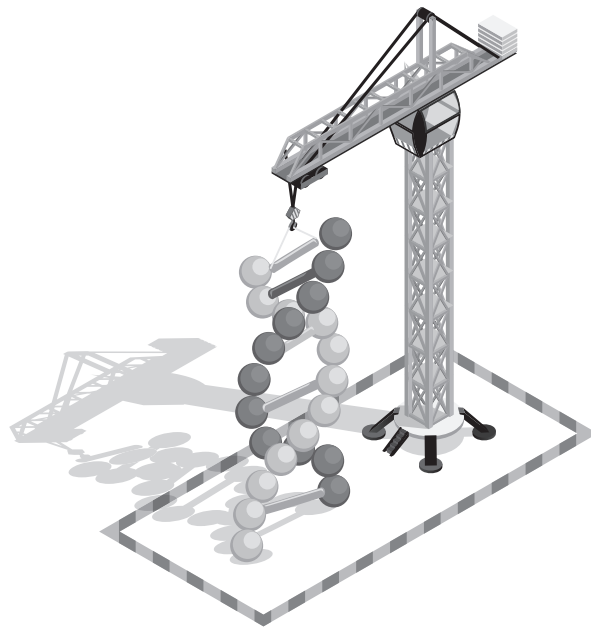


工程 研究与应用

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3期 2026年3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 | 基于 GIS 的专题地图制图方法研究
Research on Thematic Map Cartography
Methods Based on GIS | 刘万源, 杨永辉
Liu Wanyuan, Yang Yonghui |
| 004 | 道路工程边坡防护结构稳定性分析
Stability Analysis of Road Embankment Protection Structures | 王玉平
Wang Yuping |
| 007 | 基于 PLC 与 Robot Studio 机器人焊接仿真研究
Research on Robot Welding Simulation Based on
PLC and Robot Studio | 何政洋, 张攀, 沈爱萍
He Zhengyang, Zhang Pan, Shen Aiping |
| 013 | 长春地区龙嘉机场与龙嘉站空铁联运发展优化研究
Research on the Optimization of Air-Rail Intermodal Transport Development between
Longjia Airport and Longjia Station in Changchun Area | 陈清越
Chen Qingyue |
| 016 | 文洛型温室铝合金天沟的受力分析及选型
Stress Analysis and Selection of Aluminum Alloy Gutters for
Venlo Greenhouses | 孙佳
Sun Jia |
| 019 | 航线维修故障管控系统的建立研究
Research on the Establishment of an Airline Maintenance Fault
Control System | 拜向洲, 王超辉
Bai Xiangzhou, Wang Chaohui |
| 022 | 非常规气井压裂后生产制度优化与长期稳产策略研究
Research on Production System Optimization and Long-term Stable Production
Strategies for Unconventional Gas Wells after Fracturing | 段文义
Duan Wenyi |
| 025 | 山区路桥服务区滑坡监测预警系统构建与处治效果评估
Construction and Treatment Effect Evaluation of a Landslide Monitoring
and Early Warning System for Road and Bridge Service Areas in
Mountainous Regions | 许鹏飞
Xu Pengfei |
| 028 | 利用微震数据推断雨的地震特征
Inferring the Seismic Characteristics of Rainfall from
Microseismic Data | 周晓悦, 陈宇强
Zhou Xiaoyue, Chen Yuqiang |
| 032 | 园林微地形工程施工过程控制与常见问题处理技术研究
Research on Construction Process Control and Common Problem Handling
Techniques for Garden Micro-topography Projects | 孙世宏
Sun Shihong |
| 036 | 工地能耗物联网实时监测技术应用研究
Research on the Application of Real-Time Monitoring Technology for Internet of Things
in Construction Site Energy Consumption | 葛光杰, 方献林
Ge Guangjie, Fang Xianlin |
| 039 | 装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能及快速施工技术研究
Research on Mechanical Properties and Rapid Construction Techniques for Connection
Joints in Prefabricated Concrete Bridge Structures | 王祥海
Wang Xianghai |
| 042 | 浅谈工程项目成本的控制
A Brief Discussion on the Control of Project Costs | 李玲
Li Ling |
| 046 | 基于大客户战略驱动的质量工具应用研究
Research on the Application of Quality Tools Driven by Key
Account Strategy | 章浩杨
Zhang Haoyang |

049	锅炉闸阀密封性能提升的技术方案研究 Research on the Technical Solution of Improving the Sealing Performance of Boiler Gate ValveThe Impact of Smoking on Cognitive Function in Chinese Older Adults	张志海 Zhang Zhihai
052	冬季低温环境对道路养护施工质量的影响及应对措施分析 Analysis of the Impact of Winter Low Temperature Environment on Road Maintenance Construction Quality and Countermeasures	谢家书 Xie Jiashu
055	电气工程建设中电气安装问题及安装技术探讨 Discussion on Electrical Installation Problems and Installation Techniques in Electrical Engineering Construction	李夏静, 周铭 Li Xiajing, Zhou Ming
058	道路工程中新材料、新技术的应用与实践 Application and Practice of New Materials and Technologies in Road Engineering	张颐 Zhang Yi
061	工程造价评估中的风险管理与不确定性分析 Risk Management and Uncertainty Analysis in Construction Cost Estimation	黄成 Huang Cheng
064	悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用分析 Analysis of the Application of Cantilever Bridge Construction Technology in Bridge Engineerings	曹铁锤 Cao Tiechui
068	新型齿轮范成加工虚拟仿真系统设计与实现 Design and Implementation of a Virtual Simulation System for the Generating Machining of New-type Gears	徐文俊, 杨宇飞, 郑丽文, 林钰珍 Xu Wenjun, Yang Yufei, Zheng Liwen, Lin Yuzhen
072	工程项目合同管理与纠纷防控研究 Research on Contract Management and Dispute Prevention in Engineering Projects	陈瑛 Chen Ying

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

075	EPC 模式下工程造价动态控制机制研究 Research on Dynamic Cost Control Mechanisms in EPC Mode	赵焕焕 Zhao Huanhuan
078	商业综合体建筑电气负荷计算与配电系统优化 Calculation of Electrical Load for Commercial Complex Buildings and Optimization of Power Distribution System	高洁 Gao Jie
081	绿色建筑全寿命周期成本测算模型与碳成本内化路径研究 Research on the Life Cycle Cost Calculation Model and Carbon Cost Internalization Path for Green Buildings	王鹏程 Wang Pengcheng
084	某佛学院结构设计关键问题解析 Analysis of Key Issues in Structural Design of a Buddhist College	范华君 Fan Huajun

能源科学 | ENERGY SCIENCE

088	区域地质填图与矿产勘查一体化技术在辽宁的应用 Application of integrated technology of regional geological mapping and mineral exploration in Liaoning Province	邵九龙 Shao Jiulong
091	基于多源数据融合的深部矿产资源勘查方法研究 Research on Exploration Method of Deep Mineral Resources Based on Multi-source Data Fusion	李国银 Li Guoyin
094	露天煤矿铲装运输环节安全隐患排查与整改措施研究 Research on Safety Hazard Investigation and Rectification Measures in the Scraping, Loading and Transportation Process of Open pit Coal Mines	郭利波, 孙佼 Guo Libo, Sun Jiao
097	关于油气企业安全生产标准化建设的研究 Research on the Standardization Construction of Safety Production in Oil and Gas Enterprises	杨岭飞, 张瑞毅, 丛一宁 Yang Lingfei, Zhang Ruiyi, Cong Yining
100	露天煤矿雨季防洪排水安全管理体系优化实践 Optimization Practice of Flood Control and Drainage Safety Management System in Open-Pit Coal Mines During Rainy Season	钱福刚, 郭利波 Qian Fugang , Guo Libo
103	水工环地质勘察中生态保护技术研究 Research on Ecological Protection Technologies in Hydrogeological, Engineering Geological, and Environmental Geological Exploration	赵建军 Zhao Jianjun
106	天然气站场压缩机故障预测与基于振动信号的智能诊断 Prediction and Intelligent Diagnosis of Compressor Faults Based on Vibration Signals in Gas Station	靳丁琨, 李志文, 程士瀚 Jin Dinghui, Li Zhiwen, Cheng Shihan
109	石油勘探钻井并用井下测控仪器电路的研发与应用探究 Research and Application of Circuitry for Underground Monitoring and Control Instruments Used in Petroleum Exploration Drilling	谢培, 诸梦青, 蓝永宗 Xie Pei, Zhu Mengqing, Lan Yongzong
112	低温环境下通信电源的启动性能优化 Startup Performance Optimization of Communication Power Supplies in Low-Temperature Environments	杨金凤, 辛文启, 李新阳, 刘泰琪 Yang Jinfeng, Xin Wenqi, Li Xinyang, Liu Taiqi
115	北方中小型污水处理厂绿色低碳转型技术路径 Green and Low-Carbon Transition Pathways for Small and Medium Wastewater Treatment Plants in Northern China	陈建刚 Chen Jiangang
118	采煤环节质量管控与煤样规范管控的实践应用研究 Practical Application Research on Quality Control in Coal Mining Process and Standardized Control of Coal Samples	边智文 Bian Zhiwen
121	油气管道消防安全研究初探 Preliminary Study on Fire Safety in Oil and Gas Pipelines	丛一宁, 杨岭飞, 张瑞毅 Cong Yining, Yang Lingfei, Zhang Ruiyi

124	融合数字孪生与深度强化学习的火电厂燃料智能掺烧多目标动态寻优策略 Multi-Objective Dynamic Optimization Strategy for Intelligent Fuel Blending in Thermal Power Plants by Integrating Digital Twin and Deep Reinforcement Learning	杨发亮, 马凤骁, 崔岗, 许畅, 蒋俊英 Yang Faliang, Ma Fengxiao, Cui Gang, Xu Chang, Jiang Junying
127	基于天然气行业“五个零”的安全管理建设与研究 Construction and Research on Safety Management Based on the "Five Zeros" Principle in the Natural Gas Industry	张瑞毅, 丛一宁, 杨岭飞 Zhang Ruiyi, Cong Yining, Yang Lingfei
130	石英砂岩矿床开采技术条件分析 Analysis of Technical Conditions for Mining Quartz Sandstone Deposits	胡波 Hu Bo

基于 GIS 的专题地图制图方法研究

刘万源, 杨永辉

北京新航城控股集团有限公司, 北京 102604

DOI:10.61369/ERA.2026030003

摘 要 : 北京大兴国际机场临空经济区（北京部分）的开发建设，对区域空间规划工作提出更为严苛的标准，该区域囊括交通路网搭建、产业功能排布、生态屏障构建等多维度空间要素，迫切需要高精度、动态实时化、直观可视化的专题地图作为技术支撑，地理信息系统（GIS）在空间数据的获取整合、加工处理、深度解析及成果呈现等环节展现出独特技术优势，能够为临空经济区的规划管控与科学决策提供有力保障，本研究重点梳理空间数据处理全流程、专题地图编制核心技术与可视化表达创新方法，深入探究上述技术路径在临空经济区规划实践中的具体应用模式，最终实现提升规划方案科学性与空间信息传递效率的双重目标。

关 键 词 : GIS; 专题地图; 大兴国际机场临空经济区; 空间分析; 可视化表达

Research on Thematic Map Cartography Methods Based on GIS

Liu Wanyuan, Yang Yonghui

Beijing New Aerotropolis Holding Co., Ltd. Beijing 102604

Abstract : The development and construction of the Beijing Daxing International Airport Economic Zone (Beijing section) have imposed more stringent standards on regional spatial planning. This area encompasses multi-dimensional spatial elements such as transportation network construction, industrial function arrangement, and ecological barrier establishment, urgently requiring highly accurate, dynamically real-time, and visually intuitive thematic maps as technical support. Geographic Information System (GIS) demonstrates unique technological advantages in acquiring, integrating, processing, deeply analyzing, and presenting spatial data, providing strong assurance for the planning, control, and scientific decision-making of the airport economic zone. This study focuses on organizing the entire process of spatial data processing, core technologies for thematic map compilation, and innovative methods for visual expression. It delves into the specific application modes of the aforementioned technical paths in the planning practice of the airport economic zone, ultimately achieving the dual goals of enhancing the scientific nature of planning schemes and improving the efficiency of spatial information transmission.

Keywords : GIS; thematic map; Beijing Daxing International Airport Economic Zone; spatial analysis; visual expression

引言

北京大兴国际机场临空经济区正处于高速建设阶段，航空物流枢纽、特色产业园区、生态涵养空间等多元功能载体在该区域内高度汇集，这一发展态势对空间信息的精准度与可视化呈现水平提出全新要求，地理信息系统（GIS）凭借多源异构数据整合、空间格局深度分析、专题地图科学编制等核心技术能力，可为临空经济区的规划管理优化、产业空间布局完善、交通系统组织升级提供坚实可靠的技术支持^[1]，本研究聚焦数据处理规范、专题制图方法与可视化应用路径三大核心板块，搭建一套适配临空经济区规划编制与成果展示需求的完整技术体系。

一、临空经济区专题地图的数据基础与处理方法

（一）数据来源与特征

遥感影像数据是临空经济区专题制图的核心基础素材，高分辨率影像可助力地物的精细化判别，依托较高的更新频次精准捕捉区域建设进程，在土地利用类型划分与区域发展动态监测领域

占据不可替代的地位，矢量地理数据包含行政区划界线、道路交通网络、地下综合管廊、产业功能片区划分等内容，是搭建空间分析模型与搭建专题信息表达框架的核心数据源，其数据精度与格式规范程度会对最终制图品质产生直接且关键的影响，多源异构数据涵盖人口空间分布格局、产业经济运行指标、交通流量实时监测结果、生态环境质量监测数据等多个维度，此类数据在数

据结构、存储格式与更新周期上存在明显差异,需借助统一的数据治理方案完成整合集成,进而满足临空经济区多维度空间信息高效表达的实际需求。

(二) 数据预处理与标准化

专题地图制作工作开展之前,需对收集到的全部数据实施系统化预处理操作,坐标系统一、投影方式转换与数据格式转化等环节的落实,可保障多源数据处于同一空间参考框架内进行运算分析,拓扑错误修复、缺失数据补充完善、边界精度校验修正等数据清洗措施的执行,能够有效提升后续空间分析工作的结果可信度^[9]。统一符号体系搭建、属性分类编码规则制定以及图层标准结构设定的推进,可实现空间数据的规范化统筹管理,促使制图工作在信息表达风格、数据属性结构及空间语义阐释等层面保持高度协调统一。

(三) 数据融合与空间数据库构建

结合临空经济区数据类型繁杂、更新速度较快的特点,需运用多源数据融合技术手段,例如栅格与矢量数据的优势互补融合、时序数据的叠加对比分析等,以此构建起全面完整的区域空间认知体系,在完成多源数据融合的基础之上,可搭建面向临空经济区规划建设需求的空间数据库,该数据库涵盖基础地理信息、产业空间布局、交通网络架构、生态环境保护等多个主题功能模块,实现数据的结构化存储与层级化分类管理^[9]。空间数据库需具备动态更新运行机制,通过定期更新遥感影像数据、接入实时交通监测数据接口、整合在线环境监测数据等方式,让专题地图能够精准反映区域发展的最新状态,为临空经济区规划编制与日常管理工作提供稳定可靠的数据支撑。

二、基于 GIS 的专题地图制图技术体系

(一) 专题图分类及适用性分析

依托 GIS 技术编制的专题地图,可根据表达对象属性与空间分布特征划分为定量、定性及动态三大类别,各类专题地图在临空经济区规划编制与运营管理工作具备差异化的应用价值,定量专题地图采用分级设色、等值线绘制、热力渲染等表现形式,直观呈现产业规模差异分布、客流量时空变化特征与空间发展演变趋势,清晰反映区域发展活力强度与功能核心热点区域,定性专题地图主要包含土地利用现状图、功能分区规划图、规划综合实施方案图则、交通系统组织图等类型,用于直观展示区域空间结构形态、土地资源功能定位与交通网络布局特征,是规划方案审查核验与空间资源精细化管理的重要工具^[4]。动态专题地图如临空区土地资源整理数据平台,借助时序地理信息数据,精准刻画区域建设推进进度、产业空间扩张轨迹与生态环境演变状况,在区域发展动态监测与政策实施效果评估方面发挥重要作用,尤其适配处于高速发展阶段的临空经济区建设需求。

(二) 制图要素设计与表达规范

制图要素的科学设计直接关系到专题地图的信息读取效率与内容表达精准度。颜色选取需遵循对比适中、主题突出、色序符合认知规律的原则,通常采用 3 ~ 7 级分级设色方案,相邻色阶

亮度差控制在 15% ~ 25% 区间,以确保信息层级清晰可辨。符号造型设计应保证图形形状、尺寸大小与所代表地理语义形成明确对应关系,点状符号尺寸宜控制在 2 ~ 6 mm,线状要素线宽一般设置为 0.2 ~ 1.0 pt,以兼顾可读性与版面整洁度。注记文字排布需遵循最小遮挡原则,常用字体字号设置在 6 ~ 10 pt 范围内,并通过自动避让算法减少对关键地理要素的遮挡。比例尺、图例说明、指北针等辅助要素的合理配置,能够有效增强专题地图的信息解释能力,帮助用户快速、准确解读空间信息。面向临空经济区规划管理需求,还需建立统一的符号语义解析体系,通过标准化色彩组合、线型参数与标注风格规范,实现不同类型专题地图之间的表达风格一致性,进而提升地图成果在跨部门协作与多场景应用中的协调适配性与资源共享水平。

(三) 空间分析技术在制图中的集成

空间分析技术的嵌入应用,是 GIS 专题制图区别于传统地图编制技术的核心特征,缓冲区分析方法可用于科学划定机场噪声影响辐射范围、安全管控核心区域及关键基础设施保护范围,为临空经济区规划综合实施方案提供明确的管控边界依据。叠加分析技术通过整合地形地貌、道路交通、生态保护、产业布局等多维度数据信息,为用地适宜性评价、产业空间布局优化、重点项目选址论证等工作提供全方位的决策支持,可视域分析计算与三维模型构建技术的结合运用,能够有效模拟航站区周边视线通达范围、建筑景观空间影响及航空运营空间限制条件,使专题地图的信息表达方式更加贴近真实空间场景^[9]。

三、专题地图可视化表达与交互技术

(一) 二维可视化表达策略

二维专题地图是临空经济区规划成果展示的基础载体形式,数据分级方法的合理选取对地图视觉呈现效果与信息解读效率起着决定性作用,自然断点分级法适用于数值呈现突变特征的数据信息,等距分级法适配数值呈均匀分布态势的数据内容,量化分级法能够保障各级别数据样本数量基本均衡,从而提升地图版面的视觉协调性,场景化地图设计通过强化道路干线、城际铁路 TOD、机场跑道、航站楼等核心要素的视觉表现效果,使地图更契合机场区域独特的空间结构特征^[9]。

(二) 三维可视化与数字孪生表达

三维可视化技术通过构建高精度的真实地形模型与建筑实体模型,让临空经济区的空间形态特征以更加直观立体的方式呈现出来,三维专题渲染技术可清晰表达航空关联产业空间布局、建筑高度梯度分布及空域管控范围要求,为规划方案的直观化评估提供真实的视觉模拟环境,数字孪生技术进一步将实时监测数据、三维实体模型与空间分析算法进行深度耦合,构建具备动态更新能力的临空经济区虚拟仿真系统。

(三) 交互式地图设计

交互式地图凭借信息查询检索、自定义标注编辑、图层叠加控制等功能,有效增强用户对空间信息的主动获取与深度挖掘能力,让专题地图不仅具备信息展示功能,更能够支撑规划管理工

作中的深度分析应用，多端适配设计可确保交互式地图在电脑端、移动终端及大屏展示设备中均能保持良好的交互操作体验，满足规划方案研讨交流、公众展示宣传、项目会议汇报等多元化场景的应用需求^[7]。针对规划方案评审环节的特殊需求，可通过规划情景快速切换、多版本方案对比分析、建设进程动态演示等交互功能设计，显著提升规划评审工作的效率与科学性，使专题地图成为辅助规划方案论证决策的重要技术工具，图1阐释了临空经济区专题地图可视化与交互技术的整体架构体系，清晰呈现二维表达优化、三维建模与数字孪生构建、交互式地图功能设计三大核心模块的内容组成与功能特性。

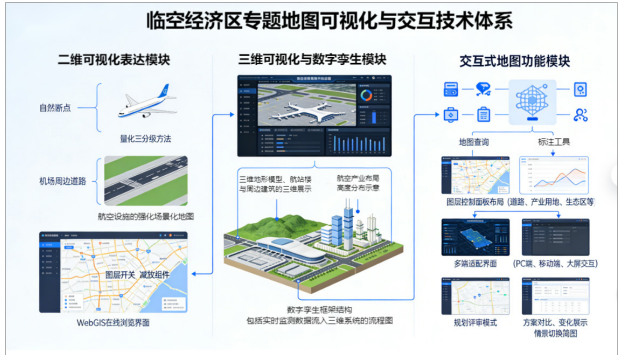


图1 临空经济区专题地图可视化与交互技术体系示意图

四、专题地图在大兴国际机场临空经济区规划中的应用研究

（一）产业规划专题图的制图应用

在临空经济区产业布局规划工作中，产业专题地图能够直观呈现航空物流枢纽、国际航空社区、生命健康社区及新兴服务产业集群等功能板块的空间分布格局与阶段性发展导向。例如，在大兴国际机场临空经济区（北京部分）产业规划实践中，通过叠加现状土地利用数据与规划用地指标，专题地图清晰标注航空物流产业区约 8.5 km²、生命健康产业区约 6.2 km² 的空间范围及用地结构比例。基于 GIS 空间分析技术，对地形坡度（≤5°）、距高速出入口距离（≤3 km）、轨道交通可达性（30 min 时圈）等关键因子进行加权叠加分析，形成产业发展适宜性分级图，为重点产业项目选址提供量化决策依据^[8]。同时，依托 2019—2024 年遥感影像与产业统计数据的时序对比分析，专题地图动态展示了物流仓储用地沿机场货运区外围呈“带状扩展”的空间演变特征

参考文献

征，为产业政策评估与用地调控提供可视化支撑。

（二）交通组织与综合交通体系专题图

交通网络体系是保障临空经济区高效运行的重要基础，通过综合交通专题地图可系统呈现机场高速、京雄城际铁路、轨道交通新机场线及城市主干路网等多层级交通系统的组织结构。在规划应用中，将现状路网、在建项目及规划线路进行分层表达，清晰揭示各类交通方式之间的换乘节点与衔接关系。基于交通模型预测结果，将高峰小时客流数据导入 GIS 平台，生成客流热力分布专题图，结果显示机场航站区及轨道交通换乘枢纽周边客流强度显著高于外围区域，高峰期局部路段交通饱和度接近 0.85，为优化公交接驳线路与完善慢行系统布局提供了直观依据^[9]。通过专题地图对比分析不同规划方案下的交通组织效果，可有效支撑综合交通体系的结构优化与运行效率提升。

（三）生态与空间管控专题地图

生态与空间管控专题地图在临空经济区规划管控中发挥着基础性作用。通过整合生态保护红线、水系分布、现状绿地及规划生态廊道数据，构建生态专题地图，可清晰界定重点生态保护区与建设活动限制范围。在大兴机场周边规划中，生态专题图明确标示约 30 km² 的生态控制空间，为绿色隔离带与生态缓冲区布局提供空间依据。机场噪声影响范围与安全管控限制区的专题制图，则基于航空噪声预测模型计算不同等值线（如 65 dB、70 dB）覆盖范围，并结合高度控制要求形成分区管控图，直观反映不同等级噪声影响区域与空域安全边界^[10]。该类专题地图为建设项目审批、功能布局调整及生态风险防控提供了明确、可操作的技术支撑。

五、结语

GIS 专题地图在临空经济区规划编制与管理中发挥着关键作用，不仅实现多源空间信息的高效整合，还为产业布局优化、交通组织完善与生态管控提供有力决策支撑，并显著提升规划成果的可视化表达与信息传递效率。本文构建的专题制图流程与技术体系具有较强实践适用性，可为同类型临空经济区及城市新区规划提供参考。针对数据更新时效性不足与三维表达精细度受限等问题，未来可通过人工智能制图、大数据时空分析与数字孪生技术的融合应用，进一步推动规划管理向智能化、精细化发展。

[1] 贾峰. 基于 Mashup 网络地理信息服务的专题地图平台应用研究 [D]. 成都理工大学, 2021.DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2021.000312.

[2] 丘洁萍. 基于开源 GIS 的地震应急专题地图在线制图系统研究 [D]. 东华理工大学, 2021.DOI: 10.27145/d.cnki.ghddc.2021.000232.

[3] 樊妙, 章任群, 马丹, 等. 海洋专题制图标准的发展与展望 [J]. 海洋通报, 2022, 41(02): 121-130.

[4] 彭洁. 基于 Web GIS 的高中生地图能力培养研究 [D]. 河南大学, 2023.DOI: 10.27114/d.cnki.ghnau.2023.000429.

[5] 高巧艳. 基于时空大数据平台的专题地图服务研究与实践 [D]. 河南大学, 2023.DOI: 10.27114/d.cnki.ghnau.2023.001097.

[6] 陈春祥. 基于聚焦滤波的林业专题地图制图综合方法 [J]. 林业调查规划, 2024, 49(01): 1-7.

[7] 卜若. 基于 ArcPy 与数据驱动页面的专题地图批量制图方法研究 [J]. 现代测绘, 2024, 47(02): 8-11.

[8] 陈春祥. 基于聚焦滤波的林业专题地图制图综合方法 [J]. 林业调查规划, 2024, 49(01): 1-7.

[9] 卜若. 基于 ArcPy 与数据驱动页面的专题地图批量制图方法研究 [J]. 现代测绘, 2024, 47(02): 8-11.

[10] 万荣军. 基于栅格数据矢量化技术的专题地图快速制图方法研究 [J/OL]. 自然资源信息化, 1-6[2025-12-22].<https://link.cnki.net/urlid/10.1797.N.20250901.0955.002>.

道路工程边坡防护结构稳定性分析

王玉平

陇南公路应急保障与路网监测中心, 甘肃 陇南 746000

DOI:10.61369/ERA.2026030004

摘 要 : 道路工程边坡防护结构的稳定性直接关系到道路运营安全与沿线生态环境, 是岩土工程与道路工程交叉领域的关键研究课题。本文以道路边坡常见防护结构为研究对象, 通过现场勘查、室内试验与数值模拟相结合的方法, 分析岩土体性质、水文条件等关键因素对稳定性的影响机制, 对比不同防护方案优劣, 梳理常见病害类型与成因, 提出针对性治理技术及动态优化策略, 构建“设计—分析—优化—治理—养护”全生命周期技术体系。研究表明, 组合式防护结构较单一形式可提升边坡稳定性系数 15%~25%, 病害治理后稳定系数达 1.35 以上, 最大位移量控制在 5mm 以内。本文为道路边坡防护设计、病害治理与运营养护提供了理论依据与技术支撑。

关 键 词 : 道路工程; 边坡防护; 结构稳定性; 病害治理; 优化策略

Stability Analysis of Road Embankment Protection Structures

Wang Yuping

Longnan Highway Emergency Response and Road Network Monitoring Center, Longnan, Gansu 746000

Abstract : The stability of slope protection structures in road engineering directly impacts road operational safety and the ecological environment along the route, serving as a critical research topic at the intersection of geotechnical engineering and road engineering. This study focuses on common slope protection structures, employing a combination of field investigations, laboratory tests, and numerical simulations to analyze the influence mechanisms of key factors such as geotechnical properties and hydrological conditions on stability. It compares the advantages and disadvantages of different protection schemes, identifies common types and causes of slope failures, proposes targeted remediation techniques and dynamic optimization strategies, and establishes a comprehensive "design-analysis-optimization-remediation-maintenance" lifecycle technical system. The research demonstrates that combined protection structures can enhance slope stability coefficients by 15% to 25% compared to single forms, achieving stability coefficients above 1.35 after remediation and controlling maximum displacement within 5mm. This study provides theoretical foundations and technical support for slope protection design, failure remediation, and operational maintenance in road engineering.

Keywords : road engineering; slope protection; structural stability; disease control; optimization strategy

引言

道路工程建设中, 边坡作为路基的重要组成部分, 广泛分布于山区、丘陵区道路沿线。边坡失稳引发的滑坡、崩塌等地质灾害, 不仅造成道路中断、交通瘫痪, 还威胁周边居民生命财产安全, 因此边坡防护结构的稳定性分析具有重要工程实践意义。近年来, 随着道路工程向复杂地质区域延伸, 边坡面临的水文、地质条件愈发复杂, 传统单一防护结构难以满足高稳定性要求。行业内专家围绕边坡防护结构开展研究, 在岩土体本构模型、支护结构受力特性等方面取得诸多成果, 但现有研究多聚焦静态工况下稳定性分析, 对动态水文变化、长期荷载作用下的结构响应研究不足, 且缺乏“设计—施工—治理—养护”全流程协同技术体系。

基于此, 本文结合工程实际案例, 系统分析边坡防护结构稳定性关键影响因素, 构建多因素耦合下的稳定性评价体系, 对比不同防护方案优劣, 梳理病害类型与成因并提出治理技术, 旨在为道路边坡防护工程的设计、施工与长期安全运营提供科学指导。

一、道路边坡防护结构类型及适用条件

综合防护型三类, 不同类型结构适用条件与防护机理存在显著差异, 需结合边坡岩土体性质、坡度、水文条件及环境要求针对性选用。

道路工程中常用边坡防护结构可分为支挡型、坡面防护型与

支挡型防护结构以抗滑桩、挡土墙为典型代表，其核心机理是通过结构自身刚度与强度，抵抗边坡岩土体下滑力，适用于岩土体力学性质较差、边坡坡度较陡的路段。抗滑桩通过桩体嵌入稳定地层，利用桩土相互作用传递荷载，可有效控制深层滑动，尤其适用于存在软弱夹层、潜在滑动面较深的边坡；挡土墙则依靠墙体自重或锚拉结构平衡土压力，按结构形式可分为重力式、悬臂式、锚杆式等，多用于浅层边坡防护及坡脚受河流冲刷、路基填筑段的边坡加固。

坡面防护型结构包括喷锚支护、植草防护、格构护坡等，主要作用是防止坡面岩土体风化、冲刷，维持边坡表层稳定。喷锚支护通过锚杆锚固与喷射混凝土面层的结合，增强坡面岩土体的整体性，适用于岩质边坡及节理裂隙发育的破碎岩体边坡；植草防护与格构护坡则兼具防护与生态修复功能，植草防护通过草本植物根系固土、茎叶截留雨水，适用于坡度较缓土质边坡，格构护坡常与喷播植草结合，形成“框架+植被”的防护体系，多用于土质边坡与环境敏感区域。

综合防护型结构是支挡型与坡面防护型组合形式，如“抗滑桩+格构护坡”“挡土墙+喷锚支护”等，通过多结构协同作用，实现深层与浅层防护有机结合，适用于地质条件复杂、稳定性要求高的高陡边坡，例如山区高速公路的深挖高填路段、临近建筑物或重要管线的边坡工程，可有效降低边坡失稳风险，保障道路运营安全^[2]。

二、边坡防护结构稳定性影响因素分析

（一）岩土体性质

岩土体的物理力学性质是决定边坡防护结构稳定性的内在核心因素，核心指标包括重力、内摩擦角与粘聚力。内摩擦角与粘聚力直接决定岩土体抗剪强度，抗剪强度越高，边坡自稳能力越强，防护结构荷载越小、安全储备越高。风化岩、松散填土、软黏土等抗剪强度低，颗粒粘结力弱，易发生剪切破坏，需采用抗滑桩、锚杆挡土墙等刚度较大的支挡结构；硬质岩浆岩、完整沉积岩等抗剪强度高，边坡自稳性好，采用喷锚支护、植草防护等坡面防护即可。此外，层理、节理、裂隙发育的岩体及断层破碎带附近岩土体，易沿弱面滑移，需针对性增设预应力锚杆等加固结构。

（二）水文地质条件

水文条件是影响稳定性的关键外部因素，地下水渗流与地表水冲刷会显著降低岩土体强度。地下水渗流产生的动水压力会破坏颗粒粘结力、改变应力状态，同时增加岩土体饱和重度，增大下滑力，严重时引发深层滑坡；地表水冲刷直接侵蚀坡面，导致坡面塌陷、防护结构基础裸露，坡脚长期冲刷易形成淘空区，诱发结构倾覆。因此，地下水丰富的边坡需增设截水沟、盲沟等排水系统；降雨充沛区域应采用格构护坡、浆砌片石护坡等形式，构建多层抗冲刷防护体系。

（三）防护结构与施工质量

防护结构的设计参数与施工质量直接决定其稳定性。抗滑桩的桩长、桩径、桩间距需与下滑力精准匹配，桩长不足或桩间距

过大易导致桩体变形断裂；挡土墙的墙高、埋深及回填土压实度需严格遵循设计标准，压实度不足会引发墙体沉降倾斜。施工工艺缺陷同样影响稳定性，如喷锚支护中锚杆锚固长度不足、注浆不饱满，喷射混凝土厚度不均、养护不到位，或支挡结构施工中基坑开挖扰动岩土体，均可能诱发边坡失稳。因此，施工阶段需加强全流程质量管控，严格执行设计规范与施工工艺，同步做好施工监测，实时调整方案。

三、稳定性分析方法与工程案例

（一）常用稳定性分析方法

道路边坡防护结构稳定性分析方法主要包括极限平衡法与数值模拟法。

1. 极限平衡法是工程中最常用的方法，其基本原理是将边坡划分为若干滑动体，通过计算滑动面的抗滑力与下滑力比值，确定边坡稳定系数，常用方法有瑞典条分法、毕肖普法、简布法等。该方法计算简便、适用性强，但未考虑岩土体的应力应变关系，适用于初步稳定性评价。

2. 数值模拟法以有限元法、有限差分法为代表，通过构建边坡三维模型，模拟岩土体与防护结构的相互作用，分析结构应力分布、位移变化规律，可实现动态工况下的稳定性分析。以FLAC3D软件为例，可输入岩土体力学参数、防护结构形式等数据，模拟降雨、荷载作用下的结构响应，为优化设计提供精准依据^[3]。

（二）工程案例

选取国道212线K482+700~K483+390九姊妹梁路段边坡工程为研究对象。该路段位于陇南白龙江流域，地处复杂地质构造区域，地形陡峭，岩土体松散、自稳性差，且汛期降雨集中，历史上多次发生大规模塌方（2020年“8.12”水毁塌方近10000立方米，2024年“7.22”水毁塌方近6000立方米），边坡失稳导致交通频繁中断，严重威胁沿线群众生命财产安全。原防护措施缺乏系统性设计，仅针对局部塌方进行临时抢修，属于“头痛医头、脚痛医脚”的被动处置模式，未能从根本上解决边坡稳定性问题，稳定系数长期低于规范要求的1.20，且坡面位移无有效控制，灾害反复发生。

通过极限平衡法计算原被动防护方案，稳定系数仅为1.02，无法满足长期运营安全需求；借助无人机航拍踏勘与大数据建模开展数值模拟分析，明确边坡存在深层滑动风险，且坡面岩土体松散易受雨水冲刷，单一防护形式难以兼顾深层抗滑与浅层防护需求。基于此，优化设计采用“分区治理、协同防护”的组合方案：将边坡划分为六个工点同步施工，坡脚统一设置“抗滑桩+挡板墙+冠梁”复合支挡体系，1、2号工点因坡体更陡、地质更复杂，额外增设框格梁加固，形成“上固下挡”的立体防护结构；同步配套急流槽、截水沟等排水设施，构建“防、排、稳、固”一体化闭环体系，框格梁区域码砌植生袋实现绿化覆盖，兼顾防护与生态效益。

优化后经极限平衡法复核，边坡稳定系数提升至1.38，满足

规范及长期运营安全要求；现场监测数据显示，边坡最大位移量控制在4mm 以内，彻底解决了历史上“屡毁屡修、屡毁屡修”的难题。该工程通过科学选址、多结构协同设计与精细化施工，实现了从“被动抢险”到“主动防护”的转变，验证了复杂地质条件下组合式防护体系的有效性与适用性。

值得注意的是，即便设计施工达标，边坡防护结构长期运营中仍会受岩土体劣化、水文变化、荷载作用及环境侵蚀等因素影响，滋生各类病害。若未及时治理，易导致防护功能失效、引发边坡失稳，因此需梳理病害类型、成因及治理技术，形成“设计－分析－治理－养护”完整技术体系，为道路边坡长期安全运营提供全生命周期保障^[4]。

四、边坡防护结构病害类型与治理技术

边坡防护结构长期稳定，既依赖前期合理设计与规范施工，也需重视运营期病害防控。本节结合工程实践分析病害类型、成因，为养护及处置提供技术支撑。

（一）常见病害类型及成因

（1）支挡结构病害

典型病害为挡土墙倾斜、沉降、开裂，抗滑桩断裂、位移超标。成因有三：一是设计参数失配，如挡土墙埋深不足、抗滑桩桩长未达稳定地层，致使结构受力超限；二是施工质量缺陷，如回填土压实度不足、混凝土强度不达标，降低承载能力；三是长期环境作用，地下水侵蚀引发钢筋锈蚀、岩土体强度衰减，结构在土压力下变形破损。

（2）坡面防护病害

涵盖喷锚支护面层剥落、锚杆松动，植草防护植被退化、坡面冲刷沟发育，格构护坡框架开裂、节点脱落。喷锚病害源于锚杆锚固不足、注浆不饱满或混凝土养护不到位；植草退化与降雨冲刷、土壤贫瘠、植被选型不当相关；格构护坡病害则因混凝土收缩裂缝、坡面平整度差引发应力集中。

（3）综合防护体系协同失效

组合式结构易出现多构件联动失效，如抗滑桩位移过大牵拉格构框架断裂，或排水堵塞加剧各类病害。成因是设计未考量结构受力协调、施工工序衔接不当，以及运营期养护不及时，造成体系功能衰减^[5]。

（二）针对性治理技术

（1）支挡结构病害治理：挡土墙倾斜沉降采用锚杆注浆加固，增设预应力锚杆并改良墙后软弱土体；墙体裂缝压力灌浆防渗，严重破损段拆改重建。抗滑桩失效时，增设补充桩或通过外包钢板、注浆加固提升刚度，控制位移。

（2）坡面防护病害治理：喷锚支护凿除破损面后重新锚固注浆，喷射高强混凝土并加设钢筋网；植草退化区域清理冲沟、改良土壤，选用乡土植被喷播，必要时增设三维植被网。格构护坡裂缝灌浆、节点加固，变形严重段重新施工贴合坡面。

（3）综合防护体系优化治理：先经勘查与数值模拟明确协同失效成因，增设衔接构件协调受力，疏通重建排水系统。建立常态化养护机制，定期检查、及时处置早期病害 [6]。

（三）治理效果验证

治理后通过极限平衡法确保稳定系数 ≥ 1.20 ，FLAC3D 模拟验证协同有效性，现场布设监测设备连续监测6个月以上，控制最大位移 $\leq 5\text{mm}$ 。国道212线九姊妹梁路段边坡经综合治理后，稳定系数从1.08提升至1.35，变形稳定，防护功能恢复，验证了治理技术可靠性^[6]。

五、结语

道路工程边坡防护结构稳定性是保障道路安全运营的核心要素，其稳定性受岩土体性质、水文条件、设计施工等多因素影响，且需兼顾长期运营中的病害防控。单一防护结构难适应复杂地质工况，组合式防护结构通过多形式协同作用，可提升边坡稳定性系数15%~25%，极限平衡法与数值模拟法结合的科学分析方法，为方案优化提供了精准支撑。本文通过理论分析、工程案例验证与病害治理技术梳理，明确各影响因素的作用机制，构建“设计－分析－优化－治理－养护”的全生命周期技术体系，为道路边坡防护工程的设计、施工与运营养护提供系统的理论参考与技术支撑。未来研究应进一步融合人工智能、物联网等技术，构建智能化边坡稳定性监测与预警体系，实现病害早期识别与动态治理；同时深化生态防护与工程防护的融合应用，在保障稳定性的基础上提升生态效益，推动道路工程边坡防护技术向精准化、智能化、生态化方向持续发展。

参考文献

- [1] 吕大为. 公路边坡稳定性分析及治理方法研究 [J]. 交通科技与管理, 2025(08).
- [2] 付幸豪. 拓宽开挖条件下的公路高边坡稳定性与加固分析 [J]. 北方交通, 2025(01).
- [3] 姜涛. 岩土工程中边坡稳定性分析与加固技术研究 [J]. 新城建科技, 2024(08).
- [4] 韩杰; 吴伟骏. 城市道路岩质高边坡失稳机理分析及加固措施研究 [J]. 交通科技与管理, 2024(02).
- [5] 马海鹏. 公路路基设计中的边坡防护问题及应对措施分析 [J]. 大陆桥视野, 2023(04).
- [6] 陈墨. 边坡防护中的生态防护与基本建设设计 [J]. 中国高新科技, 2023(06).

基于 PLC 与的 Robot Studio 机器人焊接仿真研究

何政洋，张攀，沈爱萍

四川大学锦江学院，四川 眉山 620860

DOI:10.61369/ERA.2026030007

摘 要： 本文对基于 PLC 与 Robot Studio 的机器人焊接仿真进行应用研究。传统的手工焊接不但需要耗费大量的人工且工作效率较低，容易受到人为因素的影响，危害工人的生命健康，因此，有必要对焊接仿真进行研究提高工作效率。本文深入探讨了焊接机器人的应用及控制系统设计，PLC 的软件程序的设计。搭建焊接机器人工作站，对弧焊机器人进行示教编程，同时，研究了 PLC 与触摸屏之间的通讯机制，以实现更加直观的人机交互。最后，完成了整个系统的安装与调试，确保了焊接机器人及其控制系统能够稳定、高效地运行。实验结果表明，该方案提高了工作效率，减少人为因素影响，具备了稳定性与安全性，为工业自动化焊接系统的开发提供了技术参考。

关 键 词： PLC；机器人；焊接；Robot Studio

Research on Robot Welding Simulation Based on PLC and Robot Studio

He Zhengyang, Zhang Pan, Shen Aiping

Sichuan University Jinjiang College, Meishan, Sichuan 620860

Abstract： This paper conducts applied research on robot welding simulation based on PLC and Robot Studio. Traditional manual welding not only requires a significant amount of labor but also exhibits low efficiency and is susceptible to human factors, posing risks to the life and health of workers. Therefore, it is necessary to conduct research on welding simulation to enhance work efficiency. This paper delves into the application of welding robots and the design of their control systems, as well as the design of PLC software programs. It establishes a welding robot workstation, performs teach programming for arc welding robots, and simultaneously investigates the communication mechanism between PLC and touchscreens to achieve more intuitive human-machine interaction. Finally, the installation and debugging of the entire system are completed, ensuring the stable and efficient operation of the welding robot and its control system. Experimental results demonstrate that this solution improves work efficiency, reduces the influence of human factors, and possesses stability and safety, providing technical references for the development of industrial automated welding systems.

Keywords： PLC; robot; welding; Robot Studio

引言

随着自动化技术的快速发展，机器人技术在生产制造行业中的应用日益广泛。焊接作为工业生产中的重要环节，对焊接质量和效率的要求越来越高。传统的焊接方式存在操作复杂、工作环境恶劣、焊接质量不稳定等问题。因此，研究基于 PLC 与 Robot Studio 的机器人焊接仿真具有重要意义。

国内学者利用 Robot Studio 进行仿真研究，例如陈磊等通过该软件设计 T 型焊接工作站，实现了焊接过程的视觉效果仿真，验证了工作站逻辑设计和程序编制的可行性。此外，武汉理工大学和山东理工大学的研究团队结合离线编程软件（MotoSimEG-VRC）和 Solid Works 建模，优化了焊接路径规划和碰撞监控技术，提升了仿真的精确性。陈磊团队通过 Robot Studio 仿真验证 T 型焊接工作站效果；2023 年中国智能焊接机器人市场规模 3.6 亿元，预计 2025 年达 166 亿元。

机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，是衡量一个国家创新能力和产业竞争力的重要标志，已经成为全球新一轮科技和产业革命的重要切入点。针对中国工业机器人产业发展，国家相继出台的工业 4.0、《中国制造 2025》及《机器人产业发展规划》等政策，从宏观、战略角度构建产业顶层设计，国家大力支持机器人产品“智能化”发展。^[1-2]



图1 机器人焊接仿真流程图

作者简介：何政洋（1991.07—），男，汉族，四川宜宾人，讲师，工学硕士，研究方向：机器人控制技术。

Robot Studio 作为 ABB 开发的仿真平台，广泛应用于焊接机器人工作站设计。以日本松下机器人为例介绍机器人焊接仿真的过程。焊接机器人一般为示教再现型机器人。通过移动机器人手臂，可以自动生成机器人操作的一个程序，这个过程被称为“示教”，示教程序可以储存在控制系统存储器中，需要时运行该程序，机器人可以反复再现已经示教好的一系列操作，自动执行正确的焊接和动作顺序^[3]。现如今机器人焊接仿真技术在汽车企业焊装中得到不断推广，其凭借功能稳定、焊接质量高、运行效率快等优势在汽车焊装中应用，可有效弥补传统人工焊装存在的不足，更好地保证产品质量^[4]。

因此，本文主要研究内容是在 Robot Studio 中创建机器人工作站模型。导入工件模型，并设置焊接路径和参数。编写机器人焊接程序，并进行仿真调试。优化焊接路径和参数，生成最终的焊接程序。将 PLC 与 Robot Studio 进行联合仿真，利用触摸屏与 PLC 编程控制机器人的开始与暂停。完成整个系统的安装与调试，确保了焊接机器人及其控制系统能够稳定、高效地运行。

本文的技术关键是研究 PLC 与 Robot Studio 之间的通信协议和数据交换方式，确保两者能够无缝集成，实现协同工作。通过配置和编程，建立 PLC 与 Robot Studio 之间的连接，实现控制信号的实时传输和反馈。

一、创建焊接机器人仿真模型

在 Robot Studio 中创建机器人工作站模型。导入工件模型，并设置焊接路径和参数。编写机器人焊接程序，并进行仿真调试。优化焊接路径和参数，生成最终的焊接程序。本文采用了 Robot Studio 对机器人焊接进行仿真，Robot Studio 仿真软件自带一些常用库，如各种型号的工业机器人及一些简单的工具及工件。^[5] 以下为工作站模型搭建过程点击 ABB 模型库添加一台 RIB410 的机器人。进一步添加焊接工作站其他辅助组件直到焊接机器人工作站模型完成，由此可见焊接机器人工作站一般由机器人、控制柜、示教器、弧焊电源、焊枪、工作台、外围栅栏等设备组成。^[6] 成图如下。

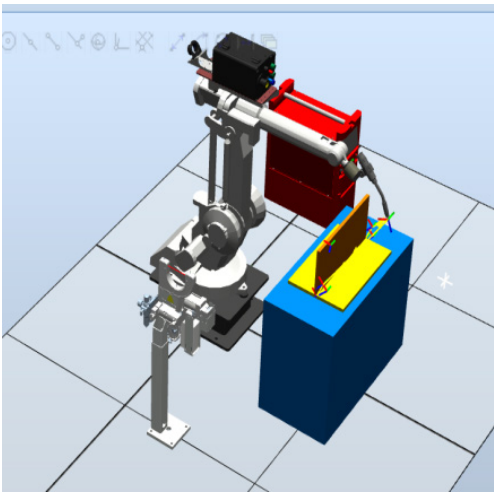


图2 机器人焊接仿真模型

二、机器人工作站系统配置

（一）机器人系统配置

在完成弧焊机器人工作站的基础搭建和空间布局后，需通过软件平台建立虚拟控制系统。以下关键参数配置如图所示：

语言设置：中文模式（Chinese）
通信模块：709-1 I/O 通信接口

工艺：633-4 Arc 焊接专用模块

电源配置：标准 I/O 焊机接口（Standard I/O Welder）

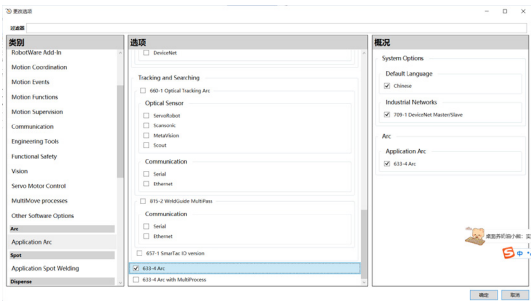


图3 机器人系统设置

系统创建完成后，需将预先设定的弧焊焊接工艺参数导入新建的虚拟系统中（具体操作见附图）。此步骤确保工具坐标系与工作站布局精确匹配。^[7]

（二）I/O 信号的配置

该工作站中，机器人控制系统与焊接系统和变位系统间的通讯效率影响了焊接精度，采用有 16 路数字输入和输出以及 2 路模拟输出通道的标准 I/O 信号通讯板卡 DSQC651 实现工作站逻辑信号配置。^[8]

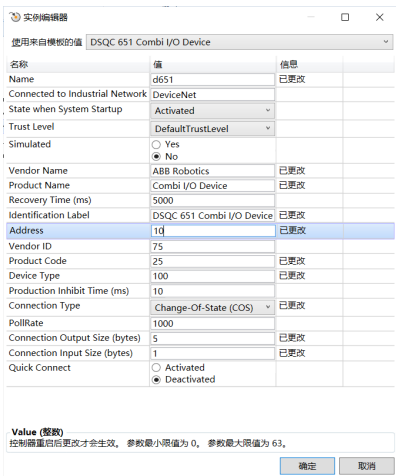


图4 信号模块参数

在机器人焊接系统的配置过程中，首要任务是完成焊接电源启停控制所需的数字信号设置。具体操作流程如下：访问控制器

菜单下的配置选项，选择 I/O 系统功能模块进入参数设置界面。在该界面中需要建立新的 Device Net 设备驱动，详细的操作方法与步骤可参见随附的示意图示。

（三）电流电压的配置

焊接工艺参数设置的首要步骤是完成电流模拟量输出的配置。具体参数设置如下：将信号命名为 aoCurrentReference，并设定为模拟输出类型。具体配置界面参见附图。

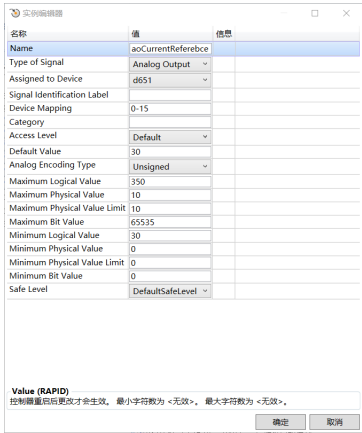


图5 电流模拟量输出参数

再来配置焊机电压设定的模拟量输出，它的名称是 aoValtReference，信号类型选择模拟量输出，驱动模块是 d651，信号地址设定为 16-31，默认值设定为 12，模拟量编码类型是无符号如下图。

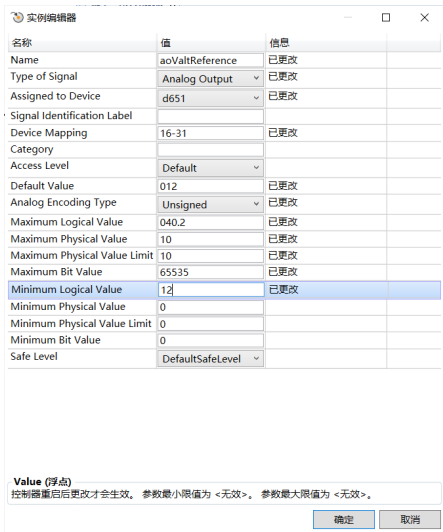


图6 电压模拟量输出

在构建机器人仿真系统过程中，当选定焊接工艺模块后，系统将自动加载 Robot Ware Arc 功能包。需要注意的是，该功能包初始状态为空置，必须经过参数设定方可投入运行。在焊接参数配置过程中，首要步骤是选取预先设定的电压模拟量输出信号作为焊接设备的电压控制信号。随后，需要指定已配置的电流模拟量输出信号用于调节焊接工作电流。

然后是焊接设备的数字量输入，双击选择配置的焊机焊接启停反馈信号，用于焊接软件检测焊接起弧熄弧是否成功，^[9]ABB 弧焊焊接机器人数字量 I/O 信号配置说明详细如图所示。

DeviceNet Device (I/O信号模块配置)				
使用来自模板的值		DSQC 651 Combi I/O Device		
Address		10		

Signal (I/O信号配置)				
Name	Type of Signal	Assigned to Device	Device Mapping	说明
diArcEst	Digital Input	d651	0	焊接启停反馈
doWeldOn	Digital Output	d651	32	焊接启停控制
doGasOn	Digital Output	d651	33	焊接气体控制
doFeedOn	Digital Output	d651	34	手动送丝控制
doFeedOnBwd	Digital Output	d651	35	手动退丝控制

图7 I/O 信号配置参数

配置首先是焊接气体开关控制，选择焊接气体控制的数字量输出信号，焊接启停控制选择焊接启停控制的数字量输出信号，手动送丝控制选择 doFeedOn。

在实际焊接机器人工作站中，为确保系统安全运行，需对送丝控制信号（doFeedOn）实施必要的安全逻辑控制。在系统配置过程中，针对退丝功能的控制信息（doFeedOnBwd）需特别注意：该接口为可选配置项，若实际应用中需要启用此功能，则必须对退丝控制信号实施与送丝信号（doFeedOn）相同的安全逻辑处理机制。

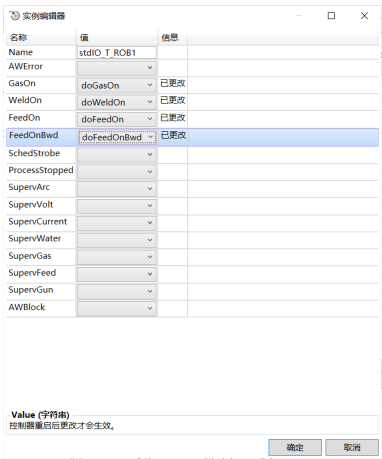


图8 焊接设备的输出数字量参数

这样焊接设备的 I/O 信号就配置完成了，点击重启，系统重启完成之后配置的这个焊接系统参数就生效了。

三、机器人弧焊焊接示教编程

在机器人编程过程中，首先需要建立一个新的运动轨迹程序，并将其命名为“main”作为系统主程序。接着进行以下操作：确定机器人的初始参考位置，指定焊接专用工具，设置运动参数为关节坐标系模式，运行速率调整为 500 单位 / 秒，并将路径精度设为完全停止模式。具体参数配置可参考随附示意图。



图9 主系统参数

机器人运动轨迹设定过程如下：首先将当前机械臂位置记录为初始参考点，通过示教功能完成坐标确认。随后调整焊枪空间姿态，使工具中心点（TCP）保持垂直向下，并将 Y 轴角度归零。切换到手动线性模式后，将焊枪末端定位至工件焊接起点位置，同时将焊枪绕 Y 轴旋转 -45 度。为确保焊接质量，需在起焊位置正上方设置过渡点，该点需沿 X 轴正向和 Z 轴正向偏移适当距离。运动参数维持默认设置，具体数值可参考附图。

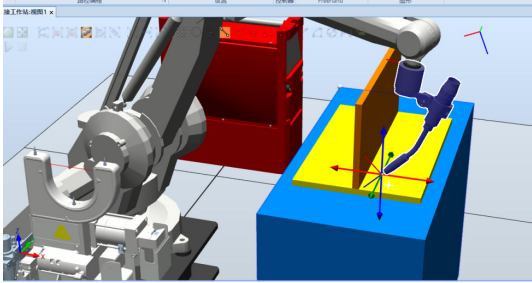


图10 home 点放置

拖拽到焊接起始点位置，使用直线运动焊接起弧指令。选择编辑指令模板。点击添加选择直线运动焊接起弧指令如下图。

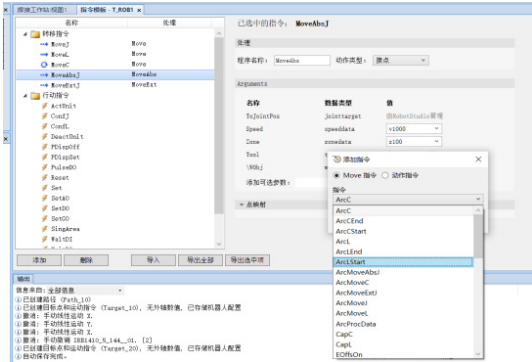


图11 编辑直线运动焊接起弧指令

同样道理，依次添加起弧熄弧数据，添加直线运动焊接熄弧指令，点击直线运动的焊接起弧指令，运行速度500，拐弯数据选择 fine，点击示教指令后，将机器人拖曳到焊接结束点如下图。使用直线运动的熄弧指令，运行速度500，拐弯数据选择 fine。结束之后机器人需要抬枪，沿着 x 轴正方向，沿着 z 轴正方向运动，运动指令选择直线运动，运行速度500，拐弯数据选择 fine。机器人回 home 点，复制粘贴。机器人焊接程序示教完成如下图。



图12 路径与步骤

焊接程序完成后，打开机器人示教器在机器人示教系统中插入 Wait Time 指令，使机器人在焊接开始点位暂停2s，可以保证程序安全运行，路径与步骤完成后，具体的焊接程序如下图。第一条指令为直线插补指令，moveL 指令使机器人从当前位置沿直线移动到 Target_110 (home 点) 位置，运动速度为500单位 / 秒，拐弯数据为 fine，表示机器人会精准到达当前点位。第二条指令同样是以500的速度到达 Target_70 (焊接开始位置)。第三条指令为时间暂停指令，指的是在点位上暂停2s，以保证程序安全运行。第四条指令为直线运动焊接起弧指令从 Target_80 (焊接起始点) 以500的速度开始焊接，此时起弧数据为之前设定好的 seam1，焊接数据为 weld1。第五条指令为焊接熄弧数据此时的结束点为 Target_90 (焊接结束点)，其余数据与起弧指令相同。第六条指令为直线插补指令，机器人抬枪移动至安全点 Target_100 运动速度为500，拐弯数据为 fine。第六条指令机器人重新移动回 home 点，程序结束。

```

31 |=====|
32 |PROC main()
33 |IF qldong=1 THEN
34 |MoveL Target_110,v500,fine,Weldgun\Wobj:=wobj0;
35 |MoveL Target_70,v500,fine,Weldgun\Wobj:=wobj0;
36 |WaitTime 2;
37 |ArcLStart Target_80, v500, seam1, weld1\Weave:=weave1, fine, Weldgun\Wobj:=wobj0;
38 |ArcLEnd Target_90, v500, seam1, weld1\Weave:=weave1, fine, Weldgun\Wobj:=wobj0;
39 |MoveL Target_100,v500,fine,Weldgun\Wobj:=wobj0;
40 |MoveL Target_130,v500,fine,Weldgun\Wobj:=wobj0;
41 |ENDIF
42 |!Add your code here
43 |ENDPROC
44 |ENDMODULE

```

图13 路径与步骤

将数据同步到虚拟示教器，打开虚拟示教器，调到手动模式，点击程序编辑器添加起弧熄弧数据和焊接数据，进入程序数据，先设定起弧熄弧数据。它默认显示4个参数设置选项第一个是吹扫时间设置为1s，第二个是送气时间设置为0.5s，刮擦重启保持为0，最后一个是尾送气时间设置为0.5s，这样起弧熄弧数据就设置完成了。

在焊接参数配置环节，需对核心工艺数据进行设定。焊接时如果发现焊件成形不理想，存在缺陷时，就要在生产屏幕的设置菜单下，调整焊接速度、送丝速度、电压及电流大小，直至焊出满意的焊缝。具体操作如下：将焊接行进速率调整为10mm/s，维持系统预设的电压参数不变（28V），同时将工作电流值设定为160A。完成上述参数配置后，系统即具备执行焊接作业的基本条件，相关参数设置界面可参见附图说明，重启后完成弧焊指令编程。



图14 焊接数据

四、PLC 和触摸屏设计

首先打开博图进行组态, 只有 1500 才可以进行接下来的仿真。本文选择 1500 PLC 的原因是其支持通信仿真, 但仿真时启动仿真器要使用 S7-PLCSIM Advanced。同时还需要添加新设备组态触摸屏, 并将触摸屏与 PLC 连接起来。

然后配置网络，切换为 PLCSIM Virtual Eth. Adapter 模式，输入虚拟 PLC 参数，选择以太网。“local”为本地虚拟网卡，它是在安装 PLCSIM Advanced 这一软件时会自动进行安装的网络适配器。配置 advance 里的数据，x1 指 x1 端口所以地址与 PLC 一致，还需配置虚拟 PLC，配置如下图。再下载进虚拟 PLC，配置完成。

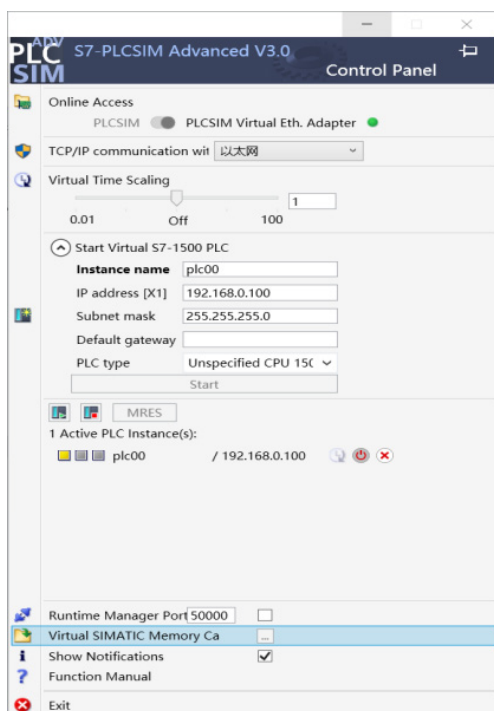


图 15 S7-PLCSIM Advanced 的配置

接下来，将通讯 smart 组件拖入 Robot Studio 软件中，配置好相关参数，要注意的是机器人、电脑、仿真 PLC 必须在同一网段，此处设置机器人 IP 为 192.168.0.200。

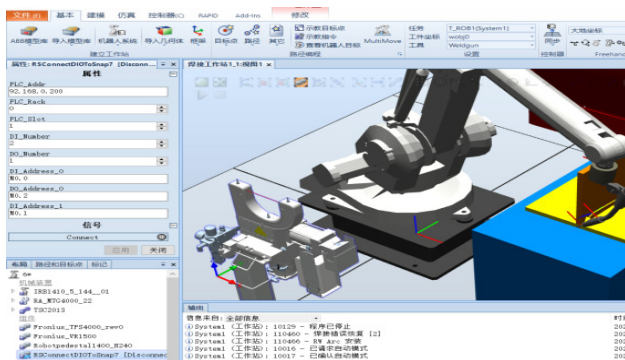


图 16 smart 组件配置

将工作站逻辑连接，rs 软件给博图发消息是实时的，将他们连接起来。

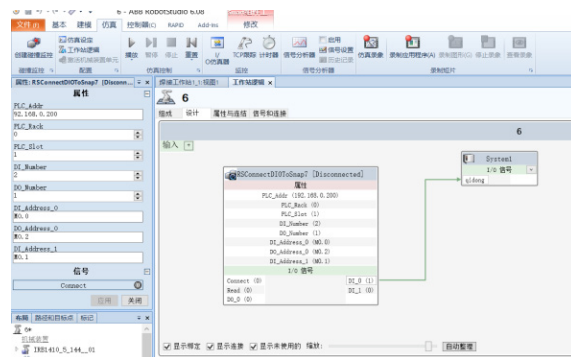


图17 工作站逻辑

最后在控制器里添加一个启动停止指令，Robot Studio 的配置基本完成。

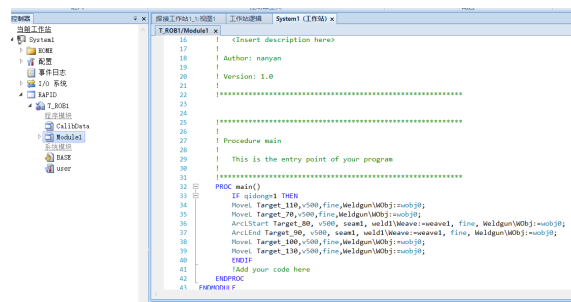


图 18 工作站逻辑

五、基于 PLC 与 Robot Studio 的焊接联合仿真

整个仿真过程可通过 Robot Studio 的 3D 虚拟示教器实时监控,并在仿真界面中动态显示焊接路径、机器人运动状态及 PLC 信号交互情况,如下图所示。该系统的成功运行验证了 PLC+Robot Studio 联合仿真在焊接自动化中的可行性,为后续实际焊接工作站的应用提供了可靠的虚拟调试方案。

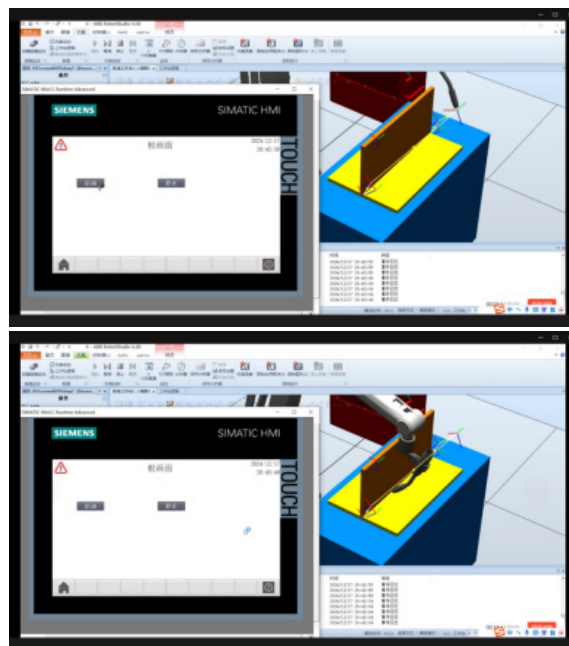


图 19 焊接仿真运行

六、 结语

本文在研究过程中，充分利用了 Robot Studio 强大的建模、仿真和分析工具，以及 PLC 在控制系统模拟方面的优势。首先，在 Robot Studio 中建立了准确的焊接机器人模型，并设置了相关

参数，以确保仿真的真实性。其次，结合 PLC 的控制器模块，模拟了焊接机器人的控制逻辑和动作，进一步验证了机器人与控制系统之间的协调性。此外，还通过构建虚拟生产线模型，模拟了真实的焊接生产环境，为焊接自动化生产线的设计和调试提供了有力支持。

参考文献

[1] 樊启永, 廖小吉, 田超. 基于 MES 的料仓智能取料系统构建及机器人编程的实现 [J]. 工业技术与职业教育 .2019(6):11-14.

[2]WANG Baicun, HU S J, SUN Lei, et al.Intelligent welding system technologies: state-of-the-art review and perspectives[J]. Journal of Manufacturing Systems,2020,56(6):373-391.

[3] 赵君. 机器人焊接仿真在汽车焊装中的应用 [J]. 现代零部件 ,2011(9):74-75.

[4] 陈康, 张永祥, 孙文才. 浅析机器人焊接仿真在汽车焊装中的应用 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术 ,2015(12):228.

[5] 叶晖, 管小清. 工业机器人实操与应用技巧 [M]. 北京 : 机械工业出版社 ,2010.

[6] 杨永波, 崔彤, 秦伟涛, 等. 焊接机器人工作站系统中焊接工艺的设计 [J]. 焊接 ,2015(8):43-45.

[7]Nico Hochgeschwender Gerhard K. Kraetzschmar Paul G. Ploeger Michael Reckhaus 1 January 2010.

[8] 张金衡. 大熔深穿孔等离子弧焊接闭环控制系统及不锈钢焊接工艺研究 [D]. 济南 : 山东大学 ,2021.

[9] 李壮, 方贞琪, 王兴宇, 等. 机器人学基础课程轨迹规划仿真教学研究 [J]. 廊坊师范学院学报 (自然科学版),2024,24(02):107-113.

长春地区龙嘉机场与龙嘉站空铁联运发展优化研究

陈清越

中国铁路沈阳局集团公司客运部, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ERA.2026030010

摘 要 : 随着我国疫情结束各行业复工复产的全面恢复, 国内交通运输业的发展, 全国旅游业和银发经济的崛起, 近年来空铁联运成为一种结合航空与铁路两种长距离交通的主要出行方式, 大力发展空铁联运已成为铁路适应现代化经济发展方式转变的必然选择。本文通过了解长春枢纽地区航空与铁路换乘旅客的联运服务需求, 在航空发挥长途运输的基础上, 由铁路发挥短途运输优势, 优化运行图结构和精细化的售票组织票额预分, 进一步提升空铁联运的服务品质, 让旅客的出行体验更加便捷。

关 键 词 : 空铁联运; 铁路; 旅客

Research on the Optimization of Air-Rail Intermodal Transport Development between Longjia Airport and Longjia Station in Changchun Area

Chen Qingyue

Passenger Service Department, Shenyang Railway Bureau Group Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : With the end of the epidemic in China and the full resumption of work and production in various industries, the development of domestic transportation industry, the rise of national tourism and the silver economy in China, air-rail combined transportation has become a main travel mode that combines long-distance transportation by air and railway. Vigorously developing air-rail combined transportation has become an inevitable choice for railways to adapt to the transformation of modern economic development mode. This article, by understanding the combined transportation service demands of air and railway transfer passengers in the Changchun hub area, based on the long-distance transportation role of aviation, and leveraging the short-distance transportation advantages of railways, optimizes the operation diagram structure and the refined ticketing organization and quota pre-distribution, further improves the service quality of air-rail combined transportation, and makes the travel experience of passengers more convenient.

Keywords : air-rail combined transportation; railway; passengers

引言

近年来, 随着铁路、公路、水运和民航等各交通方式信息化^[1], 我国银发经济和旅游业快速发展, 加快交通强国建设, 推动构建多层级一体化的综合交通运输体系, 充分发挥铁路和航空运输融合优势, 更好地满足旅客对高品质空铁联运服务的美好需求, 铁路和航空在国家交通运输中发挥着重要的作用, 也成为旅客长途出行的主要方式。然而, 随着旅行社跟团游的便捷服务、私家车和租车自驾游的数量增多, 同时受点到点距离的限制, 铁路和航空始终无法保证运输到目的地“最后1公里”, 这逐渐成为制约铁路和航空发展的瓶颈。近年来, 高铁与航空的竞合关系一直以来饱受国内外学者关注^[2], 铁路与航空如何联运, 便捷换乘, 提高旅客列车短途出行的区间客座率是铁路需要解决的问题。

一、长春地区交通枢纽现状

(一) 铁路现状

将铁路线网引入机场是实现空铁联运的基础设施基本保障^[3]。龙嘉站, 长春站管二等站, 是沈阳局管内唯一一座与民航机场交通枢纽配套服务的车站, 距离长春龙嘉国际机场 T1 航站楼345

米、T2航站楼565米, 与机场南侧公路并行。车站规模为2台4线, 站房形式为地下车站, 旅客进站、出站采用“上进下出”方案。该站为长珲城际线上的中间站, 距离上行长春站32公里, 二等座公布票价10元起, 运行14分钟; 距离下行珲春站439公里, 二等座公布票价135.5元起, 运行3小时。

2024年龙嘉站发送旅客248.7万人, 图定旅客列车25对, 长

作者简介: 陈清越 (1988.04-), 女, 汉族, 辽宁本溪人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 旅客运输。

春方向11.5对，吉林方向13.5对。

（二）航空现状

长春龙嘉国际机场，距长春市中心32公里，为4E级民用机场，目前两座航站楼，运营航线168条，通航城市47个。2024年旅客吞吐量1760.75万人次。2024年龙嘉国际机场航班645班，出港航班326班，进港航班319班。每日计划航班263班，工作日航班约415班，周末航班约420班。

（三）空铁联运现状

空铁联运，广义上是指城市轨道交通、铁路、机场轨道专线等与民用航空的联合运输；空铁联运本质是将民航旅客运输与铁路旅客运输有效结合的新型出行方式^[4]。旅客一般分为票价敏感性旅客和敏感型旅客，绝大部分时间敏感型旅客选择高铁或者飞机直达运输，只有少部分旅客在运输OD是长途航线或者飞机无直达时，选择在枢纽城市进行中转。利用这种方法，可以为时间敏感型旅客设计时间更短、出行更方便的交通方式^[5]。龙嘉站作为中转换乘火车站，主要客流是航空出行中转换乘的旅客。去往上行长春方向的旅客占总客流的35%–38%，下行吉林方向的旅客占总客流的62%–65%。

空铁联程联运服务主要包括行李运输、票务服务、商业服务、信息服务等类型^[6]。合适的时间、高效率的换乘及简便的手续是吸引旅客选择空铁中转的“三大法宝”^[7]。龙嘉站至龙嘉机场间有一条方便快捷的换乘通道，距离为750米，由城开集团负责日常管理。换乘通道内有完善的各类设置，旅客乘坐地面步梯步行仅需要12分钟。旅客携带大件行李包裹或行动不便需要重点服务，换乘通道均能满足日常需求。

2024年龙嘉站旅客到达人数是出发人数的130%，分析原因一是铁路出行时间固定、旅时短、无堵车风险，旅客可以更合理的规划时间；二是交管部门要求送客车辆在龙嘉机场落客平台停留不超过8分钟，公路出行有时间局限性。龙嘉机场大巴、网约车、出租车、私家车等有指定接客地点，落地旅客行李较多直接乘车更加方便，同时旅客落地后时间充足，不需接续下段行程，交通工具的选择更为多样性。因此，龙嘉站发送旅客人数要低于到达人数，旅客前往龙嘉机场选择乘坐高铁到达的出行方式更为快速便捷。

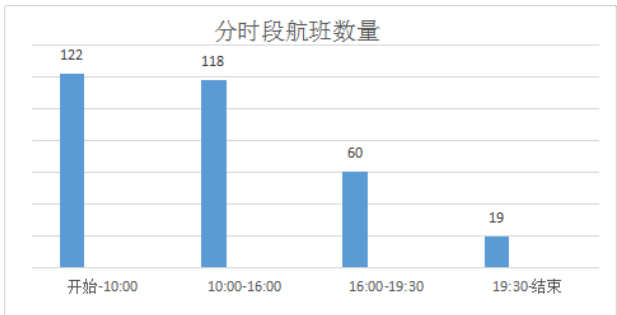
随着航空公司票价的调整，广州、上海、深圳等地直飞哈尔滨的票价涨幅较大，很多旅客选择先飞长春龙嘉机场、动车长春—哈尔滨这样的飞机+动车联程路线，节省开销同时可以沿途去往珲春延吉长白山旅游。吉林省旅客政策调整已将延吉、珲春、长白山等城市发展为旅游城市，龙嘉站2.5小时可达延吉、长白山。夏季亚洲最长的长白山天然漂流水道、人参采摘，珲春国门的“一眼望三国”；冬季长白山国际滑雪节、“云顶天空”雪景观赏，极大吸引了南方旅客，龙嘉—哈尔滨的动车旺季时期更是一票难求。

二、空铁联运分析

龙嘉机场夏航季出港航班最早班次6:35，最晚班次23:05；进

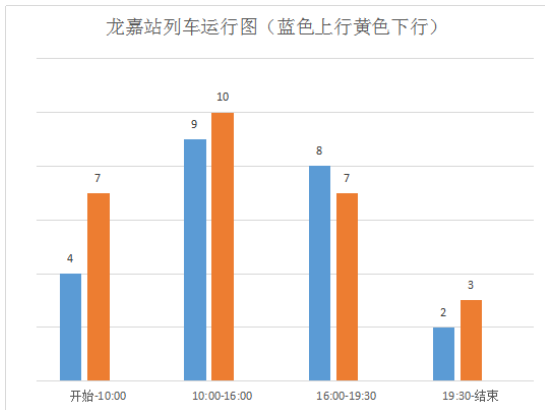
港航班最早班次5:25，最晚班次21:15。

进港时间段划分：



出港时间段划分：

上图航班总数量，每日开行航班数为总数量65%。10时前进出港航班数虽多，携程大数据统计非节假日和旅游旺季航班上座率不高，龙嘉站客流不大；进出港客流高峰时段集中在10时–16时；19时30分后，出港航班数50班，航班上座率较高，龙嘉站17时后出站旅客较多。



龙嘉站去往吉林方向列车最早到达时间6:25（C1003次长春—珲春），最晚到达时间20:40（C1233次长春—吉林）；去往长春方向列车最早到达时间为7:00（C1202次吉林—长春），最晚到达时间21:13（C1320次长白山—长春）。

目前，航空公司主流机型使用空客320型，满载人数152；长珲城际铁路使用CRH-5型车底，定员613。以10时前为例，机场最大落地旅客数量18544人，当日航班开行总航班数65%及约40%的动车选择率，推算人数为4820人，上下行11列动车定员6743人，可满足落地旅客中转换乘需求。龙嘉站现有图定车日常客座率约80%，满足旅客出行需求但存在旅客等车时间较长问题。节假日、春暑运、旅游季等时段，龙嘉站上下行均为沿途站，沿途票额不足导致旅客在龙嘉站仍存在旅客购票难的问题。

三、空铁联运发展浅析和展望

（一）票额及运能

为解决空铁联运衔接问题，铁路方面从以下几方面改善：

一是铁路客票系统及时调整共用定义，考虑旅客短途票即买即走实际情况，长吉本线城际动车，预留2节车厢票额15天预售期龙嘉站即可共用，2天全程共用；长珲本线城际动车，同样预

留2节车厢票额15天预售期龙嘉站票额共用,5天全程共用。二是2023年铁路三季度调整图起,调整长吉间城际动车70列均经停龙嘉站,满足旅客基本需求。三是客流高峰阶段,受龙嘉站站台长度制约列车无法重联扩编运行时,结合航班夏航季、冬航季客流情况,通过加开高峰线列车缓解客流压力,满足旅客出行需求。四是随着综合交通枢纽布局基本形成,精细化空铁联运产品设计将会是主要趋势^[8]。在以后的研究中,可以进一步引入航空和高铁的时刻表,根据龙嘉机场首班与末班航班时间,结合车底出库情况,优化设计一体化的接续方案,铺画图定长春、吉林、延吉等方向5时30分到达龙嘉站的首趟城际动车和23时30分出发的城际动车,提高空铁联运产品的换乘质量。

（二）铁路城市公交化

经龙嘉站多次写实,在非不良天气情况下,飞机到达龙嘉机场时间都会提前,造成换乘旅客购买火车票存在顾虑。提前购票票额充足,旅客落地后候车时间久;随走随买票额不足,同时受火车票停售时间影响,落地再购票无法换乘相邻车次。目前中铁银通卡能实现部分功能,但是未做到普及推广,旅客群体少受限

多。可以考虑在龙嘉站出售至长春、吉林两地的单次实时票,旅客同意无坐席的前提下购买车票,可凭车票乘坐任何一趟去往长春、吉林两地的列车,参考城市轨道交通、公交车,方便旅客出行减少旅客等待的时间。龙嘉站售票处到达检票口距离较近,购票后顺利安检5分钟内可到达检票口,考虑缩短龙嘉站人工售票窗口停止办理业务时间,将窗口提前15分钟停办业务改为10分钟。

旅游市场今年呈现强劲的复苏趋势,哈尔滨冬运会、冬奥余热、花样玩雪等有利因素,让东北地区冰雪游热度也持续增长,2024年冬季全国参与冰雪旅游休闲达5.2亿人次,其中吉林省游客1.7亿人次,冰雪游收入2950亿元。随着旅客需求多样化,空铁联运发展模式是未来客运业务发展的一个方向[9],铁路12306程序已经陆续提供“空铁联运”、“铁水联运”、“高铁+租车”等出行服务。枢纽机场与高铁的一体化衔接,将铁路速度快、站点多和民航长距离、快速直达特点结合起来,将航空的远程航线与高铁中短途线路有效衔接,为旅客提供了高效舒适的运输服务^[10],未来长春地区独有的交通优势让空铁联运出行更加舒适和便捷。

参考文献

- [1] 单杏花,朱建军,朱颖婷,等.综合交通下的旅客多式联运智能出行研究[J].铁路计算机应用,2019,28(12):1-4+9.
- [2] 黄仪融,田丽君,陈德旺.航空直飞与空铁联运模式竞争研究[J].系统科学与数学,2021,41(02):373-382.
- [3] 张晓光,孙相军,崔姝.我国空铁联运发展的对策建议[J].综合运输,2015,37(08):41-45.DOI:10.20164/j.cnki.cn11-1197/u.2015.08.008.
- [4] 李晓津,邢伟永,杨斌,等.我国空铁联运服务定价研究——基于旅客时间价值的实证分析[J].价格理论与实践,2016,(07):75-78.
- [5] 孔明星.空铁运输博弈分析及空铁联运网络优化设计研究[D].南京航空航天大学,2019.
- [6] 李兴华,李思雨,成诚,等.空铁一体枢纽联运服务需求及偏好研究[J].综合运输,2020,42(06):8-12.
- [7] 赵红丽,董博,于兆华.高速铁路与航空旅客出行选择特征研究[J].铁道运输与经济,2013,35(11):32-36.
- [8] 可钰,聂磊.基于OD分类的空铁联运换乘点选择研究[J].北京交通大学学报,2020,44(03):136-141.
- [9] 王洪业.基于区块链技术的空铁联运售票模式研究[J].铁道运输与经济,2019,41(11):32-39.
- [10] 刘艺.关于枢纽型机场空铁联运发展的研究[J].交通与运输(学术版),2016,(01):123-126+135.

