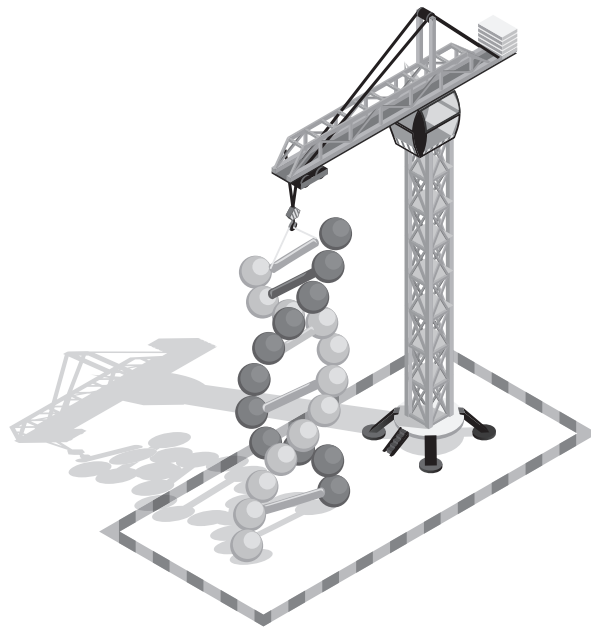


工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.
(United States)

Editorial Board

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.



工程研究与应用

Engineering Research and Application

第4卷 第6期 2026年6月刊

主管 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主办 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

地址: 263 S KENWOOD ST 560

CASPER,WY 82601

网址: <https://arttechpress.com>

本刊说明:

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

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

工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- | | | |
|-----|---|---|
| 001 | 原位测试技术在工程地质勘察中的应用研究 | 胡冲, 刘江波, 刘启玉, 宋辉 |
| | Application of In-situ Testing Technology in Engineering Geological Survey | Hu Chong, Liu Jiangbo, Liu Qiyu, Song Hui |
| 004 | 公路工程沥青混凝土路面施工技术应用研究 | 王进冈 |
| | Research on the Application of Construction Technology for Asphalt Concrete Pavement in Highway Engineering | Wang Jingang |
| 007 | 地下工程防水抗渗施工技术研究 | 戴国钧 |
| | Research on Waterproof and Anti-Permeability Construction Techniques for Underground Engineering | Dai Guojun |
| 011 | 基于无人机航测的土石方量计算精度分析 | 郭飞 |
| | Precision Analysis of Earthwork Volume Calculation Based on UAV Aerial Survey | Guo Fei |
| 015 | 无人机倾斜摄影测量在地形图生产中的应用 | 梁国晨 |
| | Application of UAV Oblique Photogrammetry in Topographic Map Production | Liang Guochen |
| 019 | 分析 BIM 技术在市政路桥施工中的应用 | 郑培炜 |
| | Analysis of the Application of BIM Technology in Municipal Road and Bridge Construction | Zheng Peiwei |
| 022 | 智能制造环境下车辆装配精度在线检测研究 | 葛晶 |
| | Research on Online Detection of Vehicle Assembly Accuracy in the Smart Manufacturing Environment | Ge Jing |
| 025 | 高边坡生态加筋挡土墙施工工艺与变形监测 | 董浪军 |
| | Construction Technology and Deformation Monitoring of Ecological Reinforced Retaining Walls for High Slope | Dong Langjun |
| 028 | 软土地基深基坑围护结构中 SMW 工法桩施工技术应用研究 | 蒋兴华 |
| | Research on the Application of SMW Construction Technique Piles in the Enclosure Structure of Deep Excavations on Soft Soil Foundations | Jiang Xinghua |
| 032 | 外露式钢柱脚极限承载力不足的处理方法与工程应用
——以祥银传动设备制造二期项目为例 | 冷辉良 |
| | Treatment Methods and Engineering Applications for Insufficient Ultimate Bearing Capacity of Exposed Steel Column Bases —Taking the Phase II Project of Xiangyin Transmission Equipment Manufacturing as an Example | Leng Huiliang |
| 036 | 地下综合管廊运维难点以及应对措施研究
——以台州市某地下综合管廊运维工程为例 | 陈立东 |
| | Research on the Difficulties and Countermeasures of Operation and Maintenance of Underground Utility Tunnels —Taking the Operation and Maintenance Project of an Underground Utility Tunnel in Taizhou City as an Example | Chen Lidong |
| 040 | 化工园区重大危险源风险分级管控
与智能化预警系统构建策略 | 高彭, 许浩, 庞丽丽, 凌瑞昕 |
| | Construction Strategy of Risk Grading Control and Intelligent Early Warning System for Major Hazard Sources in Chemical Industrial Parks | Gao Peng, Xu Hao, Pang Lili, Ling Ruixin |
| 043 | 老旧小区综合改造中的排水系统更新与道路恢复技术研究 | 王啸霄 |
| | Research on Drainage System Renewal and Road Restoration Technology in the Comprehensive Renovation of Old Residential Areas | Wang Xiaoxiao |

047	有空气阻力的抛体运动探析 Analysis of Projectile Motion with Air Resistance	刘愉快, 侯敏玲, 郑雯丽 Liu Yukuai, Hou Minling, Zheng Wenli
051	智慧智造产业园钢结构工程施工技术研究——以环普重庆项目为例 Research on Construction Technology of Steel Structure Engineering in the Smart Manufacturing Industrial Park —Taking the Huanpu Chongqing Project as an Example	李阳光 Li Yangguang
054	公路工程路基施工质量控制研究 Research on Quality Control of Subgrade Construction in Highway Engineering	杨晓龙 Yang Xiaolong
057	医院高压氧舱防雷接地必要性及技术实施研究 Research on the Necessity and Technical Implementation of Lightning Protection Grounding for Hyperbaric Oxygen Chambers in Hospitals	冯有成, 高耀文, 郑明 Feng Youcheng, Gao Yaowen, Zheng Ming
060	面向全生命周期的城轨信号工程安全质量协同控制策略 Collaborative Control Strategy for Safety and Quality in Urban Rail Transit Signal Engineering Across the Entire Lifecycle	李娟 Li Juan
063	智能制造与工业大数据融合下企业运营模式升级 Upgrading Corporate Operational Models through the Integration of Intelligent Manufacturing and Industrial Big Data	杨明 Yang Ming
066	深层地层钻井中卡钻事故成因机理与高效解卡技术策略研究 Research on the Causal Mechanism and Efficient Stuck Pipe Releasing Technical Strategies for Drilling in Deep Formations	宋俊杰 Song Junjie
069	高压线下桥涵基坑静态爆破技术优化研究 Optimization Research on Static Blasting Technology for Bridge and Culvert Foundation Pits Under High-Voltage Power Lines	吴国银, 李成, 杜倩倩, 范云, 程广福 Wu Guoyin, Li Cheng, Du Qianqian, Fan Yun, Cheng Guangfu
072	壳牌气化炉激冷盒烧损原因分析及修复改造 Analysis of Burnout Causes and Repair and Transformation of Quench Box in Shell Gasifier	杨岱 Yang Dai
075	长距离输水工程运行安全风险辨识与管控体系研究 Research on the Risk Identification and Control System for the Operation Safety of Long-Distance Water Transmission Projects	刘洋 Liu Yang
078	机电工程安装施工的质量管控与安全技术优化研究 Research on Quality Control and Safety Technology Optimization for Installation and Construction of Mechanical and Electrical Engineering	吕宏宇 Lv Hongyu
082	基于预训练模型适配的烟草营销领域智能查询增强技术研究 Research on Intelligent Query Enhancement Technology in the Tobacco Marketing Domain Based on Pre-trained Model Adaptation	李一平, 舒刚, 张滔, 祝凯, 程康 Li Yiping, Shu Gang, Zhang Tao, Zhu Kai, Cheng Kang
086	公路工程路基施工技术及质量控制研究 Research on Construction Technology and Quality Control of Roadbed in Highway Engineering	任学起 Ren Xueqi

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

089	高端商业空间精装修施工技术研究——以上海静安寺 ROASTEDCOFFEE 项目为例 Research on the Construction Technology of Fine Decoration in High-End Commercial Spaces —Taking the ROASTEDCOFFEE Project at Jing'an Temple in Shanghai as an Example	钱彬彬 Qian Binbin
092	化工建筑抗爆改造关键技术与管理措施应用分析 Application Analysis of Key Technologies and Management Measures for Anti-Explosion Renovation of Chemical Buildings	吴卫荣 Wu Weirong
096	建筑工程混凝土施工质量通病及防治研究 Research on Common Defects and Prevention of Concrete Construction Quality in Construction Engineering	张振洋, 王铭杨 Zhang Zhenyang, Wang Mingyang
099	建筑工程施工进度管理方法分析 Analysis of Construction Project Construction Schedule Management Methods	吕鹏辉 Lv Penghui
102	谈在房建施工管理中如何应用精细化管理研究 Research on the Application of Refined Management in Housing Construction Management	管雪朋 Guan Xuepeng
105	绿色建筑背景下建筑工程施工技术应用研究 Research on Construction Technology Application in Building Engineering under the Background of Green Building	王伟伟, 申鑫恒 Wang Weiwei, Shen Xinheng
108	建筑施工安全隐患排查与预警系统研究 Research on Safety Hazard Investigation and Early Warning System for Construction Projects	荆涛 Jing Tao
111	建筑工程管理控制要点分析与实践优化策略 Analysis of Key Control Points in Construction Engineering Management and Practical Optimization Strategies	农勇顺 Nong Yongshun
114	建筑幕墙防渗漏技术分析研究 Analysis and Research on Anti-Leakage Technology for Architectural Curtain Walls	王春雨 Wang Chunyu
119	建筑工程质量检测中的问题及改进措施研究 Research on Problems and Improvement Measures in Building Engineering Quality Inspection	郎克乐 Lang Kele

能源科学 | ENERGY SCIENCE

122	石油钻井过程中井漏问题成因及防治技术研究 Research on the Causes and Prevention and Control Technologies of Well Leakage During Oil Drilling	崔香明 Cui Xiangming
-----	--	----------------------

125	老旧小区燃气管道改造设计与安全评估 Design and Safety Assessment of Gas Pipeline Renovation in Old Residential Areas	靳毓茜 Jin Yuqian
128	浮法玻璃生产线机电设备选型优化与工艺适配分析 Analysis on Optimization of Electromechanical Equipment Selection and Process Adaptation for Float Glass Production Line	成建平 Cheng Jianping
131	基于故障诊断的风力发电机转子振动特性分析与监测 Analysis and Monitoring of Rotor Vibration Characteristics of Wind Turbine Based on Fault Diagnosis	王建国 Wang Jianguo
134	煤化工装置工艺安全风险评估与技改优化研究 Research on Process Safety Risk Assessment and Technical Optimization of Coal Chemical Industry Plants	张敏 Zhang Min
137	城市河道水质改善关键技术与治理效果评价 Key Technologies for Improving Water Quality in Urban Rivers and Evaluation of Treatment Effects	张旭, 董军益 Zhang Xu, Dong Junyi
140	遥感技术在矿产地质调查中的应用研究 Research on the Application of Remote Sensing Technology in Mineral Geological Survey	姜河 Jiang He

原位测试技术在工程地质勘察中的应用研究

胡冲, 刘江波, 刘启玉, 宋辉

中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ERA.2026060003

摘 要 : 在工程建设施工中, 地质勘察数据是否真实可靠直接影响着设计方案的合理性、施工作业的安全性。本文选取原位测试技术, 从其内涵、类型出发, 围绕具体工程阐述技术要点、操作流程和应用成效。结果显示, 结合工程情况合理选用原位测试技术, 既能对真实的地层状态进行还原, 更能提升勘察参数的精准性, 为类似工程的设计施工提供参考依据。

关 键 词 : 原位测试技术; 地质勘察; 岩土体参数

Application of In-situ Testing Technology in Engineering Geological Survey

Hu Chong, Liu Jiangbo, Liu Qiyu, Song Hui

China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey and Design Institute Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650051

Abstract : In engineering construction, the authenticity and reliability of geological survey data directly determine the rationality of design plans and the safety of construction operations. This paper selects in-situ testing technology, starting from its connotation and types, and elaborates on technical key points, operational procedures, and application effectiveness in specific projects. The results demonstrate that the rational selection of in-situ testing technology based on project conditions can not only accurately reconstruct the true stratum state but also enhance the precision of survey parameters, providing a reference basis for the design and construction of similar projects.

Keywords : in-situ testing technology; geological survey; geotechnical parameters

引言

工程地质勘察作为勘察岩土体分布、不良地质、地质构造的常用手段, 其精准性和工程安全有着直接的关联性。传统地质勘察以室内试验、钻探取样为主, 虽然也能获得岩土体相关参数, 但受限于土体扰动、条件限制、试样尺寸等因素, 勘察结果往往不够精准。原位测试技术具有综合、原位等优势, 依托专业测试仪器直接获取岩土体参数, 如承载力、原位强度、渗透系数等, 在弥补传统勘察技术缺陷的同时, 保证勘察数据的可靠性。文章以某工程为案例, 针对地质条件进行综合试验, 分析岩土体特征, 以期为后续的地质勘察提供技术支撑。

一、原位测试技术概述

原位测试技术, 是指在岩土体原始位置、自然状态下, 在不影响其结构、应力和湿度的情况下测试岩土体特性的一种方法。相较于室内试验方法, 其既不需要采集、制样岩土体, 更能避免因样本采集带来的结构受损、土体扰动等问题, 特别适用于原状土样获取难度大的土层。

原位测试技术主要包括标准贯入试验、静力触探试验、旁压试验、重型圆锥动力触探试验等, 其中标准贯入试验是动力触探的一种, 常用于碎石土、粉土、砂土等土体的测定, 通过对土体相关参数的评定, 了解土体的变形情况、强度, 识别场地的地震液化情况; 静力触探试验的鲜明特性持续测试、数据精度高, 不仅不需要采集样本, 还能持续分层测定岩土体, 防止因样本采集

给土体扰动带来的偏差^[1]。现阶段, 此方法主要用于粉土、黏性土、软土等土体, 但不能用于富含砂石、碎石的土体; 旁压试验可用于不同深度的土体测定, 如碎石土、黏性土等, 可通过均匀向孔壁施加应力, 促使孔壁土体变形、结构受损, 在此基础上展开变形、应力关系的测量, 从而获得土体的关键参数; 重型圆锥动力触探试验则用于碎石土、坚硬地层, 通过对堆积体密度、颗粒级配的评价, 展开土体变形、强度等各项参数的估算。其优势在于操作简单、设备轻便, 可在迅速获得地层特征的前提下, 有效弥补静力触探试验的缺陷。

二、原位测试技术在工程地质勘察中的应用

为评判原位测试技术在地质勘察中的应用成效, 围绕具体的

工程案例，从标准贯入试验、静力触探试验和重型圆锥动力触探试验3个层面展开测量，具体操作要点如下。

(一) 工程概况

某工程为特高坝，属混凝土重力坝，高182m；地形平坦，局部起伏，地面标高（绝对）介于23.3 ~ 30.1m之间。系统性分析，工程所在地地层组成有人工填土、冲洪积层。其中，人工填土为碎石土、黏质粉土、杂填土，厚度最小0.51m、最大7.81m；冲洪积层为黏质粉土、粉质黏土、砂质粉土、粉细砂。同时，初步勘察也发现施工区域有地下水2层：潜水埋深6.89 ~ 10.38m，标高15.22 ~ 19.33m层间水埋深16.69 ~ 20.81m，标高6.82 ~ 8.32m。

(二) 技术要点

1. 静力触探试验

静力触探试验使用荷兰 Geomil 公司生产的触探设备，由传感器、密封圈、锥头等多个部件构成（见下图1）。操作要点如下：

（1）正式试验前，全面调试触探设备的相关部件，保证传感器精度、锥头灵敏度等相关参数和规范要求相符；以勘察方案为参考，展开测试点位的明确，同步对施工场地进行平整处理，保证触探设备的锥头和测试点保持垂直对准的状态，避免锥头偏位情况的出现。

（2）贯入操作中，加强对锥头速率的把控，一般为每秒2.0cm，过程中持续记录锥尖阻力、摩阻比、侧壁摩阻力等相关数据。其中，摩阻比计算结合下列公式进行；若贯入环节遇到大块石、大碎石等障碍物，应当即刻暂停贯入，同时记录实际的贯入深度、障碍物的具体类型和物质。

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100\% \quad (1)$$

公式（1）中， R_f 为摩阻比， q_c 为锥尖阻力， f_s 为侧壁摩阻力。

（3）结合相关参数的变化曲线，围绕钻探资料，展开粉质黏土、碎石土、砂土边界的识别；以《岩土工程勘察规范》为参考，对土层的类型、状态进行判定。当各参数的变幅和相邻段均值相比高出50.0%，可结合现场情况、岩芯钻探的方式对分层边界进行综合识别^[2]。应结合钻探岩芯、现场描述及区域地质资料进行综合判识，必要时联合室内试验展开验证。针对碎石层，应格外关注锥尖阻力的最大值、回落情况，防止因部分区域架空带来的误判。

（4）测试深度达到预设值，或无法持续贯入后，将锥头缓慢上提，对表面泥土进行清理，细致检查锥头的受损情况，为下次的测试操作奠定基础；完成测试操作后，整理、导出全部数据，剔除异常数据。

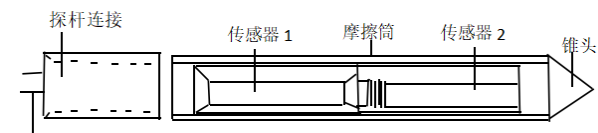


图1 静力触探试验设备组成示意图

2. 重型圆锥动力触探试验

（1）牢固连接探头、探杆，保证探头处于垂直状态，锥尖不会出现磨损，且连接探杆的螺纹未松动，防止因探杆歪斜影响测试进程和结果；使用质量120.0kg的落锤，将其方式设定为自由下落，借助自动脱钩进行控制，确保其高度始终控制为76.0cm。需要注意，落锤每次下落需保证探杆垂直，避免探杆歪斜或侧摩阻力影响测试数据的真实性。

（2）贯入过程中，实时记录贯入深度，每贯入10.0cm展开锤击数量的记录，待贯入深度到达30.0cm后，方可着手计算N63.5值。如果贯入难度大、锤击数量突然增多，立即暂停贯入、查明成因；如果贯入操作遇到坚硬碎石、孤石，除了要详细标记这些异常体的深度、形态特征外，还可辅以地质雷达进行验证^[3]。

（3）试验完成后，详细复检探杆垂直度、螺纹连读紧固度、锥尖磨损度等，无任何异常后再对设备进行拆卸操作；详细、完整地记录整个试验过程产生的各类数据，严禁出现事后涂改或补充的情况。

3. 标准贯入试验

（1）标准贯入试验前期，需做好充分的钻孔准备。使用金刚石钻机进行钻孔，保证孔径、贯入器直径一致；以预设测试深度为参考依据，确保最终的孔深比其超出50.0cm。钻孔完成后，将底部残渣清除干净，保证内部无其他杂质^[4]。

（2）安装贯入器，保证其与探杆牢固连接，随后缓慢放入孔底，确保贯入器和位置和测试位置精准对位、紧密接触；先预打入贯入器，深度不超过15.0cm，过程中采用轻击的方式展开贯入器垂直度的校对。

（3）预打结束后，正式进行贯入试验，使用质量63.5kg的穿心锤，以自由下落的方式对贯入器进行持续击打。待贯入深度达30.0cm后，做好锤击数量的记录。如果30.0cm的锤击数量在50击以上，即刻终止测试，记录此时的深度、锤击数^[5]；完成测试后，将贯入器上提，同步取出受干扰的土体，详细观察土体湿度、颜色等情况，并展开和钻探资料、其他结果的比照。

(三) 应用效果

1. 岩土体参数

（1）本工程在静力触探试验中，选取粉质黏土、黏质粉土、砂质粉土作为对象展开，共计完成12个测孔的检测（见下表1）。分析显示，黏质粉土的锥尖阻力和室内试验抗剪强度保持一致，砂质粉土界面和钻孔分层结果高度相似，黏质粉土的锥尖阻力和锤击数量存在线性关系。

表1 静力触探试验结果

土层	样本量	锥尖阻力 (MPa)	侧壁摩阻力 (kPa)	摩阻比
粉质黏土	17	0.7~1.5	9~24	0.9~1.9
黏质粉土	31	1.1~2.7	14~34	0.7~1.4
砂质粉土	23	2.9~5.4	29~59	0.4~1.1

（2）重型圆锥动力触探试验对象为杂填土、碎石填土、黏质粉土素填土，共计进行有效测试12组（见下表2）。进一步分析，杂填土、碎石填土的 N_1 均值存在较大差异，需换填处理；黏质粉土素填土的密度中等，可用作临时地基。

表2 重型圆锥动力触探试验结果						
土层	样本量	锤击数量 (击)	N ₁ 均 值	标准差	变异系 数	承载力 标准值 (kPa)
杂填土	5	2.9~5.4	4.1	0.7	0.18	119
碎石填土	3	8.4~9.9	9.1	0.4	0.04	196
黏质粉土 素填土	7	4.7~7.1	5.9	0.6	0.11	128

(3) 标准贯入试验对象选取粉质黏土、黏质粉土，有效测试共计280次（见下表3）。分析表明，黏质粉土的N₂均值为11.4，说明该土层具有较高的密实度；和粉质黏土的变异系数相比，黏质粉土更高，说明该土层内含的粉土薄层是造成土层力学参数异常的关键因素。

表3 标准贯入试验结果						
土层	样本量	锤击数量 (击)	N ₂ 均 值	标准 差	变异系 数	承载力标准 值(kPa)
粉质黏土	29	6.9~13.1	9.8	1.6	0.16	131
黏质粉土	55	6.9~18.9	11.4	2.4	0.21	141

2. 勘察效率和成本控制

结果显示，和单一的钻探、室内试验相比，本工程所用3种方法的勘察效率提升了45.0%，数据获得时长缩短了26天，且勘察费用也降低了30.0%，进一步论证了原位测试技术的应用成效。

三、结语

文章在某工程地质勘察中使用原位测试技术，得出结论如下：（1）标准贯入试验可量化处理粉质黏土、黏质粉土密实度，静力触探试验在土层界面的识别上作用显著，重型圆锥动力触探试验可精准评估填土层是否均匀、力学情况；联合开展这3种测试，可提高勘察效率，减少勘察成本。（2）在未来，地质勘察应积极引入多种技术，全方位勘察复杂地质，进一步提升勘察数据的精准度。

参考文献

[1] 李浩源. 矿山岩土工程地质勘察中的原位测试技术分析[J]. 中国金属通报, 2024(16): 141-143.
[2] 段文轩. 原位测试技术在岩土工程地质勘察中的应用分析[J]. 工程与建设, 2024, 38(4): 798-799, 802.
[3] 莫云凯. 原位测试技术在水利工程地质勘察中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(20): 141-144.
[4] 何林暄. 岩土工程勘察中的原位测试技术及其应用[J]. 工程建设与技术, 2025, 3(7)22.
[5] 牛欢, 陈亮, 汪奇, 等. 岩土工程地质勘察中的高新技术——以原位测试技术为例[J]. 中国科技信息, 2025(4): 61-63.

公路工程沥青混凝土路面施工技术应用研究

王进冈

云南齐鹏建设工程有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2026060004

摘 要： 沥青混凝土路面因其具备良好的耐久性、舒适性与经济性，已成为现代公路建设的重要结构形式。本文旨在深入研究公路工程沥青混凝土路面施工技术的应用，以提升工程施工质量。文章分析了原材料质量控制与混合料配合比设计对路面性能的决定性影响，明确了各环节的控制标准；探讨了施工准备阶段下承层处理、透层与粘层施工及机械设备配置等关键技术要点；重点阐述了沥青混合料在拌和、运输、摊铺及碾压四个核心工序中的施工工艺与质量控制措施，包括温度控制、速度设定及碾压组合等。严格把控各施工环节的技术参数与操作规范，是确保路面平整度、密实度及整体稳定性的关键，可为同类公路工程施工提供理论依据与技术参考。

关 键 词： 公路工程；沥青混凝土路面；施工技术；配合比设计

Research on the Application of Construction Technology for Asphalt Concrete Pavement in Highway Engineering

Wang Jingang

Yunnan Qipeng Construction Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract： Asphalt concrete pavement has become an important structural form in modern highway construction due to its excellent durability, comfort, and economy. This paper aims to conduct an in-depth study on the application of construction technology for asphalt concrete pavement in highway engineering to enhance the quality of project construction. The article analyzes the decisive impact of raw material quality control and mix proportion design on pavement performance, clarifying control standards for each stage. It explores key technical points such as subgrade treatment, prime coat and tack coat construction, and mechanical equipment configuration during the construction preparation phase. The paper focuses on elaborating the construction techniques and quality control measures for asphalt mixtures in the four core processes of mixing, transportation, paving, and compaction, including temperature control, speed setting, and compaction combinations. Strictly controlling the technical parameters and operational specifications at each construction stage is crucial for ensuring pavement smoothness, compactness, and overall stability, providing theoretical basis and technical references for similar highway engineering projects.

Keywords： highway engineering; asphalt concrete pavement; construction technology; mix proportion design

引言

在公路路面结构中，沥青混凝土路面凭借其表面平整、行车舒适、抗滑性能优良、施工便捷且耐久性较强等突出优势，被广泛应用于高速公路、市政道路及乡村公路等各类公路工程中，成为现代公路建设的首选路面类型。随着城市化进程的加快和汽车保有量的大幅增长，公路交通量持续攀升，车辆荷载不断加大，加之极端天气（高温、暴雨、严寒等）的频繁影响，对沥青混凝土路面的使用性能和使用寿命提出了更高要求。当前，我国公路建设正朝着高质量、低损耗、长寿命的方向发展，如何优化沥青混凝土路面施工技术，提升施工质量，减少路面病害，延长路面使用寿命，成为公路工程领域亟待解决的重要课题。基于此，本文围绕公路工程沥青混凝土路面施工技术展开系统研究，重点分析施工原材料与配合比设计要点、施工准备阶段技术要求及核心施工工艺的应用，探讨各环节质量控制措施，以期在实际公路工程沥青混凝土路面施工提供理论参考和实践指导，推动我国公路建设事业的可持续发展。

一、沥青混凝土路面施工材料与配合比设计

（一）原材料质量控制

随着我国城市化建设的加快，公路建设需求增加，沥青混凝土路面是现代公路建设的重要路面结构，其具有较强的耐久性、舒适性以及经济性，是公路项目施工的重要技术手段^[1]。沥青混凝土路面施工质量的关键在于原材料控制，其性能直接决定混合料的强度、稳定性与耐久性，必须严格按规范把控。沥青作为核心胶结材料，需依据公路等级、使用要求及气候条件选用合适标号，保证针入度、延度、软化点等指标达标^[2]。进场前抽样检测，合格后方可使用，存放时做好防雨、防晒、防尘，防止老化离析，不同标号严禁混用^[3]。粗集料应坚硬、耐磨、颗粒均匀，满足压碎值、磨耗值、针片状含量等要求，进场后筛分清洗以保证级配合格。细集料需洁净干燥，严控含泥量与细度模数，避免影响强度与耐久性。填料常用石灰石矿粉，要求洁净干燥、亲水性好，细度与比表面积达标，不合格严禁使用。如需添加改性剂，应选用与沥青相容性佳的材料，精准控制掺量，确保改性沥青性能满足设计标准。

（二）沥青混合料配合比设计

沥青混合料配合比设计是沥青混凝土路面施工的关键，核心是合理搭配原材料比例，使混合料满足强度、稳定性等使用要求，需遵循目标配合比—生产配合比—生产配合比验证三步法^[4]。目标配合比阶段，根据设计要求和原材料性能确定混合料类型及级配范围，通过马歇尔试验确定最佳沥青用量和集料级配，形成目标配合比。生产配合比阶段，结合拌和设备实际情况，抽样筛分各料仓集料、调整供料比例，并重做马歇尔试验验证沥青用量，确定生产配合比。生产配合比验证阶段，抽取混合料试件进行试验，合格则确定为最终施工配合比，不合格需重新调整；施工中需根据原材料变化及时调整，保障混合料质量稳定。

（三）材料与配合比对施工质量的影响分析

原材料质量与配合比设计直接决定沥青混凝土路面的施工质量和使用性能，控制不当易引发各类路面病害^[5]。原材料方面，沥青性能不佳、集料质量差、细集料含泥量高、矿粉不合格，会分别导致路面松散开裂、抗车辙能力不足、粘结失效及水损害等问题。配合比方面，沥青用量不当会造成车辙泛油或松散渗水，集料级配不合理则会影响施工和易性、密实度与抗滑性能。因此，严控原材料质量、优化配合比设计，是保证沥青混凝土路面质量的关键。

二、沥青混凝土路面施工准备阶段技术要点

（一）下承层准备与检查

下承层作为沥青混凝土路面的承载基础，其平整度、强度、密实度等性能直接影响上层路面的施工质量，因此在施工准备阶段，需做好下承层的准备与检查工作^[6]。下承层通常为水泥稳定碎石基层或石灰土基层，在沥青混合料摊铺前，需对下承层进行全面清理，去除表面的杂物、浮土、积水等，确保下承层表面干

净、干燥。同时，需对下承层的各项性能指标进行检测，包括压实度、弯沉值、平整度、纵断高程、横坡等，检测结果需符合设计规范要求。若下承层压实度不足，需进行补压处理，直至达到设计标准；若下承层存在裂缝、坑槽等病害，需及时进行修补，避免病害延伸至上层路面；若下承层平整度不符合要求，需进行打磨、修整，确保表面平整，为沥青混合料摊铺创造良好的条件。此外，需在下承层表面喷洒透层油前，对其表面进行拉毛处理，增强透层油与下承层的粘结力。

（二）透层与粘层施工技术

透层与粘层是沥青混凝土路面施工的关键工序，主要作用是加强结构层间粘结、防止层间剥离、提高路面整体稳定性^[7]。透层用于下承层与沥青面层之间，施工前需保证下承层洁净干燥，过干时可少量洒水湿润；宜选用渗透性强的乳化沥青或煤沥青，控制喷洒量使其均匀渗入下承层，渗透深度一般不小于5mm，待完全破乳干燥后再摊铺上层混合料^[8]。粘层用于沥青面层各层之间及沥青面层与桥面、构造物界面，施工前需清理表面杂物浮尘；采用相容性良好的乳化沥青，按规范控制喷洒量，确保均匀无漏喷、多喷，桥面等部位可适当增加用量；喷洒后应在破乳前及时摊铺，防止粘层油失效。

（三）施工机械设备的配置与调试

沥青混凝土路面施工强度大、工艺高、连续性强，需配置齐全且性能良好的施工机械设备。设备配置需结合施工规模、工艺及设计要求，主要包括拌和、运输、摊铺、碾压及辅助设备^[9]。拌和设备优先选用间歇式沥青混合料拌和机，其拌和均匀、质量稳定，需配备温度控制、计量及除尘系统，保障混合料质量并减少污染。运输选用密封性好、载重量适中的自卸卡车，车厢涂隔离剂、运输时盖篷布，防止混合料粘结、降温或污染。摊铺采用带自动找平、调速功能的摊铺机，调整好摊铺宽度和速度，提前预热熨平板。碾压搭配钢轮与胶轮压路机，分别用于初压、终压和复压，保障压实效果。设备进场前需全面检查调试，施工中安排专业人员定期维护保养，避免设备故障影响施工进度和质量。

三、沥青混凝土路面核心施工技术应用

（一）沥青混合料的拌和技术

沥青混合料拌和质量直接决定路面强度与耐久性，需严格控制拌和温度、时间及配合比，保证拌和均匀、质量稳定^[10]。普通沥青混合料拌和温度为140℃~160℃，改性沥青为160℃~180℃，温度过高易使沥青老化，过低则拌和不均。拌和时先将集料干拌10~15s，再加沥青拌和30~45s，至色泽均匀、无花白料、无结团。需按生产配合比精准计量用料，定期校准计量设备；同时保证除尘系统正常运行，及时清理机内积料。拌和完成后应及时检测温度与质量，合格后方可出料。

（二）沥青混合料的运输技术

沥青混合料的运输过程中，需重点控制运输时间、运输温度和混合料的离析，确保混合料能够顺利运至摊铺现场，且质量符合要求。运输时间应尽量缩短，从拌和机出料到摊铺机摊铺的

时间，普通沥青混合料不宜超过2h，改性沥青混合料不宜超过1.5h，若运输距离较远，需采取保温措施，延长混合料的有效运输时间。运输过程中，需严格控制混合料的温度，普通沥青混合料的运输温度不宜低于130℃，改性沥青混合料的运输温度不宜低于150℃，车厢需用篷布严密覆盖，防止温度下降过快和雨水污染。运输车辆在装料时，应前后移动车辆，分三次装料，避免混合料在车厢内出现离析现象；卸料时，需缓慢卸料，避免混合料冲击摊铺机，导致摊铺不平整。运输车辆到达摊铺现场后，需检测混合料的温度，若温度不符合要求，需废弃处理，严禁使用。此外，运输车辆需有序停放，避免影响摊铺施工的连续性。

（三）沥青混合料的摊铺技术

沥青混合料摊铺是路面施工关键工序，直接影响路面平整度、厚度和压实度，施工中需严格控制核心参数并规范操作。摊铺前，需全面检查调试摊铺机，确保熨平板预热到位、找平系统正常，按设计要求调整摊铺宽度和厚度。摊铺温度需与混合料类型匹配，普通沥青不低于120℃，改性沥青不低于140℃，温度过高或过低均会影响施工质量。摊铺速度需均匀连续，控制在2~6m/min，避免混合料离析、摊铺不平整。摊铺时熨平板需保持平稳，摊铺厚度比设计厚5%~10%以预留碾压沉降量，专人观察摊铺表面，及时清除杂物、处理离析等问题。纵缝采用热接缝，相邻摊铺带重叠5~10cm，碾压后切除重叠部分；横缝采用平接缝，端部切割整齐、清除松散料并喷洒粘层油后再继续摊铺。

（四）沥青混合料的碾压技术

沥青混合料碾压是提高路面密实度、强度与稳定性的关键，需严格按初压—复压—终压流程施工，合理控制温度、速度、力度及遍数。碾压温度应随混合料类型调整：普通沥青初压不低于110℃、复压不低于90℃、终压不低于70℃；改性沥青初压

不低于130℃、复压不低于110℃、终压不低于90℃。温度过低难以压实，过高易出现推挤、泛油。初压用钢轮压路机，速度1.5~2km/h，碾压1~2遍，压实并稳定摊铺形态，驱动轮朝向摊铺机，由两侧向中心碾压，轮迹重叠1/3~1/2。复压用胶轮压路机，速度2~3km/h，碾压4~6遍，提升密实度与平整度。终压用钢轮压路机，速度2~3km/h，碾压1~2遍，消除轮迹、保证平整。

碾压过程中压路机不得在未成型路面停留、转弯或掉头；终压后检测压实度，不达标需补压；路面温度降至50℃以下方可开放交通。

四、结束语

本文围绕公路工程沥青混凝土路面施工技术应用展开了全面且系统的研究，结合当前公路建设高质量发展需求，重点探讨了施工原材料质量控制、沥青混合料配合比设计、施工准备阶段技术要点，以及沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压四大核心施工工艺的应用规范与质量控制措施，明确了各施工环节的关键技术参数和注意事项，梳理了原材料、配合比、施工工艺等因素对路面质量的影响机制。本次研究结合现有施工技术规范 and 工程实践经验，为公路工程沥青混凝土路面施工提供了理论参考和实践指导，但随着公路建设技术的不断革新，新型材料、新型设备和新型施工工艺的应用日益广泛，未来还需结合实际工程案例，进一步深入研究沥青混凝土路面施工技术的优化路径，解决复杂工况下的施工难题，不断提升公路工程建设质量和综合效益，助力我国交通运输事业实现可持续发展。

参考文献

- [1] 王金强. 山区高速公路沥青混凝土路面施工技术研究 [J]. 建筑机械化, 2025, 46(11): 134-136+148.
- [2] 王恩泽. 多碎石沥青混凝土路面施工技术 & 性能研究 [J]. 工程机械与维修, 2025, (11): 32-34.
- [3] 张明明. 市政道路工程沥青混凝土路面平整度施工技术 [J]. 中国高新科技, 2025, (21): 115-117. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2025.21.35.
- [4] 张祥庆. 公路工程沥青混凝土路面施工技术研究 [J]. 汽车周刊, 2025, (12): 68-70.
- [5] 刘青. 市政道路沥青混凝土路面施工技术探讨 [J]. 中国房地产业, 2025, (31): 198-201.
- [6] 王琳. 城市道路新建工程项目中沥青混凝土路面施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (31): 35-37.
- [7] 黄丰丰. 市政道路沥青混凝土路面施工技术要点 [J]. 低碳世界, 2025, 15(10): 161-163. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2025.10.011.
- [8] 周晓婵. 高速公路工程中沥青混凝土路面施工技术要点研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (29): 50-52.
- [9] 郑创辉. 市政沥青混凝土路面超薄磨耗层施工技术及质量控制 [J]. 中国水泥, 2025, (10): 122-124.
- [10] 陆恺. 公路沥青混凝土路面施工技术研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(18): 61-64. DOI: 10.26929/j.cnki.issn.2097-1672.2025.18.016.

地下工程防水抗渗施工技术研究

戴国钧

上海益宇建设集团有限公司，上海 200439

DOI:10.61369/ERA.2026060010

摘 要： 地下工程防水抗渗性能直接影响到结构安全、使用功能以及工程耐久性。针对当前地下工程在高水位条件下易发生的渗漏、节点构造复杂、防水体系协同不足等情况，本文系统的分析防水抗渗对结构稳定性、功能完整性，在总结常见防水失效的原因基础上，重点的探讨了弹性体改性沥青防水卷材、结构自防水混凝土及关键节点多道设防等施工技术。结合嘉定新城马陆社区学校地下工程的实例，对桩头、施工缝、后浇带及高水位抗浮等复杂工况下的防水构造进行针对性分析，为类似地下工程防水抗渗的施工提供技术参考。

关 键 词： 地下工程；防水抗渗；施工技术

Research on Waterproof and Anti-Permeability Construction Techniques for Underground Engineering

Dai Guojun

Shanghai Yiyu Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200439

Abstract： The waterproof and anti-permeability performance of underground engineering directly affects structural safety, functional integrity, and engineering durability. In response to the issues of leakage, complex node structures, and insufficient coordination of waterproofing systems that commonly occur in underground engineering under high water level conditions, this paper systematically analyzes the impact of waterproofing and anti-permeability on structural stability and functional integrity. Based on a summary of common causes of waterproofing failure, it focuses on discussing construction techniques such as elastomer-modified bitumen waterproofing membranes, structural self-waterproofing concrete, and multi-layered defenses at key nodes. Using the underground engineering project of Malu Community School in Jiading New City as an example, this paper provides targeted analysis of waterproofing structures under complex conditions such as pile heads, construction joints, post-pouring strips, and anti-floating in high water levels, offering technical references for the construction of waterproofing and anti-permeability in similar underground engineering projects.

Keywords： underground engineering; waterproof and anti-permeability; construction techniques

随着城市空间向立体化、集约化方向不断的发展，地下工程在公共建筑、市政基础设施及综合体项目中的应用也越来越普遍。受复杂地质条件、高地下水位及施工环境受限等原因影响，地下工程渗漏问题存在节点集中、修复难度大、重复发生率高等特点，会削弱结构耐久性。如今的防水技术在高水位环境和复杂节点条件下仍存在适应性不足的问题，新材料、新工艺的应用缺少系统的总结。因此，需要结合具体工程实例，对地下工程防水抗渗施工技术进行针对性的研究，以此来提升防水体系的整体可靠性和适用性。

一、地下工程防水抗渗的重要性及现状

（一）地下工程长期处于地下水及土壤水的压力作用之下

防水抗渗性能是保障结构的安全和耐久性的关键因素。水分侵入混凝土的内部会加速钢筋的锈蚀与混凝土的劣化，也会降低结构承载力并诱发裂缝扩展。在使用层面，渗漏易造成地下空间湿度失控，会影响设备运行以及使用的舒适性，尤其对实验室及数据用房等功能空间的影响十分显著。从全生命周期角度来看，防水的失效往往会导致后期的维修成本远高于初期的投入，甚至影响城市的基础设施的正常运行。因此，构建可靠且耐久的地下

工程防水抗渗体系具有社会价值。

（二）地下工程防水抗渗施工现状问题

防水体系协同性不足，卷材防水、涂料防水与结构自防水之间的衔接不紧密，多道设防流于形式，导致整体的防水性能难以充分发挥。防水材料耐久性的差异明显，部分的材料在长期水压、温差变化及化学侵蚀作用下容易出现老化、开裂等情况。混凝土振捣的不密实、卷材搭接处理不规范、涂料厚度不均等情况普遍存在，成为渗漏隐患的主要原因。当前地下工程防水失效的主要原因并非是因为单一的材料性能不足，而是多种的防水技术在高水位、复杂节点条件下缺乏有效协同，尤其在施工缝、桩

头及穿墙管等部位。这使得地下工程防水效果存在着较大不确定性。

二、项目概述

本工程名称为嘉定新城马陆社区27-2地块九年学校新建工程,地址为上海市嘉定区嘉定新城马陆社区。竣工日期:2022年9月30日,合同价:27288.5026。本项目包括1#楼小学部,2#楼文化中心,3#楼中学部,4#楼综合楼以及外环境等多处单体,总建设用地面积约46166 m²,总建筑面积约43120 m²,地下建筑面积约4500 m²。项目地上结构类型为装配式结构,地下为现浇混凝土结构,地下工程防水等级为防水等级为一级,抗渗等级为P6,合理使用年限为50年。



图1 马陆学校鸟瞰图

三、地下工程防水抗渗关键施工技术

(一) 弹性体改性沥青 SBS 防水卷材热熔满粘施工技术

本工程地下室防水采用的是3+3mm厚SBS改性沥青防水卷材(Ⅱ型),通过热熔满粘工艺来形成连续、封闭的防水层。工程实践表明,SBS改性沥青防水卷材的防水效果不仅取决于材料类型,更依赖于基层的平整度控制、热熔满粘工艺稳定性及搭接密封质量,施工过程的技术控制是决定卷材体系的防水可靠性的关键因素。

底板基层施工时,先浇100厚的C15混凝土垫层,用平板振捣器振捣密实后养护7天,等强度达到 $\geq 10\text{MPa}$ 才行。接着进行20厚DP20水泥砂浆找平层,阴阳角要抹成半径50mm的小圆角。例如4#楼综合楼底板和工程桩的交接处,需把浮土清理干净,再用高压水枪冲洗晾干。地下室外墙是P8防水钢筋混凝土,拆模后把表面的浮浆和模板杂物清理掉。一次性止水螺杆留下的孔,用1:2的防水砂浆分两次封堵压光,之后再施工20厚DP20找平层。顶板使用P6防水钢筋混凝土,养护14天以后进行机械磨光,把浮灰和油污去掉。预留洞口周边500mm范围内要做2%的找坡,20厚DP20找平层沿着后浇带分段施工。

热熔铺贴采用“高压喷灯热熔+滚压排气”的工艺,喷灯用

5000W的,按照地下车库后浇带①区→②区的顺序来(比如4#楼车库就先贴后浇带两侧)。底板施工得两个人配合,侧墙就从下往上铺贴。

搭接密封方面,长短边搭接宽度要 $\geq 100\text{mm}$,搭接缝处热熔沥青溢出 $\geq 5\text{mm}$ 后刮平就行。顶板是“3+3厚SBS卷材+4厚SBS耐根穿刺卷材”的双层体系,接缝要错开1/3幅宽,第二层和第一层错开300mm。

(二) 地下工程关键节点防水抗渗构造技术

本项目地下工程最容易漏水的地方,主要是工程桩桩头、地下室外墙施工缝、底板和外墙后浇带,以及穿墙管等节点。针对这些部位,采用了“多重设防+定制构造”的技术,并通过项目的隐蔽验收。地下车库基坑里的工程桩数量不少,桩头和底板连接的部位,混凝土收缩易出现裂缝,所以使用“涂料+砂浆+止水条+密封胶”四重防护措施。先凿平修补桩头,清理松动的石子并用高压风吹干净灰尘,桩顶上露出来的钢筋也需用砂纸除锈。接着刷上1.5mm厚的水泥基渗透结晶型防水涂料,等干燥后抹20厚掺了5%抗裂纤维的聚合物水泥防水砂浆,验收时检查涂料厚度和砂浆平整度。然后在桩顶的锚固钢筋上缠30mm宽的遇水膨胀止水条,底板的SBS卷材要延伸到桩侧50mm的位置并加热压实,最后在浇筑40厚细石混凝土之前,给桩侧阴角打上10mm直径的单组分水膨胀聚氨酯密封胶。

底板和地下室外墙的施工缝留在底板往上翻300mm的位置,选用3mm厚300mm宽的镀锌钢板止水带,要放在中间位置,和墙体钢筋点焊固定好,像4#楼综合楼施工时,就用2m靠尺检查垂直度,确保 $\leq 3\text{mm}$;浇筑外墙混凝土之前,先清理施工缝的浮浆,用高压水冲洗,再刷上水泥基界面剂,铺上30mm厚和混凝土同配合比的砂浆,然后分层浇筑,注意振捣棒距离施工缝要 $\geq 50\text{mm}$,1#楼小学部验收的时候没发现空鼓。地下室的后浇带分两种,一种是沉降型的,比如4#楼和车库连接的位置,设置钢板网、300mm宽的外贴止水带,嵌入遇水膨胀止水条,用C35P8微膨胀混凝土浇筑后养护28天;另一种是收缩型的,例如车库底板跨中位置,就不用外贴止水带,用C30P8微膨胀混凝土养护 ≥ 14 天。地下工程的渗漏风险高度集中于桩头、施工缝及后浇带等关键节点,并且单一的防水构造是难以满足长期服役要求,通过防水涂料、防水砂浆、止水材料与密封材料组合应用形成多道设防,是提高节点防水安全裕度的有效技术路径。

(三) 防水混凝土与多道防水层施工技术

本项目中的防水混凝土是结构自防水的核心,再配合SBS卷材的柔性防水,形成“刚柔结合”的体系。关键是把混凝土施工、防水层衔接和养护这三个环节抓好,这样才能确保它们一起发挥抗渗作用。地下室底板和侧墙用的是P8防水混凝土,顶板用的是P6防水混凝土。原材料方面,选的是P.O42.5普通硅酸盐水泥、Ⅱ级粉煤灰、5~25mm连续级配碎石和中砂,加入1.2%的聚羧酸系高效减水剂以及8%的膨胀剂。浇筑的时候,底板用汽车泵分层浇筑,用 $\Phi 70$ 型振动棒振捣,例如4#楼地下车库底板,由3名振捣工分区作业,防止漏振。侧墙要“分层浇筑(每层 $\leq 1.5\text{m}$)+对称振捣”,并且振捣棒要插入下层50mm,避免混

凝土离析。养护的话,12小时内就得盖上土工布浇水,底板养护时间 ≥ 14 天,2#楼文化中心的地下室外墙使用湿度传感器,保证相对湿度 $\geq 80\%$ 。底板防水层验收完24小时内,要浇筑40厚C20细石混凝土保护层,1#楼小学部地下车库的底板保护层,48小时内不能让人踩踏。侧墙的防水混凝土拆模后,清理掉浮浆,再做20厚DP20找平层,贴上3+3厚SBS卷材,然后施工40厚聚苯板保护层,4#楼综合楼地下室外墙的聚苯板施工完后,还设置了临时防护栏。顶板养护好后,做20厚DP20找平层,贴上3+3厚SBS卷材和4厚SBS耐根穿刺卷材,验收后浇筑70厚C20细石混凝土保护层,同时做好2%的排水坡度,防止积水。采用防水混凝土与柔性防水层相结合的“刚柔复合防水体系”,可在限制结构裂缝发展的同时,提高防水层对变形与水压波动的适应能力,从而显著提升地下工程整体抗渗性能。

四、项目难点与解决对策

(一) 复杂节点防水处理难度大

地下工程存在大量桩头、穿墙管、施工缝等细部节点,这些地方结构复杂、应力集中,是防水渗漏的高发区,桩头和底板交接处容易因为混凝土收缩形成缝隙,穿墙管和墙体之间的空隙很难密封严密,施工缝处新旧混凝土结合面容易形成渗漏通道,传统的防水处理方法不能保障长久的防水效果。

解决对策:桩头处,先对桩顶进行修补,然后保证基层平整,涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料,最后用聚合物水泥防水砂浆处理,锚固钢筋底端设置遇水膨胀止水条,底板防水层铺贴到桩侧之后,在细石砼保护层浇筑之前用单组分水膨胀聚氨酯密封胶封闭桩侧阴角,穿墙管处用套管式防水法,套管加焊10厚钢板止水环,止水环与主管满焊密实且居墙中,管道安装后在预留凹槽里用嵌缝材料嵌填密实,施工缝设置在底板上翻300mm处,放置3mm厚,300mm宽的止水钢板,保证止水钢板与混凝土结合紧密,浇筑前清理施工缝表面的浮浆和杂物,涂刷界面剂以加强粘结。

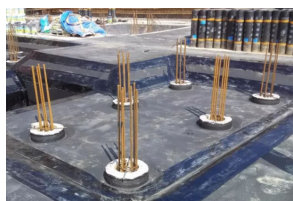


图2 桩头防水处理图



图3 地下室外墙+300设置止水钢板图

(二) 大面积卷材铺贴质量把控难

地下室底板、外墙和顶板要大面积铺贴3+3厚SBS改性沥青防水卷材,施工面积大而且作业环境复杂,基层平整度,干燥度难以均匀控制,很容易产生卷材铺贴空鼓,搭接不严密等情况,卷材热熔铺贴的时候,温度控制不当就会造成卷材老化或者粘结不牢固,进而影响到整体的防水性能,而且分区域施工时搭接处理也不容易做到完美无缺。

解决对策:施工前要严格检查基层,保证基层干燥(含水率

不大于10%)、平整坚实,阴阳角抹成半径50–100mm的圆弧,涂刷基层处理剂时要均匀不露白,干燥4–6小时后才能铺贴,采用分区流水施工,按先远后近、先低后高、先节点后大面的顺序铺贴,用高压喷灯均匀加热卷材和基层夹角处,保证卷材与基层、卷材之间100%热熔满粘,卷材长短边搭接宽度均不小于100mm,搭接缝边缘溢出热熔改性沥青并压实,上下层卷材接缝错开1/3幅宽,安排专人实时检查铺贴质量,对空鼓部位及时切开排气并重贴,保证卷材与基层紧密结合。

(三) 高水位环境下抗浮与防水协同控制难

本项目地下水位较高,根据勘察报告地下水位埋深1.2–2.5m,在结构施工及使用阶段需同时考虑浮力荷载和地下水渗透压力。高水位易造成底板混凝土浇筑时泌水、离析,产生蜂窝麻面等渗漏通道,且水位波动加速防水材料老化,传统的单防水措施难以兼顾抗浮稳定性和防水可靠性,易发生结构上浮变形或渗漏。

解决对策:施工前布置直径300mm、间距8–10m的管井降水,将地下水位降至底板以下500mm,并配合自动监测仪维持浇筑期内水位的稳定性。底板采用U型膨胀剂补偿收缩混凝土,掺量为补偿量的2–4%(膨胀率 $2-4 \times 10^{-4}$),粉煤灰作为水泥部分,20%粉煤灰取代水泥以控制水化热,分层振动捣实混凝土,插入下层50mm防止泌水离析,防水层选用“1.5mm水泥基渗透结晶涂料+4mmSBS卷材”复合,水泥基渗透结晶涂料刷前应将基层表面清理干净,阴、阳角处设置500mm宽的附加卷材,热熔后粘贴满贴,保证贴合紧密,接缝压实封边;按 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 设置抗浮锚杆,进入岩层不得少于1.5m,并与底板钢筋相连接,采用抗浮、防水相互结合的方法,平衡结构浮力、形成多道防渗防线,以保持结构的稳定和防水功能。在高地下的水位条件下,防水设计需要与结构抗浮的措施同步考虑,通过降水控制、补偿收缩混凝土、复合防水层及抗浮锚杆的协同实施应用,以此可以实现结构稳定性与防水可靠性的双重保障。

五、个人心得体会

在这个项目的防水抗渗施工过程当中,我体会到地下工程防水属于一种系统工程,要兼顾材料性能,施工工艺以及结构特性,从开始规划方案一直到现场施工,每一个环节都可能会影响到最后的防水效果,处理那些复杂的节点的时候,我发现不能死守着以前的经验,要结合项目实际情况来创新处理办法,桩头部分就采用了“防水涂料+防水砂浆+止水条+密封胶”这种多重设防体系,把桩头渗漏问题给解决了,这才明白技术创新并不是凭空想象出来的,而是要针对工程难点展开深入剖析,还要搞清楚各种材料的性能才行。

在把控大面积卷材铺贴质量的时候,我主导创建了“三检”制度,通过自检,交接检以及专检逐级把关,我及时察觉并改正了许多处铺贴瑕疵,这让我领悟到,质量管理不能单纯依靠后期验收,过程控制才是重点,高水位环境下的施工经历,也让我体会到“抗浮和防水协同”的根本逻辑,降水系统稳固水位,补偿

收缩混凝土改善结构自防水，复合防水层加强防渗性能，抗浮锚杆维持荷载均衡，这些举措共同做到“结构安全+防水可靠”的目的，以后碰到类似工程的时候，我要更多重视前期勘察和方案预估，持续改良防水施工技术，加强地下工程防水抗渗的可靠性。

六、结语

地下工程防水抗渗是涉及材料性能、结构与施工的系统

性工程。通过嘉定学校项目的实践可以得知，在高水位和复杂节点条件下，单一防水措施是难以满足长期的使用需求，必须通过结构自防水与柔性防水相结合、多道设防协同控制的方式来构建可靠的防水体系。工程实践表明，针对渗漏风险点进行精细化设计与过程的质量控制，是提升地下工程防水耐久性的关键。地下工程防水抗渗的可靠性并非依赖单一的材料或工艺，而是通过对风险的识别，节点的强化以及体系的协同这一整个过程控制的技术路径，该方法对类似的地下工程具有普遍指导意义。

参考文献

- [1] 苏俊. 土木工程施工中防水防渗技术探究 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(10): 91-93.
- [2] 张浩, 李小溪. 小米武汉总部东湖1号项目地下防水工程设计与施工 [J]. 中国建筑防水, 2025, (06): 30-36. DOI: 10.15901/j.cnki.1007-497x.2025.06.007.
- [3] 李坤洋. 高层住宅建筑地下防水工程施工技术研究 [J]. 居舍, 2024, (24): 26-29.
- [4] 宋海波. 深基坑防水抗渗施工探讨——以汉口火车站广场地下室主体工程防水抗渗工程为例 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(10): 49-51.
- [5] 柳聪娟, 秦萍. 地下防水工程施工技术应用 [J]. 江西建材, 2021, (12): 280-281+284.

基于无人机航测的土石方量计算精度分析

郭飞

阜新蒙古族自治县方寸测绘有限公司, 辽宁 阜新 123100

DOI:10.61369/ERA.2026060014

摘 要 : 土石方量精准计算是工程施工、场地平整、矿山开采、路基填筑等工程项目的核心环节, 其精度直接决定工程造价核算、施工方案设计与工程进度管控。无人机航测技术凭借低空作业灵活、数据采集高效、外业成本低廉、成果可视化程度高等优势, 逐步替代传统全站仪、RTK。

散点测量法, 成为土石方量测算的主流技术手段。本文结合测绘工程实践, 阐述无人机航测土石方量计算的技术原理与作业流程, 系统分析航飞参数、像控点布设、数据处理、地形条件等因素对测算精度的影响, 通过搭建实验对比模型, 将无人机航测成果与传统测量成果、激光雷达测量成果进行精度校验, 量化分析误差来源与控制标准, 提出针对性精度优化策略, 为无人机航测技术在土石方工程中的规范化应用提供理论依据与实践参考, 助力工程测绘领域提质增效。

关 键 词 : 无人机航测; 土石方量计算; 精度分析; 误差控制; 数字高程模型; 工程测绘

Precision Analysis of Earthwork Volume Calculation Based on UAV Aerial Survey

Guo Fei

Fangcun Surveying and Mapping Co., Ltd., Fuxin Mongolian Autonomous County, Fuxin, Liaoning 123100

Abstract : Precise earthwork volume calculation serves as a critical component in engineering projects including construction, site leveling, mining operations, and roadbed filling. Its accuracy directly impacts cost estimation, construction planning, and project schedule management. Drone aerial survey technology is progressively replacing traditional total stations and RTK systems due to its advantages such as low-altitude operation flexibility, efficient data acquisition, reduced fieldwork costs, and high visualization capabilities of results.

Scatter measurement has become the mainstream technical approach for earthwork volume estimation. Drawing on practical surveying engineering experience, this paper elucidates the technical principles and operational workflows for UAV-based aerial surveying of earthwork volumes. It systematically analyzes how flight parameters, image control point deployment, data processing, and topographic conditions influence measurement accuracy. Through experimental comparison models, the study validates UAV survey results against traditional measurement methods and LiDAR data, quantitatively identifies error sources and control standards, and proposes targeted precision optimization strategies. These findings provide theoretical foundations and practical references for standardized application of UAV surveying technology in earthwork engineering, thereby enhancing quality and efficiency in engineering surveying practices.

Keywords : UAV aerial survey; earthwork volume calculation; accuracy analysis; error control; digital elevation model; engineering surveying

引言

土石方工程贯穿各类项目全过程, 土石方量精准测算既是工程招投标、造价预算关键依据, 也是施工管控、竣工结算核心指标。传统土石方量测量采用人工散点测量法, 外业工作量大、周期长、成本高, 难以全覆盖测量, 易致误差偏大, 无法满足现代化工程测算需求。无人机航测技术作为新型低空测绘技术, 可实现土石方量自动化、智能化计算, 弥补传统技术缺陷。但实际应用中, 其测算精度受航飞参数、像控点密度等多重因素影响, 误差控制是核心难点。当前, 工程建设对测算精度与效率要求提升, 开展无人机航测土石方量

计算精度分析，明确误差来源与控制方法，对推动技术应用、保障测算质量有重要意义。本文结合测绘职称评审要求，基于实践与实验数据，开展精度分析与优化研究，为从业者提供技术方案。

一、无人机航测土石方量计算技术原理

（一）核心原理

无人机航测土石方量计算以摄影测量共线方程与数字高程模型（DEM）为理论基础，通过无人机搭载航摄仪，低空采集测区原始地表与开挖后地表多视角影像并同步获取定位定姿（POS）数据；经内业空三加密、密集点云匹配、DEM 构建，生成原始地形 DEM 与开挖后地形 DEM；叠加对比两个时期的 DEM 数据，计算地表高程差值，结合网格法、断面法、等高线法等算法，自动解算土石方开挖量、回填量与净方量。

（二）作业流程

无人机航测土石方量计算分四个核心环节，流程规范、逻辑性强：

1. 测区准备：开展踏勘，明确测算范围等情况，确定坐标系与高程基准，完成空域申请，规划航飞区域，布设像控点。
2. 外业航飞：通过地面站规划航线、设置参数，无人机自动采集原始与施工后地形影像及 POS 数据，确保影像完整无漏拍模糊。
3. 内业处理：将影像与 POS 数据导入专业软件，完成影像预处理等操作，剔除非地形数据干扰。
4. 土石方量计算：在软件中导入边界线，叠加两期 DEM 数据，选算法自动解算土石方量，生成报告。
5. 精度验证：采用 GPS - RTK 抽检高程点，对比航测 DEM 高程值，计算误差以验证精度。

（三）主流计算算法

1. 网格法：将测算区域划分为规则正方形网格，算每个网格单元平均高程差，结合网格面积求单元土石方量，累加得总方量，操作简便、计算高效，适用于平坦、起伏小的区域，是行业常用算法。
2. 断面法：沿测区纵向布设断面，提取高程数据，算相邻断面间土石方量，累加得总方量，适用于道路、河道等线性工程，精度较高但计算复杂。
3. 等高线法：基于前后两期等高线数据算土石方量，适用于起伏大的山地丘陵区域，对等高线精度要求高。

二、无人机航测土石方量计算精度影响因素分析

无人机航测土石方量计算精度受外业航飞、像控布设、内业处理、地形环境四大维度因素影响，各环节误差叠加直接决定最终测算精度，具体影响因素如下：

（一）航飞参数对精度的影响

航飞参数是影响数据采集质量的核心因素，主要包括地面分

辨率、影像重叠度、飞行高度、航飞角度：

1. 地面分辨率（GSD）：分辨率越高，影像细节、点云密度、DEM 精度越好，土石方量误差越小；反之，地形细节缺失，高程误差和测算偏差增大。
2. 影像重叠度：航向与旁向重叠度不足，会使影像匹配点缺失、空三加密误差增大、点云模型有漏洞；通常航向重叠度控制在 75%–85%，旁向重叠度 65%–75%，重叠度过高增加数据量，过低影响匹配精度。
3. 飞行高度：飞行高度与地面分辨率成正比，过高会降低影像分辨率和高程精度，过低易受地形遮挡、降低航飞效率，需依测算精度要求合理设置。
4. 航飞姿态：无人机飞行颠簸、倾角过大，会造成影像畸变、POS 数据误差增大，直接影响空三解算精度。

（二）像控点布设对精度的影响

像控点是实现影像坐标向地面实际坐标转换的基准，其布设质量直接决定航测成果绝对精度：

1. 布设密度：像控点密度不足，无法有效控制全测区高程精度，偏远区域、地形起伏区域误差偏大；大比例尺土石方测算需按 200–300m 间距布设，复杂区域加密布设。
2. 点位选择：像控点选在植被覆盖、松软地面、移动地物处，会导致实测坐标误差，或影像中无法清晰识别，影响空三平差精度。
3. 测量精度：像控点采用 RTK 测量时，观测时长不足、信号遮挡、多次测量差值过大，会导致像控点坐标误差，传递至 DEM 与土石方量计算中。

（三）内业数据处理对精度的影响

内业处理是误差控制的关键环节，处理流程不规范会产生系统性误差：

1. 空三加密：空三平差参数设置不合理、粗差剔除不彻底，会导致影像方位元素解算误差，直接影响点云与 DEM 精度。
2. 点云滤波：地表植被、杂物等非地形点云未彻底过滤，会抬高 DEM 高程，导致土石方量测算偏大；滤波过度则会丢失地形细节，造成测算偏差。
3. DEM 编辑：DEM 拼接、裁剪、平滑处理不当，或测算边界线绘制不准确，会直接导致土石方量计算误差。

（四）地形与环境因素对精度的影响

1. 地形起伏：山地、丘陵等地形起伏剧烈区域，高程变化大，航测影像匹配难度增加，DEM 拟合误差大于平坦区域。
2. 地表覆盖：茂密植被、农作物、积雪覆盖区域，影像无法穿透覆盖层，点云采集的为植被顶部高程，而非真实地面高程，导致土石方量测算误差显著。
3. 气象条件：航飞时大风、雾霾、强光逆光等气象条件，会

导致影像模糊、畸变，影响影像匹配与点云生成精度。

三、精度对比实验与分析

（一）实验概况

选取某工业园区场地平整项目作为实验区，测区面积1.2km²，地形以平坦区域为主，局部包含缓坡，地表有少量农作物覆盖，需测算场地开挖土石方量。实验分别采用无人机航测法、传统RTK散点法、三维激光扫描法三种方式开展测量，以三维激光扫描成果作为高精度参考值，对比分析无人机航测法的测算精度。

（二）实验实施

1. 无人机航测：选用多旋翼无人机，搭载高清航摄仪，地面分辨率0.08m，航向重叠度80%，旁向重叠度70%，布设像控点36个，RTK实测坐标，生成DEM分辨率0.1m，采用网格法计算土石方量。

2. 传统RTK散点法：按5m×5m网格布设高程点，人工实地采集，共采集高程点4800个，构建DEM计算土石方量。

3. 三维激光扫描法：采用地面三维激光扫描仪，全覆盖采集点云数据，生成高精度DEM，作为本次实验参考真值。

（三）实验结果与精度分析

随机抽取120个检查点，对比三种方法的高程误差，统计土石方量测算结果，具体数据如下：高程中误差方面，无人机航测法为±0.06m，传统RTK散点法为±0.09m，三维激光扫描法为±0.03m；土石方量误差方面，无人机航测法测算方量与参考值相对误差为0.82%，传统RTK散点法为1.56%。实验结果表明，无人机航测法高程精度与土石方量测算精度均优于传统RTK散点法，略低于三维激光扫描法，相对误差控制在1%以内，能满足《工程测量规范》（GB50026-2020）中土石方量测算精度要求，可替代传统测量方法用于工程实践。

（四）误差来源总结

结合实验数据，无人机航测土石方量计算主要误差为：像控点测量误差占比25%，航飞参数与影像质量误差占比30%，点云滤波与DEM编辑误差占比35%，地形植被覆盖误差占比10%，其中内业数据处理与航飞参数设置为最主要误差来源。

四、无人机航测土石方量计算精度优化策略

针对上述精度影响因素与误差来源，结合工程实践，提出以下针对性优化策略，有效提升测算精度：

（一）优化航飞参数设置，保障影像采集质量

1. 根据土石方测算精度要求合理设置地面分辨率，1:500大比例尺测算控制在0.05-0.1m，普通工程测算控制在0.1-0.2m，确保点云密度满足DEM精度需求。

2. 规范影像重叠度，平坦区域航向重叠度≥75%、旁向重叠度≥65%，地形起伏区域提高至航向80%-85%、旁向70%-75%，避免影像匹配漏洞。

3. 选择无风、晴朗、能见度高的时段航飞，采用防抖相机与稳定飞行平台，避免影像畸变，全程监控航飞姿态，确保POS数据精准。

（二）规范像控点布设与测量，夯实坐标基准

1. 遵循“均匀分布、边缘加密、地形突变区加密”原则布设像控点，平坦区域间距300m左右，复杂地形、缓坡区域间距200m以内，测区四角与中心必须布设。

2. 像控点选在视野开阔、无遮挡、地面坚实的固定地物处，避开植被、水域、松软地面，采用RTK静态测量模式，每个点观测≥3次，取平均值作为最终坐标，确保像控点平面误差≤±0.03m，高程误差≤±0.04m。

（三）精细化内业处理，严控数据处理误差

1. 空三加密阶段，严格检查影像匹配质量，手动剔除粗差点，进行区域网平差，确保平面残差≤0.1m，高程残差≤0.15m，不合格重新解算。

2. 点云滤波阶段，采用多级滤波算法，彻底剔除植被、建筑物、杂物等非地形点云，保留真实地面点云，对植被覆盖区域进行手动编辑修正。

3. DEM构建与编辑阶段，采用高密度点云生成DEM，精准绘制土石方测算边界线，对DEM漏洞、异常高程值进行手动修复，确保DEM贴合真实地形。

（四）针对性处理复杂地形与覆盖区域

1. 地形起伏剧烈区域，采用仿地飞行模式，保持无人机与地面相对高度恒定，增加航飞航线密度，提高影像覆盖度。

2. 植被覆盖区域，结合RTK实地补测地面高程点，修正DEM高程数据，或采用无人机激光雷达融合航测技术，穿透植被获取真实地面高程。

（五）完善精度验证流程

土石方量测算完成后，采用GPS-RTK随机抽检高程点，抽检点数不少于总点数的5%，重点检查地形突变区、植被覆盖区，计算高程中误差与方量相对误差，确保精度符合规范要求，误差超限及时返工优化。

五、工程应用价值与发展展望

（一）应用价值

无人机航测技术在土石方量计算中的应用，可大幅缩减外业作业时间，降低人工成本，相较于传统测量法效率提升60%以上，且实现地形全覆盖数据采集，避免人工漏测、错测问题，测算精度满足工程招投标、施工管控、竣工结算全流程需求，适用于建筑场地、矿山、道路、水利等各类土石方工程，具备显著的经济价值与实用价值。

（二）发展展望

随着无人机技术、摄影测量技术与人工智能技术的不断融合，无人机航测土石方量计算将朝着全自动、高精度、智能化、轻量化方向发展。人工智能算法将实现点云滤波、DEM编辑、土石方量解算的全自动化，减少人工干预；无人机与激光雷达、多

光谱传感器的融合应用，将彻底解决植被覆盖、复杂地形的精度难题；云端数据处理平台的普及，将实现内业处理效率的进一步提升，降低硬件门槛。

同时，行业技术规范与精度标准将不断完善，推动无人机航测土石方量测算的规范化、标准化，使其成为工程测绘领域的主流技术，为智慧工地、数字工程建设提供核心数据支撑，助力工程建设行业数字化转型。

六、结论

无人机航测技术作为高效、精准的土石方量测算手段，其测

算精度整体优于传统 RTK 散点测量法，能够满足各类工程土石方量测算的规范要求，是替代传统测量技术的优选方案。通过优化航飞参数、规范像控点布设、精细化内业处理、针对性处理复杂地形，可将土石方量测算相对误差控制在1% 以内，高程中误差控制在 $\pm 0.07\text{m}$ 以内，有效保障测算精度。

在实际工程应用中，需结合测区地形、地表覆盖与精度要求，制定完善的作业方案，严控各环节误差，充分发挥无人机航测技术的优势。随着技术的持续革新与行业标准的完善，无人机航测技术将在土石方工程中实现更广泛的应用，为工程测绘提质增效、工程建设高质量发展提供坚实保障，也成为测绘专业技术人员职称评审与专业能力提升的核心技术方向。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量规范 (GB50026-2020)[S]. 北京：中国计划出版社，2020.
- [2] 王占武. 无人机航测技术在土石方工程量计算中的精度控制研究 [J]. 测绘通报，2022(S1): 189-192.
- [3] 李志强，刘艳霞. 无人机航测土石方量精度影响因素及优化方法 [J]. 测绘与空间地理信息，2023, 46(08): 178-181.
- [4] 张磊. 无人机航测与传统测量在土石方量计算中的精度对比分析 [J]. 城市勘测，2021(03): 152-155.
- [5] 赵伟. 基于无人机航测的复杂地形土石方量计算精度研究 [J]. 矿山测量，2024, 52(01): 92-95.
- [6] 陈明长. 无人机航测 DEM 精度对土石方量计算的影响分析 [J]. 铁道勘察，2022, 48(02): 45-48.
- [7] 杨明强. 像控点布设对无人机航测土石方量精度的影响研究 [J]. 地理空间信息，2023, 21(05): 89-92.
- [8] 周志富. 基于无人机倾斜摄影的土石方量自动化计算及精度验证 [J]. 工程勘察，2021, 49(07): 65-69.
- [9] 吴迪. 无人机航测在矿山土石方量测算中的精度分析 [J]. 世界有色金属，2022(11): 123-125.
- [10] 陈刚. 低空无人机航测土石方量计算误差分析及修正方法 [J]. 测绘标准化，2023, 39(02): 72-75.

无人机倾斜摄影测量在地形图生产中的应用

梁国晨

阜新蒙古族自治县方寸测绘有限公司，辽宁 阜新 123100

DOI:10.61369/ERA.2026060015

摘 要： 在基础测绘、国土空间规划、工程建设等领域持续发展的背景下，大比例尺地形图生产对效率、精度、完整性的要求不断提升，传统测绘技术已难以适配现代化生产需求。无人机倾斜摄影测量作为新型低空测绘技术，凭借多视角影像获取、三维建模高效、外业工作量小等优势，逐步成为地形图生产的核心技术手段。本文结合测绘工程实践，阐述无人机倾斜摄影测量的技术原理与系统组成，梳理其在地形图生产中的全流程作业步骤，通过实际工程案例分析成果精度，探讨该技术的应用优势、现存问题及优化策略，为地形图生产的技术升级与规模化应用提供参考，助力测绘行业数字化、高效化转型。

关 键 词： 无人机；倾斜摄影测量；地形图生产；三维建模；精度分析；测绘应用

Application of UAV Oblique Photogrammetry in Topographic Map Production

Liang Guochen

Fangcun Surveying and Mapping Co., Ltd., Fuxin Mongolian Autonomous County, Fuxin, Liaoning 123100

Abstract： Against the backdrop of sustained advancements in foundational surveying, territorial spatial planning, and engineering construction, the production of large-scale topographic maps faces escalating demands for efficiency, precision, and completeness. Traditional surveying technologies have become increasingly inadequate for modern production requirements. As an emerging low-altitude surveying technology, drone oblique photogrammetry has progressively emerged as a core technical approach for topographic map production, leveraging advantages such as multi-angle image acquisition, efficient 3D modeling capabilities, and reduced fieldwork requirements. This paper integrates practical surveying engineering experience to elucidate the technical principles and system architecture of drone oblique photogrammetry, delineate its end-to-end workflow in topographic map production, analyze measurement accuracy through real-world case studies, and explore the technological advantages, existing challenges, and optimization strategies of this methodology. The findings aim to provide references for technological upgrades and large-scale application of topographic map production, thereby facilitating the digital and efficient transformation of the surveying industry.

Keywords： UAV; oblique photogrammetry; topographic map production; 3D modeling; accuracy analysis; surveying and mapping applications

引言

地形图是地理信息数据核心载体，用于国土调查等领域，其精度与质量影响后续工程决策科学性与可行性。传统地形图生产依赖全站仪等技术，存在外业人工采集多、效率低等问题。随着技术发展，无人机倾斜摄影测量技术出现，它搭载多镜头航摄仪，多视角获取地表影像、采集信息，结合软件生成实景三维模型、提取数据，实现地形图自动化、智能化生产。与传统技术相比，它可减少外业作业量、提升数据完整性等，适配大比例尺、复杂区域地形图生产需求。当前，实景三维中国建设推进，地形图生产急需技术革新。本文结合职称评审与工程实践要求，研究无人机倾斜摄影测量在地形图生产中的应用流程、精度控制与实践效果，为测绘从业者提供技术方案，推动该技术规范化、规模化应用。

一、无人机倾斜摄影测量技术概述

（一）技术原理

无人机倾斜摄影测量依托无人机低空飞行平台，搭载多视角

倾斜航摄仪，突破传统垂直摄影局限，从1个垂直和4个倾斜视角获取地面影像，覆盖地物顶部与侧面信息。它同步记录影像 POS 数据，结合空中三角测量等技术解算影像空间坐标，构建实景三维模型，基于模型提取地形要素与地物特征，完成地形图绘制与

作者简介：梁国晨（1997.09-），男，蒙古族，大专，初级职称，研究方向：工程测量，邮箱：2216965985@qq.com。

编辑。其核心原理基于摄影测量共线方程，关联影像与地面坐标，通过多视角影像冗余匹配提升点位解算精度，弥补传统垂直摄影缺陷，实现地物全维度信息采集，为高精度地形图生产提供数据支撑。

（二）系统组成

无人机倾斜摄影测量系统由飞行平台、航摄传感器、地面控制系统、数据处理系统四部分构成，协同完成数据采集与处理。飞行平台方面，多旋翼无人机起降灵活、低空飞行稳定、操作简便、成本低，适用于小范围、大比例尺测区；固定翼无人机飞行效率高，适用于大面积、长距离测区，可依测区面积和地形条件选择。航摄传感器核心是多镜头倾斜相机，有1个下视镜头和4个倾角45°的倾斜镜头，能同步获取多视角高清影像，部分高端设备搭载POS系统可提升解算精度。地面控制系统由地面站和遥控器组成，可规划航线、设置参数、监控状态、操控起降和拍摄，实现自动化航飞。数据处理系统包含专业摄影测量建模软件和地形图编辑软件，能完成影像预处理、三维建模、地形图编辑出图等全流程工作。

（三）技术优势

相较于传统测绘技术，无人机倾斜摄影测量在地形图生产中优势显著：一是数据采集高效，单架次可覆盖数平方公里测区，外业采集时间较传统RTK测量缩短超70%；二是信息采集全面，多视角影像能完整获取地物顶部、侧面及隐蔽区域信息，避免数据缺失；三是精度可控，合理布设像控点可满足1:500、1:1000大比例尺地形图精度要求；四是外业成本低，减少人工外业工作量，降低复杂地形作业风险；五是成果多元化，可同步生成实景三维模型、数字线划图（DLG）、数字高程模型（DEM）、数字正射影像（DOM）等多种测绘成果，适配不同应用场景。

二、无人机倾斜摄影测量生产地形图的作业流程

无人机倾斜摄影测量生产地形图分为外业数据采集、内业数据处理、成果检查与验收三大阶段，流程规范、逻辑性强，具体步骤如下：

（一）测区踏勘与前期准备

作业前需全面开展测区踏勘，收集测区地形地貌、植被覆盖、建筑密度、气象条件、空域审批等资料，明确地形图生产的比例尺、精度要求、坐标系统（一般采用2000国家大地坐标系，1985国家高程基准）。根据测区范围与地形条件，选择合适的无人机与航摄相机，规划飞行区域，避开禁飞区、高压线路、高大建筑物等危险区域，完成空域申请与飞行报备。同时，准备像控点靶标、RTK设备、电池、存储设备等作业工具，制定应急预案，确保作业安全。

（二）像控点布设与测量

像控点布设是提升地形图精度的关键，应遵循均匀分布、边缘加密、特征明显原则，选地面平整、视野开阔、无遮挡、易识别处（如道路交叉口等），避植被、水域、移动地物。1:500大比例尺地形图，像控点间距200–300m，测区边缘、拐角加密，确

保航带覆盖；平坦区可减少密度，复杂地形增加密度。布设完成后，用GPS–RTK实地测量，每个点测量不少于3次，取平均值作成果，保证精度符合规范。

（三）飞行航线规划与影像采集

通过地面控制系统规划自动化飞行航线，设置核心航摄参数：地面分辨率（GSD）按地形图比例尺确定，如1:500比例尺为0.05m，1:1000比例尺为0.1m；航向重叠度控制在75%–85%，旁向重叠度控制在65%–75%，以保证影像冗余，便于后续密集匹配；飞行高度依相机焦距和地面分辨率计算并保持稳定；飞行方向沿测区长轴，选光照足、能见度高且避开恶劣气象的时段作业。

航线规划完成后，无人机按预设航线自动飞行，多镜头同步采集多视角影像，实时传输POS与影像数据，作业人员全程监控飞行状态并及时处理异常。航飞结束后，检查影像清晰度、重叠度和覆盖范围，确保无漏拍、模糊、畸变等问题，不合格区域及时补飞。

（四）内业数据预处理

将采集的影像数据、POS数据导入专业处理软件，进行数据预处理：一是影像筛选，剔除模糊、曝光过度、畸变严重的影像，保证数据质量；二是参数设置，导入相机参数、像控点坐标、坐标系与高程基准；三是影像匹配，软件自动对多视角影像进行特征提取与匹配，构建自由网，初步解算影像方位元素。

（五）空中三角测量加密

空中三角测量（空三加密）是地形图生产核心步骤。先导入像控点坐标，对自由网平差解算，优化影像内外方位元素，剔除误差大的匹配点，提升整体解算精度。完成空三加密后，检查加密点残差，要求平面残差不大于0.1m、高程残差不大于0.15m，符合精度要求则进入三维建模环节；若残差超限，需重新检查像控点测量数据和影像质量，调整参数重新解算。

（六）实景三维模型构建与修复

基于空三加密成果，软件自动进行密集匹配，生成高密度点云数据，通过构建不规则三角网（TIN）、纹理映射，生成实景三维模型。模型生成后，进行人工检查与修复，处理模型漏洞、拉花、扭曲等问题，对植被茂密、建筑物密集区域进行精细化修复，确保模型完整、精准，还原真实地表形态。

（七）地形图要素提取与编辑

将三维模型导入地形图编辑软件（EPS、CASS），基于模型提取地形要素。一是提取房屋、道路等各类地物要素，精准绘制轮廓并标注属性；二是通过点云数据提取高程点、等高线，生成数字高程模型以还原地形；三是按制图规范对提取要素进行修正、接边、删减等编辑，补充遗漏、删除冗余、调整等高线走向，确保地形图符合要求。

（八）成果检查与验收

地形图成果完成后，进行内业检查与外业核查。内业检查要素完整性等；外业用GPS–RTK、全站仪抽检地物点、地形点坐标与高程，计算中误差验证精度。精度符合相关规范要求后，整理成果数据，完成验收与归档。

三、工程案例

（一）项目概况

某城镇更新改造项目，需生产 1:500 比例尺地形图，测区面积约 2.5km²，地形以平原为主，局部包含低矮丘陵，区域内建筑密集、道路纵横、植被覆盖较多，兼具建成区与农田区域。传统 RTK 测量需 15 人作业 20 天，效率低下，故采用无人机倾斜摄影测量技术开展生产，要求平面位置中误差 ≤ ± 0.15m，高程中误差 ≤ ± 0.20m，坐标系采用 CGCS2000，高程基准为 1985 国家高程基准。

（二）作业实施

1. 设备选择：选用大疆 M300 RTK 多旋翼无人机，搭载五镜头倾斜相机，地面分辨率设为 0.05m；用 GPS - RTK 进行像控点测量与成果核查。
2. 像控点布设：布设 42 个像控点，均匀分布于测区，边缘与拐角处加密，间距约 250m，全部 RTK 实测确保点位精度。
3. 航飞参数设置：航向重叠度 80%，旁向重叠度 70%，飞行高度 75m，航飞 4 小时完成全测区影像采集，无漏拍、模糊问题。
4. 数据处理：用 ContextCapture 软件进行空三加密与三维建模，EPS 软件进行地形图要素提取与编辑，内业处理耗时 5 天。

（三）精度分析

项目完成后，随机抽取 60 个检查点（地物点 35 个、地形点 25 个），采用 RTK 实地测量，对比地形图坐标，计算中误差：

- 平面位置中误差：± 0.12m，小于规范限差 ± 0.15m；
- 高程中误差：± 0.16m，小于规范限差 ± 0.20m。

成果精度完全满足 1:500 大比例尺地形图生产要求，且作业总时长仅 7 天（外业 2 天 + 内业 5 天），较传统测量方式效率提升 75%，大幅降低人工成本与作业周期。

（四）应用效果

本项目通过无人机倾斜摄影测量生产的地形图要素完整、精度达标、可视化好，清晰还原测区地物地貌与地形起伏，为城镇更新改造的规划设计、拆迁核算、工程施工提供精准数据支撑。同时，同步生成的实景三维模型、DOM、DEM 成果可直接用于国土空间规划、三维城市建设等后续工作，实现一测多用，提升了测绘成果应用价值。

四、无人机倾斜摄影测量在地形图生产中的优势与现存问题

（一）应用优势

1. 作业效率大幅提升：自动化航飞采集替代人工外业测量，单架次覆盖广，缩短生产周期，适配大面积、大比例尺地形图生产，解决传统技术痛点。
2. 数据完整性与三维性强：多视角影像采集地物信息，避免数据缺失，实景三维模型还原地表，便于要素提取，提升成果质量。
3. 成本与风险可控：减少外业人员，降低成本，复杂危险区

域无需实地作业，规避风险，适配特殊区域测图。

4. 成果多元化：一次作业同步生成多种成果，满足不同行业需求，实现高效利用，符合发展趋势。

5. 精度适配性高：合理布设像控点、优化航飞参数，可满足不同比例尺地形图精度要求，灵活适配工程项目需求。

（二）现存问题

1. 植被覆盖区域精度受限：影像难穿透植被获取地面真实高程，点云数据混杂植被信息，导致地形高程精度偏差，需外业补测。
2. 模型精细化程度不足：建筑物密集区、狭窄街巷、高层建筑物底部易出现模型漏洞等问题，需大量人工修复，增加内业工作量。
3. 气象条件影响较大：无人机抗风、抗雾能力弱，恶劣天气无法作业，易延误工期。
4. 数据处理要求高：三维建模与空三加密需高性能硬件，软件操作专业性强，对人员技术水平要求高，缺专业人员易影响成果质量。
5. 像控点布设成本较高：大比例尺、高精度地形图生产需大量像控点，外业测量工作量大，偏远区域布设难度大。

五、优化策略与发展展望

（一）优化策略

1. 植被区域精度优化：采用激光雷达与倾斜摄影融合技术，用激光点云穿透植被获取地面高程，结合多视角影像提升地形精度；对植被茂密区，增加像控点密度并开展局部外业补测。
2. 模型质量提升：优化航飞参数提高影像重叠度，避免建筑物遮挡；用人工智能算法自动修复模型漏洞，减少人工干预；加强空三加密质量管控，精准剔除误差点提升解算精度。
3. 降低气象影响：选用高性能抗风无人机并配备高清防抖相机，选择适宜气象时段作业；建立气象监测机制，提前规划航飞计划，避免天气延误工期。
4. 提升技术人员素养：开展专业技术培训，提升作业人员在航线规划、数据处理、模型修复、地形图编辑方面的专业能力，规范作业流程保障成果质量。
5. 推广免像控技术：依托高精度 POS 系统、PPK 后差分技术，推广免像控或少量像控作业模式，减少外业像控点布设工作量，提升作业效率。

（二）发展展望

随着实景三维中国、新型基础测绘建设推进，无人机倾斜摄影测量技术将朝智能化、高精度、低成本、多元化发展。未来，人工智能等技术融入数据处理可实现全自动化，提升生产效率；无人机与激光雷达等融合能拓展应用场景；轻量化三维模型与 GIS 系统结合可助力智慧城市等。同时，行业规范与技术标准不断完善，推动该技术规范化、标准化应用，逐步成为主流技术，为测绘业高质量发展提供核心支撑。

六、结论

无人机倾斜摄影测量技术优势明显，能解决传统地形图生产的诸多问题，满足大比例尺地形图精度要求，适配多种地形，应用前景广阔。实际应用时需把控全流程质量，对特殊区域优化以

保障精度。随着技术革新完善，该技术将推动地形图生产数字化、智能化转型，提升测绘效率与成果质量，为测绘地理信息事业注入新动能。在职称评审和工程实践中，其应用体现测绘技术现代化水平，掌握作业流程与精度控制方法是测绘从业者必备技能，也为工程项目实施提供可靠技术保障。

参考文献

[1] 徐洋林，林永成. 无人机倾斜摄影测量在大比例尺地形图测图中的精度分析及应用研究 [J]. 测绘通报，2021(S1):123-126.

