



www.viserdata.com

# 工程施工技术

ENGINEERING CONSTRUCTION TECHNOLOGY

月  
刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 2972-4058(online) 2972-404X(print)

中国知网 (CNKI) 收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊



2025 7

第3卷 总第24期

## COMPANY INTRODUCTION

# 公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd. )成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



# 工程施工技术

Engineering Construction Technology

2025年·第3卷·第7期(总第24期)

主办单位: Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N: 2972-4058 (online)

2972-404X (print)

发行周期: 月刊

出版时间: 7月

数据库收录: 中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

期刊网址: www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱: viser-tech@outlook.com

地 址: 195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,  
Singapore 168976

学术主编: 朱 强

学术副主编: 魏 忠 高 江

责任编辑: 戚 豪

学术编委: 倪勤盛 陈 鹏 王子红 张耕野  
侯明卫 刘 刚 赵 欢 王海军  
王永华 洪秋生 刘汉涛 钱 冰  
吉咸伟 杨熠卿 宋世超

美工编辑: 李 亚 Anson Chee

定 价: SGD 20.00

## 本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点;作者文责自负,如有侵犯他人版权或者其他权利的行为,本刊概不负连带责任。

版权所有,未经许可,不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人: 稿件凡经本刊使用,如无电子版或书面的特殊声明,即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

## 目 录

### CONTENTS

#### 建筑工程

- 智能化技术在建筑给排水监控系统的应用研究.. 崔 乐 1  
基于 BIM 技术的施工成本控制方法应用探讨 .....  
.....吴沛晟 陈明栋 沈 壮 李 帅 4  
基于现场实际条件的大型钢结构吊装路径与方案优化分析 ..... 蒋宇锋 黄志光 潘勤涛 7

#### 市政工程

- 路桥过渡段加固施工技术应用分析 ..... 李发新 10  
城市轨道交通与市郊铁路互联互通贯通运营技术研究 .....  
.....李天然 14  
关于道路交通平面交叉口渠化及安全设计的探讨 .....  
.....彭益清 18  
路桥施工管理过程的创新管理分析 ..... 王腾骏 21

#### 冶金工程

- 高温熔融还原铜渣冶炼铜铁合金..... 黄伟军 刘亚静 24  
铸管水泥砂浆内衬防腐工艺优化与质量控制研究.....  
.....姚思隽 29

#### 材料工程

- 基于响应面法的 EGC 力学性能研究与配合比优化.....  
.....余志辉 周宗伯 刘文化 夏 涛 张 勇 32

#### 工程管理

- 建筑工程管理及施工质量控制有效策略 ..... 颜学江 37  
电子招投标平台对工程建设项目流标率的影响实证研究 .....  
.....孙 雷 40  
基于信息化手段的施工项目安全环保动态监管研究 .....  
.....贾志国 43  
浅议建筑工程管理的影响因素及对策分析 ..... 李中平 46

#### 施工技术

- 地下工程防渗漏关键节点施工控制与质量保障研究 .....  
.....徐善亮 潘 宇 49  
装配式建筑施工关键节点施工技术研究 ..... 张 威 52

深基坑施工全过程智能化监测与多源数据融合分析方法研究 .....	尹海勇 刘柬宏	55
高层建筑施工中爬架安全控制技术研究 .....	王 瑞	58
生物基聚酰胺建筑模板应用综合技术研究 .....		
.....郑 硕 吕 珊 罗凯旋 宋 磊 陈 琛		62
静力切割工艺在复杂地质条件下基坑支撑拆除中的适应性研究.....赵昊 徐善亮		65
大体积混凝土施工裂缝控制技术研究与工程应用.....赵 言		68
复杂地质条件下双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术应用研究 .....	付兴南 周赛赛	71
保通钢便桥施工技术及运维期间评估、维护研究.....蔡欣荣		74
预制砖胎膜施工技术在提升基础施工效率中的应用分析 .....	周 豪 赵 昊	79

## 石油化工

关于苯乙烯主冷器夏季高温运行的对策 .....	曹振斌	82
<b>节能环保</b>		
冷库制冷系统设计中常见问题的探讨 .....		
.....王婵君 王明章 常广勋		86
空调制冷系统的自动化控制与节能策略研究.....王明章		
.....王 锋 郭重阳		89

## 机 电 机 械

节能设计理念在机械制造及其自动化中的应用 .....		
.....张国帅		92
城市轨道交通供电系统的无功补偿要点分析 ...	王元贵	95
机械加工制造中自动化技术的运用探究 .....		
.....冯 凯 陈哲瀚 陶冯炜 卞俊杰 沈芯卉		98
机械设计制造中数字化技术的运用策略研究 .	马孟硕	101
氧化空气压缩机组不对中故障机理分析及验证思路 .....		
.....牛广原		105

## 建 筑 设 计

土木工程结构设计中存在的问题及应对措施探讨.....		
.....郑广超 彭伟湘		108
谈节能设计在建筑设计中的有效应用分析 .....	杨义新	111
基于地域文化的城市建筑风貌设计探讨 .....	胡晓娟	114
城市更新背景下老旧小区建筑立面改造设计探讨 .....		
.....耿 莎		117
可持续理念下绿色建筑设计策略研究 .....	卢子凡	120
建筑设计院多元化业务拓展与经营风险防控策略 .....		
.....李 凌		123
基于人工智能的装配式建筑设计方法探讨 .....	张 冰	126

## 智能化技术在建筑给排水监控系统的应用研究

崔 乐

九易庄宸科技（集团）股份有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**随着建筑行业的不断发展，建筑给排水系统的智能化升级成为提升建筑性能的关键。文中探讨了智能化技术在建筑给排水监控系统中的应用现状、优势、挑战及应对策略。研究发现，智能化技术通过传感器网络、自动化控制和数据分析，显著提高了系统的运行效率和可靠性，降低了运维成本。未来，随着技术的不断进步，智能化给排水监控系统将更加完善，为建筑的可持续发展提供有力支持。

**[关键词]**智能化技术；建筑给排水；监控系统；系统集成；数据安全

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17201 中图分类号: TU976 文献标识码: A

## Research on the Application of Intelligent Technology in Building Water Supply and Drainage Monitoring System

CUI Le

Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** With the continuous development of the construction industry, the intelligent upgrade of building water supply and drainage systems has become the key to improving building performance. The article explores the current application status, advantages, challenges, and response strategies of intelligent technology in building water supply and drainage monitoring systems. Research has found that intelligent technology, through sensor networks, automated control, and data analysis, significantly improves the operational efficiency and reliability of systems, and reduces maintenance costs. In the future, with the continuous advancement of technology, intelligent water supply and drainage monitoring systems will be more perfect, providing strong support for the sustainable development of buildings.

**Keywords:** intelligent technology; building water supply and drainage; monitoring system; system integration; data safety

### 引言

建筑给排水系统是建筑的重要组成部分，其性能直接影响建筑的使用功能和用户体验。传统给排水监控系统存在监测不及时、故障响应慢、能耗高等问题，难以满足现代建筑对高效、节能、安全的要求。在实际应用中，仍面临诸多挑战，如系统集成难度大、数据安全和隐私保护不足、专业技术人员短缺等。研究智能化技术在建筑给排水监控系统中的应用现状、优势、挑战及应对策略，对于推动建筑给排水系统的智能化升级具有重要的现实意义。

### 1 应用现状分析

智能化技术在建筑给排水监控系统中的应用已取得显著进展，为系统的高效运行和精细化管理提供了有力支持。传感器技术的广泛应用是智能化给排水监控系统的重要基础。通过在给排水系统的关键部位安装各种传感器，如压力传感器、流量传感器、水质传感器等，系统能够实时监测水压、流量、水质等关键参数。这些传感器将采集到的数据传输到监控中心，为后续的分析和调控提供数据支持。压力传感器可以实时监测管道内的水压，确保供水系统的稳定运行；流量传感器能够精确测量水流速度和流量，为用水量统计和节水管理提供数据支持。自动化控制

技术则根据预设规则和实时数据自动调节水泵频率、阀门开合程度等，实现系统的高效运行。通过变频调速技术，可以根据用水需求自动调节水泵的运行频率，避免传统系统中水泵长时间高负荷运行的情况，降低能耗。这些技术的应用不仅提高了系统的运行效率，还为建筑的可持续发展提供了重要保障。

尽管智能化技术在建筑给排水监控系统中取得了显著进展，但在实际应用中仍面临诸多挑战。系统集成难度大，不同设备和系统之间的兼容性问题亟待解决。目前市场上各种设备和系统的兼容性较差，不同厂家的产品之间存在通信协议和数据格式的差异，导致系统的集成难度较大。传感器设备和自动化控制设备可能来自不同的厂家，其通信协议和数据格式不一致，需要进行复杂的转换和适配才能实现系统的正常运行。数据安全和隐私保护不足，数据泄露风险高。智能化给排水监控系统采集和存储了大量的数据，这些数据不仅包含系统的运行状态信息，还可能涉及用户的隐私信息。数据安全和隐私保护是智能化系统的重要问题。数据泄露可能导致系统的运行状态被恶意篡改，影响系统的正常运行，甚至可能对用户的生命财产安全造成威胁。这些问题不仅增加了系统的建设和维护成

本,还限制了智能化给排水监控系统的进一步发展。

这些问题不仅增加了系统的建设和维护成本,还限制了智能化给排水监控系统的进一步发展。系统集成难度大导致项目建设周期延长,增加了项目成本和风险。数据安全和隐私保护不足使得用户对系统的信任度降低,影响系统的推广和应用。专业技术人员短缺则导致系统在运行过程中出现故障时难以及时修复,影响系统的稳定运行。解决这些问题对于推动智能化给排水监控系统的广泛应用具有重要意义。未来,需要通过技术创新和管理优化,逐步解决这些挑战,提高系统的集成度、安全性和可靠性,降低系统的建设和维护成本,促进智能化给排水监控系统的广泛应用。通过建立统一的通信协议和数据标准、强化数据安全和隐私保护措施、加强人才培养和优化系统设计等综合措施,智能化给排水监控系统将更加完善,为建筑的可持续发展提供有力支持。

## 2 智能化技术的优势

智能化技术为建筑给排水监控系统带来了诸多显著优势,其中最为突出的是实时监测功能。通过在给排水系统的关键部位安装高精度的传感器,如压力传感器、流量传感器和水质传感器等,系统能够实时采集并传输关键运行参数。这些传感器如同系统的“眼睛”,时刻关注着系统的运行状态。一旦出现异常情况,如漏水、堵塞或水质异常,系统能够立即发出警报,通知维护人员及时处理。这种快速响应机制不仅减少了故障对建筑使用的影响,还避免了潜在的安全隐患。在某大型商业建筑中,通过安装在管道关键节点的压力传感器,系统成功检测到一处隐蔽的漏水点,并及时通知维护人员进行修复,避免了大量水资源的浪费和可能引发的建筑结构损坏。

智能化技术的自动化控制功能显著提高了建筑给排水系统的运行效率,并实现了节能减排的目标。传统给排水系统中,水泵等设备通常以固定频率运行,无论用水需求如何变化,能耗始终较高。这种运行模式不仅浪费能源,还可能导致设备过度磨损,缩短使用寿命。而智能化系统通过引入变频调速技术,能够根据实时用水需求自动调节水泵的运行频率。在用水低谷时段,水泵自动降低运行频率,减少不必要的能耗;在用水高峰时段,水泵则自动提高频率,确保供水稳定。这种智能调控不仅优化了设备的运行状态,还显著降低了能耗。某医院在采用智能化给排水系统后,通过自动化控制功能,每月节省了约 30% 的用水和用电成本,同时确保了医疗用水的稳定供应,提升了医院的运营效率和经济效益。智能化系统的自动化控制功能还减少了设备的维护成本。由于设备运行更加合理,减少了因长时间高负荷运行导致的设备损坏,延长了设备的使用寿命。这不仅降低了设备更换的频率,还减少了因设备故障导致的停机时间,进一步提高了系统的可靠性和稳定性。智能化技术的自动化控制功能为建筑给排水系统

带来了显著的经济效益和环境效益,是未来建筑给排水系统发展的重要方向。

智能化技术的数据分析和预测功能为建筑给排水系统的长期稳定运行提供了有力支持。系统通过收集和存储大量的运行数据,利用大数据分析技术挖掘数据中的潜在规律和趋势。这些分析结果不仅能够帮助维护人员提前预测设备故障,合理安排维护计划,还能优化系统的运行策略。通过对历史用水数据的分析,系统可以预测不同时间段的用水需求,从而优化水泵的运行时间和频率,进一步降低能耗。数据分析还可以评估设备的健康状况,提前发现潜在的性能下降问题,延长设备的使用寿命。某高档住宅小区通过智能化系统的数据分析功能,提前预测并修复了多处潜在的设备故障,减少了维修成本和停机时间,提升了居民的生活满意度。这些功能的综合应用,使得建筑给排水系统不仅在短期内提高了运行效率,还在长期内实现了可持续发展。

## 3 面临的挑战

尽管智能化技术在建筑给排水监控系统中具有诸多优势,但在实际应用中仍面临诸多挑战。系统集成难度大,不同设备和系统之间的兼容性问题需要解决。建筑给排水监控系统涉及多种设备,如传感器、控制器、执行器等,这些设备往往来自不同的制造商,各自采用不同的通信协议和数据格式。某些传感器可能采用 Modbus 协议,而控制器则使用 Profibus 协议,这种协议不一致导致设备之间无法直接通信,需要进行复杂的协议转换和适配。不同设备的硬件接口和软件平台也存在差异,增加了集成的复杂性。解决这一问题需要建立统一的通信协议和数据标准,推动设备制造商遵循行业规范,确保设备之间的无缝对接。

数据安全和隐私保护是智能化系统的重要问题,防止数据泄露和被恶意攻击是系统稳定运行的关键。建筑给排水监控系统采集和传输大量的敏感数据,包括水压、流量、水质等信息,这些数据不仅关系到建筑的正常运行,还可能涉及用户的隐私。通过分析用水数据,可以推断出用户的日常活动规律。数据的安全性和隐私性至关重要。技术措施方面,采用加密技术对数据进行加密处理,防止数据在传输和存储过程中被窃取和篡改。使用高级加密标准 (AES) 对传感器采集的数据进行加密,确保数据在传输过程中的安全性。采用访问控制技术,限制对数据的访问权限,确保只有授权人员才能访问和操作数据。管理措施方面,建立完善的数据安全管理制度,明确数据的采集、存储、使用和共享的流程和规范,加强对数据的管理和监督。

智能化技术的应用需要专业的技术人员进行维护和管理,而目前相关人才的短缺也制约了系统的发展。智能化给排水监控系统涉及多个领域的知识,如传感器技术、自动化控制、数据分析等,需要技术人员具备多方面的专业知识和技能。目前市场上相关专业技术人员短缺,导致系统的建设和维护难度较大。一方面,高校和职业院校应

调整相关专业的课程设置,增加智能化技术方面的课程内容,培养具备多方面专业知识和技能的复合型人才。另一方面,企业应加强对在职人员的培训和教育,通过内部培训、外部培训和实践锻炼等方式,提高技术人员的专业水平和实践能力。

#### 4 应对策略

针对智能化技术在建筑给排水监控系统中面临的诸多挑战,首要的应对策略是加强系统集成。在实际应用中,不同设备和系统之间的兼容性问题常常导致集成困难。传感器设备和自动化控制设备可能来自不同的厂家,其通信协议和数据格式不一致,需要进行复杂的转换和适配才能实现系统的正常运行。建立统一的通信协议和数据标准至关重要。通过制定行业标准和规范,推动各设备厂家的产品符合统一的通信协议和数据格式,可以实现设备之间的无缝对接,从而大大提高系统的集成效率和可靠性。强化数据安全和隐私保护也是应对挑战的关键措施。数据安全和隐私保护是智能化系统的重要问题,防止数据泄露和被恶意攻击是系统稳定运行的关键。采用加密技术对数据进行加密处理,防止数据在传输和存储过程中被窃取和篡改;采用访问控制技术,限制对数据的访问权限,确保只有授权人员才能访问和操作数据;采用数据备份技术,定期对数据进行备份,防止数据丢失和损坏。这些技术措施能够有效保障数据的安全性和完整性。

加强人才培养是推动智能化给排水监控系统发展的另一关键策略。智能化技术的应用需要专业的技术人员进行维护和管理,而目前相关人才的短缺是制约系统发展的主要因素之一。通过高校教育、企业培训和产学研合作等方式,可以培养高素质的专业技术人才。高校和职业院校应调整相关专业的课程设置,增加智能化技术方面的课程内容,培养具备多方面专业知识和技能的复合型人才。企业应加强对在职人员的培训和教育,通过内部培训、外部培训和实践锻炼等方式,提高技术人员的专业水平和实践能力。优化系统设计也是降低系统成本、提高应用可行性的有效途径。在系统设计阶段,应充分考虑系统的功能需求和经济性,合理选择设备和技术方案。根据建筑的规模和用水需求,选择合适的传感器设备和自动化控制设备,避免设备的过度配置;采用开源软件和硬件平台,降低系统的开发和采购成本。在系统运行阶段,应加强系统的运

行管理和维护,提高系统的运行效率,降低系统的运行成本。通过优化系统的运行策略,减少设备的能耗;加强设备的维护保养,延长设备的使用寿命,降低设备的更换成本。

综合来看,加强系统集成、强化数据安全和隐私保护、加强人才培养以及优化系统设计等对策的协同实施,能够有效解决智能化技术在建筑给排水监控系统中面临的挑战,推动系统的智能化升级。这些措施不仅提高了系统的兼容性和可靠性,还保障了数据的安全性和完整性,同时降低了系统的建设和运行成本,提高了系统的应用可行性。随着技术的不断进步和相关问题的逐步解决,智能化给排水监控系统将更加完善,为建筑的可持续发展提供有力支持。未来,随着人工智能、物联网、大数据等技术的深度融合,智能化给排水监控系统将具备更强的自主学习和预测能力,能够实现更加精细化的管理和控制,为人们创造更加舒适、安全的建筑环境。

#### 5 结语

智能化技术在建筑给排水监控系统中的应用是建筑行业发展的必然趋势。通过实时监测、自动化控制和数据分析等技术手段,能够有效提高系统的运行效率和可靠性,降低运维成本。虽然目前仍面临系统集成难度大、数据安全和隐私保护不足、专业技术人员短缺等问题,但随着技术的不断进步和相关问题的逐步解决,智能化给排水监控系统将更加完善,为建筑的可持续发展提供有力支持,为人们创造更加舒适、安全的建筑环境。

#### [参考文献]

- [1]王晓明.智能化技术在建筑给排水中的应用研究[J].建筑技术开发,2023,50(2):45-47.
  - [2]李华.基于物联网的建筑给排水监控系统设计与实现[J].智能建筑电气技术,2022,16(4):78-80.
  - [3]张伟.智能化技术在建筑给排水系统中的应用分析[J].建筑与文化,2024,12(1):67-69.
  - [4]刘洋.大数据分析在建筑给排水监控系统中的应用探讨[J].建筑节能,2023,51(3):56-58.
  - [5]赵强.建筑给排水监控系统的智能化设计与实践[J].建筑科学,2022,38(5):89-91.
- 作者简介: 崔乐 (1994.9—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北工程大学, 现工作单位: 九易庄宸科技(集团)股份有限公司。

## 基于 BIM 技术的施工成本控制方法应用探讨

吴沛晟<sup>1</sup> 陈明栋<sup>2</sup> 沈壮<sup>2</sup> 李帅<sup>2</sup>

1. 甘肃建筑职业技术学院, 甘肃 兰州 730000

2. 中建新疆建工(集团)有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**建筑行业快速发展, 施工项目规模扩大, 有效控制施工成本对提升项目经济效益很关键。建筑信息模型(BIM)技术是集成化信息管理工具, 靠数字化、三维化建筑模型实现多专业协同设计与施工管理, 让施工过程精细化、智能化管理大大推进。文章依据BIM技术, 全面探讨它在施工成本控制的具体应用办法, 着重分析施工预算、进度与成本集成管理以及变更管理等方面的实际策略, 还构建了相应实施流程。通过深入探讨BIM施工成本控制方法的理论与实践, 希望能给施工企业带来科学合理成本控制思路与操作路径, 促使施工管理朝着数字化、智能化转变, 提高项目整体效益与竞争力。

**[关键词]**BIM技术; 施工成本控制; 控制方法

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17194

中图分类号: U44

文献标识码: A

## Discussion on the Application of Construction Cost Control Method Based on BIM Technology

WU Peisheng<sup>1</sup>, CHEN Mingdong<sup>2</sup>, SHEN Zhuang<sup>2</sup>, LI Shuai<sup>2</sup>

1. Gansu Construction Vocational Technology College, Lanzhou, Gansu, 730000, China

2. CSCEC Xinjiang Construction & Engineering (Group) Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** With the rapid development of the construction industry and the expansion of construction project scale, effective control of construction costs is crucial for improving project economic benefits. Building Information Modeling (BIM) technology is an integrated information management tool that utilizes digital and three-dimensional building models to achieve multi-disciplinary collaborative design and construction management, greatly promoting the refinement and intelligent management of the construction process. The article comprehensively explores the specific application methods of BIM technology in construction cost control, focusing on the analysis of practical strategies in construction budget, schedule and cost integration management, and change management. Corresponding implementation processes are also constructed. Through in-depth exploration of the theory and practice of BIM construction cost control methods, we hope to provide construction enterprises with scientific and reasonable cost control ideas and operational paths, promote the transformation of construction management towards digitization and intelligence, and improve the overall efficiency and competitiveness of projects.

**Keywords:** BIM technology; construction cost control; control method

### 引言

施工成本控制乃是工程项目管理当中的关键核心所在, 其对项目经济效益以及企业竞争力有着极为直接的影响作用。随着建筑行业所呈现出的复杂程度不断提升, 传统的成本控制方式面临着诸如信息孤岛、沟通障碍以及数据滞后等一系列的挑战情况, 这些挑战的存在严重影响了成本控制的精准化以及高效化管理。BIM技术能够凭借构建起的数字化且可视化的三维模型, 成功打破不同专业之间存在的信息壁垒, 进而达成设计、施工以及运营在整个全生命周期范围内的协同管理目标。借助BIM技术的应用, 施工成本控制便可以实现动态预算的调整以及更为精细化的管理, 并且还能通过将进度与成本加以集成分析的方式, 及时地去发现潜在的风险并且予以化解, 以此来进一步提升成本控制的实际效果。本文着重关注BIM技术在施工成本控制方面的具体应用情况, 希望能够给施工企业在相关方面提供一定的技术路径参考以及管理策

略指导, 从而有力地推动工程项目得以高效地实施开展, 并且促使项目的效益能够实现最大程度的发挥。

### 1 BIM 技术概述

BIM技术全称为建筑信息模型, 是一种在建筑、工程和设计领域广泛应用的创新技术。它通过数字化建模, 将建筑物、结构和设备等元素的相关信息整合在一个统一的平台中, 实现了多个专业之间的协同工作和高效沟通。BIM技术的诞生, 标志着建筑设计与施工的革命性变革。传统的建筑工程设计, 往往需要各个专业团队在独立的设计软件中进行工作, 互相之间信息的传递和整合非常困难。而BIM技术的出现, 打破了这种限制, 将建筑设计从二维平面中解放出来, 使设计师能够以三维的形式构建建筑物, 并在此基础上进行各团队的专业协作。BIM技术的核心在于建筑信息模型, 它是一个包含了建筑物的几何形状、材料、构件、设备等相关信息的数字化表示。通过BIM软件, 设计师可以创建一个虚拟的建筑模型, 并给

模型中的每个元素添加详细的信息。这些信息包括尺寸、材料特性、供应商信息、施工工艺等。除了在设计阶段的协作, BIM 技术在建筑施工和运维中也发挥着重要的作用。通过 BIM 模型, 施工人员可以进行碰撞检测, 即在施工前发现和解决不同专业团队之间的冲突, 避免施工过程中的误差和问题。此外, BIM 模型还可以与施工设备和机器人进行集成, 实现自动化施工和优化资源利用。

## 2 基于 BIM 的施工成本控制方法

### 2.1 BIM 技术在施工成本控制中的应用价值

BIM 技术作为一款先进的数字化信息集成工具, 在施工成本控制方面彰显出了十分突出的应用价值。BIM 可以把建筑项目的几何信息、材料规格、施工工艺以及相关成本数据相互有机结合起来, 进而构建起详尽且能够动态更新的成本信息模型, 达成施工成本的可视化管理目标。借助这一集成平台, 项目管理者便可以实时清楚地知晓各个阶段的成本支出具体情况, 切实有效地防止因信息滞后而出现的决策失误情况发生。BIM 技术推动了多专业之间的深入协同合作, 打破了传统施工当中设计、采购、施工等诸多环节存在的信息孤岛状况, 减少了由于信息不对称所引发的成本浪费以及资源浪费现象。除此之外, BIM 技术还能够提供基于模型的成本预算以及动态调整的支持功能, 这使得预算编制工作变得更加科学合理起来, 也降低了因设计变更或者施工偏差而造成成本超支的风险。BIM 模型可支持对施工过程进行模拟操作, 开展碰撞检测以及施工方案优化等工作, 如此一来便能减少现场返工以及材料损耗的情况, 大幅提升成本控制的精准程度和工作效率。

### 2.2 BIM 在施工预算中的应用

施工预算是项目成本管理的开端, 其对整个施工过程的成本控制成效有着直接的影响。有了 BIM 技术, 施工预算工作能够达成更为科学且系统的管理状态。凭借构建 BIM 模型这一方式, 设计师以及造价工程师可依据真实的三维建筑模型, 精准地提取各类构件的数量与规格, 如此一来便规避了传统二维图纸里数量计算存在较大误差的那种情况。与此 BIM 系统能够联合材料价格数据库还有施工工艺标准, 自动形成各分部分项工程的预算清单, 这在很大程度上提升了预算编制的效率以及准确性。预算的动态更新属于 BIM 技术的一项关键优势, 当设计发生变更或者施工条件出现调整时, BIM 模型可以实时呈现出相关构件和工序的变化状况, 进而迅速对预算数据做出调整, 以此保证预算具备时效性以及可靠性。在预算过程中所具有的可视化功能让项目管理者能够较为直观地去理解成本构成, 针对那些重点的成本控制环节展开有效的管控举措, 避免出现预算超支的情况。

### 2.3 基于 BIM 的施工进度与成本集成管理

施工进度与成本控制在项目管理里属于两大关键核

心环节, 把这两者有效地集成起来, 能够为达成成本优化给予重要的保障。在传统的施工管理当中, 进度以及成本方面的信息常常是各自独立地去进行管理的, 如此一来便使得协调工作变得颇为困难, 而且还会出现数据脱节的情况, 进而增加了施工所面临的风险以及管理方面的难度。而 BIM 技术能够把施工进度计划和三维模型相互结合起来, 以此来实现对进度信息进行可视化的展示以及动态的跟踪, 进而能够为成本控制提供较为直观的数据方面的支持。借助于 BIM 模型, 在施工各个阶段的计划任务、资源投入以及完成的具体情况都能够清晰地展现出来, 管理者可以实时对施工进度加以监控, 能够及时察觉到进度偏差, 并且知晓其给成本所带来的潜在影响。BIM 还能支持在施工进程之中同步地去更新成本数据, 再结合像挣值管理这类分析工具, 能够精准地去评估施工进度和成本之间的匹配程度, 从而达成对进度偏差针对成本的动态反馈以及相应的调整。这样的集成管理模式, 一方面提升了数据的透明度以及管理的效率, 另一方面也有效地减少了由于进度出现滞后或者超前而导致的成本浪费情况, 进一步强化了项目整体的风险控制能力。

### 2.4 变更管理与成本控制的融合

施工进程当中, 设计变更以及现场调整属于常见情况, 怎样高效地去管理变更, 并且对由其引发的成本波动加以控制, 这在施工成本控制方面堪称一大难题。BIM 技术给变更管理给予了颇为有力的支撑作用。借助 BIM 模型, 设计变更可以在虚拟环境里达成可视化的模拟效果, 相关专业的人员能够提前对变更可能产生的影响展开评估, 涉及结构、施工工艺以及材料等诸多方面。BIM 系统能够对变更信息实施集中的管理操作, 可自动同步更新模型里面的全部相关数据, 以此保证各个参与方都能够获取到最新的设计信息, 防止因信息滞后的缘故而出现重复施工以及资源浪费等不良状况。与此基于 BIM 所开展的变更管理与成本控制实现了深度融合的状态, 凭借动态计算变更所带来的额外成本以及工期方面的影响, 来助力项目管理者更为科学地去评估变更决策的经济可行性。BIM 平台具备生成变更成本分析报告的能力, 能给出相应的依据来支持决策行为, 及时对预算以及施工计划做出调整, 进而降低变更所存在的风险。

## 3 基于 BIM 的施工成本控制实施流程

### 3.1 BIM 模型构建与信息集成

施工成本控制要以准确且完整的工程信息数据作为前提条件。BIM 模型的搭建在这个过程当中属于基础环节, 其包含的内容不只是建筑的几何形状方面的情况, 而且还涉及材料属性、施工工艺以及设备规格等诸多维度的信息。在具体实施的时候, 一开始得依靠设计院和施工单位密切协同合作, 依据建筑设计图纸来创建详尽的三维 BIM 模型<sup>[1]</sup>。这个模型要把各个专业的设计信息都集成起

来,像是结构方面的、机电方面的以及给排水方面的信息,以此来保证数据具备完整性并且保持一致性。接着,把相关的成本数据、供应商信息还有施工工艺标准等等都导入到模型里面,进而构建起完备的成本信息体系。这样的一种信息集成的过程可以确保施工各个环节当中的成本数据都能够实时地呈现在 BIM 模型当中,达成信息的统一管理以及共享的目的。凭借着持续不断地对 BIM 模型加以更新与维护,项目的管理者便能够随时知晓工程的推进情况以及成本的状况,从而形成成本控制的数字化根基,给后续的动态监控以及决策给予精准的数据方面的支撑。

### 3.2 施工阶段成本动态监控

施工阶段对于成本控制而言属于极为关键的时期,在这一阶段对施工成本展开动态监控,便能够及时察觉到其中出现的异常情况并加以纠正,进而有效防止成本出现超支的现象。基于 BIM 技术所开展的动态成本监控,主要是依靠 BIM 模型以及施工现场数据能够实时完成集成来达成的。通过持续且细致地对工程进度、资源投入还有实际成本等方面予以跟踪,就能够实现对施工成本的在线监控以及相应的预警功能<sup>[2]</sup>。借助传感器、物联网设备以及现场信息采集系统等手段,把实际施工的具体进展状况、材料的实际使用情况以及劳动力投入方面的相关数据都反馈到 BIM 平台之上,以此来保证这些数据具备实时性以及准确性。BIM 系统会综合考虑计划成本以及预算信息这两方面的情况,动态地去计算当前阶段的实际成本数额,从而精准地识别出成本方面存在的偏差情况。接着,BIM 模型运用可视化的呈现方式,十分直观地展示出成本呈现出的动态变化趋势,这能够助力管理者迅速锁定成本出现异常的具体环节或者施工区域所在之处。再结合智能分析工具的作用,系统还能够自动地生成成本预警的相关报告,以此来引导项目团队及时对施工方案或者资源配置做出相应的调整。除此之外,动态监控机制还推动了信息的透明化共享进程,使得各参与方在协同效率方面得到了切实的提升,有效地规避了传统管理模式当中因信息存在滞后情况以及沟通出现障碍而引发的成本风险问题。

### 3.3 成本控制效果评估

成本控制效果的评估乃是检验施工成本管理举措是否行之有效关键环节,同时也是开展持续改进工作的根基所在。凭借 BIM 技术,评估工作得以达成量化的程度,具备了客观性,并且能够展开动态的监测操作。将施工前期所预算的预算成本同施工进程中实际产生的成本数据加以比对,再综合考量项目进度以及质量指标等方面的情况,从而全方位地去评定成本控制所取得的绩效水准<sup>[3]</sup>。BIM 系统能够对那些关键的成本控制节点实施回溯式的分析,以此来辨识出产生偏差的原因,深入剖析成本出现

超支的具体缘由,像是材料存在浪费现象、施工效率处于较低水平或者设计发生了变更等情况的影响。评估得出的结果会以可视化的报表以及图表的形式展现出来,这便使得项目管理层能够较为轻松地知晓项目整体的成本状况以及控制所达成的成效如何。如此依据评估所反馈回来的信息,项目团队便可以对以往的经验与教训加以总结,进而对施工策略以及管理方法做出相应的调整,进一步完善 BIM 成本控制模型。持续不断地开展成本控制效果的评估工作,一方面提升了项目管理的透明程度,另一方面也促使施工单位构建起科学且合理的成本控制机制,进而为后续的项目给予宝贵的管理方面的参考以及技术层面的支持。

### 4 结语

建筑行业朝着数字化、智能化方向迈进之时,凭借 BIM 技术所开展的施工成本控制办法,呈现出颇为显著的应用潜力以及颇具广度的推广价值。本文全面且细致地对 BIM 技术于施工成本控制方面的诸多维度应用展开探讨,其中涵盖了预算编制环节、进度与成本集成管理方面以及变更管理等极为关键的环节,与此同时还搭建起了较为科学且合理的实施流程。借助达成成本信息的数字化集成状态以及动态监控状况,BIM 技术切实有效地提升了施工进程当中的透明程度以及管理工作的效率,使得资源浪费的情况得以减少,风险发生的概率也降低了,进而促使项目经济效益得以提升。虽说当下 BIM 应用在成本控制领域依旧面临着数据标准化层面的难题、技术集成方面的阻碍以及人员培训等等方面的挑战,然而伴随技术不断向前发展以及管理理念持续往深处推进,上述这些难题将会一步步获得妥善解决。在未来,BIM 技术有希望和人工智能技术、大数据分析等新兴技术实现高度融合,从而推动施工成本控制朝着更高的层次不断发展,最终达成建筑项目智能化全生命周期管理的目标。施工企业务必要积极主动地去拥抱这样的一种发展趋势,积极推动 BIM 技术得以广泛运用,以此来促使成本管控朝着精细化、科学化以及持续优化的方向迈进。

### 【参考文献】

- [1]魏泽坤.BIM 技术在工程项目施工成本控制中的应用研究[D].山东:山东建筑大学,2023.
  - [2]徐明山.BIM 技术在工程项目施工成本控制中的应用[J].大陆桥视野,2024(5):124-126.
  - [3]李文洁.基于 BIM 技术的建筑施工成本控制应用分析[J].江苏建筑职业技术学院学报,2024,24(2):33-38.
- 作者简介:吴沛晟(1985.4—),女,汉族,甘肃静宁人,研究生,工商管理硕士,讲师,2014 年 6 月毕业于兰州理工大学 工商管理专业,工商管理硕士主要研究方向:主要从事高校就业政策落实及党建思政方面的研究。

## 基于现场实际条件的大型钢结构吊装路径与方案优化分析

蒋宇锋 黄志光 潘勤涛

常州中车铁马科技实业有限公司, 江苏 常州 213000

**[摘要]**在现代船舶建造与舾装过程中, 大型钢结构吊装是决定关键节点工期与施工安全的重要环节。由于船体结构复杂、作业空间受限、水域环境特殊、安全要求严苛, 因此需在充分评估现场条件基础上, 优化吊装路径与作业方案。文中聚焦于船厂及船体建造现场, 结合吊装设备布置、构件运输路径、吊装顺序及多设备协同等核心因素, 系统阐述吊装路径的设计原则与优化技术, 提出多方案比选和动态调整策略, 适用于各类船舶建造和大型舾装件安装作业场景, 有效提升吊装作业的安全性与施工效率, 为实现高质量、高效率、可控性的船舶建造提供技术支撑。

**[关键词]**钢结构吊装; 船厂现场; 路径优化; 吊装方案; 作业协同

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17184 中图分类号: TU758 文献标识码: A

## Optimization Analysis of Lifting Path and Scheme for Large Steel Structures Based on Actual On-site Conditions

JIANG Yufeng, HUANG Zhiguang, PAN Qintao

CRRC Changzhou Tech-Mark Industrial Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

**Abstract:** In the process of modern shipbuilding and outfitting, the hoisting of large steel structures is an important link that determines the key node construction period and construction safety. Due to the complex structure of the ship, limited working space, special water environment, and strict safety requirements, it is necessary to optimize the lifting path and operation plan based on a thorough assessment of the site conditions. The article focuses on shipyards and ship construction sites, and combines core factors such as lifting equipment layout, component transportation path, lifting sequence, and multi equipment collaboration to systematically explain the design principles and optimization techniques of lifting paths. Multiple scheme comparison and dynamic adjustment strategies are proposed, which are applicable to various types of ship construction and large-scale outfitting installation scenarios, effectively improving the safety and construction efficiency of lifting operations, and providing technical support for achieving high-quality, high-efficiency, and controllable ship construction.

**Keywords:** steel structure hoisting; shipyard site; path optimization; lifting plan; homework collaboration

### 引言

现代船舶, 尤其是大型油轮、集装箱船、特种工程船等, 在建造过程中大量使用整体舾装模块、大型甲板结构件、大型滑轨、桁架段等钢结构部件, 其吊装作业复杂度显著高于一般建筑工程。传统吊装路径设计多依据理论最短路径或理想环境设定, 往往忽略实际船坞、码头、平台区域的狭窄空间、潮汐波动、平台不平整, 以及构件安装精度要求, 极易造成吊装不畅、构件损伤甚至施工安全事故。本文立足船厂建造一线, 通过典型案例分析现场制约因素, 提出吊装路径与方案优化策略, 为大型船舶钢结构件吊装提供实用指导。

### 1 船厂现场条件分析

#### 1.1 船体结构周边空间限制与施工交通组织

船舶大型构件吊装一般发生于船坞、浮码头或总装平台, 其空间分布通常呈纵向狭长、两侧设备密集。船坞内起重设备的布置、构件运输车行走路径受限于龙门吊轨道、作业通道、临时设施等, 特别是在双船并行施工或夹缝空间作业中, 吊装干涉风险极高。因此必须通过三维激光扫描或数字建模方式, 对船体周边空间、构件行进路线、起

吊点及安全回转半径进行精确建模, 提前规划出安全通行区、待吊区及风险高发点。施工交通需与总装计划协调一致, 合理设置运输周期, 减少与其他施工单元交叉干扰, 同时布设临时交通标志、反光标线、作业引导员, 保障钢构件吊运路径通畅无阻。

#### 1.2 滑道地基承载力与设备站位限制

船厂大型吊装多采用岸吊、轨道吊或大型履带式吊车, 尤其在安装上层建筑、大型舾装模块时, 常面临设备地基承载力不足、滑道沉降等问题。码头区域常因回填土沉降或受海水侵蚀导致承载力下降, 需通过静载试验评估站位安全性, 必要时铺设钢板道轨或混凝土地基, 增加荷载扩散层。起重设备布置需避开压载舱口、燃油区、进气管道、走道平台等关键部位, 确保吊臂作业范围覆盖吊装点, 避免跨越式作业引发重心失稳。多设备联合作业时, 应通过模拟软件(如Navisworks、Bentley LiftPlanner)对臂架动态干涉、吊点受力、转运路径进行仿真分析, 确定最佳组合站位与作业顺序。

#### 1.3 构件堆放逻辑与船坞内运输路径管理

船舶钢结构件多为异形、非标、长宽高不等的块体结

构,如舷侧模块、平台支架、起重基础、桅杆基座等,其堆放方式必须与吊装工序密切对应。构件应以“先装优先、近岸靠近”为原则,统一编号、分区存放,确保“运输一起吊一安装”三点间路径最短。船坞通道设计应满足500吨以上构件运输平台车的轴荷与转弯半径要求,地面铺设钢轨或加固垫层以避免重复碾压损坏,同时配备导航灯、雷达指引、人员引导系统,提高夜间或狭窄工况下的吊运安全性。部分构件若需通过驳船转运,还需规划与潮汐节律相协调的对接方案,避免起吊时因潮差过大导致构件高度错位或脱吊风险。

## 2 吊装路径规划原则

### 2.1 吊装最短路径与避障原则

在船体建造及舾装阶段,大型钢结构件如舾装平台、桅杆基座、舷外装置等的高空吊装对路径规划提出极高要求。科学规划吊装路径的核心是实现构件从堆放区到船体安装部位的最短安全路径,此路径不仅需满足最小距离原则,更要符合船坞或平台的可达性、设备动作的稳定性以及作业空间的安全冗余。需提前识别所有可能造成吊装干涉的因素,如已装结构、临时防坠护栏、登船跳板、排水沟盖板、舾装支架、电缆托架、照明杆等障碍物。在路径规划过程中应结合船厂三维建造模型(如船舶数字孪生平台)开展空间模拟,精准计算吊装路径的水平距离、垂直起落高度、高差变化及旋转幅度,动态优化起重机吊臂动作曲线,减少设备空转及重复移动。对因船体结构狭窄或设备遮挡导致难以避障的情况,应通过提前拆除临时设施、设立吊装窗口或调整构件装配顺序等方式进行规避,从而提升整体吊装连贯性与安全稳定性。

### 2.2 起重设备作业范围与转运路径

船厂内常用的门座吊、浮吊、履带吊或轨道吊等设备,其吊装作业覆盖范围直接影响路径布局和作业组织效率。由于船体上甲板布置复杂,舾装设备密集,需确保起重设备选型合理、作业点定位科学,确保目标安装区域处于设备额定作业半径内,避免出现超半径起吊或设备偏位造成力矩失衡。设备布置需结合结构重量、重心位置、作业节拍等因素合理选择站位,防止“拉斜绳”或“吊中转”作业方式带来不稳定性。多台起重设备协同作业(如多浮吊同步起吊舾装模块)时,应清晰划分作业责任区,制定统一指挥调度方案并设置互锁限位,避免吊臂交叉干涉。设备转运路径应避开滑道盲区、泵舱口、边缘坡口等风险地带,同时考虑潮汐高差或平台位移,必要时采用钢轨铺设、可调节支撑坡道、转运限位装置等辅助手段,保障设备在穿越坞底、跨区吊装等复杂路径中的稳定性和可控性。合理的设备布置与路径统筹能有效减少等待与回转时间,提高船体多工序并行下的施工效率。

### 2.3 构件运输与临时支撑衔接设计

大型钢结构件(如舷侧桁架、模块化平台、集中舾装段)从堆场运输至船体安装点,其路径设计需与吊装过程

形成系统化、无缝衔接。构件运输路径应充分考虑舾装区实际空间、平台通道宽度、过梁高度及转向半径,优先选择无障碍、短距离、低扰动路线,并合理设置导向员、转向缓冲区及限高限宽提示标识。针对曲折区域或高差较大的码头边装平台,可配备低平板车、液压转向车或同步导向系统实现精准转运。构件进入安装区域前应提前设置可调式临时支撑平台或插装框架,支撑结构设计要兼容构件结构特征与落位精度要求,并具备可调节、可快速拆卸和重复利用的特性。临时支撑必须满足风载、水位变化、间断作业等不利工况下的稳定性要求,防止构件位移、下沉或倾覆。将构件运输路径与吊装节奏、支撑结构动态整合,可有效减少构件落位前的等待时间,提高精装舾装过程中的连续作业能力与安全保障水平。

## 3 吊装方案设计要点

### 3.1 吊装分区与分段次序安排

在大型船舶建造或模块化舾装过程中,钢结构件吊装需依据船体分段结构和总装工序科学划分吊装区域。一般按作业属性可划分为主甲板区、上建区、舾装平台区、艉部桅杆区等功能分区,各分区构件按图纸模块化集成,提升作业集中度与调度效率。吊装顺序原则上遵循“自中心向两侧”“自低至高”“先主后辅”原则,确保结构整体稳定性和构件安装连续性。

### 3.2 起重机选型与作业半径匹配

船厂吊装设备通常包括浮吊、门座吊、履带吊等,选型需结合构件尺寸、质量、吊装高度和码头地形综合考虑。设备必须满足最大荷载下的安全裕度,作业半径应覆盖目标安装区域并预留转动与避让空间。例如艉部区域的高空桅杆吊装可选用高功率履带吊配合辅助转运平台,保证吊装起点至船体安装点间的吊距稳定可控。若面临结构复杂或吊装跨度过大情形,可采用双吊或多吊联合作业方案,并提前进行力学仿真分析与吊点协同设计,确保提升过程动态平衡。合理选型和半径匹配既能控制设备使用成本,也可有效规避因起重量不足或路径受限引发的风险。

### 3.3 吊装过程同步与协同控制策略

船舶吊装工程中常涉及多构件、多设备协同作业,施工组织需高度同步化。尤其是船体外段拼接、主甲板整体吊装、长桁架平台等吊装任务,必须通过集中控制平台实现多吊点同步提升,确保构件不因受力不均而发生变形或失衡。推荐使用具备负载实时反馈与姿态修正能力的数字化吊装系统,并在作业中引入施工可视化手段,如BIM吊装仿真、无人机巡检、全流程进度管控系统等,提升吊装透明度与响应能力。现场各工种如设备操作、运输调度、信号指挥等应统一指挥、密切配合,形成高效、稳定的吊装协同网络,确保船体吊装各阶段顺利推进、安全受控。

## 4 方案比选与优化方法

### 4.1 多方案建模与模拟分析

船舶大型钢结构吊装往往涉及多套可行路径与设备

组合方案，其前期技术决策需依托三维建模与模拟分析。基于船坞或码头现场条件，将不同的起重机布置、构件安装顺序及路径方案输入 BIM 平台，建立带有真实设备参数和构件尺寸的空间模型。通过施工仿真软件进行吊装路径模拟、构件碰撞检测、临时支撑布置评估等工作，全面对比不同方案在资源配置、作业时间、空间协调方面的优劣。仿真分析应同步考虑构件堆放空间、起重设备转场频率、操作盲区等实际限制，辅以工程经济指标分析如设备利用率、吊装时长、施工成本等，明确最优方案选型依据，从而确保所选方案具备较高的可执行性与经济性。

#### 4.2 吊装流程仿真与瓶颈识别

针对船体模块或舾装段的吊装流程开展动态仿真，可有效识别施工组织中的关键瓶颈与潜在风险。仿真内容应覆盖构件从码头堆放、转运平台移动、起吊路径到船体定位全过程，重点分析作业节拍、设备利用冲突、高空定位干涉、潮差影响等关键因素。如发现构件交叉运输、设备等待时间长、构件定位误差大等问题，可通过调整起吊顺序、改变堆放位置或优化协同节点予以化解。利用流程仿真数据优化施工组织逻辑和资源调度安排，可实现船体吊装任务的动态排程，提高全流程运行效率，减少等待与干扰，有效提升船坞作业节奏与施工节拍。

#### 4.3 方案动态调整与应急预案制定

船舶吊装现场存在海况变化、潮汐影响、空间冲突等多种不确定因素，吊装方案必须具备动态调整能力和完善的应急响应机制。如遇大风停工、构件吊耳偏移、起重机突发故障等情况，应能迅速切换备用设备、调整路径、修改作业计划。在初期方案设计中就需制定多套关键路径变更方案、构件替代运输路线和设备增援策略，同时依托数字化调度平台实现现场状态感知与数据共享，确保吊装指令实时同步、进度动态可控。通过建立“计划—监测—反馈—调整”闭环机制和灵活应急体系，可实现吊装全过程在多变环境下的稳态运行与高效推进，保障船体结构件吊装任务安全、精准、可控完成。

### 5 安全与效率双重保障策略

#### 5.1 吊装过程的风险点识别与控制

船舶建造过程中，大型舾装模块、上建结构或桅杆平台等吊装作业普遍面临高空、重载、潮汐、风压等多种不稳定因素。风险识别是保障安全的第一道防线，应通过作业前的风险评估机制识别吊装各环节的重点风险源。常见问题包括：吊点选择偏差导致构件受力不均或翻转；吊装路径与桅杆、雷达塔等高耸设备发生干涉；强风突发影响吊钩稳定；作业人员协调失误导致指令错误等。针对上述风险，应设定明确的风险控制措施，如限定风速上限（通常不超过 6 级）、配置防摇摆吊具与限位装置、制定标准操作规程、开展作业前技术交底与应急演练。作业中须安排专业安全员全过程旁站监督，特别是在高空对接、换索操作、夜间作业等关键节点，确保防范措施真正落地执行，

杜绝重大安全隐患。

#### 5.2 吊装指挥系统与实时监控技术

为实现船舶吊装作业的高精度和智能化，需建立集成化吊装指挥系统与实时监控平台。吊装指挥应由具备资质的船厂吊装调度人员统一指挥，利用船坞调度系统协调构件进场、设备联动与信号传输，避免指令混乱。采用无线通讯与语音识别技术能提高指令传达效率，尤其适用于嘈杂或远距作业场景。通过部署高清视频监控、载荷感应器、GPS 吊钩定位系统等技术手段，实现对吊装过程的动态监测与轨迹跟踪，并将监测数据上传至施工云平台，便于远程监管、趋势分析及故障预警。此类智能系统不仅能实时识别异常状态、防范操作偏差，还能在事故发生后提供回溯依据，为安全管理提供重要数据支撑。

#### 5.3 施工组织协调与作业效率提升措施

吊装效率的提升依赖于施工组织的系统化与多工序协同能力。在船体模块化建造模式下，应合理编排起重作业、构件运输、临时支撑、焊接定位等工序节点，做到一环接一环、无缝衔接。利用施工组织管理平台进行任务下发、现场信息回传与资源协调，使施工节奏更可控，任务状态更透明。推进标准化作业流程，统一各工序操作规程和质量验收标准，避免因人为操作差异引发效率波动。同时，按工程进度科学分配作业班组与设备资源，动态调配人员与机械，降低空闲率与资源浪费。通过构建“统一调度、集中管控、分级执行”的组织机制，强化精细化施工管理，最终实现船体吊装工程的安全、高效、规范推进。

### 6 结语

综上所述，大型船舶钢结构吊装工程面对作业空间受限、结构复杂、工序密集等挑战，需从现场条件出发，科学规划吊装路径、优化设备配置、强化协同控制与风险管理。通过多方案建模、流程仿真与动态调整机制，实现了吊装作业的安全、高效、可控。本文研究成果可为船舶建造现场的大型构件吊装提供系统化技术支撑，推动施工管理向智能化、精细化发展，具有良好的实践指导价值。

#### [参考文献]

- [1] 张千一.三跨空间梁拱组合钢结构桥梁安装技术研究与应用[D].济南:山东建筑大学,2024.
- [2] 梁子康.大型场馆折面异形金属屋面施工技术应用与研究[D].合肥:安徽建筑大学,2024.
- [3] 张磊.大跨度钢桁架结构变轨累积滑移施工关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [4] 程梦琪.基于箱式钢结构模块化建造体系的中小学教学建筑设计研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [5] 宗德新.基于 DFMA 的装配式钢结构住宅设计研究[D].重庆:重庆大学,2022.

作者简介：蒋宇锋（1982.4—），男，常州工学院，机械设计制造及其自动化，常州中车铁马科技实业有限公司，工段长，高级技师，高级工程师。

## 路桥过渡段加固施工技术应用分析

李发新

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**随着路桥工程建设的快速发展，路桥过渡段位置的加固工作受到越来越多的关注。基于桥面和路基间存在的刚度差异，极易造成路桥过渡段出现桥头跳车等现象，影响路桥的使用安全。因此要切实采用有效的加固施工技术，解决各种常见病害问题，保障路桥过渡段的整体性能。该文将围绕路桥过渡段加固施工技术进行深入研究，分析常见病害问题及原因，分析过渡段加固施工设计，并重点探究加固施工技术的实际应用。

**[关键词]**路桥过渡段；加固施工技术；注浆技术；桩板结构

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17193

中图分类号: U443.82

文献标识码: A

## Application Analysis of Reinforcement Construction Technology for Road Bridge Transition Section

LI Faxin

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** With the rapid development of road and bridge engineering construction, the reinforcement work of the transition section of road and bridge has received increasing attention. Due to the stiffness difference between the bridge deck and the roadbed, it is easy to cause phenomena such as bridge head jumping in the transition section of the road and bridge, which affects the safety of road and bridge use. Therefore, effective reinforcement construction techniques should be effectively adopted to solve various common disease problems and ensure the overall performance of the road bridge transition section. This article will conduct in-depth research on the reinforcement construction technology of road and bridge transition sections, analyze common disease problems and their causes, analyze the reinforcement construction design of transition sections, and focus on exploring the practical application of reinforcement construction technology.

**Keywords:** road and bridge transition section; reinforcement construction technology; grouting technology; pile-board structure

### 引言

当前路桥工程中过渡段多发桥头跳车现象，极大地影响着路桥使用舒适度，对车辆通行造成了不同程度的影响。基于此，各建设单位需要切实加强对路桥过渡段加固施工技术的研究与应用，结合存在的病害问题，进行针对性地加固施工控制，并依托科学的加固施工设计，解决路桥工程中的实际问题。通过专业化的路桥过渡段加固施工技术的应用，能够切实解决路桥工程的安全隐患。

### 1 路桥过渡段桥头跳车的影响因素分析

路桥过渡段是桥梁和道路连接的带状构造物，需有效承载路桥运行车辆的荷载，为路桥过渡段提供可靠的路基基础。然而基于过渡段结构的特殊性，其在不同刚度情况下易引发道路刚度突变等问题，导致出现桥头跳车等质量通病现象，引发对车辆通行舒适性的影响。现对桥头跳车的主要影响因素进行分析<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 基础不稳

过渡段基础不稳是造成桥头跳车现象的主要因素之一，由于路桥工程所处位置并不具备相对稳定的地基结构条件，在过渡段施工建设中常会出现不同程度的沉降问题，威胁着过渡段的整体安全，并加大了过渡段的施工难度。如，部分路桥工程过渡段的软土地基等，均会引发沉降或坍塌的风险，影响路桥过渡段的平整度。

#### 1.1.1 过渡段桥台台背路堤压实度不够

在路桥工程过渡段施工中，需对台背进行填料处理，保证形成过渡段结构的有效填充。然而实际施工中，常会因施工操作不当，或施工材料、施工器械等方面的原因，造成过渡段桥台台背路堤压实度不够的情况，进而导致填料土压实度难以达到规范标准，引发过渡段出现不均匀沉降等问题。同时，由于环境、天气等客观因素影响，亦会造成过渡段土基塑性发生变化，而出现不规则变形等情况，极大影响着路面的平顺度。

#### 1.1.2 过渡段桥头引道软土基处理不够

经过研究发现路桥过渡段发生桥头跳车现象主要是因为路基和桥台间刚度差异引起，加之路基与桥台沉降性能的差异，亦会随着时间推移增加桥头跳车现象的发生概率<sup>[2]</sup>。尤其针对过渡段的软土地基区域，会造成的桥头跳车现象愈发明显，因此需要软土地基路段施工设计的深度研究，进一步加强过渡段的刚度。然而实际施工中，部分工程项目会因为钻探深度设计不合理，以及地质钻探布孔设置较少等问题，导致难以及时做好软土地基的加固处理工作，进而导致出现过渡段路基沉降等问题。

#### 1.2 水侵害问题

水侵害问题是造成路桥过渡段易发桥头跳车的一大诱因。由于过渡段区域的地下结构含水量较大，随着时间

推移不可避免会出现水侵害问题。尤其结合雨水天气的影响，发生水侵害风险的概率会逐渐加大。在具体的水侵害过程中，会对路基的强度造成一定影响，导致出现结构变形。雨水会跟随过渡段衔接部位缝隙，不断向下渗透，进而造成对过渡段土类填料的侵蚀与软化，影响过渡段的整体强度。

### 1.3 搭板应用问题

路桥过渡段中搭板的应用，是避免过渡段出现桥头跳车的有效方法之一，可避免过渡段出现不均匀的沉降问题。然而，部分工程存在着过渡段连接结构设计不合理的问题，严重影响着搭板的实际使用性能。其中，在过渡段搭板施工中，需严格按照相关规范进行搭板长度设置及安装部位设计，一般情况下，大桥和中桥中桥头搭板长度为8m；在小桥上搭板的长度为5m。若搭板尺寸长度不够，将严重影响搭板的承载力，造成搭板脱落等情况。若搭板结构设计过程中，将桥头高程设计过大，将导致桥头引道位置填土量增加，造成过渡段压实的负担。

## 2 路桥过渡段加固施工设计

为有效应对路桥过渡段的桥头跳车现象，需充分采用过渡段加固施工技术，保证过渡段结构的稳定性。

### 2.1 控制路基沉降变形范围

在路桥过渡段加固施工过程中，需将路基作为维护过渡段结构稳定性基础，借助路基的稳定性建设，有效延长路桥过渡段的使用寿命。其中，在具体的加固施工中，要着重关注路基的承载力性能设计，结合工程的实际台背地基的软土地基地质情况，科学控制路径的沉降变形范围，进一步确定差异沉降的控制指标。设定路桥过渡段发生沉降变化，此时需将边坡率计算作为沉降变形控制的要点，计算公式为：

$$e = \frac{q-w}{d} \quad (1)$$

式中  $q$  为路基中心处的变化量， $w$  为路肩处的变化量， $d$  为路基的宽度参数。同时，除边坡率外，还需结合过渡段路面材料的疲劳性及极限抗拉性等，进行承建限制范围的评定，从而保证基桥台沉降与路基沉降的平稳过渡，避免出现路堤中央变形或坡脚路肩处协调变形等问题。

### 2.2 软土路基浅层换填加固

在对路桥过渡段进行加固施工过程中，要对软土路基实施浅层的换填加固处置，有效提升过渡段路基的承载力。由于过渡段主要连接路面与桥台，整体地基结构较为松散，因此需对过渡段的软土地基进行加固施工设计，进一步提升路基的稳定性。在软土路基的换填加固过程中，需保证换填材料符合标准，具有压缩、固结、凝固等属性，从而进一步提升路基结构的整体承载力，改进路基的填层。一般情况下，可将路基填层分为3层（图1），一层为基层，可使用密度为  $2340\text{kg/m}^3$  的 CTB 泥石结构填铺，二层为底基层，可利用粉砂作为主要填铺材料，三层为填土层，

则需使用压实的黏土材料作为路基的底层结构，进一步提升路基的可靠性和稳定性。同时，要基于路基加固结构设计（图2），针对不同区域进行相应材料的填充，如，可在衔接处路基结构中填充轻质 EPS 材料，尽量保证路基的轻量化设计，避免加大沉降的程度，保证整体路基结构的稳定性。针对过渡段的桩土复合地基材料选择，则要兼顾结构稳定性和紧密贴合性，进行合理适宜的填料选择，并适当地控制土层的密度和铺设的间距等问题，保证过渡段衔接处获得适宜的过渡，具备较强的负载能力和抗变形性能。常见的桩土复合地基材料参数见表1。要着重对于桩土复合地基中的桩体进行设计，采用水泥为固化剂的水泥搅拌桩作为主要桩体结构，并借助水泥浆液和软弱土质的充分混合，以及采取一系列物理、化学反应设计<sup>[3]</sup>，实现对软土路基的固化硬结处理。

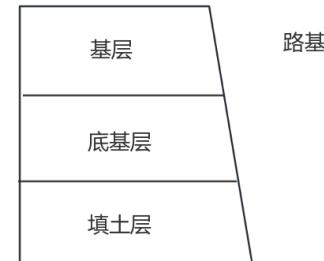


图 1 路基填层示意图

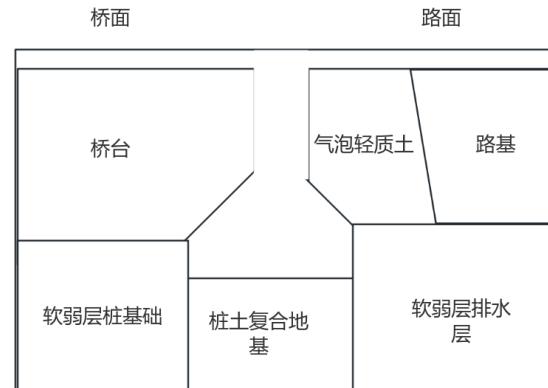


图 2 路基加固结构设计图

表 1 桩土复合地基相关材料参数表					
结构层	材料名称	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	弹性模量 (MPa)	黏聚力 (KPa)	泊松比 ( $\mu$ )
褥垫层	砂	2010	38	-	0.30
桩体	混凝土	2300	-	-	0.29
地基 1 层	吹填土	1950	12	12	0.31
地基 2 层	亚黏土	1800	13	11	0.36
地基 3 层	粉砂	1900	19	7	0.36
地基 4 层	黏土	1950	29	16	0.43

### 2.3 土工格栅补强路堤

在路桥过渡段加固施工中，要借助土工格栅补强路堤结构。土工格栅作为混合材料制成的专用补强结构，可凭

借自身较强的抗拉强度，在土木工程中发挥重要的作用。其中，过渡段加固施工中可利用土工格栅作为路基支撑，强化路基结构的整体强度，进一步实施对路基结构的侧向约束，避免台背出现填料沉降的情况。在土工格栅加固路桥过渡段的研究中，可将其作为重要的沉降控制措施，借助科学的铺设间隔、铺设层数、铺设长度等变量的控制，获得良好的沉降控制效果<sup>[4]</sup>。在具体的路堤补强施工中，土工格栅的铺设要注意方向性和分层性，并采用纵横交替的交叉铺设方式，提升土工格栅使用性能，具体的铺设要点如下：(1)在土工格栅的铺设中往往与水泥土搅拌桩形成配合，以上下结构的形式搭配出现。其中，土工格栅的铺设间距可设置为0.75m，水泥土搅拌桩的浇筑间距可定为1m。(2)在土工格栅底层铺设中需设置约0.3m厚度的砂垫层，用以形成对土工格栅的底层铺垫。(3)土工格栅上需填铺0.25m厚的顶配碎石，保证土工格栅结构的稳定性，并赋予土工格栅较强的排水性能。其中，在土工格栅的铺设过程中，需根据工程的实际情况进行土工格栅的裁切，对于桥台与路面衔接较为倾斜的工程项目，要尽量让土工格栅的端头与过渡段的斜交角相吻合，避免出现铺设方向差异，影响结构的整体稳定性。

#### 2.4 添设路基排水层

在路桥过渡段加固施工中，还需在完成土工格栅铺设后，增加路基的排水层设计。基于过渡段的水侵害问题影响，需优化过渡段的排水性能，设置单独的排水系统，用以减少积水、渗水的影响。其中，排水层可设置排水层、反滤层、黏土层等三层结构，并搭配设置盲沟，提升排水层的排水性能。排水层的设计需结合工程的路面渗透情况及地下水文状况，一般可将厚度控制在0.2m左右，并采用顶级碎石材料作为填料，保证排水层的经济性；反滤层作为中间层，主要用于阻挡水体的下渗；而黏土层则用于保证排水层结构的稳定性。针对排水层的结构层次，可根据隔水性能的强度进行材料的选择，如，可利用土工织物等作为反滤层主要结构，并在排水层上铺设油毡层，提升排水层的耐磨性，减少对排水层的损坏。

#### 2.5 衔接处铺设桥头搭板

过渡段加固施工中，可在桥台和路面之间采用安装搭板的方式，形成路桥的有效连接，并基于搭板的自身性能，形成过渡段的平坦状态。通过搭板的应用，能够掩盖路桥衔接处出现的小范围不均匀沉降问题，保证路桥的有效通行效果。在实际的施工中，需格外注意桥头搭板的脱空情况，尽量采用一体化设计方法，进行桥头搭板的搭建。桥头搭板的长度关系到桥台结构的整体稳定性，因此，要对桥头搭板长度进行计算，保证其符合规格标准，防止出现桥头搭板绕转的情况。桥头搭板长度计算公式为：

$$L = \frac{\alpha}{\beta} \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为容许沉降参数， $\beta$  为容许纵坡变化率参数。而

结合常规的路桥设计要求，工程中的 $\alpha$ 参数应 $\leq 10\text{cm}$ ， $\beta$ 要处于4‰和6‰之间， $L$ 要超出填土土体的破坏长度参数 $k$ ，其计算公式为：

$$k = z(\tan \varphi + \cot \delta) \quad (3)$$

式中： $z$  为路基填料高度参数， $\varphi$  为桥台背墙倾角参数， $\delta$  为桥台滑动面倾角参数。

### 3 路桥过渡段加固施工技术的实际应用

#### 3.1 工程介绍

文章以某路桥过渡段工程项目为例，该路段为双向四车道道路结构，路桥过渡段属不良地质路段，主要由淤泥质黏土和人工填土组成。路堤填筑拟设计高度为4~6m，在工程施工中，需对路桥过渡段进行加固施工处置，有效防止路桥工程出现桥头跳车现象。

#### 3.2 过渡段加固施工要点

##### 3.2.1 填料选择

根据该工程的实际加固需求，具体的填料选择如下：

(1) 采用石灰土及普通土作为填筑压实主要材料，具有材料易得、成本较低等优点，但由于此类材料在遇水后出现强度的改变，因此，需结合填料进行混合使用。(2) 工程中借助大量碎石、石屑等作为填筑材料，需结合工程的强度要求，进行碎石级配的选择，并采取分筛的方法，进行碎石的有效分类处理。基于随时较高的强度，其可作为路桥过渡段的绝佳填筑材料<sup>[5]</sup>，为过渡段提供稳定的支撑。(3) 水泥稳定土是填料必不可少的组成，可评价胶凝材料的粘性，得到高强度和刚度的水泥稳定土。

##### 3.2.2 地基处理

过渡段加固施工中，地基处理可作为施工的保障措施。施工人员可先明确过渡段的地基承载力要求，并结合现场的实地考察研究，制定相应的加固施工方案。之后，对过渡段区域的软土地基进行加固硬化处理，采用换填法进行软土地基的处理。可将过渡段原有的软土地基全面挖出，并利用选择的适宜填筑材料进行置换填充，要保证换填过程中，将各分层进行压实处理，进一步提升过渡段地基的承载力，为后续的加固施工做好准备。

##### 3.2.3 搭板设置

搭板设置作为过渡段加固施工的重点内容，常用的设计方式有：(1)长度相应的搭板设置，保证长度的适宜性，解决过渡段的刚柔差异问题。(2)预留反向坡度的搭板设置方法，确保过渡段纵断面的平顺度。(3)平行设置方法，即搭板与面层顶面处于平行状态，可一定程度上解决桥台与路基刚度差异问题。同时，要基于工程路段的车流量及行车速度等，进行搭板长度及坡度的设计，并采用适宜的搭板固定方式，进行平稳的固定，可利用混凝土材料进行搭板的固定。完成搭板固定工作后，需进行相应的检查与验收，确保搭板的质量以及加固效果。

另外，为进一步提升过渡段的加固效果，还需进行相

关排水系统的设置，有效避免水侵害的影响，避免出现积水渗透。

#### 4 结束语

综上所述，针对路桥过渡段进行加固施工，不仅可以保证过渡段的通行安全，还能够进一步延长路桥的使用寿命。在实际的加固施工中，需采用科学合理的施工手段，选择适宜的填筑材料，进行结构化加固施工。需着重做好地基加固处理和搭板固定等工作，结合工程的实际需求，进行针对性地加固施工建设，进而能够获得良好的路桥过渡段加固效果。

#### [参考文献]

[1]耿青.高强土工格室对路桥过渡段加固效果的研究[J].

交通世界,2025(1):228-23.

[2]陈晨,王臣.市政路桥过渡段不均匀沉降影响因素及其预防维护措施分析[J].四川水泥,2024(2):234-236.

[3]孟凯.双向水泥搅拌桩在路桥过渡段路基加固处理中的应用[J].江西建材,2023(12):334-336.

[4]秦浪朝.桥头软土地基加固对路桥过渡段变形特性的影响[J].苏建筑职业技术学院学报,2022,22(2):19-23.

[5]何兆霖.公路施工中路桥过渡段加固技术[J].交通世界,2021(34):42-43.

作者简介：李发新（1973.2—），男，中国地质大学（北京），土木工程，新疆北新路桥集团有限公司，中级职称。

# 城市轨道交通与市郊铁路互联互通贯通运营技术研究

李天然

重庆交通建设管理有限公司, 重庆 401120

**[摘要]**城市轨道交通与市郊铁路的贯通运营, 目前已成为推动城轨交通实现“四网融合”的必由之路。近些年来, 各地城市轨道交通的运营里程持续增长, 客观上体现了城轨交通与市郊铁路实现一体化运营的紧迫性。在互联互通的基本原则指导下, 打造不同交通形式的贯通运营模式需要加大物质资源与基础设施方面的投入, 而且不能够缺少人工智能的建模技术手段作为支撑。本篇文章主要基于城市轨道交通与市郊铁路贯通运营的实际情况, 探讨建立互联互通列车运营模式的可行性策略。

**[关键词]**城市轨道交通; 市郊铁路; 贯通运营; 互联互通技术

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17185

中图分类号: U292

文献标识码: A

## Research on the Interconnection and Operation Technology of Urban Rail Transit and Suburban Railway

LI Tianran

Chongqing Transportation Construction Management Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

**Abstract:** The seamless operation of urban rail transit and suburban railways has become a necessary path to promote the integration of the four networks in urban rail transit. In recent years, the operating mileage of urban rail transit in various cities has continued to grow, objectively reflecting the urgency of achieving integrated operation of urban rail transit and suburban railways. Guided by the basic principles of interconnectivity, building interconnected operation models for different forms of transportation requires increased investment in material resources and infrastructure, and cannot be without the support of artificial intelligence modeling technology. This article mainly discusses the feasibility strategy of establishing an interconnected train operation mode based on the actual situation of the operation of urban rail transit and suburban railways.

**Keywords:** urban rail transit; suburban railway; integrated operation; interconnection technology

### 引言

城市轨道交通以及市郊铁路承担了保障乘客出行的责任, 以上两种轨道车辆的运营线路也存在密不可分的联系。我国已经进入城镇化带动工业化转型的重要历史阶段, 城市群日益成为区域协调发展、支撑经济增长的重要载体。都市圈与城市群的加快发展需要依靠健全且完善的交通网络, 尤其不能够离开城际铁路、干线铁路、城轨交通、市郊铁路的共同支持。因此如何采用因地制宜的思路推进两种轨道交通的融会贯通, 已成为打造全方位、立体化城乡交通模式的关键所在。

### 1 城市轨道交通与市郊铁路贯通运营的研究背景及其必要性

#### 1.1 研究背景

近些年来, 国内很多研究人员正在积极探索“都市圈快轨”与市郊铁路之间的互联互通实现方案, 总体上取得了比较突出的理论研究进展。例如张丽认为, 都市圈的轨道交通制式应当实现根本性的转变, 旨在重新定位不同轨道交通线路承担的功能, 并需要充分考虑枢纽衔接以及网络融合的基本要求; 潘昭宇等研究人员则认为, “跨线过轨运行”应当成为不同轨道交通模式实现跨界融合的必经之路, 该模式能够突破传统的行车配线方案局限性<sup>[1]</sup>。由

此可见, 国内研究人员倾向于突破城市轨道交通以及市郊铁路的车辆运营边界, 坚持跨界融合的指导思想, 旨在更大程度上方便城乡群众的日常出行。

#### 1.2 必要性

我国目前已经全面进入“城镇化带动工业化”的转型期, 新型城镇化的重要表现形式即为城市群。各地为了加快城镇化以及工业化的进程, 正在致力于谋求都市圈与城市群的一体化发展路径, 其中最为突出的举措就是打造“四网融合”的新型交通体系。基于以上的社会变迁背景, 构建一体化的交通运营模式不能够缺少城际铁路、干线铁路、城市轨道交通以及市郊铁路之间的深度融合; 力求在具备可行性条件的前提下, 发挥城市轨道交通网络在打造新型都市全过程中的推动作用。

### 2 城市轨道交通与市郊铁路贯通运营的工程实例

#### 2.1 工程概况

XX 地区的主干城轨快线总里程达到 51.88km, 该城轨快线的最大运行时速可达每小时 130km, 城轨快线共设有 10 座站台。市郊铁路 XX 线的总里程达到 69.37km, 市郊铁路的最大运行时速可达每小时 155km, 该铁路沿线共设有 6 座站台。XX 地区长期致力于打造市郊铁路与城轨快线的贯通运营模式, 以期进一步发挥市郊铁路以及城

轨快线的最大化运输功能<sup>[2]</sup>。

采用互联互通理念打造的“市郊铁路 XX 线工程”目前已经与该地区的城轨快线实现无缝衔接,该工程有力支持了主城区各分区之间的“一小时通达”、相邻地区之间的“半小时通达”目标实现,突出安全、快捷、便民的轨道交通与铁路交通一体化运营目标。贯通运营后的城轨列车车型与市郊铁路的列车车型能够保持一致,其能够满足长期稳定运营的要求。

## 2.2 方案设计

“市郊铁路 XX 线工程”沿线具有丰富的特色旅游资源,当地居民长期依靠生态旅游以及文化旅游产业实现致富目标。基于此,城轨交通以及铁路交通管理部门充分考虑了不同运营模式实现互联互通的内在需求,旨在有效缓解乘客出行高峰时段的城轨交通客流量压力,采取合理分散客流的解决措施。方案设计人员通过计算城市轨道交通运营组织在早高峰以及晚高峰时间段的客流量变化指标,经过统计得出轨道交通乘客对于快速直达城市中心区域的需求动态。通过实施以上的评估统计,归纳得出该城市地区早高峰的轨道列车客流量集中于进城客流,因此体现了城市轨道交通以及市郊铁路互联互通的紧迫性<sup>[3]</sup>。

“市郊铁路 XX 线工程”主要采用了“独立运营+贯通运营”的组织设计方案,紧密围绕客流需求打造互联互通的精品线路工程。依据上位文件的指导思想,在明确功能定位的同时致力于保障铁路乘客以及轨道交通乘客的人身安全,促进两种不同交通运营模式的资源整合。其中的城市轨道交通 A 站点设计为贯通线路的始发站,该站点应当满足城市轨道列车的独立折返需求,并能够同时与轨道车辆基地进行接轨,以期妥善解决两条不同交通线路的换乘问题。

如下图 1, 为贯通运营模式下的行车配线方案:

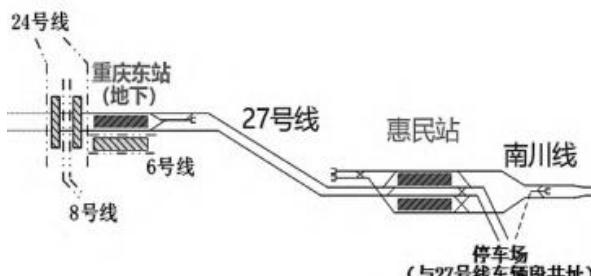


图 1 城市轨道交通以及市郊铁路贯通运营下的行车配线方案

## 2.3 优势及缺陷评价

城市轨道交通与市郊铁路实现贯通运营的重要优势体现在节约乘客的换乘时间,方案设计人员坚持便民服务的基本理念,打造“双岛双线站台”进一步满足乘客在城市早晚出行高峰时段内的换乘要求,体现了城市轨道交通以及市郊铁路的便民服务宗旨。两条不同的交通线路能够在 A 站实现“同站台换乘”,为乘客提供了多元化的线路换乘便利<sup>[4]</sup>。A 站作为“双岛双线站台”能够实现高密度

的集中运营目标,而且与既有的市郊铁路线路之间不会发生任何冲突,符合贯通运营模式下的乘客人身安全与财产安全保障需求。“四线贯通”旨在有关部门采取大力支持的措施,有序推动各城市地区轨道交通实现“四网融合”的目标,并结合城市轨道交通在运营管理方面的实际情况,提出行之有效的技术整改方案。轨道交通“四网融合”的对象应包括干线铁路、城际铁路、市郊铁路、城市轨道交通,通过实现不同交通方式之间的无缝衔接,对于城市核心区域以及市郊区域的旅客换乘时间资源予以最大程度的节约,为各地旅客打造更为快捷舒适的全新乘车体验。

但是同时,采用以上的贯通运营方案也在一定程度的不足之处,集中在于建造“双岛双线站台”的前期投资相对较高,并且站后折返的列车需要耗费较长的时间完成“空载运行”,不利于贯通运营模式的技术优势获得最大化的体现。一部分乘客反馈,贯通运营模式下的城市轨道交通以及市郊铁路的互联互通运营方案虽然方便了乘客在早晚高峰快速出行,但是换乘站现有的基础设施仍然有待完善,主要涉及人工智能的站内导引设备有待实现维护与更新。

## 3 城市轨道交通与市郊铁路贯通运营的互联互通技术实现要点

市郊铁路主要服务于大都市圈范围、主城区以外乘客的日常出行,近些年来国内很多地区旨在采用“轨道交通引领城市发展”的指导理念,以期从根本上解决城市都市圈范围内的中心城市与主城区交通联结问题。通过新建市郊铁路的轨道网络体系,以实现主城区轨道快线内连城市轨道的目标,外部衔接周边区域的高铁枢纽站,达到最大化的互联互通使用目标<sup>[5]</sup>。采用城市轨道交通体系与市郊铁路的贯通运营模式,还可以有效弥补不同类型交通在承上启下、内接外畅方面的短板,为城市地区实现“三铁融合”提供有力的保障。基于此,构建城市轨道交通与市郊铁路贯通运营的互联互通体系,应当体现在如下的技术实现方案:

### 3.1 区域环境调研

城市轨道交通与市郊铁路的贯通运营方案是否可行,主要取决于方案设计人员的前期调研考察工作。为进一步明确城市轨道交通线路的区位环境特征,那么方案设计人员应当致力于深入开展前期考察,以期绘制准确、完整而清晰的轨道交通跨线运营示意图。具体需要明确城市早晚高峰等特殊时段内的轨道车辆运营状况,避免在贯通运营方案设计的过程中存在盲目性。

推动城市轨道交通以及市郊铁路之间的互联互通,还应当体现在灵活、合理的跨线运营模式选取,以期在最大限度上满足城市早晚高峰期间的居民出行需求。当前时期的方案设计人员主要可以利用微信公众号的信息技术平台,提倡广大市民自主填写城轨交通与市郊铁路实现贯通

运营的“意愿表”。将广大市民提出的反馈建议作为构建互联互通交通体系的科学依据,通过加大前期资源投入、加强调研考察等措施尽快弥补城市交通体系在运行过程中的短板或者缺陷。

如下图2,为城市早高峰期间的跨线交路示意图:

### 3.2 运营方案比选

城市轨道交通与市郊铁路的贯通运营方案包括多种形式,方案设计人员只有经过综合、全面的比对,才能够在多个配线方案中选择最适宜的一种。经过改造的轨道列车贯通运营方案既要保证人员及车辆的安全,同时还要体现良好的成本效益指标。城轨交通以及市郊铁路的互联互通方案应建立在深入考察的基础上,技术人员需要反复验算得出最优的贯通运营配线图,为城市轨道交通以及市郊铁路的资源共享打下良好的基础。具体需要全面考虑方案安全性、经济成本、改造难度等技术指标,彰显以人为本的轨道交通贯通运营宗旨。

除此以外,城市轨道交通的运营管理部还需要根据客流需求来制定最具可行性的行车调度计划,重点针对城市轨道交通存在的客流需求大、发车间隔小,或者客流需求小、发车间隔大等常见问题予以妥善解决<sup>[6]</sup>。在高峰时段到来时,城市轨道交通列车应当按照“最小追踪间隔”进行发车,并且不宜开行直通列车;等待城市早晚出行的高峰时段过后,轨道交通的客流量将会逐渐减少,那么此时城市轨道交通列车将会不断进行收车,导致其发车间隔持续延长,则可以视具体情况开行更多班次的轨道交通直通列车。

如下图,为改造前后的城市轨道交通贯通运营配线方案比对结果图:

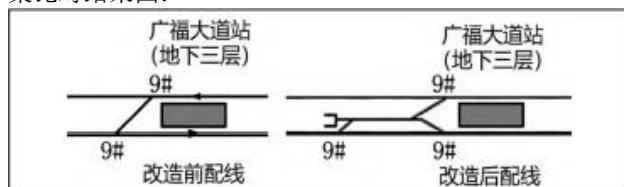


图3 改造前后的贯通运营配线方案比对图

### 3.3 成本效益评估

贯通运营模式下的城市轨道交通以及市郊铁路列车

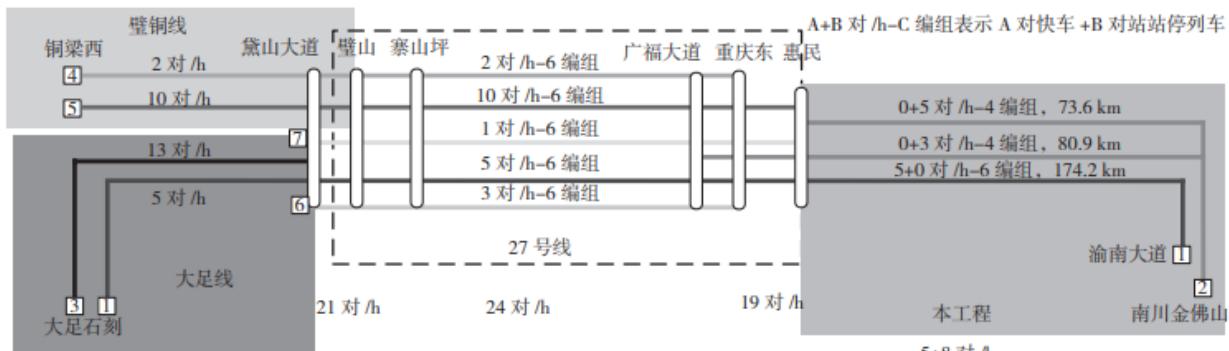


图2 城市早高峰期间的跨线交路示意图

通过能力将会实现大幅的提升,技术人员应当在准确评估成本效益指标的前提下,采用因地制宜的设计理念加以完善。轨道交通管理部门在加大物质资源投入的同时,还应采取积极有效的措施促进资源整合,推动轨道交通运营过程中的节能减排目标达成。

基于此,方案设计人员需要充分考虑城轨列车与铁路列车的通过能力差异,在维护人员与车辆安全的基础上着眼于成本效益指标的提高,深入推进不同交通模式的无缝衔接。采用绿色节能的贯通运营保障技术手段,降低市郊铁路列车以及城轨列车在整个寿命周期内的电能消耗,突出节能降耗的贯通运营宗旨。

如下表,为贯通运营模式下的城市轨道交通以及市郊铁路列车通过能力对比:

表1 贯通运营模式下的城市轨道交通以及市郊铁路列车通过能力对比 (单位:列/h)

列车运营模式	非贯通运营	贯通运营
列车通过能力	27	46
经济效益	一般	良好

### 3.4 基础设施保障

建立在贯通运营理念基础上的城市轨道交通以及市郊铁路运营管理部都需要加大物质资源的投入力度,力求在最短时间里完善贯通运营的配套基础设施,促进乘客的满意度提升<sup>[7]</sup>。具体有必要深入推进标准化的衔接贯通工作,结合实际制定互联互通模式下的行业技术标准,以及更好满足城际铁路衔接城区公交线路、接入城市中心轨道交通线路的内在要求<sup>[8]</sup>。

城市轨道交通的运营管理部目前还应当进一步完善车载信号系统、智能监控系统、自动烟感报警系统等。加强对轨道交通车辆驾驶人员的专业技能培训,确保轨道交通车辆的驾驶人员具备良好的业务能力以及职业道德水平。创建一体化的轨道交通以及市郊铁路互联互通规则,采用技术规范的方式加强对各部门、各岗位人员的约束。充分利用人工智能的辅助设备,支持旅客利用微信平台实现自主购票,并通过刷身份证等快捷的方式进出站。

#### 4 结束语

综上所述,城市轨道交通与市郊铁路如果要达到贯通运营以及跨界融合的目标,则不能够缺少互联互通技术作为保障。当前时期的国内研究人员普遍认为,促进城市轨道交通与市郊铁路之间的无缝衔接符合民众出行的内在要求,对于城市化进程的加快具有不可忽视的影响。在此前提下,打造互联互通的城轨交通以及市郊铁路贯通运营模式应当侧重于四网融合的实施方案优化,健全配套性的轨道列车运维保障机制。轨道交通的运营管理门还应当加强隐患排查的力度,采用人工智能的自动预警模型,以期更好地维护人员及车辆的安全。

#### [参考文献]

[1]潘良,张宏强,姚吉,等.城市轨道交通 PRP(并行冗余协议)双路通信冗余系统性能测试验证[J].城市轨道交通研究,2024,27(2):47-50.  
[2]顾磊磊.市域铁路与城市轨道交通共线运营实施路径研

- 究[J].城市轨道交通研究,2024,27(2):117-120.  
[3]只巍,吴文祥,李鉴,等.同制式城市轨道交通线路贯通运营列车开行方案优化研究[J].交通工程,2024,24(9):63-71.  
[4]任艾,孟令云,王义惠,等.面向客流的市域与城轨贯通运营下快慢车开行方案优化 [J].北京交通大学学报,2024,48(4):153-163.  
[5]张文正,杨超.市郊铁路与城市轨道交通线路贯通运营方案研究[J].交通与运输,2024,37(1):161-166.  
[6]郝勇.“互联互通”背景下城市轨道交通综合监控系统方案研究[J].信息与电脑(理论版),2024,36(11):165-169.  
[7]王靓.重庆市郊铁路与城市轨道贯通运营探索与实践[J].中国新技术新产品,2020(8):113-114.  
[8]庹兴兵,杨帆,邹飞,等.市域快线互联互通网络化运营技术研究[J].都市快轨交通,2025,38(1):171-176.