文洛型温室铝合金天沟的受力分析及选型

孙佳

中国建材国际工程集团有限公司，上海 200063

DOI:10.61369/ERA.2026030012

摘 要： 文洛型温室起源于荷兰，因其结构合理、透光性好、美观实用而广受欢迎。文洛型温室采用铝合金天沟，其在温室结构中起到了关键作用：天沟是连接温室主体钢结构和铝合金屋面系统的重要衔接构件，人字梁与天沟的连接方式采用了创新的卡接技术，即现场无需打孔，也无需使用紧固件，便能实现精准定位和简便施工；天沟可以用于收集和排放雨水，成功解决了国内温室长期面临的“温室必漏”难题；天沟也作为结构受力构件，起到屋面系杆的作用，增强温室的整体结构稳定性，同时作为受弯构件又能承担雪载和屋面清洗机的重量。

关 键 词： 文洛温室；铝合金；天沟；受力分析

Stress Analysis and Selection of Aluminum Alloy Gutters for Venlo Greenhouses

Sun Jia

China Triumph International Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200063

Abstract： The Venlo-type greenhouse originated in the Netherlands and is widely popular due to its reasonable structure, good light transmittance, and aesthetic appeal as well as practicality. The Venlo-type greenhouse uses aluminum alloy gutters, which play a crucial role in the greenhouse structure. The gutter is an important connecting component that links the main steel structure of the greenhouse and the aluminum alloy roofing system. An innovative snap-fit technology is adopted for the connection between the rafters and the gutters, which enables precise positioning and simple construction without the need for on-site drilling or the use of fasteners. The gutters can be used to collect and discharge rainwater, successfully solving the long-standing problem of "leakage in all greenhouses" faced by domestic greenhouses. The gutters also serve as structural load-bearing components, functioning as tie rods for the roofing. This enhances the overall structural stability of the greenhouse. At the same time, as flexural members, the gutters can bear the weight of snow and the roof cleaning machine..

Keywords： Venlo greenhouse; aluminum alloy; gutter; stress analysis

一、铝合金天沟的材料

在荷兰、以色列等农业发达国家，铝合金天沟因其轻质、耐腐蚀、强度高优点广泛应用于高科技温室中，经过多年发展，已形成以材料创新、结构优化和智能化应用为核心的技术体系。由欧标 EN12020-1^[1] 可看出欧洲广泛采用 6000 系铝合金（如 ENAW-6060/6063）——温室主要以 6063-T6 系列铝合金为主，通过调整镁、硅元素比例提升强度（抗拉强度 $\geq 200\text{MPa}$ ），并配合阳极氧化（膜厚 $\geq 15\mu\text{m}$ ）或粉末涂层工艺（符合 Qualicoat 标准），显著增强抗腐蚀能力，适用于高湿度或沿海盐雾环境。

在我国温室建设中，合理选用铝合金天沟材料对于降低维护成本、提高温室使用寿命具有重要意义。根据国标《农业温室结构设计标准》^[1]3.3.1 条指出：“温室用铝合金型材宜采用 6XXX 系列铝合金。”目前，国内生产的温室铝合金天沟材料主要以

6063-T5、T6 系列铝合金为主，这种材料具有良好的抗腐蚀性和加工性能，能够满足温室长期使用的需求。我国针对内陆地区大部分铝合金天沟不做表面处理，但在沿海地区为了适应高腐蚀性气候条件会对铝合金表面进行特殊处理，如粉末喷涂或阳极氧化，从而提高其耐候性和美观度——但是造价会有所提高。

二、铝合金天沟的截面及选型

目前我国大多数文洛温室铝合金天沟及配套人字梁、屋脊均沿用国外截面和连接方式，并根据建设地气候条件及受力情况适当优化壁厚或局部构造。虽然连接方式会有差异，但文洛温室铝合金天沟截面均有一个封闭大空腔，此空腔除考虑结构受力及排水因素外，最重要的是为了防止冷桥效应的产生——由于铝合金材料导热系数高（约 $160\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），天沟成为热量传递的“捷径”，导致温室内外热量通过天沟快速交换——冬季室内热量

作者简介：孙佳（1988.12-），女，汉族，辽宁人，本科，中级工程师，研究方向：结构设计。

通过天沟外泄，夏季外部高温通过天沟传入，会增加温控能耗，且天沟表面温度低于露点温度时，冷凝水会腐蚀结构或滴落损伤植物。

按截面形式分类天沟截面可大致分为4类：1、单腔（图1(a)~(d)）；2、1大+1小腔（图1(e)）；3、1大+2小腔（图1(f)）；4、1大+3小腔（图1(g)）。按功能性分类天沟截面可大致分为4类：1、带外遮阳+不考虑清洗机轨道；2、带外遮阳+考虑清洗机轨道；3、不带外遮阳+考虑清洗机轨道；4、不带外遮阳+不考虑清洗机轨道。

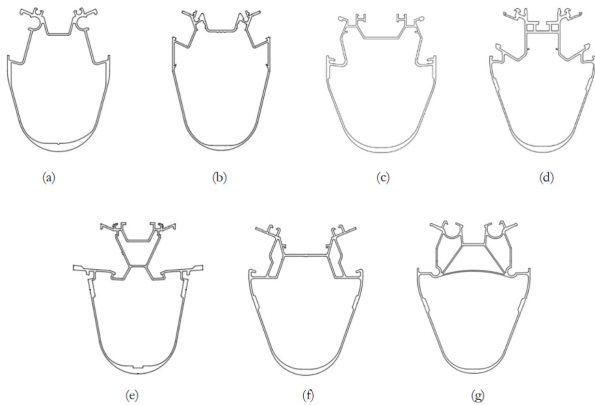


图1 文洛温室铝合金天沟截面示意

天沟根据所处地区风雪荷载和清洗机外遮阳等设计条件的不同导致铝合金天沟米重差异较大，但大部分在3kg/m~6kg/m之间。

铝合金天沟截面的选择因素很多，需综合考虑功能需求、环境条件、结构受力、施工便利性、成本效益等多方面，权衡利弊，不可顾此失彼。

三、铝合金天沟的受力分析

在自重、雪压、屋面清洗机和检修荷载的工况下，铝合金天沟上翼缘受压，而实际安装温室时天沟上翼缘两侧均有人字梁及玻璃能有效阻止天沟受压翼缘的侧向位移，所以设计时可不计上天沟的整体稳定性。

1. 抗弯强度验算

铝合金天沟通过支座与柱连接，形成多跨连续梁。受自重、雪压、风压、屋面清洗机和检修荷载工况的影响，天沟可按纯受弯构件验算其截面抗弯强度。

根据国标《铝合金结构设计规范》^[2]6.1.1条：在主平面内受弯的构件，其抗弯强度应按下式计算：

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{enx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{eny}} \leq f$$

M_x 、 M_y 为同一截面处绕x轴和y轴的弯矩； W_{enx} 、 W_{eny} 为对截面主轴x轴和y轴的较小有效净截面模量，应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区以及截面孔洞的影响； γ_x 、 γ_y 为截面塑性发展系数； f 为铝合金材料的抗弯强度设计值。

2. 抗剪强度验算

根据国标《铝合金结构设计规范》6.1.2条：在主平面内受弯的构件，其抗剪强度应按下式计算：

$$\tau = \frac{V_{max} S}{I t_w} \leq f_v$$

V_{max} 为计算截面沿腹板平面作用的最大剪力； S 为计算剪应力处以上毛截面对中和轴的面积矩； I 为毛截面惯性矩； t_w 为腹板厚度； f_v 为材料的抗剪强度设计值。

3. 轴心受力强度验算

在0°风荷载工况下，迎风面山墙承受风压力，背风面山墙承受风吸力，铝合金天沟发挥系杆的作用，既有可能是轴心受拉构件也有可能为轴心受压构件，故两种受力情况均需要考虑。

（1）根据国标《铝合金结构设计规范》7.1.1条：轴心受拉构件的强度应按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq f$$

σ 为正应力； f 为铝合金材料的抗拉强度设计值； N 轴心拉力设计值； A_{en} 为有效净截面面积，对于受拉构件仅考虑焊接热影响区和截面孔洞的影响。

（2）根据国标《铝合金结构设计规范》7.1.2条：轴心受压构件的强度应按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq f$$

σ 为正应力； f 为铝合金材料的抗压强度设计值； N 轴心压力设计值； A_{en} 为有效净截面面积，对于受压构件应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区和截面孔洞的影响。

4. 挠度验算

根据《农业温室结构设计标准》表4.4.2知：天沟作为受弯构件竖向挠度限制取“ $L_s/150$ 与30较小值”，平面外水平挠度取“ $L_s/300$ ”， L_s 为构件跨度。

铝合金天沟可简化看做简支梁，当其受均布荷载时最大挠度为 $y_{max} = \frac{5ql^4}{384EI}$ ，当为单个集中荷载时最大挠度为 $y_{max} = \frac{8Pl^3}{384EI}$ 。

四、铝合金天沟实际案例设计

1. 项目基本信息详见表1。

表1 项目基本信息

项目地点	地面粗糙度	抗震设防烈度	设计基本地震加速度	场地类别	设计地震分组	特征周期
赤峰市宁城县天义镇包古鲁村	B类	8度	0.20g	Ⅱ类	第一组	0.35s

2. 铝合金天沟构件计算软件：MsteelV2025.02.26；

3. 荷载取值信息详见表2。

表2 恒活荷载取值

荷载类型	荷载名称	荷载
恒载	4mm玻璃+铝合金框	0.12kN/m ²
活载	屋面	0.1kN/m ²

偶然荷载	屋面清洗机	650kg
检修荷载	施工检修	1kN
风压	20y 基本风压	0.74kN/m ²
雪压	20y 基本雪压	0.25kN/m ²

注：风压、雪压根据《农业温室结构荷载规范》^[3] 规定取值。

4. 考虑铝合金天沟实际受力工况，荷载组合详见表3。

表3 荷载组合

组合序号	组合名称	荷载
工况1	①自重+②恒载+③雪载	见图2
工况2	①自重+②恒载+④清洗机	见图3

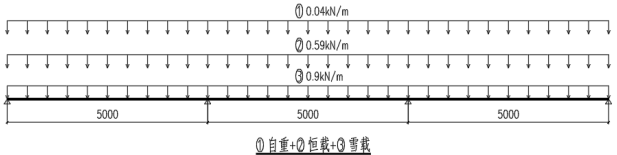


图2

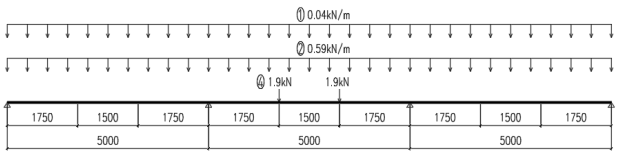
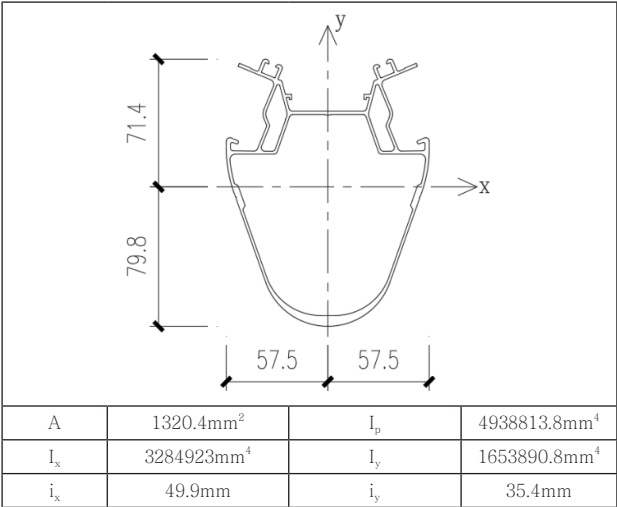


图3

铝合金天沟截面几何参数表。



W _x (上)	45987.8mm ³	W _y (左)	28769.1mm ³
W _x (下)	41153.9mm ³	W _y (右)	28757.6mm ³
绕 X 轴面积矩	29061.9mm ² · mm	绕 Y 轴面积矩	21001mm ² · mm
形心离左边缘距离	57.5mm	形心离右边缘距离	57.5mm
形心离上边缘距离	71.4mm	形心离下边缘距离	79.8mm
主矩 I ₁	3284922.9mm ⁴		
主矩 I ₂	1653890.1mm ⁴	米重	3.6kg/m

五、铝合金天沟的优化和未来发展

铝合金材质在规范合理范围内适当调节其元素含量可以提高所需性能，例如：添加 0.1–0.3% 的稀土元素（如铈 Ce），细化晶粒结构，提升氧化膜致密度，实验数据显示在 70% 湿度环境下，腐蚀速率降低 40%；适量增加镁含量可提高铝合金的强度和韧性，同时不显著降低其耐腐蚀性；硅可以提高铝合金的硬度和强度，增强其耐磨性，尤其是在排水过程中水流冲击等情况，但硅含量过高可能会降低铝合金的韧性；铜能显著提高铝合金的强度和耐热性。因不同地区气候环境不同，却一概而论用同样的元素配比铝合金显然是不合适的，最好的设计应是因地制宜，按照当地特点调整对应的铝合金天沟元素含量。

除了材料元素本身的优化，还可通过优化生产工艺来进一步提升铝合金天沟性能，如在铸锭工序与挤压成型工序之间增加初步热处理工序，消除或减少晶内偏析，提高材料热变形和冷变形的能力。

随着全球对节能减排的重视以及温室能耗问题的凸显，铝合金天沟将更注重节能设计；为了适应不同地区的气候条件和温室使用需求，铝合金天沟的结构将不断优化；未来，铝合金天沟可能会集成更多智能化功能，例如：结合传感器技术，实时监测天沟内的水位、积水情况等，实现自动排水控制，防止积水过多对温室造成损害，还可与温室环境控制系统相连，根据室内外湿度等参数对天沟收集的冷凝水进行合理利用，如用于温室灌溉等；铝合金天沟可能会与光伏技术等进一步融合。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 农业温室结构设计标准 : GB/T51424-2022[S]. 中国计划出版社, 2022.

[2] 中华人民共和国建设部. 铝合金结构设计规范 : GB50429-2007[S]. 中国计划出版社, 2007.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 农业温室结构荷载规范 : GB/T51183-2016[S]. 中国计划出版社, 2016.

[4] 周长吉. 现代温室工程 [M]. 2 版. 北京 : 化学工业出版社, 2010.

[5] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述 [U]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 100–109.

[6] 张天柱. 温室工程规划、设计与建设 [M]. 北京 : 中国轻工业出版社, 2010.

[7] 李秀刚, 李东星, 卜云龙, 等. 连栋玻璃温室设计建造要点 [J]. 农业工程技术 (温室园艺), 2018, 38(19): 33–37.

[8] 冯广和. 玻璃温室 (上) [J]. 农村实用工程技术, 1998, 11: 5–5. DOI:CNKI:SUN:NSGJ.0.1998-11-002.

[9] 李亮英, 张其林. 铝合金温室结构设计与优化 [C]// 全国现代结构工程学术研讨会. 2010.

[10] 周强, 郑丽芳, 陆乐. 一种温室铝合金天沟屋面 : CN201110091617.5[P].CN102733554A[2026-01-11].

航线维修故障管控系统的建立研究

拜向洲, 王超辉

深圳航空有限责任公司, 广东 深圳 518128

DOI:10.61369/ERA.2026030013

摘 要 : 航空运输业迅猛发展, 机队规模持续扩展, 航班密度不断增加, 飞机系统集成度以及智能化水平明显增强, 以往依赖人工经验以及分散式管理的航线维修故障管控模式无法满足高运行密度、严适航要求与海量数据环境下故障的快速反应、精准处理及前瞻性防控的需求。基于此, 本文首先阐释航线维修故障管控系统在保障飞行安全、提升运营效率方面的重要意义, 其次分析它的重难点, 并给出相应的航线维修故障管控系统构建办法, 实现了故障信息的实时汇集与分享、排故流程的规范与高效、人为差错的系统防控以及故障风险的提前预判, 提升了航线维修故障管控的及时程度和可靠程度。

关 键 词 : 航线维修; 故障管控系统; 信息整合; 故障排除; 人为

Research on the Establishment of an Airline Maintenance Fault Control System

Bai Xiangzhou, Wang Chaohui

Shenzhen Airlines Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518128

Abstract : The aviation transportation industry is experiencing rapid development, with continuously expanding fleet sizes and increasing flight density. The integration level and intelligence of aircraft systems have significantly improved. The traditional fault management model for line maintenance, which relied on manual experience and decentralized management, can no longer meet the demands of high operational density, stringent airworthiness requirements, and the need for rapid response, precise handling, and proactive prevention in a data-intensive environment. Based on this, the paper first explains the significance of the line maintenance fault management system in ensuring flight safety and enhancing operational efficiency. It then analyzes its key challenges and proposes corresponding methods for constructing such a system. The system achieves real-time aggregation and sharing of fault information, standardization and efficiency in troubleshooting processes, systematic prevention of human errors, and early prediction of fault risks, thereby improving the timeliness and reliability of line maintenance fault management.

Keywords : airline maintenance; fault management system; information integration; troubleshooting; artificial

前言

尝试搭建科学高效的航线维修故障管理系统, 实现对故障从头到尾的系统化、智能化管理, 是增强维修效能的必然举措, 也是保障民航高质量发展的内在要求, 具备关键的理论价值以及实践意义。

一、航线维修故障管控系统的重要性

民航运输体系中, 飞行安全是绝对不能跨越的界限, 同时航司的持续发展, 关键靠运营效率; 二者一同构成了航线维修工作的核心。因目前航空运输量持续上涨, 机队规模随之扩大, 航线维修需在有限的过站时间中将故障找出并处理, 其管控的质量对

飞机适航性与航班运行秩序有直接的影响。传统分散形式的维修管理模式, 难以招架高频率、快节奏的运行需求, 所以需靠系统化手段来整合资源、规范流程, 提高管控的精准度与有效性^[1]。

保障飞行安全方面, 航线维修故障管控系统可对机载监测系统数据、机组报告信息及地面检测结果进行全范围汇集, 利用统一平台开展实时分析与异常辨认工作, 防止因信息不连贯造成故

作者简介:

拜向洲 (1986.02-), 男, 甘肃庆阳人, 汉族, 本科, 航线维修资深工程师, 从事飞机飞控系统和动力装置维修研究;

王超辉 (1993.05-), 男, 浙江金华人, 汉族, 本科, 航线维修工程师, 从事飞机飞控系统和动力装置维修研究。

障漏判或错判，让飞机在满足适航标准的情况下投入运营。

从提高运营工作效率方面分析，航线维修故障管控系统可优化故障信息传送途径与排故逻辑，削减因信息延迟或流程多余造成的停场时长损耗，提高飞机中途停靠维修的效率，进而提升航班准点程度和机队利用效率；二者的协作功效，可使航线维修满足安全合规方面的要求，并推动运营效益增长。

二、航线维修故障管控的重难点

当航线面临运行环境动态多变、参与主体多元多样以及技术系统复杂难测的问题，其重难点体现为信息传递过程、流程执行环节、人因管控以及风险预判这四个维度的系统性约束中。

（一）故障信息分散难整合

航线维修的故障相关信息来自机组报告、机载传感器、地面检测设备以及维修记录等多个方面，这些数据在格式、传输协议以及存储方式方面存在明显差别，仍未形成标准化的集成接口及实时交互机制；鉴于航班过站的时间限制，信息需通过多个环节予以传递及转换，易于引发时序错误或内容遗漏，造成维修决策不能凭借完整的故障状态描述产出，使得故障识别在及时性与准确性方面变差，增加了后续管控的不稳定性^[2]。

（二）故障排除流程不规范

航线维修做排故作业要依据机型维护手册与故障代码逻辑推演，但目前部分航司的航线故障维修中缺乏针对不同故障状况的规范化操作步骤，实际执行过程中易受维修人员个体经验的干扰，有步骤取舍不同、关键检查项遗漏或验证标准模糊这类问题，因执行不规范，排故耗时波动十分显著，而且可能因为处理不全面让故障隐患遗留，使管控过程的稳定性及结果的一致性受到影响。

（三）人为差错防控难

维修作业的质量取决于人员的技能高低和注意力是否集中，作业疲劳、环境干扰以及对工卡信息认知偏差等情况，均会引发漏检、错装或是接线错误等的操作性差错，目前的管控方式主要是在出现差错后进行纠正并追溯责任，没有作业过程的实时防错设计以及风险预警机制，让差错于操作环节没法及时被识别和阻挡，差错成因的记录与分析欠缺系统性，类似问题易重复出现，增添了故障管控里的不稳定状况。

（四）故障趋势难预测

以往的故障数据大多以非结构化或孤立的样式存于维修记录、部件台账以及运行日志中，未依据部件类型、服役周期、航线环境以及季节特征这些维度来构建关联分析模型。数据的离散情况导致故障发生的统计规律以及共性致因难以提取，无法预先识别高失效风险部件或典型运行场景，导致维修计划只能按照已发生的故障被动去调整，无法顺利实现从事后维修到事先防控的转变，限制了管控的前瞻性与主动性。

三、航线维修故障管控系统的建立策略

（一）集成多源数据，实时汇总信息

为使航线维修故障管控系统实现数据跨系统的同步与一致，

技术人员需先创立统一的数据接入及治理架构，清除信息孤岛，为航司管理人员的快速决策提供支撑。

技术人员首先需界定清楚飞行运行、机载健康、维修执行、航材保障、人员资质、质量适航六大块内容，明确各领域的核心实体以及关键属性，做出能进行计算的最小数据项清单，使得不同来源的数据都能映射进同一语义框架。同时技术人员应制定企业级的数据字典与主数据，针对这些对象实行统一编码与版本把控，让同一实体在不同业务系统中的标识与含义始终相同，为后续关联分析建立可靠根基^[3]。

技术人员可建立消息总线与事件驱动架构，以航班相关事件、故障发出的告警、工卡状态的变更、资源状态的变化作为关键事件，明确标准化事件结构及主题分区办法，并应用至少一次语义的可靠投递和幂等消费机制，保证从头到尾的时间顺序与一致性。技术人员需连接多种来源不同的接口，涉及航班计划和动态变化，统一运用 RESTful API 与 Webservice 皆有的接入方式，清晰界定鉴权、限流、重试与熔断的规则，并输出统一的 JSON 数据协议。

（二）制定标准流程，规范故障排除步骤

为确保不同人员于各种情形下开展排故作业，结果一致且可回溯，技术人员应以工程手册及适航规章为准绳，建立能实施的流程模式与操作规范。对此，技术人员需开展任务拆分以及流程构建，以故障的现象作为起始；以故障隔离、临时措施、根因确认、永久性修复、功能测试、放行条件复核为基础构建端到端流程图，借助 BPMN 对任务节点、网关、事件与泳道予以定义，厘清输入、输出和异常处理的途径，同时技术人员需编写出情景化标准作业规程，将飞机维护手册、故障隔离手册、结构修理手册、最低设备清单同构型偏离清单分解成可操作步骤卡片，并建立覆盖不同机型及系统的 SOP 库。

同时进行流程规划与部署，在流程引擎中设置任务的先后顺序、并行程度、时间限制、回退及升级办法，作为流程门禁，若未达成前置条件，自动阻断并给出解决途径，而且技术人员应将任务包与电子工卡关联起来，使流程节点与电子工卡、签署项、质检点一一相匹配，支持线上或线下双模式签署及自动归档，保证人员、事件、证据相符。技术人员要明确时限管理及升级办法，给接报、到场、隔离、修复、验证、放行设定时限门槛和升级路线，到时间未处理完成便自动通知维修控制中心和技术支援，且记录处置流程；技术人员还要纳入质量节点及见证点，在关键环节设立自检、互检、专人检验这三级把控点，此过程必须拍照或录像或记录读数予以留存，形成证据关联。

为实现协同运转，需在流程里预先设置机组沟通、签派协调、航材保障、外站支援这些协同任务，明确联系人及沟通样式，从而减少信息传递的偏差。技术人员应实施版本区分管理，对 SOP 及流程配置的版本号、变更单、生效范围予以管理，保存历史版本与差异对照，可依据机型、站点、季节迅速切换。航司管理人员应进行培训与考核的闭环操作，以流程和 SOP 为基础制作课件、仿真脚本与实操考核，依据通过率、返工率、超时率评估掌握程度，未达标准的限制授权。同时，技术人员应搭建持

续改进体制，手机返工原因、流程偏差、质量事件，列成问题清单，按 PDCA 循环完善 SOP 与流程参数，使排故过程实现标准化、结构化以及可量化，保证不同人员执行结果一致与合规。

（三）嵌入防错机制，降低人为操作风险

为防范漏检、错装、误签等操作风险，技术人员应在流程、界面、设备以及监督方面系统设置防错设计，让错误在出现前就被察觉或拦截；任务启动时，技术人员应做前置条件的校验工作，例如下达排故任务时，对人员资质有效性、所需工具及航材可用情况、相关设备运行正常状况、适用适航指令和服务通告符合性进行批量审核，只要有一个条件不满足，则不允许开工，并说明具体原因和可行的替代办法。同时技术人员应于电子工卡内构建步骤级的强制排序，按照看一项、做一项、查一项、签一项的规范组织作业环节，系统的前序步骤未完成或未通过验证时，确定后续步骤与签署按键，避免步骤跳跃或内容遗漏。

技术人员应运用唯一性约束与装配防错规则，要对部件件号、序列号、批次号、安装站位、安装方向、保险方式等关键属性，进行唯一性校验与装配逻辑校验，并利用条码或射频识别的读取结果，与防错工装治具协同工作，杜绝错件、漏件的安装和部件的反向安装。技术人员可以部署传感器和计量闭环控制，对扭矩扳手、张力计、压力传感器这些量具的输出实时采集，然后与目标值比对，超差情况出现时即刻报警且禁止进入下一步，让关键紧固与连接参数契合工程要求。数据校验方面则实行双人交叉核验，当进行安全关键部件的装卸、系统的通电检测以及飞行操纵面的调校时，设定必须由另一名具备相应资质的人员现场核实并电子签署。

（四）构建预测模型，预判故障趋势

为将航线故障维修从被动应对转为主动预防，技术人员要凭借历史数据建立可量化、可优化的预测模型，发现故障频发部件与运行情形

技术人员首先需进行数据准备与特征工程，集合历史维修记录、部件更换台账、运行日志、环境因素、航班剖面与载荷谱，按照部件类型、服役时间长短、运行循环数目的多少、运行环境的温湿度与气压状况、航线的特征实施标签化处理，使用时长、

故障间隔时间、维修频次、工况强度等特征变量，清理并平滑缺失值以及异常值。技术人员要划分数据集并选取建模方法，按照时间次序划分成训练集、验证集与测试集，针对故障发生与否、剩余使用时间、故障类别等不同的预测目标，选取生存分析、时间序列预测、分类算法同回归算法等适宜模型，凭借领域知识构造工况与维护行为的因果特点。

同时，技术人员应当开展模型训练与参数调优事宜，训练期间引入交叉验证及网格搜索以优化超参数，按照任务选取准确率、召回率、均方误差、C 指数等当作评估指标，保证模型在未知数据里具有稳定的泛化性能；并落实模型部署与在线推理，将训练后模型转变为微服务，实现实时数据流和工单系统的接通，实时给新出现的部件状态、运行参数进行评分，划分风险等级，以便于航司管理人员按照预先设定的阈值，启动高、中、低三个等级的预警。为保证故障预警的持续准确性，技术人员可以搭建模型监控及迭代的机制，持续跟踪预测结果的命中比例与误报比例，留意输入特征分布的变动态势，性能一旦降至设定界限，便自动启动再训练流程，并且更新模型版本以保障预测有效，为维修资源配置与风险防控提供定量依据，从而实现前瞻性管控。

四、结束语

当下航空运输的高频率运行和苛刻适航要求，让航线维修故障的快速响应、精准处置与前瞻防控成为关键需求，航司需用系统化手段重新构建管控能力。本文针对性地提出四项策略，即集成多源数据以实现信息实时汇聚、制定标准流程来规范排故操作步骤、嵌入防错机制来降低人为操作风险、构建设模分析以达成故障趋势预判，可从整体上提升航线维修故障管控的时效与可靠程度。相关人员未来应持续推进系统智能化演进与跨主体数据共用，促进人因工程跟大数据技术的融合运用，完善法规适配以及人员培训的体系，让航线维修故障管控朝着更智能、高效、可靠的方向发展，为保障民航安全运行和实现高质量发展提供坚实后盾。

参考文献

- [1] 张兆民，潘张磊，付维方. 基于 BiLSTM-Attention 改进的航线维修知识图谱构建研究 [J]. 航空维修与工程，2025，(07): 71-74.
- [2] 胡怡春，裴琼阁. 国际航线维修标准协议实用技巧 [J]. 航空维修与工程，2025，(07): 119-120.
- [3] 张蓉，朱赞，王甦. 航线维修故障管控系统的建立 [J]. 航空维修与工程，2020，(09): 55-57.

非常规气井压裂后生产制度优化与长期稳产策略研究

段文义

中国石油化工股份有限公司西南油气分公司采气一厂，四川 德阳 618000

DOI:10.61369/ERA.2026030014

摘 要： 本文针对筇竹寺组页岩气井开展生产制度优化和稳产技术研究，解决压裂后产量递减快、难以长时间保持稳产的问题，主要通过对该类气井“三段式”生产动态特征开展分析，在分析该类气井产量递减规律的基础上，针对性提出分阶段生产制度优化对策，然后从气藏整体出发，提出“三段式”稳产综合技术方案，以期为深层古老页岩气井经济合理开发提供思路参考。

关 键 词： 页岩气井；生产制度；制度优化；稳产策略

Research on Production System Optimization and Long-term Stable Production Strategies for Unconventional Gas Wells after Fracturing

Duan Wenyi

No.1 Gas Production Plant, Southwest Oil & Gas Branch Company, Sinopec, Deyang, Sichuan 618000

Abstract： This paper focuses on the optimization of production systems and the development of stable production techniques for shale gas wells in the Qiongzhusi Formation, addressing the issues of rapid production decline and difficulty in maintaining stable production over extended periods following fracturing. By analyzing the "three-stage" production dynamic characteristics of these gas wells and understanding their production decline patterns, targeted optimization strategies for phased production systems are proposed. Furthermore, from a holistic perspective of the gas reservoir, a comprehensive "three-stage" stable production technical plan is introduced, aiming to provide insights and references for the economically rational development of deep ancient shale gas wells.

Keywords： shale gas well; production system; system optimization; stable production strategy

引言

在非常规油气勘探开发不断深化的过程中，除去震旦—下古生界页岩气田外，筇竹寺组页岩气已经成为一个重要接替领域，但由于其埋藏深、年代古老、地应力复杂等原因，气井压裂后产出特征较复杂，大部分井往往表现为初期递减较快、长期稳产难的问题，而采用现有的常用生产工艺及稳定生产措施已难以实现这一领域内稳定生产的需要，因此，亟需深化对压裂后生产动态的认知，建立分阶段生产制度优化体系及系统性长期稳产措施。

一、筇竹寺组页岩气井压裂后生产动态特征与核心挑战

筇竹寺组页岩气井体积压裂后生产动态，因埋藏深、年代古老、应力条件复杂等因素影响，具有不同于常规储层的一些特点及难题。“三段式”的生产曲线特征明显，且三阶段特征差异显著：压裂液返排结束后，在复杂网状裂缝系统的控制下，气井获得高产，由于压裂改造范围有限，控制储量不足，加之储层存在强应力敏感性，压后产气量、产气流压迅速呈指数衰减，这一阶段生产动态对返排制度和初始工作制度依赖性强，若采用强排方式，可能导致支撑剂回流或裂缝过早失效。随后，随着压裂形成

的缝网泄压，气流由基质向裂缝内流动，进入中期，但由于低渗、高吸附页岩基质中气体会发生解吸、扩散速度慢，可采程度受到制约，同时，裂缝中的流体滞留量也比较大，气井会出现井筒积液情况^[2]；随后，气井逐渐进入了基质向裂缝扩散为主的低产期，该阶段产量低但递减平缓，然而经济采气需依托精细排水采气、低成本维护等技术，是全生命周期中难度最大、涉及问题最复杂的阶段。其中最关键的是，由于储层自身矿物组成、有机质含量、天然裂缝发育程度、现今地应力场的各向异性，使储层纵向上、侧向上非均质性十分严重，显著降低储层有效性，单井初始产能及控制储量很难准确预测，制度很难得到优化。除此之外，在生产过程中，由于生产压差不断增大导致的有效应力不断

增大，将不可避免地产生支撑剂嵌入、裂缝面蠕动、岩屑运移等损伤作用，严重时会造成裂缝导流能力的不可逆损失。该种损伤对于埋藏深、应力高的地层表现得更为突出。不仅如此，地层能量有限，并且没有能量补充，在整个生产周期中如何科学地控制生产压差，避免应力敏感伤害的同时，使裂缝导流能力和井筒的携液效率均能得到较好的保证，并保持最优状态是需要重点解决的问题。前期以高速裂缝流为主，后期转为低速基质扩散，流动机理与核心矛盾随之变化，要求生产制度具备较强的阶段适应性和前瞻性，这对地质认知与工程响应提出了更高要求，也是构建系统性应对措施的关键前提。而上述问题均为筇竹寺组页岩气井实现长周期经济稳产的核心制约因素。

二、筇竹寺组页岩气井分阶段生产制度优化方法

（一）早期生产制度精细控制

早期生产制度精细控制是筇竹寺组页岩气井长周期高效率开发的主要技术环节，即采用“控压慢排”技术思路，通过精细控制，在保护好裂缝系统的同时，提升压裂液返排效率，确保支撑剂有效就位，保障初期高产。已有研究表明，深层页岩气井压后返排规律显示：返排初期的井底流压下降速率决定了支撑剂的运移分布以及裂缝导流能力^[1]，因此控压生产的重点就是要合理确定初始返排速率，让井底流压缓慢平稳地下降到裂缝闭合压力以上，给支撑剂的沉降和压实提供一定的空间，若压降过快，易导致裂缝提前闭合或支撑剂回流。由于实时采集了井口气量、水量、井口压力和流体矿化度数据，结合井底流压动态模型，实现了从返排开始到试气阶段的平稳过渡。控压生产制度优化研究表明，深层页岩储层应力高、敏感性强，工作制度选择需统筹短期高产与长期裂缝导流能力维持，即应防止初始生产压差较大引起的支撑剂嵌入和裂缝面失效的风险，同时需要精准调整油嘴尺寸或使用节流管汇，将井口压力控制在合理区间范围内，在维持较好的携液效率的同时，避免井筒压力大幅波动对靠近井底的裂缝系统的影响。此阶段的精细控制，能够为后续生产过程建立稳定高效的渗流通道，其科学性直接决定气井投产后的初始产量与递减趋势，是保证筇竹寺组页岩气井全生命周期经济效益的重要前提。

（二）中期制度调整与递减控制

伴随气井从高产早期向后期过渡，地层能量逐步衰减，此时出现以基质向裂缝供气为主的流体运动方式，进而进入到中期生产阶段。考虑筇竹寺组页岩气井埋藏深、地层压力系数变化大和岩石力学性质特殊等因素，这一阶段的中期递减控制尤为重要。因此，在此期间应根据地层能量衰减程度，适时采取对应的生产制度调整措施，实现估算最终可采储量（EUR）最大化。通过对气井动态连续监测，采集生产压差、产量递减率、气水比、流压变化等准确数据，据此判断裂缝系统有效性及井筒携液状况，针对筇竹寺组低压、常压等类型气井，此阶段需坚持“控压稳产”或“间歇生产”，严格控制井口压力或采取“开-关”交替生产的方式，合理安排井底地层复压时机，利用压力脉冲效应加速基

质吸附气的解吸与扩散，保证气源稳定。同时应注意监测和预防井筒积液，在此基础上统筹优化油管直径选型及柱塞气举、泡沫排水等人工举升技术^[4]。此阶段制度调整非静态固定，而应是一个动态响应过程，需依据实时生产数据与预测模型，不断优化工作制度，在技术极限产量与经济极限产量之间找到最佳平衡点，以应对筇竹寺组储层中后期能量补充有限、递减加快的固有挑战，为最终实现长期稳产奠定基础。

（三）智能优化与自适应调控技术

筇竹寺组页岩气井具有较强的非均质性，生产动态复杂多变，原有的基于固定模板或经验公式生产制度调整模式不能有效满足精准时效要求。而智能优化和自适应调控则是依托智能工作流将“数据感知-模型预测-决策优化-闭环控制”紧密结合在一起的一套流程，根据地质条件动态变化持续更新生产制度并落地实践，实现生产制度精准优化目标。以物联网为手段搭建的数据采集系统，可高频采集井口压力、温度、流量等参数，井下若安装永久压力计，可实时反馈井底状态，通过整合海量数据，结合数据驱动与机理模型，将气井生产数据转化为数字孪生体。数据驱动的机器学习模型可快速分析采出量、产气状况等数据，实现短期采气量变化趋势预测及故障工况预警等功能，而基于地质力学、渗流理论的机理模型则能够按照采气压力在生产中造成的裂缝发展规律和气、水两相流动机理来模拟中期和长期气井的产层特性。相较于单一模型，两者融合形成的混合模型预测精度更高，可大幅提升对筇竹寺组复杂缝网系统动态响应的预测准确性。自适应调控以模型预测控制为基础的闭环优化算法，其原理是在持续获取数据的过程中更新模型状态，以未来一段时间累计产气量最大化或经济效益最优化为目标函数进行递归求解，得到油嘴开度和节流压力等最优控制指令，并下发到井口控制设备上实施。这种优化方式可以根据地层压力的下降、裂缝导流能力衰减、井筒积液的变化情况实现动态调整生产制度，跟踪理论最优的生产制度轨迹^[5]；另外，智能优化类研究方法可有效解决控压生产过程中的参数寻优问题，并且可以实现对气井工作制度的个性化、前瞻性动态管理，进而最大限度地降低人工干预程度，提高页岩气井最终采收率以及生产效益。

三、筇竹寺组页岩气藏长期稳产综合策略与管理实践

（一）整体井网与压采协同优化

为获得页岩气藏长周期稳产，不应仅仅局限于单井管理，应站在气藏层面，同时进行井网布置和压裂-投产全过程的协调优化。本质上而言，就是要通过地质-工程一体化研究，开发初期即对井位、井距、井序、压裂规模等进行统筹设计，充分考量气藏不同部位的压裂改造有利区域，规避相邻井间强烈能量干扰及“压窜”内耗问题。具体而言，通过精细三维地质建模与地质力学仿真技术，优选井网布局及压裂时序，使水力裂缝在平面上均匀分布，最大可能地实现储量的高效、均质动用。“压采协同”核心是将长期生产需求前置到压裂设计阶段。例如，基于预测生产压降剖面，优化支撑剂粒径组合与铺置浓度，确保裂缝导流能力

适配全生命周期生产需求，或在确定不同段簇参数后形成有利于中后期压力更趋平衡下降的裂缝形态，进一步提升裂缝系统在长时间开采过程中的导流能力保持率；或者基于井组生产制度调控过程来分析井间干扰随时间演变后的动态响应结果，并据此对各个井采取相应的区别化工作制度，主动控制地层压力场在各向均衡扩展，切实推迟边角井的见水时间，减缓边角井的压力衰减速率。从气藏到气井压裂改造再到后续生产，都贯穿着全生命周期思想^[3]，围绕开发源头到生产末期如何统筹协调压裂改造与生产开采的关系展开，在兼顾效率优先的前提下，保障干气藏开发寿命延长，尽量减少干扰、提高采收率，为气田长期经济稳定生产提供坚实的基础保障。

（二）重复压裂技术经济评价

已经进入中后期生产的筇竹寺组页岩气井重复压裂是维持井组产量、保障产能接替及实现稳产的重要手段，需从技术、经济上对重复压裂的必要性、效益性和安全性展开综合评价。理论上，重复压裂将老井重新压开，恢复储层在地应力环境下的有效渗流能力，或者重新启裂老井管外未射孔部分，或经过反复启裂沟通各种待发育缝簇形成更高程度充填化的缝网结构，使近井渗透率得到更好的改善，同时避免重复完井改造伤害。成功实施的核心要点首先是优选候选井层，在全面认识本井区剩余储量、地应力状态、老井井筒（特别是套管）完好程度的基础上，判断老井第一次压裂完井效果及生产递减情况；其次依据选好的潜力井层参数，按照相应的地质、工程情况，选用合适的方式，例如，对原压裂无效井，可采用大规模酸化或转向压裂技术；对储层仍有大量未动用区域的井，可尝试密割缝、暂堵转向压裂构建新缝网；对套管变形井段，需先完成通管复位再实施压裂。每个具体的应用技术都要进行经济上的考量，核心是开展技术经济一体化综合评价，需统筹考量全流程经济效益，成本测算需覆盖井筒作业、压裂材料及技术服务等全流程费用，还要通过地质工程的过程来计算出增产的效果以及稳产时间，然后得到增量的净现值、内部收益率这几个主要的经济指标。同时需考量施工成败、井间干扰加剧及井筒损伤等潜在风险。最后，通过反复权衡增量收益、作业成本及各类风险，确定重复压裂的经济有效实施时

机，将单一重复压裂技术，升级为气田稳产开发的科学产能接替方案之一。

（三）全生命周期数据与完整性管理

全生命周期数据和完整性管理是页岩气井长期安全稳产的重要保证，以整个生命周期的数据链路和风险控制为支撑，采用标准化、结构化的数据湖作为综合数据来源，将随钻测井数据、工程参数、压裂施工曲线、生产实时动态、设备状态监测等多种异构数据纳入，为后续深度分析与决策优化提供充足数据支撑；针对资产完整性管理功能需求主要关注保持井筒及地面设施的功能可靠性要求，首先进行井筒完整性长期监测与风险评价，通过连续监测套管压力、水泥环密封性以及地层流体窜流等进行过程监控，并结合周期性井下测井，建立完整性屏障的状态模型及失效预警。气井生产过程中后期伴随井口压力下降、产液量变化等特点，地面集输系统应根据气井特性与实际运行状况优化流程设备、计量装置与防腐措施。基于历史非计划停机案例及不良数据统计分析结果，并结合自身的技术优势，以预测为主、预防为辅，构建大数据与物理模型融合的数据驱动型预测性维护智能平台。从平台采集的海量运行数据中，提取并总结适配工况特征，精准预测关键部件寿命余量，提前开展维护作业。避免设备突发故障导致的生产中断，同时提升数据读取效率，规避无效数据干扰。这种覆盖递减管控、风险防控、经济开采期延长的全生命周期管理方法，是实现气藏资产价值最大化的核心保障。

四、结语

本文以筇竹寺组页岩气井为例，分析压裂后的生产动态特征，在此基础上建立分阶段优化与全生命周期稳产的技术体系。气藏尺度需聚焦早期控压、中期调控、后期智能优化三大核心环节；通过分析并明确后期优质气层带的地层泄压压力，实现后期地层压力的精准调控，形成井网协同、重复压裂和完整性管理等综合措施。该理论与方法对于同类深层页岩气藏效益开发有着重要的参考价值。未来应结合生产数据、地质资料及人工智能等技术，实现非常规气井的智能化、自适应、高效开发。

参考文献

- [1] 刘殷韬, 康正, 夏彪, 等. WY 区块深层页岩气井压后返排规律及制度研究 [J]. 油气井测试, 2024, 33(04): 1-8.
- [2] 赵志良, 陈江友, 李海龙, 等. 安场向斜常压页岩气井生产特征及排采规律分析 [J]. 能源与节能, 2024, (05): 53-56.
- [3] 孔润东. 页岩气井全生命周期精细管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(16): 85-88+94.
- [4] 张金武. 威远页岩气井低压低产期稳产技术与实践 [J]. 钻采工艺, 2023, 46(01): 71-77.
- [5] 王广东. 川南页岩气井控压生产制度优化方法研究 [J]. 当代化工研究, 2022, (18): 174-176.

山区路桥服务区滑坡监测预警系统构建与处治效果评估

许鹏飞

湖北交投荆州投资开发有限公司, 湖北 荆州 434000

DOI:10.61369/ERA.2026030015

摘 要 : 随着人口的急剧增长和城市化的快速发展, 人类活动的空间范围逐渐扩展, 人类工程活动的规模不断加大, 加之受到暴雨、地震等极端自然因素的影响增多, 我国的滑坡灾害发生的次数和造成的损失呈增多趋势。以下聚焦山区路桥服务区滑坡防控核心需求, 系统阐述监测预警系统构建、处置技术体系及效果评估体系, 结合利咸高速纳水溪 A 服务区滑坡案例验证实践可行性, 为山区交通基础设施滑坡灾害防控提供技术参考与工程借鉴, 保障路网安全稳定运行。

关 键 词 : 山区路桥服务区; 滑坡监测预警; 滑坡处治技术; 处治效果评估

Construction and Treatment Effect Evaluation of a Landslide Monitoring and Early Warning System for Road and Bridge Service Areas in Mountainous Regions

Xu Pengfei

Hubei Communications Investment Jingzhou Investment and Development Co., Ltd., Jingzhou, Hubei 434000

Abstract : With the rapid population growth and urbanization, the spatial extent of human activities has gradually expanded, and the scale of engineering activities has continuously increased. Coupled with the increasing influence of extreme natural factors such as heavy rainfall and earthquakes, the frequency and losses caused by landslides in China have shown an upward trend. This paper focuses on the core needs of landslide prevention and control in road and bridge service areas in mountainous regions, systematically elaborates on the construction of monitoring and early warning systems, disposal technology systems, and effect evaluation systems. It validates the practical feasibility through a case study of the landslide at the Nashuixi A Service Area on the Lixian Expressway, providing technical references and engineering insights for landslide disaster prevention and control in transportation infrastructure in mountainous areas, ensuring the safe and stable operation of road networks.

Keywords : road and bridge service areas in mountainous regions; landslide monitoring and early warning; landslide disposal technology; treatment effect evaluation

山区路桥服务区是交通路网的关键节点, 承担着服务保障及路网衔接的关键作用, 但其多选址于地形复杂的汇水负地形或易滑地层区域, 滑坡灾害隐患突出。此类灾害不仅会直接损毁服务区建筑、路基桥梁等工程设施, 还会引起交通中断、路网瘫痪等连锁反应, 带来极大经济损失, 如利咸高速纳水溪 A 服务区滑坡造成多跨桥梁倾倒、60m 路基挡土墙毁坏及地方道路被覆盖封堵。山区滑坡防控存在监测精准度达不到要求、处治方案针对性欠缺、效果评估标准不统一的状况, 难以符合路桥服务区高水准的安全防控要求。基于此, 本文围绕滑坡监测预警系统搭建、处治技术体系应用与效果评估开展深入分析, 结合典型工程案例探索科学高效的防控路径, 旨在填补山区路桥服务区滑坡防治的技术空白, 为同类工程提供实践指引, 助力提高山区交通基础设施的抗灾能力与安全保障程度。

一、山区路桥服务区滑坡监测预警系统构建

(一) 监测指标体系设计

设计监测指标体系需全面覆盖滑坡形成及演化的核心节点, 结合山区路桥服务区地形地质方面特征与工程场景, 构建“地质环境、诱发因素、动态演化”三维指标体系。地质环境指标把焦点放在滑坡孕灾基底条件上, 涉及深部变形、岩体应力及地下水

位, 参考纳水溪滑坡的勘察结果, 重点关注易滑地层分布、崩坡积体厚度等关键参数。诱发因素指标以强降雨为核心, 搭配地表径流量、坡体含水量监测, 适配山区汇水负地形的水文效应。动态演化指标涵盖地表位移、坡面裂缝的发育进程、滑体整体稳定性水平, 直接反映滑坡从表层变形过渡到快速滑移的递进过程。单北斗监测系统可量化水平及垂直位移, 裂缝宽度及延伸的速率能直观体现滑坡活跃程度。各指标要明晰监测频率以及精度标

作者简介: 许鹏飞 (1980.02-), 男, 汉族, 湖北省荆门市, 工程师, 本科, 研究方向: 路桥。

准,依靠多维度数据对接,达成对滑坡风险的全面感知,为后续预警分析给予齐全的数据支撑。

(二) 监测技术集成与优化

监测技术集成需同时兼顾常规手段及智能化技术,形成优势互补彼此补足的监测网络。常规技术方面,留存采用人工巡查、钻孔勘探、挖探等普通手段,用来核实滑坡边界、开展地质条件补充勘察,如纳水溪滑坡应急处置期间的补充地质调绘与钻探工作,为技术选定提供基础地质佐证。智能化技术聚焦高效精准监测,融合单北斗自动位移监测、工程物探、无人机航测等技术,达成地表与深部变形的实时动态捕捉。针对山区呈现出的复杂环境,应实施技术适应性优化:采用无线与有线融合传输方案解决信号遮挡问题,为监测设备配置可起到防水、抗冲击作用的防护装置,应对极端天气,结合地形状况对监测点布局进行优化,保证能覆盖滑坡后缘裂缝、前缘滑移带等关键地段。通过技术聚合与优化,增进监测数据的连续性、精准度,为预警决策筑牢数据后盾^[1]。

(三) 预警阈值确定与分级响应机制

预警阈值需借助监测数据统计分析、数值模拟以及工程案例复盘来综合量化。参考纳水溪滑坡的监测数据,通过分析滑坡位移速率、裂缝扩展速率、地下水位涨幅等参数与滑坡失稳存在的相关性,找出各指标的临界值,如地表日位移超出5mm、裂缝单日的扩展量超出2mm,即触发高风险预警。形成“低、中、高、极”四级风险的分级判定标准,对应差异化的应对手段:低风险阶段扩充巡查频次,中风险阶段启动监测的加密化模式,高风险阶段迅速组织施工人员、设备撤离,极风险阶段开展交通封路及区域管控。建立多主体协同应急机制,明确施工、设计、监理各单位及地方政府的职责界定,如纳水溪滑坡中“发现险情、上报研判、应急处置”的闭环流程,保证预警信息发布后1小时内即刻启动响应,及时落实各项防控手段,尽量把灾害损失降到最低。

(四) 监测预警系统整体架构

系统整体采用“四层架构”设计,达成数据采集、传送、解析、发布的全流程闭环。数据采集层把单北斗地表位移监测站、深部测斜仪、应力传感器、雨量计、水文观测设备等不同类型监测设备整合起来,适应纳水溪滑坡在地表形变、深层位移、地下水水位、应力全维度的监测需求,保障数据采集的整体全面性。数据传输层采用无线与有线融合方案,5G和北斗短报文守护无线传输的稳定性,光纤为有线传输给予支撑支持,解决山区信号传输不稳定问题,保证监测数据实时完成上传^[2]。数据分析层采用专业数据处理平台,具备数据筛选、趋势判定、阈值核对能力,采用算法模型分析滑坡的演变趋向,生成风险等级评定结果。预警发布层组建多渠道通知体系,涉及手机APP推送、短信预警和应急指挥平台联动,同时对接交通管控部门,促成预警信息与封路、分流措施的快速搭连。系统具备可扩展性,支持依据不同山区服务区滑坡规模及风险特征,灵活调整监测设备的配置以及分析模型的参数。

二、山区路桥服务区滑坡处治技术体系与应用

(一) 核心处治技术应用与优化

核心处治技术以“支挡稳坡+排水减载+生态防护”作为核

心内容,结合山区地质状况与工程要求不断优化。支挡工程是稳定边坡的核心手段,矩形抗滑桩可按照滑坡规模对桩径、桩长与间距进行调整,以满足巨型堆积土滑坡的承载要求,钢轨桩则针对敏感构筑物防护场景,通过密集排布强化抗滑刚度。排水工程聚焦汇水地形的水文隐患,截水沟沿滑坡后缘环形布置,支撑盲沟以树枝状形态分布来疏导坡面的渗水,仰斜式排水孔直接到达滑体富水层,形成“截、排、导”立体排水体系。生态防护与整形技术同步实施,坡面整形可封闭裂缝、让坡体变得平顺,喷播植草能实现固土与生态的恢复,清方填方精准清除滑坡堆积体并回填损毁路基,保障稳定状态并控制工程扰动范围,平衡技术实用性与环境适应性。

(二) 复杂滑坡分区处治方案设计

复杂滑坡分区处理需根据滑坡规模、变形阶段以及风险等级精准施策。以纳水溪滑坡为例,借助滑体编号HP1、HP2、HP3对区域加以划分,并采取区别化的方案。HP1作为前期整治区域,在原有抗滑桩基础上添设单排桩,减小服务区场坪规模,以降低荷载扰动,坡体衔接处采用放坡设计。HP2为滑动呈现活跃态势的区域,借助上下两排抗滑桩加强支护,桩顶冠梁跟格宾挡墙协同受力,配套采用钢轨桩挡土墙保护外侧电塔,同时清除桩前堆积体降低下滑推力。HP3目前处于表层变形阶段,以实施监测预案为主,预先为抗滑桩布置预留位置,若变形加剧则快速开启支挡施工,分区设计充分顾及各区域地形高差、滑体厚度和周边构筑物的具体分布,避免采取单一的处治手段,提高处治针对性及经济性^[3]。

(三) 施工关键技术与质量控制

施工关键技术着重山区复杂环境下效率与安全的把控,全流程均贯穿质量控制。施工组织按照“先排水后支挡、先上后下”原则进行操作,先完成截水沟与排水系统,为后续施工缔造稳定的环境。抗滑桩施工重点把控嵌岩的深度,凭借渣样核对与地质补勘对桩长加以调整,实现锚固效果;桩间板、冠梁建设施工严格把控钢筋绑扎和混凝土浇筑质量,维持结构的整体特性。安全管控适配山区天气特点,雨天暂停边坡的开挖,开辟施工便道与平台以减轻对坡体的干扰。同步实施质量监测工作,实时监测桩体的垂直程度、坡面的平整程度与排水系统的畅通程度,结合滑坡动态监测的结果调整施工参数,对钢轨桩间距、挡土墙埋深等关键指标开展全程旁站监督工作,保障工程质量符合I级防治要求。

三、山区路桥服务区滑坡处治效果评估体系

(一) 评估指标体系构建

评估指标体系依照“稳定性、工程质量、生态效益、经济效益”四维核心构建,保证覆盖处治全效能。稳定性指标为核心,涉及滑坡地表的位移速率、深部变形量、地下水位控制效果与稳定性系数,直接体现处治对滑坡失稳风险的管控成效,参考纳水溪滑坡监测数据的维度设定量化标准。工程质量指标聚焦关键设施性能,涵盖抗滑桩承载力与入岩深度、排水系统的通行顺

畅率、挡墙结构的整体稳固性、坡面整形的表面平整度等，适应支挡与排水工程的关键技术要求。生态效益指标关注环境适配性，涉及坡面植被恢复率、水土流失管控程度、生态景观协调性，与喷播植草等生态防护措施的目标相契合。经济社会效益指标涉及交通恢复时效、工程投资控制、灾害损失降低比例，体现处治工程的实际应用意义。各指标明确权重及量化标准，形成科学全面的评价维度^[4]。

（二）评估方法与技术路径

评估方法运用“数据驱动 + 实地验证 + 综合研判”的多元融合方式。数据对比法通过处治前后监测数据，分析位移、水位、应力等指标变化趋势，量化稳定性改善效果，如对比纳水溪滑坡处理前后地表位移速率的区别。现场踏勘法直观核查工程实体质量，重点查看抗滑桩的完整度、排水系统功能的有效性、坡面植被生长的状态等，检查施工与设计的契合水平。数值模拟法借助专业软件计算滑坡稳定性系数，对不同工况下的处治效果进行模拟，为评估给出理论支撑。综合评价法借助加权评分机制，结合各指标表现得整体评估结果，同时参考专家的评审意见对结论加以优化。技术路径遵循“数据收集、指标量化、分项评估、综合研判”的流程开展，确保评估结果客观精准，为后续优化途径提供支撑。

（三）评估流程与周期

评估流程分为阶段性评估、完工综合评估以及运营期跟踪评估三个环节。阶段性评估随施工进度同步开展，在截水沟、抗滑桩等关键工序完工后开展，关键检查单工序质量及初步稳坡效果，及时发现施工偏差并整改。完工综合评估在处治工程整体竣工后的1-3个月内实施，全面审查四维指标的具体表现，形成完整评估报告，明确处治工程是否达到设计标准^[5]。运营期的跟踪评估按每年进行开展，结合长期监测积累的数据，剖析滑坡稳定性的长期变化走向，检测处治效果的持久程度与适应状态。周期设定兼顾短期时效与长期成效，阶段性评估跟随施工节点灵活调整，完工评估聚焦短期成效，运营期评估看重长期稳定，形成包含“施工、完工、运营”阶段的全周期评估闭环，保障处治效果

始终符合规范。

四、案例分析—以利咸高速纳水溪 A 服务区滑坡为例

利咸高速纳水溪 A 服务区 K19+180~K19+560 段滑坡，是山区路桥服务区巨型堆积土滑坡典型案例，由 HP1、HP2、HP3 滑体组成，总体积 284.7 万 m³，危害等级为特严重。其成因是三叠系巴东组易滑地层为基底，受 2024 年 7 月强降雨诱发，叠加服务区场坪开挖造成的人工干扰，造成坡体急速地滑动，造成桥梁倒塌、路基破坏、交通阻塞。监测预警方面，采用单北斗地表位移监测、深部测斜、地下水位监测等多种方式，提前发现坡体下沉、裂缝等潜在险情，按照四级响应机制及时撤离人员、管控通行，未造成人员伤亡。处治方案实行分区施策：HP1 额外设置抗滑桩强化支挡，HP2 采用双排布抗滑桩联合钢轨桩和立体排水的组合方案，HP3 以实施监测预案为主，预留处治的空间。目前，截水沟全部完工，1360m 长坡面支撑盲沟和 19800 m² 坡面整形的工作推进有序，26 根抗滑桩施工已结束，滑坡的稳定性实现显著提升。该案例验证了“监测预警、分区处治”模式的有效性，为山区服务区巨型滑坡防控提供了实践借鉴^[6]。

五、结语

综上所述，山区路桥服务区滑坡防控需构建“监测预警、处治实施、效果评估”的闭环体系，把精准监测作为起始前提、科学处治作为核心要务、系统评估作为保障后盾。本文提炼的监测预警架构、分区处治方案以及综合评估手段，经纳水溪案例检验，具备较高的实践适配性。未来应进一步促进监测技术智能化、处治技术绿色化进步，优化防控标准与相关规范，为山区交通基础设施防滑坡灾害提供有力技术后盾，有利于实现路网安全稳定运作与区域交通可持续发展。

参考文献

- [1] 梁东，冯茂秘. 北斗卫星导航系统在山体滑坡实时监测中的应用 [J]. 电子技术, 2025, 54(06): 154-155.
- [2] 赵丽华，史康怀，瞿伟. 复杂山区滑坡监测设备抛投无人机智能路径规划 [J]. 大地测量与地球动力学, 2025, 45(03): 319-324.
- [3] 丁沛君. 山区高速公路边坡稳定性监测分析 [J]. 交通世界, 2024, (09): 48-51.
- [4] 张海生. 无人机贴近摄影测量技术在贵州山区滑坡监测中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(02): 208-210.
- [5] 陶宜权，范文，曹琰波，等. 秦巴山区浅表层滑坡灾害监测预警平台设计与实现 [J]. 灾害学, 2023, 38(02): 219-225.
- [6] 陈磊，李斌，彭程，等. 岩溶山区滑坡监测预警云平台设计与实现 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(06): 138-144.

利用微震数据推断雨的地震特征

周晓悦, 陈宇强

江西理工大学, 江西 赣州 341000

DOI:10.61369/ERA.2026030017

摘 要 : 地震仪器越来越多地被用于监测河流活动以及量化洪水期间的泥沙运输, 在降雨期间, 产生的涉及水流、泥沙、降雨和风的复杂地震记录。因此, 需要对降雨的地震特征进行地震表征, 以更好地分析每个水流过程并提高我们对河流地震特征的了解。在本研究中, 我们通过在河流岸边部署的地震仪记录的数据, 实验研究了降雨的地震响应, 这些地震仪、雷达流量计和雨量计共位。结果表明, 在降雨期间地震噪声的功率谱密度 (PSD) 在 40–90 Hz 的频率范围内对降雨增强, 地震信号能量与降雨量 5 分钟均方根在时间序列上有较好的一致性, 说明利用微震信号监测降雨事件及其水文效应是可行且有效的。

关 键 词 : 微震信号; 频谱分析; 降雨地震特征

Inferring the Seismic Characteristics of Rainfall from Microseismic Data

Zhou Xiaoyue, Chen Yuqiang

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000

Abstract : Seismic instruments are increasingly being employed to monitor fluvial activities and quantify sediment transport during floods. During rainfall events, complex seismic records associated with water flow, sediment movement, precipitation and wind are generated. Therefore, it is necessary to conduct seismic characterization of the seismic characteristics of rainfall, so as to better analyze each hydrological process and enhance our understanding of fluvial seismic signatures. In this study, we experimentally investigated the seismic response to rainfall based on data recorded by seismometers deployed along the riverbank, which were co-located with radar current meters and rain gauges. The results show that the power spectral density (PSD) of seismic noise during rainfall is enhanced in the frequency range of 40–90 Hz. Moreover, the seismic signal energy exhibits a good temporal consistency with the 5-minute root mean square of rainfall intensity. These findings indicate that it is feasible and effective to use microseismic signals for monitoring rainfall events and their hydrological effects.

Keywords : microseismic signal; spectral analysis; seismic characteristics of rainfall

引言

雨水相关的自然风险可能导致重大的环境、基础设施破坏和危及人类生命安全^[1,2]。由降雨引发的洪水的主要影响之一是河流中的泥沙运输, 这可能会破坏河流旁边的设施^[3]。更好地监测河流活动和泥沙运输有助于最大限度地减少由洪水引起的损害。关于雨的地震特征在文献中记载得很少, 在过去十年中, 一些实验在河流附近部署地震仪用来监测河流活动^[4,5], 但其中只有少数关注雨的特征本身^[6]。尽管这些研究的环境不同, 但它们记录了雨滴下落发出的信号, 这些信号通常在时间和空间上同时发生, 并且在可能的重叠频率范围内。因此, 通过地震数据监测河流活动需要更好地了解雨的地震特征。这种方法在研究滑坡或岩崩时尤其有帮助, 因为大量降雨是这些危险过程的主要触发因素^[7,8]。此类实验方法中的一个关键问题是地震仪的物理特性及其记录雨声特征的能力。使用宽带地震仪或高频地震仪进行的地震研究表明^[9], 雨的地震特征在约 80–480 Hz 的频率范围内占主导地位, 强调了较大雨滴对地震信号贡献的重要性^[6]。他们的结果还显示了地震噪声与雨强度 (或动能) 之间的幂律关系。因此, 使用地震仪监测降雨的特征取决于地震传感器的带宽、其高截止频率以及采集系统的采样频率。

为了更好地区分河流地震噪声、降雨地震噪声以及其他信号, 尤其是更好地监测降水期间的泥沙运输, 我们在本研究中开发了一种实验方法来表征和量化地震传感器记录的雨的地震特征。以下分析了地震仪在频率大于 0.5 Hz 时记录的频谱内容, 以量化并讨论雨的特征及其频率域。在考虑降水量的情况下, 分析了记录的地震噪声的振幅。

一、仪器设置、数据处理方法

（一）仪器设置

本次研究在贡江河流的一条支流进行河流长期监测实验，在监测实验中利用微震仪器、雷达流量计和雨量桶对监测流域的地震噪声和流速、流量、水深、降雨进行监测，实验装置如图1所示。



图1 实验监测设备

实验一共使用2台微震监测设备、雷达流量计和雨量计。在表1中具体展示仪器安装位置具体坐标，其中 S5安装在距离河流0.3m 远的岸边进行河道外监测，雷达流量计和雨量桶安装在监测流域的正上方，具体安装位置如图2所示。

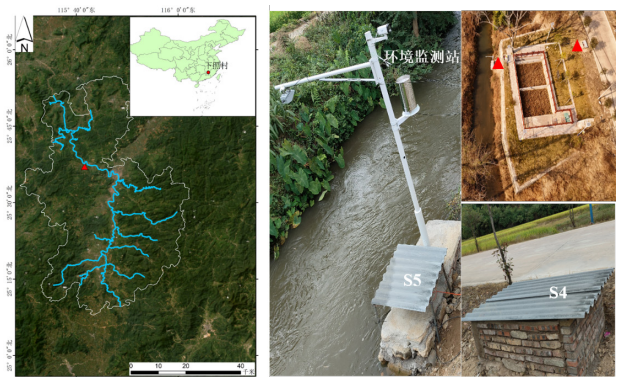


图2实验装置布设图

表1：仪器安装位置具体坐标

名称	经度	纬度	高程 (m)
S4	115.693329	25.617544	166.08
雷达流量计	115.69342	25.617373	174.67
雨量计	115.693413	25.617304	169.02
S5	115.693405	25.617311	161.32

（二）数据处理方法

本文基于 Python 编程将全部微震原始数据转换为地面速度，得到信号的波形图。基于快速傅里叶变换将时域内容转换至频域，得到微震信号的频谱图，再基于短时傅里叶变换（STFT）将微震地面速度的原始时间序列数据分割成若干片段，每个片段中傅里叶变换的数据点数（窗长度）为200，窗口重叠50%，窗口类型选择 Hanming 窗，得到微震信号的时频分析图。与此同时，为减少由于简单使用 FFT 产生的频谱方差，并增强时频分析的解释，使用一种依赖于 Welch 的重叠方法估计微震信号的平均功率谱密度 PSD，计算每个频率的平均功率，窗口为1 s（200个样本），窗口重叠50%，得到离散的频率带。

二、下照村气象概况

研究区会昌县下照村属中亚热带季风型温暖湿润气候区，具

有山区立体气候明显的特征，气候温和热量足，日照充裕光能佳，雨水不均易旱涝，四季分明差异大。年平均气温 19.3摄氏度，一月份平均气温 8.3摄氏度，七月份平均气温 28.7摄氏度；极端最低气温 -6.7摄氏度，极端最高气温 39.5摄氏度；平均无霜 280天，年平均降雨量 1624毫米，春夏多雨，秋冬少雨，尤在4-6月降雨集中，平均可达 752.9毫米，占全年总雨量的 48.4%，常引起洪涝灾害，而7-9月的年平均降雨量只有 388.1毫米，仅占全年总量的 24%，加之蒸发量又大于降雨量 253.5毫米，常发生干旱。月平均降雨量与气温图如图3所示，灾害性天气主要有春季低温、夏季洪涝、干旱以及秋季“寒露风”。研究区境内河流众多，南来的湘江与东来的绵江汇成贡江直入赣江。县内溪流纵横，有大小河流 319条，且河床比降大，境内河流总长 1726 km，水域面积 73.64 km²。

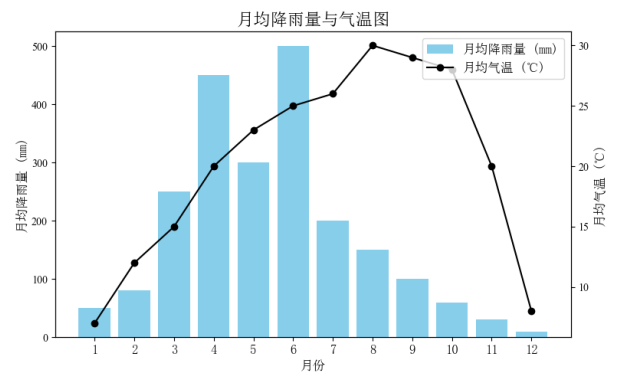


图3研究区月平均降雨量与月均气温图

三、结果：地震频谱分析

微震信号物理特征的研究是微震监测应用研究的基础。微震信号的物理特征是区分降雨信号与地震信号、人类活动等环境噪声的重要依据。

（一）人为地震特征

为了区分不同来源的地震信号，明确不同人类活动在地震记录中的表现形式，实验地点位于县道旁，在白天7点至夜晚8点有较多车辆行人通过，所以将实验监测时间段内采集的六类典型信号进行归类分析，包括大货车、汽车、摩托三轮车、摩托车、行人及电动车经过激发的微震信号。每类信号均绘制了时域波形与功率谱密度曲线，分别进行时域波形与频谱分析，以揭示其在能量分布与频率特征方面的差异（如图4所示）。

1. 大货车信号

大货车通过时，地震记录呈现明显的高幅值、长持续时间脉动特征，峰值振幅远高于背景噪声，持续时间可达数十秒。在时域中，可见其包络线呈单峰结构，且振幅变化陡峭，能量集中在 2-8 Hz 范围内，低频成分占比较大，反映出大货车车辆自重较大、轮胎与路面作用周期较长的特性。

2. 汽车信号

汽车信号的振幅较大货车显著降低，持续时间相对较短（约 5-15 秒）。频谱分布主要集中在 4-10 Hz 区间，低频能量弱于大货车，但中高频部分有所增强，表现为能量峰值位置略向高频移动。

3. 摩托三轮车信号

摩托三轮车的振幅介于汽车与摩托车之间，但波形中可见较

为规律的振动包络，反映出发动机与车身共振特性。频域特征表现为 5-12 Hz 的较宽频带分布，且在 8-10 Hz 处有明显能量峰值。

4. 摩托车信号

摩托车信号振幅较低，持续时间短（通常不足 8 秒），但在时域中仍可识别明显的轮胎冲击脉动。频域分析表明能量集中在 6-15 Hz 范围，且高频成分占比显著，高于其他车型。

5. 行人信号

行人信号振幅极低，接近背景噪声水平，波形中呈现间断的小幅脉冲，持续时间较长（可达数十秒）。频谱能量主要分布在 8-18Hz，高频部分较明显，反映出行人步伐冲击作用短促且高频。

6. 电动车信号

电动车信号振幅与摩托车相近，但波形更加平稳，缺少发动机燃爆引起的脉动。频谱分布集中在 5-12 Hz，低频和中频部分较为均衡，高频成分弱于摩托车，反映出其电机驱动的平顺性。

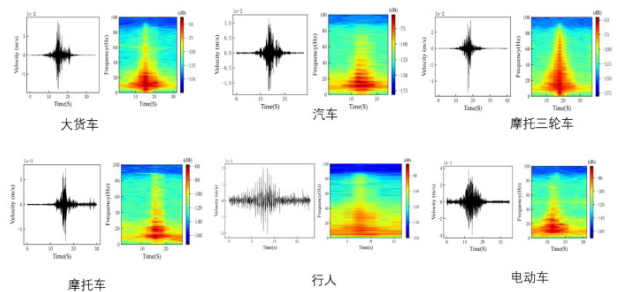


图4不同人类活动的噪声信号时频图

图5展示了研究区域人类活动信号在白天与夜间的功率谱密度（PSD）差异。整体上，白天信号在 0-30 Hz 范围内的能量显著高于夜间，尤其在 5 Hz、15 Hz 附近存在明显峰值，最大幅值可超过 50 dB，而夜间同频段的峰值幅度仅约为 10 dB。从图中可以看出白天的频谱特征峰分布较为密集，且多个峰值频段对应机动车、摩托车及其他人类活动的特征频率，反映出白天交通运输及人类生产活动频繁，对地震记录产生了较强的低频至中频干扰。夜间曲线整体平缓，仅在 10-20 Hz 范围内出现弱峰值，说明该时段人类活动显著减少，地震背景噪声水平较低。该结果表明，白天与夜间在地震记录的频谱特征上存在显著差异，人类活动是导致日间噪声水平升高的重要因素。

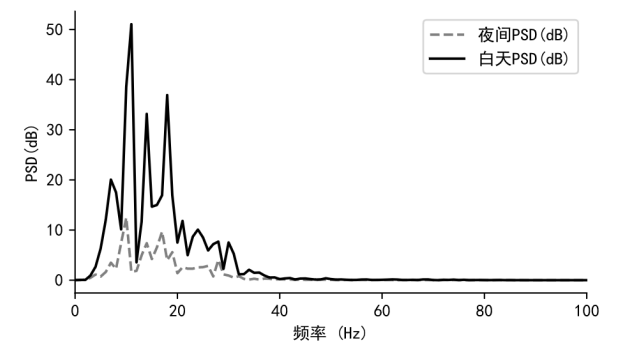


图5人类活动在白天夜间的差异

（二）降雨地震特征

为分析降雨事件在时频域中的能量分布特性，对三次降雨

（2025年3.3-3.5、2025年6.2-6.4和2024.11.15）时的地震信号进行了频谱分析。频谱计算采用 Welch 方法估计功率谱密度，连续功率谱密度结果（图6）显示，雨的活动可以在时频域中与人类活动噪声重叠。为了研究雨的频谱特性，我们研究了降雨期间记录的数据，时频图表明降雨活动的记录在约 20-90Hz 的频率范围内，这与先前学者研究的内容一致^[5]。在 40 至 90Hz 的频率范围内，我们的结果表明，雨的地震能量随着频率的增加而增加。图 3.3 中的玫红色虚线框中显示的是降雨事件，可以看到，在这些事件窗口内，频谱能量显著增强，特别是在 40 至 90 Hz 范围出现清晰的峰值，这一集中能量区间通常代表快速增强的降雨过程（如短时强降雨），说明降雨强度的短时波动具有明确的频率响应。降雨和噪声信号在 40Hz 以下存在较低且复杂的功率谱密度差异，但雨在 30Hz 频段以上主导噪声频率。本次研究中，降雨活动中微震信号的主要频率在 20 至 90Hz 之间。在 40Hz 以下，降雨特征与其他活动重叠，而在 90Hz 以上，地震信号强度降低，功率谱密度的强度取决于降雨强度的增强。

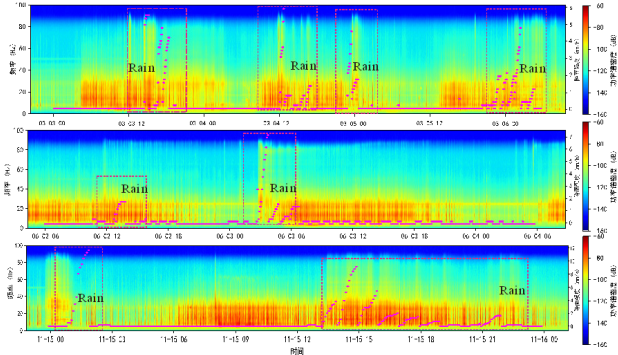


图6. 三次降雨期间降雨和地震频谱的叠加图（从上至下依次是 2025 年 3.3-3.5、2025 年 6.2-6.4 和 2024.11.15 三次降雨事件）

图7展示了降雨强度时间序列与地震能量时间序列的同步变化曲线。可以明显看到，在降雨事件发生期间，地震能量出现了与降雨强度相对应的同步增强。两者时间序列趋势整体一致性较强，表明降雨过程能够显著影响浅部地表的微震信号，尤其是在河岸、松散堆积体以及饱水坡面等地质环境中。在降雨骤增的 5-15 分钟内，地震能量随即出现快速上升，反映出雨滴撞击地表、径流形成的以及初期汇流过程所诱发的高频微震响应。对于持续型降雨事件，地震能量呈现稳态升高、延迟下降的特征，说明地表的浅层介质在受水入渗、孔隙水压力升高及地表径流强度增强的条件下，会产生连续性的微震信号能量增强。降雨事件的频率结构决定了其在不同时间尺度上的能量特征，而地震能量对这些频率成分具有显著响应。因此，利用微震信号监测降雨事件及其水文效应是可行且有效的，为后续开展降雨期间河流的流量反演及暴雨径流监测奠定了数据基础。

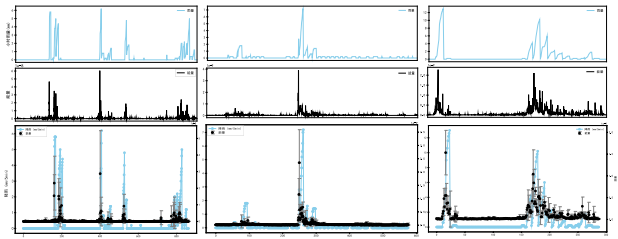


图7. 三次降雨事件的降雨量和能量时间序列图（从左至右分别是 2025 年 3.3-3.5、2025 年 6.2-6.4 和 2024.11.15 三次降雨事件）

为揭示降雨强度变化对微震能量响应特征的影响,本次研究依据降雨量大小将研究期间的降雨过程划分为无雨(0 mm/h)、小雨(0-10 mm/h)、中雨(10-20 mm/h)和大雨(>20 mm/h)四个强度等级,并统计分析各降雨强度等级下对应时间窗内的地震能量分布特征(如图8所示)。结果表明,在无雨条件下,地震能量整体处于较低量级 1.2×10^{-11} ,能量分布相对集中,箱体范围较窄,表明研究区域背景微震噪声水平较为稳定。当降雨强度由无雨逐渐增强至小雨和中雨等级时,地震能量的中位数及上四分位值均呈现出逐步抬升的趋势,小雨和中雨时处于 4.5×10^{-10} 和 1.7×10^{-9} 量级,同时能量分布范围有所扩大,说明降雨过程开始对地表及河道系统产生扰动,并在微震信号中体现为能量增强。在大雨条件下,地震能量表现出显著增强特征,其能量中位数明显高于无雨及小雨和中雨等级处于 7.4×10^{-8} 量级,同时能量分布的离散程度显著增大。散点分布显示,在强降雨过程中,不同时间窗内的能量响应差异较大,反映出降雨诱发的微震信号具有明显的非稳定性和间歇性特征,总体来看,地震能量随降雨强度增加呈现出明显的非线性增长趋势。

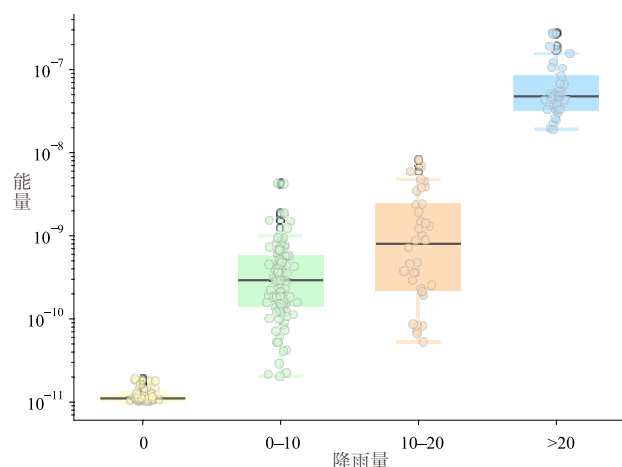


图8 不同降雨量对应的微震信号能量的箱线图

上述结果表明,降雨强度是影响研究区微震能量变化的重要控制因素。弱降雨条件下,降雨主要通过润湿地表和浅层介质,对地表—河道系统的扰动有限,因此对应的微震能量仅表现为

轻微增强。而在中雨及大雨条件下,降雨强度显著增大,地表径流形成并增强,河道水流流量增加以及可能带动河床泥沙运动,从而引发更强烈的微震响应。此外,大雨条件下地震能量分布离散度的显著增大,表明微震响应过程并非简单的线性叠加,而是受到多种因素的共同影响,可能是降雨时空分布不均、地表介质非均质性以及局部汇流过程的差异等。这种复杂性使得在强降雨条件下,不同时间窗内的微震能量响应存在较大波动。但是在部分无雨条件下仍可观测到相对较高的能量值,可能与非降雨因素(如背景环境噪声或局部扰动事件)有关。因此,在未来有关分析中有必要结合时间序列特征及频谱特征,对降雨诱发信号与其他噪声源进行进一步区分,不同降雨强度等级下地震能量统计分布的差异,为利用微震信号反演或表征降雨及水动力过程提供了重要的定量依据。

四、结论

本次研究依托下照村河流进行的监测实验,综合利用微震仪、雷达流量计与雨量计的同步观测数据,系统分析降雨过程中的地震响应特征通过对多次降雨事件的分析,获得了以下主要认识和结论。

通过对不同类型人为活动信号与降雨信号的时域和频域特征进行对比分析,明确了人类活动主要集中在0-30 Hz频段,而降雨诱发的地震信号在中高频段表现更为显著。研究结果表明,降雨事件在40-90 Hz频率范围内引起地震功率谱密度的显著增强,该频段内地震能量随降雨强度增加而明显升高,且与人类活动噪声具有较好的可区分性。这一结果进一步验证了微震信号在高频段对降雨过程具有较高敏感性,为降雨地震特征的识别提供了可靠的频率依据。

通过对降雨时间序列与地震能量时间序列的对比分析发现,在降雨发生及增强阶段,地震能量呈现出同步上升的变化趋势,二者在5分钟尺度上的相关性显著,相关系数普遍较高。这表明降雨过程能够有效激发高频微震信号,微震监测可作为降雨过程中的重要补充监测手段。

参考文献

- [1] 刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,2020,66(5):1334-1348.
- [2] 单云锋,李为乐,周胜森,等.长江上游区域滑坡灾害生态风险评估[J].生态学报,2024,44(24):11437-11449.
- [3] 杨春宝.GPRS技术在水文监测系统中的应用[J].能源与节能,2018,(01):86-87.
- [4] 柯樱海,甄贞,李小娟,等.遥感导论[M].中国水利水电出版社:2019.01.178.
- [5] 柳云龙,田有,冯珏,等.微震技术与应用研究综述[J].地球物理学进展,2013,28(04):1801-1808.
- [6] 李甲振,郭新蕾,巩同梁,等.无资料或少资料区河流量监测与定量反演[J].水利学报,2018,49(11):1420-1428.
- [7] Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3), 239-267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- [8] Helmstetter, A., & Garambois, S. (2010). Seismic monitoring of S é chilienne rockslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. *Journal of Geophysical Research*, 115(F3), F03016. <https://doi.org/10.1029/2009jf001532>.