[2] 成云端. 无人机倾斜摄影测量在大比例尺地形图测图中的应用研究 [J]. 科技创新与应用，2024(03):85-88.

[3] 张启鹏. 无人机倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测图中的优化应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息，2025, 48(36):112-115.

[4] 丁钰洋，王天颖，张茂顺. 基于无人机倾斜摄影的像控点布设对1：500地形图精度的影响 [J]. 地理空间信息，2025, 23(01):78-81.

[5] 孙伟. 基于倾斜摄影测量技术的大比例尺地形图测绘 [J]. 测绘标准化，2025, 41(02):67-70.

[6] 胡丹丹，朱悦阳，刘杨. 仿地飞行+倾斜摄影在高山地区1：500地形图制作中的应用 [J]. 测绘通报，2025(S1):92-95.

[7] 李洋. 基于消费级无人机倾斜摄影的1:500大比例尺数字地形图生产探讨 [J]. 地矿测绘，2019, 2(05):94-97.

[8] 陈宗富，马敏. 无人机倾斜摄影测量在地形图生产中的应用及精度控制 [J]. 城市勘测，2023(04):156-159.

[9] 吴捷. 无人机倾斜摄影测量在大比例尺地形图测图中的应用 [J]. 江西建材，2022(07):107-108+111.

[10] 中华人民共和国自然资源部. 低空数字航空摄影测量外业规范 (CH/Z 3004-2010)[S]. 北京：测绘出版社，2010.

分析 BIM 技术在市政路桥施工中的应用

郑培炜

广东虹光建设发展有限公司，广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2026060017

摘 要： 文章旨在系统探讨 BIM 技术在路桥工程设计与施工管理中的综合应用与优化路径。研究的核心目的是阐明 BIM 技术通过其可视化、模拟性与可出图性等核心优势，如何深刻改变传统工程管理模式，进而在具体施工环节中实现效率、质量与安全性的显著提升。在此基础上，文章进一步从人才培养与数据治理两个维度，提出支撑 BIM 技术深度应用的策略性优化措施，以期为推动路桥工程建设的数字化、精细化转型提供理论参考与实践指引。

关 键 词： BIM 技术；市政路桥施工；应用

Analysis of the Application of BIM Technology in Municipal Road and Bridge Construction

Zheng Peiwei

Guangdong Hongguang Construction Development Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper aims to systematically explore the comprehensive application and optimization paths of BIM technology in the design and construction management of road and bridge projects. The core objective of the study is to elucidate how BIM technology, through its key advantages such as visualization, simulation, and drawable capabilities, profoundly transforms traditional engineering management models, thereby achieving significant improvements in efficiency, quality, and safety during specific construction phases. Building on this foundation, the paper further proposes strategic optimization measures to support the in-depth application of BIM technology from the perspectives of talent cultivation and data governance, with the aim of providing theoretical references and practical guidance for promoting the digital and refined transformation of road and bridge engineering construction.

Keywords： BIM technology; municipal road and bridge construction; application

引言

建筑信息模型（BIM）技术以其强大的信息集成、三维可视与过程模拟能力，为破解信息断层、协同困难、资源浪费等问题提供了革命性工具。文章将深入剖析 BIM 技术在路桥工程中的应用价值，详细阐述其在设计优化、施工模拟、成本管控及专项管理等方面的具体实践，并探讨保障其有效实施的配套措施，以期为行业实践提供系统的理论框架与应用借鉴，推动路桥工程管理向智能化、信息化方向迈进。

一、路桥施工管理中应用 BIM 技术的优势

（一）可视化

传统的路桥工程结构组成复杂，仅依赖平面施工图纸往往难以全面把握其三维空间布置与构造细节，这给现场施工组织与管理带来一定困难。借助 BIM 技术，能够显著提升桥梁建造过程的可视化程度，使桥墩、梁体、支座等各构件的几何形态、空间位置及衔接关系更加清晰直观，从而帮助工程人员系统理解整体结构，增强桥梁在力学与形态上的完整性。实现模型可视化后，不同构件之间的逻辑关联与协同作用得以凸显，有利于优化受力传递路径，确保构件在整体系统中发挥应有性能，进而提升材料利

用效率和结构综合性能。可视化设计手段也有助于梳理和表达设计思路，使方案展示更为直观，易于发现潜在问题，从而提升设计方案的合理性与实施可行性，为桥梁工程从设计到施工的顺利推进提供可靠保障。

（二）模拟性

基于 BIM 技术所构建的路桥三维模型，具备高度仿真与动态模拟的功能，能够对桥梁实际建设及运营中的多种工况进行真实还原与预测分析。该类模拟应用尤其集中于设计阶段，通过模拟桥梁在荷载、温度、振动等外部作用下的响应，可系统评估设计方案的结构可靠性与安全储备，确保各细部构造在设计层面即满足规范与功能要求，从而提高施工图纸的准确性与可实施性，减

少后续修改与返工。此外，依托 BIM 模型进行施工过程模拟，能够直观展现材料运输、构件吊装、工序衔接等关键环节，有助于提前识别施工冲突与资源分配问题，实现对工程造价更为精准的前期控制^[1]。

（三）可出图性

在路桥设计领域，应用 BIM 技术能够系统性地整合设计全过程的信息与数据，从而有效确保桥梁设计成果的完整性与一致性。设计人员可依托 BIM 平台，便捷地提取和调用桥梁各专业、各构件的设计信息，通过软件将集成的三维数字化模型进行渲染与输出。这一过程不仅能够生动展现桥梁的整体形态与细部构造，还能依据模型自动生成符合制图标准的平面、立面、剖面及节点大样等多类图纸，显著提高了出图的效率与精度。最终，基于统一模型所衍生的图纸之间具备高度的关联性、协调性，形成逻辑清晰、表达准确、易于校审的成套设计文件，为后续施工与验收提供了可靠依据。

二、BIM 技术在市政路桥施工中的应用

（一）建立路桥工程 BIM 模型

在市政路桥工程的施工阶段，BIM 技术可有效支持从三维建模到全过程管理的各项任务。通过构建路桥工程的 BIM 模型，能够将设计图纸、施工组织方案、材料设备清单、工期进度安排等多源信息集成至统一的三维数字化平台中。这种集成方式使项目管理人员得以从立体视角全面把握工程的整体布局、构件关系及资源分布，从而提升现场作业的协调性与执行效率，减少因信息孤岛导致的材料浪费或工序冲突，辅助实现设计与施工方案的进一步优化，达到节约成本与保障质量的双重目标。此外，依托 BIM 模型的可更新性与信息联动特点，在施工阶段，基于已构建的可视化 BIM 模型，项目团队可进行施工交底、技术方案会审、复杂工艺演示，使参建各方对设计意图和施工要求形成统一、直观的认识^[2]。

（二）精准模拟施工现场环境

在市政路桥工程中，施工现场环境复杂多变。利用 BIM 技术，可构建融入实时地理信息（GIS）、周边建筑及地下管线数据的高精度融合模型，实现对实际施工环境进行动态和精准的仿真模拟。在模拟过程中，系统可综合考虑气象变化、地质地形、周边交通及环境制约等多种现场因素，并支持对不同施工方案进行多情景推演与比选。此外，模型还能对施工机械的布置与调度、人员作业区域的划分以及多工种协同安排进行仿真，帮助管理人员直观识别工序衔接与空间冲突等潜在问题。借助可视化手段，模拟结果能以三维动画或交互视图等形式清晰展示，便于各方理解施工流程与关键环节。基于这些仿真分析，项目团队可以提前预见施工难点、优化资源调配，有效防范现场冲突与安全风险，从而在控制成本的同时提升工程品质与现场安全水平。

（三）复杂节点施工方案模拟

针对桥梁支座、钢混结合段、大型互通匝道等复杂节点，传统的二维交底难以清晰表达。通过建立精细化（如 LOD400 以

上）的 BIM 模型，可专项模拟因结构复杂、工序交叉而面临协调难度大、安全隐患多等挑战。通过 BIM 技术建立精细化三维模型，能够真实还原节点结构与周边环境，进而对不同工况下的施工流程进行动态仿真，分析各施工环节的可操作性及相互影响。在模拟过程中，可综合考虑人员配置、机械运行、材料堆放等现场实际因素，通过多方案对比与优化，形成安全可靠、经济合理的施工组织设计。模拟完成后，还可结合虚拟现实技术，使施工、管理及监理人员沉浸式体验施工全过程，提升对方案的理解与执行准确度。

（四）工程算量与成本管理

1. 在设计阶段

BIM 技术的核心在于其作为一个集成化的信息处理平台，能够通过对工程项目各类数据的分析与整合，实现三维模型的构建与施工全过程的虚拟演示。在设计初期，首要步骤是依据设计规范与标准，向系统中输入准确、格式统一的基本参数。为提升效率，可借助相关辅助插件自动载入预设数据模板，从而快速生成初步模型框架。在此基础上，设计人员可基于 BIM 平台对模型中各项参数进行精细化修改与动态调整，通过持续的优化迭代，使模型不断贴近实际工程需求。这一参数化驱动的设计过程，有助于在设计阶段实现对施工质量目标的前置管控与动态跟踪^[3]。

2. 在施工阶段

BIM 技术在施工过程中，能够支撑更为精细的进度规划与动态施工推演，从而在确保工程品质的同时，有效压缩整体工期，并促进资源的优化配置与利用。通过集成施工时间与工序逻辑，BIM 模型可生成可视化的进度计划，实现施工过程的逐阶段仿真。这有助于识别关键路径、预见工序冲突，并及时进行调整优化。同时，模型可关联人力、材料、机械等资源信息，辅助进行科学合理的资源调度，减少闲置与浪费。基于 BIM 的施工管理与协调，不仅能提升现场作业效率，也为项目按期、高质量交付提供了有力保障。

3. 精确计算工程量和成本

BIM 技术能够实现工程量与造价的精准核算，显著提升统计效率与数据准确度，同时支持物资采购与供应链流程的自动化管理，减少人为错误并有效控制物料损耗。借助该技术，还可以对各阶段工程进展与成本支出进行实时追踪与监控，从而增强项目计划的动态适应性。基于前期活动积累的实时数据，可及时分析工程量与成本的实际偏差，并据此灵活调整后续工作安排，使项目全过程管理更加精细化、科学化。

（五）在物料控制方面的应用

在路桥工程建设中，材料管理是影响项目总投资与最终实体品质的核心要素之一。从成本控制维度分析，BIM 技术能够系统地对各类工程材料的数据，如型号、价格、技术参数及供应商信息等进行结构化归档与集成管理。基于 BIM 平台构建的材料管控系统，可实现物料成本、规格标准与质量要求等信息的自动关联与实时同步，从而在采购与投入环节确保材料符合设计与施工要求，有效避免因信息滞后或误差导致的超额采购与资金浪费。在工程质量保障方面，BIM 技术支持依据材料特性（如钢材、混凝

土、预应力材料等)实施差异化的储运与维护策略,通过模拟堆放条件、环境影响因素等,降低因保存不当引起的性能下降或损坏风险。同时,依托 BIM 系统的流程化管控机制,可不断优化材料计划、进场验收、领用发放及库存盘点等环节,形成闭环管理,显著减少施工过程中的材料损耗与相关经济损失,提升项目整体物资管理水平^[4]。

（六）管线设计

在城市地下基础设施规划中,道路下方的排水与综合管网设计至关重要,直接关系到城市水资源管理、污染防治与防灾减灾能力。当前,部分区域面临降雨内涝、生活污水收集处理效率低下及既有管线老化破损等问题。在传统设计与施工过程中,常因技术手段局限导致管线布置冲突、施工反复等问题,不仅影响工程推进效率,也增加了不必要的成本投入与资源消耗。通过引入 BIM 技术,可实现管线系统的三维协同设计与整体优化。该技术能够在设计阶段对管道排布、坡度、管径及接口等进行数字化模拟与冲突检测,主动识别潜在问题,并将相关信息反馈至设计团队进行审核调整。这一过程显著减少了因设计错漏或施工返工造成的路段重复作业,从而有效节约设计与施工资源,控制工程成本,提升管线系统的可靠性与建设效益。

三、BIM 技术在应用上的优化措施

（一）培养专业人才

BIM 技术的深度应用与持续优化,离不开专业化人才队伍的支撑。因此,构建与行业发展需求相匹配的人才培养体系显得尤为重要。企业或相关机构应制定结构清晰、内容全面的培训计划,系统性地开展面向内部员工及外部合作人员的 BIM 技术能力提升项目。同时,通过明确职业发展路径与各岗位的技能要求,帮助从业人员清晰规划个人成长方向,增强学习的针对性和主动性。此外,积极倡导团队协作与知识共享,鼓励成员交流经验、整合资源,在集体智慧中形成对 BIM 应用的共识,从而提升团队整体技术素养。

在高等教育层面,院校应当将 BIM 技术纳入教学体系,涵盖从本科到研究生的不同阶段,为社会输送具备扎实理论基础与实践能力的复合型人才。通过多层次的课程设置与产学研结合,帮助学生建立系统化、专业化的知识结构。

（二）建立数据管理机制

要推动 BIM 技术的有效应用与持续优化,仅依靠引入新技术或改进流程是不够的,还必须构建一套系统化、规范化的数据管理体系,为 BIM 在全生命周期的应用提供可靠支撑。应明确制定数据采集、处理、存储与维护的相关标准,确保数据在工程设计、施工及运维各阶段的一致性与可用性,进而充分发挥数据在决策支持与过程管理中的作用^[5]。

企业或组织需建立有序的数据共享机制,在保障数据安全与合规的前提下,使项目参与方能够及时获取所需信息。该机制应严格遵循数据隐私保护与知识产权管理政策,防止信息泄露与滥用。构建完善的 BIM 数据管理体系,有助于提升数据的准确性、完整性与安全性,从而增强 BIM 应用的实效。此外,还应积极推进数据标准化与互操作性建设,健全数据转换与集成流程,并为相关人员提供持续的数据管理培训,全面提升组织的数据治理能力。

四、结束语

综上所述,文章系统地论证了 BIM 技术在提升路桥工程全流程管理效能方面的核心价值与应用策略。通过构建集成化的三维信息模型,BIM 技术实现了从设计可视化、施工过程动态模拟到工程量与成本的精准管控,并有效应用于复杂节点施工、物料供应链优化及地下管线协同设计等关键环节。为充分发挥其潜力,必须同步推进专业化人才梯队建设和规范化数据管理机制,形成技术应用与组织能力相辅相成的良性发展格局。未来可进一步关注 BIM 与物联网、人工智能等新兴技术的融合路径,探索基于 BIM 的智能运维与全生命周期资产管理系统,以实现工程价值在运营阶段的持续释放。

参考文献

- [1] 吴晓青,陈巍.关于 BIM 技术在市政路桥施工中的应用[J].中国住宅设施,2025(3):239-241.
- [2] 周芳仲.探究 BIM 技术在市政路桥施工中的应用[J].建筑与装饰,2024(18):88-90.
- [3] 张松韬.BIM 技术在市政路桥施工中的应用研究[J].石油化工建设,2023,45(1):106-108.
- [4] 杨威.探讨 BIM 技术在市政路桥施工中的应用[J].科技创新导报,2022,19(23):164-166.
- [5] 万长青.BIM 技术在市政路桥施工中的应用及难点分析[J].中国科技投资,2019(18):45.

智能制造环境下车辆装配精度在线检测研究

葛晶

正德职业技术学院，江苏 南京 211106

DOI:10.61369/ERA.2026060019

摘 要： 车辆装配精度在线检测以智能制造生产线高节拍、高精度需求为核心，整合机器视觉、深度学习、数字孪生等技术构建完整检测体系。检测过程需先搭建适配场景的深度学习视觉检测系统，完成图像采集与预处理，再通过模型训练与亚像素级边缘定位提升检测精度，随后实施系统多维度校准与误差动态调控保障可靠性，最终依托数字孪生技术实现装配精度的实时映射、动态监测及全场景仿真优化，有效解决传统人工检测效率低、偏差大的问题，推动车辆装配检测向高效化、精准化、智能化转型。

关 键 词： 智能制造；车辆装配精度；在线检测

Research on Online Detection of Vehicle Assembly Accuracy in the Smart Manufacturing Environment

Ge Jing

Zhengde Polytechnic College, Nanjing, Jiangsu 211106

Abstract： Online detection of vehicle assembly accuracy centers on the high-tempo and high-precision requirements of smart manufacturing production lines, integrating technologies such as machine vision, deep learning, and digital twins to construct a comprehensive detection system. The detection process begins with the establishment of a deep learning-based visual detection system tailored to the specific scenario, encompassing image acquisition and preprocessing. Subsequently, detection accuracy is enhanced through model training and sub-pixel edge localization. System reliability is ensured by implementing multi-dimensional calibration and dynamic error adjustment. Ultimately, relying on digital twin technology, real-time mapping, dynamic monitoring, and full-scenario simulation optimization of assembly accuracy are achieved, effectively addressing the issues of low efficiency and significant deviations inherent in traditional manual detection methods. This drives the transformation of vehicle assembly detection towards greater efficiency, precision, and intelligence.

Keywords： smart manufacturing; vehicle assembly accuracy; online detection

引言

当前传统人工检测模式难以满足生产线高节拍、高精度的检测要求，现有视觉检测系统存在精度不足、易受工况干扰、误差调控不及时等问题。为破解上述困境，提升车辆装配检测的效率与可靠性，研究围绕车辆装配场景构建适配的深度学习视觉检测系统，优化图像采集与模型训练流程，建立多维度校准与动态误差调控机制，实现检测技术的优化升级，满足实际生产中的检测需求。

一、机器视觉在线检测法

（一）面向车辆装配场景的深度学习视觉检测系统构建与多工况图像采集

系统搭建人员首先需构建适配汽车总装车间复杂环境的深度学习视觉检测系统，核心在于整合高分辨率工业面阵相机、多角度环形补光模组与高性能嵌入式处理单元，并引入经过轻量化改进的YOLOv8目标检测模型，在保证检测精度的前提下最大限度

提升推理速度，以满足智能制造生产线每分钟4-6辆的高节拍生产要求。现场调试人员需结合发动机舱、底盘、车门等不同关键装配工位的空间布局与检测范围要求，反复校准相机的安装倾角与垂直高度，确保镜头视场能够完整覆盖目标检测区域，同时有效规避装配过程中机械臂、零部件移动对成像造成的瞬时遮挡。同时对环形补光模组的光照强度与照射角度进行多轮迭代调试，通过漫反射补光技术最大限度削弱金属零部件表面的镜面反光、车间顶部照明造成的明暗不均以及设备阴影等干扰因素，保障采

集图像的灰度值分布均匀且对比度适宜。

在图像采集阶段，数据采集人员需同步覆盖燃油车、纯电动车、混合动力车等不同车型以及正常装配、轻微偏差、严重缺陷等多种工况，全面采集包含螺栓漏装、连接件错位、装配间隙超标、线束插接不到位等典型装配缺陷的样本图像。随后将所有采集到的原始图像批量导入 Neuro-T 自动深度学习平台开展标准化预处理操作，先通过灰度化处理将三通道彩色图像转换为单通道灰度图像以降低计算量，再采用 5×5 高斯滤波算法平滑图像并消除椒盐噪声与高斯噪声干扰，进而运用动态感兴趣区域（DynamicROI）技术自动锁定螺栓孔、连接件边缘等关键检测部位，有效屏蔽车身钣金、背景设备等无关区域的干扰，从而大幅提升后续模型推理的速度与精度^[1]。

（二）基于改进 YOLOv8 的模型训练与亚像素级边缘精准检测技术实现

在完成图像采集与标准化预处理工作后，算法工程师需依托 Neuro-T 深度学习平台开展模型训练与优化工作，核心在于将改进后的 YOLOv8 目标检测模型与多项式插值亚像素边缘检测算法深度融合，从而突破传统像素级检测技术的精度瓶颈，满足汽车装配行业对毫米级检测精度的严苛要求。算法工程师首先需使用专业标注工具对预处理后的所有图像进行像素级精准标注，清晰标注出螺栓、螺母、线束插头、钣金连接件等目标对象的边界框位置、几何尺寸以及对应的标准装配参数，随后按照 8:2 的比例将标注完成的高质量数据集随机划分为训练集与验证集，将训练集导入经过网络结构优化的 YOLOv8 模型中进行多轮迭代训练。

模型训练完成并通过验证集精度测试后，算法工程师需引入亚像素边缘检测算法对目标对象的边缘进行亚毫米级精准定位，首先通过 3×3 Sobel 算子计算图像在水平与垂直方向的梯度幅值与梯度方向，从而准确识别出图像中灰度变化最为剧烈的边缘区域，随后采用非极大值抑制算法对初步检测到的边缘点进行细化处理，筛选出连续且单像素宽的边缘轮廓，最后利用二次多项式插值法对边缘点的梯度幅值进行拟合，通过求解拟合抛物线的顶点坐标得到精确的亚像素偏移量，最终将系统的边缘检测精度提升至 0.1 个像素级别，完全满足汽车装配行业对间隙、面差等关键参数的检测要求^[2]。

二、视觉检测系统的校准与误差动态调控

（一）实施系统多维度校准以保障检测基准精准

技术运维人员必须定期对机器视觉检测系统开展全维度标定校验工作，这是保障汽车装配精度检测结果可靠性与一致性的核心前提，需综合运用相机内参标定、空间几何校准与灰度响应校准三类技术手段形成协同校验体系。相机内参标定环节采用行业通用的张正友标定法，技术人员将高精度棋盘格标定板依次放置在检测区域内的不同空间位置与倾斜角度，采集至少 20 帧不同姿态的标定图像，通过非线性优化算法求解相机的内部参数矩阵（包含焦距、主点坐标、像素物理尺寸）与畸变系数，从根源上消除相机镜头径向畸变与切向畸变带来的系统性检测偏差。

空间几何校准环节以整车装配的设计基准坐标系为唯一参考，在检测工位的固定位置布设不少于 6 个高精度标准标记点，视觉系统自动采集各标记点的图像坐标并与理论设计坐标进行逐点比对，通过坐标变换矩阵修正系统的空间几何偏移误差，确保视觉检测坐标系与整车装配坐标系实现毫米级精准重合。灰度响应校准环节使用经过计量认证的标准灰度卡，采集车间不同时段、不同光照强度下的灰度响应数据，建立环境光照强度与图像灰度值之间的非线性映射关系，有效规避车间照明波动、设备老化导致的灰度值漂移对检测精度的不利影响^[3]。

（二）构建工业大数据驱动的运行偏差动态自适应调控机制

构建基于工业大数据分析的运行偏差动态自适应调控机制，以应对智能制造环境下车辆装配工况复杂多变、零部件批次质量波动、环境参数实时变化等多重因素带来的检测精度挑战，其核心在于将迁移学习理论与实时数据反馈闭环深度融合，实现系统偏差的自主感知与智能调整。算法工程师需搭建多源异构数据融合平台，实时采集视觉检测系统的运行数据、生产线的装配工艺参数、车间的环境温湿度数据以及零部件的批次质量信息，构建覆盖全生产要素的动态数据库，通过相关性分析与机器学习算法挖掘系统偏差产生的内在规律，精准识别出环境温度变化、零部件表面粗糙度差异、生产线振动等影响检测精度的关键变量。

针对这些关键影响因素，算法工程师引入迁移学习中的领域自适应算法，将在大量标注数据上训练完成的基础检测模型与新工况下采集的少量标注样本相结合，通过微调模型的高层特征提取网络快速适配新的装配场景与零部件类型，无需从零开始重新训练模型即可实现检测精度的快速恢复，大幅降低模型迭代的时间成本与数据标注成本。

三、数字孪生与全场景模拟仿真

（一）依托数字孪生技术构建车辆装配精度在线检测体系

（1）搭建高保真数字孪生模型，夯实在线检测基础

检测人员需以车辆装配线物理实体为核心，依托数字孪生三维模型（物理实体、虚拟模型、数据链路、服务支撑、孪生应用）理论，系统搭建高保真虚拟孪生体，为在线检测工作筑牢基础。首先，检测人员要全面梳理车辆装配线的核心构成，涵盖零部件输送单元、装配工位、检测传感器等所有与精度相关的物理组件，明确各组件的几何参数、运动特性及约束关系，确保虚拟模型与物理实体的几何一致性和行为一致性。其次，检测人员需融合边缘计算技术与数字孪生建模方法，将装配过程中的实时数据通过工业物联网（IIoT）终端采集并传输至虚拟模型，实现数据驱动下的模型动态更新，打破传统静态模型的局限性。同时，检测人员要运用模型校准算法，对比虚拟模型仿真结果与物理实体实测数据，不断修正模型参数，降低建模误差，确保虚拟孪生体能够精准复刻物理装配过程中的精度变化规律，为后续在线检测提供可靠的模型支撑^[4]。

（2）基于数字孪生模型实现装配精度实时映射与动态监测

技术团队首先需搭建物理装配实体与数字孪生虚拟模型之间

的双向实时数据交互通道，通过在各关键装配工位分布式部署高精度工业视觉传感器、激光位移测距仪与扭矩采集终端，同步采集零部件装配间隙、螺栓拧紧力矩、车身三维姿态等与装配几何精度直接相关的多维度数据，所有原始数据经边缘计算节点完成滤波降噪与格式标准化预处理后，通过工业以太网高速传输至云端数字孪生系统，从而保证虚拟模型能够以毫秒级延迟同步复现物理装配现场的每一个动态细节。

在此基础上，算法工程师运用数字孪生驱动的多维度实时监测算法，对虚拟模型中映射的所有装配精度参数进行连续动态分析与异常值识别，一旦系统识别到虚拟模型中映射的精度偏差超出预先设定的合格阈值，将立即触发分级声光预警机制，并通过数据溯源算法反向定位物理装配过程中导致偏差产生的具体工序与设备节点，为现场工程师及时介入调整提供精准的技术指引。

（二）基于全场景数字孪生仿真的车辆装配精度在线检测流程优化

（1）多体动力学与有限元耦合仿真模拟及检测难点预判

算法工程师需基于已构建的高精度数字孪生虚拟模型，综合运用多体动力学仿真理论与有限元分析方法，开展车辆装配全流程、全场景的数字化仿真模拟，全面预判在线检测过程中可能遇到的各类技术难点与潜在风险。在仿真建模阶段，技术人员需明确仿真模拟的核心覆盖范围，不仅要包含零部件输送、精准定位、面差贴合、扭矩紧固等所有关键装配工序，还要充分融入实际生产过程中存在的各类不确定性因素，如零部件加工尺寸公差波动、装配工具的系统精度误差、车间环境温度湿度变化以及生产线振动干扰等，从而构建高度还原真实生产场景的数字化仿真环境，确保仿真结果的真实性与工程应用价值。

（2）通过仿真迭代优化检测策略，提升在线检测效能

首先，检测人员要针对仿真过程中发现的检测难点和干扰因素，优化检测点位的布置方案，结合装配工序的特点，将检测点位设置在精度影响最大、偏差最易出现的关键位置，同时调整传感器的安装角度和检测参数，提升传感器的数据采集精度，减少信号干扰对检测结果的影响。其次，检测人员需基于仿真数据优化检测算法，融合机器视觉识别技术与深度学习算法，对采集到的装配精度数据进行精准分析，提升偏差识别的准确率和速度，同时简化检测流程，减少不必要的检测步骤，缩短检测周期，满足智能制造环境下高效检测的需求。此外，检测人员要建立仿真迭代优化闭环，将实际在线检测过程中获取的数据反馈至仿真系统，不断修正仿真参数、完善仿真场景，使仿真结果更贴合实际生产情况，进而基于优化后的仿真结果持续改进检测策略。

四、结束语

总体来说，车辆装配精度在线检测体系通过多技术融合与全流程优化，实现了检测模式从被动排查向主动监测的转变，有效提升了装配检测的精度、效率与稳定性，为智能制造背景下的车辆装配质量管控提供了可靠支撑。该体系的应用不仅解决了传统检测模式的核心痛点，更构建了“采集、检测、校准、优化”的闭环机制，为后续同类产品装配检测提供了可借鉴的技术思路。未来可进一步深化数字孪生与多技术的融合应用，优化仿真场景的真实性与模型迭代效率，推动车辆装配精度在线检测技术向更高精度、更全场景、更智能化方向发展。

参考文献

[1] 王平让, 韩军祥, 邵景松, 等. 车辆荷载下预制装配式箱涵受力特征分析 [J]. 建筑科技, 2026, 10(01): 26-30.
[2] 齐振国, 侯秀娟. 轨道车辆车体多层次结构装配偏差传递分析方法研究 [J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(04): 81-88.
[3] 王宣. 装配式建筑预制构件配送车辆调度研究 [J]. 中国储运, 2025, (02): 110-111. DOI: 10.16301/j.cnki.cn12-1204/t.2025.02.079.
[4] 苟建议, 严猛, 何苗苗. 预制装配式桥梁下部结构在车辆撞击下的损伤行为研究 [J]. 公路, 2024, 69(12): 190-195.

高边坡生态加筋挡土墙施工工艺与变形监测

董浪军

上海飞滕建设发展有限公司，上海 201907

DOI:10.61369/ERA.2026060021

摘 要： 本文以越州 ±800 千伏换流站工程四通一平项目为背景，针对站区高填方边坡支护工程，系统阐述生态加筋挡土墙的完整施工工艺体系与全过程变形监测技术。详细分析工程地质与水文条件，梳理施工重难点，重点论述从基础处理、加筋材料铺设、分层填筑压实到坡面生态防护的成套施工技术。同时，构建覆盖施工期与工后期的变形监测体系，明确监测点布设原则、监测方法、频率及预警机制。通过本工程实践，验证该工艺在复杂丘陵地形高边坡支护中的适用性与可靠性，研究可为同类工程提供系统的技术参考与实施范例。

关 键 词： 高边坡支护；生态加筋挡土墙；土工格栅；分层填筑；变形监测

Construction Technology and Deformation Monitoring of Ecological Reinforced Retaining Walls for High Slope

Dong Langjun

Shanghai Feiteng Construction Development Co., Ltd., Shanghai 201907

Abstract： This paper takes the "Four Supplies and One Leveling" project of the Yuezhou ±800 kV converter station project as the background, focusing on the high-fill slope support project within the station area. It systematically elaborates on the complete construction technology system and full-process deformation monitoring techniques for ecological reinforced retaining walls. A detailed analysis of the engineering geological and hydrological conditions is conducted, along with an overview of the key challenges and difficulties in construction. The paper emphasizes the complete set of construction techniques, ranging from foundation treatment, laying of reinforced materials, layered filling and compaction, to ecological slope protection. Additionally, a deformation monitoring system covering both the construction and post-construction periods is established, specifying the principles for monitoring point layout, monitoring methods, frequency, and early warning mechanisms. Through practical application in this project, the applicability and reliability of this technology in supporting high slopes in complex hilly terrains are verified, providing systematic technical references and implementation examples for similar projects.

Keywords： high slope support; ecological reinforced retaining wall; geogrid; layered filling; deformation monitoring

引言

在电网建设，尤其是特高压换流站工程中，站址常选址于丘陵山区，场地平整形成的高填方边坡稳定性成为“四通一平”阶段的关键控制性难题^[1]。传统刚性支挡结构常存在生态景观效果差、对地基变形适应能力弱等问题。生态加筋挡土墙技术融合了加筋土结构与生态防护理念，通过土中加筋材料提高土体自身强度和整体稳定性，并采用柔性面层实现植被生长，兼具结构安全、环境友好与经济合理等优势^[2]。越州 ±800 千伏换流站工程填方区边坡最大高度达 22m，地质条件复杂，对支挡结构提出较高要求。本文旨在系统总结该工程中高边坡生态加筋挡土墙从施工到监测的全过程关键技术，以期为类似环境下的边坡支护工程提供详实借鉴。

一、工程概况与边坡特点难点分析

越州 ±800 千伏换流站站址位于浙江省绍兴市上虞区驿亭镇二都村南侧，地处罗岩山山脚，属典型浙东低山丘陵地貌，原始地形起伏显著，自然地面标高介于 45.32m 至 88.19m 之间。本工

程“四通一平”阶段土石方工程量巨大，总挖方约 103 万 m³，总填方约 99 万 m³。其中，填方区边坡采用生态加筋挡土墙进行防护，最大填筑厚度 22m，边坡设计坡率根据高度分段设定，整体稳定性要求高。

（一）工程地质与水文条件

根据详细地质勘探报告，站址区域地层自上而下分布为：①1层素填土，松散，工程性质差；②1层含碎石粉质黏土，可塑状，混角砾碎石，层厚变化大（2.0~18.60m），工程性质较好，为主要填筑料源之一；②2层含黏土，软塑，高压缩性、低强度，仅局部钻孔揭示，为工程薄弱层；③1层含碎石粉质黏土，硬可塑；④1层全风化凝灰岩；④2层强风化凝灰岩；④3层中等风化凝灰岩，力学强度高，是良好持力层。场地浅部地下水为第四系孔隙潜水，受大气降水补给，水位变幅2.0~3.0m，对边坡长期稳定性构成潜在影响。土壤及地下水对混凝土结构及钢筋具微腐蚀性。

（二）边坡特点与施工难点

本工程填方最大高度达22m，由此产生的巨大水平土压力对加筋材料的强度、耐久性及筋土界面摩擦性能提出极高要求。地质条件方面，局部存在的②2层软塑状高压缩性黏土具有高压缩性，易引发不均匀沉降，影响加筋墙体整体协调变形。水文条件亦较为复杂，季节性降水丰沛，地表水与地下水活动频繁，必须严格控制填料含水量，并确保坡面及内部排水系统长期有效。此外，项目需兼顾生态与结构要求，在保障结构安全的基础上实现坡面快速植生绿化，对填筑工艺、面层处理及加筋材料反包节点设计提出诸多技术挑战。

针对施工难点采取了以下措施：针对22m高填方产生的水平土压力，选用双向拉伸聚丙烯土工格栅（TGSG30-30），其极限抗拉强度 $\geq 30\text{kN/m}$ ；针对②2层软塑黏土引发的不均匀沉降，采用级配碎石垫层（厚50cm）+土工格栅复合地基处理；针对水文条件复杂问题，设置“截水沟+坡面泄水孔+墙趾排水盲沟”三级排水系统；针对生态与结构协同要求，采用植生袋反包工艺实现坡面绿化。

二、生态加筋挡土墙施工工艺

（一）施工工艺流程

生态加筋挡土墙施工遵循“分层开挖、分层填筑、分层加筋、分层压实、同步防护”的逆作思路^[3]。核心工艺流程精简为：施工准备与测量放样→基底处理→加筋材料铺设张拉→填料摊铺压实→格栅反包与连接→重复填筑至设计标高→生态防护与排水系统施工。全过程需与变形监测紧密配合，实行信息化施工。

（二）基底处理与排水系统施工

基底处理需清除边坡范围内的植被、树根、腐殖土及障碍物，确保坡脚基础开挖至设计标高，形成坚实、平整的基底^[4]。若遇②2层等软弱土层，应依据设计要求采用级配良好的砂砾石或碎石进行换填，并分层压实至设计密实度。排水系统施工中需在边坡顶缘后方设置截水沟以拦截外部地表径流，同时在加筋土挡墙底部布设排水沟，其沟底坡度不小于0.5%以利汇水顺畅排出。

墙体内部部分层铺设透水性填料或土工排水材料，形成有效内部排水通道，降低墙后积水导致的孔隙水压力。所有排水沟接缝须严密处理，防止渗漏。

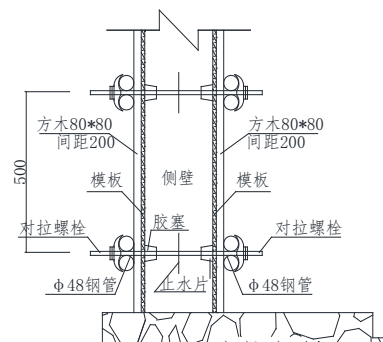


图1 安装及加固图示

（三）墙体填筑与分层施工技术

格栅按设计长度裁剪时，必须保留至少一整排完整的60mm长纵向肋条，以保证连接强度^[5]。铺设时使格栅主受力方向垂直于坡面，采用人工拉紧并结合专用张拉梁施加预张力，确保格栅平顺、紧密贴附于已压实的填土表面，消除褶皱，以减少初始变形。格栅张拉就位后，应立即使用U形钢筋钉等锚固件以横向@500mm、纵向每2~3m一排的间距将其临时固定于下层土体中，防止后续填土施工时移位。相邻两幅格栅之间采用专用聚合物连接棒进行连接，连接棒必须穿过搭接处每一根肋条，确保力的有效传递，同时检查搭接宽度是否符合设计要求。每层填土压实并完成坡面修整后，将预留的格栅端部反折覆盖在坡面填土上，反包长度不小于1.5m。反包部分与上一层铺设的格栅通过连接棒进行可靠连接，形成连续加筋体，确保该节点作为筋材与面层间力系转换关键部位的结构牢固性。

（四）加筋材料铺设与锚固施工技术

填料严格按照设计要求选用填料，本工程规定填料容重不小于 19kN/m^3 ，等效内摩擦角不小于 35° 。优先使用站区开挖的②1层或③1层含碎石粉质黏土。填料最大粒径不得超过150mm，且粒径大于100mm的颗粒含量不宜超过总重的15%。施工前通过击实试验确定填料的最优含水量，施工中控制实际含水量在最优值 $\pm 2\%$ 范围内，过湿需晾晒，过干需洒水闷料。摊铺与平整中填料采用自卸汽车运输至工作面，用推土机初步摊平，再用平地机精平。每层虚铺厚度严格控制在300mm以内，并保持铺土面平整，横向设置2%~4%的排水横坡。压实作业是保证压实度 ≥ 0.94 的核心。采用5t以下轻型振动压路机或手扶式振动夯进行压实。碾压路线从格栅中部开始向尾部进行，再从中间向坡面方向进行。碾压轮迹需重叠1/3以上。靠近反包坡面1m范围内禁止重型机械碾压，必须采用人工或蛙式打夯机夯实，防止机械对格栅和坡面结构造成破坏。坡面生态防护中在每一层填筑压实、格栅反包后，立即在坡面位置人工码放预先装填好混合草籽与肥料的生态麻袋。麻袋尺寸为 $400*300*200\text{mm}$ ，需装填饱满、重量均匀，码放时上下错缝、拍打密实，形成整齐稳定的坡面轮廓线。麻袋既是临时模板，也是永久生态载体。

（五）关键节点与特殊部位处理

在边坡转角处，格栅须采用环绕方式铺设。外转角部位若出现空隙，应裁剪同规格格栅片进行补强覆盖；内转角出现格栅重叠时，需在重叠区域铺设一层10~20mm厚的中粗砂作为隔离层，避免筋材直接摩擦受损。当加筋土挡墙与进出站道路挡墙、排水涵洞等刚性结构物衔接时，应设置柔性过渡段，可通过增加加筋

层数或采用渐变强度格栅实现，并做好连接部位的防排水处理，以降低差异沉降引起的开裂风险。雨季施工期间需密切关注天气预报，提前备足防水篷布。摊铺后的填料应及时碾压成型，避免雨水浸泡；已铺设但未覆土的格栅须进行临时覆盖。同时应保持作业面及周边排水畅通，防止现场积水。

三、变形监测体系建立与实施

（一）监测内容与监测点布设

监测内容主要包括墙顶水平位移、墙顶及墙体内部分层沉降以及坡面外观巡检，涵盖裂缝、鼓胀与渗水等现象。监测点应沿挡墙延伸方向按每15-30m 间距布设主监测断面，每个断面需在墙顶、墙高1/2处（可根据实际高度增加监测层位）及墙脚分别设置兼具位移与沉降监测功能的测点。测点应采用强制对中标志或预埋钢筋桩等方式，确保其稳固可靠。同时，需在远离挡墙的稳定区域设置不少于3个基准点，以构成完整的监测控制网。

（二）监测方法与频率

测量方法：水平位移采用高精度全站仪进行极坐标法或小角度法观测；沉降采用精密水准仪按二等水准测量要求进行闭合路线观测。所有测量需固定人员、固定仪器、固定路线，以减小系统误差。

监测频率按阶段划分：施工期间，每完成3层加筋填筑（高度约1.0-1.2m）进行一次全面监测；竣工初期，首月每周监测一次，第2至3个月每两周一次；运营后期，竣工后3个月至1年内每月一次，1年后调整为每季度一次，之后每年于雨季前后各监测一次。遇连续降雨或地震等特殊情况，应适当加密观测频次。

（三）监测数据分析、预警与反馈

数据整理阶段需及时计算各监测点的累计位移量与沉降量，并确定本期变化速率；同时应绘制位移-时间与沉降-时间关系曲线，以便动态反映变形趋势。控制标准与预警机制依据设计要求及相关规范，并结合本工程实际特点进行制定，具体监测控制标准见表1。

表1 高边坡生态加筋挡土墙施工期监测预警控制标准

监测项目	控制标准 (累计值)	预警值 (累计值)	报警值 (累计值)	速率控制标准 (每日)
墙顶水平位移	≤墙高的0.3%(且≤50mm)	达到控制标准80%	达到或超过控制标准	≤2.0mm
墙顶沉降	≤30mm	达到控制标准80%	达到或超过控制标准	≤1.5mm
填筑层差异沉降	≤层厚的0.5%	—	连续两层超限	—

根据越州 ±800 千伏换流站工程施工工期及竣工后连续半年的监测数据显示，各监测点墙顶水平位移最大为12.5mm，远低于

控制标准（≤50mm）；墙顶沉降最大为8.3mm，小于控制标准（≤30mm）。位移-时间及沉降-时间曲线均呈收敛趋势，表明边坡稳定性良好。通过与表1 控制标准对比，实际监测值均未达到预警值（水平位移预警值40mm，沉降预警值24mm），日变化速率最大为0.8mm/ 天，满足≤2.0mm/ 天的速率控制要求。

数据分析表明，加筋材料的抗拉强度及筋土界面摩擦性能有效控制了变形，分层填筑压实工艺和完善的排水系统（截水沟 + 坡面泄水孔 + 墙趾排水盲沟）降低了孔隙水压力，避免了水害导致的变形加剧。施工中格栅张拉预紧、边缘人工夯实等精细化操作进一步减少了初始变形，确保加筋体整体协调受力。监测数据达到预警值时，分析原因并加强监测频率。当达到报警值或变化速率持续超标时，必须立即暂停施工，启动应急预案，采取如减载、补强加筋、注浆加固等工程措施。

四、工程实施效果及经验总结

越州换流站填方区生态加筋挡土墙施工完成后，边坡整体线形顺直，坡面生态袋内草籽已初步萌发，呈现良好生态效果。施工期及竣工后连续半年的监测数据显示，所有监测断面墙顶最大水平位移小于15mm，最大沉降小于10mm，位移与沉降曲线均已趋于收敛平稳状态，表明边坡处于稳定安全状态。

前期地质勘察是工程基础，精准掌握软弱夹层分布与水文条件，为针对性设计和施工预案提供依据。填料质量是内在保证，严格控制其粒径、级配及含水量，以实现高压实度与良好的筋土摩擦性能。精细化施工是关键环节，格栅的张拉、固定、连接及反包等工序应严格按工艺操作，避免疏漏，并采用轻型机械碾压与边缘人工夯实相结合的方式，有效保护加筋结构。排水系统通过完善的地表截排水及墙体内排水系统可有效降低水害风险。及时的变形监测不仅保障施工安全，也为动态评估结构状态、验证设计合理性提供数据支撑。

五、结语

在越州 ±800 千伏换流站高填方边坡工程中，通过系统应用生态加筋挡土墙施工技术，并辅以全过程变形监测，成功解决复杂地形条件下高边坡的稳定与生态防护问题。实践表明，该技术体系具有施工相对灵活、对地基适应性强、生态效益显著等优点。其成功实施依赖于精细化的施工组织管理以及科学的信息化监测反馈。本工程所总结的工艺要点与管控经验，可为今后类似环境下的电力基础设施乃至其他行业的高边坡工程建设提供切实可行的技术路径与工程借鉴。

参考文献

[1] 张俊腾, 刘常涛. 软土地基上生态加筋挡土墙力学性状的现场试验和数值模拟分析 [J]. 宁德师范学院学报 (自然科学版), 2025(1).
[2] 张川, 李红亮, 褚丽. 自嵌式植生挡土墙在淮阳县七里河挡墙式护坡中的应用及推广 [C]//2024（第三届）城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集 .2024.
[3] 王智明, 张智超, 齐昌广. 原位钻孔剪切试验在加筋土挡墙填土中的应用研究 [J]. 工程勘察, 2024, 52(12): 28-32.
[4] 尤文贵, 张俊腾. 软土地基上柔性加筋挡土墙的研究现状综述 [J]. 安徽建筑, 2025, 32(1): 132-134.
[5] 马之东. 装配式模块化生态挡土墙快速安装施工技术 [J]. 山西建筑, 2025(16).

软土地基深基坑围护结构中 SMW 工法桩施工技术应用研究

蒋兴华

上海海怡建设（集团）有限公司，上海 201300

DOI:10.61369/ERA.2026060022

摘要： 以上海浦东新区 D13-C103#、104#、105# 通用厂房项目为工程背景，针对软土地基深基坑围护施工中的技术难点，系统研究了 SMW 工法桩施工技术及其配套措施。该项目基坑面积 7280 m²，开挖深度 5.7m，采用双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢围护结构，结合坑内真空深井降水与分层开挖工艺。本文详细阐述了双轴搅拌桩施工技术、H 型钢插入工艺、钢支撑安装技术以及降水 - 开挖协同施工技术，总结了软土地基深基坑围护施工的关键经验，为类似工程提供参考。

关键词： 软土地基；深基坑；SMW 工法桩；双轴搅拌桩；基坑降水；H 型钢

Research on the Application of SMW Construction Technique Piles in the Enclosure Structure of Deep Excavations on Soft Soil Foundations

Jiang Xinghua

Shanghai Haiyi Construction (Group) Co., Ltd., Shanghai 201300

Abstract： Taking the D13-C103#, 104#, and 105# general factory building projects in the Pudong New Area of Shanghai as the engineering background, this study systematically investigates the SMW construction technique piles and their supporting measures, addressing the technical challenges encountered in the enclosure construction of deep excavations on soft soil foundations. The excavation area of the project is 7,280 square meters, with an excavation depth of 5.7 meters. It employs a biaxial cement-soil mixed pile with inserted H-section steel enclosure structure, combined with vacuum deep well dewatering and layered excavation techniques within the pit. This paper elaborates on the construction techniques of biaxial mixed piles, the insertion process of H-section steel, the installation technology of steel supports, and the coordinated construction techniques for dewatering and excavation. It summarizes key experiences in the enclosure construction of deep excavations on soft soil foundations, providing references for similar projects.

Keywords： soft soil foundation; deep excavation; SMW construction technique piles; biaxial mixed piles; excavation dewatering; H-section steel

引言

软土地基具有高含水量、高压缩性、低承载力等特点，深基坑施工中围护结构的稳定性与变形控制是工程核心问题^[1]。SMW 工法桩作为一种兼具挡土与止水功能的围护结构，在软土地区得到广泛应用^[2]。本文依托上海浦东高桥镇富特北路 559 号厂房项目，基坑实际开挖深度 5.7m，周边环境复杂（东侧紧贴既有建筑、南北两侧临近市政道路、西侧紧靠高架道路），围护结构采用双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢（SMW 工法桩），结合坑内真空深井降水与分层开挖工艺。通过施工过程中的技术控制与监测数据分析，验证了 SMW 工法桩在软土地基深基坑中的适用性，总结形成系统的施工技术要点。

一、工程概况与工程地质环境条件

（一）工程基本概况

拟建项目位于上海市浦东新区高桥镇富特北路 559 号，建设用地面积 11016 m²，总建筑面积 30043.3 m²。其中 103# 厂房 7561.94 m²、104# 厂房 8407.00 m²、105# 厂房 7359.93 m²，地库

建筑面积 6714.43 m²。103#、104#、105# 厂房均为地上 4 层，地下室 1 层。基础形式为筏板及桩承台基础，工程桩采用先张法预应力混凝土管桩，共计 325 根，采用静力压桩工艺。基坑面积 7280 m²，基坑围护结构采用水泥土搅拌桩加内插 H 型钢（SMW 工法桩），基坑实际开挖深度 5.7m，集水井局部落深 1.3m~1.85m。现场原始地面标高为 4.3m。

（二）工程地质条件

本工程基坑施工环境复杂，主要体现在三个方面：一是场地土层以软黏土及淤泥质土为主，土体强度低、压缩性大，基坑开挖过程中容易产生较大侧向位移；二是基坑周边环境敏感，东侧紧邻既有建筑，南北两侧为市政道路，西侧为高架道路，一旦围护结构变形过大，可能对周边建筑物安全造成影响；三是地下水位埋深浅，基坑开挖深度超过地下水位约5.2m，若降水措施不到位，容易引发流砂、管涌等工程风险。因此在围护结构设计及施工过程中，需要综合考虑止水、抗变形和施工效率等因素。

二、软土地基深基坑工程施工难点与 SMW 工法桩适用性分析

（一）软土地基深基坑围护施工核心难点

场地内存在饱和软黏土及暗浜分布，土层含水量高、孔隙比大、抗剪强度低，基坑开挖卸荷后易产生较大变形^[3]。暗浜范围内淤泥质土必须彻底清除处理，否则将直接影响围护结构稳定性。基坑东侧紧贴既有建筑，南北两侧临近市政道路，西侧紧靠高架道路，开挖深度5.7m，卸荷产生的水平位移及沉降需严格控制，围护结构变形量须满足环境安全要求。地下水位埋深仅0.5m，坑底位于地下水位以下5.2m，若不采取有效降水措施，坑底易发生流砂、管涌，围护墙背侧可能产生水土流失，危及周边环境安全。围护桩施工、降水、土方开挖、支撑安装等工序需紧密衔接，软土中桩基施工后需一定时间恢复土体强度，降水效果须达到设计要求方可开挖，工序间相互制约。

（二）SMW 工法桩在本工程中的适用性与优势

SMW 工法桩采用双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢，兼具挡土与止水功能^[4]。双轴搅拌桩形成的水泥土墙体渗透系数 $< 10^{-7} \text{cm/s}$ 、28d 强度 $> 1.2 \text{MPa}$ ，止水且具有一定刚度；内插 H 型钢承载土压，与钢支撑组成支护体系。在本工程条件下，围护结构形式的选择需综合考虑止水性能、施工周期及周边环境影响。若采用地下连续墙，虽然结构刚度较大，但施工周期长、造价较高，并且对施工场地要求较高；若采用钻孔灌注桩加止水帷幕，施工过程中需多道工序配合，施工效率较低。相比之下，SMW 工法桩通过水泥土搅拌形成连续墙体，同时内插 H 型钢承担结构受力，不仅具有良好的止水性能，还能够有效控制围护结构变形，并且施工设备简单、施工效率较高。因此在本工程软土地基条件及复杂周边环境条件下，SMW 工法桩具有较好的适用性。

三、SMW 工法桩关键施工技术及工艺控制

（一）暗浜处理

本工程北侧存在暗浜区域，该区域土体以淤泥质土为主，含水量高、强度低，若处理不当将影响 SMW 工法桩围护结构稳定性。因此在围护桩施工前，对暗浜范围进行专项处理。施工过程中首先对暗浜区域进行开挖清淤，清除至原状老土层后采用素粘土分层回填，并通过压实度检测确保回填质量。在暗浜区域施工

双轴搅拌桩时适当提高水泥掺量至 16%，以提高桩体强度和止水性能。

（二）施工机械与试桩

水泥掺量是影响搅拌桩强度及止水性能的重要因素。若掺量过低，桩体强度不足，易导致围护结构变形增大；若掺量过高，则会增加工程成本并影响施工效率。本工程通过试桩试验及室内强度试验，确定水泥掺量为 13%。试验结果表明，在该掺量条件下，水泥土 28d 无侧限抗压强度可达到 0.8MPa 以上，满足围护结构设计要求。对于暗浜区域，由于土体含水量较高，适当提高水泥掺量至 16%，以提高桩体强度和整体稳定性。

（三）H 型钢插入施工技术

H 型钢表面平整度控制在规范允许范围内，除锈后在干燥条件下涂抹减摩剂以利于后期回收，搬运使用过程中防止碰撞和强力擦挤。型钢接头设在基坑底标高以下，翼板与腹板焊接相互错开，满足等强度焊接要求。搅拌桩施工完成后 30min 内插入 H 型钢，若水灰比或水泥掺量较大，插入时间可相应增加；型钢采用隔一插一布置，插入时保持垂直，定位准确。插入过程中利用桩架导向架控制垂直度，插入到位后临时固定防止移位，型钢顶标高控制准确以便与支撑体系有效连接。在实际施工过程中发现，个别搅拌桩垂直度接近规范允许偏差上限。为提高施工精度，施工中加强搅拌机就位控制，采用经纬仪对桩机垂直度进行实时监测，并通过导向架进行调整，确保搅拌桩垂直度控制在 0.5% 以内。同时在 H 型钢插入过程中利用桩架导向架进行二次校正，保证型钢位置准确。

（四）钢支撑制作与安装施工技术

本工程采用 $\Phi 609 \times 16$ 钢管支撑，中心标高 -1.35m，沿竖向设一道钢管水平支撑，立柱为 $\text{H}400 \times 400 \times 13 \times 21$ 型钢，支撑体系安装便捷、可周转、成本低；在钢支撑施工过程中，为防止预应力损失影响支撑体系稳定性，支撑安装完成后采用两次施加预应力。第一次施加 250KN 用于调整支撑直线度并初步受力，焊接连接件完成后进行第二次施加至 500KN ，使支撑预应力达到设计值。同时对活络头螺母进行锁紧并焊接固定，以减少施工过程中预应力损失。土方开挖至工作面后，测放控制点并焊接槽钢托架，测定支撑位置确保轴线垂直围护，根据实测距离选配中间管段（规格包括 7m、6m、3m、4m、3m、2m、1m、0.8m、0.7m、0.6m、0.5m、0.4m、0.3m），活络头长 2.3m；支撑采用汽车吊分段二点吊装，东侧用塔吊，就位后暂不松钩，拉出活络头顶紧支座预埋件，用两台 50t 千斤顶施加预应力，首根支撑先施加少量预应力调整直线，第一组安装并施加第一次预应力后焊接连接杆，再安装第二组，相邻组安装后焊接较长连接件，验收合格后施加第二次预应力至设计值，全过程记录；所有节点按设计要求焊接或螺栓连接，局部设加劲板。

四、基坑降水与分层开挖协同施工技术

（一）坑内降水方案设计与施工实施

根据开挖深度 5.7m、水位埋深 0.5m 地质，坑内采用真空深

井降水。基坑7280 m²形状规则，抽水半径9m，布35口梅花形疏干井，距围护墙6~8m、井距15m，避支撑沿支撑边布置。井管/滤管Φ273钢管外包铁丝网，底板止水片；滤管长4+2m，内6目铁丝网、外60目尼龙网。每井配深井水泵（5~15t/h，扬程24~30m），每3~5口井配真空泵使管内压力>0.06MPa，同步开启。成井用wk-1000旋挖钻机，孔径≥Φ650，垂直度保证；下管电焊连接，滤料瓜子片加粗砂填实。吸水头置滤管下口沉砂管，电机座与井口密封；真空泵与深井泵硬管或波纹管连接，接头密封。坑内分区设观测井（每区≥1口），坑外四周≥4口监测水位。施工穿插围护，围护后二周内完成，安装后验收预降水；开挖前预降水三周，至底板浇筑养护结束，截止时间抗浮计算。在降水施工过程中，通过监测发现局部区域降水效果不均匀。针对该情况，通过调整井泵运行时间及增加抽水强度，使坑内地下水位稳定控制在坑底以下0.5~1.0m范围内，从而保证基坑开挖过程中坑底稳定。

（二）基坑分层开挖原则与施工工艺

基坑开挖分层分段、对称平衡、限时，控制卸土速度以减少对围护及桩基影响，与底板流水施工缩短暴露时间。流向自远及近、周边向中间汇集，按由南向北（104#楼暂缓）。深度分两层：第一层至支撑底（-1.70m），一次性挖，PC200大挖机作业，及时浇筑支撑；第二层至垫层面以上0.85m（-5.20m），第三层土采用120小挖机+人工清底跟进挖至坑底（含承台等深坑），每2m打竹板桩控标高，留20~30mm人工铲平，严禁超挖；高差≤3m，放坡1:1.5（宜1:2），钢立柱及塔吊周边对称掏挖。垫层分段紧跟，见底12h内浇筑，平板振捣密实并打磨。提前掌握天气，坑周设排水沟，坑内明排水；土层异常及时通知勘察、设计处理并签证。

（三）降水-开挖-SMW工法桩围护协同施工技术

SMW工法桩完成并达到设计强度后开始坑内降水，预降水三周且水位降至坑底以下0.5~1.0m后开始第一层土方开挖；第一层土开挖后及时安装钢支撑，待支撑形成整体并达到设计强度80%后方可进行第二层土开挖；第二层土开挖至坑底后12h内完成垫层浇筑并随即进行底板施工。在软土地基深基坑工程中，降水与开挖之间具有密切关系。若降水深度不足，基坑开挖过程中可能出现坑底隆起或流砂现象；若降水范围过大，则可能导致周边地基沉降。本工程通过布置35口真空深井进行降水，使坑内地下水位稳定控制在坑底以下约1.0m。在降水稳定后再进行分层开挖，可以有效减少坑底土体扰动，保证基坑施工安全。

五、施工实施效果检测与分析

（一）围护结构整体稳定性检测

成桩7d后采用轻便触探抽取桩身土样（检验数量≥成桩数量的2%），观察搅拌均匀性，对比判定强度。触探结果显示，桩身搅拌均匀，击数满足强度要求。对部分桩身取芯样试压，28d无侧限抗压强度达不小于0.8MPa，满足设计要求。型钢插入后检查垂直度及平面位置，偏差均在允许范围内。型钢顶标高控制准

确，与钢支撑连接牢固。支撑安装后检查焊缝质量及预应力施加记录。所有焊缝经外观检查合格，预应力施加值达设计要求，支撑体系受力可靠。具体见表1：

表1 SMW工法桩施工质量检测结果统计

检测项目	设计/规范要求	检测数量	检测结果	合格率
搅拌桩垂直度	≤0.4%桩长	45根	0.3%~0.4%	100%
桩位偏差	≤50mm	45根	15~45mm	100%
水泥掺量	234kg/m	12组	236~247kg/m	100%
28d抗压强度	≥0.8MPa	18组	0.80~1.53MPa	100%
H型钢垂直度	≤0.5%	30根	0.2%~0.5%	100%
钢支撑预应力	设计值	35道	达设计值	100%

（二）基坑周边沉降与位移监测结果

施工过程中对基坑周边环境进行监测，项目包括围护墙顶水平位移与沉降、周边地表沉降、邻近建筑沉降、地下水位变化及深层土体侧向位移。从监测数据可以看出，围护墙顶最大水平位移为28.5mm，发生在基坑长边中部位置。该位置为基坑受力最不利区域，通常容易产生较大侧向变形。根据软土地基深基坑工程经验，当基坑开挖深度为6m左右时，围护结构水平位移一般为开挖深度的0.2%~0.5%。本工程最大位移约为开挖深度的0.46%，处于合理范围内，说明SMW工法桩围护体系整体刚度能够满足工程要求。具体见表2：

表2 基坑监测主要数据汇总

监测项目	测点数量	累计最大值 (mm)	报警值 (mm)	备注
围护墙顶水平位移	18	28.5	40	位于基坑长边中部
围护墙顶沉降	18	15.2	30	-
周边地表沉降	24	22.3	30	东侧邻近建筑处
邻近建筑沉降	12	8.5	20	-
深层土体侧移	8	32.1	45	深度5.7m处

（三）效果分析

①桩基施工：325根预应力管桩采用静力压桩，21天完成，日均压桩15~16根，桩位偏差满足规范要求。低应变检测显示Ⅰ类桩比例95%，无Ⅲ、Ⅳ类桩。②SMW工法桩施工：四台双轴搅拌机同步作业，围护桩施工18天，坑内加固桩12天，进度符合计划。搅拌桩成桩质量稳定，H型钢插入顺利。③降水效果：35口真空深井抽水三周后，坑内水位降至坑底以下约1.0m，开挖过程中坑底干燥，无明水及流砂管涌现象。④土方开挖与支撑安装：分层开挖有序，钢支撑安装与土方开挖衔接紧密，预应力施加及时，围护结构变形可控。

六、工程应用经验总结

双轴搅拌桩水泥掺量13%（≥234kg/m）、水灰比0.6、下沉速度≤1m/min、提升速度≤0.5m/min，必须严格控制，试桩确定参数后方可大面积施工。H型钢插入时机与减摩处理影响回收效率：搅拌桩完成后30min内插入型钢，水灰比较大时可适当延长；型钢表面涂刷减摩剂应均匀，搬运中避免碰撞。支撑系统及时性至关重要，第一层土开挖后立即安装钢支撑并施加预应

力，预应力应均匀、对称、分两次施加，待支撑体系形成整体后方可下层开挖。降水与开挖协同是安全前提：水位降至坑底以下 0.5 ~ 1.0m 后方可开挖，降水井布置避开支撑，保持连续降水确保坑底稳定。

七、结语

上海浦东 D13-C103#、104#、105# 厂房项目深基坑工程，采

用 SMW 工法桩（双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢）作为围护结构，结合坑内真空深井降水与分层开挖工艺，成功解决了软土地基深基坑施工中的稳定与变形控制难题。施工中严格控制搅拌桩垂直度、水泥掺量、提升速度等参数，确保 H 型钢插入质量与钢支撑及时安装；降水与开挖协同进行，保证坑底干燥稳定。监测数据显示，围护结构最大水平位移 28.5mm，周边地表沉降 22.3mm，均在控制范围内，工程实施效果良好。本文总结的关键施工技术与控制要点，可为类似软土地区深基坑工程提供有益参考。

参考文献

- [1] 张敏. 深基坑支护中 SMW 工法桩施工技术的应用研究 [J]. 2025(8):56-57.
- [2] 张蕴中. SMW 工法桩在深基坑围护结构中的应用研究 [J]. 建设科技, 2025(1):103-105.
- [3] 王嘉操. SMW 工法在深基坑围护结构中的应用研究 [J]. 散装水泥, 2025(5):88-90.
- [4] 张祥. SMW 工法桩在高层建筑深基坑围护施工中的使用分析 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2023.
- [5] 何敬锋. 建筑工程项目中的基坑 SMW 工法施工工艺 [J]. 四川建材, 2023, 49(3):192-194.

外露式钢柱脚极限承载力不足的处理方法与工程应用 ——以祥银传动设备制造二期项目为例

冷辉良

上海申联建筑设计有限公司, 上海 201900

DOI:10.61369/ERA.2026060023

摘 要 : 针对多层钢结构厂房工程中, 外露式刚接柱脚按规范 "强节点弱构件" 要求设计时, 普遍出现锚栓规格超常规、底板尺寸过大、甚至极限承载力不满足要求的行业痛点, 本文结合现行规范与钢结构设计理念, 剖析问题核心成因, 提出基于抗震性能化设计的优化方法。以 笔者主持设计 2023 年竣工的祥银传动设备制造二期项目为依托, 针对刚度、长细比控制的钢柱特性, 通过设定中震弹性性能目标, 采用 50% 全塑性受弯承载力控制指标完成柱脚优化。结果表明, 该方法可将柱脚钢材用量降低 35%, 锚栓规格从 M45 优化至常规 M39, 有效缩小柱脚尺寸, 兼顾安全性与经济性, 可为同类工程提供可靠参考。

关 键 词 : 外露式钢柱脚; 极限承载力; 钢结构; 抗震性能化设计; 刚度控制柱

Treatment Methods and Engineering Applications for Insufficient Ultimate Bearing Capacity of Exposed Steel Column Bases —Taking the Phase II Project of Xiangyin Transmission Equipment Manufacturing as an Example

Leng Huiliang

Shanghai Shenlian Architectural Design Co., Ltd., Shanghai 201900

Abstract : In multi-story steel structure factory buildings, when exposed rigid column bases are designed according to the specification requirement of "strong joints and weak members," industry pain points such as oversized anchor bolts, excessively large base plate dimensions, and even insufficient ultimate bearing capacity commonly occur. This paper combines current specifications with steel structure design concepts to analyze the core causes of these issues and proposes optimization methods based on seismic performance-based design. Relying on the Phase II Project of Xiangyin Transmission Equipment Manufacturing, completed in 2023 and designed by the author, this study addresses the characteristics of steel columns controlled by stiffness and slenderness ratios. By setting moderate earthquake elastic performance objectives and adopting a 50% full plastic flexural capacity control indicator, the column base optimization is achieved. The results show that this method can reduce steel usage in column bases by 35%, optimize anchor bolt specifications from M45 to conventional M39, effectively reduce column base dimensions, and balance safety and economy, providing a reliable reference for similar projects.

Keywords : exposed steel column base; ultimate bearing capacity; steel structure; seismic performance-based design; stiffness-controlled column

引言

外露式钢柱脚因施工便捷、造价可控等优势, 在多层钢结构厂房中应用广泛。但现行规范基于 "低强度高延性" 的传统抗震延性设计理念, 以 "强节点弱构件" 为核心原则, 对柱脚极限承载力提出了严格的强连接约束, 导致工程中普遍出现柱脚底板超尺、锚栓规格超标、经济性差的问题, 尤其对于由刚度、长细比控制的框架柱, 传统设计理念的适用性存在先天局限, 极易造成过度设计。本文结合现行规范剖析问题成因, 提出适配刚度控制柱的性能化优化方法, 并结合实际工程验证方法的可行性与经济性, 为同类工程设计提供参考。

一、现行规范对外露式柱脚的核心设计要求

我国现行钢结构相关规范均围绕 "强节点弱构件" 的抗震理念, 对柱脚连接极限承载力作出强制性规定, 核心要求可归纳为两点:

一是常规抗震设计中, 柱脚与基础的连接极限承载力应满足 $M_{uj} \geq \eta_j M_{pe}$, 其中外露式柱脚连接系数 η_j 按规范取 1.1~1.2, M_{pe} 为考虑轴力影响的钢柱全塑性受弯承载力;

二是《钢结构设计标准》GB 50017-2017 第 17.2.12 条明确, 框架承担总水平地震剪力 50% 以上的结构, 实腹柱刚接外露式柱脚, 按锚栓毛截面屈服计算的受弯承载力不宜小于钢柱全截面塑性受弯承载力的 50%, 为性能化优化设计提供了明确的规范依据。

上述公式中, 考虑轴力影响的钢柱全塑性受弯承载力 M_{pe} , 是柱脚承载力设计的核心计算参数, 对于 H 形截面绕强轴受弯的构件, 按《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99-2015 第 8.1.5 条规定计算:

$$\text{当 } N/N_y \leq 0.13 \text{ 时, } M_{pe} = M_p$$

$$\text{当 } N/N_y > 0.13 \text{ 时, } M_{pe} = 1.15(1 - N/N_y)M_p$$

式中: $M_p = f_y W_p$, 为钢柱无轴力影响的全塑性受弯承载力; W_p 为钢柱截面绕强轴的塑性截面抵抗矩; N 为柱底最不利组合轴力设计值; $N_y = Af_y$, 为钢柱轴向屈服承载力; A 为钢柱截面面积; f_y 为钢材屈服强度设计值。

二、外露式柱脚承载力不足的核心成因分析

结合规范条款、设计理念与工程实践, 外露式柱脚出现极限承载力不足、尺寸过大的核心原因可归纳为以下 3 点。

(一) 抗震设计理念与节点受力特性的先天矛盾

规范 "强节点弱构件" 的强连接要求, 源于低强度高延性的传统抗震设计理念, 核心目标是确保地震作用下塑性铰先出现在钢柱柱身, 通过构件的塑性变形实现延性耗能, 避免柱脚连接部位发生脆性破坏。但外露式柱脚本质上属于半刚性节点, 其弯矩传递主要依赖锚栓的受拉和底板下混凝土的受压, 极限受弯承载力提升高度依赖锚栓规格、底板尺寸和力臂的增大, 要满足 "连接承载力高于构件塑性承载力" 的延性设计要求, 本身存在先天的受力局限性。

(二) 钢柱截面控制因素与设计理念的错配

多层钢结构厂房的框架柱, 绝大多数情况下截面由长细比、层间位移角等刚度指标控制, 而非强度控制, 这也是本文优化设计方法的核心前提。此类钢柱的截面尺寸远大于强度需求, 全塑性受弯承载力数值极高, 且当柱轴力较小时, 对柱脚极限承载力的要求会进一步提高。以本文工程实例的 H400×400×13×21 钢柱为例, 多遇地震下柱底实际弯矩设计值仅为全塑性受弯承载力的 33.8%, 柱身在设防烈度地震下仍能保持弹性, 无需利用塑性变形耗能, 天然适配高强度低延性的设计逻辑。

常规设计的核心误区, 正是将适用于强度控制构件的 "低强度

高延性" 理念, 机械套用到了刚度控制的钢柱上: 对于无需利用延性耗能的柱身, 仍强行要求柱脚承载力高于柱身全塑性弯矩, 最终必然导致柱脚尺寸和锚栓规格远超工程常规范范围, 造成严重的材料浪费与施工难度提升。

(三) 常规设计方法的局限性

常规设计中, 设计人员多直接按多遇地震组合内力进行柱脚截面设计, 再按规范强连接条款进行极限承载力验算, 未结合结构的实际抗震性能需求、钢柱的截面控制因素进行针对性调整。对于刚度控制的钢柱, 这种设计方法完全忽略了截面承载力的富余度, 也未利用规范中性化设计的相关条款突破传统设计理念的局限, 最终导致柱脚设计极不经济, 甚至出现承载力无法满足的情况。

三、外露式柱脚承载力不足的处理方法

结合现行规范条款、设计理念与工程实践, 针对外露式柱脚承载力不足的问题, 可采用以下 3 类处理方法, 各类方法的适用场景与技术要点如下。

(一) 更换柱脚形式, 采用埋入式或外包式柱脚

当外露式柱脚锚栓直径超过 M42、底板尺寸过大时, 可直接更换为埋入式或外包式柱脚。该类柱脚属于刚性柱脚, 弯矩主要通过钢柱翼缘与基础混凝土的承压传递, 锚栓仅需满足安装固定和构造要求, 无需承担主要弯矩, 可从根本上解决锚栓规格过大的问题, 其抗震性能更优, 但施工复杂度与造价相对更高, 适用于抗震等级高、对柱脚刚度要求严格、柱身由强度控制需利用延性耗能的结构。

(二) 采用抗震性能化设计, 优化承载力控制指标

该方法为解决外露式柱脚设计难题的核心方案, 也是高强度低延性设计理念的具体工程落地, 其核心设计逻辑源于规范的本质要求: "强节点弱构件" 的核心目的, 是确保塑性铰先出现在柱身、而非柱脚节点; 对于刚度控制的钢柱, 若通过性能化设计, 保证柱底在设防烈度地震下保持弹性、不出现塑性铰, 就从根本上实现了规范的抗震安全目标, 无需机械套用传统延性设计的强连接条款, 同时可结合 GB 50017-2017 第 17.2.12 条的规定, 将柱脚受弯承载力控制指标从 $1.1M_{pe}$ 优化为 $0.5M_{pe}$, 大幅降低设计要求。

具体设计逻辑与流程为: 首先完成多遇地震下的结构整体计算, 明确钢柱的截面控制因素, 验证其刚度控制、承载力富余的特性; 其次设定抗震性能目标为中震弹性、大震不屈服, 计算设防烈度地震下的柱底内力组合, 验算钢柱柱根的压弯承载力, 确保柱底在中震下保持弹性, 不会出现塑性铰, 无需利用柱身延性耗能; 若中震弹性验算满足, 即可根据 GB 50017-2017 第 17.2.12 条, 按锚栓毛截面屈服计算的柱脚受弯承载力不小于 $0.5M_{pe}$ 进行设计; 若中震弹性验算不满足, 说明柱身需利用延性耗能, 仍按原规范强连接条款进行设计。该方法完全符合现行规范要求, 既保证了结构的抗震安全, 又可将柱脚的承载力要求降低 50% 以上, 使锚栓规格和底板尺寸回归工程常规范范围, 是多层

钢结构厂房刚度控制柱的首选设计方案。

（三）优化钢柱截面设计，降低全塑性受弯承载力

对于截面完全由刚度控制、承载力富余度极大的钢柱，可在满足规范层间位移角、长细比限值的前提下，优化钢柱截面形式与尺寸，降低截面塑性抵抗矩，从而减小钢柱全塑性受弯承载力，降低对柱脚极限承载力的要求。设计中可优先采用窄翼缘 H 型钢，在保证截面回转半径、满足刚度要求的同时，减小翼缘宽度和厚度，降低截面塑性受弯承载力。但该方法存在明显局限性，若截面优化后无法满足结构刚度要求，或导致用钢量不降反升，则不宜采用。

四、工程应用实例

（一）项目概况

本项目为两层钢结构生产车间，位于 7 度抗震设防区（0.1g），设计地震分组第三组，场地类别 II 类，建筑安全等级二级，设计使用年限 50 年。建筑总高度 12.0m，首层层高 7.8m，二层层高 4.2m，柱网尺寸 7.5m×9.0m，横向采用刚接框架，纵向设置柱间支撑作为主要抗侧力构件，经计算框架承担的总水平地震剪力占比为 62%，满足 GB 50017-2017 第 17.2.12 条的适用条件。框架柱采用焊接 H 型钢，截面规格为 H400×400×13×21，材质为 Q355B，柱脚设计采用外露式刚接柱脚。

（二）原设计问题

本项目钢柱无轴力影响的全塑性受弯承载力，按本文第 1 章所述方法计算，柱底轴压比 $N/N_y=0.104<0.13$ ，因此考虑轴力影响的全塑性受弯承载力。本项目框架柱截面由长细比、层间位移角控制，属于典型的刚度控制柱，适配高强度低延性的设计逻辑，原设计机械套用传统延性设计的强连接条款，是造成柱脚设计过度保守的核心原因。

按《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010（2016 年版）要求，外露式柱脚极限受弯承载力需满足。经设计验算，需采用 16 根 M45 锚栓，底板尺寸 1000mm×1000mm×36mm，锚栓规格远超工程常规的 M20~M42 范围，底板尺寸过大，不仅施工难度高，且材料浪费严重，经济性极差。

（三）优化设计方案

本次优化采用抗震性能化设计方法，核心逻辑为通过设定合理的性能目标，在保证抗震安全的前提下优化柱脚设计参数。首先设定结构性能目标为中震弹性、大震不屈服，经计算，中震荷载组合（1.0 恒载 + 1.0 活载 + 1.0 中震地震作用）下，柱底最大弯矩设计值，轴力设计值 $N=780\text{ kN}$ 。

随后对钢柱柱根进行压弯承载力验算，该截面在 $N=780\text{ kN}$ 轴力下，可承受的弯矩设计值为 $900\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，远大于中震下的柱底弯矩 $420\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，满足中震弹性要求，即柱底在设防烈度地震下不会进入塑性，不会出现塑性铰，从根本上满足了规范“强节点弱构件”的抗震核心要求。

根据 GB 50017-2017 第 17.2.12 条，柱脚受弯承载力控制值

取。基于此控制值完成优化设计，最终柱脚参数如下：底板采用 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ，材质 Q355B；锚栓采用 12 根 M39，材质 Q355B，单根锚栓毛截面屈服承载力 412 kN ；经计算，柱脚极限受弯承载力为 $840\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，满足 $\geq 621\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的规范要求。同步完成底板受弯、基础混凝土局部承压、锚栓锚固长度、柱脚受剪承载力验算，均满足规范要求，其中剪力由底板与基础顶面的摩擦力承担，设置抗剪键作为安全储备。

（四）优化效果对比

优化前后柱脚设计参数与经济性对比如下表所示。		
设计项目	原设计	优化设计
锚栓规格与数量	16 根 M45	12 根 M39
底板尺寸与厚度	$1000\text{ mm}\times 1000\text{ mm}\times 36\text{ mm}$	$800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 30\text{ mm}$
柱脚极限受弯承载力	$1380\text{ kN}\cdot\text{m}$	$840\text{ kN}\cdot\text{m}$
柱脚钢材总用量	302kg	196kg
锚栓施工难度	极高，需定制加工	常规，现货供应

由对比结果可知，优化后的柱脚尺寸与锚栓规格回归常规工程范围，钢材用量降低 35%，施工难度大幅下降，同时完全满足现行规范的抗震设计要求，兼顾了结构安全性与工程经济性。该项目投用至今，柱脚工作状态良好，未出现任何变形、裂缝等异常情况。

五、设计注意事项

采用 $0.5M_{pe}$ 控制指标设计时，必须严格把控设计理念的适用边界，仅适用于由刚度、长细比控制、中震下可保持弹性的框架柱，非框架控制的抗侧力结构、需利用柱身延性耗能的强度控制柱不得直接套用该方法。必须严格满足 GB 50017-2017 第 17.2.12 条的适用条件，即框架承担的总水平地震剪力占比需 $\geq 50\%$ ；抗震性能化设计必须进行专项验算，中震、大震下的构件内力，应采用振型分解反应谱法完成专项计算，结合对应设防烈度的地震参数与无分项系数的荷载标准组合确定，严禁采用小震内力线性放大的简化方式，确保柱底在设防烈度下不出现塑性铰。外露式柱脚的受剪承载力必须单独验算，性能系数不宜小于 1.0，水平剪力优先由底板与基础顶面的摩擦力承担，摩擦力不足时必须设置抗剪键，不得由锚栓承担水平剪力；锚栓的锚固长度必须满足规范极限状态要求，确保锚栓先于混凝土发生屈服破坏，避免出现混凝土锥体破坏、拔出破坏等脆性失效模式；当柱轴力较大、 $N/N_y>0.13$ 时， M_{pe} 会发生折减，柱脚的承载力要求相应降低，此时外露式柱脚的适用性更好，设计中可优先利用轴力的有利影响。

六、结论

外露式钢柱脚出现极限承载力不足、尺寸过大的核心成因，是传统“低强度高延性”抗震设计理念与钢柱刚度控制特性的错配，对于长细比、层间位移角控制的框架柱，其全塑性受弯承载力远高于地震作用下的柱底内力，柱身在设防烈度地震下无需利

用延性耗能，直接按强连接条款设计必然导致柱脚极不经济。现行《钢结构设计标准》GB 50017-2017 中的抗震性能化设计条款与 17.2.12 条的专项规定，为适配 " 高强度低延性 " 理念的柱脚优化设计提供了明确的规范依据，是解决该工程难题的核心技术路径。针对刚度控制的钢柱，通过设定中震弹性的抗震性能目标，采用 $0.5M_{pe}$ 的控制指标，可将柱脚钢材用量降低 35%，大幅减

小柱脚尺寸与锚栓规格，技术可行，经济合理，可为同类多层钢结构工程提供参考。设计中需严格把控优化方法的适用边界与适用条件，做好中震、大震下的专项承载力验算，确保结构抗震安全，不得盲目降低柱脚承载力要求。

参考文献

-
- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 (2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] 钢结构设计手册编委会. 钢结构设计手册 (第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 郭小农, 熊宙, 朱勐骏, 等. 外露式钢柱抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (06): 145-155.
- [6] 张相勇, 张艳霞, 刘冰. 多层钢结构外露式柱脚设计优化方法 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (08): 95-100.
- [7] 赵鹏飞, 张相勇, 刘军进. 钢结构柱脚设计方法修订建议 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (15): 78-84.

地下综合管廊运维难点以及应对措施研究 ——以台州市某地下综合管廊运维工程为例

陈立东

上海城建城市运营（集团）有限公司，上海 200000

DOI:10.61369/ERA.2026060024

摘 要：近年来，随着地下综合管廊在全国的迅猛发展，全国各处都新建了地下综合管廊，因此地下管廊的运维也变得越来越重要。以台州市 19.9km 地下综合管廊运维工程为依托，针对江南地区高地下水位、梅雨高湿环境及台风强降雨等情况，系统分析了管廊在运行阶段面临的机电设备腐蚀失效、监测盲区、雨水倒灌及结构渗漏开裂等关键技术难点。在此基础上，提出了基于分级编码的设备全生命周期管理方法、融合多源传感与 AI 预测的智能运维模式，以及“堵漏 + 补强”的结构病害治理技术，并构建了 BIM+GIS 一体化智慧运维平台。以期彻底改善管廊的运维质量，推动管廊运维技术水准的提高，确保其能够发挥最大的作用，为管廊内管线安全提供更好的保障。

关 键 词：地下综合管廊；运维和养护；应对措施

Research on the Difficulties and Countermeasures of Operation and Maintenance of Underground Utility Tunnels —Taking the Operation and Maintenance Project of an Underground Utility Tunnel in Taizhou City as an Example

Chen Lidong

Shanghai Urban Construction Urban Operation (Group) Co., Ltd., Shanghai 200000

Abstract： In recent years, with the rapid development of underground utility tunnels across the country, new underground utility tunnels have been constructed everywhere, making the operation and maintenance of these tunnels increasingly important. Based on the 19.9 km operation and maintenance project of an underground utility tunnel in Taizhou City, this study systematically analyzes key technical challenges faced during the operational phase, including corrosion and failure of electromechanical equipment, monitoring blind spots, rainwater backflow, and structural leakage and cracking, under conditions of high groundwater levels, humid plum rain environments, and typhoon-induced heavy rainfall in the Jiangnan region. Building on this analysis, it proposes a hierarchical coding-based equipment lifecycle management method, an intelligent operation and maintenance model integrating multi-source sensing and AI prediction, and a "leak-blocking + reinforcement" structural defect treatment technique. Additionally, it constructs a BIM+GIS integrated intelligent operation and maintenance platform. The aim is to thoroughly improve the quality of tunnel operation and maintenance, elevate the technical standards of tunnel operation and maintenance, ensure their maximum effectiveness, and provide better safeguards for the safety of pipelines within the tunnels.