作者简介: 李天然 (1984.12—), 男, 四川农业大学, 农业电气化及自动化专业, 高级工程师。

# 关于道路交通平面交叉口渠化及安全设计的探讨

彭益清

盐城市交通规划设计院有限公司，江苏 盐城 224000

**[摘要]**交通渠化设计是一种利用多种交通辅助手段，引导行人和车辆交通行为的一种措施，使各种类型的道路使用主体能够按照交通规则有序运动。道路交通平面交叉口渠化及安全设计对于提高交叉口通行效率，减少交通事故，提升交通安全率有着重要作用。基于此，本篇文章从实际情况出发，首先分析了道路平面交叉口的形式划分与通行能力，进而明确了道路平面交叉口交通组织优化思路和流程，最后针对性提出了道路交通平面交叉口渠化及安全设计的有效举措以供参考。

**[关键词]**道路交叉口；渠化设计；安全设计

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17163

中图分类号: U49

文献标识码: A

## Discussion on Channelization and Safety Design of Road Traffic Intersection

PENG Yiqing

Yancheng Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224000, China

**Abstract:** Traffic channelization design is a measure that utilizes various traffic assistance methods to guide pedestrian and vehicle traffic behavior, enabling various types of road users to move in an orderly manner according to traffic rules. The channelization and safety design of road traffic intersections play an important role in improving intersection traffic efficiency, reducing traffic accidents, and enhancing traffic safety rates. Based on this, this article starts from the actual situation, first analyzes the form division and traffic capacity of road intersections, and then clarifies the optimization ideas and processes of traffic organization at road intersections. Finally, targeted measures for channelization and safety design of road traffic intersections are proposed for reference.

**Keywords:** road intersection; canal design; safety design

### 引言

道路平面交叉口属于交通流集散地，容易发生交通拥堵和行车事故，尤其是机动车数量日益增多的背景下，优化道路交叉口设计，做好渠化及安全设计就显得尤为重要。从实践效果来看，道路交通平面交叉口渠化及安全设计能够保障交叉口的交通安全性，提高交通效率。结合交叉口实际情况，使交叉口渠化设计满足道路交通需求，对于提高道路交通效率，满足人民群众道路出行交通需求有着重要的积极影响。

### 1 道路平面交叉口的形式划分与通行能力分析

#### 1.1 形式划分

道路平面交叉口指的是两条或两条以上道路在同一平面相交的位置，交叉口的形式划分一般按照岔路的几何形状、交通组织方式、交通控制方法几方面进行划分。与其他道路位置相比平面交叉口的交通流聚集效果更明显，

交叉口的交通特性较为复杂，与单条道路交通流有明显不同，各类道路使用主体在交叉口的汇聚量大、集聚时间长，按照形状进行划分不同类型交叉口的特点见表 1。

#### 1.2 通行能力

(1) 无信号灯控制平交交叉口。这种道路岔口在中小型城镇及乡村较为常见，按照实际情况可将道路划分为无标牌指示、有标牌指示两部分。无标牌指示表明该路段没有明确的信号指示，行人穿越道路、车辆行驶在交叉口的过程中都只能根据周边情况判断后续行为，行人与机动车的行为规范性不高<sup>[1]</sup>。因此，无信号灯控制平角交叉口的道路使用行为具有明显的不可控性与偶发性，极易出现车辆碰撞的情况，通行效率不高、通行能力较差。

(2) 有信号灯控制平角交叉口。合理的信号灯配时方案能够有效减少车辆与行人的等待时间，对于防止交叉口拥堵、防止交叉口交通事故发生有着明显作用。

表 1 不同类型道路平面交叉口的特点

平交口类型	道路数量/条	特点
“X”形	2	两条道路以<75° 锐角相交，对右转弯车辆不利，有较多视觉盲区
“Y”形	3	3条道路以<75° 锐角相交，驾驶人视线受限
“十”字形	2	两条道路近似垂直，形式简单、交通组织便利、易于渠化
“T”形	3	3条道路近似垂直交叉，视线良好
畸形交叉	≥4	占地面积大，交通流冲突点多、不易渠化

在中大型城市的道路交叉口一般都配有信号灯,在遵守交通信号灯指示的情况下能显著提高车辆和行人的通行效率,按照信号灯形式及功能,可以将其划分为预定周期式信号控制、半感应式信号控制、全感应式信号控制三部分,合理设置信号灯能减少交通冲突,提高通行能力。

(3) 平面环形交叉口。这类交叉口一般遵循“右进右出、逆时针单向环行”原则,在线性道路交叉期间车辆之间的“强冲突”能够被转化为车辆合流、分流的“弱冲突”,对于缓解交通拥堵、减少大规模交通压力有着重要作用。根据环形交叉口的车流量特点,车辆在不同车流情况中的行驶情况具有明显差异,在不同车流量情况下也具有不同的行驶决策。比如车流量过大车辆无法直接穿过交叉口,因此就需要选用交织、穿插的行驶方式;在车流量较低时,车辆能够自由行驶通过交叉口,无需做其他的整改。根据平面环形交叉口的特点确定环形节点,要求车辆在环形节点中以交织行为渐次推进,其最大交通能力可以根据下述公式计算得出:

$$Q_m = \frac{354 (1 + e/w) (1 - p/3)}{1 + w/l}$$

式中:  $Q_m$  表示为交叉口最大通行能力;  $e$  表示为入口宽度;  $p$  表示为车辆与环行节点内全部车辆之比;  $w$  表示为交接长度;  $l$  表示为支段长度。

## 2 道路平面交叉口交通组织优化思路和流程

### 2.1 交通组织优化思路

渠化设计是解决道路交叉口拥堵问题的一种有效措施,从实际应用情况来看,渠化设计对交叉口拥堵问题的解决作用与功能表现为以下几方面:首先,渠化设计增大了交叉角度。车辆冲突的交叉角度越小,则驾驶人能够应对冲突的时间越少,越容易发生交通事故出现拥堵。渠化设计能够合理增加平面交叉口的交叉角度,帮助驾驶人提高冲突的反应时间,能够更直观地判断自己身旁车辆的行驶状况,能够有效减少车辆的直接冲突,为车辆的位置判断预留更多时间,其次,减少冲突面积。利用渠化设计的方式压缩车辆与行人、车辆与车辆的冲突范围,大大减少道路使用主体之间的直接冲突<sup>[2]</sup>。最后,渠化设计有效分割车流。将交叉点内的冲突点数量大幅减少,能够避免过多冲突碰撞产生的拥堵问题。对接上述几方面内容,道路平面交叉口的优化应从宏观优化、微观交通两方面入手,要求能够在时间上削峰填谷,利用空间上的优化减少车辆的直接冲突。同时合理增加信号控制灯,为车辆和行人使用道路提供指引,充分利用平交口的空闲时间和空间。

### 2.2 交叉口渠化的设计流程

为了增强道路交通平面交叉口渠化设计的高效性,使设计方案能够满足大规模交通流量推进、缓解交通拥堵、降低行车事故的需求,就需要根据实际情况优化交叉口渠化设计流程,明确交叉口各设计要点与渠化走向,提高设计的指向性与规范性。按照道路交通平面交叉口渠化的基

本组成将其流程划分为三个部分,即前期的交通调查、中期的渠化设计、后期的方案确定与实施,具体流程见图1。

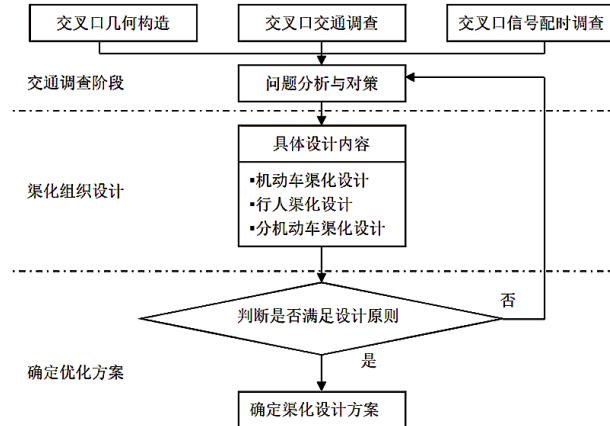


图1 交叉口渠化设计流程

首先,做好交通调查。渠化设计需要根据道路具体情况针对性设计,要求设计人员能够明确每个交叉口的交通流量情况、几何构造以及道路节点,在开展渠化设计前要求设计人员做好实地调查,掌握道路交叉口拥堵情况的具体成因,明确道路进出口的宽度以及交叉口性质。其次,设计渠化组织。渠化组织的设计需要根据前期勘察效果做好优化,具体内容包括:①机动车渠化设计。通过设计专用车道的方式,满足大规模车流量的一体推进需求,根据当前道路机动车道数量增设额外车道;②非机动车道渠化设计。以交叉口交通量作为主要参考,明确机动车、非机动车位置做好渠化设计;③行人渠化设计。部分跨度较大、宽度较高的入口需要在中间位置预留停留区。最后,确定优化方案。做好道路交叉口各处渠化设计后,设定多个方案并综合对比,最终确定优化方案。对于初步生成的方案则需要根据道路交通流量、信号灯以及道路组织方案持续改进,为后续的渠化施工奠定基础。

## 3 道路交通平面交叉口渠化及安全设计的有效举措

### 3.1 车道功能划分

基于交叉口渠化设计的车道功能划分包括以下几部分:首先,在机动车道方面应明确日常车流量的具体情况以及车流量分布的实际情况。如果不同车道的数量分布较为均匀,则可以直接在道路中增设一条专用车道,将道路两侧划分为快车道、慢车道两部分。机动车道与非机动车道之间需要做好明显区分,可以在中间标记分道线做好明确区分。其次,道路机动车数量直行远高于其他走向车辆时,按照中间标分的模式额外设计两条自行车道;当左转和右转车辆较多且道路条件受限时,可以适当降低右转车道的优先值,额外增加1条左转车道,巩固基础。然后,道路左转车辆远少于右转车辆时,可以设计1条左转车道分流,自行车道与右转车道合并;反之可以设置1条右转车道分流,自行车道与左转车道合并。

### 3.2 人行横道与导流线

人行横道的渠化设计应着重分析以下几方面内容：一是人行横道的方向。坚持机动车与行人行驶距离最短原则，避免在交通信号灯时间结束时行人未过交叉口、行人与机动车产生直接冲突的情况；二是人行横道的位置。要求人行横道能够与交叉口中心距离保持适当距离。人行横道与交叉口中心距离直接关系行人的后续道路使用行为，如果距离过大行人过道的时间也会有所增加，与车辆产生直接冲突的风险也会因此加大；如果距离过小不仅会影响车辆的正常通行，使车辆行驶多出许多无意义的等待时间，同时也会提高交叉口的车辆碰撞概率，因此需要合理设计。三是人行横道的宽度。人行横道的宽度设计需要与交叉口的道路交通使用需求相契合，根据道路的流量变化合理设计，宽度不宜过窄<sup>[3]</sup>。一般情况下城市主干道交叉口的人行横道宽度需要在5m以上，支路则需要在3m以上。导流线的设计主要是针对交叉口空间较大、车流量较为密集的部分，这部分交叉口仅依靠信号灯控制车辆与行人道路使用行为的效果有限，需要额外设计导流线引导交通，限制车辆随意转弯，提高交叉口的控制效果，避免因为车辆行驶线路存在偏差，减少线路冲突最大限度避免行车事故，减少行车拥堵的问题。其中，自行车导流线的设计能够大幅缓解机动车道的错位问题，左转导流线则能起到缩小交通冲突，减少车辆与车辆、车辆与行人的直接冲突情况。

### 3.3 进口道与出口道设计

进口道首先需要做好展宽设计，能够精确地信号控制交叉口设计。根据道路进口车道数做好合理划分，根据实际的交通流量和流向提高交通流畅度，加强车辆行驶的安全性。依据实际交通流量和流向做好细致思考，明确配置情况。根据一般道路的设计原则，进口车道数应高于上游路段的车道数，为车辆的安全规范行驶提供充分的交通空间。展宽方法可以按照向右展宽进口道、向左压缩绿化带、压缩进口车道宽度等方式合理设计。在进口道的车道宽度设计方面，需要做好交叉口的规划设计。为了确保进口车道满足大规模交通流量需求，应按照标准宽度3.25m做好设计，提高交叉口规划设计成效与交通效率。在出口道设计方面，则需要根据上游各进口道同一信号相位流入的最大进口车道数匹配，合理设置出口道数量，确保车辆能够顺利通过交叉口<sup>[4]</sup>。出口通道的宽度和高度需要满足车辆通行需要，确保车辆能够高效、安全地离开交叉口。

### 3.4 交叉口信号控制设计

交叉口信号控制设计的目的在于提高车辆与行人的道路使用行为，合理分配交通时间，避免车辆与车辆、车辆与行人的直接冲突，提高交通效率。根据道路交叉口的平均流量和大致流向，合理设置信号相位，确保车辆与行人能够按照信号灯的指示有序通行。比如，针对行人流量较大的交叉口可以设置行人专用相位。信号设备的选择，需要根据道路性质与道路交通流量的特点选择合适的信

号设备和控制系统，确保信号控制的准确性与稳定性。部分承担着重要交通任务的交叉口，需要额外设置应急控制系统和备用电源，在停电等紧急情况下仍能保持正常运行。交通信号灯的时间配时，则需要在前期做好路段的流量分析，统计每个路段的特点和交通流量实际情况，按照交通流量合理确定信号周期长度和绿信比。根据不同时间段的交通情况合理调整信号时间适应交叉口的交通需求。

### 3.5 交通岛与行人过街

交通岛的设计主要是用来控制、分隔冲突车流，使车流能够在进入一定的路线后合理分流，避免同时进入交叉口产生直接冲突，对降低一次性交通压力，确保车辆和行人的交通安全有着重要作用。在交通岛设计方面，需要根据道路交叉口的特点划分为安全岛和导流岛两部分，交通岛面积不宜过大，转角可以作为行人过街的安全岛，安全岛面积需要适当增加，保持在20m<sup>2</sup>以上。合理设计交通岛能够控制行车速度，使车辆按照规范路线行驶，确保定向车流，优化交叉口的行车空间。行人过街设计的目的则是在人行横道的基础上为行人提供更多的交通选项，减少对机动车交通影响<sup>[5]</sup>。行人过街的位置需要与人行道直接接触，特殊情况下与路中线夹角位置保持在60°以内。在人流量较大的交叉口位置需要额外装设行人过街信号灯，为行人过街提供专门的安全通道，确保行人过街安全的同时也能缓解交叉口交通压力。

## 4 结束语

综上所述，随着城镇化建设的不断推进，道路交通压力显著增加，车流量不断提升、道路交通愈发拥堵，尤其是道路交叉口部分作为流量集中区，道路拥堵问题极为严重，也是行车事故的高发区。针对道路交叉口特点做好渠化设计，是缓解道路交叉口交通压力、提高交通安全性的有效举措。此过程中，从车道功能划分、人行横道与导流线、交叉口信号控制设计、交通岛与行人过街几部分做好渠化设计，是提高道路行车效率，保障交通安全，缓解道路交通压力的重要方法。

### 【参考文献】

- [1]刘家志,蔡军,王怡欢.面向交通改善的道路典型设计要素研究——以辽宁省大连市交叉口为例[J].住宅产业,2024(8):12-15.
- [2]李梦佳,王保民,戴斌.城市道路平面交叉口非机动车道交通组织应用[J].黑龙江交通科技,2024,47(10):182-185.
- [3]唐亮.基于交通设计理念的道路平交口交通阻塞问题的道路精细化设计[J].工程建设与设计,2024(1):103-105.
- [4]胡玉洲,施佳露.基于VISSIM 仿真的城市道路平面交叉口交通组织优化[J].惠州学院学报,2023,43(6):22-27.
- [5]林祥.旧城区道路节点交通拥堵治理方案的探析——以湛江市赤坎立交改造为例 [J]. 交通与运输,2021,34(1):23-26.

作者简介：彭益清（1997.9—），男，毕业于南京林业大学土木工程专业，现就职于盐城市交通规划设计院有限公司，设计部门设计师，助理工程师。

## 路桥施工管理过程的创新管理分析

王腾骏

新疆北新路桥集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**新时期路桥工程施工管理任务较为艰巨, 需对施工现场设备、材料、人员等进行全方位的管理, 切实保证施工质量及施工效率, 促进路桥工程的高效施工。为进一步提升路桥工程施工管理质量, 施工单位需在施工管理中引入科学的管理手段, 不断进行施工管理创新, 从而提升施工建设的整体管理水平, 优化路桥工程的经济效益和社会效益。本篇文章将围绕路桥施工管理创新进行深入研究, 分析路桥施工管理特点, 并结合当前路桥施工管理中的常见问题, 重点探究路桥创新管理的对策。

**[关键词]**路桥工程; 施工管理; 创新管理; 数字化技术

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17192

中图分类号: U415

文献标识码: A

## Innovative Management Analysis of Road and Bridge Construction Management Process

WANG Tengjun

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** The construction management task of road and bridge engineering in the new era is relatively arduous, requiring comprehensive management of construction site equipment, materials, personnel, etc., to effectively ensure construction quality and efficiency, and promote efficient construction of road and bridge engineering. In order to further improve the quality of construction management in road and bridge engineering, construction units need to introduce scientific management methods in construction management, continuously innovate construction management, thereby enhancing the overall management level of construction and optimizing the economic and social benefits of road and bridge engineering. This article will conduct in-depth research on innovation in road and bridge construction management, analyze the characteristics of road and bridge construction management, and focus on exploring countermeasures for innovative management of road and bridge construction by combining common problems in current road and bridge construction management.

**Keywords:** road and bridge engineering; construction management; innovation management; digital technology

### 引言

路桥工程作为城市基础设施建设的重要组成, 需采用有效的创新管理办法, 方能保证路桥施工管理的有效性。建设单位可将创新管理作为提升路桥施工管理科学性的重要措施, 结合工程实际特点, 不断优化施工管理流程, 为路桥工程质量安全提供切实保障。其中, 可利用施工管理创新, 有效弥补传统路桥施工管理中的不足, 有效推进路桥工程施工管理工作的落实, 提升路桥施工管理的全面性和覆盖性。

### 1 路桥施工管理特点

路桥工程的施工管理是工程建设的重要一环, 需充分借助科学合理的管理举措, 方能进一步提升路桥施工质量及效率, 获得良好的施工管理效果。其中, 在路桥施工管理过程中, 逐渐体现出复杂性、流动性、规划性等管理特点, 需要着重围绕施工管理特点, 进行有序的施工管理部署。

#### 1.1 复杂性

复杂性作为路桥工程施工管理的主要特点, 是因为路桥工程施工所处环境及参建方组织结构等较为复杂, 从而增加了施工管理难度, 需要在施工管理过程中有效地应对自然环境的影响, 并进行施工人员及任务的合理安排。其中, 我国城镇化建设中, 路桥工程作为保证民生交通出行

的重要工具, 需在不同地区地形地貌环境下进行工程项目的建设, 并由不同的地形地貌差异环境差异等, 提出不同的施工建设要求。如, 东南沿海地区的路桥工程需要做好抗渗性施工, 而西南地区城市则要结合当地的地势山脉等, 进行相应的施工建设, 提升路桥工程的结构质量。基于不同地区地理环境的影响, 需采用不同的路桥工程施工手段, 也造成了施工管理的复杂性特征<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 流动性

路桥工程施工管理还具备流动性特点, 由于路桥工程施工长度不一, 导致其实际的施工周期与施工环境存在较大差异性, 相应地要求施工队伍采用流动式施工作业方式, 在一定期限内需完成大量区域的路桥施工建设。而此种流动性施工特点, 也造成路桥工程的施工管理存在着一定流动性。需跟随切实保证施工管理的机动效果, 从而能够针对施工区域的不同开展相对应的施工管理措施, 解决工程流动施工中存在的各种问题, 切实保证施工管理工作的有效性和可行性。

#### 1.3 规划性

从工程规模上进行分析, 可发现路桥工程项目往往涉及区域较广、规模较大, 在实际施工中需结合多种施工技

术手段,方能保证工程项目的顺利建成。因此,针对路桥工程施工采取的管理措施须具备一定的规划性,能够围绕路桥工程建设的各施工环节进行有效的规划设计,切实保证路桥施工的质量安全。同时,由于路桥工程所处环境复杂,不只分布在城市内,也涉及野外的路桥施工等,让工程施工形成许多不可控因素。为保证工程能够按时完工,需采取有效的施工管理措施,提前做好相关准备工作,并严格各施工环节,遇到一些意外情况时,及时处理和解决,能够有效避免工程施工受到影响<sup>[2]</sup>,展现出施工管理规划的必要性。

## 2 路桥施工管理过程中的常见问题

### 2.1 施工质量难以保证

路桥施工质量会受到诸多客观条件的影响,从而加大路桥工程施工管理难度,导致施工质量难以得到保障。其中,基于施工环境等外界因素的影响,将会对施工材料和施工工艺的实际应用效果产生限制,因此需充分利用科学有效的施工管理方法,进行科学的施工管控。然而由于施工管理措施的使用不当,常会导出出现施工质量难以保证的问题<sup>[3]</sup>。如,部分企业盲目追求施工经济效益最大化,极限压缩施工成本,将极大地影响施工质量。还有部分施工企业缺少对施工材料的有效管理,缺少科学地分类与存储,将难以为施工提供强有力的物料支撑,难以保证施工质量。另外,缺少有效的施工管理,将导致施工中的突发事件难以及时地应对,造成无法挽回的紧急损失。

### 2.2 施工管理体系待完善

对当前路桥工程施工管理现状进行分析,可发现部分地区的路桥工程存在着施工管理体系不完善的情况,路桥施工管理体系较为滞后,传统的施工管理模式难以满足现阶段的施工管理需求<sup>[4]</sup>。其中,施工管理体系不完善的主要体现为:(1)体系中缺少对路桥施工情况的预估。现阶段城镇化建设中交通工具的增多,增加了路桥的压力,单位面积的车流量过大影响,导致路桥老化现象严重的问题。施工管理过程若缺少精准的施工情况评估,将极易导致路桥施工中混凝土路面开裂等问题,从而影响路桥工程的实际使用效果。其中,施工管理中路面养护监督力不足,也将导致路面出现损害,留下安全风险隐患。(2)施工管理体系中缺少动态过程监控。部分施工企业在施工管理过程中,缺少动态施工监督,将导致各施工环节难以有效地衔接,极大地影响着施工质量和进度。(3)施工管理体系对施工质量控制方案设计不足。部分施工企业未能围绕施工质量进行施工管理部署,将导致施工管理成效难以凸显。

### 2.3 成本管理欠缺完善性

路桥工程施工管理中成本管理十分重要,可借助有效的施工成本管理方法,形成对施工过程有效控制,显著提升工程的经济效益和社会效益。然而部分地区的路桥工程施工成本管理缺乏完善性,未能科学地进行施工材料成本控制,无法准确把握材料价格进行规划购置,极大地影响着工程的整体收益。缺少对设备的成本控制,将缺少对设

备维修和保养的限制和约束,易导致设备在施工中出现各种故障问题,影响设备的使用性能,亦会造成极大的安全隐患。同时,由于缺少人工成本的有效控制,将导致工程施工中人力资源无法有效匹配,不利于工程项目有序地开展。

### 2.4 相关人员综合素质不强

路桥工程施工对于技术的要求较高,需要施工人员利用精湛的施工技术和丰富的施工经验,才能保证路桥工程项目的顺利施工,尤其针对当前大跨度预制桥梁结构的施工,对于施工人员的专业度要求更高,需要相关人员具备较强的专业水平,才能保证施工质量安全。然而当前多数路桥工程的施工人员素质参差不齐,缺少专业化的技术培训,极大地制约着施工人员的施工操作水平。而施工管理人员的管理意识不强,将极大地影响着施工管理效果,难以结合有效的施工管理措施,进行工程施工操作的监督。

## 3 路桥施工管理过程的创新管理对策

### 3.1 工程介绍

文章以某路桥工程为例,项目线路全长 10710km,挖方路基总长度为 4710m,最大开挖高度为 68.23m;填方路基长度为 5420m,最大填筑边坡为 4 级边坡。工程中需跨越当地的环城河道,总施工期限为 36 个月。为保证施工企业能够在工期内按时按点地完成工作任务,需进行施工管理过程创新,促进工程按时按点地进行施工。

### 3.2 施工管理创新对策

#### 3.2.1 加强施工质量管理创新

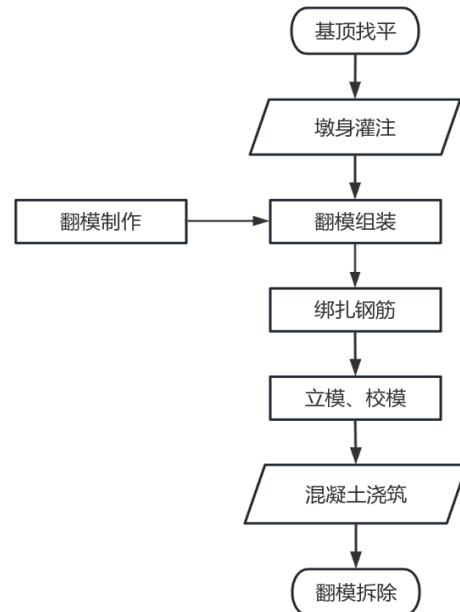


图 1 桥梁墩身浇筑施工工艺流程

该工程的施工管理创新过程中,需着重加强施工质量管理创新,即从多层面进行施工质量的控制。在具体的提升工程施工质量过程中,可结合工程实际拟定施工质量管理目标,并从施工材料、施工现场、管理模式等方面进行综合性的创新。在施工材料创新管理过程中,由于施工材料与施

工质量存在直接关联性，因此需做好施工材料的质量控制，综合性地进行选材，将材料质量作为选材的第一顺位，采购人员要横向比较多家材料供应商的资质，并比较材料的性能，最终进行材料的选择。在保证施工质量的前提下，可利用价格作为参考要素，进一步提升材料采购的经济性。在施工材料进场前，需经历严格的材料抽检试验，从而避免存在质量问题的材料流入工程中。而在施工现场的管控中，需对现场进行分区域的管理，建立材料管理专区，从而避免施工材料及设备等出现性能的影响，需对现场的各种影响因素进行排查，切实保证施工现场的安全等级。如，在进行混凝土材料的储存过程中，需对现场的存放区域进行全面的核查，并做好防潮控制，从而保证混凝土原材料的质量，维护施工的质量。而在管理模式创新中，需围绕施工质量目标，利用可视化技术规范具体的施工工艺流程（图 1），从而有序地开展施工操作，提升施工管理的科学性和有效性。

### 3.2.2 建立健全的施工管理体系

该工程施工管理创新过程中，应当建立健全的施工管理体系，保证施工任务的顺利完成，更快地达成施工目标。其中，施工管理体系中应当明确设定各施工环节的具体工作内容，并提供各环节施工的管理标准，严格落实内部监管制度，保证各工程项目施工工作的顺利开展。要在施工管理体系中，安排专人进行施工管理监督，从而规范工程施工中的各种实践行为，促进施工科学合理地进行。管理人员应当具备一定的否决权和领导权，对于施工中出现的各种违规操作施工行为等，需及时予以阻止，对于未按照原定施工计划和施工周期开展施工的行为，要借助施工管理体系的内部监理机制，进一步提升施工管理的有效性和可行性。

### 3.2.3 实现施工成本的合理控制

成本管理是路桥工程施工管理的重点内容，企业可借助低成本施工，占据更大的建筑市场，提升自身的施工效益。工程在具体的施工成本控制中，需着重针对各种成本支出进行了解和掌握，进而开展有效的耗材成本控制、人工成本控制、施工设备成本控制，节省工程的实际支出。其中，在路桥工程成本管理中还存在着一些隐性成本费用，如施工管理中的各类支出、电话费等。因此，需采取有效施工成本管理措施，进行成本控制。（1）成本预测。成本预算是指在工程施工前针对工程的实际建设需求，进行成本的预测。可利用科学的预测工具和方法，进行综合性的项目评估，从而有效预测工程项目未来的成本走势，借此拟定最低的成本方案。（2）成本核算。在工程进行成本核算过程中，往往需要根据施工项目的具体情况<sup>[5]</sup>，进行财务数据的收集和整理，并借助大数据和云计算技术，进行精准的财务数据核算，得出不同施工阶段的成本费用，并做好成本使用记录。企业可充分利用成本核算，规避路桥施工中的风险。（3）成本分析。则可跟随具体的施工过程，对各环节产生的成本费用进行针对性地分析，从而判断当前成本管理效果。如，可利用成本分析，对施工的各项成

分花费进行科学研究，能够识别施工中最费钱的项目及最省钱的施工操作，便于进行施工操作调整。同时，对于施工建设中不必要的成本开销，可借助成本分析进行纠察。

（4）成本考核。主要是在完成施工后，对工程成本控制表现进行相应的奖励与处罚，进一步提升施工管理效率。

### 3.3 加强相关人员的技术培训

在路桥施工管理中，还要着重加强相关人员的技术培训，保证施工人员具备较强的专业施工能力，能够有序地开展施工操作，为施工管理质量提供有力的保障。其中，具体的施工技术管理要点如下：（1）加强对施工技术方案的审查。施工技术直接关系到工程质量安全及施工进度等，在进行技术管理中需对当前工程的技术方案进行全面的核查，判断方案的可行性和适宜性，并严格按照技术方案中的施工顺序等，进行有效的施工管理。技术方案中的具体施工工艺、资源配置、安全保证等内容，均可为施工管理提供重要依据。需保证实际施工与技术方案的一致性，避免由于不规范施工操作引发的质量安全问题。（2）施工过程技术监督。在相关人员的技术培训过程中，为了让施工人员能够更加熟悉施工工艺及施工规范，施工单位要组织开展专业化施工技术的培训，让施工人员能够掌握最新的施工标准和规范操作要求，并按照国家和行业规定的施工程序，进行施工执行。可在培训中帮助施工人员提升自身的专业技能，并及时发现施工人员存在的操作误区，从而能够对路桥工程的关键施工环节进行有效的把控，减少施工中的失误操作频率，让施工人员能够利用现代化的施工技术完成施工任务。

## 4 结束语

综上所述，路桥工程施工管理创新是新时期改革的应然之举，要利用管理手段的创新，有效解决传统施工管理中的问题，获得卓越的施工管理效果。在具体的施工管理过程中，需着重加强施工质量的管理，并做好施工成本控制，加强相关人员的培训，借助完善的施工管理体系，形成对施工人员施工行为的监管与约束，从而进一步提升施工管理的指向性和有效性，保证路桥工程的快速建设和投入使用，为城市打造良好的交通出行通道。

### 【参考文献】

- [1] 朱银虎.路桥施工管理过程的创新管理分析[J].产品可靠性报告,2023(8):70-72.
- [2] 马立新.浅析路桥施工管理过程的创新管理[J].中国公路,2022(6):90-91.
- [3] 李方.路桥施工管理过程中的创新思考[J].运输经理世界,2022(15):65-67.
- [4] 庞哲.试论路桥施工管理过程的创新管理[J].四川建材,2024,50(10):215-216.
- [5] 徐世伟.路桥工程项目施工管理的创新探讨[J].四川建材,2022,48(2):125-126.

作者简介：王腾骏（1976.2—），男，西南科技大学建筑工程技术，新疆北新路桥集团有限公司，项目经理，中级。

## 高温熔融还原铜渣冶炼铜铁合金

黄伟军<sup>1,2</sup> 刘亚静<sup>1</sup>

1.河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056038  
2.包头稀土研究院资源与生态环境研究所, 内蒙古 包头 014030

**[摘要]**研究了一种采用碳热法冶炼铜铁合金直接还原技术。铜和铁的回收率随反应时间、反应温度和还原剂量的增加而增加。为了得到适宜还原率与合金成分, 还原条件为 1500°C, 14wt% C, 20~25wt% CaO, 60~80min。铁和铜的回收率分别约为 90% 和 85%, 合金中铁和铜的含量分别为 91~93wt% 和 5~7wt%。尾矿主要由  $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$  和  $\text{SiO}_2$  组成, 可作为水泥和球团制备的原料。

**[关键词]**熔融铜渣; Cu-Fe 合金; 回收率; 直接还原

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17165 中图分类号: TF046 文献标识码: A

## High-temperature Molten Reduction of Copper Slag for Copper-iron Alloy Production

HUANG Weijun<sup>1,2</sup>, LIU Yajing<sup>1</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China  
2. Institute of Resources and Ecological Environment, Baotou Rare Earth Research Institute, Baotou, Inner Mongolia, 014030, China

**Abstract:** An innovative technology for the direct reduction of copper slag was studied while smelting Cu-Fe alloy by carbon to recover the main valuable elements from the copper smelting slag. Meanwhile, the recovery rates of copper and iron increased with the increase of reaction time, reaction temperature, and reduction agent. In order to obtain good element yield, the optimum conditions for reducing copper and iron from the molten copper slag were determined to be 1500 °C, 14 wt% C, 20~25 wt% CaO, and 60~80 min. The recovery rates of iron and copper reached about 90% and 85%, and the contents of iron and copper in alloy reached about 91~93 wt% and 5~7 wt%, respectively. The tailing was mainly composed of  $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ ,  $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$ , and  $\text{SiO}_2$ , which could be used as a raw material for cement and pelletizing.

**Keywords:** molten copper slag; Cu-Fe alloy; recovery rate; direct reduction

铜、铁是现代工业的粮食, 广泛应用于各行各业<sup>[1-4]</sup>。特别进入 21 世纪, 我国的铜、铁资源储量和开发远远不能满足正常的工业化需求, 我国 80% 的铁矿和铜矿依靠国外进口<sup>[5-7]</sup>。因此, 有效缓解我国铜、铁资源紧缺的窘境, 保障基础原料的供应, 增强市场竞争力, 已刻不容缓。目前生产铜的工艺主要是火法冶炼, 其产量约占世界铜产量的 80%, 我国更是高达 97%<sup>[8-10]</sup>。火法冶炼 1t 铜将产出 2.2t 铜渣, 我国每年的铜渣产量高达 1800 万 t, 全国堆存量超过 3 亿 t, 不仅造成资源的浪费, 还占用土地污染环境<sup>[11-14]</sup>。铜渣约含 TFe:35%~50%、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ : 20%~40%、 $\text{SiO}_2$ : 30%~40%、Cu: 1.0%~2.5%、 $\text{CaO} \leq 10\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 10\%$  及少量的贵、重金属, 其成分见表 1<sup>[12,14-17]</sup>。因此, 如何有效地回收利用这些资源, 同时提高其综合附加值, 减少对环境的污染, 是冶金行业的迫切要求。

此外, 铜渣的出渣温度为 1200~1250°C, 其物理显

热约为 1.32GJ/t。<sup>[13-17]</sup>全世界每年生产铜渣约 4220 万 t, 可回收利用的铜渣余热为  $5.570 \times 10^7\text{GJ}$ , 目前高温铜渣多采用水淬处理, 不仅浪费了大量的物理显热, 而且造成了水污染, 恶化了工作环境。<sup>[13-17]</sup>Cu-Fe 合金可作为耐候钢的原料。耐候钢具有良好的耐候性、优异的力学性能和焊接性能, 广泛应用于轨道交通、桥梁工程等领域。因此, Cu-Fe 合金作为耐候钢的原料具有广阔的市场前景。利用铜渣冶炼铜铁合金工艺简单, 污染少, 具有潜在的技术、经济和环境优势。此外, 硅酸盐尾矿还可作为制备水泥和球团的原料。

本研究以铜渣二次资源回收工艺为基础, 利用铜渣液对铜铁合金进行了直接还原冶炼。考察了改性剂、还原剂、还原温度和还原时间对铜铁回收率的影响。在利用铜渣冶炼铜铁合金的过程中, 确定了涉及铜铁合金配方参数的合金成分。

表 1 铜渣的化学组成分析结果% (注 带“\*”的单位:g/t)

组成	TFe	Cu	Zn	S	Pb	As	P
含量	35.0-50.0	0.5-2.5	0.8-1.8	0.3-0.82	0.1-0.3	0.01-0.05	0.02
组成	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Ag*	Au*
含量	30.0-40.0	2.5-6.5	1.5-3.5	1.5-2.5	0.3-0.6	16.47	0.26

## 1 实验

渣样取自中国某铜厂。用 X 射线荧光光谱研究了化学成分。利用 ICP-OES 测试结果计算各种氧化物质量含量 (表 2)。采用 X-射线粉末衍射 (XRD) 检测了铜渣的矿物学相；采用扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱分析仪 (EDS) 对样品进行了显微组织和相组成分析。

表 2 铜渣的多组分分析, wt%

成分	TFe	TCu	Zn	S	Pb	As	P
含量	41.46	2.52	1.23	0.32	0.31	0.01	0.02
成分	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Others
含量	39.98	31.45	4.53	3.38	2.35	0.36	0.20

以试剂级氧化钙 (>99.90wt%) 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (>99.90wt%) 粉末为原料, 调整铜渣的组成。采用高纯度石墨 (>99.99wt%) 作为还原剂。配料前将铜渣细磨至 200 目, 将磨碎的铜渣和 CaO 放入干燥箱, 在 105°C 下干燥 4h 以除去水分, 然后在球磨机中按要求比例与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 充分混合。将混合后的粉末压成片剂样品, 在刚玉坩埚中 1450°C 加热 120min, 确保完全熔化, 然后在电阻炉氩气下制备预熔渣。样品加热后, 在炉内用氩气冷却至室温, 以避免冷却过程中元素氧化。

预熔工艺完成后, 预处理渣也被磨至 200 目左右。随后, 将预处理后的炉渣与还原剂按要求比例在球磨机内充分混合。将混合物倒入刚玉坩埚中, 研究炉渣中铜和铁的还原。在电阻炉氩气中, 测定了不同还原剂用量、温度和时间下金属中的成分。在不同还原条件下得到的样品也在氩气炉中冷却到室温。用 XRF 和 ICP-OES 测定了合金和炉渣的化学成分。用 ICP-OES 分析得到的相应元素的质量换算样品中各种氧化物的含量。最后, 根据式 (1) 计算出铁和铜的回收率。

$$\eta_M = \frac{m_0 \times w_0 - m_1 \times w_1}{m_0 \times w_0} \quad (1)$$

式中:  $\eta_M$  为铜渣中元素(铁或铜)的回收率, %;  $m_0$  和  $m_1$  分别为渣和尾矿的质量, g;  $w_0$  和  $w_1$  分别为渣和尾矿中氧化物的质量分数, wt%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 转炉铜渣的矿物学相

众所周知, 转炉铜渣主要由铁和铜组成。典型转炉铜渣的 XRD 结果如图 1 所示。转炉铜渣主要矿物组成为铜相 (Cu)、辉铜矿相 (Cu<sub>2</sub>S)、磁铁矿相 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 和铁橄榄石相 (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)。图 2 所示为铜渣形貌的 SEM 显微照片。

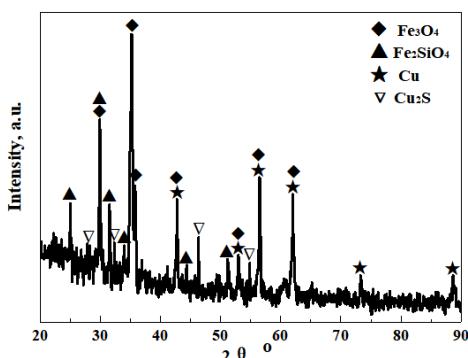


图 1 典型转炉铜的 XRD 图谱

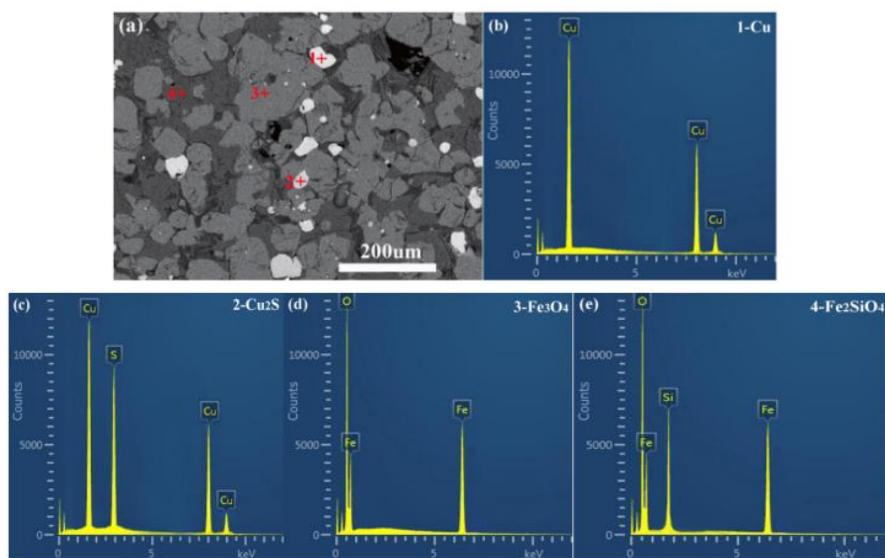


图 2 转炉铜渣的微观结构:(a)转炉铜渣的 SEM 照片;(b)Cu;(c)Cu<sub>2</sub>S;(d)Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>;(e)Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

由图 2(a)可知, 转炉铜渣的物相主要由四种矿物相组成, 即第 1 相 (亮白色)、第 2 相 (白灰色)、第 3 相 (浅灰色) 和第 4 相 (深灰色)。能谱分析 (EDS) 表明, 其中亮白色相为铜相 ( $\text{Cu}$ ), 白灰色相为黄铜矿 ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )。这些是分散在基体中的主要含铜相。浅灰色相和深灰色相分别代表磁铁矿和铁橄榄石相。两者都是矿渣中主要的含铁相, 其含量直接影响矿渣的黏度和熔点。特别是高熔点磁铁矿主要存在于转炉内炼铜条件下的固相中。它可以急剧增加炉渣的黏度, 降低流动性, 导致大量含铜相包裹在炉渣中, 无法有效分离。此外, 采用热耗尽法回收铜渣中的铜是降低磁铁矿含量、提高渣流动性、实现铜富集的关键。但实际结果表明, 热耗尽法回收铜的效果并不理想。此外, 渣中的大量铁不能得到有效的回收利用。

## 2.2 铜渣中元素的还原

图 3 为 14wt% 碳和 20wt%  $\text{CaO}$  在 1550°C 下还原 80min 后的合金成分。可以看出, 金属中主要有两相, 即灰色相 1 和白色相 2。灰质相 1 主要为含铁相, 铁含量为 96.39%, 铜含量为 0.38%, 硅含量为 3.23%。在白相 2 中, 铜的含量高达 5.53%, 是主要的含铜相, 其中硅和铁的含量分别为 2.35% 和 92.12%。同时, 白色相呈条纹状均匀分布在

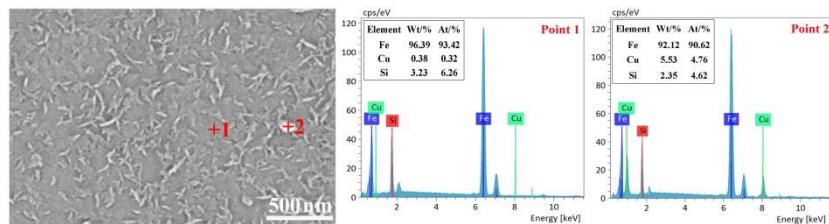


图 3 合金的 EDS 能谱图

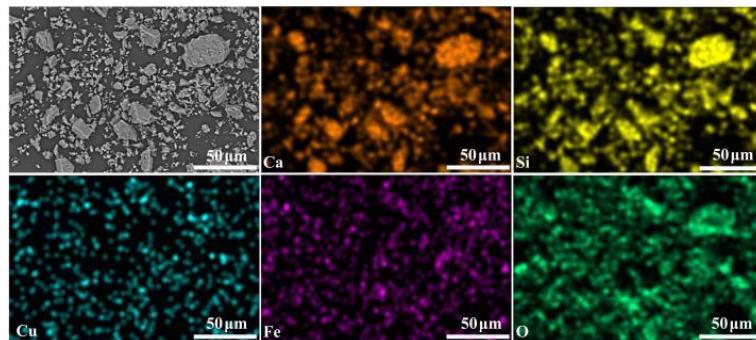


图 4 还原尾矿的元素分布

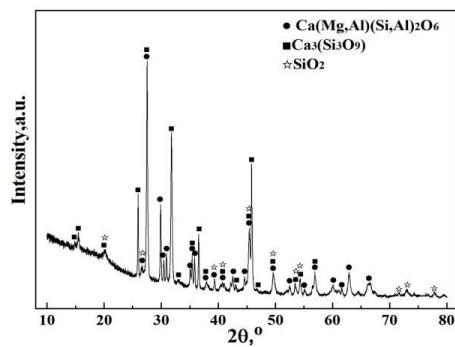


图 5 尾矿的 XRD 图谱

灰色基体中。

图 4 显示了尾矿中元素的分布。从图中可以看出, 尾矿中的主要元素是钙、硅和氧。尾矿中含有少量的锰和铝。铜和铁的含量几乎可以忽略不计, 表明铜渣中的有价元素几乎完全还原。此外, 从尾矿的矿物学分析可知, 尾矿主要由  $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$  和  $\text{SiO}_2$  组成, 主要为硅酸盐和石英, 如图 5 所示。此外, 从图 5 中可以看出, 尾矿中没有出现铁和铜的矿相, 这进一步证明了渣中主要的有价元素铁和铜的还原是比较完整的。

## 2.3 还原条件对铜渣中铜铁回收的影响

表 3 为不同条件下还原 100g 铜渣, 合金的还原量及 Fe、Cu 的回收率。在 1400°C、1500°C 和 1600°C 时的合金质量分别为 35.47g、39.89g 和 41.11g。随着温度的升高, Fe 和 Cu 的回收率均有所提高, 1400°C 时 Fe 的回收率为 78.23%, Cu 的回收率为 76.41%; 1500°C 时 Fe 的回收率为 89.31%, Cu 的回收率为 84.98%; 1600°C 时 Fe 的回收率为 92.13%, Cu 的回收率为 86.52%。结果表明: 在 1400~1500°C 范围内合金的质量和回收率提高较快, 在 1500~1600°C 范围内合金的质量和回收率提高较慢, 表明低于 1500°C 的温度不适合还原铜渣中的 Fe 和 Cu。

表3 加入14wt% C和20wt% CaO不同温度下加热60min Fe和Cu的还原率

样品	温度/℃	合金质量/g	Fe回收率/%	Cu回收率/%
1	1400	35.47	78.23	76.41
2	1500	39.89	89.31	84.98
3	1600	41.11	92.13	86.52

由上述分析可知,适当的还原条件对金属的聚合和铜、铁的还原影响明显,为此,研究了改性剂用量、还原剂用量、还原温度、保温时间等工艺条件对铜和铁的回收率以及合金成分的影响,以获得最佳还原效果。

图6为温度1500℃、保温时间60min、碳14wt%条件下,改性剂(CaO含量)对铜渣中铜和铁的回收结果。如图6(a)所示,铜和铁的回收率先逐渐增加,随着改性剂的增加,回收率迅速上升,随后回收率逐渐增加。这可能是由于在酸性铜渣中加入CaO与SiO<sub>2</sub>反应生成低熔点复合氧化物,改善了渣的熔融性能和反应动力学。当炉渣中CaO含量超过一定量,低熔点复合氧化物就会转变为高熔点氧化物。由图6(b)可知,随着CaO的增加,金属中铜的含量略有下降,而铁的含量略有增加。综上所述,CaO作为助熔剂可以改善渣的流动性和化学反应,

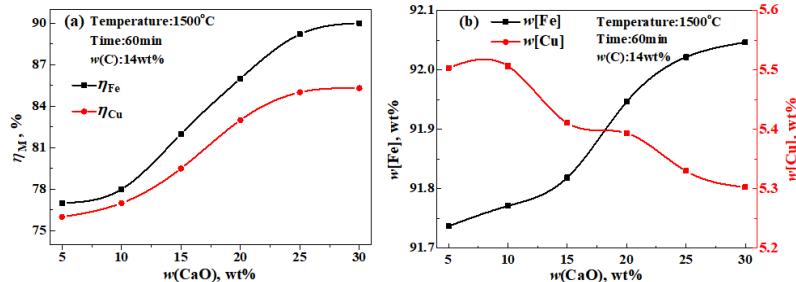


图6 改性剂对铜渣中铜铁回收的影响

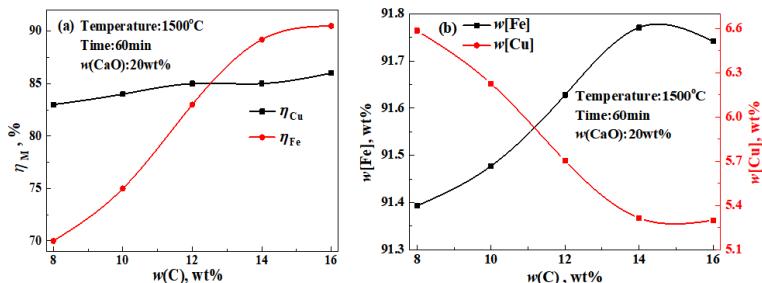


图7 还原剂对铜渣中铜铁回收的影响

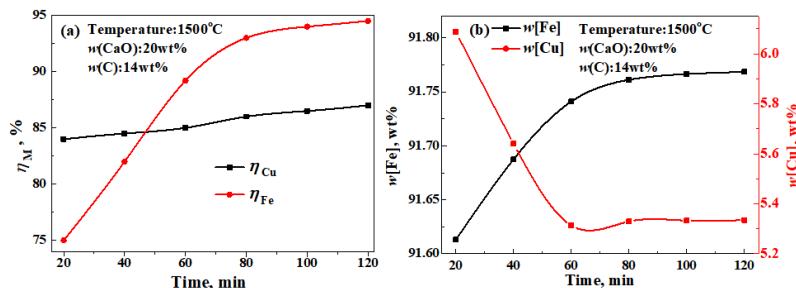


图8 还原时间对铜渣中铜铁回收率的影响

但CaO的过量添加会产生大量高熔点相,使炉渣黏度增大,致化学反应难以发生。因此,渣中CaO的最佳含量为20-25wt%。

图7为还原剂对CaO含量为20%的铜渣在1500℃、60min条件下铜和铁的回收率的影响。从图7(a)中可以看出,随着还原剂用量的增加,铜的回收率略有变化。对于铁的氧化,回收率随还原剂用量的增加而增加,超过14wt%C后,回收率略有增加。同时,合金中铁的含量逐渐增加,相反,合金中的铜含量下降,如图7(b)所示。完全还原后,合金中的铜和铁含量几乎没有变化。总之,碳的数量对低于14wt%的还原剂对铁的还原效果有显著影响。因此,最佳还原剂为14wt%C。铜和铁的回收率分别达到85%和90%左右。

图8显示了在1500℃、CaO为20wt%、C为14wt%时,还原时间对铜渣中铜和铁的回收率的影响。由图8(a)可以看出,铁的回收率随着还原时间的延长而显著增加,60min后略有增加,超过80min后趋于恒定。同时,铜的回收率和还原量随着还原时间的延长而略有增加。此外,如图8(b)所示,合金中铁含量的变化趋势与铜含量的变化趋势相反。而铜和铁的含量变化不大。因此,适宜的还原时间为60~80min,铁和铜的回收率分别可达90%和85%。

总之,采用铜渣直接还原法冶炼Cu-Fe合金,可以有效回收铜渣中有价元素和显热,明显减少废料的排放和储存量。尾矿主要由 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$ 和 $\text{SiO}_2$ 组成,可作为水泥和球团制备的原料。同时,改性剂和还原温度、还原剂和还原时间对铜和铁的回收率有相同的影响,在适宜条件下铜和铁的回收率可分别达到80%和90%以上。总体而言,不同条件下合金中铜和铁的含量变化不大,合金中铁和铜的含量分别为91~93wt%和5~7wt%。通过以上分析,确定了从铜渣中还原铜和铁的最佳条件为1500°C, 14wt%C, 20~25wt%CaO, 60~80min。

### 3 结论

根据铜渣的特点,直接利用铜渣冶炼Cu-Fe合金,回收铜渣中的有价元素,减少废弃物排放。铜和铁的回收率随着改性剂用量的增加迅速升高,之后回收率几乎没有变化。这是由于酸性铜渣中改性剂与硅酸盐发生反应所致,生成低熔点复合氧化物,释放出游离氧化铁,改善熔炼性能和还原反应。同时,铜和铁的回收率随反应时间、反应温度和还原剂量的增加而增加。为获得较好的元素收率,从铜渣中还原铜和铁的最佳条件为1500°C, 14wt%C, 20~25wt%CaO, 60~80min, 铁和铜的回收率分别达到90%和85%左右。合金中铁和铜的含量分别达到91~93wt%和5~7wt%。尾矿主要由 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$ 和 $\text{SiO}_2$ 组成,可作为水泥和球团制备的原料。

基金项目:国家自然科学基金(52374300, 52174277);河北省自然科学基金(E2022402101, E2022402105)。

### [参考文献]

- [1]Roy,S K, Nayak D,Rath S S.A review on the enrichment of iron values of low-grade iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation[J].Powder Technology,2020,3(67):796-808.
- [2]Dwari,R K,Rao D S,Reddy P S R.Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample[J].International Journal of Mining Science and Technology,2013,23(1):1-5.
- [3]Li K Q,Ping S,Wang H Y,et al.Recovery of iron from copper slag by deep reduction and magnetic beneficiation[J].International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2013,20(11):1035-1041.
- [4]Afshoon I,Sharif Y.Utilization of micro copper slag in SCC subjected to high temperature[J].Journal of Building Engineering,2020(29):101128-101143.
- [5]Isaksson J,Vikström T,Lennartsson A,et al.Settling of copper phases in lime modified iron silicate slag[J].Metals,2021(11):1098-1110.
- [6]Shui L,Cui Z X,Ma X D,et al.Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter:a water model study[J].Metallurgical And Materials Transactions B,2015,46(3):1218-1225.
- [7]Najimi M,Pourkhorshidi A R. Properties of concrete containing copper-slag-waste[J].Magazine of Concrete Research,2011,63(8):605-615.
- [8]Das B,Mishra B K,Angadi S,et al.Characterization and recovery of copper values from discarded slag[J].Waste Management & Research,2010,28(6):561-567.
- [9]Lowinska-Kluge A,Piszora P,Darul J et al.Characterization of chemical and physical parameters of post copper slag[J].Central European Journal of Physics,2011,9(2):380-386.
- [10]Alp I,Deveci H,Süngür H.Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production[J].Journal of Hazardous Materials,2008(159):390-395.
- [11]Zhang B J,Zhang T A,Niu L P,et al.Moderate dilution of copper slag by natural gas[J].JOM,2018,70(1):47-52.
- [12]Gopalakrishnan R,Nithyanantham S.Microstructural,mechanical,and electrical properties of copper slag admixed cement mortar[J].Journal of Building Engineering,2020(31):101375-101382.
- [13]Lori AR,Hassani A,Sedghi R.Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate[J].Construction and Building Materials,2019(197):130-142.
- [14]Rajasekar A,Arunachalam K,Kottaisamy M.Assessment of strength and durability characteristics of copper slag incorporated ultrahigh strength concrete[J].Journal of Cleaner Production,2019(208):402-414.
- [15]Zhang H B,He Y Z,Hu J J,et al.Assessment of selective sequential extraction procedure for determining arsenic partitioning in copper slag[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2020,30(10):2823-2835.
- [16]Wang H Y,Song S X.Separation of silicon and iron in copper slag by carbothermic reduction-alkaline leaching process[J].Journal of Central South University,2020(27):2249-2258.
- [17]Yin F,Xing P,Li Q,et al.Magnetic separation-sulphuric acid leaching of Cu-Co-Fe matte obtained from copper converter slag for recovering Cu and Co[J].Hydrometallurgy,2014(149):189-194.

作者简介: 黄伟军 (1985.11—), 毕业院校: 东北大学,

所学专业: 冶金工程, 当前就职单位: 包头稀土研究院,

职务: 无, 职称级别: 工程师; \*通讯作者: 刘亚静

(1984.5—), 毕业院校: 东北大学, 所学专业: 冶金工

程, 当前就职单位: 内蒙古科技大学, 职务: 无, 职称级

别: 讲师。

## 铸管水泥砂浆内衬防腐工艺优化与质量控制研究

姚思隽

安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455000

**[摘要]**伴随城市供水及工业输配系统对管材的使用时长、输水水质要求持续升高, 工程关注焦点转向铸铁管内壁的防腐性能。作为铸管防腐主流技术里的一种, 水泥砂浆内衬, 存有材料易取得、施工方便、耐久性较高等长处, 可在实际应用当中, 依旧有涂衬不均匀、发生开裂、空鼓乃至脱层等质量方面隐患。通过以分析现行水泥砂浆内衬施工工艺为基础, 透彻分析其主要技术难点及质量影响要点, 制定了一套涵盖材料配比合理优化、施工参数严格把控、固化养护全面改进、在线检测等流程的工艺优化手段, 还依据工程实践制订出一套具备可操作性的质量管控体系。

**[关键词]**铸管; 水泥砂浆; 内衬防腐; 工艺优化; 质量控制; 施工技术

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17178 中图分类号: TF777 文献标识码: A

## Research on Optimization and Quality Control of Anti corrosion Process for Cast Pipe Cement Mortar Lining

YAO Sijun

Angang Group Yongtong Ductile Cast Iron Pipe Co., Ltd, Anyang, He'nan, 455000, China

**Abstract:** With the continuous increase in the usage time and water quality requirements for pipes in urban water supply and industrial distribution systems, the focus of engineering attention has shifted to the anti-corrosion performance of the inner wall of cast iron pipes. As one of the mainstream anti-corrosion technologies for cast pipes, cement mortar lining has the advantages of easy material availability, convenient construction, and high durability. However, in practical applications, there are still quality hazards such as uneven coating, cracking, hollowing, and even delamination. Based on the analysis of the current construction process of cement mortar lining, a thorough analysis of its main technical difficulties and quality impact points has been conducted. A set of process optimization methods covering reasonable optimization of material ratio, strict control of construction parameters, comprehensive improvement of curing and curing, online detection and other processes has been developed. Based on engineering practice, an operable quality control system has also been developed.

**Keywords:** cast pipes; cement mortar; inner lining anti-corrosion; process optimization; quality control; construction technique

### 引言

在市政给排水、工业循环水的相关系统以及石油化工等领域, 鉴于铸铁管的强度表现出色且施工性能良好, 被大量采用。然而, 考虑到其内壁长期与水以及腐蚀性流体产生接触, 很容易产生腐蚀、结垢等弊病, 由此影响到管道的使用寿命以及输送效率。为此, 在铸管的内壁添加防腐层成常规操作, 水泥砂浆内衬以其优良的物理化学稳定性、跟铸管的适配程度以及良好的输水卫生表现, 被普遍采用。虽说现有的水泥砂浆内衬施工工艺成熟度高, 但因施工环境、原材料以及操作手法等因素复杂多变, 常出现厚度不整齐、空鼓情形与黏结不紧实等现象, 如何借助对涂衬工艺参数的合理优化、对质量控制流程的严格管理, 以此增进内衬的均一性及防腐效能, 成为铸管应用时面临的关键技术课题。

### 1 水泥砂浆内衬防腐工艺概述

在铸铁管的防腐处理范畴内, 应用最广泛的是水泥砂浆内衬防腐技术, 主要是对市政给排水、工业输送等系统铸管内壁做防护处理。其基本原理为利用水泥砂浆在铸管

内壁造就一层附着牢固、质地致密的保护结构, 由此可有效隔绝管内输送介质与管材本体的直接接触, 减少或阻止腐蚀现象的涌现。鉴于水泥砂浆具备碱性环境、一定的抗渗优势以及和铸铁良好的匹配性, 可于铸管内壁构建起一个稳固的“钝化层”, 使金属表面处在不易受腐蚀的情形, 可有效达成延长寿命的目的<sup>[1]</sup>。

水泥砂浆内衬施工一般是采用机械喷涂也或人工抹涂的方式来操作, 施工流程一般包含内壁除锈清洗这一流程、预湿处理这一流程、砂浆喷涂或抹涂工序、初凝养护流程和终凝检测流程等。正常情况下, 内衬厚度控制在6~9mm范畴, 应做到均匀无差, 防止砂浆层出现空鼓、裂缝、脱落等质量缺陷。

### 2 水泥砂浆内衬工艺中存在的主要问题

#### 2.1 厚度控制困难

在水泥砂浆内衬施工的阶段中, 对厚度的控制, 乃是保障防腐效果和使用寿命的关键指标。如离心成型或喷涂工艺这类常见施工方法, 虽在效率方面较高, 然而在实际作业时, 往往会受重力、离心力、管径大小、旋转速率以

及操作技能等要素的制约,导致砂浆层厚度分布呈现出不均势态。实施离心工艺的阶段,旋转情况下,浆体容易向管壁的低洼处堆积成团,且上部或是接口位置,易出现“薄弱之处”,导致局部厚度不达标,较厚的地方易因内应力过大,出现收缩裂缝甚至掉砂的问题。若厚度过薄,会直接对材料的抗渗性、防腐能力及其使用寿命产生影响<sup>[2]</sup>。

## 2.2 黏结力不足、易空鼓脱层

判定水泥砂浆内衬是否牢固持久的核心指标当中,黏结强度算一个。倘若在施工前铸管内壁未开展彻底除锈清洁,管道表面留存如浮锈、油污、氧化皮的杂质,或者未能让内壁维持湿润态,砂浆不易达成与金属基体的充分结合。若存在干燥、吸水效果欠佳以及粗糙度不足的现象,砂浆极易出现“滑脱”情况,生成粘结效果微弱的接触层,极易滋生空鼓、裂缝、分层等方面的质量弊病。若养护期间未维持适宜的湿度与温度,砂浆表层容易出现水分过快流失,进而引起表面干裂、界面的稳定性缺失,影响到内衬整体的耐久性与防腐成效。

## 2.3 原材料波动影响品质

原材料的品质好坏,在较大程度上左右着水泥砂浆质量的稳定性。在部分相关工程里面,为缩减成本,也或是采购渠道不稳定,施工单位往往采用普通硅酸盐水泥或劣质的矿渣水泥。此类材料未达标准配比规格,早期强度增长呈现缓慢状,后期易形成收缩裂缝。更显棘手的是,未做筛分处理的粗砂,以及含泥量偏高的河砂,会大幅削弱砂浆的致密性与均匀性,引发其易渗水,抗压强度变差,极大影响了内衬抵御腐蚀的能力。材料入场之后需进行样本抽取检验,设立关于原材料使用的台账,保证每一批砂浆具备扎实的性能基础,自起始端把控施工水准。

## 2.4 缺乏全过程质量追踪

目前不少铸管水泥砂浆内衬项目中,仍然出现“重结果达成、轻过程实施”的质量管理问题。部分施工单位极度依赖终端成品检验的相关数据,却忽略了对施工进程里关键环节开展实时监控与管控,这使得诸如厚度偏差、养护不规范、黏结不紧密等潜在质量缺陷,在生产阶段不易被及时查找与整改。尤其在以批量化、流水作业进行生产时,倘若未设立周期性的工艺检查节点、人员复查机制以及养护记录体系,极易引发施工标准执行不一致、设备运转不顺畅等现象。为增进整体质量把控水平,应构建起“全阶段质量控制体系”,有原材料检验的记录文档、设备参数的日志存档、施工期间影像的留存措施、内衬厚度抽样检查的台账,以及质量追溯码的管理手段<sup>[3]</sup>。

# 3 工艺优化路径与技术改进策略

## 3.1 优化材料配比与掺合剂使用

水泥砂浆内衬质量好坏的关键之处,是材料的合理调配与功能性掺合材料的甄选,为增进抗裂特性与黏结强度,一般采用P.O 42.5 级普通的硅酸盐水泥,该水泥呈现早强、

稳定性佳的特性;需筛选粒径≤2mm 这种规格的细砂作砂子,含泥量宜控制于 1.5% 以内,以达到提升砂浆密实度和均匀性的目的。基于这一基础,适量地加入化学添加剂(如氧化钙 CaO 类物质),能有效矫正砂浆干缩造成的体积变动,由此可降低产生开裂的风险。

从试验数据对比的结果看,经历掺合优化工序后的砂浆,其抗折强度提高值约为 12%,对基体黏结力的提升超过 15 个百分点。此外,优化后的浆体,流动性得到进一步改善,较容易开展机械化施工,离心均匀性呈现明显提升,应安排专人在施工现场进行配料比的控制。凭借自动计量系统对砂、水、水泥及外加剂精准投配,保障每一批砂浆性能稳定无波动,为内衬防腐筑牢稳固的材料根基。

## 3.2 改进施工工艺与机械参数

在衬层机通过旋转离心使铸管附着砂浆的工艺中,施工工艺与机械参数的优化是提升质量与效率的关键。施工工艺方面,可采用分段注浆法,先在铸管两端注入高稠度砂浆,利用离心力快速形成稳固的端部基础层,再向中部均匀注浆,避免因砂浆分布不均导致的厚度偏差。同时,引入动态监控系统,实时监测砂浆注入速度与铸管旋转状态,根据实际情况调整注浆节奏,确保砂浆均匀附着。

机械参数改进上,通过试验测试不同转速与离心力的匹配关系,确定最优参数组合。适当提高铸管初始旋转速度,可增强离心力,使砂浆快速贴合管壁;在砂浆附着过程中,采用变频调速技术,逐步降低转速,让砂浆充分密实。此外,优化砂浆输送泵的压力参数,确保砂浆以稳定压力注入,避免因压力波动造成砂浆堆积或附着不牢,通过施工工艺与机械参数的协同改进,有效提升铸管砂浆衬层的施工质量与效率<sup>[4]</sup>。

## 3.3 完善养护制度

养护环节是保障铸管砂浆衬层强度与耐久性的核心工序,需依据科学参数构建标准化制度。温度与湿度控制是养护的关键要素,将养生温度严格控制在 35~65°C 区间,此温度范围既能加速水泥水化反应,又可避免因温度过高导致砂浆干裂;同时保持环境湿度大于 80%,防止水分过快蒸发造成衬层表面龟裂,为砂浆硬化创造适宜的湿热环境。

在养生时间设定上,需结合管径与季节差异精准规划。自然养生适用于常规工况,小管径铸管因散热快、砂浆层薄,养护 2~4h 即可满足强度要求;大管径铸管因散热慢、砂浆层厚,需延长至 4~6h。蒸汽养生则针对极端气候条件,冬季通过 6~8h 蒸汽养护补偿低温对水化反应的抑制;夏季根据管径调整养护时长,小线管 4~8h、大中线管 6~8h,避免高温加速水化而产生结构缺陷。通过系统化的养护制度,可显著提升砂浆衬层的密实度与抗渗性能,延长铸管使用寿命<sup>[5]</sup>。

## 3.4 增设在线厚度检测与质量验收机制

水泥内衬作为铸管防护与功能实现的关键结构层,其

厚度直接影响管道的耐腐蚀性、输水安全性及使用寿命。为确保水泥内衬厚度严格符合国家标准,亟需构建全流程在线厚度检测与质量验收机制,从实时监测、智能分析到闭环管理形成完整质量管控链条。在在线厚度检测系统构建方面,采用非接触式测量技术实现高效、精准检测。可引入X射线测厚仪与超声波测厚仪协同作业,前者利用X射线穿透水泥内衬后的衰减特性,快速计算出厚度数值,适用于连续生产过程中的快速扫描;后者通过超声波在水泥与铸管基体界面的反射时差,精确测量内衬厚度,特别适合复杂工况下的局部厚度检测。两种技术互为补充,在铸管生产线上间隔布置检测点,确保每根铸管的圆周方向与轴向均能覆盖检测范围。同时,将检测设备与生产线控制系统联网,一旦检测到厚度数据异常(如低于国标规定的最小厚度值),系统立即触发声光报警,并自动调整衬层机的砂浆注入量与离心时间,实现“检测-反馈-修正”的动态闭环控制。

质量验收机制需建立多级核查体系。首先,在生产环节设置首件检验、巡检与成品抽检制度。首件检验在生产线启动或工艺参数调整后立即开展,对首根铸管的水泥内衬进行全尺寸、多方位检测,确认工艺参数设定的准确性;巡检则由质量控制人员按固定频次对生产中的铸管进行随机抽样检测,重点关注厚度波动趋势;成品抽检在铸管养护完成后进行,通过破坏性检测(如切割管壁)与非破坏性检测相结合的方式,对批量产品进行最终质量把关。其次,引入第三方检测机构定期介入,依据国家标准对企业生产的铸管进行独立检测与认证,确保检测结果的公正性与权威性。

为提升检测数据的利用价值,需搭建智能化质量分析平台。该平台可集成在线检测系统、生产设备运行数据及养护环境参数,通过大数据分析与机器学习算法,挖掘厚度偏差与生产工艺、设备参数、环境条件之间的关联关系。例如,当系统发现某批次铸管内衬厚度普遍偏薄时,可自动追溯到当时的砂浆配比波动、衬层机旋转速度异常等因素,并生成优化建议推送给生产管理人员。此外,平台还可建立质量追溯档案,将每根铸管的生产时间、检测数据、操作人员等信息进行永久性记录,便于后续质量问题溯源与责任界定。

在人员管理与制度保障层面,需制定详细的检测与验收操作规范,明确各岗位人员的职责与权限。对检测人员进行专业培训,使其熟练掌握各类检测设备的操作方法与数据解读技巧;对生产人员开展质量意识教育,使其充分认识内衬厚度控制对产品质量的重要性。同时,建立质量奖惩制度,对严格执行标准、及时发现质量隐患的人员给予奖励,对违规操作、隐瞒质量问题的行为进行严肃处理。通过技术、管理、制度多维度协同发力,确保水泥内衬厚度始终处于受控状态,为用户提供符合国家标准、质量可靠的铸管产品<sup>[6]</sup>。

#### 4 结语

作为保障输水管道防腐成效与使用时长的核心环节,就是铸管水泥砂浆内衬工艺,该工艺在合理性与质量控制方面的水平,直接关乎系统运行的安全状况。经由对材料、设备、工序与质量控制体系做系统性优化,可有效增进内衬均匀性、附着的牢固度及防腐表现,有效杜绝施工阶段的各类缺陷。研究提出工程实施时,强化标准化的操作流程、全程监测及技术培训工作,助力水泥砂浆内衬施工往规范化、智能化方向前行,为市政与工业输配管道的稳定安全运转筑牢根基。

#### [参考文献]

- [1]李万峰.球墨铸铁管水泥涂层机的技术改进[J].中国设备工程,2022,5(10):120-122.
  - [2]秦晓川.盾构输水隧洞内衬钢管防腐蚀研究[J].水利规划与设计,2022,28(1):113-116.
  - [3]夏鹏.给水管道防腐技术研究进展[J].建材与装饰,2020,16(13):83-84.
  - [4]王广存.水性丙烯酸改性沥青铸管防腐涂料的研发[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(4):98-101.
  - [5]阎富杰.市政混凝土污水输送管道内部腐蚀及防腐的研究[J].城市道桥与防洪,2019,12(8):305-315.
  - [6]申发田,杜波,孙聚杰,等.球墨铸铁管内外表面防腐技术[J].铸造设备与工艺,2019,50(2):36-38.
- 作者简介:姚思隽(1992.8—),男,籍贯:河北省玉田县,毕业学校:辽宁科技大学,专业方向:材料化学专业,职称:助理工程师,职务:质量专员,当前就职单位:安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司。

## 基于响应面法的 EGC 力学性能研究与配合比优化

余志辉<sup>1</sup> 周宗伯<sup>2</sup> 刘文化<sup>2</sup> 夏涛<sup>1</sup> 张勇<sup>1</sup>

1. 纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000

2. 江南大学 纤维工程与装备技术学院, 江苏 无锡 214000

**[摘要]**本论文以赤泥(RM)、高炉矿渣(GGBS)和粉煤灰(FA)为前驱体,采用响应面法中的Box-Behnken设计对工程地聚合物复合材料(Engineered Geopolymer Composites, EGC)进行配合比优化。通过建立RM与FA质量比(A)、NaOH摩尔浓度(B)、GGBS在前驱体中的质量分数(C)与28d力学性能的全二次项关系方程。研究表明:C对力学性能影响最显著,其对抗压强度、抗拉强度的影响顺序均为C>A>B,对拉伸应变容量为C>B>A。优化EGC配合比(A=0.216, B=7.195mol/L, C=0.5)的预测值与实测值误差<10%,证实了响应面法在EGC多目标优化中的有效性,为工业固废资源化利用提供了理论依据。

**[关键词]**响应面法;工程地聚合物复合材料(EGC);力学性能;配合比优化

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17176 中图分类号: TU52 文献标识码: A

## Study on Mechanical Properties and Mixing Proportion Optimization of EGC Based on Response Surface Method

YU Zhihui<sup>1</sup>, ZHOU Zongbo<sup>2</sup>, LIU Wenhua<sup>2</sup>, XIA Tao<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>

1. LEISTUNG (Jiangsu) High-Tech Development Co., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan university, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

**Abstract:** In this paper, the Box-Behnken design in response surface methodology was used to optimize the mix ratio of engineered geopolymers (EGCs) using red mud (RM), blast furnace slag (GGBS), and fly ash (FA) as precursors. The full quadratic term relationship equations between RM to FA mass ratio (A), NaOH molar concentration (B), GGBS mass fraction in precursor (C) and 28d mechanical properties were established. The study showed that: C had the most significant effect on the mechanical properties, and its effects on compressive and tensile strengths were in the order of C>A>B, and on tensile strain capacity was C>B>A. The predicted values of the optimized EGC mixing proportion (A=0.216, B=7.195 mol/L, and C=0.5) had an error of <10% from the actual values, which confirmed the effectiveness of the response surface method in the multi-objective optimization of EGCs, and provided a good solution for the industrial solid waste resource utilization provides a theoretical basis.