园林微地形工程施工过程控制与常见问题处理技术研究

孙世宏

腾冲市住房和城乡建设局城市绿化管理所，云南 腾冲 679100

DOI:10.61369/ERA.2026030018

摘 要： 园林微地形是园林绿化工程中非常重要的构成基础，其最终的施工效果直接影响着整体项目的成败。在园林建设当中，合理的地形塑造能够打造出更加层次分明的景观空间，增强园林的艺术表现力，同时对于周边生态环境进行优化。而园林的核心功能就在于为人们提供一个兼具休闲娱乐的自然场所，其工程体系涵盖了多个环节，如地形改造、绿化栽植和建筑营造等，每一个环节都承载着对于自然的诗意改造以及精神追求。基于此，在本篇文章中，也会就园林微地形工程施工过程控制中常见的问题进行分析，并且探讨相应的解决技术，希望能够为相关工作人员提供一定的帮助。

关 键 词： 园林工程；微地形；问题处理

Research on Construction Process Control and Common Problem Handling Techniques for Garden Micro-topography Projects

Sun Shihong

Urban Greening Management Institute, Housing and Urban-Rural Development Bureau of Tengchong City, Tengchong, Yunnan 679100

Abstract： Garden micro-topography serves as a crucial foundational element in landscaping projects, with its final construction outcome directly influencing the overall success or failure of the project. In garden construction, rational topography shaping can create more layered landscape spaces, enhancing the artistic expression of the garden while optimizing the surrounding ecological environment. The core function of a garden is to provide a natural setting for both leisure and entertainment, encompassing multiple aspects of the engineering system such as topography modification, green planting, and architectural construction, each carrying poetic transformation of nature and spiritual pursuit. Based on this, this article will analyze common issues encountered in the construction process control of garden micro-topography projects and explore corresponding solutions, aiming to offer assistance to relevant personnel.

Keywords： garden engineering; micro-topography; problem handling

引言

园林地形是承载水体、道路、植物包括建筑以及小品等重要要素的基底，同时也是整个空间体系在打造时的基础骨架，微地形则指的是在平坦的基底上面，根据天然的山水意象或者是人工匠心所打造出来的起伏，并且缓和且富有相当韵律的地面形态，合理且巧妙的对于微地形进行利用包括处理就能够营造出更加趋向于优美且细腻的景观层次。同时，在一定程度上也能够强化整个园林的艺术表现力，使空间可以在有限的尺度当中展现出无限的意境。

一、园林微地形施工的重要性

（一）生态功能的展现

园林微地形通过人工塑造的方式打造出来一定的起伏形态可以显著的改善区域小气候包括水文循环，以北方城市为例，在冬季北方城市的西北风是比较强劲的，而合理的设置好高起地形则能够有效阻挡冷空气，同时形成背风暖区。在夏季则可以通过打造凹地来引导通风，降低热导效应。微地形的坡向差异，例如南坡、西坡可以有效的提升地表温度1℃到3℃左右，延长植物的生

长期，对于喜温物种来说，能创造出非常适宜的生态环境^[1]。更为重要的一点是，地下的起伏可以增强地表径流的渗透性，减少地表出现积水的概率，同时提升30%以上的雨水下渗率，有利于直接缓解城市的内涝压力。经研究表明，同等面积条件下，微地形绿地的蓄水能力相较于平地来说，能提升25%到40%左右，其土壤的持水性包括植被根系网络，能够构成天然的海绵体^[2]。

（二）景观价值的展现

微地形是非常重要的展现园林空间美学的载体，其高低起伏直接打破了传统平面布局所产生的单调性，能够构建出更加丰富

的视觉层次包括空间序列，通过障景、夹景包括对景等一系列传统的造园手法，再利用地形引导视线的焦点，就能够将景观节点的叙事性强调出来，微地形的曲线轮廓包括等高线变化可以形成非常自然的天际线和林缘线，直接增强景观的动态韵律感。如在石家庄的公园当中就设计出了龟背型微地形，这样不仅能够有效提升视觉丰富感，同样通过光影的变化，例如晨昏时分所产生的明暗对比，强化了整体空间的沉浸感，其可塑性相较于传统的硬质铺装要明显的更加优越，可以和植物、水体包括构筑物等形成有机融合^[3]。



腾冲西山坝街角绿地微地形效果

（三）功能作用的展现

微地形所展现出来的不仅是一种审美，更是一种非常重要的功能组织，通过地形的高差就能够自然的把功能区域划分出来，如缓坡更加适合使用为休憩草坪，而凹地可以形成更加私密的小型水景或者是庭院，台地则更加适合设置观景平台或者是儿童活等区域。不仅如此，微地形还能够有效的对于人流进行引导，如坡道跟台阶的自然设计就能够引导游客流向核心性的景点，避免存在着路径混乱的情况。而“之”字形的步道则能够有效的降低坡度，同样也可以延长游览的路径，提升游客的停留时间。此外，地形也能够隐藏服务设施，例如排水沟或者是管线井等，让整体空间变得更加趋向于整洁化，真正的实现功能及景观的现代化设计理念。



腾冲西山坝带状公园微地形与绿道结合的效果

二、微地形的处理原则

（一）科学造景

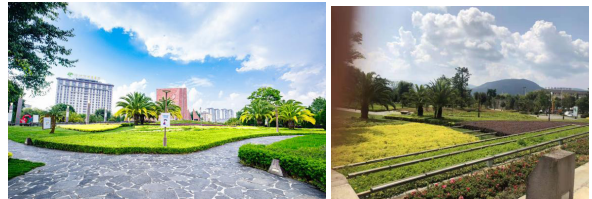
在针对于微地形进行设计时，核心就在于精准的形态控制，而并非规模化的堆砌，其价值体现在针对于地形高低、体量包括比例以及尺度的系统性规划，通过更加精细的竖向设计，在有限的空间内打造出富有韵律的景观层次，在宏观尺度上，必须要结合开阔的草坪以及树林、草地等一系列开敞空间，强化整体的水平延展性包括视觉通透感^[4]。而在微观层面上，则需要通过缓坡、台地和洼地等一系列要素的有效融合，营造出垂直方向的空间感变化。



腾冲 - 琿琿中国人口地理分界线主题公园微地形塑造中

（二）以小见大，适当造景

微地形的本质其实就是对空间进行精微调控，在大型场地当中平坦的绿地包括开阔的草坪是打造出恢宏气势的基础，而在本身就有限的空间内，微地形打造则能够成为打破规格并且激活空间活力的核心性手段，通过适当的高度变化以及局部隆起或者是凹陷，就能够在水平和垂直维度上打造出视觉焦点跟空间序列，引导游线包括划分区域以及隐藏视线，其关键就在于适度原则，一定要避免存在过度堆砌所导致的失真现象，必须要以自然的形态语言为准，真正的实现一岗一谷皆成景的有效表达。这种少即是多的设计理念，使微地形能够在非常有限的资源条件下最大化的展现出更加丰富的景观体验维度。



腾冲 - 琿琿中国人口地理分界线主题公园微地形塑造后的效果图

（三）融入自然

在对于微地形进行设计时，必须尊重并且模拟自然地貌，充分的对于场地原有的地形机理和地形特征以及植被分布规律等进行深入的分析，并且顺应自然的坡向以及水脉和整体生态格局，避免存在过度人为的几何化干预，优先选择使用乡土植物群落和本地的土石材料，使整体的人工塑造地形和周边环境能够形成无缝衔接^[5]。而且在设计时必须模仿自然的侵蚀和沉积等一系列过程所形成的缓坡、台地等形态，只有这样才能够超越传统单纯的景观装饰，实现人和自然的深层次对话。

三、园林微地形工程施工过程中的常见问题

（一）水土流失问题

对于微地形施工来说，土方开挖和回填阶段是导致其出现水土流失最为严重的环节，裸露坡面在降雨的作用下很容易形成细沟和切沟，致使表面的肥沃土壤出现大量流失。如果在施工过程中没有完全遵循先拦后填的相关原则，土方顺坡堆积就会很自然形成汇水通道，直接加剧了径流的冲刷，表土在剥离之后，若未及时做到回覆或者是覆盖，地表植被的根系固土功能则会完全丧失，土壤的抗蚀能力会出现明显骤降。一旦地形坡度的整体设计出现不合理或者是未配套对应的工程防护措施时，其侵蚀风险就会呈现指数级上升，这种问题如果未在施工初期进行强烈干预，不仅会导致出现资源浪费现象，更有可能导致引发下游排水系

统的淤塞以及植物基质养分匮乏等连锁反应，直接削弱了整体景观生态功能包括后期的维护效率^[6]。

（二）坡面失稳与坍塌问题

坡面坍塌问题有很高的概率是发生在地形塑造完毕之后的养护期，其主要的诱因在于工程管理缺陷，例如坡脚深挖导致破坏了天然的支撑结构，导致上部土体失去抗滑能力，最为常见的直接原因就是排水系统存在着滞后，施工导致雨水持续渗入坡体，软化了黏性土层，直接降低了其抗剪强度。其次是压实度控制失效，使得土体内部形成了大量的空隙和弱面，一旦遇到水之后，就会产生深陷性的破坏。而且在某些微型地施工当中，为了追赶工期会选择使用一次性堆砌，而并不是分层碾压，这也进一步的加剧了结构不均问题。这种问题具备着一定的隐蔽性和滞后性，通常在施工后的1个月到3个月内突发，后期的修复成本要远超预防投入。

（三）植物成活率低问题

通常情况下，在园林微地形工程施工中出现植物大面积死亡会被判定为品种不适，但实际上出现这种情况的原因多数是来源于根区长期积水所导致的生理窒息，如果底层的土体并没有做好透水处理或者是回填土混入了大量的粘土以及建筑垃圾就会形成隔水层，导致水分下渗出现明显阻碍。植物根系长期处在厌氧环境条件下，就会产生乙醇中毒，主要表现为叶片的黄化以及新梢枯死等，而且土壤的板结也会进一步的恶化土壤透气性，在容重超过每立方米1.4g以及整体孔隙度低于40%时，植物的根系伸展会受到明显阻碍，微生物活性也会受到抑制，最终形成排水不良—缺氧—病害—死亡的恶性循环，这种问题也存在着明显滞后性，基本上是在景观打造栽植后的6个月到12个月集中爆发，经常会被误认为是养护失误问题^[7]。

四、园林微地形工程施工过程当中控制与常见问题的处理技术

（一）坡面稳定性加固技术

对于园林微地形工程施工来说，坡面的稳定性加固是非常重要的环节之一，对于坡面进行施工时可以选择使用植生毯+格宾网的复合体系，实现协同应用。植生毯在施工时需要严格执行三步法，首先，对于坡面进行有效的清理，并且每平方米施有机肥25g到30g，沿着坡顶和坡脚开挖30cm到50cm的固定沟嵌入毯体，并且选择使用U型钉紧固，从上到下进行铺设，搭接区域需要超过20cm，坡脚覆盖土体镇压。而格宾网在进行应用时，本身属于结构层，选择使用80×100mm的网眼即可，填充粒径需要控制在80到200mm，密实度需要超过90%。石笼按照品字形进行堆砌，层间错缝连接位置以双股钢丝10cm到15cm左右的间隔进行绞合利用，二者协同应用就能够实现根系固土—网笼承重—石料挡水的三维稳定，植被覆盖率12个月内能够达到85%以上^[8]。

（二）排水系统的维护技术

在园林微地形工程施工当中，各种水景的打造也就意味着必

须要做好整个体系的排水系统的维护，而对于排水系统来说，最容易出现的问题就是堵塞，工作人员必须要做到依据堵塞情况分级治理。在进行明沟清淤时，一定要建立季度巡检机制，派遣专业工作人员负责关闭上游水阀，并且清除落叶以及塑料等不同杂物，同时利用高压水枪对于沟壁和底部进行清洗，将出现的淤泥运送到堆肥点。对于滤网进行安装时，也必须要严格符合相应标准，在排水口包括集水井位置可以设置不锈钢或者是HDPE滤网，每2个月到3个月需要拆洗一次。而如果存在着透水铺装堵塞问题的话，则主要是因为细颗粒和园林落叶堆积所导致的，在这时，负责维护的工作人员就需要每月展开吸尘式清扫，每半年利用高压反冲洗，也可以选择铺装层下5cm到10cm左右级配的碎石反滤层，在实现了体系化的排水系统维护之后，整体的园林透水系数能够得到有效的稳定。

（三）压实度的标准化控制技术

土石方的压实对于最终土层的整体稳定性会产生非常直接的影响，在施工的过程当中，一定要精准的把控好土壤的含水量，因为土壤过于干燥或者是过于潮湿对于最终的压实都是非常不利的^[9]。如果土壤存在过于干燥的问题，则需要在压实之前进行有效的洒水湿润，除此之外，也需要注意在松土的过程当中，必须要做到先轻后重，在展开压实操作时，也需要先从边缘开始向中间进行有效推进和靠拢，确保整个土方的安全性，避免在压实的过程当中由于挤压造成坍塌问题。而且压实度一定要严格的依据《GB/T 50123-2019 土工试验方法标准》来把控，同时也需要根据土壤的不同情况选择合适的压实方式，如细粒土适合使用环刀法，工作人员需要将表面浮土清理干净之后，垂直压入环刀，并且对于干密度进行称重计算，在种植区域上层1米内压实度需要超过0.85，而非种植区域则需要超过0.90。对于粗粒土则适合使用灌砂法，工作人员需要在施工点挖设标准体积坑，并且灌入标准砂，通过砂重差来对于密度进行计算，选择利用8t到12t振动压路机碾压6遍到8遍，将最终的含水率控制在最优值，上下浮动不能超过2%，所有的检测数据必须要形成监理签字台账，未达标区域则必须返工。

（四）土壤板结改良技术

通过有效的土壤改良就能够更好的提升园林微地形工程施工植物的成活率，在进行土壤板结改良时，需要实施三位一体改良，分别为物理、生物、化学改良。首先是物理改良，工作人员需要利用深松机或者是旋耕机对于土壤进行松土，深度需要超过30cm，打破犁底层。其次是生物改良，每平方米可以施3kg到5kg的腐熟有机肥，或者是10L到15L的泥炭土，将土壤有机质提升到3%以上。最后是化学改良，酸性土可以选择使用石灰，碱性土则可以使用硫磺粉或者是腐殖酸改良剂，通过科学的土壤改良技术，植物成活率能够从原有的58%左右跃升到92%^[10]。

五、结束语

综上所述，园林的最大功能就在于可以为人们提供一个趋向于休闲娱乐的自然环境，有效的强化人和自然之间的协调发展。而对于园林工程来说，其中微地形的处理具有着非常重要的意

义，针对于园林微地形进行有效的把控是确保整体园林能够实现可持续发展的必然要求。因此，针对于园林微地形工程施工过程中的常见问题进行分析，并且加强技术处理是非常具有现实意义的，只有这样才能更好的促进我国园林事业的长远发展。

参考文献

[1] 唐粤. 园林工程中微地形塑造对排水效率的影响 [J]. 花卉, 2025(15):52-54.DOI:10.3969/j.issn.1005-7897.2025.15.018.

[2]Inoue Takuo, Manabe Rikutaro, Murayama Akito et al.Landscape value in urban neighborhoods: A pilot analysis using street-level images[J]Landscape and Urban Planning, 2022, 221

[3] 高峰, 刘杰. 园林景观设计中的微地形营造技术探究 [J]. 花卉, 2025(12):37-39.DOI:10.3969/j.issn.1005-7897.2025.12.013.

[4] 宋勇飞. 微地形在园林景观施工中的应用分析 [J]. 农业灾害研究, 2024, 14(10):49-51.DOI:10.3969/j.issn.2095-3305.2024.10.017.

[5] 罗霄. 微地形景观设计在市政园林绿化工程中的应用 [J]. 花卉, 2024(24):67-69.DOI:10.3969/j.issn.1005-7897.2024.24.023.

[6]Zhu Guofeng, Sang Liyuan, Zhang Zhuanyia et al.Impact of landscape dams on river water cycle in urban and peri-urban areas in the Shiyang River Basin: Evidence obtained from hydrogen and oxygen isotopes[J]Journal of Hydrology, 2021, 602

[7] 于景春, 毛腾飞, 王渝飞. 微地形塑造在园林景观的应用分析 [J]. 建筑工人, 2023, 44(4):47-49.DOI:10.3969/j.issn.1002-3232.2023.04.018.

[8]Lewis Alan C., Khedun C. Prakash, Kaiser Ronald A.Assessing Residential Outdoor Water Conservation Potential Using Landscape Water Budgets[J]Journal of Water Resources Planning and Management, 2022, 148(6).

[9] 杨利荣, 王彩霞. 微地形景观在园林绿化工程中的应用 [J]. 模型世界, 2023(7):40-42.DOI:10.3969/j.issn.1008-8016.2023.07.014.

[10]Michalczuk Jerzy, Michalczuk Monika Rural parks as refugia of cavity nesters in an agricultural landscape: Which habitat features are important for cavity dwellers?[J] Landscape and Urban Planning, 2022, 223

工地能耗物联网实时监测技术应用研究

葛光杰, 方献林

供销粮油武汉有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2026030019

摘 要 : 伴随建筑业绿色低碳转型持续加深, 施工现场能源消耗管理已变成增强工程生态友好性的重要抓手, 依赖物联网实时感知技术, 可对施工全周期用能状况开展动态采集、即时回传与智能解析, 为精细化能耗管控给出坚实技术保障。本文选取典型工程项目为实例, 深度剖析工地能耗物联网监测体系的核心模块、现场落地过程中的主要技术瓶颈及相应工艺改良方案, 凭借技术集成应用跟施工方法迭代升级, 有效增进大型用能设备的监控精度与管理效能, 为建筑领域节能管理实践给出切实可行的技术范式跟实操参照。

关 键 词 : 工地能耗; 物联网监测; 实时管控

Research on the Application of Real-Time Monitoring Technology for Internet of Things in Construction Site Energy Consumption

Ge Guangjie, Fang Xianlin

Gongxiao Grain and Oil Wuhan Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : With the continuous deepening of the green and low-carbon transformation in the construction industry, energy consumption management at construction sites has become a crucial aspect of enhancing the ecological friendliness of projects. Relying on real-time sensing technology of the Internet of Things (IoT), dynamic collection, instantaneous transmission, and intelligent analysis of energy consumption throughout the entire construction cycle can be achieved, providing solid technical support for refined energy consumption control. This paper selects a typical engineering project as an example to conduct an in-depth analysis of the core modules of the IoT-based monitoring system for construction site energy consumption, the main technical bottlenecks encountered during on-site implementation, and corresponding process improvement solutions. Through the integrated application of technologies and iterative upgrades of construction methods, the monitoring accuracy and management efficiency of large energy-consuming equipment are effectively enhanced, offering practical technical paradigms and operational references for energy conservation management practices in the construction field.

Keywords : construction site energy consumption; IoT monitoring; real-time control

引言

建筑施工阶段的能源消耗在全生命周期中占比较高, 且形式多样、管理难度大, 传统管理方式多靠着人工统计, 存在数据延迟、准确度低及包含不全等缺陷, 比较难契合绿色施工与节能监管的实际要求, 物联网技术依赖其感知、传输跟处理的全流程优势, 在工地能耗监测中的应用越来越深度, 可对电能、水能、燃油等多种能源实现准确实时监控。本文依赖某工程项目, 开展工地能耗物联网实时监测技术的应用研究, 着重剖析其核心技术组成及工程实行中的核心瓶颈, 并提出相应的工法改良方案, 以加强工地能耗管理的智能化跟精细化水平, 助推绿色施工技术的实际应用, 为类似工程给予技术参照。

一、工程概况

本工程系规模宏大的住宅集群建设项目, 总占地规模达28.6万平方米, 包含12座高层住宅、3座附属商业楼宇及1处地下停车设施, 项目整体建设历时36个月, 施工高峰阶段现场在岗人员近850名, 投入大型施工装备42台(套), 含塔吊8台、人货两用梯6台、混凝土泵送设备4台、柴油发电机组2台, 以及数量可观

的中小型电动机具。工程施工中的能源消耗主要囊括电力、柴油跟自来水三类, 电力主要用于驱动施工机械、现场照明及临时办公; 柴油主要供应塔式起重机与柴油发电机等大型装备, 自来水则用于混凝土养护、降尘及生活需求, 为实现准确能耗管理, 项目引入物联网实时监测技术, 搭建包含全工地的能耗监控网络, 对各类用能数据实行动态采集与分析。工程场地地形平缓, 施工区有多栋在建建筑, 对监测信号传输造成一定遮挡, 加之现场大

型设备启停频繁，易引发电磁干扰，影响监测系统稳定运行。

二、能耗物联网实时监测核心技术架构

（一）感知层传感器选型配置

感知层构成能耗信息获取的根基，关键在于依据实际需求专业遴选并部署各类能耗监测装置，针对该工程的详细用能特征，电能计量使用三相电子式多功能电能表，其计量准确度达0.5S级，额定电压测量区间为0至400伏，额定电流包含0至600安，具备RS-485通信功能，可实时获取电压、电流、有功功率及累计电能等核心参数。柴油能耗监测使用容积式流量传感器，精度达±0.5%，量程为0-50L/min，有着抗振跟耐高压性能，适用于柴油发电机、混凝土输送泵等设备的燃油管路，自来水能耗监测则选用2级精度超声波水表，量程0-100m³/h，非接触式测流，规避了传统机械水表的磨损缺陷。传感器布设点位依据现场施工总平面图统筹规划：电能表嵌入各作业区临时配电箱，燃油流量传感器串接于机械燃油输送管道；超声波水表则设置于主供水管网的核心支路节点，以保障各类能源消耗数据的全域采集与准确监控。

（二）传输层通信网络构建

传输层负责将感知层采集的信息传送至平台层，依据某工程现场实际条件，建立了“LoRa跟4G协同”的复合通信体系，LoRa使用扩频调制机制，有着包含范围广、抗扰性能优、能耗水平低等优势，适用于工地场景中广域分布、低频次的的回传，典型通信半径为3至5公里，工作频段位于470-510MHz，且信号可有效穿透施工中建筑墙体等遮挡物。在工地临边地带及无线信号欠佳区域，部署LoRa中继设备以扩展通信覆盖范围，其传输速率介于1200至9600bps之间，支持多跳数据转发，监测信息借助工业级全网通4G DTU模块上传至云端监管平台，理论下行速率超100Mbps，并具备断点续传能力，保障数据回传的可靠性和持续性。传输网络实行分层架构设计，感知层传感器经由RS-485接口接入LoRa终端，后者对采集数据实行整合，并借助4G DTU模块将信息传送至监控平台，建立起“传感器→LoRa终端→4G DTU→监控平台”的端到端通信途径。

（三）应用层功能模块实现

应用层为用户集成能耗监测与调控服务，周密对接工程施工管理实际需求，包含实时追踪、统计解析、异常告警及报告编制四项核心能力，实时追踪模块依赖可视化界面动态表现各测点能耗信息，借助柱状图、折线图图表清晰折射变化规律，并支持按地理分区、设备类别及时间粒度灵活筛选。统计解析模块可自动汇总累计量、均值、极值等指标，横向对比不同施工周期的能耗表现，准确定位高耗能时段与重点用能设备，系统依赖预设的能耗警戒线实行异常告警，一旦实测数值突破该界限，即刻经由短信通知及平台界面提示双通道发布预警，全程响应时长严格控制在5秒以内；报表模块可按需生成标准化能耗分析报告，其格式完全契合《建筑工程绿色施工评价标准》规范，满足项目能耗绩效评估与审核需求。表1数据显示，所选传感器均有着优异的测量准确度与匹配的测量范围，可以满足该工程对各类能耗的监测要求，其中，0.5S级三相电子式多功能电能表可保障电能数据的精确获取，容积式流量传感器凭借抗振性能适应施工现场杂工况，超声波水表使用非接触式测量有效延长设备寿命，且所有传

感器均配备RS-485通信接口，便于与传输层设备实现兼容连接。

表1 某工程能耗监测感知层传感器技术参数表

传感器类型	测量精度	测量范围	通信接口	适配能耗类型	安装位置
三相电子式多功能电能表	0.5S级	电压 0-400V；电 流0-600A	RS-485	电能	各区域临时配电箱
容积式流量传感器	±0.5%	0-50L/min	RS-485	柴油	设备燃油供给管路
超声波水表	2级	0-100m³/h	RS-485	自来水	主要供水管路分支处

三、能耗监测技术工程实施技术难题

（一）传感器安装环境适应性不足

某工程项目执行期间，传感器对现场安装条件的适应能力偏弱，临时配电箱内部空间局促，强电线路密集，让三相电子式多功能电能表易受电磁干扰，部分采集数据发生波动，峰值偏差达5%，柴油动力设备燃油管路振动强烈，容积式流量传感器受其影响，振动经管路传导至传感元件，削弱测量准确性；尤其在混凝土输送泵运行工况下，振动频段集中于15-20Hz，造成燃油消耗量监测值显著失真。施工场地供水系统压力波动显著，早、晚用水高峰时段压力峰值达1.2MPa，超过超声波水表允许工作压力上限，引发仪表渗水故障，干扰计量监测作业，除了上述所说，现场扬尘浓度偏高，让传感器表面积聚大量颗粒物，遮蔽重点检测部件，加重测量误差。

（二）传输网络信号穿透性差

信号穿透能力不足是影响监测数据可靠传输的重点瓶颈，该工程现场分布着多座正在建设的楼宇，其主体使用高密度钢筋混凝土框架体系，显著削弱LoRa无线信号强度，在楼宇内部及相邻楼宇间，信号覆盖范围急剧收窄至50米以内，让数据不容易稳定回传。除了上述内容以外，现场密集部署的塔吊、施工电梯等大型金属构架设备更深一步造成电磁遮蔽，激化局部区域信号衰减跟盲区形成，地下车库深度达3米，4G信号显著减弱，强度仅相当于地表的三成，让能耗数据上传滞后，最久延迟30秒；另外，现场电气设备运行引发的电磁干扰亦影响通信质量，造成数据丢失，最高丢包率可达8%。

（三）海量数据处理实时性不足

监测点规模扩大后，海量数据的实时处理能力明显受限，某项目布设120处监测终端，每10秒采集一次信息，单日生成数据逾103.68万条，目前系统依赖云端集中式架构实行接收跟运算，峰值时段服务器负载过高，响应延迟逾10秒，比较难支撑能耗指标的即时解析与闭环反馈。施工现场偶现异常数据，譬如传感器失灵引发的突变值、通信链路引入的误码等，目前过滤机制仅可识别显著越限的离群点，不容易准确辨识微幅异常波动，让部分冗余数据混入分析流程，挤占系统计算资源，进而削弱整体处理效能。

（四）监测系统与施工工序协同性差

监测系统跟施工流程协同不足，削弱了监测的连续性与完整性，某工程工序繁杂，各阶段所用能耗设备类型及运行状态差异显著，而监测参数没能及时匹配工序变动，主体结构施工期间，塔式起重机、混凝土输送泵等设备高频运转，能耗激增，但系统

依旧沿用基础施工阶段的能耗阈值，让异常预警误报频发，误报率高达12%。装饰装修阶段施工区域划分更趋细化，既有监测点覆盖范围不容易顾及新增作业面的能耗监控需求，形成监测空白区；同时，现场设备频繁挪移、管线调整等作业易致传感器及传输装置遭受撞击或损毁，让系统局部功能异常，月均发生3至5起设备故障，严重干扰数据采集的连续性。

四、能耗监测技术工法优化策略

（一）传感器安装工法优化

为增强传感器在繁复环境中的适配能力，从固定结构与防护方针两方面开展工艺精进，针对三相电子式多功能电能表，实行电磁屏蔽安装工艺：外部加设镀锌钢板屏蔽罩（厚度2mm），接地电阻严格控制于4Ω以内，有效抑制强电线路电磁干扰，同时，在临时配电箱内预留专用安装位，尺寸不小于200mm×150mm×100mm，保障电表跟强电导线间距≥10cm。针对容积式流量传感器，实行减振安装工艺：在传感器与燃油管路间设置刚度5-8 N/mm、阻尼比0.2-0.3的橡胶隔振接头，以高效衰减管路振动；同时于传感器支撑架底端配置弹簧隔振装置，显著削弱振动传递效应。超声波水表施工中应用压力调控工艺：前端配置额定压力1.6MPa、可调区间0.1-1.2MPa的减压装置，保障其运行压力处于规范限值内；接口部位加装密封垫圈以杜绝泄漏，传感器须每月清灰保养，维持测量部件性能稳定。

（二）传输网络增强工法优化

为改良传输网络信号穿透力不足的状况，实行“中继节点部署+信号强化”协同改良方略，于在建楼宇间的信号弱包含区域及建筑内部，专业配置LoRa中继设备，使用壁挂方式安装，高度设定为3至5米，相邻设备间距不超过300米，建立无缝衔接的信号包含体系。针对钢筋混凝土结构引发的信号衰减，在墙体预设专用传输途径，内穿低损耗同轴电缆，其衰减率控制在0.5分贝每百米以内，显著增强信号越障能力，在地下车库区域部署4G信号增强装置，使用分布式天线系统，将天线布设于车库顶部，间隔20米，使室内4G信号强度达到地面水平的80%以上，有效减少数据传输时延。同时改良传输设备通信频段，将LoRa工作频率调整至490MHz，以规避施工电气设备产生的电磁干扰，显著减少数据丢包率，经改良后，LoRa通信包含距离超1000米，4G传输时延低于5秒，数据丢包率不足1%。

（三）数据处理机制优化

为解决大规模数据实时处理能力欠缺的考验，设计“边缘计算跟云平台协同”的数据处理架构，现场布设工业级嵌入式边缘节点，搭载Intel Core i7-8700 CPU、16GB内存及512GB固态硬盘，

边缘计算节点接收感知层传来的原始信息，在本地实时执行解析、校验及筛选操作，使用改良后的卡尔曼滤波方法剔除异常值，该方法凭借自适应调节增益系数，显著增强对微小异常波动的辨识能力，使异常识别准确率突破95%。处理后的高质量数据经由4G网络传送至云端平台，后者承担数据归档、统计建模与可视化报表输出等重点任务，使用分布式数据库架构，将信息分散部署于若干服务器节点，显著增强数据存取及检索效能，处理响应时延压缩至3秒内；同时实行任务分级调度机制，赋予实时告警信息最高执行优先级，保障能耗异常状况可以迅速识别与响应。

（四）监测系统协同工法优化

针对监测体系同施工流程匹配度不足的现状，建立监测体系随施工阶段动态改良的协同方法，施工筹备期，依据工程进度安排，编制监测参数动态调控方案，依据各阶段用能特征，预先设定能耗警戒值、数据采集频次等指标，主体结构施工期间，塔吊、混凝土泵车等大型机械的能耗警戒值上调30%，数据采样间隔缩短至5秒；装饰装修阶段，则下调大型设备警戒值，同步加强手持式电动工具的监测权重。借助部署便携式移动监测终端补充监测空白区域，该终端内置高容量电池，连续工作时长不少于8小时，兼容LoRa跟4G双通信制式，可随施工场地动态迁移布设，同步建立常态化巡检维保机制，由专职技术员每周开展全包含检查，重点核查传感器、数据传输单元的安装稳固性、运行效能及网络连通性，保证故障早识别、快处置。经实行上述改良方针，监测系统同施工流程的配合度明显增强，异常警报误触发比例降至2%以内，单月设备故障频次稳定控制在1次以下。

五、结语

本研究依赖详细工程项目，系统考察了施工现场能源消耗物联网实时监控技术的实行途径，依据对其重点体系架构的解析，厘清了感知、传输、平台及应用四层结构中的核心技术指标跟部署规范，针对工程建设中传感器安装环境适配性欠佳、通信网络信号穿透能力薄弱、大数据分析实时响应滞后、监测平台跟施工流程匹配度不高等技术瓶颈，建立了包含传感器布设工艺改良、通信链路强化、数据分析机制升级及系统协同管控改良的融合解决方案。实际应用证实，精进后的能耗物联网动态监测技术可对施工现场多类能源消耗实行高精度、高稳定性跟踪，显著增强能耗管理的智慧化程度，该成果为施工现场能耗物联网实时监控技术的落地实行给予了可靠的技术方案与工艺参照，有利于助推建筑工程绿色建筑能力升级，削减施工期能源消耗，助力行业绿色低碳转型；后续可加强监测信息与进度管理、成本控制的协同应用，增强能耗管控的整体效能。

参考文献

[1] 卢朋, 邓凯, 王榕樽, 等. 基于物联网技术的火电厂设备实时监测研究 [J]. 智能物联技术, 2025, 57(06): 38-41. DOI: 10.26921/j.cnki.2096-6059.2025.06.009.
[2] 王阳, 胡美臣, 邓骞帆, 等. 基于物联网技术的智慧农业灌溉系统的设计与实现 [J]. 南方农机, 2025, 56(23): 46-49.
[3] 汤轩轩, 吴有龙, 张威, 等. 新能源汽车智能车位管理与自主充电系统 [J]. 物联网技术, 2025, 15(23): 59-61. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2025.23.012.
[4] 盛连才. 物联网传感器在建筑设备实时监测系统中的数据融合技术 [J]. 信息系统工程, 2025, (11): 20-23.
[5] 陈重辰, 区永通, 徐健, 等. 基于物联网的电力设备监测管理运行方法设计 [J]. 粘接, 2025, 52(11): 280-283.

装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能 及快速施工技术研究

王祥海

广西桂建工程质量检测有限公司, 广西 钦州 535000

DOI:10.61369/ERA.2026030020

摘 要 : 本文围绕装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能及快速施工技术展开系统研究, 从连接介质、受力形式、构造位置三个维度对连接节点进行分类, 剖析灌浆套筒、预应力拼接、榫卯连接等典型节点的构造设计要点, 探究不同连接方式下节点的传力机理与破坏模式。基于 ABAQUS、ANSYS 等有限元软件构建节点数值模型, 通过足尺或缩尺试验完成模型验证与校准, 采用控制变量法开展参数化分析, 明确混凝土强度、灌浆料等级、套筒长度、灌浆密实度等关键参数对节点承载力、刚度等力学指标的影响规律。从精密预制构件生产、高效吊装与拼装、连接节点快速施工工艺三个层面构建快速施工技术体系, 形成模具精准控制、智能化定位拼装、自动化灌浆张拉等关键技术方案。

关 键 词 : 装配式混凝土桥梁; 连接节点; 力学性能; 传力机理

Research on Mechanical Properties and Rapid Construction Techniques for Connection Joints in Prefabricated Concrete Bridge Structures

Wang Xianghai

Guangxi Guijian Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Qinzhou, Guangxi 535000

Abstract : This paper presents a systematic study on the mechanical properties and rapid construction techniques for connection joints in prefabricated concrete bridge structures. The connection joints are classified based on three dimensions: connection medium, stress form, and structural location. The design essentials of typical joints, such as grouted sleeve connections, prestressed splicing, and mortise-tenon connections, are analyzed. The force transfer mechanisms and failure modes of joints under different connection methods are explored. Numerical models of the joints are constructed using finite element software such as ABAQUS and ANSYS, and the models are validated and calibrated through full-scale or scaled-down experiments. Parametric analysis is conducted using the controlled variable method to clarify the influence of key parameters, including concrete strength, grout grade, sleeve length, and grout compactness, on the mechanical properties such as load-bearing capacity and stiffness of the joints. A rapid construction technique system is established from three aspects: precise prefabricated component production, efficient lifting and assembly, and rapid construction techniques for connection joints. Key technical solutions are developed, including precise mold control, intelligent positioning and assembly, and automated grouting and tensioning.

Keywords : prefabricated concrete bridge; connection joint; mechanical property; force transfer mechanism

引言

随着装配式技术在中小跨度桥梁中的广泛应用及向大跨度桥梁领域的延伸, 结构整体性能与施工效率的核心制约因素逐渐聚焦于连接节点。作为预制构件传力与协同工作的枢纽, 连接节点的力学性能直接决定桥梁结构的承载能力、刚度、耐久性及抗灾能力, 其施工效率则直接影响工程建设周期与综合成本, 因此成为装配式混凝土桥梁技术研究的核心与难点。当前装配式混凝土桥梁连接节点形式日趋多样, 湿连接、干连接及半干连接各有优劣, 不同节点的构造设计、传力机理及破坏模式存在显著差异, 在复杂荷载与施工偏差的耦合影响下, 易出现界面剥离、灌浆不密实、螺栓失效、节点开裂等问题, 严重时可能引发结构安全隐患。同时, 现有研究多侧重单一类型节点的力学性能分析或孤立施工工艺优化, 对节点力学性能与快速施工技术的协同适配性研究不足, 数值模拟模型的工程适用性有待进一步验证, 关键设计参数与施工工艺的量化匹配关系尚未完全明确, 难以满足装配式桥梁高效、安全建设的实际需求。为破解上述难题, 本文围绕装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能及快速施工技术开展系统性研究。

一、装配式桥梁连接节点类型与受力机理分析

（一）装配式桥梁连接节点的分类

任何一个成功的设计构件都需要合理的选择材料，充分利用材料的性能，使各种材料各尽其能、协调工作、充分发挥结构的整体作用^[1]。装配式混凝土桥梁连接节点按连接介质可分为湿连接、干连接与半干连接三类，湿连接依赖胶凝材料，整体性与刚度大但施工慢，多用于主梁与桥墩；干连接通过机械咬合或螺栓连接，施工快捷可拆卸，适用于临时工程但整体性较弱；半干连接结合两者优势，兼顾效率与性能，常见于中等跨度桥梁。按受力形式分为受弯、受压、受拉及复合受力节点，其中主梁多承受复合受力，桥墩基础则以受压受弯为主。按构造位置则可分为主梁间、主梁与桥墩、桥墩与基础及附属结构连接，需针对不同位置的受力需求进行针对性设计。

（二）典型连接节点构造设计

典型装配式桥梁连接节点的构造设计需满足受力传递、施工便捷性与耐久性要求，结合不同节点类型的性能特点优化构造细节^[2]。灌浆套筒连接作为湿连接核心，通过预埋套筒灌注高强料利用粘结传力，需控制套筒尺寸与锚固深度以确保密实，常用于主梁纵拼及桥墩连接；预应力拼接节点作为干连接代表，通过预留孔道穿束张拉依靠挤压力传力，需合理设置孔道与锚固以满足抗裂及刚度要求，适用于大跨度梁体拼接；榫卯连接则通过端头榫槽咬合定位并辅以灌浆或螺栓加固，需优化咬合尺寸确保抗剪抗扭及拼装便捷，多用于中小跨板桥连接^[3]。

（三）节点传力机理与破坏模式分析

装配式桥梁连接节点的传力机理取决于连接方式与构造设计，核心是实现构件间力的有效传递，确保结构整体受力协调^[4]。湿连接依靠灌浆料与钢筋的粘结及材料强度传力，需防范界面剥离；干连接通过接触挤压或机械连接（如预应力、螺栓）传力，关键在于摩擦系数及螺栓布置；半干连接则结合两者优势^[5]。节点破坏模式包括粘结剥离、钢筋屈服、灌浆压溃、螺栓剪切及滑移等，受构造、材料及荷载影响。通过优化构造、提升材料性能及控制施工质量，可确保节点传力可靠与结构安全。

二、连接节点数值模拟与参数化分析

（一）有限元模型的建立

基于 ABAQUS、ANSYS 等有限元软件构建装配式桥梁连接节点数值模型，需结合节点构造与受力特性，合理选取单元类型、材料本构、边界条件及荷载施加方式，保障模型贴合实际力学行为^[6]。单元类型上，预制混凝土构件与灌浆料用 C3D8R 等实体单元，钢筋以 T3D2 桁架单元通过 Embedded 技术嵌入，螺栓、套筒等金属构件用实体单元。材料本构需匹配工程性能，混凝土与灌浆料采用损伤塑性模型，输入抗压、抗拉强度等参数考虑损伤；钢筋用双线性弹塑性模型模拟屈服后塑性变形；金属连接件采用理想弹塑性模型考虑塑性破坏^[7]。边界条件与荷载施加还原实际场景，按节点位置设定约束，分级施加轴力、弯矩等荷载或位

移加载至节点破坏，获取完整荷载 - 位移曲线。模型构建中简化次要细节以减计算量，同时保证核心受力部位精度。

（二）模型验证与校准

为保证数值模型可靠性，需结合室内试验数据对其验证校准，将模型计算值与试验值的误差控制在 10% 以内^[8]。试验需采用与数值模型一致的节点构造、材料参数及加载方案，制作足尺或缩尺试件，通过静力、疲劳加载获取节点承载力、刚度、裂缝发展及破坏形态等数据。模型验证从三方面开展，对比极限承载力，调整混凝土损伤因子、钢筋粘结强度等材料本构参数；拟合荷载 - 位移曲线，优化摩擦系数、粘结刚度等界面接触参数，确保曲线各阶段趋势一致；对比裂缝分布与破坏位置，调整单元网格精度并修正应力集中区域构造模拟，使破坏模式与实际吻合^[9]。校准后的模型需能精准预测节点在不同荷载工况下的力学响应，为后续参数化分析与优化设计提供可靠支撑。若计算结果与试验数据偏差较大，需排查单元类型、边界条件、材料参数等环节并修正，直至满足验证标准。

（三）参数化扩展分析

基于验证数值模型，开展参数化扩展分析，明确关键设计参数对连接节点力学性能的影响规律，为节点优化设计提供依据^[10]。参数选取结合工程实际与构造特点，聚焦材料性能（混凝土 C40-C60、灌浆料 CGM-100 至 CGM-150、钢筋 HRB400-HRB600）、构造尺寸（套筒长度 200-400mm 等）、施工参数（灌浆密实度 80%-100% 等）三类，采用控制变量法获取节点力学性能指标。结果显示：混凝土与灌浆料强度提升显著优化承载力及刚度（CGM-100 升至 CGM-150 时承载力提升 25%-30%）；套筒最优长度为钢筋直径 18-22 倍，锚固长度需满足构造要求；合理提升预应力张拉值增强整体性，过量易致开裂；灌浆密实度低于 90% 时性能下降明显。据此提出参数合理取值建议，为装配式桥梁节点设计提供量化依据，实现力学性能与经济性协同优化。

三、装配式桥梁快速施工关键技术研究

（一）精密预制构件生产技术

精密预制构件是装配式桥梁快速施工与质量管控的核心基础，其生产精度直接决定现场装配效率与节点力学性能。基于工厂标准化生产模式，构建模具精准控制 - 原材料质量管控 - 生产过程智能化监测的精密生产技术体系。模具采用模块化可调式高强度钢结构，经三维扫描检测将尺寸偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内，同步预留构件收缩变形量；原材料选用高强高耐久混凝土（优化配合比，掺入矿物掺合料与高效减水剂），钢筋、套筒等预埋件经进场力学性能检测，灌浆料采用早强高强微膨胀型，初凝 4-6 小时、终凝不超 12 小时；生产环节依托自动化布料与变频振动设备保障混凝土浇筑密实度，通过无线传感器监测养护温湿度，采用蒸汽或恒温养护加速强度达标，构件出厂前经三维扫描、回弹检测验收并标注定位标识，为现场精准装配提供支撑。

（二）高效吊装与拼装技术

高效吊装与拼装技术是提升装配式桥梁施工效率的核心，需

结合构件重量、跨度及现场工况优化方案与工艺，实现构件精准对接、快速固定。吊装设备需按预制构件类型（主梁、桥墩柱等）选用塔式起重机、汽车起重机或架桥机，配套专用吊具并增设缓冲垫，采用双点或四点吊装方式，避免构件受力不均开裂，保障吊装平稳与构件表面质量。拼装定位采用智能化定位+人工微调模式，依托GPS、激光测距仪及BIM技术构建定位体系，将轴线偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 、高程偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ ；关键部位预设定位销、榫槽等导向结构，辅以千斤顶、手拉葫芦实时微调，确保对接精准。施工流程采用流水作业，多跨桥梁运用架桥机逐跨拼装技术，实现吊装与拼装同步推进，缩短施工周期。同时需划定吊装警戒区域，配备专职安全员，落实安全防护措施。

（三）连接节点快速施工工艺

针对不同类型连接节点特性，优化施工工艺并研发快速施工技术，实现节点连接高效化、标准化。湿连接节点以灌浆工艺优化为核心，采用高压灌浆设备配合预埋孔道，结合早强型灌浆料与蒸汽养护技术，将施工周期缩短30%以上；以灌浆套筒节点为例，采用0.3–0.5MPa自动化灌浆设备，搭配流动传感器监测灌浆过程，可有效避免空鼓、漏灌问题。干连接节点聚焦螺栓紧固与预应力张拉优化，运用电动扭矩扳手、液压张拉设备等自动化工具提升工效与质量；通过螺栓群同步紧固技术及扭矩传感器，保障螺栓受力均匀、紧固达标；预应力拼接节点采用两端同步张拉技术优化张拉顺序，缩短张拉时间，张拉后及时锚固封锚。半干

连接节点融合干湿连接优势，先以螺栓、定位销等机械连接实现构件快速固定并提供临时支撑，再开展局部灌浆，无需等待灌浆料硬化即可推进后续工序；同步研发便携式灌浆枪、快速定位夹具等专用机具，简化操作流程，降低对人工技能的依赖。

四、结束语

本文针对装配式混凝土桥梁连接节点力学性能与快速施工技术的核心问题，从节点分类、受力机理、数值模拟及施工技术四个维度开展系统性研究，形成了较为完善的理论分析与技术方案。明确了湿连接、干连接、半干连接等不同类型的节点的构造特点与传力规律，厘清了混凝土强度、灌浆料等级、套筒尺寸等关键参数对节点力学性能的影响机制，验证了有限元数值模型在节点性能预测中的可靠性，构建了涵盖精密预制、高效拼装、节点快速连接的一体化施工技术体系，可为工程实践提供直接指导。未来可结合长期性能试验，完善考虑环境因素的节点力学性能演化模型，提升研究成果的长期适用性；聚焦大跨度、复杂工况下装配式桥梁节点的设计与施工技术，拓展研究范围；融合智能化监测技术，开发节点施工质量实时管控与性能长期监测系统，实现设计、施工、运维全生命周期协同优化。后续研究将持续完善装配式混凝土桥梁连接节点技术体系，为交通基础设施高质量建设提供更全面的支撑。

参考文献

[1] 王天. 结构损伤对大跨度铁路钢—混凝土组合桁梁桥力学性能的影响研究 [D]. 兰州交通大学, 2013. DOI:10.7666/d.Y2384693.
[2] 林帮军, 王近兴, 毛力辉, 等. 装配式梁桥三角形钢横梁隔梁栓接节点设计与力学性能分析 [J]. 福建交通科技, 2025(7): 68–73.
[3] 陈晓飞, 熊文, 宋晓东, 等. 装配式桥梁下部结构接头力学特性分析 [J]. 公路, 2022, 67(7): 176–183.
[4] 曹紫龙. 装配式桥梁节点病害与灌浆材料力学性能试验研究 [D]. 河北: 河北大学, 2022.
[5] 陈广飞. 基于不同带肋角钢连接的梁柱半刚性节点力学性能研究 [D]. 湖南: 湘潭大学, 2024.
[6] 史战萍. 桥梁满堂支架节点力学性能研究 [D]. 贵州: 贵州大学, 2016.
[7] 周黎军, 赵启林, 李飞, 等. FRP 轻量化应急桥模块间连接节点力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2024, 53(14): 99–104, 107. DOI: 10.14158/j.cnki.1001–3814.20221615.
[8] 孟祥勇, 王海军, 武加强. 预制系梁与柱式墩连接节点力学性能分析 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(6): 128–131. DOI: 10.3969/j.issn.1001–523X.2024.06.046.
[9] 赵小童. 大跨度钢筋混凝土桥梁施工满堂支架结构力学分析 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2021.
[10] 陈鸿炜, 苏庆田, 吴冲, 等. 空间钻石型钢塔梁柱连接节点力学特性分析 [J]. 结构工程师, 2014(6): 61–66. DOI: 10.3969/j.issn.1005–0159.2014.06.009.

浅谈工程项目成本的控制

李玲

绿春县公共资源交易中心, 云南 红河 661199

DOI:10.61369/ERA.2026030022

摘 要： 随着社会经济高速发展，工程项目成本控制工作越来越重要，它是一项复杂的系统工作，贯穿于投资决策、勘察设计、招投标、项目施工、交工验收等全建设过程，对工程的成本进行管理、控制和监测，旨在预测成本变动趋势，从而确保实际支出符合既定成本目标，真正做到降低造价，提高资金使用效益，显得非常重要。本文作了工程项目成本控制概述，分析了工程项目成本控制的特点和控制原则，从工程项目投资决策、设计阶段、实施阶段、项目后期等几个环节分析提出了工程项目成本控制的办法，并结合工作实践经验提出了工程项目管理成本控制的措施。

关 键 词： 工程项目成本控制；概念；设计阶段；实施阶段；实践措施

A Brief Discussion on the Control of Project Costs

Li Ling

Lvchun County Public Resources Trading Center, Honghe, Yunnan 661199

Abstract： With the rapid development of the social economy, cost control in engineering projects has become increasingly crucial. As a complex systemic task, it spans the entire construction process—from investment decision-making and surveying and design to bidding, construction, and final acceptance. The primary objectives are to manage, control, and monitor project costs, predict cost trends, ensure expenditures align with predetermined targets, and ultimately achieve cost reduction and improved capital efficiency. This paper provides an overview of cost control in engineering projects, analyzes its characteristics and principles, and proposes methods for cost control across key phases including investment decision-making, design, implementation, and post-construction. Additionally, it offers practical measures for cost control in project management based on real-world experience.

Keywords： engineering project cost control; conceptual; design stage; implementation stage; practical measures

引言

工程项目成本控制项是一项复杂的系统工作，贯穿于投资决策、勘察设计、招投标、项目施工、交工验收等全建设过程，特别是目前缺少系统全面的理论，从工程项目成本控制投资决策、设计阶段、实施阶段、项目后期控制等系统研究控制显得非常重要，分析如何管理、控制与监测工程成本，从而预测其变化趋势，确保实现成本目标，真正做到降低造价，提高资金使用效益，确实为人民群众谋福^[1]。本文将从工程项目成本控制投资决策、设计阶段、实施阶段、项目后期控制等角度，分析工程项目成本的控制。

一、工程项目成本控制概述

工程成本是参建各方在建设施工及管理过程中发生的全部费用，它集中反映了工程所消耗的人力与物资资源，是衡量项目管理综合效益的关键指标，体现了参建单位的综合管理水平，是提高社会竞争力、应变力、开拓力的关键。在满足工程质量、工期等合同约定的基础上，对项目全过程产生的费用进行管控，即为工程项目成本控制。这包括项目实施中必需消耗或投入的人力、

材料、工程设备、施工机械台班等直接费用，以及相应的管理支出，同时涵盖按规定需缴纳的规费与税金^[2]。对一个工程项目进行成本控制，从本质上说就是围绕“增收”与“节支”两方面展开，即通过增加收入来源、扩大效益与节省开支、减少消耗相结合，来实现项目整体效益的最大化。

（一）工程项目成本预测

成本预测亦称作工程估价。根据项目所处的不同阶段，该工作可划分为前期策划阶段的投资估算，以及设计、计划阶段的设

计概算与施工图预算。具体预测内容通常涵盖：人工费、材料费及相关各项费用的估算；因施工方案调整可能产生的费用变动；辅助工程费用；大型临时设施费用；小型临时设施费及工地转移费；同时还包括对成本失控风险的预判等。

（二）工程项目成本控制的特点

1. 项目参加者对成本控制的影响

项目参与方对成本管理的投入程度，通常与其所承担的责任形式密切相关。以承包商为例，其在成本控制方面的职责主要取决于合同约定，不同合同类型会对其成本管控积极性产生差异化的影响。例如，在成本加酬金合同条件下，承包商可能缺乏管控成本的动力，甚至可能出现为提高利润而故意增加成本的行为；而在固定总价合同条件下，承包商则会主动采取严格措施以控制成本。由此可见，建立明确的组织结构并落实责任制度，是实现有效成本控制的重要基础^[3]。

2. 成本控制的综合性

成本目标的实际意义与价值，需结合质量、进度、效率、工作量及资源消耗等方面的要求，才能充分体现。

3. 成本控制的周期的要求

成本控制周期通常不宜设置过长，实践中大多按月进行核算与对比分析，并将控制重心置于近期成本上。这种做法有利于提高管理与控制的准确性与精细化水平^[4]。在项目管理的各项职能中，成本管理工作涉及多重视角与广泛的信息来源，所需处理的信息量往往较大，易引起信息处理成本增加、管理复杂度上升、信息超载乃至决策偏差等问题^[5]。

二、投资决策、设计阶段的工程成本控制

投资决策、设计阶段是整个项目的成本控制的重要环节，业主投资决策时一般委托有人员资质的第三方评估设计公司来完成项目可行性研究、施工图设计编制等前期工作，做好工程项目前期工作，能有效降低建设成本^[6]。设计方案的质量直接关系到建设成本的高低与施工周期的长短，同时也在很大程度上决定了人力、物力和财力资源的配置规模。认真分析整个工程项目，充分考虑经济合理性，合理科学设计，作方案比选，避免重复浪费，坚决做好工程项目投资计算^[7]。该阶段项目成本控制主要有：一是推行设计招标和择优选择设计单位；二是运用价值工程优化设计方案^[7]；三是开展限额设计以有效控制造价；四是采用合同措施有效控制造价。

三、工程项目实施阶段的工程成本控制

在工程项目管理中，通常重点关注三个方面，即质量、进度与成本管理（近年来由于安全生产受到高度关注，部分地区或项目已将安全管理纳入为第四项关键控制内容）^[8]。成本控制是建设

项目中的关键环节，其管理成效不仅关系到项目能否顺利实施，也直接决定着施工企业的盈利状况。强化施工阶段的成本管理，本质上是加强对合同履行行为的规范与监督。在实际项目推进过程中，成本控制主要涵盖以下几方面任务：应对工程变更并相应调整合同价款；通过加强现场过程管控，减少工程索赔风险；落实建设监理制度，实现对质量、进度和造价的全方位管理；综合技术与经济两方面手段控制工程成本；以及做好建设工程价款的结算工作。

（一）工程变更与合同价款的调整

作为业主方造价管理人员，应当将管控重点前移，强化事前控制与主动管理，对各类工程变更进行严格审核，并通过量化分析评估其对项目总投资的潜在影响，从而有效控制变更的发生。在决定是否进行变更时，需综合考虑使用需求、经济性与美观性等因素，避免不必要的费用增加，确保投资处于受控状态。若确需进行变更，必须依据国家有关规定并按照合同约定的程序执行，同时加快推动、督促施工单位尽快落实。在确定变更涉及的合同价款时，应当优先选用合同中已有的、可直接适用或能够参照的计价方式，这主要是由于合同原定价格通常已具备较好的合理性与公允性。

（二）抓好过程管理以减少工程索赔

在施工阶段的造价控制工作中，做好工程索赔管理至关重要。当前广泛采用的工程量清单计价模式下，施工企业往往采取“低价中标、索赔盈利”的方式承接项目。处理索赔事项时，必须以合同约定为准绳。监理工程师需遵循及时、合理的原则处置索赔事件，防止因索赔问题堆积而延误工期、导致双方受损。审核索赔时应把握合理尺度，严格把关，控制不合理的索赔费用支出。通过强化事前预防，减少索赔发生的可能性，确保工程顺利实施，以此实现工程造价的有效管控。此外，针对施工单位或材料供应商未按合同履约的情况，应及时采取反索赔措施，从而进一步提升造价控制成效。

（三）从工程管理机制上建立健全投资控制系统

建立工程监理制度的主要目的，是对项目投资实现有效控制。按照监理规范及相关细则要求，需清晰界定各岗位职责，健全配套管理制度，通过责任落在工程管理体系内形成完整的投资管控机制。同时，应切实开展月度工程进度款的审核工作，以避免投资突破预算。在进度款审核过程中，依据监理方核定的工程量，根据合同约定的计价方法，并参考材料价格与费用定额进行核算，从而支付相应款项。

（四）从技术和经济方面控制工程成本

1. 从技术措施上实施项目造价的有效控制

在深化关键施工技术方案论证的基础上，积极引入新材料、新工艺与新技术，并通过技术方法切实强化对项目造价的管理与控制。运用有效的技术措施，是实现工程造价管控的关键保障。据统计，材料成本一般在直接工程费中的占比约为70%。同时，

直接费的变化也会对间接费产生连带影响。因此,采用先进的工艺与材料,不仅有助于提高生产效率,也为加快施工进度、缩短工期提供了重要支撑^[9]。

2. 从经济措施上实施项目造价的有效控制

建议加强对现场和总部管理费用的把控,并合理压缩建筑工程相关开支,以进一步降低项目静态投资。具体可通过优化占道费、绿化赔偿费及其他补偿性支出予以落实。针对大宗材料或大型设备的供应,也可按合同约定采取甲方直供方式,以助力建设成本的控制与节约。

(五) 项目施工成本控制的几个方面

1. 合同方面

在施工过程中,应严格按照施工图纸及承包合同的约定,以合同中明确的工程项目、质量标准、进度节点等为依据,详细制定施工组织设计,并将该文件作为计划成本测算的基本依据。对于合同中所列的暂定项目以及可能出现变更的工程分项,应按程序及时进行申报。在合同约定的权利范围内,积极争取合理的工程收入,同时通过合法合规的履约管理有效控制支出。

2. 技术方面

根据工地现场条件,对施工布局进行合理规划,为降低消耗、节约成本奠定基础;同时,凭借内部技术实力,广泛发动管理团队,开展合理化建议征集活动,全面延伸成本管控的涉及范围与执行深度。

3. 质量和安全方面

严格按照工程技术规范和安全操作规程开展工作,有效控制质量与安全事故的发生,尽可能降低各类损失。

4. 机械管理方面

根据施工需要,需合理选用机械设备,以充分提升其使用效能;通过优化施工区段布置,提高现场机械的利用效率,进而节约机械使用成本;同时应严格执行机械定期保养制度,保障设备完好,为项目整体进度创造条件。如需租赁外部设备,则应提前开展市场调查与比选工作。

5. 材料方面

材料采购应以“优质、低价、就近”为原则,对进场材料严格执行计量验收,减少采购过程中的损耗。需结合施工进度科学安排供应计划,避免因缺料导致停工。材料领用须严格管理,定期盘点,及时掌握实际消耗与工程进度的匹配情况。周转材料使用后需及时回收、整理并按时退场,以提升周转效率、节约租赁成本,保障成本控制目标实现。

6. 财务方面

财务部门在成本控制体系中发挥着关键作用,具体体现为:通过审核各类费用开支,统筹资金安排,设立相关辅助台账,并协同管理部门对各部门成本执行状况进行检查与监督。在此基础上,该部门对项目成本展开全面分析,并将分析结果及时反馈至决策层,从而为纠正成本偏差提供依据、支持采取相应措施。

四、工程项目后期控制

在项目收尾阶段,主要工作包括交工验收、竣工审计以及交付使用等,这也是造价控制的最终环节。此阶段的核心任务在于做好竣工决算。需严格根据合同条款、预算与定额规范、竣工文件及国家或地方相关法律法规,对工程款进行细致审查。审核工作应以有关政策文件为依据,核验实际施工完成量,确认工程联系单与现场签证费用的合规性,保证审定结果准确体现工程真实造价。

五、工程项目成本控制实践措施

国内外工程师在工程项目成本控制方面已积累了丰富的研究成果。相关理论与实践不断交融,通过总结实际经验,不仅推动了项目建设成本管控水平的提升,也进一步充实了实践方法体系,形成了诸多关于投资成本管理的理论主张与实施路径。下文将从项目组织、技术运用、经济分析和质量管理等维度,梳理当前工程项目成本控制中常用的若干措施。

(一) 采取组织措施控制工程成本

首先,需明确建设工程项目的组织架构与岗位设置,厘清从部门、科室到具体项目团队的隶属与职责。同时,要清晰划分各施工队伍之间的权责关系。项目团队是代表公司实施具体项目管理的工作组,应站在项目整体利益的高度,统筹协调各方在责任、权力和利益上的关系。其次,应落实成本控制的负责人员及其具体任务,确保成本管理责任到人,有效防止成本过高、费用超支、项目亏损以及责任界定不清等问题的发生^[10]。

(二) 采取技术措施与经济措施控制工程成本

应积极调动技术人员的主观能动性,对关键技术方案的开展经济性与可靠性综合论证,以选择经济合理、安全可行的实施方案,有效节约项目成本。技术人员需从技术措施、材料节约、机械效率提升、工序优化及质量管控等多方面实施全过程把控。人工成本通常约占工程总成本的10%,占比较高,需予以重点管控。材料成本在项目总成本中占比最大,是影响成本控制的关键因素,应遵循“量价分离”原则进行精细管理。在机械设备管理过程中,需要科学安排与调度,以降低台班数量、提升利用效率;还应做好现场设备的日常维护与保养,控制大修及常规修理成本,防止因操作不当引起的设备闲置。同时,应合理规划机械租赁方案,有效利用社会上的闲置设备资源,通过多种途径减少台班费用支出。

(三) 加强质量管理控制返工率

在施工全过程中,必须严格执行质量管理,各层级质检人员需明确检查点位、岗位与职责,实现质量管控在项目各环节的全面覆盖。通过确保工程一次施工到位、一次验收合格,有效减少返工,避免因重复投入人力、财力、物力而导致成本增加,从而

保障项目的整体效益。

六、总结

总之，工程项目成本控制项是一项复杂的系统工作，贯穿于投

资决策、勘察设计、招投标、项目施工、交工验收等全建设过程，而成本控制的各项指标有着其综合性和群众性，参建各方都要按照自己的业务分工各负其责，合理规划，遵守工程管理制度，引进先进设备材料，让项目建设制度化、科学化、机械化，提供工作效率，才能达到成本控制的目的，“增产节约，增收节支”。

参考文献

[1] 王炜, 李峥. 浅谈建筑工程的成本控制 [J]. 中州煤炭. 2011(02)

[2] 袁国盾. 建筑工程项目成本控制的方法和内容 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊). 2011(05)

[3] 蔡晨晓. 浅析建筑工程项目的成本控制 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊). 2011(07)

[4] 王巍, 王忠吉. 基于挣值法的工程项目成本控制管理研究 [J]. 价值工程, 2014, 33(30): 86-88.

[5] 唐红卫. 建筑工程项目成本控制措施分析探讨 [J]. 山西建筑. 2009(11)

[6] 张玉慧. 建筑工程造价中全过程成本控制策略探讨 [J]. 工程建设与设计, 2024(15): 280-282.

[7] 成勇. 国内建筑工程项目成本控制分析 [J]. 山西建筑. 2009(17)

[8] 李强年, 赵敬忠, 马岷成. 基于智慧建造的工程施工成本精益控制研究 [J]. 工程研究, 2025, 3(1): 105-110.

[9] 谭明艳. 建筑工程全过程成本管控研究 [J]. 石油化工建设, 2024, 46(12): 65-67.

[10] 张澄茜, 刘陈平, 薛行健. 施工企业项目成本管控影响因素研究 [J]. 建筑经济, 2025, 46(3): 91-96.

基于大客户战略驱动的质量工具应用研究

章浩杨

铜陵有色股份铜冠电工有限公司, 安徽 铜陵 244000

DOI:10.61369/ERA.2026030023

摘 要 : 在市场竞争加剧与公司推进大客户战略、主产品向高端领域转型的背景下, 针对质量工具(尤其是统计技术)应用不足的问题, 本文系统阐述了公司通过构建专项推进机制、分层分类培训, 以及在产品全流程中应用 FMEA、KANO 模型、APQP 等质量工具, 结合大数据与统计技术优化管理的具体实践。实施结果表明, 公司成功开发并稳固了高端客户群体, 主产品质量与市场份额显著提升, 形成了特色化管理改进方法, 为同类企业在大客户战略下的质量工具应用提供参考。

关 键 词 : 质量工具; FMEA; APQP; 统计技术

Research on the Application of Quality Tools Driven by Key Account Strategy

Zhang Haoyang

Tongguan Copper Rod & Wire Corp Tongling Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Tongling, Anhui 244000

Abstract : Against the backdrop of intensified market competition and the company's promotion of a key account strategy, as well as the transformation of main products toward high-end segments, this paper addresses the issue of insufficient application of quality tools (especially statistical techniques). It systematically explains the company's specific practices in optimizing management through building specialized promotion mechanisms, hierarchical and classified training, and applying quality tools such as FMEA, the KANO model, and APQP throughout the entire product process, combined with big data and statistical techniques. Implementation results show that the company has successfully developed and consolidated a high-end customer base, significantly improved the quality and market share of main products, and formed a distinctive management improvement approach, providing a reference for similar enterprises in applying quality tools under a key account strategy.

Keywords : quality tools; FMEA; APQP; statistical techniques

一、实施背景

近年来, 市场竞争日趋激烈, 公司主动调整发展战略, 将大客户战略列为核心战略之一, 推动漆包线、阳极磷铜球、铜杆三大主产品向高端领域转型, 并成功开发行业头部企业。

在高端客户开发过程中, 公司发现质量工具(特别是统计技术)应用存在明显短板, 具体问题如下:

- 对质量工具的重视程度不足, 未将其纳入核心管理流程;
- 质量工具培训覆盖不全面、针对性不强, 员工应用能力薄弱;
- 实际应用中存在工具选用错误、数据收集方法不当、操作不规范等问题, 导致质量工具应用有效性大打折扣, 难以满足高端客户对产品质量的严苛要求。

二、主要做法

(一) 理解并掌握质量工具, 提高应用水平

成立跨部门专项小组: 组建质量工具推进专项小组, 统筹负责《质量工具应用指南》编写、跨部门培训交流及日常应用指

导, 确保工具应用的系统性与规范性。

完善制度保障: 制定《合理化建议管理办法》《统计技术应用控制程序》《设计开发与创新管理标准》等制度, 将质量工具应用纳入创新管理体系, 明确设计环节需应用 DFMEA、生产质量控制环节需应用 QC、SPC 等工具的要求。

分层分类开展培训: 针对不同岗位需求开展专项培训, 如面向研发人员的 QFD 培训、面向研发与制造工艺人员的 FMEA 培训、面向质量管理人员的 SPC 及过程能力分析培训; 除常规“老七种统计工具”外, 重点导入矩阵图、柏拉图等工具, 强化员工质量意识与应用能力。

(二) 采用 FMEA 工具, 有效预防和控制质量风险

公司基于风险管理的思维, 采用失效模式和后果分析(FMEA), 对产品实现的全流程的质量风险进行识别、评价和控制, 并建立了从合同管理到加工制造, 从策划管控到服务跟进, 从技术管理到技术创新的一项新的控制方案。通过此举, 有效地提升了产品质量水平, 降低了内外部损失, 提高了客户满意度。

1) 产品实现过程质量风险的识别。

公司质计技术部对 2020 年发生的质量问题进行汇总、分类, 从工序关键点、质量问题易发点、管控困难点三个维度确定漆包

线、阳极磷铜球和铜杆3大主产品风险控制要求，将风险分布环节细化到具体生产工序，覆盖设计开发、采购仓储、生产制造、包装运输等过程。

2) 产品实现过程风险等级评价。

风险等级评价借助失效模式和后果分析（FMEA）工具，主要从风险严重度、发生频率和检查发现难易度三个维度进行打分，风险从一星到三星对应低、中、高三个等级，公司组织相关单位对各部门识别出的产品实现过程风险点进行评审调整，认真分析产品实现风险产生原因，综合考虑人员配置、技能操作、设备运行、标准规范、材料采购、检查验收等，制订切实可行的管控预防措施。同时评估防控措施落实后，产品风险指标变化情况，设立风险改进目标，确保风险等级逐年降低，产品质量稳步上升。

3) 产品实现过程风险管控措施的落地。

风险管控不能仅停留在纸面上，为了使这些风险点及相应的管控措施得到所有产品实现过程参与人员的了解及有效落实，主管部门在公司范围进行了全面宣贯。针对制造过程风险点的控制，落实到“QC 工程图“中，确保制造过程风险点所涉及的作业人员、生产管理人员、检验人员能执行相关风险点的控制要求，并记录控制结果。其中高风险点实施“三定“管理，即定人、定工艺、定设备，确保风险点所涉及的人、机、料、法和环等相关要素的稳定可控，从而达到风险点的可控。

（三）采用卡诺模型，精准识别顾客需求

KANO 模型是对顾客需求进行分类和优先排序的常用工具，主要将顾客需求划分为基本型需求、期望型需求与魅力型需求。KANO 模型可以评价顾客需求的重要性，深入挖掘关键顾客需求与期望，将其与产品与服务的卖点策划、品牌价值点的挖掘等进行深度融合，为顾客需求实现提供有效支撑。

在收集到顾客需求后，公司通过质量功能展开（QFD）的方式来进行需求的转化，将关键顾客需求分解传递到产品与服务实现的全过程，在持续满足顾客需求的同时，促进顾客满意度与忠诚度的提升。

近年来，公司定位的电动车市场行业漆包线产品面临调整转型，以往常规的130级-1型漆包线纷纷转用180级-2型号，公司了解到电动车电机对漆包线产品主要问题点反应在润滑性和附着能力两方面，通过对提升伸长率改善，以 $\geq 33\%$ 为目标，降低静摩擦，静摩擦系数 ≤ 0.055 的目标，改变表面润滑涂覆的配比，从而满足单线机绕的要求。改进后的产品得到国内电动车一线品牌客户的充分认可。

（四）应用 APQP 方法，保证高端客户开发成功率

漆包线高端客户开发周期长，从供应商前期导入，到样品试制、整机测试等需要经历漫长的过程。一旦样品客户试用不通过，则供应商导入需要从头开始，不仅浪费大量的人力、物力资源，而且会使公司错失发展机遇。

APQP 作为新产品开发的最有效工具，在汽车行业内广泛使用，其功能为满足产品、项目或合同规定，在新产品投入以前，用来确定和制定确保生产某具体产品或系列产品使客户满意所采

取的一种结构化过程的方法。为制订产品质量计划提供指南，以支持顾客满意的产品或服务的开发。

公司在空调线的开发过程中，应用产品质量先期策划（APQP）方法，确定和制定下述确保产品使顾客满意所需步骤：

第一步：计划与确定范围

确定先期策划 Cpk 值是否大于1.33质量稳定能力，通过对产品安全性进行评估产品制造可行性分析，完成产品保证计划。计划完成时间：2021年12月。

第二步：产品的设计和开发

首先，设计“原材料+识别产品特殊特性”清单，经讨论初步确定产品规格书、确定生产工艺参数。其次，完成 FMEA 潜在失效模式与效力分析，从原材料采购开始成品入库、识别各工序潜在风险，制定预防措施，确保过程有效控制。第三，根据产品的特殊特性，确保产品特性、控制要求、控制方法、监测频次等，完成产品质量控制计划。

第三步：过程设计与开发

首先，制作了过程控制流程图、利用特性矩阵图，按照过程参数要求，标注与产品安全、产品性能等有关的特殊标示。第二，确定试生产控制计划，并制定工序作业指导书。第三，制定空调线包装规定。

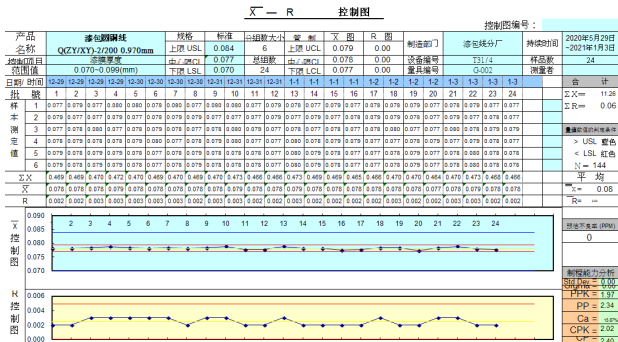
第四步：产品及过程确认

首先，制定试生产计划，完成过程监控；第二，完成 Cpk 值过程能力分析；第三，按照控制计划完成过程控制。第四步，数据收集分析表明，过程能力 Cpk 为1.926，PPK 为2.215，满足客户 Cpk ≥ 1.67 ，PPK ≥ 1.67 的要求。第五，客户认可公司提交的零件保证书后，固化工艺，制定生产控制计划，完成量产文件的移交，并对员工进行新生产工艺技术培训。

第五步：反馈、评估及纠正措施

试产过程经“总结+调试”后，进行小批量生产。在批量生产期间发现，出现产品（Q(ZY/XY)-2/200 0种 0.95L0种）静摩擦系数涂油后指标波动的问题。为此，漆包线分厂重新调整了外润滑涂履装置，修订内控标准涂油后静摩擦系数 ≤ 0.070 ，通过调整，有效改善了漆包线的柔韧度，符合预期设计结果。

目前，空调线项目在多部门联合攻关下已实现批量供货，空调线生产和销售实现历史性突破。



（五）统计技术与大数据结合，助推精准管理

在生产控制上，依托质量管理信息系统，并结合 ERP 等系统，建立了空调线生产信息数据库，对生产过程中工艺数据之间

的相关性展开探索，开展大数据分析，通过建立数据分析模型，最终达到实时在线的数据分析与过程监控。对于生产过程的特殊特性，采用均值－极差图（见下图），控制其过程的稳定。客户关注的关键特性，采用均值－极差图、正态概率图等统计工具充分分析及改进，保障其指标的稳定达成。近年来公司产品的一致性和品质的稳定性得到高端客户的充分认可。

在订单排产上，由于公司客户多，作价方式多，生产订单呈现小批量、多品种的生产特点，为了避免因生产计划排产不合理所导致的损失，我们加强了统计工具的应用，生产分厂每日对订单生产完成情况进行统计分析并跟踪，发现问题，及时纠正。计划订单生产结束之前，由业务员与客户确认是否有后续订单，以便提高生产连续性。营销部每月末对当月交付订单进行统计分析，掌握客户对各型号规格产品的需求量，进行预测性排产，确保准时交付，扭转被动接受订单的局面，提高生产计划安排的机动性和主动性。

在质量管理上，推行质量成本管理方法，通过 ERP 信息系统收集和分析数据，可查询任意时间段内该项成本作业发生的具体来源，实现了原始数据的追溯管理，应用于质量改善，减少失效成本，实现企业在生产成本的财务控制。2024年，进一步完善了不良质量成本体系，经过2024年以来的跟踪分析，不良质量成本占销售额的百分比总体达到了<0.5%的目标要求。

（六）灵活运用统计分析技术，提升企业管理水平

公司在日常管理中积累了大量的记录数据，如仓库领料记录、质量记录、维修记录和投诉记录等。通过对这些数据进行统计分析，可显著提升管理水平。现以仓库领料记录为例，说明统计分析技术的应用：

建立常规物资库：通过统计“领用物资”，识别使用量较大的物资，科学建立常规物资库，避免盲目采购和库存积压。

科学设定库存量：将“领用物资”统计结果与维修记录中的相关数据对比分析，掌握常规物资的领用情况和更换频率，据此合理设定库存量，优化库存结构。

监控维修材料去向：通过将仓库物资领用情况与维修记录中的材料使用情况进行对比分析，并结合维修工作的回访记录，准

确掌握物资出库后的去向，确保物尽其用。

通过对孤立、杂乱的工作记录进行统计和分析，公司能够发现管理中隐藏和易忽略的问题，从根本上解决问题，科学识别管理薄弱环节，及时堵住漏洞，提升整体管理水平。

（七）选择适应的分析方法，保证改进效果

公司将质量工具与绩效分析与评价相结合，进一步突显了质量工具的优势，同时质量工具的应用领域逐步向着公司经营管理层面进行延伸。

绩效分析和评价围绕产品与服务、顾客与市场、财务、资源、过程有效性、领导六个维度展开。将绩效测量分析系统收集的数据用于各种会议和专题分析，并将分析结果反馈给各部门和各层级人员，为各层级决策提供重要依据。

如各种分析会对绩效结果从市场变化、资源配置、工作质量和管理效率等多方面进行因果分析，并进行内部数据纵向对比，资源配置，工作质量和管理效率等多方面进行因果分析，并进行内部数据纵向对比，行业数据横向对比以及标杆和竞争对手横向对比，找出造成绩效差距的原因，并提出绩效改进方案，确定今后资源配置重点，并对未来市场、行业、技术、财务等方面做出预测。分析会常采用趋势分析、对比分析、因果分析、差异分析、归因分析、头脑风暴等分析工作，以确保绩效分析的有效性和效率性。此外，通过标杆对比，学习标杆企业的管理创新，促进公司提升管理水平。

三、质量工具实施效果

1）成功开发了空调压缩机客户群中的头部企业，并形成量产供货，对我公司空调压缩机用漆包线产品在其他客户的开发上提供有利支撑。

2）巩固和提升了电动车用漆包线市场份额，成为国内电动车一线品牌的主供应商，市场占有率30%以上，处于标杆地位，近几年来一直稳居市场第一。

3）漆包线、阳极磷铜球和铜杆三大主产品质量稳定提升，主要产品技术指标达到国际先进水平。

Q（ZY/XY）-2/200 Φ0.550mm 漆包线近3年主要技术指标对比情况

主要技术指标	本企业水平			同行业水平	竞争对手	国际先进水平
	2019年	2020年	2021年			
1. 导体电阻 (Ω/m)	0.07304	0.07303	0.07305	≤ 0.07415	≤ 0.07342	≤ 0.07417
2. 击穿电压 (KV)	9.6	9.6	9.7	≥ 5.0	≥ 9.6	≥ 9.5
3. 绝缘连续性 (个/30m)	0	0	0	≤ 3	≤ 1	≤ 1

阳极磷铜材近3年主要技术指标对比情况

主要技术指标	本企业水平			同行业水平（平均）	竞争对手	国际先进水平
	2019年	2020年	2021年			
1、Cu+Ag 含量（%）	99.90	99.91	99.93	≥ 99.90	≥ 99.90	≥ 99.90
2、P 含量（%）	0.050	0.051	0.0535	0.060 > P > 0.045	0.065 > P > 0.045	0.055 > P > 0.045

4）公司总结出了具有自身特色的改进和改进方法，应用生产、经营和管理的各个环节，通过 SPC（统计过程控制）、试验设计、方差分析、回归分析、标杆分析、业务流程再造、MSA（测

量系统分析）等统计技术和先进的方法，充分利用数据分析、信息和知识共享，为公司各层次的绩效改进提供有力支持。

锅炉闸阀密封性能提升的技术方案研究

张志海

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司，贵州 遵义 563108

DOI:10.61369/ERA.2026030027

摘 要： 锅炉闸阀作为热力系统核心密封部件，其密封性能直接关系到锅炉运行的安全性、稳定性与经济性。针对锅炉工况下闸阀易出现密封失效的问题，本文从闸阀密封基础、影响因素、提升技术及方案验证四个维度展开研究。先明确密封结构、评价指标及工况要求，再分析材料、结构与工况对密封性能的作用机制，进而提出材料优化、结构改进及工艺提升的技术措施，最后通过测试方法与可行性验证完善方案。研究旨在为锅炉闸阀密封性能提升提供理论支撑与技术参考，助力解决实际运行中的密封难题，保障锅炉系统高效运转。

关 键 词： 锅炉闸阀；密封性能；技术提升；可行性验证

Research on the Technical Solution of Improving the Sealing Performance of Boiler Gate Valve The Impact of Smoking on Cognitive Function in Chinese Older Adults

Zhang Zhihai

Yaxi Power Generation Operation Branch, Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd., Zunyi, Guizhou 563108

Abstract： As a critical sealing component in thermal systems, the performance of boiler gate valves directly impacts operational safety, stability, and economic efficiency. To address the frequent sealing failures under boiler conditions, this study investigates four key dimensions: sealing fundamentals, influencing factors, improvement techniques, and solution validation. The research begins by defining sealing structures, evaluation metrics, and operational requirements, then analyzes how material properties, structural design, and operating conditions affect sealing performance. Subsequently, it proposes technical measures including material optimization, structural enhancements, and process improvements. Finally, the proposed solutions are validated through testing methods and feasibility studies. This study aims to provide theoretical support and technical references for improving boiler gate valve sealing performance, helping resolve practical sealing challenges and ensuring efficient boiler system operation.

