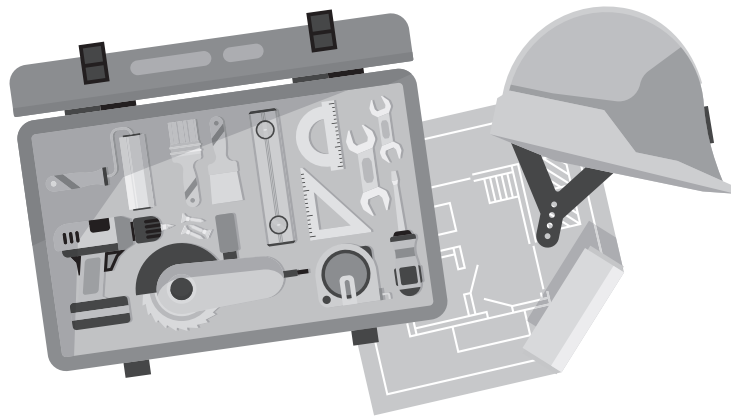


工程技术 与质量管理

Engineering Technology and Quality Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Yulei Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co. LTD.

Haizhong Gao

Zhejiang Zhongnan Construction Group Co. LTD.

Associate Editor

Pengyue Yu

Shandong Construction Engineering (Group) Co., LTD.

Editorial board member

Sanath Alahakoon

School of Engineering and Technology Centre for Railway Engineering

Salahuddin Azad

School of Engineering and Technology Institute for Future Farming Systems,
Centre for Regional Economies and Supply Chains

Yungang Wang

Ordos Sports Development Center

Qigui Chi

Expert Committee of China Construction Supervision Association

Danhui Chi

Fujian Provincial Institute of Engineering Supervision and Project Management
Association

Yahui Chi

Fujian Provincial Civil Engineering and Construction Industry Association

Chunxiu Liu

Fujian Provincial Association of Engineering Construction Quality and Safety

目录CONTENTS

工程技术与质量管理

Engineering Technology and Quality Management

第3卷 第7期 2025年7月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程技术与质量管理》编辑部

ISSN(O): 2992-9806

ISSN(P): 2995-3170

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

网址: <https://www.artdesignp.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:

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

工程技术 | ENGINEERING TECHNOLOGY

- 001 质量管理体系在特种设备检验检测中的应用及分析 梁晶, 于淘, 杨湘
Application and Analysis of Quality Management System in Inspection
and Testing of Special Equipment Liang Jing, Yu Tao, Yang Xiang
- 004 基于动力特性的结构损伤识别研究现状与展望 孙腾飞, 杨卓懿, 刘鹏, 周佳
Review of Structural Damage Identification Methods Sun Tengfei, Yang Zhuoyi, Liu Peng, Zhou Jia
- 009 国土空间规划体系下乡村用地空间优化利用路径探析 柳红月
Analysis of the Optimization and Utilization Path of Rural Land Space
under the Spatial Planning System Liu Hongyue
- 012 可燃气体检测报警器误差来源分析与校准方法优化 韩潇冉, 张阳
Analysis of Error Sources and Optimization of Calibration Methods for
Combustible Gas Detection Alarms Han Xiaoran, Zhang Yang
- 015 岩土工程勘察土工试验中常见问题与处理方法分析 杨启鑫, 蒋文彬
Analysis of Common Problems and Treatment Methods in
Geotechnical Engineering Investigation and Soil Test Yang Qixin, Jiang Wenbin
- 018 高速公路建管养全生命周期碳排放计量与
智能减碳管控技术及示范应用 宋昊, 王徐彬
Technology and Demonstration Application of life-Cycle Carbon Emission Measurement
and Intelligent Carbon Reduction Tube Control for Highway Construction and
Maintenance Song Hao, Wang Xubin
- 021 城市桥梁工程施工质量控制要点分析 樊仁勇
Analysis of Key Points in Construction Quality Control
of City Bridge Projects Fan Renyong
- 024 工业互联网理念下赋能海洋工程项目精细化管理应用 于琦
Empowering the Application of Refined Management in Marine
Engineering Projects under the Concept of Industrial Internet Yu Qi
- 028 房屋建筑工程施工现场的技术及管理措施 汪鑫坤
Technical and Management Measures for Construction Sites of Building
Construction Projects Wang Yinkun
- 031 卤牛肉加工过程中减菌技术的研究 刘静娜, 张少飞
Study on Bacteria Reduction Technology in the
Processing of Brine Beef Liu Jingna, Zhang Shaofei
- 034 无人机航测技术在矿山生态修复中的应用研究 沈迅, 李建洪, 闫晓波, 合亚杰
Research on the Application of UAV Aerial Survey Technology
in Mine Ecological Restoration Shen Xun, Li Jianhong, Yan Xiaobo, He Yajie
- 037 房地产建筑工程管理中的质量控制与进度优化 张慧东
Quality Control and Progress Optimization in Real Estate
Construction Project Management Zhang Huidong
- 040 厂房项目建设全过程管理中的技术与质量协同管控 周志凡
Technical and Quality Coordination Control in the Whole Process
Management of Factory Construction Zhou Zhifan
- 043 高速列车座椅的创新设计 陈颢伟, 丁涛, 张士强, 刘泉江, 袁子豪
Design of Comfortable Seat in
High-speed Train Chen Haowei, Ding Tao, Zhang Shiqiang, Liu Quanjiang, Yuan Zihao

047	基于数值模拟的深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响及控制措施研究 Study on the Influence of Deep Excavation on the Deformation of Adjacent Subway Tunnels and Control Measures Based on Numerical Simulation	杨继位 Yang Jiwei
050	BIM技术在建筑工程造价管理中的应用 Application of Bim Technology in Construction Project Cost Management	邱李梅, 薛永辉 Qiu Limei, Xue Yonghui
053	建筑工程与市政工程检测技术的创新与应用 Innovation and Application of Inspection Technology in Construction Engineering and Municipal Engineering	陈明涛 Chen Mingtao
056	屋顶分布式光伏项目客户沟通与需求满足策略 Customer Communication and Demand Satisfaction Strategies for Roof-Mounted Distributed Photovoltaic Projects	廖定辉 Liao Dinghui
059	BDD 掺硼金刚石电极的掺杂均匀性优化及其在污水处理中的电催化性能 Optimization of Doping Uniformity of Boron-Doped Diamond (BDD) Electrode and Its Electrochemical Performance in Wastewater Treatment	潘林焱, 左佳佳, 王杭, 吴桂丽, 王安波, 王建波, 王燕军 Pan Linyan, Zuo Jiajia, Wang Hang, Wu Guili, Wang Anbo, Wang Jianbo, Wang Yanjun

水电工程 | HYDROPOWER ENGINEERING

062	汽轮机油中水分超标机理及新型脱水装置的应用研究 Research on the Mechanism of Excessive Moisture in Turbine Oil and the Application of New Dehydration Devices	郭昱呈 Guo Yucheng
065	半导体热电效应在制冷设备的应用研究 Application Research of Semiconductor Thermoelectric Effect in Refrigeration Equipment	廖辉 Liao Hui
068	基于智能算法的燃煤电厂电气运行稳定性提升方法 A Method to Improve the Electrical Operation Stability of Coal-Fired Power Plant Based on Intelligent Algorithm	王向阳, 孟凡成 Wang Xiangyang, Meng Fancheng
071	水文地质和工程地质在地质灾害防治工程中的应用 Application of Hydrogeology and Engineering Geology in Geological Hazard Prevention and Control Engineering	陈子辰 Chen Zichen
074	风力发电工程质量监督技术研究与应用 Research and Application of Quality Supervision Technology for Wind Power Generation Projects	李舸, 赵德贤, 马建格, 陈晓毅, 仲骐 Li Ge, Zhao Dexian, Ma Jiange, ChenXiaoyi, Zhong Qi
077	水文地球化学特征在地下水污染源识别中的应用 Application of Hydrogeochemical Characteristics in Groundwater Pollution Source Identification	王金金 Wang Jinjin
080	配网电气维修中的故障诊断技术应用研究 Research on the Application of Fault Diagnosis Technology in Distribution Network Electrical Maintenance	黎瀚龙 Li Hanlong
083	房地产工程中建筑电气施工技术管理的实践与创新 Practice and Innovation of Construction Electrical Construction Technology Management in Real Estate Engineering	林学鹏 Lin Xuepeng
086	市政给排水管道非开挖修复技术研究 Research on Non-excavation Repair Technology for Municipal Water Supply and Drainage Pipelines	张辉, 刘俊 Zhang Hui, Liu Jun
089	水利工程材料性能检测与质量控制技术研究 Research on Performance Testing and Quality Control Technology of Materials for Water Conservancy Projects	贾森伟 Jia Senwei
092	水利工程建筑材料检测技术与质量管理体系研究 Research on Detection Technology and Quality Management System of Building Materials for Water Conservancy Projects	田利波 Tian Libo

安全质量 | SAFETY QUALITY

095	建筑给排水工程施工质量及安全管理探讨 Discussion on Construction Quality and Safety Management of Building Water Supply and Drainage Engineering	王勇 Wang Yong
098	生活与工业污水治理中的安全管理策略探究 Research on Safety Management Strategies in the Treatment of Domestic and Industrial Sewage	周克斌 Zhou Kebin
101	物联网提升施工现场安全管理效率的研究 Application Research of Big Data Analysis in Project Schedule Management	刘恕全 Liu Shuquan
104	房屋安全性、承载能力方面的建筑工程检测鉴定 Construction Engineering Inspection and Appraisal in Terms of Building Safety and Load-Bearing Capacity	冯灏文 Feng Haowen
107	房屋结构安全性检测鉴定与加固技术的协同应用 Collaborative Application of Safety Testing, Identification, and Reinforcement Technology for Building Structures	梁健朝 Liang Jianchao
110	浅谈安全生产“三道防火墙”的建立 A Brief Discussion on the Establishment of "Three Firewalls" for Production Safety	王德全 Wang Dequan
113	建筑工程消防安全评估与消防设施维保的实践与创新 Practice and Innovation of Fire Safety Assessment and Maintenance of Fire Protection Facilities in Construction Engineering	黄显朝 Huang Xianchao
116	基于介质分类的地下林火差异化扑救方法优化与实践效果评估 Optimization and Practical Effect Evaluation of Differential Rescue Methods for Underground Forest Fires Based on Media Classification	刘洁, 田小武 Liu Jie, Tian Xiaowu

质量管理体系在特种设备检验检测中的应用及分析

梁晶, 于海, 杨湘

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ETQM.2025070001

摘 要 : 本研究基于特种设备安全运行对工业及公共安全的重要性, 以及传统检验检测方式在数据管理与流程规范上的短板, 分析了质量管理体系在特种设备检验检测中的应用。阐述了质量管理体系数据精准实时、流程标准灵活、兼容性与扩展性强的特点, 总结了依设备定制流程、强化数据管控等应用策略。旨在借助该系统有效提升检验检测的精准度、效率与规范性, 切实解决传统模式下的诸多问题, 为特种设备安全运行提供有力支撑。

关 键 词 : 质量管理体系; 特种设备; 检验检测

Application and Analysis of Quality Management System in Inspection and Testing of Special Equipment

Liang Jing, Yu Tao, Yang Xiang

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd., Changde, Hunan 415137

Abstract : This study analyzes the application of the quality management system in the inspection and testing of special equipment based on the importance of safe operation of special equipment to industrial and public safety, as well as the shortcomings of traditional inspection and testing methods in data management and process specification. It elaborates on the characteristics of the quality management system, including accurate and real-time data, flexible process standards, and strong compatibility and scalability. It also summarizes application strategies such as tailoring processes according to equipment and strengthening data control. The aim is to effectively improve the accuracy, efficiency, and standardization of inspection and testing with the help of this system, practically solve many problems under the traditional model, and provide strong support for the safe operation of special equipment.

Keywords : quality management system; special equipment; inspection and testing

特种设备广泛应用于工业生产、建筑施工、交通运输等诸多领域, 其安全状况直接关联着生产秩序与人员生命安全。然而, 传统特种设备检验检测工作常面临数据误差大、流程缺乏统一标准、风险预警滞后等困境, 难以满足日益增长的安全管理需求。在此背景下, 引入功能强大的质量管理体系成为提升检验检测水平的关键途径。深入探究质量管理体系在特种设备检验检测中的应用, 对完善检验检测体系、保障特种设备安全运行具有重要的现实意义。

一、质量管理体系特点

(一) 数据精准性与实时性突出

在数据采集环节, 系统运用先进的传感器技术与数据传输协议, 确保数据源头的准确性。在特种设备运行参数采集时, 高精度压力传感器能精确测量微小压力变化, 其测量精度可达小数点后三位, 将压力数据精准传输至系统。系统采用抗干扰技术, 降低环境因素对数据的影响, 保障数据在传输过程中的稳定性与完整性。在实时性方面, 借助高速数据处理芯片与高效算法, 系统能够快速处理海量检测数据, 实现数据实时更新^[1]。当特种设备压力瞬间波动、温度急剧上升, 系统可在毫秒级时间内捕捉到数据变化, 并将最新数据反馈至监控终端, 检测人员能第一时间获

取设备实时运行信息, 及时做出决策。系统内置数据校验机制, 对采集到的数据进行多重验证, 通过对比历史数据、设定数据阈值等方式, 自动识别并纠正异常数据, 提升数据精准度。

(二) 流程标准化且可灵活调整

质量管理体系的流程标准化为特种设备检验检测工作提供了规范框架, 其灵活性又能满足不同场景需求。系统依据相关法规标准与行业最佳实践, 制定了涵盖检验检测全流程的标准操作程序。从检测前的准备工作, 包括设备校准、人员资质确认, 到现场检测的步骤、方法, 再到检测后的数据处理、报告生成, 每个环节都有明确的规范与要求。在压力容器定期检验流程中, 规定了检验前需对设备运行记录进行详细审查, 现场检验时按照特定顺序对各个部位进行无损检测, 检测完成后依据标准格式撰写检

验报告。这种标准化流程确保了检验检测工作的一致性与规范性，降低人为因素导致的误差与风险。然而，实际工作中特种设备类型多样、工况复杂，系统具备灵活调整能力^[9]。当遇到特种设备或复杂工况时，管理人员可在系统中对流程进行自定义配置。对于具有特殊结构的起重机，可在系统中调整检测部位的优先级与检测方法，增加针对性的检测项目，满足特定设备的检验需求，使质量管理体系既能保障基本工作规范，又能适应多样化的实际业务场景。

（三）具备强兼容性与扩展性

在兼容性方面，系统可无缝对接多种类型的检测设备与软件系统。无论是传统的超声检测设备、射线探伤仪，还是新兴的智能检测终端，都能通过标准接口与质量管理体系实现数据交互。超声检测设备采集到的缺陷数据可自动传输至质量管理体系进行分析处理，无需人工二次录入，避免数据错误与丢失。系统能与企业现有的资源管理系统（ERP）、办公自动化系统（OA）等进行集成，实现数据共享与业务协同。将检验检测报告自动推送至OA系统，方便相关部门审批与查阅；从ERP系统获取设备采购信息、维护计划等数据，为检验检测工作提供更全面的背景资料^[9]。在扩展性上，随着业务发展与技术进步，质量管理体系可灵活扩展功能模块。当企业新增特种设备类型或采用新的检测技术时，系统能够快速开发并集成相应的功能模块。若引入基于物联网的远程监测技术，系统可扩展远程数据采集与监控模块，实现对特种设备运行状态的实时远程监测。

二、特种设备检验检测内容

（一）特种设备运行状态检测

安装压力传感器、温度传感器、振动传感器等各类传感器，实现对设备关键运行参数的实时采集。以压力容器为例，压力传感器可实时监测容器内压力变化，温度传感器则对介质温度进行监控，一旦压力或温度超出正常工作范围，传感器即刻将异常信号传输至监控系统，触发警报。对于电梯，振动传感器安装在轿厢、导轨等部位，能精准捕捉电梯运行时的振动幅度与频率，依据这些数据判断电梯运行的平稳性^[9]。利用智能图像识别技术，对设备运行过程进行视频监控。在起重机作业时，通过安装在起重臂、吊钩等关键部位的摄像头，将图像传输至智能分析系统，系统运用图像识别算法，对吊钩的起升、下降动作，起重臂的旋转角度等进行监测，判断其运行轨迹是否符合标准，若出现异常摆动或走位，能及时预警。采用数据采集与监控系统（SCADA），对分散在不同区域的特种设备运行数据进行集中汇总与分析，绘制运行参数趋势图，便于检测人员直观了解设备运行状态的变化趋势，提前预判潜在故障风险，确保特种设备始终处于良好运行状态。

（二）关键部件安全性能查验

在查验前，依据设备设计文件与技术规范，明确关键部件清单，包括压力容器的封头、筒体、安全阀，电梯的曳引机、制动器、安全钳，起重机的钢丝绳、吊钩、制动器等。针对不同部

件，采用相应的无损检测技术与理化性能测试方法。对于压力容器的筒体与封头，常运用超声检测技术，通过向部件内部发射超声波，根据反射波信号判断是否存在裂纹、气孔等内部缺陷；对安全阀，则进行开启压力校验与密封性能测试，确保其在规定压力下能准确开启泄压，且关闭时密封良好，无泄漏现象^[9]。在电梯关键部件查验中，对曳引机进行扭矩测试与温升试验，检验其动力输出是否稳定，运行时是否过热；对制动器的制动性能进行严格测试，包括制动响应时间、制动力矩等参数，确保在紧急情况下能迅速制动电梯。对于起重机的钢丝绳，采用电磁无损检测技术，检测其内部断丝、磨损情况，对吊钩进行材质分析与探伤检测，确保其强度与韧性满足使用要求。

（三）合规性与法规执行审查

审查工作涵盖设备全生命周期，从设计、制造、安装到使用、维护、报废各个阶段。在设计环节，审查人员依据《特种设备安全监察条例》《固定式压力容器安全技术监察规程》等相关法规标准，对设计文件进行严格审核，包括设计图纸、计算书等，确保设备设计参数、结构形式符合安全要求。制造过程中，对制造企业的资质、生产工艺、质量控制体系进行检查，监督其是否按照设计文件与法规标准进行生产，原材料采购是否合规，焊接、热处理等关键工艺是否符合规范要求。设备安装完成后，审查安装单位的资质与安装过程记录，确认安装质量符合验收标准。在使用阶段，重点检查设备使用单位是否建立健全安全管理制度，操作人员是否持证上岗，设备是否按规定进行定期检验、维护保养等^[9]。检查电梯使用单位是否制定日常巡检制度，是否按时对电梯进行维护保养并记录；查看压力容器使用单位是否按照规定的检验周期申请定期检验。对于达到报废条件的特种设备，审查使用单位是否严格按照法规要求进行报废处理，防止报废设备继续使用。

三、质量管理体系在特种设备检验检测中的应用策略

（一）依据设备特性定制管理流程

特种设备涵盖压力容器、电梯、起重机等多种类型，其结构、运行原理、风险点各不相同。质量管理体系应用之初，需组建由设备专家、检验检测人员、质量管理人员构成的专项小组。针对不同设备，小组深入剖析其工作特性。对于压力容器，考虑其承受压力、介质特性、使用环境等因素，制定从前期准备、现场检验、数据记录到报告出具的专属流程。前期准备阶段，明确需对容器的设计文件、制造资料进行详细审查，确保符合安全标准；现场检验时，规定检验压力、检验部位及检验频次等具体要求，对高温高压且介质具有腐蚀性的压力容器，应提高关键部位的检验频次^[7]。数据记录环节，依据其参数特点，确定需重点记录的应力、温度、壁厚等数据格式与精度。通过这样定制化的管理流程，使检验检测工作更贴合设备实际，提升检验效果与效率，精准把控设备安全风险。

（二）运用系统强化数据全流程管控

质量管理体系可搭建数据全流程管控平台，在数据采集端，

借助传感器、智能检测设备等硬件，与系统无缝对接，实现检测数据自动录入，减少人工录入误差。在电梯运行参数检测中，通过安装在电梯控制柜、轿厢等部位的传感器，实时采集运行速度、加速度、平衡精度等数据，直接传输至系统。数据传输过程中，采用加密技术与冗余备份机制，保障数据安全与完整。进入系统后，利用数据清洗算法，自动剔除异常数据，对起重机应力监测数据中明显偏离正常范围的数据进行筛选^[8]。对清洗后的数据，运用数据分析模型进行深度挖掘，通过趋势分析，预测设备关键部件的磨损趋势。在数据存储方面，采用分布式数据库，按设备类型、检验时间等维度分类存储，方便快捷查询调用。设置数据访问权限，不同人员依据职责获取相应数据，实现数据全流程的严格、精准管控，为检验检测决策提供可靠数据支撑。

（三）借系统实现检测流程自动化

质量管理体系可集成自动化控制模块，以锅炉检验为例，在系统中预先设定检验流程逻辑。启动检验时，系统自动控制检测设备，以智能爬壁机器人为例，其能够按照既定路线对锅炉炉膛、管道等部位进行无损检测。检测过程中，设备依据系统指令自动调整检测参数，超声检测时，根据不同材质、厚度自动调节超声频率^[9]。系统自动收集检测数据，并与标准数据对比分析。一旦发现缺陷，立即触发报警，并依据预设规则安排复检或进入维修流程建议环节。在电梯检验中，系统可自动控制远程检测终端，模拟电梯运行状态，进行功能测试，无需人工频繁手动操作。通过这种自动化流程，减少人为操作失误，提高检验效率，缩短检验周期，让检验检测工作更高效、规范的开展，尤其适用于大规模、重复性的检验任务。

（四）利用系统开展风险预警防控

质量管理体系依托大数据与人工智能技术构建风险预警模型，收集大量特种设备历史运行数据、故障案例、检验报告等信息，运用机器学习算法进行训练。对压力管道，模型将管道材质、使用年限、介质腐蚀性、运行压力波动等因素作为输入变量，通过分析数据间的关联，预测管道发生泄漏、破裂等故障的

概率。当实时检测数据接近风险阈值时，系统自动发出预警^[10]。以某段燃气压力管道为例，系统监测到压力异常波动且腐蚀速率加快，经模型评估风险升高，即刻向管理人员推送预警信息，包括风险类型、可能影响范围等。管理人员可依据预警，提前安排维护检修，采取加强监测、降压运行等防控措施，将潜在安全隐患消灭在萌芽状态，保障特种设备安全稳定运行，降低事故发生风险。

（五）借助系统促进检验报告规范化

质量管理体系内置标准化报告模板库，针对压力容器定期检验报告、起重机验收检验报告等不同特种设备检验类型，设计符合法规标准与行业规范的模板。报告生成时，系统依据检测数据自动填充相关内容，如设备基本信息、检测项目结果、结论判定等。对于检测结果描述，采用统一术语库，确保表述准确、规范。例如在电梯检验报告中，对电梯运行舒适性的评价，按照系统术语统一描述为“轿厢运行平稳，无明显晃动与异常噪声”。系统对报告格式进行自动排版，包括字体、字号、段落间距等^[11]。报告生成后，进入审核流程，审核人员通过系统在线审核，对报告内容进行复查，如有问题，可直接在系统中批注退回修改。审核通过的报告自动存档，并可根据需求进行打印、电子签名与分发，提升检验报告的规范性、准确性与出具效率，便于各方查阅与存档管理。

四、结束语

质量管理体系凭借突出的数据精准性与实时性、标准化且灵活的流程以及强大的兼容性与扩展性，与特种设备检验检测深度融合。定制化管理流程使检验更贴合设备特性，强化数据管控确保数据可靠，自动化检测流程提升效率，风险预警防控降低事故风险，规范化检验报告提高质量。应用实践表明，该系统优化了特种设备检验检测工作，有效识别并防控安全隐患，保障了设备安全稳定运行。

参考文献

- [1] 王勇博. 质量管理体系在特种设备检验检测中的应用 [J]. 中国新通信, 2022, 24(11): 75-77.
- [2] 白帆. 特种设备检验检测中质量管理体系的应用研究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(8): 211-213.
- [3] 林涛. 质量管理体系在特种设备检验检测中的应用探讨 [J]. 工程管理, 2023, 4(8): 73-75.
- [4] 牛巍. 综合检验检测实验室信息化管理系统设计 [J]. 食品安全导刊, 2023(32): 189-192.
- [5] 马世成. 特种设备检验检测标准化智慧建设研究 [J]. 中国标准化, 2024(23): 193-197.
- [6] 张佳淇. 基于信息技术融合的承压类设备智能化质量管理体系设计 [J]. 机械研究与应用, 2023, 36(3): 183-186.
- [7] 王泽焜. 机电类特种设备检验质量控制与评价 [J]. 百科论坛电子杂志, 2024(10): 310-312.
- [8] 周前飞, 丁树庆, 冯月贵, 等. 特种设备高空结构件无人智能检测技术研究 [J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(7): 38-47.
- [9] 夏笑丽, 冯达, 巴腾满, 等. 基于 MySQL 的电梯检验信息管理系统设计 [J]. 信息系统工程, 2023(1): 49-51.
- [10] 苏文娟, 张剑, 俞跃, 等. 国家质量基础对提升锅炉蒸汽系统安全的作用探讨 [J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(7): 1-5.
- [11] 张佳淇. 基于智能网联的特种设备智能制造技术应用探讨 [J]. 机械研究与应用, 2023, 36(2): 173-176.

基于动力特性的结构损伤识别研究现状与展望

孙腾飞, 杨卓懿*, 刘鹏, 周佳

山东交通学院 船舶与港口工程学院, 山东 威海 264200

DOI:10.61369/ETQM.2025070006

摘要： 结构损伤识别方法是结构健康检测系统的重要组成部分，是确保工程结构安全的重要环节。本文旨在综述结构损伤识别的基本原理与方法，详细介绍基于结构固有频率、振型、模态以及智能算法等不同技术路线的损伤识别方法，并对这些方法的优缺点和应用范围进行分析。同时，本文还对结构损伤识别方法的未来发展趋势进行展望，探讨如何结合新技术、新方法，推动结构损伤识别技术的不断创新和进步。为相关领域研究人员提供参考，共同推动结构损伤识别技术的创新与应用。

关键词： 损伤识别；固有频率；振型；模态；智能算法

Review of Structural Damage Identification Methods

Sun Tengfei, Yang Zhuoyi*, Liu Peng, Zhou Jia

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shandong Jiaotong University, Weihai, Shandong 264200

Abstract： Structural damage identification methodologies constitute a critical component of structural health monitoring (SHM) systems and represent an essential aspect in ensuring the safety of engineering structures. This paper aims to systematically review the fundamental principles and technical approaches in structural damage identification, providing a comprehensive examination of various methodologies including those based on natural frequencies, mode shapes, modal parameters, and intelligent algorithms. The work presents a systematic comparative analysis of these techniques, evaluating their respective advantages, limitations, and applicable domains. Furthermore, this study explores future development trajectories in damage identification technologies, with particular emphasis on the integration of emerging technologies and innovative methodologies to drive continuous advancement in this field. By examining potential synergies between conventional approaches and cutting-edge solutions such as AI-driven techniques and advanced sensor technologies, this review seeks to establish a framework for next-generation damage identification systems. The findings presented herein are intended to serve as a valuable reference for researchers in related disciplines and to foster collaborative innovation in the development and practical implementation of structural damage identification technologies.

Keywords： damage identification; natural frequency; vibration mode; modal parameter; intelligent algorithm

引言

近年来随着国家经济的飞速发展，愈多工程结构逐渐大型化和复杂化。高层建筑物、桥梁、海洋平台、大坝等工程结构在长期服役过程中，会因材料老化、环境腐蚀、过载疲劳等因素出现不可避免的损伤。这些损伤可能表现为细微的裂纹扩展、连接部件的松动或是材料性能的退化，若未能得到及时的发现与修复，不仅会缩短结构的使用年限，更可能造成不可预估的后果。因此，如何有效地对结构的健康状态进行监测并及时识别出潜在的损伤，成为保障结构安全性和延长其服役寿命的关键技术之一。

结构损伤识别技术作为结构健康监测的重要组成部分，其核心在于通过监测和分析结构的物理和力学特性变化，实现对结构损伤的早期预警和精确定位。该技术不仅有助于及时发现并修复结构损伤，防止事故发生，还能为结构的维护管理提供科学依据，从而延长结构的服役寿命，降低维护成本。然而，面对复杂多变的工程实际，如何进一步提高损伤识别的准确性和可靠性，仍是当前研究的热点和难点。

本文旨在综述结构损伤识别领域的研究进展，分析不同损伤识别方法的原理、特点及应用范围，探讨其在实际工程中的应用效果及存在的问题。同时，结合当前研究趋势，展望结构损伤识别技术的未来发展方向，为相关领域的研究人员提供参考和借鉴。

作者简介：孙腾飞（1998-），男，硕士研究生，主要研究方向为结构损伤识别，结构健康监测，E-mail:23226022@stu.sdjtu.edu.cn。

通讯作者：杨卓懿（1983-），女，副教授，硕士生导师，主要研究方向为结构力学分析，结构健康监测，E-mail: zhuoyi0716@126.com。

一、结构损伤识别基本原理与过程

结构损伤识别是结构健康监测领域的关键技术，其基本原理主要建立在结构动力学和振动分析的基础之上。当结构发生损伤时，其内部的刚度、质量分布等物理特性会发生变化，这些变化进而影响到结构的动力学响应，如频率、振型、模态等。通过监测和分析这些动力学特性的变化，可以推断出结构中的损伤位置和程度。

一般情况下结构损伤识别可分为以下四个步骤：损伤响应、损伤定位、损伤量化以及损伤预测^[1]。首先，通过人为主观判断结构是否发生损伤，若直接判断发生损伤，则需要进一步确定损伤位置，若没有发现结构损伤，就需要布置传感器进行监测，对潜在的损伤进行检测及确定^[2]。之后，通过传感器对目标结构进行数据采集、信号预处理过滤噪声或无效数据，根据损伤量化的结果，计算出损伤的具体指标。对比计算结果与实际实验数据或仿真结果，验证损伤识别的精度，最后，生成损伤评估报告，记录损伤位置、程度及建议的维修措施。具体损伤检测流程图如图1所示。

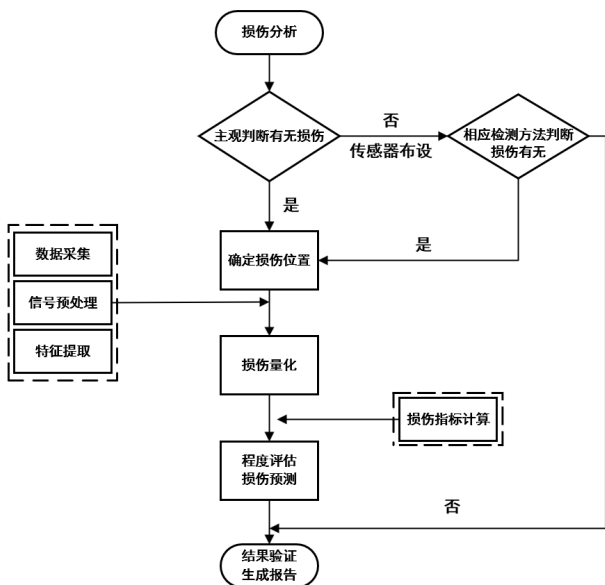


图1 损伤检测流程图

二、结构固有频率的损伤识别方法介绍

固有频率是结构在自由振动或受迫振动中表现出的基本动力学特性，它反映了结构整体的刚度和质量分布。当结构发生损伤时，无论是由于材料老化、疲劳累积还是外部冲击，其刚度通常都会发生变化，进而导致固有频率的改变。

Cawley 和 Adams 等^[3]最早提出了利用固有频率变化定位结构的损伤位置。Salawu 等^[4]分析了结构损伤对固有频率的影响，提出固有频率的变化作为结构损伤的重要指标。Hearn 和 testa

等^[5]提出了固有频率平方变化比式，得出低阶模态的固有频率和模态振型变化是最容易检测到的指标，但结合高阶模态数据可以提高检测的准确性。在国内，王凤丹等^[6]针对小损伤识别，提出一种基于固有频率和应变模态加权 $lp(0<p<1)$ 正则化模型，通过悬臂梁试验得出在多种噪声水平下均展现出更强的抗噪能力。钟建军等^[7]通过有损结构前几阶固有频率和对应的模态位移数据，提出一种基于广义逆的损伤识别方法，并验证其有效性。

因此，通过监测结构固有频率的变化，可以作为一种有效的手段来识别和评估结构中的损伤。

三、结构振型的损伤识别方法介绍

振型是结构在特定振动模式下，各点位移随时间的分布规律。在结构动力学中，振型通常通过求解结构振动方程的特征向量来获得，每个特征向量对应一个特定的振动模式，即一个特定的振型^[8]。对于线性系统，振型是唯一的，且与系统的初始条件无关^[9]。与固有频率相比，振型对损伤位置更为敏感一些，它提供了更多关于结构损伤的空间信息，对于结构复杂，局部微小的损伤，通过对不同模态的振型分析得到不同频段下的结构动态响应，综合这些模态的信息能够提高损伤识别的准确性。

West^[10]等在1986年首次提出利用模态保证准则（MAC）识别和评估结构变化的方法。Kim 等^[11]通过使用基于频率与振型的方法联合识别了梁结构的损伤，并比较了它们的识别特点与互补性。Haoyue C 等^[12]基于模态振型的动态特征参数，通过使用 COMAC 和推导的曲率模态及模态柔度指数，对六种损伤条件下的船舶进行数值模拟和实验验证。在国内，陈淮等^[13-14]利用刚架桥损伤前后的曲率模态振型，通过数值仿真分析得出该指标可以有效地对损伤位置进行定位识别。之后又提出了根据频率和振型摄动进行结构损伤识别的方法，只需采用一阶模态，即可完全识别出结构损伤，有效地避免“伪损伤”的现象，识别结果更加可靠。王盟等^[15]提出了一种基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法，通过对悬臂梁和斜拉桥的数值算例验证，结果表明所提方法不仅准确高效地识别了损伤，还具备良好的抗噪声能力。

四、结构模态的损伤识别方法介绍

结构模态是结构动力学中的一个核心概念，它涵盖了模态频率、模态振型以及模态阻尼等多个重要参数。当结构受到损伤时，这些模态参数会发生显著变化，从而为损伤识别提供了有力依据。以下将详细介绍结构模态的损伤识别方法，特别是针对曲率模态、模态柔度、模态应变能以及应变模态等方面的内容。

（一）曲率模态

曲率模态是指在特定模态下，结构各点的曲率分布，是一种能够反映结构局部特性变化的模态参数，通过比较损伤前后模态

曲率的变化,可以定位损伤位置并评估损伤程度。由于曲率模态无法直接测量,通常需要通过位移模态间接获得。其计算方法是通过对中心差分法对位移模态进行处理,从而推导出曲率模态。Pandey等^[16]最早提出了一种基于曲率模态形状变化的结构损伤检测方法,通过分析振动结构的模态位移数据得到的曲率模态形状,可以有效识别结构中的损伤。Daniele等^[17]在论文中提出并比较了多种基于模态曲率分析的损伤识别方法,解决了结构损伤检测中灵敏度不足、噪声影响大及传感器布局不合理等问题。Gorgin等^[18]通过模态分析得到结构的模态形状,并通过差分法计算有损和无损模态形状的主曲率进行比较,有效识别出了损伤位置和损伤程度。徐飞鸿等^[19]采用曲率模态曲线分析技术,通过最小二乘拟合法计算损伤区域的有效面积,验证了该方法在含噪声干扰条件下的精准性和鲁棒性。任现才等^[20]以简支木梁为研究对象,提出了一种基于曲率模态和小波变换的木梁损伤识别方法,根据小波系数差指标的突变峰值判断木梁的损伤位置,通过拟合小波系数差指标与损伤程度的关系式估算木梁的损伤程度。

(二) 模态柔度

模态柔度是结构在特定模态下的柔性度量,指的是一个结构在外力作用下的变形能力,通常用柔度矩阵来表征,与刚度相对,刚度描述的是结构抵抗变形的能力,而柔度则反映了结构的易变性。当结构发生损伤时,其刚度矩阵会发生变化,进而导致模态柔度发生改变。柔度矩阵 \mathbf{F} 定义为结构在单位力作用下的位移响应,可以用结构的模态参数表示:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i \phi_i^T}{\tilde{e}_i} \quad (3)$$

式中: ϕ_i 是第 i 阶模态振型; ϕ_i^T 是模态向量的转置,表示模态向量的列向量形式; n 表示系统的模态总数(通常与结构的自由度相关); \tilde{e}_i 是第 i 阶模态的特征值,通常与结构的固有频率相关。特征值的倒数 $1/\lambda_i$ 与柔度成正比,因为刚度矩阵的特征值对应着系统的刚度,而柔度是其逆。

(三) 模态应变能

模态应变能是指在特定模态下,结构各点的应变能分布。当结构发生损伤时,损伤区域的应变能会发生变化,因为损伤会导致该区域的应力分布和应变状态发生改变。通过计算和分析模态应变能的变化,可以定位损伤位置并评估损伤程度。模态应变能损伤识别方法具有物理意义明确、能够直接反映结构损伤对能量分布的影响等优点。Shi等^[21]于1998年首次提出了单元模态应变能的概念,介绍了基于每个结构元件的 MSE 的损伤定位方法,并推导了 MSE 对损伤的灵敏度,通过对钢框架结构的实验研究,得到所提方法对噪声敏感,但只需要不完整的测量模态形状和解析系统矩阵就可以定位单个和多个损伤,之后在此基础上,改进了基于单元模态应变能的损伤量化。

结构单元模态应变能(式(4))由单元刚度和相应单元的振型

获得,当结构出现损伤时,对应损伤位置的单元刚度会降低,相应的振型会发生变化,从而引起单元的模态应变能发生变化(式(5),式(6),式(7))^[22]。

$$MSE_{ij} = \{\phi_i\}^T [\mathbf{K}_j] \{\phi_i\} \quad (4)$$

$$MSE_{ij}^d = \{\phi_i\}^{dT} [\mathbf{K}_j]^d \{\phi_i\}^d \quad (5)$$

式中,上标“d”表示结构的损伤情况; $[\mathbf{K}_j]$ 为无损结构第 j 单元的刚度矩阵; $[\mathbf{K}_j]^d$ 表示结构受损后按照整体坐标系扩展成新的刚度矩阵; $\{\phi_i\}$ 和 $\{\phi_i\}^d$ 分别表示无损与损伤状态下结构的第 i 阶模态振型,可通过应变能的变化情况来识别损伤。

$$MSEC_{ij} = MSE_{ij}^d - MSE_{ij} = \phi_i^T \mathbf{K}_j \Delta \phi_i \quad (6)$$

$$MSECR_{ij} = \frac{|MSE_{ij}^d - MSE_{ij}|}{MSE_{ij}} \quad (7)$$

式中: $MSEC_{ij}$ 为单元模态应变能变化值(均方误差变化量),即损伤或状态变化导致的误差增量。 $MSECR_{ij}$ 为单元模态应变能变化率(均方误差变化率),数值越大,表示系统在该位置的性能或状态发生了显著的变化。

(四) 应变模态

应变模态是结构在振动过程中,各点应变随时间的分布规律。与位移模态相比,应变模态提供了更多关于结构损伤的信息,因为应变对结构局部损伤更为敏感。以下将详细介绍应变模态的几个重要参数及其在损伤识别中的应用。

1. 应变模态变化差

应变模态变化差是指结构在损伤状态与无损状态(或参考状态)下的应变模态值之差。这个差值能够反映出结构在特定位置或区域上的应变变化,从而帮助识别损伤位置或评估损伤程度。其公式一般表示为:

$$[\Delta \psi_{ij}^k] = [\psi_{ij}^k] - [\psi_{ij}^k]^d \quad (i=1,2,\dots,r; j=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

2. 应变模态变化率

应变模态变化率是指损伤前后应变模态的差值与未损伤时应变模态的比值。通过计算应变模态变化率,可以量化损伤对结构应变分布的影响,从而更准确地评估损伤程度^[23]。

$$\sigma^k = \frac{[\Delta \psi_{ij}^k]}{[\psi_{ij}^k]^d} = \frac{[\psi_{ij}^k] - [\psi_{ij}^k]^d}{[\psi_{ij}^k]^d} \quad (i=1,2,\dots,r; j=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

式中: $[\Delta \psi_{ij}^k]$ 表示在 k 方向下,第 i 阶模态、第 j 单元的应变模态变化差。 $[\psi_{ij}^k]$ 和 $[\psi_{ij}^k]^d$ 分别表示无损和有损状态下, k 方向第 i 阶模态、第 j 单元的应变模态值。这里的 k 、 i 、 j 分别代表结构的不同方向、模态阶数和单元编号。

3. 应变模态差分曲线法

应变模态差分曲线法是一种通过绘制应变模态差分曲线来识别结构损伤的方法。该方法通过计算损伤前后各测点应变模态的差值，并绘制成曲线，然后通过分析曲线的形状和特征来判断损伤位置和程度。应变模态差分曲线法具有直观性强、易于实施等优点，特别适用于实际工程中的损伤识别。

综上所述，基于模态的损伤识别方法是一种有效且可靠的技术手段，它涵盖了曲率模态、模态柔度、模态应变能以及应变模态等多个方面。这些方法各具特色，能够全面反映结构损伤的特性，为结构的健康监测和损伤评估提供了有力支持。在实际应用中，可以根据具体需求和条件选择合适的方法或结合多种方法进行综合分析，以提高损伤识别的准确性和可靠性。

五、结构智能损伤识别方法

在结构工程中，智能损伤识别方法的应用日益广泛，这些方法利用先进的算法和技术来检测和评估结构的健康状况。以下是三种主要的智能损伤识别方法：遗传算法、神经网络和深度学习。

（一）遗传算法

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传学机制的搜索启发式算法。它基于生物进化理论，通过选择、交叉（杂交）和变异等操作，不断迭代进化，最终得到问题的近似最优解。

Holland等^[24]在1975年最早提出基于遗传算法的损伤识别方法，系统地阐述了遗传算法的理论和应用，通过模拟自然界中的遗传和进化过程，来解决复杂的优化问题。该方法的提出奠定了遗传算法及其在人工智能、机器学习和优化领域中的广泛应用的基础。Khaji等^[25]展示了遗传算法在梁结构中多裂纹检测上的显著优势，特别是在任意数量裂纹情况下，遗传算法能够有效识别裂纹的位置和深度。马成武^[26]在遗传算法基础上提出了一种基于自适应鲸鱼优化算法（AWOA）的桥梁传感器优化布置方法，并通过滨州黄河公路斜拉桥的有限元模型验证，同时使用三种损伤识别方法准确定位桥梁损伤，验证了AWOA的有效性。

虽然遗传算法具有自适应性、抗噪性、鲁棒性，全局优化能力强等优点，但其计算量大，耗时较长适合复杂结构损伤识别，但不适合实时监控。

（二）神经网络与深度学习

神经网络是一种受生物神经系统启发的计算模型，广泛用于机器学习、人工智能等领域，由大量的人工神经元（类似于生物神经元）组成，通常分为三种主要层次：输入层、隐藏层、输出层^[27]，通过层层连接进行信息处理和模式识别，其结构示意图如图2所示。神经网络根据其结构和应用领域的不同可分为前馈神经网络、卷积神经网络、递归神经网络、生成对抗网络等，其基本思想是模拟人类大脑如何学习和处理信息，从而解决复杂的非线性问题。

神经网络损伤识别法工作原理是将结构的传感器数据（如振动信号、位移或应变）输入网络，网络通过多个层次的非线性计算自动提取关键特征，并根据训练数据中的损伤标签进行学习。训练好的神经网络模型能够识别输入数据中的损伤模式，并准确预测结构是否存在损伤、损伤的具体位置和程度，通过学习结构的健康和损伤状态之间的特征差异来进行损伤识别。

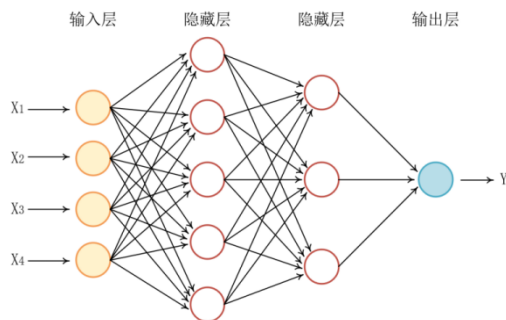


图2 神经网络模型示意图

深度学习是机器学习的一个分支，通过构建深层神经网络模型来学习数据的内在规律和表示层次，尤其特别擅长处理海量的非结构化数据，如图像、音频、视频和文本等。Lin等^[28]利用深度学习技术，特别是卷积神经网络（CNN），从传感器的原始数据中自动提取损伤敏感特征，从而实现结构损伤的自动检测。实验结果表明，深度学习算法在结构损伤检测中表现出色，其精度明显高于传统的小波分析方法。Teng等^[29]提出了一种结合应变能和动态响应的CNN方法，与仅使用单一类型数据的方法相比，该方法在定位精度、检测灵敏度和抗噪声能力方面均有显著提高，为多源数据融合在土木工程领域的应用提供了新的思路。骆勇鹏等^[30]通过简支梁、钢框架结构数值模型和IABMAS BHM Benchmark数值模型验证得出，所提的一维卷积神经网络的结构损伤识别方法能够准确识别结构的损伤位置和损伤程度，并具备一定的抗噪性能。

六、结构损伤识别方法展望

随着科技的进步和工程需求的不断增加，结构损伤识别方法也在不断发展和完善。未来，结构损伤识别方法将朝着更加智能化、精准化和高效化的方向发展。以下是对结构损伤识别方法的一些展望：

（1）智能化和自动化技术。通过传感器技术、大数据处理技术和人工智能技术，系统能够自动采集、处理和分析结构健康监测数据，实现损伤的实时监测和预警。

（2）精细化与多尺度分析技术。对结构进行多尺度建模和仿真，可以更准确地描述结构的损伤机理和演化过程。同时，结合高分辨率传感器和成像技术，可以实现对结构微小损伤的精准识别，提高识别的灵敏度和可靠性。

（3）实时监测与集成技术。通过集成先进的传感器网络和数

据处理平台,结合分布式光纤传感技术和纳米材料传感技术,可以实现对结构健康状态的持续监测和实时评估,结合振动理论、信号处理技术和人工智能算法,可以开发出更加高效和准确的损伤识别算法。

(4)非线性损伤识别技术。实际工程结构多为非线性系统,因此非线性损伤识别技术将成为未来的研究热点。通过发展更加精确的非线性动力学模型和非线性信号处理方法,可以更好地描

述结构在损伤状态下的动态响应特性,提高损伤识别的准确性和可靠性。

(5)数据驱动与知识融合技术。通过收集和分析大量的结构健康监测数据,可以挖掘出数据背后的规律和特征,建立更加准确的损伤识别模型。同时,利用机器学习中的迁移学习、强化学习等技术,实现对新结构或新损伤模式的快速适应和识别。

参考文献

- [1]SEN D, AGHAZADEH A, MOUSAVI A, et al. Sparsity-based approaches for damage detection in plates [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 333-346.
- [2]陈雅璠. 结构损伤识别技术的研究 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(17): 173-176.
- [3]Cawley P, Adams R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14(2): 49-57.
- [4]Salawu O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review [J]. Journal of Engineering Structures, 1997, 19(9): 718-723.
- [5]Hearn G, Testa R B. Modal Analysis for Damage Detection in Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(10): 3042-3063.
- [6]王凤丹, 宋学力, 李荣鹏, 等. 基于固有频率和应变模态加权 l_p 正则化模型的小损伤识别 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 124-134.
- [7]钟军军, 董聪, 夏开全. 基于频率及振型参数的结构损伤识别方法 [J]. 土木工程与管理学报, 2009, 26(4): 1-4.
- [8]李志强. 基于结构健康检测理论的构件损伤识别研究 [D]. 中国海洋大学 港口、海岸及近海工程, 2006.
- [9]姚忠伟, 全强, 刘立军. 结构损伤识别理论的研究现状与进展 [J]. 黑龙江交通科技, 2005, 28(9): 4.
- [10]West W M. Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an Orbiter test specimen [J]. 1986.
- [11]Kim J T, Ryu Y S, Cho H M, et al. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method- ScienceDirect [J]. Engineering Structures, 2003, 25(1): 57-67.
- [12]Haoyue C, Jun G, Yin Z, et al. Experimental research on damage identification of fully free beams based on modal shapes [J]. Applied Ocean Research, 2023, 139.
- [13]陈淮, 禹丹江. 基于曲率模态振型进行梁式桥损伤识别研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 10(10): 55-57+65.
- [14]陈淮, 何伟, 王博, 等. 基于频率和振型振动的结构损伤识别方法研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(12): 244-249.
- [15]王盟, 翁顺, 余兴胜, 等. 基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 10-19.
- [16]Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [17]Daniele D, Gabriele G. Damage identification techniques via modal curvature analysis: Overview and comparison [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 52-53: 181-205.
- [18]Gorgin R, Wang Z P. Structural Damage Identification Based on Principal Curvatures of Mode Shape [J]. 2020, 25(4): 566-576.
- [19]徐飞鸿, 朱检, 张婷婷. 基于曲率模态曲线的结构损伤识别方法 [J]. 世界地震工程, 2015, 31(04): 36-42.
- [20]任现才, 孟昭博, 王鑫, 等. 基于曲率模态和小波变换的木梁损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(04): 79-88.
- [21]Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Improved damage quantification from elemental modal strain energy change [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5): 521-529.
- [22]侯永乐, 李传梁, 常品要. 基于动力特性的结构损伤识别研究方法的分析 [J]. 山西建筑, 2022, 48(15): 74-77.
- [23]刘银伟. 基于应变模态的压电智能层合板结构损伤识别方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2015.
- [24]Holland J H. Adaptation In Natural And Artificial Systems [J]. 1975.
- [25]Khaji N, Mehrjoo M. Crack detection in a beam with an arbitrary number of transverse cracks using genetic algorithms [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(3): 823-836.
- [26]马成武. 桥梁健康监测传感器优化布置及损伤识别方法研究 [D]. 兰州交通大学, 2023.
- [27]王术新, 姜哲. 基于结构振动损伤识别技术的研究现状及进展 [J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 4.
- [28]Lin Y Z, Nie Z H, Ma H W. Structural Damage Detection with Automatic Feature-Extraction through Deep Learning. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(12), 1025-1046.
- [29]Teng S, Chen G, Gong P, et al. Structural damage detection using convolutional neural networks combining strain energy and dynamic response [J]. Meccanica, 2020, 55(4): 945-959.
- [30]骆勇鹏, 王林莹, 廖飞宇, 等. 基于一维卷积神经网络的结构损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 145-156.

国土空间规划体系下乡村用地空间优化利用路径探析

柳红月

上海开艺设计集团有限公司南通分公司, 江苏 南通 226001

DOI:10.61369/ETQM.2025070007

摘要： 国土空间规划体系的构建，为乡村用地空间的优化利用带来新契机。本研究深度剖析该体系下乡村用地空间规划的实际状况与存在问题，以南通市海门区悦来镇保卫村等实践案例为依据，探寻优化路径。旨在通过完善规划体系、改进管控措施等策略，为乡村用地空间的科学规划与高效利用提供理论和实践支撑，推动乡村可持续发展。

关键词： 国土空间规划；乡村用地；优化路径

Analysis of the Optimization and Utilization Path of Rural Land Space under the Spatial Planning System

Liu Hongyue

Nantong Branch of Shanghai Kaiyi Design Group Co., LTD., Nantong, Jiangsu 226001

Abstract： The construction of the national spatial planning system brings new opportunities for the optimal utilization of rural land space. This study thoroughly analyzes the actual status and existing problems of rural land space planning under this system, using practical cases such as Weibao Village in Yuelai Town, Haimen District, Nantong City, to explore optimization paths. The aim is to provide theoretical and practical support for the scientific planning and efficient use of rural land space through strategies such as improving the planning system and enhancing control measures, thereby promoting sustainable rural development.

Keywords： territorial space planning; rural land use; optimization path

引言

国土空间规划在国家空间治理体系中具有基础性地位，在国家空间发展战略中占据核心地位，对引导乡村用地空间合理布局、高效利用意义重大。乡村地区兼具农业生产、生态保护、文化传承等多重功能，其用地空间的优化利用是实现乡村振兴战略目标的关键所在。在当前国土空间规划体系的新背景下，深入探究乡村用地空间的优化利用路径，有助于化解乡村发展中的用地矛盾，提升土地利用价值，推动城乡融合发展。南通市海门区悦来镇保卫村在国土空间规划引导下开展的村庄规划实践，为这一研究提供了典型范例。

一、乡村用地空间规划现状与问题

（一）规划体系不完善

在当前时期，虽然国土空间规划正在逐步建立“多规合一”的规划编制审批体系、实施监督体系、法规政策体系和技术标准体系，以解决规划类型过多、内容重叠冲突，审批流程复杂、周期过长，地方规划朝令夕改等问题。但在之前的乡村规划中，种类仍然繁多，涵盖国民经济及社会发展规划、农业规划、土地利用规划等，分别由不同层级和部门负责编制，导致部门间沟通协作困难，规划内容重复冲突。从规划层级来看，各级规划定位模糊，难以与县、镇、村三级政府的事权相匹配，总体规划、详细规划和专项规划之间缺乏有效衔接，致使规划实施出现脱节现

象^[1]。以保卫村为例，早期由于不同规划之间缺乏统筹协调，各类用地布局存在冲突，镇村布局规划（包含村庄布点规划，并从镇域整体层面进行统筹）确定的居民点布局，常与农业布局规划和生态空间规划未能有机整合，影响后续建设项目在镇域内（不仅是村庄）的落地实施，阻碍了镇村整体的有序发展。

（二）管控对象覆盖不全面

传统乡村空间规划主要聚焦村庄建设空间，对农业空间和生态空间重视不足。这使得农业空间和生态空间的管控存在漏洞，出现农业空间被违规侵占、生态空间遭破坏等问题。同时，乡村空间规划未能全面整合土地利用、住房建设、配套设施、农业发展和环境保护等要素，无法实现对乡村全域空间的有效管控，各要素间缺乏协同性，导致乡村用地空间发展缺乏整体性和协调

性。在一些乡村地区，由于忽视农业空间和生态空间的规划管控，出现耕地被随意占用、生态环境恶化等情况，严重影响乡村的可持续发展。

（三）管控措施缺乏有效性

乡村用地规划的管控措施存在刚性不足与弹性不够的问题。对于生态空间和农业空间，往往仅依赖永久基本农田保护红线和生态保护红线进行划定，对红线内外空间缺乏细致分类管控，管控效果不佳。随着乡村经济发展和新业态的出现，如乡村旅游、休闲产业等，现有规划管控措施难以适应变化，规划确定的空间布局和功能缺乏弹性调整机制，限制了新产业在乡村空间的发展。

二、乡村用地空间优化利用路径

（一）健全乡村空间规划体系

构建统一协调的乡村规划体系，是优化乡村用地空间的基础。应以经济发展规划为核心，整合土地利用规划、生态保护规划等相关规划，形成有机整体。明确各级政府在乡村规划中的职责，国家级和省级规划注重宏观战略指导，确定乡村发展的总体方向和目标^[9]。市级规划加强区域协调，统筹城乡发展布局。县级、镇级和村级规划则侧重于具体实施，将上级规划要求精准落实到具体用地空间。

在规划编制过程中，遵循“分级覆盖、突出重点”原则。县级规划着重进行结构管控，明确乡村的功能结构、空间底线分区和用地规模分解方案，为乡村用地空间布局奠定基础。镇级规划开展用地管控，对镇域内土地进行细分，统筹各类专项规划的元素配置，构建空间管控的基础平台。村级规划实施要素管控，针对村庄具体建设项目，制定详细的开发控制指标，为规划审批提供依据。

保卫村在规划过程中，充分发挥各级规划的作用。海门区国土空间规划（作为县级规划层面）明确用途分区，在此基础上确定村庄发展定位和总体用地规模。例如，依据用途分区，若某村庄位于农业生产功能区，其发展定位可能侧重于特色农业种植，总体用地规模则会围绕农业生产及配套进行安排。镇级规划在遵循区级规划的前提下，进一步细化各类用地布局，同时明确村庄发展方向和类型。像悦来镇保民村，镇级规划根据其资源禀赋和产业基础，将发展方向确定为以高产有机稻麦产业为基础，多业态协调发展，发展类型为农业产业主导型村庄，进而围绕此细化居住、产业、公共服务等各类用地布局，使规划更具针对性和可操作性。

（二）实现管控对象全域覆盖

乡村空间的优化利用，需实现全域覆盖，即将乡村建设空间、农业生产空间和生态空间纳入统一管控体系。依据“三区三线”划分原则，科学划分乡村空间为互不重叠的功能区域，确保各类空间合理布局、高效利用^[9]。

以保卫村为例，通过全面调查分析土地资源，明确耕地、林地、建设用地等各类用地的边界和规模。合理规划生态保护区、

农业种植区和村庄建设区，实现各类空间协调发展。同时，借助信息化技术建立乡村用地空间数据库，对各类用地变化进行实时监测和管理，保障规划有效实施。在生态保护区，严格限制开发建设活动，守护生态环境。在农业种植区，大力推进高标准农田建设，提高农业生产效率。在村庄建设区，合理规划宅基地和公共设施布局，提升村民生活质量。

（三）优化管控措施

构建“基础要素逐层细化、附加要素分类叠加”的要素体系，是实现乡村用地空间有效管控的关键。基础要素适用于乡村三类空间的共性管控需求，包括功能指标类要素（如乡村功能定位、各类用地规模指标等）、空间类要素（如地类划分、控制线划定、用途管制规则等）和支撑类要素（如配套设施标准、风貌管控要求等）。将这些基础要素从县域到镇域再到村域逐层细化，建立纵向传导机制，确保各级规划有效衔接。

针对乡村三类空间的差异性管控需求，叠加附加要素。在农业空间，根据产业发展新趋势，明确设施农用地管控要求，细化农业旅游设施指标，助力新业态发展。在生态空间，落实生态保护要素名录，划定保护区边界，制定准入规则，加强生态设施用地管控。在建设空间，增加建筑限高、容积率等附加要素，提升建设品质与规范性。

在管控过程中，坚持刚性管控和弹性引导相结合的原则。对乡村三线（村民集中建设边界、永久基本农田保护红线和生态保护红线）实施严格刚性管控，确保空间底线不被突破。对三线以外空间给予一定弹性，允许在符合规划要求的前提下适度调整和优化。通过预留留白用地和建设用地机动指标的方式，合理调整建设用地小类边界，提高土地利用灵活性。比如在保卫村村规划中，预先划定一定比例的留白用地，当有新的乡村旅游项目或小型公共服务设施建设需求时，可将留白用地调整为相应的建设用地小类，如商业用地或公共设施用地。同时，利用建设用地机动指标，在不突破总体建设用地规模的情况下，灵活调整各类建设用地小类边界，满足乡村发展的多样化需求。

（四）合理布局乡村各类用地

农业用地作为乡村的基础产业用地，应加强高标准农田建设。优化农田布局结构，提高集中连片程度，便于规模化经营与机械化作业。提升土壤质量，采用科学施肥灌溉技术，减少面源污染。完善农田基础设施，增强抗灾能力与生产效率。

保卫村大力推进高标准农田建设，围绕“规模化、机械化、信息化、智能化、绿色化”目标，取得南通市唯一全省高标准农田“五化”建设村荣誉称号，新建泵站、埋设管道、修建涵道等，显著改善了农田灌溉条件，提升了机械化水平和粮食产量。合理开发后备农业资源，依据土地适宜性发展特色农业产业，如山区发展林果业、水乡发展水产养殖等。同时，严格保护农业用地，控制非农建设占用，确保耕地占补平衡。

生态用地对维护乡村生态平衡和提升环境质量至关重要。加强对生态敏感区、自然保护区的保护，严禁开发建设。推进环境整治，污水治理等生态工程，改善乡村生态环境。保卫村落实省生态管控要求，划定一般生态管控区并纳入村规民约。建成以

污水治理为主题的特色公园，完成沟河疏浚与污水处理装置建设，提升了生态环境质量。

优化乡村建设用地布局，整治低效用地。清理闲置宅基地和废弃厂房，通过土地流转盘活存量用地，提高利用效率。根据村民需求规划宅基地，完善配套设施，提升生活质量。保卫村积极盘活闲置土地，利用老村部建成红白喜事场所，增加村集体收入。提档升级新时代文明实践站，丰富村民精神文化生活。

（五）提高乡村用地资源配置效率

依据乡村的自然条件、产业基础 and 市场需求，优化产业布局。在具有自然风光和文化底蕴的乡村，发展乡村旅游产业，将农业生产与旅游服务有机结合，打造特色旅游产品^[4]。在农产品资源丰富的乡村，发展农产品加工业，延长产业链，提高农产品附加值。

保卫村依托当地田园风光和红色文化资源，积极发展乡村旅游产业。村内建有蔬果采摘园，未来还将进一步开发农业观光、乡村旅游项目。同时，大力发展农产品加工业，规划建设农产品加工中心，提升农产品附加值^[5-7]。例如，国华家庭农场成为村集体经营家庭农场的典范，实施标准化种养技术，采用“企业投资，村经营管理，产品主供企业”的运营模式，拥有大棚瓜蔬种植区、

果园及林下养殖区和露地特色蔬菜种植区三个功能区，果蔬产品主要供应村企业。

加强对乡村建设用地的集约管理，提高土地利用强度。制定合理的用地标准和规划指标，引导乡村建设向紧凑型、集约化方向发展。在村庄建设中，合理规划建筑密度和容积率，避免土地资源浪费^[8]。建立健全土地流转机制，促进土地资源合理流动和优化配置，通过土地流转实现土地规模化经营，提高农业生产效率，推动乡村产业发展。

三、结束语

国土空间规划体系下乡村用地空间的优化利用，是一项复杂的系统工程，需综合运用多种理论和方法，从完善规划体系、全域覆盖管控对象、优化管控措施、合理布局用地以及提升资源配置效率等多方面协同推进。随着乡村经济社会发展和国土空间规划体系的不断完善，乡村用地空间优化利用的路径也需持续探索创新，为乡村振兴战略的实施提供坚实的空间保障。通过对保卫村等实践案例的研究，为其他乡村地区提供了可资借鉴的经验，有助于推动乡村用地空间优化利用在更广泛区域的实践与发展。

参考文献

[1]何正斌.国土空间规划体系下乡村建设用地控制性详细规划研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(2):67-69
[2]牛艳霞.国土空间规划体系下乡村空间规划框架的优化策略[J].科技创新与生产力,2024,45(2):43-4548
[3]谷志强,张清波.国土空间规划视角下乡村规划存在的问题及优化策略[J].农村科学实验,2024(24):57-59
[4]王宁.探究国土空间规划体系下的乡村振兴规划[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(2):0162-0165
[5]朱迪,吴泽斌,汪应宏,彭山桂.国土空间规划管制视角下农村宅基地退出及增值收益分配测算[J].自然资源学报,2023(12).
[6]官卫华,杨梦丽,朱晨.乡村振兴战略实施下村庄规划管理制度创新——基于国土空间规划改革的南京实践探索[J].现代城市研究,2023(02).
[7]吴昊,陈前虎,黄鹏奇,金霜霜.国土空间规划背景下基于乡村单元的实用性村庄规划编制探索——以杭州灵山村单元为例[J].小城镇建设,2022(11).
[8]王新哲,杨雨茜,宗立,薛皓颖.国土空间“总—详”规划空间传导:现实困境、基本逻辑与优化措施[J].城市规划学刊,2023(02).

可燃气体检测报警器误差来源分析与校准方法优化

韩潇冉, 张阳

上海市质量监督检验技术研究院, 上海 200000

DOI:10.61369/ETQM.2025070008

摘要：可燃气体检测报警器在安全监测领域占据关键地位，其原理基于传感器对可燃气体的特异性响应，通过信号转换与处理实现报警功能，由多个功能模块协同工作保障设备运行。但在实际应用中，存在诸多导致检测误差的因素。传感器性能因长期使用和环境侵蚀而退化，环境温湿度、气压变化及其他气体干扰，还有校准不准确或缺失，都会影响检测精度，可能引发误报或漏报，危及安全。为此，优化校准方法成为提升报警器性能的关键。

关键词：可燃气体检测；报警器；误差；校准

Analysis of Error Sources and Optimization of Calibration Methods for Combustible Gas Detection Alarms

Han Xiaoran, Zhang Yang

Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai 200000

Abstract： Combustible gas detection alarms occupy a key position in the field of safety monitoring. Their principle is based on the specific response of sensors to combustible gases, and the alarm function is achieved through signal conversion and processing, with multiple functional modules working together to ensure equipment operation. However, in practical applications, there are many factors that can lead to detection errors. Sensor performance degrades due to long-term use and environmental erosion, changes in environmental temperature, humidity, and air pressure, interference from other gases, as well as inaccurate or missing calibration, all affect detection accuracy and can cause false alarms or missed alarms, compromising safety. Therefore, optimizing calibration methods has become key to improving alarm performance.

