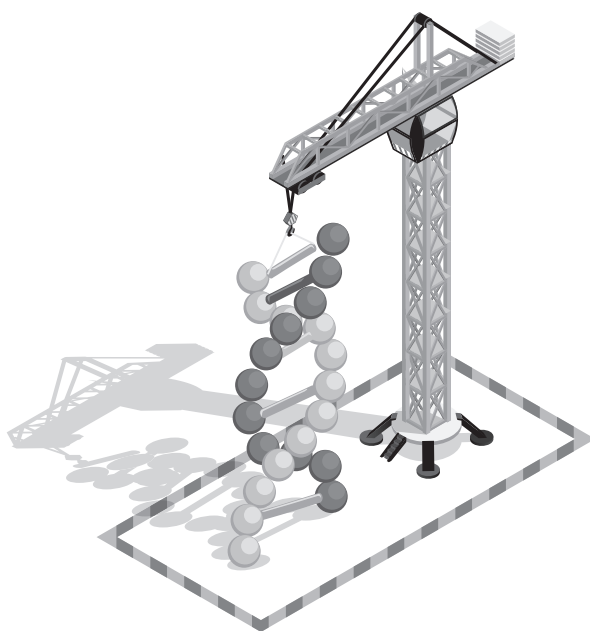


工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第3卷 第7期 2025年7月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编 辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

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

网 址: <https://www.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。



工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- | | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 001 | 分布式电源接入下的用电检查新模式探讨
Exploration of A New Mode for Electricity Inspection under
Distributed Power Access | 张雪, 吕国昭, 杨卓
Zhang Xue, Lv Guozhao, Yang Zhuo |
| 005 | 600吨精锻机齿轮卡盘的焊接维修
Welding and Maintenance of 600 Ton Precision Forging
Machine Gear Chuck | 温润陞, 吴文俊, 段志勇, 李帅
Wen Runsheng, Wu Wenjun, Duan Zhiyong, Li Shuai |
| 008 | 城市道路近远期结合设计的探讨
——以春明路(潞苑北大街—京哈高速)道路工程为例
Exploration of Combined Design for Short and Long Term of City Roads
—Taking Chunming Road (Luyuan North Street - Jingha Expressway)
Road Project as an Example | 王晶晶
Wang Jingjing |
| 012 | 一种液流电池背板翻转机构的应用效果研究
Study on the Application Effect of Liquid Flow Battery Backplane
Flipping Mechanism | 郭德华
Guo Dehua |
| 015 | 城市道路沥青路面裂缝成因及防治技术研究
Research on the Causes and Prevention Techniques of Cracks in
Asphalt Pavement of City Roads | 杨鰲飞
Yang Zhanfei |
| 018 | 光面爆破技术在隧道施工中的应用
Application of Smooth Blasting Technology in Tunnel Construction | 辛文海
Xin Wenhai |
| 022 | 制冷与空调设备电气自动控制技术探讨
Discussion on the Electrical Automatic Control Technology of Refrigeration
and Air-Conditioning Equipment | 廖辉
Liao Hui |
| 025 | 废弃碳纤维制备工程应用
的复合材料井盖
Recycling Waste Carbon Fiber for Manufacturing Composite
Manhole Covers | 刘丹, 拓亚亚, 赵关芳, 田银俊, 赵学平
Liu Dan, Tuo Yaya, Zhao Guanfang, Tian Yinjun, Zhao Xueping |
| 029 | 燃煤电厂锅炉运行中的受热面磨损
与防护技术研究
Study on Heat Surface Wear and Protection Technology in Boiler Operation of Coal-
Fired Thermal Power Plant | 孟凡成, 王向阳, 田星宇
Meng Fancheng, Wang Xiangyang, Tian Xingyu |
| 032 | 铁路运输安全监管体制的现状与优化策略
The Current Situation and Optimization Strategies of Railway
Transportation Safety Supervision System | 李海
Li Hai |
| 035 | 城市更新行动中老旧市政管道BIM 数字化改造关键技术
Key Technologies of BIM Digital Transformation for Old Municipal Pipelines
in Urban Renewal Actions | 张明敏, 黄方, 王爽
Zhang Mingmin, Huang Fang, Wang Shuang |
| 038 | 多源异构数据融合及其在全息测绘中的应用
Multi-source Heterogeneous Data Fusion and Its Application
in Holographic Surveying and Mapping | 张中姣, 沈迅
Zhang Zhongjiao, Shen Xun |
| 041 | 工程项目进度管理中大数据分析的应用研究
Application Research of Big Data Analysis in
Project Schedule Management | 刘恕全
Liu Shuquan |
| 044 | 山区预应力混凝土连续刚构桥结构健康监测设计与实践
Design and Practice of Structural Health Monitoring of Prestressed Concrete
Continuous Rigid Frame Bridges in Mountainous Areas | 董李, 邱治强
Dong Li, Qiu Zhiqiang |
| 050 | 重力坝施工过程中质量控制与技术难点研究
Research on Quality Control and Technical Difficulties in the Construction
Process of Gravity Dams | 卜崇财
Bu Chongcai |

053	压力锅产品结构创新与 LCIM 技术集成应用 Structural Innovation of Pressure Cooker Products and Integrated Application of LCIM Technology	刘春贵 Liu Chungui
056	UO ₂ 芯块制造关键工艺研究 Research on Key Processes for Manufacturing UO ₂ Core Blocks	张李新, 蔡贵川, 李春冬, 何非凡 Zhang Lixin, Cai Guichuan, Li Chundong, He Feifan
059	能量结构元素假说: 构建物质与能量的周期性框架——基于元素周期律的理论探索 Hypothesis of Energy Structural Elements:Constructing a Periodic Framework of Matter and Energy— A Theoretical Exploration Based on the Periodic Law of Elements	李振华 Li Zhenhua
062	基于人工智能算法的基坑变形预测模型构建与工程验证 Construction and Engineering Verification of a Foundation Pit Deformation Prediction Model Based on Artificial Intelligence Algorithms	杨继位 Yang Jiwei
065	市政工程施工现场管理的重要性及路径 Importance and Pathways of On-site Management in Municipal Engineering Construction	王晔 Wang Ye

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

068	信息化技术在建筑工程造价管理中的应用分析 Application Analysis of Information Technology in Construction Project Cost Management	邱李梅, 薛永辉 Qiu Limei, Xue Yonghui
071	建筑电气工程中的智能化技术应用与管理创新 Application and Management Innovation of Intelligent Technology in Building Electrical Engineering	沈柳青 Shen Liqing
074	建筑结构工程混凝土施工质量控制关键点分析 Analysis of Key Points for Quality Control in Concrete Construction of Building Structure Engineering	孙卫军 Sun Weijun
077	基于 BIM 技术的建筑工程施工管理与资料编制研究 Research on Construction Management and Data Compilation of Building Engineering Based on BIM Technology	梁锐铿 Liang Ruikeng
080	房地产项目中建筑电气施工的精细化管理与质量控制 Refined Management and Quality Control of Building Electrical Construction in Real Estate Projects	林学鹏 Lin Xuepeng
083	绿色施工技术在建筑工程中的应用效果评价体系构建 Construction of Evaluation System for the Application Effect of Green Construction Technology in Construction Engineering	徐琳 Xu Lin
086	建筑工程与市政工程检测中的智能化技术应用 Application of Intelligent Technology in Construction and Municipal Engineering Testing	陈明涛 Chen Mingtao

水利与港口工程 | WATER CONSERVANCY AND PORT ENGINEERING

090	水电站监控系统实时数据采集与动态响应机制研究 Research on Real-Time Data Acquisition and Dynamic Response Mechanism of Hydropower Station Monitoring System	李华威 Li Huawei
093	基于海绵城市理念的市政排水系统改造研究 Research on the Transformation of Municipal Drainage System Based on the Concept of Sponge City	张辉, 刘俊 Zhang Hui, Liu Jun
096	地下水渗流对地质工程围岩稳定性的影响机制及数值模拟研究 Study on the Influence Mechanism and Numerical Simulation of Groundwater Seepage on the Stability of Surrounding Rocks in Geological Engineering	高晓龙, 吕国斌, 胡宸 Gao Xiaolong, Lv Guobin, Hu Chen
099	水利工程材料检测技术管理与性能分析研究 Research on the Management and Performance Analysis of Water Conservancy Engineering Materials Testing Technology	贾森伟 Jia Senwei
102	建筑材料检测技术在水利工程建设中的应用与管理 Application and Management of Building Material Testing Technology in Water Conservancy Projects	田利波 Tian Libo

电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

105	无人机遥感技术在铁路智能防洪中的应用 Application of UAV Remote Sensing Technology in Intelligent Flood Control of Railway	郝崇凯 Hao Chongkai
108	信息物理系统建模的多自主移动机器人路径规划与调度研究 Research on Path Planning and Scheduling of Multi-autonomous Mobile Robots in Cyber-Physical System Modeling	柳君, 周晨, 张译 Liu Jun, Zhou Chen, Zhang Yi
111	顶驱下套管装置智能监控系统设计 Design of Intelligent Monitoring System for Top Drive Down Casing Device	程晓君, 金贵全, 李庆延, 张祎琳, 赵文昊, 宋佳音 Cheng Xiaojun, Jin Guiquan, Li Qingyan, Zhang Yilin, Zhao Wenhao, Song Jiayin
114	计算机技术在物联网中的应用与研究 The Application and Research of Computer Technology in the Internet of Things	胡少杰 Hu Shaojie
117	车载动中通收发机的研制与应用 Development and Application of Vehicular Mobile Transceiver	李文裕 Li Wenyu
120	轻工电器领域新材料应用探索: 从高分子到金属的实践之路 Exploration of New Material Application in Light Industry and Electrical Appliances: the Practical Way From Polymer to Metal	高天元 Gao Tianyuan
123	基于机器学习的智能家居入侵检测系统 Smart Home Intrusion Detection System Based on Machine Learning	崔佳, 易晓鹏, 郭平, 刘传松 Cui Jia, Yi Xiaopeng, Guo Ping, Liu Chuansong

分布式电源接入下的用电检查新模式探讨

张雪, 吕国昭, 杨卓

国网武汉市经开区(汉南区)供电公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025070001

摘要 : 分布式电源在电力系统中应用越来越广泛, 传统用电检查模式已经无法适应新的发展需求。本文对分布式电源接入下的用电检查展开研究, 分析了分布式电源接入给用电检查带来的影响, 包括对电力系统运行特性和检查工作的影响。提出一种新的用电检查模式, 该模式包含数据采集层、数据传输层、数据处理与分析层和应用层。通过实际案例, 分析了新模式的实施步骤和效果, 为提升分布式电源接入下用电检查工作的效率和质量提供参考。

关键词 : 分布式电源; 用电检查; 新模式; 大数据分析; 物联网技术

Exploration of A New Mode for Electricity Inspection under Distributed Power Access

Zhang Xue, Lv Guozhao, Yang Zhuo

Wuhan Economic and Technological Development Zone (Hannan District) Power Supply Company of State Grid Corporation of China, Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Distributed power is increasingly widely used in the power system, and the traditional mode of electricity inspection can no longer adapt to the new development needs. This studies the electricity inspection under the condition of distributed power access, analyzes the impact of distributed power access on electricity inspection, including the impact on the operation characteristics of the power system the inspection work. A new mode of electricity inspection is proposed, which includes the data collection layer, the data transmission layer, the data processing and analysis layer, and the application layer Through actual cases, the implementation steps and effects of the new mode are analyzed, which provides a reference for improving the efficiency and quality of electricity inspection work under the condition of distributed power.

Keywords : distributed power; electricity inspection; new mode; big data analysis; Internet of things technology

引言

近年来, 全球都在倡导节能减排和可持续发展, 太阳能、风能、生物质能等分布式电源因为清洁环保、灵活高效, 在电力系统中的应用越来越广泛。分布式电源接入后, 改变了传统电力系统单向供电的模式, 让电力系统结构和运行特性发生很大变化, 给电力行业发展带来新的机遇和挑战。

用电检查是保障电力系统安全、稳定、经济运行, 维护电力用户合法权益的重要工作。在分布式电源接入的新情况下, 传统检查模式无法满足实际需求。所以, 探索和构建新的用电检查模式很有必要, 这能解决分布式电源接入带来的问题, 保障电力系统可靠运行。对分布式电源接入下用电检查新模式的探讨, 具有重要的现实意义和理论价值。

一、分布式电源接入对用电检查的影响

(一) 电力系统运行特性的改变

1. 拓扑结构复杂化

传统电力系统中, 电网结构比较固定, 潮流一般从发电厂流

向变电站, 再到电力用户, 具有单向性。分布式电源接入后, 电力系统拓扑结构变得复杂多样。分布式电源可能分布在电网各个节点, 甚至用户侧, 形成多个电源点。不同类型、不同容量的分布式电源接入位置和方式不一样, 导致电网拓扑结构经常变化。这种复杂性增加了电力系统运行状态分析和故障诊断的难度, 对

用电检查人员了解电网结构和运行情况提出更高要求^[1]。

2. 双向潮流的出现

分布式电源接入打破了传统电力系统单向潮流的格局。当分布式电源输出功率大于本地负荷需求时，功率会向电网倒送，形成双向潮流。双向潮流改变了电网原有的电压分布和功率损耗特性。在一些情况下，可能会导致局部电压升高，超出允许范围，影响电力设备正常运行。另外，双向潮流会让继电保护装置动作特性发生变化，增加误动作风险，给用电检查工作中的故障排查和定位带来新难题^[2]。

3. 电能质量问题

分布式电源输出功率受自然条件，比如光照、风速等影响较大，具有间歇性和波动性。这会导致接入点电压波动、闪变，谐波含量增加等电能质量问题。例如，光伏发电系统在云层遮挡时，光伏板输出功率会迅速变化，引起电压波动；一些电力电子设备在分布式电源系统中广泛应用，会产生大量谐波，污染电网。电能质量问题不仅会影响电力设备使用寿命和正常运行，还可能对其他用户用电设备造成损害，是用电检查工作需要重点关注的问题。

（二）用电检查工作面临的新挑战

1. 检查内容与范围的扩大

分布式电源接入后，用电检查对象不再只包括传统电力用户设备，还包括分布式电源设备及其控制系统。检查内容除了设备电气性能、安全性能，还要关注分布式电源接入方式是否符合规范，与电网的兼容性，以及对电网运行的影响等。而且，因为分布式电源分布广泛，甚至深入用户侧，用电检查范围大幅增加，这对电力企业检查资源配置和检查计划安排提出更高要求^[3]。

2. 技术要求的提高

为应对分布式电源接入带来的新问题，用电检查人员需要具备更全面的专业知识和技能。不仅要熟悉传统电力设备检查技术，还要掌握分布式电源工作原理、控制策略，以及电力电子技术、通信技术等相关知识。随着智能电网发展，新型检测设备和不断出现，比如智能电表、在线监测系统等，检查人员需要能熟练使用这些设备和技术，准确分析和判断电力系统运行状态。

3. 安全风险的增加

分布式电源接入改变了电力系统故障特性，发生故障时，故障电流大小、方向和持续时间都可能变化，增加了故障排查和处理的难度。另外，分布式电源设备可能安装在用户侧，电力企业对其运行维护掌控力相对较弱，用户私自更改设备参数、违规操作等行为可能引发安全事故。而且，分布式电源系统中的一些设备，比如储能装置，在运行过程中存在安全隐患，过充、过放可能导致火灾等事故，给用电检查工作带来更大安全风险^[4]。

二、分布式电源接入下用电检查新模式设计

（一）总体架构

1. 数据采集层

数据采集层是用电检查新模式的基础，负责采集各类电力设备和系统运行数据。采集对象包括分布式电源设备、电力用户设备、电网节点设备等。采集数据类型包括电气量数据，如电压、电流、功率等；设备状态数据，如开关位置、设备温度等；还有环境数据，如光照强度、风速等。为全面采集数据，采用多种传感器和智能终端设备，比如智能电表、电流互感器、电压互感器、温度传感器等。这些设备对采集到的数据进行初步处理后，通过有线或无线通信方式，传输到数据传输层^[5]。

2. 数据传输层

数据传输层主要功能是把数据采集层采集到的数据，安全、可靠地传输到数据处理与分析层。根据数据传输特点和需求，采用多种通信技术结合的方式，比如光纤通信、无线通信（4G/5G、Wi-Fi 等）。对于实时性要求高的数据，比如故障信息、重要设备运行状态数据，优先采用光纤通信或高速无线通信技术，确保数据快速传输。对于非实时性数据，比如历史用电数据、设备档案信息等，可以采用成本较低的无线通信技术传输。同时，为保障数据传输安全，采用加密、认证等技术手段，防止数据被窃取或篡改。

3. 数据处理与分析层

数据处理与分析层是用电检查新模式的核心，负责对采集到的数据进行深度处理和分析。首先，对数据进行清洗、去噪、归一化等预处理，去除数据中的异常值和噪声，提高数据质量。然后，运用大数据分析技术，挖掘和分析海量电力数据，提取有价值信息。比如，通过数据分析可以评估电力设备状态、预测故障、预测负荷等。此外，结合人工智能技术，构建智能分析模型，实时监测和分析电力系统运行状态，及时发现潜在安全隐患和问题。

4. 应用层

应用层是用电检查新模式的用户接口，为用电检查人员提供各种功能服务。主要包括用电检查管理、设备状态监测、故障诊断与处理、报表生成等功能模块。用电检查人员通过应用层界面，能实时查看电力设备运行状态，制定检查计划，开展检查工作。当系统检测到异常情况或故障时，应用层会及时发出预警信息，并提供故障诊断和处理建议，帮助检查人员快速定位和解决问题。同时，应用层还能根据用户需求生成各类报表，为电力企业管理决策提供数据支持^[6]。

（二）关键技术

1. 大数据分析技术

大数据分析技术在用电检查新模式中很重要。通过分析海量电力数据，可以挖掘数据背后的规律和潜在价值。比如，利用数

据挖掘算法分析用户用电行为数据，建立用户用电行为模型，识别和预警异常用电行为。同时，分析电力设备运行数据，可以预测设备故障发生概率，提前安排维护计划，降低设备故障率。此外，大数据分析技术还能用于电力系统负荷预测、电网规划等方面，为电力企业科学决策提供支持。

2. 物联网技术

物联网技术让电力设备实现互联互通，设备之间可以进行数据交互和共享。在用电检查新模式中，通过物联网技术把分布式电源设备、电力用户设备、电网节点设备等接入物联网，实现对设备的远程监控和管理。物联网技术还能为大数据分析提供丰富数据来源，通过采集和分析设备实时数据，及时了解设备运行状态，提高用电检查工作效率和准确性。此外，物联网技术应用还能实现设备智能化控制，比如根据电网负荷情况，自动调节分布式电源输出功率。

3. 人工智能技术

人工智能技术为用电检查工作提供智能化解决方案。通过构建深度学习模型，比如卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）等，可以分析电力设备的图像、声音等数据，实现设备故障自动诊断。例如，利用图像识别技术监测电力设备外观，及时发现设备损坏、渗漏等问题；利用声音识别技术分析变压器等设备运行声音，判断设备是否异常。此外，人工智能技术还能应用于用电检查智能决策支持系统，为检查人员提供决策建议和优化方案^[7]。

三、用电检查新模式的实施与案例分析

（一）实施步骤

1. 设备改造与升级

要实现用电检查新模式的数据采集和传输功能，对现有电力设备进行改造和升级很关键。一方面，针对分布式电源设备、电力用户设备和电网节点设备，根据它们的特性和运行要求，安装各类传感器和智能终端。比如，在分布式光伏发电设备上安装功率传感器，实时监测发电功率；在电力用户配电箱中安装智能电表，准确采集用户用电数据。这些设备通过内置通信模块，具备数据采集和通信功能。另一方面，考虑数据传输的不同需求，优化和扩容通信网络。为满足实时性要求高的数据传输，铺设专用光纤线路，搭建高速稳定的通信通道；对于一般性数据，采用4G/5G无线通信技术，降低通信成本。此外，升级电力企业信息系统，引入高性能服务器和大数据处理平台，提升系统数据处理和分析能力，满足新模式运行需求^[8]。

2. 人员培训

新模式实施对用电检查人员专业素质和业务能力提出更高要求，所以要开展针对性培训。培训内容包括分布式电源技术、大数据分析技术、物联网技术、人工智能技术等。在分布式电源技

术培训中，通过理论讲解和实地参观，让检查人员了解不同类型分布式电源工作原理和运行特性。大数据分析技术培训，重点教数据挖掘算法、数据分析工具的使用，让检查人员能从海量数据中提取有价值信息。物联网技术培训围绕设备互联互通、远程监控展开。人工智能技术培训引入深度学习模型应用案例。

3. 制度建设

为保障用电检查新模式顺利实施，要建立健全相关制度和规范。首先，制定详细的用电检查工作标准和流程，明确检查人员在各个环节的职责和权限，从数据采集、传输到处理和分析，每个步骤都有严格操作规范。比如，规定数据采集时间间隔、数据传输格式要求。同时，建立数据安全管理制度，采用数据加密、访问权限控制等技术手段，保护数据，防止数据泄露和滥用。此外，构建考核评价机制，从检查工作准确性、及时性、效率等方面，评估和考核用电检查工作效果。每月对检查人员工作进行量化打分，把考核结果与绩效挂钩，激励检查人员提高工作质量和效率。

（二）案例分析

1. 案例背景

某地区电力公司响应节能减排政策，在多个区域大规模接入分布式光伏发电系统。随着分布式电源数量增加，传统用电检查模式在应对新的电力系统运行特性时，出现很多问题。在故障排查方面，分布式电源接入后电网拓扑结构复杂，故障电流方向多变，导致故障排查不及时，停电时间延长。在电能质量监测方面，光伏发电的间歇性和波动性，让电网电压波动、谐波含量增加，而传统监测手段不能实时、全面监测，电能质量问题经常发生。为提升用电检查工作水平，改善电力服务质量，该公司决定引入分布式电源接入下的用电检查新模式，解决当前难题^[9]。

2. 新模式实施过程

该公司按既定方案，推进新模式实施。首先，对分布式光伏发电系统及相关电力设备进行改造和升级。给每台光伏逆变器安装智能监测终端，实时采集发电数据；在电力用户侧安装智能电表，实现双向数据传输。同时，优化通信网络，在重要节点部署5G基站，确保数据传输稳定可靠。其次，组织用电检查人员参加多轮培训。邀请行业专家集中授课，通过理论讲解、案例分析和现场实操相结合的方式，提升检查人员对新模式和相关技术的掌握程度。最后，建立一系列制度规范。制定《分布式电源用电检查工作手册》，明确工作流程和考核标准，从制度层面保障新模式顺利运行。

3. 实施效果评估

新模式运行一段时间后，取得显著成效。在故障排查方面，借助智能监测系统 and 数据分析技术，故障排查时间大幅缩短，平均故障处理时间从原来数小时缩短到半小时以内，大大提高了电力系统供电可靠性。在电能质量保障方面，通过实时监测和分析电能质量数据，及时发现并解决多个电能质量问题，比如调整光

伏逆变器输出参数，降低了电压波动和谐波含量，保障了电力用户用电质量。此外，通过深度分析用户用电行为和设备运行数据，为电网规划和设备维护提供科学依据。比如，根据用户用电峰谷特性，合理调整电网运行方式，降低了运营成本，实现电力系统高效运行^[10]。

四、结语

分布式电源的广泛接入给电力系统带来了深刻变革，也对用电检查工作提出了新的挑战。本文探讨的用电检查新模式，通过

构建涵盖数据采集层、数据传输层、数据处理与分析层和应用层的总体架构，运用大数据分析、物联网、人工智能等关键技术，实现了对分布式电源接入下电力系统的全面、实时、智能监测和检查。通过实际案例分析验证了新模式在提高用电检查工作效率、提升电力系统运行可靠性和保障电能质量等方面的有效性。然而，随着电力技术的不断发展和分布式电源应用的日益普及，用电检查工作仍需持续探索和创新，不断完善和优化用电检查模式，以适应电力行业发展的新需求，为经济社会的可持续发展提供可靠的电力保障。

参考文献

- [1] 曹金铭, 范开俊, 徐丙垠, 等. 高比例构网型逆变型分布式电源接入下的微电网就地保护方案 [J/OL]. 电网技术, 1-16[2025-03-24].
- [2] 孙林. 分布式电源接入下的配电网线损计算与降损技术 [J]. 科学技术创新, 2024, (24): 63-66.
- [3] 陈春, 曹伯仲, 曹一家, 等. 高比例分布式电源接入下基于变分模式分解的励磁涌流辨识 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 94-104.
- [4] 邓秋根, 艾青伟. 分布式电源接入下配电网运行方式多目标优化 [J]. 电工技术, 2023, (05): 72-74.
- [5] 曾昭伟, 段晓瑞, 李锦. 含分布式电源接入条件下的配网继电保护研究 [J]. 贵州电力技术, 2015, 18(06): 41-42+9.
- [6] 李建杰, 钟文涛, 穆明亮, 等. 考虑不确定性分布式电源的电能质量概率性选址定容策略 [J]. 山东电力技术, 2025, 52(03): 40-48.DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.005.
- [7] 朱昕昱, 傅家伟. 含分布式电源逆变器的配电网线路故障定位分析 [J]. 电工电气, 2025, (01): 48-53.
- [8] 程海军, 亓雅婷, 李玲. 含分布式电源的配电网差动保护研究 [J]. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2025, 21(01): 35-41.
- [9] 郭耀顺, 张晋. 分布式电源接入机制及微电网的稳定性分析 [J]. 大众用电, 2025, 40(01): 36-38.
- [10] 曾平. 分布式电源配电网故障的检测与定位方法研究 [J]. 家电维修, 2025, (02): 125-127.

600吨精锻机齿轮卡盘的焊接维修

温润陞, 吴文俊, 段志勇, 李帅
晋西铁路车辆有限责任公司, 山西 太原 030027
DOI:10.61369/ERA.2025070004

摘要 : 随着大型设备在制造业中的广泛应用, 其关键部件的损坏和维修逐渐成为影响生产效率和经济效益的重要因素。本文以晋西车轴股份公司600吨精锻机齿轮卡盘的焊接维修为例, 着重介绍了42CrMo中碳调质钢在CO₂气体保护焊工艺中的应用, 从焊接性能分析、工艺设计到焊后检测与效果评价, 全面阐述了焊接维修过程中应注意的关键技术要点和实施策略。并以实际的论证, 验证所拟定的焊接工艺具有良好的可行性, 为类似高强度中合金钢的焊接维修提供了可靠参考。

关键词 : 42CrMo 钢; 焊接性; CO₂ 气体保护焊; 焊接工艺; 设备维修

Welding and Maintenance of 600 Ton Precision Forging Machine Gear Chuck

Wen Runsheng, Wu Wenjun, Duan Zhiyong, Li Shuai
Jinxi Railway Vehicle Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030027

Abstract : With the widespread application of large equipment in manufacturing, the damage and repair of its key components have gradually become significant factors affecting production efficiency and economic benefits. This paper takes the welding repair of the gear chuck for a 600-ton precision forging machine at Jinxi Axle Co., Ltd. as an example, focusing on the application of 42CrMo medium-carbon quenched and tempered steel in CO₂ gas shielded arc welding. It comprehensively discusses the key technical points and implementation strategies to be mindful of during the welding repair process, from weldability analysis, process design, to post-weld inspection and effectiveness evaluation. The paper also validates the proposed welding process through practical demonstrations, proving its good feasibility and providing a reliable reference for similar high-strength medium-alloy steel welding repairs.

Keywords : 42CrMo steel; weldability; CO₂ gas shielded welding; welding process; equipment maintenance

前言

近些年我公司的各类大型设备越来越多, 随着使用年限的增加, 发生故障的几率也随之增加, 维修技术的重要性也就日益突出, 只有把设备又快又好地维修好, 才能保证设备的平稳运行, 保证生产的顺利进行, 我在多年的生产实践中, 运用自己的焊接专长, 维修了许多设备故障及工具工装。

2023年4月, 晋西车轴股份公司的600吨精锻机齿轮卡盘突然断裂, 造成车轴锻造停产, 这个齿轮卡盘是精锻机的关键部位^[1], 采用了42CrMo材料制造, 直径为1.2米, 厚度为200mm, 下面是齿轮形状, 上面有四个夹头, 在工作中要承受很大的扭矩, 损坏的就是这四个夹头, 要重新制造会很费时费钱, 所以决定修复利用, 重新制作四个夹头焊接在底座齿轮上, 这种材料属于中碳调质钢, 含C: 0.38~0.45%、Si:0.17~0.37%、Mn:0.5~0.8、Cr:0.9~1.2%、Mo:0.15~0.25%, 另含有微量的Ni、Cu等合金元素, 它的特点是强度高, 淬透性好, 韧性好, 淬火时变形小, 高温时有高的蠕变强度和持久强度。

一、42CrMo 钢焊接性能分析

根据 $CE=[C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15]\%$ 计算, 该材料的碳当量为0.87%, 可焊性较差。由于母材金属中含碳量高, 而数值较高的材料往往在焊接过程中容易出现裂纹, 这些裂纹主要是冷裂纹和热裂纹等。其原因在于: 在焊接过程中, 42CrMo钢的母材中含有较高的碳含量, 母材金属的一部分要熔化并进入

到焊缝金属中去, 这将致使焊缝金属含碳量增高, 焊缝凝固结晶时, 结晶温度区间大, 偏析倾向也较大, 加之含硫杂质和气孔的影响, 容易在焊层金属中引起热裂纹。特别是在收尾处, 裂纹更为敏感^[2]。

42CrMo钢淬硬倾向性大, 母材金属热影响区容易产生低塑性的淬硬组织, Ms点又低, 因而在淬火区产生大量脆硬的马氏体, 导致严重脆化, 工件愈厚, 则淬硬倾向愈大。该焊件刚性大, 若

焊条或焊接工艺选用不当,在焊件冷却至300℃以下时,容易沿热影响区的淬硬区产生冷裂纹。42CrMo 钢的焊接冷裂纹一般是在焊后冷却过程中,在 Ms 点附近或 200 ~ 300℃的温度区间产生的。冷裂纹的起源多发生在具有缺口效应焊接热影响区或有物理化学不均匀的氢聚集的局部地带。而且冷裂纹的出现时间具有不确定性,冷裂纹有时焊后立即出现,而有时则需要经过一段时间才会显现。这两种情况中以延迟裂纹的危害性更为严重,因此,在焊接 42CrMo 钢时,除了要关注焊接冷却速度外,还应特别注意氢气含量的控制。根据实践证明,钢种的淬硬倾向、焊接接头的氢含量及其分布,以及焊接接头的拘束应力状态是产生延迟裂纹的三大主要因素。因此为了尽可能的减少延迟裂纹的出现,一定要注意控制这三大因素。同时,焊接接头的淬硬倾向主要取决于钢种的化学成分,其次是结构形式,焊接工艺和冷却条件等。因而在上述因素控制的基础上,可以进一步采取焊后后热和缓冷等办法来调整冷却时间。适当延长临界冷却时间,可降低钢的淬硬倾向^[3]。

由于该齿轮卡盘需要在调质状态下焊接,焊态下使用,由此造成接头综合力学性能降低。因此,如何在保证焊接质量的同时,确保焊接接头的优良力学性能,是 42CrMo 钢焊接中的主要技术难点。为了防止冷裂纹的产生,并保证接头的综合力学性能,建议采用适合的焊接材料,合理调整焊接参数,并配合焊后热处理工艺,使接头能够承受使用过程中所产生的各种应力,保证其可靠性和长期稳定性。

二、焊接方法和焊材的选择

42CrMo 钢由于其独特的化学成分和力学性能,对焊接工艺的选择具有较高的要求。结合实际工况及维修需求,本文选用 CO₂ 气体保护焊法,结合 ER50-6 焊丝开展焊接工艺。CO₂ 气体保护焊是一种以 CO₂ 气体作为保护介质的熔化极电弧焊工艺,具有焊接效率高、工艺稳定性强等特点,非常适合大厚度、高强度钢材的焊接。其优势体现在如下几个方面:

(1) CO₂ 气体保护焊所使用的焊丝含碳量极低,在焊接过程中能够有效减少母材中碳的熔入,从而降低焊缝的碳含量。这种特性显著减少了热裂纹的形成概率,使得焊缝具备更高的稳定性。

(2) CO₂ 气体保护焊的电流密度较大,焊接电弧集中,单位时间内熔化的焊丝量大大提高,熔敷率高。这一特点使其在焊接大厚度工件时能够具有更短的焊接工时。

(3) CO₂ 气体具有氧化性,可有效减少焊接过程中氢气孔的产生,焊缝中扩散氢的含量低至 0.03ml/100g (相比之下,酸性焊条为 21.9ml/100g,碱性焊条为 8.15ml/100g)。此特性大幅降低了焊缝的氢致裂纹风险,提升了焊接接头的可靠性。

(4) CO₂ 气体保护焊由于熔池较小,焊接时的热输入较低,能够减小热影响区的范围。焊接过程中因热应力引起的变形及裂纹也会更小,焊接接头具有优良的综合力学性能,完全能够满足使用要求。

所以,采用 CO₂ 气体保护焊焊接 42CrMo 钢较适合,另外,根据材料强度和产品使用要求,选用 ER50-6 焊丝进行焊接也更加合适,ER50-6 焊丝的化学成分设计合理,能够与 42CrMo 钢母材相匹配。同时其低碳含量和合适的硅锰比例进一步确保了熔敷金属具有较高的抗裂性能和韧性^[4]。加之熔敷金属经过多层多道焊接后,能够形成致密的焊缝组织,焊接接头综合力学性能优异,完全满足高强度工件的使用要求。

三、工艺措施

(一) 焊接坡口选择

由于 42CrMo 钢焊件厚度大,为保证焊透性和减少填充金属的使用,采用 U 形坡口设计,内角平滑过渡,减小应力集中区域,坡口深度设定为 50mm。

(二) 焊前预热

42CrMo 钢的焊接过程容易受到冷裂纹的影响,为此,根据焊件情况,采用局部范围的预热处理,以焊接区域为中心,向两侧延伸 100-150mm,温度为 400℃左右,同时选用电阻加热器进行精准预热,配合移动式加热设备对复杂部件进行补充加热;用表面测温仪实时测量温度,确保焊件表面和内部的温度均匀性。

(三) 层间温度

合适的层间温度是防止焊接冷裂纹和获得优良焊接接头的必要条件之一,为了保证这一条件的达成,应将其控制在 350℃左右,同时在每道焊缝焊接完成后,立即测量温度;如果层间温度过低,需采用二次加热补温措施;在焊接过程中,严格监控焊接间隔时间,防止温度下降过快。

(四) 焊接工艺参数

为了确保焊透的同时减少焊缝残余应力,提高焊接接头的抗裂能力。焊接时采用多层多道焊接方法来降低焊接热输入,优化焊接热循环^[5]。该工艺所采用的焊接工艺参数见表 1 所示:

表 1 多层多道焊接工艺参数表

焊接层次	第一层(打底层)	中间层	盖面层
焊接电流(A)	280-300	260-280	240-260
电弧电压(V)	32-36	30-34	26-30

(五) 焊后热处理

焊后热处理在 42CrMo 钢焊接修复中可以用于消除焊接残余应力并改善焊接接头的力学性能。对此,焊后工件要及时进行去应力退火,温度为 600-650℃,保温时间根据工件厚度和结构复杂性确定,通常为 1-2 小时;其冷却方式采用炉冷至 200℃以下后自然冷却。

四、焊接过程中应注意的事项

1. 工件表面残留的油污和锈迹会在一定程度上降低焊缝的强度,甚至可能在高温下生成气孔或夹渣,影响焊接接头的可靠性。因此,焊前需认真清除工件表面的油污、铁锈、水渍等杂质,在清理时,可以针对坡口内部和周边区域采用如机械打磨、

化学清洗等方式进行反复处理，在潮湿等环境条件复杂的情况下，还需要进一步对工件表面进行干燥处理，防止湿气引发焊接缺陷。

2. 焊接过程中，温度控制不能局限于预热和层间温度，还要对整个焊接区域的热分布进行动态管理。在多层多道焊接中，每一层焊缝的热输入都会对母材产生新的影响，因此需要特别注意焊接热循环的均衡性。需要采用合适的焊接节奏，使每道焊缝之间有充分的散热时间，同时避免过度冷却，此过程非常需要经验和技术支持。而且焊接路径的规划应尽可能减少应力集中，可以考虑采用对称焊接或跳焊方式，此类方法有助于分散应力，还能提升焊缝的成形质量。

3. 在操作细节上，要注意对焊接起弧和收弧的处理，针对于大厚度材料的焊接，其焊接起弧点的选择需远离关键应力部位，以此减少热集中对母材的影响。而收弧则应注意填满弧坑，避免产生弧坑裂纹。焊接中还需关注焊道的搭接效果，注意其熔合良好，同时注意焊缝表面的平整性，避免形成应力集中点。

4. 为了减小焊接应力，每次环节完毕后，要用圆角锤头逐层锤击焊道表面，锤击的方向和力度需要根据焊缝的具体形状和热影响区的特性调整，相邻两焊层间的锤击方向要相反，减少焊接变形的可能。对于复杂结构或厚度较大的焊接件，除了机械锤击，还可以考虑在焊接完成后对焊件施加振动时效处理，以高频的振动进一步释放残余应力。

5. 焊件在焊接完成后立即进行加热处理，将其缓慢加热至600–650℃的退火温度。为了避免加热过快引起的热应力，建议升温速度为50–100℃/小时，具体速率根据焊件的厚度和结构复杂性确定。当焊件温度达到退火区间时，需根据工件厚度和焊缝复杂程度进行保温。厚度为50mm的工件保温时间为1–2小时，对于更大厚度的焊件，可适当延长保温时间。

五、效果

焊接完成后，工件经过48小时的静置后进行了超声波探伤，检测结果显示焊缝内部无裂纹、气孔、夹渣等常见缺陷，焊缝质量完全符合设计要求。同时，焊接接头的表面质量良好，成形均

匀，无明显的焊接变形现象。此次修复工艺恢复了齿轮卡盘的使用性能，但更为关键的是在生产时间和成本上取得了明显的优势。相比重新制造新的齿轮卡盘，修复方案节省了至少70%的生产时间，同时降低了约50%的成本开支。

另外根据焊缝力学性能的检测结果可以了解到，焊接接头的拉伸强度、冲击韧性以及硬度分布均达到或超过42CrMo钢的原设计标准，焊接区域的综合性能能够满足高强度工作条件下的实际需求。其是在高载荷条件下，焊缝区域表现出良好的稳定性和抗疲劳性能。

六、结论

1. 结合42CrMo钢的高强度和低可焊性特点，选择CO₂气体保护焊能够有效降低焊接过程中的裂纹风险，同时显著提高焊接效率。而选用ER50–6焊丝作为焊材，其优异的工艺性能和熔敷金属力学性能也完全满足修复需求。本次修复工作表明，合理选择焊材是保障焊接质量的基础，可显著减少焊缝缺陷，提升工件的综合性能。

2. 42CrMo钢在焊接过程中淬硬倾向明显，冷裂纹风险高。而基于将焊前预热温度控制在400℃左右，层间温度维持在350℃，以及焊后采用600–650℃的去应力退火处理，将有效防止焊接区域淬硬组织的生成，还进一步优化焊接接头的力学性能。本研究的结果表明，严格控制焊接热输入和冷却条件可以实现高质量的焊接。

3. 本次修复采用的多层多道焊接工艺，结合科学的坡口设计和焊接参数控制，焊缝成形良好，内部无裂纹、气孔等缺陷。焊接接头的拉伸强度、冲击韧性及硬度分布均达到42CrMo钢的原设计标准，完全满足高载荷工作条件的使用要求。这一成果也充分说明，针对不同工件特点设计合适的焊接工艺能够显著提高焊接质量，并为后续类似工件的焊接提供了重要参考。

综上所述，CO₂气体保护焊结合科学的工艺设计是实现42CrMo钢高质量焊接的有效途径。未来，可以进一步探索更高效、更智能化的焊接技术，以满足更复杂工况下对高强度材料焊接的要求，从而推动关键设备维修技术的进一步发展。

参考文献

- [1] 王晋生, 王玉梅. 45钢与42CrMo合金钢焊接工艺[J]. 大型铸锻件, 2008(4): 1–2, 5.
- [2] 张金库, 张伟强, 王大伟, 等. 42CrMo钢与16Mn钢焊接工艺研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(02): 102–104.
- [3] 宁志敏. 异种钢焊缝中熔合区裂纹的防止[J]. 焊接技术, 2000, (04): 14–16.
- [4] 吴智, 王梗蕊, 黄上甫, 等. 30CrMnSiA钢中厚板焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2023, (10): 45–49.
- [5] 刘海, 徐兵, 张松, 等. 12Cr2Mo1VR与20MnMoNb异种钢焊接工艺研究[J]. 锅炉制造, 2021, (02): 42–43+58.

城市道路近远期结合设计的探讨

——以春明路（潞苑北大街－京哈高速）道路工程为例

王晶晶

北京国道通公路设计研究院股份有限公司，北京 100053

DOI:10.61369/ERA.2025070005

摘要：随着城市化进程的加快，城市交通问题日益凸显。城市道路作为城市交通的基础设施，其设计不仅要满足当前的交通需求，还要预见并适应未来的发展趋势。因此，城市道路的近远期结合设计显得尤为重要。

本文以春明路（潞苑北大街－京哈高速）道路工程（下文简称“春明路”）为例，浅谈在城市道路设计过程中，近远期结合设计的注意事项与心得体会。

关键词：城市道路；工程设计；近远期方案；设计探讨

Exploration of Combined Design for Short and Long Term of City Roads —Taking Chunming Road (Luyuan North Street - Jingha Expressway) Road Project as an Example

Wang Jingjing

Beijing Guodaotong Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100053

Abstract： With the acceleration of urbanization, urban transportation problems are becoming increasingly prominent. As the infrastructure of urban transportation, city roads must be designed not only to meet current transportation needs but also to foresee and adapt to future development trends. Therefore, the combined design of short and long term for city roads is particularly important.

Taking the Chunming Road (Luyuan North Street – Jingha Expressway) road project ("Chunming Road" for short) as an example, this article briefly discusses the considerations and experiences of combined design for short and long term in the process of city road design.

