槽的管理和维护，以避免阳极氧化带来的问题。在更换极片的过程中，需要迅速添加原料，并调整其边缘形状，从而保证保温材料的紧密贴合，防止阳极暴露。尽量减少使用大锤头，以避免其对中缝绝缘材料或电解质造成损害。发现材料接触点上有阳极氧化现象时，建议采用氧化镓电解质进行防护。

2. 加强对电解槽换极操作质量的管理，确保炉膛保持清洁，确保技术条件的稳定和合理，避免阳极发生故障并防止电解温度升高。极转换周期被调整为35天，同时剩余极点的高度维持在16厘米以上。

3. 强化阳极浇铸的管理，保证浇铸工艺的优良，防止由于

质量缺陷出现阳极偏流、破损或脱落的问题，以避免局部温度升高，进而减轻阳极氧化的风险。

4. 加强对电解槽技条件的监控，确保其平稳运行，减少长效效应的出现，并防止因技条件不当而引起电解质过热。

5. 增加清理炭渣的频率，减少电解质中的炭渣量，以提升电解质的导电性能。为避免炭渣积累、电解液电阻增大、局部放电及极距过低等因素引起的电解温度上升等负面现象，必须降低阳极掉渣的概率。<sup>[3]</sup>

6. 对炭渣的捞取量进行精准测量和统计，进行详细分析，并与阳极炭块生产公司保持及时沟通与反馈。这将有助于精确地评估炭阳极的品质，并为制定相应的提升质量措施奠定基础。

## 五、结束语

炭阳极的质量问题以及电解铝生产中管理的难题，导致炭渣

含量上升，使得炭阳极的单耗指标提高。这种情况对电解槽的安全稳定运行和经济效益造成了显著的负面影响。

通过调整工艺参数和优化炭渣回收操作，维持合适的电解质浓度及其过热程度，加强电解槽的日常保养，并执行标准化回收程序，对回收的炭渣进行二次分离处理。<sup>[1]</sup>

通过采取这些行动，电解槽中的炭渣明显减少，氟盐的使用量也下降，同时电流效率显著提高。此外，这也确保了电解槽内部的清洁和设备状态的稳定。1月份时，每吨铝料能产生约3公斤的铝炭渣，而到了3月份，这个数字下降到平均1.5公斤铝炭渣，每天的炭渣回收量因此减少了3.7吨。自从实施三班倒工作制度以来，捞渣频次下降，减少了人为操作的干扰，电解质的波动幅度也变小，从而降低了二次反应的发生，提高了电流的效率。这不仅提升了生产效能和产量，还增强了企业的盈利水平。

## 参考文献

- 
- [1] 刘艳, 胡广艳等. 铝电解槽炭质固体废弃物综合利用进展 [J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(01): 166-171.
- [2] 刘宣伟, 李登辉. 电解槽内炭渣对铝电解生产过程的影响 [J]. 冶金管理, 2021(03): 24-25.
- [3] 张海龙. 电解铝工业减污降碳及超低排放技术 [J]. 世界有色金属, 2022(11): 1-3.



# 大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机

王树涛

重庆 云阳 404500

DOI:10.61369/ERA.2025120005

**摘 要：**三峡五级船闸和垂直升船机为长江经济带经济增长作出了重大贡献，但是长年超负荷运行的三峡t大坝拥堵日益加剧。大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机，是在卧式大长圆筒上顺纵向按通航落差，对称固定两个圆筒管，管端设置小半圆的重力自旋门和随旋的调水管、基座、启闭机、防撞绳架、管内圆环挂轨上相配安全设施等，这就组成了由水厢载船的旋转升船机，对接闸首门载船翻坝安全通航，建设很快投资很低，又效率相当高并且安全环保。

**关 键 词：**大圆筒水浮旋升船机；三峡通航瓶颈；柔性防撞；超级平衡；冲泄水调水系统

## Large Diameter Water-Suspended Spinny Super Balance Ship Lift

Wang Shutao

Yunyang, Chongqing 404500

**Abstract：** The Three Gorges Ship Lock and Vertical Ship Lift have significantly contributed to economic growth in the Yangtze River Economic Belt. However, the Three Gorges Dam has faced increasing congestion due to prolonged overloading. The Large-Semispherical Water-Suspended Rotary Super Balanced Ship Lift utilizes a horizontally oriented large semispherical cylinder aligned with navigational drop height. This system features two symmetrically fixed cylindrical tubes equipped with semi-circular gravity rotation gates at tube ends, rotating adjustment pipes, bases, hoists, collision prevention rope racks, and safety facilities on internal circular rail tracks. This configuration forms a rotary ship lift that safely transports vessels through water chambers and through the ship-riding lock gate for dam crossing. The design achieves rapid construction, low investment, high efficiency, and environmental safety.

**Keywords：** large-Semispherical water-suspended rotary ship lift; three gorges navigation bottleneck; flexible collision prevention; super balanced system; inlet and outlet water regulation system

### 引言

三峡五级船闸和垂直升船机为长江经济带经济增长作出了重大贡献<sup>[1]</sup>，长年超负荷运行的三峡大坝拥堵日益加剧，影响着黄金水道的整体成色，而正准备建设的三峡第二新通道，占地及移民多，建设周期长，投资巨大<sup>[2]</sup>。有没有一种即建设很快投资很低，又效率高并且安全环保的创新方案呢？答案是肯定的：大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机<sup>[1]</sup>。

### 一、大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机概述

大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机如图1和图2，在大圆筒的两端用圆环板或圆板，中部用 n 榫大圆骨架等距连接组成的卧式大长圆筒<sup>[3]</sup>（按三峡工程为例：外径约156m 长约400m，虽然很庞大，但圆度等不需整体机加工，且制安比鸟巢、钢结构厂房、造船、摩天大楼还简单，其位置在现有垂升机与五级船闸之间靠下游处就足够，而上游处建加固型常规隧道，逐步扭转至与圆弧形闸首相连。葛洲坝用本机外径约90m）上顺轴向总长，按

水头对称固定两个同长的圆筒管（直径约38m），在管两端各设置低于管中心的重力自旋门（有效过船万吨巨轮以上，自旋门上的槽口式小门，上宽约34m，底宽32m 水深6.5m，水面距圆筒管顶因长江大桥所限而约21.5m），并将通长的冲泄水管（管下设支承轮）设置成能自调误差的、双向接口安装在两端门框的下部作本机平衡并平稳的调水<sup>[4]</sup>；各门框的两边向内连接的基座上设置门扇的启闭机，相配已设计好的防撞绳、架等；在管内等距设置的圆环挂轨上相配浮旋的通风照明、疏散走道及横向防撞、安全等设施，还可按螺旋间隔位置的设置逃生通道；大圆筒内纵、横向

作者简介：王树涛（1952-），男，重庆云阳人，大学生，高级工程师，研究方向：从事机械工程、模具（冷冲压、金属热压铸、铝型材挤出模具）设计与制造，其间设计过建筑框架结构工程，退休后从事多项建筑工程监理，并作总监代表监理了本县从地勘到竣工十个亿的大型公共高楼建筑。于1977年获首届县科技大会先进科技工作者奖，90年代荣登云阳县县志

和筒外及圆筒管外可加钢丝绳栓、捆固；就构成了刚、柔并济且能自调误差的升船机主体结构、和独特平衡的筒内所载水能保持自然平、稳的承船水厢<sup>[5]</sup>如图3（排淤可由制动或已设计的锁定机构，将本机停在两水厢呈水平位置时，由厢外平衡设置的n套排淤系统或加上移动搅泥机排污到下游）。这个大圆筒就像船一样定位在满溢水的水库作底座（整体有调整误差的柔性间隙和承船厢所载船舶的前后左右均为柔性防撞，以保证运行及遇地震时，各方向的耦合力、流固耦合基本消失为零，承船厢内水体无波动）的稳定平静（由澄清池经滤网流入）的清水上，像垂直升船机似的对位上下游的、圆弧形闸首的整扇下沉式弧形大闸门<sup>[6]</sup>（与三峡垂直升船机闸首一样的随水位在圆弧形轨道上由配重平衡的省力升、降，但不需要增减叠梁而更好，其圆弧形航槽的通航净空大于最高船舶的通航要求）上的重力工作自旋门（其上的小门能适应一定的水位变化），并由防水等推力的液压楔形器、或楔高器楔定大圆筒，然后可靠对接通水域载船、关门调整水位后，通过水库座两边的多台由电器同步的大力杠杆压贴式摩擦主动轮，或多台卷扬机、省力滑轮组钢丝绳贴、挂在大圆筒的外圆面一拉一松的、或再加n台液压顶动式助力启动（有多方式合一的制动）机构（或用水调整成可变偏心的大圆筒的启动、制动等方式）启动后旋转约半圈（在往复运行中他能自我柔性调整各处误差，而闸门和各自旋门有多方式合一的止水和防漏水机构，在工作时可部份卸压使密封不很紧又耐用，旋转也灵活），就实现了水电大坝上下的船舶，同时快捷（总耗时约45分钟）安全互送通航<sup>[7]</sup>。

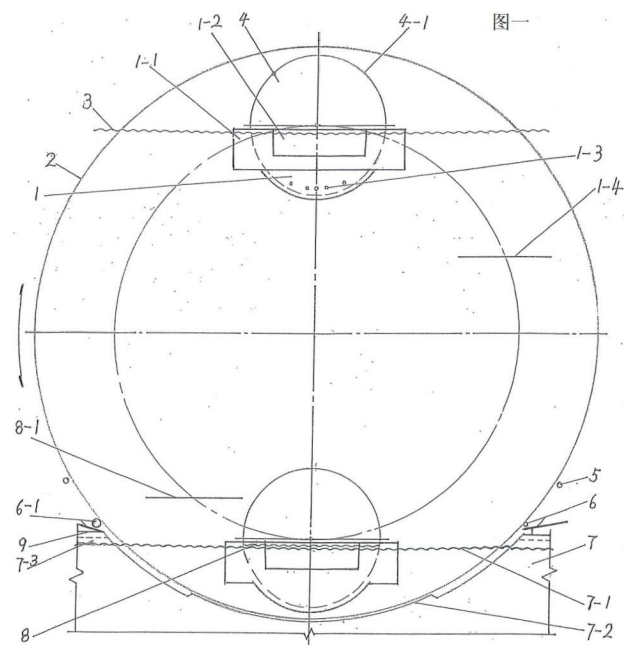


图1 《大圆筒水浮旋省力升船机》正立面示意图

1、小半圆的重力式自旋门（门边框向厢内设置基座，其上安装小门的启闭机、防撞绳、架等，厢内设环形挂轨并配附属设施）1-1、对接闸首的止水面板1-2、下沉式弧形门（门框口可按船的斜度设置）1-3、冲泄水水管1-4、最低水位时的门上口2、大圆筒兼被动轮3、大坝内和承船厢内的水面4、固定的圆筒管或大半圆槽，两端设置前述自旋门构成了承船水厢4-1、圆门框5、大圆筒纵径向

的轮胎式定位轮6、压贴轮胎式传动轮及杠杆（两边n台n套）6-1、或斜轨重力滑贴式传动轮，或两边对称钢丝绳卷扬机一松一拉式传动7、水库式底座7-1满溢的清水面7-2、n根弧形凸肋条（其上可设卧式楔高器）7-3、溢水孔8、下游最低水面及承船厢内水面8-1最高水位时的门上口9、桥式基座

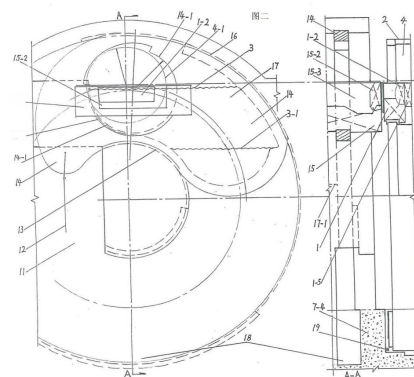


图2 圆弧形上闸首正、侧面及对接示意图（下闸首类似）

11、大闸门的配重凹坑12、n根吊配重的钢丝绳和定滑轮13、悬臂式内15-1滑道，检修站的滑道或加宽并设置横向液压泵14、大闸门，其结构除加厚外另有加强机构，检修时用配重等装置将其下放到检修站或横移检修14-1、圆弧形门框道，中心向右下偏移适应水位变化更大，检修自旋门则在框顶用电动葫芦偏心提升15、重力自旋门，也可小半圆15-1止水面板15-2、卧倒小门15-3、门航道1-2、模拟下沉式弧形门4-1、模拟承船厢的圆门孔16、外滑道和拱3、大坝内和承船厢的水面3-1、最低水面17、闸首航道，与凿成的引航道逐渐扭转接通18、检修站17-1、航道底1、承船厢的重力自旋门1-5、设备基座7-4、水库钢筋砼墙19、楔形器2、大圆筒4、承船水厢1、A端门框的下框2、A端门框的下框上连接的回头管3、A端回头管的回头段4、A端门框的下框上连接的单向管5、回头管的回头处与门框的定位套6、B端门框的下框7、B端门框的下框上连接的回头管8、B端回头管的回头段9、B端门框的下框上连接的单向管10。

注：承船厢调水水管与门框用球阀式伸缩管、软管、大小头套管为一体连接，使其适应万向的角度、长度、轴向位移的误差而统一又互相自由运行等。

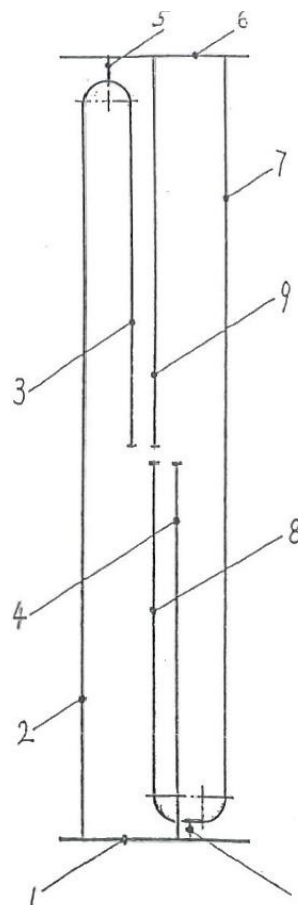


图3 承船厢的冲、泄水调水水管简图

若将本技术应用于葛洲坝、三峡大坝等处，尽管规模很庞大，但本方案其简便易行，稳定安全如不倒翁，又灵巧如燕，并创造旅游新高峰，还可不占耕地无移民，节能减排绿色环保，与现有设施共同实现突破三峡瓶颈，船舶随到随通航。

## 二、大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机优点

本机不仅兼具了拟建新船闸的大容量和现有升船机的优点，还用索道式机械、隔流墙或柱等建筑方式，实现引航道双向牵引护航，解决了通航水流包括泄洪、五级船闸冲水等诸多乱流之不利复杂因素的干扰、及船闸工作门不停航就能调水位的止水还有排淤难题等，并且各原理、结构、制安简便精度普通：本机采用同型号材料配料等，在工厂制成统一尺寸的标准件，比如骨架外圆为双层立向钢板交叉接头等方式，采用不封闭废料的落料冲（销螺）孔阶梯式复合模冲裁成型，即降低了冲裁力安装又准确<sup>[9]</sup>；其大圆筒和承船水厢的外围标准板因板厚不同、也可自然弯曲，因此，在现场搭设脚手架、塔吊，架跳上再用小车吊等方式

安装、检测、调校割磨、固定就很方便；大圆骨架搁置在水库弧形凸肋条上施工时，其搁置处的密封板，先在骨架内固定临时板并与骨架的外围板临时接头固定密封好，然后水库进水使大圆筒浮升、旋转几十度排水又搁置后，再拆除临时板，然后固定安装该段的外围板。各自旋门的圆孔及门可在现场平整坝子，用专设卧式机床等方案加工后，可整可拆分吊装。整扇下沉式圆弧形闸首门（和各自旋门）虽庞大但另有加强受力机构而并不太厚，且制成扇形叠梁式，运到闸首的悬臂式内滑道下面的检修站再次重叠组合后<sup>[10]</sup>，用钢索穿过孔栓固，还可在门内部打孔配销、钉固定和可配止水面的调平螺钉，再打磨门的止水面后，与该门的平衡配重相连并配合吊装较轻松安装到位。

## 三、结语

综上所述，大圆筒水浮旋巧省力超级平衡升船机不仅比拟建新船闸节省约2/3以上投资，也减少工期约一半而早见效，再加使用效率高、成本低、维修方便少检修，性价比确实很高。

## 参考文献

- [1] 刘莹, 司马俊杰, 王雁飞, 等. 基于智能化的船舶过闸调度需求分析 [J]. 交通世界, 2022, (26): 11–14.
- [2] 孙辉. 三峡通航信息化现状分析及展望 [J]. 中国水运, 2022, (11): 56–57.
- [3] 史娇, 黄绍文, 胡赛军. 三峡船舶过闸计划的智能编制与优化 [J]. 水运管理, 2021, 43(12): 30–31+33.
- [4] 司马俊杰, 王前, 南航. 长江三峡船舶过坝计划智能编制框架 [J]. 水运管理, 2021, 43(11): 12–14.
- [5] 郑卫力. 推进三峡通航安全生产治理体系和治理能力现代化的思考 [J]. 中国水运, 2021, (19): 47–50.
- [6] 肖圣魁, 孙荣, 姜东参, 等. 三峡通航调度系统架构优化研究 [J]. 中国水运, 2021, (19): 67–68.
- [7] 袁松. 移动终端软件在三峡通航船舶过闸申报中的应用 [J]. 水运管理, 2021, 43(07): 21–23.
- [8] 朱晶晶. 交通强国建设下三峡通航诚信管理体系发展之路 [J]. 交通企业管理, 2021, 36(04): 34–36.
- [9] 周引平, 王士健, 肖圣魁. 基于船舶远程申报系统提高三峡通航效率和安全的实践 [J]. 中国水运, 2019, (21): 50–51.
- [10] 胡开端. 新时期的三峡通航形象提升路径分析 [D]. 湖北大学, 2015.

# ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的应用与优化研究

任文东

中国核工业华兴建设有限公司西北分公司, 陕西 西安 712000

DOI:10.61369/ERA.2025120006

**摘 要 :** ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的应用与优化研究是一个重要的课题。通过合理的施工技术和优化的施工方法, 可以提高墙板施工的效率和质量, 从而为住宅建筑提供更好的墙体材料和施工方案。因此, 深入研究和推广 ALC 墙板施工技术的应用与优化, 对于住宅建筑行业具有重要的意义。

**关 键 词 :** ALC 墙板; 施工技术; 住宅建筑; 应用; 优化

## Research on the Application and Optimization of ALC Wall Panel Construction Technology in Residential Buildings

Ren Wendong

Northwest Branch of China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 712000

**Abstract :** The research on the application and optimization of ALC wall panel construction technology in residential buildings is an important topic. By employing reasonable construction techniques and optimized construction methods, the efficiency and quality of wall panel construction can be improved, thereby providing better wall materials and construction solutions for residential buildings. Therefore, in-depth research and promotion of the application and optimization of ALC wall panel construction technology hold significant importance for the residential building industry.

**Keywords :** ALC wall panel; construction technology; residential building; application; optimization

### 引言

随着人们对住宅建筑环境质量的要求不断提高, 传统的砖混结构已经逐渐被新型轻质建筑材料所取代。其中, ALC 墙板作为一种重量轻、强度高、隔热、隔音、防火等优点集于一身的预制轻质墙体材料, 逐渐得到了广泛应用。在住宅建筑中, ALC 墙板施工技术的应用与优化研究具有重要意义。ALC 墙板施工技术的应用在住宅建筑中具有诸多优势。首先, 由于 ALC 墙板的重量轻, 施工过程中不需要使用大型机械设备, 因此可以减少施工成本和工期。其次, ALC 墙板的强度高, 能够满足住宅建筑对于结构安全性的要求。此外, ALC 墙板具有良好的隔热、隔音和防火性能, 能够提高住宅的舒适性和安全性。

### 一、ALC 墙板概述

ALC 墙 板 (Autoclaved Lightweight Concrete Panel) 是一种轻质混凝土墙体材料, 也被称为轻质混凝土板或 AAC 墙板 (Autoclaved Aerated Concrete Panel)。它是由水泥、石膏、石灰、细砂和气泡剂等原材料组成, 经过高温高压的自动养护加工而成。ALC 墙板具有优异的隔热、隔声和防火性能, 同时具备良好的抗震性能和施工便利性。

ALC 墙板的轻质特性使其具有较低的自重, 因此在建筑中可以减少结构荷载和地基负担。它的优异隔热性能可以有效地降低建筑物的能耗, 提高室内的舒适度。此外, ALC 墙板还具有优异的隔音性能, 可以有效地隔绝噪音传播, 提供一个安静的室内环境。同时, ALC 墙板具有出色的防火性能, 能够抵御火灾蔓延,

为建筑物的安全提供保障。

ALC 墙板的施工便利性也是其优势之一。由于 ALC 墙板具有标准化的尺寸和轻质的特性, 它可以通过干挂或湿挂的方式快速安装在建筑结构上。这种快速施工的特点不仅可以减少工期, 还可以降低施工成本。此外, ALC 墙板的表面平整度高, 可以直接进行内外墙的装饰, 如贴瓷砖、涂料等, 提高了建筑物的整体美观度。综合而言, ALC 墙板以其轻质、隔热、隔音、防火和施工便利性等特点, 成为现代建筑领域中备受青睐的墙体材料之一。

### 二、ALC 墙板作业条件

ALC 墙板的生产需要一定的作业条件。首先, 需要具备一定规模的生产厂房或生产车间, 以容纳生产设备和材料储存区。生



产厂房应具备良好的通风和排水条件，以确保生产过程的顺利进行。其次，ALC 墙板的生产需要一定的设备和工具。常见的设备包括混凝土搅拌机、自动养护设备、自动切割机等。这些设备应符合安全标准，并定期进行维护和检修，以确保生产过程的稳定和高效。此外，ALC 墙板的生产还需要一定的原材料和配方。常见的原材料包括水泥、石膏、石灰、细砂和气泡剂等。这些原材料应符合国家或地区的相关标准，确保产品的质量和性能。在生产过程中，需要准确控制原材料的配比和加工工艺，以确保 ALC 墙板的质量稳定和一致性。综上所述，ALC 墙板的生产需要具备适宜的作业条件，包括合适的生产厂房、必要的设备和工具，以及符合标准的原材料和配方。这些条件的满足可以确保 ALC 墙板的高质量生产和产品性能的稳定。

### 三、ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的应用

#### （一）测量放线

##### 1. 测量放线的重要性

在 ALC 墙板施工之前，进行准确的测量放线是非常重要的。测量放线可以确定墙板的具体位置和尺寸，并保证施工的准确性和一致性。通过测量放线，可以避免因墙板位置偏移或尺寸不准确而导致的施工错误和后续工作的困难。因此，测量放线是 ALC 墙板施工过程中的关键步骤。

##### 2. 测量放线的方法

测量放线主要采用传统的测量工具和仪器，例如测量尺、水平仪、激光测距仪等。在进行测量放线之前，需要根据设计图纸确定墙板的位置和尺寸，并参考基础工程的标高。然后，根据设计要求和标准，使用测量工具和仪器进行测量和放线。一般情况下，采用三点法或四点法进行放线，以确保墙板的水平度和垂直度。

##### 3. 测量放线的注意事项

（1）选择合适的测量工具和仪器，确保测量的准确性和精度。（2）进行测量放线之前，需要对施工现场进行清理，确保墙板位置的清晰可见。（3）在放线过程中，需要保持仪器和工具的稳定性和垂直度，以确保测量的准确性。测量放线的结果应及时记录和核实，以便后续的施工工作和质量检验。通过科学准确的测量放线，可以为 ALC 墙板施工提供准确的参考和指导，确保墙板的位置、尺寸和平整度符合设计要求，从而保证施工的质量和效率。在实际施工中，施工人员应严格按照测量放线的要求进行操作，并及时纠正和调整任何偏差，以确保施工的准确性和一致性。<sup>[1]</sup>

#### （二）ALC 墙板施工

ALC 墙板的施工技术涉及到主体墙到柱的安装、门孔的处理以及补板的方法。此外，还需要注意墙板对线位置的微调。

1. 主体墙到柱的施工：在安装 ALC 墙板时，从主体墙到柱的一头到另一头的顺序进行。首先，根据设计要求和墙板尺寸，在墙体上标出安装位置，并做好水平和垂直的定位。然后，使用专用的粘结剂或胶水将墙板粘贴到墙体上，确保墙板与墙体之间紧密贴合。在墙板的接缝处，应使用专用的 ALC 墙板连接件进行固

定，以增加墙体的整体稳定性。<sup>[2]</sup>

2. 门孔的施工：对于有门孔的墙体，需要在安装墙板之前预留好门洞的位置。安装时，应从门洞两边开始，依次安装墙板，确保门洞两侧的墙板与门框对齐。在门洞附近，可以使用专门设计的支撑材料，如木方或钢支架，来保持墙板的稳定。

3. 补板的处理：如果 ALC 墙板的宽度小于一块的厚度，需要进行补板处理。补板时，可以将墙板切割成合适的大小，并将其拼接在墙内，使用粘结剂或胶水进行固定。为确保补板的稳固性，补板的宽度应大于200mm，并与周围的墙板进行紧密连接。

4. 墙板对线位置的微调：在安装 ALC 墙板时，由于墙板和墙体之间的微小误差，通常需要进行微调。可以使用细调工具，如楔子或调整螺栓，对墙板进行微调，以确保墙板的对线位置准确。一般来说，微调范围通常在5mm 内，以保证墙体的整体平整度和美观度。<sup>[3]</sup>

以上是关于 ALC 墙板施工技术的介绍，包括主体墙到柱的安装顺序、门孔处理、补板方法以及墙板对线位置的微调。在实际施工中，需要根据具体情况和设计要求进行操作，并确保施工质量 and 安全性。<sup>[4]</sup>

#### （三）特殊部位的处理

特殊部位的处理是在 ALC 墙板施工中需要特别注意的地方，如墙角、窗洞和梁柱等。对于墙角，可以采用专门设计的墙角连接件来加固和连接墙板，确保墙角的牢固性和平整度。对于窗洞，需要提前按照设计要求预留好窗洞的位置，并在安装墙板时确保墙板与窗框对齐，同时加强窗洞周边的支撑和固定。对于梁柱，需要在安装墙板时留出梁柱的空间，并在接触部位采取适当的固定措施，确保梁柱与墙板之间的连接稳固。

另外，特殊部位还包括电器插座和开关等。<sup>[5]</sup> 在施工时，需要提前确定好电器插座和开关的位置，并在墙板上预留好相应的孔洞。这些孔洞应与实际的电器设备尺寸相匹配，并采取防水措施，如使用防水盒或涂刷防水涂料，以确保电器设备的安装和使用安全。

此外，特殊部位还可能涉及到管道的穿越和防水处理。对于管道的穿越，需要在墙板上预留好相应的孔洞，并采取适当的防水措施，如使用管道套和密封胶等，以防止水分渗透和漏水问题。对于需要防水处理的部位，如浴室和厨房等，可以使用防水涂料或贴防水膜等防水材料，确保特殊部位的防水性能。特殊部位的处理在 ALC 墙板施工中至关重要。通过采取适当的连接、固定和防水措施，可以确保特殊部位的稳固性、安全性和防水性能，从而提高建筑物的整体质量和可靠性。在施工前需进行合理规划 and 设计，并根据具体情况选择合适的处理方法。

### 四、ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的优化

1. 在住宅建筑中，ALC 墙板施工技术可以采取一系列优化措施，以进一步提升施工效率与工程质量。首先，推广工厂化预制生产模式。在工厂内对 ALC 墙板进行规模化、标准化生产，不仅能够严格控制产品尺寸精度和性能指标，还可以在出厂前完

成嵌件、孔洞和连接件的预制工作，从而减少现场切割与二次加工的环节。现场施工环节只需按照设计图纸进行安装，大大缩短工期，并有效降低施工现场的噪音和粉尘污染。这种工厂预制 + 现场安装的施工方式，符合当前绿色施工和装配式建筑的发展趋势。

2. 结合 BIM 技术（建筑信息模型）进行优化是提升 ALC 墙板施工水平的重要手段。通过 BIM 三维建模，可以在设计阶段直观展示墙板与结构、管线的关系，提前发现设计冲突并进行优化调整，避免现场返工。同时，BIM 技术能够精确计算墙板用量、吊装位置和安装顺序，为施工组织提供科学依据。借助 BIM 的可视化和信息化优势，还可以实现施工全过程的模拟和管控，使施工人员在实际操作前即可熟悉安装要点和工序流程。结合移动终端或 AR 技术，施工现场还能实现实时定位和可视化指导，从而提升安装精度与效率。

3. 采用专业化施工团队与机械化施工设备，是优化 ALC 墙板安装效果的关键。施工人员需具备丰富的装配式建筑经验和对 ALC 墙板的专业培训，确保施工环节严格按工艺标准执行。与此同时，配套使用高效的施工设备，如墙板专用吊装机、粘结剂喷涂机、自动测量校准工具等，可以显著减少人工误差和劳动强度。机械化与自动化施工的引入，不仅提高了安装效率，还能保障墙体垂直度、平整度及接缝严密性，从而改善整体观感质量。

4. 优化施工工艺与节点处理。对于墙板接缝部位，可采用专用防裂砂浆或柔性连接材料，避免后期出现裂缝问题。同时，应在施工过程中严格控制板缝宽度与填缝深度，确保粘结均匀牢固。对于特殊部位，如管线预留洞口和门窗洞口，可以在设计阶段预留或采用模块化构件，减少现场切割加工，避免因二次开槽而影响墙体整体强度。对于防水要求较高的区域，如厨房和卫生间，应在施工中增加防水砂浆层或防水卷材，并结合涂刷型防水材料进行复合处理，进一步提升墙体整体的防水耐久性和使用寿命。

5. 强化施工管理与质量控制。施工现场应建立全过程质量管控体系，从材料进场检验、测量放线、安装定位到后期验收，均应设立标准化流程和责任人。通过信息化管理平台，可以实时记录施工进度和质量情况，实现动态监管。对于关键工序，如吊装、拼缝、粘结，应进行全过程旁站监督，确保施工达到设计要求。同时，还应建立质量追溯机制和责任考核制度，以提升施工管理的规范化和长效性。

通过预制化生产、BIM 技术应用、专业化团队建设、机械化施工设备的引入以及精细化管理的配合，ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的应用将更加高效、精准和可控。这不仅有助于提升施工速度和工程质量，还能有效降低成本和资源浪费，推动住宅建筑向绿色、环保和装配化方向发展，为居民提供更安全、舒适和节能的居住环境。

## 五、结束语

本文对 ALC 墙板施工技术在住宅建筑中的应用与优化研究进行了探讨。ALC 墙板作为一种重量轻、强度高、隔热、隔音、防火等优点集于一身的预制轻质墙体材料，在住宅建筑领域具有广泛的应用前景。通过对 ALC 墙板施工技术的优化研究，可以提高施工效率、降低施工成本，并提升住宅建筑的环境质量和人居舒适性。针对 ALC 墙板施工过程中存在的问题和不足，可以通过优化施工工艺、选择适合的设备和工具、优化材料配比以及加强施工管理等手段进行改进。值得注意的是，ALC 墙板施工技术的应用与优化研究是一个不断探索和改进的过程。在实际施工中，需要施工人员具备专业知识和技能，严格按照施工规范和要求进行操作，确保施工质量和安全。

## 参考文献

- [1] 马天祥. ALC 墙板的施工技术措施分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (07): 159-161.
- [2] 齐姜斌, 苑飞, 贾树强. 浅谈 ALC 隔墙板在施工中的应用 [J]. 中国住宅设施, 2022, (12): 69-71.
- [3] 季海斌. 浅谈 ALC 轻质隔墙板在装配式钢结构建筑施工中的应用 [J]. 中华建设, 2022, (11): 152-154.
- [4] 曹培民, 李东. 轻质 ALC 墙板应用与施工技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2022, (20): 203-205.
- [5] 林戈. 浅谈某高层工业厂房 ALC 墙板的施工技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2022, (09): 34-36.

# 高温季节公路施工中混合料温度控制技术研究

李莹莹

河北光太路桥工程集团有限公司，河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2025120007

**摘 要：** 高温季节公路施工中，混合料温度控制是影响施工质量和工程寿命的重要因素。高温环境下，混合料在摊铺、压实等过程中容易出现温度过高，导致施工质量下降。为应对这一问题，采用温控设备、智能监测系统以及优化材料配比等多种技术手段进行温度调控。通过实施实时温度监测、改进施工工艺、加强运输环节的温控管理，有效降低了混合料温度波动，保证了施工的顺利进行。优化后的温控措施不仅提升了工程质量，还延长了路面使用寿命，具有显著的技术与经济效益，对提高公路建设水平具有重要意义。

**关 键 词：** 高温季节；混合料温度控制；温控技术；施工质量；工程寿命

## Research on Temperature Control Technology for Mixtures in Highway Construction during High-Temperature Seasons

Li Yingying

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

**Abstract：** In highway construction during high-temperature seasons, the temperature control of mixtures is a crucial factor affecting construction quality and project lifespan. Under high-temperature conditions, mixtures are prone to excessive temperatures during processes such as paving and compaction, leading to a decline in construction quality. To address this issue, various technological measures, including temperature control equipment, intelligent monitoring systems, and optimized material proportioning, are employed for temperature regulation. By implementing real-time temperature monitoring, improving construction techniques, and strengthening temperature control management during transportation, fluctuations in mixture temperatures are effectively reduced, ensuring smooth construction progress. The optimized temperature control measures not only enhance project quality but also extend the service life of pavements, offering significant technical and economic benefits. They are of great importance for improving the level of highway construction.