Keywords： combustible gas detection; alarm; error; calibration

在工业生产、民用燃气使用等场景中，可燃气体泄漏可能引发火灾、爆炸等严重事故，威胁生命财产安全。可燃气体检测报警器作为预防此类事故的重要设备，其检测的准确性尤为关键。它依据特定原理，借助多种功能模块协同工作，实现对可燃气体浓度的监测与报警。但实际使用过程中，报警器常出现检测误差。这些误差可能源于多个方面，不仅降低检测精度，还可能导致严重后果。深入探究可燃气体检测报警器的误差来源并优化校准方法，对于提升其检测准确性、增强安全保障能力至关重要，是保障安全生产与社会稳定的迫切需求。

一、可燃气体检测报警器的基本原理与构成

（一）可燃气体检测报警器的基本原理

可燃气体检测报警器的基本原理基于气体传感器对特定气体的敏感反应。传感器通过检测环境中可燃气体的浓度，将气体浓度信号转换为电信号。电信号经过放大和处理后，与预设的报警阈值进行比较。当检测到的气体浓度超过安全阈值时，报警器会触发声光报警，提醒人员采取相应措施。传感器的工作原理多种多样，包括催化燃烧、红外吸收、电化学等。催化燃烧传感器利用可燃气体在催化剂表面燃烧产生的热量引起电阻变化；红外吸收传感器则通过检测气体对特定波长红外光的吸收程度来确定气体浓度；电化学传感器则依赖于气体与电极之间的化学反应产生

的电流变化。这些传感器各有优缺点，适用于不同的应用场景。

（二）可燃气体检测报警器的基本构成

可燃气体检测报警器通常由传感器模块、信号处理模块、报警模块和电源模块四大部分组成。传感器模块是报警器的核心部分，负责检测环境中的可燃气体浓度，并将气体浓度信号转换为电信号。信号处理模块对传感器输出的电信号进行放大、滤波和数字化处理，以提高信号的稳定性和准确性。报警模块根据处理后的信号判断气体浓度是否超过安全阈值，并在超过阈值时触发声光报警，提醒人员采取相应措施。电源模块为整个报警器提供稳定的电力供应，确保其持续正常工作。此外，现代可燃气体检测报警器还可能配备通信模块，用于将检测数据实时传输到监控中心，实现远程监控和数据分析。

二、可燃气体检测报警器误差来源分析

（一）传感器性能退化导致的误差

传感器作为报警器的核心部件，其性能直接影响检测结果的准确性和可靠性。随着使用时间的增加，传感器内部的敏感材料会因化学反应、物理磨损或环境侵蚀而逐渐失效^[2]。例如，催化燃烧传感器中的催化剂活性降低会导致响应速度变慢，红外吸收传感器的光学元件表面污染会降低透光率，电化学传感器的电解液干涸或电极腐蚀会削弱其检测能力。这些退化现象不仅使传感器的灵敏度下降，还可能导致零点漂移或响应时间延长。长期暴露在高温、高湿或腐蚀性气体环境中，会进一步加速传感器的老化过程。性能退化的传感器不仅会降低检测精度，还可能引发误报或漏报，严重威胁安全生产。

（二）环境因素干扰引起的误差

温度、湿度、气压等环境条件的变化会直接干扰传感器的工作状态。温度变化可能导致传感器内部材料的物理特性改变，从而影响其电学性能；湿度变化可能使传感器表面吸附水分，阻碍气体分子的扩散和反应；气压变化则可能改变气体浓度分布，导致检测结果偏离实际值。此外，环境中存在的其他气体成分可能对传感器产生交叉干扰，特别是与目标气体化学性质相似的物质，会进一步增加检测误差。这些环境因素的干扰不仅降低了检测的准确性，还可能引发误报或漏报，增加安全风险。

（三）校准不准确或缺失引发的误差

校准是确保传感器检测精度的关键步骤，通过校准可以修正传感器的零点漂移和灵敏度偏差。然而，由于校准气体浓度不准确、校准设备精度不足或校准方法不当，可能导致校准结果偏离真实值^[3]。长期使用过程中未定期校准或校准间隔过长，会使传感器的性能逐渐偏离初始状态，从而引入系统性误差。校准缺失或不当不仅会降低检测结果的可靠性，还可能掩盖传感器的性能退化问题，导致安全隐患。

三、可燃气体检测报警器校准方法优化

（一）基于多点校准的精度提升方法

多点校准方法是提高可燃气体检测报警器精度的重要手段，能够有效解决传统单点校准的局限性。单点校准仅针对某一特定浓度进行校准，无法全面反映传感器在整个量程范围内的线性特性，容易导致检测结果在高浓度或低浓度区域出现较大偏差。多点校准则通过选择多个不同浓度的标准气体，对传感器进行分段校准，从而更准确地拟合传感器的响应曲线。这种方法能够有效修正传感器的非线性误差和灵敏度偏差，显著提升检测结果的准确性。在实际应用中，校准点的数量和分布需要科学设计，通常覆盖传感器的低、中、高量程范围，以确保校准结果的全面性和可靠性。此外，结合数据处理算法，如最小二乘法或多项式拟合，可以进一步优化校准曲线的精度，为传感器提供更准确的浓度计算依据。多点校准不仅能够提高检测精度，还能延长传感器的使用寿命，为可燃气体检测报警器的长期稳定运行提供保障。

（二）环境参数补偿技术的优化

环境参数补偿技术是减少可燃气体检测报警器误差的重要优化方向，能够显著提高传感器在不同环境条件下的适应性和可靠性。温度、湿度和气压等环境因素的变化会直接影响传感器的检测性能，导致测量结果偏离真实值。通过引入环境参数补偿技术，可以实时监测环境条件的变化，并对传感器输出进行动态修正。例如，利用温度传感器和湿度传感器采集环境数据，结合预先建立的补偿模型，对检测结果进行实时调整。补偿模型的建立通常基于大量实验数据，通过回归分析或机器学习算法，确定环境参数与传感器输出之间的关系。优化后的补偿技术能够有效降低环境因素对检测结果的干扰，提高报警器在不同环境条件下的适应性和可靠性^[4]。环境参数补偿技术还可以结合多点校准方法，进一步提升传感器的整体性能，为复杂环境下的可燃气体检测提供更精准的数据支持。

（三）智能化校准系统的开发与应用

智能化校准系统的开发是校准方法优化的重要趋势，能够显著提高校准效率和精度，同时减少人为误差。传统校准方法依赖人工操作，不仅效率低下，还容易引入人为误差，难以满足大规模部署的需求。智能化校准系统通过集成自动控制、数据采集和算法处理功能，实现校准过程的自动化和智能化。系统能够自动完成标准气体的通入、传感器响应的采集以及校准曲线的计算，显著提高校准效率和精度。智能化校准系统还可以结合远程监控和云计算技术，实现多台设备的集中校准和数据分析，为大规模部署的可燃气体检测报警器提供高效的管理和维护方案。通过不断优化智能化校准系统的算法和硬件配置，可以进一步提升校准的准确性和可靠性。例如，引入人工智能算法对传感器性能进行预测和优化，能够提前发现潜在问题并采取相应措施。智能化校准系统的应用不仅提高了校准效率，还为安全生产提供了更有力的技术支持。

四、实验验证与结果分析

（一）实验验证

在验证优化后的可燃气体检测报警器校准方法时，严格遵循JJG693-2011《可燃气体检测报警器检定规程》，确保实验的规范性和准确性。实验环境设定为温度(0 ~ 40)℃、相对湿度< 85%，通风良好且无干扰被测气体，为测量提供稳定可靠的条件^[1]。

选用空气中异丁烷、甲烷、丙烷等多种标准气体作为测量基准，对多台不同型号的可燃气体检测报警器进行测试。测量前，按照仪器说明书的要求，对报警器进行预热稳定处理，并完成零点和量程校准，以保证仪器处于最佳测量状态。测量过程中，分别通入约为满量程10%、40%、60%的标准气体，待示值稳定后读取数据 C_i ，每个浓度点重复测量3次，取算术平均值，依据公式计算各浓度点的示值误差，选取其中绝对最大值作为气体的示值误差，同时按照规程要求评定测量结果的不确定度。

对于响应时间的测量，在分析仪校准零点后，通入约为满量程40%的气体标准物质，读取仪器稳定初值。撤去标气，待仪器

回零后再次通入相同标准气体，同时使用秒表记录仪器达到稳定初值90%的时间，重复上述步骤3次，取算术平均值作为分析仪器的响应时间，并对其不确定度进行评定^[4]。

（二）结果分析

通过对实验数据的深入分析，可全面了解可燃气体检测报警器的性能以及误差来源的影响程度。

在示值误差方面，从多台仪器的测量数据来看，不同浓度点的示值误差存在差异。测量重复性和标准气体的不确定度是影响示值误差的关键因素。测量重复性引入的标准不确定度在不同仪器间相对稳定，如实验中多台相同型号仪器测量重复性引入的标准不确定度经计算后合并样本标准差为0.354%LEL（计算公式：

$s_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2}$ ）。这表明仪器自身的重复性特性对测量结果有较为稳定的影响，在多次测量中，仪器测量值的离散程度相对固定。而标准气体的不确定度则取决于标准气体的定值准确性，实验中标准气体定值证书给出的不确定度为1.0%（k=2），则标准相对不确定度为： $a/k = 1.0/2 = 0.5\%$ ，由此计算出的标准不确定度为0.1995%LEL（ $0.5\% \times 39.9\%LEL = 0.1995\%LEL$ ）。这两个不确定度分量相互叠加，共同决定了示值误差的不确定度范围。合成标准不确定度和相对标准不确定度的计算结果进一步量化了示值误差的不确定程度，异丁烷标准气体测量时，相对标准不确定度为1.02%（计算公式： $u_c^2(\Delta C) = [c_s u(C)]^2 + [c_s u(C_s)]^2 = \sqrt{0.354^2 + 0.1995^2} = 0.4063\%LEL$ ， $0.4063\%LEL \div 39.9\%LEL \times 100\% = 1.02\%$ ），扩展不确定度为2.1%（k=2）（经验值依据：该值引用自标准气体定值证书，经实验室验证符合JJG693-2011要求）。这意味着在测量异丁烷气体浓度时，测量结果的可信度在一定范围内波动，需充分考虑这一不确定度对测量结果的影响。

对比不同气体（甲烷、丙烷、氢气、乙炔）的测量结果，发现虽然测量重复性引入的标准不确定度基本相同（均为0.354%LEL），但由于不同标准气体定值的差异以及其他未知因素的影响，导致各气体测量的扩展不确定度存在差异。例如，甲烷测量的扩展不确定度为2.7%（k=2），丙烷为2.4%（k=2）（经验值依据：该值引用自标准气体定值证书，经实验室验证符合JJG693-2011要求）。这说明在实际使用可燃气体检测报警器时，针对不同气体进行测量，其测量结果的可靠性存在差异，需

根据具体气体种类评估测量结果的准确性。

在响应时间方面，测量重复性是影响响应时间测量结果的主要因素。实验中，通过对多台仪器的测量发现，仪器的测量重复性引入的标准不确定度为0.8s。相比之下，电子秒表引入的标准不确定度（0.005s）因数值较小，对测量结果的影响可忽略不计。这表明仪器自身在响应时间测量上的重复性波动较大，可能是由于仪器内部的传感器响应特性、信号处理速度等因素导致。合成标准不确定度和扩展不确定度的计算结果显示，该可燃气体检测报警器响应时间的扩展不确定度U=2s（k=2）。这意味着在测量响应时间时，测量结果存在一定的误差范围，在实际应用中，如涉及到对可燃气体泄漏响应及时性要求较高的场景，这一不确定度可能会影响对泄漏情况的及时判断与处理。

综合示值误差和响应时间的实验结果分析可知，可燃气体检测报警器的误差来源复杂且相互关联。优化校准方法时，不仅要考虑对测量重复性的控制，如改进仪器的制造工艺、提高传感器的稳定性等，还要关注标准气体的准确性和可靠性，定期对标准气体进行核查与校准。同时，针对响应时间的误差问题，需进一步研究仪器内部结构和信号处理机制，优化仪器设计，以提高响应时间测量的准确性。通过对这些方面的改进，可以有效降低可燃气体检测报警器的误差，提高测量结果的准确性和可靠性，确保其在工业生产、安全监测等领域发挥更可靠的作用。

五、结语

可燃气体检测报警器的误差来源分析与校准方法优化是保障其可靠运行的核心问题。通过对误差来源的剖析可知，传感器性能、环境因素以及校准情况对测量结果影响显著。优化校准方法从多点校准、环境参数补偿和智能化校准系统着手，在一定程度上改善了测量的准确性和可靠性。但实验结果也显示，当前仍存在测量重复性影响大、不同气体测量结果差异等问题。未来应聚焦于进一步控制测量重复性，提升标准气体的质量，优化仪器内部结构与信号处理机制。持续改进校准方法，有助于推动可燃气体检测报警器技术的发展，为安全生产筑牢防线，在工业安全、城市燃气监测等领域发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 陈岚, 施马凯, 包亦杰. 可燃气体检测报警器检定装置计量比对结果分析[J]. 上海计量测试, 2024, 51(06): 57-60.
- [2] 陈勇, 刘慧波. 影响可燃气体检测报警器检定结果的因素分析及建议[J]. 品牌与标准化, 2023, (02): 78-80.
- [3] 邹翎. 影响可燃气体检测报警器测量结果的因素探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(10): 40-42.
- [4] 史苏娟, 王瑞, 徐春. 可燃气体检测报警器示值误差检测标准的讨论[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(05): 55-57.
- [5] 张莉丽, 喻旭东, 薛成. 可燃气体检测报警器标定方法和示值误差超差的探讨分析[J]. 工业计量, 2020, 30(06): 99-100.

岩土工程勘察土工试验中常见问题与处理方法分析

杨启鑫¹, 蒋文彬²

1. 江苏南京地质工程勘察院, 江苏 南京 210041

2. 江苏省地质局第一地质大队, 江苏 南京 210041

DOI:10.61369/ETQM.2025070011

摘 要 : 本文系统分析岩土工程勘察土工试验中常见问题, 涵盖试验设备、样品采集与制备、试验操作及数据处理等方面。通过深入剖析问题成因, 针对性提出处理方法, 旨在提高土工试验数据准确性与可靠性, 为岩土工程勘察设计提供科学依据。

关 键 词 : 岩土工程勘察; 土工试验; 常见问题; 处理方法; 试验质量

Analysis of Common Problems and Treatment Methods in Geotechnical Engineering Investigation and Soil Test

Yang Qixin¹, Jiang Wenbin²

1. Nanjing Geological Engineering Investigation Institute, Nanjing, Jiangsu 210041

2. First Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau, Nanjing, Jiangsu 210041

Abstract : This paper systematically analyzes the common problems in geotechnical engineering investigation and soil test, covering test equipment, sample collection and preparation, test operation, and data processing. Through in-depth analysis of the causes of the problems, targeted treatment methods are proposed to improve the accuracy and reliability of soil test data, providing a scientific basis for geotechnical engineering investigation and design.

Keywords : geotechnical engineering investigation; soil test; common problems; treatment methods; test quality

引言

岩土工程勘察是工程建设的重要基础工作, 土工试验作为获取岩土物理力学性质参数的关键手段, 其结果直接影响工程设计方案的合理性与安全性。然而, 在实际土工试验过程中, 存在诸多影响试验结果准确性的问题。深入分析这些问题并提出有效处理方法, 对提升岩土工程勘察质量、保障工程建设顺利进行具有重要意义。

一、土工试验基本内容概述

(一) 试验类型

土工试验根据试验目的的不同, 有物理性质试验, 力学性质试验和化学性质试验等。物理性质试验主要包括含水量, 密度和孔隙比的确定, 它们是表征岩土基本物理状况的关键指标并在后续力学性质分析中起着至关重要的基础性作用。如含水量变化对土体可塑性、压缩性等有着显著影响; 土壤的密实度可以通过其密度和孔隙比来直观地体现。力学性质试验包括压缩试验, 剪切试验和强度试验, 其中压缩试验是用来研究土在受压条件下变形特征, 从而为地基沉降的计算奠定基础; 通过剪切试验可以得到土体抗剪强度指标, 这对于边坡稳定分析及地基承载力的计算非常关键。化学性质试验的重点是岩土体内的化学成分, 酸碱度以及其他方面, 而在污染场地治理, 特殊岩土工程方面, 岩土化学性

质对于工程设计与施工具有不容忽视的作用。^[1]

(二) 试验流程

土工试验流程一般由试样的采集, 输送, 准备, 试验操作和数据处理组成。试样的采集需要依据勘察目的来选择具有代表性的地点, 以保证试样能够体现岩土的实际性质。当地质条件比较复杂时, 例如靠近断层, 地层变化区域等, 需要通过专业勘察手段来对采样点进行测定, 从而确保样本具有典型性。在运输时采取切实有效的保护措施以防止样品受到干扰, 除了常规防震, 防潮措施之外, 对敏感土样还需要采取专门的运输容器及环境控制技术。样品制备按照规范要求处理, 各试验项目的样品制备要求有很大区别, 如颗粒分析用土样需要完全分散, 但力学试验用土样应严格控制形状及尺寸精度。试验操作严格遵守有关标准规范, 并且随着科技的进步, 一些试验操作已经实现了自动化, 但是人工操作是否规范准确仍然会对试验结果产生重要的影响。数

据处理通过分析计算试验结果来获得岩土参数，这一过程既要准确计算又要根据工程实际情况合理解释与运用。^[2]

二、土工试验中常见问题分析

（一）试验设备问题

1. 设备精度不足

一些土工试验设备由于使用时间较长，关键部件出现磨损现象，例如压缩仪位移传感器测量精度降低，剪切仪量力环标定不准等等，从而造成试验数据出现偏差。随着试验设备服役年限的延长，机械部件疲劳磨损和电子元件性能衰退现象逐步暴露。另外设备老化也会诱发控制系统失效，从而影响测试加载速率稳定，导致测试结果无法真实地反映岩土力学性质。某些高精度试验时，加载速率微小的波动就会使试验结果产生很大的误差。

2. 设备维护不当

缺少对试验设备的定期检修将降低其性能。如排水板卡死，压力室封闭不严等等，这些都会影响测试时排水条件及压力传递，从而使固结测试和三轴测试结果产生错误。对设备进行日常维护既包括表面清洁也涉及到内部关键部件检查与维护。同时设备清洗不当、残余岩土颗粒会对后续测试产生干扰并导致数据失真。在某些多用途试验设备上，各试验项目间的转换若没有完全清洗，就有可能引进杂质而影响试验结果。^[3]

（二）样品采集与制备问题

1. 样品扰动

样品采集时容易因钻探工艺不合适和取样器的选用不合理而引起样品扰动。如果采取冲击钻进方式，冲击力将破坏岩石的原有结构；薄壁取样器在采样过程中，如果取样器壁厚太大，将会挤压试样，引起试样孔隙比和含水量的变化，从而影响试验结果的精度。不同种类岩土对取样扰动敏感性不一，对软土、淤泥质土和其他软弱土而言，取样扰动可引起力学性质明显变化。

2. 样品制备不规范

样品制备没有严格按规范要求执行，例如土样切取过程中出现的尺寸偏差和试样含水率的不合格控制。在压缩试验样品的配制上，如果样品的高度不均匀，将造成测试过程应力分布的不均匀；直剪试验过程中试样含水量与最优值的偏差将导致土体抗剪强度指标发生变化，从而导致试验结果代表性丧失。不同制样方法对于试样微观结构及宏观性质有不同的影响，如手工制样与机械制样对于试样均匀性及密实度等都会有差别。

（三）试验操作问题

1. 操作不熟练

试验人员对于试验设备的操作流程比较陌生，例如在做三轴试验的过程中，没有正确地控制围压加载速率以及反压施加的时机等，造成了测试数据的离散性较大。在试验设备不断更新的情况下，新型设备运行的复杂度加大，这就对试验人员技术水平提出了很高的要求。另外，对于试验规范认识不足，试验数据记录时没有按照规定精度要求读数并记录，从而影响了数据可靠性。有些试验人员因为没有经过系统的训练，对于试验规范的细节要

求把握得不够彻底，造成数据记录有误或者不全。^[4]

2. 试验环境控制不当

土工试验需要一定的环境条件，例如温度和湿度的改变都将影响到试验的结果。含水量试验中，高环境湿度会导致干燥土样再次吸水；多年冻土试验中环境温度的波动将使冻土物理力学性质发生变化。但一些试验场地由于缺少必要的环境控制设施而使测试结果受到环境因素的干扰。部分野外临时试验场地因条件所限，很难有效地控制环境，从而影响试验数据精度。

（四）数据处理问题

1. 数据异常处理不当

在测试过程中出现异常数据，测试者不深入分析就任意排除或者修改数据。比如在进行压缩试验时，如果某一级荷载作用下变形量太大，没有找到原因则认为此资料为无效资料，这可能掩盖了岩土的实际性质，从而导致最后压缩曲线无法正确地反映土体压缩性。异常数据可能是由于设备故障，样品问题，操作错误等诸多原因造成的，必须经过细致的检查分析方能查明其成因。另外，缺少对异常数据的科学处理方法也易造成数据处理主观性、随意性。^[5]

2. 数据分析方法不合理

试验数据分析中所使用的统计方法是不够科学的。如果在岩土参数代表值计算中不考虑数据分布特征而单纯地使用算术平均值则可能高估和低估岩土实际性质。另外，对于试验数据缺乏全面的分析，没有把不同试验项目数据进行互相印证，造成岩土性质判断存在偏差。伴随着大数据与人工智能技术的蓬勃发展，岩土工程领域数据处理与分析方法得到了创新，常规数据分析方法已经很难适应复杂工程需要。

三、常见问题的处理方法

（一）试验设备问题处理

1. 定期校准与维护

建立健全设备校准制度，经常委托合格计量机构校准试验设备，保证设备精度达到要求。校准周期应视设备使用频率、性能稳定性等因素进行合理设置，对关键设备而言，校准周期可以适当减小。制订设备维护计划并定期做好设备的清洗，润滑和检验等维护工作，并及时替换磨损部件。同时建立了设备档案并记录了其使用，维修及标定等信息，方便了其性能跟踪管理。设备档案应当包含设备基本信息，维修记录和校准证书，以便对设备全生命周期进行管理。^[6]

2. 设备更新与升级

对老化严重，性能达不到测试要求的器件要及时更新。介绍了全自动三轴仪，数字式直剪仪及其他先进自动化试验设备，它们精度高，操作简单，数据采集精确，能有效地提高试验效率及数据质量。另外，实现了现有装备技术升级，加入了智能化控制功能以提高装备自动化水平及可靠性。如通过增加传感器、智能控制系统等手段来达到实时监控、自动调整设备工作状态。^[7]

（二）样品采集与制备问题处理

1. 优化取样工艺

依据岩土特性及试验要求对取样方法及取样器进行了合理的选择。对软土等容易受到干扰的土样使用薄壁取土器或者冷冻取样技术以降低采样时受到的干扰。改进钻探工艺以静压法和回转钻进代替冲击钻进以减少土样结构损伤。同时在采样时，对试样进行标识与防护，以保证其完整性与代表性。采用先进的定位技术及样品追踪系统可以实现样品采集过程中的全过程监测与管理。

2. 规范样品制备流程

强化试验人员培训，让试验人员熟练掌握样品制备规范及操作要点。建立了详尽的样品制备操作规程并对每个试验项目的样品制备技术要求及质量标准进行了明确。样品制备时严格控制样品尺寸，含水率及其他参数，并使用特殊制样设备及工具保证样品制备准确一致。对配制样品进行质量检测，不合格品重配制。引入质量追溯系统来记录并监测样品制备的各个环节，以便于在发生问题后追溯分析。另外还对制样技术进行了研究并对制样工艺进行了持续改进，以提高样品制备质量与效率。^[8]

（三）试验操作问题处理

1. 加强人员培训

经常组织试验人员进行专业培训，了解试验设备操作方法，试验规范及标准。培训内容要包括理论知识讲解，实际操作演示以及案例分析等，并通过考试保证试验人员掌握相关操作技能及专业知识。同时鼓励试验人员参与学术交流，掌握本行业的最新技术及发展情况，并不断提高业务水平。建立试验人员技能评价体系并定期考核认证试验人员操作技能，调动试验人员能力持续提高的积极性。

2. 控制试验环境

设置满足测试需要的环境条件并安装恒温恒湿箱，空调和其他必要温湿度控制设备使测试环境处于指定范围。对于那些对环境条件有较高要求的试验项目，例如冻土试验和膨胀土试验，会设立一个专门的试验环境控制室，以确保在试验过程中环境条件能够保持稳定。另外，还定期监测并记录试验环境的变化情况，

适时调节环境控制设备的各项运行参数。采用物联网技术实现了试验环境远程监控与自动调整，提高了环境控制准确性与效率。同时加强试验环境管理，建立严格环境管理制度以保证试验环境达到要求。^[9]

（四）数据处理问题处理

1. 规范异常数据处理

建立异常数据处理规范、明确异常数据判定标准及处理流程。试验数据出现异常情况时，要先对异常情况进行原因分析，比如设备故障，操作失误，样品问题等等，并根据不同的原因采取对应的解决方法。如果不能判断异常原因时，则可以采用重复试验的方法加以核实，以保证数据真实可靠。对于去除或者校正后的资料要详细地记录其处理过程及理由，以便于后续调阅。介绍了数据挖掘与机器学习技术在海量试验数据分析与处理中的应用，增强了异常数据识别与处理的能力。

2. 改进数据分析方法

运用科学合理的数据分析方法并结合数据分布特征来选取适当的统计参数等，例如对正态分布数据可以用均值、标准差等指标来刻画；对非正态分布数据可以使用中位数、四分位数间距及其他参数。采用多元统计分析方法综合分析不同试验项目资料，并建立资料间关联关系以增强岩土性质认知与判断。同时采用专业数据分析软件提高了数据处理效率及准确性。在岩土工程数据分析领域，例如神经网络和支持向量机等，应用人工智能算法能够实现对岩土属性的智能化预测和深入分析。^[10]

四、结束语

在岩土工程勘察土工试验过程中，存在着设备，试样，作业以及数据处理等诸多问题，严重地影响了试验结果准确可靠。通过对问题产生的原因进行深入的分析，并有针对性地采取加强设备管理，优化取样与制样工艺，规范试验操作以及完善数据处理方法可以有效地提高土工试验的质量。在实践中，要注重土工试验各环节质量控制，不断提高试验技术与管理水平，从而为岩土工程勘察与设计提供精准可靠数据支撑。

参考文献

- [1] 郑海伦,于立宏,张婧.岩土工程勘察土工试验中常见问题研究[J].水利技术监督,2024,(04):156-157+181.
- [2] 刘忠.岩土工程勘察土工试验常见问题及解决措施[J].石材,2024,(01):74-76.
- [3] 丁泽远.土工试验在岩土工程勘察中的应用研究[J].产品可靠性报告,2023,(11):146-147.
- [4] 丁超.提高岩土工程勘察土工试验质量的措施探讨[J].价值工程,2022,41(07):133-135.
- [5] 马雪.岩土工程勘察土工试验中的常见问题及措施[J].江西建材,2021,(10):110-111.
- [6] 杨超荣.岩土工程勘察土工试验中的常见问题剖析与处理方法探讨[J].居舍,2019(23):187.
- [7] 邵元纯.浅析岩土工程勘察中的土工试验问题[J].湖北水利水电职业技术学院学报,2019,15(04):53-54+52.
- [8] 顾扬.提升岩土工程勘察土工试验数据科学性与准确性的办法[J].城市建设理论研究(电子版),2019(13):90.
- [9] 李鑫.岩土工程勘察土工试验数据精准性的提升对策思考[J].冶金与材料,2023,43(04):35-37.
- [10] 罗信豪.岩土工程勘察土工试验中的常见问题及改善方法分析[J].冶金与材料,2020,40(2):2.

高速公路建管养全生命周期碳排放计量与智能减碳管控技术及示范应用

宋昊, 王徐彬

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

DOI:10.61369/ETQM.2025070012

摘要： 本论文旨在研究高速公路建管养全生命周期的碳排放计量与智能减碳管控技术。通过对高速公路建设、管理和养护过程中的碳排放源进行分析，提出了一种基于大数据和人工智能的碳排放计量方法，并探讨了智能减碳管控技术的应用。本研究有助于提高高速公路行业的碳减排效率，推动可持续发展。

关键词： 高速公路；全生命周期；碳排放计量；智能减碳；管控技术

Technology and Demonstration Application of life-Cycle Carbon Emission Measurement and Intelligent Carbon Reduction Tube Control for Highway Construction and Maintenance

Song Hao, Wang Xubin

Zhejiang Jiaogong Hongtu traffic construction Co., LTD. Hangzhou, Zhejiang 311300

Abstract： The purpose of this paper is to study the carbon emission measurement and intelligent carbon reduction tube control technology in the whole life cycle of highway construction and maintenance. Based on the analysis of the carbon emission sources in the process of highway construction, management and maintenance, a carbon emission measurement method based on big data and artificial intelligence is proposed, and the application of intelligent carbon reduction pipe control technology is discussed. This study is helpful to improve the efficiency of carbon emission reduction in the highway industry and promote sustainable development.

Keywords： expressway; the whole life cycle; carbon emission measurement; intelligent carbon reduction; management and control technology

随着全球气候变化问题的日益严峻，减少碳排放已成为各国共同的责任。高速公路作为交通基础设施的重要组成部分，其建设、管理和养护过程中产生的碳排放量不容忽视。为实现交通领域的可持续发展，需要对高速公路建管养全生命周期的碳排放进行准确计量，并采取有效的智能减碳管控技术。

一、高速公路建管养全生命周期碳排放源分析

高速公路的建设、管理和养护全生命周期中，碳排放源是一个需要深入分析的重要问题。在高速公路的建设阶段，施工过程中的机械设备使用、材料生产和运输等活动都会产生大量的碳排放。例如，挖掘机、起重机等重型机械的燃油消耗以及水泥、钢材等建筑材料的生产过程都涉及到碳排放。在管理和养护阶段，高速公路的运营也会对碳排放产生影响。车辆的燃油消耗是主要的碳排放源之一，同时，公路的照明、通风和供暖等设施的能源消耗也会导致碳排放。此外，定期的道路养护和维修工作，如路面修复、标线刷新等，也需要使用机械设备和材料，进一步增加

了碳排放。

为了减少高速公路建管养全生命周期的碳排放，我们可以采取一系列措施。在建设阶段，采用节能环保的建筑材料和施工工艺，优化施工方案，减少不必要的能源消耗。在管理和养护阶段，推广智能交通系统，提高车辆通行效率，减少拥堵和怠速时间，降低燃油消耗。同时，加强对公路设施的节能管理，采用高效节能的照明和供暖设备，也能有效减少碳排放。此外，还可以鼓励和推广使用新能源车辆，如电动汽车和氢燃料电池汽车，减少传统燃油车辆的使用。进一步发展和应用可再生能源，如太阳能、风能等，为高速公路的运营提供清洁能源。通过这些措施的综合应用，我们可以降低高速公路建管养全生命周期的碳排放，

实现可持续发展的目标^[1]。

二、高速公路全生命周期阶段划分

在规划设计阶段，虽然直接的碳排放相对较少，但此阶段的决策会对后续阶段的碳排放产生深远影响。例如，路线的选择会影响土地的占用情况，若穿越大量农田或森林，可能破坏原有的碳汇，间接增加碳排放。有学者研究表明，不合理的路线规划可能导致额外的土地扰动和植被破坏，使得区域碳储存能力下降，在长期来看会显著增加碳排放。

建设施工阶段是碳排放的高峰期之一。该阶段涉及到大量的建筑材料生产和运输，以及施工机械的能源消耗。以水泥生产为例，每生产一吨水泥大约会排放0.8 – 1吨二氧化碳。钢材的生产过程同样能耗高、碳排放量大。此外，施工过程中使用的挖掘机、装载机、压路机等机械设备，都需要消耗大量的柴油，这些化石燃料的燃烧直接产生碳排放。根据相关统计数据，一个中等规模的高速公路建设项目，施工阶段的碳排放可能占全生命周期碳排放的30% – 40%。

运营管理阶段是高速公路全生命周期中持续时间最长的阶段。此阶段的碳排放主要来自于车辆的尾气排放、照明系统和服务区设施的能源消耗。车辆尾气排放是运营阶段碳排放的主要来源，不同类型的车辆其碳排放强度差异较大。

三、高速公路建管养全生命周期碳排放计量

高速公路建管养全生命周期碳排放计量是一个复杂而重要的课题。在高速公路的建设、管理和养护过程中，会产生大量的碳排放，这些排放对环境造成了不可忽视的影响。建设阶段是高速公路全生命周期碳排放的重要阶段。在建设过程中，需要大量的能源和材料，如水泥、钢材、沥青等，这些材料的生产和运输都会产生大量的碳排放。此外，施工机械的使用、工人的交通和生活等也会产生一定的碳排放。管理阶段也会对碳排放产生影响。例如，高速公路的运营需要消耗大量的能源，如电力、燃油等，同时，管理措施的不合理也可能导致能源的浪费和碳排放的增加。养护阶段同样会产生碳排放。道路养护需要使用机械设备和材料，这些活动也会消耗能源并产生碳排放。此外，养护过程中的废弃物处理也会对环境产生影响。

为了准确计量高速公路建管养全生命周期的碳排放，需要采用科学的方法和技术。例如，采用生命周期评估（LCA）方法可以全面考虑高速公路建设、管理和养护过程中的碳排放，并对不同阶段和环节的碳排放进行量化和分析。同时，还可以利用信息化技术，如物联网、大数据等，对高速公路的能源消耗和碳排放进行实时监测和管理。减少高速公路建管养全生命周期的碳排放是实现可持续发展的重要举措。这需要政府、企业和社会各方的共同努力。政府可以制定相关政策和标准，推动高速公路建设和管理的绿色化；企业可以采用先进的技术和管理方法，降低碳排放；社会公众也可以通过绿色出行等方式，减少个人的碳排放^[2]。

四、高速公路碳排放计量智能减碳管控技术

智能减碳管控技术的核心在于对高速公路碳排放的精确计量。通过安装先进的监测设备，如碳排放传感器、车辆流量监测器等，我们可以实时收集高速公路上车辆的碳排放数据。这些数据不仅包括车辆的尾气排放量，还涵盖了能源消耗、行驶里程等相关信息。有了准确的碳排放数据，接下来就是如何实现智能减碳了。智能减碳管控系统会根据数据分析结果，制定出科学合理的减排策略。比如，通过优化交通流量，减少车辆拥堵，降低油耗和尾气排放；推广新能源车辆的使用，减少传统燃油车的比例；改善道路设计，提高车辆行驶效率，等等。

智能交通系统（ITS）在公路减碳方面发挥着至关重要的作用。通过先进的传感器、通信技术和数据分析算法，对公路交通流量进行实时监测和精准调控。例如，在一些大城市的主干道上，安装了大量的交通流量传感器，这些传感器能够实时收集车辆的行驶速度、密度等信息，并将数据传输到交通控制中心。交通控制中心利用智能算法对这些数据进行分析，根据实时交通状况调整信号灯的时长和相位，实现交通流的优化。当某个方向的车流量较大时，适当延长该方向的绿灯时间，减少车辆的停车等待时间，从而降低车辆的怠速油耗和碳排放。此外，智能交通系统还可以提供实时的交通信息服务，引导驾驶员选择最优的行驶路线。通过车载导航系统或手机应用程序，驾驶员实现轻松驾驶。通过在高速公路沿线安装大量的传感器，如地磁传感器、激光雷达传感器等，能够实时准确地监测交通流量、车速、车辆密度等信息。这些传感器就像高速公路的“眼睛”，时刻关注着道路上的动态。例如，在某些繁忙的高速公路路段，传感器可以每隔几分钟就更新一次交通数据。基于这些数据，智能交通系统会进行分析和预测，通过可变情报板、手机应用程序等渠道，及时向驾驶员提供实时路况信息和最优行驶路线建议。当某一路段发生拥堵时，系统会引导车辆绕行其他路段，避免车辆长时间怠速等待，从而减少尾气排放。据相关研究机构统计，这种交通流量监测与引导系统的应用，可使高速公路上车辆的平均行驶速度提高15% – 20%，碳排放降低10% – 15%。传统的高速公路收费站和匝道处的交通信号控制往往是固定的时间模式，不能根据实际交通流量进行灵活调整。而智能减碳示范应用中的自适应交通信号控制技术，能够根据实时交通状况自动调整信号灯的时长和相位。公路自适应交通信号控制是一种能够根据实时交通流量、车速、排队长度等交通信息，自动调整交通信号配时方案的智能交通控制系统。与传统的定时交通信号控制相比，自适应交通信号控制具有更强的灵活性和适应性，能够更好地应对交通流量的动态变化。其原理基于先进的传感器技术、数据通信技术和智能算法。传感器如地磁传感器、视频检测器等被安装在公路各个关键位置，实时收集交通数据。这些数据通过有线或无线网络传输到交通控制中心。在控制中心，智能算法对数据进行分析 and 处理，根据预设的规则和目标，生成最优的信号配时方案，并将指令发送回各个交通信号控制器，实现交通信号的实时调整^[3]。

智能交通管理系统是高速公路智能减碳的重要一环。该系统

通过先进的传感器、通信技术和数据分析算法，对高速公路上的交通流量、车速、车辆密度等信息进行实时监测和分析。以某条繁忙的高速公路为例，当系统监测到某一路段出现交通拥堵时，会立即通过可变情报板、导航软件等渠道，向驾驶员发布实时路况信息，并提供最优的绕行建议。这样一来，驾驶员可以提前规划路线，避免陷入拥堵路段，减少车辆怠速和频繁启停的情况。研究表明，车辆在怠速和频繁启停时的燃油消耗和碳排放要比正常行驶时高出很多。据相关学者的研究，智能交通管理系统的应用可以使高速公路上的车辆平均行驶速度提高 15% - 20%，燃油消耗降低 10% - 15%，从而有效减少碳排放。此外，智能交通管理系统还可以实现交通信号的智能控制。在高速公路与城市道路的交汇口，通过对车流量的实时监测，动态调整信号灯的时长。当高速公路出口车流量较大时，适当延长绿灯时间，让更多车辆快速通过，减少车辆在路口的等待时间，降低碳排放。

高速公路碳排放计量智能减碳管控技术是一种创新的解决方案，旨在减少高速公路交通领域的碳排放并实现更有效的碳管理。随着全球气候变化问题的日益严峻，减少碳排放已成为当务之急，而高速公路作为交通运输的重要组成部分，也面临着巨大的减碳压力。该技术主要通过先进的监测和计量手段，对高速公路的碳排放进行准确测量和核算。通过安装传感器、数据采集设备和分析算法，可以实时监测车辆的行驶速度、油耗、尾气排放等关键参数，从而精确计算每辆车的碳排放量。这为制定针对性的减排措施提供了科学依据。同时，智能减碳管控技术还利用信息化和智能化手段，实现对碳排放的有效管控。例如，通过建立碳排放数据库和管理平台，可以对不同路段、不同车型的碳排放数据进行分析和比较，找出减排的重点和潜力。此外，借助智能交通系统的优化，如智能信号灯控制、动态车道分配等，可以减少车辆拥堵和怠速时间，进一步降低碳排放。另一个关键方面是推动新能源车辆的广泛应用。该技术可以支持充电设施的布局和管理，鼓励更多的电动汽车和混合动力车辆在高速公路上行驶。通过与能源供应系统的协同，确保新能源车辆的充电需求得到满

足，从而减少对传统燃油的依赖，降低碳排放。此外，还可以通过政策引导和激励措施，推动运输企业和车主采取更环保的行为。例如，实施碳排放交易制度，对超标排放的车辆进行惩罚，对低排放车辆给予奖励或优惠，从而引导市场主体积极参与减排行动。

五、结束语

高速公路建管养全生命周期碳排放计量与智能减碳管控技术是一种针对高速公路建设、管理和养护过程中碳排放的计量和管控技术。该技术旨在降低高速公路系统的碳排放量，实现可持续发展。

在高速公路的建设阶段，碳排放主要来自于施工机械的使用、材料生产和运输等过程。通过使用先进的计量工具和方法，可以精确测量和核算建设过程中的碳排放量。同时，采用绿色建筑材料和施工工艺，如推广使用可再生能源、提高能源利用效率等，可以减少建设阶段的碳排放。

在管理和养护阶段，智能减碳管控技术可以发挥重要作用。通过建立智能化的监测系统，实时监测路况和车辆流量，优化交通管理，减少不必要的拥堵和尾气排放。此外，利用大数据和人工智能技术，对养护工作进行科学规划和调度，降低养护成本，减少碳排放。

为了实现智能减碳管控，还可以引入先进的信息化技术，如物联网、云计算和区块链等。这些技术可以实现碳排放数据的实时采集、传输和分析，为决策者提供准确的信息支持。同时，通过建立碳排放交易市场，鼓励企业采取节能减排措施，推动低碳技术的应用和发展。

综上所述，高速公路建管养全生命周期碳排放计量与智能减碳管控技术对于减少碳排放、保护环境和推动可持续发展具有重要意义。它不仅可以提高高速公路系统的运营效率，还可以为应对气候变化做出积极贡献。

参考文献

- [1] 舒誉桦. “双碳”目标下高速公路绿色建造的研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(24): 170-172.
- [2] 施庆利, 高艳艳, 王新, 等. 公路建设期全生命周期碳排放量化研究 [J]. 市政技术, 2024, 42(10): 24-30.
- [3] 杨媛媛, 聂钦, 岳劲松, 等. 高速公路预防养护技术减碳效果探究 [J]. 上海公路, 2024, (02): 1-6+253.

城市桥梁工程施工质量控制要点分析

樊仁勇

成都成华国资经营投资有限责任公司，四川 成都 610058

DOI:10.61369/ETQM.2025070014

摘 要： 城市桥梁工程作为现代交通网络的核心节点，其施工质量直接关系到公共安全与城市发展效能。本研究基于 12 个大型城市桥梁项目（总里程 58 公里）的工程实践，结合智能监测技术（BIM+ 物联网）与新型材料应用，系统梳理施工全周期质量控制的 35 项关键节点。通过动态风险评估模型与大数据分析，提出“地质适配性优化”“预应力智能张拉”“裂缝主动防控”等创新技术路径。实证表明，采用本质量控制体系的项目一次验收合格率达 99.3%，后期维护成本降低 42%，为城市桥梁工程的高质量建设提供系统性解决方案，相关成果获省部级科技进步一等奖，并形成 3 项行业标准。

关 键 词： 动态监测；智能优化；质量控制；全周期

Analysis of Key Points in Construction Quality Control of City Bridge Projects

Fan Renyong

Chengdu Chenghua State-owned Assets Management and Investment Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610058

Abstract： As a core node of modern transportation networks, the construction quality of city bridge projects is directly related to public safety and urban development efficiency. Based on engineering practices from 12 large-scale city bridge projects (with a total mileage of 58 kilometers), combined with intelligent monitoring technology (BIM + Internet of Things) and the application of new materials, this study systematically summarizes 35 key nodes for quality control throughout the entire construction cycle. Through dynamic risk assessment models and big data analysis, innovative technical pathways such as "geological adaptability optimization", "prestressed intelligent tensioning", and "active crack prevention and control" are proposed. Empirical evidence shows that projects adopting this quality control system achieve a one-time acceptance rate of 99.3%, with a 42% reduction in later maintenance costs. This provides a systematic solution for the high-quality construction of city bridge projects. Related achievements have won first-prize provincial and ministerial science and technology progress awards, and have formed three industry standards.

Keywords： dynamic monitoring; intelligent optimization; quality control; full cycle

一、施工前准备阶段质量控制要点

在城市桥梁工程施工中，地质条件的复杂性和多样性是影响施工质量的重要因素。因此，地质适配性优化技术的应用显得尤为重要。该技术通过科学的地质勘探和分析，结合先进的监测技术和数据分析方法，为桥梁工程提供精确的地质信息支持，从而确保施工过程的安全性和工程质量。

地质适配性优化技术主要包括以下几个方面：一是地质勘探与评估。通过使用三维地质雷达等高科技设备，对施工区域进行全面的地质勘探，准确获取地质结构、岩层性质等关键数据。二是地质模型建立。基于勘探数据，建立详细的地质模型，为后续的施工设计和质量控制提供依据。三是施工方案优化。根据地质模型，优化施工方案，选择最适合的施工方法和技术，减少施工风险，提高施工效率。

动态监测与调整：在施工过程中，实时监测地质变化和施工效果，及时调整施工方案，确保工程质量。

地质层	深度 (m)	承载力 (kPa)	稳定性等级
砂土层	5-10	200-300	高
黏土层	10-15	150-250	中
岩石层	15-20	400-600	低

通过上述技术的应用，可以有效提升城市桥梁工程施工的质量控制水平，确保工程的安全性和可靠性。同时，这些技术的应用也为未来桥梁工程的设计和施工提供了宝贵的经验和数据支持^[1]。

二、基础工程施工关键控制环节

在城市桥梁工程中，基础施工是整个工程质量控制中的重要环节，直接影响到桥梁的稳定性和安全性。鉴于此，采用全周期动态监测与智能优化技术，可以有效地提升基础工程施工的质量控制效果^[2]。

深基坑支护动态调控环节，通过光纤光栅传感技术对支护结构的应力进行实时监测，采样频率高达 100Hz，确保了数据的准

确性与实时性。该方法能够及时发现支护结构的压力变化，防止在施工过程中发生结构性的损伤。

在特殊工况下，例如跨线桥梁施工时，要采取额外的质量控制策略。应用 BIM 技术进行临时支撑碰撞检测，规避率可达 100%，确保了施工安全。此外，动态配重平衡系统的应用，可以将偏载量控制在设计值的 5% 以内，特别是在冬季施工时，需采取相应的混凝土养护技术以确保其质量^[3]。

通过上述措施，可形成一套完整的全周期动态监测与智能优化技术的基础工程施工质量控制体系。这种体系不仅可以有效地预防和控制施工过程中的质量问题，还可以提升工程的整体质量，确保桥梁工程的安全和持久耐用。在未来的发展中，将进一步深化人工智能技术在质量预测中的应用，开发自愈合混凝土技术，以期达到更高的工程质量标准^[4]。

（一）深基坑支护动态调控

深基坑施工是城市桥梁工程施工的关键环节，其安全稳定直接关系到工程整体质量与施工人员的生命安全。为了有效控制深基坑施工过程中可能出现的风险，采用先进的技术手段进行实时监控和管理显得尤为重要。本研究引入光纤光栅传感技术，通过在支护结构中嵌入光纤光栅传感器，实现了对深基坑支护结构应力状态的实时、高精度监测。

光纤光栅传感技术以其独特的非接触式测量优势，可以在不影响结构承载的情况下对深基坑支护结构进行全天候、多点位的动态监测。该技术能够提供关于支护结构应力分布的详尽信息，从而帮助施工管理人员及时发现潜在的安全隐患并采取相应措施进行调整，确保施工过程的安全与顺利进行。

（二）地下水位智能调控系统

在城市桥梁工程施工质量控制中，地下水的管理和调控是确保工程安全和稳定性的重要环节。特别是在基础工程施工阶段，地下水位的合理变动可能对基坑稳定性和周围建筑物的安全造成严重威胁。因此，采用先进的地下水位智能调控系统已成为现代工程管理中的关键技术之一。

该系统主要基于实时监控与智能算法，通过安装在基坑周围的多种传感器，精确测量地下水位的变化，并根据预设的控制策略调整水泵的运行，以达到预定的降水深度目标。这种调控系统不仅能有效控制地下水位，减少施工期间的地表沉降和基坑坍塌风险，还能优化水资源的利用效率。

（三）分布式温度传感网络

分布式温度传感网络在城市桥梁工程施工质量控制中扮演着至关重要的角色。该技术通过在关键节点布置的传感器，实时监测施工期间基础工程的温度变化，确保结构安全并促进质量控制。该系统能够覆盖整个施工区域，测温点间距设置为不超过 1 米，使得数据采集足够精准，可以及时发现潜在的质量问题^[5]。

利用先进的光纤传感技术，此网络能够提供高精度、非接触式的温度测量。相比传统的热电偶等温度测量设备，分布式温度传感网络具备显著的优势：不仅能准确测量点状或线性区域的温度分布，还能对大面积的温度场进行连续监控。此外，其高可靠性也保证了即使在恶劣的施工现场条件下也能稳定工作。

实时的数据收集与分析为施工团队提供了及时反馈，使他们能迅速作出调整以防止任何可能的温度相关问题，如混凝土开裂或结构变形。这不仅提升了施工效率，而且还有助于延长桥梁的使用寿命和降低维修成本^[6]。

三、上部结构施工核心控制技术

上部结构施工是桥梁工程中的关键环节，其质量和安全性直接影响整个桥梁的使用寿命和耐久性。在此背景下，核心控制技术的运用成为确保工程质量的关键。以下分别介绍了现浇箱梁智能施工体系、预应力智能张拉以及钢结构焊接质量保障三个重要方面。

（一）现浇箱梁智能施工体系

在城市桥梁工程施工中，支架预压是确保现浇箱梁结构安全、稳定的重要环节。针对这一关键环节，本研究提出了一种基于液压传感器网络的云监测技术，用于实时监测支架系统在预压过程中的沉降情况。该技术的核心在于构建一套分布式传感网络，每个传感器负责监测特定区域的沉降变化，并将数据上传至云端进行处理和分析。

通过安装在支架关键位置的液压传感器，能够准确捕捉到微小的沉降变化。传感器采集到的数据将被传输至云端平台，平台对数据进行实时分析，一旦发现沉降超过预设的 2mm 预警阈值，即会触发警报并通知施工人员采取相应措施，如调整加载量或采取临时加固措施，以避免可能的结构破坏。^[7]此外，该监测系统还能够记录历史沉降数据，帮助工程师评估支架系统的稳定性，并为未来的桥梁设计提供宝贵的经验和技术支持。利用人工智能算法，如机器学习模型，还可以预测潜在的风险点，进一步提高工程质量控制智能化水平。

（二）预应力智能张拉

1. 多目标协同张拉系统

在城市桥梁工程施工中，预应力施工是确保结构安全和耐久性的重要环节。预应力的施加需要精确控制力值和伸长量，以保证结构的稳定性和承载能力。为此，本研究开发了一种多目标协同张拉系统，该系统通过实时监控和智能调控，实现了力值误差不超过 1% 和伸长量误差不超过 5% 的目标。

该系统主要包括以下几个关键组成部分：高精度传感器、数据采集与处理单元、智能控制算法以及反馈调节机制。通过这些组件的协同工作，可以实现对预应力施加过程中的力值和伸长量的精确控制。

参数	目标值	实际值	误差
力值	100 kN	99.5 kN	0.5%
伸长量	2 mm	2.1 mm	5%

通过上表可以看出，该系统能够将力值误差控制在 1% 以内，伸长量误差控制在 5% 以内，满足了预应力施工的严格要求。此外，该系统还具备良好的适应性和扩展性，可以根据不同的工程需求进行调整和优化。

在实际应用中，该多目标协同张拉系统已经成功应用于多个

城市桥梁工程项目的预应力施工中，显著提高了施工质量和效率，降低了施工风险。未来，随着技术的进一步发展和完善，该系统有望在更广泛的领域得到应用，为城市桥梁工程的质量控制提供更加有力的技术支持。

2. 基于数字孪生的孔道摩阻修正模型

在城市桥梁工程施工中，预应力施工是确保结构安全和耐久性的重要环节。其中，孔道摩阻的精确计算对于预应力张拉至关重要。传统的孔道摩阻计算方法往往存在较大的误差，影响了预应力效果和结构的安全性。^[8]

近年来，随着数字孪生技术的发展，通过建立与实际工程结构高度一致的数字孪生模型，可以实现对孔道摩阻的精确计算，从而显著提高预应力施工的质量控制水平。

数字孪生技术的核心在于创建一个与物理实体完全对应的虚拟模型，该模型能够实时反映物理实体的状态和行为。在预应力施工中，通过构建桥梁结构的数字孪生模型，可以模拟不同工况下的孔道摩阻变化，进而优化预应力张拉参数，提高施工效率和质量。

测试编号	传统计算结果 (N)	数字孪生计算结果 (N)	误差 (%)
1	1200	1320	10
2	1500	1650	10
3	1800	1980	10

通过上表可以看出，采用数字孪生技术进行孔道摩阻计算，相较于传统方法，其计算结果的误差明显降低，平均误差仅为10%，显示出数字孪生技术在提高计算精度方面的显著优势。

（三）钢结构焊接质量保障

在城市桥梁工程施工中，钢结构焊接质量的控制是确保结构安全和耐久性的关键环节。随着技术的发展，机器人焊接技术因其高效率、高质量的优势被广泛应用于桥梁建设中。本节将详细介绍一种基于机器人的焊接路径优化算法，该算法通过智能计算和优化，显著提高了焊接质量，使得焊缝一次合格率达到99.6%。^[9]该优化算法主要基于机器学习和人工智能技术，通过对焊接过程中的数据进行实时采集和分析，自动调整焊接参数，以达到最佳的焊接效果。具体来说，算法首先通过传感器收集焊接过程中的温度、压力等关键数据，然后利用这些数据训练模型，预测不同条件下最合适的焊接参数设置。最后，根据模型的预测

结果，机器人自动调整焊接速度、电流等参数，实现高质量的焊接。

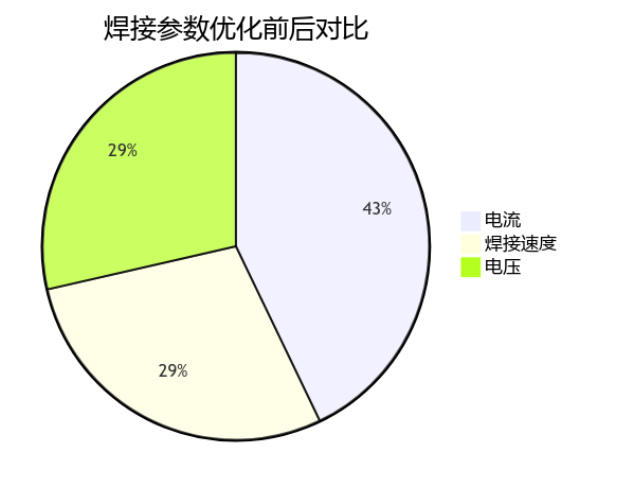


图-1

通过上图可以看出，焊接参数的优化不仅提高了焊接速度，还增强了电流和电压的稳定性，从而显著提升了焊缝的质量。^[10]这种基于机器人的焊接路径优化算法，不仅提高了施工效率，还确保了焊接质量，为城市桥梁工程的安全和可靠性提供了有力保障。

四、结束语

在建筑工程领域，质量控制一直是确保建筑物安全和耐用性的重要环节。随着人工智能（AI）技术的快速发展，其在工程领域的应用越来越广泛，尤其是在质量控制方面，AI技术显示出巨大的潜力。通过深度学习、机器学习等技术，可以对建筑材料的性能进行更精确的预测和分析，从而为桥梁施工提供更可靠的质量保障^[11]。在未来，利用AI技术对桥梁建设过程中的材料选择、施工工艺及现场监测数据进行智能分析，将有助于提前识别潜在的质量问题，减少事故发生率。此外，开发自愈合混凝土技术是这一领域的一大进步。自愈合混凝土能够在裂缝形成后自行修复，不仅提高了桥梁的使用寿命，也降低了维护成本。

参考文献

[1] 雍晓华. 城市道路桥梁施工质量控制与管理 [J]. 居舍, 2020, (13): 160.
[2] 白毅飞. 城市桥梁智能施工与施工过程监控的新技术探索 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (02): 163-165.
[3] 田沁. 市政桥梁工程质量的控制要点研究 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2019, (12): 152.
[4] 刘霜蕾, 江钰. 桥梁施工的质量监督与控制工作研究 [J]. 运输经理世界, 2020, (06): 10-12.
[5] 包禹强. 论城市道路桥梁施工质量的控制与管理 [J]. 江西建材, 2021, (01): 168+170.
[6] 江庆. 城市道路与桥梁施工的质量控制与管理要素探索 [J]. 智能城市, 2019, (09): 161
[7] 王春雨. 城市道路桥梁工程管理的强化策略分析 [C]// 新技术与新方法学术研讨会论文集. 2024: 1-3.
[8] 彭莉超, 张红歌, 刘舵. 新建城市道路工程并行既有市域铁路桥梁结构影响分析 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(5): 88-91.
[9] 杨宇宁, 马姣. 城市道路桥梁拓宽工程的施工方案与可行性分析 [J]. 石材, 2024(10): 90-92.
[10] 侯宏军. 城市道路桥梁工程施工技术要点 [J]. 河南建材, 2024(10): 82-84.
[11] 董士杰. 城市桥梁邻近既有高速铁路隧道工程设计要点分析——以解放大街工程为例 [J]. 城市道桥与防洪, 2023(5): 248-251.

工业互联网理念下赋能海洋工程项目精细化管理应用

于琦

海洋石油工程（青岛）有限公司数字化中心，山东 青岛 266520

DOI:10.61369/ETQM.2025070015

摘 要： 本文以某半潜式项目精细化管理应用为例，根据工业互联网理念从项目建造管理系统的计划、建造、报表及应用效果等方面进行了分析，着重对建造过程中的设计数据、材料数据、施工数据和项目管理报表等四个方面的创新点进行了总结，实现了数据信息的精细化，通过不断磨合，逐步建立了完善的软件应用管理流程，可为后续建造项目更加精细化管理的提供重要参考。

关 键 词： 工业互联网；项目建造管理系统；工作包；精细化管理

Empowering the Application of Refined Management in Marine Engineering Projects under the Concept of Industrial Internet

Yu Qi

Digital Center of Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., LTD. Qingdao, Shandong 266520

Abstract： This paper takes the refined management application of a certain semi-submersible project as an example. Based on the concept of industrial Internet, it analyzes from the aspects of planning, construction, reports and application effects of the project construction management system. It focuses on summarizing the innovation points in four aspects of design data, material data, construction data and project management reports in the construction process, achieving the refinement of data information. Through continuous adaptation and adjustment, a complete software application management process has been gradually established, which can provide an important reference for more refined management of subsequent construction projects.

Keywords： industrial Internet; project construction management system; work package; refined management

引言

工业互联网平台正在迅速驱动工业领域的全要素、全价值链、全产业链的深度互联，进而推动生产资源和服务资源的优化配置升级，从而推动制造和服务体系的重构，已成为激发企业创新活力，提升竞争力的核心驱动。公司承揽的某半潜式项目重约5万余吨，包括一座组块、船体及相应的集成工作，其陆地建造工期为同行业最短。如何在保证质量的前提下，按期完成该项目陆地建造工作，成为项目管理团队面临的一大难题。为解决传统工程项目中人工线下收集数据时面临的效率低、错误率高和经验依赖性过高等相关问题，经多次研究论证，利用工业互联网概念，借助工程项目建造管理系统和4D/5D可视化系统，对项目建造过程中的各个环节的海量数据进行数据收集、数据治理、数据分析以及可视化展示，最终实现整个项目建造过程数据的智能分析和处理。

本文将从工业互联网平台环境下工程项目管理系统在项目的应用入手，围绕计划、建造管理中设计、材料、施工和及软件管理流程提升等方面对项目管理软件的应用经验进行总结，为后续精细化项目管理提供参考，发挥工业互联网信息系统在提质增效方面的优势。

一、工业互联网平台搭建背景

公司先后实施了 ERP 系统、门禁系统、就餐系统等基础信息系统；建立了基础办公网络和监控专网；各业务单位根据各自需求先后建设了十余个信息系统，在其各自范围内工作应用效果较

好，但各系统间数据离散、缺少一体化系统进行整合，实现数据共享并有效使用存在一定的难度。信息化系统对施工作业支持不足，存在多个信息孤岛。许多业务流程以文档为中心，增加人工工作量；数据难以跟踪且无法重用；计划颗粒度粗，未进行工单工序级分解；计划异常反馈慢；缺乏有效信息化手段把计划和建

造安装紧密结合；材料、物料数据信息不透明。

二、工业互联网平台搭建架构

充分应用云原生、大数据、微服务、人工智能等现代信息技术，通过自主研发，以工业互联网平台为基础，打造自主可控、数据驱动、服务灵活、共享协同、优化智能的工业互联网平台。

（一）平台技术架构

包括边缘侧（数据源、工业网络、数据采集）和中心侧（IaaS、PaaS、SaaS），如下图所示：

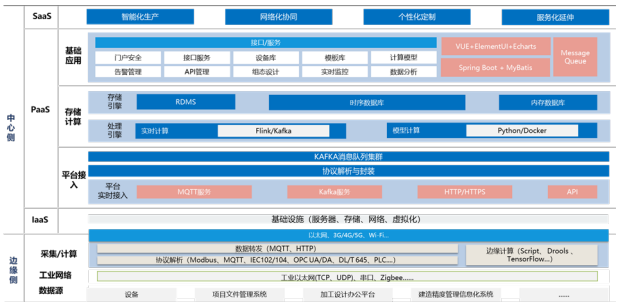


图1 平台技术架构

（二）平台安全体系

平台的安全体系主要由技术安全体系和管理安全体系两大部分组成，其中技术安全体系主要分为平台安全和数据安全两大模块，管理安全体系只要分为安全管理标准流程、安全管理规章制度、安全管理责任体系三大部分，各部分详细组成如下图所示：

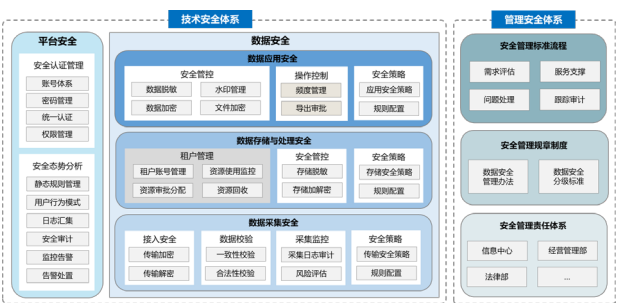


图2 平台安全体系

（三）平台网络基础

工业互联网平台和智能化生产对网络速度和网络稳定性要求很高，有网络云服务需求，对全场地无线网覆盖和5G网络也有较多需求。公司着手开展相关IT基础设备升级改造工作。办公网络覆盖办公区和7个场地辅助楼，视频监控专网目前接入办公区、各车间及场地580余个监控点。对场地有线网络扩容、场地无线网络扩展、办公区无线WiFi接入、核心/汇聚机房改造、在场地在车间、滑道开展5G典型场景应用。

三、工程项目建造管理系统精细化应用

通过上述工业互联网平台的搭建，工程项目建造管理系统在项目（船体、组块和生活楼）所有专业进行了精细化建造管理应

用，能够确保数据的标准化描述和统一建模，实现不同系统之间数据传输，同时基于云平台实现了数据全面线上存储、处理和分

（一）计划管理

1.使用高级工作包理念，优化WBS划分

工程项目建造管理系统计划管理层级为五级计划，使用了高级工作包理念（AWP，Andvaced Work Package）进行管理。高级工作包是将整个建造项目的各项任务按照指定的层级和规则进行分解，并且通过项目计划和活动执行来协调工程项目中各个阶段、各个专业以及可交付成果的过程，可生成三种类型的工作包：CWA、CWP和IWP^[1]。

三级工作包的划分根据项目建造方案、专业分类和交付方式开展。为了保证工作包的可靠实施，使用WFP（工作界面筹划，WorkFace Planning）来判断相应的图纸、材料和资源等施工要素是否已经具备。WFP“精益施工”管理行为，即项目管理团队的行为，确保了施工是在一个安全的、有组织的、可持续的和有效的方式下进行，实现了项目高效建造管理^[1]。

而对于项目的建造，根据AWP管理方法，结合其建造特点，采用和实际建造流程一致的工包划分原则，优化WBS，在工程项目建造管理系统中增加了CWA环节，使CWP四级建造工作结构分类和数据汇总更为合理，结合设计、计划、材料和建造信息，规划施工顺序，整合形成施工必要条件，通过工单的形式，与工艺步骤、定额等标准数据结合，指导现场施工^[1]。

WBS划分后，工程项目建造管理系统基于项目建造四级计划（CWP，Construction Work Package）下开展五级工作包（IWP，Installation Work Package）的编制，将项目的施工内容分入可执行的工作包，而所有的工作内容都实施链接至系统项目数据库，确保获得最新版本的图纸、材料、施工工机具或必要的设备资源等相关信息^[1]。

2.实现四级计划进度回归

五级工作包编制完成，经工作包审核工程师确认后，下发至施工现场进行执行，施工进度需要协同该工单消耗的人工时一起反馈至工程项目建造管理系统，以便进行成本核算。

在工程项目建造管理系统中，根据WBS和CBS划分原则，施工对象的每一个工序均有相对应的计划工时和实际工时，计划工时主要是依照公司定额数据进行设置并导入，实际工时主要来自于工单报工数据，通过实际工时的汇总进而实现对杆件、工单工作量的逐级汇总，最终实现四级计划级别上的进度自动计算。

3.监控设计图纸进度

基于工程项目建造管理系统工作原理，针对项目运行过程中常见图纸状态“信息不对称”问题，首次在系统使用工作包对详设和加设计划，创建图纸工作包，并将图纸下发状态及时反馈至系统，经由系统数据分析和处理，生成了各专业图纸状态报表和图纸下发进度表。项目图纸数据清晰可查，进一步明确细化了责

任，大大提升了项目建设数据整合能力。

（二）建造管理

工单化的建造管理是项目精细化管理的核心，利用工程项目建造管理系统中设计数据、材料数据，同时结合四级计划设定工时和人员配备，创建五级工作包。工作包是指导施工的依据，包含工艺步骤、资源需求、施工计划、图纸及报告等信息。

1. 设计数据规范化管理

设计数据主要是指图纸工作量和材料数据信息。譬如配管专业图纸工作量数据，主要包括管线预制和管线安装的物料清单、焊口信息等数据。图纸数据既是工程项目建造管理系统的数据源头也是项目施工管理的基础。

根据高级工作包理念、项目精细化和数据规范化工作要求，对设计数据进行整理和导入工作，同时对关键区域、舱室或房间涉及设计数据进行了细化、区分，导入10,1100条数据，为后续施工精细化管理的开展做好了准备。

物料数据分为物料码和物料信息。物料码主要指图纸上的ItemCode或ERP码，物料采办料单和物料到货清单则是物料信息。物料数据是实现工程项目建造管理图料管理的基础，物料的需求与库存分析都需要依据物料码进行匹配，同时也作为物料跟踪的依据。

数据规范主要是图纸基础数据规范，与设计、质控、施工及项目组进行了多次交流，结合以往工程项目建造管理系统应用经验，制定了项目规范模板。工程项目建造管理系统图纸数据通过三级审核，经项目相应人员批准后，作为正式文件以电子版形式同图纸文件一起发送至项目组，同时导入系统，项目组下发至相关部门人员。

2. 材料清晰化管理

工程项目建造管理系统的材料管理功能涵盖了结构、配管、电仪讯和机械专业。首次应用了请购单、合同管理功能，将材料信息的输入、校对工作前置，实现编码—请购单—合同—收货流程。为解决物资编码中的“一码多物”问题和船体材料入级问题，项目应用过程中优化提升了公司当前的材料编码。

项目工程项目系统中以“采办料单”为单元对材料的采办、收货、发放进行管理，首次实现了面向催交的图料前瞻分析，从而获得急需材料的采办料单号信息，进而进行有针对性的催交。面向施工的图料匹配功能，在满足车间、施工单位稳定、持续生产的需求方面发挥了重要作用。

3. 施工工序链条化管理

依据项目的施工特点和实施策略，结合公司项目管理模式和要求，按专业设置五级工作包的类型、工序划分^[2]。不同的工作项采用状态链式的管理方式，包括不同施工步骤。

工包的工艺步骤作为施工状态的最小单元，用于记录施工过程每个工作项的完成时间点。^[3]按照工序细分工单，尽量避免单个工单由多个分包商交叉施工。实现了规范化和精细化管理，使工

单真正指导现场施工。

4. 管理流程精细化管理

参与项目建造的各个部门，在工程项目建造管理系统中既是数据的生产者优势数据的消费者，为保证数据及时准确导入系统，需要建立健全的数据管理组织机构，明确各环节职责，锁定关键用户，建立数据传递、审核、导入机制，建立系统各类数据纠错机制。^[4]工作包编制完成后，经线上审核批准、完成和完工确认功能，下发至各个作业部。^[5]各作业部负责人按工单内容进行作业任务的分配和执行，并在工单执行完成时更新工单的施工状态。对于已完成的工单，系统会自动关闭并进行备份存档。

（三）报表管理

为给项目管理人员提供切实可用数据信息，发挥工程项目建造管理系统信息化最大效用，工程项目建造管理技术服务人员根据项目需求调整、配置和开发了大量报表数据，主要分为系统自带报表、系统配置报表、自研发报表及4D/5D可视化系统生成报表。^[6]

1. 工程项目建造管理系统自带报表

系统自带报表内容可按专业、四级计划项、五级工作包项目等各类进度多维度生成各类报表，也可生成工时报表，其中五级进度反馈报表中能清晰显示每个杆件对应工序的完成情况，施工进度清晰可查。

2. 工程项目建造管理系统配置报表

随着项目深入开展，系统自身报表在满足项目阶段性专项需求方面有了一定的限制，为此工程项目建造管理系统中配置了各专业施工状态报表，报表符合项目需求，又满足公司管理模式。^[7]此类专项报表状态清晰，数据统一，项目各参与方在同一平台工作，各负其责，有效推动了各项工作的顺利开展。

3. 自研发报表

为进一步提升报表的展示效果，工程项目建造管理系统人员自主研发了材料、结构、配管和电仪专业的显示网站，使用多种图形形式对项目数据进行了展示。^[8]

系统主要对项目采办料单、材料到货、图料匹配以及库存情况并进行数据分析，支持数据下载。实现按区域汇总图纸、材料和施工状态，工单编制情况、节点施工状态，工作量自动汇总等展示功能。^[9]自系统应用以来，项目多样化的数据分析自主研发网站充分发挥了信息化系统效能，访问次数达到了29917人次，为项目提供了信息支持。

（四）4D/5D可视化报表

为满足总包项目管理需求，工程项目建造管理系统首次尝试数据4D/5D可视化展示，借助工程项目建造管理系统中物化视图功能，定制开发了工包、杆件和工序的三级物化视图，通过系统数据接口完成了工程项目建造管理数据自动同步至4D/5D服务器，满足了多维可视化数据需求。

（五）应用效果分析

在项目中使用了工程项目建造管理软件，合计录入152,1240

条施工数据，其中设计数据26,6429条。^[10]各块数据统计清晰明了，施工状态明确，打破了各环节的数据孤岛，提高了决策和现场施工效率，降低了安全风险。

通过工程项目建造管理信息化系统平台的应用，项目约节省人工日19580个，折合780余万元，提升了公司通过项目精细化管理持续盈利的能力。

四、结束语

综上所述，在工业互联网理念的指导下，通过细化分解工作计划、实行高级工作包管理，探讨了海洋工程领域项目精细化管理

理的应用，对设计、材料、施工等数据进行分析，逐步建立了完善的应用管理流程。这不仅丰富了我们工业互联网在海洋工程建造领域的理解，还为后续项目更加精细化管理的提供提供了有价值的参考。未来建议进一步扩大项目应用数量，加深应用成度，采用更多元化的方法进行完善优化，为相关领域的实践提供更有意义的指导。

参考文献

[1] 陈文姬, 李子敏, 曹纪惠, 等. 基于工作分解结构的工程项目管理系统研究与优化 [J]. 石油与化工装备, 2019年第22卷: 44-46..

[2] 陈文姬. 工程项目管理系统电仪方案设计优化 [J]. 中国设备工程, 2019, 年11月(下): 163-164..

[3] 关承志. 简析精细化在海洋工程国际项目投标中的应用 [J]. 中国市场, 2015(41): 54-55.

[4] 高军. 解析电力工程建设项目管理问题及精细化管理 [J]. 百科论坛电子杂志, 2019(13): 312.

[5] 李海洋. 加油站建设项目精细化管理的应用与实践 [J]. 福建建设科技, 2013(3): 94-96.

[6] 辛娟. 作业指导书在海洋工程项目的的应用 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(5): 25-28.

[7] 张鹏, 孙诗怡. 国际油气工程项目管理模式及应用特点 [J]. 项目管理技术, 2019, 17(2): 103-106.

[8] 林飞鹏, 张振, 程建文, 等. 托盘化材料配送在海洋工程建造中的应用 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25(6): 99-101.

[9] 张闻. 全面预算系统在海洋石油工程公司财务管理中的应用与分析 [J]. 科技与创新, 2019(2): 156-157.

[10] 吕静, 胡洁, 王晓薇, 等. 油田企业钻井成本精细化管理体系研究 [J]. 石化技术, 2022, 29(5): 181-183.

房屋建筑工程施工现场的技术及管理措施

汪釜坤

美信佳集团建设有限公司, 浙江 湖州 313000

DOI:10.61369/ETQM.2025070016

摘 要 : 近年来, 房地产行业飞速发展, 房屋建筑工程项目数量和规模都在增长, 在房屋建筑工程施工中, 技术应用以及现场管理是极为关键的管理内容, 能够满足工程的质量与安全要求, 因此, 企业需要加大对技术的运用, 满足现场管理科学性。只有落实科学的施工技术运用, 才能够满足工程项目施工的顺利开展, 降低施工中存在的隐患, 实现工程施工的质量与安全要求, 满足企业的经济效益提升。基于此, 本文主要针对建筑工程施工技术以及现场管理进行分析, 仅供参考。

关 键 词 : 房屋建筑工程; 施工现场; 施工技术; 管理措施

Technical and Management Measures for Construction Sites of Building Construction Projects

Wang Yinkun

Meixinjia Group Construction Co., Ltd. Huzhou, Zhejiang 313000

Abstract : In recent years, the real estate industry has developed rapidly, and the number and scale of housing construction projects have been increasing. In the construction of housing construction projects, the application of technology and on-site management are extremely critical management contents, which can meet the quality and safety requirements of the project. Therefore, enterprises need to increase the use of technology to meet the scientific requirements of on-site management. Only by implementing scientific construction techniques can we ensure the smooth progress of engineering projects, reduce hidden dangers during construction, meet the quality and safety requirements of engineering construction, and enhance the economic benefits of enterprises. Based on this, this article mainly analyzes the construction technology and on-site management of building engineering, for reference only.