**Keywords:** response surface method; engineered geopolymers composites (EGC); mechanical properties; mixing proportion optimization

### 引言

工程地聚合物复合材料(Engineered Geopolymer Composites, EGC)是以地聚合物为基体,加入聚乙烯(Polyethylene, 简称PE)纤维,通过基体与PE纤维的协同作用展现出优异的力学性能和耐久性,在绿色建筑和基础设施以及建筑结构修复等领域具有广阔的应用前景。地聚合物通常以工农业副产品或固废为主要成分,原料来源广泛且成本低廉,不仅能够缓解废弃物堆积对环境的压力,而且可大幅减少CO<sub>2</sub>的排放,被认为是绿色环保的建筑材料,契合“无废城市”理念,对于实现“双碳”目标和推动建筑行业低碳转型具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。传统的聚合物的前驱体以高炉矿渣和粉煤灰这两种固废材料为主,然而,随着资源化利用需求的提升,越来越多的废弃物材料,如赤泥<sup>[3]</sup>、电石渣<sup>[4]</sup>、钢渣<sup>[5]</sup>等,也开始被纳入研究视野。其中,赤泥作为铝土矿提取氧化铝过程中的副产品<sup>[6]</sup>,具有较高的碱性(pH值10~13),并且含有一定的活性硅铝成分,具有制备地聚合物的潜力。目前,全球赤泥资

源储量已达40亿t,每年产生约1.2亿t赤泥,其资源化利用已成为了一个世界性的难题<sup>[7-8]</sup>。

基于前人的研究基础上,本文考虑将赤泥(RM)、高炉矿渣(GGBS)、粉煤灰(FA)作为地聚合物的前驱体,采用响应面法(response surface method, RSM)对EGC的基体配合比进行优化设计。RSM是一种有效的多变量优化技术,通过建立响应面模型,能够分析多个因素对目标性能的影响,并确定最优的因素组合。本文探究了三个自变量对EGC性能的影响,分别是RM与FA质量比、NaOH摩尔浓度、GGBS在前驱体中的质量分数,以期确定最优的配合比,为EGC基体配合比多目标优化提供参考。

### 1 实验

#### 1.1 原材料

本文所使用的前驱体材料为S105级高炉矿渣(山东康晶)、一级粉煤灰(河南铂润)、拜耳法赤泥(武汉梓绿),三种材料的化学成分如表1所示。

表 1 前驱体材料的化学成分

Type	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	etc.
FA	2.93	65.70	20.63	4.65	0.28	2.25	0.33	3.27
GGBS	40.07	32.47	17.29	0.57	3.23	5.28	0.50	0.59
RM	0.36	10.26	17.21	53.73	0.73	0.12	8.01	9.58

本文采用高强度 PE 纤维, 纤维长径比为 500、抗拉强度 2800MPa、弹性模量 100~120GPa, 在本文的试验中, PE 纤维掺量均为 2% 体积掺量。本文采用的碱性激发剂为 NaOH 和硅酸钠 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) 溶液, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液为微黄色透明液体, 其主要指标见表 2。

表 2 硅酸钠主要指标

指标名称	模数	波美度	Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	pH 值
参数	3.3	38.5	8.53	26.98	10~13

### 1.2 配合比设计

基于响应面法, 采用 Design Expert 软件中的 Box-Behnken 方法进行试验设计与数据结果分析。选择了三个自变量因素, 分别是: RM 与 FA 质量比、NaOH 摩尔浓度、GGBS 在前驱体材料中的质量分数, 分别用 A、B、C 表示; 以抗压强度、抗拉强度 (均为 28d) 作为响应值, 分别用 Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>。试验各因素水平编码见表 3。通过 Box-Behnken 设计, 确定了不同因素水平的组合, 制备并测试样品。

表 3 自变量因素编码及水平

编码	因素	水平		
		-1	0	1
A	RM/FA	0.1	0.2	0.3
B	NaOH molarity	6	7	8
C	m (GGBS)	0.3	0.4	0.5

### 1.3 EGC 的制备

制备 EGC 的具体操作步骤如下: (1) 碱激发剂配制: 将 NaOH 溶于水, 加入硅酸钠溶液混匀后冷却至常温。(2) 混合工艺: 前驱体材料低速搅拌 2min, 加入碱激发剂低速混合 3min, 分次加入 PE 纤维高速混合 3min。(3) 成型养护: 装模静置 24h 脱模, 标准养护 28d 测试。

抗压试验采用边长为 70.7mm 的立方体, 采用 2000kN 的伺服液压试验机进行加载, 如图 1 所示, 加载方式选择应力控制, 速率设定为 0.3MPa/s, 每组试验均保证至少有三个有效数据 EGC 的单轴拉伸性能由“狗骨”型试件测得, 其横截面尺寸为 20mm×13mm, 为了精确获得拉伸过程中发生的变形, 在试件中部设置了一个高精度 MTS 引伸计 (标距为 50mm), 试验中机器的加载方式选择位移控制, 加载速率为 0.5mm/min, 如图 2 所示。



图 1 抗压试验

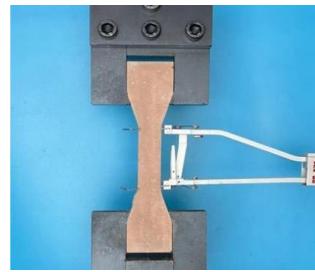


图 2 单轴拉伸试验

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验结果与模型分析

表 4 数据显示, EGC 各组试件的抗压强度、抗拉强度及拉伸应变容量的预测值与实测值对比表明: 虽然存在一定数据波动, 但两者差异总体较小 (相对误差<8%)。28 天测试结果表明, 该模型能有效预测 EGC 力学性能, 具有较高可靠性。

表 4 EGC 力学性能的试验值与预测值

序号	因素编码			28d 抗压强度 (MPa)	28d 抗拉强度 (MPa)	试验值	预测值
	A	B	C	试验值	预测值		
A	0.3	8	0.3	32.17	32.57	2.68	2.71
B	0.1	6	0.5	58.00	57.83	3.41	3.35
C	0.3	7	0.4	49.70	47.76	4.15	4.09
D	0.2	7	0.4	50.57	51.02	4.82	5.02
E	0.1	8	0.5	64.30	65.40	3.99	4.01
F	0.3	6	0.3	30.10	29.23	3.64	3.60
G	0.2	7	0.4	49.47	51.02	5.11	5.02
H	0.2	6	0.4	44.70	46.37	4.62	4.75
I	0.2	7	0.4	51.13	51.02	5.33	5.02
J	0.1	7	0.4	59.25	60.24	4.13	4.29
K	0.2	7	0.3	36.10	38.50	4.78	4.92
L	0.3	6	0.5	47.83	48.60	4.68	4.71
M	0.3	8	0.5	57.70	59.34	4.23	4.28
N	0.2	8	0.4	54.43	51.82	4.67	4.64
O	0.2	7	0.5	60.07	56.73	5.26	5.23
P	0.1	6	0.3	49.53	48.13	4.35	4.28
Q	0.1	8	0.3	48.83	48.30	4.54	4.48

基于表 5 数据对比分析, 采用全二次多项式模型能有效建立 EGC 力学性能与 A、B、C 的关系。模型评价指标显示: P 值均<0.01 (0.0038/<0.0001), 失拟 P 值均>0.05 (0.0837/0.8832), 且 R<sup>2</sup> 校正/预测值较高, 表明该模型具有显著性和可靠性, 适用于 EGC 力学性能分析。

表 5 力学性能数学拟合模型比较

力学性能	模型	P		R <sup>2</sup>	
		P 值	失拟 P 值	校正值	预测值
抗压强度	一次线性	0.0301	0.0427	0.8494	0.7613
	缺项二次	0.1106	0.0550	0.8899	0.7577

力学性能	模型	P		R <sup>2</sup>	
		P 值	失拟 P 值	校正值	预测值
全二次	0.0038	0.0837	0.9357	0.7840	
三次	0.0718	0.1950	0.9854	-1.8250	
抗拉强度	一次线性	0.8672	0.0984	-0.1663	-0.8633
	缺项二次	0.1583	0.1170	0.0770	-2.3510
	全二次	<0.0001	0.88320	0.9299	0.8825
	三次	0.8603	0.5636	0.8836	-5.6235

## 2.2 抗压强度响应面模型分析

通过响应面法对 EGC 抗压强度试验数据进行多元回归分析, 建立了 EGC 材料 28 天抗压强度 ( $Y_1$ ) 与 RM 与 FA 质量比 (A)、NaOH 摩尔浓度 (B) 以及 GGBS 在前驱体材料中的质量分数 (C) 之间的二次多项式回归方程 (1):

$$Y_1 = 41.0182 - 6.241 \times A + 2.727 \times B + 9.117 \times C + 0.7925 \times AB + 2.415 \times AC + 1.85 \times BC + 2.9857 \times A^2 - 1.9243 \times B^2 - 3.4043 \times C^2 \quad (1)$$

在建立回归方程后, 进行了方差分析, 以确保该模型具有较高的准确性。表 6 展示了回归方程的分析结果。根据表 6 可知, 回归方程  $Y_1$  具有高度显著性 ( $P<0.01$ ,  $F=26.88$ ), 失拟检验合格 ( $P=0.0837$ )。单因素影响排序为  $A \approx C > B$ ; 交互作用中仅 AC 显著 (AB、BC 不显著), 二次项影响较弱。

表 6 抗压强度回归方程的方差分析结果

数据源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	1434.16	9	159.35	26.88	0.0001
A	389.50	1	389.50	65.70	<0.0001
B	74.37	1	74.37	12.54	0.0094
C	831.20	1	831.20	140.21	<0.0001
AB	5.02	1	5.02	0.8476	0.3879
AC	46.66	1	46.66	7.87	0.0263
BC	27.38	1	27.38	4.62	0.0687
$A^2$	23.88	1	23.88	4.03	0.0847
$B^2$	9.92	1	9.92	1.67	0.2368
$C^2$	31.05	1	31.05	5.24	0.0559
残差	41.50	7	5.93		
失拟项	40.07	5	8.01	11.24	0.0837
纯误差	1.43	2	0.7132		

表 7 为模型可信度检验的详细分析结果, 回归方程  $Y_1$  的  $R^2$  (0.9719) 与校正  $R^2$  (0.9357) 高度接近, 变异系数 6.14% (<10%), 信噪比 19.369 (>4), 表明模型拟合优度高、数据稳定性好, 预测结果可靠。

表 7 抗压强度模型可信度检验分析结果

回归模型	变异系数%	$R^2$	校正 $R^2$	预测 $R^2$	信噪比
$Y_1$	6.14	0.9719	0.9357	0.7840	19.3693

图 3 为两因素交互作用的抗压强度 3D 响应面曲面图

和对应的水平投影图。降低 RM/FA 比值 (0.3→0.1) 和增加碱浓度 (6→8mol/L) 均能提升抗压强度 (图 3(a))。图 3(b) 表示增大高炉矿渣质量分数并降低 RM/FA 可以得到最大的抗压强度, 反之抗压强度则最小。图 3(c) 表示增大碱浓度和高炉矿渣质量分数可以获得最大的抗压强度。机理分析表明: 碱浓度提高可加速硅铝溶解和 N-A-S-H 凝胶形成, 而高炉矿渣增加提供了更多反应物, 二者协同增强地聚合物骨架强度。

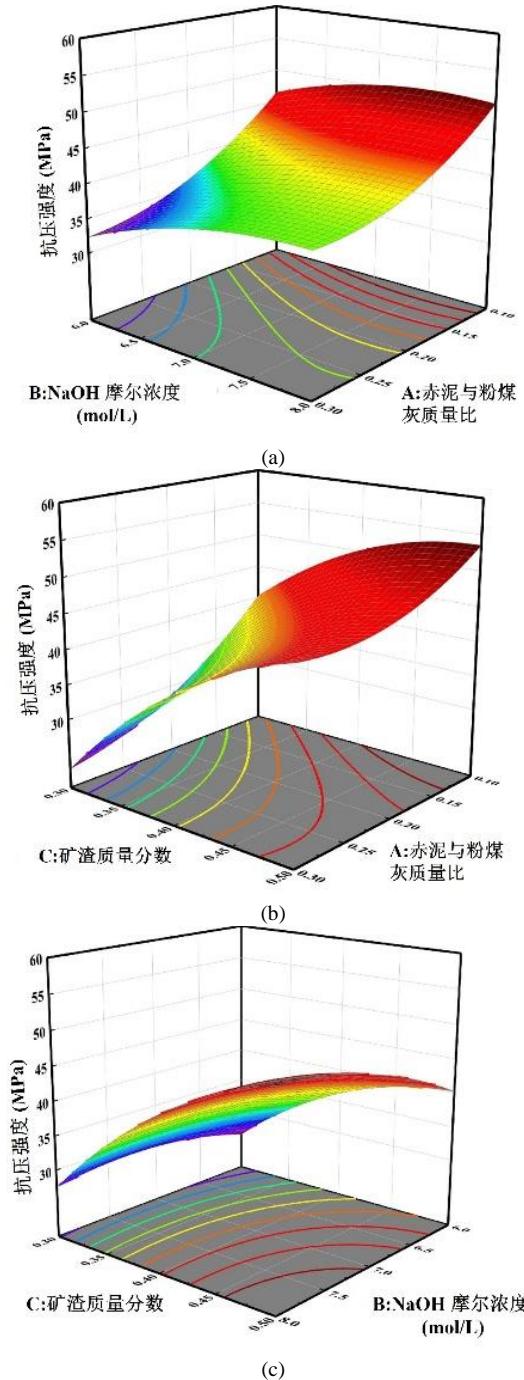


图 3 抗压强度的两因素交互作用响应曲面图: (a) AB 交互作用; (b) AC 交互作用; (c) BC 交互作用

### 2.3 抗拉强度响应面模型分析

同理, 对数据进行多元回归分析后, 建立了 EGC 材料 28d 抗拉强度 ( $Y_2$ ) 与 RM 与 FA 质量比 (A)、NaOH 摩尔浓度 (B) 以及 GGBS 在前驱体材料中的质量分数 (C) 之间的二次多项式回归方程(2):

$$Y_2 = 5.01631 - 0.1029 \times A - 0.0584 \times B + 0.1587 \times C - 0.27275 \times AB + 0.50925 \times AC + 0.1135 \times BC - 0.825542 \times A^2 - 0.322042 \times B^2 + 0.594577 \times C^2 \quad (2)$$

表 8 为抗拉强度回归方程的方差分析结果, 方差分析显示: 抗拉强度回归模型  $Y_2$  具有高度显著性 ( $P=0.0002$ ), 失拟检验合格 ( $P=0.8832/0.6625$ )。单因素影响排序为  $C > A > B$ ; 交互作用中  $AC$ 、 $AB$  显著 ( $AC > AB$ ),  $BC$  不显著; 二次项中  $A^2$  影响最大,  $B^2$  次之,  $C^2$  不显著。模型整体拟合优度高。

表 8 抗拉强度回归方程的方差分析结果

数据源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	7.25	9	0.8055	24.59	0.0002
A	0.1059	1	0.1059	3.23	0.1153
B	0.0341	1	0.0341	1.04	0.3416
C	0.2519	1	0.2519	7.69	0.0276
AB	0.5951	1	0.5951	18.17	0.0037
AC	2.07	1	2.07	63.32	<0.0001
BC	0.1031	1	0.1031	3.15	0.1194
$A^2$	1.83	1	1.83	55.73	0.0001
$B^2$	0.2779	1	0.2779	8.48	0.0226
$C^2$	0.0095	1	0.0095	0.2891	0.6075
残差	0.2293	7	0.0328		
失拟项	0.0971	5	0.0194	0.2940	0.8832
纯误差	0.1322	2	0.0661		

$Y_2$  的模型可信度检验结果如表 9 所示, 表 9 显示  $Y_2$  模型可信度良好:  $R^2=0.9693$  (接近 1), 变异系数 4.14% (<10%), 信噪比 18.165 (>4),  $R^2$  与校正  $R^2$  接近, 表明模型拟合优度高、预测可靠。

表 9 抗拉强度模型可信度检验分析结果

回归模型	变异系数%	$R^2$	校正 $R^2$	预测 $R^2$	信噪比
$Y_2$	4.14	0.9693	0.9299	0.8825	18.1652

图 4 为两因素交互作用的抗拉强度 3D 响应面曲面图。抗拉强度响应面分析表明: RM/FA (A) 在 0.2 时抗拉强度达到峰值, 其影响显著大于碱浓度 (B)。碱浓度在 7.0mol/L 时出现最佳值但变化幅度较小。AC 交互作用显示, 当 RM/FA=0.2 且矿渣含量=0.5 时强度最大, 矿渣增加仅轻微提升强度。BC 交互作用的响应面呈平面状, 证实其影响不显著。各因素影响排序为:  $A > AC > B > BC$ 。

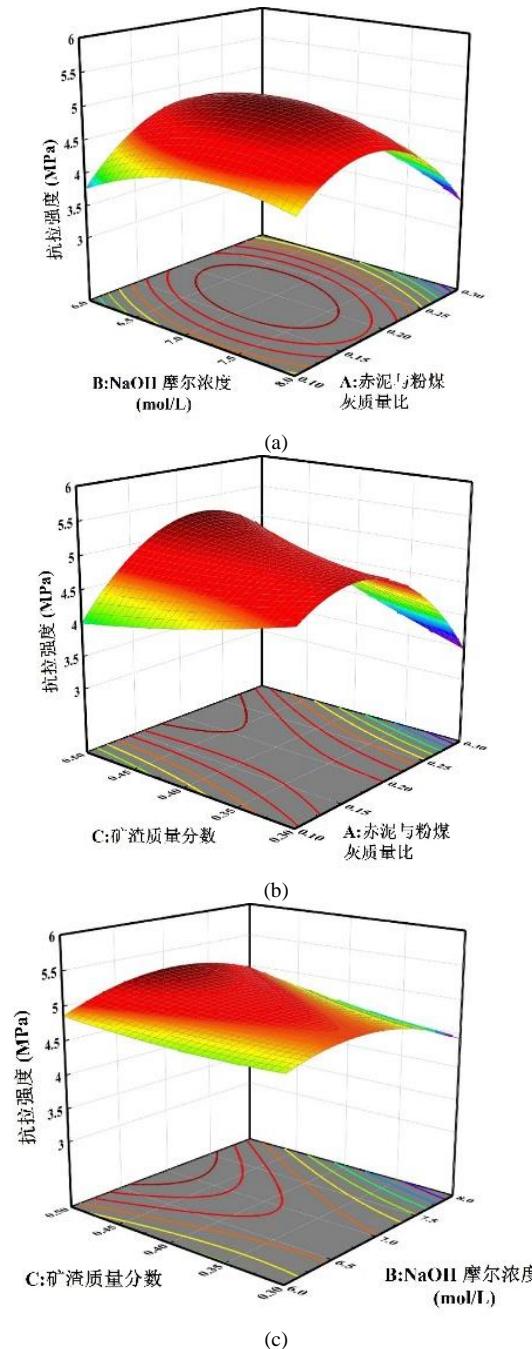


图 4 抗拉强度的两因素交互作用响应曲面图: (a) AB 交互作用; (b) AC 交互作用; (c) BC 交互作用

### 3 EGC 配合比响应面法优化

多元固废地聚合物的抗压强度、抗拉强度是评估其力学性能的重要标准, 选取以上两个指标的最大值作为期望值, 通过 Design-Expert 软件优化得到多元固废地聚合物的最佳配比: RM/FA=0.216, NaOH 浓度 7.195mol/L, 矿渣占比 0.5。预测 28d 抗压强度 58.116MPa, 抗拉强度 5.268MPa。经实验验证, 实测抗压强度 60.250MPa (误差 3.67%), 抗拉强度 5.747MPa (误差 9.09%), 误差均在合

理范围内,证实了响应面优化模型的可靠性。

#### 4 结论

本研究通过响应面法优化多元固废 EGC 材料配比,得出以下结论:

(1) 建立的二次项模型能准确预测材料性能(抗压  $R^2=0.9357$ , 抗拉  $R^2=0.9299$ , 应变  $R^2=0.8304$ ), 可用于指导实际配比设计;

(2) 对 EGC 力学性能影响因素重要性排序显示:矿渣含量 (C) 对各项性能影响最大, 其次是赤泥/粉煤灰比 (A), 碱浓度 (B) 影响最小;

(3) 基于响应面的多目标优化方法, 对 A、B、C 三个因素进行了优化, 通过预测给出了综合性能最佳的多元固废 EGC 的配合比: A=0.216, B=7.195mol/L, C=0.5, 预测值与实测值误差均<10%(抗压 3.67%, 抗拉 9.09%), 研究表明响应面法能有效优化 EGC 材料配比。

#### [参考文献]

- [1] Alharbi Y R, Abadel A A. Engineering properties of high-volume fly ash modified cement incorporated with bottle glass waste nanoparticles [J]. Sustainability,2022,14(19):12459.
- [2] Punurai W, Kroehong W, Saptamongkol A, et al. Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage

of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste [J]. Construction and Building Materials,2018(186):62-70.

[3] 李明登, 黄鑫, 倪景辉, 等. 赤泥基地聚物的制备及吸附性能研究 [J]. 非金属矿, 2025, 48(1):14-16.

[4] 张国芳, 崔晨, 胡文佩, 等. 多元固废制备地聚合物的抗压强度和微观结构 [J]. 水泥, 2025(2):11-15.

[5] 俞莉, 张树祥, 朱涛, 等. 钢渣-矿粉基地聚合物的流变性能及其参数预测 [J]. 建筑材料学报, 2025, 28(5):465-476.

[6] Uysal M, Kuranhı Ö F, Aygörmez Y, et al. The effect of various fibers on the red mud additive sustainable geopolymer composites [J]. Construction and Building Materials, 2023(363):129864.

[7] Bai B, Wang J, Zhai Z, et al. The penetration processes of red mud filtrate in a porous medium by seepage [J]. Transport in Porous Media, 2017(117):207-227.

[8] Yuan S, Liu X, Gao P, et al. A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud [J]. Journal of hazardous materials, 2020(394):122579.

作者简介: 余志辉 (1998—), 男, 汉族, 江西鹰潭人, 硕士, 助理工程师, 主要从事混凝土和固废资源化利用等方向检测和科研工作。

## 建筑工程管理及施工质量控制有效策略

颜学江

重庆市石柱工业发展集团有限公司, 重庆 409100

**[摘要]**建筑工程属于系统性复杂的项目范畴, 强化对其管理以及施工质量的把控, 对于提高项目成功的概率而言是极为关键的。伴随着市场竞争程度的不断加剧, 建筑工程所对应的质量标准也在持续提升。要想保证施工流程能够有序且顺利地向前推进, 把工期延误以及资源浪费等情况减少到最低限度, 那就得把管理以及质量控制当作重点方面来抓, 构建起行之有效的约束机制, 以此来促使工程质量能够达成预期设定的目标。文中就建筑工程管理以及施工质量控制的有效策略展开较为详尽的探讨, 目的在于清晰明确具体的项目管控举措, 进而提升整体项目的管理水准。

**[关键词]**建筑工程管理; 施工质量; 质量控制; 控制策略

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17191

中图分类号: TU7

文献标识码: A

## Effective Strategies for Construction Project Management and Construction Quality Control

YAN Xuejiang

Chongqing Shizhu Industrial Development Group Co., Ltd., Chongqing, 409100, China

**Abstract:** Construction engineering belongs to the category of systematic and complex projects. Strengthening its management and control of construction quality is crucial for increasing the probability of project success. With the increasing competition in the market, the quality standards corresponding to construction projects are also continuously improving. In order to ensure that the construction process can proceed in an orderly and smooth manner, minimizing delays and resource waste, management and quality control must be prioritized, and effective constraint mechanisms must be established to promote the achievement of expected project quality goals. The article provides a detailed discussion on effective strategies for construction project management and construction quality control, with the aim of clarifying specific project control measures and improving the overall project management level.

**Keywords:** construction project management; construction quality; quality control; control strategy

### 引言

随着我国城市化进程不断推进以及建筑行业持续发展, 建筑工程项目的规模与复杂程度都在不断提升, 工程质量与管理水平的重要意义也日益凸显出来。高质量的建筑工程关乎公共安全与使用功能, 还直接影响社会经济的可持续发展以及人民群众的生活品质。当下, 建筑工程在管理以及施工质量控制方面依旧存在不少挑战, 像材料采购不够规范、施工工艺不够严谨、质量监管不到位等状况, 这些都对建筑行业的健康发展形成了制约。有效的工程管理与质量控制策略, 既能规范施工流程、提高施工效率, 又能大幅降低安全风险与工程后期维护成本, 推动建筑项目顺利完工并长久使用。所以, 深入且细致地探讨并完善建筑工程管理以及施工质量控制的有效策略, 有着十分重要的理论意义与现实价值, 对于促进行业标准化、规范化建设, 提高工程整体质量水平, 达成建筑行业的高质量发展有着积极的推动作用。本文目的在于全面剖析当前建筑工程管理与施工质量控制的实际状况与存在问题, 综合实际情况给出切实可行的优化策略, 给相关从业者给予科学的指引与参考依据。

### 1 建筑工程项目管理与施工质量控制的重要意义

建筑工程项目管理及施工质量控制有着极为重要的

意义, 这在保障工程质量、提高建设效率、控制成本投入、确保施工安全以及推动行业可持续发展等诸多方面均有体现。其一, 科学的项目管理可对工程全程展开系统且规范的组织与协调工作, 能将人力、材料、设备以及资金等各类资源予以有效整合, 以此确保项目能够按时完成, 保证质量, 并且在合理成本范围内达成目标。其二, 施工质量控制属于保障建筑物使用功能、延长其使用寿命以及避免出现安全隐患的关键环节, 若其中任何一个环节出现失控的情况, 都有可能引发返工现象, 甚至导致事故发生, 产生灾难性的后果。其三, 在建设进程当中实行精细化管理并落实全流程的质量把控举措, 能够减少材料方面的浪费情况, 降低不必要的损耗, 进而实现节能降耗的目的, 提升项目的经济效益以及社会效益。与此优质的项目管理与质量控制还有助于提升企业的品牌形象, 增强其市场竞争力, 为后续的工程投标以及业务拓展打下坚实的基础。所以, 建筑工程项目管理与施工质量控制不但关乎单个工程能否取得成功, 而且是建筑企业实现高质量发展的关键支撑所在。

### 2 建筑工程管理及施工质量控制的现状

#### 2.1 材料采购问题

在当下建筑工程管理以及施工质量把控期间, 材料采

购方面的问题依旧算是影响工程质量的关键要素之一。诸多工程项目在材料采购这一环节，普遍存在管理机制不够完善、流程不够规范、监管力度不够到位等状况，如此一来，便致使所采购材料的质量很难得到切实保障。部分施工单位为了能够压缩成本开支，有可能会去挑选那些价格较为低廉然而质量却达不到标准要求的建材，这样一来，便给后续施工埋下了质量方面的隐患。除此之外，有一部分项目在采购环节还存在着信息不够透明、招标流程不够规范的情况，甚至还有可能出现利益输送这类现象，这些情况都对采购工作的公正性以及科学性产生了影响<sup>[1]</sup>。而在材料验收环节，很多时候只是流于表面形式，并没有严格依据相关标准和技术规范去检测材料性能，这就致使不合格的材料得以混进施工现场，进而对建筑工程的整体质量以及安全性造成了极为严重的威胁。

## 2.2 施工工艺不规范

在建筑工程管理以及施工质量控制的实际进程当中，施工工艺不规范的情况是比较常见的，这已然变成影响工程整体质量以及安全性的关键要素。部分施工单位在具体的操作环节里，并没有依照设计图纸、技术规范以及施工工序的要求来严格开展作业活动，存在着随意对施工方案做出变更、把操作流程予以简化、对关键技术节点加以忽视等状况。特别是在像混凝土浇筑、防水处理、钢筋绑扎这样的关键工序方面，由于操作人员的技术水平有着高有低，或者管理监督工作做得不够到位，往往会出现施工步骤不完整、参数控制不够精准、作业质量不够稳定等一系列问题，进而致使建筑结构的性能有所降低。在赶工期、压成本这样的情形之下，有些施工单位在组织施工的时候，对施工工艺的规范性有所忽视，甚至还出现了“带病施工”的情况，这就给建筑物日后的使用以及维护留下了极为严重的隐患。

## 2.3 质量监控与监管不到位

质量监控与监管不到位是建筑工程中常见且严重的质量管理问题。部分建筑企业未能建立完善的质量管理体系，导致施工过程中的质量控制缺乏有效组织和保障。尽管行业已有明确的质量标准和规范，但由于管理体系不健全，质量监管措施难以落实，常出现疏漏。例如，项目经理和技术人员的质量意识薄弱，施工现场的质量检查多停留在表面，缺乏对各环节的深入跟踪和系统分析，导致质量问题未能及时发现和纠正，影响工程整体质量。此外，质量监控手段单一且技术支持不足也是重要原因。部分项目仍依赖传统的人工检查和纸质记录，这不仅效率低下，还容易遗漏和出错，难以满足现代建筑对高效精准质量监管的需求<sup>[2]</sup>。随着工程规模扩大和施工内容复杂，单一监控方式已难以适应实际需求，但部分企业技术投入不足，未能引入信息化和自动化监测系统，致使现场质量控制水平较低。

# 3 提高建筑工程管理与施工质量控制的有效策略

## 3.1 重视建筑工程管理的细节

在建筑工程项目推进期间，管理方面的诸多细节常常

直接左右着工程质量、施工进展以及项目成本的最终走向，所以充分关注建筑工程管理中的各类细节，既是提高工程质量把控水平的关键举措，也是达成科学管理并高效施行的基本保证。建筑工程属于系统性相当突出的综合性项目，其中的每一个环节、每一道工序以及每一项材料的运用都得严格依照标准与规范来执行，要是忽略掉任何细节，那很可能会变成严重质量问题或者安全事故。就好比在施工准备阶段，像图纸会审、技术交底、施工组织设计审核这类基础性工作当中，倘若不仔细审查技术参数的细节，也不认真核对图纸和现场条件是否一致，那么后续施工时就可能出现误差、返工或者与结构不符的施工状况；在材料管理这块，要是对钢筋、水泥、砼等关键材料的进场验收、批次标识、储存环境、使用期限等细节不够重视，那么不合格材料就很有可能混进施工环节，进而直接影响工程结构性能；在施工进程中，包含钢筋绑扎间距、模板支设垂直度、混凝土振捣时间与强度控制、防水层铺设接缝处理、电气管线预埋位置等一系列细节操作的规范性，都会悄无声息地影响建筑物的耐久性和使用安全。施工现场的文明施工管理、安全标识设置、施工日志记录的规范性、现场巡视以及隐蔽工程拍照留档等管理行为也都属于工程质量控制里不可缺失的细节内容，只要有一处细节管理没做好，那么在竣工验收的时候就极有可能暴露出一系列难以挽回的问题。所以说，建筑工程管理人员务必要始终秉持“细节决定成败”的理念，把全过程、全方位的细节控制纳入日常管理体系里面，清晰界定各岗位人员的细节管理职责，借助细化管理流程、完善操作规范、强化现场监管、落实责任追溯等方式，确保每一项工作都能切实落地。

## 3.2 对强化管理人员与作业工人的质量意识和工程质量标准教育培训

在提高建筑工程管理以及施工质量控制水准的时候，加强对管理人员和作业工人质量意识以及工程质量标准方面的教育培训，是稳固工程质量根基、促使精细化施工管理向前推进的重要环节。建筑工程项目周期较长、涉及人员众多且技术工序繁杂，在此情况下，人员的质量意识以及标准执行能力会对施工行为的规范性以及工程实体质量的好坏产生直接影响。当下，部分项目当中依旧存在着管理层对质量管理不够重视、一线工人操作较为随意并且对技术标准理解不够透彻等问题，这些问题在很大程度上削减了质量控制体系的执行力。所以，有必要从制度层面构建起全员质量教育培训机制，依据国家相关规范、行业标准以及项目技术要求，定期组织开展针对管理人员和施工人员的系统性、有针对性的培训。就管理人员来讲，应当着重强化他们对于项目全过程质量控制要点的认识，提升他们的组织协调能力、现场监督能力以及问题预判与应对能力，以此来保证工程质量在制度以及执行层面上始终处于可控状态；对于作业工人而言，需要借助理论学习

与实操演练相互结合的方式,让他们能够熟练掌握施工工艺流程、技术操作要点、安全操作规范以及质量验收标准,从根源上降低因操作不当或者技术不熟练而引发的质量隐患<sup>[3]</sup>。与此还应当建立质量意识考核机制,把培训效果和岗位考核、绩效评估、质量奖惩关联起来,增强全体人员的质量责任感,推动“人人重视质量、处处遵守标准”的管理文化在施工现场真正落实并生根发芽。

### 3.3 引入先进的施工技术与设备

在建筑工程管理以及施工质量控制迈向现代化的过程中,引入先进的施工技术与设备,这既是提升工程效率与精度必不可少的手段,也是推动质量控制体系朝着高标准、高水平方向演进的关键驱动力。随着建筑行业科技水平持续发展,传统的人工操作以及机械化施工方式,在复杂的工程环境以及高质量的要求之下,逐渐显现出其局限性,难以满足精细化、智能化管理方面的需求。通过引入像BIM(建筑信息模型)、激光测量、全站仪放样、智能混凝土振捣与养护设备、预制装配式技术、无人机巡检、物联网监测系统等先进技术和设备,可以达成施工过程的可视化、数据化、智能化管理,这既提升了作业效率,又大幅增强了对质量关键环节的可控程度。比如,BIM技术能够在施工之前开展多维建模工作,借此识别出施工冲突并且提前对设计方案加以优化,从源头上降低质量风险;智能设备的应用则提高了施工精度,减少了人为误差,特别是在结构施工、钢筋加工、模板拼装等关键环节当中,能够实现统一化、标准化的操作,增强了施工的一致性以及质量的稳定性。

### 3.4 加强工艺技术标准控制力度

在整个提升建筑工程管理以及施工质量控制水平的进程中,强化对于工艺技术标准的控制程度,这无疑是最核心的关键举措。建筑工程往往会涉及数量众多且极为复杂的各类施工工艺,同时还存在多个专业的交叉作业情况。要是缺少了针对工艺技术标准的较为系统的把控手段,并且也未能做到严格执行,那么在施工期间就极有可能会出现各种各样的偏差情况,如此一来便会引发像结构安全隐患、施工返工、进度延误等一系列的质量问题。所以说,务必要把国家以及行业当下现行的技术规范、施工标准同项目的自身特点紧密地结合起来,进而构建起一套

具备科学性、严谨性的并且能够全程覆盖的工艺标准管理体系,让其贯穿在施工组织设计、技术交底、过程控制、质量验收等诸多环节之中。具体来讲,在施工正式开始之前,应当组织相关的技术人员针对那些关键的工艺流程展开十分详尽的分析工作,制定出标准化的操作手册以及节点控制标准,以此来保证施工团队能够对技术标准达成一致的理解<sup>[4]</sup>。在施工实际进行的过程当中,需要借助巡查、旁站、样板引路、工序交接检验等一系列方式来强化对执行过程的监管力度,严格地把控住施工每一项工艺的技术参数以及质量要求,坚决杜绝出现随意更改工艺流程或者简化施工步骤这样的情形。到了竣工验收的阶段,要依据工艺标准来开展质量评估工作,从而确保实测实量所得到的结果能够与设计技术要求相吻合。与此还应当引入技术复核方面的机制以及第三方的质量评估手段,以此来提升标准执行所具有的权威性以及透明度。

## 4 结语

建筑工程管理以及施工质量控制对于确保工程能够顺利开展并达成预期的质量目标而言极为关键。借助强化管理举措、提升相关人员的质量意识、引入先进的技术手段并且严格依照施工标准来执行,是能够切实提高工程质量的,同时也能降低安全方面的风险,促使项目得以按时完成。唯有不断地对管理措施加以完善,才能够推动建筑行业实现健康的发展态势,保障工程具备安全性和耐用性,从而满足社会以及用户所提出的需求。

## 【参考文献】

- [1]陈晓丹.基于施工质量控制的建筑工程管理创新策略研究[J].住宅与房地产,2025(17):107-109.
  - [2]林江玲.建筑工程管理及施工质量控制的重要性及优化策略[J].城市建设理论研究(电子版),2024(32):22-24.
  - [3]成莺.建筑工程管理及施工质量控制的有效策略[J].居业,2025(2):135-137.
  - [4]黄文欣.建筑工程管理及施工质量控制的有效策略探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(7):31-33.
- 作者简介: 颜学江 (1978.3—), 毕业院校: 重庆文理学院体育教育专业, 重庆教育管理学院教育管理专业, 当前就职单位: 重庆市石柱工业发展集团有限公司, 现职务: 党委专职副书记。

# 电子招投标平台对工程建设项目流标率的影响实证研究

孙雷

吉林省吉润工程咨询有限公司, 吉林 长春 130000

**[摘要]**信息化技术不断发展, 工程建设里电子招投标平台的应用越来越广泛, 数字化手段提升透明度、优化流程效率并有效降低人为干预的可能性, 对控制流标现象有积极作用, 实证分析显示, 引入电子招投标平台让工程建设项目流标率显著下降, 在提升投标人参与度、减少招标不确定性方面效果显著, 而且平台运行的规范性和地方政策支持程度也调节着它的影响力, 为工程招投标制度未来的优化提供有力支撑。

**[关键词]**电子招投标; 建设工程; 流标率; 透明度; 实证分析

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17179

中图分类号: F28

文献标识码: A

## Empirical Study on the Impact of Electronic Bidding Platforms on the Failure Rate of Engineering Construction Projects

SUN Lei

Jilin Jirun Engineering Consulting Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

**Abstract:** With the continuous development of information technology, the application of electronic bidding platforms in engineering construction is becoming more and more widespread. Digital means improve transparency, optimize process efficiency, and effectively reduce the possibility of human intervention, which has a positive effect on controlling the phenomenon of bidding failure. Empirical analysis shows that the introduction of electronic bidding platforms significantly reduces the bidding failure rate of engineering construction projects, and has a significant effect on improving bidder participation and reducing bidding uncertainty. Moreover, the standardization of platform operation and the degree of local policy support also regulate its influence, providing strong support for the future optimization of the engineering bidding system.

**Keywords:** electronic bidding and tendering; construction project; flow rate; transparency; empirical analysis

### 引言

基础设施建设加速推进, 工程建设项目作为交通体系的重要组成部分, 其招投标过程的规范性和效率备受大家关注。流标现象频发, 不仅会延误工期还造成资源浪费, 成为制约项目推进的大障碍, 而电子招投标平台的出现, 因其信息公开、流程可控等好处, 为解决流标难题提供了新办法, 探讨该平台对流标率的实际影响有助于深化招投标制度改革、推动建设工程高质量发展。

### 1 建设工程流标问题的现状与成因分析

交通基础设施里建设工程是重要组成部分, 工程能否顺利推进与它的招投标环节直接相关, 流标频发是工程实施受到严重制约的重要因素, 要深入分析现状和成因来寻找破解的办法。

#### 1.1 流标现象的普遍性与表现形式

近年来, 各地建设工程流标现象屡见不鲜, 这一常见问题对项目推进有影响, 且一些中小型项目或者边远地区工程流标概率更高。具体而言, 投标人数量不够、没人报名、投标文件不达标或者报价异常等情况都会导致流标, 部分项目多次重新招标还流标, 这使政府投资效益和工程建设进度受严重影响, 并且项目技术要求提高、政策规范变严, 部分施工企业觉得招标门槛高难以企及, 流标现象

就更严重, 而招标公告发布后长时间没响应, 开标阶段有废标, 这些都是建设工程里急需关注的流标信号。

#### 1.2 制度机制与招标流程的内在缺陷

诸多局限存在于传统招标制度的流程设计与执行机制, 是诱发流标的重要因素, 一方面, 招标文件编制缺乏针对性, 技术要求含糊、工期安排不妥、评标标准不明晰, 会降低潜在投标人的参与意愿, 另一方面, 招标流程繁杂冗长、审批环节众多、信息传递效率低下, 会造成资源配置滞后的局面, 部分项目立项初期预算评估偏离市场实际, 招标控制价设置不合理, 多数企业难以在控制价内有效报价, 最终形成想做却做不了的僵局, 而且, 传统人工操作流程中信息披露不够、透明度低, 给利益输送与非理性竞标提供了空间, 进一步扰乱投标市场秩序。

#### 1.3 企业参与意愿与市场环境的双重制约

投标主体是施工企业, 其流标概率直接由参与意愿决定, 当下市场环境中, 企业大多面临成本压力大、利润空间被压缩等状况, 对投资回报率低、合同条款不友好的工程项目没啥积极性, 有些建设工程由于施工难度大、交通不便或者回款风险高的地方, 企业更是不敢沾边, 工程量小、周期短但履约责任重的项目类型也让企业不想参与, 从宏观来看, 地方基础设施投资节奏慢下来了、行业竞争

格局有了变化、招投标市场准入门槛调整了，这些因素对企业投标策略影响很大，双重因素凑一块，大量项目在招标的时候就没人搭理，高流标率就这么在现实中出现了。

## 2 电子招投标平台的运行机制与技术优势

电子招投标平台以信息化、智能化手段重构传统流程，提升了透明度、效率与监管能力，已逐步成为降低建设工程流标率的重要工具。要更好发挥其效能，必须深入了解其运行机制与技术优势。

### 2.1 平台架构与流程设计的系统化

电子招投标平台构建了“统一入口、全程线上”的服务体系，涵盖公告发布、报名、文件下载、投标、开评标及结果公示等环节，形成闭环式流程。平台通常由招标管理端、投标操作端、数据交互系统及监管接口组成，具备资料校验、节点控制与资格审核等功能，显著减少人为干预与操作错误。标准化流程模板与智能引导机制提升了工作规范性和效率，招标人可实时掌握投标进展，投标人便捷响应，监管部门实现全过程监控，有效提升流转效率和操作透明度。

### 2.2 信息公开与风险防控的透明机制

平台实现了信息披露的全面透明，资格要求、技术参数、投标名单、答疑与评标过程均及时公开，解决了传统招标中信息不对称问题，增强企业信心，减少围标串标等不正当行为发生。平台具备可查可溯的操作日志及数据记录，为监管和争议处理提供依据。专家评标系统与辅助工具结合评分模型实现初步筛查与异常预警，再加上区块链、电子签章、身份验证等安全技术，进一步筑牢风险防控屏障，保障招投标活动公平有序。

### 2.3 智能化功能提升用户体验与参与度

平台借助大数据、人工智能等技术，从流程工具向决策辅助平台演进。通过分析企业资质与历史行为，智能推荐匹配项目；对招标人，则可提供市场热度评估和风险提示。语义识别、问答机器人等功能助力在线咨询、文档解析和错误纠正，降低使用门槛。移动端应用、远程开评标等拓展了应用场景，突破时间与地域限制。这些智能化设计不仅优化了体验，也提高了企业参与度，有效降低了工程流标概率。

## 3 电子招投标平台对流标率的影响路径解析

传统招标方式被电子招投标平台改变的建设工程的投标生态也被其深刻影响，其运行方式与制度优势从多个路径对流标率产生影响，梳理解析这些作用机制有助于从根源上提升投标成功率与工程推进效率。

### 3.1 降低信息壁垒促进市场参与

传统招标过程存在公告渠道有限、传播不及时、信息碎片化的问题，许多有投标意愿的企业因未及时获取项目信息而错过机会。电子招投标平台则不同，它有统一信息发布渠道且网络传播有优势，能使项目信息快速、广泛、

高效地被覆盖，投标企业可通过关键词订阅、分类推送等方式精准获取适配项目，从而扩大潜在参与主体范围。平台还将报名、答疑、文件下载等环节一体化处理，大大降低企业的时间和经济成本，明显降低中小型施工企业参与门槛，市场参与度一旦提升，“报名人数不足”“无人应标”等导致流标的核心问题就会直接改善，这成为平台影响流标率的首要通路。

### 3.2 优化交易效率压缩不确定风险

大量人工操作节点被电子化流程简化，招投标工作效率得以提高，以往因时间安排冲突、资料递交误差或人为失误导致的废标现象在平台运行机制下大大减少，投标文件的自动校验、格式标准化检查和截止提醒功能有效防止了形式性流标情况的出现，平台对评标时间、结果发布等关键环节严格控制时限，项目从公告到中标的周期被缩短，企业对招标结果不确定性的顾虑也减少了，由于工程项目本身就很复杂具有不确定性，要是投标流程的不确定风险再累加往往会使企业触发放弃投标的想法，流程确定了效率提升了，企业投标的信心和积极性在不知不觉中就增强了，投标活跃度也间接被推动提升了。

### 3.3 提升制度规范增强信任机制

电子招投标平台强化了制度执行力，从而使招投标行为更加规范、可控，其靠后台监管、数据留痕与行为可追溯机制构建起公平、公开、公正的交易环境，监管部门能实时监控项目节点和企业行为、自动预警异常操作，压缩人为干预和违规操作的空间，制度稳定公平与否是投标企业判断是否参与竞争的重要依据，平台实施统一的评标标准、透明的评分过程和结果公示极大提升了企业对招投标制度的信任度，在此机制下，之前经常被“暗箱操作”困扰的企业也愿意投入更多资源参与竞争，平台化招投标重建了市场信心，制度信任增强从根本上是削弱流标发生概率的核心路径。

## 4 实证数据分析与区域差异对比研究

要全面理解电子招投标平台对建设工程流标率的影响就得结合实证数据对比分析并横向比较不同地区的应用效果才能揭示平台实施效果的区域差异和影响机制的具体体现从而给政策优化提供参考。

### 4.1 样本数据来源与选取标准

本研究选取 2022 年至 2024 年间全国六个有代表性的省份，即东部的江苏、广东，东北的辽宁、吉林、黑龙江，其建设工程招标项目数据符合代表性与可比性。选取依据为：项目必须在电子招投标平台发布，招投标程序已完成，且数据公开可查。总共纳入样本 1128 个，数据来源包括各省公共资源交易中心官网与交通建设信息平台，重点采集项目数量、投标参与数、是否流标、是否采用电子平台等指标。在数据整理过程中，剔除了项目中止、合并招标等特殊情况，以保证统计口径一致。

#### 4.2 各地区电子平台应用成效对比

电子招投标平台在全国逐步推广且不同地区应用成效差异显著,对比分析六个省份建设工程招标数据能揭示电子平台降低流标率的区域表现和实际影响(见表1)。

表1 六省建设工程2022-2024年电子招投标应用与流标率对比分析表

地区	项目总数	使用电子平台项目数	平均投标企业数	流标项目数	流标率(%)
江苏	180	162	8.9	6	3.33
广东	190	176	8.4	5	2.63
辽宁	160	145	7.2	10	6.25
吉林	170	150	6.5	13	7.65
黑龙江	220	182	6.1	22	10.00
河南	208	173	6.0	24	11.54

从表中可以看出,东部地区(江苏、广东)电子平台使用率最高,平均投标企业数也明显领先,流标率被有效控制在3%以内。东北三省中,辽宁电子平台覆盖率较高,投标企业参与度良好,流标率为6.25%,表现相对较优;吉林虽覆盖率尚可,但企业参与度略低,流标率达到7.65%;黑龙江情况较复杂,尽管平台使用项目数不少,但流标率仍高达10%,略高于中部河南省的11.54%。这说明电子平台的使用对降低流标率具有一定的积极作用,但在不同区域,其效果受到诸多因素影响。

#### 4.3 区域差异背后的影响因素分析

电子平台应用效果存在区域差异,主要受平台技术水平、制度执行力、企业能力和政策支持等因素影响。东部地区如江苏、广东技术投入高、运行成熟、制度完善、市场活跃,平台使用便捷、企业参与度高。相比之下,东北部分地区平台培训不足,中小企业使用能力弱,参与意愿低。同时,各地政府在推广力度与监管标准上差异明显,东部推行力度大,监管严格,而部分地区仍以线下方式为主,影响平台效能。

#### 5 优化电子招投标应用以降低流标率的对策建议

电子招投标平台虽提升建设工程招标效率与规范性,但实际运行效果受多种因素制约,要让平台在降低流标率上发挥更大作用,需从技术、制度和服务方面提出针对性优化对策。

##### 5.1 加强平台功能完善与智能化升级

多数现有的电子招投标平台基本流程已实现电子化,但智能化服务还有很大提升空间,得加快人工智能、大数据分析、区块链等新技术在平台深度融合的推进,构建智能投标推荐系统、风险预警模块和投标行为分析模型,平台能依据企业历史参与数据和项目特征智能推送合适项目以提升企业响应率,评标环节引入智能辅助判分系统可提高评审效率和公平性,数据安全方面要强化电子签章、身份验证、数据加密等机制来保证交易过程完整可信,靠

技术驱动提升平台的用户黏性和操作便捷性。

##### 5.2 推动制度协同与政策保障机制建设

制度与政策的支撑对电子招投标取得成效很关键,要制定统一且细化的操作规范、平台管理制度以防止因地区标准不同而产生不公平竞争,强化监管机制且确保信息全程公开透明,严惩围标串标之类的行为,构建中央和地方协同的政策机制也很有必要,用财政激励、运营补贴等办法来鼓励企业参与投标,尤其要鼓励偏远地区的企业和小项目投标,并且政府应推动平台运营机构提供培训和咨询服务,这样能提升中小施工单位的数字化能力,增强它们投标的意愿和能力,最终有效抑制结构性流标问题。

##### 5.3 构建多元化服务生态增强企业参与意愿

流标率受企业投标意愿直接影响,平台得从单一交易工具朝着综合服务生态体系转变,可引入像财税服务、金融授信、法律咨询等第三方资源以解决企业在融资、担保方面的现实难题;针对中小型施工单位提供项目解读、文书模板、模拟投标等辅助功能来降低参与门槛;建立投标人信用评价系统,优先展示履约良好的企业并给予技术支持以提升其中标率与市场信任;鼓励企业间的在线交流与经验分享来增强用户黏性;构建高效、可信、多元的服务生态能全面激发企业参与积极性,从而从根本上减少投标意愿不足引发的流标问题。

#### 6 结语

建设工程建设的高效化、透明化离不开电子招投标平台这一重要的推动载体,其在降低流标率上已展现出积极成效,优化平台运行机制、提升智能化水平、强化制度保障与服务生态能有效激发企业参与热情并缓解信息不对称、流程障碍等关键问题,区域实证数据也显示平台建设越成熟、越规范流标率就越低,往后需持续推动平台与政策协同发展以实现制度创新和技术融合,从而给建设工程招投标注入更强动力与更高质量的保障。

#### 参考文献

- [1]赵蕊,张远兵,朱永祥.建设工程仿真教学实验平台建设思考[J].安徽建筑,2019,26(7):125-129.
- [2]陈海荣,卢修宇,黄晓明.论电子招投标平台大数据的应用[J].中国物流与采购,2022(23):33-34.
- [3]林盛.建筑企业电子招投标平台应用与发展分析[J].建筑施工,2023,45(8):1729-1732.
- [4]周智杰.国有企业采购电子招投标平台建设现状及优化措施[J].产权导刊,2024(11):28-32.
- [5]李文鹏.新时期电子招投标平台应用及研究[J].中国招标,2025(6):76-78.

作者简介:孙雷(1988.2—),女,吉林省长春市,汉族,本科学历,高级工程师,就职于吉林省吉润工程咨询有限公司,从事招标工作。

## 基于信息化手段的施工项目安全环保动态监管研究

贾志国

华电水务朔州有限公司，山西 朔州 036000

**[摘要]**提升施工项目安全环保管理水平的关键在于构建高效的信息化监管体系，集成物联网、移动互联网、大数据等技术构建动态感知、实时预警、闭环管理的监管机制，从而精准识别施工现场安全隐患和环保风险并快速响应，系统平台通过数据采集与分析全面监控作业行为、环境指标、设备运行状态等，进而让监管更科学更及时，该方法能提升监管效能，有效降低事故率与环境污染，使项目管理实现信息化、精细化与智能化。

**[关键词]**施工项目；信息化监管；安全管理；环保控制；动态监测

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17167 中图分类号: F272.7 文献标识码: A

### Research on Dynamic Supervision of Construction Project Safety and Environmental Protection Based on Information Technology

JIA Zhiguo

Huadian Water Shuozhou Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi, 036000, China

**Abstract:** The key to improving the safety and environmental protection management level of construction projects is to build an efficient information supervision system, integrate Internet of Things, mobile Internet, big data and other technologies to build a dynamic perception, real-time early warning, closed-loop management supervision mechanism, so as to accurately identify the safety hazards and environmental protection risks on the construction site and respond quickly. The system platform comprehensively monitors the operation behavior, environmental indicators, equipment operation status, etc. through data collection and analysis, thus making the supervision more scientific and timely. This method can improve the supervision efficiency, effectively reduce the accident rate and environmental pollution, and make the project management information, refined and intelligent.

**Keywords:** construction project; information technology supervision; safety management; environmental control; monitoring

#### 引言

城市建设快速推进，施工项目规模与复杂性不断增大，安全和环保问题愈发突出，这些问题制约着工程可持续发展，而传统监管模式响应慢、信息不对称、管理粗放，不适应现代施工管理需求，借助信息化手段构建智能化、动态化监管体系，给安全环保管理增添新动能，既能提升管理效率，又为绿色施工和高质量发展提供有力支撑，这是行业转型的重要方向。

#### 1 施工项目安全环保管理的现状与挑战

施工项目不断扩展，安全与环保成了工程管理无法回避的核心问题，而传统监管方式有很多局限，急需创新管理手段来突破。

##### 1.1 传统监管模式存在的主要问题

目前，大多数施工项目仍采用以人工巡查、纸质记录为主的传统监管方式，这种方式在实际执行中有很多问题，如信息获取滞后，现场真实情况监管人员难以及时掌握，一旦发生突发事件常因响应不及时造成严重后果，并且信息传递链条长且易失真，管理层难以据此准确判断现场安全环保状态，再者监管人员配置不足和专业能力不匹配，导致监管执行力下降、问题发现与处理效率低，在高风险

作业、高强度施工以及复杂环境因素面前传统手段局限性更显著，无法满足动态变化环境下的高效监管需求，而且监管数据分散、更新不及时、缺乏统一信息平台，施工单位与管理部门之间信息壁垒严重，影响协同效率与决策科学性，制约施工项目安全环保管理水平的整体提升。

##### 1.2 安全环保风险不断增加的原因

施工技术发展且项目规模扩大，施工现场高度机械化、密集化、复杂化，安全隐患和环保风险随之上升，多工种交叉作业空间高度重叠致使安全管理难上加难，稍有不慎就会出事故，部分施工企业环保意识不强、环保措施不完善，施工中的噪音、粉尘、废水等污染控制不好，并且施工周期压缩、资源调配紧张，管理者往往优先考虑进度而在实际操作中不重视安全和环保，这些因素凑在一起使得施工项目安全和环保监管更难了。

##### 1.3 对信息化监管的现实需求凸显

传统监管方式弊端多多且施工风险不断攀升，这种情况下提升监管效能必然得引入信息化手段，其集成传感器、视频监控、智能预警系统等技术，能实时监控施工现场并采集数据，有效补上了人工监管的漏洞，而大数据分析、云平台共享等技术手段一引入，管理层就能全面掌握施工

现场安全状态与环境指标从而科学决策、精准施策，信息化手段提高了监管的及时性和准确性，推动施工项目管理从“经验判断”转向“数据驱动”，由于政策法规越来越严且公众环保意识不断提高，构建智能化、动态化的安全环保监管体系成了行业发展的必经之路。

## 2 信息化技术在施工监管中的应用基础

施工项目监管有了新工具和新思路得益于信息化技术的快速发展，构建现代化、智能化管理体系离不开关键技术基础的深入应用与整合。

### 2.1 物联网技术实现现场智能感知

施工现场信息化监管以物联网技术为核心支撑之一，在关键区域和设备部署传感器、RFID 标签、智能穿戴设备等终端即可实时采集施工现场温度、湿度、有害气体浓度、设备运行状态、人员定位等各类数据，数据汇聚到统一平台便能全面感知与追踪作业环境、施工行为以提升安全隐患识别能力，当检测到氧气浓度异常、烟尘超标或者人员进入高风险区域时系统马上触发报警以实现主动干预从而避免事故，这种基于感知层的智能化管理提高了监管效率且大大降低了对现场人工巡查的依赖。

### 2.2 大数据平台支撑决策分析与预测

大数据平台对海量施工现场数据的有效利用起着支撑作用，感知层采集的数据经清洗、整合与分析后，能深入挖掘安全与环保风险的潜在规律与变化趋势，系统依据历史事故案例和环境监测数据构建风险评估模型，对施工高危节点动态预判、风险预警，数据可视化技术一应用，管理人员就能直观掌握现场风险分布和变化情况，响应速度与决策科学性得以提高，而且大数据平台可与工程进度、劳务安排、机械调度等管理模块互联互通，实现多维度综合分析，使施工管理从“结果管控”迈向“过程治理”。

### 2.3 移动与云技术提升协同效率

施工项目的信息化监管被移动互联网和云计算技术赋予了更强的灵活性与协同能力，部署移动端应用后，监管人员能随时随地实时查看施工现场状态、上传问题报告、下达整改指令，从而让现场和远程管理实现无缝对接，且各类监管数据因云平台的使用得以跨区域、跨部门共享，打破信息孤岛，提高协同监管效率，多项目、多工地并行作业时，云端统一监管体系可集中管理和统一调度多个现场，提升整体资源配置效率，移动和云技术相结合，既能优化管理流程，又能降低运维成本，为构建高效、可持续的施工监管体系打下坚实基础。

## 3 动态监管体系的构建与关键技术路径

提升施工项目安全环保水平的核心在于构建动态监管体系，靠着先进的信息化技术逐步从被动响应转为主动防控以实现系统性转变。

### 3.1 构建动态监管体系的总体架构

动态监管体系有着以“感知-分析-预警-反馈”为核心

的闭环架构，施工现场的全面感知与高效管理靠多技术融合得以实现，传感器、摄像头、智能终端被部署在感知层以达成环境、人员、设备等核心要素的实时数据采集，数据传输层把信息通过有线或者无线网络汇聚到数据处理中心来实现高速且稳定的信息流通，平台层构建数据管理平台与分析系统进行各类数据的清洗、整合、分析以支持风险预警与决策，移动端、可视化界面与自动控制系统在反馈执行层相结合将分析结果转化为管理指令从而指导现场快速响应以实现闭环管控，整个体系的动态监测、实时预警与精准干预能力得到强化，使施工项目从传统“静态监管”迈向“全过程、全方位、全时段”的智能化监管模式。

### 3.2 智能预警技术实现风险实时响应

在动态监管体系里，主动防控的关键在于智能预警技术，关联分析历史数据和现场实时数据能构建多维度风险识别模型，从而快速对异常行为或环境变化作出响应，借助视频识别技术可自动检测人员未戴安全帽、高空作业无防护等违规行为，通过传感器数据分析能识别环境指标超限、设备运行异常等问题，而且不同等级风险有对应的分级响应机制，进而实现了“预警—通知—处置”的联动流程，使得响应更及时、更精准，智能预警还能多通道推送信息，短信、APP 提醒、平台提示等都行，这样相关责任人第一时间就能获取风险信息，预警技术一嵌入，监管体系就从被动应对变成主动预测和干预，从而使事故发生概率大幅降低。

### 3.3 关键技术路径与协同应用机制

要想构建高效的动态监管体系，就得明确关键技术路径并建立跨系统协同应用机制。在技术路径方面，要优先达成传感采集系统的标准化与模块化以保证数据源既全面又准确，推动 AI 算法和大数据平台深度融合来增强风险识别与趋势预测能力，再次强化系统间的兼容性与开放性从而打造多平台互联互通的技术框架。建立多主体参与的协同机制，政府监管部门、项目承建单位、技术服务商等都要参与进来，借助数据共享、流程对接和责任联动形成合力，并且项目上可以构建多级权限管理体系让各类管理人员依据职责精准履职，只有关键技术集成创新加上多方高效协同执行，动态监管体系才能够真正落地，进而既能提升施工安全与环保治理能力，又能实现管理效益和社会效益双提升。

## 4 信息化监管对安全与环保绩效的提升作用

在施工领域，信息化监管手段深入应用使管理效率得以提升且在安全控制和环保治理上成效显著，成了推动项目高质量发展的关键动力。

### 4.1 精准管控降低安全事故发生率

多维度、全覆盖的风险预警机制被构建起来，让安全管理的主动性与精准度通过信息化监管得到有效提高，实时视频监控、传感器感知、人员定位等手段协同工作，能在作业过程中快速发现违规行为或者潜在危险并第一时

间推送至管理平台或者责任人,使得问题处理依靠数据驱动和系统判断而非人工经验,高空作业人员没佩戴安全带的行为能马上被AI识别系统捕捉到且系统会自动发出警告提示,从而有效避免由行为失误导致的重大事故,智能化巡检、作业行为记录等功能也大大增强了监督频率与质量,使施工项目安全管理从“事后处置”转变成“事前防范”和“实时管控”,事故率因此显著降低。

#### 4.2 实时监测助力环保达标排放

在环保监管方面,信息化手段优势强大,安装粉尘浓度、噪声、挥发性有机物(VOCs)等环境监测设备后,施工现场可7×24小时不间断地实时采集和上传环境数据,一旦监测数据超环保标准,系统马上预警提示,联动喷淋、降噪或通风设备自动响应,不让污染持续扩散,这种动态监控系统让环保响应更及时,可防止因数据滞后遭受环保处罚或邻里投诉,而且环保数据的留痕记录能成为企业履行绿色施工责任的有力证据,在招投标、信用评级等环节展示良好环保绩效,提升企业综合竞争力。

#### 4.3 绩效评估推动持续优化提升

信息化监管平台不仅有实时监控和风险预警功能,还完善了数据归档与绩效分析模块,施工期间系统能依据安全隐患排查率、环保指标合规率、响应处置时效等维度自动生成量化报告,为项目绩效评估提供科学依据,企业内部管理改进可使用这些评估数据以推动责任落实与制度完善,为后续项目提供经验参考从而形成闭环优化机制,更关键的是监管绩效可视化展示让管理者重视数据驱动的管理转型,不断优化管理策略与资源配置,形成标准化、规范化、智能化的持续改进路径,全面提升施工项目的安全与环保水平。

### 5 构建可持续发展的智能监管模式探索

“双碳”目标和智慧建造的背景下,施工项目管理探索可持续发展的智能监管模式当作重要课题以帮助安全、环保与效能的系统性提升。

#### 5.1 融合绿色理念构建监管导向

施工项目被可持续发展理念要求不能只追求经济效益,还得兼顾环境保护与资源节约,构建智能监管体系时要让绿色施工理念成为基础性导向渗透进监管机制、技术选择和评价标准,设置监管目标不能只关注安全事故频率,碳排放水平、扬尘控制效果、噪音扰民投诉率等环保指标也应重点监控,应用技术时要优先选能耗低、资源占用少、环境友好的监测设备与平台系统,把绿色理念嵌入信息化监管体系设计既能强化项目的生态责任又能为推动行业绿色转型提供可复制的范本从而将社会效益、生态效益与管理效益统一起来了。

#### 5.2 提升系统韧性保障动态稳定运行

智能监管系统若要可持续发展,就得有良好的韧性和

自适应能力以应对施工环境的复杂多变和突发事件,且要构建多层次的冗余备份机制与灾备体系以确保平台在网络中断、电力波动或者设备故障的时候还能保持基本运行功能,还得有智能学习能力,能依据历史数据和现场反馈不断优化风险识别模型与响应策略以提高在突发风险时的处置效率,架构设计要注重模块化和扩展性,方便根据项目规模、监管要求的变化灵活调整配置让系统长期适配且可升级,只有系统架构有足够的韧性和弹性,信息化监管才能长期稳定运行,施工项目的可持续发展目标才得以支撑。

#### 5.3 推动监管生态协同共建共享

多方参与主体协同合作与资源共享对构建可持续发展的智能监管模式必不可少,政府监管部门要完善相关政策标准和监管制度,为信息化监管提供制度保障和导向支持,施工企业作为实施主体需加大智能技术投入并积极推动数字化转型,技术服务商要提供可靠系统解决方案和持续运维服务以保证平台高效运行,要构建统一的数据接口与共享平台使项目、企业、政府之间数据互联互通促使监管结果透明、数据资源可用,建立多方参与的监管生态可实现资源集约配置、经验共享互鉴、标准协同制定,不仅能提升监管整体效率,还有助于提升行业整体治理能力,推动施工领域智能化监管持续健康发展。

### 6 结语

施工项目变得日益复杂且标准越来越高,传统安全与环保监管方式难以满足现实需求,信息化手段一引入就给监管提供了技术支撑且让监管从静态管理转型成动态、智能、高效的管理,构建多层次信息化监管体系并整合物联网、大数据、云计算这些关键技术提升了安全防控的精准度和环保治理的实时性,而且把可持续发展理念贯穿到监管全过程推动绿色施工和智能建造深度融合为施工行业高质量发展提供了新途径,以后得持续加深多方协同、优化技术路径、完善标准体系以全面推动智能监管体系落地并迭代升级。

#### [参考文献]

- [1]高斌,陈振华,钟志刚.信息化手段在水电建筑施工企业安全管理与水情预警上的应用[J].福建建材,2018(2):99-100.
- [2]袁昕瞳.建筑施工项目精细化成本管理研究[D].昆明:云南大学,2019.
- [3]许永福.浅谈利用信息化手段提升项目危险性较大的部分工程安全管理[J].建筑安全,2020,35(10):72-75.
- [4]刘峰.住宅建筑施工项目管理的安全控制分析[J].居舍,2024(35):139-142.

作者简介:贾志国(1992.2—),男,汉族,毕业学校:朔州市职业技术学院,现工作单位:华电水务朔州有限公司。

## 浅议建筑工程管理的影响因素及对策分析

李中平

蓝月生态建设有限公司, 安徽 合肥 230000

**[摘要]**在城镇化以及基础设施不断进程之中,建筑工程规模变得越来越大,技术复杂程度也有所提高,这就给项目管理提出了更高的要求。本论文全面且细致地探讨了人员组织、材料设备、技术工艺以及环境风险这四大核心要素给建筑工程管理所带来的影响,同时还针对性地给出了健全管理体系、强化技术方面的支撑、优化资源配置以及加强风险管控等相关对策。

**[关键词]**建筑工程管理; 影响因素; 成本控制

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17166

中图分类号: TU71

文献标识码: A

## Brief Discussion on Analysis of Influencing Factors and Countermeasures in Construction Project Management

LI Zhongping

Blue Moon Ecological Construction Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

**Abstract:** In the process of urbanization and continuous development of infrastructure, the scale of construction projects is becoming larger and the technical complexity is also increasing, which puts higher requirements on project management. This paper comprehensively and meticulously explores the impact of the four core elements of personnel organization, materials and equipment, technical processes, and environmental risks on construction project management. It also provides targeted measures such as improving management systems, strengthening technical support, optimizing resource allocation, and enhancing risk control.

**Keywords:** construction project management; influencing factors; cost control

### 引言

随着我国城镇化进程的加速和基础设施建设的不断推进,建筑工程项目规模日益扩大,技术复杂程度不断提高,对建筑工程管理提出了更高的要求。然而,在实际施工过程中,受多方因素影响,建筑工程管理仍面临诸多挑战。深入分析建筑工程管理的影响因素,找出当前存在的主要问题,并提出有针对性的对策和建议,对提高建筑工程管理水平,确保工程质量效益,推动建筑业持续健康发展具有重要的现实意义。

### 1 建筑工程管理的重要性

#### 1.1 成本控制的核心作用

成本控制工程项目开始之前,需要进行预算编制任务,相关从业人员综合考虑工程材料、劳动力、设备以及技术支持等方面的成本,针对工程项目的特点开展合理的预算编制,确保工程项目每个阶段都有充足的资金支持,良好的预算编制可为后续的成本控制打下良好基础,确保企业拥有良好的经济收益。在此基础上,为了进一步提高各项资金的利用效率,将采取多种措施对各项资金进行监控,以此确保每项资金都得到充分利用<sup>[1]</sup>。如果在工程项目开展过程中,出现资金利用不当的情况,应立即采取有效措施进行干预,以避免建筑企业出现较大的经济损失。此外,在预算编制和资金监控之外,建筑工程管理工作应结合当下工程项目开展情况进行优化,仔细审查项目中不同阶段

的成本要素,通过优化设计、选择更经济的材料以及提高工作效率等降低成本,与供应商和承包商进行谈判,进而获得更低的价格以及更加优质的服务。

#### 1.2 质量保障的关键支撑

项目管理体系构建起了从工程设计开始,经材料采购、现场施工,一直到竣工验收的整个过程的质量管控链条,其中明确的质量标准、严格的工序检查以及可追溯的责任制度一道构筑成了保障工程实体品质的防线,该体系所开展的系统性监督切实有效地防止了偷工减料以及工艺违规等情况的发生,它可以说是国家强制性技术规范能够落实到位的最为关键的保障。依据住房和城乡建设部在2024年所做的事故统计分析报告来看,那些管理体系较为健全的项目,其质量事故的发生率要比行业的平均水平低35.6%。一个健全的项目管理体系,通过对设计、采购、施工到验收各个环节的严格把控,确保了每一项工程都能达到既定的质量标准。这不仅关乎企业的声誉和经济效益,更直接关系到人民群众的生命财产安全。因此,加强建筑工程管理,完善质量管控体系,是提升工程质量、保障社会和谐稳定的必然要求。

#### 1.3 进度协调的系统要求

在多专业交叉施工这样复杂的场景之下,倘若能开展高效的管理工作,那么便能够将设计方所秉持的意图、施工方所具备的能力以及供应商的响应情况加以整合。借助

精确的进度计划网络图,可达成资源于时间维度以及空间维度的最优配置状态,如此一来便能够有效防止因工序出现冲突或者资源存在短缺等情况而引发的工期延误现象<sup>[2]</sup>。依据国家统计局在2025年第一季度所公布的数据来看,那些应用了智能进度管理系统的项目,其平均工期偏差率能够被控制在7.2%以内,这一数据明显要比传统管理模式下高达15.8%的平均工期偏差率要低得多。

## 2 建筑工程管理的影响因素

### 2.1 人员组织因素

项目参与人员的专业素质直接影响着技术方案的理解程度以及执行的精准度。现场工程师要是缺少BIM技术应用能力,那么这将会对管线综合排布效率产生颇为显著的影响。并且,一线工人的责任意识较为薄弱,容易致使安全操作规范在执行过程中落实不到位,就好比没有正确佩戴防护装备便开展高空作业这样的情况。中国建筑业协会在2023年度所开展的调研表明,人员因素是导致现场出现变更以及返工现象的首要原因,其占比达到了42.1%。其中,新型智能施工设备操作人员技能断层的问题显得尤为突出,在2024年全国装配式建筑岗位技能测评当中可以看出,关键岗位的持证率不足65%。团队协作机制存在缺失,这会让土建与安装工序衔接环节出现管理方面的真空地带,而这种真空状况往往会导致返工损失达到工程造价的3.8%。而且,项目管理团队决策能力存在着结构性的缺陷这一点更是需要引起警觉,那些没有接受全过程工程咨询培训的项目经理,在面对EPC模式的时候,其决策失误率要比专业团队高出2.3倍。

### 2.2 材料设备因素

那些对结构安全以及使用寿命有着直接影响的关键建材,像钢筋、混凝土等,其采购质量把控一旦出现失守情况,便会引发结构方面的隐患。根据国家市场监管总局在2025年所开展的专项抽查情况来看,强度不达标的钢筋在流通环节所占的比例依然达到了8.7%。而施工机械在日常的维护管理工作方面若存在缺失,那么就会致使设备故障频繁发生,进而拖慢工程的推进节奏。从中铁建集团于2024年出具的设备停机报告能够看出,由于维保工作不及时,所导致的停机时间在总故障时间里占比高达71%。供应链所面临的突发中断风险在近些年表现得格外突出,在2024年的时候,华东地区因为关键建材运输遭遇阻碍,使得23%的在建项目的进度出现了滞后的情况,而且滞后的时间还超过了两周。材料性能的波动性同样是不可以被忽视的,尤其是商品混凝土的坍落度在现场控制不当的情况下所引发的结构缺陷,对于这类问题,如果处理不够及时的话,往往需要付出比正常情况下多出十倍以上的修补代价。

### 2.3 技术工艺因素

设计方案本身存在可行性方面的欠缺,这会迫使现场做出大量的被动修改,就像在处理软弱地基的时候,没有

充分考虑到地下水位发生变化所产生的影响。技术创新的应用要是缺少充分的验证,就有可能引发新的质量风险,就好比重庆某座跨江大桥所采用的智能张拉系统,因为算法存在缺陷,导致预应力损失超出了规定的9%。特别需要注意的是新材料应用所带来的标准适配方面的问题,现行的GB50010混凝土结构设计规范对于碳纤维复合材料的耐久性指标还没有实现完全的覆盖。工艺标准出现迭代滞后的现象同样需要引起警觉,当2025版钢结构焊接验收标准把缺陷容许率压缩了40%的时候,那些没有提前去做工艺验证的项目就会面临着大规模的返修情况。在技术因素当中,最具破坏性的是技术交底呈现出形式化的情况,工人对于新工艺掌握得不够熟练,而这种新工艺往往就成了质量事故发生的起点。

### 2.4 环境风险因素

极端天气情况,像持续不断的强降雨,会直接给土方工程以及露天作业计划带来冲击。中国气象局在2025年所发布的建筑气候风险图谱清晰地显示出,在长三角地区,其有效施工天数相较于五年前已经减少了12d之多。政策法规方面出现的调整同样有可能让原有的管理框架彻底颠覆,就拿2025年新实施的建设工程绿色施工管理规范来讲,它强制性地要求施工现场PM10浓度的小时均值必须要低于150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。社会经济环境发生变化,比如2024年铜价在单个季度内暴涨了40%,这使得电气工程造价完全失去了控制。地方环保政策差异化执行的情况远远比预期要严重得多,有一个跨省项目就是因为两地扬尘标准存在差异,最终导致停工争议一直持续了23d之久。环境责任风险正逐渐成为新的风险爆发点,土壤污染防治法修订案明确规定,历史污染场地要是没有完成评估的话,那么就不能开工,要是这类风险管控得不够到位,那么很可能致使项目整体陷入搁浅的困境之中。

## 3 建筑工程管理影响因素的对策

### 3.1 健全管理体系

构建覆盖项目全生命周期的制度规范体系,其中责任传导断层问题要重点去解决,得明确业主决策权限、总承包实施责任以及监理监督范围的具体法律边界和事务衔接程序,特别是像隐蔽工程验收这样的关键环节,要建立起影像资料区块链存证与多方在线会签机制。推广使用的项目管理信息系统,应实现从材料报验到工序交接的全流程线上化闭环管理,让每个管理动作都有可追溯的操作痕迹。ISO9001质量管理体系认证的要求,要融入日常工作中,而不仅仅是放在文件柜里的证书,要将其转化成日常巡检的检查清单和月度考核的量化指标,管理体系健全的程度直接影响组织效能的发挥。据中国建筑业协会2024年调研数据,实施数字化流程管理的项目,管理效率提升了32.7%,而责任界面模糊的项目纠纷率比行业均值高4.8倍<sup>[3]</sup>。更为重要的是,要建立管理标准的动态更新机制,

针对新型工程模式如 EPC 总承包或建筑师负责制及时调整管理规则, 毕竟再完善的制度也需要持续迭代才能保持生命力。

### 3.2 强化技术支撑

BIM 技术的广泛应用不应仅仅止于三维可视化展示这一阶段, 而要将其进一步转化成为能够预判的碰撞检测工具, 同时还要让它成为可以模拟施工进度的平台以及能够实现动态管控的造价模型, 在超高层建筑的机电管线综合排布方面达成毫米级别的精度控制。那些布置在深基坑边缘的物联网智能监测设备, 得具备自动预警的功能, 要是支护结构位移量超出预先设定的阈值, 就要立刻触发报警信息, 并且推送到五位责任人的手机终端上。编制施工工艺标准化手册的时候, 要配套制作三维动画交底视频以及二维码现场查询系统, 让文化程度不算高的工人们也能够精准地掌握技术要点。住房城乡建设部《建筑业“十四五”发展规划》所设定的到 2025 年智能化技术应用覆盖率达到 60% 这一硬性指标是值得关注的, 这就要求企业在平均每年投入的数字化改造资金方面, 金额不能低于产值的 1.2%。强化技术支撑, 说到底是对传统经验管理的一种科学化改造, 比如把老师傅依靠手感做出的判断转化为混凝土坍落度的传感器数据, 把施工员凭借目测估量得出的结果升级成由无人机土方测算所提供的精确计量。

### 3.3 优化资源配置

基于区块链技术打造的物资调度平台, 可达成钢筋这类大宗材料在不同项目间的调拨操作。依据中建集团 2024 年的实践数据来看, 此种模式在让库存周转率提升 40% 之际, 还使得仓储成本降低了 15%。所构建的供应商评估模型, 得涵盖质量合格率、交货准时度以及价格波动系数等多达 12 项的核心指标, 而后依照评估得出的结果, 去施行战略合作、普通合作还有淘汰名单的分级管理举措。对于台风汛期等季节性风险所制定的应急预案, 要细致到应急物资储备清单以及备用供应商联络矩阵等方面, 务必要保证在道路出现中断的情况下, 72h 以内依旧能够维系关键施工面的正常开展进程。资源优化配置这件事, 尤其得留心人力资源的弹性调度事宜, 搭建起一个拥有 800 万名建筑工人的全国劳务调剂平台, 从而让突发停工项目的工人可以迅速转移到那些急需人手的工地当中。这样一种资源配置模式方面的革新, 已然在转变传统那种“项目各自为政”的局限状况, 在粤港澳大湾区某个城市群的建设进程中, 三地共享的预制构件中心促使单个项目的临时用地减少了 37%。

### 3.4 加强风险管控

运用风险矩阵工具时, 得先建立起一个评估数据库, 这里面要包含像自然灾害、政策变更以及供应链断裂等多

达 38 类的风险事件。借助概率影响分析来明确哪些是需要重点去防范的红色等级风险。在实施全过程跟踪审计的过程中, 其覆盖范围应当涵盖从土地获取成本一直到竣工结算争议期间的所有资金流动节点, 并且要格外留心因设计变更而引发的成本出现异常跳增的情况。所引入的第三方评估机构务必要具备国家所认可的危大工程专项认证资质, 针对那些超过一定规模且危险性相对较大的工程方案, 要开展独立的结构验算以及施工可行性的论证工作。风险管理要想得到强化, 还必须要建立起知识积累方面的机制, 把每一个项目的风险处置案例转变成企业风险库里的实战教材<sup>[4]</sup>。国家发改委在 2025 年出台的新规明确规定, 亿元以上项目都必须设置风险总监岗位, 这意味着风险管理正逐步从辅助职能朝着核心管理模块转变。环境责任风险的前置防控这一点尤其需要引起注意, 新颁布的《建筑工程生态环境损害赔偿办法》指出, 土壤污染修复的成本有可能会达到工程造价的 20%, 这类隐性风险要是管理不及时, 往往会酿成灾难性的后果。

## 4 结语

建筑工程管理的效能主要依靠对人员、材料、技术以及环境这四个因素相互交织作用的系统性把控和精准干预来决定, 其关键在于构建刚柔并济的管理体系框架, 既要强化制度规范的刚性约束, 又要重视技术创新的柔性赋能。当下建筑业正在经历数字化、绿色化方面的深刻变革, 只有把管理体系的完善放在技术应用的前提位置, 把资源配置优化当作风险防控的物质基础, 才能够真正达成工程品质、效率以及效益的协同提升。管理者迫切需要突破碎片化应对思维, 在项目全周期的视野下对各类要素的匹配关系加以统筹, 这既是应对当下挑战的务实之举, 也是推动行业迈向内涵式高质量发展的必然需求, 毕竟再先进的工具最终还是需要稳健的管理框架才能够释放出其应有的价值, 项目进度管理不够严格往往就是工期失控的开端, 只有回归管理的本质才能够筑牢建筑百年基业。

## 【参考文献】

- [1] 杨建.装配式建筑施工技术要点及管理措施研究[J].中国建筑装饰装修,2025(7):128-130.
- [2] 张勃.建筑工程管理影响因素与解决措施研究[J].工程建设与设计,2025(9):247-249.
- [3] 吴伟.基于 BIM 技术的建筑工程管理优化[J].中国住宅设施,2025(6):49-51.
- [4] 许世杰.装配式建筑工程管理的影响因素与对策分析[J].工程建设与设计,2022(20):235-237.

作者简介: 李中平 (1976.10—), 男, 毕业院校: 大连理工大学, 所学专业: 工程管理, 当前就职单位: 蓝月生态建设有限公司, 职务: 项目经理, 职称级别: 高级工程师。

## 地下工程防渗漏关键节点施工控制与质量保障研究

徐善亮 潘宇

浙江省二建建设集团有限公司,浙江 宁波 315200

**[摘要]**复杂地质条件与高地下水位影响地下工程时极易出现渗漏问题,从而严重威胁结构安全与使用功能。要有效防渗就得加强关键节点施工控制以提升质量保障能力,在分析地下结构常见渗漏类型和成因后提出围护结构接缝、变形缝、穿墙管道等重点部位的施工控制要点,明确施工阶段的材料选择、工艺管理与验收标准,结合质量管理体系建设强化监测预警并强化全过程质量追溯机制以确保防渗效果持续可靠。

**[关键词]**地下工程;防渗漏;关键节点;施工控制;质量保障

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17189 中图分类号: TU761 文献标识码: A

### Research on Construction Control and Quality Assurance of Key Nodes for Leakage Prevention in Underground Engineering

XU Shanliang, PAN Yu

Zhejiang Provincial Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

**Abstract:** Complex geological conditions and high groundwater levels can easily lead to leakage problems in underground engineering, posing a serious threat to structural safety and functional use. In order to effectively prevent seepage, it is necessary to strengthen the construction control of key nodes to enhance quality assurance capabilities. After analyzing the common types and causes of leakage in underground structures, key construction control points for enclosure structure joints, deformation joints, and through wall pipelines should be proposed. The material selection, process management, and acceptance standards during the construction phase should be clarified. Combined with the construction of a quality management system, monitoring and early warning should be strengthened, and the entire process quality traceability mechanism should be strengthened to ensure the continuous and reliable effectiveness of seepage prevention.