**Keywords：** high-temperature seasons; mixture temperature control; temperature control technology; construction quality; project lifespan

## 引言

高温季节对公路施工中的混合料温度控制提出了严峻挑战。混合料在高温下易发生温度过高、冷却不均等问题，直接影响施工质量和路面寿命。有效的温控技术不仅能提高施工效率，减少返工和维修成本，还能延长道路使用年限。随着技术的不断进步，智能化温控设备和数字化监测手段为解决这一问题提供了新机遇，成为提升公路施工质量的关键所在。

## 一、高温季节混合料温度变化特点

### （一）高温环境下混合料的物理特性变化

在高温环境下，混合料的物理特性会发生显著变化。首先，温度升高会导致混合料中沥青的粘度下降，进而影响其粘结力和稳定性。沥青的粘度是其与骨料结合的关键，当粘度过低时，混合料容易出现分离现象，导致路面质量下降。其次，高温环境还会导致混合料中的水分蒸发较快，特别是在摊铺过程中，水分损

失加剧了骨料与沥青的结合困难，使得混合料的密实度和耐久性受到威胁<sup>[1]</sup>。

此外，高温下混合料的热膨胀特性也表现得尤为明显，混合料的体积膨胀可能引起应力集中，导致裂缝的产生。这些物理特性的变化使得高温季节施工面临更大的挑战，尤其是在施工过程中需要特别注意混合料的温控，避免因过高的温度造成材料性能的严重退化。

### （二）温度对混合料性能的影响

温度变化直接影响混合料的工作性能和最终的结构稳定性。



较高的温度会导致沥青在施工过程中的流动性增大，降低了混合料的稳定性。沥青流动性过大时，混合料容易出现软化，失去足够的支撑力，尤其是在荷载作用下更容易出现车辙等问题，严重影响路面的使用寿命。

此外，高温还会加速混合料的老化过程，尤其是沥青的氧化反应在高温下更加剧烈，导致混合料的抗裂性和抗老化性下降。这种性能的变化使得高温季节施工的混合料更加容易出现裂纹、松散、车辙等缺陷，进而影响公路的长期使用和维护成本。

### （三）高温季节施工的挑战和不利因素分析

高温季节施工中的一个主要挑战是混合料温度的过高和控制困难。高温环境下，混合料的热损失增加，特别是在运输和摊铺过程中，混合料温度容易过早下降，影响其施工性能。同时，由于施工过程中混合料的温度变化不均，可能导致不同区域的施工质量不一致，造成路面质量的波动<sup>[2]</sup>。

此外，施工设备和技术的不足也是高温季节施工中的一个不利因素。在高温环境下，传统的混合料温控设备难以满足施工要求，容易导致温控失效。与此同时，高温还会加剧施工人员的作业强度，增加安全风险。因而，高温季节施工不仅要考虑材料的温控，还需优化施工工艺与设备，提高施工的效率 and 安全性。

## 二、混合料温度控制的关键技术

### （一）温控设备的选择与应用

温控设备在公路施工中扮演着至关重要的角色，尤其是在高温季节。常用的温控设备包括智能温控系统、热辐射加热器和冷却设备。智能温控系统能够精确监测和调节混合料的温度。系统采用高精度温度传感器（如 NTC 热敏电阻或红外传感器），精度可达到  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。设备通过实时数据传输至中央控制系统，自动调节加热或冷却设备以保证温度在合适范围内（常见控制温度为  $140^{\circ}\text{C}$  至  $160^{\circ}\text{C}$ ）。加热设备通过红外辐射或电加热方式提高温度，适用于温度过低的混合料；而冷却设备则通过水喷雾或空气冷却系统降低混合料温度，避免高温导致沥青氧化、裂纹等问题。

### （二）施工现场温控系统的设计与实现

施工现场的温控系统设计应根据不同施工工艺进行优化。首先，温度监测系统应设置在混合料储存、运输和摊铺的关键环节。一般采用精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  的高精度温度传感器，确保系统能够实时反映混合料的温度波动。数据采集系统将实时温度数据传输到中央控制中心，基于设定的温度范围（例如， $140^{\circ}\text{C}$  -  $160^{\circ}\text{C}$ ），通过计算机控制系统调节加热或冷却设备。温控系统应具备自动报警功能，一旦温度超出设定范围，系统自动调节并发出警报，防止因温控失效影响施工质量。施工现场还应设置温度调节装置，如水冷却塔或加热器，以便在极端温度条件下进行快速响应。

### （三）高温环境下混合料运输与摊铺过程中的温度控制方法

在高温环境下，混合料的运输和摊铺过程中，温度的保持尤为重要。运输过程中，混合料应使用温控保温车（如加装保温层的混合料运输车），确保混合料温度不超过  $165^{\circ}\text{C}$ ，且不低于  $130^{\circ}\text{C}$ 。根据《公路工程施工技术规范》（JTG F40-2004），运

输距离不应超过 30km，且运输过程中每隔 5 公里进行一次温度检查。摊铺过程中，使用带有温度监控功能的摊铺机，以确保摊铺温度在  $140^{\circ}\text{C}$  -  $160^{\circ}\text{C}$  范围内，精度可达到  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。摊铺机通常配备温度传感器，可以实时监控摊铺过程中的混合料温度，确保摊铺质量和路面密实度，避免因温度过高导致路面出现裂缝或车辙等问题<sup>[3]</sup>。

### （四）温控材料的使用与效果评估

温控材料在高温季节施工中发挥着重要作用，常见的温控材料包括热稳定性添加剂、隔热涂层和改性沥青。热稳定性添加剂可有效延缓沥青的降温速度，一般添加剂量为混合料重量的 0.5%-1.5%。改性沥青通过加入聚合物或橡胶改性剂，提高沥青的耐热性能和抗裂性。使用改性沥青后，温度控制范围可提升至  $170^{\circ}\text{C}$ ，并且具有更好的抗老化能力。在施工过程中，隔热涂层也可用来覆盖混合料堆放区域或运输车厢，减少热量散失。效果评估表明，使用改性沥青及热稳定性添加剂的混合料，在高温季节的施工过程中，能够延缓降温过程，确保温度保持在适宜范围内，从而提高路面的密实性和使用寿命。

## 三、温度监测与控制技术的优化策略

### （一）温度实时监测技术

温度实时监测技术是确保混合料温度稳定的核心手段。高精度温度传感器（如 RTD 热电阻传感器或热电偶传感器）广泛应用于混合料温度监测中，这些传感器能够提供  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  的精确测量，确保温度数据的准确性。通过在施工现场的多个关键点布设传感器（如混合料运输、堆放和摊铺区域），能够实时监测各个环节的温度变化，及时调整施工工艺。自动化控制系统则负责对温度数据进行实时采集与分析，当温度超过设定阈值时，系统可自动启动冷却或加热装置，调节混合料温度，保证施工质量<sup>[4]</sup>。

同时，智能温控系统结合温度传感器和自动化控制装置，可以通过计算机程序对不同区域的温度进行监控与调节，精确控制温度波动范围。例如，系统可根据实时数据调整混合料的输送带速度或加热炉的加热功率，使得混合料温度保持在理想范围内。温度监测系统的优化能够在极端天气条件下仍然稳定工作，提高公路施工的可靠性和施工周期的灵活性。

### （二）数字化技术在温控中的作用

数字化技术的应用大大提升了温控技术的精准性和灵活性，尤其是 BIM（建筑信息模型）和物联网（IoT）在温控系统中的集成使用。BIM 技术能够在项目设计阶段创建全方位的三维数字化模型，为温控系统的设计与实施提供准确的基础数据。在施工过程中，BIM 模型可以实时更新施工进度，帮助项目团队更精确地控制温度管理任务<sup>[5]</sup>。

物联网技术则通过将传感器、监控设备和控制系统互联互通，形成一个数据采集与分析的智能网络。传感器收集到的温度数据通过无线传输系统实时传送至中央服务器，供管理人员进行远程监控与调控。物联网技术不仅能够实时反映混合料温度的变化，还能够通过数据分析提供趋势预测，提前预警潜在的温度异



常问题。

（三）多维温控方法的结合与优化策略

多维温控方法结合了不同技术手段，优化了混合料温度控制的效果。传统的温控方法主要依赖单一的温控设备，如加热炉或冷却装置，而多维温控方法则结合了温控设备、智能系统以及施工工艺的优化。首先，温控材料（如隔热膜、热稳定性添加剂等）可以在混合料运输和摊铺过程中发挥重要作用，通过延缓温度波动来保持混合料的最佳施工温度。其次，通过传感器和实时监测系统配合自动化控制系统，不仅可以调节温度，还能够同步优化施工过程中的其他因素，如摊铺速度、压实度等，确保温度控制与其他工艺参数的协调一致<sup>[6]</sup>。

进一步的优化策略包括温控方法的区域化管理和动态调节。例如，根据施工现场的具体情况，温控系统可以根据地形、环境温度以及施工进度等因素，自动调节温度控制方案。在高温环境下，系统可以提高冷却效率，而在较冷的天气中，系统则优先加热。

四、高温季节混合料温度控制效果的评估与应用前景

（一）温控效果评估标准与方法

温控效果的评估标准主要通过温度控制精度、施工质量和路面耐久性进行综合分析。常见的评估方法包括温度波动范围检测、温度监测频率和温度保持时间等指标。根据《公路工程施工技术规范》（JTG F40-2004），混合料在运输和摊铺过程中，温度变化应控制在  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  以内。施工完成后的路面质量评估还应包括车辙深度、裂缝宽度和抗疲劳性等指标。温控效果良好的施工项目，其路面车辙深度通常低于15mm，裂缝宽度控制在0.2mm以内<sup>[7]</sup>。此外，采用红外温度扫描技术和传感器数据分析方法，可实现实时温度监测与快速评估，确保温控措施的有效性。

（二）技术经济分析：成本效益与工程质量

温控技术的引入往往需要一定的初期投入，但从长远来看，其能显著提高工程质量，降低后期维护成本。技术经济分析通常涉及直接成本和间接成本的评估。在成本方面，温控系统的安装和设备维护费用是主要支出，但能够有效延长道路使用寿命，减少因温度控制不当引发的返工和修复费用。根据一项工程案例分析，采用先进的温控技术可降低返工率约20%，提高工程质量15%。此外，技术的高效性可以缩短施工周期，进一步节省人工和设备费用。整体而言，温控技术的应用提高了路面的耐久性，降

低了生命周期成本，提升了工程经济效益。如表1所示。

表1 温控技术应用对比分析

项目	传统施工方法	温控技术应用后	差异（%）
返工率	15%	12%	-20%
工程质量提升	75%	90%	+15%
施工周期（天）	45	38	-15.6%
维修成本（万元）	100	80	-20%

（三）温控技术对工程可持续发展的贡献

温控技术在提高公路施工质量的同时，对工程的可持续发展具有重要贡献。通过有效的温度管理，不仅能减少施工过程中温度异常引起的质量问题，还能够大幅降低资源消耗和环境污染。例如，优化后的温控系统减少了能源浪费和施工过程中不必要的加热与冷却，使得项目的碳排放量降低了约18%。此外，温控技术能够有效延长道路的使用寿命，减少长期内的维护和修复频率，降低了资源消耗和环境压力，符合绿色施工和可持续发展的要求<sup>[8]</sup>。

（四）技术推广与应用前景展望

随着温控技术的不断进步和应用，未来其在公路建设中的推广前景非常广阔。高效、智能化的温控系统将成为标准配置，尤其是在高温地区和极端气候条件下，温控技术的应用将更加普及。此外，随着人工智能、大数据和物联网技术的进一步集成，未来的温控系统将更加智能化、自动化，能够根据环境条件和施工进度自主优化温控策略。预计到2028年，温控技术在公路施工中的普及率将达到85%以上，相关技术将被广泛应用于全球范围内的道路建设中，推动公路行业向更高效、更环保、更可持续发展的方向发展。

五、结语

高温季节对公路施工中的混合料温度控制提出了挑战，但通过先进的温控技术，可以有效克服这些困难，提高施工质量并延长路面使用寿命。温控设备的选择、智能化监测系统的应用以及温控材料的优化使用，均为实现高效、精确的温度管理提供了技术保障。同时，温控技术不仅在提升工程质量和施工效率方面表现突出，还在降低成本、提高经济效益和环境可持续性方面具有重要作用。随着技术的不断发展与完善，温控技术的推广应用前景广阔，将成为公路施工中不可或缺的重要组成部分，推动行业向高效、智能、绿色的方向发展。

参考文献

[1] 龙云霄. 高温多雨地区高速公路沥青混凝土路面施工关键技术研究 [J]. 交通世界, 2024, (08): 89-91. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2024.08.023.

[2] 王树凯. 公路工程施工中灌入式复合路面的应用分析 [J]. 交通世界, 2023, (16): 58-60. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.16.036.

[3] 王国鹏. 公路工程环氧沥青混凝土施工及温度控制探讨 [J]. 交通世界, 2020, (34): 47-48. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2020.34.020.

[4] 张伟蓉. 试论公路施工技术及路面施工的质量控制措施 [J]. 四川建材, 2023, 49(03): 151-153.

[5] 吴剑, 吴虹. 公路改建工程沥青路面施工技术分析 [J]. 江西建材, 2023, (05): 344-345+348.

[6] 郑弘. 温拌沥青技术在公路施工中的应用分析 [J]. 运输经理世界, 2023, (01): 25-27.

[7] 丁雪峰, 何国荣. 高海拔地区公路施工要点及质量控制分析 [J]. 中国科技投资, 2024, (13): 140-142.

[8] 张伟蓉. 试论公路施工技术及路面施工的质量控制措施 [J]. 四川建材, 2023, 49(03): 151-153.

# 医用建筑精益改造与精密安装控制技术研究

徐国杰, 陈建飞, 贾波, 蔡长春, 谢文尧  
中国建筑第四工程局有限公司, 广东 东莞 523000  
DOI:10.61369/ERA.2025120014

**摘 要 :** 随着我国城市化进程的加快和医疗卫生事业的不断发展, 既有医疗建筑的改造与功能提升已成为城市更新中的重要组成部分。东莞某医院作为一所具有25年历史的医疗建筑, 其结构安全性、功能布局及环境设施均已无法满足现代医疗服务的需求。因此, 对其进行系统性改造具有重要的现实意义。本文基于该改造工程的实际策划与实施过程, 从天棚施工、碳纤维布施工及粘贴钢板加固等方面展开研究、深入分析, 为国内同类既有医疗建筑的改造项目提供可借鉴的实践经验与技术参考, 助力推动医疗建筑更新改造领域的规范化、高效化发展。

**关 键 词 :** 改造工程; 医疗建筑; 结构加固

## Research on Lean Renovation and Precision Installation Control Technology of Medical Buildings

Xu Guojie, Chen Jianfei, Jia Bo, Cai Changchun, Xie Wen Yao  
China Construction Fourth Engineering Division Corp. LTD., Dongguan, Guangdong 523000

**Abstract :** With the acceleration of China's urbanization and the continuous development of healthcare services, the renovation and functional upgrading of existing medical buildings have become a vital component of urban renewal. As a medical facility with a 25-year history, a hospital in Dongguan no longer meets modern healthcare demands in terms of structural safety, functional layout, and environmental facilities. Therefore, undertaking a systematic renovation holds significant practical importance. Based on the actual planning and implementation of this renovation project, this paper conducts research and in-depth analysis on aspects such as ceiling construction, carbon fiber cloth application, and steel plate bonding reinforcement. It aims to provide practical experience and technical references for similar renovation projects of existing medical buildings in China, thereby contributing to the standardized and efficient development of the medical building renovation sector.

**Keywords :** reconstruction project; medical building; structural reinforcement

## 引言

本改造工程位于东莞市南城街道, 周边人流密集, 东邻光大新亚外国语学校, 北接原计生委宿舍及光大景湖春晓小区。项目总用地面积约6889.65平方米, 改造总面积约11680平方米, 主要包括主楼和副楼两栋建筑。改造内容包括结构加固、室内外装修、机电系统更新、消防系统升级等。改造后, 副楼1~8层均作为医疗用房, 第八层设置为厨房与餐厅, 主楼仍保留医疗功能。由于原建筑设计基准期为50年, 剩余使用年限为25年, 需对结构进行加固处理, 以满足现行抗震规范要求。

## 一、项目重难点分析

由于本改造工程师多专业交叉工程的施工管理与协调是一项系统工程, 面临着管理协调难度大、专业进场与工序衔接组织困难等诸多挑战, 对施工单位的综合能力提出了极高要求。而天棚施工作为装饰装修工程的重要组成部分, 其施工质量直接影响室内空间的美观度与使用功能。在天棚施工过程中, 常见的重点难

点主要包括以下几个方面:

### (一) 主龙骨、次龙骨纵横方向线条不平直

主龙骨与次龙骨作为天棚的承重结构, 其安装精度直接决定了天棚的平整度。导致主龙骨、次龙骨纵横方向线条不平直的原因主要有以下几点: 一是主龙骨、次龙骨在运输或存储过程中受到扭折, 虽经修整但仍无法恢复平直状态; 二是挂铅线或镀锌铁丝的射钉位置设置不合理, 拉牵力不均匀, 使得龙骨在安装过程

中受力失衡；三是施工人员未按照规范要求拉通线对主龙骨、次龙骨的高低位置进行全面调整，导致龙骨安装高度不一致<sup>[1]</sup>；四是吊顶水平线的测量存在误差，且中间平线起拱度不符合设计规定，进一步加剧了龙骨线条的不平直问题。

### （二）吊顶造型不对称、罩面板布局不合理

吊顶造型的对称性与罩面板的布局合理性是天棚装饰效果的关键影响因素。造成吊顶造型不对称、罩面板布局不合理的主要原因在于施工前期准备工作不足<sup>[2]</sup>。施工人员未严格按照设计图纸要求布置主龙骨和次龙骨，导致龙骨的分布位置与设计存在偏差，进而影响吊顶造型的对称性。同时，铺安罩面板时的施工流向不正确，未遵循从中间向四周或从一端向另一端的规范流程，使得罩面板之间的拼接缝隙不均匀，布局显得杂乱无章。

### （三）接缝明显

天棚罩面板接缝明显是施工中常见的质量问题，主要表现为接缝处接口露白茬和接缝不平产生错台。接口露白茬主要是由于罩面板切割精度不足或拼接时未进行有效的密封处理，导致接口处的基材暴露在外，在视觉上形成明显的痕迹<sup>[3]</sup>。接缝不平产生错台则是因为罩面板安装过程中，相邻面板的安装高度存在差异，或面板本身的平整度不符合要求，加之施工人员未对面板进行充分的调整与固定，从而在接缝处出现高低差。

### （四）吊顶与设备衔接不妥

在天棚施工过程中，往往需要与空调、灯具、消防等设备的安装进行协同作业。若设备工种与装饰工种之间缺乏有效的沟通与配合，在施工方案制定阶段未明确各工种的施工顺序与衔接要求，就容易导致吊顶与设备安装完成后衔接不佳的问题。例如，设备安装位置与吊顶开孔位置不匹配，或设备安装完成后吊顶无法顺利闭合等，不仅影响天棚的整体美观度，还可能对设备的正常运行造成影响<sup>[4]</sup>。

## 二、碳纤维布施工重点难点分析

碳纤维布的高强度、轻量化、耐腐蚀和耐高温等特性，使其成为天棚加固和提升性能的理想材料。通过使用碳纤维布，可以有效地提高天棚的承载能力、延长使用寿命、降低维护成本，并且施工便捷，适应复杂的结构形状。碳纤维布的高强度、轻量化、耐腐蚀和耐高温等特性，使其成为天棚加固和提升性能的理想材料<sup>[5]</sup>。但碳纤维布施工工艺复杂，对施工技术与环境条件要求较高，其重点难点主要体现在以下几个方面：

### （一）碳纤维布的选择

碳纤维布的质量直接决定了结构加固的效果，因此合理选择碳纤维布是施工的首要重点难点。在选择碳纤维布时，需综合考虑结构的载荷情况与设计的要求，深入了解碳纤维布的强度、厚度、密度及纤维织布方式等技术属性，确保所选碳纤维布的性能能够满足结构加固的需求。同时，应选用具备高质量认证和良好市场信誉的供应商提供的产品，以避免因选用品质不佳的碳纤维布而无法达到预期加固效果，造成时间与成本的浪费。

### （二）基材表面处理

表面处理是保障碳纤维布与基材之间黏结牢固的关键环节，其施工质量对加固效果具有决定性影响。表面处理通常包括清洗、打磨、除尘和涂刷等多道工序。首先需对基材表面进行彻底

清洗，去除表面的油污、灰尘、松散物等杂质；然后采用打磨设备对表面进行打磨处理，使其达到平整、粗糙的状态，以增加碳纤维布与基材的粘结面积；打磨完成后，要用压缩空气吹净表面粉尘，必要时还需用清水冲洗并进行干燥处理；最后根据设计要求涂刷相应的界面剂，进一步提高粘结性能<sup>[6]</sup>。若表面处理不当或不到位，将导致碳纤维布粘贴效果不佳，严重影响加固质量。

### （三）施工环境控制

碳纤维布施工对环境条件要求严格，环境因素的变化会显著影响粘结效果。防尘是环境控制的重要内容之一，施工过程中若环境受到污染，灰尘等杂质混入粘结界面，将大幅降低粘结强度。因此，施工前需对现场进行有效保护，设置必要的防护设施，如搭建防护棚、悬挂防尘网等<sup>[7]</sup>。同时，环境的温度和湿度也需严格控制，不同类型的黏结剂对施工环境的温度和湿度有特定要求，需在适宜的环境条件下进行施工，以确保黏结剂能够正常固化，保障粘结质量<sup>[8]</sup>。

### （四）粘接固化过程控制

粘接固化过程是碳纤维布施工的核心环节，其施工质量直接关系到加固效果的优劣。首先，需根据碳纤维布的类型和施工要求选择合适的黏结剂，并确保黏结剂的质量符合相关标准。在黏结剂调配过程中，要严格按照使用说明书的要求控制配比和搅拌时间，配比不准确或搅拌不充分都会影响黏结剂的黏结性能。其次，采用合适的涂抹方法将黏结剂均匀涂抹在混凝土和碳纤维布表面，涂抹厚度需保持均匀一致，避免出现过薄或过厚的区域，过薄可能导致粘结力不足，过厚则会影响固化效果<sup>[9]</sup>。最后，在粘贴碳纤维布时，需均匀施加压力，确保树脂从布的两边溢出，保证粘结密实无孔洞，同时在固化过程中要严格按照规定的固化条件进行养护。

### （五）施工安全防护

碳纤维布施工过程中存在多种安全风险，因此做好安全防护工作至关重要。施工人员必须穿戴齐全个人防护装备，包括安全帽、带有防护镜的护目镜、防护手套、防护鞋等，以防止施工过程中受到意外伤害。碳纤维布容易引起皮肤刺激或过敏反应，施工人员应尽量避免直接接触皮肤，必要时可穿戴防护服<sup>[10]</sup>。此外，碳纤维布属于易燃材料，施工现场严禁出现明火或其他火源，同时要采取有效的防静电措施，防止静电的产生和积累。施工现场还需保持良好的通风条件，避免黏结剂等有害物质挥发对施工人员的健康造成损害。

## 三、粘贴钢板加固工程施工重点难点分析

粘贴钢板加固技术是一种常用的结构加固方法，通过将钢板粘贴在混凝土结构表面，以提高结构的承载能力。该技术施工过程中的重点难点主要包括混凝土基面处理、钢板加工与安装以及胶黏剂施工等方面：

### （一）混凝土基面处理

混凝土基面处理的质量直接影响钢板与混凝土之间的粘结力，是粘贴钢板加固施工的关键环节。首先，必须对混凝土粘贴



面进行彻底清洁,采用合适的方法去除表面的油污、灰尘、松散物等杂质,若清洁不彻底,粘结界面将存在缺陷,严重影响加固效果。其次,对混凝土表面进行打磨处理,打磨后的表面应平整、粗糙,以增加粘结面积<sup>[11]</sup>。打磨完成后,需用压缩空气吹净表面粉尘,对于污染较为严重的表面,必要时用清水冲洗并进行干燥处理,确保基面符合粘贴要求。

### (二) 钢板加工与安装

钢板的加工质量与安装精度对加固效果具有重要影响。在钢板加工阶段,需根据设计要求对钢板进行精确的切割、钻孔等操作,严格控制钢板的尺寸偏差,确保其在允许范围内,同时钻孔的位置和大小必须符合设计要求,以方便后续的安装和锚固工作。加工后的钢板表面易生锈,需及时进行除锈和防锈处理,可采用喷砂、打磨等方法去除表面锈迹,然后涂刷防锈漆,防止钢板在使用过程中锈蚀<sup>[12]</sup>。在钢板安装阶段,需按照设计要求将钢板准确粘贴到预定位置,保证钢板与混凝土表面紧密贴合。粘贴过程中,要避免钢板产生翘曲、移位等现象,对于较大面积的钢板粘贴,可采用分段粘贴的方式,并确保各段之间连接紧密、平顺。

### (三) 胶黏剂施工

胶黏剂是连接钢板与混凝土的关键材料,其施工质量直接决

定了粘结效果。在胶黏剂施工前,需严格按照使用说明书的要求进行调配,准确控制胶黏剂的配比和搅拌时间等参数,配比不准确会严重影响胶黏剂的黏结性能<sup>[13]</sup>。胶黏剂涂抹时,应采用合适的方法将其均匀涂抹在混凝土和钢板表面,涂抹厚度需均匀一致,避免出现厚度不均的区域。涂抹厚度过薄可能导致粘结力不足,无法满足加固要求;过厚则可能影响胶黏剂的固化效果,降低粘结强度。在胶黏剂固化过程中,需严格按照规定的固化条件,如温度、湿度、固化时间等进行养护,确保胶黏剂充分固化,达到设计要求的黏结强度。

## 四、结论

东莞市某医院改造工程通过科学策划、精细管理和技术创新,有效解决了旧建筑改造中的多项难题。项目在保障医疗功能正常运行的前提下,实现了结构安全、环境友好、成本可控的目标。建议未来类似项目进一步推广 BIM 技术、装配式施工等现代化建造方式,提升工程质量与效率,同时加强项目全过程的环保与节能管理,推动绿色建造的发展。本研究为类似医疗建筑改造工程提供了可借鉴的管理经验与技术路径。

## 参考文献

- [1] 许鹰. 基于智慧化驱动医院能源系统绿色节能改造实践——以湖北省某人民医院为例[J]. 绿色建筑. 2025, 17 (04): 151-155+165
- [2] 喻思兰. “双碳”背景下医院建筑节能改造增量成本与效益分析[J]. 砖瓦. 2025 (06): 118-120
- [3] 刘强, 李伟. 老旧医院建筑改造中的结构加固技术研究[J]. 建筑技术. 2024(3): 45-49
- [4] 王鹏, 张静. BIM 技术在医疗建筑改造中的应用研究[J]. 施工技术. 2023(12): 78-82
- [5] 单俊达, 宗敏. 医疗类建筑能效现状及节能改造关键技术研究与实践[J]. 建设科技. 2025(01): 48-51
- [6] 张淳毅, 许璟琳, 余芳强. 医院建筑数字孪生系统构建与大数据分析实践[J]. 中国医院建筑与装备. 2025, 26(04): 11-16
- [7] 毛泽琴. 既有大型公共建筑节能改造的可行性分析[J]. 工程设计与设计. 2022(17): 82-84
- [8] 张灿. 基于“双碳”目标的上海市长宁区既有公共建筑节能降碳实践[J]. 绿色建筑. 2023, 15(05): 36-39+46
- [9] 刘珊. 精准调适、智慧运维——“碳达峰碳中和”目标引领下公共建筑节能的挑战、机遇和建议[J]. 城乡建设. 2021(20): 73-75
- [10] 谢婉君, 李晓娟. 基于全寿命周期的绿色建筑节能技术经济评价研究[J]. 上海节能. 2021(08): 832-838
- [11] 程子伟, 项兴彬, 余芳强. 基于数字孪生的医院建筑机电系统智慧运维管理[J]. 中国医院建筑与装备. 2023(24): 42-45
- [12] 蔡观国. 医院建筑工程的气密性施工要点探究——以深圳市第二儿童医院项目为例[J]. 房地产世界. 2024(21): 149-151
- [13] 王晶, 周涛. 城市有机更新视角下的医院建筑改扩建问题与设计策略[J]. 城市建筑. 2025, 22(04): 160-164



# 智能建造技术在建筑工程中的应用研究

钱俊超

中南建筑设计院股份有限公司，湖北 武汉 430060

DOI:10.61369/ERA.2025120018

**摘 要：** 在建筑工程领域，智能建造技术凭借融入人工智能、物联网、大数据、BIM 等先进手段，已逐步发展为关键构成部分。运用该技术可切实提升设计与施工阶段的工作效率，改善建筑品质，减少成本投入并压缩工期时长，设计环节中，BIM 技术对建筑方案起到优化作用，同时提高了设计精度；施工期间，智能化施工设备与机器人技术增强了自动化程度，降低了人为操作失误的发生率；进入运营与维护阶段后，智能监控与数据分析技术让建筑物的管理工作更为高效，进一步延长了建筑物的使用年限，智能建造技术的推广应用，不仅推动建筑行业实现数字化转型，还为绿色建筑发展、能源节约与排放减少提供了坚实支撑，具备重要的现实价值与广阔的应用空间。

**关 键 词：** 智能建造技术；建筑工程；BIM；技术创新；施工自动化

## Research on the Application of Intelligent Construction Technology in Architectural Engineering

Qian Junchao

Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430060

**Abstract：** In the field of architectural engineering, intelligent construction technology, integrating advanced approaches such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), big data, and Building Information Modeling (BIM), has gradually become a crucial component. The application of this technology can effectively enhance work efficiency during both the design and construction phases, improve building quality, reduce costs, and shorten project timelines. In the design stage, BIM technology optimizes architectural plans while improving design accuracy. During construction, intelligent construction equipment and robotics enhance automation levels and reduce the incidence of human operational errors. After entering the operation and maintenance phase, intelligent monitoring and data analysis technologies make building management more efficient, further extending the service life of buildings. The promotion and application of intelligent construction technology not only drive the digital transformation of the construction industry but also provide solid support for the development of green buildings, energy conservation, and emission reduction, possessing significant practical value and broad application prospects.

**Keywords：** intelligent construction technology; architectural engineering; BIM; technological innovation; construction automation

## 引言

建筑行业正朝着全新的数字化时代迈进，这一变革的核心驱动力便是智能建造技术。伴随人工智能、物联网、BIM 等技术的持续进步，建筑工程在设计模式、施工流程及管理方法上均产生了深刻改变，这些先进技术在提升工程效率与保障工程质量方面发挥显著作用，同时在控制成本支出、缩短工期进程等方面也展现出巨大潜力，当前建筑行业面临劳动力供给不足、资源利用效率偏低等问题，而智能建造技术恰好提供了创新性的解决路径，该技术的广泛普及为建筑行业实现可持续发展创造了新的机遇，相关内容值得开展深入的探讨与研究。

## 一、智能建造技术的概述

### （一）智能建造技术的基本构成

在建筑行业向数字化、智能化转型的进程中，智能建造技术

应运而生，它是多种先进技术相互融合的成果。其核心组成包含人工智能（AI）、物联网（IoT）、大数据分析、建筑信息模型（BIM）以及机器人技术等关键要素，借助机器学习与深度学习手段，人工智能能够对海量数据展开分析并制定智能决策，进而优

化设计流程与施工环节，物联网则利用传感器、摄像头等各类设备，将建筑施工现场的设备与人员实时关联起来，达成信息的顺畅传输与实时监控，大数据技术可对建筑工程从设计、施工直至运营维护全流程产生的数据进行高效处理与深度分析，为工程管理工作提供科学的决策参考。<sup>[1-3]</sup>

作为智能建造的核心工具，BIM 技术依托三维建模与信息集成能力，实现了设计、施工及运维阶段数据的统一管理，有效提升了工程的精度与整体效率，相关数据显示，应用 BIM 技术能够使设计错误减少 30%–50%，施工阶段的成本节约幅度可达 10%–20%，在建筑施工现场，机器人技术的应用，特别是在高危作业场景或重复性劳动环节，能够有效降低人员受伤风险与施工误差，进一步提升施工效率，通过这些技术的深度融合，智能建造技术为建筑行业各环节的优化提供了具有革命性意义的解决方案。<sup>[4]</sup>

## （二）智能建造技术的发展历程

智能建造技术的发展源头可追溯至 20 世纪 90 年代，彼时计算机辅助设计（CAD）技术已开始在建筑行业逐步推广应用，为建筑设计工作搭建起数字化操作平台，但随着建筑行业对工程精度与工作效率的要求不断提高，传统的设计模式与施工方式逐渐难以满足行业发展需求，步入 21 世纪后，信息技术的快速发展促使建筑行业开始逐步接纳更为智能化的工具与运作方法。<sup>[5-8]</sup>

2000 年代，BIM 技术的兴起为智能建造的发展提供了更加强有力的数据支撑。BIM 技术不仅能在设计阶段实现虚拟建造，还能在施工与运营阶段对信息进行全生命周期管理，进入 2010 年代，物联网与大数据技术的结合推动智能建造技术走向深度应用，建筑工程领域中的传感器与数据采集技术被广泛用于施工现场的实时监控与环境数据分析工作，尤其在提升建筑施工精度与工作效率方面，智能建造技术展现出显著成效，如今，随着人工智能与机器人技术的持续进步，智能建造技术的应用范围得到进一步拓展，从施工现场的自动化操作到建筑管理的智能化升级，正不断改变传统建筑行业的运作模式。

## 二、智能建造技术在建筑设计中的应用

### （一）BIM 技术在建筑设计中的应用

建筑信息模型（BIM）技术应用于建筑设计领域，大幅提升了设计工作的效率与精准程度。借助构建数字化三维模型，BIM 能够全面整合设计、结构、施工等多类信息，所有设计团队成员可在同一平台上实时共享数据，进而减少因信息传递不对称引发的设计偏差，行业报告指出，BIM 技术可使设计阶段的失误率降低 30%–50%，同时加快设计推进速度，其具备的三维可视化功能，让设计师在设计初期便能提前察觉潜在问题并进行调整优化，避免后期施工阶段出现大规模修改与成本损耗。

BIM 还拥有强大的碰撞检测能力，在建筑设计过程中，可自动识别设计图纸内的冲突与不一致之处，保障建筑各部分结构的协调适配，依托 BIM 模型，设计团队能够精准计算每个建筑元素的尺寸与位置，提升设计精度，减少因测量偏差造成的成本超出预算与工期延误问题，在结构复杂的建筑项目里，BIM 的运用实现了更精

细化的设计，从而达成节能、环保与功能优化等多方面目标。

### （二）AI 与大数据在建筑设计中的智能决策

人工智能（AI）与大数据的结合，为建筑设计提供了更具智能化的决策支撑。AI 可对历史建筑设计数据展开分析，生成设计优化方案，尤其在建筑风格定位、空间利用规划、结构布局设计等创新领域，AI 能通过自学习算法提出创新性较强的设计思路，AI 不仅可以模拟不同设计方案的实施效果，还能预判方案在实际施工中的可行程度，并给出优化建议，进而加快设计迭代进程，面对多个设计方案时，AI 可依据实际需求自动评估各方案的合理性，推荐最优选择。

大数据技术让建筑设计阶段的决策更具科学性，通过分析大量来自不同建筑项目的数据，设计师能够获取建筑材料特性、环境影响因素、施工效率水平等方面的实时数据支持，进一步优化设计方案，大数据还可对建筑设计中的能源效率进行模拟分析，助力设计团队挑选出最节能、环保的设计方案，在建筑物投入使用后，大数据分析能够协助监控建筑的各项性能指标，像温度、湿度、能源消耗等，为优化建筑全生命周期管理提供数据依据。

## 三、智能建造技术在施工阶段的应用

### （一）智能建造技术在施工阶段的应用

建筑施工阶段引入自动化施工设备与机器人技术后，施工效率与精度得到显著提升，以建筑施工中的 3D 打印技术为例，该技术已在建筑结构施工中广泛应用，借助自动化打印设备，建筑材料可逐层堆积，精度能达到毫米级别，大幅提高建筑精度的同时降低人力成本，尤其在复杂结构施工或特殊材料应用场景中，3D 打印的优势更为突出，行业数据显示，应用 3D 打印技术可使传统施工时长缩短约 30%，材料浪费率控制在 20% 左右。

与此同时，机器人技术在建筑施工中也发挥着重要作用，机器人可承担高风险或高强度作业，例如高空操作、危险区域施工等任务，无人驾驶施工机器人在施工现场的使用，大幅减少人工干预，降低施工过程中人为失误的发生概率。以隧道施工为例，自动化掘进机（TBM）能够精准完成隧道开挖工作，挖掘速度与精度比人工操作高出约 40%，且明显提升施工安全性，此外，机器人还可用于钢筋绑扎、混凝土浇筑等重复性作业，提高施工效率，缩短工期。

无人机（UAV）技术在施工现场实时监控与数据采集工作中作用显著，无人机可在施工现场高效开展地形测绘、建筑物外观检查及施工进度跟踪工作，相关调查数据表明，利用无人机进行测绘比传统人工方式节省约 50% 的时间，误差范围控制在 2 厘米以内，大幅提升数据精准度与施工进度的可视化程度。

### （二）智能监控技术在施工质量与安全性中的应用

智能监控技术通过实时采集施工现场各类数据，保障施工质量与作业安全，依托传感器与物联网技术，施工现场的温湿度、材料质量、设备运行状况等信息均可实现实时监控，智能监控系统能根据收集到的数据，自动分析施工环境中的风险要素，比如，当环境温度过高或湿度过大时，建筑材料强度可能受到影

响，智能系统会及时发出预警，避免因环境因素引发质量问题。

在安全保障方面，智能监控技术的应用进一步降低施工风险，施工现场安装的智能传感器与摄像头，不仅能实时捕捉施工过程中的潜在危险，如人员误入危险区域、机械设备故障等情况，还可通过面部识别与穿戴设备监测工作人员的安全状态，以智能安全帽为例，其可实时监测工人的生理指标，如体温、心率等，一旦出现异常，系统会立即提醒工作人员撤离危险区域，通过这些措施，施工现场的事故发生频率已明显下降。

智能监控系统还整合大数据分析功能，能对施工中的各项参数进行长期跟踪分析，发现潜在质量隐患并提前预警，相关数据显示，应用智能监控系统可使施工事故发生率降低 30% 以上，施工质量合格率提高 15%，通过智能化监控，施工过程的可控性与安全性得到大幅提升。

### （三）智能建造技术在施工阶段的应用效果

在施工阶段引入智能建造技术后，整体施工效率、质量与安全性均得到了明显提升。通过 3D 打印技术，建筑结构施工的精度已达到毫米级，施工周期缩短，并且材料浪费大幅减少，这不仅优化了施工流程，也有效降低了成本。自动化设备与机器人在高风险、高强度作业中发挥了关键作用，像隧道掘进机（TBM）和钢筋绑扎机器人，不仅提升了作业精度与速度，还显著提高了施工安全性。

此外，无人机的引入使得测绘、外观检查与进度监控更高效，节省了一半以上的时间，并提升了数据的精准度和可视化水平。与此同时，智能监控系统借助物联网与大数据分析实现了施工环境、材料及设备的实时监测与预警。智能安全帽等可穿戴设备更进一步保护了工人安全。

## 四、智能建造技术在运营与维护阶段的应用

### （一）智能建造技术在建筑物运营中的应用

当建筑完成竣工进入运营阶段后，智能建造技术主要依靠智能传感器与远程监控系统，提升建筑物的运行效率与使用舒适性，智能传感器被广泛应用于建筑物的各类系统当中，涵盖供暖、通风、空调（HVAC）、电力、照明等领域，这些传感器通过实时采集数据，对建筑内部环境的各项参数进行监控，比如温度、湿度、气流状况等，依据不同时间段的实时数据，这些传感器能够调整建筑系统的工作状态，在保障环境舒适性的同时实现

节能目标。

除此之外，智能传感器还能对建筑物的结构健康状况展开监控，具体包括检测墙体裂缝、管道渗漏、电力系统故障等问题，这些监测数据会通过远程监控系统实时传输至管理平台，让相关工作人员能够快速做出响应，开展必要的维修或保养工作，避免传统维护模式中因检测与反应延迟，而引发的安全隐患及高额维修费用，借助这种智能化的管理方式，建筑物的运营效率得到明显提升，其使用寿命也相应延长。

### （二）远程监控与数据分析在建筑物维护管理中的应用

作为智能建造技术的重要组成部分，远程监控系统在建筑物运营过程中发挥着不可忽视的作用，远程监控系统与智能传感器相互结合，能够实时监测建筑物的运行状态，同时借助云平台完成数据存储与分析工作，这类系统不仅可以实时提供建筑系统的运行数据，还能通过大数据分析，对设备的维护需求进行预测，例如智能电力系统，它能根据设备的使用频率与负载情况，预判电力设备出现故障的风险，进而提前安排维护作业，防止设备突发故障。

在建筑物的维护管理工作中，数据分析占据着至关重要的地位，管理人员通过分析建筑运营期间收集到的大量数据，能够识别出建筑设施的运行趋势，发现潜在的维护问题，并制定出相应的优化方案，比如通过分析建筑的能耗数据，可找出在能效方面存在不足的系统或设备，随后调整其使用策略或进行设备更新，另外，智能数据分析还能帮助管理人员优化建筑物的能源管理方案，减少不必要的能源消耗，以此实现绿色建筑目标，进一步提升建筑物的可持续性与经济效益。

## 五、结语

在建筑行业的各个阶段，智能建造技术的应用都发挥着重要作用，尤其在设计、施工以及运营维护阶段，有力推动了建筑行业的数字化转型与智能化发展进程。从 BIM 技术实现的精准设计，到机器人、无人机助力的高效施工，再到智能传感器与远程监控技术对建筑运营的持续优化，智能建造技术大幅提升了建筑工程的效率、质量与安全性，随着技术的不断进步，智能建造技术在建筑行业中的作用将愈发重要，推动建筑行业朝着更高效、绿色、可持续的方向迈进，最终构建出智能化、自动化的建筑生态系统。

## 参考文献

- [1] 张建弘，曹真真. 建筑工程管理中智能建造技术的创新应用 [J]. 房地产世界, 2024, (19): 164-166.
- [2] 林满. 基于智能建造的装配式建筑施工关键技术研究与应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (29): 127-129. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202429041.
- [3] 邱梦娟，周培松. 安置房项目中智能建造技术的应用研究 [J]. 住宅产业, 2024, (09): 75-77.
- [4] 孔繁松. 智能建造技术在建筑工程管理中的应用与价值分析 [J]. 价值工程, 2024, 43(28): 27-29.
- [5] 石恩岭. 智能建造在建筑工程技术专业中的运用 [J]. 学园, 2024, 17(26): 31-33.
- [6] 尹大伟，钱峰，王嘉. 智能建造 BIM 技术在复杂建筑工程的集成应用与技术创新研究 [J]. 四川建筑, 2024, 44(02): 82-84.
- [7] 郝毅. 智能建造技术在建设工程管理中的创新应用研究 [J]. 新城建科技, 2024, 33(07): 188-190.
- [8] 曾德伟. 智能建造技术的应用与发展 [J]. 中国住宅设施, 2024, (04): 4-6.



# 弱电智能控制技术在建筑造价管理中的应用及发展趋势

陈尧春

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ERA.2025120022

**摘 要：** 本文围绕弱电智能化技术体系展开，阐述了其涵盖的子系统及造价管理相关内容。包括各子系统功能，工程量清单计价、BIM 造价模型等方法，设计优化、设备选型等对造价的影响，以及智能化造价在标准体系、技术融合等方面的进展与挑战，还提及了发展趋势和人才需求等。

**关 键 词：** 弱电智能化；造价管理；技术融合

## The Application and Development Trend of Weak Current Intelligent Control Technology in Construction Cost Management

Chen Yaochun

Zhuhai, Guangdong 519000

**Abstract：** This paper focuses on the weak current intelligent technology system and elaborates on the subsystems it covers and the related contents of cost management. It includes the functions of each subsystem, methods such as bill of quantities pricing and BIM cost models, the impact of design optimization and equipment selection on cost, as well as the progress and challenges of intelligent cost in terms of standard systems and technology integration. It also mentions development trends and talent demands, etc.