Keywords： underground utility tunnel; operation and maintenance; countermeasures

引言

地下综合管廊作为典型地下设施，但是在日常的管廊运维管理中，却面临多重运维挑战。首先，已江南地区为例，地下水位较高，导致地下结构易出现渗漏隐患。其次，梅雨季节空气湿度长期处于高位，加之地下设施与外界存在显著温差，极易形成凝露现象。此外，台风季短时强降雨频发，若防范措施不到位，可能引发雨水倒灌风险。本文结合台州市地下综合管廊工程深入探讨当前地下管廊设施设备运维的状况，并从中发现其运维难点，最终给出有效的建议和改善措施。

一、项目概况

台州市地下综合管廊一期工程（台州大道段、市区段），全长共19.9公里，布设在道路一侧绿化带下或非机动车道与人行道下。台州大道段廊体采取双舱断面（综合舱和高压电力舱），入廊管线包括电力、通信、给水、中水。市区段共15.6公里，廊体采取三舱断面（综合舱、高压电力舱和燃气舱），入廊管线包括电力、通信、给水、中水、天然气，2023年工程竣工后开始养护运维，目前已经运维3年。

二、机电设备运维难点分析及解决措施

（一）机电设备运维难点

机电设备对于地下管廊来说非常重要，因为综合管廊内机电设备种类繁多，包括供电系统、照明系统、通风系统、排水系统、安防监控系统等设备，每种设备都有其特定的功能和维护要求，而在目前台州管廊运维期间，机电设备运维存在以下四处难点。

一是台州管廊机电设备有153类，经过现场统计包含大小机电设备将近300万个，数量庞大，涉及机电设备类型也较多，有大型配电柜，也有小型的应急照灯，分布广泛。

二是台州地下管廊内集成了供电、供水和通信等各种管线，一旦管线发生故障，如10KV电缆接头短路、中水管路漏水等情况，由于管廊内摄像头为固定布设，目前管廊内为200米一个区间，布设一个枪型摄像头，但是局部地方（倒洪段、转弯处）存在视频盲区，不易及时发现，容易造成事故的扩大化。

三是地下管廊湿度高、通风差，因为在每年的5月~7月梅雨季节期间，管廊内湿度达到了95%以上，而管廊内通风只有200米设置了一处风机，导致管廊内金属部件易腐蚀，电气设备易受潮短路，从而缩短机电设备的使用寿命，以温度/湿度传感器为例，原设计使用寿命在2年，而在管廊内潮湿的环境，使用寿命缩短为一年，传感器就失去了作用。

四是在汛期，管廊地下管廊面临雨水倒灌风险，因为管廊逃生口及通风口位于地面，而由于周边的施工以及开发，部分的通风口在周边地势低洼之处，一旦发生强降雨，极易导致雨水倒灌的情况。

（二）机电设备运维措施与创新技术

1. 分级编码的全生命周期资产管理技术

针对设备规模大及管理复杂的问题，如采用传统的设备登记台账的模式，工作量大且效率低下，同时难以对具体设备进行系统管理，所以在该项目中采用分级编码的全生命周期资产管理技术，项目首先在管廊智慧平台对机电设施进行标准化分类、按照管廊内机电系统分类进行一级编码，其次对子系统设备进行二次编码，如排水系统5000个设备，安防监控系统900个设备进行

二级编码，并进行动态资产管理，第二是根据运营重要程度的不同，对机电设备进行三级管理，第三是制定详细的设备维护计划，明确维护周期和维护内容，导入智慧平台，由管廊智慧平台自动生成巡检工单和维保工单。实现设备从安装、运行到报废的全过程数字化管理。并匹配差异化巡检与维护周期，从而实现由传统的统一管理向精细化分级管理的转变。

2. 多源感知融合的智能监测与故障预测技术

针对监测盲区问题，传统的运维模式是携带纸质记录表进行现场记录，在巡视后进行统计分类并开具工单，工作流程长，维修不及时。而此项目中采人工巡视通过使用VoIP手持终端每日记录设备运行状态，并上传终端服务器进行分析处理，确保机电设备处于可控的状态，同时配备红外热像仪对电缆接头温度进行检测。在管廊已有各类传感器（感温光纤、超声波液位仪、爆管检测仪等）的基础上，建立通过AI算法预测故障（如电缆接头过热预警），并及时定位并发布维修工单，实现由事后维修向事前预警的转变。

3. 高湿环境下的自适应通风除湿控制技术

利用数据对设备的性能进行准确的评价，在智慧平台进行评价分析后，针对每一种机电设备自行制定合理的设备维修策略，保障机电设施功能完好、运转可靠，确保各系统运行的稳定性和安全性。对机电设备的硬件进行升级，首先提高防潮防腐设计。其次优化通风除湿，根据温湿度传感器数据自动调节管廊送风机和吹风机的开启时间，实现风机启停的自动调节，防止凝露等现象，降低环境湿度，通过该技术，使得管廊内的湿度明显降低，极大延长的机电设备的使用寿命。

4. 极端降雨工况下的韧性防汛与应急保障技术

在汛期前管廊的所有出入口、高压细水雾泵站安装可拆卸式防水挡板，挡水板采用一级防水等级，挡水高度在1.0m~1.5m，并采用二级抗水压：抗水压 $\geq 0.05\text{MPa}$ ，渗水量 $\leq 0.1\text{L}/(\text{m}\cdot\text{h})$ ，当暴雨时快速安装，结合沙袋对管廊进行双重防护。雨季前全面清理排水沟、集水井淤泥，并排污泵及排污泵电机进行检测，检查并调整联轴器同心度，对泵体/电机润滑部位进行润滑，检查排污泵内有无异物。常备20KW小型发电机和4000W移动发电机、大流量移动排水泵以及数台潜水泵，在极端天气时部署、至关键节点增援。同时建立管廊智能应急仓库，根据管廊需要及时补充应急物资，通过韧性防汛与应急保障技术，让管廊在极端降雨工况下，做到事先预判，事中处置有序得当，确保管廊的安全运行。

三、土建结构病害及运维措施

（一）结构病害分析

台州市地下综合管廊在长期高地下水位及复杂外部环境作用下，结构逐步出现以施工缝渗漏水 and 结构裂缝为主的病害问题。其中渗漏施工缝约200条，导致地下管廊部分地方积水，影响设

备运行及结构寿命。同时台州地下管廊周边施工的工地较多，周边施工（如管线入廊、道路改造）可能引发地基沉降，导致结构开裂或接口错位，裂缝较多。部分区域通风不良、光线昏暗，给检测设备的操作和检测人员的工作带来困难，以及有些裂缝可能隐藏在管廊结构内部，或者表面被覆盖层遮挡，难以直接通过肉眼或常规检测方法发现。经过管廊内全线排查，共发现裂缝150余条，管廊裂缝纵向为主，横向较少。

（二）运维措施

1. 施工缝渗漏水治理措施

针对伸缩缝的渗水情况，根治管廊施工缝渗漏水病害，结合现场渗漏水情况，在台州管廊采取“先堵、再补强”的方式进行处理，通过结构堵漏注浆对施工缝进行堵漏，再通过压注环氧进行补强。由于本项目涉及管廊内施工，施工场地受限，首先选择小型设备机械进场施工，确保设备尺寸适合管廊内的操作空间，其次施工设备的布局优化，确保设备之间有足够的操作空间，同时进行作业流程的优化，减少不必要的工序和材料搬运。在施工过程中，首先对施工缝两侧的混凝土进行凿除，并对缝内的残渣清理干净、修补平整，接着根据现场情况，在缝隙表面用双快水泥封闭，再安装施工排架，采用手持冲击钻，在距离渗漏水施工缝边6~10cm处斜向60度打入 $\phi 14$ 注浆孔，钻孔纵向间距20~30cm，在已打好孔的位置埋入15cm金属注浆管阀，孔内清理干净，管阀埋入应牢固密实；采用手提式注浆泵，进行油性聚氨酯材料(A,B组)注浆施工，当出气孔出浆后将出气孔封闭，然后再进行屏浆，使缝隙充满聚氨酯浆液，阻断外来明水。注浆直至渗漏处两侧50cm范围有聚氨酯浆液溢出为止，最后待注浆材料固化后，将金属管拔出，用双快水泥封口。同时，对施工采用的油性聚氨酯材料性能要求如下：

表1 油性聚氨酯性能要求表

序号	项目	指标
1	密度 (g/cm^3)	≥ 1.05
2	粘度 ($\text{Mpa} \cdot \text{s}$)	$\leq 1.0 \times 10^3$
3	凝固时间 (s)	> 800
4	不挥发物含量 (%)	≥ 78
5	发泡率 (%)	≥ 1000

2. 结构裂缝处理措施

针对管廊内裂缝情况，首先用专业仪器（HC-CK102裂缝测宽仪、GLM80激光测距仪）进行裂缝检测。本项目采取多种检测技术结合，利用红外热成像技术，当裂缝存在时，其热传导特性与周围完好结构不同，在红外热像图上会呈现出温度差异，从而辅助识别裂缝。二是对于裂缝宽度的测量，选用精度高、分辨率高的电子裂缝测宽仪。这种仪器可以精确到0.01mm，能够满足裂缝宽度测量的高精度要求。同时测量裂缝深度时，可采用超声波检测仪。它利用超声波在不同介质中的传播速度差异来检测裂缝深度，通过合理设置检测参数和多次测量取平均值的方法，可以提高测量结果的准确性。例如本项目中的T0+650m南第1变形缝+16m（东侧墙），通过电子裂缝测宽仪和超声波检测仪，检测出该处裂缝

宽度0.25mm，裂缝长度1210mm，裂缝深度11.2mm，该处裂缝如未检测出来，日久裂缝会加大加深，甚至导致结构安全。裂缝处理，主要分为三个情形，普通裂缝，采用封闭或注浆加固处理，大于0.5mm的裂缝经检测后处理。已渗水的裂缝，采用嵌缝法、堵塞法或注浆法，止水后封闭处理。变形缝渗漏裂缝，采用注浆或止水带修复，特殊情况可安装外加导流槽。对于001 T0+845m（西侧墙）处的裂缝，裂缝宽度1.04mm，裂缝长度2030mm，裂缝深度40.2mm，采取了注浆法处理。

四、基于智慧平台长期检测运维

由于地下管廊环境复杂，存在水土压力、腐蚀性介质、震动荷载等问题。结构长期服役也会面临着材料老化、性能退化的风险。同时内部系统高危，并且隐蔽工程且空间受限，传统人工巡检效率低。需要定期开展结构健康检测（如裂缝监测、混凝土碳化深度检测）以及更高效的监测和检测手段。在本项目中结合物联网、以BIM+GIS等多种先进技术，构建管廊运维的数字化模型，以此实现对机电设备的实时监管，确保设备处于正常运行状态。同时采用结构数字化监测、机电数据实时交换等手段，对管廊的设施、设备状态进行智能监测，结合管廊的日常运维养护现状，搭建综合管廊数字化智能管养平台，实现数据资源综合管理、信息高度共享。最终实现与各管线部门间的信息共享和应用价值提升，保障管廊科学、高效、安全的运行。

设备设施智能监测主要对监控、通信、消防、通风、排水、供配电等系统设备状态进行实时监控并操作相关设备。为进一步提高地下综合管廊管养水平，保障管廊安全运行，通过采集分析地下管廊各类机电设备的实时运行数据，智能整合数据资源，完善管养功能，实现机电设备监控平台与业务平台间的数字化信息共享。针对土建设施管养需求，提出更精细、更科学的全生命周期数字化运维方案。通过应用全生命周期管理平台，实现设施基础数据、业务数据、监测数据的融合，形成数据资产，进而实现数据可视化、资产数字化、业务标准化、评价智能化、决策科学化。运维管理方案“立足全生命、动态分级管理、实现数字化”。

五、实施效果及经验总结

台州管廊经过三年的运维，通过一系列的改进措施，管廊内的机电设备延长了使用寿命，在梅雨季、汛期，因措施得当，管廊内没有发生积水，倒灌等情况，所有的机电设备都处于有效管控之中，同时管廊内的土建的渗水和裂缝问题，采用多种检测技术结合，并克服了管廊内空间狭小的问题，优化了施工流程、材料，为今后地下管廊运维积累了一定的运维管理经验。同时引入地下管廊智慧平台，形成线上线下协同联动的闭环管理网络，为每台机电设备建立电子档案，实现从坏了再修到预防性维护的转变。同时可以生成设备资料库，引导完善大中修，实现全生命养护

周期模式,降低大中修维修费用,真正实现“一屏观设施,一网管运维,动态防风险”,这也进一步推动了地下管廊设施全生命周期一体化运维。

在本项目的运维过程中,我带领团队发现了管廊中机电设备以及土建中存在的运维难点和痛点,并在解决这些技术难点的过程中,我始终秉持严谨的态度,深入分析问题的本质,结合管廊的实际情况,不断探索和提升管廊运维方案。通过这些努力,有效解决管廊运维的技术难题,还在实际应用上取得新的突破,为管廊运维提供宝贵的经验借鉴。

六、结语

总的来说,管廊的运维对于管廊以及管线的安全性和稳定性具有极其重要的意义,本文根据台州市地下综合管廊运维项目的实践,针对高湿、高水位及强降雨等复杂的环境条件,系统地分析了机电与结构运维中的关键技术问题,并提出了相应的解决方案。实践表明,该体系能有效提升管廊运行安全性与运维效率,也实现了从被动维修向主动预防的转变。未来,应进一步加强智能化技术在运维中的应用,推动地下综合管廊管理向更高水平发展。

参考文献

- [1] 姚浩,吕龙飞.城市地下综合管廊运维标准研究[J].城市建筑,2025(4):216-218.
- [2] 陈刚,张培兴,等.国内综合管廊运维管理研究领域文献计量分析[J].项目管理技术,2022(10):39-43.
- [3] 盖云波.城市地下综合管廊运维安全保障体系研究[J].暖通空调,2025(S1).
- [4] 张文明,张利峰,王斐,等.雄安新区地下综合管廊建设关键技术创新与应用[J].隧道建设(中英文),2026,46(01):214-223.
- [5] 张哲,刘敏,李鹏飞,等.城市地下综合管廊运维安全保障体系研究[J].暖通空调,2025,55(S1):435-438.

化工园区重大危险源风险分级管控与智能化预警系统构建策略

高彭, 许浩, 庞丽丽, 凌瑞昕
鲁西化工集团股份有限公司, 山东 聊城 252211
DOI:10.61369/ERA.2026060026

摘要 : 针对化工园区重大危险源数量多、分布密、关联性强的风险特征, 传统“人防”模式难以适应动态管控的需求。本文提出构建风险分级管控与智能化预警系统, 通过建立全息化危险源辨识机制、差异化分级标准与责任体系, 部署多源数据融合感知层、预警模型与闭环处置机制, 形成风险等级与预警联动、数据驱动优化及两级平台协同的融合路径, 并明确分阶段实施与制度保障策略。该系统旨在实现从被动响应向主动预防的转型, 提升化工园区安全韧性与应急效能。

关键词 : 分级管控; 全域监测; 预警响应; 动态优化

Construction Strategy of Risk Grading Control and Intelligent Early Warning System for Major Hazard Sources in Chemical Industrial Parks

Gao Peng, Xu Hao, Pang Lili, Ling Ruixin
Luxi Chemical Group Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252211

Abstract : In response to the risk characteristics of chemical industrial parks, such as numerous major hazard sources, dense distribution, and strong interconnections, the traditional "human defense" mode is difficult to meet the requirements of dynamic control. This paper proposes to build a risk grading control and intelligent early warning system. By establishing a holographic hazard source identification mechanism, differentiated grading standards and responsibility system, deploying multi-source data fusion perception layer, early warning model and closed-loop disposal mechanism, a fusion path of risk level and early warning linkage, data-driven optimization and two-level platform collaboration is formed. And the phased implementation and institutional guarantee strategies are clearly defined. This system aims to achieve the transformation from passive response to active prevention, and enhance the safety resilience and emergency efficiency of chemical industrial parks.

Keywords : grading control; global monitoring; early warning response; dynamic optimization

引言

随着我国社会经济发展, 化工园区的集聚优势日渐突出, 一批批化工园区项目相继落地。伴随而来的生产装置大型化, 生产工艺复杂性以及园内企业多元化都给园区的安全生产管理带来很大的挑战。化工园区重大危险源呈现数量多、分布密、关联性强的典型特征, 传统“人防”模式难以适应动态风险管控要求。构建风险分级管控与智能化预警系统, 是实现从被动响应向主动预防转变的必然路径, 亦是提升园区整体安全韧性与应急效能的核心抓手。

一、化工园区重大危险源风险识别与分级体系构建

(一) 危险源全息化辨识机制

化工园区重大危险源风险管理, 始于对危险源的全面精准辨识。建立全息化机制, 是从物料危害、工艺风险、设备完整性、环境敏感性四个维度构建系统化风险识别框架。该机制要求对园

区内所有重大危险源开展静态属性建档与动态行为追踪, 将设计阶段、运行阶段及变更管理过程中存在的风险因素纳入统一视图。通过构建能够动态更新的危险源数据库, 达成信息的一次采集、多方共享以及实时校准, 从根本上消除因为信息滞后或者责任交叉而产生的辨识盲区。这一机制得到确立之后, 为后续开展的风险分级工作、管控资源分配工作以及预警阈值设定工作提供

作者简介: 高彭 (1988.10-), 男, 汉族, 山东聊城人, 本科, 中级注册安全工程师, 研究方向: 化工行业全场景安全管控体系落地与技术迭代, 石油化工企业系统性安全风险防控体系建设。

了完整并且可靠的数据基础。

（二）风险分级标准与评估方法

在完成了对危险源进行全息化辨识的基础之上，需要建立起统一的风险分级标准以及评估方法，以此来实现风险管理的差异化以及精准化。采用定性和定量相结合的风险矩阵模型，把事故后果的严重性以及发生的可能性当作两个基本的维度来进行综合度量^[1]。其中，后果的严重性包含人员伤亡、财产损失、环境破坏以及社会影响这四个层面，可能性评估则综合考虑设备失效的概率、工艺偏离的频率以及管理失效的程度等因素。依据评估得出的结果，把重大危险源划分成红、橙、黄、蓝这四个等级，红色代表最高的风险等级，然后依次递减。不同的等级对应着差异化的管控主体以及响应层级：红色风险由园区管理部门提升级别进行监管，橙色风险由企业主要负责人重点进行管控，黄色与蓝色风险则由企业专业部门以及车间实施常规管理。该分级体系为后续开展的差异化管控措施制定工作以及预警阈值设定工作提供了明确的依据^[2]。

二、风险分级管控的责任机制与执行路径

（一）企业主体责任、园区监管责任、第三方技术支撑责任的界面划分

在风险分级体系确立之后，需要通过明确的责任划分以及差异化的管控清单，将管理要求转化成为可以执行的具体行动。企业作为重大危险源安全管理的责任主体，承担着风险辨识、日常监测、隐患整改以及应急准备等直接责任，确保各项管控措施能够落实到位。园区管理机构履行统一的监管职责，负责制定园区层面的风险管控标准，组织开展监督检查以及综合评估工作，并且对红色与橙色风险实施重点监管。第三方技术服务机构则提供专业化的支撑，承担监测系统的运维工作、风险评估的复核工作、预警模型的校准工作等技术服务，确保管控工作具备科学性以及客观性^[3]。三方责任明确之后，必须针对每一处重大危险源建立“一源一档、一源一策”的差异化管控清单，详细记载风险等级、管控措施、责任主体、检查频次以及应急处置要点，形成可以追溯、可以考核的闭环管理依据。

（二）分级管控措施的精准落地

针对那些属于不同风险等级的重大的危险源，必须要采取有着差异化、精准化特点的管控方面的措施，以此来确保管理方面的资源和风险的程度能够相互匹配。对于红色风险等级，实施提级管理，由园区管理机构直接介入并监督，责令企业在限定期限内完成系统性整改，并部署在线监测设备实施全天候实时监控，确保风险处于受控状态。对于橙色风险等级的情况，采取重点进行监管的方式，由企业的主要负责人牵头来制定治理的方案，明确整改的时限，园区的监管机构增加现场巡查的频次，定期地跟踪整改进展的情况。对于黄色与蓝色风险等级的情况，把它们纳入常规管理的范畴，由企业的专业部门以及车间按照标准化的作业程序开展日常的检查与维护，持续地推进降低风险的措施，并且通过岗位培训以及风险告知卡等形式，确保作业人员能够充分

地认知相关的风险^[4]。各个等级的管控措施之间形成梯次的衔接，实现风险治理的精准化以及高效化。

（三）管控效能评估与动态调整

风险分级管控体系的持续的有效性，依赖于对管控效能进行科学的评估以及对风险等级进行动态的校准。设置风险管控的绩效考核的指标，从隐患的整改率、监测数据异常的频次、预警响应的时效、巡查覆盖的完整性等维度，对企业以及园区管理方的履职情况进行量化的评价。考核结果纳入企业安全生产诚信体系及园区管理部门年度评价，形成正向激励与反向约束相结合的工作机制。在此基础之上，依托运行数据的积累以及事件回溯的分析，定期地开展风险等级的校准。具体来说，依据在线监测数据所反映的设备运行的状态、工艺参数波动的情况，结合日常检查当中发现的隐患的类型以及整改的难度，还有近周期之内发生的异常事件或者险兆事故，对现有的风险等级进行重新的评估^[5]。对于风险状况有显著改善的危险源，可以下调风险的等级，相应地调整管控资源的配置；对于风险呈现上升趋势的，则及时地上调等级并且强化管控的措施，确保分级的结果始终和风险的实际情况保持一致。

三、智能化预警系统的总体架构与技术支撑

（一）系统设计原则

智能化预警系统的设计，目的是构建覆盖化工园区整个区域、贯穿风险管控全部过程的主动防御的体系。系统遵循全域感知的原则，通过部署多层次的感知终端，实现对重大危险源工艺的状态、设备的健康、环境的参数以及人员的行为进行全面的监测，消除监测的盲区。坚持数据驱动的原则，以实时采集的多源数据作为核心的资产，替代传统的经验判断，为预警决策提供客观的依据。突出预警精准的原则，通过融合机理的模型和数据的模型，降低误报和漏报的比率，确保预警信息具备实际的指导价值。强调响应闭环原则，建立从预警触发、信息推送、处置确认到结果反馈的完整链路，杜绝预警信息悬置^[6]。此外，系统的设计和园区现有的安防、应急、环保等专业化的系统保持相互连通，避免形成信息的孤岛，实现数据的共享和业务的协同，从而支撑园区整体安全管理的一体化运行。

（二）多源数据融合与边缘感知层

多源的数据相融合以及边缘进行感知的这一层，它是属于智能化预警系统的数据方面的基础，承担起前端信息去采集以及初步做处理这样的核心功能。在重大的危险源以及关键的区域之处，系统去部署各类在线做监测的仪表，实时地去采集温度、压力、液位、可燃以及有毒气体浓度等关键的工艺参数以及安全指标。视频 AI 设备针对生产装置区、储罐区、装卸站台等重点部位开展全天候视频做监控，通过图像识别技术自动检测人员违章的行为、设备异常的状态以及环境的变化。物联网传感终端达成对关键设备振动、腐蚀、温度等健康状态做连续的监测，以及气象条件、泄漏扩散等环境指标做动态的感知。上述感知终端所采集到的数据通过边缘计算节点开展就近处理以及协议转换，达成

工艺参数、设备状态、环境指标、人员行为这四类信息的实时汇聚以及标准化接入，给后续预警分析提供完整、及时、可信的数据支撑^[7]。

（三）预警模型与阈值管理体系

预警模型以及阈值管理体系是智能化预警系统的核心决策的环节，决定着预警输出的准确程度以及有效程度。系统构建基于机理模型跟数据模型相融合的预警算法，其中机理模型依托工艺原理、物料特性以及设备失效模式，建立参数变化跟风险演化之间的因果关联；数据模型则利用机器学习方法，从历史运行数据当中挖掘异常模式以及潜在规律，两者相互补充，提升预警的灵敏程度以及可靠程度。在阈值管理方面，依据风险等级以及工艺特点，设定关注、预警、报警这三级阈值。关注阈值用来提示参数偏离正常范围，预警阈值标识风险上升需要采取预控措施，报警阈值则表明已接近事故临界状态必须立即处置。在此基础上，区分三种预警类型：参数超限预警针对单一指标超限，趋势异常预警识别参数持续劣化趋势，耦合风险预警则捕捉多参数交互引发的复合风险，实现对风险状态的全方位感知^[8]。

四、分级管控与智能化预警的融合机制与实施路径

（一）分级管控与智能化预警的融合机制

风险等级与预警联动策略是实现分级管控与智能化预警深度融合的核心环节。针对不同风险等级的重大危险源，系统配置差异化的监测灵敏度与预警阈值，高风险源对应高灵敏度监测与低阈值预警，确保风险在萌芽阶段即可被及时捕捉；橙色及以下风险则依据风险程度逐级放宽监测参数与预警边界。在预警触发了之后，系统自动去识别当前的风险等级，并且关联和这个等级对应的应急预案，明确应急响应的流程、资源调配的方案以及人员职责的分工，实现从风险识别一直到应急响应的没有缝隙的衔接^[9]。这种联动策略把风险分级的结果直接映射到预警参数以及应

急准备上面，有效地缩短了风险识别和响应处置这两者之间的决策链条。

（二）实施路径与保障措施

数据驱动的管控策略优化是推动风险分级管控与智能化预警系统持续演进的核心动力。系统通过对历史预警数据进行系统性的分析，识别出风险管控当中的薄弱环节，这些环节包括高频预警的点位、误报以及漏报的分布特征、响应处置的滞后环节等等，为管控资源优化配置提供量化的依据。在这个基础之上，引入机器学习算法，对风险分级边界以及预警阈值进行动态的优化。算法依据实际运行的数据以及历史事件的结果，持续地学习风险演化的规律，自动地调整分级参数以及阈值的设定，让风险等级评估更加符合实际的状况，预警触发更加趋向于精准。这种优化机制实现了从静态预设朝着动态自适应的转变，确保系统在面对工艺变更、设备老化、外部环境变化的时候，始终保持着对风险状态的准确刻画以及及时的响应^[10]。

五、结论

综上所述，化工园区重大危险源风险分级管控以及智能化预警系统的构建，它的核心价值在于实现安全管理从被动响应朝着主动预防的根本性的转变。通过建立全息化风险辨识、差异化分级管控、精准化预警响应与动态化优化改进的完整链条，系统将分散的管理要素整合为有机整体，显著提升了园区整体的安全韧性与应急效能。实践表明，仅仅单一地依赖技术投入或者制度约束都很难达到理想的效果，只有坚持“技术+管理”双轮驱动，以数据智能作为支撑，以责任体系作为保障，才能够实现风险治理的精细化以及长效化。面向未来，随着物联网、大数据以及人工智能技术的持续不断地演进，化工园区安全治理将会迈入以数据作为驱动、以预测作为核心的智能化新范式。

参考文献

[1] 李蕾. 基于风险分级管控的化工园区安全管理体系构建研究 [J]. 上海安全生产, 2024, 15 (3): 45-48.
[2] 李松明. 基于大数据驱动的化工园区企业动态风险分级管控系统的研究与实现 [J]. 华南理工大学学报, 2024, 52 (4): 112-118.
[3] 侯文涛, 张金岩. 化工园区石油化工装置拆除过程风险分析及安全控制研究 [J]. 山西化工, 2023, 43 (2): 56-60.
[4] 徐清军. 基于事故树和层次法的装置拆除中高处坠落事故风险分析 [J]. 化工安全与环境, 2022, 35 (6): 32-36.
[5] 黄兰, 多英全, 杨国梁, 易益茹. 危化企业安全风险分级管控实施工作程序与评估方法研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19 (8): 78-84.
[6] 曲秋影. 化工园区安全风险动态管控技术研究 [J]. 中国石油大学学报, 2024, 48 (3): 102-107.
[7] 纪永瑞. 化工园区风险分级管控平台建设研究 [J]. 中国石油大学学报, 2023, 47 (5): 89-94.
[8] 张丹. 滨州市化工企业风险分级管控和隐患排查治理体系建设 [J]. 中国石油大学学报, 2022, 46 (4): 75-80.
[9] 唐海江. 化工园区应急管理评价指标体系设计 [J]. 化工管理, 2023, 31 (7): 62-66.
[10] 于世震. 浅谈化工园区公共管廊事故应急救援体系建设 [J]. 化工管理, 2024, 32 (9): 55-59.

老旧小区综合改造中的排水系统更新 与道路恢复技术研究

王啸霄

上海汇成建设发展有限公司第七分公司, 上海 200233

DOI:10.61369/ERA.2026060027

摘要： 以市政道路施工为载体，系统梳理老旧小区综合改造中排水系统更新与道路恢复一体化施工技术。针对老旧小区普遍存在的管道老化、雨污合流及排水能力不足等问题，构建协同技术体系。在排水系统更新过程中，采用雨污分流改造路线，选用 HDPE 双壁缠绕管替代传统混凝土管，并结合开槽埋管与定向钻非开挖技术，在减少道路扰动的同时完成管网更新。道路恢复阶段，通过优化基层结构与沥青面层施工工艺，提高路面承载能力与耐久性。工程实践表明，改造后排水能力提高超过30%，路面平整度标准差由2.5mm降低至1.2mm，实现地下管网与道路结构的协同优化。研究成果可为类似老旧小区改造提供技术参考。

关键词： 老旧小区改造；排水系统更新；雨污分流；道路恢复技术

Research on Drainage System Renewal and Road Restoration Technology in the Comprehensive Renovation of Old Residential Areas

Wang Xiaoxiao

Seventh Branch, Shanghai Huicheng Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200233

Abstract： Taking municipal road construction as a carrier, this paper systematically explores the integrated construction technology for drainage system renewal and road restoration in the comprehensive renovation of old residential areas. In response to prevalent issues such as aging pipelines, combined stormwater and sewage flow, and inadequate drainage capacity in old residential areas, a collaborative technological framework is established. During the drainage system renewal process, a stormwater and sewage separation renovation approach is adopted, with HDPE double-wall corrugated pipes replacing traditional concrete pipes. This is combined with open-trench pipe laying and directional drilling trenchless technology to achieve pipeline network renewal while minimizing road disturbance. In the road restoration phase, the bearing capacity and durability of the pavement are enhanced by optimizing the base course structure and asphalt surface construction techniques. Engineering practice demonstrates that the drainage capacity has increased by over 30% post-renovation, and the standard deviation of pavement evenness has decreased from 2.5 mm to 1.2 mm, achieving collaborative optimization of the underground pipeline network and road structure. The research findings offer technical references for similar renovation projects in old residential areas.

Keywords： old residential area renovation; drainage system renewal; stormwater and sewage separation; road restoration technology

随着我国城市化持续推进，老旧小区综合改造已经成为提高城市品质、优化人居环境的关键举措^[1]。老旧小区排水系统更新工程通常依托道路开挖实施，道路结构既是施工载体，也是影响管网长期稳定运行的重要因素。因此，有必要结合老旧小区自身特点，从道路施工全过程出发，统筹研究排水系统更新与道路恢复的协同技术路径^[2,3]。本文梳理排水系统更新和道路恢复相关技术，梳理出适配这类工程的技术路径，梳理雨污分流技术的实际应用场景，整理管道更换工艺优化方向，最终形成完整技术模式。

一、项目概况

本研究依托华泾绿苑小区综合改造项目，小区建成于2003年，内部共有36幢多层砖混结构住宅楼，总建筑面积约12万

m²，常住居民约1500户，建设年代久远，小区排水系统出现老化，存在雨污混接现象，同时小区内部路面破损，各类附属设施陈旧。本次改造以雨污分流为核心，同步推进道路修复、绿化补种、非机动车库修缮等综合整治工作。该项目位于车流量较大的

区域,周边道路网络密度较高,施工过程中要同时保障居民日常出行,也要推进工程建设,呈现出来城市更新项目共有的特点。

二、基于道路施工的排水系统更新关键技术

(一) 老旧小区排水系统典型问题及其成因分析

上世纪80至90年代建成的多数小区,排水管道投入使用已超过三十年,这些管道多采用混凝土或铸铁材质,管道本体普遍出现腐蚀破损,接口部位也常有脱落,渗漏比例可达20%至30%,管道输送效率下降,地下水污染、地面沉降等问题也随之出现,小区排水能力达不到使用需求,和原设计管径偏小有关。现有雨水管规格多集中在DN200至DN300,污水管规格多集中在DN150至DN200,参数低于现行排水规范要求,雨季来临时,排水系统长期处于超出负载的运行状态,小区内涝频繁出现,约60%至70%的老旧小区仍沿用雨污合流排水方式,雨天大量雨水汇入污水管线,污水处理厂负载大幅提高,甚至出现污水外溢,直接影响环境卫生与居民日常居住状态。梳理问题成因,可发现建设阶段标准偏低,加上后续维护工作没有到位是问题出现的核心原因,约40%的小区从未完成系统性管道清淤与检测,导致管网状态逐步变差。

(二) 雨污分流改造技术路线与关键工艺研究

在建筑出墙管改造中,智能雨污分流装置的安装是本次改造的核心技术措施之一,解决老旧小区存在的“人为误接”问题,受历史条件限制,许多居民将洗衣机废水管私自接入屋面雨水立管,本应直排河道的雨水管道长期输送污水,引发环境污染,智能雨污分流器对应这一痛点设计,依靠水流量的动态变化实现通道自动切换。晴天状态下,楼宇立管内部流量较小的生活污水,一般来自洗衣机、洗涤池等,缓冲控制室内水位较低,分流器保持污水通道开启、雨水通道关闭,所有污水进入污水管网,雨天状态下,屋面雨水径流量增大,水流进入雨水收集室后水位升高,浮筒随水位浮起,带动杠杆机构旋转闸板,开启雨水通道,同步关闭污水通道,雨水排入雨水管网。雨量减小或降雨停止后,水位下降,浮筒回落,闸板自动恢复晴天状态下的初始位置。

在具体实施的阶段当中,首先要对建筑物的出墙管进行改造。这就需要将原来的合流立管进行拆分,使其分为雨水立管和污水立管。其中,雨水立管采用直径为110mm的UPVC管材,铺设坡度要不少于1.5%,以此确保雨水能够快速排出,避免形成积水现象。而污水立管则选用直径160mm的UPVC管材,铺设坡度控制在1.2%至2.0%的区间范围内,目的是防止污泥在管内出现沉积情况。接下来,第二步是在道路结构开挖的基础之上展开排水干管的铺设工作。管道施工是依托既有的道路破除来形成沟槽空间的,沟槽尺寸必须同时满足管道安装、后续道路结构恢复的要求。雨水系统所选用的HDPE双壁缠绕管,其环刚度是不低于 8kN/m^2 的,管径主要为DN300和DN400,这种管材能够适应车行道荷载,进而让结构维持稳定状态。污水系统是以DN300管径为主的,埋深被控制在1.2m到2.5m的范围之内。在进行管道铺设的时候,需要同步控制沟槽基础、回填的质量,采用砂石

基础和 360° 包覆工艺,通过这样的方式来提高管道受力的均匀程度。此措施不但增强了管道结构的稳定性,还为道路基层的恢复提供了均匀的承载条件。工程实践表明,沟槽回填质量对道路恢复后的沉降控制效果有着直接的影响,它是实现排水系统与道路结构协同稳定的关键环节。此次改造所完成安装的这类装置,其总数达到了268套。每一套装置都连接着De110或者De160的立管,设计的切换流量阈值是每秒0.5升至1.0升。在晴天的时候,当产生小流量污水,污水能够进入污水管,而在雨天,形成大流量雨水时,雨水可以进入雨水管。依靠这样一项技术,能够彻底解决“雨污混接”所存在的隐蔽性难题。

(三) 管道更新与检查井系统优化技术研究

管道更新施工要依靠道路开挖空间来进行,它的施工质量不但会对排水系统的运行效果产生影响,还直接关乎道路恢复后的结构稳定性。所以,在管道材料选型、施工工艺、检查井布置这几个过程中,要同时考虑道路荷载作用、结构层恢复的要求,达成地下管网和地面结构的协同设计。选择DN300规格的HDPE管去替换原有的混凝土管,管道使用寿命从原本的15年提高到50年,由此能够看出材料选择对系统耐久性有着决定性的影响,铺设环节把开槽埋管和定向钻非开挖工艺结合起来,穿越道路和绿化带的时候采用定向钻技术,最大程度减少对小区环境的破坏,非开挖段占比在15%至20%之间,降低了施工扰动、维护成本。本项目地下空间有限且既有管线交叉较多,非开挖技术的应用使施工冲突有效降低,施工效率得以提高。检查井系统优化主要围绕井位合理布置、井型多样化选择、井盖材质升级进行,一体化成品检查井采用PE或PP材料,有450mm、630mm、800mm三种井筒直径规格,能适配不同管径和埋深需求,井盖选用钢纤维混凝土或复合树脂材料,承重能力达D400级别,可满足车行道荷载要求,其内置防盗锁扣设计,能降低井盖丢失风险。优化管道与检查井系统后,检查井数量减少10%至15%,渗漏风险降低超30%,排水效率提高,对道路结构的扰动减少。

三、面向管网稳定的道路恢复与结构优化技术

(一) 道路恢复中基层处理与材料选型技术研究

在道路恢复进程里,基层结构施工对路面使用性能影响重大,还是保障排水管道长久稳定运行的关键部分。排水管道埋在道路结构下方,沟槽回填质量会直接影响路基承载能力、沉降控制成效。所以在基层处理阶段,要把管道沟槽回填和道路结构恢复当作一个整体来把控。沟槽回填运用分层夯实技术,每层厚度控制在20cm到25cm的范围,压实度不低于95%。这种做法能防止道路结构出现不均匀沉降,也能避免管道因土体松散出现位移或者接口开裂,达成“路—管—体”的结构稳定。中基层选用ATB-25沥青稳定碎石,厚度为30cm,骨料级配合理,空隙率控制在3%至6%,该配置让基层拥有出色的抗变形能力,提高结构整体的承载水平,面层设计为双层沥青结构,下面层为6cm厚AC-20C粗粒式沥青混合料,骨料最大粒径19mm,上面层为4cm厚AC-13C细粒式沥青混合料,骨料最大粒径13mm,表面

纹理深度控制在0.4mm至0.6mm，提高路面防滑能力。SBS改性沥青应用后，材料软化点可达到60℃以上，低温延度超过30cm，路面高温环境下抵抗车辙变形的能力、低温环境下避免开裂的能力都得到提高。考虑本项目道路长期承受较高通行频率及停车荷载，上述结构组合在提高承载能力的同时，也增强了耐久性，符合实际使用需求。

（二）沥青路面摊铺工艺与质量控制技术研究

沥青路面摊铺工艺包括摊铺、碾压和接缝处理这三个核心步骤，每一环节都要严格控制工艺参数，保证最终结构拥有符合要求的性能和使用时长。摊铺开始前，施工人员要在基层表面喷洒乳化沥青透层油，喷洒剂量控制在0.7–1.0 L/m³范围内，增强基层和沥青层之间的粘结强度，避免层间出现分离脱离。摊铺作业进行时，摊铺机行进速度限定在2至4m/min，搭配夯锤频率控制在1000至1200次/min，保证沥青混合料可以均匀铺设，获得符合要求的初始压实度，沥青混合料运送到施工现场时温度不低于150℃，摊铺作业时内部温度维持在140℃以上，保障材料拥有符合要求的可摊铺状态和粘结性能。碾压作业分为初压、复压和终压三个部分，初压使用双钢轮压路机静压2遍，行进速度控制在2至3 km/h，形成初步密实结构，复压阶段用轮胎压路机揉压4至6遍，行驶速度调整为3.5至4.5 km/h，可消除混合料内部空隙，终压阶段使用钢轮压路机收面2遍，清除碾压产生的轮迹，提高路面表层平整度。横向接缝处理环节，先做垂直切割，再涂刷热沥青，碾压完成后接缝平整度可控制在3mm以内，减少接缝位置应力集中和水侵害风险，现场检测数据显示，路段整体压实度超过98%，平整度标准差小于1.2mm，工艺调整优化后，路面使用寿命延长约20%，可体现摊铺工艺、质量控制技术应用于老旧小区道路恢复的实用价值，也能展现相关技术的优势。

（三）侧平石、窨井盖等附属设施恢复技术研究

侧平石安装使用C25混凝土制作基础，基础厚度15cm，宽度比侧石宽出10cm，保障侧石稳定，同时满足承载要求，侧石统一规格为100cm×30cm×12cm，直线段安装缝宽控制在1cm以内，曲线段缝宽不超过1.5cm，缝隙填充使用M10水泥砂浆，勾缝饱满度需达到100%，阻断水渗漏通道，避免结构松动。雨水口的布置要和道路纵横坡设计一起进行同步优化，这样能让路表径流迅速地汇入排水系统，防止路面积水给行车安全和路面结构带来不好的影响，进而实现排水功能和道路使用性能共同提高。侧平石安装的坡度与路面横坡一样，大多处于1.5%至2.0%的范围里，以此保证雨水能够顺利流入雨水口，加快排水速度，减少路面积存的雨水。在窨井盖恢复环节，车行道采用D400级球墨铸铁井盖，这种井盖可以承受40吨荷载，并且配套加装防坠网，防坠网承重不低于100 kg，以此提高安全性能。在人行道、绿化带区域，采用的是B125级复合树脂井盖。这种井盖具有重量比较轻的特点，同时防盗性能非常出色。其井盖安装高程偏差能够控制在±3mm范围之内，以此消除高差情况，防止车辆通行的时候出现颠簸现象，进而对行车体验起到优化作用。根据行业统计数据表明，精细化施工能够让井盖周边路面破损率降低50%，并且可使侧平石使用寿命延长至15年以上。结合本项目车行道与人行道交

错分布的特点，差异化选用井盖类型，有效提升了安全性与经济性。依托科学合理的附属设施恢复技术，道路结构整体稳定性得到保障，使用时间更长，小区周边环境视觉效果更好，道路恢复工程技术和路面结构优化实现深度融合。

四、施工期间交通组织与临时设施布置技术研究

由于排水系统更新需依托道路施工展开，施工期间交通组织直接影响工程实施效率及居民出行体验。施工期间需结合小区出入口数量及车流量条件规划临时通行路线，单向通行路段长度控制在200m范围以内，每间隔50m设置一处错车区，舒缓车辆通行压力，小区主要出入口安排交通协管员，早晚高峰时段增加现场疏导力量，车辆等待时长压缩至5min以内，压缩交通延误时长，临时便道选取碎石或钢板铺设，路面宽度不小于3.5m，可支持消防车等应急车辆顺利通过。材料堆放区选在闲置空地或绿化带边缘，堆放面积控制在100m²以内，表层覆盖苫盖防尘网减少扬尘扩散，落实生态防护要求，临时水电接驳点设在施工区边缘，电缆采用架空或穿管方式布置，布设高度不低于5m，避开车辆通行区域，降低刮碰损坏概率，施工围挡沿施工范围连续布设，转角位置更换为透明围挡，保留开阔视线，降低通行风险。夜间施工区域选用LED投光灯提供照明，照度维持在50勒克斯以上，满足施工活动安全要求，方案投入使用后，施工期间车辆通行效率可维持在非施工时段的80%以上，居民出行满意度上升20%，该技术方案的有効性与实用价值均得到实际验证。

五、实施效果及经验总结

改造完成后，小区排水系统完成雨污分流改造，雨水管道总长度达到9300 m，污水管道长度为7800 m，管道材质更换为HDPE和UPVC，设计使用年限从原有15年延长至50年，闭水试验数据显示，全部新装管道渗水量低于每日每公里2.5 m³，接口密封性符合要求。新建检查井1750座，井盖选用D400级钢筋纤维混凝土或复合树脂，防盗性能提高，井周路面未出现沉降裂缝，道路恢复完成后，路面平整度标准差从改造前的2.5 mm降至1.1 mm，压实度达98%以上，侧平石安装全部合格，绿化修复面积26456 m²，新植乔木成活率95%，小区整体环境得到改善。施工过程中，施工方通过居民说明会、每周简报、入户预约等方式，累计收集居民意见280条，已解决其中258条，居民满意度调查得分为89分，项目实施总结出几方面经验，前期细致勘查调整方案，可减少后期施工返工，联动物业、居委会、业委会和施工方，能及时化解施工过程中的各类矛盾。施工中使用定向钻这类非开挖技术穿越绿化带，可减少绿化破坏面积约两成，施工环节严格分层回填压实，可避免路面投入使用后出现沉陷问题。老旧小区改造过程中，排水系统更新与道路恢复不应作为独立工序实施，而应以道路结构为施工载体，构建地下管网与地面结构协同实施模式。通过一体化技术路径，可有效提升排水系统运行效率，并增强道路结构耐久性，实现功能与结构的统一优化。

六、总结

本文针对老旧小区排水系统更新与道路恢复技术进行系统性研究,梳理出雨污分流、管道更新及道路恢复三类关键技术环节的施工要点,也梳理出对应环节的质量控制方法,确认科学技术路线搭配精细化施工管理,可决定提高改造工程最终质量,选取

典型小区进行改造实践,实践数据显示,改造后小区排水能力提高超过30%,区域内涝问题得到缓解,道路平整度出现变化,平整度标准差由2.5mm降低至1.2mm,技术措施的有效性、工程质量的提高都得到验证。建立完善居民沟通机制,同时搭建完整施工组织模式,施工阶段居民投诉率下降40%,居民满意度升至90分以上,社会管理与技术实施可形成良性互动。

参考文献

- [1] 宁济平. 老旧小区排水单元海绵化改造研究 [J]. 低碳世界, 2025, 15(10): 19–21.
- [2] 陈信霖, 张树林, 毛立娟, 等. 老旧小区排水管网运行效能定量评估研究 [J]. 给水排水, 2023, 59 (06): 134–140+149.
- [3] 林日云. 老旧小区改造景观设计研究——以厦门市思明区老旧小区为例 [J]. 居业, 2025, (09): 82–84.
- [4] 王鹏, 郭宰宏, 严瞿飞, 等. 北方某城市老旧小区专用排水设施研究及治理措施 [J]. 给水排水, 2025, 61(05): 109–114.

有空气阻力的抛体运动探析

刘愉快, 侯敏玲, 郑雯丽

肇庆学院电子与电气工程学院, 广东 肇庆 526061

DOI:10.61369/ERA.2026060028

摘 要 : 通过分析两种不同空气阻力形式下物体抛体运动, 引导学生利用微元法、配速法等求解真实物理问题, 旨在提高学生模型思维、数理结合能力。同时, 希望能够让学生建立大 - 中衔接的物理知识体系, 认识到科学是在不断修正和逼近中认识世界的过程和从“学习物理知识”向“掌握物理学思想方法”转变。

关 键 词 : 抛体运动; 空气阻力; 微元法; 配速法

Analysis of Projectile Motion with Air Resistance

Liu Yukuai, Hou Minling, Zheng Wenli

College of Electronics and Electrical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing, Guangdong 526061

Abstract : Here, by analyzing projectile motion using two different forms of air resistance, it will help students use the infinitesimal method and velocity decomposition methods to solve real physical problems. This aims to enhance their modeling thinking and ability to integrate mathematics and physics. Meanwhile, it is expected that students will establish a physics knowledge system that bridges high school and university, recognizing that science is a process of constantly revising and approximating our understanding of the world, and transitioning from "learning physics knowledge" to "mastering the methods of physical thinking."

Keywords : projectile motion; air resistance; infinitesimal method; velocity decomposition methods

抛体运动作为牛顿运动定律的直接应用, 具有承上启下的作用: 既需综合运用直线运动、牛顿定律和受力分析等知识, 又为后续学习圆周运动、万有引力和电磁场中的类平抛运动奠定基础。教学实践中通常从忽略空气阻力的理想模型入手, 帮助学生聚焦于运动分解、牛顿定律和能量转化等核心规律, 从而建立基本物理观念与科学思维方法。然而在生活实践中, 如足球轨迹、滑雪跳跃、无人机投掷等, 空气阻力影响显著。为促进学生基于真实情境的知识迁移能力, 切实提升学生模型建构能力, 高中物理教学应引入有空气阻力的抛体运动问题。考虑空气阻力时, 抛体模型主要分为两类: 一是低速小物体(如雾滴、烟尘)的运动, 空气阻力与速率成正比, 即 $f = -kv$; 二是高速度或尺度较大(如跳伞、飞机飞行、汽车高速行驶、雨滴下落等)的运动, 阻力与速率的平方成正比, 即 $f = -kv^2$ 。^[1-5] 这两类模型分别对应不同的流体动力学区间, 体现了物理建模中按实际情况简化问题的重要性。

一、空气阻力 $f = -kv$ 情况下的竖直上抛问题

(一) 原题呈现

【北京2024年高考物理8题】将小球竖直向上抛出, 小球从抛出到落回原处的过程中, 若所受空气阻力大小与速度大小成正比, 则下列说法正确的是()

- A. 上升和下降两过程时间相等
- B. 上升和下降两过程损失的机械能相等
- C. 上升过程合力的冲量大于下落过程合力的冲量
- D. 上升过程的加速度始终小于下落过程的加速度

分析: 不考虑空气阻力, 小球在空中运动时间为 $t = 2v_0 / g$, 上升高度为 $h_0 = v_0^2 / 2g$ 。有空气阻力时, 上升过程空气阻力向下, 下降过程空气阻力向上; 整个运动过程, 只有阻力做功, 因而小

球落地速度 v_f 小于 v_0 , 且机械能的损失不等。为了让学生更清晰的知道空气阻力下其运动时间, 我们通过多种方法对其进行定量的求解分析。

(二) 微元法求解小球运动时间

取竖直向下为正方向, 利用微元法有

$$(mg + kv)t = m\Delta v$$

由 $\Delta h_1 = vt$ 并对整个过程进行叠加, 可得

$$mgt_1 + kh_1 = mv_1 \quad (1)$$

下降过程中, 设下降时间为 t_2 。同理, 有

$$(mg - kv)t = m\Delta v$$

同理可得

$$mgt_2 - kh_1 = mv_2 \quad (2)$$

(1) 和 (2) 式相加, 即

$$mgt_1 + mgt_2 = mv_1 + mv_2$$

小球在空中运动时间 $t' = t_1 + t_2 = (v_1 + v_2) / g$ 。

(三) 图像法求解小球运动时间

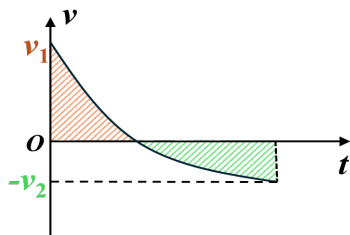


图1 例1第二问的图解法示意图

小球 $v-t$ 图如图1所示, 横坐标上下两部分面积表示其上升和下降的高度, 且它们的面积相等。由于 $f=kv$, 所以图1也是小球在整个过程的 $f-t$ 图。在 $f-t$ 图中, 显然小球在整个运动过程中空气阻力对它的总冲量为零, 也就是说小球在运动的全过程中受到的总冲量仅为重力对它的冲量。根据动量定理, 有

$$mgt = mv_2 - m(-v_1)$$

即

$$t = \frac{v_1 + v_2}{g}$$

(四) 微积分法求解小球运动时间

为了更清楚的知道 t_1 、 t_2 以及 h_1 的具体表达式, 下面将利用微积分对进行分析^[5]。

对于上升部分, 取向上为正方向, 运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = -mg - kv$$

对上式分立变量, 积分得上升时间 t_1

$$t_1 = \int_{v_1}^0 \frac{dv}{-g - \frac{k}{m}v} = \frac{m}{k} \ln \left(\frac{mg + kv_1}{mg} \right) \quad (3)$$

利用 $\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dt} = v \frac{dv}{dy}$, 运动方程可改为

$mv \frac{dv}{dy} = -mg - kv$ 对上式分离变量, 积分从初始位置 $y=0$ 到最大高度 $y=h_1$ 可得

$$h_1 = \frac{mv_1}{k} - \frac{m^2 g}{k^2} \ln \left(1 + \frac{kv_1}{mg} \right) \quad (4)$$

同理可以得到 h_1 与 v_2 的关系式

$$h_1 = -\frac{mv_2}{k} - \frac{m^2 g}{k^2} \ln \left(1 - \frac{kv_2}{mg} \right) \quad (5)$$

下降过程取向下为正方向, 落地速度为 v_2 。运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = mg - kv$$

积分可得下降时间 t_2 为

$$t_2 = \int_0^{v_2} \frac{dv}{g - \frac{k}{m}v} = \frac{m}{k} \ln \left(\frac{mg}{mg - kv_2} \right) \quad (6)$$

小球在空中运动的总时间 t' :

$$t' = t_1 + t_2 = \frac{m}{k} \ln \left(\frac{mg + kv_1}{mg - kv_2} \right) \quad (7)$$

联立 (4) 和 (5) 式可得:

$$(v_1 + v_2) = \frac{mg}{k} \ln \left(\frac{mg + kv_1}{mg - kv_2} \right)$$

将上式带入 (7) 式, 可得 $t' = \frac{m}{k} \ln \left(\frac{mg + kv_1}{mg - kv_2} \right) = (v_1 + v_2) / g$, 此结果与利用上面里面动量定理处理结果一致。

二、空气阻力 $f=-kv$ 情况下的平抛问题

(一) 平抛例题

【例2】将一小球从距水平地面高 h 处的 A 点以速度 v_0 水平抛出, 小球运动过程中受到的空气阻力大小始终与速率成正比, 方向始终与运动方向相反, 落到水平地面上的 B 点时速度方向与水平地面的夹角为 45° , 如图2所示。已知小球从 A 点抛出时受到的空气阻力最大, 最大值恰好等于自身受到的重力, 重力加速度大小为 g 。求: 1) 小球落到 B 点时的速度大小; 2) 小球的水平射程 x ; 3) 小球从 A 点运动到 B 点的时间 t_0 。

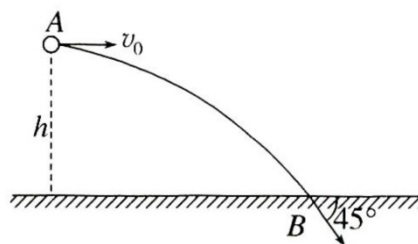


图2 例2示意图

【分析】根据题目可知小球在 A 点抛出时受到空气阻力 f 最大, 最大值恰好等于自身受到的重力, 即 $f=kv_0=mg$, 可以得到 $v_0=mg/k$ 。小球被抛出后, 其受到向下的重力和与速度方向相反的空气阻力。首先我们介绍利用微积分知识分析解决此类问题的过程与方法^[6], 以便能够理解其速度和运动的变化形式; 然后通过其速度和运动的变化规律, 巧用“配速法”求解含有与速度有关变力的平抛问题。

(二) 微积分法求解

将运动分解为水平和竖直方向, 取 y 轴向上为正, 初始条件为: $x(0)=0$ 、 $y(0)=h$ 、 $v_x(0)=v_0$ 、 $v_y(0)=0$ 。

运动方程为：

$$m \frac{dv_x}{dt} = -kv_x$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -mg - kv_y$$

利用分离变量的方法并结合初始条件可以求得

$$v_x(t) = v_0 e^{-\frac{k}{m}t}$$

$$v_y(t) = \frac{mg}{k} \left(e^{-\frac{k}{m}t} - 1 \right)$$

设落地时刻为 t_0 ，落地时速度与水平方向成 45° ，即：

$$\tan 45^\circ = \frac{|v_y(t_0)|}{v_x(t_0)}$$

即：

$$v_0 e^{-\frac{k}{m}t_0} = -\frac{mg}{k} \left(e^{-\frac{k}{m}t_0} - 1 \right)$$

化简可得：

$$t_0 = \frac{v_0 \ln 2}{g}$$

将上式带入速度 $v_x(t)$ 和 $v_y(t)$ 的表达式，即可求出落地时速度分量为：

$$v_x(t_0) = \frac{v_0}{2}, v_y(t_0) = -\frac{v_0}{2}$$

速度大小为：

$$v_B = \sqrt{v_x(t_0)^2 + v_y(t_0)^2} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

由 $v_x(t)$ 的表达式，可以求出其水平位移为：

$$x = \int_0^{t_0} v_x(t) dt = \frac{mv_0}{2k} = \frac{v_0^2}{2g} \quad (9)$$

现在，我们分析竖直位移与初速度 v_0 的关系：

$$y(t_0) = h + \int_0^{t_0} v_y(t) dt = 0$$

对上式中的积分进行计算，可得：

$$\int_0^{t_0} v_y(t) dt = \frac{m^2 g}{k^2} \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t_0} \right) - \frac{mg}{k} t_0$$

化简可得：

$$\int_0^{t_0} v_y(t) dt = \frac{v_0^2}{2g} - v_0 t_0$$

即：

$$h = -\int_0^{t_0} v_y(t) dt = v_0 t_0 - \frac{v_0^2}{2g}$$

解得

$$t_0 = \frac{h}{v_0} + \frac{v_0}{2g}$$

(三) 配速法求解

如果以速度的方向为正方向，重力相对速度的方向就是一个“变力”。基于此，我们可以在任意时刻的速度 v 中分解一个 v_0 ，使其对应的阻力 $(-kv_0)$ 与重力平衡，这种情况下小球受到的合力 f' 就时刻与速度 v' 在同一直线上，如图3所示。这种方法称为配速法。

利用配速法后，在 A 点小球的合成初速度为 $v'_0 = \sqrt{2}v_0$ 且与竖直方向夹角为 45° ，任一时刻小球的合力 f' 与合成后的速度 v' 在一条直线上，即小球的真实运动可以看成竖直向下的匀速直线运动和斜向上的变速直线运动的叠加。到达 B 点时速度 v_B 与水平地面的夹角为 45° ，可知 v_B 与 v' 方向垂直，可知 $v_B = \frac{\sqrt{2}}{2}v_0$ ， $v'_B = \frac{\sqrt{2}}{2}v_0$ 。

设在 t 时刻，小球的合成后的速度 v' ，在一极短时间 Δt 内，利用微元法可知：

$$-kv'_\Delta t = m\Delta v'$$

式中 $v'_\Delta t$ 表示小球在 Δt 时间内沿着 v' 运动的距离 Δs 。从 A 点运动到 B 点的整个过程利用动量定理，即对上式进行求和：

$$-ks = m(v'_B - v'_0)$$

$$\text{即 } s = \frac{m(v'_0 - v'_B)}{k} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{mv_0}{k}$$

s 为小球从 A 点运动到 B 点其沿着速度 v' 运动的路程，水平射程 $x = s \cdot \cos 45^\circ$ ，即

$$x = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{mv_0}{k} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{v_0^2}{2g}$$

结果与 (9) 式一样。小球从 A 点运动到 B 点的时间为 t_0 ，其在 y 方向的总位移来源于两部分。第一部分为沿着竖直方向向下的匀速直线运动，第二部分为小球在斜向上 45° 方向运动产生的向上位移为 y' ，根据上述分析可知道 $y' = s \cdot \cos 45^\circ = \frac{v_0^2}{2g}$ 。即：

$$h = v_0 t_0 - y' = v_0 t_0 - \frac{v_0^2}{2g}$$

上式进行化简，即可求得 t_0

$$t_0 = \frac{h}{v_0} + \frac{v_0}{2g}$$

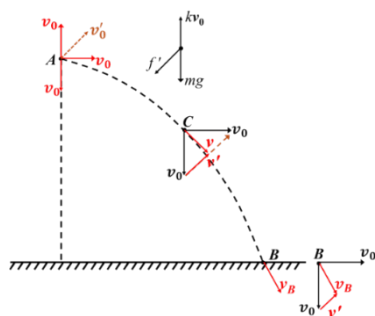


图3 例2解法二示意图

三、空气阻力 $f=-kv^2$ 情况下的平抛问题

(一) 例题再现

【例3】跳伞是一项充满挑战的户外运动。运动员在下落过程中，受到空气阻力的大小与下落速度的平方成正比，即 $f=-kv^2$ 。设运动员和伞的质量为 m ，跳伞运动员在张开降落伞的瞬间初速度 $v_0=0$ ，随着速度的增加，空气阻力不断增大，当空气阻力增大到与重力相等时，运动员达到下落的最大速度，称为终极速度 v_T 。分析跳伞运动员张开伞后，其速度随时间变化关系。

(二) 微积分法求解任一时刻

当空气阻力增大到与总重力相等的时候，跳伞运动员就达到了下落的最大速度，称为终极速度 (v_T)。根据 $kv_T^2=mg$ ，可以得到 $v_T=\sqrt{mg/k}$ 。

取竖直方向为正方向，把人伞作为一个整体，根据牛顿第二定律可知：

$$m \frac{dv}{dt} = mg - kv^2$$

初始条件为： $t_0=0, v_0=0$ ； t 时刻，速度为 v ，对上式分离变量积分可得

$$\frac{1}{2v_T} \ln \frac{v_T + v}{v_T - v} = \frac{k}{m} t$$

化简可得

$$v = \frac{1 - e^{-\frac{2gt}{v_T}}}{1 + e^{-\frac{2gt}{v_T}}} v_T \quad (10)$$

如果 t 时刻下落的高度为 h ，则下落高度 h 与速度的关系为：

$$\frac{dh}{dt} = v(t) = v_T \cdot \frac{1 - e^{-\frac{2gt}{v_T}}}{1 + e^{-\frac{2gt}{v_T}}}$$

积分得：

$$h(t) = \frac{v_T^2}{g} \ln \left[\cosh \left(\frac{g}{v_T} t \right) \right] \quad (11)$$

若跳伞运动员和伞的总质量 $m=80 \text{ kg}$ ，阻力系数 $k=0.25 \text{ N}^2 \cdot \text{m}^2/\text{s}$ ，重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 ，则跳伞运动员最后的终极速度约为 56 m/s 。

四、总结

本文通过分析两种不同类型空气阻力下的抛体运动，让学生体会从“理想模型”过渡到“物理现实”和从“代数思维”跃升到“微分思维”的过程，逐步认识到理想化模型的使用条件、“模型建构”的重要性，有意识的构建中学到大学螺旋式的知识体系和深刻理解物理学提供的不是一成不变的真理而是一系列逐渐逼近真理的模型。

参考文献

- [1] 何盼盼, 胡小龙. 考虑空气阻力与速度平方成正比的小球下摆问题——缘起2022年湖北高考物理卷力学实验题 [J]. 物理教学, 2023, 45(06): 67-70.
- [2] 王永雄. 有阻力的抛体运动问题探究 [J]. 物理教学探讨, 2024, 42(06): 73-76.
- [3] 赵志栋, 陈光红. 从抛物线的几何性质看抛体运动的射程问题 [J]. 物理教师, 2016, 37(07): 56-57.
- [4] 郭雪鹏. 考虑空气阻力的斜抛运动研究 [J]. 物理教学, 2017, 39(04): 14-16.
- [5] 殷仁勇. 物理竞赛抛体问题的处理与运用 [J]. 物理教师, 2019, 40(11): 95-97.
- [6] 漆安慎, 杜婵英. 普通物理学教程·力学: 第四版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.

智慧智造产业园钢结构工程施工技术研究

——以环普重庆项目为例

李阳光

上海中尧达建筑工程有限公司，上海 201400

DOI:10.61369/ERA.2026060029

摘要： 本文以环普重庆智慧智造产业园钢结构施工为研究对象，从大跨度钢梁吊装、狭小高强螺栓节点、立体仓库智能设备接口精度等施工难点出发，对施工痛点和相应的技术策略进行系统的分析。对高低起伏场地构件运输及吊装、螺栓节点精度控制、屋面防水及结构平整度等提出智能化数控加工、模块化工厂预装、数字化质量检测相结合的施工方法。前期场地优化、施工精度全程控制、数字化支撑等措施，使关键节点偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，提高施工效率、质量，给类似智慧智造产业园钢结构工程提供可以复制的经验。

关键词： 智慧智造；产业园；钢结构工程；施工技术

Research on Construction Technology of Steel Structure Engineering in the Smart Manufacturing Industrial Park — Taking the Huanpu Chongqing Project as an Example

Li Yangguang

Shanghai Zhongyaoda Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 201400

Abstract： This paper takes the steel structure construction of the Huanpu Chongqing Smart Manufacturing Industrial Park as the research object. Starting from construction challenges such as the hoisting of large-span steel beams, narrow high-strength bolt joints, and the precision of interfaces for intelligent equipment in three-dimensional warehouses, it systematically analyzes the construction pain points and corresponding technical strategies. Construction methods that combine intelligent CNC processing, modular factory pre-assembly, and digital quality inspection are proposed for the transportation and hoisting of components on uneven terrain, precision control of bolt joints, roof waterproofing, and structural flatness. Through measures such as preliminary site optimization, full-process control of construction precision, and digital support, deviations at key nodes are controlled within $\pm 2\text{mm}$, improving construction efficiency and quality. This provides replicable experience for steel structure projects in similar smart manufacturing industrial parks.

Keywords： smart manufacturing; industrial park; steel structure engineering; construction technology

伴随着智能制造产业的迅速发展，智慧智造产业园作为新型产业发展的重要载体，对钢结构工程施工提出了更高的要求。钢结构因跨度大、施工速度快，被用作产业园主体结构的主要方案。但是产业园功能集成化、设备智能化、场地复杂性给钢结构施工带来空间精度高、节点受力复杂、管线接口协调难等问题。本文以环普重庆智慧智造产业园钢结构施工为研究对象，对施工技术及难点进行分析，并提出相应的对策，探索智能化加工、模块化安装、数字化质量检测在钢结构工程中的应用，为产业园区建设提供一定的参考。

一、项目概况

环普重庆临空智慧智造产业园项目，环普重庆智慧智造产业园位于渝北区玉峰山镇，厂房及仓库大多为单层钢结构和框架组合，基础条件复杂，有天然地基和旋挖桩。场地起伏大、施工工序多、对钢结构高精度安装有较高要求。环普重庆智慧智造产业园位于渝北区玉峰山镇，建有1#至6#厂房及6#仓库等建筑，主体为单层钢结构、框架结构，基础条件复杂（天然地基+旋挖灌注桩）。

二、智慧智造产业园钢结构施工难点

环普重庆智慧智造产业园钢结构施工过程中存在诸多技术难题，大部分是由施工环境复杂、施工精度高造成的。大跨度钢梁吊装不能忽略。施工场地高低差为6米，不平坦的地形造成吊装时钢梁横向摆动，导致梁端和柱节点对接精度无法控制，影响后面自动化设备如堆垛机的安装精度。钢梁重量大、大跨度结构特点，任何偏差都会被放大，影响整个结构的稳定以及后续施工。

高强螺栓节点安装同样是高强螺栓节点施工的又一难题。施工现场工作空间只有1.2米，狭小的工作空间造成施工人员无法操作螺栓，从而导致螺栓的安装精度不能保证。螺栓孔位偏差一般为0.4mm，螺栓穿入孔位困难，导致节点受力分布受到影响，造成节点强度不足，钢结构整体稳定性差。

立体仓库智能设备的安装精度要求比一般的高。预埋孔位偏差为5mm左右，虽然数值不大，但是对高度自动化设备安装而言，会造成设备接口不准确，进而影响设备正常运转。所以准确的接口精度要求成了本项目施工的一大难题。

钢结构施工本身所具有的高精度要求，也给施工过程带来了诸多的难题。梁柱节点预紧力 $\pm 5\%$ 以内，平台平整度 $\pm 3\text{mm}/\text{m}$ ，智能设备预留孔位误差 $\leq 2\text{mm}$ 。因此构件加工到现场安装的每一个环节都要严格控制，不能有丝毫的偏差影响结构稳定和设备安装精度。项目所在施工场地基础条件复杂，有天然地基、旋挖桩等多种类型的基础设施，施工团队土方及桩基处理工作量大。由于基础条件复杂、场地高低差大，施工人员在钢结构安装前需要对基础进行详细的处理，保证不因地基不稳造成结构安装偏差。

最后屋面施工难度也大。屋面不但要具有良好的防水性，还要严格控制平整度。屋面平整度偏差都会影响到防水层整体性，进而影响到整个产业园功能性。

三、钢结构工程施工要求分析

智慧智造产业园钢结构施工要实现功能适配、高精度控制、绿色施工三者之间的协调统一。产业园内部集成智能化生产设备、自动化物流系统，对梁柱节点承载性能、平台平面度、管线接口精度有要求，生产车间梁柱节点预紧力控制在 $\pm 5\%$ 以内，立体仓库平台平面度控制在 $\pm 3\text{mm}/\text{m}$ 以内，智能设备预留孔位误差控制在2mm以内。施工过程中运输、吊装操作容易造成尺寸偏差，需要用工厂数控加工、三维扫描检测、可调导向夹具、数字扭矩扳手等技术来实现全过程的精度控制。屋面檩条的布置和锁边屋面板的安装精度要求很高，天沟、天窗节点防水要求严格。钢构件预制率为90%、钢材边角料回收率为95%体现了绿色智能施工的思想。因此，产业园钢结构施工要准确对接功能布局、数字化支撑施工精度，在绿色施工和安全高效施工之间取得平衡，为后续智慧运维打下基础。

四、钢结构工程施工技术

（一）智能化构件加工技术

钢结构施工，尤其是大跨度、复杂造型构件加工时，任何尺寸偏差都会对整体结构精度、稳定性造成影响。为了保证构件加工的高精度，环普重庆智慧智造产业园项目使用了先进的智能化加工技术。项目采用数控等离子切割设备，按照构件CAD模型自动生成切割路径，控制切割误差在 $\pm 0.5\text{mm}$ 之内。数字化切割方式可以消除人工切割产生的尺寸误差，保证构件的准确加工。其

次，在焊接过程中加入了焊接机器人，焊接机器人带有视觉识别系统，能够对焊缝位置实施实时检测，按照钢材材质、厚度等要素自行调节焊接电流、电压以及焊接速度，从而保证焊缝熔深符合设计标准，并且焊接期间没有出现气孔、夹渣等缺陷。对复杂的曲面构件项目用Tekla软件做深化设计，满足产业园特殊造型钢结构施工要求。最后用三维扫描仪对构件进行全尺寸检测，将扫描数据与设计模型实时对比，发现偏差及时反馈给加工设备进行调整，保证每个构件都符合安装标准，为现场安装提供高质量的构件保障。

（二）模块化安装技术

模块化安装技术对于智慧智造产业园钢结构施工来说，起着非常重要的作用，在缩短施工周期、提高施工精度方面有着明显的优势。项目钢结构施工团队将整个钢结构系统拆解成若干个标准模块，模块化处理使构件的组装、管线预装、防腐涂装等工序可以在工厂内完成，现场施工时只需进行模块的拼接和安装。施工周期明显缩短，现场作业的复杂程度也大幅度降低。每个模块的重量不大于起重机额定起重量的80%，保证吊装时安全、稳定。现场安装时使用了带GPS定位系统的汽车起重机和塔式起重机配合作业，模块安装位置实时定位、监控。为了保证螺栓连接精度，项目采用数控钻孔技术加工螺栓孔，保证孔径公差H12，防止由于孔位偏差造成安装困难。高强螺栓节点安装过程中，施工人员使用可调导向夹具、数字扭矩扳手，使螺栓安装更加准确，节点平面度误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，受力均匀。项目用全站仪复测、微调支撑板的方式，使预埋孔位精确对接，避免了设备安装过程中出现的冲突问题，为堆垛机的顺利安装打下了精确的基础。

（三）大跨度钢梁吊装技术

大跨度钢梁吊装是钢结构施工中的一大难题，在场地存在较大高低差的时候，钢梁吊装时容易出现横向摆动，造成节点的偏差。环普重庆智慧智造产业园项目场地起伏达6米，大跨度钢梁吊装更加复杂。为保证吊装精度，施工人员在工厂对钢梁分段预装，并留有临时支撑孔。现场吊装时，用吊索张力传感器对梁体状态进行实时监测，在吊装过程中，根据传感器反馈的数据，施工人员可以准确地调节吊装过程中每一个参数，保证吊装安全、精确。为了提高安装精度，项目用液压千斤顶微调梁体位置，保证梁端轴线和平面度满足设计要求。现场吊装时，在梁端设激光反射标志，和全站仪、GPS设备联动，精确定位，使梁体安装轴线、标高误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。该技术手段很好地解决了大跨度钢梁吊装精度问题，保证了后面自动化设备安装的精准对接，给复杂场地下钢梁吊装提供可复制的经验。

（四）钢屋面系统安装与防水保障

屋面施工时檩条间距、屋面板锁边、天沟、天窗节点防水等施工精度要求高，累积误差容易造成渗漏。施工前复测钢屋面梁标高、平整度，重新校核檩条布置线；檩条安装用全站仪放线、拉线复核，超限位置用专用矫正夹具调整；屋面板锁边采用“首块控制+逐块推进”，锁边工序为“人工初咬+机械锁边”。天沟、天窗节点做蓄水试验，密封胶厚度、宽度严格控制。采用上

述技术措施后,屋面安装精度和防水性能均得到保证,施工方法可以推广到其它工业厂房屋面系统。

（五）钢结构精度控制与螺栓节点技术

钢结构施工中高强螺栓节点安装,由于操作空间小、孔位偏差,施工难度大。环普重庆智慧智造产业园项目施工现场空间只有1.2米,螺栓孔位偏差一般为0.4mm,造成螺栓穿入困难,影响节点受力分布。施工团队使用可调导向夹具、数字扭矩扳手来解决问题。螺栓安装时导向夹具可以保证螺栓正确地插入孔内,减小人为操作误差。数字扭矩扳手可以准确地控制螺栓的拧紧力,保证节点受力均匀,达到设计要求。节点安装时施工人员使用动态校核系统对节点安装的精度进行实时监控,保证作业时节点的平面度、受力分布满足设计要求。

（六）数字化检测技术

智慧智造产业园钢结构施工过程中,数字化质量检测技术是施工质量控制的重要手段,在施工的整个过程里起着作用。项目使用超声波探伤仪对焊缝进行检测,利用超声波扫描可以实时得到焊缝内部的缺陷信息,检测精度为 $\pm 1\text{mm}$,满足焊接质量要求。钢结构变形检测项目使用全站仪、数字水准仪对关键节点进行测量,准确掌握结构的平面度、垂直度等主要参数,误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,及时发现并纠正超过允许范围的偏差。项目采用涂层测厚仪、附着力测试仪对钢结构防腐涂层进行检测,保证防腐涂层达到设计要求的厚度,涂层与钢材的附着力大于 5MPa ,防止涂层脱落、腐蚀现象的发生。施工过程中每一个环节都可以得到实时的监控和反馈,保证工程质量达到智慧智造产业园长期运行的要求。

五、心得体会

通过对环普重庆智慧智造产业园钢结构施工项目进行分析,

得出了一些施工经验,这些施工经验不仅可以保证本项目的顺利实施,而且可以给类似的项目提供经验借鉴。

精度控制在施工的全过程都有所影响。钢结构工程中任何一个环节出现的细微偏差都会对整个结构的稳定造成影响。因此精度控制要贯穿构件加工到现场安装的全过程。在环普重庆项目中使用了智能化数控加工、数字化测量工具(全站仪、激光扫描仪等)对整个过程进行精度控制,保证每一个构件、节点的误差都在设计允许的范围内,保证钢结构高精度安装。大跨度钢梁吊装技术属于本项目主要难点之一,在高低差较大的场地内吊装钢梁容易造成精度误差。为了解决上述问题,项目采用吊索张力传感器、液压千斤顶微调梁体位置等方式对吊装过程中各个环节进行实时监测,准确调节每一个环节,保证钢梁安装精度和稳定性。这些技术的应用,一方面可以解决大跨度钢梁吊装精度问题,另一方面也为后面自动化设备安装精准对接打下了基础。

从以上经验可以看出,钢结构施工今后会越来越依赖智能化、数字化技术,给产业园区建设提供更高效、更安全、更绿色的施工方案,也为智能制造、数字建造技术的发展打下了基础。

六、结束语

智慧智造产业园钢结构施工要达到结构安全、功能匹配、施工精度和绿色智能发展的四个目的。环普重庆项目实践证明,用智能化构件加工、模块化安装、数字化质量检测三者结合的方式可以提高施工效率、保证关键节点精度、保证屋面防水和设备接口精度,为智慧智造产业园长期稳定运行提供保障。伴随着智慧制造、数字建造技术的发展,钢结构施工会向着高效、绿色、智能化的方向前进,给新型产业园区的创建赋予可靠的技术工程支撑。

参考文献

- [1] 宋涛,袁波宏,张雄,等.智慧产业园项目BIM技术的综合应用[C]//中国图学会土木工程专业分会,《土木建筑工程信息技术》编辑部.《第12届BIM技术国际交流会——数智建造助力城市高质量发展》论文集.2025:248-252.
- [2] 夏昊,张少森,谈丽华,等.苏州工业互联网产业园“科技之环”钢结构分析与设计[C]//中国建设科技集团股份有限公司,2024:293-297.
- [3] 罗敏.钢结构工程施工质量控制措施[J].江苏建材,2022,(05):145-146.
- [4] 张国珍.某数字产业园钢结构厂房施工技术方案[J].福建建设科技,2021,(06):91-93+134.
- [5] 侯兆新,刘晓刚.钢结构建筑产业化关键技术与示范[J].建筑钢结构进展,2021,23(10):1-11.

公路工程路基施工质量控制研究

杨晓龙

张家口路缘公路工程有限责任公司，河北 张家口 076250

DOI:10.61369/ERA.2026060030

摘 要： 公路工程路基施工直接影响整个道路的承重能力、结构强度以及使用安全性。对填料质量不稳定、压实度不够、排水设施不到位以及现场组织协调缺乏等问题，在施工准备、材料检查、分层铺筑、压实方式、排水保护和检查测试等方面加强质量管理，形成贯穿施工前、期间到后评估的全生命周期质量管理体系。通过对施工工艺参数进行调整，加强施工现场监控力度并严格执行标准化作业可以有效地预防路基出现沉降、开裂等问题的发生，提升其整体强度、稳定性和使用寿命，节省后期维护费用，保证公路工程长久可靠地发挥效用。

关 键 词： 公路工程；路基施工；质量控制；压实度；全过程管理

Research on Quality Control of Subgrade Construction in Highway Engineering

Yang Xiaolong

Zhangjiakou Luyuan Highway Engineering Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 076250

Abstract： Subgrade construction in highway engineering directly impacts the load-bearing capacity, structural integrity, and operational safety of road systems. To address challenges such as inconsistent filler quality, insufficient compaction density, inadequate drainage facilities, and poor on-site coordination, it is essential to strengthen quality management across construction preparation, material inspection, layered paving techniques, compaction methods, drainage protection measures, and quality testing. This approach establishes a comprehensive lifecycle quality management system spanning pre-construction planning, construction phases, and post-construction evaluation. By optimizing construction process parameters, enhancing on-site monitoring, and strictly adhering to standardized procedures, potential issues like subgrade settlement and cracking can be effectively prevented. Such measures enhance structural strength, stability, and service life while reducing maintenance costs, ultimately ensuring long-term reliability of highway infrastructure.