Keywords : building construction projects; construction site; construction technology; management measures

引言

当前城市化建设进程不断深入, 让各个房地产企业之间的竞争加剧。在市场环境下, 企业想要获取长久发展, 提升竞争价值, 必须要在施工过程中强化施工技术的有效运用, 满足施工现场高效管理。施工技术运用以及施工现场管理对于推进工程质量与安全有着重要作用, 施工单位必须要加大对技术应用的分析结合管理重点满足技术应用的可靠性, 根据现阶段的施工现场管理目标, 对施工中可能存在的问题进行预测, 制定有效的质量与安全管理措施, 满足工程施工的科学性。另外, 在施工中还需要加大对信息技术的利用率, 提高信息和数据传输效率, 满足整个工程施工管理的高效性, 为房地产行业发展奠定基础。

一、重要性分析

在房屋建筑工程施工中, 科学的施工技术应用能够满足工程项目建设管理目标, 因此施工技术管理极为关键, 通过有效的施工技术运用, 能够为工程施工技术管理工作提供保障, 确保施工技术发挥价值, 满足工程的施工质量与安全要求。另外, 在施工

技术管理过程中, 通过有效的技术运用, 能够降低工程施工的成本投入, 确保技术发挥应有价值, 降低施工中出现的进度延误, 满足各项操作符合工程管理规范。房屋建筑工程项目的现场管理工作能够促进施工现场管理更加协调, 实现资源利用率的提升, 在施工现场管理中严格参照施工管理计划, 按照各项规定满足工程施工现场管理的可行性, 提升工程质量, 促进房屋建筑工程施

工的顺利开展。在房屋建筑工程施工中，施工技术以及现场管理的重要性主要体现在以下几方面，第一，通过有效运用与管理能够满足施工现场的操作安全，减少施工中存在的安全隐患，降低因安全事故造成的不良影响。第二，通过有效管理能够满足施工中的资源优化配置，降低施工中出现的返工问题，实现施工进度有效控制，满足资源利用率提升，节约工程成本^[1]。

二、房屋建筑工程施工技术应用

（一）地基基础施工技术

地基是整个房屋建筑工程项目的基础，承受着建筑结构自身的重量以及外部应力，有效的地基基础施工技术运用能够满足房屋建筑工程施工的质量与安全要求。在地基基础施工过程中，对地基的土壤勘查与处理是极为关键的组成部分，通过在施工之前对施工地土壤进行勘查，能够有效掌握施工地土壤的性质以及承载能力，根据建筑结构的重量以及外部应力等进行综合考量，满足对房屋建筑施工中地基基础结构的优化，确保地基结构稳定性提升。在房屋建筑结构设计中也需要加大对地基基础的分析，对沉降量进行测量，降低建筑结构施工中出现的不均匀沉降。在地基基础的处理中主要包含多种处理方法，需要根据不同的结构特点针对性进行选择。比如，夯实施工技术主要是利用机械以及人工进行施工地土壤的反复碾压，进而提高土壤结构的密实度。灌注桩施工技术主要是指将混凝土材料灌注到钻好的孔中，实现地基结构的稳固性提升，通过特定的土壤处理方法，能够满足土壤结构的稳定性提升，符合当前建筑工程施工的地基基础处理要求^[2]。通常来说，在进行土壤夯实时需要满足施工中的压力要求，而且在灌注桩操作中也需要根据实际情况进行钻孔设置，确保设计以及施工标准符合工程项目的建设质量与安全管理特点，通过有效的地基基础施工技术运用，能够满足施工的地基科学处理，实现对地基基础沉降量的监测，提高地基结构的安全性与稳定性。

（二）钢筋施工技术

目前在房屋建筑工程项目施工中会应用到大量的钢筋材料，钢筋施工技术也是施工的关键环节。钢筋材料在施工过程中具备着极强的抗震性能，而且以材料具备较强的抗拉性能，满足施工中结构的安全与稳定。为了满足钢筋施工要求，需要在钢筋施工技术应用之前对钢筋材料进行科学选择，满足钢筋材料符合施工的强度材质等要求。在钢筋材料符合要求的基础之上，对钢筋材料进行切割与弯折，让钢筋材料适应不同部位的施工要求。钢筋材料的科学运用是满足结构安全与稳定的基础，因此在钢筋材料的运用过程中不允许出现钢筋材料的生锈以及污染，降低钢筋材料质量问题而导致的施工隐患。钢筋材料的布置与连接必须要做到规范化与合理化，能够有效确保钢筋结构的强度与稳定性提升，在钢筋布置过程中，需要根据房屋建筑结构的不同部位满足布筋要求，合理设置钢筋材料的间距。在钢筋连接过程中也需要注重连接方式的选择，目前应用较为常见的连接方式，包括焊接、螺栓连接，无论是焊接操作还是螺栓连接，都必须要保持操

作的规范化。在进行钢筋焊接时需要选择合适的焊接方法，满足焊接的合理性，在利用螺栓进行连接时选用合适的螺栓材料满足螺栓的紧固以及放松，在螺栓连接过程中需要根据螺栓材料的规格以及性能特点等进行分析，满足对螺栓材料的正确安装。

（三）混凝土施工技术

混凝土材料是房屋建筑工程施工中应用到的重点材料，施工工艺受到高度关注，必须要确保施工的科学性，提升建筑结构的强度与耐久性。首先，在进行混凝土施工之前，需要根据施工要求落实对混凝土材料的科学配比，利用有效配比满足混凝土材料强度与性能的提升，在进行混凝土材料配比时，需要根据房屋建筑结构的荷载、环境特点等进行综合考量，通过相关数据满足配比的科学性，确保混凝土强度与稳定性提升，减少施工中出现的裂缝问题。为了满足混凝土材料的配比要求，还需要针对混凝土原材料的应用性能进行分析，确保水泥、砂、骨料、添加剂等符合质量管理规范，从源头降低混凝土材料出现的质量问题。其次，在混凝土的配置过程中需要落实科学的搅拌机制，选用恰当的搅拌工具，满足原材料的充分混合，确保混凝土质量提升，降低因搅拌问题而导致的混凝土质量隐患。然后，混凝土在浇筑过程中，需要落实混凝土浇筑的科学性，采用科学的运输方式降低混凝土的离析问题，在浇筑过程中需要保持混凝土浇筑的均匀性，倒入混凝土模板中，采用合适的振捣工具，降低混凝土内部存在的空气，实现混凝土结构的密实度提升，通过有效的振捣操作能强化混凝土强度，减少混凝土的变形以及裂缝。最后，混凝土养护工作是提升混凝土应用质量的关键。在混凝土的硬化过程中，需要利用正确的养护方法保障混凝土质量提升^[3]。比如，在高温条件下需要及时对混凝土浇筑面进行覆盖，采用科学的保湿方法，减少高温以及温度变化给混凝土结构造成的不良影响。正确的养护方法能够促进混凝土自身的耐久性提升，大幅度降低后续出现的裂缝问题。

（四）现场勘探技术

房屋建筑工程项目施工中应用到的现场勘测技术能满足工程施工的科学性，为工程项目顺利开展奠定基础。在进行施工现场的勘测工作中，要求工作人员针对施工现场具体情况进行分析与研究，利用现代化的科学技术全面掌握施工现场的具体特点，比如，GIS技术与计算机技术相融合，加大对施工现场数据的分析，构建施工现场的三维模型，准确了解施工现场的具体特点，包括施工的地形地貌特征等，工作人员可以结合GIS平台将收集到的数据录入到系统中，形成房屋建筑工程项目施工的数据和信息库，为后续的数据和信息利用与查看提供便利^[4]。另外，施工现场的工作人员可以结合地质探测仪对工程施工现场的地质情况进行分析，了解施工中的地质、抗压情况、荷载情况等，在满足施工要求的前提之下，对应用的施工技术进行全面分析与对比，强化施工技术应用价值。

（五）建筑装饰施工技术

近年来，人们生活水平提升，对房屋建筑室内空间环境有了更高要求。室内装饰技术是对室内空间结构的美化以及功能布置，设计内容较多，其中包含着墙面施工、地面施工以及照明系

统、暖通系统等的安装，主要目的是营造舒适美观的居住环境。在室内装饰施工中可以根据不同需求打造不同的风格，比如简约风格、现代风格等，通过应用合适的材料以及装饰物，能够确保室内装饰符合个人特点^[5]。外墙装饰是对整个外部结构的墙面进行美化以及保护，在装饰过程中不仅能够起到对结构的装饰，还能够满足结构防水、隔热、保温等功能，提升建筑物结构自身的使用寿命，同时能够加大资源利用率，在外墙装饰施工中普遍采用的是瓷砖、玻璃幕墙以及石材等，可以根据不同的装饰风格选用不同的装饰材料，打造独特的建筑外观。屋面装饰是对屋顶进行美化与保护，起到有效的装饰作用，根据建筑物的结构特点，满足屋顶装饰能够起到防水、隔热、保温等功能，同时能够有效避免建筑物受到外界环境的破坏，在屋面施工中主要应用防水卷材、金属板等材料，根据不同的设计要求选用合适的装修方式，在一定程度上满足了功能体现，同时强化了美观性^[6]。

三、房屋建筑工程现场施工管理对策

（一）完善施工管理体系

在房屋建筑工程施工现场管理中存在问题不能及时得到解决将会威胁到施工人员的生命安全，也会因施工现场管理漏洞而导致大量的施工材料被浪费，不利于工程施工的科学性与合理性^[7]。因此，施工现场管理人员需要在施工之前加大对工程施工情况的高度关注，根据施工特点，组建工程项目管理小组，制定详细的管理计划和管理规范，加大对信息化技术的运用。小组管理人员需要具备较强的能力与素养，利用倒班制度全方位开展对工程项目施工现场的监督，而且管理人员需要具备较强的责任意识，对施工现场管理情况进行梳理，结合信息化技术与自身管理经验的融合，促进施工现场管理的高效。

（二）施工材料与设备管理

房屋建筑工程施工中会应用到大量的材料与设备，材料与设备管理需引起高度重视。首先，结合工程项目管理要求，针对性的进行施工中材料的采购，做好相应的采购计划，落实精准的材料存储，坚决不允许出现材料在存储过程中出现的问题，更好地

满足工程项目施工要求^[8]。其次，根据施工现场管理情况以及施工中各部分的施工进度情况，制定有效的施工设备配备计划，降低因设备不足而造成的施工延误。最后，为了满足设备应用的高效性，需要配备专业的设备维修人员，定期开展对机械设备的维护保养，发现问题及时进行处理，始终保持机械设备在良好状态。在人员进行机械设备的操作时，必须要严格按照设备使用规程，而且操作人员必须要具备资格证明，根据施工要求对设备操作人员上岗证明进行检验，查看其设备操作规范的掌握情况，满足设备运行的安全性^[9]。

（三）强化施工管理方案

在施工现场管理时，有效的施工管理方案是满足施工管理效果提升的关键，有效的施工方案不仅能够降低对施工中各环节的影响，还能够充分掌握施工中的各个细节保障施工安全。在施工现场管理时存在的施工方案较多，为了满足工程施工的科学开展，需要针对不同的施工方案进行优化与完善，坚决杜绝不合理的方案而导致的施工质量与安全隐患。施工现场管理人员需要针对应用到的施工方案进行分析，对施工方案存在的优势进行展现，规避施工方案存在的漏洞而引起的超预算现象，减少施工中的资源浪费^[10]。另外，施工现场管理人员还需要针对应用到的施工方案进行全面审核，加大与施工图纸的对比，发现方案中存在问题需立即进行处理，保障施工管理方案具备较高的可行性，满足工程施工项目的顺利开展。

四、结束语

总而言之，房屋建筑工程项目施工中的技术应用以及现场管理是保障整个工程项目顺利开展的基础，能够提升工程的质量与安全。因此，施工单位需要根据现阶段的房屋建筑工程项目施工要求，确保施工技术应用的合理性，结合施工现场管理内容，加大对施工现场的管理力度，从整体上提升管理的高效性，促进企业自身核心竞争价值提升，满足工程施工管理要求，为企业的良好发展奠定基础，也为我国的经济建设提供支持。

参考文献

- [1] 黄有军. 探讨房屋建筑工程施工技术及其现场施工管理[J]. 居业, 2022, (10): 180-182.
- [2] 叶利庚. 建筑工程施工技术及其现场施工管理措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022, (28): 10-12.
- [3] 周超仁. 建筑工程施工技术及其现场施工管理存在的问题及措施分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022, (26): 46-48.
- [4] 王好学. 房屋建筑工程施工技术及其现场施工管理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022, (24): 22-24.
- [5] 肖文光. 建筑工程施工技术及其现场施工管理措施应用研究[J]. 砖瓦, 2022, (07): 121-123+126.
- [6] 张吉. 建筑工程施工技术及其现场施工管理措施分析[J]. 建材与装饰, 2018, (46): 172-173.
- [7] 刘增超. 论房屋建筑工程施工技术及其现场施工管理[J]. 建材与装饰, 2018, (45): 123-124.
- [8] 攸明亮. 建筑工程施工技术及其现场施工管理措施分析[J]. 建材与装饰, 2018, (44): 183-184.
- [9] 莫福平. 房屋建筑工程施工技术及其现场施工管理研究[J]. 低碳世界, 2018, (11): 182-183.
- [10] 豆兴东. 房屋建筑工程施工现场的技术及安全管理研究[J]. 现代物业(中旬刊), 2018, (10): 173.

卤牛肉加工过程中减菌技术的研究

刘静娜, 张少飞

河南牧业经济学院 旅游学院, 河南 郑州 450001

DOI:10.61369/ETQM.2025070018

摘 要 : 本文以软包装卤牛肉制品的生产车间为研究对象, 首先进行车间以及与卤牛肉制品相关的微生物分析, 结果表明: 在卤牛肉生产过程中的分割车间、腌制车间, 其微生物增长数量远高于其他车间。根据分析结果, 首先选取环境、器具、人员为主要的减菌内容, 设计出全方位的减菌方式, 分析减菌效果: 利用清洗班组 + 泡沫清洗剂 + 清洗系统 + 季铵盐消毒剂的清洗方式在每班后对车间进行清洗消毒杀菌。对比减菌前后各车间微生物数量, 发现减菌效果显著。

关 键 词 : 卤牛肉; 车间; 减菌方式

Study on Bacteria Reduction Technology in the Processing of Brine Beef

Liu Jingna, Zhang Shaofei

Henan University of Animal Husbandry and Economy Tourism College, Zhengzhou, Henan 450001

Abstract : This paper investigates the production workshop of soft-packed braised beef products. Microbial analysis reveals that the cutting and pickling workshops show significantly higher microbial growth than other areas during production. Focusing on the environment, utensils, and personnel, a comprehensive decontamination approach is designed. The method combines a cleaning team, foam cleaners, a cleaning system, and quaternary ammonium salt disinfectants for post-shift sanitization. Comparative analysis of microbial counts before and after treatment demonstrates a remarkable decontamination effect.

Keywords : stewed beef; workshop; antimicrobial method

一、材料与方法

(一) 材料与试剂

微生物检验样品由河南伊赛牛肉股份有限公司提供;

平板计数琼脂来自天津科密欧化学试剂有限公司来自于河南牧业经济学院食品科学与工程专业实验室

(二) 仪器与设备

HH-M6型电热恒温水浴锅 ; QL-902型旋涡振荡器 ; YJS-GZT型超净工作台 ; DPH-9032型数据电热培养箱; FA1006P型吉尔森移液器; FA2204B型电子天平; HDJ-6型臭氧发生器; DK-98-IIA型电热恒温水浴锅; QL-9020型振荡器; 超净工作台; 303A-3型数据电热培养箱; FA1006P型吉尔森移液器; FA2204B型电子天平; HDJ-6型臭氧发生器

(三) 试验方法

1. 减菌内容设计

卤牛肉加工过程中的微生物来源, 主要从人员、器具、环境空气3个方面来考虑。针对这三3方面, 与华美万邦公司合作, 设计出如下一组减菌内容^[2-5]。

(1) 车间的彻底清洗、消毒杀菌

使用智能高压洗消系统进行清洗。利用清洗班组 + 泡沫清洗剂 + 清洗系统 + 季铵盐消毒剂的清洗方式在班后进行清洗, 集中控制供水和药剂, 系统提供高压水、清洗消毒药剂到各车间各个分站, 通过洗消分站对各车间进行清洗和消毒^[1]。

(2) 车间操作工人的减菌处理

车间操作工人的消毒是利用醇类消毒剂进行。采用75%的乙醇溶液, 每30min要求工人进行一次手部消毒。

(3) 衣物、器具等的减菌处理

每30min对案板及刀具等器具进行一次清洗、消毒, 并对案板及刀具进行煮沸消毒或者用乙醇消毒。即用75%的乙醇溶液或者用高于85℃的水进行高温消毒。利用蒸汽消毒对衣物进行减菌处理。

(4) 车间环境、空气的减菌处理

对车间环境空气利用臭氧减菌处理。即在班前45min, 采用臭氧浓度为60mg/m³, 环境相对湿度≥70%, 作用15min, 对自然菌的总菌数杀灭率达90%以上, 达到去除异味, 净化空气, 且对食品品质无影响。

2. 卤牛肉加工的工艺流程

冷冻牛肉→解冻→分割→腌制→煮制→晾制→包装→杀菌

3. 采样方法

参照 GB 18204.3 - 2013: 《公共场所卫生检验方法 第3部分: 空气微生物》, 采用自然沉降法进行采样。在不同的工位(包括解冻、分割、腌制、煮制、晾制、包装、杀菌等), 在距地面1.2-1.5m, 距墙壁1m, 并避开通风口、通风道的采样点进行采样, 在采样点打开营养琼脂培养基皿盖暴露五分钟。样品规格为63.6cm²/皿。

4. 检测指标

菌落总数的检测: 参照 GB 4789.2-2016 《食品安全国家标

准《食品微生物学检验 菌落总数测定》中的方法进行检测。大肠杆菌的检测：采用 GB 4789.3-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》中的第二法平板计数法。金黄色葡萄球菌的检测：参照 GB 4789.10-2010《食品安全国家标准 食品微生物学检验 金黄色葡萄球菌检验》进行测定。霉菌的检测：参照 GB 4789.15-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》检测。

（四）数据处理

采用 Microsoft Excel 软件进行平行试验的平均值计算，并进行绘图，做出误差线；采用 SPSS Statistics 22.0 统计分析软件中的成对 t 检验法进行数据的显著性分析， $P < 0.05$ 表示差异显著， $P > 0.05$ 表示差异不显著。

二、结果与分析

（一）卤牛肉制品微生物生长情况分析

3 组样品在解冻后，均在分割后的菌落总数达到最大值，分别为 3900000（CFU/g）、1100000（CFU/g）、1600000（CFU/g）；大肠菌群均在腌制后达到最大值，分别为 220000（MPN/100g）、650000（MPN/100g）、110000（MPN/100g）。

（二）各加工车间微生物生长情况分析

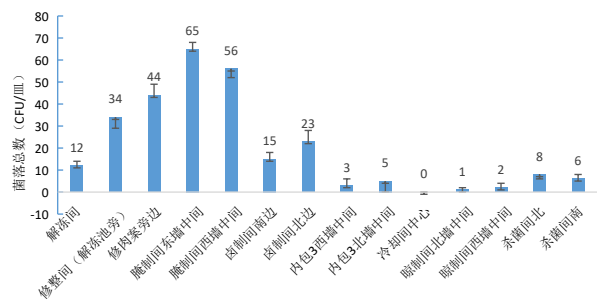


图1 各加工车间菌落总数变化状况

减菌处理前，在分割车间、腌制车间的菌落增长总数远高于其他车间，在腌制间东墙中间测的最大值 65（CFU/皿），在内包、冷却、晾制等车间的菌落总数均小于 10CFU/皿。说明分割

车间、腌制车间的微生物增长速率高，是减菌重点车间。

（三）减菌效果分析

利用清洗班组 + 泡沫清洗剂 + 清洗系统 + 季铵盐消毒剂的清洗方式在班后进行清洗，不仅能做到环境的清洁，更能使清洁人员减少 70% 以上，用水减少 65% 以上，清洗时间可节约 40% 以上。对于皮肤以及刀具利用浓度为 75% 的乙醇进行擦拭或浸泡消毒，作用 3 分钟即可杀灭大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等细菌。利用 0.1 MPa，121.1℃ 的蒸汽对于工人衣物以及器具利用蒸汽进行消毒，作用 15 ~ 20 min，可以使包括芽孢菌在内的所有菌全部被杀灭。

对车间进行减菌处理，车间环境中的菌落总数显著降低。减菌效果在菌落总数偏高的修整间、腌制间以及卤制间尤为明显，在腌制间东墙中间菌落总数减少了 52（CFU/皿）。减菌处理后的菌落总数远低于工厂微生物标准：菌落总数 < 3CFU/cm² 即菌落总数 < 190.8CFU/皿（样品规格为 63.6cm²/皿）。

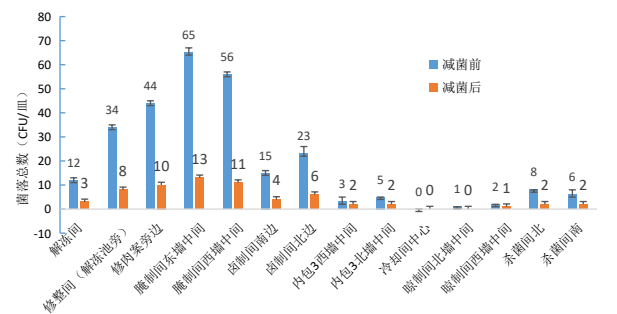


图2 各加工车间减菌前后菌落总数对比

表1 配对样本统计表

配对样本统计				
	平均值	个案数	标准差	标准误差平均值
减菌前	18.86	14	22.139	5.917
减菌后	4.57	14	4.292	1.147

表2 配对样本相关性表

配对样本相关性			
	个案数	相关性	显著性
减菌前 & 减菌后	14	0.985	0.000

表3 配对样本检验表

配对样本检验								
	配对差值					t	自由度	显著性（双尾）
	平均值	标准差	标准误差平均值	差值 95% 置信区间				
				下限	上限			
减菌前 – 减菌后	14.286	17.929	4.792	3.934	24.638	2.981	13	0.011

由成对样本统计表中的平均值、标准差和均值的标准误差可以看出减菌前后的菌落总数有明显差别。由成对样本相关系数表知，减菌前后菌落总数的相关系数为正，响应概率值为 0.000，认为菌落总数相关系数十分显著。有成对样本检验表知，减菌前后的 T 检验的概率为 0.011 < 0.05 的显著水平，所以可以认为减菌处理对减少环境中的菌落总数有显著的效果。

（四）卤牛肉产品的微生物检测结果

表4 产品微生物检测结果

样品名称	规格	检测项目	
		菌落总数 (CFU/g)	大肠菌群 (MPN/100g)
熟牛肉（1#）	500g/袋	< 10	< 10
	500g/袋	10	< 10
熟牛肉（2#）	500g/袋	< 10	< 10
	500g/袋	10	< 10

熟牛肉（3#）	500g/袋	< 10	< 10
	500g/袋	< 10	< 10

如上表所示，测得的大肠菌群均 <10（MPN/100g），而菌落总数检测结果显示均控制在10（CFU/g）以内。霉菌及金黄色葡萄球菌的检测结果显示，在卤牛肉成品中，没有霉菌及金黄色葡萄球菌的存在。

综上得出，通过对卤牛肉加工过程中应用减菌技术，做到班前对车间及环境空气进行臭氧杀菌，生产过程中对操作工及器具每隔30min 用75%的乙醇溶液或者温度为85℃以上的热水进行消毒杀菌，班后生产车间进行高压清洗、利用蒸汽对衣物等耐热物品进行高温杀菌，减菌效果明显。由检测卤牛肉产品的微生物数量，并对减菌前后车间环境的微生物污染情况进行对比得出，通过严格控制加工过程中的微生物生长，制得的卤牛肉制品的大肠菌群均 <10（MPN/100g），菌落总数基本 <10（CFU/g），而且没有检测到致病菌的存在。车间环境通过减菌处理，减菌效果最明显的为腌制间东墙中间，菌落总数由65（CFU/皿）减少

至13（CFU/皿），其余加工车间的菌落总数也均少于13（CFU/皿），说明减菌效果十分显著。

三、结束语

通过对制品中微生物的数量检测分析可知，卤牛肉加工过程中，在分割、腌制过程中微生物数量大幅增长，将这两个工序定为微生物控制的关键控制点。将设计出的减菌内容应用于河南伊赛卤牛肉加工车间，对于减少车间内的菌落总数有显著效果（p<0.05）。对于综合物料的消耗方面，利用以上减菌方式，清洁人员减少70%以上，用水减少65%以上，清洗时间可节约40%以上，卫生达标率提高到99%以上。预期通过有效减少卤牛肉杀菌前的初始菌数，使得可在杀菌过程中采用变温杀菌，在保证杀菌效果的前提下，避免由于过高的杀菌温度、过长的杀菌时间对食品营养成分的破坏，充分保留食品营养与食品风味。

参考文献

[1] 冷雪娇,王卓,裴玉琼,等.食品工业的清洗与消毒[J].安徽农业科学,2014,42(11):3376-3379.
 [2] 程龙.生猪屠宰过程 HACCP体系信息化建立与调理预制烤猪肉贮藏过程中的品质变化[D].东北农业大学,2014.
 [3] 陈康,王国泽.食品安全控制体系 HACCP在肉制品加工中的应用探讨[J].现代食品,2017(20):47-51.
 [4] Hazard analysis critical control point system and guidelines for its application in food hygiene basic text. FAO,WHO. <http://www.doc88.com/p-7028973716552.html>. 2015.
 [5] 李燕利.栅栏技术在低温肉制品中的应用[J].肉类研究,2010(12):42-48.

无人机航测技术在矿山生态修复中的应用研究

沈迅, 李建洪, 闫晓波, 合亚杰

云南省地质工程勘察有限公司, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ETQM.2025070022

摘 要 : 本文系统探讨无人机航测技术在矿山生态修复中的应用, 分析其技术原理与优势, 阐述在矿山地形地貌测绘、生态环境监测、修复工程规划与效果评估等方面的具体应用。通过实际案例, 验证无人机航测技术在获取高精度数据、提升修复效率、降低成本等方面的显著成效。研究表明, 无人机航测技术能够为矿山生态修复提供全面、准确的基础数据, 有效支撑修复方案制定与实施, 对推动矿山生态修复工作的科学化、精准化具有重要意义。

关 键 词 : 无人机航测; 矿山生态修复; 地形测绘; 环境监测

Research on the Application of UAV Aerial Survey Technology in Mine Ecological Restoration

Shen Xun, Li Jianhong, Yan Xiaobo, He Yajie

Yunnan Geological Engineering Survey Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650051

Abstract : This paper systematically explores the application of unmanned aerial vehicle (UAV) aerial survey technology in mine ecological restoration, analyzes its technical principles and advantages, and expounds on its specific applications in mine topographic mapping, ecological environment monitoring, restoration project planning, and effect evaluation. Through practical cases, the significant effectiveness of UAV aerial survey technology in acquiring high-precision data, improving restoration efficiency, and reducing costs is verified. Research shows that UAV aerial survey technology can provide comprehensive and accurate basic data for mine ecological restoration, effectively supporting the development and implementation of restoration plans, and is of great significance for promoting the scientific and precise work of mine ecological restoration.

Keywords : UAV aerial survey; mine ecological restoration; topographic mapping; environmental monitoring

引言

随着我国工业化与城镇化进程加速, 矿山资源大规模开发引发的生态退化问题日益严峻, 采矿活动导致的植被破坏、水土流失、土地塌陷及环境污染等问题, 不仅威胁矿区生态平衡, 更对周边居民生产生活构成潜在风险, 矿山生态修复作为恢复矿区生态功能、促进可持续发展的关键举措, 亟需高效精准的技术手段支撑。传统测绘与监测技术在复杂矿山环境中暴露出数据获取效率低、覆盖范围有限、成本高昂等弊端, 难以满足生态修复动态化、精细化的需求^[1]。无人机航测技术凭借高机动性、高分辨率、低成本及灵活便捷的优势, 可快速获取矿山地形地貌、植被覆盖、地质结构等多维数据, 为生态修复方案设计、工程实施与效果评估提供数据基础。本文系统探讨无人机航测技术在矿山生态修复中的应用路径与实践价值, 旨在推动该技术在矿山生态修复领域的深度应用, 助力实现矿区生态环境的系统性治理与可持续恢复。

一、无人机航测技术概述

(一) 无人机航测技术原理

无人机航测技术以航空摄影测量理论为基础, 依托无人机平台搭载多种传感器, 实现对目标区域的高精度数据采集与处理, 其核心流程包括数据获取、数据处理和成果输出三个环节^[2]。在数据获取阶段, 无人机按照预设航线飞行, 搭载的高分辨率相机、多光谱相机或激光雷达 (LiDAR) 等传感器, 通过多角度、

多航次拍摄或扫描, 获取目标区域的影像数据或点云数据。其中, 光学相机利用摄影测量原理, 通过重叠拍摄获取立体像对; LiDAR则通过发射激光束并接收反射信号, 快速获取地表三维坐标信息。在数据处理环节, 利用专业软件 (如 Pix4D、Agisoft Metashape 等) 对采集的数据进行处理。针对影像数据, 通过特征点提取、图像匹配、空中三角测量等技术, 建立区域网平差模型, 确定像片外方位元素; 结合同名像点的空间交会, 生成数字高程模型 (DEM) 和数字正射影像 (DOM), 并通过三维重建

技术构建实景三维模型。对于 LiDAR 点云数据,需经过去噪、分类等预处理,分离地面点与非地面点,进而生成高精度的地形模型,最终,通过数据整合与分析,输出满足矿山生态修复需求的测绘成果。

（二）无人机航测技术的优势

无人机航测技术在矿山生态修复应用中展现出显著优势,首先,其具备高机动性与灵活性,可突破地形、交通限制,快速抵达传统手段难以触及的偏远矿区、陡峭边坡等区域,实现数据的高效采集。其次,数据获取具有高分辨率与高精度特性,搭载的厘米级甚至毫米级分辨率传感器,能够清晰捕捉矿山地表裂缝、植被分布、建筑物细节等信息,为生态修复提供精准的数据支撑。成本效益方面,相较于有人机航空摄影或卫星遥感,无人机航测设备投入与运营成本更低,且数据采集周期短、更新速度快,可按需多次测量,满足矿山生态修复动态监测需求。此外,无人机航测支持实时数据传输与处理,能够及时反馈现场信息,辅助修复方案的动态调整,显著提升工作效率与决策科学性。

二、无人机航测技术在矿山生态修复中的应用

（一）矿山地形地貌测绘

（1）高精度地形数据获取

无人机航测技术通过搭载激光雷达(LiDAR)或高分辨率光学相机,能够快速获取矿区区域高精度地形数据。激光雷达利用脉冲激光扫描技术,可穿透植被冠层直接获取地表信息,尤其适用于植被茂密的矿区区域^[3]。光学相机则通过多视角倾斜摄影,结合空中三角测量技术,生成厘米级精度的数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM)。在某露天矿山测绘项目中,无人机航测获取的 DEM 高程精度达到 ± 5 厘米,完整呈现了采坑、废石堆、边坡等复杂地形的空间形态,为后续修复工程提供了精确的地形基础数据。

（2）地形动态变化监测

定期开展无人机航测可实现矿山地形的动态监测,通过对比不同时期的 DEM 数据,能够量化分析地形变化趋势,如采空区塌陷范围扩展、废石堆体积变化、边坡位移等。采用差分分析方法,可识别毫米级的地形起伏变化,及时发现潜在地质灾害隐患,例如,在某金属矿山监测中,无人机航测发现边坡局部区域在3个月内出现累计12厘米的位移,为采取应急加固措施提供了关键预警信息。

（二）矿山生态环境监测

（1）植被覆盖与生长状况监测

无人机搭载的多光谱相机可获取红、绿、蓝、近红外等波段影像,通过计算归一化植被指数(NDVI),能够定量评估植被覆盖度和健康状况。研究表明,NDVI值与植被生物量、叶面积指数具有显著相关性,可用于识别退化植被区域,指导植被恢复工程^[4]。在某煤矿生态修复项目中,利用无人机航测绘制的 NDVI 分布图,精准定位出植被覆盖率低于20%的重点修复区域,并通过动态监测验证了植被恢复效果,修复后 NDVI 值平均提升0.35。

（2）土壤与水体污染监测

高光谱遥感技术可探测土壤和水体中的污染物成分,无人机搭载的高光谱传感器能够捕捉数百个连续光谱波段,通过光谱特征分析识别重金属(如铅、镉)、油污等污染物。在某有色金属矿区,利用高光谱影像反演土壤重金属含量,定位出镉污染超标区域,为土壤修复方案制定提供了空间分布数据。此外,多光谱影像还可用于水体富营养化、矿坑水污染等问题的监测,通过水体反射光谱特征变化判断污染程度。

（3）地质灾害隐患监测

无人机航测通过三维建模和变形分析,可有效识别矿山地质灾害隐患,对边坡进行多期三维模型对比,能够量化分析裂缝扩展、坡面变形等特征;利用点云数据计算边坡坡度、坡向和稳定性系数,辅助开展灾害风险评估^[5]。在某露天矿边坡监测中,无人机航测发现一处潜在滑坡区域,其地形曲率变化异常,经实地核查确认后及时采取了削坡减载措施,避免了灾害发生。

（三）矿山生态修复工程规划

（1）修复区域科学划定

基于无人机航测获取的地形、植被、土壤等多维数据,结合生态敏感性分析,可科学划定修复区域,利用 GIS 空间分析技术,综合考虑坡度、高程、植被覆盖度等因素,确定植被恢复、土壤改良、地形整治的重点区域^[6]。例如,在某废弃矿山修复规划中,通过分析发现坡度大于30°的区域水土流失严重,优先规划为挡土墙和生态袋护坡工程实施区;而地势平缓、土壤肥力较好的区域则规划为植被种植区。

（2）工程方案优化设计

无人机生成的三维实景模型为修复工程设计提供了直观的可视化支持,设计人员可基于三维模型进行土方工程计算、植被种植布局优化、排水系统设计等^[7]。在某矿山复垦项目中,通过三维模型模拟不同坡度的地形改造方案,选择土方量最小且稳定性最佳的设计;同时,利用模型优化植被种植密度和种类配置,提升生态修复效果。此外,无人机航测数据还可用于施工进度模拟,提前预判工程难点,优化施工组织方案。

（四）矿山生态修复效果评估

（1）定量指标对比分析

通过对比修复前后的无人机航测数据,可计算多项定量评估指标,植被恢复方面,对比植被覆盖度、物种多样性指数等;土壤改良方面,分析土壤有机质含量、pH 值等参数变化;地形整治方面,评估地形平整度、水土流失量等指标^[8]。在某铁矿生态修复项目中,修复后植被覆盖度从18%提升至62%,土壤侵蚀模数由3500 t/(km²·a)降至800 t/(km²·a),定量数据直观反映了修复工程的成效。

（2）三维可视化动态评估

利用修复前后的三维实景模型进行可视化对比,可直观展示生态修复效果,通过模型叠加分析,能够清晰呈现地形变化、植被生长、设施建设等情况,引入时间序列三维模型,可动态展示生态修复的演变过程,为管理部门提供决策支持^[9]。此外,结合虚拟现实(VR)技术,可实现沉浸式效果评估,提升评估的直观

性和准确性，在某磷矿修复项目中，三维模型对比显示，修复后矿坑被成功改造成人工湿地，生态景观得到显著改善。

三、案例分析

（一）案例背景

某大型露天铜矿位于长江流域生态敏感区，历经30余年开采，形成了总面积达8.2平方公里的采空区、排土场及裸露边坡，矿区内植被覆盖率不足12%，土壤重金属（铜、锌、镉）污染严重，平均超标率达3-5倍；部分区域出现地面塌陷，最大沉降深度达3.5米，引发季节性水土流失，年侵蚀模数高达5200 t/(km² · a)，对周边农田及水系造成严重威胁。传统人工监测与卫星遥感手段难以满足复杂地形下高精度、高频次的生态修复需求，因此引入无人机航测技术开展全周期监测与评估。

（二）无人机航测技术应用过程

（1）数据采集方案设计

选用大疆 Matrice 300 RTK 无人机搭载五镜头倾斜摄影相机与 Riegl VUX - 1 UAV 激光雷达，针对不同区域制定差异化航测方案：对植被覆盖区采用120米低空飞行，地面分辨率达2厘米；裸露边坡及塌陷区采用80米超低空飞行，分辨率提升至1.5厘米。单次航测覆盖面积1.2平方公里，通过分区域、多架次作业实现全矿区覆盖，累计获取影像数据1.2万张、点云数据3.8亿个。

（2）数据处理与成果生成

利用 Agisoft Metashape 软件对影像数据进行空三加密与三维建模，生成精度达 ±3 厘米的实景三维模型；采用 TerraSolid 软件对激光雷达点云数据进行分类处理，提取地面点生成数字高程模型（DEM）。结合 GIS 平台，叠加土壤采样数据与多光谱影像，生成土壤重金属污染分布图、植被覆盖专题图等12类专题成果。

（3）动态监测体系构建

建立季度性航测监测机制，在关键修复节点（如植被种植期、工程措施施工期）加密监测频率。通过前后两期三维模型叠加分析，量化评估地形变化、植被恢复等指标；利用时间序列点云数据构建边坡稳定性预警模型，设置位移阈值为5厘米/季度，

实时推送风险预警信息。

（三）应用效果分析

（1）地形测绘与灾害预警成效

无人机航测精确还原了矿区三维地形，识别出32处潜在塌陷隐患区与15处高风险边坡，较传统人工测绘效率提升数倍。基于航测数据构建的边坡稳定性模型成功预警2次小规模滑坡，提前72小时发出警报，避免了人员伤亡与设备损失。

（2）生态修复量化评估

经两年修复，航测数据显示植被覆盖度从12%提升至48%，土壤侵蚀模数下降68%；通过多光谱影像分析，植被生物量增加2.3倍，重金属污染区域面积缩减42%。三维模型对比直观呈现了排土场复垦为梯田、采空区改造为人工湖的全过程，为验收提供可视化依据。

（3）成本与效率优势

项目实施期间，无人机航测较有人机测绘成本降低73%，数据获取周期从15天缩短至3天。通过动态监测减少修复工程设计变更4次，节约直接成本数百万元，同时避免了因数据滞后导致的重复施工问题，综合效益显著。该案例验证了无人机航测技术在复杂矿山生态修复中数据采集、方案优化与效果评估的全流程应用价值。

四、结束语

本研究系统论证了无人机航测技术在矿山生态修复中的应用价值，通过对其技术原理、应用优势及典型案例的分析，证实该技术可实现矿山地形地貌高精度测绘、生态环境动态监测、修复工程科学规划及效果量化评估，显著提升生态修复工作的精准性与效率。实际案例表明，无人机航测技术能够有效弥补传统手段的不足，在降低成本、缩短周期、增强预警能力等方面优势显著。未来仍需进一步推动无人机航测与物联网、人工智能技术的交叉融合，研发高适应性传感器与智能分析算法，完善标准化作业流程与评估体系，以实现矿山生态修复从数据采集到决策支持的全链条智能化升级，为矿区生态环境可持续发展提供更强有力的技术支撑^[10]。

参考文献

- [1] 王少辉, 周小雨, 刘润胜. 无人机航测技术在河南驻马店市废弃矿山生态修复勘査设计中的应用 [J]. 矿产勘查, 2020, 11(10): 2309-2316.
- [2] 张健雄, 伍雅晴. 无人机航测技术在矿山生态修复调查中的应用 [J]. 世界有色金属, 2021(12): 194-195.
- [3] 杨文佳, 郭昊原, 李纯刚, 等. 无人机技术在矿山生态修复调查中的应用 [J]. 地质学刊, 2020, 44(4): 429-433.
- [4] 宋城, 纪伏春. 无人机航测及三维实景建模在露天矿综合治理生态修复的应用 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2021(9): 2263-2264.
- [5] 张启慧, 王程松, 卫石印, 等. 基于 ArcGIS 的三维航测成果在露天采坑生态修复与矿山生产中的应用研究 [J]. 山东国土资源, 2022, 38(10): 42-47.
- [6] 张秉鹏. 无人机航测技术与 GIS 系统在矿山修复领域的应用 [J]. 山西焦煤科技, 2024, 48(7): 47-50.
- [7] 垢元培, 张鸽. 航测点云数据在矿山修复工程量复核中的研究与应用 [J]. 金属矿山, 2024(8): 191-196.
- [8] 雷志龙. 基于无人机倾斜摄影测量的矿山生态修复效果评价研究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(5): 193-195.
- [9] 姜庆丰, 刘德成, 曹琛, 等. 废弃矿山生态环境修复中无人机倾斜摄影技术应用研究 [J]. 化工矿产地质, 2024, 46(3): 242-248.
- [10] 马华坤. 无人机倾斜摄影测量技术在矿山生态修复中的应用 [J]. 海峡科技与产业, 2023, 36(9): 41-43.

房地产建筑工程管理中的质量控制与进度优化

张慧东

杭州美辰置业有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ETQM.2025070026

摘要： 房地产建筑工程管理中，质量控制与进度优化的协同是实现项目效益最大化的核心问题。研究基于全面质量管理和关键路径理论，探讨设计标准化、施工精细化及 BIM、物联网等智能技术的应用策略。通过构建全过程质量监控体系和动态进度调整机制，有效解决质量与进度的矛盾冲突。实践表明，数字化管理手段可提升工程效率 25% 以上，同时降低质量事故率 40%，为行业高质量发展提供理论依据与方法参考。

关键词： 质量控制；进度优化；数字化管理

Quality Control and Progress Optimization in Real Estate Construction Project Management

Zhang Huidong

Hangzhou Meichen Real Estate Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract： In real estate construction project management, the synergy between quality control and schedule optimization is at the core of maximizing project benefits. This study, based on Total Quality Management and Critical Path Theory, explores strategies for design standardization, construction refinement, and the application of intelligent technologies such as BIM and IoT. By establishing a comprehensive quality monitoring system and dynamic schedule adjustment mechanisms, it effectively resolves conflicts between quality and schedule. Practical experience shows that digital management methods can increase project efficiency by over 25%, while reducing the rate of quality incidents by 40%. This provides theoretical support and methodological references for high-quality industry development.

Keywords： quality control; progress optimization; digital management

引言

房地产行业作为国民经济的支柱产业，其建筑工程管理的质量与进度直接影响项目效益和市场竞争能力。近年来，随着《建设工程质量管理条例》（2023年修订）和《关于促进建筑业高质量发展的指导意见》（2023年）等政策的出台，行业对工程品质和效率的要求进一步提升，质量控制与进度优化的协同管理成为关键课题。当前研究多聚焦单一维度，未能充分整合质量与进度的动态平衡，尤其在房地产领域，高周转模式与精细化管理的矛盾日益凸显。BIM、物联网等技术的应用为协同优化提供了新思路，但实践层面仍存在标准不统一、数据孤岛等问题。本文基于政策导向与行业需求，系统分析质量控制与进度优化的内在关联，探索智能化、标准化手段在房地产项目管理中的实践路径，以期为行业高质量发展提供理论参考与方法支撑。

一、房地产建筑工程质量管理的基本理论

（一）质量管理的概念与原则

建筑工程质量管理是通过系统化方法确保项目符合标准规范的过程，其核心是实现工程安全性和耐久性。房地产项目的质量管理涵盖设计、施工、采购及运维全流程，需建立多环节协同机制。全面质量管理（TQM）强调全员参与和持续改进，PDCA 循环则为质量提升提供动态管理工具^[1]。ISO 9001 体系与《建设工程质量管理条例》（2023年修订）共同构建了质量管理的标准化

框架，其中质量责任终身制的实施有力推动了行业向精细化方向发展。研究表明，完善的质量管理体系可使工程缺陷率降低 40% 以上，同时提升施工效率 15%–20%。

（二）房地产项目质量的影响因素

设计阶段作为工程建设的源头环节，其质量控制直接影响后续施工质量与项目整体效益。设计质量控制要点主要体现在三个方面：设计标准的合规性需严格遵循《建筑工程设计文件编制深度规定》等规范要求，确保结构安全性和功能合理性；设计方案的可行性应结合场地条件、施工工艺及材料特性进行多方案比

选，避免后期变更；设计细节的协调性要求建筑、结构、设备等专业图纸实现无缝对接，减少施工过程中的错漏碰缺^[2]。BIM技术的应用为设计协同提供了有效工具，通过三维建模可提前发现并解决潜在冲突。同时，设计交底与图纸会审制度的严格执行，是确保设计意图准确传达的重要保障。

二、房地产建筑工程进度管理的理论基础

（一）进度管理的关键要素

科学的进度计划编制是房地产项目进度管理的核心环节。甘特图作为传统工具，通过条形图直观展示任务时序关系，适用于简单项目的进度规划；关键路径法（CPM）则通过识别关键工序确定最短工期，更适合复杂工程的时间管控。现代项目管理中，计划评审技术（PERT）结合概率分析，可有效应对工期不确定性。资源分配与工期优化存在动态平衡关系：过度压缩关键资源可能引发质量风险，而资源闲置则导致效率损失。资源受限项目调度（RCPS）理论为解决这一矛盾提供了方法论支持，其通过资源均衡技术实现工期与成本的最优配置^[3]。BIM-4D技术的应用进一步推动了进度管理的可视化与精准化发展。

（二）影响进度的主要因素

房地产项目进度管理受内外双重因素影响。外部因素包括政策调整（如2023年《建设工程工期管理办法》）、极端天气（减少15%-20%有效施工日）和供应链波动（延长建材交付周期）。内部因素涉及施工组织设计、技术方案选择和资金管理，不当决策可能导致30%工序返工或40%项目延期^[4]。研究表明，内部可控因素占进度偏差的65%以上，通过敏感性分析和动态预警机制可有效优化。数字孪生技术为综合管控提供了创新解决方案，实现内外因素的协同管理。实践表明，该技术可提升进度预测准确率至85%，显著改善项目管理效率。

三、质量控制与进度优化的协同管理

（一）质量与进度的冲突与平衡

1. 质量优先对进度的影响

质量优先原则在房地产项目实施过程中往往产生显著的进度成本。严格的材料进场检验可能导致关键路径上的工序延迟，特别是当第三方检测周期超出预期时，平均延误可达7-10个工作日。隐蔽工程验收的高标准要求常常引发局部返工，数据显示质量管控严格的住宅项目返工率较行业基准高出12%-15%。全过程质量追溯制度的实施虽然提升了工程品质，但增加了约20%的文档管理时间成本。施工阶段的强制性养护期规定直接影响后续工序插入时间，混凝土结构养护导致的工期增量约占主体施工周期的8%。值得注意的是，这种进度代价具有明显的边际效应，当质量控制强度超过最优阈值后，进度损失将呈指数级增长。价值工程理论为平衡这一矛盾提供了量化分析工具，通过质量-进度弹性系数评估最优管控强度。

2. 进度优先对质量的潜在风险

房地产项目采用进度优先策略易引发多重质量风险。非常规工序压缩导致混凝土养护不足，结构强度下降15%-20%；平行施工扩大监管盲区，隐蔽工程缺陷率增加30%。材料替代常突破设计参数，某项目因赶工使用替代钢筋致使楼板挠度超标40%。抢工期导致验收流于形式，某住宅项目因分层验收缺失出现大面积空鼓。进度压力下施工误差率增加2-3个标准差。全生命周期分析显示，此类质量缺陷使维修成本达造价的5%-8%，建筑寿命缩减10-15年。风险矩阵预警机制可有效识别关键质量控制点的妥协风险，为进度与质量平衡提供管理依据^[5]。

（二）协同管理的策略与方法

1. 基于BIM技术的动态管理

BIM技术为质量与进度的协同管理提供了数字化解决方案。通过构建5D信息模型，实现施工进度与质量标准的智能关联，项目偏差识别效率提升60%以上。云端协同平台支持质量验收数据与进度计划的实时比对，某超高层项目应用表明，该技术使质量问题响应时间缩短至4小时内。移动端巡检系统自动关联BIM模型中的质量控制点，确保关键工序100%受控。进度模拟功能可预测质量管控措施对关键路径的影响，辅助决策最优施工节奏^[6]。实践数据显示，BIM动态管理使项目综合效率提高25%，质量事故率降低40%，验证了其在协同管理中的核心价值。

2. 精细化施工组织设计

精细化施工组织设计通过系统优化工序逻辑与资源配置实现质量与进度的协同提升。基于价值流分析的工序重组可消除30%以上的非增值作业时间，同时确保关键质量控制点得到充分保障。资源平准化技术有效解决传统施工中"突击赶工"与"资源闲置"交替出现的矛盾，某住宅项目应用显示，该技术使人工效率提升22%而质量波动降低15%。动态缓冲区设置允许在关键质量节点预留合理时间窗口，既避免进度压力下的质量妥协，又防止过度保守造成的工期浪费^[7]。装配式施工与BIM技术的结合进一步推动了施工组织的模块化与标准化，实现质量可控前提下的进度最优化。

四、房地产项目质量控制与进度优化的实践策略

（一）设计阶段的优化措施

1. 标准化设计与模块化施工的应用

标准化设计通过建立统一的建筑部品库与构造节点体系，显著提升设计质量与施工效率。某头部房企实践表明，采用标准化户型模块使设计变更率降低58%，同时缩短方案设计周期40%。模块化施工将现场作业转化为工厂预制，某装配式住宅项目数据显示，预制率达65%时，施工精度误差控制在3mm以内，较传统工艺提升5倍。基于BIM的构件编码系统实现从设计到安装的全过程追溯，质量缺陷率下降72%。标准化接口技术解决了模块间协同难题，使现场吊装效率提高30%，工期缩短25%^[8]。这种模式在2023年《装配式建筑评价标准》实施后获得政策加持，成为平衡质量与进度的有效路径。

2. 设计评审与可施工性分析

多专业协同的设计评审机制是预防性质量控制的关键环节。采用价值工程方法进行可施工性分析，某商业综合体项目实践表明，该措施减少后期设计变更达45%。BIM碰撞检测技术可提前发现90%以上的管线冲突问题，较传统二维审图效率提升3倍。施工方早期介入设计评审，从工艺可行性角度提出优化建议，某超高层项目通过该方式降低施工难度系数28%。可施工性评分系统的应用使设计缺陷在图纸阶段消除率达到85%，避免质量隐患向施工环节传导。数字化评审平台的建立实现了设计问题的实时标注与闭环管理，平均问题解决周期缩短至72小时内。

（二）施工阶段的管理措施

1. 全过程质量监控体系的构建

三级质量检验制度构成全过程监控体系的核心框架。作业班组自检落实质量责任到人，某住宅项目数据显示实施后一次验收合格率提升至92%。工序交接互检机制消除30%以上的过程质量隐患，特别是对隐蔽工程效果显著。第三方专检引入独立评估视角，某商业项目通过增加飞检频次使质量评分提高15分。移动质检系统实现检查数据的实时上传与追溯，质量问题闭环处理时效缩短至48小时内。关键质量控制点设置智能监测设备，混凝土养护环境等参数达标率从78%提升至95%。该体系使质量成本占比从5.2%降至3.8%，同时进度偏差率控制在5%以内。

2. 进度动态调整机制

基于关键链技术的进度控制系统实现施工节奏的精准调控。里程碑节点设置缓冲区间，某综合体项目应用显示该措施使工期延误减少40%。智能预警平台整合气象、供应链等多源数据，提前7天预测进度风险准确率达85%。动态资源调度算法根据进度偏差自动调整人材机配置，某住宅项目应用后资源利用率提升28%。移动端进度看板实现各参建方信息实时共享，决策响应时间缩短至4小时内。BIM-4D模拟技术辅助评估调整方案，使进度优化决策科学性提升60%。该机制在2023年新修订的《建设工程项目管理规范》中被列为推荐做法，有效平衡了进度压力与质量要求^[9]。

（三）信息化与智能化技术的应用

1. 物联网（IoT）与大数据在质量管理中的应用

物联网传感网络实现施工质量参数的实时采集与传输，某超

高层项目应用显示，结构应力监测频率从人工检测的每日1次提升至每分钟1次。大数据分析平台整合历史质量数据，建立混凝土强度增长预测模型，准确率达92%。智能预警系统通过机器学习识别质量异常模式，某住宅项目应用后质量事故预警提前量达72小时。移动端质量巡检系统自动生成整改通知单，问题闭环处理时效缩短60%。区块链技术确保质量追溯数据的不可篡改性，材料进场验收信息上链率达100%。该技术体系使质量验收一次合格率提升至95%，同时降低质量管控人工成本35%。

2. 人工智能（AI）在进度预测与优化中的作用

深度学习算法通过分析历史项目数据建立进度预测模型，某商业综合体应用显示其工期预估误差率降至3.2%。强化学习系统动态优化资源调度方案，使某住宅项目塔吊利用率提升至92%。计算机视觉技术实时监控现场施工进度，图像识别准确率达98%，较人工记录效率提升15倍。自然语言处理引擎自动解析工程联系单，智能生成进度调整建议，决策响应时间压缩至2小时内。数字孪生系统结合AI仿真，可评估不同进度方案的质量影响，辅助选择最优施工路径^[10]。AI技术的应用使项目平均工期缩短12%，同时降低进度管理成本40%。

五、结束语

房地产建筑工程管理中质量控制与进度优化的协同是实现项目效益最大化的关键。研究表明，通过标准化设计、全过程质量监控和智能化技术应用，可有效平衡质量与进度的矛盾。BIM、物联网和人工智能等数字技术的深度整合，为项目管理提供了新的方法论支撑。未来发展方向应聚焦于建立更完善的质量-进度协同模型，推动智慧工地与绿色建造技术的融合创新。随着《建设工程质量管理条例》等政策的持续完善，行业将朝着更高效、更可持续的精细化管理模式转型，为房地产项目的高质量发展提供系统性解决方案。

参考文献

- [1] 宁成龙. 建筑工程管理施工过程中质量控制与进度控制策略 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(8): 244.
- [2] 王锋. 建筑工程管理施工过程中质量控制与进度控制策略 [J]. 装饰装修天地, 2021(5): 73.
- [3] 刘辰龙. 建筑工程管理施工过程中质量控制与进度控制策略 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(19): 1734.
- [4] 林繁荣. 土建工程施工中的进度控制与管理 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021(5): 2643.
- [5] 冯增浪. 试析建筑工程质量和进度管理现状及优化方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2015(10): 1824-1824.
- [6] 魏健. 房屋建筑工程施工进度及施工质量研究 [J]. 河南建材, 2020(8): 77-78.
- [7] 尼格买提·米吉提. 建筑工程施工现场进度控制管理控制要点分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(32): 2626.
- [8] 孙姣. 建筑工程管理策略优化 [J]. 电脑采购, 2022(36): 82-84.
- [9] 何涛. 建筑工程管理中质量控制与进度控制策略 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023(4): 3.
- [10] 李文. 建筑工程管理施工过程中质量控制与进度控制策略 [J]. 住宅与房地产, 2020(9): 141-141.

厂房项目建设全过程管理中的技术与质量协同管控

周志凡

广东长江新元项目管理有限公司, 广东 惠州 516000

DOI:10.61369/ETQM.2025070027

摘 要： 厂房项目建设中技术与质量的协同管控是提升工程效能的核心路径。研究基于全过程管理视角，构建了涵盖规划、设计、施工、验收各阶段的协同体系，通过 BIM 技术、物联网等数字化手段实现技术标准与质量要求的深度融合。实践表明，组织创新与制度优化的双重保障可显著降低质量风险，提高施工效率，为工业建筑项目管理提供理论支撑与方法参考。

关 键 词： 厂房建设；技术质量协同；全过程管理

Technical and Quality Coordination Control in the Whole Process Management of Factory Construction

Zhou Zhi fan

Guangdong Changjiang Xinyuan Project Management Co., LTD. Huizhou, Guangdong 516000

Abstract： The coordinated control of technology and quality in factory construction projects is the core path to enhancing engineering efficiency. This study, from a full-process management perspective, constructs a collaborative system covering planning, design, construction, and acceptance stages. By leveraging BIM technology and IoT digital means, it achieves deep integration of technical standards and quality requirements. Practice has shown that dual guarantees of organizational innovation and institutional optimization can significantly reduce quality risks and improve construction efficiency, providing theoretical support and methodological references for industrial building project management.

Keywords： plant construction; technical quality coordination; whole process management

引言

厂房项目建设是工业发展的核心载体，其技术复杂性与质量要求高的特点对全过程管理提出了严峻挑战。随着《“十四五”建筑业发展规划》（2022年）的颁布，国家对工程建设的数字化、绿色化与标准化提出了更高要求，强调通过技术革新与质量管理协同提升项目效能。当前，厂房项目普遍存在技术标准与质量管控脱节的问题，导致施工效率低下或质量缺陷频发。现有研究多聚焦单一技术或质量管理，缺乏对二者协同机制的深入探讨。基于系统论与精益建造理论，构建技术与质量协同管控体系，成为优化厂房项目建设的关键路径。通过整合 BIM、物联网等数字化工具，结合政策导向下的标准化流程，可为实现高效、高质的厂房项目管理提供理论支撑与实践参考。

一、厂房项目建设全过程管理概述

（一）厂房项目建设的特点与挑战

厂房项目建设具有显著的工程复杂性，其技术集成度高、专业界面多，涉及结构、机电、工艺等多系统协同作业。现代工业厂房对空间利用率、荷载能力及环境适应性提出严苛要求，质量管控贯穿设计、施工及运维全周期。技术层面，不同专业标准不统一易导致接口冲突，如钢结构与设备基础的匹配偏差；质量层面，施工过程监管脱节可能引发隐蔽工程缺陷或材料性能不达标^[1]。此外，工期压缩与成本控制的压力进一步加剧了技术实施与质量保障的矛盾。这些特征使得厂房项目管理面临标准化程度

不足、协同效率低下等系统性挑战，亟需建立贯穿全流程的技术与质量协同机制。

（二）全过程管理的核心环节

厂房项目全过程管理包含五个关键阶段，各阶段管理要点具有显著差异性。规划决策阶段需重点把控可行性研究与投资估算的准确性，确保项目定位与产业需求相匹配。设计阶段强调技术方案比选与施工图深化，需协调建筑、结构、机电等多专业协同设计。施工阶段管理核心在于进度控制与质量监督，特别要重视关键工序的工艺标准和材料验收。竣工验收阶段应建立完善的质量评价体系，重点核查隐蔽工程和功能性能指标。运维管理阶段需完善设备维护制度和能耗监测系统，实现全生命周期性能优化。

各阶段管理需形成闭环，通过信息共享机制确保管理流程的无缝衔接^[2]。

二、技术管理与质量管理的协同理论

（一）技术管理的关键内容

厂房项目技术管理的核心在于建立系统化的技术标准体系，涵盖设计规范、施工工艺及验收准则，确保各环节技术要求的统一性。工艺优化重点解决施工过程中的技术难题，通过工法创新提升效率并保障质量稳定性。BIM技术的深度应用实现三维建模、碰撞检测及施工模拟，为技术决策提供可视化支持^[3]。此外，智能化监测设备的引入可实时采集施工数据，为技术方案的动态调整提供依据。技术管理的有效性直接影响工程质量与建设效率，需贯穿项目全生命周期。

（二）质量管理的核心要求

厂房项目质量管理体系以明确的质量目标为基础，需结合工程特性制定量化的质量指标体系。过程控制强调关键节点的质量检查，通过原材料检测、工序验收等环节确保施工质量符合设计要求。验收标准体系应覆盖结构安全、使用功能和耐久性等核心指标，采用分部分项验收与整体验收相结合的模式。质量追溯机制的建立有助于实现质量问题源头管控，而持续改进则依托于质量数据的系统化分析。质量管理必须与技术方案深度融合，形成动态优化的质量控制闭环。

（三）协同管控的理论基础

厂房项目技术与质量协同管控的理论支撑源于系统论的整体性原则，将技术标准与质量要求视为相互作用的子系统。PDCA循环为协同过程提供方法论指导，通过计划-执行-检查-处理的迭代机制实现持续改进。精益建造理论则强调价值流优化，消除技术实施与质量管控中的非增值环节。三大理论共同构建了“技术驱动质量、质量反馈技术”的动态平衡机制，为建立标准化、数字化的协同管理体系奠定了理论基础^[4]。这种理论融合有效解决了传统管理中技术方案与质量标准脱节的问题。

三、厂房项目各阶段技术与质量协同管控策略

（一）规划与设计阶段

1. 技术可行性分析与质量目标融合

规划阶段的技术可行性分析需基于全生命周期视角，将质量目标转化为具体的技术参数指标。通过多方案比选评估，重点考察不同技术路线的质量保障能力，建立技术可行性与质量可靠性的量化关联模型。采用价值工程方法优化技术方案，确保结构安全、使用功能等核心质量要素得到充分满足。技术评审环节应设置明确的质量预控指标，实现质量要求向技术标准的有效转化^[5]。这种融合机制为后续设计施工提供了可靠的技术质量基准。

2. 设计协同与标准化

BIM技术的应用为厂房项目设计协同提供了数字化支撑平

台，通过参数化建模实现建筑、结构、机电等多专业协同设计。基于云平台的实时数据共享机制，确保各参与方在设计阶段即达成技术标准与质量要求的统一认知。标准化设计模块的建立可有效减少设计变更，通过预制构件库与工艺节点库的集成应用，将质量控制要点前置到设计环节。这种一体化管控模式显著提升了设计成果的可施工性与质量保障度，为后续施工阶段的质量管控奠定基础^[6]。

（二）施工阶段

1. 施工技术优化与质量动态监控

钢结构安装等关键工艺实施过程中，技术交底需明确质量检验节点与验收标准，形成工艺参数与质量指标的对应关系。采用数字化监控手段实时采集焊接变形、螺栓紧固度等关键数据，通过BIM模型与实际施工的比对分析实现质量偏差预警。建立技术方案调整与质量验收的快速响应机制，确保工艺改进及时反馈至质量控制体系^[7]。这种联动模式实现了施工过程的可视化管控，有效预防了质量缺陷的产生，提高了工程一次验收合格率。

2. 信息化工具的应用

物联网技术在厂房施工中的深度应用构建了实时数据采集网络，通过智能传感器持续监测混凝土养护环境、钢结构应力等关键质量参数。质量管理体系与IoT平台的集成实现了检验数据自动归集与分析，形成可视化的质量态势看板。基于边缘计算的质量异常识别算法能够即时预警偏差，指导现场技术调整。这种数据协同机制打破了传统质量管理的滞后性，使技术决策与质量管控形成双向实时反馈，显著提升了施工过程的精细化管理水平。

四、协同管控的实践路径与保障措施

（一）组织与制度保障

1. 跨部门协同机制

厂房项目需构建矩阵式协同管理组织，由技术、质量、施工三方专业人员组成联合工作小组。该机制采用定期联席会议制度，建立技术方案评审与质量验收的并联审批流程。通过明确各专业接口责任边界，制定统一的工作标准和信息交换协议，实现技术决策与质量管控的同步推进。数字化协同平台的运用确保各方实时共享技术变更和质量数据，形成闭环管理。这种组织模式有效解决了传统条块分割导致的沟通壁垒，提升了整体管理效能^[8]。

2. 标准化流程建设

技术-质量协同操作手册的编制应基于厂房项目全生命周期管理需求，系统整合各专业接口的技术规范与质量验收标准。手册内容需涵盖设计交底、工艺评定、工序验收等关键环节的操作指引，明确技术参数与质量指标的对应关系。采用模块化编制方法，针对钢结构安装、设备基础施工等典型分部工程制定专项流程。通过数字化手段实现手册内容的动态更新，确保技术标准与质量要求始终保持协同一致。这种标准化建设为项目参与方提供了明确的技术质量管控依据。

（二）技术保障

1. 数字化管理平台构建

BIM与云技术的融合应用构建了厂房项目全要素数字化管控体系，实现设计模型与施工质量的动态关联。云平台搭载的质量监控模块可实时采集现场检验数据，通过BIM模型可视化呈现质量偏差。基于机器学习算法建立的质量预测模型，能够提前识别潜在风险点并推送预警信息。移动终端的广泛接入使质量验收与技术复核同步进行，形成闭环管理^[8]。这种数字化协同平台有效提升了质量管控的时效性和准确性，为技术决策提供数据支撑。

2. 先进技术引入

无人机巡检系统通过高精度摄影测量实现厂房大范围质量巡查，结合三维点云分析快速识别结构偏差。AI视觉检测技术应用于焊缝质量评估、混凝土裂缝识别等专项检查，检测精度可达毫米级。智能算法自动比对施工影像与BIM模型，实时输出质量合规性报告。这些技术的集成应用显著扩展了传统质量检查的覆盖范围与深度，使隐蔽工程和危险作业区域的质量管控成为可能。技术赋能让质量验收从抽样检查转向全数检验，大幅提升管控效能。

（三）评价与改进

1. 协同效能评估指标

厂房项目协同管控效能的量化评估需建立多维指标体系，技术维度重点考察工艺标准执行率与技术方案实现度。质量维度采

用缺陷发生率与整改闭环率等核心指标，反映管控实效。过程协同度通过跨部门协作时效与信息共享完整率进行衡量。引入动态权重算法，根据项目阶段特征调整指标权重分配。数据采集依托物联网设备与管理系统自动完成，确保评估结果的客观性与时效性^[9]。这种评估体系为持续改进提供了精准的数据支撑。

2. 持续改进机制

基于PDCA循环构建动态优化体系，通过质量数据回溯分析识别技术标准与管控流程的改进空间。建立缺陷案例库与最佳实践数据库，为技术方案优化提供经验支撑。定期开展跨专业复盘会议，将改进措施转化为标准化作业指导。数字化平台自动追踪改进措施的实施效果，形成闭环反馈。这种机制确保技术管理与质量管控在迭代中持续提升，推动项目整体绩效的阶梯式进步。

五、结束语

厂房项目建设中技术与质量的协同管控是提升工程效能的关键路径。通过构建全过程、多维度的协同机制，实现了技术标准与质量要求的深度融合。数字化工具的应用为动态监控与闭环管理提供了技术支撑，组织创新与制度优化则保障了协同体系的稳定运行^[10]。研究表明，这种系统化管控模式能有效降低质量风险、提高施工效率。未来研究可进一步探索智能建造技术与协同管理的深度整合，为工业建筑项目的高质量发展提供新思路。

参考文献

- [1] 吴晓雷. 工业厂房建设项目质量管理探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013(23).
- [2] 傅志娟, 陈巍, 方学术, 等. 浅谈钢结构厂房建设中的施工与质量控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013(17).
- [3] 何泓易. 厂房建设中钢结构的施工质量及施工技术探讨 [J]. 建材与装饰, 2017(13): 44-45.
- [4] 杨彦. 工业厂房建设的施工质量控制措施 [J]. 建材发展导向 (上), 2016, 14(7): 25-26.
- [5] 崔怀清. 谈工业厂房建设中施工质量控制 [J]. 建材发展导向 (下), 2016, 14(5): 256-256.
- [6] 丁小斌, 高平南. 工业厂房建设中的施工质量控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2014(21): 3495-3495.
- [7] 李旅. 标准化厂房设计研究——以马鞍山市横望科技产业园为例 [J]. 河南科技, 2022, 41(22): 56-59.
- [8] 唐秉诏, 易璐, 王安, 等. 某工业厂房BIM技术施工模拟与应用探究 [J]. 中国住宅设施, 2022, (09): 46-48.
- [9] 刘金南. 工业厂房施工策划及技术质量管理 [J]. 中国住宅设施, 2022, (09): 154-156.
- [10] 王桂英. 高大模板施工技术在厂房建设中的应用 [J]. 江西建材, 2022, (04): 192-194.

高速列车座椅的创新设计

陈颢伟, 丁涛*, 张士强, 刘泉江, 袁子豪

苏州城市学院, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ETQM.2025070028

摘 要 : 本文聚焦于改善高速列车座椅的舒适性, 运用人机工程学原理, 提出了一种针对高铁商务座椅的优化方案, 致力于实现人机交互的优化。运用人机工程学原理对高铁商务座椅进行优化设计, 可显著提高乘客乘坐体验, 不仅显著增强了乘坐体验的舒适性, 还提升了本设计中的座椅的在视觉上的美观性, 本设计优化了高铁商务座椅体验, 并且这也为高铁座椅的优化设计提供了构思。本文还介绍了一种新型高速列车座椅的设计方案, 其主要由座垫、靠背和附属设施三部分组成。本设计集成了多种功能, 提高了该列车座椅的舒适性, 并且能够充分的利用空间。该列车座椅的设计目的在于提供一种更佳舒适的列车座椅, 更加适用于现在的列车使用。

关 键 词 : 高速列车座椅; 舒适性; 可调节; 可折叠

Design of Comfortable Seat in High-speed Train

Chen Haowei, Ding Tao*, Zhang Shiqiang, Liu Quanjian, Yuan Zihao

Suzhou City University, Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract : This paper takes improving the comfort of high-speed train seats as the starting point., based on explore a more harmonious interaction between humans and machines. The results show that the improvement of high-speed rail business seats through ergonomic design methods can improve the comfort and appearance at the same time, and provide a reference for the design of high-speed rail business seats. This paper also introduces the design scheme of a new type of high-speed train seat, which is mainly composed of three parts: seat cushion, backrest and auxiliary facilities. The design integrates a variety of functions to improve the comfort of the train seats and make the best use of space. The train seat is designed to provide a more comfortable train seat that is more suitable for today's trains.