**Keywords：** weak current intelligence; cost management; technology integration

### 引言

在建筑行业数字化转型加速的背景下，智能化造价管理日益受到关注。随着《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（2020年）等政策的颁布，智能化造价管理迎来新的发展机遇。建筑智能化系统造价管理涵盖多个方面，包括弱电智能化技术体系中的各子系统应用，工程量清单计价、BIM 造价模型及动态成本控制等多种计价和管理方式。同时，智能化子系统设计优化、设备选型比价、施工工艺标准化等对造价控制至关重要。此外，BIM 技术、物联网监测系统在材料消耗控制和变更管理中也有重要应用。智能化造价在标准体系构建、技术融合、人才培养等方面面临挑战，其发展趋势与产业生态演进和政策法规完善紧密相关。

### 一、智能控制技术理论基础

#### （一）弱电智能化技术体系

弱电智能化技术体系是智能控制技术的重要组成部分，涵盖了多个子系统。楼宇自控系统作为核心，通过传感器、控制器等设备对建筑物内的机电设备进行监测和控制，实现节能、提高舒适度等功能 [1]。安防系统是保障建筑物安全的关键，包括视频监控、入侵报警、门禁控制等。视频监控利用摄像头采集图像信息，入侵报警通过探测器检测异常入侵行为，门禁控制则管理人员和车辆的出入权限。综合布线系统为建筑物内的语音、数据、图像等信息传输提供物理通道，具有灵活性、开放性和可靠性等特点，确保各弱电系统的互联互通和正常运行。这些子系统相互协作，共同构成了弱电智能化技术体系，为智能控制技术的应用

提供了基础平台。

#### （二）造价管理技术框架

工程量清单计价是一种市场定价模式，它依据工程量清单规范，将工程分解为各个分项工程，确定其工程量和综合单价，从而计算工程造价 [2]。BIM 造价模型则基于建筑信息模型技术，整合建筑项目的各种信息，实现对造价的精确计算和动态管理。通过 BIM 模型，可以快速获取工程量信息，结合市场价格数据，准确估算造价，并能在项目实施过程中实时跟踪成本变化。动态成本控制强调在项目全生命周期内对成本进行动态监控和调整。它以成本预算为基础，通过对实际成本的实时监测，分析成本偏差原因，及时采取措施进行纠正，确保项目成本始终处于可控范围内 [3]。造价管理技术框架通过多种技术手段，为智能控制技术在项目中的应用提供了成本控制和管理支持。



## 二、智能控制在造价管理中的应用

### （一）弱电系统造价控制

在造价管理中，智能控制技术的应用对弱电系统造价控制具有重要意义。智能化子系统设计优化是关键环节，合理的设计能够避免不必要的功能冗余，减少设备和材料的浪费，从而有效降低成本<sup>[3]</sup>。在设备选型比价环节，借助智能控制技术，可快速获取市场上各类设备的价格、性能等信息，便于选择性价比最高的设备，实现成本节约。此外，施工工艺标准化对造价也有显著影响。标准化的施工工艺能提高施工效率，减少施工过程中的错误和返工，降低人工成本和材料损耗，进而有效控制弱电系统的造价。

### （二）智能建造成本管理

智能控制技术平台在施工阶段成本管理中发挥着重要作用。BIM 技术通过构建建筑信息模型，能够精确计算材料用量，并对材料的采购、使用进行实时监控。它可以模拟施工过程，提前发现可能导致材料浪费的环节，从而优化施工方案，减少不必要的材料损耗<sup>[4]</sup>。物联网监测系统则可实现对施工现场材料的动态监测。借助传感器等设备，实时获取材料的存储、使用等信息，及时反馈给管理人员。在变更管理中，BIM 技术可以快速评估变更对造价的影响，为决策提供依据。物联网监测系统能记录变更过程中的相关数据，辅助分析变更原因及成本变化情况，有助于更好地控制建造成本。

## 三、智能化造价发展现状与挑战

### （一）行业发展现状

#### 1. 技术应用水平

当前建筑智能化系统造价管理的技术应用水平呈现出多方面的特点。在成本估算方面，一些基于大数据和人工智能的算法开始应用，能够对建筑项目的造价进行较为准确的预测，但这些技术的准确性仍有待提高，尤其是在面对复杂的建筑结构和多样化的功能需求时<sup>[5]</sup>。在成本控制上，智能化的造价管理系统可以实时监控项目成本的变动，通过设定预警值及时发现成本超支的风险。然而，其不同地区和不同规模企业中的应用程度差异较大，市场渗透率整体处于中等水平。在造价评估环节，虽然有相关软件工具辅助，但智能化技术对于一些非标准工程的评估能力还比较有限。

#### 2. 标准体系构建

智能化造价在标准体系构建方面取得了一定进展。在专业工程量计算规则上，逐渐引入智能算法，提高计算的准确性和效率<sup>[6]</sup>。例如，一些软件能够自动识别建筑构件并准确计算其工程量。计价依据也在不断完善，结合市场动态和工程实际情况，利用大数据技术进行分析和调整。然而，目前仍面临一些挑战。不同地区和企业可能存在标准不一致的情况，导致数据兼容性和通用性较差。同时，标准的更新速度可能跟不上智能化技术的快速发展，需要建立更加灵活和及时更新的机制，以适应行业的变化。

### （二）主要制约因素

#### 1. 技术融合障碍

智能化造价在技术融合方面面临诸多障碍。BIM 与 ERP 系统的数据对接存在困难，BIM 侧重于建筑信息的三维可视化及数据集成，而 ERP 主要关注企业资源的规划与管理，两者的数据结构和应用场景差异较大，难以实现高效对接<sup>[7]</sup>。智能设备接口标准化也是一大难题，市场上智能设备种类繁多，各厂商接口标准不统一，导致数据采集和传输困难，无法实现设备间的互联互通，影响了智能化造价系统的整体运行效率和数据准确性，制约了智能化造价技术的融合发展。

#### 2. 专业人才缺口

智能控制在建筑造价管理中的应用日益广泛，然而既懂智能控制技术又掌握造价管理的复合型人才短缺成为制约智能化造价发展的关键因素之一。随着建筑行业的数字化转型加速，对这类复合型人才的需求急剧增加，但相关教育和培训体系尚不完善，难以满足市场需求。传统造价人才往往缺乏智能控制技术知识，而智能技术专业人员对造价管理的了解也有限。这导致在智能化造价项目实施过程中，缺乏能够有效整合两种技能的专业人员，影响项目的质量和效率，延缓了智能化造价的发展进程<sup>[8]</sup>。

## 四、智能化造价管理发展趋势

### （一）技术升级方向

#### 1. 全过程智能化

随着科技发展，智能化造价管理在全过程呈现出多维度升级趋势。在设计阶段，智能算量技术将不断优化，通过建筑信息模型（BIM）与人工智能算法的深度融合，实现更精准的工程量计算和材料预估<sup>[9]</sup>。施工阶段，智能传感器和物联网技术将实时监控工程进度和资源消耗，及时反馈数据用于成本动态调整。同时，利用机器学习算法对成本数据进行实时分析和预测，为项目决策提供支持。在运维阶段，基于大数据分析的成本管理系统将建立，对建筑全生命周期的成本数据进行挖掘和分析，为后续项目提供经验借鉴，进一步提升智能化造价管理的效率和准确性。

#### 2. 新技术融合应用

随着科技的不断进步，智能化造价管理呈现出多方面的技术升级趋势。在新技术融合应用层面，AI 算法在材料价格预测方面具有巨大潜力。通过对大量历史数据的学习和分析，AI 算法能够更准确地预测材料价格波动，为造价管理提供前瞻性的决策依据<sup>[10]</sup>。同时，区块链技术在合同管理中的应用也将带来创新。它可以确保合同数据的不可篡改和透明性，提高合同执行的效率和可信度，有效避免合同纠纷和欺诈行为，进一步提升造价管理的规范化和智能化水平。

### （二）管理模式创新

#### 1. 动态成本控制

随着科技发展，智能化造价管理在动态成本控制方面呈现新趋势。基于物联网的实时数据采集为造价动态调整提供了可能。通过在建筑项目各个环节安装传感器等设备，可实时获取材料使

用量、设备运行状态、施工进度等数据。这些数据传输到智能管理系统后,经过分析处理,能及时发现成本偏差。例如,若材料用量超出预算,系统可快速发出预警,管理人员据此调整采购计划或施工方案,避免成本大幅增加。同时,智能算法可根据实时数据预测后续成本走向,提前制定应对措施,实现动态、精准的成本控制,提高造价管理的效率和准确性。

## 2. 云端协同管理

随着信息技术的发展,云端协同管理在智能化造价管理中日益重要。云端造价数据库为项目各参与方提供了一个集中的数据存储和共享平台。设计单位可上传设计方案及相关造价估算信息,施工单位能实时获取并依据实际情况调整施工预算,业主方则可全面了解项目造价动态。各方通过云端平台进行实时沟通和协作,及时解决造价管理过程中出现的问题。同时,基于云计算强大的计算能力,能够快速处理大量造价数据,为项目决策提供准确依据。这种云端协同管理模式打破了传统的信息孤岛,提高了造价管理的效率和准确性,是智能化造价管理发展的重要趋势。

## (三) 产业生态演进

### 1. 专业服务转型

随着科技发展,造价管理产业生态不断演进,智能化成为核心趋势。在此背景下,造价咨询企业面临转型。一方面,市场需求发生变化,客户对精准、高效、智能的造价解决方案需求大增。传统服务模式难以满足,企业必须借助智能技术提升服务质量和效率。另一方面,技术进步为转型提供支撑,如大数据、人工智能等可用于分析海量造价数据,提供准确的造价预测和成本控制建议。企业向智能化解决方案提供商转型,不仅能拓展业务范围,涵盖从项目前期规划到后期运维的全生命周期造价管理,

还能提升自身竞争力,在产业生态中占据更有利地位,实现可持续发展。

## 2. 政策法规完善

智能化造价管理的发展趋势不仅体现在技术创新上,还与产业生态演进和政策法规完善密切相关。在产业生态方面,随着智能技术的融入,造价管理相关企业的角色和合作模式不断变化。不同主体如软件开发商、咨询企业和施工单位等之间的协同更加紧密,共同推动行业发展。同时,政策法规也在逐步完善。行业主管部门将更加关注智能建造计价规范的制定,以适应新技术带来的计价方式改变。此外,数据安全方面的政策导向也会更加明确,确保造价管理中大量数据的安全性和合规性,保障行业的健康稳定发展。

## 五、总结

智能控制技术为建筑造价管理带来革新,提高了管理的精准性与效率。通过实时数据采集与分析,能精准预测成本,优化资源配置。然而,其发展面临技术瓶颈,如部分算法准确性不足、数据兼容性差等,同时存在管理痛点,像相关人员对新技术接受度低、管理流程与技术不匹配。跨学科人才培养至关重要,这类人才能够更好地融合技术与管理知识,推动技术应用。标准体系建设也不可或缺,它能规范技术应用,保障数据质量与管理效果。只有突破这些障碍,加强人才培养和标准体系建设,才能促进智能控制技术在建筑造价管理中的更好应用,推动行业数字化转型。

## 参考文献

- [1] 郭洁茹.全过程造价管理在建设工程造价控制中的应用[J].引文版:工程技术,2016,000(003):P.85-85.
- [2] 朱先清.电网工程全过程造价管理研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [3] 王敏.BIM技术在建筑工程全过程造价管理中的应用研究[D].江西:华东交通大学,2021.
- [4] 周晓娅.BIM技术在房建工程造价管理中的应用[D].河南:华北水利水电大学,2020.
- [5] 胡柯.全面造价管理在Z公司建设工程造价管理中的应用[D].四川:西南交通大学,2020.
- [6] 马民俊.造价管理在建筑工程造价中的应用与控制[J].中国科技博览,2011(34):2.
- [7] 王唯琦,宫连峰.全过程造价管理在建设工程造价控制中的应用[J].工程技术:引文版,2016:00069-00069.
- [8] 夏强.浅谈BIM技术在建筑施工造价管理中的应用[J].建材与装饰,2018(25):2.
- [9] 雷群国.BIM技术在建筑项目造价管理中的应用探讨[J].四川水泥,2017(8):1.
- [10] 耿成焕,翟彬芳,陈皓然.造价管理在建筑工程造价中的应用与控制讨论[J].中国科技投资,2018,000(016):107.

# 智能建造与 AI 数字应用在建筑领域的融合与创新

杨松

广东广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120023

**摘 要：** 介绍智能建造体系架构在建筑设计阶段的延伸应用，包括三层技术架构及设计环节功能，阐述 AI 驱动的设计优化算法等相关原理，强调在方案生成、性能模拟、构件预制设计等建筑设计方面的应用，还涉及基于 BIM 的设计施工一体化协同等内容，同时提及含设计合理性指标的智能建造系统评价模型及未来研究方向。

**关 键 词：** 智能建造；机器人；PLC

## The Integration and Innovation of Intelligent Construction and AI Digital Applications in The Field of Architecture

Yang Song

Guangzhou, Guangzhou 510000

**Abstract：** This paper introduces the extended application of intelligent construction system architecture in the architectural design stage, including the three-layer technical architecture and functions in design links, elaborates on relevant principles such as AI-driven design optimization algorithms, emphasizes its application in architectural design aspects like scheme generation, performance simulation, and prefabricated component design, and also involves BIM-based integrated design and construction collaboration. At the same time, it mentions the intelligent construction system evaluation model including design rationality indicators and future research directions.

**Keywords：** intelligent building; robot; PLC

### 引言

随着《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（2020年）等政策的颁布，智能建造在建筑领域的应用从施工向全生命周期延伸，建筑设计的源头引领作用日益凸显。智能建造涵盖多层技术架构，其感知、决策和执行层在设计阶段均有重要应用。AI 设计优化算法、BIM 协同设计原理及参数化建模技术等是构建设计 - 施工一体化系统的关键。在方案优化、性能模拟、预制构件参数化设计等方面均有相关技术研究与应用。这些技术的发展旨在通过设计优化提升施工效率和质量，推动智能建造向设计引领模式发展。

## 一、智能建造与 AI 数字技术的理论框架

### （一）智能建造体系架构的设计维度

智能建造三层技术架构在设计阶段形成特色应用。感知层负责收集设计基础数据，如激光扫描获取场地三维信息、传感器采集气候参数等<sup>[1]</sup>。决策层基于数据运用 AI 算法优化设计方案，例如在 BIM 中通过遗传算法优化建筑体型系数以降低能耗，自动检测设计冲突。执行层将设计意图数字化传递，如参数化设计模型直接生成施工机器人指令。数字孪生技术在设计预演中价值显著，创建虚拟模型模拟采光、通风等性能，预演施工流程以优化设计方案，减少后期返工。

### （二）设计驱动的核心技术原理

AI 设计优化算法是设计精准化的核心，通过机器学习挖掘历

史项目数据，自动生成多组设计方案并优化能耗、结构稳定性等性能指标<sup>[2]</sup>。PLC 逻辑控制原理赋能设计流程自动化，将建筑规范转化为可执行逻辑规则，实现构件配筋率、尺寸偏差等参数的实时合规性校验。伺服系统的精密定位特性为参数化设计提供技术支持，确保建模设备达成毫米级精度，通过构建“设计参数 - 施工控制参数”的直接映射关系，保障设计意图从虚拟模型到实体建造的精准落地。

## 二、设计 - 施工协同：技术集成与实现路径

### （一）基于 BIM 的设计施工协同规范

在机电设计环节，BIM 平台通过全专业数据集成构建设计与机器人 - PLC 系统的协同核心。设计阶段依托 BIM 可视化功能完



成管线综合优化，为机器人安装制定毫米级精准基准，地基预埋的标高偏差、轴线定位等关键参数均直接从模型中提取并固化为施工标准<sup>[3]</sup>。针对高温、潮湿、多尘等不同建筑环境，在 BIM 模型中提前嵌入机器人专项防护方案设计：高温环境明确散热装置功率与安装间距，潮湿环境标注防水密封等级与线缆防护标准，多尘环境预设空气过滤系统参数，使设计要求通过模型数据无缝传递至施工环节，实现从源头对设备适配性的精准管控。

## （二）设计导向的智能调试技术流程

构建以 BIM 为数据源头的 PLC 闭环调试体系，设计阶段即在模型中建立设计参数与 PLC 信号的关联映射，完成机器人 I/O 信号的预配置与逻辑校验，确保信号传输逻辑与设计功能需求完全匹配<sup>[4]</sup>。利用 BIM 协同软件模拟机器人运动轨迹，通过碰撞检测验证设计方案的可施工性，同步在模型中优化布线路径：采用强弱电分区隔离、关键线路屏蔽层包裹等设计措施，并标注接地电阻值等抗干扰参数，使调试阶段的信号稳定性从设计环节得到保障，有效减少调试返工，确保设计意图向施工效果的精准转化。

## 三、伺服驱动系统在建造场景的应用创新

### （一）设计驱动的运动控制优化

#### 1. 参数化轨迹规划

在异形构件与复杂形态设计中，伺服驱动系统的多轴联动轨迹规划算法成为设计落地的核心支撑。以自由曲面幕墙、双曲屋面等复杂构件设计为例，设计阶段通过运动学正逆解算法，将建筑形态参数转化为机器人各轴运动参数，精准计算加工轨迹的加速度、角速度阈值。同时在 BIM 模型中模拟轨迹可行性，提前规避构件曲率与机器人臂展的冲突、运动干涉等问题，确保设计形态无需因施工设备限制妥协。这种“设计形态 - 轨迹参数”的直接关联，既保留了建筑美学的设计自由度，又通过伺服系统的精准控制保障了施工精度<sup>[5]</sup>。

#### 2. 负载适应性设计

伺服系统的实时载荷反馈为重型构件设计提供了动态优化依据。在钢结构柱、预制墙板等重型构件设计阶段，通过采集伺服电机电流环反馈的负载数据，建立载荷与构件应力的关联模型。据此优化构件连接节点的螺栓选型、焊缝高度等参数：如针对大跨度构件吊装时的动态载荷，增加节点加强肋设计；根据伺服系统的过载预警阈值，调整构件自重分布。这种设计与施工载荷特性的协同优化，既避免了设计冗余导致材料浪费，又通过伺服系统的自适应控制提升了施工稳定性<sup>[6]</sup>。

### （二）设计装备系统集成创新

#### 1. 模块化设计接口

模块化设计接口聚焦 BIM 与施工设备的数据联通，其核心是满足 IP65 防护等级的 BIM-PLC 通讯模块。该接口通过标准化数据协议，将 BIM 模型中的构件尺寸、安装精度等设计参数自动转化为 PLC 可识别的控制指令，实现设计模型与机器人、生产线等施工设备的即插即用。在设计变更时，接口能实时同步模型参数更新，如调整预制构件开孔位置后，10 分钟内即可完成设备参数

重置，大幅缩短响应周期。同时模块化架构支持新增设备的快速接入，为不同项目的设备组合提供灵活扩展能力，强化设计与施工的协同效率<sup>[7]</sup>。

#### 2. 设计优化边缘节点

边缘节点将 AI 推理模型与设计终端深度集成，构建“施工数据 - 设计参数”的动态优化闭环<sup>[8]</sup>。节点实时采集伺服驱动系统的位置偏差、扭矩波动等数据，通过轻量化 AI 模型分析施工过程中的精度偏差原因：如发现预制构件安装间隙超差，自动反推设计阶段的构件公差设置是否合理；根据伺服电机的能耗数据，优化构件减重设计参数。这种基于施工实时数据的设计优化，使方案能动态适配现场条件，如调整幕墙龙骨角度补偿安装误差，既保障设计意图落地，又通过精准参数调整提升建造质量稳定性。

## 四、智能建造系统实证研究

### （一）预制构件设计优化案例

#### 1. 参数化设计方案

在预制构件设计中，视觉引导技术与参数化设计形成深度协同模式。设计阶段通过视觉传感器捕捉钢筋网片绑扎场景信息，构建机器人运动轨迹与设计参数的关联模型。基于机器人作业特性反推钢筋布局、节点锚固等核心设计要素，在 BIM 平台中生成适配施工需求的参数化模板<sup>[9]</sup>。这种设计方法通过精准对接机器人操作逻辑，避免因设计与施工适配性不足导致的调整，使钢筋网片设计更贴合自动化施工流程，有效提升设计方案的可实施性，推动预制构件生产从设计源头实现高效协同。

#### 2. 设计能效评估

智能建造评价模型将设计合理性作为核心维度纳入能效评估体系。评价指标聚焦设计对全流程能效的影响，其中构件标准化设计通过减少设备换型频率提升整体效率，规范统一的设计参数使施工设备运行更稳定。同时，设计阶段通过 BIM 模拟优化构件生产各环节流程，从浇筑顺序到养护方式的设计优化，直接降低能源损耗。这种以设计为起点的能效评估，实现了设计意图与施工能耗、设备效率的有机衔接，形成闭环式能效管控机制<sup>[10]</sup>。

### （二）超高层设计与施工协同

#### 1. 伺服顶升设计适配

超高层巨型钢柱设计阶段注重与伺服顶升系统的技术适配。通过 BIM 平台模拟钢柱吊装全过程受力状态，将伺服系统的承重特性、同步精度等技术参数纳入设计考量。针对钢柱截面尺寸、节点连接刚度等关键设计要素进行优化，确保结构特性与液压伺服集群控制技术相匹配。这种设计与施工技术的提前协同，在保障结构安全的前提下，通过优化构件设计减少施工中的技术适配障碍，推动吊装过程更顺畅，体现设计对施工效率的前置支撑作用。

#### 2. 设计误差溯源

依托数字孪生平台构建设计与施工的误差联动分析机制。设计阶段在模型中为关键节点预设合理误差阈值，明确各类施工工艺参数的设计依据。通过平台实时关联设计参数与施工精度数



据,分析偏差产生的设计层面原因。当出现施工精度问题时,可回溯设计参数的合理性,如节点构造、尺寸标注等是否适配施工工艺。通过这种设计与施工的双向追溯,及时调整设计细节以减少偏差,提升整体施工精度控制水平。

（三）设计驱动的智能运维

1. 设计阶段健康预设

设计阶段为建筑全生命周期运维植入健康监测基准参数。基于 PLC 振动特性与伺服系统运行规律,在 BIM 模型中为构件连接节点等关键部位预设健康状态阈值。如钢结构连接节点明确振动幅度安全范围,预制构件接缝处标注位移偏差预警值。这些设计参数成为运维阶段故障诊断的重要依据,使运维人员能通过比对实际运行数据与设计预设值,及时识别潜在隐患,实现从设计源头为智能运维提供技术支撑。

2. 设计可靠性验证

通过长时间连续运行测试验证设计参数的实际可靠性,测试场景全面模拟各类施工环境条件。伺服驱动系统的核心运行参数均源于设计阶段的负载特性分析,确保设备运行状态与设计预期一致。测试过程重点验证设计参数对系统稳定性的影响,通过观察设备在复杂工况下的表现,评估设计方案对潜在问题的预判能

力。测试结果显示,经优化的设计参数能有效减少系统故障,充分体现设计阶段参数优化对提升整体系统可靠性的关键作用。

五、总结

在智能建造与 AI 数字应用的深度融合进程中,建筑设计的引领作用愈发凸显。设计作为工程全生命周期的源头环节,通过与 AI 算法、数字孪生等技术的结合,从根本上优化施工流程适配性,推动施工效率的提升与质量缺陷的减少。这种以设计为核心的协同模式,通过提前规避施工矛盾、优化资源配置,使初期技术投入得以在全流程中逐步摊薄,实现长期效益最大化。未来研究需进一步强化设计与建造的技术衔接,重点探索基于 5G-MEC 技术的远程协同设计模式,打破空间限制实现跨主体实时设计交互。同时,开发建筑设计专用模块化机器人,通过标准化接口与参数化设计适配,提升设计方案向施工转化的灵活性。这些方向将推动设计与建造从技术协同迈向深度融合,为建筑行业智能化转型提供核心驱动力。

参考文献

[1] 吴德建. 智能建造水平与建筑业企业绩效关系研究 [D]. 哈尔滨商业大学, 2023.  
[2] 王水玲. 基于 IoT 的装配式建筑智能建造系统构建研究 [D]. 广州大学, 2021.  
[3] 刘世越. 路桥施工企业智能建造能力评价研究 [D]. 东北林业大学, 2023.  
[4] 杜鹏. 基于成熟度理论的施工企业智能建造能力评价模型与应用研究 [D]. 华中科技大学, 2022.  
[5] 张晓龙. 适用于智能建造的装配式木结构研究 [D]. 天津大学, 2022.  
[6] 付慧星. 装配式混凝土建筑的数字设计与智能建造 [J]. 江苏建材, 2022(3): 57-58.  
[7] 徐卫国. 从数字建筑设计到智能建造实践 [J]. 建筑技术, 2022, 53(10): 1417-1420.  
[8] 孙永庆, 张燕. 基于装配式建筑智能建造的思考与创新研究 [J]. 中国住宅设施, 2021(8): 47-48.  
[9] 潘毅. 建筑工业化与智能建造融合发展的路径探索 [J]. 建材发展导向 (下), 2022, 20(10): 52-54.  
[10] 燕斌. 智能建造技术在建筑工程领域中的应用 [J]. 建筑, 2024(5): 126-128.

# 建筑监理在大型项目中的组织结构与管理效率提升研究

吴爱滔

浙江伟民建设项目管理有限公司，浙江 温州 325000

DOI:10.61369/ERA.2025120028

**摘 要：** 建筑监理在大型项目中起着至关重要的作用，直接影响项目的质量、进度与安全管理。通过分析建筑监理的组织结构和管理效率，提出了优化监理体系的有效途径。首先，明确了监理的基本职能，并对传统和现代监理组织结构进行对比分析，强调了信息化管理与数字化工具在提升监理效率中的重要性。此外，通过优化工作流程、合理配置监理团队及提升专业素质，能够大幅度提升监理管理效率。研究表明，科学的组织结构与先进的管理手段能有效提高项目管理的精细化和透明度，确保大型项目的顺利实施。

**关 键 词：** 建筑监理；组织结构；管理效率；信息化管理；项目管理

## Research on Organizational Structure and Management Efficiency Improvement of Construction Supervision in Large-Scale Projects

Wu Aitao

Zhejiang Weimin Construction Project Management Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

**Abstract：** Construction supervision plays a crucial role in large-scale projects, directly influencing project quality, progress, and safety management. By analyzing the organizational structure and management efficiency of construction supervision, this study proposes effective approaches to optimize the supervision system. Firstly, it clarifies the fundamental functions of supervision and conducts a comparative analysis of traditional and modern supervisory organizational structures, emphasizing the importance of information-based management and digital tools in enhancing supervision efficiency. Additionally, optimizing workflows, rationally allocating supervision teams, and improving professional competencies can significantly enhance supervisory management efficiency. Research indicates that scientific organizational structures and advanced management methods can effectively improve the refinement and transparency of project management, ensuring the smooth implementation of large-scale projects.

**Keywords：** construction supervision; organizational structure; management efficiency; information-based management; project management

## 引言

大型建筑项目在复杂性和规模上不断增长，如何高效管理和确保项目顺利实施成为关键问题。建筑监理作为项目管理中的重要环节，直接影响项目的质量、进度及成本控制。随着建筑行业对高效管理需求的增加，传统监理模式逐渐暴露出不足，信息化与精细化管理的需求愈发迫切。通过优化监理的组织结构、流程和团队配置，提升管理效率已成为推动项目成功的重要手段。探索这一课题的实际意义，不仅能帮助提升项目执行的质量和效率，也能为行业发展提供宝贵的参考与借鉴。

## 一、建筑监理的基本职能与工作内容

### （一）建筑监理的定义与职能

建筑监理是指在建筑项目的实施过程中，监理单位根据合同要求，代表业主对项目进行监督和管理的一项专业服务活动。其主要目的是确保项目按设计方案和相关法规顺利进行，并在过程中保障项目的质量、进度、安全及投资控制。监理服务既包括对施工质量的监督，也涉及项目管理的各个方面，如资金的控制和风险管理<sup>[1]</sup>。

建筑监理的职能涵盖了多个方面。首先是质量控制，监理单位要确保施工质量符合设计要求和国家标准；其次是进度控制，监理需要监督施工进度，确保项目按期完成；此外，成本控制也是监理的重要职能之一，监理要监控项目的资金使用，避免预算超支；最后，安全管理是另一项关键职能，监理要督促施工单位遵守安全操作规程，减少事故发生，确保工人安全。

### （二）监理工作内容的具体分析

在设计阶段，建筑监理主要对设计图纸和技术方案进行审

查，确保设计内容的可行性与合理性。同时，监理还需与业主和设计单位沟通，确保设计方案的需求与实际建设目标一致。此阶段的监理工作还包括对设计变更的管理，确保变更后的设计能合理、及时地纳入到施工方案中。

在施工阶段，监理的主要工作是确保施工按图纸和施工规范进行。监理需要实时检查施工质量，监督施工进度，并与施工单位沟通解决施工中遇到的问题。同时，监理还要对施工现场的安全进行监管，确保施工人员遵守安全规定。此阶段，监理会根据项目进展编制进度报告，并与项目相关方保持沟通，确保施工进度顺利进行<sup>[2]</sup>。

在竣工阶段，监理的工作主要是对工程进行验收，确保所有施工内容符合设计标准及合同要求。监理单位还需审核竣工图纸，确认工程与设计图纸一致，并在项目交付前进行各项检测，如质量验收、安全验收等。此外，监理还需确保项目的后期维护工作能够按计划展开，协助业主完成竣工报告的提交。

### （三）监理与项目其他管理角色的关系

建筑监理作为项目管理的重要组成部分，与其他管理角色之间的关系紧密。监理与业主的关系尤为关键，监理代表业主对项目实施进行监督，确保业主的利益得到最大化保护。监理在整个过程中需要与业主保持密切沟通，及时反馈项目的进展和可能存在的问题，帮助业主做出决策<sup>[3]</sup>。

与设计方的协作关系也非常重要，监理需要与设计单位保持协调，确保设计的可执行性，并在施工过程中根据实际情况提出合理的设计优化建议。监理还要在设计变更时与设计方密切配合，确保变更后的设计能在施工中得到正确实施。

与施工方的关系则是日常监督的基础，监理需要与施工单位保持良好的合作关系，监督施工质量、进度和安全，确保施工过程按计划进行。监理不仅仅是监督者，还需与施工单位共同解决问题，推动项目进展。

## 二、建筑监理组织的类型与模式

### （一）传统组织结构与现代组织结构

传统的建筑监理组织结构通常包括层级型和职能型结构。在层级型结构中，监理单位的各个部门层级分明，上级向下级传递指令，决策过程较为集中。其优点是责任明确，管理层次清晰，适用于规模较小、任务明确的项目。而职能型结构则根据项目的不同职能划分部门，每个部门专注于某一特定领域（如质量管理、进度控制、安全管理等），便于专业化管理和任务分工，但缺乏灵活性和跨部门协调，可能导致信息沟通不畅。

随着建筑项目规模和复杂度的增加，现代监理组织结构逐渐趋向矩阵型结构和扁平化结构。矩阵型结构通过跨部门的团队合作，能够更好地应对项目中的多维度需求，增强项目的灵活性和协作效率。而扁平化结构则减少了管理层级，增强了沟通效率，使监理人员能够更加迅速地响应项目中的问题，适用于动态变化较大的项目环境。

### （二）建筑监理组织的优势与局限

传统组织结构在建筑监理中的应用通常具有层级分明和责任明确的优势，能够确保各项管理任务得到严格执行。每个管理层的职能和责任都清晰划分，监督体系和决策机制非常明确，这对

一些规模较小、任务较单一的项目来说尤为有效。这种结构便于制定标准化的管理流程和规范，确保项目按照既定计划顺利推进。然而，随着项目规模的扩大和复杂度的增加，传统结构也暴露出许多问题，尤其是在信息流通和部门协作方面。部门之间信息传递通常受到层级壁垒的制约，造成沟通不畅，容易形成信息孤岛。此外，传统结构下的决策过程较为集中，往往导致响应速度较慢，项目中遇到的问题不能得到及时解决，影响了项目整体执行效率<sup>[4]</sup>。

现代组织结构，如矩阵型结构和扁平化结构，则在面对复杂项目时具有较强的灵活性和协作性。矩阵型结构通过跨部门合作，能够快速响应项目中的多种需求，增强了团队之间的沟通与协调，适应了大型项目对跨职能合作的要求。扁平化结构则减少了管理层级，提升了决策效率和响应速度，特别是在动态变化的环境中表现出极大的灵活性。然而，这些结构的局限性也不可忽视，特别是在资源紧张或管理跨度较大的情况下，容易出现角色重叠、责任不明确等问题，导致管理复杂性增加。因此，如何平衡灵活性与管理层次，是优化监理组织结构时需要重点解决的问题。

### （三）建筑监理组织的最佳实践案例

在国内的建筑监理实践中，香港的某大型住宅项目是一个成功的案例。该项目采用了矩阵型组织结构，在项目管理中，监理团队由多个专业人员组成，如质量控制、进度管理、成本控制等，每个小组都负责特定的职能领域。矩阵型结构使得各个专业团队能够相互协调，并跨部门进行合作，确保项目顺利推进。在项目实施过程中，团队定期召开跨部门会议，确保项目进展信息的及时共享，并及时解决各类问题。这一组织结构在项目施工阶段发挥了重要作用，特别是在高强度的施工进度和质量要求下，能够有效调动各方资源应对复杂情况，并确保项目按时按质完成<sup>[5]</sup>。此外，矩阵型结构在协调多方利益和应对突发情况时也展现出其独特的优势，确保了各方利益的平衡。

在国际化的大型项目中，中东地区的某基础设施建设项目采用了扁平化结构，这一结构将决策层与执行层紧密结合，减少了管理层级，极大提高了响应速度。在这个项目中，监理团队与施工单位保持了高度的协作和沟通，能够迅速处理各类问题，确保施工进度的按时推进。尽管扁平化结构带来了更高的管理压力，要求监理人员具备更强的综合能力，但它在高风险环境下的快速反应和灵活性，使得项目能够及时调整策略，化解风险，最终成功交付项目。这些案例表明，建筑监理组织结构的合理选择能够有效提升项目管理的效率，保证项目的顺利完成。

## 三、提升建筑监理管理效率的策略

### （一）信息化与数字化管理

建筑信息模型（BIM）在建筑监理中的应用，改变了传统的管理模式。通过BIM技术，监理人员可以实时查看建筑项目的三维设计模型，从而更好地进行质量控制、进度跟踪和资源调度。BIM不仅能提供精确的设计信息，还能预测施工过程中可能遇到的问题，帮助监理团队提前进行调整和优化，减少施工中的返工和资源浪费。BIM的应用增强了项目的透明度，提升了沟通效率，使各方能够在同一平台上共享信息<sup>[6]</sup>。

此外,项目管理软件与监理数据共享平台的使用,进一步推动了建筑监理的数字化转型。借助先进的项目管理软件,监理人员能够实时跟踪项目的进展、成本、质量等数据,并通过数据共享平台实现与业主、设计方、施工方的无缝对接。这种信息化管理方式大大提高了决策的及时性和准确性,使监理团队能够更加高效地解决项目中的问题,提升整体管理效率。

### (二) 优化监理流程与工作分配

优化监理工作流程是提升管理效率的关键之一。通过精细化管理,可以确保每个环节都得到充分的控制和监督。首先,监理工作流程应当简化和标准化,以减少不必要的环节和流程。实施精细化管理,可以确保项目的每个细节都得到关注,从设计、施工到竣工,每个阶段的监理工作都能高效且精准地执行。此外,规范化的工作流程能够提升工作效率,减少管理漏洞,为项目的顺利完成提供保障。

监理团队的合理配置与任务分配也是提升管理效率的重要策略。监理团队需要根据项目的规模和复杂性合理配置,确保每个成员都能在其擅长的领域发挥作用。项目初期,监理团队应对各个职能进行详细分工,将质量、进度、安全等职责明确分配给相关人员,并定期进行团队协作,确保各项工作无缝衔接<sup>[7]</sup>。这种有效的分工与协作能够提升监理效率,使各项任务按时高质量完成。

### (三) 提升监理人员的专业素质与管理能力

建立健全的培训体系是提升监理人员专业素质的基础。监理人员不仅需要具备丰富的专业知识,还应具备一定的管理能力。因此,监理单位应定期组织专业培训,提升监理人员在项目管理、法律法规、质量控制等方面的综合能力。此外,随着建筑行业技术的不断发展,监理人员还需掌握先进的工具和技术,如BIM、信息化管理软件等,提升其在现代项目管理中的适应能力。

提升监理人员的技术能力与管理水平是管理效率提升的重要保障。通过持续的学习和实践,监理人员能够提高其问题解决能力与决策水平,确保在项目管理中作出科学的判断与高效的决

策。加强团队协作和跨部门合作,提升管理人员的沟通能力,能够增强团队的整体执行力和反应速度,从而提高项目监理的整体效率和质量。

### (四) 风险管理与应急预案

建筑项目通常面临着多种潜在风险,如资金风险、质量风险、时间风险等。项目中的潜在风险识别与管理是提高监理管理效率的必要措施。监理人员需要在项目初期进行全面的风险评估,并根据评估结果制定相应的风险管理策略。这包括对项目的关键路径进行分析,识别可能的瓶颈和风险点,并采取预防措施,减少风险发生的可能性。通过提前进行风险识别,能够有效避免项目进程中出现的各类突发问题<sup>[8]</sup>。

建立健全的突发事件应急响应机制是确保项目顺利进行的关键。在项目实施过程中,可能会遇到施工安全事故、环境问题、材料供应不足等突发事件。监理单位应制定详细的应急预案,确保在发生突发事件时能够快速反应,采取有效措施进行处理。同时,监理人员还需定期进行应急演练,提高全员的应急处置能力,确保在真实的突发情况下能够迅速恢复项目进度,避免对整体项目进度和质量造成影响。

## 四、结语

建筑监理在大型项目中的管理效率直接影响着项目的成功与否。通过优化监理的组织结构、引入信息化管理工具、精细化管理流程以及提升监理人员的专业素质,可以显著提高管理效率,确保项目按时、按质、按预算完成。信息化技术的应用,如BIM和项目管理软件,已成为提升监理工作透明度与协作效率的重要手段。同时,合理的工作分配和团队建设、有效的风险管理与应急响应机制,也是确保监理工作的顺利进行的关键。随着建筑行业的发展,建筑监理的管理模式需要不断创新,以应对日益复杂的项目需求。本研究为提升建筑监理管理效率提供了理论依据和实践指导,为行业的发展与项目的顺利实施奠定了坚实的基础。

## 参考文献

- [1] 姜绪明. 建筑监理在绿色建筑施工中的应用与实践 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (33): 176-178. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202433058.
- [2] 黄雨国. 住宅建筑监理单位对项目工程质量管理的方法探讨 [J]. 居舍, 2024, (34): 128-131. DOI: CNKI: SUN: JUSH.0.2024-34-037.
- [3] 黄雨国. 住宅建筑监理管理中存在的问题及完善措施 [J]. 居舍, 2024, (35): 127-130. DOI: CNKI: SUN: JUSH.0.2024-35-035.
- [4] 刘辉. 住宅建筑专业监理服务的创新与实践 [J]. 居舍, 2024, (36): 120-123. DOI: CNKI: SUN: JUSH.0.2024-36-034.
- [5] 林江华. 建筑工程监理对施工现场的协调及对策 [J]. 中华建设, 2024, (10): 22-24. DOI: CNKI: SUN: CJJA.0.2024-10-037.
- [6] 李建龙. 建筑工程监理的作用与优化措施讨论 [J]. 中国住宅设施, 2023, (07): 73-75. DOI: CNKI: SUN: ZZSS.0.2023-07-025.
- [7] 马中军. 浅议建筑监理对施工现场的协调工作的开展 [J]. 大陆桥视野, 2023, (08): 134-135. DOI: CNKI: SUN: DLCS.0.2023-08-055.
- [8] 廖全伟. 建筑监理职业发展前景及相关政策分析 [J]. 城市开发, 2024, (13): 166-167. DOI: CNKI: SUN: CSKF.0.2024-13-070.