Keywords： highway engineering; subgrade construction; quality control; compaction degree; whole-process management

引言

随着公路工程项目规模的不断扩大，交通荷载及运行的要求不断提升，而路基则是公路结构受力以及稳定的基石，在很大程度上决定了公路能否满足使用者的需求以及使用寿命长短。在实际工程应用过程中，填筑材料选择不当、施工压实度不稳定、排水设施缺乏等问题依旧普遍存在，极易造成由于路基沉降、开裂等原因引起的工程质量问题，进而阻碍着整个项目建设工作的顺利开展。通过对路基施工质量管理的研究不仅可以解决现阶段公路工程项目中存在的实际问题还为后面针对病害产生的原因、防控要点以及对策措施等方面进行系统的阐述打下良好的基础。

一、路基施工质量控制的基本内容

（一）路基施工质量的内涵

路基工程质量管理是对从施工前期准备到地基处理、选择筑材料、分层摊铺、机械碾压、做好排水与防护、检验测试直到竣工验收整个项目的总体控制，它的实质就是依靠技术措施、工艺方法以及管理措施相互配合来实现对路基的质量管理，在规定

的使用寿命期内达到满足承重、稳定性、变形量的要求。路基地段管理主要体现在施工完成质量合格的同时更要注重过程中各个影响因素是否可控，填层厚度一般控制在20~30cm之间；压实工作需要根据土质情况、含水状态以及压路机自重来进行调整；现场检测包括的是压实密度、弯沉值、含水量、平整度等项目。根据现行政策公路工程质量检验及路基工程施工技术标准的规定，路基工程的质量控制重点就是做到压实均匀，密度好，排水顺畅

及边坡稳固，进而达到强度，稳定性及耐久性的统一。

（二）路基施工质量控制的主要目标

路堤工程质量控制的基本方向是：结构强度可靠，沉降量适当，经久耐用。首先必须使压实度达到设计与规范规定的要求，各级公路和不同区域有不同的规定，一般上路床、下路床以及填土路堤都按规定的要求分区控制；其次要使填料干湿度接近最佳含水量，一般容许误差应在最佳含水量的 $\pm 2\%$ 附近为妥，以获得较好的压实效果；第三要使边坡边坡坡度、压实程度与防护设施相适应，避免遭到冲刷、滑塌等破坏；最后要做好边沟、截水沟、排水沟等设施，减少因地下水与地表水对路基的冲刷作用^[1]。

（三）路基施工质量控制的重要性

路基为公路结构组成的底基层，路基质量好坏决定着路面结构的使用性能、行车体验以及使用寿命长短。如果路基压实不到位或者填实不均匀，则会造成路面基层层面受到重车反复冲击而产生裂缝、车辙、沉降等病害，维修费用会大大增高。特别是在重载运输、软弱地基、高填方以及降水丰富地带的情况下更是如此。路基一旦出现早期的质量问题，在其上面的所有结构层都会进一步扩大，进而引起整条道路的通行质量和安全性下降。就工程项目而言，路基土石方工作量大、工序复杂、隐蔽性强，是公路工程中的重要组成内容及重要组成部分，若要保证整个工程质量，就必须把质量管理前置到原材料检测、试验路施工、工艺参数的选择、过程监控等具体的环节上来，从而对后面的面层结构和项目总体质量起到一定的保证作用^[2]。

二、公路工程路基施工中常见的质量问题及成因

（一）填料质量不达标问题

路基填料不合格首先是料场管理粗糙，土质差别巨大以及现场摊铺筛除不到位，使得夯实均匀性和结构强度降低很多。根据《公路路基工程施工技术规范》的相关规定，对于湿粘土使用石灰处理的情况下，石灰的最大粒径不应大于20mm，在翻拌的过程中要将填料中的块状物剔除干净，填层厚度不应超过200mm；风积沙做为填料严禁混入杂草、有机物、黏土块等有害物质，小于0.075mm 的细小颗粒不宜超过10%。如果在施工过程中没有严格按照试验数据进行控制填料级配、含水量及杂质含量等问题，就会造成局部出现低强度区域，使得后序碾压工艺无法一致，从而产生压实度不一、路槽承载力不够等一系列问题^[3]。

（二）压实不足与沉降问题

压实不到位是造成路基初期缺陷最主要的原因，产生原因主要是机械组合不当、摊铺厚度超标、测量次数少以及缝茬质量差等几方面。根据规定要求，高速公路、一级公路的上路床（0 ~ 0.30m）压实度不得低于96%，下路床（0.30 ~ 0.80m）压实度亦不得低于96%，上路堤（0.8 ~ 1.5m）不得低于94%，下路堤 > 1.5m 时不得低于93%。在施工中，对每一个碾压层面都要进行压实度检验，检测频率为1000 m² ≥ 2点，在成型后对压实度进行检验按200 m² / 层测2处实施。如果分层回填间断、搭接距离不够，规定强制性要求的接缝处分层搭接厚度不低于2m 也不能得

到保证的话，则很容易造成新老结合部产生不均匀沉降而发生路基沉降及路面裂缝以及局部冒泥等现象。

（三）排水与边坡防护不到位问题

排水及边坡保护处理不完善将会导致雨水不断渗透到路堤填筑体内造成土体强度失衡从而发生边坡流失、坍塌、差异沉降等病害，规范规定：路堤施工过程中工作段面要设2%~4%的排水横坡，严禁积水，边坡也要同时做好临时性排水工作，而截水沟则不宜小于3%，以便于地面水流迅速排出。另外，在整修完毕之后的边坡坡率必须符合设计标准，检测间隔距离是每隔200米测四个点。如果施工过程只关注填筑速度而忽略临时排水和永久排水相接的问题或者边坡保护滞后于主体构造工程，则会发生水毁病害迅速扩大的情况，尤其是在高填方段以及雨量较大时，排水不及通常会比压实不够更易引发一系列次生问题^[4]。如下图1所示。

表1 路基施工常见质量问题及关键控制指标表

质量问题	关键控制数据	规范依据
填料不合格	石灰颗粒大小≤ 20mm；块状颗粒大于15mm 的比例小于15%；改良层厚度≤ 200mm	JTG/T 3610—2019
	上路床压实度≥ 96%；每1000m ² 每层检测不少于2点	JTG/T 3610—2019
接缝沉降	分层搭接长度≥ 2m	JTG/T 3610—2019
排水不畅	作业面排水横坡2% ~ 4%；截水沟纵坡≥ 0.3%	JTG/T 3610—2019

三、公路工程路基施工质量控制的关键措施

（一）严格控制施工前准备工作

施工准备阶段为路基工程质量管理的基础，在此之前应对沿线地质情况、水文条件以及不良地质的分布情况进行调查了解，再参照设计资料对于高填方、软土分布区、挖填交界面等特殊地段作进一步检查；另外还应拟定专门的施工方案，确定填料种类、压实施工设备配置、每层虚铺厚度、测试手段以及雨天施工措施。依据《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610—2019）的相关规定，正式大面积填筑之前必须先铺设试验段来确认松铺系数、碾压遍次、机械压路机走行速度、最合适的含水量范围，切忌随意采用经验值。技术交底要细化到层厚、横坡、接缝搭接及检测频次等可控性指标上，使前期准备工作从“有资料证明”变为“有指标支撑”。

（二）强化施工过程中的技术控制

工程的施工管理重点是要使填料以及含水率、层厚及压实施工方法符合规范要求的数值。路基填筑要遵循分层填筑、分层碾压的原则，在普通土方路基中每层压实厚度为20 ~ 30cm 左右，水分含量应该接近最佳含水量的水平，其允许的偏差不应超过± 2%，各区域压实度也需分别满足标准，高速公路与一二级公路中上路床（0 ~ 0.30米）、下路床（0.30 ~ 0.80米）区段的压实度必须达到96% 以上。施工现场测量方面，在同一压实层内每隔1000平方米至少进行两次测量，在完成整个路段建设后每隔200米对每个压实层次进行两次测量，出现异常分散点应及时再次碾

压或重新施工避免后期产生下沉以及非均匀性损害^[5]。

（三）加强排水、防护与检测管理

排水、防护及检查是最后一项对确保路基保持持久稳定性至关重要的控制点。在施工过程中，施工段落需有2%~4%的横向坡度以便雨水可以顺利排除出去，对于截水沟、边沟等排水设施而言，其纵坡应该不低千0.3%，防止表面积水分滞留和浸入到路基中去；当路肩成型之后便要及时进行骨架防护或者浆砌防护或者植被防护来降低冲刷及浅层滑坍的可能性。检测管理除了要压实度检测之外还要参照《公路路基路面现场测试规程》（JTG3450-2019）来进行弯沉、平整度以及几何指标的测试，弯沉指标代表着路基的整体承载能力，边坡坡度等几何项目的检测一般为每200米检测四个点。采用“排水为首、保护为辅、检查跟进”的闭合体系可以大大加强道路基层结构的整体性，稳定性以及耐久性^[6]。

四、提升路基施工质量控制效果的保障机制

（一）完善施工质量管理体系

提高路基施工质量管理成效，首先要制定涵盖施工前期准备工作、过程中的具体操作、隐蔽部位验收及竣工验收等环节的完整闭合式管理模式，各施工方要根据《公路工程质量检验评定标准》及《公路路基施工技术规范》规定，明确项目经理、技术主管、试验人员以及现场管理人员各自的责任分工，做到“人人有责、逐级把关、层层落实”，还要制定原材料入场复试制度、分段施工分层验收制度、隐蔽工程确认签字制度以及质量问题处理销号制度等。对于压实度、含水量、层厚、横坡等重要参数需进行台账式管理，压实度试验资料及相关试验报告及鉴证材料必须要同工程同期进行，杜绝出现“先施工，后补充资料”的情况发生，使质量管理有章可循，有序进行。^[7]

（二）提升施工人员专业素养

工作人员技术水平直接影响着工程质量控制手段的实施情况，在压实作业工序的实施，填料识别以及施工现场突发问题处置等方面都对相关人员的操作水平及技术鉴别能力有着较高的要求。应该制定分层次分类别的培训体系，对工程管理者要进行

规范要求、质量检验流程以及数据解析方面的教育，对工程技术人员要进行试验检测、施工参数调整以及病害预测等方面的培训，对机器手要进行压路机行驶速度、遍数控制以及搭接形式方面的指导。按照现场操作规范，压路机行走速度一般应当保持在一个科学合理的范围内，不能过快出现遗漏碾压或者走的太慢导致反反复复破坏的情况发生；技术交底的内容应该具体到松散度、最适宜湿度范围以及接缝搭接宽度等等详细指标上。以持证上岗、岗前考核、及重要工序旁站的方式可以有效地降低由于人为误操作造成的质量问题波动。

（三）推进信息化与全过程质量监督

信息化管理是增强路基施工质量管理精准度及时效性的有力措施，应当把传统的现场人工巡查和现代化信息监控结合起来，形成全链条式的、可追溯的质量监督机制。施工现场可以以试验室数据分析平台为基础，对压实度、含水量、弯沉值以及几何尺寸等多项重点指标统一登记，并实时对比分析，一旦出现偏差超标时即时提示报警，在对高填方、软土地基以及挖填交接部位，可以采用沉降测量、位移观测、成像监控等方式对路基的下沉变形变化过程实施连续式观察。根据目前的质量管理规定，试验数据要做到分段收集、分段归档、现时校对并同施工时间段、桩位坐标、责任人对应起来，使每一环节都有相应的质量可追溯记录。运用信息化、标准化及动态化的管理模式，大大增强了质量管理的时效性、精确度以及执行力^[8]。

五、结语

公路工程施工路基的质量控制在选材、施工过程、排水保护、检查验收以及管理保证各环节都需要进行严格控制，它是影响道路结构的稳定性和道路使用年限的基础。针对道路施工过程中容易发生的填料不合格、压实不到位、排水不及时、管理不到位等情况，只有做到技术和制度同时严格把控，方能有效地减少下沉、裂缝等方面的质量事故的发生概率。不断健全完善质量管理体系，提高从业人员技术水平，加强信息化监管力度，有利于提高路基施工的安全系数、可信度和耐用程度，给公路工程安全运行打下良好的基础。

参考文献

[1] 张琳政. 公路工程路基施工质量控制的关键技术研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (03): 40-42.
[2] 刘敏. 公路工程高填方路基施工技术及其质量控制研究 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (05): 64-66.
[3] 杨雪婷. 公路工程中石灰土路施工技术应用及质量控制措施 [J]. 汽车周刊, 2025, (05): 116-118.
[4] 郑娟. 公路工程高填方路基施工技术及其质量控制研究 [J]. 运输经理世界, 2025年 (第12期): 32-34.
[5] 朱珍彪. 公路工程路基施工质量控制的关键技术研究 [J]. 张江科技评论, 2025, (05): 84-86.
[6] 田俊. 公路工程项目中填石路施工技术应用研究 [J]. 时代汽车, 2025, (13): 187-189.
[7] 刘鹏. 公路工程路基施工全过程控制策略研究 [J]. 山东交通科技, 2025, (S1): 64-66.
[8] 苏勤波. 公路工程路基施工质量控制关键技术研究 [J]. 汽车周刊, 2025, (09): 115-117.

医院高压氧舱防雷接地必要性及技术实施研究

冯有成, 高耀文*, 郑明

青海省气象服务中心, 青海 西宁 810001

DOI:10.61369/ERA.2026060032

摘 要 : 西宁市地处青藏高原东北部, 属高原雷电高风险区域, 年均雷暴日 41.7–55 天, 雷电 具有幅值大、正地闪占比高、感应效应强的特性, 加之高寒冻土、高土壤电阻率的地域环境, 让医疗机构高压氧舱安全防护面临严峻挑战。高压氧舱作为富氧、高压、密闭的医用特种设备, 属一类易燃易爆危险源, 雷击易引发火灾爆炸、设备失控、人员伤亡等重特大事故。本文结合西宁地区气候地理特征、氧舱安全属性、国家及行业法规标准, 系统阐述该地区各大医院高压氧舱实施防雷接地的强制性与必要性, 明确高原环境下防雷接地技术规范、检测维护要求, 为西宁地区医用高压氧舱安全运营提供技术支撑与实践指导。

关 键 词 : 高压氧舱; 防雷接地; 西宁高原; 医疗特种设备; 安全防护; 雷电灾害

Research on the Necessity and Technical Implementation of Lightning Protection Grounding for Hyperbaric Oxygen Chambers in Hospitals

Feng Youcheng, Gao Yaowen*, Zheng Ming

Qinghai Provincial Meteorological Service Center, Xining, Qinghai 810001

Abstract : Located in the northeastern part of the Qinghai–Tibet Plateau, Xining City is classified as a high-risk area for plateau lightning strikes, with an average annual number of thunderstorm days ranging from 41.7 to 55. Lightning strikes in this region are characterized by high amplitude, elevated positive ground flashover ratios, and strong induced effects. Coupled with the extreme cold permafrost environment and high soil resistivity, these factors pose significant challenges to the safety protection of hyperbaric oxygen chambers in medical institutions. As specialized medical equipment featuring oxygen enrichment, high pressure, and enclosed design, hyperbaric oxygen chambers are classified as Class I flammable and explosive hazards. Lightning strikes can easily trigger major accidents such as fires, explosions, equipment failures, and casualties. This study systematically examines the mandatory and necessity of lightning protection grounding systems for hyperbaric oxygen chambers in major hospitals across Xining based on regional climatic and geographical characteristics, oxygen chamber safety attributes, and national and industry regulatory standards. It clarifies technical specifications and maintenance requirements for lightning protection grounding in plateau environments, providing technical support and practical guidance for the safe operation of medical hyperbaric oxygen chambers in Xining.

Keywords : hyperbaric oxygen chamber; lightning protection grounding; Xining Plateau; medical special equipment; safety protection; lightning disaster

引言

高压氧治疗是一氧化碳中毒等病症的核心治疗手段, 在临床救治中至关重要。西宁市是青海医疗核心区, 各级综合性医院配备高压氧舱, 承担全省急危重症患者救治任务, 是高原医疗体系重要组成部分。但西宁海拔高, 特殊地理气候条件带来挑战: 雷暴频繁且破坏力大, 土壤砂石含量高、冬季冻融交替, 使防雷接地系统施工难度大且易老化失效。同时, 高压氧舱内部环境特殊, 是高安全风险场所, 雷电引发的微小电火花或电位差都可能触发事故。目前, 部分医疗机构对高原氧舱防雷接地工作重视不足, 存在设计不规范、施工不达标、检测维护不及时等隐患。基于此, 本文立足西宁实际, 从多维度论证了高压氧舱开展专业防雷接地工程及定期检测的必要性, 为筑牢高原医疗特种设备安全防线提供依据和参考。

作者简介:

冯有成 (1971.11–), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 本科, 工程师, 研究方向: 气象服务;

郑明 (1982.02–) 男, 汉族, 青海西宁人, 本科, 工程师, 研究方向: 气象服务。

通讯作者: 高耀文 (1992.08–), 女, 汉族, 山西朔州人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 气象服务。

一、西宁地区高压氧舱雷击风险特性分析

（一）高压氧舱自身高危安全属性

高压氧舱的运行环境决定了其属于最高等级安全风险设备，这主要源于三个方面的固有危险特性。首先，是其高氧助燃与爆炸性风险，舱内氧气浓度远超常压空气，作为强效助燃剂，能使可燃物的燃点显著降低，即使微小的电火花或静电放电，也极易引发剧烈爆燃；更为严峻的是，在密闭空间内，燃烧速度可达常压空气的8-10倍，且几乎不具备有效的扑救与人员疏散条件。其次，是其高压密闭的受限性风险，氧舱工作压力通常维持在1.5至2.5个绝对大气压，本质上属于压力容器范畴，一旦遭遇雷击，强大的冲击力可能导致舱体结构变形、密封系统失效或泄压装置故障，从而引发高压窒息、减压病等严重的二次伤害。最后，是其电气系统的极端敏感性，为保障安全，舱内所有电器均严格采用24V以下的弱电设计，但雷电产生的强大电磁脉冲仍极易击穿线路绝缘层，造成设备运行失控或产生火花放电，直接威胁到舱内人员的生命安全。

（二）西宁高原雷电特殊危害性

西宁位于青藏高原东缘，是典型雷电高发区，雷电灾害有四个特征：一是雷电流强度偏大。因高原大气对流旺盛，雷暴云内电荷分离剧烈，雷电流峰值比平原地区高30%以上。强大直击雷易击穿飞行器或舱体，产生高温电弧引发火灾。二是正地闪发生比例高。本地观测显示，正地闪比例常年在35%至60%之间，远超全国平均水平。正地闪能量大、持续久，对地面接地系统和电气设备破坏大，常造成永久性损伤。三是雷电感应效应显著。高原空气稀薄，电磁波衰减慢，雷电产生的强电磁脉冲会在金属舱体、管路及线缆上感应出过电压，沿管线传导至设备舱，形成放电火花威胁电子系统安全。四是地电位反击风险突出。强大雷电流泄放入地使接地网电位急剧抬升，电位差通过金属管道、线缆传导至舱体，可能使设备外壳带电，威胁舱内人员安全，造成设备损坏和人身触电双重威胁。

（三）西宁地域环境对防雷接地的不利影响

西宁地处高原，其高寒、高阻的地理条件，进一步加剧了防雷接地工程实施的难度：一是土壤电阻率极高，本地以砂质土壤为主，电阻率普遍超过5000Ω·m，远超常规标准，使得传统接地施工方法难以达到安全规范要求；二是冻融破坏问题突出，冬季冻土深度可达1-2米，季节性的冻融循环导致接地体发生变形、断裂或连接部位松动，致使接地电阻值逐年升高，性能持续下降；三是环境干燥多风，易积聚静电，高原地区空气湿度低，加上多风气候，人员活动及设备运行中极易产生并积累静电，若此时接地系统失效，静电无法及时导走释放，将构成持续的安全隐患。

二、高压氧舱防雷接地的法规强制要求

西宁地区各大医院高压氧舱防雷接地，是受国家法律、行业标准严格约束的强制性举措，绝非可选性维护工作。在法律层面，《中华人民共和国气象法》《防雷减灾管理办法》明确规定，

易燃易爆、人员密集的特种设备，必须安装防雷装置并定期检测，不合格严禁投入使用；《特种设备安全法》将高压氧舱列为一类压力容器，防雷接地是设备年检、运营许可的必备条件；《医疗机构管理条例》将其纳入医院安全评审体系，隐患未整改将责令停业。

在技术标准层面，GB 50057-2010《建筑物防雷设计规范》将高压氧舱划分为第一类防雷建筑物，要求独立设防、严禁共用接地；GB/T 12130-2020《氧舱》规定，氧舱保护接地电阻≤4Ω，舱体、管路、设备需全面等电位连接，纯氧舱增设静电接地；TSG 24-2015《氧舱安全技术监察规程》要求防雷、防静电、保护接地独立设置，管线金属套管两端必须接地。青海省气象、卫健、市监部门联合监管，明确西宁地区氧舱防雷检测每半年一次，检测报告作为运营备案必备材料，违规将依法处罚并追责。

三、西宁地区高压氧舱防雷接地技术实施要点

结合西宁高原环境特点，高压氧舱防雷接地需遵循“独立设防、降阻防腐、等电位均衡、分级防护”原则，构建适配高原的全流程防护体系。一是一类防雷系统建设，设置独立避雷针/避雷带，与舱体保持3米以上安全距离，引下线不少于2根，采用热镀锌钢材，接地网独立设置，与建筑接地网间距**≥5米**，防止地电位反击；二是高原降阻防腐措施，采用深井接地、长效降阻剂、环形接地网，接地体埋深**≥1.2米避开冻融层，焊接处做双重防腐处理，抵御高原腐蚀；三是全面等电位连接**，将舱体、金属门窗、氧气管路、床体、设备外壳全部连通接地，消除电位差，杜绝静电火花；四是浪涌分级防护，供电、信号线路加装对应浪涌保护器，阻断感应过电压侵入舱内，舱内严禁接入强电设备。

四、防雷接地检测与日常维护要求

西宁地区雷电季节分明，接地装置易受冻融影响，需建立全周期管理机制。定期检测要求每半年开展一次（雷季前5月、雷季后10月），由具备资质的专业机构实施，检测接地电阻、等电位导通性、浪涌保护器性能，核心指标接地电阻必须**≤4Ω**，检测报告存档备案；日常巡检要求专人每月检查接地装置、连接点、静电端子，雷雨后立即专项排查，每3年开挖抽检接地体状况；高原专项维护，春季冻土融化后紧固调试接地装置，冬季覆土加固防冻土隆起，及时更换老化部件，确保防雷系统持续有效。

五、西宁地区高压氧舱防雷接地核心必要性

结合西宁地域特点与氧舱安全属性，其防雷接地的必要性无可替代：一是生命安全底线，氧舱人员密集无法疏散，高氧高压下雷击即爆燃，防雷接地是唯一生命屏障；二是高原风险刚需，本地雷电破坏力强、接地难度大，无规范防雷将长期处于重大隐

患状态；三是法定强制责任，法律法规与地方监管双重约束，不检测、不合格属于违法行为，需承担安全责任；四是医疗运营保障，完善防雷系统可保护设备、降低故障，保障高压氧治疗持续开展，维护高原医疗服务稳定性。

六、结论

西宁市各大医院高压氧舱处于高原雷电高风险环境，自身具

备易燃易爆的高危属性，防雷接地是法定强制要求、安全核心底线、不可妥协举措。医疗机构必须严格按照一类防雷标准建设独立系统，落实降阻防腐、等电位连接、浪涌防护等技术要求，坚持每半年定期检测，及时整改隐患。同时，相关部门需加强联合监管，压实医院主体责任，推动氧舱防雷安全规范化、常态化，从根本上防范雷击事故发生，保障患者与医护人员生命安全，维护高原地区医疗安全与社会稳定。

参考文献

[1] GB 50057-2010, 建筑物防雷设计规范 [S].
[2] GB/T 12130-2020, 氧舱 [S].
[3] TSG 24-2015, 氧舱安全技术监察规程 [S].
[4] 青海省气象局. 青海省雷电灾害风险区划报告 [R].2022.
[5] 张旭. 高原医用高压氧舱防雷防静电技术研究 [J]. 高原医学杂志 ,2021(02).
[6] 陈源高. 医用高压氧舱的防雷防静电措施 [J]. 价值工程 ,2010,29(32):136-137.
[7] 国家质量技术监督局, 卫生部. 医用氧舱安全管理规定 [S]. 北京: 中国标准出版社 ,1999.
[8] 李刚, 陈曦, 刘芳. 医院特殊医疗设备防雷与电磁兼容技术研究 [J]. 医疗装备 ,2023,36(11):131-133.
[9] 张义军, 周璧华, 陈绍东. 高海拔地区雷电放电特征与电网防雷关键技术 [M]. 北京: 科学出版社 ,2019.
[10] 崔桂兴, 郭欣, 侯元红, 等. 高原农牧区配电网防雷研究 [J]. 农村电气化 ,2021(06):19-21+25.
[11] 周建, 李丽. 三甲医院供电系统可靠性提升及防雷改造实践 [J]. 中国医疗设备 ,2024,39(02):142-145.

面向全生命周期的城轨信号工程安全质量协同控制策略

李娟

中铁通信信号勘测设计院有限公司, 北京 100036

DOI:10.61369/ERA.2026060033

摘 要 : 针对传统工程管理模式中存在的阶段割裂、主体协同不足及信息壁垒等问题, 本文提出了一种面向全生命周期的城轨信号工程安全质量协同控制策略。剖析了概念与规划、设计与研发、设备制造与出厂、施工安装与调试、交验与试运行五大阶段的安全质量协同管控要点与实施路径, 实现风险前置与过程精准把控; 构建了涵盖组织协同、数据与信息协同、制度与标准协同的关键支撑机制, 有效打破主体与阶段壁垒; 建立基于安全、质量、协同、高效四个维度的效能评价指标体系, 运用层次分析法与模糊综合评价法构建评价模型, 形成评价—分析—整改—优化的闭环持续改进机制。研究为提升城轨信号工程全生命周期安全质量管理水平、实现各方高效协同与风险可控提供了系统性的理论框架与实践参考。

关 键 词 : 城市轨道交通; 信号工程; 全生命周期; 安全质量

Collaborative Control Strategy for Safety and Quality in Urban Rail Transit Signal Engineering Across the Entire Lifecycle

Li Juan

China Railway Communication & Signaling Survey & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100036

Abstract : Addressing issues such as fragmented phases, insufficient collaboration among stakeholders, and information barriers in traditional engineering management models, this paper proposes a collaborative control strategy for safety and quality in urban rail transit signal engineering across the entire lifecycle. It analyzes the key points and implementation paths for collaborative safety and quality management across five phases: concept and planning, design and development, equipment manufacturing and delivery, construction installation and commissioning, and handover inspection and trial operation, enabling proactive risk management and precise process control. The paper establishes key supporting mechanisms encompassing organizational collaboration, data and information collaboration, and institutional and standard collaboration, effectively breaking down barriers between stakeholders and phases. Additionally, it develops a performance evaluation index system based on four dimensions—safety, quality, collaboration, and efficiency—and constructs an evaluation model using the Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method, forming a closed-loop continuous improvement mechanism of evaluation—analysis—rectification—optimization. This research provides a systematic theoretical framework and practical reference for enhancing safety and quality management across the entire lifecycle of urban rail transit signal engineering, achieving efficient collaboration among stakeholders, and ensuring controllable risks.

Keywords : urban rail transit; signal engineering; entire lifecycle; safety and quality

引言

在当前的城轨信号工程建设实践中, 安全质量管理往往呈现出碎片化与阶段性特征。一方面, 规划、设计、制造、施工、验收等各阶段相对割裂, 缺乏全局统筹, 导致前期规划遗留的风险在后期施工或运营中集中爆发, 造成返工与资源浪费; 另一方面, 建设、设计、监理、施工、设备供应商及运营单位等多主体间存在明显的信息孤岛与壁垒, 协同沟通不畅, 极易出现责任交叉或缺位、技术接口冲突等问题。传统的以单一阶段或单一主体为中心的管理模式, 已难以满足现代复杂城轨信号工程对高安全性和高可靠性的迫切需求。基于此, 本文立足城轨信号工程全生命周期, 系统剖析各阶段安全质量协同管控的核心策略, 构建涵盖组织、数据、制度三大维度的关键支撑机制, 并建立科学的协同效能评价与闭环改进体系, 旨在为提升城轨信号工程整体安全质量管控水平提供系统的理论框架与实践参考。

一、各阶段安全质量协同控制策略

（一）概念与规划阶段

城市轨道交通信号系统是控制城市轨道交通列车运行的大脑，也是实现列车安全运营的保障，是整个城市轨道交通建设过程中的关键环节，城市轨道交通信号系统的建设水平直接关系到最终整个轨道交通项目的管理水平和交付质量^[1]。概念与规划阶段是城轨信号工程安全质量管控的源头，核心在于明确项目定位、规避系统性风险，为后续管控筑牢基础^[2]。该阶段应构建多方协同、风险前置 管控模式，推动规划方案与安全质量需求深度融合。由建设单位牵头，联合设计、运营、监理及设备供应商组建协同小组，明确职责、健全沟通机制，围绕项目定位、线路规模、运营需求开展可行性论证，重点研判信号系统与其他专业的兼容性，提前识别信号覆盖、接口冲突等潜在风险，保障规划科学合理安全^[3]。同时依据相关规范制定安全质量风险清单，聚焦客流预测、系统选型、应急方案等关键环节，采用定性定量结合方式开展评估，对高风险项制定防控措施，将风险管控贯穿规划全过程，从源头避免后期安全质量隐患。

（二）设计与研发阶段

设计与研发是城轨信号工程安全质量的核心，直接决定系统性能、可靠性与安全性，需采用协同设计、精准管控、全程验证策略，保障设计成果合规，并与制造、施工、运营有效衔接^[4]。协同设计上，搭建多方平台实现数据共享与联合作业，设计单位依规完成总体、详细及接口设计，供应商提前介入提供技术参数，运营单位结合实际提出优化建议^[5]。质量管控方面，建立分级管控与评审机制，对关键方案开展多轮专家评审，排查安全质量隐患；强化技术交底，确保各单位准确理解设计要求。同时通过仿真、试验等开展全面设计验证，及时优化方案，为后续制造施工提供可靠支撑。

（三）设备制造与出厂阶段

设备制造与出厂阶段是城轨信号工程硬件质量的关键，核心是确保设备达标、杜绝不合格产品进场，需落实协同监造、全程追溯、严格检验的控制策略^[6]。由建设单位牵头，联合监理、设计、运营等单位组建监造小组，驻厂对原材料、加工、组装、测试等全流程进行监督，严控制造质量。为每台设备建立唯一标识，记录关键信息，实现全流程可追溯。出厂前厂家先自检，合格后由监造小组联合开展性能、质量、安全等全面检验，合格方可出厂，并留存验收及检测资料，为后续安装调试提供依据。

（四）施工安装与现场调试阶段

施工安装与现场调试是工程关键且风险高发环节，需秉持协同施工、规范操作、精准调试、全程管控策略，规避安全质量风险^[7]。施工阶段由施工单位牵头，联合监理、建设、设计、设备供应商组建协同小组，明确职责、畅通沟通，各单位各司其职，严控施工精度与规范；调试阶段由多方组建调试小组，制定方案，重点调试信号系统各项性能，及时整改问题并强化安全管控^[8]。同时，做好全程资料整理，确保完整可追溯，为后续交验运维提供依据。

（五）交验与试运行阶段

交验与试运行是城轨信号工程安全质量检验的关键环节，核心是核查工程质量与系统性能，保障满足运营条件，需落实协同验收、全程监测、风险管控策略，实现两阶段无缝衔接。协同交验由建设单位牵头，联合监理、施工、设计、供应商及运营单位组建验收小组，制定方案并明确标准、流程与分工，对工程实体、设备性能、资料完整性等按规范验收，隐患限期整改复验，做好记录并出具报告，为试运行提供依据。试运行由运营单位牵头，多方组建管控小组，编制方案明确周期、范围、监测重点及应急措施，全程监测信号系统状态与指标，及时处置问题；供应商与施工单位现场驻场保障，强化安全管控与预案防范。试运行结束后协同总结评估，针对问题优化完善，达标后方可转入正式运营。

二、协同控制的关键支撑机制

（一）组织协同机制

组织协同机制是城轨信号工程全生命周期安全质量协同控制的核心保障，关键在于打破主体与阶段壁垒，构建统一协调、分工明确、权责对等、高效协同的组织体系^[9]。成立由建设单位牵头的全生命周期协同管理领导小组，统筹设计、制造、施工、运营、监理及设备供应商等各方，负责制定总体方案、协调重大问题、监督履职，并下设办公室负责日常沟通与推进。明晰各参与主体权责，制定责任清单，细化全生命周期各阶段安全质量职责，避免权责交叉或缺位，确保各单位各司其职、协同发力。建立常态化沟通机制，通过定期会议、现场协调、线上平台等方式实现信息共享与问题闭环，提升协同管控效率。

（二）数据与信息协同机制

数据与信息协同机制是全生命周期安全质量协同控制的重要支撑，核心在于破除信息壁垒、实现数据共享与可追溯^[10]。搭建全生命周期数据共享平台，整合各阶段安全质量相关数据，实现集中管理、统一共享与查询分析；建立统一的数据标准规范与质量管控体系，保障数据一致、准确、完整；完善数据追溯与智能应用机制，实现问题溯源追责，并通过大数据、AI 分析挖掘风险规律，为风险防控与协同决策提供支撑。

（三）制度与标准协同机制

制度与标准协同机制是全生命周期安全质量协同控制的基础，核心在于构建统一完善、衔接顺畅的制度标准体系，规范各参与主体与各阶段管控行为。完善全生命周期协同管控制度，结合城轨信号工程特点及法规规范，制定涵盖协同工作、责任追究、沟通协调、数据共享、质量验收等管理制度，明确各方要求与行为规范。建立统一安全质量标准体系，整合规划、设计、制造、施工、调试、验收、运维等全流程技术、质量及安全标准，强化各阶段标准衔接，避免冲突与脱节。健全制度标准执行与监督机制，压实主体责任，加强监督检查与追责问责，保障落地实施；同时结合技术进步与工程实践，定期修订完善，确保制度标准科学适用、具有前瞻性，为协同管控提供持续制度保障。

三、协同控制效果评估与持续改进

（一）协同效能评价指标体系构建

为全面衡量城轨信号工程全生命周期安全质量协同控制效能，需构建科学、全面、可操作的评价指标体系。该体系覆盖全生命周期各阶段与协同维度，遵循系统性、科学性、可操作性、动态性原则，结合工程特点从安全效能、质量效能、协同效能、高效效能四个维度构建。安全效能侧重安全风险管控，含安全隐患整改率、安全事故发生率、应急处置成功率等；质量效能反映工程及设备质量，含设计合格率、设备出厂合格率、施工验收合格率、设备完好率等；协同效能体现多方及各阶段配合水平，含协同沟通效率、数据共享率、责任落实率、问题协同解决率等；高效效能关注管控效率效益，含管控成本控制率、工期履约率、运维效率等。同时对各指标分级量化，明确评价标准、计算方法及权重，采用层次分析法结合专家意见与工程实际合理赋权，保障评价结果科学合理。

（二）评价方法与模型

结合城轨信号工程全生命周期安全质量协同控制特点，采用定性定量结合的方式构建协同效能评价模型。定量指标通过数据统计与计算分析得出结果，定性指标采用专家打分、问卷调查等方式综合评定。模型基于层次分析法确定指标权重，运用模糊综合评价法进行模糊处理并计算综合得分，据此将协同管控效能划分为优秀、良好、合格、不合格等级，精准识别优势与不足。同时建立评价数据收集更新机制，定期开展评价，为协同管控持续改进提供支撑。

（三）闭环持续改进机制

协同控制效果的持续改进，是提升城轨信号工程全生命周期安全质量的核心。需构建评价—分析—整改—验证—优化的闭环机制，持续提升协同管控效能。先依据协同效能评价结果，系统分析组织、数据、制度、措施等方面的问题与成因，建立问题清单，明确责任、措施及时限；再由各责任主体落实整改，完成后提交报告，经领导小组验证闭环；最后结合整改与实践，优化协同策略、支撑机制及评价指标体系，补齐薄弱环节，并将成熟经验固化为制度规范，实现协同管控长效优化，保障工程全生命周期安全质量可控。

四、结束语

城轨信号工程的安全质量直接关系到人民群众的生命财产安全与城市公共交通的运行效率。面对信号系统技术密集、接口复杂、安全苛求度高的特点，传统阶段割裂、主体分散的粗放式管理模式已难以适应现代城轨建设的高质量发展要求。本文系统提出的面向全生命周期的城轨信号工程安全质量协同控制策略，通过精准把脉概念规划—设计研发—设备制造—施工调试—交验试运行五大阶段的核心风险点，构建了组织、数据与信息、制度与标准三大协同支撑机制，并辅以科学的效能评价与闭环持续改进体系，形成了一套完整、系统、可操作的管理理论框架。

参考文献

- [1] 尉安宇. 城市轨道交通信号系统工程项目风险管理研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2024.
- [2] 王坚. 城市轨道交通线路级信号系统大修改造工程筹划研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 88-92. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.11.020.
- [3] 蔡婷, 熊秋梅, 牛克甲. 城市轨道交通通信信号安装工程质量监督模式的探索 [J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 15-18. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2016.05.004.
- [4] 樊军艳. 城市轨道交通信号系统工程项目的目标成本管控研究 [J]. 人民公交, 2024(24): 188-190. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8050.2024.24.059.
- [5] 张惶. 城市轨道交通信号系统大修改造工程设计重点分析 [J]. 铁道通信信号, 2022, 58(8): 79-83. DOI: 10.13879/j.issn.1000-7458.2022-08.22137.
- [6] 王俊锋, 宾海丰, 王明霞, 等. 城市轨道交通建设信号系统工程进度管理 [J]. 现代城市轨道交通, 2013(1): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7533.2013.01.011.
- [7] 邹强. 城市轨道交通延伸线工程信号系统过渡改造方案分析 [J]. 现代城市轨道交通, 2019(9): 53-56.
- [8] 李鹏. 浅谈城市轨道交通信号系统工程设计 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2011(16).
- [9] 黄奕. 项目管理在城市轨道交通信号工程中的应用 [J]. 科技风, 2021(15): 121-122, 129. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202115052.
- [10] 杨安安. 城市轨道交通信号系统互联互通工程关键技术应用 [J]. 运输经理世界, 2022(13): 64-66. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3681.2022.13.022.

智能制造与工业大数据融合下企业运营模式升级

杨明

襄阳宇清传动科技有限公司, 湖北 襄阳 441058

DOI:10.61369/ERA.2026060035

摘 要： 智能制造与工业大数据深度融合，正全面重塑制造业企业运营体系。工业大数据为企业提供全流程数据支撑，实现各环节精准感知与智能分析；智能制造依托数据完成自主决策、动态优化与闭环执行。二者协同打破信息孤岛，推动运营从经验驱动转向数据驱动，生产转向柔性定制，管理趋于扁平高效，供应链实现生态协同，服务升级为全生命周期主动运维。同时也面临数据标准不一、系统集成困难、复合型人才不足等问题。企业应完善数据治理、推进技术兼容、分步实施转型，以数据赋能运营升级，提升核心竞争力，实现高质量发展。

关 键 词： 智能制造；工业大数据；企业运营模式；数字化转型；数据驱动决策

Upgrading Corporate Operational Models through the Integration of Intelligent Manufacturing and Industrial Big Data

Yang Ming

Xiangyang Yuqing Transmission Technology Co., Ltd., Xiangyang, Hubei 441058

Abstract： The deep integration of intelligent manufacturing and industrial big data is comprehensively transforming the operational frameworks of manufacturing enterprises. Industrial big data provides end-to-end data support, enabling precise monitoring and intelligent analysis across all processes; intelligent manufacturing leverages data for autonomous decision-making, dynamic optimization, and closed-loop execution. Their synergy eliminates information silos, shifting operations from experience-driven to data-driven models, enabling flexible customization, streamlined management, ecosystem-coordinated supply chains, and service upgrades to proactive lifecycle maintenance. However, challenges persist, including inconsistent data standards, system integration difficulties, and a shortage of interdisciplinary talent. Enterprises should enhance data governance, ensure technical compatibility, and implement phased transformation strategies to empower operational upgrades through data, thereby strengthening core competitiveness and achieving high-quality development.

Keywords： intelligent manufacturing; industrial big data; enterprise operation model; digital transformation; data-driven decision making

引言

随着工业4.0推进与新一代信息技术发展，全球制造业正加速向智能制造转型。工业大数据作为智能制造的核心要素，贯穿研发、生产、供应链与服务全生命周期，与智能制造深度融合，可有效破解传统运营中信息孤岛、决策滞后、流程割裂等问题。当前我国制造业处于转型升级关键阶段，面临产能过剩、创新能力不足、运营成本偏高等压力，推动二者融合、重构运营模式，已成为提升企业核心竞争力、培育新质生产力的重要路径^[1]。本文围绕智能制造与工业大数据融合机理及实践路径，探讨企业运营模式升级的关键举措，为制造业数字化转型提供参考。

一、智能制造与工业大数据融合的理论基础与价值内涵

（一）核心概念界定

智能制造依托新一代信息技术，覆盖设计、生产、管理与服

务全流程，具备自感知、自决策、自适应等特征，以信息物理系统（CPS）实现虚实融合，推动生产向智能、柔性、精益化发展。工业大数据是工业全生命周期产生的海量多源异构数据，包含设备、工艺、物料、市场及用户等信息，具有强实时性、低价值密度特点。其与通用大数据的核心区别在于深度贴合工业场

景,需结合工艺机理与专业知识进行价值挖掘,为生产运营与科学决策提供数据支撑^[2]。

(二) 融合的内在逻辑与技术架构

智能制造与工业大数据以数据为纽带实现深度协同,而非简单技术叠加。工业大数据为智能制造提供决策依据,智能制造为数据采集、分析提供场景与硬件支撑,形成“采集—分析—决策—反馈—优化”的闭环生态。其技术架构分为五层:感知层通过传感器、机器视觉采集现场数据;传输层依托 5G、工业以太网实现高速传输;存储层采用时序数据库、数据湖实现海量存储;分析层运用数字孪生、机器学习挖掘数据价值;应用层将成果落地于生产管控、供应链优化等实际场景^[3]。

(三) 融合对企业运营的核心价值

借助全面实时的大数据分析,企业决策模式更加科学,能够从事后总结转向事前预判与事中动态调控,显著提升决策的精准度与响应效率。通过数据驱动生产排程、工艺优化与智能运维,生产过程更加高效顺畅,有效减少资源浪费与设备停机,实现降本增效。数据可视化贯穿运营全流程,推动管理从粗放走向精细,精准把控生产、成本、质量各环节;依托用户及产品数据,可定制研发、提供个性化服务,延伸价值链、提升客户粘性。同时数据互联互通破除内外信息壁垒,实现产供销协同一体化,强化企业运营韧性与产业链抗风险能力^[4]。

二、融合背景下企业运营模式的升级路径

(一) 生产运营模式:从刚性生产到柔性智能生产

传统规模化生产模式十分依赖固化的生产流程,调整过程繁琐且花费巨大,不易灵敏捕捉并及时回应千变万化的市场需求,易造成资源闲置浪费和市场响应滞后之类的问题,在智能制造和工业大数据深度融合的趋势情形下,企业生产模式正加快向柔性化、智能化方向变革,核心目标是搭建覆盖生产全流程的自主调度和动态优化机制,对生产组织逻辑进行重塑。在开展生产计划制定的阶段,凭借工业大数据综合分析的能力,认真分析市场需求走向、订单动态情况和物料库存情形,基于此生成更符合实际生产状况的计划方案,这种模式破除了传统生产排程的刚性限制,大幅提高了多品种、小批量生产任务的适配程度,使企业可灵活改变生产的节奏,及时对市场波动作出反应,加大经营的灵活力度^[5]。生产执行端依托设备联网与全维度实时数据采集,实现生产全流程可视透明化。系统实时监测设备状态与工艺参数,异常自动预警、动态调参,实现过程实时管控与在线质控,降低品质波动风险。设备运维由传统定期检修升级为数据驱动的预测性维护,通过深度分析设备工况及运维数据,精准预判故障隐患、科学规划维保,减少非计划停机,保障生产连续稳定高效运行^[6]。

(二) 管理运营模式:从层级管控到数据驱动的扁平化管理

传统企业一般运用金字塔式的层级管控模式,这种纵向传递的管理架构造成信息传递链条过长,容易造成信息衰减和沟通的隔阂,部门彼此数据不流通、业务不配合,最终造成决策反应慢、管理效率不高,于智能制造与工业大数据深度融合的背景之

中,企业管理运营模式正逐渐过渡到数据驱动的扁平化管理,其要点是打破内部信息的孤岛,搭建实时化、协同化的管理运转机制。在组织架构的层面上,企业搭建起统一的工业大数据平台和数据中台,全方位整合生产、销售、财务、人力资源等多方面运营数据,做到数据标准相同、资源互用,有力缩减中间管理环节,拉近决策层跟一线执行层的距离,使生产、采购、财务等部门能够基于同源数据开展高效的合作^[7]。在管理决策层面,依托数据可视化平台实时呈现生产进度、成本消耗、库存及客户反馈等核心指标,助力管理者动态掌握经营全貌,快速识别运营风险与管理短板,提升决策时效与科学性。成本管控上,通过全流程数据深度剖析,清晰追溯成本构成,精准定位物料损耗、能源浪费、流程冗余等低效节点,制定专项优化方案,推动企业由传统粗放管理转向精细化、智能化管控,全面提质降本增效。

(三) 供应链运营模式:从线性协同到生态化智能协同

传统供应链一般采用“供应商—制造商—经销商—客户”的线性经营样式,各环节信息沟通不畅、协同的程度不高,面对市场波动时一般响应不及时,整体抵抗风险的能力不高,在智能制造和工业大数据深度融合的驱动当中,供应链运营模式慢慢从传统线性协同转变成生态化智能协同形式,主要方向是打通全链条的数据壁垒,达成资源智能安排与高效联合。在协同管理相关方面,企业借助工业大数据去搭建一体化协同平台,整合上下游企业跟客户的相关数据,做到需求预判、采购安排、生产组织和物流配送的统一配合联动,凭借数据分析及时找出潜在风险并灵活改变供应策略,保障供应链正常运行。在库存管理方面,通过对市场需求、生产节奏、物流周期等多类数据的综合分析,科学规划库存规模与补货时机,在保障生产连续性的同时减少库存积压,实现精益化库存管控。在物流配送方面,利用大数据优化配送路线与调度方案,结合实时路况与订单分布合理配置物流资源,同时运用物联网技术全程追踪货物状态,提升物流过程透明度与交付可靠性^[7]。

(四) 服务运营模式:从被动服务到主动式全生命周期服务

传统制造企业长期以产品生产为核心,服务环节局限于产品售出后的维修保障,服务形式单一、附加值较低,难以满足客户多元化、深层次的需求。在智能制造与工业大数据深度融合的背景下,企业服务运营模式逐步从被动响应式服务,升级为主动式全生命周期服务,核心是依托产品全生命周期产生的各类数据,延伸服务价值链,实现从“单纯卖产品”向“卖产品+增值服务”的转型突破。在产品研发阶段,企业通过整合分析客户需求、竞品情况及现有产品使用反馈等相关数据,精准把握市场需求趋势,针对性开展定制化产品研发与快速迭代优化,让产品更贴合客户实际使用需求^[8]。在售后服务环节,借助大数据与物联网技术,实时采集产品运行状态数据,主动预判产品可能出现的故障隐患,提前介入提供维修、保养等服务,同时结合客户使用习惯提供个性化指导,打破传统“客户报修、企业响应”的被动模式。在增值服务层面,企业依托工业大数据挖掘能力,不断拓展服务边界,为客户提供设备租赁、数据咨询、工艺优化、远程监控等多元化服务,丰富服务内容、提升服务价值,不仅能增强

客户粘性，更能培育新的盈利增长点，推动企业从制造型向服务型、价值型企业转型。

三、融合发展面临的挑战与优化策略

（一）主要挑战

数据治理体系不完善，工业大数据来源广泛、类型繁杂且缺乏统一标准，企业在数据采集、清洗、存储等环节缺乏规范，导致数据质量参差不齐，限制价值挖掘，同时数据安全与隐私保护机制不健全，存在数据泄露、滥用风险。技术适配与集成难度较大，各类智能制造设备和系统来自不同厂商，接口与数据格式不兼容，增加了数据集成难度，且部分企业老旧设备数字化改造成本高、难度大，技术适配性不足。专业复合型人才短缺，融合发展需要既懂工业机理、生产工艺，又精通大数据、人工智能技术的人才，人才缺口制约了融合落地进度^[9]。此外，转型成本与风险较高，设备改造、系统搭建、人才培养等需大量资金投入，给中小企业带来较大资金压力，且转型中还存在技术选型失误、业务流程重构受阻等风险。

（二）优化策略

以多维度系统搭建优化策略，全方位保障融合落地并发挥成效，在数据治理层面来讲，应牵头制定覆盖数据采集、清洗、存储、应用全流程的统一的工业数据标准，明确各环节技术规范以及管理要求，同时建立起全链路数据质量监控和动态评估机制，一直提高数据的完整程度、精准度与及时性；同时搭建多方位的数据安全防护体系，一并运用数据加密、访问权限分级、隐私计算等技术，形成数据全生命周期安全防护的闭环，有力防范数据泄露、滥用等风险。在技术协同相关事务里，优先引进标准化、开放性的智能制造设备和系统，对接口协议与数据格式加以统一，降低跨系统集成造成的成本；采用边缘计算和云端协同以融合的架构，利用边缘节点达成老旧设备数据的采集和初步处理，云端达成数据整合以及深度分析，有力克服老旧设备数字化改造成本高、难度大的障碍，做到新旧系统的无缝衔接和协同作业。在人才建设方面，企业深度推进校企协同育人，联合高校及职业院校开设智能制造、工业大数据、人工智能等新兴交叉专业，搭

建理论与实践深度融合的培养模式，定向培育输送复合型技术人才。同时常态化开展内部跨专业技能实训，赋能在岗员工提升专业技术与综合业务能力；并面向海内外引育高端领军人才，打造专业化技术骨干队伍，为产业融合创新发展筑牢人才与智力根基。在转型推进层面，企业需结合自身规模、技术基础与业务特点，制定分阶段、分步骤的转型规划，优先在核心生产环节开展试点应用，积累经验后逐步向全流程、全产业链拓展；充分依托政府产业扶持政策、行业公共服务平台等资源，降低转型资金压力与技术门槛；引入专业第三方机构提供全流程技术咨询、方案设计、项目实施与效果评估服务，精准规避技术选型失误、业务流程重构受阻等转型风险，保障智能制造与工业大数据融合平稳、高效落地，助力企业实现运营模式的全方位升级^[10]。

四、结语

智能制造与工业大数据的深度融合，是制造业企业突破传统运营瓶颈、实现高质量发展的必由之路。二者融合推动企业运营模式从经验驱动转向数据驱动，从单点优化转向全链路协同，从被动响应转向主动预判，在生产、管理、供应链、服务等维度实现全方位升级。当前融合发展虽面临数据治理、技术适配、人才短缺等挑战，但随着技术成熟与政策支持，制造业数字化转型步伐将不断加快。未来，企业需立足自身实际，以数据为核心、技术为支撑、业务为导向，稳步推进二者融合，优化运营模式、提升核心竞争力，在全球制造业变革中占据主动。

参考文献

- [1] 徐明. 基于人工智能的制造业数字化转型路径 [J]. 智能制造, 2024, 31 (3): 10-18.
- [2] Ming Luo. A digital twin-based big data virtual and real fusion learning reference framework supported by industrial internet towards smart manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025, 75: 123-135.
- [3] 侯卫锋, 古绍武, 张志铭, 等. 工业大模型赋能的新型流程工业智能工厂核心工业软件体系 [J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55 (7): 1783-1800.
- [4] 大数据驱动的离散制造车间生产过程智能管控方法研究 [J]. 机械工程学报, 2025, 61 (22): 189-201.
- [5] 彭国超. 工业人工智能: 智能制造的中枢大脑 [M]. 科学出版社, 2024.
- [6] 孙新波, 李祎祯, 张明超. 智能制造企业数字化赋能供应链敏捷性实现机理的案例研究 [J]. 管理学报, 2023, 20 (8): 1116-1127.
- [7] 制造业数字化转型实施指南解读 [EB/OL]. (2024-12-26)[2026-03-30].
- [8] 熊先青, 张美, 岳心怡, 等. 大数据技术在家居智能制造中的应用研究进展 [J]. 世界林业研究, 2023, 36(2): 74-81.
- [9] Practice path and effect analysis of the digital transformation of discrete manufacturing enterprises [J]. ACM Transactions on Management Information Systems, 2025, 16 (2): 1-18.
- [10] 智能制造高质量发展视域下工业数字化转型典型案例剖析 [J]. 智能制造, 2025, 32 (6): 45-52.

深层地层钻井中卡钻事故成因机理 与高效解卡技术策略研究

宋俊杰

中海油服一体化和新能源事业部平台作业公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ERA.2026060036

摘 要 : 深层地层钻井受高温、高压、复杂岩性及井眼轨迹多变等因素影响, 卡钻事故频发且处置难度大, 严重制约钻井安全与效率。本文系统剖析深层钻井四类典型卡钻事故的核心成因机理, 在此基础上梳理卡钻早期识别技术, 包括地面异常参数特征提取、LWD/MWD 随钻监测预警及大数据机器学习智能预警模型; 进而提出高效解卡技术体系, 明确不同卡钻类型的技术优选原则。研究可为深层钻井卡钻事故的机理认知、早期预警与快速高效处置提供理论依据与技术支持, 对降低复杂地层钻井风险、提升施工安全性与经济性具有重要意义。

关 键 词 : 深层地层钻井; 卡钻事故; 成因机理; 压差卡钻

Research on the Causal Mechanism and Efficient Stuck Pipe Releasing Technical Strategies for Drilling in Deep Formations

Song Junjie

Platform Operation Company, Integrated and New Energy Business Division, China Oilfield
Services Limited, Tianjin 300450

Abstract : Drilling in deep formations is subject to high temperatures, high pressures, complex lithologies, and variable wellbore trajectories, leading to frequent stuck pipe incidents that are difficult to manage and significantly hindering drilling safety and efficiency. This paper systematically analyzes the core causal mechanisms of four typical types of stuck pipe incidents in deep drilling. Based on this analysis, it outlines early identification techniques for stuck pipe incidents, including the extraction of abnormal surface parameter characteristics, Logging While Drilling (LWD)/Measurement While Drilling (MWD) monitoring and early warning, and intelligent early warning models based on big data machine learning. Furthermore, it proposes an efficient stuck pipe releasing technical system and clarifies the principles for selecting optimal techniques for different types of stuck pipe incidents. The research provides a theoretical basis and technical support for understanding the mechanisms, early warning, and rapid and efficient management of stuck pipe incidents in deep drilling, which is of great significance for reducing drilling risks in complex formations and enhancing construction safety and cost-effectiveness.

Keywords : deep formation drilling; stuck pipe incidents; causal mechanism; differential pressure sticking

引言

为破解深层钻井卡钻事故防控难题, 厘清各类卡钻事故的核心成因机理, 建立科学有效的早期识别、动态监测与高效解卡技术体系, 降低卡钻事故发生率与处置损失, 保障深层钻井作业安全高效推进, 本文系统剖析深层钻井中四类典型卡钻事故的成因机理, 梳理卡钻早期识别与动态监测技术, 提出针对性的高效解卡技术策略与优选方案, 结合相关工程实践与研究成果, 为深层钻井卡钻事故的机理认知、预警防控与快速处置提供理论依据与技术支持, 对推动深层油气资源高效勘探开发、突破深层钻井工程技术瓶颈具有重要的理论意义与工程应用价值。

一、深层钻井卡钻事故成因机理分析

（一）压差卡钻的“力学－滤饼”耦合机理

压差卡钻是深层钻井最常见的卡钻类型之一，核心是力学与滤饼耦合作用使钻柱被井壁吸附卡滞。钻井液液柱压力与地层孔隙压力形成的压差，会把钻柱压向井壁并与井壁滤饼紧密贴合。滤饼会增大接触面积、增强吸附力，深层高温高压还会压实滤饼、劣化钻井液，让滤饼更厚更致密，大幅提升黏附阻力。井斜角、狗腿度增大会加长接触长度、加大接触力，钻柱静止时间过长也会持续增强吸附作用。当吸附力超过钻柱活动能力时就会发生卡钻，多见于水平井大斜度段及高渗透性地层。

（二）井塌/掉块卡钻的“热－流－力”耦合失稳机理

深层地层井塌/掉块卡钻的核心是热－流－力多场耦合致井壁失稳，岩石坍塌或掉块后卡滞钻柱。高温引发热应力、加速钻井液与岩石反应，弱化井壁；钻井液冲刷、滤失破坏岩石胶结、改变孔隙压力，加剧失稳；地应力重构形成应力集中，叠加钻柱机械作用，导致岩石破裂掉块卡钻。天然裂缝会加剧破坏区域扩展，水平地应力差和流体压力差扩大破坏范围，溶质质量分数差可降低风险，钻井液温度对坍塌影响小但能减少拉伸破坏。

（三）缩径卡钻的岩石黏弹塑性蠕变机理

缩径卡钻的核心成因是深层地层岩石的黏弹塑性蠕变特性，在高温、高压作用下，井壁岩石发生不可逆塑性变形，导致井径缩小卡滞钻柱。深层盐膏层、软泥岩、泥页岩等岩石黏弹塑性显著，蠕变变形随时间累积。盐膏层蠕变速率随温度、压力升高而加快，钻井液液柱压力与盐层压力的差值影响井径变化；软泥岩（尤其欠压实型）塑性大、蠕变速率高，主要受上覆地层压力和自身含水量影响，易快速蠕动缩径；胶结不良的砂岩、砾岩因钻井液滤失形成厚滤饼，也会引发缩径卡钻。分数阶 Maxwell 蠕变模型研究显示，井壁径向应变随时间增大，弹性模量、黏度系数越小、初始地应力越大，缩径越严重。

（四）沉砂/岩屑床卡钻的多相流动力学机理

沉砂/岩屑床卡钻的核心是岩屑在井内堆积形成岩屑床，导致钻柱卡滞，其机理遵循多相流动力学规律。深层钻井中，钻头产生的岩屑本应随钻井液排出，但复杂井眼轨迹（水平井、大斜度井）使井眼底边流速偏低，岩屑易沉降堆积；高温会改变钻井液流变性能，若黏度、切力不足，悬浮携岩能力下降；循环排量低于临界携岩流速，也会促使岩屑床形成增厚。试验表明，岩屑床运移速度与流体密度、排量、转速正相关，增大排量可提速但压降受限，提高转速效果明显且对压降影响小。岩屑床过厚会挤占井眼空间，大幅增大摩擦阻力，钻柱静止或操作不当即可引发卡钻；固控系统失效、环空出现桥堵也会加剧该风险。

二、深层钻井卡钻早期识别与动态监测技术

（一）卡钻前兆地面参数特征提取

国内外学者对于卡钻的预测进行了长期的研究，卡钻预警方法多以区域井统计分析和基于传统钻井物理模型为主^[1]。卡钻事故

发生前钻井地面参数会出现明显异常，可通过提取这些异常特征实现卡钻早期识别^[2]。深层钻井需重点监测钻井液性能、钻井施工及钻柱受力三类地面参数，不同类型卡钻的地面参数异常特征各不相同^[3]。压差卡钻前兆为扭矩、摩阻逐渐增大，悬重波动减小，钻井液滤失量增大、含砂量超标，泵压基本稳定；井塌/掉块卡钻前兆表现为泵压突然升高且波动频繁，钻井液返出量减少、携带岩屑量骤增，扭矩、摩阻急剧增大，悬重突然下降；缩径卡钻前兆为起下钻阻力增大，扭矩逐渐升高，泵压略有上升，钻井液循环正常但井径测量值逐渐减小；沉砂/岩屑床卡钻前兆为泵压缓慢升高，扭矩、摩阻持续增大，钻井液返出岩屑量减少，悬重出现不规则波动^[4]。通过建立地面参数异常阈值体系进行实时监测与数据处理，当参数超出阈值并持续异常时及时发出早期预警，指导现场调整施工参数以规避卡钻风险，例如监测到扭矩增幅、摩阻系数均突增大于20%时，需立即排查卡钻隐患。

（二）基于随钻测量（LWD/MWD）的井下卡钻预警

随钻测量（LWD/MWD）是深层钻井井下参数监测的核心技术，可实时获取温度、压力、井径、钻柱振动等数据，为卡钻预警提供支撑^[5]。其中 MWD 的振动冲击测量模块是卡钻预警关键，如同钻具“黑匣子”，能实时感知井下极端力学环境。LWD 可监测井径变化，结合压力数据预警缩径卡钻；MWD 实时监测钻柱多向振动、冲击加速度及温度，异常参数可预示井塌、掉块或压差卡钻风险^[6]。现代 MWD 多采用高性能三轴加速度计，部分模块还兼具测温与数据存储功能，为预警分析提供依据。地面系统通过色码直观显示安全等级，出现红色警报时可及时采取控钻压、降转速等措施防范卡钻。同时利用 LWD/MWD 获取地层压力参数，结合钻井液密度可预判井壁失稳，提前优化钻井液性能，从源头降低卡钻风险。

（三）基于大数据与机器学习的智能预警模型

深层钻井产生大量多源异构数据，基于大数据与机器学习技术，依托数据中台，结合物理模型、智能算法等可构建卡钻智能预警模型^[7]。模型构建需经过数据预处理、特征工程、模型训练与验证三步，相关系统在50余口不同类型探井中应用，预警符合率达91.5%，具备可行性与实用性，国内外相关数字化平台也为其提供技术支撑。

三、深层地层高效解卡技术策略与优选

（一）解卡技术分类及“黄金救援时间”界定

深层钻井解卡技术按原理分为化学、力学及非常规三类，化学解卡靠药剂破坏胶结、降阻；力学解卡通过机械力打破卡钻力学平衡；非常规解卡针对复杂顽固性卡钻，配套补救措施应对解卡失败^[8]。深层卡钻“黄金救援时间”为发生后4-8小时，此时滤饼未固化、岩屑床未压实、井壁稳定，解卡成功率超85%；超时则卡钻加剧，成功率骤降，易引发钻柱断裂、井眼报废。盐膏层、软泥岩等易蠕变地层，因井径收缩快，黄金救援时间需缩短至4小时内。

（二）化学解卡技术策略

化学解卡技术适用于压差卡钻、泥饼吸附卡钻，以及部分缩

径、沉砂卡钻。其核心是通过注入化学解卡剂,破坏滤饼结构、降低摩擦阻力、溶解或分散卡滞物,实现钻柱解卡。结合深层高温、高压环境,化学解卡剂需具备耐高温($\geq 150^{\circ}\text{C}$)、耐高压、配伍性好、无伤害地层等特点^[9]。解卡剂选型需根据卡钻类型针对性选用,针对压差卡钻,选用滤饼破坏型解卡剂(如酸溶性乳化液、过硫酸铵氧化剂),其中含15%–20% HCl的酸溶性乳化液可定向破坏渗透性地层滤饼结构,过硫酸铵氧化剂可氧化滤饼中的有机杂质,降低滤饼强度,针对泥饼吸附卡钻,选用润滑型解卡剂,可降低钻柱与滤饼之间的摩擦系数^[10]。针对沉砂、岩屑床卡钻,选用分散型解卡剂,可分散岩屑、沉砂,提高其流动性,便于随钻井液排出。化学解卡的施工流程为卡钻确认→停钻循环→注入解卡剂→浸泡反应→活动钻柱→解卡验证。深层地层施工时,需控制解卡剂注入速度($2\text{--}3\text{m}^3/\text{h}$),确保解卡剂均匀分布在卡点区域。浸泡时间根据卡钻严重程度确定,一般为4–8小时,复杂情况下可延长至12小时,浸泡期间,定期小幅活动钻柱,促进解卡剂与卡点接触,提升解卡效果,解卡后,需循环钻井液,清除井内残留的解卡剂和岩屑,恢复正常钻井。

(三) 力学解卡技术策略

力学解卡技术适用于井塌/掉块卡钻、缩径卡钻、沉砂/岩屑床卡钻,以及部分顽固性压差卡钻。其核心是通过施加机械力,打破卡钻的力学平衡,释放钻柱,深层地层力学解卡需结合钻柱强度、井眼状态,避免因机械力过大导致钻柱断裂、井壁进一步坍塌。常用的力学解卡技术包括震击解卡技术、旋转解卡技术和提拉–下放解卡技术,其中震击解卡技术分为上击解卡和下击解卡,通过在钻柱上连接震击器,利用震击器产生的冲击力,打破卡点的卡滞状态,适用于井塌/掉块、缩径、键槽卡钻,震击力需控制在钻杆疲劳极限以内,一般为1.2–1.5倍钻具重量。旋转解卡技术则通过缓慢旋转钻柱,利用旋转产生的扭矩,破坏卡点的摩擦阻力,适用于沉砂/岩屑床、轻度压差卡钻,旋转速度控制在5–10 r/min,避免高速旋转加剧井壁坍塌,提拉–下放解卡技术通过反复提拉、下放钻柱,利用钻柱的弹性变形,施加轴向力,打破卡点的吸附或卡滞状态,适用于轻度卡钻,提拉、下放速度需缓慢,避免产生冲击载荷。深层地层力学解卡时,需实时监测

钻柱受力、扭矩、泵压等参数,若参数出现异常,立即停止解卡操作,排查井眼状态,对于井塌/掉块卡钻,解卡前需先循环钻井液,清除部分岩屑、坍塌物,再进行力学解卡,避免盲目施加机械力导致井壁进一步坍塌,对于缩径卡钻,可结合划眼技术,通过钻头反复划眼,扩大井径,再配合震击、提拉解卡。

(四) 非常规解卡技术及补救措施

深层复杂顽固性卡钻(如严重井塌、盐膏层蠕变缩径、钻柱卡死等)常规解卡效果不佳,需采用非常规解卡技术及配套补救措施以降低损失。常用非常规解卡技术有,水力脉冲解卡,利用高频水力脉冲破坏岩屑床、坍塌物结构,促进钻井液循环,适用于沉砂、严重井塌卡钻;高能气体压裂解卡,通过高压脉冲冲击井壁、破碎障碍物,适用于严重缩径、井塌卡钻,需控制压力防井壁破裂;定向铣削解卡,通过铣削键槽或坍塌物扩大井眼,配合震击提拉,适用于键槽卡钻、钻柱卡死。解卡失败后补救措施有,丢钻具解卡,丢弃卡死钻柱继续钻井,后续打捞;侧钻解卡,避开复杂井段重新钻井,适用于严重井塌、缩径无法恢复的情况;注水泥封固解卡(预防卡钻),钻过复杂井段后,注水泥封固该井段,凝固后重新钻井或侧钻。

四、结束语

本文围绕深层地层钻井卡钻事故的成因机理与高效解卡技术策略展开系统研究,针对深层高温高压、地层复杂、井眼轨迹多变等极端工况,全面剖析了压差卡钻、井塌/掉块卡钻、缩径卡钻、沉砂/岩屑床卡钻四类典型卡钻事故的核心成因机理,明确了各类卡钻的作用机制与影响因素,梳理了基于地面参数监测、LWD/MWD随钻监测及大数据机器学习的卡钻早期识别与动态监测技术,构建了涵盖化学、力学、非常规解卡及补救措施的高效解卡技术体系,界定了不同地层条件下的“黄金救援时间”,提出了针对性的技术优选原则与施工控制要点。后续可聚焦于不同区块深层地层卡钻机理的差异化分析,结合人工智能、大数据等前沿技术,进一步优化卡钻智能预警模型,完善卡钻事故防控与处置的全流程技术体系。

参考文献

- [1] 胜亚楠. 页岩气钻井卡钻故障预警方法研究与应用[J]. 河南科学, 2023, 41(11): 1569–1575. DOI: 10.3969/j.issn.1004–3918.2023.11.002.
- [2] 任美洲. 定向井施工卡钻事故成因分析和预防措施[J]. 石化技术, 2022, 29(3): 203–204. DOI: 10.3969/j.issn.1006–0235.2022.03.093.
- [3] 叶芊, 贾相健. 定向钻井中压差卡钻事故的成因及其处理方法[J]. 中国井矿盐, 2010, 41(4): 20–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001–0335.2010.04.007.
- [4] 杜飞. 压差卡钻成因与事故分析[J]. 科技风, 2010(1): 88. DOI: 10.3969/j.issn.1671–7341.2010.01.080.
- [5] 杜高举. 基于层次分析法的钻井井塌卡钻事故分析研究[J]. 安全、健康和环境, 2011, 11(1): 11–14. DOI: 10.3969/j.issn.1672–7932.2011.01.005.
- [6] 王金平. 卡钻事故处理技术应用浅议[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(24).
- [7] 于丹, 郭文武, 蒋明. 地质岩心钻探吸附卡钻事故的预防与处理[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(8): 256. DOI: 10.3969/j.issn.1674–5167.2018.08.239.
- [8] 王宝. 米桑油田井下卡钻复杂情况处理技术应用[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18(4): 204–206. DOI: 10.3969/j.issn.1674–2850.2025.04.067.
- [9] 许超, 石智军. 煤矿井下定向钻进钻孔事故的预防及处理[J]. 煤田地质与勘探, 2014(3): 100–104. DOI: 10.3969/j.issn.1001–1986.2014.03.023.
- [10] 孙庆春, 赵利锋, 刘涛. 大牛地气田水平井通井卡钻处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015(9): 34–37. DOI: 10.3969/j.issn.1672–7428.2015.09.010.

高压线下桥涵基坑静态爆破技术优化研究

吴国银, 李成, 杜倩倩, 范云, 程广福
中建交通建设集团有限公司, 北京 100040
DOI:10.61369/ERA.2026060037

摘 要 : 在高压输电线路下方开展桥涵基坑施工, 安全风险高、控制要求严, 传统静态爆破常出现坡面成型差、超欠挖明显、岩石粒径不均等问题。本文以高压线下特殊工况为背景, 围绕装药量、孔径、孔深及孔位布置开展静态爆破技术优化研究, 通过合理匹配参数组合, 改善破碎均匀性与坡面成型质量, 减少后期修整作业, 同时提升爆破石料对路基填料的适用性, 实现安全施工、质量控制与资源利用的统一。文章从工况特点、机理分析、参数优化、工艺控制等方面进行系统论述, 可为类似工程提供理论依据与技术参考。

关 键 词 : 高压线下; 桥涵基坑; 静态爆破; 参数优化; 路基填料

Optimization Research on Static Blasting Technology for Bridge and Culvert Foundation Pits Under High-Voltage Power Lines

Wu Guoyin, Li Cheng, Du Qianqian, Fan Yun, Cheng Guangfu
China Construction Communications Engrg.Group Corp.,Ltd.,Beijing 100040

Abstract : In the construction of bridge and culvert foundation pits under high-voltage transmission lines, the safety risks are high and the control requirements are strict. Traditional static blasting often suffers from problems such as poor slope forming, obvious over-under excavation, and uneven rock particle size. Based on the special working conditions under high-voltage lines, this paper conducts an optimization study on static blasting technology focusing on charge weight, borehole diameter, borehole depth and borehole layout. By reasonably matching parameter combinations, the fragmentation uniformity and slope forming quality are improved, the later trimming work is reduced, and the applicability of blasted stone materials to subgrade fillers is enhanced, so as to realize the unity of safe construction, quality control and resource utilization. The paper systematically discusses the working condition characteristics, mechanism analysis, parameter optimization and process control, which can provide theoretical basis and technical reference for similar projects.

Keywords : under high-voltage lines; bridge and culvert foundation pit; static blasting; parameter optimization; subgrade filler

前言

随着交通建设不断向复杂地形推进, 桥涵基坑施工时常遭遇临近高压输电线路的工况。受电磁安全、环境敏感及结构精度约束, 常规爆破方式难以适用, 静态破碎技术成为主要选择。但传统静态爆破在参数设计上多依赖经验, 易出现破碎不均、坡面平整度不足、超欠挖控制不佳等问题, 既增加修整工作量, 又导致石料难以直接利用。为解决上述问题, 本文结合高压线下施工的特殊性, 从装药量、孔径、孔深、孔位布局等关键环节入手, 对静态爆破技术进行系统性优化, 在确保施工安全的前提下, 提升基坑成型质量与岩石资源化利用率, 为工程提质增效提供理论支撑与实践思路^[1]。

一、高压线下桥涵基坑施工特点与技术难点

(一) 工况特殊性

高压线下桥涵基坑属于典型受限空间施工, 其特殊性主要体现在电磁安全风险高、施工扰动控制严、周边环境敏感。施工过程中不允许出现震动、飞石、冲击波及电火花等隐患, 因此只能采

用无震动、无起爆、低干扰的静态爆破方式。同时, 桥涵基坑对基底稳定性、边坡平顺度要求较高, 爆破效果直接影响后续结构施工质量与运营安全。

(二) 传统静态爆破存在的问题

传统的静态爆破没有做精细的参数设计, 在实际施工过程中存在着两个方面的不足。一方面, 破碎过程的可控性差, 坡面平

作者简介: 吴国银 (1988-), 汉族, 男, 内蒙古赤峰市人, 本科, 工程师, 研究方向: 桥梁。

整度不能保证,超挖和欠挖现象普遍,造成人工修整量大、工期延长、成本增加。另一方面,岩石破碎粒径分布不均,大块石过多或者过细,不能满足路基填料的级配要求,一般要进行二次破碎,影响施工效率,也不利于资源就地利用。

（三）优化目标与技术思路

本次技术优化以安全可控、坡面规整、粒径适宜为原则,对钻孔参数和装药参数进行系统匹配,达到岩石均匀破碎、边坡成型效果改善、后期修整作业减少的目的,同时提高破碎程度,使更多的石料满足路基填筑直接使用的要求,达到工程效益和经济效益双提升的效果。以机理分析为基础,以参数协同优化为手段,以工艺控制为保证,创建出适合于高压线下桥涵基坑的静态爆破优化体系^[2]。

二、静态爆破作用机理及主要影响因素

（一）静态爆破基本原理

静态爆破依靠破碎剂遇水发生水化反应产生体积膨胀,在钻孔约束下形成持续膨胀压力,当压力超过岩石抗拉强度时,岩石内部产生裂隙并逐步贯通,最终实现岩体破碎。整个过程无爆破震动、无飞石、无噪音,对高压线路、周边建(构)筑物干扰极小,适合在敏感环境下使用^[3]。

（二）装药量对破碎效果的影响

装药量决定了膨胀压力的大小和作用范围,也是控制破碎程度的方法。药量过低会造成岩体开裂不足,整体性好,开挖困难,粒径大;药量过高容易造成局部应力集中,坡面出现过破碎、掉块、超挖等现象,影响边坡平顺性。合理的药量要兼顾破碎程度和坡面稳定,达到均匀开裂的目的。

（三）孔径与孔深的控制作用

孔径影响单位孔内装药量及膨胀压力分布,孔径太小会导致药剂填充不足,破碎效果差;孔径太大容易造成应力集中,不利于边坡轮廓控制。孔深同开挖深度、基底保护有关,孔深不足容易造成底部岩体没有充分破碎,孔深过大又会扰动基底,影响基坑成型质量。

（四）孔位布置对平整度与粒径的影响

孔位布置有孔距、排距、布孔方式和坡面边界孔位控制等,是决定边坡平整度和岩石粒径均匀性的因素。孔距过大容易造成裂隙不能贯通,粒径过大;孔距过小容易造成破碎过度。边界孔位布置不合理,很容易造成坡面凹凸不平、超欠挖严重。经由改良孔位排布方式,可以使得膨胀压力得到均匀的传递,进而改善坡面的规整状况以及破碎情况。

三、高压线下桥涵基坑静态爆破参数优化

（一）装药量优化原则

高压线基坑静爆药量优化以“安全可控、适度破碎、保护边坡、兼顾效率”为原则,符合高压线路无扰动、低风险施工底线的要求,符合基坑成型质量的要求。装药量直接影响破碎剂的膨

胀压力大小,是控制破碎效果和施工安全的关键,要分区精细控制。

边坡轮廓区以“控形、保稳”为主,减小装药量,防止应力集中造成超挖、崩落,防止坡面破损、修整量增大,避免边坡失稳。基坑中部岩体远离边坡,在安全距离内可以适当增大药量提高破碎强度,使岩体充分开裂,防止大块残留。采用分区差异化控制方式可以达到整体破碎效果的同时又保护了边坡质量,减少修整工作量,防止药量失控^[4]。

（二）孔径与孔深优化

孔径优化是静态爆破的关键,要考虑破碎能力、施工精度、边坡稳定这三个因素之间关系,根据岩体强度、风化程度、设备条件等因素来综合选择^[5]。孔径太小,破碎剂填充量少、膨胀压力低,会造成岩体破碎不彻底、大块率高;孔径过大,容易产生局部应力集中,孔口岩体松散,破坏坡面平整度。因此要选择合适的孔径区间,保证破碎剂填充密实、压力稳定释放,提高破碎的可控性。

孔深优化是以设计开挖深度为基础,结合岩体风化、层理变化来确定的。孔深过浅容易造成下部岩体欠挖,增加修整的难度;孔深过大会扰动基底,降低承载力。精确控制孔深,可以保证膨胀压力的均匀传递,使岩体有序开裂,防止欠挖和基底扰动,提高基坑成型精度,严格控制钻孔偏差,保证施工安全高效。

（三）孔位系统优化

孔位布置是保证坡面平整度、岩石粒径均匀性、石料利用率的主要方法。高压线下桥涵基坑静态爆破采取“整体均匀布置、边界精细控制、分区差异化布设”的办法来符合特殊工况的要求。基坑内根据孔距、排距的合理安排,保证膨胀应力能顺利传导,使破碎后的粒径均匀,提高路基填料的直接利用率,降低二次加工和外运成本。

边坡区需要精细布孔,适当加大边界孔距、优化钻孔角度,使岩体沿坡面有规律地开裂,形成整齐的破裂面,控制平整度、减小超欠挖。经过优化的孔位可以使得膨胀压力分布更加均匀,破裂路径也更容易控制,从而得到设计轮廓一致的破碎形态。通过协调布置可以提高破碎的均匀性以及基坑轮廓的平整度,达到坡面质量、石料利用率同时提高的目的^[6]。

（四）参数协同匹配

静态爆破效果是由装药量、孔径、孔深、孔位共同决定的,单一参数的优化不能达到综合目标,必须建立多参数协同匹配机制。高压线施工时,参数组合要根据地质情况、岩性、风化程度、基坑深浅和安全距离一起规划、随时变动。

经过参数协同匹配之后,膨胀压力分布符合预期的破碎形态,不会出现破碎不均、边坡失稳、粒径离散大的问题。药量与孔径适配、孔深与开挖深度一致、孔位与破碎强度相吻合,在保证线路及边坡安全的基础上,减小后期修整工作量,使岩石达到填料直接使用的条件。该模式提高了特殊工况下静态爆破的适用性,实现了安全、质量、效益三者统一,可以给类似工程提供借鉴。

四、施工工艺控制与质量保障措施

（一）钻孔施工控制

钻孔精度是静态爆破效果的基础保证，直接影响后面破碎剂膨胀压力的传递和岩体开裂形态，施工全过程要严格控制钻孔施工质量，杜绝各种钻孔缺陷影响整体施工效果。施工前根据优化后的参数方案进行精确放样孔位，做好标记并进行复核，防止孔位偏移、间距不均等情况的发生；钻孔时安排专业技术人员全程旁站监督，严格控制钻孔的孔位偏差、倾角、深度，使用专业的测量工具实时校验，防止出现偏孔、缩孔、孔深不足或者超深等问题^[7]。

尤其对于边坡区域的钻孔来说，它是坡面成型的关键控制点，必须予以重点专项控制。按照设计坡度调节钻孔倾角，保证钻孔顺直、间距一致，为后续形成规整平顺的坡面做好铺垫。钻孔结束后要及时清除孔内石粉、碎屑，保证孔内干净，防止堵塞影响破碎剂灌注和压力传递，做好孔口防护，防止杂物落入，保证钻孔符合设计要求，为后续爆破作业打下质量基础。

（二）破碎剂拌和与灌注控制

破碎剂拌和、灌注质量对水化反应及膨胀压力有影响，是控制破碎质量的重要工序。拌和时要严格控制水胶比，根据材料要求及现场情况准确配比，不得随意加水；使用专用机具充分拌和，防止结块、离析，保证水化反应均匀稳定，使膨胀压力持续可靠释放^[8]。

灌注按照自上而下、连续密实的原则进行，匀速施工并辅以轻微捣实，保证孔内填充饱满无空洞，使膨胀压力有效传递，岩体均匀开裂，减少欠挖和粒径不均。对边坡区域钻孔要加大灌注质量控制力度，防止由于填充不足引发坡面开裂不规则、平整度不好，保证整体破碎效果达到设计标准。

（三）高压线下安全管控措施

高压线施工要以安全为根本，严格遵守电力安全相关规定，建立全过程的安全控制体系。施工前主动联系电力管理部门，确定安全作业距离和防护要求，做好安全技术交底，使作业人员了解施工的禁忌和注意事项；现场设安全作业区，设警示标志、隔离设施，严禁无关人员、设备进入。

施工期间由专职安全员全程监督，保证人员、设备处在安全距离以内。在使用绝缘工具及防护用品时规范临时用电、消除电气隐患、排除电磁干扰。在保证高压线路安全稳定运行的基础

上，有条理地组织施工，使施工安全和进度得到控制。

（四）破碎效果监测与调整

静态爆破施工受到岩体岩性、风化程度、环境温度等诸多因素的影响，实际破碎效果同预期存在差别，因此施工时要创建起实时监测、动态微调、持续改进的管控体系，保证最终成果符合要求。安排专业技术人员全程对岩体开裂状况、坡面成型平整度、岩石粒径分布等进行观测，做好实时记录和效果评价工作，重点观察边坡区域成型质量及石料粒径的匹配程度^[9]。

若监测到岩体破碎不充分、坡面平整度不足、粒径过大等问题，分析原因，根据现场实际情况调整装药量、孔距等参数，有针对性地对后续施工工艺进行优化；如果出现局部超挖、破碎过大的情况，立即改变药量和孔位布置，用实时监测和动态调整来不断改善破碎均匀性、坡面平整度和石料适用性，逐步达到预期的控制目标，保证整个施工过程质量可控、效果达标，充分发挥参数优化和工艺管控的综合效益。

五、工程应用价值与综合效益

优化后的静态爆破技术更适应高压线下桥涵基坑的严苛工况，在安全、质量、经济三方面体现出明显优势。安全层面，无震动无飞石，对高压线路干扰极小，施工风险显著降低。质量层面，坡面平整度提升，超欠挖得到有效控制，基坑成型质量更好，后期修整工作量明显减少。经济层面，岩石粒径均匀性提高，更多石料可直接作为路基填料使用，降低二次破碎成本与外运成本，提升资源就地利用率，缩短工期，提高综合效益^[10]。

六、结尾

本文针对高压线下桥涵基坑这一特殊工况，对静态爆破技术进行了系统性理论优化，通过对装药量、孔径、孔深、孔位的协同控制，有效改善坡面平整度，减少超欠挖与后期修整工作量，同时提升岩石粒径对路基填料的适用性。该优化思路以安全为前提、以质量为核心、以效益为目标，理论逻辑清晰、工程适用性强，可为类似敏感环境下的基坑开挖提供参考。在后续实践中，可结合不同岩性与现场条件进一步细化参数体系，推动静态爆破技术向更精细化、高效化方向发展。

参考文献

- [1] 朴占华. 紧邻商业区城市深基坑静态爆破技术应用研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019(08).
- [2] 曹小娟. 路基深挖路段坚石级岩石光面爆破施工 [J]. 黑龙江交通科技, 2019(01).
- [3] 曹鑫. 静态破裂剂膨胀机理的研究 [D]. 武汉理工大学, 2007.
- [4] 孟建创. 静态爆破技术在石质路堑施工中的应用分析 [J]. 价值工程, 2018(19).
- [5] 智慧矿山中预裂 + 浅孔 + 深孔组合爆破施工技术 [J]. 王峰. 建筑机械, 2025(03).
- [6] 蔡李荣. 孔爆破在坑槽石方开挖施工中的应用 [J]. 低碳世界, 2017(26).
- [7] 范志光. 既有有线附近爆破施工探析 [J]. 建筑技术开发, 2017(08).
- [8] 罗卫华; 陈彩苑. 某边坡爆破施工对既有隧洞影响数值分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2022(04).
- [9] 刘永. 高速公路土石方开挖作业中的静态爆破施工技术 [J]. 中国高新科技, 2021(08).
- [10] 李金龙. 高速公路隧道掘进爆破施工技术应用研究 [J]. 居舍, 2021(11).

壳牌气化炉激冷盒烧损原因分析及修复改造

杨岱

云南云天化工业装备技术有限公司, 云南 昆明 650300

DOI:10.61369/ERA.2026060038

摘 要 : 激冷盒作为壳牌气化炉的关键部件, 它的运行状况会直接和整个装置的稳定以及安全产生关联。壳牌煤气化工艺的核心设备也就是这种气化炉, 激冷盒在长时间运转之后, 比较容易出现烧损的情况。那么, 本文基于它的结构特性以及工作机理, 来深入开展烧损关键诱因的剖析工作, 这些诱因包括激冷气通道阻塞、激冷气的供应出现短缺情况, 惰性气体于环形区域当中的分布比较稀疏, 密封间隙的尺寸超出了标准范围。鉴于长期设备维护实践来开展工作, 构思了一套激冷盒的全面修复以及升级策略。这个方案着重对检查孔的设计进行了调整, 对百叶窗的构造开展了优化, 并且对密封体系进行了改进。激冷盒的烧蚀状况在改造之后得到了明显的改善, 这样气化炉的运行时长也因此增加了, 这就为开展相似设备的维护工作带来了可借鉴的经验。

关 键 词 : 壳牌气化炉; 激冷盒; 烧损原因; 修复改造; 密封结构

Analysis of Burnout Causes and Repair and Transformation of Quench Box in Shell Gasifier

Yang Dai

Yunnan Yuntianhua Industrial Equipment Technology Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650300

Abstract : As a key component of the Shell gasifier, the operational status of the quench box is directly related to the stability and safety of the entire unit. The gasifier, which is the core equipment of the Shell coal gasification process, is prone to burnout of the quench box after prolonged operation. Therefore, based on its structural characteristics and working mechanism, this paper conducts an in-depth analysis of the key causes of burnout, including blockage in the quench gas passage, insufficient quench gas supply, sparse distribution of inert gas in the annular region, and seal gap dimensions exceeding standard limits. Drawing on long-term equipment maintenance practices, a comprehensive repair and upgrade strategy for the quench box has been devised. This plan focuses on adjusting the design of inspection ports, optimizing the louver structure, and improving the sealing system. After the transformation, the erosion condition of the quench box has significantly improved, thereby extending the operational duration of the gasifier and providing valuable experience for the maintenance of similar equipment.