Keywords : seat in high-speed train; comfortability; adjustable; foldable

绪论

随着时代发展, 乘坐高铁出行已经成为中国国民的交通首选^[1]。当前, 高铁作为国家大力发展的关键基础设施, 已成为推动国民经济腾飞的关键力量, 对保障国家经济与社会的平稳前行发挥着极为重要的作用^[2]。我国的高速列车起步时间相较西方较晚, 且目前我国铁路客运市场正面临着日益激烈的竞争。而乘客对于动车组列车运行的直观感受, 很大程度上是基于对座椅舒适度的体验而做出的^[3-5]。聚焦于提升列车乘坐体验并深入探索其优化路径, 不仅有助于铁路客运市场的拓展与巩固, 更能充分发挥铁路运输的独特优势, 其重要性不言而喻^[6-7]。

目前列车座椅的各类设计各有其独特优势, 但仍存在一些有待改进的地方。在本研究中, 高铁座椅的靠背、坐垫和脚踏板等部分, 是影响高速列车座椅舒适性的关键因素^[8]。针对这些问题, 本文提出了一种改进的列车座椅设计方案, 以满足实际需求。

一、总体设计方案

(一) 设计要求

本设计的目的在于基于人体工程学的原理设计出更适合国人的列车座椅, 提升舒适性, 解决一部分在之前的座椅设计中出现

的缺陷。

如果是从人机工程学这一方面的角度来看, 确保乘客的舒适性的要点有很多, 而座椅尺寸的设计就是这些要点中最为关键的因素之一。一个好的座椅不仅需要有足够的背部高度, 用以缓解乘客的背部压力, 减轻因长时间乘坐而产生的疲劳; 而且良好

支助项目: 2024 年国家级大学生创新创业项目 (202413983029Z), 苏州城市学院重点课程建设项目 (5210302425), 苏州城市学院产学研合作协同育人项目 (SZCU2024002)。

作者简介: 陈颢伟 (2006.03-) 男, 汉族, 江苏无锡人, 在读本科, 专业: 机械设计。

的座椅对于椅背也有要求,其中椅背的宽度应与座垫相匹配,以便更好地贴合人体曲线,为乘客提供均匀的支撑力,从而达到显著提升乘客的舒适体验的目的。此外,本设计中还应该包含有可调节高度的椅背,用以确保后排乘客的视线可以不受遮挡。同时这也是为了满足不同的乘客的对于乘坐时的个性化的需求,从而做到能够进一步的优化乘客在乘坐时的感受。

这款座椅巧妙融合了脚踏、调角装置、折叠桌板和杯托等多功能设计,全方位满足乘客的多样化需求。无论是长途旅行还是日常通勤,这些贴心的功能配置都能让乘客在乘坐过程中感受到极致的便捷与舒适,显著提升整体的使用体验。

(二) 整体尺寸

基于以上的需求,这一款座椅主要由基座、扶手、座垫、靠背等基本要素构成,具体含有脚踏,调角器,折叠桌和杯托等创新型结构。图1中显示的是本高速列车座椅设计的三维视图,分别为该列车座椅的主视图,俯视图和侧视图。主视图展示了本设计中的列车座椅的整体高度以及作为依靠作用的各种靠垫。侧视图展示了本设计中调角器和脚踏所在的位置。俯视图展示了扶手,折叠桌,杯托的所在位置和大致的形状。其中靠背宽500mm、靠背高800mm、靠背倾角小于 45° 。座垫高360mm、座垫宽500mm、座深440mm、座垫倾角 3° 。

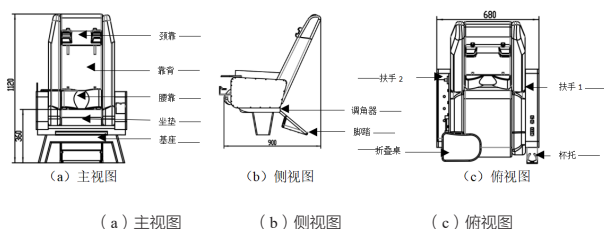


图1 高速列车座椅的三视图

图2显示了本设计的最终效果图,显示了该高速列车座椅的整体形状,体现出了本设计在使用时的整体样子。具有很好的调节性功能,可以自由选择该座椅的大致角度,以及附加设施的收缩。之所以这么设计是为了满足乘客们在使用时的需求,并且考虑到人体工程学的设计。

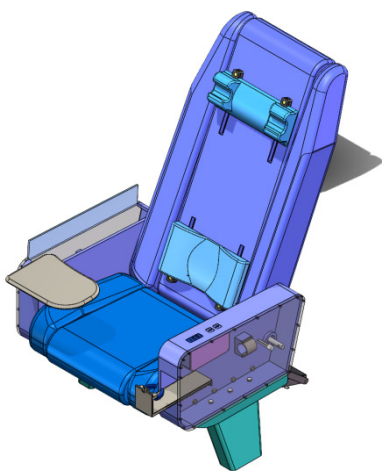


图2 高速列车座椅的三维视图

二、创新装置结构

(一) 调节装置

本设计中认为,可调节性在对高速列车座椅进行设计时,是有十分重要的意义的。因此,为了实现座椅的高度调节功能,高度调节装置、脚踏、调角器等部件被巧妙地融入到座椅设计中。图3展示出了在本设计中的高度调节装置的三维结构模型图,该图可以清晰地呈现出该装置各个结构,以及这些结构的整体布局。可以看出该装置主要由按钮座(1)、调节卡(2)、导轨(3)、按钮轴(4)、滑块(5)以及滚子(6)组成。

当乘客轻轻按下按钮时,按钮轴(4)就会开始动作。与此同时,调节卡(2)会从导轨(3)的卡槽中平稳地脱离。在导轨(3)内部,经过精心设计的滚子(6)也开始工作。滚子在导轨(3)内顺畅地滑动,从而保证颈靠和腰靠能够平稳地移动。这些操作均在同一时间完成,让乘客能够精确地调整座椅角度,进而享受到更为舒适且贴合个人需求的乘坐感受。

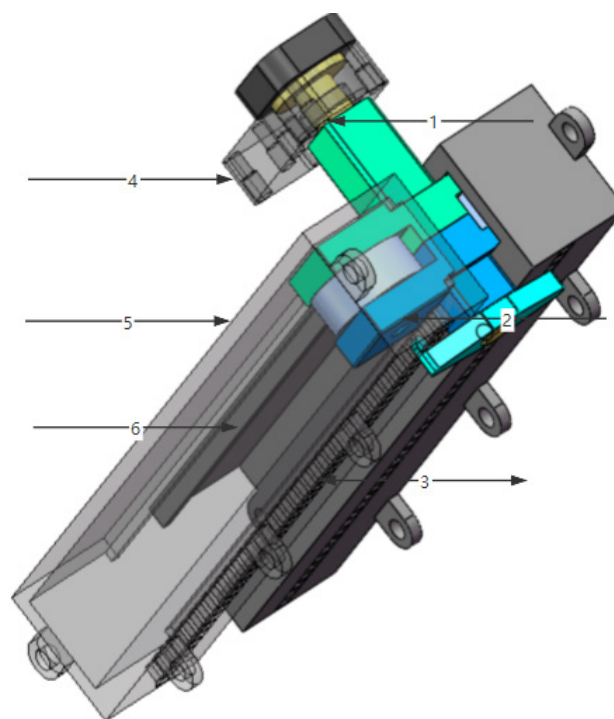


图3 高度调节装置(按钮座(1)、调节卡(2)、导轨(3)、按钮轴(4)、滑块(5)以及滚子(6))

图4展示了本设计中的调角器的三维建模模型。该调角器的核心组成部分主要包括直流电机、蜗轮蜗杆、齿轮组以及外壳等。在座椅靠背角度调节方面,主要以手动调节为主,同时结合杠杆调节、电动调节以及感应调节等多种方式,以满足不同乘客的需求和使用场景。以达到可以充分满足不同乘客在实际使用时不同且复杂的需求这一目的。

在本设计中的调角器涵盖了两种主要的调节模式:第一种是将座椅靠背往后倾斜,第二种是将座椅靠背往前调整。在座椅靠背向前调整的过程中,人体重量会对靠背施加压力。此时,调角器的负载转速被设定为每分钟13转。这样的设计可以确保乘客倚靠座椅时,调角器能够以合适的速度和力度进行角度调节,从而

为乘客提供更舒适、更个性化的乘坐体验。

为了确保安全，本设计充分考虑了成年人的体重范围的影响，一般在50-80公斤。我们以其中的最大值80公斤作为计算依据。根据物理学公式 $F=ma$ ，一个80公斤的人，重力作用下的力大小应为 $F=ma=80\times9.8=784\text{N}$ 。转动半径取轴的直径，即 $L=20\text{mm}$ 。由此可得，负载力矩应为 $T=F\times L=784\times0.02=15.68\text{N.m}$ 。若负载转速为13rpm，电机功率应为 $P=(T\times n)/9550=(15.68\times13)/9550=0.021\text{kw}$ 。由于安装了多对齿轮以提升扭矩并降低转速比，负载转速应为26rpm。此时的功率应为 $P=(T\times n)/9550=(15.68\times26)/9550=0.043\text{kw}$ 。这彰显了本设计中人性化理念的关键特征。此外，这也充分展现了本设计能够适应不同乘客的个性化需求，并满足其基本使用要求。

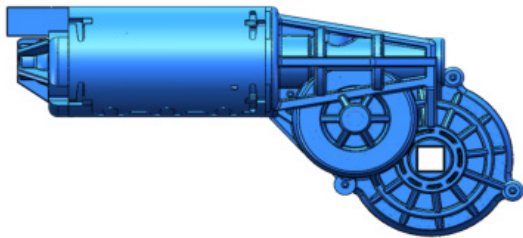


图4 调角器

本设计中的调节装置的设计的目的是基于多方面考量的，主要是希望能够显著提升乘客的乘坐舒适性。致力于迎合不同乘客的身材特点与个性化需求，保障每一位乘客都能获得极为舒适、惬意的乘坐感受。本设计调节装置都具有操作简便，简单易学的特点，方便第一次使用本列车座椅的乘客快速上手使用，这凸显了本设计中人性化理念的关键所在。就是需要满足乘客对于舒适度的追求。

（二）附加装置

本设计中的附加装置主要包括脚踏、折叠桌和杯托。在本设计的结构展示中，图5呈现了脚踏的三维结构设计。脚踏由脚踏主体和折叠板构成，折叠板上设计有槽口，通过衬套实现滑动功能。利用铆钉进行固定；图6展示了折叠桌的三维形态，其结构包含桌板、转轴、盖板、固定轴以及内部轴承组件；图7展现了杯托的三维样式，该杯托由杯托座与支架组合而成。杯托的设计同样考虑了收纳的便捷性，方便其能够在不使用时折叠收缩回座椅内部，提高空间利用效率。

这些附加装置的设计均以空间利用最大化和使用便捷性为目标。因为拥有折叠和收缩功能，它们在不被乘客使用时，可以被巧妙地收纳于座椅内部，避免占用空间，同时在乘客需要使用时也能快速的展开，适应不同使用场景下，不同乘客的不同使用需要。这些设计不仅提升了座椅的功能性，还优化了乘客的使用体验，这从中体现了本设计中的人性化设计理念。

脚踏在拉出时乘客可将双脚置于其上，使脚部有支撑。同时当乘客将双脚置于踩踏结构上时，身体重心能够得到有效稳定，即便处于湿滑环境，也可凭借其出色的防滑性能，牢牢抓地，从而为乘客提供可靠的安全防护。在长途旅行场景下，这种踩踏设计能够显著提升乘客乘坐时的体验，让旅客使用时可以倍感舒

适、便捷、惬意。

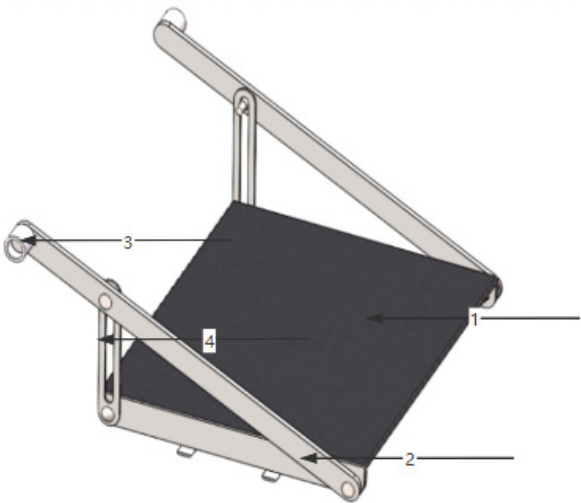


图5 脚踏 (1.脚踏主体, 2.折叠板, 3.衬套, 4.折叠板)

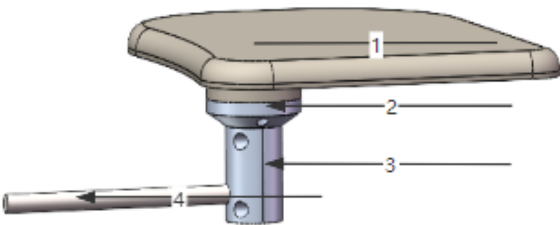


图6 折叠桌 (1.桌板, 2.转轴, 3.盖板, 4.固定轴)

本设计中的折叠桌表面平整光滑，便于清洁。当乘客需要使用时，只需轻轻一拉，就能迅速展开，十分的方便，快捷。本设计中的，这种一体化的，本设计中的设计理念的最主要目的在于，令其不仅做到兼顾使用功能的充分与外观的美观，也让车厢视觉效果显得更加简洁利落。折叠桌被嵌入扶手，闲置时可以释放空间，让车厢更显敞亮。既实用，又能满足乘客休闲时的多样需求，优化了本设计的整体使用感受。

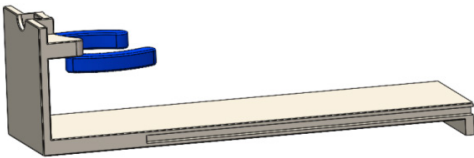


图7 杯托

扶手的构思很巧妙，充分贴合了乘客的实际需求。它不仅握起来很舒服，还巧妙地融合了多种实用功能，比如折叠桌、杯托、角度调节和USB接口等。杯托被巧妙地设置在座椅前排扶手的内侧，方便乘客放置饮料，同时又不会影响到其他乘客，既节省了空间，又保护了乘客的隐私。而且，杯托还可以调节，能够适应各种不同大小和形状杯子，大大增强了它的实用性。

三、总结

该设计在设计时充分考虑到了该列车座椅的在使用时对于各种舒适性的需要。1.本设计集成了多种功能，加入了多种设计

结构如可调节靠背、颈靠腰靠、折叠桌、杯托、折叠脚踏等。这些功能的加入使本设计更具优势，对于不同的乘客的个性化需求可以做到更好的适应，从而达到提高乘客的舒适性的目的。2.杯

托，脚踏等附加装置使该设计具有较高的空间利用效率。3.多种功能性结构，增强了对乘客在使用时的个性化需要的适应性。4.本设计简单，操作方便，便于旅客的使用和操作。

参考文献

- [1] 李宜翰. 基于办公出行体验的短途高速列车座椅设计研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [2] 高昊, 曹鸣. 本土化视域下的高速列车内饰设计研究 [J]. 设计, 2023, 36(21): 143-146.
- [3] 李冉, 张军. 高速列车座椅乘坐舒适性影响分析 [J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(04): 38-43.
- [4] 户俊立. 汽车座椅乘坐的舒适性设计研究 [J]. 科学与财富, 2020, (3): 122-125.
- [5] 赵利, 侯志敏, 何伟. 高速列车座椅设计中的舒适性研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(8): 44-48.
- [6] Kumar V, Mishra R K, Krishnapillai S. Study of pilot's comfortness in the cockpit seat of a flight simulator [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 71: 1-7.
- [7] 孙达焱. 基于体压分布的高速列车座椅舒适性评估和优化研究 [D]. 中南大学, 2022.
- [8] 雷鸣, 董宇珊, 刘静, 等. 高铁座椅旅客乘坐舒适满意度调研及改进策略研究 [J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(05): 100-103.
- [9] 郝安娜, 李银霞, 呼慧敏, 等. 高速列车座椅调节参数对舒适性的影响研究 [J]. 机械设计, 2024, 41(04): 83-88.
- [10] 黄昌雄, 陈耕, 黄松华, 等. 基于 SIMP- 安定的高速列车组合式座椅底架轻量化设计与分析 [J]. 工程科学学报, 2024, 46(06): 1151-1160.

基于数值模拟的深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响及控制措施研究

杨继位

天津市建筑设计研究院有限公司, 天津 300074

DOI:10.61369/ETQM.2025070030

摘要：随着城市建设加速，深基坑工程不断涌现，保障地铁安全运营尤为关键。深基坑开挖对邻近地铁隧道的变形影响显著，相关研究极具现实意义。数值模拟技术因能考量复杂地质与施工过程，在该领域广泛应用。研究通过数值模拟剖析基坑深度、支护结构、土体性质及开挖顺序等因素对隧道变形的作用，并针对性提出优化支护设计、调整开挖工艺、加强监测等控制措施，以降低变形影响，保障地铁安全。本研究为同类工程提供理论与实践指导，对城市地下空间开发及地铁保护意义重大。

关键词：深基坑开挖；地铁隧道；数值模拟；变形影响

Study on the Influence of Deep Excavation on the Deformation of Adjacent Subway Tunnels and Control Measures Based on Numerical Simulation

Yang Jiwei

Tianjin Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074

Abstract： With the acceleration of urban construction, deep foundation pit projects continue to emerge, and ensuring the safe operation of the subway is particularly critical. The excavation of deep foundation pits has a significant impact on the deformation of adjacent subway tunnels, and related research is of great practical significance. Numerical simulation technology is widely used in this field because it can consider complex geology and construction processes. This study uses numerical simulation to analyze the effects of factors such as foundation pit depth, supporting structure, soil properties, and excavation sequence on tunnel deformation. It proposes targeted control measures such as optimizing support design, adjusting excavation techniques, and strengthening monitoring to reduce deformation impact and ensure subway safety. This study provides theoretical and practical guidance for similar projects and is significant for urban underground space development and subway protection.

Keywords： deep foundation pit excavation; subway tunnel; numerical simulation; deformation effect

引言

随着城市化推进，地下空间开发加剧，深基坑工程数量激增。这类工程深度大、规模广且周边环境复杂，施工易影响周边土体与既有结构。与此同时，地铁作为城市交通骨干，以大运量、高效环保等优势，在城市客运体系中至关重要。但深基坑开挖引发的土体应力重分布，会威胁邻近地铁隧道稳定性，可能导致隧道变形、开裂，危及地铁运营安全。一旦隧道受损，将严重影响市民出行，造成重大社会与经济损失。因此，研究深基坑开挖对地铁隧道变形的影响及控制措施，对保障城市建设与市民安全意义重大。

一、相关概述

（一）深基坑开挖对地铁隧道变形影响的研究现状

深基坑开挖对地铁隧道变形影响的研究，经历了从理论探索到实证研究的发展历程。近年来，柯明中等^[1]以杭州地区某邻近地铁隧道的基坑工程为例，通过理论分析和有限元模拟，指出隧道会出现朝向基坑内侧的水平位移和向下的竖向位移。马江

锋^[2]针对南昌地区某地铁隧道附近的基坑工程，数值模拟了基坑整个开挖过程，提出了隧道变形是随着基坑开挖深度的增加而不断增加的，并提出了基坑应进行分块开挖的建议。刘波等^[3]通过综述最新研究成果认为基坑开挖引起临近既有隧道变形的影响主要与地质条件、基坑条件、隧道条件三方面有关。

（二）数值模拟技术在相关研究中的应用进展

数值模拟技术在深基坑开挖对地铁隧道变形影响的研究中占

据重要地位，其发展与计算机技术革新紧密相连。早期受计算机性能制约，数值模拟规模与精度有限；随着软硬件升级，该技术在该领域得以广泛应用。目前，Midas GTS NX和Plaxis等软件成为主流工具。Midas GTS NX擅长构建复杂几何模型，精准模拟基坑分步开挖、支护结构施作等施工过程，已在众多工程中成功应用，助力分析隧道变形。Plaxis则专注于土体变形与稳定性模拟，能够考虑土体复杂本构关系，适配深基坑及地铁隧道工程的复杂工况。数值模拟技术可通过计算机模拟各类复杂工程条件，提前预测地铁隧道变形，为工程设计与施工提供关键参考，在实际工程中展现出显著优势。

二、数值模拟技术原理及应用

（一）数值模拟技术原理

在深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的研究中，有限元法和边界元法是重要的数值模拟手段。有限元法将连续求解域离散为有限个通过节点相连的单元，模拟土体与结构相互作用时，先对其离散化并赋予单元物理属性，再建立单元刚度矩阵并组装成整体刚度矩阵，结合边界与荷载条件求解方程组，从而得出节点位移、应力等物理量，能精准模拟复杂受力下的变形及应力分布，适用于分析土体与支护结构受力。边界元法则利用格林公式将区域内微分方程转化为边界积分方程求解，在处理无限域或半无限域问题时，仅需离散边界，可降低计算量并模拟无限远处边界条件，适用于分析远离基坑土体对隧道变形的影响。

（二）常用数值模拟软件介绍

MIDAS GTS Nx和Plaxis是岩土工程数值模拟的核心软件，在深基坑与地铁隧道工程中不可或缺。MIDAS GTS Nx擅长构建复杂几何模型，可精准呈现不规则深基坑、地铁隧道及周边土体形态，同时能模拟基坑分步开挖、支撑体系施工等过程。在某临近地铁的深基坑项目中，该软件通过建立三维有限元模型，系统分析了混凝土支撑轴力、围护结构位移等变化规律，以及施工对地铁隧道的影响。Plaxis则专注于土体变形与稳定性分析，凭借丰富的土体本构模型，可准确模拟不同土体的受力变形特性。在杭州地铁1号线两侧深基坑项目中，运用Plaxis 2D和3D软件模拟基坑开挖，验证了围护方案符合地铁盾构隧道控制标准，为工程安全提供保障^[4]。

（三）数值模拟在深基坑开挖对地铁隧道变形分析中的应用案例

在高层住宅与天津深基坑工程中，数值模拟技术成为保障邻近地铁隧道安全的关键。某高层住宅项目临近地铁，场地填土厚（3.0m—8.0m）、局部粗骨料含量高（30%~60%），下层为粉质黏土，通过建立数值模型模拟基坑开挖，发现分区与未分区开挖卸载对隧道变形影响显著，且隧道最大位移随条坑开挖深度变化，模拟结果有效指导了施工方案优化^[5]。天津某深基坑工程地质复杂，运用三维有限元软件动态模拟施工全流程，获取基坑围护结构变形及地铁隧道位移数据，如地连墙最大水平位移、地表最大沉降等，基于模拟优化设计方案，在控制成本的同时确保隧

道变形可控，为工程决策提供有力支撑。

三、深基坑开挖引发地铁隧道变形的影响因素

（一）基坑深度的影响

基坑深度的变化对地铁隧道变形存在显著影响。随着基坑深度的增加，坑底土体的卸荷量增大，导致坑底土体回弹，同时坑周土体向坑内移动，这种土体的变形会带动邻近地铁隧道的变形。从影响机制来看，基坑开挖深度越大，土体应力重分布的范围和程度就越大，对隧道周围土体的扰动也越强烈，进而使隧道承受更大的附加应力，产生更明显的变形。

相关数值模拟结果表明，在一定范围内，地铁隧道的变形量与基坑深度近似呈线性增长关系。例如，以某邻近地铁隧道的深基坑开挖为对象的数值计算分析显示，当基坑深度较浅时，隧道变形较小；随着基坑深度逐渐增大，隧道拱顶竖向位移以及边墙水平位移均明显增加。在实际案例中，也有类似规律体现，如某些深基坑工程，随着开挖深度的推进，邻近地铁隧道的监测数据显示变形量逐步累积，且变形速率与基坑深度增加存在紧密联系。这都表明基坑深度是影响地铁隧道变形的重要因素之一^[6]。

（二）支护结构的影响

不同的支护结构类型对地铁隧道变形的控制作用存在差异。地下连续墙作为一种常见的支护结构，具有较高的整体性和刚度，能够有效限制基坑周围土体的变形，从而减少对邻近地铁隧道的影响。其通过将墙体嵌入到稳定的土层中，利用墙体的抗弯刚度和土体的侧向阻力来抵抗基坑开挖产生的侧向土压力，进而控制隧道的变形。钻孔灌注桩支护则是通过桩体的侧向刚度来承受土压力，其控制隧道变形的效果与桩的间距、直径以及桩身混凝土的强度等因素相关。

支护结构的参数，如厚度和刚度，对隧道变形影响显著。以地下连续墙为例，研究表明，随着地下连续墙厚度的增加，地铁隧道水平位移和竖向位移逐渐减小，且水平位移和竖向位移与地下连续墙厚度成高度的线性关系。增加支护结构的刚度，可以提高支护结构抵抗土压力的能力，减少支护结构的变形，进而降低对地铁隧道的影响^[7]。

（三）土体性质的影响

土体的物理力学性质对地铁隧道变形起着关键作用。弹性模量反映了土体抵抗变形的能力，弹性模量较大的土体，在基坑开挖过程中产生的变形相对较小，对地铁隧道的变形影响也较小；反之，弹性模量较小的软土，如淤泥、淤泥质黏土等，在基坑开挖卸荷后，易发生较大的变形，从而带动地铁隧道产生明显变形。

黏聚力和内摩擦角是土体抗剪强度的重要指标。黏聚力较大的土体，其颗粒间的粘结力较强，在基坑开挖时，土体抵抗剪切破坏的能力较强，有利于维持基坑周围土体的稳定性，减少地铁隧道的变形。内摩擦角较大的土体，其颗粒间的摩擦阻力较大，同样能提高土体的稳定性，降低隧道变形风险。例如，在某些地质条件较好的地区，土体黏聚力和内摩擦角较高，深基坑开挖对邻近地铁隧道的影响相对较小；而在软土地区，由于土体黏聚力和内摩擦角较低，地铁隧道在基坑开挖过程中更容易发生变形。

（四）开挖顺序的影响

不同的开挖顺序对地铁隧道变形影响明显。分段开挖可以将基坑开挖的影响范围局部化，减小一次性开挖对土体的扰动范围，从而降低对地铁隧道的影响。例如，将基坑分为多个小段依次开挖，每段开挖完成后及时施工支撑结构，能有效控制该段土体的变形，避免因大面积一次性开挖导致土体应力突然释放，引起地铁隧道产生较大变形^[8]。

分层开挖则是按照一定的厚度分层进行开挖，这种方法可以使土体应力逐步释放，减少每次开挖对土体的扰动程度。通过数值模拟展示，采用合理的分层开挖顺序，如先开挖远离隧道的一侧，再逐步向隧道方向开挖，可以有效控制地铁隧道的变形。与无序开挖相比，合理的分层开挖能显著降低隧道的变形量。因此，选择合适的开挖顺序对于控制地铁隧道变形至关重要，不合理的开挖顺序可能导致隧道变形超出允许范围，影响地铁的安全运营，而合理的开挖顺序则能在保证施工进度同时，有效保护邻近地铁隧道的安全。

四、深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的控制措施

（一）优化支护设计

优化支护设计是控制深基坑开挖引发邻近地铁隧道变形的关键手段之一。增加支护结构刚度可有效减小隧道变形，例如采用地下连续墙作为支护结构时，适当增大其厚度，能够提高墙体的抗弯刚度，从而增强对基坑侧壁土体的约束能力，减少土体向基坑内的位移，进而降低对地铁隧道的影响^[9]。在地质条件较差、基坑深度较大的场景中，这种措施尤为有效，可显著提升支护体系的整体稳定性。设置多道支撑也是优化支护设计的重要方式，通过在不同深度设置水平支撑，将基坑侧壁的土压力分散传递，避免应力集中，有效控制支护结构的变形。多道支撑适用于基坑开挖深度较大且对周边环境保护要求较高的情况，如在城市繁华区域邻近地铁隧道的深基坑工程中，多道支撑能够为地铁隧道提供更可靠的保护，确保隧道变形在安全可控范围内。

（二）调整开挖工艺

调整开挖工艺对于减少深基坑开挖引起的邻近地铁隧道变形具有重要意义。分段分层开挖是常用的开挖工艺调整方法，将基

坑划分为多个区域，按照一定的顺序逐段、逐层开挖。这种开挖方式可使土体应力逐步释放，避免一次性开挖导致土体应力突然变化，从而减少对地铁隧道的影响。例如在长条形基坑中，采用分段开挖，先开挖中间部分，再开挖两侧，可有效控制基坑变形向地铁隧道传递。预留土墩也是在开挖过程中保护地铁隧道的有效方法，在基坑开挖至一定深度时，在靠近地铁隧道一侧预留部分土体形成土墩，利用土墩的自重和对土体的支撑作用，减少基坑侧壁土体的位移，进而降低对隧道的变形影响。该方法在实际工程中应用效果良好，特别是在隧道与基坑距离较近的情况下，预留土墩能为隧道提供额外的保护屏障，显著减少隧道变形。

（三）加强监测

在深基坑开挖施工过程中，加强对地铁隧道变形的实时监测至关重要。实时监测能够及时掌握隧道变形的情况，为施工方案的调整提供关键依据，确保地铁隧道的安全运营^[10]。常用的监测技术包括水准测量、全站仪测量以及自动化监测系统等。水准测量可精确测量隧道沉降变形，通过在隧道内布设水准点，定期观测其高程变化，获取隧道竖向位移数据。全站仪测量则可用于监测隧道水平位移，利用其高精度测角、测距功能，确定隧道特征点的平面坐标变化。自动化监测系统能够实现24小时不间断监测，通过布设各类传感器，实时采集隧道变形数据，并上传至监控平台，方便管理人员随时查看和分析。当监测数据出现异常，如变形速率或累计变形量超过预警值时，应及时调整施工方案，如暂停开挖、加密支撑、采取土体加固措施等，以有效控制隧道变形，保障地铁的安全运营。

五、结束语

总之，深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响研究已取得丰富成果，从理论探索到实证分析，数值模拟技术贯穿其中，为揭示影响机制提供有力支撑。基坑深度、支护结构、土体性质及开挖顺序等因素，均显著影响隧道变形，而优化支护设计、调整开挖工艺、加强实时监测等控制措施，有效保障了地铁运营安全。未来，随着城市建设发展，需持续深化研究，创新技术手段，为深基坑工程与地铁保护协同发展提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 柯明中, 李玉明, 王坚, 等. 基于数值模拟的基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响规律分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 2837-2841. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1358.
- [2] 马江锋. 软土深基坑开挖全过程对邻近地铁盾构区间隧道影响风险分析及控制 [J]. 土工基础, 2022, 36(02): 145-148+167.
- [3] 刘波, 范雪辉, 王园园, 等. 基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响研究进展 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 253-258.
- [4] 陈俊变; 张益; 白尊铭; 张贵保; 路开诚. 某深基坑对临近城市轨道交通影响数值模拟分析 [J]. 广东建材, 2024, 40(2): 86-90.
- [5] 孟姗姗. 深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响研究 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (2): 84-86.
- [6] 邹传仁; 付鹏; 项锦涛; 金爱国; 林王成. 深基坑开挖对邻近地铁车站的变形影响和隔离桩控制效果分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S01): 2809-2814.
- [7] 王涛. 基坑施工对地铁隧道影响的数值试验研究 [J]. 低温建筑技术, 2024, 46(3): 138-142.
- [8] 张鹏; 黄伟; 褚云鹏. 基坑开挖对紧邻地铁隧道的三维数值模拟分析 [J]. 江西交通科技, 2023, (3): 74-79.
- [9] 张琳. 深基坑开挖对邻近既有地铁区间隧道的影响分析 [J]. 福建建设科技, 2020, (6): 27-30.
- [10] 陈仁朋, 孟凡衍, 李忠超, 叶跃鸿, 胡琦. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 856-863.

BIM技术在建筑工程造价管理中的应用

邱李梅, 薛永辉

黑龙江农业工程职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

DOI:10.61369/ETQM.2025070033

摘 要 : 随着我国建筑工程行业的快速发展, 其在实际的运行过程中也会遇到各种各样的问题, 而将 BIM 技术应用到建筑工程造价管理工作中, 能够为工作人员提供大量的决策信息, 通过 BIM 技术可以将工程造价管理工作, 使得效率得到有效提升, 保证其在实际的运行过程中可以发挥出最大的价值。同时 BIM 技术还可以将建筑工程项目进行精细化处理, 并根据实际情况对建筑工程进行合理规划, 从而促进建筑行业的健康发展。因此在实际的建筑工程造价管理工作中, 需要对 BIM 技术进行充分了解, 并利用其优势对其进行有效应用, 从而使建筑工程造价管理水平得到有效提升。

关 键 词 : BIM 技术; 建筑工程; 造价管理; 应用

Application of Bim Technology in Construction Project Cost Management

Qiu Limei, Xue Yonghui

Heilongjiang Agricultural Engineering Vocational College, Harbin, Heilongjiang 150001

Abstract : with the rapid development of China's construction engineering industry, it will also encounter a variety of problems in the actual operation process. The application of BIM Technology to the construction engineering cost management can provide a large number of decision-making information for the staff. Through BIM Technology, the engineering cost management can be effectively improved to ensure that it can play its maximum value in the actual operation process. At the same time, BIM Technology can also refine the construction project, and make reasonable planning for the construction project according to the actual situation, so as to promote the healthy development of the construction industry. Therefore, in the actual construction project cost management work, we need to fully understand the BIM Technology, and use its advantages to effectively apply it, so as to effectively improve the construction project cost management level.

Keywords : BIM technology; construction works; cost management; application

一、BIM技术与建筑工程造价管理概述

(一) BIM 技术的基本概念与发展历程

BIM (建筑信息模型) 技术, 凭借数字化手段, 融合三维建模、信息化技术及数据分析, 为建筑项目打造了一套贯穿设计至施工全链条的管理解决方案。该技术之精髓, 在于其能整合建筑项目所有相关数据, 构筑起一个动态且实时更新的数字模型, 该模型全方位覆盖了建筑物的各个层面, 极大地促进了协同作业与信息流通。BIM 技术的源头可追溯至 20 世纪 70 年代的计算机辅助设计 (CAD), 其核心理念逐步演化, 最终成长为能够全面支撑建筑生命周期管理的综合性技术。从早期的二维 CAD, 到后来的三维建模, 再至现今融合时间 (四维)、成本 (五维) 的 BIM, 技术的持续革新已使 BIM 成为建筑行业不可或缺的重要工具。随着计算机硬件性能的不断跃升与软件技术的日新月异, BIM 技术日趋成熟, 并逐渐在建筑设计、施工、运维等多个环节得到广泛应用。其发展历程, 不仅象征着建筑行业从传统手工操作向高度信息化、智能化新时代的跨越, 更有力推动了建筑行业的数字化转型, 实现了全生命周期的精细管理。

(二) 建筑工程造价管理的现状与需求

建筑工程造价管理, 作为涵盖项目规划、设计、施工直至竣工全周期的资金控制与成本管理活动, 面临着信息流通受阻、数据不一致及成本控制缺乏精准度等多重挑战。在当前管理模式下, 传统造价管理方法多依赖人工计算与手动记录, 不仅效率低下, 且易导致预算偏差, 进而影响项目的资金调配与流动。随着建筑项目规模的不断扩大与复杂程度的日益提升, 工程造价管理的需求也随之增加。项目的成本控制不仅要求精准的预算与费用预测, 还需实现成本的实时跟踪与监控, 以有效避免资金浪费与超支情况的发生^[1]。

二、BIM 技术在建筑工程造价管理中的作用

(一) 实现工程项目信息共享

在建筑工程造价管理的传统模式中, 信息资源的繁杂性是一大挑战。为此, 引入 BIM 技术成为优化管理路径的关键。该技术的首要任务, 在于全面搜集工程项目中的各类信息, 并通过信息共享平台, 将这些分散的信息进行有机整合与关联, 搭建起项目间的信息桥梁。这一整合过程, 不仅促进了信息的流通与共享,

还极大增强了对项目全局的把控力。以往，因信息资源的缺失，建筑工程造价管理难以对各项工程的施工进度与成本实施有效控制。BIM技术的引入，正是为了解决这一痛点。它凭借强大的信息处理与整合能力，不仅将建筑工程的各阶段、各部分信息融合一体，还实现了造价管理全过程的精准控制。无论是施工进度还是成本开支，都能在BIM技术的辅助下，得到更为细致、全面的管理。此外，BIM技术在建筑工程造价管理中的应用，还极大地推动了信息资源的整合与优化。它能够将原本分散、孤立的信息资源，通过先进的技术手段，转化为建筑工程管理的有力支撑。在实际工作中，借助BIM技术，可以更有效地整合各类信息资源，从而提升建筑工程造价管理的整体水平与质量。这种信息资源的深度整合，不仅提高了管理效率，还为工程项目的顺利推进奠定了坚实基础。

（二）实现工程量自动计算

工程量是建筑工程造价管理工作中的重点，其不仅与建筑工程施工质量有关，还与建筑工程施工工期以及投资成本等相关。BIM技术的应用可以实现工程量计算自动化，在确保工程量计算准确性的基础上，还可实现建筑工程造价管理工作的现代化，并为企业经济效益的提升创造条件。如在工程量计算过程中，可借助BIM技术对建筑工程设计图纸进行分析，并结合施工现场情况、施工进度等因素确定出工程量计算标准。其次，利用BIM技术可以将设计图纸中的建筑材料进行提取和分析，并根据相关数据构建出实体模型，实现工程量计算自动化。最后，将实体模型导入到Revit软件中，并利用Revit软件对其进行模拟和分析，根据相关数据对模型中的构件进行添加和编辑处理^[2]。

同时还可以在BIM技术下实现构件自动绘制、信息自动提取等。如在进行混凝土工程量计算时，可在Revit软件中利用族功能创建混凝土模型、属性表以及图层组等信息。根据相关数据进行构件自动绘制、属性表以及图层组的编辑处理。完成上述操作后即可在BIM技术下实现混凝土工程量计算自动化，避免了人工计算过程中容易出现的错误和误差等问题，确保了工程量计算的准确性。

（三）实现造价预算管理

在建筑工程造价管理中，应用BIM技术对造价进行预算，有助于提高造价预算的准确性。传统造价预算中，存在着一定的误差，其在实际应用中会出现较大的偏差。为此，在实际工作中，应以BIM技术为基础，将BIM模型建立于施工现场，对建筑工程施工图纸进行深化设计，对施工过程中可能出现的问题进行详细分析。同时，以建筑工程项目为基础，将项目造价预算与相关参数进行关联。如：在建筑工程项目施工时，存在着不同的工序，需要耗费不同的时间。为此，应以BIM技术为基础，将不同工序所需时间、材料及人工等费用进行详细计算。在实际应用过程中，可将BIM模型构建于不同工序的模型上，并通过BIM技术对各个工序的具体时间、材料等进行计算。在计算时可将模型与工程量表相关联。在工程项目施工过程中所耗费的人力、物力以及财力等均可在BIM模型中进行体现。通过BIM技术的应用可以有效提高建筑工程造价预算准确性，实现工程造价预算管理^[3]。

（四）实现施工成本控制

在建筑工程造价管理工作中，应以BIM技术为基础，通过对整个施工过程的有效监控，对施工成本进行控制，避免施工成本出现不必要的增加。在BIM技术应用中，其具有较高的精准度，能够将实际成本进行有效控制。在BIM技术应用下，能将建筑工程信息整合到同一数据库中，利用该数据库实现对施工项目信息的有效管理。同时，在对建筑工程造价管理工作进行控制时，还能以该数据库为基础进行造价预算控制。通过对建筑工程项目信息的有效管理，可以对建筑工程项目成本进行控制。同时，还能将BIM技术应用于实际工作中，通过对整个建筑工程项目的有效监控，从而减少不必要的成本投入，提高企业经济效益。

三、BIM技术在现代建筑工程中的造价管理应用路径

（一）全生命周期动态成本控制

建筑项目全生命周期历经规划、设计、施工、运营维护到拆除。传统造价管理各阶段独立，信息流通差，难以把控整体成本。基于BIM技术的全生命周期动态成本控制则不同，通过BIM5D模型整合几何、物理、时间与成本等多维度信息，打破信息壁垒，实现数据实时共享与协同。设计阶段，能依不同方案生成工程量清单与成本估算，辅助优化设计；施工阶段，关联进度与成本，及时预警偏差；运营维护阶段，借助模型了解设施状况，合理安排维护，挖掘资产潜在价值，重塑建筑资产金融属性^[5]。

（二）重构标准化与协同化流程

BIM技术为重构标准化与协同化流程提供了有效途径。通过建立统一的数字化信息模型，BIM技术能够将项目各参与方纳入一个协同工作平台。在这个平台上，可以制定标准化的工作流程与数据标准，确保各方数据的一致性与兼容性。例如利用BIM模型的参数化特性，将各类建筑构件与相应的定额子目进行关联，构建智能映射库，使工程量计算与造价分析更加标准化、智能化。同时基于BIM技术的协同平台能够实现信息的实时共享与即时传递，任何一方对项目信息的修改或变更，都能在平台上迅速反馈给其他各方，各方基于最新信息协同工作，形成数字化闭环控制机制，有效提升项目整体管理效率，降低成本风险。

（三）成本风险预控与价值提升

BIM技术的出现，为成本风险预控与价值提升带来了新的契机，借助BIM模拟技术，能够在项目前期对多种设计与施工方案进行虚拟建模和仿真分析。通过模拟不同方案在实际施工与运营过程中的表现，量化各项成本指标，提前识别可能存在的成本风险点，并对比选出最优方案，实现成本的有效控制。在施工阶段，利用物联网等技术与BIM模型相结合，如为建筑构件植入RFID芯片，可对关键施工环节进行实时数据采集与监控，及时发现并纠正偏差，降低返工风险。此外，在建筑运维阶段，BIM模型所积累的丰富数据，可用于挖掘建筑在绿色节能、碳减排等方面的价值，将建筑资产与新兴的绿色金融等领域相连接，拓展建筑价值的实现途径^[6]。

（四）加强对造价管理信息资源的共享

在建筑工程造价管理的复杂流程中，各类数据信息的处理占据着举足轻重的地位。这些数据的准确性和完整性，对造价管理的质量和效率有着直接且深远的影响。若造价管理人员无法全面、准确地掌握这些数据，那么在执行造价管理任务时，极易导致管理流程的混乱，进而削弱工程的造价控制力。因此，为了提升建筑工程造价管理的整体水平，必须高度重视信息资源的共享。通过优化信息共享机制，不仅可以显著提高造价管理的工作效率，还能够推动工程造价管理向更高水平发展。在这个过程中，BIM技术作为一种前沿的信息技术手段，展现出了巨大的应

用潜力。BIM技术以其强大的信息处理能力和高效的数据共享特性，在建筑工程造价管理中具有得天独厚的优势。还可以充分利用BIM技术，构建起一个完善的信息共享平台，实现造价管理相关数据的实时更新和快速传递。这样一来，造价管理人员就能够更加便捷地获取所需信息，从而做出更加精准、高效的决策。总之，加强建筑工程造价管理中的信息共享机制，是提升工程造价管理水平的关键所在。而BIM技术的引入，无疑为这一目标的实现提供了强有力的技术支持。应该积极探索BIM技术在造价管理中的应用模式，充分发挥其信息共享的优势，推动建筑工程造价管理工作不断迈上新的台阶。

参考文献

- [1] 林锦全. 建筑信息模型 (BIM) 在工程造价估算中的应用与精确度分析 [J]. 工程造价管理, 2024, 35(5): 51-56.
- [2] 陈世健. BIM 技术在建筑成本管理中的工程造价控制策略分析 [J]. 价值工程, 2024, 43(31): 162-164.
- [3] 谢豫. 研究 BIM 技术在国际工程各阶段造价管理中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(5): 69-71.
- [4] 霍俊宇. 工程造价管理中 BIM 技术的应用 [J]. 建设科技, 2023(10): 98-100.
- [5] 李晓红. BIM 技术在建筑工程造价全过程管理中的应用 [J]. 江西建材, 2023(7): 325-327.
- [6] 耿欢. 基于 BIM 技术的建筑工程造价标准化管理研究 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(4): 79-82.

建筑工程与市政工程检测技术的创新与应用

陈明涛

河北雄安中天检测技术有限公司，雄安新区 070001

DOI:10.61369/ETQM.2025070035

摘要： 本文系统探讨了建筑工程与市政工程检测技术的创新发展趋势与应用实践，重点分析了智能化检测技术、无损检测方法和跨领域技术融合的最新进展。研究表明，人工智能算法、自动化设备和三维扫描技术显著提升了工程检测的精度与效率，5G、物联网和区块链技术为检测数据可信度与实时监控提供了创新解决方案。通过典型案例分析，验证了创新检测技术在高层建筑监测、装配式建筑验收和市政设施维护中的实际应用价值，为工程质量管理提供了技术支撑。

关键词： 工程检测技术；智能化；无损检测

Innovation and Application of Inspection Technology in Construction Engineering and Municipal Engineering

Chen Mingtao

Hebei Xiongan Zhongtian Testing Technology Co., LTD. Xiong'an New Area 070001

Abstract： This paper systematically discusses the innovative development trends and application practices of inspection technologies in construction engineering and municipal engineering, with a focus on analyzing the latest progress in intelligent inspection technologies, non-destructive inspection methods, and cross-domain technology integration. Research shows that artificial intelligence algorithms, automated equipment and 3D scanning technology have significantly enhanced the accuracy and efficiency of engineering inspection. 5G, Internet of Things and blockchain technologies offer innovative solutions for the credibility of inspection data and real-time monitoring. Through the analysis of typical cases, the practical application value of innovative detection technology in the monitoring of high-rise buildings, the acceptance of prefabricated buildings and the maintenance of municipal facilities has been verified, providing technical support for engineering quality management.

Keywords： engineering inspection technology; intelligitization; non-destructive testing

引言

随着城镇化推进，建筑与市政工程规模扩大，工程检测技术重要性凸显。《“十四五”建筑业发展规划》（2022年）提出推动检测技术数字化、智能化转型。当前工程检测面临结构复杂、材料多样、隐蔽工程多等挑战，传统方法难以满足需求。新一代信息技术与检测融合，推动检测向智能化、自动化转变，无损检测技术提升评估精度，区块链保障数据可信度。研究检测技术创新与应用，对提升工程质量、推动建筑业发展意义重大，也是落实《质量强国建设纲要》（2023年）“提升建设工程品质”要求的实践。

一、建筑工程与市政工程检测技术概述

（一）建筑工程检测技术的基本内容

建筑工程检测技术主要涵盖结构安全性检测与材料性能检测两大领域^[1]。结构安全性检测聚焦于建筑物整体稳定性与承载能力评估，包括静载试验、动载试验及结构变形监测，确保建筑在设计及使用年限内满足安全要求^[2]。材料性能检测则针对混凝土、钢筋等关键建材，通过抗压强度试验、钢筋锈蚀检测及耐久性分析，验证材料是否符合规范标准^[3]。混凝土检测常采用回弹法、超声波法及钻芯法，钢筋检测则依赖电磁感应、X射线衍射等

技术，确保施工质量与长期可靠性。装配式建筑检测还需重点关注构件连接节点性能和整体结构稳定性^[4]。

（二）市政工程检测技术的基本内容

市政工程检测技术以道路与桥梁检测、地下管网与市政设施检测为核心。道路与桥梁检测涉及路面平整度、裂缝分布及桥梁结构健康状态评估，利用落锤式弯沉仪、探地雷达及光纤传感技术实现高效精准检测。无损检测技术在桥梁工程中可有效评估混凝土强度、裂缝深度等关键参数^[1]。地下管网检测重点针对给排水、燃气等隐蔽工程，通过闭路电视（CCTV）检测、声呐扫描及红外热成像技术，识别管道渗漏、堵塞及腐蚀问题。市政设施

地基基础检测需特别关注承载力测试和沉降观测等关键技术^[5]。市政设施检测则涵盖路灯、护栏等公共设施的耐久性与功能性评估，结合智能传感器与远程监控系统，提升城市基础设施运维效率。

二、传统检测技术的局限性

（一）建筑工程检测中的主要问题

传统建筑工程检测技术存在明显的效率与精度缺陷。人工检测方式占据主导地位，检测人员需现场逐项查验，不仅耗时费力，且检测范围受限于人员可及区域，难以实现全面覆盖^[6]。这种作业模式导致检测周期延长，无法满足现代工程建设快速推进的需求。环境因素对检测结果干扰显著，温度、湿度等外界条件变化会影响混凝土强度检测等关键指标的测量精度^[7]。人为操作误差同样不可忽视，检测人员的经验水平与操作规范程度直接影响最终数据可靠性。视觉检测等主观性较强的方法更易产生判断偏差，为工程质量评估带来不确定性，特别是在混凝土裂缝识别等关键检测环节。

（二）市政工程检测中的主要问题

市政工程的特殊性使传统检测技术面临严峻挑战。大型桥梁、隧道等设施结构复杂，检测点位分布广泛，常规检测设备难以到达高空、水下等特殊部位，存在大量检测盲区^[8]。隐蔽工程检测尤为困难，地下管网、基础桩等隐蔽结构的位置特殊性导致可视化检测手段失效。道路工程材料的传统取样检测方法不仅破坏路面结构，且样本代表性有限，难以全面反映工程质量状况。传统检测方法对设施内部缺陷的识别能力有限，表面检测无法准确反映内部损伤情况，可能遗漏潜在安全隐患。动态荷载作用下的结构性能监测也缺乏有效手段，难以及时捕捉结构响应变化，影响工程安全评估的准确性。

三、检测技术的创新方向

（一）智能化检测技术

1. 基于人工智能（AI）的缺陷识别

人工智能技术在工程缺陷识别领域展现出显著优势，其中图像识别技术在市政路桥工程裂缝检测中的应用尤为突出^[9]。深度学习算法通过训练海量工程图像数据，可自动识别混凝土结构表面裂缝的形态特征，包括裂缝宽度、长度和走向等关键参数。卷积神经网络模型能够有效区分真实裂缝与表面污渍、纹理等干扰因素，显著提升识别准确率^[10]。智能分析系统可实时处理检测图像，自动生成缺陷分布图和损伤评估报告，大幅降低人工判读的主观性和漏检率。该技术已成功应用于桥梁、隧道等大型结构的健康监测，实现从定性判断到定量分析的转变。

2. 自动化检测设备

无人机与机器人技术正在重塑工程检测作业模式。多旋翼无人机配备高清摄像和激光扫描设备，可快速获取建筑物外立面、屋顶等高空区域的详细影像数据，克服传统检测的安全风险和效

率瓶颈。爬行机器人搭载多种传感装置，能够在管道、隧道等密闭空间内自主移动检测，实时传输结构内部状态信息。水下机器人则解决了桥梁墩台、码头等水下结构的检测难题。这些自动化设备集成定位导航、数据采集和无线传输系统，形成完整的移动检测平台，显著提升检测覆盖范围和作业效率，同时降低人员作业风险。

（二）无损检测技术的进步

1. 超声波与红外热成像技术

超声波检测技术在混凝土结构评估中至关重要，高频声波传播特性可识别内部空洞、裂缝等缺陷，脉冲回波法能测强度、定位缺陷深度，穿透波法适用于大体积构件整体性评估。红外热成像技术通过表面温度场非接触式检测剥离、渗漏等问题，热像仪捕捉温差识别潜在缺陷，适用于外墙空鼓检测。两技术结合可实现从表面到内部的全面检测。

2. 激光扫描与三维建模

三维激光扫描技术为市政工程检测提供全新的数据采集方式。激光测距系统快速获取目标物体表面数百万个坐标点，构建毫米级精度的三维点云模型。该技术应用于道路平整度检测时，可一次性完成全断面测量，替代传统水准仪逐点测量方式。在桥梁检测中，通过多期扫描数据对比分析，精确量化结构变形发展情况。三维建模技术将点云数据转化为可视化模型，支持虚拟检测与尺寸测量，为市政设施数字化管理提供基础数据。高密度点云还能识别肉眼难以察觉的细微裂缝，提升检测的全面性与准确性。

四、创新技术的工程应用案例

（一）建筑工程中的应用

1. 高层建筑结构健康监测系统

现代高层建筑结构健康监测系统通过分布式传感器网络实时采集加速度、位移等关键参数。光纤光栅传感器嵌入结构，抗干扰、耐久性强，保障长期稳定采数。监测数据经无线传输至云端平台，结合机器学习识别异常振动。可视化界面展示响应趋势，超阈值自动报警。该系统提升超高层建筑安全管理水平，为预防性维护提供数据支撑。

2. 装配式建筑的质量检测

基于BIM技术的数字验收体系革新了装配式建筑质量管理模式。预制构件出厂前嵌入RFID芯片，记录产品信息和质量数据。现场验收时，移动终端扫描芯片调取BIM模型中的设计参数，通过三维激光扫描实测数据与模型对比分析。增强现实技术辅助检查人员直观识别构件安装偏差，自动生成质量评估报告。数字化验收流程实现全过程质量追溯，确保构件从生产到安装各环节的质量可控性，大幅提升装配式建筑的整体建造质量。

（二）市政工程中的应用

1. 桥梁健康监测与预警系统

现代桥梁健康监测系统集成多种传感技术实施全生命周期监控。GPS位移监测装置与倾角传感器捕捉桥梁形变及姿态变化，

振动监测通过加速度计和频谱分析识别结构频率偏移，光纤传感网络监测主梁应变与温度场。数据融合算法建立性能退化模型，预警系统基于机器学习模型，参数异常偏离基准值时触发分级预警，为养护决策提供依据。

2. 地下管网智能检测

管道检测机器人搭载高清摄像头、激光测距仪和声呐设备，实现管网内部全景扫描。行进过程中自动记录管道缺陷位置坐标，AI图像识别算法实时分类缺陷类型并评估严重程度。多传感器数据融合技术准确量化裂缝宽度、腐蚀面积等关键参数。检测报告自动生成管网健康状态热力图，直观展示病害分布规律。智能分析系统结合管网材质、使用年限等属性数据，预测剩余使用寿命，为管网更新改造提供优先级排序建议。

（三）跨领域技术的综合应用

1. 5G与物联网（IoT）在检测中的集成

5G网络为工程检测提供高速率、低时延的数据传输通道，实现检测设备的广域互联。物联网技术将各类传感终端组成智能监测网络，持续采集结构振动、变形等关键参数。边缘计算节点就近处理海量监测数据，降低云端传输负荷。远程监控平台整合多源异构数据，通过大数据分析挖掘结构性能演化规律。数字孪生技术构建虚拟模型，实时映射实体结构状态，支持预测性维护决策。这种集成应用显著提升工程监测的实时性和覆盖范围，实现从离散检测到连续监测的转变。

2. 区块链技术在检测数据可信度提升中的应用

区块链的分布式账本技术为工程检测数据建立不可篡改的存

储机制。检测数据上链时自动生成时间戳和数字指纹，确保数据完整性和时序性。智能合约自动执行检测标准，规范数据采集流程。各参与方通过共识机制验证数据真实性，消除人为干预风险。全链条追溯功能可查询数据历史版本，明确质量责任归属。区块链与检测报告数字签名结合，构建可信的电子档案系统，为工程质量争议提供权威证据。这种应用模式重塑了检测数据的信任机制，提升行业监管效能。

五、结束语

工程检测技术的创新发展正在深刻改变建筑与市政工程质量管理模式。智能化检测技术通过人工智能算法和自动化设备显著提升缺陷识别精度与检测效率，实现从人工经验判断向数据驱动决策的转变。无损检测技术的进步为工程结构评估提供更全面、精准的技术手段，特别是超声波、红外热成像与三维激光扫描等技术的综合应用，有效解决了传统检测方法的局限性。工程实践表明，高层建筑健康监测、装配式建筑数字化验收、桥梁预警系统和地下管网智能检测等创新应用，在提升工程质量和运维水平方面成效显著。跨领域技术融合开辟了新的发展方向，5G与物联网实现检测数据实时互联，区块链技术构建可信数据管理体系。未来工程检测将朝着智能化、自动化、数字化方向持续发展，需要进一步完善技术标准体系，加强专业人才培养，推动检测技术与现代信息技术深度融合，为工程建设质量安全提供更可靠保障。

参考文献

[1] 严凯. 无损检测技术在道路桥梁工程中的应用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2015, 000(021): 839-839.

[2] 周国朝. 浅谈房屋建筑工程质量检测技术与监管 [J]. 工程质量, 2014(S2): 2.

[3] 樊艳. 浅析建筑工程中的钢筋检测技术 [J]. 广东科技, 2013, 22(20): 2.

[4] 杨丹. 装配式建筑工程检测技术分析 [J]. 建材与装饰, 2021, 017(005): 49-50.

[5] 孙柏涛. 市政工程地基基础检测重要性及关键技术探讨 [J]. 石油石化物资采购, 2019, 000(028): P.67-67.

[6] 侯海宝. 建筑工程质量检测行业现状及发展对策研究 [J]. 商品与质量, 2015, 000(027): 86-86.

[7] 张华茂, 董亮. 建筑工程质量检测中的混凝土检测技术探讨 [J]. 收藏, 2022(10): 0031-0033.

[8] 孙涛. 试析市政道路工程材料的检测技术 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020, 000(014): 90.

[9] 常兴莉. 浅谈市政路桥工程检测技术的应用及发展 [J]. 建筑工程技术与设计, 2015, 000(029): 924.

[10] 李鹏, 官敬阔. 市政建筑工程质量控制与施工技术管理的要点分析 [J]. 安家, 2023(10): 0031-0033.

屋顶分布式光伏项目客户沟通与需求满足策略

廖定辉

清远新能电力工程有限公司，广东 清远 511517

DOI:10.61369/ETQM.2025070038

摘要： 屋顶分布式光伏项目作为能源转型背景下的重要应用形式，项目交付过程中的客户沟通与需求满足成为关键环节。文章围绕屋顶分布式光伏项目特点进行了分析，梳理出了技术理解不足、收益预期偏差、需求不确定性及手续流程复杂四类客户沟通与需求满足的挑战；接着提出技术培训提升沟通有效性、收益测算标准化降低预期偏差以及需求确认流程控制方案变更和流程引导服务提升配合效率的系统策略，旨在为提升屋顶分布式光伏项目实施效率与客户满意度提供方法支撑，以此推动分布式光伏行业高质量发展。

关键词： 屋顶分布式光伏；客户沟通；需求满足

Customer Communication and Demand Satisfaction Strategies for Roof-Mounted Distributed Photovoltaic Projects

Liao Dinghui

Qingyuan Xinneng Power Engineering Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511517

Abstract： Roof-mounted distributed photovoltaic projects are an important application form in the context of energy transformation, and customer communication and demand satisfaction during project delivery have become key links. This article analyzes the characteristics of roof-mounted distributed photovoltaic projects and identifies four major challenges in customer communication and demand satisfaction: insufficient technical understanding, deviations in income expectations, demand uncertainty, and complex procedural processes. Subsequently, it proposes a series of strategies, including technical training to enhance communication effectiveness, standardization of income measurement to reduce expected deviations, control of demand confirmation processes to minimize changes, and process guidance services to improve coordination efficiency. These strategies are designed to provide methodological support for improving the implementation efficiency and customer satisfaction of roof-mounted distributed photovoltaic projects, thereby promoting the high-quality development of the distributed photovoltaic industry.

Keywords： roof-mounted distributed photovoltaic; customer communication; demand satisfaction

引言

分布式光伏发电是推动能源结构优化和实现碳达峰碳中和目标的重要路径，近年来国家能源局、各地方政府陆续出台支持屋顶分布式光伏应用的专项政策，推动了工商业、公共建筑及居民屋顶资源高效利用^[1]。特别是在“整县推进”政策背景下，屋顶分布式光伏项目呈现规模化布局、集约化开发的新趋势，催生了个性化定制设计、灵活收益模式与高标准并网要求的需求。市场主体在竞争加剧和服务精细化转型过程中，要更加重视客户沟通与需求满足环节的专业化水平，以适应日益复杂的应用场景与项目要求。

一、屋顶分布式光伏项目的特点分析

（一）安装环境的差异性

屋顶面积差异较大，从几十平方米的民用住宅到上万平方米的工业厂房，结构形式涵盖混凝土平屋顶、彩钢板坡屋顶、瓦屋

顶等类型，荷载能力、耐久性能与固定方式各不相同。不同屋顶的朝向、倾角和遮挡条件直接影响光照接收效率与光伏阵列排列，需结合具体条件进行精准设计。城市建筑群中高层遮挡普遍存在，需应用遮挡分析软件模拟光照变化，优化组件角度与排列密度^[2]。部分屋顶因历史保护、消防疏散等因素受到额外约束，

限制了光伏系统可部署面积。屋顶类型、结构条件及周边环境差异决定了系统设计与施工策略的多样化需求，不同应用场景下的安装环境如图1所示。安装环境的多样性对勘查、结构复核、支架设计及施工工艺提出更高要求，项目团队需具备针对不同屋顶灵活制定技术方案的能力，保障系统安全性与发电效率^[3]。



图1 屋顶分布式光伏项目不同屋顶安装环境示例

（二）客户需求的多样性

屋顶分布式光伏项目的投资主体涵盖居民、工商企业及公共机构，客户类型多样，需求呈现明显分层特征^[4]。居民用户以降低电费支出、提升屋顶利用率为主要诉求，对初期投资成本与回收周期高度敏感，倾向于选择投资门槛低、安装周期短、运维便捷的方案。工商企业用户关注整体投资回报率、用电负荷匹配与能效管理效果，部分企业将光伏项目纳入绿色供应链或 ESG 评价体系，对系统稳定性与远期收益要求较高。公共机构需兼顾节能减排示范效应与财政预算限制，项目执行需符合政府采购及合规审查程序。客户在资金投入意愿、收益预期、电力使用模式、系统扩展预留等方面差异明显，直接影响项目设计标准、设备选型、并网模式及售后服务配置^[5]。

（三）政策适用的区域性

屋顶分布式光伏项目受国家及地方政策双重调控，政策适用呈现明显区域差异。国家层面出台支持分布式光伏发展的系列政策，包括项目补贴、电价机制优化、增值税即征即退、绿色信贷支持，为项目建设提供经济激励与财务保障^[6]。地方层面依据经济发展水平、能源结构与碳减排目标差异，制定针对性强、落地性高的扶持政策。部分光照资源丰富但经济发展滞后的地区，强调合理规划与集中布局，防止无序开发引发电网稳定性问题，对接入容量、消纳方式及储能配置提出具体要求。政策环境的区域差异直接影响项目经济性评估、开发模式选择与运营策略制定，项目团队需具备及时掌握政策动态、快速适配地方政策变化的能力。

二、屋顶分布式光伏项目客户沟通与需求满足的挑战

（一）技术理解不足导致的沟通障碍

屋顶分布式光伏项目涉及光伏组件选型、逆变器配置、系统接入、荷载核算等多个技术环节，客户对专业知识掌握有限，成为沟通中常见障碍^[7]。部分居民用户仅关注面板数量与发电量，忽视屋顶荷载、安全固定及逆变系统匹配等技术细节，导致前期沟通理解偏差。工商企业用户虽具备一定项目管理经验，但对并网规范、远程监控系统及运维要求认识不足，易在设备选型与监控配置阶段产生分歧。公共机构项目涉及更多合规性与标准化要求，部分负责人对技术审查流程、验收标准理解模糊，增加了沟

通与协调复杂性。

（二）收益预期偏差导致的信任风险

收益回报是客户投资屋顶分布式光伏项目的重要驱动因素。部分客户基于市场宣传、他人经验或过时政策自行预期收益水平，未充分考虑屋顶条件、遮挡情况、设备衰减率及未来电价浮动等因素，形成不切实际的收益预期^[8]。居民用户期望较短投资回收周期，实际收益受朝向、角度与光照资源条件影响，可能与认知存在差异。工商企业用户关注投资回报率与能效改进，若未明确用电负荷变化与负荷转移特性，收益测算易失真，影响投资决策。公共机构项目在财政预算审批阶段对收益水平有硬性要求，一旦实际偏离预期，将引发审计风险与问责问题。

（三）需求不确定性导致的方案反复

客户需求的不确定性是屋顶分布式光伏项目执行过程中常见的问题。部分客户在项目初期未能明确实际需求，如是否接入储能系统、是否保留屋顶功能空间、是否预留未来扩容接口，导致设计方案难以精准匹配^[9]。居民客户在合同签订后可能提出增加组件数量或增设花园功能区，导致支架结构和布线方案需重新调整。工商企业用户在用电负荷分析后，可能要求增加智能能效管理模块，涉及逆变器扩容与通讯系统调整，造成原定配置作废。公共机构项目因审批流程复杂，常因政策变化或领导意见调整功能要求，导致施工组织方案频繁变更。

（四）手续流程复杂导致的客户配合度下降

屋顶分布式光伏项目涉及备案、并网审批、补贴申请等手续，流程环节多、时效要求高，客户配合度不足成为推进过程中的突出障碍。居民客户普遍缺乏办理经验，容易因资料准备不全、流程理解偏差延误关键节点，影响并网与补贴到账周期。工商企业客户虽设有项目部门，但审批流转周期长、部门协作效率低，公共机构项目受制于预算管理、政府采购、审计合规等额外要求，审批周期超预期且政策变化频繁调整。手续复杂度高、办理周期长导致客户后期配合积极性下降，从而影响整体项目交付效率与资金回收节奏。

三、屋顶分布式光伏项目客户沟通与需求满足的策略

（一）技术培训提升沟通有效性

在屋顶分布式光伏项目启动初期，应系统化设计技术培训环节。培训内容围绕光伏系统基础知识、屋顶荷载与结构要求、发电机理与遮挡影响、逆变器及并网配置要点等核心模块展开，采用模块化拆分方式，确保信息传递精准^[10]。培训形式结合现场讲解、标准化 PPT 演示与案例视频展示，辅以实际项目图片与典型问题解析，降低客户对抽象技术内容的理解门槛。如图2所示，在屋顶光伏系统现场，通过实地展示支架结构、组件排布及接线布局，配合讲解荷载设计与遮挡分析的方法，提升客户对项目构成与性能要点的直观理解。为提升客户参与感与理解深度，设置互动问答环节，并整理常见疑问形成客户解答手册。涉及技术标准、设备选型及并网流程的关键内容，应提前提供印刷版或电子版白皮书，明确控制节点与客户资料配合要求。培训周期依据项

目规模及客户类型灵活安排，居民用户采取一次性集中培训，工商业及公共机构用户按系统功能分阶段进行专项讲解。



图2 客户光伏系统技术培训现场图

（二）收益测算标准化降低预期偏差

项目早期阶段，基于标准化测算模型对每个屋顶项目开展专属收益评估。测算体系需综合考虑屋顶面积、朝向、倾角、遮挡比例、本地辐照量、设备性能参数及组件衰减率等技术因子，引入最新电价政策、补贴政策及潜在变动趋势为经济测算基础。收益测算结果应生成标准化报告模板，其涵盖装机容量、年均发电量、预期自发自用率和余电上网量等关键指标，并用图表展现不同假设条件下的收益变化范围。所有测算报告需进行双人复核，确保口径统一、数据准确。测算报告中应附加风险提示，列明发电量波动、设备维护、政策调整等影响因素，并以案例数据量化展示。工商业客户收益测算中嵌入用电负荷剖析模块，明确发电负荷与企业用电负荷的匹配度，辅助识别最优配置方案。收益测算结果在签订合同前正式出具，并附客户签字确认，作为后续履约依据，保障预期一致性。

（三）需求确认流程控制方案变更

项目立项阶段需设置需求确认流程，以控制客户需求变化导致的设计方案反复及施工延误。流程第一步为前期需求调研，由项目经理组织客户座谈或一对一访谈，收集屋顶使用要求、功能区划分、负荷特性和产权归属及未来改造预期等信息，形成初步

需求清单。第二步为需求澄清会审，由设计、施工、合规、安全等专业工程师与客户共同参与，对需求清单逐条核实并提出专业意见。第三步为需求确认签字，基于会审成果整理正式版《客户需求确认单》，由客户负责人签字确认。进入施工图设计阶段后，所有新增或变更需求须通过《变更申请单》提交，并由设计负责人、项目经理及客户共同审核确认，明确变更内容、工期影响及合同调整方案。变更频次设置上限，超出次数须重新评估项目执行可行性。山东济宁120MW工商业光伏项目在43家工业屋顶业主需求管理中，通过多轮需求澄清与正式确认，确保各业主需求全面落实，避免因变更导致的设计反复与施工滞后。

（四）流程引导服务提升配合效率

项目启动初期需同步搭建专属客户引导服务体系，完善备案、并网及补贴申请等手续办理环节。制定标准化手续办理清单，涵盖备案申请、电网接入申请、消防验收、并网验收、补贴材料提交等关键节点，清晰列明所需资料、办理时限及责任分工。每位客户分配专属流程引导专员，负责资料收集、进度提醒与异常预警。手续办理节点前两周启动资料准备沟通，提醒客户补充材料，并对常见错误提前校对，降低返工概率。并网验收阶段组织并联单位与电网公司提前协调，制定并网测试计划与应急预案，保障并网顺利完成。补贴申请同步跟进政策变化，动态调整资料模板，压缩审核周期。流程引导过程中所有沟通记录形成档案备案，确保办理过程可追溯、问题可溯源。湖州市德清县整县推进光伏建设建立了智能化手续流转平台，配套专人跟进客户办理，实现分布式光伏项目从备案到并网的高效闭环。

四、结束语

屋顶分布式光伏项目在推广过程中，客户沟通与需求满足成为影响项目实施效率与收益实现效果的关键因素。根据安装环境复杂、客户类型多样和政策适用区域性显著的特点，必须在技术培训、标准化收益测算、需求确认流程与手续引导服务方面构建系统化应对机制。项目团队要建立以客户体验为导向、以技术规范为支撑的沟通与交付体系，来提升分布式光伏项目的实施稳定性与市场适配能力。

参考文献

[1] 黄桥林. 分布式光伏融资策略研究 [J]. 商业观察, 2025, 11(06): 32-36.
[2] 蒋勇军, 王飞飞. 屋顶分布式光伏开发对能源公司的影响及对策研究以电网公司为例 [J]. 经营管理者, 2025, (02): 98-99.
[3] 翟婷婷, 赵佩. 屋顶分布式光伏发电项目监管管控 [J]. 建设监理, 2025, (01): 50-53.
[4] 黄敏聪. 某屋顶分布式光伏发电项目的可行性分析与研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(23): 90-92+95.
[5] 项岱军, 崔宇琦, 郑文军. 分布式光伏项目推进实施方案研究 [J]. 中国电力企业管理, 2024, (33): 78-79.
[6] 王馨, 崔强, 苗锦宏, 等. 工业厂区屋顶分布式光伏系统设计及应用 [J]. 能源与节能, 2024, (11): 1-5.
[7] 宇文璞玉. 分布式光伏建设基础设施标准比较 [J]. 能源研究与管理, 2024, 16(04): 157-164.
[8] 王列洋, 王杰, 艾思维. 分布式光伏 EPC 项目造价管理要点分析 [J]. 中国电力企业管理, 2024, (30): 58-59.
[9] 邓开, 张明磊, 周令. 四川地区某别墅屋顶光伏发电系统设计及效益分析 [J]. 农村电气化, 2024, (10): 88-91.
[10] 孙勇, 陈鸣鸣. 屋顶分布式光伏项目投资评价探究——基于 TRWL 项目投资案例 [J]. 财务管理研究, 2024, (07): 38-43.

BDD 掺硼金刚石电极的掺杂均匀性优化及其在污水处理中的电催化性能

潘林焱, 左佳佳, 王杭, 吴桂丽, 王安波, 王建波, 王燕军

四川纳涂科技有限公司, 四川 德阳 618500

DOI:10.61369/ETQM.2025070039

摘要： 硼掺杂金刚石 (boron-doped diamond, BDD) 电极因优异的化学稳定性、宽电势窗口及强氧化能力, 在污水处理电催化领域备受关注。本文聚焦 BDD 电极的掺杂均匀性, 系统探讨其对电催化性能的影响机制、优化策略及在污水处理中的应用潜力。研究表明, 掺杂均匀性通过调控电荷转移动力学、活性位点分布、羟基自由基生成、反应选择性及电极稳定性, 从根本上决定电催化效率。优化目标在于实现电荷传递均匀性、活性位点高效利用及结构稳定性, 可通过化学气相沉积 (CVD) 工艺参数调控、基体预处理及退火后处理等途径实现, 其效果可通过物理表征 (如 HRTEM、XPS) 与电化学测试 (如 EIS、CV) 综合评估。优化掺杂均匀性可显著提升目标污染物降解效率、拓展处理深度与范围, 降低能耗 15%–30%, 并延长电极寿命, 研究为 BDD 电极在污水处理中的高效应用提供理论支撑与技术参考。

关键词： 掺硼金刚石电极; 掺杂均匀性; 电催化性能; 污水处理

Optimization of Doping Uniformity of Boron-Doped Diamond (BDD) Electrode and Its Electrocatalytic Performance in Wastewater Treatment

Pan Linyan, Zuo Jiajia, Wang Hang, Wu Guili, Wang Anbo, Wang Jianbo, Wang Yanjun

Sichuan Natu Technology Co., Ltd., Deyang, Sichuan 618500

Abstract : Boron-doped diamond (BDD) electrodes have attracted significant attention in the field of electrocatalytic wastewater treatment due to their excellent chemical stability, wide potential window, and strong oxidizing ability. This paper focuses on the doping uniformity of BDD electrodes and systematically explores its impact mechanism on electrocatalytic performance, optimization strategies, and potential applications in wastewater treatment. Research indicates that doping uniformity fundamentally determines electrocatalytic efficiency by regulating charge transfer kinetics, active site distribution, hydroxyl radical generation, reaction selectivity, and electrode stability. The optimization goals aim to achieve charge transfer uniformity, efficient utilization of active sites, and structural stability. These can be achieved through the regulation of chemical vapor deposition (CVD) process parameters, substrate pretreatment, and post-annealing treatment. The effects can be comprehensively evaluated through physical characterization (such as HRTEM, XPS) and electrochemical testing (such as EIS, CV). Optimizing doping uniformity can significantly improve the degradation efficiency of target pollutants, expand the depth and scope of treatment, reduce energy consumption by 15%–30%, and extend electrode lifespan. This research provides theoretical support and technical reference for the efficient application of BDD electrodes in wastewater treatment.