# 医疗建筑项目成本控制与效益分析

朱式文

温州市第七人民医院，浙江 温州 325000

DOI:10.61369/ERA.2025120029

**摘 要：** 医疗建筑项目在现代社会中具有重要的地位，不仅涉及到庞大的资金投入，还承载着提升公共卫生服务水平的重任。有效的成本控制是确保项目顺利完成的关键因素，同时，合理的效益分析有助于实现资源的最佳配置。本文通过分析医疗建筑项目的成本构成，探讨了如何通过精细化管理、预算控制和风险应对等策略实现成本的有效控制。同时，通过综合效益评估方法，评估了项目的社会效益、经济效益及环境效益，为医疗建筑项目提供全方位的绩效评价框架。研究表明，合理的成本控制与效益分析不仅能够降低项目的建设和运营成本，还能够提升项目的长期可持续性和社会影响力。最终提出了优化成本控制和效益分析的策略，以促进医疗建筑项目的高效实施和管理。

**关 键 词：** 医疗建筑；成本控制；效益分析；精细化管理；项目管理

## Cost Control and Benefit Analysis of Medical Construction Projects

Zhu Shiwen

Wenzhou Seventh People's Hospital, Wenzhou, Zhejiang 325000

**Abstract：** Medical construction projects hold significant importance in modern society, involving substantial financial investments while bearing the responsibility of enhancing public health service standards. Effective cost control is a critical factor in ensuring the successful completion of such projects, while reasonable benefit analysis facilitates optimal resource allocation. This paper analyzes the cost composition of medical construction projects and explores strategies for achieving effective cost control through refined management, budget control, and risk response measures. Additionally, by employing comprehensive benefit evaluation methods, it assesses the social, economic, and environmental benefits of the projects, providing a holistic performance evaluation framework for medical construction projects. Research indicates that reasonable cost control and benefit analysis not only reduce construction and operational costs but also enhance the long-term sustainability and social impact of the projects. Finally, strategies for optimizing cost control and benefit analysis are proposed to promote efficient implementation and management of medical construction projects.

**Keywords：** medical construction; cost control; benefit analysis; refined management; project management

## 引言

医疗建筑项目不仅关乎医疗服务的提升，更是社会发展和公共卫生建设的重要支撑。然而，这类项目通常涉及庞大的资金投入、复杂的设计和施工流程，其成本控制和效益分析直接关系到项目的成功与否。如何在确保建筑质量与服务功能的同时，合理控制成本、提升项目效益，成为了业界关注的核心问题。精确的成本管理与全面的效益评估，能够有效优化资源配置、提高资金利用效率，为医疗建筑项目的可持续发展提供坚实保障。

## 一、医疗建筑项目成本控制的重要性与难点

### （一）医疗建筑项目的成本构成

医疗建筑项目的成本构成复杂且多样，主要包括土地成本、设计成本、施工成本和设备采购成本等。土地成本通常占据项目总成本的较大部分，尤其是在大城市和人口密集区域，土地的价格不断攀升。设计成本则包括了建筑设计、结构设计、设备选型

和医疗功能区的规划等方面，设计的质量和精度直接影响到项目的后期建设和运营效率。施工成本主要涵盖人工、材料、设备以及施工过程中产生的其他费用，这些费用通常受市场价格波动的影响较大。设备采购成本主要用于医院医疗设备的采购与安装，这部分费用随着医疗技术的进步和设备的更新换代，往往具有较高的不确定性。

此外，项目还可能面临一些隐性成本，如政府审批费用、环

境保护和安全管理费用、项目管理费用等。由于医疗建筑项目的特殊性质，这些成本的不可预见性和复杂性，要求项目在前期预算时必须考虑到所有潜在的成本因素。随着项目进度推进，成本的控制和管理需要在不影响建设质量和功能的前提下，最大限度地优化资源配置，从而提高项目的整体效益。

## （二）成本控制的难点

医疗建筑项目的成本控制面临着多重挑战，首先是预算编制的困难。由于项目周期长、涉及部门多、设计变更频繁，前期预算往往难以准确预估最终支出。特别是在医疗建筑设计的初期阶段，难以确定所有细节，且随着需求变化，设计方案可能不断调整，从而导致成本的反复波动。其次，医疗建筑项目的工程变更较为常见。随着项目推进，原有设计方案可能因技术要求、功能调整或政策变动等因素进行修改，这些变更会直接影响工程的本体和进度。

此外，医疗建筑项目的设计和施工复杂度较高，涉及到先进的医疗设备、特殊的建筑结构和安全保障措施。项目设计需要兼顾医疗功能、患者体验、建筑安全及环保要求，这使得设计方案往往较为复杂。施工阶段，除了常规的建筑工程，还需要配备专业的医疗设施，施工过程中可能出现协调问题，导致施工进度受阻<sup>[1]</sup>。如何在这些复杂的条件下实现有效的成本控制，平衡项目的质量、时间与成本，成为管理者面临的重大挑战。

## （三）成本控制对项目成功的影响

良好的成本控制直接关系到医疗建筑项目的成功。通过科学的成本管理，能够确保项目在预算范围内完成，从而避免资金超支。成本控制有助于提升项目的资金利用效率，使得有限的资金能够最大程度地满足项目需求。另一方面，精准的成本控制能够帮助项目在各阶段保持合理的进度安排，避免因资金问题拖延项目建设。

此外，有效的成本控制对项目的质量和未来效益也有重要影响。在医疗建筑项目中，建筑质量和设备配置至关重要，良好的成本控制可以确保质量得到保障的同时，减少不必要的资源浪费。同时，控制成本有助于项目运营后的可持续发展，通过优化资金流动和资源配置，提升项目的经济效益。医疗建筑项目的成功不仅体现在短期内的成本节约，还应考虑到长期的社会效益和经济回报，合理的成本控制策略能够确保项目的可持续性，进而为公共卫生事业的发展做出贡献。

# 二、医疗建筑项目成本控制策略

## （一）精细化成本管理

精细化成本管理是医疗建筑项目中重要的成本控制策略，它贯穿项目生命周期的各个阶段。项目从前期设计阶段开始，需通过详细的可行性研究和详细设计，准确估算项目的各项成本，并根据需求合理调整。在施工阶段，精细化管理要求对每项费用进行严格跟踪与控制，及时识别和纠正偏差，避免资金浪费。在运营阶段，管理者要继续关注建筑的维护成本、设备更新成本等，确保长期运营中的成本可控。通过精细化的成本管理，能够提高项目整体的资金使用效率，并最大限度地减少资源浪费，确保医

疗建筑项目的经济效益。

## （二）项目预算管理

制定合理的预算并进行有效的预算控制是医疗建筑项目成本控制的基础。预算编制时，项目团队需要考虑所有可能的费用，包括设计、施工、设备采购及预备费用等。预算需要结合实际情况，设定灵活的调整机制，以应对不确定的风险。在项目实施过程中，预算控制至关重要。项目团队必须通过定期的财务审查，跟踪每一项支出的情况，及时发现预算偏差并采取调整措施。预算控制不仅仅是对成本的监控，更需要结合项目的进度和质量，确保所有支出与预算计划相符，从而实现资金的合理分配和有效利用<sup>[2]</sup>。

## （三）风险管理与应急预案

医疗建筑项目面临着多种外部和内部风险，这些风险可能导致项目成本超支并影响进度。外部风险主要包括市场波动和政策变动。例如，建筑材料价格的上涨或新的法规要求可能使得原本设定的预算失去效力。此外，经济环境变化、政府政策调整或不可预见的自然灾害也会影响项目的整体成本。内部风险如设计变更、施工延误等，也是项目成本失控的常见原因。为了应对这些风险，项目团队需要制定详尽的风险管理计划，提前识别潜在风险，并采取预防措施。在项目实施过程中，定期更新风险评估，针对不同风险制定应急预案，确保一旦风险发生，可以迅速采取相应的应对措施，以减少风险对项目成本的负面影响。

## （四）项目合同管理

合同管理是保障医疗建筑项目成本控制的关键环节。通过合同条款的合理设置，可以有效明确项目各方的权责关系，避免因责任不清导致的成本超支。在项目合同中，应对项目的各项成本进行明确规定，如设计费用、施工费用、设备采购费用等，并设立明确的付款节点和条件。同时，合同中应包含成本控制条款，规定在项目实施过程中，若出现设计变更、施工延误等情况，如何调整费用并明确赔偿责任<sup>[3]</sup>。通过严格的合同管理，可以有效规避由于外部因素或合同双方责任不清而引发的成本超支问题。

## （五）现代信息技术在成本控制中的应用

现代信息技术为医疗建筑项目的成本控制提供了强有力的支持。建筑信息模型（BIM）技术可以在项目设计阶段进行精确的三维建模，帮助团队更好地预测施工过程中的潜在问题，从而降低设计和施工中的返工成本。BIM还可以与项目的财务管理系统对接，实现预算的动态管理与实时更新。在项目管理过程中，企业资源规划（ERP）系统能够全面整合项目的各项数据，提供即时的财务、进度、质量等信息，帮助管理层做出及时的决策和调整。此外，现代信息技术的应用还能够提高工作效率，减少人为错误，进一步优化成本控制。通过信息化手段，项目团队能够更加精确地掌控项目成本，确保项目在预算范围内顺利完成。

# 三、医疗建筑项目效益分析

## （一）效益分析的定义与范围

医疗建筑项目的效益分析不仅仅局限于经济回报，还应当涵

盖社会效益和环境效益等多方面的内容。经济效益通常指项目的投资回报、运营成本控制和财务收益等，而社会效益则主要体现在提升社会医疗服务质量、优化公共卫生资源配置等方面。环境效益包括减少建筑施工过程中对环境的负面影响，推广绿色建筑和可持续发展的理念。综合这些效益的分析能够全面衡量项目的成功与否，确保医疗建筑项目不仅能够为投资者带来经济回报，还能为社会和环境做出积极贡献。

效益分析的范围应包括项目的各个方面，考虑短期和长期效益的多维度影响。例如，医院的建设可能在短期内带来一定的经济回报，但在长期内，它对社区医疗服务水平的提升、居民健康保障等方面的影响同样值得重视<sup>[4]</sup>。因此，对医疗建筑项目的效益进行全面的分析，有助于更好地评估项目的全局性价值。

### （二）经济效益分析

经济效益分析是医疗建筑项目效益评估中最为核心的部分。首先，投资回报分析是关键，医疗建筑项目通常需要大额初期投资，因此需要通过运营过程中的收益来评估其回报周期。此时，项目的盈利模式、资金回流速度和长期运营收益等都需要纳入考量<sup>[5]</sup>。其次，运营成本控制也是经济效益分析中的重点，医疗建筑项目在建成后会产生持续的运营费用，包括人力资源、设备维护、能源消耗等，这些成本必须有效管理，避免过高的运营开支侵蚀投资回报。

此外，患者满意度也是一个不可忽视的经济效益指标。患者的满意度直接影响医疗服务的需求量及其持续性，通过提供高质量的医疗服务，医疗建筑项目能够获得更高的患者流量和市场份额，从而提高其经济效益。因此，从投资回报、运营成本到患者满意度等多个角度进行综合的经济效益分析，有助于项目投资者更全面地评估医疗建筑项目的经济可行性。

### （三）社会效益与环境效益

医疗建筑项目的社会效益主要体现在提升公共医疗服务的可及性和质量。通过建设现代化的医疗设施，可以为居民提供更加便利、先进的医疗资源，改善区域内的健康水平，尤其是在医疗资源匮乏的地区，新的医疗建筑可以填补医疗服务的空白<sup>[6]</sup>。此外，医疗建筑的建设还会直接创造大量的就业机会，推动本地经济发展，特别是建设期间的建筑工人、设计人员、设备供应商等

都能从项目中受益。

环境效益也是医疗建筑项目效益分析中的重要组成部分。现代医疗建筑越来越注重绿色设计和节能环保，通过采用可持续建筑材料、智能能源管理系统等措施，降低能源消耗，减少碳排放。医疗建筑的环境效益不仅有助于提升建筑本身的可持续性，还能对周围环境起到积极影响。例如，绿色建筑技术不仅能减少施工中的污染，还能提高建筑的使用寿命和节能效果，进而改善居民生活质量<sup>[7]</sup>。

### （四）综合效益评估方法

综合效益评估模型将经济、社会与环境效益结合起来，形成一个多维度的评价体系。在实际评估过程中，可以采用量化分析和定性分析相结合的方法，从不同维度和层次进行综合评估。例如，在社会效益方面，可以通过居民健康水平的改善、医疗服务覆盖率的提高等指标进行量化，而在环境效益方面，可以通过减少的能源消耗量、降低的碳排放量等指标进行量化。经济效益则可以通过投资回报率、运营利润等经济指标来进行评估<sup>[8]</sup>。

这种综合效益评估方法能够全面反映医疗建筑项目的整体影响，不仅限于经济回报，更包括对社会福祉和环境的长远贡献。通过这种全方位的评估，决策者可以更加精准地了解项目的多重效益，为后续的决策提供更加科学的依据。此外，综合效益评估还可以帮助项目团队在实施过程中做出及时的调整，确保项目各项效益的平衡发展。

## 四、结语

医疗建筑项目的成本控制与效益分析是确保项目成功的关键因素。通过精细化的成本管理、科学的预算控制和有效的风险管理，可以在保障质量的同时，优化资源的配置，提升资金利用率。经济效益、社会效益与环境效益的综合分析为项目的多维度价值提供了清晰的评估框架。良好的成本控制不仅能够降低项目建设和运营成本，还能提高项目的可持续性和社会贡献。因此，医疗建筑项目的管理者应在各个阶段加强成本管控，并在设计和实施过程中注重多方效益的平衡，以实现项目的长期成功和最大化价值。

## 参考文献

- [1] 吴博. TL 医疗建筑装修工程项目变更管理案例研究 [D]. 大连理工大学, 2019.DOI: 10.26991/d.cnki.gdlu.2019.003685.
- [2] 李双春. EPC 模式下 G 工程项目成本控制影响因素评价研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2023.DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2023.000001.
- [3] 石启雷, 陈斌. 医疗建筑精益设计方法概述 [J]. 工程设计与设计, 2021, (S1): 34-42.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.s1.008.
- [4] 刘赛. A 公立医院更新改造项目成本控制研究 [D]. 北京建筑大学, 2021.DOI: 10.26943/d.cnki.gbjzc.2021.000104.
- [5] 肖钦文. 全过程工程咨询模式下绿色医疗建筑项目成本管理研究 [D]. 河北建筑工程学院, 2023.DOI: 10.27870/d.cnki.ghbjz.2023.000105.
- [6] 龙超盼, 颜强. 医疗建筑项目投资控制分析 [J]. 建设监理, 2024, (02): 29-32.DOI: 10.15968/j.cnki.jsjl.2024.02.003.
- [7] 范宁宁, 尹雨晴, 王志鹏. 建筑工程项目管理全过程造价及成本研究 [J]. 黑龙江科学, 2024, 15(10): 94-96.DOI: CNKI: SUN: HELJ.0.2024-10-023.
- [8] 孙梦烁. 首儿所病房楼改造项目全过程造价管理研究 [D]. 北京建筑大学, 2019.

# 建筑工程管理中工程风险管理的创新路径

刘湘华

广东省广大工程顾问有限公司，广东 广州 511494

DOI:10.61369/ERA.2025120034

**摘 要：** 建筑工程管理中的工程风险管理面临挑战，传统模式存在局限。可通过创新路径应对，如应用智能化监测技术与大数据风险评估模型，设计前期预警机制与施工阶段风险控制流程，创新多方协同管理模式，融合保险金融工具，制定技术标准与建设数据共享平台，培养复合型人才、创新继续教育体系，推进立法与优化监管体系，实现全生命周期风险管理。

**关 键 词：** 建筑工程管理；工程风险管理；创新路径

## Innovative Pathways for Engineering Risk Management in Construction Project Management

Liu Xianghua

Guangdong Guangda Project Management & Consultancy Co.,Ltd., Guangzhou, Guangdong 511494

**Abstract：** Engineering risk management in construction project management faces challenges, with traditional models having limitations. Innovative pathways can be applied to address these challenges, such as the use of intelligent monitoring technologies and big data risk assessment models, the design of early warning mechanisms in the planning phase and risk control processes during the construction phase, the innovation of collaborative management models involving multiple parties, the integration of insurance and financial tools, the establishment of technical standards and the development of data-sharing platforms, the cultivation of composite talents and the innovation of continuing education systems, the advancement of legislation and the optimization of regulatory systems, to achieve risk management throughout the entire life cycle.

**Keywords：** construction project management; engineering risk management; innovative pathways

## 引言

《建设工程质量管理条例》于2000年1月30日颁布，旨在加强对建设工程质量的管理，保证建设工程质量。在建筑工程管理中，工程风险类型多样且具连锁性、动态性与不确定性，传统管理模式存在局限。在此背景下，建筑工程风险管理需创新路径。从智能化监测技术、大数据风险评估模型，到前期预警机制、施工阶段风险控制等多方面创新，同时融合保险金融工具、制定技术标准等。这些创新与政策导向相契合，共同助力建筑工程实现有效风险管理，推动行业可持续发展。

## 一、建筑工程风险管理的内涵与挑战

### （一）建筑工程风险类型与特征

在建筑工程管理中，工程风险类型多样。技术风险源于施工工艺、设计方案等不完善，如复杂地质条件下基础施工技术难题，可能导致工程进度延误与质量缺陷<sup>[1]</sup>。市场风险受材料价格波动、市场供需变化影响，材料价格猛涨会增加工程成本。自然风险则由自然灾害引发，如暴雨、地震等，严重破坏工程设施。这些风险具有连锁性，一种风险可能引发其他风险，像技术失误致质量问题，进而引发安全事故与经济索赔。风险还具动态性，随工程进展，风险因素不断变化。其不确定性也显著，难以精准预

测何时何地以何种形式发生，给风险管理带来挑战，因此需创新路径有效应对。

### （二）传统管理模式的局限性分析

传统管理模式在建筑工程风险管理方面存在诸多局限。在风险预警上，现有管理制度缺乏前瞻性，多依赖过往经验，难以及时察觉新型工程风险的萌芽<sup>[2]</sup>。随着建筑技术革新与环境变化，新型风险不断涌现，而经验导向型管理模式难以与之适配。在控制手段上，传统模式较为单一，缺乏灵活性与综合性，面对复杂多变的风险场景时应对乏力。同时，责任分配也存在缺陷，职责界限模糊，导致出现风险问题时，各部门相互推诿，无法高效落实应对措施。这些局限严重制约了建筑工程风险管理的成效，亟待



创新管理模式，以适应日益复杂的建筑工程环境，实现对各类风险的有效管控。

## 二、风险管理技术体系的创新实践

### （一）智能化监测技术的应用

在建筑工程管理的工程风险管理中，智能化监测技术发挥着关键作用。借助 BIM 技术，可实现三维模拟预判。通过构建精确的建筑信息模型，对工程建设过程进行虚拟仿真，提前发现潜在风险点，如空间冲突、施工顺序不合理等问题，以便及时调整方案，降低风险发生概率<sup>[3]</sup>。同时，物联网传感设备能进行实时数据采集分析。在施工现场布置各类传感器，如温度传感器、压力传感器等，实时收集工程结构状态、环境参数等数据，并通过数据分析系统进行深度挖掘。一旦数据出现异常波动，系统即刻发出预警，帮助管理人员迅速掌握风险动态，及时采取应对措施，有效保障工程建设的顺利推进。

### （二）大数据风险评估模型构建

在建筑工程管理的工程风险管理中，大数据风险评估模型构建至关重要。基于历史工程数据构建风险评估矩阵，通过收集海量的历史建筑工程项目数据，涵盖项目规模、施工环境、技术难度等多方面，对各类风险因素进行分类与量化分析，进而确定不同风险因素间的关联及影响程度，构建起科学的风险评估矩阵，为后续风险评估奠定基础<sup>[4]</sup>。同时，创新应用机器学习算法于风险概率测算。利用机器学习强大的数据分析能力，对历史数据进行深度挖掘，精准识别风险特征与规律，以提高风险概率测算的准确性。机器学习算法能自动学习数据中的复杂模式，相较于传统方法，可更好应对建筑工程风险的多样性与不确定性，实现对风险概率更为精确的预测，助力建筑工程管理者提前制定有效的风险应对策略。

## 三、管理机制创新的实现路径

### （一）全过程动态管理机制

#### 1. 前期风险预警机制设计

在建筑工程管理前期风险预警机制设计中，建立科学全面的预警指标体系是关键。构建地质勘察数字化体系，借助先进的数字化技术对工程所在地的地质状况进行精准探测与分析，将地质信息数据化，通过对数据的实时监测与分析，及时发现潜在地质风险，如地层稳定性、地下水状况等异常变化。同时，完善招标风险评估，对招标文件条款、投标单位资质信誉、投标报价合理性等多方面进行综合评估，识别潜在的合同风险、资质风险及报价风险等。通过这样的预警指标体系，实现对建筑工程前期风险的全面、动态捕捉，为后续风险管理决策提供可靠依据，有效降低工程风险，保障建筑工程顺利开展<sup>[5]</sup>。

#### 2. 施工阶段风险控制流程

在建筑工程施工阶段风险控制流程方面，要落实 PDCA 循环管控方案。以工序风险清单为基础，在施工前对各工序可能面临的风险进行全面梳理，精准识别诸如地基沉降、材料质量等潜

在风险因素。施工过程中，依据风险清单密切监测，实时捕捉风险动态。一旦发现风险迹象，立即启动应急预案，并根据实际情况进行动态调整。例如，若监测到混凝土浇筑过程中出现裂缝风险，及时调整浇筑工艺与参数，同时对应急预案中关于裂缝处理的措施进行优化。通过这种 PDCA 循环，持续改进风险管理，实现对施工阶段风险的有效控制，保障工程顺利推进<sup>[6]</sup>。

### （二）多方协同管理模式创新

#### 1. 利益相关方责任共担机制

在建筑工程管理的多方协同管理模式创新中，利益相关方责任共担机制至关重要。构建建设单位、监理单位、承包商三位一体的风险管理责任矩阵，明确各方在工程风险管理中的具体职责。建设单位作为工程项目的发起者和所有者，需把控整体风险方向，为风险管理提供必要资源和决策支持。监理单位凭借专业优势，监督工程建设过程，及时发现并反馈风险隐患，协助各方制定应对措施。承包商则直接负责工程的具体实施，要对施工过程中的各类风险进行实时监控与处理。通过这种明确的责任划分，三方形成紧密协作关系，共同承担工程风险，当出现风险问题时，能依据责任矩阵迅速定位责任主体，高效解决问题，提升工程风险管理效率与质量<sup>[7]</sup>。

#### 2. 保险金融工具融合应用

在建筑工程管理的工程风险管理中，保险金融工具融合应用是关键一环。一方面，工程保证保险作为一种有效的风险转移手段，可将工程建设中的部分风险转嫁给保险公司。例如，投标保证金能防止投标人恶意竞标，履约保证保险可确保承包商按约履行合同义务<sup>[8]</sup>。另一方面，风险证券化也是值得探索的路径。通过将工程风险以证券的形式在金融市场上进行交易，使更多投资者参与分担风险。这不仅能拓宽风险转移渠道，还能为建设工程项目筹集资金。如此，实现保险与金融工具的融合应用，从多维度有效转移工程风险，助力建筑工程管理的风险管理机制创新与完善，提升工程建设的稳定性与安全性。

## 四、制度保障体系建设

### （一）标准化体系构建

#### 1. 风险管理技术标准制定

风险管理技术标准制定对建筑工程管理中的工程风险管理至关重要。需提出涵盖风险识别、评估、处置全流程的标准化操作规范<sup>[9]</sup>。在风险识别环节，明确不同建筑工程类型可能面临的风险清单，规定采用科学的识别方法，如专家调查法、故障树分析法等。风险评估阶段，制定量化评估指标体系，运用层次分析法、蒙特卡罗模拟等技术准确衡量风险程度。针对风险处置，依据评估结果，制定详细的应对策略标准，如风险规避、减轻、转移或接受的具体适用场景与操作流程。通过制定这些全面、科学的风险管理技术标准，为工程风险管理提供坚实的技术支撑，助力建筑工程管理实现更高效、更稳健的发展。

#### 2. 数据共享平台建设

在建筑工程管理的工程风险管理中，数据共享平台建设至关

重要。通过构建数据共享平台，能打破信息壁垒，实现不同参与方数据的高效流通与交互。该平台以设计好的区域性工程风险数据库架构为基础，对各类工程风险数据进行集中存储与管理，涵盖不同地区、不同类型建筑工程的风险信息<sup>[10]</sup>。借助信息交互机制，工程建设各方，如建设单位、施工企业、设计单位等，可实时获取、更新风险数据，从而依据最新风险动态调整管理策略。例如，施工企业能及时了解类似项目在当地遇到的地质风险情况，提前做好应对准备。这不仅提升了风险管理效率，还能通过数据的整合分析，挖掘潜在风险规律，为工程风险管理创新提供有力数据支撑。

### （二）人才培养机制改革

#### 1. 复合型人才培养方案

复合型人才培养方案方面，构建跨工程管理、信息技术、金融保险的课程体系与认证制度是关键。课程体系设计上，融入工程管理核心知识，如项目规划、成本控制等，使学生具备扎实工程基础。同时加入信息技术课程，让学生掌握大数据分析、BIM技术应用等，以实现工程管理数字化。金融保险课程也不可或缺，帮助学生理解工程保险理赔、风险管理策略等。此外，配套认证制度，通过严格考核，评估学生在多领域知识与技能的掌握程度。获得认证的学生，能在建筑工程风险管理工作中，运用多学科知识，从工程实际、信息技术应用、金融保险手段等多维度应对风险，为建筑工程管理提供更全面、创新的风险管理支持。

#### 2. 继续教育体系创新

在建筑工程管理工程风险管理的人才培育机制改革下，继续教育体系创新至关重要。应整合线上线下资源，构建全方位继续教育平台，为工程管理人员提供丰富且便捷的学习渠道。一方面，开发针对工程风险管理的精品在线课程，涵盖虚拟仿真技术在风险应急处置中的应用等前沿内容，让学员可随时按需学习。另一方面，定期举办线下研讨会与讲座，邀请行业专家分享实际案例与最新经验，促进学员间交流互动。同时，设计多元化考核方式，不局限于传统考试，通过项目实践、案例分析报告等形式，检验学员对工程风险管理知识与技能的掌握及运用，确保继续教育能切实提升学员应对工程风险的能力，满足行业不断发展的需求。

### （三）政策法规配套完善

#### 1. 风险管理立法推进

在建筑工程管理的工程风险管理中，推进风险管理立法至关

重要。需研究制定建设工程风险管理专项法规，这能为工程风险管理提供坚实的法律依据与规范准则。一方面，深入探讨制定专项法规的可行性，综合考量建筑行业的特点、当前风险管理的现状以及国内外相关经验，分析其在实际推行中的可操作性与预期效果。另一方面，明确法规实施要点，包括风险评估、预警、应对等各环节的具体规范，确保法规能够精准落地。通过完善风险管理立法，使建筑工程风险管理工作有法可依，约束各方行为，提升风险管理的权威性与有效性，进而推动建筑工程行业的健康、有序发展。

#### 2. 行业监管体系优化

在建筑工程管理的工程风险管理中，行业监管体系优化至关重要。一方面，要明确各监管主体职责，避免职责不清导致监管空白或重叠，提高监管的精准度与效率。加强对监管人员专业培训，使其熟悉工程风险管理知识、掌握最新监管标准与技术，打造高素质监管队伍。另一方面，构建动态监管机制，利用信息化手段实时跟踪工程进度、风险状况等，对风险隐患及时预警与处理。推动多元主体参与监管，鼓励施工人员、业主、社会公众等反馈问题，形成全方位监管网络。同时，强化对违规行为惩处力度，增加违法成本，规范建筑市场秩序，保障工程风险管理措施有效落实。

## 五、总结

建筑工程管理中的工程风险管理，通过智能化技术应用、管理机制创新与制度保障完善三位一体的创新路径体系，为行业发展注入新活力。智能化技术的融入，可实现风险的精准识别与实时监测；管理机制的创新，有助于优化资源配置与提升应对效率；制度保障的完善，则为风险管理奠定坚实基础。展望未来，全生命周期风险管理将成为重要趋势，涵盖项目规划、设计、施工到运营的各个阶段。只有持续推进技术与制度的协同创新，才能实现建筑工程管理质的飞跃，有效降低风险，提高工程质量与效益，推动建筑行业的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 陈诗棋. G 公司车险电话营销问题诊断及管理创新路径 [D]. 西南财经大学, 2021.
- [2] 潘瑞东. 瑞安市政府全域旅游公共管理创新路径研究 [D]. 西北农林科技大学, 2022.
- [3] 陈驰. X 公司智能建筑工程风险管理研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [4] 王勇. TYXC 建筑工程施工安全风险研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [5] 刘文霞. 建筑工程辅助材料集中采购风险管理研究 [D]. 郑州大学, 2022.
- [6] 聂铭. 绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新路径 [J]. 建筑·建材·装饰, 2024(8):28-30.
- [7] 王鹏宇. 建筑工程管理中创新模式的应用及发展路径 [J]. 模型世界, 2022(16):167-169.
- [8] 石文清. 建筑工程管理中绿色模式创新路径探索 [J]. 建筑·建材·装饰, 2024(6):4-6.
- [9] 尹艾琳. 建筑工程管理中的创新管理模式 [J]. 装饰装修天地, 2021(3):234.
- [10] 王伟. 建筑工程管理模式创新路径的探析 [J]. 中国住宅设施, 2022(12):45-47.

# 房地产工程管理模式在建筑领域的应用与创新

罗嘉皓

广东广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120035

**摘 要：** 房地产工程管理模式核心要素为项目管理、造价控制与质量监督，相互作用。造价管理理论基础有全生命周期造价等理论。不同模式造价管控有差异，应用中存在评审标准匹配等问题。政府从多维度规范，借助电子化平台等创新监管机制。同时，市场调控、智能技术应用等助力模式创新，推动建筑行业发展。

**关 键 词：** 房地产工程管理模式；造价控制；模式创新

## Application and Innovation of Real Estate Engineering Management Mode in the Construction Field

Luo Jiahao

Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** The core elements of the real estate engineering management model are project management, cost control, and quality supervision, which interact with each other. The theoretical basis of cost management includes theories such as full life cycle cost. There are differences in cost control among different modes, and there are issues such as matching evaluation criteria in application. The government regulates from multiple dimensions and innovates regulatory mechanisms through electronic platforms. At the same time, market regulation, intelligent technology applications, and other factors are helping to innovate models and promote the development of the construction industry.

**Keywords：** real estate engineering management mode; cost control; model innovation

### 引言

2021年《关于加强城市更新项目投资估算与成本控制的通知》凸显优化房地产工程管理模式的重要性。其核心涵盖项目管理、造价控制与质量监督，相互协同。全生命周期造价等理论为管理提供支撑，不同模式下造价管控效果各异。实证研究有助于揭示应用困境。政府需优化评审标准与时效，强化全过程监控，市场机制协同规范行为，共同推动管理模式在建筑领域的科学化、高效化应用与创新。

### 一、房地产工程管理模式的理论基础

#### （一）工程管理模式的核心要素

房地产工程管理模式的核心要素包括项目管理、造价控制与质量监督，三者相互作用，紧密关联。项目管理涵盖从项目规划到交付的全流程，合理安排资源、进度与人力，确保工程按计划推进。造价控制致力于在保证工程质量前提下，对成本进行精准预测、预算编制与过程监控，避免超支。质量监督则贯穿始终，依据标准与规范对施工各环节严格检查，保障工程质量达标。项目管理为造价控制和质量监督提供框架与方向，合理的项目规划影响成本与质量；造价控制制约项目资源投入与进度安排，影响质量；质量监督保障项目成果，对项目管理流程和造价产生反馈。通过解构其相互作用机制，并建立与房地产开发特征的关联

模型，可优化房地产工程管理模式，提升行业整体效益<sup>[1]</sup>。

#### （二）造价管理的理论基础

在房地产工程管理模式中，造价管理的理论基础至关重要。全生命周期造价理论在房地产项目中具有高度适用性，它从项目的策划、设计、施工到运营维护直至报废拆除的全过程，对造价进行综合考量与分析，帮助房地产企业全面把握成本，避免只关注建设成本而忽视后期运营维护成本等情况<sup>[2]</sup>。定额管理为造价管理提供标准化依据，通过对人工、材料、机械等消耗的规定，使得造价计算有章可循，为项目投资估算、概预算编制等奠定基础。动态成本控制理论则适应房地产项目周期长、影响因素多的特点，实时跟踪成本变化，及时发现偏差并采取纠正措施，确保项目在预算范围内完成，助力房地产企业实现高效的造价管理，提升经济效益。



## 二、现有工程管理模式的应用分析

### （一）造价控制模式实践应用

在房地产工程管理中，不同的工程管理模式造价管控存在显著差异。例如在 EPC 模式下，总承包商对设计、采购、施工全过程负责，这使得造价控制更具整体性与连贯性，有利于在项目早期锁定成本，但对总承包商的能力要求较高。而 DBB 模式下，设计、招标、施工依次进行，虽各阶段相对独立、责任明确，但易出现设计变更导致造价增加的情况。现行造价控制体系在政府投资项目中运行时，虽能在一定程度上保障项目资金合理使用，但仍面临一些挑战。例如，项目前期规划深度不足可能导致后期造价调整。因此，需不断优化造价控制模式，充分结合各模式的优势，以提升政府投资项目的造价管控实效<sup>[3]</sup>。

### （二）财政评审典型案例研究

以省级财政评审中心项目为实证，深入探究房地产工程管理模式在建筑领域的应用。在财政评审中，评审标准对工程管理模式的有效实施具有关键作用。实际操作中，常出现评审标准与现有工程管理模式匹配性不佳的状况。一方面，部分评审标准未能充分考量房地产工程管理模式的独特性，导致管理过程中的一些关键环节难以在评审中得到合理评估；另一方面，现有工程管理模式在适应评审标准时，也存在调整不及时、不到位的问题。这种匹配性问题不仅影响工程的顺利推进，也使得财政评审的效果大打折扣<sup>[4]</sup>。通过对这些典型案例的研究，能够清晰洞察现有工程管理模式在财政评审中的应用困境，为后续优化管理模式与评审标准提供有力依据。

## 三、政府管理机制的协同作用

### （一）财政评审体系构建

#### 1. 评审标准制定逻辑

在房地产工程管理模式于建筑领域的应用与创新中，政府对工程量清单评审、定额套用规则的管控逻辑，在评审标准制定方面体现出多维度考量。工程量清单评审方面，政府需确保清单内容完整、准确且符合市场实际情况。一方面，要求清单项目划分清晰，涵盖工程所有必要内容，防止漏项或重复计算，这能为招投标双方提供公平、统一的计价基础<sup>[5]</sup>。另一方面，对于清单中各项工程量的计算规则需严格规范，使其具有一致性和权威性，避免因计算方式差异导致造价偏差。在定额套用规则上，政府致力于保证定额的科学性与时效性。一方面，依据行业发展和市场变化，定期更新定额标准，反映新技术、新工艺、新材料的成本情况；另一方面，严格监督定额的套用过程，确保其与工程实际相符，杜绝高套、错套定额的现象，从而保障工程造价的合理性，推动房地产工程管理模式在建筑领域更科学、规范地发展。

#### 2. 评审时效性优化

在房地产工程管理模式于建筑领域的应用与创新中，评审时效性优化至关重要。借助电子化评审平台，能够显著提升评审时效性。一方面，电子化平台打破了时间与空间的限制，评审人员

可随时随地获取项目资料并开展评审工作，减少因资料传递、人员聚集等造成的时间消耗。另一方面，平台利用信息化技术实现自动化的数据收集、整理与分析，快速提取关键信息，为评审决策提供有力支撑，大幅缩短评审周期。同时，通过平台设置的实时进度跟踪功能，可及时发现评审过程中的阻碍环节，及时协调解决，确保评审流程顺畅推进。电子化评审平台从多方面协同发力，高效提升评审时效性，有力推动房地产工程项目管理效率的提升，对建筑领域工程管理模式的创新发展意义重大<sup>[6]</sup>。

### （二）政府监管机制创新

#### 1. 全过程造价监控

在房地产工程管理模式的应用与创新中，全过程造价监控是政府监管机制创新的关键环节。政府通过构建基于 BIM 的监管数据平台，实现对房地产项目造价的动态跟踪。利用 BIM 技术的可视化与数据集成特性，可精准获取各阶段成本信息，如材料费用、人工成本等，及时发现造价偏差。同时，结合大数据分析，对历史项目造价数据进行比对，预测潜在成本风险。这一平台打破信息壁垒，使各监管部门协同作业，财政、审计等部门基于平台数据共同审核项目预算与决算，实现全方位、全流程的造价监控，确保房地产项目造价合理可控，保障建筑领域健康发展<sup>[7]</sup>。