**Keywords:** underground engineering; anti leakage measures; key nodes; construction control; quality assurance

### 引言

城市化进程加快使地下空间开发利用越来越广泛,地铁、隧道、地下管廊等工程数量猛增,不过地质环境复杂和水压高导致渗漏问题常出现,成为影响工程安全性和耐久性的重大隐患,关键节点部位稍一疏忽就可能发生结构渗水甚至功能失效,深入探讨防渗关键点施工控制与质量保障机制是提升工程品质的关键手段,也是推动地下工程高质量发展的必由之路。

### 1 地下工程渗漏问题的特点与成因分析

地下工程环境特殊,地下水、地应力等诸多因素极易对其产生影响且渗漏问题频频发生,深入剖析地下工程的特点与成因是精准防治、提升质量的基础。

#### 1.1 渗漏问题的主要特征

地下工程渗漏隐蔽性强、危害大且治理难,这很显著。渗漏一开始大多为微渗,肉眼不易发现,等水迹明显时结构或者功能往往已受影响,而且渗漏水常带溶解物质,这容易使钢筋生锈、混凝土碳化,从而削弱结构耐久性。渗漏还可能造成管线腐蚀、电气短路、内部潮湿发霉等问题,进而影响使用的舒适性和安全性。地下工程大多处于封闭空间,一旦渗漏维修成本高、周期长,严重时就得暂停使

用或者影响城市运行,要制定防治策略得先了解其特征。

#### 1.2 结构设计与材料问题

前期设计不合理和材料选型不当往往会造成渗漏问题,在设计阶段,有些工程没充分考虑地下水位变化与水压条件,结构防水等级设置得低了且节点细节没处理好,像变形缝间距设计得太大、位置不合理,结构就会因沉降或变形而开裂,选材不当也是个重要原因,止水带、密封材料或者混凝土外加剂性能不达标,在使用年限里就老化、失效了从而防水能力下降了,还有些工程为了降低造价简化防水层设置且不管关键部位的增强处理,这就埋下了渗漏隐患,要提升防渗能力就得从源头的设计和选材环节加强控制。

#### 1.3 施工工艺与管理缺陷

渗漏的产生,实际施工中的工艺控制与现场管理也是重要诱因,施工人员技术水平参差不齐、节点处理不好,像施工缝没做凿毛处理或者止水带埋设不居中时渗漏通道就很容易形成,而且混凝土浇筑时振捣不够、接缝处理马虎、养护不及时,混凝土就可能出现蜂窝、麻面、裂缝这些问题,给渗水提供通道,施工进度压力大的时候,有些单位会抢工期、不顾质量,质量控制形同虚设,检测环节缺失或者造假,交接验收机制不完善,责任界限不清晰,问题节点

不能及时发现和整改，隐患就积累起来了，提升施工标准化程度、加大过程监管力度，是有效防治渗漏的关键。

## 2 防渗关键节点类型与渗漏高发部位识别

在地下工程里渗漏往往聚集在特定的结构节点，若能识别出防渗的关键部位并弄清楚其容易渗漏的缘由，就能提前制定出有针对性的控制措施让工程整体的防水性能得以提升。

### 2.1 结构接缝部位

地下工程里，结构接缝在防渗方面既是重点也是薄弱之处，像施工缝、变形缝与沉降缝等都属于结构接缝，混凝土分段浇筑、结构应力释放、地基不均匀沉降等因素很容易让这些缝隙变成渗漏通道。施工缝的两次混凝土结合面有物理弱界面，若施工前没清理干净、凿毛不充分或者止水带设置没效果，冷缝或者缝隙渗水就经常出现。变形缝主要承担结构位移变化的压力，缝宽设置不合理或者变形缝止水材料选型不对，如橡胶止水带断裂、位移超限，也会造成漏水。沉降缝要是没合理布置，受地基沉降影响容易出现剪切开裂，使得缝体失稳，渗漏范围进一步扩大，材料质量、施工工艺和位移控制等多方面要求在接缝防水中必须落实，任何一个环节疏忽，都可能成为渗漏高发之处。

### 2.2 穿墙管线节点

穿墙管道、套管和预埋件等穿越结构的节点是渗漏的高风险区域，这些节点有结构不连续、材料过渡复杂的情况，密封处理难度不小，穿墙管线施工时若没设置防水翼环或者翼环和墙体结合不紧密，混凝土收缩或者管材热胀冷缩时就会产生微裂缝形成渗水通道，并且有些工程里管线预埋位置不准、封堵混凝土回填不实或者用砂浆代替防水混凝土会降低节点密封的可靠性，不同材质的弹性模量有差异，温度一变化接缝就容易开裂，管线集中穿越的区域像地下设备房、管廊交汇点得用刚柔结合的多道密封措施，施工时严格定位和复核以保证整体密封性能达到设计要求。

### 2.3 地下出入口与节点衔接

地下工程的出入口处，像车行坡道、人行通道、电梯井以及和地面结构相连的地方，结构形态复杂、荷载频繁变化，常变成渗漏隐患的集中区域，这些部位一般有标高变化、结构断面过渡、施工拼接频繁的情况，防水层的连续性很难保证，地面和地下结构连接处尤其如此，要是没采用柔性过渡结构或者防水构造断裂了，沉降差异或者车辆荷载一作用，就容易产生裂缝，防水系统就被破坏了，并且出入口坡道迎水面要是没设置导水层或者排水不顺畅，水压就会集中，渗水现象就更严重了，电梯井部位一直受地下水渗压影响，底板和井筒交接处理不严密的话，底部涌水或者井道积水很容易出现，在这些结构转换和衔接的部位，得重点把细部构造设计和防水层连续性控制好，再加上后期注浆、排水措施来双重保障，从根源上减少渗漏风险。

## 3 关键节点施工控制的技术措施与工艺要点

地下工程防渗效果好不好，关键就看节点部位施工控制是否精细，优化技术与工艺手段来提升关键节点施工质

量是达成整体防渗目标的核心办法。

### 3.1 施工缝处理要点

地下结构分段施工必然会产生施工缝，而施工缝也是渗漏经常发生的重要通道，整体防水性能和施工缝处理质量息息相关，因此设计阶段要先明确施工缝位置，且避开结构应力集中区或者迎水面以合理安排分段位置，并且施工之前旧混凝土面必须凿毛，浮浆、杂质和松散混凝土要彻底清除，这样新旧混凝土才能紧密结合，由于保障缝体水密性的关键在于设置止水带，应采用中置式橡胶或者钢板止水带，而且定位要准、固定要牢，施工时不能移位，浇筑新混凝土之前，接缝处要保持足够湿润，必要时使用界面处理剂增强黏结力，浇筑的时候要加强振捣使其密实，不能产生冷缝、蜂窝麻面这些缺陷，浇筑之后要赶紧覆盖养护，控制好温度和湿度以降低早期裂缝风险，通过系统的工艺措施最大限度降低施工缝渗漏概率。

### 3.2 止水材料施工控制

防渗体系里，止水材料是核心构件，节点防水效果直接取决于其施工质量，不同节点类型需选用适配材料，像结构接缝处往往用橡胶止水带、止水钢板，穿墙管道部位适合用止水环、防水套管等构件，施工时要严格按设计规范布设材料，保证止水带处在中间位置、平直、不扭曲且固定牢固、不被拉裂或弄脏，止水钢板搭接处要焊接严实、不能漏焊且表面要除锈，可膨胀止水条之类的材料安装时间要控制好，否则在空气中暴露久了提前吸水膨胀就会失效，密封胶和防水涂料要按比例搅匀并按工序分层施工，保证厚度一致、没有漏刷的情况，施工完要做细部检查和渗水试验，有缺陷就赶紧修补，让防水构造完整连续、密封严实，全面提高节点的耐久性和抗渗性。

### 3.3 重点节点施工流程管理

保障关键节点质量的基础是科学合理的施工流程管理，要制定详细施工技术方案和节点专项施工图以明确各类节点处理工艺、材料要求和质量标准，正式施工前需组织技术交底、开展样板引路、统一作业标准以避免操作随意性，施工过程中要实施旁站监理、进行全过程质量跟踪并重点检查节点预埋、缝体处理、止水构件安装等环节且每一道工序合格才能进行下一步作业，施工时要同步记录关键工艺参数和质量验收数据以便于问题追溯和过程改进，大体积混凝土、深基坑接头等特殊节点要配备专用工具和技术人员且必要时采用信息化管理手段进行动态监测，并且不能忽视成品保护，要安排专人养护已完成节点防止人为破坏或者污染并确保后续施工中防渗构造不被削弱，实施制度化、标准化、流程化管理就能实现关键节点施工全生命周期质量控制。

## 4 防渗质量保障体系的构建与实施路径

地下工程防渗光靠施工工艺无法全面消除渗漏隐患，要构建系统化质量保障体系并明确管理机制和实施路径才是确保工程防水效果长期稳定的关键。

### 4.1 质量控制体系构建

要保障防渗质量，得建立起涵盖设计、材料、施工以

及验收等全过程的完整质量控制体系,设计阶段明确防水等级、节点构造要求和细部做法,为后续施工提供依据,在材料方面实行原材料准入制度,止水带、密封胶、外加剂等关键材料必须经过型式检验和现场复验,不能以次充好,施工时制定节点专项施工方案,细化每个施工工序的操作要点和验收标准,做到有图可查、有据可依,质量控制体系中设专职质量员,对关键节点旁站检查、对隐蔽工程进行验收以增强现场执行力,项目上建立“三级质量验收”机制即班组自检、技术员复检、监理抽检,层层把关形成闭环控制链,从源头上提高整体防渗质量。

#### 4.2 信息化与过程监测

信息化管理手段的引入能显著提升防渗质量的可控性与透明度,通过建立施工节点信息数据库,录入各类节点的施工时间、操作人员、材料使用情况以及验收结果使过程可追溯,设置关键节点二维码标识以便后期定位与复检,在防水层施工时采用红外热像、视频巡检等非破坏性检测手段实时监测并及时修补潜在隐患,在深基坑工程和高地下水位区域布设水压监测、结构应力监测等传感系统,借助数据平台实时掌握结构受力和水位变化趋势以预判渗漏风险并实施动态管控,信息化工具不仅提升数据管理效率,还让质量控制更系统更科学,为精细化防渗管理提供技术支撑。

#### 4.3 全周期质量保障机制

地下工程防渗不能只在施工阶段下功夫,得建立涉及设计、施工、运维全周期的质量保障机制,项目一开始就要组织多专业协同进行设计审查,优化防渗结构与节点细节以防止方案出现冲突和遗漏,施工时要动态交底、更新技术并根据现场情况及时优化防水工艺和流程,工程竣工后要建立防水档案,包含节点施工记录、试验检测数据、隐蔽验收资料等给运维提供依据,使用阶段得定期检查防水状况且对沉降缝、电梯井、管廊连接处等重点部位进行专项巡查和维护,若发现渗漏就要快速启动响应机制,联合设计、施工、运维单位排查原因并修复以保证问题处理形成闭环,靠制度化管理和多环节协同长效保障地下工程防渗质量并动态优化。

### 5 提升防渗成效的综合对策与工程实践应用

提升防渗效果不能只靠优化单一环节,而是要系统联动、多措并举,根据工程实践经验来探索科学合理的综合对策,这对实现地下工程防渗长效、安全与可靠有帮助。

#### 5.1 统筹规划与源头优化

地下工程防渗效果要提升,项目前期就得进行统筹规划与系统设计,从源头上把控渗漏风险,在可行性研究阶段,要充分调研地下水位、地质条件以及周边水源影响,合理评判工程渗漏风险等级,明确防水设计策略,而且设计图纸要细化节点构造处理、止水系统布局以及排水导向路径,施工缝、穿墙管和结构转换处得优先专项深化设计,工程各参建方得协同审图,预先找出可能存在的防水冲突,保证设计阶段能闭环优化,这样源头治理好了,整个防水系统就有科学性、系统性和前瞻性,给后期施工和运维奠定坚实基础。

#### 5.2 创新技术与材料应用

提高防渗成效,技术与材料的创新是重要驱动力,施工工艺上可推广自愈型混凝土、双重止水构造、负压注浆技术等新型工法以增强结构自动封闭和抵御水压能力,材料应用方面要逐步采用膨胀橡胶止水条、高分子耐水密封胶、抗渗混凝土等高性能防水材料,因其黏结性、耐久性和适应性良好可显著提升节点防渗能力,特殊部位像深基坑、车库顶板可结合喷涂防水涂料和卷材复合构造以实现多层次多屏障防水,也要重视设备安装节点的防渗处理,采用柔性衔接、刚柔结合等复合技术手段可提升复杂部位整体密封性,通过技术升级、材料替代,地下工程防渗能力不断朝着“自控、可修、可追溯”方向转变。

#### 5.3 典型工程实践借鉴

众多地下工程实践中,防渗综合对策可从一些典型项目的成功经验里得到有益借鉴,如某大型地铁工程,施工缝处理采用“钢板止水带+自愈型止水胶”复合工艺提升了接缝密封稳定性,穿墙管道节点统一用防水套管还配套柔性密封层有效解决了多种材质管线穿越结构时的渗漏隐患,工程管理方面实施“样板引路+过程巡查+数字化台账”三位一体控制模式确保了节点工艺标准化、施工可追溯、防水问题可溯源,部分工程运营阶段建立“定期巡检+渗漏预警+快速修复”响应机制实现了从设计、施工到运维的全流程质量闭环,总结推广这些成功实践能让今后地下工程有可复制、可落地、可优化的防渗解决路径并提升行业整体防水技术水平。

### 6 结束语

地下工程防渗漏这项任务系统性和综合性很强,技术与管理都得跟上,得从设计的优化、节点的控制、施工工艺、材料应用以及质量管理等好多方面协同推进,找出高风险的部位并强化关键节点施工控制,构建起全过程的质量保障体系,凭借先进技术和工程实践经验有效提升地下结构的防渗性能和耐久性,以后要不断推动标准化和信息化融合使用,建立一个能覆盖全生命周期的防渗管理机制,使地下工程建设从“堵漏补强”转变成“预控保障”,这样城市基础设施安全运行才有切实保障。

#### 【参考文献】

- [1]蒋小斌.群体建筑地下工程防渗综合措施探析[J].安徽建筑,2019,26(7):231-232.
- [2]刘建明,高水位场地地下工程防渗漏施工关键技术研究.陕西省,陕西建工第二建设集团有限公司,2019-05-11[Z].
- [3]胡居凯.建筑工程防渗漏措施及技术应用研究[D].扬州:扬州大学,2022.
- [4]张洪瑞.地下防水工程渗漏原因分析及防水措施解决研究[J].中国建筑金属结构,2022(1):38-40.
- [5]陈顺.房屋建筑防渗漏施工技术要点研究[J].城市建筑,2024,21(16):206-209.

作者简介:徐善亮(1993.12—),男,江苏南通人,汉族,本科学历,工程师,就职于浙江省二建建设集团有限公司,从事技术质量工作。

## 装配式建筑施工关键节点施工技术研究

张威

中国建筑第八工程局有限公司，安徽 合肥 230011

**[摘要]**建筑工业化进程持续推进，装配式建筑因具有施工周期短、节能环保、标准化程度高的优势而逐渐成为建筑行业的重要发展方向，其整体结构的稳定性和安全性直接由关键节点的施工质量决定，文中重点关注装配式建筑施工中的预制构件连接、吊装定位、接缝防水等关键节点，深入剖析技术难点和优化对策，从施工工艺、施工流程控制、质量保障等方面系统探讨，旨在为装配式建筑施工质量和效率的提升提供技术支持和实践指导。

**[关键词]**装配式建筑；关键节点；施工技术；吊装定位；连接结构

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17200

中图分类号: TU74

文献标识码: A

## Research on Construction Technology of Key Nodes in Prefabricated Building Construction

ZHANG Wei

China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Hefei, Anhui, 230011, China

**Abstract:** The process of building industrialization continues to advance, and prefabricated buildings have gradually become an important development direction in the construction industry due to their advantages of short construction period, energy conservation and environmental protection, and high standardization. The stability and safety of their overall structure are directly determined by the construction quality of key nodes. This article focuses on key nodes such as prefabricated component connection, lifting and positioning, and joint waterproofing in prefabricated building construction, deeply analyzes technical difficulties and optimization strategies, and systematically explores from the aspects of construction technology, construction process control, quality assurance, etc., aiming to provide technical support and practical guidance for improving the construction quality and efficiency of prefabricated buildings.

**Keywords:** prefabricated building; key nodes; construction technology; lifting and positioning; connection structure

### 引言

建筑工业化的重要体现是装配式建筑，其在住宅、办公楼以及公共基础设施建设中被广泛应用。与传统现浇施工相比，装配式建筑施工节点更集中且结构构件连接更复杂，关键节点成为影响施工质量与安全的重点和难点。本文基于对装配式建筑施工特征的分析，系统研究连接节点、安装精度、防护处理等关键环节的施工技术与优化路径，为推动装配式建筑施工标准化、精细化发展提供技术支撑。

### 1 装配式建筑关键节点特征与分类

#### 1.1 关键节点的定义与重要性

装配式建筑里，预制构件相互连接并实现整体结构传力的关键部位叫关键节点，像梁柱连接、板墙连接、柱柱连接等都属于关键节点，这可是建筑结构系统稳定性的核心环节，各类预制构件靠节点连接成完整空间结构，整体承载力、抗震性能、耐久性直接受节点力学性能影响，装配式建筑跟现浇结构比起来，节点构造和连接工艺更复杂且施工质量控制要求也更高，关键节点有传递荷载和维持结构连续性的作用，是施工安装精度和后期维护的重点，在设计、施工、验收各阶段都得重点关注，建筑结构的整体性和稳定性由关键节点施工质量决定，建筑安全性能、使用寿命、后续维护成本也与之相关，这是工程质量和施工效率的重要保障。

#### 1.2 关键节点类型分类分析

装配式建筑里，按照连接构件的空间位置和传力路径，关键节点大体能分成竖向连接节点、水平连接节点、板墙连接节点这三类。楼层之间柱子或者墙体构件上下拼接的地方（如柱柱对接、墙墙对接处）主要有竖向连接节点，该节点竖向承载力和抗剪能力要好且受力连续性要靠钢筋套筒灌浆、插筋连接之类的方式实现。梁、板、墙水平接缝处（如梁与梁连接、墙与墙水平拼接处）水平连接节点较多，水平荷载靠它传递且结构整体性靠它保证，常采用湿接缝灌浆、连接件焊接这些工艺。楼板与墙体、楼板与楼板之间是板墙连接节点所在之处，它主要将不同方向构件有效连成整体以增强建筑结构的整体刚度和抗震能力。设计这些节点时既要满足结构传力要求，又要兼顾施工便捷性、防水密封性、后期装饰协调性，装配式建筑技术体系核心内容由这些节点构成。

#### 1.3 不同节点施工面临的主要问题

装配式建筑关键节点施工存在不少难点，影响施工质量和结构性能稳定性。连接精度难以控制，预制构件尺寸有误差、吊装会偏移、现场定位不准，这些容易使节点错位，进而影响连接可靠性。连接方式工艺复杂，竖向连接时更是如此，钢筋套筒灌浆质量控制要求高，若灌浆不密实或有空鼓，节点承载力将被严重削弱。再次，接缝防水

处理不好,板墙连接处或楼板拼缝处理不当容易发生渗漏问题,从而影响建筑使用功能。不同构件材料热胀冷缩、干缩性能差异大,容易产生节点微裂缝,而且现场施工条件受限,空间狭窄、构件吊装路径不顺畅等,会加大施工难度。标准化作业不足也是问题,部分项目节点设计不统一,施工人员技能水平参差不齐,增加了施工过程中的不可控因素。关键节点施工需要进行标准化、精细化管控,结合智能建造技术提高安装精度和质量,才能有效应对施工中的诸多挑战。

## 2 预制构件吊装与定位施工技术

### 2.1 吊装机械与工艺选择原则

装配式建筑施工中预制构件吊装是关键环节,对施工效率和安装精度影响很大,选择合适的吊装机械与工艺非常关键,常用吊装设备有塔式起重机、汽车起重机、履带起重机、门式起重机等,中高层建筑项目适合用塔式起重机,因其作业半径大、稳定性好且便于多点吊装,场地狭小、构件重量适中且吊装频繁的施工现场适用机动性强的汽车起重机,大型构件和长时间吊装作业适合履带起重机,其在基础及下部结构施工时尤其合适,构件堆场或者构件水平运输与就位常用门式起重机,要综合考虑预制构件类型、安装部位、构件重量、施工现场条件等因素才能选好工艺,保证吊装作业安全顺畅高效,吊装之前必须做详细的吊点设计与平衡性计算,这样构件在吊装过程中才平稳,避免构件旋转晃动影响施工精度,要制定吊装专项施工方案并进行吊装模拟与路径优化,才能降低高空作业风险并提高安装效率。

### 2.2 构件吊装过程的精度控制技术

预制构件安装后要满足设计要求,吊装过程中精度控制就特别关键,垂直度控制方面,施工时能用激光铅垂仪、全站仪等先进测量设备实时监测构件立面垂直度,并借助临时支撑系统初步定位与微调,竖向构件吊装时设置基准钢筋或限位卡具辅助垂直对接,标高控制一般用基准标高点配激光水平仪,逐层测量校验分层确认标高,必要时在模板或墙面设预埋控制点以保证构件逐层堆叠无累计误差,平整度控制重点在板类构件,预制楼板、屋面板安装时,要靠水平仪加人工复核确保板面高差合设计标准,而且构件吊装就位前得清理接口检查平整度,防止砂浆垫层、连接件带来附加误差,吊装时得专人指挥同步监控,保证构件在空中姿态稳定控制精度。

### 2.3 定位偏差处理与二次校正技术

预制构件吊装时,常因吊点位置、风力干扰、地面导向不清等情况而轻微偏移,就位后得靠二次定位技术微调校正,常用的方法有临时楔块支撑、钢楔校正、千斤顶微调等,墙体或柱体构件小角度偏移时,调整构件底部楔形垫片就能修正倾斜角度,再用钢拉杆或撑杆固定,板类构件可人工局部顶升与重铺垫层来整体调整,二次校正时得

注意结构安全,没完成固定连接前尤其要加强临时支撑,防止构件滑动倾覆,并且所有偏差处理都得按相关规范要求来,还要形成质量验收记录,套筒灌浆类连接节点校正完且验收后才能灌浆,确保构件连接密实、整体,现代施工也慢慢引入智能化辅助校正技术,像用BIM模型和全站仪联动进行三维点位复核,结合物联网感应器实时反馈偏差数据,这样能提高现场施工的响应效率和调控精度,多手段、多角度地控制和修正偏差,装配式构件吊装定位的精准性和结构整体安装质量就有保障了。

## 3 装配节点连接施工技术

### 3.1 湿连接与干连接工艺对比分析

装配式建筑节点连接方式大体有湿连接和干连接两类,在施工工艺、成本投入与施工效率方面两者差异明显,湿连接是在现场用现浇混凝土、砂浆或者灌浆料对构件连接部位浇筑以达成构件间结构一体化,常用于竖向墙体、楼板等结构部位,其力学性能和抗震能力都不错,虽然连接强度高、结构连续性好、抗震性能佳,但施工工艺复杂些,要支模、绑钢筋、养护且天气条件对其影响大、施工周期也长,干连接则拿螺栓、焊接件、卡扣这些金属连接件装配连接预制构件,在装配式钢结构和部分非承重构件中比较典型,其施工快、安装精度高、受环境影响小、拆卸和重复利用方便,符合快速施工和绿色建造要求,不过成本高,对构件加工精度和连接件质量要求严,连接刚度可能比湿连接稍低,节点性能得充分结构验证,在实际工程里,“湿干结合”这种复合连接方式常见,能保障结构可靠性且提高施工效率,这是装配式建筑发展的主要趋向。

### 3.2 后浇带施工质量控制要点

装配式建筑里,后浇带属于常见节点处理形式的一种,楼板、墙板水平拼缝处常设置它以靠后续现浇混凝土把各构件整体连接起来,后浇带质量控制重点在施工时序、接口处理和混凝土浇筑工艺这三方面,构件初期稳定后才能施工后浇带且得保证连接区域无沉降变形以便后浇混凝土和原构件黏结良好,接口处理很关键,后浇带内原预留混凝土面得凿毛且浮浆油污要清除有时还得加界面剂增强结合性能并且钢筋对接要准、锚固长度得符合设计要求,混凝土浇筑时要用和主体结构强度等级一样的混凝土且配比得准、振捣要密实、养护要及时以防止冷缝、空鼓、裂缝这些质量缺陷,浇筑完得保湿养护最少7天且强度达到设计要求才能接着施工,得用回弹法、超声波检测等方法验收后浇带质量使其满足整体结构使用功能和耐久性要求。

### 3.3 钢筋套筒灌浆施工工艺要点

在装配式混凝土结构里,钢筋套筒灌浆连接技术是钢筋对接的重要方式,其施工质量直接影响结构传力连续性与整体性,这一工艺包含钢筋插入、套筒定位、封闭密封、灌浆料搅拌与注入、养护与验收等步骤。施工前需按设计

要求选择合格的机械连接套筒,严格控制插入钢筋的直径、长度以及定位偏差,确保钢筋插入深度满足锚固需求,并且套筒内部和钢筋外部要保持干净、不能有油污,灌浆之前要用气泵或者高压水把内部残留杂质冲洗掉。灌浆料要符合国家相关标准,具备早强、高流动性、微膨胀、不泌水这些性能,搅拌时要严格按照厂家给的水灰比进行且搅拌均匀后要在规定时间内灌注完,灌注时采用底进顶出或者侧进顶出工艺以保证套筒里灌浆饱满没气泡,安装泄气孔来监控出浆情况,灌浆完要密封灌浆口、及时清理外溢料并做标识标记。后期养护要保持湿润以防止快速失水出现裂缝,养护期满要用回弹检测、抽样芯样破形试验等方式做质量验收,使灌浆强度和粘结性能达到设计标准,满足结构使用和耐久性要求。

#### 4 接缝处理与防水技术要点

##### 4.1 接缝部位常见渗漏问题分析

装配式建筑施工时,构件连接的重要界面是接缝部位,其既有着结构拼接功能也是防水系统的关键区域,预制构件有天然拼缝,处理不好易渗漏,像楼板拼缝、外墙板垂直接缝、屋面板拼接处尤其如此,常见的渗漏问题有接缝开裂、密封材料老化脱落、灌浆料不密实、构件错位使缝隙不均等,施工时基层没清理干净、密封胶没涂饱满、接口凹凸不平、施工环境湿度温度不达标都会直接造成渗漏,设计节点构造不合理、预制构件加工误差超标、拼装误差积累也会给后期渗水留下隐患,不同材料热胀冷缩系数有差异,长期使用会使节点产生细微裂缝慢慢形成渗漏路径,统计显示,装配式建筑外墙渗漏八成和接缝处理有关,强化接缝区域渗漏防控技术对提升整体防水性能很关键。

##### 4.2 接缝密封材料及施工工艺选择

密封材料选得对与错、施工工艺合理与否,对确保接缝部位密封性能持久可靠非常关键。现在常用的密封材料有聚氨酯密封胶、硅酮结构胶、丁基橡胶密封条,聚氨酯密封胶弹性好、耐候性强、附着力佳,在外墙、屋面、窗框等部位接缝处理时应用广泛,硅酮结构胶粘接性能好且抗紫外线老化能力优异,在幕墙这种对密封要求高的地方很适用,丁基橡胶密封条施工方便、恢复弹性好,主要用于预封缝隙和处理构件垫层。施工工艺方面,要先清理接缝部位的灰尘、油污、杂质,基层需干净、干燥、表面平整,用底涂剂处理接触面以增强黏结力,在接缝里均匀放置泡沫棒或者背衬材料来控制胶体厚度和形状,密封胶要用机械打胶或者手动注胶的方式填充,要保证胶体饱满无气泡,胶缝表面用刮刀抹成凸弧防止积水,打完胶之后需静置24h且不要扰动,让其充分固化,整个施工过程要

严格按照材料说明书和标准化施工流程进行,否则工艺出现问题的话,后期可能出现渗漏或者胶体脱落的情况。

##### 4.3 节点防水一体化施工策略

要让接缝区域防水性能更高效更可靠,当前装配式建筑技术发展的一个重要方向就是推进节点防水一体化施工,即节点设计、构件预制、现场安装和后期处理的整个过程里防水构造和结构构造同步设计、同步施工,形成多层次多道防线的系统防护体系。设计阶段需结合装配式建筑的特点明确节点防水构造层次,像防线布置、防水层搭接长度、排水坡度设计等要提前留出密封构造空间。构件加工时将部分防水构造和结构件一起预制,预埋止水条槽口、防水翼缘结构以减少现场拼装环节的防水风险。现场安装时利用工厂化裁切的密封材料和定型化工具实现标准化模板化安装操作使施工质量更一致,在接缝处增加外部密封保护层和内部柔性衬垫结构形成“内密封、外防水”的双重防线。要保证整体施工质量就得配套引入BIM模型预演、防水专项验收、现场视频监控等手段,让全过程防水质量能看到还能追溯,一体化节点防水施工策略可有效提升装配式建筑整体防水性能并减少维修次数和建筑生命周期成本。

#### 5 结语

装配式建筑是推动建筑工业化发展的重要模式,其结构安全与使用性能跟施工质量直接挂钩,本文系统探讨关键节点识别分类、构件吊装定位技术、连接施工工艺、接缝防水策略等内容并针对性地提出许多技术要点和优化措施,实践表明要让装配式建筑安全、高效、耐久运行关键是提高关键节点施工的标准化、精细化水平,以后得不断加深技术融合、创新施工工艺以推动装配式建筑高质量发展。

#### 【参考文献】

- [1]赵君.装配式混凝土结构施工现场连接技术研究[J].砖瓦,2025,11(6):181-183.
  - [2]周学军.预制装配式混凝土厂房结构体系的设计与应用[J].黑龙江科学,2025,16(10):148-150.
  - [3]葛宝峰.金属结构在装配式建筑中的施工技术与质量控制[J].中国建筑金属结构,2025,24(9):79-81.
  - [4]朱勇.装配式ALC板填充墙的施工技术与应用研究[J].现代工程科技,2025,4(8):65-68.
  - [5]苟立军.装配式建筑结构设计与施工衔接研究[J].城市开发,2025,11(7):142-144.
- 作者简介:张威(1989.10—),毕业院校:安徽建筑大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:中国建筑第八工程局有限公司,职务:项目经理,职称级别:中级工程师。

# 深基坑施工全过程智能化监测与多源数据融合分析方法研究

尹海勇 刘东宏

浙江省二建建设集团有限公司,浙江 宁波 315200

**[摘要]**深基坑工程的地质条件和施工环境复杂,传统监测方法在精度、响应速度和数据完整性上有一定局限,而全过程智能化监测体系的引入,能让基坑变形、支护结构和周边环境得到多维度的实时感知与预警;采用多源数据融合分析技术,可将来自GNSS、倾斜仪、测斜仪、激光雷达等设备的异构数据集成处理,有效提升数据分析的精确度和可靠性;构建多维信息融合模型,能为风险识别和动态决策提供支持,显著增强深基坑施工的安全性和智能管理水平。

**[关键词]**深基坑施工;智能化监测;多源数据融合;风险预警;信息集成

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17188 中图分类号: U231 文献标识码: A

## Research on Intelligent Monitoring and Multi source Data Fusion Analysis Method for the Whole Process of Deep Excavation Construction

YIN Haiyong, LIU Jianhong

Zhejiang Provincial Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

**Abstract:** The geological conditions and construction environment of deep foundation pit engineering are complex, and traditional monitoring methods have certain limitations in accuracy, response speed, and data integrity. The introduction of an intelligent monitoring system throughout the entire process can enable multi-dimensional real-time perception and warning of foundation pit deformation, support structures, and surrounding environment; By adopting multi-source data fusion analysis technology, heterogeneous data from GNSS, inclinometers, inclinometers, LiDAR and other devices can be integrated and processed, effectively improving the accuracy and reliability of data analysis; Constructing a multidimensional information fusion model can provide support for risk identification and dynamic decision-making, significantly enhancing the safety and intelligent management level of deep foundation pit construction.

**Keywords:** deep foundation pit construction; intelligent monitoring; multi source data fusion; risk warning; information integration

### 引言

城市建设向纵深发展,深基坑工程在高密度城区越来越常见,工程建设将其安全问题当作关注焦点,而传统监测方式很难满足现代工程对实时性、精度和数据全面性的要求,急需技术升级,智能化监测与多源数据融合技术发展较快,这给深基坑施工提供了全新思路,多种传感信息高效集成起来就能精准感知施工全过程,动态管控施工,为施工安全保障、工程决策优化提供坚实技术支撑。

### 1 深基坑施工智能化监测的技术现状与发展需求

深基坑工程技术复杂且施工环境多变,急需更高效、安全的监测手段,智能化监测技术因此产生,在工程实践里它潜力巨大且发展前景广阔。

#### 1.1 传统监测方式的局限性

传统深基坑监测大多靠人工巡查、全站仪测量、水准仪读数之类的方式,这些方式在早期工程里用得很广泛,但在响应速度、空间分布精度和数据连续性上有明显不足,人工监测频率有限导致施工全过程的实时掌控实现不了,单一传感器采集的数据维度也有限难以全面反映结构变形、土体变化、环境干扰等多重因素的综合影响,而且数据记录方式分散且没有统一的处理与分析平台,信息孤岛严重,基于数据驱动的科学决策难以得到支撑,工程界被

这些问题促使着积极寻找新型、集成化的监测手段以更好适应深基坑施工的动态、复杂需求。

#### 1.2 智能监测技术的发展路径

物联网、传感器技术和通信技术迅猛发展,使深基坑施工中智能化监测渐渐成为主流,现在GNSS定位系统、倾斜仪、测斜仪、光纤光栅、激光扫描和视频监控等技术已被广泛应用,无线网络能让这些设备将现场实时数据高效传至后台系统,达成自动采集、远程控制和智能预警,并且数据处理手段也开始朝着云计算和边缘计算拓展,使监测数据的分析更有时效性和深度,部分工程项目还试着引入人工智能算法分析监测数据的趋势、识别风险,从“被动响应”迈向“主动预判”,这一转变意味着深基坑智能监测进入以数据融合和智能决策为核心的新阶段。

#### 1.3 多源融合驱动未来发展

深基坑施工中信息来源广且监测数据有高频、多维、异构特性,全过程综合评估单靠一种技术难以支撑,多源数据融合是智能监测发展的关键走向,其融合技术既包含数据层面的格式兼容与清洗处理也涉及信息层面的异构数据关联建模与综合解读,将GNSS、位移传感器、激光雷达、视频图像以及环境监测数据融合起来能构建多维度、多尺度的感知体系使监测系统的鲁棒性和精准度显著提高,融合平台往

往配有统一的数据管理与可视化接口方便施工单位、设计人员和管理机构共享信息协同决策,以后基于多源数据融合的智能化监测系统会在算法优化、平台集成和工程适应性等方面不断突破以进一步保障深基坑施工安全高效进行。

## 2 全过程监测体系的构建与关键参数选取

深基坑施工过程复杂多变,保障工程安全的关键在于构建科学系统的全过程监测体系,合理选取监测参数优化体系架构便能对关键风险源动态管控。

### 2.1 监测体系构建原则

构建全过程监测体系要遵循系统性、阶段性、针对性和可扩展性原则,要系统性地全面覆盖基坑本体、支护结构、周边环境以及地下水等多个监测对象,根据施工进展动态调整监测重点以体现阶段性,开挖前主要监测原状土体与地下水,开挖过程中重点关注支护变形与周边结构响应,监测内容要与潜在风险因素对应起来以保证针对性,从而保证监测目标明确、手段有效,还要为突发情况和数据处理需求提供灵活支撑以体现可扩展性,让监测体系有良好的升级与集成能力,全过程监测体系的科学布局就靠这些原则打基础。

### 2.2 核心监测内容设置

深基坑施工时,主要结构响应和外部环境干扰这两大类应被监测内容覆盖,围护墙体的水平与竖向位移、支撑轴力、冠梁应变、基坑底部隆起等属于结构响应类,周边建筑物沉降、道路变形、地下管线位移及地下水位变化等涵盖在环境干扰类之中,施工扰动引发的土体应力变化、降水引起的地下水动力场调整也需关注。设置监测点位时,测点密度和深度要结合场地地质条件、支护形式、周边敏感目标分布合理布设以保证数据采集有代表性和敏感性。监测频率应根据施工阶段和风险等级灵活调整,高风险或者变形速率有显著变化的时候要提高监测频次,这样预警才能前移。

### 2.3 关键参数选取方法

多维度分析和实践经验积累是选取关键参数的依据,一方面能根据设计模型和历史工程数据确定像墙体位移量、支撑轴力变化率、周边沉降速率这种与变形、稳定性直接相关的参数,另一方面将数据敏感性和信噪比结合起来筛选出响应快、容易量化的特征指标以提高预警准确性,并且还得引入信息熵分析、主成分分析这种数据驱动方法挖掘各类监测数据内在联系找出有很强预测价值的变量,有智能化系统支持时参数选取过程就从人工经验判断变成数据驱动决策了,这不但让参数设定更科学还为后面的数据融合和风险识别打了基础,构建合理的关键参数体系能让全过程监测既高效又实用。

## 3 多源异构数据的采集技术与融合机制

深基坑施工环境复杂且监测数据有多源、异构、高频等特征,完善的数据采集技术与融合机制可实现信息高效整合与智能分析从而提升工程安全监控能力。

### 3.1 数据采集设备配置

多种高精度传感设备协同运行,多源异构数据采集才有下落,其中包括点位式、线性和面状感知方式,GNSS

接收机、全站仪、水准仪、测斜仪、倾斜仪、光纤光栅、激光雷达、结构健康监测传感器等都是常用设备,这些设备在采集方式、数据格式、时空精度、适用环境方面各有特点,能够分别承担位移监测、变形识别、地下水位测量、支护结构受力分析等不同任务,若要提升数据采集效率和连续性,一般要用无线数据采集模块和远程通信单元,从而使监测数据能够自动上传并可远程访问,而且要根据工程规模和风险等级制定分级布设方案,让数据采集空间覆盖良好且响应灵敏度不错,为后续融合分析打好基础。

### 3.2 异构数据处理流程

采集设备类型多样,产生的数据在格式、精度、采样频率和单位规范等方面有很大差异,得通过标准化处理来统一管理,在数据预处理阶段得先完成格式转换、单位归一、填补缺失值、剔除异常值,让各类数据有可比性和完整性,接着按空间和时间坐标把数据对齐同步,将不同设备的监测数据映射到统一时空框架里,再构建数据库或者数据湖来存结构化和非结构化信息,方便以后调用和交叉分析,这过程中要重视数据质量控制,引入动态校准机制和实时误差分析模型来提高数据可信度和分析精度,这一流程给多源异构数据深度融合和建模运算提供了有力支撑,是智能化监测系统运作的关键环节。

### 3.3 数据融合机制设计

实现多源监测价值最大的关键环节是数据融合,其目标为把多维信息有机整合起来以达成对工程状态的全面认知。融合机制通常有感知层融合、特征层融合和决策层融合这三个层次,感知层融合靠传感器网络协调来实现原始数据协同采集和初步判别,特征层融合通过主成分分析(PCA)、小波变换和卷积神经网络(CNN)等特征提取与转换方法识别多维数据里的关键信息模式,决策层融合重点是结合多个信息源的判断结果进行风险等级评估和预警决策,融合时引入贝叶斯推理、模糊逻辑、D-S证据理论等算法模型可提高处理复杂性与不确定性的能力。构建多源数据融合平台不仅能实现监测信息可视化和动态展示,还能支持实时风险感知和智能决策调度,从而助力深基坑施工全过程的智能管控。

## 4 基于融合模型的风险识别与动态预警方法

深基坑施工时,保障工程安全的核心在于及时准确识别潜在风险,构建融合模型就能协同分析多源数据并建立高效动态预警机制以有效防范工程事故发生。

### 4.1 融合模型构建方式

构建融合模型需结合工程特点、监测数据属性和分析目标并采用多层次、多方法的建模策略,常见的模型有基于统计学的贝叶斯网络、机器学习里的支持向量机(SVM)、随机森林、深度神经网络(DNN)等,多源监测数据输入这些模型后就能对基坑变形趋势、结构受力状态和环境扰动进行预测以及风险判定,为让模型适应性更强一般会结合数据驱动和机理模型的双重优势即融合监测数据时把基坑力学行为规律和历史案例经验嵌入其中

以增强模型在不同施工情境下的泛化能力,训练和优化时得充分考虑数据的不平衡性和时序性才能保证模型输出稳定且实时从而可靠地支撑后续预警系统。

#### 4.2 风险指标体系建立

要让融合模型有效运行,得先有科学合理的多维度风险指标体系,涵盖地层变形、支护结构响应、地下水变化、外部扰动等方面,其指标类型有实时监测量(像支护位移)、变化率(像日沉降速率)、稳定性系数(像安全储备系数)之类的,从历史数据归纳分析、事故案例回溯当中找出关键指标的临界阈值和联合触发机制,构建指标评价矩阵,引入像层次分析法(AHP)或者熵权法这样的权重分配策略以协调不同指标重要性,还能用模糊综合评判法或者灰色关联分析方法把多项指标融合评估来生成综合风险等级,给动态预警提供量化依据。

#### 4.3 动态预警机制设计

动态预警机制需具备“感知-识别-响应”闭环功能且能依据现场工况实时调整响应策略,要设定如蓝、黄、橙、红四级这样的多级预警等级,不同等级对应不同的风险水平和响应措施,当监测数据超阈值或者模型预测结果到达风险临界点时,系统就要自动触发预警并通过短信、APP或者控制平台给相关人员发送警报信息,还可进一步与GIS系统结合将空间分布可视化以直观反映风险位置和影响范围,预警系统要有自学习和迭代能力,通过反馈机制优化模型参数和阈值设置来增强系统适应性和长期稳定性,构建动态预警机制可使深基坑工程从“事后响应”转变为“事前干预”从而大幅提高安全管理水平。

### 5 智能化监测与数据融合在工程实践中的应用与成效分析

深基坑施工实践中应用智能化监测和多源数据融合技术,能显著提升工程信息感知能力与风险管控水平,实际案例分析可全面评估其应用成效和发展潜力。

#### 5.1 工程应用场景概述

多个大型城市基础设施项目里,地铁车站、高层建筑地下室、城市综合管廊等深基坑工程现场已广泛部署智能化监测系统,其中集成了GNSS、倾斜仪、激光扫描仪、水位计、光纤光栅等多种类型传感器,以实时监测围护结构变形、周边建筑沉降、地下水位变化与支护应力等关键参数,数据中心平台统一管理各类数据,实现采集、存储、处理与可视化展示这些数据,工程管理人员借助平台能快速掌握施工动态,部分项目还把视频识别与无人机巡检引入其中,实现监测区域的图像感知与三维重建,提升监测系统的完整性与响应速度,为施工安全提供坚实的技术保障。

#### 5.2 风险控制成果展示

智能化监测与融合分析技术支撑着,多个工程项目的风

险识别从“滞后响应”转成“主动预测”,构建融合模型后,系统既能识别异常变形趋势还能提前预警,从而实现工况动态调整。就像某地铁基坑项目,支护结构刚有点变形,系统就捕捉到小异常,预警机制及时引导加固处理,使得结构失稳扩展和次生灾害没有发生。融合平台还能分析监测数据的趋势并和历史数据对比,快速找到风险源,评估干预措施的效果。施工期和运营初期,项目整体沉降和侧移量都在设计允许范围内,施工安全性和结构稳定性大大提高,这表明智能化手段在风险控制上确实有用且应用前景广阔。

#### 5.3 管理效益与经验总结

技术手段因智能化监测与数据融合得到优化并极大推动了施工管理模式的转型,可视化平台让项目各方能数据共享、远程协同、实时决策从而大幅提高管理效率和沟通透明度,监测结果作为质量验收与施工评估的重要依据使管理过程的可追溯性与科学性增强,实践发现系统不稳定、数据准确性、人员协同能力强弱是决定成效的关键,根据工程应用反馈要加强设备维护、提升算法适应性、完善响应机制以让系统在复杂工况下的鲁棒性进一步增强,总结工程经验能给后续深基坑项目提供参考路径推动智能化监测与融合技术不断优化和大规模应用。

### 6 结束语

城市建设规模不断扩大使得深基坑施工的安全挑战愈发严峻,引入全过程智能化监测与多源数据融合技术可给工程提供全生命周期、全维度的信息支撑,从而有效提升风险识别的前瞻性与管理决策的科学性,构建完善的监测体系、集成先进的数据采集设备、设计合理的融合模型及动态预警机制已让多个工程实践取得显著成果,往后要继续强化技术集成能力与系统适应性以推动其在更广泛工程领域应用落地,进而给城市基础设施建设更安全、智能、高效的技术支撑。

#### 【参考文献】

- [1] 申文静.基于BIM与IoT的X地铁站深基坑施工安全监测及预警研究[D].北京:中国矿业大学,2022.
  - [2] 吴红翠.基于BIM的地下有轨交通深基坑施工智能预警监测技术[J].湖北理工学院学报,2022,38(5):45-49.
  - [3] 裴欣茹.深基坑施工复杂系统风险模型研究及其可靠性分析[D].武汉:武汉轻工大学,2024.
  - [4] 邹明哲.低碳视域下深基坑支护选型及智能化监测技术研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2024.
  - [5] 杨三建,王俊峰,杨明,等.超大深基坑逆作法施工智能监测技术应用研究[J].施工技术(中英文),2024,53(11):121-125.
- 作者简介: 尹海勇(1975.11—),男,江苏启东人,汉族,本科学历,工程师,就职于浙江省二建建设集团有限公司,从事项目负责人工作。

# 高层建筑施工中爬架安全控制技术研究

王 瑞

合肥市包河建设发展投资有限公司, 安徽 合肥 230000

**[摘要]**本研究聚焦于高层建筑施工里广泛运用的附着式升降脚手架(爬架)系统,重点剖析其在高空作业状况下的安全控制技术,系统梳理当前爬架施工的关键环节,探讨结构设计、传感控制、运行维护、应急响应等方面的技术路径和优化举措,研究结果显示,动态监测与风险预警体系的强化、操作人员技术素养的提升,是高效安全进行爬架施工管理的关键保障,能为高层建筑施工提供技术支持与管理依据。

**[关键词]**爬架技术; 高层建筑; 安全控制; 监测系统; 风险管理

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17199

中图分类号: TU731

文献标识码: A

## Research on Safety Control Technology of Climbing Frame in High-rise Building Construction

WANG Rui

Hefei Baohe Construction and Development Investment Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

**Abstract:** This study focuses on the widely used attached lifting scaffolding (climbing frame) system in high-rise building construction, with a focus on analyzing its safety control technology under high-altitude operation conditions. The key links of current climbing frame construction are systematically sorted out, and the technical paths and optimization measures in structural design, sensing control, operation and maintenance, emergency response, etc. The research results show that the strengthening of dynamic monitoring and risk warning system, and the improvement of operator technical literacy are the key guarantees for efficient and safe climbing frame construction management, which can provide technical support and management basis for high-rise building construction.

**Keywords:** climbing technology; high-rise building; safety control; monitoring system; risk management

### 引言

城市建设密度不断提升且超高层建筑数量迅猛增长,附着式升降脚手架(爬架)因高效又经济而在高层施工项目里被广泛应用,爬架系统在高处运行且依赖复杂机械与电控系统时易受环境干扰和人为操作失误影响而有较大安全风险,研究推广爬架施工安全控制技术很重要,本文从结构控制、监测系统、管理机制、应急响应等方面构建系统化爬架安全技术控制体系来保障施工顺利推进。

### 1 爬架系统安全控制的构成要素

#### 1.1 架体结构与防护设计技术

爬架系统安全运行的基础在于其架体结构,施工过程中平台的安全性能直接由架体结构的承载力、刚度以及整体稳定性决定,必须将其当作设计与施工控制的重点对象,设计架体结构时得按照具体建筑物的高度、区域风压等级、使用荷载标准等因素精确计算,让整体框架抗风、抗倾覆和抗震能力好,以满足高层施工复杂多变的使用条件,节点连接部位最好优先用高强度螺栓连接,必要的地方可以使用焊接工艺,从而增强节点刚性与受力传递的连续性,防止因连接松动使结构不稳定,防护设计上,架体外围要设置全封闭防护系统,用钢丝网、密目网和固定护栏组合布置,杜绝高空坠物、材料飞散这些安全隐患,爬架系统还得配置防倾装置、防坠落装

置、限位装置等安全保护部件,形成多重安全屏障,避免施工误操作、电气或机械故障引起的架体滑移、倾斜等严重事故,架体要适应不同建筑形体和施工工序的变化,要有可调节的水平支撑装置,调节支撑杆长度与角度能提高结构贴合度和平台稳定性,保证施工各阶段爬架系统都安全可靠运行。

#### 1.2 动力系统安全技术控制

动力系统是实现爬架升降动作的核心机制,整个施工平台的平衡与同步靠其安全运行来维系,这是高层建筑施工安全控制的重要环节,配置动力系统时应优先选择技术成熟、性能稳定的液压升降系统或者电动葫芦驱动装置以保证在频繁启停和高负载情况下稳定运行,动力源需有过载保护、过流保护和自动断电等功能模块避免电气故障或者负荷过重使系统失控,相关数据表明有智能保护功能的动力系统故障率能降低 30%,每组动力单元要有独立驱动和锁紧装置以便一个单元出故障时整体平台不下坠从而将事故范围控制到最小,所有动力装置要接入同步控制系统实现多点同步驱动升降时运行速度不一致架体就会倾斜、变形或者卡滞特别是 30m 的高层平台升降误差不能超过  $\pm 5\text{mm}$  这必须避免,动力线路布设要严格按规范关键部位要用软管包覆、电缆加护套来防护防止老化、磨损和短路。

### 1.3 电控系统及自动控制装置

在现代爬架施工里,传统人工操作渐渐被电控系统和自动化控制装置替代成为提高施工安全性与智能化水平的重要技术手段,电控系统的核心需配置可编程逻辑控制器(PLC)以协调各驱动单元,负责逻辑控制、升降同步、执行运行指令、处理故障报警等事务,系统集成位移、载荷、振动、电压、电流等多种传感器模块可实时采集和动态监测架体关键参数以保证所有运行状态在设定的安全范围之内,有数据表明电控系统安装完整后爬架运行事故发生率能降低四成,操作终端需配备触摸屏人机界面(HMI)以便操作人员直观查看架体升降状态、实时数据和报警信息且支持参数调整以及操作权限分级管理,控制程序里要嵌入多重安全逻辑如升降限位保护、平台偏移自动校正、防滑移控制算法、过载自动切断等以全面保证爬架运行的智能化和自适应性能,系统也需支持远程监控、数据上传和云端同步功能从而让项目管理人员通过移动设备远程操控爬架运行、调取运行日志、分析异常数据以提高现场调度效率和风险预判能力推动施工现场朝着数字化、智能化转型。

## 2 施工过程中的安全管理措施

### 2.1 操作人员培训与资质管理

爬架施工中,控制风险首要靠操作人员的专业技能和安全意识,保障施工质量和人员安全就得严格执行持证上岗制度,爬架组装、升降、维护相关人员都得经专项培训、考核,拿到《建筑施工特种作业操作资格证》,并且培训得涵盖设备结构原理、安全操作规程、应急处置技能等,还得结合现场实操课提高实战能力,统计显示,系统培训过的爬架操作人员违规操作率不到5%,没经培训的人员事故发生率却高三倍多,要建立人员档案管理制度,定期复训和技术更新,让操作人员知识体系与设备技术一起更新,而且管理人员也得定期组织班前安全教育,强化团队协作和应变意识,从源头上提高安全素养。

### 2.2 升降作业流程控制

爬架升降作业这一关键阶段最易发生事故,要建立严格的作业流程控制机制,爬架升降前需组织现场人员全面检查动力系统、电控系统、架体连接节点与荷载均衡情况,填好《升降作业安全确认单》且施工负责人签字确认后才能操作,爬架升降时要配备至少3名专职操作人员分工协作,其中一人总控,一人观测架体运行状态,一人巡查周边作业层安全,并且为保证同步需用同步控制系统,让所有驱动点启动、匀速运行以防止平台倾斜和卡滞,升降速度最好控制在6m/h以内并设置升降限位和紧急停止装置避免操作失误使架体超行程运行,爬架升降完成后要马上进行结构检查和复位确认,只有爬架稳定牢固了才能接着施工,如图1所示:

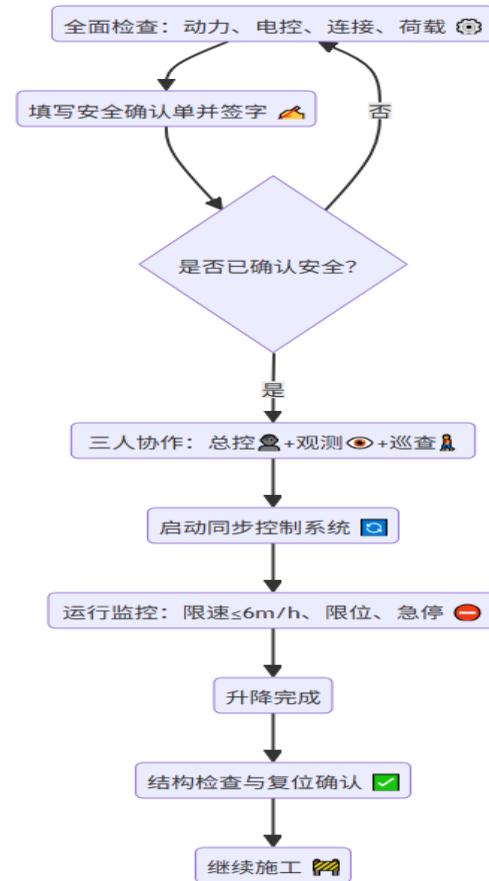


图1 爬架升降作业流程控制

### 2.3 作业环境风险控制

爬架施工时安全管理需适应作业环境变化且要求更高,恶劣天气、高温或夜间施工条件下要提前制定并实施环境风险应对措施,现场风速超6级(大概10.8到13.8米每秒)时应立即停止爬架升降作业并加固架体结构,降雨或结冰时要清理架体表面的水迹和冰霜以防止操作平台滑而出现坠落事故,架体上配置照明设备才能使夜间作业视线清楚从而避免误操作,为应对突发环境因素应配置风速传感器、温湿度监控仪等实时监测设备并将监测数据接入监控平台设置警戒阈值来推送预警,严格控制施工现场作业层材料堆放重量使平台总荷载不超设计承载力的85%以降低结构失稳风险,环境因素和设备运行动态协调就能实现爬架作业全过程风险闭环控制。

## 3 监测系统与信息化管理手段

### 3.1 实时传感监测系统部署

爬架施工安全管理把实时传感监测系统当作重要技术支撑,施工中这一系统能精准、高频地采集架体状态数据并实时反馈,应重点在系统中部署应力、位移、荷载、倾角、振动等多种类型传感器,且将这些传感器均匀布设在架体关键节点、导轨接口、动力模块等重要部位已形成多维度监测网络,采集荷载传感器数据能实时知晓作业层

材料堆载是否超标,利用位移与倾角传感器可识别架体有无不均匀沉降、倾斜移位等风险信号,电流与电压传感器能监测动力系统运行负荷避免过载或失控,所有传感数据由无线网络上传到中央处理平台并由 PLC 或者边缘计算模块配合进行初步分析处理以保证数据传输高效又稳定,系统要有数据冗余和断电缓存机制才能保障意外状况下数据的完整性和追溯能力。

### 3.2 视频监控与远程管理系统

信息化施工管理中,要实现动态监管、远程指挥和事故追溯,视频监控系统很重要,施工现场要安装分辨率高、夜视能力强的高清摄像头,重点位置如爬架内外空间、升降装置、操作控制区、人员进出口等都需覆盖以达成 360 度无死角监控,且摄像设备要具备防尘、防水、防震能力以适应复杂施工环境,还要支持远程变焦、云台控制、语音对讲功能,监控画面连接到云端平台或者本地服务器便能实现远程实时查看、视频回放、自动录制,并且能与项目管理系统、预警系统联动形成智能监管的闭环,这样管理人员通过电脑终端或者手机 APP 就能随时查看作业状态、及时掌握关键节点情况从而提升现场响应速度和指挥效率,要建立多级权限控制体系以保障监控数据隐私安全,还可将 AI 图像识别技术集成到监控系统里,从而自动识别操作人员没戴安全带、作业层堆载异常等违规行为以实现主动干预和风险防范。

### 3.3 信息集成与智能预警平台

要实现爬架系统智能化运行,构建集成化信息管理平台是核心环节,传感器数据、视频信息、人员定位、作业记录、设备状态等多维度信息平台都应加以整合以形成全场景、全流程的数字化管理系统,用统一数据库和大数据引擎能把施工状态全面可视化展示出来包括升降历史曲线、荷载变化趋势、异常报警记录等数据面板,智能预警算法平台需配套部署,将经验值和动态模型分析相结合对架体位移超限、电流异常、风速骤升等快要发生的异常状态提前预警,通过声音、短信、APP 推送等方式提示管理人员及时介入,预警等级可分黄色(建议干预)、橙色(需立即检查)、红色(强制停止)从而实现分级响应和闭环管理,平台还应有数据分析与统计功能用于事故原因溯源、运行效率评估和运维优化建议,为科学管理与持续改进提供决策依据,全面建设信息集成与预警机制能让安全管理从“被动反应”转变为“主动防控”,使爬架施工智能化水平得以全面提升。

## 4 突发事件应对与应急机制建设

### 4.1 常见突发情况应对预案

高层建筑爬架施工时,断电、动力系统故障、架体卡滞、倾斜偏移、受恶劣天气影响等突发事件常见,处置不当很容易引发重大安全事故,施工单位得制定全作业周期都覆盖的详细突发事件应对预案,突然断电时要配置备用

电源或者手动控制装置使爬架能安全停止或者回到安全位置,动力系统异常时马上启动联锁装置停止升降并安排专业人员排查设备以避免故障扩大,架体卡滞时得组织技术组分析原因(像同步系统失效、导轨卡阻之类的)并让有高级工操作资质的人员在架体稳定时排除故障,架体倾斜或者局部结构变形时必须马上警报让施工人员都撤到安全区域、封锁危险范围并启动应急结构加固程序,天气变化、风速突然增大、雷雨突然来袭的时候要提前通过预警系统发布风险提示、迅速停止作业并把架体降到最低安全位置锁定加固,应对措施都得有程序化流程图和操作手册且在现场张贴清楚、操作人员得熟练掌握并定期演练。

### 4.2 应急撤离与安全通道设置

要确保突发事件发生时施工人员能迅速有序撤离,就得结合建筑楼层结构和爬架运行区域,提前在现场规划、设置好多条独立应急通道并保证通道通畅无障碍,通道设置要遵循“最短路径”“最少交叉”“全封闭防护”原则以防止人员慌乱中穿越高危区域,内部楼层至少要有两处出口与每个作业层相通且配备应急梯、防滑踏板和夜间照明设备,安全通道要贴显眼的疏散图、方向标识、逃生灯带且逃生门或应急锁装置要便捷开关,作业区域也要设置避险区,架体靠近结构梁那儿预留安全平台以便突发情况时人员就地避险,每名操作人员的反光背心、头灯和缓降器、应急绳索等个人逃生设备应由施工单位配备,还得建立应急撤离广播系统,一接到报警信号就通过语音广播发布撤离指令引导人员沿既定路线快速安全脱离危险区域,关键节点要设紧急集合点,集合点要远离施工边界且有通风和遮蔽条件以方便后续清点人数和救援。

### 4.3 应急演练与响应机制

检验应急预案有效性、提升现场人员应对能力要靠建立系统化的应急响应机制和定期组织演练。施工单位每个季度至少组织一次包含停电撤离、卡滞救援、架体倾斜处置、设备失控处理等场景的综合性应急演练,演练分方案制定、流程演示、实战操作、总结评估四个阶段,项目部、安全员、操作班组、救援组等都要参与且要邀请第三方安全专家到现场指导,通过模拟真实环境和突发状态检验人员熟悉情况以及响应协同的效率并记录各岗位应急反应时间、到位情况和问题反馈。演练后要有完整的演练记录和问题清单,针对演练中的组织混乱、操作失误、路线不清等问题要赶紧修订完善应急预案和操作规程。应急响应机制要建立 24h 值班制度和事件上报机制并配置好多线通讯设备、应急物资包、救援工具箱等,以便突发事件发生时能马上启动响应流程。项目部要设专职应急指挥官来统一调度资源、发布命令、组织撤离和救援,使整个现场指令明确、响应及时、配合有序,有效降低突发事件的影响。

## 5 结语

高层建筑施工时,施工效率与人员生命安全和爬架技

术的安全管理息息相关，架体结构、防护设计、动力与电控系统要严格把控且施工流程规范、人员培训、环境风险控制在施工过程中也要做到位，这样事故发生概率就能有效降低，利用传感监测、视频监管、智能预警这些信息化手段可实现爬架状态的动态监管和精准预控，突发事件的应对上，完整的安全防线靠健全的应急预案、科学的通道布设、高效的响应机制构建起来，往后得一直推动技术集成和管理升级以构建智能、安全、高效的爬架施工体系。

#### [参考文献]

[1] 刘彬.高层建筑施工进度优化方案设计研究[J].砖瓦,2025,11(6):128-130.

[2] 李龙超,付旭,李龙,等.超高层异形外立面建筑附着式升降脚手架施工技术[J].建筑工人,2025,46(4):53-56.

[3] 夏宗军,李彼,陈志飞,等.超高爬架落地拼装逐层内收自动整体爬升施工技术[J].重庆建筑,2025,24(3):66-69.

[4] 马传普.超高层建筑中爬架与爬模混合支模施工技术的探讨[J].四川水泥,2025,12(2):117-119.

[5] 尹相刚.装配整体式剪力墙高层建筑施工关键技术应用分析[J].中国建筑装饰装修,2024,21(24):175-177.

作者简介：王瑞（1996.2—），毕业院校：安徽建筑大学，所学专业：建筑与土木工程，当前就职单位：合肥市包河建设发展投资有限公司，职务：工程部职员。

# 生物基聚酰胺建筑模板应用综合技术研究

郑硕 吕琎 罗凯旋 宋磊 陈琛

中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250000

**[摘要]**绿色建筑材料不断发展,生物基聚酰胺这种可再生、高性能的新型高分子材料在建筑模板领域有着广泛的应用前景,本研究围绕生物基聚酰胺建筑模板的工程应用展开,结合BIM深化设计与模板数字化加工,探索了模板设计、制作、安装与成品保护全过程的关键技术与工艺优化路径。针对框架结构与剪力墙结构,研究了新型模板及铝模组合加固方案,并通过模块化封模组件提升施工效率,减少损耗。研究还针对施工阶段的质量控制与安全管理提出切实可行的技术手段,旨在推动绿色建材在建筑模板领域的系统化、标准化应用。

**[关键词]**生物基聚酰胺; 建筑模板; BIM深化设计; 组合加固; 施工技术

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17196

中图分类号: TU4

文献标识码: A

## Research on Comprehensive Technology of Application of bio-based Polyamide Building Template

ZHENG Shuo, LYU Jin, LUO Kaixuan, SONG Lei, CHEN Chen

The Second Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan, Shandong, 250000, China

**Abstract:** With the continuous development of green building materials, bio-based polyamide, a renewable and high-performance new polymer material, has broad application prospects in the field of building templates. This study focuses on the engineering application of bio-based polyamide building templates, and explores the key technologies and process optimization paths for the entire process of template design, production, installation, and finished product protection by combining BIM deepening design and digital processing of templates. A new combination reinforcement scheme of formwork and aluminum formwork was studied for frame structures and shear wall structures, and modular sealing components were used to improve construction efficiency and reduce losses. The study also proposes practical and feasible technical means for quality control and safety management during the construction phase, aiming to promote the systematic and standardized application of green building materials in the field of building formwork.

**Keywords:** bio-based polyamide; building templates; BIM deepening design; combination reinforcement; construction technology

### 引言

建筑模板作为混凝土结构成型的关键支撑工具,其施工效率与成品质量直接影响建筑整体性能。传统模板存在重复利用率低、损耗大、施工效率高等问题。随着绿色建筑理念的发展,生物基聚酰胺材料因其优异的力学性能、耐候性能和环保可再生特性被引入建筑模板领域。本文以实际工程为依托,围绕生物基聚酰胺模板在施工全过程中的深化设计、成品制作、安装加固及质量控制展开综合性技术研究,提出一整套可复制、可推广的施工技术方案。

### 1 BIM深化设计与模板定尺加工技术

#### 1.1 BIM协同设计流程与精细化模型建立

在项目设计阶段,BIM技术通过三维信息建模手段,有效整合建筑结构、构件节点、施工顺序等信息,实现多专业之间的协同。设计团队联合凯赛生物企业,充分利用其在材料性能参数及工艺加工方面的技术积累,基于建筑结构模型开展模板系统的深化设计。设计人员借助BIM平台可对模板几何参数、安装方式、连接节点等进行可视化模拟与碰撞检测,确保最终模板系统的可制造性与可装配性。此外,通过对模板所承载混凝土压力、受力边界的数值分析,能够在设计阶段提前识别薄弱区域并进行结构

优化,为后续高效施工打下基础。

#### 1.2 模板定尺加工及数字化制造流程

模板的定尺加工是保障构件精度、提升拼装效率的关键环节。借助BIM模型中输出的标准尺寸数据,可直接对生物基聚酰胺板材进行智能化切割。采用先进的数控切割、自动拼装设备,将模型参数快速转化为加工指令,实现“拿到即装”的模板预制逻辑。这种数字化制造方式打破了传统依赖人工量测、现场裁剪的低效模式,大大降低了人为误差的风险,确保每一块模板都能够精准匹配构件设计。在凯赛生物与施工单位的联合试点中,该加工方式已表现出尺寸稳定性好、拼装速度快、返工率低等一系列优势,显著提升了模板施工的标准化水平。

#### 1.3 模板组件化设计与现场装配效率提升

为适应不同结构构件(如梁、柱、剪力墙)的多样化形态需求,模板在深化设计中采用了组件化构造思路。将传统整块模板划分为标准单元模板、阴角组件、连接条等模块化单元,不仅便于在工厂端进行预制与批量生产,也提高了施工现场的快速装配能力。尤其在采用“带梁底阴角”的一体化模板组件后,梁柱模板的拼接变得更加简便,显著减少了销钉数量与固定工序,拆装效率提升达30%

以上。组件化的模板系统还利于施工现场的存储、运输与再利用管理,有效降低了损耗率并实现模板资源的循环利用,为绿色施工理念提供有力支撑。

## 2 模板结构加固与连接创新

### 2.1 框架结构模板加固的“子母模板”应用

框架结构中墙体和板面模板的传统加固方式普遍存在着接缝不严、错位漏浆、拆装繁琐等问题。为此,本研究设计了一种凹凸托槽式的“子母模板”系统。子母模板通过模板本体一侧设置凸榫,另一侧设置凹槽,在安装过程中可实现模板之间的精确定位与稳定嵌合,显著提高模板接缝处的整体性。同时,采用背楞压板对模板和背楞进行夹紧固定,形成完整的受力闭合系统,在混凝土浇筑过程中能够有效抵抗侧压力,减少因模板错位导致的混凝土漏浆现象。此外,背楞压板的引入还便于模板后期拆除,提高了模板系统的可重复利用性和经济性。通过项目试验段施工验证,该加固方式下的模板拼装更迅速,混凝土表面成型更加平整,质量控制显著优于传统方式。

### 2.2 剪力墙结构的“新型模板+铝模”组合技术

剪力墙作为承重结构,对模板系统的整体刚度和支撑强度要求更高。课题针对这一特点,提出“新型模板+铝模”组合加固工艺。该工艺中,铝模板作为主体承载骨架,具有重量轻、强度高、重复使用次数多等优势,可为剪力墙模板提供稳定支撑结构;新型生物基聚酰胺模板则用于填补铝模板在边角、孔洞等特殊部位的空隙,增强局部成型质量。两者通过背楞与销钉系统连接为整体,形成刚柔并济的复合模板结构,不仅提高了整体稳定性,还优化了构件细部的成型精度。该组合方式尤其适用于高层结构、大跨度剪力墙区域,在保障安全的前提下显著缩短施工周期。现场实测数据显示,该方案比单一铝模施工效率提高约20%,后期修补量减少约35%,在结构精度与经济效益之间实现良好平衡。

### 2.3 梁柱连接部件的模板一体化封模设计

传统梁柱连接节点模板安装通常需多次拼接、反复加固,耗时费力且安装质量不易统一。本文依据生物基聚酰胺材料良好的可塑性和成型稳定性,研发出带梁底阴角的一体化封模组件。在设计上,梁柱模板预制成整体封模单元,可直接覆盖梁底及两侧边角,无需额外拼接、填缝。这一设计有效减少模板施工中使用的销钉数量,降低现场加固难度,提高了整体构件的装配效率与施工安全性。实测数据显示,使用该一体化组件后,模板装拆速度提升约40%,销钉数量减少近50%,显著提升了施工效率,并有效降低材料损耗率。该技术的成功应用不仅简化了施工流程,也为标准化、装配化施工方式提供了新模板系统的技术支撑。

## 3 施工过程中的质量控制与安全技术

模板安装质量是确保混凝土结构成型精度与尺寸稳

定的前提。施工现场应建立完善的模板安装标准化作业流程,从模板支撑、定位、连接、调整到整体加固,均需制定明确的技术参数与操作规程。首先,在模板支撑环节,通过统一配置钢管、扣件、可调支撑等支撑系统,并制定相应的间距控制标准,以确保模板安装的水平度与垂直度。其次,在连接与调整环节,应推广使用标准化连接件与限位装置,如预制销钉孔位、防错定位卡具等,减少因人工误差造成的拼缝错位、接缝开裂等问题。

此外,针对模板易错工序进行设计预控也是重要措施。如对子母模板设置方向指示标识,连接部位采用对称嵌合结构,在设计上限制错误操作空间;对不同构件的模板组件在出厂时贴附清晰标识编号,便于现场工人快速识别与拼装,降低重复调整的几率。这类“工程+设计”相结合的防错体系,有效提升了模板安装的一致性与施工效率,为后续混凝土浇筑创造稳定可靠的支撑条件。

### 3.2 模板施工成品保护与损耗控制措施

模板作为施工中高频使用的构件,其耐久性与重复利用率直接影响项目成本与资源使用效率。生物基聚酰胺材料具有优异的抗冲击性能与耐候性能,可显著降低施工与运输过程中的物理损伤概率。在运输阶段,通过定制运输架和模板防护套,防止模板在搬运途中因堆放不当造成变形、撞裂;现场作业时,应统一设置模板堆放区,并建立起保护围挡与防晒、防水措施,保障其物理性能稳定。

为进一步减少模板损耗率,应在模板边角和拼缝部位加装柔性缓冲垫或橡胶垫片,降低钢筋、混凝土对模板边缘的冲击磨损。在混凝土浇筑前进行模板预润滑处理,采用环保型脱模剂减少模板与混凝土间的附着力,从而降低脱模阻力,延长模板使用寿命。经实际工程检验,该模板系统的平均损耗率显著低于传统胶合板与钢模板,且周转次数可达传统模板的2~3倍,极大地提升了经济效益和资源利用效率。

### 3.3 安全施工保障及高空作业安全防护技术

模板施工尤其是高空作业区域,存在高空坠落、模板倾覆、材料掉落等多种潜在风险,必须建立严密的安全管理体系与现场防护机制。施工单位需从组织管理、人员培训、设备设施三方面入手,全面提升施工安全水平。

在组织管理方面,施工前应编制专项施工方案与安全技术交底文件,明确高空作业流程、作业区域划分与安全操作规范;对施工班组进行入场安全教育与实操演练,确保每位操作工熟悉模板安装方法与应急处理措施。技术管理层应每日进行模板架设检查,重点关注连接件是否牢固、支撑是否稳定、平台是否有松动隐患。

在安全防护设施方面,施工区域应设置连续封闭围挡、高空作业安全绳、平台护栏、模板防倾覆支架等防护装置,同时为作业人员配备符合标准的安全帽、安全带、防滑鞋等劳动防护用品。作业过程中应限制非作业人员进入高风

险区域，设立专人监管，实施高处作业实时联动机制。

此外，可引入信息化手段进行施工过程监控，如安装位移监测传感器、视频监控设备等，实时掌握模板系统变形趋势及高空作业状态，一旦出现异常可及时预警、处理。通过这一系列技术与管理措施的配套实施，显著降低了模板施工安全风险，保障了现场作业人员生命安全与施工整体顺利推进。

#### 4 创新点分析与经济效益评价

##### 4.1 生物基材料力学性能对模板设计优化支撑

聚酰胺类材料以其优异的力学性能成为模板设计优化的重要基础。其本体具有较高的抗拉强度与抗弯强度，能够承受混凝土浇筑过程中的各类侧向荷载而不发生形变或断裂，为模板大面积定型构造提供了强有力的支撑条件。同时，该材料具备良好的韧性与回弹性，即便在多次使用、反复装拆的条件下，模板边角部位也不易破裂、劈裂，从而保持较长的使用寿命。

此外，聚酰胺的可塑性强，加工灵活，可根据构件结构需求实现阴角、斜边、曲面等复杂形状的成型，有效满足异形结构的施工需求。在模板模块化设计中，可将梁、柱、墙等不同构件部位预设为一体化模板组件，通过统一设计与加工，大幅简化现场组装流程，减少误差累积，为高质量施工提供保障。

##### 4.2 模板可重复利用性与绿色施工优势

生物基聚酰胺模板具备优异的耐候性能，在高温、潮湿、阳光直射等复杂施工环境下仍能保持材料尺寸稳定性，不易膨胀、开裂、变形。其表面光滑致密，具有良好的脱模性，配合环保型脱模剂可实现快速清模、脱模，减少残浆附着，提升混凝土构件的表面质量。

与传统木模板、钢模板相比，该材料的模板平均可周转使用 50 次以上，部分标准化组件可达 60 次以上，远高于胶合板类模板的 15~20 次使用寿命。高周转率显著降低了模板更换频次与采购成本。同时，聚酰胺材料本身可回收再利用，加工过程中无有害气体释放，废料可二次熔融造粒，符合绿色建筑与节能减排政策导向，具备良好的环境友好性。

在施工现场，该模板系统质量稳定、损耗小、可分类叠放，有利于工地物料管理与运输装卸，减少了临建空间需求与二次施工废弃物的产生，对建设单位和施工单位均具有良好的综合管理效益。

##### 4.3 施工效率提升与经济成本对比分析

从施工效率角度来看，生物基聚酰胺模板系统因采用

了定尺加工、子母模板嵌合、预制拼装组件等一体化设计理念，显著缩短了安装与拆模时间。一体化封模组件使梁柱节点模板可一次性装配就位，销钉使用量减少约 50%，装拆效率提升 30% 以上，施工周期平均可缩短 3~5 天，尤其在大体量工程中体现出显著的时间效益。

在混凝土成型质量方面，聚酰胺模板表面平整致密，浇筑成型后的混凝土构件表面光洁度高，棱角整齐，普遍可达到免抹灰、直接涂料施工的标准，大大节省后期二次找平与抹灰的人力与材料成本。以某中型住宅项目为例，采用该模板系统后，后期抹灰工序减少 80%，每栋楼节省人工成本约 5 万元，材料成本减少约 3 万元。

整体而言，在材料本体成本略高于传统模板的情况下，通过高周转次数、免抹灰处理、缩短工期及运输损耗减少等多维度节支，实现了整体模板施工成本的下降。经综合测算，该模板系统在多个工程中较传统模板整体施工成本节约 10%~15%，经济效益显著。

#### 5 结语

生物基聚酰胺建筑模板凭借其优异的力学性能、耐候性与高重复利用率，在模板设计、加工、安装及施工安全等环节中展现出显著优势。结合 BIM 技术与数字化制造手段，实现了模板标准化、模块化、绿色化的施工模式，有效提升了施工质量与效率，降低了材料损耗与施工成本。其在框架结构与剪力墙结构中的创新加固方式、一体化封模组件及高空作业安全体系，为建筑工业化与绿色施工提供了切实可行的技术路径，具有广阔的工程应用前景与推广价值。

#### 【参考文献】

- [1]周亮.生物基聚酰胺 55(PA55)的合成及其性能研究[D].上海:东华大学,2022.
- [2]梁爽.生物基改性二聚酸聚酰胺及长链二酸聚酰胺酯的合成及性能研究[D].北京:北京化工大学,2024.
- [3]傅雨祺.草酸系生物基线型聚(酰胺-脲)及交联聚酰胺的合成及性能研究[D].北京:北京化工大学,2019.
- [4]刘畅.二氧化碳/生物基糠醛单体参与的多组分聚合反应研究[D].山东:烟台大学,2024.
- [5]金慈.生物炼制合成生物基聚合物及前体的谷氨酸棒状杆菌合成生物学研究[D].上海:华东理工大学,2021.

作者简介：郑硕（1996.9—），毕业院校：黑龙江省科技大学，所学专业：土木工程，当前就职单位：中建八局第二建设有限公司，职务：项目总工程师，职称级别：中级工程师。

## 静力切割工艺在复杂地质条件下基坑支撑拆除中的适应性研究

赵昊 徐善亮

浙江省二建建设集团有限公司,浙江 宁波 315200

**[摘要]**基坑支撑拆除作业在复杂地质条件下挑战多多,像地层不均、地下水丰富以及邻近结构物稳定性要求高这些情况都是挑战,而静力切割工艺有低振动、低噪声、精准控制等优点,在这种环境里适应性良好。研究对静力切割在软弱地基、富水层和密集城市建成区等条件下的应用效果从工艺参数、安全控制、施工效率这些方面进行了分析评估,结果显示,静力切割可有效减少对周边环境的不良影响,确保基坑拆除时的稳定和安全。

**[关键词]**静力切割;复杂地质;基坑支护;支撑拆除;适应性分析

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17187 中图分类号: TU746 文献标识码: A

### Study on the Adaptability of Static Cutting Technology in the Demolition of Foundation Pit Supports under Complex Geological Conditions

ZHAO Hao, XU Shanliang

Zhejiang Provincial Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

**Abstract:** The demolition of foundation pit supports poses many challenges under complex geological conditions, such as uneven geological layers, abundant groundwater, and high stability requirements for adjacent structures. Static cutting technology has the advantages of low vibration, low noise, and precise control, and has good adaptability in such environments. The study analyzed and evaluated the application effect of static cutting in soft foundation, rich water layer, and densely populated urban built-up areas from the aspects of process parameters, safety control, and construction efficiency. The results showed that static cutting can effectively reduce the adverse effects on the surrounding environment and ensure stability and safety during excavation demolition.