Keywords： boiler gate valve; sealing performance; technical improvement; feasibility verification

引言

在锅炉运行系统当中，闸阀具有介质截断及调节的重要职能，其密封性能属于核心技术指标。锅炉运行时存在高温、高压、介质腐蚀等诸多复杂工况，长时间使用极易造成闸阀密封面出现磨损、变形情况，从而致使介质泄漏，不但会影响系统的热效率，而且有可能带来安全风险^[1]。当下，优化锅炉闸阀的密封性能已变成热力设备领域的一项关键研究方向。本文围绕闸阀密封相关基础展开，系统分析影响密封性能的关键因素，针对性提出技术提升措施并进行验证，为优化锅炉闸阀密封效果、延长使用寿命提供可靠方案，满足锅炉系统安全稳定运行的实际需求。

一、锅炉闸阀密封相关基础

（一）闸阀密封结构组成

锅炉闸阀的密封结构对于保证密封性能十分关键，它包含密封面、阀座、闸板、填料函这些主要部件。其中密封面处于接触

密封的关键位置，往往位于闸板和阀座的结合面，该面的贴合精确度会左右密封的效果。阀座和阀体相固连，给密封面给予稳定的支撑，并且还要承受介质所施加的压力和温度^[2]。闸板依靠自身的开关运动与阀座的密封面达成贴合或者分离，以此来做到对介质通断的调控。而填料函则是用来堵塞闸杆和阀体间的缝隙以达

到密封的目的,阻止介质顺着阀杆向外泄漏,所用填料的材料应符合锅炉高温高压的工作环境。各个密封件相互配合,从而形成起一个完整的密封系统,其结构是否合理会直接关系到闸阀整体的密封能力。

(二) 密封性能核心评价指标

锅炉闸阀密封性能的评价需依托明确的核心指标,才可保证评定结果既科学又精准。密封性属于最为关键的一项指标,其含义在于闸阀处于指定工作状态时具备防止介质渗漏的机能,若不存在肉眼察觉的渗漏并且渗漏量达到行业标准所规定的限度就视为达标。耐压性表现密封构造在达到预定压力以及超出预定压力的工作条件下维持密封稳定性的状况,免除由于压力骤变而引发密封功能丧失。耐温性显示密封元件在锅炉高温环境下表现出来的稳定性,务必做到长时间处于高温环境下不会出现变形、老化或者密封效果下滑的现象。耐磨性关乎闸阀的使用期限,考量密封部位在频繁开关并产生滑动摩擦时的损耗情况。密封稳定性属于综合性指标,用以度量闸阀长时间运转时其密封性能得以保留的程度,是保障锅炉连续运行的重要依据。

(三) 锅炉工况对密封的要求

锅炉运行时存在一些特殊工况,这些情况对闸阀的密封性能有着严格的要求,要适应复杂的工况条件才能保证运行安全。高温工况下,密封部件要有很好的耐温性能,不能因为温度过高而使材料变软、变形或者密封面贴合变差。在高压环境下,密封结构要承受较大的介质压力,不能让压力超过密封面造成泄漏,还要抵抗住压力波动给密封性能带来的影响。锅炉中的介质往往含有腐蚀性物质,所以密封部件要有较好的耐腐蚀性,不能让介质破坏密封面,造成密封失效^[3]。而且锅炉启停很频繁,这种情况使得密封结构要有很强的抗疲劳能力,在不断启闭摩擦的时候守住密封稳定,还得跟上工况参数的动态改变,确保密封性能持续达标。

二、锅炉闸阀密封性能影响因素

(一) 材料特性影响

密封材料的特性对锅炉闸阀密封性能起着关键性的作用,它的材质性能会直接左右到密封效果及其使用年限。如果材料的耐高温性能不够,在高温工作环境下就会发生材质老化、硬度变小的情况,从而造成密封面产生变形或者磨损现象,这样就有可能出现泄漏状况^[4]。而那些耐腐蚀性能欠佳的材料,一旦被腐蚀性物质侵蚀,其密封面就会遭受锈蚀或者点蚀的损害,使得密封面变得不再平坦,影响到密封贴合的精准度。材料的硬度和耐磨性又同密封面抵抗损耗的能力存在直接联系,硬度低极易致使密封面留下划痕或者陷入坑洞,从而影响到密封功能的发挥。而且,材料自身的弹性和韧性也会对密封效果产生影响,弹性小就很难填补密封面上存在的微小缝隙,韧性差的话很容易因为在压力的强力冲击之下产生裂纹,这还会进一步加重密封失灵的严重程度。

(二) 结构设计影响

闸阀密封结构的设计是否合理,会给密封性能带来直接影

响,而且这种影响非常关键,一旦结构存在缺陷,就很可能造成密封失效。密封面的设计参数十分关键,如果贴合角度或者表面粗糙度不符合要求,就会加大泄漏的风险。角度出现偏差的时候,密封面就会受到不均匀的力,从而使得局部磨损加重。如果闸板和阀座的配合精度没有得到恰当的设计,就会产生间隙过大的情况,或者贴合不够紧密,这样也就无法达成有效的密封效果。填料函的结构设计会影响密封效果,填料安装空间及压紧结构若不合理,则极易致使阀杆处密封不严,造成介质渗漏^[5]。而且,如果阀体结构设计未考量工况应力分布,那么在运行过程中就会产生结构变形,这种变形会间接破坏密封面的贴合状况,从而减小整体密封性能。

(三) 工况条件影响

锅炉的复杂工况条件是影响闸阀密封性能的关键外部要素,工况参数的波动极易加重密封失效现象。高温环境会加快密封材料的老化速度,削减其力学性能,致使密封面贴合程度变差,而且高温还会致使部件发生热胀冷缩,从而破坏密封结构的稳定性。处于高压状态时,介质的渗透压力就会增大,如果密封结构的承压能力不够强,那么就很可能产生密封面变形以及介质冲破密封缝隙之类的状况。介质本身的性质对于密封性能有着很大的影响,具有腐蚀性的介质会损害密封部件,而含有杂质的介质则会加重密封面的磨损情况,进而减小密封的精准度。而且,工况参数经常起伏不定,使得密封部件不断承受着应力的改变,从而造成疲劳性破坏,这会进一步缩减密封结构的使用期限。

三、密封性能提升技术措施

(一) 密封材料优化

材料特性会对密封性能产生影响,要借助材料优化来改善闸阀密封的可靠性。首先选取耐高温、耐腐蚀的合金材料当作密封面基材,从而加强材料在复杂工况下的稳定性,免除出现高温老化以及被介质侵蚀的情况。对密封材料执行表面改性处理,利用喷涂、堆焊等技术在密封面上创建硬质保护层,以此优化材料的硬度及其耐磨性,缩减由于启闭摩擦所产生的损失^[6]。优化填料材质的选择,采用柔韧性佳、耐高温的复合填料,取代传统填料,从而加强阀杆部位的密封效果,阻止介质发生渗漏。要兼顾材料的弹性和韧性,使得密封面可以适应微小的变形,从而加强密封的贴合程度并延长密封结构的使用寿命。

(二) 密封结构改进

优化密封结构设计以填补原先的结构漏洞,从而改善闸阀的密封性能。调整密封面的设计参数,优化贴合角度及表面粗糙度,促使密封面均匀贴合,缩减因受力不均而产生的磨损现象。采取双密封面结构设计,在原来的密封之上增添辅助密封面,创建起双重密封保护机制,削减泄漏的可能性。优化填料函结构,优化填料的安装空间以及压紧形式,利用柔性压紧装置,让填料可以均匀地承受压力,进而加强密封的稳定性^[7]。而且,优化闸板与阀座相契合的结构,并设置导向装置,确保在开启或者关闭的时候,密封面能够准确地贴合在一起,防止由于偏移而造成的密

封功能丧失，从而加强整体的密封性能。

（三）加工工艺提升

优化加工工艺精度，这是保障密封结构性能的关键所在。利用高精度加工设备对密封面执行切削、研磨操作，保证密封面表面的平整度以及尺寸精度，缩减因加工误差而产生的密封间隙。优化焊接工艺，针对密封部件的焊接部位运用精密焊接技术，调控好焊接温度与速度，防止出现焊接变形和裂纹，维持密封结构的完整性。巩固加工过程中的质量控制，对于那些关键的密封部件实施严格的检测，尽早去除不合格的产品，以确保加工质量符合标准。而且，利用表面抛光工艺来改善密封面的光滑度，削减摩擦阻力并减轻磨损程度，从而进一步优化密封性能及其使用寿命。

四、技术方案验证与应用要点

（一）密封性能测试方法

创建科学的密封性能评价方法以保证技术方案有效。利用水压密封评价法，在模拟锅炉额定压力下对闸阀实施密封性检查，看是否有泄漏情况发生，从而评判密封效果。通过高温老化评价，把闸阀放在模拟锅炉高温工作环境里，运行一定时间之后，测量其密封性能的改变状况，以此来考察材料和结构在高温下的稳定性^[8]。做耐磨性评价，模仿闸阀频繁开关的动作，测定密封面的磨损程度以及密封性能下降的状况，进而考量方案的耐久性。并按照照行业标准制订出相应的评价指标，使得评价结果做到客观准确，为方案的优化提供依据。

（二）方案可行性验证

从技术、经济以及工况适配性这三个方面来验证密封性能优化方案是否可行。技术上要确定优化之后的材料、结构和工艺符合锅炉闸阀的设计标准，能够有效地解决原本的密封难题并改善

密封性能。经济上要全面考量材料成本、加工成本以及保养成本，保证该方案既能达到性能需求又具有经济合理性，不能因为过度追求成本效益而造成不必要的开支。工况适配性方面则需考察优化过的闸阀能否适应锅炉所处的高温、高压、含有腐蚀性介质等复杂环境状况，在实际操作过程中一直维持良好的密封效果。通过全方位的考量之后，使得这个方案具备实用的价值，可以切实得到执行。

（三）实际应用注意事项

技术方案的实际应用时，要重视细节的把控，以使密封性能得以稳定发挥。安装环节应遵照安装规范来执行，保证闸阀密封面干净无杂质，防止安装过程引发密封面受损，做到各个部件精确装配。运行期间，要控制锅炉工况参数的波动状况，免除出现超温、超压运行的情况，缩减工况改变给密封结构带来的影响^[9]。定时对闸阀实施保养，清除密封面的杂质，检查密封部件的磨损情形，对于那些已经老化或者损坏的密封件要及时更换。创建运行台账，记录闸阀密封性能的变化情况，给后续的维护和优化提供数据支持，从而延长闸阀的使用寿命。

五、结语

本文以加强锅炉闸阀密封性能为核心，就密封基础、影响因素、技术措施以及方案验证实施系统探究，制定出包含材料优化、结构改善和工艺加强的综合方案。此方案针对由材料、结构及工况造成的密封失效问题予以解决，并经科学验证具有较好的实用性和可靠性^[10]。加强锅炉闸阀的密封性能有益于防止介质泄漏，保障系统安全稳定运行，从而加强能源利用效率。未来可关注新型密封材料的研发，并将其与智能化技术相融合，不断优化密封效果和运维水平，给热力系统的高效运行提供更强有力的支撑。

参考文献

[1] 赵伏前. 电厂锅炉管道阀门检修关键技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025, (16): 88-90.
[2] 赵嘉逸, 高俊峰, 崔永硕, 等. 基于某锅炉用闸阀闸板面密封失效研究 [J]. 液气密封, 2025, 45(01): 14-20.
[3] 胡中维. 不同密封型式阀门在热风管中密封性能研析 [J]. 电力设备管理, 2025, (14): 92-94.
[4] 郑志成. 内楔式闸阀密封结构的设计与分析 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(14): 93-96.
[5] 蒋威. 给排水用软密封闸阀耐久性试验研究 [J]. 阀门, 2024, (10): 1212-1215.
[6] 林孙荣, 林孙强, 金宗林. 高压平板闸阀密封性能改进与分析 [J]. 液气密封, 2024, 44(08): 78-81.
[7] 程瑞荣, 边立平, 刘中川, 等. 火力发电锅炉炉顶密封施工技术 [J]. 安装, 2024, (S2): 50-52.
[8] 温泽森. 燃煤锅炉回转式空预器密封改造技术的研究与应用 [J]. 自动化应用, 2024, 65(12): 141-143.
[9] 傅浩. 高压锅炉水泵机械密封失效原因分析及对策 [J]. 大氮肥, 2023, 46(03): 167-169+194.
[10] 刘久城. 浅谈锅炉燃油泵密封优化改进 [J]. 中国设备工程, 2021, (16): 123-124.

冬季低温环境对道路养护施工质量的影响及应对措施分析

谢家书

曲靖市马龙区地方公路管理段, 云南 曲靖 655199

DOI:10.61369/ERA.2026030028

摘要：道路养护施工是保障公路安全、耐久与服务水平的关键，其质量关乎国计民生。冬季低温环境是制约养护质量的严峻挑战，它严重影响沥青、水泥等材料的性能与施工和易性，并对工艺控制、层间粘结及路面长期耐久性产生显著负面影响，增加质量风险与全寿命成本。本文系统分析低温对材料、工艺及结构质量的作用机理，结合地方公路管理段养护职责与“曲靖三宝至昆明清水高速公路（以下简称“三清高速公路”）”损毁修复案例，探讨涵盖材料优选改性、工艺优化创新、动态监测与质量管理的综合应对措施体系，以期在基层养护部门冬季科学施工提供理论参考与实践指导，提升公路网络在极端气候下的服役性能与韧性。

关键词：冬季低温；道路养护；施工质量；沥青混合料；温控工艺

Analysis of the Impact of Winter Low Temperature Environment on Road Maintenance Construction Quality and Countermeasures

Xie Jiashu

Qujing City Malong District Local Highway Management Section, Qujing, Yunnan 655199

Abstract： Road maintenance construction is the key to ensuring the safety, durability, and service level of highways, and its quality is related to the national economy and people's livelihood. The low temperature environment in winter is a severe challenge that restricts the quality of maintenance. It seriously affects the performance, construction, and ease of use of materials such as asphalt and cement, and has a significant negative impact on process control, interlayer bonding, and long-term durability of road surfaces, increasing quality risks and total life cycle costs. This article systematically analyzes the mechanism of low temperature on materials, processes, and structural quality, and combines the maintenance responsibilities of local highway management sections with the case of damage and repair of the "Qujing Sanbao Kunming Qingshui Expressway" (hereinafter referred to as the "Sanqing Expressway") to explore a comprehensive response measures system covering material optimization and modification, process optimization and innovation, dynamic monitoring, and quality management. The aim is to provide theoretical reference and practical guidance for winter scientific construction of grassroots maintenance departments, and improve the service performance and resilience of the highway network in extreme weather conditions.

Keywords： low temperature in winter; road maintenance; construction quality; asphalt mixture; temperature control process

引言

公路交通动脉的良好状况依赖周期性、预防性与修复性养护工程。养护施工面临复杂条件、紧迫工期及严格保通要求，其中季节性低温是影响施工质量的关键变量。我国大部分地区冬季显著，此时进行路面养护，常因材料性能劣化、工艺适应性降低，导致压实不足、粘结不良、早期病害频发，甚至工程失效，威胁公路安全与效率^[1]。这一矛盾在基层养护单位及类似“三清高速”损毁道路集中修复中尤为突出，后者常因保通压力不得不在低温季施工，加剧了质量风险。因此，系统研究冬季低温影响机理，探索有效应对措施，对提升养护水平、保障投资效益具有重要意义。

一、冬季低温环境对道路养护施工质量的影响机理分析

（一）对筑路材料性能的直接影响

筑路材料，尤其是沥青混合料与水泥混凝土，其性能具有显著的温度敏感性。在冬季低温条件下，沥青的粘弹性发生根本变化，其粘度急剧增大，流动性、柔韧性显著降低，从粘弹态向近似玻璃态转变。这使得沥青混合料在拌和、运输、摊铺过程中，沥青难以充分裹覆集料，易出现花白料，且混合料变得干涩、坚硬，施工和易性急剧恶化^[9]。对于水泥混凝土材料，低温会严重延缓水泥水化反应的速率，甚至使其接近停止。这不仅导致混凝土早期强度发展极其缓慢，无法及时形成承载能力，而且由于水化不充分，会影响混凝土的最终强度及耐久性。此外，新拌混凝土中的自由水在低温下易发生冻结，体积膨胀约9%，会在混凝土内部产生巨大的结晶压力，破坏尚未稳固的水泥石结构，导致微观裂缝的产生，这种早期冻害对混凝土的长期性能是毁灭性的。

（二）对关键施工工艺的制约效应

低温环境严重制约养护施工核心工艺。先是沥青混合料压实工艺，其效果高度依赖混合料温度。低温下混合料冷却加快，有效压实时间窗口大幅缩短。一旦温度低于临界值，沥青粘聚力与集料摩阻力剧增，导致压实不足，进而引发路面孔隙率增大、渗水、松散和抗疲劳性能下降。之后是层间粘结工艺，低温延缓乳化沥青破乳与凝结，也使热沥青迅速冷却、粘度上升，造成渗透与粘结效果差，易在行车荷载下引发表面病害^[9]。最后，对于水泥混凝土路面，低温影响浇筑与振捣均匀性，并使常规洒水养生易结冰，若保温措施不足，将严重影响强度发展及开放交通时效。

（三）对成型结构长期耐久性的潜在危害

由低温施工引发的材料性能劣化和工艺缺陷，最终会传导并固化为路面结构的“先天不足”，对其长期耐久性构成深远危害。压实不足的路面，其较高的空隙率不仅成为水分侵入的通道，加速沥青老化，而且在冬季水分进入空隙后结冰膨胀，会加剧混合料的剥离与松散，形成恶性循环^[9]。层间粘结不良的结构，其整体性能被破坏，各结构层无法协同工作，应力传递异常，大大降低了路面的抗弯拉和抗剪切能力，使得路面在重载交通下更易产生结构性损坏。对于水泥混凝土路面，早期受冻或强度发展不充分，会直接降低其抗折强度与耐磨性，表面易产生起砂、剥落，接缝处更易损坏。这些由低温施工埋下的质量隐患，往往在交通荷载和自然环境的耦合作用下，在路面投入使用后的较短时间内便暴露出来，表现为各种早期病害，极大地缩短了养护工程的有效使用寿命^[9]。

二、结合地方公路管理段职能与“三清高速”案例的特殊性分析

（一）地方公路管理段冬季养护的职责特点与困境

地方公路管理段是养护体系的基层单元，负责巡查、小修保养、预防性养护及应急抢险。冬季养护特点鲜明：以预防性为

主，重点保障防滑防滑与通行安全，主动修复工程减少；应急性突出，需快速处置冰雪灾害、突发坑槽等；兼具计划性与灵活性，虽避免严寒期安排大中修，但对突发损毁或保通任务仍可能面临冬季施工^[9]。其困境具体表现为：资源与技术有限，缺乏专业温控设备、保温运料车及实时监控系統，远距离材料运输温度损失大；成本压力显著，冬季施工需额外投入保温、防冻等措施，在经费紧张下需权衡修复紧迫性与经济性；质量控制难度高，技术人员对低温工艺掌握不足，且低温环境下取芯、压实度检测等作业困难，进一步增加质量风险^[7]。

（二）“三清高速”案例中冬季修复工程的矛盾聚焦

“三清高速”案例中，重型施工车辆长期高强度使用地方道路（如马方线、马纳线等），造成结构性损毁，其修复成为紧迫的民生工程。与常规养护相比，冬季施工矛盾尤为尖锐：一是工期与季节冲突。为在春节前保通，部分修复（如2021年12月—2022年2月）不得不“逆季节”进行。二是修复规模集中，资源调配难。损毁路段点多面广，冬季大规模施工时，保障全线材料温度与工艺一致性，管理与技术难度剧增。三是资金支付滞后加剧被动。费用拖欠导致无法采购低温改性沥青、租赁充足保温设备，甚至简化必要工序，埋下质量隐患。该案例表明，当工期、社会压力与环境制约叠加时，质量风险会被急剧放大^[9]。

（三）两类场景对系统性应对措施的共性需求

尽管地方公路管理段常规养护与“三清高速”类应急修复在规模、动因上存在差异，但二者面对低温挑战时均迫切需要一套系统、可操作且经济适用的应对体系^[9]。该体系必须能够切实应用于基层实际场景，其核心应包含：适用于小规模、分散作业的材料方案，如便于现场存储使用的高性能冷补料；适配基层现有设备条件的工艺改良，例如优化后的冷补与薄层修补技术；以及强化现场动态决策与质量管控的流程，比如基于气象预报灵活安排施工窗口、推行简捷有效的快速检测方法。因此，后续的应对措施研究必须紧密结合这些实践场景的复杂性与现实约束。

三、应对冬季低温环境的道路养护施工综合技术措施

（一）基于材料改性与选用的适应性对策

材料是应对低温挑战的第一道防线。核心思路是通过改性或选用特定材料，拓宽其在低温下的施工适应窗口和性能稳定区间^[10]。对于沥青混合料，首选措施是采用低温施工型改性沥青。例如，高含量SBS改性沥青（SBS掺量通常 $\geq 4.5\%$ ）能显著提高沥青的低温延度（可达到 $>30\text{cm}$ ， 5°C ）和弹性恢复能力，使其在 -20°C 甚至更低温度下仍能保持较好的柔韧性，避免脆裂。对于冬季应急修补，应储备和使用高性能冷补料。其核心技术在于使用特种改性液体沥青（如基于煤焦油或特种石油馏分的粘结剂），配合缓挥发稀释剂，使混合料在常温下保持疏松、不结块，可袋装存储数月。理想的冷补料应具备良好的初始稳定性（马歇尔稳定度宜大于 3kN ）和后期固化性能，在碾压后2-4周内强度可达到热拌沥青混合料的70%-80%。虽然其长期性能和水稳定性通常不及热拌料，但能有效满足冬季应急保通和临时修补的需求。

（二）施工工艺的优化与技术创新

在既定材料基础上，工艺精细化控制是关键，核心是“抢温度、保压实、强粘结”。一是温度链全程管控：拌和料出料后须采用双层保温棉加顶部油布覆盖的运料车；精确规划运输路线与时间，减少中转等待；摊铺前应应对下层预热，采用红外线加热板或热风枪消除冰霜、提升层温，这对薄层修补尤为重要。二是压实工艺强化创新：配备足量适宜压路机，紧跟摊铺机实施“高温、紧跟、强振”碾压，优先选用高频低幅振动压路机以提升压实效率；对接缝、路缘等部位采用小型振动夯或手持压实机具充分压实。三是层间粘结加强：喷洒粘层油前确保下层干燥、清洁、温暖，选用破乳快、粘结强的 SBS 改性乳化沥青，必要时对粘层轻度预热以促渗透。水泥混凝土施工应采用综合蓄热法：使用加热的拌合水与骨料；浇筑后立即覆盖保温层；有条件时可搭设暖棚并辅以热风机加热，确保混凝土在正温下达临界强度。

（三）施工过程的动态监测与质量控制

冬季施工必须建立比常温下更密集、灵敏的质量控制网络。核心是温度的实时监测与反馈控制，应在混合料出厂、到场、摊铺前后、压实前后等多个节点，使用数显温度计或红外测温枪进行多点快速测量，形成温度曲线。一旦温度接近或低于下限，须立即调整或停止作业。压实度控制应注重过程，采用无核密度仪（PQI）等进行实时、无损检测，快速发现薄弱区并补压。同时强化现场试验与快速检测，包括对摊铺均匀性、离析情况的目测，以及对冷补料的马歇尔稳定度快速试验。所有数据应详细记录，并与环境温、风速等气象数据关联分析，为工艺调整与质量追溯提供依据。对于“三清高速”类大型集中修复工程，宜建立基于物联网的远程监控中心，对全线各作业点的材料温度、运输轨迹与关键参数进行集中监控与调度，确保施工质量受控。

四、面向实践的管理策略与建议

（一）科学规划与动态决策机制

管理层面首要任务是建立基于气象预报的冬季施工科学决策机制。在编制年度养护计划时，应主动规避本地区持续严寒期安

排大型路面修复工程。对于必须实施的应急性或跨季度工程，应在施工组织设计中详细编制冬季施工专项方案，并设置清晰的气象门槛条件（如日平均气温低于5℃或预计气温持续下降时）。在施工期间，应指定专人负责与气象部门对接，获取72小时精细预报，每日召开施工前协调会，根据预报动态决定当日是否开工、开工时间以及采取的强化措施等级。这种“看天施工”的动态决策，是避免盲目施工、减少质量风险的最经济有效的手段。

（二）资源配置与供应链保障

保障冬季施工质量需要额外的资源投入，管理方必须提前谋划。在设备配置方面，应评估并备足保温运料车、预热设备（热风枪、红外加热板）、高效压实设备（如高频压路机）以及快速检测仪器。对于基层单位，可以考虑区域性设备租赁共享平台。在材料供应链方面，应提前与沥青拌和站、水泥制品厂及冷补料供应商签订冬季供货协议，明确冬季专用材料的性能指标、供应能力和应急响应机制。特别是要确保低温沥青、早强水泥、防冻剂等关键物资的稳定供应渠道和合理库存。在资金保障方面，对于“三清高速”类项目，项目业主或协调指挥部应建立专项资金支付绿色通道，确保修复费用及时、足额支付到位，避免施工单位因资金压力而牺牲材料质量和工艺要求，这在相关报告反映的“资金严重短缺”、“打折支付”问题背景下尤为重要。

（三）人员培训与长效机制建设

最终，所有技术和管理的执行者是人。必须加强对一线管理人员、技术人员和操作工人的冬季施工专项培训。培训内容应涵盖低温对材料与工艺的影响原理、本地区适用的冬季施工技术规范、特殊设备操作规程、应急质量问题的识别与处置等。

五、结语

冬季低温通过影响材料、工艺与结构耐久性，对道路养护质量构成系统性威胁。应对挑战需技术与管理并重：研发低温材料、优化温控工艺、强化动态监测，并建立科学决策、资源保障及培训长效机制，推动养护工作从被动应对转向主动驾驭，以保障工程质量、资金效益与公路韧性，服务社会经济发展。

参考文献

- [1] 徐舜枫. H 市新区市政道路养护管理体系改进研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [2] 付英俊, 张晓东. 高速公路对周边环境的影响与冬季防滑应对措施分析 [J]. 内蒙古科技与经济, 2022, (03): 108-109+111.
- [3] 王青云. 冬季道路养护手段的效率与方法分析 [J]. 中外企业家, 2020, (21): 231.
- [4] 曲胜. 高速公路冬季除雪作业及养护措施 [J]. 现代经济信息, 2018, (21): 324.
- [5] 于超. 乌鲁木齐市主要道路使用性能现状分析及养护对策 [D]. 新疆农业大学, 2015.
- [5] 王峰. 半柔性抗车辙技术在市政道路养护工程中的应用 [J]. 工程技术研究, 2020, 5 (23): 77-78.
- [7] 李会娜, 马宇翔, 王颖. 市政道路施工中沥青混凝土道路施工技术研究 [J]. 散装水泥, 2022(02): 79-80.
- [8] 赵军. 沥青混凝土道路施工技术在市政道路施工中的应用研究 [J]. 中国高新科技, 2022(06): 62-64+98.
- [9] 李雅. 道路桥梁工程的原材料试验检测技术探讨 [J]. 居舍, 2020(3): 25.
- [10] 宋非. 道路桥梁工程水泥与混凝土施工材料检测研究 [J]. 绿色环保建材, 2021(8): 1-2.

电气工程建设中电气安装问题及安装技术探讨

李夏静¹, 周铭²

1. 岱山县电力承装有限公司, 浙江 舟山 316200

2. 定州市盛邦职业技能培训学校有限责任公司, 河北 定州 071000

DOI:10.61369/ERA.2026030029

摘 要 : 电气安装是电气工程建设的重难点环节, 施工质量高低很大程度上决定了供电系统的安全性和稳定性。但不可否认的是, 现阶段电气工程建设中电气安装普遍存在着设计与施工脱节, 工艺不规范等问题, 不同程度上影响着电器安装效率与质量。随着时代进步, 数字化和智能化技术不断涌现应用, 在解决电气安装问题方面做出了重要贡献。文章围绕电气工程中的电气安装问题进行分析, 总结了电气安装的关键技术, 并针对性提出电气安装质量提升策略, 以推动电气工程高质量发展与发展。

关 键 词 : 电气安装; 电气工程; 安装问题; 电缆敷设技术; 配电系统安装技术

Discussion on Electrical Installation Problems and Installation Techniques in Electrical Engineering Construction

Li Xiajing¹, Zhou Ming²

1. Daishan County Electric Power Installation Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316200

2. Dingzhou Shengbang Vocational Skills Training School Co., Ltd., Dingzhou, Hebei 071000

Abstract : Electrical installation is a critical and challenging aspect of electrical engineering construction, with the quality of construction significantly determining the safety and stability of the power supply system. However, it cannot be denied that at the current stage, there are prevalent issues in electrical installation within electrical engineering projects, such as disconnection between design and construction and non-standardized processes, which affect the efficiency and quality of electrical installation to varying degrees. With the advancement of the times, digital and intelligent technologies continue to emerge and find applications, making significant contributions to resolving electrical installation issues. This article analyzes the electrical installation problems in electrical engineering, summarizes key techniques for electrical installation, and proposes targeted strategies for improving the quality of electrical installation to promote high-quality construction and development of electrical engineering.

Keywords : electrical installation; electrical engineering; installation problems; cable laying techniques; power distribution system installation techniques

电气安装环节是将设计方案转化为实体功能系统的过程, 其工程质量高低关系着电力供应可靠性和安全性。但我国电气工程领域发展历程相对较短, 电气安装中不可避免的依赖施工人员主观经验, 过程缺乏精细化、系统化控制, 致使实践中出现了一系列安装问题和安全隐患, 延误工期、增加施工成本。尤其一些空间狭窄、管线布设复杂的工程环境中, 传统电气安装方法的局限性日益严峻, 亟待转型升级。在此背景下, 大力推动电气安装技术创新升级, 引入智能化技术, 有助于实现电气安装全过程精准控制, 在提高安装效率与质量同时, 最大程度上保障人员安全, 对于推动我国电气事业持续发展大有裨益。

一、电气工程建设中电气安装的问题分析

(一) 设计与施工脱节

电气安装工程质量是电气系统安全、稳定运行的基础保障, 但实际建设中受多因素影响, 导致安装环境成为质量和安全隐患集中区域。其中设计与施工“两张皮”问题尤为严峻, 成为诸多安全问题产生的源头。部分电气安装工程设计图纸过于理想化, 对于现场设备安装, 空间管线综合排布等细节考虑不全面, 以至

于具体施工中面对复杂的管线布设和狭小的作业空间无从展开, 多依据主观经验动态调整, 容易出现管线冲突以及布局混乱等问题, 增加后期返工几率^[1]。

(二) 施工工艺规范性不足

施工过程的工艺操作规范性, 很大程度上决定了电气设备安装质量。部分施工人员习惯性依据个人实践经验, 对于设计图纸和施工规范的执行过于随意。如电缆敷设时未能严格遵循固定点和间距安装, 致使电缆堆积发热; 母线接头连接扭矩不符合标

准,增加接触电阻值^[2~5]。针对光纤、矿物绝缘电缆等新型电气设备安装工艺掌握不充分,仍然沿用传统方法,可能造成材料损耗或设备性能受损。如电缆敷设时弯曲半径过小,导致电缆绝缘层受损。

(三) 调试预验收不到位

调试和验收作为电机安装工程交付前的最终环节,该环节对于及早发现前期累积的问题、及时调整和解决至关重要,保证系统符合设计要求。但部分工程经常将这一环节省略或精简化^[3]。调试工作需要统通电试运行,但针对系统的联动逻辑、保护功能以及电能质量等关键项目却直接省略,尤其自动化系统程序逻辑验证缺失,影响系统后期运行稳定性。验收环节多关注工程进度及交付情况,对存在的问题记录不详细、责任模糊不清,提出的整改要求缺少具体的责任人标准以及整改时限等内容,以至于电气系统“带病运行”。

二、电气安装的关键技术

(一) 电缆敷设技术

电缆作为电能输送的基础设施,这质量高低关系着线路运行安全与使用寿命。电缆敷设前要勘察和准备,了解图纸中关于电缆的型号、路径、规格、长度等指标;检查预埋电缆保护管以及电缆支架是否符合标准,并及时验收土建工程。在具体敷设时,结合不同工程环境选择适宜的敷设方法,主要有以下几种:

(1) 直埋敷设。电缆敷设工艺适合户外环境,开挖沟深不小于0.7m,沟底铺设一层软土作为垫层;电缆敷设时保持自然松弛,避免过度牵引造成电缆损坏,若多根电缆同时敷设,则需要保持规定间距;回填土分层夯实,并在敷设路径上方设置电缆标志桩^[4~8]。

(2) 桥架内敷设。适合电缆敷设密集区域,在支架上分层敷设电缆,保证电缆排列整齐、牢固。高压电缆与低压电缆分层布置综合考量布设的散热和维护空间;选合适的防火封堵工艺,在电缆穿越墙壁,楼板等区域时使用防火材料充分密封^[9~11]。

(3) 电缆沟敷设前保证桥架安装牢固、接地可靠。电缆统一在桥架内排列整齐,避免交叉敷设;选用滚动放线方式敷设电缆,避免电缆扭曲受损。

(4) 管道内敷设。用于保护电缆穿越建筑物或道路,敷设前全面疏通管路,涂抹一层滑石粉避免绝缘层受损;牵引敷设时,牵引速度控制在15m/min以内,避免损坏电缆防护层^[12]。

除了选择合适的敷设方法外,更要保证电缆终端与接头的制作质量。在干燥、清洁环境下进行,严格遵循工艺图纸,使用专门材料和工具进行。如交联聚乙烯电缆热缩头,剥切外护套和绝缘层,依据工艺标准安装应力锥与热缩管;压接接线端子、完成连接,制作后进行试验,合格后方可使用^[13]。

(二) 配电系统安装技术

高低压开关柜,变压器,配电箱等配电设备安装前,仔细验收基础质量,多采用混凝土或槽钢基础。针对大型油浸变压器设备安装,需要吊装、就位、附件组装以及注油等工序,需施工人

员严格遵循规范和标准进行,注重安装环境干燥、通风;配电柜在基础型钢上整齐排列,先校准首尾两台柜作为基准,再逐步调整其他柜体,保证柜体之间的垂直度、缝隙等指标合乎标准;柜体的连接牢固、接地可靠。母线作为配电柜内导电主干线,支持绝缘子牢固布设。母线平置时,使用贯穿螺栓自下而上安装,其余情况则在维护侧安装螺母^[14]。螺栓连接过程中使用力矩扳手紧固,保证接触面的压力均匀,并母线大界面进行镀锌处理,降低接触电阻。

(三) 接地与防雷技术

现代民用建筑普遍采取电气保护接地、防雷接地、弱电系统工程集合于同一接地装置中的方法,可有效消除不同接地系统间的电位差,避免地电位反击诱发安全事故。此类综合接地系统的接地电阻普遍在1Ω以下,为达到这一标准,设计时多选择建筑物基础钢筋作为自然接地体,若条件不符合时,额外增设人工接地极或选择降阻剂等材料^[15]。

外部防雷装置主要起到拦截累积的作用,将雷击瞬间的强电流安全引入地下,避免对电气设备产生破坏。外部装置包括了接闪器和引下线^[16]。接闪器是指常规的避雷带、避雷针等,以及利用金属屋面或幕墙框架为接闪器,安装时保证其保护范围覆盖建筑物整体;引下线将建筑物内部的钢筋作为自然引下线,经济实惠、安全性优良,但要保证钢筋从屋顶贯穿至基础,形成可靠的焊接。内部防雷则注重等电位联结,消除危险火花以及电位差。具体通过总等电位联结以及局部等电位联结两种方式实现,前者将建筑物内所有金属管道和接地干线等整合在一起,后者则是安装在电气竖井、浴室等特殊场所,与区域内可导电部分联结。具体的接地与防雷技术关键指标如表1。

表1 接地与防雷技术关键指标

技术环节	关键指标	作用
综合接地电阻	≤1Ω(常规标准)	保证故障电流有效散流,降低接触电压
接地电阻实测值	0.3Ω(示例)	检验施工质量,符合高标准以及运行安全需求
等电位联结	使用专用卡子联结,禁止焊接	保证连接可靠,不破坏原管道
SPD 分级保护	I、II、III 级分级协调配合	逐级泄放雷电流,避免终端设备受损

(四) 智能化电气安装技术

(1) “BIM+AR”赋能现场施工。BIM模型与AR技术叠加应用于施工现场,可有效解决设计与施工脱节问题。施工人员佩戴AR眼镜,或使用平板电脑等移动终端,直观查看虚拟管线在真实环境的位置,从而实现数字模型与现场实景的叠加呈现。配合专用仪器设备的校准测量,控制机电管线安装误差在±5mm以内,核心筒对接精度达到99%,降低后期返工率70%^[17]。

(2) “BIM+ 数字孪生”虚拟建造。BIM技术在设计阶段,可收集数据建立电气安装BIM模型,设计师在虚拟环境中进行管线排布设计、碰撞检测以及设计优化,精准识别和解决潜在问题。联合数字孪生技术,对复杂作业环境方针模拟以及预演操作。如输电铁塔组立环节,基于数字孪生系统对电气系统三维仿真,多方对比后自动生成最佳方案,为机器人作业提供一站式导

航。而在电缆敷设环节，依托数字化系统收集的实际空间数据，与设计图纸对比，精准计算电缆具体长度、走向和排列方式，便于后期施工和运维^[18]。

三、电气工程建设中电气安装质量提升策略

（一）加强全过程质量管理

为了提升电质量，应加强过程质量管理，增强设计与施工协同。工作机制，鼓励设计单位与施工单位围绕设计图纸进行沟通，提出优化的施工建议。推广应用基于 BIM 技术的三维协同设计模式，虚拟环境中进行管线综合以及碰撞检测，源头上消除“漏、碰、缺”等问题；充分设计交底，保证施工人员充分掌握设计意图、特殊要求以及关键工艺。

加强设备和配件的进出管控，严格遵循设计要求检查其出厂实验报告、合格证等文件，必要时则现场实验或抽样送检。推样板引路制度，针对盘柜接、电缆头制作等核心工序，提前制作实体样板，验收合格后方可全方位进行施工。采用物联网和移动互联网等技术对于关键工序进行扫码验收，并将相关影像资料上传至云端保存，便于各环节数据全面、责任人清晰^[19]。

制定详细的调试大纲以及验收清单，由第三方专业机构对系统联动功能、接地电阻、继电保护定值等关键性能指标进行检测验收，发现问题及时要求施工单位整改，确定具体的整改时限、标准以及相关责任人，整改后重新复核相关资料同步至云端保存。

（二）实行标准化的安装工艺

编制符合规范和国家标准的工艺标准手册，内容图文并茂规

定了各类作业环节的操作步骤、工艺要点、工具选用以及质量标准等；推广“工艺卡”，将电气安装标准印制便携卡片上，下发至一线作业人员；完善工艺培训与考核机制，所有操作人员需经过专业培训和考核后方可上岗，尤其高压试验以及电缆头制作等特殊工种，需要施工人员需要持有国家认可特种作业操作证^[20]。

推行工厂预制化和现场装，可将现场加工条件转移至预制工厂，如电缆桥架的弯头与三通，配电箱的内部接线等，可在工厂内依据预设标准和规范进行生产并预组装调试；运输至现场后，通过模块化吊装以及连接即可，可大幅度降低现场作业强度以及对环境的影响，保证安装精度和效率。

（三）引入先进的质量检测技术

为了保证电器安装质量，可引入便携的数字化检测技术与设备。红外热成像技术作为一项代表的智能化检测，系统待负荷运行后可精准检测配电柜内部连接点、开关触点、电缆接头等部位，直观发现是否存在运行过载或接触不良等问题时，现隐患的及早识别和维护；针对开关柜中高压电缆等关键设备采取局部放电检测，便于精准探查设备内部绝缘缺陷及早处置，避免发生绝缘击穿事故；采用钳型接地电阻测试仪，不需要断开接地引下线即可便捷测量，多适合周期性复测，检测结果精准、检测过程安全。

四、结论

综上所述，电气安装是电气工程建设的重要环节之一，加强设计单位与施工单位联系，落实施工全过程质量控制，并通过选择合理、前沿的施工工艺，在先进的质量检测技术赋能下，形成自我完善和改进的生态系统，从而为电气安装质量提供全方位保障。

参考文献

- [1] 李玉芝. 高层建筑电气工程强电竖井内电气设备的安装施工技术探究 [J]. 电工技术, 2025, (17): 199-200+204.
- [2] 高京作. 高层住宅建筑电气工程安装施工技术探究 [J]. 中国住宅设施, 2025, (08): 242-244.
- [3] 杨小宁. 电力电气工程中线路安装与施工技术研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (10): 234-236.
- [4] 周文辉. 装配式建筑电气工程安装技术分析 [J]. 低碳世界, 2025, 15 (05): 88-90.
- [5] 朱磊, 董国庆. 建筑电气工程中低压配电系统安装与调试技术 [J]. 科学技术创新, 2025, (11): 180-183.
- [6] 倪嘉晖. 电气工程中气体绝缘开关设备安装与调试技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10 (09): 94-96.
- [7] 潘纹文. 漏电保护技术在建筑电气工程安装中的应用研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51 (10): 91-93+161.
- [8] 张立君, 王志勇, 张杨. 电气安装施工技术在智能科技建筑电气工程中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52 (03): 156-158.
- [9] 肖劲榕. 住宅建筑电气工程低压配电系统安装技术研究 [J]. 中华民居, 2025, 18 (03): 183-185.
- [10] 艾强. 电气工程施工安装环节存在的问题及解决措施 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (S1): 82-84.
- [11] 缪佳, 叶俊. 电气工程中 GIS 设备安装与调试技术研究 [J]. 产品可靠性报告, 2024, (10): 111-112.
- [12] 齐开明, 王军, 赵鹏. 高层住宅建筑电气工程安装施工技术探究 [J]. 居舍, 2024, (17): 25-28.
- [13] 赵彬. 建筑电气工程消防系统设备安装与调试技术探讨 [J]. 居业, 2024, (04): 55-57.
- [14] 牟洵, 赵凤帅. 建筑电力电气工程中线路安装与施工技术分析 [J]. 光源与照明, 2024, (01): 177-179.
- [15] 林诒喜. 基于 BIM 技术的建筑电气工程低压电气安装技术分析 [J]. 四川水泥, 2023, (12): 151-153.
- [16] 宋朝璇. 基于电气工程建设的电气安装问题及技术解决方案分析 [J]. 中国高科技, 2023, (21): 70-72.
- [17] 丁骥. 建筑电气工程施中强电电缆安装技术分析——评《高压电力电缆运行检修技术》[J]. 中国科技论文, 2023, 18 (06): 713.
- [18] 孙若豪. 电气工程建设中电气安装问题及安装技术解析 [J]. 电气技术与经济, 2023, (03): 147-149.
- [19] 陈子玮. 建筑电气工程建设中的低压配电系统安装调试技术 [J]. 江西建材, 2022, (06): 221-222+225.
- [20] 李金环. 建筑电气工程质量及安装工程存在的问题探析 [J]. 住宅与房地产, 2021, (12): 214-215.

道路工程中新材料、新技术的应用与实践

张颐

天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300051

DOI:10.61369/ERA.2026030034

摘 要 : 伴随交通基础设施不断进步, 道路工程在质量与施工效率上被赋予更高要求, 应用新材料、新技术已然成为增强道路工程质量、延长其使用期限、增进施工效率的关键所在。本文着重探究道路工程里新材料、新技术的运用及其实际意义, 剖析新材料和新技术的创新性、可行性以及市场前景, 还结合案例研究探讨其应用成效和对行业产生的影响, 通过对不同类型道路工程展开分析, 给出进一步推广应用的建议, 以推动道路工程的技术革新与行业进步。

关 键 词 : 新材料; 新技术; 道路工程; 应用实践; 施工效率

Application and Practice of New Materials and Technologies in Road Engineering

Zhang Yi

Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300051

Abstract : With the continuous advancement of transportation infrastructure, road engineering is facing higher demands in terms of quality and construction efficiency. The application of new materials and technologies has become crucial for enhancing the quality of road engineering, extending its service life, and improving construction efficiency. This paper focuses on exploring the application and practical significance of new materials and technologies in road engineering, analyzing their innovation, feasibility, and market prospects. Additionally, it examines their application effectiveness and impact on the industry through case studies. By analyzing different types of road engineering projects, the paper provides recommendations for further promotion and application to drive technological innovation and industry advancement in road engineering.

Keywords : new materials; new technologies; road engineering; application practice; construction efficiency

引言

道路工程身为基础设施的重要构成, 在推动经济社会发展、提高交通运输效率方面起着重要作用, 伴随现代化建设推进, 传统道路工程材料与技术逐渐显现出诸多不足, 像耐用性欠佳、施工周期长、资源浪费严重等问题, 为应对这些挑战, 新的材料和技术不断涌现并应用于道路工程, 这些新技术既能提高施工效率, 又能提升道路性能与可持续性, 本文会深入探究道路工程中新材料和新技术的应用, 分析其在实际项目中的应用状况与效果, 为未来道路工程发展提供借鉴, 助力其在不断变化的环境中实现更好的发展, 满足日益增长的交通需求。

一、新材料在道路工程中的应用

(一) 沥青材料的创新与应用

环保法规日益严格, 传统沥青材料的应用面临着愈发严峻的挑战, 改性沥青作为新型环保材料, 正逐步成为道路工程里的关键选择。常见改性沥青有橡胶沥青、SBS 改性沥青等, 它们可增强沥青的高温稳定性、抗老化能力以及低温柔韧性, 像 SBS 改性沥青, 在高温环境中能维持较好的流动性与粘结性, 低温时具备良好抗裂性, 使用寿命大幅延长, 统计显示其耐久性较普通沥青提升约 30% 至 50%。环保型的橡胶沥青用废旧轮胎橡胶改性, 既能减少资源浪费, 又能减轻沥青使用时的环境污染, 契合现代绿

色交通工程需求, 橡胶沥青回收利用可降低生产成本, 还能降低沥青路面噪音、提升路面舒适性, 依据国家标准《公路沥青路面工程技术规范》GB 50092 - 2013, 使用改性沥青可有效提升道路抗车辙性能与耐久性, 特别适用于高速公路和重载道路, 在高温及高流量路段, 其性能优势更为突出, 能更好地保障道路的长期稳定使用, 为交通出行提供更可靠的基础支撑^[1]。

(二) 高性能水泥与混凝土材料

高性能水泥与混凝土材料在道路工程的应用覆盖面不断拓宽, 是保障道路工程质量和耐久性的核心, 高性能水泥有较高强度、耐久性和抗冻性, 用粉煤灰水泥、硅灰水泥, 可有效增强混凝土的抗渗性与抗压强度, 减少裂缝生成数量, 高性能混凝土在

寒冷区域抗冻性格外出色，可承受150次以上的抗冻融循环，普通混凝土大多在50次左右出现破坏。高性能水泥和混凝土的强度等级多为C50及以上，适配高速公路、桥梁等关键基础设施建设，依照《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010，高性能混凝土的抗压强度可达到C60及以上，服务恶劣气候条件的道路建设，像积满冰雪的高速公路，选用高性能水泥可明显削减混凝土施工时的水化热，削减热裂缝数量，维持道路结构稳固，这类材料可延长道路使用时长，极端环境下仍可维持良好结构性能，压缩维护及修复经费^[2]。

（三）聚合物改性材料的应用

聚合物改性材料用于道路建设，尤其是对沥青和混凝土进行改性，可增强材料抗拉强度、抗老化性与抗压能力。像SBS、PE、EVA等聚合物制成的聚合物改性沥青，在高低温环境性能更佳，能提升路面抗车辙、抗裂与抗老化能力。聚合物改性沥青高温软化点可达80° C，远超普通沥青的45° C上下，适合南方高温区域，其抗老化性强于传统沥青，可减少紫外线、氧化等致老化问题，延长道路使用寿命，极端气候下，聚合物改性材料可提升道路抗冻融能力，寒冷地区改性沥青低温延展性达-20° C，避免路面低温开裂，高速公路、机场跑道、桥梁等承受高负荷且面临高温、寒冷等极端状况的道路建设广泛采用聚合物改性材料，可延长道路使用寿命并保障其安全性，让道路在复杂环境下也能保持良好性能，为交通出行提供更可靠的保障^[3]。

二、新技术在道路工程中的应用

（一）智能化监测技术的应用

智能化监测技术发展让道路工程施工质量管理与后期维护更科学、更实时，在道路结构嵌入传感器、温度计、应力计等设备，可实时监测道路应力、温度、湿度、沉降等物理指标，实现道路状况实时反馈，准确把握道路运行状况，及早发现潜在安全隐患，采用光纤传感技术能对路面长期监测，精确检测微小应力变化，光纤应变计精度达微米级别，有效预防裂缝和沉降等问题。道路遇极端天气或灾害，智能监测系统可及时预警保障安全，依据《公路工程质量检测技术规范》JTG/T F80-2017，智能监测技术广泛用于高速公路、桥梁等关键基础设施，提高道路养护维修精准度，改变人工巡检低效滞后状况，提升道路长期运行安全^[4]。

（二）3D打印技术在道路建设中的应用

3D打印技术用于道路工程推动施工工艺革新，它能依据数字化设计模型直接制造道路构件，像路面板、桥梁构件等，摆脱传统工艺对模具依赖，提升施工精度，3D打印技术提高施工效率，减少材料浪费，优化资源利用率，统计显示，使用该技术可减少约20%至30%材料消耗，缩短施工周期，2017年荷兰成功打印世界首条3D打印公路，采用3D打印混凝土路面，施工周期比传统方式缩短40%，而且3D打印技术可制造更复杂形状构件，增加道路设计灵活性，减少人工干预降低成本，3D打印让道路修复和定制更精细高效，在难度大的环境能提供创新方案，随着技术持续成熟，未来3D打印预计会在更多道路建设项目应用，推动道路工程朝智能化、自动化、高效化迈进^[5]。

（三）BIM技术在道路工程中的应用

建筑信息模型（BIM）技术用于道路工程，让其设计、施工、运维整个过程更具数字化与精细化特征。设计阶段，BIM技术开展三维建模，对道路地形、设计、结构等全方位仿真模拟，提前找出设计问题并优化，施工时，借助数字化管理，BIM技术实时追踪施工进度、材料使用状况与质量控制，保障项目顺利推进，依据《建筑信息模型应用标准》（GB/T 51231-2016），BIM技术可减少设计变更与错误，削减施工成本，有研究显示，运用BIM技术的项目，建设周期能缩短10%-20%，施工成本可降低约5%-10%，而且，BIM技术与智能监测技术结合，凭借实时数据共享与反馈，进一步完善施工方案，减少资源不必要的消耗，这些技术融合起来，BIM提升设计精度与施工效率，还对道路项目全程实施数字化管理，助力工程朝智能化、信息化方向发展，为道路工程的高质量建设提供有力支撑，在提升工程整体效益的同时，也为行业的可持续发展奠定坚实基础。

三、新材料与新技术的综合应用

（一）新材料与新技术的融合设计

新材料与新技术融合设计可提升道路工程整体性能，将BIM（建筑信息模型）技术与新型改性沥青结合，在施工前借助数字化模拟精准预知材料性能变化，进而优化施工方案，设计阶段，BIM能对路面温度、湿度等环境条件仿真，以此挑选适宜材料类型，保障道路长期稳定与安全，借助BIM模型动态分析，可找出材料性能不适应之处，像温度变化对沥青的影响，提前调整设计，防止因材料选择有误引发工程质量问题，依据《公路工程质量检测标准》GB/T 50081-2019，新型改性沥青（如SBS改性沥青）搭配BIM技术，可使道路抗车辙性能提升超40%，降低道路病害发生概率^[6]。

（二）综合应用案例分析

综合多个道路工程应用案例分析新材料和新技术实际效果，某高速公路项目采用聚合物改性沥青与智能监测系统成效显著，聚合物改性沥青增强了路面在高低温条件下的稳定性，智能监测系统对路面沉降、温度、湿度等指标实时监控，项目投入使用三年，路面病害发生率降低30%，道路使用寿命延长约20%，从该项目监测数据看，改性沥青与智能监测系统结合，减少了因路面老化和裂缝产生的维护费用，让道路整体维护成本下降15%，充分体现了新材料与新技术结合在道路工程中的优势，为后续类似工程提供了可借鉴的范例，在保障道路质量的同时，实现了成本控制与效益提升^[7]。如表1所示。

表1 改性沥青与智能监测系统应用前后数据对比

项目	改性沥青应用前	改性沥青应用后	差异
路面病害发生率	25%	17%	-8%
道路使用寿命	15年	18年	+20%
维护费用	100万元/年	85万元/年	-15%

（三）新材料、新技术在实际工程中的挑战与解决方案

新材料和新技术于道路工程有着广泛应用前景，不过推广时却面临不少挑战，技术难度大是其一，众多新技术与新材料需高水平

研发支撑，像聚合物改性沥青生产工艺繁杂，对温控和时间管理要求严苛，这无疑对施工人员技术水平有了更高要求，成本问题同样制约着新技术应用，改性沥青、BIM 技术等新技术虽长期使用可降低维护成本，但初期投入大，在资金紧张项目里全面推广较难，人才缺乏也是一大难题，很多新材料和新技术应用需专业人才操作管理。解决这些问题可加强技术研发投入，推动材料标准化与生产规模化，开展专业培训提升工程人员对新材料和新技术掌握程度，有《沥青路面材料设计规范》JTG/T F40 - 2017等相关标准支持，加强行业技术交流与经验共享，能降低新技术应用门槛，促进其在更多项目中普及，让道路工程更好地受益于新材料和新技术带来的优势，进一步提升道路建设的质量和效率。

四、新材料与新技术的未来发展趋势

（一）绿色环保材料的发展趋势

全球环境保护意识不断提升，绿色环保材料于道路工程里的应用势必更为广泛，未来道路建设会重点选用可回收、低碳排放且能高效利用资源的材料，像可降解沥青、再生塑料材料等，这些绿色环保材料能降低道路建设碳足迹，减少资源消耗与环境污染，同时再生沥青使用可削减30%至50%的原材料消耗，其抗车辙和抗裂性能与传统沥青不相上下，此外，依据《绿色建筑材料应用技术规范》GB/T 50884 - 2013标准，未来道路建设所用材料会更契合环境友好要求，预计到2030年超50%的道路建设材料可实现回收利用与低碳环保，伴随绿色技术深入发展，未来道路建设和养护会更关注材料全生命周期管理，涵盖生产、使用到回收全过程，最大程度降低对环境的负面影响^[8]。

（二）智能化技术的未来前景

智能技术不断进步，在道路工程里的作用愈发关键，未来几年会成为道路工程核心技术之一，为行业发展增添新科技动力。预计到2025年，智能监测技术市场需求从当下15%升至30%，增长约15%，智能修复技术市场需求从5%提高到15%，增长10%，两类技术需求都大幅上扬，智能交通系统（ITS）预计占整体市场20%，较当前增长10%，成为智能道路技术体系重要构成。这些技术可提升施工效率、降低维护成本，增强道路安全与耐久性，全面优化道路工程建设和养护全流程，智能监测技术能实时监测道路健康状况，提前发现潜在危险并修复，延长道路使用寿命、

减少不必要维修开支，使道路养护更具针对性和高效性。到2025年，智能化技术总市场需求预计增长20%，占道路养护市场40%以上，市场占比大幅跃升^[9]。如图1所示。

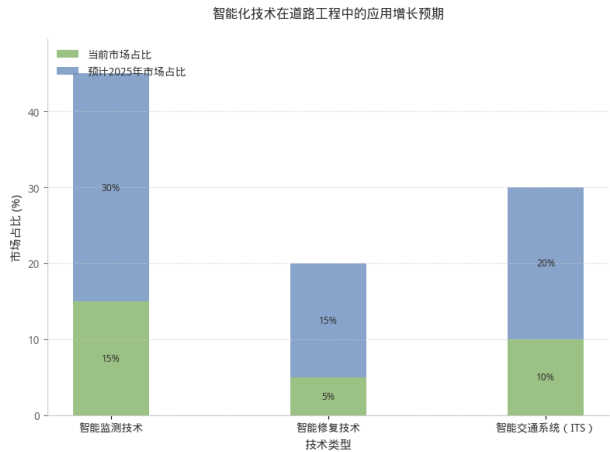


图1 智能化技术在道路工程中的应用增长预期

（三）道路工程技术的持续创新

未来道路工程势必会更着重于可持续发展和智能化相融合，在提升工程质量、削减资源浪费、达成节能减排等事宜上，技术创新会持续助力行业前行，未来道路建设会启用更高效节能设备与智能施工方案，运用大数据和 AI 技术优化施工过程，提升资源利用率、减少浪费，低碳环保政策不断趋严，未来道路工程会更多运用可再生能源技术，像太阳能路灯、风能发电系统等，进一步降低道路施工与维护时的碳排放，预估到2035年，全球道路建设资源回收率会提升至70%以上，材料综合利用率达90%以上。未来道路工程不再只关注道路施工与使用，还会重视整个生命周期内环境影响、能耗、排放等多方面可持续性^[10]。

五、结语

新材料和新技术应用给道路工程带来了创新与发展契机，绿色环保材料推广、智能化技术进步以及道路工程技术持续革新，会进一步提高道路建设效率、质量和可持续性，伴随技术不断发展，未来道路工程会更智能、环保，能更好契合现代交通需求，推动新材料、新技术广泛应用，可优化工程质量，还能减少资源浪费和环境影响，为道路工程可持续发展筑牢根基。

参考文献

[1] 杨隼. 道路工程中路面材料选择与性能评估 [J]. 汽车周刊, 2025, (02): 104-106.
[2] 李晓丽. 道路桥梁建设中新技术与新材料的应用研究 [J]. 汽车周刊, 2024, (06): 16-18.
[3] 李朝军. 特殊土路段道路施工技术与创新实践 [J]. 工程建设与设计, 2022, (12): 219-221.
[4] 张洪飞. 浅谈市政道路施工中新材料的应用 [J]. 中国设备工程, 2020, (19): 227-228.
[5] 鄂淑英. 浅谈道路工程试验检测存在的问题及控制措施 [J]. 绿色环保建材, 2020, (09): 96-97.
[6] 干红钢. 道路工程中智能化施工技术的应用 [J]. 运输经理世界, 2024, (27): 7-9.
[7] 王浩. 基于 BIM 技术的道路勘测设计实践教学模式思考与实践 [J]. 内江科技, 2024, 45(07): 34-36+39.
[8] 何小红, 刘凡. BIM 技术在道路工程的应用研究 [J]. 科学技术创新, 2024, (04): 159-162.
[9] 杨柳, 赵显焦, 聂廷武, 等. 数字孪生在道路工程中的应用综述 [J]. 交通工程, 2023, 23(03): 107-114.
[10] 代文绍. 信息化技术在道路工程项目管理中的应用探析 [J]. 信息系统工程, 2021, (10): 72-74.

工程造价评估中的风险管理与不确定性分析

黄成

天津宸颖工程咨询有限公司, 天津 300171

DOI:10.61369/ERA.2026030035

摘 要 : 工程造价评估是建设项目的关键环节, 做好风险管理和不确定性分析, 是保障工程造价评估精准性和可控性的关键方法, 文章最先分析风险管理在工程造价评估里的必要性和落实路径, 研究风险评估的通用技术和工具, 重点探究不确定性分析在工程造价预测的应用, 讲解如何运用概率模型和敏感性分析, 妥善处理评估里的不确定性因素, 结合案例剖析, 提出数项优化工程造价评估步骤风险管理的策略, 为提升项目成本控制的科学性和准确性提供参照。

关 键 词 : 工程造价评估; 风险管理; 不确定性分析; 敏感性分析; 成本控制

Risk Management and Uncertainty Analysis in Construction Cost Estimation

Huang Cheng

Tianjin Chenying Engineering Consulting Co., Ltd., Tianjin 300171

Abstract : Construction cost estimation is a crucial aspect of construction projects, and effective risk management and uncertainty analysis are key methods for ensuring the accuracy and controllability of construction cost estimation. This article first analyzes the necessity and implementation paths of risk management in construction cost estimation, studies common techniques and tools for risk assessment, and focuses on exploring the application of uncertainty analysis in construction cost forecasting. It explains how to utilize probability models and sensitivity analysis to properly handle uncertain factors in the estimation process. Through case analysis, several strategies are proposed to optimize risk management in the steps of construction cost estimation, providing a reference for enhancing the scientific and accurate control of project costs.

Keywords : construction cost estimation; risk management; uncertainty analysis; sensitivity analysis; cost control

引言

建筑行业高速发展, 工程造价评估是影响项目成败的核心因素, 传统造价评估方法靠经验和历史数据支撑, 但面对复杂工程项目, 面对多种不可控变量, 评估结果易受不确定性和风险干扰, 风险管理和不确定性分析属于现代造价管理的重要组成模块, 可辅助决策者识别、评估和应对潜在风险, 合理预判项目成本, 文章探究工程造价评估相关的风险管理与不确定性分析, 总结它在实际应用中的作用和方法, 同步给出优化方案, 增强造价评估准确水平与项目成本控制可靠程度。

一、风险管理在工程造价评估中的重要性

(一) 风险管理的定义与内容

对项目潜在风险开展识别、评估、控制及监控的流程, 要把不确定性对项目的负面冲击降到最低, 实施工程造价评估工作时, 风险管理不光包含对施工过程中的技术风险、市场风险、环境风险等的预判, 还包含成本波动、时间延误等因素的管控, 工程项目风险一般由多种因素造成, 诸如自然灾害、政策变动、资源短缺、劳动力波动等。依照 ISO 31000 标准, 风险管理得覆盖风险的识别、评估、应对和监控 4 个环节, 靠合理风险应对措施保障项目目标达成, 进行工程造价评估阶段, 风险管理的具体内容涵盖识别潜在成本增长因素、考量评估数据精度、量化风险因素

对预算的影响^[1]。

(二) 风险管理在造价评估中的作用

开展工程造价评估工作时, 风险管理起到关键作用, 风险管理可帮识别并量化可能影响工程成本的潜在因素, 诸如材料价格波动、项目延后、工人罢工等, 参照国际项目管理协会 (IPMA) 的数据, 大型工程项目中, 30% 左右的成本超支和不可控风险因素关联。依托精准的风险评估, 可提前预判这些因素对项目预算的影响, 向决策者交付更精准的成本预测结果, 风险管理给造价评估搭起灵活框架, 让工程造价能针对不同风险情境动态调整, 保障评估结果有较高准确性和可控性, 敏感性分析、蒙特卡罗模拟等技术可量化风险因素对项目造价的影响, 依此确定合规的风险应对方案, 风险管理可保障项目按预定成本顺利完成, 防止预

算失误带来的财务困境^[2]。

（三）风险管理流程与步骤

风险管理流程一般涵盖识别、评估、应对和监控4个主要步骤，风险识别阶段会逐一分析项目包含的各个流程，识别可能干扰工程造价的风险因素，我们可借助经验法则、历史数据、专家判断等识别这些因素，还要覆盖项目的每个阶段，诸如设计、施工、采购这类。风险评估针对已识别的风险开展定性和定量分析，评估它的发生概率和可能造成的影响，该阶段常用工具有风险矩阵分析、敏感性分析，评估结果借量化数据呈现，给风险应对策略做支撑，风险应对阶段需明确避免、转移、减轻或接受等应对策略，把它整合进项目管理计划。风险监控阶段要定期核查项目进展，研判已识别风险的变动走向，结合新状况调整风险应对策略，按照PMBOK（项目管理知识体系指南）的标准，风险管理要覆盖项目全周期，按照项目不同阶段动态更新风险评估结果，依托这套完整的风险管理流程，工程造价评估面对不确定性和风险干扰时，能维持较高精度^[3]。

二、常见的风险评估技术与工具

（一）定性风险评估方法

针对工程项目的潜在风险，定性风险评估方法主要通过专家判断、经验积累等手段开展初步识别，重点聚焦风险类型、发生概率及潜在危害，风险矩阵法、SWOT分析法和德尔菲法是常用定性评估工具，风险矩阵法把风险发生概率及影响程度分成不同等级，构建矩阵判断风险严重程度。风险概率划分为5个等级：影响程度划分为5个等级：某大型项目面临材料成本上涨风险，预测上涨概率达60%，影响工程总造价的占比为10%，借助风险矩阵能判定该风险为“高影响、高概率”组合，该方法操作便捷，可初步排查潜在风险，但主观性偏差明显，结果精准度不高^[4]。

（二）定量风险评估方法

定量风险评估方法依托数学模型、统计数据，分析风险具体影响的量化数值，可输出更精准的评估结果，应用较广的定量方法涵盖蒙特卡罗模拟、灵敏度分析、决策树分析，蒙特卡罗模拟是借助随机抽样技术，生成风险事件发生概率及影响的统计模拟方法，可完整衡量风险对项目造价的影响，一并呈现不同情景的概率分布。灵敏度分析可测算项目造价随各风险因素变化的敏感程度，一般通过测算不同风险因素变动对造价的影响大小判断项目风险暴露度，决策树分析靠搭建决策树，逐一评估各决策路径及对应风险，适配需决策分析的复杂项目，采用蒙特卡罗模拟时，必须明确风险因素的概率分布，依照国际风险管理标准ISO 31000的建议，模型需包含至少500次模拟迭代，保障分析结果可靠^[5]。如表1所示。

表1 风险因素概率分布及影响示例

风险因素	概率（%）	影响（万元）
材料价格上涨	60	300
施工延误	40	150
劳动力成本波动	50	100

（三）风险评估工具与模型的应用

现代各类工程项目里，各式风险评估工具和模型已在项目管理中广泛采用，常用的有风险矩阵、故障树分析（FTA）、事件树分析（ETA）等工具，风险矩阵法适合简单项目的初步风险筛查，能直接展现风险的相对严重等级，助项目经理快速辨识高风险因素。故障树分析属于定量分析方法，它通过逻辑树状结构，逐步梳理所有可能引发项目失败的故障及失效因素，靠这个手段，项目团队可排查出系统性故障的根本原因，并测算它的发生概率，事件树分析和故障树分析互为对照，从已知事件起步逐步推导可能后果，分析项目事故或灾难性事件，它的实用价值很高。分析过往工程项目数据，可预判特定区域材料价格波动走向，据此对预算做出对应调整，实际落地时，上述工具与模型结合运用，可切实识别、评估并管控工程项目的各类风险，推进大型基础设施项目期间，用风险矩阵排查出潜在风险因素后，用蒙特卡罗模拟做量化评估，借助决策树分析选定最优风险应对策略^[6]。

三、不确定性分析在工程造价评估中的应用

（一）不确定性分析的基本概念

不确定性分析指应对项目内多种不可预见因素时，以概率和统计方法衡量不确定性对工程造价评估产生的影响，工程项目包含大量不确定因素，诸如材料价格波动、施工进度延误、劳动力市场变化等，这类因素均无法精准预测，造价评估必须纳入不确定性分析这个环节。核心做法是用数学模型对这些不确定因素建模，随后分析这些内容对项目成本、工期等关键目标的潜在作用，ISO 9000质量管理体系标准着重指出，不确定性分析依靠科学量化方法开展，依据项目具体背景实施个性化风险管理，该类分析方法能给项目决策者提供更灵活可靠的决策凭据，保障评估结果合理。

（二）不确定性分析方法——概率模型与敏感性分析

不确定性分析常用概率模型与敏感性分析两种主要方法，概率模型对各类风险因素开展概率分布建模，归集工程项目的历史数据、市场趋势等信息，预估不确定因素发生概率及可能影响范围，较为常见的概率模型有正态分布、三角分布、均匀分布等，这类模型可量化项目内各类不确定因素的影响范围。开展工程造价评估时，假设材料成本波动契合正态分布，平均数值为100万元，标准差为15万，概率模型可预测材料价格的波动区间，计算不同波动状态下的成本变动，敏感性分析评估不同不确定性因素给项目目标带来的影响大小，定位对项目影响最大的关键因素，蜘蛛图、Tornado图等是敏感性分析常用工具，借助这些工具，决策者可专注处理影响显著的不确定性因素，对项目各环节做敏感性分析，能定位影响项目成本的关键变量，优化资金分配^[7]。如图1所示。

（三）不确定性分析的案例分析与实践

大型工程项目普遍采用不确定性分析，拿2012年北京地铁13号线建设项目举例，实施该项目预算评估期间，通过蒙特卡罗模拟法全面剖析材料成本、施工进度等不确定因素，按照项目风险评估报告，该项目材料成本的波动范围为±10%，施工进度或受天气、工人罢工等因素干扰。用蒙特卡罗模拟做1000次运算，经

核算明确该项目总造价预测区间为16亿元至18亿元，进一步做的敏感性分析表明，材料成本起伏对项目总造价的影响排名第一，占比突破60%，工期延误的影响相对有限，占15%左右，该分析结论为项目管理团队提供了可行的预算调整及风险管控方案，保障项目后期执行能及时应对材料成本波动，防止超支风险，这个案例证明，依托不确定性分析，可更精准判定项目成本的波动幅度，给项目决策提供科学参照^[8]。

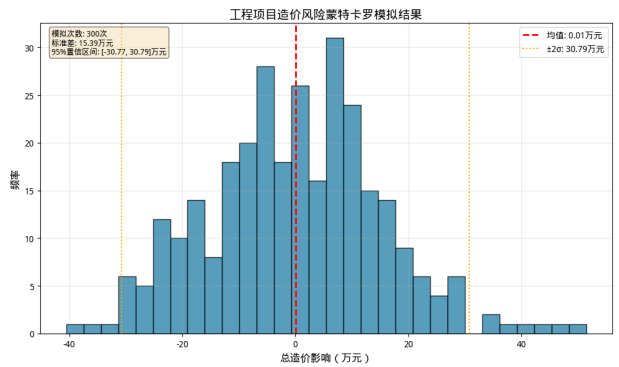


图1 蒙特卡罗模拟结果分布图

四、优化风险管理与不确定性分析的策略

（一）风险管理优化策略

优化风险管理策略的核心为增强风险识别、评估和应对的效率 and 准确性，按照 ISO 31000 风险管理标准，优化第一步为打造系统化的风险识别机制，以多维度数据分析、专家评审等方式排查各类潜在风险，按期更新风险数据库，结合历史项目经验与实时数据，靠大数据分析技术挖掘潜在风险模式，强化识别精准度，同步搭建风险识别复核机制，防止单一视角引发的风险疏漏。推进风险评估强化，用更精准的定量分析工具，诸如蒙特卡罗模拟法，推演不同情境中风险出现的概率和可能影响，精准测算项目造价的波动区间，参照项目各阶段核心目标划分风险影响等级，让评估结果匹配实际管理要求，风险应对策略要结合风险评估结果动态调整，别固化单一应对模式，为不同等级风险制定分级应对预案，增强策略的靶向性与可落地性，按照 PMBOK 指南，把优化风险应对措施贯穿项目管理全流程，保障风险应对能

灵活匹配项目变化，用最高限度降低风险造成的变数，同步搭建应对措施的执行监管体系。

（二）不确定性分析的优化方法

优化不确定性分析，关键是提升分析结果的精度和适应性，务必选用适配的概率分布模型，让不确定性分析真实体现风险因素的变化，常规正态分布模型在特定条件下无法精准模拟复杂风险因素，实际应用里要依据风险特性挑选适配模型，诸如三角分布、贝塔分布等。增多分析迭代次数 强化模拟精度，结合项目规模和复杂度设定至少1000次模拟次数，获取靠谱的分析结果，依照 ISO 31000 标准，优化后的分析方法要适配项目生命周期各阶段，自项目初始的预估阶段，实施阶段全程实时监控，各阶段均需结合最新数据动态调整，依托高精度模拟分析，能更有效预判项目造价的波动区间，压缩预算误差，增强项目管理的科学性和准确性^[9]。

（三）综合优化策略的实施路径

执行综合优化策略需从组织结构、技术手段和管理流程三个层面开展，从组织结构维度，加强专业团队建设 聚焦风险管理与不确定性分析，让跨学科专家共同参与项目风险管理，集合众人智慧增强风险识别的全面性和准确性，采用技术手段至关键，采用大数据、人工智能及云计算等先进技术，依托实时监控和预测分析，提高风险评估的时效与精度。要把管理流程优化落实到项目管理各环节，项目启动阶段，用精准预算和风险评估给后续工作打牢根基，项目执行阶段靠动态调整保障项目目标达成，依照建筑项目管理成熟经验，优化方案要涉及确立具体的风险应急处置方案、实时调整预算、落实定期风险复审，保障风险发生后及时反应，弱化对项目造价和进度的影响^[10]。

五、结语

做好工程造价评估里的风险管理和不确定性分析，是保障项目成功的关键手段，依托有效的风险识别、定量分析和动态应对策略，可有效提升评估的准确性和可控性，改进风险管理和不确定性分析方法，联动先进技术和系统化流程，也能协助辨识潜在风险，还能辅助决策者灵活应对复杂多变的项目环境，用科学方法开展风险管理与不确定性分析，可强化工程项目的预算及进度控制，保障项目顺利完工 严控成本超支风险。

参考文献

[1] 郑剑冰. 建筑房屋工程造价成本控制风险管理策略分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(24): 172-174.
[2] 梁燕鑫. 全过程工程造价管理在建筑工程总承包项目中的应用 [J]. 中国住宅设施, 2025, (11): 104-106.
[3] 王和莹. 建设工程造价管理中的风险与应对措施 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(22): 61-63.
[4] 王玉奇. 建设工程造价管理及成本控制研究 [J]. 工程设计与设计, 2025, (21): 246-248.
[5] 肖肖. 全过程工程造价管理与控制方法探析 [J]. 城市开发, 2025, (20): 67-69.
[6] 吴海燕, 左传伟. 工程造价预算中的风险控制与应对策略分析 [J]. 房地产世界, 2025, (19): 113-115.
[7] 何心婷. 建筑工程不可抗力对工程造价的影响及应对措施 [J]. 中国招标, 2025, (10): 134-136.
[8] 伍静静. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制 [J]. 中国住宅设施, 2025, (08): 206-208.
[9] 黄晓梅. 工程项目实施中的造价风险管理策略探究 [J]. 重庆建筑, 2025, 24(08): 88-90.
[10] 周丹. 合同管理及风险评估在工程造价管理中的应用分析 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6(16): 173-175.

悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用分析

曹铁锤

浙江交工集团股份有限公司第四分公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2026030036

摘 要 : 悬臂施工技术凭借施工跨度大、对桥下交通干扰小、结构整体性强的优势, 成为大跨度桥梁工程建设的核心技术之一。本文结合桥梁工程实践, 阐述悬臂施工技术的基本原理与适用范围, 分析其在桥梁工程中的具体应用场景、核心工艺实践及典型项目案例(含浙江省义东高速公路东阳段实际工程案例), 探讨施工过程中的质量控制与安全管理措施, 旨在为同类桥梁工程的施工提供技术参考, 推动悬臂施工技术的优化与创新。

关 键 词 : 悬臂施工技术; 桥梁工程; 应用分析; 悬臂浇筑法; 悬臂拼装法; 质量控制

Analysis of the Application of Cantilever Bridge Construction Technology in Bridge Engineerings

Cao Tiechui

Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd. Fourth Branch Company, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : The cantilever construction technology, with its advantages of large construction span, minimal interference to the traffic below the bridge, and strong structural integrity, has become one of the core technologies for the construction of large-span bridges. This paper, based on bridge engineering practice, elaborates on the basic principles and application scope of the cantilever construction technology, analyzes its specific application scenarios, core process practices, and typical project cases (including the actual engineering case of the Yidong Expressway Dongyang section in Zhejiang Province), discusses the quality control and safety management measures during the construction process, aiming to provide technical references for the construction of similar bridge projects and promoting the optimization and innovation of the cantilever construction technology.