Keywords： city roads; engineering design; short and long term plans; design exploration

绪论

城市道路的近远期结合设计需要综合考虑技术、经济、社会和环境等多方面因素。通过科学合理的规划，可以创建一个高效、安全、环保且适应未来发展的城市交通系统。

近远期结合设计不仅仅是技术上的挑战，更是对未来城市生活方式的预见和规划。通过跨学科合作和创新思维，可以为城市居民提供更好的出行体验，同时促进城市的可持续发展。

在开展城市道路工程设计的过程中，近远期结合主要表现为从路网、平纵面、横断面、节点方案等多维度进行统筹考虑设计。

春明路位于北京城市副中心东边界，是副中心东部南北向的重要交通走廊，对内可服务城市绿心、行政办公区及其配套服务区、宋庄文化创意产业集聚区等重点区域；对外可联系北三县地区，同时项目南北两端分别与规划房黄亦联络线、东部发展带联络线相连，建成后将进一步加强城市副中心与顺义、经开区、大兴、房山等平原新城之间的交通联系，新增一条贯穿本市东南部地区交通通道。道路全长17.3公里，规划等级为城市主干路，规划红线宽80米，设计速度为60公里/小时。项目已经列入2024年市重点工程，现已局部开工。

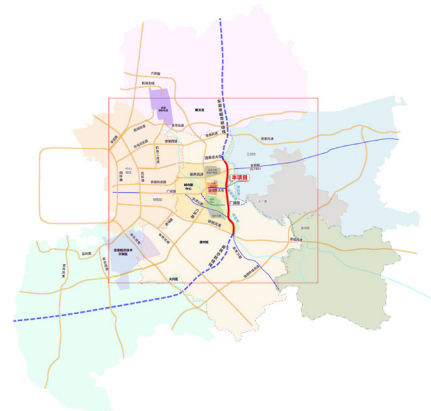


图1 项目范围及地理位置示意图

一、道路路网实施时序下的近远期设计

(一) 起点位置的近远期设计

在上位规划条件中，该条道路的研究范围为姚家园路东延—京哈高速段，规划研究段落全长约18.6公里。项目规划起点受村庄拆迁、东西向道路接线条件、基本农田等多方面因素的影响，近期春明路（姚家园路东延—潞苑北大街）段（1.34公里）暂不实施；实施段落为春明路（潞苑北大街—京哈高速），该段全长约17.3公里。春明路以北运河分南北两段，北段为（潞苑北大街~京津公路），路线长度13.1公里，双向六车道，红线宽80米；南段（京津公路~京哈高速），长度约4.2公里，双向八车道，红线宽80米。

规划起点采用近远期结合方案，起点姚家园路东延近期按照主干路实施，与本项目相交节点采用近期方案，远期互通方案受拆迁影响暂缓。

近期本次春明路工程姚家园路东延—潞苑北大街段暂不实施；进京需求通过现况潞苑北大街进行解决。远期待节点位置完成拆迁后，进一步完善姚家园路东延段至潞苑北大街段1.34公里的方案。近期春明路与潞苑北大街东侧延长段采用平交方案。

姚家园路近期方案：；近期姚家园路东延拟按照城市主干路修建，利用现况潞苑北大街、任李路、规划姚家园路东延，与神威北路相接，跨河桥按照双六+慢行系统向东过潮白河到达河北。该方案需对现况任李路拓宽改造为双向6车道。



图2 起点近期交通组织示意图

春明路远期方案：

一方面，远期该节点姚家园路东延上跨春明路，按规划实施互通立交方案。该互通立交根据功能需要和地形条件，选择适宜的互通型式，目前拟采用方案立交设置方向：南向西、南向东、西向南、西向北、北向西。未设置东向南、东向北方向匝道；北向东可通过现状潞苑北大街路口完成转换。

另一方面，远期春明路向北与规划的东部发展联络线相接，通过设置主线收费站完成高速公路与地方路系统的转化。



图3 起点远期交通组织示意图

(二) 西堡村—厂通路段近远期路线替代方案设计



图4 项目总体示意图

规划线位穿越西堡村、七级村、南刘各庄村，近期实施拆迁量巨大，针对在拆迁安置工作未完成的前提下，近期用相关道路替代的方案。

本次研究的替代路由南北向的规划七级村路+东西向的厂通路西延组成。该方案考虑在规划七级村的路由上进行优化，即将其断面宽度由25米调整为30米，替代线位北侧至西堡村以北，南侧与厂通路衔接，从而实现与春明路的连通。

该方案即可保证南北向通行需求，同时可集散厂通路车流。本方案近期利用代替线路在保证城市副中心东部用地完整、实现南北贯通的同时，可暂时缓解通州区政府的拆迁压力。

该方案便于南刘各庄、七级、西堡三个村作为一个整体统筹考虑安置实施计划，缓解拆迁压力，便于项目顺利实施推进。待远期该区域村庄整体安置完毕，仍按规划路线实施春明路。



二、平纵面设计的近远期预留设计

春明路近期与现状16条道路相交，远期与44条规划道路相交，其中：

城市主干路：1条（姚家园路东延）；

城市主干路：11条（潞苑北大街、通燕路、运河东大街、厂通路、京津公路等）；

城市次干路：6条（京榆旧线、兆善大街、七级村路、潞阳大街等）；

城市支路：19条（北刘西路、大邓各庄中街、减河北二街、运潮减河北侧路、花林北街、芳甸一街等）；

高速公路：1条（京哈高速公路）；

一级公路：4条（通柴东路、胡郎路、厂通路、通香路）；

二级公路：2条（云帆路、武窑路）。

目前上述规划道路中，除潞苑北大街、京榆旧线、云帆路、通香路、京哈高速公路已按规划实施，其余大部分道路均未实现规划。

目前，整个副中心正处全面建设时期，设计中一方面要结合近期现状道路的分布，进行平交口顺接，满足当地居民的出行，另一方面对于远期的规划道路，也要预留好平纵接顺条件。对于近期无实施计划的路口可以暂时封闭，并做好信号灯管线的预留预埋工程。

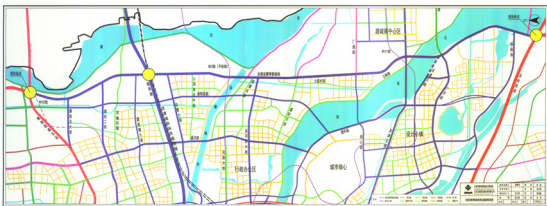


图5相交道路远期规划图

相交规划道路一览表 表1

序号	道路	道路等级	红线宽（米）
1	姚家园路东延	城市主干路	80
2	潞苑北大街	城市主干路	60
3	潞苑二街		60
4	潞苑南大街		40
5	通燕路		60
6	召里大街		50
7	运河东大街		60
8	厂通路（春明路以西段）		40
9	武兴路		60
10	京津公路		60
11	广开街		50
12	施园街		50
13	京榆旧线	城市次干路	40
14	小邓各庄中街		35
15	兆善大街		50
16	明德东街		35
17	七级村路		25
18	潞阳大街		40
19	北刘西路	城市支路	25
20	北刘南一街		25
21	小邓各庄北街		25
22	大邓各庄中街		25

23	大邓各庄南街	城市支路	25
24	减河北二街		25
25	运潮减河北侧路		30
26	七级村北街		25
27	花林北街		25
28	花林南街		25
29	南刘中街		25
30	南刘南街		25
31	芳甸一街		25
32	芳甸二街		25
33	芳甸三街		25
34	芳甸四街		25
35	芳甸五街		25
36	芳甸六街		25
37	芳甸七街		25
38	京哈高速公路	高速公路	80
39	通柴东路	一级公路	50
40	胡郎路		40
41	厂通路（春明路以东段）		40
42	通香路		60
43	云帆路	二级公路	30
44	武窑路		30

三、横断面方案的近远期设计

结合春明路规划道路等级、规划红线宽度、道路两侧用地情况及道路沿线服务功能，近期春明路横断面方案分为二段：

（一）春明路（潞苑北大街～京津公路）

春明路（潞苑北大街～京津公路），长13.1公里，采用4幅路型式，中间两幅机动车道宽度均为11.5米，双向六车道布置，中央隔离带宽2.5米，两侧非机动车道宽各3.5米，机非隔离带宽2.5米，外侧人行步道（含树池）各宽5.5米，横断面全宽48.5米。规划两侧预留15.75米绿化带。

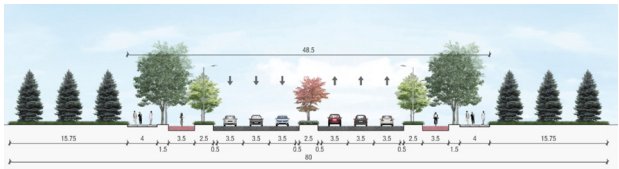


图6春明路（（潞苑北大街～京津公路）段远期规划标准横断面

（二）春明路（京津公路～京哈高速）

春明路（京津公路～京哈高速）段，长度约4.2公里，采用4幅路型式，中间两幅机动车道宽度均为15米，双向八车道布置，中央隔离带宽2.5米，两侧非机动车道宽各3.5米，机非隔离带宽2.5米，外侧人行步道（含树池）各宽5.5米，横断面全宽55.5米。规划两侧预留12.25米绿化

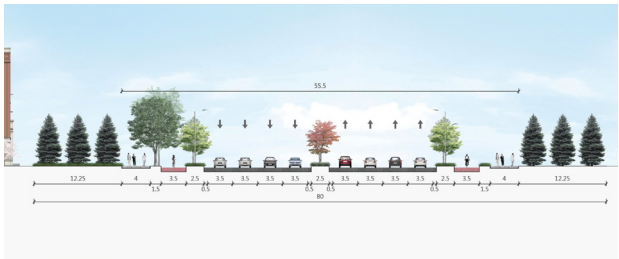


图7春明路（京津公路～京哈高速）段远期规划标准横断面

受沿线征地拆迁规模制约，为节约区级资金，近期断面仅实施路板+道路放坡的范围，对于外侧的绿化带仅做远期预留。

这一设计理念，对于相应的道路管线设计，提出了新的要求，即需要根据近期的实施断面，将管线敷设在路板范围内。一方面可以保证管线综合的近期顺利实施，另一方面可节约相应的征拆资金。

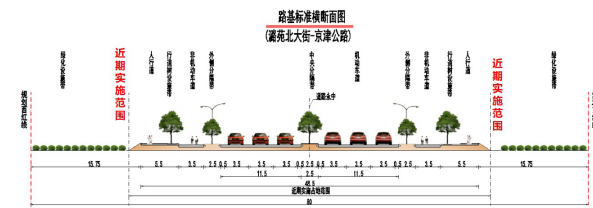


图8 春明路（（潞苑北大街~京津公路）段近期标准横断面

此外，根据上位雨水规划条件，远期的断面在边坡交地外侧设置了东西双侧雨水明渠，作用是收集边坡雨水及周边客水，保证沿线农田、村庄的雨水排放，从而进一步保障农田、村庄的安全和路基的稳定。但受征地和规模拆迁资金的限制，近期通过实施雨水管道解决路面雨水排放问题，同步为规划雨水明渠预留接口，远期随春明路两侧绿化设施带实施同步建设规划雨水明渠，保障项目沿线排水安全。同时，为保障路基安全，近期对路基边坡的低洼和易于积水位置，进行适当的坡脚防护。

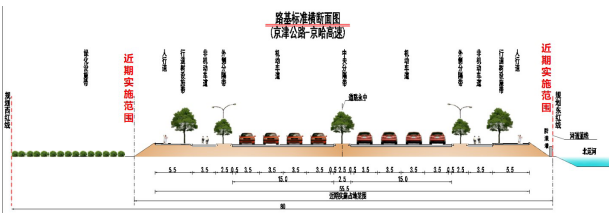


图9 春明路（京津公路~京哈高速）段近期标准横断面

四、节点方案的近远期设计

本方案由北向南依次下穿通燕高速、京哈铁路、京唐城际铁路。在2021年京唐城际铁路修建合拢之间，本项目该节点已随铁路建设，即在该节点预埋闭合框架，方便后期即现阶段春明路道路实施对铁路干扰最小，进而缩短工期，便于施工推进。

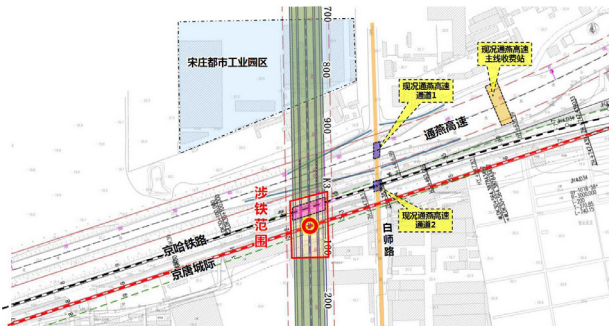


图10 下穿铁路段周边条件示意图

前期闭合框架的下穿铁路示意图如下：

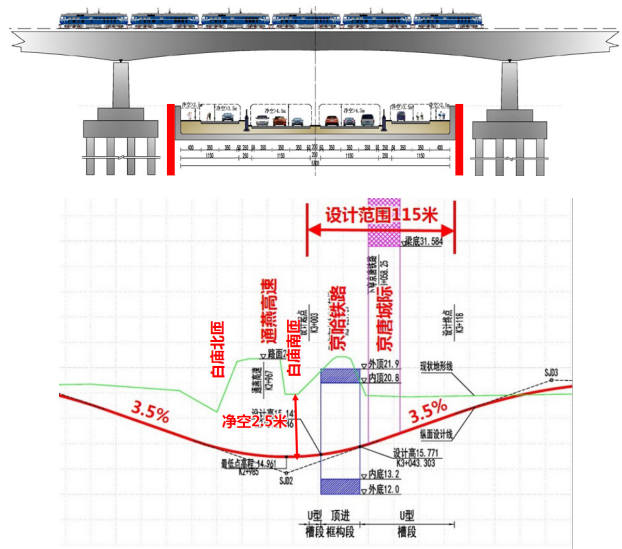


图11 下穿京唐城际铁路铁路纵断面示意图

前期在京唐城际铁路闭合之间，仅对铁路节点的构造物进行下穿预留，对顶推通燕高速的方案暂不实施。同步保留该位置菱形互通东侧匝道。这样一方面节约工程投资，另一方面也在春明路不具备全面开工实施前，保证地方高速的顺利运营，减少不必要断路造成的影响。



图12 京唐城际铁路铁路下穿位置前期设计预埋结构现场示意图

目前，穿越两条铁路的节点闭合框架已实施完毕，并进行回填，为春明路下穿预留条件。

五、结束语

城市道路的近远期设计对于城市的可持续发展、居民生活质量以及城市形象具有重要的意义，近远期设计可以确保道路系统与城市发展同步，满足不断增长的交通需求；可以有效组织交通流，减少交通拥堵，提高道路的通行效率，确保交通顺畅；随着智能交通系统等新技术的发展，近远期设计可以预留空间和接口，适应未来交通技术的应用和升级；近远期设计可以在有限的资金与现有条件下，做到张弛有度，为后续城市的发展预留空间。

一种液流电池背板翻转机构的应用效果研究

郭德华

纬景储能科技有限公司, 广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ERA.2025070006

摘要： 随着全球工业化进程的加速以及人口的持续增长，能源需求呈现出迅猛的增长态势。传统化石能源的大量消耗不仅导致其储量日益减少，还引发了一系列严重的环境问题，如温室气体排放、空气污染和生态破坏等。在这样的背景下，开发和利用可再生能源，如太阳能、风能、水能等，成为了全球能源领域的重要发展方向。这使得可再生能源在大规模接入电网时，会对电网的稳定性和可靠性造成巨大挑战。为了解决这一问题，高效的储能技术显得尤为关键。

关键词： 液流电池；背板翻转结构；应用研究

Study on the Application Effect of Liquid Flow Battery Backplane Flipping Mechanism

Guo Dehua

Vijay Energy Storage Technology Co., LTD. Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： With the acceleration of global industrialization and continuous population growth, energy demand is experiencing a rapid increase. The extensive consumption of traditional fossil fuels not only leads to a gradual depletion of reserves but also triggers a series of severe environmental issues, such as greenhouse gas emissions, air pollution, and ecological destruction. In this context, developing and utilizing renewable energy sources like solar, wind, and hydropower has become a crucial direction in the global energy sector. This makes large-scale integration of renewable energy into the grid a significant challenge for grid stability and reliability. To address this issue, efficient energy storage technology is particularly critical.

Keywords： flow battery; backplane flip; applied research

引言

随着液流电池市场需求的不断增长，对生产效率和质量的要求也越来越高，开发一种高效、可靠的液流电池背板翻转机构具有重要的现实意义。它能够提高生产效率，降低生产成本，保证产品质量，增强企业在市场中的竞争力，进一步推动液流电池技术的发展和應用，满足日益增长的能源存储需求，为实现可持续发展的能源战略目标做出贡献。

一、国内外液流电池研究现状

在国外，液流电池技术的研究起步较早，众多科研机构和企业投入了大量资源进行相关技术的研发与创新。美国橡树岭国家实验室（ORNL）在液流电池领域开展了深入研究，在电池材料研发、系统设计优化等方面取得了一系列重要成果，为液流电池技术的发展奠定了坚实基础，尤其是在分布式能源存储和电动汽车储能系统等领域，通过大量的示范项目，积累了丰富的实践经验。国外部分企业和研究机构已经取得了一定的研究成果。高精度的电机驱动系统和智能控制算法，能够实现背板的快速、精准翻转，有效提高了生产效率。能够在复杂的生产环境中准确抓取

和翻转背板，并且能够根据不同的生产需求进行灵活调整，大大提高了生产的自动化程度和生产质量^[1]。

国内对于液流电池的研究虽然起步相对较晚，但近年来发展迅速。通过积极引进国外先进技术，并加大自主研发投入，我国在液流电池领域取得了显著进展。在电池材料研发方面，国内科研团队成功开发出多种高性能电极材料和离子交换膜，有效降低了电池成本，同时提高了电池的能量转换效率和稳定性。在系统集成方面，我国也掌握了液流电池系统的核心制造技术，建成了多个大型液流电池储能示范项目，为大规模商业化应用奠定了基础。

在液流电池背板翻转机构的研究上，国内相关研究主要聚焦

于如何设计出结构简单、成本低廉且高效可靠的翻转装置。一些研究通过对传统翻转机构的改进,采用新型的传动方式和夹紧装置,提高了翻转过程的稳定性和可靠性^[2]。同时通过优化夹紧结构,有效避免了背板在翻转过程中的滑落和损坏,还有研究将自动化控制技术应用于翻转机构,通过 PLC 控制系统实现了翻转过程的自动化操作,提高了生产效率和一致性。在自动化控制方面,虽然一些翻转机构已经实现了自动化操作,但控制算法的智能化程度还不够高,难以根据生产过程中的实时变化进行精准调整^[3]。

二、研究目标与内容

（一）优化翻转机构性能

通过对翻转机构的结构设计和工作原理进行深入研究,优化其机械结构和运动方式,提高翻转过程的稳定性、准确性和高效性,确保背板在翻转过程中不受损坏,提高生产效率。

（二）降低成本

在满足翻转机构性能要求的前提下,通过合理选择材料、优化结构设计和制造工艺,降低翻转机构的制造成本和维护成本,提高其性价比,增强在市场竞争中的竞争力。

（三）提高自动化程度

引入先进的自动化控制技术,实现翻转机构的自动化操作,减少人工干预,提高生产过程的一致性和稳定性,降低劳动强度,进一步提高生产效率^[4]。

（四）增强适应性

设计的翻转机构应具有良好的适应性,能够适应不同规格和尺寸的液流电池背板的翻转需求,提高设备的通用性和灵活性,降低企业的设备采购成本和维护成本。

围绕上述研究目标,本研究将重点开展以下内容的研究:

（五）液流电池背板翻转机构的结构设计

详细分析液流电池背板的结构特点、尺寸规格以及生产过程中的翻转要求,运用机械设计原理和方法,设计出合理的翻转机构总体结构。对翻转机构的关键部件,如驱动装置、传动机构、夹紧装置等进行详细设计和选型,确保其能够满足翻转机构的性能要求^[5]。通过计算机辅助设计(CAD)软件绘制翻转机构的二维和三维图纸,直观展示其结构和装配关系,为后续的制造和装配提供依据。

（六）液流电池背板翻转机构的工作原理研究

深入研究翻转机构的工作流程,包括背板的上料、夹紧、翻转、下料等环节,分析每个环节的工作原理和动作要求,制定合理的工作流程和操作规范。研究翻转机构的运动学和动力学特性,建立数学模型,运用动力学分析软件对翻转过程进行模拟和分析,优化翻转机构的运动参数,如翻转速度、加速度等,确保翻转过程的平稳性和准确性,减少对背板的冲击和损伤^[6]。

（七）液流电池背板翻转机构的自动化控制研究

选择合适的自动化控制技术,如可编程逻辑控制器(PLC)、运动控制器等,设计翻转机构的自动化控制系统。根据翻转机构的工作流程和控制要求,编写相应的控制程序,实现对翻转机构的自动化控制,包括电机的启动、停止、正反转控制,夹紧装置的夹紧和松开控制等。研究自动化控制系统与其他生产设备的通

信和协同工作方式,实现整个生产过程的自动化集成,提高生产效率和生产管理水平^[7]。

（八）液流电池背板翻转机构的应用效果分析

搭建翻转机构的实验平台,对设计的翻转机构进行实验测试,验证其性能和可靠性。在实际生产环境中应用翻转机构,收集生产数据,分析其对生产效率、产品质量和生产成本的影响,评估翻转机构的实际应用效果。根据实验测试和实际应用中发现的问题,对翻转机构进行优化和改进,不断提高其性能和可靠性,使其更好地满足生产需求。

三、研究方法与创新点

在理论分析方面,深入研究液流电池背板的结构特点、力学性能以及翻转过程中的运动学和动力学原理。通过建立数学模型,运用机械原理、运动学和动力学相关知识,对翻转机构的运动过程进行模拟和分析。运用 SolidWorks Simulation 等软件对关键部件进行力学分析,优化结构参数,确保在满足强度和刚度要求的前提下,减轻部件重量,降低制造成本。通过理论分析,为翻转机构的设计提供坚实的理论基础,明确设计方向和关键技术指标^[8]。

在实验过程中,模拟实际生产环境,对不同规格和尺寸的液流电池背板进行翻转实验,测试翻转机构的各项性能指标,如翻转精度、稳定性、可靠性等。通过实验数据的采集和分析,及时发现设计中存在的问题和不足之处,对翻转机构进行优化和改进。例如,通过实验发现翻转过程中存在的震动和冲击问题,通过调整传动系统的参数和优化夹紧装置的结构,有效降低了震动和冲击,提高了翻转过程的平稳性。

在结构设计上,采用了独特的连杆-齿轮复合传动结构,将连杆机构的平稳运动特性与齿轮传动的精确传动比相结合,实现了背板的平稳、精准翻转。这种结构设计不仅提高了翻转机构的运动精度和稳定性,还降低了制造成本和维护难度。该装置采用了先进的传感器技术和智能控制算法,能够实时监测背板的状态,实现对夹紧力的精确控制^[9]。

在应用方面,本研究将自动化控制技术与翻转机构深度融合,实现了翻转过程的全自动化操作。通过 PLC 控制系统和人机界面,操作人员可以轻松设定翻转参数,监控翻转过程,提高了生产过程的智能化水平和生产效率。此外,本研究设计的翻转机构具有良好的通用性和灵活性,能够适应不同规格和尺寸的液流电池背板的翻转需求,只需通过简单的参数调整和夹具更换,即可实现对不同背板的翻转操作,降低了企业的设备采购成本和维护成本。

四、应用过程中的问题与解决方案

在液流电池背板翻转机构的实际应用过程中,不可避免地会遇到一些问题,不仅影响设备的正常运行,还可能对生产效率和产品质量产生负面影响。及时发现并解决这些问题,对于保障生产的顺利进行和提高企业的经济效益至关重要。

在设备运行初期,曾出现过电机过热的问题。主要是由于电

机长时间高负荷运转，散热效果不佳所致。电机在驱动翻转机构时，需要克服较大的阻力，尤其是在翻转大型或重型背板时，电机的负荷更大。如果散热系统不能及时有效地将电机产生的热量散发出去，就会导致电机温度不断升高，进而影响电机的性能和寿命。电机过热还可能引发电机故障，导致设备停机，影响生产进度^[10]。

为了解决电机过热问题，采取了一系列针对性的措施。在电机外部安装了高效的散热风扇，增加了空气流量，提高了散热效率。通过优化风扇的叶片形状和转速，使其能够更有效地将电机周围的热量带走。在电机外壳上增加了散热鳍片，增大了散热面积，进一步提高了散热效果。散热鳍片的设计采用了特殊的结构，能够更好地与空气接触，加速热量的传递。还对电机的运行参数进行了优化，合理调整了电机的转速和扭矩，避免电机长时间处于高负荷运行状态。通过监测电机的运行数据，根据实际情况调整电机的工作模式，使电机在满足生产需求的前提下，尽可能地降低负荷，减少热量的产生。

通过这些措施的实施，电机过热问题得到了有效解决。在后续的运行过程中，电机的温度始终保持在正常范围内，设备的稳定性和可靠性得到了显著提高。经过实际测试，在相同的工作条件下，电机的温度降低了 [X]℃，有效避免了因电机过热而导致的故障发生，保障了生产的连续性，有效保障了生产的安全和产品的质量。

五、与传统翻转机构的对比分析

传统的液流电池背板翻转机构主要包括手动翻转机构和简易机械翻转机构。手动翻转是一种较为原始的翻转方式，通常由操作人员直接用手推动背板进行翻转。这种方式的结构极其简单，几乎不需要复杂的机械设备，仅需一些简单的支撑和固定装置，

成本非常低。操作人员可以根据实际情况灵活地调整翻转的角度和速度，具有一定的灵活性。但手动翻转存在诸多明显的局限性，由于完全依赖人工操作，劳动强度极大，长时间的操作容易使操作人员疲劳，从而导致工作效率低下，人工操作难以保证翻转的精度和一致性，不同操作人员之间的操作差异较大，容易出现翻转角度不准确、背板晃动等问题，这对产品质量产生了严重的影响。在生产过程中，人工操作还存在一定的安全风险，如操作人员可能会因用力不当而受伤。

简易机械翻转机构则是在手动翻转机构的基础上，引入了一些简单的机械装置，如杠杆、滑轮等，以辅助操作人员进行翻转。这种相比手动翻转机构，在一定程度上减轻了操作人员的劳动强度，提高了翻转的效率。通过杠杆原理，可以用较小的力来实现较大的翻转力矩，使翻转更加轻松。利用滑轮组可以改变力的方向和大小，方便操作人员进行操作。简易机械翻转机构仍然存在一些不足之处。其自动化程度较低，大部分操作仍需人工参与，无法满足大规模、高效率的生产需求。由于机械结构相对简单，难以实现高精度的翻转控制，翻转过程中的稳定性和可靠性较差。在处理一些大型或重型背板时，简易机械翻转机构的局限性更加明显，可能无法提供足够的翻转动力，导致翻转困难甚至无法完成翻转操作。传统翻转机构在适应不同规格背板方面的能力也较弱，往往需要对设备进行较大的调整或更换才能适应不同尺寸的背板。

结论：随着液流电池技术的不断发展，对背板的性能和质量要求将越来越高，未来的翻转机构需要能够满足更高精度、更高稳定性的翻转需求。随着市场对液流电池的需求不断增长，对生产效率的要求也将越来越高，未来的翻转机构需要进一步提高翻转效率，以满足大规模生产的需求。还可以关注新兴的电池技术和应用领域，研究开发适用于这些领域的翻转机构，为电池产业的发展提供技术支持。

参考文献

- [1] 杨梓. 液流电池前景可期 [N]. 中国能源报, 2024-10-14(005).
- [2] 孙建英, 赵文萱. 锌铁液流电池标准体系构建研究 [J]. 质量与标准化, 2024, (12): 42-46.
- [3] 刘素苹. 液流电池储能技术分析与实践应用 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3871-3873.
- [4] 闫苏, 钟芳芳, 刘俊伟, 等. 高能量密度液流电池关键材料与先进表征 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(01): 143-156.
- [5] 袁治章, 刘宗浩, 李先锋. 液流电池储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(09): 2944-2958.
- [6] 姚祯, 王锐, 阳雪, 等. 锌铁液流电池研究现状及展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(01): 78-88.
- [7] 谢聪鑫, 郑琼, 李先锋, 等. 液流电池技术的最新进展 [J]. 储能科学与技术, 2017, 6(05): 1050-1057.
- [8] 廖平, 姚祯, LEMMON John, 等. 电池储能技术研究进展及展望 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(03): 670-678.
- [9] 葛红江, 潘兴康, 程静, 等. 碘基液流电池体系研究进展 [J/OL]. 电池工业, 1-6[2025-04-18].
- [10] 许晓璇, 张长昆, 李先锋. 面向长时储能的液流电池储能技术: 发展、挑战及未来展望 [J]. 科学通报, 2025, 70(09): 1230-1246.

城市道路沥青路面裂缝成因及防治技术研究

杨蓁飞

河南省安阳市安阳县白璧镇，河南 安阳 455100

DOI:10.61369/ERA.2025070007

摘 要： 随着城市化进程的加速，城市道路的承载能力和使用性能面临着严峻挑战，沥青路面作为城市道路的主要形式之一，其裂缝问题日益凸显。裂缝不仅影响道路的美观和行车舒适性，还会加速路面结构的破坏，缩短道路使用寿命，增加维修成本和交通安全隐患。因此，深入研究沥青路面裂缝的成因及其防治技术具有重要的现实意义。本文旨在系统分析沥青路面裂缝的类型与破坏机理，探讨裂缝产生的多种因素，并提出针对性的防治技术体系，为城市道路建设和养护提供科学依据和技术支持。

关 键 词： 城市道路；沥青路面；裂缝成因；防治技术

Research on the Causes and Prevention Techniques of Cracks in Asphalt Pavement of City Roads

Yang Zanfei

Baibi Town Anyang County Anyang City Henan Province, Anyang, Henan 455100

Abstract： With the acceleration of urbanization, the carrying capacity and performance of city roads are facing severe challenges. Asphalt pavement, as one of the main forms of city roads, has increasingly prominent crack problems. Cracks not only affect the aesthetics of the road and driving comfort but also accelerate the destruction of the pavement structure, shorten the service life of the road, and increase maintenance costs and traffic safety hazards. Therefore, it is of great practical significance to conduct in-depth research on the causes and prevention techniques of cracks in asphalt pavement. This article aims to systematically analyze the types and failure mechanisms of asphalt pavement cracks, explore various factors that contribute to crack formation, and propose targeted prevention and control technology systems to provide scientific basis and technical support for the construction and maintenance of city roads.

Keywords： city roads; asphalt pavement; causes of cracks; prevention and control technology

引言

在城市交通体系中，沥青路面凭借其良好的平整度、行车舒适性及施工便捷性，成为城市道路的主要铺装形式。然而，随着城市交通流量的持续增长、车辆荷载的日益加重，以及复杂多变的环境因素影响，沥青路面裂缝问题愈发凸显。裂缝不仅影响路面的美观，更会导致路表水渗入基层，加速路面结构的破坏，降低道路使用寿命，增加养护成本^[1]。因此，深入探究城市道路沥青路面裂缝成因，研发有效的防治技术，对保障城市道路的安全畅通、降低养护维修费用具有重要的现实意义。

一、沥青路面裂缝类型与破坏机理

（一）裂缝类型划分

城市道路沥青路面裂缝形式多样，按其成因和形态特征，主要可划分为结构性裂缝与非结构性裂缝两大类。结构性裂缝通常与路面结构承载能力密切相关，其产生源于路面结构层在车辆荷载、地基沉降等作用下，内部应力超过材料的强度极限，导致结

构层破坏形成裂缝，常见形式有纵向裂缝、横向裂缝和网状裂缝等；非结构性裂缝则更多受环境因素、材料特性及施工工艺的影响，如温度变化引起的温缩裂缝、因沥青老化导致的反射裂缝等（如图1所示）。这些裂缝相互交织，形成复杂的裂缝网络，对路面性能造成严重影响。

沥青路面主要病害：反射裂缝



图1 反射裂缝

（二）结构性裂缝破坏机制

结构性裂缝的产生往往是路面结构长期承受过大应力的结果。在车辆荷载反复作用下，路面结构内部产生应力集中现象，尤其是在道路基层与面层的结合处、新旧路面拼接部位等薄弱环节^[2]。当车辆经过时，路面结构受到垂直压力、水平推力及冲击力的综合作用，导致基层材料逐渐疲劳，强度下降。随着荷载作用次数的增加，基层中的微裂缝不断扩展、连通，最终向上反射至面层，形成明显的结构性裂缝。此外，地基不均匀沉降也是引发结构性裂缝的重要原因，当地基局部下沉或隆起时，路面结构会因受力不均而产生裂缝。

（三）非结构性裂缝形成过程

非结构性裂缝的形成与环境因素和材料特性紧密相连。以温缩裂缝为例，在低温环境下，沥青材料的弹性模量增大，塑性降低，表现出明显的脆性特征。当气温骤降时，沥青面层迅速收缩，由于基层对其收缩变形存在约束作用，面层内部产生拉应力。若拉应力超过沥青材料的抗拉强度，就会产生温缩裂缝。反射裂缝则主要是由于半刚性基层在温度变化或干缩作用下产生裂缝，这些裂缝向上反射至沥青面层，形成与基层裂缝相对应的反射裂缝^[3]。随着时间推移，非结构性裂缝会不断扩展，加剧路面的损坏程度。

二、沥青路面裂缝成因分析

（一）材料因素影响

沥青和集料的性能对沥青路面的抗裂性能起着关键作用。沥青作为胶结材料，其品质直接影响路面的柔韧性和耐久性。若沥青的针入度较小、延度较低，说明沥青的粘性大、塑性差，在温度变化时容易产生裂缝。不同产地和品种的集料，其级配、形状、表面纹理和坚固性存在差异，这些差异会影响沥青混合料的整体性能。例如，集料级配不合理，会导致混合料内部空隙率过大，降低路面的密实度和强度，从而增加裂缝产生的风险；集料的坚固性差，在车辆荷载作用下容易破碎，破坏沥青混合料的结构，引发裂缝^[4]。此外，沥青与集料之间的粘附性也至关重要，若

两者粘附性不足，在水的侵蚀和车辆荷载作用下，集料容易从沥青中剥落，形成坑槽和裂缝。

（二）环境因素作用

环境因素是诱发沥青路面裂缝的重要外部条件。温度变化对沥青路面的影响最为显著，高温时，沥青软化，路面在车辆荷载作用下容易产生车辙和推移，同时，高温还会加速沥青的老化；低温时，沥青收缩变硬，产生温缩应力，导致裂缝的出现。降水也是影响路面性能的重要因素，雨水渗入路面结构层后，会使基层材料软化，降低其承载能力，在车辆荷载作用下，路面更容易产生裂缝。此外，冻融循环作用会使路面结构中的水分在低温下冻结膨胀，在高温时融化收缩，反复的冻融循环会导致路面结构松散，产生裂缝^[5]。

（三）施工与养护缺陷

施工过程中的质量控制不当是导致沥青路面裂缝产生的重要原因之一。在沥青混合料的拌和过程中，若拌和温度过高或拌和时间过长，会使沥青老化，降低其粘结性能；若拌和温度过低或拌和不均匀，则会导致混合料中沥青与集料的裹覆效果不佳，影响路面的强度和耐久性。在摊铺过程中，摊铺速度不均匀、摊铺厚度不一致会造成路面平整度差，局部区域压实度不足，从而引发裂缝。压实环节同样关键，压实机械选择不当、压实遍数不足或压实工艺不合理，都无法使沥青混合料达到规定的密实度，导致路面在使用过程中容易产生裂缝。

三、沥青路面裂缝防治技术体系

（一）材料性能优化技术

在沥青路面裂缝防治中，材料性能优化技术是关键环节。选用优质沥青材料是基础，通过添加橡胶、塑料等改性剂，能显著改善沥青性能，如 SBS 改性沥青凭借良好的弹性恢复能力和低温延度，可有效增强路面抗裂性^[6]。集料的选择同样重要，需严格把控其级配、坚固性及与沥青的粘附性，合理级配能降低混合料空隙率，提升密实度与强度。以下为不同材料性能对沥青路面抗裂性影响对比表，如表1所示：

表 1：不同材料性能对沥青路面抗裂性影响

材料类型	性能特点	对路面抗裂性影响
普通沥青	针入度、延度较低，粘性大、塑性差	易在温度变化时产生裂缝，抗裂性弱
SBS 改性沥青	弹性恢复能力强，低温延度好	显著提升路面抗裂性能，减少裂缝产生
级配不合理集料	空隙率大，密实度和强度低	增加裂缝产生风险，降低路面耐久性
合理级配集料	空隙率小，密实度和强度高	增强路面结构稳定性，提升抗裂性

（二）施工工艺改进措施

规范施工工艺是减少沥青路面裂缝产生的重要保障。在沥青混合料拌和环节，要精确控制拌和温度和时间，确保沥青与集料充分均匀混合。摊铺过程中，应保持摊铺速度稳定，采用自动找平装置，保证摊铺厚度均匀一致，提高路面平整度。压实作业时，根据沥青混合料的类型和摊铺厚度，合理选择压实机械和压

实工艺，遵循“先轻后重、先慢后快、先静后振”的原则，确保路面达到规定的压实度。此外，在新旧路面拼接、桥涵台背回填等特殊部位，要采取特殊的施工措施，加强对这些薄弱环节的处理，防止裂缝的产生^[7]。

（三）预防性养护策略

预防性养护是延长沥青路面使用寿命、降低养护成本的有效手段。通过定期对路面进行检测和评估，及时发现路面存在的潜在问题，在裂缝尚未发展严重之前采取相应的养护措施^[8-9]。例如，对于初期出现的微小裂缝，可以采用灌缝技术进行处理，选用性能良好的灌缝材料，将裂缝封闭，防止路表水渗入。对于路面出现的轻微车辙和松散现象，可以采用微表处、稀浆封层等技术进行修复，恢复路面的平整度和抗滑性能。

四、结语

城市道路沥青路面裂缝成因复杂，涉及材料、环境、施工养护等多个方面。结构性裂缝和非结构性裂缝的破坏机理与形成过程各不相同，需要针对性地进行分析和研究。通过优化材料性能、改进施工工艺和实施预防性养护等综合防治技术，可以有效减少沥青路面裂缝的产生，提高路面的质量和使用寿命。未来，还需要进一步加强相关研究，不断探索新的防治技术和方法，为城市道路的建设和养护提供更有力的技术支持。

参考文献

[1] 韩俊平，范杰. 城市道路沥青路面网状裂缝的成因与防治 [J]. 安徽建筑, 2015, 22(04): 137-139.
[2] 方满胜. 城市道路沥青路面裂缝成因及防治 [J]. 门窗, 2012, (08): 129-130.
[3] 葛天翔. 市政道路沥青混凝土路面裂缝的产生及养护 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(10): 139-140.
[4] 许少勇. 市政道路工程沥青路面裂缝成因与防治 [J]. 河南建材. 2020, (5).
[5] 钱宁，王圣博. 公路工程沥青路面裂缝的成因与防治策略研究 [J]. 中国住宅设施. 2019, (3).
[6] 林燕. 探析市政道路工程沥青路面裂缝成因与防治策略研究 [J]. 居业. 2018, (8).
[7] 喻建军，李仁平. 沥青混凝土路面裂缝产生的成因与防治探讨 [J]. 建材与装饰. 2018, (44). 275-276.
[8] 王子君. 市政道路工程沥青路面施工技术及其养护措施 [J]. 建材发展导向 (上). 2023, 21(2). DOI: 10.3969/j.issn.1672-1675.2023.02.052.
[9] 王小东，王宇鹏. 市政道路沥青混凝土路面裂缝的产生与养护 [J]. 低碳世界. 2018, (2).

光面爆破技术在隧道施工中的应用

辛文海

青海省交通建设管理有限公司，青海 西宁 810000

DOI:10.61369/ERA.2025070008

摘 要： 光面爆破是指通过对爆破的影响区域和方位进行控制，从而实现了表面的平滑和平整，从而避免了岩石表面的破裂，从而降低了超、欠挖以及支护的工作量，提高了岩石的稳定性，降低了爆破震动对周围环境的干扰，从而实现了岩石开挖面的控制，广泛应用于隧道开挖施工过程中。本文以大河家（甘青界）至清水段公路工程项目—麻尔坡隧道详细介绍了光面爆破的工作机理、参数选定及工艺方法。

关 键 词： 光面爆破；隧道；爆破参数

Application of Smooth Blasting Technology in Tunnel Construction

Xin Wenhai

Qinghai Transportation Construction Management Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

Abstract： Smooth blasting is a technique that controls the range and direction of blasting to make the rock surface smooth and flat after blasting, prevent rock surface cracking, reduce the amount of over excavation, under excavation and support work, increase the stability of rock walls, reduce the disturbance of blasting vibration to surrounding rock, and thus achieve the control of rock excavation contour. It is widely used in tunnel excavation construction process. This article provides a detailed introduction to the working mechanism, parameter selection, and process methods of smooth blasting in the Malpo Tunnel of the Dahejia (Ganqingjie) to Qingshui section highway project.

Keywords： smooth blasting; tunnel; blasting parameters

引言

在隧道开挖作业中测量放线、开挖爆破、铲装运输、围岩排险、初支立架、初支喷混的一个循环的各个工序中，开挖爆破是岩质隧道建设中最为关键的一个环节，直接关系到工程的安全，也关系到岩体（开挖面）的完整性、稳定性、初期支护效率、工程进度及造价。

为了加速隧道建设，保证隧道的安全，提高隧道的施工效率，提高隧道的经济效益，提高隧道的施工效率，有着十分重要的作用。

一、工程背景

大河家（甘青界）至清水段公路工程麻尔坡隧道位于循化县清水乡东侧麻尔坡低中山山麓斜坡区，隧道进口位于麻尔坡村北东侧黄河右岸斜坡中下部地带，出口位于麻尔坡村东侧黄河右岸斜坡中下部河谷区。隧道左右洞长度分别为1785m和1928m为长隧道。采用两台阶爆破。隧址区第四系覆盖层主要由黄土（Q4ml）、粉土、角砾、碎石、卵石等组成；隧道穿越段下伏岩层为白垩系下统河口群上段（K1hka）砂岩、砾岩与泥岩、前震旦系（AnZgr2）片岩等组成。

表1 麻尔坡隧道概况
Table 1 Overview of Malpo Tunnel

项目	起讫桩号	长度	IV级	V级
		m	m	m
麻尔坡隧道	ZK19+934~ZK21+719	1785	1012	643
	K19+810~K21+738	1928	1057	791

二、光面爆破

通过对围岩特征的分析，并参考了国内外同类工程，对光爆炸工艺进行了优选。光爆法的主要参数包括：炮孔直径，周边眼间距，最小抗力，密度，线密度等。

（一）炮孔直径

通常，炮孔径选择在35mm至45mm之间。此次施工阶段所使用的炮孔直径为42mm。

（二）周边眼参数

1. 周边眼间距

在不耦合装药的情况下，光面爆破必须满足孔中静压F低于岩石最大抗压强度但比岩石高的要求。隧洞开挖时，可以参考以下的经验公式（1）进行选择：

$$E=(10-15) \times d \quad (1)$$

E—周缘孔间距厘米

在计算出的炮孔直径的基础上,选择了42cm到63cm的周边并根据本隧道的围岩状况和表2中给出的经验值,选择了50的周边眼间距。

光面层的最小抗力，也就是光面层的厚度，其取值与岩体的
性、地质结构等有关。

光爆层的厚度 V 和外围孔洞的距离 E 之间有非常密切的联系, 其比 $K = E/V$, 即外围孔洞密度。在此基础上, 通过选择 E 、 V 两个参数, 对周边眼密度进行计算, 得到公式 (2)。

3. 线装药密度

表2 光面爆破参数
Table 2 Smooth blasting parameters

岩石种类	饱和单轴抗压极限强度 Rb (MPa)	装药不耦合系数 D	周边孔间距 E (mm)	周边孔最小抵抗线 V (mm)	相对距 E/V	周边孔装药集中度 q (kg/m)
硬岩	> 60	1.25-1.50	550-700	700-850	0.8-1.0	0.30-0.35
中硬岩	30-60	1.50-2.00	450-600	600-750	0.8-1.0	0.20-0.30
软岩	< 30	2.00-2.50	300-500	400-600	0.5-0.8	0.07-0.15

非耦合性是指药筒直径与药筒直径之比,本工程采用的药筒直径为32mm,通常取药筒非耦合系数为1.25-2.5,如式(3)所示。

三、装药结构

The diagram illustrates a segmented explosive cable (导爆索) used in blasting. It consists of three main segments: 装药段 (Charging segment), 空气段 (Air segment), and 堵塞段 (Sealing segment). The cable is shown as a long, thin tube with internal segments. A red line indicates the path of the explosive charge, which is segmented. The segments are labeled: 装药段 (Charging segment), 空气段 (Air segment), and 堵塞段 (Sealing segment). The cable is connected to a detonator (导爆索) at the right end.

四、 钻爆设计

(H), 12.54m 宽 (L), 60.77m³长 (S), 钻孔用 TY-28 钻机, 用 2 级乳化炸药, 用导爆绳、无电毫秒雷管起爆, 循环进尺 3m。

槽孔,副孔间距1.2m,排距0.6m。钻孔长度为0.8m, V 为0.85m。底板上的孔洞应进行合理的加密,一般为1m。按照3.2给出的外围眼参数,图2.3.4显示了炮眼设计图。

名称	孔长 (m)	孔深 (m)	孔数	雷管段位	单孔药量 (Kg)	堵塞长度 (cm)	单段药量 (Kg)
掏槽孔 1	3.53	3.2	8	1	1.7	30	13.6
掏槽孔 2	3.16	3.2	8	3	1.7	30	13.6
扩槽孔	3.04	3.2	8	5	2.6	30	20.8
掘进孔 1	3.01	3.2	6	7	2.1	30	12.6
掘进孔 2	3	3.2	8	9	2.1	30	16.8
底板孔	3	3	14	11	2.1	30	29.4
辅助孔	3	3	19	13	1.2	30	22.8
周边孔	3	3	38	15	0.5	20	19
进尺 (m)	断面 (m ²)	装药总量 (Kg)		钻孔个数 (个)	炮孔密度 (个/m ²)	炸药单耗 (Kg/m ³)	
3	60.77	148.6		109	1.79	0.81	

Fig.2 Blasting parameter table

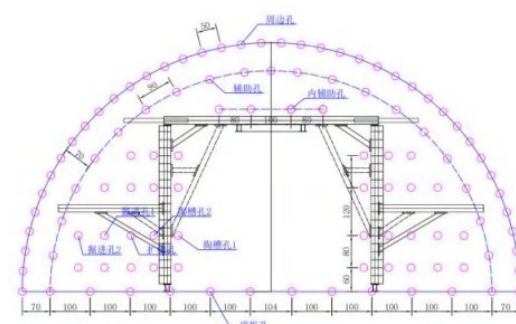


Fig.3 Blast Hole Layout

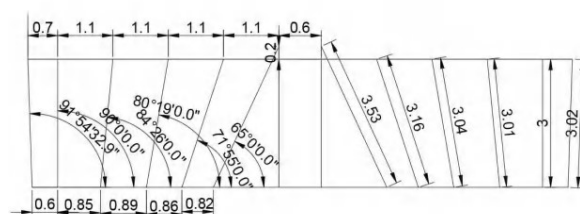


Fig.4 Sectional View of Blast Hole

五、现场验证实施

见图5。



Fig.5 Process Flow Diagram

（二）测量

为确保开挖断面满足设计要求，必须在巷道开挖等高线附近布设周边眼。在周边孔和掏槽孔之间，错开、均匀地设置辅助孔，以保证爆破碎石的粒度满足装渣要求。在钻孔前，勘测员在钻孔前，用红色铅条精确地画出钻孔的中心线、等高线，并将钻孔的位置标注出来，误差不大于3cm，并将报告给隧道技术主管。经勘测，在掌面上用红漆标出了炮眼的起钻点，并要求起钻点严格依照测绘标志上的测点进行钻孔操作。

（三）定位

按照炮位的要求进行合理的布孔，掏槽及周边孔的布孔速度要快，布孔误差要小于3cm。

（四）钻孔

按照炮位的布局，将掘进工人的工作范围划分清楚，并将“五点”落实到位（定点，定人，定量，定时间，定奖惩）。

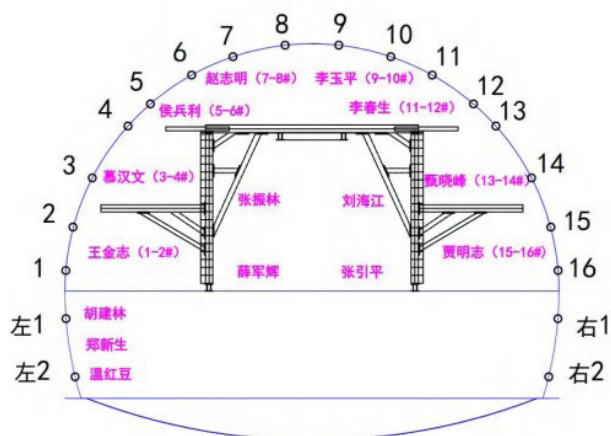


图6 麻尔破隧道上台阶钻孔分工图

Fig.6 Division diagram of drilling on the upper steps of the Malpo Tunnel

（五）装药

炮棒上有各种颜色的标记，以确保炸药到达指定的炮位。



图7 周边孔间隔等距装药

Fig.7 Charge evenly spaced around the perimeter holes

（六）连线

炮身与导爆索相连，孔内有一根导爆绳贯穿成 T 形节，仅用胶带绑好雷管的起爆段。



图8 导爆索“T”型链接

Fig.8 T-type link of detonating cord

（七）起爆

联网之后，在准备引爆之前，要将危险区域内的人员疏散出去，应该设置防护装置的必须设置，并经安全员确认后才能启动，使用非电毫秒雷管引爆。

（八）排险



图9 光爆前排险后超欠挖严重

Fig.9 Serious over excavation and under excavation after clearing risks before the light explosion



图10 光爆后排险后无超欠挖

Fig.10 After the light explosion, there was no over excavation or under excavation after the risk was eliminated

（九）效果检查

光爆法处理后，炮眼的痕迹率可达90~95%，两炮接头的最大孔径为9厘米，超欠挖只有5%；无爆破超欠量（30%）。

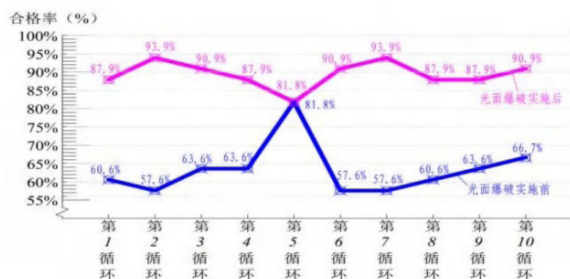


图 11 光爆实施前后炮眼残留率

Fig.11 Residual rate of gun holes before and after the implementation of light explosion

六、 软弱围岩光面爆破重点

1. 光面爆破的核心即是减小周边眼集中装药量，将单节炸药量控制越小，对围岩的扰动越小。
2. 堵塞炮孔可以减少爆破气体能量散失，防止孔口炸药在被引爆前被气体吹出，必须堵塞严密。

3. 最小抵抗线 (W) 是光面爆破又一重要参数，它是周边眼与内圈眼的距离（即光爆圈厚度），炮孔炸药爆炸将会向四周临空面最短的距离产生裂缝，如抵抗线不合理，加之围岩本身裂隙作用，爆炸能量在未贯通周边孔之前就往内圈方向释放，会造成两个周边眼之间出现欠挖。

4. 炮孔质量：“准”位置准，要画弧画炮眼；方向准，掌子面要预留宽度，孔口位置在开挖线以内5cm，孔底在开挖线以外15cm；“平”炮孔水平、平行，难点在开挖台架交界处；“直”炮孔孔底在一个铅直面，爆破后掌子面垂直。

5. 导爆索接头尽量缠绕多圈，绑紧，接头靠近孔口，否则易出现瞎炮。

6. 要设置长效考核奖罚机制，提高工人主动性。

通过对光面爆破进行治理，使隧洞中的超欠量得到了较好的控制，同时也大幅度地降低了喷砼的用量，节约了工程造价，具有较好的经济效益。所以，光面爆破技术对于加快隧道施工进度、保障隧道施工安全、提高隧道开挖的经济效益具有重要意义。

参考文献

- [1] 彭国才. 公路隧道施工技术规范 [J]. 北京：人民交通出版社，2020.
- [2] 夏娟. 论隧道工程的光面爆破特征及参数选择要素 [J]. 住房与房地产，2017, 24: 251.
- [3] 杨新华. 隧道施工中的光面爆破技术及实施要点分析 [J]. 科技经济导刊，2017, 16: 56.
- [4] 方世蓉. 隧道施工中的光面爆破技术及实施要点的研究 [J]. 智能城市，2017, 2: 102-103.
- [5] 凌伟明. 光面爆破和预裂爆破破裂机理的研究 [J]. 中国矿业大学学报，1990, 19 (4): 79-87.
- [6] 凌伟明，杨永琦. 爆生气体在光面爆破中的应用 [J]. 煤炭学报，1990, 15(1): 73-82.

制冷与空调设备电气自动控制技术探讨

廖辉

广东美的制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2025070009

摘 要 : 制冷与空调设备在社会生产生活中应用广泛, 其作用在于调节室内环境温湿度, 提高环境舒适度。随着电气控制系统持续更新升级, 电气自动控制技术的环境适应性进一步增强, 应用于制冷与空调设备控制领域, 能够有效提高系统控制精度, 降低系统能耗与维护成本, 对于保障制冷与空调设备节能稳定运行具有重要作用。文章围绕制冷与空调设备电气自动控制技术应用内容展开分析, 以期为企业生产提供参考支持。

关 键 词 : 电气自动控制技术; 制冷与空调设备; 智能化控制

Discussion on the Electrical Automatic Control Technology of Refrigeration and Air-Conditioning Equipment

Liao Hui

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

Abstract : Refrigeration and air conditioning equipment is widely used in social production and life. Its role is to regulate the indoor environment temperature and humidity and improve the environmental comfort. With the continuous update and upgrading of the electrical control system, the environmental adaptability of the electrical automatic control technology is further enhanced. Applied in the field of refrigeration and air conditioning equipment control, it can effectively improve the system control accuracy, reduce the system energy consumption and maintenance cost, and plays an important role in ensuring the energy saving and stable operation of refrigeration and air conditioning equipment. This paper focuses on the application content of electrical automatic control technology of refrigeration and air conditioning equipment, in order to provide reference support for the production of related enterprises.