Keywords : Shell gasifier; quench box; burnout causes; repair and transformation; sealing structure

引言

壳牌煤气化技术, 也就是洁净煤利用方面的一个关键途径, 在国内被广泛运用, 壳牌气化炉的构成属于工艺的关键所在, 装置的生产效益会直接受到它运行稳定程度的影响, 激冷盒在气化炉内起着核心的作用, 它的核心功能是把大约200摄氏度的循环激冷气体进行均匀散布, 让其与大约1500摄氏度的高温合成气充分地交融, 这样来实现合成气温度的显著下降, 保护下游设备。激冷盒在持续开展运行工作时, 会面临高热负荷以及复杂的流场, 它的烧损现象是比较常见的, 激冷盒要是出现故障, 就会扰乱激冷气流的分布, 从而导致合成气倒窜到环形腔室当中, 进而引发该区域的测温元件发出警报。如果情况加剧, 那就会启动气化炉的紧急停车程序。对激冷盒烧损的缘由开展深入剖析, 并且切实探寻修复改造方案, 对于维持气化装置长期平稳运转有着关键价值。

一、激冷盒结构与工作原理

(一) 激冷盒结构组成

激冷盒被放置在气化炉的激冷段, 它的构造是相当复杂的。

主要包含了激冷盒主体、激冷气分配孔、平衡孔、百叶窗、膨胀节以及密封结构等方面的组件, 把Incoloy 825钢当作激冷盒的材料来使用, 这种材料拥有优异的高温抗氧化以及耐腐蚀的特性。激冷气会把炉体四接管口当作注入通道注入环形空间, 借助八个

膨胀节来开展分流工作，分流至激冷盘，然后穿过分配孔以及百叶窗，最终在炉膛内部得以充分混合，激冷盘上面分布了384个直径为11.5毫米的孔洞，这些孔洞是用来开展激冷气体分配工作的。这些孔洞采用两排形式来进行布局。气体穿过这些孔洞之后，进入百叶窗结构，会产生2.81度的旋转导向流场。这股流场接着进入炉膛空间，并且与高温合成气进行混合。

（二）工作原理

激冷区域的气流混合机制，是鉴于均匀分布的旋转冷却气流开展的。这些旋转冷却气流会裹挟着气化炉膛当中旋转的合成气，进而形成外部温度偏低、内部温度偏高的旋转气流结构，气化炉烧嘴所喷出的合成气在炉膛当中形成了四度逆时针的旋转流，激冷盘所产生的激冷气会以二点八一度顺时针方向进行旋转，这两股气流在激冷口区域开展交汇，从而形成了方向相反的交叉包裹上升流。激冷盒可保证激冷气分布均匀，同时激冷气与热合成气混合充分，避免出现激冷段、输气管受热不均等现象。^[1]这个设计借助把冷气环绕在热气周围的方式，来减轻激冷口金属所面临的高温压力。

二、激冷盒烧损原因分析

（一）激冷气通道堵塞

激冷盒出现烧损情况，并且激冷气通道发生堵塞现象，这构成了关键的缘由，激冷气会携带大量像灰垢这类的异物，管道在长时间运行之后，其内部会形成片状的腐蚀物。要是进行检修停车，腐蚀物就会脱落，从而把分配孔堵塞住。因为激冷环与下降管是通过焊接连接成一个整体的，所以在出现损坏的情形时，这两者通常会同时呈现出不同程度的损坏状况。^[2]那么在激冷盘上面，有384个直径为11.5毫米的分配孔，它们构成了激冷气流所具有的核心通道，激冷气分配不均的主要原因是分配孔堵塞，也就是异物阻塞会引发流场分布异常。这样气化炉内部流场就会改变，激冷盒局部位置会出现气量不足的情况。随即百叶窗局部高温回火烧蚀的问题也会产生。激冷气压缩机开展设计气量的工作时气量不足，冷量比较少，这样就导致冷气对于热合成气的包裹特性较差，很容易造成热合成气回火烧蚀的情况。

（二）激冷气量不足

激冷口烧蚀现象在国内工厂当中普遍存在，激冷气压缩机K1301原始设计能力不足是引发这个问题的缘由之一，激冷口的冷却效果由于气量不足而出现了减弱的情况，这样后段区域的温度就整体上升了。位于激冷盒和高压氮气反吹管中间的冷却盘管存在腐蚀和氧化层，当下方高压氮气吹管堵塞爆裂后，造成冷却盘管减薄通洞。^[3]激冷口百叶窗出口面积偏大，这就使得流速出现了下降，致使冷气包裹层难以有效地形成，进而增加了烧蚀风险。

（三）环形空间惰性气体不足

环形空间会把氮气充入进来，开展维持微正压的工作，以此防止合成气渗入。这样做能够保障气化炉稳定运行，避免壳体温度出现异常升高的情况，那么环形空间的氮气供应要是不足，气化炉的温度就会随之升高，这样热合成气就会进入炉膛外围区域。当气流以一定的速度冲击下降管出口处的液面时，气液间的强烈动量传导会引起气体的湍流，从而引起液体的湍动。^[4]激冷盒由于热合成气串入，承受了超出设计温度的热负荷，进而加速了

它的烧损过程。

三、壳牌气化炉激冷盒热应力集中问题的详细分析

（一）极端温度梯度引发的热应力剧增

壳牌气化炉激冷盒在极端温差条件当中开展运行工作，巨大的温度梯度是热应力产生的缘由。激冷盒迎火面会承受着1400℃至1600℃的高温合成气以及熔渣的直接作用，它的背火面则和大约200℃至250℃的激冷水相接触，这样就在壁厚方向上形成了显著的径向温差。壁厚仅仅只有数十毫米，然而温差却突破了一千二百摄氏度，高温侧的材料在受热的情况下会发生膨胀，低温侧的材料在遇冷时会出现收缩，同一构件内部的温度分布不均匀，引发了膨胀方面的差异，那么在激冷盒壁面的内部，会产生出巨大的弯曲热应力。几何突变位置会产生应力集中的现象。激冷盒折边区域、开孔周边以及筋板连接部位，热应力分布呈现出非均匀的特性，在激冷盒的拐角区域当中，应力集中系数常常会超过2.0，这就意味着，即便平板区域的平均应力还处于材料屈服强度范围之内，拐角处的局部应力却早就超出了材料的屈服极限，从而使得该区域率先开展塑性变形阶段的进程。

（二）结构拘束导致的“自约束”效应

激冷盒在气化炉内一般会采用把周边焊接当作安装方式来使用，或者借助支撑件定位来开展安装工作，这种结构特性会引发热应力聚集现象，并且这种现象还比较显著。激冷盒整体会被固定到激冷室壳体以及支撑梁上，其周边位移会受到严格的限制，激冷盒在高温合成气的作用之下受热膨胀，它的边缘由于刚性约束而没办法自由伸展，这样就产生了极大程度上的压缩热应力。激冷盒一般会把夹套式构造当作来使用，或者借助厚度不同的板材开展焊接工作，进而在其内部产生一种“自约束”效应，由于板厚存在差异，就使得热容量以及热响应速度有了显著的不同，厚板在升温方面比较缓慢，而薄板升温则比较迅速。薄壁区域在瞬态工况当中会马上升温膨胀，并且升温膨胀的速度比较快，而厚壁区域则会保持低温的状态，构件的热响应出现不同步的情况，从而引发相互之间的牵制，进而形成了自约束效应。原激冷环挡水板由于现场挡水板受损比较严重，冲蚀出的孔洞较多，且整体厚度变薄，应对挡水板进行更换。^[5]厚薄板焊缝区域会承受显著的剪应力以及拉应力集中的情况，裂纹很容易在这个地方萌生。

（三）瞬态工况下的热冲击应力

激冷盒在稳态工况当中承受热应力，并且面临开停车以及事故工况所带来的热冲击，这个时候热应力集中的情况最为剧烈，在气化炉升温的这个阶段当中，合成气的温度出现了骤然升高的情况，而激冷水由于循环延迟，导致其温度处于偏低的状态，这样就形成了热冲击。气化炉反应段上部环形空间温度上升，而底部环形空间温度下降，说明气化炉存在热合成气窜入环形空间的情况。^[6]激冷盒的内壁在遭遇高温冲击的情况下，会马上产生出显著的拉应力，要是激冷水流量出现波动，或者出现局部干壁现象，那么金属壁温就会急剧地升高，那么骤冷现象会在冷却水重新把该区域覆盖的时候出现。经过骤冷骤热的循环过程，金属表层就会产生交变的热应力，材料表层存在的细微瑕疵，激冷室承压外壳一般采用堆焊或复合奥氏体不锈钢材料以应对介质对承压外壳的腐蚀。^[7]比如刮痕以及气泡，会把反复变化的应力聚集起

来。这种应力的作用容易引发裂纹，主要原因是热疲劳效应。

（四）焊接接头处的热应力叠加

激冷盒热应力集中在焊接接头区域出现的频率比较高，冶金质量以及力学性能存在不连续性是其根本缘由，焊接过程会在激冷盒接头内部留下拉伸残余应力，这些残余应力会和设备运行时的载荷应力进行叠加。在设备运行的过程当中，焊缝区域的实际应力水平极大程度上超出了设计预期，这主要缘由是工作热应力以及残余应力共同发挥作用，焊缝金属、热影响区以及母材之间，它的晶粒构造和热膨胀系数会呈现出细微的差别。在气化炉开停车时，在较低的温度下硫化物与空气和水反应生成连多硫酸，对激冷环的开裂起促进作用。^[9] 这种材料的不均匀性主要是由于不同区域的热历程存在差异所导致的。晶界区域所存在的微观差异会引发热应力在局部进行聚集，进而促使蠕变孔洞得以加速萌生以及裂纹持续开展延伸工作。

四、修复改造方案

（一）检查孔改造

激冷盒环形空间的上部位置设置了4个100mm×100mm的检查手孔，整个激冷盒的直径是2620mm，激冷水出口间隙宽度要求大于6mm，以防止激冷环内部颗粒物堵塞。为保证出口间隙均匀，须在出口处间次设置固定支撑块。^[9] 运用检查手孔去处理内部异物的清理工作难以取得有效效果，进行检查孔的设计时把它设计成了长弧形态，这样就扩展了检测的范围以及面积。对取30度的手孔弧长角度进行检查，然后在四个方位分别进行弧形检查孔的配置，在检修过程当中，会把激冷盒内部的灰尘等异物借助吸尘器以及人工的方式去处理清除工作，这样能防止激冷气分配孔发生堵塞。检修效率以及清理效果得到了极大程度上的显著提升。

（二）百叶窗结构改造

鉴于流场模拟以及工程实践，来开展激冷盒百叶窗的结构改进工作，其核心要点是提高激冷气出口速度，并且增强冷气对热合成气的包覆作用，原百叶窗把6毫米厚的Incoloy 825钢板当作材料来使用，它的出口面积相对较大。百叶窗的厚度从六毫米增加到了十二毫米，并且在孔洞两侧分别开展喷涂零点五毫米防火涂层的工作，激冷口的流通面积开展缩减工作，缩减到了0.150m²，它的流速跟着得以提升，提升到了8.30m/s，和原先的6.13m/s相比，增速达到了35.4%。施工方案是：在现有百叶窗通道两端隔板的内孔位置，分别开展新增一根竖直隔板的工作。新

增隔板的规格是56毫米宽、150毫米高、3毫米厚。进行安装时，一定要保证新增隔板和原有隔板之间得以紧密贴合，坡口的两端都进行了精细的修整工作。新型板材采用梯形设计来开展制作，得以确保和既有隔板的花焊角焊缝实现紧密贴合，新增加的隔板内端口需要去进行打磨，打磨成60°的坡口，这样做是为了保障气流能够正常流通，外端口和原有隔板之间采用花焊的方式来进行固定工作。为了提高激冷盒材料的防火性能，需要把耐高温防火材料喷涂在急冷口至环形空间150mm的区域当中。

（三）密封结构改造

激冷盒上下密封位置由于热膨胀的原因引发了密封失效的情况，已经开展了全面的改造工作，急冷盒原本的上密封挡板开展了切除工作，把耐高温纤维填塞到密封挡板以及水冷壁管之间。在炉膛侧密封挡板的端部，需要开展填塞两圈耐高温陶瓷纤维盘根的工作，这种盘根的规格是10mm×10mm，在急冷盒顶板密封点的地方，增设两块规格是20mm×6mm的密封挡板。其中一块挡板要单面焊接到顶板上，这样能保证顶板密封条和水冷壁管紧密贴合，没有间隙；密封板分别被固定在水冷壁管上，它的间隙会维持在零点三毫米以内。在底板密封点的地方，增设两块12mm×6mm的挡板，并且把它们单面焊接到急冷盒的底部，水冷壁管平台和底板密封条这方面需要开展紧密贴合的工作。

（四）工艺优化措施

需要开展激冷系统运行可靠性的提升工作，要把工艺操作优化以及设备改造结合起来。严格按焊接工艺规程和作业指导书要求施焊。做到焊前预热、焊后消氢并严格控制好温度。^[10] 借助降低激冷气温度，就可以防止冷热气混合效果受到损害；环形空间当中氮气的注入量需要提高，来抑制热合成气往该区域进行扩散，进而有效地控制环形空间的温度水平；把激冷气压缩机的运行维护工作开展得更加强化，从而保证激冷气量能够契合设计预期。

五、结束语

壳牌气化炉激冷盒出现烧损情况，主要缘由是热应力集中以及冷却水膜遭到破坏这两方面共同作用的结果，激冷盒烧损难题得到化解，原因在于开展了结构设计的优化工作，从而改善了流场分布，进行了材质升级来提升耐热耐蚀性能，开展焊接工艺改进工作以消除制造缺陷，并且和科学的工艺操作结合起来。实践表明，这个修复方案在技术方面是可靠的，并且所取得的成效也很明显，对于提高Shell气化炉运行的稳定性而言，有着重要的推广意义。

参考文献

- [1] 卢林栋，张鸿儒. 壳牌气化炉激冷盒烧损原因及修复改造 [J]. 氮肥与合成气, 2024, 52(09): 19–23+34. DOI: 10.19910/j.cnki.ISSN2096–3548.2024.09.005.
- [2] 卢玉升，孙明华，姜志轩. 航天气化炉激冷环堵塞原因分析与结构改进 [J]. 氮肥与合成气, 2025, 53(10): 45–48. DOI: 10.19910/j.cnki.ISSN2096–3548.2025.10.012.
- [3] 张智荣. 气化炉激冷区易出现的问题分析 [J]. 大氮肥, 2023, 46(01): 35–37.
- [4] 景寿堂，范为鹏，杜常宗，等. 不同结构气化炉激冷室气液两相流的数值模拟 [J]. 煤化工, 2024, 52(01): 102–105+125. DOI: 10.19889/j.cnki.10059598.2024.01.027.
- [5] 刘立国，张晓北. 水煤浆气化炉激冷环损坏的问题分析与改造 [J]. 中国设备工程, 2018, (24): 230–231.
- [6] 江明亮，朱林军，任德正. 浅析气化炉激冷环烧损的原因及对策 [J]. 大氮肥, 2022, 45(06): 361–364.
- [7] 郭殿龙. 水煤浆气化炉激冷室底部蓬渣原因及应对措施 [J]. 氮肥与合成气, 2025, 53(09): 54–55+60. DOI: 10.19910/j.cnki.ISSN2096–3548.2025.09.016.
- [8] 秦学功，陈斌，贺力奇，等. 气化炉激冷环失效分析及对策 [J]. 石油化工设备, 2000, (04): 41–43.
- [9] 张亚宁，白云波，杜常宗. 气流床气化炉激冷环的结构分析与设计要求 [J]. 煤化工, 2022, 50(06): 124–126+130. DOI: 10.19889/j.cnki.10059598.2022.06.028.
- [10] 郎启富. 壳牌气化炉激冷口盘管损坏原因分析及改进 [J]. 云南化工, 2020, 47(01): 146–149+152.

长距离输水工程运行安全风险辨识与管控体系研究

刘洋

北京市南水北调环线管理处, 北京 100176

DOI:10.61369/ERA.2026060039

摘 要 : 北京市域长距离输水隧洞是城市供水安全的关键生命线, 工程深埋城区地下, 地质复杂、环境敏感, 运行风险隐蔽、突发且易连锁扩散。本文针对北京本地输水隧洞, 从结构、水文地质、运行调度、外部环境及人为管理等方面系统识别风险并剖析成因规律。结合北京城区地下空间开发密集的地域特征, 构建“风险辨识—评估分级—监测预警—分级管控—应急保障”一体化管控体系, 提出适配的技术与管理对策, 为保障隧洞安全运行、夯实城市供水安全基础提供理论与实践支撑。

关 键 词 : 输水隧洞; 安全运行; 风险辨识; 管控体系; 北京市域

Research on the Risk Identification and Control System for the Operation Safety of Long-Distance Water Transmission Projects

Liu Yang

Beijing South-to-North Water Diversion Ring Line Management Office, Beijing 100176

Abstract : The long-distance water transmission tunnels in Beijing's urban area are the key lifeline for urban water supply security. The tunnels are buried deep underground in the city, with complex geology and sensitive environment. The operational risks are concealed, sudden, and prone to chain diffusion. This paper systematically identifies risks and analyzes the causes and patterns for the local water transmission tunnels in Beijing from aspects such as structure, hydrogeology, operation scheduling, external environment, and human management. Considering the dense regional feature of underground space development in Beijing, an integrated management system of "risk identification – assessment classification – monitoring and early warning – hierarchical control – emergency guarantee" is constructed. Appropriate technical and management countermeasures are proposed to ensure the safe operation of the tunnels and lay a theoretical and practical foundation for strengthening urban water supply security.

Keywords : water transmission tunnel; safe operation; risk identification; management system; Beijing urban area

引言

作为首都, 北京供水安全直接关系城市运行与民生保障。市域内东干渠、南干渠、团九二期、西四环暗涵等长距离地下输水隧洞, 构成覆盖中心城区、重点功能区及近郊组团的地下输水网络, 承担水源联调、原水输送、应急供水等重要功能, 是城市连续供水的关键基础设施。

北京输水隧洞多采用浅埋暗挖、盾构法施工, 埋于地下, 穿越软硬不均地层、断裂构造及砂卵石层, 且紧邻地铁、高层建筑、市政管网与交通干道, 运行环境复杂敏感。长期运行中, 在高压、水质腐蚀、结构老化、工况变化、外部施工扰动及季节冻融等多重因素作用下, 易出现衬砌开裂、变形、渗漏及设备故障等隐患。由于地下工程隐蔽性强, 一旦发生涌水、渗漏、结构失稳等突发状况, 不仅会造成区域供水中断, 还可能引发地面沉降、道路塌陷、建构筑物受损等次生灾害, 严重威胁城市公共安全。

目前, 北京输水隧洞运行管理已逐步实现制度化、规范化, 但在风险辨识系统性、评估方法针对性、预警体系智能化及管控措施精细化方面仍有提升空间, 且管控多偏重事后处置, 事前预防与过程管控能力相对不足。因此, 结合北京工程实际开展运行期安全风险识别, 构建全链条、可落地的安全管控体系, 对提升供水工程本质安全水平、保障城市供水持续稳定运行, 具有重要现实意义与工程应用价值。

一、北京市输水隧洞运行安全风险辨识

（一）结构安全风险

结构安全是输水隧洞运行的核心管控重点。北京地区输水隧洞主体多采用钢筋混凝土衬砌，在长期内水压力与外水压力作用下，混凝土易出现碳化、表层脱落、裂缝扩展等劣化，削弱结构稳定性，形成渗漏通道，进而引发围岩掏空、衬砌脱空，严重时可能导致局部鼓胀、错台甚至混凝土脱落，直接威胁结构安全。

部分隧洞穿越地质条件不佳区段，围岩自稳能力弱，地下水位变化易引发应力重分布，导致衬砌受力失衡、产生变形；浅埋段受地面荷载、交通振动影响，加剧结构疲劳，使施工阶段遗留裂缝持续扩展。同时，施工期止水带老化、回填不密实、衬砌厚度不足等隐患，在运行中逐步显现，叠加结构劣化形成恶性循环，进一步推高结构安全风险。

（二）水文地质风险

北京地质条件复杂，输水隧洞建设、运行期间常穿越粉质黏土、砂卵石、风化岩及断裂带，各层渗透性差异较大。汛期强降雨会导致地下水位骤升，隧洞外水压力增大，细小渗漏点易发展为大规模涌水，直接影响结构安全；砂卵石地层渗透性强，地下水流动易带走土体细颗粒，造成围岩流失，引发地面沉降、隧洞结构变形等问题。

冬季低温环境下，隧洞进出口、闸井、弯道等水流多变部位，易出现水面结冰、侧壁挂冰现象，冰块堆积形成冰塞后，会缩小过水断面、抬高局部水位，加剧水流对衬砌结构的冲刷。同时，反复冻融循环会破坏混凝土内部结构，导致其表面开裂、强度下降，缩短结构使用寿命。部分区段地下水含硫酸盐、氯离子等腐蚀性物质，会腐蚀混凝土与钢筋，进一步降低结构耐久性能。

（三）运行调度与设备风险

输水隧洞正常运行需稳定管控流量、水位、压力，调度方案不合理、运行工况切换过急，易引发水锤现象，对闸门、阀门、伸缩节及衬砌结构造成瞬时强冲击，导致设备与结构损坏。闸门启闭机、电动阀门等关键设备，长期处于地下潮湿、多粉尘环境，易出现锈蚀、卡滞、运行失灵等问题，若日常检修维护不到位，应急时无法正常启用，会导致风险扩大。

监测监控系统是排查隐患的重要手段，渗压、位移、水位等监测设备易出现传感器偏差、数据传输中断、供电异常等故障，监控平台若卡顿、崩溃，将无法实时掌控隧洞运行状态，难以及时排查隐患。此外，备用电源、应急排水等应急配套设施，若性能不达标、维护不及时，突发停电、渗水积水时，会严重影响应急处置效果，错失风险防控最佳时机。

（四）周边环境与外部扰动风险

北京城区地下空间开发强度大，输水隧洞沿线常涉及基坑、地铁、市政管线、道路改造等施工。近距离深基坑卸荷、降水及爆破振动会改变周边土体受力，引发地层变形，直接危及隧洞结构安全；地面重车、地铁运行等持续振动，会加速衬砌裂缝扩展与结构松动，降低整体稳定性。

部分隧洞周边老旧污水管破损、雨污混排，污水渗漏易经土层薄弱区进入输水通道，污染原水水质。极端强降雨时，地表垃圾渗滤液、农业面源污染等也会沿地层空隙渗入，给城市供水水质带来安全隐患。

（五）人为操作与管理风险

人为因素是隧洞运行中常见且可管控的风险。巡检人员专业与安全意识不足，易漏检早期隐患；检修作业不规范、关键环节管控不严，易引发安全事故。部分运维单位重抢修、轻预防，隐患整改不及时、闭环不到位，易造成隐患升级。

管理制度不完善、职责不明、台账不完整会使管控流于形式。应急演练缺乏针对性、部门协同不畅，处置突发情况时易滞后失当，扩大事故影响。

二、风险评估与分级

结合北京地区输水隧洞实际现状，本文采用风险矩阵评价法，从隐患发生概率、灾害影响程度两大维度开展量化分析，将隧洞运营安全风险划分为四级，依次为重大风险、较大风险、一般风险与低风险。

（一）重大风险（Ⅰ级）

判定标准：该等级风险发生概率较高，一旦爆发会造成隧洞主体结构损坏、大范围渗水、区域供水中断，还易引发地面沉降、周边市政配套设施损毁等严重后果，直接威胁工程整体安全。

适用范围：主要针对北京输水隧洞地质条件复杂、结构稳定性薄弱、承担核心输水任务的关键段落及重要枢纽节点。

案例分析：以某处地质复杂隧洞段落为例，该区域土质松散，同时存在断层破碎带，经风险矩阵评估为重大风险等级。该区域曾出现结构失稳渗水问题，若未及时管控，极易引发隧洞局部坍塌、供水管破损，造成停水、路面沉降等问题，严重威胁用水与公共安全，需立刻开展全天候巡查、堵漏加固等应急防护措施。

（二）较大风险（Ⅱ级）

判定标准：此类风险出现概率适中，隐患发作易造成隧洞局部结构破损、核心设备停运、输水水质不达标，对日常输水调度工作造成明显阻碍。

适用范围：涵盖北京输水隧洞常规地质路段、主要设备集中区域，以及极易受外界施工干扰的薄弱部位。

案例分析：隧洞核心闸阀设备因常年运转，易出现老化，整体出险概率中等。设备故障会造成输水流量下降、水压波动异常，虽不会造成全城停水，但严重影响居民日常用水，必须在规定时间内完成设备检修，同步做好动态监测，防止隐患进一步升级。

（三）一般风险（Ⅲ级）

判定标准：该类风险危害较轻，不会影响隧洞整体供水运行，仅对局部区域造成轻微影响。

适用范围：涵盖隧洞附属设施、次要非主体结构，以及日常运维中可快速处理的普通轻微隐患区域。

案例分析：隧洞照明线路接触不良为日常常见小隐患，仅影响局部照明使用，不损害工程结构、输水能力与供水水质。该类问题归入日常养护即可，经排查检修、更换配件便可完成整改，无需启动专项应急处置工作。

（四）低风险（Ⅳ级）

判定标准：此类风险发生概率低、影响范围有限，不会对隧洞结构、输水运行及城市供水造成实质危害。

适用范围：主要涵盖地质条件稳定、无外部施工干扰的常规输水路段，以及各类辅助配套设施区域。

案例分析：花岗岩稳定地层区间排水槽产生轻微水垢堆积，该区域地质稳定、无外界干扰，隐患发生率极低，不会影响输水效率、结构安全与供水水质，仅需日常巡检登记清理，无需专项整改处置。

经综合评估，北京输水隧洞高危隐患主要集中在地质薄弱段结构失稳、周边施工干扰、冬季冰塞水位上涨、核心设备故障等部位，是安全管控核心重点，需长期开展全天候高标准常态化防护管理。

三、输水隧洞运行安全管控体系构建

（一）全周期隐患排查机制

建立日常巡查、月度排查、季度检测、年度评估的一体化动态隐患排查机制。工作人员日常检查隧洞结构、渗漏、冰冻及设备运行状况，每月全面排查整治隐患，每季度开展结构形变、渗压、设备振动专项检测，每年结合地质、工况及外界环境开展整体安全分析，建立动态闭环隐患台账，做到风险提前排查、及时发现、快速处置。

（二）全域智能监测预警体系

搭建一体化智能监测网络，在重点路段、高风险区域布设位移、水压、水位、水质、冰情等各类感知设备，实现监测数据自动采集、实时传输、云端存储汇总。依托智慧水务管理平台，设置蓝、黄、橙、红四级预警机制，数据超标自动推送预警提示，实现风险提前预判、及时告警、快速响应。

（三）分级分类精准管控措施

依据风险等级实施分级管控：重大风险区域落实24小时专人值守，加密监测频次，做好结构加固、减震防护，严控周边高危施工；较大风险限期完成整改，做好设备更换、结构修缮与输水调度优化；一般风险纳入日常养护，及时处理微小隐患、定期维护设备；低风险以常规巡查、台账登记管理为主，防范小隐患逐步升级。

（四）应急处置多方联动体系

针对隧洞渗漏、冰堵积水、突发涌水、水质异常等隐患问题，制定专项应急预案，明确处置流程、岗位职责与处置要求。配齐专业抢险人员与应急物资并定期维护，完善多部门协同联动模式，定期开展应急演练，提升整体应急处置水平，高效稳妥化解各类突发险情。

（五）运维管理长效保障体系

健全输水隧洞安全管理制度，细化管理细则，明确各级人员岗位职责，统一巡检、整改、考核相关标准。逐级压实安全责任，落实全员管控职责。加强运维人员专业培训，定期开展风险排查、设备操作、应急实操学习，全面提升工作人员综合业务能力。

四、结论

（一）风险整体特征

北京城区长距离输水隧洞运营安全，受地质环境、工程结构、调度方案、外部环境、人为管理等多重因素叠加影响，整体隐患具备隐蔽性强、诱因繁杂、突发概率高、管控难度大、标准要求严的显著特点。

（二）整体管控框架

构建风险识别研判、分级评定、监测预警、分级管控、应急兜底全链条一体化管控体系，是防范输水隧洞运营隐患、保障工程长期平稳运行的核心举措。

（三）核心管控要点

1. 完善全流程隐患排查机制，全面消除各类安全隐患；
2. 优化智能监测预警设施，强化风险预判预警水平；
3. 推行分级精准管控模式，针对性开展隐患治理；
4. 健全多方应急联动体系，增强突发事件处置效率；
5. 筑牢日常运维管理根基，保障工程长期稳定运行。

（四）后期管控重点

结合北京城区建设密集、地质条件复杂的现状，后续重点开展管控工作：严控周边施工带来的外界干扰，减少环境破坏影响；落实冬季防冻防寒措施，保障冬季输水运行安全；整治各类结构病害，根除工程主体安全隐患；推进智慧运维体系建设，全面增强风险防控成效。

（五）总体管控目标

推行隐患闭环全流程管控，实行隐患上报、登记、整改、复核、销号全程溯源管理，提升隧洞运维管理规范精细化程度。同时强化人员专业素养与安全意识，落实各项管控措施，保障北京输水隧洞安全平稳长效运转，守住城市供水安全红线，为城市发展和居民用水提供稳定水资源保障。

参考文献

- [1] 汝俊起. 团九二期输水隧洞工程运行安全防控实践 [J]. 北京水务, 2022(06): 31-35.
- [2] 陶海军. 北京市东干渠输水隧洞安全监测与风险管控分析 [J]. 水利发展研究, 2021, 21(03): 89-93.
- [3] 北京市水务局. 北京市地下输水设施运行安全管理办法 [Z]. 2020.
- [4] 李萌. 北京城区闭环输水隧洞结构安全隐患排查与治理 [J]. 水利技术监督, 2023(02): 187-190.
- [5] 李保元. 北京市南干渠输水隧洞运行维护关键技术研究 [J]. 北京水务, 2019(04): 45-48.
- [6] 李硕. 城市密集区输水隧洞周边施工扰动风险管控 [J]. 水利建设与管理, 2024, 44(01): 78-82.
- [7] 李雪梅. 北京地区输水隧洞冬季冰期运行风险防控措施 [J]. 水利科技与经济, 2023, 29(08): 102-105.
- [8] 王健. 浅埋式输水隧洞结构劣化机理与修复技术 [J]. 水利水电技术, 2022, 53(S1): 123-128.
- [9] 北京市水务安全生产管理中心. 北京市水务工程运行安全风险辨识导则 [Z]. 2021.
- [10] 李阳. 城市地下输水隧洞智能化监测预警系统构建 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(05): 176-179.

机电工程安装施工的质量管控与安全技术优化研究

吕宏宇

天津滨海概念人力信息科技有限公司，天津 300457

DOI:10.61369/ERA.2026060041

摘 要： 海洋石油工程机电安装是海上油气勘探开发的核心环节，其施工质量与安全水平直接决定油气生产系统的运行稳定性与海上作业本质安全。本文采用文献研究法与工程案例分析法，针对海洋石油机电安装高防爆、强防腐、深水作业、工况复杂的行业特性，系统剖析了施工全流程的质量管控典型问题，深入识别了海上作业典型安全事故类型及传统监管模式的核心局限。在此基础上，构建事前预防、事中控制、事后检验的全过程质量管控优化体系，从本质安全设计、智慧监管应用、应急机制优化三个维度提出安全技术提升路径。研究旨在为海洋石油机电安装工程精细化管控提供理论支撑与实践参考，助力海上油气工程高质量发展。

关 键 词： 海洋石油工程；机电安装；全过程质量管控；安全技术；智慧监管；HSE 管理

Research on Quality Control and Safety Technology Optimization for Installation and Construction of Mechanical and Electrical Engineering

Lv Hongyu

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300457

Abstract： The mechanical and electrical installation in offshore oil engineering represents a pivotal aspect of offshore oil and gas exploration and development, with its construction quality and safety standards directly determining the operational stability of the oil and gas production system and the inherent safety of offshore operations. This paper employs a literature review method and engineering case analysis to systematically analyze typical quality control issues throughout the construction process, considering the industry-specific characteristics of offshore oil mechanical and electrical installation, such as high explosion-proof requirements, strong corrosion resistance, deep-water operations, and complex working conditions. It also delves into identifying typical types of safety accidents in offshore operations and the core limitations of traditional supervision models. Based on this analysis, an optimized system for quality control throughout the entire process—encompassing pre-event prevention, in-event control, and post-event inspection—is constructed. Furthermore, this paper proposes pathways for enhancing safety technology from three dimensions: inherent safety design, intelligent supervision application, and emergency mechanism optimization. The research aims to provide theoretical support and practical references for refined management and control in offshore oil mechanical and electrical installation projects, facilitating high-quality and safe development in offshore oil and gas engineering.

Keywords： offshore oil engineering; mechanical and electrical installation; whole-process quality control; safety technology; intelligent supervision; HSE management

引言

随着我国油气能源需求持续提升，海洋石油工程向深水化、智能化、大型化转型升级，机电安装工程作为海上油气生产系统的“神经中枢”与“动力核心”，涵盖了工艺管线、防爆电气、动设备、仪表控制系统、水下生产设施等核心模块，其施工质量与安全管理水平已成为衡量海上油气工程建设品质的核心指标^[1]。但在实际施工中，海洋石油机电安装普遍面临海上作业空间受限、专业交叉密集、盐雾腐蚀环境严苛、防爆防中毒要求高、施工窗口期短等复杂工况，质量管控不到位、安全技术防护不足等问题频发，不仅影响油气田投产进度，更易引发重大火灾爆炸、中毒窒息等安全事故。

当前国内学者针对海洋石油机电安装质量与安全管理已开展相关研究，但多数侧重单一模块的施工技术优化或现场 HSE 管理，缺乏质量与安全融合的体系化研究，对智能化技术与海洋石油行业现行规范的融合应用探讨不足。基于此，本文聚焦海洋石油工程机电安装施工质量管控与安全技术优化展开系统研究，精准识别全流程痛点与监管短板，针对性构建闭环管控体系与技术保障体系，为海上油气工程施工企业提供可落地的实践参考，也为机电工程专业技术实践提供规范化思路。

一、海洋石油机电安装施工质量管控全流程核心问题

海洋石油机电安装质量管控贯穿施工全周期，任一环节管控缺失都会形成质量隐患，甚至引发海上生产系统性故障，核心问题集中在三个阶段。

（一）施工准备阶段的质量管控短板

施工准备是质量管控的基础，该阶段隐患会直接传导至后续全流程^[9]。当前核心问题根源在于事前质量策划机制缺失：一是设计交底与图纸会审流于形式，未按《海洋石油工程施工质量验收规范》SY/T 4080-2017要求开展全专业会审，参建各方对海上平台空间布局、防爆等级划分、防腐等级要求理解不到位，极易出现安装偏差与设计不符问题^{[9][11]}；二是材料与设备进场管控不严，未执行海上工程双向检验与船级社见证制度，防腐性能、防爆等级不达标产品流入现场，为海上高盐雾、易燃易爆工况埋下永久性隐患；三是施工方案编制缺乏针对性，未结合海上作业窗口期、特殊工况细化施工流程与质量管控要点，未按要求编制焊接、动火、水下作业等专项方案，易造成后续工序混乱、操作失当。

（二）施工实施阶段的高频质量通病

施工实施是质量管控的核心环节，也是海上机电安装质量通病高发期，核心问题集中在四方面：一是工艺管线安装不规范，油气输送管线焊接未严格执行焊接工艺评定 WPS 要求，无损检测合格率不达标，管线坡度、防腐绝缘层施工不符合设计要求，易引发介质泄漏、腐蚀穿孔等重大隐患^[4]；二是设备安装精度不足，海上压缩机、泵组等动设备找平、找正、对中校核未达设计与规范要求，未考虑海上平台振动工况的特殊要求，易引发设备运行振动、噪音超标，大幅缩短设备使用寿命；三是防爆电气与仪表安装不达标，防爆设备密封、接地施工不符合《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058-2014 要求，仪表管线敷设与 ESD 紧急停车系统接线不规范，易引发系统误动作、设备失爆等重大风险；四是交叉作业协调不足，未落实工序交接检验制度，结构、配管、电气、仪表专业施工顺序混乱，易出现管线碰撞、工序颠倒，造成返工整改影响工程质量^[9]。

（三）调试验收阶段的质量管控缺陷

调试验收是检验海上机电安装施工质量的最终关口，当前核心缺陷体现在两方面^[9]：一是系统调试不规范，部分单位为追赶投产工期，仅对核心设备做简单开机测试，未按设计与规范要求开展单机试运转、系统联动调试、全工况带负荷调试，未完成 ESD 系统、可燃气体报警系统的全功能测试，易导致工程投用后出现电气短路、系统运行效率不达标、安全保护失效等故障；二是竣工验收执行不严格，未按《海洋石油工程施工质量验收规范》SY/T 4080-2017 开展分项、分部工程验收，未完成船级社见证检验与第三方检测，质量核查不全面、竣工资料不完整，造成验收结果失真，不合格工程投用后易引发连锁质量安全事故^[12]。

二、海洋石油机电安装施工安全风险识别与管理瓶颈

（一）典型安全事故类型与核心致因

海洋石油机电安装施工具有易燃易爆介质多、高处作业多、带电作业多、受限空间作业多、重型设备操作多的特点，典型安全事故集中在五类，且致因明确：一是火灾爆炸事故，为海上最高发、后果最严重的事故类型，多因机电安装动火作业防护不到位、防爆设备失爆、电气线路短路引燃烃类可燃气体引发，易造成群死群伤与重大财产损失^[6]；二是中毒窒息事故，多因受限空间作业前气体检测不到位、硫化氢等有毒气体防护措施缺失、作业人员未规范佩戴正压式呼吸器引发，是海上作业人员死亡的主要诱因之一；三是触电事故，多因海上高盐雾环境下电气设备绝缘老化、临时用电接线不规范、施工人员未规范佩戴绝缘防护用品引发，还可能引发火灾次生灾害；四是高处坠落事故，海上平台管线敷设、设备吊装等环节涉及大量高处作业，防护设施不规范、未按规定系挂双钩安全带是核心致因；五是机械伤害事故，吊装、焊接等设备安全防护装置缺失、操作人员违规作业、设备维保不到位，易引发重物坠落、挤压切割伤人事故。

（二）安全技术与监管模式的核心短板

现场安全技术与管理体系的短板，是海上机电安装安全事故频发的核心诱因^[7]。一是安全防护技术与设施适配性不足，未按海上作业风险等级匹配防爆、防中毒、防腐蚀的专项防护措施，难以实现高危环节有效防控；二是施工人员安全意识与防护能力不足，未接受海上作业专项安全教育与技术交底，对易燃易爆、有毒有害介质风险认知不足，违规作业、冒险作业现象普遍；三是传统监管模式局限性突出，过度依赖人工巡检，海上平台偏远区域、水下作业、受限空间等环节易形成监管盲区，且以事后整改为主，缺乏事前风险预判与事中动态管控，无法实现源头防控^[8]；四是 HSE 管理体系执行流于形式，作业许可制度、风险辨识制度落实不到位，施工、监理、建设单位、第三方检验机构信息不互通，易出现监管脱节、责任推诿，无法形成监管合力。

三、海洋石油机电安装工程全过程质量管控体系优化策略

针对全流程质量管控痛点，本文构建“事前预防、事中控制、事后检验”的全闭环精细化管控体系，实现从源头隐患规避到终端质量验收的全流程管控，完全适配海洋石油工程施工规范与现场工况。

（一）事前预防：源头质量管控体系构建

事前预防是提升海上机电安装施工质量的核心前提，需从源头做好施工策划。一是强化设计交底与图纸会审管理，组织各参建方专业技术人员开展全专业会审，结合海上平台空间布局、防爆防腐要求，提前排查解决管线碰撞、参数不符等问题，形成完

整交底与会审记录,为施工提供准确技术依据^[2];二是严格落实材料与设备全流程管控,建立供应商准入制度,执行进场双向检验与船级社见证制度,重点核查设备防爆等级、管线防腐性能,需复检的材料按规范取样送检,杜绝不合格产品进场,同时规范现场存储管理,避免盐雾环境造成产品性能受损^[9];三是优化施工方案编制与技术培训,结合海上作业窗口期、工况特点编制专项施工方案,明确关键工序管控要点与验收标准,同时组织施工人员开展海上作业岗前培训与特种作业考核,考核合格后方可上岗^[1]。

(二) 事中控制: 施工过程动态精细化管控

事中控制是质量管控的核心环节,需通过动态管控及时排查整改隐患。一是规范施工工序全流程管理,严格落实工序交接检验制度,上一道工序验收合格后方可进入下一道工序,重点管控管线焊接、无损检测、防爆电气安装、防腐绝缘施工、隐蔽工程等关键工序,做好全过程施工与检验记录^[10];二是健全全专业交叉作业协同机制,明确各专业施工顺序与衔接要求,建立多方协调例会制度,结合海上作业窗口期合理规划施工工序,及时解决施工冲突,同时加大日常巡查与专项检查力度,及时纠正不规范操作,闭环整改质量隐患;三是提升质量检测技术水平,引入水下机器人检测、相控阵无损检测、管线防腐层探测等先进设备,强化隐蔽工程、水下设施与关键部位检测,同时应用 BIM 技术开展平台管线综合排布与施工模拟,提前规避管线碰撞问题,提升海上狭小空间内的安装精度。

(三) 事后检验: 全周期质量追溯与验收管控

事后检验是把控海上机电安装工程质量的关键口,需通过规范管控保障交付质量达标。一是规范开展全系统调试工作,按设计与规范要求编制专项调试方案,对设备单机参数、系统联动性能、ESD 紧急停车系统、可燃气体报警系统进行全面调试,如实记录调试数据,对发现的问题及时整改^[6];二是严格执行竣工验收流程,依据设计图纸、行业规范与船级社要求,全面核查施工质量,对验收发现的隐患限期闭环整改,同时规范整理竣工资料,确保资料完整、真实、可追溯;三是建立工程质量全周期追溯体系,对材料进场检验、工序施工、检测调试、验收整改等全环节资料闭环留档,出现质量问题可快速溯源整改,同时为海上油气田全生命周期运维提供完整技术支撑。

四、海洋石油机电安装施工安全技术体系优化路径

针对海上作业安全风险与管理瓶颈,本文突破传统被动防御模式,构建“本质安全源头防控+智慧监管动态管控+应急响应兜底保障”的三位一体安全技术体系,全面贴合海洋石油工程 HSE 管理要求,提升施工安全管理水平。

(一) 本质安全化设计与源头技术防范

本质安全化设计是防范海上安全事故的根本举措,需从源头降低施工安全风险。一是优化施工方案安全专项设计,在方案编

制阶段开展 HAZOP 危险与可操作性分析,全面识别安全风险点,基于风险等级优化施工流程,合理规避高危环节交叉作业,优先选用防爆等级达标、防腐性能优异的材料与设备,从源头提升安全保障能力;二是完善现场安全防护技术体系,严格按照《石油化工建设工程施工安全技术标准》GB 50483-2019、《海洋石油安全管理细则》要求,规范搭设防护设施、设置安全警示与可燃气体监测装置,为施工人员配备符合国家标准正压式呼吸器、绝缘防护用品、双钩安全带等个人防护装备,建立领用检查制度,强制规范佩戴使用^{[13][14]};三是健全施工设备全生命周期安全管理制度,建立设备进场验收、日常维保、定期检修的全流程管控机制,针对海上盐雾环境做好设备防腐防护,严禁设备“带病运行”,严格执行操作人员持证上岗制度,杜绝违规操作。

(二) 智慧安全监管技术的融合应用

智慧监管技术可有效破解海上传统监管模式的局限性,实现全时段全方位动态监管。一是搭建一体化智慧安全监管平台,整合物联网传感器、视频监控、大数据分析技术,对海上平台临时用电、起重设备、可燃气体浓度、高危作业区域进行实时监测,参数超出安全阈值时自动预警,及时处置安全隐患^[8];二是应用 AI 智能识别技术,通过视频监控系统对未佩戴安全帽、高处作业不系安全带、违规动火、未按要求佩戴防护装备等典型违规行为自动识别与实时警示,留存违规记录,实现对不安全行为的精准管控;三是建立多方协同监管信息共享机制,打通施工、监理、建设单位、第三方检验机构的信息壁垒,实时共享监测数据、隐患整改情况,实现多方协同管控,形成监管合力,全面落实 HSE 管理要求。

(三) 动态化应急响应机制的构建优化

完善的应急响应机制是海上安全事故处置的兜底保障,可最大限度降低事故损失。一是编制科学完善的应急预案,针对火灾爆炸、中毒窒息、触电、高处坠落等典型事故,分别编制专项应急预案,明确应急组织机构、岗位职责、处置流程、物资保障,同时做好与陆岸应急救援基地的联动衔接,确保预案可操作性强;二是规范应急物资储备与管理,按预案要求足额储备急救药品、消防器材、绝缘工具、堵漏器材、正压式呼吸器等应急物资,建立台账定期检查更新,确保物资完好可用;三是常态化开展应急演练与预案动态优化,定期组织全流程应急处置演练,提升作业人员应急处置与自救互救能力,同时根据演练复盘结果、现场工况变化、规范更新动态优化预案,持续提升应急响应的针对性与有效性。

五、结论与展望

海洋石油工程机电安装的施工质量与安全管理,是保障海上油气生产系统功能完善与运行稳定的核心基石,也是机电工程专业管理的核心内容。本文结合海洋石油工程高风险、强规

范、工况复杂的行业特性，系统剖析了机电安装全施工周期的质量通病，深刻揭示了典型安全事故背后的技术与管理短板，针对性构建了全过程闭环质量管控体系，形成了“人防 + 技防 + 智防”的新型安全技术保障体系，完全适配海上油气工程建设的实际需求。

本文研究针对海洋石油平台通用机电安装施工场景，后续可

进一步针对深水水下生产设施、FPSO 机电安装等细分领域开展专项研究，同时可探索 BIM 技术与智慧监管平台的深度融合，实现质量与安全的一体化数字化管控，为海洋石油工程行业高质量发展提供更具针对性的技术支撑。

参考文献

[1] 李刚. 海洋石油工程机电安装施工技术及管理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(12): 211-212.

[2] 王健. 海洋石油工程机电设备安装全过程精细化管控研究[J]. 化工管理, 2022(24): 154-156.

[3] 张磊. 海洋石油工程机电安装施工技术要点分析[J]. 石化技术, 2021, 28(05): 214-215.

[4] 刘阳. 海洋石油工程电气设备安装施工质量管理研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(08): 191-193.

[5] 赵旭. 海洋石油工程机电设备安装调试技术要点[J]. 设备管理与维修, 2022(16): 116-118.

[6] 陈亮. 海洋石油工程施工中的安全风险识别与管控措施[J]. 化工管理, 2023(06): 82-84.

[7] 孙志远. 海洋石油工程机电安装施工安全管理体系构建[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(09): 45-49.

[8] 周斌. 智慧化技术在海洋石油工程安全监管中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(02): 86-88.

[9] 马明. 海洋石油工程机电设备安装施工质量控制措施[J]. 工程技术研究, 2020, 5(18): 167-168.

[10] 韩冰. 海洋石油工程焊接施工质量全过程管控要点[J]. 电焊机, 2022, 52(06): 115-120.

[11] 中华人民共和国国家能源局. 海洋石油工程施工质量验收规范: SY/T 4080-2017[S]. 北京: 石油工业出版社, 2017.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 爆炸危险环境电力装置设计规范: GB 50058-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工建设工程施工安全技术标准: GB 50483-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

[14] 国家安全生产监督管理总局. 海洋石油安全管理细则 [Z]. 2009.

基于预训练模型适配的烟草营销领域智能查询增强技术研究

李一平¹, 舒刚², 张滔¹, 祝凯¹, 程康²

1. 湖北省烟草公司黄石市公司, 湖北 黄石 435000

2. 湖北省烟草公司鄂州市公司, 湖北 鄂州 436000

DOI:10.61369/ERA.2026060042

摘要 : 针对 XX 烟草企业营销数据孤岛严重、业务人员数据分析能力不强、需求响应迟缓等问题, 本文结合业务需求及现有技术, 提出融合湖仓一体架构与改进型 NL2SQL 技术的查询增强方案, 以满足企业技术需求。

关键词 : 查询增强; NL2SQL; 维度建模; 烟草营销

Research on Intelligent Query Enhancement Technology in the Tobacco Marketing Domain Based on Pre-trained Model Adaptation

Li Yiping¹, Shu Gang², Zhang Tao¹, Zhu Kai¹, Cheng Kang²

1. Huangshi Company, Hubei Tobacco Corporation, Huangshi, Hubei 435000

2. Ezhou Company, Hubei Tobacco Corporation, Ezhou, Hubei 436000

Abstract : Addressing the issues of severe data silos, limited data analysis capabilities among business personnel, and sluggish demand response in XX tobacco enterprises' marketing operations, this paper proposes a query enhancement solution that integrates a lakehouse architecture with an improved NL2SQL technology, tailored to meet the enterprise's technological needs by combining business requirements with existing technologies.

Keywords : query enhancement; NL2SQL; dimensional modeling; tobacco marketing

引言与研究背景

某地烟草企业营销数据呈指数级累积, 分散在多个异构系统中, 形成“数据孤岛”。传统固定报表模式存在三大局限: 技术门槛高(需掌握 SQL)、需求响应慢(平均3-5工作日)、灵活性差(预定义报表无法满足动态需求)。

一、技术体系总体架构设计

(一) 分层架构设计原则

1. 数据编织 (Data Fabric) 理念引入

数据编织最早由 Gartner 提出, 是一种数据管理的设计思路, 其核心思想是: 不强制把所有数据都放入数据仓库中, 而是通过元数据来把分布在不同系统、不同环境中的数据“编织”到一起, 让调用像访问一个集中、统一、完整的数据平台一样去调用数据。

数据编织架构主要具备四方面的能力。第一, 数据集成可以做得更自动化。第二, 元数据管理要更智能。第三, 数据交付要能弹性编排。第四, 安全、质量和合规这类治理要求。

2. 组装式数据分析架构 (Composable D&A)

组装式数据分析架构是未来数据分析应用形态。该架构底层

依赖于数据编织设计模式, 上层将报表平台、分析工作站、自助式分析平台、数据科学平台等技术能力微服务化、容器化, 形成高度开放的能力平台。用户不再面对单一技术系统, 而是根据业务需求灵活组装所需能力, 快速构建领域专属的数据产品或分析应用。

3. 湖仓一体 (Lakehouse) 技术选型

湖仓一体架构底层逻辑是基于低成本的对象存储, 配上像 Parquet、ORC、Delta Lake、Apache Iceberg 这类开放的数据格式。不论数据是结构化的表格、半结构的 JSON 日志, 还是完全非结构的图片、文档, 均可处理。更关键的是, 它补充了数据湖短板——ACID 事务支持、数据版本管理、还有模式强制校验, 这些本来都是数据仓库才有的能力。总的来说, 是既有数据湖的“装得下”, 又有数据仓库的“管得住”。^[4]。

本文设计营销数据分析平台, 底层选择湖仓一体架构, 应用

Apache Iceberg。存储直接调用对象存储当底座，不设计专用存储。计算引擎选取 Spark 和 Flink 搭配，能够处理批处理和流处理。为了提升交互式分析效率，前面增加一层 ClickHouse（开源版本）做加速。以上各组件集成一起，构成了一个统一的数据底座。

（二）五层系统架构

1. 数据源层：多源接入与实时采集

数据源层负责对接湖北烟草营销相关的各类数据产生系统，实现数据的全面采集和高效接入。该层采用差异化的技术策略适配不同类型的数据源：

核心业务系统（省级营销管理系统、ERP、CRM 等）采用 CDC（Change Data Capture）技术捕获增量变更，结合 Debezium、Canal 等工具实现准实时数据同步；物联网设备数据（智能烟柜、RFID 标签、GPS 终端等）通过 MQTT 协议接入 Kafka 消息队列，实现高并发流式采集；外部数据服务通过 API 调用和文件传输方式获取，配置灵活的数据质量校验规则；日志与行为数据通过 Flume/Filebeat 等轻量级 Agent 收集，统一汇聚至数据湖原始区。

2. 数据存储层：ODS-DWD-DWS-ADS 分层模型

数据存储层采用经典的分层架构设计，将数据按照加工程度和应用场景划分为四个层次：ODS，主要功能是原始数据镜像与缓冲；DWD，主要功能是明细数据标准化与主题建模；DWS，主要功能是主题聚合与指标预计算；ADS，主要功能是应用专属数据服务。分层架构的价值体现在三个方面：数据能重复用；口径统一；扩展性强。

3. 数据处理层：批流一体 ETL/ELT 引擎

数据处理层主要负责：数据转换、清洗、整合，以及数据增强（enriched）。本文研究采用采用批流一体的混合模式，不选择固定单一模式。对于复杂的数据清洗和关联转换，采用 ETL 模式，在加载前完成数据清洗；对于探索性分析和灵活变换需求，采用 ELT 模式，先将原始数据加载至数据湖，再根据查询需求即时转换。

4. 数据查询增强层：NL2SQL 智能转换核心

数据查询增强层主要是负责把自然语言查询智能转换成 SQL 语句。该层采用微服务架构，其核心组件及对应功能定位、关键技术如下表所示。

组件	功能定位	关键技术
语义理解引擎	解析自然语言查询的意图和要素	BiLSTM-Attention 编码、意图分类、实体识别
Schema 感知模块	获取并编码数据库模式信息	图神经网络、元数据缓存、增量同步
NL2SQL 引擎	自然语言→SQL 核心转换	双编码器架构、语法树解码、执行反馈优化
查询优化器	SQL 重写与执行计划优化	代价模型、索引推荐、并行执行
智能缓存管理器	多级缓存与失效策略管理	语义缓存、增量更新、预热机制

在设计查询增强城时，主要考虑了烟草营销的特殊性。系统内一共收入了专业词汇共计 5000 余条，包括了组织机构名称，专业术语等等。同时可以自动识别专业术语。需要注意多表关联推

理模块主要是利用模型的外键关系和统计特点，可以自动推断出查询所要涉及的路径，而在处理数值范围、时间表达等等一些约束，可通过条件值智能匹配模块实现，提供了转换和解析能力，让用户使用起来更方便、简单。

5. 数据应用层：可视化与决策支持

数据应用层面向终端用户提供多样化的数据消费方式和决策支持工具，体现“千人千面”的设计理念：

用户群体	核心需求	功能形态	交互方式
高层管理者	宏观指标监控、战略执行跟踪	管理驾驶舱、预警推送	语音查询、移动端概览
中层管理人员	业务过程管控、团队绩效分析	自助分析工作台、固定报表	拖拽分析、自然语言查询
一线业务人员	客户信息查询、订单状态跟踪	智能问答助手、移动应用	自然语言、扫码识别
数据分析师	深度数据挖掘、模型开发	数据探索平台、API 服务	SQL/Python、Jupyter Notebook

历史问题推荐和语音输入等方便的功能可由智能问答界面提供支持。拖拽式分析，过滤筛选等一些交互式的功能，由自主分析工作台所提供。运用响应式设计管理驾驶舱可以适配不同终端，还能实现异常的报警以及实时刷新等服务功能。

（三）架构协同机制

1. 元数据驱动的数据血缘追踪

本次研究所构建的是一种统一的元数据库，利用三类元数据进行分析，包括技术元数据，操作元数据以及业务元数据，如技术元方面可提供 etl 作业等，操作元数据涉及时间更新，访问频率等，业务元数据则涉及了维度说明和指标定义等。该仓库实现的是全链路的数据血缘式追踪，简单来说就能从报表的指标向上追溯，一直到原系统的字段，能更好的对影响分析进行处理。

2. 智能查询路由与缓存优化

利用智能查询路由以及多级缓存可有效提高查询响应的性能，查询路由可根据查询特点进行执行路径的动态选择：

查询特征	路由策略	执行引擎	预期响应
预聚合指标查询	命中物化视图	ClickHouse	<100ms
明细数据探索	下推至 DWD 层	Presto/Trino	1-10s
复杂关联分析	分解子查询并行执行	Spark SQL	10-60s
实时流数据查询	直接读取 Kafka	Flink SQL	<1s

将缓存优化设计成三级结构，结果缓存可以用 Redis 纯热点查询的结果可以实现毫秒级的返回。子查询缓存是缓存公共的中间结果，查询复杂时可重复使用，并不需要过度计算。预计算缓存是利用物化视图支持常用的分析模型。

3. 安全治理与权限控制体系

数据安全治理与架构全程融会贯通，做好事前事中和事后的安全体系控制：

安全层级	核心机制	技术实现
身份认证	统一身份认证、多因素认证	LDAP/AD 集成、OAuth2.0、SSO
权限控制	RBAC+ABAC 混合模型	角色权限矩阵、动态属性授权
数据脱敏	行级过滤、列级脱敏、动态掩码	格式保留加密（FPE）、正则替换
操作审计	全量日志记录、异常行为检测	日志集中采集、ML 异常检测、合规报告

针对 NL2SQL 场景，在权限控制方面进行了如下优化。第一，查询解析阶段以用户权限约束模式的范围，为基础保障，用户只可访问已授权的数据。第二结果返回阶段，对于查询结果的敏感字段进行脱敏处理。第三操作审核阶段，完整记录自然语言查询的原文，执行结果等一系列的信息，支持合规报告和安全审计报告提供。

二、业务数据模型设计创新

（一）维度建模方法论应用

基于 Kimball 维度建模理论^[3]，主要构建营销区域、供应链条区域。再利用对于时间、产品、客户等一致维度，与总线架构可以实现跨主题的连接。

（二）动态维度建模机制

1. 缓慢变化维度（SCD）处理策略

在维度数据管理方面是整个设计的难题，本研究以烟草营销数据作为特点系统并创新使用了该策略。本研究的创新主要是提出该策略的自动化匹配制度，基于元数据标准维度的属性对策略类型进行变更，ETL 引擎可以识别变更事件。同时支持对应的版本管理，有效减少了操作的复杂程度和人工操作可能造成的风险。

2. 实时维度更新机制

突破传统 T+1 批量更新模式，构建主备双存储结构实现分钟级维度更新：

主存储（关系型数据库）：事务性维度维护，实时生效

热缓存（内存数据库）：秒级高并发读取

分析存储（分析型数据库）：分钟级异步同步

针对客户档位（核心分析维度）等关键属性，采用 SCD Type 2 策略，通过代理键 + 生效时间戳（effective_date/expiry_date）保留完整历史版本，支撑“当时有效”的历史分析，预计资源利用率提升 40%。

3. 自适应粒度聚合模型

对查询力度需求多样性进行分析，范围由明细及到高度汇总及跨越。本研究提出了适应性的力度聚合模型，以查询模式学习动态优化预计算的策略，该核心是通过识别高频查询的组合以及力度层次，可以优先去计算这些聚合点。对于一些低频的查询内容，则利用实计算或是从更粗力度上卷的一种模式开展处理，这样可以有效减少预计算的开销度，数学建模则是把聚合选择的建模分为约束优化的问题。

设候选聚合集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，每个聚合 a_i 的存储成本为 c_i ，对查询负载的加速收益为 b_i ，存储预算为 C ，则：

$$\max_{S \subseteq A} \sum_{i \in S} b_i \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i \in S} c_i \leq C$$

该问题为 NP 难的背包问题变体，利用贪心算法可求解。按收益成本比 b_i/c_i 降序选择聚合，直至预算耗尽。对于查询日志进行持续性的监控，周期性重新计算最优聚合的集合，可以有效调整预计算的策略。

三、改进型 NL2SQL 模型设计

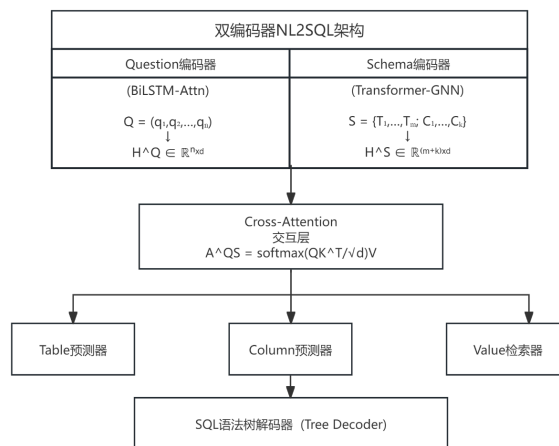
（一）领域挑战分析

烟草行业的自然语言到 SQL（NL2SQL）转换有以下三个难点：一是识别专业术语和分析比较困难，二是实际查询需要，联系多张数据报表，三是查询条件模糊或相对表述处理时较为复杂。

（二）双编码器架构

本研究提出双编码器架构，分别对数据库模式和自然语言问题进行深度编码，通过交叉注意力实现精准语义对齐^[4]。

架构示意图：



Question 编码器采用 BiLSTM-Attention 结构：

$$\vec{h}_t = \text{LSTM}(x_t, \vec{h}_{t-1}), \vec{h}_t = \text{LSTM}(x_t, \vec{h}_{t+1})$$

$$h_t = [\vec{h}_t; \vec{h}_t] \in \mathbb{R}^{2d_h}$$

$$\alpha_i = \frac{\exp(w^T \tanh(W_h h_i + b))}{\sum_{j=1}^n \exp(w^T \tanh(W_h h_j + b))}$$

$$c_Q = \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i$$

Schema 编码器采用 Transformer-GNN 混合结构，显式建模表 - 列层次结构和外键关系：

$$h_i^{(l+1)} = \text{TransformerLayer}(h_i^{(l)}, \{h_j^{(l)}\}_{j \in N(i)})$$

（三）核心模块设计

表名预测。利用层次化注意力制度，第一层基于相似度筛选 Top-K 候选表，第二层则利用 GNN 推理达到最优表组合条件。

条件值的检索工作。利用三层融合策略解决数值，时间等识别问题。

第三，语法树解码：自顶向下递归生成 SQL AST，结合约束感知束搜索（语法约束 + 模式约束 + 业务约束）与执行反馈优化生成策略。

（四）领域知识注入

本文构建包含 10,000+ 实体、50,000+ 三元组的烟草营销知

识图谱，使用 RotatE 嵌入^[5]增强语义表示。同时，采用 LoRA 技术^[6]微调中文预训练语言模型，可训练参数降至0.1%，训练速度提升10倍，同时保持领域适配效果。

四、实验评估与应用效果

（一）实验设置

构建 Tobacco-NL2SQL 数据集（15,500样本），定义执行准确率（EX，结果集匹配）与逻辑准确率（EM，SQL 字符串匹配）。测试集分布：单表查询30%、2-3表关联45%、4+ 表关联20%、嵌套子查询5%。

（二）性能评估结果

模型	执行准确率 (EX)	复杂查询准确率 (4+ 表)	平均响应时间
RAT-SQL (基线)	82.3%	68.7%	180ms
本研究模型	92.4%	85.2%	110ms

较基线提升10.1个百分点，复杂查询优势更明显（+16.5%）。消融实验表明：知识图谱嵌入贡献最大（+4.8%），执行反馈优化提升2.9%，LoRA 在训练成本降低10倍前提下性能损失仅0.6%。

（三）某地烟草企业应用成效

指标	实施前	实施后	提升幅度
平均数据获取时间	3-5工作日	5分钟	99.7%
业务自主分析比例	<10%	65%	+55个百分点
IT 开发工作量占比	100%	40%	-60%
决策响应周期	1-2周	1-2天	85.7%

五、结论与展望

（一）研究贡献

本研究所提出的是一种技术方案，通过整合湖仓一体架构以及优化后的自然语言 SQL（NL2SQL）方法，增强数据的查询功能。贡献主要包括了可动态维度建模，实现了分钟级维度的优化和自适应性。二是双编码器与领域知识注入结合在一起，使得 NL2SQL 执行准确率高达92.4%。三是五层组装式架构，可支持业务人员利用自然语言开展自助式分析工作。

（二）未来工作

在未来的工作中，需要从如下三个方面进行。第一，多轮对话式分析，引入对话状态跟踪支持用户在多方面交互中持续追问以及细化分析的需求。第二，拓展查询服务，探索跨预购数据库的查询能力，可以实现在数据不搬迁的情况下实现跨源的统一访问。第三，协同大小模型研究大语言模型以及领域专用小模型的合作架构，考虑理解力与推理的效率。

参考文献

[1] Gartner. Hype Cycle for Data Management, 2022[R]. Stamford: Gartner, 2022.

[2] Zaharia M, Ghodsi A, Xin R, et al. Lakehouse: A New Generation of Open Platforms that Unify Data Warehousing and Advanced Analytics[C]// Proceedings of the 11th Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR). Online: www.cidrdb.org, 2021.

[3] Elizabeth M. Pierce, Song I Y. Dimensional modeling: Identification, classification, and evaluation of patterns[J]. Decision Support Systems, 2008, 45(1): 59-76.

[4] Wang B, Shin R, Liu X, et al. RAT-SQL: Relation-Aware Schema Encoding and Linking for Text-to-SQL Parsers[C]// Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). Online: ACL, 2020: 7567-7578.

[5] Sun Z, Deng Z H, Nie J Y, Tang J. RotatE: Knowledge Graph Embedding by Relational Rotation in Complex Space[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Learning Representations (ICLR). New Orleans: OpenReview.net, 2019.

[6] Hu E J, Shen Y, Wallis P, et al. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Learning Representations (ICLR). Online: OpenReview.net, 2022.

公路工程路基施工技术及质量控制研究

任学起

内蒙古路桥集团有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010050

DOI:10.61369/ERA.2026060044

摘 要：针对高等级公路路堤工程材料质量差、沉降难以把控以及高精度施工的问题，在高等级公路路堤工程中提出应用复合改良材料、智能压实技术和信息化施工监测方法。通过高液限粘粒土改良、水泥-粉煤灰复合体系和填石路堤方法，使得无侧限抗压强度提高了2~3倍、压实率在95%~99%，并且沉降量不大于25mm。在智能监控方面采用GNSS定位系统、物联网传感器、无人机LiDAR技术对施工厚度、振幅指标及边坡变形进行实时跟踪。该技术的应用有效的改善了施工工艺，提升了路堤结构的稳定性和耐久性，也增强了其对抗恶劣环境的能力，给建设高精度、高可靠性的公路提供了可行性技术支持。

关 键 词：路基施工；复合改良材料；智能压实技术；数字化监测；填石路基

Research on Construction Technology and Quality Control of Roadbed in Highway Engineering

Ren Xueqi

Inner Mongolia Road and Bridge Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010050

Abstract： In response to the problems of poor material quality, difficult settlement control, and high-precision construction in high-grade highway embankment projects, the application of composite improved materials, intelligent compaction technology, and information-based construction monitoring methods is proposed in high-grade highway embankment projects. Through the improvement of high liquid limit clayey soil, the cement-fly ash composite system, and the fill stone embankment method, the unconfined compressive strength has been increased by 2 to 3 times, the compaction rate is between 95% and 99%, and the settlement is no more than 25 mm. In terms of intelligent monitoring, GNSS positioning systems, Internet of Things sensors, and unmanned aerial vehicle LiDAR technology are used to track the construction thickness, amplitude indicators, and slope deformation in real time. The application of this technology effectively improves the construction process, enhances the stability and durability of the embankment structure, and also increases its ability to withstand harsh environments, providing feasible technical support for the construction of high-precision and high-reliability highways.

Keywords： roadbed construction; composite improved materials; intelligent compaction technology; digital monitoring; fill stone embankment

引言

高等级公路建设中路基的承载力、稳定性关系到道路的使用时间以及安全程度，在复杂的地质条件之下传统的施工技术不能做到精准把控，易造成路面不平整、坡面失衡以及出现持续的病害问题等现象的发生。利用复合改良剂增强土体强度，运用智能化碾压技术及信息化监控的方式，大大提高了施工精确度及碾压均匀度。对填方路基与智能化施工工艺进行改进能够解决软土地基、地层水丰富区域、复杂地貌等问题。本文会对施工创新技术、质量管理机制以及环境保护措施等方面进行详细阐述，以便为精准化、稳定化的路基工程提供技术支持和可行性方案。

一、路基施工技术创新研究

（一）新型路基材料与复合改良技术

公路路基材料选择和改善对于路基整体承载能力、稳定性和耐久性起着至关重要的作用。在高速公路上广泛使用高塑性粘

土、粉土、砂土等天然原状土的时候应对其进行物理改良或化学添加剂处理以改善路基材料的性能特点；复合改良技术主要有水泥-粉煤灰、石灰-粉煤灰、高分子改性材料等复合体系，在对软土和湿陷性黄土等地质条件较差的地基进行改良以后可以使改良后的土的无侧限抗压强度达到原来土体的2.0~3.5倍，并使内

摩擦角增加 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ，压缩模量增加1.8~2.7倍，从而大大提高了其承载能力和变形控制能力。复合改良材料颗粒级配以及掺量应根据现场土体的物理化学性能合理的设计搭配方案，来保证改良土层厚度及强度符合设计标准的要求；例如对于沿海地区的软基处理，复合材料掺量一般控制在8%~15%，从而达到持久稳定性和抗侵蚀性的标准。通过对材料微观形貌的研究可以大大降低湿陷性黄土地基施工完成后沉降的问题，并能增强路面结构的耐久能力、整体性、耐疲劳程度等^[1]。

（二）施工机械化与自动化技术应用

近年来道路建设机械化水平不断提升，大吨位推土机、液压挖掘机及智能化压路机等已经普及开来。智能化压实技术(Intelligent Compaction, IC)应用多频率振荡器、GPS测控及GIS系统对施工路面实施精确测定及实时监控管理，压实程度可始终保持在95%~99%之间，并利用无线通讯技术传输至管理中心端予以实时管控并做出相应改进及评定。机械化施工设备有惯导系统(INS)及RTK-GNSS引导下的土方机械，用于土方挖掘及平整达到厘米级精度控制要求。在复杂的地势地貌下，安装了激光扫描仪以及地形识别装置的全自动的推土机能精确地控制到 $\pm 5\text{cm}$ 的误差，在同等条件下比传统的由人力来掌握要精确地高出30%~40%，施工现场机械设备群之间利用了5g网络连接来达到联动的效果并且可以持续工作24个小时不间断的施工，从而使得工效提高了20%~30%，这便是机械化的自动化技术减少了人为误差提高了工作的统一性并可以通过对数据进行分析来达到全程可控的质量管控。

（三）施工工艺优化与智能化流程

施工工艺改进在于过程管控以及深化的信息融合，在于路基填筑与碾压工序中应用智能化检测仪器和精密测控装置，能够对压实次数、振幅、温度、湿度等相关数值做到即时测量及回送，压实控制参数由闭环调节机制来调节，如借助物联网手段使压实机传感器测得的数据时时传送到施工现场管理系统，则能在设定的压实误差为 $\pm 0.5\%$ 范围之内做到自动纠偏；将施工BIM模型同现场感知网结合在一起，构成数字化双体施工智能管理系统，对工程项目进度管控、质量控制以及危险信号进行综合监管。另外，使用无人机LiDAR扫描仪以5~10cm精度周期性扫描施工地形，可以快速得到三维地貌地图并对比设计模型计算变形误差，为下一步工序调整提供参考依据；根据施工过程自动化建立工艺参数库，针对不同的岩土类型以及不同类型材料的施工工艺做出大数据分析模型，有利于标准化施工方案的制订和施工工艺的标准化程度以及精确度^[2]。

二、路基施工质量控制体系

（一）全过程质量监控方法

路基工程全过程中质控包括了材料选择、地基处理、填筑压实以及表面整修等方面，利用在线监控加现场检验的方式保障压实度、厚度以及含水量等都达到相关标准，在《公路工程路基施工规范》(JTG B01-2014)的基础上，压实度不低于95%~100%，每500m²取样不少于5处，使用核子密度仪或者夯实锤法测定；填筑层厚一般控制在20~30cm之间，含水量误差 $\pm 2\%$ ，对于软基处置处则采取沉降观测桩的方法，每周测一次沉降

值，精确至 $\pm 1\text{mm}$ ，累计沉降达到设计允许值的50%时要及时调整施工工艺。施工资料由施工现场移动设备传送到管理系统中实现对现场施工进行实时记录及过程检验形成闭环管理模式确保路基工程所有施工阶段的质量可控及可追溯性。

（二）智能检测与监测技术

信息化检测手段主要有地质雷达(GPR)、多点振动力测量以及无人机航测等，结合传感器网络和大数据分析技术可以实时了解路基状况；地质雷达可以探知路基内部空洞及密实度以及上下垫层之间的粘结状况，探测误差为 $\pm 5\text{cm}$ ，探测深度达2m；振动力测量通过安装加速度计在压路机上以及路基表面，在每分钟采集50个样本，记录下振动力大小与频率曲线，方便后期判断是否压实均匀；无人机航测配合LiDAR扫描产生三维点云图，精度高达 $\pm 10\text{cm}$ ，可以定期观测施工结束后的表面高差以及边坡稳定程度。信息传送是用5G网络+云平台的方式，在线制作质量报告并且自动标识问题点，作为工程整改的数据支撑。

（三）风险识别与质量预警机制

路基工程的风险有沉降过大、边坡滑移失稳、强度不够等问题，在此通过对质量指标以及检测数据建立风险辨识算法模型。沉降警报使用累计沉降速率门限，在一周内沉降速率大于设计值的0.5倍就报警。边坡稳定性的监测依靠的是倾斜仪和应变仪获得的最新的变形数值，如果临界位移达到设计规定的5毫米就发出警告。材料质量不合格通过含水率、密度、抗压强度等方面来判定是否超标，超出正负百分之五的数据录入为风险档案。报警系统与施工管理系统相结合，让异常信息可以及时传播并作出相应的决定，保证了工程施工的安全及路基长久的稳定性，也为之后的维护保养等提供了参考依据^[3]。

三、路基施工中的环境与安全控制

（一）施工对环境影响及减缓措施

路基工程施工产生的扬尘、噪声以及地表水扰动、土体碾压造成的生态环境扰动为主要环境问题。扬尘浓度采用工地现场PM10检测仪进行测定，规范要求不大于 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；喷雾洒水装置覆盖率达到85%以上；铺筑碎石基层20cm厚度减少机械车辆扬尘。噪声监测点布置在作业区边界处，每小时采集一次，噪声强度小于等于75dB(A)。雨期施工要开设边坡排水槽与沉淀池，排水管道直径为一般选取 $\phi 300\text{—}500\text{mm}$ ，确保水流清澈以及沉渣截留比率大于等于80%。针对生态脆弱地区，在施工范围内宽度控制在设计宽度70%之内，实施植被临时覆盖，维持土体结构的稳定性以及水土流失小于等于50吨/平方公里·年，施工材料运输路径与堆料场进行合理布置以减少重机械的运行频率至20%以下，减轻对外围环境破坏。

（二）安全施工规范与智能管理

工程安全管理包括边坡防护，机械设备使用，人员工作，施工意外预防四个方面，边坡观测采用倾角仪以及应变片进行监测，每隔10米设一个点，预警界限是5毫米；机械设备的操作使用智能化管理系统，对整个施工现场的液压抓斗挖掘机、推土机以及压路机电控部分进行实时的定位监控和载荷监控，数据每秒收集一次；高空作业人员佩戴的安全带与智能定位手环连接，当距离危险区不足一米发出声光警报。劳务班组严格执行《公路工

程施工安全技术规范》(JTG F10-2011)的规定,在现场全天候不间断的进行巡视检查,发现隐患及时上传至平台并予以销号处理。利用数字系统集成机械设备状况、环境监控以及工作人员情况,做到对风险进行预警、对于事故发生能够及时处理以及施工行为可以查询回溯等管理措施。

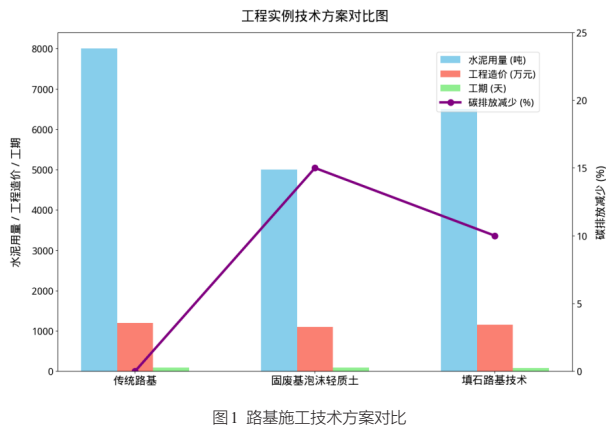
（三）可持续施工技术探索

可持续路基施工技术主要是节约能源、减排碳、提高持久稳定性,在回填中运用再生材料,以粉煤灰、废弃混凝土、工业副产品废渣等代替20%~30%左右的天然砂砾,且压实度大于或等于95%;机械运用液压动力回收装置,节约油料15%左右,碳排放降低12%左右;边坡、路肩用生态防护方法,草植覆盖率大于或等于80%,防洪能力达到设计洪水频率1/10年的水平;水土保持措施有多个层次的沉淀池及排水沟,拦截率≥85%,减小施工期水土流失。利用工程建设全生命周期信息化管理可以优化机械设备行驶路线,节约工期10%~15%,在满足施工误差±2cm的要求下达到工程经济性和环保性的双重最优解^[4]。

四、路基施工技术创新的应用与效果评估

（一）工程实例分析与施工效果验证

汉口到阳逻江北快速路项目为解决高地下水位、软土地基的问题而采取的填石路基的施工方法。本项目共填筑石方路基长度为12.5 km,其填筑层厚度 $0.8\text{ m} \pm 0.05\text{ m}$,用当地散石料代替不良土质进行填筑,降低了对于传统的土方材料的需求的同时增加了路面抗渗性。路基完成以后使用全站仪和GNSS复核高程,施工段落最终沉降量不大于25 mm,符合设计要求的30 mm的标准。填石层内渗流系数为 $1.2 \times 10^{-3}\text{ m/s}$,远远大于一般土壤的渗流系数(10^{-5} m/s),加快地表水排出速度,减小了施工阶段的积水可能性,增强路基底部稳定性和强度,这表明在复杂地质条件下填石路基技术可以做到精细化施工以及优质的工程质量。图1所示。



参考文献

[1] 刘敏. 公路工程高填方路基施工技术及管理[J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (05) : 64-66.
[2] 杨涛. 公路路基标准化施工技术及管理控制措施探讨[J]. 中国标准化, 2022, (24) : 210-212.
[3] 刘中兰, 牟映衡. 高速公路填石路基施工技术和质量管理研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (14) : 85-87.
[4] 赖冠斌. 市政公路工程路基路面施工技术及管理措施[J]. 工程与建设, 2023, 37 (02) : 689 - 691.
[5] 耿亚明. 山区公路路基施工关键技术及质保措施研究[J]. 交通世界, 2023, (28): 127-129.

（二）技术经济性分析与成本优化

针对同类型高速公路建设项目来讲,在运用工业固废复合材料技术可以大幅削减建设成本以及节约资源,例如在某一高速公路上使用固废衍生泡沫轻质土取代一定数量的水泥,每公里填筑节省水泥可达3000t左右,节约建筑费用大约100万元人民币之多,并消耗工业固体废物达10万吨。同时也可以调整材料供应链及环保目标值。此材料容重处于 $0.6\sim1.2\text{g/cm}^3$ 之间,7天抗压强度是 $1.0 \sim 4.8\text{MPa}$ 以上,超出了一部分规定标准,另外360天抗压结果相较28天提升了约1.6~2.0倍。具有较好的耐久性能。另外,采用此种材料替代减少了常规土石方运输、材料购买费用在总施工费用中的占比约有8%~12%^[5]。如表1所示。

表1 技术经济性对比 (单位: 每公里)

注: 数据根据项目施工纪实与技术推广资料整理

技术方案	水泥用量 (吨)	工程造价 (万元)	工期 (天)	环境指标 (碳排放减少)
传统路基	8000	1200	90	基线
固废基泡沫轻质土	5000	1100	88	↓约15%
填石路基技术	6500	1150	85	↓约10%

（三）对比分析：传统工艺与创新技术

传统路基工程中处理软弱地基、高填路堤时常常会使用大量的机械碾压和人工复测,其压实密度也基本保持在92%~95%,并且对于沉降差异性和排水效果方面也不够完善。但是经过智能化压实调控以及新材料的研发之后,其压实密度能够达到95%~99%,震动频次、行驶速率等相关信息也可以做到精确到正负0.2%,而且施工的一致性和压实均匀性的程度也大大加强。智能监控以及数字化工序使得每层厚度误差范围缩小到了正负0.03m之内,要比传统的正负0.05m要严格许多。新技术应用于复杂的地层上对于强夯、深层挤密桩的处理方式更加合理而且有效,使得工程完成后路基沉降总体不超过了5 cm的范围,在一些项目当中甚至达到了≤3 cm水平以下,进而增强了公路的耐久性能和服务年限。

五、结语

路基施工创新及质量管理覆盖材料选择、机械化作业以及信息化管理各个阶段,运用复合改良材料、填石路基工艺技术、智能监控等措施,达到施工准确度±0.05 m、压实度95%~99%、沉降量不大于25 mm的目标;智能化、绿色施工工艺提高了项目建设水平以及对自然环境的适应能力,在减少环境污染的同时节约了能源资源消耗,给予高速公路工程建设高效、低碳环保的解决方案和技术参考。

高端商业空间精装修施工技术研究

——以上海静安寺 ROASTEDCOFFEE 项目为例

钱彬彬

上海炬恒建筑装饰工程有限公司, 上海 202151

DOI:10.61369/ERA.2026060001

摘 要 : 随着高端商业空间对品牌形象、顾客体验的重视,精装修施工技术在现代商业空间中所起的作用也越来越大。本文以雀巢旗下高端咖啡品牌 ROASTELIER 上海静安寺旗舰店装修工程为研究对象,探究在商业空间里实现高效的空间利用、功能整合和文化氛围营造的施工技术创新。项目主要是打造一个沉浸式体验的高端商业空间。施工过程中针对空间通透性、功能布局、材料选择、施工精细化等各方面提出了新的技术方案,本文对项目施工难点进行了分析,并从技术角度探究了如何实现功能与美学的统一。本文通过对案例分析,得出 ROASTELIER 旗舰店装修项目成功的经验,给类似项目施工提供一定的技术参考。

关 键 词 : 精装修施工技术; 高端商业空间; 功能整合; 施工创新; ROASTELIER 旗舰店

Research on the Construction Technology of Fine Decoration in High-End Commercial Spaces —Taking the ROASTEDCOFFEE Project at Jing'an Temple in Shanghai as an Example

Qian Binbin

Shanghai Juheng Architectural Decoration Engineering Co., Ltd., Shanghai 202151

Abstract : As high-end commercial spaces increasingly emphasize brand image and customer experience, the role of fine decoration construction technology in modern commercial spaces has become more significant. This paper takes the renovation project of the flagship store of ROASTELIER, a high-end coffee brand under Nestlé, located at Jing'an Temple in Shanghai, as the research object. It explores innovative construction techniques aimed at achieving efficient space utilization, functional integration, and the creation of a cultural ambiance within commercial spaces. The project primarily focuses on creating an immersive high-end commercial space. During the construction process, new technical solutions were proposed regarding spatial transparency, functional layout, material selection, and construction precision. This paper analyzes the construction challenges of the project and explores how to achieve a harmonious blend of functionality and aesthetics from a technical perspective. Through case analysis, this paper derives successful experiences from the renovation project of the ROASTELIER flagship store, providing technical references for similar construction projects.