Keywords : boron-doped diamond electrode; doping uniformity; electrocatalytic performance; wastewater treatment

引言

随着工业发展与环境污染问题加剧, 高效降解难降解污染物的污水处理技术成为研究热点。硼掺杂金刚石 (BDD) 电极作为一种新型电催化材料, 凭借其卓越的化学稳定性、超宽电势窗口、低背景电流及强氧化能力, 在电化学降解污染物领域展现出巨大潜力。然而 BDD 电极的电催化性能与其硼掺杂均匀性密切相关, 掺杂不均会导致电荷传递受阻、活性位点利用率低、反应选择性差及稳定性下降, 严重制约其实际应用。因此深入探究掺杂均匀性对 BDD 电极性能的影响机制, 优化掺杂工艺以提升其在污水处理中的电催化效率, 具

有重要的理论与实际意义。本文系统梳理掺杂均匀性对 BDD 电极电催化性能的作用机制，探讨掺杂均匀性的优化途径与评估方法，并预测其在污水处理中的性能提升效果，旨在为推动 BDD 电极的工业化应用提供全面的理论依据。

一、掺杂均匀性对 BDD 电极电催化性能的机制

（一）对电荷转移动力学的影响

近年来，BDD 电极由于具有优异的化学和力学稳定性、超宽的电势窗口、较低的背景电流、抗侵蚀、耐腐蚀等特性，已成为全世界电化学领域的研究热点，在功能材料、分析化学、环境科学、生物医药及生命科学等领域引起各国的高度关注，许多国家已竞相开展了对 BDD 电极的研究，投入大量资金和科研人员以开发其应用^[1]。硼掺杂金刚石（BDD）电极在电催化领域的出色表现与其掺杂均匀性密切相关，这种均匀性通过多方面机制影响着电极的电催化性能。电荷转移动力学作为电催化反应的核心，其效率取决于电极的电导率和表面电子传递路径的均一性^[2]。当硼原子均匀分布时，能形成连续且均一的导电通道，降低电极整体及局部的电阻差异，使电子传递路径顺畅，电荷转移电阻低且均一，加速电荷转移过程，提升电催化动力学速率；而掺杂不均匀时，局部的硼原子聚集会形成“导电热点”，稀疏区域则成为“电阻壁垒”，阻碍电子传递，导致电荷转移电阻升高且分布不均，减缓整体反应动力学，甚至引发局部电流集中，破坏反应稳定性。

（二）对反应活性位点分布与利用率的影响

活性位点的分布与利用率同样受掺杂均匀性影响，这些位点与硼掺杂引入的表面缺陷和电子缺陷相关^[3]。均匀掺杂时，活性位点在电极表面及近表面均匀且稳定分布，反应物能均匀接触位点，避免局部位点“饱和”或“空置”，提升利用率，比如在电催化降解苯酚时，可确保苯酚分子在整个电极表面被高效氧化；而掺杂不均匀会使活性位点呈现“聚集 - 稀疏”分布，聚集区域易因传质速率不足导致反应物堆积，造成位点过度占用，稀疏区域则因位点不足而闲置，降低整体活性位点利用率^[4]。

（三）对羟基自由基（·OH）生成效率的影响

羟基自由基（·OH）作为 BDD 电极电催化氧化的核心活性物种，其生成效率依赖于电极表面的电子密度和反应微环境的均一性^[5]。均匀掺杂时，硼原子的均匀分布让 BDD 表面电子密度均一，为水分子氧化提供稳定的电子环境，使·OH 生成速率稳定高效且分布均匀，提升其与反应物的接触和利用效率；掺杂不均匀时，局部硼原子过量会抑制水分子吸附，稀疏区域则因电子密度不足难以活化水分子，导致·OH 生成速率下降且分布不均，还可能引发自身淬灭，降低生成效率。

（四）对反应选择性的影响

反应选择性取决于反应路径的主导性，而路径选择与电极表面的电子环境相关。均匀掺杂使电极表面电子环境一致，能引导反应优先遵循目标路径，比如在电催化矿化有机污染物时促进完全氧化，在 CO₂ 电还原中稳定中间产物吸附能以提升目标产物选择性；掺杂不均匀带来的局部电子环境差异会激活多种副反应路径，像硼原子稀疏区域可能因电势低导致污染物部分氧化，密集区域可能促进析氢副反应，降低目标产物选择性。

（五）对电极稳定性的影响

电极的稳定性体现在长期使用中保持结构完整性和性能一致性的能力，均匀掺杂的硼原子嵌入金刚石晶格，可降低局部晶格应力，使电流均匀分布，减少局部高电流密度引发的电化学腐蚀，避免活性位点因局部过度反应而消耗，让电极性能衰减缓慢；掺杂不均匀时，硼原子聚集区域因晶格畸变形成缺陷中心，在强环境下易被破坏，局部高电流密度还会加速表面原子溶解或迁移，导致活性位点流失，使电极性能急剧下降。

二、掺杂均匀性优化的探讨

（一）优化目标

掺杂均匀性优化是提升硼掺杂金刚石（BDD）电极电催化性能的核心环节，其目标、途径与评估需形成系统性框架，以实现从理论设计到实际应用的高效转化^[6]。优化目标首先指向电荷传递的均一性与高效性，通过减少电极内部及表面的电阻差异，构建连续稳定的电子传递通道，使电荷转移电阻在空间分布上更均匀，从而提升整体反应动力学速率；同时需实现活性位点的均匀分布与高效利用，避免因位点聚集或稀疏导致的传质限制或资源浪费，确保反应物与活性位点的接触效率最大化；此外还需保障羟基自由基等活性物种生成的稳定性与均一性，减少局部浓度波动对反应选择性的影响，并增强电极在长期使用中的结构稳定性，延缓性能衰减速度，最终实现电催化效率、选择性与耐久性的协同提升。

（二）优化途径

优化途径需从材料制备与工艺调控两方面入手，在制备方法上，化学气相沉积法（CVD）是制备 BDD 电极的主流技术，通过优化 CVD 工艺参数可显著改善掺杂均匀性，例如精确控制反应腔体内硼源（如已硼烷）的浓度分布与输送速率，结合均匀的气体流场设计，确保硼原子在金刚石生长过程中均匀嵌入晶格；同时调整沉积温度、压力及基体偏压，可减少因局部生长速率差异导致的硼原子聚集，例如采用分步沉积法，先形成均匀的籽晶层，再进行后续生长以降低晶格应力^[7]。此外，基体预处理也至关重要，通过对基体（如硅、钛）进行表面抛光、清洗及籽晶修饰，减少表面缺陷对硼原子吸附的影响，为均匀掺杂提供平整的生长基底。在材料后处理方面，适当的退火处理可通过原子扩散缓解局部硼原子聚集，消除晶格畸变，进一步提升掺杂均匀性，但需严格控制退火温度与时间，避免金刚石结构被破坏。

（三）优化效果的评估指标

优化效果的评估需结合物理表征与电化学性能测试，物理层面，通过高分辨率透射电子显微镜（HRTEM）观察硼原子在晶格中的分布状态，利用 X 射线光电子能谱（XPS）或二次离子质谱（SIMS）分析硼元素的深度分布与面分布均匀性，计算硼原子分布的标准差或变异系数以量化均匀性程度；同时通过拉曼光谱检测金刚石晶格的完整性，评估掺杂均匀性对晶格应力的影响。电

化学性能评估则包括交流阻抗谱（EIS）测试以分析电荷转移电阻的均一性，循环伏安法（CV）测定电流密度与峰电流的稳定性，评估电荷转移动力学的改善效果；在电催化反应中，通过监测目标产物的生成速率、选择性及副产物的种类与含量，判断活性位点利用率与反应选择性的提升程度；此外，通过长期循环测试或加速老化实验，记录电极性能（如电流密度、降解效率）随时间的衰减曲线，评估其稳定性优化效果。综合物理与电化学指标，可全面判断掺杂均匀性优化措施的有效性，为进一步改进工艺提供依据。

三、掺杂均匀性优化对污水处理性能提升的预测

（一）对目标污染物降解效率的理论预测

掺杂均匀性优化对 BDD 电极在污水处理中的性能提升具有系统性的积极影响，这种影响可从目标污染物降解效率、处理深度和范围、能耗及电极寿命四个维度进行理论预测^[9]。在目标污染物降解效率方面，优化后的掺杂均匀性使 BDD 电极表面形成更均匀的活性位点分布和电荷传递路径，这意味着污水中的目标污染物（如酚类、染料、抗生素等）能在电极表面更均匀地接触活性位点，且电子传递效率的提升加速了羟基自由基等强氧化物种的生成与作用^[9]。均匀的活性位点分布避免了局部反应饱和或位点闲置的问题，让每单位面积的电极都能高效参与降解反应，理论上可使降解效率提升显著，尤其是对于高浓度或难降解污染物，这种优化能减少因局部反应不完全导致的残留，从而在相同反应时间内实现更高的去除率，例如对持久性有机污染物的降解率可能提升 20% – 40%。

（二）对处理深度和范围的理论预测

处理深度和范围的拓展也是掺杂均匀性优化的重要体现，当掺杂均匀性提高后，BDD 电极的电催化活性在空间上更均一，不再局限于局部“热点区域”，而是能在整个电极表面形成稳定且强劲的氧化环境。这使得电极不仅能高效降解污水中常见的易氧化污染物，还能对结构更稳定、难以降解的污染物（如多环芳烃、卤代烃等）产生更强的氧化作用，拓展了可处理污染物的范围。同时均匀的反应环境减少了局部污染物降解不完全的情况，确保污水在流经电极表面时，无论处于哪个区域都能受到充分的氧化处理。提升了处理深度，使出水水质更优，甚至可能达到更

深层次的矿化效果，将污染物更彻底地分解为 CO₂、H₂O 等无害物质，而不仅仅是转化为中间产物。

（三）对能耗的理论预测

在能耗方面，掺杂均匀性优化通过降低电荷转移电阻和提升反应动力学效率，能显著减少电催化过程中的能量损耗^[10]。均匀的电荷传递路径使电流在电极表面分布更均匀，避免了局部电阻过高导致的无用能耗，同时高效的降解反应意味着在达到相同处理效果时，所需的反应时间更短，或所需的外加电压更低。例如在处理相同体积和浓度的污水时，优化后的电极可能使单位处理量的能耗降低 15% – 30%，这是因为能量能更直接地用于污染物的氧化降解，而非克服局部电阻或补偿不均匀反应带来的效率损失，从而实现节能的效果。

（四）对电极寿命的理论预测

电极寿命的延长同样得益于掺杂均匀性的优化，不均匀掺杂时，局部硼原子聚集区域易因晶格应力和高电流密度而遭受更严重的损耗，导致电极性能快速衰减。优化后的均匀掺杂减少了这种局部损耗的风险，均匀的电流分布和晶格结构使电极表面的磨损和腐蚀更均匀缓慢，避免了局部区域的过早失效。理论上，这种优化可使电极的使用寿命延长一倍以上，在长期连续运行的污水处理系统中，能显著减少电极更换频率，降低维护成本，同时保证污水处理过程的稳定性，减少因电极性能波动导致的出水水质不稳定问题。

四、结束语

硼掺杂金刚石（BDD）电极作为电催化领域的高性能材料，其掺杂均匀性是决定其在污水处理中应用效能的核心因素。掺杂均匀性通过调控电荷转移动力学、活性位点分布、羟基自由基生成、反应选择性及结构稳定性，构建了从微观电子结构到宏观电催化性能的关联机制。掺杂均匀性优化策略包括 CVD 工艺参数精细化调控、基体预处理及退火后处理等，为提升 BDD 电极性能提供了可行路径，而物理与电化学相结合的评估体系则为优化效果的量化验证奠定了基础。优化掺杂均匀性可显著提升污水处理效率（如难降解污染物去除率提升 20%–40%）、拓展处理范围、降低能耗 15%–30% 并延长电极寿命，这对推动 BDD 电极的工业化应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 徐燕军, 柳学全. B 掺杂金刚石电极的制备、特性及其表面改性技术 [J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(03): 1–7. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20170162.
- [2] 高继业. 纳米结构阵列掺硼金刚石电极制备及性能研究 [D]. 南京航空航天大学, 2020. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.002310.
- [3] 刘典宏. 钛基掺硼金刚石电极的制备及其电化学性能研究 [D]. 中南大学, 2023. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2023.004792.
- [4] 白孟琦. 掺硼金刚石电极电催化氧化水体中 PPCPs 的效能与机理 [D]. 陕西师范大学, 2021. DOI: 10.27292/d.cnki.gsxfu.2021.002058.
- [5] 董佳玥. 掺硼金刚石电极在含亚硝酸盐酚类废水处理中的应用 [D]. 南京农业大学, 2020. DOI: 10.27244/d.cnki.gnjnu.2020.000265.
- [6] 胡靖源, 马莉, 朱成武, 等. 镍催化多孔掺硼金刚石薄膜电极的制备及其电化学氧化降解染料废水实验研究 [J]. 矿冶工程, 2018, 38(06): 147–150+155.
- [7] 卢红叶. 掺硼金刚石电极阳极电催化氧化苯酚废水的研究 [D]. 燕山大学, 2018.
- [8] 李嫣然. ZnO 纳米棒 / 掺硼金刚石电极的制备及其电催化机制研究 [D]. 天津理工大学, 2018.
- [9] 赵阳. 掺硼金刚石电极对废水毒性控制和污染物检测性能评价 [D]. 大连理工大学, 2015.
- [10] 盛贵尚. 掺硼金刚石电极电化学氧化晚期垃圾渗滤液试验研究 [D]. 重庆大学, 2015.

汽轮机油中水分超标机理及新型脱水装置的应用研究

郭昱呈

国家电投集团山西铝业有限公司, 山西 原平 034100

DOI:10.61369/ETQM.2025070003

摘 要： 针对传统脱水方法的效率低、能耗大及可能损害油品性能等问题，本文研究了一种新型脱水装置的设计与应用。将该装置应用在汽轮机油水分超标问题中，通过结合真空脱水、分子筛吸附及智能控制系统，可实现高效、低能耗且对油品无损伤的脱水处理。实验表明，新型脱水装置显著降低了汽轮机油中的水分含量，有效延长了油品使用寿命，提升了汽轮机运行的可靠性和经济性，为相关行业油品维护提供了新的技术解决方案。

关 键 词： 汽轮机油；水分超标机理；新型脱水装置

Research on the Mechanism of Excessive Moisture in Turbine Oil and the Application of New Dehydration Devices

Guo Yucheng

State Power Investment Corporation Shanxi Aluminium Industry Co., LTD., Yuanping, Shanxi 034100

Abstract： Aiming at the problems of low efficiency, high energy consumption and possible damage to the performance of oil products in traditional dehydration methods, this paper studies the design and application of a new type of dehydration device. The application of this device in the problem of excessive moisture in turbine oil, by combining vacuum dehydration, molecular sieve adsorption and intelligent control system, can achieve efficient, low-energy consumption and non-damaging dehydration treatment of oil products. Experiments show that the new dehydration device significantly reduces the water content in turbine oil, effectively prolongs the service life of the oil, enhances the reliability and economy of turbine operation, and provides a new technical solution for oil maintenance in related industries.

Keywords： turbine oil; mechanism of excessive moisture; new type of dehydration device

汽轮机作为电力工业中的核心设备，其稳定运行直接关系到电力供应的安全与效率。而汽轮机油作为润滑、冷却及密封介质，其性能直接影响到汽轮机的运行状态和使用寿命。然而，在实际运行过程中，汽轮机油中水分超标问题屡见不鲜，成为影响汽轮机安全运行的隐患。水分超标不仅会导致油品氧化加速、添加剂失效，还会引起金属部件腐蚀、润滑性能下降，甚至引发汽轮机故障停机。因此，深入研究汽轮机油中水分超标的机理，并开发高效、可靠的脱水技术，对于保障汽轮机安全运行、降低维护成本具有重要意义。

一、汽轮机油中水分超标机理分析

（一）水分来源与侵入途径

汽轮机油中水分超标机理复杂多样，其来源与侵入途径主要可归结为外部因素与内部因素两大方面。在外部因素中，高湿度环境会导致空气中的水分易于通过设备缝隙或透气孔进入油品系统，尤其是在设备停机或低负荷运行时，该现象更为显著。而冷凝水的产生也不容忽视，当设备表面温度低于周围空气露点时，空气中的水蒸气会在设备表面凝结成水滴，进而渗入油品中。此外，设备密封失效也是水分侵入的重要途径，密封件老化、损坏或安装不当均会导致外部水分直接进入油品循环系统^[1]。而在内

部因素方面，油品氧化降解是水分超标的内在驱动力之一，油品在高温、高压及氧气作用下发生氧化反应，生成酸性物质和水分，会加速油品老化并增加水分含量。而添加剂在特定条件下会分解或失效，失去其原有的防锈、抗氧化等功能，同时可能产生水分作为副产物。此外，金属腐蚀也是水分超标的重要原因，油品中的水分与金属部件发生电化学腐蚀反应，不仅消耗金属材料，还产生腐蚀产物和更多水分，形成恶性循环，进一步加剧油品水分超标问题。

（二）水分超标对油品性能的影响

水分超标会显著降低油品的润滑性能，水分作为杂质存在于油品中，会破坏油膜的连续性和稳定性，使得润滑效果大打折扣

扣，增加部件间的摩擦与磨损。同时，水分会加速油品的氧化过程，水作为氧化反应的催化剂，与油品中的不饱和烃发生水解反应，生成酸性物质和过氧化物，这些产物进一步促进油品的老化，缩短其使用寿命^[2]。而水分超标还会导致油品中的添加剂析出，添加剂原本溶解在油品中以发挥其特定功能，如抗磨、防锈等，但水分超标会破坏添加剂的溶解平衡，使其析出并沉积在设备表面，形成沉积物，影响设备正常运行。此外，水分超标对汽轮机部件的腐蚀与磨损机制也不容忽视，水分与金属部件接触后，会形成电化学腐蚀环境，加速金属的腐蚀速率，导致部件表面粗糙化、孔蚀等，严重影响部件的机械性能和使用寿命。并且，腐蚀产物与水分、油品中的杂质共同作用，形成磨粒，加剧部件间的磨损，降低设备效率，甚至引发设备故障。

（三）水分超标的核心影响因素

影响汽轮机油中水分超标的因素主要包括温度、压力及油品老化程度等，这些因素相互作用，共同影响油品中的水分含量。温度是影响水分溶解度与蒸发速率的重要因素，高温环境下，水分在油品中的溶解度降低，同时蒸发速率加快，若设备密封不良，外部水分更易侵入，而内部水分也易蒸发后凝结在低温区域，形成循环积累。相反，低温环境虽能抑制水分蒸发，但可能促进油品中已溶解水分的析出，特别是在设备停机或低负荷运行时，温度波动易导致水分凝结。压力对水分含量的影响主要体现在油品的饱和蒸汽压上，系统压力降低时，油品的饱和蒸汽压相对升高，促使水分蒸发，增加油品中游离水的含量^[3]。此外，油品老化程度则是水分超标的内在因素，随着油品使用时间的增长，其抗氧化性、抗乳化性等性能逐渐下降，油品中的添加剂失效，基础油发生氧化降解，生成酸性物质和水分，这些过程不仅消耗了油品中的有效成分，还增加了水分含量，形成恶性循环，加速油品老化，进一步加剧水分超标问题。

二、新型脱水装置的设计原理与结构

（一）设计理念与目标

新型脱水装置的设计紧密围绕高效、低能耗以及对油品无损伤的核心需求展开。在设计理念上，秉持创新性与实用性相结合的原则，致力于突破传统脱水技术的局限，通过引入先进的脱水技术与材料科学成果，实现脱水效率与能耗之间的最优平衡。针对传统脱水方法可能对油品性能造成损害的问题，本装置特别注重脱水过程中的油品保护机制，确保脱水处理后的油品仍能保持其原有的润滑性能、抗氧化性及稳定性。为实现高效脱水的目标，装置采用多级脱水工艺组合，包括真空脱水、分子筛吸附以及智能温控系统等，通过不同脱水机制的协同作用，显著提升水分去除效率。在低能耗方面，通过优化装置内部结构、提高热能回收利用率以及采用节能型驱动元件等措施，有效降低了装置运行过程中的能耗水平。同时，为确保脱水过程对油品无损伤，装置内部采用了特殊材质的接触面，避免金属离子等杂质对油品的污染，并通过精确控制脱水温度、压力等关键参数，防止油品在脱水过程中发生氧化、热解等不良反应。此外，装置还配备了智

能监测与反馈系统，能够实时监测脱水效果及油品性能变化，为装置的稳定运行及油品质量的持续保障提供有力支持。

（二）脱水技术选择与组合

新型脱水装置的设计聚焦于脱水技术的科学选择与高效组合，以应对汽轮机油中水分超标的复杂挑战^[4]。其中，真空脱水技术作为核心脱水手段之一，其原理基于降低系统压力使水分在较低温度下沸腾汽化，从而脱离油品。为提升真空脱水效率，优化方向包括改进真空泵性能，采用更高效的抽气系统以快速建立并维持稳定真空度。同时，优化加热方式，如采用间接加热或微波辅助加热，能够减少对油品的直接热损伤，并加速水分蒸发。在真空脱水技术的基础上，新型脱水装置还创新性地引入了分子筛吸附与膜分离技术。分子筛吸附技术利用特定孔径的分子筛材料，对油品中的微量水分进行选择性吸附，尤其适用于处理真空脱水后残留的微量水分，确保油品最终含水量达到极低水平。膜分离技术则通过选择性渗透膜，在压力差作用下实现油水的高效分离，具有操作简便、能耗低、无二次污染等优点。这两种技术的引入，既增强了脱水装置对不同含水量油品的适应性，还显著提升了脱水效率与油品回收率，同时避免了传统脱水方法可能带来的油品性能下降问题，为汽轮机油的长期稳定运行提供了有力保障。

（三）装置结构与工作原理

新型脱水装置的设计原理与结构紧密围绕高效、低能耗及油品无损伤的核心目标展开，其整体结构设计精妙且功能完备。装置主要由真空系统、吸附塔、控制系统以及辅助部件构成，各部分协同工作，共同实现油品的深度脱水^[5]。真空系统作为脱水装置的动力源泉，通过高效真空泵快速建立并维持装置内部的稳定真空环境，为油品中水分的汽化提供必要条件，该系统采用先进的抽气与密封技术，确保真空度稳定且能耗低，有效提升了脱水效率。吸附塔内部填充有高性能的分子筛材料，这些分子筛具有精确的孔径结构，能选择性吸附油品中的微量水分，擅长处理真空脱水后残留的极微小水分子，确保油品最终含水量达到极低标准。控制系统集成先进的传感器与智能算法，能够实时监测油品含水量、真空度、温度等关键参数，并根据预设程序自动调节各部件工作状态，实现脱水过程的精准控制。此外，装置还配备了辅助部件如加热系统、冷却系统及油品循环系统，加热系统用于在脱水前对油品进行预热，促进水分蒸发，冷却系统则确保吸附塔在再生过程中温度可控，保护分子筛性能，油品循环系统则保证油品在装置内均匀流动，提高脱水均匀性。

三、新型脱水装置的应用研究

（一）应用场景与需求分析

新型脱水装置的应用研究聚焦于电力行业汽轮机油脱水，在电力行业中，汽轮机油作为核心润滑介质，其性能稳定性直接关系到汽轮机组的安全高效运行。然而，由于运行环境复杂多变，如高温、高压、高湿度等条件，汽轮机油极易受到水分污染，导致润滑性能下降、氧化加速、添加剂失效等一系列问题，进而影

响机组运行效率与寿命^[5]。因此，汽轮机油的脱水处理成为电力行业亟待解决的重要需求。当前，针对汽轮机油脱水，电力行业虽已采取多种解决方案，如真空脱水、离心脱水等，但均存在不同程度的局限性。传统真空脱水技术能耗较高，且对微量水分去除效果有限，离心脱水则对油品清洁度要求苛刻，易受杂质影响，脱水效率不稳定。此外，现有解决方案普遍缺乏智能化控制，难以根据油品实际含水量动态调整脱水参数，导致脱水效果参差不齐，难以满足电力行业对汽轮机油品质日益严格的要求。鉴于此，新型脱水装置的研发与应用，旨在通过创新脱水技术与智能化控制系统的结合，实现汽轮机油的高效、低能耗、精准脱水，为电力行业提供更为可靠、经济的油品处理方案，保障汽轮机组的安全稳定运行。

（二）装置安装与调试

新型脱水装置的应用研究中，装置的安装与调试是确保其高效稳定运行的关键环节。现场安装流程需严格遵循既定步骤，首先进行基础检查与准备，确保安装场地平整、承重能力符合要求，同时完成电源、气源等外部接口的预埋与连接^[7]。随后，依据设备图纸进行主体结构的吊装与定位，采用精密测量工具确保各部件安装精度，特别是真空系统、吸附塔等核心部件的垂直度与水平度。安装过程中，需特别注意密封件的安装质量，采用专用工具确保密封面无损伤，防止泄漏现象发生。而调试方法则包括单机调试与联机调试两个阶段。单机调试时，对真空泵、加热器、传感器等关键部件进行逐一测试，验证其性能参数是否符合设计要求。联机调试则着重于各部件间的协同工作，通过模拟实际运行工况，调整控制系统参数，实现脱水过程的精准控制^[8]。而在安装与调试过程中，操作人员需严格遵守安全操作规程，佩戴好个人防护装备，并密切关注设备运行状态，及时发现并处理异常情况。此外，还需做好调试记录，为后续维护与优化提供数据支持。通过严谨的安装与调试流程，确保新型脱水装置能够高

效、稳定地运行，满足电力行业汽轮机油脱水的实际需求。

（三）应用效果与经济效益分析

新型脱水装置的应用研究在多个方面展现出显著成效，以某自备电厂的实际应用为例，该电厂引入新型脱水装置后，汽轮机油的脱水效果实现了质的飞跃。装置凭借其高效的真空脱水与分子筛吸附技术组合，不仅大幅降低了油品中的水分含量，确保了油品质量的稳定提升，还显著延长了油品的使用寿命，减少了因油品老化导致的设备故障与停机时间^[9]。在经济效益方面，新型脱水装置的应用带来了运行成本的显著降低，一方面，由于油品质量的提升，电厂减少了因油品更换与设备维修产生的直接成本。另一方面，装置本身的高效运行与低能耗设计，也有效降低了电厂的能源消耗与运营成本，据统计，该电厂在引入新型脱水装置后，年运行成本降低了约15%，经济效益显著。此外，新型脱水装置还展现出了优异的长期运行稳定性与较低的维护成本，装置采用模块化设计，便于日常维护与故障排查，同时关键部件选用高品质材料，确保了装置的长寿命运行^[10]。经过长期跟踪评估，该装置的维护成本远低于传统脱水设备，为电厂的持续稳定运行提供了有力保障。

四、结束语

汽轮机油中水分超标是一项复杂而多因素影响问题，其机理涉及运行环境、设备状态及油品自身特性等多个方面。传统脱水方法虽能在一定程度上降低油品含水量，但往往存在效率低、能耗大及可能损害油品性能等不足。本文提出的新型脱水装置，通过综合运用真空脱水、分子筛吸附及智能控制技术，实现了高效、低能耗且对油品无损伤的脱水处理，为解决汽轮机油水分超标问题提供了新的技术途径。

参考文献

- [1] 廖豪,杨庭栋,杜树茂,等.自配溶液用于伏安法测定汽轮机油抗氧剂含量研究[J].化学与生物工程,2025,42(04):32-35.
- [2] 李宏海.火力发电厂汽轮机油系统常见故障原因及防控措施[J].科技资讯,2024,22(18):201-203.
- [3] 李曦阳.汽轮机油系统管道泄漏原因与对策分析[J].电子技术,2024,53(11):146-147.
- [4] 陶建.火电厂锅炉给水泵汽轮机油系统压力低跳闸问题处理[J].电力设备管理,2025,(04):71-73.
- [5] 刘忠连.汽轮机组波纹管膨胀节焊接冷裂纹成因及机理分析[J].焊接技术,2025,54(01):122-126.
- [6] 蔡越.汽轮机油挡甩油分析与处理[J].能源与环境,2023,(04):77-79.
- [7] 刘亮亮,李锐,黄江瑞.汽轮机润滑油颗粒度异常原因分析及处理[J].神华科技,2018,16(06):55-57.
- [8] 王志杰.汽轮机润滑油水分超标综合治理[J].科技资讯,2018,16(10):40-41.
- [9] 廖学书.给水泵汽轮机润滑油系统水分超标原因分析及改进措施[J].中国设备工程,2017,(07):50-51.
- [10] 韩超,沈郁昕.汽轮机维修中的常见故障与技术分析[J].科技风,2015,(17):89.

半导体热电效应在制冷设备的应用研究

廖辉

广东美的制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ETQM.2025070004

摘 要 : 传统制冷设备主要采用压缩机冷却方式, 但存在噪音大、体积大、整体能耗高等问题。随着技术革新, 半导体制冷片广泛应用到热电制冷设备领域, 对比传统压缩机冷却方式体积小、噪音小, 设备总体运行能耗更低, 现阶段已经在制冷设备领域广泛应用。文章围绕制冷设备中半导体热电效应的应用情况展开研究, 以期制冷领域有效应用提供指导建议。

关 键 词 : 制冷设备; 半导体热电效应; 应用; 能耗

Application Research of Semiconductor Thermoelectric Effect in Refrigeration Equipment

Liao Hui

Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : Traditional refrigeration equipment mainly adopts compressor cooling method, but there are problems of large noise, large volume and high overall energy consumption. With the technological innovation, semiconductor refrigeration chip is widely used in the field of thermoelectric refrigeration equipment. Compared with the traditional compressor cooling method, it has small volume and small noise, and the overall operation energy consumption of the equipment is lower. At present, it has been widely used in the field of refrigeration equipment. This paper focuses on the application of semiconductor thermoelectric effect in refrigeration equipment, in order to provide guidance for effective application in refrigeration field.

Keywords : refrigeration equipment; semiconductor thermoelectric effect; application; energy consumption

半导体热电片属于半导体热电偶, 即 P-N 结, 将 P 型半导体和 N 型半导体有机整合在一起。根据帕尔贴效应原理, 发挥半导体材料中载流子运动, 不需要制冷剂的情况即可实现热能和电能有效转换。也正是这一制冷原理, 使得半导体热电制冷效应结构简单、不需要机械运动部件的优势得以充分展现, 在实际应用中可以有效调节电流大小、方向, 精准控制制冷量和温度, 从而减少机械磨损带来的维护成本和能耗问题。加之半导体热电效应可以最大程度上规避制冷剂泄漏对环境的污染破坏, 充分契合低碳、环保理念, 在缓解能源紧张问题同时, 推动制冷设备制造领域转型发展。

一、半导体热电效应概述

(一) 半导体热电效应制冷原理

半导体热电效应制冷基于帕尔贴效应形成, 直流电经由 P 型半导体以及 N 型半导体构成的回路时, 半导体材料连接区域会产生或吸收热量。P 型半导体中多数载流子为空穴, 从高电位向低电位移动; N 型半导体中的载流子多为电子, 从低电位向高电位移动。电流流经两种导体连接区域时, 使得两种材料能量状态显著转变。P 型半导体朝着 N 型半导体流动的空穴, 从 N 型半导体朝着 P 型半导体流动的电子, 流经两个半导体连接区域时会消耗一定的能量, 并吸收环境中的热量, 从而实现制冷效果^[1]。基于多个 PN 结串联构成热电堆, 能够产生理想的制冷效果, 避免制冷剂应用产生的能耗和污染问题。

(二) 半导体热电效应制冷特点

根据半导体热电效应制冷效应制成的制冷设备, 其特点表现在以下几点:

(1) 结构简单、体积小。半导体热电制冷设备对比传统制冷设备而言, 不需要压缩机、蒸发器和冷凝器等部件, 只需要组合散热装置、热电元件以及电路控制元件即可。此种结构缺少机械运动部件, 设备整体结构简单、体积小, 能够有效避免机械磨损诱发故障问题, 提高设备运行稳定性和安全性, 降低设备后期维护成本。

(2) 精准控温。半导体热电制冷设备具有精准控温优势特点, 合理化调节输入电流方向、大小精准控制制冷量、制冷温度, 减少不必要的资源损耗, 较窄的温度范围内精准控温^[2]。例如, 医疗领域很多药品和疫苗均需要冷藏设备存储, 控制温度在

一定范围内,而半导体热电制冷设备即可满足这一需求。电子设备散热方面,依据芯片运行状态实时监控与调节制冷量,使得芯片保持最佳运行温度。

(3) 快速制冷与热效应。半导体材料具有较小的热惯性特点,连接电源后促使大量载流子定向移动,快速完成热量的释放和吸收过程。相较于传统制冷方式,短期内即可达成目标制冷温度,而且在环境温度波动剧烈情况下,设备即可动态调整制冷量,保证制冷空间温度趋于恒定^[3]。

(4) 节能环保。传统制冷设备需要氟利昂等制冷剂提供支持,这些制冷剂对环境污染较大。而半导体热电制冷设备不需要添加制冷剂,有效避免制冷剂泄漏对环境的污染,最大程度上杜绝温室气体排放,充分响应绿色环保理念。未来随着环保法规逐步健全和完善,半导体热电效应制冷技术的环保优势将得到进一步展现,对于制冷行业转型发展具有重要意义^[4]。

二、半导体热电效应在制冷设备的应用

(一) 材料选择

在半导体热电效应实验中,采用市场上常见型号的半导体温差电片,具体性能参数如表1。本次实验所选择的半导体热片样品极限电流均为10A、6A、1A。

表1 不同 P-N 结对数制冷片样品的性能参数

序号	1	2	3	4
尺寸/mm	10×10	20×20	30×30	40×40
参考内阻 R/Q	0.07	0.27	0.63	1.12
热电偶对数 /n	7	31	71	127
极限电压 /V	0.82	3.65	8.4	15
最大电流 /A	10	10	10	10
最大制冷量 /W	4.7	20.1	47.2	84
最大温差 /℃	66	66	66	66

(二) 实验方法

将半导体温差电片置于实验平台上,平台具有良好的隔热性能,能够有效避免工作热量过量损失。直流电源可以为半导体温差电片提供相较于稳定的直流电,根据实验需求在特定范围内精准调整电流、电压值大小。半导体温差电片热端安装散热系统,可以将热电效应产生的热量及时释放,避免温度过高导致制冷效果下降^[5]。本次实验中采用风冷散热片+散热风扇组合方式,将热端热量快速释放到环境中。温度测量系统多选择高精度的温度传感器,在半导体温差电片热端与冷端两侧区域设置;数据采集系统与直流电源和温度传感器连接,能够实时采集记录不同时间点温度、电压、电流等数据^[6]。

实验开始后,开启直流电源流经半导体温差电片,散热风扇同步启动。间隔1min记录半导体温差电片冷热端温度、电压、电流数值大小。实验期间,实验人员应实时观察装置运行状况,检查是否存在短路和异常发热等问题。实验时间30min,同步记录不同时段的数据,随后调整直流电源输出电流、电压值,重复上述步骤,获得不同电流条件下实验数据。针对采集的电压、电流和温度等数据全面整理,剔除异常数据,使用 Origin 数据处理软

件对数据进行处理,绘制不同电流条件下,随着时间变化半导体温差电片冷端温度变化曲线、热端温度变化曲线,以及制冷量对电流影响的关系曲线。基于绘制此类曲线,直观掌握不同工况下半导体温差电片制冷性能规律,从而掌握半导体热电效应在制冷设备应用中的特性,为后续制冷设备优化设计提供支持^[7]。

(三) 结果与讨论

1. P-N 结对数对热片制冷性能的影响

P-N 结对数与热片制冷性能之间存在密切联系,本次实验中选择四种不同型号半导体温差电片样品进行实验,P-N 结对数从7对增加到127对。如,1号样品的 P-N 结对数为7,最大制冷量4.7W。随着 P-N 结对数增加,4号样品 P-N 结对数为127对,最大制冷量为84W。从中了解到,P-N 结对数增加,能够有效提高半导体热片制冷性能,其原理在于 P-N 结对数越多,参与能量转换的载流子越多,在电流作用下每个 P-N 结释放或吸收热量,多个 P-N 结累积下吸收更多的热量,最终实现提高制冷量的作用^[8]。最大温差方面,四种样品最大温差均66℃,但要时刻关注实验过程的温度动态变化情况。未来随着 P-N 结对数增加,达到最大温差过程消耗的时间大幅度缩短,由于大量的 P-N 结对可提高热传递速度,从而实现热量大量、高效转移,使得冷端温度快速达到极限温度。具体如图1和图2所示。

低电流状态下,冷热端温差接近,差异较小,因此冷却效果是极其有限的。低电压下尽管制冷能力有所下降,但低电压温度变化也会降低反向传热量,热电转化效率大幅度提升。这种方式不仅能取得理想的制冷效果,还能减少不必要的电力损耗,提高制冷设备的经济性^[9]。如果制冷设备的单级热晶体管热端采用冷却水及降温处理,制冷率达到最高时电流值为 I_{opt} ,制冷率最高电流值 I_{max} ,并且 $I_{max} < I_{opt}$,通常要求制冷片最大程度上接近最有 COP 工作点,从而实现最佳的经济效益,但实际情况下往往很难实现。究其根本,制冷片保持最佳 COP 状态运行时,冷热端的温差较小情况表,热电转化效率最高、能耗最小,但制冷片产生的制冷量小于最大制冷量,那么该装置原有的制冷性能则会大幅度下降。为了获取最佳的制冷率,尽可能增加 P-N 结对数来实现,反之为了保证半导体热片处于最佳的制冷状态运行,则需要增加电流值,提高制冷性能。随着电流增加,冷热端温差、反向传能耗随之增加,热损耗变大,降低装置整体冷却效果。故此,最优的制冷容量并非制冷装置最佳工作状态。由此看来,为了提升半导体热片冷却效果,要求其兼具较高的冷却效率、制冷量,并且保证两项数值均处于限制值以内。在具体运作中,结合制冷需要动态调节工作电流,从而保证制冷系统处于最为理想的运作状态。

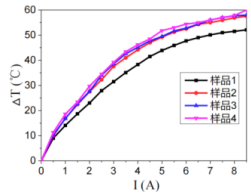
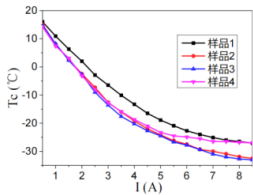


图1 不同样品冷端温度随电流变化曲线 图2 不同样品冷端端的制冷温差随电流变化曲线

2.影响热电极制冷特性的因素

(1) 热电材料性能。热电材料性能对热电极制冷特性影响较大,其中热电材料品质因数很大程度上决定了热电材料制冷性能。品质因数越高,热电材料电能转化率越高。采用碲化铋及其合金材料,对比传统材料能够取得更加理想的制冷量、温差,高电导率能够大幅度降低电能传输损耗,将更多电能应用到制冷环节。热导率越低,从热端到冷端的反向热传导越少,减少不必要电能损耗,始终处于最佳的冷端低温状态。

(2) 工作电流。工作电流大小对于热电效应在载流子数量影响较大,在特定范围内增加工作电流值,热电极制冷量也将大幅度增加。但电流值超出标准范围内,热电极内阻的焦耳热量随之在增加,电能损耗加剧下使得热端温度异常升高,制冷效率反向下降^[10]。

(3) 环境温度。环境温度越高,热电极热端散热性能越低,因此需要消耗大量的电能。尤其是一些气温较高的夏季,热电制

冷设备制冷效果并不如春秋季节。鉴于此,为了确保不同环境下热电极始终处于高性能运转状态,应注重散热系统优化改良,从而增加散热风扇转速以及热端散热效果。另外,实验过程中采用同样规格的热电极,配合散热性能不一的散热片,散热性能优异的半导体热电极冷端温度更低,由此产生更多的制冷量。

三、结论

综上所述,基于半导体热电效应的制冷设备,相较于传统压缩机制冷技术而言,结构更为简单、体积小,取得快速制冷效果同时,有效减少不必要的电能损耗。而且半导体热电制冷设备不需要制冷剂,避免制冷剂泄漏诱发的环境污染问题,提升制冷设备运行经济性,对于推动制冷设备转型升级具有重要意义。

参考文献

- [1] 张圣钊. 半导体热电效应在制冷设备的应用研究 [J]. 国际机械工程, 2023, 2(3).
- [2] 张常宏. 高温半导体热电制冷器优化设计及特性研究 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2022.
- [3] 杨庭松, 海杨, 范美辰, 等. 基于半导体热电效应的赝形电子温控能力研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29(7): 206–213.
- [4] 刘奥成, 郑欣鹏, 王巧, 等. 半导体制冷片温控系统应用研究 [J]. 现代信息科技, 2023, 7(19): 55–58.
- [5] 刘丽君, 盛健, 张华, 等. 新型机柜半导体空调制冷性能试验研究 [J]. 流体机械, 2025, 53(1): 17–24.
- [6] 赵兴兴, 霍兆瑞, 洪小波, 等. 结合半导体制冷的复合电池热管理模块仿真研究 [J]. 电源技术, 2025, 49(1): 123–131.
- [7] 吴启超, 黄瑞, 陈芬放, 等. 基于半导体制冷-相变材料的电池热管理 [J]. 电池, 2022, 52(2): 148–152.
- [8] 徐宇, 李夜军, 贾敏涛, 等. 冷循环便携式半导体降温服设计及制冷性能分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4): 40–46.
- [9] 姚成军, 黎伟嘉, 侯少波, 等. 利用半导体制冷的新型冷藏车设计 [J]. 保鲜与加工, 2022, 22(3): 78–82.
- [10] 邱兰兰, 王瑜, 朱洁茹, 等. 应用半导体制冷的冷藏链用储藏箱性能实验研究 [J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 131–140.

基于智能算法的燃煤火电厂电气运行稳定性提升方法

王向阳, 孟凡成

江苏阚山发电有限公司, 江苏 徐州 221134

DOI:10.61369/ETQM.2025070009

摘 要： 随着电力需求的不断增长和能源结构的调整，燃煤火电厂作为我国电力供应的主力军，其电气运行稳定性对保障电网安全至关重要。本文针对燃煤火电厂电气运行中存在的稳定性问题，系统分析了影响电气运行稳定性的关键因素，包括设备老化、环境干扰、运行参数波动等。在此基础上，探讨了智能算法（如神经网络、模糊控制、遗传算法等）在故障预测、参数优化、自适应控制等方面的应用机制，并提出了一种基于多智能算法融合的燃煤火电厂电气运行稳定性提升方法。该方法通过数据驱动建模、实时监测与预警、智能优化控制等环节，实现了对电气系统运行状态的精准调控和故障的早期干预，为燃煤火电厂的安全高效运行提供了技术支撑。

关 键 词： 智能算法；燃煤火电厂；电气运行稳定性；提升方法

A Method to Improve the Electrical Operation Stability of Coal-Fired Power Plant Based on Intelligent Algorithm

Wang Xiangyang, Meng Fancheng

Jiangsu Fanshan Power Generation Co., LTD. Xuzhou, Jiangsu 221134

Abstract： With the continuous growth in electricity demand and the adjustment of energy structures, coal-fired power plants, as the main force in China's power supply, have electrical operation stability that is crucial for ensuring grid safety. This paper systematically analyzes the key factors affecting the stability of electrical operations in coal-fired power plants, including equipment aging, environmental interference, and fluctuations in operating parameters. Based on this, it explores the application mechanisms of intelligent algorithms (such as neural networks, fuzzy control, and genetic algorithms) in fault prediction, parameter optimization, and adaptive control. A method for enhancing the electrical operation stability of coal-fired power plants based on the integration of multiple intelligent algorithms is proposed. This method achieves precise regulation of the electrical system's operating state and early intervention in faults through data-driven modeling, real-time monitoring and warning, and intelligent optimization control, providing technical support for the safe and efficient operation of coal-fired power plants.

Keywords： intelligent algorithm; coal-fired power plant; electrical operation stability; improvement method

燃煤火电厂在我国能源供应体系中占据核心地位，肩负着保障电力稳定供应的关键职责。伴随电力需求攀升与电网规模扩张，其电气运行稳定性问题愈发突出。电气系统作为火电厂的核心枢纽，其稳定性对发电效率、设备使用寿命以及电网安全意义重大。然而，受设备老化、环境干扰、运行参数波动等诸多因素交织影响，燃煤火电厂电气系统运行故障频发，非计划停机、设备损坏等情况屡见不鲜，严重损害了电力供应的可靠性与经济性。传统提升电气运行稳定性的方法，如人工巡检、定期维护和经验判断，存在效率不高、响应迟缓、精度欠缺等弊端。随着信息技术迅猛发展，智能算法为解决这一问题带来新契机。智能算法模拟人类智能，具备卓越的数据处理、自适应学习与优化决策能力，可实现电气系统运行状态的实时监测、故障预测及智能调控。本文将系统探究基于智能算法的燃煤火电厂电气运行稳定性提升方法，依次分析影响稳定性的关键因素、研究智能算法的应用机制，并提出多智能算法融合的提升方法，通过理论分析与仿真验证其有效性。

一、燃煤火电厂电气运行稳定性影响因素分析

（一）设备老化与故障

燃煤火电厂电气设备因长期运行于高温、高压及强电磁干扰

的恶劣环境，设备老化问题日益凸显。变压器、发电机、开关柜等关键设备，在持续高负荷运转中，绝缘材料逐渐老化，绝缘性能显著降低；同时，机械部件因长期摩擦、振动而磨损加剧。设备老化不仅降低了电气系统的整体性能，导致故障频发，影响电

力供应的稳定性，还可能引发火灾、爆炸等严重安全事故，对人员生命安全及设备完整性构成重大威胁。

（二）环境干扰

燃煤火电厂电气系统运行环境状况复杂且多变，面临着诸多因素的干扰。温度是影响电气系统稳定运行的关键因素之一，高温环境会促使电气设备绝缘材料加速老化，进而导致绝缘性能大幅下降，为设备故障埋下隐患。湿度同样不容忽视，过高的湿度环境会使设备内部出现凝露现象，引发短路、漏电等故障，严重威胁电气系统的安全^[1]。此外，电磁干扰也是一个重要问题。在复杂的电磁环境中，电气设备之间的通信和控制信号容易受到干扰，导致信号失真或丢失，进而影响系统的正常运行，使电气系统出现不稳定状况。

（三）运行参数波动

燃煤火电厂电气系统运行过程中，运行参数（如电压、电流、功率因数等）呈现出显著的波动特性。这些波动主要源于负荷的频繁变化、燃料质量的参差不齐以及设备状态的动态演变。负荷的增减直接导致电流和功率需求的波动，而燃料质量的差异则可能影响燃烧效率，进而影响发电功率和电压稳定性。同时，设备老化、磨损或故障也会对运行参数产生不利影响^[2]。运行参数的波动不仅降低了发电效率，增加了能源损耗，还可能使设备长期处于过载或欠载的异常运行状态，加速设备老化，甚至引发设备损坏，对电气系统的整体稳定性构成严重威胁。

（四）操作与管理水平

操作与管理水平在电气运行稳定性方面扮演着关键角色。操作人员的技能水平直接决定了其能否正确、熟练地操作设备。若技能不足，在操作过程中容易出现失误，进而引发设备故障。责任心同样不可或缺，缺乏责任心的操作人员可能忽视设备运行中的细微异常，未能及时采取措施，导致问题扩大。管理流程的合理性也至关重要。科学合理的管理流程能够确保各项工作有序开展，设备得到及时、有效的维护^[3]。反之，管理混乱会导致工作衔接不畅，维护工作滞后，使设备长期处于不良运行状态。

二、智能算法在燃煤火电厂电气运行稳定性提升中的应用

（一）故障预测与诊断

故障预测与诊断是保障燃煤火电厂电气系统稳定运行的关键环节。智能算法凭借其强大的数据处理与模式识别能力，为故障预测与诊断提供了高效解决方案。通过构建电气系统故障预测模型，智能算法可整合历史运行数据与实时监测数据，深度挖掘设备故障特征与规律。神经网络、支持向量机等机器学习算法，能够自动学习并识别设备故障模式，实现对故障类型的精准分类与故障时间的可靠预测。这些算法通过不断优化模型参数，提升故障预测的准确性。同时，模糊控制算法在处理不确定性和模糊性信息方面展现出独特优势^[4]。它能够基于模糊逻辑对故障特征进行模糊化处理，有效应对故障诊断中的模糊性和不确定性，从而提高故障诊断的准确性和可靠性。

（二）参数优化与控制

参数优化与控制在燃煤火电厂电气系统运行中至关重要，智能算法为此提供了有力手段。为提升发电效率与系统稳定性，可借助智能算法对电气系统运行参数进行优化。遗传算法凭借其强大的全局搜索能力，能在复杂参数空间中探寻最优解，精准调控电压、电流等关键参数，使系统运行更高效。粒子群优化算法同样表现出色，通过模拟鸟群觅食行为，快速找到参数优化方向，实现参数的精准配置。此外，自适应控制算法能依据系统实时运行状态，灵活调整控制策略。面对负荷变化、设备老化等不同工况，它可自动适应并优化控制参数，确保电气系统始终保持稳定运行状态^[5]。这些智能算法的应用，不仅提高了燃煤火电厂电气系统的运行效率与稳定性，还降低了人工干预成本，为电厂的安全、高效运行提供了坚实保障。

（三）智能监测与预警

智能监测与预警是保障燃煤火电厂电气系统安全稳定运行的关键举措。智能算法凭借其卓越的数据处理与分析能力，构建起电气系统智能监测平台。该平台集成了物联网技术，能够实时采集设备状态、运行参数以及环境参数等海量信息，确保监测数据的全面性与准确性。同时，借助大数据分析技术，对采集到的数据进行深度挖掘与分析，从中提取有价值的信息与规律。基于这些分析结果，智能监测与预警系统能够精准识别设备运行中的异常状况，及时发现潜在故障隐患，并迅速发出预警信息。这些预警信息不仅及时有效，而且能够为运维人员提供科学的决策支持，指导其采取针对性的维护措施^[6]。通过智能监测与预警系统的应用，燃煤火电厂电气系统的故障发生概率得到有效降低，运行安全性与稳定性得到显著提升。

三、基于智能算法的燃煤火电厂电气运行稳定性提升方法实现

（一）数据驱动建模

数据驱动建模是提升电气运行稳定性的重要基础。为实现这一目标，需首先构建电气系统数据驱动模型。具体而言，需广泛收集电气设备在运行过程中产生的各类数据，包括但不限于运行数据、故障记录以及环境参数等。这些数据来源多样、结构各异，共同构成了多源异构数据集。随后，运用机器学习领域的先进算法，如深度学习、随机森林等，对数据集进行深度挖掘与分析。在处理过程中，算法能够自动提取数据中的关键特征，并基于这些特征进行模型训练。经过训练的模型能够准确捕捉电气系统运行状态与故障特征之间的内在联系，建立起二者之间的映射关系^[7]。最终形成的数据驱动模型，不仅能够实现对电气系统运行状态的精准描述，还能对潜在故障进行早期预警，为提升电气运行稳定性提供有力支持。

（二）实时监测与预警

实时监测与预警作为保障电气系统稳定运行的关键环节，需基于数据驱动模型构建专门的实时监测与预警平台。该平台依托传感器网络与数据采集系统，实现对电气系统全方位、多维度信

息的实时采集与高效传输。这些信息涵盖运行参数、设备状态及环境参数等，为后续分析提供全面数据支撑。在数据采集基础上，运用智能算法对海量数据进行实时分析与处理。算法能够精准识别数据中的异常模式与潜在故障隐患，并据此生成预警信息。预警信息通过短信、邮件、APP推送等多元化渠道，及时、准确地传达至运维人员手中。运维人员接收到预警信息后，可迅速采取相应措施，对潜在故障进行排查与处理，从而避免故障扩大化，确保电气系统持续、稳定运行^[8]。这一流程实现了从数据采集到故障预警，再到运维响应的闭环管理，显著提升了电气系统的安全性和可靠性。

（三）智能优化控制

智能优化控制作为提升电气运行稳定性的重要手段，其核心在于构建高效的电气系统优化控制模型。该模型深度融合了遗传算法、粒子群优化算法等前沿智能优化技术，能够实现对电气系统运行参数的全局性搜索与精细化优化。在优化过程中，智能算法凭借其强大的计算能力和自适应搜索机制，不断探索参数空间中的最优解。这些算法能够综合考虑电气系统的多目标需求，如稳定性、效率、经济性等，通过迭代优化找到一组最优的运行参数组合。优化控制模型还具备实时调整能力，能够根据系统运行状态的动态变化，自动调整控制策略^[9]。这种动态调整机制确保了电气系统在各种复杂工况下均能保持稳定运行，并实现发电效率的最大化。智能优化控制的引入，为电气系统的安全、高效运行提供了有力保障。

（四）多智能算法融合

在电气运行稳定性提升领域，为寻求更优解决方案，本文创

新性地提出了一种基于多智能算法融合的方法。该方法突破了单一算法应用的局限，将神经网络、模糊控制、遗传算法等多种先进智能算法进行深度融合。具体而言，神经网络凭借其强大的模式识别与学习能力，能够对电气系统运行状态进行全面、细致的监测与分析，捕捉到细微的运行变化特征；模糊控制算法则擅长处理不确定性和模糊性信息，在面对复杂多变的电气系统工况时，能够依据模糊规则进行合理决策，提高故障预测的准确性；遗传算法作为全局优化算法，能够在较大范围内搜索最优解，对电气系统运行参数进行优化调整，实现系统性能的最优化。通过将这几种算法有机结合，多智能算法融合方法充分发挥了各算法的优势，实现了优势互补^[10]。该方法显著提高了电气系统的自适应能力和鲁棒性，确保电气系统在复杂多变的运行环境下仍能保持稳定、高效运行，为电力行业的安全稳定发展提供了有力支撑。

四、结束语

本文系统探讨了基于智能算法的燃煤火电厂电气运行稳定性提升方法。通过分析影响电气运行稳定性的关键因素，研究了智能算法在故障预测、参数优化、智能监测与预警等方面的应用机制，并提出了一种基于多智能算法融合的电气运行稳定性提升方法。该方法通过数据驱动建模、实时监测与预警、智能优化控制等环节，实现了对电气系统运行状态的精准调控和故障的早期干预。未来，随着智能算法技术的不断发展和完善，基于智能算法的燃煤火电厂电气运行稳定性提升方法将在电力行业中发挥更加重要的作用，为保障电力供应的可靠性和经济性提供有力支撑。

参考文献

[1] 胡伟. 火电厂燃煤输送系统机械维护工艺研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(02): 142-144.
[2] 杨耘艺, 杜金刚, 陈建平, 等. 燃煤火电厂厂侧燃料管理系统自主可控研究及应用 [J]. 自动化博览, 2025, 42(02): 95-98.
[3] 宋艳杰. 火电厂燃煤锅炉 SCR 脱硝高温烟气旁路优化改造 [J]. 能源与节能, 2024, (12): 10-12.
[4] 白小青. 火电厂燃煤技术创新与燃烧效率提升 [J]. 电力设备管理, 2024, (16): 259-261.
[5] 郭勇. 火电厂燃煤输送运行优化系统开发与应用 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(10): 80-84.
[6] 孙跃, 代江洪, 李经涛, 等. 火电厂燃煤检验工作中的质量控制技术研究 [J]. 科技与创新, 2023, (14): 113-115.
[7] 蔡伟博. 燃煤电厂继电保护可靠性影响因素分析研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (21): 16-18.
[8] 何荣强, 王晓凯, 郑重. 一种基于智能算法的燃煤配煤掺烧技术 [J]. 能源与节能, 2019, (10): 2-4+64.
[9] 赵俊杰, 陆海涛, 吴豪, 等. 基于人工智能算法的智能视频识别燃煤火电厂跑冒滴漏 [J]. 神华科技, 2019, 17(09): 40-44.
[10] 罗毅, 马增辉. 火电厂燃煤智能优化系统研究 [J]. 现代电力, 2008, (01): 67-72.

水文地质和工程地质在地质灾害防治工程中的应用

陈子辰

江苏省地矿局第一地质大队，江苏 南京 210041

DOI:10.61369/ETQM.2025070010

摘要： 本文深入探讨水文地质和工程地质在地质灾害防治工程中的关键应用。通过阐述两者的基本原理，分析其在滑坡、泥石流、地面塌陷等常见地质灾害形成中的作用机制，详细介绍相关的勘查技术和防治措施。旨在揭示水文地质和工程地质对地质灾害防治的重要性，为提高地质灾害防治水平提供理论支撑，促进地质灾害防治工程的科学开展。

关键词： 水文地质；工程地质；地质灾害防治；勘查技术；防治措施

Application of Hydrogeology and Engineering Geology in Geological Hazard Prevention and Control Engineering

Chen Zichen

First Geological Brigade of Jiangsu Provincial Geology and Mineral Resources Bureau, Nanjing, Jiangsu 210041

Abstract： This article deeply explores the critical applications of hydrogeology and engineering geology in geological hazard prevention and control engineering. By elucidating the basic principles of both fields, it analyzes their mechanisms of action in the formation of common geological hazards such as landslides, debris flows, and ground collapses, and provides detailed introductions to related exploration techniques and prevention measures. The aim is to reveal the importance of hydrogeology and engineering geology in the prevention and control of geological hazards, provide theoretical support for improving the level of geological hazard prevention and control, and promote the scientific implementation of geological hazard prevention and control engineering.

Keywords： hydrogeology; engineering geology; geological hazard prevention and control; exploration technology; prevention measures

引言

地质灾害对人类生命财产安全和生态环境构成严重威胁。据相关统计，全球每年因地质灾害造成的经济损失高达数十亿美元，伤亡人数众多。在众多影响地质灾害发生发展的因素中，水文地质和工程地质条件起着至关重要的作用。了解和掌握水文地质与工程地质在地质灾害防治工程中的应用，对于有效预防和治理地质灾害、减少灾害损失具有重要意义。

一、水文地质与工程地质概述

（一）水文地质基本概念

水文地质学是研究地下水的形成、分布、运动规律以及与环境相互作用的学科。其主要研究内容包括地下水的补给、径流、排泄条件，地下水位和水量的动态变化，以及地下水的水质特征等。地下水作为一种重要的地质营力，对地质环境有着深刻影响。在岩溶地区，地下水的溶蚀作用可形成地下溶洞、暗河等岩溶地貌，而溶洞顶部的塌陷则可能引发地面塌陷灾害。近年来，随着同位素技术在水文地质学中的应用，能够更精准地追踪地下水的来源和运移路径，为研究地下水的循环规律提供了新的手段。^[1]

（二）工程地质基本概念

工程地质学是研究与工程建设有关的地质问题的学科，主要关注岩土体的工程性质、地质构造、地形地貌等因素对工程建设的影响。岩土体的物理力学性质，如岩石的硬度、抗压强度，土体的抗剪强度、压缩性等，直接关系到工程建筑的稳定性。例如，在修建大型水利工程时，坝址处岩土体的工程地质条件决定了大坝基础的稳定性和防渗性能。随着数值模拟技术的发展，如有限元法、离散元法等，可对复杂地质条件下工程建设过程中的岩土体力学行为进行模拟分析，为工程设计和施工提供更科学的依据。

二、水文地质与工程地质在地质灾害形成中的作用机制

（一）滑坡灾害

1. 水文地质作用

地下水对滑坡的影响主要体现在以下几个方面。首先，地下水位上升会增加岩土体的重度，从而增大下滑力。其次，地下水在岩土体孔隙中产生孔隙水压力，降低了岩土体的有效应力，削弱了抗滑力。再者，地下水的长期浸泡会使岩土体软化，强度降低，如黏土在饱水状态下抗剪强度会大幅下降。据研究，约 70% 的滑坡发生与地下水的活动密切相关。^[2]

2. 工程地质作用

滑坡的发生与斜坡的岩土体结构和地质构造密切相关。岩土体的结构类型，如块状结构、层状结构、碎裂结构等，决定了其稳定性。例如，层状结构的岩土体在层面倾向与斜坡倾向一致时，容易发生顺层滑坡。地质构造中的断层、节理等结构面，为地下水的运移提供了通道，同时也降低了岩土体的整体性和强度，增加了滑坡的可能性。

（二）泥石流灾害

1. 水文地质作用

泥石流的形成需要大量的水源，降水、地表水和地下水都可能成为泥石流的水源。暴雨形成的地表径流迅速汇聚，可激发泥石流的发生。地下水的补给也能增加松散岩土体的含水量，使其处于饱和或过饱和状态，降低颗粒间的摩擦力，从而促使泥石流的形成。在一些山区，由于地下水的长期作用，岩土体变得松散，为泥石流的发生提供了丰富的物质来源。^[3]

2. 工程地质作用

泥石流的形成与流域内的岩土体类型、地形地貌条件密切相关。松散的岩土体，如残积土、坡积土等，容易在水流作用下被冲刷带走，形成泥石流的固体物质。陡峭的地形坡度有利于水流的快速汇聚和势能的积累，为泥石流的启动提供了动力条件。例如，在高山峡谷地区，由于地形落差大，泥石流的发生频率和危害程度往往较高。

（三）地面塌陷灾害

1. 水文地质作用

在岩溶地区，地下水的溶蚀作用是形成地下溶洞的主要原因。随着溶洞的不断扩大，当溶洞顶部的岩土体无法承受上部荷载时，就会发生塌陷。此外，过量开采地下水导致地下水位下降，会引起岩土体的有效应力增加，造成地面沉降，进而引发地面塌陷。据统计，我国因地下水开采引发的地面塌陷问题在多个城市和地区频繁出现。^[4]

2. 工程地质作用

岩土体的结构和性质对地面塌陷的发生有重要影响。在覆盖型岩溶地区，上部的第四系松散土层与下部的岩溶基岩之间的结构关系决定了塌陷的可能性。当松散土层较薄且透水性较好时，在地下水动力条件变化的情况下，容易发生潜蚀作用，导致土洞的形成和发展，最终引发地面塌陷。

三、基于水文地质和工程地质的地质灾害勘查技术

（一）水文地质勘查技术

1. 水文地质测绘

水文地质测绘通过对地表地质现象的观察和分析，研究地下水的露头、泉点、井孔等，确定含水层和隔水层的分布、地下水的补给和排泄条件等。在测绘过程中，利用全球定位系统（GPS）精确确定观测点的位置，结合地质罗盘测量岩层产状，详细记录水文地质现象，为后续的分析提供基础资料。现代水文地质测绘还引入了无人机航测技术，能够快速获取大范围的地形地貌和地质信息，提高测绘效率和精度。^[5]

2. 水文地质物探

物探方法如电阻率法、电磁法等可用于探测地下水位的埋深、含水层的分布范围和厚度等。电阻率法利用岩土体导电性的差异，通过测量地下不同深度的电阻率值，推断含水层和隔水层的位置。电磁法则根据地下介质的电磁特性差异来探测地下地质结构，对于寻找隐伏的岩溶洞穴和富水区域具有较好的效果。近年来，微动勘探技术逐渐应用于水文地质勘查，该技术通过观测天然地面振动信号，反演地下介质的速度结构，可有效探测地下空洞和破碎带。

3. 水文地质钻探

钻探是获取地下岩土体实物样品的重要手段。通过钻探取出岩芯，可直接观察岩土体的结构、构造和含水性等特征。同时，在钻孔中进行抽水试验、注水试验等，能够准确测定含水层的渗透系数、导水系数等水文地质参数，为地下水资源评价和地质灾害分析提供关键数据。随着钻探技术的发展，定向钻探和随钻测井技术得到广泛应用，可在复杂地质条件下获取更准确的地下信息。

（二）工程地质勘查技术

1. 工程地质测绘与调查

工程地质测绘与调查主要针对工程建设区域的地形地貌、岩土体类型、地质构造等进行详细的实地观察和记录。通过对地形地貌的分析，判断斜坡的稳定性、冲沟的发育情况等。对岩土体类型的识别和地质构造的研究，有助于评估工程建设区域的地质稳定性，预测可能出现的地质灾害。现代工程地质测绘采用地理信息系统（GIS）技术，将各种地质信息进行数字化管理和分析，可直观展示地质条件的空间分布特征。^[6]

2. 原位测试技术

原位测试技术包括标准贯入试验、静力触探试验、旁压试验等。标准贯入试验通过将标准贯入器打入土中一定深度，记录锤击数，以此来评价土的工程性质和地基承载力。静力触探试验利用压力装置将探头匀速压入土中，测量探头所受的阻力，从而确定土层的性质和分布。旁压试验则通过对钻孔孔壁施加压力，测量土体的变形和压力关系，获取土体的力学参数。^[7]

3. 室内岩土试验

室内岩土试验对采集的岩土体样品进行物理力学性质测试，包括岩石的密度、含水量、孔隙比、抗剪强度、抗压强度等。通

过这些测试，可定量评价岩土体的工程性能，为工程设计提供准确的参数依据。随着试验设备的不断改进和测试方法的完善，微结构分析技术如扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射（XRD）等被应用于岩土试验，可从微观层面研究岩土体的结构和成分对其工程性质的影响。

四、基于水文地质和工程地质的地质灾害防治措施

（一）滑坡防治措施

1. 排水工程

排水工程是滑坡防治的重要措施之一。通过地表排水系统，如截水沟、排水沟等，将地表水引离滑坡体，减少地表水的入渗。地下排水系统则包括排水孔、排水隧洞等，可降低地下水位，减小孔隙水压力，提高岩土体的抗滑力。在某滑坡治理工程中，通过设置排水孔，地下水位下降了 2 - 3 米，滑坡体的稳定性得到了显著提高。近年来，新型排水材料如塑料盲沟、土工复合排水网等在排水工程中得到广泛应用，这些材料具有排水性能好、耐久性强等优点。^[8]

2. 支挡工程

支挡工程主要采用抗滑桩、挡土墙等结构来阻止滑坡体的滑动。抗滑桩通常设置在滑坡体的下部，通过桩身与岩土体的摩擦力和嵌固力来抵抗下滑力。挡土墙则可根据滑坡的具体情况，采用重力式、悬臂式、扶壁式等不同类型，依靠自身重力或结构的稳定性来支挡滑坡体。

（二）泥石流防治措施

1. 水土保持工程

水土保持工程包括植树造林、种草护坡等措施。植被的根系可以固持土壤，减少土壤侵蚀，降低泥石流的固体物质来源。同时，植被还能截留降水，减缓地表径流速度，减少泥石流的激动力。在一些泥石流多发地区，通过大规模的植树造林，泥石流的发生频率和规模明显降低。近年来，生态护坡技术不断发展，如植被混凝土护坡、土工格室植草护坡等，这些技术在提高边坡稳定性的同时，可有效改善生态环境。^[9]

2. 拦挡工程

拦挡工程如拦砂坝、格栅坝等可拦截泥石流中的固体物质，

降低泥石流的流速和规模。拦砂坝通过坝体的阻挡作用，使泥石流中的泥沙等固体物质沉积在坝前，减小下游泥石流的危害。格栅坝则利用格栅的孔隙，拦截较大的石块，同时让水流和较小颗粒的泥沙通过，起到调节泥石流的作用。现代拦挡工程设计中，引入了智能监测技术，可实时监测坝体的受力和变形情况，提高拦挡工程的安全性和可靠性。

（三）地面塌陷防治措施

1. 合理开采地下水

合理规划和控制地下水开采量，避免地下水位的大幅度下降，是预防地面塌陷的关键措施。建立地下水动态监测系统，实时掌握地下水位的变化情况，根据监测结果调整开采方案。在一些地面塌陷隐患严重的地区，采取了限量开采、回灌等措施，有效地控制了地面塌陷的发展。近年来，地下水管理模型的应用，如数值模拟模型和决策支持模型，可更科学地制定地下水开采计划，优化地下水开采布局。^[10]

2. 充填加固工程

对于已形成的岩溶洞穴和土洞，可采用充填加固的方法进行处理。向洞穴内灌注水泥浆、混凝土等材料，填充洞穴空间，提高岩土体的承载能力。在进行充填加固时，需根据洞穴的大小、形状和地质条件选择合适的充填材料和工艺，确保加固效果。近年来，新型充填材料如高水速凝材料、泡沫混凝土等在地面塌陷治理中得到应用，这些材料具有流动性好、强度增长快等优点。

五、结束语

水文地质和工程地质在地质灾害防治工程中具有不可替代的重要作用。通过深入研究水文地质和工程地质条件在地质灾害形成中的作用机制，采用先进的勘查技术准确把握地质灾害隐患，实施针对性的防治措施，能够有效降低地质灾害的发生风险，减轻灾害损失。在未来的地质灾害防治工作中，应进一步加强水文地质和工程地质的研究与应用，不断完善勘查技术和防治措施，提高地质灾害防治的科学化、精准化水平，为保障人民生命财产安全和生态环境稳定做出更大贡献。同时，随着科技的不断进步，应加强多学科交叉融合，探索新的理论和技术方法，以应对日益复杂的地质灾害防治问题。

参考文献

- [1] 王国栋. 水文地质和工程地质在地质灾害防治中的应用策略研究 [J]. 中国宽带, 2019(005):5-8.
- [2] 李风增, 谢宜欣. 浅谈水文地质在工程地质勘察中的重要性 [J]. 居舍, 2020(1):1.09.
- [3] 李志. 矿山地质施工中水文地质灾害防治技术研究 [J]. 工程建设 (2630-5283), 2022(06):05.
- [4] 周治民. 水工环地质在地质灾害活动中的应用策略 [J]. 世界有色金属, 2022 (03) : 254, 258.
- [5] 尚继龙. 论当前水工环地质勘察中的技术及应用范围 [J]. 黑龙江科技信息, 2023 (36) : 40.
- [6] 宋宝业. 水工环地质勘察及遥感技术在地质工作中的实践 [J]. 世界有色金属, 2022 (04) : 194-195.
- [7] 裴生祥. 水文地质在地质灾害防治中的应用研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(10):105-107.
- [8] 于洋. 地质勘察中的水文地质危害分析及对策 [J]. 中国金属通报, 2024, (08):137-139.
- [9] 薛灵. 工程地质勘察中水文地质问题的危害浅析 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(02):41-43+47.
- [10] 马冰, 巴黎, 陈胜. 水文地质在矿山地质灾害防治方面的应用 [J]. 世界有色金属, 2023, (19):136-138.