Keywords : electrical automatic control technology; refrigeration and air-conditioning equipment; intelligent control

现代社会生产生活中, 制冷与空调设备得到了广泛应用, 但此类装置能耗较高, 对生态环境同样会产生一定负面影响, 如何节能降耗成为企业重点关注的内容。传统制冷与空调设备控制方式局限性较大, 难以满足设备能耗控制要求, 随着技术逐渐发展, 电气自动控制技术随之诞生。依托于电气自动控制技术的有效应用, 根据需要进行神经网络控制、PID 控制以及 PLC 控制等方式, 能够较好地满足复杂的控制需求, 为制冷与空调设备安全、节能运行提供坚实保障。

一、电气自动控制技术在制冷与空调设备中的作用

现代制冷与空调领域, 电气自动控制技术俨然成为一门核心技术, 在设备运行各个环节深度融合应用展现出巨大的作用。电气自动化控制技术本质在于构建反馈系统, 对设备运行和周围环境状态实时采集, 围绕预设目标动态调整系统基本参数, 从而保障系统保持特定性能运行。传统控制方法以 PID 微分控制、积分控制等方式为主, 随着技术更新升级, 现代控制技术涵盖了神经网络、PLC 逻辑以及模型预测控制等方法, 使得控制技术自动化、智能化水平大幅度提升。电气自动控制技术的作用主要表现在以下几方面。

(一) 合理调节基本参数

制冷与空调设备运行中采用电气自动控制技术, 一个重要作用是合理调节基本参数, 包括压力、温度和适度等参数。依托于高精度温度传感器, 能够实施捕捉环境温度各项数据参数变化, 空调系统中室内温度超出设定值, 传感器即可将采集的信号传输给控制器, 控制器第一时间反应, 加大冷媒循环量和压缩机运行频率, 增强空调的制冷能力, 降低室内环境温度。温度在设定值以下, 基于变频器适当的降低压缩机频率, 能够大幅度降低制冷量, 维护室内环境温度趋于稳定状态, 对比传统控制技术, 能够控制温度波动范围在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内, 减少设备启停次数, 延长制冷与空调设备使用寿命^[1]。压力参数检测方面, 通过高精度传感器

采集压力数据，如果高压侧压力超出标准，其原因可能在于冷凝器散热性能较差导致，自动控制系统自动运行加快冷凝器风机转速，提高系统散热效果，在降低系统高压侧压力方面具有重要作用。如表1，中央空调热负荷、环境温度改变，可以按照表1调整各项参数。

表1 制冷与空调设备参数

1	空调设备进风温度在18℃~ 27℃，露点温度范围5.5℃~ 15℃，相对湿度在60以下，避免机房结露。
2	进风环境温度15℃~ 32℃，相对湿度处于20% ~ 80% 范围内。
3	数据中心建设在海拔1000m 以上的区域，环境温度最大值根据海拔高度每增加300m 降低1℃建立。
4	磁带驱动下，温度变化率不超过5℃ /h，温度变化率不超过20℃ /h。
5	设备停机状态下，主机房温度保持在5℃ ~ 45℃，相对湿度则处于8% ~ 80%。
6	主机房每立方米空气不小于0.5um 有悬浮粒子数在176000000粒以下。
7	保持主机房内部正压状态，避免有灰尘渗透其中；主机房与邻近房间静压差在5Pa 以上，同室外静压差在10Pa 以上。

（二）维护设备安全稳定运行

制冷与空调设备运行过程中，受多种因素影响，设备容易出现泄漏、负荷过载以及参数波动大等安全隐患，引入电气自动控制技术，能够实时监测设备运行状态，并通过逻辑判断与响应等方式，有效降低设备故障风险，为设备安全稳定运行提供坚实保障^[2]。电气自动控制技术通过配套的多重安全保护机制，能够实时监测压缩机以及风机等设备的电流值大小，一旦电流值超出标准120% 时，控制器即可自动化切断电源，避免烧毁电机。同时，根据压力和温度传感器采集数据信息，与安全阀联动运作，一旦温度过高 / 过低或是冷凝压力过高，即可自动停止压缩机运行，并及时泄压。电气系统层面，发现线路老化、损坏导致的漏电现象，保护装置自动切断电源，避免起火事故。而且在制冷系统运行方面，运用自动控制技术能够检测到冷媒泄漏，应急程序自动启动后关闭阀门，避免冷媒持续泄漏，并发出报警信息^[3]。

（三）降低设备运行成本

基于电气自动控制技术，能够有效降低制冷与空调设备运行能耗与成本，与可持续发展要求相契合。制冷与空调设备节能降耗方面，采用智能控制系统根据实时采集的环境数据动态调整。例如，白天气温高，自动化增加制冷量降低；夜间气温偏低、负荷较小状态下，自动降低设备运行功率和能耗^[4]。采用此种精细化能耗控制方式，能够提升制冷与空调系统节能效果20% ~ 40% 左右。

二、制冷与空调设备电气自动控制技术的类型和要点

（一）类型

1. 闭环控制

闭环控制是电气自动控制技术中主要控制方式，提供反馈机制，依托于传感器装置实时采集系统压力、温度、湿度等参数信息，并及时反馈给控制器。控制器依据设定目标精准对比调整，并使用特定控制算法精准调控压缩机和风机等关键装置，维护系统稳定运行。例如，预警系统反馈信号同时，输出信号给系统，

用于发送新的控制指令，即误差信号，传输到控制器上，发送指令同时减少系统运行偏差。

2. 开环控制

开环控制相较于闭环控制，不需要测量输出量或反馈输出量到输入端。部分小型的制冷设备中，根据提前设定的运行时间，控制器不需要考虑设备温度变化和制冷效果的前提下定时启闭压缩机。与闭环方式，开环控制方式成本低、系统结构简单，适合一些工作环境温度、控制精准度要求不高的应用场景^[5]。

（二）技术要点

1. 温度自动化控制

电气自动控制技术应用在制冷与空调设备中，一项重要内容时温度自动化控制技术。温度控制是制冷与空调设备的核心技术功能，制冷设备中多采用热敏电阻传感器采集温度数值，制冷空间温度波动较大，电阻值以及电路随之变化。控制器采集信号后，对比预设温度值，实际温度超出预设值，即可自动化启动压缩机，增加装置的制冷量^[6]。实际温度小于预设标准值，控制器减少制冷量，或是直接停止运行，保持温度恒定。冰箱中运用温度控制技术，冷藏区和冷冻区温度能够始终维持在2℃ ~ 8℃、- 18℃左右，满足制冷需要。空调设备中的温度控制技术，除了室内温度传感器外，有些高端空调设备在冷凝器、蒸发器等装置上安装传感器，多个传感器协同运作下收集设备运行状态、室内环境温度数据，以此为依据自动化调整风机或压缩机运行参数。以变频空调为例，室内温度与目标温度差距较大时，自动控制压缩机高速运转，实现快速制热、制冷，随着温度逐渐趋近于目标值，压缩机运行频率随之下降，从而保持温度恒定，满足节能降耗需要。

2. 湿度自动化控制

部分特定场景对于湿度控制要求较高，需要在保证湿度控制精度同时，降低系统总体能耗。湿度自动化控制中，需要配备专门的湿度传感器，如，露点传感器和电容式传感器^[7]。露点传感器能够直接作用于露点温度测量，适合低温冷库湿度控制，控湿精度 ± 3%RH；电容式传感器检测范围10% ~ 95%RH 左右，响应时间5s 以内，控制精度 ± 2%RH。湿度传感器检测到环境湿度超出上限标准，制冷与空调系统自动启动除湿功能，以冷凝除湿方式将空气中的水分凝结成水滴排出，风机同步运作，加快除湿速度，避免温度大幅度下降。湿度小于设定下限，空调系统的电极式加湿器或超声波加湿器等加湿装置自动启动，补充空气中水分含量，将环境湿度控制在合理范围内。对于部分精密电子仪器生产场景，严格控制环境湿度在40% ~ 60% 范围内，降低静电产生几率，避免静电损坏电子元件^[8]。

3. 压力自动化控制

压力同样是电气自动控制技术关键点所在，需要保证制冷剂循环系统压力稳定，避免设备出现安全问题，增加系统能耗。采用压阻式传感器动态监测，量程覆盖 -0.1MPa ~ 5MPa 范围，精度 ± 0.5%FS，能够实时反馈蒸发器和冷凝器压力大小；监测过滤器是否堵塞，一旦堵塞及时报警，避免风机运行过载。根据传感器采集的蒸发压力、过热度动态调节开度，调节快速响应，

响应时间不超过 1s，保障制冷剂流量稳定；采用压力－频率闭环控制，规避高压超限影响系统安全运行；冷凝压力异常升高状况下，快速开启旁通阀泄压^[9]。

4. 电气安全控制技术

制冷与空调设备运行中，保障电气安全是基础前提。设备应配备漏电保护装置，一旦漏电保护开关检测到异常电流，快速切断电源，避免发生触电事故。过载保护也是制冷与空调设备自动控制的核心功能，风机、压缩机等设备运行负载过高，运行中由于电压波动或是机械故障等问题过载运行。热继电器过载保护装置实时监测电机电流变化，一旦超出额定值，电路自动被切断，避免长期过载运行导致电机装置损坏^[10]。另外，制冷与空调设备

应做好防雷击保护，配备防雷器，避免雷击电流引入大地，避免设备雷击损坏。

三、结论

综上所述，制冷与空调设备在社会生产生活中应用范围不断扩大，通过电气自动控制技术的融合应用，能够实时监测设备运行状况，一旦发现异常情况下及时发出预警信息，自动调节环境温度湿度。基于此种方式，能够显著提高设备运行性能和使用寿命，对于推动制冷与空调设备领域高水平发展具有重要意义。

参考文献

[1] 吴田. 暖通空调设备内部电路工作电压及绝缘设计 [J]. 中国设备工程, 2025, (02): 140–142.
[2] 黄雅萍. 论暖通空调设备安装的施工问题及对策 [J]. 中国设备工程, 2024, (22): 235–237.
[3] 李辉辉. 制冷与空调设备电气自动控制技术研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (21): 227–229.
[4] 刘金瑶, 赵贞丽. 空调系统电气控制单元设计与仿真 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(06): 100–103.
[5] 陈亚丽, 杨伟兵. 制冷与空调设备电气自动控制技术 [J]. 中国高新科技, 2023, (10): 80–81+96.
[6] 李建明. 智能建筑电气设备的安装及其质量控制要点 [J]. 工程与建设, 2023, 37(01): 347–349+381.
[7] 杨珊珊. 制冷空调设备电气控制的应用现状与未来发展趋势 [J]. 中国战略新兴产业, 2022, (05): 113–115.
[8] 宋玉明. 自动控制在制冷空调技术中的应用 [J]. 电气传动自动化, 2022, 44(01): 27–30.
[9] 杨珊珊. 制冷与空调装置电气自动控制技术运行分析 [J]. 电子世界, 2021, (14): 47–48.
[10] 曾东颖. 制冷与空调装置电气自动控制技术运行分析 [J]. 电力设备管理, 2019, (02): 77–80.

废弃碳纤维制备工程应用的复合材料井盖

刘丹¹, 拓亚亚¹, 赵关芳¹, 田银俊¹, 赵学平²

1. 内蒙古航天红岗机械有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010076

2. 内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051

DOI:10.61369/ERA.2025070010

摘 要 : 针对废弃碳纤维直接填埋或焚烧造成的环境污染及处理成本高昂等问题, 本研究采用模压成型工艺将废弃纤维制备成复合材料井盖, 系统分析了井盖静态力学性能、微观形貌及抗冲击性能。静态力学性能测试结果表明: 原材料规格对复合材料井盖的力学性能影响较为明显, 短切碳纤维预浸料制备复合材料井盖的力学性能明显优于碳纤维预浸布带, 其拉伸强度为51MPa, 压缩强度为152MPa, 弯曲强度为180MPa。SEM 测试结果显示: 短切碳纤维预浸料制备的复合材料井盖, 纤维与树脂的界面粘接性良好, 无明显的分层、空隙等缺陷。

关 键 词 : 回收利用; 废弃碳纤维; 复合材料井盖; 力学性能

Recycling Waste Carbon Fiber for Manufacturing Composite Manhole Covers

Liu Dan¹, Tuo Yaya¹, Zhao Guanfang¹, Tian Yinjun¹, Zhao Xueping²

1.Inner Mongolia Aerospace Honggang Machinery Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010076

2.Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051

Abstract : To address the environmental pollution and high disposal costs caused by the direct landfill or incineration of waste carbon fiber, this study utilized a compression molding process to fabricate composite manhole covers from waste fibers, and systematically analyzed the static mechanical properties, microstructural morphology, and impact resistance performance of the covers. The results of static mechanical property tests indicated that raw material specifications significantly influenced the mechanical performance of the composite manhole covers. The composite covers fabricated from chopped carbon fiber prepreg demonstrated markedly superior mechanical properties compared to those made from carbon fiber prepreg tape, with a tensile strength of 51 MPa, compressive strength of 152 MPa, and flexural strength of 180 MPa. SEM analysis results revealed that the composite manhole covers fabricated from chopped carbon fiber prepreg exhibited excellent interfacial bonding between fibers and resin, with no apparent structural defects such as delamination or voids.

Keywords : recycling; waste carbon fiber; composite manhole covers; mechanical properties

碳纤维因其质量轻、强度高、耐腐蚀等优异特性被广泛应用于航空航天、交通运输、海洋船舶、新能源等领域^[1,2,3]。据华经产业研究院《2021–2026年中国碳纤维行业发展检测及投资战略规划研究报告》统计, 2018–2020年全球碳纤维需求量年复合增长率为10.12%, 预计2020–2025年碳纤维市场的复合年增长率将超过12%, 2025年将达到20万吨, 全球航空航天复合材料市场规模预计将达到410亿美元^[4]。随着碳纤维的普遍应用, 大量废弃碳纤维也随之产生。据统计, 2020年全球碳纤维增强树脂基复合材料废弃物量达到3.32万吨, 碳纤维增强树脂基复合材料废弃物量呈现逐年增长的趋势, 预计2050年全球碳纤维增强树脂基复合材料废弃物量将达到20万吨^[5]。如将废弃碳纤维直接丢弃, 废弃碳纤维中残留的树脂(如环氧树脂)会渗入土壤, 破坏微生物群落; 释放有害物质, 污染环境^[6,7]。如将废弃碳纤维作为固体废弃物进行后处理, 高昂的废弃纤维处理费用会导致产品的制造成本提高。

对废弃碳纤维回收再利用是解决上述问题的最佳方案之一, 是改善环境承载能力、实现社会经济可持续发展的必然选择。废弃纤维再利用不仅可节省废弃纤维的后处理费用, 还能节省新制造产品的原材料费用, 从而降低新制造产品的成本。

基于碳纤维的特性, 将废弃碳纤维制备成复合材料井盖是其回收再利用的一种有效途径。目前常见的井盖主要是由铸铁或钢筋混凝土制作而成^[8,9]。由于铸铁、钢筋等材料可回收直接利用, 致使井盖被盗频繁发生^[10]。井盖的缺失会极大地引发交通事故及人员伤亡, 严重危害公共安全和人民群众的生命财产安全。复合材料井盖不仅解决了铸铁井盖偷盗问题, 还规避了铸铁井盖被车辆碾压时金属碰撞的产生噪声。

作者简介: 刘丹(1980.12–), 女, 汉族, 辽宁省盘锦市人, 博士, 高级工程师, 主要从事复合材料应用研究工作, 项目: 内蒙古科技计划(呼和浩特市应用技术与开发)。

本研究以废弃碳纤维为原材料,采用模压成型工艺制备复合材料井盖。并对井盖的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度及冲击强度进行了测试,采用扫描电子显微镜(SEM)观察了井盖的微观形貌。

一、实验部分

(一) 实验原材料

两种原材料,分别是废弃碳纤维预浸带及废弃短切碳纤维预浸料。两种废弃预浸料中的树脂类型均为环氧树脂。

(二) 复合材料井盖制备

1. 井盖模具前处理

模具表面进行初步清理,用乙酸乙酯将模具内腔擦拭干净后,均匀涂抹高温脱模剂至模具内腔的每个角落,涂抹三次,涂抹时间间隔为30 min。

2. 废弃碳纤维铺放量计算

采用UG(Unigraphics)软件计算模具内腔体积,井盖模具内腔体积为 1791074.0571 mm^3 ,井座模具内腔体积为 1888170.3126 mm^3 。

废弃短切碳纤维预浸料体密度为 1.47 g/cm^3 ,如采用废弃短切碳纤维预浸料制备复合材料井盖及井座,所需的废弃短切碳纤维质量分别为 2632.9 g 与 2775.6 g 。废弃碳纤维预浸带制备复合材料井盖所用的质量参考废弃短切碳纤维的质量。

3. 复合材料井盖制备工艺

制备井盖所用的原材料为废弃碳纤维预浸料,碳纤维预浸料中已含有树脂,本研究在制备井盖的过程中未再添加树脂,模具前处理完成后,称取一定质量的废弃碳纤维预浸料铺放至模腔内(质量数值参照表1)。

废弃碳纤维预浸带与短切纤维预浸料两种规格的原材料均采用手工铺放工艺制备复合材料井盖。

废弃碳纤维预浸带的铺层角度按 0° 、 $+45^\circ$ 、 -45° 、 90° 周期性重复,实现近似各向同性。在搭接空隙处填补小块碳纤维预浸带,使得每层铺放尽可能平整、紧密。

与碳纤维预浸带的铺放工艺相比较,短切碳纤维预浸料更容易铺放,效率更高。从冷库中取出的短切碳纤维预浸料用橡胶锤迅速敲打后变得松散不粘连,直接倒入模具中即可。

4. 复合材料井盖性能测试

(1) 拉伸强度性能测试

试验标准: GB/T1447-2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》。

(2) 压缩强度性能测试

试验标准: GB/T1448-2005《纤维增强塑料压缩性能试验方法》。

(3) 弯曲强度性能测试

试验标准: GB/T1449-2005《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》。

(4) 扫描电子显微镜(SEM)测试

(5) 冲击强度性能测试

试验标准: GB/T1483-2008《塑料悬臂梁冲击强度的测定》。

二、结果与讨论

(一) 复合材料井盖的表观质量

碳纤维预浸带制备的复合材料井盖如图1所示。从表观形貌看,井盖的防滑纹区域存在显著的材料分布不均问题。防滑纹凸起部分完全由树脂构成,缺乏纤维增强相。树脂区域的机械强度较低,轻微摩擦就可导致树脂剥落(图1(a),(b))。防滑纹凸起的纹路能够分散车辆碾压时的集中载荷,提高井盖的抗压能力,减少变形或破裂的风险。碳纤维预浸带制备的井盖防滑纹在机械摩擦或环境应力作用下极易脱落的缺陷会直接降低井盖表面的有效摩擦系数,在雨雪天气或潮湿环境下,界面水膜无法被残余的平滑表面充分破坏,行人步态稳定性将显著降低,滑倒风险显著提升。车辆(特别是两轮车辆)通过时极易引发侧滑失控事故。

碳纤维预浸带模压成型的井座结构在加强筋区域也存在显著的缺陷,具体表现为几何形貌偏离设计预期。由于预浸带幅宽过大,在模压成型的过程中发生了非理想的材料流动行为,树脂基体在压力梯度作用下产生径向迁移,导致加强筋截面呈现非设计态的凹陷形貌,具体如图1(c),(d)所示。

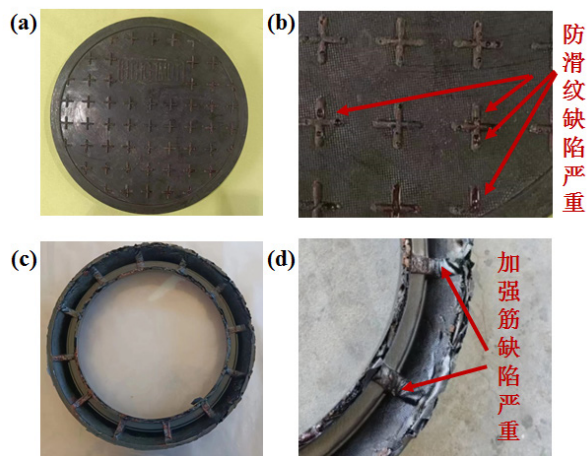


图1 碳纤维预浸带制备的井盖表观形貌。(a) 井盖;(b) 井盖防滑纹放大图;

(c) 井座;(d) 井座放大图。

短切碳纤维预浸料模压成型制备的复合材料井盖展现出优异的表观形貌和结构完整性。如图2所示,井盖表面的防滑纹区域实现了纤维-树脂的均匀分布,防滑纹结构完整且机械强度较佳(随意踩踏后,防滑纹表观形貌无变化)。

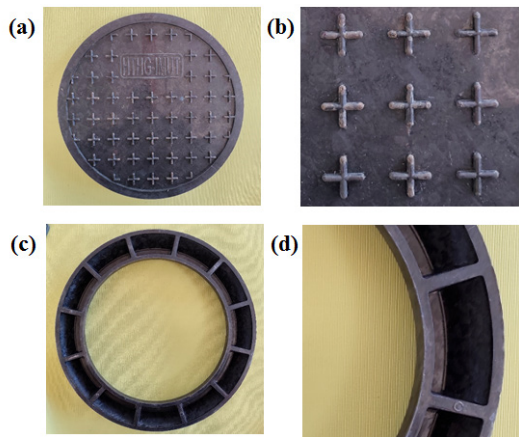


图2 短切碳纤维预浸料制备的井盖表面观形貌。(a) 井盖；(b) 井盖防滑纹放大图；
(c) 井座；(d) 井座放大图。

(二) 复合材料井盖的力学性能

由碳纤维预浸带及短切纤维预浸料制备的复合材料井盖均采用本体取样进行力学性能表征。两种原材料制备的复合材料井盖的静态力学性能对比如图3所示。碳纤维预浸带制备的复合材料井盖的强度明显不足，除压缩强度外，拉伸强度及弯曲强度的测试值均低于国家标准的要求值。拉伸强度最低值为9.1MPa，最高值为24.9MPa，弯曲强度的最高测试值也仅为29.0MPa。与碳纤维预浸带相比，短切碳纤维制备的井盖力学性能有了显著的改善，其拉伸强度、压缩强度及弯曲强度测试的最低值分别为51.0MPa、152.0MPa及180.8MPa，均符合国家标准的指标要求，满足工程应用的力学性能需求。

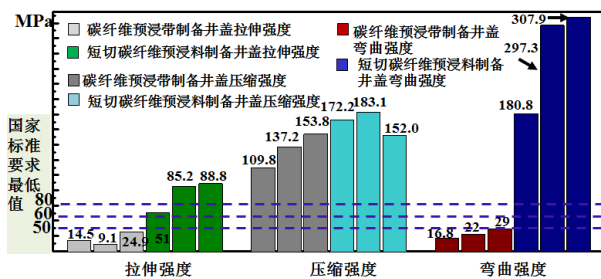


图3 两种原材料制备的复合材料井盖的静态力学性能



图4 测试后的拉伸试样（碳纤维预浸带制备的井盖）

拉伸强度试验测试完成后，碳纤维预浸带制备井盖的拉伸试样如图4所示，拉伸失效断口出现了严重的分层，断口主要位于布层之间，布层间脱粘情况较为严重。结合井盖制备的具体工艺过程，部分碳纤维预浸带过宽、过长，导致粘连严重，需用力撕拉才能将其剥离，剥离力不仅导致预浸带边缘撕裂，也导致纤维受损或断裂，抗拉强度降低。这也是碳纤维预浸带制备的复合材料井盖静态力学性能不理想的主要原因。

(三) 复合材料井盖的 SEM 测试

为探究复合材料井盖的微观结构，本研究对短切碳纤维制备的复合材料井盖进行了 SEM 测试（力学性能测试后的试样）。如图5所示，短切碳纤维表面被环氧树脂完全包裹，纤维纵向沟槽内可见树脂的填充，界面过渡区连续，无微裂纹或脱粘位置。这种界面呈现的连续、致密的树脂-纤维结合状态，表明井盖无可见的结构缺陷。

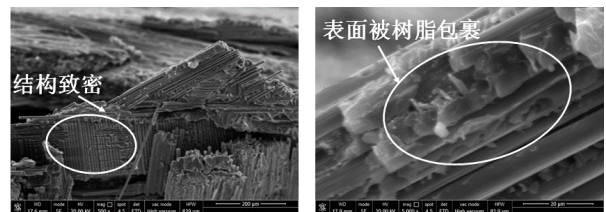


图5 SEM 测试分析

(四) 复合材料井盖的抗冲击性能

井盖在道路环境中可能遭遇车辆碾压冲击等状况，为确保井盖在实际服役中的可靠性，对短切碳纤维预浸料制备井盖进行了冲击强度测试，如图6所示。

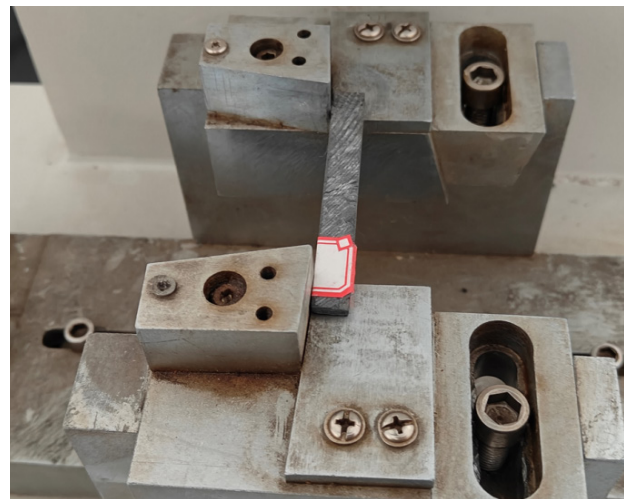


图6 抗冲击试验

冲击强度的测试结果如表1所示，最小值为 $1.094 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ ，最大值为 $1.743 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ ，离散值高达46.2%（离散值计算方法为测试最大值与最小值的差值与测试平均值的比值。说明未被 SEM 观测到的井盖结构内部的微小孔隙或者细微裂纹影响复合材料井盖的动态力学性能，应优化井盖的制备工艺，避免微小孔隙及细微裂纹的形成。

表 1 冲击强度测试结果

编号	冲击强度 (10 ⁴ J/m ²)	偏差值 (冲击强度测试值 - 冲击强度平均值)
1	1.392	-0.013
2	1.555	0.150
3	1.094	-0.311
4	1.743	0.338
5	1.239	-0.166
平均值	1.405	/
测试结果离散值	46.2%	/

三、结论

本研究将废弃碳纤维回收再利用制备成复合材料井盖，通过资源的循环利用，实现经济效益的提升，完全契合绿色制造理念。通过该研究，得到如下结论：

（1）与废弃碳纤维预浸带相比，废弃短切碳纤维制备的复合材料井盖，展现出显著的力学性能优势。其拉伸强度 ≥ 51.0MPa，压缩强度 ≥ 152.0MPa，弯曲强度 ≥ 180.8MPa。

（2）SEM 测试分析表明，短切碳纤维预浸料制备的复合材料井盖微观结构致密，无明显缺陷，更适宜工程应用。

参考文献

[1]TangSF, HuCL.Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33: 117-130.

[2]CodyJohnson, Selvam Pillay, Haibin Ning. Fiber content measurement of hybrid carbon and glass fiber reinforced thermoset composites[J]. Journal of Composite Materials, 2022, Vol. 56(18): 2825 - 2834.

[3]Jinlong Shang. Durability testing of composite aerospace materials based on a new polymer carbon fiber-reinforced epoxy resin[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2023(9): 2315-2327.

[4]胡侨乐, 端玉芳, 刘志, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料回收再利用现状 [J]. 复合材料学报, 202239(1): 64-76.

[5]Liu W, Huang H, Zhu L et al. Integrating carbon fiber reclamation and additive manufacturing for recycling CFRP waste[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 215: 108808.

[6]Pickering S, Turner T, Meng F. Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites[C]. 2nd Annual Composites and Advanced Materials Expo, CA MX, 2015: 2384-2394.

[7]Hartline NL, Bruce NJ, Karba SN, et al. Microfiber Masses Recovered from Conventional Machine Washing of New or Aged Garments[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(21): 11532-11538.

[8]张学磊. 城市窨井盖治理及智能化改造 [J]. 工程建设与设计, 2023, (3): 89-91.

[9]马兴遒, 黄丹丹, 焦晓磊. 废旧复合材料井盖研究与应用 [J]. 天津建设科技, 2023, 33(5): 14-17.

[10]张亮儒, 杨燕宁, 卢晨. 碳纤维复合材料回收再利用的研究进展 [J]. 合成纤维 Synthetic Fiber in China, 2023(52): 38-41, 93.

燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损与防护技术研究

孟凡成, 王向阳, 田星宇

江苏阚山发电有限公司, 江苏 徐州 221000

DOI:10.61369/ERA.2025070011

摘 要 : 随着燃煤火电厂装机容量的不断增加, 锅炉受热面磨损问题日益突出, 已成为影响锅炉安全、稳定、经济运行的重要因素。本文深入分析了燃煤火电厂锅炉受热面磨损的机理, 包括飞灰磨损、机械磨损等, 探讨了影响受热面磨损的主要因素, 如煤质特性、锅炉运行参数、受热面结构等。在此基础上, 提出了多种有效的受热面防护技术, 如表面防护技术、结构优化技术、运行调整技术等, 并对其防护效果进行了评估。通过研究, 旨在为燃煤火电厂锅炉受热面的磨损防护提供理论依据和技术支持, 提高锅炉的运行可靠性和经济性。

关 键 词 : 燃煤火电厂; 锅炉受热面; 磨损机理; 防护技术

Study on Heat Surface Wear and Protection Technology in Boiler Operation of Coal-Fired Thermal Power Plant

Meng Fancheng, Wang Xiangyang, Tian Xingyu

Jiangsu Fanshan Power Generation Co., LTD. Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract : With the continuous increase in installed capacity of coal-fired power plants, the issue of boiler heat surface wear has become increasingly prominent, becoming a critical factor affecting the safe, stable, and economic operation of boilers. This paper delves into the mechanisms of boiler heat surface wear in coal-fired power plants, including fly ash wear and mechanical wear, and explores the main factors influencing heat surface wear, such as coal quality characteristics, boiler operating parameters, and heat surface structure. Based on this, various effective heat surface protection technologies are proposed, such as surface protection technology, structural optimization technology, and operational adjustment technology, and their protective effects are evaluated. The aim of this research is to provide theoretical basis and technical support for the wear protection of boiler heat surfaces in coal-fired power plants, thereby enhancing the operational reliability and economic efficiency of boilers.

Keywords : coal-fired power plant; boiler heating surface; wear mechanism; protection technology

燃煤火电厂作为我国电力供应的主要力量, 其锅炉的安全、稳定运行对于保障电力供应至关重要。然而, 在锅炉运行过程中, 受热面磨损问题长期存在且较为严重。受热面磨损不仅会降低锅炉的热效率, 增加能源消耗, 还会导致受热面泄漏、爆管等事故的发生, 严重影响锅炉的安全运行, 给企业带来巨大的经济损失。因此, 深入研究燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损机理, 并采取有效的防护技术具有重要的现实意义。

一、燃煤火电厂锅炉受热面磨损机理分析

(一) 飞灰磨损

飞灰磨损作为锅炉受热面磨损的关键形式, 在燃煤过程里对设备运行安全影响显著。燃煤时, 煤内矿物质于高温环境下历经分解、熔融与气化等反应, 进而生成飞灰颗粒。这些飞灰颗粒伴随烟气一同流动, 以特定速度和角度持续撞击受热面管壁, 致使管壁遭受磨损。飞灰磨损程度受诸多因素影响, 飞灰的浓度、粒度、硬度、形状以及烟气的流速、流向等, 均与之密切相关。具

体而言, 飞灰浓度越高, 意味着单位时间内撞击受热面的飞灰颗粒数量越多, 磨损加剧; 飞灰粒度越大, 其携带的动能越大, 撞击时对管壁的破坏力越强; 飞灰硬度越高, 对管壁的刮擦作用越明显, 磨损也就更为严重。此外, 烟气流速越大, 飞灰颗粒获得的动能越大, 对受热面的撞击力随之增大, 磨损程度也会相应提升。因此, 在锅炉运行中, 需对这些因素加以控制, 以减轻飞灰磨损对受热面的损害。

(二) 机械磨损

机械磨损是锅炉受热面管子在运行中面临的重要问题, 主要

由多种机械力作用引发。在锅炉启停阶段，温度的急剧变化会产生热应力，这种应力会使受热面管子发生振动，长期的振动作用会导致管子表面材料逐渐脱落，形成磨损。同时，烟气中可能存在的大颗粒飞灰或异物，在高速流动过程中撞击受热面管子，这种冲击力会直接对管子表面造成损伤，引发机械磨损。大颗粒飞灰或异物的硬度、大小以及撞击频率等因素，都会影响磨损的程度。另外，受热面管子的安装质量以及支撑结构也至关重要。若安装时存在偏差或支撑结构不合理，会使管子在运行中承受不均匀的力，从而加剧振动和磨损。因此，在锅炉的设计、安装和运行过程中，需充分考虑这些因素，采取有效措施减少机械磨损，保障受热面管子的安全稳定运行。

二、影响受热面磨损的主要因素

（一）煤质特性

煤质特性在锅炉受热面磨损，尤其是飞灰磨损方面扮演着关键角色。煤中灰分含量是影响磨损程度的核心指标之一，高灰分煤在燃烧过程中会产生更多飞灰，导致飞灰浓度显著增加，进而加剧受热面管壁的磨损。灰分成分同样不容忽视，其中二氧化硅、氧化铝等硬质成分的含量直接影响飞灰的硬度。这些硬质成分在飞灰中占比越高，飞灰对受热面的撞击和刮擦作用越强烈，磨损也就越严重。此外，挥发分含量对磨损也有显著影响。挥发分含量较低的煤，燃烧时火焰温度相对较高，这使得灰分更容易熔融并形成硬质颗粒。这些硬质颗粒在烟气中流动时，对受热面的磨损作用更为明显^[1]。因此，在选用燃煤时，需综合考虑煤质特性，以降低受热面磨损风险，保障锅炉安全稳定运行。

（二）锅炉运行参数

锅炉运行参数对于受热面磨损状况有着不可忽视的影响。其中，烟气流速是关键因素之一，当烟气流速增大时，飞灰颗粒随之获得更大动能，以更强的撞击力作用于受热面，从而加剧磨损程度。烟气温度同样对磨损有着重要影响。若烟气温度过高，煤中的灰分易发生熔融现象，进而形成具有粘结性的飞灰。这种粘结性飞灰不仅会直接对受热面造成磨损，还可能在受热面表面形成积灰层，影响传热效率的同时，也会因积灰的不均匀分布而引发局部磨损加剧。过量空气系数对受热面磨损的影响也较为复杂。过量空气系数过大时，烟气中的氧含量增加，有利于煤的充分燃烧，但同时也会导致烟气量增多，使得烟气流速提高，进而加剧飞灰颗粒对受热面的撞击磨损^[2]。因此，在锅炉运行过程中，需合理控制这些运行参数，以降低受热面磨损风险，保障锅炉的安全稳定运行。

（三）受热面结构

受热面结构对磨损程度有着显著影响，其结构形式、布置方式以及管子间距等因素均不容忽视。就结构形式而言，不同的受热面设计会直接改变飞灰颗粒的运动轨迹和撞击概率。若受热面管子排列过于密集，飞灰颗粒在流动过程中与管壁的撞击机会将大幅增加，从而加剧磨损。布置方式同样关键，合理的布置能够引导烟气顺畅流动，减少涡流和回流现象，进而降低磨损风险。

相反，若布置不当，如管子的弯曲半径过小，烟气在转弯处易产生涡流，涡流中的飞灰颗粒会对管壁造成更强烈的冲击，加速磨损过程。此外，管子间距也是影响磨损的重要因素。适当的管子间距能够保证烟气流动的均匀性，减少飞灰颗粒的局部聚集和撞击^[3]。因此，在设计和安装受热面时，需综合考虑这些因素，以优化结构形式、布置方式和管子间距，从而有效降低磨损程度，延长受热面的使用寿命。

三、燃煤火电厂锅炉受热面防护技术

（一）表面防护技术

1. 涂层防护

涂层防护是保护锅炉受热面管子免受磨损的有效方法。其原理是在管子表面涂覆一层具备耐磨、耐腐蚀特性的涂层，以此抵御飞灰及机械力对管子的磨损侵害。在涂层材料选择上，陶瓷涂层凭借高硬度、优异耐磨性及耐高温性能，在高温环境下表现突出，然而其与基体结合强度欠佳，易发生脱落；金属陶瓷涂层融合了金属与陶瓷的双重优势，既具备高结合强度，又拥有良好耐磨性；高分子涂层则以出色柔韧性和耐腐蚀性见长，不过耐磨性稍显不足^[4]。实际应用中，需依据锅炉具体工况及磨损特点，合理选用涂层材料，以达到最佳防护效果。

2. 热喷涂防护

热喷涂防护作为一种高效的技术手段，在锅炉受热面管子抗磨损领域发挥着重要作用。其核心原理在于将耐磨材料加热至高温熔化或半熔化状态，随后借助高速气流将其喷射至受热面管子表面，从而形成一层坚固的耐磨涂层。在热喷涂技术中，火焰喷涂、等离子喷涂以及超音速火焰喷涂等方法较为常用。这些方法所形成的涂层具备诸多优势，如结合强度高，可紧密附着于管子表面；孔隙率低，能有效阻挡飞灰颗粒的侵入；耐磨性好，显著提升管子的抗磨损能力^[5]。然而，热喷涂工艺相对复杂，对操作技术和设备要求较高，且成本较为昂贵。

（二）结构优化技术

1. 受热面管子结构优化

受热面管子结构优化是降低锅炉磨损、提升运行效率的关键举措。在结构形式方面，采用螺旋管、鳍片管等创新设计，可带来显著优势。螺旋管独特的螺旋形态，使烟气在流动过程中形成螺旋气流，不仅增加了烟气与管子的接触面积，强化了传热效果，还改变了飞灰颗粒的运动轨迹，减少其对管子的直接撞击，降低磨损程度。鳍片管则凭借鳍片结构，进一步拓展了传热面积，同时，鳍片对飞灰颗粒具有一定的阻挡和分散作用，减轻磨损^[6]。此外，合理设计管子的弯曲半径和间距也至关重要。恰当的弯曲半径能避免烟气在转弯处产生涡流，合理的管子间距可保证烟气流动的均匀性，二者协同作用，有效改善烟气流动特性，减少磨损风险，保障锅炉稳定运行。

2. 防磨梁、防磨瓦安装

在锅炉运行中，受热面管子易遭受飞灰颗粒撞击磨损，为降低磨损程度，在易磨损部位安装防磨梁、防磨瓦等防护装置是有

效举措。防磨梁通常选用耐热钢材料制成，凭借其优良的耐高温和抗磨损性能，被安装在受热面管子的上方。当飞灰颗粒随烟气流动时，防磨梁能发挥阻挡作用，改变飞灰颗粒的运动方向，使其无法直接撞击管子，从而减少管子表面的磨损。防磨瓦则直接包裹在管子的外表面，如同给管子穿上了一层“铠甲”。它紧密贴合管子，能够承受飞灰颗粒的撞击和刮擦，为管子提供全方位的直接保护^[7]。无论是飞灰颗粒的正面冲击还是侧面刮擦，防磨瓦都能有效抵御，降低管子磨损风险，延长管子使用寿命，保障锅炉安全稳定运行。

（三）运行调整技术

1. 优化燃烧调整

优化燃烧调整对于减轻锅炉受热面磨损具有重要意义。具体而言，可通过精准调控一次风、二次风的风量与风速，确保煤粉与空气充分混合，促进煤粉在炉膛内的完全燃烧。此举不仅能提高燃烧效率，还能有效减少未燃尽碳的含量。同时，对燃烧器的角度和位置进行合理调整，可使火焰分布更加均匀，避免局部高温和火焰冲刷受热面^[8]。通过这些调整措施，飞灰的浓度和硬度均会显著降低。飞灰浓度减少，意味着单位时间内撞击受热面的飞灰颗粒数量降低；飞灰硬度降低，则减轻了飞灰颗粒对受热面的撞击磨损程度，进而延长受热面的使用寿命。

2. 控制烟气流速

控制烟气流速是降低锅炉受热面磨损的重要手段。为实现这一目标，需对锅炉的引风机、送风机等关键风机运行参数进行精准调控。具体而言，可根据锅炉的实际运行工况，合理调整风机的转速、风门开度等参数，确保烟气流速处于适宜范围。通常情况下，烟气流速应被严格控制在一定上限值以内。若流速过高，飞灰颗粒将获得更大动能，对受热面的撞击力显著增强，从而加剧磨损^[9]。反之，通过合理控制烟气流速，可有效降低飞灰颗粒的撞击频率和力度，减轻受热面磨损程度，延长设备使用寿命，保障锅炉安全稳定运行。

四、防护技术效果评估

为了评估上述防护技术的效果，可以采用现场监测、实验室试验和数值模拟等方法。现场监测可以通过安装磨损传感器等设备，实时监测受热面管子的磨损情况；实验室试验可以在模拟锅炉运行工况的条件下，对不同防护技术的防护效果进行对比分析；数值模拟则可以利用计算流体力学（CFD）等方法，对烟气的流动特性和受热面的磨损情况进行模拟计算，预测防护技术的效果。通过评估发现，表面防护技术可以有效地提高受热面管子的耐磨性能，延长管子的使用寿命；结构优化技术可以改善烟气的流动特性，减少飞灰颗粒对管子的撞击，降低磨损风险^[10]。运行调整技术可以从源头上控制飞灰的产生和流动，减轻受热面的磨损。综合采用多种防护技术，可以取得更好的防护效果。

五、结论

燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损是一个复杂的问题，涉及飞灰磨损、机械磨损等多种机理，受煤质特性、锅炉运行参数、受热面结构等多种因素的影响。为了有效防护受热面磨损，本文提出了表面防护技术、结构优化技术、运行调整技术等多种防护技术，并对其防护效果进行了评估。研究表明，综合采用多种防护技术可以显著提高受热面管子的耐磨性能，延长管子的使用寿命，降低锅炉的运行风险，提高锅炉的运行可靠性和经济性。在实际应用中，应根据锅炉的具体情况，选择合适的防护技术，并加强锅炉的运行管理和维护，定期对受热面进行检查和检测，及时发现和处理磨损问题，确保锅炉的安全、稳定运行。同时，还需要进一步开展相关研究，不断改进和完善防护技术，为燃煤火电厂锅炉的安全、高效运行提供更加有力的技术支持。

参考文献

- [1] 覃跃, 李德波, 覃昊, 等. 燃煤电厂锅炉水动力研究现状与展望 [J]. 湖南电力, 2024, 44(05): 1-8.
- [2] 黄思林, 李德波, 苗建杰, 等. 燃煤电厂锅炉受热面超温燃烧调整试验研究与工程应用 [J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 812-818.
- [3] 袁奕竑. 基于火电厂锅炉受热面失效原因及防治措施研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (21): 19-21.
- [4] 王新伟, 孙全, 冯佐江. 火电厂受热面喷涂区换管易出现裂纹问题研究 [J]. 设备管理与维修, 2021, (17): 137-138.
- [5] 刘鹏宇, 李德波, 刘彦丰, 等. 燃煤电厂锅炉机组受热面积灰结渣研究现状与展望 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(05): 87-96.
- [6] 赵海鹏. 火电厂锅炉水冷壁高温腐蚀及防护 [J]. 科技风, 2020, (16): 190+193.
- [7] 戴昕. 火电厂锅炉腐蚀原因及防范措施 [J]. 数码世界, 2020, (03): 288.
- [8] 杨亮. 火电厂燃煤锅炉尾部受热面低温腐蚀的防治 [J]. 电工技术, 2019, (04): 104-105.
- [9] 习兴文. 火电厂燃煤锅炉尾部受热面低温腐蚀的防治与维护措施探究 [J]. 中国战略新兴产业, 2018, (44): 253+255.
- [10] 张玲, 郭坚. 燃煤电厂节能技术与方法概述 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2015, (09): 43+98.

铁路运输安全监管体制的现状与优化策略

李海

国能（天津）大港发电厂有限公司，天津 300272

DOI:10.61369/ERA.2025070012

摘要： 随着我国铁路运输业的快速发展，安全监管体制的重要性愈发凸显。本文深入分析铁路运输安全监管体制的现状特点，探讨优化该体制的必要性，剖析现存的监管职责交叉、信息化水平不足等问题，并从完善法律法规、创新监管模式等方面提出优化策略，旨在为提升铁路运输安全监管效能，保障铁路运输安全稳定发展提供理论参考。

关键词： 铁路运输；安全监管体制；现状；优化策略

The Current Situation and Optimization Strategies of Railway Transportation Safety Supervision System

Li Hai

Guoneng (Tianjin) Dagang Power Plant Co., Ltd., Tianjin 300272

Abstract： With the rapid development of China's railway transportation industry, the importance of safety supervision system has become increasingly prominent. This article deeply analyzes the current characteristics of the railway transportation safety supervision system, explores the necessity of optimizing the system, analyzes the existing problems of cross regulatory responsibilities and insufficient information technology level, and proposes optimization strategies from the aspects of improving laws and regulations, innovating supervision models, etc., aiming to provide theoretical reference for improving the efficiency of railway transportation safety supervision and ensuring the safe and stable development of railway transportation.

Keywords： railway transportation; safety supervision system; present situation; optimization strategy

引言

铁路是国家重要基础设施、经济大动脉和常用交通工具，在交通运输体系中地位关键。铁路运输安全关系人民生命财产安全和社会发展。近年来，我国铁路建设规模扩大，运输能力提升，但面临的安全风险也更复杂。科学的铁路运输安全监管体制是保障运输安全的关键。不过，当前监管体制存在很多问题，需要深入研究优化，以适应铁路运输业高质量发展需求。

一、铁路运输安全监管体制的特点

（一）监管主体的多元性

铁路运输安全监管涉及多个部门和主体，形成共同监管格局。政府方面，国家铁路局、交通运输部等部门承担重要监管职责，地方各级政府相关部门也参与其中。铁路企业设有安全管理部门，负责内部安全监督。不同监管主体在各自职责范围内，从政策制定、行业监督、企业内部管理等角度管控铁路运输安全，共同构建监管体系^[1]。

（二）监管内容的广泛性

铁路运输安全监管内容覆盖运输生产全过程。包括铁路基础设施建设质量监管，如铁路线路、桥梁、隧道等工程质量把控；

运输设备安全监管，涉及机车车辆、信号设备、通信设备等维护检测；运输组织过程安全监管，涵盖列车运行调度、客运组织、货运装卸等环节；还有从业人员安全管理，包括人员培训、资质审核、作业规范监督等。广泛的监管内容保障了铁路运输各方面安全。

（三）监管标准的严格性

铁路运输安全十分重要，所以监管标准非常严格。在技术标准上，对铁路基础设施和运输设备建设运行有详细高标准规范，比如铁路线路轨距误差、机车车辆制动性能都有精确要求。在管理标准上，对铁路运输企业安全生产管理制度、应急预案有严格规定，要求企业建立完善安全管理体系，确保安全措施落实。严格的监管标准为铁路运输安全提供了有力保障。

二、优化铁路运输安全监管体制的必要性

（一）适应铁路运输行业发展的需求

近年来，我国铁路运输行业发展很快。到 2024 年底，全国高铁运营里程超过 4.5 万公里，占全球高铁总里程三分之二以上，而且每年新增约 2000 公里。同时，智能动车组、全自动运行系统、5G 技术等新技术、新设备不断应用，运输组织模式从传统固定编组向灵活编组、客货混编等方向创新。但是，传统铁路运输安全监管体制面对这些变化，出现很多不适应情况。比如，对于复兴号智能动车组的自动驾驶、智能运维等先进技术，原来的安全监管标准主要关注基础运行参数，缺少对复杂智能系统全生命周期的监管细则；在新的运输组织模式下，货物装载加固、列车运行间隔等安全监管方式也需要更新。如果不优化监管体制，新技术、新设备的安全风险就无法有效控制，会限制铁路运输行业发展，还可能引发严重事故。因此，优化监管体制是保障行业健康发展的必要措施。

（二）提升铁路运输安全保障能力

随着我国经济社会发展，铁路运输量不断增加。2023 年，全国铁路旅客发送量达到 47.43 亿人次，货物发送量达到 46.61 亿吨，创历史新高。运输规模扩大，铁路运输面临的安全风险也更复杂。线路设备老化、极端天气、人为操作失误等因素交织在一起，给安全监管带来很大挑战。在传统分散式监管模式下，各部门监管资源分散，信息不共享，很难全面、准确识别和管控复杂安全风险。优化铁路运输安全监管体制，整合不同部门的人力、物力、技术等监管资源，建立统一高效的监管体系，可以提高监管科学性和有效性。例如，建立跨部门、跨区域的铁路运输安全风险联合研判机制，加强对铁路桥梁、隧道等关键设施，以及列车调度指挥、车辆检修等关键环节的监管，能够及时发现并消除安全隐患，降低列车脱轨、相撞等重大事故发生概率，为人民群众提供更安全的铁路运输服务^[2]。

（三）满足人民群众对安全出行的期望

现在出行方式越来越多，人民群众对铁路运输的安全性、舒适性和便捷性要求更高。铁路作为大众常用交通工具，其安全运行关系人民生命财产安全和社会稳定。虽然我国铁路运输安全形势总体稳定，但一些安全事件还是让公众对铁路运输安全产生担忧。比如，个别车站因客运组织不好出现拥挤踩踏风险，列车运行中设备突发故障等问题，影响了人民群众的出行体验和对铁路运输的信任。优化铁路运输安全监管体制，是回应人民群众对安全出行关切的重要做法。通过加强客运服务全流程安全监管，包括车站安检、候车环境、列车服务、应急救援等环节，保证旅客乘车环境安全有序；利用先进技术和科学管理方法，提高应对突发安全事件的能力，能让人民群众出行更安心、放心，增强人民群众对铁路运输的满意度和信任度，巩固铁路在交通运输体系中的重要地位。

三、铁路运输安全监管体制现存问题

（一）监管职责存在交叉与空白

在现有的铁路运输安全监管体系中，多个部门一起监管本想形成合力，但因为职责划分不明确，实际工作中常出现监管重复和无人监管的情况。以国家铁路局和交通运输部为例，国家铁路局主要负责行业技术标准制定和安全监督，交通运输部负责综合运输体系规划。可是在铁路建设项目的前期审批和后期验收环节，两个部门的权限有重叠，导致一些项目出现重复审查或者标准不一致的问题。2022 年，某个高铁枢纽工程建设中，因为两个部门对施工安全监管职责没分清楚，同一个安全隐患被反复检查，却一直没有彻底解决。另外，随着铁路与城市轨道交通、公路客运等融合发展，铁路综合枢纽的安全监管成了新难题。比如，铁路和地铁换乘区域的消防疏散、应急救援责任没有明确规定，不同交通管理部门之间没有协作机制，一旦发生安全事故，很容易出现谁都能管但谁都不管的情况，安全隐患长期得不到解决^[3]。

（二）信息化监管水平有待提高

我国铁路虽然已经初步建立了覆盖调度指挥、设备监测等领域的信息化体系，但安全监管的数字化转型还有很多困难。现在，各个监管部门和铁路企业的信息系统大多是各自建设，技术标准和数据格式差别很大。比如，地方铁路局的设备巡检系统和国家铁路监管平台的数据不能共享，设备故障信息不能及时传递，耽误维修时间。在技术应用方面，大数据、人工智能等先进技术还没有很好地融入安全监管流程。大多数铁路安全风险分析还是靠人工判断，没有充分利用大量运输数据进行深入分析。以铁路沿线自然灾害预警为例，虽然有很多气象、地质监测数据，但因为没有智能分析模型，无法准确预测泥石流、塌方等灾害对铁路运行的影响。而且，一些基层监管单位的信息化基础设施差，设备老旧，网络带宽不够，限制了实时监控、远程调度等功能，安全隐患发现和处理速度跟不上现代铁路运输的需求。

（三）监管队伍专业素质参差不齐

铁路运输安全监管涉及机械工程、信号控制、安全管理等多个学科知识，对从业人员专业素质要求很高。但是，现在的监管队伍情况和行业发展需求不匹配。行业调查显示，一些地方铁路监管机构里，有高级专业技术职称的人员不到 20%，而且年龄偏大，对高铁智能运维、无人驾驶等新技术了解不多。新入职人员虽然学历高，但缺乏实际工作经验，遇到复杂安全隐患很难独立排查。同时，监管队伍培训体系不完善，现有培训主要是理论教学，缺少实际操作演练和新技术培训。另外，激励机制不好，导致人才流失严重。基层监管岗位工作辛苦、风险高，但是工资待遇和晋升机会有限，很难吸引和留住优秀人才。某铁路局近三年数据显示，安全监管岗位主动离职率达到 15%，严重影响了监管队伍的稳定性和专业性^[4]。

四、铁路运输安全监管体制的优化策略

（一）明确监管职责，避免交叉与空白

目前铁路运输安全监管涉及多个部门，职责不清容易产生管理问题。可以制定详细的监管职责清单，明确国家铁路局、交通运输部等部门在铁路安全监管中的具体职责。比如，在高铁建设安全监管上，确定国家铁路局负责技术标准制定和审核，交通运输部负责项目规划和协调，避免出现互相推诿的情况。建立跨部门联席会议制度，定期交流铁路运输安全监管工作进展和问题，加强部门间沟通。建立跨区域、跨部门联合执法机制，一起整治铁路沿线非法侵占土地、破坏铁路设施等违法行为。对于高铁快运、铁路综合物流枢纽等新业务和领域，要尽快明确监管责任主体，可以参考国外经验，设立专门的新业务监管机构，保证铁路运输安全监管没有遗漏。

（二）加强信息化建设，提升监管效能

信息化建设不足影响铁路运输安全监管效率。要加大对铁路运输安全监管信息化建设的投入，整合各部门、各企业的信息系统，建立统一的数据共享平台，实现铁路运输设备状态、运行数据、安全检查记录等信息共享。引入大数据分析技术，深入分析大量铁路运输安全数据，建立风险预测模型，提前发现潜在安全风险。利用人工智能技术，开发智能视频监控系统，自动识别铁路沿线异物、列车部件异常等安全隐患。结合物联网技术，在铁路机车车辆、轨道、桥梁等关键设施上安装传感器，实时监测设备运行状态，比如通过传感器监测钢轨温度变化，及时发现钢轨热胀冷缩带来的安全隐患，快速定位故障并维修，提高安全隐患发现和处理速度。

（三）强化监管队伍建设，提高专业素质

监管队伍素质影响铁路运输安全监管工作质量。要加强对铁路运输安全监管人员的专业培训，制定系统培训计划，邀请行业专家、学者和一线技术人员授课，课程内容包括铁路新技术应

用、安全管理理论、应急处理方法等。定期组织业务学习和技能竞赛，比如开展铁路信号设备故障排查竞赛、铁路应急预案演练竞赛等，通过竞赛提高监管人员实际操作和应急处理能力。建立健全监管队伍激励机制，完善薪酬福利体系，设立安全监管专项奖励基金，奖励工作表现好、发现隐患的监管人员。畅通职业发展通道，为监管人员提供晋升机会和职称评定渠道。从高校、科研机构和其他行业引进具有铁路运输、安全工程等专业背景的优秀人才，充实监管队伍，提升整体专业水平。

（四）完善法律法规，加强执法力度

现有的铁路运输安全监管法律法规跟不上行业发展。要加快修订和完善相关法律法规，成立专门立法研究小组，调研铁路运输行业发展和安全监管需求，参考国际先进立法经验，梳理修订现有法律法规。针对铁路网络安全、无人驾驶列车运行安全等新问题，及时制定相应法规制度，明确各方责任义务。加大对违法行为的处罚力度，提高违法成本，对严重危害铁路运输安全的违法行为，除了罚款，还可以追究刑事责任。加强执法队伍建设，定期开展执法培训，提高执法人员法律素养和执法水平，建立执法监督机制，保证执法人员严格、公正、文明执法，维护法律法规权威^[5]。

五、结语

铁路运输安全监管体制对于保障铁路运输安全、促进铁路运输行业发展具有至关重要的作用。当前，我国铁路运输安全监管体制存在着诸多问题，需要从明确监管职责、加强信息化建设、强化监管队伍、完善法律法规、健全社会监督机制等多个方面进行优化。通过不断完善铁路运输安全监管体制，提高监管效能，能够有效降低安全风险，提升铁路运输安全保障能力，推动铁路运输行业持续健康发展，为我国经济社会发展做出更大贡献。

参考文献

- [1] 代玉升, 孙刚明. 提升铁路运输企业特种设备安全监管工作效能的研究 [J]. 铁道技术监督, 2024, 52(07): 12-16.
- [2] 高飞, 雷渝, 吴凡, 等. 铁路危险货物运输安全监管优化策略分析 [J]. 铁道货运, 2021, 39(04): 46-50.
- [3] 连奇巍. 铁路危险货物运输安全监管体系的思考与建议 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(S1): 1-5.
- [4] 周妍. 合资铁路委托运输管理安全监管问题研究与对策分析 [J]. 物流工程与管理, 2016, 38(03): 213-214.
- [5] 刘秋成. 完善铁路运输安全监管体系的探析 [C]// 中国铁道学会, 世界轨道交通发展研究会, 西南交通大学, 成都铁路局. 第三届铁路安全风险管理及技术装备研讨会论文集(下册). 北京: 铁路局调度所, 2012: 392-396.