Keywords : fine decoration construction technology; high-end commercial spaces; functional integration; construction innovation; ROASTELIER flagship store

随着消费者对于品牌体验的需求越来越高,商业空间的装修已经不再只是简单的装饰,而是一个品牌文化以及市场定位的体现。ROASTELIER 上海静安寺旗舰店是雀巢旗下高端咖啡品牌全国首店,致力于创建一个把东方禅意与现代咖啡工坊融合在一起的高端空间。本文通过对 ROASTELIER 旗舰店装修工程的施工技术进行分析,目的在于给高端商业空间装修提供技术上的参考,并为以后类似项目的施工实践提供借鉴。

一、项目概况及施工难点分析

(一) 项目概况

ROASTELIER 上海静安寺旗舰店为雀巢旗下的高端咖啡品牌首店,也是上海静安寺旗舰店。该店处于上海静安寺商圈的中心

地带,室内和露台部分都有。项目设计定位为“东方禅意+现代咖啡工坊”的沉浸式空间,用空间设计来传达品牌的高端形象和文化内涵。店内主要功能为核心烘焙区、吧台服务区、客座区、露台,努力在有限的空间内营造出舒适且具有现代感的消费者体验。项目设计上重视功能和美学的统一,也考虑到了品牌特色,

努力给顾客提供高品质的咖啡文化体验。

（二）项目难点分析

ROASTELIER 上海静安寺旗舰店装修施工过程中，存在材料选择、施工精度、系统集成等施工技术难点，主要分析如下所示。

1. 高精度施工、细节处理，项目设计上对于精细化施工有较高的要求，在材料处理、收口工艺方面。原木、金属和玻璃等材质结合处要高度精确的拼接、无缝对接。施工时对于材料防潮、防开裂、耐磨性控制以及各种材料交接处的处理精度均有较高要求。墙面平整度、灯具定位、灯光效果的精细调节，也须要有较高的工艺水平。顶面镜面施工的难点主要是精度控制、材料安全性、基层处理和光学效果。

2. 大面积玻璃幕墙、无框窗施工，项目设计中要求大量使用落地玻璃、无框窗来达到提高空间通透性、视觉效果的目的。但是该设计在施工中存在结构安全和密封性问题，在静安寺周边密集人流以及外部环境变化的时候尤为明显。为了保证玻璃幕墙的稳定性、防水性，在施工时采用双层中空 LOW-E 玻璃、隐框结构，既保证了结构的安全性，又解决了隔音、防水的技术要求。

4. 智能化系统集成及施工，装修中集成了智能照明、空调、新风系统等现代设备，对施工提出了高要求。保证空间美观舒适度的同时，把智能系统和装修设计无缝对接起来，就成为施工的一大难题。在设备隐藏和管线合理布置方面，施工团队要保证所有的设备同装修完美对接，不能出现管线外露影响整体美观的情况。

5. 文化氛围的表达，项目设计重视“东方禅意”和现代简约风格的融合，但是没有使用传统的寺庙元素。因此，在施工过程中光线的精确控制、墙面和天花平整度的控制等都必须严格控制，最终的效果才能真实体现设计意图。

这些施工难点的解决使 ROASTELIER 上海静安寺旗舰店在空间功能、材料品质、文化氛围和技术创新上完美融合，给高端商业空间装修提供宝贵的经验和参考。

二、装修工程施工技术分析

ROASTELIER 上海静安寺旗舰店的装修施工项目，是高端商业空间的精装修工程，涉及空间布局优化、材料选择、精细化施工工艺、智能化系统集成等各个方面。精细化施工技术在空间利用、功能整合等方面都做了精心的设计，在细节处理、工艺执行上也达到了高标准，使品牌形象和顾客体验完美地融合在一起。

（一）材料选择与施工工艺

ROASTELIER 旗舰店装修施工中所用材料的选择、工艺处理都会影响到空间质量、美观性。项目所用的高端材料有原木、金属、不锈钢、玻璃等，施工过程中对这些材料的安装技术要求很高。吧台、家具等原木施工时采用多层封闭漆工艺保护木材，在潮湿环境下不变形、不开裂，长期保持美观。为保证不同材质之间顺畅过渡以及高质量外观，施工时采用无缝拼接技术，在木材与金属、玻璃等材质交接处使用。所有的交接位置都用到了精确

的定制收口条和隐形接缝工艺，没有出现传统的装修瑕疵，使空间更加整洁统一。施工团队安装的玻璃幕墙、无框窗是双层中空 LOW-E 玻璃和隐框结构，保证玻璃结构安全、隔音、防水，尤其适合人流密集、潮湿环境，大面积玻璃安装可靠美观。

（二）高精度施工与细节处理

高精度施工属于 ROASTELIER 旗舰店装修项目的主要要求。施工团队对于材料交接、细节处理上的施工严格按照技术控制来进行，保证每一道工序都可以达到最优。墙面和天花的平整度控制在 2mm 以内，为此施工团队在墙面施工时采用多层腻子打磨技术，保证墙面平整光滑，使用环保乳胶漆进行涂装，色泽均匀、无瑕疵。灯具的准确安装也是施工中的一个难题，为了保证灯具的准确安装，施工团队严格按照设计要求对灯具进行角度、色温、照度等各方面的调节，保证光源分布均匀、层次分明。施工时也用到精密的激光定位技术，保证墙面、天花、灯具的定位精度。所有的细节都不允许有瑕疵，从而使得空间的美学效果和使用体验得到了提高。

大面积玻璃幕墙和无框窗的安装技术是施工的重要环节，结构安全、密封性能、美学效果三者之间要达到平衡。施工团队选用双层中空 LOW-E 玻璃，得到很好的隔音隔热效果和节能降耗效果，室内温度稳定。为了达到无框窗的视觉效果，采用了隐框结构的设计，使玻璃面板和支撑系统连接处不露框架，达到简洁通透的效果。安装时施工人员使用高精度激光测量和定位技术，保证玻璃安装位置准确无误，用起重设备吊装安装，防止搬运过程中造成玻璃损坏。施工人员在玻璃和结构框架交接处使用了高性能硅胶密封胶，并且进行了精密密封处理，防止水渗透、空气泄漏，提高整个系统隔音防水效果。在结构支撑上采用钢筋混凝土框架，保证玻璃稳定、承载，尤其是在静安寺周边环境及高强度使用情况下，施工团队做了详细的计算和调试工作来保证系统的安全、长久。整个玻璃幕墙系统的安装既满足了设计的现代感要求，又改善了空间的采光性、开阔感，成功塑造出一个既有高端商业氛围，又有功能需求的环境空间。

顶面镜面效果属于装修施工中的重要设计亮点，可以使得空间的视觉感觉更好、更开阔，并且能够加强空间的层次感。施工时用激光测量技术保证每块镜面板位置的准确安装，防止由于位置误差造成整体效果失真。镜面板依靠金属龙骨框架支撑，用专用连接件固定，保证镜面板稳固、平整，防止长时间使用后松动、下垂。施工人员对光学效果的控制也较严格，通过精确调节镜面和光源的角度，使反射光均匀分布在空间中，提高了空间的亮度和层次感。安装完成后又做了细致的后期清洁与保养工作，保证镜面表面光亮如新。顶面镜面的精确施工和技术控制，既提高了空间的现代感，又加强了空间的视觉效果，很好地实现了设计师的创意和功能需求。

（三）智能化系统集成技术

商业空间智能化需求增加以后，ROASTELIER 旗舰店装修施工过程中也使用了智能化系统。智能照明系统施工时采用分区控制、感应调光技术，现场准确布线、设备安装，保证系统正常工作。所有的智能设备、系统独立布线、调试，照明系统与空间

需求高度吻合。空调及新风系统施工时施工队通过精确的管道布置,使设备与管道隐蔽安装,并且在操作过程中管线无外露问题对空间美观造成的负面影响。空调系统设备采用内嵌式设计,风口、管道全部隐藏在天花板内,使空间整洁,舒适度提高。除此之外,所有的智能设备也要进行集成、调试工作来保证运行的高效以及满足使用需求。

（四）文化氛围的细腻表达

ROASTELIER 上海静安寺旗舰店在设计上把东方禅意与现代简约风格融合起来,在施工时,团队经由细致的工艺处理和空间布置,很好地表现出了这种文化氛围。项目并没有使用传统的寺庙元素,而是用空间留白、简约的装饰、精确的光影效果来表现出东方禅意的空灵和宁静。施工团队用精确的灯具安装、光源调试来保证各个区域光线效果符合禅意文化的要求。为了达到空间的空灵感、宁静感,施工时对灯光的色温、照度、光线投射角度做了细致的调节,用精确布置光源的方式营造出层次丰富、静谧的环境。墙面及天花的细致施工也成了本项目的一大亮点,施工人员对墙面、天花平整度进行了严格的控制,从而达到极简风格整洁的效果,很好地实现了品牌所要求的沉浸式体验。

三、效果评估及经验总结

（一）实施效果

ROASTELIER 上海静安寺旗舰店装修施工成功地实现了设计目标,在空间布局、材料选择、施工精度、文化氛围的呈现等方面都达到了高标准,在施工过程中巧妙地将现代技术与高端商业空间需求结合起来。大面积玻璃幕墙、无框窗的安装使空间变得通透,又保持了良好的隔音、防水性能,给顾客营造了一个舒适

的环境。精细化施工使得每一个细节都能完美呈现出来,特别是墙面、天花板、灯具安装精准的时候才能达到极简风格的效果。智能化系统的集成一方面提高了空间的现代感、舒适性,另一方面也使能源得到更好的利用。整体装修体现出了 ROASTELIER 品牌高端定位和文化氛围,给品牌的消费者提供独特的沉浸式体验。

（二）经验总结

项目施工中最为重要的是精细化施工的落实。施工团队在多种材质交接、细节处理以及工艺执行方面都采取了高精度控制,保证每一个细节的完美展现。施工队用木材、金属、玻璃等材料拼接时,无缝拼接、定制收口条技术应用到每个交接处,给空间带来高端、整洁、无瑕疵的感官体验。墙面、天花板的平整度控制在2mm 以内,保证了整个空间极简风格。另外,灯光、照明系统的控制也体现出了高精度施工技术,准确调节灯光的色温、照度和角度,把设计理念和实际效果结合起来,营造出层次分明、舒适的空间氛围。这些精细化的施工要求和技术实施给今后类似项目提供了宝贵的经验。

四、结束语

ROASTELIER 上海静安寺旗舰店装修施工项目,是高端商业空间技术的体现,也是设计理念和施工工艺的结合。精细化施工技术、智能化系统集成、大面积玻璃幕墙安装、文化氛围精准传达,使项目实现了空间功能和美学的统一,提高了品牌形象和顾客体验。施工过程中出现的技术难点及创新点,既是施工团队在细节方面高标准的表现,也是今后类似项目施工的一种经验与借鉴。

参考文献

[1] 许成树. 基于视觉营销的商业空间精装修策略研究 [J]. 营销界, 2025, (03): 76-78.
[2] 张一川. 建筑装修施工技术与管理研究——以某商业广场室内装修工程为例 [J]. 居业, 2025, (05): 217-219.
[3] 叶文峰, 王之杰, 梁续世, 等. 新技术在复杂造型商业装饰工程中的应用——以深圳市华润笋岗中心项目商业精装修工程为例 [J]. 住宅与房地产, 2023, (35): 48-51.
[4] 林舜添. 商业办公楼室内装饰装修施工技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (21): 146-148.
[5] 李治中. 隔声设计在某商业中心俱乐部装修设计中的应用 [J]. 广东建材, 2023, 39(02): 62-65.

化工建筑抗爆改造关键技术与管理措施应用分析

吴卫荣

上海慧盾工程科技有限公司，上海 201906

DOI:10.61369/ERA.2026060002

摘 要： 本文以青海盐湖镁业有限公司集中人员建筑物抗爆改造项目为例，系统论述高海拔、强风、干燥及有爆炸风险环境下化工建筑抗爆改造关键技术体系与 EPC 全过程管理措施。重点剖析基于爆炸风险评估确定抗爆设计标准的方法，阐述结构加固、抗爆门窗与泄压设施安装、机电安全系统升级等核心技术应用要点，提出高海拔严酷环境专项施工策略。同时，从设计、采购、施工一体化角度，总结保障项目质量、安全与进度的关键管理措施。项目实践表明，集成应用本文所述技术与管理方法，可提升既有化工建筑在爆炸荷载下的结构安全性与人员防护能力，为类似工程提供实施路径。

关 键 词： 化工建筑；抗爆改造；结构加固；泄压设计；高海拔施工

Application Analysis of Key Technologies and Management Measures for Anti-Explosion Renovation of Chemical Buildings

Wu Weirong

Shanghai Huidun Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 201906

Abstract： Taking the anti-explosion renovation project of centralized personnel buildings at Qinghai Salt Lake Magnesium Industry Co., Ltd. as an example, this paper systematically discusses the key technical system for anti-explosion renovation of chemical buildings and the EPC (Engineering, Procurement, and Construction) whole-process management measures in environments characterized by high altitudes, strong winds, dryness, and explosion risks. It focuses on analyzing the method for determining anti-explosion design standards based on explosion risk assessment, elaborates on the application points of core technologies such as structural reinforcement, installation of anti-explosion doors and windows and pressure relief facilities, and upgrading of electromechanical safety systems, and proposes special construction strategies for harsh environments at high altitudes. Meanwhile, from the perspective of integrating design, procurement, and construction, it summarizes key management measures to ensure project quality, safety, and schedule. Project practice demonstrates that the integrated application of the technologies and management methods described in this paper can enhance the structural safety and personnel protection capabilities of existing chemical buildings under explosion loads, providing an implementation path for similar projects.

Keywords： chemical buildings; anti-explosion renovation; structural reinforcement; pressure relief design; high-altitude construction

引言

化工生产装置区内的集中人员建筑物，如办公楼、中控室、休息室等，由于内部人员密集且承担生产指挥、人员休憩等重要功能，倘若遭遇邻近装置可能发生的爆炸事故，极易容易造成群死群伤严重后果^[1]。对该类建筑物开展抗爆改造，提升抵御爆炸冲击波的能力，属于化工企业本质安全水平提升的关键环节。青海盐湖镁业有限公司厂区位于高海拔且气候条件恶劣的盐湖地区，公司人员密集建筑物的抗爆改造工程，不但要解决常规的抗爆技术难题，还需应对特殊地理气候环境带来的施工挑战^[2]。本文以该项目为背景，立足于 EPC（设计、采购、施工）总承包模式，深入分析抗爆改造过程里关键技术应用与系统性管理措施，目的是形成一套适用于严苛环境条件下且可复制推广的化工建筑抗爆改造综合解决方案。

一、工程概况

(一) 项目工程概况

本项目改造主体为青海盐湖镁业有限公司厂区内的多栋人员集中建筑物，包括办公楼、中央控制室、员工休息室及食堂等，共计8栋建筑，总建筑面积约6500 m²。厂区地处青海盐湖区域，平均海拔超过2800m，具有典型的高原气候特征：空气稀薄、年平均气温低、昼夜温差大、风力强劲、气候干燥。厂区内存在镁冶炼及相关化工工艺流程，潜在爆炸危险源明确。改造工程需在保证建筑物日常使用功能基本不受影响的前提下进行，施工安全管控要求极高。

(二) 抗爆改造面临的主要技术与管理难点

高海拔环境条件会导致施工人员工作效率降低，材料性能变化如混凝土养护与密封胶固化效率下降，机械设备功率还会显著降低；强风天气会对高空及室外作业造成持续的安全风险^[3]。厂区在改造期间需要维持部分区域正常办公与生产指挥功能，对施工组织的分区管理、隔离措施以及作业时序安排提出极高要求，同时厂区内动火、吊装等危险作业审批流程严格，协调管理工作十分复杂。抗爆性能要依据厂区特定危险介质如镁粉、氢气等的爆炸特性进行量化分析，通过爆炸压力与冲击波超压计算科学确定各建筑抗爆设防等级以确保设计合理。改造涉及建筑、结构、给排水、消防、电气、通风等多系统集成，需基于既有建筑进行协同升级，存在技术接口繁多、施工精度要求高的挑战。项目地处偏远地区，特种抗爆材料如甲级抗爆门、泄压板采购周期长，长途运输受天气与路况影响显著，供应链稳定性管理尤为关键。

二、抗爆改造核心关键技术应用分析

针对上述问题，研究所述化工建筑抗爆改造关键技术体系，见图1^[4]：

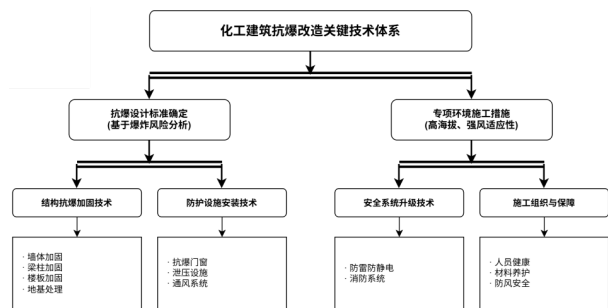


图1 化工建筑抗爆改造关键技术体系框架

(一) 基于风险分析的抗爆设计标准确定

依据《石油化工建筑物抗爆设计标准》(GB/T 50779-2022)，采用风险分析法确定设防等级。针对镁粉爆炸风险（爆炸介质质量Q=500 kg，爆炸空间体积V=1000 m³），计算爆炸压力峰值^[5]：

$$P_{\max} = K \cdot \frac{Q}{V}$$

式中，K为爆炸系数（取0.25，基于镁粉特性），Q=500kg，

V=1000m³，得：

$$P_{\max} = 0.25 \times \frac{500}{1000} = 0.125 \text{ MPa}$$

考虑到安全系数为1.2以及冲击波叠加效应情况，最终把设防压力确定为0.15 MPa，该数值满足规范要求，即Ⅱ级爆炸风险设防压力需≥0.1 MPa，建筑物在遭受设防压力冲击波作用的时，应达成“结构不倒塌、关键抗爆构件不穿透、碎片飞散受控、人员疏散通道保持可用”的性能目标。

(二) 建筑主体结构抗爆加固关键技术

对既有钢筋混凝土框架和砖混结构建筑做抗爆加固，核心要点是提升其抵御爆炸冲击波超压与冲量的整体能力，承重墙体加固采用单侧或者双侧浇筑钢筋混凝土面层的方法，加固之后墙体总厚度不能低于300mm，面层混凝土强度等级要大于C30，内置双向钢筋网片并通过植筋和原结构可靠连接，以此显著提高墙体的抗剪强度、抗弯刚度和整体性。梁柱构件加固主要采用外包角钢并灌注结构胶的方案，会用到外包角钢并灌注结构胶的办法，并在梁柱节点区域把箍筋间距加密到100mm，增强节点区的抗剪承载力与塑性耗能能力，避免爆炸荷载下发生脆性破坏，加固楼板是在原有楼板表面铺设Φ8@150mm双向钢筋网片，并浇筑60mm厚的C35细石混凝土叠合层，从而提高楼板的抗冲击性能与整体刚度，地基与基础得进行复核验算，对承载力不够的独立基础采取扩大基底面积的方式加固，对条形基础用压力注浆法加固地基土体，保证结构在爆炸荷载增量作用下地基稳定且沉降可控，植筋作为关键连接工艺，其流程包括定位、钻孔（孔径d+4到6mm，孔深大于或等于15d，d为钢筋直径）、清孔（用高压风吹和专用毛刷清理）、注胶（注入足量A级环氧树脂植筋胶）、插筋（旋转插入至孔底）及固化养护，固化后必须做现场拉拔试验，验证其抗拔力不低于钢筋屈服强度标准值，这样才能满足设计要求。具体材料及参数见表1。

表1 主体结构抗爆加固主要材料与工艺参数

加固部位	加固方法	关键材料 / 规格	主要工艺参数	性能目标
承重墙	钢筋混凝土面层	c30混凝土，hrb400钢筋网	厚度300MM，植筋深度≥15D	抗爆压力下墙体完整
框架梁柱	外包角钢灌注胶	q345b角钢，a级结构胶	箍筋加密区间距100MM	节点抗剪强度提升≥40%
楼板	钢筋网混凝土叠合层	c35细石混凝土，Φ8钢筋	叠合层厚60MM，网格150MM	抗冲击能力满足设计要求
新旧连接	植筋	hrb400钢筋，a级植筋胶	孔深≥15D，清孔彻底	拉拔力≥钢筋屈服强度

(三) 爆炸荷载作用下的动态响应分析与防护设施设计

以0.15 MPa的设防标准作为基础，把确保建筑和防护设施在爆炸冲击波下的动态响应能够控制当作核心任务，用到ANSYS/LS-DYNA有限元软件去模拟关键部位与防护设施在爆炸荷载里的动态响应，通过建立简化模型并输入设计好的超压-时程曲线来做整体结构的响应分析，对结构整体的位移、层间变形以及关键构件（柱、梁、节点）的应力应变发展进行评估，以此去判断有没有达到“大震不倒”的性能目标并把薄弱环节找出来给

加固提供依据,局部防护设施的响应分析则是针对抗爆门、抗爆窗以及泄压设施建立了精细化模型来分析它们的动力响应,重点对抗爆门/窗的框体变形和玻璃应力分布进行模拟,验证它们的抗爆压力等级还有连接节点的有效性,分析结果显示甲级抗爆门在0.15 MPa 超压下的最大变形是远远低于规范限值的。在分析泄压设施的时候,主要对开启压力、开启时间还有泄压面积的有效性去检查,通过模拟去把布置位置和构造优化一下,确保可以快速开启,把室内超压给降低,模拟结果也证实了轻质泄压板能够在规定超压下破裂,形成了有效的泄压通道。次生碎片伤害评估分析爆炸可能引发飞散碎片的轨迹和速度,给出人员伤亡风险给评估,据此指导采用抗爆玻璃、防护膜,或者对室内布局进行优化,把次生伤害减少,防护设施的设计优化是依据动态响应分析结果开展的,比如抗爆门窗的选型要满足静态压力等级,而且连接节点要经过计算验证,保证荷载能有效传递,泄压设施的设计则需要精准计算泄压面积,并且采用脆性连接或专用五金件,让其能准确动作,所有设计都以模拟结果为导向,从而保证性能可靠。

（四）关键安全系统的抗爆适应性分析

为确保爆炸发生之后建筑还能维持核心安全功能,需要对关键机电系统开展抗爆适应性分析与升级,消防系统要分析冲击波对管道、喷头以及消火栓箱所产生的影响,通过采用抗爆型设备、防震支撑并且加强箱体,以此确保管路在结构变形的情况下依旧保持完整,让关键设备在爆炸之后能够正常启动。应急照明与疏散指示系统要保证在主电中断的时候不受损坏且持续工作,设备必须具备抗震防爆性能,线路敷设应该采取防破坏保护措施。应急通信与报警系统必须保障在紧急状态下可以可靠运行,其主机与关键线路应当设置冗余保护与物理防护。通风与排烟系统需要分析爆炸对风管以及风机造成的影响,穿越抗爆墙的风管要安装抗爆防火阀,使其能够在冲击波或者高温的情况下自动关闭以防止爆燃蔓延,系统设计还需要考虑爆炸之后可能出现的堵塞或者损坏情况,确保维持基本的通风安全,此部分改造的核心之处在于,基于爆炸可能造成的破坏模式进行分析,对现有系统开展针对性强化或者将其更换为抗爆型产品,确保其在设计爆炸事件之后仍能执行预设的安全功能。

（五）改造施工过程与抗爆性能保障的关键控制

针对高海拔恶劣环境以及抗爆改造的特殊性,需要实施专项控制措施。在材料与工艺的适应性控制方面,必须针对高海拔低温、干燥环境去调整并验证混凝土配合比、植筋胶固化条件以及焊接工艺参数,例如采用低温适应性材料并且延长养护时间,以此确保加固材料性能能够满足设计要求。关键工序的质量控制包含结构加固、防护设施安装以及密封封堵等方面。结构加固工序必须严格控制植筋的钻孔深度、清孔质量与注胶饱满度,并且进行现场拉拔试验来验证锚固力。防护设施安装必须确保抗爆门窗与结构连接节点的施工质量,从而保证荷载能够有效传递。泄压设施的安装必须保证其活动部件灵活且脆弱连接部位符合设计。所有穿越抗爆墙/板的管线孔洞必须进行专业抗爆防火封堵,防止冲击波与火焰窜入。在检验与测试环节,要对关键抗爆构件进

行抽样气密性或压力测试,施工完成后必须通过专业检测手段验证各系统功能。整个施工过程的质量控制,最终目标是确保每一道工序都符合抗爆设计的性能要求,而不是仅满足外观或常规标准。

三、EPC 模式下的全过程管理措施

（一）设计阶段的管理

建立涵盖建筑结构工艺安全及机电的多专业协同设计平台,运用 BIM 技术开展碰撞检查与管线综合工作以确保抗爆设计在各专业间协调一致,组织相关专家针对初步设计进行抗爆专项评审并围绕加固节点泄压计算与材料选型等方面优化,在施工图阶段实施严格内部审核流程保证施工图纸具备可实际施工特性。

（二）采购与供应链管理

对核心抗爆产品供应商,要求具备国家级抗爆性能检测报告以及化工领域相关资质,且进行工厂考察和技术协议签订。依据施工网络计划制定详细的物资采购与供应计划明确各类材料采购周期提前锁定产能并签订供货合同,针对青海偏远地区规划可靠运输路线以此规避雨季与冬季极端天气,物资到场后由质量部、监理及施工方联合验收核查质量证明文件并对关键材料进行见证取样送检合格后方可入库使用。

（三）施工阶段的组织与管控

施工部署采用“分区分段、滚动施工”策略,将厂区8栋建筑划分为 A、B、C 三个施工区并设置硬质围挡隔离。按序先进行 A 区非核心区域改造,验收恢复后再依次推进 B、C 区施工,以最小化对生产办公的影响。严格执行动火与高危作业管理,所有动火作业需办理二级动火票,划定警戒区域并配备监火人及灭火器材;高空及吊装作业需编制专项方案并进行交底。过程控制设立关键质量控制点与停工待检点,涵盖植筋孔清洁度、抗爆门焊接质量及接地电阻测试等环节,检验合格后方可进入下道工序;每日开展安全巡检,重点检查临时用电、脚手架及个人防护用品使用情况。应用移动巡检 APP 实时记录并跟踪质量问题整改,同时利用视频监控系统对重点施工区域进行远程可视化监管。

四、应用效果评估

本项目通过系统性关键技术应用与严格 EPC 过程管理,取得显著成效。安全性能方面,经第三方机构采用计算分析与局部现场试验验证,所有建筑均满足 ≥ 0.15 MPa 抗爆设防要求,结构安全储备大幅提升。施工影响通过科学分区组织实现最小化,确保了中控室等核心建筑在改造期间的安全与基本可用,保障了厂区生产连续稳定。工程质量受全过程严格管控,抗爆加固、密封、接地等隐蔽工程及关键节点一次验收合格率达 100%。工期与成本通过高效采购供应链与精细化施工部署得以控制,克服高海拔与长途运输等不利因素,项目按期完工且总投资未超出预算。

五、结语

本文通过青海盐湖镁业有限公司抗爆改造项目的实践，系统总结了高海拔严酷环境下化工建筑抗爆改造的关键技术与管理措施。项目通过科学的风险评估、针对性的结构加固与防护设施安

装，以及 EPC 全过程精细化管理，显著提升了建筑物的抗爆安全性能，实现了施工期间生产运行的有效保障。该经验可为类似环境条件下的化工建筑抗爆改造提供技术参考与管理借鉴，对推动化工行业本质安全建设具有积极意义。

参考文献

- [1] 刘迪,王雅真,邝辰,等. 变压吸附氢气纯化装置爆炸事故定量风险研究 [J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(1): 149-157.
- [2] 张建萍. 石油化工企业抗爆控制室结构设计技术 [J]. Electronic Communication&Computer Science, 2025, 7(10).
- [3] 李振华,赵松林,陈林伟,等. 石油化工建筑物抗爆设计分析 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(9): 114-117.
- [4] 黄可奇. 多自由度抗爆建筑结构动力弹塑性分析设计 [J]. 2025(6): 017-023.
- [5] 吴广强,付路路. 某煤化工控制室抗爆改造技术及施工风险分析 [J]. 化工安全与环境, 2023, 36(3): 41-44.

建筑工程混凝土施工质量通病及防治研究

张振洋, 王铭杨

中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013

DOI:10.61369/ERA.2026060005

摘 要 : 混凝土浇筑过程中经常会出现各种各样的通病如裂缝、蜂窝麻面、强度不高还有渗漏等问题严重影响着建筑物的安全性和使用寿命, 这些问题的发生主要是由于材料的质量、配合比的设计、施工的过程以及外界环境等多方面因素相互作用造成的。通过总结常见的通病产生的原因及机理, 有针对性地提出具体的防治技术方法, 并结合具体工程实例的数据加以比较验证。结论证明采取一系列综合性的防治措施可以有效地减少这些质量通病的发生几率从而使整个建筑物更加稳固安全可靠。

关 键 词 : 混凝土施工; 质量通病; 裂缝控制; 施工工艺; 耐久性

Research on Common Defects and Prevention of Concrete Construction Quality in Construction Engineering

Zhang Zhenyang, Wang Mingyang

China Building Technique Group Co., Ltd., Beijing 100013

Abstract : various common problems such as cracks, honeycomb and pitted surface, low strength and leakage often occur in the process of concrete pouring, which seriously affect the safety, reliability and service life of buildings. These problems are mainly caused by the interaction of material quality, mix design, construction process and external environment. By summarizing the causes and mechanisms of common diseases, specific prevention and control technology methods are put forward, and compared and verified with the data of specific engineering examples. The conclusion shows that taking a series of comprehensive prevention and control measures can effectively reduce the incidence of these common quality problems, so as to make the whole building more stable, safe and reliable.

Keywords : concrete construction; common quality problems; crack control; construction technology; durability

引言

混凝土是建筑施工当中使用最多的一种结构材料, 它的质量好坏直接影响整个建筑安全性和耐久性以及建筑物的使用年限, 在工程施工中由于混凝土裂缝、蜂窝麻面、强度不够、渗水现象仍然存在较多, 在很大程度上制约着工程质量。这些问题的发生大多是因为原材料不稳定、施工工序管理不严、外界自然因素的影响造成的, 比较复杂并且不易察觉。因此有必要对这些现象进行分类归纳, 找出其中产生的原因及其预防措施并加以总结, 从而提高混凝土施工过程中的质量管理能力。

(一) 混凝土施工常见质量通病类型

1. 裂缝问题

混凝土裂缝是建筑施工中最普遍又最具有代表性的一类质量问题, 主要有收缩裂缝、温度裂缝以及应力裂缝三大类。收缩裂缝是因为混凝土在硬化过程中由于水分蒸发而引起的体积变形, 如果早期浇水养护不够充分或者水灰比过大都会引起收缩裂缝; 温度裂缝主要是因为水泥水化反应产生的水化热作用下以及外界温度的变化使得混凝土内外部之间产生的温差造成的内应力引起的; 应力裂缝一般是因为混凝土受力分布不均匀或者是设计、施工不当等原因造成的。混凝土一旦产生裂缝就会使混凝土结构的整体性能遭到破坏并且作为渗漏水的一种通道使得钢筋受到腐蚀, 降低混凝土的抗渗性和耐久度等性能, 严重情况下会危及到整个建筑物的安全。

2. 表面缺陷问题

外观瑕疵以蜂窝、麻面、孔洞等形式为主, 大多是因为施工过程管控不到位造成的。蜂窝一般是由于振捣不够或者混凝土拌合物离析造成骨料集中、砂浆不足; 麻面一般是由于模板表面光洁度差、脱膜剂选用不合理或者振捣不均所致; 而孔洞主要是由钢筋密集、混凝土坍落度过低或者间歇式浇筑造成的。此类问题虽然大多外在地体现在表面上, 但是本质上是说明了混凝土内部填充不够充实, 使得

整体强度降低以及耐久程度变差，而且还会加大后期修补工作量以及结构危险程度。

3. 强度与密实性不足

混凝土强度偏低以及密实度差是造成混凝土结构承载力不足的主要原因，往往表现在实际强度小于设计标准，构件出现局部疏松或者有较大孔洞。产生这些现象的原因主要是配合比设置不当、水灰比例失控、集料颗粒细度差、振捣、养生不充分等。内部孔隙增大破坏了混凝土整体的连贯性，在一定程度上阻碍着混凝土内部应力扩散通道，降低了其承载力和抗压强度。另外高含量的孔隙还加强了水份及腐蚀物质进入的速度，加快了钢筋锈蚀和耐久性的下降，使得建筑物使用寿命大打折扣^[2]。

一、质量通病成因分析

（一）材料因素

材料方面是混凝土施工质量最根本的因素，而水灰比是关键所在。水灰比过大，则会使混凝土强度低、收缩大，极易出现裂缝、渗漏现象；水灰比过小，则会使混凝土流动性差、浇筑难、不易振捣密实等。粗细骨料级配不良或含泥量偏高会影响骨料与水泥胶体之间相互嵌合性能，使混凝土整体结构欠佳，产生强度不足和外观瑕疵等问题。外加剂用量不当或者相容性差，容易发生混凝土离析、泌水或是凝结时长异常等情况，也会加重质量问题的发生率。所以，材料的选择以及配合比的设计是否合理对混凝土性能稳定有着决定作用。

（二）施工工艺因素

施工工艺控制是混凝土质量形成的重要的一个环节，其中振捣工序对于结构的密实程度有着直接影响。振捣不够会使混凝土中存在较多的空洞，出现蜂窝麻面、孔洞等问题；振捣过度会引起混凝土离析现象的发生，出现骨料沉落，砂浆上浮。分层浇筑不合理，例如分层过厚或者间隔时间过长会产生施工冷缝影响结构的整体性。养护不到位也是很重要的原因，如果没有保湿或者是保温养护的话会导致混凝土表面失去水分迅速干燥产生干缩开裂，或者强度达不到要求。从总体来说，在施工过程中如果缺少有效的规范以及控制，很容易放大材料的问题从而导致各种问题并发。

（三）环境与管理因素

环境作用对混凝土的影响很大，特别是温度和湿度的变化，在高温的情况下，水分的蒸发速度加快，造成混凝土出现塑性收缩开裂现象，在低温状态下，水泥水化反应降低甚至结冰，不利于强度的增长而且造成混凝土受力破坏。而日夜气温差异大的情况下，内部产生的温度应力增大，也有可能产生温度裂缝，另外，管理水平也很重要，现场管理混乱会造成工序间衔接不好以及施工技术不到位等问题的发生，从而导致工程质量隐患，同时质量检查力度小的话，一些不合格的材料或者不按规程施工的问题得不到及时发现进而积累下来并最终影响到整个工程质量。环境及管理方面的作用都有一定的隐蔽性和长期性，两者相互叠加的效果也会加大混凝土施工质量问题频发的概率^[4]。图1为混凝土工程质量通病类别分布以及其对结构性能影响的关系图，清楚各问题从现象到后果之间的传导过程，体现了工程质量对于结构耐久性和安全性综合影响的内在规律。



图1 混凝土施工质量通病类型及影响关系示意图

二、混凝土质量通病防治技术

（一）材料与配合比优化

材料选择和配合比的合理也是防治混凝土质量问题的基础步骤，必须从根源处抓起才能保证混凝土质量稳定性。水灰比一定要按照设计以及施工要求严格把控，在保证工作的同时尽可能减少水灰比，从而提升强度并避免混凝土出现收缩开裂等问题。同时也要注意施工可操作性和泵送性能。在骨料的选择上要注重粗细骨料粒径比例关系使得粗细颗粒相互搭配得当，进而提高其整体密实度，降低内部孔隙率和分层离析情况的发生概率。而对于外加剂的应用来说，应针对相应水泥特性以及外界环境来选择使用合适的减水剂或者缓凝剂或者是掺杂粉煤灰等掺合物，并且准确计量用量，防止其不适配或使用过多而导致混凝土出现泌水离析等状况发生。另外也要加强对原材料进场检验以及试配试验，保证各项性能指标平稳受控。通过对体系进行材料调整后能够明显提高混凝土的抗裂能力和耐久性能对工程质量起到良好的保障作用。^[5]

（二）施工工艺控制措施

施工工艺标准化是保证混凝土工程质量的重要措施之一，在此基础上要尤其注重对混凝土浇筑和平仓振捣的工作质量。利用分层分块浇筑法可以更好地把控各层的厚度以及浇筑间歇的时间，从而有效地防止出现冷缝问题的发生并且提高了整个结构的整体性，同时提高新旧混凝土之间连接的质量。在振捣时，则需要坚持“快插慢拔，均匀布点”这一原则来进行，使混凝土密实而不空洞，同时也避免了出现漏振或者过振的情况出现。模板及钢筋的安装质量也决定了混凝土成品的效果，因此需要做到模板对接无缝隙，支撑牢固等来防止产生漏浆、错位等情况，同时对于钢筋也要适当的进行排列设置，使其能够顺利的被混凝土填充进去。另外应该加强对施工中的技术交底及现场监管，规范施工程序，降低由于人工作业所造成的失误，从施工的一些重要工序

进行标准化管理，可以有效的降低出现蜂窝，孔洞等问题的发生，提高整个工程的质量水准。

（三）养护与环境控制

合理的维护及环境调控是对混凝土早期开裂以及强度不足的有效预防措施之一，在混凝土入模后要及时地做好覆盖、浇水养护工作，使混凝土表面处于湿润状态，减少失水的速度，加快水化过程的完成，进而加快强度的增长速度、提高其致密度。根据不同的季节选择不同的温度调节手段：炎热期间可利用遮挡太阳、喷淋降温 and 遮盖的方式对混凝土表面进行冷却以防温差过大引起裂缝；寒冷条件下要采取保温措施，比如用保温覆盖物或者是加温等方法来避免混凝土遭受到冻结损害强度下降等问题。此外合理组织施工时间，避免恶劣天气发生也有利于降低温度应力和环境变化带来的负面影响。另外还要加强对养护环节的跟踪管理和落实养护的时间及手段，通过对养护制度及环境调节方式的改进可以大大增强混凝土结构耐久性和持久性^[9]。

三、工程实例分析与效果评价

（一）工程概况

选择某地一幢18层钢筋混凝土框架结构住宅楼进行实例研究分析，总面积约为2.6万平方米，主体结构混凝土设计强度等级是C30，局部剪力墙、及梁柱节点使用C35混凝土。工程工期是在2024年4月到2025年1月份，施工过程中遇到夏季酷暑以及秋天早晚温度悬殊很大的气候条件，从而使得混凝土早起性能受到了一定的改变。在原有施工阶段有过不同程度的开裂以及表象上的瑕疵，尤其是楼板早期的收缩性的裂缝较多，部分构件有烂浆和麻面的现象，在一定程度上降低了建筑的整体性外观效果以及局部的耐久程度。针对存在的质量问题，在以后的施工过程中对配合比、施工方法和养护手段进行全面改进，在整个施工过程实施全程监控进行及时调治，使得工程质量管理水平得到了提高。

（二）质量问题统计与数据分析

通过对该项目工程在施工前后的现场取样检查记录以及第三方试验报告（数据来源为项目的监理月报和现场实测汇总）进行统计分析得出主要质量通病情况如下所示：检测通过回弹法，钻芯法两种方法结合使用，抽查构件共计120件，包括梁，板，柱等为主要承重结构部分，有较强的代表性和可信度。经检测，在没有任何加固处理的情况下，开裂发生率为17.8%，存在蜂窝麻面现象的比例达到了11.6%，有局部强度不足的现象占了全部的8.9%左右。通过优化之后，各个参数都有很大的改观，开裂的情况减少到5.4%，蜂窝麻面减少为3.2%，强度不合格的比例不超过

1.5%，并且混凝土的平均抗压强度从原来的31.2MPa增长到现在的34.6MPa，整体的质量也比较稳定，而且检测结果之间的差异性也明显变小了，可见混凝土的质量比较均匀，施工控制手段有较好的实际应用意义以及推广意义^[7]。如下表1所示：

表1 施工前后混凝土质量问题对比数据

（数据来源：现场检测记录与监理统计）

指标项目	优化前数据	优化后数据
裂缝发生率 (%)	17.8	5.4
蜂窝麻面率 (%)	11.6	3.2
强度不合格率 (%)	8.9	1.5
平均抗压强度 (MPa)	31.2	34.6

比较结果显示，采取一系列系统的工艺改进方案之后，混凝土工程质量有了很大改善，各种质量通病的发生率大幅度减少，结构安全性和可靠性也得到了很好的保证。

四、防治措施效果评价

经过对整个工程建设过程中的技术改进以及质量管理，工程中出现了大量的混凝土质量问题得以解决。对于裂缝问题，在使用了低水灰比以及加大养护力度的前提下，楼板的裂缝宽度均控制在0.2mm以下，符合规定的标准，裂缝的数量也大大减少；对于外观质量，在改善了振捣技术和提升了模板管理之后，混凝土的蜂窝麻面现象明显减弱，而且构件表面更加扎实细致且美观大方；而对于结构性能问题，通过钻孔检测发现混凝土强度的波动减小，标准差从原来的4.1MPa降到2.3MPa，这就表明了其整体的质量更加均衡稳定。并且在现场的抽样合格率也有了很大的上升幅度，后期修复返工的现象大幅度降低。综上所述，从材料、施工工艺、养护等因素的整体统筹管理，对工程来说非常适用且稳定可靠，可以给类似工程项目起到很好的借鉴作用以及工程上的支持^[8]。

五、结语

混凝土建筑施工中裂缝、孔洞麻面等问题较为普遍且严重程度各异，造成这些问题的因素有原材料质量、浇筑方式以及外界天气环境等多种原因，只有加强配合比的设计、严格控制施工流程并加大维护力度才能减少这些不良情况的发生。通过对实际工程项目的数据进行分析，可以看出相应的处理方法在减少缺陷出现几率的同时也提高了构件强度和延长了使用寿命。所以对整个项目的质量管理加以重视有助于提高整体工程的安全可靠性及其长久耐用性。

参考文献

[1] 黄爱雄. 混凝土建筑工程技术管理及施工质量研究 [J]. 价值工程, 2025, 44(36): 147-149.
[2] 林敏. 建筑工程大体积辐射混凝土施工质量控制 [J]. 石材, 2022, (12): 90-93.
[3] 陈立武. 建筑工程中混凝土结构防渗漏施工质量控制 [J]. 居业, 2025, (10): 70-72.
[4] 叶茂. 建筑工程施工过程中混凝土质量通病及预防措施研究 [J]. 大众标准化, 2023, (09): 31-33.
[5] 张通通. 浅析房屋建筑施工中混凝土质量通病及其防治措施 [J]. 房地产世界, 2023, (10): 119-121.
[6] 朱炳喜, 庄雪飞. 水工建筑物建设质量通病防治手册 [M]. 中国水利水电出版社: 202306: 325.
[7] 王定慧. 房建工程中混凝土施工质量通病及防治技术研究 [J]. 房地产世界, 2024, (02): 110-112.
[8] 曾镇华. 建筑工程施工管理中混凝土质量通病与预防措施 [J]. 中国水泥, 2025, (12): 97-99.

建筑工程施工进度管理方法分析

吕鹏辉

河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ERA.2026060006

摘 要 : 针对建筑工程施工进度控制重要节点, 全面总结进度管理的主要制约因素以及突出问题, 总结出计划制定、过程管控、信息系统运用等手段途径。注重动态控制贯穿始终的思想理念, 做到及时发现问题并加以处理; 利用关键线路法、合理调配人力物力、及时传递信息等方式, 使整个项目处于不断改进的状态中。依靠事先预防措施以及多部门互相配合来增强进度实施的可靠性与可管性, 使得工期、造价、质量三方面的目标相互匹配, 进而加强施工组织管理水平和项目实施速度。

关 键 词 : 施工进度管理; 动态控制; 资源优化; 信息化应用; 风险预控

Analysis of Construction Project Construction Schedule Management Methods

Lv Penghui

Hebei Construction Group Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000

Abstract : in view of the important nodes of construction progress control of construction projects, this paper comprehensively summarizes the main constraints and prominent problems of progress management, and summarizes the means and ways of plan formulation, process control, information system application and so on. Pay attention to the idea of dynamic control throughout, so as to find and deal with problems in time; By using the critical path method, reasonably allocating human and material resources, and timely transmitting information, the whole project is in a state of continuous improvement. Relying on preventive measures in advance and the cooperation of multiple departments to enhance the reliability and manageability of schedule implementation, so that the objectives of construction period, cost and quality match each other, so as to strengthen the level of construction organization management and the speed of project implementation.

Keywords : construction schedule management; dynamic control; resource optimization; information application; risk precontrol

引言

建筑工程项目施工进度管理直接影响到项目工期目标实现和资源利用率高低, 由于施工现场情况复杂、多方联合作业, 进度把控有着许多不确定性因素的存在, 容易出现工期滞后, 增加项目成本的现象, 过去依靠经验的方法已经无法适应精确化的管理要求了, 在信息技术以及动态化思维的影响下, 进度管理慢慢发展到大数据管理以及全周期管理阶段, 加大进度计划制定、进程跟踪以及预防风险力度能有效提高建设单位的管理水平, 达到工期、造价、质量三者之间的统筹兼顾。

一、施工进度管理的基本内涵与影响因素

(一) 施工进度管理的概念与目标

施工进度管理是指对于工程建设项目按照既定时间内完成全部施工任务的有序过程, 其核心在于实现时间安排、人力物力资源配置与施工内容之间的协调统一。在具体实施过程中, 需要以总体进度计划为依据, 对分部分项工程进行科学划分, 并通过对各阶段施工活动进行持续跟踪、动态监控及必要调整, 确保阶段性目标顺利实现。进度管理并非单纯追求工期缩短, 而是强调工

期目标与工程质量、安全管理之间的平衡关系。若盲目压缩工期, 易引发质量缺陷与安全隐患, 因此需统筹多目标协调, 通过合理组织与资源优化配置, 提高施工效率与管理水平, 确保工程在安全、优质的前提下按期完成。^[1]

(二) 施工进度的主要影响因素

工程进度受到多种因素的综合影响, 其中最关键的是资源配置问题, 包括人力、物力与财力等要素, 任何一方面出现不足或配置不合理, 都会直接制约施工进度。此外, 设计变更及外部环境因素同样具有重要影响, 如设计调整、气候变化、政策要求及

施工场地条件变化等，均可能打乱既定施工安排，增加不确定性。同时，项目管理水平与组织调度能力也是决定进度执行效果的重要因素，不同单位在沟通协调、资源统筹及决策效率方面存在差异，从而影响整体进度推进。多种因素相互叠加，使施工进度管理呈现出复杂性与动态性特征，因此需运用系统化管理方法与动态调整机制加以应对^[2]。

（三）进度管理中常见问题分析

在具体工程施工过程中，工期管理仍面临诸多问题。一方面，施工任务安排缺乏科学性，未充分考虑现场环境条件、资源约束及施工工序衔接等因素，导致制定的进度计划脱离实际，难以有效指导施工生产；另一方面，信息传递不畅及反馈机制不完善，使施工现场的实际进度与问题无法及时、准确地传递至管理层，影响决策的及时性针对性，进而导致问题逐步积累并扩大。此外，多方协同不足也是制约进度管理的重要因素，各参建单位之间沟通不畅、职责界定不清，易出现推诿责任、重复作业及返工现象，严重影响施工效率。加之缺乏统一协调机制与技术支撑，进一步加剧管理难度。因此，有必要通过优化管理流程、强化信息化手段应用及提升协同管理能力，全面提升工期管理水平与执行效果。

二、施工进度计划编制方法

（一）网络计划技术的应用

网络计划技术是施工进度计划编制的重要手段。优点是可以明确展示出各个施工过程的组织关系，给进度布置提供依据。关键线路法通过对建设工作任务进行排序，工期长度以及相互作用进行判断，找出了影响整个工期长短的主要工作与关键线路，使得管理者能抓住主要矛盾所在，突出主要问题，增强计划的针对性与有效性，在此基础上根据工期优化的要求，适当对一些非关键工作进行调整，缩短某些关键工作的工期，节约不必要的时间损耗，达到工程整体的有效统筹规划。针对工期紧、难度大的工程项目，网络图法不仅能帮助我们科学地制定好施工流程外，在以后的工作中也方便对整个工作的进展情况进行监督和检查以及调整，使整个计划更加具有可行性及可控性^[3]。

（二）横道图与里程碑计划

横道图以及里程碑计划是施工进度编制中经常使用并且较为实用的一种表示方法。横道图能够以时间为横轴、施工工序为主轴，清晰地呈现各种工作什么时候进行开工、持续多久以及什么时候完工的情况，方便管理者把握项目总体进度和阶段性进度情况，适合于工程项目的初始阶段进度布置以及施工现场日常管理；这种表现形式简单易懂，能够被各层次管理者所理解并运用，从而提升计划可視度。而里程碑计划则是注重对于主要节点以及重要里程碑阶段的把控，在基础施工完毕、主体结构封顶、设备安装完成、竣工验收等时间节点上加以界定，明确出各个阶段的目标及职责划分，使得进度控制由全面统筹转变为突出管控。两者联合运用，即可产生“全景可见、重点醒目”的项目安排模式，在提升方案描述精度的同时强化对其重要环节的制约

力，作为下一步建设安排及审查评定的标准。

（三）资源约束下的计划优化

施工进度计划的制定既要符合时间要求又要顾及现有资源限制情况，使制定出来的施工进度计划能够切实可行。而在工程建设中人员、物资、机械、资金等诸多资源都有一定的时效性限制，如果忽略掉自身资源调配实力，会导致计划进度超前但无法顺利实施的情况发生。因此编制进度计划就需要运用到负荷分配的方法来合理分配各阶段所需资源量，使高峰期资源充裕而不过剩，低谷期资源充足而不浪费，提高资源利用率，另外还需结合工程的重点部位以及现场实际情况做好资源配置工作，把有限的资源用在最需要的地方上，保证整个项目的总工期不受影响。对于众多目的而言，在对进度进行调整时，除了要满足工期的需求之外也要考虑到经济性和质量和安全问题，在综合比较各个目的之间的联系之后，确定更有效的调整措施，以达到在资源有限的情况下仍具有合理性，灵活性及可行性的进度方案的目标^[4]。

三、施工进度控制与动态管理方法

图1反映施工进度由计划制定一直到实施监督检查以及偏差分析再到动态调整的一个闭环管理体系，是全面把控不断改进的过程。

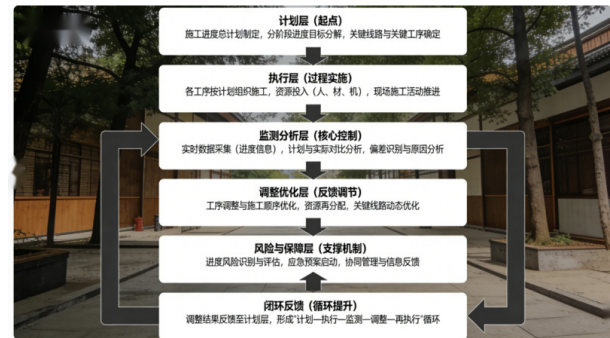


图1施工进度动态控制闭环管理示意图

（一）进度监测与偏差分析

施工进度管理的依据在于对实际施工进展的持续监控与系统分析，在完善数据采集体系的基础上，结合现场观测记录、信息管理系统及各类信息化设备，对工程进度实施全过程、全方位监督，并与既定进度目标进行对比分析，从而掌握各阶段任务完成情况以及整体发展趋势。在分析过程中，应重点关注关键工序及关键路径的推进情况，一旦出现进度滞后或提前，应及时追溯偏差来源，评估其影响范围与程度。同时，还需深入分析产生偏差的具体原因，如人员配置不足、组织管理不当或外部环境变化等，以便制定针对性的调整措施。通过科学的进度监控与偏差分析，不仅能够提高管理的前瞻性与精准性，还能有效避免问题累积，确保施工过程始终处于可控状态，并提升整体项目执行效率与管理水平。

（二）动态调整与纠偏措施

工程施工中，受到周边环境以及各种不确定性的影响，原有的进度计划也会出现变动，对于监控中出现的问题要进行及时纠

正来保证工期总目标实现不受干扰。具体办法是对施工工艺进行适当的改动,通过对工作的先后顺序或者加快平行作业的方式使施工速度提升,另外还可以重新分配资源,将人员、机械、重要物资集中到进度落后的节点上,加强主要控制,也可以调整关键路线,重新计算工序时间及逻辑关系,找出新的关键路线来达到整个工程工期再调整的目的。灵活调整注重的是及时性和灵活性,它是计划与实施之间的桥梁,在提高进度管理的时效性及管理水平上有一定的作用^[5]。

（三）风险管理 with 应急机制

工程进度管理方面也存在着很多不确定的风险,比如天气状况恶劣、原材料短缺、图纸改动以及意外事故的发生等等都会影响到工时进度,所以在进度管理过程中一定要引入系统的风险管理体系,找出所有可能导致进度延误的风险点并对之加以分析,同时对于各个风险发生的可能性和影响大小采取相应的预防手段,在此基础上还要完善应急预案系统,确定各种情形下如何处理以及谁来负责等,这样一旦有意外发生的时候就可以马上启动应急方案来降低进度延误的程度。而且,增强信息交流及联合作业,提升各方应急处置水平及联动效能,从而强化工期管控的弹性和牢靠度,保证工程进展顺利进行^[6]。

四、信息化技术在进度管理中的应用

（一）BIM 技术在进度管理中的应用

BIM 技术应用于工程施工进度管理有着很明显的可视化以及协作上的优势,在三维建模的基础上加入时间因素,把整个工程的施工过程进行直观、动态地呈现出来,让各个施工时期的具体安排都一目了然、掌握自如。利用 BIM 的可视化进度模拟,可以提前预知到整个工程施工过程当中的重要节点和可能出现的问题,对项目的先后顺序以及资源进行合理分配,使得进度计划更具有可行性、合理性,也便于后期施工中的调整;BIM 平台上有多个专业的联合应用,可以在建筑设计以及结构施工过程中互相配合起来,运用 BIM 平台中的碰撞检查功能实时掌握各专业之间是否会发生相互干扰的问题,从而降低错误率和延误的可能性。这不仅增强了信息的透明化程度,而且提升了进度管控的提前量和精度。

（二）项目管理信息系统（PMIS）

项目管理信息系统在建设工程项目的进度管控工作方面有着信息整理汇总以及资源共享的功能。建设一个统一的信息系统,把工程项目的进度、造价、质量和资源等相关数据归档起来,在此基础上可以利用多个方面的信息来进行综合分析。信息系统可以做到工程施工进度动态更新以及全程监控,以便管理者随时了解整个项目的实施状况并依据信息进行判断分析;并且 PMIS 可以克服以往的信息上传下达所面临的的时间障碍和物理障碍,加快各个参与方之间交流传达的速度,避免出现拖延和差错情况的发生。信息化管理系统标准化的数据录入处理方式,让进度管理更加有序化的同时也使得整个项目管理更具有整体性和执行力^[7]。

（三）智能化与数字化发展趋势

伴随着信息化时代的到来,项目进度管理正在向着更智能、更为科学的发展方向推进之中,在大数据的支持下通过对以往工程项目的数据进行分析研究来判断出未来工程项目的的发展趋势以及可能存在的风险情况从而作为制定以及调整工期计划的一个参考依据;与此同时 AI 及优化算法的应用也使得项目的资源配置以及进度安排更加准确合理,借助智慧化调度平台可以自动得出最优组合方式并且提升利用率降低主观因素的干扰程度;另外像物联网及自动化的集成也使工地机械设备的工作状况及施工进度信息得以及时获取回传从而提升了进度管控的时效性和反应速度等等。信息技术及智能化的应用给项目工程进度管理带来了更快速、便捷的发展方式^[8]。

五、结语

进度控制贯穿工程建设整个过程,是对工程建设进度目标以及资源合理配置的重要保障。制定合理的进度计划,加强对项目进度的过程监督考核及适时调整措施,利用现代化手段进行进度控制,能够提高进度控制的准确度及及时性;提高跨部门间协作水平,提前做好风险防范,可以减少不确定条件给项目进度带来的不利影响。总的来说,建立基于计划指导、动态管理和技术辅助相结合的管理模式对于推进项目的高质量高效率发展有积极作用。

参考文献:

[1] 黄金. 建筑工程施工造价的动态管理控制方法分析 [J]. 中国住宅设施, 2023, (11): 106-108.
[2] 王慧聪. 建筑工程施工质量进度与投资管理分析 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 新技术与新方法学术研讨会论文集. 浙江省工程咨询有限公司; , 2024: 167-169.
[3] 吴泉东. 当前建筑工程施工进度管理策略分析 [J]. 新城建科技, 2024, 33(04): 153-155.
[4] 田易牧, 于友谊. 建筑施工进度管理的重要性和控制方法分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (15): 152-154.
[5] 石乃其. 分析建筑工程施工管理的进度管理与控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (25): 42-44.
[6] 吴小亮. 建筑工程施工阶段项目进度管理的策略分析 [J]. 城市开发, 2025, (04): 111-113.
[7] 林鸿森. 建筑工程项目施工进度管理要点分析 [J]. 石材, 2025, (10): 89-91.
[8] 张伟. 建筑工程施工进度管理的优化方法与实践研究 [J]. 城市开发, 2025, (20): 103-105.

谈在房建施工管理中如何应用精细化管理研究

管雪朋

建研凯勃建设工程咨询有限公司，北京 100000

DOI:10.61369/ERA.2026060007

摘 要： 伴随着建筑业高质量发展的不断推进，房建工程施工项目日益增多、工艺越来越复杂，传统的粗放型管理模式已经不能适应对工程质量、安全、成本以及进度进行综合管理的需求了，精细化管理是解决行业发展难题、提高施工管理水平的有效途径。本文基于房建工程施工管理中存在的问题，研究精细化管理在房建工程施工中的作用及其基本原则，在此基础上从整个施工过程的角度出发，探讨精细化管理在前期策划、现场施工、成本控制、安全管理以及人员管理等方面的应用方法，避免空泛论述，总结归纳出精细化管理应用过程中存在的主要问题并提出相应的改进建议，以期能够帮助房建工程施工企业开展精细化管理工作、提高工程项目履约能力与竞争力提供有益借鉴，助力建筑行业转型升级发展。

关 键 词： 房建施工管理；精细化管理；全流程管控；应用策略

Research on the Application of Refined Management in Housing Construction Management

Guan Xuepeng

Jianyan Kaibo Construction Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100000

Abstract： With the continuous advancement of high-quality development in the construction industry, the number of housing construction projects has been increasing, and the construction techniques have become increasingly complex. The traditional extensive management model can no longer meet the comprehensive management needs for project quality, safety, cost, and schedule. Refined management is an effective way to solve industry development challenges and improve construction management levels. Based on the problems existing in housing construction management, this paper studies the role and basic principles of refined management in housing construction projects. From the perspective of the entire construction process, it explores the application methods of refined management in preliminary planning, on-site construction, cost control, safety management, and personnel management, avoiding vague discussions. It summarizes the main problems encountered during the application of refined management and proposes corresponding improvement suggestions, aiming to provide useful references for housing construction enterprises to carry out refined management work, enhance project performance capabilities and competitiveness, and support the transformation and upgrading of the construction industry.

Keywords： housing construction management; refined management; full-process control; application strategies

引言

房建施工管理是一项复杂而系统的工程，包括前期准备、实施阶段以及后期收尾等各个方面，在其中涉及到人、材、机、技等多种因素，任何一个环节出现问题都会给整个工程项目带来不利影响。随着市场竞争日趋激烈及客户对房建项目品质要求不断提高，传统的管理模式下存在职责不清、程序混乱、浪费严重等问题越来越突出，阻碍着施工单位的发展进步。精细化管理是以“精、准、细、严”为基础理念，在制定具体的目标任务后，要有一套完善的制度来约束各方的行为举止，并且落实到每一个细节上，合理安排各种资源，从而达到全面掌控整个过程的效果。所以开展关于精细化管理应用于房建施工管理的研究工作，解决其中遇到的问题，有利于提高房建施工管理水平，减少开支，保证工程质量，是建筑业转型升级发展的必由之路。

一、房建施工管理中应用精细化管理的核心内涵与价值

（一）核心内涵

房建施工管理精细化并不是简单的管理细化，而是基于房建施工行业特点以及具体工程项目实际情况，在整个工程建设过程中实施精细化管理，制定合理的管理制度、严格的作业规程、明确的责任划分等措施来对整个工程进行精确控制。它主要是针对以往粗放型管理模式下存在的“重进度、轻质量”、“重结果、轻过程”的问题而提出的，重视细节把握、流程优化和完善责任制度，使每一件事情都有标准要求、每一个环节都有规定动作、每一位员工都有明确职责，从而达到优质、安全、经济、快速的目标，建造出优质精品工程。

（二）应用价值

精细化管理应用于房建施工管理可解决传统管理模式存在的诸多问题，给施工单位带来诸多益处。从质量管理角度而言，精细化管理通过对施工工艺进行细化、加强过程检查可以有效避免出现施工质量问题，提高工程质量，减少返工次数，建设出符合行业标准以及业主要求的好工程；从成本控制的角度来说，精细化管理可以通过合理分配资源、节约材料消耗、科学制定施工顺序等方式来降低人工费、材料费、机械费等各种费用开支，增加项目利润空间；从安全管理的角度来讲，精细化管理可以对安全管理制度进一步完善、加大隐患排查力度、明确各自的安全职责从而预防安全事故的发生，保证工人生命健康及公司财产不受损失；从进度管理上讲，精细化管理可以将进度计划做细做好、做好各道工序之间的衔接工作、及时处理施工过程中遇到的各种难题从而保证工程项目按时交付使用，树立良好企业形象^[1]。

二、精细化管理在房建施工管理中的具体应用策略

（一）施工前期策划阶段的精细化管理

施工前期策划是房建项目顺利实施的前提条件，在此之前做好精细化管理工作可以为项目的开展打下坚实的基础。在工程立项之后，要组织相关人员对整个工程进行详细的勘察工作，根据该工程的功能需求以及具体的施工环境、工艺要求等来编制科学合理的施工组织设计并细化施工方案，确定施工程序、工艺标准、进度安排及资源配置等内容。在图纸会审阶段也要做到精细化管理，召集设计单位、施工单位和监理单位等相关人员共同参与审查施工图纸，找出其中存在的问题并及时反馈给设计院进行修正和完善，以免造成后期发生变更的情况而增加不必要的返工量以及成本开支^[2]。同时还要细致地做好施工预算的编制工作，依据所拟定的施工方案以及当前市场的行情准确计算出人工费、材料费、机械费等各种费用支出情况，并据此拟订详尽的成本控制措施与时间节点划分表单式文件供以后的成本控制参考使用。最后还需做好开工前的各项准备工作，包括现场布置规划、进场设备调试检测、进场物资检验等一系列工作内容，保证能够按时开工。

（二）施工现场施工阶段的精细化管理

施工现场是房建施工的重要一环，更是精细化管理的重点部位，在工艺控制上要细化各个分项工程施工工艺标准，对钢筋加工、混凝土浇筑、墙体砌筑等主要工序制定详细的作业指导书，规定其操作程序及质量标准并要求一线工人按图施工，杜绝违章作业造成工程质量事故^[3]。

在工序搭接上，细化每个工种的操作程序，确定各个工序开始与结束的时间以及相互之间的搭接点、责任人等，并制定工序交接检验制度，在前一道工序完成之后必须经过检验合格才能进行下一工序施工，防止因工序间的衔接不当造成工期拖延或者质量问题的发生。在工地布置中实施标准化管理，合理划分各施工区段、材料堆场区、办公区及生活区等功能分区，整齐堆放各种物资，做好物资的标记和保护工作，防止物资损耗及破坏；科学安排各类机械设备的位置，缩短运输距离，提升设备利用率；搞好现场卫生保洁及文明施工管理工作，降低对周围环境的影响程度。

（三）施工成本控制中的精细化管理

成本控制是房建施工管理的重要目标，在材料管理上实行精细化管理，制定合理的材料采购、验收、保管、发放制度，准确计算所需的各种材料用量，防止多买造成积压浪费；严把材料进场检验关卡，保证所购材料合格率达到标准，杜绝因材料不合格而产生的返工费用；合理安排材料发放顺序，做到有计划地发放并做好发放记录，及时掌握各种材料消耗情况，降低损耗率^[4]。

在人工管理上，明确人员安排，在施工进度以及工序要求的基础上进行合理的施工人员调配，防止过多的施工人员造成的人工浪费；对施工人员进行培训和考核，提高施工人员的技术水平及工作效率，降低由于错误操作带来的成本上升；制定合理的薪酬制度，把效率、质量、安全等因素纳入到工资中去，调动施工人员的积极性。在机械管理上，科学地规划机械设备的应用与保养，合理布置机械设备的工作任务，最大限度发挥出机械设备的作用，尽可能减少空置的时间；做好机械设备的日检和月修工作，尽早发现问题并及时处理，以达到延长其使用寿命的目的，从而节约维修费用开支^[5]。

（四）施工安全管理中的精细化管理

安全管理是房建施工管理中的重点，精细化管理可以有效的预防事故的发生，保证工程的安全进行。建立健全的安全管理制度，细化安全管理工作职责，落实到每个部门、每个人员的具体工作中去，做到人人有责、环环相扣。做好对员工的安全教育培训工作，经常性的对工人进行有关安全方面的知识以及技能的学习培训，提高工人的安全观念及自我防护的能力，防止违章作业。

实施安全隐患精细化排查制度，安排专职人员对工地进行日常巡查，针对高空作业、临时用电、深基坑施工等高风险环节的安全隐患进行全面排查并做好记录，落实责任人、整改措施及整改期限，形成闭环管理，做到及时消除隐患。同时加强安全防护设施布置，在高风险作业场所张贴醒目的安全警示标志，发放必要的个人防护装备，保障从业人员生命健康。另外建立健全安全

应急响应预案，编制详尽的安全事故应急预案，组织相关人员进行应急演练活动，提升对于突发事件的处置水平。

（五）施工人员管理中的精细化管理

施工人员是房建施工的主要力量，对施工人员进行有效管理直接关系到工程质量和进度。制定合理的人员管理制度，在人员招聘、培训、考核、奖惩等方面做到有章可循，保证施工人员的技术水平和工作效率满足工程项目要求。在人员招聘上要针对不同的工作岗位选择相应的具有相应技术和经验的工人，认真审查其资格证书，严禁无证或证件不符的人从事相关工作。

对于人员培训，制定相应的培训方案，经常性的对施工人员进行技能培训、安全教育以及管理制度的学习，提高施工人员的整体素质；对于新入场员工，进行岗前培训，使其掌握施工程序、工艺要求及安全规定后方可上岗作业。在人员考核上，建立健全合理的考核制度，明确考核标准，从施工人员的工作效率、工作质量、安全生产、遵章守纪等方面进行全面考核，考核成绩与工资发放、评选先进、提拔使用相联系，调动广大职工的积极性和创造性。同时做好对施工人员的人文关怀工作，改善施工人员的工作生活环境，使他们有家的感觉，增强团队的向心力和凝聚力，降低人员流动率。

三、房建施工管理中应用精细化管理的常见问题及优化措施

（一）常见问题

目前，一些房建施工企业在实施精细化管理时还存在一些问题制约着精细化管理的效果发挥。首先是从思想上还没有真正树立起精细化管理的理念，一部分管理者及工人依旧保持着原有的粗放管理模式的思想观念，对于精细化管理的意义理解不够到位，缺少积极主动去进行精细化管理的态度，造成精细化管理的方法手段无法落实到位；其次是制度体系不健全，一些企业缺少一套完整的精细化管理制度以及程序规定，职责分工不明晰，操作步骤不清晰，使精细化管理工作开展得杂乱无章，有疏漏之处；再次是人员素质不高，精细化管理对于管理人员以及工人自身的业务水平有着很高的要求，但是有的员工并不具备必要的管理水平和能力，不能胜任精细化管理的要求，从而影响到整

个项目的管理水平和工作效率；最后就是精细化管理与信息技术融合度较低，很多单位依然使用传统方法来进行管理而忽视了信息化手段的应用来提高精准控制的能力，在一定程度上降低了工作效率并且不利于对整个工程全过程的有效把控以及及时调整。

（二）优化措施

对于以上的问题，需要有针对性的改进措施来促进精细化管理在房建施工管理中的有效实施。第一是加强精细化管理理念宣贯，在公司内部开展各种形式的学习、会议以及宣传等活动让所有管理人员及工人了解精细化管理的意义、主要内容及其重要性，改变传统的管理模式，提高全体员工对精细化管理的认识并积极参与到精细化管理工作中去。第二是健全精细化管理制度体系，根据企业的具体情况和项目的实际需求建立一套完整的精细化管理制度和程序，界定各个部门以及每个职位的责任分工，制定合理的操作规程，做到“有章可循、有据可依、有人负责、有奖惩”，保证精细化管理工作顺利进行。第三是提高员工技术水平，加强对管理人员和技术工人的教育，定期举办精细化管理、技术能力、安全生产等相关内容的学习活动，请相关领域的专家来进行讲座，以期达到提高大家管理水平和技术水平的目的从而满足精细化管理的要求。第四是推进精细化管理与信息技术相结合，在此基础上构建一个基于信息化手段的房建工程施工精细化管理系统，可以对工程进度、质量、费用、安全等方面进行全面监督和及时调控，使工作更高效、精确地完成，进一步提升精细化管理水平。

四、结论

精细化管理是一种科学有效的管理模式，在房建施工管理中有很大的应用意义，可以解决传统管理模式的问题，提高施工管理水平、保证工程质量、节约管理费用、预防事故的发生。房建施工单位实施精细化管理要以全员参与、全过程控制、责权利一致、不断改进为原则，把精细化的理念融入到整个工程的建设当中去，重视好开工前的规划部署工作、现场施工作业过程中的管理工作、成本核算以及安全管理与人员管理工作等方面精细化管理，对于出现的问题要及时进行整改完善制度体系、培养人才、促进信息化的应用，使精细化管理切实落实到位并取得良好效果。

参考文献

[1] 唐韬. 精细化管理在房建工程施工管理中的应用 [J]. 散装水泥, 2026, (02): 208-210.
[2] 王延强. 浅谈在房建施工管理中如何应用精细化管理研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2026, (03): 46-48.
[3] 张春杰, 李绍富. 精细化管理在房建工程施工管理中的应用 [J]. 智慧中国, 2025, (02): 30-31.
[4] 高登. 精细化管理在房建工程施工管理中的应用研究 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47 (04): 75-76.
[5] 张荣水. 精细化管理在房建工程施工管理中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (14): 28-30.

绿色建筑背景下建筑工程施工技术应用研究

王伟伟, 申鑫恒

中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013

DOI:10.61369/ERA.2026060009

摘 要 : 绿色建筑理念不断发展, 在建筑工程施工过程中越来越强调节能节水、减排降噪、合理使用资源等。工程施工期间采用节能设施、绿色建材、防尘消音降噪措施、废物分类回收利用以及信息化管理系统等, 能很好地提高施工科学技术水平, 节约能源, 减少环境污染程度, 改善施工组织及现场管理, 这些措施不但可以保证工程质量和施工安全, 还可以节省开支, 节省材料, 增加经济效益, 推动着建筑业朝着低碳经济、节能环保型社会持续前进。

关 键 词 : 绿色建筑; 建筑工程; 施工技术; 节能环保; 可持续发展

Research on Construction Technology Application in Building Engineering under the Background of Green Building

Wang Weiwei, Shen Xinheng

China Building Technique Group Co., Ltd., Beijing 100013

Abstract : The concept of green building is constantly developing, with increasing emphasis on energy and water conservation, emission reduction and noise reduction, and rational use of resources in the construction process of building projects. During the construction period, the use of energy-saving facilities, green building materials, dust and noise reduction measures, waste classification and recycling, and information management systems can effectively improve the level of construction science and technology, save energy, reduce environmental pollution, improve construction organization and on-site management. These measures not only ensure project quality and construction safety, but also save expenses, save materials, increase economic benefits, and promote the construction industry to continuously move towards a low-carbon economy, energy-saving and environmentally friendly society.

Keywords : green building; architectural engineering; construction technology; energy conservation and environmental protection; sustainable development

引言

双碳战略及绿色发展不断深入发展, 建筑业正在加速从高能耗、高排放的传统发展模式转变为节能、减排的发展模式, 在此背景下, 施工阶段是整个建筑工程中耗能最多、对生态环境破坏最为严重的部分, 所以施工技术的应用程度对绿色建筑的发展起着至关重要的作用。传统的建筑施工存在着能耗高、污染严重等问题已经无法满足现在社会发展对于建筑业提出的高质量发展的需要。针对绿色建筑的要求总结施工技术应用的核心就是对技术进行细化, 从而确定了研究的技术改进方向也为后文的研究做了铺垫。

一、绿色建筑背景下建筑工程施工技术应用的必要性

(一) 促进建筑行业可持续发展

绿色建筑意识注重的是资源节约、环境保护及建筑质量的协调发展, 在建造过程也是其重要组成部分。建筑施工阶段一般伴随着大量的能源耗损、材料损失还有灰尘、噪音、建筑废物等等一系列环境污染, 如果还继续使用传统的高耗能、低效率的施工方法的话, 将会进一步造成资源浪费以及加大生态环境的压力。而运用绿色环保建筑技术在建筑工程中就可以从施工组织设计、施工工艺流程的选择、机械设备的选用及施工现

场管理和控制等方面做好节能减排措施, 从而降低工程施工造成的环境污染。同时这项技术的应用也是促进建筑工程从片面追求工期、造价到注重工程质量、经济效益以及环境保护并举的过程, 有利于提高整个行业的建造水平, 促进建筑业绿色化发展^[1]。

(二) 提高资源利用效率并降低施工成本

建筑工程项目施工需要投入大量的建筑材料, 机械设备、人力资源及水电气等资源, 如果没有科学的技术支持和技术管理, 就容易造成资源浪费现象的发生。尤其在当前绿色建筑的时代下, 对施工技术的应用也更加重视对于各种资源的选择、配置是

否合理、资源利用率如何。选择使用节能环保的设备、改进施工工艺、强化施工现场用水用电管理,并加快周转材料的周转速度,既能够保证工程质量与安全又能实现节约的目的。而绿色施工技术的应用还可以节省返工带来的浪费以及避免不必要的损失,从而降低处置废料的成本,加快施工进度,增加项目的整体收益。因此绿色施工并不是简单的加大投资,而是在技术创新、管理水平提高的基础上达到经济利益最大化的同时兼顾生态保护的一种重要途径。

（三）满足绿色建筑发展与政策要求

面对日益重视的生态文明建设以及绿色发展理念,在此背景下我国及各地方政府也陆续出台了一系列节能环保绿色建筑、施工现场环境保护方面的相关政策法规,使得对建筑工程项目施工技术水平要求也越来越高,在这种情况下,在建筑工程施工过程中除了要达到工程质量、安全生产、工期等方面的要求外还要加强对于节约能源、保护环境、节能减排以及资源再利用等目标的关注度。积极运用绿色施工技术不仅是符合国家政策发展导向以及行业发展潮流的实际选择,更是工程建设企业在履行自身责任的同时提高自身管理水平和赢得市场竞争优势必不可少的一环。特别是随着绿色建筑评估体系逐步健全和完善,政府对于行业的监管力度越来越大,在此背景下绿色施工水平已经成为评判一个公司整体实力的一个重要指标了,所以加强对建筑工程施工技艺的绿色环保应用不仅可以满足当前建筑业发展的需要,而且可以为公司长足稳健的发展打下坚实的基础^[2]。

二、当前建筑工程施工技术应用中存在的主要问题

（一）施工过程中的能耗与材料浪费较为突出

目前有的工程建设项目施工技术的应用仍然具有很强的传统粗放性特点,用能低效、浪费严重的情况很常见,在工程的实际建设过程中还存在一些施工单位采用高耗能设备和落后的施工工艺,没有注重工程中施工用电、用水以及设备运转状况的有效管理,频繁发生机械闲置、临时照明混乱以及水的浪费等情况。同时原材料采购、调运、储存、使用之间联系较少,造成钢筋、水泥、模板、保温材料损耗严重的状况时有发生,甚至因为施工方案不合理或操作不当而不得不返工加大了原材料的消耗量。能源消耗及物料损耗直接影响到建筑项目造价的同时还影响到绿色施工的实际成效,使得建筑工程项目无法达到节能减排以及快速建造的目的^[3]。

（二）环境污染控制措施落实不到位

建筑工程施工时间长、工序复杂,如果缺乏环境保护就会给周围的生态及周围群众的生活带来负面影响,目前来看,一些工地在施工中存在着比较严重的扬尘防治不到位、噪音防治不到位、排水排污处理不到位、渣土外运治理不到位的问题,比如:土石方开挖、材料堆存及运输时防尘不到位、湿法抑尘措施落实不到位,造成扬尘问题严重;夜间施工机械设备噪音扰民、影响周围群众睡眠;施工废水和生活污水未经处置就排放到外环境中,会对周围环境产生影响。另外建筑垃圾分类不

清、回收利用率不高、乱堆乱放或者清运滞留等问题屡见不鲜。环境污染治理措施执行不到位,既对绿色建筑工程的质量水平及文明施工造成不良影响,也对整个建筑行业绿色化进程产生一定的负面影响。

（三）施工技术管理体系不够完善

绿色建筑施工技术的应用不仅仅需要有新型的施工技术和设备更要有一个健全完整的管理体系来支撑它,但是当前很多建筑公司在这方面都比较欠缺,一方面一些公司的负责人对于绿色施工的认知还停留在浅层次上,过多注重的是进度问题以及费用开支而忽视了节能降耗的要求,缺乏有效的技术和实施方案等等,另一方面现场施工中技术交底不清楚,工序监管不到位,验收不严格,职责不明晰等问题也使得绿色施工难以有效落实下去。另外,有些技术人员知识水平偏低且环保理念欠缺,不能熟练使用新技术、新材料、新机具等,技术交底流于表面,使绿色施工技术得不到合理的应用。管控体系缺失导致了绿色施工往往只为空喊口号,并未建立起覆盖整个项目过程以及所有方面的一体化联动机制,从而阻碍建筑工程总体绿色程度的整体提高^[4]。

三、绿色建筑背景下建筑工程施工技术的具体应用

（一）节能型施工技术的应用

绿色建筑施工作为一项在保证工程质量以及安全生产前提下尽可能地节约资源的一种行为方式,在此条件下节能施工技术的应用也成为了施工过程中的主要内容。在实际操作中要尽量采用高效率低能耗的动力设备,还要针对不同的工程项目大小及其工序要求合理调整设备的工作状态,并尽可能地避免出现不必要的空转或重复使用情况发生等。在临时用电管理上可以从分区分片供电、时间限制使用,安装智能计价器、节能电力系统等方面入手对现场照明、动力设施和办公区域内的用电量加以控制。从而达到节约电能的目的。另外,也要在施工组织计划中做好工序间的衔接工作,减少机械设备闲置时间,加大施工流水及配合力度从而降低施工期间总耗能,在夜间施工时,也可以使用一些高效率、低能耗的灯具来增强照明效果和施工现场安全系数,让节能指标贯彻到整个工程施工前、过程中以及现场管控环节之中去。

（二）环保型施工技术的应用

建筑施工现场,扬尘、噪声、废水以及固体废物等环境污染问题是制约绿色施工效果的重要因素,所以环保型施工工艺的应用有着极大的必要性。针对扬尘污染,在土方开挖、堆放材料、运输车辆以及拆除工程中可以采取喷雾降尘、遮盖保护、洗车平台、密封运输等方法;对于施工噪音,可以通过建设隔离屏障、使用低噪声设备、调整作业时间、加强对机械设备的保养来减小外界环境的影响;对施工废水中则需要建造沉淀池、回收池、循环净化等,把泥浆水、冲洗用水、生活用水分批处理、重复利用,节约水资源。绿色施工技术不仅可以对施工现场的污染进行有效的遏制,而且可以提高施工现场文明施工程度及工程项目管理水平^[5]。如图1所示。

绿色建筑施工技术应用流程图



图1 绿色建筑施工技术应用示意图

（三）资源循环利用技术的应用

资源循环利用工艺是绿色建筑工程降低消耗增加效益的有效途径，在这里主要依靠技术和管理水平提升对建筑材料以及水资源还有建筑垃圾的利用率。建筑材料的选择方面应当优先选用绿色的可再生可循环低污染产品，严格控制好材料采购计划和定额发放还有料头回收工作，以减少材料损耗比例；在建筑垃圾处理上应该做到垃圾分类收集、分类处理、分类利用，对于废钢筋、废木材、废混凝土以及包装物进行分类回收，以提升重复使用效率，防止出现随意倾倒或者胡乱堆砌的情况。关于水资源管理和循环利用的相关技术，在施工排水方面可以考虑将施工用水、机械设备清洗水、雨水等经过沉淀、过滤后用于现场降尘、道路清扫及混凝土养护等，达到对施工用水的循环使用的目的。把资源循环利用的技术融入到整个施工过程，既可以节约资源、减轻环境压力，也利于建筑行业施工模式从高资源、高污染转向集约型、绿色型发展^[6]。

四、提升绿色建筑施工技术应用效果的对策

（一）完善绿色施工技术管理机制

绿色建筑工程施工技术的有效落实，离不开健全完善的管理制度做支撑。施工单位应该针对工程项目的实际情况以及绿色建筑的要求，制定包括施工前准备阶段，施工过程中以及质量把控与最终评价在内的绿色施工管理规定。把节地、节水、节能、节材和降噪等方面工作贯穿到整个项目施工的过程中去，在实际操作当中还要更加具体化各项任务分工，界定好建设方、承建单位、项目经理、一线工人各自的职责范围，构建明晰高效的工作体制。其次要加强过程监管考核力度，对绿色施工方案执行情况、机械利用率、材料节约率以及环境污染状况等进行实时监测

以及定期评定，发现问题立刻整改，保证各种绿色建筑施工技措得力有效开展，给予绿色建筑施工可靠保障^[7]。

（二）加强施工人员技术培训与绿色意识培养

推广绿色施工新技术是技术的转换更是一种施工观念及人员综合素质的提升，所以要重视对施工队伍专业技术素养以及绿色环保意识的同步提高。施工企业在岗位工作职能和施工任务的不同上进行有目的地进行相关的技能培训，让管理干部和技术人员及一线工人全面了解节能产品运用、环保工法执行、废弃物再利用及施工现场治理等操作要点，做到将绿色施工技术有效落实到具体的工作当中去。另外，在平常工作期间也要加强对绿色发展观念的宣传教育，在工作中把环保的要求贯穿到安全教育培训、技术交底与现场管理工作当中，提高施工人员对开展绿色施工的认知程度，使他们能够在施工过程中自觉地开展绿色施工活动。不断强化从业人员素质水平，可以给绿色施工技术的应用提供更好的人才支撑以及执行基础。

（三）推动信息化与智能化技术融合应用

伴随着建筑业信息化进程进一步深化，在绿色环保施工中对信息化智能信息技术的应用也越发重要。利用 BIM 技术，智慧工地管理系统以及能源监测装置以及环境检测传感器等设备，可以对项目现场人员、物料、机械及周围环境进行全面有效的收集、跟踪以及精细管控，进而增强绿色环保施工技术的应用水平及其协调程度。比如运用 BIM 技术可以在开工前优化工艺流程以及资源分配方案，避免重复工作及浪费建筑材料现象发生；借助智慧工地管理系统能够实现对扬尘污染源、噪音污染源、能源消耗情况以及机械设备运转状况的及时掌握，强化现场管理水平；基于大数据分析系统也能够作为节能减排、污染防治决策支持参考之一。信息化及智能化结合的发展，有利于促进绿色施工从经验型管理转向数据化管理，进而提高建筑工程项目施工技术的应用能力^[8]。

五、结语

在绿色建筑的大环境下，施工技术水平高低关系到整个工程能否实现节能减排的目标、环境保护的效果以及工程质量的好坏，加强绿色施工、污染控制、废弃物回收及综合管理等环节的技术运用有助于提高施工现场绿色环保程度和管理水平，以后还要继续加大科技创新增强联动管理力度以及信息系统集成等，进一步完善绿色施工的具体措施，促进建筑业走向绿色发展之路。

参考文献

- [1] 贺绪仲. 绿色建筑背景下装配式建筑施工技术的应用 [J]. 陶瓷, 2022, (04): 153-155.
- [2] 周鑫, 付琪桓, 刘晴. “双碳”背景下土木工程施工中绿色建筑材料的应用 [J]. 陶瓷, 2024, (08): 144-147.
- [3] 焦甲元. 基于绿色建筑背景下装配式建筑施工技术的应用研究 [J]. 陶瓷, 2024, (11): 179-181.
- [4] 张伟. 绿色建筑背景下土木工程施工中的高支模施工技术分析 [J]. 陶瓷, 2025, (02): 222-224.
- [5] 周广辉. 低碳背景下绿色建筑施工技术创新研究及应用 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(03): 170-172.
- [6] 刘康. 基于绿色建筑背景下装配式建筑施工技术的应用研究 [J]. 石材, 2025, (07): 104-106.
- [7] 蒙小江. 低碳背景下的绿色建筑施工技术应用 [J]. 散装水泥, 2025, (06): 16-18.
- [8] 古嘉斌. 低碳背景下绿色建筑施工技术创新研究及应用 [J]. 陶瓷, 2026, (01): 215-217.

建筑施工安全隐患排查与预警系统研究

荆涛

河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ERA.2026060013

摘 要 : 建筑施工安全隐患排查预警系统利用物联网、大数据以及人工智能等信息技术, 实时对施工现场进行监测分析, 能够快速识别出存在的危险因素并且报警提示, 采用自动化的检测设备以及智能化的预警方式来降低事故发生的概率, 增强现场安全防护能力, 提出了一个以传感器采集信息为基础, 依靠数据处理的智能化预警平台, 在具体的施工环节中得到了成功的实践并取得了很好的效果, 极大的提高了安全隐患判定的效率及反应速率, 是一种新型的对建筑工程进行管理和控制的方法。

关 键 词 : 建筑施工; 安全隐患; 排查; 预警系统; 智能化

Research on Safety Hazard Investigation and Early Warning System for Construction Projects

Jing Tao

Hebei Construction Group Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000

Abstract : The construction safety hazard investigation and early warning system utilizes information technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence to monitor and analyze construction sites in real time. It can quickly identify existing hazardous factors and provide alarm prompts. Automated detection equipment and intelligent warning methods are used to reduce the probability of accidents and enhance on-site safety protection capabilities. An intelligent warning platform based on sensor information collection and data processing has been proposed, which has been successfully implemented in specific construction processes and achieved good results, greatly improving the efficiency and response rate of safety hazard determination. It is a new method for managing and controlling construction projects.