#### 2. 市场调控机制

在房地产工程管理模式创新中，市场调控机制对开发成本的调控至关重要。通过工程造价指标发布制度，提供透明、权威的造价参考，帮助企业科学规划成本，避免失控。统一标准促进市场公平竞争，倒逼企业优化管理、提升效率。准确指标亦引导资源合理配置，减少浪费。该制度与政府监管协同，规范市场行为，保障行业稳健发展，推动管理模式在建筑领域更高效地应用与创新，实现成本可控、质量提升与效益优化的良性循环<sup>[8]</sup>。

## 四、工程管理模式创新路径

### （一）技术创新应用

#### 1. 智能造价预测系统

智能造价预测系统引入机器学习算法，深度挖掘项目特征、材料价格、人工成本等海量历史数据，构建精准预测模型，为预算提供科学依据。系统结合实时市场动态，持续优化预测结果，提升准确性。同时，开发造价偏差预警模型<sup>[9]</sup>，实时监测实际与预测值的差异，一旦偏差超阈值即刻预警，助力管理人员及时干预。该系统实现造价的动态化、智能化管理，有效控制成本，提升管理效率与效益，保障房地产工程顺利推进。

#### 2. BIM-5D 集成应用

在房地产工程管理模式创新中，BIM-5D 集成应用至关重要。BIM-5D 将三维模型与时间、成本信息集成，实现工程量计算与成本管理的数字化协同<sup>[10]</sup>。通过该技术，能精准快速地计算工程量，为成本核算提供可靠数据基础。在项目全生命周期中，各参与方基于统一的 BIM-5D 平台，实时共享数据，打破信息壁垒。如施工阶段，可依据实际进度与成本数据，与计划对比分析，及时发现偏差并调整。这不仅提升工程量计算的准确性与效



率，还能让成本管理更加动态、精细，助力管理者科学决策，优化资源配置，从而显著提高房地产工程管理的整体效能，提升项目经济效益与竞争力。

### （二）管理模式革新

#### 1. 联合体管理模式

在房地产工程管理中，联合体管理模式是重要的创新路径。该模式下，设计开发商与承包商紧密联合，共同承担造价管控责任。设计开发商凭借对项目整体规划与市场定位的把握，在设计阶段就充分考虑成本因素，优化设计方案，避免后期因设计变更带来造价增加。承包商则利用自身施工经验和资源优势，在施工过程中严格控制成本，合理安排施工进度与资源调配。通过这种联合体形式，打破了传统模式下设计与施工相互脱节的局面，实现信息实时共享，各方能够基于共同的造价管控目标协同作业，从而有效提升工程管理经验，降低工程成本，保障项目在预算范围内高质量完成，为房地产工程在建筑领域的高效实施提供有力支撑。

#### 2. 动态评审机制

在房地产工程管理中，建立与工程进度联动的分段评审制度至关重要。随着项目推进，不同阶段面临各异的挑战与重点。该制度依据工程进度节点，对各阶段管理工作进行动态评审。比如在项目规划阶段，评审重点在于规划方案的合理性与可行性，是否符合市场需求和建筑规范；施工阶段则着重审查施工工艺、质量控制以及进度执行情况，及时发现偏差并调整。通过这种动态评审，能实时把握工程进展，发现潜在风险，如资金超支、工期延误等，以便及时采取针对性措施。这种与工程进度紧密联动的分段评审，使工程管理始终处于优化状态，保障项目顺利推进，提升房地产工程管理模式在建筑领域的应用成效与创新水平。

### （三）制度体系完善

#### 1. 法规标准重构

在房地产工程管理模式创新中，法规标准重构至关重要。随着建筑行业发展，特别是装配式建筑兴起，现有法规标准已难以满足

需求。应提出适应装配式建筑的造价计量规则修订建议，改变传统计量方式，充分考虑装配式建筑特点，如构件预制、现场装配等环节的成本构成，确保造价计量准确反映工程实际。同时，对施工质量验收标准进行完善，明确装配式建筑各构件的验收指标与方法，加强对预制构件生产、运输、安装全过程质量把控。通过这样的法规标准重构，为房地产工程管理模式创新提供坚实的规范基础，引导行业朝着更加科学、高效、规范的方向发展。

#### 2. 信用评价体系

在房地产工程管理模式创新中，信用评价体系的完善至关重要。建立针对房地产工程参建各方的信用评价体系，综合考量各方在项目执行中的表现。对施工单位，评估其工程进度把控、质量达标情况、安全管理成效等；对材料供应商，关注材料供应及时性、质量稳定性等。通过科学的指标设定，对各参建单位的信用状况进行量化评分。信用评价结果与工程合作机会挂钩，信用良好的单位在后续项目招标中优先考虑，信用不佳的单位则受到限制。如此，激励参建单位注重自身信用建设，营造诚信的市场环境，进而提升整个房地产工程管理的效率与质量，确保工程顺利推进。

## 五、总结

房地产工程管理模式的创新对行业发展至关重要。不同模式在造价控制上各有优劣，需因地制宜选用。政府应加强政策引导与监管，企业则通过创新提升管理效能，二者协同促进行业规范发展。智能技术赋能为管理革新提供契机，推动数字化、智能化转型，提升管理效率与精准度。财政评审数字化是必然趋势，有助于优化资源配置。唯有整合力量、善用技术，持续创新，方能实现建筑领域可持续发展。

## 参考文献

- [1] 程菲雨. BIM技术在建筑工程造价控制中的应用研究[D]. 北京交通大学, 2022.
- [2] 许晓光. 上海市高校服务管理模式创新研究——以“一网通办”为例[D]. 西北师范大学, 2023.
- [3] 叶丽萍. 区块链在房地产领域应用的经济法问题研究[D]. 南昌大学, 2021.
- [4] 韦林红. 中国传统“德法互嵌”逻辑与当代乡村治理模式创新[D]. 贵州师范大学, 2022.
- [5] 丁笑语. 建筑工程领域的多数人责任研究[D]. 江苏大学, 2023.
- [6] 卢蕴华. 建筑工程施工管理模式创新研究[J]. 砖瓦, 2022, (10): 104-106.
- [7] 潘辉. 建筑工程管理模式创新路径的探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (26): 47-49.
- [8] 何源涛. 建筑工程技术管理模式创新探索[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018, (31): 142-144.
- [9] 吴周杰. 绿色施工视角下建筑工程管理模式创新分析[J]. 砖瓦, 2022, (03): 134-136.
- [10] 冯速琼. 建筑工程技术管理模式创新探索[J]. 科技风, 2022, (02): 60-62.

# 基于高层建筑设计 BIM 技术应用

陈南仁

洲宇科技集团股份有限公司广州分公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120038

**摘 要 :** BIM 技术作为建筑行业的革命性工具, 通过其三维可视化、动态模拟、协同管理与参数化设计等核心特征, 深刻改变了传统建筑结构设计模式。在高层建筑等复杂项目中, BIM 技术在配套布置、材料预测、预仿真设计和全过程动态管控等方面展现出巨大价值, 促进了各专业间的高效协同, 实现了对施工过程的预见性管理与资源的优化配置, 从而在保障工程安全与质量的同时, 为项目节约成本、提升效益奠定了坚实基础。

**关 键 词 :** 高层建筑设计; BIM 技术; 应用

## Application of BIM Technology Based on High-rise Building Design

Chen Nanren

Guangzhou Branch of Zhouyu Technology Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract :** As a revolutionary tool in the construction industry, BIM technology has profoundly transformed the traditional architectural structural design paradigm through its core features such as 3D visualization, dynamic simulation, collaborative management, and parametric design. In complex projects such as high-rise buildings, BIM technology demonstrates immense value in aspects such as supporting layout, material forecasting, pre-simulation design, and full-process dynamic control, facilitating efficient collaboration among various disciplines. It enables predictive management of the construction process and optimized allocation of resources, thereby laying a solid foundation for cost savings and enhanced efficiency in projects while ensuring engineering safety and quality.

**Keywords :** high-rise building design; BIM technology; application

## 引言

随着社会经济发展和建筑需求日益多元化, 传统依赖人工与二维图纸的建筑结构设计模式已难以满足现代工程对精度、效率与协同的更高要求。其固有的局限性, 如信息不透明、难以进行碰撞检测与能耗分析、各专业间协调不畅等, 常导致设计偏差、资源浪费与施工返工。为应对这些挑战, 建筑信息模型 (BIM) 技术应运而生并得到广泛应用。它不仅仅是一种三维建模工具, 更是一种集成了几何信息与物理属性的综合性信息管理方法。文章旨在系统阐述 BIM 技术在建筑结构设计中的关键作用、其鲜明的技术特征, 并重点探讨其在高层建筑设计各环节中的深度应用, 以揭示其如何通过信息化与智能化手段, 驱动建筑行业向精细化、科学化方向转型升级。

## 一、BIM 技术在建筑结构设计中的作用

### (一) 攻克结构设计信息化瓶颈

在过往的建筑结构设计流程中, 各项工作如数据收集、图纸绘制及资料汇总主要依赖人工完成, 不仅整体效率较低, 设计精度也难以充分保证。由于缺乏有效的预判手段, 施工过程中容易暴露各类结构安全隐患, 同时常伴随建筑材料的大量浪费, 增加了项目成本与风险。BIM 技术的引入彻底改变了这一局面, 推动了行业设计模式的转型升级。该技术使设计图纸从二维走向三维, 实现了建筑信息的立体呈现与可视化交互, 大幅降低了设计工作的理解与操作门槛。借助 BIM 平台, 结构设计的每个环节更加透明和系统, 有效提升了设计成果的准确性与完整性, 从而在

提高设计效率的同时, 显著减少了因人工疏漏造成的资源损耗, 促进建筑过程的精益化管理<sup>[1]</sup>。

### (二) 实现建筑结构设计质量全面提升

在传统建筑结构设计模式下, 设计工作主要依据二维图纸及相关数据进行, 难以对建筑内部潜在缺陷、施工全过程的能耗表现等进行深入分析。这一方式下, 结构构件之间的碰撞检测与承载力极限值的精确计算存在困难, 工程成本预算也容易产生偏差。BIM 技术的运用为上述问题提供了有效解决方案。它打通了各专业之间的数据壁垒, 实现了设计信息的集成与共享, 促进了不同专业团队的高效协作。基于统一的信息模型, 设计人员能够及早发现并修正设计中的冲突与不合理之处, 进而对方案进行持续调整与优化。这一过程显著提升了设计成果的可靠性, 为项目

的顺利推进与整体质量管控奠定了坚实基础。

### （三）赋能施工管理迈向精细化与科学化

BIM 技术在建筑结构设计阶段的深度融入，为施工管理带来了革命性进步。它能够在动工前，通过高精度数字化模型对整个建筑结构的形成过程进行动态模拟与推演。这种前瞻性的模拟使得潜在问题得以提前暴露，并借助强大的工程计算能力，为结构方案的持续优化与决策提供可靠依据，从而将施工风险降至最低。此外，该技术还整合了计算机模拟、三维模型深度分析及施工现场布局规划等多元功能，实现对人力、物料、机械等各类资源的统筹管理与最优化配置。这种一体化的科学管理方式，不仅显著提升了现场作业的效率 and 协同水平，更从根本上强化了对施工过程的全局掌控，为最终建筑成果的结构安全性与工程品质提供了坚实保障。

## 二、BIM 技术特征

### （一）三维可视化赋能设计精准决策

在传统建筑设计实践中，设计工作很大程度上依赖于设计师的个人空间构想能力，其成果主要表现为由基础平面线条构成的二维图纸。然而，伴随社会经济持续进步与居民生活水平的不断提升，社会公众对建筑功能、形态及美学的需求日益多元。在此背景下，若继续沿用依赖主观推演的设计方法，极易导致对结构材料属性、空间关系等关键信息的把握失准，进而引发设计方案与实际需求之间的显著偏离。为有效防范因设计阶段疏漏而引发的施工障碍与成本风险，项目团队可引入 BIM 技术构建建筑信息的三维数字化模型。该技术能够立体呈现建筑内外结构与构造层次，极大增强了设计成果的直观性与完整度。同时，基于高度可视化的协同平台，项目参与方能够对设计方案进行多角度审视与校验，不仅显著增强了设计与施工过程的客观性与透明度，也为工程造价的精准预估、动态成本控制与项目投资管理提供了可靠依据。

### （二）动态模拟优化设计与施工决策

BIM 技术不仅能够构建建筑物的高精度三维实体模型，还能对施工过程中那些实际难以复现或高风险的关键工序进行动态推演与可视化再现。其核心价值在于，该技术不仅可以基于模型数据输出对建筑性能与施工进度的前瞻性预测，更能为设计阶段的方案比选与优化提供坚实的量化依据。此外，借助系统内置的仿真分析工具与集成的大数据支持，BIM 平台能够对初步形成的建筑工程设计方案进行多维度、多情境的模拟验证。这一过程有效支撑了方案可行性的早期评估，显著降低了设计阶段的不确定性，从而为形成科学合理、可实施性强的建筑设计方案奠定了坚实基础，助力项目在技术性与经济性上实现双重优化<sup>[2]</sup>。

### （三）强化协同与方案优化能力

在建筑工程项目中，确保各专业系统之间的高效协同是保障设计成果落地性的关键所在。传统设计模式下，项目团队通常难以对施工全过程的所有工序及接口进行周详的事前规划与统筹安排，致使现场常出现专业冲突与返工现象。通过应用 BIM 技术，项目的参与各方，包括设计、施工及建设方，均可基于统一的数

字化平台对设计图纸进行集成审查与冲突检测。该平台为建筑、结构、机电等不同专业技术人员提供了实时交互与协同工作的环境，便于各方共同就发现的设计矛盾进行会审与研判。借助这一高效协同机制，项目团队能够在施工开始前便识别并解决潜在冲突，从而显著减少后续工程变更，有效规避因协调不力导致的工期延误与成本增加，全面提升项目的整体建设效益。

## 三、BIM 在高层建筑设计中的应用

### （一）BIM 技术在建筑配套布置中的深度应用

在工程项目实施过程中，传统方法通常需借助多种辅助工具，才能对各个部位及施工环节的效果图进行输出与展示，并据此把握配套设施的技术要求与安全部署。BIM 技术通过全过程动态仿真，为项目管理人员提供直观、集成的方案参考，尤其使非技术背景的管理参与者也能快速理解项目全貌与关键节点。基于 BIM 模型的分析能力，项目团队可精准识别设备空间布置中的不合理之处，例如在塔吊定位这类常见问题上，传统布置方式若考虑不周，极易引发一系列连锁问题：地下管线及预埋设备可能因碰撞或渗漏影响正常使用，或因前期未统筹安装顺序，导致后续设备无法顺利就位。通过建立信息模型，可对设备配置进行可视化分析与优化调整，有效避免上述问题，保障施工机械与固定设备协调运作。在进行塔吊等大型机具的平面布置时，还需综合评估地基承载力与多机协同作业条件，特别是在工程规模大、机具数量多、需设置多台设备同时作业的复杂场景中，BIM 技术的空间模拟与荷载分析功能，为场地科学布置与资源统筹提供了关键支撑。

### （二）基于 BIM 的建筑材料用量精准预测与管控

BIM 技术具备强大的数据整合与解析能力，能够对项目各类信息进行系统性统计与分析，并精准计算出材料估算所需的关键参数。基于这些高精度数据，项目团队能够更可靠地评估施工效率，并对项目全过程的成本预算实施有效监控与动态管理。依托 BIM 构建的数据库具备构件级别的精细度，为实现数据的高准确性与可追溯性提供了坚实基础。借助这一系统，管理人员能够快速识别并归类各类所需建材，生成清晰的材料需求清单。这一数字化管理方式不仅显著减少了人工核算工作量，更能有效识别并修正传统统计流程中易产生的疏漏与偏差。通过自动生成精准的材料用量明细表，项目得以实现资源的优化配置，从源头上减少材料浪费现象，在提升资源利用效率的同时，为项目成本控制与利润提升提供了有力支撑<sup>[3]</sup>。

### （三）基于预仿真技术的设计优化与方案呈现

BIM 技术通过构建虚拟的三维立体场景，能够对高层建筑结构中可能存在的设计冲突与施工难点进行前瞻性模拟，并借助可视化模型直观呈现问题本质，使潜在风险清晰可辨。这一过程不仅显著增强了设计方案的合理性与表现力，同时在项目招投标阶段，也为全方位展示设计成果提供了有力工具。以高层建筑消防设计为例，在设计初期即可通过 BIM 创建消防系统专项模型，对材料耐火性能、消火栓定位、消防通道净宽等关键要素进行多情境仿真分析。在此过程中，还可整合结构、暖通等其他专业系统

的参数进行协同验证,从而在全局层面确保消防方案的可行性与合规性。这种基于仿真的设计方法,能够大幅减少施工阶段的设计变更与返工现象,在保障工程按期推进的同时,实现对建设成本的有效控制。此外,在招投标环节,相关方可借助 BIM 技术向业主及评审方动态展示投标方案的空间布局、技术细节及施工组织模拟等内容。这种沉浸式的呈现方式极大提升了方案的沟通效率与表现力,使 BIM 技术本身成为项目竞标中的一项突出优势。

#### (四) 实现设计过程的动态化精细管控

BIM 技术通过系统化地采集、整合与解析项目数据,能够对建筑工程施工过程实施全周期的动态监控与实时调控。在传统建筑设计方案的执行体系中,静态化、滞后性的管理模式占据主导地位,管理人员往往只能在工序完成后,通过比对实际成果与预期目标之间的偏差进行分析决策。这种被动应对的方式一旦在前期方案中出现疏漏,极易引发连锁反应,造成难以挽回的经济与工期损失。借助 BIM 技术,设计人员能够全程跟踪现场施工进度,实时上传并解析包括施工工艺、工序衔接与质量验收等关键数据,确保实际作业效果与设计意图保持一致。此外,该技术的动态管控能力还显著体现在施工管理的预见性层面:在工程推进过程中,可利用可视化模拟手段对潜在问题开展前瞻性分析。例如,在建筑施工安全管控这一关键领域,虚拟模型能够将所有设计环节及高风险作业流程置于可控范围内进行模拟演练,尤其对事故高发工序实现精准预警,从而促使管理人员提前制定防范措施,保障施工全过程的安全受控与高效推进<sup>[4]</sup>。

#### (五) 基于参数化驱动的结构设计优化

BIM 系统构建了一个集成化的信息共享平台,支持设计人员

将建筑物的全维度数据整合至中央数据库,实现跨专业、跨部门的设计协同与信息互通。参数作为数据库中的核心交互元素,是设计师构建精准信息模型的基础。在该系统框架内,设计师通过虚拟数据信息,对建筑钢筋、水泥构件、梁柱系统及模板工程等实体组件进行数字化替代与参数化定义,从而将实体建筑的构建过程转化为可计算、可调控的参数化流程。将 BIM 技术深度融入建筑规划设计,需从两个层面系统推进。应依据项目规模与功能需求全面采集关键参数,构建初步的造型与结构体系;其次,需结合消防规范、施工可行性等现实约束,对参数化模型进行迭代优化与合规性验证,直至其完全满足建筑的安全性、功能性与经济性要求,形成技术与艺术相统一的设计成果<sup>[5]</sup>。

### 四、结束语

综上所述,BIM 技术的介入为建筑结构设计乃至整个工程建设领域带来了全方位的提升。它通过构建信息高度集成与共享的协同平台,将设计从静态、孤立的流程转变为动态、协同的智能化过程。从初期的方案优化、碰撞检测,到施工阶段的精准预测、动态控制和资源管理,再到全周期的成本与安全管控,BIM 技术都发挥着不可或缺的作用。它不仅有效解决了传统设计中的诸多痛点,如提升设计质量、优化施工管理、降低工程风险与成本,更重塑了项目的执行模式,推动了建筑行业的数字化进程。未来,随着 BIM 技术与人工智能、物联网等新技术的进一步融合,其必将在实现建筑产业现代化与可持续发展的道路上扮演更为关键的角色。

### 参考文献

- [1] 崔泽涛. BIM 技术在高层建筑设计中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(14): 15-16.
- [2] 陈柏丞. 基于超高层建筑设计的 BIM 技术应用研究 [J]. 砖瓦世界, 2021(4): 69.
- [3] 张永娟. 基于超高层建筑设计的 BIM 技术应用 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(9): 60-62.
- [4] 吴铭辉. 基于 BIM 技术的高层建筑结构设计应用 [J]. 中国住宅设施, 2021(2): 100-101.
- [5] 陈瑞芳, 陈瑞龙. 基于 BIM 技术的小高层住宅建筑节能设计应用研究 [J]. 建筑与装饰, 2018(18): 145-146.



# 论述建筑工程管理中的控制要点与优化

何春喜

广东华烨项目管理有限公司，广东 茂名 525000

DOI:10.61369/ERA.2025120039

**摘 要：** 建筑工程管理是确保项目质量、安全与效益的核心手段。当前建筑行业在管理措施落实、团队素质提升及材料控制等方面仍存在不足，需通过完善制度体系、强化人员培训、优化技术应用与加快信息化建设等路径加以改进。文章系统分析了建筑工程管理的核心价值、现存问题及控制措施，为提升项目管理水平提供理论参考与实践指导。

**关 键 词：** 建筑工程管理；控制要点；优化

## Discuss The Key Control Points and Optimization in Construction Project Management

He Chunxi

Guangdong Huaye Project Management Co., Ltd., Maoming, Guangdong 525000

**Abstract：** Construction project management is a core approach to ensuring project quality, safety, and efficiency. Currently, the construction industry still faces shortcomings in areas such as the implementation of management measures, enhancement of team competence, and material control, necessitating improvements through pathways such as refining institutional systems, strengthening personnel training, optimizing technological applications, and accelerating information construction. This article systematically analyzes the core value, existing problems, and control measures of construction project management, providing theoretical references and practical guidance for enhancing project management standards.

**Keywords：** construction project management; control points; optimization

### 引言

科学的管理体系不仅关系到工程项目的质量安全与进度控制，更直接影响企业的经济效益与市场竞争力。当前，在工业化、信息化融合的背景下，建筑工程管理的内容不断扩展，管理难度逐步提升，如何在复杂环境中实现精细化管理、推动技术与管理协同创新，已成为行业亟需解决的关键课题。文章基于建筑工程管理的现实需求与发展趋势，系统梳理其在品质提升、效益保障与风险防控方面的意义，深入剖析当前存在的问题，并提出具有可操作性的控制策略，以期为建筑企业管理升级与技术创新提供方向性指引。

### 一、建筑工程管理的意义分析

#### （一）全面提升建筑工程品质水平

在确保资金充足的前提下，建筑企业应当着力提升施工项目的整体质量水平。在进行建筑工程管理的过程中，加强对工程各环节的监督管控与竣工阶段的验收工作至关重要，这两个环节构成了工程管理的核心内容。工程监督与竣工验收涵盖了工程测量、质量检验以及材料选用等多个关键领域，通过实施系统化的管理措施，能够有效防范因人为失误或材料选用不当引发的各类质量问题。同时，这种全过程管理机制还能在问题初现时及时采取补救措施，从而避免项目完工后出现大规模返工的情况。通过引入先进的管理理念和技术手段，建筑企业可以构建更加健全的质量保障体系，推动建筑工程质量迈上新台阶。

#### （二）确保建筑工程项目经济效益的实现

在当前建筑产业持续进步的背景下，建筑企业所处的市场竞争环境日趋激烈。若要在行业中保持竞争优势并实现可持续发展，企业不仅需要持续优化内部管理体系，更应当确保建设项目的品质水准，并着力提升项目的综合效益。实践表明，加强工程技术管理是提升建筑工程质量最为直接和有效的路径。通过完善技术管理体系，能够显著提高施工过程的整体效率，从而为项目创造更可观的经济收益。随着建筑行业的不断成熟，越来越多的企业意识到工程技术管理对项目成功的关键作用，同时也逐步识别出原有技术管理模式中存在的短板与不足<sup>[1]</sup>。

#### （三）有效预防与减少安全事故的发生

随着现代工程项目复杂性的不断提升，许多施工作业需要在高层、高空等高风险环境下进行，这给现场作业人员的生命与财

产安全带来了潜在威胁。因此，全面强化安全生产管理，从源头上遏制安全事故的发生，已成为施工管理的重中之重。通过实施系统化的工程管理，能够对施工全过程进行严格监督与控制，在提升作业人员安全防护意识的同时，进一步完善现场安全设施与防护体系。科学的安全管理不仅包括常规的安全教育培训，还应涵盖施工现场的危险源识别、应急预案制定以及定期安全演练等多方面内容。借助现代信息技术手段，如实时监测与智能预警系统，可进一步加强对高危作业环节的管控能力。

## 二、建筑工程管理中存在的问题

### （一）管理措施执行层面存在落实不到位现象

当前，部分建筑开发企业由于对工程管理重要性的理解尚不深入，加之受到短期经济利益的驱动，时常出现随意调整原定管理方案的行为。这类现象在实际建设中屡见不鲜，例如在部分关键施工环节中安排未经专业培训的作业人员，这种操作不仅会直接影响工程的整体品质，还会导致施工效率下降，进而对建筑行业的良性发展产生不利影响。从行业层面来看，如果工程建设管理长期处于执行不力、监督缺失的状态，将难以保障建筑产品的安全性与耐久性，这不仅关系到用户的生命财产安全，也在更广泛范围内制约着我国建筑产业向高质量、可持续方向发展。因此，强化管理措施在项目执行过程中的实际落地效果，成为当前建筑管理领域亟待加强的环节<sup>[2]</sup>。

### （二）施工管理团队专业素养有待提升

在建筑工程实施过程中，项目管理人员处于组织与协调的核心位置，其能力水平直接关系到工程管理的整体效能与建设质量。然而，当前行业中不少现场管理人员存在专业基础薄弱、管理经验不足等问题。尤其值得关注的是，部分管理人员未曾接受系统化的岗位培训，其所掌握的知识结构与技能水平难以适应现代化工程项目管理的实际需求。这一现象的背后，反映出部分建筑企业在人才引进环节对专业资质的审核不够严格，甚至由于企业内部整体专业人才储备不足，导致在关键管理岗位的安排上存在一定的将就与妥协。管理人员综合素质的不足，往往直接影响施工组织的科学性与现场问题的处理效果，进而对工程整体质量形成潜在隐患。

### （三）施工材料质量控制环节存在疏漏

建筑材料品质的优劣，直接决定了工程实体的安全性与耐久性。只有采用符合规范要求、性能稳定的优质建材，才能为建筑结构的长久使用提供可靠保障。然而在实际操作过程中，部分项目在材料管控方面仍存在标准执行不严、检验流程形式化等现象。某些施工单位为追求短期经济效益，在材料采购与使用环节未能严格执行质量标准，甚至出现以次充好、降低规格选用等现象，这为工程整体质量埋下了潜在隐患。以建筑工程中广泛应用的钢筋与混凝土为例，其在进场前若未进行严格的力学性能与规格参数检验，极易导致结构承载力不足或耐久性下降。特别是在钢筋使用方面，若存储不当或防护不足，容易发生表面锈蚀问题，直接影响其与混凝土之间的粘结性能与协同工作能力。而在

混凝土施工过程中，若浇筑厚度控制不严或配合比不符合设计要求，将直接影响构件的最终强度与防水性能。尽管材料验收规范中已明确各类检测要求，但在实际执行中仍普遍存在抽样比例不足、检测项目不全等问题，反映出当前材料质量管控体系仍需进一步完善与强化<sup>[3]</sup>。

## 三、建筑工程管理中的控制措施

### （一）构建科学完善的项目管理体系

当前建筑工程领域各管理部门之间需进一步强化协同机制，亟需对传统管理理念与工作方法进行系统性优化。通过明确划分岗位职责并将具体管理任务精准落实到每位责任人，可显著提升管理制度在实践中的执行效果。在建筑项目进入实施阶段后，清晰界定各部门的职能范围与责任边界，是保障工程管理体系有效运行的重要基础。企业应对现行管理制度的执行成效进行持续跟踪与动态评估，并结合科学的激励与约束机制，对表现突出的员工予以表彰，同时对履职不力的行为进行及时纠偏，从而有效激发团队积极性与责任意识。在制度设计过程中，应立足于行业长远发展趋势，将绿色、可持续的发展理念深度融入项目管理全流程。需系统梳理现有管理流程中存在的短板与实际需求，持续优化项目管控模式，并定期验证制度内容与行业标准及技术规范的符合性，不断提升管理体系的完整性与适用性。管理人员的专业素养与执行能力直接关系到制度落地的成效，因此应着重强化其节能环保意识，为推动工程项目绿色化管理转型奠定基础。此外，在项目管理实施过程中，应对可能出现的各类技术风险、突发状况及环境因素保持高度警觉，通过提前制定系统化应急预案，为项目管理的有序推进提供有力支持。

### （二）全面提升管理团队专业能力

在建设工程项目管理体系中，施工企业各相关部门应当系统性地推进管理团队的组织结构优化，重点从管理人员的实践经验、专业能力及综合素养等多个维度进行全面提升。通过科学界定各岗位的工作范畴，实施精细化的职责划分，能够有效确保管理措施在实践过程中的执行效果与预期目标保持一致。为进一步增强管理团队的整体素质，企业应建立健全系统化的培训机制，为管理人员提供持续学习与能力提升的平台。此类培训不仅应涵盖行业最新规范与技术发展动态，还需注重培养管理人员在实际工作中灵活运用所学知识的能力。通过针对性的能力建设与职业发展引导，可以有效激发管理人员的工作热情与创新意识，增强其在复杂工程环境中的应变能力与决策水平，从而为项目的高效推进提供坚实的人才保障<sup>[4]</sup>。

### （三）强化建筑材料全过程质量控制

建筑材料作为决定工程实体质量与安全性能的基础要素，其选用与管控必须严格遵循设计文件及相关技术规范的要求。在施工准备阶段，材料管理人员应对拟采用的建材进行全面检测，通过标准化取样与实验室分析，确保其各项指标符合工程技术标准。在采购环节，需对供应商资质进行严格审查，建立完善的合格供方评价体系。为确保项目建设期间材料供应的连续性与稳定

性，建议对主要结构材料设置不少于3家的备选供应商名单，形成良性竞争与应急补充机制。建筑材料种类繁多、性能各异，其验收、存储与使用均需严格遵循标准化流程，并由具备专业资质的质量管理人员实施全过程监督。以钢筋混凝土等关键结构材料为例，需重点检测钢筋的化学成分如碳元素及合金组分含量，确保其力学性能满足结构设计要求。在材料进场验收阶段，应严格核查生产厂家资质、产品认证文件及质量合格证明，并按规定进行抽样复验。质量监督部门需完整记录检验数据，出具具有参考价值的材料分析报告，为工程质量追溯提供依据。材料选择必须符合国家现行标准，质量检验工作应当客观严谨，混凝土浇筑厚度须达到设计规定，钢筋配置比率需满足规范要求，从而为工程实体质量奠定坚实基础。

#### （四）推进新型技术在建筑工程中的科学应用

在科技持续进步的背景下，将创新技术有效融入建筑实践已成为提升行业水平的关键路径。先进工艺与技术的应用不仅能优化施工流程，更能显著增强建筑成品的整体质量与性能表现。然而，在实际推广过程中，新型技术的落地常受到设备条件、人员接受度及成本管控等多重因素制约，需要系统性地应对与解决。为适应技术发展要求，工程技术人员必须持续学习新的技术标准与作业规范，通过不断提升专业素养与实践能力，确保技术应用的准确性与有效性。施工现场的管理人员除了具备扎实的专业功底和丰富的实操经验外，还需严格遵循技术实施方案，确保各项作业按计划有序推进，从而保障施工过程的安全性与协调性。在引入新型建材与创新工法时，必须建立完善的检测验证流程，通过系统化的评估手段及时发现并弥补技术缺陷，确保施工工艺符合现行规范要求。此外，应注重将大型空间结构整体提升技术、复杂形态钢结构逆向施工法等先进工法进行有机结合，通过多种

技术的协同应用与集成创新，全面提升建筑工程的施工质量、效率与整体可控性，最终实现技术资源的最优化配置与工程效益的最大化发挥。

#### （五）推进建筑工程管理信息化转型

建筑企业应积极借助区块链、第五代移动通信技术和智慧大数据平台等现代信息技术，构建集成化的工程数据管理中心。此类系统能够实现对造价控制、进度管理、质量监测等核心业务数据的快速采集与智能分析，显著提升管理决策的科学性与时效性。信息系统的深入应用往往意味着对传统人工管理模式的根本性变革，这一过程可能面临组织架构调整、工作习惯改变等多重挑战。要顺利推进此类转型，必须获得企业高层与政策层面的双重支持，通过制定配套措施与激励机制，为管理创新营造有利的发展环境。在完成信息化管理平台的初步构建后，企业还需着力培育专业化的运营维护团队，负责信息系统的持续优化与日常管理。具体工作应包括专用功能的二次开发、系统硬件与软件的定期维护升级，以及面向内部员工的数字化技能培训与平台推广应用<sup>[5]</sup>。

### 四、结束语

建筑工程管理作为贯穿项目全周期的重要活动，对保障工程质量、提升综合效益具有决定性作用。通过完善制度设计、加强团队能力建设、推动新技术应用与信息化转型，建筑企业可有效提升工程管控水平，实现质量、安全与效益的协同发展。未来，随着智能建造、绿色建筑等理念的深入推广，建筑工程管理将进一步向标准化、数字化与集成化方向发展，为行业持续创新与高质量发展注入新的动力。

### 参考文献

- [1] 成飞. 建筑工程管理中的控制要点与优化措施 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(1): 157-160.
- [2] 江家宝, 孙宁一. 建筑工程管理中的控制要点与优化 [J]. 科技资讯, 2022, 20(10): 74-76.
- [3] 段春松. 建筑工程管理中的控制要点与优化措施 [J]. 建筑工程与管理, 2025, 7(6).
- [4] 顾江涛, 张典杰. 建筑工程管理中的控制要点与优化措施 [J]. 房地产导刊, 2022(2): 7-9.
- [5] 李俊琦. 建筑工程管理中的控制要点与优化对策 [J]. 电脑采购, 2021(15): 120-121.

# 高层住宅小区建筑给排水设计研究

张升

洲宇科技集团股份有限公司广州分公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025120041

**摘 要：** 高层住宅给排水及消防系统设计具有特殊的复杂性和技术要求。在给水系统方面，需重点解决竖向压力平衡、管网可靠性及设备噪声控制等问题；排水系统需关注管材选型、气压稳定及同层排水等技术应用；消防系统则强调自救能力建设、管网优化及设备兼容性。通过系统性设计策略和新技术应用，能够有效提升高层住宅给排水与消防系统的安全性、稳定性和节能性。

**关 键 词：** 高层住宅小区；建筑给排水；设计

## Research on The Design of Water Supply and Drainage Systems in High-rise Residential Communities

Zhang Sheng

Guangzhou Branch of Zhouyu Technology Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** The design of water supply and drainage as well as fire protection systems in high-rise residential buildings presents unique complexities and technical requirements. In terms of the water supply system, it is essential to address issues such as vertical pressure balancing, the reliability of the piping network, and equipment noise control. For the drainage system, attention should be paid to the selection of pipe materials, pressure stabilization, and the application of same-floor drainage technologies. The fire protection system emphasizes the enhancement of self-rescue capabilities, optimization of the piping network, and equipment compatibility. Through systematic design strategies and the application of new technologies, the safety, stability, and energy efficiency of water supply and drainage as well as fire protection systems in high-rise residential buildings can be effectively improved.