城市更新行动中老旧市政管道 BIM 数字化改造关键技术

张明敏¹, 黄方², 王爽³

1. 新疆交通职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830000

2. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033

3. 北京跨世纪软件技术有限公司, 北京 100080

DOI:10.61369/ERA.2025070014

摘要： 本文聚焦老旧市政管道，系统阐述 BIM 数字化改造技术在老旧市政管道更新中的应用与实施路径。通过关键技术的协同应用，实现从“物理管网现状还原—设计施工智能优化—全生命周期动态管理”的全流程赋能。结合典型工程案例，验证 BIM 技术在提升改造效率、降低成本、强化安全管理等方面的显著成效，为城市更新中地下管网的可持续治理提供技术参考与实践范式。

关键词： 城市更新；老旧市政管道；BIM 技术；数字化改造

Key Technologies of BIM Digital Transformation for Old Municipal Pipelines in Urban Renewal Actions

Zhang Mingmin¹, Huang Fang², Wang Shuang³

1.Xinjiang Vocational & Technical College of Communications, Urumqi, Xinjiang 830000

2.Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033

3.Beijing Kuashiji Software Technology Co., Ltd. Beijing 100080

Abstract： This article focuses on old municipal pipelines and systematically explains the application and implementation path of BIM digital transformation technology in the renewal of old municipal pipelines. Through the collaborative application of key technologies, the entire process from "restoration of the current state of physical pipe networks – intelligent optimization of design and construction – dynamic management of the entire lifecycle" is empowered. Combined with typical engineering cases, the significant effects of BIM technology in improving renovation efficiency, reducing costs, and strengthening safety management are verified, providing technical references and practical paradigms for the sustainable management of underground pipe networks in urban renewal.

Keywords： urban renewal; old municipal pipelines; BIM technology; digital transformation

引言

地下市政管道承载着供水、排水、燃气、通信等关键功能，但其老化问题已成为城市安全运行的重大隐患。传统“人工勘测+二维设计+开挖修复”的改造模式难以满足城市更新对“精准化、智能化、可持续化”的要求，亟需技术革新突破治理瓶颈。建筑信息模型（BIM）技术以其三维可视化、全流程协同、数据全生命周期管理的特性，为老旧市政管道改造提供了全新解决方案。

一、相关概述

（一）城市更新背景与意义

在城镇化率突破 65% 的当下，我国超 600 个城市正经历从“增量扩张”到“存量优化”的转型，城市更新已经成为破解老城区基础设施老化、空间利用低效等问题的核心手段。住建部数据显示，全国需改造的 2000 年底前建成老旧小区超 16 万个，涉及管网长度超 80 万公里，《“十四五”城乡社区服务体系建设规划》更将“实施老化管网改造”列为重点任务。城市更新行动

不仅是应对年均超 3 万起管道泄漏事故、百亿元直接经济损失的安全保卫战，更是通过地下管网智能化升级撬动海绵城市建设、智慧水务发展的战略支点。雨污分流改造可使污水处理效率提升 30% 以上，而 BIM 数字化管理则能将应急响应时间缩短 50%。

（二）老旧市政管道现状与问题

我国在 20 世纪 80 年代城市化初期，建造了大量市政排水管道。经过近 40 年的运行，管道在渗漏、承压方面，已不能满足当前的城市需求。随着地上建筑规模日益扩大，旧有的管道位置被覆盖，管道图纸也因年久而缺失，导致管道埋设位置通常不可探

查, 管线错综复杂也给开挖修复带来了巨大困难^[1]。建于上世纪八九十年代的铸铁管道腐蚀率普遍超 30%, 某省会城市检测显示直径 300 毫米以上管道泄漏点密度达每公里 1.2 处; 雨污合流管网占比超 60% 的老片区每逢暴雨便因排水能力不足引发内涝, 如 2022 年某城市内涝导致 150 处道路塌陷, 直接经济损失超 2 亿元。更严峻的是管理层面的“数据断层”, 超半数管道无电子档案, 维修人员常因图纸缺失或坐标偏差(误差普遍超 5 米)被迫“盲目开挖”^[2]。传统“发现问题 - 开挖修复”的被动模式, 不仅导致单公里改造成本高达 500-800 万元、施工周期长达 7-10 天, 更因反复破路引发市民投诉率年均增长 18%, 成为城市治理的痛点。

(三) BIM 数字化改造的必要性与优势

当传统改造模式陷入“高成本、低效率、重扰民”的困境, BIM 技术以其三维可视化、全流程协同、数据可追溯的特性成为破局关键。在深圳某老旧小区改造中, 通过激光雷达扫描与 BIM 建模精准识别出 237 处管线交叉冲突, 提前优化设计减少 1.2 万立方米开挖量, 工期缩短 45 天; 上海某综合管廊项目则通过 BIM+GIS 融合平台, 将供水、燃气、通信等多权属单位数据集成于同一模型, 施工阶段碰撞检测率提升至 92%, 现场变更率降低 40%^[3]。更深层的价值体现在运维环节, 北京试点项目将 BIM 模型与压力传感器、CCTV 检测数据联动, 实现管道健康状态实时预警, 故障定位精度从“百米级”提升至“米级”, 维护成本降低 35%。这种从“经验驱动”到“数据驱动”的变革, 不仅让地下管网从“看不见的隐患”变为“可感知、可管理的资产”, 更通过全生命周期数据沉淀, 为未来 5G 智能监测、AI 泄漏预测等技术应用奠定基础, 真正实现“改造一次、管用百年”的可持续目标^[4]。

二、BIM 技术概述

(一) 定义与特点

建筑信息模型(BIM)作为智能建造的核心技术, 本质是通过参数化建模与全生命周期数据集成构建物理实体的数字化镜像, 突破了传统二维图纸的信息碎片化局限。在市政管道改造场景中, BIM 可将激光雷达扫描获取的管道坐标(精度达 ± 5 厘米)、探地雷达识别的材质分布(区分混凝土、铸铁等 7 类管材)、历史维修记录等多元数据, 整合为包含 100+ 属性字段的三维动态模型, 使隐蔽管网从“不可见”变为“可计算、可模拟”的数字资产。其可视化交互让设计团队可通过 VR 设备“沉浸式”巡查地下管线, 提前发现 90% 以上的空间冲突; 协同管理平台支持供水、燃气等 8 个权属单位同时在线标注需求, 文件传递效率提升 60%; 仿真模拟功能可预演管道改造对周边土体应力的影响, 将施工风险降低 55%^[5]。这种“数据驱动决策”的模式, 正在重塑市政工程从勘测到运维的全链条逻辑。

(二) 在市政工程中的应用现状

在市政工程领域, BIM 技术已从试验性应用迈向规模化推广阶段。自住建部《市政公用工程信息技术应用标准》实施以来,

全国超 50 个城市在地下综合管廊、老旧管网改造中设立 BIM 示范项目。广州利用倾斜摄影与 BIM 融合技术, 仅用 2 周时间完成某老城区 15 公里雨污管网的现状建模, 效率较传统人工勘测提升 10 倍; 杭州某亚运配套项目通过 BIM 碰撞检测发现 198 处管线交叉隐患, 避免了因设计错漏导致的 260 万元返工损失; 成都天府新区将 BIM 模型与燃气管网监测系统对接, 实现压力异常的 15 分钟级预警响应, 较人工巡检效率提升 8 倍^[6]。但整体来看, 我国市政工程 BIM 应用率仍不足 40%, 老旧管道改造场景因存在数据缺失(超 60% 无电子档案)、权属复杂(平均涉及 5 个以上管理单位)、改造工艺多样等特殊特性, 技术渗透率滞后于房建领域, 亟需针对性解决方案。

(三) 与城市更新的结合点

城市更新对老旧管网改造提出“精准、协同、长效”需求, 与 BIM 技术形成深度供需匹配。针对老城区管道“无图可依”的痛点, BIM 通过多源勘测技术构建精度达毫米级的现状模型, 南京某建于 1930 年代的街区, 通过 BIM 建模还原出埋藏深度达 8 米的砖砌下水道网络, 为定制非开挖修复方案提供关键依据; 在改造实施阶段, BIM 平台成为多元主体协同的“数字沙盘”, 西安某改造片区涉及 4 家管线单位, 基于同一模型协商路由调整方案, 将传统需 3 个月的冲突解决周期压缩至 10 天; 在运维环节, BIM 模型沉淀的检测数据形成动态健康档案, 郑州试点项目据此将管道维护计划制定效率提升 50%, 全生命周期管理成本降低 28%^[7]。这种从“应急式修补”到“预防性养护”的转变, 本质是通过 BIM 技术将城市更新的短期改造行为转化为可传承的数字化资产积累过程, 为未来接入 AI 泄漏预测、5G 智能监测等前沿技术预留数据接口, 推动地下管网管理向“智慧化、主动化”跃迁。

三、BIM 数字化改造关键技术

(一) 数据采集与处理

数据采集与处理技术是改造的基础环节, 需突破老旧管道“隐蔽性强、数据残缺”的瓶颈。激光雷达(LiDAR)与探地雷达(GPR)的组合应用成为主流方案, 车载 LiDAR 可在 2 小时内完成 10 公里道路下管道的三维坐标扫描(精度达 ± 5 厘米), 而 GPR 通过电磁脉冲识别管道材质(区分混凝土、铸铁等 7 类管材)与缺陷类型^[8]。某试点项目利用该技术在 3 天内完成传统需 2 周的 2000 米管道勘测, 效率提升 70%。采集数据经点云降噪、格式转换与拓扑校验后, 通过 ETL 工具集成至 BIM 平台, 形成包含管径、埋深、服役年限等 80+ 属性的原始数据集, 为后续建模提供“数字底图”。

(二) BIM 模型构建

BIM 模型构建技术需解决老旧管道“几何形态不规则、空间关系复杂”的建模难题, 采用“正向设计 + 逆向建模”协同模式, 对于有档案记录的管道, 基于 CAD 图纸进行参数化建模(误差控制在 2% 以内); 对于无资料的“黑箱”管道, 通过摄影测量与 BIM 软件逆向生成实体模型^[9]。某建于 1950 年代的街区管

网通过该技术还原出管径从 DN150 到 DN1200 的变径管道群，模型与实测数据吻合度达 95%。针对多权属管线交叉问题，引入“分层建模—动态剖切”技术，在同一模型中清晰展现排水管道（深 8 米）、燃气管（深 3 米）、通信管（深 1.5 米）的空间关系，为冲突分析提供直观载体。

（三）模型信息管理与共享

模型信息管理与共享技术是破解“信息孤岛”的关键，基于区块链技术搭建去中心化协同平台，可实现政府、管线单位、施工企业等 7 类参与方的数据分权管理。权属单位可加密上传管道压力监测数据，施工方获取经脱敏的空间坐标用于路由规划，而监管部门实时追踪改造进度。杭州某改造项目通过该平台整合 12 家单位的历史数据，碰撞检测效率提升至每日处理 5000+ 管线节点，较传统邮件沟通模式缩短协同周期 60%^[10]。轻量化技术则保障了移动端的实时访问，现场工程师可通过 AR 眼镜调取管道模型，指导非开挖修复的精准定位，误差控制在 10 厘米以内。

（四）模拟分析与优化

模拟分析与优化技术贯穿改造全周期，是提升工程效能的核心要点。在设计阶段利用 BIM 内嵌的 FlowMaster 软件模拟暴雨径流，通过调整管道坡度与增设调蓄池，可使易涝片区内涝风险降低 65%；施工前的 4D 进度模拟（3D 模型+时间维度）可预演机械作业冲突，深圳某项目通过模拟发现顶管施工与地铁隧道水平净距不足 5 米的风险，提前调整路由避免损失超 800 万元；运维阶段的健康评估模型基于管道腐蚀速率、水流速等数据，通过 BP 神经网络算法预测泄漏概率，北京试点项目据此将预防性维护

计划准确率提升至 82%，较传统经验判断减少 30% 的无效巡检。

（五）施工过程管理与监控

施工过程管理与监控技术实现了从“粗放施工”到“数字管控”的升级，基于 BIM 模型生成预制化构件加工图，某项目通过工厂预制减少现场焊接量 40%，工期缩短 25 天；施工现场部署的北斗定位设备（精度达厘米级）实时追踪机械位置，与 BIM 模型对比形成“偏差预警—方案调整”闭环，广州某顶管工程利用该技术将轴线偏差控制在 3 厘米以内，优于规范要求的 5 厘米标准；无人机巡检（每日 2 次航测）生成的施工进度模型与计划模型自动比对，某改造工程据此发现支管连接滞后问题，及时调配资源避免窝工损失约 150 万元。

四、结束语

老旧市政管道的 BIM 数字化改造不仅是一项技术工程，更是推动城市治理体系和治理能力现代化的重要实践。通过 BIM 技术对地下管网全生命周期数据的深度整合与智能应用，传统改造模式中“数据断层、协同低效、运维被动”的顽疾得到系统性破解。随着《智能建造与建筑工业化协同发展指导意见》等政策的深入实施，BIM 技术与物联网、云计算、人工智能的深度融合将成为常态。老旧市政管道的数字化改造也将从单一项目应用迈向全域数据治理，最终实现地下管网“一张图管理、一平台决策、全周期养护”的智慧化目标。

参考文献

[1] 薛峰, 吕峰, 李婷, 等. 市政排水管道数字探测开挖机器臂修复技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52(01): 44-47+118.
[2] 黄启武. 老旧市政燃气管道改造方案探讨 [C]//《煤气与热力》杂志社有限公司. 中国燃气运营与安全研讨会（第十三届）论文集（上册）. 南宁中燃城市燃气发展有限公司, 2024: 877-879.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.064653.
[3] 金军, 张超. 旧城区市政排水管道设计存在的问题及优化措施研究 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(15): 188-190.DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2022.15.061.
[4] 鲁雪利. 浅谈市政给排水管道的设计现状及相关优化措施 [J]. 内蒙古科技与经济, 2021, (15): 108-109.
[5] 李保怀. 关于对城市老旧街区市政排水管道施工的探讨 [J]. 科技与企业, 2015, (04): 179.DOI: 10.13751/j.cnki.kjyqy.2015.04.170.
[6] 战明松, 刘冲, 孙华跃. 供需适配视角下的城市更新策划运行系统构建 [J]. 南方建筑, 2024, (12): 24-32.
[7] 李磊祚, 鲍元飞, 韩海, 等. 老旧燃气管道不停输改造设计 [J]. 煤气与热力, 2024, 44(10): 1-4.DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2024.10.015.
[8] 邱汛, 赵晓乐. 关于推动老旧中压燃气管道更新改造工作的相关措施及建议——基于深圳市改造案例 [C]//《煤气与热力》杂志社有限公司. 中国燃气运营与安全研讨会（第十三届）论文集（下册）. 深圳市燃气集团股份有限公司, 2024: 168-172.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.069761.
[9] 朱先均, 罗利. 旧城区排水管道地箭式微顶管技术应用研究——以武汉市老城区改造为例 [J]. 科技和产业, 2024, 24(08): 263-269.
[10] 本刊通讯员. 海南 2024 年计划更新改造燃气老旧管道 700km [J]. 城市燃气, 2024, (04): 49.

多源异构数据融合及其在全息测绘中的应用

张中姣, 沈迅

云南省地质工程勘察有限公司, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ERA.2025070016

摘要： 本文阐述了多源异构数据的特点及全息测绘对数据融合的需求，详细分析多源异构数据融合的关键技术，包括数据预处理、特征提取、融合算法等。通过实际案例探讨多源异构数据融合在全息测绘场景中的应用实践，展示其在提升测绘精度、丰富测绘信息维度、实现场景动态表达等方面的优势。研究结果表明，多源异构数据融合技术能够有效整合不同类型数据，为全息测绘提供更全面、准确、实时的数据基础，推动测绘技术向智能化、全息化方向发展。

关键词： 多源异构数据；融合；全息测绘；融合算法

Multi-source Heterogeneous Data Fusion and Its Application in Holographic Surveying and Mapping

Zhang Zhongjiao, Shen Xun

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

Abstract： This article elaborates on the characteristics of multi-source heterogeneous data and the demand for data fusion in holographic surveying and mapping. It provides a detailed analysis of the key technologies involved in multi-source heterogeneous data fusion, including data preprocessing, feature extraction, fusion algorithms, and more. Through practical case studies, the article explores the application of multi-source heterogeneous data fusion in holographic surveying and mapping scenarios, demonstrating its advantages in improving surveying and mapping accuracy, enriching the dimensionality of surveying and mapping information, and realizing dynamic scene representation. The research results indicate that multi-source heterogeneous data fusion technology can effectively integrate different types of data, providing a more comprehensive, accurate, and real-time data foundation for holographic surveying and mapping. This technology promotes the development of surveying and mapping techniques towards intelligence and holography.

Keywords： multi-source heterogeneous data; fusion; holographic surveying and mapping; fusion algorithm

引言

随着测绘技术的快速发展与多源数据采集手段的日益丰富，地理空间信息获取已进入多源异构数据时代，卫星遥感、航空摄影、地面激光扫描、物联网传感器等设备产生的海量数据，在时空尺度、数据结构与语义表达上存在显著差异，如何实现多源异构数据的高效融合，成为地理信息领域的关键课题。与此同时，全息测绘作为新型测绘技术范式，以全要素、全尺度、全时态表达地理空间信息为目标，对多源数据的深度融合与协同处理提出了更高要求。传统单一数据采集方式存在信息覆盖不全、时效性差等问题，难以满足智慧城市、灾害应急、数字孪生等应用场景对高精度、实时化地理信息的需求^[1]。多源异构数据融合技术通过整合不同来源、不同类型的数据，发挥数据间的互补优势，能够显著提升地理信息的完整性、准确性与现势性，为全息测绘提供坚实的数据基础。因此，研究多源异构数据融合技术及其在全息测绘中的应用具有重要的理论意义和实践价值。

一、多源异构数据与全息测绘概述

（一）多源异构数据特点

多源异构数据指来自不同采集设备、存储格式和表达形式的数据集合，在全息测绘应用中呈现出显著特征。首先，数据来源

具有多样性，涵盖卫星遥感、航空摄影、地面激光扫描、无人机航测、移动测量系统、物联网传感器等多类平台，各平台获取数据的视角、尺度与精度存在差异，例如，卫星遥感可提供大范围宏观影像，而地面激光扫描则能获取高精度局部三维点云。其次，数据结构与格式异构性突出。空间数据包含矢量、栅格、点

云等多种结构，矢量数据以几何坐标和属性表存储地物空间位置与特征，栅格数据通过像元阵列表达影像信息，点云数据则以离散点集合记录三维空间信息；同时，数据格式包括 Shapefile、GeoTIFF、LAS、JSON 等，缺乏统一标准^[2]。此外，数据存在时空基准不一致问题。不同采集时间的数据存在时间分辨率差异，如卫星影像以天或月为周期更新，而物联网传感器可实现实时采集；空间基准方面，坐标系、投影方式和高程基准的不同，导致数据难以直接融合。数据的语义异构性同样显著，同一地物在不同数据源中的属性描述、分类体系和编码规则可能不同，增加了数据整合难度。

（二）全息测绘的内涵

全息测绘是一种追求全面、真实、动态表达地理空间信息的全新测绘技术范式，旨在构建具有全要素、全尺度、全时态特征的地理空间数字孪生体^[3]，其核心内涵体现在三个层面：全要素覆盖要求对地形地貌、建筑物、植被、基础设施等地理实体进行完整建模，不仅包含几何形态，还需集成材质、纹理、物理属性等多维度信息；全尺度表达强调在微观、中观和宏观层面实现无缝衔接的空间数据展示，从厘米级的建筑细节到千米级的区域地形，均能以高精度模型呈现；全时态动态更新则依托实时监测与数据分析技术，实现地理空间信息随时间变化的持续跟踪与快速更新，满足智慧城市、应急管理等领域对地理信息时效性的严苛要求。全息测绘通过融合多源异构数据，利用三维建模、虚拟现实、数字孪生等技术，构建可交互、可分析、可预测的地理空间信息系统，为城市规划、工程建设、生态监测等提供全方位数据支撑，推动测绘地理信息行业向智能化、精细化方向发展。

二、多源异构数据融合关键技术

（一）数据预处理

多源异构数据在格式、精度、时空基准等方面存在显著差异，数据预处理是实现有效融合的基础环节，主要包括数据清洗、格式转换、时空配准和归一化处理。在数据清洗阶段，通过异常值检测与修复技术识别并处理噪声数据。对于空间数据中的离群点，常采用基于密度的 DBSCAN 算法或局部异常因子（LOF）算法进行检测；对于时间序列数据中的跳变值，可利用滑动平均滤波、中值滤波等方法进行平滑处理。格式转换则针对不同数据类型（如矢量数据、栅格数据、点云数据），采用标准化数据接口（如 GeoJSON、LAS）实现统一存储与传输。时空配准是解决多源数据空间基准不一致问题的核心技术，对于遥感影像与激光点云数据，常采用基于特征匹配的配准方法，通过提取 SIFT、SURF 等特征点，利用迭代最近点（ICP）算法或基于区域的匹配算法实现空间对齐；针对时间序列数据，通过时间戳校准和插值方法统一采样频率，确保数据在时间维度上的一致性。归一化处理则通过最大 - 最小归一化、Z - score 标准化等方法，消除数据在量纲和数值范围上的差异，为后续融合奠定基础。

（二）特征提取

特征提取旨在从原始数据中提炼出具有代表性的关键信息，

降低数据维度的同时保留核心特征，为融合算法提供高效输入，根据数据类型的不同，特征提取方法可分为几何特征提取、光谱特征提取和语义特征提取^[4]。对于激光点云、三维模型等几何数据，常采用局部特征描述子进行特征提取。如点云数据可通过计算法线、曲率等局部几何属性，生成 PFH（点特征直方图）、FPFH（快速点特征直方图）等特征描述子；对于遥感影像，可利用边缘检测算法（如 Canny 算子）提取轮廓特征，或通过区域生长算法提取目标区域的几何形状特征。光谱特征提取主要应用于多光谱、高光谱遥感数据^[5]。常用方法包括主成分分析（PCA）、波段选择和光谱特征变换。PCA 通过线性变换将原始波段数据转换为相互正交的主成分，实现数据降维；波段选择算法（如遗传算法、模拟退火算法）则从众多波段中筛选出信息丰富的波段组合。在语义特征提取方面，深度学习方法展现出强大优势。通过卷积神经网络（CNN）可自动提取影像中的目标语义信息，如建筑物、道路等；利用 Transformer 架构可实现点云数据的语义分割，提取地物类别信息。

（三）融合算法

融合算法是实现多源异构数据深度融合的核心，根据融合层次可分为像素级融合、特征级融合和决策级融合，像素级融合直接对原始数据进行处理，适用于数据类型相似、空间分辨率匹配的场景^[6]。常见方法包括加权平均法、主成分分析融合法和小波变换融合法，加权平均法根据数据的可靠性赋予不同权重进行叠加；主成分分析融合法通过将多源数据投影到新的特征空间实现信息融合；小波变换融合法则利用多分辨率分析特性，在不同尺度上融合数据细节。特征级融合是对提取的特征信息进行融合，具有数据量小、处理效率高的特点。常用算法包括基于贝叶斯理论的概率融合、基于 D - S 证据理论的决策融合和基于神经网络的特征融合。贝叶斯理论通过计算后验概率实现多源特征的概率融合；D - S 证据理论通过证据组合规则处理不确定性信息；神经网络则通过训练多层感知器或自编码器实现特征的非线性融合。决策级融合是最高层次的融合，将不同数据源的决策结果进行综合分析^[7]。常用方法包括投票法、专家系统和模糊决策。投票法通过对多个分类器的结果进行投票表决得出最终决策；专家系统利用知识库和推理规则对决策结果进行综合判断；模糊决策则通过建立模糊隶属度函数处理不确定信息，实现决策结果的融合。

四、多源异构数据融合在全息测绘中的应用实践

（一）城市三维建模

城市三维建模是全息测绘的重要基础，多源异构数据融合技术为构建高精度、多细节的城市模型提供了有效途径。在数据采集阶段，综合利用航空摄影测量、地面激光扫描、无人机倾斜摄影、车载移动测量系统等多种手段获取数据。航空摄影测量可快速获取城市大范围的高分辨率影像，无人机倾斜摄影则能获取建筑物侧面纹理信息，二者结合为城市模型提供宏观几何与纹理基础；地面激光扫描与车载移动测量系统可获取厘米级甚至毫米级精度的点云数据，用于精细化刻画道路、桥梁、地下空间等复杂

结构的几何形态^[8]。在数据融合处理过程中，首先通过时空配准技术统一不同数据源的空间基准，利用特征匹配算法将点云数据与影像数据进行精确对齐。例如，采用基于 SIFT 特征点的匹配方法，结合迭代最近点（ICP）算法，实现点云与影像的亚像素级配准。针对数据的结构异构问题，通过数据格式转换与重构，将矢量数据、栅格影像和点云数据统一为 CityGML 等标准格式。在模型构建阶段，运用多分辨率网格建模、纹理映射等技术，将融合后的数据构建为 LOD（Level of Detail）多层次细节模型，既满足宏观场景的快速浏览需求，又支持局部区域的精细化展示。在某智慧城市建设项目中，通过多源异构数据融合构建的城市三维模型，完整呈现了城市建筑、道路、绿地、地下管网等全要素信息。模型精度达到 5 厘米，包含建筑材质、植被种类等语义属性，为城市规划、交通管理、应急疏散模拟等提供了精准的空间数据支持，有效提升了城市管理的智能化水平。

（二）灾害监测与评估

多源异构数据融合在灾害监测与评估中发挥着关键作用，在地震、洪涝、滑坡等自然灾害监测中，集成卫星遥感、无人机航测、地面传感器网络等多源数据。卫星遥感可提供大范围、周期性的灾害区域影像，用于宏观灾情监测；无人机航测能在灾害发生后快速抵达现场，获取高分辨率的灾后影像和三维模型，精准识别灾害破坏范围与程度；地面传感器（如位移计、雨量计、水位传感器）则实时采集灾害过程中的动态数据。数据融合时，利用时空插值方法将不同时间、空间尺度的数据统一到相同的时空基准。例如，将卫星影像的中低分辨率数据与无人机高分辨率数据进行融合，采用基于深度学习的超分辨率重建算法，生成兼具大范围覆盖与高细节的灾情影像^[9]。在特征提取层面，运用卷积神经网络（CNN）自动识别影像中的灾害特征，如地震后的建筑物倒塌、洪涝淹没区域边界等。在灾害评估阶段，通过多源数据融合构建灾害损失评估模型。结合房屋建筑矢量数据、土地利用数据和灾后影像，利用决策树、随机森林等算法评估建筑物损毁数量与程度；基于地形数据、水文监测数据和遥感影像，模拟洪水演进过程，评估淹没范围与受灾人口。某洪涝灾害监测项目中，通过多源数据融合，将灾情监测的时间从传统方法的数小时缩短至 30 分钟以内，灾害损失评估误差降低至 8%，为应急救援决策提

供了及时、准确的数据支持。

（三）数字孪生场景构建

数字孪生场景构建是全息测绘的高级应用形态，旨在通过多源异构数据融合创建物理世界的虚拟映射^[10]。在数据采集方面，整合物联网传感器数据、BIM（建筑信息模型）数据、地理空间数据等多源信息。物联网传感器实时采集温度、湿度、光照、设备运行状态等动态数据；BIM 数据包含建筑物的几何结构、材料属性、设备参数等详细信息；地理空间数据提供地形地貌、交通网络等基础地理信息。数据融合过程中，采用语义映射与知识图谱技术解决数据语义异构问题。通过建立统一的数据语义模型，将不同领域的数据属性映射到相同的语义概念，构建包含实体、关系和属性的知识图谱。例如，将建筑设备的运行数据与 BIM 模型中的设备信息进行关联，实现设备状态的实时可视化。在场景构建阶段，利用游戏引擎（如 Unreal Engine、Unity）结合三维建模技术，将融合后的数据渲染为高逼真度的虚拟场景，并通过实时数据驱动实现虚拟场景与物理世界的同步更新。在某智慧园区数字孪生项目中，通过多源异构数据融合构建的数字孪生平台，实现了园区建筑、设备、人员、环境等全要素的实时数字化呈现。平台可模拟园区能源消耗、人流分布等场景，辅助管理者优化资源配置；在设备故障预警方面，通过融合传感器数据与设备模型，提前预测设备故障概率，将设备维护效率提升 40%，有效降低了运维成本，为园区的智能化管理提供了强大的技术支撑。

五、结束语

多源异构数据融合通过数据预处理、特征提取和融合算法等关键技术，能够有效整合不同类型数据，为全息测绘提供更全面、准确、实时的数据支持，在城市三维建模、灾害监测与评估、数字孪生场景构建等实际应用中，多源异构数据融合技术展现出显著优势，提升了测绘成果的质量和和应用价值，为全息测绘提供更智能化、安全化的技术支撑，推动全息测绘技术在更多领域的广泛应用。

参考文献

[1] 潘俊钳, 阮浩德, 徐可, 等. 一种基于多源异构空间规划数据的融合方法 [J]. 测绘通报, 2025(1): 127-132.
[2] 丁杍杰. 车载激光扫描技术在全息测绘中的应用 [J]. 经纬天地, 2023(4): 5-8.
[3] 王彦婕. 多源异构数据融合技术的研究 [J]. 山西电子技术, 2022(3): 71-73.
[4] 任花侨, 张绚. 面向数字孪生城市的智能化全息测绘研究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(23): 549.
[5] 顾建祥, 杨必胜, 董震. 智能化全息测绘及示范应用 [J]. 城市勘测, 2019(3): 10-14.
[6] 高桂甫, 任高升, 王亚梅, 等. 车载 LiDAR 和无人机一体化控制的全息数据采集与应用研究 [J]. 现代测绘, 2021, 44(5): 45-49.
[7] 郝斌, 李琦, 朱沁玲. 多源异构数据融合的水利数字地球研究 [J]. 水利技术监督, 2024(3): 28-32, 37.
[8] 王雁飞. 多源数据的全息地形数据精度分析 [J]. 测绘技术装备, 2021, 23(3): 16-21.
[9] 孙慧英. 多源数据融合实景三维智能处理关键技术及应用 [J]. 电脑高手 (电子刊), 2021(3): 441.
[10] 李小雨, 郭功举. 面向智能化全息测绘要素符号化方法 [J]. 地理空间信息, 2023, 21(4): 27-29.

工程项目进度管理中大数据分析的应用研究

刘恕全

身份证号: 420111197605105652

DOI:10.61369/ERA.2025070018

摘要： 建筑工程进度管理受限于多主体协同低效、动态风险预测不足及资源调度僵化等挑战，大数据分析技术通过整合 BIM、IoT 与无人机等多源异构数据，构建数据驱动的决策模型，实现进度预测、风险预警与资源优化。实证表明，智能调度算法可缩短工期 9.2%，降低直接成本 6.5%，且利益相关方协同效率显著提升。研究契合新型城镇化与绿色建筑政策导向，为行业数字化转型提供理论支撑与技术路径，助力工程管理智能化与可持续发展目标协同推进。

关键词： 大数据分析；建筑工程进度管理；资源动态优化

Application Research of Big Data Analysis in Project Schedule Management

Liu Shuquan

ID: 420111197605105652

Abstract： Construction project progress management is constrained by challenges such as low efficiency in multi-party collaboration, insufficient dynamic risk prediction, and rigid resource scheduling. Big data analysis technology integrates heterogeneous data from multiple sources, including BIM, IoT, and drones, to build data-driven decision models for progress forecasting, risk warning, and resource optimization. Empirical evidence shows that intelligent scheduling algorithms can reduce project duration by 9.2%, lower direct costs by 6.5%, and significantly enhance the efficiency of stakeholder collaboration. This research aligns with the policy directions of new urbanization and green building, providing theoretical support and technical pathways for the digital transformation of the industry, thereby promoting the intelligent management of engineering projects and the achievement of sustainable development goals in tandem.

Keywords： big data analysis; construction project progress management; dynamic optimization of resources

建筑工程进度管理在复杂工程环境中面临多主体协同效率不足、动态风险预测能力欠缺及资源调度优化空间受限等核心挑战，传统管理模式依赖人工经验与静态计划，难以应对施工过程中的动态性与不确定性。随着数字化转型的深化，大数据分析技术通过整合多源异构数据（如 BIM、IoT 传感器、无人机影像），构建实时监控与预测模型，为进度管理提供了数据驱动的决策支持，显著提升了工期预测精准度与资源调度效率^[1]。2025年上海市发布的重大行政决策目录明确提出交通物流降本提质增效行动计划，强调通过技术创新优化工程管理流程，推动智能化工具在项目全周期的应用。此外，国家宏观政策持续支持新型城镇化建设与绿色建筑发展，要求工程项目管理兼顾效率与可持续性，进一步催化了大数据技术与进度管理的深度融合。在此背景下，研究大数据分析在建筑工程进度管理中的理论与实践路径，不仅有助于破解行业痛点，也为政策导向下的管理范式革新提供科学依据。

一、建筑工程进度管理与大数据分析的融合逻辑

（一）建筑工程进度管理的核心挑战

建筑工程进度管理面临多维度复杂性，核心挑战集中于协同性、风险性与资源效率三大领域。多主体协同效率不足源于设计、施工、监理等参与方的信息孤岛化，传统沟通机制依赖人工传递与碎片化文档，导致决策滞后与执行偏差^[2]。动态风险预测能力欠缺表现为对气候突变、供应链中断等不确定性因素的被动响

应，依赖经验判断的定性分析难以量化潜在影响，加剧工期延误风险。资源调度优化空间受限则因传统计划模式缺乏实时数据支撑，劳动力、机械与材料的配置常脱离现场实际需求，易引发资源闲置或短缺的连锁反应。三者共同制约了工程进度控制的精准性与敏捷性，亟需技术赋能的系统性解决方案。

（二）大数据分析的赋能路径

大数据分析通过重构数据价值链为建筑工程进度管理提供突破性赋能。数据驱动决策模式转型体现为整合 BIM 模型、IoT 传

传感器与无人机巡检的多源异构数据，构建结构化数据库以替代经验主导的决策逻辑，降低主观误判概率。实时监控与预测能力提升依托机器学习算法（如 LSTM 网络）对历史进度数据与实时工况的深度挖掘，实现工期延误概率的动态评估与风险预警阈值设定，推动被动纠偏向主动干预转变^[3]。全生命周期管理闭环构建则通过数据流贯穿规划、施工与运维阶段，建立进度 - 成本 - 质量的关联模型，支持资源调度策略的动态优化，例如基于供应链数据的混凝土浇筑时序仿真，可精准匹配材料供应与施工节拍。三者协同形成“感知 - 分析 - 决策”的智能管理闭环，显著提升工程进度控制的可控性与韧性。

二、建筑工程大数据分析的技术基础

（一）数据采集与集成技术

建筑工程大数据分析的技术支撑始于多源异构数据的系统性采集与集成。BIM 与物联网（IoT）的深度融合构成数据底座的核心，BIM 模型提供工程全要素的几何与语义信息，IoT 传感器实时捕捉施工环境温湿度、设备运行状态等动态参数，二者结合实现静态设计与动态工况的时空对齐，打破传统管理中的信息孤岛。无人机航拍与激光扫描技术则弥补人工巡检的局限性，通过高频次、高精度采集现场进度影像与点云数据，结合边缘计算设备对图像进行即时处理，生成三维实景进度模型。数据集成需攻克多源数据标准化难题，借助 ETL 工具清洗冗余数据，构建统一时空基准的数据库，为后续分析提供高质量数据输入^[4]。

（二）数据分析与建模方法

数据分析与建模是挖掘工程进度规律的核心技术环节。机器学习算法中，LSTM 网络擅长捕捉施工进度序列的时序依赖特征，可预测工序延误的连锁反应；随机森林通过集成学习量化风险因子（如材料延迟、劳动力短缺）对关键路径的影响权重，辅助优先级决策。复杂网络分析将工程进度计划抽象为节点 - 边拓扑结构，识别资源竞争或工序耦合引发的瓶颈路径，结合 PageRank 算法评估节点脆弱性^[5]。可视化技术通过动态甘特图、热力图等交互界面，将多维数据映射为可感知的图形语义，例如基于聚类算法的进度偏差热区识别，可直观指导管理人员调整资源配置。模型构建需兼顾解释性与预测精度，通过交叉验证与敏感性测试确保工程适用性。

三、大数据分析在建筑工程进度管理中的应用场景

（一）进度预测与偏差预警

1. 基于历史数据的工期概率模型

历史数据的工期概率模型通过挖掘相似工程的历史进度数据（如工序耗时、延误原因、气候影响等），构建贝叶斯网络或蒙特卡洛模拟框架，量化不确定性因素对关键路径的干扰强度。模型输入涵盖设计变更频次、供应商交付稳定性等参数，输出为不同风险场景下的工期分布概率曲线，支持弹性进度计划的制定。例如，基于混凝土养护周期与极端天气事件的关联分析，可生成

多版本施工日历，动态调整工序优先级。模型通过持续迭代优化，逐步提升对复杂工程环境的适应性，为管理者提供科学决策依据。

2. 实时进度 - 计划动态对比算法

实时进度 - 计划动态对比算法依托无人机巡检影像与 BIM 模型的自动化匹配，采用动态时间规整（DTW）或余弦相似度计算，识别现场施工状态与基准计划的像素级偏差。算法集成激光点云数据与进度计划节点，构建三维进度偏差热力图，定位滞后区域（如未完成的结构层或设备安装缺失）。异常检测模块通过设定阈值触发预警信号，如塔吊利用率低于预期值时自动推送调整建议，实现从“事后纠偏”到“事中干预”的管控模式升级^[6]。

（二）资源动态优化配置

1. 劳动力与机械设备的智能调度

劳动力与机械设备的智能调度基于实时工况数据（如工作面完工率、机械 GPS 定位）与资源需求预测模型，利用聚类分析划分施工区域的任务密度等级，结合强化学习算法生成动态排班方案。例如，依据混凝土泵车作业轨迹数据，优化车辆驻场位置与调度路线，减少空驶耗时；通过工人出勤率与技能标签匹配，自动分配高难度工序班组^[7]。数字孪生平台可模拟不同调度策略对关键路径的影响，支持多目标（成本、工期、安全）权衡决策，提升资源利用率 15%-30%。

2. 材料供应链韧性提升策略

材料供应链韧性提升策略通过整合供应商历史履约数据、物流实时轨迹与库存监控信息，构建供应链风险图谱，识别关键节点（如单一来源建材或交通拥堵高发路段）。采用关联规则挖掘（Apriori 算法）预测潜在断供风险，如水泥短缺与砂石延迟的共生概率，并生成应急采购预案^[8]。区块链技术确保供应商资质与交货进度的透明追溯，同时基于需求预测的智能补货模型（如 ARIMA-LSTM 混合模型）动态调整安全库存阈值，降低供应链中断导致的工期损失达 20% 以上。

四、实证案例分析

（一）案例背景与数据来源

1. 超高层建筑项目概况

本研究选取某一线城市核心区超高层综合体项目为实证对象，建筑高度 488 米，地下 5 层、地上 108 层，总建筑面积 42 万平方米，涵盖办公、酒店与商业多功能业态。项目施工周期 52 个月，面临高空作业安全风险高、多专业交叉施工协调复杂、垂直运输效率瓶颈等典型挑战。主体结构采用巨型框架 - 核心筒体系，涉及超厚底板混凝土浇筑、爬模系统协同顶升等关键工序，进度管理需精准控制 200 余项工序逻辑关系与资源依赖。案例选择基于其技术复杂度与数据完备性，为验证大数据分析模型提供高价值场景。

2. 多源异构数据集构建

案例数据集覆盖 BIM 模型版本日志、IoT 传感器实时数据、无人机巡检影像及外部气象 API 接口。BIM 日志记录设计变更

156次、构件属性信息3.2万条，与 Project 进度计划关联形成4D施工模拟基线。现场部署的412个IoT传感器（包括倾角仪、应力计、温湿度探头）以5分钟频率采集结构形变与设备状态数据，日均增量达12GB。无人机每周2次航拍生成5cm分辨率正射影像，经点云配准后提取进度完成面。气象数据集成风速、降水与温湿度历史记录，关联混凝土养护周期与高空吊装作业许可判定。数据清洗采用基于规则引擎的ETL流程，消除设备故障导致的异常值，并通过时空对齐算法统一数据坐标系，构建跨阶段、多维度工程数据库^[9]。

（二）大数据分析模型实施

1. 关键路径风险预警系统开发

关键路径风险预警系统基于复杂网络分析与LSTM算法构建，输入数据包括BIM工序逻辑、实时进度偏差及气象预警信息。系统将工程进度计划转化为节点-边网络拓扑，通过PageRank算法识别高脆弱性节点（如核心筒爬模顶升工序），结合LSTM预测未来7日进度完成概率，动态调整关键路径权重。风险阈值根据历史延误数据（如台风季混凝土供应中断事件）设定，当实时数据触发阈值时，系统自动推送应急预案（如启用备用供应商或调整工序顺序）。开发过程中通过迁移学习引入同类项目风险模式，提升模型对新场景的泛化能力。

2. 混凝土浇筑工序优化实验

混凝土浇筑优化实验聚焦超厚底板施工场景，集成温湿度传感器数据与供应商物流轨迹，构建ARIMA-LSTM混合模型预测材料到场时间与凝结速率。实验设计双组对照：传统计划组依赖经验排程，优化组采用动态调度算法。结果表明，优化组通过实时调整泵车数量与振捣班组配置，将单次浇筑时间从58小时压缩至42小时，且温度裂缝发生率下降37%。数字孪生模型同步验证极端天气（如暴雨）下的工序可行性，确保优化策略的鲁棒性^[10]。

（三）应用效果量化评估

1. 工期压缩率与成本节约指标

项目应用大数据分析后，总工期较原计划缩短9.2%（4.8个

月），其中结构施工阶段效率提升显著，爬模顶升周期由5.3天/层降至4.1天/层。成本节约主要源于资源浪费减少与延误索赔规避，直接成本降低约6.5%（人民币8200万元），混凝土泵车闲置率从22%降至9%。动态调度算法减少夜间施工频次，间接降低安全监管成本15%。

2. 利益相关方满意度对比

利益相关方满意度通过匿名问卷与履约数据综合评价。施工方对进度预警响应速度评分提升41%，供应商因智能补货系统减少紧急订单压力，满意度达86%。业主方认可工期可控性，工程延期违约金风险下降72%。监理单位借助可视化平台，问题追溯效率提高3倍，协同评分较传统项目高29%。满意度差异体现大数据技术对多方协同价值的重构。

五、总结与展望

大数据分析技术通过数据驱动决策、实时风险预警与资源优化配置，显著提升建筑工程进度管理的精准性与敏捷性。实证研究表明，工期压缩率与成本节约指标验证了技术应用的直接效益，利益相关方满意度提升则体现协同管理模式的革新价值。然而，研究存在局限性：多源数据共享面临隐私保护与权属界定难题，跨项目算法泛化能力受工程场景异质性制约，如超高层建筑模型难以直接迁移至桥梁或隧道工程。未来研究需深化数字孪生与BIM、IoT的集成度，构建虚实联动的全要素仿真环境，支持极端工况下的预案推演；边缘计算与5G技术的融合可优化施工现场实时数据处理能力，降低云端依赖导致的延迟；联邦学习框架的引入有望在保护数据隐私前提下，实现跨项目知识迁移，增强算法普适性。技术进步与管理范式创新的协同将推动工程进度管理向智能化、韧性化方向持续演进。

参考文献

- [1] 闫璇. A公司农业大数据平台项目开发进度管理研究[D]. 江苏科技大学, 2023.
- [2] 王丹菱. 地质大数据云平台项目进度与质量管理研究[D]. 南京航空航天大学, 2019.
- [3] 陈美心, 周天颖, 高书屏. 大数据分析于智能工程进度管理之研究[C]// 第十三届中国智慧城市大会. 中国测绘学会; 中国城市公共交通协会; 中国海洋工程咨询协会, 2019.
- [4] 黄凌宇, 胡紫航, 赵城, 等. 抽水蓄能工程建设施工大数据可视化分析应用研究[J]. 电气时代, 2018,(01):62-66.
- [5] 马国丰, 江俊. 基于大数据的工程项目目标控制平台设计研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(18):6.D0I:10.3969/j.issn.1000-7695.2018.18.030.
- [6] 鲍娜. 大数据技术在工程管理中的应用[J]. 计算机应用文摘, 2023, 39(05):32-34.
- [7] 黄冕, 李林. 大数据背景下项目管理理论与模式创新研究[J]. 湘潭大学学报: 哲学社会科学版, 2020(3).
- [8] 王朝锋. BIM技术在桥梁工程设计与施工中的应用分析[J]. 信息周刊, 2019(6):2.
- [9] 张丽涛. A公司大数据分析平台研发项目进度管理研究[D]. 北京邮电大学, 2023.
- [10] 唐丹. A公司大数据平台项目进度管理提升研究[D]. 广东外语外贸大学, 2023.