Keywords : cantilever construction technology; bridge engineering; application analysis; cantilever casting method; cantilever assembly method; quality control

前言

近年来,随着预应力技术、施工机械智能化水平的提升,悬臂施工技术的应用范围不断拓展,工艺体系日趋完善,在高铁、城际铁路、跨江跨海大桥等重点工程中发挥着不可替代的作用。本文系统梳理悬臂施工技术的应用基础,深入分析其在桥梁工程中的应用场景、核心工艺与实践成效,结合山东省规划 S310 省道跨胶济铁路特大桥、济潍高速跨胶济铁路特大桥及浙江省义东高速公路东阳段变截面现浇连续箱梁工程案例,探讨质量管控要点,以期桥梁工程的高效、安全建设提供理论与实践支撑。^[1]

一、悬臂桥梁施工技术的基本原理与适用范围

(一) 基本原理

悬臂施工技术的核心原理是利用桥梁墩身作为支撑起点,以桥墩为中心,对称向两侧逐段施工梁体节段,每施工一个节段,需及时施加预应力,使节段与已完成梁体形成整体,共同承受施工荷载与后续荷载。该技术遵循“对称、平衡、同步”的施工原则,通过控制两侧悬臂端的荷载平衡,避免结构产生过大的不平衡弯矩,确保施工过程中桥梁结构的稳定性。在施工过程中,需借助挂篮、吊机等专用设备,完成梁体节段的浇筑、拼装与预应力张拉作业,逐步延伸悬臂长度,直至两侧悬臂端在跨中合拢,

形成完整的桥梁主梁结构。^[2]

(二) 适用范围

悬臂施工技术适用于大跨度预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥、斜拉桥等桥梁类型,尤其适合跨越深水河道、繁忙交通干线、山谷等难以搭设支架的施工场景。从跨度来看,该技术常用于主跨 50m 以上的桥梁工程,在主跨 100~500m 的大跨度桥梁中优势更为显著。其中,悬臂浇筑法适用于混凝土连续梁桥、连续刚构桥,其梁体整体性好,结构刚度大,可适应复杂的受力环境;悬臂拼装法则适用于预制节段质量易于控制、施工工期要求严格的桥梁工程,如城市快速路桥梁、跨海大桥引桥等,具有施工速度快、现场作业量小的特点。此外,该技术还可与其他施工

方法结合使用，如桥梁下部结构采用支架施工、上部结构采用悬臂施工，以优化施工方案，降低工程成本。

二、悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用

（一）核心工艺应用实践

1. 悬臂浇筑法的工程应用

悬臂浇筑法（又称挂篮施工法）是公路桥梁工程中应用最广泛的悬臂施工工艺，通过可移动挂篮覆盖梁体节段钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑与预应力张拉全流程。其核心优势在于梁体整体性强、适应跨高速、跨铁路、跨江河等复杂场景，无需满堂支架，能最大限度减少对桥下交通与环境的干扰，在山东、浙江等多地重点公路工程中均为首选工艺。

施工准备阶段，需先完成桥墩墩身验收，在墩顶安装钢管柱或碗扣式满堂支架用于0号块施工。支架基础需针对性加固，软土地基采用注浆或CFG桩复合地基处理，搭设后进行1.2倍设计荷载预压，消除非弹性变形并获取预拱度数据。0号块作为受力核心，长度6–12m需一次性连续浇筑，确保结构整体性。^[3]

挂篮作为核心设备，需经专项设计与有限元验算，安全系数不低于1.5，拼装后进行静载试验。安装时严格校准轴线与高程，偏差不得超过5mm；行走采用同步液压驱动，速度控制在0.5m/h以内，两侧同步推进避免倾覆。在规划S310省道跨沈海高速特大桥中，全封闭式挂篮将单节段移动时间缩短至2小时，兼顾安全与效率；浙江省义东高速公路东阳段工程中，采用菱形挂篮，单侧重量约75t，容许变形不大于2cm，行走及施工时抗倾覆安全系数大于2，有效适配跨东阳江的施工需求。

梁体节段施工遵循“对称、平衡、同步”原则。钢筋采用工厂预制现场拼装，预应力波纹管用定位钢筋固定，接缝密封严密。选用C55及以上高性能混凝土泵送浇筑，分层厚度不超过30cm，重点振捣关键部位避免质量缺陷。浇筑后启动智能喷淋养护不少于14天，强度达标后按“先纵向、后横向、再竖向”顺序智能张拉，张拉力与伸长量双控，偏差控制在±6%以内，24小时内完成孔道压浆。

合拢段施工为关键收尾环节，长度1.5–2.0m，按“先边跨后中跨”顺序施工。施工前通过配重、临时预应力调整轴线与高程偏差，选择夜间低温时段浇筑微膨胀混凝土，加强保温养护，强度达标后张拉合拢预应力筋。规划S310省道跨沈海高速特大桥实现一次性合龙，梁体线型误差控制在3mm以内；浙江省义东高速公路东阳段合龙施工中，采用刚性支撑与临时预应力张拉锁定方案，结合水袋配重动态卸载，确保合龙段无裂纹产生。

2. 悬臂拼装法的工程应用

悬臂拼装法通过工厂预制节段、现场吊装拼接形成整体结构，核心优势是施工速度快、现场作业量小、对环境干扰低，适合工期紧张的城市公路桥梁与跨海大桥引桥。该工艺将大量作业转移至工厂，有效控制质量，减少现场环境影响，在山东省内部分高标准公路项目中成功应用。

预制节段采用高精度钢模板制作，长度2–4m，重量控制在

150t以内便于运输吊装。选用高强度低收缩混凝土，通过智能温控防止裂缝，节段端面设置剪力键与定位销确保贴合度。预制后经外观、尺寸与强度检测，合格后方可运输，运输过程做好固定防护。^[4]

吊装选用缆载吊机或汽车吊，按对称原则从桥墩向跨中延伸，利用全站仪精准定位，节段贴合间隙不超过2mm。拼接分为干拼与湿拼，干拼依赖预应力张拉贴合，湿拼采用环氧树脂砂浆增强粘结力，拼接后按规范顺序张拉预应力筋形成整体。体系转换阶段分步拆除临时支架与固结措施，调整预应力使结构从施工状态平稳过渡至运营状态，转换后全面检测确保安全。

（二）典型工程应用案例

1. 规划S310省道跨沈海高速特大桥（山东）

该项目是山东省“十四五”公路网规划重点工程，路线全长约65km，其中K4+206跨沈海高速特大桥作为全线控制性工程，主桥采用悬臂现浇连续箱梁结构，跨径布置为50+85+50m，最大悬臂长度41.5m，边跨和中跨均分为9个悬臂梁段，梁体总宽26m，设计时速100km/h，满足双向四车道通行需求。工程面临的核心挑战是跨沈海高速施工，该路段日均车流量超8万辆，高峰时段车流密度大，安全管控难度极高，且施工区域临近高速边坡，地质条件复杂，需严格控制施工扰动避免边坡失稳。

施工单位严格遵循“标准化、规范化、精细化、智能化、绿色化”的五化理念，建立完善的质量管理与安全生产体系，严格执行《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》（JTG / T 3651—2022）《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50—2020）等最新行业标准。项目创新采用全封闭式智能挂篮，挂篮主桁为菱形结构，重量轻、刚度大，行走系统搭载同步液压驱动装置，实现自动化精准行走，行走偏差控制在2mm以内。全封闭式防护设计采用高强度钢板与防护网组合结构，不仅有效隔离施工区域与高速行驶车道，防止钢筋、混凝土碎块等杂物坠落影响交通，还能抵御高空强风，为施工人员提供安全舒适的作业环境。^[5]

为提升施工效率，项目团队优化施工工序，将钢筋加工、预应力管道预制等工序转移至地面加工厂标准化生产，再通过吊装设备转运至挂篮内进行组装，大幅减少高空作业时间，将原10天一个节段的施工周期缩短至7天。在质量管控方面，项目建立全过程信息化监测系统，在梁体腹板、顶板等关键部位布设80余个应变计、位移计，实时采集梁体应力、变形数据，通过5G技术上传至云端管理平台，技术人员结合监测数据动态调整模板高程与预应力张拉参数，确保梁体线型与结构受力符合设计要求。2025年5月，该桥所有主墩0号块全部浇筑完成，8套挂篮全部具备连续施工条件，截至2025年10月，已完成16个悬臂节段的施工，累计浇筑混凝土3800余立方米，工程质量一次验收合格率达到100%，未发生任何安全事故，为后续合龙施工与项目全线通车奠定了坚实基础。

2. 济潍高速跨胶济铁路特大桥（山东）

济潍高速是山东省“九纵五横一环七射多连”高速公路网的核心组成部分，路线全长约160km，设计时速120km/h，是连接济南、潍坊两大交通枢纽的快速通道。其中跨胶济铁路特大桥是全线重难点工程，主桥采用悬臂现浇连续箱梁结构，主跨径

120m，共分为11个悬臂节段，梁体采用单箱单室截面，顶板宽28m，底板宽14m，梁高从墩顶处的6.5m渐变至跨中处的3.0m。施工需跨越繁忙的胶济铁路干线，该铁路为客货混跑线路，日均通行列车超过150列，最小行车间隔仅5分钟，施工窗口期极短，且安全风险高，需严格避免施工对铁路运营造成影响。

为确保工程顺利推进，施工单位采用集成承重杆件、模板系统、平台防护、智能控制和信息化检测五大系统的智能挂篮，实现施工过程的数字化与智能化管控。通过BIM技术构建桥梁三维可视化模型，精准还原地质条件、梁体结构与施工环境，模拟节段浇筑顺序、挂篮行走路径与合龙工艺，提前预判挂篮与铁路接触网的安全距离、节段吊装与列车通行的冲突风险，优化施工方案与时间安排，将挂篮行走、混凝土浇筑等关键工序安排在铁路“天窗期”内进行。针对施工现场浅埋地基、承载力不足的问题，对0号块支架基础采用高压注浆加固处理，注浆深度达15m，形成复合地基，承载力提升至250kPa以上，确保支架在施工过程中无沉降变形。

在预应力施工方面，采用智能张拉设备，实现张拉过程的自动化控制，张拉力误差控制在 $\pm 1\%$ 以内，同时实时采集伸长量数据，与理论值对比分析，数据可实时上传至项目管理平台与铁路运营管控部门，确保张拉质量可追溯。安全防护方面，在铁路上方设置双层钢结构防护棚，顶部铺设防滑钢板与防火阻燃材料，防护棚两侧设置防撞护栏与警示标识，防止施工杂物坠落影响铁路运营。该桥于2023年3月正式启动悬臂施工，2024年8月顺利完成主跨合龙，历时17个月，累计浇筑混凝土5200余立方米，张拉预应力钢束总长超过8000m，梁体线型误差精准控制在3mm以内，结构应力符合设计要求，工程质量达到优良标准。^[9]

3. 义东高速公路东阳（江北至南市）段跨东阳江特大桥（浙江）

该项目是浙江省义东高速公路的关键控制性工程，其中东阳西互通主线桥左幅第10联（右幅第9联）为50+85+50m变截面现浇连续箱梁，上跨东阳江，桥墩编号为第52墩~55墩，左幅位于半径4600m圆曲线范围，右幅位于半径3550m圆曲线范围，墩台径向布置，桥面设2%单向横坡，桥宽20.25~22.262m，梁体采用C55混凝土，纵横向预应力采用高强度低松弛钢绞线，竖向预应力采用精轧螺纹钢。工程面临跨东阳江施工、临近临江大桥（老桥）、地质条件复杂（冲洪积平原区，上覆填土及含砾粉质黏土，下伏粉砂岩）等挑战，施工需严格控制对河道防洪、老桥通行的影响。

施工单位严格遵循《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）等规范要求，结合浙江省地方标准与工程实际制定专项方案，核心施工举措如下：

0号块施工：采用钢管柱复合支撑体系，主墩两侧设置10根钢管柱（外侧 $\Phi 1000 \times 14\text{mm}$ ，中间 $\Phi 800 \times 14\text{mm}$ ），与承台预埋钢板焊接固定，钢管间设水平框架与剪刀撑增强稳定性；0号块长度12m，混凝土方量492.4m³，采用一次浇筑成型，支架预压荷载为1.2倍梁重（998.82t），分60%、80%、100%三级加载，确保支架强度与刚度达标。

挂篮施工：投入4套菱形挂篮，左右分幅同步施工，挂篮主桁为菱形结构，配备主桁系统、底篮系统、行走及锚固系统，单侧重量75t，容许变形 $\leq 2\text{cm}$ ；挂篮拼装后进行静载试验，采用预制混凝土块堆载预压，最大预压荷载220t，分三级加载观测弹性与非弹性变形，为底模预拱度设置提供依据。梁体节段长度3~4m，浇筑遵循对称原则，针对53号墩两侧节段砼方量偏差问题（最大累加偏差22.62t），采用型钢配重平衡荷载；混凝土浇筑后智能喷淋养护不少于14天，强度达设计强度90%且龄期不小于7d后，按“先纵向、后横向、再竖向”顺序张拉，张拉力误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。

边跨现浇段施工：采用60cm优质宕渣+15cmC20混凝土硬化基础，搭设盘扣支架，立杆间距30cm \times 60cm~90cm \times 90cm（腹板处加密），设置纵横向水平杆与剪刀撑增强稳定性；支架预压荷载为1.2倍节段自重，观测沉降量满足连续24h平均值 $\leq 3\text{mm}$ 后卸载。

合龙段施工：按“先边跨后中跨”顺序施工，合龙段长度2m，采用吊架法施工；施工前在悬臂端施加50%合龙段砼重量的水袋配重，夜间低温时段浇筑微膨胀混凝土，浇筑过程中同步卸载配重；合龙前安装劲性骨架锁定，张拉临时预应力束，确保合龙段线型偏差控制在规范范围内。

安全管控方面，项目对施工区域实行全封闭管理，在东阳江河道内设置施工便道与安全防护设施，主墩临时支撑采用清宕渣回填防护防冲刷；临近临江大桥施工时，设置双层防护棚防止坠物影响老桥通行；建立全过程信息化监测系统，在梁体关键部位布设应变计与位移计，实时监测结构应力与变形。该桥悬臂施工于2020年11月启动，2022年完成主跨合龙，累计浇筑混凝土9937m³，张拉预应力钢绞线498.91t，梁体线型误差控制在3mm以内，工程质量一次验收合格率100%，未发生安全事故，获评浙江省“智慧工地”示范标段。

三、悬臂桥梁施工质量控制与安全管理

（一）质量控制

严格遵循《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50-2020）《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）等最新规范要求，建立“三检制”质量管理制度，对原材料进场、模板安装、混凝土浇筑、预应力施工等关键环节进行全程管控。原材料进场需提供质量证明文件并进行复检，混凝土配合比需根据施工环境动态调整；模板安装确保轴线、高程偏差符合要求，接缝严密不漏浆；预应力管道采用塑料波纹管，定位钢筋间距不大于0.6m（曲线段0.3m），连接采用热熔焊接；混凝土浇筑分层厚度不超过30cm，振捣密实，养护时间不少于14天；预应力张拉采用“双控”措施，张拉力与伸长量偏差控制在 $\pm 6\%$ 以内，张拉后24小时内完成孔道压浆。采用信息化监测技术，对梁体高程、轴线偏位、结构应力等参数进行实时监测，数据异常时及时调整施工参数。^[9]

（二）安全控制

针对悬臂施工高空作业多、风险点多的特点，建立健全安全

生产责任制，对施工人员进行专项安全培训与技术交底。挂篮拼装、行走及拆除过程中，设置安全防护网与警示标志，严禁违规操作；挂篮行走时设置保险装置，风力达到5级及以上时停止作业。跨线、跨江施工时采用封闭式防护措施，设置交通疏导标识，配合交管部门做好交通管制工作；跨江施工需制定防洪防汛措施，支架基础加固处理确保承载力达标。构建应急救援体系，制定坍塌、高空坠落、溺水等突发事件应急预案，并定期组织演练；施工现场配备充足的安全防护用品与应急物资，确保施工安全可控。

四、结语

悬臂桥梁施工技术作为大跨度桥梁工程的核心施工技术，其应用成效直接决定工程质量、进度与安全。在桥梁工程实践中，

悬臂浇筑法凭借整体性强的优势成为跨江跨高速等重难点工程的首选，悬臂拼装法则以高效快捷的特点适配工期紧张的建设需求，而智能化悬臂造桥机的推广应用进一步推动了该技术向高精度、高效率、低风险方向发展。结合山东、浙江多地实际工程案例来看，施工过程中需严格遵循“对称、平衡、同步”原则，强化施工监控与质量控制，落实设备安全与高空防护措施，同时结合项目所在地地质、水文、交通等实际条件优化施工方案，才能确保工程建设顺利推进。

参考文献

-
- [1] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京：人民交通出版社，2018.
 - [2] 周水兴，何兆益，邹毅松. 路桥施工计算手册 [M]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2019.
 - [3] 向中富. 桥梁施工技术 [M]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2021.
 - [4] 王伯惠. 大跨度桥梁施工控制技术 [M]. 北京：人民交通出版社，2017.
 - [5] 李乔，蔡春声. 悬臂拼装施工技术在跨大跨度连续梁桥中的应用 [J]. 桥梁建设，2021，51(02)：112-117.
 - [6] 张喜刚，马健，王毅. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥悬臂浇筑施工质量控制要点 [J]. 公路交通科技，2019，36(09)：63-69.

新型齿轮范成加工虚拟仿真系统设计与实现

徐文俊¹, 杨宇飞², 郑丽文¹, 林钰珍¹

1. 衢州职业技术学院, 机电工程学院, 浙江 衢州 324000

2. 长春理工大学, 机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘 要 : 本文基于 UG NX/Open Grip 语言构建具有参数化驱动功能的齿轮范成加工虚拟样机模型, 并利用 NX/Open UIStyler 开发了设计专用人机交互界面。系统集成模数 m 、插齿刀齿数 Z_1 、齿坯齿数 Z_2 、压力角 α 、变位系数 x 、顶隙系数 h_a 、插齿刀转速 n 及插齿频率 f 等关键参数修改对话框, 实现参数修改与虚拟样机模型的实时联动更新。在此基础上, 通过 NX CAE 完成齿轮范成加工过程仿真分析, 可直观展示不同参数下正变位、负变位及根切等典型加工动态过程, 快速生成对应齿形模型。研究成果可为齿轮范成机理分析、参数优化及齿轮传动特性研究提供直观、高效的虚拟实验平台与技术支撑。

关 键 词 : 新型; 齿轮范成加工; 虚拟仿真系统

Design and Implementation of a Virtual Simulation System for the Generating Machining of New-type Gears

Xu Wenjun¹, Yang Yufei², Zheng Liwen¹, Lin Yuzhen¹

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022

Abstract : This paper builds a gear molding processing virtual prototype model with parameterized driving function based on the UG NX/Open Grip language, and uses NX/Open UIStyler to develop a design-specific human-computer interaction interface. The system integrates key parameter modification dialog boxes such as module, number of gear shaping cutter teeth, number of gear blank teeth, pressure angle, displacement coefficient, top clearance coefficient, gear shaping cutter speed and gear shaping frequency, to realize real-time linkage update of parameter modification and virtual prototype model. On this basis, the simulation analysis of the gear molding process is completed through NX CAE, which can visually display typical machining dynamic processes such as positive displacement, negative displacement and undercutting under different parameters, and quickly generate the corresponding tooth profile model. The research results can provide an intuitive and efficient virtual experimental platform and technical support for gear formation mechanism analysis, parameter optimization and gear transmission characteristics research.

Keywords : new type; gear generation processing; virtual prototype system

引言

目前国内高校一般借助传统齿轮范成仪如图1所示来演示范成法切制渐开线齿廓的过程。演示时用手移动齿板并带动圆盘一起旋转, 逐次微移, 每移一次则沿齿板描绘齿条齿廓线直至在圆盘上形成多个完整的渐开线齿廓。传统式齿轮范成仪演示时所用辅具较多、操作费时费力、演示过程枯燥无趣、演示效果不佳。

鉴于传统齿轮范成仪存在的诸多问题, 文献 [1] 针对传统齿轮范成仪进行了改进设计, 解决了轮坯与刀具之间不能确保作纯滚动、轮坯分度圆与由钢丝中心线所形成的圆不重合等问题; 文献 [2] 罗卫平等通过结构改进设计实现了滑板的均匀移动; 文献 [3] 孙东等通过单片机编程控制实现了范成仪的电子控制自动操作; 文献 [4] 叶友东等人设计了一种新型双联行星传动式渐开线齿轮范成仪, 能同时画出标准、正变位、负变位齿廓, 方便对比; 文献 [5] 孙培禄等人设计了一种可印制齿廓轨迹的齿轮范成仪, 实现了印制刀痕代替手绘刀痕。文献 [6] 陈汝雕等人设计了一种基于3D打印技术的新型智能齿轮范成仪, 实现了齿轮渐开线齿廓的动态演示与自动生成, 但该仪

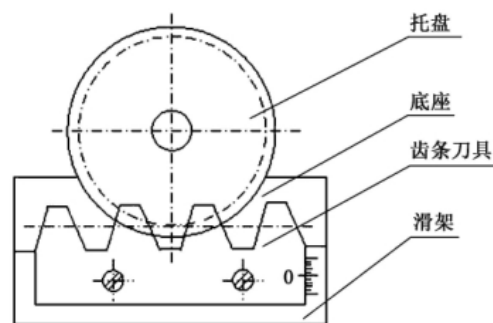


图1 传统齿轮范成仪

基金项目: 浙江省高校实验室工作研究项目 (YB202317); 浙江省教育厅一般科研项目 (Y202353634)。

作者简介: 徐文俊 (1981-), 男, 浙江衢州江山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计 CAD/CAE。

器存在齿形不精确、齿廓精度不高等问题。文献 [7] 徐文俊等人设计了一种基于 UG_NX 的新型齿轮范成加工虚拟样机, 建立了齿轮型刀具与齿条型刀具两种范成加工虚拟样机模型, 通过分析对比两种范成加工异同, 得出齿轮型刀具范成加工变位系数 $X \neq$ 齿条型刀具范成加工变位系数 x , 从而进一步深入阐释了齿轮范成加工原理, 但该虚拟样机参数修改不方便, 因此人机界面功能还有待进一步完善。

本项目在文献 [7] 基础上, 对系统人机界面进行优化与功能完善, 进一步提升交互友好性、操作便捷性与可视化展示效果。

一、设计方案^[8-9]

(一) 方案设计

在 UG NX 建立齿轮型刀具范成加工虚拟样机模型, 如图 2 所示。

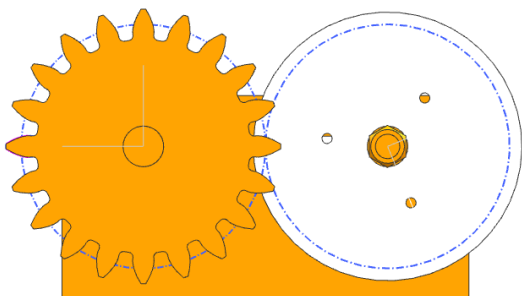


图2 齿轮型刀具范成加工虚拟样机模型

(二) 方案设计要点

(1) 插齿刀参数化建模设计

$$\begin{cases} d_a = m(z + 2 + 2 * c) \\ d = mz \\ d_b = mz \cos(\alpha) \\ d_f = d - 2 * h_f \\ h_f = (1 + c - m) * x \\ B = 9 \end{cases} \quad (1)$$

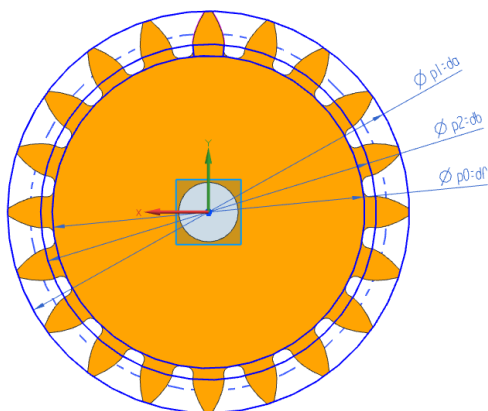


图3 齿轮型刀具范成加工虚拟样机模型

(2) 齿坯参数化建模设计

$$\begin{cases} d_a = m(z + 2) \\ d = mz \\ B = 5 \end{cases} \quad (2)$$

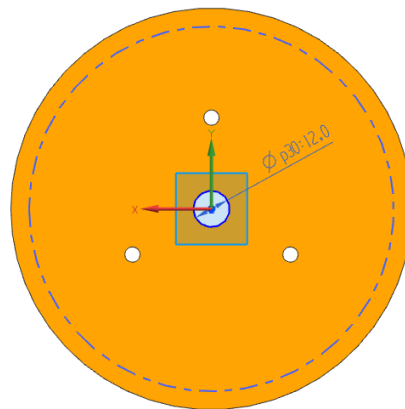


图4 齿轮型刀具范成加工虚拟样机模型

(3) 范成加工人机界面设计

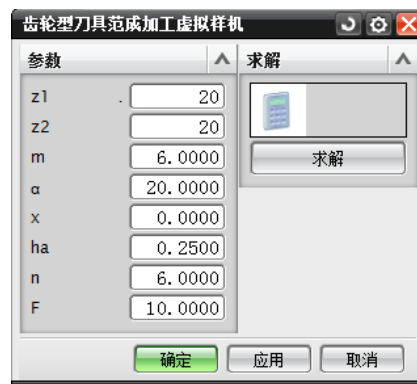


图5 齿轮型刀具范成加工人机界面设计

人机界面包括模数 m 、插齿刀齿数 z_1 、齿坯齿数 z_2 、压力角 α 、变位系数 x 、顶隙系数 h_a 、插齿刀转速 n 及插齿频率 F 等关键参数修改对话框, 实现参数修改与虚拟样机模型的实时联动更新。

当范成加工虚拟样机模型参数设置值为以下3种典型工况时:

$\begin{cases} z_1 = 20 \\ z_2 = 20 \\ m = 6 \\ \alpha = 20 \\ x = 0 \\ h_a = 0.25 \\ n = 6 \\ f = 10 \end{cases}$	$\begin{cases} z_1 = 20 \\ z_2 = 20 \\ m = 6 \\ \alpha = 20 \\ x = 0.4 \\ h_a = 0.25 \\ n = 6 \\ f = 10 \end{cases}$	$\begin{cases} z_1 = 20 \\ z_2 = 6 \\ m = 6 \\ \alpha = 20 \\ x = 0 \\ h_a = 0.25 \\ n = 6 \\ f = 10 \end{cases}$
(a) 标准齿	(b) 正变位齿	(c) 根切齿

图6 三种典型工况

单击人机界面“应用”按钮，模型即可实时更新，如图7-图9所示。

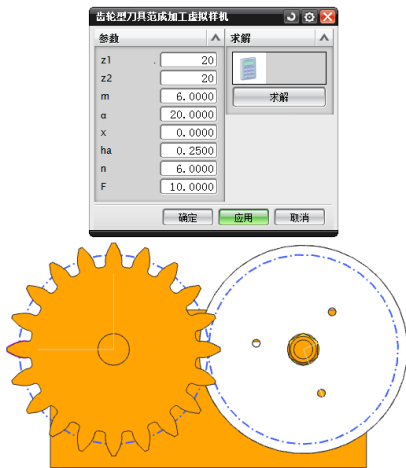


图7 标准齿范成加工虚拟样机模型
($z_1=20$ $z_2=20$ $m=6$ $x=0$)

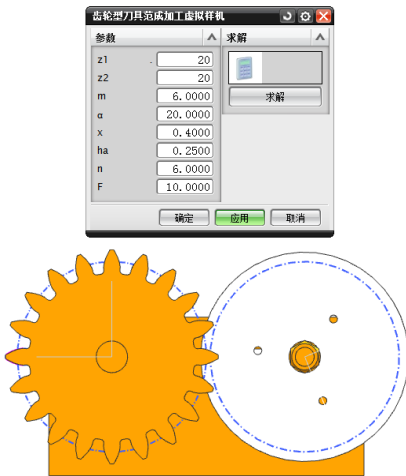


图8 正变位齿范成加工虚拟样机模型
($z_1=20$ $z_2=20$ $m=6$ $x=0.4$)

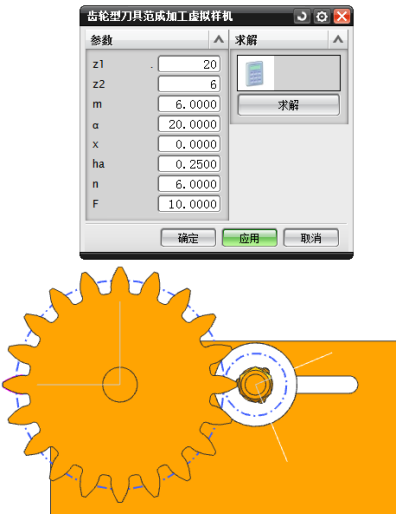


图9 根切齿范成加工虚拟样机模型
($z_1=20$ $z_2=20$ $m=6$ $x=0$)

人机界面极大地方便了齿轮范成加工虚拟样机模型的快速建

立与实时更新，从而为范成加工仿真分析提供稳定可靠的模型基础与高效便捷的交互支撑。

二、NX 虚拟样机范成加工仿真分析^[10-11]

(一) 标准齿轮加工仿真分析

当 $z_1=20$ 、 $z_2=20$ 、 $m=6$ 、 $x=0$ 时，加工出的是标准齿，分度圆上齿厚等于槽宽，模数、压力角、齿顶高、顶隙均为标准值。

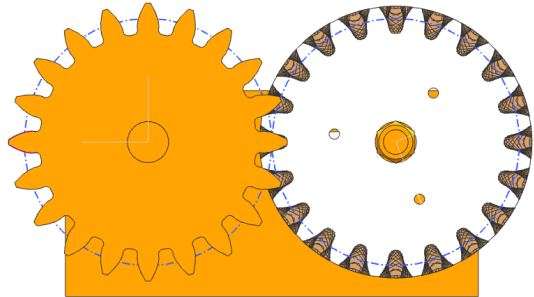


图10 标准齿 ($x=0$)

(二) 正变位齿加工仿真分析

当 $z_1=20$ 、 $z_2=20$ 、 $m=6$ 、 $x=0.4$ 时，加工出的是正变位齿，刀具远离轮坯，分度圆齿厚大于槽宽，齿顶厚减小，抗弯强度提高，无根切。

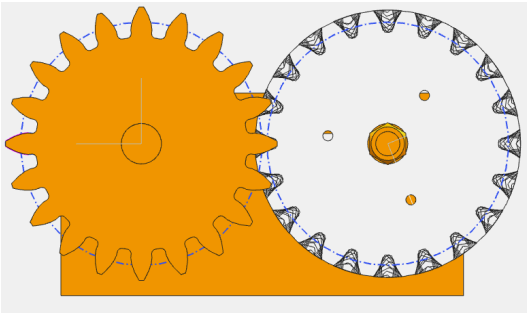


图11 正变位齿 ($x=0.4$)

(三) 根切齿加工仿真分析

当 $z_1=20$ 、 $z_2=6$ 、 $m=6$ 、 $x=0$ 时，加工出根切齿。随着齿坯被加工齿数的减少，根切现象越来越明显，在工程中应注意避免。

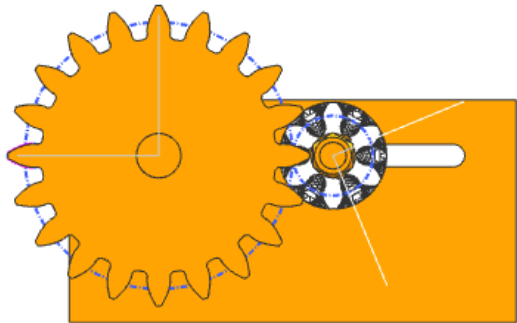


图12 根切齿 ($x=0$)

三、结论

(1) 建立了齿轮型刀具范成加工虚拟样机参数化模型及人机界面,通过人机界面可修改齿数、模数、变位系数等关键技术参数,实现范成加工模型的实时更新。

(2) 建立了齿轮型刀具范成加工虚拟样机,动态演示标准齿、正变位齿及根切齿齿廓动态形成过程。

(3) 为齿轮范成加工机理、工艺优化等提供了一种快捷可视化的支撑系统。

参考文献

-
- [1] 吕德兰. 齿轮范成仪的改进[J]. 昆明工学院学报, 1992(4):51-53,61. (Lv De-lang.Improvement of gear Fan Chengyi [J]. Journal of Kunming Institute of Technology, 1992 (4): 51-53,61.)
 - [2] 罗卫平, 姜小菁, 王珏等. 齿轮展成仪的改进[J]. 机电技术, 2011(6):49-50. (Luo Wei-ping, Jiang-Xiaojing, Wang Jun, etc.Improvement of gear generator[J]. Electromechanical technology, 2011(6):49-50.)
 - [3] 孙东, 高路, 何壮等. 基于渐开线齿轮范成仪的改进设计[J]. 吉林化工学院报, 2015, 23(4), 43-47. (Sun Dong, Gao Lu, He Zhuang etc. Improved design based on involute gear generator [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2015, 23(4), 43-47.)
 - [4] 叶友东, 刘力红. 双联行星传动式齿轮范成仪的设计[J]. 机械传动, 2015, 39(6):156-158. (Ye You-dong, Liu Li-hong.Design of gear generator with double planetary drive [J]. Mechanical Drive, 2015, 39 (6): 156-158.)
 - [5] 孙培禄, 刘赟. 一种可印制齿廓轨迹的齿轮范成仪创新设计研究[J]. 机械产品开发与创新, 2018, 31(4):10-12. (Sun Pei-Lu, Liu Shu. Innovative Design of a Gear Generator with Printed Tooth Profile Track [J]. Mechanical Product Development and Innovation, 2018, 31(4):10-12.)
 - [6] 陈汝雕, 徐文俊. 一种基于3D打印技术的新型智能齿轮范成仪设计[J]. 工程技术, 2017, 12:66-67. (Chen Rudiao.A New Intelligent Gear Generator Design Based on 3D Printing Technology[J]. Engineering Technology, 2017, 12:66-67.)
 - [7] 徐文俊, 郑丽文等. 一种基于UG_NX的新型齿轮范成加工虚拟样机设计[J]. 机械设计与制造, 2022, 02:269-276. (Xu W J, Zheng L W, et al. Design of a New Virtual Prototype for Gear Generating Processing Based on UG NX[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022, 02: 269-276.)
 - [8] G.Pohit.Application of virtual manufacturing in generation of gears[J].Int J Adv Manuf Technol, 2006, 31:85-91.
 - [9] Cuneyt Fetvacı.Mathematical Model of a Spur Gear with Asymmetric Involute Teeth and Its Cutting Simulation[J].Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2008, 36:34-46.
 - [10] Cuneyt Fetvacı.DEFINITION OF INVOLUTE SPUR GEAR PROFILES GENERATED BY GEAR-TYPE SHAPERCUTTERS[J].MechanicsBased Design of Structures and Machines, 2010, 38:481-492.
 - [11] 黄勇, 张博林, 薛运锋. UG 二次开发与数据库应用基础与典型范例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. (Huang Yong, Zhang Bo-Ling, Xue Yun-Feng.UG Basic and typical examples of secondary development and database application [M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2008.)

工程项目合同管理与纠纷防控研究

陈瑛

苏州交投建设管理有限公司, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ERA.2026030041

摘 要 : 随着工程建设项目规模不断扩大及管理难度不断增加, 合同管理和纠纷预防是制约整个工程建设能否顺利完成的重要环节, 合理有效做好合同管理工作可以避免由于合同条款不清楚或者未按合同约定履约带来的相关法律诉讼事件的发生。通过对现在工程项目管理中出现的一些典型合同管理方面的问题进行分析, 找出其背后的原因, 提出精细化合同条款制定、动态的风险预警以及信息系统的引入等一系列新的防范手段来加强合同管理, 规避法律风险, 最大化的保障各参与方利益, 提高项目的建设进度和成功概率。

关 键 词 : 工程项目; 合同管理; 纠纷防控; 风险评估; 信息化管理

Research on Contract Management and Dispute Prevention in Engineering Projects

Chen Ying

Suzhou Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract : With the continuous expansion of the scale of engineering construction projects and the increasing difficulty of management, contract management and dispute prevention are important links that restrict the smooth completion of the whole engineering construction. Reasonable and effective contract management can avoid the occurrence of relevant legal litigation events caused by unclear contract terms or failure to perform as agreed in the contract. Through the analysis of some typical contract management problems in the current engineering project management, this paper finds out the reasons behind them, and puts forward a series of new preventive measures, such as the formulation of refined contract terms, dynamic risk warning and the introduction of information system, to strengthen contract management, avoid legal risks, maximize the protection of the interests of all participants, and improve the construction progress and success probability of the project.

Keywords : engineering project; contract management; dispute prevention and control; risk assessment; information management

引言

在目前的工程建设项目中, 合同管理是整个项目管理工作的重要一部分, 直接影响工程项目的开展及各参与方的权利义务。但由于工程项目的日益庞大以及管理者层级的增多, 使得合同管理越来越困难重重, 随之而来的是合同纠纷频发。合同纠纷不仅会拖慢工程项目进程, 而且还可能带来巨大损失及企业形象损害。所以研究怎样有效的处理好合同管理工作, 尤其是合同纠纷的预防就显得尤为重要。目前很多工程项目管理还停留在传统的管理模式上, 存在着一些条款不清、履行监管不足的情况。面对以上存在的问题, 在此过程中需要一些新的方式及技术的应用, 例如精细化合同的设计和动态的风险管理系统等等, 也慢慢成为了预防争议、提高合同履行率的有效途径, 在这方面, 如何寻求更加有针对性的管理模式, 也是迫在眉睫的问题之一。

一、工程项目合同管理的现状与挑战

(一) 当前工程项目合同管理的基本模式

传统的工程建设项目合同管理方式基本上都是纸质形式的合同, 采取手工操作以及人工审查的方法。这种模式在项目的前期主要是采用招标的形式来进行合同的内容的选择, 在合同签署以后则由项目负责人或者合同管理员负责履行监督工作, 而在具体

实施的过程中, 管理者一般是利用定期巡视及书面材料来保证合同条款得到落实, 但是它的不足之处是没有即时的数据反馈以及实时的风险控制机制, 可能会导致合同执行拖延或是信息不对称的现象发生。传统模式的优势就是简便易行而且经济实惠, 适合规模较小或是标准化要求较高的工程项目使用, 但是它也存在很多不足的地方, 比如: 条款理解偏差, 履约监管不足, 合同实施时间过长等缺点。特别是对于一些大型复杂的工程项目来说, 传

统的管理方式的弊端就更为明显了，不能够有效解决项目进展改变所带来的一些问题^[1]。

（二）工程项目合同管理中常见问题分析

工程建设项目合同管理的问题之一就是合同条款不清、约定不明的情况，因为前期订立合同时缺少风险识别及沟通，所以在合同中有不少条款表述含糊或者定义不清楚，造成合同的双方对于合同的权利义务理解出现分歧。比如2015年的“北京市某地铁工程”当中就因为对于“施工工期拖延”的赔偿条款没有明确规定，使得施工单位和发包单位在发生工期拖延之后产生很大的矛盾冲突；另外在合同实施的过程中，对于“合理延期”的界定也不清楚，进而引发了一系列的漫长的诉讼案件。再者合同实施过程中的监督及管理工作不足也是合同管理中常见的问题。许多工程项目建设过程中合同履行未采取有效的动态监控措施，造成问题累积，制约项目进行；在部分工程项目中，管理人员不能及时对承包单位及分包单位的履约情况进行核查，从而引发后期工程进度滞后或者出现质量问题，例如某市级的大桥建设工程项目，因为管控不到位，对分包单位所采购的原材料质量把控不足，使得原材料质量不合格，最后造成工期延误^[2]。

（三）工程项目合同管理面临的挑战

当前，工程项目建设合同管理存在的主要问题是合同管理人员的能力水平不高。由于工程项目的规模越来越大而且越来越复杂，使得以往合同管理人员已经无法满足新型工程建设的要求。合同管理不仅是对合同条文的落实，还关系着整个项目的进度安排、风险掌控以及资金结算等一系列的事情，在广州某个高楼大厦项目中就曾出现过这样的情况：由于合同管理人员不懂得一些基本的法律法规并且不具备相应的项目管理经验，从而忽视了一些重要条款的风险性，使得此项目的合同在履行时屡次陷入到合同纠纷之中。此外，现有的相关法律规定没有跟上市场的步伐，这也加大了建设项目的合同管理难度。很多地区的法规体系未能与时俱进，很难对现今市场越发复杂多样化的工程建设项目合同进行有效的约束。比如近几年来一些PPP项目，因为相关法律法规滞后，使得其合同实施过程中产生了一系列矛盾，特别是对于资金支付与项目收益等方面的问题不能及时处理好，阻碍了项目的正常开展。

二、工程项目合同中的纠纷类型与根源分析

（一）常见合同纠纷类型分析

工程建设项目合同的实际运行过程中，关于支付问题及履行问题是最主要的纠纷问题类型。根据中国建设工程造价管理协会对建设工程合同纠纷案件统计，全国建设工程项目合同纠纷案件每年呈12.3%的增长率上升趋势，其中涉及到工程款追索案件约占到65%，涉案金额高达上千亿，可见支付问题是纠纷中最主要的问题。支付争议多是因为合同约定的支付条件未达到、结算依据不清或者审计滞后所引起，致使施工单位长期处于现金流紧缺的状态；除了支付争议，工程质量不合格以及责任不清也是经常出现的一些纠纷因素。比如在具体的判例当中，法庭指出工程质量是否达标须根据施工状况，验收结果以及检测意见来共同判断。若发现质量问题，承担责任的主体一般是承包单位、设计单位或者监理单位等多方主体，则导致分担责任较为繁杂；质量问

题还会造成工程项目不能顺利验收的问题出现，甚至还会牵连出二次返修支出增加和加大索赔范围等问题，进而恶化施工方与业主之间的关系，进一步制约工程项目按计划有序推进^[3]。

（二）合同纠纷的根源分析

合同约定不明晰是引起合同争议高发的重要因素之一。如果合同中对如何付款、工期要求以及工程质量检验标准都没有进行规定，则参建各方主体就会对其各自的理解产生不同意见，成为产生合同纠纷的基础原因。双方之间信息不对等以及沟通不到位都加重了合同模糊不清的问题。建设工程涉及到各种主体的利益相关者，由于信息传递的不对等，在签订合同以及履行合同时，各方对于工程进度、变更状况以及风险的预判也会有所不同，这不仅存在于合同签订环节，也存在于合同履行期间。例如，在建设工程合同的实际履行过程中，经常会涉及到复杂的工程技术规程、工程量清单计费规则等问题，如果监管部门未建立起统一的信息互通渠道或者监管系统，就很可能造成建设工程合同执行阶段产生误会甚至引发纠纷的问题^[4]。

（三）案例分析：典型合同纠纷的原因与影响

以ST天龙全资子公司四川中蜀世联建筑工程有限公司合同纠纷案为例，四川中蜀未依约向吴胜建设集团有限公司支付工程款，被阜新市清河门区人民法院判决支付工程款1173.22万元及利息，本案完全体现了付款争议对合同履行的影响。本案合同中对付款时间点以及责任分配的规定并没有起到足够的约束作用，被告的履约行为造成了承包人长久以来的资金压力增大，只能通过法律途径维权，类似的案例还有很多，在其他案件中也经常出现这样的情况。合同纠纷容易拖延项目工期、追加额外费用且对企业声誉带来极大损失。通过针对长三角地区的349个司法审判案例的研究表明，工程合同争议不仅数量较多，而且经常伴随着漫长的诉讼时间和复杂的执行流程，以致工程项目资源消耗在合同争议上而不是用于工程建设本身。所以合同订立过程中具体条文的设计、明晰的资金支付方式及各方的责任分配，以及合同执行过程中的信息公开和及时有效的沟通，对于降低工程合同争议率，保证工程建设顺利进行至关重要。

三、合同管理创新模式与纠纷防控措施

（一）精细化合同条款设计与执行

精细化合同条款的设计是针对明确风险分配及责任划分以后提高合同履行的有效措施，避免由于条款不清而引发合同纠纷。合同设计亮点有：列出具体的险种明细表、约定不可预见事由的损失分配比例、设立奖励与惩罚条款等方式。2025年某一市政道路项目因合同没约定地质风险分配比例，导致施工企业与发包单位产生长达四个月之久的工期争执，此项目总造价约为8.5亿人民币，合同中存在的不足之处成为其纠纷的焦点所在。为了提高合同条文实施过程中的监管力度以及贯彻力度，可以采取多层次审批程序、履约保函浮动、变更签证双签等措施，让技术负责人和技术合同员一起担任合同实施的监督检查人，以此加强施工中合同条款的执行情况^[5]。

（二）引入动态风险评估机制

动态风险管理理念是对整个合同过程中的风险不断发现、修正的过程，通过对合同履行情况及现场情况进行实时监测达到风

险警示目的。这与传统的静态风险管理不同的是它更注重以大数据、预测分析为基础的风险指标设置,通过对于工期、资金、变更频度等重要指标的动态跟踪来适时调整合同条款履约措施。风险评价模型一般是以过去项目的实际情况以及现场的信息为基础,利用数据分析算法计算出风险发生概率大小及严重性等级,由此得出风险管理建议参考意见。动态风险管理的过程包括:合同初审风险评分;阶段性的风险评价;风险防范措施调整三个环节。而这一系统的加入使得公司对于风险的辨识更加精准,同时也提高了公司在面临不可预知情况时处理问题的速度以及灵活性。

（三）信息化技术在合同管理中的应用

信息技术应用于工程合同管理主要体现在大数据、人工智能等技术的应用上。利用大数据能够对合同进行有效的监管和防范风险,在以往的基础上加入当前施工项目的实时数据来挖掘可能存在的合同隐患并生成图表化的分析结果,作为参考依据;利用人工智能技术,对合同中出现的风险免责条款自动提取出来并且按照其严重程度给出相应的评分,从而对其做出量化的评价和改善意见;运用区块链技术记录下合同文件电子证据以保证整个合同过程有据可循。例如,在一央企地铁项目的合同存证系统中,在此项目上应用之后,合同争议解决时间从114天下降到19天,证据齐全程度也从原来的47%上升到了96%,大大提升了合同管理工作效率以及纠纷预防水平。信息化合同管理系统一般会包括合同审核模块、履约跟踪模块、风险提示模块、档案管理模块等等,各个模块相互协作形成一个全生命周期自动化管理系统,大幅增加了合同履行成功率及透明度^[6]。如表1所示。

表1 信息化技术在合同管理应用效果对比

技术手段	应用效果指标	应用前	应用后
区块链存证	纠纷处理周期(天)	114	19
区块链存证	证据完整度(%)	47	96
AI合同审查	条款风险识别准确率(%)	68	98
智能预警模型	平均纠纷减少(项目)	—	65%

四、工程项目合同管理的优化策略与建议

（一）加强合同管理人员的专业培训与认证

提高工程项目的合同人员能力水平是强化合同管理制度的根本措施。目前很多合同管理失当的问题都是由于合同管理人员不懂相关的法律法规以及合同的风险因素及技术指标等原因引起的,在合同管理和实施阶段不能够准确及时发现并解决存在的风险问题。政府投资项目的实践证明:定期开展合同管理人员系统的教育学习活动,比如学习法律知识、合同拟定要求、风险管理技巧等等能够明显增强岗位工作能力,预防合同纠纷事件发生

率。业主方也可以根据工作需要聘请外部律师进行指导或者审查合同文件,使合同内容合法合规、可执行性强[7]。

（二）优化合同签订前后及过程中的管理与监督

完善合同订立前后及过程中的管理与监督措施能够避免和减少合同争议的发生以及提升履约水平。合同缔结前的审核必须以风险防范为核心,对合同内容合法、明确、公平性及其风险分担情况进行彻底分析,如需请律师或者技术人员确认;保证工期、付款时间、变更流程等重点内容没有异议从而最小化发生矛盾的风险。合同订立之后要形成一个完整的履行监控及定期评价体系,在合同履行过程中形成台账,记载重要环节并按时进行评审,发现并解决问题。在标准合同管理体系构建过程中,对动态监管、变更管理进行加强是重点,及时监控合同履行状况可以很好的掌握成本、时间以及质量等各个方面存在的风险,保证合同履行更加可靠和稳定[8]。

（三）完善法律法规与行业标准体系

健全工程建设项目合同管理制度、相关法律法规体系以及行业标准,有助于提升合同履约的合法性及预防合同纠纷。目前,在合同管理中存在法规不够明晰、行业规范缺位使得合同履行时对于双方的责任、义务的划分不明晰以及发生争执时处理方式不清楚等问题。加强立法工作应在国家层面出台更具体的工程建设项目合同管理办法,根据行业发展需要来确定不同的合同模板、纠纷解决的办法等等,增强合同条款内容的合法性、执行力;行业协会和标准化制定部门要牵头制定统一的工程建设项目的合同管理标准,包括合同拟定、审核、履约以及纠纷解决等全部过程,以统一合同管理工作要求。此外,推进企业优秀实践总结归纳与国家标准融合,建立适用于全行业的合同管理和争议处理机制,有利于提升整个行业的合同管理水平,防范由于法律法规及标准落后产生的合同纠纷。

五、结语

工程建设合同管理的改进对保障工程项目的开展有着十分重要的作用。通过对合同条文细化处理、实时跟踪风险情况、利用信息技术等手段来进行防范合同争议的发生以及提高合同履行率的正确性和公开性程度;同时加强对合同管理人员的资质培训考核及资格认定工作、改善合同拟定和履行监管机制、健全有关法律法规、制定统一标准等措施都会有利于规避风险的发生,使工程建设项目的顺利开展得到有力保障。

参考文献

[1] 陈鹏. 工程项目合同中合同履行监督管理及控制措施的研究[J]. 中国集体经济, 2025, (31): 69-72.
[2] 林昌. 建筑工程合同管理方法以及法律纠纷解决办法的研究[J]. 法制博览, 2025, (30): 70-72.
[3] 孔令印. 建筑工程项目合同纠纷风险防控措施[J]. 工程技术研究, 2025, 10(20): 128-130.
[4] 毛丽霞, 高阳. 学校办公楼建设项目施工中甲方管理合同风险管控与应对策略[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(05): 144-145+148.
[5] 颜丽波. 水利工程造价咨询中合同管理实践策略的研究[J]. 水上安全, 2025, (19): 52-54.
[6] 余明彬. 建设工程造价鉴定在建设工程合同纠纷中的实践探讨[J]. 居业, 2025, (09): 169-171.
[7] 米莎娜. 基于成本管理视角的公路工程合同管理优化研究[J]. 时代汽车, 2025, (19): 177-179.
[8] 邹承志. 加强建设工程合同管理对工程造价的影响及管理对策[J]. 中国房地产业, 2025, (26): 34-37.

EPC 模式下工程造价动态控制机制研究

赵焕焕

河北建工集团建筑装饰工程有限公司, 河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/ERA.2026030009

摘 要 : EPC 模式是工程建设领域主流的承包方式, 具有设计、采购、施工一体化的特点, 工程造价控制的复杂性、系统性比传统模式要大得多。本文以 EPC 模式下工程造价动态控制为研究对象, 结合工程建设具体工序, 对目前工程造价控制的情况及存在的问题进行分析, 并阐述建立动态控制机制的现实意义。整理出设计、采购、施工全流程关键工序的造价影响因素, 建立目标确定、过程控制、偏差纠正、反馈优化的全周期动态控制机制, 提出相应的控制策略。研究目的在于给 EPC 项目造价精准控制、提高项目经济效益提供理论依据和实践指导, 促进工程建设行业高质量发展。

关 键 词 : EPC 模式; 工程造价动态; 控制机制

Research on Dynamic Cost Control Mechanisms in EPC Mode

Zhao Huanhuan

Hebei Construction Engineering Group Building Decoration Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract : EPC mode is the mainstream contracting method in the field of engineering construction, with the characteristics of integrated design, procurement, and construction. The complexity and systematicity of engineering cost control are much greater than traditional modes. This article takes the dynamic control of engineering cost under the EPC mode as the research object, analyzes the current situation and existing problems of engineering cost control based on specific construction processes, and elaborates on the practical significance of establishing a dynamic control mechanism. Organize the cost influencing factors of key processes in the entire design, procurement, and construction process, establish a dynamic control mechanism for target determination, process control, deviation correction, and feedback optimization throughout the entire cycle, and propose corresponding control strategies. The research aims to provide theoretical basis and practical guidance for precise cost control of EPC projects, improve project economic benefits, and promote high-quality development of the engineering construction industry.

Keywords : EPC mode; engineering cost dynamics; control mechanism

我国工程建设行业转型升级之后, EPC 总承包模式由于具有整合资源、缩短工期、减轻业主管理难度等优点而被应用到大型基础设施、工业建筑等项目上。但是 EPC 模式下“总价承包”的特点, 使得承包商面临更大的造价风险, 工程造价控制成为决定项目成败的关键环节。传统的静态造价控制方式已经不能满足 EPC 模式下设计、采购、施工深度融合的特点, 不能及时应对施工过程中各种不确定因素对造价造成的影响。因此, 在 EPC 模式下开展工程造价动态控制机制的研究, 重点分析各工序造价控制的要点, 创建出科学高效、行之有效的动态控制体系, 对于降低工程造价风险, 保证各方利益, 促进 EPC 模式的发展有着重要的现实意义。本文从意义、现状、机制构建等几个方面入手, 为 EPC 项目工程造价控制提出可行的途径。

一、EPC 模式下工程造价动态控制的意义

（一）保障项目经济效益，降低造价风险

EPC 模式下，承包商要承担从设计到竣工交付的全过程责任，造价超支风险主要由承包商承担。设计阶段方案选型、材料规格确定，施工阶段工序衔接、设备运维，采购阶段供应商选择、价格谈判等都会对项目总造价产生影响。动态控制可以对各个工序的造价执行情况随时掌握，及时发现并纠正造价偏差，防止小偏差累计造成大的造价超支。在主体结构施工工序中，对混凝土用量、钢筋损耗等重要指标进行动态监控，以减少材料浪费，削减不必要支出，保证项目经济效益，降低承包商造价风险，帮助业主实现投资目标^[1]。

（二）提升项目管理水平，优化资源配置

工程造价动态控制是 EPC 项目全生命周期内设计、采购、施工等各个部门、各个工序环节的控制。在动态控制的过程中，要各个部门之间互相配合，共享造价信息，对各个工序的资源投入进行准确的控制。机电安装工序施工进度与造价费用对比，可对人力物力财力等资源合理调配，防止出现资源闲置或者短缺的情况。动态控制机制要建立健全的信息反馈机制，使各个工序造价数据能够及时传达到项目管理层，给管理层决策提供科学依据，将项目管理从经验型向数据驱动型转变，提高项目管理水平^[2]。

（三）推动行业规范化发展，助力高质量建设

目前我国工程建设行业正向高质量方向发展，工程造价控制精细化、规范化要求越来越高。EPC 模式下工程造价动态控制机制的建立和推广，会使得行业内企业更加重视各个工序的造价控制，建立标准化的造价控制流程和指标体系。以绿色建筑项目为例，在节能材料采购、环保施工工序等各方面实施动态造价控制，从而推进绿色建筑技术的合理应用，达到经济效益和环境效益的统一。不仅可以提高单个项目的建设质量，也可以带动整个工程建设行业造价管理水平的提高，促进行业的规范化、高质量发展^[3]。

（四）保障项目全生命周期可持续性，提升综合效益

EPC 模式的最大优势是对项目全生命周期的统一管理，工程造价动态控制的延伸可以进一步保证项目全生命周期的可持续性。项目运营维护工序前期，运用动态控制机制预先考虑运维阶段的造价影响因素，如材料耐久性、设备能耗等，可减少运维成本。建筑幕墙施工工序中选择经济性高、耐久性好的材料，虽然初期造价稍高，但是能减少后期维修更换的频次，降低全生命周期成本。动态控制过程中对资源消耗、环保指标的约束，可促使项目实现绿色低碳建设，符合行业的可持续发展要求，提高项目的社会、环境、经济综合效益^[4]。

二、EPC 模式下工程造价动态控制的现状

（一）设计阶段造价控制不足，与施工工序脱节

设计阶段是 EPC 项目造价控制的重要环节，设计成果的好坏直接影响到项目后续施工工序的造价水平。但目前 EPC 项目的部

分设计阶段存在以下问题：设计人员造价意识薄弱，重设计方案的技术性、轻经济性，造成设计方案出现冗余设计、材料选型不合理等问题，增大施工工序的造价负担；设计与施工衔接不畅，设计方案没有充分考虑施工可行性与经济性，在施工过程中频繁出现设计变更，造成施工工序返工、材料浪费，从而引发造价超支^[5]。

（二）施工阶段过程管控薄弱，关键工序造价失控

施工阶段是工程造价消耗的主要阶段，基础施工、主体结构施工、装饰装修等许多重要工序都发生在施工阶段，但目前施工阶段动态控制还存在着明显的不足。进度和造价协调控制没有得到充分的重视；有些项目只赶工期，不考虑造价；工序交叉作业出现浪费、返工等现象。重要工序造价监管不到位，材料耗量、人工费用、设备使用等核心要素缺少实时跟踪；不能及时掌握造价动态变化；造成造价偏差累积；三是现场签证管理不规范，有的施工单位利用现场签证漏洞虚报工程量、提高材料价格，造成造价失控。据统计，某地区 EPC 项目施工阶段由于工序管控不严造成的造价超支比例达到 45% 以上。

（三）采购阶段造价管控滞后，供应链协同不足

采购阶段属于 EPC 项目造价控制的关键部分，关乎施工工序的材料供应及造价高低。但是目前采购阶段的造价控制存在滞后性，一是采购计划与施工工序不紧密衔接，造成材料供应不及时或者积压，增加仓储和资金占用成本；供应商选择不科学，没有做市场调研和供应商比价，造成采购材料价格偏高；对采购过程缺少动态监督，对材料价格波动、运输成本变化等无法及时应对，不能及时调整采购策略。同时采购部门同设计、施工部门的协作不到位，没有根据设计优化及施工工序的改变及时对采购方案加以改善，加大了造价控制的难度^[6]。

三、EPC 模式下工程造价动态控制机制构建

（一）设计阶段动态控制机制

设计阶段是工程造价动态控制的起点，应该建立设计、造价、施工三者之间相互协调的动态管控机制。首先建立设计方案造价评审机制，组建设计、造价、施工专业人员组成的评审小组，对设计方案的经济性、施工可行性进行评审，重点是关键施工工序造价影响因素如基础类型选择、主体结构形式等，提出优化建议。其次，实行限额设计，按照项目总造价目标，将造价指标分解到各个专业设计环节和具体施工工序，明确各个设计阶段的造价控制目标，保证设计成果符合造价要求。最后创建设计变更动态控制流程，对施工期间产生的设计变更及时做造价核算及影响分析，严格按照变更审批程序执行，防止无序变更造成造价超支。在住宅 EPC 项目的主体结构造价指标分解到梁、板、柱等具体构件工序上，从而有效地控制了主体结构造价^[7]。

（二）施工阶段动态控制机制

施工阶段应对关键工序实行动态控制、实时纠偏的监控办法。一是创建工序造价动态监控指标体系，确定基础施工、主体结构施工、装饰装修等重要工序材料消耗、人工成本、机械使用

等主要监控指标，采用 BIM 技术、物联网等信息化手段对各个工序的造价数据实施实时采集，达成造价动态变化的实时追踪。二是进度与造价的协同管控，把施工进度计划同造价控制目标联系起来，定时对进度完成情况和造价支出情况展开对比分析，一旦发现进度滞后或者造价超支，就立刻剖析原因并作出相应的调整。三是规范现场签证管理流程，确定签证范围、审批权限、时限，建立签证数据台账，对签证内容的真实性、合理性进行审核，保证签证造价的准确可控。下表为某 EPC 项目主要施工工序造价动态控制指标及控制效果对比表：

表1关键工序					
关键工序	监控指标	预算值	实际值	偏差率	控制措施
基础混凝土施工	混凝土损耗率	3%	2.2%	-0.8%	优化浇筑工艺，加强现场振捣管控
主体钢筋施工	钢筋损耗率	5%	4.5%	-0.5%	采用精准下料技术，加强钢筋回收利用
外墙装饰施工	材料单位用量	12kg/m ²	11.8kg/m ²	-1.7%	加强施工人员培训，规范施工操作流程

（三）采购阶段动态控制机制

采购阶段要创建起与设计、施工工序互相配合的动态管控体系，还要加强市场风险预警。首先建立采购计划动态调整机制，按照施工进度计划及设计变更情况及时对采购计划进行调整，保证材料供应同施工工序精确对接，防止出现材料积压或者短缺的情况。其次，创建供应商动态管理体系，定时对供应商的价格、质量、交货期等展开评定，形成合格供应商名录，借助集中采购、招标采购等方式缩减采购成本，还要注意材料市场价格的起伏状况，创建价格预警机制，一旦材料价格出现大幅度波动，就及时改变采购策略，比如签订长期供货协议，储备应急材料等等^[8]。最后加强采购和设计、施工部门之间的沟通，及时分享设计优化、工序调整等有关信息，保证所采购的材料符合设计要求、施工需求，避免因材料不符造成的返工、造价增加。在大型桥

梁 EPC 项目中，由于设置了材料价格预警机制，能够提前预知钢材价格的上升趋势，并且及时签订合同来达到降低采购成本的目的。

（四）全流程信息协同管控机制

针对全流程信息协同不畅的问题，要创建数据驱动的全流程信息协同管控机制，给动态控制赋予结实的数据支撑 [9]。首先建立统一的 BIM 协同管理平台，把设计、采购、施工等各工序的造价数据、进度数据、质量数据整合到一起，实现数据的实时共享、同步更新，保证各个部门都以同样的数据为依据开展工作。将设计图纸的造价指标、施工工序的实际消耗数据、采购材料的价格数据输入平台，达到造价动态监控可视化的目的。第二，创建全流程造价数据追溯系统，对每一工序的造价产生过程做出详细的记录，确定责任主体，便于后期造价偏差分析和问题追溯。最后采用大数据分析技术对平台积攒的全流程造价数据加以深入分析，预估造价变动走向，从而给造价控制决定给予智能化支撑，创建起“数据搜集－剖析－决策－执行－反应”的闭环改善机制，加强动态掌控的科学性与前瞻性^[10]。

四、结束语

综上所述，EPC 模式下的工程造价动态控制是贯穿于项目全生命周期的一套系统工程，它的关键之处在于以设计、采购、施工各个阶段的具体工序为依托，创建起科学有效的协同控制机制。本文通过分析 EPC 模式下工程造价动态控制的意义与现状，从设计、施工、采购三个阶段入手，提出了相应的动态控制机制，重点突出了各个阶段工序控制的重点以及协同要点。经过实践证明，只有把动态控制的思想渗透到每一个具体的工序当中，对造价风险实施实时的监测和精准的修正，才能有效地减少项目造价超支的风险，保证项目各方的经济效益。

参考文献

[1] 赵艳丽，李梦. 工程项目施工阶段造价动态控制方法 [J]. 建筑与预算，2025，(03):37-39.
[2] 孙清源. BIM 技术在工程造价动态控制与优化中的应用研究 [J]. 新城建科技，2025，34(02):166-168.
[3] 戚晓. 基于装配式建筑的工程造价动态控制与优化模型 [J]. 中国建筑金属结构，2025，24(01):173-175.
[4] 徐敏. 赢得值法在市政工程造价中动态控制的运用分析 [J]. 安徽建筑，2024，31(12):190-192.
[5] 黎小宁. 钢铁企业工程造价的动态控制与风险防范 [J]. 价值工程，2024，43(33):32-35.
[6] 陈浪威. 基于 BIM 技术的建筑工程造价全过程动态控制策略探究 [J]. 建筑与预算，2024，(08):34-36.
[7] 张勇，陈奕帆. 建筑工程造价 BIM 智能动态控制研究 [J]. 绿色建造与智能建筑，2024，(05):47-49+63.
[8] 陈泱. 基于 BIM 技术的建筑工程造价全过程动态控制 [J]. 住宅与房地产，2024，(11):74-76.
[9] 张峰端. 基于 BIM 技术的建筑工程造价全过程动态控制 [J]. 房地产世界，2024，(06):89-91.
[10] 王丽琴. 施工阶段工程造价动态控制研究 [J]. 居业，2023，(11):111-113.

商业综合体建筑电气负荷计算与配电系统优化

高洁

中国建筑设计研究院有限公司，北京 100044

DOI:10.61369/ERA.2026030026

摘 要： 伴随城市化脚步的加速，商业综合体变作城市商业演进的核心载体，其功能复合状态、业态多元模样的特征对电气体系的可靠程度、经济情况和安全状况提出更高需求。电气负荷核算作为商业综合体电气规划的根基，径直决断配电体系的谋划与布置；配电体系的优化便是保障电气体系高效运作的要害。本文联合商业综合体的业态特征，深刻剖析电气负荷核算的核心诉求与现存难题，探寻负荷核算办法的合理选用策略；在此根基之上，从供电架构、设备选型、运维管理等层面，提出接地气的配电体系优化途径，为商业综合体电气体系的科学规划与高效运作提供参照。

关 键 词： 商业综合体；电气负荷计算；配电系统优化；业态特性；供电可靠性

Calculation of Electrical Load for Commercial Complex Buildings and Optimization of Power Distribution System

Gao Jie

China Architecture Design & Research Group Co., Ltd., Beijing 100044

Abstract： With the acceleration of urbanization, commercial complexes have become the core carrier of urban commercial evolution. Their functional composite state and diverse business types pose higher requirements for the reliability, economic conditions and safety status of the electrical system. Electrical load calculation, as the foundation of electrical planning for commercial complexes, directly determines the planning and layout of the power distribution system; the optimization of the power distribution system is the key to ensuring the efficient operation of the electrical system. This paper, in combination with the business characteristics of commercial complexes, deeply analyzes the core demands and existing problems of electrical load calculation, and explores reasonable selection strategies for load calculation methods; on this basis, from the aspects of power supply architecture, equipment selection, and operation and maintenance management, it proposes practical ways to optimize the power distribution system, providing a reference for the scientific planning and efficient operation of the electrical system of commercial complexes.

Keywords： commercial complex; electrical load calculation; power distribution system optimization; business characteristics; power supply reliability

引言

当下，商业综合体已成汇聚购物、餐饮、娱乐、办公等多种功能于一体的城市公共空间，其电气体系作为保障各项功能正常运转的“生命力脉络”，其规划质量径直作用于商业综合体的运营效率与用户感受。电气负荷核算为电气规划的前提，若核算偏差过大，容易致使配电设备冗余浪费或过载运作；配电体系则为负荷输送的核心载体，其合理程度径直关联供电可靠度与能耗水准^[1]。鉴于此，深刻研究商业综合体电气负荷核算办法，优化配电体系规划，对提升商业综合体电气体系运作质量、降低运营成本具备重要现实意义。本文就此展开深刻探寻。

一、商业综合体建筑电气负荷计算的核心要点与现存问题

（一）电气负荷计算的核心要求

1. 贴合业态负荷特性

商业综合体不同业态的用电需求存有本质差别，负荷核算需

充分贴合各业态的运作特征。比如，餐饮区域除常规照明、插座负荷之外，还涵盖厨房设备、通风排烟设备等专用负荷，这类负荷具备功率大、使用时段相对集中的特性；影院区域的负荷主要汇聚在放映设备、音响体系、空调体系，且负荷运作稳定程度要求高，需保障不间断供电；商铺区域的负荷则具备不确定性，受商户经营类别、营业时长、设备配置作用较大，核算时需预留一

定的负荷余量；公共区域像走廊、中庭的照明、应急照明、自动扶梯等负荷，具备全天候运作或定时运作的特性，负荷波动较小。所以，负荷核算需按业态分区开展，精准匹配各区域的负荷特性，规避“一刀切”的核算方式^[2]。

2. 保障供电可靠性需求

商业综合体呈现人流量庞大、功能关键之特征，部分区域像应急通道构造、消防系统装置、安防系统设备等归属于一级负荷范畴，对供电可靠性具备极高要求标准，需运用双电源架构或多电源供电模式。在开展负荷计算操作时，必须清晰划分不同等级的负荷种类类型，精准核算一级负荷、二级负荷、三级负荷的容量数值，为后续配电系统的电源配置工作提供基础依据支撑。与此同时，还需要考量负荷的同时系数指标，即同一时间区段内各个负荷实际运行功率与额定功率之间的比值关系，商业综合体各业态领域的负荷同时系数存在差异状况，倘若对这一因素要素予以忽视，容易造成计算结果产生偏差误差，要么形成配电设备投资的浪费情形，要么无法满足实际用电的需求状况^[3]。

3. 兼顾远期发展预留

商业综合体拥有较长的运营周期时长，在其生命周期过程当中可能遭遇业态调整变革、商户更替变化等情形状况，用电负荷也会随之产生变化波动。基于此，负荷计算工作需要具备一定程度的前瞻性，为远期负荷的增长幅度预留合理适当的空间范畴^[4]。比如讲，商铺区域可以依照未来可能出现的业态升级需求期望，适当提升负荷密度的预留标准；公共区域能够考虑新增电气设备的潜在可能，在负荷计算过程当中预留相应对应的容量数值，防止后期因为负荷增长因素而开展大规模的电气改造工程，降低改造成本开支与运营干扰影响。

（二）当前电气负荷计算存在的主要问题

1. 负荷特性把握不准确

部分设计人员在实施负荷计算工作之际，没有充分开展商业综合体具体业态规划的调研活动，对于不同区域的负荷类型类别、运行规律特征了解不够深入透彻，仅仅采用统一一致的负荷密度标准进行估算操作。例如来讲，把餐饮区域和普通商铺运用相同的负荷密度标准尺度，忽略了餐饮区域大功率厨房设备的用电需求情况；针对影院场所、超市空间等特殊业态的负荷特性特点分析不够充分，造成计算结果和实际负荷之间出现较大偏差差异。这种粗放形式的计算方式方法，要么造成配电设备配置不够充足，无法满足高峰时段的用电需求要求，引发设备过载现象、跳闸问题等情况；要么造成设备配置存在冗余过剩，增加初期投资成本与后期运维成本费用^[5]。

2. 计算方法选用不合理

当前普遍运用的电气负荷计算方法包含需要系数方法、负荷密度方法、单位指标方法等类型，不同方法各自适用于不同的场景情形。然而在实际设计工作当中，部分设计人员没有依据商业综合体的业态特点特征合理选用计算方法方式，存在“一种方法贯穿使用”的状况情形^[6]。例如来说，负荷密度方法适用于初步设计阶段的负荷估算工作，精度水平相对较低，但部分设计人员将其应用于施工图设计阶段的精确计算任务；需要系数方法适用于

各类用电设备的负荷计算工作，但没有依据不同业态设备的需要系数差异差别进行精准取值操作，造成计算结果不够准确无误。

3. 远期负荷预留存缺陷

部分项目于负荷核算之际，对远期演进需求忖度欠周，仅契合当下业态之用电需求，未预存合理之负荷增长幅度。当商业综合体运营进程中业态整饬、商户晋级之时，新增之用电装置无法接入现存配电体系，需对配电线路、变压器等装置实施改造，非但增添了改造资费，更会对商业综合体之正常运营产生影响。另有部分项目却过度预存远期负荷，致使配电装置长久处于低负荷运转态势，拉低了装置运转效能，增添了能耗与运维成本^[7]。

二、商业综合体建筑电气负荷计算的优化方法

（一）精准调研业态，细化负荷分类

负荷核算之前，需开展全面业态调研，明晰商业综合体各区域功能定位、商户类别、装置配置情形，细化负荷分类准则。譬如，将商业区域划分为零售商铺、餐饮区域、娱乐区域、超市区域、办公区域、公共区域等，针对不同区域之负荷特征，分别梳理负荷类别^[8]。就餐饮区域而言，需详尽统计厨房装置、通风排烟装置、照明装置、空调装置之数目与功率；对影院区域来讲，要着重核查放映装置、音响体系、空调体系、应急照明之功率与运转规律；对于零售商铺，鉴于商户经营类别的不可确定性，可采用“基础负荷+可变负荷”之分类模式，基础负荷涵盖照明、基础插座等必需用电负荷，可变负荷依据商铺面积与经营类别预存合理容量。借由细密化负荷分类，为后续精确核算筑根基。

（二）合理选用计算方法，精准取值参数

依照商业综合体不同设计阶段之需求与各区域，合理选用负荷核算方式，并精确择取核算参数。在初步设计阶段，可运用负荷密度法或单位指标法开展整体负荷估算，迅速确定电气体系；在施工图设计阶段，需运用需要系数法开展精确核算，保障配电装置配置。对于不同业态之负荷核算，需依照其装置运转特征精确择取需要系数。例如，餐饮区域运转概率较高，需要系数择取可相对偏高；零售商铺之装置运转具有随机性，需要系数择取可适度调低；公共区域、自动扶梯等装置运转规律平稳，需要系数择取相对恒定。同时，需考量负荷，同一楼层或同一功能区域内，因运转时段存在差异，同时系数需依照区域面积、负荷类别实施调整，规避因同时系数择取过大或过小引致核算偏差^[9]。

（三）科学预留远期负荷，兼顾经济性与前瞻性

依照商业综合体的运营规划同城市商业发展走向，对预留比例进行合理确定操作。就零售商铺、办公这类易于产生业态调整情形的区域来说，远期负荷预留比例能够在当前计算负荷的20%—30%范围之内实施控制动作；针对餐饮、影院等业态处于相对固定状态的区域，预留比例可在10%—20%区间开展控制行为。与此同时，于配电系统设计领域当中，运用模块化设计思维模式，对配电线路、变压器的扩容空间实施预留举措，举例来讲，变压器室开展额外的变压器安装位置预留事务，配电线路选用截面略大规格的电缆，为后期负荷呈现增长态势时开展快速扩

容活动提供便利条件，对大规模改造情况进行规避。

三、商业综合体建筑配电系统优化策略

（一）优化供电架构，提升供电可靠性

依据商业综合体不同区域的负荷等级状况，开展分级供电网络构建工作。对于一级负荷诸如消防系统、应急照明设施、安防系统、影院放映设备等内容，运用双电源或者多电源供电形式，保证当其中一路电源出现故障问题时，另一路电源可以开展快速切换操作，对负荷不间断供电情形进行保障；针对二级负荷像普通办公设备、超市冷藏设备等项目，采用双电源供电形式，将供电连续性保障工作放在优先位置；对于三级负荷例如普通照明装置、非必要插座等物件，运用单电源供电形式，达成降低供电成本目标^[10]。与此同时，对供电区域进行合理划分操作，采用“总配电室—分区配电室—楼层配电箱”的三级供电架构模式，每个分区配电室承担特定区域的供电任务，为故障隔离工作与运维管理事项提供便利条件，对某一区域出现故障问题对整体供电情况产生影响的现象进行避免。配电线路布局工作需要结合商业综合体的建筑结构和业态分布状况，遵循“短路径、少转角”的原则内容，开展线路损耗降低工作与故障概率减少事宜。对于大功率设备比如餐饮厨房设备、空调主机等装置，运用单独的配电线路开展供电作业，避免和其他负荷共同使用线路情况，对线路过载问题进行防止；针对人员密集区域例如中庭、疏散通道等场所，配电线路需要采用阻燃、耐火材料物质，并开展穿管保护措施，推进线路安全性提升工作。

（二）精准选型设备，降低能耗水平

变压器作为配电系统的核心设备构成，其选型情况对能耗水平和供电可靠性产生直接影响效果。按照负荷计算结果内容，结合商业综合体负荷呈现的季节性、时段性波动特征，对变压器的容量与台数进行合理选择操作。对于负荷波动幅度较大的区域范围，能够采用多台变压器并联运行的方式形态，依据负荷变化实际情况对变压器进行投切操作，避免单相变压器处于长期低负荷运行状态，推进运行效率提升进程；开展节能型变压器选择工作，降低变压器的空载损耗与负载损耗数值，开展能耗减少工作。与此同时，变压器的安装位置需要靠近负荷中心区域，缩短配电线路长度距离，开展线路损耗降低工作。开关设备的规格选取应契合负载容量与供电级别，保障其分断功能、额定电流等指标符合运行需求。针对一级负载供电线路，选用具备迅速切换性

能的开关设备，提高电源切换效能；针对频繁操作的线路，选用操作性能稳定的开关设备，减少故障几率。电缆选型需依照线路的负载电流、铺设形式、环境温度等要素，合理挑选电缆截面与材质，防止电缆过载发烫，同时选用低损耗电缆，降低线路能耗。比如，在负载较大的配电线路，选用铜芯电缆，其导电性能胜过铝芯电缆，损耗更低；在铺设空间受限的区域，选用铠装电缆，增强电缆的机械强度与防护性能。

（三）完善运维体系，提升管理效率

结合智慧建筑发展态势，搭建商业综合体电气系统智能化运维平台，达成对配电系统的实时监控、故障预警与远程操控。通过在变压器、开关设备、配电线路等关键节点安装传感器，实时收集电压、电流、温度等运行数据，传输至运维平台；平台对运行数据进行剖析，当数据超出正常范围时，及时发出故障预警，提示运维人员处置；对于部分设备，可实现远程投切控制，提高运维效率。例如，当某区域负载过载时，平台可自动发出预警，运维人员可远程调节负载分配，避免设备故障。制定健全的运维管理制度，明确运维人员的职责与工作程序，建立常态化的巡检、维护机制。定期对配电设备进行巡检，检查设备的运行状态、接线状况、绝缘性能等，及时发现并处理设备隐患；定期对变压器、开关设备等进行维护保养，如清理设备灰尘、检查润滑油位、测试保护装置性能等，延长设备使用年限；建立设备运行档案，记录设备的安装时间、维护记录、故障处理情况等，为后续运维工作提供参照。同时，强化运维人员的专业培训，提高其对复杂配电系统的操作与故障处理能力。

四、结论

商业综合体建筑电气负载计算与配电系统优化是保障其高效、可靠运行的关键环节。负载计算需充分结合商业综合体业态多样化的特征，通过精确调研业态、细化负载分类、合理选用计算方法、科学预留远期负载，提高计算准确度；配电系统优化需以负载计算结果为基础，从供电架构、设备选型、运维管理三个层面入手，构建分级供电网络、精准选型节能设备、健全智能化运维体系，提高供电可靠性、降低能耗水平、简化运维流程。在实际工程中，需结合商业综合体的具体规划与运营需求，灵活运用相关方法与策略，实现电气系统与商业运营的协同发展，为商业综合体的持续稳定运行提供有力保障。

参考文献

- [1] 廖巍. 建筑电气系统中分布式互补能源优化配置分析[J]. 山西建筑, 2025, 51(15): 105-108.
- [2] 李艳文. 商业综合体建筑电气一体化设计分析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(07): 7-9.
- [3] 冯志文, 迭勇, 刘森. 商业综合体建筑电气设计探讨[J]. 建筑电气, 2024, 43(03): 51-55+4.
- [4] 叶瑾, 陈碧虎. 大型商业综合体建筑的消防监督对策研究[J]. 今日消防, 2023, 8(01): 79-81.
- [5] 黄耀川. 商业综合体建筑电气设计探究[J]. 江西建材, 2022, (12): 117-118+121.
- [6] 张蕾. 商业综合体建筑电气设计体会[J]. 新型工业化, 2022, 12(12): 117-120+124.
- [7] 赵磊, 马宝元, 赵纪超. 大型商业综合体建筑电气与智能化一体化设计要点[J]. 现代建筑电气, 2022, 13(09): 23-27+38.
- [8] 刘炳苒. 商业综合体绿色建筑电气设计研究[J]. 中国建材科技, 2021, 30(04): 116-117.
- [9] 沈少卿. 社区商业综合体建筑电气设计管理及要点分析[J]. 现代建筑电气, 2021, 12(06): 10-13+65.
- [10] 李炳华, 潘鑫, 岳云涛, 常昊. 商业综合体建筑电气负荷密度研究[J]. 建筑电气, 2021, 40(05): 5-11.

绿色建筑全寿命周期成本测算模型 与碳成本内化路径研究

王鹏程

河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ERA.2026030038

摘要： 达成“双碳目标”，绿色建筑作用突出，要推动绿色建筑可持续发展，全寿命周期成本（LCC）测算和碳成本内化是关键抓手，运用生命周期成本分析，搭建绿色建筑全寿命周期成本测算模型，覆盖初期建设成本、运营维护成本以及拆除成本等多类内容，剖析碳成本内化的路径，把碳排放转为经济成本，并出台政策与市场机制推动碳成本内部化，该研究为绿色建筑项目开发出量化成本和碳排放的有效工具，实现绿色建筑经济性和环境效益双丰收，拥有关键的实践效用和政策指导价值。

关键词： 绿色建筑；全寿命周期成本；碳成本内化；生命周期成本分析；碳排放

Research on the Life Cycle Cost Calculation Model and Carbon Cost Internalization Path for Green Buildings

Wang Pengcheng

Hebei Construction Group Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000

Abstract： Achieving the "dual carbon goals" highlights the significant role of green buildings. To promote the sustainable development of green buildings, calculating the life cycle cost (LCC) and internalizing carbon costs are key approaches. By applying life cycle cost analysis, this study establishes a life cycle cost calculation model for green buildings that covers various costs, including initial construction costs, operational and maintenance costs, and demolition costs. It analyzes the path for internalizing carbon costs, transforming carbon emissions into economic costs, and introduces policies and market mechanisms to facilitate the internalization of carbon costs. This research provides an effective tool for quantifying costs and carbon emissions in green building projects, achieving both economic and environmental benefits for green buildings, and holds significant practical utility and policy guidance value.

Keywords： green buildings; life cycle cost; carbon cost internalization; life cycle cost analysis; carbon emissions

引言

全球气候变化问题越发严峻，绿色建筑是完成碳中和目标的核心手段，关注热度逐步上涨，绿色建筑能降低能耗，减少资源耗用，还可明显减少碳排放，绿色建筑推广普及的最大阻碍，是高额的前期投入和复杂的全寿命周期成本，引入全寿命周期成本测算模型与碳成本内化机制，可对建筑全流程的经济和环境影响做量化测算，梳理成本组成，提高建筑可持续水平，采用生命周期成本分析（LCCA）方法，绿色建筑项目兼顾环境友好属性，强化经济收益，为政策制定者和行业从业者提供务实可用的决策支持。

一、绿色建筑全寿命周期成本测算模型构建

（一）全寿命周期划分与成本构成分析

一般将绿色建筑全寿命周期拆成规划设计、材料生产、施工建设、运营维护以及拆除回收等阶段，各阶段成本均覆盖直接支出，还涉及间接费用、环境外部成本等多维度指标，规划设计阶段的成本，包含建筑能效优化设计、可再生能源集成和生态评估费用，这类花费一般占项目总成本的3%~7%，但对后续节能效

果作用明显。建材选择及供应链波动会极大影响材料生产阶段成本，比如绿色建材价格一般比传统建材高10%~25%，但它运营时可大幅削减能耗成本，施工建设阶段的核心成本涵盖施工机械能耗、废弃物处理与质量控制费用等，运营维护阶段的持续时间一般最长，建筑能耗、电梯维护、水处理系统等运营成本，占总生命周期成本比例或超40%，拆除与回收阶段成本占比很小，得把资源回收价值和环境影响纳入模型衡量体系，确保成本与环境效益的全面评估^[1]。

关乎各阶段成本的核心因素有折现率、能源价格波动、维护周期和设备寿命等，折现率用来把未来成本换算成现值，作为净现值（NPV）等经济指标计算的核心参数，取值多在3%~8%范围内；设备寿命参数关联维护成本和替换周期，直接左右长期成本预测精准度，靠系统分析这些因素，可清晰划分全寿命周期成本构成，给后续模型设计供数据支撑^[2]。

（二）成本测算理论基础与指标体系

绿色建筑全寿命周期成本测算以生命周期成本分析（LCCA）为理论核心，把初始投资、运行维护成本、替换和废弃成本等纳入统一框架，对长期经济效益做全面评估，LCCA方法聚焦成本折现、时间价值处理和阶段成本累积计算，是测算绿色建筑经济可持续性的核心技术途径，基于这一前提，净现值法（Net Present Value, NPV）和折现成本指标多用来计量不同生命周期阶段的综合成本，对比不同设计方案的经济性^[3]。

搭建绿色建筑全寿命周期成本测算指标体系阶段，需兼顾多维度指标，像经济成本指标，绿色建筑测算体系一般涉及两个组成部分：依托指标体系，能制定统一评价标准，诸如单位建筑面积生命周期成本（元/平方米·生命周期）、折现成本比率等，提升测算结果的可比性和精度，给项目评估定统一参考标准。

（三）全过程成本测算模型设计

构成绿色建筑全寿命周期成本测算模型基础结构的是成本输入模块、计算处理模块和输出结果模块，涉及输入的变量有建筑设计参数、材料价格、能源消耗数据、维护周期、折现率等关键参数；这些参数直接左右模型的运行结果精度，依托 BIM（Building Information Modeling）等数字化技术，实现成本数据结构化输入和动态更新，优化模型运行效率和预测可靠性^[4]。

各阶段成本计算可依托生命周期成本分析方法，折现计算按时间顺序排列的阶段成本，再累加算出全寿命周期成本总额，具体测算环节涉及数据采集与预处理、参数校准、阶段性成本计算、折现处理、结果输出与敏感性分析，获取数据这一块，一般整合市场报价、历史项目成本数据库、能源消耗监测系统等多源数据开展综合处理，保障模型输入数据的完整性和准确性，数据处理技术包含时间序列分析、成本预测模型优化与不确定性分析等路径，强化结果的可解释性与预测精度，为绿色建筑成本优化提量化支撑。

二、绿色建筑碳成本内化路径分析

（一）碳成本概念及其在绿色建筑中的作用

碳成本指和建筑项目全生命周期碳排放相关的经济成本，一般结合碳排放量与碳定价机制做量化处理，这一界定包含直接碳排放成本，碳排放计量依照国际标准，像《温室气体核算和报告标准》（GHG Protocol）和《ISO 14064》标准，借助精准碳排放因子实施计算^[5]。

聚焦绿色建筑，所谓碳成本内化，是将建筑生命周期产生的碳排放转化为经济成本，把它算进建筑项目的总投资和运营成本里，把碳成本纳入核算，对推动低碳建筑发展意义重大，从经济角度量化碳排放，能有效激发建筑设计及施工环节的绿色创新，并推动

可再生能源技术普及，增强能源利用效率，参考国际成熟做法，可借助多种政策工具落实碳成本内化，诸如碳交易市场、碳税这类，这些举措可推动企业削减碳排放，同时压缩长期运营成本。

内化碳成本对推动绿色建筑行业意义重大，2020年中国政府官宣碳中和目标，设定2060年实现碳达峰，建筑行业是碳排放关键构成部分之一，需落实有效手段削减碳排放，计入碳成本开支，实现建筑行业可持续发展。

（二）建筑全生命周期碳排放核算框架

建筑全生命周期碳排放核算框架采用生命周期评价（LCA）方法搭建，该方法量化建筑物从规划设计到拆除回收各阶段的碳排放数据，研判它对环境的作用，运用 LCA 方法，可全面系统覆盖建筑项目各阶段碳排放，能给出细致的碳足迹数据，协助决策者优化建筑设计，降低环境压力^[6]。

全生命周期碳排放核算框架一般涵盖5个阶段：规划设计阶段、材料生产阶段、施工建造阶段、运营应用阶段、拆除回收阶段，各阶段碳排放权重分配不相同，聚焦绿色建筑，材料生产和施工建设环节碳排放占整体总量的30%~40%，运营环节（重点是建筑能源消耗）占总排放的比例或达50%以上。权重分配的恰当程度影响着整体碳排放核算结果的准确性，制定各阶段碳排放因子，结合不同建筑类型、地区的能耗数据做量化分析，能获取精准的碳排放预测值，碳排放权重分配一般依据各阶段排放强度和全生命周期各阶段占比执行，选用低碳环保类建筑材料，材料生产阶段的碳排放会出现下降，进而改变整体碳足迹。

（三）碳成本内化路径设计与实施策略

制定碳成本内化路径，首先需衔接碳排放和成本的转换逻辑，碳排放量可借助碳定价机制，用碳税、碳交易、碳费等经济工具，把相关指标量化后转化为经济成本，碳交易市场先定碳排放总量，再分配配额，企业可购买碳配额抵消自身排放，进而做好成本管控，碳税直接按每吨碳排放征税，用这种方式引导企业降低碳排放，按照不同国家的碳定价政策，碳税收费区间多为每吨碳30~100美元，结合不同碳市场的价格波动，绿色建筑项目可推行灵活的碳成本管理^[7]。

给绿色建筑成本测算模型添加碳成本内化方法，借助调整模型输入参数（如碳排放因子、碳税费用等）能核算碳成本的实际影响，这个过程的核心是把碳排放的社会成本和经济成本整合，得出精准的建筑项目生命周期成本，这可提升绿色建筑的市场竞争力，还可为投资者提供精准决策支撑。具体实施办法，可采用政府政策、市场激励和企业自主行动相结合的方式，推出强制性碳排放标准和激励措施，落实绿色建筑碳成本内部转化，推出绿色建筑税收减免政策、搭建碳交易体系、开展绿色建筑认证等举措，可有力推动碳成本内化，对这些政策路径做合理设计，可推动绿色建筑产业低碳转型，并推动达成更高效的资源配置和可持续发展。

三、绿色建筑案例分析与模型验证

（一）案例选择与研究对象说明

选定中国某一线城市里的典型绿色建筑项目“深圳 XX 商业

综合体”作为实证研究对象，该项目2020年开工搭建，建筑占地规模约45,000 m²，构建高能效、低碳排放的综合用途结构体，该项目采用高性能围护结构、高效 HVAC（供暖通风空气调节）系统和屋顶光伏发电系统，设计寿命50年，达到国家绿色建筑2星及以上标准，我们用该项目的工程量清单（BOQ）、能源消耗监测数据及运维记录，为生命周期成本模型和碳成本核算模型做实证分析，挑这类代表性项目，可助力展现绿色建筑成本与碳排放的长期相互作用，扩大结论适用范围和政策参考价值。

增强模型对现实项目的适配性，数据采集包含材料采购成本、施工机械能耗、设备能耗、维护与替换费用等，同步依托全生命周期碳排放因子库开展排放核算，碳排放因子采用国家认可的标准化数据集，结合建筑各阶段能源消耗特点做阶段化分配，采取该举措既强化了数据精度，还提升模型不同阶段测算的可比性^[8]。

（二）全寿命周期成本测算模型应用与数据分析

将项目实际成本数据及碳排放数据导入全寿命周期成本（LCC）测算模型，分阶段拆解各项输出值，得出详尽的成本和碳排放分析结论，生命周期成本包含初期设计与施工成本、运营维护成本（含设备替换与能耗）、拆除与回收成本等，采用净现值（NPV）法完成折现计算，用5%折现率核算未来支出折现值。如表1所示。

表1 项目某些阶段成本与碳排放指标示例

阶段	成本（元 / m ² ）	碳排放（kgCO ₂ e/ m ² ）
规划与设计	320	15
材料生产与运输	1,850	120
施工建设	2,450	95
运营维护（50年）	9,720	780
拆除与回收	480	30

数据结果表明，运营维护阶段成本占全生命周期成本比例约为62%，该主体碳排放量占总排放量70%以上，这与行业统计数据吻合，建筑运营能耗构成生命周期碳排放的最大来源。

梳理各阶段成本与碳排放指标的变化，可发现绿色建筑初期投入偏大，但后期借节能措施降低能耗，明显减少运营成本，最终让全生命周期综合经济效益大幅优于未推行绿色策略的对比样本。

（三）碳成本内化效果评估与对比分析

实施碳成本内化方案后，按既定碳价格把碳排放量折算成经

济成本，归入全寿命周期成本模型重新演算，内化后的生命周期总成本，对应碳排放的经济价值，进而明确碳成本和建筑经济性的关联。

未实现碳成本内化，该项目全生命周期折现总成本约15,820元每平方米；纳入碳成本后按累计碳排放总量（约1,按040 kgCO₂e/ m²核算碳成本为72.8元 / m²，使生命周期折现总成本上涨约0.46%，该微小增长显示绿色建筑通过节能和可再生能源措施有效减少碳成本，对比传统建筑碳成本内化导致生命周期成本涨5%~10%的情形，优势更明显，把碳成本纳入核算可提升绿色建筑全生命周期成本模型的完整性，还强化了经济性和环境性的协同考量，助政策制定者和开发者更直观考量低碳投资回报。

（四）模型敏感性与可靠性分析

为验证模型稳定性，针对关键参数做敏感性分析，涉及折现率、能源价格增长率、碳定价水平等，选取3%~7%区间折现率开展波动测试，可看出生命周期总成本与折现率为反比关系，折现率上调1个百分点，生命周期总成本NPV减少约4.5%。碳价格从50元 / 吨升至100元 / 吨时，生命周期总成本增长幅度范围0.3%~0.9%，说明碳成本内化弹性属于中等区间，能源价格敏感性分析结果表明，未来运营阶段能源价格年增幅从2%提至4%，运营维护阶段成本占比上涨10%以上，着重强化能效优化在减少长期成本中的核心价值，这些敏感性分析结果证明模型适配多种未来情景，给政策制定与投资决策提供更全面的参数参照。

四、结语

绿色建筑是完成碳中和目标的核心途径，经济和环境效益表现突出，构建全寿命周期成本测算模型和碳成本内化路径，既能精准核算绿色建筑项目的整体经济收益，还可核算碳排放造成的环境成本，给决策者提供科学支撑，经案例分析证实，绿色建筑起步阶段投入成本偏高，但运营阶段节省能源、降低碳排放的效果，让全生命周期成本优势突出，引入碳成本内化机制，进一步拉高绿色建筑的综合价值，促进绿色建筑产业永续发展，技术进步及政策支持，绿色建筑的经济价值和环境效益会更凸显，为完成“双碳目标”付出更多努力。

参考文献

[1] 钱艳新. 基于全寿命周期的绿色建筑增量成本研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.
[2] 詹青. 基于全寿命周期的绿色建筑增量成本研究 [D]. 安徽建筑大学, 2021.
[3] 李辰露. 材料及多因素对绿色建筑全寿命周期成本影响研究 [D]. 武汉轻工大学, 2023.
[4] 王艳. 建筑全寿命周期能耗影响因素与协同治理研究 [D]. 济南大学, 2023.
[5] 杜淑雯. 基于碳减排视角的装配式建筑增量成本及效益评价研究 [D]. 西南科技大学, 2023.
[6] 李保振. M 商业地产项目全寿命周期成本管理研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2022.
[7] 陈嘉庆. 基于 LCSA 的机制砂高性能混凝土全寿命周期成本研究 [D]. 广西大学, 2024.
[8] 曹园. 装配式建筑全寿命周期成本效益研究 [D]. 安徽建筑大学, 2020.