**Keywords：** high-rise residential community; building water supply and drainage; design

## 引言

随着城市化进程加快，高层住宅已成为主流居住形式，其给排水及消防系统的设计直接影响建筑安全与居住品质。高层建筑具有高度大、用户集中、系统复杂等特点，给水系统需应对压力波动、噪声干扰等挑战，排水系统需解决管道腐蚀、气压平衡等问题，消防系统则需强化自救能力与设备可靠性。文章基于高层住宅给排水工程的设计特点，分析当前存在的主要问题，并提出针对性的优化策略，以期对相关工程实践提供参考。

## 一、高层住宅给排水工程的设计特点

### （一）高层住宅火灾防控策略：从被动应对到主动自救

高层住宅因其建筑结构的特殊性，内部潜藏着诸多易于诱发火灾的隐患，例如电气线路复杂、家用电器密集、人员活动频繁等。一旦发生火情，由于“烟囱效应”的加速作用，火焰与浓烟会通过竖向通道迅速向上蔓延，形成立体燃烧，这给外部消防救援带来了极大的困难与挑战。当前，尽管消防技术不断进步，但受限于云梯高度、供水压力等客观条件，消防设备的外部预警与扑救效能依然存在瓶颈。因此，高层住宅的消防安全绝不能仅仅

依赖于外部救援，其根本出路在于构建和完善建筑内部的自防自救体系。在设计阶段，就必须将消防系统的安全性与可靠性提升至最高战略层级，通过部署先进的自动报警系统、高效的自动喷淋设施以及确保疏散通道的绝对畅通，真正实现“以自身为出发点”的主动式消防安全架构。

### （二）高层住宅排水系统优化：保障压力稳定与管道安全

高层住宅由于居民户数多、日常生活用水量大，其排水系统具有管道垂直延伸距离长、排水流量大的显著特点。这一特点极易导致排水管道内部产生剧烈的气压波动，对系统的稳定运行构成威胁。为了保障排水通畅并有效防止水封破坏，避免有害气体侵入室



内,必须着力提升整个给排水系统的综合排水与稳压能力。在工程设计与选型上,可采取设置专用通气管或直接采用排水与通气功能合一的新型单立管排水系统等先进方案,以平衡管道内的空气压力。同时,在管材选择上,应优先选用机械强度高、耐腐蚀性能好的新型复合材料管道,并广泛采用柔性接口连接方式<sup>[1]</sup>。

### （三）高层建筑管线综合布局：协调空间与功能的精密设计

高层建筑在追求空间利用率最大化的同时,也对其内部的各项建筑指标提出了更为严苛的要求。在有限的建筑空间内,除了给排水管道,还密集布设着暖通、电气、燃气等多种管线,这使得管线综合布局成为一项复杂的系统工程。若设计不当,不仅会因管道内部压力过大或与建筑结构、装饰层产生冲突而引发管道变形、接头渗漏等问题,更会严重影响建筑的正常使用功能与安全耐久性。因此,在规划设计初期,就必须运用建筑信息模型(BIM)等技术进行精密的空间协调与碰撞检测,对所有管线进行一体化、集约化的合理规划。通过精确控制管线的走向、标高与安装空间,确保其与建筑结构及室内装修和谐共处,从根本上预防潜在的运行故障与安全隐患,实现建筑使用功能、结构安全与后期维护便利性的高度统一。

## 二、高层住宅小区给排水设计的部分问题

### （一）高层建筑给水系统的核心挑战与内在复杂性

高层建筑给水系统是一个由多个专业子系统构成的复杂有机体,其设计核心在于解决由建筑高度带来的独特挑战,确保供水安全、稳定与经济。

#### 1. 子系统协同与加压系统的核心作用

该系统的有效运作依赖于加压、输配管道、用户引入、参数调控、热水制备、储水及计量等多个子系统的精密整合与协同配合。在其中,加压系统扮演着“心脏”般的核心角色,其功能在于构建并维持一个稳定而适宜的供水压力环境。这一环境需达成双重目标:一方面,必须为水流提供足够的动能,以克服重力与管道阻力,确保其能被可靠地输送至每一个用户终端;另一方面,又必须精确设定压力上限,从根本上杜绝因压力过高导致卫生器具出现“超压出流”而引发的水资源隐性浪费<sup>[2]</sup>。

#### 2. 竖向压力失衡与水力计算难点

高层建筑巨大的垂直延伸性,使得理想压力环境的构建面临严峻挑战。建筑内部沿高度方向的不同标高区域,存在着截然不同的水压条件。对于位于系统中“不利点”(如最高层或管道几何末端)的用户而言,其所需的服务水头与低区用户存在显著差异。若在设计阶段的水力计算与竖向分区规划中,未能精准考量并妥善处理这种由高度差引起的压力梯度变化,将直接导致系统中远端或高区用户面临水压不稳、流量不足甚至间歇性断流的水窘境。

#### 3. 管网验证缺失与设备运行干扰

当前设计实践中的一个普遍薄弱环节,在于对给水管网本身的性能验证关注不足。设计人员常常忽视对管道接口的密封可靠性、材料承压强度及支架牢固性等关键指标提出明确的试验性检

测要求。这一疏忽导致在施工及验收阶段缺乏强制性规范依据,来执行系统性的管道压力测试与评估,从而形成一个关键的数据盲区:即无法在系统投入运行前,确切断定其管网架构是否真正具备满足顶层及高压区用户长期、稳定用水需求的物理承载能力与密封完整性。此外,作为加压系统的动力源,水泵机组运行时产生的结构振动与低频噪声,会通过建筑基体与管线进行传播,这种持续的物理干扰已成为破坏居住安宁、影响生活品质并常常引发居民投诉的焦点问题。

### （二）高层建筑排水系统设计中的材料应用与关键挑战

在高层建筑排水系统的演进过程中,管材选择经历了从金属制品到合成材料的重大转变。早期普遍采用的镀锌钢管因其金属特性存在固有缺陷,在长期接触水及空气的情况下容易发生电化学腐蚀,导致管道内壁锈蚀、有效通径减小且使用寿命显著缩短。这一现状促使工程领域广泛采用新型塑料排水管作为替代方案,该类管材不仅成功克服了传统材料易锈蚀的弱点,更展现出密度小、质量轻、连接工艺简便、耐化学腐蚀性能优异及水力摩阻系数小等综合优势。随着当代居住标准的不断提升,空调设备已成为住宅的基本配置,其运行过程中产生的凝结水排放需求构成了新的设计挑战。若在排水系统规划阶段未能充分考虑冷凝水的有组织收集与排放路径,极易因无序排水引发相邻住户间的矛盾。与此同时,卫生器具与排水管道的配置协调性亦构成系统设计另一难点,市场上坐便器等设备存在下排水与横排水等不同排放方式,对应所需的管道接口规格与敷设要求存在差异。当设计图纸对卫生器具选型及其定位表达不够明确时,施工现场可能出现排水管口预埋位置与实际安装需求不匹配的情况,此类偏差会直接限制卫生间的空间布局选择,最终可能迫使住户调整原有的卫浴设计方案<sup>[3]</sup>。

### （三）消防系统设计的技术难点

高层住宅消防系统通常选用湿式自动喷水灭火方案。考虑到建筑未配置中央空调系统,设计按中危险级标准,在单元入口及公共区域设置喷淋装置。虽然系统设计流量较小,但管道长期充水的特点对防腐提出更高要求,故采用热镀锌钢管作为主管材。报警阀前设置的过滤器允许前端管道采用非降解钢管,而系统管道连接本应采用沟槽连接,但因造价因素,现场多采用螺纹与法兰的混合连接方式。施工中常出现因机电配合不当导致的安装缺陷,加之供电保障不足,影响系统正常运行。根据规范要求,系统需在报警阀组入口、各防火分区及楼层最不利点设置试水装置。然而这些检测设施占用空间较大,在常规吊顶内难以妥善安置,且需考虑排水需求,导致实际安装位置往往不尽理想。

## 三、简述高层住宅小区给排水设计的一些对策

### （一）高层建筑给水系统优化设计策略

#### 1. 科学规划增压系统

增压设备是决定给水系统效能的核心要素,其配置方案直接影响建筑各区域的供水稳定性,特别是对顶层及压力敏感区域的用户用水体验具有决定性作用。在设计过程中,若系统压力超过

额定范围,将导致管网承压过大,引发管道接口渗漏、阀门损坏等问题,显著缩短设备使用寿命;反之,若供水压力不足,则难以满足高峰时段的用水需求,甚至可能引发排水系统气塞等现象。因此,设计人员需在方案阶段精确核算建筑高度、用水点位分布及峰值流量等参数,通过水力计算确定合理的压力分区,确保系统压力始终维持在最佳工作区间。

### 2. 创新设备选型与降噪措施

现代给水系统通过采用智能变频供水设备取代传统增压装置,实现了能效与可靠性的双重提升。这类设备通过实时监测管网压力变化,自动调节水泵运行频率,既避免了能源浪费,又显著延长了设备服役周期。针对水泵运行产生的噪声问题,需从源头控制与传播阻断两方面着手:严格规定泵房必须独立设置,严禁与居住空间相邻(包括上下层及水平毗邻位置),生活水泵、循环泵及消防稳压装置均应避开住宅区域布局。同时在管道敷设路径及设备机房内应用高性能隔音材料,有效抑制振动传播与噪声干扰<sup>[4]</sup>。

### 3. 系统化静音防护体系

构建完整的降噪防护体系需要多专业协同配合。在建筑布局阶段就应合理规划设备机房位置,确保其与居住区域保持足够缓冲距离。对于必须穿越住宅区域的给水管道,应采用柔性支吊架系统并包裹复合隔音材料,重点处理管道穿墙部位的密封隔振。此外,建议在泵房内墙面安装吸声结构,设备基础设置减震支座,通过多层次防护措施最大限度降低设备运行对居住环境的影响,最终实现声环境质量与供水品质的同步提升。

## (二) 高层建筑排水系统优化设计策略

在高层建筑排水系统设计中,优先选用具备良好声学性能的U-PVC芯层发泡管和螺旋管等新型降噪管材,可显著改善排水过程中的噪音控制效果。在管道布置方案中,应充分考虑建筑功能分区特点,使排水主管远离卧室、书房等需要安静环境的房间,通过合理的空间布局实现噪音防护的最优化。当前普遍采用的聚氯乙烯管道系统因其内壁光滑、不易结垢且耐化学腐蚀等特性,在长期使用中展现出显著优势。在系统架构设计方面,建议

采用分区排水方案,低区充分利用市政管网压力直接排水,高区则通过增压设备保障排放效率。同时,应建立完整的污废分流体系,将生活污水、废水与雨水纳入独立的收集处理系统,其中厨房与卫生间宜采用同层排水设计,空调冷凝水则需设置独立管道系统。在节能方面,可通过选用节水型卫生器具、合理利用市政管网余压、结合太阳能等可再生能源应用等综合措施,实现排水系统运行效率与可持续发展要求的统一。

### (三) 消防系统优化设计方案

在区域消防系统规划中,采用临时高压供水体系,通过设置统一的消防泵组为区域内各建筑提供消防用水。各建筑外围敷设环状消防管网,并接入建筑内部形成环状供水系统,实现整体供水与消防系统的有效整合。生活供水系统采用集中泵房与分区变频供水相结合的方式,通过优化水泵运行策略有效控制设备能耗,同时保障各区域用户的正常用水需求。区域消防系统配置共用的消防水箱及压力夹持装置,配合减压阀组实现全域持续供水,显著降低设备投入成本。在建筑排水系统方面,推广采用降板同层排水技术,该成熟工法能确保排水支管在本层空间内完成敷设,避免对下层使用空间造成影响,有效提升住宅空间的适用性与维护便利性<sup>[5]</sup>。

## 四、结束语

排水系统需重点关注管材的耐腐蚀性与降噪性能,通过新型塑料管道的应用、同层排水技术的推广以及完善的污废分流体系,确保排水通畅性并减少对居住环境的干扰。消防系统设计应立足于"主动自救"原则,通过湿式自动喷水系统、环状供水网络以及合理的试水装置布置,构建可靠的内部防火体系。未来,随着建筑信息模型技术的深入应用和智能化控制技术的发展,高层住宅给排水及消防系统将朝着更精准、高效、可靠的方向持续优化,为居民创造更安全、舒适的居住环境,同时实现资源节约与环境保护的双重目标。

## 参考文献

- [1] 王皓,王盾. 高层住宅建筑给排水系统设计与施工技术探讨[J]. 模型世界, 2025(13): 178-180.
- [2] 艾景. 超高层住宅建筑消防给排水系统设计探讨[J]. 建筑与装饰, 2021(7): 8.
- [3] 杨硕. 关于高层住宅建筑给排水消防设计的几点体会[J]. 建筑与装饰, 2021(8): 7, 9.
- [4] 陈延维. 高层住宅建筑给排水设计要点浅析[J]. 石油化工建设, 2022, 44(5): 149-151.
- [5] 江勋,卿翔,王岐桂. 超高层住宅建筑消防给排水系统设计研究[J]. 建筑·建材·装饰, 2022(8): 83-85.

# 配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱延性系数模拟研究

董勃

江苏建研建设工程质量安全鉴定有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2025120042

**摘 要 :** 基于 OpenSees 非线性有限元平台, 模拟了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱延性系数。首先, 运用迭代算法得到核心区混凝土的峰值应力及应变从而间接考虑箍筋对核心区混凝土的约束作用, 在此基础上建立的有限元模型取得了较好的模拟效果。然后, 设计了 4 组混凝土柱构件, 通过该模型模拟柱的延性系数, 研究了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱抗震性能。研究表明: 1) 在箍筋的体积配箍率合适时, HTRB600 高强箍筋能有效提高混凝土柱的延性。高强混凝土强度高、延性差, 配置 HTRB600 高强箍筋是保证其延性的有效措施。2) 规范中通过密配井字复合箍来提高柱轴压比限值的措施, 对于 HTRB600 箍筋仍然适用。在**高强混凝土柱中密配 HTRB600 井字复合箍, 具有更高的性价比。**

**关 键 词 :** HTRB600 高强箍筋; 延性系数; OpenSees; 高强混凝土; 轴压比限值

## Simulation Study on Ductility Coefficient of Concrete Columns Reinforced with HTRB600 High-Strength Stirrups

Dong Bo

Jiangsu Jianyan Construction Engineering Quality and Safety Appraisal Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract :** Based on the OpenSees nonlinear FE platform, the ductility coefficient of concrete columns reinforced with HTRB600 high-strength stirrups was simulated. Firstly, an iterative algorithm was used to obtain peak strength and strain of core concrete, which indirectly considering the constraint effect of stirrups. Based on this, a FE model which achieved appropriate simulation results was established. Then, four sets of concrete columns were designed. Based on the model, the ductility coefficient of the columns was simulated and the seismic performance of concrete columns reinforced with HTRB600 high-strength stirrups was studied. Research has shown that: 1) HTRB600 high-strength stirrups can significantly improve the ductility of concrete columns on the condition of appropriate volume ratio of stirrups. The utilization of HTRB600 high-strength stirrups is an effective measure to improve the ductility of high-strength concrete, which has high strength and poor ductility. 2) The measure of utilizing dense cross-shaped composite hoops, by which the limit value of axial compression ratio of column improved, is applicable to HTRB600 stirrups. Utilizing dense cross-shaped composite hoops of HTRB600 is comparatively effective to reinforce high-strength concrete.

**Keywords :** HTRB600 high-strength stirrups; ductility coefficient; OpenSees; high-strength concrete; limit value of axial compression ratio

## 引言

我国的混凝土结构设计规范在版本修订和升级的过程中逐渐增加了有关**高强钢筋**的内容。1996 年《混凝土结构设计规范》局部修订中首次列入了 400MPa 级**高强钢筋**; 2002 年的《混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup> 倡导将 HRB400 钢筋作为主力钢筋使用; 2010 版《混凝土结构设计规范》<sup>[2]</sup> 也已列入 500MPa 级**高强钢筋**, 其抗拉强度设计值为 435MPa。2016 年的江苏省地方标准《热处理带肋**高强钢筋**混凝土结构技术规程》DGJ32/TJ 202-2016<sup>[3]</sup>, 列入了 600MPa 级**高强钢筋**, 其钢筋牌号为 HTRB600 和 HTRB600E, 抗拉强度设计值为 520MPa。该标准从钢筋材料性能、结构分析和极限状态计算、构造规定等方面针对 600MPa 级**钢筋**在混凝土结构中的运用做出了规定。

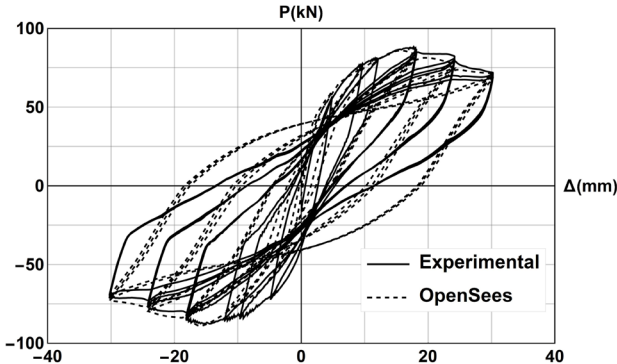
针对配置 HTRB600 高强钢筋的混凝土柱抗震性能, 国内的研究方向主要是通过拟静力试验来测试其滞回曲线, 从骨架曲线、强度与刚度退化、延性与耗能能力等参数, 比较其与配置普通钢筋的混凝土柱抗震性能。研究大多针对 HTRB600 高强钢筋用作柱的纵筋, 对于将其用作柱箍筋的研究尚不多。本文基于 OpenSees 非线性有限元平台, 应用文献<sup>[4]</sup> 中的方法建立有限元模型, 以延性系数作为主要指标, 研究配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱的抗震性能。



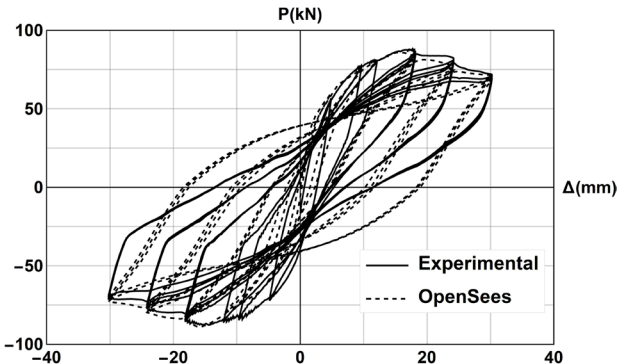
## 一、基于 OpenSees 的有限元模型

### (一) 数值模型

文献<sup>[4]</sup>中建立的数值模型基于 OpenSees 非线性有限元分析平台,由1个零长度剪切弹簧单元、8个非线性梁柱单元和1个零长度转动弹簧单元串联组成,综合考虑了柱底塑性铰区钢筋的黏结-滑移效应和构件的剪切变形,采用与实验相同的加载路径,模拟了柱顶侧向力-侧向位移的滞回曲线。图1给出了 OpenSees 数值模型与进行拟静力实验测得的滞回曲线对比,验证了该模型对于模拟配置高强钢筋的混凝土柱滞回曲线具有较好的准确性。



(a) 试件 Z3 的模拟滞回曲线与实测曲线对比



(b) 试件 Z9 的模拟滞回曲线与实测曲线对比

图1 数值模型与实验测得的滞回曲线对比<sup>[4]</sup>

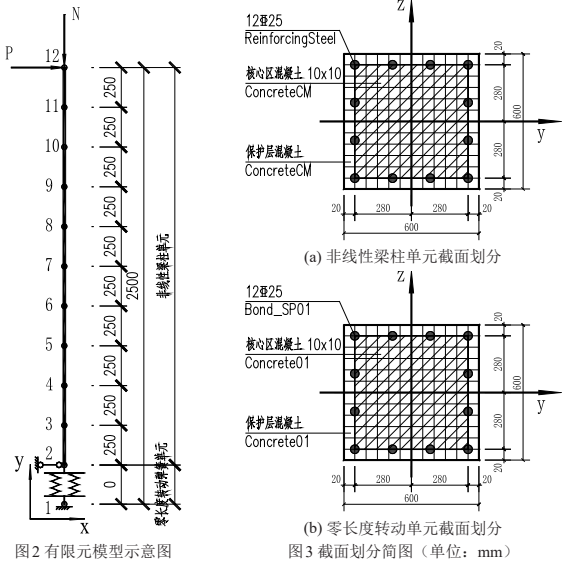


图2 有限元模型示意图

图3 截面划分简图 (单位: mm)

在此基础上,本文根据构件的尺寸、配筋建立的有限元模型见图2。从柱底向上,分别是1个零长度转动弹簧单元和10个非线性梁柱单元。每个非线性梁柱单元有4个积分截面,每个截面纤维的划分如图3(a)所示。核心区混凝土划分为10x10共100个纤维,材料采用 ConcreteCM 模型,其本构关系按文献中的方法采用迭代算法计算出约束混凝土的相关参数;保护层混凝土位于核心区混凝土纤维周边,共划分为44个纤维,材料采用 ConcreteCM 模型,其本构关系为无约束的混凝土参数;柱中的钢筋采用 Reinforcing Steel 材料模拟。柱底设置的零长度转动弹簧单元,目的是模拟塑性铰区的转动变形,其截面划分如图3(b)所示,截面划分数量与非线性梁柱单元相同,区别在于钢筋用 Bond\_SP01 材料代替。

### (二) 模型相关参数

本文模拟的钢筋混凝土柱,其混凝土强度等级为 C40 和 C60,保护层混凝土材料的本构关系根据《混凝土结构设计规范(2015年版)》GB50010-2010 附录 C 中的规定取值,强度均采用标准值,其主要参数如表1所示。根据文献中介绍的迭代算法,通过提高核心区混凝土的抗压强度及其对应应变从而间接考虑箍筋对核心区混凝土的约束作用,其主要参数如表2所示。

本文模拟的混凝土柱纵筋均为 HTRB600 钢筋,其屈服强度、极限强度按江苏省地方标准《热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程》DGJ32/TJ 202-2016中给定,且均采用标准值,其主要参数如表3所示。表3中给出的屈服时钢筋滑移量  $S_y$  和破坏时滑移量  $S_u$  两个参数,为零长度转动弹簧单元中采用的 Bond\_SP01 材料参数,本文根据文献<sup>[5]</sup>在大量拉拔试验数据的基础上给出的拟合公式计算得出。

模型首先进行柱顶轴力  $N$  的加载,通过改变  $N$  的大小来模拟不同的轴压比。轴力加载完毕后,通过在图2中的12节点处施加水平位移  $\Delta$  进行加载,同时记录12节点的横向恢复力  $P$  来获得柱顶力-位移曲线。根据  $P-\Delta$  曲线,采用延性系数  $\mu$  来定量评估试件的抗震性能,其计算公式如下:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

其中,  $\Delta_u$  为极限位移,取为承载力下降至最大荷载的85%时对应的位移;

$\Delta_y$  为屈服位移,如图4所示,过零点做一条割线 OA 使图中两块阴影部分的面积  $S_1=S_2$ ,割线与过  $P_{max}$  点的水平线的交点 A 所对应的位移值。

表1 保护层混凝土参数

混凝土等级	抗压强度 $f_{pc}$ (MPa)	抗压强度对应应变 $e_{pc}$ ( $\times 10^{-6}$ )	初始切线模量 $E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)	抗拉强度 $f_t$ (MPa)	抗拉强度对应应变 $e_t$ ( $\times 10^{-6}$ )	形状参数 $r_c$	形状参数 $r_t$
C40	26.8	1588.8	3.25	2.39	104.36	3.254	3.254
C60	38.5	1769.0	3.60	2.85	114.70	5.504	5.504



表2 核心区混凝土参数

混凝土等级	箍筋 $A_{sv}$	峰值应力时箍筋应力 $f_{hcc}$ (MPa)	有效侧向约束应力 $f_{lc}$ (MPa)	峰值应力 $f_{cc}$ (MPa)	强度提高比率 $f_{cc}/f_{c0}$	形状参数 $r_c$
C40	C8@100(4)	310.99	0.794	33.44	1.25	1.4378
	D8@100(4)	316.57	0.808	33.49	1.25	1.4330
	C10@100(4)	394.01	1.580	35.91	1.34	1.2763
	D10@100(4)	570.46	2.288	37.60	1.40	1.2110
	C12@100(4)	399.61	2.325	37.68	1.41	1.2085
	D12@100(4)	598.60	3.482	39.90	1.49	1.1537
C60	C8@100(4)	279.15	0.712	46.18	1.20	1.8851
	D8@100(4)	281.05	0.717	46.20	1.20	1.8814
	C10@100(4)	377.83	1.515	49.37	1.28	1.5267
	D10@100(4)	462.64	1.855	50.43	1.31	1.4525
	C12@100(4)	398.16	2.316	51.71	1.34	1.3321
	D12@100(4)	591.51	3.441	54.35	1.41	1.2457

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

表3 钢筋材料参数、黏结-滑移 Bond\_SP01 材料参数

钢筋等级	直径 $d_b$ (mm)	屈服强度 $f_y$ (MPa)	极限强度 $f_u$ (MPa)	初始弹性模量 $E_s$ (GPa)	强化起始点模量 $E_{sh}$ (GPa)	强化起始点应变 $e_{sh}$ ( $\times 10^{-3}$ )	峰值应变 $e_{ul}$ ( $\times 10^{-3}$ )	屈服时滑移量 $S_y$ (mm)	破坏时滑移量 $S_u$ (mm)
600	25	600	750	200	9.59*	12.38*	89.64*	0.8252	28.8830

注：其中 \* 标注的数据为文献<sup>[4]</sup>根据 HTRB600 钢筋的抗拉强度试验所得的实测数据。

限值柱的轴压比上限是保证其具有必要的延性的重要措施。

2. 配筋和轴压比相同时，混凝土柱的延性系数随混凝土强度等级的提高而减小。混凝土等级从 C40 提高到 C60，柱的延性系数下降 21%~37%。高强混凝土强度高、延性差，需要采取更严格的措施来保证其延性，配置 HTRB600 高强箍筋是措施之一。

3. 箍筋等级从 HRB400 提高至 HTRB600，混凝土柱的延性系数提高程度不一。当箍筋体积配箍率不高（如表中 0.75%）时，延性系数的提高程度小于 1%；随着体积配箍率提高（如表中 1.19%），延性系数提高约 10%~40%。其中对于 C40 混凝土柱，延性系数提高幅度在 30% 以上；对于 C60 混凝土柱，延性系数提高幅度在 10% 以上。

由表 2 可知，箍筋的体积配箍率不高（如箍筋直径为 8）时，HRB400 和 HTRB600 箍筋的抗拉强度均未有效发挥，混凝土达到峰值应力时箍筋应力约 280MPa~315MPa，低于钢筋的屈服强度，此时即使采用 HTRB600 箍筋，其提供的侧向约束应力也未有明显提高。当箍筋直径增加至 10 后，HRB400 箍筋应力约 380MPa~395MPa，HTRB600 箍筋应力约 460MPa~570MPa，接近两种钢筋的屈服强度，此时 HTRB600 箍筋强度高的优势得以体现。因此，在体积配箍率合适时，HTRB600 高强箍筋能有效提高混凝土柱的延性。

## 二、结果分析与讨论

### （一）配置 HTRB600 与 HRB400 箍筋的柱延性系数对比

《混凝土结构设计规范（2015 年版）》GB50010-2010 规定，柱受剪承载力计算时柱箍筋的抗拉强度设计值不大于 360MPa，即其他因素相同时，将柱的箍筋等级由 HRB400 提高至 HTRB600 对于柱的受剪承载力计算值并没有提高。规范的受剪承载力计算采用弹性设计，在中大震下进入弹塑性阶段后，配置 HTRB600 高强箍筋能否提高混凝土柱的抗震性能，其提高的幅度有多大仍待研究。

本节设计了两组混凝土柱试件，分别采用普通混凝土（C40）和高强混凝土（C60）。柱截面均为 600×600mm，柱高 2.5m，剪跨比 4.42，钢筋保护层厚度 20mm。将轴压比和箍筋强度作为变量，用上文建立的有限元模型模拟试件的 P- $\Delta$  曲线，并计算出延性系数，两组试件的配筋情况及延性系数模拟结果见表 4、表 5 所示。对比分析及结论如下：

1. 配筋相同时，混凝土柱的延性系数随轴压比增大而减小。轴压比从 0.50 提高到 0.75，柱的延性系数下降 10%~27%。因此，

表4 配置 HTRB600 与 HRB400 箍筋的柱延性系数对比（混凝土等级 C40）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 $A_s$	纵筋配筋率 $\rho$ (%)	箍筋配置 $A_{sv}$	箍筋体积配箍率 $\rho_{sv}$ (%)	延性系数模拟结果	延性系数提高 (%)
1	0.50	3438	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	3.193
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.218
2	0.60	4126	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	7.279
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.043
3	0.65	4469	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	5.872
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.973
							2.973	0.78
							4.332	5.608
								29.46

4	0.70	4813	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.881	2.903	0.76
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.210	5.434	29.07
5	0.75	5157	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.832	2.846	0.49
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.101	5.307	29.41

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

表5 配置 HTRB600 与 HRB400 箍筋的柱延性系数对比（混凝土等级 C60）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A <sub>s</sub>	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A <sub>sv</sub>	箍筋体积配筋率 ρ <sub>sv</sub> (%)	延性系数 模拟结果	延性系数 提高 (%)		
1	0.50	4950	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.480	2.487	0.28
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.709	4.564	23.05
2	0.60	5940	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.341	2.347	0.26
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.329	3.819	14.72
3	0.65	6435	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.283	2.289	0.26
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.224	3.638	12.84
4	0.70	6930	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.254	2.260	0.27
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.130	3.492	11.57
5	0.75	7425	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.235	2.241	0.27
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.052	3.398	11.34

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

## （二）轴压比限值下密配 HTRB600 井字复合箍的柱延性系数

《混凝土结构设计规范（2015年版）》GB50010-2010 规定，当沿柱全高采用密配井字复合箍（箍筋间距不大于 100mm、肢距不大于 200mm、直径不小于 12mm）时，轴压比限值可增加 0.10。为了研究按规范的上述要求密配 HTRB600 井字复合箍的混凝土柱的抗震性能，本节设计了普通混凝土（C40）和高强混凝土（C60）两组试件，模拟并比较了密配 HTRB600 井字复合箍且轴压比限值增加 0.10 后柱的延性系数。两组试件的配筋情况及延性系数模拟结果详表 6、表 7 所示。对比分析及结论如下：

表6 轴压比限值下密配井字复合箍的混凝土柱延性系数（混凝土等级 C40）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A <sub>s</sub>	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A <sub>sv</sub>	箍筋配筋率 ρ <sub>sv</sub> (%)	延性系数		延性系数 提高 (%)		
1	0.65	4469	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.332	5.608	24.08	45.22
	0.75	5157			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	5.375	8.144		
2	0.75	5157	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.101	5.307	18.29	32.84
	0.85	5845			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	4.851	7.050		
3	0.85	5845	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.702	4.799	12.64	20.13
	0.95	6532			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	4.170	5.765		
4	0.90	6188	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.451	4.475	9.01	12.85
	1.00	6876			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.762	5.050		
5	0.95	6532	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.214	4.126	4.32	5.26
	1.05	7220			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.353	4.343		

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

表7 轴压比限值下密配井字复合箍的混凝土柱延性系数（混凝土等级 C60）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A <sub>s</sub>	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A <sub>sv</sub>		箍筋配筋率 ρ <sub>sv</sub> (%)	延性系数		延性系数 提高 (%)	
1	0.65	6435	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.224	3.638	32.23	59.87
	0.75	7425			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	4.263	5.816		
2	0.75	7425	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.052	3.398	27.20	53.88
	0.85	8415			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.882	5.229		

3	0.85	8415	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.858	3.198	14.42	39.56
	0.95	9405			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.270	4.463		
4	0.90	8910	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.722	3.023	9.74	28.81
	1.00	9900			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	2.987	3.894		
5	0.95	9405	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.564	2.806	8.42	21.95
	1.05	10395			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	2.780	3.422		

注：表中C表示HRB400级钢筋，D表示HTRB600级钢筋。

3. 密配 HTRB600 井字复合箍对柱延性系数的提高幅度随混凝土等级提高而增大。混凝土等级 C40 时，密配 HTRB600 箍筋对延性系数提高的百分数约为 5%~45%；混凝土等级 C60 时，该百分数约为 22%~60%。与普通混凝土柱相比，在 高强混凝土柱中采用密配 HTRB600 井字复合箍以提高其轴压比限值，具有更高的性价比。

三、结语

本文基于 OpenSees 有限元平台，建立了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱数值模型。设计了 4 组构件，通过数值模拟构件的

延性系数来量化构件的抗震性能，研究了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱抗震性能。结果表明：

- 1. 建立的非线性有限元模型，运用迭代算法得到核心区混凝土的峰值应力及应变从而间接考虑箍筋对核心区混凝土的约束作用。与实测滞回曲线对比，模拟效果较好。
- 2. 在箍筋的体积配箍率合适时，HTRB600 高强箍筋能有效提高混凝土柱的延性。高强混凝土强度高、延性差，配置 HTRB600 级高强箍筋是保证其延性的有效措施。
- 3. 规范中通过密配井字复合箍来提高柱轴压比限值的措施，对于 HTRB600 箍筋仍然适用。在 高强混凝土柱中密配 HTRB600 井字复合箍，具有更高的性价比。

参考文献

[1] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 GB50010-2002[S]. 中国建筑工业出版社, 2002.  
[2] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 GB50010-2010(2015年版)[S]. 中国建筑工业出版社, 2016.  
[3] 江苏天舜金属材料集团有限公司, 东南大学土木工程学院. 苏 DGJ32/TJ 202-2016 热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程 [S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2016.  
[4] 董勃. 配置 HTRB600 级高强钢筋的混凝土柱抗震性能研究 [D]. 东南大学, 2018.  
[5] Zhao J, Sritharan S. Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures[J]. Aci Structural Journal, 2007, 104(2):133-141.

# 基于压力感应的智能交通信号灯系统设计与应用研究

路艳玲, 吴峰\*, 申浩

莱芜职业技术学院, 山东 济南 271100

DOI:10.61369/ERA.2025120015

**摘 要 :** 随着我国城市化进程的快速推进, 机动车保有量持续攀升, 城市交通拥堵问题日益严峻。传统的交通信号控制系统采用固定时序或简单自适应控制策略, 难以应对复杂多变的交通流量变化, 导致路口通行效率低下、车辆延误增加、能源浪费严重。本文提出了一种基于压力感应的智能交通信号灯系统创新设计方案, 通过实时检测路面车辆重量及数量分布, 运用多参数融合决策算法动态调整信号灯配时方案。系统采用高灵敏度压力敏感电阻阵列作为信息采集终端, 结合西门子 S7-200 PLC Smart 控制器构建分布式控制系统, 实现了"吨位优先"和"动态调时"的智能交通管控模式。实验数据表明, 该系统可使路口通行效率提升 35% 以上, 大型车辆平均延误时间减少 42%, 具有显著的社会经济效益和广阔的推广应用前景。

**关 键 词 :** 智能交通控制; 压力传感网络; PLC 控制; 动态配时优化; 拥堵治理

## Research on the Design and Application of Intelligent Traffic Signal Light System Based on Pressure Sensing

Lu Yanling, Wu Feng\*, Shen Hao

Laiwu Vocational and Technical College, Jinan, Shandong 271100

**Abstract :** With the rapid advancement of urbanization in China, the number of motor vehicles continues to rise, making urban traffic congestion an increasingly serious issue. Traditional traffic signal control systems, which employ fixed timing or simple adaptive control strategies, struggle to cope with the complex and ever-changing traffic flow, resulting in low intersection efficiency, increased vehicle delays, and significant energy waste. This paper proposes an innovative design for an intelligent traffic signal light system based on pressure sensing. By detecting the weight and quantity distribution of vehicles on the road in real time and employing a multi-parameter fusion decision-making algorithm, the system dynamically adjusts the signal timing plan. Utilizing a high-sensitivity pressure-sensitive resistor array as the information collection terminal and combining it with a Siemens S7-200 PLC Smart controller, the system constructs a distributed control system that achieves an intelligent traffic management mode featuring "tonnage priority" and "dynamic timing adjustment." Experimental data indicate that the system can improve intersection efficiency by over 35% and reduce the average delay time for large vehicles by 42%, demonstrating significant socio-economic benefits and broad prospects for promotion and application.