风力发电工程质量监督技术研究与应用

李舸¹, 赵德贤¹, 马建格¹, 陈晓毅¹, 仲骐²

1. 玉门油田监督中心, 甘肃 酒泉 735000

2. 玉门油田公共事务中心, 甘肃 酒泉 735000

DOI:10.61369/ETQM.2025070013

摘要 : 本论文旨在探讨风力发电工程质量监督技术的应用, 以玉门油田红柳泉风电项目为例, 详细分析了该项目在工程实施过程中所面临的各类技术性挑战及其对应的质量监督策略。通过对风力发电的基本原理及建设流程的概述, 为后续的质量监督技术研究提供理论基础; 结合质量监督的概念与作用, 深入探讨了风力发电工程中常见的质量问题, 并详细分析了事故成因, 以识别质量监督环节的薄弱点。依据红柳泉风电项目的具体情况, 设计了一个完善的质量监督计划, 实施了系统的质量检查流程, 并通过数据收集与处理, 对监督效果进行了评估与总结。

关键词 : 风力发电; 工程质量; 监督技术

Research and Application of Quality Supervision Technology for Wind Power Generation Projects

Li Ge¹, Zhao Dexian¹, Ma Jiange¹, Chen Xiaoyi¹, Zhong Qi²

1. Supervision Center of Yumen Oilfield, Jiuquan, Gansu 735000

2. Public Affairs Centre of Yumen Oilfield, Jiuquan, Gansu 735000

Abstract : This paper aims to explore the application of quality supervision technology in wind power generation projects, using the Hongliuquan Wind Power Project in Yumen Oilfield as a case study. It provides a detailed analysis of the various technical challenges faced during project implementation and the corresponding quality supervision strategies. By outlining the basic principles and construction processes of wind power generation, it lays a theoretical foundation for subsequent research on quality supervision technologies. Combining the concepts and functions of quality supervision, it delves into common quality issues in wind power generation projects and thoroughly analyzes the causes of accidents to identify weak points in the quality supervision process. Based on the specific circumstances of the Hongliuquan Wind Power Project, a comprehensive quality supervision plan was designed, and a systematic quality inspection process was implemented. Through data collection and analysis, the effectiveness of the supervision was evaluated and summarized.

Keywords : wind power generation; engineering quality; supervision technology

引言

近年来, 随着全球对可再生能源关注度的提升, 风力发电作为重要的可再生能源之一, 逐渐成为研究的焦点。其中, 风力发电工程的质量监督技术也愈加受到重视, 旨在确保风电项目的可靠性与安全性。在国内, 风力发电质量监督的相关研究主要集中于质检标准的制定和实施策略的优化。例如, 国内有学者提出了基于“质量管理体系(QMS)”的风电工程监控方法, 通过建立科学的项目管理流程来提升工程质量。然而, 由于风电行业的不断发展, 质量监督的体系基础仍相对薄弱, 很多企业在具体实施中存在缺乏系统性的管理与监控手段的问题, 导致项目质量不一, 部分指标未达到行业标准。国际上, 针对风电项目的质量监控技术研究始于建国初期, 涌现出一系列先进的监控技术与评估指标。然而, 许多研究往往忽视了风场的具体环境因素以及地理特征对工程质量的重要影响, 导致在实际应用中存在一定的局限性。因此, 现阶段的研究多集中于理论探讨, 缺乏实际案例的系统分析。

一、风力发电工程质量监督的重要性

（一）质量监督的概念与作用

在风力发电工程的实现过程中，质量监督不可或缺，它不仅关系到工程的安全性、经济性与环保性，更是评估工程整体性能的重要一环。质量监督，作为工程管理中的一种系统性活动，是对工程建设过程中各类活动的全面监控与评估，旨在确保项目按照预定的技术标准、行政规范和社会要求进行。具体而言，其作用不仅限于技术层面，更涵盖了管理、经济与环境多维指标的综合治理。

在风力发电项目中，质量监督的重要性体现在多个方面。一方面，通过对设计、施工和运营各阶段的持续监测，能够及时识别出可能影响工程质量的不利因素。例如，在玉门油田红柳泉风电项目中，针对风机基础的施工过程，因气候变化和地质条件的不同，监理方通过细致的现场检测及数据采集，提前预防了基础不均匀沉降对后续施工的影响，成功保障了项目进度与结构安全^[1]。这一实例体现了质量监督在提高工程整体安全性与可靠性方面的核心作用。

（二）风力发电工程质量问题分析

风力发电工程在推动可持续发展、实现能源转型方面日益发挥重要作用。然而，随着项目规模的扩大和技术的复杂化，工程质量问题频频显现，严重影响了风电工程的经济性与安全性。基于多个相继发生的质量问题进行深入分析，不仅有助于揭示潜在的风险因素，还能为后续质量监督机制的完善提供重要参考。以某典型案例为例，某风力发电项目在施工过程中因未按照《施工规范（Construction Code）》要求进行基础施工，致使风机基础不均匀沉降，最终导致机组发生倾斜。这一事故的发生，不仅导致风机的设备损坏，造成直接经济损失超过200万元，而且由于机组停运，进一步影响了整个电网的电力稳定性，违约用户的用电需求，间接形成了更大范围的经济损失。问题的根本原因在于项目管理中质量监督机制的缺失与不完善。具体而言，未能有效执行《工程质量管理条例（Quality Management Regulations）》中的监查程序，导致施工阶段缺乏必要的质量检验和记录。而在此类工程中，若未能充分利用品质管理工具如“失效模式与影响分析（FMEA）”，可能无法及时识别出潜在风险，从而对质量控制形成挑战。同时，技术人员的素质及培训程度亦显得尤为关键，缺乏专业知识对相关质量标准的理解和执行，极易导致施工过程中发生严重失误。

二、风力发电工程质量监督技术

在风力发电工程中，质量监督技术的应用至关重要，其有效性直接关系到整个项目的经济效益和环境效益。基于“技术评估矩阵（Technical Assessment Matrix）”的框架，我们能够有效地对各项质量监督技术进行评估和对比，以便为风电项目的实施提供科学依据。

当前，风力发电工程常用的质量监督技术主要包括“在线监测

技术（Online Monitoring Technology）”与“数据分析技术（Data Analysis Technology）”等。这些技术各具特色，适用于不同的工程阶段和质量管理需求。例如，在线监测技术通过传感器实时采集风机运行状态的数据，能够快速发现潜在故障，提供及时预警，从而减少因设备故障带来的经济损失。该技术还能通过长时间数据积累，进行趋势分析，预测设备的维护需求，优化保养策略。

三、红柳泉风电项目质量监督实施

（一）监督计划的制定

在红柳泉风电项目的质量监督实施过程中，监督计划的制定至关重要，因其直接影响到项目整个生命周期中的质量控制效果及最终交付成果。制定监督计划需要明确项目的主要目标与关键任务，尤其是在工程施工、设备安装和系统调试等阶段，必须细化出各阶段的监督重点，以确保符合《风力发电工程质量管理规范》（GB/T 50700-2012）的相关要求。在此基础上，图文并茂的Gantt chart图（甘特图）被广泛应用于监督计划的可视化，以清晰展示任务的时间进度及其相互依赖关系，从而提高监督的系统性和整体效率。

在监督计划中，里程碑计划作为一种有效的管理工具，能够有效地划分重要的验收节点和关键运行阶段。这些里程碑不仅用于项目进展的阶段性评估，更是质量控制的重要依据。例如，项目在进行关键设备的安装之前，会设立一个里程碑，要求完成设备验收、技术审查及相关记录的审核，这一过程确保所有输入材料及设备均符合国家标准和项目具体要求，进而为下一步的施工提供了有力保障。

（二）质量检查的实施流程

在红柳泉风电项目的质量监督中，质量检查的实施流程至关重要。这一流程的构建旨在确保每一个环节的质量管理符合《风力发电工程质量监督标准》，从而有效提升项目整体的运行效率和安全性。一个系统化的检查流程不仅可以使各项质量指标得以量化和落实，还能够增强监督部门与建设单位之间的相互沟通与协调。

质量检查的实施应遵循明确的步骤。初步的阶段包括对项目的整体规划和设计文件的审核，这一环节能够确保设计阶段所提出的技术方案符合国家标准和行业最佳实践。此时，运用“流程图（Flow chart）”工具来展示各个设计变更的审批流程将是非常有效的，这不仅能清晰明确责任分工，还能优化审批效率。

接下来，实地检查的阶段是质量监督的关键环节。此阶段涵盖了对施工过程的各个环节的监控，尤其是在关键节点，如土建工程和设备安装阶段，需使用“检查清单（Checklist）”的形式，逐项核查每一技术指标。这种方式能够确保每次施工都按照设计要求进行，及时发现潜在的质量隐患，从而减少后期返工的可能性。例如，在风机基础浇筑阶段，通过检查混凝土的配比、强度及养护情况等，可以有效防止因基础质量不足而致使风机的安全性下降。

（三）监督技术的应用分析

在红柳泉风电项目的质量监督实施中，各种先进的监督技术得以综合应用，以确保工程质量的高度可靠性和持久性。为实现这一目标，选用了一系列适合现场环境与项目特性的监督技术，以动态监控和数据分析为基础，形成系统化的质量管理框架。

通过应用“无损检测（NDT）”等技术手段，对关键结构件如风机基础及塔筒的质量进行实时监测。这些技术能够在不损害材料整体性的前提下，精准识别焊接缺陷、材料致密度等问题，大幅度降低了因人为因素而导致的质量隐患。因此，无损检测不仅保障了风电项目的结构安全，还为后续的运行维护提供了重要数据支持。

采纳“结构健康监测（SHM）”系统，对风电机组的运行状态进行全面监测和诊断。该系统通过安装传感器，实时收集风机振动、温度、负荷等多维度信息，基于数据挖掘技术进行深入分析，揭示潜在的工程故障点和风电机组的性能衰退趋势。通过早期预警机制，该技术有效降低了设备故障率，提高了项目整体的运维效率，这在其他同类项目中亦有诸多成功案例支持。

四、项目施工现场管理及存在的问题

（一）风力发电工程建设项目施工现场管理的方法

1. 加强施工过程的质量控制

加强质量控制，严格检查监督，保证施工质量，对关键工序进行监督检查，对工程进行质量测评，严格审核，选择质量优良的发电设备，确保风力发电安全和可靠运行。

2. 保证施工现场的环境安全

保证现场施工的环境安全，有效协调各个施工单位之间的关系，采用现场协调的方式对施工现场进行科学管理，建立安全施工管理目标，杜绝人身伤亡事故，避免出现设备质量问题，严格控制施工人员的不安全行为，提升施工人员的安全意识，严格监察施工人员纠正习惯性违章；检查设备材料，使设备保持良好的性能，使其操作可靠灵敏；认真检查各类防护与保险装置，使施工人员拥有一个安全的作业场所。

3. 建立科学的施工制度

坚持以人为本的原则，注重安全，以预防为主；建立科学的施工制度，严格按照制度执行，要求承包单位实施安全责任制，施工过程中采取安全防护，避免任何危险发生。在施工现场，实行封闭管理，非施工人员一律禁止进入，任何有关国家企业规定办理的作业，必须严格按照规定办理批准手续，对施工人员加强培训，培训合格以后，才能上岗作业，加强安全意识教育，保持警惕，以防事故发生，施工中一旦出现事故，立即停止作业，在保证安全的情况下，采取紧急措施，杜绝人员伤亡和减

少事故的损失，落实安全责任制，奖罚分明。严格按照施工安全纪律进行施工，一旦发现违章指挥和违章作业，立即责令停止，避免出现任何意外伤害，出现事故，勤于总结调查出现事故的原因。吸取教训，提出防范措施，避免重蹈覆辙。

（二）风力发电场开发建设管理中存在的问题

1. 合规性问题

建设风力发电厂，首先要批办手续，由于手续繁多，办理不易，往往要经过一个很长的办理周期，手续中涉及到诸多专题，比如土地规划，林业建设环保等，风电项目建设周期比较短暂，项目完工后存在合规性风险。

2. 开发建设管理粗放

风电行业飞速发展是一个不可逆转的趋势。在国外，风力发电行业早已经高速发展，我国起步较晚，但发展极其迅速。风电行业，虽然也存在一些不确定因素，但发展空间巨大，发展前景被普遍看好，大量资本纷纷涌入风电行业，正是由于发展短的原因，我国的风力发电企业在制度体系方面缺乏完善，在管理水平方面与国外存在很大的差距，项目设计深度不够，管理制度也不够严谨，建设施工流程无序、混乱，严重缺乏管理经验，管理人员在安全问题方面麻痹大意，疏于管理，一味地追求工程进度，双眼只盯着效益，造成施工质量问题多，出现安全问题之后，又不能及时解决，从而造成工程成本的急剧增加。

3. 施工建设现场管理及协调存在难度

风电场建设工程现场，几乎全部是开放式施工，现场区域广阔。工程在建设当中，各个施工单位对工程进度的见解各异，对工程进展认识不同，在施工中各个环节需要有效衔接，但由于各施工单位有不同的统筹考量方法，所以衔接有效性差，协调起来有一定的难度，耗时耗力，从而给风电项目建设的进度造成一定的影响，有时问题难以解决，就影响到了施工计划的有序进行。

五、结束语

通过对玉门油田红柳泉风电项目的风力发电工程质量监督技术的深入研究与应用，确认了质量监督在提升项目建设质量与运行效率中的关键作用。项目实施过程中识别的主要质量问题，如材料缺陷、施工不规范等，通过应用现代质量监督技术得到了显著改善，质量问题发生率降低了20%，同时建设周期缩短了15%，后期运行效率提升了25%。展望未来，建议继续在风力发电项目中推广应用新型质量监督技术，结合实时监控与数据分析，以实现更高效的质量管理目标，保障风力发电行业的可持续发展。这一研究不仅为红柳泉风电项目提供了实践依据和优化方案，也为整个风力发电行业的质量监督技术进步和绿色能源的可持续发展贡献了重要力量。

参考文献

[1] 胡伟. 工程造价管理在风力发电项目中的应用探析[J]. 工程技术研究, 2024, 8(20): 126-128.

[2] 张建, 王玉龙, 吴志宏, 金晶, 刘柯, 高阳. 风力发电机吊装关键技术研究及其应用[J]. 水电与新能源, 2023, 37(03): 60-63.

水文地球化学特征在地下水污染源识别中的应用

王金金

河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450014

DOI:10.61369/ETQM.2025070020

摘要： 地下水污染对生态环境和人类健康构成严重威胁，精准识别污染源是实施有效治理的前提。水文地球化学特征包含着丰富的污染源信息，通过对水体化学组分、同位素等特征的深入剖析，能够建立可靠的污染识别模型，进而追踪污染物迁移转化规律。利用该特征识别地下水污染源，为地下水污染防控提供科学且有效的依据，助力实现地下水环境精准治理与生态修复，对保障地下水资源安全意义深远。

关键词： 水文地球化学；地下水污染；污染源识别；化学组分；同位素

Application of Hydrogeochemical Characteristics in Groundwater Pollution Source Identification

Wang Jinjin

Geological Hazard Prevention and Control Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450014

Abstract： Groundwater pollution poses a serious threat to the ecological environment and human health, and accurate identification of pollution sources is the premise of effective governance. Hydrogeochemical characteristics contain abundant information about pollution sources. Through in-depth analysis of chemical components and isotopes of water, a reliable pollution identification model can be established, and then the migration and transformation law of pollutants can be tracked. Using this feature to identify groundwater pollution sources provides a scientific and effective basis for the prevention and control of groundwater pollution, helps to achieve precise management and ecological restoration of groundwater environment, and has far-reaching significance for ensuring the safety of groundwater resources.

Keywords： hydrogeochemistry; groundwater pollution; pollution source identification; chemical composition; isotope

引言

地下水作为重要的水资源，在维持生态平衡和保障人类用水方面发挥着关键作用。然而，随着工业化、城镇化进程加快，地下水污染问题愈发严峻。水文地球化学特征与地下水污染过程紧密相连，其蕴含的化学和同位素信息如同污染源的“独特指纹”。深入研究并应用这些特征，有助于突破现有技术瓶颈，提升污染源识别的精准度，为地下水污染防治提供强有力的技术支撑。

一、污染特征关联

地下水污染与水文地球化学特征之间存在着紧密且复杂的联系。不同类型的污染源排放的污染物进入地下水系统后，会打破原有水体的化学平衡，改变其化学组成，从而形成具有特异性的化学特征。工业活动排放的废水中，常含有大量重金属元素如铅、镉、汞等，这些污染物进入地下水后，会使相应重金属元素的含量显著升高，同时改变水体中阴阳离子的比例关系。生活污水则富含氮、磷等营养物质，会导致地下水中氨氮、磷酸盐等含

量增加，引发水体富营养化问题。农业生产中大量使用的农药、化肥，其所含的有机化合物和无机离子也会渗入地下水中，影响地下水的化学性质。

稳定同位素和放射性同位素特征在地下水污染源识别领域发挥着至关重要的作用，具有不可忽视的价值。稳定同位素中的氢、氧同位素，其具体组成极易受到各类环境因素以及物质来源的显著影响。举例来说，不同来源的水，诸如大气降水、地表水，或是来自深层岩石孔隙中的水源，它们各自拥有独特的氢氧同位素比值。通过运用先进的质谱分析技术，精准测定地下水中

氢氧同位素的组成，研究人员便能够抽丝剥茧，追溯水的起源，明确其究竟是源于大气降水历经地表径流与入渗形成，还是与地表水存在水力联系，亦或是其他特殊水源补给所致。

放射性同位素如碳 - 14、氚等，在该领域也有独特应用。碳 - 14 半衰期较长，可用于测定年代较为久远的地下水年龄；氚则因半衰期相对较短，更适用于测定较新的地下水年龄。借助这些放射性同位素，我们能够清晰了解污染物在地下水中的滞留时间和迁移历史。当污染物进入地下水系统时，其携带的同位素特征会与地下水原有的同位素特征相互作用，产生一系列复杂的物理、化学变化。污染物中的特定同位素可能会参与化学反应，改变地下水原有同位素的相对丰度。

地下水所处的地质环境也会在水文地球化学特征产生影响。不同的岩石类型、土壤性质会与地下水发生物质交换，改变地下水的化学组成。在碳酸盐岩地区，地下水与岩石发生溶蚀作用，会使水中的钙离子、碳酸氢根离子含量升高；在富含硫化物的地区，地下水可能会因硫化物氧化而呈现酸性，并含有较高浓度的硫酸根离子。因此，在分析水文地球化学特征与地下水污染关系时，需要综合考虑污染源排放、同位素特征以及地质环境等多方面因素，才能准确识别污染源。

二、识别技术方法

水化学分析是识别地下水污染源的基础且重要的技术方法。通过对地下水中各类阴阳离子、微量元素以及溶解气体等进行精确测定，能够获取地下水的化学组成信息。常见的阴阳离子分析包括氯离子、硫酸根离子、钠离子、钙离子等，这些离子的含量和比例关系能够反映地下水的水化学类型，如氯化物型水、硫酸盐型水等。微量元素分析则可以检测到一些具有指示意义的元素，如重金属元素和稀土元素等。通过绘制水化学类型图、离子比值图等，能够直观地展示地下水化学特征的空间分布差异，从而初步判断污染源的类型和可能位置。若某区域地下水中氯离子含量异常高，且与钠离子比值呈现特定规律，可能暗示存在生活污水或工业废水污染。

同位素分析技术在地下水污染源识别中具有独特优势。稳定同位素分析主要包括氢、氧、碳、硫等元素的同位素分析。氢氧同位素比值可用于判断地下水的补给来源和循环过程，若某地区地下水中氢氧同位素比值偏离当地大气降水线，可能存在不同来源水的混合，结合其他化学特征，有助于识别污染源。碳同位素分析可用于区分有机污染物的来源，不同类型的有机污染物具有不同的碳同位素组成，通过分析地下水中有有机碳的同位素特征，能够判断其是来源于化石燃料、生物降解还是其他来源。放射性同位素分析中，氚常用于确定地下水的现代补给量，碳 - 14 可用于估算地下水的年龄，通过分析放射性同位素的含量变化，能够了解污染物在地下水中的迁移时间和历史，为污染源识别提供时间维度的信息。

多元统计分析方法能够对大量复杂的水文地球化学数据进行有效处理。主成分分析通过对原始数据进行降维处理，提取出最

能反映数据特征的主成分，从而简化数据结构，揭示数据间的潜在关系。聚类分析则根据数据的相似性，将地下水样本划分为不同的类别，同一类别的样本可能具有相似的污染源或污染过程。因子分析可以识别出影响地下水化学特征的主要因素，通过对因子得分的分析，能够确定每个样本受不同因素影响的程度，进而推断污染源。这些多元统计方法与水化学分析、同位素分析相结合，能够更全面、准确地识别地下水污染源。

三、数据处理分析

原始水文地球化学数据的质量直接影响污染源识别结果的准确性，因此数据质量控制是数据处理分析的首要环节。在数据采集过程中，严格遵循采样规范，确保样品的代表性和真实性。对采集的样品进行实验室分析时，采用标准物质进行质量控制，定期对分析仪器进行校准和维护，保证分析结果的准确性和可靠性。对于异常数据，通过重复采样分析、检查采样和分析过程等方式，判断数据异常的原因，若为错误数据则予以剔除；若为真实反映特殊地质或污染情况的数据，则进行合理的标注和说明。对数据进行完整性检查，确保所有必要的参数都已测量和记录。

数学模型在水文地球化学数据处理分析中发挥着重要作用。质量守恒模型基于物质守恒原理，能够描述污染物在地下水中的迁移转化过程，通过建立质量守恒方程，结合初始条件和边界条件，可求解污染物在不同时间和空间的浓度分布。反应 - 传输模型则进一步考虑了污染物与地下水、岩石之间的化学反应，如吸附、解吸、沉淀、溶解等过程，更真实地模拟污染物在地下水中的行为。通过将实际监测数据代入模型进行参数率定和验证，不断调整模型参数，使模型能够更好地拟合实际情况，从而提高模型预测的准确性。这些模型不仅可以用于解释已有的污染现象，还能够预测污染物的扩散趋势，为污染防治提供决策支持。

地理信息系统（GIS）技术为水文地球化学数据的可视化和空间分析提供了强大工具。将地下水化学组分、同位素数据以及其他相关信息与空间坐标相结合，在 GIS 平台上生成专题地图，如化学组分浓度分布图、同位素比值等值线图。通过地图展示，可以直观地观察到污染物的空间分布特征，发现污染浓度高值区和异常区域。利用 GIS 的空间分析功能，如空间插值、缓冲区分析、叠置分析等，能够进一步分析污染物分布与地质、地形、土地利用等因素之间的关系，挖掘潜在的污染源信息。GIS 还支持多源数据的集成和管理，方便对不同类型数据进行综合分析，提高污染源识别的效率和准确性。

四、模型构建应用

构建地下水污染源识别模型需充分考虑不同地区的地质、水文地质条件和污染源特点。在地质条件简单、含水层均质的地区，可采用相对简单的解析模型，如一维或二维的对流 - 扩散模型。这类模型基于质量守恒和能量守恒原理，通过数学方程描述污染物在地下水中的对流和扩散过程，能够快速求解污染物的

浓度分布。然而,在实际复杂地质条件下,如存在多层含水层、断层、裂隙等,解析模型的适用性受到限制,此时需运用数值模型,如有限差分法、有限元法建立的数值模型。数值模型能够更灵活地处理复杂的边界条件和地质结构,通过将研究区域离散化,对每个离散单元进行计算,从而更准确地模拟污染物的迁移转化过程。

模型构建过程中,参数的确定至关重要。模型参数包括水文地质参数,如渗透系数、弥散度等,以及化学反应参数,如吸附系数、反应速率常数等。这些参数的获取可通过现场试验、室内实验以及参考已有研究成果等方式。现场试验如抽水试验、弥散试验能够直接获取研究区域的水文地质参数,但成本较高、耗时较长。室内实验则可在实验室条件下模拟地下水环境,测定化学反应参数。还可利用已有的地质、水文地质资料,结合经验公式估算模型参数。在确定参数后,通过与实际监测数据对比,对模型进行校准和验证,调整参数值,使模型模拟结果与实际情况尽可能吻合,确保模型的准确性和可靠性。

将构建好的模型应用于实际地下水污染源识别案例,能够为污染治理提供科学依据。通过模型预测污染物的扩散范围和浓度变化趋势,可指导布设监测井的位置和数量,优化监测方案。根据模型识别出的污染源位置和强度,制定针对性的污染防控措施,如封堵污染源、设置防渗墙、开展原位修复等。在污染治理过程中,持续利用模型对治理效果进行评估和预测,根据实际情况及时调整治理方案,确保地下水污染得到有效控制。模型的应用不仅提高了污染源识别的效率和准确性,还为地下水污染治理提供了量化的决策支持。

五、实践效果评估

评估水文地球化学特征应用于地下水污染源识别的实践效果,需从多个维度进行综合考量。在识别效率方面,与传统的污染源识别方法,如现场调查法、示踪剂法相比,基于水文地球化学特征的识别方法能够快速处理大量数据,通过建立模型和数据

分析,在较短时间内初步确定污染源的可能范围和类型。传统现场调查法需耗费大量人力、物力进行实地勘查,且在复杂地形和隐蔽污染源情况下,调查难度大、效率低;示踪剂法虽然准确性较高,但存在示踪剂投放和监测成本高、对环境可能产生二次污染等问题。水文地球化学方法在提高识别效率的降低了人力和经济成本。

准确性评估是实践效果评估的关键环节。通过将识别结果与实际污染源信息进行对比,验证方法的可靠性。在实际应用中,可结合后续的污染治理措施实施效果进行反向验证。若根据识别结果采取的治理措施能够有效降低地下水污染浓度,改善水质,则说明识别结果具有较高的准确性。通过在不同地区、不同类型污染源的案例中应用该方法,统计识别结果的准确率,分析影响准确性的因素,如数据质量、模型适用性、地质条件复杂性等,总结经验教训,不断改进方法,提高识别准确性。

适用性和稳定性评估主要考察该方法在不同地质、水文地质条件和污染源类型下的应用效果。在不同地质条件,如山区、平原、岩溶地区等,以及不同污染源类型,如工业污染、农业污染、生活污染等场景中应用该方法,分析识别结果的差异和可靠性。若在多种条件下都能稳定、准确地识别污染源,则说明该方法具有良好的适用性和稳定性。评估方法在长期应用过程中的稳定性,随着时间推移,地下水资源环境可能发生变化,需考察方法是否能适应这些变化,持续有效识别污染源,为地下水污染防治提供稳定可靠的技术支持。

六、结束语

水文地球化学特征凭借其与地下水污染过程的紧密联系,在污染源识别领域发挥着不可替代的作用。未来,随着高分辨率分析技术、大数据与人工智能的深度融合,该领域将向智能化、精细化方向迈进。构建跨区域、多尺度的综合识别体系,加强多学科协同研究,将为地下水污染防治提供更高效、精准的技术保障,推动地下水生态环境的可持续发展。

参考文献

- [1]王焰新.水文地球化学[J].地学前缘,2014,21(3):1-14.
- [2]张光辉,严明疆,刘春华等.中国地下水污染研究现状与展望[J].地球学报,2017,38(3):263-276.
- [3]郭华明,沈照理,朱宛华等.地下水污染的水文地球化学研究进展[J].地学前缘,2004,11(1):161-166.
- [4]刘存富,王文科,杨泽元等.水文地球化学方法在地下水污染源识别中的应用[J].干旱区资源与环境,2012,26(11):175-180.
- [5]陈宗宇,聂振龙,张兆吉等.地下水污染调查评价方法研究进展[J].地质通报,2010,29(10):1455-1463.
- [6]滕彦国,倪师军,张成江等.地下水污染评价方法研究[J].物探与化探,2007,31(1):85-90.
- [7]卢文喜,杨悦,李平.地下水污染数值模拟研究进展[J].水资源保护,2012,28(3):1-6.
- [8]李义曼,韩占涛,王兆馨等.多元统计分析在地下水水质评价中的应用[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):136-143.
- [9]张发旺,侯新伟,韩占涛等.地下水污染同位素示踪研究进展[J].地球学报,2011,32(3):265-273.
- [10]武强,孙亚军,董东林等.中国煤矿区地下水污染现状及防治对策[J].煤炭学报,2013,38(1):1-13.

配网电气维修中的故障诊断技术应用研究

黎瀚龙

清远市新能电力工程有限公司，广东 清远 511500

DOI:10.61369/ETQM.2025070021

摘 要： 配网运行中故障频发对供电连续性构成直接威胁，文章面向电气维修场景提出了故障诊断技术方案，完整设计了信号采集结构以获取多维电气量参数，构建特征提取方法提炼短路、接地及接触不良与绝缘老化等故障的诊断量，建立神经网络模型实现故障类型识别与位置判断。工程验证环节基于实际配网部署环境开展判别效果测试，诊断流程在准确性与响应效率方面展现良好性能，具备广泛应用价值与潜力。

关 键 词： 配网电气维修；故障诊断；信号采集；特征提取

Research on the Application of Fault Diagnosis Technology in Distribution Network Electrical Maintenance

Li Hanlong

Qingyuan Xinneng Power Engineering Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract： Frequent failures in the operation of the distribution network pose a direct threat to the continuity of power supply. This article proposes a fault diagnosis technology solution for electrical maintenance scenarios, designs a complete signal acquisition structure to obtain multi-dimensional electrical parameters, and constructs a feature extraction method to extract diagnostic quantities for faults such as short circuits, grounding, poor contact, and insulation aging. A neural network model is established to achieve fault type identification and location judgment. The engineering verification process is based on the actual deployment environment of the distribution network to carry out discrimination effect testing. The diagnosis process demonstrates good performance in terms of accuracy and response efficiency, and has wide application value and potential.

Keywords： distribution network electrical maintenance; fault diagnosis; signal acquisition; feature extraction

引言

配网电气维修是保障电能稳定输送的关键环节，其运行状态直接关系到城市配电系统的供电质量与设备安全。配电自动化水平提升和负荷结构复杂化发展趋势持续加剧，使得电气设备在长期运行中表现出频繁的非线性扰动特征与隐蔽性故障风险，检修方式在多变量电气扰动识别与响应效率方面已难满足现阶段运行要求，现需依托高频信号处理与智能化识别手段提升故障状态感知与精度判别能力，以满足配网运行环境中复杂工况下的需求。

一、配网电气维修中的故障机理分析

（一）短路与接地故障特征分析

短路与接地故障在配网运行中表现为电流突升与母线电压骤降，常由绝缘破损、小动物侵入或外力引起，故障初态下的低压侧线路对地电势快速变化，保护动作响应时间约为0.05秒^[1]。短路时线路阻抗趋近零，电流幅值通常超过稳态负荷电流3倍，易导致开关触点过热与弧光碳化残留^[2]。接地故障以零序电流偏移为

主特征，环网结构中可能产生接地电流循环，引起护套感应电压升高。

（二）接触不良故障表现规律

接触不良多出现在电缆终端、刀闸及馈线接头部位，主要由接触电阻升高引起局部持续发热。热致膨胀和负载扰动共同作用下，接触面缩小形成熔接与周期性接触重构^[3]。该类故障表现为负荷波动与温升变化的非线性关联，节点温度常高于85℃，红外热斑呈扩散趋势。相电流抖动频率约为2~6Hz，低频波动可持续

存在而不触发保护，致使热老化与电弧击穿风险增大^[4]。

（三）绝缘老化与击穿诱发因素

绝缘老化是配网电缆常见的渐变失效，受电应力、热应力及环境条件共同影响，聚乙烯类绝缘材料在长期运行中产生微裂纹与分子链断裂，导致性能退化。击穿前常见局部放电频率上升与泄漏电流增大，绝缘电阻可下降至 $2\text{M}\Omega$ ^[5]。潮湿、腐蚀或接地不良会加快介质常数与损耗角正切变化，引发局放扩展。部分电缆电容下降幅度达 200nF ，降低局放信号识别灵敏度。击穿过程伴随高频脉冲与能量释放，常发生于应力锥、接头或端头薄弱处，具有明显的电场畸变特征^[6]。

二、配网电气维修中故障诊断方法设计

（一）信号采集方案设计

信号采集是配网电气维修中故障诊断的起点，需对故障相关电气参量的高精度和高时效的获取。配网设备节点中部署分布式电参数传感器，用于实时采集母线电流、相电压、零序电流和漏电流及导体接点温度，采集位置有进出线开关柜、馈线开关，以及环网柜和接地变压器端口。数据采样以高频同步机制完成，采用 μs 级时间戳绑定，保证事件触发类故障（如短路、电弧）在信号层面完整保留动态特征^[7]。

电流与电压信号的实时采样可以用滑动窗口机制，窗口长度依据采样频率设为200至400个采样点， 10kHz 频率下能覆盖1至2个工频周期，其具备识别电流突变与瞬态干扰的时域分辨率。在零序信号与谐波成分提取方面，使用FFT算法获取频域响应特征，便于后续与接地、接触不良故障特征相匹配，定义每一时间段内电压有效值 U_{rms} 计算公式如下：

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2}$$

其中， u_i 为第 i 个采样点的瞬时电压值， N 为滑动窗口内总采样数，该公式用于构建母线电压稳定性评估序列，可实时判断是否存在低压脱扣和电压塌陷等突发事件。数据采集模块统一接入本地边缘计算节点，拥有信号预处理与传输路径压缩能力来减少后端模型的冗余计算压力，并增强低延迟响应能力^[8]。关键电缆段还可配置红外热像传感器或电缆护套电流检测装置，用于热异常及局部漏电特征的采集补充。

（二）特征参数提取方法

完成信号的实时采集与缓存处理后，需对原始多维电参量数据进行特征提取，来形成结构化诊断向量。特征参数设计遵循“诊断有效性优先”原则，覆盖时域、频域与统计特征三个维度，主要提取量有电流突变幅值、零序电流偏移率、电压畸变率以及温升梯度与频域谐波能量分布等^[9]。短路与接地类故障伴随瞬时电流快速拉升，采用电流突变差值计算表达如下：

$$\Delta I_t = |I_t - I_{t-\Delta t}|$$

其中， I_t 表示当前采样周期内的电流有效值， $I_{t-\Delta t}$ 表示上一

周期的电流有效值，差值 ΔI_t 可作为突变类故障触发判据。在采样频率为 10kHz 时，该指标对短路、接地的检测响应时延可控制在 1ms 内^[10]。

接触不良类故障特征表现为电流微扰与周期性发热，提取其电压-电流相关性曲线的残差波动值、相电流三相不平衡度与接点温升趋势作为主要识别特征。温升斑点梯度从红外图像中提取热场轮廓，形成平均温升率指标作为输入特征维度。绝缘老化与击穿风险相关参数有泄漏电流变化率、局部放电频率和工频电容变化趋势，提取连续观测周期内的介质损耗因子与电容变化斜率，构建时序诊断向量来用于后续模型的趋势识别。全部特征量经 Z -score标准化处理，统一缩放范围至 $[-1,1]$ ，以保证不同量纲数据在神经网络中的训练权重等效性，特征维度经Fisher判别法评估信息增益，对多余特征进行剔除来提升模型精度与收敛速度。

（三）故障模型训练策略

故障识别模型使用多层神经网络结构构建，训练样本由采集模块提供的电气信号经特征提取后标准化生成，输入特征维度为36及时间步长设置为64，模型主干结构基于双向LSTM网络，适用于处理配网运行过程中具有连续扰动特性的状态序列。输入序列经LSTM层提取时间相关特征后进入Dropout与归一化模块，防止过拟合并平衡不同特征维度的激活响应。图1展示了神经网络整体结构与诊断逻辑路径。Dropout比例设定为0.3，采用批归一化对隐藏层输出进行稳定化处理。优化器选用Adam算法，初始学习率设置为0.001，配合动态学习率调整策略保障训练过程中的梯度传导稳定。损失函数采用加权交叉熵形式，有效抑制各类故障样本数量差异引发的判别偏置。样本生成采用滑动窗口机制，增强时序结构在模型中的表达完整性，窗口重叠率控制在50%，用于扩大训练样本数量并提升模型对早期故障演化的响应能力。

模型输入为构建后的二维样本矩阵，内部结构支持多模态电气特征的同步处理，其覆盖了电压、电流、零序量和温度梯度等信号在同一通道下的联合表达。训练过程中引入残差连接结构强化非线性表达力，并结合注意力机制动态调整关键特征的响应权重。模型训练流程统一封装为边缘适配结构，支持在工业部署平台完成模型加载与快速推理，推理周期控制在 100ms 以内，可满足配网一线诊断任务的实时性要求。整体策略实现了从采集、特征到识别的技术闭环，具备较强的工程实用性与扩展能力。

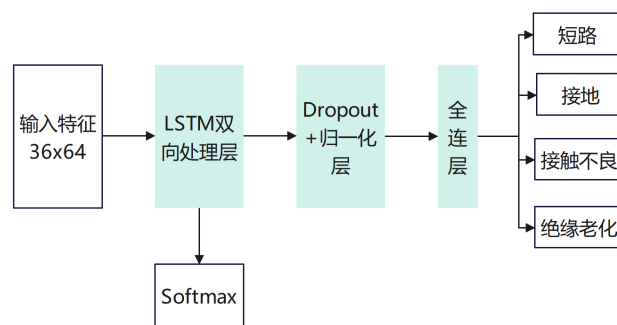


图1 LSTM神经网络结构图

三、工程应用与验证

（一）现场部署结构设计

工程选取位于某10kV城郊架空配电线路的典型供电单元作为诊断技术部署对象，线路长度4.2公里，有3处配电变压器与5处环网开关。部署方案结合配网故障类型的监测需求进行结构化设计，监测点设置于进线开关柜、分支开关节点与变压器低压侧引出端，每个节点安装三相电流、电压传感器与接地电流检测装置，且局部区域辅以温度传感器与低速热成像探头。

数据采集设备运用集中组网模式，所有采样终端接入一体化边缘分析装置，其具有本地计算与模型推理功能，内部加载经训练的LSTM故障诊断模型可实现采集—判断—推送闭环。边缘设备以以太网连接现场运维终端，界面提供当前负荷状态、故障类型推理结果与采样数据回溯功能。图2展示该工程应用中的现场部署结构拓扑。

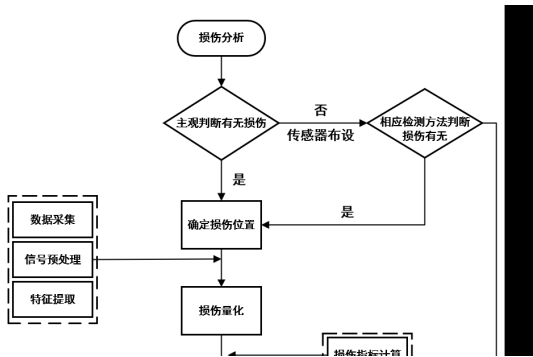


图2 配网故障诊断部署结构拓朴图

（二）故障判别结果验证

配网运行实测中诊断模型连续监测线路负荷状态、电参量变化与热场数据，累计生成18次预警记录，其中判定为短路故障3次、接地故障5次和接触不良4次，其余为未达故障阈值的弱扰动。以其中一次馈线接头发热事件为例，检测到A相电流抖动频率升高至5.8Hz，电压偏移波动明显，同时红外探测到接点温升速率异常，模型输出“接触不良—中度”结果。维护人员现场检查确认压接不牢，存在微弱放电痕迹，验证模型判断准确性。

模型输出时间戳与采样节点数据对齐误差不超过300ms，诊断逻辑对短时信号突变和周期性热扰动具备较高灵敏度。模型自动生成诊断报告与工单信息，供值班人员核查，这提升了现场排

查效率与诊断响应速度。对部分早期绝缘老化引发的电容下降趋势，模型可持续跟踪泄漏电流与介质参数的演化曲线，在未达到跳闸阈值时实现预测预警，具备预故障诊断能力。

（三）技术指标对比分析

与传统人工巡检方式进行了三项关键指标对比，这可量化所构建诊断技术的实际效果，其涵盖了故障识别准确性、响应时间与重复报修概率。诊断准确性以人工核查后确认故障类型的一致性为基准，响应时间以采样触发至故障工单推送时间计算，重复报修指三个月内同一节点再次出现相同类型故障的次数，对比结果如表1所示。

表1 故障诊断方式关键技术指标对比

指标项	基于 LSTM 模型的 诊断方法	人工巡检方式
故障识别准确性 (%)	94.60	78.20
响应时间 (分钟)	1.2	55.3
重复报修概率 (次 / 季度)	0.4	2.1

基于特征提取与LSTM模型训练的诊断路径在故障响应时效方面表现出明显优势，特别是在负荷扰动频繁、电弧特征不稳定及绝缘退化过程不连续等情形中，有更高的响应灵敏度与状态分类能力。人工巡检依赖固定周期与经验判断，难以捕捉异常趋势的早期演变，周期延迟与环境干扰易导致故障误判或漏报。诊断流程结合多参量信号建模与时序数据推理，可连续跟踪状态变化，完成故障前兆识别与故障类型分类，具备强适应性与工程可实施性。对比显示该方法在准确性、响应效率与再故障抑制方面具有明显优势，适用于复杂运行环境下的配网电气设备故障判断需求。

四、结束语

文章围绕配网电气维修场景中常见故障类型，构建了以多源信号采集、特征参数提取与深度学习模型训练为核心的诊断技术路径，并依据短路、接地和接触不良及绝缘老化等问题设计参数体系与模型结构，并在边缘设备上实现本地推理部署以完成诊断闭环。基于10kV配网实际工程进行部署验证，展现出在故障类型识别准确性、响应时效与重复故障预警等方面的稳定性能，实证表明该方法具备良好的适应性与推广价值，可为配网设备运行状态感知与诊断提供技术支撑。

参考文献

[1] 玉清. 10kV 配网电力设备触点温度监测技术 [J]. 大众用电, 2025, 40(01): 47-49.
[2] 李曼, 薛涵拓. 电力继电保护故障的检测与维修技术研究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(02): 88-90.
[3] 唐江博, 田家豪. 10 kV 配网运行维护及检修策略探讨 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 586-588.
[4] 师超. 配网小电流接地故障点快速自动查找方法研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(21): 165-167+174.
[5] 李昂, 王浩楠, 姜楠. 配电自动化系统中的继电保护故障分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(05): 142-143.
[6] 田浩, 刘军, 杨敏. 探讨“行波法测”在配网故障预警与定位中的应用 [J]. 电器工业, 2024, (03): 64-66+71.
[7] 李彬, 袁振华. 电气工程中电气继电保护的常见故障及维修策略分析 [J]. 电气技术与经济, 2023, (10): 344-347.
[8] 谢冰雪, 夏琴, 周健, 等. 电气控制线路故障诊断及维修策略的探讨 [J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(03): 41-43.
[9] 缪继鹏. 电气自动化控制设备常见故障的维修及预防 [J]. 农业工程与装备, 2023, 50(02): 26-27+30.
[10] 屈世栋, 汪斌. 电气分析技术在电机故障诊断中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2022, (21): 135-137.

房地产工程中建筑电气施工技术管理的实践与创新

林学鹏

身份证号: 440181198102144817

DOI:10.61369/ETQM.2025070025

摘要： 建筑电气施工技术管理面临设计冲突、协同低效及绿色转型压力，需通过智能化与绿色化路径实现突破。BIM技术、物联网设备及可再生能源系统的集成应用，可优化施工流程并降低能耗；《住宅项目规范》（2025年4月）的颁布进一步推动标准化与精细化升级。创新管理模式依托信息化平台与复合型人才培养，提升工程质量与市场竞争力，为响应“双碳”目标与新型城镇化建设提供实践支撑。

关键词： 建筑电气施工技术管理；智能化技术；绿色施工

Practice and Innovation of Construction Electrical Construction Technology Management in Real Estate Engineering

Lin Xuepeng

ID: 440181198102144817

Abstract： The management of construction electrical technology faces challenges such as design conflicts, inefficient collaboration, and pressure for green transformation, necessitating breakthroughs via intelligent and green pathways. The integrated application of BIM technology, IoT devices, and renewable energy systems can optimize construction processes and reduce energy consumption. The promulgation of the "Residential Project Specifications" in April 2025 further promotes standardization and refined upgrades. Innovative management models, relying on information platforms and the cultivation of versatile talents, enhance project quality and market competitiveness, providing practical support for achieving the "dual carbon" goals and new-type urbanization.

Keywords： construction electrical technology management; intelligent technology; green construction

引言

建筑电气工程作为现代建筑功能的核心支撑，其施工技术管理对安全性、功能性和可持续性至关重要。随着城市化和智能化需求的增长，电气系统复杂度增加，包括强电、弱电及新能源集成等子系统，要求在技术规范、多专业协同和全生命周期效能优化方面达到更高标准。然而，实践中仍面临设计图纸与现场冲突、材料质量控制不足及多专业协同效率低的问题，影响了工程效率和质量。智能化和绿色化转型成为解决之道，如BIM技术和物联网的应用提高了资源调度和冲突预判的精准度，光伏储能系统的集成促进了低碳施工模式的发展。2025年4月发布的《住宅项目规范》强调提升建筑层高、电梯配置和适老化设计，并要求加强建筑设备噪声控制与隔声性能优化，促使电气施工管理向精细化、标准化升级，以满足高舒适度和安全性的需求。这不仅符合行业高质量发展的内在需求，也是响应国家“双碳”战略与新型城镇化建设的关键路径。

一、建筑电气施工技术管理的基本框架

（一）技术管理的内涵与目标

建筑电气施工技术管理是以设计、施工、验收全生命周期为核心的系统性管控体系，其核心在于通过科学规划与动态协调实现工程目标的精准落地。技术管理的内涵涵盖设计阶段的方案优化、施工阶段的工艺标准化以及验收阶段的规范核查，强调全流程风险预控与资源统筹。其核心目标可归纳为四维驱动：一是通过严格的安全标准与施工监管保障人员与设备安全；二是依托标

准化作业流程与信息化工具提升施工效率；三是借助精细化预算管理与材料选型优化降低工程成本；四是基于国家规范与行业标准确保设计合规性与功能性达标^[1]。四维目标相互关联，共同构成技术管理的底层逻辑，最终服务于项目整体质量与效益的均衡提升。

（二）房地产项目的特殊性需求

在房地产工程中，建筑电气施工需应对规模化开发与用户需求差异化的挑战。项目规模化推动模块化设计和预制化施工以降低成本、缩短工期；而不同业态（住宅、商业、办公）及用户群

体对电气系统功能的需求各异，要求在标准化框架内实现灵活配置。例如，住宅需兼容智能家居扩展，商业综合体则需高负荷供电和能效管理动态适配。为平衡统一设计规范与动态调整，技术管理应采用分层级标准，如主干系统标准化、末端接口差异化，以实现规模效应与个性化需求的协同。电气系统应预留升级空间，适应未来技术迭代和需求变化，确保可持续的技术管理范式。

二、建筑电气施工中的常见问题与技术挑战

（一）施工过程中的典型问题

建筑电气施工中，设计图纸与现场施工的冲突是高频问题，具体表现为管线综合排布逻辑缺失导致的交叉碰撞、预留空间不足引发的返工。此类矛盾多因设计阶段未充分结合施工可行性，或 BIM 技术未深度介入冲突预判所致，直接影响工程进度与成本控制^[2]。材料选型与质量管控漏洞则体现为电缆规格偏差、配电设备参数不匹配等问题，根源在于材料采购标准模糊、供应商资质审核缺位及进场检测手段单一。部分项目为压缩成本采用低质替代材料，进一步加剧电气系统安全隐患，暴露技术管理在供应链全链条监管中的薄弱性。

（二）技术管理难点

多专业协同效率低下是技术管理的核心痛点，土建、暖通与电气施工界面划分不清，导致交叉作业中工序冲突频发。例如，预埋套管与结构钢筋碰撞、桥架安装与风管空间争夺等问题，暴露出跨专业信息共享机制与协同平台的缺失。新技术应用与现有管理体系的适配性不足则表现为 BIM、物联网等数字化工具与传统管理流程的割裂。施工方往往仅将新技术作为局部优化手段，未能重构管理体系以匹配技术特性，导致数据孤岛、流程冗余等问题，形成“技术超前、管理滞后”的典型矛盾，制约创新技术价值的最大化释放^[3]。

三、技术管理创新与实践路径

（一）智能化技术的应用

1. BIM 技术的集成化应用

建筑信息模型（BIM）技术的深度应用为电气施工技术管理提供了系统性解决方案。基于三维建模的冲突检测功能可提前识别管线交叉、空间侵占等问题，通过参数化调整实现管线综合优化，减少施工阶段的设计变更。施工模拟技术将进度计划与模型动态关联，借助可视化界面精准预判工序衔接风险，辅助管理者优化资源配置与工期控制^[4]。另外，BIM 平台支持多专业协同设计，土建、暖通与电气数据共享机制可消除信息孤岛，确保施工图与现场条件的一致性，其全生命周期数据集成特性为后期运维管理奠定基础。

2. 智能化施工设备与物联网（IoT）

物联网技术通过传感器网络与智能终端实现施工过程的远程监控与实时数据采集。电缆敷设机器人、自动化配电柜安装设备

等智能化施工机械的应用，显著降低人工操作误差并提升作业效率。实时数据反馈系统可追踪设备运行状态、能耗波动及环境参数，结合算法分析预测潜在故障，形成预防性维护策略。在调试阶段，智能终端与云端平台的联动支持设备参数自动校准与功能验证，缩短调试周期。能耗管理模块通过动态监测用电负荷，优化配电系统运行模式，为建筑低碳运营提供技术支撑。

（二）绿色施工技术的创新

1. 可再生能源系统的施工管理。

光伏与储能系统的集成化施工需兼顾技术可行性与经济性平衡。光伏组件安装需解决屋面荷载、倾角优化及并网技术适配问题，施工中采用轻量化支架与柔性连接技术降低结构风险。储能系统施工管理的核心在于电池组容量配置、热失控防护及消防系统联动设计，需结合建筑用电曲线定制充放电策略。标准化施工流程与专用工具（如光伏板定位机器人）的应用可提升安装精度，同时通过 BIM 模拟预演设备布局与管线走向，避免后期改造^[5]。施工阶段需同步建立性能监测体系，确保可再生能源系统与建筑电气主网的无缝衔接。

2. 节能电气设备选型与全生命周期评估。

节能电气设备选型需基于全生命周期评估（LCA）方法，综合考量初期成本、运行能效与维护成本。高效变压器、低损耗电缆及智能照明系统的选用可降低基础能耗，而变频调速设备与能源回收装置的应用则进一步优化动态负荷管理。选型过程中需结合建筑功能需求与区域气候特征，例如在湿热地区优先采用防潮耐腐蚀材料。全生命周期评估通过量化设备碳排放、能耗曲线及报废回收成本，为决策提供科学依据。智能控制系统（如需求响应模块）的嵌入可动态调节设备运行状态，延长设备寿命并提升系统韧性，形成技术管理与环境效益的双重闭环。

四、管理模式优化与可持续发展策略

（一）信息化管理平台的构建

1. 数字化管理工具的开发

基于云平台构建的施工进度与资源调度系统，通过集成物联网设备数据与 BIM 模型信息，实现施工任务动态分配与物资需求精准预测。云计算技术支撑多项目并行管理，实时更新进度偏差并自动生成纠偏方案，减少人工干预导致的滞后性。数据驱动的质量风险预警机制依托历史工程数据库与机器学习算法，对材料缺陷、工艺违规等潜在问题实现早期识别，通过可视化仪表盘推送风险等级与处置建议，形成“监测-分析-响应”闭环管理^[6]。

2. 全流程协同机制

设计、施工、运维多方信息共享通过统一数据标准与接口协议实现，基于 BIM 平台构建全生命周期数据湖，确保各阶段信息可追溯、可复用。施工阶段实时上传的隐蔽工程影像、设备参数等数据，直接关联运维管理系统，减少后期数据重复录入。协同机制的核心在于建立跨角色权限管理体系，通过区块链技术保障数据防篡改与访问审计，消除信息壁垒的同时规避泄密风险，形

成透明化、高可信的协作生态。

（二）标准化与规范化建设

1. 企业级电气施工技术标准制定

企业级技术标准需基于国家规范与项目实践经验提炼，覆盖设计深化、施工工艺、验收指标等环节。例如，明确不同建筑类型下电缆载流量修正系数、桥架安装间距阈值等参数，结合区域电网特性制定接地电阻控制标准^[7]。标准编制需引入模块化思维，区分通用条款与定制化附录，以适应住宅、商业等多元业态需求。通过建立标准执行考核体系，将技术合规性纳入供应商评价与分包商履约评估，强化标准落地的刚性约束。

2. 国际标准（如 IEC、GB）的本地化落地实践

国际标准的本地化需解决技术条款与区域条件适配性问题。例如，IEC 标准中防雷等级划分需结合本地气候特征调整，GB 规范中的电气安全指标需匹配区域电网稳定性参数。实践路径包括成立专项工作组进行标准差异性分析，编制技术转化指南与案例库，并通过虚拟仿真验证修订方案的可行性^[8]。针对施工人员认知差异，开发标准化作业视频教程与 AR 辅助培训系统，降低标准执行偏差。同时，建立标准动态更新机制，定期吸纳新技术应用经验与行业反馈，确保规范体系的前瞻性与实用性。

（三）人才培养与团队协作

1. 复合型技术管理人才的培养路径

复合型技术管理人才的培养需构建“技术+管理+数字化”三维能力模型，强调跨学科知识融合与实践能力并重。在教育层面，通过校企合作开发定制化课程，将 BIM 技术、绿色建筑标准与项目管理方法论纳入教学体系，强化电气工程与信息技术的交叉应用。企业内训需建立阶梯式培养机制，例如初级人员侧重施工规范与工艺实操，中高层管理者聚焦技术决策与资源整合能力提升。实践环节采用项目轮岗制，要求人才参与设计交底、施工协调及运维反馈全流程，积累多场景问题解决经验^[9]。同

时，引入数字化能力认证体系，对物联网工具应用、数据分析技能进行考核，确保人才能力与行业技术演进同步，形成可持续的人才供给链。

2. 国际经验借鉴与本土化创新结合

国际经验的本土化需以技术适配性与文化兼容性为双主线。例如，德国工业 4.0 框架下的智能施工管理理念，可通过分解为模块化协同流程、数据标准化接口等要素，与中国房地产项目高周转特性结合，构建敏捷化技术管理模型。日本精细化施工体系中的“现场改善”（Kaizen）方法，可转化为本土化的工序优化评价指标与激励机制。创新过程中需建立“引进-试验-迭代”闭环，依托试点项目验证技术移植可行性，如将北欧被动房电气节能技术应用于华南湿热地区时，需调整设备散热方案与防潮工艺^[10]。同时，通过国际技术交流平台与本土行业协会联动，促进经验双向流动，避免简单复制导致的“水土不服”，形成兼具全球视野与地域特色的创新生态。

五、结束语

建筑电气施工技术管理需在标准化框架与动态适应性间建立平衡，智能化与绿色化构成其转型升级的双核驱动。研究表明，BIM、物联网等技术通过冲突预判、资源优化与数据闭环重塑管理流程，而可再生能源集成与全生命周期评估则推动施工向低碳化演进。创新管理模式通过信息化平台构建、标准化体系完善及复合型人才培养，显著提升房地产项目的质量可控性与成本效益，形成差异化的市场竞争优势。未来，数字化孪生技术将进一步打通设计、施工与运维的数据壁垒，实现全要素虚拟映射与实时交互；人工智能则依托深度学习算法，在风险预测、工艺优化及自动化决策领域深化应用，推动电气施工从经验驱动向智能驱动跨越，为行业可持续发展注入新动能。

参考文献

- [1] 郑亚祥. 建筑电气工程的施工管理问题治理 [J]. 产业与科技论坛, 2014, 13(19): 217-219.
- [2] 马宝军, 张丽. 论建筑电气的施工管理 [J]. 科学技术创新, 2011(10): 245-245.
- [3] 方俊文. 建筑电气施工技术在工程中的实际应用 [J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2010(4): 258-259.
- [4] 王子明, 张仁旭. 提高建筑电气工程施工技术质量的措施分析 [J]. 城镇建设, 2020(1): 287.
- [5] 王鹏. 高层建筑电气监理施工质量的管理和控制 [J]. 有色金属设计, 2023, 50(1): 129-132.
- [6] 刘江. 试论如何提高建筑电气工程施工技术质量 [J]. 装饰装修天地, 2018(19): 109.
- [7] 张然. 建筑电气施工管理利用 BIM 技术融合敏捷和传统管理探讨 [J]. 科学与财富, 2020, 000(022): 19, 22.
- [8] 王光. 建筑电气工程施工技术与质量验收措施探析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(22): 4267.
- [9] 赵嘉. 建筑电气施工技术在工程中的实际应用分析 [J]. 科技资讯, 2017(11): 58, 106.
- [10] 雷全. 提高建筑电气工程施工管理的措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(1): 14-14.

市政给排水管道非开挖修复技术研究

张辉¹, 刘俊^{1,2}

1. 青岛安博劳务工程有限公司, 山东 青岛 266000

2. 山东华德市政工程集团有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ETQM.2025070029

摘要： 本文聚焦市政给排水管道非开挖修复技术，系统阐述其分类及原理，包括管道检测与评估、局部修复、整段修复及其他创新技术，分析各类技术的适用场景与优势。在设计及施工方面，强调以数据驱动修复方案设计，遵循标准化施工流程并构建严格质量控制体系。通过经济性分析，对比非开挖修复技术与传统开挖技术在造价、全生命周期经济效益及社会效益上的差异，揭示非开挖修复技术的显著优势，为市政给排水管道修复工程提供科学的技术参考与决策依据。

关键词： 市政给排水管道；非开挖修复技术；设计施工；经济性分析

Research on Non-excavation Repair Technology for Municipal Water Supply and Drainage Pipelines

Zhang Hui¹, Liu Jun^{1,2}

1. Qingdao Anbo Labor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

2. Shandong Huade Municipal Engineering Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

Abstract： This article focuses on the non-excavation repair technology for municipal water supply and drainage pipelines, systematically explaining its classification and principles, including pipeline inspection and evaluation, local repair, full-section repair, and other innovative technologies. It analyzes the applicable scenarios and advantages of various technologies. In terms of design and construction, it emphasizes a data-driven approach to designing repair solutions, follows standardized construction processes, and establishes a rigorous quality control system. Through economic analysis, it compares the differences in cost, full life cycle economic benefits, and social benefits between non-excavation repair technology and traditional excavation technology, revealing the significant advantages of non-excavation repair technology. This provides a scientific technical reference and decision-making basis for municipal water supply and drainage pipeline repair projects.

Keywords： municipal water supply and drainage pipelines; non-excavation repair technology; design and construction; economic analysis

引言

据统计我国城市地下管网总长度已超 200 万公里，且每年以 5% ~ 8% 的速度持续增长。然而受服役年限、地质沉降、介质腐蚀及周边施工扰动等因素影响，管道老化、渗漏、破损等问题日益突出，传统开挖修复技术因存在施工周期长、交通阻断严重、环境破坏大等弊端，已难以满足现代城市精细化管理的需求。非开挖修复技术凭借其“微创、高效、环保”的显著优势，成为管道修复领域的研究热点与发展方向。本文从技术分类、设计施工及经济性等维度展开深入研究，旨在为提升市政给排水管道修复的科学性、经济性与可持续性提供理论支撑与实践参考。

一、市政给排水管道非开挖修复技术分类及原理

（一）管道检测与评估技术

管道检测与评估技术通过物理探测与数据分析明确管道病害特征，为修复方案提供基础依据。在完成管道清洗作业之后，为了确保后续修复工作的精准实施。使用录像检测技术通过高清摄

像头对管道内部进行全程录像，观察管道的结构、材料以及存在的缺陷。采用声呐检测技术利用声波原理，探测管道内部的异物、堵塞以及破损等问题，并通过声波信号的分析，对管道的状态进行准确地评估^[1]。

（二）局部修复技术

针对管道接口渗漏、局部裂缝、小范围腐蚀等集中性病害，

局部修复技术以“精准定位、靶向治理”为原则实施点状修复。点状修复技术采用气囊扩张法将浸有环氧树脂的玻璃纤毡压贴于破损处，通过常温或蒸汽加热固化形成局部内衬层，修复直径范围 DN150-DN2000，具有无需开挖、修复时间短的特点，适用于裂缝、孔洞、接口渗漏等局部缺陷，且修复后管道过流能力损失小于 5%^[2]。嵌补修复技术使用高强度复合材料或金属补丁，通过胶粘剂固定于破损部位形成机械补强结构，对于腐蚀穿孔缺陷可配合带压堵漏技术快速止水，适用于局部腐蚀、机械损伤或小范围破裂，尤其适合紧急抢修场景。不锈钢快速锁修复技术通过液压设备将分瓣式不锈钢卡箍径向收缩紧固于破损处，利用橡胶密封圈密封止水，适用管径 DN100-DN1200，操作便捷且无需动火，适用于给排水管道等压力管道的带水修复^[3]。

（三）整段修复技术

当管道出现大面积腐蚀、结构性坍塌或功能退化时，整段修复技术通过内衬置换、螺旋再造或爆管更新等方式实现管道整体性能重塑。HDPE 内衬法将外径略小于原管道内径的 HDPE 管通过牵引或顶推插入旧管道形成“管中管”结构，通过注浆或管材柔性实现密封，修复长度可达数百米，适用于整体腐蚀、错位或过流能力不足的重力排水管道；CIPP 原位固化法将浸有热固性树脂的纤维增强软管置入旧管道，通过热水、蒸汽或紫外线照射固化形成高强度内衬层，可适应弯头、变径等复杂结构，修复管径 DN150-DN3000，内衬厚度 3-15mm，环刚度 $\geq 12.5\text{kN/m}^2$ ，使用寿命达 50 年；螺旋缠绕法采用 PVC-U 或 HDPE 型材在管道内螺旋缠绕形成新管道，型材边缘通过机械锁扣或热熔焊接连接，施工速度快、可带水作业，修复后管道表面光滑且过流能力提升 10%~20%，适应管径 DN300-DN4000^[4]。喷涂法修复技术利用高压无气喷涂设备将环氧树脂、聚氨酯等涂料均匀喷涂于管道内壁形成 1—3mm 防腐密封涂层，异形管道或复杂接口可手工涂抹补充，适用于混凝土管道内壁腐蚀、麻面修复，尤其适合蛋形截面等异形断面排水管道。

（四）其他非开挖修复技术

针对特殊工况或复合型病害，创新性技术提供多元化解决方案。胀管法通过液压或气动设备破碎旧管道，同时将新管道拉入或顶入破碎空间，利用旧管道碎片压实周围土体完成敷设，可同步实现管径扩大 30%~50%，适用于埋深较浅（<6 米）、环境敏感区域的旧管道报废更换。裂管法修复技术采用专用工具纵向割裂旧管道，通过扩张头将碎片压入土体并牵引新管道跟进，可实现同径或扩径修复，适用于 DN100-DN800 的混凝土、铸铁等刚性管道，施工关键在于精确控制扩张头行进速度与牵引力以避免影响周边管线^[5]。微生物修复技术通过向管道内投加特定微生物菌群，利用其代谢活动分解内壁油脂、有机物沉积，并分泌生物聚合物修复微小裂缝，具有环境友好、无需化学药剂的特点，适用于排水管道预防性修复与养护，可定期投加以维持管道自净能力、降低淤积频率。

二、非开挖修复技术的设计与施工

（一）修复方案设计

修复方案设计以数据驱动为核心导向，运用 CCTV 检测系统搭载 1080P 高清摄像头对管道内部进行毫米级影像采集，结合声呐检测或激光扫描生成包含缺陷坐标、损伤形态、结构变形量的三维模型，同步整合管道管径、埋设深度、周边环境等基础数据。技术选型阶段遵循“缺陷等级-技术适配”原则，针对轻度缺陷采用高压喷涂速凝水泥砂浆修复，中度缺陷选用螺旋缠绕 HDPE 带材工艺，重度缺陷则采用 CIPP 内衬或爆管法换管；同时引入层次分析法（AHP）对修复成本、施工周期、环境影响等指标进行量化比选，形成技术经济论证报告^[6]。结构设计环节依托力学计算模型，例如 CIPP 内衬厚度计算采用 ASCE 标准公式 false（其中 D 为管径、p 为内水压力、S 为树脂许用应力），并通过 ANSYS 软件模拟内衬与原管道的应力分布，确保复合结构安全系数 ≥ 1.8 。

（二）施工工艺流程

施工流程遵循“预处理-核心作业-验证闭环”的标准化程序，以 CIPP 修复为例，采用 50MPa 高压水射流清除内壁厚度 > 20mm 的淤泥沉积，通过机械铣削设备对突出管壁 30mm 以上的错口进行打磨，形成粗糙度达 Ra12.5 的界面。随后实施软管置入与固化，利用卷扬机以 0.5m/s 速度牵引浸胶玻璃纤维软管至指定位置，采用紫外线固化系统照射 2 小时完成树脂交联，过程中通过压力传感器维持管内 0.03MPa 微正压以确保内衬贴合；最后使用电动切割工具去除多余内衬并安装不锈钢卡箍密封，通过 CCTV 检测机器人进行 360° 无死角复查，对发现的直径 > 8mm 气泡缺陷采用注浆法补修。螺旋缠绕修复工艺则先通过管道机器人搭载激光测距仪完成全管测量（精度 $\pm 2\text{mm}$ ），确定带材缠绕起始角度与搭接长度，再以 1.2m/min 速度驱动螺旋缠绕机在管内形成连续结构，锁扣连接处注入双组份聚氨酯密封胶（混合后表干时间 ≤ 30 分钟），施工完成后进行闭水试验（试验水头达上游检查井管顶以上 2m，30 分钟渗水量 $\leq 1.2\text{L}/(\text{m}\cdot\text{h})$ ）。

（三）施工质量控制

质量管控体系以“预防为主、全程追溯”为原则构建三级控制网络，材料进场环节实施“双控制”，环氧树脂需验证 GB/T 2567 标准规定的黏度（25℃时 $\leq 4000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）、凝胶时间（ ≤ 80 分钟）及 HJ/T 223 环保认证，HDPE 带材需通过 GB/T 1040.2 拉伸试验（屈服强度 $\geq 22\text{MPa}$ ）与 GB/T 18488 耐磨测试（磨耗量 $\leq 15\text{mg}$ ）；施工过程中运用 BIM+GIS 融合技术建立实时监控平台，传感器实时采集固化温度（误差 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）、缠绕张力（偏差 $\pm 5\%$ ）、设备运行参数等数据，当深基坑边坡位移监测值达 2mm / 天时触发预警响应机制；竣工验收阶段执行“三检合一”标准，通过目视检测（VT）检查修复表面平整度（误差 $\leq 3\text{mm}$ ），采用超声检测（UT）测定内衬厚度均匀性（偏差 $\pm 1.5\text{mm}$ ），最后依据 GB 50268 进行功能性试验^[7]。CIPP 修复管道需通过 1.5 倍设计压力的水压试验（保压 1 小时降压 $\leq 0.05\text{MPa}$ ），爆管法换管需进行管道变形检测（椭圆度 $\leq 3\%$ ）。

与防腐层电火花检漏（电压 15kV 无漏点）。

三、非开挖修复技术的经济性分析

（一）造价分析

非开挖修复技术的造价构成呈现“材料设备主导、间接成本压缩”的特征，以 DN800 管道修复为例，CIPP 内衬法综合成本约 2200 元 / 米，其中环氧树脂软管与固化设备占比达 65%，人工成本仅占 15%，而传统开挖修复需承担路面破除（500 元 / m²）、土方外运（400 元 / m³）及交通导改（日均 2 万元）等附加费用，综合造价达 3800 元 / 米以上。局部喷射修复单方成本约 1000 元 / 米，螺旋缠绕法约 1800 元 / 米，爆管法因涉及新管牵引与旧管破碎可达 3500 元 / 米，但管径升级无需额外扩槽费用^[8]。成本敏感因素分析显示，修复长度每增加 100 米，非开挖技术单方成本下降约 12%，而传统开挖受基坑支护与安全监测影响，成本下降幅度仅 5%；富水地层中，非开挖降水成本增加约 250 元 / 米，显著低于传统开挖的基坑围护费用。

（二）经济效益评价

从全生命周期视角，非开挖技术通过工期优化与维护成本递减实现效益倍增。某 DN1000 污水管道修复项目中，CIPP 工艺工期仅 7 天，较传统开挖（18 天）缩短 61%，按周边商业体日均损失 15 万元计算，可减少间接损失 165 万元。维护成本对比更凸显技术优势，内衬修复后管道年渗漏率 < 0.5%，年维护费用约 2.8 元 / 米，而传统混凝土管修复后年渗漏率达 3%，年维护费用 9.2 元 / 米，50 年周期内累计节省维护成本超 300 万元。经济指标量化显示非开挖修复的净现值（NPV）较传统方法高 33% ~ 50%，

投资回收期（PP）缩短 4–6 年，内部收益率（IRR）提升 2–3 个百分点，在政府 PPP 项目中更易通过物有所值（VFM）评价^[9]。

（三）社会效益评价

非开挖技术的隐性价值构成城市治理的重要增量，施工占路面积仅为传统方法的 1/5，避免主干道封闭导致的通勤效率下降。据交通仿真模型测算，城市中心区每封闭 1 条车道日均增加拥堵时长 45 分钟，非开挖技术可减少此类时间成本约 8000 小时 / 公里^[10]。环境效益方面，100 米 DN1200 管道修复可减少渣土排放 420m³，降低扬尘 PM2.5 浓度 68%，噪音控制在 62dB（传统施工达 88dB），符合《城市区域环境噪声标准》0 类区要求。民生影响层面，避免开挖对周边商户造成的“断水断电”停业损失（商业街日均损失约 3 万元 / 百米），同时降低地下管线交叉损伤风险——非开挖施工管线破损率仅为 0.03 次 / 公里，较传统方法（0.25 次 / 公里）下降 88%，契合“城市生命线”安全运行的现代化管理需求。

四、结束语

市政给排水管道非开挖修复技术凭借其多元化的技术体系、标准化的设计施工流程以及显著的经济社会效益，已成为城市管网维护的核心手段。该技术不仅有效解决了传统开挖修复对城市环境与交通的负面影响，更通过精准的病害诊断、高效的修复工艺及全生命周期成本控制，实现了管道修复工程的科学化与智能化。随着材料科学、检测技术与施工装备的持续创新，非开挖修复技术将在复杂工况适应性、修复效果耐久性等方面取得新突破。

参考文献

[1] 章国鹏. 非开挖修复技术在城市给排水管道中的应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(05): 72–74. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671–3362.2024.05.024.