Keywords : construction; hidden danger; investigation; early warning system; intelligentization

引言

建筑工程中存在大量的安全隐患也是造成工程质量低下和人员伤亡的因素之一, 安全事故的发生使得社会和经济受到了较大的损失, 随着施工量以及施工难度的加大, 传统的安全管理方式已经无法满足越来越多的安全隐患, 国内外对于安全隐患的研究也取得了一些成果, 但是还存在着对隐患辨识不准、预警迟缓的情况, 在此基础上研发出一套完善的安全隐患排查预警体系, 结合信息化技术来提高管理的安全性, 这是目前建筑领域急需突破的方向。运用智能的方法改善安全检查及预判的方式, 加强施工现场的安全监管水平及其准确性正是建筑业的发展趋势。

一、建筑施工安全隐患的识别与分类

(一) 建筑施工安全隐患的类型

建筑工地有各种各样的危险源, 主要有物理危险源、化学危险源及人的危险源三类。物理危险源主要是指施工现场的设施、工具及劳动场所, 如高处坠落、机械设备损坏、施工现场周围的环境安全等; 化学危险源包括有害物质排放、易燃易爆物品乱放等问题, 会造成人员伤亡甚至爆炸等事故, 属于严重的危害; 人的危险源主要是由于操作不当和管理不到位引起的, 比如工作人员操作不符合规范, 管理人员没有严格执行安全管理规定等

等, 都是造成事故的重要原因。

(二) 隐患识别的传统方法

传统安全隐患排查手段主要是采用现场巡查、专家经验与工作经验总结分析以及调查问卷及事故案例回顾等方式。其中现场巡查是通过实际对施工现场进行走遍观察, 发现那些可以直接看到的隐患, 此方法适用于那些明显易见的问题。但安全隐患具有隐蔽、难以察觉的特点导致这种方法很容易忽略一些隐患的存在; 专家意见和工作经验主要是借助于有丰富工作经验的老员工的经验对现场情况进行分析判断从而得出结论, 这种方法虽然能在一定程度上帮助安全隐患排查工作开展但是太过依赖于个人经

验以及判断力的局限性很大。问卷调查和事故调查主要是通过搜集施工人员的观点以及过往的相关事故材料以寻找潜在危险源的方法，但是此方法存在信息完整性不足、调查对象定位不准确等问题而导致获取到的数据不够精确^[1]。

（三）隐患识别中的难点与挑战

隐患排查工作有很多困难和难题，在隐患排查工作中主要是隐患排查的主观性难题。传统的隐患排查方式主要是依靠专家的经验以及现场观察来判定是否存在隐患问题，易出现误判或者疏漏的情况。其次，建筑施工的环境也是一大难题。尤其是对于大型复杂型的工程项目来说，由于施工现场随时都在发生改变而且环境各异，常规性的巡查并不能做到面面俱到地覆盖所有的风险源点，另外就是缺少一套标准化的隐患排查手段也造成了各个工地之间隐患排查的方式千差万别，并且难以做到统一标准，降低排查效果。所以构建更加高效便捷智能型的安全隐患排查系统是提升建筑施工安全管理的重要途径所在^[2]。

二、 建筑施工安全隐患预警系统的构建

（一）预警系统的基本框架

建筑施工现场安全生产预警系统的基本框架由三部分组成即信息采集－信息处理－信息预警，首先是信息采集部分，该部分通过安装在施工现场的各种传感器及监控装置来收集各种数据信息，比如环境状况（温度、湿度）、气体含量、机械设备等工作参数；然后是信息处理部分，在此过程中将收集到的相关数据信息经过大数据算法进行分析计算得出结论；再者为信息预警部分，即以图形化的方式显示出来给相关负责人浏览查看，同时联动报警装置进行警报提示，使危险源能够第一时间得到发现并且被解决^[3]。

（二）关键技术的应用

预警系统的关键技术包括物联网、大数据处理、人工智能。物联网技术可以做到对施工现场机械设备以及传感器的即时监测与信息采集，保障了信息来源的真实可靠；而布设无线传感网可以实现无死角全覆盖式的无缝衔接各个检测站随时掌握现场情况的发展变化状况。大数据处理技术是用来对收集的大规模的数据进行深层次挖掘，借助算法实施危险源预判及隐患排查工作辅助管理者做出合理化的选择。人工智能尤其是机器学习的应用让这个系统可以自主识别出隐患所在点位，经过持续的学习和训练模型以达到更好的预警效果降低人的参与度同时增强整体预警系统的技术含量。

（三）系统的设计与实现

建筑施工现场安全风险预控系统的构建及实施涉及到系统结构设计，软硬件开发及数据采集、警报模块的开发等问题，而系统结构设计要求各部分紧密衔接并且数据之间相互传递顺畅，系统必须能够容纳海量的数据并有较好的稳定性。在软硬件方面该系统依赖多个传感器，监控器及服务器以及软件平台。软件平台主要进行的是数据的储存、解析、报警处理等工作，硬件部分主要由温度湿度传感器，气体检测仪，摄像机等

组成。数据采集及报警模块的研制为系统的主体部分，其由两部分构成，一部分是对采集设备的数据进行收集并将之发送给处理模块，另一部分是在经过处理后得到的结果的基础上生成相应的警告信息并在显示屏上显示出来，以提醒有关人员注意。该系统的有效建立可以很大程度上提高工程建设的安全系数，防止事故发生^[4]。

三、 建筑施工安全隐患排查与预警系统的优化

（一）数据优化与模型改进

数据修正以及模型升级是提高建筑施工安全隐患排查及预警系统的有效途径，一方面，在数据收集过程中准确性和实时性的要求很高，在面对复杂的施工环境、快速变化条件下，收集仪器应该有高的准确率和低的时间延迟，如对温度、湿度、气体浓度、机械运转状况等的数据进行精确地采集可以第一时间了解到工地现场出现的变化情况；另一方面，为了提升隐患预估的效果，模型算法也由传统的算法转向深度学习方向，在此基础上使用了卷积神经网络（CNN）、长短时记忆（LSTM）等深度学习的方法分析以往的历史数据从而自主找出存在的危险源。系统优化上，除了加强算法本身，还应加快运算速度，采取并行处理和分布计算缩短系统响应时间，保证及时报警，某施工项目应用深度学习模型进行系统优化之后隐患识别正确率提高了15个百分点以上，报警响应时间降低20个百分点左右。

（二）预警系统的反馈与调整

预警体系反馈与修正体系是保证它长期有效运转的基础，隐患反馈体系保证了现场人员可以实时上报隐患消息并且把反馈的结果再次带入到预警体系之中进行优化，预警体系的修改和升级也需要在收到现场反馈和新发现的隐患种类基础上不断校正警报模型算法，比如在一建筑工程项目中，最初的报警频率过高，通过对现场工作人员进行反馈并改变预警模型的系数值从而使其报警频率降低到了10%，定期审查和不断优化是维持整个预警体系正常运作的基础。系统开发队伍每隔一季度做一次系统的审查，检查所构建的模型的有效性、及时性和精准度，使系统不断改进以满足现实的应用要求^[5]。

（三）案例分析与效果评估

为了检验建设工程施工隐患排查及预警系统的作用，经典项目案例分析很重要。如北京某大型商业综合体项目，在进行隐患排查及预警系统的使用之后，在施工过程并没有发生重大的事故，隐患被发现的比例达到了92%，预警信息反馈速度为15秒左右。通过对系统进行评价，系统的数据显示，系统使用之前发生的事故比例是0.9%，而使用了之后，事故比例降低到0.3%，减少了67个百分点的事故风险。还有的工程在应用该系统之后，其机械设备出现故障的概率下降了18%，同时对工程的安全检查工作也减小了25%左右的工作量。以下是安全预警系统的应用对比表，显示了应用预警系统之后建筑施工项目安全事故的发生概率以及隐患排查的速度提升情况^[6]：如表1所示。

表1 建筑施工安全隐患排查与预警系统实施效果分析

项目名称	事故发生率 (%)	隐患识别准确率 (%)	预警响应时间 (秒)	检查工作量减少 (%)
系统实施前 (无预警系统)	0.9	65	30	0
系统实施后 (引入预警系统)	0.3	92	15	25

通过对案例以及数据分析,可以清楚的认识预警系统在提高安全管理效率、减少事故发生方面的作用。系统改善和完善让隐患排除更加准确及时,预警时效大大压缩,在现场的安全度提高了很大一个台阶。

四、建筑施工安全隐患排查与预警系统的应用前景与挑战

(一) 预警系统的应用前景

建筑施工安全隐患排查及预警系统应用范围非常广,在不同的建筑工程中都可以起到很好的安全防范效果。由于建筑工程量 and 难度加大,以往的安全管理方式已经无法适应不断增加的安全隐患问题,在此情况下就出现了智能型的安全预警系统并且有广阔的市场空间。在民用建筑、商业用房、工业厂房等建筑项目的施工过程中预警系统可以帮助我们对工地上的各种危险源进行实时监控,以便尽早地发现隐患、解决问题从而降低事故发生的可能性保证施工安全顺利进行。同时国家对于建筑行业安全管控力度也在逐渐加大,相关政策的支持以及市场需求使得安全隐患排查及预警系统被广泛应用。比如,《建筑安全生产法》及其配套措施的实行使得建筑工程公司开始意识到预警系统的应用对于加强自身管理的作用,加大资金和技术方面的投入来建立相关预警系统,促进建筑工程建设行业安全管理智能化^[7]的发展。

(二) 应用中的主要挑战

虽然建筑施工安全隐患排查与预警系统的应用有很好的市场前景,但是在实际的应用过程中仍然存在着一定的困难。一是技术难题及资金问题:智能化预警系统需要使用各种先进的传感器、数据分析技术和人工智能算法等都需要很高的投入以及后期

的维护成本,对于一些中小型企业来说很难承受。二是系统的运行也需要建筑工地安装很多监控装置和各种类型的传感器,这就对于建筑施工工地的基础设施建设及相应的资金支持提出了较高的要求。三是安全管理理念及人员素质问题,即使有很好的技术系统,在实际操作中如果没有工作人员能很好的理解和掌握该系统的功能及其作用,没有操作的概念,那么再好的系统效果也会大打折扣。所以,在系统的运行中一定要加强对职工进行安全教育、提高安全防范意识,健全和完善安全文化建设。

(三) 未来发展趋势与研究方向

建筑施工安全隐患排查及预警系统的未来发展将会朝着智能化、自动化的方向发展,逐步达到无人看管的状态下智能化监测、预警的功能;在 AI 时代背景下,其机器学习算法以及深度学习会越来越精确,使预警系统可以更好的进行事故隐患发生的概率计算以及发出对应的警报;同时,由于 5G 与物联网的发展使得信息来源多样化,系统拥有更多的基础数据作为支撑。未来,工地各监测设备将与其他建筑管理系统深度融合,实现场景之间的互联互通,进一步提高建筑领域安全管理水平,国际化的接轨与标准化也是其未来的发展趋势之一。伴随着国际交流的加强,世界建筑领域对于安全管理系统的需要将会促使标准建立起来以保证技术可以被全世界使用并且相互兼容^[8]。

五、结语

建筑工程施工安全隐患排查及预警系统的应用可以显著提升建筑施工的安全性以及降低安全事故的发生频率,借助智能的隐患检测、及时预警的方式使施工现场的安全管理变得更加高效。但是该系统的发展还存在着技术研发、人才培养、投入等诸多问题。相信在未来随着科技不断发展完善以及相关标准的制定和完善,预警系统将会越来越精准并广泛应用于各个领域内。我们应该对该系统进行完善推广,促进整个建筑行业实现智能化、安全文化化的目标,让建筑施工安全管理更加有效并且长久。

参考文献

[1] 李征,林中湘,闫占胜. 建筑施工安全生产事故隐患的排查与治理 [J]. 工程设计与设计, 2022, (09): 249-251.
[2] 秦书敏. 建筑施工安全双重预防体系构建及管控平台开发 [D]. 西南石油大学, 2023.
[3] 陈浩,王硕新,佟浩铭. 建筑机电工程施工安全隐患排查与治理技术 [J]. 建筑机械化, 2023, 44(10): 77-80.
[4] 杨玲. 建筑工程施工安全生产事故隐患排查及对策 [J]. 水上安全, 2024, (02): 160-162.
[5] 吴仁祖. 论建筑施工现场的安全隐患排查技术 [J]. 陶瓷, 2024, (02): 170-172.
[6] 郭卫平. 建筑施工现场安全隐患排查与治理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (09): 28-30.
[7] 常磊. 建筑工程施工质量安全隐患排查及治理措施 [J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 432-433.
[8] 齐友钧. 房屋建筑施工安全隐患排查与治理技术 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (16): 160-162.

建筑工程管理控制要点分析与实践优化策略

农勇顺

广东顺策工程管理股份有限公司，广东 佛山 528400

DOI:10.61369/ERA.2026060018

摘 要： 文章旨在系统探讨建筑工程技术管理的关键控制要点，分析当前建筑行业在管理体制、人才建设、质量监管及信息化应用等方面存在的突出问题，并提出具有实践意义的优化措施。研究重点包括通过完善材料质量控制体系、规范施工工艺与安全管理流程，提升工程品质；针对管理体制不健全、专业人才短缺等现状，构建全过程成本管控与信息化管理体系；强化技术交底与材料管理，确保项目各环节协同高效。

关 键 词： 建筑工程管理；控制要点；优化

Analysis of Key Control Points in Construction Engineering Management and Practical Optimization Strategies

Nong Yongshun

Guangdong Shunce Engineering Management Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528400

Abstract： This paper aims to systematically explore the key control points in construction engineering technology management, analyze the prominent issues currently faced by the construction industry in areas such as management systems, talent development, quality supervision, and information technology application, and propose practical optimization measures. The research focuses on improving project quality by refining material quality control systems and standardizing construction processes and safety management procedures; addressing issues such as inadequate management systems and a shortage of skilled professionals by establishing a comprehensive cost control and information management system; and enhancing technical disclosures and material management to ensure efficient coordination across all project phases.

Keywords： construction engineering management; control points; optimization

引言

随着建筑行业的快速发展，工程质量管理已成为影响企业核心竞争力与行业可持续发展的关键因素。当前，建筑工程规模不断扩大、技术复杂度日益提升，但在管理体制、技术创新与过程管控等方面仍存在明显短板，亟需通过系统化的管理措施实现质量、安全与效益的统筹优化。文章基于建筑工程实施全过程，深入剖析技术管理中的核心问题与控制要点，以推动行业向标准化、精细化与信息化方向转型。

一、建筑工程技术管理的控制要点

（一）施工材料质量管理与控制

建筑材料品质的优劣对工程整体质量具有决定性影响，只有选用具备优良性能且符合规范标准的材料，才能确保建筑结构达到预期的使用年限。为此，在建筑工程技术管理过程中，必须构建严格的材料质量控制体系，不断完善选材标准与管理制度，坚决杜绝使用任何不合格产品，不能为降低造价而牺牲材料品质。同时，还应健全质量监督机制，加大进场材料的检验力度，对采购的各类建材实施全面质量审核。以建筑工程中最具代表性的钢筋与混凝土为例，在投入使用前必须对其关键指标进行严格核查，所选钢筋的力学性能与规格尺寸均须满足设计规定。尤其需

要重视钢筋的防腐蚀处理，确保其在服役期间维持良好的工作状态。混凝土浇筑过程中，则要严格控制其配合比与结构厚度，保证实际施工与设计方案一致。在混凝土成型后，还应通过专业检测手段对其强度等指标进行验证，以全面评估施工质量。

（二）施工工艺与技术的规范化管理

除建筑材料质量外，施工工艺与技术水平的规范性同样是决定建筑工程整体品质的关键要素。在技术管理过程中，首先要依据工程现场条件及项目目标，科学拟定施工组织方案，合理选配技术团队，为后续施工过程管控奠定基础。随后应组织相关技术人员对设计图纸与施工方案开展全面会审，通过深入研讨使团队准确把握技术重点，科学规划施工流程与时间节点，并在评审阶段及时发现并修正设计缺陷，从源头规避潜在施工风险。此外，

还需注重提升技术管理队伍的专业能力与职业素养，确保其在施工过程中能够严格遵循规范执行管理职责。各部门之间也应建立高效的协同机制，通过密切配合共同保障工程质量。在项目最终验收阶段，必须严格执行检验标准，唯有在各项指标全面达标后方可批准交付使用^[1]。

（三）施工安全管理的系统化实施

鉴于建筑工程具有工序复杂、环境多变的特点，安全管理应当作为现场施工的首要控制环节。在建设过程中，各类潜在危险因素随时可能对作业人员构成威胁，因此必须将人员安全保障置于项目管理的重要位置。具体实施中，首先要通过持续教育和制度约束来强化全员的安全责任观念，确保所有操作均按规程执行；其次需完善现场防护设施，按规定为不同工种配备合格的安全防护装备，从硬件层面降低作业风险。同时，要建立常态化的巡查机制，对高空、临边、用电等重点区域开展系统性隐患排查，做到防患于未然。为提高整体安全水平，还应对施工中的违章现象及时予以纠正，并通过奖惩结合的方式深化员工对安全规范的理解，从而在组织内部形成自觉遵守的安全文化，最大程度地预防和减少各类事故的发生。

二、建筑工程管理的现状和存在的问题

（一）管理体制的完善与优化

科学完善的管理体系是提升建筑企业协同效能、强化团队协作的重要保障，也是推动行业持续健康发展的关键支撑。现代工程管理要求通过建立健全的内部控制机制，对项目全过程实施精细化管控，这种管理架构既对施工人员的行为起到规范作用，更为其专业发展提供了正确指引。然而，从当前建筑工程领域的实践情况来看，管理体制仍存在明显短板，集中表现为制度执行力度不足，以及在责任划分和绩效考评机制建设方面的不完善。这些系统性缺陷直接导致项目管理效能的削弱，进而对工程最终质量产生不容忽视的负面影响^[2]。

（二）管理团队专业能力建设亟待加强

当前诸多建筑企业中，管理团队普遍存在专业知识储备不足、技术素养薄弱的问题，这种状况容易引发决策偏差，进而给项目造成不必要的经济损失。由于管理人员对施工工艺和工程技术的理解不够深入，加之缺乏系统的管理实践积累，在面对现场人员提出的技术难题时往往难以给出专业有效的解决方案。这种情况不仅会影响管理指令的执行效果，还可能因指挥不当而增加施工复杂性，延误项目正常进度。管理团队专业能力的缺失既难以赢得施工人员的信任，也削弱了团队的整体凝聚力，导致管理效能持续走低。这种局面若不能及时改善，将直接制约工程质量的提升和项目进度的有效控制，最终影响企业的可持续发展能力。

（三）质量监管体系存在薄弱环节

当前建筑工程质量管理体系仍存在诸多不足，主要表现为质量标准 and 验收规范执行不到位，监管手段相对滞后。在施工过程中，部分项目未能建立完善的质量追溯制度，对隐蔽工程和关键

节点的质量控制措施不够严格。同时，质量检测手段相对单一，缺乏先进的检测设备和专业技术人才，难以对工程质量进行全面准确的评估。此外，质量责任划分不够明确，出现问题后往往难以追责到人，这种状况直接影响了工程质量的整体水平，也给建筑安全埋下了隐患^[3]。

（四）信息化建设滞后制约管理效能

建筑行业在信息化建设方面整体较为滞后，多数企业仍停留在传统管理模式。具体表现在：项目管理信息系统覆盖不全面，各部门之间信息流通不畅，存在“信息孤岛”现象；大数据、物联网等新技术在工程管理中的应用程度较低，难以实现施工过程的实时监控和数据分析；同时，企业缺乏专业的信息化管理人才，现有员工的信息技术应用能力普遍不足。这种信息化建设的滞后性，严重制约了管理效率的提升，也使企业难以适应现代化工程管理的发

三、建筑工程管理中的控制要点与优化措施

（一）强化人才培养与组织效能提升

为全面提升建筑工程管理的专业化水平，建筑企业应当从思想观念转变入手，引导全体员工适应行业发展趋势，建立现代化、科学化的管理思维。企业应在组织架构层面进行系统设计，明确市场拓展、技术研发与现场施工等各部门的职责分工，形成协同高效的工作机制。通过科学界定部门职能与管理边界，既能充分发挥各环节的专业优势，又可有效避免因过度追求经济效益而忽视工程品质的短视行为，从而增强企业在市场竞争中的综合实力。专业人才是实施高效管理的核心要素。企业应当建立系统化的培训机制，通过多元途径提升员工专业素养。一方面可积极引进国际先进的项目管理理念与方法，采取“内外结合”的培养模式。既邀请国内外行业专家开展专题培训，也可直接聘请资深顾问参与项目管理实践；同时要鼓励技术管理人员参与行业交流，通过实地考察学习拓宽视野。这种沉浸式的学习体验能够帮助团队清晰认识自身不足，明确改进方向^[4]。

（二）构建全过程安全管理体系

建筑企业应当严格履行安全生产主体责任，充分认识到建筑行业具有专业技术要求高、作业风险因素多的典型特征。在项目从规划设计到竣工验收的全过程中，各类环境变量和人为因素都可能引发安全隐患，因此必须将安全管控贯穿于工程建设的每个环节。为切实降低安全事故发生概率，不仅要严格规范作业人员的操作标准，还需建立常态化的安全巡检机制。政府部门也应加强对建筑企业的安全监管，通过多方协同形成监管合力，使“安全第一”的指导原则真正落实到每个施工环节。

在安全管理实施过程中，应优先强化管理团队的安全意识与监管能力。通过系统化的安全培训课程，使项目管理人员深入理解安全施工的重要性，进而有效指导现场作业实践。同时要建立完善职业危害申报机制，鼓励一线员工主动识别和报告安全隐患，形成全员参与、共同负责的

核。此外，还需加强对施工设备及工艺操作规程的专项培训，通过模拟演练使员工熟练掌握应急处置流程，全面提升团队应对突发事件的实战能力，最终建立起预防为主、全员参与、持续改进的安全管理长效机制。

（三）构建全过程成本管控体系

成本管控是建筑企业实现可持续发展的关键要素，需要通过多维度、全过程的精细化管理来提升项目经济效益。在项目规划设计阶段，应当注重建筑方案的技术经济性分析，结合地域环境特征与使用功能需求，通过多方案比选和价值工程分析，在确保工程品质的同时实现资源的优化配置，从源头上杜绝不必要的浪费。在项目实施阶段，需要建立动态成本监控机制，根据工程实际进展和市场变化，及时调整成本控制策略，既要防止因过度压缩成本而影响工程质量，也要避免因盲目追求进度导致成本超支。通过建立贯穿项目全生命周期的成本管控体系，企业能够在保证工程品质的前提下实现利润最优化，为长期稳定发展奠定坚实基础。同时，还应建立成本数据库和事后评估机制，通过持续的成本分析和经验总结，不断提升企业的成本管理水平。

（四）构建信息化管理新体系

建筑企业应当充分运用区块链、5G 通信、大数据分析等新一代信息技术，构建智能化的项目管理平台，实现对工程造价、进度控制、质量监管等核心数据的实时采集与深度挖掘。需要认识到，信息化建设不仅需要投入大量资金和专业技术人才，更意味着要对传统管理模式进行系统性变革，这一过程必然会面临组织架构调整和工作流程重塑等多重挑战。因此，必须获得政府政策引导和企业高层战略支持的双重保障，从制度设计和资源投入两方面为信息化建设创造有利条件。在完成信息化管理平台的初步建设后，企业需要组建专业化的运维团队，负责系统功能的持续优化和软硬件设施的日常维护。同时要注重各子系统在具体业务场景中的落地应用，通过开展全员信息化培训，提升数字化工具的实操能力，确保先进技术真正转化为管理效能。此外，还应建立长效学习机制，定期组织技术交流与案例研讨，促进信息化管

理体系的持续完善和迭代升级，最终实现企业管理水平的全面提升和创新发展^[5]。

（五）强化技术交底与材料全周期管理

建筑工程具有高度专业性和系统性的特点，要求各施工环节实现精准衔接与协同作业。针对多工种交叉施工的复杂情况，必须建立标准化的技术交底制度，确保施工人员全面掌握技术规范与操作流程。专业技术人员不仅要熟练掌握施工工艺，更需严格遵循设计要求和施工标准，同时建立完整的施工档案体系，对关键工序、检测数据等施工全过程信息进行真实准确的记录，为项目验收及后期运维提供完整可靠的技术依据，充分展现现代化工程管理的科学性与规范性。在材料管理方面，应当建立从采购到使用的全周期管控机制。采购阶段需严格执行供应商评估制度，对材料质量实施多重检验，在保证材料性能达标的基础上实现最优采购效益。现场材料管理要实行分类存储和专项防护措施，加强对施工人员的材料保管培训，使其掌握不同材质的特性及正确的存放要求。通过建立材料追溯制度和定期盘点机制，最大限度减少因管理不当导致的材料损耗，切实提高资源利用效率，为工程质量和成本控制提供有力保障。

四、结束语

通过系统分析建筑工程管理的关键环节与现存问题，文章从材料控制、工艺规范、安全管理、成本优化及信息化建设等多维度提出了一系列针对性措施，包括构建全过程质量与安全监管机制、推动专业化人才队伍建设、完善现代化管理体制等。这些举措对提升工程质量、保障施工安全、优化资源配置具有重要意义，也为建筑企业适应行业变革、增强市场竞争力指明了方向。未来可进一步聚焦智能建造、绿色施工等新兴领域，探索数字化与可持续发展理念在建筑工程管理中的深度融合路径，以推动行业实现更高质量的发展。

参考文献

[1] 成飞. 建筑工程管理中的控制要点与优化措施 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(1): 157-160.
[2] 江家宝, 孙宁一. 建筑工程管理中的控制要点与优化 [J]. 科技资讯, 2022, 20(10): 74-76.
[3] 丁明利, 马先前, 卢永峰. 建筑工程技术管理中的控制要点与优化探讨 [J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7(6): 51-53.
[4] 马相似. 建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施分析 [J]. 大众标准化, 2024(8): 52-54.
[5] 张天刚. 探究建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施 [J]. 建材与装饰, 2021, 17(8): 172-173.

建筑幕墙防渗漏技术分析研究

王春雨

上海麟德建筑装饰有限公司, 上海 201103

DOI:10.61369/ERA.2026060020

摘 要 : 随着城市建设的繁荣推进,幕墙作为城市建筑外立面不可或缺的一部分,其进化也从未停歇。在BIM 人工智能等自主创新技术的加持下,建造水平不断提升,良好的建筑幕墙施工技术,不仅可以体现建筑的美感,还可以显著增强外墙的防渗漏性能,从而延长建筑使用寿命,本文首先对引起建筑幕墙渗漏机理进行了总结,其次结合工程案例对渗漏部位及原因进行了系统性分析,最后根据幕墙防渗漏核心技术原理在施工过程中采取了针对性施工措施,并取得良好的效果,旨在为幕墙行业的发展提供有效的参考价值。

关 键 词 : 建筑幕墙; 防渗漏; 施工难点; 技术创新; 智能建造

Analysis and Research on Anti-Leakage Technology for Architectural Curtain Walls

Wang Chunyu

Shanghai Linde Architectural Decoration Co., Ltd., Shanghai 201103

Abstract : With the flourishing advancement of urban construction, curtain walls, as an indispensable part of the exterior facades of urban buildings, have continuously evolved. Supported by independent innovative technologies such as BIM and artificial intelligence, construction standards have been continuously improved. Excellent construction techniques for architectural curtain walls not only showcase the aesthetic appeal of buildings but also significantly enhance the anti-leakage performance of exterior walls, thereby extending the service life of buildings. This paper first summarizes the mechanisms causing leakage in architectural curtain walls, then systematically analyzes the leakage locations and causes in conjunction with engineering case studies. Finally, targeted construction measures are implemented during the construction process based on the core principles of curtain wall anti-leakage technology, achieving favorable results. The aim is to provide effective reference value for the development of the curtain wall industry.

Keywords : architectural curtain wall; anti-leakage; construction challenges; technological innovation; intelligent construction

引言

幕墙作为一种常见的建筑表皮设计,具有隔声、隔热、防水、围护等重要功能,然而在工程实践中幕墙渗漏隐患一直是困扰用户和施工单位的难题,由于渗漏点的排查难度非常大,往往在发生渗漏时需要花费很大的代价进行维修,所以在施工中应引起重视,本文以该项目为依托,对引起幕墙渗漏原因进行了系统分析,并提出具体解决方案,最后经过实践验证了其技术措施的可行性,同时也取得良好的社会效益。

一、项目概况

原创新药发现能力提升平台项目为上海市重大工程建设项目(见图1),位于上海市浦东新区牛顿路277号,总用地面积13597 m²,总建筑面积56146 m²,其中地上建筑面积39176 m²,地下总建筑面积16970 m²,一期范围:1号科研实验楼、3号员工宿舍、6

号污水处理池、7号配套仓库。本项目幕墙面积约18803平方米,其中最大单体幕墙面积约11923平方米(1号楼),最大高度45.7米,主要幕墙类型:玻璃幕墙系统、铝板系统、开放式陶板幕墙系统、铝合金百叶系统、采光顶、点式雨棚、地弹门、门窗系统、屋面栏杆系统等。



图1 原创新药发现能力提升平台项目幕墙航拍图（西南视角）

二、幕墙防渗漏技术原理及施工技术优化

建筑幕墙雨水渗漏机理是由于雨水在自重荷载或外部荷载作用下，通过幕墙表面缝隙进入内部，造成其渗漏的必要条件有：（1）幕墙表面存在渗漏通道；（2）幕墙表面有雨水汇集；（3）外界存在雨水渗透幕墙表面进入内部的作用力（作用力类型及应对措施见表1），本项目在幕墙施工中，主要运用了雨幕原理及外

表1 导致雨水渗透作用力类型及防渗对策（见图2）

序号	作用力	渗漏现象	对策
1	重力	雨水直接流入室内	将缝隙设置顺水倾斜构造，增加向内的重力约束
2	张力	雨水沿径流经材料表面的张力	在缝隙上部采用滴水檐、滴水线构造
3	毛细现象	缝隙较小时会产生自吸渗透	在接缝中设置间断空隙或局部空腔，阻断毛细路径
4	运动	雨水被风荷载带入缝隙	通过将缝隙设为迷宫式构造，延长路径消耗水流动力
5	压差	风力会引起压差	利用等压原理消除内外压差

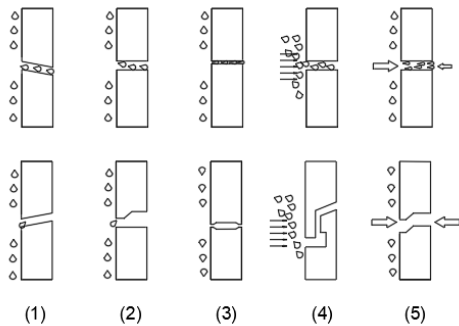


图2 通过雨幕各种作用力及改变水流方向示意图

（二）基于外侧密封法的防渗漏技术优化

是通过采用密封胶或橡胶条以“堵”的方式将水完全隔绝在外。

1. 密封胶

密封胶的等级、接缝形式、密封构造、接缝宽度及深度的设定应经严格控制，同时应考虑构件材料、施工季节、维修管理等因素，密封胶应在有效期内使用，并与基材的相容性、粘结性检测合格，注胶前工作人员要清洁密封部位，使用 PE 泡沫棒填塞胶缝其直径一般为胶缝宽度的1.2倍，其目的是避免硅胶在胶缝内形成三面粘结，保证其具有良好的弹性位移能力，防止接缝位移时

侧密封法进行了技术优化。

（一）基于雨幕原理的防渗漏技术优化

雨幕原理的智慧在于“疏导”与“平衡”。其核心是利用压力平衡机制主动“疏水”，加速排水，该理念是将幕墙系统设置为两道防线，即：外层的幕墙面板及其板缝是第一道防线，它允许少量水在风压下渗透进入板后的空腔。内部的防水隔离层或排水层为第二道防线是最终的保障，它必须做到绝对气密。只有这样，才能维持等压腔的有效性，并阻挡可能透过第一道防线的少量水汽。同时在两道防线之间的空腔作为过渡空间，这个空腔可以与室外大气连通，从而在极短时间内使空腔内的气压（P）与室外风压（P0）达到动态平衡，即 $P \approx P_0$ 。当空腔内外压力相等时，驱动水通过外部缝隙的压差便不复存在。侵入空腔的水分不再受到向内的强大推力，而是在自重作用下沿着预设的空腔底部的排水路径被有序排出。整个系统的核心目标，从“不让一滴水进来”转变为“让进来的水安全地出去”。实现雨幕原理常采用开放式或半开放式接缝。接缝宽度并非随意设定，而是基于当地最大降雨强度、风压计算来确定的。它既要保证气压平衡，又要防止大量水在强风下发生倒灌。空腔与排水系统的构造要确保背部空腔连续、通畅，无保温材料或结构构件意外阻塞。排水路径必须清晰、直接，且排水出口要有防虫、防风倒灌的装置。

约束密封胶变形，产生高应力引发脱胶或内聚破坏导致密封失效（密封胶级别、计算原则、构造形式见下表）。

表2密封胶级别

级别	实验拉压幅度 /%	位移能力 /%
25	± 25	25.0
20	± 20	20.0
12.5	± 12.5	12.5
7.5	± 7.5	7.5
25级和20级适用于 G 类和 F 类密封胶，12.5级和7.5级仅适用与 F 类密封胶。镶装玻璃用密封胶（G），建筑接缝用密封胶（F）。		

表3 接缝密封胶嵌填深度 e(mm)

基材材质	接缝密封胶嵌填宽度 W	密封胶嵌填深度 e
金属、玻璃等无孔材料	6 ~ 12	6
	12 ~ 18	1/2 宽度
	18 ~ 50	9
混凝土、砌体、砖、石等多孔材料	6.5 ~ 13	等宽度
13 ~ 251/2 宽度		
	25 ~ 50	≥ 13

密封胶宽度计算公式：

$$W_R = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{S}$$

式中：S－密封胶的位移能力(%)(± 7.5 、 ± 12.5 、 ± 15 、 ± 20 ...);

- －接缝的线性位移量 mm (下角标1表示温差位移);
- －接缝的线性位移量 mm(2表示干湿交变位移)

表4 本项目采用的接缝密封型式及密封构造

典型构造元素	A 密封胶 B 密封胶背衬 C 基材 D 隔离胶带 E 接缝填充物	
基本密封型式	接缝原始密封构造	位移后接缝密封构造变形
对接缝密封		
角接缝密封		

2. 三元乙丙橡胶条 (EPDM)

橡胶条在玻璃幕墙系统中较为广泛，主要与型材组合使用，分为穿入式和压入式两种方式，因此胶条和型材配合的端部形式与尺寸的配合非常关键，胶条要充分利用橡胶的特有弹性来达到胶条与型材的有效配合，胶条的尺寸不易控制，有时需要经过多次试模才能生产出合格的胶条，因此胶条的选型应尽量标准化、系统化、通用化。从而降低成本、提高胶条的性能。另外胶条需要具备良好的弹性和抗老化性能，其厚度也要与应用场景相适应，防止因不均匀挤压受力产生间隙，同时施工时要预留一定长度，做为收缩补偿（橡胶材料理化性能见表5）。

表5 硫化橡胶类（除硅橡胶外）密实橡胶材料性能

项目	要求				
硬度（邵氏 A）	50	60	70	80	90
拉伸强度 /MPa	≥ 7	≥ 7	≥ 7	≥ 7.5	≥ 7.5
拉断伸长率	$\geq 300\%$	$\geq 300\%$	$\geq 250\%$	$\geq 150\%$	$\geq 100\%$
断裂强度 / (KN/m)	≥ 20				
压缩永久变形	$\leq 35\%$				
热空气老化	-5 ~ 10				
	-25% ~ 25%				
	-40% ~ 40%				
硬度变化（邵氏 A）	-20℃ ~ 0℃	-10 ~ 10			
	0℃ ~ 23℃				
	23℃ ~ 70℃				
	低温性能				
		-40℃不破裂			

三、施工技术难点分析

（一）幕墙安装精度难

本项目外立面建筑幕墙与门窗呈矩阵分布（见图3），该立面形式在幕墙施工中将存在大量的收边、收口工作，如果接缝施

胶宽度偏离设计要求、而又不能维持相应的宽厚比时，密封胶将难以承受温度应力、风荷载等作用所引起的位移，会导致因位移能力不足出现胶缝开裂、脱粘或渗漏；另外如果幕墙与窗框“咬合”宽度过大，会出现堵塞门窗排水通道，在此情况下水流将会排入幕墙内侧，顺缝隙进入室内；如“咬合”宽度过小，在结构徐变或幕墙位移影响下，密封胶与窗框极易脱开，使窗框侧边缝隙暴露进而诱发渗漏，本工程施工采用高空作业吊篮，施工过程中极难被监督，在高空很难还原图纸初衷，门窗系统与幕墙系统的接缝配合尺寸施工难度非常大，综上所述幕墙安装精度是项目施工技术难点之一。



图3 原创新药发现能力提升平台项目幕墙系统局部示意图

（二）开放式陶板幕墙防渗漏施工难

本项目陶板幕墙采用开放式板缝表面雕刻砖纹设计，相邻板块横向长边拼缝采用上下搭接构造、由陶板生产工艺决定了其内部的空腔结构形态，此类陶板的纵向拼缝由于无足够的密封胶粘结面积，将会导致其难以适应板块平面位移出现开裂，所以注定了纵向短边拼缝无法采用密封胶进行处理，也不能像横缝一样进行搭接处理，而是采用内嵌 EPDM 橡胶条通过相邻板块相互挤压实现密封，但是由于胶条长期暴露于室外环境，在紫外线、冷热循环作用下易发生老化失效；加之胶条仅靠板缝挤压固定，施工偏差（板缝宽度允许误差 $\pm 2\text{mm}$ ）会直接影响压缩量。在“老化 + 偏差”双重因素作用下，原方案密封失效风险极高，此外女儿墙处陶板压顶采用的开放式朝天缝，该处内部空间并非全部采用防水批板进行封闭，且陶板挂件处均要穿透防水钢板，这对防水密封构成严峻的挑战，另外窗台及腰线处的平板立板拼缝在水平风荷载作用下，容易发生雨水倒灌，综上所述开放式陶板幕墙防渗漏是本项目的重中之重（难点示意图4）。

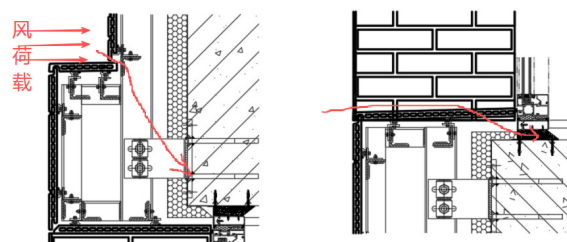


图4 陶板幕墙渗漏路径分析示意图

（三）铝板幕墙防渗漏难

本项目铝板幕墙为施工的关键工作，其拼缝采用密封胶封闭，由于项目总体时间跨度较长，按计划本项目铝板注胶工艺正值10月份，该季节在昼夜交替或阳光直射的立面，铝板表面温度变化剧烈，昼夜温差可达40℃至60℃。这种骤冷骤热使铝板频繁地热胀冷缩，接缝宽度随之反复变化。铝合金的线膨胀系数约为是玻璃的2至3倍。这意味着相同尺寸的铝板在相同温差下，其长度变化幅度远大于玻璃、石材等材料。当接缝在胶体未完全固化时发生拉伸或压缩，胶体内部会被挤压或拉出褶皱，固化后表面便呈现不平的隆起或波浪纹，即“起鼓”若起鼓伴随胶体内部应力集中，在长期温变循环下，可能诱发脱粘或开裂，增加了打胶难度，另外铝板窗台上下口的线条通过拉铆固定铝合金的方法，该做法铝板折边形成的“R角”与铝合金方管之间的拼缝不能完全密封，会使水流在此汇聚，加之风压与重力作用等因素影响，该缝隙处的水分易自吸渗透，又称毛细作用，所以针对以上难点应采取针对性措施（难点分析见图5）。

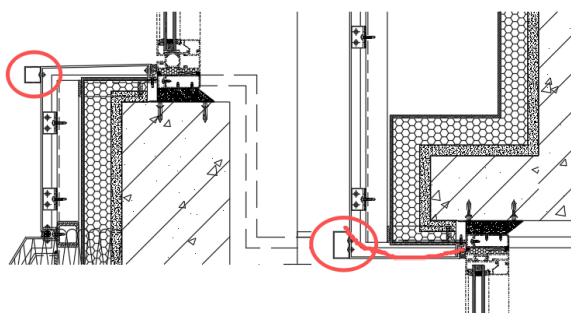


图5 铝板幕墙渗漏路径分析示意图

四、基于施工难点采取的技术措施

根据上述对建筑幕墙防雨水渗漏原因及技术原理的分析，在原创新药发现能力提升平台项目幕墙工程施工中，主要采取以下防渗漏技术措施对其幕墙工程中可能存在的雨水渗漏问题进行重点防护。

（一）确保幕墙安装精度技术措施

为保证幕墙安装精度，消除施工偏差对幕墙渗漏产生的影响，制定了一系列精细化施工措施，施工准备阶段首先制作了实体样板，分析了各工序衔接之间存在的矛盾难点，进入施工阶段通过运用了三维激光扫描技术完成了现场结构的精确测量，经与BIM模型比对确定了结构偏差情况及其纠偏方案，然后通过逆向建模技术得到现场结构实际模型，同时用0.3mm细钢丝在外立面布设了幕墙完成面控制网格；另外为提高骨架的制作安装精度，对加工用液压冲床的刀头进行了检查校正，避免因刀头磨损过大产生误差；其次横梁作为调节面板的关键因素，在制作过程中采用了定型靠模技术，首先根据放样结果将幕墙横梁进行预拼装，然后再运至安装部位与主立柱连接，有效避免了因高空作业施工操作不稳定带来的误差，其次考虑到陶板横梁间距500mm，较为密集的特点，为避免焊接应力集中对幕墙立柱造成的塑性变形，

在满焊作业时采取了分区域间断施焊的方法，并在骨架焊接作业完成后再次采用三维激光扫描仪对其安装偏差进行核对；在面层安装阶段通过在外立面提前布设的控制网格进行精确定位，因本项目面层施工中采用了高空作业吊篮，操作难度非常大，安装完全依赖作业人员素养，对此在施工过程中我们运用了无人机巡航技术，快速实现了对施工过程的全方位监测及动态调整。

（二）陶板幕墙防渗漏技术措施

陶板防渗漏是项目的重中之重，施工前通过对薄弱部位的深入分析，在确保不影响幕墙结构安全且不带来增量成本的前提下，对局部构造功能进行了技术创新，首先对女儿墙部位采用的陶板挂件安装位置由原来的骨架侧面移至平面，这样做的优势在于尽可能延长批水板的长度从而减少了搭接拼缝，也便于安装挂件及钉孔防水密封和质量检查，完全避免了挂件穿透防水批板所带来的渗漏隐患，同时考虑到陶板施工时的三维调节及EPDM胶条固定需要，挂件在原基础上进行了技术创新；其次将窗台板伸入侧板尺寸延长至35mm；并对腰线处水平板拼缝采用迷宫式排水+滴水檐构造原理进行了优化，解决了雨水在水平风荷载作用下沿板缝进入幕墙内部的问题，经过以上措施综合应用，即提高了功效，同时也显著提升了陶板幕墙整体防水性能，项目交付后经历两个台风及雨季检验，该部位未发生任何渗漏，证明了优化方案的有效性。

（三）建筑铝板幕墙防渗漏技术措施

铝板幕墙作为项目的关键工作，为避免方管与铝板拼接处出现自吸渗透，对铝板生产工艺做出了技术优化，将铝板拉铆固定铝合金方管组合方案调整为铝板一体化折弯加工成型方案，从根本上消除排水路径上的毛细现象，使排水路径更加通畅；同时在窗上口板设置滴水檐和泄水孔，确保第一道防线失守后雨水也能有效排出。另外铝板采用了封闭板缝，施工阶段恰逢夏季高温多雨，为避免气候条件对打胶带来的不利影响，我们在材料选择上使用了低模量密封胶以适应胶体在固化过程中因铝板热胀冷缩产生的位移；并在作业前对其与基材相容性做了专项检测，另外还通过作业顺序调整，错开不同部位施胶时间来应对气候因素影响。

五、实施效果及经验总结

本项目在施工中通过落实“三维激光扫描技术+无人机巡航技术+骨架靠模预拼技术”测量施工技术；“挂件功能集成创新+拼缝构造优化”陶板安装技术；“一体折弯技术+泄水构造”铝板加工技术；使工期节约25天，且项目交付后经历两个雨季检验，所有幕墙部位取得了无一处渗漏的成果；技术创新的实施也有效避免了后期渗漏维修成本，根据市场价合理估算人、材、机综合节省成本约20万元，并避免了因渗漏导致的业主投诉，得到了建设单位的高度认可。

建筑幕墙渗漏问题一直是困扰建筑行业的通病，通过对原创新药发现能力提升平台项目幕墙施工的回顾，我认为作为幕墙施工一线从业者要充分了解幕墙渗漏机理、材料属性、防治思路，

并应尽可能早地介入项目，在图纸阶段识别并解决潜在隐患，避免施工阶段返工而造成损失；同时要注重数字化智造建造技术的运用，为科学建造、低碳建造助力，还应与参建各方建立良好沟通机制通过相互提资减少信息孤岛，及时解决不同专业工程界面之间的矛盾使工作能够协调推进。

六、结语

幕墙防渗漏是一项系统性工作，应坚持源头治理摒弃“哪里

漏”、“堵哪里”的传统思维，通过合理的构造策略、优异的材料性能、专业的施工技术，不断提升建筑幕墙防渗水平有效避免因雨水渗漏对幕墙结构造的不利影响，展望未来幕墙建造在机器人技术、AI 大数据模型训练、数字孪生等技术的加持下，将为用户创造更优质的智慧生活空间。

参考文献

-
- [1] 张云齐, 占晓晖. 幕墙工程的防雨水渗漏设计. 中国建筑装饰装修 [J], 2021 (4) .
 - [2] 徐赛列, 汝祺祥. 幕墙工程的防雨水渗漏设计施工技术研究. 建筑实践 [J], 2020 (8) .
 - [3] 杨健, 开放式非透光幕墙防水设计与创新实践. 中国建筑防水 [J], 2023 (3) .
 - [4] 蔡饶, 高崇亮, 曹亚军. 幕墙渗漏原因分析与检测技术. 施工技术 [J], 2025(2).
 - [5] DG/T108-56-2019 《建筑幕墙工程技术标准》[S]. 上海: 上海市住房和城乡建设管理委员会, 2019.
 - [6] T/CECS 581-2019 《建筑接缝密封胶应用技术规程》[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2019.

建筑工程质量检测中的问题及改进措施研究

郎克乐

亳州市建设工程质量检测有限公司, 安徽 亳州 236800

DOI:10.61369/ERA.2026060043

摘 要 : 为了解决建筑工程项目质量检测取样的偏差、环节缺失、信息延迟以及闭环不到位等问题,在材料进厂、中途检验、现场检查及最终验收过程中形成一个完整连贯的检测体系,明确规范见证取样、仪器标定、检测复查和问题整改程序,应用信息化跟踪监控、非破坏性检查以及预警提示等手段来提升检测准确性,把控工程质量水平以及处理隐患的速度。

关 键 词 : 建筑工程;质量检测;见证取样;无损检测;信息化追溯

Research on Problems and Improvement Measures in Building Engineering Quality Inspection

Lang Kele

Bozhou Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Bozhou, Anhui 236800

Abstract : To address issues such as sampling bias, missing links, information delay, and incomplete closed-loop management in the quality inspection of construction projects, a complete and coherent inspection system is established throughout the processes of material entry, mid-process inspection, on-site inspection, and final acceptance. The procedures for witnessed sampling, instrument calibration, inspection review, and problem rectification are clearly defined and standardized. Information-based tracking and monitoring, non-destructive testing, and early warning prompts are applied to enhance the accuracy of inspections, control the quality level of the project, and improve the speed of handling potential risks.

Keywords : construction engineering; quality inspection; witnessed sampling; non-destructive testing; information-based traceability

引言

建设工程质量检测不仅仅是验收步骤,更是寻找问题、防范风险、保证结构安全的一道屏障。伴随着建设规模的增长及施工水平的发展,材料质量、施工技术和现场管理越来越要求检测精确度。当前还存在着取样不符合规定、数据失实、结果未充分利用的情况导致质量把控不到位的现象。针对以上现象加以探讨研究有利于促进建筑工程质量检测从“亡羊补牢”向“防微杜渐”的转变。

一、建筑工程质量检测的重要性与基本内容

(一) 质量检测是工程质量控制的重要依据

建筑工程质量检测是为了确定工程施工中使用的工程实体的质量是否达到工程图纸设计以及规范的要求的一项重要技术措施,在检测过程中主要是采取了试验、量测、取样、比对这些方法来检查建筑材料、结构构件、施工质量及工程实体等。而在施工阶段混凝土强度、钢筋力学性能、防水材料质量、砂浆强度、砌体质量、地基承载力等的检测结果都决定着整个建筑工程的结构的安全性和使用功能的好坏。而检测数据更是作为工程验收的重要凭证,同时也是施工单位进行质量整改、监理单位实施现场监督、建设单位开展管理决策的重要依据。一旦检验不到位就容易导致不合格产品流入现场,也可能会让施工误差、结构开裂、

强度不够等隐患被隐瞒下去,从而对整个工程的质量产生负面影响。所以质量检测是工程质量把控的基础与依托^[1]。

(二) 质量检测贯穿工程建设全过程

建筑工程质量检查并非工程竣工后的一次性验收行为,而是一个在整个项目建设过程中持续进行的质量把控行为,在工程建设前期主要的检验项目包括材料设备进场复试、施工组织设计及方案的技术审核、试配比例验证等,其目的在于防止质量问题的发生,在工程建设期着重对施工过程随机检查、分项工程验收、构件及砌体强度检测、重要工序复核等工作以防止质量问题发生,在建设完毕之后还需进行对主体结构的安全检测、建筑节能检测、室内污染检测、使用功能检测等一系列工作来作为工程竣工验收的质量保证。全过程检查可做到问题早发现、早分析、早整改,防止出现质量问题后期集中爆发的情况,降低返修费用

开支，加快工程进度，如图1所示。



（三）质量检测对工程安全与行业规范具有保障作用

建筑工程质量检测不但与一个工程的质量有关还关系到整个建筑行业管理能力和安全质量秩序。严格执行质量检测有利于提高施工单位的质量意识，促进监理单位严格把关，使建设单位了解自身工程质量的真实情况，形成立体化的质量监管模式。并且，检测记录也是监管部门进行工程质量检查、明确各方责任及排查隐患的主要参考材料。真实的、完整的、可核查的检测记录可以清楚地看出所用材料、施工工艺、质量问题处理情况以及最终验收结果等重点内容，避免出现质量不清、整改不到位、弄虚作假的现象。在不断进步的工程建筑标准下，工程质检需要更加精细化，信息化及全面化发展，让质检成果切实应用于工程的质量监管以及行业的质量提升。

二、建筑工程质量检测中存在的主要问题

（一）检测管理制度落实不到位

一些建设工程虽有质保管理制度，但是对检测方案，检测频率，见证取样，复核报告以及处理措施等方面落实不到位，使得该制度只是存在于文字当中而已，《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300—2013明确规定，工程质量验收应该以检验批，分项工程，分部工程，单位工程为主要层次来进行划分，但是在日常建设过程中经常会出现检验批划分模糊不清，检查内容缺失，复验措施不足等情况。一些施工企业为了节约时间与费用，对于钢筋原材、混凝土强度、防水材料、砌筑砂浆等重要指标减少取样检测的数量，在检测结果出来之前就开始进入到下一施工环节使得检测成了事后验收工作，减少了预防的作用^[2]。

（二）检测流程不规范，样品代表性不足

取样、制备、养生、送检及试验的进行直接影响到实验结果的准确性，在这方面，以混凝土试件来说，根据 GB/T 50081—2019的规定，在试件成型后应该放在温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度大于50%的环境中静置1d ~ 2d后再进行拆模，拆模后则应放入温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度在95%以上的标准养护室中进行测试，试件间距最好能保持在10mm ~ 20mm之间，如果不能满足以上规定的养护环境温湿度条件、标号标识或者龄期控制、运输保护等任何一个环节都不到位，那么就会导致28d抗压强度的结果产生较大误差，严重的会使得强度评定与真实的结构状况

不符。现场存在的主要问题是见证取样不到位、试样标签混乱不清、同条件试块远离结构养护部位、送检资料缺失等问题使得试样无法体现建筑工程实体的质量情况，在大体积混凝土浇筑以及冬施、夏施过程中环境差异会导致试块强度波动更大，即使试验结果显示合格也不能作为结构安全依据。

（三）检测数据真实性和应用效果不足

检测结果应当满足原始数据齐全、步骤清晰可见、结论能够验证的要求，同时一些检测项目还存在着人员签字潦草、记录台帐更新滞后、基础图谱丢失、审查工作走过场的现象，《建筑结构检测技术标准》GB / T50344 - 2019明确规定了适用于建筑结构检测与评定，要求检测结果用以支撑建筑结构的状况识别及安全性评估，在实际中一些检测报告仅为施工备案资料而无与现场整改、质量核验以及追责挂钩的现象。混凝土回弹强度、钢筋保护层厚度、楼板厚度、构件裂缝宽度等数据若缺乏验证机制，则易产生“检测合格、现场仍然存在问题”的管理瓶颈。数据造假以及利用不够充分都会造成质量检测技术的价值下降与工程质量管理成效的削弱。

三、建筑工程质量检测问题产生的原因分析

（一）质量责任意识不足

工程建设质量问题出现的根本原因在于参与方的质量意识薄弱，在建设单位、施工单位以及检测机构中依然把工程质量检验看成是验收资料的一个组成部分，是工程的附属品，而忽视了它作为施工过程中的质量风险控制以及质量问题预防的作用，造成了检测计划滞后、时间节点安排不当、检测结果反馈滞后的局面。从工程建设质量管理的角度来讲，对于所用材料、隐蔽工程、结构实体及竣工验收等阶段都应当做到检测封闭循环，但在具体管理过程中却容易发生“先施工、后补检”、“先验收、后补资料”的情况。施工方注重的是工期节点、造价问题而监理单位对于见证取样及送样程序以及检测报告审查把控不够严格，检测单位如果不够独立，在受到工程进度压力或者受到被检测单位委托关系的影响时会出现检测出问题之后整改不明确、不全面，复验不能及时进行等情况出现，从而使得工程质量检测失去应有的监督作用^[3]。

（二）检测人员专业能力不均衡

土建工程质量检验包括了混凝土、钢筋、防水材料、砌体工程、地基与基础、建筑能耗、室内空气质量等多项领域，在这方面对于检测员的理解水平、仪器使用技能以及试验结果分析能力、施工现场危险源辨识能力都有很高要求。有一些检测人员对于 GB 50204、GB 50300、GB/T 50081等一系列常用的标准不是很熟悉，不能对新的建筑材料、预制构件、高强混凝土等进行及时更新，致使取样的数量、试块的大小、养护条件、载荷速率、测试准确度等方面的约束不够严格。比如在做混凝土抗压试验的时候，试块的表面光洁程度、加载速度及龄期都会影响到其强度的数据值；钢筋检测时，拉力试验、弯曲试验以及重量偏差检验如果操作不当也将影响到材料是否合格的评定结果，人员资

质低只会停留在对数据表面的判定上，不能够及时发现问题隐患所在。

（三）信息化管理水平不高

目前一些工程项目的质量抽检依然依靠纸质台账、手工登记簿以及人工传递的方式进行，抽检信息分布在各个参与方手中，如施工企业、监理公司、检测机构及甲方手里，相互之间信息互通慢，可追溯性差。样品从抽样、封装、送检、测试到出具结果，一旦缺少二维码标识、电子签字、时点记录、影像留存就可能会导致样品来源不明、报告滞后、原始数据丢失等情况发生；一些工程项目的检测信息没有形成统一的质量检测数据库，检测报告只是作为竣工资料存档，没有同现场整改、复查验收及质量责任追溯结合起来。信息化程度不高一方面加大了人员干预的空间，另一方面削弱了对异常信息的感知能力，导致混凝土强度波动，钢筋保护层偏差，楼板厚度不够等现象不易及时发出警报^[4]。如表1所示。

表1 质量检测问题成因及影响分析表		
成因类别	具体表现	可能影响
责任意识不足	检测计划滞后，整改闭环不完整	质量隐患发现不及时
人员能力不足	标准理解不深，仪器操作不规范	检测结果准确性下降
信息化水平较低	资料分散，数据追溯困难	报告滞后，监管效率降低
协同机制不完善	施工、监理、检测衔接不顺	问题整改责任不清

四、建筑工程质量检测的改进措施

（一）完善检测管理制度，强化全过程责任落实

工程质量检测要从体制上实施全环节监管制度，界定业主、施工方、监理单位及检测单位对检测计划安排、见证抽取样品、委托检测流程、审阅结果以及处理缺陷的责任范围。项目开始前，需根据施工方案及质量评定标准制定专项质检计划，确定钢筋、水泥、砂石子、防水卷材、混凝土试件、砌体试件、基础工程、主体结构等检测内容及其频率，杜绝漏检、少检现象发生。在建筑过程中，必须加强见证抽样与送样的落实，重要物资、重要分项、隐蔽部位要有采样记录表、送样登记台帐、试验报告书、整改跟踪单。对于试验不合格项，必须形成“发现问题、查找原因、落实整改、复查合格、资料存档”的闭合回路，使试验

结论真正起到为工程施工质量管理的作用。

（二）提升检测人员能力，规范检测技术操作

检测人员技术水平高低直接影响检测结果的正确与否，所以要加强人员职称管理、岗位培训和技术考核。检测单位应当定期对人员进行培训学习《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300，《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081等有关标准，熟悉其取样量，试件大小，养护环境，加载速度，测定精度以及数据处理方式等具体技术要求。对于混凝土抗压强度检测，钢筋拉伸试验，回弹法，测厚，钢筋保护层厚度检测等重点检测项目，要规范化操作，降低人为因素的影响。另外也要注意检测仪器定期的标校和保养，如压力试验机、回弹仪、钢筋探测仪、超声波测厚仪等等仪器必须定期进行标校保证仪器工作可靠、仪器读数正确^[5]。

（三）推进信息化建设，提高检测数据真实性与应用价值

建筑项目的质量监测要加强信息系统的建设，以信息系统为载体，完成检测方案、取样、见证送样、试验过程、检测报告出具及整改复核等环节的全程跟踪管理。通过条形码标签化样品、电子签名、视频留存、机器抓取、网上查询等功能，避免人工操作和人为干扰因素的影响，保证检测资料的真实性、全面性以及可查证度。质量检测的数据不仅要作为工程竣工归档的依据，还要同步到施工现场管理当中去，定期对混凝土强度变化情况、钢筋混凝土保护层超标、楼板厚度不够、防水材料不达标等现象做出预警。通过对数据分析以及发展趋势分析能够给施工单位提供施工方法上的改进；为监理单位做好重要部位检查提供借鉴，提高建筑工地工程质量检测的应用效果。

五、结语

建筑工程质量检测覆盖了建筑材料进场阶段，施工中各个阶段以及结构实体、竣工验收等各阶段，是减少潜在的质量风险，保证工程质量的重要手段，对检测监管不到位，程序混乱，利用率低，人员素质参差不齐的问题要健全相应机制，严格见证取样，检测工作，做好仪器维护及数据分析工作，实现实时信息化监测。从源头、细节上进行全过程、精准化、数字化调整，让检测结果更加客观公正、及时发现并处理质量问题，从而推动建筑行业整体水平稳步上升。

参考文献

[1] 胡晓琳, 高博. 建筑工程质量检测工作中的技术措施 [J]. 住宅产业, 2023 (02) : 87–89.
[2] 闫宇嵩. 建筑工程施工材料质量检测存在的问题与解决办法 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33 (10) : 48–50.
[3] 钟泉政. 建筑工程质量检测机构核心竞争力评价研究 [D]. 东北林业大学, 2024.
[4] 周波, 陈剑, 肖明明. 建筑工程质量检测存在的问题及系统化解决方案 [J]. 房地产世界, 2025, (12) : 164–166.
[5] 周杰, 李云霄, 李继能. 关于建筑工程节能工程质量检查工作中存在的几方面的问题分析及优化 [J]. 工程质量, 2023, 41 (S1) : 167–169.

石油钻井过程中井漏问题成因及防治技术研究

崔香明

中石化西南石油工程有限公司重庆钻井分公司, 重庆 400042

DOI:10.61369/ERA.2026060008

摘 要 : 井漏是石油钻井施工中常见且危害突出的井下复杂问题, 不仅会造成钻井液大量流失、延误施工周期, 还易诱发井塌、井喷等安全事故, 严重影响钻井效率与作业安全。本文围绕石油钻井井漏问题, 系统分析其主要成因, 将井漏诱因划分为地质因素、工程与工艺因素及其他诱导因素三类, 其中地质因素为井漏发生的根本原因, 主要受地层孔隙、裂缝、溶洞及地层压力分布控制, 工程与工艺因素是主要诱发因素, 涉及钻井液性能、施工参数、操作规范等多个方面, 自然环境与人为误操作等外部因素则会加剧突发性井漏风险。在此基础上, 从钻前预防、随钻预防及降低激动压力等维度梳理井漏预防技术, 构建源头防控与实时调控相结合的预防体系; 同时针对不同漏失程度与地层类型, 介绍常规堵漏、化学与固结堵漏、特殊地层专项处理及新型堵漏材料与技术等治理手段, 形成覆盖预防与治理的井漏综合防控技术体系。研究可为复杂地层钻井井漏防治提供技术参考, 对提升钻井施工安全性、降低井下复杂风险具有重要意义。

关 键 词 : 石油钻井; 井漏; 漏失成因; 地质因素

Research on the Causes and Prevention and Control Technologies of Well Leakage During Oil Drilling

Cui Xiangming

Chongqing Drilling Branch of Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Chongqing 400042

Abstract : Well leakage is a common and hazardous downhole complication encountered during oil drilling operations. It not only leads to significant loss of drilling fluid and delays in construction schedules but also easily triggers safety incidents such as well collapse and blowout, seriously affecting drilling efficiency and operational safety. This paper focuses on the issue of well leakage in oil drilling, systematically analyzing its primary causes. The incentives for well leakage are categorized into three types: geological factors, engineering and technological factors, and other inducing factors. Among these, geological factors are the fundamental cause of well leakage, primarily governed by formation porosity, fractures, caves, and formation pressure distribution. Engineering and technological factors are the main inducing factors, involving various aspects such as drilling fluid properties, operational parameters, and operating procedures. External factors such as natural environmental conditions and human misoperations can exacerbate the risk of sudden well leakage. Building on this analysis, the paper outlines well leakage prevention technologies from dimensions such as pre-drilling prevention, prevention during drilling, and reduction of surge pressure, establishing a prevention system that combines source control with real-time regulation. Additionally, it introduces treatment methods tailored to different leakage severities and formation types, including conventional plugging, chemical and consolidation plugging, specialized treatments for specific formations, and novel plugging materials and technologies, thereby forming a comprehensive prevention and control technology system for well leakage that covers both prevention and treatment. This research provides technical references for preventing and controlling well leakage during drilling in complex formations and is of great significance for enhancing drilling safety and reducing downhole complications.

Keywords : oil drilling; well leakage; causes of leakage; geological factors

引言

随着石油勘探开发向深井、超深井、复杂地层延伸, 地层岩性、压力分布愈发复杂, 裂缝型、溶洞型等易漏地层出现频率显著增加, 井漏问题的发生概率、漏失程度及治理难度也随之提升, 传统防治技术已难以满足复杂工况下的井漏防控需求, 井漏问题已成为制

约石油钻井工程高效、安全开展的核心瓶颈之一。因此，系统剖析井漏问题的发生成因，明确各类诱因的作用机制，探索科学、高效、适配不同地层条件的防治技术，构建完善的井漏综合防控体系，对降低井漏发生率、减少漏失损失、保障钻井作业安全具有重要的理论价值与工程实践意义。基于此，本文结合现有研究成果与工程实践经验，系统分析石油钻井过程中井漏问题的主要成因，分类梳理针对性的预防与治理技术，重点探讨新型堵漏材料与技术的应用优势，为石油钻井工程中井漏问题的科学防控提供技术支撑与参考，助力钻井工程向高效、安全、低成本方向发展。

一、井漏成因分析

（一）地质因素分析

地质因素是井漏发生的根本原因，主要由地层孔隙度、渗透率、裂缝发育程度及地层压力等固有特性决定，难以通过工程手段彻底改变，是井漏防控的核心关注点。井漏主要发生在三类地层，裂缝型地层（含天然裂缝与诱导裂缝），天然裂缝多发育于碳酸盐岩、页岩等岩层，裂缝规模、连通性直接影响漏失程度，诱导裂缝则由钻井液柱压力超地层破裂压力产生；孔隙型地层多见于疏松砂岩、砾岩，漏失初期较慢，随钻进会逐步加剧；溶洞型地层常见于碳酸盐岩，因溶蚀连通溶洞易造成钻井液瞬间大量流失，漏失危险且难控。此外，地层压力偏低或分布不均，形成压力差或匹配困难，也会显著提升井漏风险。

（二）工程与工艺因素分析

除了地质原因引起井漏之外，钻井作业中的设计、材料或施工等方面的工程原因也不可忽视，如压力控制不当、井眼稳定性差、钻井速度过快、未及时固井、井眼轨迹设计不合理、钻井液体系选择不当、堵漏材料不合适等原因也会导致或者加重钻井液的漏失^[1]。工程与工艺是井漏的主要诱因，核心与钻井施工技术、操作相关，可通过优化工艺、规范操作防控。钻井液性能不合理直接增大漏失风险，密度过高易压裂地层，粘度、切力过低会导致滤饼质量差无法封堵孔隙裂缝，失水量过大则易造成滤饼脱落。钻井工艺不当同样诱发漏失，钻速过快影响井壁稳定，井眼轨迹不合理会冲刷破坏井壁，固井时水泥浆密度过高、顶替速度过快易超地层破裂压力。施工操作不规范也是重要原因，起下钻过快产生过大压力，易破坏滤饼或压裂地层；液位监控不及时，轻微漏失易发展为严重井漏。

（三）其他诱导因素

除地质因素、工程与工艺因素外，一些外部诱导因素也会增加井漏风险，主要包括自然环境因素与人为因素，此类因素多为偶然发生，但易引发突发性井漏^[2]。自然环境因素方面，钻井区域发生地震、暴雨、山洪等自然灾害时，会导致地层应力重新分布，诱发地层裂缝发育，破坏井壁稳定性，引发井漏，此外，地下水位变化过大，会导致地层压力波动，打破钻井液液柱压力与地层压力的平衡，诱发漏失；人为诱导因素则主要体现在钻井施工的各类不当操作中，钻井过程中，误操作导致钻井工具碰撞井壁，会破坏井壁完整性，引发漏失，相邻井施工时，钻井液窜入本井地层，会导致地层压力异常，进而诱发漏失，同时，钻井过程中违规加入化学药剂，会破坏钻井液性能，导致滤饼质量下

降，引发渗漏。

二、井漏预防技术

（一）钻前预防措施

钻前预防是井漏防控的核心，关键在于前期勘察与方案优化，从源头降低漏失风险^[3]。通过地震勘探、测井及资料分析，精准掌握地层岩性、裂缝、压力等参数，明确漏失层位与风险等级，绘制地质风险分布图。在此基础上优化井身结构，合理下入套管隔离易漏地层；优选钻井液性能，提前配置防漏体系；科学确定钻井、起下钻等施工参数，避免工艺不当引发漏失。同时备足防漏堵漏材料，检查设备运行状态，开展人员操作与应急培训，为后续钻井提供安全保障。

（二）随钻预防技术

随钻预防是井漏防控的核心，关键在于施工中实时监测、动态调控，早发现、早处置，防止漏失扩大^[4]。施工时需重点监测泥浆罐液位、循环流量、钻井液性能等参数，及时判识漏失情况；根据地层变化动态优化钻井液性能，合理调整密度、粘度、切力及失水量，提升封堵能力并保持压力平衡；规范钻井、起下钻操作，控制速度，避免激动压力、抽吸压力及井壁损伤，维持井内压力稳定；对易漏、疑似漏失地层提前加入桥接、封堵材料进行预处理，必要时采用分段钻井、分段封堵，从源头防控井漏。

（三）降低激动压力的技术措施

激动压力是诱发井漏的重要因素之一，主要产生于起下钻、钻井过程中，当激动压力超过地层破裂压力时，会诱发地层裂缝，引发漏失^[5]。因此，降低激动压力是井漏预防的重要手段，核心是通过优化操作、改进技术，减少压力波动。起下钻速度过快是产生激动压力、抽吸压力的主要原因，因此需严格控制起下钻速度，根据井深、井径、钻井液性能等参数，确定合理的起下钻速度，避免速度突变^[6]。起钻时采用分段起钻、中途循环的方式，及时补充钻井液，维持井内液柱压力稳定，减少抽吸压力，下钻时则控制下钻速度均匀，避免钻井液被快速挤压，产生过大的激动压力^[7]。同时要优化钻井液流变性能，钻井液的流变性能直接影响激动压力的大小，可通过调整钻井液的粘度、切力，改善钻井液的流动特性，减少钻井液在井内流动时的压力损失，降低激动压力，同时控制钻井液的固相含量，避免固相颗粒过多导致钻井液流动阻力增大，加剧压力波动^[8]。此外还需改进钻井工艺，采用定向钻井、水平钻井等先进工艺，优化井眼轨迹，减少井壁阻力，降低钻井液流动时的压力损失，钻井过程中采用低密度钻井

液体系，在保证井壁稳定的前提下，尽量降低钻井液液柱压力，减少激动压力与地层压力的差值。固井过程中则优化水泥浆性能与顶替工艺，控制顶替速度，减少环空压力波动，避免超过地层破裂压力。

三、井漏治理技术

（一）常规堵漏技术

常规堵漏技术适用于轻微至中度漏失，操作简单、成本低、见效快，核心是向钻井液中加入封堵材料，在漏失通道内形成封堵层。桥接堵漏技术（常规堵漏核心），适用于孔隙型、微小裂缝型漏失，向钻井液中加入石英砂、核桃壳等桥接剂，在压力差作用下桥联形成初步封堵层，再通过固相颗粒沉积形成致密滤饼，需匹配桥接剂粒径与漏失通道大小^[9]。高粘度泥浆堵漏技术，适用于轻微、渗漏型漏失，通过加入 CMC、黄原胶等增粘剂（或膨润土）提高钻井液粘度、切力及固相含量，减缓漏失并增强滤饼封堵能力。常规水泥浆堵漏技术，适用于中度、裂缝型漏失，将水泥浆注入漏失地层，凝固后形成坚硬封堵层实现永久堵漏，需根据地层深度、温度确定配方与凝固时间，控制注入速度与压力。

（二）化学堵漏与固结堵漏技术

化学堵漏与固结堵漏技术适用于中度至重度、复杂裂缝型漏失，核心是通过化学药剂反应形成高强度稳定封堵层，长效性优于常规技术^[10]。化学堵漏采用脲醛树脂、环氧树脂等封堵剂，流动性好，可渗透微小裂缝孔隙并固化，适用于微小裂缝、高渗透地层漏失，需按比例混合注入并根据漏失类型选剂。固结堵漏适用于严重裂缝、溶洞型漏失，注入固结剂（如水泥 - 水玻璃浆液），将地层岩石与封堵材料固结为整体，溶洞型漏失可先填骨料再注固结剂。复合化学堵漏结合多种封堵剂优势，适用于复杂漏失场景，可通过桥接剂 + 化学封堵剂、水泥浆 + 化学封堵剂等组合，实现快速长效堵漏。

（三）特殊地层井漏处理技术

溶洞型、高压裂缝型、易坍塌漏失地层的井漏，漏失量大、封堵难、易复发，需结合地层特性采用针对性技术。溶洞型地层，漏失量极大，采用填充 - 封堵结合技术，先填入碎石等骨料缩小漏失通道，再注入高强度水泥浆或化学固结剂固结；大型

溶洞分段处理，漏失量过大时先暂堵再永久封堵。高压裂缝型地层，漏失压力高、风险大，控压 - 封堵同步，调整钻井液密度控压防井喷，注入高强度封堵剂高压填充裂缝，实时监控并动态调整方案。易坍塌漏失地层：兼具漏失与坍塌风险，防塌 - 堵漏结合，优化钻井液并加防塌剂稳定井壁，用低粘度高滤失封堵剂形成滤饼封堵通道，控制施工速度，必要时分段施工。

（四）新型堵漏材料与技术介绍

随着石油钻井技术发展，新型堵漏材料与技术涌现，相比传统技术，具有封堵效率高、适应性强、环保便捷等优势，有效解决复杂地层井漏难题，推动防治技术升级。新型堵漏材料中，纳米封堵材料以纳米颗粒为核心，粒径小、吸附性强，可渗透微小裂缝形成致密高强度封堵层，适配微小裂缝、高渗透地层，环保且能减少漏失复发；可降解堵漏材料由天然高分子改性制成，可降解、不堵塞油气通道，适配油气开发后期井漏，流动性好、封堵快速；柔性封堵材料以高分子弹性体为核心，韧性佳、适配裂缝型、易变形地层，能适应地层变形，封堵效果稳定。新型堵漏技术方面，定向射孔堵漏技术可精准注入封堵剂，适配复杂裂缝、定向漏失地层，节省成本、提升效率；智能堵漏技术结合大数据、物联网，实时采集参数并智能调整方案，适配复杂多变井漏场景，可提前预警；泡沫堵漏技术以泡沫为载体，适配低压、高渗透、大裂缝地层，流动性好、成本低、环保无污染。

四、结束语

本文围绕石油钻井过程中井漏问题的成因及防治技术展开系统研究，结合现有研究成果与工程实践，全面剖析了井漏发生的地质因素、工程与工艺因素及其他外部诱导因素，明确了各类因素的作用机制，梳理了覆盖钻前、随钻及激动压力控制的全方位预防技术，分类总结了常规堵漏、化学与固结堵漏、特殊地层专项处理及新型堵漏材料与技术在内的治理方案，构建了成因识别 - 预防管控 - 精准治理的井漏综合防控思路。本文的研究成果可为石油钻井工程井漏防治提供理论参考与工程借鉴，助力钻井作业实现高效、安全、低成本推进，为石油勘探开发事业的持续发展提供支撑。

参考文献

- [1] 杜征鸿, 祁杰, 黄丹超, 等. 深井超深井井漏原因及堵漏技术综述 [J/OL]. 特种油气藏, 1-15[2026-03-20].<https://link.cnki.net/urlid/21.1357.TE.20250529.1722.004>.
- [2] 薛蓉静. 基于机器学习的井漏智能预警关键技术研究 [D]. 电子科技大学, 2025.DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2025.002877.
- [3] 陈昆鹏, 刘东鑫, 于庆川, 等. 渤中19-6油田井漏治理技术的优化及应用 [J]. 天津科技, 2025, 52(01): 83-86.DOI: 10.14099/j.cnki.tjkj.2025.01.009.
- [4] 何均宾, 柳明, 于学勇, 等. 威远区块基于地质工程一体化的井漏风险识别技术研究 [J]. 能源与环保, 2024, 46(10): 77-84+91.DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2024.10.013.
- [5] 周鹏高, 罗川, 徐智昶. 应用渗透率对比法随钻识别井漏类型 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(10): 50-53.
- [6] 白玉龙. 钻井工程中井漏预防措施探讨 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(08): 50-52.
- [7] 韩亮. 基于时序数据增强的井漏风险智能诊断方法 [D]. 中国石油大学 (北京), 2024.DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2024.001349.
- [8] 张彦军. 石油钻井工程的井漏原因和防漏堵漏工艺方案研究 [J]. 科技风, 2024, (14): 81-83+93.DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.2024.14.028.
- [9] 吕金帅, 李玉雄, 俞辉, 等. 钻井工程中井漏预防及堵漏技术 [J]. 自动化应用, 2024, 65(02): 126-128.DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.02.040.
- [10] 陈林, 陆海瑛, 王泽华, 等. 融合 LightGBM 和 SHAP 的井漏类型判断及主控因素分析 [J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(06): 771-777.

老旧小区燃气管道改造设计与安全评估

靳毓茜

佳木斯中燃城市燃气发展有限公司, 黑龙江 佳木斯 154002

DOI:10.61369/ERA.2026060012

摘 要 : 在城市化发展过程中, 逐渐突出了老旧小区燃气管道老化问题, 威胁居民用气的安全性。本文分析了老旧小区燃气管道改造设计与安全评估。在改造设计方面, 要做好管材选择和布局优化以及管径设计等, 以老旧小区实际情况采取合适的改造设计工作。在安全评估过程中, 要合理选择评估方法, 全面评估燃气管道运行的安全性, 推动城市燃气系统健康发展。

关 键 词 : 老旧小区; 燃气管道; 改造设计; 安全评估

Design and Safety Assessment of Gas Pipeline Renovation in Old Residential Areas

Jin Yuqian

Jiamusi Zhongran Urban Gas Development Co., Ltd.Jiamusi, Heilongjiang 154002

Abstract : In the process of urbanization development, the aging problem of gas pipelines in old residential areas has gradually become prominent, threatening the safety of gas consumption for residents. This article analyzes the design and safety assessment of gas pipeline renovation in old residential areas. In terms of renovation design, it is necessary to do a good job in pipe selection and layout optimization, as well as pipe diameter design, and adopt appropriate renovation design work based on the actual situation of old residential areas. In the process of safety assessment, it is necessary to choose appropriate assessment methods, comprehensively evaluate the safety of gas pipeline operation, and promote the healthy development of urban gas systems.