某佛学院结构设计关键问题解析

范华君

南京长江都市建筑设计股份有限公司，江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2026030039

摘 要： 本文系统探讨了山地学校项目的结构设计全过程。结合场地地质条件，明确了桩基选型原则，并深入分析了边坡支护设计对山地建筑安全与稳定的关键影响。详细阐述了特殊计算参数的确定依据及计算方法，确保结构分析的准确性与可靠性。在此基础上，归纳并总结了针对山地学校项目的系列结构加强措施，涵盖抗震设防要求的落实、结构重要性系数的取值、关键计算与构造措施，以及对不规则结构的处理对策。研究成果为同类复杂地形条件下的教育类建筑项目提供了可借鉴的设计思路与技术参考，具有良好的工程应用价值。

关 键 词： 山地项目；学校项目；结构设计；参数计算；措施总结

Analysis of Key Issues in Structural Design of a Buddhist College

Fan Huajun

Nanjing Yangtze River Urban Architectural Design Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper systematically explores the entire process of structural design for a mountain school project. Based on the site's geological conditions, it clarifies the principles for selecting pile foundations and provides an in-depth analysis of the critical impact of slope support design on the safety and stability of mountain buildings. The paper elaborates on the basis for determining special calculation parameters and their calculation methods, ensuring the accuracy and reliability of structural analysis. Building on this foundation, it summarizes a series of structural reinforcement measures tailored to mountain school projects, covering the implementation of seismic fortification requirements, the selection of structural importance coefficients, key calculation and construction measures, and strategies for dealing with irregular structures. The research findings offer valuable design insights and technical references for educational building projects in similar complex terrain conditions, demonstrating significant practical engineering value.

Keywords： mountain projects; school projects; structural design; parameter calculation; measure summarization

引言

随着我国城镇化进程步入中后期，房地产市场整体呈现下行趋势，住宅类建设项目显著减少，城市核心区条件优越的新增公共建筑项目亦随之锐减。同时，伴随文化旅游产业的蓬勃兴起，山地资源的开发与利用日益受到重视。在此背景下，原本在江苏地区较为罕见的山地建设项目逐渐增多，呈现出新的发展空间与建设需求。本文依托实际工程项目，聚焦山地环境下的结构设计关键问题，系统梳理设计难点与应对策略，提出具有可操作性的技术建议，旨在形成一个兼具实践价值与推广意义的山地项目设计研究课题，以期为同类工程提供参考与借鉴。

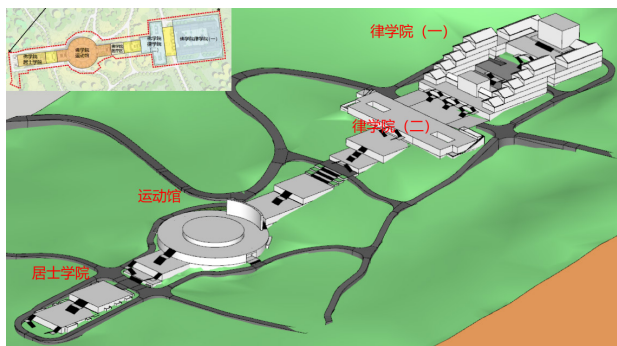
一、项目概况

（一）基本信息

本项目位于项目地位于南京市溧水区永阳街道，紧邻东庐山，本项目位于南京市溧水区东庐山观音寺山上，拟建建筑物场地依山而靠，用地南侧为东庐观音寺，西侧为城市道路溧白路。本地区抗震设防烈度为7度，设计地震分组为第一组，Ⅱ类场地。

（二）项目特点

本项目为山地学校项目，由1栋佛学院居士学院、1栋佛学院运动馆（局部下设1层地下室）、1栋佛学院医疗区和1栋佛学院律学院（局部下设1层地下室）组成。场地从起点至终点直线长度约450m，高差达66.20米。在设计过程中，根据现状道路与现状高差，均衡布置重要节点，并采用分级场地均匀平衡场地高差，结合永久支护挡墙，设计后的场地可达到缓坡上行的效果。



图一

二、桩基设计

(一) 地质概况

根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001) (2009年版), 结合地勘设计院在该地区的勘察成果, 依据岩土体的成因、时代、埋藏分布等特征, 可将勘探深度内揭示的岩土层层具体分述如下:

1-1层杂填土, 呈杂色, 稍湿~湿, 松散, 主要以碎石土、岩块及黏性土组成, 含少量植物根茎, 岩块及碎石含量在20%~45%不等, 不均匀主要为浅部分布, 堆填时间约8年。岩土工程施工等级为I级。局部分布在场内地, 层顶最小标高88.28m, 层顶最大标高129.77m, 最小厚度0.70m, 最大厚度4.10m。

1-2层素填土, 呈黄灰色~灰黄色, 湿~很湿, 松散, 以黏性土为主夹碎石, 局部夹岩石块, 含植物根茎, 局部夹淤泥质填土, 不均匀, 堆积时间约8年。岩土工程施工等级为I级。局部分布在场内地, 层顶最小标高63.93m, 层顶最大标高131.74m, 最小厚度0.30m, 最大厚度4.40m。

3层粉质黏土, 呈黄褐色, 局部灰黄色, 硬塑, 局部可塑, 局部夹黏性土团块, 含铁锰质结核, 切面稍有光泽, 干强度、韧性强, 底部局部含卵砾石及风化岩屑。岩土工程施工等级为III级。局部分布在场内地, 层顶最小标高62.13m, 层顶最大标高130.54m, 最小厚度0.50m, 最大厚度5.50m。

4层残积土, 呈灰黄色局部黄褐色, 饱和, 可塑局部硬塑, 切面粗糙, 含大量风化碎屑, 偶夹中粗砂及卵砾石, 土质不均匀, 干强度高, 韧性强。岩土工程施工等级为III级。局部分布在场内地, 层顶最小标高62.16m, 层顶最大标高128.24m, 最小厚度0.50m, 最大厚度8.00m。

5-1层强风化凝灰岩, 呈灰色夹灰黄色、青灰色, 原岩经强烈风化呈砂土状, 局部夹碎块状中等风化硬质岩块及呈土状, 手捏易散, 极不均质, 遇水易软化, 岩体基本质量等级为V级。岩土工程施工等级为III级。全场分布, 层顶最小标高59.36m, 层顶最大标高126.57m, 最小厚度0.50m, 最大厚度14.90m。

5-2P层中风化破碎状凝灰岩, 呈灰色为主, 局部青灰色、灰黄色, 岩芯呈碎块状~短柱状, 锤击声脆, 易碎, 钻进速度较慢, 属较软岩, 破碎, 局部强度较大达较硬岩, 岩土基本质量等级为

V级, 遇水易软化, 局部岩块较硬, 软硬不均。岩土工程施工等级为IV级。局部分布在场内地, 层顶最小标高63.21m, 层顶最大标高102.93m, 最小厚度1.40m, 最大厚度3.90m。

5-2层中风化凝灰岩, 呈灰色为主, 局部青灰色、灰黄色, 岩石强度较高, 岩芯呈短柱状~柱状, 局部为碎块状, 锤击声脆, 易碎, 钻进平稳, 遇水易软化, 属较软岩, 较完整, 局部岩石较硬, 达较硬岩, 岩土基本质量等级为IV级, 软硬不均。岩土工程施工等级为IV级局部V级。全场分布, 层顶最小标高52.43m, 层顶最大标高124.94m, 最大揭露厚度19.20m。

(二) 桩基选型

根据岩土工程勘察报告揭示, 场地底板以下3层粉质黏土为膨胀土, 其自由膨胀率介于36.5%~56.1%之间, 具有显著的胀缩性, 易对基础结构产生不利影响; 其下伏主要持力层为5-2层中风化凝灰岩, 该岩层具有遇水易软化的工程特性, 稳定性受环境水分变化影响较大。

依据《JGJ/T 472-2020 扩展基础与桩基础技术规范》第4.3.4条及其条文说明的指导建议: 宜优先选用桩基, 以减少主体结构变形对支撑结构及地基的附加作用”, 结合场地实际土质条件与工程特性, 经综合比选后, 最终确定采用旋挖成孔灌注桩作为本项目的基础形式。该选型可有效穿越膨胀土层, 将荷载传递至深层稳定岩层, 减小地基变形对主体结构及支护体系的影响, 提升整体结构安全性和耐久性。

三、支护设计

(一) 永久支护挡墙的作用

承担荷载: 在山地建筑中, 如果不设挡墙, 建筑物的基础往往需要直接承受来自山体的巨大侧向土压力。永久挡墙将这部分侧向土压力直接承担下来, 并将其传递至地基或深层岩体。

受力简化: 主体结构的外墙或基础不再需要按“挡土墙”标准设计, 只需承受上部建筑的竖向荷载。这大大简化了主体结构的受力模型, 降低了设计难度和配筋量。

释放变形: 山体和回填土在温度变化、雨水浸泡或自重作用下会发生变形。如果主体结构直接与山体接触(如“掉层”结构未做隔离), 土体的变形会直接拉扯建筑, 导致墙体开裂。

设置缝隙: 永久支护结构通常与主体结构脱开设置(留有缝隙或设置隔离层)。这允许土体和挡墙自身发生微小变形, 而不会将这些变形应力传递给建筑物, 有效防止了主体结构因外力约束而产生裂缝。

能量耗散: 特别是对于格宾网箱或某些加筋土挡墙, 其良好的柔韧性可以在地震发生时随地基一起变形而不破坏, 从而保护后方的主体建筑不受地基位移的牵连。挡墙结构本身在变形过程中可以耗散一部分地震能量, 起到类似“隔震层”的作用。

(二) 永久挡墙与主体结构关系

鉴于本项目属典型的山地建筑, 为确保主体结构的长期安全与稳定, 必须依赖永久性支护挡土结构。因此, 支护结构的设计成为本项目的核心难点之一。在结构设计阶段, 必须预先统筹考

考虑永久支护结构的位置,并提前与基坑支护专业单位进行充分的技术对接与协调。

以支护条件最为复杂的佛学院运动馆为例,其地形特征显著:东西向顺应山势呈现“西低东高”的态势,南北向亦存在约2米的高差。针对这一复杂的地形变化,设计采用了分级挡墙的支护策略:

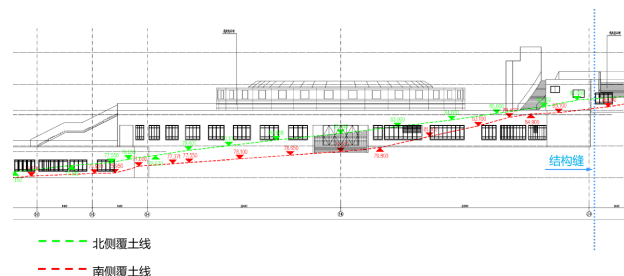
一层区域:外侧覆土高度约为底板以上2米。

一、二层交界处(圆形运动馆下方):该区域为回填重点部位。设计设置了一道红色挡墙(如图二所示),用以支挡运动馆正下方的填土,主体结构底板则直接落于该层土体之上。

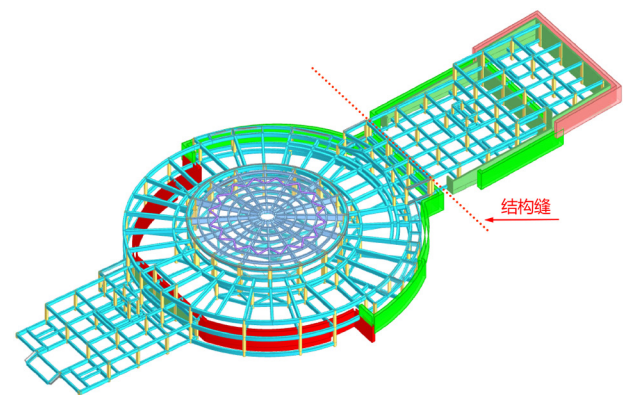
二层区域(运动馆中部向东):随着地形抬升,覆土高度逐渐超过二层底板标高。为平衡侧向土压力,此处增设了一道绿色挡墙,用于支挡二层外侧的回填土体。

三层区域:其支护逻辑与二层类似,在三层外侧设置了粉色挡墙。

通过上述针对性的永久性挡土墙设计,不仅有效化解了复杂的地形高差带来的侧向压力,更为主体结构提供了稳固的基础支撑,从而保障了建筑的整体安全。



图一



图二

四、地震作用、风荷载计算

(一) 地震作用放大系数计算

不利地段地震作用放大:根据 JGJ / T472-2020 第4.2.2条《建筑抗震设计规范》GB/T50011-2010 第4.1.8条及条文说明:居士学院取1.1,运动馆取1.2,律学院(一)(二)取1.3。

居士学院: $5 \leq 6.08 < 15$, $H/L=6.08/450 < 0.3$, 取1.1

运动馆: $15 \leq 19.6 < 25$, $H/L=19.6/450 < 0.3$, 取1.2

律学院(二): $H \geq 25$, $H/L=38/450 < 0.3$, 取1.3

律学院(一): $H \geq 25$, $H/L=57/450 < 0.3$, 取1.3

(二) 风荷载放大系数计算

依据 GB50009-2012 第8.2.2条

居士学院取1.1,运动馆取1.33,律学院(二)取1.63,律学院(一)取1.95。

五、山地建筑等不规则项加强措施总结

(一) 抗震管理条例相关要求

本项目是佛学院,在提前公示中已明确为学校建筑,需按重点设防类进行设计,同时应严格执行《建设工程抗震管理条例》相关要求,即设防类别:重点设防类;满足中震正常使用要求;竖向抗侧力构件,转换构件:中震弹性(GB/T 50011-2010 性能2),水平构件:中震不屈服(GB/T 50011-2010 性能3)。

(二) 结构重要性系数

根据 JGJ / T472-2020 第3.1.12条:掉层结构上接地层的竖向构件1.1。由于是乙类建筑,按乙类包络。

(三) 计算措施

1) 抗侧刚度: JGJ / T472-2020 第3.4.2条:对掉层结构,掉层及上接地层掉层范围内结构抗侧刚度不宜小于上一层相应结构部分的抗侧刚度。

2) 受剪承载力: JGJ / T472-2020 第3.4.3条:掉层结构的掉层层间受剪承载力不宜小于其上层相应部位竖向构件的受剪承载力之和的1.1倍。

3) 质量参与系数: JGJ / T472-2020 第5.1.2-1条:掉层结构,振型质量参与系数不小于95%。

4) 两个软件校核: JGJ / T472-2020 第5.1.3条:宜

5) 构件应力分析: JGJ / T472-2020 第5.1.6条:受力复杂的结构构件

6) 弹性板内力计算: JGJ / T472-2020 第5.1.8条及条文说明:楼盖应补充内力分析,掉层结构上接地端楼盖和上接地层楼盖的框架梁应补充按偏拉(压)构件设计,取包络值。轴向拉力可取弹性楼板时计算值的1.1倍。

7) 楼层、基底剪力: JGJ / T472-2020 第7.1.6条:掉层结构所有接地部位基底剪力之和应符合下式要求: $V_{ek0} > \lambda GE$

(四) 构造措施

1) 抗震等级: JGJ / T472-2020 第7.1.9条、第7.1.10条:按乙类,已提高一级抗震。

2) 楼盖整体性: JGJ / T472-2020 第7.1.2条:掉层结构接地端楼盖及未设置接地端楼盖时的上接地层楼盖不应采用楼层错层,开洞面积不应超过25%,有效楼板宽度不应小于该层楼板典型宽度的50%。

3) 楼盖厚度和配筋: JGJ / T472-2020 第7.2.4条:上接地端宜设置与掉层部分连接的现浇梁板式接地楼盖。当设置接地端楼盖时,多层掉层结构接地端楼盖的楼板厚度不宜小于120mm。当未设置接地端楼盖时,上接地层楼盖的楼板厚度不应小于

150mm。以上部位配筋均采用双层双向通长布置，单层单向配筋率不应小于0.25%。

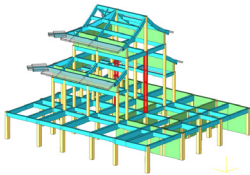
4) 剪力墙：JGJ / T472-2020第7.1.4条：掉层结构上接地层及以下的外侧剪力墙，宜设端柱或翼墙。

5) 接地层柱：JGJ / T472-2020第7.2.1-2条：掉层结构各接地层柱，箍筋应全柱段加密，体积箍筋率宜提高10%。——配筋按此执行

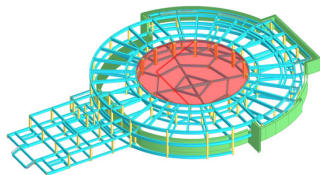
6) 掉层结构上接地层框架梁：JGJ / T472-2020第7.2.2条：沿梁全长顶面和底面应至少各配置两根纵向通长钢筋，钢筋直径不应小于14mm，且顶面和底面的通长筋最小配筋百分率取0.25和55ft/fy中的较大值；上接地层楼盖与竖向构件相连的梁，除应满足本条第一款要求外，通长钢筋尚不应小于梁两端顶面和底面纵向配筋中较大截面面积的1/4。沿梁腹板高度应配置间距不大于200mm，直径不小于14mm的腰筋。

（五）其他不规则项

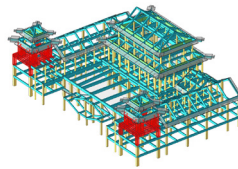
- 1) 穿层柱
- 2) 楼板不连续——进行楼板应力分析
- 3) 转换梁——按中震弹性进行性能化设计
- 4) 律学院（一），坡屋面、逐层收进——弹性板模型包络



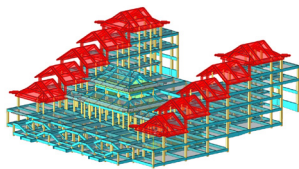
图一 穿层柱



图二 楼板不连续



图三 转换梁



图四 坡屋面、逐层收进

六、结束语

本项目作为一个山地学校项目，既有学校项目作为“两区八大类”建筑的典型特点，也有山地项目的典型特点，更有寺庙建筑的诸多特殊节点与造型。本文通过分析项目的基本信息，制定了桩基方案，并在此基础上确定了永久支护的方案及作用。然后结合山地特点，计算了地震放大系数、风荷载放大系数，明确了计算参数中的一些特殊内容，针对山地建筑以及寺庙建筑中的一些特点和不规则项进行了总结，为以后类似项目提供了经验参考。

最后，本文撰写已接近尾声，但对山地学校这一特殊类型建筑的思考与探索，却远未结束。本研究围绕山地学校项目的结构设计、场地适应性、安全性能等核心问题展开，通过对典型工程案例的分析与技术方案的论证，力求在复杂地形与高烈度抗震设防要求下，寻求安全、经济、实用的建筑解决方案。

参考文献

- [1]JGJ/T472-2020 山地建筑结构设计标准 .
- [2]GB/T50011-2010 建筑抗震设计标准 .
- [3]GB50009-2012 建筑结构荷载规范 .

区域地质填图与矿产勘查一体化技术在辽宁的应用

邵九龙

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034

DOI:10.61369/ERA.2026030001

摘 要 : 区域地质填图与矿产勘查一体化技术是破解传统地质工作中“填图与勘查脱节、成果利用率低”等难题的关键手段。辽宁作为我国重要的老工业基地和矿产资源大省,地质构造复杂,矿产资源种类丰富但勘查程度不均衡。本文基于辽宁独特的地质背景,系统构建区域地质填图与矿产勘查一体化技术体系,重点分析该技术在辽东变质岩区、辽西火山岩区及辽北沉积岩区的应用实践,揭示一体化技术在地质体精准划分、矿化信息提取及找矿靶区圈定中的核心优势。最后,针对技术应用中存在的深部探测能力不足、多源数据融合不充分等问题,提出优化路径,为辽宁矿产资源绿色勘查与可持续发展提供技术支撑。

关 键 词 : 区域地质填图; 矿产勘查; 一体化技术; 辽宁; 地质构造

Application of integrated technology of regional geological mapping and mineral exploration in Liaoning Province

Shao Jiulong

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

Abstract : The integrated technology of regional geological mapping and mineral exploration is a key means to solve the problems of "disconnection between mapping and exploration, and low utilization rate of results" in traditional geological work. Liaoning, as an important old industrial base and a province with abundant mineral resources in China, has complex geological structures and abundant types of mineral resources, but the degree of exploration is uneven. This article is based on the unique geological background of Liaoning, and systematically constructs an integrated technical system for regional geological mapping and mineral exploration. The focus is on analyzing the application practice of this technology in the metamorphic rock area of Liaodong, the volcanic rock area of western Liaoning, and the sedimentary rock area of northern Liaoning, revealing the core advantages of integrated technology in precise geological body delineation, mineralization information extraction, and prospecting target area delineation. Finally, in response to the problems of insufficient deep detection capability and insufficient fusion of multi-source data in technological applications, an optimization path is proposed to provide technical support for green exploration and sustainable development of mineral resources in Liaoning.

Keywords : regional geological mapping; mineral exploration; integrated technology; Liaoning; geological structure

引言

区域地质填图是地质工作的基础,旨在系统查明区域地质构造、地层岩性及矿产分布的宏观规律;矿产勘查则聚焦于矿产资源的定位、定量及定性评价,二者在地质工作体系中存在天然的逻辑关联。传统工作模式下,区域地质填图多以基础地质研究为导向,矿产勘查则侧重目标矿种的寻找,导致填图成果难以直接服务于勘查实践,勘查过程中发现的新地质现象也无法及时反哺填图精度提升,造成人力、物力资源的浪费。随着地质勘查技术的不断发展,一体化技术理念逐渐形成,通过整合填图与勘查的技术流程、数据标准及成果载体,实现“填图为勘查提供基础支撑,勘查为填图深化提供依据”的良性互动。基于此,本文结合辽宁典型地质单元特征,探讨一体化技术的应用路径与实践价值^[1]。

一、辽宁区域地质背景与一体化技术需求

（一）区域地质背景特征

辽宁地质构造格局受多期构造运动影响，呈现出“东西分异、南北过渡”的显著特征。以郯庐断裂带东延段为界，东部为辽东隆起区，主要由太古宇变质岩系构成，经历了多期变质作用与构造改造，是辽宁金、硼、铁等矿产的重要富集区；西部为辽西凹陷区，以中生代火山岩系为主，伴随有沉积岩夹层，发育煤、膨润土、钼等矿产；北部为辽北台隆区，沉积岩系保存相对完整，叠加后期构造活动，形成了铁、铅锌等矿产资源；南部则受渤海湾盆地延伸影响，以新生代沉积为主，局部发育油气资源^[2]。复杂的地质背景导致辽宁不同区域的矿产成矿机制差异显著。

（二）一体化技术应用的核心需求

从辽宁矿产勘查实践来看，一体化技术的核心需求主要体现在三个方面。其一，地质体精准划分需求。辽宁多地存在地质体相变剧烈、岩性界限模糊的问题，如辽东地区太古宇变质岩系中，斜长角闪岩与片麻岩的界限易受后期构造改造而混淆，传统填图手段难以精准区分，而这些岩性界限往往与矿体分布密切相关，需通过一体化技术整合岩性填图与矿化蚀变勘查数据，实现地质体的精准划分。其二，矿化信息高效提取需求。辽宁部分老矿区经过长期开采，地表矿化线索逐渐减少，深部及隐伏矿体成为找矿重点，传统勘查手段难以穿透复杂覆盖层提取深部矿化信息，需借助一体化技术中的物探、化探与填图结合的方法，实现矿化信息的立体提取^[3]。

二、区域地质填图与矿产勘查一体化技术体系构建

（一）前期准备：数据整合与方案设计

前期准备阶段的核心是打破数据壁垒，为一体化工作奠定基础。首先，开展历史数据梳理，收集辽宁不同时期的区域地质填图报告、矿产勘查成果、物探化探剖面数据、遥感影像及钻孔资料等，通过数据标准化处理，将不同格式、不同精度的数据统一录入地理信息系统平台，建立涵盖地层、构造、岩性、矿化蚀变等信息的基础数据库^[4]。其次，基于区域地质背景分析，明确工作目标，若针对辽东金矿勘查，则以绿岩带分布区为重点工作范围，结合历史填图成果圈定重点靶区；若针对辽西钼矿勘查，则聚焦中生代火山岩盆地边缘构造带。最后，制定一体化工作方案，明确填图比例尺与勘查精度的匹配关系，例如在重点靶区采用大比例尺地质填图与高精度物探勘查相结合的方式，在区域范围采用中比例尺填图与区域化探相结合的方式，确保技术手段与工作目标适配。

（二）野外实施：流程融合与同步验证

野外实施阶段是一体化技术的核心环节，实现填图与勘查工作的同步开展与相互验证。在地质填图过程中，改变传统“仅记录岩性与构造”的模式，同步开展矿化蚀变调查，对发现的石英脉、黄铁矿化、绢云母化等蚀变现象，及时标记并采集样品进行室内分析，同时记录其空间坐标与地质产状，为后续勘查工作提

供直接线索。例如，在辽东某金矿区野外填图时，通过仔细观察岩层中的黄铁矿化分布特征，结合构造裂隙走向，初步圈定矿化带范围，随后立即开展高精度磁法与激电勘查，验证矿化带的规模与深度，实现填图线索向勘查靶区的快速转化。

同时，在矿产勘查过程中，将勘查发现的地质现象反哺填图精度提升^[5]。

（三）室内综合研究：数据融合与成果输出

室内综合研究阶段旨在通过多源数据融合分析，实现填图与勘查成果的深化与集成。首先，对野外采集的岩矿样品、化探数据、物探剖面数据进行系统分析，建立岩性-地球物理-地球化学对应关系，例如在辽东变质岩区，通过分析斜长角闪岩的磁异常特征与金元素含量的相关性，构建“岩性+物探异常+化探异常”的找矿模型。其次，利用地理信息系统平台，将区域地质填图形成的地质图与矿产勘查形成的靶区图、钻孔柱状图等成果进行叠加，实现地质体、构造、矿化异常等信息的空间关联分析，精准圈定找矿靶区并评价其资源潜力。最后，输出一体化成果报告，报告不仅包含传统的区域地质填图成果，还整合了矿产勘查靶区位置、资源量估算、成矿规律分析等内容，同时附上统一格式的数据库与空间分布图，为后续矿产开发、矿山环境评价等工作提供一体化的数据支撑^[6]。

三、一体化技术在辽宁不同地质单元的应用实践

（一）辽东变质岩区：金硼矿勘查中的应用

辽东地区是我国重要的金硼矿富集区，区内太古宇鞍山群、辽河群变质岩系广泛分布，经历了多期构造变质作用，岩性复杂且蚀变强烈，传统填图难以精准区分与成矿相关的地质体，勘查工作易受干扰。一体化技术通过“高精度填图+定向勘查+模型约束”的模式，有效解决了这一难题。在填图环节，采用“大比例尺填图+显微岩相分析”的方法，详细划分变质岩岩性单元，重点识别绿岩带中的斜长角闪岩夹层与辽河群中的含硼大理岩，通过显微观察岩石中的矿物组合与结构构造，确定变质作用强度，为成矿环境分析提供依据。在勘查环节，针对金硼矿不同的成矿特征，采用差异化技术手段：对于金矿，结合填图发现的构造蚀变带，开展土壤地球化学测量与高精度激电勘查，通过分析金、银、砷等元素的异常分布与激电异常的对应关系，圈定矿体范围；对于硼矿，利用含硼大理岩与围岩的密度差异，开展重力勘查，结合填图确定的岩性界限，精准定位含硼矿体的空间位置^[7]。通过一体化技术应用，在辽东某金矿区成功圈定3条隐伏矿体，其中1条矿体厚度达到5米，较传统勘查方法提前6个月实现找矿突破；在某硼矿区，通过填图与重力勘查结合，修正了前期填图中的岩性界限，发现了2处新的含硼矿段，提升了资源储量估算精度。

（二）辽西火山岩区：钼矿与煤矿勘查中的应用

辽西地区以中生代火山岩系为主，主要岩性为流纹岩、安山岩及火山碎屑岩，伴随有侏罗系-白垩系沉积岩夹层，区内钼矿与煤矿资源丰富，但火山岩的强风化作用导致地表地质现象模糊，传统填图难以建立火山岩相带与矿体的空间关联，勘查工作

盲目性较大。一体化技术通过“遥感解译+填图校准+综合勘查”的模式,实现了火山岩区矿产勘查的精准化。在前期工作中,利用高分辨率遥感影像进行火山岩相解译,通过分析不同火山岩相的光谱特征,圈定火山口、火山碎屑岩分布区等关键地质单元,结合历史填图成果,确定野外填图的重点路线与观测点。在野外填图过程中,重点调查火山岩的接触关系、喷发韵律及蚀变特征,同步采集火山岩样品进行同位素测年,确定火山活动时代,为钼矿成矿时代分析提供依据^[8]。辽西钼矿多与晚侏罗世火山岩浆活动相关,通过填图确定的火山岩时代可缩小勘查范围。在勘查环节,针对钼矿与煤矿的不同成矿机制采用不同技术组合:对于钼矿,在填图圈定的火山岩与沉积岩接触带开展土壤化探与高精度磁法勘查,利用钼元素异常与岩浆活动形成的磁异常叠加区圈定找矿靶区,随后通过钻探验证;对于煤矿,结合填图确定的侏罗系沉积岩夹层分布范围,开展地震勘查与电法勘查,通过分析沉积岩厚度变化与电性差异,确定煤层的赋存深度与厚度。

(三) 辽北沉积岩区: 铁矿勘查中的应用

辽北地区以华北地台北缘的沉积岩系为主,主要发育古元古界浅变质沉积岩与中生代碎屑岩,区内铁矿多为沉积变质型铁矿,矿体受沉积地层控制,传统填图虽能圈定沉积地层范围,但难以识别矿体的具体位置与厚度变化。一体化技术通过“地层精细填图+物探剖面控制+钻孔验证”的模式,实现了沉积岩区铁矿的高效勘查。在填图环节,采用“地层剖面测量+标志层识别”的方法,详细划分沉积地层的岩性段,重点识别与铁矿共生的赤铁矿化砂岩、含铁角砾岩等标志层,通过建立地层柱与岩性序列,确定铁矿的赋存层位。在勘查环节,沿填图确定的地层走向部署高精度磁法与重力勘查剖面,利用铁矿与围岩的磁性、密度差异,圈定磁异常与重力异常区,结合填图成果排除非矿异常如火山岩侵入体引起的磁异常。随后,在异常区部署钻孔进行验证,根据钻孔揭露的矿体厚度与品位,结合填图与物探数据,构建矿体三维模型,实现资源量的精准估算。

四、一体化技术应用存在的问题与优化路径

(一) 存在的主要问题

尽管一体化技术在辽宁矿产勘查中取得了显著成效,但结合

实践来看,仍存在三个方面的问题。其一,深部探测能力不足。辽宁部分老矿区已进入深部找矿阶段,矿体埋深超过1000米,现有一体化技术中的物探手段如激电、磁法等对深部地质体的分辨率较低,难以精准刻画深部矿体的形态与规模,导致深部找矿突破难度较大。其二,多源数据融合不充分。辽宁地质工作积累的历史数据格式多样,部分数据精度与现测数据不匹配,现有一体化数据平台仅能实现数据的简单叠加,难以进行深度融合分析,如遥感影像解译成果与化探数据的耦合分析不足,影响了找矿模型的准确性^[10]。

(二) 优化路径

引入高精度地震勘探、大地电磁测深等深部探测技术,与传统填图、物探技术整合,构建“浅部填图+中部物探+深部地震”的立体探测体系,同时利用数值模拟技术,建立深部地质体与地球物理异常的对应关系,提升深部矿体识别精度。例如,在辽东深部金矿区,通过大地电磁测深与高精度填图结合,精准刻画深部构造蚀变带的分布,为钻探部署提供依据。基于大数据与人工智能技术,建立辽宁区域地质填图与矿产勘查一体化智能数据平台,实现历史数据与现测数据的标准化处理、精度匹配及深度融合。通过机器学习算法,自动识别遥感影像中的蚀变信息与化探数据中的元素异常组合,构建智能找矿模型,提升数据处理效率与找矿决策的科学性。

五、结论

区域地质填图与矿产勘查一体化技术通过整合技术流程、贯通数据资源,实现了基础地质研究与矿产勘查实践的深度融合,为辽宁复杂地质背景下的矿产资源勘查提供了有效技术支撑。本文构建的“前期数据整合-野外流程融合-室内数据融合”一体化技术体系,在辽东变质岩区、辽西火山岩区及辽北沉积岩区的应用实践中,均取得了显著成效,不仅提升了地质填图精度与矿产勘查效率,还实现了隐伏矿体的精准定位与资源量的科学估算。针对技术应用中存在的深部探测能力不足、数据融合不充分等问题,通过强化深部探测技术集成、构建智能数据平台及研发针对性技术方案等优化路径,可进一步提升一体化技术的适配性与应用效果。

参考文献

- [1] 成永生, 曾德兴. 近十年来构造地球化学研究进展及其矿产勘查应用现状 [J]. 地质学报, 1-21.
- [2] 于乐. 多金属矿产勘查中地质矿产 A 勘查及找矿技术研究 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(10): 142-144.
- [3] 俞兆龙. 地质工程测绘在矿产资源勘查中的重要意义研究 [J]. 新疆有色金属, 2025, 48(05): 65-66.
- [4] 周志强, 张承伟, 谢启鹏. 矿产资源综合利用与绿色勘查技术研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (10): 103-105.
- [5] 孟健, 刘智荣, 黄静宜, 薛怀宇. 面向复合型找矿人才培养的“矿产勘查学”实践体系改革与探索 [J]. 科技风, 2025, (28): 47-49.
- [6] 班金彭, 宋继伟, 黄明勇, 彭坤, 文国江, 方青. 贵州省固体矿产绿色勘查钻探典型问题及技术对策 [J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 244-249.
- [7] 陈喜峰, 唐金荣, 施俊法, 陈秀法, 杨宗喜. 新世纪以来非洲大陆主要矿产勘查新进展 [J]. 中国矿业, 2025, 34(10): 242-253.
- [8] 陈宇, 杨华本, 籍哲羽, 鹿传磊, 宰俊文, 刘占辉, 闫永生. 中国东北浅覆盖区地质矿产绿色勘查实践与应用研究 [J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(09): 46-54.
- [9] 钟强生, 赵凯莉, 张航飞, 何永刚, 梁成. 四川乐山地区战略性矿产勘查研究进展和找矿突破策略 [J]. 四川地质学报, 2025, 45(03): 484-490.
- [10] 肖广玲. 三维建模技术在深部金属矿产资源勘查中的应用和优化建议 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(09): 61-63.

基于多源数据融合的深部矿产资源勘查方法研究

李国银

云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655000

DOI:10.61369/ERA.2026030002

摘 要 : 深部矿产资源勘查是保障矿产资源可持续供应的核心方向, 对维护工业发展与国民经济安全具有重要意义。深部地质环境具有构造复杂、矿体埋藏深、赋存形态不规则等特征, 单一勘查技术难以全面捕捉矿体赋存信息, 数据碎片化、解释偏差等问题严重制约了勘查精度与效率。多源数据融合技术通过系统整合物探、化探、遥感、钻探及地质调查等多维度数据, 实现勘查信息的互补与优化, 为深部矿体精准定位与资源科学评价提供有力支撑。本文立足深部矿产勘查核心需求, 分析多源数据融合的技术优势, 深入探讨数据预处理、融合模型构建、信息提取及可视化表达等关键环节的实现路径, 结合典型应用场景阐述融合方法的实践效果, 旨在构建系统高效的深部矿产资源勘查技术体系, 提升深部勘查的精准度与智能化水平, 为矿产资源合理开发利用提供坚实的理论与实践参考。

关 键 词 : 多源数据融合; 深部矿产; 资源勘查; 勘查方法; 数据处理

Research on Exploration Method of Deep Mineral Resources Based on Multi-source Data Fusion

Li Guoyin

Yunnan Chihong Zinc & Germanium Co., Ltd. Qujing, Yunnan 655000

Abstract : Deep mineral exploration serves as the cornerstone for ensuring sustainable mineral resource supply, playing a vital role in safeguarding industrial development and national economic security. Deep geological environments are characterized by complex structures, deep-seated ore bodies, and irregular distribution patterns. Conventional exploration techniques struggle to comprehensively capture ore-bearing information, while data fragmentation and interpretive discrepancies severely limit exploration accuracy and efficiency. Multi-source data fusion technology integrates geophysical, geochemical, remote sensing, drilling, and geological survey data to achieve complementary optimization of exploration information, providing robust support for precise deep ore body localization and scientific resource evaluation. This paper addresses core demands in deep mineral exploration by analyzing the technical advantages of multi-source data fusion. It explores implementation pathways for key processes including data preprocessing, fusion model construction, information extraction, and visualization. Through practical case studies, the paper demonstrates the effectiveness of fusion methods, aiming to establish a systematic and efficient deep mineral exploration technology framework. This initiative enhances exploration precision and intelligence, offering solid theoretical and practical references for rational mineral resource development and utilization.

Keywords : multi-source data fusion; deep mineral resources; resource exploration; exploration methods; data processing

引言

随着浅部易开采矿产资源日益枯竭, 矿产勘查工作逐步向地下深部延伸, 深部矿产资源已成为保障工业发展与国民经济安全的战略重点。深部地质环境具有地层压力大、温度高、构造复杂、矿体埋藏深且赋存形态不规则等特征, 传统单一勘查技术易受地质条件干扰, 存在探测深度有限、异常识别模糊、数据解释片面等问题, 难以满足深部矿产精准勘查的需求。多源数据融合技术打破了不同勘查手段的信息壁垒, 通过整合物探反映的地球物理场信息、化探揭示的地球化学异常、遥感捕捉的地表间接标志、钻探获取的实物地质资料及区域地质调查数据, 实现多维度信息的协同分析与综合研判。在深部矿产勘查中应用该技术, 能够有效提升异常识别的准确性、矿体定位的精准度及资源评价的可靠性, 对突破深部勘查瓶颈、推动矿业可持续发展具有重要现实意义。

一、深部矿产勘查的核心需求与多源数据融合的技术优势

（一）深部矿产勘查的核心需求

深部矿产勘查的核心需求集中在三个方面。一是精准定位，需穿透复杂地层，准确识别深部隐伏矿体的空间位置、形态规模及产状特征，解决深部矿体边界模糊、难以追踪的问题；二是异常区分，需从复杂的深部地质背景中剥离矿致异常与非矿异常，避免因地质干扰导致的勘查误判；三是综合评价，需整合多维度信息，科学估算资源储量，为后续开采方案制定提供可靠依据。这些需求要求勘查技术不仅具备深度探测能力，更需具备多信息整合与精准解析能力。

（二）多源数据融合的技术优势

多源数据融合技术通过互补性整合与系统性分析，展现出显著技术优势。其一，信息互补性，不同勘查技术获取的数据具有各自侧重，物探数据反映地层物理性质差异，化探数据揭示元素分布规律，遥感数据呈现地表宏观地质特征，钻探数据提供直接地质证据，融合后可全面覆盖深部矿体的赋存信息；其二，精度提升性，通过多数据交叉验证，能够修正单一技术的测量误差与解释偏差，增强异常识别的准确性与矿体定位的可靠性^[1]；其三，效率优化性，融合技术可实现数据的集中处理与综合研判，缩小勘查靶区范围，减少无效钻探工程量，降低勘查成本与周期；其四，智能化支撑，融合过程中引入大数据与人工智能技术，可实现勘查信息的自动提取与规律挖掘，为勘查决策提供智能化支持。

二、基于多源数据融合的深部矿产勘查关键技术环节

（一）多源勘查数据预处理

数据预处理是多源数据融合技术在深部矿产勘查中发挥效能的基础前提，其核心目标是将不同来源、不同格式、不同精度的勘查数据转化为标准化、高质量的分析素材，为后续融合分析扫清障碍。首先开展全面的数据收集与系统分类，需广泛整合物探领域的电磁测深、重力测量、磁测等反映地层物理性质的数据集，化探领域的土壤、水系沉积物、岩石等介质的地球化学元素分析数据，遥感领域的多光谱、高光谱、微波遥感等捕捉地表与浅部地质特征的影像数据，钻探领域的岩芯观测记录、测井曲线数据，以及区域地质图、构造分布图、成矿规律研究报告等基础地质资料。按照数据类型、勘查尺度、获取时间等维度进行分类归档，建立结构化数据库，确保数据管理的有序性。

随后启动多维度数据清洗工作，通过专业数据筛选算法剔除因测量仪器故障、野外环境干扰、人为操作失误等因素导致的异常值与无效数据，采用插值法、趋势外推法等科学方法填补数据缺失区域，保障数据集的完整性；开展数据标准化转换，将不同量纲、不同精度等级的数据统一到相同的空间坐标系与数值评价体系，消除数据差异带来的分析偏差，确保各类数据具备可比性^[2]；运用滤波、去噪等数据处理技术，削弱深部复杂地质背景、地表覆盖物等干扰因素带来的噪声影响，突出与深部矿体相关的

矿致异常信息，为后续的融合建模与信息提取奠定坚实的高质量数据基础。

（二）融合模型构建与优化

融合模型的构建与优化需紧密结合深部矿产勘查的核心目标与多源数据的特征，打造针对性强、适应性高的融合分析框架。针对深部勘查中定性数据与定量数据并存的情况，采用加权融合模型，综合考量不同类型数据的可靠性、可信度及与矿体赋存的相关性，通过层次分析法、专家打分法等方式科学分配权重系数，实现多维度数据的量化整合与综合评估，让各类数据的价值得到充分发挥；针对复杂地质条件下矿致异常与非矿异常难以区分的难题，采用证据理论融合模型，将不同数据源视为独立证据，通过证据的积累、合成与冲突消解，逐步提升矿致异常的识别概率，降低误判风险^[3]；针对深部矿体空间分布预测的需求，采用机器学习融合模型，以物探、化探数据中的特征指标为输入变量，以钻探获取的实际矿体信息为标签样本，训练神经网络、随机森林、支持向量机等预测模型，实现对深部矿体空间分布的精准模拟与预测。

同时，融合模型的优化需深度结合区域地质背景，充分考虑勘查区域的地质构造类型、地层岩性组合、岩浆活动特征、成矿规律等关键因素，对模型的核心参数进行动态调整与校准。例如在断裂构造发育区域，适当提高物探数据中构造相关指标的权重；在岩浆岩活动频繁区域，强化化探数据中与成矿相关元素组合的权重，通过这种个性化调整增强模型对特定勘查场景的适应性，确保融合模型能够准确反映深部地质演化规律与矿体赋存特征，提升融合结果的科学性与可靠性。

（三）融合数据信息提取与解析

信息提取与解析是多源数据融合技术的核心环节，旨在从整合后的海量数据中深度挖掘与深部矿体赋存相关的关键信息，实现从数据到知识的转化。采用空间叠加分析技术，将物探异常区、化探元素高值区、遥感地质异常区、构造发育密集区等多类异常区域进行空间叠加，精准圈定多信息高度重合的潜在勘查靶区，有效缩小小勘查范围，提升勘查针对性；运用三维地质建模技术，整合多源数据构建涵盖深部地层、断裂构造、岩浆岩体、预测矿体的三维可视化模型，通过模型的旋转、剖切、放大等操作，直观呈现矿体的空间形态、埋藏深度、产状特征及与周边地质体的空间关系，助力勘查人员快速把握矿体赋存规律^[4]。

引入智能识别算法，基于深度学习、模式识别等技术，自动提取与深部矿体相关的特征指标，如物探数据中反映矿体与围岩差异的低阻高磁异常、高密异常，化探数据中与成矿相关的元素组合异常、元素比值异常，遥感数据中指示隐伏矿体的线性构造密集带、环形构造、矿化蚀变遥感异常等，实现矿致异常的快速识别与精准定位。在信息解析过程中，需结合区域成矿规律与地质演化历史，综合分析矿体与构造、地层、岩浆岩之间的空间关联与成因联系，明确控制矿体形成与赋存的关键地质因素，为深部矿产资源储量评价、勘查方案优化调整及后续开采规划制定提供科学、可靠的地质依据。

（四）融合结果可视化与验证

融合结果的可视化表达与科学验证是连接数据处理与勘查实

践的关键桥梁，直接影响勘查决策的科学性与勘查工作的成效。采用地理信息系统技术，将融合分析后的异常分布图、勘查靶区预测图、三维地质模型、矿体储量估算图等成果以多样化的可视化形式呈现，通过色彩分级、符号标注、图层叠加等方式，直观展示深部矿体的空间分布范围、异常强度等级、埋藏深度及与周边地质体的相互关系，为勘查人员提供清晰、直观的决策参考，降低勘查决策的难度。

同时，需建立多维度的融合结果验证体系，通过部署验证性钻探工程，精准定位钻探靶点，获取深部岩芯样品，结合岩芯观察、矿化蚀变鉴定、元素品位分析等手段，对比分析矿体的实际赋存情况与融合预测结果的吻合度，检验融合模型的准确性；针对验证过程中发现的偏差，结合矿化蚀变特征、元素分布规律、构造发育情况等数据，对融合模型的参数进行修正，对预测靶区的范围进行调整优化^[5]；建立长效的验证反馈机制，将实际勘查成果、开采数据持续反哺至数据融合过程中，不断优化融合模型的结构与参数、完善信息提取算法，形成“数据预处理—模型构建—信息提取—结果验证—模型优化”的闭环体系，持续提升后续深部矿产勘查工作的精准度与效率^[6-8]。

三、典型应用场景与实践效果

以某深部金矿产勘查区域为例，该区域构造破碎带发育，矿体埋藏深，单一物探技术难以区分矿致异常与构造干扰异常，勘查工作进展缓慢。采用多源数据融合勘查方法：首先收集该区域高精度电磁测深、重力、磁测等物探数据，土壤与岩石地球化学化探数据，高分辨率遥感与微波遥感数据，以及前期钻探测井数据与区域地质资料，完成数据预处理与标准化转换；构建加权融

合模型与机器学习预测模型，整合多数据进行综合分析，圈定三个高可信度勘查靶区；通过三维地质建模直观呈现靶区内地层、构造与预测矿体的空间关系；部署验证性钻探工程，成功钻遇厚大金矿体，验证了融合结果的准确性。

实践表明，基于多源数据融合的勘查方法成效显著，该区域勘查靶区命中率较传统单一技术提升百分之七十以上，无效钻探工程量减少百分之五十，勘查周期缩短约三分之一，资源储量估算精度提高至百分之九十五以上。融合技术有效破解了复杂地质条件下深部隐伏矿体的定位难题，大幅降低了勘查成本与风险，为同类复杂地质背景下的深部矿产勘查提供了可行的技术范式与实践参考^[9-10]。

四、结论与展望

基于多源数据融合的深部矿产资源勘查方法，通过数据预处理、融合模型构建、信息提取与可视化验证等关键环节，实现了多维度勘查信息的协同整合与精准解析，有效突破了传统单一技术在深部勘查中的局限，显著提升了勘查的精准度与效率。该方法充分发挥了不同勘查技术的优势，为深部隐伏矿体定位与资源评价提供了科学有效的技术路径，对保障深部矿产资源开发利用具有重要意义。未来，应进一步推动多源数据融合技术与新兴技术的深度融合，加强人工智能、大数据、物联网等技术在数据处理、模型构建与信息提取中的应用，提升勘查过程的智能化水平；加大对深部勘查专用传感器与数据采集设备的研发力度，拓展数据获取的深度与广度；建立不同成矿类型、不同地质条件下的标准化融合技术规范，推动该方法在更多深部矿产勘查场景中的推广应用，为我国矿产资源安全保障提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 李永成. 地质矿产勘查中多源遥感数据融合技术的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2024, (06): 93-95.
- [2] 朱令. 多源数据融合技术及其在地质矿产勘查中的应用 [J]. 低碳世界, 2022, 12(08): 73-75.
- [3] 姚强, 张瑞雪. 多源数据融合技术及其在地质矿产勘查中的应用 [J]. 世界有色金属, 2020, (09): 133-134.
- [4] 刘荣, 刘春娥, 刘晶晶. 多源数据融合技术及其在地质矿产勘查中的应用 [J]. 中国锰业, 2018, 36(01): 13-15.
- [5] 赖晶. 多源数据融合技术及其在地质矿产勘查中的应用 [J]. 建材与装饰, 2017, (15): 208-209.
- [6] 闫佳佳, 刘蓓, 赵亮, 等. 深部金属矿产资源勘查技术方法与研究分析 [J]. 西部资源, 2024, (04): 116-120. DOI: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2024.04.005.
- [7] 余林冰. 深部矿产资源勘查技术与方法的研究与应用 [J]. 中国金属通报, 2024, (05): 137-139.
- [8] 史长义, 王惠艳. 深部矿产资源立体地球化学勘查方法技术体系 [J]. 地质学报, 2022, 96(11): 3705-3721. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022079.
- [9] 桂徽昊, 饶仁堂. 深部金属矿产资源地球物理勘查方法探析 [J]. 世界有色金属, 2020, (12): 96-97.
- [10] 王智麒. 深部金属矿产资源地球物理勘查方法探析 [J]. 世界有色金属, 2018, (07): 156-157.

露天煤矿铲装运输环节安全隐患排查与整改措施研究

郭利波, 孙佼

内蒙古白音华蒙东露天煤业有限公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 026200

DOI:10.61369/ERA.2026030005

摘 要 : 露天煤矿铲装运输段落属煤矿生产的核心脉络, 关联装备、个体、境况等多维度要素, 作业情景繁杂、变动性大, 安全风险点众多且隐匿性高, 易催生装备损伤、个体伤亡等安全事端。本文参照露天煤矿实地作业实况, 深入探寻铲装运输段落落在装备运转、个体操作、实地管控、作业境况等层面现存的具体安全风险, 解析风险产生的本源, 靶向性给出可施行、贴实际的整顿办法, 为露天煤矿强化铲装运输段落安全管控、防范安全事端发生提供实践参照。

关 键 词 : 露天煤矿; 铲装运输; 安全风险; 探寻; 整顿办法

Research on Safety Hazard Investigation and Rectification Measures in the Scraping, Loading and Transportation Process of Open pit Coal Mines

Guo Libo, Sun Jiao

Inner Mongolia Baiyinhua Mengdong Open-pit Coal Industry Co., Ltd. Xilingol League, Inner Mongolia 026200

Abstract : The shovel loading and transportation section of open-pit coal mines is the core thread of coal mine production, which is related to multidimensional factors such as equipment, individuals, and situations. The operation scenarios are complex and highly variable, with many safety risk points and high concealment, which can easily lead to safety incidents such as equipment damage and individual casualties. This article refers to the actual situation of field operations in open-pit coal mines, and explores in depth the specific safety risks that exist in the shovel loading and transportation section at the levels of equipment operation, individual operation, on-site control, and operation conditions. It analyzes the origin of the risks and provides targeted and practical rectification measures, providing practical reference for strengthening safety control and preventing safety incidents in the shovel loading and transportation section of open-pit coal mines.

Keywords : open-pit coal mine; shovel loading and transportation; security risks; explore; rectification measures

引言

露天煤矿采掘具备作业空间宽广、生产效能高、资源回收度高的长处, 在我国煤炭工业架构中占据关键位置。铲装运输段落作为露天煤矿采掘的紧要衔接工序, 肩负着矿岩剥离、煤炭装载与转运的核心职责, 涉及挖掘机、装载机、矿用货车等多种大型装备, 作业段落繁杂、交叉作业频繁, 受个体操作水准、装备运转状态、实地境况变动等要素作用较大, 安全风险处于高位。近些年, 我国露天煤矿安全管控水准不断提升, 但铲装运输段落仍偶发安全事端, 不仅酿成个体伤亡和财物损失, 还干扰煤矿正常生产秩序。所以, 深入探寻铲装运输段落现存的安全风险, 制定科学有效的整顿办法, 筑牢安全屏障, 对推动露天煤矿安全生产态势持续稳定向好具备重要现实价值^[1]。本文依据露天煤矿实地作业特征, 聚焦铲装运输段落的现实难题, 开展风险探寻与整顿办法探究, 力求内容契合实地、办法切实可行。

一、露天煤矿铲装运输环节安全隐患排查

(一) 装备运转安全风险

铲装运输装备是作业核心, 装备陈旧、维护不足、配件消耗等难题均易诱发安全事端, 具体风险如下: 一是铲装装备关键构

件消耗严重, 如挖掘机斗杆、销轴、液压体系密封件等长期处于高强度作业状况, 若未及时更替, 易出现斗杆断裂、液压油渗漏等故障, 致使铲装作业中断, 甚至引发装备倾覆; 部分装载机铲斗磨损严重, 作业中易出现物料洒落, 对周边个体和装备构成威胁^[2]。二是运输装备安全装置失效, 矿用货车的制动体系、转向

作者简介: 郭利波 (1984.12-), 男, 汉族, 河南省洛宁县人, 学历: 本科, 职称: 注册安全工程师, 研究方向: 露天煤矿生产安全。

体系、灯光警示装置等存在故障风险，如制动蹄片磨损超标、转向拉杆松弛、尾灯不亮等，在重载运输、夜间作业或复杂路段行进时，易引发追尾、侧翻事端；部分货车轮胎磨损不均、胎压异常，长期重载运转易发生爆胎事故^[3]。三是设备日常维护保养呈现形式化倾向，部分煤矿未以严谨态度实施“每日点检、定期保养”制度，针对设备运行过程中的异响、渗漏等微小问题未开展及时排查活动，小故障在时间推移中逐步演变成大隐患；设备润滑、冷却系统维护工作未做到及时跟进，造成设备出现过热现象、部件磨损速度加快，在缩短设备使用周期的情况下同时增加安全方面的风险。四是设备改装、维修操作缺乏规范性，部分煤矿为达成追求作业效率的目标，擅自对设备部件进行改装操作，例如实施加大铲斗容量、调整液压系统压力等行为，致使设备负载数值超出设计标准范围，出现结构强度不够的状况；维修环节中采用非原厂配件，对设备运行的稳定性产生影响，从而埋下安全隐患的种子。

（二）人员操作安全隐患范畴

人员作为作业活动的主导力量，操作技能存在不足、安全意识表现薄弱、违规操作等情况属于引发安全事故的重要成因，具体体现为：一是操作人员专业技能水平呈现参差不齐的状态，部分新入职的员工未曾经历系统全面的岗前培训流程，仅仅通过简单的跟班学习方式就进入独立上岗阶段，对于铲装运输设备的操作规范内容、安全注意要点未能熟练掌握，容易出现误操作情形，如同挖掘机铲斗与卡车驾驶室发生碰撞、装载机装料过多造成物料向外溢出等现象。二是安全意识处于淡薄层面，违规操作现象频繁发生，部分资历较深的员工怀有侥幸心理，在作业过程中对操作流程进行简化处理，例如出现卡车超速行驶、疲劳驾驶、不依照指定路线行驶的状况；铲装作业开展期间，人员在设备作业半径区域内停留、穿行，没有遵守“设备作业半径内禁止站人”的规定内容；部分员工未按照要求佩戴劳动防护用品，像安全帽佩戴方式不规范、未穿着防滑鞋等行为，增加了自身受到伤害的风险系数^[4]。

（三）现场管理安全隐患

现场管理作为规范作业流程、防范安全隐患的关键所在，当前部分露天煤矿存在管理方面的漏洞情况，具体隐患内容如下：一是作业现场规划缺乏合理性，铲装区域、运输通道、卸车区域未能进行明确划分操作，或者出现标识标牌缺失、模糊不清的状况，造成车辆行驶秩序混乱、交叉作业冲突情况频繁发生；运输通道宽度未能达到标准、坡度超过规定数值、路面状态不平整，并且未能及时进行维护工作，增加了卡车行驶的难度系数，容易引发侧翻、颠簸致使物料散落等问题。二是安全管理制度执行力度不够，煤矿虽然制定了铲装运输环节的安全管理制度，但在实际作业过程中缺乏有效的监督检查举措，对于违规操作行为的处罚力度不足，使得制度仅仅停留在形式层面；作业开始前安全技术交底工作不够充分，仅仅进行注意事项的简单告知，未能结合当日作业环境状况、设备运行状态、作业任务内容开展具有针对性的交底工作，员工对风险点的认知程度不足^[5]。

（四）作业环境安全隐患方面

露天煤矿作业环境受到自然条件的影响程度较大，并且在作业过程中容易对现场环境造成改变，进而形成安全隐患情况，具体涵盖内容为：一是自然环境产生的影响，雨季降水会造成作业现场出现积水现象、路面变得泥泞不堪，降低路面的附着力数值，卡车容易出现打滑侧翻情况；夏季高温会导致设备产生过热问题、人员出现中暑现象，对设备运行状态和作业效率产生影响；冬季低温状态促使设备液压油以及润滑油产生凝固现象，制动系统出现功能失效情形，路面结冰状况造成行驶风险形成叠加效应；大风伴随扬尘的天气环境对视线产生干扰作用，致使操作人员难以对作业环境做出准确判断，容易诱发碰撞事故的发生条件^[6]。二是作业面所处环境呈现复杂特性，铲装作业面的边坡角度超出标准范围，边坡稳定性处于失衡状态，容易引发滑坡与坍塌事故的潜在风险，构成对设备和人员的掩埋威胁；作业面存在浮石以及杂物未得到及时清理的状况，在铲装作业过程中容易导致浮石出现滚落现象，形成对人员的砸伤风险和对设备的损坏可能；卸车区地面平整度不足，承载力处于不达标状态，卡车在卸车过程中容易发生倾倒状况。

二、露天煤矿铲装运输环节安全隐患整改措施

（一）强化设备全生命周期管理，消除设备安全隐患

以设备“点检、保养、维修、报废”的全流程管控机制作为核心内容，构建设备安全防护的坚实防线^[7]。一是严格落实设备的日常点检与定期保养工作，制定内容详尽的点检清单文件，明确规定点检项目、技术标准、责任主体以及时间节点要求，操作人员需在每日上岗之前对设备的关键部件（涵盖液压系统、制动系统、转向系统、轮胎等）进行全面细致的检查操作，认真做好点检记录工作，一旦发现问题需立即采取停机处理措施，严格禁止设备处于“带病”作业状态；依据设备说明书的相关要求，定期组织开展保养作业，重点做好润滑、冷却、密封等关键工作内容，及时对磨损部件进行更换操作，确保设备始终保持良好的运行状态。二是规范设备维修与改装工作流程，设备维修作业必须由具备专业资质的维修人员负责实施，严格执行既定的维修流程规范，选用原厂生产的合格配件产品，维修作业完成后需进行试运行检验程序，检验合格后方可投入实际使用；严禁任何形式的擅自改装设备部件行为，确因生产实际需要进行改装的情况，需组织技术部门、安全部门、设备生产厂家开展联合论证工作，确保改装后的设备符合相关安全标准要求。

（二）提升人员专业素养，规范操作行为

以“培训 + 管理 + 监督”的综合管理模式作为工作抓手，强化人员的安全意识，提升操作技能水平，坚决杜绝违规操作行为的发生。一是完善岗前培训与在岗培训体系建设，新入职员工必须接受系统全面的岗前培训课程，培训内容包括设备操作规范、安全管理制度、风险点识别方法、应急处置流程等方面，经理论知识考试和实际操作考核双合格之后，方可获得独立上岗作业资格；定期组织在岗员工开展技能提升培训和安全警示教育活

动,邀请设备生产厂家技术人员、安全管理领域专家进行授课指导,结合近期行业内发生的典型安全事故案例,深入分析事故发生原因,认真吸取事故教训,切实提升员工的安全意识和应急处置能力水平;针对特种作业人员群体,严格执行资质管理规则条例,保障全体人员持有证件走上岗位,定期开展证件复核审查和技能复查核对,更新专业知识体系内容。第二项举措为强化现场操作监督管理,安全管理人员增强现场巡视检查力度和强度,重点筛查违规操作行为现象,针对超速开动行驶、疲劳维持驾驶、设备作业半径范围之内站立人员、未依照规定佩戴劳动防护用品等行为表现,一经发现一例、即刻查处一例,加大惩罚处罚力度程度,同时做好违规行为记录备案,纳入员工绩效考核考核,构建形成“不敢违反、不能违反、不想违反”的氛围环境^[9]。

(三) 完善现场管理体系,强化过程管控

优化现场布局结构,健全管理制度体系,提升现场管理精细细致化水准水平。合理科学规划作业现场区域,明确清晰划分铲装作业区域、运输通行通道、卸车作业区域、人员休息区域等功能不同区域,设置清晰明了、牢固可靠的标识标牌装置,例如限速标识标记、避让标识标记、危险警示标识标记等,确保人员群体和车辆交通工具有序流动运行;定期进行维护运输通行通道,及时平整路面表层、修补破损毁坏部位,依据作业实际需求合理设置通道宽度尺寸和坡度角度,在弯道拐角、坡道路段等关键重要位置设置防护栏杆和警示提醒装置,保障车辆交通工具行驶运行安全。严格落实安全管理制度体系,细化分解铲装运输环节安全管理细则规则,明确界定各岗位安全职责义务,将安全管理责任权限层层分解落实到具体人员;强化作业开展之前安全技术交底工作,由技术专业人员、安全管理人员、作业班组长共同参与进行,结合当日作业环境状况、设备运行状态、作业任务内容,有针对性地告知风险要点和防控保障措施,交底双方签署签字确认,确保交底工作落实到位^[9]。

(四) 优化作业环境,降低环境风险

结合自然气候条件和作业实际特点,有针对性地采取应对措

施,改善作业环境状况,消除环境安全隐患问题。应对自然环境产生的影响作用,在雨季时节提前清理作业现场排水通道,设置排水沟槽和积水坑体,及时排除积水水体,在泥泞湿滑路面铺设碎石颗粒、钢板板材等,提升路面附着摩擦力度;在夏季时节为作业人员配备防暑降温物资用品,在休息区域设置降温制冷设备,合理调整安排作业时间节点,避开高温炎热时段;冬季针对设备实施防冻处置,完成防冻型液压油、润滑油的更换操作,对制动体系、轮胎开展保暖防护作业,及时完成路面结冰的清除事项,进行融雪剂的撒布动作;大风天气与扬尘天气状况下,暂停露天施工作业,或施行洒水降尘举措、采取佩戴防尘口罩行为,以此实现作业环境的改善目标。开展作业面环境的整治任务,定期实施铲装作业面边坡稳定性的检查工作,针对边坡角度超出标准数值、存在滑坡风险隐患的区域范围,及时运用削坡作业、锚固工艺、喷浆技术等防护手段;作业开展之前,开展作业面浮石及杂物的清理工作,进行警戒区域的设置安排,防范浮石出现滚落造成人员伤害情况;开展卸车区地面的加固工程,实现地面承载力的提升效果,保障地面处于平整状态,避免卡车在卸车过程中发生倾倒现象^[10]。

三、结论

露天煤矿铲装运输环节所存在的安全隐患呈现出复杂性特征、隐蔽性特点以及动态性状况,对煤矿安全生产的正常秩序以及人员和设备的安全情况产生直接作用影响。本文从设备维度、人员层面、现场管理方面以及作业环境角度这四个维度方向,深入细致地开展了露天煤矿铲装运输环节现存具体安全隐患的排查工作,深刻剖析了隐患产生的根源因素,有针对性地提出了设备全生命周期管理办法、人员素养提升方案、现场精细化管控措施以及作业环境优化策略等整改手段,所有提出的措施均与现场实际状况相契合,具备较强的实际操作性能。

参考文献

[1] 王忠鑫,乔夏梁,王磊,蔡忠超,徐汉宝.我国露天煤矿智能化发展政策十年演进过程与规律研究[J].露天采矿技术,2025,40(04):1-7.

[2] 马军.露天煤矿采场粉尘污染源精准识别与防治[J].资源节约与环保,2025,(04):79-82.

[3] 李双,秦冬松,马彦林,哈德力努尔·革明努尔,董进龙,刘光伟.露天煤矿挖掘机模拟驾驶舱仿真系统研究[J].能源与环保,2025,47(02):230-234+240.

[4] 郭继群.露天煤矿开采中的空气间隔装药技术[J].露天采矿技术,2024,39(06):32-35.

[5] 刘伟,黄树巍,魏琪嘉.无人驾驶在露天煤矿的应用研究[J].信息通信技术与政策,2024,50(10):21-27.

[6] 李东田.露天煤矿水孔爆破施工技术分析[J].工程机械与维修,2024,(01):195-197.

[7] 张吉苗.露天煤矿多目标自动配煤方法及应用[J].中国矿业,2022,31(10):89-94.

[8] 聂忠叶,袁文华.关于数码电子雷管在台阶松动爆破中应用现状分析[J].内蒙古煤炭经济,2022,(12):175-177.

[9] 王星,武讲,张阳,谈婵娜.智能露天煤矿信息综合管控平台设计及关键技术研究[J].煤炭工程,2022,54(03):33-39.

[10] 赵春.空气间隔装药技术在露天煤矿爆破开采中的应用[J].能源技术与管理,2022,47(01):61-62.

关于油气企业安全生产标准化建设的研究

杨岭飞, 张瑞毅, 丛一宁

国家管网集团北京管道有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ERA.2026030032

摘 要 : 随着国家油气体制改革和油气管道大规模建设的推进, 基层站队作为企业管理的最小单元, 仍存在管理标准低和管理水平参差不齐的现象, 导致企业在管理效率和油气资源利用率方面还有较大提升空间。因此本文通过系统分析油气管道企业安全生产标准化建设的背景及意义, 提出基层站队安全生产标准化建设管理思路, 并以北京管道公司河北输油气分公司为例详细说明了具体实践过程, 以期对油气管道企业基层站队建设提供帮助。

关 键 词 : 安全生产标准化; 安全经验分享; 油气企业; 标准体系

Research on the Standardization Construction of Safety Production in Oil and Gas Enterprises

Yang Lingfei, Zhang Ruiyi, Cong Yining

Petrochina Beijing Gas Pipeline Co.,Ltd. Beijing 100020

Abstract : With the advancement of national oil and gas system reforms and large-scale pipeline construction, grassroots stations—as the smallest operational units in enterprise management—still face challenges such as low management standards and uneven operational levels, resulting in significant room for improvement in management efficiency and oil/gas resource utilization. This study systematically analyzes the background and significance of safety production standardization in oil and gas pipeline enterprises, proposes management strategies for safety standardization at grassroots stations, and demonstrates practical implementation through the case study of Beijing Pipeline Company's Hebei Oil and Gas Transmission Branch, aiming to provide actionable insights for infrastructure development in pipeline enterprises.

Keywords : management mode; management innovation; enterprise governance; standard system

安全生产标准化建设背景

国家十四五规划与中长期油气管网规划中提出了要提高资源利用率, 合理优化油气资源配置的要求。在此背景下, 2019年12月国家管网集团成立, 目的是通过对油气管网形成统一的调控, 提高油气资源利用率。国家管网集团资产主要由中石油、中石化与中海油划拨组成, 由于三桶油的管理水平和标准存在一定差异, 资产完整性状况也是参差不齐, 所以基层站队从建设、运行到维护整个生命周期的体系建设也不尽相同^[1]。

国家管网集团目前正处于全面接管运营后的起步阶段, 尚未形成稳固的安全生产管理基础, 资产重组后的安全文化差异明显, 安全理念、管理基础、管控水平不尽相同, 尚未形成统一的标准和要求, 成为制约当前集团公司安全生产形势平稳受控的重要障碍。解决这个问题, 迫切需要解放思想、转变观念、统一标准和凝聚全员共识。同时2021年9月1日起施行的新修订的《中华人民共和国安全生产法》第四条规定: 生产经营单位必须加强安全生产标准化建设, 提高安全生产水平, 确保安全生产^[4-6]。因此为提升国有企业管理体系和管理能力, 解决这种基层站队管理的差异化, 国家管网集团北京管道有限公司持续开展安全生产标准化建设行动, 实施集团公司安全生产队伍“三湾改编”, 通过集团公司集中统一领导和精准安排部署, 统一思想、统一标准、统一行动, 推动安全生产队伍脱胎换骨, 奠定公司安全生产管理基础, 彻底扭转严峻的安全生产形势, 切实保障油气管网安全运行, 为保障国家能源安全贡献力量, 并取得一系列创新创效的重大成果^[2]。

与此同时国家管网集团北京管道公司, 从二十一世纪初就开始着手标准化建设工作, 在不懈探索过程中发现安全生产标准化建设还存在一定差距: 管理制度不健全, 尚未建立公司风险隐患分级、高风险作业、重大危险源等管理制度标准, QHSE 风险管控要求需要进

一步深度融入业务管理制度和管理活动；体检建设标准不统一，所属企业开展公司 QHSE 管理体系承接和建设缺乏充分的标准依据；油气管网资产重组后业务规模、运营方式、责任、使命发生了根本性变化，历史遗留大量安全隐患、大规模新建管网资产增长等给安全管理和运行带来了巨大挑战，旧有安全管理模式、技术方法已不能适应管网安全运行需要，必须创新管理模式、工作体制机制、技术方法。

一、安全生产标准化建设思路

立足安全自主管理推进工作，结合国家管网集团公司安全生产队伍“三湾改编”总体工作要求，以国家管网及公司安全基础管理体系和技术标准为基础，以风险分级管控和隐患排查治理为抓手，以“五位一体”的基层站队标准化建设为核心，以“3统一”“2提升”“1创新”为工作目标，聚焦岗位责任制落实、聚焦风险控制、聚焦岗位员工能力提升，实现“安全体制标准化”“基层站队标准化”和“员工岗位标准化”的多重达标建设，进一步完善公司基础管理标准体系，夯实安全环保基础工作，提升员工“三种”能力，培育公司安全文化，积极开展安全生产管理创新、科技创新，推动公司逐步迈入自主安全管理阶段^[3]。

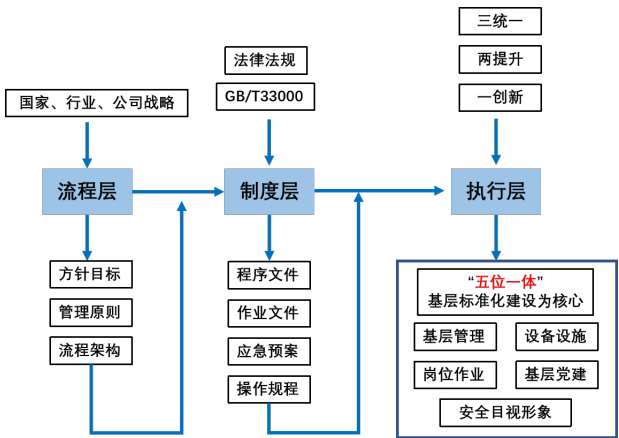


图1 安全生产标准化建设流程

深度推进集团公司 QHSE 管理体系融合，构建“一贯到底”QHSE 管理体系架构，修订完善集团公司《QHSE 管理体系管理手册》，健全完善 QHSE 管理相关制度和标准，编制《集团公司 QHSE 管理体系量化审核清单》，有力支撑 QHSE 管理体系有效落地。建立集团公司全员安全生产责任制，按照“一岗一清单”要求制定覆盖集团公司各管理层级和工作岗位的全员 HSE 责任清单，明确全员安全生产岗位责任和考核标准，确保安全生产责任人人明责、人人知责、可追溯、可考核。制定覆盖全员的安全生产责任履责考核指标体系和考核办法，明确安全生产业绩与企业负责人及干部选任相关联和日常监督管理的要求。

二、安全生产标准化建设实践

为了促进安全生产责任建设、安全生产制度标准体系建设、安全生产队伍能力提升等安全生产管理基础环节的提升，确立公司对安全生产队伍的强力领导，从理论和实践上打造整齐统一的管网铁军，奠定集团公司安全生产管理基础，带动和促进符合集

团公司市场化转型要求的新型安全生产管控体制机制建设，推动公司安全文化建设和认同，保障公司安全生产和高质量发展。北京管道公司将站队标准化建设作为在基层落实体系的载体和工具，开展“3统一”“2提升”“1创新”的安全生产标准化建设工作。下面进行北京管道公司一些典型做法的分享，以期在安全生产标准化建设中能提供一些好的经验^[4]。

（一）统一 QHSE 管理体系

开展与管网公司 QHSE 标准对标工作，参与制定修订集团公司、公司相应的体系文件，组织对拟发布体系文件征集意见，做好修订文件的宣贯培训工作。突出“管业务必须管安全、管行业必须管安全、管生产经营必须管安全”的理念，建立覆盖全员 HSE 责任清单，开展各分公司机关、作业区各岗位责任清单的编制工作，形成全员“一岗位一清单”的安全生产责任体系，实施全员安全记分管理。参照管网集团公司和公司安全生产责任履责考核指标体系和考核办法，完善公司各级安全生产监督考核制度，整合现有考核载体，进一步梳理考核主体和量化考核内容，精准测评，切实提高体系文件执行力，将安全生产监督考核制度纳入到员工绩效考核，严格兑现。

（二）统一安全生产标准体系

按照管网集团公司企业安全生产技术标准，开展与管网集团安全生产技术标准的对标工作，修订完善公司安全生产技术标准体系。依据管网集团标准的基层岗位作业指导文件模板，同时结合公司各层级实际岗位责任清单和工作指引表，组织各部门动态修订编制基层岗位作业指导文件，杜绝基层岗位作业指导文件“两层皮”问题。开展与管网集团应急预案体系框架（总体应急预案、综合应急预案、专项应急预案、现场处置方案、岗位应急处置卡）、应急预案管理制度的对标工作，修订完善分公司及各部门的应急预案体系。开展应急处置卡的评审工作，以实际演练的方式验证应急处置卡的符合性、可操作性。

（三）统一基层站队标准化建设

为了促进 QHSE 管理体系在作业区及基层岗位更好的落地执行，使体系执行在基层具体化、直观化，表格化、简明易操作，与岗位工作紧密结合，切实提高基层体系执行力、提高风险管控水平、提升员工安全履职能力。北京管道公司将站队标准化建设作为在基层落实体系的载体和工具，以岗位作业标准化为核心，开展“视觉形象、基础管理、设备设施、岗位作业、基层党建”五位一体标准化建设工作，指导基层“写你所做，做你所写”。

（四）提升全员安全生产履职能力

完善安全生产培训体系。对标管网集团发布的员工安全生产能力素质要求、培训需求和履职能力考核标准、培训矩阵。建立完善公司安全环保履职能力评估工作机制，建立各层级安全素质

能力模型和必备能力清单，开展全员安全环保履职能力评估工作。聚焦员工“三种能力”建设，突出作业区主任、专业工程师、安全专业人员等关键岗位的培训考核，将国家注册安全工程师资格作为作业区主任上岗的必备条件。

强化安全生产培训与考核。按管网集团统一安排，组织参加集团公司组织的全员安全生产轮训，学习安全生产新制度标准体系，领悟安全生产文化理念，对操作岗位开展实操演练及突发事件现场处置演练，全面加强一线员工基本功，切实提升全员安全生产履职能力，并对培训效果进行考核验证。

（五）提升公司安全生产管控水平

开展站队达标与标杆站队评选。以安全自主管理为目标，强化作业区执行力，进一步提升站队标准化建设水平。结合安全自主管理、管网集团标准化建设规范、成果经验制定分公司内部的标准化建设提升方案，从注重达标数量向提升建设质量转变，开展新一轮的对标、达标工作。强化安全绩效考核。按照管网集团“逐级层层考核”的原则，年底对照安全生产责任体系，组织开展分公司各管理层级及基层站队安全绩效考核，将考核结果纳入单位和员工年度绩效考核，并作为安全生产评先评优和站队业绩评价、考核奖惩的重要依据。

（六）创新安全生产管理机制

积极探索安全生产数字化转型。依托公司5.0安全环保流程全面推广运营数字化转型工作，探索使用安全生产数字化平台，实现集团公司安全生产队伍“三湾改编”成果数字化管理；配套现场终端设备、数字信息模块和软件，实现安全生产基础管理跟踪、反馈的闭环机制，推动集团公司安全生产队伍“三湾改编”成果应用落地；按照集团公司制程融合工作要求，将QHSE管理体系管控要求全面嵌入流程，大力推动制程一体化进程，确保QHSE管理内容不缺、要求不减、能力不降。

推动陕京二线光缆预警系统的应用，做好系统扩大运行后的管理，安排专人每日复核预警信息，每季度对服务人员进行考核，尽量缩短预警发出与现场核实反馈时间，及时排除危害管道安全的风险。通过对系统的进行摸索优化和验证，目前预警系统有效预警率达到95%以上，对管道安全运行起到了很好的补防作用。

优化员工安全培训。以岗位能力为核心，以“精准”和“有效”为目的，突出强化培训员工国家管网企业文化、所缺所需知

识技能、技术技能竞赛知识等重点内容；坚持“一人一单”培训矩阵培训内容的自学与验证；通过电子化采集和压减等手段，简化培训过程的记录资料。

创新审核检查组织策划，通过每季度内审和计划性的专项检查相结合的方式，既做到全年要素覆盖，又要突出重点，强化审核员的选拔与培训工作，提高了工作效率，提升了审核和检查效果。

三、结束语

北京管道公司持续推进安全生产标准化建设，以安全生产队伍“三湾改编”为抓手促进基层站队标准化达标建设工作。通过北京管道公司的实践分享，我们充分认识到安全生产及标准化建设是一项长期的、艰巨的任务持续推进，下面就安全生产标准化建设工作提出几点建议：

1. 不断增强安全生产标准化建设工作的前瞻性和主动性。锚定行业中先进经验和典型做法，因地制宜进行吸取经验，同时根据国家层面息息相关的发展战略确定顶层设计，谋划在前，主动出击，努力适应新发展的需要。

2. 加强在安全生产标准化建设中标准实施的指导工作。结合集团公司数字化流程试运行工作，对体系文件、规章制度进行再完善，进一步整合、优化，努力在“制程”上创出实效，促进程序文件的简明、高效。要积极吸收基层员工意见建议，提高体系文件的实用性和可操作性。

3. 岗位标准化建设主要解决岗位职责不明确的问题，落实“谁在岗，谁负责”的问题，从另一方面来说，系统任务管理模块的建设，旨在减少员工在任务操作上的某些繁琐程序，现已通过编程进行了初步优化，在一定程度上减少了工作量，但仍具有一定的提升空间。

4. 以结果为导向，坚持标准先行和创新驱动。标准的可执行和基层效率提升是标准化建设的落脚点，解决基层站场工作中存在的问题为制定标准的出发点，在坚持标准先行的同时，需要在实践探索中总结先进经验和不足，持续改进标准化建设体系。同时企业数字化转型的加快，为解决标准化建设提供了新的模式和方法，有利于企业构建统一高效的平台化建设模式。

参考文献

- [1] 祝懋智，吴超，李秋扬，张雪琴，曾力波，高山卜. 全球油气管道发展现状与未来趋势[J]. 油气储运, 2017, 36(04): 375-380.
- [2] 刘剑文，杨建红，王超. 管网独立后的中国天然气发展格局[J]. 天然气工业, 2020, 40(01): 132-140.
- [3] 黄维和. 对我国《中长期油气管网规划》的解读和思考[J]. 科学中国人, 2017(27): 64-65.
- [4] 《国家标准化发展纲要》[J]. 大众标准化, 2022(06): 200.