**Keywords:** static cutting; complex geology; excavation support; support dismantling; adaptability analysis

#### 引言

城市建设朝着深层次、高密度发展,复杂地质条件下的基坑工程越来越多,施工中支护结构安全拆除成了关键环节,但是传统拆除方式往往有高噪声、高振动以及不确定风险,难以符合精细化施工与环境保护需求,而静力切割技术安全性和环保性高,工程界逐渐关注它,在软弱地基、富水层和邻近建(构)筑物区域有独特优势,因此探索它在复杂地质中的应用潜力,对提高基坑工程整体安全性和施工质量意义重大。

#### 1 复杂地质条件下基坑支撑拆除的工程特点与技术挑战

基坑支撑拆除在复杂地质环境下进行,多种不确定因素摆在面前,既要保障结构安全,又得兼顾施工可控性,这就对拆除技术提出了更高要求。

##### 1.1 地质环境的多样性与不确定性

软弱土层、强夯回填、富水砂层、岩溶发育带及地质构造破碎带等是复杂地质条件的主要表现形式,基坑支护结构的受力模式与稳定性直接受这些地质背景的影响,在软弱地基或者粉质黏土里支撑结构受力往往比较大,沉降或者坍塌风险稍有扰动就可能被引发,富水地层中结构不稳定性被地下水的浮力与渗流作用加剧,支撑释放过程在拆除的时候就变得更加敏感,支撑体系的非线性响应也可

能被地质条件的不确定性引发,拆除作业风险就难以预测,首要前提是准确掌握地质情况并且实时反馈到施工决策中去,这样才能控制风险。

##### 1.2 施工环境与空间约束的复杂性

城市核心区域或地质构造交汇带常出现复杂地质条件,这里施工空间狭窄作业面受限且支撑结构大多靠近地铁、隧道、建筑物之类的敏感设施,在这种环境下,传统切割或拆除方式会有高振动、高噪声、不规则断面等状况,邻近结构物可能因此变形甚至被破坏从而安全隐患增加,空间环境限制设备布设、人员调度、渣土运输等作业环节致使施工组织协调难度增大,施工时间、环保标准、扬尘控制等方面要求严格进一步提升了拆除任务复杂性,施工过程要高度精细化且工艺要有低扰动、高可控性的特性。

##### 1.3 拆除过程的风险控制与应急应对

复杂地质环境里,基坑支撑拆除不只是物理拆解,更是对整个基坑结构状态进行重新分配和调节,某段支撑拆除后,荷载由剩余结构重新承担,拆除顺序和时间控制不合理时,结构极易突变,地下水位频繁变动或者地基承载力突变区域尤其如此,支撑拆除可能使围护结构失稳,甚至引发坍塌事故,这一挑战面前,拆除技术要有良好响应性和灵活性以适应突发地质变化,配套监测系统得实时反馈支撑受力、周边位移、沉降变化等参数,给调整拆除策略提供依据,要建立应急预案机

制,突发情况能迅速响应及时止损,保障工程安全。

## 2 静力切割工艺的原理与关键技术参数

静力切割这种拆除工艺无冲击、低扰动且适应性和安全性都很优异,在复杂地质条件下的基坑支撑拆除作业里被广泛应用。

### 2.1 静力切割的基本原理

静力切割工艺主要靠液压驱动系统给金刚石绳锯或液压剪等切割工具施加恒定又可控的推力,在无冲击、振动小的情况下完成混凝土、钢材等结构的分割作业,其工作原理是液压系统高压传动加上定向控制,让切割刀具按预设轨迹运动使结构连续均匀地断裂,跟传统爆破、风镐或者冲击锤相比,静力切割作业时几乎不产生冲击波、粉尘和飞石,对周边环境影响特别小,该工艺适合用于对噪声、振动和变形控制很严格的地方,如城市核心区、地铁隧道附近或者历史建筑旁边这样的工程环境,通过调整液压系统参数和切割工具配置能适应不同材料、尺寸还有拆除节奏的需求,灵活性和可操作性非常高。

### 2.2 关键技术设备与工艺参数

静力切割设备主要由液压泵站、金刚石绳锯机、液压剪刀、导轨系统和控制单元等构成,其中液压泵站给整个系统提供恒定高压,是影响切割稳定性与效率的关键,金刚石绳锯靠高速循环运动精准切割混凝土结构,在大型或厚重构件拆除时较为适用,液压剪适合切断钢筋支撑或截面小的构件,导轨系统能确保切割路径稳定又精准以防止偏移或跳动,液压系统压力、刀具进给速度、绳锯张力、切割冷却方式、切割时间控制等属于关键工艺参数,合理设置这些参数对保证切割效率、控制切口质量、避免结构异常受力极为重要,在高强混凝土或者钢筋密集区,需要适当加大刀具进给压力并使用强制水冷系统,否则工具会过热烧毁且切割面裂缝会扩展,施工之前,要根据支撑结构的尺寸、材料强度、周边环境、拆除顺序来校核系统参数、选择设备,从而让工艺适配、现场稳定。

### 2.3 技术优势与适用边界

静力切割技术有高精度、低扰动、可控性强等特点,在复杂地质条件下的基坑支撑拆除时优势明显,能在不影响周边结构稳定性的情况下精准分割、按序拆除,有效降低结构突然释放的风险,施工时噪声小、粉尘少、无震动,能满足环保和城市施工规范,再次这种技术适用于钢筋混凝土、型钢支撑、预应力构件等多种材质和构造类型,在不同环境下适应性都很广泛,不过静力切割也有适用范围,像极厚钢板、高强钢构件或者空间太狭小的工况,设备布设和操作空间会受限,可能影响切割效率和质量,并且高强度切割对设备耐久性和施工人员技术水平要求高,实际应用时要结合工程特点综合评估,留够施工操作空间和安全缓冲区,保证切割顺利高效。

## 3 静力切割在典型复杂地质环境中的应用分析

多种复杂地质环境下静力切割有着不错的工程适应

性,支撑拆除时地质条件复杂会带来施工难点和安全挑战而静力切割能有效应对。

### 3.1 软弱土层中的应用特点

淤泥质土、粉质黏土这类常见于沿江沿海或者填土区域的软弱土层,其特点是承载力低、对沉降敏感,在这种地质状况下开展支撑拆除作业时,围护结构位移或者土体失稳可能会被任何震动或扰动诱发,而静力切割工艺有着“无冲击、低扰动”的特性,使其在软弱地基中拆除时能实现高稳定性,且液压控制设备能精确分配切割力,防止局部应力集中,削减支撑突然释放给围护结构带来的影响,此工艺与实时监测系统配合使用,在切割时能够动态掌握支撑受力和围护变形的状态,一旦出现异常马上调整施工参数,就能有效避免次生地质风险,和传统冲击式拆除方式比起来,静力切割在这种地质条件下,施工可控性和安全性方面优势明显。

### 3.2 富水砂层中的稳定控制

富水砂层或者含水粉砂层里地下水不少且渗透性强、结构松散,在拆除基坑支护时很容易出现管涌、渗流或者局部突砂等问题,传统拆除方法作业时会产生振动可能扰动地层使地下水流动态改变增加支护体系失稳的风险,静力切割技术切割过程稳定又缓慢能有效控制对地基水动力条件的扰动,液压绳锯或者剪切系统在没有冲击的情况下缓慢分离支撑构件可避免瞬时应力释放防止地层扰动更严重,而且可以在切割前后设置止水帷幕或者回灌措施进一步让作业区水力环境稳定,工程实践显示富水地层里用静力切割拆除钢支撑或者混凝土支撑能把基坑变形控制在合理范围且突发性水害事故也会大大减少。

### 3.3 城市密集区中的应用优势

在城市建成区、交通枢纽或者邻近历史建筑的施工环境里,振动、噪音以及空间扰动的控制在拆除过程中有极高要求,且这类区域地质条件复杂多变,像回填土层和天然地层交错分布,还有地下管线、地铁或者桩基等多种构筑物相叠加,而静力切割技术在这种环境下的最大优势就是“绿色拆除”,其设备体积小能适应狭小作业面,施工时基本无粉尘和碎屑飞溅且噪音比传统方式低很多,切割面整齐可直接用于后续施工定位和接驳,在多层支撑体系中,静力切割可逐段施工按顺序释放结构应力以防止局部卸载造成整体失稳,在狭小地下空间作业时,静力切割凭借定制刀具和多角度安装装置能实现高精度作业,从而为复杂城市环境下的基坑支撑拆除提供了安全高效的技术手段,工程案例显示,这一技术在北京、上海等超大型城市的轨道交通建设和深基坑施工中应用效果良好。

## 4 静力切割工艺对周边环境与结构安全的影响评估

在复杂地质和高密度城市环境下,周边结构与环境在基坑支撑拆除时的扰动控制极为关键,而静力切割工艺低扰动、高可控,使其成为安全拆除的重要手段。

#### 4.1 减少振动与噪音污染的环境效益

传统支撑拆除技术中的风镐、切割锯片、冲击破碎等作业方式，强烈振动和噪音总是如影随形，不但扰民特别厉害，还容易让邻近建筑产生次生结构风险，在医院、学校、文保建筑等敏感区域附近时，强噪声干扰明显，可能引发建筑物微裂缝扩大、饰面脱落之类的问题，而静力切割靠液压驱动系统稳稳地输出切割力，施工时基本没有冲击波传播，设备运行声音比传统机械小，能有效控制噪音污染，施工实践显示，静力切割用于围护结构、钢筋混凝土梁体等构件时很安静，施工扰动降低了，施工声环境也能满足环保法规的严格要求，在营造舒适施工环境方面优势很显著。

#### 4.2 对周边建筑物结构的保护作用

深基坑拆除作业时，地铁隧道、桩基、旧建筑基础等周边结构物常处于应力敏感区，拆除方式不当很容易使结构受力重分布从而导致结构沉降变形或者裂损；静力切割靠精确力学计算和切割路径设计，有着“柔性控制+定向释放”的技术策略，能慢慢释放关键节点的结构应力以防止结构突变，与突发性爆破、震动切割相比，静力切割能在结构受控时逐步卸载，减少对基坑围护结构、邻近地基的扰动，保证周边结构稳定不被破坏；拆除时同步设置沉降观测点、倾斜计、应力计等监测装置，可实时反馈拆除时结构响应数据，为及时调整施工策略提供依据以提高整个系统的安全控制能力。

#### 4.3 控制基坑变形与地基扰动的工程价值

在基坑拆除时支撑结构为临时受力构件，拆除它会使围护体系受力重新分布，也许会导致围护内移、基底变形以及地表沉降，在松散或有填土、淤泥层等不良地质体的区域，传统拆除方式振动大且力输出不稳定，容易造成地层扰动、沉陷甚至渗漏等情况，而静力切割工艺用持续稳定的切割力实现“渐进式”卸载，控制地基变形过程防止结构突变，并且能配合反力支撑和临时固定装置对切割后的短期支撑结构予以支撑，待应力重新分布后再继续拆除，从而提高和地质响应的协调性，工程实践显示该工艺可将围护变形控制在设计预警线之内，地表沉降趋势平稳，安全保障作用良好。

### 5 静力切割工艺在复杂地质基坑拆除中的适应性与优化路径

复杂地质条件下有基坑支撑拆除需求，静力切割工艺因稳定、安全、环保而被广泛应用，但仍需结合实际环境不断优化以提升其适应能力与施工效率。

#### 5.1 适应多样地质环境的能力

静力切割工艺的地质适应性很强，在软弱地基、富水层、岩溶地带等多种复杂地质里都能稳定作业，软土环境下因其低振动特性支护系统不会被扰动，富水地层中合理布设止水系统并同步控制切割就能有效降低突涌风险，在有密集结构物的环境里由于设备体积小且切割精度高狭小作业面也能适用，精准的液压控制系统、可定制的刀具配置、模块化的设备布设方式让静力切割工艺适应性高，

能根据不同地质调整工艺路径以柔性应对复杂地质变化且拆除作业的安全性和可控性也显著提高。

#### 5.2 制约工艺效率的关键因素

静力切割在工程稳定性上有优越表现，但多种因素影响着它的作业效率，设备运行速率和刀具磨损速度直接决定施工进度，高强度构件或者厚重钢支撑的切割周期就比较长，而且作业环境对设备布设有限制，空间狭小、地下管线密集等情况会使设备进出和操作变难，施工时对冷却、排渣、人员配合等环节依赖程度高，稍微一延误整体节奏就受影响，要优化工艺流程、进行人员培训和加强现场管理来提升整体施工效率，解决适应性强但进度慢的问题，保障工程质量与效率。

#### 5.3 优化路径与发展方向

要提升静力切割在复杂地质环境中的表现，需从技术、装备和组织管理这三方面共同推进，技术上要加强建设针对不同地质类型的切割参数数据库并推动智能化切割系统发展以达成对切割力、进给速率、材料反应的实时调控，装备上要研发更轻便、更模块化的切割设备来适应极限空间条件下的布设需求，管理上要建立标准化操作流程和多专业协作机制以提高作业效率和现场应急能力，推广BIM等数字建造工具来支撑拆除仿真分析和工艺优化也是提升适应性的重要方向，多维优化之后，静力切割工艺在复杂地质条件下会更安全、更灵活且工程价值更高。

### 6 结语

基坑支撑拆除在复杂地质条件下进行，这使得施工技术的安全性、可控性与环境适应性要达到更高要求，而静力切割工艺具有低扰动、低噪声、高精度等优点，在软弱地基、富水砂层和城市密集区域这些典型场景里已表现出广泛适用性，若优化工艺参数、强化装备适配、完善管理机制，就能让它在复杂工况下施工效率与安全保障能力进一步提升，以后静力切割要是和智能化控制、数字化施工手段相结合，在绿色、安全、精细化拆除方面会发挥出更大潜力与价值。

#### 【参考文献】

- [1] 李志宏,廖建国,何康.地质复杂的坑中坑支护与内支撑分段拆除研究与应用[J].安徽建筑,2020,27(12):96-98.
- [2] 郑世伦,梁旭之,刘斌,等.混凝土切割技术在危桥改造中的应用[J].交通建设与管理,2022(1):70-73.
- [3] 杨玉友,陈小波.绳锯静力切割技术在金阳电站坝体拆除工程中的应用[J].小水电,2024(3):21-23.
- [4] 吴德旭.城市老旧桥梁拆除——静力切割法拆除南京铁心桥变截面预应力钢筋混凝土连续梁桥老桥上部结构施工工艺[J].运输经理世界,2024(35):102-104.
- [5] 张超.无损静力切割拆除内支撑的安全控制要点[J].四川建筑,2025,45(3):198-200.

作者简介：赵昊（1993.10—），男，浙江宁波人，汉族，本科学历，工程师，就职于浙江省二建建设集团有限公司，从事建筑工程管理工作。

# 大体积混凝土施工裂缝控制技术研究与工程应用

赵 言

中国二十二冶集团有限公司，河北 唐山 063000

**[摘要]**大体积混凝土施工时，因水化热易集聚、温度梯度往往较大等情况会使它极易产生温度裂缝，从而严重影响结构安全与耐久性。为有效控制裂缝形成，需要对材料选用、配合比优化、浇筑工艺、养护措施和温度监测等方面进行系统分析，提出温控和应力控制并重的综合技术体系，并用典型工程实例验证其可行性和效果。结果显示，合理的裂缝控制策略可显著降低开裂风险，确保结构整体性能和长期使用安全。

**[关键词]**大体积混凝土；温度裂缝；施工技术；温控措施；结构耐久性

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17169 中图分类号: TU755 文献标识码: A

## Research and Engineering Application of Crack Control Technology in Large Volume Concrete Construction

ZHAO Yan

China MCC22 Group Corporation Ltd., Tangshan, Hebei, 063000, China

**Abstract:** During the construction of large volume concrete, the accumulation of hydration heat and large temperature gradients can easily cause temperature cracks, which seriously affect the safety and durability of the structure. To effectively control the formation of cracks, it is necessary to conduct a systematic analysis of material selection, mix proportion optimization, pouring process, curing measures, and temperature monitoring. A comprehensive technical system that emphasizes both temperature control and stress control should be proposed, and its feasibility and effectiveness should be verified through typical engineering examples. The results show that a reasonable crack control strategy can significantly reduce the risk of cracking, ensuring the overall performance and long-term safety of the structure.

**Keywords:** large volume concrete; temperature cracks; construction technology; temperature control measures; structural durability

### 引言

随着基础设施建设不断发展，大体积混凝土广泛应用于大型桥梁、高层建筑和水利工程，不过施工时水化热引发的温度裂缝问题越来越突出，成为制约工程质量与安全的关键因素，有效控制裂缝、提高结构耐久性是工程实践急需解决的核心技术难题，因此深入探讨裂缝形成机理与控制技术路径对提高大体积混凝土施工水平和工程质量意义重大。

### 1 大体积混凝土裂缝成因分析

大体积混凝土体积大且内外温差明显，在施工和硬化过程中很容易产生裂缝，要想有效控制裂缝就得深入分析裂缝成因。

#### 1.1 水化热积聚导致的温度应力

大体积混凝土在水泥水化期间会释放大量热量，尤其中心区域因体积大散热慢、热量积聚导致内部温度迅速攀升，而混凝土开始冷却时表层受环境影响降温快，内外部温度有差异导致体积变形不均匀，这种变形若受限则温度应力就会产生，应力超混凝土早期抗拉强度时裂缝形成，这类裂缝多贯穿性，水平或斜向分布，早龄期常见，是影响结构耐久性的主要问题之一，并且温度应力和收缩应力可能叠加使裂缝发展趋势加剧，控制水化热释放速率、低温升峰值、调节温降过程是防止温度裂缝的关键。

#### 1.2 约束条件引起的收缩变形

大体积混凝土自身体积大且结构复杂，硬化时常受到基础、旧结构或者模板等外部条件的约束，其自由变形被这些约束抑制后内部会产生附加应力，在混凝土干缩和温度收缩叠加时这种情况更严重，若约束强度大于混凝土自身抗拉强度，受限部位如钢筋锚固部位、边角区域或者接口处就很容易出现裂缝，并且不均匀沉降和差异收缩也可能使应力集中，这是施工中必须严格控制的一个诱因，由于约束裂缝在初期往往不容易被发现，后期容易被荷载扩大，从而影响结构的耐久性和安全性，而合理布设缝隙、优化支模方式、控制混凝土浇筑顺序并使用缓凝剂延缓水化反应，就能有效减小约束作用的不利影响，让结构变形能够可控地释放。

#### 1.3 原材料质量与施工工艺影响

原材料的选择与施工工艺和混凝土裂缝的形成关系密切，水泥用量多且水灰比控制不好时水化热和收缩变形风险会增加，骨料级配不合理会使混凝土内部结构密实性差、强度分布不均进而容易出现微裂缝，胶凝材料活性高或者掺合料掺量不合适会使水化反应速率过快形成早期温度峰值、加剧内外温差，振捣不密实、浇筑不连续或者养护不到位等施工中的情况可能产生冷缝和干缩裂缝，施工缝处理粗糙或者后浇带接缝封闭不好也容易成为裂缝

扩展的起始点，在高温、干燥、风大等不利气候条件下若不及时覆盖保湿、洒水养护等表面裂缝容易出现且混凝土早期抗裂性能会降低，要确保材料稳定性、优化施工流程、加强现场质量控制和养护管理，这对减少非结构性裂缝是重要保障、对提升整体工程质量是关键环节。

## 2 裂缝控制的关键技术与措施

大体积混凝土裂缝多发，得从设计、材料、施工等多个环节入手并运用系统化、科学化的控制技术与措施，全过程裂缝防治目标才能实现。

### 2.1 优化混凝土配合比设计

控制裂缝的基础在于合理的配合比设计，要降低水化热释放量，应优先选用低水化热水泥或者像粉煤灰、矿渣粉这类矿物掺合料，用它们替代部分水泥，从而降低整体水化热峰值与温升速率。水灰比要适当降低，使混凝土密实，让强度得以发展，减少后期干缩开裂的可能性。选择骨料要注级配优化，保证骨料间填充性良好，降低孔隙率，进而提升整体抗裂能力。可以掺加膨胀剂、减缩剂这些功能性外加剂，补偿收缩或者调节水泥反应速率，从源头上降低裂缝形成几率。要是混凝土有特殊性能要求，也得考虑使用缓凝剂、减水剂之类的材料，改善施工性能并控制早期温升。配合比设计要结合工程特点和气候条件进行试验，查看可行性和稳定性，确保设计与施工一致且相适应。

### 2.2 严格温度控制与监测

裂缝防治中温度控制是核心手段之一，施工时可采用分层分区浇筑、降低入模温度、设置冷却管等方式，以降低温升速率，减少因温差产生的热应力，大体积基础或者承台结构特别适用冷却水循环系统，能有效带走水化热且在混凝土强度还未形成时降低裂缝产生风险，施工前中后期布设温度传感器实时监测温度有助于及时掌握温度变化趋势并动态调整控制策略，养护阶段采用覆盖草垫、洒水保湿、设置保温棉毯等保温保湿措施可缓解降温速率和收缩应力叠加，施工环境温差大时要控制浇筑时间和夜间温差影响以最大程度降低温度裂缝风险。

### 2.3 完善施工工艺与养护措施

混凝土裂缝控制效果受施工工艺直接影响，浇筑方式需连续快速以免出现冷缝，振捣要充分且不能漏振以保证密实成型，施工缝和后浇带设置得科学合理既能方便施工又对释放结构应力有益从而减少强制约束产生的裂缝隐患，像转角、开口和连接节点等结构应力集中的部位要加强局部构造处理、配置加密钢筋网片或者设置裂缝诱导缝来引导应力释放，养护要注重“早养护、长养护”，在干热气候或者风力较强的地区需延长养护时间、增加保湿频次以保证混凝土表面不开裂，在结构内部还没稳定的时候控制住外界荷载和扰动让应力平缓发展有助于提高整体抗裂性能，施工工艺和养护措施有效配合是保障大体积混凝土结构质量的关键环节。

## 3 温控技术在施工中的应用策略

大体积混凝土施工时温度控制极为关键，合理的温控

策略能有效舒缓热应力、减少裂缝风险，是保障结构质量与安全的重要技术手段。

### 3.1 预冷与控温材料应用

混凝土浇筑前，预冷技术能有效降低入模温度、减缓早期水化热累积，常见的有使用低温拌合水、冷却骨料或拌合时加碎冰等方法，在夏季高温施工时尤其适用；掺入粉煤灰、矿渣粉等活性矿物材料，可减少水泥用量、降低水化热释放速度并延缓水化峰值出现，这对温度应力平稳释放有利，而膨胀剂、减缩剂等辅助材料在调节体积变化上也有一定作用，能弥补温降造成的体积收缩、改善内部应力状态，选材得因地制宜，结合当地气候、运输条件和结构特征制定策略以保证温控技术从源头得以施行。

### 3.2 施工过程中的动态温控措施

在混凝土浇筑及初凝阶段要对温控措施进行动态调整，兼顾结构厚度、气温变化和施工进度；水冷系统是一种高效的主动控温方式，将冷却水管埋设在混凝土内部使冷水循环进入结构核心区域，可直接带走大量水化热从而显著降低核心温度，该技术常用于大型基础或者水工结构；分层分区分段浇筑的方式能避免整体温度一起升高从而有效控制温度梯度发展，配合合理的间歇时间在上层混凝土还没过热时进行下一层浇筑可减少结构整体应力集中情况；施工时选择清晨或者夜间温度低的时候可降低外部环境对温升的不利影响；在整个过程中设置自动温度监测装置能实时反馈结构温度变化并及时调整冷却策略和养护手段，这对提升施工智能化和安全性很关键。

### 3.3 养护阶段的温降缓释与保温措施

在混凝土养护阶段，温控重点是“缓降温、防骤降”以防止结构因温度骤降而开裂，传统的覆盖养护如用麻袋、草帘再加上洒水保湿能有效控制表面水分蒸发速度，让冷却时表层收缩变慢从而降低表面裂缝出现的几率，冬季或者昼夜温差大的环境下要在混凝土表面加上泡沫板、保温棉之类的保温层以免冷风直接吹且防止低温快速传导到内部，关键部位或者高强度结构可采用电加热毯、热风机这种主动保温的方法来延长温降过程从而减少热应力因骤冷而波动的情况，养护周期往往要延长直至结构温度和环境温度的差值缩小到安全范围里，必要时用温度数据分析和结构应力模拟确定最佳养护终点，系统化、精细化的保温降温策略对结构不开裂和混凝土强度均衡发展很重要且是重要保障。

## 4 典型工程裂缝控制实例分析

典型大体积混凝土工程里裂缝控制的实践分析能验证裂缝控制技术的有效性，从而给类似工程提供可复制、可借鉴的技术路径与经验支持。

### 4.1 港珠澳大桥人工岛承台裂缝控制

世界级跨海通道工程港珠澳大桥的人工岛承台结构混凝土方量超级大，最大单仓浇筑量超  $5000m^3$ ，是典型大体积混凝土结构，面对水化热引发温度裂缝的控制问题，项目团队构建了“冷却水管+温控监测+外加剂优化”三位一体

的温控体系，承台里头预埋环形冷却水管，施工时靠冷却水循环系统把温度控在 60℃之下且掺加粉煤灰和矿渣，降低水泥用量和水化热释放速率，用保温棉毯把结构表面盖着二次保温，将温降速率控制在不超 1.5℃/日，使内外温差稳稳在 25℃以内，测量验收后发现这个承台没明显温度裂缝，验证了多措并举、系统控温的策略可行又可靠。

#### 4.2 上海中心大厦筏板基础裂缝防治

632m 高的上海中心大厦筏板基础厚达 6m、混凝土总量超 15000m<sup>3</sup>，是典型的大体积基础结构，为有效控制早期裂缝项目采用分区分层浇筑和全过程智能温控系统，筏板浇筑时入模温度严格控制在 25℃以内且施工前优化混凝土配合比、加入 35% 的粉煤灰和缓凝减水剂以降低水化峰值，预埋冷却水管并布设好多点温度传感器以实时采集中心和表层温度数据、依据数据反馈动态调整冷却水流量和频次，并且浇筑完马上覆盖保温层、将养护时间延长到 21 天，最终筏板基础零贯穿性裂缝达到优质结构标准，智能温控和全过程质量控制成效显著。

#### 4.3 南水北调中线丹江口大坝混凝土裂缝治理

南水北调中线工程的重要组成部分丹江口大坝加高工程，其施工内容包含大体积重力坝体混凝土浇筑，由于水压和温度应力长时间共同作用于大坝混凝土，裂缝控制要求非常高，施工时用低水化热水泥和高掺量矿物掺合料控制水化热以降低内部升温速度，并且设置冷却水管系统，加上气温调节、夜间浇筑等施工组织优化手段将温差控制在安全范围，合理布置裂缝诱导缝，在坝体两边设置温度释放槽，分段浇筑时同步强化面层保温防护，通过多项技术协同控制，有效达成工程让坝体稳定运行十年没有结构性裂缝的目标，也体现出复杂工程里裂缝控制技术的系统性和长期效能。

### 5 裂缝控制技术的工程效果与发展趋势

大体积混凝土结构的耐久性与安全性因裂缝控制技术的有效实施得到显著提升，且相关技术体系也不断被推动着完善与创新，这一技术有着广阔的应用前景和发展潜力。

#### 5.1 综合控制技术成效显著

裂缝控制技术系统化发展，从材料选型、施工组织到后期养护已形成一套成熟的综合技术体系。实践显示，通过配合比优化、内置冷却水管、智能温控监测、分层分区浇筑、覆盖保温养护等多项技术的集成应用，能有效降低大体积混凝土结构温度裂缝发生率。在港珠澳大桥、上海中心大厦、南水北调丹江口大坝等重点工程中，这些措施大大降低了裂缝发生概率，部分结构贯穿性裂缝为零，混凝土整体性能大大提升。工程效果验证，严格执行温控与限裂技术，绝大多数裂缝问题可控可防，项目质量水平与结构使用寿命显著提升。

#### 5.2 智能化监测与反馈应用推广

传统裂缝控制主要靠人判断、凭经验调节，受较多因素限制，近年来裂缝控制里智能化技术的作用越来越重要，

在混凝土结构里布设温度传感器、应力应变监测点，将数据采集系统和温控反馈装置相结合，就能对温度变化、结构状态实时监控并智能调节，如上海中心大厦项目，温控系统根据传感器数据动态调整冷却水流量和养护方案，实现了全过程闭环控制，这种智能化管理提升了控制精度、减少了人为干预，增强了裂缝控制的可预见性与主动性，以后 BIM、物联网和 AI 技术融入进来，裂缝控制会朝着更精准、自动化方向发展，从“被动处理”根本转变为“主动预防”。

#### 5.3 绿色低碳与材料创新融合发展

在碳排放控制和绿色施工的大背景下，裂缝控制技术向着节能环保方向不断深化，材料方面，低碳胶凝材料研发和应用持续推进，高掺量粉煤灰、矿渣、活性硅灰之类的材料，既能减少水泥用量又能降低水化热以推动绿色低碳建设，且新型功能材料如膨胀剂、减缩剂、自愈合微胶囊等被推广，为结构裂缝事前控制和后期修复创造更多机会，施工工艺上，浇筑流程优化、温升路径控制、养护周期延长，能耗和资源浪费也随之减少，以后裂缝控制会更注重材料绿色性能和施工可持续性，形成“控制—监测—调节—修复”一体化多维度发展格局，大体积混凝土工程综合价值和生态性能将被全面提升。

### 6 结语

大体积混凝土裂缝控制是保障结构安全与耐久性的重要环节，其涉及材料设计、温控技术、施工管理和智能监测等多方面内容，典型工程的实践验证了温度控制、配合比优化、科学养护等措施综合应用能有效降低裂缝发生率并提升工程整体质量，如今智能化和绿色建造理念不断推进使裂缝控制技术向着数字化、精准化、低碳化方向发展，日后需加强新材料、新工艺和智能系统的集成创新以构建多维度、全生命周期的裂缝控制体系，从而为复杂结构和重大工程高质量实施提供坚实保障。

#### 【参考文献】

- [1] 王鹏辉,许琼鸽.大体积混凝土裂缝控制技术在建筑工程中的应用[J].建筑结构,2022,52(2):1015-1018.
- [2] 关中正,王星宇,杨帅,等.房建工程大体积混凝土施工裂缝控制技术研究[J].中国建筑装饰装修,2025(6):174-176.
- [3] 杨承磊,刘涛.建筑工程施工中大体积混凝土裂缝控制技术及效果评价[J].北方建筑,2025,10(2):43-46.
- [4] 于占秋.港口航道工程大体积混凝土裂缝施工控制技术研究[J].珠江水运,2025(8):138-140.
- [5] 丁茂.房建施工中大体积混凝土裂缝控制技术应用[J].中国建筑装饰装修,2025(12):176-178.

作者简介：赵言（1989.2—），单位名称：中国二十二冶集团有限公司，毕业学校和专业：河北联合大学轻工学院，土木工程。

# 复杂地质条件下双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术应用研究

付兴南 周赛赛

浙江省二建建设集团有限公司,浙江 宁波 315200

**[摘要]**传统桩基施工技术在复杂地质条件下面临钻进效率低、成桩质量差等挑战,双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术把套管护壁、螺杆钻进与潜孔锤击这三项动力机制集成在一起有效提升了成孔稳定性与施工效率,在卵石层、强风化岩层等复杂地层中该技术适应性良好可显著降低孔壁坍塌及钻进阻力风险以保障桩基成型质量,工程实践显示这一技术成桩速度快、施工控制精度高、适用范围广且有广泛推广应用价值。

**[关键词]**复杂地质条件;双动力全套管;螺杆引孔;潜孔锤;成桩技术

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17190 中图分类号: TU753 文献标识码: A

## Research on the Application of Double Power Full Casing Screw Drilling and Down the Hole Hammer Pile Forming Technology under Complex Geological Conditions

FU Xingnan, ZHOU Saisai

Zhejiang Provincial Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

**Abstract:** Traditional pile foundation construction techniques face challenges such as low drilling efficiency and poor pile quality under complex geological conditions. The dual power full casing screw drilling and down the hole hammer pile forming technology integrates the three dynamic mechanisms of casing wall protection, screw drilling, and down the hole hammer to effectively improve the stability and construction efficiency of hole formation. In complex strata such as pebble layers and strongly weathered rock layers, this technology has good adaptability and can significantly reduce the risk of hole wall collapse and drilling resistance to ensure the quality of pile foundation formation. Engineering practice has shown that this technology has fast pile forming speed, high construction control accuracy, wide applicability, and wide promotion and application value.

**Keywords:** complex geological conditions; dual power full casing; screw lead hole; down the hole hammer; pile forming technology

### 引言

城市建设不断深入,复杂地质条件下桩基施工需求日益增多,在高卵石含量、强风化岩层等地质环境中传统成桩工艺容易效率低且成孔难,急需突破这一技术瓶颈,探索适用于多变地层的新型成桩工法。双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术具有多重动力协同优势,能保障施工质量、提升作业效率,为复杂地质条件下深基础施工提供全新解决方案,其工程应用前景很重要。

### 1 复杂地质条件下桩基施工面临的主要挑战

桩基施工在复杂地质环境下被提出更高要求,由于传统成桩技术很难达到效率与质量的双重标准,关键问题急需深入剖析。

#### 1.1 地层结构复杂多变

城市扩建、山区基础设施和交通工程等项目的施工现场常出现砂卵石层、淤泥层、强风化岩层、夹层土层等地质条件,这类地层结构分布不均匀、成分复杂且力学性质变化大,钻进时层间突然硬化或者松散的情况很常见,会使设备负载急剧波动、钻进速率下降,还可能发生卡钻、掉钻事故,像砂卵石夹泥岩这种地层局部承载力弱、孔壁稳定性差,成孔时特别容易坍塌,进而影响成桩精度和后期承载性能,并且地下水位高时孔壁失稳的风险会加剧、护壁施工难度也会增

加,当前桩基技术的核心挑战是适应多变的地质条件。

#### 1.2 传统设备适应性不足

复杂地层里,常规冲击钻、回转钻、冲抓钻等设备有着明显短板,像高密实度卵石层或者强风化岩层中,因冲击力不够,钻进效率会大幅下降且设备振动更厉害,从而机械故障常发生,而松散流塑状粉质黏土或者淤泥层中,旋转钻进这种方式很容易扰动孔壁,进而诱发坍孔事故。传统设备大多是单一动力模式,不能有针对性地调节动力输出以适应不同地层特性,这让它在多层交互、地质突变频繁区域的应用效果受到限制,且工艺刚性强,施工时实时调节和响应能力差,导致施工效率低、质量波动大,进一步制约工程进度和安全保障。

#### 1.3 成桩质量难以保障

在复杂地质条件下,整个桩基的承载能力和使用寿命直接取决于成孔质量,传统成桩技术在地层扰动大、护壁不稳时往往没法形成规则、完整、垂直的孔形,从而导致混凝土灌注不均、断桩、桩身夹泥等质量问题,并且在含水层或者高孔隙率地层里,混凝土容易被稀释,强度下降,严重时桩基会失效,成桩时若不能精确控制钻进深度和轴线偏差,桩位布置、结构受力均衡也会受到影响,工程实践中质量事故大多集中在孔壁坍塌、桩体夹杂、桩径不均、

垂直度失控这些问题上,给工程带来不可控风险,要想高精度、高稳定性地成桩,就得系统升级设备配置和施工工艺,提高抗干扰和自适应能力。

## 2 双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术原理与结构组成

复杂地质成桩是个难题,双动力全套管螺杆引孔潜孔锤技术将多动力系统融合起来且适应性很高、成孔能力高效,这让它成为工程施工里一项重要的创新手段。

### 2.1 技术原理综述

螺杆钻进、潜孔锤击、全套管护壁集于该技术一体,双动力协同工作使得成孔作业高效又稳定。钻进时由液压或电动驱动螺杆系统输出高扭矩旋转力,适用于中软地层的连续破碎排渣,潜孔锤高频率轴向冲击能为卵石层或风化岩等硬地质层提供强大破碎力,解决了传统钻机对高密实层破碎能力不足的问题。全套管结构随钻推进,护壁防塌效果好,特别适用于软弱或含水且孔壁稳定性差的地层。钻进期间双动力模式依据地质变化调整动力组合,实现螺旋推进和冲击破岩的有机配合,大幅提高钻进效率和孔形稳定性并减少成桩过程中的风险因素。

### 2.2 结构组成分析

主机动力装置、全套管护壁装置、螺杆钻头系统、潜孔锤装置和控制系统组成了该设备系统,履带式液压钻机常被选作主机,因其机动性高、功率输出能力大,能适应不同施工场地需求。全套管装置由连续推进的钢套管构成,外面设有密封装置,可同步跟进、护壁成孔,有效抵抗侧向地层压力,其前端与旋转接头连接并和螺杆钻具联动工作。螺旋叶片与排渣通道被布置在螺杆钻头,它既能提供旋转切削力,又能经钻杆把钻渣输送到孔外。潜孔锤为气动或液压驱动结构,位于钻头下方,内部有活塞冲击系统,靠高频往复运动产生冲击力以提升破岩能力。智能化控制装置对整个系统进行钻速、扭矩、压力、成孔深度等参数的实时监测,以达成施工过程的精细化调控和反馈闭环。

### 2.3 动力配合与施工机制

系统动力输出在不同地层条件下能灵活调节,软弱地层主要靠螺杆扭矩快速旋转切削进尺,进入卵石层或风化岩层后潜孔锤启动强力冲击使破碎效率与成孔稳定性得以提升,在互层结构里两种动力协同工作达成持续、均匀、稳定的成孔推进,施工时全套管护壁系统一直随钻下沉保障孔壁稳定、避免地层坍塌或孔径变形,同步护壁和钻进一体化设计简化了施工工序、缩短了工期且提高了成桩质量,智能控制系统可预设不同地层的施工参数并现场实时调整以有效避免人为误操作、提高施工自动化和安全性,这一技术整体施工机制工程适应性、可控性和成桩效果优良,给复杂地质条件下的桩基施工提供了高质量解决方案。

## 3 成桩工艺流程与关键施工控制参数分析

在复杂地质条件下,要保障桩基质量与施工效率的关键在于成桩工艺流程科学合理且施工参数控制精准,这需要进行系统化管理。

### 3.1 成桩施工流程解析

双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术施工,其通常的流程包括场地准备、设备就位、钻进成孔、清孔检测、钢筋笼下放、混凝土灌注和拔管成桩等步骤。施工开始时要依据勘察资料制定详细方案,明确各地层参数和施工段落分布。设备就位后启动螺杆钻进系统进行旋转推进,这种方式适用于软弱土层和松散砂层,遇到卵石层或者强风化岩层时同步启动潜孔锤以提高破碎效率。钻进时全套管结构跟着钻动护壁防止孔壁坍塌,成孔到设计深度后开始清孔作业,要确保孔底无沉渣且符合灌注条件。接着下放钢筋笼,采用导管法或者泵送方式灌注混凝土,逐段拔除套管,完成成桩全过程。整个施工流程设备集成度高、工序衔接紧密、施工节奏可控,适用于复杂、突变地层条件下的高质量桩基建设。

### 3.2 关键动力参数控制

在施工的时候确保成孔质量、实时调控动力参数相当关键,像钻进扭矩、推进压力、冲击频率、套管下沉速率和成孔速度等都是主要参数,地层硬度不同螺杆扭矩设定也不一样,软土层时螺杆扭矩要设在  $10\sim20\text{kN}\cdot\text{m}$  范围里,碰到卵石或者硬岩就得提高到  $30\sim40\text{kN}\cdot\text{m}$ ,推进压力要和扭矩联动调节,不能因压力不够而打滑且压力过大设备过载也不行,潜孔锤冲击频率稳定在  $500\sim1000\text{次}/\text{min}$  才能持续破岩且孔壁结构不会受损,套管下沉速度每分钟  $10\sim30\text{cm}$  米比较合适且要和钻进速度保持同步,不然孔口悬空或者护壁滞后就会坍孔,要根据地质反馈及时调整参数让动力系统跟着地层变化协调响应,施工管理人员要靠着监测系统实时了解钻进状态动态优化参数配置以便作业安全、连续又高效。

### 3.3 成孔质量控制要点

要达成高标准的成孔质量,得在全过程进行技术和管理方面的控制,钻进时需保持轴线垂直度,把孔位偏差控制在规范允许范围里以免桩体偏斜影响受力,钻进后的清孔环节对成桩质量特别关键,必须彻底清除孔底沉渣且用清孔探头检测残渣厚度并控制在 5 厘米以内,钢筋笼下放要垂直平稳,不能因碰撞孔壁导致穿孔或者钢筋笼变形,混凝土灌注必须不间断完成,中断会造成冷缝且灌注速度要与拔管速度相匹配,否则混凝土会分离或者孔壁遭到破坏,灌注时要设置导管深度和混凝土高度的监控装置以保证混凝土一直在导管出口上方实现正压灌注,拔管速度每分钟不能超过  $40\text{cm}$ ,严禁快速强力拔管使混凝土回吸,采取上述质量控制措施能大幅提高成桩的一致性、稳定性和承载性能,满足复杂地质条件下高质量桩基的需求。

## 4 典型复杂地层中的工程应用及效果评估

双动力全套管螺杆引孔潜孔锤技术应用于典型复杂地层时,其适应性和成桩质量可被有效验证,且相关工程实践成果有推广价值和代表性。

### 4.1 卵石层地质应用实例

四川成都地铁某车站基坑支护桩工程的场地地质大多为中密卵石层且局部夹杂细砂和黏性土、地下水位还高

使得成桩特别难,传统冲击钻设备施工时卡钻、坍孔、混凝土灌注失败等问题频发,项目引进的双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩设备靠螺旋推进和潜孔锤一起破碎且套管全程护壁,实际施工时该设备穿透卵石层的效率提高了60%还多、单桩施工时间从原来的4小时减到1.5小时、成孔垂直度误差在1.5%以内且孔壁稳固无坍塌情况,严格把控清孔、灌注、拔管等工艺参数后桩体完整性检测优良率达到96%且有效解决了大粒径卵石层成桩质量不稳定的问题,为后续车站基坑施工奠定了可靠基础。

#### 4.2 强风化岩层施工验证

重庆某山地道路桥梁项目的桥墩基础得穿越厚层强风化砂岩和局部中风化夹层,该地层强度差别大、岩石结构松散,钻进阻力变化剧烈,传统钻机穿透不稳定,使用双动力成桩技术后,施工设备能调整螺杆输出扭矩和潜孔锤冲击频率,在强风化段以旋进为主、冲击为辅,进入中风化层以冲击破岩为主、旋转推进协同,如此动态调节使设备适应性强、施工安全稳定,桥墩总共施桩46根,平均单桩钻进时间不到2h,桩底沉渣厚度小于3cm,混凝土灌注饱满,桩基静载试验表明承载力超设计值20%,充分证明该技术在高差异性岩层里成桩可靠、力学性能稳定。

#### 4.3 工程效果综合评估

上述典型工程应用对比分析表明,在复杂地层里双动力全套管螺杆引孔潜孔锤技术多项关键指标表现挺好,成孔效率上该技术能普遍提升30%到70%从而使工期大幅缩短,成孔稳定性方面因有全程护壁和动力调控机制可有效避免塌孔、缩径、断桩这些质量问题,桩身质量经声波透射法、低应变法检测后发现桩体完整性优良率超90%且承载力富余度高、安全储备良好,并且该技术施工时噪音和振动比传统冲击钻设备低符合城市施工环保标准,总体评估下来这种成桩工艺综合优势明显且适应性、效率、质量都高,特别适合复杂多变地层里的高标准工程项目因而工程推广前景广阔。

### 5 技术优势对比分析与推广应用前景探讨

桩基施工技术不断革新,双动力全套管螺杆引孔潜孔锤技术有着独特优势且工程应用价值显著、推广前景广阔。

#### 5.1 与传统工艺对比

传统成桩工艺有冲击钻、回转钻、冲抓钻等,和它们相比在复杂地质条件下这项技术优势明显。传统钻机大多用单一动力系统适应性不强,在高密实度卵石层或者强风化岩层里容易卡钻、断钻、成孔偏斜,双动力系统则能根据不同地层特性灵活切换或者叠加动力输出连续高效成孔。潜孔锤能强化破岩,螺杆系统稳速推进,再加上全套管护壁,坍塌、渗水、夹层破坏这些问题都能有效应对。传统设备在混凝土灌注阶段因孔形不稳定桩体常夹泥、缩径,这项技术成孔规整、垂直度高灌注质量更好控制,成桩一致性和承载力表现都能有效提升,在地质条件频繁变

化的城市工程建设中特别适用。

#### 5.2 技术综合应用优势

在设备集成、动力耦合、智能控制等方面,本技术有着高度协同的优势,设备集成度高,能在狭小场地快速组装作业且施工灵活性很强,双动力组合既拓宽了施工地层范围,又提高了成孔过程的可控性与安全性,全套管护壁结构保障了孔壁稳定性,适用于高水位、软弱地层等高风险区域,智能化方面,系统能实时监测钻进参数与地层反馈并动态调整作业策略以减少人为误差,作业时低噪音低振动,符合城市中心区、交通枢纽等环保要求且社会适应性和工程兼容性良好,综合而言,该技术在效率、质量、环保、安全等多个方面都有显著优势,已成为解决复杂地质桩基难题的重要手段。

#### 5.3 推广应用发展前景

城市基础设施朝着深层次、高密度、复杂环境发展,使得桩基施工面临更高的技术挑战与质量要求,而双动力全套管螺杆引孔潜孔锤技术地质适应性广、施工灵活性强,在地铁工程、高架桥基础、深基坑支护、高层建筑等领域未来应用空间会更大,且这一技术设备模块化、施工参数可复制、操作智能化,在设计、施工、运维全过程实现标准化管理也更容易,BIM技术智能施工平台融合发展能与大数据监测、远程控制等系统深度结合,提升施工信息化与管理智能化水平,并且在绿色施工理念推动下,这一技术低扰动、低排放,符合可持续发展方向,推广潜力广阔、行业引领价值很高。

### 6 结束语

双动力全套管螺杆引孔潜孔锤成桩技术适应性强、效率高、成桩质量优良,在复杂地质条件下优势明显,工程实践表明传统工法在卵石层、强风化岩层等地层适应性差、成桩质量难控制,而该技术有效克服这些问题,达成安全、高效、环保的桩基施工目标,随着城市建设朝着更复杂地质条件延伸,推广应用这一技术能给深基础施工更可靠的技术保障,推动桩基工程朝着智能化、绿色化、高质量发展,应用前景广阔且在行业内有引领意义。

#### 【参考文献】

- [1] 姜文革,崔向华,郭传新.双动力头潜孔锤凿岩钻孔机[J].建筑机械,2015(3):37-41.
- [2] 林金江.双动力头强力钻机在海滨复杂地质下硬切割咬合桩中的应用[J].江西建材,2020(12):194-195.
- [3] 王晓伟.双动力头全套管咬合桩在深基坑支护中的应用[J].建筑与预算,2020(9):55-57.
- [4] 薛银山.双动力头钻机全套管成孔在咬合桩施工中的应用[J].地基处理,2021,3(1):82-87.

作者简介:付兴南(1994.4—),男,陕西省铜川人,汉族,本科学历,工程师,就职于浙江省二建建设集团有限公司,从事项目安全管理工作。

# 保通钢便桥施工技术及运维期间评估、维护研究

蔡欣荣

上海建工五建集团有限公司, 上海 200062

**[摘要]**文中以外环东段(华夏中路-龙东大道)交通功能提升工程2标项目-保通钢便桥为例,结合现状外环线主线交通任务重,大重型车辆多、施工周边复杂,钢便桥使用时间长等情况。浅析保通钢便桥施工技术研究及钢便桥运行期间安全评估及维护要点管理研究,为类似工程提供参考。

**[关键词]**钢便桥施工; 安全评估; 维护要点

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17168

中图分类号: U45

文献标识码: A

## Construction Technology and Evaluation and Maintenance Research during the Operation and Maintenance Period of Baotong Steel Bridge

CAI Xinrong

Shanghai Construction No. 5 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200062, China

**Abstract:** Taking the example of Section 2 of the Traffic Function Improvement Project for the Eastern Section of the Outer Ring Road (Huaxia Middle Road - Longdong Avenue) - Baotong Steel Bridge, combined with the current heavy traffic tasks on the main line of the Outer Ring Road, the large number of heavy vehicles, the complex construction surroundings, and the long service life of the steel bridge. The article analyzes the research on construction technology of Baotong Steel Bridge and the management of safety assessment and maintenance points during the operation of the steel bridge, providing reference for similar projects.

**Keywords:** construction of steel temporary bridge; safety assessment; maintenance points

### 引言

在国家倡导“城市更新”背景下,钢便桥因其高强度和良好的承重能力,适用于多种地形,能快速搭建和拆卸(反复使用)等优点,广泛应用于城市建设、市政工程、水利工程、矿业、应急救援及大型活动等多个领域。当钢便桥使用时间长,通过车辆要求高的情况下,易腐蚀、噪声和振动、钢材疲劳等问题随着使用时间的推移,越来越影响行驶的舒适度和安全。

本文结合外环东段(华夏中路-龙东大道)交通功能提升工程2标项目-保通钢便桥具体案例,在荷载要求高(外环线快速路交通任务重,大型、重型车辆多),临时钢便桥使用时间长(设计年限2年)的条件下,开展保通钢便桥施工技术研究,以及长期使用过程中钢便桥安全评估及维护要点管理研究。

### 1 工程概况

#### 1.1 工程概况

外环东段(华夏中路-龙东大道)交通功能提升工程2标,工程范围南起高科中路,北至龙东大道,桩号范围K2+281.902~K4+528.821,全长约2.247km,采用“主线高架+地面道路”的建设形式。主线将现状地面快速路改建为高架快速路,维持标准段双向8车道规模,设计速度80km/h,并同步改造现状高科路匝道及龙东立交局部匝道。地面道路按城市主干路标准,采用双向6快2慢规模,设计速度50km/h。

### 1.2 钢便桥概况

钢便桥设置目的:龙东立交区域新建的主线高架下部结构与老的外环线高架重叠,在“不能断交、占一还一”的交通要求下,为确保施工期间主线及匝道具备作业面,结合现状外环线大型车辆多,对行车舒适性和功能要求高。在综合考虑现场狭窄及工期紧张等情况下,采取临时钢便桥保通。

施工期间翻交顺序:先施工匝道钢便桥ZD1|ZD2|ZD3|ZD4,并通过验收→将现状匝道交通翻交至匝道钢便桥上→拆除老的匝道,并在拆除后的位置修建主线W\E钢便桥,并通过验收→老桥主线交通翻交至W\E钢便桥上→拆除老桥主线位置,新建桥梁具备施工场地。

本文针对现状交通最复杂、钢便桥搭设长度最大的龙东立交匝道钢便桥和龙东立交主线钢便桥进行研究分析。本工程钢便桥为临时结构,设计使用年限为二年,设计荷载采用城-A级,结构的设计安全等级为二级,结构的重要性系数为1.0。本工程钢便桥桥面标准宽度:二车道8.5m,三车道12m。



图1 龙东立交区域钢便桥平面图

### 1.3 钢便桥施工概况

#### 1.3.1 钢便桥下部结构设计

钢便桥下部结构采用“钢盖梁+钢管桩”形式，桥台下部结构采用“混凝土桥台+钢管桩”形式。

标准钢盖梁采用三拼或双拼 45b 工字钢型钢，标准跨连续梁中墩位置采用双拼，异型段位置以及 15m 跨桥墩采用三拼。桩基采用外径 0.63m 的钢管桩，壁厚 10mm，同时，为加强桥墩的横向稳定性选用  $2 \times 20b$  槽钢横系梁，桥墩设置一般采用单排桩，桥台采用梅花桩，伸缩缝及局部加强墩采用双排桩。路口处钢管桩以及距匝道水平距离 5m 以内的钢管桩外包混凝土防撞。

桥台采用轻型桥台，桥台宽度 2.2m，台后填土高度 2m 左右，钢管桩采用梅花排列，排距 0.6m，钢管桩伸入桥台 0.1m，保证钢管桩与混凝土桥台的有效连接，桩头 5m 范围内填充 C30 低收缩混凝土，并布置纵向钢筋深入桥台内。

#### 1.3.2 钢便桥上部结构设计

龙东立交主线及匝道钢便桥按结构连续体系设计，贝雷主梁选用国产 321 型贝雷片为受力单元，9m、12m、15m、21m、24m 跨钢便桥采用标准贝雷架作为承载结构，顺桥向以 3m 间距设横向支撑架，确保纵梁横向稳定共同参与受力。钢便桥桥面采用 126mm 钢桥面板和 20cm 厚现浇整体化层组成，桥面板与铺装层通过剪力钉进行连接。匝道二车道 9m、12m 跨径采用 10 片贝雷，匝道二车道 15m 跨径采用 14 片贝雷，主线三车道采用 21 片贝雷。跨径小于 20m 采用不加强贝雷，跨径大于 20m 采用加强型贝雷。

#### 1.3.3 附属结构设计

(1) 桥面铺装：10cm 钢筋砼+10cm 沥青砼（贝雷桥），8cm 钢筋砼+6cm 沥青砼（型钢桥）。(2) 桥面铺装防水层，防水等级为Ⅱ级，防水层采用符合国家标准《城市桥梁桥面防水工程技术规程》(CJJ 139—2010)的纤维增强聚合物改性沥青防水涂料。(3) 防撞护栏：防撞等级 SB 级（加强型防撞等级）。

(4) 支座：采用板式橡胶支座。(5) 桥面排水：自然排水。

## 2 钢便桥施工技术研究

本工程在施工过程中，根据现场管线错综复杂、现状

外环线交通负荷要求高，钢便桥使用时间长等实际情况，相对于常规的钢便桥施工方法，采取了以下一些因地制宜的施工技术措施。

#### 2.1 新老桥拼接

对于钢便桥和现状老桥的拼接处理，根据以往施工经验，有以下 3 种常规方案，分别为型钢拼缝、弹性拼缝和桥面铺装连续。

(1) 采用型钢拼缝时，钢便桥和老桥结构完全分离，各自单独受力，互不干扰。但由于拼缝与车道斜交，雨天车辆容易打滑，且拼接处平面线形较差，打滑后容易发生事故，故不推荐采用该方案。

(2) 采用弹性拼缝时，由于钢便桥为临时结构，考虑到经济性，拼缝材料可采用 STS 弹塑体，但外环重载交通多，弹塑体在重载交通作用下易损坏，且外环交通繁忙，弹塑体修复需要临时封闭交通，故不推荐采用该方案。

(3) 采用桥面铺装连续时，由于桥面铺装连续，耐久性好，且无车轮打滑风险。同时在拼缝处设置 800mm 宽橡胶垫片，可很好地适应拼缝位置新老桥的相对变形。另外再适当增加桩长，控制钢便桥沉降量小于 10mm，减小与老桥之间的差异沉降。

经施工单位结合现状外环线交通现状与设计讨论、综合分析后，最终采用桥面铺装连续的拼接方案。该方案在匝道和主线钢便桥的运行、维护期间，钢便桥与老桥无明显高差，拼缝无破坏、开裂、打滑等问题，行车舒适度满足外环线交通需求。

#### 2.2 特殊节点处理（利用老桥承台、利用老桥外伸横梁等）

ZD1 匝道 ZD13~ZD14 墩位置，由于钢便桥下存在高压燃气管和上水管，无落桩条件。钢便桥在该位置处，需设置门架钢盖梁形式跨越现状管线，由于该位置的北侧存在现状老桥基础，门架也无落桩条件，故考虑门架钢盖梁北侧基础部分利用龙东立交老桥承台基础作为支撑，实现门架的架设。施工期间及钢便桥运行期间，对现状老桥沉降和横向变形进行监测，结构无变形，沉降符合要求。

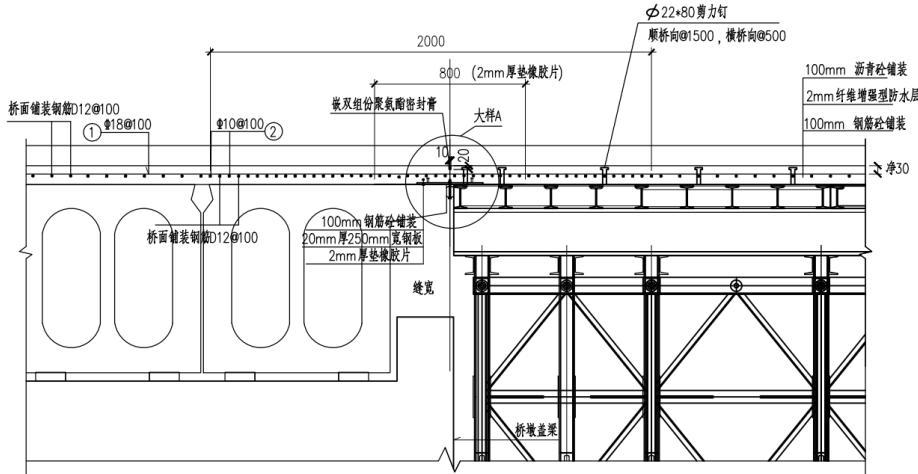


图 2 桥面铺装连续拼缝构造示意图

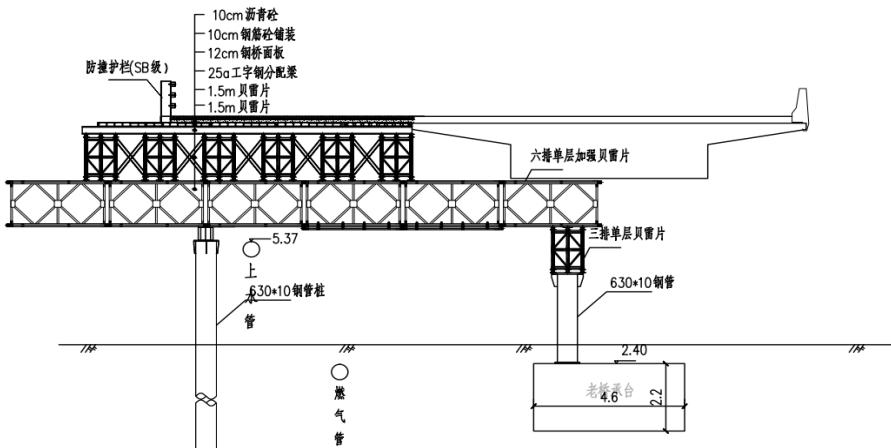


图 3 利用老桥承台 A-A 断面示意图

调整后钢管桩荷载计算(摩擦桩改为老承台承载,仅计算钢管桩轴向承载力):

钢管桩: 钢管桩直径 630mm, 壁厚 10mm。考虑锈蚀情况, 壁厚最不利按照 6mm 进行计算。其截面特性为:



图 4 钢管桩截面特性计算图

回转半径  $ix=22.062\text{cm}$ 。

考虑钢管桩横联间距为 10m, 即钢管桩的自由长度按 10m 计算, 钢管桩一端固定, 一端自由, 自由长度系数为 2.0, 则计算长度为  $2*10=20\text{m}$ 。

钢管桩的长细比:  $\lambda=L/ix=20/0.22=90.7$ 。

查《钢结构设计规范》表 C-2 得: 中=0.616。

考虑钢材的容许应力为  $[\sigma]=180\text{Mpa}$ 。

最大轴向力计算:

$$\sigma=N/(\Phi*A)+N*a/Wt=N/(.616*0.0118)+N*0.2/(.364*10^{-2})=192.5\text{N}=[\sigma]=180*10^6$$

求得:  $N=935.1\text{KN}$ , 即直径 630mm, 最不利壁厚 6mm 情况下, 单根钢管桩可承载 935.1KN, 远大于设计荷载采用城-A 级, 符合要求。

### 3 钢便桥运维期间安全评估、维护研究

#### 3.1 钢便桥巡查

钢便桥的巡查分为经常性检查、定期检查和特殊检查三种。

(1) 经常检查: 经常检查主要以目测方式配合简单工具进行, 每月至少进行两次, 汛期应加强检查。主要对钢便桥的基本状况进行日常巡视检查。对经常检查中发现重要部(构)件出现问题的, 应立即安排进行维修。

(2) 定期检查: 定期检查主要以目测结合仪器检查方式进行。其检查周期一般不低于每季度一次。定期检查应该制定钢便桥定期检查计划, 组织项目相关人员对钢便桥进行全面检查工作, 及时对发现的问题进行整改。

(3) 特殊检查: 当经常检查及定期检查中发现难以判断损坏原因及程度的部位。或沉降观测超过预警值时, 存在严重威胁钢便桥结构及上部通车安全的情况下, 可采取特殊检查, 特殊检查应委托有相应资质和能力的单位实施。本工程暂不涉及特殊检查。

本工程巡查 101 次, 统计数据如下表 1:

#### 3.2 钢便桥监测

为避免钢便桥自重和其上所行驶的车辆荷载导致桥梁出现变形, 当变形量超过安全值时就会危及钢便桥运行安全, 根据建设单位及相关规范要求应对钢便桥进行沉降观测, 以确保钢便桥的安全, 如表 2。

表 2 监测项目一览表

序号	监测项目	警戒值 (单位 mm)		
		变化速率 (mm/次)		累计变化量 (mm)
		预警值	报警值	
1	钢便桥沉降位移	6	10	50

监测点布置在各组管桩桩顶正上方所对应的桩顶横梁边缘处, 此处不会因车辆不断经过变形, 也便于监测, 用水准仪对监测点的标高进行监测汇总后进行数据对比。施工期间观测频次一般情况下每日需观测一次, 观测时间不少于 15d。前 15d 内每天观测一次, 第 15~30d 每星期观测一次。

以本工程运行最长时间的匝道 ZD2 钢便桥和跨度最大的主线 W 钢便桥为例, 进行钢便桥运行期间的监测分析:

#### 3.3 钢便桥运维期间评估

本工程在钢便桥运行期间通过日常巡视及沉降观测等方法, 发现主要问题集中在:

表 1 钢便桥巡查项目及统计表

序号	检查内容	经常及定期巡查结果
1	桩间桩帽连接焊缝是否有裂纹	检查 101 次, 全部合格, 100%
2	承重梁与钢管桩连接是否牢固, 焊接部位是否变形	检查 101 次, 全部合格, 100%
3	横向分配梁与贝雷梁连接是否紧固、横向分配梁是否存在变形	检查 101 次, 全部合格, 100%
4	贝雷梁有无严重锈蚀、变形损坏等现象	检查 101 次, 变形损坏全部合格, 100% 局部锈蚀较严重; 5 次, 合格率: 95%。
5	检查贝雷片连接处的销子、定位销子的松动情况	检查 101 次单体, 每个单体跨下随机检查约 20 个点, 个别跨下有定位销子松动, 随时间推移, 频率增多, 整体合格率: 90%。
6	检查 U 形螺栓松动情况, 对螺栓、螺帽脱落的部位及时安装复原	检查 101 次单体, 每个单体跨下随机检查约 20 个点, 个别跨下有贝雷架之间的斜撑螺栓松动, 随时间推移, 频率增多, 整体合格率: 95%。
7	桥面板是否存在翘曲、损坏及位移的现象	检查 101 次单体, 3 次沥青面层局部轻微破损, 出现在拼接部位, 合格率约: 97%。
8	检查桥面护栏有无松动、严重锈蚀及警示标志标牌情况	检查 101 次, 全部合格, 100%

统计时间: 2024.1~2024.10;  
巡查对象: 龙东立交区域 ZD1、ZD2、ZD3、ZD4 钢便桥及主线 W、E 钢便桥;  
巡查频率: 每个月两次, 总计次数 (按单个钢便桥计算): 101 次。

表 3 监测点位统计表

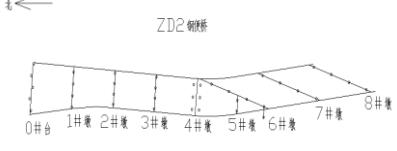
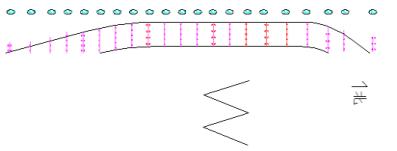
钢便桥名称	监测点位平面图
ZD2 钢便桥 (9 个监测点) 2024.1.12 翻交	 A 3D perspective diagram of the ZD2 steel bridge monitoring point layout. The bridge is shown with 9 monitoring points labeled 1# to 8# across its length. A vertical line labeled 'ZD2 钢便桥' is positioned above the bridge. A north arrow is also present.
主线 W 钢便桥 (20 个监测点) 2024.6.4 翻交	 A 3D perspective diagram of the Main Line W steel bridge monitoring point layout. The bridge is shown with 20 monitoring points, indicated by a series of blue dots along the top edge. A north arrow is also present.

表 4 ZD2 钢便桥沉降数据统计表

序号	观测日期	单次沉降均值	单次沉降最大值	累计沉降均值	观测日期	单次沉降均值	单次沉降最大值	累计沉降均值
1	2023.12.1	初始值	/	/	13	2024.5.29	1.33	3
2	2023.12.16	1.33	3	1.33	14	2024.6.15	1.22	4
3	2024.1.2	1	2	2.33	15	2024.7.1	1.22	3
4	2024.1.16	3.89	5	6.22	16	2024.7.15	0.87	3
5	2024.1.31	2	3	8.22	17	2024.8.1	0.91	3
6	2024.2.15	1.33	2	9.55	18	2024.8.15	0.89	3
7	2024.3.1	1.89	2	11.44	19	2024.9.1	0.89	3
8	2024.3.15	1.55	4	12.99	20	2024.9.15	0.67	2
9	2024.4.1	1.33	3	14.32	21	2024.9.30	0.89	2
10	2024.4.15	1.33	2	15.65	22	2024.10.15	1.33	2
11	2024.5.1	1.11	3	16.76	23	2024.10.28	0.78	2
12	2024.5.13	1	2	17.76				

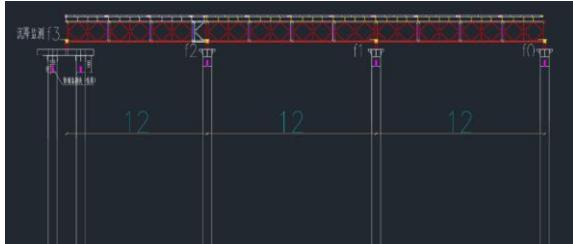
注: ZD2 钢便桥 9 个监测点, 2024.1.12 翻交。

监测点累计沉降均值 28.76mm, 单个监测点最大值 33mm。

**表 5 主线 W 钢便桥沉降数据统计表**
**主线 W 钢便桥沉降观测 (单位: mm)**

序号	观测日期	单次沉降均值	单次沉降最大值	累计沉降均值	观测日期	单次沉降均值	单次沉降最大值	累计沉降均值
1	2024.5.15	初始值	/	/	7	2024.8.15	1.4	3
2	2024.5.31	1.2	2	1.2	8	2024.8.31	1.5	3
3	2024.6.15	3.25	5	4.45	9	2024.9.15	1.3	3
4	2024.6.30	2	4	6.45	10	2024.10.1	1.4	2
5	2024.7.15	1.9	4	8.35	11	2024.10.15	1.2	2
6	2024.7.31	1.8	3	10.15	12	2024.10.30	1	2

注: 主线 W 钢便桥 20 个监测点, 2024.6.4 翻交。监测点累计沉降均值 17.95mm, 单个监测点最大值 21mm。


**图 7 监测点位断面图**

### 3.3.1 钢便桥的锈蚀

具备两个特点: (1) 随着时间推移, 锈蚀越来越多。(2) 恶劣环境下, 尤其是 ZD1 钢便桥, 在河道里设置, 下部结构钢管桩长时间接触水源, 由于钢材特性, 较其他几个单体钢便桥锈蚀更为严重。

### 3.3.2 插销、限位铁丝螺栓松动

具备以下两个特点: (1) 随着时间推移, 出现的频率变高, 难以避免。(2) 频发于结构转弯、拼接、结构异形处。

### 3.3.3 钢便桥与老桥桥面拼接区域沥青面层的轻微破坏

具备以下两个特点: (1) 主要在钢便桥与桥台/老桥拼接处、转弯、坡度变化处。(2) 随时间推移, 不及时处理, 现象会越来越严重。

### 3.4 钢便桥运维期间维修、保养

针对发现的问题, 维修保养主要针对以下几点:

#### 3.4.1 钢便桥锈蚀

钢便桥钢管桩、贝雷架、分配梁等承重结构锈蚀后, 厚度减少, 承载力下降, 严重威胁结构安全。

针对钢便桥使用时间长, 涉及恶劣环境的情况下, 钢便桥运维期间的锈蚀维修养护措施: 钢结构表面清理→防腐底漆涂刷→中间涂层涂刷→色漆面层涂刷, 在此基础上, 防腐底漆、面漆的选择根据使用环境和防腐要求来选择长效、重防腐涂料。尤其是涉及到临水等恶劣施工环境下, 在钢结构锈蚀无法避免的情况下, 既减缓锈蚀, 同时减少维护保养次数, 以达到更好的防腐效果, 确保钢便桥结构的安全。

#### 3.4.2 钢便桥连接部位螺栓松动、限位铁丝掉落等

钢便桥属于临时承重结构, 在承受车辆反复荷载及不均匀荷载的情况下, 尤其是长时间使用, 对于钢便桥的连接部位的牢固性、安全性有很大的挑战。

针对该问题维修养护: (1) 运行期间采取勤巡查, 全

数检查, 尤其是钢便桥转弯、拼接、结构异形处, 发现松动立即修复, 保证钢便桥运行期间的安全。(2) 普通螺栓或高强螺栓连接的构件, 若发现松动应及时加以拧紧, 对于高强螺栓必须施加设计的预拉应力。为了便于螺栓的更换, 销子周围应涂油脂, 防止雨水进入销孔缝隙; 外露的螺栓丝扣应涂油, 防止锈蚀。

#### 3.4.3 钢便桥桥面板面层破损

钢便桥桥面沥青层破损主要原因在于拼接处两侧不均匀沉降引起的变形缝、大重型不均匀荷载以及拼接部位沥青铺装压实等不到位等原因产生, 严重影响行车安全及舒适度。

针对该问题维修养护: (1) 因社会车辆保通等需要, 对于小面积或局部松散病害, 可以使用快速沥青修复材料进行修复。这种修复材料具有高渗透性和防水封闭功能, 能够固化骨料颗粒、修复细微裂缝, 且施工简单, 施工完成后短期即可开放交通。(2) 根据夜间封道等条件, 尽量选择上半夜, 温度较高时施工, 确保压实度足够, 减少内部空隙率。对于钢便桥沥青面层问题, 最科学合理的方法是在施工期间进行沥青面层施工管控, 通过沥青的施工温度、压实度、沥青含量、机械选择等控制。尤其是针对拼接处、转弯、坡度变化处采取加强处理措施。以达到更好的预防效果。

### 4 结语

在我国, 临时钢便桥在现状道路修缮、功能提升等市政道路工程中作为保通道路, 出现的频率越来越高。钢便桥荷载能力强、施工简单方便、可重复利用等特点能在保证现有交通通行、周边环境复杂的情况下能良好地完成施工。本文以外环东段(华夏中路-龙东大道)交通功能提升工程 2 标项目-钢便桥的施工及维护、保养期间的措施, 结合具体的数据, 分析钢便桥施工过程中及运营期间需要重点控制的地方, 为上海地区其他类似工程提供参考。

### [参考文献]

- [1] 吕科, 王举鹏. 现浇梁施工钢便桥平台施工要点探讨 [J]. 工程地质学, 2020(4):67.
- [2] 胡胜. 浅谈钢便桥施工过程及注意事项 [J]. 建筑设计及理论, 2018(12):78.

作者简介: 蔡欣荣 (1989.7—), 毕业院校: 同济大学浙江学院, 所学专业: 土木工程, 当前就职单位: 上海建工五建集团有限公司, 职务: 项目经理, 职称级别: 中级工程师。

## 预制砖胎膜施工技术在提升基础施工效率中的应用分析

周豪 赵昊

浙江省二建建设集团有限公司,浙江 宁波 315200

**[摘要]**基础工程里预制砖胎膜施工技术效率优势明显,工厂预制标准化胎膜并在施工现场快速拼装,解决了传统现浇砖胎膜依赖人工和工期延误的问题且提高了施工质量的可控性和一致性,该技术施工时机械化程度高、能节约人力资源并有效缩短施工周期,在复杂地基或者大体积混凝土基础里适应性良好、提升了整体施工的安全性和环境友好性且推广应用价值挺高。

**[关键词]**预制砖胎膜;基础施工;施工效率;装配化施工;工程质量

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17186

中图分类号: U44

文献标识码: A

### Application Analysis of Prefabricated Brick Membrane Construction Technology in Improving Foundation Construction Efficiency

ZHOU Hao, ZHAO Hao

Zhejiang Provincial Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

**Abstract:** The construction technology of prefabricated brick membrane in basic engineering has obvious efficiency advantages. The factory prefabricates standardized membrane and quickly assembles it on the construction site, solving the problems of traditional cast-in-place brick membrane relying on manual labor and project delay, and improving the controllability and consistency of construction quality. This technology has a high degree of mechanization during construction, can save human resources, and effectively shorten the construction period. It has good adaptability in complex foundations or large volume concrete foundations, improves overall construction safety and environmental friendliness, and has high promotion and application value.

**Keywords:** prefabricated brick membrane; basic construction; construction efficiency; prefabricated construction; project quality

#### 引言

建筑业对施工效率和工程质量的要求不断提高,传统基础施工方式渐渐暴露出工期长、质量难控、资源浪费等问题。预制砖胎膜施工技术高效、规范又环保,应运而生,在基础施工领域是重要的技术革新,该技术融合传统工艺和现代装配式理念,让施工组织更科学、现场操作更便捷,发展前景广阔、推广潜力大,在行业里引起广泛关注。

#### 1 预制砖胎膜施工技术的原理与发展背景

装配式建筑理念推广开来使施工现场标准化和工业化程度持续提升,预制砖胎膜技术高效又环保,在基础施工里渐渐冒尖并成为提升效率的重要手段之一。

##### 1.1 预制砖胎膜的基本构成与工作机制

传统砖胎膜结构经由工厂化手段预制加工就成了预制砖胎膜形成标准化胎膜单元,运到施工现场后按设计拼装使用,其主要由砖块、预制钢筋网片、混凝土连接构件等构成,有些还结合防水层和定位结构来确保稳定性与整体性,施工时,预制胎膜作混凝土基础外模板,灌注混凝土后二者共同成为整体以限制混凝土外扩、确保基础尺寸精度,预制砖胎膜跟传统现场砌筑比起来,在质量控制、材料利用率和施工周期上优势明显,是施工装配化的重要体现。

##### 1.2 技术发展背景与行业应用驱动因素

传统基础施工里现浇砖胎膜人工作业用得很普遍,但

气候、人员技术水平、现场管理能力都会对其产生限制,从而导致效率低和质量不稳定的情况到处都有。建筑产业现代化进程加快使预制施工工艺慢慢推广开来,装配式结构体系成为行业发展的主流,而且国家对绿色施工、节能降耗、建筑工业化有政策支持,施工企业受此推动积极引入新型施工技术。在这样的背景下,预制砖胎膜能工业化生产、标准化安装、施工速度快等优点让它广受关注,在市政工程、大型基础项目里逐步得到应用,成为解决传统砖胎膜效率瓶颈很重要的突破口。

##### 1.3 预制砖胎膜技术的推广价值与发展趋势

预制砖胎膜的推广解决了基础施工里效率和质量控制的难题,对推动施工现场文明管理、建筑产业链转型升级也有重要意义,其技术标准化设计、模块化制造,能大幅减少现场湿作业、降低施工噪音和粉尘污染,有助于实现绿色建造目标,而且施工时对工人技能依赖小,能解决用工难、工期紧等问题,以后BIM技术和智能制造融合后,预制砖胎膜会更灵活、适配性更强,在复杂地基、大体积结构、环保要求高的项目里应用前景更广阔,行业得加快制定相关技术规范和标准体系,为其全面推广提供制度保障。

#### 2 传统砖胎膜施工存在的效率瓶颈

基础工程施工时传统砖胎膜应用广泛,但工程体量一旦增加、工期要求一旦提高,传统砖胎膜施工效率低、管

理难度大的问题就愈发明显，急需技术革新突破，这是必须的。

### 2.1 施工周期长影响工程进度

传统砖胎膜一般为现场人工砌筑，其方式工序繁杂需按顺序施工，从基层清理、放线到砖砌、勾缝、浇水养护各工序都耗时久，尤其在雨季或低温时施工进度更易受干扰从而延误整体工程周期，并且要使砌体稳固、尺寸精确需安排多道复测和调整工序会使施工周期更长，在大型或多节段基础工程里这种低效率操作模式无法适应现代建筑高效、高质施工要求还限制整体施工组织的灵活性和连续性，现场人工施工需协调多人进场管理更难且存在交叉作业干扰问题会进一步降低工效使工期更不确定，随着项目越来越复杂且工期要求不断提高，传统施工模式的周期性瓶颈愈发明显无法满足现代工程高标建设需求。

### 2.2 质量控制难度大导致返工频繁

基础混凝土外模采用砖胎膜，混凝土结构的外观与强度直接受其平整度、垂直度及尺寸准确性影响，传统工艺大多靠工人经验，操作水平、材料批次、现场管理等因素对其影响较大，质量问题常出现，如砌体不密实、错缝不规范、模板开裂变形等，若出现施工偏差，不但后续结构施工会被影响，甚至可能局部返工或全部拆除重做，造成时间和成本的双重浪费，并且人工砌筑对施工环境要求很高，湿作业时更容易产生砂浆脱落、砖体移位等问题，从而进一步加大质量风险，很难做到过程可控、结果一致。

### 2.3 人工依赖强不利于规模化发展

传统砖胎膜施工很依赖熟练工人，如今建筑行业劳动力短缺且用工成本上升，这种情况下高强度、持续性的施工节奏很难维持，特别是在一线城市或者大型基建项目里，人工短缺常制约施工进展，并且人工操作难以复制，不利于技术标准化和推广，不符合建筑工业化、标准化、装配化的发展趋势，人工管理分散，现场作业协同困难，材料浪费和安全隐患经常出现，进一步降低了施工效率和现场管理水平，制约施工质量提升和项目成本控制。

## 3 预制砖胎膜在基础施工中的应用优势

基础施工追求高效、高质和绿色发展，预制砖胎膜因在结构标准化、施工机械化等方面表现突出而逐步取代传统工艺，其应用优势体现在多个方面。

### 3.1 缩短工期提升施工效率

工厂化生产标准胎膜单元的预制砖胎膜，使施工从现场砌筑彻底转变为装配施工，与传统手工砌筑相比，现场只需吊装拼接、固定节点即可，操作简单、安装快，极大减少了现场湿作业和人工作业环节。施工高峰期或对进度要求严格的项目，可按工期安排提前批量生产胎膜构件，有效缩短施工周期。标准化设计能让多节段作业，避免工序穿插带来的等待和资源浪费，大大提高施工组织的连续性和高效性。地质复杂或基础形式特殊的工程，采用定制

化预制设计还能进一步优化结构布置、减少返工，使工程建设更具计划性和时效性。

### 3.2 提升质量控制与成型精度

工厂化制造过程是预制砖胎膜的依托，构件在受控环境里生产，其尺寸精度高、结构强度佳，能有效解决现场砌筑中砖缝不匀、垂直偏差大等问题。安装时，构件间借助定位槽、连接钢筋或其他结构件严密拼接，可确保整体胎膜稳定不变形，从而为混凝土浇筑提供坚固可靠的模板支撑。预制砖胎膜表面平整度高，能有效提升混凝土基础的成型质量并减少后期修整工作。而且，统一规范生产可保障各节段施工质量一致，使大体积或长条形基础结构施工效果更协调统一。部分预制胎膜产品还集成了止水带、防腐层等功能性构造，提高了结构耐久性与防渗性能，助力工程整体性能的优化与延寿。

### 3.3 降低人力消耗与安全风险

现场对高技能工人的依赖被预制砖胎膜技术显著降低，施工人员只需接受简易培训就能完成拼装作业从而缓解熟练劳动力紧缺问题，在人力成本不断攀升的行业背景下，此技术有助于降本增效，装配式作业减少了高空作业、砌筑作业等高风险工序且使现场作业流程更清晰、机械化程度高从而有效提升施工安全水平，施工现场作业面减少让施工环境更整洁规范也便于全过程质量监督和安全管控，结合 BIM 系统和数字建造平台等现代项目管理工具可实现构件的进场、安装、验收全流程可追溯管理以进一步提升现场管控能力，重点工程项目工期紧、标准高、风险大，预制砖胎膜综合适应性良好能为项目提供更安全、可控、智能的施工解决方案。

## 4 工程实例对比分析与效率提升成效

预制砖胎膜在实际工程里的应用成效正一点点展现出来，好多典型项目都显示这一技术在施工效率、质量把控以及资源节约上表现很棒且有广泛推广的价值。

### 4.1 北京地铁昌平线项目实践成效

北京地铁昌平线南延工程某地下区间施工时，预制砖胎膜技术被应用于基础结构以让基础筏板混凝土模板外侧成型，该项目原本设计为传统砖胎膜方式，需组织 30 多个工人连续干 15d 才能完成基础胎膜砌筑，但使用预制砖胎膜后，现场仅需 12 个工人用吊装设备拼装构件，5d 就能完成同样工作量，工期缩短一大半还多，且胎膜拼装精度高，混凝土基础浇筑完后表面平整度大大提高，无需二次抹面处理，省出后续工序的时间，项目负责人称，预制胎膜既提高了效率，又减少工地湿作业次数，有效减轻扬尘和噪声污染，改善作业环境，符合绿色施工理念。

### 4.2 上海某高层住宅基础工程对比分析

上海浦东新区某大型住宅小区建设时，开发单位同步把传统砖胎膜和预制砖胎膜用于基础施工以作对比，传统砖胎膜用于项目 A 区，砌筑加上拆模差不多花了 18d，施

工时受天气影响多次停工、尺寸有多处偏差且有渗漏隐患，而预制砖胎膜用在 B 区则不同，仅仅 9d 就完成混凝土浇筑和安装，安装时构件拼接很顺、模板牢固又稳定且现场施工几乎没有返工，施工单位统计显示 B 区劳动力投入减少了大概 40%，混凝土浇筑成型后检测发现底板边界线形控制精度提高了 30%，这个项目证明预制技术在提高施工稳定性、质量一致性和整体效率方面作用显著。

#### 4.3 贵阳综合管廊工程综合提升表现

贵阳市综合管廊一期工程的地下结构基础施工是在复杂地质条件下进行的，施工选用预制砖胎膜技术，该项目存在雨污水、电力通信等多类管线交叉敷设情况且基础结构节点复杂，对施工进度和工期要求非常高，统一设计模板模块后在现场采用分段预装配的施工方式可大大提高模板定位精度，与周边用传统胎膜施工的标段相比，预制段施工周期减少 35%、材料浪费少 25%、现场作业人员减少一半还多，有效缓解人力调配难题，现场环境改善明显且安全事故率大大降低，工程管理单位将这项技术列为后续市政工程优先推广的技术，项目总结称在基础形式复杂、空间受限、工期紧张的市政项目里预制砖胎膜特别适用且在效率提升、安全环保方面效益特别突出。

### 5 推广应用预制砖胎膜技术的对策与建议

预制砖胎膜是提升基础施工效率的重要技术手段且已取得良好应用成效，但在更广范围推广时还面临着认知、机制和技术配套等多方面挑战，得系统推进。

#### 5.1 加强标准体系建设与技术规范引导

预制砖胎膜技术的推广，首要任务是完善技术标准体系，制定统一的设计规范、构件尺寸标准、生产工艺流程以及质量检验标准，目前各地区的工程实践大多为试点性探索，缺少成体系的规范支撑，限制了该技术的普及和复制，住房城乡建设部门或者行业协会应牵头，结合典型工程经验，组织编制《预制砖胎膜技术应用规程》，明确设计参数、连接形式、防水要求以及适用范围，以指导设计院和施工单位科学选型，建立健全质量验收和施工评估机制，推广信息化施工管理和智能检测手段，提高施工质量的可控性，增强全过程监管能力，标准化可推动规模化发展，进而为技术推广提供制度保障和操作依据。

#### 5.2 推动产业链协同与构件工厂化生产

预制砖胎膜的推广需要构件制造企业、施工单位与项目业主高效协同；构件生产环节，应鼓励有预制构件能力的建材企业转型布局砖胎膜产品线，推广模块化设计和机械化流水作业以提高构件制造效率与质量；各地可引导建立区域性构件配送中心，达成工厂集中生产、统一物流运输、按需供货的模式来降低运输成本和现场堆放压力；设计方面要鼓励设计院在项目初期参与胎膜系统设计，与施工单位共同确定胎膜形式、拼装方式和现场安装条件以减

少后期调整和误差；施工单位要有专业装配施工队伍以提高装配效率和技术熟练度，促使队伍从“现场砌筑工人”向“装配技工”转型，还可探索与 BIM、数字建造平台对接，对构件建模、定位、安装全过程进行信息管理以推动技术和数字化融合发展。

#### 5.3 完善激励机制与政策支持体系

构建良好的市场环境和政策导向对预制砖胎膜技术的推广是必要的，在政府投资项目、重点工程和绿色建筑示范工程中建议优先采用这一技术，并且在招投标评分机制里给应用该技术的加分以促使施工单位积极采用新工艺，对于采用预制胎膜技术的项目在施工许可证审批、绿色施工评价等环节也给予支持来降低企业应用技术的门槛，在财政政策上鼓励地方政府设立建筑工业化专项资金，对采用预制胎膜技术且效果显著的企业在补贴或者税收优惠安排上调动企业投入积极性，要加强施工企业管理层和一线人员的技术培训并开展示范工程观摩、工法宣讲、技术竞赛等多种形式的技术推广活动来增强全行业对预制砖胎膜施工价值的认知和接受度，从而形成“标准先行—技术引导—市场驱动”的良性发展模式以加速这一技术在基础施工领域全面落地。

### 6 结束语

建筑基础施工领域的预制砖胎膜施工技术是重要革新手段，充分体现建筑工业化、标准化与绿色发展理念。实际工程应用表明该技术在提高施工效率、稳定质量保障、优化现场管理和减少资源消耗方面优势显著，有效解决传统砖胎膜施工的诸多瓶颈。若要在更大范围推广应用，需在标准制定、产业协同、政策激励等多方面继续努力，完善技术支撑和市场保障体系。随着施工理念不断更新和技术融合深入发展，预制砖胎膜技术未来可能在基础施工中发挥更重要的作用，助力建筑业高质量发展。

### 【参考文献】

- [1] 刘勇利.建筑工程中 HZ 预制砖胎膜的施工方法[J].江西建材,2017(10):94-98.
  - [2] 穆团卫,罗宗育.预制钢筋混凝土板材胎膜施工方法及优点[J].城市建设理论研究:电子版,2014(28):559.
  - [3] 蒋志烽,殷鸿炜.预制砖胎膜施工技术在工程施工中的应用[J].散装水泥,2020(6):99-100.
  - [4] 叶卫良,夏锦欢.承插装配式预制胎膜施工技术[C].北京:2022 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册),2022.
  - [5] 曹先文.探究在工程施工中预制胎膜施工技术的应用[J].化肥设计,2022,60(5):45-48.
- 作者简介：周豪（1992.5—）男，浙江宁波人，汉族，本科学历，工程师，就职于浙江省二建建设集团有限公司，从事现场施工管理工作。

## 关于苯乙烯主冷器夏季高温运行的对策

曹振斌

陕西延长石油（集团）有限责任公司延安炼油厂，陕西 延安 727406

**[摘要]**空冷器作为石油化工装置的常见换热设备，其运行效能直接关乎整个系统的稳定与经济性，而苯乙烯装置 E-1305 主冷器在夏季高温天气时出现的冷却能力不足问题，导致工艺温度超出设计指标，使装置运行处于不良运行状态。通过系统分析发现，粉尘与杨柳絮在翅片管表面积聚形成的隔热层才是传热恶化的主因，这些沉积物的导热系数仅为铝材的 1/400，简直像给换热管裹了层棉被。当操作人员尝试调节风机参数时，被外层翅片遮挡的深层积灰依然阻碍传热，这种缺陷通过简单调整无法彻底解决。

**[关键词]**空冷器；翅片管；高于设计值

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17197

中图分类号: TQ24

文献标识码: A

## Countermeasures for High-temperature Operation of Styrene Main Cooler in Summer

CAO Zhenbin

Yan'an Refinery of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi, 727406, China

**Abstract:** As a common heat exchange equipment in petrochemical plants, the operational efficiency of air coolers directly affects the stability and economy of the entire system. However, the cooling capacity of the E-1305 main cooler in the styrene plant is insufficient during high temperature weather in summer, resulting in process temperatures exceeding the design specifications and causing the plant to operate in a poor state. Through system analysis, it was found that the thermal insulation layer formed by the accumulation of dust and willow catkins on the surface area of the finned tube is the main cause of heat transfer deterioration. The thermal conductivity of these sediments is only 1/400 of that of aluminum, which is like wrapping a blanket around the heat exchange tube. When the operator attempts to adjust the parameters of the fan, the deep layer of dust covered by the outer fins still hinders heat transfer, and this defect cannot be completely solved by simple adjustments.