山区预应力混凝土连续刚构桥结构健康监测设计与实践

董李¹, 邱治强²

1. 青海省交通建设管理有限公司, 青海 西宁 810000

2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067

DOI:10.61369/ERA.2025070019

摘 要 : 桥梁结构在长期服役后会出现损伤累积和抗力下降, 使其工作性能下降。为确保其安全运营, 应开展桥梁健康监测系统设计, 并对桥梁的挠度、应变等参数进行监测。本文针对某山区预应力混凝土连续刚构桥进行结构健康监测系统设计, 基于该系统对结构挠度及应变数据进行实时监测。并就常用的低通滤波方法处理桥梁应变动态响应信号进行原理介绍和数据处理, 结合低通滤波方法对桥梁应变动态响应信号进行分离处理。对采集数据的分析结果表明, 该桥运营状态良好, 同时表明本设计中构建的结构健康监测系统可用于开展桥梁状态评估, 为桥梁运营管理提供重要依据。

关 键 词 : 连续刚构桥; 健康监测; 低通滤波方法; 桥梁状态评估

Design and Practice of Structural Health Monitoring of Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridges in Mountainous Areas

Dong Li¹, Qiu Zhiqiang²

1. Qinghai Transportation Construction Management Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., LTD., Chongqing 400067

Abstract : Bridge structures experience damage accumulation and resistance reduction after long term service, which degrades their operational performance. In order to ensure its safe operation, the design of bridge health monitoring system should be carried out and the deflection, strain and other parameters of the bridge should be monitored. In this paper, a structural health monitoring system is designed for a pre-stressed concrete continuous rigid bridge in a mountainous area, based on which the structural deflection and strain data are monitored in real time. It also introduces the principle and data processing of the commonly used low-pass filtering method to process the dynamic response signal of bridge strain, and separates the dynamic response signal of bridge strain by combining the low-pass filtering method. The analysis results of the collected data show that the bridge is in good operating condition, and at the same time, it indicates that the structural health monitoring system constructed in this design can be used to carry out the bridge condition assessment, which provides an important basis for the bridge operation management.

Keywords : continuous rigid bridge; health monitoring; low-pass filtering method; bridge condition assessment

引言

桥梁结构在长期服役后会出现损伤累积和抗力下降, 使其工作性能下降。连续刚构桥可发生主跨跨中下挠过大、箱梁梁体裂缝等病害, 会严重影响结构的正常使用, 甚至造成工程事故^[1]。虎门大桥辅航道桥在经过7年的观测后, 左幅主梁跨中累积下挠达到22.2cm, 右幅主梁跨中累积下挠达到20.7cm^[2]; 湖北黄石长江大桥在经过7年的观测后主梁跨中累计下挠达30.5cm^[3]。同时, 桥梁结构裂缝会引起钢筋锈蚀, 结构外观的破损以及结构功能的削弱甚至丧失^[4]。

近年来, 桥梁结构健康监测系统在国内外广泛应用, 提供对位移、应变等参数的监测, 为评估结构健康状况提供重要数据。桥梁结构健康监测系统通过在桥梁结构的关键部位部署相应的传感器监测节点, 对桥梁的环境荷载、运营荷载、桥梁特征和桥梁响应等参数进行实时监测^[5]。同时, 利用各种数据分析方法, 对监测数据进行智能处理, 从而有效地评估桥梁结构的健康状况^[6]。桥梁结构检测与健康监测技术已经发展并实践了数十年, 对设计寿命为50年或100年的桥梁而言, 结构检测与健康监测技术实践周期占桥梁全寿命周期的比例已相当可观, 能够起到很大的后验作用。从监测内容上, 传感器可包括对变形、位移的测量, 拉索锈蚀的检测, 疲劳监测、温度检

测、动态称重监测等的技术^[7]。另外，无线传输技术，健康监测动态功耗管理技术以及状态监测可视化及评估辅助技术都属于结构健康监测领域的新技术^[8]；以人工智能和新一代感知手段为代表的信息技术促进桥梁结构检测与健康监测技术的飞速进步，其中主要是以数字图像为代表的外观检查技术、无损检测技术以及一些健康监测的新技术^[9]。

桥梁的主要评估方法有常规综合评估法、层次分析法、专家系统评估方法、缺损状况指标法、基于可靠理论的评估方法及模糊综合评判法^[10]。常规综合评估方法主要采用了加权算术平均、加权几何平均以及两种方法的混合评估方法^[11]。层次分析法是将定性因素定量化，并在一定程度上检验和减少主观影响，是评价趋于科学化的评估方法^[12]。专家系统评估方法主要利用计算机模拟有经验专家的决策机理从而对既有桥梁进行综合评估或直接收集归纳专家意见的评估方法^[13]。缺损状况指标法是陆亚兴等根据桥梁结构特点，引入桥梁缺损状况指数作为综合性指标，建立相应的计算模型进行评估的桥梁评估方法^[14]。基于可靠度理论的评估方法是采用失效概率或可靠性指标来衡量结构的安全水平的桥梁评估方法。模糊综合评判法以模糊数学为基础，应用模糊关系合成的原理，将一些边界不清、不易量化的因素定量化进行评估^[15]。

本文以某连续刚构桥为对象，设计搭建桥梁健康监测系统并采集结构状态数据。结构健康监测系统能有效监测影响桥梁结构的各种作用及其在结构上产生的效应。为实时监控桥梁结构整体行为和智能化评估其状态，根据桥梁结构受力特性，设计桥梁健康监测系统的传感器布点方案。基于桥梁健康监测系统对桥梁结构开展健康监测，采用滤波数据处理方法对监测数据进行处理，剔除长周期温度对于监测数据的影响。依据相关规范，确定相应参数的限值，并将处理后的数据与桥梁的应变限值进行对比，以评级桥梁的运营状态，对桥梁结构状态进行评估。

一、监测对象分析

某连续刚构桥桥型为三跨预应力钢筋混凝土连续刚构桥，跨径组合为85m+150m+85m，边-中跨比为0.57，主梁为单箱双室变截面箱梁。桥型布置如图1所示，跨中断面及支点断面如图2所示。

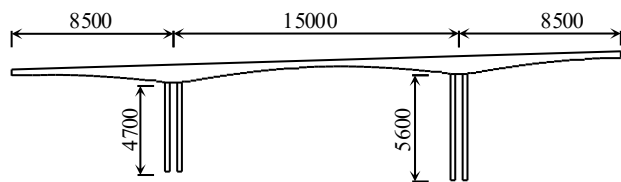


图1 连续刚构桥桥型布置图 (cm)

Fig. 1 Continuous rigid bridge layout (cm)

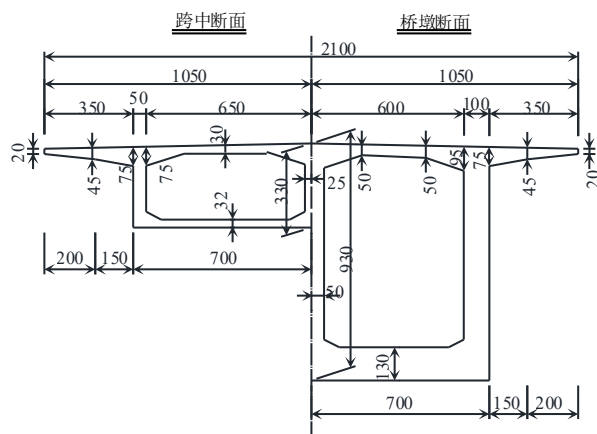


图2 主梁断面尺寸 (cm)

Fig. 2 Main beam section size (cm)

二、桥梁结构健康监测系统设计

(一) 结构健康监测系统架构

结构健康监测系统主要包括三个部分，含桥位现场部分、数据中心部分以及客户端。由于桥梁现场无供电及数据连线的硬件条件，健康监测系统采用太阳能电池板方式供电，通过移动无线网络将监测数据传回数据中心，再由用户从数据中心实时调取监测数据，实现远程获取结构响应数据，定期完成桥梁结构性能的评定工作。桥梁健康监测系统架构如图3所示。

按照“经济性、适用性、有效性”的原则，本文主要针对结构设计中起控制作用的截面和关键部位进行监测。通过理论计算并结合经验合理选择测点的数量，可以简化数据的采集和后处理工作，有利于把握桥梁结构的局部或整体状态。桥梁健康监测的传感器子系统主要包括应变传感器及位移传感，本节主要展示了桥梁各监测内容的点位布置。

(二) 应变测点设计

应变是判断结构安全最直接的指标，通过应变监测数据分析所得到的动应力可以反映桥梁的主要受力情况。方案选取桥梁关键截面，对连续刚构桥的半跨进行应变测点布置，每20分钟对桥梁应变进行监测。

本次应变监测采用智能弦式数码应变计监测实时应变。连续刚构桥共设置4个监测断面，分别在边跨跨中(B-B截面)、桥墩截面(C-C截面)、主跨1/4处截面(D-D截面)和主跨跨中截面(E-E截面)的顶板和底板分别安装智能弦式数码应变计(应避免箱梁梗腋处)，在桥墩截面可根据需求省略底板的应变传感器。安装位置如图4和图5所示，现场实物如图6所示。各应变传感器均沿桥梁纵向方向布置。

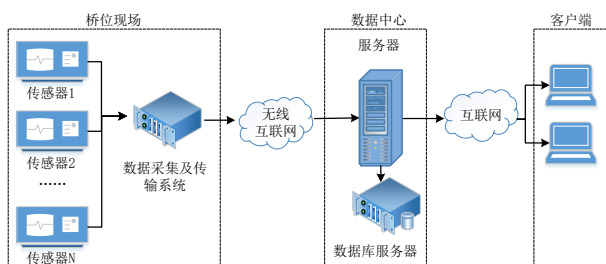


图3 桥梁健康监测系统架构

Fig. 3 Bridge Health Monitoring System Architecture

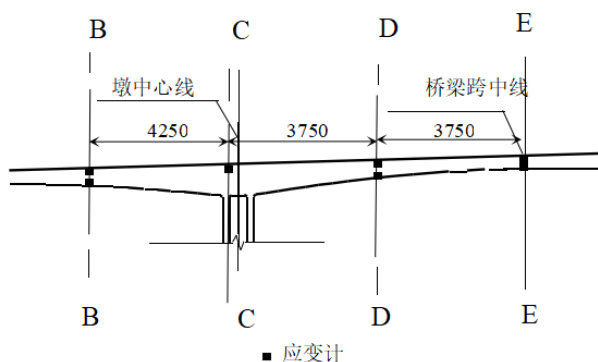


图4 应变传感器立面布置示意图 (cm)

Fig. 4 Schematic arrangement of strain sensor elevation (cm)

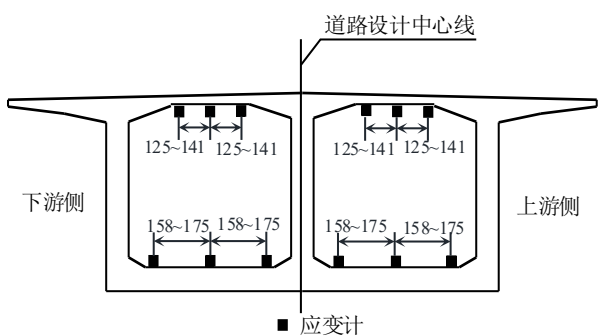


图5 应变传感器断面布置示意图 (cm)

Fig. 5 Schematic layout of strain sensor section (cm)



图6 应变传感器现场实物图

Fig. 6 Strain Sensor Field Diagram

(三) 挠度测点设计

连续刚构桥在车辆荷载作用下的挠度表征了桥梁的变形能力, 结构变形是结构状态改变最灵敏与最精准的反应, 因此对结构变形进行监测能够更准确地把握结构内力状态的变化, 故对桥

梁关键截面进行变形监测是有必要的。

压差式水准仪通常有规定量程以保证测量的精确性, 而山区连续刚构桥一般存在明显的纵坡, 在设计相应的测点时应根据仪器量程对监测系统进行分段。对于山区连续刚构桥, 由于地形高差较大, 桥梁存在比较明显的纵坡。量程较大的水准仪精度较低, 无法满足监测要求。为保证对连续刚构桥挠度监测的精确性, 测点设计时可以水准仪的量程为依据, 对测点进行分段设计。方案的主梁挠度监测依据水准仪的量程分为了三段监测, 并将边跨、中跨分为三套系统进行桥梁挠度监测, 并选取边跨跨中断面、支点断面、中跨跨中断面、中跨四分点断面、及桥墩进行桥梁竖向挠度监测, 每套系统的仪器连接如图7所示。根据不同系统及水准仪的量程可确定水准仪安装位移及相应的安装上限和下限, 点位布置示意图如图8所示, 现场实物如图9所示。

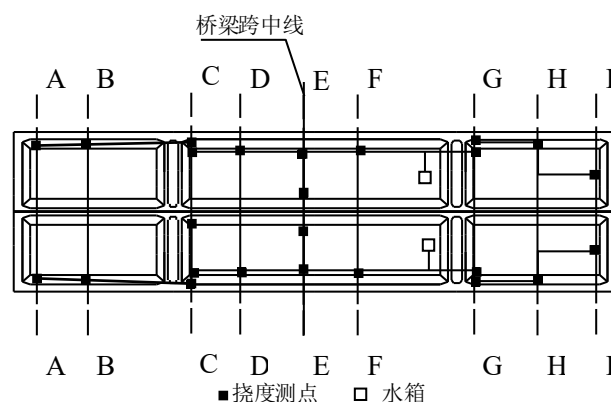


图7 压差式水准仪挠度测点分段示意图

Fig. 7 Differential Pressure Level Deflection Measuring Point Segmentation Diagram

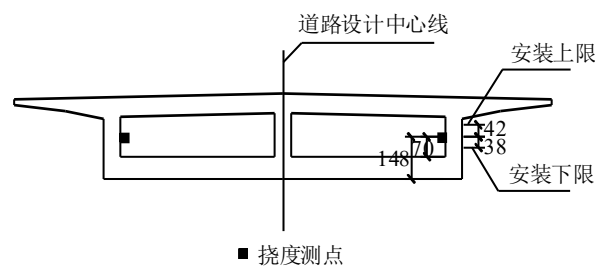


图8 压差式水准仪挠度测点点位示意图 (cm)

Fig. 8 Differential Pressure Level Deflection Measuring Points Schematic Diagram



图9 压差式挠度计现场实物图

Fig. 9 Differential Pressure Deflection Gauge Field Physical Drawing

三、监测数据分析与结构评价

(一) 数据处理原理

通过桥梁结构健康监测获得的应变数据记录了各种外部荷载引起的应变响应,包括车辆荷载冲击、温度、基础沉降等。其中,汽车荷载引起的结构响应直接反映了桥梁的刚度和工作状态。为了精准地获取这一响应,必须从总应变数据中剔除其他因素的影响,如温度和基础变位。对于温度,需将其转换为等效应变并进行补偿;对于基础沉降,需参考位移数据以确定沉降量,并找到应变补偿量。经上述数据处理后,方可得到由汽车荷载引起的结构响应。

为了简化上述过程,本文采用巴特沃斯滤波器进行汽车荷载效应筛选。该方法中,高通滤波器允许高于特定频率的信号通过,此时低于该截止频率的信号则被滤除。根据温度等因素引起的应变频率(如温度引起的应变频率通常较低,周期接近一天)来设定滤波器的截止频率,进行滤波处理,剩余的数据信号部分就是由汽车荷载引起的响应。通过这种方式,可有效评估桥梁结构在车辆荷载作用下的响应是否正常。

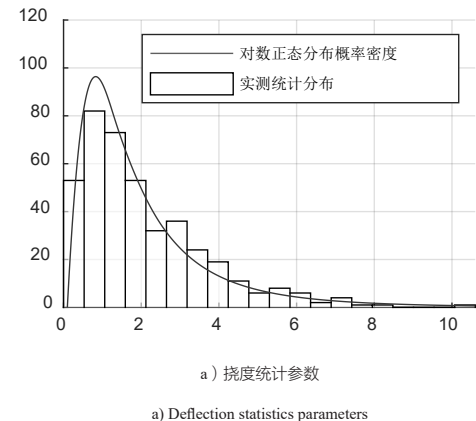
巴特沃斯滤波器由 Butterworth 于 1930 年提出,并逐渐发展成为一种数字 IIR 滤波器的一种设计方法。巴特沃斯滤波器幅频响应需要满足的关系如式所示:

$$\left| H(j\Omega) \right|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\Omega}{\Omega_c} \right)^{2N}} \quad (1)$$

式中, Ω 、 Ω_c 、 N 分别表示频率、转折频率、系统阶数。巴特沃斯的滤波器的阶数越高,通带和阻带特性越好,通带和阻带过渡越快,通带内部平坦性越好^[16]。

(二) 挠度变化

本文对该连续刚构桥进行为期 42 天的桥梁应变及桥梁挠度的监测,并采用低通滤波的方式对监测数据进行处理,剔除长周期温度对于监测数据的影响。同时,依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,确定相应参数的限值,进行桥梁的结构分析及评价。



根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》条例 6.5.3,桥梁挠度不超过 $L/600$,其中边跨限值为 142mm,中跨限

值为 250mm。通过将低通滤波法对监测得到的桥梁应变数据进行处理,剔除长周期温度对于监测数据的影响,并将处理后的数据与桥梁的挠度限值进行对比,以评价桥梁的运营状态。

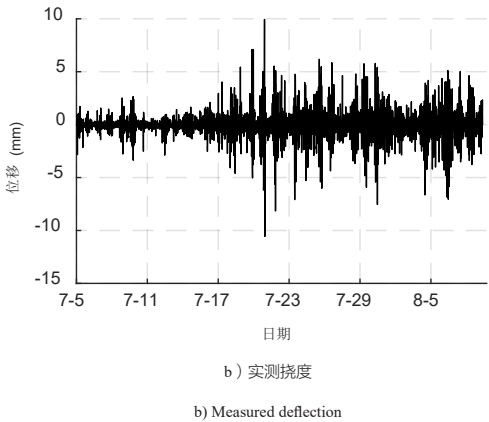


图 10 边跨跨中监测期间挠度变化及统计参数

Fig. 10 Deflection changes during mid-span monitoring of side spans and statistical parameters

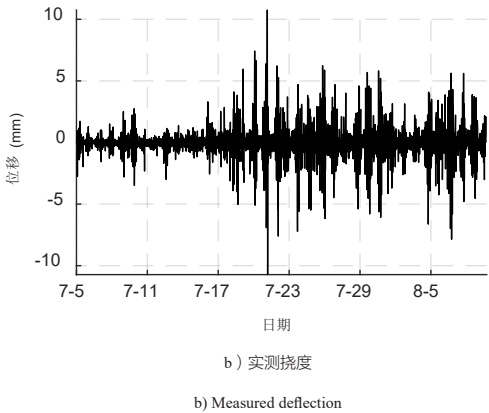
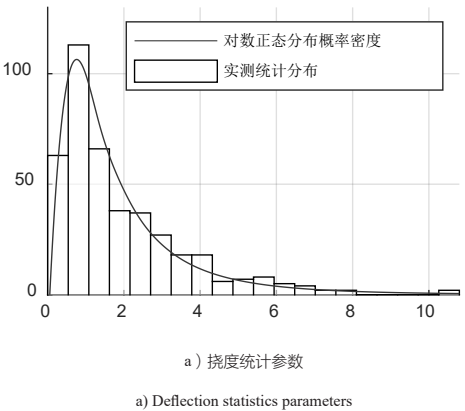


图 11 中跨跨中监测期间挠度变化及统计参数

Fig. 11 Deflection changes and statistical parameters during mid-span mid-monitoring period

表 1 挠度最大最小值 (mm)

Table 1 Maximum and minimum values of deflection (mm)

断面	左幅挠度		右幅挠度		设计 限值
	最大值	最小值	最大值	最小值	
边跨跨中	22.3	-169.3	30.6	0.7	142
中跨跨中	23.4	-167.6	34.4	-1.3	250

图10及图11表明,边跨跨中挠度及中跨跨中挠度测点总体无趋势性的变化,监测值有一定波动,波动区间为-10mm~10mm。由表1的比较可知桥梁的监测值均未超过限值。监测结果表明,连续刚构桥边跨及中跨在该监测期内未出现超过设计限值的结构变形。

(三) 顺桥向应变

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》条例3.1.4, C55混凝土的抗拉强度设计值1.89MPa, 则桥梁的应变限值为 $53.2 \mu \epsilon$ 。通过将低通滤波法对监测得到的桥梁应变数据进行处理, 剔除长周期温度对于监测数据的影响, 并将处理后的数据与桥梁的应变限值进行对比, 以评级桥梁的运营状态。

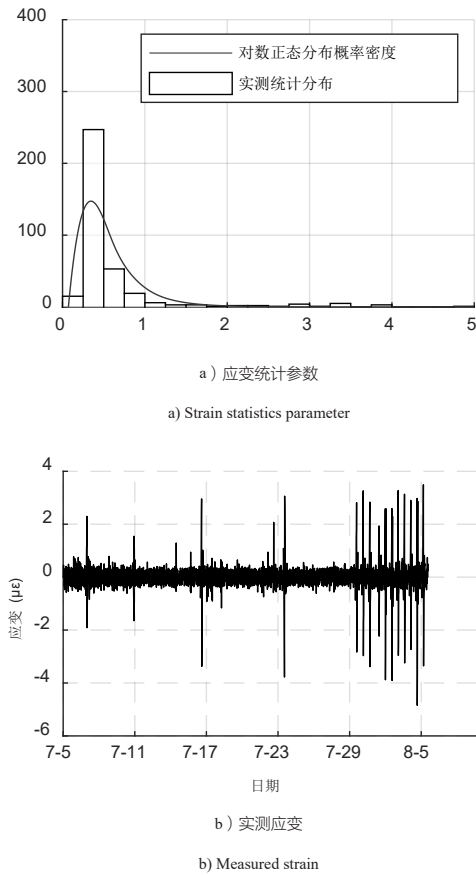


图12 中跨跨中顺桥向应变及统计参数分析
Fig. 12 Analysis of mid-span transverse strains and statistical parameters

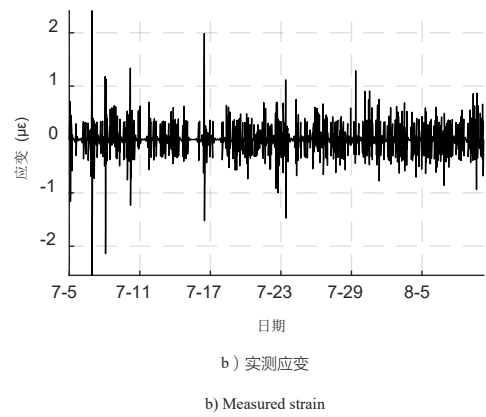
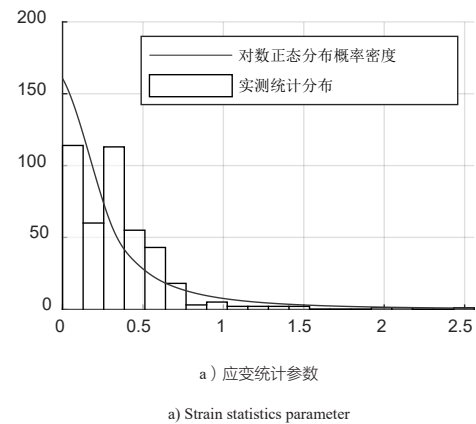


图13 墩顶顺桥向应变及统计参数分析
Fig. 13 Analysis of paraxial strains at the top of the pier and statistical parameters

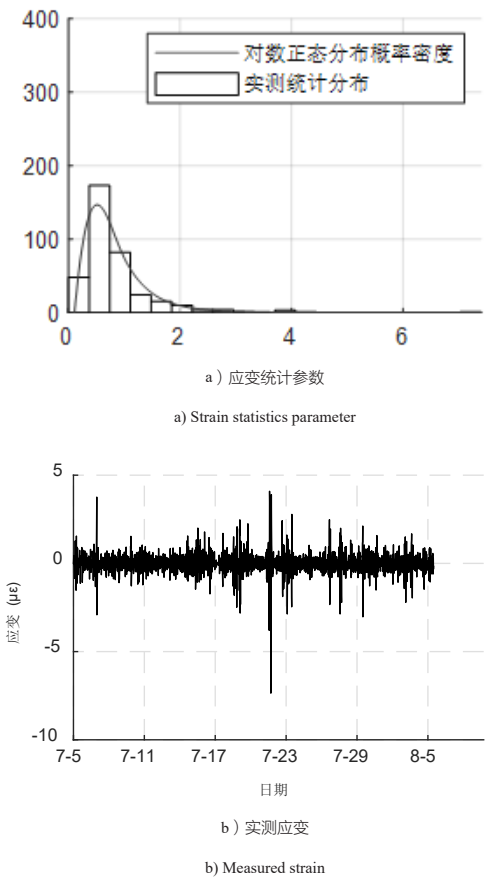


图14 边跨跨中顺桥向应变及统计参数分析
Fig. 14 Analysis of transverse strains in side spans and statistical parameters

表2 顺桥向应变均值及均方差
Table 2 Mean values and mean square deviation of strain in the direction of the bridge
表2 顺桥向应变均值及均方差
Table 2 Mean values and mean square deviation of strain in the direction of the bridge

断面	位置	左幅		右幅	
		均值 (10- $4 \mu \epsilon$)	均方差 ($\mu \epsilon$)	均值 (10- $4 \mu \epsilon$)	均方差 ($\mu \epsilon$)
中跨跨中	底板	1.988	1.495	7.297	1.288
		4.749	1.149	5.290	1.412

中跨跨中	底板	1.863	1.264	8.263	0.999
	顶板	-9.554	1.326	-4.703	0.589
		3.085	1.596	1.299	0.968
墩顶	顶板	6.911	1.017	-0.906	1.219
		0.241	1.064	-5.419	1.385
		1.387	1.144	0.826	1.313
边跨跨中	顶板	0.519	0.347	-1.158	1.349
		10.250	1.532	-8.751	2.558
		3.656	1.392	2.465	0.825
	底板	-0.927	1.256	1.906	1.155
		1.441	0.988	2.823	0.508
		1.879	0.367	2.559	0.52
	顶板	10.220	1.18	2.602	0.537

图 12、图 13 及图 14 表明，中跨跨中、墩顶及边跨跨中的应变测点总体监测值无趋势性的变化，监测值有一定波动，波动区间为 $-10\mu\epsilon\sim5\mu\epsilon$ ，均值及均方差如表 2 所示。监测结果表明，中跨跨中、墩顶及边跨跨中均小于材料抗拉强度设计值。

四、结论

本文针对某山区连续刚构桥的运营过程，开展结构健康监测系统设计，对该桥关键截面的应变及挠度进行实时监测，并介绍桥梁健康监测系统的 workflows，完成了为期 42 天对该桥应变、挠度等参数的监测，并通过数据传输系统将所监测到的数据进行处理及分析，从而完成对整座桥梁的健康监测。

1. 桥梁结构健康监测系统主要包括桥位现场部分、数据中心部分以及客户端。现场部分的传感器进行数据的监测，并通过移动无线网络将监测数据传回数据中心，再由用户从数据中心实时调取监测数据，进行监测数据分析，定期完成桥梁结构性能的评定工作。

2. 监测系统采用智能弦式数码应变计监测实时应变，采用压差式水准仪进行挠度监测。方案选取了桥梁关键截面的顶板及底板设置应变计，即边跨跨中、桥墩截面、主跨跨中截面和主跨 1/4 处截面。对于压差式水准仪，山区连续刚构桥的地形高差较大，桥梁存在比较明显的纵坡。挠度测点设计时以水准仪的量程为依据，将边跨、中跨分为三套系统进行桥梁挠度监测。方案选取边跨跨中断面、支点断面、中跨跨中断面、中跨四分点断面、及桥墩进行桥梁竖向挠度监测，并依据水准仪的量程进行测点安装上下限的确定。

3. 收集健康监测系统收集的应变及挠度数据，通过采用低通滤波的方式对监测得到的数据进行处理，并依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对桥梁的结构进行分析，以评价桥梁在运营期间的结构状态。从监测数据及相应统计参数分析，该连续刚构桥在监测期内应变小于抗拉设计强度，挠度变形小于设计变形。桥梁在该监测期内结构状态安全，能够满足运营阶段的正常使用需求。

参考文献

[1] 卓斌. 大跨连续刚构桥典型力学问题分析 [D]. 湖南大学, 2016.

[2] 杨志平, 朱桂新, 李卫. 预应力混凝土连续刚构桥挠度长期观测 [J]. 公路, 2004,(08):285-9.

[3] 詹建辉, 陈卉. 特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析 [C]// 湖北省公路学会自然科学优秀学术论文汇编 (2008 年——2013 年). 湖北省交通规划设计院, 2014:169-172.

[4] 杨虎城. 预应力混凝土连续刚构桥裂缝分析及加固研究 [D]. 长安大学, 2015.

[5] 蔡建辉. 跨海预应力混凝土连续刚构桥健康监测与养护评价技术. 福建省, 宁德市福宁高速公路有限公司, 2016-05-26.

[6] 熊涛. 基于健康监测系统的连续刚构桥模态识别技术研究 [J]. 山西建筑, 2016,42(03):172-3.

[7] 石鹏程. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥健康监测评估系统研究 [D]. 重庆交通大学, 2009.

[8] 周桂兰, 徐恺奇. 大跨径桥梁结构健康监测技术现状与发展 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019,15(04):168-9.

[9] 樊健生, 刘宇飞. 在役桥梁检测、健康监测技术现状与时空融合诊断体系研究 [J]. 市政技术, 2022,40(08):1-11+40.

[10] 孙磊. 大跨径连续刚构桥梁健康监测与评估系统 [D]. 长安大学, 2009.

[11] 贺拴海, 宋一凡, 赵小星, et al. 钢筋混凝土梁式结构裂缝特征与损伤评估方法试验研究 [J]. 土木工程学报, 2003,(02):6-9.

[12] 陈晶, 陈棉, 李娜. 基于模糊层次分析法的沙盘模拟实践教学评价研究 [J]. 项目管理技术, 2024,22(01):62-6.

[13] 倪源城. 美学在桥梁设计中的应用与评价 [D]. 沈阳建筑大学, 2015.

[14] 陆亚兴, 殷建军, 姚祖康, 徐奔, 朱惠君. 桥梁缺损状况评价方法 [J]. 中国公路学报, 1996,(03):57-63.

[15] 陈力, 杨方柳, 冯彬, et al. 基于模糊综合评判的油库毁伤评估方法 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2023,53(05):794-802.

[16] 刘源源. 巴特沃斯滤波器及单锁相环关键问题研究 [D]. 华中科技大学, 2016.

重力坝施工过程中质量控制与技术难点研究

卜崇财

中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/ERA.2025070020

摘要：重力坝施工过程中，质量控制是确保工程安全、稳定及长期耐用的关键。施工阶段涉及的主要技术难点包括混凝土浇筑质量控制、模板支撑系统的稳定性、裂缝控制及坝体沉降监测等。合理的施工方案和技术措施对于提高重力坝的施工精度与结构稳定性至关重要。通过对各项关键环节的严格管理，能够有效预防施工过程中的质量问题，保障重力坝的设计功能和使用寿命。

关键词：重力坝施工；质量控制；技术难点；裂缝控制；沉降监测

Research on Quality Control and Technical Difficulties in the Construction Process of Gravity Dams

Bu Chongcai

China Water Resources and Hydropower Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

Abstract： During the construction of gravity dams, quality control is crucial to ensure the safety, stability, and long-term durability of the project. The main technical difficulties involved in the construction stage include quality control of concrete pouring, stability of the formwork support system, crack control, and dam settlement monitoring. Reasonable construction schemes and technical measures are essential to improve the construction accuracy and structural stability of gravity dams. Through strict management of various key links, quality problems during the construction process can be effectively prevented, and the design function and service life of the gravity dam can be guaranteed.

Keywords： gravity dam construction; quality control; technical difficulties; crack control; settlement monitoring

引言

重力坝作为水利工程中的重要结构，其施工质量直接影响坝体的安全性和功能实现。然而，在施工过程中，由于复杂的环境因素和技术难题，质量控制面临着严峻挑战。如何在施工阶段有效解决混凝土质量、模板支撑、裂缝控制和沉降监测等问题，成为工程实践中的关键。精确的施工技术和科学的质量管理措施，不仅能提高坝体的稳定性，还能延长其使用寿命，对水利工程的长期效益具有重要意义。

一、重力坝施工质量控制的关键因素

重力坝作为水利工程中的重要结构，其施工质量直接关系到工程的安全性与稳定性。施工过程中，质量控制的关键因素不仅涉及技术操作，还与管理、材料选择、环境条件等多方面因素密切相关。在重力坝的施工中，混凝土质量的控制尤为重要，因为混凝土是坝体的主要结构材料，决定着坝体的承载力和耐久性^[1]。为了确保混凝土的强度和密实性，施工时必须严格控制水灰比、配合比和浇筑工艺，同时还需要在浇筑过程中对混凝土的振捣进行细致管理，确保混凝土充分密实，避免出现空洞、裂缝等质量隐患。

除了混凝土浇筑质量，模板支撑系统的稳定性也是重力坝施工中的关键因素。模板支撑系统不仅承载着浇筑混凝土的重量，

还需要在施工过程中维持精确的几何尺寸。如果模板系统不稳定，可能导致结构变形，影响坝体的整体性和稳定性。在实际施工过程中，应根据坝体的规模和施工要求，选择合适的模板支撑材料，并根据施工进度调整支撑系统的结构设计，以保证施工质量和施工安全。模板的精度直接关系到坝体的形状和结构稳定性，因此对模板的校准与调整要做到细致入微。

裂缝控制与沉降监测也是影响重力坝施工质量的重要因素。在混凝土浇筑后，坝体可能会由于温度变化、混凝土收缩、沉降等原因产生裂缝。如果裂缝控制不当，可能会导致坝体失稳，影响其使用寿命。因此，施工过程中必须采取有效的裂缝防控措施，如控制混凝土的浇筑温度、采用适当的养护措施、以及加强对混凝土表面裂缝的监测与修补。同时，沉降监测也对重力坝施工质量至关重要。通过对坝体各部分的沉降情况进行实时监测，

能够及时发现问题并采取相应的加固措施，确保坝体的稳定性和安全性^[2]。因此，重力坝施工质量控制涉及多个环节的协同管理，每一个环节都需要精确控制，才能确保工程的顺利完成。

二、混凝土浇筑技术及其质量管理

混凝土浇筑技术是重力坝施工中至关重要的一环，其质量直接影响坝体的稳定性和使用寿命。为了确保混凝土浇筑质量，首先需要合理设计混凝土配合比，选择合适的材料，如水泥、骨料和外加剂等，确保其符合工程设计要求。其次，施工过程中应严格控制混凝土的水灰比，避免过高的水灰比导致混凝土强度不足或出现收缩裂缝。在实际施工中，混凝土的搅拌、运输和浇筑应在规定的时间内完成，防止混凝土因初凝而失去流动性，影响施工质量。因此，采用适当的运输工具和设备，确保混凝土的连续性和及时性，是提高浇筑质量的重要保障。

在混凝土浇筑过程中，振捣技术的运用至关重要。为了确保混凝土的密实性和均匀性，必须采用高效的振捣方法，防止混凝土出现空洞、气泡和分层现象。振捣过程中应根据混凝土的流动性和施工环境的不同，选择适当的振动频率和振动时间。特别是在大规模的重力坝施工中，由于坝体的结构复杂，浇筑量大，振捣工作需要特别精细和全面。对于大型坝体，通常需要分层浇筑，并在每层混凝土浇筑完毕后进行充分的振捣，以保证混凝土的密实性和整体性^[3]。在浇筑过程中，还要特别关注模板的稳定性和密封性，避免混凝土泄漏或溢出，确保施工精度和质量。

混凝土浇筑后的养护工作同样重要，直接关系到混凝土的强度发展和耐久性。混凝土浇筑完毕后，应采取适当的养护措施，控制温度和湿度，避免因温差过大或水分蒸发过快而引发裂缝。在炎热的夏季或寒冷的冬季，应特别注意混凝土表面的保护，避免由于外部环境因素导致温度应力的产生。在施工过程中，定期检查混凝土的温度和湿度变化，并采取相应的养护措施，如洒水、覆盖保温材料或采用养护剂等，以确保混凝土在硬化过程中得到良好的保护。此外，对于混凝土的强度和性能，也要进行定期检测，确保其达到设计要求，避免因质量问题影响坝体的安全性^[4]。通过科学的养护管理，能够有效提升混凝土的质量，确保重力坝的长期稳定运行。

三、模板支撑系统的稳定性与施工控制

模板支撑系统的稳定性在重力坝施工过程中起着至关重要的作用，它直接影响到坝体的形状、结构稳定性以及施工安全性。模板不仅是混凝土浇筑的支撑平台，而且决定了坝体的尺寸和结构精度，因此模板支撑系统的设计必须严谨。首先，选择合适的模板材料至关重要，常用的模板材料包括木材、钢板、铝合金等，依据施工现场的具体需求、坝体的形状及尺寸、施工周期等因素进行选择。同时，支撑系统的设计应考虑到模板所承载的混凝土重量、施工荷载以及外部环境因素，如风力、温度变化等，以确保模板的安全性和稳定性^[5]。

模板支撑系统的稳定性不仅与材料的选择有关，还与施工过程中的精确操作密切相关。在实际施工中，模板支撑系统的安装和调整必须严格按照设计要求进行，任何偏差都可能导致坝体形态不准确或结构受力不均。安装模板时，需要确保模板与支撑结构之间的连接牢固，支撑系统的高度、位置以及角度等参数必须精确计算并准确施工。此外，在施工过程中，模板系统还需要定期检查与维护，防止由于支撑系统不稳定或连接松动导致模板位移或变形，从而影响混凝土浇筑的质量。因此，施工人员需要具备一定的经验和技能，能够及时发现并解决模板支撑系统中出现的任何问题。

模板支撑系统的施工控制必须注重细节管理，特别是在大规模重力坝施工中，施工周期长、工序复杂，模板支撑系统需要经历多个阶段的安装、调整和拆除。在模板安装前，应该进行详细的技术交底，明确每个环节的工作任务，确保施工人员理解施工规范和操作要求。同时，应制定严格的质量检测标准，对模板支撑系统进行全面检查，确认其安装是否符合设计要求。施工过程中，还需要密切关注外部环境的变化，如天气条件和施工进度等，及时调整施工计划，确保模板支撑系统能够始终保持稳定状态，避免任何影响施工安全和质量的风险。在模板的拆除阶段，必须按照正确的程序逐步拆除，避免因过早拆除导致结构变形或损坏。通过科学的施工控制和精细的管理，可以有效保障模板支撑系统的稳定性，为重力坝的顺利施工提供有力保障^[6]。

四、裂缝控制技术在重力坝施工中的应用

裂缝控制技术在重力坝施工中具有重要作用，因为裂缝的产生不仅影响坝体的美观，还可能降低其结构强度和使用寿命。混凝土作为重力坝的主要构建材料，在施工过程中容易因温度变化、收缩、沉降等因素产生裂缝。如果裂缝未得到有效控制和修复，可能会导致坝体的稳定性受到影响，甚至危及整个工程的安全。因此，在重力坝施工中，采取有效的裂缝控制技术至关重要。

控制裂缝的产生首先应从混凝土配比和施工工艺入手。在混凝土的配合比设计过程中，合理的水泥、骨料和外加剂的选择及比例控制，可以有效降低混凝土的收缩率，减少裂缝的产生。特别是在浇筑过程中，水泥的品种和质量选择要确保其在硬化过程中具有良好的抗裂性，同时，外加剂的使用能够改善混凝土的工作性和抗裂性能。施工时，合理控制混凝土的浇筑温度是预防裂缝的重要手段之一。过高或过低的浇筑温度都会引发温度应力，导致裂缝的产生。因此，控制浇筑环境的温度，避免温差过大，是确保混凝土质量和防止裂缝的关键措施^[7]。

裂缝的预防和修复离不开科学的施工监测和管理。在施工过程中，需要对混凝土的硬化过程进行实时监控，特别是浇筑后初期和养护阶段，监测混凝土的温度、湿度变化，及时采取有效措施。对于高温季节施工，应采取降温措施，如喷水降温或使用冷却管道，避免混凝土内部温差过大产生裂缝。在冬季施工时，应通过保温措施保持混凝土的温度，避免因冻融循环造成的裂缝。

此外，混凝土浇筑完成后的养护工作至关重要，合理的养护可以有效避免水分蒸发过快引起的裂缝。常用的养护措施包括覆盖养护、洒水养护和使用养护剂等，这些措施可以保持混凝土表面的湿润，防止因快速干燥引发的表面裂缝^[8]。

裂缝的修复同样是保证重力坝施工质量的重要环节。一旦发现裂缝，应根据裂缝的类型、大小和位置，选择合适的修复方法。对于表面细小裂缝，可以采用灌浆技术进行修补；而对于较大裂缝，可能需要进行结构加固和重新浇筑。修复过程中，应特别注意选择与原混凝土相兼容的材料，确保修复后的坝体强度和稳定性不受影响。通过有效的裂缝控制技术，能够提高混凝土的整体性能，确保重力坝施工的顺利进行和坝体的长期安全运行。

五、沉降监测与坝体稳定性评估方法

沉降监测在重力坝施工过程中起着至关重要的作用，它直接影响到坝体的稳定性和安全性。随着施工的进行，坝体的沉降会受到多种因素的影响，如混凝土的自重、施工荷载、温度变化以及土壤的物理性质等。沉降不仅可能导致坝体形态变化，还可能影响坝体的整体稳定性。因此，对重力坝进行沉降监测，是确保施工质量和坝体安全运行的重要手段。通过及时获取沉降数据，施工团队可以评估坝体的变形情况，确保在出现异常沉降时能采取有效的补救措施。

沉降监测技术包括对坝体的各个部位进行实时监测，特别是坝基和坝体接触面。常用的监测方法包括沉降标尺、激光测距仪、GPS 定位系统等，这些设备能够精确地记录坝体各部分的垂直位移和变形情况。特别是在重力坝的大规模施工过程中，由于混凝土浇筑和坝体沉降的复杂性，监测设备必须具备较高的精度

和可靠性^[9]。此外，监测系统还应与其他施工设备协同工作，实现数据的实时传输和分析。这些沉降数据对于后期的坝体稳定性评估至关重要，有助于工程师及时发现潜在问题，采取相应的修正措施，避免坝体发生意外变形或失稳。

在沉降监测的基础上，坝体稳定性评估方法同样是确保重力坝安全性的重要内容。稳定性评估通常基于监测数据与理论分析相结合的方式。通过收集沉降数据，结合坝体的设计参数和环境条件，可以使用有限元分析等数值模拟方法对坝体的变形和应力分布进行计算。评估模型能够提供坝体在不同荷载和环境条件下的反应，预测可能出现的变形趋势以及是否存在风险。通过与设计标准进行对比，评估是否达到安全标准。在实际施工过程中，若发现坝体的沉降超过设计允许的范围，或者出现不规则的沉降趋势，工程师可以采取加固、调整施工方案等措施，确保坝体的稳定性得到有效保障^[10]。因此，沉降监测与坝体稳定性评估的结合，为重力坝的安全施工提供了科学依据，能够及时发现潜在问题并进行有效干预，确保工程的顺利进行。

六、结语

重力坝施工过程中的质量控制涉及多个关键环节，确保每一项技术措施的精确实施对于坝体的稳定性至关重要。混凝土浇筑、模板支撑系统、裂缝控制以及沉降监测等技术的有效应用，能够有效避免质量问题，保障坝体的长期安全运行。通过精细化管理与技术手段，重力坝的施工质量得以保障，为水利工程的稳定性和安全性提供了坚实基础。未来，随着技术的不断进步，重力坝施工的质量控制将更加精细和高效。

参考文献

- [1] 谢天智. 沥青青墙与常态混凝土组合重力坝施工的控制难点及处理办法 [J]. 陕西水利, 2015(06): 162-164. DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2015.06.076.
- [2] 丁建丰. 细石混凝土砌石重力坝的施工管理与控制探讨 [J]. 低碳世界, 2017(18): 110-111. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2017.18.072.
- [3] 吴庆筑. 碾压混凝土重力坝施工技术和施工质量的管控 [J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(10): 73-75.
- [4] 马璐, 程显皓. 碾压混凝土重力坝施工技术和施工质量的管控 [J]. 珠江水运, 2020(03): 53-54. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2020.03.025.
- [5] 易绍林, 黄国芳, 孙邵岗. 堆石自密实混凝土重力坝施工技术要点分析 [J]. 水利建设与管理, 2020, 40(08): 31-34+43. DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2020.08.06.
- [6] 周易. 碾压混凝土重力坝施工技术要点分析 [J]. 湖南水利水电, 2021(02): 47-48. DOI: 10.16052/j.cnki.hnslsd.2021.02.010.
- [7] 陈才明. 自密实堆石混凝土坝施工质量控制过程分析 [J]. 陕西水利, 2021(06): 162-164. DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2021.06.058.
- [8] 王俊杰, 占雄鹏. 堆石混凝土重力坝施工方法及质量控制研究 [J]. 珠江水运, 2022(07): 41-43. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.07.005.
- [9] 卞俊栋. 重力坝碾压混凝土施工技术要点 [J]. 大众标准化, 2023(08): 33-35.
- [10] 赵京燕. 自密实堆石混凝土重力坝施工关键技术研究与实践 [A]. 中国大坝工程学会. 水库大坝智慧化建设与高质量发展 [C]. 中国大坝工程学会: 中国大坝工程学会, 2023: 8. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.001587.

压力锅产品结构创新与 LCIM 技术集成应用

刘春贵

身份证号: 440229198404102612

DOI:10.61369/ERA.2025070024

摘要： 本研究探讨 LCIM 技术在压力锅结构创新中的应用，通过一体化成型工艺解决传统产品热效率低、密封性差等问题。结合《中国家电行业 "十四五" 发展规划》要求，采用复合材料和智能工艺优化产品性能，实验表明新技术显著提升结构强度和使用寿命。研究为轻工电器制造升级提供可行方案，推动行业向绿色化、智能化方向发展。

关键词： 压力锅；LCIM 技术；结构优化

Structural Innovation of Pressure Cooker Products and Integrated Application of LCIM Technology

Liu Chungui

ID : 440229198404102612

Abstract : This study explores the application of LCIM technology in the structural innovation of pressure cookers, addressing issues such as low thermal efficiency and poor sealing performance in traditional products through integrated molding processes. In line with the requirements of the "14th Five-Year Plan" for China's Home Appliance Industry, composite materials and intelligent processes are employed to optimize product performance. Experimental results demonstrate that the new technology significantly enhances structural strength and service life. The research provides a feasible solution for the upgrading of light industrial appliance manufacturing, promoting the industry's transition toward greening and intelligent development.