露天煤矿雨季防洪排水安全管理体系优化实践

钱福刚, 郭利波

内蒙古白音华蒙东露天煤业有限公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 026200

DOI:10.61369/ERA.2026030006

摘 要 : 露天煤矿作业领域广阔、地势构造复杂, 雨季强烈降水容易催生边坡稳定性缺失、采场水体聚集、泥石流等灾害情形, 直接对人员与设备的安全状态和生产的持续进程构成威胁。现存防洪排水管理框架常常呈现责任履行不彻底、设施运行维护不细致、监测预警不按时等状况。本文融合露天煤矿现场作业特征, 从责任架构、设施管控、监测预警、应急处理四个关键层面, 探究防洪排水安全管理框架的优化途径, 为露天煤矿安全度过汛期给予可施行的实践参照。

关 键 词 : 露天煤矿; 雨季防洪; 排水管理; 框架优化; 安全实践

Optimization Practice of Flood Control and Drainage Safety Management System in Open-Pit Coal Mines During Rainy Season

Qian Fugang, Guo Libo

Inner Mongolia Baiyinhua Mengdong Open-pit Coal Industry Co., Ltd. Xilingol League, Inner Mongolia 026200

Abstract : The field of open-pit coal mining operations is vast and the terrain structure is complex. Strong rainfall during the rainy season can easily lead to the loss of slope stability, water accumulation in the mining area, mudslides and other disasters, directly posing a threat to the safety status of personnel and equipment and the continuous process of production. The existing flood control and drainage management framework often presents situations such as incomplete fulfillment of responsibilities, inadequate operation and maintenance of facilities, and untimely monitoring and warning. This article combines the characteristics of on-site operations in open-pit coal mines and explores the optimization approach of flood control and drainage safety management framework from four key aspects: responsibility structure, facility control, monitoring and early warning, and emergency response. It provides practical reference for the safe passage of flood season in open-pit coal mines.

Keywords : open-pit coal mine; flood prevention during rainy season; drainage management; framework optimization; safety practice

引言

露天煤矿开采活动受自然环境作用明显, 雨季降水集中且强度较大, 加上采场所形成的人工边坡、排土场地以及工业区域的地形改造状况, 致使地表径流路线产生变化、汇水能力有所增强, 防洪排水的压力急剧增加。当防控手段不得当, 不仅会造成设备被水浸泡、生产活动停止, 还可能诱发边坡滑坡、排土场地坍塌等重大恶性事故, 导致人员伤亡和财产损失。目前部分露天煤矿防洪排水管理依旧处于“被动应付”阶段, 体系化、精细化程度不够^[1]。鉴于此, 结合露天煤矿现场操作经验, 优化健全防洪排水安全管理框架, 达成从“人力防范”到“人力防范+技术防范+制度防范”的全面防控模式, 对保障露天煤矿雨季安全生产具备重要现实价值^[2]。

一、露天煤矿雨季防洪排水管理现存核心问题

(一) 责任架构碎片化, 执行浮于形式

防洪排水工作关联生产、机电、安全、调度等多个部门以及外委施工单位, 部分煤矿虽然明确了部门职责内容, 但缺少统一的统筹协调机制, 存在“各自开展工作”的现象。例如采场边坡

截排水设施的维护工作由生产部门承担, 排水设备的检修工作归机电部门管理, 一旦出现设施损坏、排水不及时等问题, 容易出现责任相互推诿的情况。同时, 基层岗位的责任履行不彻底, 部分员工存在“重视生产、轻视防汛”的观念, 日常巡查工作浮于表面, 未能及时察觉排水沟堵塞、边坡渗水等安全隐患, 小问题逐渐演变成大风险^[3]。

（二）设施运行维护不细致，防控效能不够

截排水设施作为防洪排水的核心屏障，然而部分露天煤矿存在设施建设不规范、日常运行维护不到位等问题。采场各个水平台阶的排水沟断面尺寸未达标准、纵坡设置不合理，雨季容易出现积水倒灌的情况；边坡上方的截洪沟长时间未进行清理，杂草、碎石堵塞情况严重，无法有效拦截地表径流。在排水设备方面，部分水泵出现老化现象、管路存在破损问题，并且缺乏定期的检修保养，在雨季突发降雨时容易出现故障；备用设备储备数量不足、摆放位置分散，无法进行快速调配补充，导致排水能力不足^[4]。除此之外，排土场地的挡水坝砌筑不够牢固、底部未设置防渗层，雨水冲刷容易引发溃坝风险。

（三）监测预警迟滞，风险预判匮乏

多数露天煤矿依然凭借人工巡查作为主要方式，欠缺智能化监测手段，针对雨情、水情以及边坡稳定性的监测精准度和时间有效性不足。人工巡查被天气、地形以及人员责任心等要素制约，难以对全部风险区域进行覆盖，特别是高陡边坡、偏远排土场等部位，没有办法及时察觉边坡细微变形、隐蔽渗水等异常状况。与此同时，与气象、水利部门的联动机制不够健全，预警信息传递不够及时，部分煤矿在收到暴雨预警之后，未能迅速启动应对举措，错失最佳防控时机^[5]。

（四）应急处置失范，实战能力薄弱

部分露天煤矿应急预案针对性不强，直接套用通用模板，没有结合自身采场布局、地形特点以及设备分布等实际状况对流程进行细化，可操作性较差。应急演练浮于表面，大多为桌面推演或者简单流程模拟，没有对排水设备故障、边坡滑坡等极端场景进行模拟，员工应急处置技能无法得到有效提升。除此之外，应急物资储备缺乏科学性，沙袋、土工布、应急照明等物资存在数量不足、存放受潮以及过期失效等问题，抢险设备调配不够顺畅，致使在突发险情时无法快速做出响应^[6]。

二、露天煤矿雨季防洪排水安全管理体系优化措施

（一）健全责任体系，强化闭环管理

搭建“全员参与、层层落实”的责任体系，明确防汛工作领导小组的核心职责，由矿长担任组长，对各部门工作进行统筹协调，防止责任碎片化。对部门分工进行细化，生产技术部门承担截排水设施设计、边坡稳定性管控工作；机电部门负责排水设备检修维护、供电保障任务；安全部门履行隐患排查监督、整改验收职责；调度部门承担应急调度、信息传递工作；外委施工单位对自有作业区域防汛工作承担全部责任，并纳入煤矿统一管理体系。建立“岗位责任制+隐患闭环管理”机制，将防汛责任落实到每个班组、每个岗位以及每个人员，明确巡查范围、频次和标准^[7]。日常巡查实行“谁巡查、谁记录、谁负责”原则，一旦发现隐患立即上报并下达整改通知书，明确整改时限和责任人，整改完成之后由安全部门进行复核验收，形成“排查—上报—整改—复核”的闭环。同时，将防汛工作纳入绩效考核体系，对责任落实到位、隐患整改及时的单位和个人给予表彰，对推诿扯皮、履

职不力的单位和个人进行严肃追责，以此倒逼责任落实。

（二）设施管控优化，防控基础提升

就截排水设施所存问题，实施全面排查整治，依照采场地形、汇水特征对设施布局进行优化。采场各水平台阶排水沟依据实际汇水量对断面尺寸作出调整，对沟内淤堵物予以清理，对破损部位进行修补，保障纵坡合理、排水实现顺畅；边坡上方截洪沟延展至采场边界之外，运用浆砌水泥砖抹面工艺加以加固，杂草、碎石定期开展清理，沟底防渗层予以设置，防范雨水下渗致使边坡软化。排土场对场内及周边截排水设施进行完善，底部拦挡坝进行砌筑，坝体借助沙袋叠加、碎石铺垫实施加固，规避雨水冲刷造成坍塌情况。排水设备全生命周期管理加强，对现有水泵、管路开展全面检修，对老化设备进行更换，关键区域水泵“双回路供电”予以实行，防范断电引发停机^[8]。设备定期保养制度建立，雨季之前联合排水试验开展，保障设备运行稳定；备用水泵、发电机等设备于采场入口附近高地集中存放，防潮、防蚀处理做好，专人配备进行管理，保障随时能够调取。另外，采场低洼处、工业广场入口等关键位置挡水墙设置，沙袋堆砌方式采用，高度按照历史积水状况进行调整，雨水倒灌予以阻挡。

（三）监测预警完善，风险预判强化

“人工巡查+智能监测”双重监测体系构建，预警精度与时效性予以提升。高陡边坡、地质薄弱带、排土场等重点区域，位移传感器、地下水位计等设备布设，边坡变形、渗水情况实时监测，数据异常实时预警信号自动发出；无人机常态化巡查开展，人工难以抵达区域覆盖，截排水设施破损、边坡裂缝等隐患快速排查。人工巡查流程优化，巡查片区划分，巡查路线与重点明确，雨季巡查频次加密，降雨期间每小时巡查一次，边坡、排水沟、水泵站等部位重点关注^[9]。

气象、水利部门常态化联动机制建立，专人安排负责预警信息接收，工作群、广播、对讲机等方式运用将信息快速传递至各作业区域。矿区历史降雨数据与地形特点结合，降雨预警等级划分，差异化应对措施制定：小雨天气巡查加强，中雨天气高陡边坡作业暂停，大雨及以上天气全面停产，人员设备组织撤离至安全区域。同时，水情分析台账建立，降雨量、水位变化、排水情况等信息记录，规律定期分析，为防汛工作数据支撑提供。

（四）应急处置规范，实战能力提升

应急预案优化，露天煤矿实际情况结合，滑坡、积水倒灌、设备故障等不同场景处置流程细化，预警信号、撤离路线、抢险分工、物资调配等内容明确，冗余条款删除，可操作性增强。季度框架内组织实战化应急演练安排，每季度周期至少实施一回，构造极端降雨情形、边坡滑坡场景、水泵故障状况等模拟模块，开展演练人员转移行动、设备迁移操作、隐患处理流程、物资调配环节等程序步骤，演练活动完毕之后即时进行复盘研讨，查找薄弱环节并优化应急预案文本^[10]。

科学维度储备应急物资体系，依照“邻近区域存放模式、充足数额储备标准、固定周期更新机制”原则规范，在采场作业区域、工业广场地带、排土场地域等关键位置设定应急物资储备点位，储备沙袋防汛物资、土工布防护材料、应急照明设备、水泵

排水器械、铁锹作业工具等物资品类，建立登记台账文档，定期开展物资状态检查工作，及时进行过期物资更换、损坏物品处置等操作。组建专职抢险队伍组织，从员工群体之中选拔具备丰富经验者构成队伍架构，配备挖掘机工程设备、装载机作业机械等抢险装备设施，开展专项内容技能培训项目，提升边坡加固工艺、排水抢险作业、人员救援行动等实战能力水平。与此同时，搭建与属地管辖应急救援队伍之间的联动机制体系，遭遇重大等级险情状况时及时发出支援请求信息。

（五）技术支撑强化，创新赋能防汛

以科技器物赋予防汛系统能力，增进风险防范的精确程度和前瞻性质。凭借数字化矿山营造根基，搭建“防汛智能指挥平台”，集合气象观测、水文感应、边坡雷达、视频监视等多种源头数据，达成汛情“一幅图形”可视化呈现。平台具备自动警示功能，当降雨数量、边坡移动、水位等数据超越临界数值，系统自动引发警示并推送到相关负责人员手持终端，同时启动预先设定应急回应程序。引入边坡稳固状态实时解析模型，联合地质勘探数据与实时监测消息，对潜在滑坡风险开展动态评定和推测，为预先施行加固或者疏散办法提供科学根据。

强化防汛技术研究与应用推广，针对边坡渗水容易发生区域，试点推行新型生态防渗材料和导排水技术，降低雨水向下渗透对岩体构造的损害。在关键排水沟槽段落增加自适应流量调节装置，依照汇水速度自动调整排水断面，提升排水系统效能。探寻运用物联网技术对排水设备实行远程智能管理控制，实时监测水泵运转状态、能源消耗和故障信息，达成“预测性维护”，降低设备突然发生故障风险。定时组织防汛技术交流会议，邀请高等学校、科学研究所专家开展专题讲解，推广边坡治理、水文分析等领域先进技术经验，提升技术人员专业修养。

三、实践效果

A 露天煤矿主体通过施行上述优化措施方案，防洪排水安全

管理水准实现显著提升态势。责任体系架构的健全完善有效化解部门推诿问题现象，隐患排查整改工作效率得以提升增进，雨季周期之前排查发现的截排水设施破损情况、边坡渗水现象等隐患问题全部完成整改处置，整改合格比率达到百分之百数值。设施管控体系的优化升级使得截排水能力规模大幅提升增强，雨季时间段内采场作业区域、工业广场地带未出现明显积水状况，排土场地域未发生冲刷侵蚀、坍塌隐患情形。监测预警体系的健全完备实现风险问题早发现、早处置的防控目标，成功预判识别并处置两起边坡微小变形隐患情况，避免事故危害扩大蔓延。应急处置能力的强化提升使员工群体应对突发险情的反应速度、实操技能得到提升增进，预计周期之内未发生人员安全事故、设备损害事件，保障生产活动连续运行状态。

四、结论

露天煤矿雨季防洪排水管理需立足现场实操，破解责任碎片化、设施运维弱、预警滞后等问题。通过健全闭环责任机制、优化设施管控、构建双重监测体系、强化实战应急与全员教育，实现从被动应对到主动防控的转变，筑牢安全防线。后续需结合开采进度与环境变化动态优化措施，将防汛管理融入日常生产，依托科技赋能提升精细化水平，为露天煤矿雨季安全生产提供可靠保障。后续需持续跟踪管理体系运行效果，结合开采进度、地形变化、气象条件等因素动态优化措施，不断积累实操经验，将防汛管理融入日常生产全过程，形成常态化、规范化的管理机制。同时，积极借鉴先进技术和实践案例，推动科技赋能防汛工作，进一步提升露天煤矿雨季防洪排水安全管理的精细化、智能化水平，为煤矿安全生产筑牢雨季防线。

参考文献

[1] 刘干, 韩流, 黄华森. 露天煤矿雨季软岩边坡稳定性研究 [J]. 非金属矿, 2025, 48(02): 96-101.
[2] 张志佳, 刘建宇. 浅谈煤矿雨季三防应急管理措施 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (24): 121-123.
[3] 刘建宇, 王新国, 毛自新, 李宇, 杜鑫伟, 单磊. 煤矿雨季“三防”监测预警系统构建研究 [J]. 煤矿机械, 2024, 45(07): 198-202.
[4] 肖福坤, 张晓燕, 刘刚. 煤矿雨季“三防”管理体系评价指标的构建 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(03): 335-340+354.
[5] 李恩来. 基于 Bigemap GIS 的煤矿雨季“三防”动态管控图应用 [J]. 煤, 2023, 32(12): 95-97.
[6] 郭瑞睿. 煤矿雨季“三防”事故分类 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2019, (08): 97-99+127.
[7] 裴胜强, 蒋亭. 浅谈煤矿“雨季三防”工作实施方案 [J]. 经贸实践, 2015, (13): 297.
[8] 郑传书, 高文星. 云南先锋露天煤矿雨季持续供煤方案研究 [J]. 露天采矿技术, 2013, (09): 1-2.
[9] 黄文明, 蓝上平. 改善煤矿安全监管工作重在以人为本 [J]. 安全生产与监督, 2010, (05): 49.
[10] 本刊编辑部. 吉林省安监局加强雨季煤矿“三防”工作 [J]. 吉林劳动保护, 2010, (07): 12-13.

水工环地质勘查中生态保护技术研究

赵建军

山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队（山东省第八地质矿产勘查院），山东 日照 276826

DOI:10.61369/ERA.2026030008

摘 要： 在生态保护成为新时代发展核心诉求的背景下，水工环地质勘查活动与生态环境的协同发展愈发关键。本文围绕水工环地质勘查中的生态保护技术展开研究，旨在构建适配不同勘查场景的全链条生态保护技术体系。首先剖析典型勘查活动对生态环境的影响机理，建立科学的生态影响识别与评估方法；进而从勘查前期规划、过程减损、后期修复三个维度构建核心技术体系，明确不同场景的技术适配策略；同时开展关键技术研发与验证，建立多维度应用效果评价体系，并提出政策、技术、管理层面的保障措施。研究成果可为实现水工环地质勘查与生态保护协同发展提供技术支撑，对推动绿色勘查发展、维系生态系统稳定具有重要理论与实践价值。

关 键 词： 水工环地质勘查；生态保护技术；绿色勘查；生态影响评估；生态修复

Research on Ecological Protection Technologies in Hydrogeological, Engineering Geological, and Environmental Geological Exploration

Zhao Jianjun

The Eighth Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development (Shandong Provincial Eighth Geological and Mineral Resources Exploration Institute), Rizhao, Shandong 276826

Abstract： Against the backdrop where ecological protection has become a core demand for development in the new era, the coordinated development between hydrogeological, engineering geological, and environmental geological exploration activities and the ecological environment has become increasingly crucial. This paper focuses on the research of ecological protection technologies in hydrogeological, engineering geological, and environmental geological exploration, aiming to construct a comprehensive, chain-wide ecological protection technology system tailored to different exploration scenarios. Firstly, it analyzes the impact mechanisms of typical exploration activities on the ecological environment and establishes scientific methods for ecological impact identification and assessment. Subsequently, it constructs a core technology system from three dimensions: pre-exploration planning, in-process mitigation, and post-exploration restoration, clarifying technology adaptation strategies for different scenarios. Meanwhile, it conducts research and validation of key technologies, establishes a multi-dimensional application effectiveness evaluation system, and proposes safeguard measures at the policy, technological, and managerial levels. The research findings can provide technical support for achieving coordinated development between hydrogeological, engineering geological, and environmental geological exploration and ecological protection, holding significant theoretical and practical value in promoting the development of green exploration and maintaining ecosystem stability.

Keywords： hydrogeological, engineering geological, and environmental geological exploration; ecological protection technology; green exploration; ecological impact assessment; ecological restoration

引言

水工环地质勘查是资源开发与工程建设的前置性基础工作，对保障项目科学实施具有关键作用。但传统勘查作业中的钻孔、开挖等工序，极易扰动区域水文循环系统，破坏地表土壤与植被覆盖，进而引发水土流失、植被退化等一系列生态环境问题。新时代生态文明建设战略要求，水工环地质勘查必须统筹经济效益与生态保护双重目标，绿色勘查理念由此成为行业发展的核心导向。当前，水工环地质勘查与生态保护的融合实践仍面临诸多瓶颈，如绿色技术适配性不足、全流程生态管控体系不完善等问题，严重制约行业绿色转型进程。本文聚焦勘查全流程生态保护技术路径，通过深入剖析勘查活动对生态系统的影响机理，构建多维度绿色勘查技术体系，研发针对性关键技术，为实现勘查作业与生态系统的协同共生提供科学解决方案，助力水工环地质勘查行业高质量绿色发展。

一、水工环地质勘查中的生态影响机理与识别方法

水工环地质勘查中的生态影响机理与识别方法：水工环地质勘查的钻孔、开挖、抽水试验等作业易引发系列生态影响，其核心机理体现为：扰动水文循环导致地下水补排失衡，破坏土壤结构引发退化，损毁植被栖息地造成生物多样性下降，进而导致生态系统服务功能退化。生态影响识别需依托“基线调查－过程监测－动态评估”全流程。前期通过植被、土壤、水文等指标调查建立生态基线；勘查中采用遥感监测、原位传感等技术动态识别影响；基于此构建涵盖生态、技术等维度的评估指标体系，结合层次分析法等量化模型，实现对勘查生态影响的精准识别与科学评估，为后续生态保护技术应用提供依据^[1]。

二、水工环地质勘查中生态保护核心技术体系构建

（一）勘查前期生态友好型规划技术

勘查前期生态友好型规划技术：作为勘查全流程生态保护的前置关键环节，该技术核心是通过系统性规划规避或降低勘查活动对生态环境的潜在影响。核心技术路径包括三方面：一是生态敏感性评价导向的选址优化，依托遥解读译、实地调研等手段，识别生态红线区、生物栖息地等敏感区域，划定勘查禁区与适宜区，优化勘查路线与点位布局；二是勘查方案生态预评估，构建多维度评估指标体系，预判不同方案的生态影响程度，针对性调整勘查强度与工艺；三是生态保护目标融入规划，明确植被保护、水资源防控等具体目标，制定勘查前植被移植、表土剥离储存等前置保护预案，为后续勘查作业筑牢生态保护基础^[2]。

（二）勘查过程中的生态减损技术

勘查过程中的生态减损技术：作为生态保护的核心环节，该技术旨在通过低扰动作业与精准管控，最大限度降低勘查对生态环境的即时影响。核心技术包括四类：一是绿色勘查核心技术，采用低扰动钻孔、环保钻井液等工艺设备，减少对土壤和地下水的污染；二是土壤植被保护技术，对作业区植被进行临时防护，严控施工压实土壤，同步实施表土分层堆放与保护；三是水资源保护技术，优化抽水试验流程实现水资源循环利用，强化钻孔止水措施防止串层污染；四是动态监测技术，整合遥感、原位传感等手段，实时追踪生态指标变化，及时调整施工策略，保障减损效果^[3]。如下图：



图1 展现勘查过程中生态减损技术应用场景

（三）勘查后的生态修复与重建技术

勘查后的生态修复与重建技术：作为勘查全流程生态保护的

收尾关键环节，该技术旨在修复勘查活动造成的生态损伤，推动区域生态系统恢复稳定与功能提升。核心技术体系涵盖四方面：一是地形地貌修复，通过场地平整、边坡生态固坡等技术，恢复勘查区域原始地形轮廓与稳定性；二是土壤修复，针对污染或退化土壤，采用生物修复、化学改良、淋洗等技术改善土壤理化性质；三是植被重建，筛选乡土优势物种构建适配的植被群落，通过科学种植与养护提升植被覆盖率；四是水文生态修复，采取地下水补排调控、地表径流优化、湿地重建等措施，恢复水文循环平衡^[4]。各项技术协同应用，实现生态系统的全面修复与可持续发展。如下图：



图2 勘查后生态修复与重建技术应用场景

（四）不同勘查场景的技术适配与集成应用

不同勘查场景的技术适配与集成应用：水工环地质勘查场景差异显著，需结合区域生态特征与勘查需求，实现保护技术的精准适配与多技术协同集成。山区勘查需重点适配边坡生态固坡、植被原位防护技术，集成低扰动钻孔与遥感动态监测技术，规避地形破碎引发的水土流失；平原地下水勘查应优先采用环保钻井液、地下水循环利用技术，集成土壤分层保护与水文动态监测系统，减少对农耕生态与地下水资源的影响；矿区及污染场地勘查需强化污染隔离与土壤修复技术适配，集成钻孔防污染止水、污染物原位监测技术，实现勘查与污染管控同步推进^[5]。通过构建“场景识别－技术筛选－集成应用－效果反馈”的适配机制，可最大化发挥生态保护技术效能，保障不同场景下勘查与生态保护协同发展。

三、关键生态保护技术研发与验证

关键生态保护技术研发与验证：为突破现有技术瓶颈，提升水工环地质勘查生态保护效能，需聚焦核心需求开展靶向研发与系统验证。研发方向重点涵盖四方面：一是低扰动高效勘查技术，研发无扰动取样设备、可降解环保钻井液等，降低勘查对地质环境的干扰；二是生态敏感区专用技术，针对高寒区、湿地等特殊区域，开发抗逆性强的植被防护与修复技术；三是智能化监测预警技术，构建“物联网＋遥感”融合监测系统，实现生态指标实时感知与风险预警；四是低成本生态修复技术，研发高效生物修复菌剂、改良型土壤修复材料等，提升修复经济性与适用性^[6]。研发流程遵循“实验室试验－现场小试－中试优化”逻辑，先完成材料性能与参数优化，再在典型勘查区域开展实地验证。验证标准需兼顾生态与技术维度，生态层面考核植被覆盖率、地下水水质等指标，技术层面评估勘查效率、操作便捷性等，结合

国家规范形成量化验证体系，确保研发技术具备实际应用价值^[7]。

四、典型勘查场景下生态保护技术应用实践

（一）不同区域类型的技术适配案例

海域勘查案例

日照黄海冷水团鱼类养殖海域勘查项目中，针对水深 70m、洋流流速 3m/s、浪高 8-10m 的复杂环境，采用改造后的大型养殖工船作为钻探平台，通过 6 只锚体八字形抛置固定，搭配重力导向装置保障套管垂直下放，避免洋流冲击导致的孔位偏移。采用跟管钻进与双管钻进工艺，解决淤泥、砂层孔段坍塌问题，全程无废水废渣外排，既完成 3 个 50m 深钻孔勘查任务，又保护了海洋养殖生态环境^[8]。

山区林区案例

日照望台山钼矿勘查中，因林区植被茂密、场地狭窄，选用小型便携式钻机施工，避免传统大型设备对林地的碾压破坏。采用低扰动钻探技术，钻孔完成后及时用原土分层回填，同步栽植黑松、紫穗槐等乡土植被，实现勘查与植被保护同步推进，施工效率较传统工艺提升 40%。

废弃矿区案例

莒县沭河流域历史遗留废弃矿山勘查修复项目中，先通过遥感与实地勘察结合，查明 12 处采坑的生态受损状况。勘查过程中采用模块化钻探设备，减少场地扰动，同步实施土壤重构技术；勘查后采用“耕地恢复 + 植被绿化”模式，新增耕地 108 亩、林草地 370 亩，构建起“勘查 - 治理 - 修复”一体化生态保护体系^[9]。

（二）案例分析

以日照市三类典型水工环地质勘查项目为对象，分析生态保护技术的应用成效。望台山钼矿勘查项目地处林区，采用小型便携式钻机替代传统大型设备，搭配低扰动钻探工艺，钻孔完成后及时原土分层回填并栽植乡土植被，既完成矿化体圈定任务，又避免林地碾压破坏，施工效率较传统工艺提升 40%。莒县沭河流域废弃矿山勘查修复项目中，采用“勘查 - 治理 - 修复”一体化模式，通过模块化钻探设备减少场地扰动，同步实施土壤重构、植被绿化等技术，最终新增耕地 108 亩、林草地 370 亩，林草覆盖率从 25% 提升至 98%。日照海域海洋牧场调查项目，运用无人机航磁测量、多波束地形测量等绿色技术，配套“泥浆不落地”“垃圾集中转运”

工艺，有效规避海洋污染，构建起适配海洋环境的勘查技术体系，项目获绿色勘查优秀评审结果。实践表明，针对性选用生态保护技术可实现勘查与生态保护协同发展^[10]。

五、水工环地质勘查生态保护管控体系与保障措施

构建全流程生态管控体系，筑牢勘查生态保护防线。勘查前建立生态准入机制，结合遥感、GIS 技术划定生态敏感区红线，对勘查方案开展生态影响专项评审，严禁在核心敏感区布设勘查点位。勘查中实施动态监测制度，依托物联网设备实时追踪钻孔废水排放、植被扰动等指标，设置预警阈值，异常时立即停工整改。勘查后执行修复验收与长效管护机制，明确修复责任主体，验收合格后方可销号，同步建立后期监测档案。保障措施层面，完善绿色勘查政策标准，细化日照地区海域、山区等典型区域技术规范。搭建技术支撑平台，联合科研院校推进低扰动钻探等关键技术研发转化。强化监管执法，将生态保护成效纳入勘查单位信用评价。开展常态化培训，提升从业人员生态保护意识与技术实操能力，形成“政策引领、技术支撑、监管保障、全员参与”的协同保障体系。

六、总结

本文围绕水工环地质勘查中生态保护技术展开系统性研究，构建了“前期规划 - 过程减损 - 后期修复”全流程生态保护技术体系，明确了不同勘查场景的技术适配与集成策略，为实现勘查与生态保护协同发展提供了完整解决方案。研究首先厘清了勘查活动对水文循环、土壤植被等的生态影响机理，建立了全流程生态影响识别与评估方法；随后针对性研发了低扰动勘查、智能化监测、低成本修复等关键技术，形成了覆盖山区、平原、矿区等典型场景的技术集成方案，并建立了兼顾生态、技术、经济维度的验证与评价体系。研究突破了传统勘查重效益轻保护的局限，通过技术创新与体系构建，有效破解了技术适配性不足、管控不完善等行业痛点。成果不仅为水工环地质勘查绿色转型提供了技术支撑，更对维系生态系统稳定、推动生态文明建设具有重要实践价值，未来可进一步强化智能化技术融合应用，拓展特殊生态敏感区技术适配研究，提升成果的普适性与推广价值。

参考文献

[1] 许琳琳. 矿山水工环地质勘查技术的应用初探 [C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题（第二册）. 内蒙古地质工程有限责任公司, 2025:341-345.

[2] 洪宇. 水工环地质勘查技术在矿山地质灾害防治中的应用 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(08):33-35.

[3] 冯永刚. 水工环地质勘查在地质灾害治理中的应用 [J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1):269-270.

[4] 胡紫薇. 矿山水工环地质勘查工作的问题及解决途径 [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18(03):321-323.

[5] 刘星. 水工环地质勘查在矿山勘查中的应用价值研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (06):189-191.

[6] 钱振义, 韦忆涵. “双碳”目标下金属矿区水工环地质勘查的要点研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (08):201-203.

[7] 陈平. 解决水工环地质勘查问题, 做好防治工作至关重要 [J]. 楼市, 2025, (07):23-25.

[8] 蔺永红. 金属矿山水工环地质勘查技术的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2025, (12):192-194.

[9] 沈舒, 喻海倚. 横向生态保护补偿机制的分层建构与分类拓展 [J/OL]. 中国国土资源经济, 1-13[2026-01-07].

[10] 吴易国, 叶东旭, 陈斌. 矿山水工环地质勘查技术的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (24):214-216.

天然气站场压缩机故障预测与基于振动信号的智能诊断

靳丁琿, 李志文, 程士瀚

国家管网集团北京管道有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ERA.2026030011

摘 要 : 本文围绕振动信号的故障特性提取与智能诊断技术开展深刻研究。首先剖析压缩机典型故障和振动信号的映射联系, 进而探究时域、频域及时频域的特性提取办法优化路径, 重点研究基于机器学习与深度学习的智能诊断模型构建逻辑, 最后结合站场实际运用场景提出故障预测体系的实施架构。研究显示, 通过振动信号的精细化解析与智能算法的交融运用, 可达成压缩机早期故障的精确辨识与趋势预测, 为设备运维给予科学支撑。

关 键 词 : 天然气站场; 压缩机; 故障预测; 振动信号; 智能诊断

Prediction and Intelligent Diagnosis of Compressor Faults Based on Vibration Signals in Gas Station

Jin Dinghui, Li Zhiwen, Cheng Shihan

Petrochina Beijing Gas Pipeline Co.,Ltd. Beijing 100020

Abstract : This paper focuses on the in-depth research of fault feature extraction and intelligent diagnosis technology based on vibration signals. Firstly, the typical faults of the and the mapping relationship with the vibration signals are analyzed, and then the optimization path of the characteristic extraction method in the time domain, frequency domain and time-frequency domain is explored. construction logic of intelligent diagnosis model based on machine learning and deep learning is studied, and finally the implementation architecture of fault prediction system is proposed according to the actual application scenario of the. The research shows that through the refined analysis of vibration signals and the integration of intelligent algorithms, the accurate identification and trend prediction of early faults of the compressor can be achieved, which provide scientific support for equipment operation and maintenance.

Keywords : gas station; compressor; fault prediction; vibration signal; intelligent

引言

天然气站场压缩机在高压、持续运行工况之下, 容易因为转子不平衡、轴承磨损、气阀泄漏等故障致使设备停机, 甚至诱发安全事故, 造成巨额经济损失。传统故障诊断依靠人工巡查与离线检测, 存在诊断延迟、主观性强等局限, 难以契合智能化站场的运维需要。振动信号作为设备运行状态的“全息载体”, 能够直观体现零部件的力学改变与故障演化规则, 基于振动信号的诊断技术已成为压缩机状态监测的核心方向。本文立足工程实际, 深刻剖析振动信号与故障机理的内在联系, 优化特性提取与诊断模型, 构建兼具精确性与实用性的故障预测体系, 为天然气站场压缩机的可靠运行提供技术保障^[1]。

一、压缩机典型故障与振动信号机理解析

(一) 核心部件故障类型

天然气站场压缩机的故障主要汇聚在转子系统、轴承组件、气阀机构及密封装置四大核心部件。转子系统作为动力传输核心, 容易出现不平衡、不对中及弯曲变形等故障, 其中不平衡故障占比超过40%, 主要由叶轮磨损、介质结垢等因素引发; 轴承组件承担转子支撑功能, 常见故障包含滚珠磨损、保持架损坏及

润滑失效, 其故障演化速度快, 容易引发连锁停机; 气阀机构的故障以阀片破损、弹簧失效为主, 直接作用于气体压缩效率, 导致排气压力异常; 密封装置故障多呈现为泄漏, 不仅造成天然气损耗, 还可能诱发安全风险^[2]。

(二) 故障同振动信号的映射关联状况

故障呈现情形下, 压缩机零部件的运动形态产生异常状况, 引致振动信号的特征参量出现变化情形, 造就明确的映射关联状态。转子不平衡故障会催生和转速频率成正比例的简谐振动现

象,于振动信号的频域图形之中体现为转速基频位置的峰值状况;转子不对中故障则会激发2倍转速频率的振动成分状况,同时伴随着轴向振动增强的态势;轴承滚珠磨损故障会产生特征频率为 $f=z \times n \times (1-d^2/D^2)/(2 \times 60)$ 的振动信号情况(在此处 z 代表滚珠数目, n 代表转速情况, d 代表滚珠直径状况, D 代表滚珠直径情形),特征频率及其谐波成分变成为故障辨识的关键要点;气阀故障的振动信号体现为非平稳特性增强的状况,时域信号的峰值因子、峭度等参量显著提升的态势,同时频域分布呈现出宽频带的特征情况。这种映射关联为依托振动信号的故障诊断供给了理论根基状况^[3]。

二、振动信号特征提取办法

(一) 时域特征提取方面

时域特征提取是借助剖析振动信号的时域波形参量,反映故障的时域特性情况,具备计算简便、实时特性强劲的优势状况。经常运用的时域特征参量涵盖峰值、峰值因子、峭度、偏度、均方根值以及脉冲指标等内容。峰值能够直观地反映振动信号的最大振幅情况,适宜用于辨识剧烈冲击类型的故障状况;峰值因子是峰值同均方根值的比值情况,对早期磨损类型的故障具备敏感性;峭度作为衡量信号分布陡峭程度的参量情况,在故障初始时期会显著增大,随着故障程度加剧而逐渐趋向平稳状态,是早期故障诊断的核心指标内容;均方根值反映振动信号的能量大小情况,能够从整体上评估设备运行的状态情形。在实际运用过程中,需要结合多种时域参量构建特征向量情况,规避单一参量的局限性质,比如将峭度同峰值因子相结合,能够有效地辨别轴承磨损与气阀故障情况^[4]。

(二) 频域特征提取层面

频域特征提取通过傅里叶变换手段将时域信号转变为频域信号情况,揭示故障的频率分布规律情形,适宜用于辨识周期性故障状况。傅里叶变换能够把复杂的时域信号分解成不同频率的正弦成分情况,通过剖析频域图形中的峰值位置、幅值以及谐波分布情况,确定故障的类型状况。比如,转子不平衡故障在频域图形之中体现为基频位置的高幅值峰值情况,而轴承故障则会出现特定的特征频率峰值状况^[5]。为解决傅里叶变换针对非平稳信号适应能力较差的问题,在实际运用过程中经常采用功率谱密度剖析手段,通过计算信号的功率谱分布情况,增强频率特征的辨识程度情况。频域特征提取的关键之处在于准确辨识故障特征频率情况,排除电网干扰、基础振动等背景噪声的影响状况^[6]。

(三) 时频域特征提取操作

面向压缩机故障所产生振动信号具备的非平稳性质特征,时频域特征实时提取的方式方法,能够在同一时间体现出信号涵盖的时间以及频率方面的信息内容,对时域和频域所采用方法存在的不足进行弥补完善。一般会运用到时频域剖析方法,包含有小波开展变换、短时傅里叶实施变换以及经验模态进行分解等形式。小波开展变换借助伸缩以及平移方面的操作举动,达成对信号开展多分辨率的剖析工作,能够卓有成效地提取出非平稳信号

当中存在的局部性特征,特别是在气阀出现故障、密封产生泄漏等非周期性故障的诊断工作上适用;短时傅里叶实施变换依靠滑动形式的时间窗口,把信号进行分段式的处理操作,在时间窗口范围之内开展傅里叶变换工作,对时间分辨率和频率分辨率进行平衡协调,适用于故障发展演变过程的动态化剖析;对经验模态进行分解,将构成复杂的信号拆分开来,成为若干个本征模态函数,每一个本征模态函数都与信号不同的频率分量形成对应关系,能够精确无误地将故障特征和噪声信号分离开来。时频域特征开展提取工作的核心要点,在于对分解参数进行优化处理,提升特征所具备的辨识度以及稳定性水平^[7]。

三、基于振动信号构建的智能诊断模型体系

(一) 机器学习诊断模型架构

机器学习模型通过针对故障特征向量开展训练学习的活动,搭建起故障类型和特征参数之间形成的映射模型,达成故障的自动化识别目标。通常会使用到的模型,包括支持向量机、决策树、随机森林以及K近邻算法等类型。支持向量机通过构建起最优的分类超平面,在高维度的特征空间范围之内,实施故障的分类工作,具备泛化能力强、对小样本数据适应能力良好的优势特点,适用于压缩机早期出现故障时的诊断工作;决策树模型通过递归的方式,对特征空间进行划分操作,搭建起直观清晰的分类规则,便于对诊断结果作出解释说明,适合现场负责运维的人员进行使用;随机森林通过集成多个决策树的形式,降低单一模型出现过拟合的风险概率,提升诊断结果的准确程度,能够对存在多特征、多故障类型的诊断场景进行处理应对。机器学习模型所具备的性能,关键之处在于特征的选择工作以及参数的优化工作,需要借助主成分开展分析、因子实施分析等方式方法,进行降维处理操作,提升模型的运算效率水平^[8]。

(二) 深度学习诊断模型架构

深度学习模型依靠自身强大的特征自动化提取能力,不需要人工进行特征参数的设计工作,适用于复杂类型故障的诊断场景。卷积神经网络(CNN)作为具有典型性的深度学习模型,通过卷积层和池化层的交替式运算操作,自动提取出振动信号蕴含的深层特征,能够有效地识别出不同故障类型之间存在的特征差异;循环神经网络(RNN)针对振动信号具备的时序特性,通过记忆单元捕捉信号存在的时间依赖关系,适用于故障发展演变过程的动态化诊断工作;长短时记忆网络(LSTM)对RNN存在的梯度消失问题进行了改进优化,能够更好地对长序列的振动数据进行处理操作,提升故障预测结果的准确程度。深度学习模型开展训练工作,需要数量庞大的标注数据,在实际应用过程当中,可以通过数据增强技术手段,对样本集合进行扩充操作,同时结合迁移学习的方法方式,利用相似设备产生的故障数据,对模型训练工作提供辅助支持,降低对目标设备故障数据的依赖程度^[9]。

(三) 模型融合与重构

单个诊断模型存在适用场景的限定范畴,模型融合能够整合各模型的优势特性,提升诊断结果的可靠程度与鲁棒性能。常见

的融合办法包含加权投票方式、堆叠集成方式以及贝叶斯融合方式。加权投票法依照各模型的诊断准确概率分配权重数值,综合做出故障类型的决策判断;堆叠集成法把多个基础模型的输出结果作为输入内容,构建次级分类模型,进一步优化诊断结论;贝叶斯融合法基于贝叶斯概率理论体系,融合各模型的后验概率分布,提高诊断结果的置信水平。模型优化需要结合站场实际工作状况,考量温度数值、压力参数等环境要素对振动信号的作用影响,通过引入注意力运行机制、自适应学习率调节手段等方式,提升模型针对工况变化的适应能力^[10]。

四、故障预测体系的推行与运用

(一) 数据采集系统搭建

数据采集工作是故障预测体系的根基基础,需要结合压缩机的结构特点与运行工况条件,合理规划振动传感器的布置位置。传感器应当安装在转子轴承座体、气阀腔体空间、气缸缸体结构等关键部位区域,选用加速度传感器类型,测量方向涵盖径向维度与轴向维度,采样频率需要符合 Nyquist 定理要求,通常设定为故障特征频率的5-10倍数值,确保完整捕捉故障信号波形。数据采集系统需要具备实时传输功能、存储功能与预处理功能,通过边缘计算设备对原始信号进行滤波操作、去噪处理,消除电网干扰因素、机械共振现象等噪声信号影响,提升数据质量水平。同时,需要同步采集设备运行参数(转速数值、压力参数、温度指标)与环境参数数据,为故障诊断工作提供多维度的数据支撑体系。

(二) 故障预测流程规划

故障预测流程包含数据采集环节、特征提取环节、模型推理环节、故障预警环节四个阶段环节。首先借助传感器采集振动信号数据与运行参数信息,传输至数据处理中心平台;其次采用时域分析、频域分析、时频域分析相结合的特征提取方法,构建多维度的特征向量集合;接着输入训练成熟的智能诊断模型,推理

判断设备运行状态情况与故障类型类别;最后依据故障严重程度等级与演化趋势走向,发出不同等级的预警信号信息,同时生成运维建议内容。故障预测流程需要具备实时性能与自主性能,能够自动触发数据采集操作、分析处理流程与预警发布机制,减少人工干预程度,满足智能化运维管理需求。

(三) 应用成效与实践价值

基于振动信号的智能诊断与故障预测体系在天然气站场的应用实践,能够实现压缩机故障的早期识别判断与趋势预测分析,将故障诊断时间提前3—7天周期,有效防范突发停机事故发生。实践结果表明,该体系针对转子不平衡状态、轴承磨损现象等典型故障的诊断准确概率达到95%以上比例,针对气阀故障问题、密封泄漏情况等复杂故障的诊断准确概率达到88%以上水平,显著降低设备故障发生频率与运维成本支出。同时,故障预测体系生成的运维建议能够指导运维人员实施精准检修作业,缩短停机时间长度,提高设备利用效率,为天然气站场的安全运行、高效运行提供有力保障支撑。

五、结论

本文以天然气站场压缩机的故障预测与智能诊断为核心内容,对典型故障和振动信号间的映射关联展开深度剖析,对时域、频域以及时频域的特征提取办法实施优化操作,搭建起机器学习和深度学习相互结合的智能诊断模型架构,提出一整套故障预测体系的施行框架内容。相关研究成果显示,借助振动信号开展的智能诊断技术可以精确辨认压缩机的早期故障情形,给设备的运维工作供给科学合理的依据支撑,具备至关重要的工程应用价值体现。往后的研究方向能够将焦点聚焦于极端工况环境下的故障诊断技术领域,通过强化学习技术与数字孪生技术的融合运用方式,进一步提升故障预测工作的准确性程度和前瞻性水平,搭建覆盖全生命周期的设备健康管理体系架构,为天然气站场的智能化升级进程提供助力支持。

参考文献

- [1] 李玮璞,钟晓峰,陈奕铭,陈宏盛,刘家杨,邱天友,杨永胜,程丽.天然气站场压力波动对螺栓法兰连接系统密封性能的影响[J].润滑与密封,1-7.
- [2] 伍奕,张杰,高继江.基于用能单元的输气站场能耗指标建立及应用[J].石油石化节能,2018,8(10):54-56+12.
- [3] 张尚洲.天然气站场工艺管道吹扫试压策略分析[J].当代化工研究,2018,(08):167-168.
- [4] 华松.车用压缩天然气站场的安全管理探讨[J].化工管理,2017,(29):248.
- [5] 张轩,王华青,向奕帆,吴海辰,张利勋,杨峰,丁昱,孙波浪.余热制冷技术在天然气输气站场应用的可行性研究[J].石油石化节能,2016,6(04):12-14+8.
- [6] 刘松杰,李山山.天然气站场工艺管道吹扫试压方法[J].管道技术与设备,2016,(01):55-57.
- [7] 韩世川,周丽娜.我国车用压缩天然气站场安全管理对策[J].价值工程,2014,33(19):140-141.
- [8] 郭李平.吕梁市城市天然气站场布置规划应用[J].山西建筑,2014,40(01):36-37.
- [9] 李晓倩,蒿云.压缩天然气加气站的前景展望及站场设计[J].煤炭与化工,2013,36(08):124-126.
- [10] 王洪喜,孙盛,吴中林,关中原.西气东输站场放空天然气回收需求与工艺[J].油气储运,2012,31(05):363-365+406.

石油勘探钻井用井下测控仪器电路的研发与应用探究

谢培, 诸梦青, 蓝永宗

杭州丰禾石油科技有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2026030016

摘 要 : 石油勘探钻井的作业环境较为复杂, 井下测控仪器是能够保障钻井安全、精准获取地层参数的关键装备, 其中电路系统是仪器的主要部分, 其性能情况能够直接影响测控数据的准确性, 还决定仪器是否能进行稳定的工作。现在国内井下测控仪器的电路还存在一些技术难题, 比如耐高温能力不够、抗干扰效果差等问题, 且关键元器件大多依赖于进口, 影响石油勘探装备的自主研发和发展。推进井下测控仪器电路的研发关键在于解决超高温适配、低噪声抗干扰、低功耗的技术问题, 让电路在极端工作条件下更可靠、更适配。

关 键 词 : 石油勘探钻井; 井下测控仪器; 电路研发; 应用路径

Research and Application of Circuitry for Underground Monitoring and Control Instruments Used in Petroleum Exploration Drilling

Xie Pei, Zhu Mengqing, Lan Yongzong

Hangzhou Fenghe Petroleum Technology Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : The operating environment for oil exploration drilling is quite complex. Underground monitoring and control instruments are crucial equipment that can ensure drilling safety and accurately obtain geological parameters. Among these instruments, the circuit system is the primary component, and its performance directly affects the accuracy of the monitoring and control data. It also determines whether the instrument can operate stably. Currently, there are still some technical challenges in the circuit systems of underground monitoring and control instruments in China, such as inadequate heat resistance and poor anti-interference capabilities. Additionally, key components are largely dependent on imports, which hinders the independent development and advancement of oil exploration equipment. Promoting the development of the circuit systems for underground monitoring and control instruments is essential for addressing the technical issues of high-temperature compatibility, low noise resistance, and low power consumption, thereby making the circuits more reliable and suitable for extreme operating conditions.

Keywords : petroleum exploration drilling; downhole monitoring and control instruments; circuitry development; application pathways

引言

随着全球能源需求不断上涨, 推动石油勘探向深井、超深井以及复杂地质区域推进, 也大幅度增加了钻井的难度和风险。井下测控仪器就像是钻井作业在地下工作的“眼睛”, 能够进行实时采集地层电阻率、温度、压力等关键参数, 为储层识别、轨迹优化以及事故预警等提供重要的参考数据, 而电路系统则是保障保证仪器正常发挥作用的关键组成部分。井下高温、高压、强振动等极端条件下对电路的稳定性以及适应性提出了更高的要求。开展井下测控仪器电路的研发以及应用研究, 对于打破国外技术封锁、保障国家能源安全以及提高勘探效率, 有着十分重要的意义。

一、石油勘探钻井井下测控仪器电路相关介绍

石油勘探钻井采用的井下测控仪器电路, 是一种包含信号采集、信号处理、数据传输、电源管理等功能的专用电子装置, 是实现井下测控仪器参数监测以及执行指令的主要载体。其主要构成包含模拟前端电路、数字处理电路、数据传输电路以及电源管理电路四个模块内容, 各模块间相互配合, 按照要求完成从参数

采集、信号转换、数据处理以及远程传输的整个流程。其中, 模拟前端电路主要负责连接各类传感器, 将地层物理量、井筒环境量等 = 模拟信号进行滤波、放大和调理处理; 数字处理电路主要依靠微处理器或专用芯片, 实现信号模数的转换以及数据运算; 数据传输电路使用电缆传输、泥浆脉冲传输等形式, 实现井下和地面之间的数据进行有效互通; 电源管理电路能够为整个系统提供稳定电力, 以此保障设备在极端环境下持续运转。

二、井下测控仪器电路研发的必要性

（一）满足深层勘探对测控精度的需求

随着浅层油气资源开发的枯竭，目前石油勘探已经逐渐转向深层、超深层以及复杂岩性储层^[1]。相比浅层油气，这类区域的地质条件更加复杂，储层的非均质性更强，对与井下测控数据的精度要求也更高。传统的井下测控仪器电路主要受信号调理技术和抗干扰设计的限制，在深层环境中工作容易出现信号失真、数据漂移等相关问题，进而导致储层参数识别出现问题，影响勘探决策的准确性。比如在进行深层页岩气勘探的过程中，地层的电阻率差异是非常微小的，要求电路系统能够具备纳伏级的信号检测能力，但目前采用的常规电路，在噪声抑制方面的标准还不够。因此需要通过研发高精度的信号采集电路、低噪声放大电路以及自适应抗干扰系统，保障深层石油勘探工作的顺利推进。

（二）突破核心技术进口依赖的瓶颈

现阶段国内高端井下测控仪器的主要电路、配套元器件等主要依赖进口的状态，其中美国 TI、ADI 等国际厂商在相关市场中有着主导地位。进口的电路产品不仅采购成本偏高，还存在供货周期久、技术封锁、售后响应不及时等一系列问题，严重阻碍了国内石油勘探装备的自主化发展步伐，也对相关产业安全造成了影响。以超高温（200℃以上）专用处理器、高精度 ADC 这类关键芯片为例，长期以来都被国外企业垄断，国内企业很难获取到对应的关键技术参数。积极开展自主研发工作，能够突破国核心技术依赖进口的问题，进而实现相关电路及元器件实现国产替代，有效降低对进口产品的依赖程度。同时还可以借助技术创新优化产品的成本结构，进而提升国内石油装备企业的市场竞争力。

（三）提升极端工况下仪器运行可靠性

井下的极端环境，是影响测控仪器稳定运行的关键因素。目前不管是进口的还是国产的常规电路，在长期极端工况下都容易出现元器件失效、电路断路这类故障，进而导致仪器停机。这不仅仅会拖慢钻井进度，还可能引发仪器损坏、井眼卡钻等后续问题。根据相关统计，国内钻井作业中，大概有 35% 的测控仪器故障都和电路系统失效有关，其中高温造成的电容老化、振动带来的焊点脱落，是引发故障的主要原因^[2]。通过针对性的研发工作，选用耐高温的元器件（比如 SiC 基芯片）、加强电路的防震封装设计、优化电路的拓扑结构，能够明显提升电路系统的环境适应能力。研发能够适配极端工作环境的电路系统，能有效降低仪器发生故障的几率，提升钻井作业的安全性。

（四）适配智能钻井技术发展的需求

智能钻井是石油勘探领域发展的方向，其关键在于将钻井过程中的实时测控数据以及智能算法进行有效结合，进而能够实现钻井作业决策的自动化决策、调控的精准化。目前常用的常规电路多数据采用较为单一参数采集方式，相关的数据处理能力非常有限，无法贴合智能钻井在实时性、集成化方面的切实需求。因此研发集成多通道同步采集电路、边缘计算处理单元以及高速传输接口的智能电路系统是非常必要的。能够有效实现地层参数与

工程参数进行同步采集，还能在本地完成实时数据分析，进而有效缩短数据传输延迟，为智能钻井的决策提供更加快速的数据支持。除此之外，该智能电路系统还搭载了自诊断功能，能实时监控自身运行状态，帮助提升仪器的智能化运维效率，助力石油勘探钻井行业逐步向自动化、智能化转型。

三、井下测控仪器电路研发的关键技术方向

（一）超高温电路设计与元器件选型

提升超高温环境下的适应能力是井下测控仪器电路研发无法绕开的难关，应将高温电路设计技术作为主要突破方向，通过选用耐高温材料搭配特殊工艺来提升电路的热稳定性能。在进行元器件选型时优先选用高温等级不低于 200℃的专用器件，比如碳化硅（SiC）基功率器件、高温石英晶振、陶瓷电容等，规避使用民用级、工业级的常规元器件。与此同时还要积极优化电路拓扑结构，尽力减少对温度敏感的元件用量，可以采用分布式布局的形式来降低局部区域的热量聚集问题。另外还需要结合高温老化试验、温度循环试验等加速测试手段，验证电路在不同温度梯度下的性能表现，在此基础上建立电路的高温失效模型，为后续进行的电路优化设计提供有力的数据支撑。

（二）低噪声与抗干扰电路设计

井下环境存在强电磁干扰，很容易让电路信号出现失真，进而影响测控数据的精度，所以低噪声设计和抗干扰能力提升，是井下测控仪器电路研发的关键方向。在信号采集这一环节中，需要有针对性的做好抗干扰处理：使用屏蔽线传输信号，同时设计差分放大电路和多级滤波电路，能够有效降低共模干扰和电磁辐射带来的干扰。在进行电源电路设计方面，需要强化开关电源的输入输出滤波，搭配使用 EMI 滤波器，以此减少电源噪声对信号电路的产生干扰。此外还要精准设定每个振荡器的频率参数，避开同频干扰的问题；对于大功率振荡器要进行严格控制阻尼比，从根源上降低斜波干扰的发生率。关键电路模块需要用金属屏蔽罩实现单独屏蔽，进而形成完整的电磁防护体系。

（三）低功耗电路优化与电源管理

井下仪器的供电大多靠内置电池或者电缆，而电源容量本身有限，所以低功耗设计直接关系到仪器工作时间的长短，是延长续航的关键所在。在进行电路研发的过程中需要针对性采用低功耗策略：一方面要优先选低功耗的元器件和芯片，另一方面要优化电路工作的方法，设计采集、处理、传输的工作机制，在非工作时段能够减少电路功耗，减少能量消耗。在电源管理电路方面，需要具备高效稳压、过流保护、低静态功耗等主要功能，搭配使用高效 DC-DC 转换器来提高电源转换效率，实现降低能量损耗。另外，结合高温环境会让电池性能下降因素，可以集成电池状态对电路进行监测，将剩余电量实时反馈，能够为地面工作人员提供更换或充电的预警信号。通过以上的低功耗优化，能够将电路系统的功耗控制在毫瓦级，延长井下仪器的持续工作时间的同时还能减少电源更换的次数，有效提升整个钻井作业的效率。

四、井下测控仪器电路的应用路径

（一）定向井与水平井随钻测控应用

定向井和水平井钻井技术是提高油气采收率的重要技术手段，其钻井方式对于随钻测控的实时性和准确性有非常高的要求。井下测控仪器的电路在这类场景中如何能有效发挥作用，重点在于保证钻井轨迹的控制精度以及地层参数的实时反馈能力。实际应用时，将之前研发的高精度采集电路和抗干扰传输电路集成到随钻测井（LWD）仪器里，就能同步采集井斜、方位、工具面角这类工程参数，以及地层电阻率、伽马值这类地质参数。这些实时数据会通过泥浆脉冲传输电路传到地面，地面系统再根据数据调整钻井轨迹，确保钻头能精准钻进储层里的高产区域。考虑水平井钻进距离较长的特点，可以采用低功耗的电路设计，在延长仪器工作时间基础上避免中途起钻更换电源，有效缩短钻井工期。例如在进行页岩气水平井勘探的过程中，可以搭载自主研发电路的随钻测控仪器，能实现毫米级的轨迹控制，增大储层的接触面积、提高油气产量。在投入应用前需要根据钻井深度和地质条件，提前对电路做温度、压力方面的适应性调试，确保能够在复杂的井下工况下能稳定运行。

（二）深层超深层钻井安全监测应用

深层和超深层钻井作业，要面对高温、高压、井壁不稳定等多重风险，井下测控仪器的电路系统，得重点支撑安全监测功能的落地，这样才能为钻井事故的提前预警提供可靠的数据依据。在进行实际应用的过程中，可以将高耐温、高耐压的电路集成纳入井筒监测仪器中，能够有效实时采集井内压力、温度、井径以及井壁位移等关键的参数，随后通过有较高可靠性的数据传输电路，将监测数据实时的回传给地面系统。地面相关的技术人员可以根据这些实时反馈的数据进行风险研判，能够及时发出井壁坍塌、井漏、超压等危险预警。同时电路本身需要具备自诊断功能，能够进行实时监测自身的运行状态，有效避免因为电路故障致使整个监测工作中断。在进行深层超深层钻井的实际应用过程中，自主研发的超高温电路，能够在 200℃ 以上的环境里进行稳定工作，其压力监测精度甚至可以达到 0.1MPa，不仅能够有效、精准的捕捉地层压力的异常变化，还能提前 3 至 5 小时发出预警，有效降低钻井事故的发生概率。在投入使用前，还需要对电路做极限环境的模拟测试，确保它在高温高压叠加的极端工况下，依旧能稳定运行。

（三）非常规油气藏勘探测控应用

非常规油气藏（像页岩气、煤层气这类）有着储层致密、渗透率低、分布不均匀的特点，这就对测控仪器的精细化、多参数测量能力提出了更高要求，井下测控仪器的电路系统也得跟着适

配，满足多参数同步采集和精准分析的实际需求^[3]。具体应用时，要将多通道集成采集电路、高速数据处理电路整合到非常规油气藏的测控仪器中，能够同步、精准地测量储层孔隙度、渗透率、含油气饱和度、地层压力等关键参数。同时可以借助边缘计算电路，在井下对这些多参数数据进行融合分析，有效提升储层评价结果的准确性。结合非常规油气藏钻井过程中振动强烈的环境特点，在电路设计部分采用了模块化防震，用来增强整体的抗震性能。例如在煤层气勘探作业中，应用自主研发电路的测控仪器，能够实现煤层厚度、含气性、渗透率等关键指标的同时采集，其数据处理效率有效提升，为后续压裂施工参数的优化调整提供了有力的数据支撑。在投入应用前还需要结合非常规油气藏自身的地质特点，对电路的参数采集范围、测量精度做针对性校准，确保采集到的测量数据和储层的实际情况保持一致。

（四）智能钻井自动化控制应用

在智能钻井的自动化控制场景里，井下测控仪器的电路得扛起数据采集、实时处理和指令执行的核心担子，关键是要能和地面控制系统高效配合、协同工作。在实际应用的过程中，将集成边缘计算功能的电路系统用到智能测控终端上，一方面进行实时采集钻井工程参数、地层参数，另一方面通过本地数据处理完成特征进行提取和异常识别，这样能够有效减少数据传输的延迟，加快决策响应的速度。同时电路一定要具备安全加密功能，保证数据传输和指令执行的安全性，还能在一定程度上避免出现数据泄露以及指令误执行的问题。在智能钻井平台的具体应用时，自主研发的这套电路系统能够有效实现钻井参数的实时优化、调整，能够让钻井效率提升 20% 以上，并将人力成本降低 30%。在应用过程中，需要建立电路与地面系统、执行机构之间的协同调试机制，这样能够保证数据交互顺畅、指令执行的精准；同时还应加强对电路系统的实时监控以及日常维护，这样才能保障智能钻井过程的连续性和稳定性。

五、结束语

针对井下测控仪器电路的研发与实际应用，能够有效提升石油勘探精度、保障钻井作业安全，推动行业向智能化转型。目前在这一领域的研发虽然取得了一定成绩，但在超高温核心芯片这类关键领域方面与国际先进水平之间还存在差距。未来需强化产学研协同创新的力度，集中力量攻克核心技术的难关，优化完善国产化产业链条；推动电路技术与智能算法的有效融合，为石油勘探行业的高质量发展提供扎实的技术保障，也能够为国家能源安全建设增加力量。

参考文献

- [1] 王雨，陈文，梁小兵，等. FITS-D 高温过钻具数字声波测井仪电路设计与应用 [J]. 2025.
- [2] 陈岩. 对井筒震电测井采集控制和传输电路的研究 [J]. 石化技术，2021，28(6):2.
- [3] 耿战峰，张化庆，刘金平，等. 石油测试仪器的电流检测系统 [J]. 化学工程与装备，2021(5):213-214.

低温环境下通信电源的启动性能优化

杨金凤, 辛文启, 李新阳, 刘泰琪

中国人民解放军32125部队, 山东, 济南 250004

DOI:10.61369/ERA.2026030024

摘 要 : 通信电源是保障通信系统稳定运行的核心基础设施, 其在低温环境下的启动可靠性至关重要。本文针对低温环境下通信电源启动失败的问题, 深入分析了其影响机理。低温通过改变关键元器件的物理化学特性, 引发蓄电池容量锐减、功率半导体开关性能恶化、电容电感参数漂移等一系列问题, 进而导致系统出现启动电流不足、电压波动剧烈、热失衡及保护机制误触发等系统性挑战。为应对这些问题, 本文提出了一套系统性的优化策略, 在元器件层面, 优选低温性能优异的器件并优化电路拓扑与布局; 在热管理层面, 集成 PTC 辅助加热与智能温控技术; 在系统控制层面, 采用分段启动、自适应调节与智能故障预判等软件算法。此外, 构建了包含仿真验证、实验平台测试和量化指标体系的综合评估方案, 以验证优化策略的有效性。

关 键 词 : 通信电源; 低温启动; 性能优化; 辅助加热

Startup Performance Optimization of Communication Power Supplies in Low-Temperature Environments

Yang Jinfeng, Xin Wenqi, Li Xinyang, Liu Taiqi

Unit 32125 of the Chinese People's Liberation Army, Jinan, Shandong 250004

Abstract : Communication power supplies are the core infrastructure ensuring the stable operation of communication systems, and their startup reliability in low-temperature environments is of paramount importance. This paper delves into the issue of startup failures in communication power supplies under low-temperature conditions, thoroughly analyzing the underlying mechanisms. Low temperatures alter the physicochemical properties of key components, leading to a sharp decline in battery capacity, deterioration in power semiconductor switching performance, and drift in capacitor and inductor parameters, among other issues. These, in turn, result in systemic challenges such as insufficient startup current, severe voltage fluctuations, thermal imbalances, and false triggering of protection mechanisms. To address these problems, this paper proposes a systematic optimization strategy. At the component level, it involves selecting devices with superior low-temperature performance and optimizing circuit topology and layout. In terms of thermal management, it integrates PTC auxiliary heating and intelligent temperature control technologies. At the system control level, it employs software algorithms such as staged startup, adaptive adjustment, and intelligent fault prediction. Additionally, a comprehensive evaluation scheme encompassing simulation verification, experimental platform testing, and a quantitative indicator system is constructed to validate the effectiveness of the optimization strategy.

Keywords : communication power supply; low-temperature startup; performance optimization; auxiliary heating

引言

随着全球信息化的飞速发展, 通信网络的稳定运行直接关系到国计民生与社会安全。通信电源为整个网络提供着持续、稳定的能量供给, 是保障通信畅通的基石。然而通信设备部署环境日趋复杂, 从高寒地区的户外基站到偏远山区的微波中继站, 极端低温环境对通信电源的可靠性构成了严峻挑战。在低温条件下, 电源启动失败的事件时有发生, 一旦发生, 将可能导致通信中断, 造成巨大的经济损失和社会影响。因此, 深入研究并优化通信电源在低温环境下的启动性能, 已成为业界和学术界共同关注的重要课题。

一、低温对通信电源启动性能的影响机理分析

（一）关键元器件的低温特性变化

通信电源源自国家电网输出的能源，对日常生活至关重要，不能容忍任何故障。一旦出现问题，将对整体和全局产生严重影响。因此，通信电源需要在各种环境下可靠运行，以满足不同客户的需求^[1]。作为核心储能部件，蓄电池在低温下容量锐减、内阻激增，甚至触发保护机制而无法输出，是启动失败的首要原因。同时 MOSFET、IGBT 等功率半导体因阈值电压升高、导通电阻增大而难以驱动且功耗增加，开关速度变慢也影响了电流控制的稳定性^[2]。此外，电容因 ESR 剧增和容值衰减而无法有效滤波储能，电感则因磁芯特性变化削弱了电流调节能力，共同导致启动电压波动。继电器等元件在低温下易出现吸合不牢、触点弹跳等问题，直接威胁启动电路的通断可靠性。

（二）启动过程的系统级挑战

低温环境下，电源启动面临多重严峻挑战。蓄电池与功率器件性能双双衰减，导致启动电流严重不足，系统难以建立正常工作电压^[3]。同时电容滤波效果减弱与器件开关变慢，共同引发剧烈的电压波动与尖峰，极易冲击控制电路并触发误保护^[4]。此外，系统内部产热不均与散热过快的矛盾，不仅可能触发过热保护，更会形成“低温 - 性能衰减 - 热量不足”的恶性循环。而这一切，又因低温导致元器件参数漂移，使得过流、欠压、过热等保护机制频繁误判，导致启动失败。

（三）影响机理总结

低温对通信电源启动性能的影响是“元器件特性衰减 - 系统级协同失调”的链式反应过程^[5]。从本质上看，低温通过改变元器件的物理结构与化学特性，导致其电气参数发生异常变化；这些变化进一步影响了电源系统启动过程中的电流输出、电压稳定、热量平衡等关键环节，引发启动电流不足、电压波动、热失衡等问题；在多重因素的叠加作用下，可能导致电源启动失败或保护机制误触发，严重影响通信电源的低温启动可靠性^[6]。因此，优化低温启动性能需从根源上解决元器件的低温适应性问题，同时通过系统级设计提升各部件的协同工作能力，打破上述链式反应。

二、通信电源低温启动性能优化策略

（一）元器件选型与电路设计优化

提升通信电源的低温启动能力，需从元器件、电路和热管理三方面进行系统性优化^[7]。在元器件选型上，应优先选用符合低温标准的军品或工业级产品，包括采用低温性能优异的锂电池或改进型铅酸电池并搭配高性能 BMS，选用低温特性好的 MOSFET/IGBT 功率器件，以及用钽电容或陶瓷电容替代传统电解电容，同时确保继电器、变压器等也满足耐低温要求^[8]。在电路设计上，需优化拓扑结构与参数，例如设计预充电电路以避免启动冲击，采用交错并联结构降低电流纹波，并增强驱动与滤波能力以保障低温下的电压稳定性。在电路布局阶段，应运用热集中设计理念，将功率器件等发热元件靠近电池等敏感元器件以实现被动加热，

同时通过选用高导热 PCB 和优化散热路径来确保热量高效传导，避免局部过热，从而全面提升电源的低温启动性能。

（二）辅助加热与热管理技术

为确保通信电源在 -40℃ 以下极端低温环境中可靠启动，必须集成主动加热与智能热管理策略^[9]。通过在蓄电池、功率器件等关键区域安装具有自限温特性的 PTC 加热器进行精准预热，同时利用智能温控系统根据环境与元器件温度，自动执行启动前预热、动态功率调节及启动后停机等操作，以节约能源。此外，配合高效保温材料、密封外壳及可调通风口设计，最大限度减少热量散失，将加热能量集中于关键部位，从而确保电源在极端低温下能够成功、高效地启动。

（三）系统级控制与软件算法优化

为提升电源系统在低温下的启动可靠性，可通过优化控制策略与软件算法，实现启动过程的智能化^[10]。核心在于采用分段启动策略，根据环境温度动态调整各模块的启动时序与参数，依次完成辅助加热、电池检测、预充电和功率变换，避免瞬间冲击。同时基于实时数据构建自适应调节模型，动态优化启动电流与电压，保护电池并稳定输出。此外，还需优化保护机制，引入温度补偿防止误触发，并构建故障预判模型，通过数据趋势分析提前识别潜在风险，实现从启动时序、参数调节到故障防护的全链路智能化管理，从而全面提升低温启动的可靠性与安全性。

三、优化方案的验证与评估体系

（一）仿真验证方法

仿真验证需依次完成模型构建、场景设计与结果分析三大核心环节，基于 MATLAB/Simulink、PSpice 等仿真软件，构建通信电源的整机仿真模型，包含蓄电池、功率器件、电容、电感、控制电路等关键模块，并引入低温下的元器件参数模型，例如根据蓄电池的低温特性曲线建立不同温度下的容量 - 内阻模型，根据功率器件的 datasheet 提供的低温参数修正器件模型的阈值电压、导通电阻等参数，根据电容的低温容值衰减特性建立容值与温度的函数关系，同时在模型中集成辅助加热模块、智能热管理控制算法、自适应启动调节算法等优化模块，确保仿真模型能真实反映优化方案的工作状态。在此基础上设计多组不同低温环境的仿真场景，覆盖通信电源可能面临的典型低温工况，如 -10℃、-20℃、-30℃、-40℃ 等不同温度等级，同时考虑不同启动负载条件（如轻载、满载、冲击负载），在各仿真场景下模拟优化方案的启动过程，采集启动时间、启动电流峰值、输出电压波动幅度、元器件温度变化、保护机制触发情况等关键数据，通过对比优化前（未采用任何优化策略）与优化后的数据，分析优化方案对启动性能的提升效果，此外还需进行极端工况下的仿真测试，如最低温度（-40℃）+ 满载启动、温度骤变（从 -40℃ 快速升至 0℃）下的启动，验证优化方案的鲁棒性。对各仿真场景下的测试数据进行整理与分析，重点关注启动成功率（不同温度下启动成功的次数与总测试次数的比值）、启动时间（从启动指令发出到电源输出稳定的时间）、启动电流峰值（启动过程

中的最大电流值)、输出电压纹波系数(电压波动幅度与额定输出电压的比值)、元器件最高温度(启动过程中功率器件、蓄电池等元件的最高温度)等指标,通过数据分析判断优化方案在不同低温场景下的启动性能是否满足设计要求,识别优化方案中可能存在的不足(如加热模块功率不足、算法调节响应滞后等),并针对性地进行方案迭代优化。

(二) 实验验证平台构建

为验证通信电源优化方案,需搭建一个包含低温实验箱(−50℃~+80℃)、示波器、电子负载等设备的实验平台,并准备原始与优化两组样机进行对比。测试将遵循标准化流程,在目标低温(如−40℃)下恒温2小时,然后在不同负载条件下启动样机,实时采集启动时间、电流峰值、电压纹波等数据,并通过重复测试计算成功率。此流程将覆盖−30℃至−10℃等多种温度与负载组合,除常规测试外,还需进行极端工况与长期可靠性验证,包括最低温下的百次连续启动、温度骤变、低电压启动,以及将优化样机置于−20℃环境中连续运行1000小时,以全面评估优化方案的有效性与长期可靠性。

(三) 评估指标体系

为全面评估通信电源的低温启动性能,建立包含启动能力、启动稳定性、安全性与可靠性四个维度的量化指标体系。启动能力要求在−40℃满载条件下启动成功率不低于99%、启动时间不超过60秒,且最低启动温度不高于−40℃、最低启动电压不高于额定电压的70%。启动稳定性要求启动过程中的输出电压纹波系数不超过2%、启动电流波动幅度不超过10%,以及关键元器件的

温度变化速率不超过5℃/秒。安全性与可靠性指标要求保护机制误触发率不超过1%,元器件最高温度不超过其额定上限,且绝缘电阻不低于100MΩ。长期可靠性则要求在−20℃环境下累计启动次数不低于1000次,连续运行1000小时后关键性能指标变化率不超过5%,且故障后恢复时间不超过10秒。通过该体系可全面客观地评估优化方案的低温启动性能,为工程化应用提供支撑。

四、结束语

本文围绕低温环境下通信电源启动性能优化的核心问题,深入剖析了低温对关键元器件电气特性的影响机理,揭示了由元器件性能衰减引发启动电流不足、电压波动、热失衡及保护误判等一系列系统性挑战的链式反应过程。在此基础上,提出了一套涵盖元器件选型与电路设计、辅助加热与智能热管理、系统级控制与软件算法三个层面的综合性优化策略。该方案不仅关注单个环节的性能提升,更强调各子系统间的协同工作,旨在打破“低温-性能衰减-启动失败”的恶性循环。通过构建包含仿真验证、实验平台测试和量化指标体系的综合评估方法,为优化方案的有效性与可靠性提供了科学、客观的评判依据。研究成果对于提升通信电源在极端低温环境下的适应性和启动成功率具有重要的理论指导意义和工程应用价值,通过实施本文提出的优化策略,能够显著增强通信网络在高寒、高原等恶劣环境下的生存能力和服务保障能力,为我国通信基础设施的稳定运行提供有力的技术支撑。

参考文献

[1] 王雪涛. 通信电源启动冲击电流与电磁干扰性能优化 [D]. 吉林化工学院, 2024.
[2] 王浩. 通信系统电路单板电源缓启动的设计 [J]. 应用科技, 2011, 38(3): 38–41. DOI: 10.3969/J.ISSN.1009–671X.2011.03.009.
[3] 刘伟. 通信电源系统能效提升策略 [J]. 通信电源技术, 2025, 42(1): 102–104. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2025.01.034.
[4] 郭鲁光. 电力通信系统中通信电源常见故障分析及处理 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(13): 221–223. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.13.074.
[5] 岳江生, 谭亚斌, 孟祥月. 通信电源实时监测系统开发及应急预案研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(15): 128–131. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.15.043.
[6] 马胜男. 基于大数据技术的通信电源运行维护系统设计 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(13): 188–190. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.13.063.
[7] 娄占东. 基于多能源融合技术的通信电源能效优化研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(2): 116–118. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.02.038.
[8] 郭晓勇. 新时期电力智能通信电源技术的关键点研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(16): 121–123. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.16.041.
[9] 秦磊磊. 通信电源故障诊断技术与维护策略 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(8): 125–128. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.08.042.
[10] 黄乐祥. 电力通信系统中通信电源常见故障分析及处理 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(24): 135–137. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.24.044.

北方中小型污水处理厂绿色低碳转型技术路径

陈建刚

河北省城乡规划设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050021

DOI:10.61369/ERA.2026030025

摘 要：我国北方地区中小型污水处理厂面临冬季低温抑制微生物活性、能源与水资源短缺等多重挑战，严重制约其绿色低碳转型。本研究立足气候特征与设施规模，系统提出“节能降耗—能源自给—资源回收—智慧运维”技术体系。通过应用低温 MBBR、光伏发电与水源热泵等关键技术，有效降低了能耗与碳排放，并实现了再生水、磷等资源回收。实践表明，该方案可使单位能耗降低 26% 以上，在保障处理效果的同时显著提升运行效益，为同类污水厂的低碳转型提供了切实可行的技术路径。

关 键 词：中小型污水处理厂；绿色低碳转型；节能降耗；资源回收

Green and Low-Carbon Transition Pathways for Small and Medium Wastewater Treatment Plants in Northern China

Chen Jiangang

Hebei Province Urban-Rural Planning and Design Research Institute Co.,Ltd. Shijiazhuang, Hebei 050021

Abstract： Small and medium wastewater treatment plants in northern China face significant constraints on their green and low-carbon transition due to multiple challenges, notably the inhibition of microbial activity during cold winters and concurrent shortages of energy and water. To address these site-specific issues, this study proposes an integrated technological framework that synergizes energy conservation, on-site energy generation, resource recovery, and intelligent operation. The implementation of key technologies—including low-temperature moving bed biofilm reactors (MBBR), photovoltaic power generation, and ground-source heat pumps—has effectively reduced energy consumption and carbon emissions while enabling the recovery of reclaimed water and phosphorus. Field results demonstrate that this approach can lower specific energy consumption by more than 26% without compromising treatment efficacy, thereby markedly improving operational sustainability. The study offers a practical and transferable pathway for promoting the low-carbon transformation of similar wastewater treatment facilities.