Keywords : old residential areas; gas pipeline; renovation design; safety assessment

老旧小区燃气管道的安全问题要引起重视, 因为老旧小区建设时间较长, 一些燃气管道很容易出现老化问题, 不仅降低燃气供应效率, 还会威胁人们的生命安全。例如频繁发生管材锈蚀和穿孔等问题, 引发燃气泄漏甚至爆炸等事故。此外一些老旧小区的燃气管道布局不合理, 例如当时建设中没有合理设置建筑物间距, 加剧安全隐患。在这一背景下, 突出了老旧小区燃气管道改造设计的重要性, 不仅可以提高居民生活质量, 还可以保障城市基础设施运行的安全性。

一、老旧小区燃气管道现状

(一) 管道老化情况

老旧小区燃气管线普遍存在老化问题, 出现了锈蚀和穿孔等问题, 威胁了管道运行的安全性。在内外环境因素的干扰下, 将会逐渐减薄钢管壁厚, 同时会降低钢管强度, 最终引发泄漏事故。此外温湿度和土壤侵蚀也会加速管道老化^[1]。例如在潮湿和酸性土壤中, 将会提高钢管腐蚀速度, 针对 PE 管, 很容易出现老化变脆的情况。出现老化问题主要是因为建设时间较长, 当时设计标准不符合当前情况, 同时没有定期开展检测和维护工作, 不断积累老化问题, 将会影响管道的耐久性, 威胁居民用气的安全性。

管道老化会诱发各种潜在问题, 首先管道出现锈蚀和龟裂问题, 将会降低管道的承压力, 很容易引发泄漏事故。其次管道运行中改变压力, 或者发生外力冲击, 将会引发管道破裂问题。此外燃气管道通常在地下埋设, 不利于直接发现老化状况, 提高了问题排

查和处理的难度。因此需要深入分析管道老化问题, 提高安全隐患识别的有效性, 同时为后续改造设计工作的开展提供指导。

(二) 布局不合理

燃气管道布局不合理指的是管道和建筑物的间距不合理, 如果出现燃气泄漏问题, 将会引发火灾或者爆炸事故, 整体事故的影响范围比较大^[2]。此外燃气管道穿越地下排水管或者热力管等, 利用交叉布置方式很容易损坏燃气管道, 因为其他管道运行中会产生振动和热量影响, 最终干扰燃气管道。一旦发生泄漏事故, 将会引发一系列的连锁反应, 例如会引发水体污染, 导致其他管线被破坏, 严重影响周围环境。

(三) 其他常见问题

老旧小区燃气管道缺乏标识, 在开展其他市政施工项目中, 施工单位不利于判断燃气管道的位置, 很容易引发误挖等问题。此外缺乏标识, 在应急抢修工作中工作人员很难及时定位事故部位, 延长了抢险时间, 加剧事故的负面影响^[3]。此外在燃气管道

中, 阀门属于重要的设施, 因此需要重视阀门老化问题, 出现这一问题之后不利于正常使用管道, 尤其在紧急情况下无法及时切换气源, 引发严重的安全事故。

二、老旧小区燃气管道改造设计

(一) 管材选择

管材的选择关系到管道系统运行的安全性, 常用的燃气管材包括钢管和聚乙烯管, 二者的特点和适用性具有较大的差异性。钢管的强度和抗压性较高, 而且具备耐高温性, 适用于输送高压燃气和复杂地质条件。但是这类管材缺乏耐腐蚀性, 因此选用钢管要同时配置防腐措施, 避免出现锈蚀穿孔问题^[4]。PE 管的耐腐蚀性较强, 施工过程也相对简单, 而老旧小区地下空间狭窄, 可以发挥 PE 管的柔性优势, 适应各种地形条件, 降低施工难度。

设计人员要结合老旧小区实际情况选择管材。首先对小区地质条件进行评估, 针对高腐蚀性环境要选用 PE 管, 有利于节省后期维护投资。其次要结合管道设计压力和输送需求, 对管材的承压性进行分析。此外还要考虑施工便利性和经济性。例如燃气管道要穿越建筑物或者道路, 可以选用 PE 管异径穿插技术, 有利于减少土方开挖数量, 减少改造施工对居民生活的干扰。

(二) 布局优化

提高燃气管道布局的科学性, 有利于保障管道运行的安全性。结合老旧小区实际情况, 在布局优化中合理控制和建筑物的间距, 尽量避免穿越其他设施^[5]。在改造设计中严格遵循设计规范, 保证安全距离的合理性, 通常情况下安全距离要超过 0.5m, 可以结合燃气管道压力和周围环境调整具体数值。

其次在布局中要尽量避免穿越重要设施, 降低安全问题发生率。设计人员要对管道走向合理调整, 选用架空敷设方式。同时

结合小区内部道路和绿化带等位置, 对管道路径合理规划, 避免干扰居民生活。此外要合理设置管道标识, 提高后期维护管理的便利性。

(三) 用气量计算

用户用气量关系到管径规格的规格, 直接影响了整体改造工程的经济性, 因此设计人员要做好调研工作, 提高水力计算科学性^[6]。尤其要分析居民燃气灶和热水器等设备的应用率。一些老旧小区内部涉及餐饮业, 因此增加了用气量, 在改造过程中要合理选择管径, 控制压损问题, 满足用气高峰期的需求。

原来老旧小区热水器使用率较低, 取暖选用壁挂炉。因此在改造设计中, 需要调查分析壁挂炉安装数量, 提高加工气量核算的精准性。设计人员可以利用入户调查和问卷统计等方式, 确定壁挂炉安装数量, 同时分析季节性用气变化, 尤其要分析冬季取暖阶段用气量^[7]。此外考虑今后用气增长趋势, 合理预留设计余量, 避免因为用气量的增加而引发超负荷问题。

(四) 确定中压管径

结合气量计算结果确定在老旧小区燃气改造中普遍利用中压管径, 在计算过程中选用合适的水利计算软件。以 PE 管道某一截面为基础, 在 1h 内燃气流经管道截面的流量为:

$$Q = \pi R^2 \times v \times 3600 \times p$$

上式中 Q 代表燃气管道的计量流量 (单位: m³/h); R 代表燃气半径 (单位: mm); v 代表燃气流速 (单位: m/s), 针对 PE 管流速一般取值为 12m/s; P 代表绝缘压力 (单位: MPa)。

结合上述公式, 可以粗略估算不同管径、不同压力下 PE 管的理论输气量, 如下表 1 所示。将其作为经验值为老旧小区实际改造提供参考。

表 1 常见燃气管道管径不同压力下理论输气量 m³/h

压力 /MPa	d _n 63 SDR11	d _n 90 SDR17	d _n 110 SDR17	d _n 160 SDR17	d _n 200 SDR17
0.25	316	749	1 118	2 366	3 697
0.30	361	856	1 277	2 704	4 225
0.35	406	963	1 437	3 042	4 753
0.45	452	1 070	1 597	3 379	5 281

注: SDR 指聚乙烯燃气管的标准尺寸比, 即公称直径与公称壁厚的比值。

如果老旧小区原来是利用铸铁管道和钢管, 改造更换为 PE 管, 可以适当调小管径。用户反映在高峰期存在气量不足的情况, 可以适当扩大管径。中压燃气管道要选择埋地敷设方式, 如果现有条件很难开展埋地敷设, 可以利用无缝钢管沿着障碍物 (如围墙或者住宅楼) 架空敷设管道。

确定老旧小区燃气管道管径阶段, 要综合考虑特殊情况, 例如一些小区的燃气管道已经超过了服役期, 管道出现了严重的锈蚀和结构问题, 将会减少流通面积, 压力损失由此增加^[8]。因此在管径计算中要利用修正系数, 有利于对管道流动能力下降因素发挥补偿作用。此外要结合小区发展规划, 合理预留用气余量, 满足居民生活需求。

(五) 室外低压架空管

在改造老旧小区燃气管道中, 也涉及供热和给排水等方面的改造工作, 因此要做好燃气管道绝缘和隔热处理。可以设置绝缘板和隔热棉。一些老旧小区在室外加装了电梯, 将会增加室外燃气管道改造难度。如果室外电梯选用玻璃材质, 在改造过程中可以选用局部埋地敷设方式, 通过玻璃电梯之后再采用架空方式。同时可以利用三角支架或者 U 型吊卡等固定方式, 提高燃气管道的稳定性。

室外低压架空管道在高层建筑物的伸缩缝部位, 设计人员可以加设金属软管。如果管道长度超过了 50m, 可以设置门型弯, 并利用焊接钢管连接门型弯的弯头。如果架空管管径超过 DN65,

要选用焊接钢管的方式^[9]。针对 DN50 以下的管道，要利用镀锌钢管，跨越门型弯部位的管道，要选用焊接钢管，有利于避免出现沉降问题。在连接镀锌管和焊接管的时候，选用焊接管套丝方式。注意在焊接镀锌钢管之前，要将焊口周围的镀锌层清除干净，完成焊接之后要防腐处理焊缝部位。

三、老旧小区燃气管道安全评估

（一）评估指标体系构建

开展老旧小区燃气管道安全评估工作，有利于保障管道运行的正常性。在构建评估指标体系中，需要综合分析管道运行状态和外部环境以及运行管理等方面。针对管道运行状态，主要是分析管材老化情况和腐蚀速度以及壁厚变化等，这些因素关系到管道的强度和使用寿命。针对外部环境，要综合分析土壤腐蚀性和地下水位以及温度变化等，同时要检查管道和建筑物的安全距离等情况。在运行管理中，需要分析管道维保记录和巡检次数以及应急预案完善度等方面，提高管道运行的安全性。

首先要理论分析和实际调研结果选择指标，保证选择的指标直观反映管道状态。其次要突出指标体系的层次性，所选的多层次信息可以全面评估管道运行的风险性。最后保证所选的指数数据获取方式相对便利，同时保证计算方法的可行性，提高评估结果的科学性。结合上述要求，构建的评估体系包括目标层和准则层以及指标层，目标层为燃气管道安全状态，准则层为管道自身状况和外部环境等，指标层对具体评估指数进一步细化。

（二）评估方法选择

选择安全评估方法的过程中，要结合老旧小区燃气管道特点和实际运行环境，当前常用的方法包括故障树分析和层次分析法以及模糊综合评估法等。其中故障树分析法指的是利用图形方式分析故障原因和逻辑，有利于识别燃气管道失效问题^[10]。层次分析法通过构建递阶层次结构模型，合理分解复杂的问题为不同的层次，在各指标权重确定中利用专家评分和数学计算方式，有利于综合评价系统风险。模糊综合评价法指的是利用模糊数学理论，有利于评估复杂系统。

以老旧小区燃气管道的特点，在安全评估中可以综合利用故障树分析和层次分析法。利用故障树分析法可以识别管道失效问题，有利于提高风险控制水平。利用层次分析法可以对不同指标的权重量化分析，获取精准的评估结果。这两种方法的可操作性较强，可以综合利用各项数据和专家经验，有利于精准评估老旧小区燃气管道运行的安全性。

例如风险概率预测模型综合利用物理机制驱动和数据驱动融合混合框架，表达式如下：

$$P = \lambda(P_{physical}) + (1 - \lambda)p_{data}$$

上式中， P 代表综合风险概率，为风险分级和决策提供量化指标。 λ 代表权重系数（ $\lambda \in [0,1]$ ），可以综合专家经验和历史数据确定该值。 $P_{physical}$ 代表物理模型风险概率，将管道失效机制反映出来。 P_{data} 代表数据模型风险概率，有利于分析各种非线性关系。

（三）安全评估实施

在安全评估实施中，首先要全面调查老旧小区燃气管道现状，例如分析管道老化程度和布局问题等。综合现场勘察和数据采集，细化评估基础资料。其次根据构建的评估指标体系，综合利用故障树分析和层次分析法，量化分析各项指标。针对高风险区域，要对其综合风险概率进行重点分析，获取准确的评估结果。此外组织专家团队监督和指导评估过程，提高评估的质量。最后生成评估报告，为改造设计和施工等工作提供便利。

四、结束语

本文分析了老旧小区燃气管道改造设计与安全评估，结合当前老旧小区管道现状，提出了针对性的改造设计和安全评估方法。在改造设计中，提出管材设计和布局优化以及管径确定等要点。在安全评估中，综合利用故障树和层次分析法，保证评估工作的全面性。通过本文的研究可以对实际改造工作提供指导，降低安全问题发生率，维持燃气系统运行的安全性。

参考文献

- [1] 关进璞. 城市老旧小区燃气管道改造施工技术探析 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(21): 91-93.
- [2] 江山. 老旧小区燃气管道改造中的安全隐患与风险评估 [J]. 石化技术, 2025, 32(09): 371-373.
- [3] 梁浩, 张小亮. 户内燃气锈蚀管道改造技术及现场管理探究 [J]. 城市燃气, 2025, (07): 38-42.
- [4] 尹永强. 老旧小区燃气管道改造施工技术和现场管理 [J]. 上海煤气, 2024, (03): 19-21.
- [5] 李杨俊. 老旧小区地下燃气管道改造的施工要点 [J]. 上海煤气, 2023, (03): 15-17.
- [6] 赵珍云. 老旧小区燃气管道改造工程施工技术浅谈 [J]. 四川水泥, 2023, (06): 82-83+86.
- [7] 王涛, 寄玉玉. 老旧小区燃气管网改造工程设计要点 [J]. 上海煤气, 2023, (01): 9-12.
- [8] 毕既华, 苏光明. 压接式涂覆碳钢管在老旧小区燃气管道改造工程中的应用 [J]. 建设科技, 2022, (13): 80-83.
- [9] 徐火力, 范成龙, 汤彬坤, 等. 老旧小区低压钢质燃气管道风险识别与安全评估技术 [J]. 城市燃气, 2021, (08): 30-36.
- [10] 金昌浩, 庞宇. 埋地燃气管道净距不足时采取的安全防护措施 [J]. 煤气与热力, 2021, 41(05): 8-11+44.

浮法玻璃生产线机电设备选型优化与工艺适配分析

成建平

信义环保特种玻璃(江门)有限公司, 广东 江门 529000

DOI:10.61369/ERA.2026060016

摘 要 : 文章以某节能玻璃有限公司节能玻璃项目为研究对象, 聚焦浮法玻璃生产线机电设备选型优化与工艺适配问题。通过分析项目工程概况, 从原料处理、熔化工段、成形工段等核心环节入手, 探讨机电设备选型与工艺适配的关键要点。针对设备与工艺匹配度不足、能耗控制矛盾等难题, 提出针对性解决措施, 旨在实现设备运行效率提升、工艺流畅性优化及生产成本降低, 为浮法玻璃生产企业的设备选型与工艺优化提供实践参考, 助力行业绿色高效发展。

关 键 词 : 浮法玻璃生产线; 机电设备选型; 优化; 工艺适配

Analysis on Optimization of Electromechanical Equipment Selection and Process Adaptation for Float Glass Production Line

Cheng Jianping

Xinyi Environmental Protection Special Glass (Jiangmen) Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract : This paper takes the energy-saving glass project of an energy-saving glass company as the research object, focusing on the optimization of electromechanical equipment selection and process adaptation for the float glass production line. By analyzing the project overview, it delves into the key points of electromechanical equipment selection and process adaptation from core segments such as raw material processing, melting section, and forming section. In response to challenges such as insufficient matching between equipment and processes and conflicts in energy consumption control, targeted solutions are proposed. The aim is to enhance equipment operational efficiency, optimize process fluidity, and reduce production costs, providing practical references for equipment selection and process optimization in float glass production enterprises and facilitating the green and efficient development of the industry.

Keywords : float glass production line; electromechanical equipment selection; optimization; process adaptation

引言

浮法玻璃生产作为现代玻璃制造的核心工艺, 其生产线的自动化、智能化水平直接决定产品质量与市场竞争力。机电设备作为生产线的核心组成部分, 其选型科学性与工艺适配性不仅影响生产效率, 更关联到能耗控制、环保达标及长期运营成本。当前, 平板玻璃行业面临普通产品过剩、高端产品不足的结构性矛盾, 节能玻璃、超白玻璃等高端产品需求持续增长, 对生产线机电设备提出了更高要求。

一、工程概况

本项目为某节能玻璃有限公司节能玻璃项目, 建设地点位于江门市鹤山工业城, 总用地面积约500亩, 总投资200000万元。项目核心建设内容为两条浮法玻璃生产线, 熔窑熔化能力分别为900t/d(超白玻璃)和950t/d(优质玻璃), 配套建设1000万m²/年连线Low-E镀膜玻璃生产线及500万m²/年建筑节能玻璃车间。生产线机电设备总装机容量达95145kW, 年耗电量37843×10⁴kW·h, 采用天然气为主要燃料, 配套余热发电与光伏发电系统实现节能降耗。项目严格遵循国家产业政策, 产品涵盖超白玻璃、Low-E镀膜玻璃等高端品类, 通过先进机电设备选

型与工艺优化, 确保产品成品率达到95%以上, 实现经济效益与环保效益的协同发展, 为机电设备选型优化与工艺适配研究提供了典型工程样本。

二、浮法玻璃生产线核心工艺与机电设备配置现状

(一) 核心生产工艺流程梳理

浮法玻璃生产工艺具有连续性强、技术密集的特点, 核心流程包括原料处理、熔化、成形、退火、切裁五大环节。原料处理阶段需完成硅砂、纯碱等原料的均化、称量、混合, 确保配合料化学组成均匀; 熔化工段通过熔窑将配合料高温熔化、澄清, 形

成合格玻璃液；成形工段中玻璃液在锡槽内摊平、冷却，经拉边机控制形成特定规格玻璃带；退火工段通过退火窑消除玻璃内应力，保障产品力学性能；切裁工段则完成玻璃的在线检测、切割、堆垛。各环节工艺环环相扣，对温度、压力、速度等参数控制精度要求极高，为机电设备选型与工艺适配奠定了基础。

（二）关键机电设备配置情况

项目关键机电设备配置围绕核心工艺展开，原料系统配备耙砂机、电子秤、混合机等设备，其中电子秤动态准确度达0.2级，确保配料精度；熔化工段采用斜毯式投料机、节能型天然气喷枪及玻璃液水平搅拌器，熔窑冷修周期达10年；成形工段配置悬挂式拉边机、锡槽冷却风机等设备，锡槽容锡量 $2\times 293t$ ，保障玻璃成形质量；退火工段选用进口退火窑，配备高精度温度控制系统，确保玻璃应力消除效果；切裁工段采用德国产在线缺陷检测仪与冷端机组，实现玻璃自动检测与切割。此外，项目还配置余热发电机组、一体化氮站、天然气制氢站等辅助机电设备，形成完整的生产保障体系。

（三）机电设备与工艺适配的基础条件

项目机电设备与工艺适配具备良好基础条件，其一，设备技术水平与工艺要求高度匹配，核心设备如Low-E镀膜机、在线缺陷检测仪等采用国际先进产品，满足高端玻璃生产工艺需求；其二，公用工程系统支撑有力，供电、供水、供气系统配置充足，总装机容量、天然气供应量等参数与生产工艺耗能量精准匹配；其三，自动化控制系统保障适配精度，通过DCS系统实现熔窑温度、锡槽压力等工艺参数与设备运行状态的实时联动控制；其四，环保设备与工艺协同设计，烟气脱硫脱硝系统、废水处理站等设备与生产工艺同步运行，确保污染物达标排放，符合绿色生产工艺要求。

三、浮法玻璃生产线机电设备选型优化与工艺适配的难题

（一）设备性能与工艺参数匹配度不足

浮法玻璃生产工艺参数随产品规格（厚度3—12mm）、原料特性动态变化，但部分机电设备调节范围与工艺参数适配性不足。例如，拉边机线速度调节精度直接影响玻璃带厚度均匀性，若设备调节响应速度滞后于工艺参数变化，易导致玻璃厚薄差超标；熔窑温度控制系统若无法精准匹配配合料熔化速率，会造成玻璃液澄清不充分，产生气泡缺陷。此外，不同设备间的参数协同性不足，如退火窑温度控制与玻璃带传输速度未实现精准联动，可能导致玻璃内应力分布不均，影响产品合格率。

（二）能耗控制与工艺效率的矛盾

玻璃生产属于高能耗行业，机电设备能耗占总能耗的5%~7%，设备选型与工艺适配面临能耗控制与效率提升的双重压力。一方面，部分高效能设备初始投资较高，如节能型风机、变频电机等，企业在选型时需平衡投资成本与长期能耗效益；另一方面，工艺优化要求设备满负荷运行以提高生产效率，但设备长期高负荷运转可能导致能耗上升、使用寿命缩短。例如，熔窑

风机若为满足熔化效率持续高功率运行，会增加电力消耗，而过度降低风机功率又会影响燃烧充分性，降低熔化质量。

（三）设备可靠性与工艺连续性适配难题

浮法玻璃生产线连续运行周期长（年工作日365天），机电设备可靠性直接决定工艺连续性。部分关键设备如锡槽冷却风机、退火窑传动系统等，若选型时未充分考虑工艺连续运行需求，易出现故障停机。例如，锡槽冷却风机若发生故障，会导致锡液温度异常，引发玻璃成形缺陷；此外，设备维护周期与工艺生产周期不匹配，如余热锅炉维护时间与熔窑运行周期冲突，会中断生产流程，影响生产计划推进，凸显设备可靠性与工艺连续性适配的重要性。

（四）环保设备与生产工艺的协同难题

随着环保要求日益严格，烟气脱硫脱硝、废水处理等环保机电设备成为生产线必备配置，但此类设备与生产工艺的协同适配存在诸多难题。环保设备运行参数需与生产工艺污染物排放量精准匹配，如SCR脱硝系统的氨喷射量需根据熔窑烟气 NO_x 浓度动态调整，若调节不及时，会导致脱硝效率下降或氨逃逸超标；同时，环保设备运行会消耗一定能源，如脱硫风机、废水处理泵等，如何平衡环保达标与能耗控制，实现环保设备与生产工艺的高效协同，成为亟待解决的问题。

（五）设备更新与既有工艺的兼容难题

行业技术迭代加速，新型机电设备不断涌现，但既有生产工艺布局相对固定，设备更新时面临与既有工艺的兼容难题。例如，为提升生产效率更换新型拉边机时，其安装尺寸、控制接口需与原有锡槽、传动系统适配，若兼容性不足，可能导致设备无法正常运行；此外，新型设备的操作流程、维护要求与既有工艺操作规范存在差异，员工技能水平需同步提升，否则会影响设备性能发挥，制约工艺优化效果，增加设备更新与工艺适配的难度^[1]。

四、浮法玻璃生产线机电设备选型优化与工艺适配的解决措施

（一）建立工艺参数导向的设备选型标准

以工艺参数需求为核心，建立系统化的设备选型标准。针对不同产品规格的工艺要求，明确设备关键性能指标，如配料系统电子秤精度需满足配合料化学组成偏差 $\leq 0.1\%$ ，拉边机速度调节范围需覆盖3—12mm玻璃厚度的成形需求，熔窑温度控制系统需实现 $\pm 1^\circ C$ 的精准调控，确保玻璃液熔化质量稳定。采用设备性能参数与工艺参数的量化匹配方法，通过计算玻璃液熔化速率与熔窑功率的适配关系、玻璃带传输速度与退火窑冷却能力的匹配系数，结合项目实际生产数据建立数据库，为选型提供数据支撑。优先选择模块化、可调节性强的设备，如变频式风机、可变速拉边机等，搭配智能控制系统，实现设备参数与工艺变化的实时响应，提升设备对工艺参数变化的适应性，同时引入设备全生命周期成本评估模型，综合考量采购成本、运行能耗、维护费用等因素，实现选型精准性与经济性的统一，确保设备性能与工艺要求

的动态匹配。

（二）优化能耗导向的设备组合配置

采用能耗与效率协同优化的设备组合配置策略，在设备选型时综合考量初始投资、运行能耗与工艺效率。优先选用一级能效电机、节能型燃烧器等高效机电设备，如熔窑选用捷克进口节能型天然气喷枪，其燃烧效率较普通喷枪提升 15% 以上，显著降低天然气消耗；配套余热发电系统与屋面光伏发电系统，年发电量分别达 $3780 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 和 $3000 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，有效抵消部分外购电量。根据工艺负荷变化，配置变频调速、余热利用等节能装置，如熔窑风机采用变频控制，根据熔化温度自动调节风量，退火窑余热回收用于车间保温，减少额外能源消耗。建立设备能耗监测与工艺优化联动机制，通过 DCS 系统实时监控设备能耗数据，结合工艺生产效率，动态调整设备运行参数，例如根据玻璃产量波动调节循环水泵运行频率，避免设备空载运行造成的能耗浪费。同时制定能耗考核指标，将能耗控制责任分解至车间、班组，强化员工节能意识，实现能耗与效率的最佳平衡。

（三）强化设备可靠性与工艺连续性的适配设计

从设备选型、维护体系两方面强化与工艺连续性的适配。选型时优先选择具有长寿命、高可靠性的设备，如选用耐磨材料制造的输送设备、密封性能优良的熔窑部件，锡槽冷却风机采用四用一备配置，退火窑传动设置双传动站备用，确保单一设备故障时生产不中断。针对核心设备建立全生命周期健康管理体系，通过安装振动传感器、温度检测仪等设备，实时监测设备运行状态，利用大数据分析技术预判潜在故障，提前安排维护保养，避免突发停机。根据工艺连续运行周期，制定科学的设备维护计划，如熔窑冷修周期设定为 10 年，同步规划余热锅炉、脱硫脱硝设备等辅助设施的维护时间，确保与生产工艺周期错位衔接，不影响正常生产。建立设备备件库，储备关键设备易损件，如拉边轮、燃烧器喷嘴等，缩短故障修复时间，同时加强设备操作人员技能培训，提高应急处理能力，确保设备故障时能快速响应、及时处置，保障生产工艺的连续性与稳定性。

（四）构建环保设备与生产工艺的协同运行体系

建立环保设备与生产工艺的协同运行机制，实现污染物治理与生产效率的同步提升。针对烟气脱硫脱硝、废水处理等环保机电设备，安装实时监测仪表，如 NO_x 浓度检测仪、废水悬浮物监测仪，确保环保设备运行参数与生产工艺污染物排放情况精准

匹配。采用智能化控制手段，将环保设备纳入 DCS 系统统一管控，如根据熔窑烟气排放量自动调节脱硫剂投放量，根据生产废水量调整废水处理泵运行功率，实现环保设备与生产工艺的动态协同。优化环保设备运行流程，将废水处理后的再生水回用至生产线，实现水资源循环利用，使环保设备不仅满足环保要求，还能助力工艺节能。定期对环保设备与生产工艺的协同效果进行评估，根据环保标准更新与工艺优化需求，调整环保设备运行参数与工艺操作规范，确保污染物排放始终符合超低排放 A 级企业标准，实现绿色生产与工艺高效的协同发展^[2]。

（五）推进设备更新与既有工艺的兼容适配

设备更新时采取“技术兼容 + 分步实施”策略，确保与既有工艺的顺畅衔接。在设备选型阶段，全面评估新型设备的安装尺寸、控制协议、能源需求等与既有工艺的兼容性，优先选择接口标准化、适配性强的产品，如新型 Low-E 镀膜机采用通用通讯协议，可直接接入原有 DCS 控制系统。对于兼容性不足的情况，配套改造既有工艺设施，如更换拉边机时同步调整锡槽边封结构，升级电气接口，确保设备安装与运行适配。采用分步更新模式，先在局部工艺段试点运行新型设备，验证其与既有工艺的适配效果后再全面推广，例如先在一条浮法生产线试点安装新型在线缺陷检测仪，优化调试后再应用于另一条生产线。同时加强员工技能培训，通过内部培训、厂家指导等方式，让操作人员熟练掌握新型设备的操作流程与维护要点，建立设备更新技术档案，记录设备适配过程中的问题与解决方案，为后续设备更新提供参考，充分发挥设备优化工艺的作用^[3]。

五、结束语

浮法玻璃生产线机电设备选型优化与工艺适配是提升产品质量、降低能耗、保障生产稳定的关键。文章基于某节能玻璃（江门）项目实践，分析了核心工艺与设备配置现状，指出了设备与工艺匹配度不足、能耗矛盾等五大难题，并提出了建立工艺导向选型标准、优化设备组合配置等针对性解决措施。实践表明，通过科学的设备选型与工艺适配设计，能够有效提升生产效率、降低运营成本、实现绿色生产。未来应进一步加强机电设备与工艺的深度融合，推动浮法玻璃生产行业向高效、低碳、高端化方向转型。

参考文献

- [1] 张丽. 玻璃生产线中工业厂房供配电设计原则 [J]. 建材世界, 2021, 42(4): 76-78.
[2] 陈智勇. 玻璃工厂给排水系统 [J]. 玻璃, 2021, 48(6): 36-38.
[3] 董西阳, 刘明, 屠帅帅. 浮法建筑玻璃减反膜的制备与光学性能研究 [J]. 玻璃, 2025, 52(7): 37-42.

基于故障诊断的风力发电机转子振动特性分析与监测

王建国

西安中车永电捷力风能有限公司，陕西 西安 441058

DOI:10.61369/ERA.2026060034

摘 要： 风力发电机转子作为能量转换核心部件，其振动特性直接决定机组运行稳定性与安全性。在复杂风况、交变载荷与电磁激励耦合作用下，转子易出现不平衡、不对中、轴承故障及裂纹等问题，引发异常振动甚至连锁失效。本文从故障诊断视角，分析转子振动机理与故障振动特征，构建时频域联合分析方法，研究监测系统架构、传感器布设及智能诊断技术，结合工程实例验证效果，提出多源信息融合与深度学习监测方案，为转子故障预警、状态维护提供理论与技术支持。

关 键 词： 风力发电机；转子；振动特性；故障诊断；状态监测

Analysis and Monitoring of Rotor Vibration Characteristics of Wind Turbine Based on Fault Diagnosis

Wang Jianguo

CRRC Xi'an Yongdian Jieli Wind Energy Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi 441058

Abstract： As the core component of energy conversion systems, wind turbine rotors' vibration characteristics directly determine operational stability and safety. Under complex wind conditions, alternating loads, and electromagnetic excitation coupling effects, rotors are prone to issues such as imbalance, misalignment, bearing failures, and cracks, which may lead to abnormal vibrations or even cascading failures. From a fault diagnosis perspective, this study analyzes rotor vibration mechanisms and fault vibration patterns, develops a time-frequency domain joint analysis method, investigates monitoring system architecture, sensor deployment strategies, and intelligent diagnostic technologies. Through engineering case validation, we propose a multi-source information fusion and deep learning monitoring solution to provide theoretical and technical support for rotor fault early warning and condition-based maintenance.

Keywords： wind turbine; rotor; vibration characteristics; fault diagnosis; condition monitoring

引言

随着风电产业规模化、大型化发展，风力发电机长期服役于强风、沙尘、温差剧变等恶劣环境，转子系统作为连接叶轮与发电机的关键传动部件，承受机械、电磁、气动多场耦合交变载荷，故障发生率居高不下^[1]。转子振动异常是轴承失效、转轴断裂的主要诱因，不仅导致机组非计划停机、运维成本激增，更威胁电网稳定与设备安全。传统事后维修与定期检修模式难以适配变工况运行特性，基于振动信号的故障诊断与在线监测成为核心技术路径^[2]。本文深入解析转子振动机理与故障特征，构建全流程监测与智能诊断体系，对提升风电机组可靠性、降低全生命周期成本、推动风电智能化运维具有重要工程价值。

一、风力发电机转子振动基础理论

（一）转子系统结构与振动激励源

双馈风力发电机电力系统由主轴、叶轮、轮毂、发电机及联轴器组成，通过叶轮捕获风能并转化为机械能，再经主轴传递至发电机实现电磁能量转换。其振动激励主要分为三类：机械激励为主要来源，包含转子不平衡、转轴弯曲、联轴器不对中、轴承

间隙异常等；电磁激励由定转子磁场相互作用产生，与电机极对数和转速密切相关；气动激励则由湍流风、塔影效应等引发气动不平衡，形成低频振动。三类激励耦合作用，使转子振动呈现非平稳、非线性与强噪声特征，显著提升了故障诊断难度^[3]。

（二）转子振动基本形式与数学模型

转子振动主要有径向、轴向和水平三种形式，其中径向振动占比超 80%，是监测重点。正常工况下转子振动表现为小幅值

稳定简谐振动,发生故障时幅值、频率和相位会明显突变,并伴随冲击、调制与倍频等特征。采用 Rayleigh-Ritz 法与有限元法建立转子横向振动动力学模型,将转子简化为连续梁模型,综合考虑陀螺效应、剪切变形及轴承支撑刚度,构建相应运动微分方程^[4]。模型可准确反映不同故障下的转子振动响应规律,为振动特征分析与故障识别奠定理论基础。

二、风力发电机转子典型故障振动特性分析

（一）转子质量不平衡故障

转子质量不平衡是最常见故障,占比约 35%,由叶片磨损、结冰、材质不均、装配偏差、局部脱落引发,导致质心与旋转中心偏移。振动特征:以一倍旋转频率($1 \times f_0$)振动为主,幅值显著增大且与转速平方成正比;径向水平、垂直方向振动相位差稳定($90^\circ \sim 180^\circ$);频谱中 $1 \times f_0$ 占绝对主导,高次谐波幅值较低。变工况下,振动幅值随风速、转速升高线性增大,时域波形呈规则正弦曲线,无明显冲击分量^[5]。

（二）转子不对中故障

分为平行不对中、角度不对中及组合不对中,由联轴器安装偏差、轴承沉降、转轴变形引发,占转子故障 20% 以上。振动特征:平行不对中以二倍旋转频率($2 \times f_0$)为主,伴随 $1 \times f_0$ 、 $3 \times f_0$ 谐波;角度不对中以轴向振动突出,频谱含 $2 \times f_0$ 及高频啮合成分;组合不对中呈现 $1 \times f_0$ 、 $2 \times f_0$ 、 $4 \times f_0$ 多频复合特征。振动幅值对负荷变化敏感,联轴器附近测点振动幅值最大,时域波形出现周期性“双峰”冲击^[6]。

（三）转子轴承故障

轴承作为转子核心支撑部件,故障占传动系统故障的 40%,易出现内/外圈点蚀、滚动体剥落、保持架损坏及润滑失效等问题。其振动具有固定特征频率,如 BPFI、BPFO、BSF、FTF。故障初期表现为 500~5000Hz 高频冲击,频谱出现特征频率及边频;后期冲击增强,时域出现周期性尖峰,峭度由 3~5 升至 7 以上。早期信号易被噪声掩盖,需降噪和解调处理^[7]。

（四）转子裂纹与转轴弯曲故障

转轴裂纹由疲劳损伤、过载、材质缺陷引发,弯曲由长期不平衡振动、热变形、外力冲击导致。裂纹特征:振动为非线性响应,频谱含 $1 \times f_0$ 、 $2 \times f_0$ 、 $3 \times f_0$ 及分数谐波,幅值随裂纹扩展周期性波动;启停过程中通过临界转速时,振动幅值突变且相位偏移。弯曲特征:以 $1 \times f_0$ 振动为主,幅值稳定且不随转速变化明显衰减,轴向振动增大,转子“弓形”回转,相位差固定。两类故障易引发转子碰摩,诱发剧烈振动与设备损毁^[8]。

（五）电磁激励引发的转子振动

由转子绕组短路、断路、铁芯松动、气隙不均引发,表现为电磁振动。振动特征:频率为电源频率(50Hz)及其倍频、转频与电源频率组合频率($f_0 \pm 50\text{Hz}$ 、 $2f_0 \pm 50\text{Hz}$);振动幅值与负荷电流正相关,空载时幅值显著降低;频谱中电磁特征频率突出,机械转频成分较弱。常与机械振动耦合,需通过负荷试验与信号分离区分故障类型^[9]。

三、转子振动信号分析方法

（一）时域分析方法

时域分析核心特征参数主要分为三类:幅值类参数包括峰值、有效值、峰峰值,可直观反映振动强度,故障发生时幅值通常会超过正常阈值 2~5 倍;统计类参数包含均值、方差、偏度与峭度,其中峭度对冲击类故障最为敏感,正常工况下峭度值约为 3,出现轴承点蚀、裂纹等故障时会显著大于 5;波形类参数如波形因子、脉冲因子、裕度因子,可有效区分规则周期性振动与随机冲击振动。但时域分析仅能判断振动强弱,无法获取频率信息,难以精准定位故障类型与位置,通常作为故障初判手段^[10]。

（二）频域分析方法

频域分析以快速傅里叶变换(FFT)为核心,将时域信号转换为频域分布,是风力发电机转子故障诊断的主流方法。频谱分析可确定振动主导频率,根据 $1 \times f_0$ 、 $2 \times f_0$ 等特征频率快速识别质量不平衡、联轴器不对中、轴承故障等典型问题。包络谱分析通过 Hilbert 变换对高频冲击信号进行解调,提取隐藏的低频故障调制频率,大幅提升早期微弱轴承故障的检出能力。功率谱分析则能够反映信号能量分布,突出稳定频率分量并抑制随机噪声干扰。频域方法可精准定位故障频率,但对风电机组变转速、变负载下的非平稳、时变信号适应性较差,容易出现频谱模糊与特征丢失问题。

（三）时频域联合分析方法

时频域联合分析可同时反映信号频率随时间的变化规律,适配风电机组变工况下的非平稳振动信号。其中,小波变换(WT)能多尺度细化分解信号,凭借优良时频局部化特性提取早期微弱故障冲击分量;经验模态分解(EMD)与集合经验模态分解(EEMD)可自适应将复杂信号分解为多个固有模态函数(IMF),高效分离噪声与故障分量,提升信号纯度。短时傅里叶变换(STFT)采用固定窗函数,直观展示频率随时间的演变趋势;Wigner-Ville 分布(WVD)时频分辨率高,但易产生交叉干扰,需配合平滑处理保障可靠性。

（四）智能分析方法

智能分析方法依托机器学习与深度学习实现故障特征自主学习与自动识别,显著提升诊断精度与智能化水平。支持向量机(SVM)在小样本条件下仍保持较高分类准确率,适用于非线性、高维振动特征分类。卷积神经网络(CNN)可直接从时频图谱中自动提取深层特征,故障诊断准确率可达 95% 以上。长短期记忆网络(LSTM)与双向门控循环单元(BiGRU)能够捕捉振动信号时序依赖关系,有效提升变工况下的诊断稳定性。多模态融合方法进一步联合振动、声发射、温度及 SCADA 运行数据,实现多源信息互补,将综合识别准确率提升至 99%,为风电机组转子智能故障监测提供了强有力支撑。

四、风力发电机转子振动监测系统设计

（一）系统总体架构

采用现场感知层—传输层—数据处理层—应用层四层分布式

架构,实现从信号采集到智能运维的全流程闭环管理。现场感知层以压电式加速度、速度及位移传感器为核心,布设于主轴轴承座、齿轮箱、发电机轴承座等关键测点,实时捕捉转子多维振动信息。传输层依托工业以太网、4G/5G 及 LoRa 通信,完成高可靠远程数据传输,支持边缘计算本地预处理以降低传输压力。数据处理层集成降噪、特征提取、故障诊断等核心算法,实现振动数据深度解析。应用层为运维人员提供状态监测、故障预警等功能,为机组安全稳定运行提供智能化支撑。

（二）传感器布设与数据采集

结合风机转子结构特点与故障传播路径,测点按关键部位全覆盖、多方向同步监测原则布设。齿轮箱前后轴承为核心支撑测点,可监测质量不平衡、不对中及轴承磨损、点蚀等故障;发电机驱动端与非驱动端轴承用于捕捉电磁振动及转子本体故障;联轴器可灵敏反映安装偏差与连接松动;机座测点用于监测整机振动传递特性。各测点均采用水平、垂直、轴向三向布置,全面采集多维振动信息,避免故障漏判。

数据采集参数上,采样频率设为 10~20kHz 以覆盖故障高频分量,防止频率混叠;采用 16~24 位高精度采样,提升微弱早期故障信号灵敏度。采集采用连续与触发结合模式,连续采集跟踪趋势,超限触发存储故障瞬态数据。同时同步采集转速、温度、负荷等参数,构建多源数据体系,削弱变工况干扰,为后续故障诊断提供标准数据基础。

（三）信号预处理技术

原始振动信号易受环境噪声、电磁干扰及变工况波动影响,需通过预处理技术提纯有效故障信息。噪声抑制环节采用自适应阈值 SVD、小波阈值降噪与 EEMD-CC 联合降噪方案,通过多算法互补抑制风场强背景噪声,将信号信噪比提升至 58dB 以上,突出微弱故障冲击特征。趋势项剔除采用最小二乘法与高通滤波结合方式,消除温度漂移、载荷缓慢变化等引发的慢变趋势项,避

免其掩盖真实故障频率成分。异常值处理采用 3σ 准则与箱线图联合判别法,自动识别并剔除传感器异常、瞬时冲击等造成的野点数据,保证信号平稳性与一致性。经过系统化预处理,可有效降低噪声干扰,提升信号质量,为后续特征提取与故障识别奠定可靠基础。

（四）故障诊断与预警流程

故障诊断与预警流程遵循“数据采集—信号预处理—特征提取—故障识别—分级预警—趋势预测”的闭环逻辑。首先通过多传感器同步采集振动、转速、负荷等多维度数据,经降噪、滤波、归一化等预处理后,提取时域、频域及时频域联合特征构建特征向量。采用阈值判断与智能模型分类相结合的方式,精准判定故障类型、发生位置及损伤程度。按照运行状态将预警等级划分为正常、注意、异常、故障、紧急停机五级,实现差异化预警管理。同时运用 ARIMA 与 LSTM 时序预测模型,对振动幅值及特征参数进行趋势推演,可提前 72 小时实现故障发展趋势预测,为运维人员预留充足处置时间,有效避免故障扩大化与非计划停机,提升机组运行可靠性。

五、结语

风力发电机转子振动特性分析与故障诊断是保障机组安全运行的关键技术。本文系统剖析转子多源激励机理与五类典型故障振动特征,构建时域、频域、时频域及智能算法联合分析方法,设计四层架构在线监测系统。工程实例表明,该方法可有效识别早期故障并实现精准预警。目前研究仍面临变工况非平稳信号处理、微弱故障特征提取、多故障耦合分离及极端环境传感器可靠性等难题。未来需深化多物理场建模、多源信息融合、边缘-云端协同及数字孪生技术研究,推动监测系统向智能、精准、可视化与预测化发展,为风电高质量发展提供技术支撑。

参考文献

[1] 张利慧,李殊瑶,李晓波,等.基于时频域特征参数的风力发电机滚动轴承振动监测与故障诊断[J].内蒙古电力技术,2024,42(02):45-51.
[2] 陈鹏,陈雪峰,李兵,等.风力发电机组振动状态监测与智能故障诊断[J].振动与冲击,2025,44(08):112-120.
[3] 林家欣,杨立国,吴文远,等.振动传感器信号调制下风电机组变频器转子偏心故障检测[J].传感技术学报,2025,38(04):512-519.
[4] 唐永维,刘主红,胡旭龙,等.基于多模态 2DKAN-BiGRU-ACBAM 风电机组主轴承多故障分类与诊断[J].制造业自动化,2026,48(02):34-40.
[5] 马越,陈捷,洪荣鼎,等.风电机组在线振动监测系统及现场应用[J].振动、测试与诊断,2026,46(01):156-162.
[6] 高阳,潘宏侠,吴升.基于改进 SVD 与轻量化 CNN 的风力发电机转子故障诊断[J].中国机械工程,2025,36(23):2817-2824.
[7] 赵雷,王磊,张健.大型风力发电机转子电磁-机械耦合振动特性分析[J].电机与控制学报,2024,28(09):78-86.
[8] 刘杰,何正嘉,张西宁.基于 EEMD 与谱峭度的风电机组转子早期故障特征提取[J].机械工程学报,2025,61(05):134-142.
[9] 王健,李刚,张磊.基于 CAVF-Net 多模态信号融合的风电机组旋转轴承故障诊断[J].Entropy,2026,27(03):951.
[10] 闫航瑞,董广明,王健.风电机组转子连接结构松动振动特性与监测方法[J].太阳能学报,2025,46(07):198-205.

煤化工装置工艺安全风险评估与技改优化研究

张敏

内蒙古黄河工贸集团千里山煤焦化有限责任公司, 内蒙古 乌海 016011

DOI:10.61369/ERA.2026060040

摘 要 : 本研究以煤炭化工过程为研究对象, 以提高煤炭资源利用效率为目标。本研究拟以危害和操作性评价 (HAZOP) 和 LOPA (LOPA) 为手段, 对煤气化、合成和提纯等关键流程进行综合评价。在评价过程中发现了一些重要的危险因素, 如设备故障、材料泄漏、催化剂中毒、工艺参数波动等。在此基础上, 从反应流程优化、控制方案优化、耐腐蚀材料选择、设备冗余设计和智能监控等方面, 提出技术改造优化方案。

关 键 词 : 煤化工装置; 工艺安全; 风险评估; 技改优化

Research on Process Safety Risk Assessment and Technical Optimization of Coal Chemical Industry Plants

Zhang Min

Inner Mongolia Yellow River Industry and Trade Group Qianlishan Coal Coking Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia 016011

Abstract : This study focuses on coal chemical processes with the objective of enhancing the efficiency of coal resource utilization. It employs Hazard and Operability Analysis (HAZOP) and Layer of Protection Analysis (LOPA) as tools to conduct a comprehensive evaluation of key processes such as coal gasification, synthesis, and purification. During the evaluation, several significant hazards were identified, including equipment failure, material leakage, catalyst poisoning, and fluctuations in process parameters. Based on these findings, technical optimization plans are proposed in areas such as reaction process optimization, control scheme enhancement, selection of corrosion-resistant materials, equipment redundancy design, and intelligent monitoring.

Keywords : coal chemical industry plants; process safety; risk assessment; technical optimization

一、煤化工行业及装置概述

(一) 煤化工行业特点

煤化工是我国经济发展的一个重要环节, 对我国经济发展起着举足轻重的作用。随着我国经济的持续发展和工业体系的完善, 化工行业在经济建设中的重要性日益突出, 尤其是煤化工, 其在化工行业中的地位煤化工行业是一个高风险行业, 其生产工艺复杂、生产装置数量多、火灾爆炸危险性大、危险源多且复杂, 一旦发生事故, 其影响范围和后果往往是不可估量的^[1]。近年来, 我国煤化工产业规模不断扩大, 技术水平显著提升, 已形成以煤气化、合成气转化、精细化学品合成为核心的完整产业链条。特别是在国家政策的支持下, 新型煤化工技术得以快速发展, 如煤制油、煤制天然气、煤制烯烃等项目相继投产, 为缓解石油资源短缺压力、促进经济可持续发展提供了有力支撑^[2]。但是, 在高速发展的同时, 也面临着资源消耗大、环境污染大、安全风险大等一系列难题, 迫切需要通过科学的管理与技术手段来解决。

(二) 工艺安全的重要性

煤化工装置工艺安全是保障生产稳定运行、环境保护和人员安全的核心要素。由于煤化工生产过程具有高温高压、易燃易

爆、有毒有害等特点, 其工艺系统的复杂性决定了安全管理的难度较大^[3]。一旦发生事故, 不但会造成设备的损伤, 而且会引起火灾、爆炸、中毒等次生灾难, 给周围的环境和人民的生命财产带来巨大的危害^[4]。比如, 煤炭气化过程所处的高温、高压环境和易燃、易爆等特点, 大大提高了过程介质的泄漏风险; 然而, 在合成过程中, 对温度和压力等条件有较高的要求, 使得过程安全性显得尤为重要。加强对煤化工生产过程的安全管理, 既是对企业社会责任的一种表现, 也是对工业可持续发展的需要。

(三) 安全风险评估方法研究现状

目前, 我国煤炭行业普遍采用的危险性和可操作性分析 (HAZOP)、保护层分析 (LOPA) 等, 对煤炭行业的风险辨识和控制起到了很大的作用, 但各有其局限性。HAZOP 方法通过对生产过程中的偏差进行系统的分析, 可以有效地发现与设计值不符而导致的安全隐患, 并将其应用于煤制甲醇装置的低温甲醇洗过程。但是, HAZOP 方法对人员的经验要求较高, 缺乏对系统动力学特性的考虑。相比之下, LOPA 方法通过定量分析保护层的有效性, 能够更准确地评估风险等级, 但其实施成本较高且需要大量的基础数据支持。此外, 基于贝叶斯网络的动态风险评估技术在大型煤气化装置中的应用研究表明, 该方法能够更好地处理系统的不确定性与动态变化, 但其模型构建与参数学习过程较为

复杂^[4]。因此,安全风险评估可以帮助企业更快地了解风险性质、风险程度以及风险影响,为企业提供可靠决策数据,从而制定科学合理的风险管理措施,降低潜在风险对企业安全生产的影响^[2]。

二、煤化工装置工艺安全风险分析

(一) 煤气化工艺风险分析

煤气化过程中,高温、高压、材料特征等因素对气化过程的影响较大,总体安全隐患较大。由于整个过程都处在高温、高压的极端环境中,对设备的强度和密封性提出了极高的要求,在长时间的服役过程中,易发生蠕变、氧化和疲劳老化等现象,导致其力学性能退化^[3]。此外,气化炉和换热器等关键设备的失效往往具有突发性和灾难性的特点,极易导致材料泄露。此外,该过程介质含有易燃、有害的一氧化碳、氢气等气体,一旦泄露,容易引起火灾和爆炸,还可能导致人员中毒和窒息,虽然使用了高性能的密封材料和定期维护,但由于操作失误、事故等原因,仍然不能完全避免。另外,过程材料自身也具有很大的安全隐患,如煤粉和水煤浆在贮存和运输过程中,由于粉尘的含量超标,容易引起爆炸。

(二) 合成工艺风险分析

煤化学合成过程的核心安全风险是催化剂的风险和反应条件的控制。催化剂是保证反应效率和产物品质的的重要因素,但由于原料气体中存在的硫化物、氯离子等杂质,易发生烧结、积碳或毒性,导致反应速率下降,副反应增多,甚至引起局部温度过高,甚至出现热失控等安全事故,而杂质引起的中毒往往是永久性的、不可逆的^[4]。目前对其危害的控制手段主要是通过对原料气体进行预处理和定期检测来进行,但由于其故障机理复杂,尚不能对其进行实时、精确的监控。但是,由于反应温度、压力和流速等条件的苛刻,使得反应过程中的参数存在较大的波动。高温异常会加剧催化剂的烧结和副产物的形成,而压力失控则会引起装置超压,导致泄漏和爆炸。如果原料流不稳定,就会引起反应物的比例失调,从而引起反应的失控^[5]。

(三) 净化分离工艺风险分析

煤化学提纯与分离过程中,存在着两方面的安全隐患:一是对有毒有害物的处置,二是设备的腐蚀。合成气中的硫化氢、二氧化碳等杂质是脱硫脱碳的核心过程,如果不合理的话,很容易引起一系列的安全问题,如果不能及时处理好这些有害气体,就会导致尾气超标,有毒介质泄漏,对人体健康和生态环境造成威胁。该工艺使用的化工原料如醇胺等有泄露,也容易引起人体的化学烧伤。目前可以通过工艺优化、新型分离技术的应用和实时监控等手段来减少,但是复杂的反应条件很难对其进行全面的风险监控,仍然需要依靠智能监控和自动控制技术来提高其安全性^[6]。与此同时,设备的腐蚀也是这一过程的一项重要隐性隐患。生产过程中含有的硫化氢、二氧化碳等酸性气体,再加上湿气、高温高压和流体冲刷的影响,这些都会使设备的腐蚀速度加快,弯头、三通等部位容易发生局部腐蚀、壁厚减薄,容易造成设备穿孔、介质泄露等突发事件。

三、安全风险评估方法应用

(一) 选定评估方法

煤化工生产过程复杂,操作风险大,需要根据其特点选择合适的安全风险评价方法。HAZOP 和 LOPA 是目前国际上普遍采用的评价方法,具有系统性和针对性。其中,HAZOP 通过对工艺参数偏差进行结构化分析,挖掘出设计缺陷和运行隐患,与煤化工危险化学品的种类多、工况条件复杂,现已在低温甲醇洗等过程的节点划分、危险辨识和风险控制方面取得了较大进展。LOPA 是一种定量的方法,它通过对已有的安全防护措施的效果进行评价,并对其定量评价,从而为制定相关的安全政策提供科学的依据。结合煤化工高温高压、介质危害等特定工作条件,将两者结合,实现对不同危险点的全方位覆盖,大大提高风险评价的准确性和可靠性。在方法的适用性方面,HAZOP 可以通过小组合作,对潜在的风险进行深入的挖掘,但是对于基础数据的完整性和从业者的业务素质有很高的要求;LOPA 技术虽然可以进行危险等级的判断,但在复杂的生产环境下,容易导致结果的保守性。

(二) 评估流程

研究中所使用的 HAZOP 和 LOPA 的协同评价方法,按照数据采集、节点划分、偏差分析和结果评价四个关键环节进行。数据采集是风险评价的基础,需要对煤化学设备的设计文档、操作规程、设备参数等进行综合整理,对设备在高温高压条件下的强度、密封性等重要参数进行系统的梳理,保证基础数据的完整和可靠,为后续的风险分析提供支持。本研究以简化复杂流程为目标,根据材料流动方向和功能,将整个过程分解成多个独立的分析单元,精确确定各个环节的过程特性和隐患,例如,对低温甲醇洗过程进行分区,进行风险针对性分析。在偏差分析方面,借助 HAZOP 分析系统,并与过程参数的正态范围相结合,并辅以“无”、“多”、“少”等提示语,对由设备故障、操作失误、外界干扰等引起的过程偏差进行系统性的排查,对各种可能的风险进行深入的挖掘^{[8][9]}。在结果评价中,将 LOPA 法融入到事故发生的概率、影响范围和危害程度中,对已有的安全防护层的保护效果进行评价,准确地判断危险水平,并提出相应的防控对策。

(三) 风险等级判定

在安全风险评价中,风险水平分级是一个关键步骤,其目标是确定危险点的优劣,从而为技术改造方案的优选提供决策依据。本文参照国内外有关风险矩阵,把风险水平分为四个等级,即低风险、中风险、高风险和极高风险。其划分标准为:低风险是指事故发生的概率很低,后果很小,可以用正常的管理手段来进行控制。中风险是指有可能发生的事件,其后果比较严重,需要有针对性的预防措施;高风险意味着发生事故的可能性很大,后果很严重,需要马上进行纠正;高风险是指事故的可能性很大,而且是非常严重的,必须停止生产,直到危险降低到可以接受的程度。

在确定危险水平时,要将事故发生的可能性和后果的严重性结合起来。另外,在净化分离过程中,如果由于设备的腐蚀或者操作不当而发生了泄露,会对周围的环境和人身安全产生很大的

影响，因此也需要作为高风险点来进行控制。

四、技改优化策略

（一）工艺改进

本研究以提高煤化工装置的安全生产为目标，从工艺过程的优化和调控策略的完善两个角度，实施风险防控的优化措施。煤化工反应流程复杂，危险介质种类繁多，通过对反应步骤的调控和物料配比的优化，可以有效地减少操作风险，提高安全和效率。通过合理的流程设计，可以有效缓解苛刻工况下的设备载荷和密封压力，降低其安全风险。在控制方案层次上，通过采用集散式 DCS 和 ESD 应急停机系统，对过程风险进行精确的控制。DCS 可实现温度、压力和流量等重要指标的实时监控和动态调整，保证运行参数在安全范围内；独立的静电保护装置，能在工作条件出现异常时，迅速关闭危险流，防止事故扩散^[10]。

（二）设备升级

酸性气体如硫化氢、二氧化碳等，容易引起设备损伤和材料泄露，严重影响企业的安全生产。针对这一问题，本研究拟针对不同的工作环境，选择合适的耐蚀材料，如：双相不锈钢和哈氏合金，在低温甲醇清洗等强腐蚀环境下，能够有效抵抗不同介质的复合腐蚀；对运行中的设备，可以采用内衬橡胶或陶瓷等防腐蚀材料，提高设备的耐腐蚀性。选择合适的防腐蚀材料，不但可以减少设备失效的几率和运营费用，而且可以大大提高设备的安全和可靠性。而对其进行冗余化设计，则是保证生产持续稳定运行的重要途径。若核心装置如压缩机、输送泵和换热器发生失效，则会导致整个系统的关闭，严重时会造成严重的安全事故。通过“一用一备”和“二用一备”两种备用结构，实现了在主装

置发生故障的情况下，迅速实现后备装置的切换，避免了生产中断和安全隐患。

（三）自动化控制优化

煤化学设备智能化改造是提高煤炭化工生产安全防控水平的一项重要措施，其核心内容包括智能监控系统的引入和自动控制策略的优化。本研究以传感器和物联网为基础，建立一套完整的信息采集网络，实现对设备温度、压力、振动和工艺介质成分等重要参数的实时获取，并将其进行无线传输，并将其汇总到中央控制平台进行分析和处理。在煤制醇生产过程中，采用在线气体分析仪和智能传感设备对生产过程进行实时监测，对生产过程中出现的异常情况进行及时的判断，并进行紧急处理。与此同时，本研究还将利用大数据和人工智能算法，对运营历史数据进行深入分析，对潜在风险进行准确预测，提出优化方案，从而提高风险预警的准确性，降低人为因素造成的安全风险。由于传统的控制方法不能适应复杂的煤化工工况，以及突发工况下的响应延迟，因此对自动控制策略进行优化和升级显得尤为重要。

五、结束语

本研究以系统的过程安全风险评价为基础，对煤气化、合成、净化与分离等关键过程中存在的安全隐患进行了综合梳理，确定了关键危险源，高温高压设备失效、危险材料特性、催化剂失效、参数调控失衡、有毒物质处置不当和设备腐蚀等。将 HAZOP 和 LOPA 相结合，实现危险链的危险等级划分，确定高风险链的控制要点，并有针对性地提出流程、设备和自动化三个层次的技术改造优化策略，减少事故发生的几率，提高设备的稳定运行。

参考文献

- [1] 韩晶；王玮佳；刘刚；高硕. 煤化工企业综合风险分析评估 [J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(1): 60-63.
- [2] 康秦宝. 基于风险评估的煤化工聚烯烃生产安全管理对策研究 [J]. 化工管理, 2024, (22): 100-102.
- [3] 赵国良. 探究化工工艺的风险识别和安全评价 [J]. 山西化工, 2022, 42(3): 228-229.
- [4] 刘明；侯明君；周妍. 大型煤气化工艺装置与设备动态风险评估研究进展 [J]. 石油石化绿色低碳, 2023, 8(2): 49-54.
- [5] 陈良超；宋策；方舟；陈学儒；潘伟. 典型煤化工装置设备风险评级与管理系统 [J]. 炼油与化工, 2024, 35(1): 63-66.
- [6] 孙超；王旭；王丹丹. 煤化工行业风险管理对策研究 [J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 282-284.
- [7] 罗慧丰；陈菊香. 基于 AHP-模糊综合评价法煤化工储运装置安全风险评估研究 [J]. 化工管理, 2022, (7): 129-133.
- [8] 王向阳；王金歌；孙妍. 壳牌煤气化风险分析及安全预防措施探究 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(3): 118-120.
- [9] 李祺；高小强. 安全风险预控管理体系在煤化工领域的具体实践 [J]. 石油石化物资采购, 2023, (6): 118-120.
- [10] 宋庆梅. 煤化工企业风险预控管理 [J]. 化工管理, 2021, (33): 124-125.

城市河道水质改善关键技术与治理效果评价

张旭, 董军益

中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/ERA.2026060011

摘 要 : 城市河道水质改善正遭遇严峻的污染难题, 传统治理办法成效欠佳, 故而有必要探寻更高效的技术途径。运用物理治理、化学处理与生态修复相融合的综合技术, 可有效改良水质, 使水生态系统功能得以恢复。具体做法涵盖建设水质净化设施、管控污染源、修复人工湿地以及恢复水生植物植被等, 借助先进监测技术, 配合水质评估指标体系, 对治理成效予以量化评估, 保障治理举措的科学性与可持续性, 研究显示, 这些技术手段既有效削减了水体污染物浓度, 又优化了水体生态环境, 增强了水质稳定性, 丰富了生物多样性, 具备广泛的应用前景与实际价值。

关 键 词 : 城市河道; 水质改善; 物理治理; 生态修复; 水质评价

Key Technologies for Improving Water Quality in Urban Rivers and Evaluation of Treatment Effects

Zhang Xu, Dong Junyi

Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

Abstract : The improvement of water quality in urban rivers is facing severe pollution challenges, and traditional treatment methods have shown limited effectiveness, making it necessary to explore more efficient technological approaches. By integrating comprehensive techniques that combine physical treatment, chemical processing, and ecological restoration, water quality can be effectively improved, and the functions of the aquatic ecosystem can be restored. Specific practices include constructing water purification facilities, controlling pollution sources, restoring constructed wetlands, and reviving aquatic plant vegetation. Advanced monitoring technologies, coupled with a water quality assessment index system, are employed to quantitatively evaluate treatment outcomes, ensuring the scientific and sustainable nature of treatment measures. Research indicates that these technological approaches not only effectively reduce the concentration of pollutants in water bodies but also optimize the aquatic ecological environment, enhance water quality stability, and enrich biodiversity, demonstrating broad application prospects and practical value.

Keywords : urban rivers; water quality improvement; physical treatment; ecological restoration; water quality assessment

引言

伴随城市化进程的加快, 河道水质污染问题愈发突出, 对生态环境和居民健康造成影响。传统治理手段常常难以从根本上化解水质恶化问题, 所以, 探索高效且可持续的技术方法十分必要。将物理治理、生态修复与先进监测技术相结合, 能够大幅提升水体自净能力, 改善水质情况, 这些技术不仅利于控制污染源, 还能让河道生态系统功能得以恢复, 推动水环境的长期健康发展, 深入研究水质改善关键技术及其效果评价, 对推进城市水环境治理意义重大, 能为城市生态环境的优化提供有力支撑。

一、城市河道水质改善的技术体系

(一) 城市河道污染成因与治理需求

城市河道水质变差, 主要是多种污染负荷共同作用的结果。工业废水里存在大量有机物、重金属以及难以降解的物质, 生活污水则富含氨氮、总磷等营养盐类, 这些污水长期排入河道, 让水体富营养化问题愈发严重, 城市地表径流会汇集面源污染物,

降雨时大量污染物被冲进水体, 使得污染问题变得更为复杂。河道因泥沙和有机物长时间堆积而出现淤积, 导致河道自净能力下降, 水体黑臭、缺氧等典型问题频繁出现, 严重影响生态功能和城市景观价值, 治理城市河道, 不只是为了提升水质指标, 还需恢复河道生态系统的结构与功能, 让其在防洪、调节气候以及为公众提供休闲空间等方面发挥更大作用。

由于污染源种类多、治理难度大, 仅靠单一治理措施无法达

到预期效果，需要构建系统化技术体系，在源头控制、过程净化以及末端恢复等环节都要部署相应技术，形成联防联控的综合治理策略，这样既能有效降低污染物浓度，又能增强水体稳定性，实现水质长期改善与生态系统的健康稳定发展。

（二）物理干预技术

物理干预技术作为改善城市河道水质的关键部分，能迅速缓解污染状况并优化水体通量，截污治污工程搭建起完备的雨污分流系统、污水收集与排放管网，把未处理污水截留下来送往污水处理厂，降低污染物直接排入河道的几率，引水冲污、曝气增氧等物理手段可提升水体流动性与溶解氧水平，为后续生态处理创造有利条件。

清淤技术着眼于河道底泥富集难题，利用机械或环保清淤方式去除富含有机物的淤泥层，降低内源污染释放的风险，运用“薄层多次”清淤策略能减少对生态的干扰，清除后的泥料经无害化处理后实现资源化利用，提升治理效率与环保效益。

水流调控技术借助闸坝、水闸等设施调节河道水位与流速，增强水体自净能力，缩短污染物滞留时间，合理调节水流还能改善水生态连接性，对整体水质提升意义重大，有助于营造更健康的河道生态环境。

（三）生物与生态修复技术

生态修复技术用于河道治理时，着重借助自然过程来增强水体净化能力与生态功能，构建人工湿地系统开展湿地建设，凭借湿地植被、沉积介质和微生物的共同作用，可高效去除氮、磷等污染物，推动水体生态功能的恢复，还能增强水体缓冲能力，有效应对污染峰值情况。

生态补水技术引入高质量水源补给低流量河段，让水体维持动态平衡，改善稀释条件，提高整体水质稳定性，结合水量调控进行补水能增强自净能力，降低污染物浓度^[1]，水生植物修复依靠水生植物的吸收、富集作用及其根际微生物协同降解机制，可有效减少水中营养盐及有机污染物含量，建立水生植物群落既能净化水质，又有助于恢复水体生态结构和生物多样性。

（四）综合修复与绿色基础设施

综合修复技术注重工程与生态手段深度结合，以提升河道治理的可持续性和长效性，生态护岸与自然岸线恢复技术通过恢复自然岸线形态、种植本土植被等方式，使河岸更具侵蚀抵抗力，为水生生物提供栖息空间，进而改善生态环境^[2]。

绿色基础设施像“海绵城市”与低影响开发（LID）措施，从源头减污和雨水管理着手，利用透水铺装、雨水花园、截留设施等构建城市水循环系统，实现雨污分离和污染削减，这些措施既能改善城市水环境，又能增强城市对极端天气的适应能力和韧性，为河道水质改善提供更全面保障^[3]。

二、治理效果评价的理论与方法

（一）治理效果评价指标体系构建

量化城市河道水质改善成效，构建综合评价指标体系是根基，该体系要涵盖水质、生态与社会等多维度指标，水质指标一般选取常规理化指标，像化学需氧量（COD）、氨氮（NH₃-N）、总磷（TP）和总氮（TN）等，这些指标能够反映污染物削减程度和水体达标水平，还可利用溶解氧（DO）监测水体氧化还原

状态与自净能力，生态指标引入生物多样性、生物完整性指数（IBI）等，用于定量评价水生态系统结构与功能改善状况，同时结合水体叶绿素 a 评判富营养化程度，社会指标涵盖公众满意度、亲水性指数等，以此综合反映治理成效的社会受益范围和治理举措的被接受程度，指标体系要依照国家和行业标准，如《地表水环境质量标准》GB 3838 及生态监测规范来选取和加权^[4]。

常见的指标体系结构运用多层次设计，包含目标层、准则层和指标层，各层级指标权重可借助定量分析方法来确定，从而让评价结果更具科学性与可比性，水质达标率、污染物削减率及生物多样性变化等指标可于二维矩阵中展现并构成综合评分表格，给后续综合评价提供清晰的数据支撑。

（二）数据采集与监测方法

治理效果评价需系统的数据采集与监测作支撑，现场水质监测通过设置采样点位定时采集水样，按照标准方法测定化学需氧量（COD）、氨氮（NH₃-N）、总磷（TP）等理化指标，同时结合生物监测收集浮游植物、底栖动物等生物样本，以此获取多层次生态信息。标准化监测可依照《河流生态环境质量监测与评价技术规范》等国家技术规范开展，保证数据准确且具有可比性。

遥感技术与在线监测系统能弥补现场采样在时空上的局限，高频在线传感器可对酸碱度（pH）、溶解氧、电导率等参数进行实时监测，为动态模型提供高时间分辨率的数据，卫星或无人机遥感影像可用于大范围水体叶绿素 a 分布、浮藻覆盖等情况的监测，统一监测频次与空间布局利于构建时间序列数据库，为分析治理成效趋势提供数据支撑^[5]。

（三）综合评价方法

综合评价方法用于把多指标数据转化为治理效果量化结果，模糊综合评价法能应对指标间的不确定性与模糊性，通过设定隶属函数将指标值映射到评价等级并算出综合得分，层次分析法（AHP）通过构建层次结构模型，结合专家判断确定指标权重，进而对评价结果科学加权。AHP 与模糊评价结合的模型可借助熵权等客观赋权方法优化权重分配，让评价结果更具代表性，实际应用中可把各类评价方法和统计分析相结合，以构建雷达图或综合得分矩阵等图表形式呈现治理成效差异，为决策者提供直观评价参考。

（四）模型与数值模拟

水动力与水质耦合模型作为预测和剖析不同治理方案成效的关键技术手段，像水质 - 水动力耦合模型（像 SWMM、EFDC）能够对河道流速以及污染物输移和扩散过程予以模拟，设定不同治理措施情景，诸如增加补水量、改变湿地净化面积等，以此评估其对水体 COD、NH₃ - N 等指标改善的贡献。模拟输出能用于计算污染物削减率、富营养化缓解程度，为治理策略的优化提供量化支撑。

模型结果可搭配情景分析表格来比较不同方案预期效果，在表格里列出不同方案下关键水质指标预测值，给工程选择提供量化对比参照表1。表中呈现不同治理方案下水质与生态指标预测值对比情况。如表1所示：

表1 不同治理方案下水质与生态指标预测值对比					
方案	COD (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP (mg/ L)	DO (mg/ L)	生态指标 得分
基准	30.5	2.8	0.15	5.2	0.62

方案	COD (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP (mg/ L)	DO (mg/ L)	生态指标 得分
滤床 + 湿地	22.1	1.9	0.10	6.1	0.78
动态补水 + 生态岸	18.7	1.5	0.08	6.8	0.85

将模型模拟与评价指标体系相结合，可全方位展现治理措施对水质改善和生态修复起到的综合作用，更深入且全面地反映整体状况。

三、综合治理效果分析与案例讨论

（一）城市河道治理典型案例分析

城市河道综合治理在国内外都不乏成功范例，上海苏州河环境综合整治便是其中的典型，苏州河治理工程于1988年开启，累计投入超400亿元，采取了分期截污、建设污水处理设施、清淤疏浚以及水系连通等一系列综合治理举措，治理后苏州河全线监测断面水质都达到国家地表水Ⅲ类标准，河段黑臭现象基本消除，水生生物多样性得以恢复，着生动物与底栖无脊椎动物种类增多，岸线公共空间实现贯通开放，城市滨水环境与生态功能得到有效提升^[6]。

国内还有常德市穿紫河生态修复这一典型案例，穿紫河经过“五水一体”统筹治理，水质从劣Ⅴ类提升至Ⅲ类，生态滤池出水处化学需氧量较进水降低约59.6%，水生植物覆盖度和生物多样性大幅提高，治理过程融合源头截污、清淤疏浚、生态护岸建设等多项技术，达成了水质改善与生态恢复的协同提升。

对比不同技术组合能发现，截污、清淤、生态修复与智慧调控相结合的综合治理模式明显比单一技术措施更具优势，在处理黑臭水体以及提升生态系统稳定性方面效果更佳^[7]。

（二）治理效果实证评价

治理效果的实证评价要依据治理前后水质指标和综合评价体系得分对比，以穿紫河来说，治理前化学需氧量、氨氮等主要污染物指标长期超标，治理后化学需氧量显著降低，出水段化学需氧量低于30mg/L，氨氮情况明显好转，水质稳定达到Ⅲ类标准，生态指标如溶解氧和叶绿素a等呈上升趋势，意味着自净能力增强，结合构建的综合评价体系进行周期性得分分析，能够量化展现治理成效趋势，为后续治理优化提供参考依据。如表2所示。

表2 不同治理阶段水质指标对比

指标	治理前	初期治理	持续治理	目标值（Ⅲ类）
COD (mg/L)	45.2	32.7	28.1	≤ 30
NH ₃ -N (mg/L)	3.5	2.4	1.8	≤ 1.5
TP (mg/L)	0.20	0.15	0.11	≤ 0.15
DO (mg/L)	3.2	4.5	5.8	≥ 5.0

参考文献

- [1] 胡朝伟, 李利红. 探讨城市黑臭水体治理与水质长效改善保持技术 [J]. 环境与发展, 2020, 32(11): 67-68.
- [2] 裴菲. 城市污染河道生物生态修复研究进展 [J]. 绿色科技, 2021, 23(08): 85-87.
- [3] 翟毕娇. 城市河道景观评价与优化 [D]. 山西农业大学, 2021.
- [4] 孙玥. 臭氧混合曝气增氧技术在城市河道水质改善中的应用 [J]. 水利技术监督, 2022, (08): 15-18.
- [5] 王宝强, 陈姚, 刘合林. 城市水系统安全评价与生态修复 [M]. 华中科技大学出版社: 202110: 235.
- [6] 李永华, 黄振虎, 肖飞, 等. 城市河道生态环境治理的研究分析与应用 [J]. 建筑施工, 2022, 44(11): 2693-2696.
- [7] 韩志军. 试析城市河道水环境污染治理对策 [J]. 水上安全, 2023, (08): 88-90.
- [8] 管桂玲, 符锐, 李萍, 等. 城市河道水环境综合治理实践与思考 [J]. 水利规划与设计, 2023, (05): 80-85.

该类对比表直观反映治理措施实施过程中水质改善趋势及指标达标情况。

（三）关键技术实施成效与问题

综合治理技术实施成效颇佳，特别是生态修复技术，像湿地处理、生态浮岛以及自然岸线设计，能长久有效净化水体，提高水质，恢复水生态系统功能，既推动了水生生物的多样发展，又改善了水体景观，增强了公众参与感与认同感。智慧监测与调控系统达成了对流域水质的实时监测、数据采集和动态调节，让治理措施更精准高效。

不过实施过程中也存在挑战，非点源污染控制效果有限，降雨径流时污染物快速积聚进入水体，使水质波动加剧。生态修复技术初期投资成本高，后期维护要求大，增加运营成本和管理难度，生态系统稳定性受季节性变化影响，保持生态修复技术长期效果还需进一步优化完^[8]。

（四）对策与建议

为提升城市河道水质综合治理效果，要强化流域尺度治理和污染源头控制，建立雨污分流、截污管网完善体系及农田面源污染控制措施，从源头减少污染物输入，缓解水体污染压力。推动数字化水环境监测和智能评价体系建设，利用物联网技术构建水质大数据平台，实现对水质关键指标实时监测和动态预测，优化治理效果。

实施生态修复技术要保障长期效益，建立多方参与长效维护机制，鼓励公众参与监督，确保生态技术持续发挥作用。推广成功案例和经验，让更多地区在水质治理中借鉴先进做法，实现可持续水环境改善。

四、结语

城市河道水质改善的综合治理是复杂系统工程，需物理、化学和生态修复等技术手段与管理措施协同应用，能显著提升水质、恢复生态功能、增强水体自净能力。治理效果综合评价体系为政策制定和技术优化提供科学依据，保证治理工作持续可操作。虽面临非点源污染控制和生态系统稳定性等挑战，但随技术进步和数字化智能监控手段应用，城市河道水质治理将更精准高效。推动流域综合治理和源头控制，能进一步提升城市水环境质量，为生态文明建设添砖加瓦。

遥感技术在矿产地质调查中的应用研究

姜河

湖南省地质勘探院有限公司, 湖南 长沙 410000

DOI:10.61369/ERA.2026060031

摘 要 : 伴随着遥感技术的发展和高分辨率卫星图像的应用, 矿产地质考察中遥感技术已经成为提升勘探速度与准确度的有效手段。借助遥感影像采集以及解析可以清楚辨别出矿藏位置、土地使用的变迁情况及其污染程度和危险性等等。对于采矿区矿产资源探测, 环境监控和危险源判定等方面都有了很大的进步, 遥感技术的应用对矿山的开采与管理起到了很好的促进作用。高分辨率影像、多种数据综合应用以及智能化处理方法的应用, 都可以给矿山带来持续发展的保障, 进而达到资源勘探与保护的双赢目的。

关 键 词 : 遥感技术; 矿产地质; 勘查; 环境监测; 高分辨率影像

Research on the Application of Remote Sensing Technology in Mineral Geological Survey

Jiang He

Hunan Geological Exploration Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000

Abstract : With the advancement of remote sensing technology and the application of high-resolution satellite imagery, remote sensing has become an effective tool for enhancing exploration efficiency and accuracy in mineral geological surveys. Through remote sensing image acquisition and analysis, it enables clear identification of mineral deposit locations, land use changes, pollution levels, and potential hazards. Significant progress has been made in mineral resource detection, environmental monitoring, and hazard source assessment in mining areas, with remote sensing technology playing a pivotal role in advancing mining operations and management practices. The integration of high-resolution imagery, multi-source data analysis, and intelligent processing methods provides sustainable development support for mining operations, ultimately achieving a win-win outcome in resource exploration and conservation.

Keywords : Remote sensing technology; Mineral geology; Exploration; Environmental monitoring; High-resolution imagery

引言

矿产资源普查是地质科学的一项重要工作, 传统的地质考察方法存在耗时、耗力及费用高的问题。但是遥感技术凭借着全面的大范围覆盖、多样化的数据采集手段以及良好的图象解析性能已经成为当代矿产地质勘探的有效手段, 在矿产资源普查、矿山环境污染监测以及土地开发情况统计等方面都有很大的发展空间。本文主要围绕遥感技术应用于矿产地质勘探的研究展开, 总结了遥感技术用于矿产地质研究的优势以及未来的发展方向并讨论该领域的创新点及其实际意义。

一、遥感技术在矿产地质调查中的应用现状

(一) 遥感技术的发展历程

遥感技术诞生于上世纪六十年代初期, 早期的遥感图象分辨率比较低, 一般都在几十米乃至上百米之间, 主要用于对地表大面积的勘探以及监视; 后来由于科学技术的发展特别是卫星技术的更新换代, 遥感影像的空间分辨率不断提高, 在二十一世纪初已经可以做到亚米级精度了, 目前最新的高分辨遥感图象的空间分辨率可达0.3m, 如GeoEye-1卫星拍摄的图片。高清晰度、准确性使地球物理勘探更为便捷准确。尤其在矿产资源勘探方面,

高分辨率遥感影像可以迅速的大范围地了解地貌条件, 矿产的类型与分布, 矿床类型等基本地质情况, 在很大程度上减少了工作量, 加快了勘探的速度, 增加了找矿成功率^[1]。

(二) 遥感影像的处理与分析技术

遥感影像的数据处理与分析主要包括了遥感影像的数据预处理、增强处理、分类、解译等环节。对于矿业地质勘察而言遥感影像预处理通过对影像的辐射校正以及几何校正等方法使遥感影像质量得到提升, 保证了影像较好的空间及光谱分辨率; 遥感影像增强通过对遥感影像进行增强可以突出地物尤其是矿物、地质构造的特征, 使遥感影像对比度增强、清晰度提高, 从而让采

矿资源的相关地质特征更加分明。遥感影像分类遥感影像分类可以通过使用支持向量机（SVM）、决策树等方法来对不同地质体进行分类，有助于研究者辨别出矿山资源的分布情况。随着近年来深度学习技术的发展以及应用越来越多地用于遥感影像解析上，在遥感影像上使用卷积神经网络（CNN）等方法自动化的识别，大大提高了遥感影像解析速度和准确性^[2]。

（三）国内外遥感技术在矿产调查中的应用案例

遥感技术在矿产地质调查的应用已有大量实验证明过，很多国内外的例子都显示出遥感技术是有效的，例如我国的“高分一号”卫星，其分辨率高达2m，遥感成像分析中发现了很多金矿、铜矿以及铁矿的矿化带。还有就是美国的 Landsat 卫星系列表现出它是最先一批上天运行的遥感卫星，它提供的多光谱图也已经被运用到矿产勘察当中去了，尤其是 Landsat8 卫星的30米分辨率的影像，结合实地勘查资料能够精确地找到阿根廷安第斯山铜矿带。另外，澳大利亚的 TERRA 卫星也利用遥感技术在它广阔的矿产带发现了很多的金矿资源点，给之后的地质探测提供了重要的参考依据。这些都证明了运用高分辨率遥感影像可以实现对矿产地质调查的大范围快速初筛以及潜力评价的作用。

二、遥感技术在矿产资源勘查中的创新应用

（一）基于遥感数据的矿产资源分布预测

遥感技术高分辨的图像以及光谱数据蕴含着矿产资源的空间分布情况。在矿产资源调查工作中，遥感影像能很好的辨别出不同矿物的光谱特性，对地表样品数据做比较分析，从而确定矿产资源的空间分布格局。以 QuickBird 卫星所采集的分辨率为0.6米级别的高分辨率图片为例，在此高分辨率之下，可以利用不同矿物的光谱特性来进行矿产资源推断，用机器学习方法，比如支持向量机（SVM）、随机森林（RF）等来训练其光谱数据，进而形成矿产资源预报模型。不同的光谱波段结合尤其在短波红外（SWIR）、中红外（MIR）波段的优势可以很好的识别出不同种类的矿物从而推测出可能的矿产资源富集区，在近些年里通过这种方法来建立的预测模型也越来越准确，可以给出详细的矿产分布范围，提高了矿产勘测的精准程度与速率^[3]。

（二）多源遥感数据融合在矿产调查中的应用

多源遥感数据融合技术整合由不同的传感器和平台收集到的数据，包括光学遥感、雷达遥感以及激光雷达（LiDAR）等等，能给予矿山资源勘探更完整的地质资料。光学遥感卫星影像具有较高的空间分辨率及丰富的光谱信息可以获得详细的矿物和岩石结构的信息，合成孔径雷达（SAR）具有穿透云层和大气的的能力、全天候工作能力，通过融合多种遥感数据可以克服单一遥感源不足的问题。比如说运用 Landsat 8（30m 分辨率）、Sentinel-1（10m 分辨率）卫星数据以及 SAR 图像与光学影像相结合，在雨季或其他不良气候条件下亦可对矿产资源进行有效探测。大数据整合技术用多维度、立体化的方法对数据进行综合性的解析，提高了对矿产资源勘探的精确性和覆盖面，是新时期矿产勘探的必要方式。

（三）高分辨率遥感影像在矿产资源评估中的优势

高精尖遥感图像给矿产资源勘查提供准确的地质基础资料，在矿山勘探尤其细致的方面起了很大作用。比如 WorldView-3 卫星就拥有着0.31m 的空间分辨力，能清楚看到矿区的地质结构、矿脉、断裂带以及岩石的变化等各种重要的地质因素，通过对遥感图像进行图像分类以及解译，并结合实地勘测的结果，可以大概估计出矿山资源量，这样就加快了资源评估的速度与精准度，使矿产资源的勘探更加高效。在矿产资源评价中，遥感图象可以很好的分开各种不同的矿藏所处位置，特别是对一些比较复杂的矿山地质地貌，有高分辨率的数据支持可以很好的对矿产储量进行精准评定，而且现在遥感数据分析技术越来越先进，从遥感图象里进行矿产资源评价，现在已经可以做到自动化的分析，加快了速度^[4]。

三、遥感技术在矿区环境监测中的应用研究

（一）矿区土地利用变化分析

遥感技术以多时相高分辨率影像进行定量化分析矿区土地利用 / 覆盖变化（Land Use/Cover Change, LUCC）可以反映采矿活动带来的生态环境变化状况。比如从2013—2020年的高分遥感影像中对平朔露天煤矿区进行面向对象分类得到的结果表明，矿区面积缩减了7.84 km²，其中农田减少了36.08 km²，林地草地增加了64.77 km²，水体和排土场变化不大，小于10 km²，体现了绿矿理念下生态修复演变过程。遥感数据分析中常用的 NDVI、EVI 等植被指标来计算地表植物的覆盖率，采用的是基于对象的分类与机器学习模型进行土地用途的识别，从而做到量化观测；高空间分辨率图像（诸如 Sentinel-2 10 m、WorldView 0.5 m 级）之间跨年度的数据比较可以得到矿区内裸露区域、植被区、湿地、水域等地块的变化情况，供环境保护、规划使用^[5]。如表1所示。

表1 矿区土地利用类型变化表（示例）

时间节点	裸地面积 (km ²)	林地草地面积 (km ²)	水体面积 (km ²)	农田面积 (km ²)
2013	120.5	64.8	8.2	40.7
2017	134.2	72.4	7.9	28.1
2020	130.9	75.1	8.0	25.4

（二）矿区污染源识别与监控

遥感技术可以用来寻找煤矿区污染源，对污染物进行空间分布及变化监测。利用多时相遥感图像的时间序列分析，可以计算出煤矿周围土壤，植被，河流等地表环境的变化情况。光学遥感加热红外遥感能提取出矿区高发热区，进而找到潜在污染源。从青南木里煤田聚乎更矿来看，使用无人机挂载热红外相机采集到热红外图像，经过分析得出，五号井北部高温异常区域面积达2.6万平方米，实地测量结果达到222摄氏度；八号井西面出现的异常区面积有0.45万平方米，实测温度达到120摄氏度左右等高温异常情况一般都跟煤层自燃和残余煤堆有关，会对周围环境产生长期性的影响。而通过 SAR（合成孔径雷达）与光学遥感影像的结合可以继续跟踪观测该区域地面塌陷及滑坡等相关情况的发展变化状况。把污染监测同地面变形结合起来，对矿场生态环境危害

程度进行综合评判提供了更多的依据^[6]。

（三）矿区生态环境恢复效果评估

矿场生态修复成效评价需长期、多层次遥感观测信息，运用生态指数定量检测矿山植被恢复程度及土壤等各项生态要素的变化情况；遥感生态指数能够全面地表征湿地、植被与水体、土地的健康状态，适合用来分析矿山生态系统修复时空演变特征，通过利用 Landsat 序列遥感影像时间序列可以得到矿山在经过生态修复措施以来的生态变化历史进程，比如有矿区在 1994—2024 年间用 Landsat 影像以及 RSEI 对矿山生态进行监控，展示了开矿和修复活动带给该区域的生态环境变化格局。而且基于定量遥感监测架构融合机器学习、大数据等相关技术，能够对植被覆盖率、土壤有机碳含量以及湿地修复水平等主要生态环境指标实现精准量化测算，从而为相关部门及企业提供制定生态环境保护政策措施时的参考指标与决策辅助平台。

四、遥感技术在矿区风险评估中的作用

（一）矿区灾害风险识别

矿山通常遭受着滑坡、泥石流及塌陷等地质灾害侵扰的风险，这些灾害会对矿山生产安全带来隐患的同时也会给周边环境带来较大的影响，在此情况下就需要通过使用遥感技术，以 SAR 以及高分辨率光学图像为主的遥感成像技术可以帮助矿山灾害风险监测。SAR 技术可以透过云层提供地表变形数据从而监测矿山区域沉降、滑坡以及裂隙等矿山地质灾害的发生征兆；比如基于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据配合 DInSAR 方法进行矿山滑坡的精准度监测。定期监测可以随时掌握可能出现滑坡地段的信息，预判发生灾害的可能性并且给警报系统提供即时信息参考，在某铜矿矿区利用 2016—2021 年 SAR 数据，对比分析之后得出附近矿区处的滑坡体积逐年上升的趋势，从而提早发现了隐患地区，减少了威胁^[7]。

（二）矿区安全评估与风险管理

遥感技术对矿区安全生产的风险评价及管理工作做出了

贡献，在矿区利用遥感图像以及地质模型、环境模型等都可以对矿区安全风险作出全面性的分析。比如：基于遥感图像（WorldView-2 分辨率为 0.46m）、GIS 系统结合矿区矿层结构、地表地质、地下水系等情况建立矿区风险评价模型，该模型能对不同种类的风险作出具体量化的评价，包括水患风险、泥石流隐患风险以及土壤污染水平等，进而为矿山安全治理及规划管理提供参考依据。另外，在对采区周围进行观测的过程中，遥感图像可以直观地反映出采区所面临的风险变化情况，为有关单位提供预警信息，及时采取防范手段、改进矿区内风险防控方案。

（三）矿区规划与风险防控措施优化

遥感应用在矿山规划、危险源管理方面也起到很大的作用，遥感图像多尺度分析提供了矿山及其周围环境的整体视角，为矿区建设规划设计提供参考数据，在矿山勘查阶段，使用遥感图像能够了解矿山附近的土地类型、植被覆盖率以及水源位置等信息以利于对矿山开采区、环境保护区、绿化带等地进行科学设计。同时遥感图像的时间序列分析还可以找出矿山发展的潜在风险隐患，通过对矿山开采之后的植被情况以及地面塌陷等进行观察，能够尽早发现问题如发生水土流失、污染排放等情况进而提升矿山的安全管理水平与可持续发展水平。对于某一金矿矿山规划，在对 2015—2020 年之间的卫星遥感监测的基础上提出了水源防护、生态环境修复以及滑坡预警等一系列的风险防范手段，使该矿山区域的环境更加的安全稳定^[8]。

五、结语

利用遥感技术对矿山地质勘探、矿物勘探、生态环境监测以及风险预警等方面的应用使矿山管理更加精确高效。借助高精度遥感照片、多种信息源集成与高级处理手段可以完成矿山灾害预警、生态系统修复监控、安全保障评价等多种任务。随着科技的发展，未来遥感技术会更广泛的应用于采矿业以及环境治理当中去，给矿山企业带来持续发展动力。

参考文献

- [1] 叶永春. 矿山资源勘查与生态环境地质调查技术分析 [J]. 中国金属通报, 2025, (11): 216-218.
- [2] 孙湛淇. 地质勘测技术在复杂山区矿产资源勘探中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2025, (19): 160-162.
- [3] 方红超. 遥感测绘技术在自然资源调查与监测工作中的应用探索 [J]. 中国房地产业, 2025, (25): 146-149.
- [4] 赵英俊, 孙雨, 秦凯, 等. 航空高光谱遥感工程化地质应用技术体系与找矿示范 [J]. 铀矿地质, 2025, 41(04): 666-676.
- [5] 王国鹏, 董兴军. 水工环地质勘察和遥感技术在地质中的实践应用 [J]. 中华建设, 2025, (06): 186-188.
- [6] 李凯. 遥感测绘技术在自然资源调查与监测工作中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(15): 193-196.
- [7] 赵佳鑫. 高光谱遥感在自然资源调查监测中的应用研究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(08): 76-78.
- [8] 何亦成. 金属矿产资源勘查中地质找矿技术要点及优化 [J]. 中国金属通报, 2025, (04): 82-84.