**Keywords :** intelligent traffic control; pressure sensing network; PLC control; dynamic timing optimization; congestion management

## 引言

### (一) 研究背景

城市交通拥堵已成为制约现代城市可持续发展的重大挑战。根据交通运输部 2023 年统计数据显示, 我国城市道路拥堵造成的经济损失已超过 GDP 的 2%, 其中信号控制不合理导致的无效等待占比高达 38%。传统信号控制系统主要存在三大技术瓶颈: 一是检测手段单一, 大多采用环形线圈或视频检测, 无法获取车辆重量信息; 二是控制策略僵化, 难以适应突发交通流变化; 三是系统响应滞后, 无法实现真正的实时优化。

当前城市交通信号控制系统主要面临以下几个突出问题:

基金项目: 莱芜职业技术学院横向课题 (吨位优先的交通信号灯 课题编号 2024hxky137)

作者简介:

路艳玲 (1992.07-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 新能源汽车技术;

申浩 (1989.03-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 智能网联汽车技术研究。

通讯作者: 吴峰 (1967.07-), 男, 山东济南人, 本科, 副教授, 研究方向: 电工电子技术研究。



首先，检测维度单一。现有系统多基于车辆存在检测（如环形线圈、视频检测等），仅能获取车辆通过与否的二元信息，无法区分车辆类型和重量，导致控制系统无法实现“吨位优先”的智能决策。重型车辆（如货车、公交车）的频繁启停不仅加剧燃油消耗和尾气排放，还容易引发安全隐患<sup>[1]</sup>。

其次，控制策略适应性差。传统定时控制信号灯无法根据实时交通流变化调整配时方案，即使采用感应控制方式，也因缺乏多维度交通参数而难以做出最优决策。研究表明，在交通压力较大的情况下，优化算法可以显著提高信号灯的控制性能，平均延误时间可以降低40%以上，交通效率可以提高30%以上<sup>[2]</sup>。

第三，系统响应速度慢。现有系统从检测到执行往往存在较大时间延迟，无法满足动态交通环境下实时控制的需求。特别是在早晚高峰期间，交通流变化迅速，要求控制系统必须具备毫秒级的响应能力才能实现精准调控<sup>[3]</sup>。

基于上述问题，本研究提出了一种基于压力感应的智能交通信号灯系统，该系统具有以下多维度检测能力、实时动态响应、自适应优化算法、节能环保优势。通过多参数融合的交通控制模型，突破了传统单维度检测的局限。

## （二）国内外研究现状

### 1. 国外研究现状

国际上对智能交通信号控制系统的研究起步较早，形成了多个具有代表性的技术流派。英国南安普敦大学的 Wen-Hua Chen 等人针对城市交通信号灯控制中存在的问题，提出了多目标遗传算法来优化信号灯的控制方式。研究结果表明，在交通压力较大的情况下，该算法可以显著提高信号灯的控制性能。美国开发的 ACS-Lite 系统采用视频检测技术作为主要感知手段，通过计算机视觉算法识别车辆排队长度和速度，进而调整信号配时。然而，这类系统受光照条件影响较大，在夜间或恶劣天气下性能下降明显。

欧洲国家普遍采用的 SCOOT（Split, Cycle and Offset Optimization Technique）系统基于地磁感应技术，通过埋设在路面下的感应线圈检测车辆通过情况。虽然检测精度较高，但安装和维护成本高昂，且施工时需要破坏路面，影响了其推广价值。德国学者则侧重于车路协同技术研究，通过车载设备与信号控制系统的直接通信，实现精准的绿灯窗口预测和速度引导，但这种方案依赖于车辆装备率，短期内难以大规模应用。

日本在交通信号控制领域独树一帜，开发了 UTMS(Universal Traffic Management System) 系统，将信号控制与公交优先、紧急车辆通行等特殊需求相结合，形成了较为完善的智能交通管理体系。

近年来，国外学者开始探索机器学习在交通信号控制中的应用。MIT 的研究团队利用深度强化学习算法，通过模拟城市交通环境训练神经网络控制器，在虚拟测试中取得了优于传统方法的控制效果。然而，这类算法对计算资源要求高，实时性难以保证，仍处于实验室研究阶段。

### 2. 国内研究现状

我国智能交通信号控制系统的研究虽然起步较晚，但发展迅速，形成了具有中国特色的技术路线。华南理工大学王健研究组提出了基于遗传算法的智能交通信号灯控制系统。该系统采用遗传算法优化交通信号灯控制时序，结果表明，在高峰交通流量的情况下，平均延误时间可以降低40%以上，交通效率可以提高30%以上<sup>[4]</sup>。

北京交通大学团队开发了视频与地磁融合的检测方案，通过多传感器数据互补提高检测精度，在北京市多个路口得到应用。该系统虽然性能稳定，但成本较高，且无法获取车辆重量信息。浙江大学则专注于公交信号优先技术研究，通过 RFID 识别公交车辆，动态调整信号相位，确保公交车的优先通行权。但该系统存在隐私泄露风险，且无法覆盖所有社会车辆。

在技术标准方面，我国已制定了较为完善的交通信号控制行业标准体系，包括 GB25280-2016《道路交通信号控制机》等多项国家标准，为智能信号灯的研发和应用提供了规范指导<sup>6</sup>。市场研究数据显示，2019年我国交通信号灯市场规模约为120亿元，预计到2025年将达到180亿元，年复合增长率约为8%，其中智能交通信号灯的市场份额从2018年的20%增长到2020年的30%。

表 1：国内外主要交通信号控制技术比较

技术类型	代表系统	优势	局限性	适用场景
视频检测	美国 ACS-Lite	非接触式、安装方便	受光照天气影响大	光照条件好的城市道路
地磁感应	欧洲 SCOOT	检测精度高	安装维护成本高	主干道、高流量路口
RFID 识别	国内公交优先系统	车辆识别准确	需车载设备、隐私问题	公交专用道
压力感应	本研究系统	多维度检测、成本低	路面施工要求高	各类城市路口
车路协同	德国 UTMS	控制精准	依赖车辆装备率	智能网联示范区

### 3. 现有技术局限性分析

通过对国内外研究现状的梳理，发现现有交通信号控制系统普遍存在以下技术瓶颈：

感知能力有限：现有检测手段（如视频、地磁、RFID 等）大多只能获取车辆存在与否的二元信息，缺乏对车辆重量、类型等多维度参数的感知能力，制约了控制策略的精细化程度<sup>[5]</sup>。

实时性不足，响应速度往往跟不上交通流变化节奏。

成本效益失衡，缺乏兼具高性能和低成本优势的解决方案。

扩展性受限，现有系统多针对特定场景设计，缺乏灵活可扩展的架构。

本研究通过创新性地采用压力感应技术，结合改进的控制算法和分布式系统架构，在检测维度、实时性能、成本控制和扩展能力等方面实现了突破，为城市交通管理提供更优解决方案。

## 一、系统总体设计

### (一) 系统架构

设计结构：一个压力敏感电阻，无压力时电阻无穷大，有压力时，电阻逐渐下降到大约600欧姆，将其串联一个2M 欧姆的定值电阻，接在10V 直流电源上，2M 定值电阻两端分别接出一根信号线，两根信号线接入西门子200PLCsmart 模拟量输入模块。以上装置制备两个，分别将其压力敏感电阻置于东西和南北路面下。

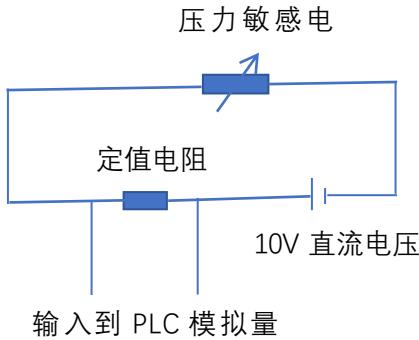


图1 系统结构

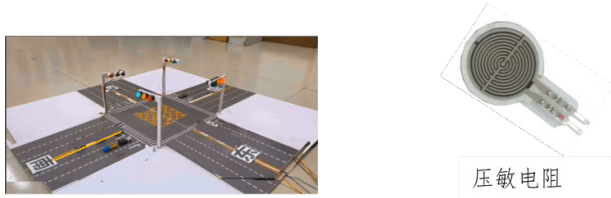


图2 交通信号灯系统实物图

### (二) 工作原理

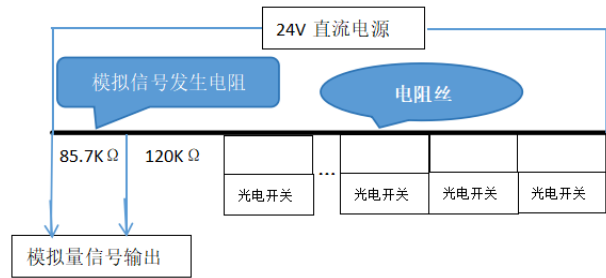


图3 车辆数量监测原理

光电开关根据东西和南北方向车辆的数量信息即时改变电阻丝的阻值，从而即时产生带有车辆数量信息的电信号，电信号即时传递给 PLC，PLC 即时逻辑判断，即时控制延长车辆较多方向的绿灯通行时间，或使其尽快获得通行权，从而即时缓解交通压力。

当车辆通过检测区域时，压力敏感电阻的阻值变化  $\Delta R$  与车

辆重量  $G$  满足：

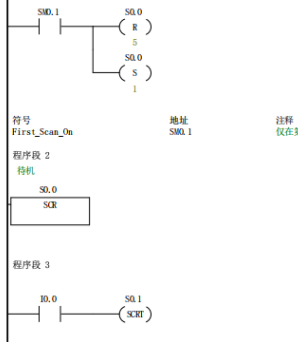
$$\Delta R = k \cdot G + C \quad (k \text{ 为灵敏度系数, } C \text{ 为补偿常量})$$

通过测量分压电路输出电压  $V_{out}$ ：

$$V_{out} = (R_0 / (R_0 + \Delta R)) \cdot V_{in}$$

PLC 采集各车道  $V_{out}$  值，经归一化处理后输入决策模型。

部分程序设计：



## 二、实验验证与分析

### (一) 测试环境搭建

在济南市莱芜文化路 - 龙潭大街交叉口建立试验平台；

测试周期：2024.9-2025.3；

采集数据量：超过50 万车次；

对比系统：SCATS 信号控制系统。

### (二) 性能指标对比

表2：性能测试参数

指标	本系统	SCATS 系统	提升幅度
通行能力 (pcu/h)	1850	1360	+36%
平均延误 (s)	28.5	49.2	-42%
停车次数	1.2	2.5	-52%

## 三、结论与展望

本研究成功验证了压力感应技术在智能交通控制领域的应用价值。利用车辆的重力信息作为判定车辆多少的依据，不仅获得了车辆数量信息也获得了车辆吨位信息，让大吨位的车辆先行，让车辆较多的方向车辆先行，缓解了交通压力，保护了路口车辆的安全。即时延长繁忙方向绿灯时间，或使其尽快获得通行权，有效缓解交通拥堵，环保节能，实用意义巨大。

市场前景：本设计结构简单，工作状态稳定，本设计采用200PLC smart，成本可控，交通路口成千上万，本设计有效解决交通拥堵，环保节能，推广应用前景广阔，经济效益和市场可观。

## 参考文献

- [1] 王笑京. 智能交通系统体系框架 [M]. 人民交通出版社, 2021.
- [2] 胡明伟, 吕品, 蔡金梅. 基于 PLC 的智能交通信号灯控制系统设计 [J]. 2022.45(18)
- [3] 乔志龙, 张军强. 多路交通信号灯状态监测系统的设计 [J]. 2015, 23(13)
- [4] 李德毅. 人工智能在交通控制中的应用进展 [J]. 自动化学报, 2023, 49(2): 245-260.
- [5] Smith J. Dynamic Traffic Control Using Weight Detection[J]. IEEE ITS, 2022, 23(5): 2105-2116.

# 基于信号设备履历的智能化远程测试系统推动电务管理智能化变革

杨慧

国能新准铁路有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

DOI:10.61369/ERA.2025120019

**摘 要 :** 本文主要侧重于电务管理范畴, 探究借助信号设备履历的智能远程测试系统对促成电务管理智能化变革的关键价值, 旨在借助智能化远程测试手段, 将信号设备的履历信息加以整合, 提高电务管理效能质量, 运用案例剖析手段, 对现存电务管理模式的问题展开深入分析, 对智能化远程测试系统的架构、功能与应用予以详尽说明。结果表明, 该系统能够达成对信号设备的实时监测、精确故障诊断以及预测性的维护工作, 有效减少设备出现故障的概率, 削减运维开支, 提升电务管理智能化水准, 智能远程测试系统助力电务管理智能化转型, 具备极大应用潜力与推广意义。

**关 键 词 :** 信号设备履历; 智能化远程测试系统; 电务管理; 智能化变革

## Intelligent Remote Testing System Based on Signal Equipment Records Promotes Intelligent Transformation in Railway Signaling and Communication Management

Yang Hui

CHN ENERGY Xinzhun Railway Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia 017000

**Abstract :** This paper primarily focuses on the field of railway signaling and communication management, exploring the key value of an intelligent remote testing system based on signal equipment records in driving intelligent transformation in this domain. By leveraging intelligent remote testing methods, the system integrates historical information of signal equipment to enhance the efficiency and quality of signaling and communication management. Through case analysis, it conducts an in-depth examination of issues in existing management models and provides a detailed explanation of the architecture, functions, and applications of the intelligent remote testing system. The results demonstrate that the system enables real-time monitoring, precise fault diagnosis, and predictive maintenance of signal equipment, effectively reducing the probability of equipment failures, cutting operational and maintenance costs, and elevating the level of intelligent management. The intelligent remote testing system supports the intelligent transformation of signaling and communication management, holding significant potential for application and promotion.

**Keywords :** signal equipment records; intelligent remote testing system; signaling and communication management; intelligent transformation

### 引言

电务管理在铁路运输体系里属核心部分, 直接影响铁路运行的安全性与效率。传统电务管理模式着重依靠人工定时巡检以及设备出故障后的维修, 有监测滞后、故障诊断偏差大、维护费用过高等弊端, 伴随铁路运输迅猛进步, 信号设施数量持续增长、复杂程度不断攀升, 传统管理方式难以契合现代铁路运营要求。设备全生命周期(从采购、安装、调试到运行维护)信息被记录在信号设备履历中, 是电务管理的核心数据依据, 智能远程测试系统依托先进的传感、通信与数据分析技术, 可达成对信号设备的实时远程监控与智能分析, 把二者进行整合, 搭建依托信号设备履历的智能远程测试系统, 对助力电务管理智能化革新具备关键的现实意义。

## 一、现有电务管理模式的问题分析

### （一）监测手段落后

传统电务管理监测信号设备状态主要依赖人工定期巡查，此种方式既消耗大量人力与物力，且监测频次不足，难以即刻察觉设备潜藏的故障。例如，部分隐蔽故障在人工巡检时或许难以发觉，要等到故障发展到一定阶段，对设备正常运行产生影响后才会被识别出来，进而造成设备故障加剧，使维修难度与成本提升<sup>[1]</sup>。

### （二）故障诊断不准确

在信号设备出现故障，传统故障诊断手段多依靠维修人员经验，没有科学数据分析的支撑，因维修人员经验水平参差不齐，对故障的判定或许产生误差，造成故障诊断失准，让设备维修时间得以延长，对铁路运输的有序性产生影响。面对部分复杂故障，传统的办法无法快速找准故障根源，进而加大了维修的难度。

### （三）维护成本高

传统电务管理运用“事后维修”和“定期维修”相融合的办法，该办法有过度维修或者维修不充分的弊端，维修过度会造成设备更换与维护成本的额外增加。维修不充分则会造成设备频繁出现故障，对设备的使用寿命以及铁路运行的安全性产生影响，人工巡检与维护期间所产生的人力、交通等费用也偏高，使电务管理总成本进一步上升。

### （四）数据管理混乱

就当下电务管理而言，各部门和系统分别存放着信号设备的相关数据，但缺少统一管理平台，普遍存在数据格式不一、更新滞后等状况，造成数据难以实现共享与高效运用。当开展设备维护相关决策时，鉴于缺少全面且精准的数据支撑，决策的科学合理程度遭受冲击。

## 二、基于信号设备履历的智能化远程测试系统构建

### （一）系统架构设计

智能化的远程测试系统采用层级式架构设计，主要有数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用层。数据采集层借助在信号设备上装设各类传感器，对设备运行状态数据开展实时收集，像电压、电流、温度这类数据，借助有线或无线通讯手段；数据传输层，将所采集的数据输送到数据处理核心，数据处理模块对接收的数据开展清理、保存与剖析，发掘数据中的潜在价值；应用层依据数据处理的成果，向用户赋予设备监控、故障判定、维护决策制定等功能<sup>[2]</sup>。

### （二）数据采集与整合

系统借助多种手段采集信号设备的履历数据，包含设备基本情况、安装调试记载、运行维护记录等内容。依托数据采集层实时获取的设备运行状况数据，搭建全面的设备数据系统，为保障数据的精准性与统一性，对不同源头的数据开展清理与转化，让数据格式整齐划一，进而构建数据关联，达成设备全周期数据的

高效整合。

### （三）智能化分析技术应用

在数据处理阶段，采用大数据解析、机器学习这类智能化分析办法，对设备数据展开深度探究。借助构建故障预判模型，实时评估设备的运转状态，预估设备或许出现的故障种类与时间，提早发出预警信号，借助机器学习方法剖析历史故障数据，归纳故障特性与规则，提升故障诊断的精准度与速率。

### （四）系统安全保障

为保障系统安全平稳运转，实施多项安全防护手段，数据传输之际，运用加密手段加密数据，以防数据被泄露和篡改。在系统接入环节，设置严苛的用户鉴别和授权办法，仅获授权的用户可访问系统相关功能和数据，按时对系统实施安全监测与维护工作，迅速找出并处理潜藏的安全隐患。

## 三、智能化远程测试系统在电务管理中的应用

### （一）实时设备监测

智能远程测试系统有出色的实时设备监控能力，可对信号设备的运转状态进行全程、不间断地跟踪观测。系统凭借前沿的传感器技术，准确采集设备关键指标，像电压、电流、频率、温度这类数据，再把这些数据以直观明了的图表样式展示给用户，用户仅借助终端装置，诸如电脑、手机这类，不管身处何方，均能随时掌握设备实时运行状态。

实时监测机制大幅提升了设备故障察觉的即时性，若设备的某个参数突破正常范围，如设备温度高于预设临界值，系统会即刻启动警报系统，借助短信、邮件或者系统内部消息等途径，即时告知相关人员，相关人员可及时行动，对设备实施检查与维护操作，切实防止设备因诸如过热之类的异常情形而遭受更严重的损坏，保证信号设备运行稳定，为电务管理给予可信的技术保障<sup>[3]</sup>。

### （二）精准故障诊断

在电务管理领域，设备故障的精准诊断对电务管理十分关键。一旦信号设备出现故障问题，智能远程测试系统凸显明显长处，它全面采用前沿的智能分析技术，把设备历史履历数据与实时运行资料深度融汇，设备全生命周期信息，包括采购、安装及日常维护阶段的内容，由设备履历数据涵盖，实时运行资料反映出设备此刻的工作情形。

借助对两类数据的综合分析，系统可迅速且精确地找出故障源头，区别于传统故障诊断方法凭借人工经验、效率欠佳且准确性欠佳的情况。此系统能给出全面的故障详情，精准确定故障发生的精确位置以及引发故障的根本缘由，维修人员可获取精准的维修指引，杜绝盲目式排查，进而显著减少故障修复时长，切实增强设备使用效能，保证电务系统稳定工作，为铁路等行业的安全高效运营筑牢支撑根基。

### （三）预测性维护

在电务管理里，远程智能测试系统凭借故障预测模型，让设备维护实现变革性升级。该模型借助对设备过往运行数据、实时



监控数据以及同类型设备故障实例等多源资料的深入挖掘与剖析，精确评估设备当前的健康水平，按照评估结论，系统可精准预估设备的剩余使用时长，为维护决策给出可靠凭据。

基于预测资讯，电务管理部门可制订合理科学的维护规划，促使维护模式从传统“事后维修”的被动处理与“定期维修”的过度养护，转向“预测性维护”的积极、精准模式，预测性维护可对维护工作开展预先的规划与部署。在设备出现故障前做针对性处置，防止设备突发故障影响铁路运输秩序，它可削减多余的维护工作，削减维护开支，提升设备维护的效率，保证电务设备长时间稳定且可靠地运行。

（四）数据管理与决策支持

智能化远程测试系统在电务管理中具备强大的数据管理与决策支撑功能，其能够对信号设备涵盖设计、生产、安装、运行、维护、报废的全生命周期数据实施集中存储与管理，打造完备的数据仓库，保障数据完整、准确且一致。

系统借助对巨量数据的深入剖析，系统可发掘出有价值的内容，给电务管理决策提供科学凭据，借助设备故障统计资料，精确剖析故障频发缘由。像特定部件的老化、特定环境的作用等，随后针对性地采取优化措施，增强设备稳定性，利用数据挖掘手段，可找出设备运转时潜藏的隐患，此类数据还能为设备的选型、采购等关键抉择提供支撑，助力电务部门挑选性能更佳、更契合实际需求

（五）案例分析：朔黄铁路智能运维系统实践

朔黄铁路作为“西煤东运”第二大重载煤炭运输通道，年运输量达 3.6 亿吨，2 万吨重载列车规模化运转长达 7 年，传统运维模式碰到运量急剧增长、设备老化失修、人工检测效率不佳等挑战。2020 年，国家能源集团把它纳入科技创新项目范畴，自行研发出国内首套重载铁路智能运维系统（表 1）<sup>[4]</sup>。系统搭建起“空天车地”一体化检测架构，利用无人机、北斗定位技术、机器人巡检作业和智能传感器群组，全方面采集装置数据，整合 19 个现有业务系统，产出 20 余套数据集，搭建设备全周期数字孪生模型，智能大脑平台开展研发工作，形成了 132 种智能算法与 15 套评估预测模型，可实现 800 多项功能，涉及设备监测、故障诊断等核心应用场景。远程测试核心模块达成实时监控、智能判诊与远程操控，智能检修机器人平台构建起“识别－决策－作业”的闭环体系。

表 1 系统应用后的关键指标提升效果分析		
维度	关键指标	提升效果
效率	检修效率	提升 30%
质量	设备运行质量	提升 20% 信号百组道岔故障率降至 0.1 件（降幅 66.7%）
成本	维修成本	降低 15% 2024 年大中修投资节约 3.5 亿元
可靠性	关键部件寿命	提升 15%
故障处理	应急恢复时间	缩短至 3 分钟内
朔黄铁路依靠智能运维系统达成从“周期修”到“状态修”		

的转变，构建起“智能感知－自主决策－精准执行”的闭环体系，为电务智能化管理提供全面范例，以数据整合推动决策改良为核心价值，极大增强安全性与经济性，为重载铁路运维打造行业典范。

四、推动电务管理智能化变革的途径

（一）技术创新与升级

电务管理智能化变革需依靠技术的持续改进与更新，要时刻留意智能化技术前沿的最新动态。积极吸纳如 5G 通信、人工智能等新型技术与办法，对智能化远程测试系统开展迭代式优化，5G 通信技术能够极大增强数据传输的速率与可靠性，保障实时监测数据迅速且精准地传送；人工智能可提升故障诊断与预测的精确程度，需加强与科研单位、高校协作，依靠产学研联合攻克难题，整合各方的才智与资源，为电务管理智能化技术创新发展增添强劲动力。

（二）人才培养与引进

电务管理实现智能化，复合型人才的核心支持。应着重抓好现有电务人员的培养工作，按照智能化变革要求，精准规划并实施包含数据分析、智能系统操控等方面的培训项目，将理论研习与实践运用相融合，增强他们借助智能化系统开展设备管理与保养工作的水平，大力拓展人才引入途径，出台利好政策，引入拥有智能化技术背景的专业人才融入电务管理队伍，为智能化革新增添新的活力，筑牢人才支撑，助力电务管理智能化水准不断攀升。

（三）标准化建设

电务管理迈向智能化，标准化建设是基础支撑。应创建健全的

电务管理智能化标准架构，包含数据采集准则，界定数据获取的准则与条件，维持数据品质；确立系统接口规范，保障不同系统实现高效对接与流畅交互；设定故障诊断依据，让故障判定的准则与流程达成统一，标准统一能提升不同系统间的兼容度，达成数据的互通共享，促进技术标准化运用，提升标准的宣传推广强度，促使企业及相关单位按标准进行建设，推动电务管理智能化进程的有序开展。

（四）政策支持与引导

电务管理的智能化转型需要政府给予有效支撑与指引，有关部门要推出具有针对性的政策举措，促使企业积极投入智能化技术的研究与运用，给予资金扶持，创设专项基金协助企业解决关键技术困境；实施税收减免，缩减企业研发费用，舒缓资金困境，弱化智能化变革隐患，加强市场管控，确立严格标准，惩治非正当竞争现象，保证市场的公平有序，为电务管理智能化革新创造公平、有益的发展氛围，带动行业智能化水准逐步上扬。

## 五、结语

综上所述,以信号设备履历为基础的智能化远程检测系统为电务管理的智能化革新给出了有效举措,利用实时设备监测、精确故障诊断、预防性养护等功能,该系统凭借实时设备监控、精确故障排查、预防性维护等功能,可以化解传统电务管理方式中监测方法滞后、故障诊断有误、维护费用过高等方面的难题,提

升电务管理效能与品质,保证铁路运输安全高效地运转。未来,伴随科技持续演进,智能远程测试系统会不断改进与拓展,5G通信、人工智能、大数据等技术深度整合会赋予系统更强劲的功能与性能,电务管理智能化革新会朝更深层面推进,达成电务管理与铁路运输其余环节的深度配合,带动整个铁路行业走向智能化、现代化方向。

## 参考文献

- 
- [1] 马志强,崔高星,张文兴,等.铁路信号系统智慧实训室建设方案研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(01):35-43.
- [2] 马海龙.基于信号设备履历的智能化远程测试系统[J].铁道通信信号,2024,60(08):28-33.
- [3] 宋社平,黄玉祥,焦炳岩,等.电务车载设备智能运维系统研究[J].铁道通信信号,2024,60(08):9-15.
- [4] 石成,岳雷.基于信号集中监测数据的电务作业智能盯控系统研究[J].铁道通信信号,2024,60(04):1-6.

# 基于 GIS 与遥感技术的雅丹地貌旅游资源评价 与可持续利用研究

尹雪

新疆维吾尔自治区地质局水文环境地质调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ERA.2025120020

**摘 要 :** 雅丹地貌有科学价值和旅游潜力, 但生态脆弱性制约了开发。本文把典型雅丹分布区当作对象, 将 GIS 和遥感技术融合起来, 创建起多维度评价体系, 依靠遥感提取地貌形态、生态背景, 而且动态监测, 再利用 GIS 空间分析 (缓冲区, 叠加, 网络分析) 从景观美学、科学价值、生态敏感性、可达性、开发条件展开量化评价。GIS 与遥感技术可以有效地找出核心保护区和适宜开发区, 从而给出“保护优先、分区管控、智慧监测、社区参与”的策略, 给雅丹旅游开发和生态保护找到平衡点, 推动三效益协同发展。

**关 键 词 :** GIS 遥感技术; 雅丹地貌旅游; 资源评价; 可持续利用

## Study on Evaluation and Sustainable Utilization of Yadan Landform Tourism Resources Based on GIS and Remote Sensing Technology

Yin Xue

Hydrogeological Survey Center, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830000

**Abstract :** Yadan landforms possess both scientific value and tourism potential, yet ecological fragility constrains their development. This study focuses on typical Yadan distribution areas, integrating GIS and remote sensing technologies to establish a multidimensional evaluation system. By utilizing remote sensing for geomorphological extraction and ecological context analysis, coupled with dynamic monitoring, we employ GIS spatial analysis (buffer zones, overlaying, network analysis) to conduct quantitative assessments of landscape aesthetics, scientific value, ecological sensitivity, accessibility, and development feasibility. The integration of GIS and remote sensing effectively identifies core conservation zones and suitable development areas, proposing a strategy of "protection priority, zoned management, smart monitoring, and community participation." This approach achieves a balance between yadang tourism development and ecological conservation, promoting coordinated development of ecological, economic, and social benefits.

**Keywords :** GIS remote sensing technology; Yadan landform tourism; resource evaluation; sustainable utilization

### 引言

雅丹地貌是干旱区风力侵蚀松散沉积物形成地貌, 主要分布在敦煌、柴达木盆地等我国西北地区, “雄奇险幽”成为旅游热点。但其所在地生态脆弱, 土壤保水差、植被少, 旅游干扰 (踩踏、碾压、污染) 后恢复周期长, 传统评价方法依靠实地定性分析, 存在数据效率低、范围小、动态监测弱等问题, 难以适应精细化需求, GIS 的空间数据处理和可视化能力、遥感的大范围周期性信息获取能力, 为雅丹旅游资源研究提供了新思路。本文意在通过二者的融合, 建立量化的评价体系, 确定开发与保护的优先级, 提供理论和实践指导。

### 一、雅丹地貌旅游资源评价与可持续利用研究意义

#### (一) 干旱区地貌旅游评价的技术融合理论空白填补

传统雅丹地貌旅游资源评价一直受困于定性分析, 缺乏技术

支撑的量化框架, 评价结果主观性强、适用性窄。本研究将 GIS 与遥感技术深度嵌入评价过程, 形成“技术支撑—数据提取—空间分析—量化评价”的完整理论链条: 遥感技术破解了地貌形态、生态背景等基础信息的高效获取难题, 突破了传统实地调查

的时空限制；GIS 空间分析功能完成多源数据整合与维度拆解，让景观美学、生态敏感性等抽象指标可量化、可叠加。这种技术融合既弥补了传统评价的理论短板，又形成干旱区地貌旅游资源评价的技术化理论范式，为同类研究提供从“定性描述”到“定量分析”的理论转型借鉴，丰富了干旱区旅游地理学的技术应用理论体系<sup>[1]</sup>。

### （二）多维度评价指标的理论权重与逻辑关联的完善

雅丹地貌旅游资源评价要涵盖景观、生态、开发等多个方面，不过传统研究没说清楚各个方面的指标理论权重和内在联系，所以评价结果缺少系统性，本研究按照雅丹地貌特点和旅游开发需求，形成“5—1+12—2”指标体系，用 AHP 层次分析法来确定权重，既看重景观美学的形态独特性权重0.15，又重视生态敏感性的植被覆盖度权重0.12。而且也考虑到可达性交通距离权重0.08，开发条件环境承载力权重0.06这些实际因素。这样的指标设定，既规定了每个因素在评价中的理论优先级，也揭示了“景观价值—生态约束—开发可行”的内在逻辑，景观价值决定开发潜力，生态敏感性限定保护底线，可达性与开发条件衔接理论与实际，此指标体系的理论搭建，给类似地貌（丹霞，喀斯特）的旅游资源评价赋予了可复制的指标逻辑框架，丰富了旅游资源评价的理论系统性<sup>[2]</sup>。

### （三）深化跨学科理论的交叉应用研究

雅丹地貌旅游资源研究包含旅游地理学、生态保护学、地理信息科学等学科，但以往研究多局限在单一学科视角，跨学科理论融合不足。本研究以可持续发展理论为导向，与 GIS、遥感技术的理论特性深度融合，一方面可持续发展理论要求“开发与保护平衡”，为评价指标设定（如生态敏感性权重 > 开发条件）提供理论支撑，另一方面 GIS 与遥感技术的“空间性”“动态性”理论优势，解决了可持续发展理论在地貌旅游研究中“难以落地监测”的问题（如季度遥感监测生态变化）。这种跨学科融合不仅拓宽了旅游地理学“技术赋能理论实践”的研究路径，而且充实了生态保护学“动态监测理论”的应用范畴，给多学科交叉研究给予了“理论导向—技术支撑—实践检验”的融合范式，促使相关学科理论协同生长。

## 二、基于 GIS 与遥感技术的雅丹地貌旅游资源评价

### （一）数据来源与技术流程

#### 1. 数据来源

本研究数据分为遥感数据、地理空间数据、辅助数据三类。（1）遥感数据选取研究区近5年的高分二号（GF-2）卫星影像（空间分辨率1m）、Landsat-8OLI 影像（空间分辨率30m）和 Sentinel-2 影像（空间分辨率10m），用于提取雅丹地貌形态特征、植被覆盖度、土地利用类型；（2）地理空间数据包括研究区1:5万地形图（制作数字高程模型 DEM）、交通路网数据（国道、省道、乡村道路）、行政区划数据、旅游设施（景区入口、观景台、停车场）分布数据，从国家地理信息公共服务平台获取；（3）辅助数据包括研究区气象数据（年均降水量、风速、风向）、土壤类型数

据、游客量统计数据，分别从当地气象局、文旅部门获取<sup>[3]</sup>。

### 2. 技术流程

（1）研究技术流程（共4个阶段）：①数据预处理：针对遥感影像执行辐射定标、大气校正与几何精校正等工作，再借助 DEM 数据来获取诸如坡度、坡向之类地形因子。②信息提取：采用面向对象的遥感影像分类方法对雅丹地貌的分布范围以及形态参数，包括垄岗长度、宽度和高度、植被覆盖度等内容展开信息提取。③空间分析：在 GIS 平台当中，借助缓冲区分析手段对交通干线给景区带来的可达性产生影响，又经由叠加分析将地貌分布图层，生态敏感度图层以及可达性图层加以叠加，再运用网络分析测算出游客由入口通往各个观景台的最佳路径等等，从而实施综合评价，把上述评价成果表现成专题地图的形式，清楚地显示不同等级的旅游资源其空间散布情况。

### （三）评价结果与分析

根据上述指标体系和技术方法，将研究区雅丹地貌旅游资源划分为4个等级：一级资源（综合得分 $\geq 4.0$ ）、二级资源（3.0—3.9）、三级资源（2.0—2.9）、四级资源（ $< 2.0$ ）；

#### 1. 空间分布特征

从 GIS 专题地图中可以看到一级资源主要集中在研究区中部，此处雅丹地貌形态独特，有“鲸鱼背”“舰队”状垄岗，景观完整性高，距省道5km，可达性较好；二级资源主要分布在一级资源周围，形态完整性略差，但生态敏感性较低，具有一定的开发潜力；三级资源主要分布在研究区边缘，交通可达性较差，部分区域植被覆盖度低，生态敏感性较高；四级资源主要为分散的小型雅丹斑块，景观价值和可达性都较低，以生态保护为主<sup>[4]</sup>。

#### 2. 关键制约因素

从指标权重得分来看，影响研究区旅游资源开发的主要制约因素有：①西部雅丹群等部分高景观价值区域路网密度较低，游客可达性较差；②北部边缘等生态敏感性较高的区域与景观价值较高的区域存在重叠，开发与保护矛盾突出；③旅游设施主要集中在一级资源区，二级资源区旅游设施配套不足，容易导致游客过于集中。

## 三、雅丹地貌旅游资源可持续利用策略

### （一）实施分区管控，明确保护与开发边界

根据 GIS 空间分析结果，把研究区划分为“核心保护区”“生态缓冲区”“适度开发”和“综合服务”这四个功能区，每个功能区都要制定不一样的管控细则，1. 核心保护区：包含四级资源区以及生态敏感度大于等于4分的区域，彻底禁止旅游活动和工程建设，仅仅允许科研团队经由报备之后，在此执行低干扰的观测，每个月用高分辨的遥感影像（像 GF-2 这样的）定时监测生态改变状况，创建起生态档案，一旦察觉到植被退化或者地貌破坏之类的情况出现，立刻启动应急修复预案，2. 生态缓冲区：涉及三级资源区和部分二级资源区，限定每日游客数量（依照环境承载力来算，每平方公里不能多于20人），不允许机动车驶入，只铺宽不过1.2米的木质栈道，放置生态解说牌，引领游客按照固定的



路线观赏，还在缓冲区周边布置红外相机，用来观察野生动物的活动情形，防止游客打搅到动物的生存环境，3. 适度开发区：主要为二级资源区，规划高度不高于3米的生态型观景台，采取钢结构架空结构，削减对地表的遮挡和毁坏，凭借 GIS 网络分析来改良游览路径，把各个观景台连接起来形成环形路线，免除游客来回走动而产生的反复干扰，而且在开发区内部安排移动环保厕所和垃圾分类回收站点，保证垃圾能够做到日产日清，

**（二）构建智慧监测体系实现生态风险动态管控**

运用遥感技术和物联网设备结合，创建“季度—月度—实时”三级动态监测体系，优化生态风险管控精确度：1. 季度监测：采用 Sentinel-2 影像（空间分辨率10m），借助 ENVI 软件反演植被覆盖度（NDVI 指数）、土壤湿度等生态指标，结合 GIS 空间叠加分析，比较不同季度指标变化，找出游客活动频繁之处（像观景台周围）的生态退化趋向，形成季度监测报告；2. 月度监测：采用 GF-2 高分辨率影像（空间分辨率1m），细致监测雅丹地貌垄岗、沟槽的形态变化，判定是否因为游客攀爬、风沙侵蚀加重而造成地貌破损，还要监测旅游设施（栈道、观景台）的完好情况，尽快察觉设施老化、损坏等问题。

**（三）优化旅游产品设施，提升可持续性**

在产品设计上，以雅丹地貌的科学价值为依托，开发“地质研学旅游”“星空观测旅游”等低干扰、高附加值的产品，减少大众观光带来的生态压力；在设施建设上，使用环保材料（可降解栈道、太阳能游客中心）并借助 GIS 空间分析进行设施布局，避免破坏核心景观与生态敏感区；完善交通接驳系统，在市区至

景区间开通专线大巴，减少私家车进入景区，降低碳排放与交通干扰。

**（四）促进社区参与，达成利益共享**

雅丹地貌所在地区大多为少数民族居住地，社区参与是可持续利用的重要保证，运用 GIS 技术确定社区参与范围，明晰社区在旅游服务（民宿经营，向导服务），生态保护（日常巡逻，垃圾清理）中的角色，创建利益共享机制，把旅游收入的一部分投入社区基础设施创建和生态补偿，激发社区参与保护的热情，执行生态保护培训，优化社区居民的环保意识，达成“政府—企业—社区—游客”共同参与的可持续发展模式。

**四、结束语**

综上所述，雅丹地貌旅游开发与生态保护矛盾的破解，要依靠技术手段和科学理论，本文借助 GIS 和遥感技术融合，创建起雅丹旅游资源量化评价体系，精确找出开发和保护优先级，证实了地理信息技术在干旱区地貌研究中的理论和实践意义，研究仍有欠缺之处，评价指标没有完全包含游客体验，文化价值这些人文要素，动态监测没有包含土壤微生物，动物栖息地这些微观生态指标，以后可以联系大数据剖析游客行为，采用机器学习预估气候变化影响，进一步完善评价体系和监测网络，相信随着技术和理论的深入发展，雅丹地貌会做到“保护中开发，开发中保护”，给干旱区自然遗产的可持续利用赋予理论和操作范例

**参考文献**

[1] 方臣, 陈曦, 徐玟莹, 等. 基于遥感与 GIS 技术的武汉都市圈生态保护重要性评价研究 [J]. 资源环境与工程, 2024, 38(06): 736-743.  
[2] 张振华. 测绘遥感技术与地理信息系统应用于矿山地质勘测中的研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (24): 126-128.  
[3] 陈浩. 测绘技术与 GIS 技术在工程测量中的应用研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (35): 172-174.  
[4] 李洪波. 基于遥感与 GIS 技术的西藏阿里高海拔地区滑坡易发性综合评价研究 [J]. 华北自然资源, 2024, (06): 119-123+127.

# Ai 在智能电能表检验检测数据异常识别中的应用

鲁舟斌, 宋凤伟

国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000

DOI:10.61369/ERA.2025120031

**摘 要 :** 智能电能表数据异常识别是确保智能电网稳定运行的重要手段, 通过准确识别智能电能表数据异常, 可保障用户与企业的权益。然而, 传统的数据异常识别方法主要是以人工为主, 效率低下, 且容易出现误判与漏判等问题, 难以满足智能电能表的检测需求。鉴于此, 研究针对现阶段智能电能表数据异常识别过程中面临的挑战, 系统阐述了人工智能 (Ai) 在智能电能表数据异常识中的原理与优势, 以具体实例分析了 Ai 的实际应用情况, 并对 Ai 的应用情况进行展望, 以期为推动智能电网的发展提供参考。

**关 键 词 :** Ai; 智能电能表; 数据异常; 识别

## The Application of Ai in Anomaly Identification of Inspection and Testing Data for Smart Electricity Meters

Lu Zhoubin, Song Fengwei

State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Zhoushan Power Supply Company, Zhoushan, Zhejiang 316000

**Abstract :** Abnormal data identification of smart electricity meters is an important means to ensure the stable operation of the smart grid. By accurately identifying abnormal data of smart electricity meters, the rights and interests of users and enterprises can be protected. However, the traditional methods for identifying data anomalies are mainly manual, which are inefficient and prone to problems such as misjudgment and missed judgment, making it difficult to meet the detection requirements of smart electricity meters. In view of this, this study addresses the challenges faced in the current process of identifying abnormal data in smart electricity meters, systematically expounds the principles and advantages of artificial intelligence (Ai) in the identification of abnormal data in smart electricity meters, analyzes the practical application of Ai with specific examples, and looks forward to the application of Ai, with the aim of providing references for promoting the development of smart grids.