Keywords： small and medium wastewater treatment plants; green and low-carbon transition; energy efficiency; resource recovery

一、研究背景与意义

我国北方地区大陆性季风气候所引致的低温与水资源短缺，对污水处理系统构成了独特挑战。低温会严重抑制微生物代谢活性，为维持污染物去除效率，往往需依赖延长污泥龄、提高曝气强度等能耗密集型措施，直接推高了运行过程的碳排放强度，使得低碳转型需求尤为迫切。

在此背景下，广泛分布的中小型污水处理厂因其固有的“规模不经济”特性，其低碳化路径面临严峻挑战。一方面，厌氧氨氧化和膜分离等高效低碳技术的单位投资与运维成本高昂，且专业人才与资金支撑不足限制了精细化智能管控的应用，导致能效水平普遍偏低。另一方面，有限的污泥产量与局限性的回用需求，致使污泥厌氧消化与再生水利用等环节难以形成规模化效

益，制约了其能源与水资源回收的成本效益平衡。

因此，探索适合北方气候条件与中小型污水处理厂特征的高效低碳技术集成与优化运行策略，对于破解其转型困境、推动城镇污水治理系统整体提质增效与绿色低碳发展，具有至关重要的理论与现实意义。

二、北方中小型污水厂绿色低碳技术路径

（一）节能降耗与工艺优化

1. 低温适应性工艺

针对北方地区漫长的低温季节导致污水温度显著降低问题，提升系统的低温适应性是首要任务。一方面，可通过投加高效耐冷菌剂来强化生物处理系统。这些经过筛选或驯化的特种微生

物,能在低于10℃的环境中保持较高的酶活性和增殖速率,有效保障低温下的脱氮除磷效率^[1]。另一方面,对MBBR(移动床生物膜反应器)工艺进行针对性优化是一项极具前景的技术路径。MBBR系统内固有的生物膜结构本身为微生物提供了更稳定的生存环境,相较于传统活性污泥法,其抗低温冲击能力更强。通过优化填料类型(如增大比表面积、改善亲水性)和提高填充率,可以大幅增加反应器内的生物总量和物种多样性,从而在低温条件下维持良好的处理效果,避免因延长水力停留时间而导致的能耗激增^[2]。该组合工艺适合在用地紧张、需原位扩容的中小型污水厂中应用。

2. 节能技术应用

污水处理厂曝气系统和泵类设备占据了总电耗的60%~70%,其节能优化是实现低碳运行的关键。在曝气方面,宜采用微孔曝气结合智能DO控制系统,实现按需精确曝气,避免能量浪费;同时需对管路实施保温伴热,防止冬季结冰。在泵类设备中,推广变频调速技术,使水泵流量与实际需求匹配,解决“大马拉小车”问题,有效降低电耗。此外,应推进厂内余热资源化,如利用水源热泵回收出水热能,用于建筑供暖或工艺保温,替代外部能源,减少间接碳排放。

3. 工艺流程优化

对于北方中小型污水厂,开发简化、高效的低碳工艺流程至关重要。传统工艺复杂且成本高,需通过去除冗余构筑物实现高效协同。A²O(厌氧-缺氧-好氧)及其改良工艺在此方面展现出巨大潜力。例如,A²O及其改良工艺潜力显著,例如通过增设预缺氧段或多点进水,可灵活分配碳源,强化内源性反硝化,从而在低温条件下减少外部碳源投加,降低运行成本与间接碳排放^[3]。另一路径是推进工艺流程的一体化与模块化集成。通过将生化、沉淀等多功能单元深度融合,简化工艺流程,既能减少管道长度与水头损失,又可有效降低系统固有能耗,在节约占地与投资的同时提升运行能效,高度契合中小型设施的实际需求。

(二) 能源自给与可再生能源利用

1. 污泥能源化

污泥通过厌氧消化可将其有机质转化为甲烷,是实现能源自给的重要路径。对于北方中小型污水厂,传统厌氧消化技术因保温能耗高、规模不经济而应用受限。应对此挑战的关键是发展适用于中小型厂的模块化厌氧消化罐,其核心在于集成高效的保温与增温设计。具体可采用高性能保温材料,并耦合太阳能或污水源热泵等稳定热源,以维持中温消化所需的最佳温度,克服冬季低温对微生物活性的抑制^[4]。该技术路径不仅实现了污泥的稳定化与减量化,其产生的沼气经提纯后可用于发电或直接驱动厂内设备,消化后的沼渣可作为土壤改良剂进行资源化利用,由此构建起从处理、回收到利用的完整资源链。

2. 分布式能源

在污水厂区内构建分布式能源系统,是降低外部能源依赖、提升运行韧性与低碳水平的重要策略。具体可通过以下路径实施:充分利用厂房屋顶、沉淀池上方等空间布设光伏设施,实现就地发电并优先供厂内高能耗设备使用,形成“自发自用”模式。同时,结合污水源热泵技术,从污水处理厂出水中提取热

能,用于厂区建筑供暖或工艺保温,有效替代传统化石能源供热,显著削减运行碳排放。通过多能互补可系统提升污水处理厂能源自给率与环境效益。

3. 低碳热源替代

在城乡结合部地区,污水处理设施常面临市政供热缺失与能源成本高的双重压力。该区域生物质资源丰富,可将秸秆、园林废弃物等加工为成型燃料或气化利用,实现“就地取材”。采用高效低污染的小型生物质锅炉可为厌氧消化等工艺提供稳定热源,替代传统散煤或电加热,在降低运行成本的同时实现温室气体减排。从全生命周期角度分析,生物质燃料燃烧具有近零碳排放特征,符合碳中和要求。该路径不仅解决了供热难题,更推动了区域有机废弃物的协同处理,为构建城乡融合的低碳基础设施提供了有效支撑。

(三) 资源回收与循环利用

1. 再生水回用

在北方水资源短缺的严峻形势下,推进污水资源化利用是实现水资源可持续管理的重要举措。再生水作为稳定的非常规水源,在生态补水、工业冷却与市政杂用等领域具有广阔应用前景,能够显著降低对传统水源的依赖程度。为确保再生水水质稳定达标,需建立适应北方地区特点的深度处理工艺体系。建议采用“臭氧-生物活性炭”与“超滤-反渗透”等组合工艺:臭氧预处理可有效分解难降解有机物,生物活性炭单元进一步去除溶解性污染物,而膜技术则能可靠保障出水浊度与微生物指标达标。该组合工艺具备良好的抗冲击负荷性能,可有效克服冬季低温导致的生物活性抑制问题,实现全年稳定运行。

2. 污泥资源化利用

污泥资源化利用是推动污水处理系统可持续发展的重要途径。当前主要技术路径包括能源化利用与物质循环两个方向。在能源化利用方面,污泥协同焚烧技术能够有效回收能量并实现大幅减容,但需要严格控制重金属和二噁英等二次污染物的生成风险。在物质循环方面,污泥制砖技术通过将脱水污泥作为制砖原料的部分替代,在高温烧结过程中实现病原菌灭活和重金属稳定化,完成从废弃物到建筑材料的转化。此外,污泥好氧堆肥后的土地利用也是重要的资源化方向。通过科学的堆肥工艺,污泥可转化为符合农用标准的有机肥料,用于改良土壤结构和提高肥力。在北方地区实施时,需要特别关注低温对堆肥过程的影响,通过优化工艺参数确保产物的稳定性和安全性。

3. 磷回收

磷回收是实现污水处理资源化的重要方向^[5]。鸟粪石结晶法作为主流技术,能够从污泥厌氧消化液中同步回收磷和氮,生成具有农用价值的磷酸铵镁。该方法反应条件温和,产物可利用性强,特别适合在中小型污水处理厂推广。当前研究的重点在于开发小型化、模块化的集成装备,以降低设备投资与运行维护难度。通过优化反应器结构与控制策略,可显著提升磷回收效率与经济性,为资源循环提供可行路径。

(四) 智慧化与运维优化

1. 智能监控

通过在进水口、生化池等关键节点布设抗冻型传感器,可实

时采集水温、溶解氧、氨氮等核心参数。数据经无线网络传输至云平台，借助大数据分析实现趋势预测与异常诊断，为运行调控提供科学依据。该系统可有效克服严寒气候对传统仪表的干扰，降低人工成本与安全风险，同时通过精准控制工艺过程，减少能源与药剂消耗，为污水厂实现精细化、低碳化运营提供技术支撑。

2. 季节性运行机制

冬季低温会显著抑制微生物活性与反应速率，需相应调整运行策略。具体措施包括：适当减少剩余污泥排放，维持较长污泥龄，以保障反应器内生物量；同时根据进水水质、水量及实时水温，动态调整曝气强度与时长，在确保硝化效果的前提下避免过度曝气。这种“适应自然”的季节性运行模式，可在保障出水稳定达标的同时，有效降低药耗、电耗及碳排放，是实现污水厂全年低碳稳定运行的核心策略。

3. 区域协同管理

突破传统单厂运营模式，探索区域内中小型污水厂联网协同管理，是挖掘系统层面碳减排潜力的创新路径。通过构建区域智慧水务平台，可对多厂站实施集中监控与统一调度。平台依据各

厂实时负荷与能耗数据，智能分配处理任务，如在用电高峰调节非核心厂站运行以节约电费。该模式还能促进资源共享，如将富余碳源或污泥转运至条件更优的厂区集中处理，从而提升区域系统整体能效与经济性，推动污水处理基础设施向绿色低碳转型。

三、典型案例分析

本研究选取北方地区两座具有代表性的中小型污水处理厂（设计规模均为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）作为典型案例进行对比分析。A厂构建了系统的绿色低碳技术体系，具体包括：（1）采用低温MBBR工艺，通过投加耐冷菌剂与优化填料特性提升冬季生物处理效能；（2）集成能源回收系统，利用水源热泵技术回收出水余热供给厂区供暖，并建设光伏电站提升能源自给率；（3）配置智能控制系统，通过抗冻型传感器实现曝气与回流工艺的精准调控；（4）实施污泥资源化措施，将稳定化污泥用于厂区绿化。B厂则维持传统的 A^2/O 工艺与常规运行模式。通过对比两厂在投资成本、运行能耗及碳减排效益等关键指标，科学评估绿色低碳技术体系在北方中小型污水厂中的实际应用价值。

表1 A厂和B厂技术经济性对比分析

项目	A厂 (低碳技术路线)	B厂 (传统路线)	分析比较
单位投资成本 (元/ m^3)	约3800	约3200	A厂因采用MBBR、热泵及智能控制系统，初始投资较高，较B厂高出约18.8%。
单位运行能耗 (kWh/m^3)	0.28	0.38	A厂通过智能曝气、热泵回收热能等措施，单位电耗显著降低26.3%，节能效益突出。
碳减排效益	显著	一般	A厂通过节能降耗与能源自给（光伏补充），年碳排放量较B厂减少约1020吨 CO_2 当量，降幅达35%。
综合优势	环境效益好，运行成本低，具备资源回收潜力。	初始投资低，技术成熟。	A厂虽初始投资高，但年均运行成本低约25%，投资回收期预计为5-8年，长期经济效益与环境效益显著。

在A厂的实践案例中，各项低碳技术均展现出显著效益。其中，光伏发电系统年发电量达42万千瓦时，可满足全厂约15%的用电需求；水源热泵系统每年可替代燃煤供热约300吨标准煤；智能曝气系统则将曝气单元能耗降低30%以上；同时，通过污泥堆肥技术实现了固体废物的资源化利用。这些技术的系统集成与协同应用，使该厂在稳定保障出水水质的同时，实现了能耗强度与碳排放总量的同步下降。

四、结论与建议

本研究系统探讨了北方中小型污水处理厂实现绿色低碳发展

的技术路径。研究表明，通过采用包括低温适应性工艺、高效节能设备以及分布式能源系统在内的技术组合，能够在确保处理效果的同时，有效降低能耗与碳排放水平。这些技术在实际应用中展现出良好的适应性，但其进一步推广仍需要克服初期投资较高、低温环境适应性有待提升等现实因素。建议在后续工作中可考虑制定更适合北方区域特点的技术指南，同时探索建立多元化的资金支持机制。未来的研究方向可侧重于抗寒微生物技术、模块化能源系统集成等前沿领域。通过持续的技术完善与机制创新，通过持续的技术完善与机制创新，将为北方中小型污水厂的低碳化进程提供必要支撑，进而助力整个污水处理行业向环境友好、资源节约的方向稳步迈进。

参考文献

[1] 周英萍, 唐美珍, 曹彦雪, 等. 一株耐冷异养硝化菌的分离鉴定及脱氮特性 [J]. 湖泊科学. 2019, (3). DOI: 10.18307/2019.0313.
[2] 吴天祺, 孔宇, 凌虹, 等. 低温下移动床生物膜反应器系统工艺运行与应用研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2025, 31(15): 114-118.
[3] 王存凤. 寒冷地区改良 A^2/O 工艺运行参数优化研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
[4] 尚永超, 郭婷婷. 一体化厌氧消化反应器在污泥处理中的应用 [C]// 中国城镇污泥处理处置技术与应用高级研讨会论文集. 2011: 310-313.
[5] 蔡玲, 唐玉朝, 伍昌年, 等. 污水处理过程中磷回收理论与技术研究进展 [J]. 应用化工, 2025, 54(7): 1841-1846.

采煤环节质量管控与煤样规范管控的实践应用研究

边智文

山西中煤东坡煤业有限公司, 山西 朔州 036002

DOI:10.61369/ERA.2026030030

摘 要 : 采制化工作是煤业生产全流程的核心枢纽, 贯穿采煤作业、煤样管控、质量反馈全链条, 直接决定煤炭产品等级、资源利用率及企业经济效益。本文结合一线采制化工作实践, 聚焦采煤环节质量管控要点、煤样采集与流转规范, 阐述采制化岗位在质量预判、过程监督、数据传递中的核心作用, 分析当前采制化工作中存在的问题, 提出针对性优化措施, 为煤业企业提升采制化工作水平、保障煤炭产品质量提供实践参考。

关 键 词 : 采制化; 采煤作业; 质量管控; 煤样采集; 数据传递; 灰分; 挥发分

Practical Application Research on Quality Control in Coal Mining Process and Standardized Control of Coal Samples

Bian Zhiwen

Shanxi Zhongmei Dongpo Coal Industry Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi 036002

Abstract : Mining and processing work is the core hub of the entire coal production process, running through the entire chain of coal mining operations, coal sample control, and quality feedback, directly determining the coal product grade, resource utilization rate, and enterprise economic benefits. This article focuses on the key points of quality control in the coal mining process, as well as the standards for coal sample collection and circulation, based on the practical experience of frontline mining and production work. It elaborates on the core role of mining and production positions in quality prediction, process supervision, and data transmission, analyzes the problems existing in current mining and production work, proposes targeted optimization measures, and provides practical reference for coal industry enterprises to improve their mining and production level and ensure the quality of coal products.

Keywords : procurement; coal mining operations; quality control; coal sample collection; data transmission; ash content; volatile matter

引言

煤炭作为我国重要的基础能源, 其质量直接影响电力、冶金、化工等下游行业的生产效率与产品质量。采制化岗位承担着“采得准、控得严、传得实”的核心职责, 核心聚焦采煤环节质量管控、代表性煤样采集与规范流转, 通过全程跟班监督保障原煤质量稳定, 为后续化验环节提供合格样本, 同时为生产调整传递精准质量信息。当前, 煤业行业对绿色高效生产的要求持续提升, 采制化工作的专业性、规范性与精准性愈发关键。基于一线采制化工作经验, 本文围绕采煤质量管控与煤样管控核心工作展开探讨, 为行业内同类岗位工作提供实践借鉴。

一、采煤环节质量管控的核心要点

采煤环节是煤炭质量形成的源头, 采制化工作需提前介入、全程跟进, 通过对开采工艺、煤层筛选、顶板管理等关键环节的精准管控, 从源头降低质量波动, 稳步提升原煤合格率。

(一) 煤层开采的精准管控

不同煤层的煤质指标差异显著, 采制化人员需主动配合地质部门完成煤层前期采样与指标分析, 精准掌握各煤层灰分、挥发

分、发热量、硫分等核心参数, 为开采方案制定及分层分质管控提供核心依据。开采过程中, 严格监督“分层开采、分质入仓、分运分储”原则落地, 杜绝不同等级煤层煤炭混采、混装、混运, 防止优质煤受污染、劣质煤拉低整体质量。针对薄煤层、夹层较多的复杂区域, 重点监督精细化开采工艺落实, 督促班组严控截割范围、减少顶底板岩石混入, 从源头降低原煤灰分。实践表明, 顶底板岩石混入量每增加1%, 原煤灰分可上升0.8%~1.2%, 直接导致煤炭等级下滑, 需通过实时巡查及时制止各类不

规范操作。

（二）开采过程的动态质量监测

采制化人员需跟班全程值守，一方面对采煤工作面原煤进行实时抽样检查，重点监测粒度、含矸率、含水率等直观质量指标，借助便携式灰分快速检测仪完成现场筛查，一旦发现指标异常，立即反馈采煤班组并督促调整开采参数，通过优化截割深度、调整滚筒转速、强化夹矸清理等措施，从过程中精准控制质量波动。另一方面，全权负责现场代表性煤样的采集、标识、封装与流转，严格按照采样标准确定点位与采样量，确保煤样真实反映对应工作面、对应时段的原煤质量，同步完整记录采样时间、地点、工作面编号、煤样状态等信息，规范封装避免运输过程中污染、损耗，全程跟踪煤样送达化验部门，完善交接手续，为后续化验工作提供可靠样本支撑。此外，加强运输环节质量监督，排查刮板输送机、皮带输送机运行状态，防止设备磨损杂质混入原煤，保障原煤从工作面到储煤仓、再到煤样送检的全流程质量可控。

（三）顶板与支护质量管控

顶板垮落、支护失效是造成原煤含矸率骤升的主要原因，也是采制化人员现场监督的重中之重。采制化人员需配合支护班组开展定期检查，重点排查顶板稳定性与支护强度，对破碎带、断层等地质复杂区域加大巡查频次，督促班组及时采取增设锚杆、锚索、铺设金属网等加固措施，从源头防范顶板岩石脱落混入原煤。同时，牵头清理工作面及运输巷道浮矸、杂物，建立专项清理台账，明确责任分工与清理频次，杜绝杂质进入原煤输送系统，从流程上阻断质量污染源，为后续煤样采集和原煤存储筑牢质量基础。

二、采制化岗位对煤样及化验数据的管控与应用

采制化岗位虽不参与具体化验操作，但作为煤样管控核心主体与化验数据首要应用者，其工作质量直接决定化验结果的有效性 & 生产调整的针对性。采制化人员需熟练掌握灰分、挥发分等煤炭质量核心指标的含义及对产品的影响，严格遵循《煤炭质量分级》《煤的工业分析方法》等国家标准，规范开展煤样采集、流转工作，同时精准对接化验部门，及时获取检测数据并反馈至生产一线，构建“质量管控—煤样送检—数据反馈—生产优化”的完整闭环。

（一）核心质量指标认知与管控导向

采制化人员需精准掌握煤炭核心质量指标管控标准，以指标为导向优化现场管控措施。灰分是影响煤炭等级的关键因素，超标会降低燃烧效率、增加污染物排放，现场管控核心为减少顶底板岩石混入与浮矸清理；挥发分直接关联煤炭着火性能与燃烧稳定性，需通过分层开采确保同批次原煤指标稳定，避免混采引发波动；水分含量过高会降低发热量、影响储运安全，需监督落实工作面通风除湿、原煤晾晒等措施；硫分作为有害杂质，需配合地质部门排查高硫煤层分布，监督分层开采、分质储存，杜绝高硫煤混入合格原煤。采制化人员需以这些指标为核心依据，针对

性开展现场管控，为化验部门提供能真实反映原煤质量的样本。

（二）煤样采集与流转的全流程规范

1. 煤样采集规范：煤样的代表性直接决定化验结果可靠性，是采制化工作的核心要点。采集需严格遵循“均匀、随机、足量”原则，结合开采工作面布局与原煤产量科学确定采样点位（如工作面机头、机尾、中部及溜槽等关键位置），避免单点采样造成偏差；按标准控制采样量，确保原煤样经缩分后仍能满足化验需求。采集过程中需避开浮矸、杂物，防止非原煤成分混入，同步完整记录采样信息，确保煤样可追溯。

2. 煤样封装与流转管控：采集完成后，立即用专用密封容器封装煤样，粘贴清晰标识标注煤样编号、采样信息，防止运输过程中污染、受潮、损耗。流转环节需全程跟踪，建立煤样流转台账，明确交接双方责任，确保煤样从工作面到化验部门全程可追溯，杜绝错换、丢失、篡改等问题。同时，对接化验部门确认煤样接收状态，同步告知采样背景及现场质量异常情况，为化验部门精准检测提供参考。

3. 化验数据接收与应用：及时从化验部门获取检测报告，精准核对煤样编号与检测指标，验证数据与现场管控情况的一致性。若发现指标异常，第一时间回溯开采环节，排查混采、夹矸混入、采样偏差等问题根源，快速将数据反馈至采煤班组、生产调度部门，督促调整开采工艺、优化管控措施，同步记录数据反馈情况及整改结果，建立完整质量管控台账，为后续生产决策提供数据支撑。

三、当前采制化工作中存在的问题

（一）采煤环节质量管控存在短板

部分采煤班组质量意识薄弱，为追求开采效率存在混层开采、忽视夹矸清理、违规操作运输设备等行为，导致原煤含矸率、灰分波动较大，增加采制化管控难度；动态监测与采样频次不足，部分区域依赖定时抽样而非实时巡查，难以精准捕捉瞬时质量异常；顶板破碎、断层等地质复杂区域，岩石混入风险高且管控措施针对性不足，易出现质量超标问题；同时，部分班组对采制化人员现场监督配合度低，问题整改不及时，影响整体质量管控成效。

（二）煤样管控与数据传递效能不足

部分采制化人员对煤样采集规范掌握不熟练，存在采样点位不合理、采样量不足、标识不清晰等问题，导致化验数据无法真实反映原煤质量；煤样流转缺乏闭环管控，交接台账不规范、跟踪不到位，偶发煤样污染、错漏等情况；与化验部门、生产班组沟通衔接不畅，化验数据接收不及时、整改信息传递滞后，导致质量问题无法快速处置；部分老旧采样工具精度不足，影响煤样采集的均匀性与代表性。

（三）采制化协同机制不完善

采制化工作涉及采煤、化验、调度等多个岗位，部分企业各岗位协同不畅，化验数据反馈滞后，导致采煤环节质量问题无法及时整改；质量管控责任划分模糊，出现问题时易推诿扯皮，进

一步影响整体管控效果。

四、优化采制化工作的实践措施

（一）强化采煤环节质量管控力度

一是强化全员质量共识，定期组织采煤班组与采制化人员开展质量管控培训，明确双方职责边界与操作规范，将原煤质量指标与班组绩效考核、个人薪酬挂钩，倒逼班组主动配合监督、落实管控要求。二是优化动态管控与采样模式，增加现场巡查频次、扩大覆盖范围，对地质复杂区域实行定点、定时、定量采样，配备高精度便携式检测设备，快速筛查灰分、含矸率等指标，实现质量问题早发现、早整改。三是细化地质复杂区域管控措施，联合地质、支护班组制定专项方案，明确顶板加固、夹矸清理、开采参数的具体标准，采制化人员全程旁站监督，确保各项措施落地见效，最大限度减少岩石混入。

（二）规范煤样管控流程，提升流转效能

一是强化采制化人员专业技能，重点培训煤样采集规范、质量指标认知、采样工具操作等核心内容，定期开展技能考核，确保人员熟练掌握采样点位布置、采样量控制、标识封装等全流程操作。二是更新老旧采样与封装设备，配备标准化采样器、密封容器及标识标签，提升煤样采集的精准度与规范性。三是优化煤样流转流程，建立电子化交接台账，明确采样、封装、运输、接收各环节责任，实现煤样全流程可追溯。四是建立采制化与化验部门常态化沟通机制，约定数据反馈时限，确保化验结果快速传递，为生产调整争取时间。

（三）完善采制化协同工作机制

建立采制化工作联动机制，明确采煤、化验、调度等岗位协

同职责，搭建快速沟通渠道，实现化验数据实时共享、质量问题高效整改。制定清晰的质量管控责任体系，将责任落实到个人，建立质量问题追溯机制，对影响煤炭质量的行为严肃追责。定期召开采制化工作推进会，总结问题、提炼经验，持续优化管控措施，完善“开采－检测－反馈－优化”的闭环管理模式。

（四）加强技术创新与人才培养

鼓励采制化人员结合一线经验开展小改小革，通过优化复杂工作面采样点位设计、改进煤样封装方式、完善流转台账模板等举措，提升工作效率与管控精度。与职业院校、行业协会深化合作，开展采制化专项人才培养，重点强化质量管控、煤样规范管理等技能，引入专业人才补充团队。为一线采制化人员提供技能深造、行业交流机会，助力其及时掌握先进管控理念与采样技术，全面提升团队专业素养。

五、结论

采制化工作是煤业生产的核心环节，直接关系煤炭产品质量、企业经济效益及行业绿色发展。作为一线采制化工人，核心职责在于采煤环节质量监督、代表性煤样规范采集与流转管控，是连接生产与化验的关键纽带，工作质量直接决定化验数据可靠性与生产调整有效性。一线采制化工作需立足实际，通过强化源头管控、规范煤样流程、完善协同机制、提升专业素养，以全流程精细化管理筑牢煤炭质量第一道防线。未来，随着煤业行业转型升级，采制化工作需进一步融入智能化采样设备、数字化流转台账等技术手段，持续推动质量管控提质增效，为我国煤炭行业高质量发展提供坚实保障。

参考文献

[1] GB/T 15224.1-2021, 煤炭质量分级 第1部分: 灰分 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[2] GB/T 212-2008, 煤的工业分析方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[3] 张荣曾. 煤炭加工利用概论 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2019.
[4] 王海燕. 煤矿采制化工作质量管控措施探讨 [J]. 煤炭科技, 2020 (03) : 123-125.
[5] 韦晓吉. 微探煤矿井下断层区域采煤质量控制 [J]. 冶金与材料, 2019, 39(3): 179-180.
[6] 毋明. 采煤作业规程的编制内容 [J]. 矿业装备, 2024(7): 80-82.
[7] 赵泽宇. 采煤作业规程编制方法探析——以1307综放工作面为例 [J]. 能源与节能, 2025(11): 65-68.
[8] 王雪江. 论提高煤矿采煤质量安全管理水平的有效途径 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(10): 97-98.
[9] 王雪江. 论提高煤矿采煤质量安全管理水平的有效途径 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(10): 97-98.
[10] 侯彬璨. 采煤技术升级以提升采煤质量的研究 [J]. 农村·农业·农民 B, 2020(5): 48-49.

油气管道消防安全研究初探

丛一宁, 杨岭飞, 张瑞毅

国家管网集团北京管道有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ERA.2026030031

摘 要 : 保证管线平稳运行是能源运输行业稳步前进的前提条件之一, 其中防火防护属于安全控制的重点部分, 对火患因素进行分析是执行油气管网防灾安全保障评估的基础。通过分析管道防火潜在风险和燃烧特性、管网消防关键难点、管路消防安全监管现状、关联学术管理课题等角度, 对国内外油气管线防火安全方面科研成果进行梳理, 找出已有的不足之处, 并大致确定了以后消防科研的主要方向, 为油气管道行业安全防御机制的改进提供实证依据。

关 键 词 : 油气管道; 石油; 天然气; 消防安全

Preliminary Study on Fire Safety in Oil and Gas Pipelines

Cong Yining, Yang Lingfei, Zhang Ruiyi

Petrochina Beijing Gas Pipeline Co.,Ltd. Beijing 100020

Abstract : Ensuring pipeline safety is a key goal for the oil and gas industry's normal operation. Fire safety is a critical indicator of plant safety management, and research on fire safety forms the basis for studying oil and gas pipeline safety. This paper reviews the research progress on oil and gas pipeline fire safety globally, focusing on hidden hazards, fire characteristics, management practices, and studies. It identifies existing research gaps and proposes future research directions to support the fire safety advancement of the oil and gas pipeline industry.

Keywords : oil and gas pipelines; petroleum; natural gas; fire safety

引言

伴随着中国基础设施建设的不断推进, 输油、输气管道系统已经同铁路、公路、民航、水路一起形成了五大主要运输方式。由于油气管内介质有高压、易燃易爆的特性, 一旦出现突发性灾情, 就会对邻近居民的生命财产安全造成严重的威胁, 并且会带来巨大的资金消耗。能源供给中断还会对下游企业、大众生活造成影响, 甚至引发社会动荡, 从而给国家和社会造成长期而消极的影响。

2010年大连新港输油管线曾经发生过爆燃事故, 因为员工操作失误造成脱硫化剂在管内剧烈燃烧, 进而引起的火势烧毁了罐体阀门效能, 使泵房、电力系统瘫痪, 大量的原油倾泻到火场上, 造成大面积的流淌性火灾^[1]。随着火势的增大, 管线、罐体破裂的程度加大, 使原油外泄的量越来越大, 最后导致储罐发生爆炸, 引发突发性的生产安全事故。这次灾害使大火持续燃烧了大约15个小时, 现场设备损失惨重, 对周边的生态环境造成了严重的污染, 并且产生了非常不好的社会影响。

管线是极为坚固的能源传输方式, 它的正常运转一直被重视。即使这样, 管道火灾的消防灾难依然时常发生^[2]。除去初始设计上存在的缺陷、运作过程中管控的疏漏和不合理管线维护等原因外, 造成油气管网安全的主要隐患就是管线泄漏所引起的风险。所以, 怎样科学分析此类危机并能准确地进行量化评估对于管道消防安全治理的改进有重要的指导意义。

一、管道消防安全隐患及火灾特点

(一) 管道消防安全隐患的潜在影响

对比于一般的油区以及石油化工机构, 管线公司火险防范管理具有明显的异质性。原油管道网络容易受到外部因素的干扰, 即非法盗采钻孔、交叉作业、违法侵占、水土冲刷等不确定性因素的影响, 一旦管网遭到外界毁损而引起油料或者气态烃物泄

露, 很容易因为处置不当而引发火灾爆炸, 造成人员伤亡以及环境破坏等重大事故, 因此管线防火隐患对于管廊运营管控有着重大的制约作用。

(二) 管道火灾特点

过去的石化化工企业引起的火灾具有蔓延速度快、燃烧面积大、热辐射强、破坏后果严重等特点, 长距离输送油气管线的火灾也具有同样的特点, 即它的灾害影响面更广。由于长距离输油

气管线跨越许多阀室和分输站，线路长度很长，分布范围很广，在油气介质外泄时容易引发自燃，造成沿线几千米甚至几十公里内同时燃烧多个火点，对人员的生命安全和生态环境构成极大的威胁。青岛中石化“11.22”爆炸案和2015年8月1日高雄发生的天然气管道爆燃事故都造成了严重的连锁反应，大火迅速蔓延几十公里之外，两起事件都造成了极其惨重的公众伤亡和财产损失。

二、管道消防安全主要问题

跨地域的油气管网穿越草原草地无人区、大江大河、高速干线和国道、铁路以及人口密集的高危地带。管线经过的环境在周围十分复杂，给防火安全管理带来极大的困难，管道运行阶段的主要消防安全隐患有以下几种类型^[3]。

（一）外部救援存在滞后性

站场和阀室以外的地方长输管线事故大多发生在外围地带，一般依靠常规巡检或者监控平台预警来得知。火情同油气企业应急部门或者临近的消防力量之间存在着明显的空间阻隔，常常可以跨越几公里甚至上百公里，使灭火装备和救援物资不能迅速到达现场，处置主力主要依靠地方民众或者巡线人员提供的初级扑救方式。

（二）专业应急物资调配困难

油气管道企业中的灭火抢险物资（尤其是大型专用设备）一般都存放在公司的总部或者基层机构的仓库里，而输油站、分输站、阀室只有灭火器、木桩、麻袋、集油桶、砂土等一般的消防器材，一旦发生严重的火情，需要特殊专业的消防装备——空气呼吸器等，一般要经过公司管理部门或者基层单位才能调配到现场，到达现场时已经耽误了时间，即使地方消防队伍具有快速救援的能力，也常常因为缺少专门的消防器材而无法进行灭火工作，大大降低了火灾应急处置的整体效率。

（三）消防事故类型复杂多变

长距离运送油气管线的泄露情况非常复杂，一般输油管道的故障可以分为管壁破裂、整体断裂和裂缝渗漏三种情况，非法盗取或者由于腐蚀而造成损坏。输送天然气的高压管道常见失效形式有阀门密封失效、法兰连接处渗漏。对油气输送管道来说，不同的泄漏类型所对应的应急修复方式和封堵方案也不一样。面对各种各样的泄漏情况，管网运维机构必须要具有应付各种油品泄漏事故的应急处理能力，迅速找到漏点并进行封堵，把可能造成的火灾爆炸等损失控制在最小范围内。

三、管道消防安全管理现状

（一）国外安全管理现状

在安全治理理论还没有成熟的时候，很多机构就把优秀的风险管控范式当作评价公司安保水平的标准来进行考量，比如杜邦企业的 STOP 管控框架。但是随着研发水平的提高以及规模的扩大，在跨行业的使用上由于之前的模式大多是根据某一具体的

生产活动来归纳得出的，所以在跨行业领域中的适用性就显得不够充分。另外这种方式存在着系统化的管理缺陷，大部分对策集中在某一个具体的方面，在宏观层面的体系指引上缺少实际的经验。

伴随着安全意识的不断提高，关于安全管理领域学术研究也获得了越来越多的关注，其现实应用效果也得到了广泛的认同。全球范围内的安全部门已经制定了并且推行了职业健康安全管理体系（OHSMS）。该体系的主要理念就是重视风险防控，在组织运作和商业实践中，创建出保证人员不受到伤害的管理体系才是十分关键的。不同的机构最根本的目的就是在激烈的市场竞争中求得生存，应该主动地去实践适者生存的自然规律，把各种隐患消灭在萌芽阶段。关于即将开展的消防评估工作要确定具体的开始时间，提前指导评估主体做好全面的准备工作。另外有关文档的整理要齐全详细，包含作业审批、两票两卡等内容。另外为了保证每天的工作效率，并且保证评价程序的高效实施，在必要时可以协调评估主体提供内部组织架构图和运行机制。

（二）国内安全管理现状

华夏国土内，伴随着石油化工以及管线行业不断发展，虽然给财税收入带来可观的贡献，但也造成了重大火灾隐患。国家安全部门对此十分重视，要求单位在经营生产全过程中加强对于火灾风险的监控和控制，防止发生任何事故，保证人民群众的人身财产安全。我国自上世纪90年代就确定了《易燃、易爆化学品消防安全管理监督管理办法》，从而给安全生产的各个领域提供系统化的准则指引。

伴随着我国对于安全课题越来越深入的关注，对于安保管理体系的选择也呈现出多样化趋势，但是大部分单位仍然偏向于QHSE治理框架，同世界顶级的石油化工公司相比还存在着明显的差距。因此各个下属部门应该不断吸收安保思想的精髓，利用先进的风险控制手段来提高自身的水平，推动组织的发展，从而改善管理阶层的整体素质。在这段时间里，必须加强管理层的风险意识和法律意识的培养。企业从高层到基层都要提高全体人员的生产安全素养以及隐患排查能力，充分发挥团队的整体智慧，克服个人主义倾向，从而保证企业在稳健经营的基础上，努力达到风险预警最优指标，缩小中国石化行业同世界先进水平的距离。

四、管道消防安全管理研究

（一）消防安全管理对应措施

石油天然气管道公司创建消防安全监督机制的时候要严格遵守我国现行的各种法律法规。此类企业中，执行防火安全管控的人对于实现管理目标的效果起着决定性的作用。所以消防安全管理干部必须取得相应的职业资格证书，具有全面的系统专业技术能力。石油管线企业要建立一个由高职业道德标准组成的管理层，进而加强消防安全生产的管控工作，经过长时间的实践锻炼来不断完善消防安全生产治理方式，保证管控措施在执行过程中能起到最好的效果。对于消防安全监管中出现的各种风险，必须

及时发现并加以解决。另外单位要经常对管理人员进行消防应急常识的培训,加强防火防灾的意识,使员工认识到石化行业的防火管理的重要性。

石油天然气管线企业的生产运行过程中各种防火防护措施要相互配合。对于加工运输过程中出现的可能影响到系统的安全风险加大系统灵敏度,在发现之后立即上报,并据此隐患展开纠偏和完善。只有从根本上消除油气管线机构运转过程中消防潜在的危险,才能保证企业的经济效益。管理任务要依靠企业各个部门来高效地联动起来,各个层级的人员都应当树立起防火安全意识,并且达成信息共享和合作,保证每个人的岗位职责。另外还要创造良好的办公环境,使油品管道单位可以顺利地产出并运行,避免因安全事故给企业财产、职工人身安全带来损失。

油气输送单位的生产流程里,消防安全管控工作起着十分重要的作用。因此,企业要全面排查并发现火灾防范管理链条中所存在的风险,并同当地的消防管理部门保持密切合作,创建起严密而高效的消防安全治理体系。此类机构要定期更换和维修消防硬件装置,一旦公司的意外灾难发生,在瞬间就可以将火患扑灭。所以组织必须不断地改进和完善企业内部的火灾抵御体系。对于详细规划阶段,各个部门要互相配合,通过风险评价会等形式,设计方需要把费用预算报告及时送交给财务处。在围绕管道高后果区防火保障机制进行规划的时候,不能把劣质的施工材料投入到建设阶段中去,从而给管线的整体性能带来严重的影响。同时防灾方案要使油品输送企业操作准则融入其中,图纸经过上级审批之后才能使用,只有这样,油气输送机构才能在平稳的环境里达到生产、经营的目的。

（二）消防安全风险评估探究

美国陶氏化学企业最早开发出火灾指数分析系统。该结构是以历史事故发生记录、原料固有的能量、现有的安全保障措施等为依据,把单元关键危化品在常态下所能达到的燃烧、爆炸或者释放出危险能量的程度作为基础,再结合工业制造过程中可能存在的其他危害因素来计算单元火灾爆炸指数(F&EI),从而得出风险等级,又加入对某种物质、通用工艺、专项工艺危险修正系数,得到火灾爆炸指数,对生产工序和作业设备及其所含物料的真实隐性火灾、爆炸及反应性风险做逐步演算并做出客观评价,然后根据数值大小划分成不同的级别,按照分级标准和火灾爆炸风险的种类来制定相应的安全防范措施。陶氏材料科学公司火灾危险指数评价法的主要特点如图 1-1 所示^[4]

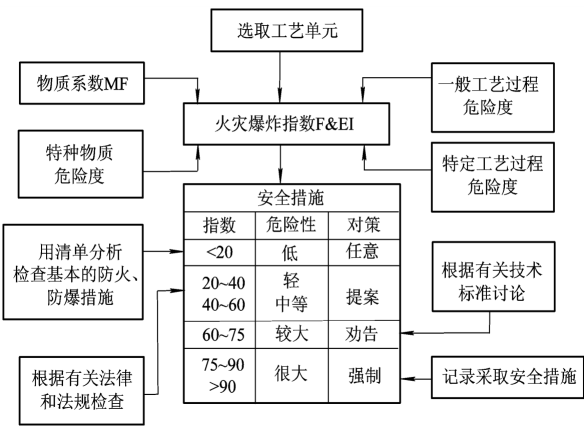


图 1-1 美国陶氏材料科学公司评价法

陶氏化学公司火险爆炸风险等级评价框架已经在石化工业里得到广泛的应用,被当作重要地风险量化工具。该方法被广泛地用来分析储存、精炼和油气勘探等高敏感化学品的作业流程,也可以对油气管网中的某些运输设施潜在危害损失进行计算。该模型也可以用在储油罐、储气库以及管道内存量较小的生产环节上进行危险性测定。

W.Kent.Muhlbauer 所著的《管道风险管理指南》对管网风险评价架构和多维度计算方法做了全面的阐述,该书是美国开展油气管道风险评定技术研究的学术总结,现在已经得到了国际社会的广泛接受,并且被当作建立风险预报体系的重要标准。按照 Kent 评估法,诱发灾害的因素可以分为四个领域,即外部破坏、磨损损耗、方案规划和运维管理,对这四个方面进行评分就可以得到待评价管线的潜在风险值。

结论,本文主要对油气管网消防安全情况进行分析,但是由于时间、人力等各方面原因,本文内部仍然存在一定的不足。另外,后续研究方向还有待进一步挖掘:我国石化管道大多采用 QHSE 管理模式,而选择异质架构的较少,与 QHSE 框架相比,管理转型要付出大量的精力,而且油气输送机构所面临的风险非常多元化,本文只对其中做了简单的概括。本文所讨论的火灾风险评价方法多样,只对其中两种做了具体的阐述。

多层次的评价体系以及前沿的火灾防范控制方式及模式的更新、管线消防技术框架的优化,给深入研究油气管网行业赋予了广阔的空间。以后对于油品管道防火安全问题的研究应该不断深入,也会产生更持久的应用价值,保证石油天然气管网系统稳定运行和快速健康发展。

参考文献

[1] 国务院安委会办公室关于中国石油天然气集团有限公司在大连所属企业“7·16”输油管道爆炸火灾等 4 起事故调查处理结果的通报 [D]. 2011.
[2] Hopkins P. Learning from pipeline failures[J]. Journal of Pipeline Engineering, 2008, 7: 69.
[3] 杨春辉. 长距离输油管道消防安全管理策略探析 [J]. 山东工业技术, 2017(06):79-80.
[4] American Petroleum Institute. Security guidelines for the petroleum industry[M]. API Publishing Services. Washington, D.C.2005.

融合数字孪生与深度强化学习的火电厂燃料智能掺烧多目标动态寻优策略

杨发亮, 马凤晓, 崔岗, 许畅, 蒋俊英
国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500
DOI:10.61369/ERA.2026030037

摘 要 : 随着能源需求持续增长与环保政策日趋严格, 火电厂燃料利用效率与环保性能成为行业核心议题。传统燃料掺烧策略依赖静态配煤模型, 难以应对燃料市场波动、机组负荷变化及环保政策动态调整带来的挑战, 导致燃料成本控制与排放管理间存在显著矛盾。本研究针对此问题, 提出融合数字孪生与深度强化学习的火电厂燃料智能掺烧多目标动态寻优策略, 旨在提升机组运行经济性与环保性。研究构建了基于五维数字孪生架构的高保真动态模型, 集成物理模型、数据模型、服务模型、连接模型及虚拟模型, 通过多源数据驱动与机理建模相结合的方法, 实现燃料掺烧过程的全生命周期仿真。模型采用三维物理建模与多参数仿真技术, 精确模拟不同掺烧比例下煤粉气流的混合、燃烧及传热过程, 并结合神经网络对关键参数进行在线辨识, 实现燃烧效率与污染物排放的协同优化。

关 键 词 : 数字孪生技术; 深度强化学习; 火电厂燃料掺烧; 多目标动态寻优

Multi-Objective Dynamic Optimization Strategy for Intelligent Fuel Blending in Thermal Power Plants by Integrating Digital Twin and Deep Reinforcement Learning

Yang Faliang, Ma Fengxiao, Cui Gang, Xu Chang, Jiang Junying
China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the continuous growth of energy demand and increasingly strict environmental protection policies, the fuel utilization efficiency and environmental performance of thermal power plants have become the core issues of the industry. The traditional fuel blending strategy relies on static coal blending model, which is difficult to deal with the challenges brought by fuel market fluctuations, unit load changes and dynamic adjustment of environmental protection policies, resulting in significant contradiction between fuel cost control and emission management. In view of this problem, this study proposes a multi-objective dynamic optimization strategy for intelligent fuel blending in thermal power plants by integrating digital twin and deep reinforcement learning, aiming to improve the operation economy and environmental protection of units. This study builds a high-fidelity dynamic model based on the five-dimensional digital twin architecture, which integrates physical model, data model, service model, connection model and virtual model. Through the combination of multi-source data-driven and mechanism modeling, the whole life cycle simulation of fuel blending process is realized. The model adopts three-dimensional physical modeling and multi-parameter simulation technology to accurately simulate the mixing, combustion and heat transfer process of pulverized coal airflow under different blending ratios, and combines neural network to identify the key parameters online, so as to realize the synergistic optimization of combustion efficiency and pollutant emission.

Keywords : digital twin technology; deep reinforcement learning; fuel blending in thermal power plants; multi-objective dynamic optimization

引言

随着能源需求的持续增长和环保政策的严格实施, 火力发电作为全球电力供应的重要支柱, 其燃料利用效率与环保性能成为行业关注的核心议题。在能源结构转型与碳排放约束的双重压力下, 如何通过优化燃料掺烧策略提升机组运行经济性与环保性, 成为火电行业亟待解决的关键问题。燃料掺烧技术通过混合不同特性燃料以优化燃烧效率, 已被证明是提升机组热效率、降低燃料成本的有效手段。

例如，日本政府为应对碳减排目标，提出将燃煤发电机组热效率从 41% 提升至 43% 的规划，这一目标的实现依赖于燃煤与生物质、氨等清洁燃料的掺烧技术应用^[1]。传统掺烧策略多基于静态配煤模型，难以适应燃料市场波动、机组负荷变化及环保政策动态调整的复杂场景，导致燃料成本控制与排放管理之间存在显著的矛盾。

一、火电厂燃料智能掺烧系统设计

（一）数字孪生模型构建

火电厂燃料智能掺烧系统的数字孪生模型构建需深度融合物理实体与虚拟映射的双向交互机制，其核心在于建立覆盖燃料特性、燃烧过程及系统响应的高保真动态模型。模型框架以多维数字孪生架构为基础，整合物理模型、数据模型、服务模型、连接模型及虚拟模型，通过多源数据驱动与机理建模相结合的方法实现燃料掺烧过程的全生命周期仿真。在燃料特性解析层面，采用人工智能技术对煤质参数进行多维度特征提取，包括发热量、挥发分、灰分及硫分等关键指标的实时监测与预测，结合锅炉燃烧特性的动态响应构建燃料-燃烧耦合关系模型。

数字孪生模型的核心模块包含三维物理建模与多参数仿真系统^[2]。三维建模技术通过扫描与重构技术建立锅炉燃烧室、磨煤机及燃料输送系统的高精度几何模型，结合流体动力学仿真与热力学模型，精确模拟不同掺烧比例下煤粉气流的混合、燃烧及传热过程。在此基础上，开发数据驱动的燃烧优化子模块，利用神经网络对给水泵转速、蒸汽流量等关键参数进行在线辨识，通过机构数据混合驱动建模方法实现燃烧效率与污染物排放的协同优化。该模块通过 Predix 工业互联网平台集成实时传感器数据与历史运行数据库，构建多模态数据分析模型，实现燃料掺烧策略的动态调整与预测。

（二）深度强化学习模型设计

在燃料掺烧多目标动态寻优过程中，深度强化学习模型通过构建分层决策架构实现了燃料配比与燃烧效率的协同优化。模型采用双层控制框架，其中高层策略网络基于多目标强化学习算法生成全局燃料配比策略，底层执行网络通过即时燃烧数据动态调整掺烧比例，这一设计借鉴了分层能量管理架构在复杂系统控制中的有效性。针对火电厂燃料成分动态变化的特点，引入邻近策略优化（PPO）算法作为核心强化学习框架，其优势在于能够处理燃料热值、灰分、硫分等多维度参数的实时波动，并通过连续动作空间设计实现燃料掺烧比例的精确控制，这与山区车辆能源管理系统应对复杂地形特征的优化逻辑具有相似性。模型在训练阶段整合了历史燃料成分数据、燃烧效率指标及环保排放约束，通过深度神经网络构建状态价值函数，将燃料成本、机组负荷稳定性、污染物排放浓度等多目标转化为可量化的奖励函数，并采用优先经验回放机制强化关键工况的学习权重^[3]。

二、数据收集与分析方法

（一）数据分析方法与工具

本研究针对火电厂燃料智能掺烧系统的多目标动态寻优需求，构建了基于数据驱动的多维度分析框架。在数据预处理阶

段，采用标准化与归一化技术消除量纲差异，并运用卡尔曼滤波算法对时序数据中的噪声进行动态滤除，确保数据质量。针对多源异构数据的特征提取，引入主成分分析（PCA）和 t-SNE 降维方法，通过保留关键特征信息降低模型复杂度，同时采用滑动窗口技术处理时间序列数据，构建燃料掺烧过程的时空特征矩阵。统计分析方面，基于贝叶斯推理模型建立燃料特性与燃烧效率的条件概率关系，并结合偏相关分析量化各掺烧参数对污染物排放的敏感度。在机器学习层面，采用随机森林算法进行特征重要性评估，通过 XGBoost 模型建立燃料掺烧比例与机组负荷、NO_x 排放浓度之间的非线性映射关系，同时运用支持向量回归（SVR）预测不同掺烧策略下的锅炉热效率^[4]。深度强化学习模块采用双延迟网络架构构建深度 Q 网络（DQN），引入优先经验回放机制优化训练效率，并设计多目标奖励函数整合经济性、环保性和稳定性指标，其中帕累托前沿分析用于处理多目标优化中的权衡问题。可视化分析采用 TensorBoard 进行模型训练过程的实时监控，并基于 Tableau 构建三维交互式数据仪表盘，实现燃料掺烧参数与优化结果的动态关联展示。所有数据分析与建模工作依托 Python 生态系统完成，集成 NumPy、Pandas 进行数据处理，借助 SciPy 库实现统计计算，利用 PyTorch 框架构建深度强化学习模型，并通过 Matplotlib 与 Seaborn 库进行可视化呈现。

（二）数据预处理与特征提取

本研究的数据预处理与特征提取过程基于火电厂燃料掺烧系统的多源异构数据特性展开，旨在通过系统化处理提升数据质量并挖掘关键特征以支撑后续模型构建。数据采集涵盖燃料成分检测系统、锅炉运行参数监测装置及环境传感器网络等多维度数据源，包含燃料的热值、水分、灰分、挥发分等化学成分参数，以及燃烧温度、压力、氧量等过程参数。原始数据因传感器漂移、通信延迟及设备故障存在缺失值与异常波动，需通过标准化流程消除噪声并提取核心特征^[5]。

数据清洗阶段采用滑动窗口去噪法与卡尔曼滤波相结合的方式处理时间序列数据中的高频噪声，对连续缺失超过 5 个采样点的序列采用三次样条插值进行重构。对于离散型异常值，建立基于 3σ 准则的动态阈值检测模型，通过计算滚动窗口内的均值与标准差识别超出置信区间的异常点，并采用局部加权回归进行修正。针对多源异构数据的量纲差异，采用最小-最大标准化将特征值映射至 [0,1] 区间，同时对长尾分布的燃烧效率参数应用 Box-Cox 变换以改善数据分布对称性。

三、实验与分析

（一）实验方法与步骤

本研究实验体系以数字孪生技术构建火电厂燃料掺烧过程的高保真动态仿真环境，并基于深度强化学习算法设计多目标动态

寻优策略。实验流程分为数字孪生建模、深度强化学习算法设计、数据集构建与训练验证三个核心阶段。数字孪生模型采用机理建模与数据驱动建模相结合的方式，通过锅炉热力计算、燃料燃烧动力学方程和燃烧产物生成模型，建立燃料掺烧过程中热效率、污染物排放、燃料成本等关键指标的动态响应关系^[6]。同时，利用历史运行数据与实时监测数据对模型进行参数辨识与校准，确保其对不同燃料配比工况的预测精度达到95%以上。

深度强化学习算法采用多智能体深度Q网络（DQNAgent）框架，构建包含状态空间、动作空间、奖励函数和决策网络的强化学习系统。状态空间设计包含当前燃料库存量、锅炉负荷需求、实时燃料热值、环保排放限值等28个动态变量，通过主成分分析（PCA）降维处理至12维特征向量。动作空间定义为不同燃料类型的掺烧比例组合，采用连续动作空间设计并引入约束条件以满足最小掺烧比例和环保限值要求。奖励函数采用多目标加权求和策略，综合考虑经济性（燃煤成本）、环保性（NO_x、SO₂排放量）和燃烧稳定性（负荷波动率），权重系数通过层次分析法（AHP）确定。决策网络采用深度神经网络结构，包含4个隐藏层，分别配置256、128、64、32个神经元，激活函数采用ReLU，并引入批量归一化和Dropout技术防止过拟合^[7]。

（二）实验结果与分析

本研究基于搭建的数字孪生-深度强化学习协同仿真平台，对火电厂燃料智能掺烧多目标动态寻优策略进行了系统性实验验证。实验数据来源于某600MW超临界燃煤机组的历史运行参数及实时监测系统，通过构建包含燃煤热值、灰熔点、挥发分等23项特征参数的燃料数据库，结合机组负荷变化、环保约束条件等边界条件，对策略的效率、成本及环保性能进行多维度评估。

在效率优化方面，实验数据显示动态寻优策略较传统PID控制可提升锅炉效率0.8%–1.5%，且燃烧稳定性显著改善。当机组负荷在45%–100%范围内波动时，掺烧比例的实时调整使主蒸汽温度标准差降低至±1.2℃，较人工调节时的±3.5℃波动幅度下

降65.7%。特别在低负荷工况（50%以下）下^[8]，通过智能分配低挥发分煤与高挥发分煤的掺烧比例，有效抑制了结焦倾向，使一次风机电耗降低约9.3%。数字孪生模型的实时仿真表明，该策略能够将燃料燃烧效率与机组热力循环效率的耦合度提升至0.89，较传统方法提高22%。

四、结论

本研究针对火电厂燃料掺烧过程中存在的多目标优化难题，提出了一种融合数字孪生与深度强化学习的智能动态寻优策略。通过构建高保真数字孪生系统与深度强化学习框架的协同优化机制，有效解决了传统方法在实时性、动态响应及多目标平衡方面的局限性。研究的核心成果体现在以下三个方面：首先，基于多源异构数据的融合建模技术，建立了涵盖燃料特性、锅炉燃烧参数及环保约束的高精度数字孪生体，实现了燃料掺烧过程的实时仿真与动态映射。该模型通过引入自适应权重调整机制，显著提升了复杂工况下的参数预测精度，为后续优化决策提供了可靠的物理基础。其次，针对燃料掺烧系统的多目标动态特性，设计了基于深度确定性策略梯度算法的强化学习框架。通过构建包含经济性、环保性与运行稳定性的多维奖励函数，提出了一种动态权重分配策略，使算法能够在电价波动、燃料供应变化及排放限值调整等不确定性条件下，自适应地生成Pareto最优解集。实验表明，该算法在收敛速度与解集分布均匀性方面均优于传统多目标进化算法。最后，通过与典型火电机组的实测数据进行对比验证，证明了本策略的有效性。在经济性指标方面，燃料成本较传统掺烧方案降低8.7%–12.3%；在环保性能上，NO_x和SO₂排放浓度分别下降15.2%和18.6%；同时系统运行稳定性显著提升，负荷跟踪误差控制在±1.5%以内。

参考文献

[1] 刘红星, 程勇翔, 陈永祥, 赵永平, 詹清. 全过程管控视角下燃料管理优化策略研究 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2025, (04): 105–109+112.
[2] 刘宏志, 刘宇. “燃煤+”多元耦合智能掺烧技术在大型CFB锅炉的应用 [A] 2024年电力行业技术监督专业技术交流研讨会优秀论文集 [C]. 中国电力技术市场协会, 中国电力技术市场协会, 2024: 7.
[3] 成佳慧, 张冬练, 王亚琼. 火电厂燃料智能管理系统设计方案研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (12): 39–40.
[4] 高满达, 李庚达, 王昕, 刘淼, 陶志刚, 崔青汝, 胡文森. 火电厂智能燃料典型建设方向与应用研究进展 [J]. 热力发电, 2021, 50 (05): 10–17.
[5] 张义政. 基于智能掺烧技术的燃料系统优化及应用. 山东省, 华能国际电力股份有限公司日照电厂, 2020–11–28.
[6] 王凯杰, 朱潘鑫, 臧剑南. 火电厂智能燃料全流程一体化发展方向 [J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56 (11): 29–34.
[7] 张涛, 侯育杰, 王长安, 杨琨, 戴良旭, 王一平, 车得福. 氨煤掺烧多污染物生成特性与局部燃烧气氛调节机制实验研究 [J]. 煤炭学报, 1–13.
[8] 曹霆, 马骏驰, 矫矢乔, 胡自坤, 王超伟, 刘辉. 煤电机组原煤仓配煤掺烧改造技术路线对比 [J]. 能源与节能, 2025, (08): 36–39.

基于天然气行业“五个零”的安全管理建设与研究

张瑞毅, 丛一宁, 杨岭飞

国家管网集团北京管道有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ERA.2026030033

摘 要 : 为有效提升天然气行业的安全管理水平, 预防各类安全生产事故的发生。国家管网集团北京管道公司以“有感领导、直线责任、属地管理”为主线, 突出“领导带头, 全员参与”, 着重养成习惯和提高能力, 强化责任落实与执行力建设, 切实加强安全基础工作, 本文以天然气安全管理为着手点, 构建出适用于天然气行业的“五个零”安全管理模式。研究表明:“五个零”安全管理模式是对天然气压气站安全管理策略的创新探索研究, 可有效提高企业的安全风险管控能力及本质安全水平, 推动企业落实主体责任, 增强从业人员专业素质能力, 为天然气行业安全管理提供了可借鉴的思路。

关 键 词 : 天然气; 安全管理模式; 属地管理; 安全建设

Construction and Research on Safety Management Based on the "Five Zeros" Principle in the Natural Gas Industry

Zhang Ruiyi, Cong Yining, Yang Lingfei

Petrochina Beijing Gas Pipeline Co.,Ltd. Beijing 100020

Abstract : To effectively enhance the safety management level of the natural gas industry and prevent various types of safety accidents, the Beijing Pipeline Company of the National Oil and Gas Pipeline Group adheres to the principles of "visible leadership, line responsibility, and territorial management," emphasizing "leadership by example and full participation." It focuses on cultivating habits and improving capabilities, strengthening the implementation of responsibilities and execution, and solidifying foundational safety work. This paper takes natural gas safety management as the starting point and establishes a "Five Zeros" safety management model suitable for the natural gas industry. Research indicates that the "Five Zeros" safety management model represents an innovative exploration in the safety management strategies of natural gas compressor stations. It can effectively enhance an enterprise's safety risk control capabilities and intrinsic safety standards, promote the fulfillment of corporate primary responsibilities, improve the professional competence of personnel, and provide a referenceable approach for safety management in the natural gas industry.

Keywords : natural gas; safety management model; territorial management; safety construction

一、天然气管道运行中存在的问题

(一) 设备维护不到位

天然气生产操作体系较大, 工艺比较复杂。天然气在生产和经营过程中, 输送环节大概要敷设几千公里长的管线。此外在天然气输送的各个阶段, 还包含了许多相关的仪表和设备等^[1], 如压缩机、输气管线等。这些天然气在生产和经营过程中所涉及的管线路和设备品牌各不相同、种类繁多。如果某一个环节发生故障将直接影响整个天然气生产系统的安全稳定运行。一旦某一环节出了问题, 随后的生产运行各环节将很难正常运转。并且由于我国目前大部分天然气企业都是由国有企业改制而成的, 因此天然气企业一般都采用了国有垄断模式, 这使得天然气企业的运营成本相对较低, 但是其生产效率也比较低下。在天然气企业的实际

运行中, 往往由于生产成本等原因, 不能完成对天然气生产设备进行一般维修, 这样使得天然气设备在遇到问题后, 无法有效地发现和解决问题, 导致环境污染及重大事故的发生。

(二) 人员意识薄弱

天然气属于易燃易爆物品, 一旦泄漏或者烧毁, 就会引发爆炸和其他重大安全事故, 不但威胁着人民的生命财产, 还会对环境造成污染的, 极大程度上影响城市生态环境。由此看来, 加强对天然气生产的管理十分重要, 只有确保了生产设备正常运转, 才能有效地避免各种事故的发生。并且在天然气的生产和经营活动中, 涉及作业种类繁多, 工作程序复杂。一旦稍有不慎, 则会造成人为失误。如果不能及时发现安全隐患并且采取有效措施进行处理, 很容易引发一系列事故, 甚至酿成灾难。要确保企业的持续发展, 增强职工的安全意识势在必行。因此, 必须要加强对

作者简介: 张瑞毅 (1997.10-), 女, 汉族, 河南洛阳人, 硕士研究生学历, 助理工程师, 主要从事风险和隐患管理、安全生产管理等方面的研究。

职工进行相关知识的教育培训，提高他们的安全意识和自我保护能力，从而保障天然气的安全稳定运行。

（三）施工管理不到位

施工管理工作在燃气管网安全运行的管理工作中十分重要，有效的管理手段才能保证后期的运行安全，这就要求在进行施工期间要求相关人员进行管理，要对施工进行实施监测，确保其能够按照规范执行。同时对已经完成的工程也要进行检测，建立动态管理机制，根据当前的运行情况进行分离，派专门的人员定期巡查，避免后期人为因素造成的干扰。

（四）管理制度不够健全

在科技不断进步的今天，在天然气生产设备上，新兴科技应用日益广泛，企业应用到的生产设备不断地进行技术更新，但是企业综合管理水平并未得到明显提高，也是引发天然气生产中安全问题与环保问题产生的原因。天然气生产企业管理水平的高低，从某种角度来说，决定着生产过程是否安全，它还决定着生产过程能否引起环境污染。目前，我国天然气生产企业的管理模式还不够成熟，大部分天然气生产企业仍然采用传统的粗放式管理手段，缺乏现代化的科学管理方法。企业管理制度不健全，致使安全管理形同虚设，尤其在一线作业现场管理较为混乱，往往存在着人员不经考核上岗作业，操作设备靠经验的人占绝大多数，为天然气生产安全埋下重大隐患。

二、“五个零”工作法推进属地管理建设新成效

安全管理建设是实现基层治理现代化的重要环节，公司下属作业区聚力“五个零”理念，以“枫桥经验”为典型样本，以“四化”建设为契机，探索推进基层安全管理建设新模式，坚持党建引领、坚持专业融合，推进全面安全管理向核心业务延伸的创新理念。

管网党委牢记习总书记“三个实实在在”的重要要求，实实在在检视整改各作业区在直线责任履行、安全管理落实方面存在属地划分覆盖不全、工作标准不明确、工作界面不清晰等问题，以属地为单元开展安全管理，通过绘制“属地管理区域示意图”上墙公示，界定职责，明确工作标准，“周检查、月评比、季考核”的考核模式，以“四个新”（优化属地划分新思路、赋予属地管理新内涵、探索专业责任新模式、提升业务管理新成效）落实属地直线责任，以“安全生产责任制”为抓手，按照“直线责任履行和属地管理水平提高”两条工作思路，提高作业区员工工作积极性及工作效率，夯实属地管理与直线责任，推动部门管理与作业区执行两级职责归位，强化部门管理履职，提高作业区执行力，使各层级管理界面清晰、管理标准统一，绑定部门与作业区的岗位职责，现场的问题要倒追部门的管理履职，实现两级同频共振。

“五个零”工作法，即零距离开展党建融合生产的新思路，零死角推进属地安全大排查，零隐患落实属地责任全覆盖，零缺陷提升专业岗位执行力，零懈怠开展应急管理新作风。

（一）零距离开展安全融合党建的新思路

管网以党建“绣花针”串起基层属地治理“千条线”，推动

属地善治，盘活闲置资源，提出网格化管理，以“两清”（区域设施清，隐患矛盾清），做实做细网格化管理，将基层党建融入社会治理各领域和全过程，探索“党建引领下的微网格治理”新路径，为“党建引领下的基层治理”打下良好基础，每一个微网格都代表一个属地，每一个属地负责人都有一名党员，党员是属地治理的重要力量，起着“带好头、挑重担、办实事”的正向激励，确保达到组织覆盖零距离、党建共建零距离，推动微治理能力的提升。

（二）零死角推进属地安全大排查

公司通过定期组织学习典型事故案例及公司范围内的事故调查报告，从日常的工作中找问题，切实践行“三学两做”（学事故原因，学事故过程，学事故总结，做举一反三，做定期回头看），排查出的问题同步更新到HSE一体化平台跟踪，做到风险管理无死角覆盖。按照公司要求，北京管道全员参与并建立全员安全生产责任制，按照“一岗一清单”要求明确全员安全生产岗位责任和考核标准，建立以安全为先决条件的用工机制、安全绩效与员工年度绩效考核挂钩的奖惩机制和严格的安全责任失职追责机制，切实落实目视化建设[3]，建立和固化“发现、分析、分享、整改、评估”五个环节的管理程序，形成管理流程。根据管网现有搭建的“HSE”系统（安全风险分级管控系统），作为落实两级《作业指导书》的辅助工具，实现了工作任务下达、实施和监督考核的PDCA循环，确保了岗位工作不遗漏、工作标准不打折、岗位监督不缺失，提高了执行力。最大程度地夯实“三个责任”，属地管理深化以案为鉴、以案促改、以案促治，夯实不敢轻视、不能轻视、不想轻视的责任机制，使员工做到“眼中有风险、心中有对策、手上有办法”，提高风险预测预警能力，下好先手棋、打好主动仗。

（三）零隐患落实属地责任全覆盖

管网以“三再”（再强调，再部署，再落实）原则“整体规划、系统推进、持续改善”的属地管理思路推行属地管理现场改善工作，瞄准属地隐患从零做起，向零奋斗的目标。公司建立各类隐患清单，定期动态更新进展，对处理进度及时把控，最大限度消除隐患。同时，通过对隐患数据进行分析统计，找出安全行为方面的薄弱环节，根据分析结果动态调整安全监控重点，制定整改措施，并将发现的不标准状态评价分级，落实负责人进行整改并追踪闭环。公司制定《直线责任属地管理提升方案》，作业区重复划分属地，对辖区所有区域的设备设施、房间、道路、绿地等无遗漏的划分，以现有岗位管理对象为依据，做到每一片区域、每一个设备、每一间房屋、每一条道路、每一块绿地和闲置地等在每一个时刻均有人负责管理，切实履行岗位责任，提升员工履职能力；管理界面清晰，属地负责人对其属地设备信息、运检维情况、管理标准、故障缺陷如数家珍，实现“谁主管，谁负责”的目标。

（四）零缺陷提升专业岗位执行力

在公司范围内，专业执行杜绝“差不多”，追求“零缺陷”，营造“学习工作化，工作学习化”的执行氛围，以“二中三两”（在学中干，在干中学，两手抓、两不误、两促进）的模式培

养出“一专、多能、零缺陷”的专业化队伍（一专是立足岗位的专业技能；多能是要做工作的多面手，不断扩展自己的成长半径；零缺陷是将专业失误能力降到最低）。通过实施“专业一体化”管理，以“区域”作为专业管理的基础单元，告别“专业单线各管一段”的弊端。部门工程师每人承包一个作业区，全面负责作业区专业管理并承接对应奖惩考核；同时，作业区工程师以区域、无人站作为直线责任辖区，对辖区内的设备全范围负责，从头管至尾。公司以专业链条化管理，以“红黄绿灯”月报考核，实现预警纠偏，将管理关口前移；以“安全生产责任制”为抓手，使直线负责人的专业信息掌握更全面，专业技能显著提升，促进员工在干中学，在学中干，走出固有单一专业的舒适区，深度推进专业融合。尤其在作业管理中，依据该管理方式，大大提高了作业管理成效，对作业分析识别清单也进行了全面梳理，具体如图1。同时，大力推广“电子唱票系统”作为执行“操作票”和“维检修作业卡”的有效工具。工作执行人通过系统申请票卡，作业区主任在系统中进行审批，工作执行人和监护人携带防爆PAD到达现场，按照系统提示“一步一确认”，实现了“申请—审批—执行—风险提示—记录归档”全过程的信息化闭环管理，杜绝操作和维检修中少程序、错步骤、漏风险，养成“有指令、有监护、有执行、有反馈”的良好行为习惯^[4]。

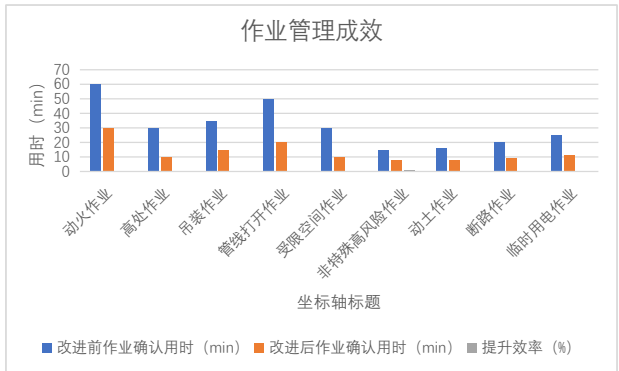


图1 管理模式作业管理成效前后对比

（五）零懈怠开展应急管理新作风

属地管理零懈怠，公司强化属地监管，以零懈怠的作风，做专“主防”主业、延伸“主防”触角。公司部门联合各属地负责人以应急演练为切入点，狠抓应急管理，每年公司定期组织开展火灾爆炸、冰堵、防汛等应急演练130余次，累计参演人数500人次。通过应急演练，切实提升员工的应急反应意识，锻炼员工在发生紧急情况时的应急反应能力，同时通过实战演练进一步检验应急预案的可操作性、思想的紧绷性。同时，公司每月抽取各个岗位人员，从安全、生产、管道、综合等方面，多维发力，考核员工掌握情况，巩固安全知识，增强全员“零懈怠”意识，引导员工克服麻痹松懈思想、提升安全生产素质，将安全生产贯穿于社会生产的各个环节，促进安全生产理念入脑入心入行，持续树牢安全红线意识，切实提升员工安全意识和应急疏散能力，达到“人人讲安全，个个会应急—畅通生命通道”的效果。

三、结论

安全是油气企业生产运营的重要课题，安全管理建设在安全管理中发挥着重要的导向、激励、凝聚和规范作用，是实现从“要我安全”到“我要安全”的内在本质。本文坚持“从零做起，向零奋斗”的管理理念，持续提升属地履职能力，通过聚焦“五个零”属地管理模式模式”，全力提升基层安全管理水平，切实打通管理提升的“最后一公里”，打造形成标杆作业区基层治理模式，进一步激发大家争先创优的积极性和主动性。真正实现安全“无序管理”到“有序管理”，真正实现“人员管理”到“思想管理”，推动公司的高质量发展。

参考文献

[1] 薛皓文. 浅谈天然气生产运行中安全环保管理措施 [J]. 清洗世界, 2024, 40(02): 193-195.
[2] 孔丹丹. 浅谈天然气长输管网安全运营中存在的问题及对策措施 [J]. 石化技术, 2023, 30(12): 109-111+100.
[3] 赵彪, 伍天能, 蒋至, 等. 天然气场站安全可视化的建设与研究 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(11): 31-33.
[4] 魏丽波. 天然气长输管道安全管理存在问题 [J]. 化学工程与装备, 2023, (07): 247-249. DOI: 10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2023.07.081.

石英砂岩矿床开采技术条件分析

胡波

昭通高速矿业开发有限公司, 云南 昭通 657000

DOI:10.61369/ERA.2026030021

摘 要 : 以彝良县大桥石英砂岩矿为例, 对矿区水文地质、工程地质、环境地质条件进行分析评价。矿区与距彝良县城约32 km, 交通便利, 具有较好的开发条件。经分析评价, 矿区水文地质条件较差, 主要为构造裂隙水和岩溶水; 工程地质条件良好, 主要为构造破碎带; 环境地质条件较差, 主要为构造破碎带和岩溶塌陷。评价认为矿区水文地质条件对矿山开采影响不大, 但存在一定的水文地质危害。在后续矿山开发建设中, 应加强水文地质、工程地质和环境地质研究工作, 采取必要的防治措施和方法, 确保矿山生产安全。

关 键 词 : 石英砂岩矿床; 开采技术; 条件分析

Analysis of Technical Conditions for Mining Quartz Sandstone Deposits

Hu Bo

Zhaotong High-speed Mining Development Co., Ltd. Zhaotong, Yunnan 657000

Abstract : Taking the Daqiao quartz sandstone deposit in Yiliang County as an example, this paper analyzes and evaluates the hydrogeological, engineering geological, and environmental geological conditions of the mining area. The mining area is approximately 32 km away from Yiliang County town, with convenient transportation and favorable development conditions. After analysis and evaluation, it is found that the hydrogeological conditions in the mining area are relatively poor, mainly consisting of structural fissure water and karst water; the engineering geological conditions are favorable, primarily characterized by structural fracture zones; and the environmental geological conditions are relatively poor, mainly due to structural fracture zones and karst collapses. The evaluation suggests that the hydrogeological conditions in the mining area have little impact on mining operations but pose certain hydrogeological hazards. During subsequent mining development and construction, it is essential to strengthen research on hydrogeological, engineering geological, and environmental geological conditions, and implement necessary prevention and control measures to ensure mining safety.

Keywords : quartz sandstone deposit; mining technology; condition analysis

引言

矿产资源开发利用, 是经济社会发展的重要支撑。矿山开发利用过程中, 受开采深度、矿体形态、地形地貌及水文地质等因素影响, 将对矿山生产建设和安全生产造成一定的影响, 特别是水文地质条件对矿山生产建设的影响。因此, 加强矿山水文地质条件评价工作, 为矿山后续开采设计和安全生产提供可靠依据具有十分重要的意义。本文通过分析矿区水文地质、工程地质、环境地质条件, 对矿区开采技术条件进行了分析评价, 为该矿床后续开采设计及安全生产提供可靠依据。

一、工程项目概况

本项目选择云南省彝良县城直线距离约32公里的彝良县大桥石英砂岩矿山为研究对象, 位于彝良县的小草坝镇。矿区地理坐标为东经104° 19′ 06.182″ 至104° 19′ 43.424″, 北纬27° 47′ 19.763″ 至27° 48′ 03.733″。该地区位于滇东北高原东缘, 山高谷深, 地形陡峭, 总体上呈东北高, 东南低的特点。矿区地形下切强烈, 形成30–80m 高、60–80° 的陡崖, 是一种典型的中山地貌。其余的地形为10–40度。该矿区最高海拔

为2028.00m, 最低为1830.00m, 海拔为198.00m^[1]。

二、水文地质条件

(一) 含水层

本区含水层主要为第四系中的冲洪积层位的冲积层(Q4al)、残坡积层(Q3al)和新近系上新统冲积层位的松散岩类孔隙水。含水层岩性以砂质粘土为主, 夹细砂、砾石等砂质碎屑物, 局部夹有薄层泥质物。隔水底板以砂砾石层为主, 夹薄层泥质物。在

矿区东部和西部出现了数个隔水底板。局部地段可能存在局部承压含水层，但一般均不具有含水能力。从钻孔资料来看，井下涌水量较小。钻孔涌水量在200 ~ 350m³/h。依据涌水量大小，可将区内地下水分3类：①小（微）孔水位降落漏斗区，面积约为2.06km²，深度约为0 ~ 60m，单孔涌水量5 ~ 80m³/h；②较大（微）孔水位降落漏斗区，面积约为4.54km²，深度约为80 ~ 200m，单孔涌水量7 ~ 150m³/h；③较大（微）孔水位降落漏斗区，面积约为8.35km²，深度约为200m，单孔涌水量5 ~ 60m³/h。根据钻孔资料分析，地下水补给来源主要有大气降水、地表水及潜水蒸发三种方式；径流途径主要有潜水径流、侧向径流和潜水排泄三种方式。

（二）隔水层

根据区域地质调查，矿区内无第四系隔水层，但在主要含水层之间，有一定厚度的第四系松散堆积层，其主要为黄土状、粉砂质黄土状粘土等，厚度一般为0.5~5m。第四系松散堆积层的上部为厚约0.2~0.3m的粘土和粉砂沉积层，底部为厚约0.3~0.5m的粉砂沉积层。松散堆积层一般与含水层之间存在隔水层，其厚度一般为0.1~0.5m，若地下水水位较高时，可以作为隔水层。但松散堆积层属风化带下部的粘土沉积层，其厚度变化较大。另外在个别地段还有第四系砂岩含水层或基岩含水层与第四系松散堆积层之间也存在隔水组分^[2]。

（三）地下水补给、径流、排泄条件

矿区地下水主要通过大气降水补给，以大气降水入渗、地面径流和岩溶裂隙水排泄为主。大气降水补给量取决于大气降水的强度和补给季节。地下水径流以裂隙或岩溶管道为主，受地形、地貌、水文地质条件的控制，且地表水与地下水有一定的水力联系。地表水径流排泄以岩溶裂隙水为主，地下径流排泄主要受断层控制。矿区地下水动态特征为：地下水流流量小，多年平均流量0.026m³/s；地下水矿化度低，一般小于1g/L；水化学类型为HCO₃—Na型。根据地表径流试验资料统计，地下水动态变化规律为：丰水期为多年平均径流量的103% ~ 141%，枯水期为多年平均径流量的10% ~ 15%。

（四）水文地质对矿床开采的影响

矿区内地下水主要是大气降水补给，并通过地表径流和地下水的运动排泄，其补给来源主要是大气降水。由于矿区内含水层厚度不大，地下水在运动过程中，各含水层之间相互连通，地表水和地下水之间的水力联系密切。因此，矿区内地下水对矿床开采影响较小。在地表水及地下水的补给、径流、排泄过程中，由于地表水补给量较大，同时也是地表水的主要补给来源。在矿床开采过程中，由于开采后形成的采空区，如果不能及时充填或进行充填处理，将会对地表生态环境造成破坏和影响。因此在矿床开采过程中必须做好地表环境保护工作。

三、工程地质条件

（一）地形地貌

本区地处滇东北高原东部，区内山高谷深，地势陡峻，总体地势北东高南东低。矿区属构造侵蚀低中山地貌，地形切割较大，沿沟两侧形成陡崖，陡崖高30 ~ 80m，坡角60 ~ 80°。其余地形坡度在10 ~ 40°。矿区内最高海拔标高2028.00m，最

低海拔标高1830.00m，高差198.00m。矿区内发育一条常年性溪沟大槽河，属金沙江流域长江水系，主要接受大气降水直接补给，沟内流水自西北向东南流经矿区中部，雨季流量约0.041m³/s，旱季流量约0.011m³/s。当地最低侵蚀基准面为矿区南东部边缘的大槽河河谷，标高1830m，同时也是该区地表自然排水标高，矿区地处大关—水城断裂带东侧，位于南北向的马边—大关地震带南段靠东南边缘部位上。据《建筑抗震设计规范》（GB/T 50011-2010，2024年版），本区抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度值为0.10g，所属设计地震分组为第三组，区域地壳稳定性分区属稳定区^[3]。

（二）地层岩性

矿区地层由老到新划分为：上二叠系中统（P1h）、下三叠统（P2b）及第四系。（1）上二叠系中统（P1h）：岩性主要为灰、灰绿色粉砂岩夹细砂岩，局部夹泥岩，厚度约80 ~ 160m。岩性主要为灰绿色粉砂岩、灰绿色细砂岩、灰黑色泥岩及灰色泥岩。主要岩性有：含砾粗砂岩、含砾中粗砂、含砾细砂及砂质粘土岩，夹少量泥质板岩。（2）下三叠系（P2b）：为一套陆相碎屑岩及碳酸盐岩建造，主要岩性有：灰绿色粉砂岩、灰色粉砂岩，含泥质板岩。主要岩性有：细砂岩、粉砂岩及泥质板岩。（3）第四系（Q）：第四系全新统冲洪积层，为一套河流沉积物，其上有一套砾岩、砂砾岩及含砾砂岩互层。厚度约10.50 ~ 102.60m。

（三）地质构造

矿区内未发现大型及大型以上断裂构造，但局部可见小断层。矿体赋存于近南北向背斜轴部的翼部，总体倾向北西，倾向较陡，向东南缓倾。矿区内地质构造以单斜构造为主，在空间上呈似“W”形，两组断层之间由地层层位错乱的裂隙所充填。矿区内断裂主要为NNE向断裂及NW向断层，其中NNE向断层为控矿断裂。矿区内无区域性大的岩浆活动及火山构造，但有小型的岩浆侵入活动。区域内岩浆岩为燕山期闪长岩脉群（J3g），脉群呈北西—南东走向分布于矿区中部及西北部。岩体具小规模的风化，岩体受后期构造作用影响，岩体完整性差。

（四）岩体质量

矿区内基岩为寒武系灰岩，岩体较破碎，节理、裂隙发育。岩体产状为：南倾，倾向NW，倾角45 ~ 55°，平均为52°。由各钻孔所取样品的物理力学性质测试结果可知：矿体上部和下部的岩石密度较大，均在2.12 ~ 2.19g/cm³之间；而中部的岩石密度相对较小，1.26 ~ 1.45g/cm³之间；平均密度为1.19g/cm³，质地较硬。矿体上部和下部岩石抗压强度分别为15.22 ~ 48.44MPa和32.23 ~ 69.44MPa，岩体强度较高。矿体中部岩石抗压强度最高为45.33MPa，抗拉强度为34.02MPa，岩体稳定性较好。

四、环境地质条件

（一）气象

据彝良气象资料，区内多年平均气温13.38℃，多年平均最低气温12.42℃。日最高气温25.98℃，最低气温零下3.31℃。多年平均最大降雨量为1909.39mm，多年平均最小降雨量为1531.13mm，多年平均降水量为1698.48mm，日平均降雨量4.65mm，日最大降雨量125.7mm，多年平均蒸发量725.68mm。多年平均相对湿度83.14mm，多年平均径流951.21mm^[4]。

（二）水文

矿区水文地质条件简单，以大气降水为主，无地表水。根据野外勘查工作，矿区内地下水类型主要有第四系孔隙潜水和基岩裂隙水两类。第四系孔隙潜水位于矿区北部，出露于南部山坡附近，该层水为弱酸性水，为区内的主要充水含水层，地下水矿化度一般小于1g/L，水质较好。基岩裂隙水位于矿区中部及东南部，出露于矿区南部山坡附近。基岩裂隙水由于受大气降水补给，水量较大，主要分布在矿区南部的低山丘陵地带。根据钻孔资料分析：该基岩裂隙水水质较好，矿化度小于1g/L。综上分析：矿区水文地质条件简单，无地表水与地下水的补给、径流、排泄条件。

（三）地质灾害

矿区内无大型地质灾害及严重地质灾害。矿区内地质灾害主要为滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷。滑坡的发生主要受地形地貌条件、地层岩性及构造条件控制，也与降雨有一定关系，当降雨量大时易发生滑坡，当雨季来临时易发生泥石流。崩塌主要受岩层倾角及厚度控制，倾角较陡的岩层其稳定性较差，崩塌多发生于煤层上部；当煤层厚度大于30m时，上部岩层稳定性相对较好。地面塌陷是由于矿床开采破坏了原来的地质环境而地面下沉，若塌陷深度大于30m时，将直接威胁到采矿工人和周围居民的生命财产安全。由于开采对地表水系及植被的影响较小，故矿区内未发生地质灾害。

（四）矿产资源开发环境影响

矿区开采将改变地貌景观和土壤结构。在矿区地表，由于露天开采，原有的地貌景观被破坏，原有的地形地貌发生改变；在矿坑内开采，因坑道开挖而破坏地表植被和原有的土壤结构。同时，露天采矿还会引起土地资源的流失和水土流失等环境问题。采矿过程中产生大量扬尘、噪声、废水污染等；露天矿开采会形成大量固体废弃物，如废石、尾矿等；尾矿处理和土地复垦需要大量资金和技术，同时还需要占用一定的土地面积，还会产生废渣对土壤结构和环境产生不利影响。因此，矿区开采可能会对环境产生一定影响。

（五）生态环境

矿山开采和生产过程中，对地表植被的破坏，可能会造成水土流失、土地荒漠化、水土流失等生态环境问题，随着矿山开采的进行，也会对周围的生物生存环境产生一定的影响，最终造成生态环境破坏。根据相关规定，对于生态环境保护，应该在设计中做好对生态环境保护的规划设计。同时，相关部门应该严格落实

国家环保相关政策和法规，采用有效措施，实现矿山开采过程中对生态环境保护和治理。对于矿区生态环境的恢复和重建工作，要制定合理的计划和措施，加大资金投入力度。同时要加强对矿山开采过程中产生的废弃物的处理工作，对废弃土地进行有效利用^[5]。

五、综合评价

通过上述分析，可以看出，矿山开采技术条件分析：通过分析矿区水文地质、工程地质、环境地质条件，对矿区水文地质、环境地质条件进行了综合评价，认为该矿床开采技术条件总体较好。矿床水文地质条件：矿区地下水补给来源主要是大气降水及地表降水，地表水对地下水补给影响较大，但经排水沟汇至地表后，对地下水位的影响不大；矿区主要充水含水层为第四系松散层及石炭系灰岩风化裂隙水，属弱富水性含水层。工程地质条件：矿床水文地质条件较好；工程地质条件一般。环境地质条件：矿床开采不会对矿区生态环境产生较大影响；环境地质问题较少。

同时，需要注意的是，矿山在进行采矿活动时，由于矿区内水文地质条件、工程地质条件和环境地质条件较为复杂，在开采过程中存在发生水害、地面沉降、地震等灾害的可能性。因此，需要在进行采矿活动前，根据矿区实际情况做好准备工作。一旦发生水害、地震等灾害时，要按照应急预案的要求，及时组织人员进行抢险救灾。

六、结论

综上所述，通过对矿区水文地质条件、工程地质条件及环境地质条件进行分析评价，认为该矿区为一大型石英岩矿床，矿区水文地质及工程地质条件简单，环境地质条件复杂程度为简单。对矿区采矿方法技术可行性进行了评价，认为采用浅孔留矿法具有可行性，但存在生产成本低、开采深度浅、回采损失量大等缺点，不适宜采用浅孔留矿法采矿。对矿山建设方案进行了评价，认为该矿山建设方案可行，但应结合矿区水文地质、工程地质和环境地质条件确定合理的开采技术参数，并采取必要的水害防治措施，综合评价认为该矿山建设方案可行。

参考文献

- [1] 张业果，王修玥. 龙家沟石英岩矿床水文地质对开采策略影响分析 [J]. 新疆有色金属, 2025, 48 (05): 72-75.
- [2] 陈龙. 宜昌鹰子咀矿区云台观组石英砂岩矿床分区划分勘查类型研究 [J]. 矿产勘查, 2024, 15 (S2): 34-42.
- [3] 于雷. 中国石英砂资源概况及应用前景分析 [J]. 吉林地质, 2024, 43 (02): 17-22.
- [4] 何永波，唐永昆. 彝良县沙木沟石英砂岩矿床地质特征及成因浅析 [J]. 云南地质, 2024, 43 (01): 71-75.
- [5] 孙泽晨. 内蒙古金齐泰石英砂岩矿床地质特征和开采技术条件 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023, (04): 33-36.