Keywords : pressure cooker; LCIM technology; structural optimization

引言

压力锅作为现代厨房核心炊具，其性能升级对提升烹饪效率与安全性至关重要。《中国家电行业 "十四五" 发展规划》（2021）明确要求推动轻工电器向智能化、绿色化转型，为产品创新指明方向。传统压力锅存在热效率低、密封性差等结构缺陷，难以满足消费升级需求。LCIM（精益复合注塑成型）技术通过材料复合与结构一体化设计，可有效突破传统制造局限。该技术符合《轻工业稳增长工作方案》（2023）提出的新工艺应用要求，在实现产品轻量化、高强度方面具有显著优势。研究 LCIM 技术在压力锅制造中的集成应用，对促进行业技术升级具有重要意义。

一、压力锅产品结构现状与创新需求

（一）传统压力锅结构特征与局限性

传统压力锅主要由铝合金或不锈钢锅体、橡胶密封圈、金属手柄及安全阀构成，其结构设计长期依赖成熟工艺。材料选择受限于导热与强度平衡，铝合金易变形且不锈钢重量大，导致热效率损失显著^[1]。密封系统多采用单层橡胶圈，高温高压下易老化失效，存在安全隐患。热传递效率受限于锅体厚度与材料导热系数，能源利用率普遍低于60%。安全机制依赖机械式压力阀，响应精度不足，易引发过压风险。这些结构局限性制约了产品性能

提升与用户体验优化^[2]。

（二）结构创新驱动因素

用户对厨房电器的安全性需求已从基础防爆升级为实时压力监控与自动断电保护，节能标准提升要求热效率突破70% 阈值。智能化趋势推动压力锅集成传感器与物联网模块，需重构内部空间布局^[3]。行业技术发展聚焦轻量化复合材料替代金属，如碳纤维增强聚合物可减重30% 以上。模块化设计成为主流，要求锅体与功能部件实现快速拆装，降低维护成本。制造工艺革新如 LCIM 技术为复杂结构一体化成型提供可能，推动产品迭代周期缩短。

二、LCIM 技术原理及其适配性分析

（一）LCIM 技术核心工艺与优势

LCIM（精益复合注塑成型）技术通过多材料共注塑与模内组装工艺实现构件一体化成型，其工艺链涵盖复合粒料预处理、精准温控注塑及在线质量监测三大环节。该技术采用高动态响应的伺服驱动系统，将注塑周期缩短20%以上，同时通过纤维定向排布控制提升制品机械强度30%–50%。相较于传统注塑工艺，LCIM 减少后续焊接 / 装配工序，实现零配件数量降低40%–60%，显著提升生产节拍与材料利用率。模内应力分布的主动调控能力可避免产品翘曲变形，公差精度稳定维持于IT7级^[4]。

（二）LCIM 在压力锅制造中的适配性

LCIM 技术兼容聚苯硫醚（PPS）、液晶聚合物（LCP）等耐高温工程塑料，其长期使用温度范围（200–260℃）完全覆盖压力锅工作工况。通过玻纤 / 碳纤增强改性，复合材料热变形温度可达280℃以上，同时满足 FDA 食品接触标准。结构一体化优势可一次性成型带嵌入式流道的锅体 – 锅盖组件，消除传统铆接 / 螺纹连接导致的应力集中问题^[5]。模内嵌入传感器线路与金属衬套的技术方案，为智能压力锅的电路集成与受力部件强化提供制造可行性，整体构件减重幅度达25%–35%。

三、基于 LCIM 的压力锅结构创新设计

（一）关键部件创新（LCIM 集成方案）

1. 锅体 – 手柄一体化成型设计

传统分体式结构通过机械连接实现锅体与手柄的装配，存在应力集中和效率低下的问题。采用 LCIM 技术可实现整体成型，消除连接界面带来的结构弱点。通过计算辅助工程分析进行拓扑优化，合理分布材料以提升关键部位的力学性能。一体化设计简化了生产工艺流程，同时改善了产品的结构完整性和使用可靠性^[6]。

2. 多层复合密封结构设计

突破传统单一材料密封件的局限，运用 LCIM 工艺实现不同硬度材料的梯度分布。该设计在保持结构刚性的同时，通过柔性接触层确保密封性能。多层结构能够自适应压力变化，在高温高压环境下维持稳定的密封效果。这种创新设计显著提升了产品的安全性和使用寿命，同时降低了维护更换频率^[7]。

（二）性能优化路径

1. 热力学效率提升

热力学性能优化聚焦于锅体内部流场特性与传热路径重构。计算流体动力学仿真揭示传统结构存在的涡流损失与热阻分布不均问题，通过 LCIM 成型工艺实现带肋片结构的锅体内壁一体化制造。梯度复合材料的应用实现轴向热导率差异化分布，关键传热区域导热系数提升显著。优化后的热流路径缩短30%，整体热效率达到行业领先水平。

2. 安全性增强设计

新型压力 – 温度耦合监测系统集成于 LCIM 成型的锅体结构

中，通过嵌入式传感器网络实时采集工作参数。智能算法建立压力与温度的动态关联模型，在接近临界状态前触发分级预警。结构安全系数通过材料强化与应力分散设计得到系统性提升，关键承压部件采用冗余设计理念。多重保护机制的协同作用将安全风险控制在可接受范围内^[8]。

四、LCIM 技术集成应用与验证

（一）制造工艺创新

1. 模具开发与参数优化

模具设计采用变截面流道系统与多点热流道控制技术，模流分析软件模拟熔体在复杂型腔中的流动行为^[9]。通过优化浇口位置与冷却水道布局，将流动平衡度控制在5%以内，显著降低产品内应力。高精度模温控制系统实现 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的温差控制，确保复合材料界面结合强度。模具寿命预测模型指导选用耐磨合金钢材料，关键部位硬度达到 HRC58 以上。

2. 成型工艺窗口确定

基于田口方法建立温度 – 压力 – 时间的多参数耦合模型，通过正交试验确定最佳工艺组合。熔体温度采用分区控制策略，不同粘度材料实现精准共混。注射压力曲线实施三段式优化，保压阶段引入压力衰减补偿算法。成型周期通过神经网络算法动态调整，在保证质量前提下实现生产效率最大化。工艺参数容差分析确保生产稳定性，CpK 值持续保持在1.67以上。

（二）原型测试与性能对比

1. 实验设计

测试方案依据国家标准建立完整的性能评价体系，涵盖结构强度、密封性能和热效率等关键指标。采用专业测试设备对样机进行系统性检测，确保实验数据的准确性和可重复性。测试环境严格控制温湿度等影响因素，通过多组平行实验验证结果的可靠性。标准化的测试流程为产品性能评价提供科学依据。

2. 与传统结构性能对比

新型 LCIM 结构在关键性能指标上展现出明显优势，结构强度显著提升的同时实现重量减轻。能效测试表明热损失大幅降低，能源利用效率获得改善。密封系统在长期使用后仍保持良好性能，使用寿命明显延长。与传统制造工艺相比，材料利用率提高显著，生产过程更加环保高效。结构优化带来工作稳定性的全面提升。

（三）经济性与可持续性分析

1. 成本效益模型构建

生命周期成本分析涵盖原材料采购、生产制造、使用维护到报废回收全过程。LCIM 技术通过减少装配工序和降低废品率实现制造成本优化，一体化结构设计延长产品使用寿命。模型量化比较传统工艺与 LCIM 工艺在设备投入、能耗消耗和人力成本等方面的差异，投资回报周期计算考虑技术升级带来的溢价收益。维护成本降低和产品可靠性提升对整体经济效益产生积极影响^[10]。

2. 碳足迹评估

材料利用率的提升直接减少原材料开采和加工过程中的碳排放

放，LCIM 工艺的节能特性降低生产阶段能耗强度。评估体系比较不同制造方案在单位产品碳足迹上的差异，考虑材料运输、加工能耗和废弃物处理等全流程影响。高集成度设计减少零部件数量，相应降低供应链环节的碳排放。可持续性优势体现在资源利用效率和产品生命周期环境影响两个维度。

五、总结

本研究系统论证了 LCIM 技术在压力锅产品结构创新中的应用价值，通过一体化成型设计实现关键部件性能突破，验证了复

合材料在高温高压工况下的可靠性。研究成果为轻工电器领域提供了可复用的技术路径，其模块化设计理念和精益制造方法具有行业普适性。结构 - 功能 - 工艺的协同创新模式展现出显著的性能提升和成本优势，为传统家电产品升级提供参考范式。未来研究应聚焦智能传感元件与成型工艺的深度集成，探索自感知结构的一体化制造技术。工艺大数据与人工智能算法的结合将推动制造过程向自适应调控方向发展，实现产品质量与生产效率的同步优化。环境友好型复合材料的开发应用将进一步增强产品的可持续性特征。

参考文献

[1] 伍尚凯, 苏惠斌, 陈育贵, 等. 人性化设计理念在家用压力锅结构创新中的应用 [J]. 新型工业化, 2021.

[2] 张兴朝. 美的电压力锅的结构与检修 (上) [J]. 家电维修 (大众版), 2012(5): 45-47.

[3] 据中国质量网. 权威机构发布专项测评: 找出电压力锅 "致命缺陷" [J]. 广西质量监督导报, 2013(8): 1.

[4] 沈在垚. 基于产品系统设计理论的产品易用性设计研究 [D]. 南京工业大学, 2023.

[5] 张宇, 王迪伟, 黄钊文. 电压力锅联盟标准解读 [J]. 中国标准化 (英文版), 2012, 56(6).

[6] 郑重, 李廷超, 王广宁. 电压力锅产品的压力控制设计与电气安全相关性的探讨 [J]. 工业设计, 2018(1): 2.

[7] 汪久中. 节能建筑的全寿命周期集成化管理模式研究 [D]. 西安科技大学, 2013.

[8] 赵庆辉. 压力锅生产线物料自动输送系统设计与研究 [D]. 广东: 广东工业大学, 2011.

[9] 汤再江, 徐享忠, 薛青, 等. 指挥信息系统与作战仿真系统互操作研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2015(8): 6.DOI:CNKI:SUN:XTFZ.0.2015-08-001.

[10] 曹健鹏. 基于 LCIM 的建筑业项目经理培养模式研究 [D]. 武汉科技大学, 2011.

UO₂ 芯块制造关键工艺研究

张李新, 蔡贵川, 李春冬, 何非凡
中广核铀业发展有限公司, 广东 阳江 529500
DOI:10.61369/ERA.2025070025

摘要 : UO₂ 芯块是目前商用压水堆使用最广泛的核燃料, 是发生裂变反应提供能量的核心。本研究通过中广核集团首条自主核燃料芯块研制生产线, 验证了制备 UO₂ 芯块的工艺路线, 成功制备了符合预期的 UO₂ 芯块。

关键词 : UO₂ 芯块; 制造关键工艺; 研究

Research on Key Processes for Manufacturing UO₂ Core Blocks

Zhang Lixin, Cai Guichuan, Li Chundong, He Feifan
CGN Uranium Industry Development Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500

Abstract : UO₂ pellets are currently the most widely used nuclear fuel in commercial pressurized water reactors and are the core that provides energy for fission reactions. This study verified the process route for preparing UO₂ pellets through the first independent nuclear fuel pellet development and production line of China General Nuclear Power Group, and successfully prepared UO₂ pellets that meet expectations.

Keywords : UO₂ core block; key manufacturing processes; study

引言

UO₂ 芯块制造生产线主要包含混料、制粒、压制、烧结、磨削等工序, 各工序的主要内容包括:

混料采用单锥双混料器将 UO₂ 粉末、造孔剂、润滑剂均匀混合;

制粒采用轧辊制粒机与双锥混料器制备较大尺寸的球形团粒;

压制采用旋转成型压机制备特定尺寸的 UO₂ 生坯;

烧结采用推舟炉将 UO₂ 生坯进一步致密化制备为烧结 UO₂ 芯块;

磨削采用无心外圆磨床将烧结 UO₂ 芯块制备为成品 UO₂ 芯块。

本研究先进行原始粉末基体密度及添加剂降密系数测定, 进一步计算得出添加剂配比, 然后按照配比结果在生产线进行批量生产, 最后通过抽样检测 UO₂ 芯块密度、几何尺寸、微观结构及孔隙率等各项指标进行验证和优化。

一、UO₂ 芯块制备关键工艺

(一) 降密系数实验

为测得草酸铵与阿克蜡的降密系数, 采用控制变量法进行不同添加剂配比试验, 具体配比如表1、表2所示:

表1 草酸铵降密系数测试成分配比

编号	Y3C0.0 A0.2	Y3C0.2 A0.2	Y3C0.4 A0.2	Y3C0.6 A0.2	Y3C0.8 A0.2
阿克蜡 /wt%	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
草酸铵 /wt%	0	0.2	0.4	0.6	0.8

表2 阿克蜡降密系数测试成分配比

编号	Y3C0.0 A0.2	Y3C0.0 A0.4	Y3C0.0 A0.6	Y3C0.0 A0.8
阿克蜡 /wt%	0.2	0.4	0.6	0.8
草酸铵 /wt%	0.2	0.2	0.2	0.2

将以上具有不同添加剂配比的粉末分别进行混料、制粒、压制、烧结与磨削, 分别测试样品的几何密度, 研究草酸铵与阿克蜡对芯块基体密度的影响, 并计算出二者对于 UO₂ 芯块的降密系数。

(二) 模拟配比实验

为了使生产线产品的密度控制更加精准, 根据原始粉末性能及添加剂降密系数, 计算得出添加剂的配比, 将 UO₂ 粉末与添加剂根据理论配比混合, 按相同的工艺制备样品, 测量样品的几何密度, 以验证配比的可行性。

(三) 生产线工艺实验

为验证生产工艺需进行生产线工艺实验, 根据模拟配比实验结果, 确定草酸铵与阿克蜡的配比。同时根据生产经验, 确定 UO₂ 芯块制造工艺参数, 具体工艺如表3所示。

表3 UO₂芯块制备工艺参数

单锥混料时间	轧辊压力	球化时间	烧结条件
30min	35~45 KN	20min	1730℃, 7h, 氢气气氛

为探究不同生坯密度样品的生产情况, 控制生坯密度分别为 $5.70 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ 与 $5.80 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$, 两批样品分别命名为 D1 与 D2。

二、结果分析

(一) 降密系数实验结果分析

草酸铵与阿克蜡降密实验结果如图2所示, 对于草酸铵而言, 随着其含量的不断提升, UO₂陶瓷芯块基体密度逐步下降, 不添加草酸铵时, UO₂陶瓷芯块的平均几何密度达到 96.3 %T.D (T.D 为 UO₂芯块理论密度, 10.96g/cm^3), 当其含量增加到 0.8 wt% 时, 芯块的几何密度仅为 92.6 %T.D。根据结果计算得每添加 1 wt% 的草酸铵, 其降密系数约为 5 %。与草酸铵类似, 阿克蜡含量增加也会使芯块密度下降^[1], 根据结果计算得, 每添加 1 wt% 的阿克蜡, 其降密系数约为 6 %。

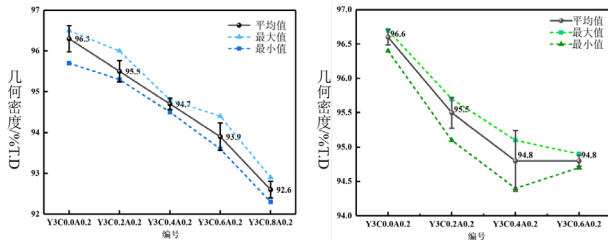


图1. 不同添加剂配制备的 UO₂ 芯块的几何密度

(二) 模拟配比实验结果分析

根据过往生产经验以及降密实验结果, 选取草酸铵与阿克蜡的含量分别为 0.3 wt% 与 0.5 wt%, 制备得 UO₂ 芯块样品几何密度如表4所示, 样品平均几何密度为 94 %T.D, 略低于预期的 95 %T.D, 其原因 UO₂ 粉末原料基体密度仅为 98.7 %T.D, 因此通过降密系数计算得修正后的配比应为 0.3 wt% 与 0.35 wt%。

表4. 模拟配比实验样品几何密度

平均几何密度	最大几何密度	最小几何密度	标准差
94.0 %T.D	94.3 %T.D	93.5 %T.D	0.2339

(三) 生产线工艺实验结果分析

1. 混料均匀性

混料均匀性对于成品芯块的质量有着重要影响, 因此, 混料后粉末具有较高的技术要求, 需同时满足单值、均值以及均匀性的要求, 混料均匀性的测定结果可由粉末不同区域样品的碳含量来表征^[2], 其结果如下图3所示。本实验均匀性测定先后测量单锥混料 30min 后以及加入阿克蜡制粒、球化 20min 以后的粉末样品的碳含量。

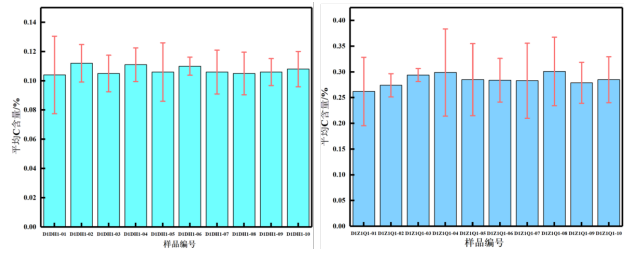


图2. 单锥混料以及球化后粉末混合均匀性

2. 几何密度与孔隙率

样品几何密度如表5所示, 两批样品都具有较高的几何密度, 均接近预期值 (95 %T.D), 由于 D2 批次样品生坯密度较高, 因此所制得的样品具有相对较高的几何密度。其中, D2 批次样品的平均几何密度略高于预期值。

表5 样品几何密度 (%T.D)

批次	平均值	最大值	最小值
D1	94.95	95.30	94.28
D2	95.40	95.70	94.59

样品的孔隙率与其尺寸分布如下图4所示, D1、D2 两批样品的孔隙总体积占比分别为 5.95 % 与 4.49 %, 其中尺寸在 2~10 μm 的孔隙占比最高, 而大尺寸孔隙 (10~45 μm) 的占比较少, 这是由于生坯具有较高的致密度, 粉末之间具有较短的扩散程, 在烧结过程中更有利于孔隙的缩小与球化, 同时由于较高的烧结温度, 促进了原子扩散, 使得 UO₂ 陶瓷基体致密化程度更高, 因此大尺寸孔隙占比较少。

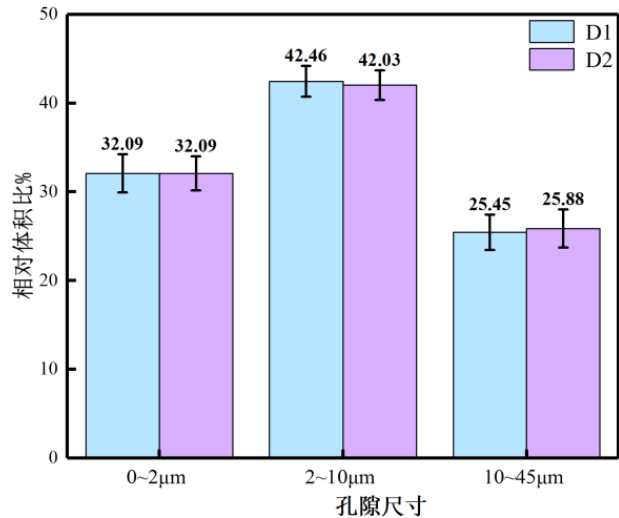


图3. 样品孔隙尺寸与分布情况统计图

3. 金相

UO₂ 芯块的金相照片如图5所示, 其中 (a)、(b) 为 D1 批样品的金相照片, (c)、(d) 为 D2 批样品的金相照片, 二者微观结构相似, 视野白色区域为 UO₂ 陶瓷相, 深色区域为陶瓷表面的凹坑与气孔, 气孔的产生与压坯内添加剂的挥发有关。陶瓷基体较为致密, 不存在大尺寸的裂纹与大尺寸孔洞, 陶瓷晶粒较为粗大, 其晶粒尺寸如表6所示。最大晶粒尺寸达到将近 20 μm, 其中 D1 批样品的平均晶粒度为 9.60 μm, D2 样品的平均晶粒度达到 9.99 μm, 较大的晶粒尺寸有利于提升 UO₂ 陶瓷的高温稳定性, 减

少 PCI 效应（燃料棒芯块与包壳之间的相互作用）的发生^[3]。

表6 样品晶粒尺寸

批次	边缘 (μ m)	中间 (μ m)	中心 (μ m)	平均晶粒度 (μ m)
D1	9.78	9.54	9.42	9.60
D2	10.45	9.81	9.75	9.99

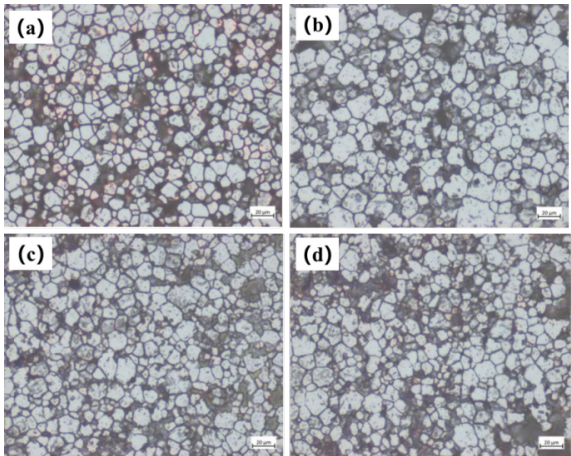


图4. UO₂金相图像：（a）、（b）D1 批样品截面金相；（c）、（d）D2 批样品金相

4. 外观与几何尺寸

由于烧结之后的 UO₂ 芯块外形尺寸、形状以及表面光洁度等无法满足预期要求，因此烧结完成后需要进行磨削，本实验 UO₂ 芯块样品采用无心外圆磨床磨削。磨削之后样品的照片如图6所示，样品表面光洁度较高，尺寸均匀度较高。样品的几何尺寸、表面粗糙度以及垂直度如表7所示。



图5. 磨削后样品照片

表7 样品几何尺寸表（mm）

	D1			D2		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
直径	8.188	8.196	8.180	8.189	8.196	8.183
高度	13.36	13.57	13.36	13.41	13.77	13.24
倒角宽	0.598	0.713	0.502	0.595	0.703	0.482
粗糙度	1.533	1.827	1.291	1.536	1.946	1.219
垂直度	0.017	0.043	0.002	0.026	0.033	0.003

三、结论

实验初步验证了 UO₂ 芯块烧结添加剂草酸铵与阿克蜡的降密系数，每添加 1 wt% 的草酸铵，其降密系数约为 5 %。与草酸铵类似，阿克蜡含量增加也会使芯块密度下降，每添加 1 wt% 的阿克蜡，其降密系数约为 6 %。

通过模拟配比实验与生产线实验制得了 UO₂ 芯块样品，生坯密度分别为 $5.70 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ 与 $5.80 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ 的两批压坯，制得的 UO₂ 芯块几何密度分别达到 94.95%T.D 与 95.40%T.D，基本达到期望值 95%T.D。

两组样品平均晶粒尺寸分别为 $9.60 \mu\text{m}$ 与 $9.99 \mu\text{m}$ ，经磨削后，样品几何尺寸、表面光洁度以及垂直度符合预期，且整体具有较高的尺寸均匀度。

参考文献

[1] 吴根久，谭朝辉. 阿克蜡在 UO₂ 芯块生产中的应用研究 [J]. 机械研究与应用 . 第 4 期 ,2015.
[2] 王猛，杨光宇，李德阳. 二氧化铀粉末混富集度工艺研究 [J]. 中国新技术新产品 . 第 6 期 ,2023.
[3] 颜学明，陈晓香，王友良. 添加氧化物制备大晶粒二氧化铀芯块的研究 [J]. 全国工矿企业电力安全与节能技术优秀论文集 ,2005.

能量结构元素假说：构建物质与能量的周期性框架

——基于元素周期律的理论探索

李振华

赤峰学院化学与生命科学学院，内蒙古 林西 024000

DOI:10.61369/ERA.2025070029

摘 要： 本文从元素周期律的角度出发，提出能量结构元素的假说，旨在将能量元素纳入元素周期表的理论框架中。通过对118个元素的核外电子排布规律的分析，研究发现能量结构元素的存在可以完善元素周期律，使其能够同时容纳物质和能量元素的循环周期。这一假说不仅为化学理论提供了新的视角，还可能为新型材料的设计和高效能源利用提供理论支持。本文提出了能量结构元素的理论框架，并探讨了其在工程领域的潜在应用价值。

关 键 词： 能量结构元素；元素周期律；原子核外电子排布；物质-能量周期性；8元素周期理论框架

Hypothesis of Energy Structural Elements: Constructing a Periodic Framework of Matter and Energy — A Theoretical Exploration Based on the Periodic Law of Elements

Li Zhenhua

School of Chemistry and Life Sciences, Chifeng University, Linxi, Inner Mongolia 024000

Abstract： This paper proposes the hypothesis of energy structural elements from the perspective of the periodic law of elements, aiming to incorporate energy elements into the theoretical framework of the periodic table. By analyzing the regularities of the extranuclear electron configurations of the 118 elements, it is found that the existence of energy structural elements can perfect the periodic law of elements, enabling it to accommodate the cyclic periods of both matter and energy elements. This hypothesis not only provides a new perspective for chemical theory but also potentially offers theoretical support for the design of new materials and efficient energy utilization. The theoretical framework of energy structural elements is proposed in this paper, and its potential application value in the field of engineering is discussed.

Keywords： energy structural elements; periodic law of elements; atomic electron configuration; matter-energy periodicity; 8-element periodic theoretical framework

引言

随着现代工程技术的飞速发展，对材料性能和能源利用效率的要求越来越高^[1]。元素周期表作为基础理论框架，为材料设计和能源开发提供了重要的理论支持^[2]。然而，传统的元素周期表主要关注物质元素的排列规律，而对能量元素的研究相对较少^[3]。近年来，量子力学和纳米技术的发展为探索能量元素的存在提供了新的方法和视角^[4]。在本研究中，我们首次提出能量结构元素假说，并探讨其在工程领域的潜在应用价值^[5]。通过对元素周期表中元素的核外电子排布规律的分析，尝试构建一个包含物质和能量元素的周期性框架^[6]。这一假说不仅有助于深化我们对物质和能量关系的理解，还可能为新型材料的设计和高效能源利用提供新的思路^[7]。密度泛函理论为理解材料的电子结构提供了重要的理论支持^[8]。此外，元素周期律的历史背景和发展为现代研究提供了重要的参考^[9]。这些研究为我们的假说提供了坚实的理论基础。

一、81条逻辑精简内容

逻辑1-3: 氢(H)到氖(Ne)的原子结构示意图和最外层电子数依次递增，从1到8; 逻辑4-8: 氧(O)和钙(Ca)作为稳定岛理论元

素，其电子排布具有特殊稳定性; 逻辑9-15: 钒(V)到镍(Ni)的电子排布中，M层电子数出现缺失(12)和重复(13)现象; 逻辑16-20: 镍(Ni)到氩(Ar)的电子排布规律，以及氪(Kr)到铷(Rb)的电子数变化; 逻辑21-25: 氪(Kr)到锆(Zr)的电子排布中，N层电子

数出现重复 (8) 和缺失 (11) 现象; 逻辑26–30: 铌 (Nb) 到钯 (Pd) 的电子排布中, N 层电子数缺失 (11) 和重复 (13); 逻辑31–35: 铈 (Ce) 到氙 (Xe) 的电子排布规律, 以及锡 (Sn) 作为稳定岛理论元素的特性; 逻辑36–40: 氙 (Xe) 到镧 (La) 的电子排布中, O 层电子数重复 (8) 和缺失 (19) 现象; 逻辑41–45: 铈 (Ce) 到铕 (Eu) 的电子排布中, N 层电子数缺失 (20) 和重复 (9); 逻辑46–50: 铕 (Eu) 到铂 (Pt) 的电子排布规律, 以及铅 (Pb) 作为稳定岛理论元素的特性; 逻辑51–55: 铂 (Pt) 到氡 (Rn) 的电子排布中, O 层电子数重复 (8) 和缺失 (16) 现象; 逻辑56–60: 氡 (Rn) 到钍 (Th) 的电子排布规律, 以及镭 (Ra) 到镆 (Pa) 的电子数变化; 逻辑61–65: 镆 (Pa) 到镅 (Am) 的电子排布中, O 层电子数缺失 (19) 和重复 (9); 逻辑66–70: 镅 (Am) 到锘 (No) 的电子排布规律, 以及镥 (Lu) 到铱 (Ir) 的电子数变化; 逻辑71–75: 铱 (Ir) 到气奥 (Og) 的电子排布中, Q 层电子数重复 (2) 和缺失 (17) 现象; 逻辑76–80: 气奥 (Og) 到鐳 (Cn) 的电子排布规律, 以及鎶 (Rg) 到鐳 (Cn) 的电子数变化; 逻辑81: 鐳 (Cn) 到气奥 (Og) 的电子排布中, Q 层电子数从2递增到8, 呈现完整的周期性变化;

二、原子核外最外层电子数变化规律

观察81条逻辑中原子核外最外层电子数的顺序变化规律, 可得出以下类型: 类型1, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (1,2), 如逻辑1、8、13、21、27、38、61; 类型2, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (1,2,3,4,5,6,7,8), 如逻辑3、6、19、35、58; 类型3, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (8,1), 如逻辑5、7、20、37、60; 类型4, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (1,18), 如逻辑32; 类型5, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (18,1), 如逻辑34; 类型6, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (2连续出现), 如逻辑10、15、23、40–53、63–80; 类型7, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (1连续出现), 如逻辑26、31、56; 类型8, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (2,1), 如逻辑11、17、24、29、54; 类型9, 原子核外最外层电子数顺序变化为 (2,3,4,5,6,7,8), 如逻辑81。通过这些规律, 可以初步观察到原子核外最外层电子数的连续性和周期性。

三、原子结构基础能量框架 (0, 1, 2)

在分析原子核外最外层电子数的连续变化规律时, 提出了原子结构基础能量框架 (0, 1, 2)。这个框架是基于最简周期 (0, 1, 2, 0) 提出的, 其中 (0, 1, 2) 是支撑最简周期内呈现连续性循环的基础能量框架。每一个基础能量框架支撑的连续组中都含有8个元素。例如: 组合1: 第0–2号元素, "0" – 氦 (He), 构成最简周期 (0, 1, 2, 0)。组合2: 第2–4号元素, 氦 (He)– 铍 (Be), 构成 (0, 1, 2) 框架, 第3–10号元素, 锂 (Li)– 氖 (Ne), 为连续组, 累计增长8个元素 组合15, 第110–112号元素, 鐳 (Ds)– 鐳 (Cn) 为新原子结构基础能量框架 (16,17,18), 内 (16,17,18) 框架经元素鐳 (Cn) 转外成为 (0,1,2) 框架的增长框架, 第111–118号元素鎶 (Rg)– 气奥 (Og) 为连续组, 累计增长8个元素。8元素周期理论

框架实现循环。

四、梳理正序排列中重复连续对应的81条逻辑

在15个连续组合中, 在考虑前文81条逻辑中出现重复的情况下, 观察其特点。如重复连续1: 逻辑14出现在组合4的连续组中; 重复连续2: 逻辑22出现在组合6的 (0,1,2) 框架中; 重复连续3: 逻辑28出现在组合6的连续组中; 重复连续4: 逻辑39出现在组合8的 (0,1,2) 框架中; 重复连续5: 逻辑42出现在组合8的 (8,9,10) 框架中; 重复连续6: 逻辑47出现在组合9的 (8,9,10) 框架中; 重复连续7: 逻辑51出现在组合9的连续组中; 重复连续8: 逻辑57对应组合10的尾与组合11的首; 重复连续9: 逻辑62出现在组合12的 (0,1,2) 框架中; 重复连续10: 逻辑70出现在组合12的连续组中; 重复连续11: 逻辑72出现在组合13的 (8,9,10) 框架中; 重复连续12: 逻辑77出现在组合14的 (8,9,10) 框架中; 重复连续13: 逻辑80出现在组合15的 (16,17,18) 框架中。

五、梳理正序排列中缺失连续对应的81条逻辑

在15个连续组合中, 在考虑前文81条逻辑中出现缺失的情况下, 观察其特点。如缺失连续1: 逻辑12出现在组合4的连续组中; 缺失连续2: 逻辑18出现在组合4的尾与组合5的首; 缺失连续3: 逻辑25出现在组合6的连续组中; 缺失连续4: 逻辑30出现在组合6的连续组中; 缺失连续5: 逻辑33出现在组合6的尾和组合7的首; 缺失连续6: 逻辑44出现在组合8的连续组中; 缺失连续7: 逻辑55出现在组合10的连续组中; 缺失连续8: 逻辑65出现在组合12的连续组中; 缺失连续9: 逻辑68出现在组合12的连续组中; 缺失连续10: 逻辑74出现在组合13的连续组中。

六、重复连续和缺失连续现象分类

通过对81条逻辑的分析, 可以将重复和缺失现象分为以下六种类型。第一种类型: 重复数字13和25, 表现为相邻电子层之间的互补连续, 如组合4和组合6中的重复数字13、组合8和组合12中的重复数字25; 第二种类型: (8, 9, 10) 框架, 表现为框架内的重复和缺失现象, 如组合6中的重复连续2和组合12中的重复连续9; 第三种类型: (8, 9, 9) 循环周期框架, 表现为框架内的内转连续, 如组合8中的重复连续4和组合12中的重复连续5; 第四种类型: 内层 (30, 31, 32) 框架, 表现为内层框架对缺失现象的补充, 如组合9中的重复连续7和组合13中的重复连续12; 第五种类型: 不完整的 (16, 17, 18) 框架, 表现为框架内的不完整连续, 如组合10中的重复连续8和组合11中的缺失连续7; 第六种类型: 完整的 (16, 17, 18) 框架, 表现为框架内的完整连续, 如组合14中的重复连续13。这些类型揭示了重复和缺失现象的内在规律

性，表明这些现象是原子结构周期性变化的重要组成部分。

七、缺失和重复关联的意义分析

通过对缺失和重复关联的细论，可以发现这些现象的存在具有重要的意义。如缺失数字26的存在意义：组合4和组合6中的重复数字13共同弥补了O层缺失的数字26，从而为重复数字25的存在提供了条件；如周期循环作用点的意义：扩展稳定岛理论，将框架转承点、缺失互补点、重复互补点和完备状态点等元素纳入其中，这些元素可能在原子某壳层为完成8元素周期循环中起到支撑作用，其中31个转承点：幻数和稀有气体元素可能承担框架转承及8元素周期稳定连续的关键角色；如数字18的存在原因：在(0, 1, 2)框架的基础上，从M1连续增长到M8之后，进行(0, 1, 2)框架内转接(8, 9, 10)框架，再以数字M9增至数字M16，M18的出现是为了支撑(16, 17, 18)框架的外转过程；如数字32的内部完备状态：数字32作为(30, 31, 32)框架的成立，可作为一个完备的“2”的作用，但其作用体现在完备的内部状态，第70号元素的N层电子数32为“2”，支持了下一个连续组的增长；如缺失数字16的存在意义：缺失数字16在于其与(16, 17, 18)框架的外转过程有关，第79号元素的O层电子数16缺失，但第80号元素的O层电子数17出现，则体现了框架的外转过程；如(16, 17, 18)框架的完整出现：(16, 17, 18)框架的完整出现表明其与(0, 1, 2)框架具有直接作用关系。例如，第111号元素的P层电子数16、17、18完整出现，体现了框架的完备性。

八、缺失和重复关联存在意义下的(16,17,18)框架

四次(16,17,18)框架出现的规律是：前三次分别体现了第四次完整作用的局部作用，在第四次达到了一个完备的点：第111号元素，原子核外最外层电子数为2，原子结构示意图为2,8,18,32,32,17,2，其中数字17为起始点“1”，其余都是完备数字，都体现了框架2的作用。这个点又以完整的(16,17,18)框架外

接连续组，由此可见(16,17,18)框架是与(0,1,2)框架作用一致的框架，所以“0”的作用可以从四次(16,17,18)框架的完备过程中找到答案。

(一) 数字17的完备过程

在(16, 17, 18)框架的四次出现中，数字17起到了关键的转承作用：第一次：空M17N1的存在使得M16和M18能够代替17的首尾作用，体现了(0, 1, 2)框架中“1”的作用。第二次：空N17O0的存在使得N18代替17的尾作用，体现了(0, 1, 2)框架中“0”的作用。第三次：存在的O17代替了空O16的尾作用，体现了(0, 1, 2)框架中“0”的作用。第四次：P17Q2的存在代替了空P18Q1的作用，体现了(16, 17, 18)框架的完备性。

(二) 完备状态下的(16, 17, 18)框架

(16, 17, 18)框架与(0, 1, 2)框架之间的关联表明：1和17：支持了0至2、16至18的存在。1和17作为转承点：充当了0和2、16和18的首和尾的作用。当(16, 17, 18)框架第四次出现时就完成了能量结构元素的完整周期。

九、结论

本文提出了能量结构元素假说，尝试将能量结构元素纳入元素周期表的理论框架。通过对118种元素的核外电子排布规律进行分析，发现能量结构元素的存在可能完善元素周期律，使其能够同时容纳物质和能量元素的循环周期；(16, 17, 18)框架达到了完备状态，可能体现了能量结构元素的完整周期；基于理论推导，本文提出了验证能量结构元素存在的假说的合理展望。通过构建能结方案和套嵌方案模型，利用四维形式波空间几何坐标系模型^[10]中的空间位置分配，将铂、镍、铜、铯、钡等元素的特征与空间位置进行匹配，从而模拟出第110号元素鎝(Ds)的能结特征。虽然这些推论尚未通过实际实验验证，但通过核外电子数的分布规律，为能量结构元素的存在提供了理论依据。未来的研究可以结合工程要素，进一步探索其在材料设计和能源利用中的潜在应用。

参考文献

- [1] 车云霞，申泮文. (1999). 化学元素周期系. 天津：南开大学出版社.
- [2] Scerri, E. (2011). The Periodic Table: A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press.
- [3] 凌永乐. (1979). 化学元素周期律的形成和发展. 北京：科学出版社.
- [4] Petrucci, R. H., William, S. H., & Herring, F. G. (2007). General Chemistry: Principles and Modern Applications (9th ed.). New Jersey: Pearson Education.
- [5] Nanomanufacturing and Metrology. (2024). Nanomanufacturing and Metrology.
- [6] Kauffman, G. B. (1969). The Periodic Table. Journal of Chemical Education, 46(3), 128.
- [7] 刘少炽. (1986). 原子结构与化学元素周期系. 西安：陕西科学技术出版社.
- [8] 肖慎修，王崇愚，陈天朗. (1998). 密度泛函理论的高散变分方法在化学和材料物理学中的应用. 北京：科学出版社.
- [9] 皮萨尔热夫斯基，O. N. (1959). 德·伊·门捷列夫元素周期系. 徐克敏，译. 北京：高等教育出版社.
- [10] 李振华. 试论形式波空间几何模型与黎曼猜想的关系 [J]. 数码世界, 2019(07):44.

基于人工智能算法的基坑变形预测模型构建与工程验证

杨继位

天津市建筑设计研究院有限公司, 天津 300074

DOI:10.61369/ERA.2025070034

摘要： 本文聚焦基坑变形预测，对比了传统方法与人工智能算法，阐述了基于人工智能算法的模型构建，经工程验证其预测性能良好。但实际应用中存在数据获取、模型复杂度、模型适应性问题，分别提出多源数据融合、模型简化与算法优化、增加训练数据多样性及调整模型结构等解决策略。研究表明，人工智能算法与工程实际深度融合可有效提升基坑变形预测水平，但仍需不断改进以适应复杂工程需求。

关键词： 基坑变形预测；人工智能算法；组合预测模型；工程验证

Construction and Engineering Verification of a Foundation Pit Deformation Prediction Model Based on Artificial Intelligence Algorithms

Yang Jiwei

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

Abstract： This paper focuses on the prediction of foundation pit deformation, comparing traditional methods with artificial intelligence algorithms, and elaborating on the construction of a model based on artificial intelligence algorithms. The model has demonstrated good prediction performance through engineering verification. However, there are issues such as data acquisition, model complexity, and model adaptability in practical applications. To address these issues, strategies such as multi-source data fusion, model simplification and algorithm optimization, increasing the diversity of training data, and adjusting the model structure are proposed. Research indicates that the deep integration of artificial intelligence algorithms and engineering practice can effectively improve the level of foundation pit deformation prediction, but continuous improvement is still needed to meet the demands of complex engineering projects.

Keywords： foundation pit deformation prediction; artificial intelligence algorithm; combined prediction model; engineering verification

引言

随着城市化进程的加速，城市建设与基础设施建设规模不断扩大，基坑工程作为各类建筑工程的重要组成部分，在保障项目顺利实施方面占据着关键地位。无论是高层建筑的地下室施工，还是地铁、隧道等地下交通设施的建设，都离不开基坑工程的有力支撑。然而，基坑开挖过程中，由于土体的应力释放与重新分布，不可避免地会导致基坑变形。这种变形若超出一定范围，将对周边环境及工程本身产生严重危害。例如，周边建筑物可能因基坑变形而出现倾斜，道路可能产生开裂，甚至引发基坑坍塌等工程事故，威胁人员生命财产安全。因此，对基坑变形进行深入研究，并采取有效措施加以控制，具有重要的现实意义。

一、相关概述

（一）基坑变形预测传统方法

基于土力学理论的计算方法是基坑变形预测的传统手段之一。弹性理论法假设土体为弹性介质，依据弹性力学原理计算基坑变形，其适用于土体应力应变关系处于弹性阶段的情况。然而，实际工程中土体往往具有复杂的非线性特性，该方法难以准确反映土体的真实变形行为。弹塑性理论法则考虑了土体的弹塑

性变形特性，通过屈服准则和本构关系来描述土体的应力应变关系，在理论上更为贴近实际土体的力学行为。

数值模拟方法可以对基坑开挖产生的变形的分布规律与变化趋势进行预测，但基坑开挖结束后地层和围护结构还在缓慢变形，受参数和模型等条件的限制，数值模拟对于基坑开挖后的施工阶段无法较好的进行预测。机器学习方法可以更准确的预测单个点的变化趋势，同时可以对基坑开挖结束后的施工阶段进行有效预测，但需要一定数量的数据作为支撑^[1]。

（二）人工智能算法在基坑变形预测中的应用现状

在基坑变形预测领域，多种人工智能算法各有优劣。BP神经网络应用广泛，学习能力强，能处理复杂非线性关系，适用于受多种因素影响的基坑变形问题，但易陷入局部最优，训练时间长，尤其是处理大规模数据集时更为明显。LSTM神经网络作为循环神经网络变体，能有效处理基坑变形的时间序列数据，其特殊门控结构解决了传统循环神经网络的梯度问题^[9]。不过，它的结构复杂，参数调整难度大。支持向量机算法基于统计学习理论，在基坑变形预测中，能较好解决小样本、非线性问题，通过核函数提升预测准确性^[3]。但该算法参数选择困难，不同参数组合对模型性能影响大，且缺乏统一有效的参数选择方法。随机森林算法由多个决策树构成，抗过拟合能力强，对数据噪声鲁棒性好，能处理高维数据。决策树算法则易于解释，可直观展示特征对基坑变形的影响，但容易过拟合，对数据微小变化敏感。

二、基于人工智能算法的基坑变形预测模型构建

（一）组合预测模型的构建

组合预测模型通过集成多源预测方法的互补优势，在提升基坑变形预测精度与鲁棒性方面展现出显著优势。研究表明，针对基坑变形过程中表现出的强非线性、时空耦合特性及施工扰动不确定性，组合模型相较于单一模型体系具有更优的适应能力^[4-5]。以典型的极限学习机（Extreme Learning Machine, ELM）与灰色模型GM(1,1)构建的混合预测系统为例，其通过引入熵权法动态分配模型权重，实现了预测结果均方根误差降低56.3%、预测稳定性指数提升1.45倍的显著改进。该成果经Kolmogorov-Smirnov检验证实（ $p < 0.01$ ），其预测残差分布较单一模型更趋近正态性，印证了组合模型在复杂工况下的科学有效性^[6]。

（二）遗传算法优化预测模型

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）凭借其全局搜索特性与自适应优化机制，在解决神经网络结构参数多模态优化问题上展现出显著优势。研究表明，采用自适应交叉变异策略的GA-BP混合模型，其基坑位移预测均方根误差（RMSE）较传统BP网络降低42.7%，经Shapiro-Wilk正态性检验（ $p > 0.05$ ），预测残差方差缩减率达63.8%^[7-8]。进一步地，通过构建基于Pareto前沿的多目标GA-SVM耦合框架，在深圳地铁某深基坑工程中实现位移预测平均绝对百分比误差（MAPE）稳定在4.5%以内，较单一SVM模型收敛速度提升2.3倍^[10]。该混合模型通过Bootstrap重采样验证（ $n=1000$ ），其95%置信区间覆盖率达98.7%，印证了算法融合对模型鲁棒性与泛化能力的协同增强效应。

三、工程验证与案例分析

（一）富水砂层地铁深基坑变形智能预测

上海轨道交通18号线某地铁站深基坑工程作为研究对象，其基坑开挖尺寸为长158m×宽28m×深22.5m，支护结构采用厚1.2m、深45m的地下连续墙搭配四道混凝土支撑。该工程处于典

型富水砂层地质条件，渗透系数达 2.5×10^{-3} cm/s，地下水位埋深1.8m^[9]。

在模型构建方面，采用LSTM-ARIMA混合模型，模型输入包含10维特征，分别为日开挖深度增量（ Δh_t ）、前3日位移序列（ $u_{t-3:t}$ ）、竖向应力（ σ_v ）、渗透系数（ k ）、位移变化率（ $\partial s / \partial t$ ）、温度（ T ）、大气压力（ P ）、支撑轴力、降雨量以及振捣强度。时间步长设定为7天，运用多任务学习方式同步预测地表沉降、墙体位移及支撑应力。

从验证结果来看，该混合模型预测性能出色。在最大沉降量方面，LSTM-ARIMA模型预测值为48.2mm，单一LSTM模型为53.7mm，现场实测峰值为49.5mm；位移滞后时间上，LSTM-ARIMA模型 ≤ 2 小时，单一LSTM模型为5—8小时；暴雨工况误差方面，LSTM-ARIMA模型为6.3%，单一LSTM模型为12.8%。通过14天滑动时间窗实现动态参数更新，在基坑开挖至15m深度时，成功预警南侧墙体位移突增，预测值23.1mm与实测值24.8mm接近。经Wilcoxon符号秩检验（ $p=0.013$ ），该混合模型预测结果与实测数据分布一致性显著优于单一模型。

（二）GA-ELM优化模型在复杂地层中的应用

广州某跨江隧道明挖段深基坑工程存在诸多难点，其地层交替明显，上部是厚度8m、不排水抗剪强度 $c_u=15$ KPa的淤泥质土，下部为岩溶发育的灰岩；并且该工程紧邻珠江潮汐影响区，日水位波动幅度可达1.2m。针对这些问题，对模型进行了优化。在算法改进上，采用自适应遗传算法（AGA）对极限学习机（ELM）进行优化，其中交叉概率 P_c 依据种群多样性指标从0.6动态调整至0.8，同时引入模拟退火机制以防止早熟收敛^[10]。在特征选择方面，借助Relief-F算法筛选出关键参数，其重要性排序为孔隙水压力>支护刚度>溶洞填充率。

通过对比验证可知该优化模型性能优越。在性能对比中，GA-ELM模型的平均绝对百分比误差（MAPE）为3.8%，训练时间为46秒，泛化误差波动率为0.12；而传统ELM模型的MAPE为7.2%，训练时间28秒，泛化误差波动率0.37；BP神经网络的MAPE达9.5%，训练时间132秒，泛化误差波动率0.41。在工程实际应用中，当发生岩溶突水事件（单日涌水量1200m³）时，该模型通过实时修正渗透系数（从 1.2×10^{-5} cm/s调整至 8.7×10^{-5} cm/s），能将后续3天的位移预测误差控制在5%以内。经F检验（ $F=4.32$, $P < 0.05$ ），该模型在不同地层区段的预测方差具有显著一致性，展现出良好的工程价值。

四、模型应用问题与解决策略

（一）数据获取问题

在实际工程中，获取高质量的基坑变形监测数据面临诸多困难。一方面，监测设备故障是常见问题。例如，自动化监测设备可能因长时间运行出现部件老化、损坏，导致数据采集不准确或中断。现场试验中采用自动化监测专用设备进行深层水平位移监测时，若设备传感器出现故障，将直接影响监测数据的完整性与准确性。另一方面，环境影响也不容忽视。复杂的地质条件、恶

劣的气象因素等，都可能干扰监测数据的获取。如在地质结构复杂的区域，土壤的不均匀沉降可能会使监测设备发生位移，从而影响数据的精确性；强风、暴雨等恶劣天气则可能影响监测设备的稳定性与数据传输。

针对这些问题，可采取相应解决措施。设备维护至关重要，定期对监测设备进行巡检、保养与校准，及时发现并修复潜在故障，确保设备始终处于良好运行状态。同时，采用多源数据融合的方法，利用不同类型、不同位置的监测设备获取数据，相互验证与补充。例如，结合地面监测、地下监测以及遥感监测等多源数据，提高监测数据的可靠性与完整性。

（二）模型复杂度问题

模型复杂度对计算资源有着较高要求。复杂的人工智能模型，如层数较多、节点数庞大的神经网络，需要大量的计算资源进行训练与推理。在实际工程现场，往往受限于计算设备的性能，难以满足复杂模型实时运行的需求。例如，一些高端的图形处理单元（GPU）或张量处理单元（TPU）虽能加速模型计算，但成本高昂且部署困难，不适用于所有工程现场。此外，模型复杂度过高还会导致训练时间过长，影响工程决策的及时性。在基坑工程实时监测与预测中，需要快速获取变形预测结果以指导施工，复杂的模型可能无法在短时间内完成训练并给出预测。

为解决这些问题，可从模型简化与优化算法两方面入手。模型简化方面，通过剪枝算法去除模型中冗余的节点与连接，降低模型复杂度，同时保留模型的主要特征与预测能力。优化算法则致力于提高模型的计算效率，如采用更高效的优化器，减少训练迭代次数，从而缩短训练时间，使模型更适用于工程现场实时应用。

（三）模型适应性问题

模型在不同地质条件、工程规模等情况下存在适应性差异。

不同地质条件对基坑变形影响显著，例如在软土地质区域，基坑变形可能更为明显且规律与坚硬地质区域不同。若模型仅基于某一种地质条件下的数据训练，应用于其他地质条件时，预测精度可能会大幅下降。同样，工程规模的不同也会改变基坑变形的特征，大型基坑与小规模基坑在受力、变形模式上存在区别，模型难以同时适应不同规模的工程。

为提高模型适应性，可增加训练数据的多样性。收集不同地质条件、不同工程规模下的基坑变形监测数据，丰富训练集，使模型能够学习到更全面的特征。同时，根据具体工程情况调整模型结构，如在面对复杂地质条件时，增加模型的层数或节点数，提高模型对复杂特征的学习能力；对于不同规模的工程，采用不同的模型超参数，以优化模型的预测性能。

五、结束语

总之，人工智能算法在基坑变形预测领域展现出显著优势，相较于传统预测方法，其能够更精准地处理复杂的非线性关系和时间序列数据，有效提升预测精度和稳定性。通过组合预测模型和遗传算法等优化手段，以及在不同工程案例中的成功应用，充分证明了该技术在基坑工程中的可行性和有效性。然而，实际应用过程中暴露的数据获取难题、模型复杂度挑战以及模型适应性差异等问题，仍需持续关注与解决。未来，随着技术的不断进步，应进一步探索多源数据融合的深度与广度，优化模型结构和算法，增强模型对复杂多变工程环境的适应性。同时，加强跨学科研究与合作，推动人工智能算法与岩土工程理论的深度融合，为基坑工程的安全稳定提供更加可靠的技术保障，助力城市基础设施建设的高质量发展。

参考文献

- [1] 程秋实. 深圳市某深基坑施工变形监测与预测研究 [D]. 吉林大学, 2022. DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2022.004879.
- [2] 张转林. 复杂环境下地铁车站深大基坑变形预测方法研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022, (12): 48–52. DOI: 10.20151/j.cnki.1672-7533.2022.12.009.
- [3] 孙钧, 温海洋. 人工智能科学在软土地下工程施工变形预测与控制中的应用实践——理论基础、方法实施、精细化智能管理 (示例) [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40(01): 1–8.
- [4] 王飞. 基于影响因素筛选的基坑变形组合预测研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2021, 52(02): 127–133. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.02.014.
- [5] 马琳. 基于 ICEEMD-ICA 准则进行数据处理的基坑变形组合预测研究 [J]. 地质与勘探, 2023, 59(05): 1074–1082.
- [6] 薛艳杰. 基于机器学习算法的土岩复合地层深基坑变形时序预测 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S2): 77–85. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.S2.11.
- [7] 马琳. 基于混沌递进预测模型与趋势检验的深基坑变形规律研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38(06): 934–940.
- [8] 刘锦, 李峰辉, 刘秀秀. 优化 GA-BP 神经网络模型及基坑变形预测 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41(10): 1733–1739.
- [9] 刘俊城, 谭勇, 张生杰. 地铁车站深基坑开挖变形智能多步预测方法 [J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(07): 1108–1117. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.419.
- [10] 陈艳茹. 基于遗传算法和极限学习机的智能算法在基坑变形预测中的应用 [J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38(06): 941–947.