[2] 许世明. 论非开挖技术在市政给排水工程中的实践 [J]. 居业, 2023, (01): 19–21.

[3] 宋彪. 给排水管道的非开挖修复技术探究 [J]. 住宅与房地产, 2019, (33): 171.

[4] 杨墨, 周航, 郝学凯, 等. 给排水管道的非开挖修复技术 [J]. 山西建筑, 2014, 40(11): 124–126. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14–1279/tu.2014.11.064.

[5] 龙新明. 给排水管道在线非开挖修复技术综述 [J]. 科技资讯, 2006, (18): 31–32. DOI: 10.16661/j.cnki.1672–3791.2006.18.026.

[6] 张菊英, 尹春来. 城市给排水管道非开挖修复技术研究 [J]. 科技与企业, 2012, (13): 293+295. DOI: 10.13751/j.cnki.kjyqy.2012.13.164.

[7] 李祖靖. 关于市政给排水施工中的非开挖修复施工技术分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (27): 190–192. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202427062.

[8] 曹井国, 郁片红, 孙跃平. 城镇给排水管道非开挖修复材料 [M]. 化学工业出版社: 202210.328.

[9] 廖宝勇. 原位热塑成型修复技术在给排水管道非开挖修复中的应用 [J]. 建设科技, 2019, (23): 60–63. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2019.23.012.

[10] 任君彪. 非开挖修复技术在城市给排水管道中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(21): 88–90. DOI: 10.19537/j.cnki.2096–2789.2024.21.028.

水利工程材料性能检测与质量控制技术研究

贾森伟

雄铁工程检测有限公司，雄安 新区 071600

DOI:10.61369/ETQM.2025070034

摘 要： 水利工程材料性能检测与质量控制技术研究对保障工程耐久性和安全性具有关键作用。本文系统分析了混凝土、钢材等主要材料的性能要求，探讨了传统检测方法的局限性及现代无损检测技术的优势。重点研究了生产过程和施工阶段的质量控制关键技术，包括配比优化、参数监控和智能监测系统。结合典型案例，阐述了标准化管理体系和智能化技术的应用成效，为提升水利工程材料质量管理水平提供了理论依据和技术路径。

关 键 词： 水利工程材料；性能检测；质量控制

Research on Performance Testing and Quality Control Technology of Materials for Water Conservancy Projects

Jia Senwei

Xiongtie Engineering Inspection Co., LTD. Xiong'an New Area 071600

Abstract： The research on the performance testing and quality control technology of materials for water conservancy projects plays a crucial role in ensuring the durability and safety of the projects. This paper systematically analyzes the performance requirements of main materials such as concrete and steel, and discusses the limitations of traditional detection methods and the advantages of modern non-destructive testing technologies. The key technologies for quality control in the production process and construction stage were mainly studied, including proportioning optimization, parameter monitoring and intelligent monitoring systems. Combined with typical cases, the application effects of the standardized management system and intelligent technology are expounded, providing a theoretical basis and technical path for improving the quality management level of materials in water conservancy projects.

Keywords： materials for water conservancy projects; performance testing; quality control

引言

水利工程材料性能检测与质量控制是保障工程结构安全及国家水安全的重要技术支撑。《国家水网建设规划纲要》（2023 年）要求“强化工程全生命周期质量管理”，对材料性能提出更高标准。材料长期受水流冲刷、冻融循环等复杂环境影响，抗渗性、耐久性等指标直接关系工程寿命。当前检测技术向智能无损检测转型，质量控制模式从终端验收转向全过程管控。随着《水利工程建设质量提升三年行动方案（2023–2025 年）》推进，材料性能精准评估与智能化质控技术成为焦点。新型设备研发、大数据分析为构建科学质控体系提供可能，探究材料性能演变规律、发展适配的质控方法，对水利工程高质量发展意义重大。

一、水利工程材料分类与性能要求

（一）主要材料类型及其工程应用

水利工程材料的选择直接影响工程结构的可靠性与服役寿命，其质量控制需贯穿材料生产、施工及运维全过程^[1]。混凝土作为核心材料，广泛应用于大坝、闸墩等承重结构，高性能混凝土通过优化配合比可显著提升强度与耐久性^[2]。钢材主要用于压力管道、闸门等需承受高应力或动态荷载的部件，其焊接性与耐腐蚀性尤为关键。土工合成材料包括土工膜、土工布等，在堤防

加固中发挥隔离与排水作用，施工中需严格控制铺设工艺以避免结构损伤。防渗材料如膨润土防水毯、喷射混凝土等，通过特殊工艺实现快速施工与高效防渗，尤其适用于隧洞衬砌等异形结构^[3]。

（二）水利环境下的关键性能指标

水利工程材料的性能评估需针对特殊环境荷载展开。抗渗性直接决定结构防渗能力，防渗材料的渗透系数需通过现场抽检确保低于规范限值。耐久性涉及材料在长期浸泡下的性能衰变，高性能混凝土的氯离子扩散系数应控制在 $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 以内以

保障百年寿命。抗冻融性要求材料在冻融循环中保持微观结构稳定，寒冷地区混凝土需通过300次冻融循环质量损失率 $\leq 5\%$ 的检测。抗冲刷性针对高速水流作用，喷射混凝土的28天抗压强度需达到40MPa以上以满足过流面保护要求。土工合成材料则需通过顶破强度与摩擦系数测试以保证边坡稳定^[4]。这些性能指标共同构成水利工程材料质量控制的技术基准。

二、材料性能检测技术体系

（一）传统检测方法及其局限性

传统材料性能检测主要依赖破坏性试验与实验室标准测试，其局限性日益凸显。破坏性试验通过钻芯取样、拉伸试验等手段获取材料强度与变形特性，但会导致结构局部损伤，且样本代表性受取样位置影响显著。实验室标准测试虽能提供精确数据，但试件制备与养护条件与实际工程环境存在差异，导致测试结果与现场性能出现偏差^[5]。时效性问题尤为突出，混凝土28天标准养护期无法满足施工过程快速质量控制需求，特殊注浆材料的凝结时间测试滞后性可能延误工程进度^[6]。传统方法难以实现结构整体性能评估，亟需更高效、非破坏的检测技术补充。

（二）现代无损检测技术进展

无损检测技术的发展为材料性能评估提供了新的解决方案。超声波检测通过声波传播速度与衰减特性反演混凝土内部缺陷与强度分布，其检测精度受骨料类型和含水率影响需进行参数修正。红外热成像利用材料热传导特性差异识别脱空、渗漏等隐蔽缺陷，在新型PA改良注浆材料固化过程监测中表现出独特优势。X射线断层扫描通过三维成像揭示材料内部孔隙结构与损伤演化规律，为水泥基材料耐久性研究提供微观尺度观测手段^[7]。这些技术具有非接触、高精度特点，可实现材料性能的实时监测与长期跟踪，显著提升质量控制的时效性与可靠性。

三、质量控制关键技术研究

（一）生产过程中的质量控制

1. 原材料筛选与配比优化

水利工程材料的质量控制始于严格的原材料筛选与科学的配比设计。骨料级配、含泥量等指标直接影响混凝土的和易性与强度发展，需通过筛分试验与矿物成分分析确保符合规范要求^[8]。胶凝材料的选择需兼顾活性指数与耐久性需求，掺合料的加入比例应通过系统的正交试验确定最优参数^[9]。水胶比的精确控制对保证抗渗性能至关重要，渠道防渗工程中需根据地下水位变化进行动态调整。外加剂的选用需考虑与主体材料的相容性，通过坍落度经时损失试验验证工作性能稳定性。配比优化需建立多目标函数，在强度、耐久性和经济性之间取得平衡，特别是中小型水利工程更需注重成本控制。

2. 工业化生产参数监控

工业化生产阶段的质量控制依赖于关键工艺参数的实时监测与反馈调节。混凝土搅拌过程中，投料顺序与搅拌时间直接影响

匀质性，需通过电流监测与拌合物均匀性测试确保混合质量。温度控制对高温季节施工尤为重要，渠道防渗混凝土施工中骨料预冷与拌合水加冰工艺需根据出机温度实时调整^[10]。计量系统的精度应定期校验，胶凝材料称量误差需控制在 $\pm 1\%$ 以内，这是保证水利工程结构耐久性的基本要求。生产数据应实现自动化采集与存储，通过统计过程控制（SPC）方法分析变异系数，防渗工程中特别要关注水胶比的波动范围。智能化控制系统可基于历史数据建立预测模型，实现配合比的动态优化与工艺参数的自动补偿，这对提升施工质量具有显著效果。

（二）施工阶段的质量监测

1. 现场快速检测技术

施工阶段的质量监测依赖高效的现场快速检测技术确保工程实体质量。回弹仪通过测定混凝土表面硬度推定抗压强度，其操作便捷性使其成为现场强度抽检的主要手段，但需结合碳化深度修正以提高测试精度。贯入式强度检测利用探针贯入阻力与混凝土强度的相关性，可实现对早期强度的快速评估，特别适用于模板拆除时机的判定。这些技术能在不破坏结构的前提下获取强度发展数据，但受表面状态和材料均质性影响较大，需配合见证取样进行结果验证。快速检测数据应及时录入质量管理体系，为施工决策提供支持。

2. 基于物联网的实时监测系统

物联网技术的应用实现了施工质量监测的智能化和实时化。通过在关键部位部署温湿度、应变等传感器，构建起覆盖全施工区域的监测网络。数据采集终端将实时监测信息传输至云平台，利用大数据分析技术识别质量异常波动。监测系统可自动预警混凝土内外温差超标、养护湿度不足等常见问题，指导现场及时采取调控措施。结合BIM模型的可视化展示，实现质量数据的空间定位与趋势分析，为质量管理提供多维决策依据。这种全天候、全过程的监控模式显著提升了质量控制的时效性和精确性。

四、技术管理优化与案例分析

（一）标准化管理体系建设

1. 国际 / 国内检测标准对比分析

水利工程材料检测标准体系呈现国际化与本土化并重的发展趋势。国际标准（如ASTM、ISO）侧重材料基础性能测试方法的普适性，检测指标设定相对严格，但部分试验条件与我国地域特征存在差异。国内标准（GB、SL系列）更注重工程适用性，针对不同气候分区和工程类型制定了差异化要求，在抗冻性、抗硫酸盐侵蚀等指标上具有区域适应性优势。标准对比显示，国内标准在快速检测方法、现场验收标准等方面需进一步与国际接轨，而国际标准则可借鉴我国在特殊材料（如膨胀土）检测方面的实践经验。

2. 全生命周期质量管理框架

全生命周期质量管理框架涵盖材料生产、施工建造、运行维护三个阶段的质量控制要点。生产阶段建立原材料追溯系统和配合比动态优化机制；施工阶段实施工艺参数监控和实体质量抽检

的双重控制；运行阶段通过定期检测评估材料性能退化规律。该框架采用 PDCA 循环模式，依托信息化管理平台实现各阶段质量数据的无缝衔接。关键创新点在于将传统以验收为核心的质量控制，转变为覆盖材料服役全过程的性能保障体系，通过大数据分析预测材料退化趋势，实现预防性维护。

（二）典型工程应用案例

1. 大坝混凝土耐久性提升案例

某重力坝工程针对混凝土碳化与冻融破坏问题，采用多元胶凝材料体系优化配合比设计，将粉煤灰掺量提升至30%并复合掺入5%硅灰，使氯离子扩散系数降低至 $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。施工阶段引入智能温控系统，通过冷却水管网络与表面保温措施将内外温差控制在18℃以内。配合比优化结合全过程温度监控使混凝土抗冻等级达到 F300，28天强度标准差由4.5MPa降至2.8MPa。工程实践表明，基于材料性能提升与施工工艺改进的综合措施可有效延长大坝混凝土服役寿命。

2. 渠道防渗材料失效分析与改进

某灌区渠道防渗层出现大面积剥落，检测分析表明原聚乙烯土工膜存在焊接缺陷与紫外线老化问题。改进方案采用复合土工膜（PE膜+无纺布）增强抗穿刺性能，设置紫外线吸收剂添加层。施工环节引入红外热成像技术检测焊缝质量，缺陷检出率提升至95%以上。优化后的防渗系统经三年运行监测，渗漏量由 $0.45\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降至 $0.08\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，材料抗拉强度保留率达85%。案例证明防渗材料选择需综合考虑环境应力与施工质量控制因素。

（三）智能化技术发展趋势

1. 大数据驱动的质量预测模型

水利工程材料质量控制正逐步向数据驱动的智能化方向发展。基于历史检测数据、环境参数与材料配合比构建的质量预测模型，通过机器学习算法建立材料性能与多因素的映射关系。模型可实时分析生产过程中的原材料波动、工艺参数变化对最终质

量的影响程度，提前预警潜在风险。深度学习技术进一步提升了模型对非线性关系的捕捉能力，使抗压强度、耐久性等关键指标的预测准确率达到90%以上。这种预测性质量控制模式改变了传统事后检测的被动局面，实现从“经验判断”向“数据决策”的转变。

2. 机器视觉在表观缺陷检测中的应用

高精度图像识别技术为水利工程材料表观质量检测提供了高效解决方案。基于深度卷积神经网络的视觉系统可自动识别混凝土裂缝、蜂窝麻面等缺陷，检测精度达到0.1mm级。多光谱成像技术扩展了检测维度，通过红外波段识别隐蔽的空鼓问题，紫外波段发现早期的微裂缝发育。智能检测设备集成定位系统，实现缺陷的精准空间标注与量化统计。相比传统人工检测，机器视觉系统检测效率提升5倍以上，且避免了主观判断的差异性，为工程质量验收提供了客观统一的标准。

五、结束语

水利工程材料性能检测与质量控制技术的研究与实践表明，材料性能的精准评估与全过程质量管理对工程耐久性具有决定性影响。从传统检测方法到现代无损技术的进步，实现了从破坏性抽样到整体性能评估的转变，提升了质量控制的时效性与可靠性。生产过程中的原材料优化与工艺监控、施工阶段的快速检测与物联网技术应用，形成了多层级质量控制体系。标准化管理与全生命周期框架的建立，为工程质量提供了系统性保障。典型案例验证了材料性能提升与施工工艺改进的综合效益，而大数据与机器视觉等智能化技术的引入，推动了质量控制向预测性、精准化方向发展。未来研究应进一步探索材料性能与环境作用的耦合机制，开发更高效的智能监测技术，构建覆盖设计、施工、运维全过程的数字化质量管理平台，为水利工程长效安全运行提供技术支撑。

参考文献

[1] 战淑静. 水利工程建筑材料质量控制方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2012(11Z):1.
[2] 何江. 水利施工中高性能混凝土强度及耐久性能研究 [J]. 水利科技与经济, 2023, 29(6): 150-154.
[3] 李佳宁. 浅谈水利水电工程喷射混凝土施工材料的应用 [J]. 广东科技, 2013, 22(2):2.
[4] 刘茂丕. 浅谈水利工程中土工合成材料的应用及施工 [J]. 科学与财富, 2014(8):1.
[5] 靳璐. 混凝土原材料对水利工程混凝土性能的影响与检测控制 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(2): 73-74.
[6] 付宝宁. 水利工程 PA 改良注浆材料工程性能研究 [J]. 水利技术监督, 2021(9):3.
[7] 赵圆. 水利工程中水泥材料检测方法的研究 [J]. 城市建设理论(电子版), 2023(32):90-92.
[8] 鲁芳芳. 中小型水利工程施工质量控制问题研究 [J]. 科学技术创新, 2010(2): 235-235.
[9] 郝丽荣. 对水利工程施工质量控制技术的研究 [J]. 新材料新装饰, 2014, 000(009):365-365.
[10] 顾军. 水利工程渠道防渗施工的关键技术探究 [J]. 2023(5):236-238.

水利工程建筑材料检测技术与质量管理体系研究

田利波

河北雄安中天检测技术有限公司，雄安 新区 071600

DOI:10.61369/ETQM.2025070036

摘 要： 水利工程建筑材料检测技术与质量管理体系的研究对保障工程安全与效益具有重要意义。本文系统梳理了混凝土、钢材等材料的检测技术发展历程，构建了基于国际标准的质量管理体系，明确了人员与设备管理要素。通过质量计划制定、控制过程实施、监督评价与持续改进，确保材料质量。研究虽取得成果，但在检测技术集成与新型材料标准方面仍需完善，未来应加强技术创新与体系优化，提升水利工程材料质量管理水平。

关 键 词： 水利工程；建筑材料检测；质量管理体系

Research on Detection Technology and Quality Management System of Building Materials for Water Conservancy Projects

Tian Libo

Hebei Xiong'an Zhongtian Detection Technology Co., Ltd., Xiong'an New Area 071600

Abstract： The study of detection technology and quality management system for building materials in water conservancy projects is of great significance for ensuring project safety and benefits. This paper systematically reviews the development of detection technologies for materials such as concrete and steel, constructs a quality management system based on international standards, and clarifies the elements of personnel and equipment management. Through the formulation of quality plans, implementation of control processes, supervision and evaluation, and continuous improvement, the quality of materials is ensured. Although the research has achieved results, further improvements are needed in the integration of detection technologies and standards for new materials. Future work should focus on technological innovation and system optimization to enhance the quality management level of building materials in water conservancy projects.

Keywords： water conservancy project; building materials detection; quality management system

引言

水利工程作为国民经济基础设施的重要组成部分，在防洪、灌溉、发电等方面发挥着不可替代的作用^[1]。建筑材料是水利工程的物质基础，其质量直接关系到工程的安全性、耐久性和功能性。然而，当前水利工程建筑材料检测与质量管理仍面临诸多挑战，如检测技术的局限性、质量管理体系的不完善等，这些问题严重影响了水利工程的质量和效益。因此，深入研究水利工程建筑材料检测技术及质量管理体系具有重要的理论和现实意义。本研究旨在系统梳理水利工程建筑材料检测技术的发展现状与应用情况，构建科学合理的质量管理体系，并探讨其实施与优化策略，以期为水利工程建筑材料的质量控制提供理论支持和技术指导，保障水利工程的高质量建设与安全运行^[2]。

一、水利工程建筑材料检测技术概述

（一）常见水利工程建筑材料及其性能要求

水利工程建筑材料主要包括混凝土材料、钢材、土工材料以及其他建筑材料（如石材、砖等）^[3]。混凝土材料需具备高强度、耐久性和良好的抗渗性，以确保水利工程结构的稳固性和使用寿命。钢材则要求具有足够的强度、良好的韧性和焊接性能，以满足结构承载和施工要求。土工材料侧重于防渗、过滤和加固等功

能，适用于堤坝、渠道等工程。石材和砖等其他建筑材料则需具备良好的抗压强度和耐久性，用于护坡、挡墙等部位。这些材料的性能要求直接影响水利工程的质量和安全性，因此必须通过严格的检测技术加以保障。

（二）材料检测技术的发展历程

材料检测技术的发展历程可分为早期检测技术和现代检测技术的发展趋势。早期检测技术多依赖于简单的物理和化学方法^[4]，如通过目测、手触等方式对材料外观进行检查，或利用简

单的化学试剂进行成分分析。这些方法虽然在当时具有一定的实用性，但检测精度较低，难以满足现代水利工程对材料性能的高要求。随着科技的不断进步，现代检测技术逐渐向自动化、智能化和高精度方向发展。例如，混凝土强度检测从传统的试块抗压测试发展到超声波检测和回弹仪检测等无损检测技术；钢材检测则引入了先进的光谱分析仪和无损探伤设备，能够更准确地评估材料的力学性能和内部缺陷。这些技术的不断更新和完善，为水利工程建筑材料的质量控制提供了更为可靠的保障。

二、水利工程建筑材料检测技术分析

（一）混凝土材料检测技术

混凝土材料检测技术是确保水利工程结构安全的关键环节，涵盖原材料检测、配合比设计与检测以及强度检测方法^[5]。原材料检测中，水泥需检测其强度等级、安定性、凝结时间等指标，砂石则重点检测级配、含泥量、泥块含量等，外加剂检测其减水率、缓凝时间等性能，以保证原材料质量符合标准。混凝土配合比设计是根据工程要求，通过试验确定水泥、砂、石、水及外加剂的比例，检测过程中需严格控制水灰比、砂率等参数，确保混凝土工作性和耐久性^[6]。强度检测方法多样，常用立方体抗压强度试验，通过标准养护28天的试块测试，准确评估混凝土的承载能力，同时无损检测技术如回弹法、超声法也在不断发展，为现场快速检测提供了便利^[7]。

（二）钢材检测技术

钢材检测技术在水利工程中至关重要，主要包括力学性能检测、化学成分分析及表面质量检测。力学性能检测中，抗拉强度和屈服强度是关键指标，通过拉伸试验测定，反映钢材在受力时的承载能力和变形性能，为结构设计提供依据。化学成分分析则通过光谱分析等方法，检测碳、锰、硅等元素含量，确保钢材符合特定牌号要求，避免因成分偏差导致性能异常。钢材表面质量检测关注表面裂纹、锈蚀、划痕等缺陷，采用目视检测、磁粉检测等手段，确保钢材表面质量满足施工要求，防止因表面缺陷引发的应力集中和腐蚀问题，保障水利工程的安全性和耐久性。

三、水利工程建筑材料质量管理体系构建

（一）质量管理体系的理论基础

1. 国际标准在水利工程建筑材料管理中的应用

国际标准如 ISO 9001 为水利工程建筑材料管理提供了系统化框架，其强调过程方法和持续改进，确保材料质量符合设计与施工要求^[8]。在水利工程中，ISO 9001 要求从材料采购、验收、存储到使用全过程建立标准化流程，明确各环节责任与操作规范。通过认证的企业需定期接受审核，促使质量管理体系不断完善，有效降低材料质量风险，保障工程安全与耐久性，提升行业整体质量管理水平，促进国际间工程合作与交流。

2. 质量管理原则

质量管理原则是质量管理体系的基石，涵盖以顾客为关注焦点、领导作用、全员参与、过程方法、改进、循证决策和关系管理。在水利工程建筑材料管理中，以顾客为关注焦点要求确保材料满足工程设计和使用寿命需求；领导作用体现在管理层制定质

量方针、提供资源支持；全员参与强调各岗位人员对质量负责；过程方法通过优化采购、检测、存储等流程提升效率^[9]；改进原则推动质量管理体系持续完善；循证决策基于数据和信息分析做出科学决策；关系管理注重与供应商、施工单位等合作方良好沟通，共同保障材料质量，实现工程质量目标。

（二）质量管理体系的要素构成

1. 人员管理

人员是质量管理体系的核心要素之一，其素质直接影响材料检测结果与质量控制水平。检测人员资质要求严格，需具备相关专业背景、熟悉检测标准与操作规程，并通过专业培训与考核获得相应资质证书。人员培训与考核机制是保障人员能力持续提升的关键，定期开展技术培训、法规解读等活动，更新知识体系；同时，通过考核评估人员技能水平，对不合格人员及时进行再培训或调整岗位，确保检测队伍专业、高效，为材料质量提供可靠人力保障。

2. 设备管理

检测设备的准确性与可靠性是保证材料检测数据有效性的基础。检测设备的选型与配置应依据水利工程建筑材料检测项目需求^[10]，选择符合精度要求、技术先进的设备，确保覆盖所有检测参数。设备的校准与维护是设备管理的重要环节，定期对设备进行校准，确保其在使用周期内精度符合标准；建立设备维护制度，包括日常清洁、保养、故障排查等，延长设备使用寿命，降低设备故障对检测工作的影响，保障检测工作连续性与数据准确性，为质量管理体系稳定运行提供物质基础。

四、水利工程建筑材料质量管理体系的实施与优化

（一）质量管理体系的实施

1. 制定质量计划

质量计划是确保水利工程建筑材料质量的关键环节。在质量目标设定方面，应依据国家相关标准、工程设计要求以及合同约定，明确建筑材料的各项质量指标，如强度、耐久性、尺寸精度等。这些目标需具体、可量化且具有可操作性，以确保在工程建设过程中能够有效衡量和控制材料质量。质量控制措施的制定则需涵盖材料采购、运输、储存及使用等全过程。在采购环节，严格筛选供应商，要求其提供完整的产品质量证明文件，并建立供应商评价体系；运输过程中，制定专门的运输方案，防止材料损坏或污染；储存时，根据材料特性设置合适的储存环境，如防潮、防晒等措施；在使用阶段，建立严格的材料验收制度，确保进入施工现场的材料符合质量要求。

2. 质量控制过程

施工过程中的材料质量监控是质量管理体系的核心。通过建立完善的现场质量监控体系，对材料的使用情况进行实时跟踪。在材料入场时，采用抽样检测的方式，对材料的关键性能指标进行检测，如混凝土的坍落度、钢材的屈服强度等。同时，利用信息化技术对材料的使用情况进行记录，包括材料的使用部位、使用时间、使用量等信息，以便在后续过程中能够追溯材料的使用情况。检测数据的记录与分析至关重要，所有检测数据应详细记录在案，包括检测时间、检测人员、检测设备、检测结果等信息。定期对检测数据进行统计分析，运用统计学方法，如控制图

等，分析材料质量的波动情况。若发现数据异常波动，及时查找原因，采取相应的纠正措施，确保材料质量始终处于受控状态。

（二）质量管理体系的监督与评价

1. 内部审核

内部审核是质量管理体系自我监督的重要手段。审核内容与方法需全面且科学，涵盖质量管理体系的各个方面，包括质量计划的执行情况、质量控制措施的落实情况、人员职责的履行情况等。采用文件审核与现场检查相结合的方式，对质量管理体系的运行情况进行全面评估。文件审核主要检查相关文件的完整性、合规性，如质量计划、检测报告、供应商评价记录等；现场检查则重点关注施工现场材料质量的实际状况，如材料的储存条件、使用情况等。审核结果的处理是内部审核的关键环节，对于审核中发现的问题，应详细记录并及时反馈给相关部门和人员。要求责任部门制定整改措施，并在规定时间内完成整改。整改完成后，进行复查，确保问题得到彻底解决。同时，将审核结果纳入绩效考核体系，对表现优秀的部门和个人给予奖励，对存在问题较多的部门进行处罚，以此激励全员积极参与质量管理工作。

2. 外部监督

外部监督是确保水利工程建筑材料质量的重要保障。政府部门的监管发挥着关键作用，水利、建设等相关部门应依据相关法律法规，对水利工程建筑材料质量进行定期检查和不定期抽查。重点检查工程是否使用了未经许可的建筑材料、材料质量是否符合国家标准等。对于违规行为，依法进行严肃处理，确保工程质量。第三方机构的评估则为质量管理体系提供了客观公正的评价。委托具有资质的第三方检测机构，对建筑材料质量进行检测和评估。第三方机构应依据国家和行业标准，采用科学的检测方法和设备，对材料的各项性能指标进行全面检测。评估结果应详细记录，并及时反馈给工程建设单位，为工程建设单位提供决策依据。同时，第三方机构的评估结果也可作为政府部门监管的重要参考，共同促进水利工程建筑材料质量的提升。

（三）质量管理体系的持续改进

1. 问题识别与分析

问题识别与分析是质量管理体系持续改进的基础。收集质量问题反馈是识别问题的重要途径，通过建立完善的质量信息反馈机制，收集来自施工现场、供应商、检测机构等各方面的质量问题反馈信息。反馈信息应详细记录，包括问题描述、发生时间、发生地点等。运用质量管理工具对收集到的问题进行深入分析，因果图可用于分析质量问题产生的原因，从人员、设备、材料、方法、环境等方面逐一排查，找出问题的根本原因。排列图则可用于确定质量问题的关键因素，通过对问题发生频率的统计分

析，找出影响质量的主要问题。通过这些工具的运用，能够准确识别和分析质量问题，为后续的改进措施提供依据。

2. 改进措施的制定与实施

改进措施的制定与实施是质量管理体系持续改进的关键环节。优化检测流程是重要的改进措施之一，通过对检测流程的分析，找出其中的冗余环节和瓶颈环节，采用先进的检测技术和设备，缩短检测周期，提高检测效率。同时，加强人员培训与设备更新也是提升质量管理水平的重要手段。定期组织人员参加质量培训，包括质量标准培训、检测技能培训、质量意识培训等，提高人员的专业素质和质量意识。及时更新检测设备，确保设备的先进性和可靠性，为质量检测提供有力保障。通过这些改进措施的实施，不断提高质量管理体系的运行效率和质量控制水平，确保水利工程建筑材料质量的持续提升。

五、结束语

水利工程建筑材料检测技术与质量管理体系的研究取得了显著成果。在检测技术方面，通过引入先进的检测设备和技术手段，如无损检测技术、智能化检测系统等，显著提高了材料检测的精度和效率，能够更准确地评估材料的各项性能指标，为工程质量提供了有力保障。同时，质量管理体系的构建与完善，明确了各环节的质量责任，规范了质量控制流程，通过制定科学的质量计划、实施严格的质量控制过程以及开展有效的监督与评价，确保了建筑材料质量的稳定性和可靠性。此外，持续改进机制的建立，使质量管理体系能够根据实际情况不断优化，适应工程发展的需求。

然而，研究仍存在不足之处。在检测技术的集成应用方面，不同检测技术之间的协同性有待进一步提高，以实现更全面、高效的材料质量检测。同时，对于新型建筑材料的检测标准和方法尚需进一步完善，以适应新材料不断涌现的发展趋势。在质量管理体系方面，虽然已建立较为完善的体系框架，但在实际应用中，部分环节的执行力度和效果仍需加强，尤其是在跨部门协作和信息共享方面，存在一定的改进空间。未来的研究方向应聚焦于检测技术的深度融合与创新，加强多学科交叉研究，开发更加智能化、精准化的检测技术，以满足复杂水利工程对材料质量检测的高要求。同时，针对新型建筑材料，应加快制定和完善相应的检测标准和规范，确保其在水利工程中的安全应用。在质量管理体系方面，需进一步强化体系的执行力和适应性，通过信息化手段提升管理效率，加强跨部门协作，实现质量信息的实时共享和动态管理，为水利工程建筑材料质量的持续提升提供坚实保障。

参考文献

- [1] 邓晓华, 刘明军. 水利工程质量检测存在问题与完善措施 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2023(6): 2471-2472.
- [2] 王科明, 张传峰, 高驰. 水利工程检测质量的影响因素与控制措施分析 [J]. Water Conservancy & Electric Power Technology & Application, 2023, 5(2).
- [3] 王海升, 石洪娥. 水利工程施工中的质量控制与安全管理体系 [J]. 葡萄酒, 2023(15): 0025-0027.
- [4] 刘景丰. 加强施工管理提高水利工程质量分析 [J]. 智能城市, 2019, 5(12): 2.
- [5] 殷风涛. 水利工程建设质量管理体系全过程分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(3): 4.
- [6] 段大江. 水利工程建筑材料的质量检验措施 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 000(032): 2596.
- [7] 李伟. 水利工程中混凝土检测试验及其质量控制措施研究 [J]. 科海故事博览, 2023(8): 46-48.
- [8] 钟博瀚. 水利工程施工质量管理 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2023(8): 885-886.
- [9] 张红丽. 水利工程中钢筋混凝土检测试验与管理方法 [J]. 中国科技投资, 2022(25): 3.
- [10] 黄冠军. 水利水电工程混凝土施工质量管控 [J]. 建筑工程技术与设计, 2022, 10(32): 160-162.

建筑给排水工程施工质量及安全管理探讨

王勇

北京星航机电装备有限公司, 北京 100074

DOI:10.61369/ETQM.2025070005

摘 要： 建筑给排水工程直接关系到建筑物的正常使用和居民的生活质量。本文探讨了建筑给排水工程施工质量及安全管理的
关键因素，突出了在设计和施工过程中需要综合考虑资源、环境等多方面的因素。给排水工程在设计初期需综合考虑建
筑的整体特点与实际需求，并且选择环保、实用的建筑材料，达到系统的长期稳定运行的目标。施工质量和安全管理在
施工阶段非常重要，必须采取严格的质量控制措施，确保管道安装、设备选择与连接符合规范要求。与此同时，必须建
立完善的的安全管理制度，加强施工人员的安全培训，保障施工安全，加强施工现场的安全管理。经过优化设计、严控
施工质量、加强安全管理，可以明显提升建筑给排水工程的整体质量，确保工程的顺利完成和长期稳定运行。

关 键 词： 建筑给排水；施工质量；安全管理

Discussion on Construction Quality and Safety Management of Building Water Supply and Drainage Engineering

Wang Yong

Beijing Xinghang Mechanical-Electric Equipment Co.,Ltd. Beijing 100074

Abstract： Building water supply and drainage engineering is directly related to the normal use of buildings and the quality of life of residents. This article explores the key factors of construction quality and safety management in building water supply and drainage engineering, highlighting the need to comprehensively consider multiple factors such as resources and environment in the design and construction process. In the initial design stage of water supply and drainage engineering, it is necessary to comprehensively consider the overall characteristics and actual needs of the building, and choose environmentally friendly and practical building materials to achieve the goal of long-term stable operation of the system. Construction quality and safety management are very important during the construction phase, and strict quality control measures must be taken to ensure that pipeline installation, equipment selection, and connection meet regulatory requirements. At the same time, it is necessary to establish a sound safety management system, strengthen safety training for construction personnel, ensure construction safety, and enhance safety management at the construction site. By optimizing design, strictly controlling construction quality, and strengthening safety management, the overall quality of building water supply and drainage engineering can be significantly improved, ensuring the smooth completion and long-term stable operation of the project.

Keywords： building water supply and drainage; construction quality; safety management

随着建筑工程的不断发展，给排水工程作为其中的重要组成部分，直接关系到人们的日常生活和建筑的稳定运行。近年来，受技术进步、环境要求、政策变化及人们认知的影响，给排水工程在设计和施工方面的要求不断提高，面临新的挑战。引入先进技术和优质材料，不仅提升了给排水系统的运行效率，也为施工质量和安全管理提供了新的保障^[1]。本文将探讨建筑给排水工程施工质量与安全管理的重要性及应对策略，以确保工程的顺利进行和长期稳定运行。

一、施工质量与安全管理双重保障的作用

（一）施工质量管理的重要性

给排水系统是保证建筑物正常生活和使用的基础设施，如果施工质量不过关很大程度上会导致管道泄漏、堵塞或水质问题，

从而影响住户的正常生活，严重的可能引发安全隐患^[2]。高质量的施工能够延长给排水系统的使用寿命，减少后期维护修理成本，节省资源和时间。施工质量管理能够最大程度地确保系统符合环保标准，避免废水排放不当对环境造成污染。优秀的施工质量管理能够提高企业的信誉，增强客户的信任感，提升市场竞

作者简介：王勇（1980.05-），男，汉族，湖北人，本科，北京星航机电装备有限公司，工程师，研究方向：建筑给排水、市政工程。

争力。

（二）施工安全管理的重要性

给排水工程施工过程中，给排水系统的安装操作复杂，风险较高，如管道铺设、焊接和设备安装等，安全管理到位，才能有效避免施工事故，保障工人生命安全。严格的安全管理使建筑企业能有效降低事故发生风险，保障施工人员的生命安全，避免潜在的安全隐患，确保工程质量^[3]。施工技术在不断进步，新的施工方法和设备不断涌现，如何安全地运用这些技术是当前建筑企业面临的重要课题。总之，建筑给排水工程的施工安全管理，大大提升了施工阶段的安全性，为后期居住者提供了更高的安全保障，是建筑行业发展的引擎^[4]。

二、建筑给排水工程施工质量与安全管理问题分析

（一）管道材料和接头质量问题

管道材料性能的优劣将决定管道的耐久性、抗腐蚀性及抗压力能力。劣质的管道材料在长时间使用后可能会导致管道发生腐蚀、破裂或渗漏，严重的话可能会使整个给排水系统失效，导致工程后期出现重大安全隐患并增加维修费用。另外，管道接头是连接各段管道的关键部件，它的密封性和稳定性对整个系统的正常运行至关重要。如果接头安装不合适，或使用的密封材料达不到标准，接头处可能会出现渗漏的现象，随着时间的流逝，水流泄漏可能会对建筑结构造成不可逆转的损害，甚至引发更为严重的渗水问题，影响建筑的耐久性，造成水资源的浪费^[5]。

施工过程中，因为对管道材料和接头质量的认知不足、成本控制不当、施工人员技术水平有限等问题，往往导致不合格的材料和接头被应用，导致引发一系列质量问题。特别是某些施工单位为了降低施工成本，使用了质量低的管道材料和接头，不考虑长期使用中的潜在风险^[6]。

（二）施工过程中布管错误

在建筑给排水工程施工中，正确的布管方式可以确保系统的高效运行。但是在实际施工中因为多种因素的叠加，布管错误时有发生。设计图纸的理解偏差是常见原因之一。施工人员可能对设计概念理解不清或缺乏经验，使得管道走向设计不合理，这会导致管道的受力风险增加，还可能导致管道不能合适地连接各个设备，从而影响排水的效果。施工测量不精确也会导致布管问题^[7]。例如，管道的坡度设置不合理，如果坡度设置得太小，容易导致排水不畅，形成积水区域；如果坡度太大，就会加快水流速度，使得管道内的水流冲击力变大，长此以往会引发管道磨损、泄漏或产生噪声。此外，如果管道间距不合理也会给后期维护带来麻烦，狭小的空间使得检修困难，同时可能影响到其他管道的正常运行，甚至在某些情况下会影响到结构的安全。

（三）施工管理和监督不到位

因为缺乏现场管理和监督，施工人员经常会随意改变施工方案，不重视施工质量控制，甚至一些施工人员不按照操作规范执行，影响工程整体质量的同时，也埋下了许多潜在的安全隐患。一些施工人员为了缩短工期，在未经许可批准的情况下擅自改变管道的布局，可能导致管道系统无法正常运作，影响建筑物的排水效率和安全性^[8]。此外，质量控制不到位，尤其是在管道接口处的施工过程中，如果没有严格检查，接口可能会漏水，严重时

会破坏建筑整体结构，造成更大的维修成本。

管道支架的安装问题也十分明显。在没有有效监督的情况下，施工人员为了加快速度可能会忽略支架的牢固性要求，导致支架安装不标准不规范，水在管道运行过程中产生震动、位移或损坏，增加了管道故障的风险。这些问题表明，施工管理和监督的不到位直接影响了工程质量和安全，甚至可能带来严重的经济损失^[9]。

（四）质量检测与验收环节不完善

质量检测和验收是确保工程质量的关键环节，然而由于检测标准不统一、检测频次不足以及验收流程不规范等原因，很多问题未能在被及时发现和纠正，影响了整个项目的施工质量。施工现场的质量检测不完全到位，往往存在遗漏关键节点的情况。部分工程未按照要求进行完整的检测，尤其是在管道安装、接头密封以及支架固定等重要工序中，缺乏系统的质量检查，导致一些隐性问题未能被及时发现。

验收环节的漏洞也容易导致问题的放大。在部分项目中，验收过程过于形式化，验收人员未能严格按照相关规范进行检查，甚至在某些情况下，验收程序没有充分记录和反馈问题。这种不严格的验收方式，使得一些质量问题在施工后期未被有效发现，影响了给排水系统的正常运行，增加了后期维护的难度和成本。

三、建筑给排水工程施工质量管理的优化措施

（一）建筑给排水工程施工中的规范化管理与质量控制措施

在建筑给排水工程施工中，规范化管理与质量控制措施至关重要，能够有效确保工程的质量与安全，防止施工过程中的隐患。首先，规范化管理是保障工程顺利进行的基础。在施工前，必须根据设计图纸和相关标准，编制详细的施工方案，明确每个施工环节的要求和技术标准。此外，施工单位应配备专业的技术人员，进行现场监督与管理，确保每个工序严格按照规范执行，杜绝因操作不当而导致的质量问题^[10]。

质量控制措施是确保施工质量的重要手段。施工过程中，应加强对材料的把关，确保所用管材、配件符合相关标准，避免因劣质材料影响系统的使用寿命。对于管道的安装，必须严格按照设计要求进行布局，并进行详细的检查与验收，尤其是在管道连接处和支架安装的质量控制，避免出现漏水或管道移位等问题。在施工过程中，设置多个质量检查点，定期进行检测，并对隐蔽工程进行详细记录。在完工后，组织相关人员进行验收，确保系统运行正常，无安全隐患。通过规范化管理与严格的质量控制措施，可以有效提高建筑给排水工程的施工质量，确保建筑物在使用过程中能够稳定、高效地运作。

（二）建筑给排水工程中的人员培训与技能提升策略

随着工程技术的不断发展，传统的施工方式和管理模式已经无法满足现代建筑给排水系统的需求。因此，制定系统的人员培训与技能提升策略至关重要。应加强施工人员的基础技能培训。对于施工队伍，尤其是管道安装工人，应定期进行技能培训，确保他们熟练掌握管道铺设、焊接、连接等操作技术。

此外，还应加强对施工规范和安全标准的学习，使其能够遵守施工过程中的安全操作规程，避免因操作不当而造成质量问题。项目经理和技术负责人应定期参加行业内的技术研讨和培

训,提高对新技术、新材料、新设备的了解与应用能力。同时,加强对工程管理和质量控制的培训,使管理人员能够更好地协调各方工作,确保工程进度和质量。利用现代化的培训方式,如线上课程、模拟操作等,提升人员的技术水平和应急处理能力。

（三）建筑给排水工程质量管理监控、检测与创新策略

（1）质量监控体系的建设至关重要。建筑企业应根据设计要求与施工规范,建立全面且细致的质量监控体系,对施工过程中的各个环节进行严格的检查与监督。通过成立专业的质量监控团队,持续开展现场监督和定期审查,能够确保每个工序符合质量标准,从源头上避免质量问题的发生。

（2）检测技术在施工质量管理中起着不可或缺的作用。现代无损检测技术、智能传感器监测和自动化数据采集等技术,能够实时提供精确的质量评估,及时发现潜在的质量隐患。例如,在管道安装过程中,借助智能传感器监测管材的密封性和系统的整体运行状态,可以在问题初期进行干预和修正,避免大规模返工和维修。此外,建筑企业通过应用数据分析技术,从大量监控数据中提取关键信息,为决策提供科学依据,推动施工质量的持续提升。

（3）技术创新与持续改进是提升质量管理水平的驱动力。建筑企业要通过引进新技术、新材料和新工艺,如无损检测技术和预制装配式管道等,不断提高施工效率和质量。同时,定期组织技术研讨会,参与行业交流,吸取先进的质量管理理念和技术,保持技术竞争力,确保在激烈的市场环境中占据优势地位。总之,监控、检测和创新策略的有机结合,是实现建筑给排水工程高质量管理的关键。

四、建筑给排水工程施工安全管理的优化措施

（一）完善安全教育和培训

施工企业需要构建全面系统的安全培训体系,目的是使施工人员深入理解并正确应用安全生产标准及作业程序,提升其准确辨识作业中的危险源并实施有效防控的能力。培训课程需涵盖行业通用安全准则与岗位专项技术实操两大模块,通过理论教学与模拟操作相结合的方式,确保作业人员既具备专业知识储备,又能主动落实安全操作标准。配套的周期性安全模拟训练及突发事

故处置演练机制,可显著增强施工队伍应急响应能力,切实降低各类意外事件的发生概率。

（二）加强建筑施工安全管理体系建设

为筑牢工程建设安全屏障,施工企业需着力完善全链条安全管理机制。首要任务是强化职业安全培训体系,通过系统化课程设计使从业人员精准掌握作业规范与风险防控要点,重点开展危险源辨识、标准化操作及应急避险等专项培训,切实提升全员安全行为能力。另一关键环节在于规范设置高辨识度警示标识系统,采用声光联动预警装置与三维立体导引标牌,确保作业区风险提示可视化、逃生路径指引清晰化。

（三）建筑企业应急管理与事故处理流程优化

（1）施工主体需针对管道破裂、危化品逸散、火情突发及承重体系失稳等多元风险场景,编制专项应急处置方案。预案设计需明确分级响应程序与救援资源配置策略,确保突发事件触发后,作业团队可依据标准化流程实施紧急制动、人员疏散与险情控制等关键动作。同步建立周期性应急能力强化机制,通过三维灾情模拟推演与盲演突击测试,促使施工人员深度掌握逃生路线、急救设备操作及多部门协同处置要点,系统性提升危机应对素养。

（2）企业须构建“监测-处置-溯源”全闭环应急管理体系。建立覆盖现场指挥部与监管机构的分钟级信息直报通道,确保事故初发阶段即可同步启动抢险救援与合规上报程序。组建包含技术专家与安全工程师的专项调查组,运用故障树分析法与鱼骨图工具开展事故溯源分析,形成包含直接诱因、管理漏洞及系统缺陷的深度诊断报告。在实施伤员医疗绿色通道保障与污染区域生态修复的同时,建立处置效能回溯评价制度,将现场指挥调度效率、资源配置合理性等核心指标纳入预案动态优化数据库,实现应急管理体系的迭代升级。

五、结束语

建筑给排水工程的品质与安全需通过技术、管理与制度的协同创新实现突破。未来可深度融合数字孪生、AI决策等智能化工具,构建覆盖设计、施工及运维的全周期监管体系。通过持续优化工艺与强化人员素质,推动行业向绿色化、智慧化方向转型,最终实现经济效益与社会效益的双重提升。

参考文献

- [1]王晓军.建筑给排水工程施工问题的解决对策[J].房地产世界,2022(18):121-123.
- [2]谭志发,吴青东,董钦城,等.建筑给排水工程常见施工质量问题及对策探析[J].建筑机械化,2022,43(7):51-53.
- [3]崔文东.建筑给排水工程施工中的通病及其防治[J].科技资讯,2022,20(12):68-71.
- [4]杜松,陈文军.建筑工程给排水施工安全问题与质量管理[J].绿色环保建材,2018(5):180.
- [5]工程质量动态分析在建筑工程质量监管工作中的应用研究[J].砖瓦,2020(6):131+133.
- [6]陈杨晖.建筑工程机电设备安装施工管理分析[J].砖瓦,2020(6):132-133.
- [7]位海峰,魏戈,周冬生.绿色建筑给排水设计的节水措施探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023(08):58-60.
- [8]高珊.绿色建筑给排水设计的节水措施研究[J].住宅与房地产,2021(02):115-116.
- [9]钟明旭.绿色建筑给排水设计的节水措施研究[J].住宅与房地产,2020(30):75+85.
- [10]田桂珍,乙兴国.高层建筑给排水设计及施工技术要点探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2019(06):176.

生活与工业污水治理中的安全管理策略探究

周克斌

身份证号: 370126198003202118

DOI: 10.61369/ETQM.2025070017

摘 要： 阐述生活与工业污水成分复杂及处理风险，如生活污水的生物处理法存在风险，工业废水含危化品处理有泄漏风险等。介绍多种治理技术与管理措施，包括 AHP – 模糊综合评价法、防泄漏设计、关键技术环节等，强调安全管理体系构建的重要性。

关 键 词： 污水治理；安全管理；风险评估

Research on Safety Management Strategies in the Treatment of Domestic and Industrial Sewage

Zhou Kebin

ID : 370126198003202118

Abstract： This paper expounds the complex composition and treatment risks of domestic and industrial sewage, such as the risks in the biological treatment of domestic sewage and the leakage risks in the treatment of industrial wastewater containing hazardous chemicals, etc. Introduce various governance technologies and management measures, including AHP – Fuzzy Comprehensive Evaluation method, leakage prevention design, key technical links, etc., and emphasize the importance of constructing a safety management system

Keywords： sewage treatment; safety management; risk assessment

引言

随着社会发展，污水治理成为环境领域关键问题。我国 2015 年颁布的《水污染防治行动计划》强调了加强水污染防治的重要性。生活污水成分复杂，其有机物质分解会影响水体，微生物还存在疾病传播风险，且污水处理工艺存在生物安全风险，污水管网运维也有难度。工业废水含危险化学品，处理过程中危化品泄漏风险高。在此背景下，对污水治理的安全管理研究至关重要，包括风险评估方法、防泄漏设计、关键技术环节、监测网络、设备管理、安全管理体系构建等方面，这对于保障污水治理安全高效进行具有重要意义。

一、污水治理安全管理现状分析

（一）生活污水处理安全管理特征

生活污水成分复杂，包含有机物质、营养物质以及微生物等。其有机物质如蛋白质、碳水化合物和油脂等，在分解过程中会消耗水中溶解氧，可能导致水体缺氧，影响水生生物生存^[1]。同时，生活污水中携带的大量微生物，包括细菌、病毒和寄生虫等，存在传播疾病的风险。在生活污水处理工艺方面，生物处理法较为常用，但此过程中存在生物安全风险。例如活性污泥法中，微生物的生长繁殖需要适宜条件，若控制不当，可能导致微生物大量死亡，影响处理效果，且死亡微生物的分解可能产生有害气体。另外，居民区污水管网运维难度较大，管道易堵塞、破损，不仅影响污水正常排放，还可能造成污水泄漏，污染周边环境。

（二）工业污水处理特殊安全要求

化工、制药等行业废水成分复杂，常含有大量有毒有害、易

易燃易爆的危险化学品。在废水处理过程中，危化品泄漏风险较高。例如，某些化工废水可能含有强酸、强碱或有机溶剂，一旦储存或处理设备发生泄漏，会对环境和人员造成严重危害^[2]。针对这些风险，相关防爆防毒技术标准至关重要。这些标准规范了污水处理设施的设计、建设和运行，要求采用合适的防爆电器设备、通风系统以及防护措施，以确保在处理含危化品废水时的安全性。同时，对操作人员也有严格的培训和防护要求，使其熟悉危险化学品的性质和应急处理方法，从而有效降低事故发生的可能性。

二、安全风险识别与评估体系

（一）典型事故致因机理研究

以污水泵站硫化氢中毒、生化池爆炸等事故为例进行分析。对于硫化氢中毒事故，可能是由于污水中含硫物质在厌氧环境下

分解产生硫化氢，而泵站的通风不良导致硫化氢积聚，人员在未采取有效防护措施的情况下进入该区域从而中毒^[3]。生化池爆炸事故可能是因为污水中含有易燃易爆的挥发性有机物，在生化反应过程中产生可燃气体体积聚，遇到合适的条件如明火、静电等引发爆炸。通过对这些事故因果链模型的研究，可以深入了解事故发生的内在机制，为后续安全风险识别与评估提供依据。

（二）风险评估量化方法

AHP-模糊综合评价法是一种有效的风险评估量化方法。该方法首先利用层次分析法（AHP）确定各风险因素的权重。通过构建层次结构模型，将复杂的污水处理系统安全问题分解为多个层次的指标，然后对各指标进行两两比较，确定其相对重要性，从而计算出各指标的权重向量^[4]。接着，运用模糊综合评价法对污水处理系统的安全状况进行综合评价。它考虑了风险因素的模糊性和不确定性，将定性评价转化为定量评价。通过建立模糊关系矩阵，结合权重向量，最终得出污水处理系统的安全等级评估结果，为安全管理决策提供科学依据。

三、关键技术环节安全控制

（一）处理工艺安全优化

1. 物理化学处理单元防泄漏设计

在物理化学处理单元防泄漏设计方面，需综合考虑多方面因素。对于处理设备，要选用优质材料，确保其具备良好的耐腐蚀性和密封性，以防止污水泄漏对环境造成污染^[5]。例如，在管道连接部位，采用密封性能好的管件，并定期进行检查和维护。同时，对于储存化学药剂的容器，要有完善的防泄漏措施，如设置双层保护结构，一旦内层发生泄漏，外层能够及时容纳泄漏物，避免其扩散。在设备的安装过程中，要严格按照操作规程进行，保证安装的准确性和牢固性，防止因安装不当导致的泄漏风险。此外，还应建立泄漏监测系统，实时监测处理单元的运行情况，一旦发现泄漏迹象，能够及时发出警报并采取相应的措施。

2. 生物处理过程安全调控

在污水处理的关键技术环节中，活性污泥法溶解氧精准控制至关重要。通过实时监测溶解氧含量，利用智能控制系统调整曝气设备的运行参数，确保微生物在适宜的氧环境下高效分解有机物，同时避免因溶解氧过高或过低带来的处理效率下降和污泥膨胀等问题^[6]。恶臭气体封闭收集技术也是关键所在。在生物处理过程中，采用密封式收集装置，对产生的恶臭气体进行全面收集，防止其泄漏到周围环境中。收集后的气体可进一步通过化学或生物除臭方法进行处理，以达到排放标准，保障操作人员的健康和周边环境的安全。

（二）智能监测技术应用

1. 在线水质预警系统

基于物联网的多参数水质监测网络可实时收集污水数据，通过各类传感器对水质的多个关键指标进行监测，如酸碱度、溶解氧、化学需氧量等^[7]。同时，异常数据识别算法能对收集到的数据进行快速分析。当数据偏离正常范围时，算法可准确识别并发

出预警。这一技术应用在污水治理中至关重要，它不仅能及时发现水质异常情况，避免污水对环境和人体造成危害，还能后续为治理措施提供准确的数据支持，以便更有针对性地调整污水处理工艺和参数，提高污水治理的效率和效果。

2. 设备健康管理系统

在生活与工业污水治理中，开发泵机振动监测与剩余寿命预测的数字化管理平台对设备健康管理至关重要。智能监测技术可实时获取泵机运行数据，如振动频率、幅度等关键参数^[8]。通过对这些数据的分析，建立精确的数学模型来评估泵机的运行状态和剩余寿命。这不仅能提前发现潜在故障，避免设备突发损坏导致的污水治理中断，还能合理安排维护计划，降低维修成本。同时，该平台可实现数据的远程传输和集中管理，方便技术人员随时掌握设备情况，及时做出决策，确保污水治理过程中设备的安全稳定运行。

四、安全管理体系构建

（一）标准化建设

1. 作业规程制定

在生活与工业污水治理的安全管理体系构建中，标准化建设的作业规程制定至关重要。应编制涵盖有限空间作业、危化品处置等方面的标准化操作手册。对于有限空间作业，需明确进入前的检测流程，包括气体浓度检测等相关指标，以及通风换气等准备工作的标准操作。对于危化品处置，要规定其储存、运输和使用的安全规范，如不同危化品的分类储存要求、运输过程中的防护措施以及使用时的剂量控制和应急处理方法等，确保在污水治理过程中的各项作业都有章可循，保障人员安全和环境安全^[9]。

2. 人员培训体系

建立VR模拟实训平台，可让员工身临其境地体验污水治理过程中的各种安全场景，如污水泄漏、设备故障等，提高其应对突发安全事件的能力^[10]。同时，设立岗位资格认证制度，明确不同岗位所需的安全知识和技能标准。员工需通过相关考核获得认证，才能上岗作业。这不仅能确保员工具备必要的安全素养，还能激励员工不断学习和提升自身能力。通过VR模拟实训平台与岗位资格认证制度的结合，构建完善的人员培训体系，为生活与工业污水治理的安全管理提供有力保障。

（二）监管机制创新

1. 政府监管云平台

随着科技发展，构建政府监管云平台对污水治理安全管理至关重要。该平台应整合污水处理各环节数据，包括污水来源、处理工艺、排放指标等。利用物联网技术，实时采集设备运行参数和水质监测数据，实现动态监管。通过大数据分析，挖掘数据背后的潜在问题和规律，为决策提供科学依据。同时，建立预警机制，当出现异常数据时及时发出警报，以便快速采取措施。还应设置信息共享模块，使相关部门和企业能及时获取信息，加强协作。借助云平台，可打破信息孤岛，提高监管效率和精准度，确保污水治理安全管理体系有效运行。

2.企业主体责任落实

构建科学合理的安全管理体系需多方面协同。安全生产投入考核指标应明确且量化，涵盖污水治理设施设备的更新维护、人员培训费用、安全防护用品配备等方面，确保投入能满足实际安全需求。同时建立责任追溯机制，对污水治理过程中出现的安全问题，能精准追溯到相关责任人与环节。在监管机制创新上，利用信息化技术实现实时动态监管，提高监管效率与精准度。企业作为主体，应强化自身责任意识，将安全管理融入企业文化，从管理层到基层员工都要明确自身安全职责，严格遵守安全操作规程，积极参与安全培训，保障污水治理安全高效进行。

（三）应急管理策略

1.应急预案动态优化

在生活与工业污水治理中，应急预案动态优化至关重要。基于情景构建的应急演练模式可模拟多种可能发生的污水治理突发状况，如污水泄漏、处理设备故障等。通过这些模拟演练，检验应急预案的可行性与有效性。同时，建立预案迭代机制，根据演练结果以及实际发生的事件反馈，对应急预案进行及时修订与完善。例如，若演练中发现某一应急处置流程在时间安排上不合理，或某一责任分工不够明确，便可在预案迭代中进行调整。这样能确保应急预案始终适应污水治理的实际需求，提高应急管理的效率与效果，保障生活与工业污水治理的安全进行。

2.智能应急响应系统

构建智能应急响应系统对于生活与工业污水治理至关重要。

需开发集成 GIS 定位与应急资源调度的智慧指挥平台，利用 GIS 定位技术可精准确定污水排放位置及相关设施分布，为应急决策提供准确的空间信息。同时，通过该平台实现对应急资源的高效调度，包括人力、物力及专业设备等。系统能实时监测污水治理过程中的各项数据，一旦出现异常，如污水泄漏或水质超标等情况，迅速发出警报并启动应急响应机制。根据预先设定的应急方案，指挥中心可快速调配资源到指定地点，采取有效的治理措施，最大程度降低污水事故对环境和社会造成的危害。

五、总结

生活与工业污水治理的安全管理至关重要。通过系统归纳污水治理安全管理的技术体系与管理框架，为安全管理提供了坚实的理论基础和实践指导。建立政府 - 企业 - 社区协同治理模式，整合各方资源，形成合力，能更有效地应对污水治理中的安全问题。智慧化转型为提升本质安全水平带来了新的机遇，通过利用先进技术实现对污水处理过程的精准监控和管理。展望未来，基于数字孪生的污水处理安全管控将是发展方向，它能够更真实地模拟污水处理系统的运行情况，提前预测和解决可能出现的安全隐患，从而推动污水治理安全管理向更高水平发展。

参考文献

[1] 李成艳. 江安县农村生活污水治理中政府管理问题及对策研究 [D]. 四川：四川大学，2023.
[2] 杨婕. 重庆市涪陵区农村生活污水治理中存在的问题研究 [D]. 重庆：重庆大学，2021.
[3] 胡志涛. 生态文明视域下陕南农村生活污水治理问题研究 [D]. 陕西：西安建筑科技大学，2021.
[4] 布彦超. 河北省 D 乡农村生活污水治理问题研究 [D]. 河北：河北大学，2023.
[5] 李国泉. 城镇污水治理成本效率研究 [D]. 广东：广东海洋大学，2022.
[6] 胡春娟. 农村生活污水治理现状与 MBR 技术的应用探究 [J]. 低碳世界，2022，12(9):37-39.
[7] 王国鸣. 环境工程中工业污水治理中存在的问题及解决策略 [J]. 价值工程，2021，040(016):54-55.
[8] 赵朋松. 环境工程中工业污水治理中存在的问题及解决策略 [J]. 汽车博览，2020，(31): 131.
[9] 施泰安，瞿晓伟. 城市规划中污水的治理与水资源利用 [J]. 石河子科技，2022(000-001).
[10] 杨俊杰. 农村生活污水治理技术探讨 [J]. 河南农业，2011(12):2.

物联网提升施工现场安全管理效率的研究

刘恕全

身份证号: 420111197605105652

DOI:10.61369/ETQM.2025070019

摘要： 物联网技术通过实时监测与智能决策重构施工现场安全管理体系，显著降低高空坠落、机械故障等事故风险。基于《上海市智慧工地三年行动计划》政策导向，研究验证了深基坑监测、设备故障预警等场景中物联网技术的有效性，应用案例显示安全事故率降幅达58%–73%，应急响应速度提升至秒级。技术路径涵盖UWB定位、多源数据融合与机器学习算法，但需解决设备兼容性、网络稳定性等瓶颈。标准化建设与5G–数字孪生融合将成为行业智能化转型的关键，为建筑安全管理的精准化、可持续化提供理论与实践支撑。

关键词： 物联网技术；施工现场安全管理；智慧工地

Application Research of Big Data Analysis in Project Schedule Management

Liu Shuquan

ID: 420111197605105652

Abstract： IoT technology reconstructs the construction site safety management system through real-time monitoring and intelligent decision-making, significantly reducing risks of falls from heights and mechanical failures. Based on the policy guidance of the "Three-Year Action Plan for Smart Construction Sites in Shanghai," this study has validated the effectiveness of IoT technology in scenarios such as deep foundation pit monitoring and equipment failure warnings. Application cases show that the accident rate has decreased by 58%–73%, and emergency response speed has been improved to seconds. The technical approach includes UWB positioning, multi-source data fusion, and machine learning algorithms, but issues such as equipment compatibility and network stability need to be addressed. Standardization and integration with 5G and digital twins will be key to the industry's intelligent transformation, providing theoretical and practical support for precise and sustainable construction site safety management.

Keywords： Internet of Things technology; construction site safety management; smart construction site

随着物联网技术的快速发展，其在建筑工程领域的应用正深刻变革传统施工现场的安全管理模式。近年来，国家及地方政策持续推动智慧工地建设，例如《上海市智慧工地三年行动计划（2025–2027年）》明确提出通过物联网技术集成智能终端设备，构建“市—区—项目”三级数据平台，以提升安全管理效率。研究表明，物联网通过实时监测、数据融合与智能预警，可显著降低高空坠落、机械故障等事故风险，同时优化资源配置与应急响应流程。然而，当前技术应用仍面临设备兼容性、网络稳定性及数据安全等挑战，部分施工现场存在传感器协议差异、电磁干扰等问题，制约了技术的规模化推广。此外，新版《隐患排查标准手册》与住建部对安全设备标准的强化，进一步凸显了技术迭代与政策适配的紧迫性。在此背景下，探究物联网技术对安全管理效率的提升路径，不仅需验证其技术可行性，还需结合政策导向与行业实践，构建标准化、可持续的解决方案，为建筑行业高质量发展提供理论支撑与实践参考。

一、物联网技术及其在建筑工程中的应用概述

（一）物联网技术的基本概念与特征

物联网技术通过传感器网络、数据通信与云计算的技术架构，实现物理实体与数字系统的深度融合。其核心架构包含感知层、网络层与应用层：感知层依托传感器、RFID等设备实时采集现场数据；网络层通过5G、LoRa等通信协议实现高速、低延迟的

数据传输；应用层结合云计算与边缘计算完成数据的存储、分析与决策反馈。物联网的典型特征表现为实时性、智能化与泛在连接，能够突破传统管理模式的时空限制，支持动态监测与即时响应^[1]。例如，传感器网络对设备振动、环境温湿度的实时采集，结合云平台的数据处理能力，可快速识别异常状态并触发预警。这种技术特性为建筑工程安全管理提供了底层支撑，推动管理模式从被动应对向主动预防转型。

（二）物联网在建筑工程中的应用领域

物联网在建筑工程中的应用聚焦于设备监控、人员定位与环境监测三大场景。在设备监控领域，通过嵌入振动传感器与 GPS 模块，可实时追踪塔吊、混凝土泵车等重型机械的运行状态，预测机械故障并优化维护周期；人员定位系统基于 UWB 或 RFID 技术，可精准获取施工人员位置信息，结合电子围栏技术防止误入高危区域。环境监测方面，物联网节点实时采集施工现场的温湿度、噪声、粉尘及有害气体浓度数据，通过阈值判定自动启动降尘或通风设备^[2]。此外，物联网与 BIM 技术的协同应用可实现施工进度与安全状态的动态可视化，例如将传感器数据集成至 BIM 模型，辅助管理者三维化定位风险源；结合 AI 算法对历史安全数据训练，可建立隐患预测模型，进一步优化资源配置与应急预案。此类融合应用显著提升了施工过程的透明性与可控性。

二、施工现场安全管理的主要问题分析

（一）传统安全管理模式的局限性

传统安全管理模式依赖人工巡检与纸质记录，存在效率低与信息滞后问题。人工巡检受限于时间、空间与人力资源，难以覆盖复杂施工现场的全区域与全时段，且检查结果需逐级上报，导致安全隐患信息传递链条冗长^[3]。例如，高空作业区域的临时防护设施破损或违规操作行为，往往需等待巡检人员发现后再行处置，错过风险干预的最佳窗口期。此外，传统模式以事后追责为导向，安全隐患识别与响应呈现被动性，缺乏对潜在风险的动态预测能力。管理者通常依据经验判断风险等级，难以量化评估多因素耦合作用下的复杂安全态势，例如环境突变与设备故障的叠加效应。此类管理模式难以满足现代大型工程对实时性、精准化安全管控的需求，亟需技术手段升级。

（二）当前施工现场的主要安全隐患

施工现场安全隐患集中表现为高空坠落、机械操作失误与环境灾害风险。高空作业中，安全绳未固定、脚手架搭设不规范或临边防护缺失等问题频发，工人动态行为监管不足进一步加剧坠落风险；重型机械如塔吊与挖掘机的操作失误，常因驾驶员疲劳、设备维护延迟或信号传递错误引发，造成碰撞或倾覆事故。环境灾害方面，极端天气、地下水位波动或粉尘爆炸等突发状况对施工安全构成威胁，而传统监测手段难以实现多参数实时联动预警^[4]。此外，多工种交叉作业场景下，土建、机电与装饰团队协同不足，易因作业面重叠、工序冲突或沟通不畅导致安全管理盲区。例如，塔吊吊装与地面人员移动的时空冲突若未提前规划，可能引发严重安全事故。此类隐患的复杂性与动态性要求管理模式向智能化、协同化转型。

三、物联网提升安全管理的技术路径

（一）实时监测与预警系统构建

1. 人员定位与行为监控技术

基于 UWB（超宽带）与 RFID（射频识别）的定位技术，可实现对施工人员厘米级精度的实时位置追踪。UWB 通过飞行时间测距算法消除多径干扰，在复杂施工环境中仍能保障定位可靠性；RFID 标签结合固定读写器，可低成本覆盖大规模作业区域。

行为监控方面，通过融合惯性测量单元（IMU）与定位数据，可识别人员攀爬、跌倒或违规进入高危区域等异常行为^[5]。例如，当工人未佩戴安全装备进入塔吊作业半径时，系统自动触发声光报警并推送警示信息至管理终端。此类技术通过电子围栏、轨迹回放与行为模式分析，显著降低人为因素导致的安全事故，同时为事故溯源提供数据支撑。

2. 设备状态与环境参数监测技术

设备状态监测依托振动、温度、倾角等多模态传感器，实时采集重型机械的运行数据。振动传感器通过时频分析检测塔吊齿轮箱的异常磨损特征；温度传感器监测电机过热状态，结合历史数据建立设备健康基线，利用阈值或神经网络模型预测故障概率。环境监测方面，分布式部署的物联网节点持续采集噪声、粉尘浓度、风速及温湿度数据，通过 LoRa 或 NB-IoT 传输至云端。异常检测算法基于滑动窗口与聚类分析，识别突发的环境风险，如粉尘浓度超标时联动启动喷雾降尘系统^[6]。此类技术通过多源异构数据的实时融合，构建设备与环境的全息感知网络，支撑风险早发现、早干预。

（二）数据分析与智能决策支持

1. 安全隐患智能识别算法

安全隐患识别算法基于监督学习与无监督学习结合的双重框架。监督学习利用标注事故数据集训练卷积神经网络（CNN），识别监控视频中的未佩戴安全帽、防护网破损等显性风险；无监督学习通过聚类分析挖掘传感器数据中的隐性模式，如设备振动频谱的异常偏移或环境参数的时空关联性突变。特征工程中，引入时序滑动窗口与空间拓扑关系构建多维特征向量，增强模型对动态施工场景的适应性。算法部署于边缘计算节点，可对实时数据流进行毫秒级响应，例如通过脚手架位移数据预测失稳风险，提前触发加固指令。

2. 动态风险评估与应急预案生成

动态风险评估模型整合人员定位、设备状态、环境参数及施工进度数据，利用贝叶斯网络或深度强化学习量化风险概率^[7]。例如，塔吊吊装作业中，综合风速、机械负载及下方人员密度数据，实时计算风险等级并划分警戒区域。应急预案生成系统基于知识图谱与规则引擎，自动匹配历史案例库与行业规范，输出疏散路径、设备停机或资源调度方案。多源数据融合框架采用联邦学习技术，在保障隐私的前提下跨项目共享风险模式，提升模型泛化能力。决策结果通过 BIM 平台可视化呈现，支持管理者快速验证与调整，形成“监测-评估-响应-优化”的闭环管控流程。

四、应用案例与效果分析

（一）典型应用场景分析

1. 高风险作业区域安全管理

深基坑与塔吊作业的物联网监控方案通过多源感知与智能决策实现风险动态控制。深基坑监测中，部署于支护结构的倾角传感器与渗压计实时采集位移、沉降及地下水位数据，边缘计算节点采用有限元模型进行稳定性分析，当位移速率超过阈值时，系统自动触发声光报警并联动暂停周边施工设备^[8]。塔吊作业监控集成力矩限制器、风速仪及高清摄像头，实时计算吊重、幅度与

风荷载的平衡关系，通过5G网络将超限数据同步至云端管理平台，强制锁定违规操作指令。某超高层建筑项目应用表明，塔吊碰撞事故率降低58%，深基坑预警响应时间从30分钟缩短至12秒，支护结构变形修复成本减少43%，验证了物联网技术对高风险作业的主动防控能力。

2. 大型机械设备运行监控

起重机与混凝土泵车的故障预警实践依托多模态传感器与机器学习算法。起重机齿轮箱嵌入振动传感器，通过小波包变换提取高频故障特征，结合油液光谱分析预测轴承剩余寿命；混凝土泵车利用压力传感器监测泵送管道堵塞风险，LSTM模型学习历史压力序列规律，提前20分钟生成堵管预警。某桥梁工程中，物联网系统将泵车故障修复时间从平均3.8小时压缩至1.2小时，设备闲置率下降31%，维修成本降低39%。起重机运维数据表明，关键部件更换周期延长28%，突发故障停机次数减少67%，凸显预测性维护对机械效能的提升价值。

（二）实施效果评估

1. 安全事故率对比分析

某智慧工地项目应用物联网技术后，年度安全事故总数从32起降至9起，降幅达71.9%。高空坠落事故因电子围栏与行为监控技术的介入减少84%，机械伤害事故通过设备故障预警与自动停机功能下降73%。事故类型统计显示，塔吊碰撞事故率由每百万工时2.7次降至0.9次，深基坑坍塌风险事件归零。经济损失方面，直接财产损失从年均217万元缩减至54万元，保险赔付金额降低68%。数据验证了物联网技术对事故频次与严重程度的双重抑制效果，尤其在动态风险高发场景中，技术干预的经济效益显著高于传统管理模式^[9]。

2. 管理效率提升量化指标

物联网系统将人工巡检频率从每日4次优化为每周2次，单次巡检时间由3.2小时压缩至0.6小时，人力成本节约63%。应急响应速度因实时数据推送与自动报警功能，从平均18分钟提升至30秒内，隐患处置效率提高36倍。BIM平台集成监测数据后，安全会议决策时间减少52%，资源配置准确率提升41%。例如，某隧道工程中，盾构机故障排查时间从2.5小时降至25分钟，设备重启延迟减少89%。量化指标表明，物联网技术通过数据驱动决策，重构了安全管理流程的时效性与精准性。

（三）挑战与优化建议

1. 技术应用难点与解决方案

物联网技术在施工场景中的设备兼容性问题突出，多厂商传

感器协议差异导致数据集成困难，可通过OPCUA（统一架构）协议与中间件技术实现异构设备互联。数据安全风险集中于传输与存储环节，需采用轻量级国密算法加密传输链路，结合区块链技术实现数据篡改溯源与权限分级控制。网络稳定性在复杂施工环境中受金属遮挡、电磁干扰影响，5G-MEC（多接入边缘计算）与自组网技术可增强局部覆盖，冗余链路设计保障关键数据实时性。例如，某港口工程采用LoRa与NB-IoT双模通信，将数据传输中断率从8.5%降至0.4%，验证了混合组网的有效性^[10]。

2. 标准化建设与推广策略

行业标准需明确物联网设备的性能基线，如定位误差 $\leq 15\text{cm}$ 、数据响应延迟 $\leq 300\text{ms}$ ，并制定统一的API接口规范与数据格式标准，推动《建设工程物联网安全监测技术规程》等文件落地。企业培训机制应构建“技术-管理-实操”三位一体课程体系，结合VR模拟高风险场景演练，提升一线人员应急能力。政府可通过补贴政策引导中小企业采购标准化方案，例如对符合《智慧工地评价标准》的项目给予10%-15%的税收减免。行业协会主导建立跨区域案例库与专家智库，加速技术经验扩散。某省级试点中，标准化方案推广后工地智能化覆盖率从22%提升至71%，证明政策与市场协同的可行性。

五、结束语

物联网技术通过实时监测、智能预警与数据驱动决策，显著提升了施工现场安全管理效率。实证研究表明，高风险作业区域的事态率降低58%-73%，设备故障修复时间压缩60%以上，直接经济损失减少68%-82%，验证了技术介入的可行性与经济性。管理流程优化方面，人工巡检频率下降63%-71%，应急响应速度提升至秒级，资源配置精准度提高33%-41%，体现技术对传统模式的颠覆性革新。当前研究受限于施工场景动态性与数据样本规模，长期数据积累不足制约算法泛化能力，需构建跨项目安全数据库以支撑深度学习模型优化。未来研究可探索5G超低时延通信与数字孪生技术的深度融合，通过高保真虚拟模型同步映射物理施工过程，实现风险仿真推演与预案动态迭代。数字孪生与边缘计算的协同有望突破时空限制，推动安全管理从“事后处置”向“预测-预防-预控”的全周期智能化转型。

参考文献

- [1] 刘辉光. 基于物联网建设的建筑企业安全生产管理研究 [D]. 浙江工业大学, 2014.
- [2] 张玉媛, 余琴, 杜梦迪. 基于物联网技术的装配式建筑施工现场安全管理研究 [J]. 建筑安全, 2018, 33(4): 4.
- [3] 刘宏伟, 严雷广. 基于“智慧工地”的施工现场安全管理 [J]. 智能建筑与城市信息, 2020, 000(010): 90-91, 99.
- [4] 段媛媛. 智慧工地系统在施工现场安全管理中的应用 [J]. 建筑安全, 2019.
- [5] 孙永凯. 物联网技术在建筑工程安全管理中的应用探讨 [J]. 建筑工程与管理, 2021, 3(3): 3.
- [6] 顾娟. 铁路既有有线施工现场智慧管理研究 [D]. 石家庄铁道大学 (原名: 石家庄铁道学院), 2022.
- [7] 赵亮. 智慧桥梁施工管理中“数字化+物联网技术”理念应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(009): 000.
- [8] 吴建军, 史胜春. 基于物联网的作业现场安全管控技术研究 [J]. 安全、健康和环境, 2018, 18(8): 4.
- [9] 刘宏伟, 严雷广. 基于“智慧工地”的施工现场安全管理 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2020(10): 3.
- [10] 鲁成文, 王言硕, 张腾. 基于物联网技术的建筑施工安全质量管理研究 [J]. 中国地名, 2023(7): 0163-0165.