**Keywords:** air cooler; finned tube; exceeding the design value

### 1 绪论

空冷器主要由翅片管束构成，空气在风机驱动下，降低温度的低温空气流过翅片管的外侧，利用流动的低温空气将翅片管内的热量带出，从而达到降低介质温度的目的，空冷器的翅片管主要作用是：管内走需要冷却或冷凝的工艺流体，管外是空气流动通道，在风机作用下增强空气流动增加管外表面的温度下降，使翅片提高传热效率，使气相介质冷却、冷凝为液相介质，迅速促成气液相的转换。

### 2 论述背景

苯乙烯装置中关键冷设备 E-1305 主冷器，其核心工作原理在利用环境空气在风机的作用下为介质冷却，具体而言，就是依靠电机驱动庞大的风叶高速旋转，从而产生强劲的气流，这股持续不断的风被精准地导向并吹拂过翅片管束经过设计的、拥有巨大扩展表面积的外表面，通过这样一种方式，使得在翅片管内部封闭流动着的、来自上游脱氢反应环节的、温度极高的气态反应产物所含有的热量，能够被高效地、持续不断地传递出来并被流动的冷空气带走，最终实现该高温气态物料在设定温度指标这一目标温度之下成功完成冷凝相变，进而达成气态与液态组分明确分离这一目的冷却设备。然而，在每年夏季气温较高

月份的实际运行过程中，经常出现冷后温度超出设计指标的现象，即该主冷器出口物料的实际冷却温度，超出了其设计所规定的指标，在极端炎热天气条件下，其读数甚至能够攀升至高达 58°C 这样一个显著偏离设计基准的水平<sup>[1]</sup>。对于夏季高温，冷后温度超出设计指标，操作人员和技术人员也尝试了多种在常规认知中理应能够调节冷却效果的、针对空冷器本身的运行参数调整手段，其中就包括了调节那些巨大风叶的旋转角度或者改变其转速等直接作用于风量和风压的措施，但虽有效果但期望中的冷却温度有效降低这一目标却始终未能达成，冷却效果提升得并不明显或者说改善得极其有限。因此，夏季高温天气时段里，E-1305 主冷器冷却后温度超出设计指标已经实实在在地、不容置疑地构成了对苯乙烯装置达到规定生产负荷目标的一个显著且亟待解决的制约因素。

### 3 原因分析

#### 3.1 工艺过程与聚合物生成可能性的排除性论证

主冷器内部所处理的介质本质上属于负压绝热脱氢反应后产生的、经过多级换热系统深度降温的复杂气态混合物，具体而言，该混合物首先流经过热器 (E-1301) 进行初步冷却，紧接着进入低压蒸汽发生器 (E-1302) 和低

低压蒸汽发生器（E-1303）这两个关键换热设备，通过这样一系列连续而充分的换热过程，其温度已经从初始高温状态显著下降到大约 120°C 这样一个相对较低的、但仍然高于许多有机物沸点的水平；此后，在急冷器环节中，温度被精确控制在 51°C 左右的液态急冷水以雾化形态被高压喷入，与高温气流发生剧烈的、面对面的直接接触式换热，这种换热方式效率极高，使得反应产物气流的温度在极短时间内被急剧冷却到 69°C 左右，虽然温度降低明显，但此时物料整体依然保持完全的气相状态，然后这股气态物流才会离开急冷器并最终进入主冷器（E-1305）的管程内部。需要特别指出的是，在 E-1305 内部维持着的负压操作环境、结合温度进一步降低至 60°C 以下且介质流速极快这两大特征，以及一个不可忽视的观察事实——即在环境温度相对较低的夜间时段和春秋季节，主冷器的出口温度完全能够稳定达到并满足生产工艺所规定的指标要求——基于所有这些工艺条件和实际运行表现，从物理化学基本原理出发进行审慎推断，在 E-1305 主冷器内部管道中发生聚合物生成、沉积并最终导致传热效率下降这种情况，其发生的理论可能性实际上也是微乎其微或者说根本不具备成立条件的。

### 3.2 装置负荷与设计能力匹配度的评估结论

该套苯乙烯装置在其建成投产的初期运行阶段，未出现过类似当前所面临的夏季主冷器冷却能力不足的问题，这一历史运行情况是明确而有据可查的；更加具有说服力的是，当前装置的实际运行负荷仅仅维持在 45% 这样一个远低于设计最大处理能力的水平，只达到设计负荷的小部分而非满负荷甚至过负荷运行。综合投产初期的良好表现与当前低负荷运行的现实，经过对比分析，我们可以相当有把握地得出结论：空冷器系统的原始设计规格和换热能力，在理论上和实践上都是完全能够满足甚至超出当前实际生产需求的，换句话说，设计能力存在缺陷或者设计余量不足这一可能性，可以被明确而彻底地排除在导致当前问题的主要原因之外。

### 3.3 空冷器本体环境积灰效应的实证性锁定

将分析焦点转向空冷器设备本身可能存在的缺陷或影响因素，通过组织多次深入而细致的现场检查、运行数据比对和设备状态分析，一个显著且具有明确地域相关性的问题被清晰地揭示出来：由于我厂的地理位置处于中国北方典型的多风沙、多飞絮的干旱半干旱区域，每年春季开始，周围环境中充斥着的杨柳絮、细微尘埃颗粒、随风飘扬的泥沙以及各类小型昆虫等空气悬浮杂质，极其容易在空气流经空冷器翅片管束时，因为静电吸附、惯性撞击和表面黏附等多种物理机制的作用，持续而顽固地沉积并附着在那些由铝合金材料制成的、为了增大换热面积而设计的翅片管的最外层表面上；尤其需要强调的是，由于该空冷器采用的风机是向上吹风的独特设计布局，这种气流组织方式在长期运行过程中反而加剧了问题，使得那些从地面或低空被卷扬起来的、较重的灰尘颗粒和泥沙更容易在翅片管表面滞留和累积。随着时间的推移和设备不间断

地连续运转，在翅片管与空气接触的所有外表面上，无可避免地形成了一层由多种杂质混合构成的、厚度不均的覆盖层<sup>[2]</sup>。特别关键的是，构成这层覆盖物的主要成分是灰尘和泥沙，它们固有的、极低的导热系数，通常仅在 0.1~0.5W/m·K 范围内，而铝材高达 200W/m·K，就像给翅片管包裹上了一层厚厚的隔热保温棉被，从根本上严重阻隔了热量从管内高温介质向管外流动空气的正常传递过程，说白了就是，最终导致空冷器翅片管散热性能出现大幅度的、灾难性的下降，这才是夏季冷却效果恶化的根本性原因。

## 4 解决对策

### 4.1 工业风初步吹扫的有限性实践验证

基于前期分析中明确锁定的翅片管表面沙尘堆积是导致散热降低的这一结论，车间技术人员决定首先采取操作最为简便快捷的、使用 0.6MPa 压力工业压缩空气进行逐片机械吹扫的初级干预手段。具体实施过程表现为：操作人员在空冷器顶部平台，手持特制的、带有细长金属喷管的吹扫装置，针对每一片翅片管束的上部可见表面，以倾斜 45° 角的姿态和约 20cm 的近距离，实施高强度定点喷吹作业。这种直接作用于表层的物理清理方式，的确取得了立竿见影的、值得记录的效果——主冷器出口温度从原先的 58°C 高位显著回落到 51.4°C 这一接近设计值的水平。然而，这样的吹扫智能吹扫空冷管束的上表面，由于空冷器内部多层翅片管束紧密排列所形成的复杂空间结构特性，那些位于内层深部的、被外层翅片遮挡的顽固积灰区域，工业风的气流根本无法有效触及和清除；更麻烦的是，在向上吹扫的半密闭环境中，被短暂吹离表面的粉尘颗粒，实际上会在气流扰动结束后重新沉降并再次附着到翅片表面。因此，尽管吹扫作业暂时性缓解了温度超标这一表象问题，但本质上只是将深层积灰的影响部分延迟和转移了，未达到根除效果。

### 4.2 清洗

当装置尝试提升生产负荷至 60% 时，工业风吹扫后短暂稳定的冷却温度再次出现反弹升高趋势，这一现象强有力地证明了表面处理措施的局限性。通过更细致的现场观察发现，E-1305 翅片管表面积灰主要由松散附着的浮尘和泥沙构成，未见化学黏结或者其现象微弱。因此，车间采用分区分时段作业模式，使用高压清水对翅片管实施多轮冲洗：第一阶段：自上而下冲洗外层翅片；第二阶段：侧向斜射冲洗中层间隙；第三阶段：底部逆向冲洗内层管束；冲洗后温度变化数据呈现出明显改善（如图 1-4 所示）：上午 11:00 平均温度从 56.2°C 降至 49.1°C，中午 1:00 平均温度从 58.0°C 降至 50.3°C，下午 3:00 平均温度从 57.5°C 降至 50.8°C。

但随后发现新问题：在连续三次冲洗后，翅片管表面出现白色物质。经分析，当用普通清水冲洗运行中的设备时，管内 60°C 以上的介质会使翅片表面水温迅速升高，导致水中钙镁离子析出形成水垢，这种导热系数仅 1.1W/m·K 的沉积物，比粉尘的隔热效果更可怕。因此总结出经验，清洗时必须切换除盐水，否则随短时解决温

度超出设计指标问题,但是如果长期清洗会造成结垢,降低传热效果,更可怕的是可能出现设备的损坏。

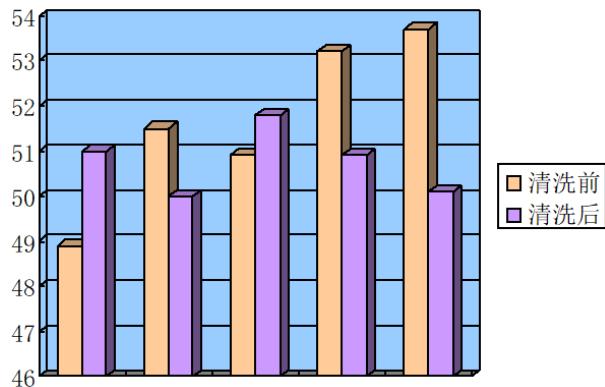


图 1 连续五天清洗前后上午 11:00 温度对比

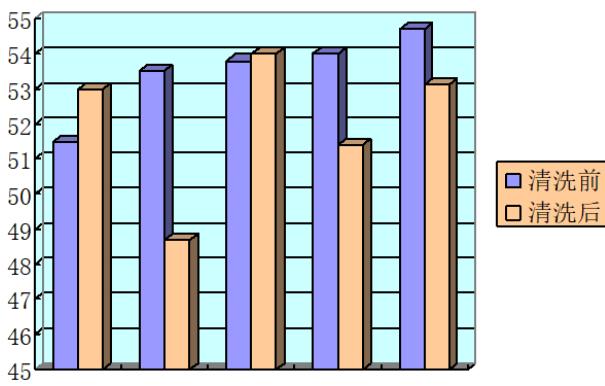


图 2 连续五天清洗前后中午 13:00 温度对比

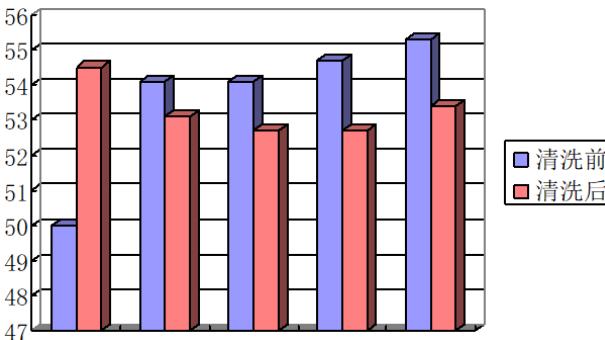


图 3 连续五天清洗前后下午 15:00 温度对比

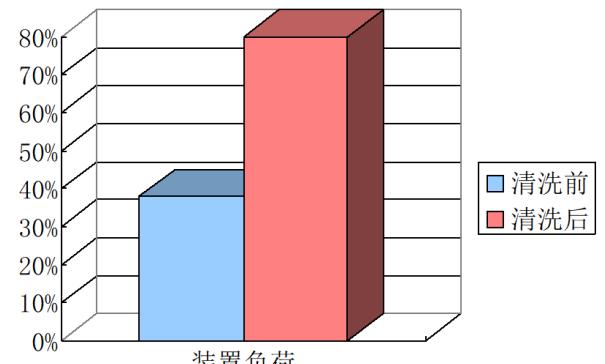


图 4 加工负荷对比

### 4.3 关键操作要点的经验固化

通过实践总结出两条经验:但凡涉及可能产生温度梯度的在线清洗,必须采用电导率 $<10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的除盐水,这是防止二次结垢的底线要求,普通清水仅允许在停机检修,温度较低时使用。使用清水清洗作业,冲洗水压力不能过高,防止水压对铝制翅片的冲压变形,也防止损坏管束。

## 5 长效保障方案

### 长效应对方案

#### 5.1 挡风板防热风回流的物理隔离策略

当基础清洗手段以外,在极端高温天气条件下还可以在空冷器翅片管束散热区域的正上方两侧钢结构框架处,加装由较轻但坚实的材质制成的、高度和长度覆盖整个管束区域的垂直挡风板这一看似简单的改造措施,可以作为降低主冷器温度的辅助效果。具体安装位置及结构示意详见图 5。其作用是由于空冷风机持续向上吹送冷却气流,被翅片管加热至 70°C 左右的高温空气,在无遮挡情况下会自然上升并扩散至周边环境;然而,在夏季无风或微风的特定气象条件下,这些密度较低的热空气团,极有可能在空冷器设备本体周围形成局部热循环流场,最终导致部分高温空气被底部进风口重新吸入。通过设置挡风板这样物理屏障,能够有效阻隔热废气在设备顶部空间的水平扩散路径,强制改变其运动方向使之垂直向上快速排离,这个简单的装置就是要切断热风回流这条恶性循环链,防止已经带走过热量的高温空气回头再次参与冷却过程,因为用热风来冷却热管,效果必然变差。

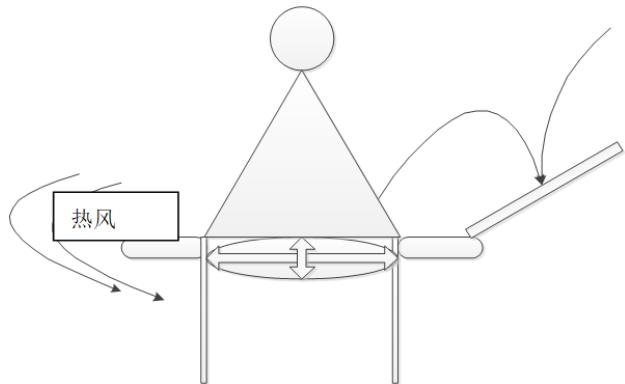


图 5 安装位置示意

#### 5.2 并联水冷系统扩容的工程冗余设计

针对空冷器固有换热能力在夏季高温高负荷工况下存在刚性不足这一深层次矛盾,在挡风板改造基础上同步推进的、在脱氢反应产物总管关键节点处增设旁路水冷器的保障方案,则代表着更为彻底的系统性解决思路。具体实施流程是:首先需要全面收集装置在近三年夏季运行期间所有相关温度、流量、压力等历史操作数据;然后委托具有甲级资质的化工设计院,基于这些真实运行参数进行严谨的热力学计算和换热面积校核,准确量化现有空冷器管束在极端工况下的换热能力缺口<sup>[3]</sup>;最后根据该缺口

量身定制设计一台管壳式换热器，以并联方式接入现有工艺流程，并在其进出口管线上配置双切断阀及调节阀组以实现灵活控制。这套系统最巧妙的地方在于，在春秋季等温和气候时段，水冷器可以完全隔离退出运行，这时候空冷器单独承担冷却任务；但是一旦进入夏季高温季节或者装置需要提升负荷至 80% 以上时，只需打开阀门让部分反应产物分流至水冷器，用循环水带走那部分多余的热负荷，空冷器的负荷降低，温度可以控制在设计指标范围内。

## 6 结论

通过实施高压除盐水清洗、挡风板防热风回流以及并联水冷器扩容等系列改造措施，苯乙烯装置将 E-1305 主冷器的夏季出口温度稳定控制在 51℃ 以下，这验证了积灰导致传热恶化的初始判断，更标志着装置彻底摆脱了季节性负荷限制的困境。在改造过程中发现的清水冲洗导致二次结垢这一现象，也明确了化工设备高温运行清洗中水质控制的重要性，那些看似微不足道的钙镁离子，

在 60℃ 以上介质加热作用下形成的隔热层，其危害甚至远超原始粉尘污染。值得反思的是，该案例暴露出传统设计规范对多风沙地区空冷器防污设计的考虑不足，那些按照标准工况计算的换热余量，在实际运行中可能被环境因素轻易吞噬。

## [参考文献]

- [1] 张健,赵广明,李凤奇,等.苯乙烯管道冷循环热力特性研究[J].石油化工设计,2019,36(4):58-63.
- [2] 陈腾龙.废塑料纤维增强聚苯乙烯轻质混凝土干缩性能研究[J].广东建材,2025,41(6):17-20.
- [3] 王志,孙海东,严雄仲,等.电活性 SPS/CNTs/PVA/LMO 渗透膜的构筑及锂离子选择性分离 [J].水处理技术,2025,6(24):1-7.

作者简介：曹振斌（1981.9—），男，毕业院校：西安石油大学，所学专业：机械设计制造及其自动化，当前就职单位：陕西延长石油（集团）有限责任公司延安炼油厂，职务：设备工程师，职称级别：中级。

## 冷库制冷系统设计中常见问题的探讨

王婵君 王明章 常广勋

华商国际工程有限公司, 北京 100069

**[摘要]**伴随冷链物流以及食品保鲜行业不断向前发展,冷库在确保食品质量以及延长货物储存时间方面有着十分重要的作用。不过当下冷库的制冷系统设计还存在着不少问题,这些问题一方面影响了冷藏库的运行效率以及制冷效果,另一方面也造成了能源的浪费并且使得运行成本有所提高,对冷藏库的可持续发展形成了限制。这篇文章针对冷库制冷系统设计里那些典型的难题展开系统剖析,目的是为设计方面的优化以及节能减排给予一定的理论依据与实践方面的参考。

**[关键词]**冷库; 制冷系统设计; 问题及策略

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17198

中图分类号: TU249

文献标识码: A

### Discussion on Common Problems in Cold Storage Refrigeration System Design

WANG Chanjun, WANG Mingzhang, CHANG Guangxun

Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100069, China

**Abstract:** With the continuous development of cold chain logistics and food preservation industry, cold storage plays a very important role in ensuring food quality and extending the storage time of goods. However, there are still many problems in the current design of refrigeration systems for cold storage. These problems not only affect the operational efficiency and cooling effect of cold storage, but also cause energy waste and increase operating costs, which limits the sustainable development of cold storage. This article conducts a systematic analysis of typical challenges in the design of refrigeration systems for cold storage, with the aim of providing theoretical basis and practical reference for design optimization and energy conservation and emission reduction.

**Keywords:** cold storage; refrigeration system design; problem and strategy

#### 引言

随着现代冷链物流以及食品保鲜方面的需求快速增长起来,冷库已然成为保障食品安全以及质量的关键基础设施,所以其制冷系统设计的科学性与合理性越发受到人们的关注。冷藏库的制冷系统肩负着维持库内温度处于低温且恒定状态这样的关键任务,同时它还对储存物品的品质、能耗水平以及运营成本产生着直接的影响。不过在实际的工程设计以及运行进程当中,依旧存在着不少显而易见并且普遍存在的一些问题,这些问题一方面制约着冷藏库制冷系统性能的正常发挥,另一方面也加大了维护的难度并且加重了能耗的负担。像制冷系统负荷计算出现不准确的情况、设备选型不够合理、管路设计以及保温措施存在缺陷、控制系统响应速度迟缓还有能耗管理以及节能设计有所欠缺等等这类问题,在冷库的设计与建设环节当中是广泛存在的,它们对冷藏库的使用效果以及经济效益造成了极为严重的影响。针对这些存在的问题,去深入剖析其产生的原因以及呈现出来的表现形式,并且提出切实能够施行的优化策略,这对于提高冷库的设计水准、保障冷链的安全以及推动绿色节能工作都有着十分重要的意义。本文主要是要全面且细致地梳理冷库制冷系统设计中那些常见的问题,借助对其在技术层面以及管理层面所存在不足之处展开分析,再结合先进的技术以及管理手段,给出科学且合理的改进办法。

#### 1 冷库制冷系统设计中常见问题分析

##### 1.1 制冷系统负荷计算不准确

在冷库开展制冷系统设计的时候,制冷系统负荷计算出现不准确的情况是比较常见的,并且这一问题产生的影响颇为严重。负荷计算在整个制冷系统设计当中属于基础环节,它的精准与否会直接影响到后续的设备选型工作、管道的布置情况、系统的运行效率以及能耗方面的水平。不过在实际的设计流程里,有一部分设计人员因为对冷藏库的使用功能、储存货物的种类还有货物进出的频率等因素考虑得不够周全,往往会仅仅凭借个人经验或者运用简化的计算办法,把建筑结构的热传导情况、人员以及设备的散热状况、开门次数所引发的热负荷,还有货物初冷期间的热湿交换等都给忽略了,如此一来就使得计算得出的结果存在很大的偏差。而且还有部分设计没有充分考虑到冷藏库所在地区气候变化的因素以及全年的运行工况,进而使得设计出来的冷量不是偏小就是偏大,这对系统运行的稳定性以及经济性都产生了影响。

##### 1.2 制冷设备选型不合理

在冷库的制冷系统设计环节当中,制冷设备选型欠合理这一情况,已然成为致使系统运行效率不高、能耗过高的情况出现,同时还会让维护成本有所增加,这无疑是一个较为突出的问题。部分设计单位在开展设备选型相关工作的时候,没能很好地将实际工况以及冷藏库的实际使用需求充分结合起来考虑,大多是以自身的经验来做出判断

的,对于设备的各项性能参数、运行时的稳定性状况、适用的具体环境以及从长远来看其运行的经济性等方面,并没有去做综合性的分析考量。就好比说,有些设计在碰到那种存在大温差、负荷变化幅度也很大的场景时,依旧采用单一型号或者固定容量的制冷设备,如此一来,设备在处于部分负荷状态的情况下,就会频繁地进行启停操作,这对系统的稳定运行以及使用寿命都产生了不利影响<sup>[1]</sup>。除此之外,还有部分项目并没有依据冷藏库的具体用途(像是速冻、冷藏又或者是保鲜等不同用途)去选择具备相应功能特性的设备,结果导致设备没办法满足所需要的温湿度控制方面的要求,最终对贮藏货物的品质也造成了影响。

### 1.3 管路设计及保温措施缺陷

在冷库的制冷系统设计环节当中,管路设计以及保温措施方面存在着一定的缺陷,而这一情况恰恰是影响系统运行效率以及制冷效果的关键因素之一。部分从事设计工作的人员在着手布置管道的时候,没有全面且细致地去考量管路的长度、走向、坡度以及敷设的具体方式,如此一来便致使制冷剂流动时所遇到的阻力有所增大,系统出现过高的压降状况,并且还极有可能会出现局部气液分离或者回油不够顺畅的这类现象,进而对压缩机的正常运转以及系统的整体稳定性都产生了不利的影响。除此之外,像冷凝管、蒸发管等在系统中极为关键的部位,在设计之时并没有按照相关的工艺要求留出足够的用于维修与更换的空间,这无疑给后期的维护工作带来了相当大的麻烦。就保温措施来讲,有些工程项目在选择管道的保温材料以及设定其厚度的时候并不恰当,尤其是在那种高温且高湿的环境之下,保温层很容易就会出现吸湿、老化、变形等一系列的问题,这就使得冷量出现了较为严重的损失情况,同时系统能耗也随之大幅度地上升。更有甚者,由于保温施工工艺比较粗糙,又或者是对施工质量的把控不到位,从而导致保温层出现缝隙、发生脱落或者产生热桥效应等不良情况,最终引发管道出现凝露、滴水等现象,甚至还会出现腐蚀、结霜等状况,这既影响到了制冷的效果,而且还可能对设备的安全以及冷库内部的卫生环境都构成潜在的威胁。

### 1.4 控制系统响应迟缓或不稳定

在冷库的制冷系统设计环节当中,控制系统出现响应迟缓或者运行不够稳定的情况,这无疑属于影响整个制冷系统达成精确调控以及实现高效运行的常见问题之一。冷藏库对于温度、湿度等诸多参数的控制精度有着颇高的要求,倘若控制系统的响应不够及时,又或者指令传输不够准确,那么便极易致使冷库内部的温湿度出现频繁波动的状况,进而对贮藏物品的品质以及安全产生影响。有些工程在设计伊始并未充分考量控制系统和制冷主机、传感器、阀门等各类设备之间的匹配情况,如此一来便使得自动控制逻辑不够完善,参数设置也不够合理,最终造成系统运行时频繁地启停,又或者没办法依据负荷变化来动态地调整自身的运行状态<sup>[2]</sup>。除此之外,控制系统硬件配置得当与否,亦或是通讯线路设

计是否规范,倘若存在问题,那么同样有可能引发诸如数据延迟、信号干扰乃至控制失灵等一系列问题,这对制冷系统的运行效率以及稳定性造成了极为严重的影响。

### 1.5 能耗管理与节能设计不足

在冷库开展制冷系统设计之时,能耗管理以及节能设计存在诸多不足,这可算得上是普遍存在的状况,并且这一情况对于长期运行成本所产生的影响极为显著。冷藏库属于典型的高能耗建筑类型,其中的制冷系统往往就是能源消耗最为集中的源头所在。倘若在设计环节没有全面且细致地去考量节能方面的各项策略,那么在后续的实际运行过程当中,便极有可能出现能源被大量浪费的情况,进而使得整个系统的经济性大打折扣。有些项目在设计流程当中,把过多的关注点都放在了如何满足制冷能力的要求之上,然而却完全忽略了针对系统整体能效所应当开展的评估工作,也没有依据实际情况合理地去挑选那些具备高能效特性的设备,如此一来,就致使设备在实际运行当中的效率变得极为低下。不仅如此,还存在着缺乏一套系统化能耗分析与评估工具的状况,这就导致设计工作没办法准确地去量化不同设计方案给能耗所带来的具体影响,同时也很难达成具有针对性的优化效果。在节能设计这个层面上来讲,部分冷藏库并没有设置像热回收、变频控制、分区调节这类的节能功能,其系统运行的方式也比较单一,在面对季节变换或者负荷发生变化的时候,也无法自动地去调整自身的运行策略,最终使得能耗一直处于过高的状态。

## 2 优化冷库制冷系统设计的策略与措施

### 2.1 提高负荷计算的准确性

提高负荷计算的精准度乃是优化冷库制冷系统设计的关键环节,其与制冷系统设备选型是否合理、运行效率高低以及能源消耗控制水平紧密相关。在实际设计进程中,需要全面考量诸多影响因素,针对冷负荷展开科学且严谨的计算,这其中包括库体围护结构的传热负荷、货物进出时带入的热量、人员和设备散发的热量、照明产生的热负荷、通风换气带来的热量等,并且要对货物预冷期间的瞬时负荷以及日常运行过程中的动态负荷变化加以评估。库房的地理位置、气候条件、建筑朝向以及季节温差等外部环境因素同样要作为负荷评估的重要参考依据,以此保证设计方案契合实际运行的需求。为了提升计算精度,应当运用先进的负荷计算软件或者构建数学模型来对各类负荷展开模拟分析,防止因经验估算或者参数选取不妥当致使负荷计算出现偏差。

### 2.2 合理选型与设备配置

合理选型以及设备配置,这可是确保冷库制冷系统能够高效且稳定地运行的重要环节,它对于保障制冷效果、降低能耗还有延长设备使用寿命等方面有着极为重要的意义。在实际开展设计工作的过程当中,设备选型应当以准确的负荷计算得出的结果当作基础,再结合冷藏库具体的用途、规模、温湿度的要求以及运行工况等情况,综合去考量制冷设备的制冷能力、运行效率、适用环境、控制

方式还有其能效比等诸多关键参数,务必要保证所选取的设备能够在不同季节以及不同工况下都可满足冷库动态负荷的需求。特别是在面对那些货物种类多种多样、进出又十分频繁的冷库场景时,就更要优先去选择具备多级调节功能以及有自动负载调控能力的制冷设备了,如此一来便可避免因设备频繁启停而出现的能耗浪费以及运行不稳定的情况<sup>[3]</sup>。与此在设备配置的过程当中,还应当重视系统的整体匹配性和协同性,比如说压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀等各个部件的容量需要合理地相互匹配起来,以此来保证系统运行的平衡性和可靠性。从系统结构设计的角度来讲,要优先采用那种高效节能型的设备,像是变频压缩机、高效换热器以及智能化控制模块等等,通过这些举措来提升整体的运行效率,进而降低运行成本。

### 2.3 优化管路设计与强化保温

优化管路设计以及强化保温举措对于提升冷库制冷系统的运行效率而言极为关键,能够有效降低冷量损耗并确保库内温度维持稳定状态。在制冷系统当中,管路属于制冷剂输送的重要通道,其布置方式是否合理会直接对系统的流动阻力、换热效率以及能耗水平产生影响。在实际开展设计工作时,需要依据冷藏库的结构布局情况、设备所处的位置以及具体使用功能来科学规划管道的走向以及长度,要尽力避免出现不必要的迂回状况以及过长的管线情况,与此同时还要确保有合理的坡度以及回油设计,以此来减少制冷剂在管路里面出现的压降以及滞留情况,进而提高系统的循环效率。尤其是在多联机组或者多区间制冷系统这种情况下,更要着重关注管路之间压力的平衡与分配是否合理,防止系统在运行过程中出现不稳定的情况。除了从流体动力学方面进行设计之外,强化管道的保温措施同样有着十分重要的意义。因为冷藏库的内部与外部存在着较大的温差,倘若管道的保温处理做得不够到位,那么就会导致大量的冷量出现损失情况,使得制冷负荷以及能源消耗都增加起来,甚至在处于高湿的环境之下还会出现结露、滴水以及结霜等一系列的现象,进而对系统设备的正常运行以及库内环境卫生都会产生影响。在选择保温材料的时候,应当综合考虑管道的温度等级、所处的使用环境以及施工工艺等因素,优先选用那种导热系数比较低、吸湿率也比较小并且阻燃性较强的高性能材料,而且还要合理地设计保温厚度,以此来确保能够达到长期运行的效果。

### 2.4 采用先进智能控制系统

采用先进的智能控制系统乃是优化冷库制冷系统设计的关键举措,其可助力达成对冷藏库内部温湿度的精准调控,推动系统运行效率得以提升,促使能源消耗有所降低。智能控制系统经由集成传感器、控制器以及执行机构,可实时对库内的温度、湿度、制冷设备运行状态还有环境变化等诸多关键参数加以监测,依据预设的控制策略来自动调节制冷机组的启停情况、风机转速、阀门开度等设备运行模式,进而保证冷藏库各个区域温度维持均匀且稳定

的状态,契合不同的储存需求<sup>[4]</sup>。除此之外,智能控制系统拥有数据采集与分析的功能,能够实时记录设备运行数据,结合历史数据以及环境信息展开大数据分析与预测,提前对潜在故障和能耗异常发出预警,达成预防性维护的目的,缩减设备停机时间以及维修成本。

### 2.5 节能技术应用与能耗监测

节能技术的应用以及能耗监测,这在提升冷库制冷系统运行效率方面而言,可算得上是极为关键的环节,其对于达成绿色节能以及可持续发展的目标来讲,有着不容小觑的重要意义。在着手设计的时候,务必要充分地引入那些较为先进的节能技术,比如说可以采用变频调速技术来对压缩机还有风机的运行加以调节,依据实际所存在的负荷需求去动态地调整设备的运行状态,如此一来便能够避免出现无效能耗的情况,也能防止因频繁启停而引发的能量浪费问题。与此要和热回收技术相结合起来,把制冷过过程里所产生的余热拿来用于冷库的辅助加热或者预热工艺当中,以此进一步促使能源利用率得以提升。除此之外,还得合理地去设计分区控制以及负荷分配系统,依据不同区域所具有的储存需求以及温控标准,达成精准控温的目的,进而减少那些不必要的能量消耗情况。在运行的这个过程当中,建立起完善的能耗监测体系那是相当重要的事情,通过去安装智能能耗监测仪表以及数据采集系统,能够实时地将各个设备以及系统的能耗数据都记录下来,再结合大数据分析技术针对能耗趋势展开评估与诊断工作,从而能够及时地察觉到异常能耗点以及潜在的节能空间所在,进而为优化运行策略给予科学层面的依据支撑。

### 3 结语

冷库制冷系统设计存在诸多问题,这使得系统运行效率以及能源利用效果均受到了影响。经对这些问题加以分析后能够发现,科学且合理的设计以及管理对于确保冷藏库稳定运行有着十分重要的意义。在今后应当着重强化针对负荷计算、设备选型、管路保温以及智能控制等诸多方面的优化工作,持续提升节能水平,促使冷藏库制冷系统朝着更为高效并且更加环保的方向不断发展,进而更好地契合冷链物流以及储存方面的需求。

#### 【参考文献】

- [1] 唐浩.冷库制冷工艺存在的问题分析[J].工程技术研究,2020,5(3):263-264.
- [2] 许宁波.冷库制冷工艺存在的问题及对策分析[J].时代农机,2017,44(9):116.
- [3] 赵杨.大型冷藏库制冷工艺设计易见问题的探讨[J].冷藏技术,2009(4):35-39.
- [4] 刘军,董磊,全峰.某大型冷库制冷系统的选[J].冷藏技术,2019,42(4):38-40.

作者简介:王婵君(1980.2—),女,民族:汉,籍贯:天津,职称:高级工程师,学历:本科,毕业院校:天津商业大学,研究方向:制冷工艺。

## 空调制冷系统的自动化控制与节能策略研究

王明章 王 锋 郭重阳

华商国际工程有限公司, 北京 100069

**[摘要]**建筑能耗在整体能源消耗里所占的比例不断升高, 空调制冷系统是关键的能耗主体, 其自动化控制以及节能技术变成研究的重点对象。当下, 许多传统空调系统大都使用定频控制模式, 存在着能耗偏高、控制响应速度慢, 还有运行效率不高等诸多问题。尽管近些年来变频技术、智能传感器以及自动化控制系统获得了广泛的应用, 然而系统的整体智能化程度依然存在改进和提高的部分, 在达成个性化调节以及动态负荷优化这些方面还需要探索与研究。所以深入研究更为精准且高效的自动化控制策略以及节能办法, 促使空调制冷系统朝着智能化、绿色化的方向去发展, 有着十分重要的实际意义和应用价值。

**[关键词]**空调制冷系统; 自动化控制; 节能策略

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17195

中图分类号: TP29

文献标识码: A

## Research on Automation Control and Energy-saving Strategy of Air Conditioning Refrigeration System

WANG Mingzhang, WANG Feng, GUO Chongyang

Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100069, China

**Abstract:** The proportion of building energy consumption in overall energy consumption is constantly increasing, and air conditioning and refrigeration systems are the key energy consuming entities. Their automation control and energy-saving technologies have become the focus of research. At present, many traditional air conditioning systems mostly use fixed frequency control mode, which has many problems such as high energy consumption, slow control response speed, and low operating efficiency. Although frequency conversion technology, intelligent sensors, and automation control systems have been widely used in recent years, there is still room for improvement and enhancement in the overall intelligence of the system. Further exploration and research are needed to achieve personalized regulation and dynamic load optimization. Therefore, in-depth research on more precise and efficient automation control strategies and energy-saving methods is of great practical significance and application value in promoting the development of air conditioning refrigeration systems towards intelligence and green direction.

**Keywords:** air conditioning refrigeration system; automated control; energy-saving strategy

### 引言

全球能源消耗总量不断增多, 环境保护的压力也越来越大, 在这样的情况下, 空调制冷系统作为建筑能耗的关键部分, 其节能以及智能化控制方面的问题受到了很多关注。空调系统一方面在营造舒适环境这件事上起着极为重要的作用, 另一方面也是能源消耗以及碳排放的重要部分。传统的空调系统大多使用定频运行为主的方式, 存在着能耗偏高、调节粗放以及设备磨损较为严重等诸多问题, 很难满足现代建筑对于节能环保目标和智能管理的要求。随着自动化技术、传感器技术以及信息通信技术不断发展与进步, 空调制冷系统的自动化控制程度也在不断提高, 智能调控以及动态节能变成了有可能实现的事情。借助引入先进的控制算法、变频技术、负荷预测以及热能回收等一系列节能策略, 不但能够对系统运行效率加以优化, 而且还可以有效地减少能源消耗以及运营成本, 推动绿色建筑以及可持续发展目标达成。所以, 深入且细致地去研究空调制冷系统的自动化控制技术以及节能策略, 有着十分重要的理论层面的价值以及实际应用方面的意义。这篇文章

会围绕空调制冷系统的自动化控制当下状况、关键技术以及节能策略展开全面分析, 探寻怎样依靠智能化的方式提高系统性能, 达成节能减排的目的, 从而给相关领域在技术发展以及工程实践方面给予一定的参考。

### 1 当前空调自动化控制的主要挑战

当前空调自动化控制于实际应用进程里碰到不少难题。其一, 不同使用场合针对温度、湿度、空气质量等舒适性参数所提出的要求有着明显区别, 这致使系统设计以及控制策略很难达成通用化, 进而让系统开发及运维的复杂程度有所增加。其二, 现有空调系统当中存在着传感器控制精度有一定限制、布置不够合理之类的问题, 这些问题有可能致使环境数据采集出现不精准的情况, 对控制系统的实时响应以及调节成效产生影响。建筑结构具备复杂特性且空调负荷变化存在不确定性, 这就使得系统在应对动态环境变化的时候难以达成高效且稳定的调控效果。在传统控制系统方面, 普遍存在着响应存在滞后情况、调节精度不够等技术方面的局限, 特别是在多区域、多联机空调系统当中, 协调控制的难度会更大一些。与此部分设备

缺少统一的通信协议以及标准接口,这就致使自动化系统的集成性较差、兼容性不足,对系统整体的运行效率以及智能化水平都产生了影响。用户使用行为带有随机性并且存在差异性,这又进一步加大了空调负荷预测的难度,对自动化控制系统的精细化以及智能化发展形成了限制。

## 2 空调制冷系统的自动化控制技术

### 2.1 温度、湿度与压力的监测与调控技术

在空调制冷系统里,对温度、湿度以及压力展开监测并加以调控的技术,构成了实现自动化控制的关键基石。借助安装高精度传感器这一举措,系统便能够持续且实时地收集室内外的温度、湿度方面的数据,同时也能获取系统内部的压力数据,进而构建起完备的数据感知网络体系。这些传感器一般都会与中央控制器或者PLC模块建立连接关联,依据所设定的逻辑算法来针对环境参数展开分析与判定操作,以此推动压缩机、风机、阀门等一系列执行机构达成自动调节的目的,从而确保能维持住设定好的舒适环境区间范围<sup>[1]</sup>。比如说,要是检测发现室内温度超过了设定的数值,那么系统就会自动增加制冷输出的强度;而当湿度处于过低的状态或者出现压力波动异常的情况时,同样也会迅速对运行状态做出调整,以此来保证系统的安全状况以及运行的效率水平。

### 2.2 PLC控制系统应用

在空调制冷系统里,PLC控制系统得到应用之后,系统的自动化程度以及运行效率都得到了明显提升。PLC自身具备很高的可靠性,还有灵活的编程能力以及强大的逻辑处理功能,可以针对空调系统里面的压缩机、冷凝器、蒸发器、电动阀、风机等这些关键设备展开精准控制。借助预先设置好的控制程序和控制策略,PLC能够依据实时所采集到的温度、湿度、压力等相关参数,自动完成启动、调节以及停机等一系列操作,以此来保证系统在不一样的运行工况之下始终处于最佳的系统状态。除此之外,PLC还能匹配多种通信协议模块,这使得其与上位机、触摸屏以及建筑管理系统(BAS)进行信息交互时较为便利,进而达成对整个空调系统的集中监控以及远程操作。

### 2.3 传感器与执行器的集成控制

在空调制冷系统的自动化控制方面,传感器与执行器的集成控制属于实现高效且智能运行的关键环节。传感器主要用来实时采集温度、湿度、压力以及流量等关键参数,把采集到的这些数据反馈给控制单元,从而让系统可以精准地判断当下的运行状态。执行器包含电动阀、风机调速器、压缩机启动器等设备,其作用是依据控制命令来执行相应的调节动作。传感器与执行器的集成控制一方面达成了信息采集与设备动作的闭环控制,另一方面还能够借助控制逻辑达成功态联动调节,以此提高响应速度以及控制精度。伴随技术的不断发展,越来越多的系统开始采用总线技术或者智能模块,这使得传感器和执行器之间的通讯变得更加高

效且稳定,进而进一步强化了系统的智能化程度。

### 2.4 智能控制与远程监测技术

在空调制冷系统当中,智能控制以及远程监测技术的应用,这无疑代表着自动化水平有所提升,同时也体现出管理模式方面存在创新之处。智能控制借助引入人工智能算法、模糊逻辑还有神经网络等一系列的技术手段,进而达成对空调运行状态的自学习以及自适应调节,使得系统可以依据环境所发生的各种变化以及用户的各类行为来自动地去优化自身的运行策略,如此一来便能够促使能效比得以提高,同时舒适性也得到了相应的提升<sup>[2]</sup>。与此远程监测技术依靠物联网平台以及云计算技术,把传感器所采集到的诸如温度、湿度、压力以及电能消耗等方面的数据实时地上传至中央管理系统或者云端服务器,管理人员能够凭借电脑、手机这类终端设备来远程查看系统的运行状态、历史数据以及报警信息,并且还能够实现远程的操作与维护相关事宜。

## 3 空调制冷系统的节能策略分析

### 3.1 变频技术在节能中的应用

在当下空调制冷系统所应用的节能技术当中,变频技术已然成为其中极为重要的一项核心手段。它从以往传统的“普通电机加上外置变频器”这样一种模式逐步发展转变为了“变频电机搭配变频器”或者“变频电机配上定制化的控制模块”这样更为集成的一体化解决办法。这样一种在结构层面所进行的技术升级,一方面极大地提高了系统整体的运行效率,另一方面也达成了在更高层次上对于能耗的有效控制以及智能化的精准调节。就变频电机而言,其自身有着更为出色的能效特性,并且当它与专门为它配备的变频控制单元共同协作开展工作的时候,能够依据环境负荷的具体变化情况来实时对压缩机、电风机等那些关键部件的运行频率做出相应的调节,进而让系统即便处在部分负荷的状态之下依旧能够维持高效运行的良好态势,最大程度地避免了传统空调在频繁进行启停操作的过程中所产生的那种能耗方面的浪费情况出现。多亏了变频电机自身在电磁设计方面所做的优化处理以及控制策略朝着智能化方向的发展,整个系统在实际运行的过程当中对于电网所产生的冲击力有了大幅度的降低,如此一来便有效地缓解了配电系统所面临的负荷压力,使得供电系统的稳定性以及安全性都得到了提升。除此之外,由于变频运行具备着连续且平滑的加减速特点,所以设备在处于低速运行的状态之时,其振动的幅度是比较小的,电磁噪声也是相对较低的,这样一来,设备的整体运行噪声水平就明显降低了,这无疑进一步增进了用户在使用过程中的舒适性体验,同时也提升了设备对于环境的适应能力。

### 3.2 负荷预测与优化运行策略

负荷预测及优化运行策略对于提高空调制冷系统的能效水平而言,算得上是很关键的手段,其重点就在于借助对系统未来负荷变化趋势做出较为科学的预估,达成设

备运行的前馈控制以及动态优化这一目的。空调系统的负荷会受到诸多因素的影响,像室外的气候条件、人员的活动情况、建筑的结构特点、设备的运行状态等等,所以说,构建起具备高精度的负荷预测模型,这便成了开展节能控制工作的前提条件。当下被广泛运用的方法涵盖了依据历史数据展开的时间序列分析方式、凭借多变量输入构建起来的机器学习模型以及将气象预测、用户行为以及实时监测数据融合在一起的混合算法模型,通过精准地预测在未来短时或者长时间尺度之内的冷负荷需求,促使系统可以提前去调节自身的运行参数,进而实现按照实际需求来供冷、供风的目的,防止出现系统过载或者低效运行的状况<sup>[3]</sup>。在此基础之上,优化运行策略会通过建立数学模型或者是控制逻辑的方式,针对压缩机组的启停顺序、冷却塔水泵的转速、冷冻水的流量、能源切换模式等方面展开动态调度操作,以此尽可能地降低单位能耗。在存在多机组或者多区域联动的系统当中,优化策略还得考虑到设备之间负载分配的均衡性以及整个系统的运行经济性,从而达成系统整体能效的最优化状态。

### 3.3 热回收与余热再利用技术

在空调制冷系统的节能策略方面,热回收以及余热再利用技术已然成为一项极为关键的节能减排举措,其重要性正一天天凸显出来,备受各方关注。这项技术的核心要义就在于大幅度削减系统运行期间所产生的诸多热排放,进而达成能源得以循环利用的目标,同时让环境所承受的负荷得到明显降低。就传统空调系统来讲,在其制冷的过程当中,会有大量的冷凝热径直借助冷凝器排散至外部环境之中,如此一来,既造成了热能出现极大的浪费情况,又使得城市热岛效应不断加剧,还致使碳排放总量有所增加。然而当热回收以及余热再利用技术得以施行的时候,便能够通过在系统里设置高效的热交换器,把原本理应被排放掉的高品位余热给回收起来,然后将其应用于生活热水的供应环节、建筑的采暖环节以及空调的再加热环节,甚至还可以将其耦合到吸收式制冷系统当中,以此进一步转化成可以被利用的冷量,从而实现冷热双回收所产生的协同效应。此技术在促使系统综合能源利用率得以提升的同时,还使得对一次能源的消耗量大幅减少,在医院、宾馆、商场等这类冷热负荷同步存在的建筑当中,该技术所展现出来的节能效率以及运行经济性都非常之高。更为重要的是,热回收系统的引入是从源头处减少了废热对大气环境的排放情况,有效地缓解了因为大量制冷设备集中运行而引发的环境温度升高问题,它无疑是推动建筑空调系统朝着绿色方向转型、达成碳达峰以及碳中和目标的一条极为重要的技术途径。

### 3.4 多联机系统的节能优化

在空调制冷系统节能优化策略方面,多联机系统因有灵活且高效的运行特性,所以当下在商业建筑以及大型公

共设施里被广泛采用,其节能效益关键在于对主机变频技术的充分运用。从系统运行能耗构成来讲,主机部分一般占整个空调系统能耗的差不多 70%,所以对主机能效进行优化,这对整个系统的节能程度起决定性作用。现代多联机系统大多使用高性能直流变频压缩机,借助变频控制技术让压缩机的运行频率可依据室内负荷实时做出调整,如此一来就能防止传统定频系统频繁启停所引发的能耗波动以及电能浪费情况出现<sup>[4]</sup>。在部分负荷工况下,变频主机能够处于低速高效的状态持续运转,在维持室内温度稳定的时候把能耗大幅降低,其节能贡献率能达到系统整体节能效果的 70% 以上,是节能控制的主导因素。而且主机的智能控制系统可协同各室内机的运行状况,依照各区域负荷变化动态调节冷媒流量与压力,进一步提升系统能效比 (EER) 与综合部分负荷性能系数 (IPLV)。这不但提高了用户的舒适度,还增加了设备的使用寿命,降低了运维成本。从建筑节能角度来讲,主机变频技术在多联机系统里的深度集成,既是提高系统运行效率的重要因素,也是达成绿色建筑和低碳运营目标的核心技术途径,所以在设计选型以及工程实施当中需要给予高度关注并优先采用。

## 4 结语

空调制冷系统的自动化控制以及节能策略,对于提高系统运行效率、减少能源消耗而言,是极为关键的途径,也是达成绿色建筑目标的重要方式。借助先进的传感技术、智能控制算法,还有像变频、热回收这类节能举措,能够切实提升系统的动态响应能力以及运行稳定性,并且能够满足不同环境以及用户所提出的个性化需求。在未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术相互融合的程度越来越高,空调制冷系统会朝着更为智能化、精准化以及协同化的趋势去发展,从而实现节能与舒适的高度统一。强化理论研究和工程实践之间的结合,持续对控制策略以及节能技术加以优化,这将会为推动建筑领域的节能减排以及可持续发展作出积极的贡献。

## [参考文献]

- [1]赵奇剑,应雪明,陈敏霞,等.空调制冷系统的自动化控制与节能策略研究 [J].现代工业经济和信息化,2022,12(6):96-98.
  - [2]侯艳君.浅谈空调制冷系统在航站楼的应用 [J].科技创新导报,2013(5):103-104.
  - [3]洪刘兵.制冷空调设备控制器软件自动化测试工具的改进 [J].制冷与空调,2017,17(9):50-53.
  - [4]李辉辉.制冷与空调设备电气自动控制技术研究 [J].中国设备工程,2024(21):227-229.
- 作者简介:王明章 (1973.7—),男,民族:汉,籍贯:天津,职称:高级工程师,学历:本科,毕业院校:浙江工业大学,研究方向:制冷空调控制与节能方向。

# 节能设计理念在机械制造及其自动化中的应用

张国帅

邢台纳科诺尔科技股份有限公司，河北 邢台 054000

**[摘要]**我国机械制造与自动化技术发展较快，因该行业有高能耗、高资源消耗特点，节能设计成急需解决关键课题。文章从材料选取、结构设计及机构优化等方面着手，探析怎样有效融入节能设计思路，达成节能减排目的。通过阐述分析节能设计思想在机械制造领域具体运用，推进行业绿色发展，推动环境保护，助力达成可持续发展目标。

**[关键词]**节能设计理念；机械制造；自动化；技术应用

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17175

中图分类号: TP39

文献标识码: A

## Application of Energy-saving Design Concept in Mechanical Manufacturing and Automation

ZHANG Guoshuai

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

**Abstract:** The development of mechanical manufacturing and automation technology in China is rapid. Due to the high energy and resource consumption characteristics of this industry, energy-saving design has become a key issue that urgently needs to be addressed. The article starts with material selection, structural design, and institutional optimization to explore how to effectively integrate energy-saving design ideas and achieve energy-saving and emission reduction goals. By elaborating and analyzing the specific application of energy-saving design ideas in the field of mechanical manufacturing, we aim to promote green development in the industry, advance environmental protection, and help achieve sustainable development goals.

**Keywords:** energy-saving design concept; mechanical manufacturing; automation; technical application

### 引言

随着全球资源日益紧缺以及环境保护意识持续增强，节能减排已然成为机械制造及其自动化领域发展的关键方向。机械制造属于工业生产重要组成部分，在传统生产方式里，其于能源消耗以及资源利用效率方面存在着不少不足之处，迫切需要借助引入节能设计理念来达成生产过程的绿色转型以及可持续发展。节能设计理念着重于在产品设计、材料选用、工艺流程以及自动化控制等诸多环节贯穿节能思想，以此尽可能地降低能源消耗与环境影响，并且提升产品性能以及制造效率。伴随智能制造、大数据以及人工智能技术的迅猛发展，机械制造自动化水平不断提升，这为节能设计的实施给予了强有力的技术支撑与保障。本文将会全面探讨节能设计理念在机械制造及自动化中的应用优势、具体技术举措以及未来发展策略，目的在于为推动行业绿色升级以及高质量发展给予理论参考以及实践指导。

### 1 节能理念下机械制造与自动化的应用优势

节能理念在机械制造与自动化领域所具有的应用优势，主要表现在可提高资源利用效率、降低能源消耗以及推动可持续发展等方面。运用节能设计理念，可对机械设备的结构以及工艺流程加以优化，达成轻量化设计以及高效能传动的目的，如此一来便能减少材料方面的浪费以及能量方面的损失，进而促使整体资源的利用率得以提升。自动化技术的引入，使得生产过程变得更加精准且高效，

有效减少了因人为操作而引发的能耗波动情况，借助智能控制系统对设备运行状态进行动态调节，实现按需用能，电力和燃料的消耗也得到了大幅度降低。除此之外，节能机械制造着重于环保材料的应用以及绿色工艺的推广，以此来减少对环境产生的负面影响，助力企业去满足日趋严格的环保法规以及市场需求方面的要求。与此自动化和信息技术相融合之后，不但使得生产效率有所提升，而且优化了生产管理环节，生产成本也得以降低，企业的市场竞争力也随之增强。通过将节能理念切实贯彻并落实下去，机械制造与自动化行业便能够实现经济效益与环境效益的双重提升，推动制造业朝着绿色、智能以及可持续发展的方向不断迈进，进而促进工业转型升级以及社会可持续发展目标的达成。

### 2 机械设计制造及其自动化中节能设计理念的应用

#### 2.1 节能设计技术应用于机械设计阶段

在机械设计制造及其自动化的进程中，节能设计理念于机械设计阶段的应用格外重要，它直接决定了后续制造、使用及维护过程中能源消耗的水平。在设计初期，工程师应充分考虑节能目标，通过结构优化、功能集成和轻量化设计等手段，减少材料使用量和能量传递损耗<sup>[1]</sup>。例如，通过有限元分析对机械结构进行受力分析与形状优化，可以在不降低强度和刚度的前提下减少不必要的材料冗余，降低整机重量，从而降低运行过程中的能耗。同时，节能

设计还强调动力传递系统的高效匹配,设计过程中通过选择合适的传动方式、合理配置传动比和优化动力路径,有效提升能量传输效率。

## 2.2 在选材方面作出适当调整

在机械设计制造以及自动化的进程中,贯彻节能设计理念的一项关键举措就是在选材方面做出科学且合理的调整。材料的选用跟产品的性能、使用寿命有着紧密关联,还对制造过程中的能源消耗以及资源利用效率产生直接影响。在节能理念的指引下,设计人员要优先挑选那些具备高强度、轻质量、良好加工性能以及高回收利用率的环保材料,以此来减轻设备的整体质量,降低在制造、运输以及运行过程当中的能耗。就好比在传统钢材应用较为广泛的结构部件当中,能够采用铝合金、镁合金或者复合材料来代替,进而达成轻量化的目的,同时也能够维持足够的强度与刚度。除此之外,合理选材还需要综合工艺性来考量,选用那些易于切削、成型以及焊接的材料,不但能够让加工时间得以缩短、刀具寿命得以延长,而且还可以大幅度降低加工设备的能耗。在部分零部件的设计环节,运用模块化以及标准化的设计思路,再配合上高性能材料,便能够实现材料的最大化利用,减少材料方面的浪费。与此选材策略还要兼顾环境友好性,尽可能采用可再生或者可循环利用的绿色材料,降低对于不可再生资源的依赖程度。

## 2.3 优化机械设备的内置结构

在机械设计制造以及自动化的进程中,对机械设备的内置结构予以优化,这可是落实节能设计理念的关键手段之一。借助对设备内部构造展开科学且细致的调整操作,一方面能够促使系统运行效率得以提升,另一方面也能大幅度地削减能耗,并且有效遏制材料的无端浪费。具体来讲,内置结构的优化涉及针对动力传递路径、运动部件布局、结构受力分布等诸多关键要素展开系统的分析工作,并且做出合理的配置安排,如此一来便能够减少能量方面的损失以及机械所存在的阻力情况。就好比说,运用紧凑型的结构设计方式,把动力传递路径给缩短了,那么就可以切实有效地降低能量在传输整个过程当中的损耗程度;对运动部件之间的相对位置以及运动方式加以优化处理,这对于降低摩擦系数是很有帮助的,进而能够减少那些本不该存在的能量消耗情况<sup>[2]</sup>。除此之外,对结构的受力分布予以合理的设计安排,防止出现局部应力集中的状况,如此不但能够让设备的使用寿命得以延长,而且还可以避免因过度设计而引发的材料浪费问题。在自动化机械系统当中,对内置结构进行优化的时候,还得充分考虑到传感器、控制单元还有执行机构各自在空间上的布局情况,务必要确保控制系统能够做到响应速度足够快,并且能量调配也得较为合理,从而达成智能化的调节效果以及实现动态节能的运行状态。与此引入模块化以及集成化的设计理念,把多个功能模块整合到有限的空间范围之内,这样既

能使得结构复杂性有所降低,又对于后期的维护以及升级工作是有益处的,进而能够进一步提升能源使用时的灵活性以及经济性方面的情况。

## 2.4 零件加工

在机械零件的加工工艺中,主要包括毛坯制造、特种加工和热处理等关键环节。通常情况下,只有少部分零件采用高精度加工工艺或非晶材料工艺,而大多数机械零件则采用铸造、焊接和锻造等通用工艺进行制造。具体加工过程中,常见的工序包括车削、磨削和铣削等,这些工序能够满足零件不同的尺寸和表面质量要求。同时,机械零件在制造后通常会经历正火、调质和退火等热处理工艺,以改善其机械性能和内部组织结构。在选择具体的制造技术时,应综合考虑零件的材料特性、内部结构复杂程度、外形尺寸及其使用工况,合理匹配相应的加工和热处理工艺,从而提升零件的制造质量和使用性能,确保其满足设计和应用需求。

## 2.5 运用智能集成技术

在机械设计制造及其自动化进程中,运用智能集成技术属于达成节能设计理念的关键途径之一。智能集成技术借助把传感器、控制系统、执行机构以及数据处理系统予以有机整合的方式,赋予机械设备自主感知、动态调节还有能效优化方面的能力,由此使得系统的运行效率以及能源利用率得以明显提升。就比如在自动化生产线上,凭借集成智能感知系统,能够对设备运行状态、负载变化以及能耗水平展开实时监测,再结合智能控制算法来自动调节加工参数以及功率输出,让设备一直处在高效节能的那种工作状态当中。与此智能集成技术还能够支撑生产全过程的数据采集与分析工作,其可预测能耗趋势、识别异常运行状况并且提前发出预警,防止因为设备故障或者运行不合理而引发的能源浪费情况出现<sup>[3]</sup>。除此之外,通过和云平台以及工业物联网(IoT)技术相结合,达成远程监控与集中调度管理的目的,这不但提升了对能源资源的精细化管理程度,而且使得多个系统之间的协同变得更加高效,进一步降低了整体的能耗水平。在设备设计的阶段,智能集成还能够助力构建起模块化且可重构的系统架构,让设备拥有不错的可扩展性以及节能适应性。

## 2.6 在汽车制造中的应用

在机械设计制造及其自动化领域当中,节能设计理念在汽车制造领域里的应用是极为广泛的,并且还拥有着十分重要的意义。随着节能减排以及绿色制造逐渐变成行业发展的关键核心目标,汽车制造企业在整车设计环节、材料挑选方面、工艺流程层面以及自动化生产等各个领域都积极地融入节能理念,进而达成能源利用的最优化状态以及环境负担的最小化效果。在整车设计这个阶段,工程师借助轻量化设计来对汽车结构加以优化,广泛运用高强度钢材、铝合金、碳纤维这类轻质材料,以此来削减整车的

重量,进而使得燃油消耗或者电能消耗得以降低。在制造工艺这块,企业通常会采用高效节能的自动化设备以及智能生产线,凭借机器人焊接技术、自动喷涂技术、智能搬运技术等手段去减少能量方面的损耗,并且还要提升生产的效率。与此在汽车零部件的加工过程当中,也大量地引入了像数控加工、干式切削、精密成型这样的绿色制造技术,由此大幅度地降低了能源的消耗以及废弃物的排放情况。

## 2.7 在游乐设施中的应用

在机械设计制造以及自动化的进程当中,节能设计理念于游乐设施里所呈现出来的应用,同样有着重要的价值,并且拥有着十分广阔前景。随着公众对于绿色消费以及环境保护方面的意识不断地得到提升,游乐设施制造企业在日益注重节能降耗以及可持续发展的情况之下,便开始在设计环节、选材方面、驱动系统以及控制方式等多个不同层面,全面地融入节能理念。在设备的设计阶段,工程师借助结构优化以及轻量化设计的方式,有效地减少了材料的使用量以及设备自身的重量,从而从源头处降低了运行时的能耗。在选材这个方面,更多地采用的是高强度、耐腐蚀并且具有环保特性的材料,如此一来,既使得设备的使用寿命得到了提高,同时也让维护能耗有所减少。在驱动系统方面,数量众多的游乐设施正逐步采用高效电机与变频调速系统,这能够依据实际的负载情况来动态地调节功率的输出,进而达成按需供能的效果,减少电力的浪费。部分处于高端层次的设施还整合了能量回收装置,比如在制动的过程当中,会把多余的动能转化成为电能并加以储存,以便后续再加以利用,由此进一步提升了能源的利用效率。

## 3 节能设计理念在机械制造及自动化中的应用策略

要把节能设计理念应用于机械制造以及自动化领域,其应用策略得从系统化且立足于全生命周期的角度来展开规划并予以实施,重点在于要让设计环节、制造环节以及运行维护环节都协同起来进行优化。一开始在设计阶段的时候,应当大力去推广绿色设计理念,着重关注产品的轻量化方面、结构的优化情况以及功能的集成状况,借助采用那些高效节能的材料还有先进的设计工具,以此尽可能地把资源消耗以及对环境产生的影响都给减少掉。接着在制造环节当中,要把智能制造以及信息技术结合起来,达成生产设备能够实现自动化并且是智能化的管理状态,对加工工艺参数以及生产流程加以优化,从而提高能源的

利用效率,同时削减废料以及能耗方面的量。除此之外,还得强化针对节能设备以及相关技术的研发工作并将其推广应用开来,像高效电机、变频驱动、余热回收这类关键技术都要涉及,以此推动机械系统的能效得以提升<sup>[4]</sup>。到了运行维护阶段,那就需要构建起完善的能耗监测以及管理体系,凭借物联网以及大数据分析手段来实现对设备状态的实时监控以及预测性的维护工作,确保系统可以稳定且高效地运行着。与此还要推动企业在内部开展节能文化的建设活动以及技术培训事宜,提升全体人员的节能意识以及操作技能,营造出一个节能减排的良好氛围。从政策方面来讲,要积极回应国家所提出的绿色制造以及低碳发展的战略导向,依据行业的具体特点去制定节能标准以及激励举措,推动节能技术能够广泛地普及并加以推广。

## 4 结语

节能设计理念于机械制造及其自动化方面所开展的应用,一方面有益于提高能源利用的效率,另一方面也促使生产成本得以降低,并且有力地推进了绿色制造以及可持续发展相关进程的向前发展。持续对设计方案予以优化,对制造工艺展开创新,同时引入智能化技术,如此一来,机械制造行业便可以达成节能减排的目标,进而使得自身的整体竞争力获得提升。在未来,伴随技术不断地取得进步以及节能意识日益得到强化,在机械制造这个领域当中,节能设计将会发挥出更为关键的作用,从而助推实现经济效益同环境保护之间的协调与统一,推动行业朝着绿色智能化发展的全新时代迈进。

## 【参考文献】

- [1]潘星宇.浅谈节能设计理念在机械制造及其自动化中的应用[N].重庆科技报,2024-11-26(7).
- [2]何凤超.机械制造及其自动化中节能理念落实探究[J].湖北农机化,2020(1):31.
- [3]龙江周.节能设计理念在机械制造及其自动化中的运用[J].农机使用与维修,2021(11):42-43.
- [4]李军.节能设计理念在机械制造及其自动化中的应用[J].石河子科技,2024(5):33-35.

作者简介: 张国帅(1996—),男,汉族,籍贯: 河北省邢台市平乡县油召乡张田庄村,职位,成本控制工程师,单位地址邢台纳科诺尔科技股份有限公司,17年09毕业于石家庄职业技术学院,大专最高学历,主要从事工作成本核算和控制。

## 城市轨道交通供电系统的无功补偿要点分析

王元贵

重庆市铁路（集团）有限公司，重庆 401120

**[摘要]**随着城市轨道交通体系的不断完善，供电系统运行稳定性对整体轨道交通运行质量的影响日益凸显。鉴于城市轨道交通供电系统在电力负荷及线路电感等因素作用下会产生无功电流，影响系统运行质量与设备寿命，深入分析无功补偿技术至关重要。通过提升供电系统运行安全性，可有效保障城市轨道交通系统的能源利用效率。本篇文章据此对城市轨道交通供电系统的无功补偿要点进行了系统论述。

**[关键词]**城市轨道交通；供电系统；无功补偿

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17183

中图分类号: U223

文献标识码: A

## Analysis of Reactive Power Compensation Points for Urban Rail Transit Power Supply System

WANG Yuangui

Chongqing Railway Group Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

**Abstract:** With the continuous improvement of urban rail transit system, the impact of power supply system stability on the overall quality of rail transit operation is becoming increasingly prominent. Given that the power supply system of urban rail transit generates reactive current under the influence of factors such as power load and line inductance, which affects the quality of system operation and equipment life, it is crucial to conduct in-depth analysis of reactive power compensation technology. By improving the operational safety of the power supply system, the energy utilization efficiency of the urban rail transit system can be effectively guaranteed. This article systematically discusses the key points of reactive power compensation for urban rail transit power supply systems based on this.