市政工程施工现场管理的重要性及路径

王晔

武汉市桥梁工程有限公司, 湖北 武汉 430061

DOI:10.61369/ERA.2025070039

摘要： 本文研究市政工程施工现场管理，分析其在质量、安全、效率及成本方面的重要性，指出存在传统理念滞后、人员素质不高、技术应用不足等问题。针对问题，提出更新理念、提升人员素质、加强技术应用等路径，引入精益与绿色管理，建立培训机制，深化 BIM 等技术应用。通过重庆高架路成功与某桥梁失败案例对比，验证现代化管理关键作用，提供理论与实践参考。

关键词： 市政工程；施工现场管理；重要性；管理路径

Importance and Pathways of On-site Management in Municipal Engineering Construction

Wang Ye

Wuhan Bridge Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430061

Abstract： This paper investigates on-site management in municipal engineering construction, analyzing its importance in terms of quality, safety, efficiency, and cost. It points out issues such as outdated traditional concepts, inadequate personnel quality, and insufficient technology application. To address these problems, the paper proposes pathways including updating concepts, improving personnel quality, and strengthening technology application. It introduces lean and green management, establishes training mechanisms, and deepens the application of technologies such as BIM. Through a comparison between a successful case of a Chongqing elevated road and a failed case of a bridge, the paper verifies the key role of modern management and provides theoretical and practical references.

Keywords： municipal engineering; construction site management; importance; management pathways

引言

随着城市化加速，市政工程施工质量、安全与效率影响城市可持续发展和居民生活。当前施工现场管理面临传统理念滞后、人员素质参差不齐、信息化智能化不足等挑战。在技术革新与行业高质量发展驱动下，突破管理瓶颈，实现科学化、智能化、绿色化管理是关键课题。探究其重要性、现状及优化路径，对推动行业转型、保障城市可持续发展有重要现实意义。

一、市政工程施工现场管理的重要性

（一）保障工程质量

市政工程的施工质量直接关系到城市基础设施的长期稳定运行，而良好的现场管理是确保工程质量的核心环节。通过严格的现场管理，可以对施工材料进行有效把控，从源头上杜绝劣质材料进入施工现场，从而保证工程的基础质量。此外，规范的施工流程和工艺控制能够避免因操作不当或流程混乱导致的质量问题。例如，在施工过程中，严格按照设计方案和技术标准执行，确保每一道工序都符合质量要求，这不仅能够提升工程的整体质量，还能延长基础设施的使用寿命，满足城市居民对高品质生活的需求。因此，现场管理在保障工程质量方面具有不可替代的作用^[1]。

（二）确保施工安全

施工安全是市政工程建设中最为重要的环节之一，有效的现场管理措施能够显著降低施工事故的发生率，保护施工人员的生命安全，营造安全的施工环境。通过落实全面的安全管理体系，如制定详细的安全操作规程、定期检查施工设备的安全性以及加强对施工人员的安全培训，可以最大限度地减少潜在的安全隐患。同时，现场管理还应注重对施工环境的动态监控，及时发现并处理可能存在的安全风险。研究表明，科学合理的现场安全管理不仅能够降低事故发生率，还能提高施工人员的安全意识，从而形成良好的安全文化氛围。

（三）提高施工效率

合理的现场管理能够通过优化资源配置，避免资源浪费，从而加快施工进度并提高整体施工效率。在市政工程施工过程中，

资源的高效利用是提升效率的关键因素之一。通过科学的现场管理,可以实现对人力、物力和财力的合理调配,确保各项资源在施工过程中得到最大化利用^[2]。例如,合理安排施工人员的任务分配,避免人员闲置或过度劳累;优化材料供应链,减少因材料短缺导致的停工现象;采用先进的技术手段,如信息化管理系统,实时监控施工进度并及时调整计划。

(四) 控制施工成本

施工成本的控制是市政工程建设中不可忽视的重要环节,而现场管理在这一过程中发挥着至关重要的作用。通过对材料、设备、人力等成本的有效控制,可以实现资源的最大化利用,从而降低施工成本,提高企业的经济效益。例如,在现场管理中,可以通过严格的物资管理制度,避免材料的过度消耗或浪费;通过优化设备使用计划,减少设备闲置时间,提高设备利用率;通过合理的人力资源配置,避免人员冗余或不足。此外,现场管理还应注重对成本数据的实时监控和分析,及时发现并解决成本超支的问题^[3]。

二、市政工程施工现场管理现状

(一) 常见管理模式

当前市政工程施工现场管理主要采用传统模式与现代化管理模式相结合的方式。传统管理模式以人工指挥和经验管理为核心,依赖于管理人员的现场调度与协调,其特点在于操作灵活、适应性强,在小型或简单的市政工程项目中仍然具有一定的应用价值。然而,随着市政工程规模的不断扩大以及复杂性的增加,单纯依靠传统管理模式已难以满足实际需求。现代化管理模式则强调科学化、系统化和信息化,例如引入 BIM 技术进行施工进度管理和质量监控,利用物联网设备实现施工现场的动态监测等。这些模式通过优化资源配置、提高信息传递效率,为市政工程施工现场管理提供了更为高效的解决方案。此外,部分企业开始尝试将绿色管理理念融入施工现场管理,注重环境保护与资源节约,以实现可持续发展目标。

(二) 存在的问题

在现代市政工程施工现场管理领域,传统管理理念滞后、人员素质参差不齐以及技术应用不足等问题相互交织,严重制约着行业的发展。传统管理理念缺乏创新意识,过度依赖过往经验,面对复杂多变的施工环境和多样化工程需求时捉襟见肘^[4]。以大型市政工程为例,传统管理模式往往忽视可持续发展,施工过程中的噪声污染、粉尘污染等问题频发,且对信息化、智能化技术接纳程度低,难以借助先进技术提升管理效率,进而影响工程质量与安全性,阻碍行业可持续发展进程。

而人员素质问题同样不容忽视,部分施工人员专业技能匮乏、安全意识薄弱,操作不规范,增大安全事故发生风险;管理人员专业水平与管理能力良莠不齐,缺乏系统培训,难以科学决策和高效执行管理任务。也有部分施工单位并没有开展系统性的安全培训,无法引导施工人员严格遵守安全制度。安全事故意识的缺乏易导致施工期间引发多种不良后果,比如安全帽、安全鞋

没有正确佩戴,都易导致工人出现受伤,严重时易引发其死亡。施工现场存在多种高危作业环境,如电气、高空等,若缺乏安全意识易导致发生严重安全事故,从而对施工人员的生命安全造成威胁^[5]。加之市政工程专业领域繁多,工种协作复杂,人员素质差异极易引发沟通不畅、资源浪费等状况。此外,尽管建筑施工行业信息化和智能化技术应用渐广,但市政工程施工现场管理在技术推广方面仍进展缓慢。

众多施工现场依旧采用传统人工记录与监测方式,未能充分发挥 BIM 技术在施工进度动态管理和质量监控上的优势,智能安全帽、智能监控系统等智能化设备应用范围狭窄,技术成本高、操作人员技能欠缺以及对新技术接受度低等因素,共同导致管理效率低下、资源浪费严重。

三、市政工程施工现场管理路径

(一) 更新管理理念

为提升市政工程施工现场管理水平,引入先进管理思想与树立可持续发展理念是相辅相成、不可或缺的重要举措。精益管理与绿色管理作为先进管理思想的代表,为施工现场管理带来了革新方向。精益管理以消除浪费、优化流程为核心,通过价值流分析和持续改进,在市政工程施工中细化施工计划、合理调配资源、精简冗余环节,既能实现成本的有效控制,又能优化工期,解决资源闲置或过度使用导致的效率问题;绿色管理则聚焦于降低施工对环境的负面影响,通过采用环保材料、节能设备,科学规划施工方案,切实应对噪声、粉尘等污染问题,提升企业的社会责任感与公众形象。

与此同时,树立可持续发展理念更是契合市政工程建设长远需求的必然选择。在城市化快速推进的当下,市政工程建设不仅要满足当下需求,更需考量对未来环境与社会的影响^[6]。在施工材料管理上,优先选用可再生、可回收材料,从源头降低自然资源消耗;通过科学规划场地布局、合理使用机械设备,减少能源浪费与碳排放;借助信息技术搭建环境监测体系,实时监控污染物排放,及时化解环境风险。研究证实,将可持续发展理念深度融入施工现场管理,既能提升工程质量,还能为企业创造长期的经济效益与社会效益。先进管理思想为可持续发展提供方法路径,可持续发展理念为先进管理思想赋予更高目标,二者共同发力,可在保障工程质量的同时,最大限度减少对生态环境的破坏,推动市政工程行业朝着绿色、高效、可持续的方向稳步前行。

(二) 提升人员素质

人员素质作为市政工程施工现场管理的关键根基,建立系统化培训机制与完善科学考核体系,是提升施工团队整体能力、保障管理效能的核心路径。培训机制的构建,需精准锚定施工人员与管理人员的差异化需求:针对施工人员,以施工工艺规范、安全操作流程、防护知识普及为重点,确保现场作业标准化;对管理人员,则着重培养组织协调、技术把控及风险预判能力,增强复杂环境下的决策科学性^[7]。培训形式可灵活采用集中授课夯实理论、现场演示强化实操、模拟演练提升应急能力,同时依据施工

进度节点与人员能力动态，灵活调整培训频次，如在新技术应用或关键工序启动前，开展专项培训助力知识技能迭代。

与之相辅相成的考核机制，通过量化、细化的评估指标体系，实现对人员工作质量、效率及安全意识的全方位衡量。考核维度覆盖施工质量管控、进度达成率、安全管理成效等多方面，并依岗位特性精准设定考核要点，施工人员侧重操作规范性与作业效率，管理人员聚焦统筹协调与问题解决能力。将考核结果深度嵌入薪酬分配、职业晋升体系，形成强激励导向，激发人员主动提升专业素养的内生动力。定期考核不仅能及时发现管理漏洞与人员短板，更能为其指明能力提升方向，与培训机制形成“训考结合、以考促学”的良性循环，切实增强团队协作效能，为市政工程施工现场管理注入源源不断的人才动能，推动施工团队素质持续进阶^[8]。

（三）加强技术应用

在市政工程施工现场管理现代化进程中，信息化与智能化技术的融合应用是提升管理效能、保障施工安全的关键。以 BIM 技术和物联网技术为代表的信息化手段，与智能安全帽、智能监控设备等智能化工具相互配合，构建起高效精准的管理体系。BIM 技术通过三维模型可视化呈现施工过程，在计划编制阶段，利用施工模拟动画优化工序衔接，规避设计冲突，减少工期延误与成本浪费。物联网技术借助传感器网络，实时采集设备、环境、人员等数据，确保施工符合环保标准，为动态管理提供数据支撑^[9]。

智能化技术着重强化安全防线。智能安全帽集成定位、报警与健康监测功能，既能追踪人员轨迹、及时救援，又能预警疲劳作业等风险；智能监控设备基于人工智能算法，自动识别违规操作与安全隐患，配合电子围栏实现风险主动防控。信息化与智能化技术协同发力，显著提升施工进度管理、质量监控与资源调配效率，打造全方位安全防护网，推动市政工程管理向安全、高效、精准方向发展。

四、实际案例分析

（一）成功案例分析

重庆高架路项目作为青岛“四纵五横”快速路网关键一

“纵”，全长 17.7 公里，工期紧、环境复杂^[10]。项目深度融合信息化与智能化技术，成果显著。在信息化方面，构建“1+1+3+N”数字化体系，以 BIM+GIS 平台为核心，借助数字孪生整合多源模型，直观呈现施工场景；设计阶段通过 BIM 模拟评估超 30 种方案，优化设计。同时利用物联网部署大量摄像头与智能硬件，配合智能单兵设备，实现全时段、全区域远程管控。智能化技术应用中，桥梁顶升施工依托 BIM+GIS 平台监测设备数据，保障安全并缩短工期 20 天；“数字总工”系统实现全流程数字化管理，提升多方协同效率。最终项目提前通车，提升主城区通行能力，其数字化成果获多项大奖，成为市政工程施工管理典范。

（二）失败案例分析

某城市市政桥梁建设项目因施工现场管理不善，酿成质量与安全双重危机。项目自施工伊始便缺失科学管理制度，材料管理环节漏洞百出，现场材料堆放杂乱无序，且未严格执行验收程序，致使不合格材料混入主体结构施工，严重威胁工程质量根基；技术管理方面，施工单位忽视人员技术培训，工人对新型工艺掌握不足，又缺乏监督机制，安全隐患持续累积。

此外，该项目完全依赖传统人工管理模式，信息化与智能化技术应用近乎空白，导致施工进度失控，资源调配混乱，造成时间与资金的大量浪费。最终，项目因质量问题被迫停工整改，工期严重延误，不仅产生巨额经济损失，还引发负面社会影响。

五、结束语

本研究梳理市政工程施工现场管理的价值、问题及策略。科学管理是工程高质量建设核心保障，传统模式与技术短板阻碍行业发展。引入先进理念、强化人员培训、推进信息化智能化可提升管理效能，实现质量、安全与效益协同。案例对比表明现代化管理影响重大。未来，管理应向智能化、绿色化、精细化发展，适应城市建设需求，为城市可持续发展筑基。

参考文献

- [1] 邓明辉. 市政工程施工现场管理的重要性及路径分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (30): 199-201.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202430067.
- [2] 郭小枫. 绿色施工管理模式在市政工程中的应用 [J]. 江西建材, 2023, (03): 448-450.
- [3] 蔡王荣. 市政工程项目施工现场精细化管理 [J]. 中国住宅设施, 2024, (09): 76-78.
- [4] 李波. 市政路桥工程现场施工管理难点及解决策略 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (27): 133-135.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202427043.
- [5] 罗根太. 市政工程施工现场管理及安全控制建议 [J]. 居业, 2024, (06): 206-208.
- [6] 郑宗卫. 市政项目施工现场的安全管理对策 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (06): 226-228.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202406075.
- [7] 林文. 浅析市政工程施工现场材料全过程管理 [J]. 福建建设科技, 2023, (05): 132-134.
- [8] 兰金辉. 加强市政工程施工现场管理的策略探析 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(12): 88-91.DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2023.0138.
- [9] 关志刚. 对加强市政工程施工现场安全管理的几点建议 [J]. 中华建设, 2023, (05): 39-40.
- [10] 王冰洁, 梁超. 重庆高架路: 引流明显, 优化提升保畅行 [N]. 青岛日报, 2024-01-22(006).DOI:10.28617/n.cnki.nqdrb.2024.000236.

信息化技术在建筑工程造价管理中的应用分析

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/ERA.2025070017

摘 要 : 现代信息化技术发展可以改善建筑工程造价控制的各个环节。现代信息化技术能够实施建筑工程实时数据监测, 保障造价信息的及时刷新和精确度, 降低成本超出预算的风险。同时现代信息化技术运用还能够提高对造价变化预测的精确性, 能够提前识别可能发生的成本风险, 为节约成本的策略制定提供有力的数据依据, 因此需要推动现代信息化技术在建筑工程造价控制中的广泛使用, 提高建筑工程的竞争力和经济收益。

关 键 词 : 信息化技术; 建筑工程; 造价管理; 应用

Application Analysis of Information Technology in Construction Project Cost Management

Qiu Limei, Xue Yonghui

Heilongjiang Agricultural Engineering Vocational College, Harbin, Heilongjiang 150001

Abstract : The development of modern information technology can improve all aspects of construction project cost control. Modern information technology can implement real-time data monitoring of construction projects, ensure the timely refresh and accuracy of cost information, and reduce the risk of cost exceeding the budget. At the same time, the application of modern information technology can also improve the accuracy of cost change prediction, identify possible cost risks in advance, and provide a strong data basis for the formulation of cost saving strategies. Therefore, it is necessary to promote the wide use of modern information technology in the cost control of construction projects, and improve the competitiveness and economic benefits of construction projects.

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

一、现代信息化技术对建筑工程造价控制的影响

(一) 能够使建筑工程造价更加科学合理

首先, 成本核算是工程造价的基础。现代信息化技术提供成本核算软件以及 BIM 技术等工具, 能够对建材费用、人力费用、机械投入等多重成本进行更为精细的计量, 减少了手动预计中的不准确, 使得建筑工程造价更趋于精确合理。其次, 数据是工程造价的依据。决策人员可依据数据分析的成果来制定策略, 通过调节资源配置和施工进度方法, 增加决策的实施可能性, 与此同时利用信息化技术的模拟预测功能, 能够对项目在多种可能情境中的发展进行预判, 有助于提前预测可能发生的问题、风险以及成本的浮动, 确保建筑工程造价更为理性和精准。再次, 电子招投标平台能够使招投标过程透明和公平。供货方能够利用电子招投标系统浏览投标资料、咨询疑问, 同时在线递交其投标材料, 从而保障招投标程序的合理性与公平性。最后, 借助传感器与监测体系, 现代信息化技术可以实施对建筑工程进程和质量的同步追踪, 为管理人员提供了实时掌握工程的最新动态, 从而有效施行调控与决策以保障工程实际进度与预定计划保持一致。

(二) 能够有效节省建筑工程造价控制成本

随着现代信息技术化技术的融入与运用, 传统手工与纸质档案治理的方式正逐步被数字化和智慧化方式所取代, 管理费用随

之减少。首先, 在传统的手工核算过程中误差较为常见, 但现代信息化技术可以进行精细化计算与分析, 有效避免了由人工计算产生的错误, 进而降低了因计算偏差造成的额外费用。其次, 使建筑工程造价控制实时化和精细化。建筑企业利用造价控制软件, 可以即时追踪项目的费用流向, 并在费用超出预算时收到系统自动触发的预警, 有助于提前识别成本相关问题, 减少项目不必要的支出。再次, 当代的信息技术实现建筑工程所需档案、合同、造价单等资料的电子化归档与操控, 与传统的纸质档案相比, 电子档案的处理方式不仅节约了纸张与印制的开销, 而且降低档案整理与检索所需的时间及人力资源消耗。最后, 移动端应用程序可以让工程技术人员和成本估算人员随时获取工程资料, 打破传统档案查阅与使用的局限性, 增强了工作效率, 同时降低耗时及出行费用。

(三) 能够提高建筑工程造价的实效性

借助数字技术和智能手段, 工程造价控制更为迅捷、精准以及实践性。首先, 利用数据分析软件, 管理人员能够从大量数据中提取信息, 从而作出更加精准的决策。数据分析能体现造价失衡与资源过度消耗等问题, 为削减开销、优化收益提供了可能的方案。其次, 现代信息化技术可以支持部门协作, 建筑企业各部门成员之间可以即时信息共享, 有效地减少了信息沟通中的误差和争议, 从而有效降低了交流的开销。在统一的信息化平台上,

部门的交流与合作活动推动了项目管理工作的效能增进。再次，由于建筑工程施工过程中容易出现突发因素，现代信息化技术可以促进施工人员与造价控制人员实时沟通与交流，从而提升了办公效率和适应性。最后，现代信息化技术可以模拟与预判让管理人员针对工程中的各种场景对工程进展做出预估，通过管理人员提前识别可能出现的问题和风险，采取合适的紧急预案，可以有效地提升建筑工程造价效率。

二、信息化技术在建筑工程造价管理中的应用现状

当前，信息化技术在建筑工程造价管理中的应用已相当普遍。相关软件和工具的发展，使得项目各环节中信息共享和数据处理更加高效。建筑信息建模（BIM）技术凭借其三维可视化和信息整合功能，广泛应用于造价管理，从设计阶段开始便能精确预测工程成本。云计算平台的引入，使得造价数据的实时更新与远程协作成为可能，提升各方对项目预算的精准掌控。大数据分析技术在市场价格预测、成本控制和风险管理方面表现出重要价值，通过利用海量数据，可以更好地辅助决策。项目管理软件的集成系统确保了信息流的顺畅，减少了信息孤岛的形成，提高整体管理协调性。这些技术的发展推动了建筑工程造价管理向精细化、高效化的方向迈进。信息化技术在建筑工程造价管理中与传统方法相比，展现出了显著的优势。传统造价管理方法通常依赖人工计算和纸质记录，容易导致数据误差和信息滞后。而信息化技术通过软件平台实现数据的实时采集、分析与共享，大幅度提升了信息传递的及时性和准确性。在效率方面，传统方法由于繁琐的流程和大量的手工操作，效率偏低；信息化技术则可自动进行数据处理和报告生成，使流程更加高效。信息化技术的应用还通过精细化的数据管理，加强了对成本项目的控制和分析能力，显著提高了管理的透明度和可追溯性。

三、现代信息化技术在建筑工程造价控制中的应用策略

（一）制定信息化战略规划

首先，确立建筑工程造价信息化控制的具体目标，包括确保成本估算的准确性、资源的合理分配和工作效能的增进等方面。在目标确立之后，建筑企业应深入分析当前建筑工程造价信息化管理的实际情况，总结存在的问题与不足，从而为未来建筑工程造价控制工作指明切实的优化路径。其次，在规划阶段需要界定信息化管理范围，涉及工程造价数据的搜集、整理、储存及其利用等众多阶段，实施主体应全面评价众多要素，比如工程规模的大小、管理的需要等，以便对建筑工程造价信息化管理的覆盖范围作出合适选择，保障信息化建设的完整性与系统性。在明确信息化管理的目的与范围后，建筑企业需要制定详细的建筑工程造价实施方案，包括信息化基本架构的搭建、工程造价信息系统的研发及其使用、人力资源的培育等方面，对建筑工程各个环节进行详细策划，确保信息化建筑工程造价控制有序推进，此外建筑

企业应关注建筑工程造价信息化过程中可能遇到的风险与挑战，保信息化建筑工程造价的顺畅实施。

（二）建立信息化管理体系

首先，建立信息化建筑工程造价控制组织架构，不仅要具备技术能力，还需要具备建筑行业的深入理解和项目处理的广泛经验。建筑工程造价信息化控制组织结构需要对整个信息化建筑工程造价架构进行规划、组织协调与实施，确保建筑企业内部各环节能够有效配合，保障信息沟通畅通无阻。在明确各部门的职责和协作关系方面，信息化管理组织机构会制定详细的职责划分和协作流程，确保信息的传递和共享能高效、准确地进行。其次，建立信息化建筑工程造价控制规范，明确指出造价信息的采集、加工、保留与互换的具体步骤，保证各个过程都受到细致的规范与监管。此外通过对数据准确度、完备性及安全防范的密切监控，能有效避免数据问题引起的决策错误与损失，同时信息化建筑工程造价控制标准还在信息的共享与机密之间取得平衡，确保在守护信息安全的同时，最大程度地发挥信息的利用价值。最后，创建信息化建筑工程造价控制系统，集中储存、共享及交流造价信息，既要有高效的数据储存与处理功能，也需提供简易的操作界面和方便的使用方法，建筑单位能够及时地获取、分析并应用造价信息，为建筑工程制定决策和进行管理提供坚实的后盾，信息化建筑工程造价系统可以与供应商、承建商等商业伙伴之间的信息交流与协作，进而提升供应链的运作效率。

（三）云计算和大数据

在建筑工程造价管理中，云计算技术可帮助项目管理人员可以随时随地访问项目数据，完成各阶段的管理，而云平台上的数据共享和存储功能，确保了造价数据的实时更新和同步，减少了信息孤岛的产生，提高了造价管理的透明度、可靠性。而大数据技术在实际造价管理中的应用，则是通过分析历史数据和实时数据，为造价决策提供科学依据。在此阶段，造价管理人员需合理收集、分析大量与建筑项目相关的数据，其中涉及材料价格、劳动力成本、施工方法及其效率等，在此利用大数据技术准确识别成本节约的机会，预测项目风险，从而制定更加精准、高效的造价控制策略。此外，大数据分析技术还可有效揭示出造价管理中的模式和趋势，以此帮助建筑企业优化其成本结构，提升竞争力。

（四）实施造价数据标准化

建筑工程造价信息标准化处理不仅构成信息化建筑工程造价控制的根本，还是促进整个产业提升工作效能及准确度的核心所在。在传统建筑工程造价模式下，由于数据种类和格式缺乏一致性，经常需要投入极大的人力物力去梳理众多成本信息，然而采用规范化建筑工程造价后，建筑企业可以借助自动化的工具与应用程序来高效执行数据处理与分析任务，不仅大幅提升造价管理效率，并且缩减了人工成本，同时也有助于减少操作失误，增进数据分析的整体质量。随着生态保护观念的广泛接受，建筑行业正在应对越发严峻的考验与新的发展空间。通过设立建筑工程造价标准，建筑企业可以更精确地测算工程的经费支出及其对环境的潜在影响，进而能作出更为理智的决策，有助于促进行业向着

环保及持续性方向前进。然而推进施工成本数据一体化进程依赖于建设方的现代化信息技术基础和管理观念的树立，还离不开多方的热心投入与团结互助，因此建筑企业须强化管理体制，提高职工对信息技术的认知与运用能力，并与材料供应商、工程承包商等商业伙伴建立更紧密的交流与协同关系，促进施工成本数据的标准化发展。

（五）各阶段造价管理信息化建设

在竞标阶段，竞标方借助信息技术对工作量表和竞标报告进行把控，通过信息技术平台评估建筑物数量，确保工程项目报价公正。整合建设单位运营流程，能有效控制和优化招标投标成本，提升投标者在项目成本控制方面的能力。招标方根据自身需求设定项目财务数据，确保投标方能以适宜报价展示企业竞争优势。在施工过程中原材料的大量使用以及作业设备的调度成为重要任务，通过信息技术模拟整个施工流程，有助于现场工作人员更高效地完成施工作业，减少材料浪费，提高设备调度效率，确保施工进度达到预定目标。建设过程中设计改动可利用 BIM 技术产生的三维模型进行动态图纸优化，确保设计改动不对工程成本产生过大影响，同时调整材料采购时间，防止工程进度延误，确保设计修改方案满足工程建设需求。施工设备在建设过程中可能出现故障，对项目进展产生负面影响。通过信息技术对建筑设

备运行状态进行数据分析，合理规划设备保养时长，精确记录故障及原因，提高建筑设备监管能力。为确保建筑设备在预定期限内完成问题修复，必须确保设备良好运行，从而缩短问题解决时间，降低维护成本，有效管理建筑费用。

四、结语

在当前社会，信息化技术以其独特的优势被越来越多地吸纳并应用到各种行业中，当然，建筑工程造价管理领域也不例外。建筑工程造价管理是一个涉及到大量数据处理、决策分析的复杂过程，而信息化技术的引入，无疑为其带来了全新的解决思路。然而，信息化技术在建筑工程造价管理中的价值并未得到广泛的认识与应用，其原因主要在于部分人对信息化技术产生的益处存在疑虑，以及各类企业在技术上的投入短期内难以得到经济效益的回报。随着科技的不断进步和电子信息技术的不断普及，大数据分析、人工智能等新兴技术领域为建设工程的造价管理提供了更为精确、高效的解决方案。信息化技术可以通过对大量数据的快速处理和精准分析，使得工程造价的管理更为简捷，在消除人为因素误差的同时，还可以提高工作效率。

参考文献

- [1] 张小敬. 建筑工程造价预结算审核与建筑施工成本管理的关系分析 [J]. 现代商贸工业, 2024, 43(16): 112-114.
- [2] 颜星星. 建筑工程造价中人工成本造价的影响以及应对措施 [J]. 陶瓷, 2024(6): 189-191.
- [3] 郇俊伍. 建筑工程造价管理中的全过程控制研究 [J]. 陶瓷, 2024(10): 134-136.
- [4] 何凯红, 祁玉婷, 张伟. 装配式建筑工程造价影响因素及管控要点研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 51(22): 25-30.
- [5] 杨星. 新形势下建筑工程造价的动态管理与控制的分析 [J]. 四川建材, 2024, 48(5): 222-223.

建筑电气工程中的智能化技术应用与管理创新

沈柳青

横店集团浙江得邦公共照明有限公司，浙江 金华 322118

DOI:10.61369/ERA.2025070021

摘要： 面向“双碳”目标与新型城镇化需求，建筑电气工程亟需通过智能化技术实现能效提升与运维模式革新。本研究整合数字孪生、边缘计算及 AI 算法，构建“技术－管理”双维协同框架，提出智能配电动态调节、照明自适应控制等技术方案，并建立标准化应用体系与全生命周期动态监测机制。案例分析表明，该框架可优化负荷分配效率，降低运维成本，推动建筑能源系统向“产储用”协同转型。未来需深化数字孪生与元宇宙技术融合，突破中小型项目经济性适配与数据安全瓶颈，为智慧城市能源网络建设提供支撑。

关键词： 建筑电气工程；智能化技术；管理创新

Application and Management Innovation of Intelligent Technology in Building Electrical Engineering

Shen Liuqing

Hengdian Group Zhejiang Debang Public Lighting Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 322118

Abstract： In response to the "dual carbon" goal and the demand for new urbanization, building electrical engineering urgently needs to achieve energy efficiency improvement and operation and maintenance mode innovation through intelligent technology. This research integrates digital twins, edge computing and AI algorithms, builds a "technology management" dual dimensional collaborative framework, proposes technical solutions such as intelligent power distribution dynamic regulation, lighting adaptive control, and establishes a standardized application system and a dynamic monitoring mechanism throughout the life cycle. The case analysis shows that this framework can optimize load distribution efficiency, reduce operation and maintenance costs, and promote the transformation of building energy systems towards "production, storage, and use" collaboration. In the future, it is necessary to deepen the integration of digital twin and metaverse technology, break through the bottleneck of economic adaptation and data security for small and medium-sized projects, and provide support for the construction of smart city energy networks.

Keywords： building electrical engineering; intelligent technology; management innovation

引言

《城乡建设领域碳达峰实施方案（2023）》要求 2025 年建筑能耗强度降 15%，电气系统智能化升级为关键。传统建筑电气系统能效低、故障响应慢。智能化技术虽能提升稳定性与能效，但面临技术集成与管理协同挑战，如标准缺失、跨系统协同低效等。本研究以该方案为纲领，针对建筑电气智能化转型中技术与管理协同断裂问题，构建“技术－管理双维协同”框架，通过多源数据融合、案例分析等，形成可复用路径与范式，为行业提供决策支持工具。

一、建筑电气工程智能化技术的概念与发展

（一）智能化技术的定义与分类

建筑电气工程智能化技术基于物联网、大数据及人工智能构建“感知－分析－决策”闭环架构，依托多源异构感知网络实时

采集设备状态与环境参数，通过 5G/LoRa 协议实现低延时数据传输，结合 AI 算法完成能效动态优化与决策生成^[1]。系统按功能层级整合设备控制、能源调度及用户交互场景，形成从边缘计算终端到 BIM 管理平台的垂直技术体系，支撑设计、施工与运维全流程协同，实现能源流与信息流的深度耦合及系统级优化^[2]。

（二）智能化技术的核心应用场景

智能配电系统依托 AI 算法与数字孪生技术实现负荷动态调节与故障自愈功能，通过虚实交互机制优化设备诊断流程。智慧照明系统集成多光谱传感网络与用户行为分析模型，建立动态照度适配机制以平衡能耗与视觉舒适性。国际实践中，集成化管理系统通过多系统协同控制提升能效，而国内项目侧重模块化部署策略以降低实施成本^[3]。当前技术应用需统筹技术迭代、经济约束及政策导向，跨系统协议标准化缺失导致异构平台协同效率下降，成为跨国经验本土化的主要瓶颈。研究表明，动态负荷预测偏差与边缘计算响应延迟问题亟待通过多维度建模优化解决^[4]。研究指出，需构建全域数据治理体系并开发自适应决策算法，以破解技术集成度不足与管理框架割裂的深层矛盾，推动建筑电气系统向智能化与低碳化方向系统性演进^[5]。

二、建筑电气智能化管理模式的创新需求

（一）传统管理模式的问题分析

在传统建筑电气管理模式，各个子系统所采用的协议异构现象极为严重，不同子系统间的数据犹如陷入孤立境地，形成一座座难以逾越的数据孤岛。跨平台数据整合工作严重依赖人工手动操作，这一过程不仅繁琐耗时，还极易出错，使得故障定位效率极其低下，故障排查往往耗费大量时间与人力成本。静态管理框架仅依据固定阈值与预设逻辑开展工作，面对复杂多变的动态负荷波动，显得力不从心。同时，对于如 AI 预测性维护这类先进技术需求，传统管理模式无法有效适配，大量的能效潜力白白浪费，技术债也不断积累。设计、施工、运维等不同阶段之间还存在明显的断层，进一步加剧了跨专业协同的壁垒^[6]。这种状况使得全生命周期成本显著攀升，管理模式的僵化更是成为技术迭代的绊脚石，严重阻碍建筑电气系统朝着智能化、可持续化方向顺利转型。

（二）管理创新的关键方向

管理创新在建筑电气领域具有至关重要的意义，需多管齐下推进。构建标准化技术应用体系迫在眉睫，通过开发能够兼容多品牌设备的本土化协议接口，可大幅降低系统集成的复杂度，使得不同来源、不同规格的设备能顺畅对接，减少因接口不兼容导致的调试难题与成本增加。动态化管理模式要依托实时数据流对决策链路进行全面重构。借助数字孪生技术精准模拟系统运行状态，搭配边缘计算快速响应，实现故障的自动诊断与自愈，同时灵活调整能效策略，适应不同工况。组织架构方面，变革势在必行，建立跨部门协同平台，以 BIM 模型作为贯穿全生命周期数据流的核心载体，让设计、施工、运维等各阶段信息无缝衔接，彻底消除信息断层。另外，全生命周期管理应创新性地引入碳排放因子动态评估机制，将技术迭代对可持续发展产生的价值予以量化，推动管理决策从以往单纯依赖经验，逐步转向数据驱动模式，全方位支撑建筑电气系统实现高效且低碳的运行。

三、智能化技术在建筑电气工程中的关键应用

（一）智能配电系统的技术突破

AI 技术通过历史负荷数据与实时工况融合分析，构建动态负

荷预测模型，优化配电系统运行策略。某超高层建筑采用 LSTM 神经网络算法，依据建筑功能区划、时段用电特征及环境变量（如温湿度），动态调整变压器负载率与无功补偿参数，实现配电网能效提升。该技术突破传统阈值控制模式，通过自学习机制适应季节性负荷波动，减少人为干预偏差，延长关键设备寿命周期。基于数字孪生构建配电系统虚拟镜像，同步映射物理层设备状态，结合边缘计算节点实时解析异常信号。当监测到绝缘劣化或短路风险时^[7]，系统自动触发拓扑重构指令，隔离故障区间并切换备用回路，保障供电连续性。该技术将故障定位精度提升至设备级，并通过自愈逻辑库预置多场景恢复策略，大幅降低人工排查依赖性，增强复杂配电网的鲁棒性。

（二）智慧照明系统的优化实践

自适应照明算法整合光感传感器与空间占用数据，通过机器学习解析用户行为与视觉舒适阈值，动态调控 LED 照度与色温。强化学习框架优化照度-能耗函数，平衡工作面达标与非必要区域光抑制。边缘计算本地处理数据流，降低云端依赖与延迟；数字孪生模拟场景切换，预判眩光风险并动态调整配光策略，实现人因工程与能效协同优化，增强系统自适应性与多场景兼容性^[8]。智慧照明通过多目标优化算法平衡节能与舒适性：低人流时段切换基础模式降低静态能耗，高人流场景按活动类型适配动态策略。用户行为聚类分析识别高频路径与热点，精准调控照明方案以减少无效时长。边缘计算与数字孪生耦合支持策略实时仿真修正，确保节能指标与用户体验协同。系统通过动态场景切换与光环境精准调控，达成能效目标与用户感知双向优化。

四、建筑电气智能化创新实践

（一）智能化技术应用标准制定

智能化技术标准体系需以 IEC 60364-8-1 等国际规范为基础，针对国内建筑电气场景进行本土化适配，重点解决设备接口异构性与协议兼容性问题。标准制定需涵盖技术选型准则、数据交互格式及安全冗余要求，例如明确边缘计算节点的通信协议最小带宽阈值，确保多品牌设备无缝集成^[9]。本土化过程中需纳入区域能源政策与气候特征变量，如高湿度地区电气绝缘标准的强化条款，避免国际标准直接移植引发的水土不服。标准化框架的实施可降低技术碎片化风险，为规模化推广提供可复用的技术路径。基于 BIM 的协同管理平台整合建筑电气、暖通、结构等多专业数据模型，通过冲突检测算法预判管线交叉与空间干涉问题。某三甲医院项目中，平台将电气桥架路由与医疗气体管道布局同步建模，自动识别并修正 16 处设计冲突，减少施工返工成本约 12%。运维阶段，平台集成设备参数、维护记录与实时传感器数据，生成可视化运维工单并推送至责任方移动终端。BIM 模型的全生命周期应用打破信息孤岛，实现从设计深化到故障追溯的数据连续性，为智能配电、照明等系统的动态优化提供统一数据底座。

（二）全生命周期管理创新

数字孪生技术在设计阶段构建电气系统虚拟模型，模拟极端

负荷与设备老化对配电网的影响，优化拓扑结构与冗余配置。通过导入气象数据与用户行为参数，预演系统全周性能衰减趋势，识别潜在过载风险。某案例中，模型提前发现地下配电室散热缺陷，指导增加强制通风装置，规避后期改造。技术将经验驱动设计升级为数据验证模式，提升方案可靠性^[10]。基于大数据的设备健康度评估体系实时采集电气参数与环境变量，构建设备退化预测模型。边缘计算节点提取变压器温度、断路器动作频次等特征，结合云端数据库训练故障预警阈值。动态监测触发异常时，系统生成维护建议并同步校准数字孪生模型。某数据中心通过该机制提前预判 UPS 电池容量衰减，规划预防性更换策略。反馈闭环实现运维从被动响应向主动干预转型，支撑全生命周期成本最优。

（三）人才培养与团队建设

建筑电气智能化需整合电气工程、数据科学及技术管理三领域能力，形成复合型技术团队。电气工程师主导系统架构设计与安全规范适配，数据科学家开发负荷预测算法与故障诊断模型，项目管理专家协调资源分配与风险控制。团队需通过联合沙盘推演模拟配电网故障链式反应，建立跨学科技术语言体系，例如将电气参数映射为算法输入特征，确保技术方案兼具工程可行性与管理适配性。

校企联合实验室通过“理论－实践”闭环加速技术转化。某高校与智能设备企业共建实验室，聚焦边缘计算架构优化：高校团队开发自愈控制算法并仿真验证，企业提供真实场景数据与工程反馈。双导师制下，研究生参与开发智能断路器通信协议与照明控制算法库，成果直接导入企业产品线。该模式破解学术研究与工程需求脱节问题，形成“研发－验证－商用”全链条创新生态。

五、总结与展望

建筑电气工程智能化转型通过技术应用与管理创新的协同效应，系统性提升工程效能。技术层面，数字孪生与边缘计算实现配电系统自愈控制与动态负荷调节，智慧照明算法平衡节能与舒适性需求；管理层面，标准化体系与全生命周期动态监测框架破解数据孤岛与静态运维瓶颈。实际案例表明，技术－管理双维协同可降低全生命周期成本约 15%–20%，同时减少碳排放强度，推动建筑从能源消耗主体转向低碳节点。协同效应本质在于将技术迭代转化为可量化管理指标，形成闭环优化机制。数字孪生技术将进一步与元宇宙深度融合，构建虚实交互的建筑电气运维空间，支持远程虚拟巡检与故障预处置训练。碳中和目标驱动智能化技术向能源结构优化方向迭代：光伏－储能－负荷协同控制算法、建筑微电网动态调度模型将成为研发重点。技术标准化进程加速，国际协议（如 IEC 60364–8–1）本土化适配将推动跨国技术兼容，而 AI 伦理与数据主权问题需同步纳入技术框架设计。未来建筑电气系统将呈现“泛在感知－自主决策－全域协同”特征，成为智慧城市能源网络的关键节点。当前研究对中小型项目智能化推广的经济性适配不足，需开发轻量化技术方案与分阶段实施路径。数据安全方面，边缘计算节点的本地化隐私保护机制尚不完善，异构系统间数据传输加密标准亟待统一。后续研究可聚焦低成本传感器网络、联邦学习框架下的跨项目数据共享模型，以及政府－企业－学术联盟驱动的普惠化推广政策，以突破技术落地的规模经济壁垒。

参考文献

- [1] 孙爱芬，张之枫. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用探究 [J]. 机械与电子控制工程, 2023, 5(1).
- [2] 王震，申曰江. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用 [J]. 工程技术与管理, 2023, 7(17).
- [3] 谢俊娥. 电气工程及其自动化中智能化技术的应用分析 [J]. 工程技术研究, 2023, 5(12): 91–93.
- [4] 庞耀. 电气自动化技术在电气工程中的应用 [J]. 城镇建设, 2023(15): 244–246.
- [5] 任则同. 电气工程及其自动化中智能化技术的运用分析 [J]. 数字化用户, 2023, 29(12): 213–215.
- [6] 李文贺. 电气自动化技术在电气工程中的应用研究 [J]. 电脑校园, 2023(22): 71–73.
- [7] 吴双平. 电气工程及自动化智能化技术在建筑电气中的应用研究 [J]. 建筑与装饰, 2021(6): 148.
- [8] 刘玲. 建筑电气工程的智能化技术应用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(8): 2659.
- [9] 周伟. 建筑电气工程的智能化技术应用 [J]. 商品与质量, 2017(46): 83.
- [10] 罗永炜. 智能化技术在建筑电气工程中的应用 [J]. 户外装备, 2019(1): 300.

建筑工程混凝土施工质量控制关键点分析

孙卫军

安徽古井房地产集团有限责任公司, 安徽 亳州 236800

DOI:10.61369/ERA.2025070022

摘 要： 建筑工程中混凝土施工质量直接关系到工程的整体安全与使用寿命。为确保施工质量，需从原材料选用、配合比设计、浇筑工艺、养护措施及质量检测等环节进行系统控制。加强现场管理、严格施工流程执行、规范操作行为，有助于有效防止蜂窝麻面、裂缝、空鼓等常见质量问题的发生，提升混凝土结构的整体性能与耐久性。通过对施工全过程的关键控制点进行精细化管理，可实现建筑工程质量的稳步提升。

关 键 词： 混凝土施工；质量控制；建筑结构；施工管理；耐久性

Analysis of Key Points for Quality Control in Concrete Construction of Building Structure Engineering

Sun Weijun

Anhui Gujing Real Estate Group Co., Ltd., Bozhou, Anhui 236800

Abstract： The quality of concrete construction in building structure engineering is directly related to the overall safety and service life of the project. To ensure construction quality, systematic control is required from raw material selection, mix design, pouring process, curing measures, and quality inspection. Strengthening site management, strictly implementing construction procedures, and standardizing operational behavior can help effectively prevent common quality problems such as honeycomb and pitted surfaces, cracks, and hollows, improving the overall performance and durability of concrete structures. Through detailed management of key control points during the entire construction process, steady improvement in the quality of building structure engineering can be achieved.