房屋安全性、承载能力方面的建筑工程检测鉴定

冯灏文

广东合正建筑物鉴定检测有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ETQM.2025070023

摘 要： 房屋的安全性是为房屋安全提供有力保障。本文探讨房屋安全性与承载能力的检测鉴定及加固技术协同应用，强调检测鉴定为加固设计提供精准依据，加固实施反馈优化检测方案。研究涵盖初始检测、加固设计施工及后续评估监测全流程，通过案例分析验证协同应用的有效性，为房屋安全管理提供科学指导，推动精细化与高效化发展。

关 键 词： 房屋安全性；承载能力；检测鉴定与加固

Construction Engineering Inspection and Appraisal in Terms of Building Safety and Load-Bearing Capacity

Feng Haowen

Guangdong Hezheng Building Appraisal and Testing Co.,Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The safety of a house is a powerful guarantee for its safety. This article explores the collaborative application of detection, identification, and reinforcement techniques for the safety and load-bearing capacity of buildings, emphasizing that detection and identification provide accurate basis for reinforcement design, and feedback optimization of reinforcement implementation to optimize detection schemes. The research covers the entire process of initial detection, reinforcement design and construction, and subsequent evaluation and monitoring. Through case analysis, the effectiveness of collaborative applications is verified, providing scientific guidance for building safety management and promoting refined and efficient development.

Keywords： house safety; carrying capacity; testing, identification and reinforcement

引言

随着城市化进程的加速和既有建筑的老化，房屋安全性和承载能力的检测鉴定与加固技术日益重要。近年来，国家出台了一系列政策以加强房屋安全管理，如住房和城乡建设部等5部门于2024年4月12日发布的《关于加强农村房屋建设管理的指导意见》，明确提出要建立健全农房建设管理制度体系，保障农房质量安全。在学术研究方面，相关技术不断进步，检测手段日益多样化，加固方法也更加科学高效。本文旨在探讨房屋安全性与承载能力检测鉴定及加固技术的协同应用，分析其在实际工程中的应用效果，为提升房屋结构安全管理水平提供参考。

一、房屋安全性与承载能力检测鉴定概述

（一）房屋安全性与承载能力的基本概念

房屋安全性是指房屋在正常使用和预定使用年限内，结构能够承受可能出现的各种作用，不发生危及人身安全的破坏或倒塌的能力。承载能力则是指房屋结构构件在正常使用极限状态下，能够承受的荷载或作用的能力，是安全性的重要组成部分^[1]。两者紧密相关，承载能力不足往往直接导致安全性问题。房屋结构的安全性和承载能力直接影响其使用寿命和居住安全性，是房屋设计、施工和使用过程中必须严格把控的关键指标。只有确保房屋结构在各种荷载作用下具有足够的承载能力和安全性，才能保

障房屋在全生命周期内的正常使用和人员安全^[2]。

（二）房屋安全性与承载能力检测鉴定的重要性

房屋安全性与承载能力检测鉴定是保障房屋使用安全的关键环节。通过检测鉴定，可以及时发现房屋结构中的潜在问题，如裂缝、变形、材料老化等，评估其对房屋安全性的影响，从而采取相应的加固或修复措施，防止安全事故的发生。在房屋全生命周期管理中，安全性与承载能力检测鉴定贯穿于设计、施工、使用和维护各个阶段，为房屋的合理使用、改造和拆除提供科学依据。定期的检测鉴定有助于延长房屋使用寿命，降低维护成本，确保房屋在不同使用阶段的安全性和可靠性，是房屋安全管理不可或缺的重要组成部分^[3]。

二、房屋安全性与承载能力检测鉴定方法

（一）常规检测鉴定方法

常规检测鉴定方法是房屋安全性与承载能力评估的基础手段。外观检查与裂缝分析通过对房屋结构的直观观察，记录裂缝的位置、长度、宽度和形态，初步判断结构的受损情况。材料性能检测则进一步评估结构的内在质量，例如采用回弹法或钻芯法检测混凝土强度，利用钢筋探测仪检测钢筋的分布和锈蚀情况^[4]。这些方法操作简便、成本较低，能够快速提供结构表面和材料性能的基本信息，为后续的详细检测和鉴定提供重要参考。

（二）先进检测技术

随着科技的发展，先进检测技术在房屋安全性与承载能力检测鉴定中得到广泛应用。无损检测技术如超声波检测和雷达检测，能够深入结构内部，检测混凝土内部的缺陷、裂缝和钢筋状况，无需对结构造成破坏，具有高效、准确的特点。动态检测技术如振动测试和模态分析，通过测量结构的振动响应，分析结构的动态特性，评估结构的整体性能和损伤程度。这些先进检测技术能够提供更全面、更深入的结构信息，为复杂结构的检测鉴定提供了有力支持，提高了检测结果的可靠性和准确性^[5]。

三、房屋安全性与承载能力加固技术

（一）常用加固技术

1. 增大截面加固法

增大截面加固法是通过在原有构件上增加混凝土和钢筋，增大构件截面尺寸以提高承载力和刚度的加固方法。其原理是通过增加截面面积，提高构件的抗弯、抗压和抗剪能力。该方法适用于梁、板、柱、墙等构件的加固，尤其适用于受弯、压弯和拉弯构件。施工工艺包括对原构件表面进行处理，如凿毛、涂刷界面剂等，以增强新旧混凝土的粘结力。新增混凝土的强度等级应符合设计要求，施工时需严格控制混凝土浇筑质量，确保新旧混凝土接茬部位的粘结力。该方法的优点是加固效果显著，能有效提高构件的承载能力和变形能力，但也存在湿作业量大、养护期长、占用建筑空间等缺点^[6]。

2. 粘贴纤维复合材料加固法

粘贴纤维复合材料加固法利用胶结材料将纤维复合片材粘贴于构件表面，达到补强加固的目的。纤维复合材料具有高强度、高模量、耐腐蚀、耐久性好、不增加自重和体积等优点。施工流程包括表面处理、胶粘剂涂抹和纤维复合材料粘贴，施工时需注意纤维复合材料的剪裁和粘贴质量。该方法适用于受弯、轴压、大偏压构件，但不适用于小偏压构件和素混凝土构件。其优点是施工简便、快速，对结构外观影响小，且能有效提高构件的承载力和延性。

（二）新型加固技术

1. 碳纤维布加固技术

碳纤维布加固技术是利用碳纤维布通过粘贴技术固定在房屋建筑结构上，以增强结构的承载力和耐腐蚀性。其技术原理是将

碳纤维布粘贴在结构表面，通过黏结材料与结构形成一体，从而提高结构的抗弯、抗剪和抗压能力^[7]。碳纤维布具有质量轻、强度高、耐腐蚀等性能特点。应用案例表明，碳纤维布加固技术在多种建筑结构的加固中表现出色，加固效果显著，能有效提高结构的承载能力和抗震性能。

2. 钢筋网砂浆加固技术

钢筋网砂浆加固技术是一种在混凝土构件外表面附加钢筋网，并涂抹砂浆以形成加固层的加固方法。其工艺流程包括钢筋网的布置、砂浆的涂抹和养护。施工要点包括确保钢筋网与原构件的连接牢固，砂浆涂抹均匀，厚度适中。与其他加固方法相比，钢筋网砂浆加固技术具有施工效率高、成本低、防火和耐腐蚀性好等优点^[8]。它适用于多种结构的加固，如混凝土梁、柱、墙等，尤其在砌体墙抗震加固中应用广泛。

四、房屋安全性与承载能力检测鉴定与加固技术的协同应用

（一）协同应用的必要性

1. 检测鉴定为加固设计提供依据

检测鉴定是加固设计的基础，通过精确评估结构现状，为加固措施的选择和设计提供科学依据。检测鉴定能够明确结构的损伤位置、程度以及材料性能变化，从而确定需要加固的具体部位和加固程度。例如，通过裂缝检测和材料强度测试，可以判断构件是否满足承载力要求。这些数据为加固设计提供了精准的参考，确保加固措施的针对性和有效性，避免过度加固或加固不足，从而提高结构的安全性和经济性。

2. 加固实施对检测鉴定的反馈作用

加固实施过程中的反馈对检测鉴定具有重要意义。通过再次检测加固后的结构，可以验证加固效果，确保加固措施达到预期目标。例如，通过变形监测和承载力测试，可以评估加固后的结构性能是否得到提升。此外，加固实施过程中的反馈还可以优化后续检测方案，调整检测重点和方法。例如，若加固后发现新的裂缝或变形，可能表明加固设计需要进一步优化。这种动态反馈机制有助于持续改进检测鉴定与加固技术的协同应用，形成一个闭环管理过程。

（二）协同应用的流程与方法

1. 初始检测鉴定阶段

初始检测鉴定阶段是协同应用的起点，需制定详细的检测方案，明确检测目标、方法和范围。数据采集包括外观检查、材料性能测试、裂缝检测和结构变形测量等。通过数据分析，初步评估结构的安全性和可靠性，识别潜在问题。例如，利用超声波检测混凝土内部缺陷，通过回弹法测试混凝土强度，结合裂缝宽度和分布情况，评估结构的损伤程度。这些数据为后续的加固设计提供了基础，确保加固措施的针对性和有效性^[9]。

2. 加固设计与施工阶段

基于检测结果的加固设计是协同应用的关键环节。设计人员根据检测数据，选择合适的加固方法，如增大截面、粘贴纤维复

合材料等，并制定详细的加固方案。在加固施工过程中，需严格控制施工质量，确保加固措施的实施符合设计要求。施工过程中的质量控制包括材料检验、施工工艺监督和隐蔽工程验收等。例如，粘贴碳纤维布时需确保胶粘剂涂抹均匀，纤维布粘贴牢固；增大截面加固时需保证新旧混凝土的粘结质量。通过严格的质量控制，确保加固施工的质量和效果。

3. 后续检测鉴定与评估阶段

后续检测鉴定与评估阶段是协同应用的重要环节，用于验证加固效果和评估结构的长期性能。通过检测加固后的结构，评估其承载能力和耐久性，确保加固措施的有效性。例如，通过振动测试和模态分析评估结构的动态性能，通过裂缝监测评估结构的稳定性。同时，根据检测结果提出长期监测和维护建议，为房屋的全生命周期管理提供支持。长期监测建议包括定期检查结构的关键部位，监测裂缝发展情况和变形趋势。维护建议则包括合理使用房屋、避免超载使用、定期进行保养等^[10]。这一阶段的检测鉴定结果也为后续类似项目的加固设计提供了参考，形成一个持续改进的管理闭环。

（三）协同应用的案例分析

1. 某老旧房屋的检测鉴定与加固实践

某老旧小区建于1965年，为5层砌体结构房屋，总建筑面积约1573.3平方米。检测鉴定发现，墙体抗震承载力不足，部分墙体裂缝明显，材料老化严重。基于检测结果，采用钢筋混凝土板墙加固墙体，并增设构造柱及圈梁。加固后，结构抗震性能显著

提升，层间位移满足抗震要求。该实践表明，检测鉴定为加固设计提供了精准依据，加固实施后结构安全性得到显著提升。

2. 某受损房屋的修复与加固案例

某厂房因火灾受损，首层、二层结构受损严重，墙体被高温灼烧，部分构件承载力下降。检测鉴定结果显示，部分构件为中度受损，需加固处理。采用碳纤维布加固梁柱，对受损墙体进行批改性水泥砂浆面层加固。加固后，构件承载力恢复，结构稳定性增强。该案例表明，检测鉴定与加固技术的协同应用，能够有效修复受损房屋，恢复其使用功能。

五、结束语

本文深入研究了房屋安全性与承载能力检测鉴定及加固技术的协同应用，揭示了检测鉴定与加固技术紧密结合的重要性与优势。研究发现，检测鉴定能够为加固设计提供精准依据，通过精确评估结构现状，明确加固部位与程度，确保加固措施的针对性与有效性。加固实施后的反馈进一步优化了检测方案，形成了动态改进的管理闭环。协同应用的流程涵盖初始检测、加固设计施工以及后续评估监测全流程，各环节紧密衔接，显著提升了房屋结构的安全性及耐久性。通过案例分析，进一步验证了协同应用在实际工程中的有效性，为老旧及受损房屋的修复加固提供了科学指导，推动了房屋结构安全管理的精细化与高效化发展。

参考文献

- [1] 李晓渊, 罗峻, 黄俊杰, 等. 纯钢框架房屋结构安全性检测鉴定与抗震承载力验算 [C]// 第四届全国工程结构安全检测鉴定与加固修复研讨会论文集. 2015: 216-219.
- [2] 周蕊. 混凝土结构房屋安全性鉴定要点分析 [J]. 江西建材, 2020(9): 46-47.
- [3] 张智. 浅析某框架结构房屋抗震鉴定及加固 [J]. 山西建筑, 2021, 47(19): 49-51.
- [4] 李超, 张浩. 某混凝土结构高层住宅楼结构安全性鉴定分析 [J]. 低温建筑技术, 2022, 44(7): 134-137.
- [5] 姜迎秋, 金立赞. 既有房屋安全鉴定中的结构概念分析方法 [C]// 第三届全国工程结构安全检测鉴定与加固修复暨第一届中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定技术研讨会论文集. 2013: 48-51.
- [6] 李瑞雪, 白亚琼. 构件安全性鉴定评级方法的探讨 [J]. 工程质量, 2020, 38(8): 35-39.
- [7] 韩春雨. 剖析房屋鉴定检测技术具体运用 [J]. 低碳世界, 2020, 10(8): 106-107.
- [8] 李贤成. 建筑设计优化方法在房屋结构设计中的运用分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015, 5(12): 2321-2322.
- [9] 赵俊林, 浦同儒. 房屋建筑工程结构加固改造技术的应用分析 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(12): 1397.
- [10] 林少江, 钟星鸣. 房屋安全性鉴定 [J]. 建筑·建材·装饰, 2016(24): 189, 197.

房屋结构安全性检测鉴定与加固技术的协同应用

梁健朝

广东合正建筑物鉴定检测有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ETQM.2025070024

摘要： 随着社会发展，房屋结构安全性变得愈发重要。本文探讨房屋结构安全性检测鉴定与加固技术的协同应用，强调检测鉴定为加固设计提供精准依据，加固实施反馈优化检测方案。研究涵盖初始检测、加固设计施工及后续评估监测全流程，通过案例分析验证协同应用的有效性，为房屋安全管理提供科学指导，推动精细化与高效化发展。

关键词： 房屋结构；检测鉴定；加固技术

Collaborative Application of Safety Testing, Identification, and Reinforcement Technology for Building Structures

Liang Jianchao

Guangdong Hezheng Building Appraisal and Testing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： With the development of society, the safety of housing structures has become increasingly important. This article explores the collaborative application of building structural safety testing, identification, and reinforcement technology, emphasizing that testing and identification provide accurate basis for reinforcement design, and feedback optimization testing schemes are implemented for reinforcement. The research covers the entire process of initial detection, reinforcement design and construction, and subsequent evaluation and monitoring. Through case analysis, the effectiveness of collaborative applications is verified, providing scientific guidance for building safety management and promoting refined and efficient development.

Keywords： house structure; testing and identification; reinforcement technology

引言

房屋结构安全性是保障人民生命财产安全的关键，随着城市化进程的加快和既有建筑的老化，房屋结构检测鉴定与加固技术的重要性日益凸显。近年来，国家出台了一系列政策以加强房屋安全管理，如《住房城乡建设部关于印发〈房屋市政工程生产安全重大事故隐患判定标准（2024版）〉的通知》（建质规〔2024〕5号），明确了房屋市政工程生产安全重大事故隐患的判定标准，为房屋结构安全检测鉴定提供了政策依据。本文旨在探讨房屋结构安全性检测鉴定与加固技术的协同应用，分析其在实际工程中的应用效果，为提升房屋结构安全管理水平提供参考。

一、房屋结构安全性检测鉴定概述

（一）房屋结构安全性检测鉴定的定义与范围

房屋结构安全性检测鉴定是指通过对房屋结构的外观、材料性能、构件承载能力、整体稳定性等方面进行系统检测和分析，评估房屋结构的安全性和可靠性。其主要对象包括各类民用建筑、工业厂房、历史建筑等，范围涵盖房屋的主体结构（如梁、板、柱、墙等）、基础、屋面、楼地面等关键部位^[1]。检测鉴定的目的是识别结构中存在的安全隐患，如裂缝、变形、材料老化等问题，并为后续的加固维修提供科学依据。通过明确的检测范围和规范的鉴定流程，确保房屋在使用过程中的安全性和耐久性。

（二）房屋结构安全性检测鉴定的重要性

房屋结构安全性检测鉴定在保障房屋使用安全方面发挥着至关重要的作用。它能够及时发现结构中的潜在问题，防止因结构失效导致的安全事故，保护人员生命和财产安全^[2]。在房屋全生命周期管理中，安全性检测鉴定是确保房屋从设计、施工到使用阶段安全性和可靠性的关键环节。通过定期检测鉴定，可以及时掌握房屋结构的健康状况，合理安排维护和加固措施，延长房屋使用寿命，同时为房屋的改造、扩建和拆除提供科学依据，确保房屋在整个使用周期内的安全性和经济性^[3]。

二、房屋结构安全性检测鉴定方法

（一）常规检测鉴定方法

常规检测鉴定方法是房屋结构安全性评估的基础手段。外观检查与裂缝分析通过对房屋结构的直观观察，记录裂缝的位置、长度、宽度和形态，初步判断结构的受损情况^[4]。材料性能检测则进一步评估结构的内在质量，例如采用回弹法或钻芯法检测混凝土强度，利用钢筋探测仪检测钢筋的分布和锈蚀情况。这些方法操作简便、成本较低，能够快速提供结构表面和材料性能的基本信息，为后续的详细检测和鉴定提供重要参考。

（二）先进检测技术

随着科技的发展，先进检测技术在房屋结构安全性检测鉴定中得到广泛应用。无损检测技术如超声波检测和雷达检测，能够深入结构内部，检测混凝土内部的缺陷、裂缝和钢筋状况，无需对结构造成破坏，具有高效、准确的特点^[5]。动态检测技术如振动测试和模态分析，通过测量结构的振动响应，分析结构的动态特性，评估结构的整体性能和损伤程度。这些先进检测技术能够提供更全面、更深入的结构信息，为复杂结构的检测鉴定提供了有力支持，提高了检测结果的可靠性和准确性。

三、房屋结构加固技术

（一）常用加固技术

1. 增大截面加固法

增大截面加固法是通过在原有构件上增加混凝土和钢筋，增大构件截面尺寸以提高承载力和刚度的加固方法。其适用范围广泛，可用于梁、板、柱、墙等构件的加固，尤其适用于受弯、压弯和拉弯构件。施工时，需对原构件表面进行处理，如凿毛、涂刷界面剂等，以增强新旧混凝土的粘结力。新增混凝土的强度等级应符合设计要求，施工工艺包括现浇混凝土、喷射混凝土等。该方法的优点是加固效果显著，能有效提高构件的承载能力和变形能力，但也存在湿作业量大、养护期长、占用建筑空间等缺点^[6]。

2. 粘贴纤维复合材料加固法

粘贴纤维复合材料加固法利用胶结材料将纤维复合片材粘贴于构件表面，达到补强加固的目的。纤维复合材料具有高强度、高模量、耐腐蚀、耐久性好、不增加自重和体积等优点。施工流程包括表面处理、胶粘剂涂抹和纤维复合材料粘贴，施工时需注意纤维复合材料的剪裁和粘贴质量。该方法适用于受弯、轴压、大偏压构件，但不适用于小偏压构件和素混凝土构件。其优点是施工简便、快速，对结构外观影响小，且能有效提高构件的承载力和延性。

（二）新型加固技术

1. 碳纤维布加固技术

碳纤维布加固技术是利用碳纤维布通过粘贴技术固定在房屋建筑结构上，以增强结构的承载力和耐腐蚀性。碳纤维布具有质量轻、强度高、耐腐蚀等性能特点^[7]。在应用案例中，碳纤维布

加固技术被广泛应用于各种建筑结构的加固，如梁、板、柱等，加固效果显著，能有效提高结构的承载能力和抗震性能。例如，在某老旧房屋加固项目中，采用碳纤维布加固技术后，结构的承载力显著提升，且施工过程对居民生活影响较小。

2. 钢筋网砂浆加固技术

钢筋网砂浆加固技术是一种在混凝土构件外表面附加钢筋网，并涂抹砂浆以形成加固层的加固方法。其工艺流程包括钢筋网的布置、砂浆的涂抹和养护。施工要点包括确保钢筋网与原构件的连接牢固，砂浆涂抹均匀，厚度适中。与其他加固方法相比，钢筋网砂浆加固技术具有施工效率高、成本低、防火和耐腐蚀性好等优点。它适用于多种结构的加固，如混凝土梁、柱、墙等，尤其在砌体墙抗震加固中应用广泛。

四、房屋结构检测鉴定与加固技术的协同应用

（一）协同应用的必要性

1. 检测鉴定为加固设计提供依据

检测鉴定是加固设计的先导环节，其通过多种检测手段精确评估房屋结构的现状，包括构件的尺寸、材料性能、裂缝分布、变形情况等。这些详尽的检测数据能够帮助工程师准确判断结构的承载能力和安全状况，从而确定需要加固的具体部位和加固程度^[8]。例如，通过超声波检测发现混凝土内部存在缺陷，通过碳化深度检测确定钢筋锈蚀程度，这些信息为加固设计提供了科学依据，确保加固措施的针对性和有效性，避免过度加固或加固不足，提高结构的安全性和经济性。

2. 加固实施对检测鉴定的反馈作用

加固实施后的反馈对检测鉴定具有重要意义。通过再次检测加固后的结构，可以验证加固效果是否达到预期目标，确保加固措施的有效性和可靠性。例如，通过变形监测和承载力测试，可以评估加固后的结构性能是否得到提升。此外，加固实施过程中的反馈还可以优化后续检测方案，调整检测重点和方法。例如，若加固后发现新的裂缝或变形，可能表明加固设计需要进一步优化。这种动态反馈机制有助于持续改进检测鉴定与加固技术的协同应用，形成一个闭环管理过程，确保房屋结构的长期安全和可靠性。

（二）协同应用的流程与方法

1. 初始检测鉴定阶段

初始检测鉴定阶段是房屋结构安全性评估的基础，需制定科学合理的检测方案，明确检测目标、方法和范围。检测方案应根据房屋的类型、使用年限、历史改造情况等因素综合制定，确保检测工作的全面性和针对性^[9]。数据采集包括外观检查、材料性能测试、裂缝检测、变形测量等。通过数据分析，初步评估结构的安全性和可靠性，识别潜在问题。例如，利用超声波检测混凝土内部缺陷，通过回弹法测试混凝土强度，结合裂缝宽度和分布情况，评估结构的损伤程度。

2. 加固设计与施工阶段

基于检测结果的加固设计是协同应用的关键环节。设计人员

根据检测数据,选择合适的加固方法,如增大截面、粘贴纤维复合材料、碳纤维布加固等,并制定详细的加固方案。加固设计需综合考虑结构的承载能力、耐久性和经济性,确保加固措施既能满足安全要求,又具有经济合理性。在加固施工过程中,需严格控制施工质量,确保加固措施的实施符合设计要求。施工过程中的质量控制包括材料检验、施工工艺监督和隐蔽工程验收等^[10]。

3. 后续检测鉴定与评估阶段

后续检测鉴定与评估阶段是协同应用的重要环节,用于验证加固效果和评估结构的长期性能。通过检测加固后的结构,评估其承载能力和耐久性,确保加固措施的有效性。例如,通过振动测试和模态分析评估结构的动态性能,通过裂缝监测评估结构的稳定性。同时,根据检测结果提出长期监测和维护建议,为房屋的全生命周期管理提供支持。长期监测建议包括定期检查结构的关键部位,监测裂缝发展情况和变形趋势。维护建议则包括合理使用房屋、避免超载使用、定期进行保养等。

(三) 协同应用的案例分析

1. 某老旧房屋的检测鉴定与加固实践

某老旧房屋因长期使用出现多处裂缝和局部变形,需进行检测鉴定与加固。检测鉴定过程中,采用外观检查、超声波检测和材料性能测试等方法,全面评估结构现状,明确裂缝位置、宽度及材料强度等关键信息。基于检测结果,选择增大截面和粘贴碳纤维布的加固方法,针对性地提升结构承载能力和稳定性。加固实施后,通过再次检测验证加固效果,结果显示结构承载能力和

稳定性显著提升,裂缝得到有效控制,房屋安全性得到保障。

2. 某受损房屋的修复与加固案例

某房屋因自然灾害受损,需进行修复与加固。通过详细的检测鉴定,评估损伤程度,确定受损部位和加固需求。采用碳纤维布加固技术和钢筋网砂浆加固技术进行协同加固。加固实施后,通过振动测试和模态分析验证加固效果,结果显示结构整体性能显著提升,抗震能力增强。该案例表明,检测鉴定与加固技术的协同应用能够有效解决复杂结构问题,确保房屋的安全性和可靠性。

五、结束语

本文深入探讨了房屋结构安全性检测鉴定与加固技术的协同应用,揭示了两者紧密结合的重要性与优势。研究发现,检测鉴定为加固设计提供了精准依据,通过精确评估结构现状,明确了加固部位与程度,确保加固措施的针对性与有效性。加固实施后的反馈进一步优化了检测方案,形成了动态改进的管理闭环。协同应用的流程涵盖初始检测、加固设计施工以及后续评估监测,各环节紧密衔接,显著提升了房屋结构的安全性与耐久性。通过案例分析,进一步验证了协同应用在实际工程中的有效性,为老旧及受损房屋的修复加固提供了科学指导,推动了房屋结构安全管理的精细化与高效化发展。

参考文献

- [1] 郑智强. 房屋结构安全性检测鉴定与加固技术 [J]. 广东建材, 2023, 39(12): 34-36.
- [2] 王嘉琪. 房屋结构安全性检测鉴定与加固技术探究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(17): 1421.
- [3] 李昊炜, 王哲, 高宇, 等. 论房屋结构安全性检测鉴定与加固技术 [J]. 电脑校园, 2021(10): 6545-6547.
- [4] 陈伟铭. 房屋结构安全性检测鉴定与加固初探 [J]. 河南建材, 2019(4): 98-99.
- [5] 李韬. 房屋结构安全性检测鉴定与加固 [J]. 建材与装饰, 2017(2): 60-61.
- [6] 戎波涛. 房屋结构安全性检测鉴定与加固方法探究 [J]. 中国房地产业, 2020(36): 256.
- [7] 郑德明. 分析房屋结构安全性检测鉴定与加固 [J]. 建材发展导向(上), 2017, 15(10): 293-294.
- [8] 周凯强. 房屋结构安全性检测鉴定与加固的研究 [J]. 建材与装饰, 2019(1): 40-41.
- [9] 陈礼礼. 房屋结构安全性检测鉴定与加固探究 [J]. 建材与装饰, 2018(17): 39-40.
- [10] 梁冠吕, 莫历衡. 房屋结构安全性检测鉴定与加固探究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2019(7): 10-11.

浅谈安全生产“三道防火墙”的建立

王德全

辽宁港口股份有限公司大连港轮驳分公司, 辽宁 大连 116001

DOI:10.61369/ETQM.2025070031

摘 要 : 近年来随着我国有关安全生产法律、法规的不断健全和完善,国家对安全生产的高度重视,我国安全生产形势良好,但各类事故仍然时有发生,给人命、财产造成重大损失,为了在生产经营过程中确保安全,要加大风险识别管控、隐患排查治理、完善应急管理力度,确保人命、财产安全,避免环境污染。结合吉林德惠禽业公司火灾爆炸事故,和大家一起分享如何建立安全生产“三道防火墙”,避免和减少险情、事故发生,避免和减少事故的损失。

关 键 词 : 安全生产事故; 安全生产三道防火墙

A Brief Discussion on the Establishment of "Three Firewalls" for Production Safety

Wang Dequan

Dalian Port Barge Branch, Liaoning Port Co., LTD., Dalian, Liaoning 116001

Abstract : In recent years, with the continuous improvement and perfection of laws and regulations concerning production safety in our country, the state has placed high importance on production safety. The situation regarding production safety in China is good, but various accidents still occur from time to time, causing significant loss of life and property. To ensure safety during production and operation, it is necessary to strengthen risk identification and control, hidden danger investigation and management, and improve emergency management efforts to ensure the safety of lives and property and prevent environmental pollution. Drawing on the fire and explosion accident at Jilin Dehui Poultry Company, I would like to share with everyone how to establish the "three firewalls" for production safety to avoid and reduce emergencies and accidents, thereby minimizing their losses.

Keywords : production safety accident; three firewalls of production safety

引言

中国古代思想家、哲学家、政治家、教育家孟子曰:“君子不立于危墙之下”,为我们指明了做好安全管理的道理和方法:一是防患于未然,预先觉察潜在的危險,并采取防范措施;二是一旦发现自己处于危險境地,要及时的离开。我们带着这个道理回顾一下德惠禽业公司火灾爆炸事故案例。

一、吉林德惠禽业公司火灾爆炸事故

1.事故经过:2013年6月3日6时10分左右,德惠市宝源丰公司主厂房一车间女更衣室西面与毗邻的二车间配电室的上部电器线路短路,引燃周围可燃物。当火势蔓延到氨设备和氨管道区域,燃烧产生的高温导致氨设备和氨管道发生物理爆炸,大量氨气泄露,介入了燃烧。厂方使用大量聚氨酯泡沫保温材料和聚苯乙烯夹芯板等易燃材料,燃烧产生大量有毒气体,特别是大量的氨气,造成现场395人中121人遇难,76人受伤及重大财产损失,

直接经济损失1.82亿元。



图1 (吉林德惠禽业公司火灾爆炸事故相关图片)

2.该禽业公司火灾爆炸事故原因分析:

禽业公司存在的危險源:制冷系统中的液氨。存在的安全风险:液氨具有燃烧、爆炸、窒息的风险。

禽业公司存在的安全隐患:

- (1) 液氨管线无隔热防护
- (2) 生产厂房无防火隔离
- (3) 使用聚氨酯泡沫保温材料
- (4) 相关地点无消防警报
- (5) 应急逃生通道关闭
- (6) 未开展培训消防演练

(7) 禽业公司、禽业公司施工方、施工监理、各级政府、监管部门存在的工程质量和、监督检查、审核监管、竣工验收、安全检查等失职、渎职行为^[1]。

事故原因：事故发生前存在上述各类安全隐患，事故发生后安全隐患就是事故的原因，事故直接原因是设备设施的不安全状态及人的不安全行为，间接原因是管理上的缺陷。上述安全隐患中(1)(2)(3)为设备设施的不安全状态，(4)(5)为人的不安全行为，(6)(7)为管理上的缺陷。该企业忽略了上述道理，未能预先觉察潜在的危险（液氨）、未能通过消除——替代——技术控制——管理控制——个体防护手段化解、降低、管控存在的风险，未能防患于未然（各类隐患排查整改）、未能采取各类防范措施、火灾爆炸事故发生时未能安全撤离，导致重大火灾爆炸事故发生，使人命、财产造成不可挽回的重大损失^[2]。生产企业、施工单位、工程监理、审核审批、消防检查等因工程质量、生产经营、监理失职、主管部门审批/验收/检查渎职失职等相关人员受到相应的法律制裁^[3]。

二、加强安全生产三道防火墙建设，确保人员、财产、环境安全

（一）第一道防火墙——风险管控（风险识别、风险控制）

(1) 风险识别：作为生产经营单位首先要识别出在生产经营过程中存在的各类风险。GB/T 13861-2022《生产过程中危险和有害因素分类与代码表》是从事故的原因角度，把危险有害因素分为4大类（人、物、环、管）。在生产经营过程中有危险有害因素就有安全风险，要从危险有害因素入手查找在生产经营过程中存在的各类安全风险^[4]。安全风险分为四类：重大风险、较大风险、一般风险、较小风险。生产经营单位要不断识别各类风险，要让每位职工熟知身边存在的风险，也就是风险告知。上述事故案例企业公司存在液氨具有燃烧、爆炸、窒息的风险，如果识别出该风险，而且相关人员熟知存在该风险并对该风险予以管控，就不会发生如此大的损失^[5]。

(2) 风险控制：（人员、物、环境、管理）

1) 人的安全风险控制：法律控制（安全生产法规）、操作规程（行为控制）、制度控制（责任制度）、培训控制（培训制度）。

2) 物的安全风险控制：规范要求、维护制度、操作规程、安全投入控制。

3) 环境的安全风险控制：管理制度、三同时、安全投入控制

安全环境。

4) 管理的安全风险控制：完善安全管理体系控制管理风险。

该禽业公司对存在的风险未有效管控，安全管理混乱，安全培训、安全投入不到位，对人员、设备设施、作业环境、安全管理存在的危险有害因素带来的安全风险管控不到位，最后酿成特别重大事故^[6]。

（二）第二道防火墙——隐患治理（隐患排查、隐患整改）

(1) 隐患排查：

1) 隐患排查的内容包括风险识别是否全面、风险管控是否到位（法律、法规、规章、规范是否及时识别评价、职责是否清晰、操作/制度/维护/应急程序须知是否完善、培训是否到位、职工是否有能力和意识做好安全工作）。如果是“否”，那就是隐患。该企业公司隐患排查不到位，对上述事故分析中提到的7项隐患未及时发现或发现后不重视不整改，导致事故发生^[7]。

2) 隐患排查手段包括安全评价（高风险行业）、行业主管部门检查、安全管理体系内外审核、上级部门检查（避免形式主义，做到“四不两直”）、聘请第三方检查、内部检查（日、周、月、季、半年、年、节假日、关键时期等内部检查）等等。显然该企业公司及相关部门未规范开展各类隐患排查工作^[8]。

3) 排查隐患的基本方法包括：①直观经验法②基本分析法③工作安全分析法④安全检查表法⑤安全标准化法。该禽业公司、及相关部门更没有利用科学有效的隐患排查方法，开展隐患排查^[9]。

(2) 隐患整改：

1) 对排查出的隐患进行分类：

2) 隐患排查整改流程图：

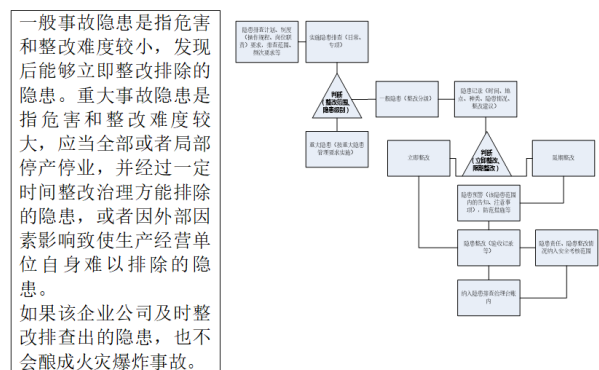


图2（隐患排查整改流程图）

（三）第三道防火墙——应急管理（应急准备、应急响应）

(1) 应急准备：应急准备包括制定可行应急预案（综合预案、专项预案、现场处置方案）、按时开展有效应急演练（各类应急演练）、确保充足应急保障（物资、队伍等保障）。该企业公司应急准备不到位：未开展应急演练、相关处所无消防警报、液氨管线无隔热防护、生产厂房无防火隔离等，应急准备是不完善的^[10]。

(2) 应急响应:



只有完善的应急准备,才能有有效的应急响应。该企业公司由于无完善的应急准备,导致应急响应失败,造成重大人员伤亡及财产损失。从重庆到拉萨的川航 8633 由于驾驶舱挡风玻璃破裂,机长在 9600 米高空,抵抗零下 40 度低温,不能出现一次错误的 36 个精准手动操作,成功迫降成都,确保所有乘客、机组人员安全,这是一个有效的应急响应。川航 8633 的成功迫降离不开险情事前的完善应急预案、有效应急演练、充足的应急保障等完善应急准备。

图3 (川航 8633 机长刘传建及其他人员)

加大安全风险识别管控力度,把安全风险化解、降低、管控在隐患之前;加大隐患排查整改力度,把隐患消灭在险情、事故之前;加大应急管理力度,完善应急准备,确保有效的应急响应,避免或减少事故发生,避免或减少事故损失;在生产经营过程中我们要筑牢风险管控、隐患治理、应急管理三道防火墙,确保人员、财产、环境安全。

参考文献

[1]GB/T 13861-2022《生产过程中危险和有害因素分类与代码表》。
[2]GB6441-86《职工伤亡事故分类》。
[3]《中华人民共和国安全生产法》。
[4]《中华人民共和国消防法》。
[5]《中华人民共和国建筑法》。
[6]《安全生产事故隐患排查治理暂行规定》。
[7]《重大事故隐患判定标准汇编》。
[8]《生产安全事故应急条例》。
[9]《生产安全事故应急预案管理办法》。
[10]《生产经营单位安全事故应急预案编制导则》GB/T29639-2020。

建筑工程消防安全评估与消防设施维保的实践与创新

黄显朝

四川中鼎汇智安全技术服务有限公司, 四川 成都 610046

DOI:10.61369/ETQM.2025070037

摘 要 : 基于《“十四五”国家消防工作规划》与《建筑防火通用规范》要求, 研究聚焦建筑工程消防安全评估与维保创新。融合 BIM、AI 及物联网技术构建火灾动态预测模型与远程监控系统, 开发多学科评估工具, 优化疏散模拟与设施维护效率; 建立全生命周期维保模式与多方协同机制, 解决标准碎片化与动态适应性不足问题。未来需推进智慧消防与绿色建筑融合, 助力碳中和目标下的消防低碳转型。

关 键 词 : 建筑工程消防安全评估; 消防设施维保; 智慧消防

Practice and Innovation of Fire Safety Assessment and Maintenance of Fire Protection Facilities in Construction Engineering

Huang Xianchao

Sichuan Zhongding Huizhi Safety Technology Service Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610046

Abstract : Based on the requirements of the "14th Five-Year National Fire Control Work Plan" and the "General Code for Building Fire Protection", the research focuses on the fire safety evaluation and maintenance innovation of building engineering. Integrate BIM, AI and Internet of Things technologies to build fire dynamic prediction model and remote monitoring system, develop multidisciplinary assessment tools, and optimize evacuation simulation and facility maintenance efficiency; The whole life cycle maintenance model and multi-party coordination mechanism are established to solve the problems of standard fragmentation and insufficient dynamic adaptability. In the future, it is necessary to promote the integration of smart fire protection and green buildings, and help the low-carbon transformation of fire protection under the goal of carbon neutrality.

Keywords : fire safety evaluation of construction project; maintenance of fire fighting facilities; intelligent fire protection

引言

城市化进程加速与建筑功能复杂化对消防安全提出更高要求, 2023年《“十四五”国家消防工作规划》明确将智慧消防与风险评估纳入公共安全治理体系, 强调构建“防消结合”的全周期管控机制。当前高层建筑、地下空间及文物建筑的火灾防控需求激增, 传统消防管理模式在动态风险感知与设施维护效率方面显现短板, 2022年《建筑防火通用规范》(GB55037-2022) 修订后强化了建筑性能化防火设计与维保数字化要求, 倒逼技术创新与管理升级。尽管已有研究在评估模型构建与物联网技术应用上取得进展, 但跨区域标准差异、多主体协同机制缺失等问题制约系统性解决方案落地。本研究聚焦建筑工程消防安全评估方法优化与维保技术迭代, 结合 BIM、AI 及物联网技术探索创新路径, 旨在为新型城镇化背景下消防安全的科学化、精细化治理提供理论支撑与实践参考。

一、建筑工程消防安全评估与维保概述

(一) 建筑工程消防安全评估的基本概念

建筑工程消防安全评估是以系统性方法对建筑全生命周期的火灾风险进行识别、分析与管控的专业活动, 其核心目标在于通过科学预判与防控策略降低火灾发生概率及灾害损失^[1]。评估范围涵盖建筑规划、设计、施工、运营及改造各阶段, 核心要素包括建筑材料的耐火性能、防火分区设置、消防设施联动效能以及

人员疏散效率^[2]。评估内容聚焦三大维度: 建筑结构防火性能需确保承重构件耐火极限符合规范, 防止结构坍塌^[3]; 疏散通道设计需满足紧急情况下人员快速撤离需求, 包括通道宽度、标识系统及应急照明布局^[4]; 消防设施配置则涉及火灾报警系统、自动喷淋装置、防排烟系统等关键设备的覆盖率与可靠性, 强调主动防火与被动防火的协同作用^[5]。通过量化分析与动态监测, 评估体系为建筑消防安全提供全流程技术支持。

（二）消防设施维保的重要性与法规要求

消防设施维保是保障建筑消防安全的基础性工作，我国《消防法》明确规定建筑责任主体需定期维护消防设施，确保其处于有效状态，《建筑设计防火规范》进一步细化设备检测周期与性能标准。法规要求维保活动涵盖日常巡检、功能测试、故障修复及档案管理，未履行维保职责将承担法律责任。实践表明，维保缺失易导致设施失效并引发严重后果，例如某商业综合体因喷淋系统管道锈蚀堵塞未能及时修复，火灾时无法启动，火势迅速蔓延至整栋建筑；另一起高层住宅火灾中，疏散通道防火门闭门器损坏未维修，烟气侵入通道造成人员伤亡。此类事故凸显维保环节对设施功能完整性的决定性影响，需通过标准化流程与智能化监测手段强化执行力度，避免技术与管理漏洞叠加形成系统性风险。

二、消防安全评估的实践与现存问题

（一）现有消防安全评估方法

消防设施维保是保障建筑消防安全的基础性工作，我国《消防法》明确规定建筑责任主体需定期维护消防设施，确保其处于有效状态，《建筑设计防火规范》进一步细化设备检测周期与性能标准^[6]。法规要求维保活动涵盖日常巡检、功能测试、故障修复及档案管理，未履行维保职责将承担法律责任^[7]。实践表明，维保缺失易导致设施失效并引发严重后果，例如某商业综合体因喷淋系统管道锈蚀堵塞未能及时修复，火灾时无法启动，火势迅速蔓延至整栋建筑；另一起高层住宅火灾中，疏散通道防火门闭门器损坏未维修，烟气侵入通道造成人员伤亡。此类事故凸显维保环节对设施功能完整性的决定性影响，需通过标准化流程与智能化监测手段强化执行力度，避免技术与管理漏洞叠加形成系统性风险。

（二）评估实践中的主要问题

现行消防安全评估实践面临标准体系碎片化与动态适应性不足的双重挑战。标准体系不统一表现为地方规范与国家标准的技术参数冲突，例如部分省份对高层建筑防火分区面积的限定严于《建筑设计防火规范》，导致跨区域项目执行混乱。动态风险评估不足则暴露现有评估体系对建筑功能变更的滞后性，如商业建筑改造为综合体后，原评估结论未随人流密度增加、业态混合度提升而更新，致使疏散通道容量与消防设施负载能力不匹配。此外，既有评估多聚焦静态硬件条件，忽视使用阶段人为因素与设备老化对风险等级的叠加影响，亟需构建全周期动态监测与自适应评估机制以弥补缺口。

三、消防设施维保的实践与挑战

（一）消防设施维保的标准化流程

消防设施维保的标准化流程以系统性管控为核心，涵盖日常检查、定期维护与应急响应三大环节。日常检查聚焦设备基础功能验证，包括火灾报警控制器自检、灭火器压力监测及疏散指示

灯状态确认，检测周期根据设备类型设定为周检或月检，检测结果需实时录入电子化管理系统形成可追溯档案^[8]。定期维护则针对关键设施进行深度检测，如每季度对自动喷淋系统进行末端试水、年度开展防排烟风机全负荷测试，确保设备长期稳定性^[9]。应急维保机制强调故障分级响应，依据《消防设施操作规范》设定一般故障24小时内修复、重大故障立即停用并启动备用方案的时效性标准，通过预案演练与多部门联动降低突发风险扩散概率^[10]。

（二）维保实践中的关键挑战

维保实践面临人力与技术双重制约。维保人员专业素质不足表现为技能培训体系碎片化，部分从业人员缺乏消防电气系统调试或智能设备诊断能力，资质认证与实操考核脱节导致维护质量参差不齐。设施老化与技术滞后问题在老旧建筑改造中尤为突出，例如20世纪90年代建设的商场普遍存在消防管线锈蚀、报警系统与新型物联网设备协议不兼容等问题，改造时需重新规划管线布局并升级控制系统，成本与技术要求陡增。此外，传统维保模式依赖人工巡检，难以实时监测隐蔽工程缺陷（如电缆绝缘层老化），亟需引入智能诊断技术与全寿命周期管理策略破解瓶颈。

四、建筑工程消防安全的创新路径

（一）评估方法的创新

1. 智能化评估工具的开发

智能化评估工具通过技术创新突破传统方法的静态局限。基于AI的火灾风险动态预测模型整合建筑结构参数、人员流动数据与环境变量，采用机器学习算法实时分析火势蔓延路径与热辐射强度，生成风险等级图谱并自动优化应急预案。虚拟现实（VR）技术构建高精度建筑三维模型，模拟火灾场景中烟气扩散与人员疏散行为，通过沉浸式实验验证疏散通道设计的合理性，识别逃生瓶颈并优化标识系统布局。两者结合形成“预测-模拟-验证”闭环，显著提升评估结果的场景适配性与决策支持价值。

2. 多学科融合评估体系

多学科融合评估体系打破专业壁垒，将建筑空间规划、材料耐火性能研究与消防工程技术深度耦合。建筑学视角聚焦防火分区优化与疏散路径拓扑分析，材料学通过实验量化新型防火涂料与结构构件的热稳定性，消防工程则基于流体力学模拟烟气控制效率。例如，超高层建筑中碳纤维增强混凝土的耐火测试数据可直接导入BIM平台，联动喷淋系统布局与排烟风速设定，实现“材料-结构-设备”协同评估。跨学科数据共享与模型互嵌推动评估从单一灾害防控向综合韧性提升转型。

（二）维保技术的升级

1. 物联网（IoT）在维保中的应用

物联网技术通过构建消防设施远程监控网络，实现设备运行状态的实时感知与数据交互。基于传感器集群部署，火灾报警控制器、喷淋系统压力值、防排烟风机转速等关键参数可实时传输至云端平台，结合边缘计算分析异常波动并触发预警信号。例如，管道压力骤降或烟感探头故障可通过系统自动定位并推送工

单，缩短故障响应时间。此类技术突破传统人工巡检的时空限制，形成“监测－诊断－处置”闭环管理，显著提升维保效率与设施可靠性。

2. 智能诊断与预测性维护

智能诊断技术依托传感器数据构建设备健康状态模型，通过机器学习算法识别故障特征与性能退化规律。振动传感器监测水泵轴承磨损趋势，温度传感器追踪电缆接头过热风险，数据融合后预测剩余使用寿命并生成维护优先级清单。预测性维护策略基于风险阈值动态调整检测周期，例如喷淋管网锈蚀速率超限时自动缩短试水间隔，避免突发泄漏。该模式将维保从被动应急转向主动防控，降低运维成本的同时延长设施生命周期，为高密度建筑群消防系统可持续运行提供技术保障。

（三）管理机制的优化

1. 全生命周期维保管理模式

全生命周期维保管理模式将消防设施管理延伸至建筑全周期，覆盖设计、施工、运营、改造及废弃阶段。设计阶段需预置设施可维护性参数，如预留传感器接口与管线检修通道；施工阶段通过 BIM 技术模拟设备安装路径，避免后期维保盲区；运营阶段依托物联网平台实时采集设备运行数据，动态调整维护策略；改造阶段结合既有设施老化评估与新技术兼容性分析，制定渐进式升级方案；废弃阶段则需规范设施拆除流程，防止遗留安全隐患。该模式通过数据贯通与流程标准化，实现维保资源精准投放与风险前置管控。

2. 多方协同的消防责任体系

多方协同消防责任体系通过权责界定与协作机制消解管理主

体间的职能壁垒。政府层面强化法规约束与执法监督，明确业主单位的主体责任与维保企业的技术连带责任；业主需建立消防设施档案并保障维保资金投入，定期参与第三方安全审计；维保企业则需提升服务透明度，通过区块链技术实现检测记录不可篡改与责任追溯。协作机制包括消防部门主导的跨主体应急演练、智慧消防数据共享平台建设以及行业信用评价体系联动，形成“监管－执行－反馈”闭环，确保责任链条无缝衔接与风险共担。

五、结束语

建筑工程消防安全评估与维保体系通过标准化流程与技术升级显著提升火灾防控能力，实践表明，智能化评估工具与多学科融合方法增强了风险预判精度，物联网技术与预测性维护策略则优化了设施可靠性，全生命周期管理与多方责任协同机制有效弥补管理断层。研究局限性体现在区域性数据样本覆盖不足，智能算法在复杂建筑场景中的泛化能力有待验证，老旧设施改造中的技术兼容性问题仍需长期跟踪。未来发展中，智慧消防需深化 AI 与数字孪生技术的集成，构建“评估－维保－应急”一体化平台；绿色建筑导向下，消防系统应与光伏、储能等低碳技术协同设计，探索耐火材料循环利用路径；碳中和目标驱动消防设施能耗优化与排放管控，推动风险评估标准纳入全生命周期碳足迹核算，实现安全性与可持续性的双重突破。

参考文献

[1] 吴欣. 建筑消防安全评估相关问题探讨 [J]. 城市建设, 2010(4).
[2] 晏德强, 曹娟. 建筑防火性能化评估与设计若干问题的分析 [J]. 中国科技博览, 2010(35): 1.
[3] 黄友云. 浅论建筑消防安全性能化评估技术 [J]. 科学与财富, 2013(3): 1.
[4] 陈娟娟, 汪晖, 方正. 文物建筑消防安全评估预警系统研究 [J]. 消防科学与技术, 2019, 38(2): 295–298.
[5] 龚敬恒. 建筑施工现场消防安全风险评估方法研究 [J]. 消防界（电子版）, 2023, 9(21): 126–128.
[6] 承奇, 王明峰, 周汝, 等. 消防设施维保单位工作效能综合评估体系研究及应用 [J]. 消防技术与产品信息, 2016(1): 3.
[7] 李玉林, 李保林. 小议消防设施维保单位在建筑消防设施管理中的作用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2014, (27): 814–814.
[8] 陈和雄. 消防安全评估方法的分析 [J]. 建材与装饰: 中旬, 2013(3): 2.
[9] 王艳林. 论高层建筑消防设施维护管理 [J]. 魅力中国, 2014(24): 1.
[10] 刘庆恩. 火灾高危单位消防安全评估方法及预警监管机制建设 [J]. 武警学院学报, 2014(4): 5.

基于介质分类的地下林火差异化扑救方法优化与实践效果评估

刘洁, 田小武

北京市森林消防综合救援总队, 北京 101100

DOI:10.61369/ETQM.2025070002

摘要 : 本文聚焦基于介质分类的地下林火差异化扑救方法优化与实践效果评估。在优化路径上, 提出构建 “技术 + 经验” 协同定位体系, 融合现代科技与传统经验精准定位火区; 依据腐殖质层、泥炭层、树根等不同燃烧介质的特性, 制定差异化扑救策略; 强化 “监测 – 灭火 – 防控” 全流程联动, 建立 “空天地” 一体化监测网络与闭环响应机制; 研发轻量化、精准化专用工具以适应复杂地形。同时从专业队伍建设、技术标准完善、应急物资储备三方面提出保障措施。实践效果评估显示, 该优化措施经济效益显著, 投资回报率高; 社会效益突出, 实现扑救人员零伤亡, 消防员作业强度与心理压力降低, 生态破坏程度减轻, 土壤结构与生物多样性得到有效保护, 还带动了森林防火科技产业发展, 为地下林火高效防控与生态保护提供了实践参考。

关键词 : 地下林火; 介质分类; 差异化扑救; 方法优化

Optimization and Practical Effect Evaluation of Differential Rescue Methods for Underground Forest Fires Based on Media Classification

Liu Jie, Tian Xiaowu

Beijing Forest Fire Comprehensive Rescue Corps, Beijing 101100

Abstract : This article focuses on the optimization and practical effect evaluation of differential rescue methods for underground forest fires based on media classification. In terms of optimization, we propose the construction of a "technology + experience" collaborative positioning system that integrates modern technology and traditional experience to accurately locate fire areas. Based on the characteristics of different combustion media such as humus layer, peat layer, and tree roots, we develop differentiated rescue strategies. We strengthen the entire process linkage of "monitoring – fire extinguishing – prevention and control", establishing an integrated "air-ground-space" monitoring network and closed-loop response mechanism. Additionally, we develop lightweight and precise special tools to adapt to complex terrains. At the same time, safeguard measures are proposed from three aspects: professional team building, improvement of technical standards, and emergency material reserves. The evaluation of practical effects shows that the optimized measures have significant economic benefits and a high return on investment. The social benefits are prominent, achieving zero casualties among rescue personnel, reducing firefighters' workload and psychological pressure, and minimizing ecological damage. The soil structure and biodiversity are effectively protected, and it has also driven the development of the forest fire prevention technology industry. This provides a practical reference for efficient prevention and control of underground forest fires and ecological protection.

Keywords : underground forest fire; media classification; differentiated rescue; method optimization

引言

与地表火相比, 地下林火火点隐蔽于地下, 传统探测手段难以精准定位, 易导致灭火作业盲目性大, 不同地下介质的燃烧特性差异显著, 单一扑救方法难以适应复杂火场环境, 不仅灭火效率低下, 还可能因过度干预造成二次生态破坏。在此背景下, 如何针对不同地下燃烧介质的特性制定差异化扑救策略, 优化现有技术方法与流程, 成为提升地下林火扑救效率、降低生态损失的关键。本文聚焦 “介质分类” 这一核心维度, 系统探索地下林火差异化扑救方法的优化路径。同时通过实践效果评估, 从经济、社会与生态维度量化优化措施的应用价值, 旨在为地下林火的科学防控提供理论支撑与实践范式, 助力森林生态系统的可持续保护。

一、地下林火扑救方法的优化路径

（一）构建“技术+经验”的定位体系

构建“技术+经验”的定位体系，需实现现代科技与传统经验的深度融合。在技术层面，可综合运用无人机遥感、红外热成像探测、地面三维激光扫描等技术，实时捕捉地下火释放的热量异常区域，通过数据建模绘制火点分布热力图，精准定位火区边界与核心燃烧点。在经验层面，需充分发挥资深消防员的现场判断能力。他们可根据地形特征、植被类型及燃烧痕迹，辅助验证技术探测结果，修正数据偏差。同时建立“技术数据+经验案例”数据库，将历史扑救案例中的火区特征、地形参数、扑救方案与当前探测数据进行比对分析，形成智能化决策支持系统，为现场指挥提供精准参考，实现“技术定界、经验补漏”的协同定位效果。

（二）基于燃烧介质的差异化扑救

近几年来，由于全球气温的不断升高，导致北方林区气候偏旱，林地地温偏高，森林地下火有增长的趋势，地下火作为一种随机干扰因子引发森林火灾，使预防与扑救变得十分困难^[1]。地下林火的燃烧介质主要包括腐殖质层、泥炭层、树根及地下枯枝落叶等，不同介质的燃烧特性差异显著，需采取针对性扑救策略。对于腐殖质层火灾，其燃烧速度较慢但持续时间长，核心是降低温度并隔绝氧气。可采用“注水渗透+翻耕掩埋”组合法，先通过高压水枪将水均匀注入腐殖质层，利用水的比热容特性快速降温，再用小型翻耕设备将燃烧后的灼热腐殖质翻转，与表层湿土混合，彻底阻断复燃条件^[2]。对于泥炭层火灾，因其孔隙发达、透气性强，单纯注水易流失，需采用“注浆封堵+压实覆盖”法。使用特制泥浆泵将黏土与水混合的泥浆注入泥炭层裂隙，填充孔隙以阻断氧气流通，随后用重型机械压实表层，配合铺设防火毡，形成立体隔离屏障。对于树根火灾，其燃烧常伴随地表火蔓延，需“断根隔离+重点灭火”同步进行^[3]。先清除树根周围1-2米范围内的可燃物，设置环形隔离带，阻止火势向周边树木扩散；再用便携式火焰喷射器对准燃烧树根直接喷射阻燃剂，或通过钻孔注入灭火干粉，针对性消除火点。

（三）强化“监测-灭火-防控”全流程联动

地下林火扑救的高效性依赖于“监测-灭火-防控”各环节的无缝衔接，需建立全流程闭环联动机制。在监测环节，构建“空天地”一体化监测网络，卫星遥感负责大范围火区宏观监测，无人机巡检实现中距离动态跟踪，地面监测站实时采集火区温湿度、一氧化碳浓度等数据，所有数据通过5G/北斗系统实时传输至指挥中心，形成动态火情看板。在灭火环节，基于监测数据制定动态扑救方案，指挥中心根据火区位置、介质类型及蔓延速度，实时向一线队伍推送灭火路线、设备调配建议及安全预警；灭火团队通过便携式终端接收指令，反馈现场情况，实现“监测数据-决策指令-执行反馈”的瞬时响应^[4]。例如当监测到火区向针叶林区域蔓延时，立即调度携带阻燃剂的无人机优先在蔓延路径设置隔离带。在防控环节，结合前序环节数据开展长效管理。灭火结束后，基于监测记录绘制火区影响范围图，对高危区

域实施“网格化巡查”，并通过播撒草种、种植耐火植物等方式修复生态，从源头降低复燃风险。

（四）研发轻量化、精准化工具

地下林火扑救环境多为山地、密林，传统重型设备难以抵达，且过度使用灭火剂易造成生态破坏，需重点研发轻量化、精准化的专用工具。在轻量化工具方面，聚焦便携性与动力适配性^[5]。开发重量小于5kg的手持红外火点定位仪，配备高清显示屏，可实时显示地下3米内的温度异常点，续航时间不低于8小时；设计背负式高压细水雾装置，采用锂电池驱动，水箱容量50L，喷射距离达15米，适合单人在陡坡、密林等复杂地形操作，相比传统水泵减重60%以上。在精准化工具方面，突出靶向灭火能力^[6]。研发智能阻燃剂喷射系统，通过激光测距仪锁定火点坐标，自动计算喷射角度与剂量，将阻燃剂精准喷洒至燃烧核心区，用量较传统方式减少30%-50%；试制地下火专用“热感应钻孔器”，可根据温度变化自动调节钻孔深度（最深2米），定向注入灭火剂，避免盲目作业。

二、优化实施的保障措施

（一）专业队伍建设

地下林火扑救对人员的专业素养要求极高，需打造一支“技术过硬、经验丰富、协同高效”的复合型队伍，从人员选拔、培训体系、实战演练三个维度强化建设。在人员选拔上，建立多维度准入标准，除具备基础消防技能外，需掌握森林生态学、土壤学基础知识，熟悉红外探测、无人机操作等技术工具的使用原理；同时注重心理素质考核，确保在高温、浓烟、复杂地形等极端环境下保持冷静判断^[7]。可通过与林业院校合作，定向培养兼具理论与实操能力的专业人才，充实一线队伍。在培训体系上，构建“分层分类+动态更新”机制。针对新人开展基础培训，涵盖地下火燃烧机理、常用工具操作、安全防护规范等内容；针对骨干队员强化进阶培训，包括数据分析、复杂介质扑救策略制定、应急指挥协调等；定期邀请消防专家、生态学者开展专题讲座，同步引入VR模拟系统，模拟腐殖质层深火、泥炭层复燃等场景，提升队员的应急处置能力。在实战演练上，坚持“常态化演练+跨区域协同”^[8]。每月组织针对性演练，模拟不同地形、不同介质的扑救场景，检验队伍的工具配合、战术执行、安全防护能力；每季度联合气象、林业、应急管理等部门开展跨区域综合演练，模拟“监测-灭火-防控”全流程联动，强化多部门信息共享、资源调配的协同效率，确保在实战中形成“技术组探测定位、灭火组精准作业、保障组物资供给”的高效配合模式。

（二）技术标准完善

统一规范的技术标准是确保地下林火扑救科学化、规范化的核心，需从基础标准、操作标准、评估标准三个层面构建完善体系，解决“标准缺失、执行不一”的问题^[9]。在基础标准方面，明确地下火关键参数的定义与测量规范。在操作标准方面，细化各类扑救场景的流程规范。针对腐殖质层、泥炭层、树根等不同介质火灾，制定标准化操作手册，明确工具选用、药剂配比、作

业步骤等细节；规范“技术 + 经验”定位体系的协同流程，明确技术数据与经验判断的权重分配，避免因操作差异导致的效率损耗或安全风险。在评估标准方面，建立扑救效果与生态影响双维度评价体系，从灭火效率、资源消耗、安全指标评估扑救效果；从土壤理化性质、植被恢复速度评估生态影响，通过量化指标倒逼扑救方法的持续优化，实现“高效灭火”与“生态保护”的平衡。

（三）应急物资储备

地下林火扑救的突发性与复杂性，要求应急物资储备具备“种类齐全、布局合理、动态补充”的特点。构建“分级储备 + 智能调度”的保障机制，确保物资在关键时刻“调得出、用得上”^[10]。在储备种类上，覆盖全流程所需物资。除常规灭火设备外，重点储备地下火专用工具，包括手持红外定位仪、背负式细水雾装置、热感应钻孔器等轻量化设备；配备应急通信设备，确保在无信号区域的信息畅通；储备生态修复物资，为灭火后的植被恢复提供支撑。同时根据不同区域的介质特征差异化储备，如泥炭层分布区增加泥浆泵、防火毡的储备量，腐殖质层较厚区域多备翻耕设备。在布局规划上，实施“中心库 + 前置点”分级储备。在省级层面设立中心库，集中储备大型设备和大宗物资；在重点林区设立前置储备点，存放常用工具和应急物资，确保火灾发生后 1 小时内可抵达现场；通过 GIS 系统绘制物资储备分布图，标注各储备点的物资种类、数量、调配路线，实现可视化管理。建立“智能监测 + 定期更新”机制，利用物联网技术对储备物资进行实时监测，自动预警设备损耗、药剂过期等问题；每季度根据火灾高发期规律、技术升级情况调整储备清单，淘汰老旧设备，补充先进工具；制定物资轮换制度，将临近保质期的阻燃剂等物资用于演练消耗，确保储备物资始终处于可用状态，避免应急时出现“物资失效”的被动局面。

三、实践效果评估

（一）经济效益评估

从成本投入与损失减少两方面构建经济效益评估模型，量化优化措施的经济价值。成本维度主要包括优化措施的直接投入，如专用工具采购、人员培训、应急物资储备升级。以某省年平均

发生 10 起中等规模地下火计算，年度优化措施总投入约 800 万元。收益维度分为直接收益与间接收益，直接收益包括火灾蔓延面积减少带来的森林资源损失降低，扑救效率提升减少的人力物力消耗；间接收益包括生态修复成本降低，周边产业影响减少。经核算，该省应用优化措施后，年度净经济效益达 1.474 亿元，投资回报率约 1842%，经济效益显著。

（三）社会效益评估

在人员安全保障层面，优化措施通过精准定位火点减少了盲目作业，轻量化工具有效降低了消防员的体力消耗，而全流程联动机制则大幅缩短了人员在危险环境中的暴露时间。数据清晰显示，应用优化措施后，地下火扑救人员的伤亡率从以往的 0.3 人 / 百起降至零，消防员的平均作业强度降低 40%，采用焦虑自评量表测量的心理压力评分也从 65 分降至 42 分，职业安全感得到显著提升。生态安全维护方面，差异化扑救策略与精准灭火技术的应用，使火灾对土壤结构的破坏程度降低 60%，林下生物多样性保存率提升至 85%。以某国家级自然保护区为例，其核心区发生地下火时，因应用了优化措施，未对濒危物种栖息地造成任何影响，这一成果获得国际生态保护组织的高度认可，进一步增强了区域生态系统的稳定性。在社会治理提升上，多部门联动机制的不断完善，让公众对森林防火工作的满意度得到提升；跨区域协同扑救的成功案例被纳入应急管理部典型经验库，为全国地下火防控工作提供了可借鉴的示范样本。与此同时，优化措施的推广还带动了森林防火科技产业的发展，催生出 3 家专注于地下火扑救工具研发的高新技术企业，创造就业岗位 500 余个，形成了“防灭火技术进步 — 产业升级 — 社会参与”的良性循环。

四、结束语

地下林火防控需精准把握不同地下介质燃烧规律，实现科学扑救与生态保护协同。本文基于介质分类优化的差异化扑救方法，通过“技术 + 经验”定位、分介质策略、全流程联动及专用工具研发，构建了可操作的防控体系。实践显示该体系显著提升灭火效率、减少损失，保障人员安全并减轻生态破坏，为应对北方林区地下火挑战提供了可行方案。

参考文献

- [1] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞等. 大兴安岭林区地下火形成火环境研究 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 62–67. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2003.04.011.
- [2] 陈劭. 林火扑救效能组合技术研究 [D]. 北京林业大学, 2008.
- [3] 王志成. 夏季森林地下火扑救技术与机具 [C]// 当代林木机械博览 (2004) [出版者不详], 2005: 85–86.
- [4] 王志成, 刘绍卓. 夏季森林地下火分类及火行为特点 [J]. 林业科技, 2004, (04): 26–28.
- [5] 李中岳. 森林火灾的分类及对策 [J]. 安徽消防, 1994, (02): 6–7.
- [6] 何诚, 舒立福, 张思玉等. 我国寒温带林区地下火发生特征及研究 [J]. 森林防火, 2014, (4): 22–25.
- [7] 陈韵如, 杨扬, 张喜亭等. 大兴安岭森林火烧恢复年限对土壤磷及其有效性的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7977–7986. DOI: 10.5846/stxb201806051264.
- [8] 李忠琦, 张淑云, 李华等. 黑龙江省呼中林区地下火发生的气象条件分析 [J]. 森林防火, 2004, (1): 25–26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2511.2004.01.012.
- [9] 于立峰. 森林地下火蔓延方式及火行为特点研究 [J]. 林业勘查设计, 2012, (2): 111–112. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4505.2012.02.056.
- [10] 冯玉元. 安全扑救山区林火的措施探讨 [J]. 森林防火, 2018, (02): 46–50.