**Keywords:** urban rail transit; power supply system; reactive power compensation

### 引言

城市轨道交通系统承载着巨大的客运量（2024 年数据显示年客运量已超 300 亿人次），其牵引负荷能耗占系统总能耗的 60% 以上，且该负荷的功率因数存在较大范围波动（0.3~0.8）。然而，国家强制标准《GB/T 40493—2021》明确要求轨道交通系统在电网侧的月均功率因数必须达到 0.9 以上。

对我国城市轨道交通系统建设情况进行分析可知，城市轨道交通系统常因线路长、部分区域负荷低等因素导致供电系统功率因数偏低。当前城市化建设对轨道交通运行效率提出更高要求，技术人员需依据系统运行需求，深入分析无功补偿措施。通过对功率因数的高效控制，为城市轨道交通的安全稳定运行奠定坚实基础。

### 1 城市轨道交通供电系统中无功电流的影响

受到城市轨道交通系统运行特点的影响，供电系统在运行过程中会在整体运行负荷以及自身线路电感等因素的影响下，形成一定量无法产生功率，且不会被消耗的无功电流<sup>[1]</sup>。在供电系统的运行过程中，无功电流在产生后只能在系统线路中不断流动，并在影响供电系统中相关设备寿命的同时，通过虚功率的形成降低供电系统的运行质量。具体而言，无功电流对城市轨道交通供电系统的影响通常可分为以下几方面：

#### 1.1 影响电网的正常运行

当产生无功电流后，供电系统的电压也会产生较大波动，并直接导致系统中某些设备的运行稳定性较差。如当无功电流过大时，供电系统的电压会不断降低，并直接导致系统中某些设备无法正常启动与运行。

#### 1.2 降低供电系统的输电性能

随着无功电流的增加，城市轨道交通供电系统线路的电感与电阻均会明显提高，最终导致供电系统运行过程中电能的损耗问题越发严重，并直接影响到城市轨道交通系统的输电能力与供电效率。

#### 1.3 缩短设备寿命

在产生无功电流后，城市轨道交通供电系统的总电流与能耗均会明显增加。在过高电流的影响下，设备的运行温度也会不断提升<sup>[2]</sup>。最终因设备老化速度的加快导致其寿命不断缩短。同时，由于无功电流具有不稳定性特征，因此，供电系统电压的频繁变化会影响设备运行的稳定性，并导致设备故障率的明显提升。

### 2 城市轨道交通供电系统无功补偿的本质与价值

#### 2.1 城市轨道交通供电系统无功补偿的本质

城市轨道交通供电系统具有“昼高夜低、冲击频繁、谐波叠加、容感性交错”的负荷特征，无功功率的时空分布极不均衡。无功补偿从本质上讲即运用科学的措施抵消

无功电流对供电系统产生的影响<sup>[3]</sup>。在此过程中,常见的无功补偿措施通常需要运用各类电容或电感元件加强对供电系统电压、电流与功率的控制,以此确保电力系统运行过程中的无功功率与有功功率始终处于平衡的发展状态。城市轨道交通无功补偿的本质,是利用全四象限、全时段、全网域的电力电子柔性资源,把“动态无功”从系统累赘转化为“支撑电压、回收再生、降低网损、抑制谐波”的多功能能量资产,最终实现“容感性双向、毫秒级、零惩罚”的低熵供电。若不能实现精准、快速、可逆的无功补偿,不仅导致功率因数低于0.9而被电网罚款,而且会引起电压波动、电缆发热及再生制动能量浪费。

## 2.2 城市轨道交通供电系统无功补偿的价值

### 2.2.1 提升供电系统的功率因数

城市轨道交通供电系统运行中形成的无功电流无法转化为支撑设备运行的电能,因此,供电系统电路的功率因数通常较低。在运用了无功补偿设备后,供电系统中的无功电流可转化为电能,减少电压波动和谐波污染,显著提升功率因数及系统运行效率。

### 2.2.2 提升供电系统的运行稳定性

随着供电系统中无功电流的增加,线路的电压通常会产生较大波动,严重时甚至会导致供电系统中某些设备的损坏。而在投运了无功补偿装置后,供电系统的电压通常能够保持较为稳定的状态。以此在保障供电系统运行稳定性的同时,避免系统中的设备产生运行故障。

### 2.2.3 降低供电系统的能源损失

由于无功电流只能在电路中不断流动,无法用作设备运行的能源,因此,当供电系统中存在大量无功电流时,系统整体的能源浪费情况通常较为严重。而在运用了无功补偿器后,系统中的无功电流可被控制在一定范围内,最终实现供电系统运行中能源浪费问题的有效解决。

### 2.2.4 降低电费支出

在城市轨道交通供电系统的运行中,电费支出始终是衡量系统运行质量的重要因素<sup>[4]</sup>。且随着城市化建设规模的扩大,电力公司在收取电费时,通常会通过对客户用电系统功率因数的分析,选择不同的收费梯度。而在运用了无功补偿装置后,城市轨道交通供电系统的功率因数可明显提升,整体的电费支出也会明显降低。最终实现对城市轨道交通供电系统运行成本的有效控制。

## 3 城市轨道交通供电系统的无功补偿要点

### 3.1 无功补偿装置的安装

#### 3.1.1 无功补偿装置的选择

随着城市轨道交通供电系统的不断发展,安装无功补偿装置作为提高供电系统功率因数的重要手段,现阶段行业内能够运用的无功补偿装置通常可分为静态补偿装置与动态补偿装置两类。其中,静态补偿装置通常包括电容器、电抗器、静态同步补偿器等。该类补偿器的优点在于

设备的操作频率较低。但由于响应速度较慢,因此,设备运行过程中容易出现过补偿或欠补偿等问题。常见的动态补偿装置则包含静止无功补偿器、可控串联补偿装置等。由于运用了微处理器,因此,此类装置的响应速度极快,且支持双向补偿。但与静态补偿装置相比,其运用成本通常更高。为确保设备优势的充分发挥,在运用无功补偿装置时应充分分析供电系统的运行需求,并根据情况灵活运用多种补偿装置。以此实现对供电系统无功功率的灵活调整。

#### 3.1.2 无功补偿装置的安装与调试

由于城市轨道交通系统的规模较大,因此,在安装无功补偿设备时,需要结合系统情况合理规划设备的安装位置。在确保补偿设备的安全性以及周遭环境的散热性的同时,尽量选择一些便于开展维护操作的位置。以此为设备后续运行管理效率的提升打下坚实基础。在完成补偿装置的安装后,为确保装置运行效率的提升,技术人员需要结合城市轨道交通供电系统的运行需求对装置的参数与控制逻辑进行针对性调整,并通过完善的测试工作明确不同设备的运行特点。以此为供电系统后续的调整与升级提供准确的参考依据。

### 3.2 借助明确电能计量点规划补偿区域

由于我国的城市轨道交通供电系统普遍会选择集中供电模式,运用自建主变电所从城市电网中接入110kV电源,因此,电能计量点的选择通常会直接影响到技术人员对电力系统无功状态的分析与管理效率<sup>[5]</sup>。在此过程中,由于各地区城市轨道交通系统在归属方面存在一定差异,因此,在规划补偿区域时,要通过对城市轨道交通系统产权归属、运行模式以及电网结构的全面分析,提高电能计量点的精准性。具体而言,若由轨道交通系统建设单位负责电力系统电源线路的敷设,应当将电能计量点设置在城市变电所的供电源头,以此确保后续的供电系统功率因数计算工作能够充分考量电缆充电无功等所有无功损耗情况,并帮助运营方在准确计算结果的督促下,通过科学措施自主提升供电系统的功率因数,以此达到降低城市轨道交通供电系统无功损耗的目标。但若城市轨道交通供电系统的电源线路的管理在投入使用后由供电所管理,技术人员则应将电能计量点设置在轨道交通主变电所的进线侧。在此种计算模式中,供电系统功率因数的计算将不再考虑供电系统的电缆充电无功。并且,为实现对供电系统整体功率因数的准确把控,轨道交通管理部门与供电部门间要加强沟通,以此确保整体供电系统中无功管理的完善性。若城市轨道交通供电系统与城市变电所均使用单回电源,并通过T接形式连接,技术人员则应将电能计量点设置在城市变电所的出线端,以此通过对整体供电系统线路无功情况的全面分析,明确彼此的管理责任,并确保城市轨道交通运营单位与供电单位通过高效合作,共同促进城市轨道交通供电系统运行质量的提升。

### 3.3 结合城市轨道交通系统发展水平规划无功补充能量

由于城市轨道交通系统的运行负荷通常较大,因此,在不同类型阶段,供电系统的运行特点间也存在着一定的差异。针对这一情况,在应用无功补偿技术时,为确保供电系统功率因数的稳步提高,技术人员应结合城市轨道交通系统的发展水平,对无功补偿设备的容量进行分层设计。具体而言,在城市轨道交通供电系统的设计中,技术人员通常会通过对城市轨道交通系统远期负荷的分析,调成整流变压器、中压环网电缆等设备的安装容量。基于此种模式,在设计无功补偿装置的安装容量时,为灵活满足系统不同阶段的发展需求,技术人员应从城市轨道交通供电系统的初级设计阶段入手,通过对系统未来负荷增长情况的分析,精准计算各运行阶段城市轨道交通供电系统无功补偿装置的容量。以此通过供电系统功率因数的不断提高,保障城市轨道交通供电系统初期的稳定运行,并确保其轻松应对供电系统未来运行负荷增长带来的各项挑战。

### 3.4 通过精准功率因数校核模式提高容量配置精准性

受到城市轨道交通系统运行特点的影响,加强对供电系统无功功率的准确运算,始终是提高无功补偿装置容量配置精准度的重要措施。在现阶段城市轨道交通供电系统管理中,常用的功率因数校核模式通常包括以下两种:一种是对城市轨道交通系统夜间停运后,供电系统的无功功率进行校核。在此种计算模式中,计算人员需假设夜间轨道交通系统停止运行后供电系统的运行负荷降至了最低。在假设成立的前提下,电缆式供电系统中无功电流的主要产生设备,计算人员可轻松计算出无功补偿设备的理想容量。但由于忽略了不同时间段内城市轨道交通系统运行负荷间存在的差异,因此,过度补偿等情况极为常见。另一种计算模式则是以月为周期,计算供电系统的平均功率因数。由于城市轨道交通系统运行负荷的高峰阶段与低谷阶段存在一定的规律,因此,与前一种计算模式相比,此模式计算出的无功补偿设备容量与城市轨道交通空间系统的运行需求更加贴近。下表1为某案例中两种计算方法得出的无功补偿设备容量。结合案例可知,第1种计算方法强调对供电系统特定状态下无功需求的分析,第2种计算方法则更加重视供电系统在不同阶段的负荷变化,因此,在实际应用中,第2种计算模式得出的无功补偿设备需求更加准确。

表1 两种计算方法的补偿容量

供电系统夜间停运无功功率计算		供电系统月平均功率因数计算	
项目	数值	项目	数值
系统有功功率	567.4kW	月平均有功电度	4290000kW·h
无功功率	804.7kvar	月平均无功电度	2184304kW·h
系统功率因数	0.56	系统功率因数	0.86
目标功率因数	0.84	目标功率因数	0.84
补偿容量	454.7kvar	补偿容量	无需补偿

### 3.5 通过设备性能的提升降低无功补偿需求

由于供电系统整体负荷与电路线杆是直接导致无功电流形成的主要因素,因此,优化供电系统的性能也是提高供电系统无功补偿效率的重要措施。在此背景下,随着城市轨道交通供电系统技术的不断创新,低压有源滤波技术与逆变型再生能源回馈装置等核心技术的应用,均能够实现轨道交通供电系统运行质量的明显提升。其中,低压有源滤波技术通常能够清除0.4kV侧线路中的谐波,并通过补偿电流的输出,实现对供电系统功率因数的动态调整。最终确保城市轨道交通供电系统在各种负荷状态下均能够对电能进行有效利用。而逆变型再生能源回馈装置在投入使用后则可有效吸收城市轨道交通系统在运行过程中释放的能量,并将列车制动时浪费的电能转化为能够被供电系统重复利用的电能。以此通过能源的循环运用,降低无功电流造成的能源损失。在此过程中,由于逆变型再生能源回馈装置输出的交流电压可被调整,因此,供电系统电源侧的有功功率与无功功率分配情况可得到有效控制,最终通过供电系统运行稳定性的提升,达到与无功补偿相同的管理效果。

## 4 结束语

综上所述,面对社会建设工作对城市轨道交通系统运行质量提出的更高要求,提高供电系统的运行质量已经成为轨道交通系统管理工作中的重点任务。而考虑到供电系统中无功电流的存在会影响到供电系统的运行稳定性与功率因数,技术人员则应结合城市轨道交通供电系统的运行特点,深入研究可行的无功补偿措施与技术。最终通过城市轨道交通供电系统的高效稳定运行,为城市化建设工作效率的提升注入更强的动力。

## 【参考文献】

- [1]李立颖,周丹,林珊,等.考虑主变电所资源共享的城市轨道交通供电系统无功补偿方案[J].城市轨道交通研究,2024,27(2):53-57.
  - [2]戴丽君,杨立新,张喜海,等.基于轨道交通供电系统双向变流装置分散补偿无功的技术与应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):39-45.
  - [3]马静.城市轨道交通供电系统加装无功补偿装置技术应用[J].价值工程,2023,42(22):75-77.
  - [4]赵佳微,汪理,邹大云,等.城市轨道交通供电系统能馈装置无功协调控制方案研究[J].城市轨道交通研究,2024,27(9):193-197.
  - [5]雷霆,刘现军,张智宝,等.城市轨道主变电所无功补偿策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(4):21-26.
- 作者简介:王元贵(1987.2—),女,毕业院校:西南交通大学,所学专业:电力系统及其自动化,当前就职单位:重庆市铁路(集团)有限公司,职务:系统设备管理岗,职称级别:高级工程师。

## 机械加工制造中自动化技术的运用探究

冯凯<sup>1</sup> 陈哲瀚<sup>2</sup> 陶冯炜<sup>3</sup> 卞俊杰<sup>4</sup> 沈芯卉<sup>5</sup>

1.南京林业大学, 江苏南京 213164

2.南通大学, 江苏南通 226019

3.南京工业大学, 江苏南京 211816

4.常州工程职业技术学院, 江苏常州 213164

5.江苏省横林高级中学, 江苏常州 213101

**[摘要]**机械加工制造领域的自动化技术应用正重塑着产业生态,其战略价值已从效率提升工具跃升为驱动制造业高质量发展的核心引擎。随着我国数控化率在2024年达到65.2%和工业机器人密度攀升至每万人392台,自动化技术通过CAD/CAM集成、精密数控加工、工业机器人应用等优化了生产效能与产品质量。当前制造业面临高质量、柔性化、绿色化转型等的需求,亟待深化自动化与人工智能、工业互联网等技术的融合与创新。文中系统探究自动化技术在机械加工制造中的发展脉络、应用实践与效能机制,分析其是如何通过智能化的升级应对复杂的市场挑战,并展望未来人机协同、数字孪生等的前沿方向,为构建更具韧性的制造体系提供理论参照。

**[关键词]**机械加工制造; 自动化技术; 智能制造

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17177

中图分类号: TH164

文献标识码: A

## Exploration on the Application of Automation Technology in Mechanical Processing and Manufacturing

FENG Kai<sup>1</sup>, CHEN Zhehan<sup>2</sup>, TAO Fengwei<sup>3</sup>, BIAN Junjie<sup>4</sup>, SHEN Xinhui<sup>5</sup>

1. Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu, 213164, China

2. Nantong University, Nantong, Jiangsu, 226019, China

3. Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 211816, China

4. Changzhou Vocational Institute of Engineering, Changzhou, Jiangsu, 213164, China

5. Jiangsu Henglin Senior High School, Changzhou, Jiangsu, 213101, China

**Abstract:** The application of automation technology in the field of mechanical processing and manufacturing is reshaping the industrial ecology, and its strategic value has risen from an efficiency improvement tool to a core engine driving the high-quality development of the manufacturing industry. With Chinese CNC rate reaching 65.2% by 2024 and industrial robot density climbing to 392 units per 10000 people, automation technology has optimized production efficiency and product quality through CAD/CAM integration, precision CNC machining, and industrial robot applications. At present, the manufacturing industry is facing the needs of high-quality, flexible and green transformation, and it is urgent to deepen the integration and innovation of automation, artificial intelligence, industrial Internet and other technologies. The article systematically explores the development trajectory, application practices, and efficiency mechanisms of automation technology in mechanical processing and manufacturing, analyzes how it upgrades through intelligence to address complex market challenges, and looks forward to the cutting-edge directions of human-machine collaboration, digital twins, etc. in the future, providing theoretical references for building a more resilient manufacturing system.

**Keywords:** mechanical processing and manufacturing; automation technology; intelligent manufacturing

近些年来我国科技发展非常迅速,机械加工制造过程中对于自动化技术的应用也越来越广泛,自动化技术不仅提高了机械加工制造的生产效率,也为人们的生活带来了便利,但是现在对于产品质量和产品生产效率的要求都更高,而自动化技术作为机械加工制造过程中最重要的工艺之一,它的应用价值和效果也更加重要。机械加工制造业通过自动化技术的有效运用,达到了自动化控制整个机械加工流程的目的,使整个生产效率显著提升,将更高的经济效益带给了企业发展。全球经济持续推进,国际化发展也成为机械加工

制造业的重要方向,而自动化技术作为一种高新的手段与工艺,能够有效地促进机械加工制造行业稳步向前。

### 1 自动化技术在机械加工制造中的发展历程与现状概述

机械加工制造领域自动化技术的开端能一直追溯到20世纪中,彼时数控NC机床刚刚问世。它借助穿孔带指令,初步达成了对加工动作进行程序化控制的目的,这无疑是对于传统人工操作依赖所出现的第一次极为重要。当前,在我国规模以上机械制造企业当中,数控化率已然攀升到了颇为可

观的程度。依据中国机械工程学会 2024 年《中国机械工业发展蓝皮书》所公布的数据来看,关键工序的数控化率在 2024 年达到了 65.2%,相较于 2020 年而言,其提升幅度超过了 15%,这无疑充分彰显出了自动化设备在我国车间层面所具有的渗透广度。就应用深度来讲,在汽车以及电子等高端制造领域,工业机器人的部署密度已经逼近国际先进水平。2023 年工信部所进行的统计数据显示,我国制造业的机器人密度达到了每万名工人 392 台<sup>[1]</sup>。并且更为关键的是,超越了单点自动化的范畴,柔性制造单元 FMC、柔性制造系统 FMS 以及计算机集成制造系统 CIMS 的相关理念与实践正一天比一天更加成熟,进而构建起了能够实现响应迅速且资源得以优化配置的智能化生产的坚实基础。

## 2 自动化技术在机械加工制造中的核心应用领域

### 2.1 计算机辅助设计与制造 CAD/CAM 的集成应用

在产品研发阶段, CAD/CAM 集成系统充当着设计编程自动化方面极为重要的角色,就好比是中枢神经一般。工程师会借助三维 CAD 软件来开展工作,通过它能够完成产品结构以及零部件的数字化建模操作。这样的方式使得模型既直观又容易查看,并且要是需要修改的话也相对便捷,其设计效率和传统的图板相比,有着十分明显的提升幅度。更为重要的是,与之无缝集成在一起的 CAM 模块,能够依照三维模型自动地生成极为精确的数控加工刀具路径 G 代码。如此一来,便可以高效地把设计意图转化成机器能够识别的加工指令,彻底地搭建起从设计图纸到实物部件之间的数字化桥梁,产品开发周期得以大幅度缩短,人为编程出现差错的情况也减少了。

### 2.2 数控 NC/CNC 技术在精密加工中的应用

现代 CNC 机床乃是加工设备达成核心自动化的重要根基,它借助预装加工程序,可对主轴转速、进给速度、刀具轨迹以及切削深度予以全自动且精细的把控。在航空航天、精密模具、医疗器械这类高精尖的领域当中,五轴联动 CNC 加工中心能够完成极为复杂的空间曲面的高精度铣削工作,其定位精度通常可以达到微米级  $\mu\text{m}$ ,甚至还能达到亚微米级<sup>[2]</sup>。恰是这样精准、可靠并且可重复性极高的自动化加工能力,让复杂关键零部件实现批量化以及一致性生产变成了现实情况。

### 2.3 工业机器人在物料搬运、上下料与装配中的应用

工业机器人因其出色的重复定位精度、强大的负载能力以及能够持续作业且不知疲倦的特点,在物料搬运、机床上下料以及部件装配等诸多环节都表现得十分出色。在现代化的生产线上,关节臂机器人可以高效地从物料区域抓取毛坯,然后精准地将其放置到加工中心的工作台上,在加工完成之后还能迅速把成品取下并送入下一个工序或者检测单元。在装配线上,协作机器人 Cobots 甚至能够和工人一起安全地开展作业,完成像拧紧螺丝、精密压装、涂胶这类具有重复性的劳动,这使得装配效率以及一致性都得到了较为明显提升。

### 2.4 机器视觉在线检测与过程监控中的应用

自动化质量保障离不开机器视觉系统的精准检测能

力,高分辨率工业相机配合先进图像处理算法,可针对高速运动工件开展尺寸测量以及表面缺陷检测等工作,像划痕、裂纹、污渍等都能检测到,还能检查装配完整性,比如是否存在漏装、错装等情况,和传统人工抽检相比,机器视觉可实现 100% 在线全检,检测速度更快,客观性更强,数据也易于追溯,而且视觉系统还可用于引导机器人精确定位,如视觉引导抓取 VGR,或者实时监控加工状态,像刀具磨损监测,以此来确保过程稳定。

## 2.5 柔性制造系统 FMS 与计算机集成制造系统 CIMS 的应用

自动化技术所追求的终极价值在于能够实现系统级别的集成以及让生产管理变得更为智能化。柔性制造系统 FMS 把数控机床、机器人、自动导引车 AGV 或者 RGV 还有自动化立体仓库都整合到一起,并且依靠中央计算机来统一进行调度控制,如此一来便达成了对于多品种以及中小批量工件开展高效混合流水线生产的成效,而且还能够快速地对订单方面的变化做出响应。处于更高层级的计算机集成制造系统 CIMS 更是进一步把企业当中的工程设计 CAD/CAM/CAE、生产制造 FMS、经营管理 ERP/MES 乃至市场营销等诸多子系统都集成于同一个统一的数据平台之上,进而实现了信息流、物流以及资金流之间极为紧密地融合并且完成了全局层面的优化,这无疑代表着制造领域在自动化、信息化以及智能化方面所呈现出的较为高级的一种形态。

## 3 自动化技术应用的价值与效果分析

### 3.1 生产效率的显著提升

自动化技术所带来的效益当中,生产效率的大幅提升无疑是最为直观的一项。借助于减少工序之间相互等待的时间、缩短装夹所耗费的时间以及让设备能够实现二十四小时不间断地运行,就像黑灯工厂模式那样,生产周期便得以大幅度地压缩。依据赛迪顾问在 2025 中国智能制造发展白皮书中所给出的预测数据来看,那些广泛采用自动化技术的产线,其设备综合效率 OEE 通常都能够提升百分之二十到三十五这样的幅度<sup>[3]</sup>。有一家处于行业领先地位的工程机械企业在引入了自动化焊接与装配线之后,单台设备的生产节拍竟然缩短了高达百分之四十的程度,产能的扩张效果可以说是立竿见影的。

### 3.2 产品质量的一致性与可靠性增强

高度依靠精密传感器、闭环控制系统以及程序化执行的自动化生产方式,很好地消除了人工操作中不可避免会存在的波动性以及主观性因素。在数控加工环节,每一款产品都能够依照相同的程序路径与参数来进行加工制作;而在自动化装配环节,机器人每次拧紧螺丝时所施加的扭矩均是精确且能够被控制的。如此这般极高的一致性与可靠性,直接促使产品不良率出现了大幅度地下降情况,同时也使得客户满意度得以稳固地提升起来。传统的人工操作,存在疲劳、情绪波动等因素,往往难以长时间保持高精度、高质量的生产状态,而自动化技术则是通过精密的传感器和闭环控制系统,确保了每一个生产环节都能够严格按照预设的参数

和程序稳定进行，从而大大提高了产品的质量和品质。

### 3.3 生产成本的综合控制

尽管自动化系统在初期投入的资金并不少，然而它在长期的运营过程里所呈现出的颇为强大的成本控制方面的实力是绝对不可以被忽视掉的。从一个方面来讲，自动化在很大程度上大幅度地削减了对于直接操作工人数量的需求，特别是在那些环境状况极为恶劣的岗位上，像是存在高温情况的、充斥着粉尘的、满是噪音的岗位，还有那些劳动强度特别大或者工作内容十分单调乏味的岗位，其人工成本是能够得到很好的优化效果的。再从另一个方面来看，借助于提高产品的良品率、降低废品所带来的损失、对能源使用加以优化，比如具备智能启停这样的功能以及减弱对那些拥有高技能的操作工人的持续性的依赖等这些举措，综合制造成本是能够实现有效且合理的管控的。

### 3.4 制造柔性与快速响应能力的提升

客户需求日益个性化且多变，这使得制造系统的柔性面临了前所未有的挑战。自动化技术，尤其是柔性制造系统 FMS 以及能够快速重编程的机器人，让生产线具备了迅速切换产品类型以及适应变批量生产的能力。生产线能够在极短的时间内完成不同产品加工程序以及工装夹具的切换，这极大提升了企业应对市场波动的能力，也更好地满足了小批量定制化订单的需求，增强了企业的敏捷性。自动化技术还提高了生产数据的实时采集与分析的能力，使得管理层能够基于精准的市场数据洞察市场动态，及时做出决策调整，进一步缩短了从市场需求到产品交付的响应时间，这不仅增强了企业的市场竞争力，也为消费者提供了更加多样化、个性化的产品选择。

### 3.5 安全生产与绿色制造的促进

自动化技术把工人从那些危险、繁重且单调的岗位给解放了出来，像冲压、喷涂以及焊接这些工序，其工作环境得到了相当大的改善，工伤事故的发生率也降低了。在绿色制造这块，自动化系统能够更为精准地把控物料的使用，比如可减少切削液的飞溅情况，还能优化能源的消耗，例如依据负载来动态地调节电机的功率，并且它还能够推动废料的分类回收工作，促使制造业朝着更加安全、更环保以及更具可持续性发展的方向去努力。自动化技术推动智能化监控与预警系统的应用，也促使企业开始更加注重生产过程中的节能减排与资源循环利用，推动了绿色制造理念的深入实践。

## 4 未来发展趋势展望

未来，自动化技术会朝着智能化、集成化、虚拟化、绿色化还有人本化这些方面快速向前发展。其中，智能化和人工智能 AI 相互融合的程度会越来越深，这股力量会成为推动自动化技术发展的核心动力。机器学习以及深度学习这两种技术会在自动化系统里发挥出巨大的作用，让系统能够做到更智能的预测性维护，也就是能提前知道设备哪里可能出现故障；还能实现自适应加工，随时对切削参数做出优化调整<sup>[4]</sup>；智能排产调度也能让生产计划动态

地得到优化，并且依靠视觉方面的技术来判定产品质量，如此一来，系统的自主决策能力就会有明显提高。在集成化以及网络化这方面，工业互联网平台会被广泛运用起来，这样就能促使设备、系统、企业乃至整个供应链的上下游之间达成更为广泛的互联互通以及数据共享，进而构建起一个透明、协同、优化的制造生态系统，使得跨层级的生产协同以及资源调配都能够顺利实现。数字孪生 Digital Twin 这项技术要是普及开来，就能给像设备、产线、工厂这样的物理实体打造出高保真的虚拟模型，凭借虚实之间的互动交流、仿真的预测以及闭环优化等一系列操作，为设计验证、生产监控、效能优化以及远程运维等环节给予强有力的核心支撑，大幅提高制造系统的可预测性以及可控性。绿色可持续自动化是实现“双碳”目标的一条关键路径，在这方面，会把提升能源效率当作重点，比如去应用能源管理系统 EMS，还要想办法让资源消耗降到最低，像是采用精准供料技术，同时还要注重废弃物的减排以及循环利用，以此推动制造业朝着低碳化的方向去转变。人机协作 HRC 模式也会进一步发展下去，协作机器人 Cobot 会不断强化自身的安全防护机制以及智能互动能，从而能够更高效地和人类工作者一起并肩作战，把人类所具备的灵活性、判断力和机器人拥有的力量、精度以及耐力结合起来，共同营造出一个高效且充满人性关怀的工作环境，重新塑造未来工厂里面的人机关系模式。

## 5 结束语

机械加工制造领域中自动化技术之广泛应用与持续深化，已然并将继续深刻重塑产业格局、赋能企业核心竞争力提升。其带来的生产效率跃升、品质飞跃、成本优化与柔性增强等核心价值，是制造业迈向高质量发展的关键支撑。然而，高投入门槛、集成复杂性、人才瓶颈等挑战依然横亘在前，需要产业界、学术界与政府协同发力，共同破解。展望未来，拥抱智能化浪潮、深化系统集成、融合数字孪生技术、践行绿色理念、优化人机协作模式，必将是自动化技术发展的主航道。唯有持续推动自动化技术向更高阶的智能化、网络化、绿色化方向发展，我国机械加工制造业才能在全球竞争格局中站稳优势地位，赢得未来发展的主动权。自动化技术不仅是提升制造能力的工具，更是驱动产业转型升级、实现制造强国战略目标不可或缺的核心引擎。

## [参考文献]

- [1] 冯锋. 自动化技术融入机械加工制造的路径探析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(12):80-82.
- [2] 徐永, 李刚. 机械加工制造中自动化技术的应用价值 [J]. 内燃机与配件, 2022(12):100-102.
- [3] 王维. 机械加工制造中自动化技术的应用分析 [J]. 中国设备工程, 2025(8):228-230.
- [4] 陈晓林. 自动化技术融入机械加工制造的路径研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(3):59-61.

作者简介：冯凯（2004.12—），在读院校：南京林业大学，所学专业：自动化，当前就职单位：南京林业大学，职务：学生，职称级别：学生。

## 机械设计制造中数字化技术的运用策略研究

马孟硕

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司，河北 邢台 054001

**[摘要]**通过将物理世界的信息转换为数字信号，数字技术使设计师和工程师更容易进行开发，模拟和优化。使用数字技术不仅提高了机器设计和制造的效率和精确度，而且使产品设计、制造和销售更加透明和可控。在数字技术的支持下，机械制造商可以更快地响应市场需求，提高产品质量和生产效率，更好地满足客户的需求。因此，数字技术在机械设计和制造领域的应用越来越普遍，在职业培训中也得到了很大的关注。

**[关键词]**机械设计制造及其自动化；发展趋势；挑战；对策

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17174

中图分类号: TH122

文献标识码: A

### Research on the Application Strategy of Digital Technology in Mechanical Design and Manufacturing

MA Mengshuo

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054001, China

**Abstract:** By converting information from the physical world into digital signals, digital technology makes it easier for designers and engineers to develop, simulate, and optimize. The use of digital technology not only improves the efficiency and accuracy of machine design and manufacturing, but also makes product design, manufacturing, and sales more transparent and controllable. With the support of digital technology, mechanical manufacturers can respond to market demand faster, improve product quality and production efficiency, and better meet customer needs. Therefore, the application of digital technology in mechanical design and manufacturing is becoming increasingly common, and it has also received great attention in vocational training.

**Keywords:** mechanical design, manufacturing, and automation; development trend; challenge; countermeasures

#### 引言

21世纪初，信息技术、计算机技术和人工智能的融合导致了数字设计和制造技术的出现，这标志着这项技术的出现。机械工程已经从传统的物理实验和手动操作阶段发展到基于计算机的虚拟设计和智能生产的新阶段。数字化设计与制造该技术不仅提高了产品设计的准确性，还提高了生产率，显著降低了成本，更重要的是，使公司能够快速应对市场变化。

定制化和个性化生产，在激烈的市场竞争中获得优势。数字技术在机械制造领域的应用已成为行业发展的重要趋势。从 CAD 到 CAM，再到虚拟原型和 PLM 系统，数字技术的广泛应用提高了设计效率，降低了成本，并促进了团队协作和沟通。数字化使设计和制造流程更加精确和高效，降低了产品开发的风险。构建数字设计平台、数据管理和集成以及智能制造和工厂的数字化将是推动行业向智能灵活生产模式转型的重要战略。

#### 1.1 研究背景与意义

解释机械设计制造及其自动化在工业体系中的关键地位，随着技术的进步，提高国内制造业的竞争力变得越来越重要。描述了专业发展和挑战研究对理解行业趋势，解决现有问题和促进工业现代化的重要性。

#### 1.2 采用先进的技术

机械设计制造及其自动化这一项技术的发展，需要各

种不同的先进技术作为支撑，先进的技术是机械设计制造及其自动化这一项技术在发展过程中的基础，不论是机械化产品，还是机械化系统中，在功能这一方面最为重要的还是相关的技术，机械化设备在功能的选择上还是要将技术放在首位，只有这样才能充分的体现机械设计制造及其自动化在机械设备中发挥的作用，才能体现现代化机械设备的智能化。

##### 1.2.1 各种加工的机械化设备

通过对相关产品进行处理与加工，改变相关产品原有的形态，增加相关产品中所具备的功能，例如：机床、数控车床等各种加工的现代化机械设备。

##### 1.2.2 转换能量的机械化设备

动力机主要的功能就是以转换能量为主，如：内燃机、水轮机、电动机等一系列转换能力的机械化设备。

##### 1.2.3 处理数据信息的机械化设备

将数据信息输入相关的机械化设备后，经过机械化设备的处理之后得到所需要的数据信息，最常见的处理数据信息的机械化设备有传真机、计算机等一系列机械化设备。将处理数据信息作为主要功能的机械化设备称为信息机，信息机用来对相关的数据信息进行处理，使数据信息转换为较为直观的方式，能够让人们获取自己所需的数据信息，例如：文字、图像等。

##### 1.2.4 具有其他功能的机械化设备

只有对机械设计制造及其自动化这一项技术进行深

入的分析与研究，了解这一项技术中所具备的主要功能，才能在运用机械设计制造及其自动化技术时将不同的产品设计出来，培养创新的思维。用途、功能不同的机械化设备在运行的方式上也不同，这一点充分地体现了机械化制造及其自动化在发展过程中的空间非常的大，根据对机械设计制造及其自动化这项技术的不断创新与设计，机械设计制造及其自动化会更加的完善。机械设计制造及其自动化这一项技术在发展中，先进的技术依然是其最强有力的支撑，在不断完善的过程中要对其进行科学合理的规划与设计。

### 1.3 研究方法与内容框架

说明采用文献研究法梳理专业发展脉络与现状，用案例分析法剖析实际应用与问题；介绍论文从发展历程、现状、趋势、挑战到对策建议的内容架构。

## 2 数字化技术的特点

### 2.1 提高工作效率

在传统的机械设计和制造业中，我们需要深入了解产品特性，并将其整合到一个复杂的技术集成中，从而影响到生产效率。在这个过程中，我们选择了一种新的技术，即所谓的机械设计，而当个人需要时，我们需要将其整合在机械设计中。中国的规划和工业的发展受到了影响。随着智能技术和数字技术的不断发展，机器制造和装配的集成不再是机器制造和制造的生产效率，现在的制造目标更加优化。我的机器制造项目能够有效地为企业提供技术支持，为企业提供人力、物力和财力资源，因此，无论是人工、人工还是人工，都是一种高效的生产方式。随着智能技术和数字技术的发展，智能产品的生产、质量问题的解决和产品质量的提高，基于生产标准的智能技术和数字化技术的有效性证明了这一点。我们有足够的时间和资源来支持和支持我们的言论自由。

### 2.2 实现协同设计

多个人或团队可以参与机器的设计和制造，每个参与者都可以一起工作，履行各自的责任。数字技术的应用为机械设计和制造中的平行设计提供了技术支持。在任何设计和制造过程中，多个人和团队都可以共同设计。借助网络信息技术的便利，可以在不同团队成员之间建立信息通信渠道，使设计不受空间和时间的限制，从而提高了设计效率，开发了高质量的机械数字模型。例如，设计师，制造商和生产经理可以在模型分析中合作，根据数字模型分析机械产品设计的可行性和完整性，然后直接在模型上进行设计和修改，从而提高设计效率。

## 3 数字化技术在机械设计制造中的运用策略

### 3.1 设计阶段的数字化技术应用

在机械设计阶段，数字化技术的应用为设计师们提供了前所未有的便利和效率。首先，计算机辅助设计(CAD)系统成为设计师的得力助手。通过 CAD 软件，设计师可

以快速绘制出精确的三维模型，并且能够实时更改和优化。这不仅缩短了设计周期，而且显著降低了建设成本。此外，利用 CAD 软件的参数化设计功能，设计人员可以快速生成、比较和选择多个设计方案，以满足不同客户的需求。除了 CAD 系统，数字仿真技术在设计阶段也发挥着重要作用。仿真软件允许设计人员模拟和测试设计计划，以验证其可行性和性能。例如，在设计机械系统时，可以使用动态仿真软件对机构进行动力学和动态分析，以确保其运动路径和性能符合设计要求。这种模拟技术使得在早期设计阶段就可以检测到潜在的问题，并避免了后期制造和测试阶段的问题和成本浪费。

### 3.2 制造阶段的数字化技术应用

在制造阶段使用数字技术使生产过程更加智能化和自动化。计算机辅助制造(CAM)系统根据设计图纸自动生成加工过程，以指导数控机床进行精密加工。借助 CAM 系统，您可以实现加工过程的自动化和精确控制，以提高加工的精度和效率。此外，数字化使灵活的生产和量身定制的生产成为可能满足不同客户的需求。数字测试技术在制造业中也发挥着重要作用。通过引入激光测量、机器视觉等先进技术，它能够实时监控加工过程和产品质量。这些测试技术可以及时检测和纠正制造过程中的错误和缺陷，以确保一致和稳定的产品质量。

### 3.3 管理与服务阶段的数字化技术应用

在管理和服务阶段，数字技术的应用使企业能够实现更高效，更准确的管理和服务。企业资源规划(ERP)系统可实现企业资源的全面管理和优化。通过 ERP 系统，企业可以获得生产需求、库存状况、销售数据等实时信息。记录并为决策提供强有力的支持。此外，ERP 系统还可以实现供应链协作和优化，降低仓储和运输成本。在服务阶段，数字技术可以实现远程监控和维护。通过引入物联网技术，可以实现对产品使用状态的实时监控和数据分析。一旦发现异常情况，就可以立即进行远程诊断和维护，以提高产品的可靠性和使用寿命。

### 3.4 三维数字化技术

数字 3D 技术为机械产品设计工作带来了极大的便利。传统的 2D 设计技术智能地构建了产品组件的平面效果，直观性不强，使用 UG 等 3D 建模软件，可以创建机械产品的 3D 渲染图，显示产品的实际整体效果，有利于改进提高工作效率。UG 软件是目前应用广泛的三维建模软件，曲面排序和三维实体建模技术不再局限于基础建模。这种弯曲设计允许灵活调整产品形状和尺寸，为不同的弯曲机械零件使用不同的视图轮廓线来完成表面建模。最后：细化细节，实现绘图的高度灵活性和自主性。此外，实体建模技术还可以从各个角度和多个角度观察产品形状反映了机械产品的性能，可以帮助技术人员设计复杂系统的机械产品，也可以帮助设计师更详细地观察和定制设计产品。

的功能、质量和零件特性。

#### 4 机械设计制造中应用的数字化设计技术

##### 4.1 计算机辅助技术。

计算机辅助技术于机械设计制造而言,有着极为关键的支撑作用,其最为重要的价值就在于能把传统的手工绘图以及计算这一过程转变为更为高效的数字化流程。就拿 CAD 系统来讲,该技术不但能够达成三维模型的参数化设计,而且凭借特征建模、装配仿真等各项功能,可大幅度提高设计的精度。现代的 CAD 平台已然发展出了云协作模式,能够给予多人在线编辑以及版本管理的支持,如此一来,设计团队便能够实时地共享模型数据,并且迅速地对修改的需求做出响应。更为先进的方面是, CAD 与 CAE 软件进行深度融合之后,能够在设计阶段实现力学分析以及热力学仿真的操作,这在很大程度上降低了物理样机制作过程中的试制成本。在制造这一端, CAM 系统可以径直读取 CAD 模型进而生成加工路径,以此保证设计意图能够精确无误地传达到生产环节当中,这样一种没有缝隙的数据流已然成为了数字化工厂的基础架构所在。

##### 4.2 知识工程技术

知识工程技术借助构建专业领域内的知识库以及规则引擎的方式,把机械设计方面的经验转变为可以重复利用的数字化资产。该技术运用本体论的方法来对设计知识加以结构化的表达,比如把轴承选型规则、材料疲劳特性等专业知识编码成计算机能够识别的逻辑关系。在实际的应用过程当中,基于案例推理 (CBR) 的系统可以自动去匹配历史上的设计方案,以此为新型号的开发给予参考依据。更为前沿的应用则表现在智能决策支持方面,通过机器学习算法对海量的设计数据展开分析,自动推荐出最优的公差配合或者装配工艺。这样的技术大大降低了设计人员的经验门槛,让企业在保留核心知识资产的情况下能够加快产品的创新迭代速度。

##### 4.3 虚拟样机技术

虚拟样机技术借助多学科协同仿真的方式,在数字空间打造出和物理实体极为相近的产品原型。该技术把机械动力学、控制系统、流体分析等仿真模块加以整合,能够针对复杂系统展开耦合仿真操作。就工程机械开发来讲,运用 ADAMS 软件来开展运动学仿真的相关验证工作,以此确认机构是否合理,与此借助 ANSYS 完成结构强度方面的验证事宜,最终实现在虚拟环境当中对整机作业工况进行模拟。此种技术成功突破了传统那种“设计-试制-测试”的串行模式,达成了设计缺陷能够在早期便得以暴露并且及时修正的效果。现代的虚拟样机平台已然具备了实时渲染的能力,能够支持在 VR 环境下进行沉浸式的评审活动,进而让跨部门团队可以直观地去评估人机交互的实际效果。

##### 4.4 数据安全和隐私

在数字技术广泛应用的背景下,数据安全和数据保护

在企业中变得特别重要。生产数据泄露可能导致商业机密泄露排名甚至会影响企业的竞争力。企业必须制定严格的数据安全政策,采用加密技术来保护数据,并定期进行安全检查计算。同时,应提高员工的数据安全意识,以防止内部疏忽导致的数据泄露。

#### 5 在机械设计和制造中应用数字化和智能的优化策略

##### 5.1 数据质量

在机械设计制造迈向数字化转型这一进程里,数据质量已然成为左右智能化应用能否取得成功的极为关键的因素。高质量的数据理应拥有准确性、完整性、时效性以及一致性这四个方面的特征。具体来讲,在设计阶段,三维模型所呈现出的几何精度,还有材料属性数据所具备的准确性,这两者会对后续开展的仿真分析以及加工制造产生直接的影响;而在生产阶段,依靠实时采集方式获取到的设备状态数据以及工艺参数数据的可靠性,将会对生产过程的稳定性以及产品质量起到决定性的作用。以某一家汽车零部件企业作为例子来说,这家企业凭借建立起较为完善的数字化质量管控体系,针对设计数据施行版本控制举措,对于生产数据设定自动校验的相关规则,使得产品的不良率成功降低了 23%。与此还引入了基于深度学习所打造的智能检测系统,利用它来对海量的生产数据展开实时的分析操作,从而能够及时地察觉到潜在存在的质量波动趋势,进而达成了预测性质量管控的目标。除此之外,企业还应当着手建立数据治理委员会,制定出统一的数据标准以及相应的管理流程,以此来保证各个业务环节当中数据能够实现互联互通的状态。唯有构建起完整的数据质量管理闭环,才能够切实地让数字化技术发挥出其应有的价值。

##### 5.2 统一标准

标准化建设在机械制造业数字化转型当中属于基础性工程。当下该行业所面临的首要挑战在于:不同设备厂商会采用各不相同的专有数据格式以及通信协议。就好比在 CAD 领域,存在着 STEP、IGES 等多种多样的格式;而在工业通信领域,又有着 PROFINET、EtherCAT 等各不相同的协议,如此一来便致使系统集成起来颇为困难,并且数据交换的效率也十分低下。对于这一问题,可从三个层面去推进标准化工作:其一,在技术层面,企业应当优先选用国际通用的标准,比如在产品数据交换方面采用 ISO 10303 (STEP) 标准,在工业通信方面采用 OPC UA 架构;其二,在管理层面,需建立起企业级的数字化标准体系,囊括数据格式、接口规范、系统架构等诸多方面;其三,在实施层面,能够通过构建数字化示范产线的方式,来验证各类标准的实际适用性。在未来,随着工业互联网平台不断普及开来,行业还需进一步强化标准互认方面的工作,从而推动形成一个开放且协同的智能制造生态系统。

## 6 结束语

机械设计制造领域正经历着数字化以及智能化方面的转型，这已然变成提升该行业竞争力的关键驱动力量。借助于强化对数据质量的管理，同时积极推动标准体系得以切实落地实施，企业是能够有效克服技术集成所存在的障碍的，进而达成从传统制造模式朝着智能制造模式转变的跨越效果。在往后的日子当中，伴随数字孪生、AI 辅助设计等相关技术的不断深度融合，机械制造业会进一步朝着高精度、高柔性以及绿色化这样的方向去发展。

### [参考文献]

[1]白雪洁,李琳,宋培.数字化改造能否推动中国行业技术

- 升级[J].上海经济研究,2021(10):62-76.
- [2]赵琳瑞.制造企业数字化转型对技术创新能力的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.
- [3]何鑫宇,冯正坤.浅谈数字化技术在机械设计制造中的应用[J].电脑校园,2023(1):510-511.
- [4]叶楠.机械设计制造中自动化和数字化技术运用分析[J].造纸装备及材料,2024,53(8):78-80.
- 作者简介：马孟硕（1999.1—），男，民族：汉族，河北省邢台市平乡县人，职务：机械工程师，现主要从事辊压机收放卷设计毕业日期：2021年6月毕业于河北水利电力学院专业：机械电子工程学历：本科。

## 氧化空气压缩机组不对中故障机理分析及验证思路

牛广原

沈鼓集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110869

**[摘要]**某氧化空气压缩机机组在运行过程中出现压缩机高速轴振动持续缓慢上涨的现象。文中通过现场调试机组运行状态, 系统分析在线监测数据, 结合频谱特征、轴心轨迹和相位变化等多维度信息, 深入探究故障根源。研究采用逐步排除法, 首先排除高速轴转子动平衡、轴承磨损和齿轮损伤等常见故障, 最终锁定联轴器不对中问题。通过详实的案例分析, 阐述了故障诊断的系统性思路和科学方法, 为同类设备的故障诊断与预防提供了重要参考。

**[关键词]**故障诊断; 振动分析; 转子动平衡; 不对中; 轴心轨迹; 频谱特征; 氧化空气压缩机

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17181

中图分类号: TP277

文献标识码: A

## Mechanism Analysis and Verification Ideas for Misalignment Fault of Oxidation Air Compressor Unit

NIU Guangyuan

Shengu Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110869, China

**Abstract:** During the operation of a certain oxidation air compressor unit, the high-speed shaft vibration of the compressor continued to slowly increase. Through on-site debugging of the unit's operating status, system analysis of online monitoring data, and the combination of multi-dimensional information such as spectrum characteristics, axis trajectory, and phase changes, the root cause of the fault is deeply explored in the article. The study adopts a gradual elimination method, first eliminating common faults such as high-speed shaft rotor dynamic balance, bearing wear, and gear damage, and finally locking the problem of coupling misalignment. Through detailed case analysis, the systematic thinking and scientific methods of fault diagnosis are elaborated, providing important references for fault diagnosis and prevention of similar equipment.

**Keywords:** fault diagnosis; vibration analysis; rotor dynamic balance; not right; axis trajectory; spectral characteristics; oxidation air compressor

### 引言

氧化空气压缩机作为化工生产中的关键设备, 其运行稳定性直接影响生产效率和设备安全。在实际运行中, 由于安装误差、基础沉降或部件磨损等原因, 常会出现轴系不对中故障。本文以某化工厂氧化空气压缩机为研究对象, 针对其压缩机高速轴振动异常问题, 开展系统的故障诊断分析。通过详实的监测数据和专业的分析方法, 揭示了故障产生的机理, 并提出了有效的解决方案。

### 1 设备案例

#### 1.1 系统组成

化工苯酚丙酮装置中的氧化空气压缩机组通常采用多单元联动设计, 包括驱动电机、增速齿轮箱、离心式多轴压缩机等。机组带有两个级间冷却器、一个末级冷却器的组装型整体齿轮增速离心式空气压缩机。压缩机由电机来驱动, 并通过大齿轮轴端的膜片联轴器与电机相联接。压缩机本体及电机安装在公用底座上、气体冷却器及油站单独布置, 齿轮箱和冷却器容器是焊接结构, 蜗壳为铸件。调节功能, 当出现转速异常升高时, 电机自动脱扣实现机组紧急停机。

#### 1.2 异常表现

2019年4月起, 该机组主传动轴段开始出现振动幅值渐进性攀升现象, 其中靠近驱动机侧的监测点1V1X与

1V1Y振幅值增长趋势尤为显著。振动数据呈现两个特征: 一是以约10μm/月的速率持续上升, 二是伴随明显的波动性变化。截至9月检修前, 空压机靠近驱动机侧的两个监测点1V1X与1V1Y的振动峰值已升至60μm, 并且振幅之波动最大差值超过了10μm, 总体振动峰值接近压缩机高速轴振动报警阈值。值得注意的是, 同期低速轴各振动测点的振动数据保持稳定, 未出现明显波动。压缩机高速轴振动变化趋势详见附图1。

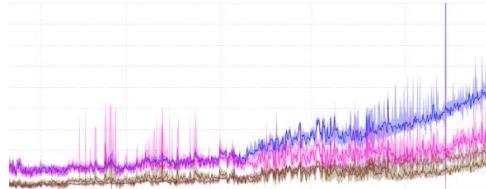


图1 压缩机高速轴振动趋势

#### 1.3 运行期间的基础性调试现象观察

##### 1.3.1 调节机组转速观察机组振动现象

在机组振动持续缓慢上涨的过程中, 曾尝试在工作转速下, 将机组缓慢降低1000rpm, 转速降低至设定转速后, 振动仍缓慢持续上涨, 空压机靠近驱动机侧的两个监测点1V1X与1V1Y分别对应的振幅值随机组转速降低有小幅

下降,但是整体仍有上涨趋势,上涨速率并无明显变化。

在机组转速降低 1000rpm 并持续运行一周后,将机组转速提升至工作转速,空压机靠近驱动机侧的两个监测点 1V1X 与 1V1Y 的振幅值有明显提升迹象,1V1X 振幅 28 $\mu\text{m}$  短时间提升至 37 $\mu\text{m}$ ,1V1Y 振幅由 30 $\mu\text{m}$  短时间提升至 39 $\mu\text{m}$ ,但几小时后机组靠近驱动机侧的两个监测点 1V1X 与 1V1Y 的振幅值开始缓慢下降,逐渐降至 30 $\mu\text{m}$  左右,1V1X 与 1V1Y 振幅值再次开始持续缓慢上涨。相比两个转速下,机组的故障现象与趋势有着一定的重复性,高速轴的动平衡状态很可能已经已经产生了变化。

### 1.3.2 调节机组轴承的进油温度及进油压力

机组支撑轴承的工程供油压力设计值为,0.08~0.12MpaG,设计流量范围为 20~45L/min,在机组其他条件不变的情况下,尝试调低机组支撑轴承的供油压力至设计允许值下限 0.08MpaG,流量约 25L/min,靠近驱动机侧的两个监测点 1V1X 与 1V1Y 振幅值仍然无明显变化,后续也尝试将轴承供油量提升至设计上限值,但 1V1X 与 1V1Y 振幅值仅有小幅下降,表现十分不明显。轴承温度始终稳定可控,机组各轴承测点温度均在 60~80°C 之间,可基本判断轴瓦运行情况十分良好,机组润滑油供油的进、回油油路通畅无堵塞。

### 1.3.3 测量机组壳振数据

机组运行后期即将检修前,使用手持测振仪,对氧化空压缩机以及驱动电机各支撑处测量了壳振数据,其测量数据差异十分明显,氧化空压缩机及驱动电机都为靠近联轴器测振动数据较大,分别为 3.5mm/s 与 2.8mm/s,以产品联轴器为中心,双向向两侧延伸,壳体的振动数据呈现减弱趋势,空压机及驱动电机靠近两联轴器侧的壳振数据依次是 2.6mm/s 与 1.9mm/s,而空压机及驱动电机两侧盲端的壳振动数据最小,依次是 0.6mm/s 与 0.2mm/s。为充分排查机组外围故障,使用塞尺实际测量了空压机及驱动电机各支撑处配合面的间隙情况,整体测量间隙均符合设计标准要求,排除了联轴器附近基础支撑刚性不足导致的问题。

## 1.4 故障分析

氧化空气压缩机机组结构相对简单,在正常运行工况下,维持机组转速不变的情况下,其振动趋势通常较为平稳。若出现振动持续上升并伴有明显波动的情况,可能由以下因素导致:

### 1.4.1 支撑轴承磨损导致刚度下降

轴承磨损通常会导致轴承间隙增大,降低支撑刚度,进而引发振动上升。此类故障的一个典型特征是振动传感器的 GAP 电压(间隙电压)持续升高。然而,通过对比检修前后的监测数据,压缩机齿轮箱高速轴和低速轴各通道的 GAP 电压均未出现明显变化。因此,可以排除轴承磨损的可能性,振动上涨并非由轴承支撑问题引起。

### 1.4.2 齿轮啮合不良(如轮齿损伤或断裂)

本氧化空压缩机为齿轮式离心压缩机,齿轮箱的主

要功能是调整转速并传递扭矩。在氧化空气压缩机机组运行过程中,转速通常保持稳定,负荷波动较小。此外,随着制造工艺的提升,齿轮损伤类故障已较为罕见。通过对振动波形进行分析,发现各通道信号呈现良好的正弦波形态,重复性高,且未出现周期性冲击特征(见图 2)。因此,可以排除齿轮啮合不良或齿面损伤的可能性。

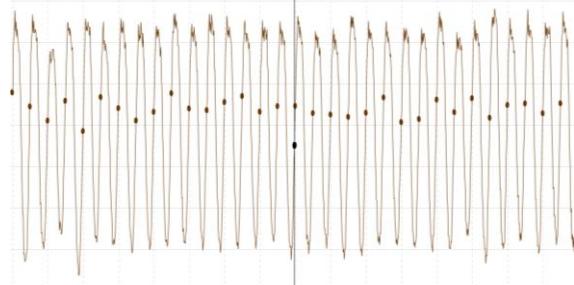


图 2 压缩机齿轮箱高速轴波形频谱示意图

### 1.4.3 轴系平衡状态异常引发的振动增长

作为刚性转子结构的齿轮箱传动轴,在出厂动平衡达标的情况下,运行期间通常不会出现显著的平衡性问题。然而,当关联设备(如联轴器)存在对中偏差、膜片组断裂或结构性损伤时,可能呈现渐进式的转子不平衡特征。

振动频谱分析显示,压缩机齿轮箱高速轴各测点的振动增长主要表现为工频(1X)分量幅值的持续上升(图 3),同时伴随工频相位的规律性漂移(图 4)。值得注意的是,同期相连的主驱动机工频振动却呈现缓降趋势。这种反向变化特征明确表明,该轴系的动态平衡状态已发生实质性改变,符合联轴器异常或转子系统失衡的典型故障模式。

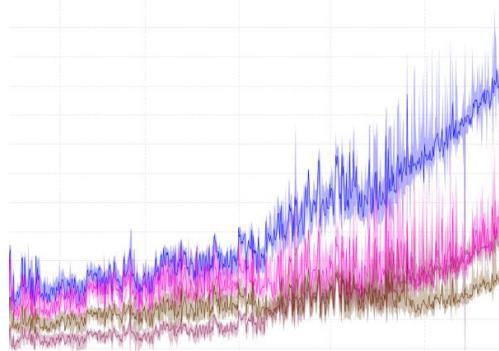


图 3 高速轴 1X 幅值趋势图

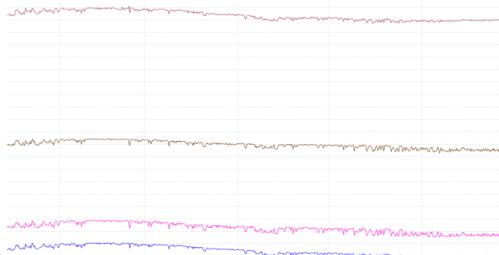


图 4 压缩机齿轮箱高速轴 1X 相位趋势图

#### 1.4.4 轴系对中不良的振动特征分析

通过对主驱动机振动频谱的深入检测,发现与齿轮箱连接端的两个测点呈现显著的二倍频(2X)振动特征,其幅值甚至超过工频(1X)成分(详见附图5)。与此同时,压缩机齿轮箱高速轴连接端的轴心轨迹分析显示典型的非线性运动形态——一端呈现“香蕉型”轨迹,另一端则表现为“8字形”特征(见附图6、7)。这种频谱特征与轨迹形态的组合,是轴系对中不良的典型诊断依据,表明机组在运行过程中存在明显的联轴器对中偏差问题。



图5 驱动侧侧波形频谱图

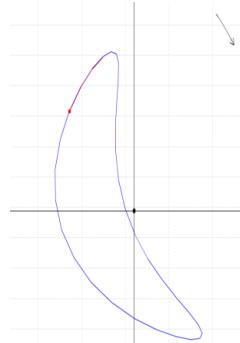


图6 压缩机齿轮箱高速轴轴心轨迹图

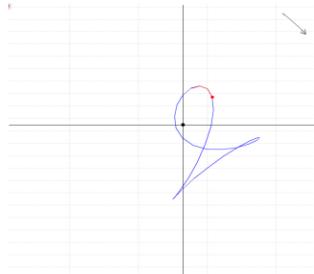


图7 驱动端轴心轨迹图

#### 1.5 检修处理过程

2021年1月上旬,机组按计划停机检修。经拆检发现,首先机组转定子间没有明显的刮碰迹象,各处机械密封以及油封都未与转子主轴发生刮碰,机组的各级叶轮也均运行良好,复检各处装配间隙都在设计间隙范围内,各级转子两侧支撑轴颈外观质量良好,润滑油供油油路通畅无堵塞,但在检查机组联轴器时,发现了压缩机齿轮箱高速轴与主驱动机之间的联轴器膜片存在明显的疲劳断裂损伤(具体损伤形貌见图8)。进一步测量轴系对中数据,

结果显示实际对中偏差远超设计允许范围。这一发现验证了前期振动分析中关于对中不良的判断,膜片断裂正是导致振动持续上升的根本原因。

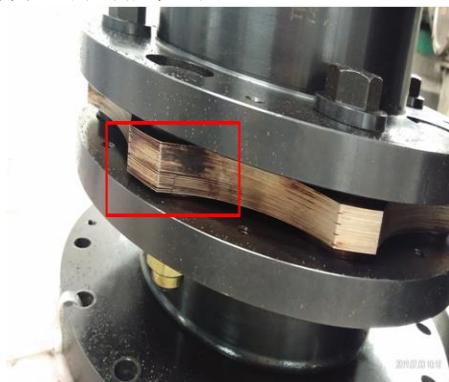


图8 联轴器图状态

#### 1.6 结论与启示

本案例通过系统的故障分析,为类似问题的诊断提供了清晰的解决路径:首先基于在线监测数据,排除了齿轮箱自身故障的可能性;随后通过对压缩机齿轮箱高速轴频谱、轴心轨迹、相位特征以及主驱动机连接端的振动特性进行综合分析,最终确认故障根源为轴系不平衡问题。实际检修发现,压缩机齿轮箱高速轴与驱动机的对中偏差导致联轴器膜片长期承受异常扭转应力,进而引发膜片塑性变形和疲劳损伤,表现为典型的轴系不平衡特征,这正是压缩机齿轮箱高速轴振动持续升高的根本原因。本案例所采用的诊断逻辑和分析方法——从振动特征识别到故障机理验证的系统性流程,不仅成功解决了本次故障,更为同类压缩机设备对中不良问题的分析处理提供了可复用的技术范本,具有重要的机组工程运行指导价值。

#### [参考文献]

- [1] 张玲,王宏岩.大型机组不对中故障的正确诊断方法[J].石油和化工设备,2013,16(9):64-66.
- [2] 刘成俊,杨泽林.离心压缩机动态不对中故障诊断[J].风机技术,1995,11(2):36-38.
- [3] 郭用坚.旋转机械几种常见故障的分析[J].化工自动化及仪表,1993,11(1):22-26.
- [4] 汪磊,苏军会,罗文.汽轮发电机组联轴器不对中振动分析与诊断[J].节能,2020,39(3):14-16.
- [5] 张祖德,王玉强.旋转机械转子不对中的故障诊断[J].特钢技术,2010,16(4):56-59.

作者简介:牛广原(1988.6—),毕业院校:辽宁工业大学,所学专业:机械设计制造及其自动化,当前就职单位:沈鼓集团股份有限公司,职务:项目经理,职称级别:工程师。

## 土木工程结构设计中存在的问题及应对措施探讨

郑广超<sup>1</sup> 彭伟湘<sup>2</sup>

1. 广西壮族自治区城乡规划设计院, 广西 南宁 530000

2. 南宁市宾阳城建集团有限公司, 广西 南宁 530000

**[摘要]**随着我国城市化进程持续推进, 土木工程在数量以及规模方面都呈现出快速增长的势头。结构设计属于土木工程实施的前提条件以及基础保障, 其科学性、合理性还有先进性对于整个工程的质量、安全性以及经济效益有着关键性的影响。不过, 在实际的工程实践当中, 结构设计往往存在不少问题, 像对安全性考虑不够周全、施工环节出现脱节情况、材料选择不恰当等等, 这些问题对工程建设实现高质量发展形成了极为严重的制约作用。综合当前土木工程结构设计的实际状况, 全面且细致地剖析了其中存在的诸多主要问题, 并且给出具有较强针对性的相关应对办法, 希望能够为优化结构设计的质量以及提升工程的安全水平给予一定的参考帮助。

**[关键词]**土木工程; 结构设计; 问题与措施

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17182

中图分类号: TU318

文献标识码: A

## Discussion on Problems and Countermeasures in Civil Engineering Structural Design

ZHENG Guangchao<sup>1</sup>, PENG Weixiang<sup>2</sup>

1. Guangxi Urban-Rural Planning Design Institute, Nanning, Guangxi, 530000, China

2. Nanning Binyang Urban Construction Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

**Abstract:** With the continuous advancement of urbanization construction in China, civil engineering has shown a rapid growth trend in both quantity and scale. Structural design is a prerequisite and basic guarantee for the implementation of civil engineering. Its scientificity, rationality and progressiveness have a critical impact on the quality, safety and economic benefits of the whole project. However, in practical engineering practice, there are often many problems in structural design, such as insufficient consideration of safety, disconnection in construction processes, inappropriate material selection, and so on. These problems have a very serious constraining effect on achieving high-quality development in engineering construction. Based on the current practical situation of civil engineering structural design, a comprehensive and detailed analysis of many major problems has been conducted, and relevant targeted measures have been proposed. It is hoped that this can provide some reference and assistance for optimizing the quality of structural design and improving the safety level of engineering.

**Keywords:** civil engineering; structural design; problems and countermeasures

### 引言

土木工程属于基础设施建设当中的关键部分, 它对于国家经济发展、社会稳定以及人民生命财产安全都有着极为重要的影响。其中, 结构设计是土木工程建设的开端, 同时也是极为关键的一个环节。结构设计肩负着构筑物安全、适用以及经济这些基本职责, 而且还要去面对地质环境、功能需求以及施工技术等不断出现的变化情况。所以说, 结构设计的质量会直接对整个工程的建造水准以及使用年限产生影响。近些年来, 我国在土木工程设计理论、技术手段以及管理体系等方面都在持续取得进展, 然而在部分项目的实施进程当中, 还是存在着结构设计理念较为陈旧、手段相对滞后等诸多现象。本文把现实问题当作导向, 着重关注结构设计里常见的七类比较突出的问题, 并且在深入剖析其形成原因的基础之上, 去探寻能够优化结构设计的系统性办法, 希望能够推动土木工程设计朝着科学的方向发展, 从而确保工程质量以及安全。

### 1 土木工程结构设计的必要性

在整体土木工程建设与施工流程中, 至关重要的就是前期的结构设计质量, 也就是说, 前期结构设计质量好与坏, 都会直接影响到整个土木工程最终呈现的效果, 所以, 必须要加大重视力度。从整体社会发展的大趋势来看, 我国的土木工程建设规模越来越大, 相应的建设数量也在不断增加, 所以, 针对土木工程质量方面, 更要严格把控, 杜绝一些安全隐患问题, 但是在具体土木工程施工进展过程中, 若前期设计缺少科学性与合理性, 那么就不能为后续施工带来正确的引导与指挥, 相应的施工工艺水平也无法最大化发挥, 若遇到非常严重的情况, 还会导致一系列的安全事故发生, 威胁到人们的生命安全。在前期结构设计阶段, 缺乏全局性和合理性, 那么后续的施工成本费用也会不断提升, 导致企业经济利益受损。更为重要的一点, 就是站在国家的角度来分析, 土木工程作为最重要的基础工程, 可以说前期结构设计占据了至关重要的地位, 只有保证结构设

计的科学性与合理性,杜绝不一些可能会出现的问题,才可以保证土木工程质量,促进我国社会的和谐稳定发展。

## 2 土木工程结构设计中常见的问题分析

### 2.1 结构安全性设计不足

在诸多土木工程项目当中,因为设计周期显得较为紧张,前期可供参考的资料也比较匮乏,又或者对于荷载作用的判断不够精准,所以结构安全性设计方面的问题接连不断地显现出来。有一部分设计单位仅仅片面地去追求造价方面的控制,却把安全储备系数以及灾害容忍度给忽视掉了,这就使得结构在遭遇地震、台风还有荷载突变这类极端条件的时候,很难有足够的抵御能力。除此之外,由于缺少系统的可靠性分析以及灾变模拟,不少结构方案在理论验证环节就存在着这样那样的漏洞,甚至还出现了承载力配置不够充足、关键构件断面尺寸偏小或者连接节点比较薄弱等一系列的问题,这些情况无疑增加了结构安全方面的风险。

### 2.2 材料选择与使用不合理

材料是结构能够实现承载以及具备耐久性的根本所在,其性能状况会对结构的整体功能产生直接影响。然而在实际开展设计工作的进程当中,相当数量的工程在材料选型这件事情上都欠缺科学严谨性,还存在着用价格导向来取代设计考量这样的情况。部分设计人员并未全面且细致地去思考材料所具有的力学性能、耐久方面的特性、对环境的适应能力以及和结构系统相互间的匹配程度,如此一来便致使材料强度等级和实际的受力状态无法达成匹配,甚至还会出现钢筋出现腐蚀状况、水泥发生老化这类的现象。除此之外,对于节能环保材料的应用以及推广力度不够充足,这也对结构绿色性能的充分发挥形成了限制作用。

### 2.3 设计与施工脱节现象突出

结构设计方面和施工实践方面存在着信息不对称的情况,而且二者之间的沟通也不是很顺畅。这就使得设计图纸没办法精准地对现场施工起到指导作用,最终对工程的质量以及进度都产生了影响。在部分项目当中,设计方案并没有对施工可行性展开细致的分析,施工技术路径、现场条件还有设备资源这些因素也都没有被充分地考虑到。如此一来,施工单位在执行相关工作的过程中,就不得不频繁地去变更设计,甚至还出现了临时修改结构构造的现象,这无疑让工程安全风险不断叠加起来。除此之外,在设计阶段还忽视了对施工反馈以及现场实测数据的采集工作,也没有很好地去利用这些数据,所以设计质量也就没办法达成闭环改进的效果。

### 2.4 抗震与抗风设计存在缺陷

我国大部分地区都处于地震以及风灾频发的地带,这就给结构的抗震和抗风设计提出了更高的要求。然而在实际开展设计工作的过程当中,依旧存在着部分项目抗震设防达不到标准、风荷载计算不够准确等诸多问题。比如有

部分设计在进行相关工作时,完全忽略了场地土质对于地震波传播所具有的放大效应,也没有对结构的动力响应做出合理的模拟。再比如高层建筑在风振控制设计方面做得不够有力,致使结构的舒适性以及安全性都有所降低。除此之外,一些设计单位在抗震构造措施的落实上执行得不够严格,没有依照规范来设置足够数量的抗震缝或者耗能构件,这更是进一步削弱了结构抵御灾害的能力。

### 2.5 结构耐久性与可持续性考虑不足

现代土木工程在强调结构使用安全时还要求其具备长期的服役能力以及可持续发展的性能。部分结构设计往往只是着重于满足短期指标,对于耐久性的考量有所欠缺。比如说,结构细部构造的处理较为粗糙,没有有效地防止水侵、腐蚀等长期破坏因素的入侵,而且材料老化曲线也没有被纳入到设计寿命的评估当中,致使结构出现提前退化的情况。在应对气候变化以及资源约束这样的大背景之下,设计里没有系统地引入绿色建筑理念,像节能减排、可再生材料利用等可持续要素都存在缺失,进而使得结构的环境适应性降低。

### 2.6 设计人员专业能力与责任意识偏弱

设计人员的技术能力以及职业操守在很大程度上决定了结构设计的水准。有一部分从业人员存在着知识结构较为陈旧、更新速度滞后等情况,对于新规范以及新技术往往缺乏相应的理解能力与应用能力。在开展设计工作的过程当中,由于经验有所欠缺或者责任心不够强,就很容易出现诸如误算漏算、图纸标注出现错误亦或是细部构造不够完善这类低级的失误情况,进而给后续的施工环节以及结构安全留下了隐患。与此设计审核方面的机制不够严格、岗位责任界定不清楚,这也使得部分设计人员在工作中缺乏敬业的精神以及对质量的追求,从而对整个团队的专业表现产生了影响。

## 3 土木工程结构设计优化的应对措施

### 3.1 完善设计前期调研与资料收集机制

高质量的结构设计离不开前期资料与数据的有力支撑。需完善设计前期的调研制度,保障地质勘查、气象水文、场地荷载等基础资料准确且完整。强化对历史工程案例的归纳分析,构建结构设计知识库,给相似工程提供技术参考。借助遥感、无人机、物联网等新兴技术手段采集数据,提高设计基础数据的时效性与多维性,为科学决策打下坚实基础。

### 3.2 提高设计人员专业素质与责任意识

提升设计质量的关键在于强化人的能力以及责任方面的要求。需要加强对结构设计人员展开继续教育以及职业培训方面的相关工作,着重提高他们在结构理论、计算分析、规范运用等不同维度所具备的综合素养水平。与此要强化针对职业伦理的教育力度,以此来强化设计人员对于责任的认知意识以及对于质量的重视意识,营造出一种

重视安全、力求精度的专业领域氛围。从组织管理的角度来讲,应当建立起设计责任终身追溯的相关制度,清晰明确各个环节人员各自的职责边界范围,进而形成层层把关且各自承担相应责任的设计质量保障方面的机制。

### 3.3 加强设计与施工阶段的协同与反馈机制

达成设计和施工的高效对接,这对于提高工程的质量以及施工的效率而言,显得极为关键。要积极推动设计单位和施工单位在项目刚开始的时候就建立起协同工作的相关机制,让双方能够一同参与到结构方案的论证工作当中,同时还要共同开展施工图的深化以及技术交底等方面的工作,以此来保证设计所取得的成果能够和实际的施工条件极为契合。在施工正式开始之后,应当构建起设计问题的反馈以及修改方面的机制,安排设计人员参与到施工的指导工作里,以便能够及时地对施工现场出现的技术调整方面的需求做出回应。借助于数据形成的闭环以及多方展开的联动举措,进而达成结构设计的动态优化以及持续不断的改进效果。

### 3.4 强化结构安全、抗震与可持续设计要求

在结构设计环节,需着重强化对安全冗余、极限状态设计以及失效模式分析这些方面的应用,以此来提高结构于极端灾害状况下所具备的抗风险能力。就抗震设计来讲,务必要全面且细致地考量地基的具体条件、场地所产生的效应还有结构自身所具有的动力特性,并且要合理地去安排抗震构造以及能量耗散系统。在那些风灾频发的区域当中,应当针对风荷载的分布情况以及风振反应展开更为精细准确的计算工作<sup>[1]</sup>。与此还应当引入全生命周期的设计理念,把可持续性的目标融入结构选型、材料的运用以及维护策略等相关内容里面,从而达成结构安全性与环境友好性能够协同推进发展的目的。

### 3.5 推广 BIM 等数字化设计工具的应用

BIM 技术具备三维可视、信息集成以及多专业协同等优势,已然变成现代结构设计里极为关键且不可或缺的一种手段。借助 BIM 平台展开建设并加以推广,设计人员便能够在同一个数字环境当中完成建筑、结构、水电等诸多专业的模型搭建工作,达成数据共享,切实有效地冲破传统设计阶段所存在的“信息孤岛”这一壁垒,达成多专业实时协同,提高设计的整体精度,提升工作效率。在结构设计进程之中,BIM 一方面能够凭借模型可视化的方式清晰地表达出复杂的结构关系,助力设计人员优化构造逻辑,另一方面还能够依靠参数化工具实现快速建模以及方案比较,从而为设计决策给予科学的依据<sup>[2]</sup>。与此借助 BIM 模型开展受力仿真分析以及施工碰撞检测,可以于设计初始阶段及时察觉到潜在的冲突以及风险,防止因为图纸出现错误或者存在空间冲突而引发的返工情况以及资源的浪费,提高工程施工的可控程度以及前瞻性。并

且,BIM 技术能够与物联网、大数据、人工智能等技术紧密结合,实现结构设计数据向施工管理以及运维阶段的平滑过渡,让结构信息在整个建筑全生命周期之内持续保持连续并且不断更新的状态,促使建筑结构从静态成果朝着动态管理资产转变,进而构建起集成化、智能化、可持续的现代土木工程结构体系。所以,设计单位应当加快 BIM 技术的推广速度,强化平台建设、技术培训以及团队协同能力的建设,让 BIM 切实发挥出提升结构设计质量、推动工程高质量发展的作用,成为其中的核心驱动力。

### 3.6 健全监管制度与质量控制体系

为保证结构设计质量能够真正落实到位,需构建起一个设计质量监管体系,其中政府监督占据主导地位,而行业自律则作为补充环节。要将设计图纸审查、施工图联合审查以及重大结构专项论证制度予以健全完善起来,以此对设计成果展开从过程到要素都涵盖在内的全方位质量监控举措<sup>[3]</sup>。与此还得积极推动第三方审查机构朝着专业化方向不断发展,借此提升设计评审所具备的技术深度以及其应有的权威性。在设计单位的内部控制层面,应当建立起多级审核的相关制度,还要构建起设计质量评估指标体系,施行将质量责任和绩效考核相互挂钩的办法,从而切实有效地提升设计质量管控方面的能力。

## 4 结语

土木工程结构设计属于工程建设里极为关键的一个环节,它的科学性、系统性以及前瞻性和工程的质量、安全还有效益是紧密相关的。就当下而言,我国在土木结构设计这一领域已经收获了一定程度的进展,然而依旧面临着诸如设计理念存在滞后情况、技术手段有所欠缺等一系列的挑战。本文针对现阶段结构设计当中所存在的问题展开细致分析之后,给出了具有针对性的优化办法,这些办法涉及设计数据的准备、人员能力的提升、设计与施工的协同配合、智能化工具的推广运用以及监管机制的建设等多个方面。在未来,需要持续推动设计理念方面的创新以及技术的集成整合,同时要不断完善制度以及标准体系,以此来全面提升结构设计的质量,进而为我国土木工程实现高质量的发展给予强有力的支撑。

### 【参考文献】

- [1] 张峰.土木工程结构设计中存在的问题及应对措施探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023(3):155-157.
- [2] 罗建刚.土木工程结构设计中存在的问题及应对措施探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023(18):97-99.
- [3] 李雪峰.试析土木工程结构设计的问题及对策[J].建材发展导向,2024,22(19):29-31.

作者简介:郑广超(1990.2—),毕业院校:桂林理工大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:广西壮族自治区城乡规划设计院,职务:结构设计师,职称级别:工程师。

## 谈节能设计在建筑设计中的有效应用分析

杨义新

河北建筑设计研究院有限责任公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**绿色建筑理念的核心内容是节能设计，现代建筑设计离不开它，通过优化建筑布局、增强围护结构保温性能、合理利用自然通风与采光、选用高效节能设备等手段，能显著降低能源消耗，提升建筑的环境适应性和使用舒适度，而且节能设计推动可再生能源集成应用，缓解建筑运行时对传统能源的依赖，在建筑全生命周期管理中，节能设计具有系统性和前瞻性，为可持续发展目标的实现提供有力支撑。

**[关键词]**节能设计；建筑设计；绿色建筑；能源效率；可持续发展

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17180 中图分类号: TU201 文献标识码: A

## Effective Application Analysis of Energy-saving Design in Architectural Design

YANG Yixin

Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The core content of green building concept is energy-saving design. Modern building design cannot do without it. By optimizing building layout, enhancing the insulation performance of enclosure structure, rational utilization of natural ventilation and lighting, and selecting high-efficiency energy-saving equipment, energy consumption can be significantly reduced, the environmental adaptability and comfort of buildings can be improved. Moreover, energy-saving design promotes the integrated application of renewable energy and alleviates the dependence on traditional energy during building operation. In the full life cycle management of buildings, energy-saving design has systematic and forward-looking characteristics, providing strong support for the realization of sustainable development goals.

**Keywords:** energy-saving design; architectural design; green building; energy efficiency; sustainable development

### 引言

能源危机和环境问题越来越严峻，建筑领域作为能源消耗的重要部分正面临着前所未有的挑战和转型需求，于是节能设计应运而生，其既响应了时代对绿色低碳发展的需求也给建筑带来了可持续的新活力，在创新理念和技术手段的推动下节能设计从概念慢慢走向实践成为引领建筑设计进步的关键，深入探索节能设计的有效应用对构建生态宜居的未来空间很重要。

### 1 建筑节能设计的内涵与发展背景

建筑行业转型升级，建筑节能设计作为绿色建筑重要组成部分正成为核心方向，其发展历程和内涵融合了技术进步与可持续理念。

#### 1.1 建筑能耗现状与挑战

社会总能耗中建筑能耗长期占比较大，在城市化快速推进时能源消耗和碳排放问题愈发凸显，采暖、通风、照明、电器使用等方面是建筑运行阶段能源开销的主要体现之处且大量能源常因不合理设计和落后设备而被浪费，统计显示部分发展中国家建筑能耗占全国总能耗比例超 30% 且逐年上升，这不但让能源资源面临严峻挑战而且对环境可持续性也有深远影响，急需科学节能设计理念与技术手段干预以系统控制和有效管理建筑能耗。

#### 1.2 节能设计理念的演变

节能设计理念从被动节能发展到主动节能再到智慧节

能，早期重视对自然资源的利用，如建筑朝向、开窗方式、遮阳系统等，着重在不依靠机械设备的情况下提高建筑的舒适性和能效，科技发展起来后高效设备系统、自动化控制、智能管理被逐渐引入建筑以实现能源的动态优化和使用效率的提升，现在更重视从建筑全生命周期去考虑，将数字化工具、可再生能源、智能算法融合起来构建以用户为中心、以数据驱动为核心的综合节能体系，这一理念的更新拓宽了节能技术的应用范围且推动绿色建筑和城市低碳发展深度融合，节能设计理念的演进伴随着政策引导、行业标准提高、公众环保意识增强，这让节能成为建筑设计必须的核心目标从而推动建筑行业走向更智能、高效、可持续的未来。

#### 1.3 节能设计政策与技术推动

能源与环境问题面前，各国政府纷纷出台建筑节能相关政策与标准成为推动节能设计应用的重要外部力量。我国陆续实施《绿色建筑评价标准》《建筑节能设计标准》《近零能耗建筑技术导则》等政策文件，从规范层面给设计单位明确了节能目标、评估指标和技术路径，让节能设计有据可依、有标可循，这些政策不但强化了设计前期的节能控制要求，还提高了设计成果的可验证性与工程转化率。BIM（建筑信息模型）、能耗模拟、被动房技术、高性能围护结构、三玻两腔窗体、地源热泵、光伏一体化等一系列节能技术不断成熟并广泛应用，使节能设计从理念走向工程可实施性，技术进步为节能提供更高效、精准的

实现手段,也提升了节能建筑的综合性能。政策引导和技术赋能双轮驱动,节能设计在新建建筑与既有建筑改造中逐渐规模化落地,推动建筑行业绿色转型良性发展格局形成,为未来城市建筑走向绿色、智能、低碳奠定坚实基础。

## 2 节能理念在建筑设计阶段的系统融入

建筑节能目标的实现,建筑设计阶段是关键环节,节能理念系统地融入其中不仅与建筑能效水平有关,还决定着建筑长期运行成本与环境影响的状况。

### 2.1 前期策划中的节能考量

建筑设计前期,节能设计有效实施的基础是科学合理的规划与定位,要把项目所在地的气候特征、地理环境和城市总体布局综合起来以确定建筑体量、朝向、间距和形态等基本要素,从而从源头上减少对人工能源的依赖,寒冷地区应优先考虑紧凑布局和朝阳方向以削减采暖负荷,炎热地区则可通过增加遮阳、利用自然通风和绿化覆盖来降低冷负荷,设计团队要与业主、工程顾问、能源顾问等多方合作,明确节能目标与指标并运用能耗模拟等技术手段对设计方案预测和调整,这样节能策略在整体策划阶段才能精准嵌入。

### 2.2 建筑形体与空间组织优化

建筑能耗水平直接受其形体设计和空间布局影响,节能设计需优化建筑体型系数、开窗面积、遮阳系统等以有效削减冷热能量损失,形体紧凑的建筑外围护面积比复杂形体建筑小,热传导面积随之减少,利于热量保存;在空间组织上合理布置功能区,如把高能耗区域集中起来,让热负荷高的区域远离朝西或西南方向就能提高能效和舒适性;还应重视自然采光和通风设计,中庭、风井、通透立面布局等手法能提升室内空气流动和光照质量,从而降低人工照明和通风的能耗需求,建筑形体和空间的科学组织使建筑物理性能和使用功能有机统一是节能理念深入设计过程的核心体现。

### 2.3 技术系统与建筑一体化设计

节能理念要系统融入,不能只在被动设计策略里体现,而在主动技术系统选型与集成上也得高度协调,暖通空调、照明、供配电等机电系统设计时应优先选择高能效设备并结合建筑自身条件进行系统整合,像地源热泵系统、变风量空调系统、LED 智能照明和建筑自动化控制系统协同使用既能提高设备运行效率,又能按实际需求动态调节能耗,建筑外壳设计也得与技术系统好好配合,采用双层幕墙、外遮阳百叶、保温一体板这些措施可增强围护结构热工性能,建筑和技术系统深度融合并非简单堆一块,而是系统性协同优化的设计过程,是实现建筑节能目标必须的路径。

## 3 建筑构造与材料优化在节能中的关键作用

要实现节能目标,关键技术手段是优化建筑构造与材料,这与建筑的热工性能、能耗水平和环境舒适性直接相关且在节能设计中是不可忽视的核心环节。

### 3.1 高性能围护结构设计

建筑能量交换主要靠建筑外围护结构这个界面,整体能耗很大程度上取决于其热工性能,墙体、屋面和地面构造合理就能有效控制热传导、降低冷热负荷以实现建筑节能目标。围护结构设计时,优先考虑复合保温体系、高密闭性能的窗体构件和热桥断绝设计很有必要,可减少热损耗与冷气渗漏,像双层中空玻璃窗、高反射屋面材料和外墙外保温系统能显著提升热阻与反射率、改善建筑热环境。不同气候区域要因地制宜,选择适配性强的围护结构类型,寒冷地区注重保温隔热,炎热地区强化遮阳与隔热能力,科学设计围护结构、调控建筑与环境间热量传递是节能设计的基础支撑。

### 3.2 绿色建筑材料的合理选用

节能效果受建筑材料种类与性能的重要影响,围护结构和内部构件选择时更得慎重。当下市场有好多新型建筑材料,像相变储能材料、真空绝热板、发泡陶瓷保温板之类的,它们既保温、环保又节能,在提升热工性能的还顾得上可持续性。轻质高强材料的使用能让建筑自重降低、施工周期缩短、能源消耗减少。选材得遵循因地制宜、经济可行、可再利用等原则,应鼓励用本地资源和再生材料,以降低运输和加工当中的能耗和碳排放。合理配置绿色材料能提升建筑节能水平,这也是生态设计理念的具体应用,现代节能建筑可不能少了它。

### 3.3 构造细节对节能的支撑作用

宏观层面的结构布局和材料选择只是节能设计的一部分,对微观构造细节的精准把控也很重要,像门窗与墙体连接节点密封好不好、阳台挑板有没有做热桥断绝处理、屋面泛水和女儿墙部位保温是否连续,这些都会影响建筑整体热稳定性和密闭性,高性能建筑尤其如此,细节处理不好,热损失就会增大,冷凝现象也会经常出现,使用舒适度和设备运行效率都会受影响, BIM 模拟分析、热桥检测和现场测试这些方式,可以用来验证和完善构造节点的优化,节能理念延伸到构造细部,这体现了建筑师和工程师对品质的追求,也是提升建筑综合能效的重要步骤,不容忽视。

## 4 可再生能源技术在建筑设计中的集成应用

提升建筑节能水平实现碳减排目标的关键在于可再生能源技术的集成应用,这在现代建筑设计中正成为重要趋势与技术焦点。

### 4.1 光伏建筑一体化设计

太阳能发电系统被光伏建筑一体化 (BIPV) 直接融合进建筑构件,实现了能源供应和建筑美学双重统一。与传统附加式光伏板相比, BIPV 在设计初期就将建筑整体构思纳入其中,常被用于屋面、幕墙、阳光棚等部位,不但具备发电功能,还能作为遮阳、保温、隔热的结构构件,在南向屋面或者采光不错的幕墙上安装光伏玻璃幕墙,既能高效利用太阳能资源,又不会影响建筑外观。BIPV 与电

力系统智能耦合后,能够达成多能互补和智能控制,提升能源利用效率,该技术已在商业综合体、工业厂房以及住宅小区广泛推广,是推动建筑能源自给型发展的重要方式。

#### 4.2 地源热泵系统的节能优势

有一种高效系统叫地源热泵,它能利用地下恒温层进行冷热调节,具有能耗低、稳定性强、环保无污染等显著优势,建筑设计时可通过竖直或者水平埋管将地源热泵与建筑内部空调与供热系统连接起来以实现冬天供热夏天制冷,与传统空调系统相比,地源热泵运行能效比高30%,在办公楼、医院和大型公共建筑等对舒适性和能效要求高的地方特别适用,并且系统要根据建筑面积、土壤热物性参数和区域气候条件进行个性化设计以保证换热效率和运行经济性达到最优平衡,由于绿色建筑标准一直在推进,地源热泵逐渐成为被动节能和主动系统融合的重要技术手段。

#### 4.3 风能与其他技术的辅助利用

特定区域像风力资源富足的沿海或者高原地区,风能能有效补充建筑能源系统,中小型建筑风力发电设备可装在建筑屋顶或者塔楼顶部并与储能系统相结合,给建筑提供夜间或者备用电源以提高能源供应的稳定性和灵活性。雨水收集和中水回用、太阳能热水器、生物质能锅炉等技术也逐渐成为可再生能源系统的一部分,这些辅助技术在满足建筑局部能源需求时有助于优化能源结构、缓解传统能源依赖、提升建筑能源系统的可持续性和弹性。多种可再生能源技术有机组合、统筹布局不仅能提升建筑整体能源自给率,还能助力分布式能源网络的构建,推动城市低碳转型和可持续发展战略的深入实施。

### 5 提升建筑节能效果的策略与未来趋势分析

“双碳”战略驱动建筑节能正从局部优化迈向系统升级,在科学策略与前沿趋势引导下建筑节能会走向更高效、更智能的发展路径。

#### 5.1 全过程节能设计策略

建筑节能效果的提升得贯穿于设计、施工、运营的整个过程并形成系统性的控制机制,在设计阶段利用模拟分析精准确定能耗目标并对朝向、体型、围护结构以及自然资源利用策略进行优选,施工阶段要注重保温层连续性、热桥处理、密封细节控制等环节的质量以防止节能设计无法落实,运营阶段依靠智能系统来监控和调节从而达成功态的能耗管理以及运行的优化,并且要加强设计与运维团队之间的信息连接与协作以推进“设计-建造-使用”一体化的节能路径避免因阶段分离而导致资源浪费和能效降低,全过程的节能策略能从源头上提高节能效果且是提升建筑综合性能的重要保障。

#### 5.2 智能建筑与数据驱动应用

节能建筑得到了智能化技术发展的有力支撑,传感器、

物联网设备和能耗管理平台融合应用时建筑就能实时感知环境变化与用户行为并动态调节照明、通风、空调等系统以实现按需供能、精准控制,像根据人流密度自动调节照明强度、按室外温湿度自动调节新风量都能有效减少无效能耗,而且引入大数据和人工智能技术后建筑能耗分析更有预测性、决策性,能借历史数据模拟未来趋势以制定最佳节能策略,智能建筑不只是设备集成而是一个有“自学习”“自调节”能力的能效管理系统从而给建筑节能持续优化提供强大技术支撑。

#### 5.3 节能标准升级与绿色转型趋势

建筑节能技术发展且全球碳中和进程推进,各类节能标准和评估体系随之不断更新升级,如《绿色建筑评价标准》《近零能耗建筑技术导则》《被动式超低能耗建筑设计标准》等都对建筑节能有更高要求,“近零能耗建筑”“正能建筑”“全生命周期碳管理”将是未来节能发展方向,建筑要节能就得实现能量回馈和碳排放抵消,政策引导将更重视激励机制与强制约束相结合,如推广绿色金融支持、进行能耗限值监管、推广碳交易制度等为节能建筑发展提供制度保障,绿色低碳建筑成为行业共识,是未来城市生态建设和提升人居环境的重要支点。

### 6 结语

建筑行业迈向绿色低碳转型的关键时候,节能设计的有效应用体现的不只是技术进步,更是对生态环境和未来可持续发展高度负责的表现,其从前期规划、构造优化,到可再生能源技术集成,再到智能化控制和政策引导,正慢慢形成系统化、多维度的综合策略体系,建筑运行时它降低了能源消耗和碳排放并提升了建筑功能性、舒适性和经济性,以后节能建筑会更加注重全过程管理、智能协同和标准引领以推动整个行业从“节能”迈向“零碳”,全面理解和深化节能设计理念是实现高质量建筑发展必须走的路也是构建绿色人居环境的重要保障。

#### 【参考文献】

- [1]黄兰.节能设计在建筑设计中的有效应用分析[J].智能建筑与智慧城市,2022(12):133-135.
- [2]吴振东.节能设计在民用建筑设计中的有效应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023(1):71-73.
- [3]张岳文,白佳令.节能设计在建筑设计中的有效应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023(21):67-69.
- [4]黄娟,陈亮.节能设计在建筑设计中的有效应用分析[J].房地产世界,2024(18):47-49.
- [5]陈骏.能耗分析在建筑工程电气节能设计中的应用研究[J].智慧城市,2025,11(1):51-53.