**Keywords :** Ai; smart electricity meter; data anomaly; identification

## 引言

智能电表作为智能电网的关键部分, 其承担着电量计量、数据采集与传输等关键任务<sup>[1]</sup>。然而, 智能电表采集的数据通常会出现数据缺失、超出阈值的情况, 导致计量误差、设备故障误判等问题, 直接影响电力企业的经济效益与用户的用电体验。传统数据异常检测主要以人工抄表与定期校验为主, 存在漏检率高、误判率大、效率低下等缺陷。在人工智能 (Ai) 飞速发展的背景下, 其凭借其强大的数据处理能力与模式识别优势, 为智能电表的数据异常检测提供了思路<sup>[2]</sup>。

鉴于此, 本文分析了智能电表数据异常识别的重要性与挑战, 系统阐述了 Ai 在数据异常识别中的应用原理与优势, 以具体实例分析了 Ai 的应用情况。

## 一、智能电表数据异常识别的重要性与挑战

### (一) 重要性

对于智能电能表而言, 其产生的计量数据主要用于电费结算, 若计量数据异常, 则会严重影响电费的结算。通过对数据异

常进行识别, 可在确保计量数据准确性的同时, 维护用户与企业的权益。一般来说, 在智能电能表内部发生故障或者受到外部信号的干扰后, 便会产生相应的数据异常。例如, 当智能电能表中的电压、电流等参数产生波动或者受到外界电磁的干扰后, 表明智能电能表的电路发生了异常, 通过识别这些异常, 可为智能电

能表的维护提供依据，这样不仅可延长智能电能表的使用寿命，而且还可在一定程度上提升电力系统的稳定性。此外，在智能电能表数据异常识别过程中，需严格按照相应的监管标准进行，确保数据检测的合理性<sup>[3]</sup>。

（二）挑战

在智能电能表运行过程中，涉及的参数具有多样化的特点，这些参数信息主要有电压、电流以及功率等。由于这些数据容易受到环境与负载的影响，使其呈现出一种非线性特征。当温度与湿度变化的情况下，智能电能表的精度则会受到严重影响，导致计量数据产生偏差。同时，当负载发生变化后，也会导致智能电能表内部的电压、电流等参数发生相应的变化，进而影响智能电能表的运行效果。在此种情况下，让数据异常识别的难度增加。目前，常见的智能电能表异常模式主要分为瞬时突变、缓慢漂移以及周期性波动等，其中，瞬时突变主要是由于智能电能表内部发生瞬间故障导致，缓慢漂移主要是由于智能电能表元件老化导致，而周期性波动主要是由于负载发生变化导致。在这些异常模式识别过程中，需深入分析数据的变化规律。在智能电网飞速发展的今天，智能电能表数量逐渐增加，产生的数据也逐渐增多，导致异常数据的识别难度加大。传统的数据识别方式难以实现庞大数据的处理，识别效率较低，难以满足海量数据的检测需求。为此，探索一种全新的数据识别方法迫在眉睫<sup>[4]</sup>。

二、Ai 在数据异常识别中的应用原理与优势

（一）机器学习算法

机器学习算法属于人工智能（Ai）的一个分支，其主要是通过分析数据的规律，构建预测模式进行数据异常的识别。目前，常见的机器学习算法主要包括支持向量机（SVM）、决策树算法以及随机森林算法。其中，支持向量机（SVM）主要是通过寻找最优的超平面，实现正常数据与异常数据分离<sup>[5]</sup>。在模型训练过程中，可根据实际情况对超平面位置与方向进行优化，进而实现正常数据与异常数据的有效分离，以此来判断输入的数据是否为异常数据。决策树算法主要是基于相应的判断规则，实现数据的分类。在分类过程中，从根节点出发，基于数据的不同属性，进行相应的分支，且每个分支对应相应的判断条件，最后由叶节点输出相应的分类结果，以此来实现正常数据与异常数据的识别。而随机森林算法主要是在决策树的基础上演变形成的，其中包含多个决策树，可通过投票的方式，确定相应的分类结果，可在提升分类准确性的同时，确保分类的稳定性。通过上述这几种算法，可实现数据的自动学习，突破了人工识别的限制，且对数据的分布假设较少，不仅可实现高维数据的处理，而且还可对智能电能表多参数数据进行深入分析，适应性相对较强<sup>[6]</sup>。

（二）深度学习算法

对于深度学习算法而言，其属于机器学习的一个分支。该算法主要是基于多层神经网络模型，从海量数据中自动提取对应的特征。目前，常见的深度学习算法主要包括卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）及其变体（如 LSTM、

GRU）。其中，卷积神经网络（CNN）主要包括卷积层与池化层，卷积层主要用于提取数据特征，池化层主要用于实现数据特征的降维，有效减少计算量。通过 CNN，可进行智能电能表数据时序波形的处理，并基于波形特征，分析数据是否异常。而 RNN 及其变体（如 LSTM、GRU）可从时序数据中提取数据之间的关系。一般来说，在智能电能表采集数据过程中，主要是基于时间顺序进行的，在 RNN 的作用下，可通过记忆单元实现历史数据的存储，并基于当前时刻的数据与历史数据，分析数据是否存在异常。对于深度学习算法而言，其特征提取能力相对较强，可从原始数据中自动识别数据特征，在一定程度上提升了数据异常识别的准确性。同时，该算法可实现海量数据的集中处理，且模型性能随着数据量的增大而提升。在将其应用与智能电能表数据异常识别中后，可对大量的数据进行训练，在精准获取数据异常特征的同时，进一步提升了数据异常的识别能力。

三、Ai 在智能电能表数据异常识别中的应用案例分析

（一）案例背景

某电力公司为有效提升智能电能表的运行稳定性，对大量智能电能表进行检验检测。由于智能电能表产生的数据量较大，采用传统的检测方法难以实现数据异常的有效检测，且在检测过程中出现误判与漏判的现象，在影响智能电能表质量控制的同时，在一定程度上增加了工作量。为此，该公司决定采用 Ai 技术进行智能电能表数据异常的识别。

（二）具体识别过程

基于 Ai 技术的智能电能表数据异常识别流程如图 1 所示。

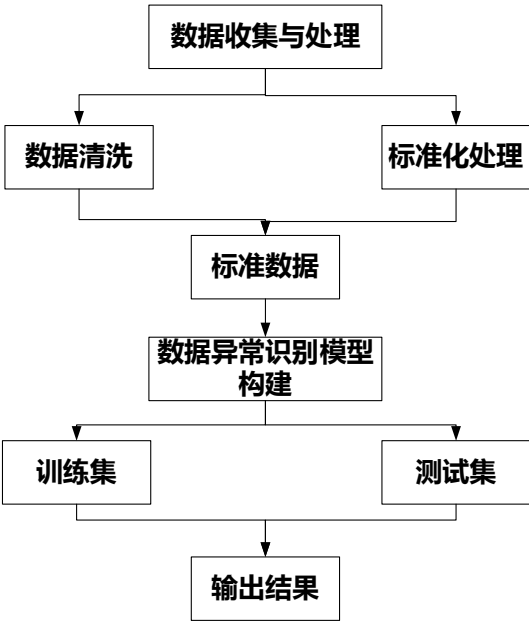


图 1 数据异常识别流程

首先，收集智能电能表历史检测数据，包括正常数据异常数据。基于采集的数据，进行清洗，去除噪声和异常值。在数据清

洗完成后,对其进行标准化处理,使数据具有可比性。在标准化处理过程中,主要是对不同量纲的参数进行归一化处理,使其处于同一数值范围内。其次,基于 SVM、随机森林和 LSTM 等算法,构建数据异常识别模型,并将经过处理的数据分为训练集与测试集。其中,训练集主要用于数据异常识别模型的训练,测试集主要用于测试模型的性能。在此过程中,需对模型参数进行调整。对于 SVM 模型,主要是调整核函数的参数与惩罚系数,随机森林模型主要是调整树的数量与深度,而 LSTM 模型主要是调整神经元数量与学习率。最后,输出结果,并以准确率、召回率、F1 值等指标,评估模型的性能<sup>[7]</sup>。

### (三) 效果分析

结果显示, LSTM 模型的识别准确率最高,高达 95% 以上,说明在通过 Ai 技术进行智能电能表数据异常的识别后,进一步提升了数据异常识别的准确性。一方面, Ai 模型可准确识别海量数据的不同异常模式,在一定程度上减少了误判与漏判的情况。另一方面, Ai 模型有效提升了数据异常识别的效率。对于传统的数据异常识别而言,其主要是依赖人工,识别效率较低。在 Ai 模型的应用后,实现了数据异常的自动化检测,不仅有效提升了识别的准确率,而且还一定程度上缩短了检测时间,提升了工作效率。此外,通过 Ai 模型的应用,还在一定程度上降低了成本。通过及时发展智能电能表的数据异常,可避免因计量不准确导致的用户纠纷和经济损失,且可在短时间内发现智能电能表的故障问题,在一定程度上降低了企业的运营成本。

## 四、Ai 在智能电能表检验检测数据异常识别中的应用前景与问题

### (一) 应用前景

在 Ai 技术飞速发展的今天,智能电能表检验智能化水平将逐渐提升。借助 Ai 技术的优势,不仅可实现智能电能表数据的实时检测与自动识别,而且还可在第一时间发出告警。通过在电能

表中集成 AI 芯片,在发现数据异常的情况下,系统便会在第一时间发送预警,让管理人员在第一时间进行解决,实现检测过程的自动化和智能化。在未来的发展中,可将智能电能表与其他设备进行互联,并通过 Ai 技术实现多源数据的融合,进而提升数据分析的全面性。例如,通过借助 Ai 技术整合用电行为数据、环境数据等,深入剖析识别数据异常产生的原因。在提升数据异常识别准确性的同时,进一步提升其可靠性。同时,还可根据用户的不同需求,提供个性化的检测服务<sup>[8]</sup>。

### (二) 存在的问题及解决方向

在智能电能表运行过程中,产生的数据较为庞大,数据中可能存在噪声、缺失值等问题,导致 Ai 模型性能下降。其中,数据中的噪声主要是设备误差、外界干扰等因素所致,缺失值主要是传输设备故障导致。为有效解决这一问题,需不断提升数据采集设备性能,在提升数据采集精度的同时,减少数据中的噪声。同时,在数据处理时,可通过插值法、滤波法等方法,对数据进行预处理,进而消除其中存在的噪声,并补充缺失值。此外,对于智能电能表而言,其采集的数据涉及用户隐私。为避免用户数据的泄露,需采用先进的加密技术,实现数据的加密处理,提升数据在传输与存储过程中的安全性。同时,需采用访问控制技术,设置相应的访问权限,避免出现数据泄露的情况。

## 五、结语

综上所述, Ai 技术具有显著的优势,通过在智能电能表检验检测数据异常识别中应用 Ai 技术,不仅可有效提升数据异常识别的准确性,而且还可在一定程度上提升数据识别的效率。虽然现阶段 Ai 技术应用过程中还存在数据质量问题与隐私保护问题,但是随着技术的发展,可有效解决这些问题。在未来的发展中,需不断加强 Ai 技术的研究,并对相应的算法进行优化,进一步提升电力系统运行的稳定性。

## 参考文献

- [1] 冯小峰,冯霞山,张正峰,等.基于最大似然法和决策树的智能电能表计量误差检测方法[J].电测与仪表,2024,61(12):205-211.
- [2] 程鹏申,周文斌,赵磊,等.基于全生命周期检测数据的智能电能表质量监督评价研究[J].电工文摘,2021,000(006):28-32
- [3] 崔建军,宋海霞.智能电能表费控功能检测异常故障分析[J].2022(2).
- [4] 杨蓓蓓,郑可,邹波,等.单相智能电能表现场检测与寿命评估[J].电测与仪表,2022(004):059.
- [5] 汤野,程文玉,王晨,等.局部异常点检测算法的电能表高压泄露计量[J].2021.
- [6] 李蕊.基于 SSHM 模型的智能电能表操纵行为检测算法研究[J].电测与仪表,2023,60(9):188-194.
- [7] 孙璐.智能电能表检验与检测[J].中国科技期刊数据库工业 A,2021(12):3.
- [8] 程际凯.智能电能表电量异常的原因分析及检测方法研究[J].中国科技期刊数据库工业 A,2022(3):4.



# 浅谈力控 pSpace 数据库在智慧化工厂中应用与实践

王亮

中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209

DOI:10.61369/ERA.2025120043

**摘 要 :** 随着煤化工行业的发展, 生产过程的自动化、信息化需求日益增长。力控数据库作为一种高效的工业数据库, 在化工厂的生产管理中得到了广泛应用。本文主要阐述力控 pSpace 数据库产品特点、核心架构、旧数据库系统面临挑战、在智慧化工厂中建设方案、以及在智慧化工厂二次开发和应用, 最后还总结了其应用效果并展望了未来的发展趋势。

**关 键 词 :** 数据库; 网络; 智慧化

## A Brief Discussion on the Application and Practice of ForceControl pSpace Database in Smart Factories

Wang Liang

Ordos Coal-to-Liquids Branch, China Shenhua Coal-to-Liquids and Chemical Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017209

**Abstract :** With the development of the coal chemical industry, there is an increasing demand for automation and informatization in production processes. The ForceControl Database, as an efficient industrial database, has been widely applied in the production management of chemical plants. This paper mainly elaborates on the product features, core architecture of the ForceControl pSpace database, challenges faced by legacy database systems, construction plans in smart chemical plants, as well as secondary development and applications in smart chemical plants. Finally, it summarizes its application effects and looks ahead to future development trends.

**Keywords :** database; network; smartification

## 引言

某煤化工工厂工艺过程伴随着高温、高压、易燃、易爆等特性, 复杂性与危险性并存。确保生产的安全、稳定、高效与低碳运行, 是行业永恒的追求。传统的生产管理模式依赖于分散的监控系统和关系型数据库, 已难以应对现代化工厂对海量实时数据的采集、存储、分析和应用的需求。信息孤岛林立、数据价值挖掘不足、决策滞后等问题日益凸显。

智慧化工厂作为工业 4.0 和“中国制造 2025”战略在流程工业的具体实践, 其本质是构建一个以数据为核心驱动力的智能制造体系。这个体系的核心, 在于建立一个贯通底层设备、过程控制、生产执行乃至经营决策的“数字孪生”体, 实现数据的全域感知、集成互通与智能分析。在这一宏大愿景下, 一个稳定、高效、能够处理海量时序数据的实时数据库平台成为了不可或缺的基石。力控 pSpace 实时数据库正是为此而生, 它通过与工业网络的深度融合, 为上层各类智慧化应用提供了强大的数据支撑, 从而驱动整个工厂的智能化升级。

## 一、背景

某煤化工企业为提升生产管理水平, 推进智能化转型, 于 2023 年启动了实时数据库升级项目。该企业生产装置规模庞大, 工艺流程复杂, 涉及液化、气化、净化、合成等多个工段, 日常运行中需要实时监控的温度、压力、流量等工艺参数点超过 10 万个。在引入 pSpace 数据库之前, 其信息系统面临严峻挑战:

1. 数据性能瓶颈: 原有基于关系型数据库的系统无法承受每秒数万点的数据写入压力, 导致数据延迟、丢失, 实时监控画面刷新缓慢, 关键报警响应不及时。

2. 网络架构复杂且拥堵: 各车间、各系统间网络条块分割, 数据传输协议不一, 形成大量信息孤岛。未经优化的数据流在网络中无序传输, 占用大量带宽, 影响关键控制指令的传输效率与可靠性。

3. 数据存储与分析成本高昂: 海量的过程历史数据存储成本不断攀升, 而基于传统数据库的数据查询与分析效率极低, 一次全厂性的工况回溯分析可能需要数小时, 数据价值无法有效释放。

4. 智慧化应用缺乏基础支撑: 企业希望实施设备预测性维护、工艺参数优化、能源精细管理等智慧化应用, 但苦于没有统

一、高质量、易访问的数据平台，导致这些先进应用要么无法落地，要么效果大打折扣。

5. 原数据库 PHD 系统使用年限过长且为非国产系统，不满足当前生产需要。

面对这些问题，该企业认识到，必须建立一个统一的、面向时序数据优化的实时数据平台，并重构其工业网络架构，以实现数据的高效流动与集中管理。力控 pSpace 数据库因其卓越的性能和丰富的工业接口，被选为这一核心平台。

## 二、实时数据库 pSpace 产品介绍及核心构架

### （一）产品介绍

实时历史数据库对于流程工厂来说就如同飞机上的“黑匣子”，是实现智能工厂的关键。力控企业级实时历史数据库 pSpace 可用于工厂过程的自动采集、存储和监视，可在线存储每个工艺过程点的多年数据，可以提供工厂模型，生产运营管理、设备运行管理、历史追忆、生产报表等多种调度管理模块。pSpace 是一个高性能、高吞吐能力、可靠性强、跨平台的实时 / 历史数据库系统可以用于采集、压缩、存储、加工、分析等任何带有时间特性的生产信息。pSpace 提供全系列的工业通信接口及 ERP 业务接口实现生产监控到调度管理的完美整合，可以与工业云实现完整融合。

#### 1. IO Server 采集站

作为数据库的数据采集站，实现设备数据的接入，支持上千种设备的连接，采用模型化开发设计，多人协作开发将各采集站数据均送入数据库中，在线 / 离线工程维护，系统性能监视，远程运维管理。

#### 2. pSpace Server 数据服务

作为数据库系统核心，提供多种数据类型包括浮点、整型、布尔型、字符串等，实现实时数据处理、历史数据存储、自诊断自恢复、磁盘阵列冗余保证数据持续稳定运行。

#### 3. 应用客户端

支持 C 端及 HTML5 技术的 Web 端可视化展示。提供方便友好的开发环境及面向对象的设计，预制图形模板、工业标注的符合图形组件，方便工程人员构建过程的监控和部署的可视化应用。

#### 4. 扩展组件

支持关系库交互 ODBCRouter、SQLRouter，标准 OPC DA、OPC UA 协议转发，计算引擎 SDK 接口，数据同步工具等。

#### 5. SDK 接口

实时数据库的接口支持传统客户端应用以及信息化平台等 Web 端的调用，支持 C、.NET、Java、nodejs。

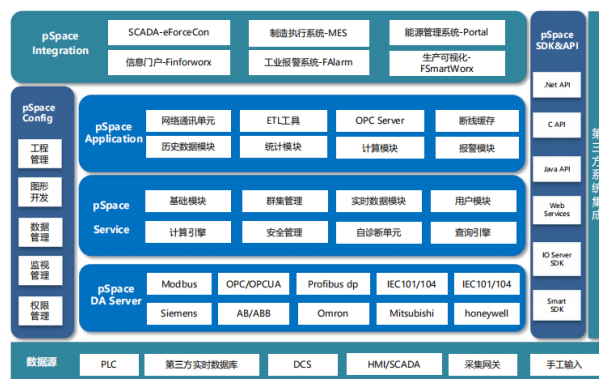
### （二）核心架构

pSpace 数据库采用分布式、可扩展的架构设计，主要由以下核心组件构成，共同构成了智慧化工厂的“数据心脏”。

实时数据引擎：作为系统的核心处理单元，它驻留于内存中，负责以极高的吞吐量接收、处理和分发实时数据。它采用

了多线程、异步 I/O 等先进技术，确保了在面对海量并发数据点时，仍能保持微秒级的响应延迟，为实时监控和闭环控制提供了可能。

下图为 pSpace 数据库概述图。



pSpace 数据库概述图 1

历史数据存储引擎：专为时间序列数据设计，采用了高效的压缩算法（如旋转门算法、死区压缩等）和专用的存储格式。它不仅能将数据存储空间压缩至原始大小的 10%–20%，极大降低了存储成本，还优化了针对时间范围的查询效率，使得快速查询数年甚至数十年的历史数据成为可能。

数据连接器集合：这是 pSpace 与外界通信的“桥梁”。它提供了极其丰富的工业标准接口，包括但不限于 OPC DA/UA、Modbus TCP/RTU、S7、DDE 等，能够无缝对接市面上主流的 DCS、PLC、SIS、SCADA 等控制系统和设备。这保证了各类异构数据源能够被轻松接入。

应用开发接口：为上层智慧化应用的开发提供了标准的 ODBC/JDBC、API（如 RESTful API）等接口，方便 MES、ERP、APC、高级报警管理等系统直接访问实时和历史数据，极大地简化了系统集成的工作量。

## 三、实时数据库建设方案

### （一）整体方案

实时数据库建设完成工业控制系统、气体检测系统（GDS）等数据采集。在各生产中心汇聚网络层部署两台数据采集器，进行实时数据采集，然后通过数据传输网把采集的数据传输到企业办公网的 pSpace 实时数据库，GDS 系统数据通过 OPC 集成到实时数据库。

数据湖、基石项目、生产制造执行系统 MES 和政府、工业园区的等所需数据通过接口服务器进行对外传输。通过 API SDK 向数据湖提供数据，并配合开发调试访问数据湖实时数据库接口，根据煤化工企业易燃易爆与有毒有害气体数据上传集团规范开发方位实时数据库接口，并部署在接口机上，生成上传文件，供上传数据使用；提供 OPC、DA、UA 供政府和园区取数；修改 MES 厂商提供的 PHDApi.cs，供 MES 厂商部署。部署配置表如下。

网络环境	服务器	功能
办公网络	实时数据库 pSpace 服务器 (2台)	由两台30万点实时数据库组成的热备集群, 当其中一台服务器异常宕机, 则另一台服务器会接管实时数据库服务。
	存储设备 (磁盘阵列) (1台)	实时数据库故障转移集群挂接的存储设备, 用于共享存储, 保证数据一致性。
	可视化服务器 (1台)	提供资产建模服务, 部署资产建模管理平台, 建立数学模型进行关键指标的计算。提供可视化服务, 展示流程图、报表。
	接口服务器 (1台)	以 OPC、OPC UA 的方式发布 pSpace 数据库中数据; 给政府、工业园区相关系统提供数据服务。
	接口服务器 (1台)	企业内部系统, 给公司原 MES 系统提供数据服务;
	接口服务器 (1台)	给集团数据湖、基石系统提供数据服务。
过程控制网络	采集服务器 (8台)	冗余部署, 采集各生产中心实时数据, 上传给实时数据库。

部署配置表1

## (二) 数据采集方案

在公司机房部署一套实时数据库, 采用冗余方式进行, 确保功能实时切换。霍尼韦尔 RDM 软件是 Redirection Manager 的简写, 用于访问 honeywell PKS, 在里面可以配置访问 PKS APP, 配置完后, OPCDA 可在 RDM 软件安装的服务器被其它软件访问。工业通信网关里含定制开发的程序, 能和 pks 通讯, 并转发发出 OPC 协议来满足数据采集。

1. 气化生产中心有5套 PKS R500 DCS 系统。在煤制氢机柜间部署2台数据采集器 (冗余部署), 安装霍尼韦尔 RDM 软件, 然后在 RDM 里面配置对应5套 PKS OPC, 从而提供 OPC server, 通过 OPC server 完成实时数据采集。油渣萃取装置浙江中控 DCS 系统通过 OPC server 完成实时数据采集。

2. 液化生产中心有5套 PKS R500 DCS 系统。在四联合机柜间部署2台数据采集器 (冗余部署), 安装霍尼韦尔 RDM 软件, 然后在 RDM 里面配置对应5套 PKS OPC, 从而提供 OPC server, 通过 OPC server 完成实时数据采集。2套和利时 MACS V6 系统数据通过 PKS 系统采集。

3. 间接液化生产中心有1套 PKS R500 DCS 系统和2套 PKS R311 DCS 系统。在重整机柜间部署2台数据采集器 (冗余部署), 安装霍尼韦尔 RDM 软件, 然后在 RDM 里面配置对应重整装置 PKS OPC, 从而提供 OPC server, 通过 OPC server 完成实时数据采集。2套 PKS R311 系统通过工业通信网关采集 (冗余部署)。在重整机柜间部署2台工业通信网关, 由工业通信网关提供 OPC server 服务, 采集服务器采集工业通信网关提供的 OPC 数据, 完成实时数据采集。

4. 环储生产中心有4套 PKS R500 DCS 系统、5套 PKS R311 DCS 系统和1套 PKS R430 DCS 系统。在环保四套机柜间部署2台数据采集器 (冗余部署), 安装霍尼韦尔 RDM 软件, 然后

在 RDM 里面配置4套 PKS R500对应装置 PKS OPC, 从而提供 OPC server, 通过 OPC server 完成实时数据采集。5套 PKS R311 和1套 PKS R430系统通过工业通信网关采集 (冗余部署)。在环保四套机柜间部署2台工业通信网关, 由工业通信网关提供 OPC server 服务, 采集服务器采集工业通信网关提供的 OPC 数据, 完成实时数据采集。2套和利时 MACS V6 系统数据通过 PKS 系统采集。

5. 将热电生产中心 SIS 数据库数据采集至公司实时数据库中。SIS 系统提供 C 语言接口, 开发 C 语言服务程序, 把 SIS 系统的数据集成到 pSpace 实时数据库中。

气体检测系统, 通过数据采集服务器部署 OPCserver 采集实时数据至实时数据库中。为了保证新数据库中数据的完整性, 需要对原 PHD 内已经存在的历史数据进行迁移。PHD 内历史数据的迁移, 需要保证不影响当前软件运行, 迁移数据需要满足完整性和准确性, 不能影响新数据库数据的存储, 不能出现存储混乱问题。

## (三) 数据集成方案

各生产中心数据采集到实时数据库后, 需要通过服务器向其他系统提供数据。

1. 企业内部 MES 系统: 利用现有 MES 服务器, 在 MES 厂商提供的 “PHDApi.cs” 接口程序引用力控 .netSDK, 替换原 PHD SDK 接口, 再重新编译接口程内, 用于原 MES 系统数据服务。

2. 集团智慧化工接口服务器

(1) 根据 “煤化工企业易燃易爆与有毒有害气体数据上传集团接口规范” 编写接口程序; 接口程序和集团统一提供的上传程序部署在接口服务器上。编写的接口程序生成需要上传的文件, 再由集团的上传程序把文件上传到集团基石系统服务器。

(2) 集团数据湖项目组编写、调试接口程序, 利用接口服务器将实时数据上传给集团数据湖。

3. 政府主管部门、工业园区数据采集服务器: 在接口服务器上安装实时数据库 OPC DA、UA 标准接口程序, 满足政府主管部门、工业园区对实时数据的采集要求。

4. 可视化服务器: 可视化展示部分, 绘制生产、安全、环保、设备等方面的流程图画面。针对关键设备的运行进行监控、关键性能指标和重要经济指标的监控, 实时数据库系统需要提供资产建模工具, 根据实际需求建立数据模型, 可视化展示内容需满足生产管理需要。

## (四) 数据传输网络改造方案

以生产中心为单位, 每个生产中心设置一个网络汇聚点, 从汇聚点将数据传输至公司核心机房。五个生产中心的汇聚点分别为: 煤液化生产中心四联合机柜间, 间接液化生产中心重整机柜间, 煤气化生产中心煤制氢机柜间, 环储生产中心环保四套机柜间, 热电生产中心六楼机房。保证已对新增加网络设备进行充分技术论证, 保证网络安全畅通。在项目实施前梳理清楚整体网络结构, 画出网络拓扑图, 做出合理规划, 保证网络改造霍尼韦尔、中控、和利时等 DCS 厂家数据独立传输, 不相互干扰; 保证 DSA 通讯协议正常; 保证原所有通讯均正常不受影响。

网络改造新增交换机分别部署在公司核心机房和各中心汇聚点所在机柜，与原有网络打通连接后对各接入交换机点位逐个进行割接。单点位割接全部完成后，对此接入业务进行测试，确认业务已正常运行。确保新增网络设备已进行充分技术论证，保证网络安全畅通。

#### 四、pSpace 数据库在智慧化工厂二次开发及应用

1. 利用读取的实时数据每个生产中心制作一张生产数据展示图，可展示中心概况、生产运行情况、年度任务完成情况、能耗情况、主要设备运行时常等，同时在调度室内、办公网内随时进行访问。

2. 对外数据监控可对基石系统、市应急管理局、工业园区、生态环境局、碳排放管理、能源管理的传输数据状态。

3. 设备监控可对设备、仪表、电气三个专业重点关注内容进行监控，通过设置人机交互画面、权限功能划分让设备监控更加

清晰明了。

4. 工艺监控可对各生产中心主要流程图进行监控，通过办公网络浏览实时工艺流程状态，在数据传输过程中设置防火墙等安全设施保证安全生产。<sup>[2]</sup>

#### 五、总结与展望

随着 pSpace 数据库在该煤化工工厂应用已超过2年，运行期间已可替代原调度执行系统数据，与 ERP、MES、外部数据、DCS、SIS、GDS 系统数据完美交互，标志着 pSpace 数据库在该煤化工企业得到成功应用。实践证明，pSpace 作为统一、高效、开放的实时数据平台，通过与分层分区、安全可靠的工业网络深度融合，成功打通了从底层设备到顶层决策的数据链条，为智慧化应用的落地与价值释放提供了坚实的基础，为数据库深层次再开发指明方向。

#### 参考文献

[1] 力控科技. 企业级实时历史数据库 pSpace 产品手册.

[2] 王树青, 乐嘉谦. 自动化与仪表工程师手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.



# 基于接收信号强度的多天线阵列自适应波束成形

张永波, 张佳懿, 张日宣, 周雨馨, 赵佳鑫, 杜文静  
延安大学物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000  
DOI:10.61369/ERA.2025120047

**摘 要 :** 本文研究了基于接收信号强度的多天线阵列自适应波束成形, 根据接收信号强度估算出移动终端与各部天线的实时距离, 并以此为基础形成相应的阵列修正因子向量, 对天线阵列波束进行实时调整。为了进行对比, 分别选取了四种传播衰减因子进行 MATLAB 仿真。仿真结果表明: 传播衰减因子越小, 波束指向性能越好; 此外, 与无加权相比, 加权后的波束功率集中度更高。

**关 键 词 :** 多天线阵列; 波束成形; 传播衰减因子

## Adaptive Beamforming for Multi-Antenna Arrays Based on Received Signal Strength

Zhang Yongbo, Zhang Jiayi, Zhang Rixuan, Zhou Yuxin, Zhao Jiaxin, Du Wenjing  
College of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000

**Abstract :** This paper investigates adaptive beamforming for multi-antenna arrays based on received signal strength. It estimates the real-time distances between the mobile terminal and each antenna based on the received signal strength and forms corresponding array correction factor vectors to adjust the antenna array beams in real time. For comparison, four propagation attenuation factors are selected for MATLAB simulation. The simulation results indicate that a smaller propagation attenuation factor leads to better beam pointing performance; furthermore, compared to unweighted beamforming, the weighted beamforming exhibits higher power concentration.

**Keywords :** multi-antenna array; beamforming; propagation attenuation factor

### 引言

当前, 随着社会由信息化向智能化深入发展, 人们在日常生活中产生的数据交互场景及流量越来越多, 由此也对通信技术, 特别是承担移动终端流量接入的无线通信技术提出了更高的要求。为了实现更快的接入速度、更大的用户容量, 移动通信和无线互联网通信中均采用了多天线阵列, 例如 4G 移动通信中的 4 天线阵、8 天线阵, 5G 移动通信中的 64 天线阵、128 天线阵, 无线路由器的 3 天线阵、4 天线阵等等。

多天线阵列除了能够提供更高的接入速率, 还可以对电磁波束进行赋形, 使其尽可能对准目标用户, 改善辐射效果。根据波束赋形处理的位置与方式的不同, 一般可以分为模拟波束赋形、数字波束赋形和混合波束赋形三种。数字波束赋形是指对天线端口映射形成的基带信号进行幅度与相位加权, 赋形精度高, 成本也高; 模拟波束赋形是指对送至天线的每路射频信号进行相移, 赋形精度受硬件影响, 成本较低; 混合波束赋形是指同时采用数字波束赋形和模拟波束赋形两种方式, 兼有二者优点。

目前, 针对波束赋形的研究方向有很多。文献 [1] 将传统遗传算法应用于混合波束赋形, 首先对模拟域和数字域分别迭代优化, 然后在功率一定的前提下进行总体优化。文献 [2] 设计了一种 3D MIMO 场景下基于主瓣重叠的快速波束搜索方案, 将辐射空间划分为多个子空间, 使用格雷码来控制波束的投射。文献 [3] 利用毫米波大规模 MIMO 信道在虚拟角度域的结构化稀疏性, 将混合波束赋形设计问题建模为稀疏重构问题, 提出一种基于压缩感知的混合波束赋形设计方案。

本文提出了一种基于接收信号强度的波束赋形方法。首先各天线阵元根据接收信号强度估算出与移动终端之间的等效距离, 然后利用该等效距离形成定向波束。

课题信息: 本文受延安大学校级大学生创新创业训练计划项目 D202309 资助。

作者简介:

张永波 (1980.11—), 男, 汉族, 山西省忻州市人, 研究生学历, 太原理工大学, 延安大学物理与电子信息学院就职, 通信工程专业讲师, 主要从事通信工程专业的教学与科研工作。课题: 主持校级课题结题 3 项, 发表论文 10 余篇;

张佳懿 (2003.03—), 女, 汉族, 陕西省铜川市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

张日宣 (2003.09—), 女, 汉族, 陕西省西安市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

周雨馨 (2002.11—), 女, 汉族, 陕西省渭南市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

赵佳鑫 (2003.11—), 女, 汉族, 陕西省渭南市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

杜文静 (2002.08—), 女, 汉族, 陕西省宝鸡市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生。

## 一、多天线波束成形原理

采用多天线阵列时,天线的排列形式多种多样,常见的有线阵、面阵、圆阵等。下面以最基本的等距离直线阵为例来说明其原理。

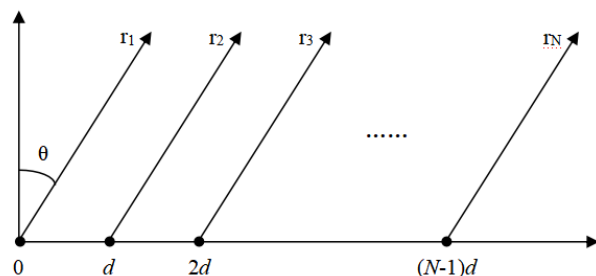


图1 等距离直线阵

如图1所示,假设直线阵共有  $N$  个阵元,每个阵元的信号初始幅度均相同,根据图中的几何关系,可得阵列因子为<sup>[4]</sup>

$$AF = 1 + e^{j(kd \sin \theta + \delta)} + e^{j2(kd \sin \theta + \delta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \sin \theta + \delta)} \quad (1)$$

其中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为电波波长,  $d$  为阵元间距,  $\delta$  为阵元之间的相位差。

定义阵列向量为

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j(kd \sin \theta + \delta)} & \dots & e^{j(N-1)(kd \sin \theta + \delta)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

加权向量为

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_0 e^{j\phi_0} & w_1 e^{j\phi_1} & \dots & w_{N-1} e^{j\phi_{N-1}} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

则加权后的阵列因子为

$$AF = \mathbf{a}(\theta) \mathbf{w} \quad (4)$$

通过实时调整加权系数,就可以改变天线阵的功率辐射方向图。

## 二、自适应波束成形

当终端处于移动状态时,随着传播距离的变化,天线接收功率也在实时变化,因此可以根据接收功率的大小自适应调整天线阵列的加权系数,使主瓣方向始终对准目标用户。

假设天线数为  $N$ ,第  $i$  个天线的接收信号归一化强度为  $\beta_i$ ,可以使发射信号的加权因子与之成正比

$$\mathbf{w} = \rho [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_{N-1}]^T \quad (5)$$

其中,  $\rho$  为比例系数,此处不考虑相位加权。

在实际仿真中,可以近似认为接收信号强度与传播距离的  $r$  次方成反比,我们将  $r$  称为传播衰减因子。

本文取天线数  $N=4$ ,天线阵为等距离直线阵,阵元间距  $d = \lambda/2$ ,  $\lambda$  为电波波长,天线电流相位差均为0。我们对图2的两种位置情况进行 MATLAB 仿真 ( $\Delta$  代表用户位置),取传播衰减因子  $r=2$ ,得到其归一化幅度辐射方向图如图3所示。

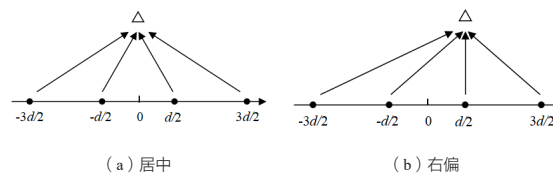


图2 两种用户位置示意图

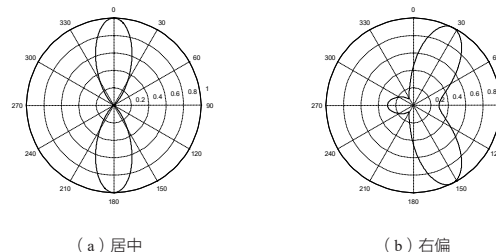


图3 两种位置的阵列归一化幅度辐射方向图

图3中的 (a) 图取归一化幅度加权因子为  $[5/13 \ 1 \ 1 \ 5/13]$ , (b) 图取归一化幅度加权因子为  $[1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2]$ 。从图上可以看出,波束的指向性良好,旁瓣很少,能够实时跟踪用户位置变化。

进一步对图2 (b) 所示位置情况进行深入研究。分别取归一化幅度加权因子为  $[1/25 \ 1/4 \ 1 \ 1/4]$ 、 $[1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2]$ 、 $[1/\sqrt{5} \ 1/\sqrt{2} \ 1 \ 1/\sqrt{2}]$ 、 $[1/\sqrt{5} \ 1/\sqrt{2} \ 1 \ 1/\sqrt{2}]$  四种,对应于传播衰减因子  $r$  为4、2、1、1/2,得到的辐射方向图如下所示。

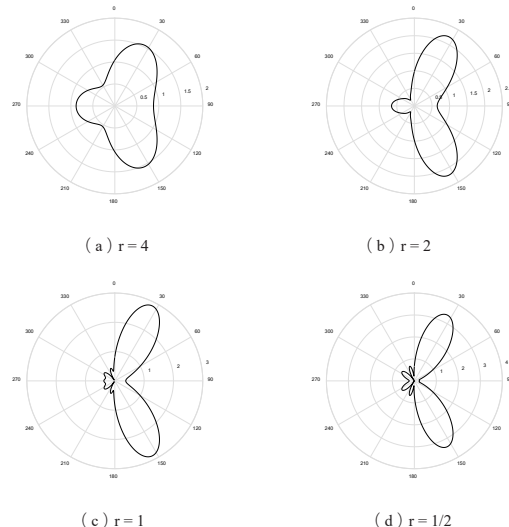


图4 四种传播衰减因子下的阵列辐射方向图

观察上图四种情况,可以发现随着传播衰减因子的减小,波束的定向性能越来越好,这一点可以从主瓣、副瓣的最大幅度和主瓣的半功率波束宽度等三项指标上得到验证,具体数据如下表所示。

表1 四种传播衰减因子下的波束参数

参数	主瓣最大幅度	副瓣最大幅度	主瓣波束宽度
$r=4$	1.5400	0.8797	$58.76^\circ$
$r=2$	2.2000	0.6491	$39.27^\circ$
$r=1$	2.8614	0.4472	$33.54^\circ$
$r=1/2$	3.3505	0.6953	$31.24^\circ$

分析上表,可以发现:传播衰减因子越小,主瓣幅度越大,波束宽度越窄,说明波束的指向性能越好。与此同时,副瓣幅度

呈现先减小后增大的趋势，结合图4，可以得知，随着波束指向性能越来越好，波束形状从连成一片趋向于离散化和精细化，致使部分副瓣辐射功率较为集中。

接下来进一步比较一下无加权和有加权两种情况下的波束形状，假设有精确的波达方向估计，同样对加权系数作归一化处理，无加权时加权向量可视为  $[1\ 1\ 1\ 1]$ ，有加权时选取指向性最好的加权向量  $[1/\sqrt{5}\ 1/\sqrt{2}\ 1\ 1/\sqrt{2}]$ ，二者的波束辐射方向图如下。

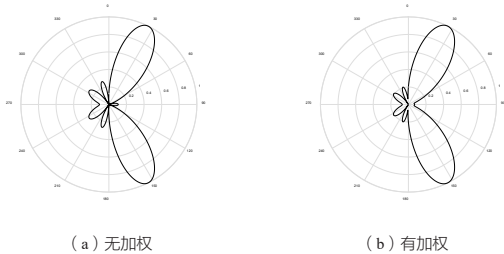


图5 无加权与有加权的天线阵辐射方向图对比

对比以上两种情况，很容易发现无加权时旁瓣更多且更大，共有4个左侧旁瓣和1个右侧旁瓣，且4个左侧旁瓣的归一化幅度峰值均明显超过了0.2；有加权时只有4个左侧旁瓣，其归一化幅度峰值大约为0.2。由此可知，有加权时波束集中度明显更高。

### 三、总结

本文研究了天线阵列的自适应波束成形，根据接收信号强度来实时调整波束形状。分别采用四种传播衰减因子进行仿真，仿真结果显示：该方法可以使天线主瓣有效对准目标用户，并且传播衰减因子越小，波束的指向性能越好。另外，与无加权波束成形相比，有加权时旁瓣的数目和功率都更小，波束集中度更高。

### 参考文献

- [1] 郑文逸, 吴广富, 李云. 基于 MIMO 阵列的混合波束赋形算法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2022, 34(04): 646-653.
- [2] 李佩茵. 毫米波大规模 MIMO 系统中的 3D 波束赋形及跟踪技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [3] 王力权, 马西锁, 王力男. 基于压缩感知的毫米波大规模 MIMO 混合波束赋形设计 [J]. 信息技术, 2022, (08): 48-52.
- [4] Frank Gross. 智能天线 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 74-75.