作者简介: 杨义新 (1982.1—), 男, 汉族, 毕业学校: 重庆大学, 现工作单位: 河北建筑设计研究院有限责任公司。

## 基于地域文化的城市建筑风貌设计探讨

胡晓娟

北京威斯顿建筑设计有限公司河北分公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**城市建筑不单单是功能空间的承载物，也是地域文化传承与象征的载体。在全球化趋势愈演愈烈之时，很多城市建筑风貌同质化，地域特色和文化认同感被削弱。文中从地域文化视角出发，探讨城市建筑风貌设计的重要性与策略，想要推动建筑设计在传承地域文化、展现城市个性的基础上创新协调发展。并且在系统分析地域文化特征提取、建筑形式与文化内涵融合、材料与色彩在地化选择等方面后，提出一套可行的建筑风貌塑造路径，为提升城市文化品位与空间品质提供理论依据和实践参考。

**[关键词]**地域文化；城市建筑；风貌设计；文化传承；空间特色

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17173

中图分类号: TU984

文献标识码: A

## Exploration on Urban Architectural Style Design Based on Regional Culture

HU Xiaojuan

Hebei Branch of Beijing Western Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Urban architecture is not only a carrier of functional space, but also a carrier of regional cultural inheritance and symbolism. In the increasingly globalized trend, many cities have homogenized their architectural styles, weakened their regional characteristics and cultural identity. Starting from the perspective of regional culture, this article explores the importance and strategies of urban architectural style design, aiming to promote innovative and coordinated development of architectural design on the basis of inheriting regional culture and showcasing urban personality. And after systematically analyzing the extraction of regional cultural characteristics, the integration of architectural forms and cultural connotations, and the localization selection of materials and colors, a feasible path for shaping architectural style is proposed, providing theoretical basis and practical reference for improving urban cultural taste and spatial quality.

**Keywords:** regional culture; city building; landscape design; cultural inheritance; spatial characteristics

### 引言

城市精神的核心体现是地域文化，对建筑风貌的形成起着基础性作用，但当下不少城市在发展时忽视了地域性，导致建筑缺乏文化认同与特色表达。本研究聚焦建筑风貌设计里地域文化的具体体现，梳理影响路径、探讨融合方法，希望为未来城市建设提供既有文化又有设计的参考思路，提升城市整体形象和居民归属感。

### 1 地域文化与城市建筑风貌的内在关系

#### 1.1 地域文化的构成与表现形式

一个地区在长期历史发展过程中形成了地域文化，这是一种独特且具延续性的、融合地理环境、历史背景、民族风俗、宗教信仰、社会制度、语言习惯、传统工艺等众多方面的文化体系，是人类活动和自然环境长期互动的结果。其表现形式多样，有像地方建筑、服饰、工艺、饮食这样的具体物质形态，也有像语言、民俗、信仰、节庆等非物质形态。在建筑领域里，建筑风格、结构构造、空间布局、装饰艺术、用材色彩等元素常将地域文化展现出来。就拿中国来说，南方水乡重视院落式布局和粉墙黛瓦相协调，体现温润气候和人居生活的适应关系；西北黄土高原窑洞建筑适应干旱寒冷自然条件，彰显地域智慧。

#### 1.2 城市建筑风貌的基本内涵

一个城市在特定历史和文化背景下形成的建筑空间

整体形象，有着识别度和审美特征，这就是城市建筑风貌。其涵盖建筑单体的造型、色彩、材质这些视觉要素，以及建筑和周边环境、城市街区之间的空间关系与文化意象。建筑文化与城市精神以建筑风貌为物质呈现形式，且城市记忆与地域特征集中体现于建筑风貌。城市面貌的独特性由建筑风貌决定，且市民的文化认同与归属感受其影响；城市对外交流中的形象名片也是它。建筑设计师在塑造建筑风貌时，往往要综合城市发展阶段、地理条件、社会结构、历史演变等因素，进行整体规划与设计，以保证风貌统一、层次分明、文化特色鲜明。

#### 1.3 二者的互动机制与相互影响

地域文化与城市建筑风貌之间存在紧密的互动关系。地域文化为城市建筑风貌提供了深厚的文化土壤与设计灵感，并通过建筑风貌的物化表达进一步促进其传播与认同。地域文化决定了建筑的基本语境与设计逻辑，使建筑不再是孤立的构造物，而成为承载地方精神的重要文化载体。建筑风貌在地域文化的基础上进行再创造，通过形式的创新与技术的融合，激发传统文化的现代生命力，塑造出既具有时代感又富有地域特色的城市景观。同时，建筑风貌的演变也反向影响着地域文化的更新与表达，在城市空间的持续建构过程中，增强市民对地方文化的感知与记忆，从而推动文化认同的传承与延续。因此，地域文化与建筑风貌应

相互尊重、协同发展，实现文化与空间的共生共荣。

## 2 不同地域文化背景下的建筑风貌差异

### 2.1 北方城市：厚重与对称的文化气质

中原农耕文化和古代王朝制度对北方城市建筑风貌影响颇深，使其展现出沉稳、对称、规整的文化气质。这种文化在建筑上表现为严谨的中轴对称布局、宏大的空间尺度和厚重的建筑体量。以北京为例，故宫是其城市规划的核心，中轴线清晰，宫殿、庙宇、民居布局整齐统一，充分体现出“礼制”思想下的秩序感与等级感。传统民居中，四合院结构严谨，注重私密性与围合感；灰瓦红墙、砖木结构、深远屋檐等建筑元素无不透着北方文化的厚重与沉静。北方冬季寒冷，建筑常采用厚墙体、小窗户的形式，以增强保温性能。这种对气候的适应性逐渐融入建筑风貌的文化表达之中，进而形成了北方城市特有的稳重、大气之感。

### 2.2 南方城市：精致与园林式的建筑表达

湿润气候和江南水文化影响着南方城市建筑，使其形成灵动、精巧且充满园林意境的建筑风貌。苏州、杭州等地的传统建筑大多白墙黛瓦、小巧玲珑，注重空间穿插和视线引导，体现出“虽由人作，宛自天开”的自然融合理念。建筑布局常与水系相结合，水塘、曲桥、假山、回廊等元素被巧妙利用，营造出移步换景、诗意栖居的空间体验。穿斗式木结构为民居常用结构，屋面坡度较缓，既有利于雨水排泄，也能增强通风效果。南方建筑重视与自然的互动，不拘泥于严格的对称布局，追求形态自由、形式美感与文化内涵的统一。南方城市建筑风貌因这种对环境的适应性和文化审美倾向，呈现出轻盈、雅致、富有层次的特色。

### 2.3 西部与少数民族地区：民族性与地理环境的融合

西部及少数民族地区的建筑风貌鲜明地展现出民族文化特色，且对自然地理环境有着高度的适应性。藏族地区的民居大多为石砌建筑，屋顶平、墙体厚，以应对高原寒冷干燥的气候；建筑色彩以红、黄、白为主，并融合佛教文化象征元素，呈现出一种独特的宗教审美风格。新疆地区维吾尔族传统建筑受伊斯兰文化影响，穹顶、拱门、几何花纹装饰使其充满异域风情。西南地区苗族、侗族等少数民族依山地地形建吊脚楼、干栏式木屋，结构灵活，能抗湿防虫，并通过雕花、织锦等方式体现族群文化。这些建筑不只是居住空间，更是民族精神与自然智慧的具体体现。西部建筑风貌的关键，在于协调融合文化多样性与环境适应性，这是地域文化和生态地理互动关系的真实反映。

## 3 地域文化融入建筑设计的关键路径

### 3.1 建筑造型语言中的文化符号

建筑是一种能被阅读的空间语言，地域文化最直观的体现方式就是将其符号化，并融入造型表达里。图腾、纹样、传统构件、历史建筑形制等地域文化内容，都可变为现代建筑设计的灵感来源。就像浙江嘉兴城市更新项目，当地设计团队把江南民居的马头墙、拱形门洞、飞檐翘角等符号元素引入新建建筑，再结合现代建构技术，在保留传统风貌的同时，也没缺失功能性和时代感。《中国城市建筑

风貌调查报告（2023）》统计，全国新建公共建筑中，超 68% 在设计时引用了地方文化元素，造型符号化表达的占比达 44% 之高。可见，文化符号成了建筑传达地域文化的重要视觉语言，增强了建筑识别度，并强化了空间的文化归属。

### 3.2 建筑色彩与材质的本土化表达

建筑感知中，色彩和材质是极富感染力且有很强文化指向性的要素。不同地域因自然资源、审美习惯、气候条件有别，使得建筑色彩和材料使用特色明显。福建土楼夯土墙体和木质结构就地取材，且传达出“厚重包容”的地方价值观；云南丽江古城建筑大多采用木结构和灰色瓦片，色调低饱和，与周边自然景观十分和谐。

《2024 中国传统村落建筑材料应用研究白皮书》的数据显示，全国超 52% 的新型仿古建筑优先选用本地材料，以控制碳排放、保持文化连贯性。色彩运用也体现文化心理，如西藏建筑多用红、黄等象征信仰的明亮色系，且视觉识别度很强。本土化的色彩和材料既能提升美学表现力，又承载着文化记忆和生态智慧。

### 3.3 文化活动空间与生活习俗的适应设计

城市建筑可不只是居住和工作的场所，还是文化活动、生活习惯的空间承载物，要做融入地域文化的设计就得尊重当地人群的生活节奏、行为模式以及社会交往方式。就拿贵州侗寨来说，鼓楼是公共空间的中心，承担着村民集会、婚礼、节庆等多种功能且其建筑空间设计和族群生活方式紧密相连。在现代建筑设计里，福建泉州的一些新建社区设置广场、庙口式入口和半开放式庭院，将“邻里集聚”的传统空间逻辑延续下来了，而且住建部 2022 年的调研数据表明，在用户满意度比较高的城市社区里，有 71% 明确说更喜欢“有地方风俗氛围和文化交流空间”的住宅环境。这么看的话，建筑空间要是能对本土文化的日常实践和人际关系特征作出回应，就能从功能适用上升到文化共鸣，真正实现文化嵌入和认同构建。

## 4 风貌协调机制中的多元主体协作

### 4.1 政策引导与制度保障

强有力的政策引导与制度保障对城市建筑风貌的塑造和保护不可或缺。作为公共空间和城市文化管理者的政府，在法规制度方面得建立起明确的建筑风貌控制体系和审查机制。通过制定城市设计导则、风貌控制规划等规范文件，对建筑高度、立面形式、色彩材质、文化元素等加以指导和限制；并且在审批流程里设风貌评审环节，以确保新建项目符合地域文化的表达要求。

《深圳市历史文化风貌区保护条例》明确提出，城市核心区的建筑改造要通过风貌审查，从而形成制度化保护机制。2023 年住建部统计显示，全国有 92 个城市制定了风貌专项规划，且其中七成多把地域文化列为风貌控制的重要内容。制度保障的不断推进，使得城市建设质量得以提升，多元协作也有了制度框架和政策依据。

### 4.2 设计单位与开发主体的协同创新

设计单位与开发主体要塑造建筑风貌，就得在文化表

达和技术实现方面达成共识。设计单位需深入探究当地地域文化，并将其变为能施行的设计语言，从空间布局、构造方式、细部处理等方面体现文化内涵。而开发商要在成本控制、功能达成和市场需求之间，平衡创新与商业逻辑的关系，共同推动文化和产业融合发展。

如成都“宽窄巷子”改造项目，设计团队和开发商多次商量，在保留清末民居风貌的基础上，引入现代商业功能，打造出既有文化传承又有经济效益的示范街区。《中国建筑设计行业发展报告（2024）》显示，近五年超60%的城市更新项目设有“开发-设计”联合团队机制，提升了地域风貌塑造的落地率和公众接受度。协同创新既能优化设计成果，还能形成城市建设多赢的格局。

#### 4.3 居民参与与社区文化传承机制

城市建筑风貌不只是政府和市场的事，广大居民的生活体验与文化归属也受其直接影响，居民参与极为关键。鼓励居民表达在城市设计、社区更新、建筑改造方面的意见，既能提升方案的实用性和认同感，又能激发文化自觉和地方认同感。

杭州良渚文化村建设时，规划团队组织居民座谈会、开展文化调研、进行模拟体验，把社区传统节庆、宗族活动空间需求等融入建筑与景观设计，打造出有文化温度的人文社区。同时，还得建立社区文化传承机制，设立文化馆、活动中心、传统工艺展示空间，促使文化在空间里延续传播。

《2023年城乡社区参与度调研报告》表明，78%的居民乐意参与有文化传承意义的社区共建活动，而且大多希望建筑空间能体现地方认同。多元主体协作不能无视居民的文化主权，要通过机制设计，让居民从使用者变为共建者。

### 5 地域文化导向下建筑风貌设计的实践探索

#### 5.1 成功案例解析与启示

近年来，一些城市积极将地域文化融入建筑风貌设计，取得了显著成效。例如，杭州运河沿岸历史街区更新项目通过保护与重构原有建筑风貌，保留了清末民初的建筑形制，并引入现代服务功能，使古街重焕生机，成为文化旅游与社区生活融合发展的典范。

另一个典型案例是西安大唐不夜城项目。该项目在建筑立面设计中提取唐代宫殿的建筑特征，融合现代灯光与互动媒体技术，打造出独具风格的城市夜景轴线，成功重塑了城市文化形象，并极大带动区域消费。根据文化和旅游部2023年发布的数据，大唐不夜城年接待游客超过2200万人次，文化和经济效益显著。

这些案例表明，若建筑风貌设计能够深入挖掘地域文化特质，并与现代功能需求相融合，不仅能够实现地域文化的活化传承，也具备可持续的社会与经济价值，为城市更新与发展提供了有力支撑。

#### 5.2 现存问题分析与改进建议

地域文化导向的风貌设计理念不断推进，但实践中仍存在一系列问题。

其一，表面化、符号化问题明显。有些项目将传统元

素简单堆砌，不重视文化内涵与空间功能的协调，导致“伪风貌”建筑泛滥；其二，风貌控制体系缺乏统一标准。不少地区没有完整的设计导则和实施监督机制，使得建筑风格杂乱；其三，居民参与不足。公众不关注城市风貌设计，造成设计与实际生活需求脱节。

针对这些问题，需要为专业设计人才加强本土文化培训，并推动跨学科合作；制定细致且可操作的建筑风貌控制标准，并严格执行；鼓励社区参与设计前期调研和方案共创，以构建“政府-专家-公众”三位一体的设计推进机制，从而让建筑风貌更具文化底蕴，且更贴合群众需求。

#### 5.3 未来城市风貌塑造的发展趋势

未来，城市建筑风貌设计以地域文化为导向，会呈现出融合创新、数字赋能与生态协同的发展趋向。

融合创新方面，建筑不会局限于复制传统风格，而是通过现代材料和建构技术，把文化内核用现代方式表达出来；数字赋能方面，BIM、AI、虚拟仿真等技术会在城市风貌模拟、历史场景复原、公共参与平台建设中广泛运用，从而让决策效率和空间体验质量得以提高；生态协同方面，建筑设计会更注重文化与自然、历史与未来的系统融合，以构建低碳、有弹性、多样的城市风貌生态系统。

《2024年中国城乡建设趋势报告》显示，全国新型城市设计项目中，超38%已将“文化、生态、科技”当作风貌核心要素。这种多元融合的发展模式，今后将成为风貌设计的重要方向，能让城市在高质量发展和提升文化软实力上实现双重目标。

### 6 结语

城市独特的精神和历史积淀体现为地域文化，在建筑风貌设计里，应深入挖掘地域文化并创新表达。通过提炼文化符号、优化空间结构、协调多元主体参与，让功能与文化、传统与现代有机统一起来。当下风貌塑造虽已取得一定成果，但在制度建设、设计机制、公众参与等方面仍需继续优化。未来，若能朝着融合创新、数字赋能、生态协同的方向，构建具有地域识别度、人文温度和时代精神的城市建筑风貌，就能塑造可持续发展的城市文化形象。

#### 【参考文献】

- [1] 刘洋.地域文化视角下的城市门户形象景观提升研究[D].西安:西安建筑科技大学,2024.
- [2] 张瑛.基于山水自然地理特质的传统商业街文化传承城市设计研究[D].合肥:安徽建筑大学,2024.
- [3] 李东骏.基于彝族建筑文化传承的布拖县城市风貌规划策略研究[D].绵阳:西南科技大学,2021.
- [4] 谭小松.地域性导向下的城市建筑立面风貌控制思考[J].城市建筑,2019,16(9):103-105.
- [5] 李敏竹.地域文化视角下片区级城市风貌特色营造研究[D].武汉:长江大学,2021.

作者简介：胡晓娟（1998.3—），女，汉族，毕业学校：河北工程技术学院，现工作单位：北京威斯顿建筑设计有限公司河北分公司。

## 城市更新背景下老旧小区建筑立面改造设计探讨

耿莎

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**城市更新进程中, 提升城市形象和居住品质的关键环节是老旧小区建筑立面改造。建筑外观美化是立面改造涉及的一方面, 它还关系到城市文脉延续、社区活力激发。老旧小区立面存在功能缺失、审美落后、结构老化等问题, 分析这些问题并结合现代设计理念和本地文化特色去探索多样、可持续的改造策略, 要强调实用性和艺术性融合以推动建筑和环境协调发展, 这有助于城市空间整体优化和人居环境全面提升。

**[关键词]**城市更新; 老旧小区; 建筑立面; 改造设计; 可持续发展

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17171 中图分类号: TU984 文献标识码: A

## Exploration on the Facade Renovation Design of Old Residential Buildings in the Context of Urban Renewal

GENG Sha

Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** In the process of urban renewal, the key to improving the image of the city and the quality of living is the renovation of the facades of old residential buildings. Architectural exterior beautification is one aspect of facade renovation, which is also related to the continuation of urban context and the stimulation of community vitality. The facades of old residential areas suffer from functional deficiencies, outdated aesthetics, and structural aging. By analyzing these issues and combining modern design concepts with local cultural characteristics, diverse and sustainable renovation strategies should be explored. Emphasis should be placed on the integration of practicality and artistry to promote the coordinated development of architecture and environment, which will contribute to the overall optimization of urban space and the comprehensive improvement of living environment.

**Keywords:** urban renewal; old residential areas; building facade; renovation design; sustainable development

### 引言

城市化进程加快, 上世纪建的大量老旧小区功能退化、形象陈旧等问题渐显, 难以满足现代居民对美观、舒适、安全居住的需求。建筑立面是城市空间视觉界面, 不但影响街区风貌, 还承载城市记忆与文化认同。在城市更新背景下, 立面改造如何提升建筑品质、改善居住环境、激发社区活力, 成了设计实践的关键课题, 受到广泛关注和深入探讨。

### 1 城市更新背景下老旧小区立面改造的时代意义

推动城市高质量发展, 城市更新是重要路径, 而老旧小区立面改造作为其中重要组成部分直接关系到民生和城市形象, 急需系统性思考与实践。

#### 1.1 城市更新推动空间品质再提升

城市发展有从增量扩张转变成存量优化的趋势, 在这种情况下提升城市功能与形象的核心策略就是城市更新, 老旧小区是城市空间的重要组成部分, 其建筑立面长期存在年久失修、风格杂乱等问题影响城市整体面貌和居住环境质量, 而立面改造能提升小区自身的视觉形象、在城市空间中重塑秩序、改善街道界面, 让城市空间更宜居、更有吸引力, 推动城市从“外延式扩张”转向“内涵式发展”

以全面再提升空间品质。

#### 1.2 建筑立面改造满足多元民生需求

建筑立面可不单是外观的事儿, 还直接关联居住者的安全、舒适和心理感受, 不少老旧小区现在都有诸如保温性能差、结构老化、通风采光不好之类的问题从而严重限制居民生活品质。在城市更新的大背景下, 立面改造不再仅仅是表面美化工程, 而是集节能改造、安全加固、人性化设计于一体的综合性提升工程, 科学设计加上技术干预能满足现代居住需求并尊重和关照不同人群的生活方式, 提升居民归属感与满意度, 促使社区治理迈向更高层次。

#### 1.3 激活城市文化记忆与社区认同感

城市历史的载体是老旧小区, 其立面形式和建筑风格常蕴含独特的文化印记, 立面改造时保持和提炼原有的历史元素并融合现代设计语言, 有助于延续城市记忆、唤起居民的文化共鸣、增强社区的归属感与认同感, 而且改造后的立面成为城市展示在地文化与特色风貌的重要窗口, 推动城市形成个性鲜明内涵丰富的文化景观, 这种文化再激活不但提升城市形象, 还给城市软实力构建注入持久动力。

### 2 老旧小区建筑立面存在的问题与成因分析

老旧小区建筑立面结构老化、功能滞后、视觉杂乱这

些问题普遍存在并影响城市整体环境和居民生活质量,得从问题根源出发系统性分析应对,这很急迫。

### 2.1 结构老化与材料性能退化

上世纪七八十年代建成的大多数老旧小区,其建筑使用寿命快要接近或已超过设计年限,结构松动、墙体开裂、渗水发霉等问题在立面构造上普遍存在,水泥砂浆、马赛克、瓷砖等传统外墙材料因长期经受风吹雨淋、阳光暴晒而出现粉化、脱落现象,这对建筑安全性影响极大,并且由于缺乏系统维护和周期性保养,窗台、雨篷、栏杆等立面构件容易存在锈蚀、松动甚至坠落等安全隐患,材料性能衰退使建筑耐久性降低,后期改造成本不断增加,这成了城市更新中的难点。

### 2.2 功能滞后与节能环保缺失

老旧小区建筑立面设计普遍未考虑节能与环保理念,保温隔热性能差,导致冬天冷夏天热且能耗很高,部分建筑要么未设外保温层,要么保温措施无效,既不符合当下节能减排政策要求又影响居民居住体验,很多建筑最初设计时未预留空调机位、雨水排水系统、遮阳构件等现代生活设施的空间,居民自行加装后使得立面更乱,通风和采光条件差的情况也常见,南北通透性差的户型更是如此,这会降低居住舒适度甚至可能引发健康问题。

### 2.3 立面形象混乱与视觉风貌缺失

时间推移且居民个性化使用需求增多,老旧小区立面慢慢变成“拼贴式”视觉场景,阳台私自封闭、空调外挂机乱挂、遮阳布各种各样、小广告乱贴,建筑外观杂乱不堪,城市立面整体性与街区协调性被严重破坏,有些小区不搞局部维修或者“面子工程”改造,没有统一设计语言、建筑风格杂、色彩搭配乱,美感特色全无,视觉混乱、居民审美体验降低、城市公共空间品质形象受影响,城市面貌整体提升受阻。

老旧小区建筑立面的问题典型地有着历史遗留、技术滞后和管理疏忽的特性,在城市更新背景下要制定科学合理的改造策略,前提是深入分析这些问题的成因,只有全面理解问题才能够实现从“修修补补”到“系统提升”的转变,进而为改善城市环境和人居质量打下坚实基础。

## 3 建筑立面改造设计的基本原则与核心要素

老旧小区立面改造不只是外观更新,重点是建筑功能、文化内涵以及环境品质的全面提升,需遵循科学设计原则,统筹好各类核心要素才能让品质和效益都得到提升。

### 3.1 注重整体协调与空间融合

建筑单体和城市空间的联系由建筑立面这一城市界面承载着,其改造的立足之处是整体环境的协调统一,一方面小区内部楼栋之间风格得保持一致且要避免颜色、材料、形式过于杂乱,不然整体秩序会被破坏,另一方面周边街区的建筑风貌要与之相融合且要尊重城市已有的空间肌理和景观格局,就像在高密度老旧片区,立面改造用

中性色调和简洁构图比较好,这样能塑造统一、整洁的视觉界面,而且要统筹考虑地面铺装、绿化景观、公共设施等要素的联动改造,避免“只改墙面、不顾周边”的孤立设计才能实现建筑与环境、人与空间的有机融合。

### 3.2 强化功能提升与使用便利性

老旧小区立面改造不能光想着呈现出“美”,而应更看重“用”的实际效果,要把建筑节能、结构安全、居民便利当作核心出发点来做系统设计,节能方面可采用外墙保温系统、节能窗户、遮阳系统等措施,有效减少建筑能耗的提高居住舒适度,结构老化问题可通过结构加固、外立面防水处理等方式提升建筑的耐久性和安全性,使用方面要预设好空调设备统一安装位置、增设晾衣架和遮阳篷、规范使用行为、减少“私搭乱建”现象,改造时也要关注无障碍通行、夜间照明、防盗安全等细节,做到以人为本、功能优先,让建筑既好看又便捷、安全、实用。

### 3.3 融合文化表达与审美创新

建筑形象的再塑造即立面改造,这一过程也是对文化价值的重新发掘,设计时需深挖小区和城市的历史、地域文化、社会记忆以使建筑有更深层次的文化表达,提炼坡屋顶、花格窗、灰白色调等传统建筑元素并用现代手法演绎,这样改造后的建筑既有当代感又有历史韵味,要注重材料和工艺的创新使用,如采用轻质环保的新材料、模块化装饰构件等,这既能提高施工效率又能让立面表现力更丰富,审美方面应推崇简洁、耐看、宜人的设计风格,不可只追求视觉冲击而不顾与环境的协调,文化和美学深度融合后建筑就成为提升居民审美体验、增强社区认同感的重要载体。

## 4 融合地域文化与现代审美的设计策略探索

老旧小区建筑立面改造不只是功能和形象提升之事,更是地域文化传承与现代审美表达的交融之处,需要在尊重历史和创新设计里找平衡以塑造出带有地方特色的城市界面。

### 4.1 提炼地域文化符号融入立面语言

城市个性的重要来源之一是地域文化,在建筑立面里表达地域文化有助于增强城市记忆和居民归属感。老旧小区往往有着独特的地方历史与建筑风貌,江南水乡的白墙灰瓦、岭南民居的灰雕彩画、北方胡同的砖石肌理等,立面改造时应深入挖掘当地元素,通过构图、材质、色彩等方式将其再现和演绎出来,把本地传统纹样用作装饰图案,将传统屋檐线条转化为现代构件语言,又或者在立面嵌入反映地方记忆的浮雕与图腾,从而给建筑增添文化温度和艺术气息,这样嵌入文化符号,改造后的建筑更具识别性,居民在日常生活中也能感受到熟悉亲切的文化氛围。

### 4.2 运用现代设计手法提升视觉美感

现代审美注重简洁、秩序和理性且看重材质质感、色彩关系与比例协调。老旧小区立面改造时运用现代设计手法,不但建筑外观质感显著提升,而且能改善立面原本的杂乱无章。用水平和垂直线条分割可优化建筑比例关系,

使用哑光金属、仿石材板、清水混凝土等现代材料，沉稳细腻的视觉效果就会出现。统一采用灰、白、米之类的中性色构成色彩体系，立面风貌就会和谐且耐看。光影处理在现代手法里也很重要，改变构造并进行局部照明设计，立面在不同就会有丰富的光影层次，整体观感也会提升。形式控制上不能过度堆砌和装饰，必须强调整洁、秩序和精致细节，让建筑在简约中体现品质，在平实里传递美感。

#### 4.3 文化与现代的融合路径与方法

老旧小区立面改造的关键挑战与创新方向是把地域文化和现代审美有机融合起来，一方面不能简单堆砌或符号化复刻传统元素，而要以“转译”和“再设计”的方法让传统语言和现代建筑语汇内在逻辑统一，像用现代结构体系重新演绎传统骑楼形式，借助数字化建模整合传统图案与立面构件，营造“既熟悉又新颖”的视觉感受，另一方面得注重设计语境的真实和适宜，不能脱离小区实际情况和居民需求，要根据不同地域、气候、材料可得性以及居民审美偏好制定因地制宜的融合策略以提高改造的可落地性和群众接受度，还可以用参与式设计引导居民共建共创，让文化融合更包容、更有生命力，促使居民和空间双向认同，推动社区文化复兴。

### 5 推动老旧小区立面改造实施的路径与保障机制

老旧小区立面改造这项城市更新任务具有系统性和综合性，涉及政策引导、资金投入、技术支持、居民参与等多个层面，需构建科学路径和完善机制以确保高效有序推进。

#### 5.1 多元主体协同的治理机制

立面改造多个环节如设计、施工、管理、使用等都涉及到了，需要政府、社区、设计单位、施工企业、居民等众多主体共同参与才能形成共治共享的治理局面，其中政府要主导，明确改造的政策导向、技术规范并提供制度保障和资金支持，依靠街道、社区等基层组织进行宣传引导、协商协调工作，在居民和专业团队之间搭建沟通的桥梁，设计和施工单位要在尊重居民想法的基础上拿出专业且实在的改造方案以确保设计落地且施工质量过关，居民作为直接使用者其意见和需求应被尊重和吸收，可通过问卷调查、座谈会、样板区试点等方式进行参与式设计以增强认同感和主动性，多方达成共识、责任明确、沟通顺畅，立面改造才能从“政府推动”变为“多方共建”且实施更具持续性。

#### 5.2 因地制宜分类推进的实施路径

老旧小区类型不少、问题繁杂且资源分布不均衡，立面改造需坚持“一小区一策”，因地制宜地制定分级分类的实施路径，结构稳固些、居民积极性高的小区可优先被纳入试点，采用“政府+居民共筹”或者“企业+平台运营”模式推进，而改造意愿弱、居民分歧大的区域可先靠微改造、示范工程等方式慢慢引导氛围，积累经验、增强信任，立面改造还能与既有公共空间整治、雨污分流改造、智慧社区建设等项目统筹结合，做到“多改合一”，提高资

源利用效率，减少重复施工，时间安排不要“一刀切”和“赶工期”，要合理划分施工阶段，维持居民正常生活节奏，把扰民成本降到最低限度，通过精细的分类管理和分步骤推进，实现从“点上突破”到“面上铺开”的渐进式更新。

#### 5.3 完善政策支持与资金保障体系

城市更新的重要内容是立面改造，这需要明确的政策支持以及稳定的资金来源来保障推进，政策方面得完善相关法规体系，把改造范围、审批流程、施工标准和后期管理机制都明确下来以给实践操作提供制度依据，并且要结合像“城市更新专项规划”“绿色建筑评价标准”这些文件，把立面改造纳入城市高质量发展目标里统筹部署，资金是推进的关键瓶颈，可探索多元化筹资模式，像财政补贴、居民自筹、社会资本参与、公建民营、项目回报型合作等以构建可持续的资金投入机制，还得设立专项奖励机制，对表现突出的社区、设计团队和施工单位给予政策激励和资金扶持以激发市场活力和技术创新动力，只有健全的政策框架加上强有力的财政支持，立面改造才能有章可循、有钱可用、有效可行。

老旧小区立面改造要顺利实施，需要科学合理的路径选择，且多方主体协同合作、制度机制全方位保障也不可或缺，建立共建共治治理体系、实施因地制宜改造路径、完善多元化政策与资金支持体系能破解现实推进中的难题、提升改造效率与成果质量，让城市更新工作从“局部修补”变为“系统提升”，使老旧小区从“外在焕新”达成“内在更新”的整体跃升。

### 6 结语

城市更新中老旧小区建筑立面改造是关键环节，其与城市形象塑造、居民生活质量提升都有关系，经系统分析存在问题后明确设计原则，融合地域文化和现代审美并探索出可行的实施路径与保障机制，立面改造就能实现功能优化、美学重构与文化传承等多重价值，往后要秉持统筹规划、因地制宜、协同共建理念推动改造工作往制度化、精细化、人本化发展，在城市更新中延续城市记忆、在提升过程里塑造宜居环境，使城市迈向高质量发展新阶段。

#### 【参考文献】

- [1] 尹博.基于城市微更新视域下的东北寒地城市老旧小区优化设计研究[D].长春:吉林建筑大学,2023.
  - [2] 赵文平.城市更新背景下老旧小区绿色建筑技术实践[J].中国建筑装饰装修,2024(15):134-136.
  - [3] 程舒娴.基于城市更新背景下老旧小区微改造建筑设计研究[J].住宅产业,2024(9):47-49.
  - [4] 冯君来.城市更新背景下老旧小区建筑工程改造施工探究[J].中国住宅设施,2025(2):251-253.
- 作者简介：耿莎（1987.3—），女，汉族，毕业学校：河北建筑工程学院，现工作单位：河北建筑设计研究院有限责任公司。

## 可持续理念下绿色建筑设计策略研究

卢子凡

北京威斯顿建筑设计有限公司河北分公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**全球都重视可持续发展理念，建筑行业转型升级的重要方向是绿色建筑，这使绿色建筑越来越受关注，在可持续发展理念指导下，文中探讨绿色建筑设计的核心策略和实践路径，通过分析节能环保设计、生态材料选择、智能化系统集成、室内环境优化等关键环节，提出一套可行的绿色建筑设计体系，以实现建筑性能和环境责任的有机统一，本研究希望为我国绿色建筑推广提供理论支撑和技术指导，推动建筑行业朝着低碳环保高效方向不断发展。

**[关键词]**绿色建筑；可持续发展；节能设计；生态材料；智能控制

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17172 中图分类号: TU746 文献标识码: A

## Research on Green Building Design Strategy under Sustainable Concept

LU Zifan

Hebei Branch of Beijing Western Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The concept of sustainable development is highly valued worldwide, and green buildings are an important direction for the transformation and upgrading of the construction industry. This has made green buildings increasingly popular. Under the guidance of the concept of sustainable development, this article explores the core strategies and practical paths of green building design. By analyzing key aspects such as energy-saving and environmental protection design, ecological material selection, intelligent system integration, and indoor environment optimization, a feasible green building design system is proposed to achieve the organic unity of building performance and environmental responsibility. This study hopes to provide theoretical support and technical guidance for the promotion of green buildings in China, and promote the continuous development of the construction industry towards low-carbon, environmentally friendly and efficient direction.

**Keywords:** green building; sustainable development; energy-saving design; ecological materials; intelligent control

### 引言

全球当下正面临资源紧张和环境恶化的双重挑战，必须推动建筑业朝着绿色可持续方向发展。绿色建筑是达成资源节约、环境友好和高效运作的重要方式且其设计理念与策略一直在发展。本文以可持续发展为核心，系统梳理和研究绿色建筑设计的具体策略并总结实践经验以提升建筑整体绿色性能，从而给设计师和施工方提供可借鉴的技术路径。

### 1 绿色建筑设计的基本内涵与发展趋势

#### 1.1 绿色建筑的定义与分类

在建筑的全生命周期里最大限度节约资源、保护环境、减少污染，给人们提供健康、适用且高效使用空间并与自然和谐共生的建筑被称为绿色建筑，绿色建筑不仅看重建筑自身的功能性与美学价值，而且更重视对生态环境友好、资源利用合理，其评价标准通常包含节能、节地、节水、节材、室内环境质量以及运营管理效率这六大方面，不同国家按照自己的国情和发展阶段设立了像美国的 LEED、中国的绿色建筑评价标识（“绿标”）、英国的 BREEAM 等各异的绿色建筑评级体系，这些体系根据设计、建造、运营等阶段对建筑分级评估，等级一般分为一星、二星、三星或者银级、金级、铂金级等以反映建筑在可持续性方

面的技术水平与综合表现。

#### 1.2 可持续理念对建筑设计的影响

可持续发展理念强调“既满足当代人的需求，又不损害后代人满足其需求的能力”，这不仅是一种发展战略更是一种成体系的价值取向，给现代建筑设计带来全新目标与挑战，在这一理念的指引下，建筑设计的核心不再只是满足结构功能和视觉形式，而是将环境友好、资源节约和人文健康等要素全面纳入其中以追求建筑和自然的和谐共生，设计者选材料得优先用低污染、可再生资源，空间布局要注重通风采光和生态融合，能耗控制要结合智能化系统提高效率，废弃物处理要强调资源回收和减量管理，可持续理念促使建筑从传统“线性开发”模式朝着“循环再利用”与“生态闭环”模式转变并注重对建筑全生命周期的系统规划和综合控制。

#### 1.3 国内外绿色建筑发展现状

全球范围内，绿色建筑已从理论倡导迈向大规模实践，欧美国起步早且构建了成熟的政策机制与市场激励体系，像美国借助税收减免、绿色信贷等手段鼓励开发绿色项目使得绿色建筑占比不断增加，德国和北欧国家靠高能效标准、低碳排放法规促使绿色建筑普及，中国绿色建筑起步相对较晚但近年来政策引导和市场推动力量一直在

增强,绿色建筑面积迅速增加且绿色建筑标准体系也在逐步完善,在“碳达峰、碳中和”战略目标下,绿色建筑成为实现“双碳”目标的重要途径,当下中国绿色建筑正从“政策驱动”慢慢转变成“市场主导”,朝着绿色社区、绿色城市建设延伸发展,发展态势良好且前景广阔。

## 2 节能与环保技术在设计中的融合

### 2.1 建筑节能设计策略

绿色建筑的核心环节之一是建筑节能设计,目标是靠优化建筑设计减少建筑运行时的能耗,而要实现节能关键得提升围护结构的保温性能,像墙体、屋顶、门窗这些构件的保温隔热设计,选高性能保温材料、用双层中空玻璃窗、减少热桥效应等手段都能大幅降低建筑能耗,并且自然采光设计能让白天人工照明需求尽量减少,合理布局窗户、设置采光天窗、运用反射面导光等方式可提高室内照明效率,通风设计得根据建筑方位和气候条件设定自然通风路径,利用风压和热压原理,对开窗形式、通风口布置和风塔系统进行设计,以促进室内外空气流通,降低空调使用频率,提高居住舒适性和能效水平。

### 2.2 能源系统的优化与整合

可再生能源的有效利用是绿色建筑设计的重点,目前太阳能和地热能集成应用这种清洁能源策略比较成熟,太阳能热水系统、光伏发电系统这些太阳能技术常与建筑屋面、外墙立面等构件一体化设计,美观又实用,地热能借助浅层地热能换热器和热泵系统能让室内冬暖夏凉,能效高且运行稳定,设计时得充分考虑建筑物位置、朝向和局部资源分布才能保证清洁能源系统既经济又高效,多能源集成系统像光伏+储能+智能控制平台之类的也广泛被用,靠此实现建筑能源自给自足或者低碳运行,系统集成不但能提高能源利用效率还能达成本分布式能源管理和远程能耗监控,全面提升建筑绿色水平。

### 2.3 水资源与材料的循环利用设计

绿色设计离不开节水和资源循环,在水资源方面,建筑设计要考虑雨水收集、灰水回用、中水处理等系统,铺设渗透性地面、设置雨水花园和过滤装置能实现雨水资源化并降低市政供水压力,洗浴、洗衣等排水经灰水处理系统净化后可用于冲厕或者绿化灌溉以有效节约生活用水,在材料方面,绿色建筑重视采用可再生、可回收、低碳排放的材料,如木结构构件、再生混凝土、再生钢材等,这既能减少资源消耗又能降低建筑碳足迹,设计时还要关注材料全生命周期性能,从原料开采、生产运输、使用维护到最终回收阶段都要考虑,促使建筑材料从“使用-废弃”模式转变成“使用-再生”模式以构建真正可持续的建筑体系。

## 3 绿色材料的选用与应用技术

### 3.1 生态型建筑材料概述

生态型建筑材料指的是生产、使用、回收过程里对环境影响小、能耗低且资源可再生的材料,在绿色建筑设计

里被广泛运用,像天然竹木、再生钢材、粉煤灰混凝土、低辐射玻璃、水性涂料、透水砖等都属于这类材料,其中粉煤灰混凝土里掺入工业副产物粉煤灰,既能减少水泥用量、降低碳排放,又能提高混凝土的耐久性,再生钢材制造时能耗只是新钢材的三分之一,回收利用率能高达 98%,天然竹材生长周期短、强度高还能降解,在室内装饰与结构构件方面广泛使用,低 VOC (挥发性有机化合物) 涂料、水性胶黏剂等材料能有效减少室内空气污染,提升居住环境质量,并且生态材料的选择得符合国家绿色建筑评价标准 GB/T 50378—2019,要保证其环保性能达到相关技术指标。

### 3.2 材料全生命周期评估方法

绿色材料选用时既要考虑初始性能,也不能缺少全生命周期评估 (LCA),要把它在开采、制造、运输、使用直至报废整个过程里的环境影响量化出来,评估内容涵盖能耗、碳排放、水资源使用、废弃物产生量等方面,传统水泥生产每吨大约要排放  $0.85\text{t CO}_2$ ,若用矿渣、粉煤灰这类工业废渣代替部分水泥,碳排放能减少 30%,在使用阶段要评估材料在建筑运行中的维护频率、使用寿命和更换周期,报废阶段要分析材料的可再利用性和可降解性,设计人员借助 GaBi、SimaPro 等软件进行定量分析就能制定出科学合理的材料选型方案, LCA 方法既满足绿色建筑认证体系要求,又给企业提供了实现碳足迹透明化管理的依据,有助于推动建筑行业走向绿色低碳转型。

### 3.3 材料性能对建筑节能效果的影响

建筑整体能耗水平与建筑材料的热工性能、透光性、密闭性等指标直接相关,就围护结构材料来说,像岩棉、聚氨酯板这种墙体保温材料,导热系数通常在  $0.035\sim0.045\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  范围,和普通混凝土约  $1.0\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  比起来优势明显,能让建筑能耗降低 20% 还多,Low-E 玻璃这样的高性能节能玻璃,可见光透射比能到 70%, U 值才  $1.4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,自然采光有效提升了,热量损失也减少了,断热铝合金或者塑钢材质用于窗框材料,密封性能得以提升,冷桥效应被避免,冬季供暖和夏季制冷的能耗就减少了,中国建筑科学研究院统计显示,典型公共建筑要是采用节能型材料,空调能耗能减少 15%~30%,科学选材是提升建筑绿色性能的手段,更是节能减排、降低运营成本的关键环节。

## 4 智能化绿色建筑系统设计

### 4.1 建筑智能控制系统概述

智能控制系统对绿色建筑高效运行有着重要的技术支撑作用,主要包括对照明、空调、安防等子系统的集成和协同控制,在照明系统里,智能感应与调光控制技术能依据室内人员活动、自然光强度自动调整灯光亮度,达成“人来灯亮、人走灯灭”以有效减少不必要的能耗,平均节电率在 20%~40% 之间,在空调系统中,温湿度传感器、智能变频控制与区域独立调节技术让其可实时感知环境变化自适应运行,避免过度制冷或制热,节能效率提高了

大概 30%，安防系统集视频监控、门禁控制和报警系统于一体，在保障建筑安全的能联动灯光与通风系统，提升能源使用的精准性与协调性，各个系统都接入智能管理平台，凭借集成控制逻辑实现跨系统联动管理，明显提高建筑的能源利用效率与管理便利性。

#### 4.2 智慧建筑能耗监控系统设计

绿色建筑能效提升，智慧能耗监控系统是“中枢神经”，物联网技术助力下建筑内各类用能设备被接入数据采集网络，从而实现能耗数据的实时采集、传输、存储与分析，系统能对水、电、气、暖等能源使用情况进行分项计量与趋势预测，借助大数据分析技术挖掘异常能耗行为，给节能改造提供科学依据，好比安装智能电表与传感器，能识别某一区域用电异常或者夜间“虚耗”现象，并且及时预警与调节，管理平台可对用能数据可视化展示，也支持云端远程控制，物业管理者能跨时空高效监管建筑能耗，国家住建部统计，引入智能能耗监控系统的绿色建筑，单位能耗平均降低 15%~25%，这个系统渐渐成为新建绿色建筑的标配，也是既有建筑绿色化改造的重要方向。

#### 4.3 智能化技术与绿色设计的融合趋势

人工智能、5G 通信、边缘计算等前沿技术不断发展，使得绿色建筑和智能技术融合得越来越深，发展趋势呈现高度集成化、自学习化、协同优化，因此建筑设计阶段要预留智能化布线、设备接入、数据传输通道，让智能控制和建筑功能深度耦合，并且 AI 算法能依据用户行为模式、气候数据等信息，自主对照明、温控、遮阳系统进行调整以达成精准节能管理，而 BIM 技术在绿色建筑里推广可让设计、施工、运维阶段的协同管理更高效，给智能化控制系统集成提供数据支撑，以后绿色建筑不会是单一节能元素的简单叠加，靠智能化技术手段形成“感知-决策-响应”闭环系统就能实现资源使用最优化、环境影响最小化、用户体验最优化这三重目标。

### 5 绿色建筑的室内环境质量优化策略

#### 5.1 室内空气质量控制设计

绿色建筑特别关注的核心目标之一是提升室内空气质量，在高密闭性的现代建筑里这显得格外重要，而新风系统很关键，它能保障空气流通、排出污染物，设置全热交换器、空气净化模块和 CO<sub>2</sub> 浓度感应器后，就能合理置换室内外空气，让室内含氧量足且空气清洁。污染源隔离是减少室内有害物质扩散的有效办法，功能分区设计的时候，得避免厨房、卫生间这些污染源和居住空间直接相通，可设置隔断门、独立排风系统来实现气流物理隔离。内装材料的选择会直接影响空气中挥发性有机化合物（VOCs）的含量，优先用通过国家绿色建材认证的低 VOC 环保材料比较好，像水性涂料、E0 级人造板、无醛胶黏剂之类的，统计表明，合理设计新风、使用绿色材料能让建筑中的 VOCs

浓度下降 40%，明显提升空气健康水平。

#### 5.2 室内声环境与光环境优化设计

工作与居住的舒适性和效率的提高得益于良好的声环境，绿色建筑设计时应重视隔声、吸声和噪声控制等技术的应用，隔声设计时墙体与楼板构造处理要选用高密度隔声材料且门窗采用中空隔音玻璃加密封条的组合以实现 30~40 分贝的隔音效果，机电设备区和主要使用空间之间设置隔振基座和柔性连接构件从而有效降低结构传声。光环境方面，绿色建筑重视自然采光和人工照明协同设计，通过合理布置窗户大小和位置、利用反光面和浅色墙面增加光反射来提高日照时间和均匀度，采用可调亮度 LED 照明加上光照传感器既能使照度达标又能降低能耗，电动遮阳系统和光导管技术的使用让室内光照更智能更舒适以满足不同空间的视觉需求。

#### 5.3 室内热舒适环境营造技术

使用者满意度受热舒适性这一重要指标影响，室内热环境通过绿色建筑被动与主动措施协同得到优化，在被动设计上合理建筑朝向、外遮阳装置、隔热构造设计能让太阳辐射热进入量显著减少从而降低空调负荷，主动技术方面采用分区可控空调系统、地源热泵或者辐射供冷供热系统并结合温度传感器智能调控可提高能效且确保室内温湿度稳定，建筑内部材料的选择对热舒适性也有影响，高热容量材料能减小昼夜温差波动提升体感稳定性，按热环境评价标准 PMV（预测平均满意度）模型调节空调设置能提升满意度到 90% 从而营造舒适、节能、健康的室内使用环境，在热环境优化方面，绿色建筑已从“控温”走向“调适”且更重视个体体验与环境友好性的综合平衡。

### 6 结语

可持续发展理念在建筑领域具体体现为绿色建筑，这是未来建筑发展的重要方向，系统整合节能环保技术、生态材料、智能化控制和室内环境优化策略后，绿色建筑在资源利用效率和环境友好性方面显著提升且能给人们提供更健康舒适的生活与工作空间，本文研究绿色建筑设计的关键要素以明确设计路径与实践重点，以后要持续推动绿色技术创新和标准完善，从而让建筑性能和生态责任高度统一来构建绿色低碳社会。

#### [参考文献]

- [1] 黄新钦, 李天宇, 靳铭宇, 等. 绿色理念下建筑交互可持续发展设计策略探究[J]. 居舍, 2025(18):118-121.
- [2] 张淑梅. 绿色建筑理念下施工质量与可持续发展协同路径探索——施工质量检测与评估难度问题[J]. 中国品牌与防伪, 2025(6):155-157.

作者简介：卢子凡（1997.12—），男，汉族，毕业学校：河北工程技术学院，现工作单位：北京威斯顿建筑设计有限公司河北分公司。

## 建筑设计院多元化业务拓展与经营风险防控策略

李凌

河北建筑设计研究院有限责任公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**建筑行业正经历深刻调整，建筑设计院亟需通过多元化业务拓展寻求新的增长点。在此过程中，战略误判、组织协同不畅、经验缺失等问题可能引发多重经营风险。为保障多元发展战略的有效落地，需要建立多维度风险指标体系，引入动态预警机制，强化前期论证与资源配置优化，同时完善合规管理与弹性组织架构。研究指出，应以核心能力为基础推进差异化拓展，并通过文化、治理与数据系统的协同升级，提升整体抗风险能力与运营效率。

**[关键词]**多元化业务；经营风险；战略转型；建筑设计；风险防控

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17170 中图分类号: F812 文献标识码: A

## Diversified Business Expansion and Risk Prevention Strategies for Architectural Design Institutes

LI Ling

Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The construction industry is undergoing profound adjustments, and architectural design institutes urgently need to seek new growth points through diversified business expansion. During this process, issues such as strategic misjudgment, poor organizational collaboration, and lack of experience may lead to multiple business risks. In order to ensure the effective implementation of diversified development strategies, it is necessary to establish a multidimensional risk indicator system, introduce dynamic warning mechanisms, strengthen preliminary argumentation and resource allocation optimization, and improve compliance management and flexible organizational structure. Research suggests that differentiated expansion should be promoted based on core competencies, and overall risk resistance and operational efficiency should be improved through the collaborative upgrading of culture, governance, and data systems.

**Keywords:** diversified business; operational risk; strategic transformation; architectural design; risk prevention and control

### 引言

建筑行业的深度变革促使建筑设计院不断探索多元化发展路径，以应对市场需求变化、技术创新压力与竞争格局重塑带来的挑战。然而，业务结构的扩展也带来一系列经营风险，涵盖战略执行、资源整合、质量控制等多个层面。如何在拓展新业务的构建系统化的风险防控机制，成为决定企业转型成败的关键因素。这一议题不仅关系到建筑设计机构自身的可持续发展，也为整个行业的转型升级提供了重要参考。

### 1 建筑设计院多元化业务拓展的动因与趋势分析

#### 1.1 行业竞争格局变化下的生存压力

近年来，建筑设计行业的市场竞争日趋激烈，传统设计业务利润空间不断压缩，客户对服务质量与效率的要求持续提升。行业内企业数量不断增加，部分大型综合设计院通过资源整合实现跨区域、跨领域发展，进一步加剧了市场集中度的提升。在此背景下，中小型建筑设计院面临市场份额被挤压、项目获取难度加大等现实困境。境外设计机构逐步进入国内市场，带来了更先进的设计理念与管理经验，也对本土建筑设计院形成了更大的竞争压力。这种行业格局的深刻变化迫使建筑设计院必须重新审视自身定位，寻求差异化发展路径，以增强抗风险能力和市场适应能力。

#### 1.2 市场需求升级推动的服务延伸

随着城市化进程的深入推进和建筑使用功能的不断演变，市场对建筑设计服务的需求已不再局限于传统的方案设计与施工图绘制，而是向全过程咨询、绿色节能设计、智能建筑系统集成等方向拓展。业主方更加注重项目的整体效益，包括可持续性、运营维护成本以及用户体验等多个维度。这一趋势促使建筑设计院从单一的设计服务商向综合解决方案提供商转型，要求其在原有专业基础上，整合规划、造价、工程管理等相关服务内容，形成覆盖全生命周期的技术服务能力。服务内容的延伸不仅提升了企业的附加值，也为多元化发展提供了新的切入点。

#### 1.3 技术创新驱动的业务模式重构

数字技术的快速发展正在深刻改变建筑设计行业的运作方式。BIM、人工智能、大数据分析等新技术的应用，使建筑设计流程更加高效、精准，并推动了协同设计、远程协作等新型工作模式的普及。与此智慧建筑、装配式建筑等新兴业态的发展，也对建筑设计院提出了更高的技术响应能力要求。为适应这一变革，建筑设计院开始调整内部组织架构与资源配置，加强技术研发投入，推动设计成果的数字化交付与智能化应用。技术进步不仅改变了传统的设计方法，还催生了诸如数字孪生、虚拟仿真等新业务形态，促使建筑设计企业在价值链中的角色发生转变，从

被动执行者向主动创新者演进。

## 2 多元化发展战略中的典型风险类型

### 2.1 战略误判导致资源错配

在多元化业务拓展过程中,部分建筑设计院因对市场趋势判断不准确或对自身能力评估过高,出现战略方向偏差。在未充分评估新业务与主营业务关联度的情况下盲目扩张,导致资源配置分散,核心设计能力被稀释。由于缺乏系统性的战略规划和长期投入机制,企业在人力、资金和技术等方面难以形成有效支撑,造成资源浪费与重复建设。部分机构在进入新兴领域时忽视行业壁垒与竞争格局,投入大量资源却难以形成竞争优势,最终影响整体运营效率和可持续发展能力。这种战略层面的失误往往源于对市场需求理解不深、对政策导向把握不准以及对业务成长周期预估不足,使得企业在转型过程中陷入进退两难的局面,甚至削弱了原有业务的市场地位与品牌影响力。

### 2.2 组织协同不畅影响执行效率

多元化发展往往涉及多个业务板块的协同运作,而建筑设计院传统的职能型组织结构在应对复杂多样的业务体系时存在明显短板。部门之间职责划分不清、信息传递不畅、资源整合困难等问题普遍存在,导致跨业务协作效率低下。与此原有管理体系难以适应新业务对灵活性与响应速度的要求,决策流程冗长、反馈机制滞后,进一步削弱了企业对市场的快速反应能力。若未能及时优化组织架构与管理流程,将直接影响多元业务的整体推进效果与战略落地质量。

### 2.3 跨领域经验缺失引发的质量隐患

建筑设计院在向非传统业务领域延伸时,常常面临专业认知不足、技术积累薄弱等挑战。由于缺乏相关行业的实践经验与成熟的技术标准,企业在项目实施过程中可能出现设计缺陷、施工配合不到位等问题,进而影响工程质量与客户满意度。新业务所需的复合型人才储备不足,也使得企业在面对复杂项目时难以组建具备足够执行力的专业团队。质量管理体系建设滞后与风险防控机制不健全,进一步加剧了因经验缺失带来的潜在质量问题,成为制约多元化业务稳定发展的关键因素之一。与此跨领域项目往往涉及多专业协同与技术集成,现有技术管理体系难以有效支撑新型业务流程,导致设计成果与实际需求脱节,增加了项目返工率和成本超支风险,进一步削弱了企业在新兴市场中的竞争力与信誉基础。

## 3 风险识别与评估机制的构建路径

### 3.1 建立多维度风险指标体系

为有效识别多元化业务拓展中的潜在风险,建筑设计院需构建覆盖战略、市场、财务、运营等多方面的风险指标体系。该体系应结合行业特性与企业发展阶段,设定定量与定性相结合的评估标准,实现对各类风险因素的系统化监测。通过引入权重分配机制,突出不同业务板块的风

险敏感性,提升指标的针对性与可操作性。指标体系应具备动态调整能力,能够根据外部环境变化和内部战略演进进行持续优化,确保风险识别的全面性与前瞻性,为管理层提供科学决策依据。该体系还需融入行业政策变动、市场竞争态势及技术发展趋势等外部变量,增强对宏观环境不确定性的适应能力,使风险管理更具前瞻性和系统性,从而在复杂多变的市场环境中保障企业稳健发展。

### 3.2 引入动态预警模型与决策支持系统

在多元业务快速发展的背景下,传统的静态风险管理方式已难以应对复杂多变的经营环境。建筑设计院应依托信息化手段,构建基于大数据分析的动态预警模型,实时捕捉业务运行中的异常信号,并通过可视化界面呈现关键风险指标的变化趋势。配合智能算法与数据挖掘技术,辅助管理层精准判断风险等级与应对优先级。决策支持系统应整合历史项目数据、市场反馈信息与政策变动情况,形成闭环反馈机制,提升企业在多元化发展过程中的风险响应速度与决策质量。

### 3.3 强化前期调研与可行性论证机制

多元化业务的推进必须建立在充分的市场调研与科学的可行性分析基础之上。建筑设计院应在项目启动前开展系统性的行业研究,涵盖政策导向、市场需求、竞争格局及技术门槛等多个维度,全面评估新业务的发展潜力与进入难度。在此基础上,结合企业自身资源禀赋与能力结构,制定切实可行的实施路径与阶段性目标。应建立由技术、市场、财务等多专业人员组成的评估小组,围绕项目收益预期、资源配置需求与潜在风险点展开深入论证,确保决策的理性与稳健,避免盲目扩张带来的战略失误。前期研究还应纳入对客户需求演变与行业未来趋势的预判,强化对新兴领域成长周期和技术迭代节奏的理解,提升战略判断的前瞻性与落地性,为多元化项目的顺利推进奠定坚实基础。

## 4 风险防控措施的具体实施策略

### 4.1 优化资源配置与优先级管理

在多元化业务拓展过程中,建筑设计院面临资源分散、投入产出不均衡等挑战,亟需建立科学的资源配置机制。应根据战略目标与业务发展阶段,合理分配人力、资金、技术等关键资源,优先支持具有高成长性与协同效应的业务板块。构建基于数据驱动的资源调度体系,通过项目收益评估、市场响应速度与风险暴露程度等指标,动态调整资源配置方向与强度。强化预算管理与绩效反馈机制,提升资源使用的透明度与效率,确保有限资源向核心竞争力培育和战略新兴业务倾斜,避免盲目扩张带来的资源浪费与运营负担。资源配置机制还需结合企业整体发展战略,建立跨业务协同的资源共享平台,推动关键要素在不同业务单元之间的高效流动,提升组织整体运营效能,增强企业在复杂市场环境下的抗风险能力与发展韧性。

#### 4.2 完善内部控制与合规管理体系

随着业务类型的多样化与组织结构的复杂化,建筑设计院在经营过程中面临更高的法律合规风险与内部管理压力。应健全覆盖全流程的内部控制制度,强化财务监管、合同审查、项目执行等关键环节的风险防控能力。建立统一的合规管理框架,结合行业规范与企业实际,明确各业务板块的操作标准与责任边界。加强审计监督与信息披露机制建设,提升内部治理水平,防范因管理漏洞或制度缺失引发的法律纠纷与经济损失,保障多元业务在合法合规前提下稳步推进。

#### 4.3 构建弹性组织结构以应对不确定性

多元化发展战略要求建筑设计院具备更高的组织灵活性与市场适应能力。传统刚性管理模式难以满足跨领域业务快速迭代与协同发展的需求,因此有必要推动组织架构的柔性化转型。通过设立项目制、矩阵式管理单元等方式,增强部门间的协作效率与资源调配能力。鼓励知识共享与跨职能流动,提升组织对突发情况与外部变化的响应速度。弹性组织结构不仅有助于提升运营效率,还能为新业务孵化与战略试错提供制度支撑,使企业在不确定环境中保持稳健发展态势。组织变革还需配套优化绩效考核与激励机制,打破部门壁垒,强化跨业务协同意识,推动管理模式由层级管控向敏捷响应转变,从而更好地支撑多元化战略的落地实施与持续优化。

### 5 多元化与风险平衡下的可持续发展建议

#### 5.1 聚焦核心能力支撑下的差异化拓展

在多元化业务推进过程中,建筑设计院应以自身长期积累的专业优势为基础,避免盲目跨界与资源消耗型扩张。通过深化在建筑设计、城市规划、绿色节能等领域的技术积淀,推动主营业务向高附加值环节延伸,形成具有独特竞争力的服务体系。结合市场需求变化,探索与主业高度协同的新业务方向,如全过程工程咨询、建筑数字化交付等,提升整体服务能力和市场响应速度。这种以核心能力为依托的差异化拓展路径,有助于企业在多元发展中保持战略定力,增强业务间的互补性与可持续性。依托已有技术平台和客户资源,进一步强化品牌影响力与行业话语权,在拓展新业务的过程中实现资源整合与价值再造,构建稳健且富有活力的发展模式。

#### 5.2 推进企业文化与治理机制同步升级

随着业务结构的复杂化和组织规模的扩大,建筑设计院原有的文化理念与管理模式面临适应性挑战。需重塑企

业文化,强化创新意识、协作精神与风险责任观念,使其与多元化发展战略相匹配。与此治理机制也应相应调整,优化决策流程与权责划分,提升跨部门协同效率。建立适应多元业务的绩效考核体系与激励机制,激发员工在不同业务板块中的积极性与创造力。只有实现文化导向与制度保障的有机统一,才能为企业多元化发展提供坚实的内部支撑。

#### 5.3 打造数据驱动的决策与反馈闭环

在多元业务并行发展的背景下,传统经验式管理已难以满足企业对精准决策与快速响应的需求。建筑设计院应加快信息化建设步伐,整合项目管理、财务运营、客户关系等多维度数据资源,构建统一的数据分析平台。通过对关键指标的实时监测与趋势预测,辅助管理层科学评估业务运行状态与风险暴露水平。建立基于数据分析的反馈机制,将执行结果反哺至战略调整与资源配置中,形成闭环管理流程。这一机制不仅能提升决策效率,还能增强企业在复杂环境下的应变能力与运营韧性。

### 6 结语

建筑设计院在多元化业务拓展过程中,面临战略、组织、技术等多方面的风险挑战。通过构建科学的风险识别体系、优化资源配置机制、完善内部控制结构以及提升组织灵活性,能够有效增强企业在复杂环境下的稳健发展能力。未来,随着行业持续升级与市场竞争加剧,建筑设计机构需进一步强化核心竞争力,推动治理机制与文化建设同步演进,借助数据驱动提升决策水平。只有实现多元化与风险防控的动态平衡,才能在行业变革中实现高质量可持续发展。

#### 【参考文献】

- [1]周志远.建筑设计企业多元化战略研究[J].建筑经济,2023,44(6):89-94.
- [2]孙文斌,高雪梅.建筑设计单位业务转型路径探析[J].工程建设与设计,2022,70(4):112-116.
- [3]吴晓峰.城市更新背景下建筑设计企业的市场机遇与挑战[J].城市规划,2024,48(2):56-61.
- [4]李晨曦.建筑设计机构风险管理体系建设探讨[J].工程管理学报,2021,35(3):78-83.
- [5]赵宏宇.建筑行业多元化经营中的资源整合问题研究[J].建筑管理现代化,2023,37(5):45-50.

作者简介: 李凌 (1988.4—), 男, 汉族, 毕业学校: 清华大学, 现工作单位: 河北建筑设计研究院有限责任公司。

## 基于人工智能的装配式建筑设计方法探讨

张冰

中联合盛科技有限公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**人工智能技术发展起来后传统建筑设计方法就得变革,装配式建筑是现代建筑产业的重要发展方向且对设计复杂性和系统集成度的要求日益增高。文中探讨了人工智能在装配式建筑设计中的关键应用,如基于AI的建筑建模、结构优化、设计自动化路径等方面,引入深度学习、生成式设计和数据驱动建模技术可提升设计效率和施工可实施性。研究表明, AI技术既能使建筑设计实现智能化转型,又能优化资源配置、提高建筑品质,从而为未来装配式建筑发展提供技术支持。

**[关键词]**人工智能; 装配式建筑; 建筑设计; 结构优化; 生成式设计

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17164

中图分类号: TU741

文献标识码: A

## Exploration on Design Methods for Prefabricated Buildings Based on Artificial Intelligence

ZHANG Bing

Zhonglian Hesheng Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** With the development of artificial intelligence technology, traditional architectural design methods need to be transformed. Prefabricated buildings are an important direction for the modern construction industry and have increasingly high requirements for design complexity and system integration. The article explores the key applications of artificial intelligence in prefabricated building design, such as AI based building modeling, structural optimization, and design automation paths. The introduction of deep learning, generative design, and data-driven modeling technologies can improve design efficiency and construction feasibility. Research has shown that AI technology can not only enable intelligent transformation of architectural design, but also optimize resource allocation and improve building quality, thereby providing technical support for the future development of prefabricated buildings.

**Keywords:** artificial intelligence; prefabricated buildings; architectural design; structural optimization; generative design

### 引言

装配式建筑工期短、环保高效,在现代建筑行业里推广得很快,且人工智能(AI)技术跨界融合,给建筑设计带来新活力,传统装配式建筑设计流程效率不高且方案优化能力不强,AI则数据处理、学习和推理能力强,能在建筑设计环节创新突破,本文想探讨基于人工智能的装配式建筑设计方法,从技术路径、系统架构、应用成效这三个方面分析,给构建高效、智能、可持续的装配式建筑设计体系作参考。

### 1 人工智能技术在建筑设计中的应用基础

#### 1.1 神经网络与深度学习在设计建模中的作用

人工智能技术不断进步,神经网络在建筑设计建模里用得越来越多,卷积神经网络(CNN)和图神经网络(GNN)更是发挥着极为重要、不可替代的作用,CNN图像特征提取能力强,在建筑图纸自动识别方面表现很好,像建筑平面图结构解析、构件轮廓边界提取、立面图像构造识别等任务都能做,建筑师借助这些功能,能快速准确掌握设计元素几何特征和空间关系,装配式建筑里,CNN技术能自动识别和分类标准化构件,外形轮廓、预留开口、连接节点啥的都能识别,这样设计过程建模效率和数据精度都能提高,图神经网络(GNN)对构件间拓扑连接关系建模,三维装配结构里构件协同作用能精准模拟,构件排

列优化、节点连接合理性分析、施工顺序可行性评估都能支持,神经网络深度学习机制让系统有自我学习和适应能力,从大量历史设计数据里提取设计模式和构造逻辑,建筑模型自动生成、智能补全、优化推荐都能实现,设计周期被大幅缩短,建筑设计也从经验驱动向数据智能驱动发生根本转变,这为高效、智能的装配式建筑设计提供了强有力的技术支撑。

#### 1.2 数据驱动设计与大数据平台构建

装配式建筑发展日益将数据驱动设计理念作为关键方向,建筑设计各阶段决策与优化靠大数据分析支撑是该理念的核心,装配式建筑设计时建筑师既要应对结构参数、构件选型、空间布局等技术因素,也要整合用户行为偏好、功能需求、环境适应性等多维信息,传统手工设计手段面对高维、动态、关联性强的数据体系时不可行,构建基于人工智能的大数据平台能统一集成历史项目数据、构件标准参数库、施工反馈记录、运营维护信息、用户使用数据从而实现多源异构数据的整合管理,AI系统利用机器学习与数据挖掘算法提取高频设计要素、构件组合模式、性能关联规则进而得到新项目的精准设计参数推荐、空间功能组合优化方案,数据驱动设计也能支持场地条件识别、自然采光模拟、节能指标评估、流线组织分析等多目标方案推演,平台可打通建筑设计、构件生产、采购物流、现

场施工等各环节信息壁垒达成全流程协同设计与动态调整从而提升建筑设计效率、构件利用率、项目整体运行质量,为装配式建筑朝着智能化、系统化迈进提供助推力。

### 1.3 人工智能辅助决策机制构建

复杂建筑设计过程中,建筑师常面临设计决策挑战,需要兼顾功能需求、造价控制、结构安全、绿色节能等多目标多约束要素,而人工智能能构建辅助决策机制,通过分析大量数据与规则,给建筑师提供科学参考方案,在多目标优化算法下, AI 系统可生成空间布局、构件配置等方面若干可行性方案并自动评价各方案成本、能耗、施工难度等表现以供设计师选择最优路径,并且 AI 能有实时反馈机制,在设计时不断学习设计者偏好并反馈以慢慢优化推荐策略,在装配式建筑方面, AI 辅助决策可评估构件标准化、模数协调、运输路径等并给出建议,从而增强项目实施的可控性与可预见性,该机制减轻设计师判断负担,提升设计方案科学性与可落地性,是智能建筑设计系统的重要支撑。

## 2 AI 赋能装配式建筑构件设计优化

### 2.1 模块化构件的 AI 几何建模技术

装配式建筑基本特征是标准化与模块化,这对提升效率、达成产业化建造很关键,而要满足高效设计、快速响应需求,构件三维建模与排布优化中人工智能算法作用越来越大。深度神经网络经训练, AI 系统能精准识别构件几何规则、尺寸比例、节点逻辑、参数约束,从而实现墙板、楼板、梁柱、门窗等标准构件自动三维建模,尤其与参数化设计平台结合时,根据建筑类型、使用功能、空间组合等条件, AI 能快速生成多种构件排列组合方案,自动调整构件尺寸、配置开口、添加连接节点,确保构件间逻辑协调性、结构匹配性。在构件排布方面, AI 综合分析受力路径、空间利用效率、施工吊装路径,智能优化构件布置,最大限度避免构件错位、冲突、空间浪费。设计人员借助 AI 建模平台,可在短时间内完成多轮模型设计、参数调整、方案推演,大大提高设计效率与方案质量,提供后续预制生产、现场装配、施工仿真精确数字支撑,实现概念设计到建造实施全流程数据联动。

### 2.2 结构力学分析中的智能推演

设计装配式建筑的核心要素是结构的安全性与稳定性,人工智能里的机器学习和强化学习方法能派上用场,通过在结构力学分析中引入智能推演机制可自动评估与预测建筑整体和局部构件的性能,系统学习大量已有的结构分析数据和工程案例构建出结构性能预测模型便能快速完成荷载分布计算、受力状态判断、抗震响应模拟等任务,以抗震设计为例,输入建筑类型、材料属性、连接方式等参数后, AI 模型能预测建筑在不同地震强度下的反应并给结构设计提出有针对性的优化建议,而且 AI 还能找出设计中的薄弱环节自动给出结构增强方案如节点加

固、受力路径调整、构件替换等让设计更具鲁棒性,与传统有限元分析相比, AI 推演计算速度更快且自适应能力更强,装配式建筑项目若构件种类多、连接复杂就特别适合用 AI 推演。

### 2.3 构件连接节点的智能识别与方案推荐

装配式建筑里构件连接节点是关键构造环节,其设计直接影响结构整体性能与施工效率, AI 在这方面主要应用于图像识别和知识图谱构建,将已有项目图纸、模型图像和施工照片经卷积神经网络训练后, AI 系统就能识别不同构件连接节点类型、位置与结构方式且能自动标注连接形式如插接、螺栓、焊接之类,在新项目里设计人员把构件类型和空间位置输入, AI 就能结合构件属性、施工条件和受力需求推荐最合适的连接节点方案,系统能自动检查节点设置是否合理并判断是否存在受力不均、施工障碍或者材料冲突等问题, AI 借助知识图谱技术还能在构件数据库搜索相似案例以类比优化节点设计并提供多种实现路径,这一智能化流程提高了连接设计的精准度和可靠性,为标准化构件推广、施工效率提升和质量控制提供了坚实支撑。

## 3 AI 驱动的建筑设计流程再造

### 3.1 生成式设计与方案自动生成

AI 在建筑领域的一个重要突破是生成式设计,其核心在于靠算法生成许多可行的设计方案供建筑师挑选和优化,深度生成模型如生成对抗网络 (GAN)、变分自编码器 (VAE) 很有代表性,常用于建筑平面布局、外立面造型、功能分区的自动生成, GAN 通过判别器和生成器对抗训练能模拟大量真实建筑设计规律,从而生成多样且逻辑严密的方案,而 VAE 能依据连续潜在空间里的样本生成许多建筑布局变体,使设计方案更具创新性和灵活性,将这些算法和参数化建模工具相结合,系统根据建筑用途、面积需求、地形约束等输入条件很快就能输出符合规范与美学要求的设计方案,再用采光率、流线效率、构件数量等量化评价指标筛选优化,这种自动生成机制大大提高了方案初设效率,使设计人员不必总是做重复劳动,从而能将更多精力放在创意和审美提升上。

### 3.2 虚拟仿真与 AI 可视化集成设计

保障建筑设计方案的可行性,建筑设计的可视化与仿真验证是重要环节,而传统方法靠手工建模与模拟,效率不高、响应迟缓,难以对多轮设计迭代进行实时支持,不过 AI 和 VR、AR 技术相结合可构建出更智能、交互性更强的可视化设计平台, AI 能自动提取设计参数并构建实时三维虚拟模型,这样设计人员就能在沉浸式环境里动态查看空间布局、构件连接、采光通风等效果且能马上调整设计方案,仿真模块把建筑物物理模型和环境参数结合起来能实现热工模拟、结构响应分析、节能评估等功能,并且 AI 算法可以自动识别设计中的冲突区域、不合理路径或

者空间浪费且在虚拟环境中给出预警和调整建议,这种集成式仿真设计流程提升了设计决策的可视性与互动性,还增强了设计结果的落地性和施工可实施性,是推动建筑设计数字化转型的重要工具。

### 3.3 设计协同与智能化版本控制

装配式建筑项目对多专业协同设计需求迫切,而传统文件式管理和手动版本更新方式难以满足高效协同、动态调整需求,在基于 BIM 平台的多方实时协作场景中, AI 在设计协同和版本控制方面作用重大,其可借助自然语言处理与模型比对技术智能识别不同版本设计图差异、自动标注修改内容以减少人为疏忽,且当规则引擎与任务调度算法相结合时,能进行多专业设计任务分工调度、进度追踪和信息同步,保证各模块设计协同一致并防止构件冲突或返工(由信息滞后导致),智能化版本控制机制还能支持设计变更快速回溯、冲突检测和最优版本推荐以有效削减设计沟通成本、提升协作效率,建筑设计流程就这样以高度集成和智能管理的方式从线性变为并行、从静态变为动态,为装配式建筑高效交付提供强力技术支撑。

## 4 基于 AI 的装配式建筑全生命周期设计融合

### 4.1 建筑信息模型 (BIM) 与 AI 融合应用

装配式建筑中,建筑信息模型 (BIM) 作为重要的信息载体在设计、施工与运维阶段均处于核心位置, BIM 与人工智能融合可达成建筑全生命周期内信息联动和智能分析。在设计阶段, AI 可基于 BIM 模型自动识别空间冲突、构件碰撞、尺寸偏差等问题,从而提前避免设计缺陷并提高模型准确性。施工阶段, AI 可利用 BIM 提供的结构与流程数据进行施工进度预测、材料需求分析和施工方案模拟以实现施工全过程的动态控制,并且语义理解与图像识别技术使 AI 能够将现场采集的图像数据与 BIM 模型进行比对,进而做到施工质量的实时监测和异常预警。运维阶段,基于 BIM 的 AI 系统可接入传感器数据以分析建筑能耗、设备运行状态等信息,从而辅助建筑运营管理者制定节能策略与维护计划。BIM 和 AI 深度融合不仅提升了数据利用效率,还建立了设计-施工-运维闭环的智能协同机制,为装配式建筑全流程管理提供强有力的技术支撑。

### 4.2 智能化施工路径与预制工艺联动

装配式建筑施工和传统建筑方式大不相同,关键在于预制构件的精准拼装和高效安装,而 AI 技术给施工路径优化与预制工艺联动带来新想法,能根据 BIM 模型里构件的位置、尺寸、安装顺序等信息并结合施工现场的空间布局、起重设备布置情况自动算出最优装配路径,从而让施工时间缩短、资源浪费减少,通过路径规划算法和仿真技术, AI 能在预制构件运输、吊装路径和安装流程间找到最短路径、最低干扰的组合以提高现场作业效率,并且

还可以实时监测施工进度和构件安装状态并根据实际情况动态调整装配计划,使施工更具柔性和可控性,在预制工艺方面, AI 能够学习和分析构件工厂的生产数据以优化模具设计、排产顺序和材料使用,进而提升构件质量和生产效率,这种从设计到生产再到施工的全链条智能协同大大提高了装配式建筑整体交付质量和经济效益。

### 4.3 面向绿色建筑的智能设计导向

能源效率、环境友好与资源可持续利用都是绿色建筑所强调的,在这个方向上 AI 的引导作用日益凸显。建筑设计初期, AI 能分析历史绿色建筑案例和能耗数据以生成节能导向的设计方案,并且优化自然采光、通风布局和建筑朝向来有效降低建筑运行中的能源消耗。建筑环境模拟系统与 AI 结合可量化评估建筑热岛效应、噪音影响、水资源使用等并提出改进建议。材料选择时, AI 能智能筛选低碳、可再生、可回收材料并结合结构安全与施工工艺要求推荐出性价比高的材料组合方案。运维阶段, AI 利用物联网设备持续监控建筑能耗、碳排放与室内空气质量从而得出节能运行策略与智慧运维建议,延长建筑使用寿命并降低运维成本。AI 给绿色设计赋能,使装配式建筑变得更环保、低碳,从“节能”迈向“智能节能”,从单点优化变为系统级生态优化,成为推动建筑行业可持续发展的重要技术引擎。

## 5 结语

装配式建筑的全生命周期正被人工智能技术深度嵌入,从设计建模、构件优化、流程再造到绿色运维全面推进建筑设计的智能化转型, AI 不但提升了设计效率与施工精度,还优化了资源配置、强化了协同能力从而构建起一个集成、高效、可持续的建筑系统,在未来,随着算法优化与数据融合持续深化, AI 在装配式建筑领域将释放更多潜能助力建筑行业质量升级、技术革新与绿色发展,为现代建筑注入持续动力与智能引擎。

## 【参考文献】

- [1] 王备,潘微,张亚东.基于预制构件生产过程中的智能建造管控系统[J].中国科技信息,2025(12):65-67.
- [2] 刘汉章,杨琴.基于人工智能技术的装配式建筑绿色低碳发展路径研究[J].佛山陶瓷,2025,35(6):100-102.
- [3] 陈前亮.基于智能建造的装配式建筑施工关键技术研究与应用[J].住宅与房地产,2025(17):56-58.
- [4] 何凡,赵玥杰.文旅融合视域下装配式建造产品设计智创研究[J].包装工程,2025,46(10):502-508.
- [5] 杨军三.融合智能技术的建筑工程装配式施工技术研究[J].新城建科技,2025,34(4):16-18.

作者简介: 张冰 (1991.5—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北工业大学城市学院, 现工作单位: 中联合盛科技有限公司。

Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

[www.viserdata.com](http://www.viserdata.com)