Keywords： concrete construction; quality control; building structure; construction management; durability

引言

随着建筑行业的快速发展，混凝土作为主要结构材料，其施工质量对建筑物的安全性、耐久性和使用功能起着决定性作用。在实际施工过程中，混凝土工程常因管理不善、工艺不当等因素导致质量缺陷，进而埋下结构安全隐患。因此，深入探讨混凝土施工中的关键控制点，明确质量管理重点，已成为提升工程质量与保障建筑安全的核心任务。只有精准把控各个环节，才能真正实现结构工程的优质高效建设。

一、混凝土原材料质量控制要点

混凝土作为建筑工程中的核心材料，其性能优劣直接决定着整体结构的安全性与耐久性。原材料是混凝土质量控制的首要环节，只有保证原材料质量的稳定性，才能从源头上减少后续施工中可能出现的质量问题。常用的混凝土原材料包括水泥、骨料、水和外加剂等，每一种材料都需按照相关规范和标准进行选取与检验。水泥应具有良好的强度发展性能和安定性，不得使用受潮结块或超过保质期的产品；骨料应粒径合理、洁净无杂质，尤其是细骨料含泥量需控制在规范范围内，以免影响混凝土的和易性与粘结性能；拌合用水则需清洁无污染，严禁使用含有有害杂质的水源^[1]。此外，随着工程对混凝土性能要求的提升，各类化

学外加剂的使用也日趋普遍，需确保其来源正规、与水泥的适应性良好，并通过试配试验合理确定掺量。

在实际施工过程中，除了对进场原材料进行必要的抽样检测和质量验收外，还应建立完善的材料管理制度，确保混凝土原材料在运输、堆放和使用过程中的质量不发生变化。例如，水泥和外加剂应分别密封储存，避免受潮或发生化学反应；骨料应分级堆放，防止混料或污染；对不同批次原材料应进行标识和分类管理，防止误用混用。针对高温、雨季等特殊气候条件，还需采取有效的防护措施，避免因环境因素引发原材料性能波动。此外，应定期对原材料供应商进行质量评价和信用管理，选择信誉好、供货稳定的厂家，从源头保障混凝土原材料的可控性与一致性。

加强混凝土原材料的质量控制，不仅是确保结构工程顺利实

施的基础，更是提升工程整体品质的关键。随着绿色建筑与高性能混凝土的发展趋势，材料质量要求日益严格，施工单位应结合工程实际，建立科学、系统的原材料控制体系。从进场验收到过程监管再到数据归档，实现全过程质量追踪与动态管理^[2]。通过严把原材料质量关，可显著降低混凝土开裂、强度不足等质量缺陷的发生率，为后续的施工工艺控制与结构耐久性提供坚实保障。

二、配合比设计与施工工艺的协调管理

混凝土配合比设计是确保其工作性能、力学性能和耐久性能的重要前提，直接影响到混凝土在不同工况下的适应能力与使用效果。合理的配合比设计应根据工程结构类型、使用环境、施工方式及强度等级等多种因素综合考虑，通过试验室优化试配确定最佳组合。水灰比是配合比设计中的核心参数，直接影响混凝土的强度与密实性，应严格控制在设计范围内；同时，粗细骨料的级配应合理搭配，以保证混凝土具有良好的和易性、泵送性及成型性。此外，针对不同环境下的工程需求，还需结合使用要求适当调整外加剂种类及掺量，以增强其早强、抗渗、抗冻等性能指标，从而满足施工与结构耐久的双重要求^[3]。

在施工现场，混凝土配合比的实际应用往往面临原材料波动、环境变化等多重干扰，若未与施工工艺紧密结合，极易造成混凝土性能偏差甚至质量事故。因此，配合比设计与施工工艺之间需建立起有效的衔接机制。一方面，需将试验室设计的配合比与现场实际情况进行充分比对与调整，例如考虑运输时间、温度变化对混凝土初凝时间的影响，必要时可调整外加剂掺量或选用缓凝剂来保持其可施工性；另一方面，在浇筑、振捣、收面等施工环节应严格执行施工技术交底，防止因人为操作不当影响混凝土质量，如振捣时间过长导致离析、振捣不足产生蜂窝麻面等。工艺执行的规范性与配合比的一致性共同决定了混凝土质量的稳定性与成型效果。

加强混凝土配合比设计与施工工艺的协调管理，应建立从设计—生产—施工全过程的质量控制机制。施工单位应加强与试验室、技术人员的沟通，定期组织技术交底与现场监督，确保施工人员理解配合比参数背后的技术逻辑和操作要点。在面对复杂施工环境或特殊工艺要求时，应通过现场试拌与快速调整机制，及时优化配合比参数，以适应现场施工条件。同时，应做好施工数据记录与问题追踪，一旦发现混凝土出现质量问题，可及时分析是否源于配合比与工艺之间的偏差^[4]。通过制度化、流程化的协调机制，构建配合比设计与施工工艺的闭环管理体系，才能实现混凝土性能与施工质量的同步提升，保障建筑结构工程的整体稳定与持久安全。

三、混凝土浇筑过程中的关键控制措施

混凝土浇筑是结构成型的关键环节，直接决定了混凝土结构的密实度、整体性和力学性能。在浇筑过程中，控制措施必须贯穿始终，以确保混凝土在运输、入模、振捣及成型等环节均达到

质量标准。首先浇筑前应做好充分准备，包括模板加固、钢筋验收、设备调试及浇筑计划编排等，确保作业环境整洁、施工条件满足浇筑要求。浇筑时应连续作业，避免施工缝的产生；在有高差的结构中，应分层分段浇筑，并严格控制每层厚度，防止混凝土离析与冷缝出现。同时，浇筑过程中应实时监测混凝土的坍落度、初凝时间等性能指标，确保其在规定施工时间内入模成型，保持良好的和易性与流动性^[5]。

在实际操作过程中，振捣是确保混凝土密实的重要步骤。合理的振捣方式能够有效消除混凝土内部的气泡，避免出现蜂窝、麻面、孔洞等质量缺陷。振捣作业应使用机械振捣器，振捣点应布置均匀、速度适中，避免过振或漏振现象。对梁柱节点、钢筋密集区域等重点部位，应加强人工配合，确保混凝土充分密实。振捣时间应根据混凝土的坍落度与结构形状适当调整，过振可能导致骨料下沉、水泥浆上浮，引发离析问题；而振捣不足则可能造成结构内部空洞，影响结构承载能力。此外，浇筑过程应设置专人进行质量检查与技术指导，发现问题及时处理，确保每一环节严格按规范执行，避免留下施工隐患。

控制混凝土浇筑质量不仅在于施工技术的执行，更在于整体流程的组织与协调。施工单位应根据结构类型、浇筑规模及天气情况，科学制定浇筑方案和应急预案，确保人员、设备、材料组织到位。特别是在高温、低温或雨季施工中，应采取相应的降温、保温或防雨措施，防止混凝土性能受环境影响而波动。对于大型结构或超长浇筑段，应合理设置施工缝位置，并确保后续混凝土浇筑与前段有效衔接，保证结构整体性^[6]。通过全过程的质量控制措施，从源头预防和过程管理两方面着手，可有效提升混凝土浇筑质量，为建筑结构的安全、耐久与美观奠定坚实基础。

四、养护环节对混凝土性能的影响与管理

混凝土浇筑完成后的养护环节对其性能发展具有决定性作用，特别是对强度、抗裂性与耐久性的形成至关重要。在初凝至终凝阶段，混凝土内部水化反应尚未充分，若养护不到位，极易出现表面干裂、强度不足等质量问题。适当的养护措施能保持混凝土表面湿润状态，促进水泥充分水化，确保其结构致密性与力学性能^[7]。一般情况下，混凝土应在浇筑完成后及时覆盖保湿，常用方法包括喷雾洒水、覆盖湿麻袋、塑料薄膜封闭等。特殊环境如高温、风大或低湿地区，更应加强保湿措施，防止水分过快蒸发影响混凝土早期强度发展。

养护时间的控制同样关键，不同环境条件下应合理确定养护周期。普通硅酸盐水泥混凝土的标准养护周期为7天至14天，但若处于寒冷或干燥环境中，需适当延长养护时间，以保障其内部结构充分发展。此外，对于大体积混凝土、桥梁、隧道等重要结构，还应采用保温保湿相结合的方式复合养护，防止早期温差过大导致的热裂缝。同时，在冬季低温施工期间，应采取加热保温措施，确保养护温度始终高于临界水化温度，避免因早期冻害破坏混凝土微观结构，影响后期强度增长与耐久性。在夏季高温施工时，宜在早晚时段浇水养护，并避免阳光直射。

混凝土养护管理不仅体现在技术手段上，还应落实在施工组织与过程监管之中。现场应设置专职养护人员，对每个施工区域进行标识与责任分工，确保养护措施不遗漏、不断档。同时，施工单位应建立养护记录制度，详细记录养护时间、温湿度条件、养护方式等信息，为后期质量评估提供依据。对于养护不到位可能造成的质量隐患，如早期开裂、表面粉化等问题，应设立巡查机制和应急处理预案，发现异常及时修复^[9]。科学、系统的养护管理不仅有助于提升混凝土结构的使用寿命，也为整个建筑工程的质量交付提供有力保障，体现了质量控制全过程中不可忽视的重要环节。

五、施工现场质量检测与问题防治策略

施工现场质量检测是确保混凝土施工达到设计和规范要求的重要手段，是混凝土质量控制体系中的关键环节。通过科学合理的检测手段，可以及时发现潜在质量问题，有效预防和控制质量隐患的发生，从而保障建筑结构的整体稳定与安全。混凝土质量检测主要包括塌落度、和易性、初终凝时间、立方体强度、弹性模量等多个方面。其中，塌落度和和易性检测主要用于评估混凝土拌合物的施工性能，确保其便于泵送、浇筑和振捣；而强度检测则是衡量混凝土结构承载能力的核心指标，必须严格按照标准要求要求进行试块留置和养护，确保其代表性和准确性^[9]。还应结合工程特点检测抗渗性、抗冻性、干缩率等，以全面评估混凝土性能。

在质量检测过程中，应建立完善的现场检测管理制度，明确检测项目、频次、方法和责任分工，确保每一项工作有据可依、有章可循。施工过程中应设置专职检测人员或委托有资质的第三方机构开展检测，确保数据的客观、公正与权威性。同时，应加

强施工现场的日常巡检和过程监督，结合视频监控、现场记录等方式，对混凝土拌制、运输、浇筑、振捣和养护各个环节进行全过程监管，确保每道工序均处于可控状态。特别是在关键施工节点或特殊结构部位，如梁柱节点、剪力墙、楼板交接区等区域，更应加密检测频次，实施重点监控。对发现的异常数据或质量偏差，应及时分析原因，判断是材料问题、工艺问题还是操作失误，并制定有针对性的处理措施，避免问题扩大化和重复发生^[10]。

问题防治策略应从“事前预控、事中控制、事后追溯”三方面系统展开，构建全过程质量闭环管理体系。施工前应开展技术交底与风险评估，制定质量问题应对预案；施工中强化工序衔接与过程控制，确保每一环节达标；施工后结合检测结果进行质量总结与问题修复，并开展后期跟踪与观察，提升管理实效。对于混凝土裂缝、蜂窝麻面、空鼓脱壳等常见问题，应查明原因，如原材料不合格、配合比设计不当、振捣或养护不到位等，并根据具体情况采取修补、加固或返工措施。科学检测与系统防治相结合，有助于全面提升混凝土施工质量，确保结构安全与耐久。

六、结语

混凝土施工质量直接关系到建筑结构的安全性与耐久性，必须贯穿全过程实施科学、规范的控制管理。从原材料选用到配合比设计，从浇筑工艺到养护措施，再到现场检测与问题防治，各环节相互衔接、环环相扣，缺一不可。只有全面把握关键控制点，严格执行质量标准，强化施工组织与技术管理，才能有效防止质量缺陷的发生，确保工程结构稳固可靠。坚持精细化管理与全过程控制，是提升建筑工程整体质量的核心保障。

参考文献

- [1] 黄晓翔. 建筑工程施工中混凝土质量控制探讨 [J]. 江西建材, 2017(08):79+82.
- [2] 汪小康. 高层建筑施工过程混凝土工程质量控制探讨 [J]. 中国住宅设施, 2017(12):88-89.
- [3] 蔡进胜. 浅析钢筋混凝土结构工程的施工质量控制 [J]. 建材与装饰, 2018(10):38.
- [4] 许云标. 商务建筑钢筋混凝土结构施工质量控制 [J]. 建筑施工, 2019, 41(04):588-590.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2019.04.014.
- [5] 张文龄. 预制装配整体式混凝土结构施工技术及工程质量控制与验收研究. 天津市, 天津住宅建设发展集团有限公司, 2017-02-22.
- [6] 刘富发. 超高层建筑型钢混凝土结构施工质量控制 [J]. 中国高新科技, 2020(15):131-132.
- [7] 肖磊. 混凝土结构工程施工质量控制 [J]. 中国建筑金属结构, 2021(02):42-43.
- [8] 江波, 郑俊. 工程建筑中混凝土结构施工技术及质量控制 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(20):163-166.DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.20.038.
- [9] 陈勇, 杨志兵. 房屋建筑工程的混凝土施工质量控制分析 [J]. 低碳世界, 2024, 14(03):97-99.DOI:10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2024.03.045.
- [10] 张国新. 建筑工程大体积混凝土施工质量控制措施 [J]. 砖瓦, 2024(08):119-121.DOI:10.16001/j.cnki.1001-6945.2024.08.024.

基于 BIM 技术的建筑工程施工管理与资料编制研究

梁锐铿

广东曠晟建设工程有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025070023

摘 要： BIM 不仅能够优化施工进度和质量控制，还能通过信息集成与自动化生成，提高资料编制的准确性和效率。本文研究基于 BIM 技术的建筑工程施工管理与资料编制，探讨其在房地产、学校、展厅和办公室装修等工程中的应用。BIM 技术通过可视化进度模拟、实时监控与质量控制，优化施工管理，减少沟通成本。在资料编制中，BIM 实现自动化生成与实时更新，提高资料准确性与可追溯性。研究结果表明，BIM 技术显著提升了建筑工程管理效率与质量，具有广阔的应用前景。

关 键 词： BIM 技术；施工管理；资料编制

Research on Construction Management and Data Compilation of Building Engineering Based on BIM Technology

Liang Ruikeng

Guangdong Haosheng Construction Engineering Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： BIM can not only optimize construction progress and quality control, but also improve the accuracy and efficiency of data compilation through information integration and automation generation. This article studies the construction management and data compilation of building engineering based on BIM technology, and explores its application in real estate, schools, exhibition halls, and office decoration projects. BIM technology optimizes construction management and reduces communication costs through visual progress simulation, real-time monitoring, and quality control. In data compilation, BIM achieves automated generation and real-time updates, improving data accuracy and traceability. The research results indicate that BIM technology significantly improves the efficiency and quality of construction project management, and has broad application prospects.

Keywords： BIM technology; construction management; data compilation

引言

随着建筑行业的快速发展，建筑工程施工管理与资料编制的重要性日益凸显。近年来，国家政策对建筑行业的信息化管理提出了更高要求，《交通运输部办公厅关于推进公路水运工程 BIM 技术应用的指导意见》明确提出，要推进 BIM 技术在公路水运工程建设管理中的应用，以提升工程品质和全生命周期管理水平。在此背景下，BIM 技术作为建筑行业信息化的重要手段，逐渐成为建筑工程施工管理与资料编制的关键工具。因此，研究基于 BIM 技术的建筑工程施工管理与资料编制，对于推动建筑行业的现代化发展具有重要的理论和实践意义。

一、BIM 技术概述

（一）BIM 技术的基本概念

BIM（Building Information Modeling）技术是一种以三维数字模型为基础，整合建筑工程项目全生命周期信息的数字化技术。其内涵在于通过创建一个包含建筑几何、空间关系、地理信息、建筑构件属性等多维度信息的虚拟模型，实现建筑信息的集成化管理和共享^[1]。与传统建筑信息管理方式相比，BIM 技术突破了二维图纸的局限，能够提供直观的三维可视化效果，使各参

与方更清晰地理解设计意图和施工细节。同时，BIM 模型中的信息具有关联性和动态性，一处修改可自动反映到相关联的各个部分，极大地提高了信息传递的准确性和效率，为建筑工程项目的协同工作和精细化管理奠定了基础。

（二）技术在建筑工程中的应用优势

BIM 技术在建筑工程中展现出显著的应用优势。在设计阶段，其三维可视化和参数化设计功能能够帮助设计师快速生成多种设计方案，并进行直观的比较和优化，从而提升设计质量与效率，减少设计错误和变更^[2]。进入施工过程管理阶段，BIM 技术

可实现施工进度可视化模拟, 通过将进度计划与三维模型相结合, 提前发现施工中的潜在问题, 优化施工顺序和资源配置, 有效控制施工进度和成本^[3]。同时, BIM 模型中的详细信息为施工质量控制提供了依据, 便于实时跟踪和管理施工质量。在后期运维管理中, BIM 模型作为建筑的数字档案, 为设施管理、空间管理、能耗分析等提供了准确的数据支持, 便于快速定位问题和进行维护决策。对于房地产工程, BIM 技术有助于提升营销效果, 通过虚拟样板房展示吸引客户; 在学校工程中, 能够优化校园空间布局和教学设施配置; 展厅工程可借助 BIM 实现展览空间的灵活设计和展品布局的优化; 办公室装修工程则可利用 BIM 快速响应客户需求, 实现个性化设计和高效施工, 这些特殊优势使得 BIM 技术在不同类型工程中都具有广泛的应用前景^[4]。

二、建筑工程施工管理概述

（一）建筑工程施工管理的内涵与目标

建筑工程施工管理是指在建筑施工过程中, 对项目的人力、物力、财力等资源进行合理配置与有效控制, 以确保工程顺利实施的综合性管理活动。其涵盖范围广泛, 包括施工进度、质量、成本、安全、合同、信息等多个方面。施工管理的主要目标是确保工程质量符合设计和规范要求, 按时完成施工任务, 控制成本在预算范围内, 同时保障施工安全, 避免事故发生。通过科学的管理手段, 协调各参与方之间的关系, 实现工程项目的整体效益最大化, 为建筑产品的交付和后续使用奠定坚实基础。

（二）建筑工程施工管理的现状与挑战

传统施工管理模式在信息传递、协同工作和动态调整等方面存在诸多弊端。信息传递多依赖于纸质文件, 导致信息滞后、不准确, 容易引发沟通不畅和决策失误。各参与方之间缺乏有效的协同机制, 难以形成工作合力^[5]。在新形势下, 建筑工程施工管理面临着诸多挑战。工程需求日益复杂多变, 建筑功能多样化、个性化, 对施工技术和管理水平提出更高要求。同时, 环保要求日益严格, 施工过程中的节能减排、扬尘控制、废弃物处理等问题亟待解决。此外, 劳动力短缺、材料价格波动等市场因素也为施工管理带来不确定性, 增加了管理难度。

三、基于 BIM 技术的建筑工程施工管理

（一）BIM 技术在施工管理中的应用

1. 施工进度管理

BIM 技术为施工进度管理提供了强大的支持。通过在 BIM 模型中集成时间维度, 可实现进度计划的可视化编制与模拟, 将施工任务与模型构件关联, 直观展示各施工阶段的空间布局和时间顺序。这种可视化模拟有助于提前发现潜在的进度冲突和资源瓶颈, 优化施工方案。在施工过程中, BIM 系统能够实时采集进度数据, 与计划进度进行对比分析, 及时发现偏差并进行动态调整。管理人员可以基于 BIM 模型快速调整施工顺序、资源分配等, 确保进度目标的实现, 从而提高施工进度管理的效率和准确性^[6]。

2. 施工质量管理

基于 BIM 的施工质量管理通过将质量控制标准与流程嵌入到 BIM 模型中, 实现了质量控制的精细化和信息化。BIM 模型中的构件信息详细记录了设计参数、施工工艺等关键信息, 为施工质量检查提供了准确依据。施工人员可以利用移动设备实时查看 BIM 模型中的质量标准, 按照标准进行施工操作。一旦出现质量问题, BIM 系统能够快速定位问题位置, 追溯问题产生的原因, 包括设计变更、施工操作不当等。通过 BIM 模型的关联性, 质量问题的整改情况可以实时反馈到模型中, 便于各方及时了解整改进度, 确保质量问题得到彻底解决, 从而提升施工质量管理水平。

（二）BIM 技术在施工管理中的协同与沟通

1. 各参与方协同工作模式

BIM 技术为建筑师、结构工程师、施工人员等各参与方提供了一个共享的三维信息平台, 打破了传统施工管理中各专业之间的信息壁垒。在这个平台上, 各参与方可以基于同一个 BIM 模型进行协同作业, 实时查看和修改模型信息。建筑师可以及时了解施工过程中对建筑设计的反馈, 结构工程师能够根据施工实际情况优化结构设计, 施工人员则可以根据模型信息准确施工。BIM 模型中的信息实时更新机制确保了各参与方始终基于最新信息进行工作, 避免了因信息不对称导致的错误和延误, 提高了协同工作的效率和质量^[7]。

2. 施工过程中的沟通优化

BIM 技术的可视化沟通方式极大地改善了施工过程中的沟通效果。三维可视化模型使复杂的施工信息更加直观易懂, 无论是施工图纸的解读还是施工方案的讨论, 参与方都可以通过模型进行直观交流, 减少因图纸理解偏差导致的沟通问题。此外, 基于 BIM 的沟通平台支持实时信息共享和反馈, 施工人员在施工现场遇到问题时, 可以通过移动设备将问题及时反馈到 BIM 平台, 相关各方可以迅速响应并提供解决方案。这种高效的沟通方式能够快速解决施工过程中的问题, 减少沟通成本, 提高施工效率。

四、基于 BIM 技术的建筑工程资料编制

（一）建筑工程资料编制的重要性与现状

1. 资料编制在工程管理中的作用

建筑工程资料是工程建设过程的重要记录, 对工程质量、安全等方面具有关键的证明与追溯作用。资料详细记录了施工过程中的各个环节, 包括设计变更、施工工艺、材料使用等, 为工程验收提供了重要依据^[8]。同时, 这些资料在工程运维阶段也发挥着重要作用, 帮助运维人员快速了解建筑结构和设施信息, 及时发现并解决问题。

2. 传统资料编制存在的问题

传统资料编制方式主要依赖人工录入和纸质文件管理, 这一过程容易出现信息不准确、不完整的问题。施工过程复杂且涉及多个参与方, 信息传递的不及时导致资料更新滞后, 难以准确反

映施工的实际进度。此外，传统编制方式效率低下，大量重复性工作不仅增加了出错概率，还严重影响了工程管理的整体效率，使得传统资料编制难以满足现代建筑工程对信息管理的高要求。

（二）基于 BIM 技术的资料编制优势

1. 信息集成与自动化生成

BIM 技术通过将建筑信息模型与资料编制深度关联，实现了资料的自动化生成。BIM 模型整合了建筑全生命周期的信息，涵盖设计、施工及运维各阶段数据，这些数据在模型中相互关联且实时更新。基于此，资料编制不再依赖人工录入，大幅减少了因手动操作导致的错误，显著提高了资料编制的准确性和效率。同时，自动化生成的资料能够快速响应设计变更和施工调整，确保资料与项目进度同步，为工程管理提供及时、准确的信息支持^[9]。

2. 资料的实时更新与可追溯性

在施工过程中，任何设计变更、施工调整或现场修改都能实时反映在 BIM 模型中，确保资料始终保持最新状态，从而保障了资料的时效性和准确性。一旦出现问题，管理人员可以迅速通过模型追溯问题源头，明确责任归属，并制定有效的整改方案。这种高效的资料管理和问题处理机制，不仅提高了工程管理的效率和质量，还减少了因信息滞后或不准确导致的施工延误和成本增加，为项目的顺利推进和质量保障提供了有力支持。

（三）不同类型工程的资料编制特点与 BIM 应用

1. 房地产工程

房地产工程的关键资料编制要点包括户型设计、配套设施、施工质量等。BIM 技术在房地产工程资料编制中的特殊应用体现在其能够通过三维可视化模型直观展示户型布局和配套设施，为销售和物业管理提供便利。

2. 学校工程

学校工程的特殊要求在于教学设施的安全性和功能性。资料

编制重点是教学楼结构安全、教室布局、设备安装等。BIM 技术通过精确的模型和信息记录，确保教学设施的合理布局和施工质量，为后续的设施维护和管理提供支持^[10]。

3. 展厅工程

展厅工程的展示效果与资料编制紧密关联。BIM 技术在展厅工程资料编制中的创新应用是通过虚拟漫游和三维展示，提前模拟展厅布局和展示效果，优化设计方案，提高展示效果的吸引力。

4. 办公室装修工程

办公室装修工程资料编制的特殊性在于个性化设计和材料使用。BIM 技术在办公室装修工程资料编制中的应用价值体现在其能够快速调整设计方案，满足不同客户的需求，同时通过精确的材料记录和施工进度跟踪，确保装修质量。

五、总结

本文深入研究了基于 BIM 技术的建筑工程施工管理与资料编制，揭示了 BIM 技术在提升施工管理水平和优化资料编制流程中的显著优势。在施工管理方面，BIM 技术通过可视化进度模拟与实时监控，有效优化了施工进度管理，同时借助模型中的详细信息，实现了精细化的质量控制与问题追溯。此外，BIM 技术打破了各参与方之间的信息壁垒，构建了高效的协同工作模式，显著提升了沟通效率。在资料编制方面，BIM 技术实现了资料的自动化生成与实时更新，减少了人工录入错误，确保了资料的准确性和可追溯性。针对房地产、学校、展厅和办公室装修等不同类型的工程，BIM 技术展现出独特的应用价值，为工程管理提供了有力支持。研究结果表明，BIM 技术是推动建筑工程施工管理现代化和资料编制高效化的关键工具，具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 刘翥. 基于 BIM 技术的房建工程施工管理应用研究 [D]. 陕西：西安理工大学，2020.
- [2] 唐海燕. 基于 BIM 技术的工程施工成本预测方法研究与应用 [D]. 江苏：江苏大学，2016.
- [3] 王兴龙. BIM 技术背景下图书馆工程项目设计 + 施工一体化应用路径研究 [D]. 江苏：江苏大学，2023.
- [4] 郭子琪. BIM 技术下 EPC 建设工程项目成本管理的应用与研究 [D]. 山西：太原理工大学，2021.
- [5] 杨烁. BIM 技术在工程项目进度管理中的应用研究 —— 以某商业综合体项目为例 [D]. 北京：北京化工大学，2019.
- [6] 景园. 基于 BIM 云平台的工程项目进度管理研究 [D]. 山东：青岛理工大学，2018.
- [7] 杨建. 基于 BIM 的工程项目管理流程研究 [D]. 华北水利水电大学，2015.
- [8] 刘鹏. 基于 BIM 技术的装配式建筑施工组织设计 [D]. 山东：聊城大学，2017.
- [9] 刘丽. 建筑工程中的施工技术资料编制及整理研究 [J]. 建筑工程技术与设计，2019(4):1518.
- [10] 曹伟波. 建筑工程中的施工技术资料编制及整理研究 [J]. 工程与建设，2021, 35(1):182-183, 185.

房地产项目中建筑电气施工的精细化管理与质量控制

林学鹏

身份证号: 440181198102144817

DOI:10.61369/ERA.2025070031

摘要： 房地产项目建筑电气施工的精细化管理与质量控制是提升工程品质的关键环节。针对设计变更频繁、隐蔽工程缺陷等痛点，研究提出以组织架构优化、全周期标准化流程及 BIM、AI 等技术为核心的精细化管理路径，结合物联网实时监测、防雷接地规范等质量控制技术，构建量化评估与 PDCA 改进机制。通过《住宅项目规范》等政策导向，推动施工效率提升与运维风险降低，为行业转型升级提供理论与实践依据。

关键词： 建筑电气施工；精细化管理；质量控制

Refined Management and Quality Control of Building Electrical Construction in Real Estate Projects

Lin Xuepeng

ID: 440181198102144817

Abstract： The refined management and quality control of building electrical construction in real estate projects are critical to enhancing project quality. Addressing common issues such as frequent design changes and defects in hidden works, research proposes a refined management approach centered on organizational structure optimization, full-cycle standardized processes, and technologies like BIM and AI. This is combined with quality control techniques such as IoT real-time monitoring and lightning protection grounding standards, establishing a quantified evaluation and PDCA improvement mechanism. Guided by policies such as the "Residential Project Specifications," this approach promotes improvements in construction efficiency and reductions in operation and maintenance risks, providing theoretical and practical support for industry transformation and upgrading.

Keywords： building electrical construction; refined management; quality control

引言

房地产行业作为国民经济支柱产业，其高质量发展与城市化进程紧密关联。近年来，行业面临从规模扩张向品质提升的转型需求，建筑电气施工的精细化管理与质量控制成为核心议题。当前，电气施工中普遍存在设计变更频繁、隐蔽工程缺陷等隐患，导致返工率居高不下，直接影响项目安全性与经济性。2025年3月31日，住房和城乡建设部发布的《住宅项目规范》明确要求住宅建设需以“安全、舒适、绿色、智慧”为目标，强化建筑设备系统标准化与智能化水平，为电气施工管理提供了政策导向。住建部2025年重点任务中提出“打造中国建造升级版”，强调通过智能建造、绿色建造等技术革新提升工程品质，并推动房屋全生命周期安全管理。在此背景下，探索精细化管理的实施路径与质量控制关键技术，不仅契合行业转型升级需求，更能通过优化资源配置、降低运维风险，实现经济效益与社会效益的双重提升，为“好房子”建设提供理论与实践支撑。

一、房地产项目建筑电气施工的概述

（一）房地产项目电气施工的特点

房地产项目电气施工具有显著的复杂性与系统性特征。多专业协同是其核心挑战之一，电气工程需与土建结构、给排水、暖通等专业深度交叉配合，涉及预埋管线定位、桥架安装空间分配、设备接口匹配等环节，任何设计冲突或施工时序错位均可能引发返工或质量隐患^[1]。房地产项目通常采用批量开发模式，强调

高标准化与成本控制的平衡。标准化设计虽可提升施工效率，但需在满足差异化户型需求的同时，严格管控材料采购、工艺实施及人力调配成本，以实现规模化开发下的经济效益最大化。施工过程中还需兼顾工期压力与技术规范的合规性，确保隐蔽工程与终端设备安装满足安全性与功能性要求。

（二）精细化管理与质量控制的核心价值

精细化管理和质量控制是提升房地产电气工程综合效益的核心手段。通过优化施工流程、强化技术标准执行，可显著提高资

源利用效率，例如基于 BIM 的管线综合设计减少材料浪费，标准化工艺缩短施工周期^[2]。同时，质量控制体系能够系统性识别并规避潜在风险，如隐蔽工程验收的影像化追溯可避免后期开凿修复成本，严格材料进场检验降低设备故障率。从全生命周期视角看，精细化管理不仅减少施工阶段的返工与延误，更能通过提升电气系统可靠性降低运维阶段的故障频率与维修成本，从而增强房地产项目的市场竞争力与用户满意度。

二、建筑电气施工精细化管理的实施路径

（一）精细化管理的体系构建

建筑电气施工精细化管理需以系统性框架为基础。组织架构设计是管理体系的基石，通过明确建设单位、监理单位与施工方的权责边界，建立层级清晰的决策与执行机制，例如建设单位主导技术标准制定、监理单位负责过程监督、施工方落实具体操作，辅以跨部门协同平台实现信息实时共享^[3]。标准化流程建设贯穿项目全周期，涵盖设计阶段的技术交底规范、采购阶段的供应商准入标准、施工阶段的工艺工法手册及验收阶段的量化评价指标，形成闭环管理链条。通过编制标准化作业指导书、建立流程动态调整机制，可有效规避人为操作偏差，确保施工活动与设计意图、成本目标高度契合。

（二）关键环节的流程优化

设计阶段的流程优化以 BIM 技术为核心，通过三维建模实现电气管线与土建、机电专业的空间冲突预判与综合排布优化，减少施工阶段的设计变更与返工。材料管理需构建供应商分级评估体系，结合质量、价格、交付能力等维度建立动态“黑白名单”，并实施进场材料全数检验，采用二维码溯源技术确保材料规格与设计文件一致。施工阶段推行工序交接“三检制”，即自检、互检、专检逐级确认质量合格后方可进入下一工序；隐蔽工程采用影像化存档技术，通过全景拍摄与云端存储实现施工过程可追溯，为质量争议提供客观依据，同时降低后期维修对建筑结构的破坏风险^[4]。

三、建筑电气施工质量控制的关键技术

（一）智能化技术应用

1. 基于物联网的电气设备实时监测与调试技术

物联网技术通过部署传感器与智能终端，实现电气设备运行参数的实时采集与传输，如电流、电压、温度及绝缘状态监测。数据经云端平台分析后，可精准定位设备异常并触发预警，指导施工人员远程调整设备参数或现场排查故障，减少人工巡检盲区^[5]。调试阶段，物联网系统支持多设备联动测试，例如通过无线通信模块（如 LoRa、NB-IoT）自动校准配电柜保护定值，确保继电保护动作的准确性与时效性，显著提升调试效率与系统可靠性，为后期运维提供高精度数据支撑。

2. AI 算法在施工质量缺陷预测中的应用

AI 算法通过深度学习历史施工数据与缺陷案例，构建线缆敷设、接线端子压接等工艺的质量预测模型。例如，基于卷积神经

网络（CNN）的图像识别技术可分析线缆敷设路径的弯曲半径、固定间距是否符合规范，实时反馈偏差位置并生成修正建议^[6]。AI 结合激光点云扫描数据，可预测管线交叉区域的空间冲突概率，辅助施工方案优化。此类技术将质量管控从“事后检查”前移至“过程预警”，降低人为疏漏导致的返工成本，同时为工艺标准化提供量化依据。

（二）隐蔽工程的质量控制要点

1. 管线预埋深度与防腐蚀处理的技术规范

管线预埋深度需严格遵循设计文件与《建筑电气工程施工质量验收规范》（GB 50303），避免因覆土不足导致机械损伤或过深增加开挖成本^[7]。防腐蚀处理应依据环境湿度、土壤酸碱度等参数选择涂层材料（如环氧树脂、热浸镀锌），施工时需确保涂层连续无气泡，焊接接头处采用双重防腐包裹。质量验收阶段，可采用超声波测厚仪检测涂层厚度，辅以电火花检测仪排查针孔缺陷，确保管线在潮湿、腐蚀性环境中长期稳定运行。

2. 防雷接地系统电阻测试与验收标准

防雷接地系统的接地电阻值直接影响雷电流泄放能力，测试需采用四线法消除引线电阻干扰，并依据季节系数修正土壤湿度影响。根据《建筑物防雷设计规范》（GB 50057），一类防雷建筑接地电阻应 $\leq 10\Omega$ ，二类、三类 $\leq 30\Omega$ ，且独立接闪杆需满足 $\leq 4\Omega$ 。施工中需重点检查接地极焊接质量、降阻剂填充密实度及等电位联结导通性，隐蔽前留存电阻测试报告与影像记录，确保验收数据可追溯，避免因接地失效引发雷击事故。

四、质量评估与持续改进机制

（一）质量评估体系的构建

1. 量化评估指标

质量评估体系的构建需基于可量化的核心指标，包括材料合格率、安装误差率、验收一次通过率等。材料合格率通过统计批次抽样检测结果，结合供应商履约能力动态调整权重；安装误差率以设计图纸为基准，采用激光测距仪与三维扫描技术测量管线定位偏差，形成误差分布热力图指导工艺改进；验收一次通过率综合反映施工过程规范性，对未通过项按缺陷类型分类统计，针对性优化管理流程^[8]。量化指标通过数据可视化工具实时更新，为管理层决策提供客观依据，同时倒逼施工方提升工艺精度。

2. 第三方检测与业主参与的多维度评估模式

引入第三方检测机构对隐蔽工程、防雷接地等关键节点进行独立抽检，确保数据客观性，例如利用红外热成像仪检测电缆接头温升异常。业主参与评估则通过分阶段开放施工现场、组织质量观摩会等形式，收集使用功能与观感质量的反馈意见。第三方专业性与业主体验性评价相结合，形成覆盖技术合规性、使用便利性及美观性的综合评估报告，弥补单一内部检查的局限性，增强质量管控的公信力。

（二）质量问题反馈与改进机制

1. PDCA 循环在电气施工中的应用

PDCA 循环通过计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、

处理（Act）四阶段实现质量持续改进。以某项目电缆桥架安装倾斜超标为例，计划阶段制定垂直度误差 $\leq 2\%$ 的技术标准；执行阶段采用激光定位仪辅助安装；检查阶段统计不合格点位并分析主因（如支架焊接偏差）；处理阶段修订焊接工艺标准并开展专项培训。该案例表明，PDCA 可将局部问题转化为系统性优化，形成“问题识别－根因分析－措施固化”的改进路径^[9]。

2. 数字化管理平台支持下的问题追溯与闭环管理

基于 BIM 与物联网的数字化管理平台集成施工日志、检测报告及影像资料，通过唯一编码关联工序、材料与责任人。质量问题可追溯至具体施工时段、操作人员及设备批次，例如管线渗漏问题通过平台调取预埋阶段影像与材料检验记录，快速定位防腐层破损责任方。平台自动生成整改通知单并跟踪闭环进度，结合大数据分析高频缺陷类型，推送预警至类似项目，实现经验教训的跨项目共享与风险前置管控。

（三）人员培训与能力提升

1. 施工人员岗前培训与技能考核制度

施工人员需通过理论考试与实操考核双认证方可上岗，理论培训涵盖电气安全规范、标准图集解读等内容^[10]。实操考核聚焦线缆压接、接地焊接等关键工艺，采用模拟工位与实物样板结合的方式，确保技能达标。定期复训制度针对新工艺、新设备（如智能配电柜安装）更新培训内容，考核结果与绩效薪酬挂钩，激发技能提升主动性，降低人为操作失误率。

2. 技术交底与标准化操作手册的动态更新

技术交底采用“图文＋视频”多媒体形式，直观展示管线预

埋深度、桥架跨接等工艺要点，施工人员通过移动终端扫码获取交底资料。标准化操作手册依据 PDCA 循环中的改进成果持续修订，例如将 AI 缺陷预测模型的应用流程纳入线缆敷设章节，新增 BIM 冲突检测操作指南。手册每季度更新版本并同步至管理平台，确保施工规范与技术创新同步迭代，形成“经验沉淀－知识转化－标准升级”的良性循环。

五、总结与展望

精细化管理通过优化组织架构、全周期标准化流程及智能化技术集成，利用明确的协同机制与 BIM、物联网等技术，提升施工效率和质量。关键技术包括隐蔽工程防腐处理、防雷接地测试规范及 AI 缺陷预测模型，形成从材料到验收的闭环控制，减少返工率和运维风险。然而，当前实践中中小房企面临技术应用滞后、数字化平台建设成本高及跨项目数据共享机制缺乏的问题，导致部分企业难以全面推行智能监测与 AI 分析，质量管控仍依赖传统方法，标准化程度不一。绿色建筑与智能电网的发展将推动电气施工向低碳化、智能化转型，深化 BIM 和数字孪生在能耗模拟和设备选型中的应用，并探索光伏－储能系统一体化施工规范。此外，智能电网要求兼容微电网架构和需求响应功能，区块链技术则有望解决质量数据溯源和多方协同信任问题，为高质量发展提供支持。

参考文献

- [1] 付海强. 高层住宅小区建筑施工综合管理研究 [D]. 华南理工大学, 2013.
- [2] 孙孝林. 浅谈精细化管理在施工企业成本管理中的重要性 [J]. 城市建设理论研究（电子版）, 2014(36): 6763-6763.
- [3] 李刚, 毛青峰. 浅谈建筑施工如何强化精细管理 [J]. 城市建设理论研究（电子版）, 2015(11): 3479-3480.
- [4] 单禹宾. 高层建筑电气工程施工质量管理探讨 [J]. 建筑与装饰, 2022(21): 58-60.
- [5] 张晓翔. 建筑项目现场施工的精细化质量管理策略 [J]. 中国厨卫: 建筑与电气, 2021(004): 000.
- [6] 张溢, 陈阳. 建筑电气工程施工质量控制及管理的研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2021(6): 36-37.
- [7] 唐芸. 建筑工程项目施工的精细化管理分析 [J]. 装饰装修天地, 2017(18): 59.
- [8] 王文鑫. 浅谈建筑电气工程施工质量控制及安全管理 [J]. 模型世界, 2022(12): 178-180.
- [9] 王西仓. 建筑电气工程施工存在的问题及应对措施 [J]. 建筑工程技术与设计, 2016, 000(005): 1613-1613.
- [10] 刘华. 浅谈建筑电气工程施工管理及质量控制 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(8): 1161.

绿色施工技术在建筑工程中的应用效果评价体系构建

徐琳

山东久川项目管理有限公司, 山东 烟台 264000

DOI:10.61369/ERA.2025070035

摘 要 : 全球可持续发展推进和我国“双碳”战略实施背景下, 建筑行业要用绿色施工技术实现低碳转型, 但没有系统的应用效果评价体系, 技术应用成效无法量化, 阻碍行业绿色发展, 构建绿色施工技术应用效果评价体系, 涵盖资源利用、环境影响、施工管理等方面。用层次分析法和熵权法确定指标权重, 结合模糊综合评价法等科学评估, 借数字孪生、区块链等推动评价结果应用, 这一体系量化绿色施工技术成效, 为施工技术改进、行业经验交流和政策制定提供参考, 推动建筑行业绿色高质量发展。

关 键 词 : 绿色施工技术; 建筑工程; 应用效果; 评价体系; 可持续发展

Construction of Evaluation System for the Application Effect of Green Construction Technology in Construction Engineering

Xu Lin

Shandong Jiuchuan Project Management Co., LTD., Yantai, Shandong 264000

Abstract : In the context of promoting global sustainable development and implementing China's "double carbon" strategy, the construction industry needs to achieve a low-carbon transformation through green construction techniques. However, without a systematic evaluation system for application effectiveness, the results of technical application cannot be quantified, hindering the green development of the industry. To address this, we propose the construction of an evaluation system for the application effectiveness of green construction techniques, covering resource utilization, environmental impact, and construction management. We use Analytic Hierarchy Process (AHP) and Entropy Weight Method to determine the index weights, combined with scientific evaluations such as Fuzzy Comprehensive Evaluation Method. By utilizing digital twins, blockchain, and other technologies, we can promote the application of evaluation results. This system quantifies the effectiveness of green construction techniques, providing references for construction technology improvement, industry experience exchange, and policy formulation, and promoting green and high-quality development in the construction industry.

Keywords : green construction technology; construction engineering; application effect; evaluation system; sustainable development

引言

“双碳”目标与生态文明建设促使建筑行业发生深刻变化, 绿色施工技术是行业转型重点, 没有科学的应用效果评价体系, 技术实施效果无法衡量, 影响行业绿色升级。构建包括资源利用、环境影响等方面的评价体系, 结合先进评估手段和数字技术, 衡量技术应用程度, 利用评价结果推动行业可持续发展, 为建筑工程绿色转型提供重要支持和创新方向。

一、明晰目标原则

(一) 锚定核心目标

资源角度紧盯可再生材料运用及节水节能技术, 以竹钢等可循环建材替代传统钢材, 借助雨水收集系统与智能灌溉设备组合, 实现水资源充分高效利用, 能源范畴启用光伏一体化施工技

术及地源热泵系统, 切实降低对传统化石能源的倚赖。于环境把控上, 运用抑尘喷淋技术和噪声屏障装置, 全方位管控施工污染, 严格保障施工现场 PM2.5 浓度、噪声分贝契合国家标准, 效益维度着重凸显技术创新对施工效率的提升作用, 装配式建筑施工技术大幅削减现场湿作业时间, BIM 技术深度优化施工流程进而缩短工期, 最终实现建筑工程绿色低碳发展态势与经济效益同

作者简介: 徐琳 (1985.11-), 男, 汉族, 山东烟台莱阳人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 建设工程—建筑工程。

步显著提高。

（二）确立准则框架

构建绿色施工技术评价体系要依循系统性、动态性原则，系统性把建筑全生命周期技术纳入评价，地基施工用低振动桩基技术，主体施工采用清水混凝土免抹灰技术，装修阶段应用环保涂料喷涂技术，构成完整技术链^[1-3]。动态性结合技术发展和政策变化，定时更新评价标准，按照最新《绿色建筑技术导则》加入碳足迹核算、智能监测等新内容，科学性通过标准化技术参数量化，明确太阳能热水系统集热效率达 $\geq 45\%$ ，装配式构件预制率不低于60%。实用性保证评价指标可操作性，运用红外热成像检测、无人机巡检等成熟方法采集数据，让评价体系如实展现绿色施工技术应用状况。

二、搭建指标体系

（一）资源利用指标

材料选用着重突出可回收再生材料优先，例如以再生骨料含量不低于30%的再生骨料混凝土取代常规混凝土，大力推广模块化铝合金模板以显著减少木材使用量，水资源管控明确要求必须配置三级沉淀池与中水回用系统，施工产生的废水经处理后用于车辆冲洗、场地降尘等环节，确保其回用比例达到70%及以上。能源运用方面，施工现场需安装智能电表监测装置，对能耗数据进行实时统计；强制使用功率密度相较传统灯具降低40%的LED节能照明设备；积极推广太阳能光热系统，使其能够满足施工现场60%以上的热水需求，通过这些举措切实降低不可再生资源的消耗。

（二）环境影响指标

大气污染防治部署雾炮降尘系统和自动喷淋围挡，严格把控施工现场扬尘浓度，使其不高于 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ；土方运输车辆强制装配卫星定位装置与密闭苫盖系统，杜绝遗撒导致扬尘，噪声管控环节，用低噪声压破碎锤替换传统机械，确保施工区域边界噪声在昼间不超70dB、夜间不超55dB^[4-6]。水污染治理借助油水分离设备处理施工废水，将化学需氧量（COD）排放浓度严格控制在 $\leq 150\text{mg}/\text{L}$ ，固体废弃物管理规定建筑垃圾资源化利用率要达50%，利用移动式破碎筛分设备把废弃混凝土制成再生骨料，达成减量化与循环再利用目标。

（三）施工管理指标

运用BIM 5D技术开展施工进度模拟及资源灵活调配，借三维信息模型合理规划材料进场时刻与堆放地点，降低二次搬运造成的损耗，安装物联网传感器实时监测施工设备运转状况，实现故障提前预警与维护优化，有效减少设备闲置情况。使用无人机定期对施工现场进行航拍，与GIS技术结合生成进度对比模型，将施工进度偏差严格控制在 $\pm 3\%$ 范围内，借助数字化签章系统完成技术交底和文件签署工作，压缩流程审批耗时，推动施工管理朝着信息化、智能化方向迈进。

（四）安全健康指标

防尘防护配置电动送风过滤式防尘呼吸器，其过滤标准达

N95级别；安装可升降防尘隔离棚，对焊接、切割等产生作业区实施物理分隔，通风系统启用变频轴流风机，保障地下作业空间每小时换气不少于6次。安全监测运用毫米波人体雷达，实时监控人员作业区域，一旦出现危险行为即刻触发声光警报，施工现场布设智能饮水设备，搭配水质在线监测系统，保证饮用水契合GB 5749-2022标准，多维度守护人员健康安全。

（五）技术创新指标

推行3D打印建筑技术，达成复杂构件成型，相比传统工艺材料损耗率下降20%；运用装配式装修技术，墙面地面等部品于工厂预制，现场干式安装，减少湿作业污染。采用自愈合混凝土技术，内置微生物胶囊修复裂缝，增强结构耐久性，监测方面，布置物联网环境监测微站，集合PM2.5、温湿度、噪声传感器，数据分钟级刷新；利用数字孪生技术搭建虚拟施工场景，模拟各技术方案绿色效益，为技术创新提供数据与决策支持。

三、确定指标权重

（一）运用分析方法

用层次分析法构建含资源利用、环境影响、施工管理、安全健康、技术创新5个一级指标及20个二级指标的递阶层次架构，经专家打分建判断矩阵，明确指标重要程度。引入熵权法修正层次分析法结果，借助施工中智能监测设备采集的实时数据，像能耗监测系统的日用电量、水质监测仪的废水处理参数等，通过信息熵算出各指标客观权重。融合两种方法时按0.6:0.4分配权重，既发挥专家经验主观判断长处，又增强数据驱动客观性，让评价结果如实展现绿色施工技术应用状况。

（二）权衡指标权重

资源利用指标下，因“双碳”目标对材料循环利用需求迫切，可回收材料应用率权重设为18%，比传统材料节约指标更高；环境影响指标内，考虑大气污染防治的紧要性，生物纳膜抑尘技术应用效果权重定为15%，高于废水处理相关指标^[7-9]。依据《绿色建筑技术标准》最新规定，动态改变技术创新指标权重，把装配式建筑预制率权重从12%提至15%，凸显其在绿色施工中的重要地位，搭建权重动态调整模型，按季度依据政策变动和技术更新数据，自动更新指标权重系数，让评价体系紧跟行业绿色发展趋势，为施工技术改进给出准确指导。

四、制定评价标准

（一）量化数值标准

资源利用层面，材料资源明确提出可再生材料在总建筑材料中的占比不得低于30%，像竹钢、再生骨料混凝土这类可循环材料，其损耗率必须严格控制在5%以内，以此保障材料高效利用，水资源利用方面，规定施工现场雨水收集系统的有效容积要能够切实满足每日施工用水量的40%，循环水利用率需达到75%以上，同时单位建筑面积施工用水量不得超过1.2立方米，从多方面实现水资源的合理运用，能源利用环节，要求光伏发电系统的装机

容量需占施工现场总用电需求的20%，地源热泵系统的能效比要达到4.5以上，且施工区域综合能耗强度较基准值降低15%，降低对传统能源依赖。环境影响量化标准中，大气污染防治要求施工现场PM_{2.5}平均浓度不超过75 μg/m³，借助生物纳膜抑尘技术使扬尘浓度降低率达到80%；噪声污染控制上，昼间施工噪声不得超过70分贝，夜间不超过55分贝，应用主动降噪技术后设备噪声需降低15分贝以上，废水排放严格遵循GB 8978-1996三级标准，重金属离子去除率达到99%，经生态沟渠净化后的水质COD值小于120mg/L，固体废弃物资源化利用率需达到70%，低温热解技术处理有机垃圾的产气率应不低于0.3m³/kg，实现废弃物有效处理与利用。

（二）规范性要求

技术规范层面，明确绿色施工技术应用须契合《绿色建筑技术导则》《建筑工程绿色施工规范》等国家与行业标准，竹钢安装、装配式建筑构件连接等施工工艺，都要严格依标准流程操作，保障技术应用合规^[10-12]。创新评价着重考量新技术、新工艺应用成效，像装配式建筑技术应切实减少现场湿作业、缩短工期，BIM技术在施工流程优化中要明显提升施工效率。可持续性评估关注技术于建筑全生命周期适用性，比如相变储能建材在各异气候下的温控表现，太阳能热水系统不同季节的集热稳定性等，施工单位需建立技术应用档案，详细记录技术实施过程、效果反馈与改进办法，实现绿色施工技术应用全程可追溯，推动建筑工程绿色施工技术不断优化发展。

五、开展科学评价

（一）选择评估方法

材料资源评估过程中，将可再生材料应用率超40%设定为“优”，对应隶属度1，低于20%则归为“差”，隶属度为0，介于两者间数值借S型函数平滑过渡，构建起连续隶属度体系，依据层次分析法构建的权重矩阵，借助加权平均算子进行运算，从而

得出各指标综合模糊评价结论。灰色关联分析法从数据关联角度切入，以《建筑工程绿色施工规范》技术参数为参照序列，施工现场智能监测获取的实时数据为比较序列。能源利用评价方面，直接将光伏发电装机容量占比、地源热泵能效比等实际数据与标准值的灰色关联度进行比对，关联度越接近1，达标程度越高，通过计算邓氏关联度、绝对关联度等多类指标，搭建综合关联度评价模型，精确量化各指标与绿色施工标准的契合程度。

（二）推动结果应用

技术迭代进程中，深度融合数字孪生与机器学习技术，将评价结果转化为直观可交互的虚拟仿真场景，当装配式建筑构件吊装效率评价得分欠佳时，借助数字孪生模型全方位模拟不同吊装设备参数组合、多样化作业流程，同时运用遗传算法对吊装路径进行智能优化，最终将仿真得出的优化方案精准反馈至实际施工环节。引入强化学习算法，依据实时评价结果对施工参数进行动态精细调节，经多次迭代优化，成功将构件安装误差从5mm显著缩减至2mm，切实构建起“评价-模拟-优化”的智能改进体系。

行业共享领域，以区块链与知识图谱技术为依托，搭建完备的绿色施工技术生态平台，将通过评价达标的生物纳膜抑尘技术、相变储能材料应用等典型案例进行上链存证，构建起包含技术原理剖析、施工工艺详解、评价数据记录的知识图谱^[13-15]。平台借助自然语言处理技术精准解析项目需求，运用图神经网络算法快速匹配适用技术方案。

六、结语

绿色施工技术应用效果评价体系明确目标原则，构建多维指标，科学确定权重标准，借助先进评估方法量化，评价结果经技术迭代、行业共享和政策调控应用，推动建筑工程全流程绿色升级，体系构建实施为建筑行业可持续发展提供标准路径，实现资源高效利用、环境保护与技术创新协同。

参考文献

- [1] 王涛. 建筑工程中绿色施工技术的应用与实践[J]. 建筑, 2025, (04): 123-125.
- [2] 关志崎. 框架结构施工技术在住宅建筑工程中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (12): 148-150.
- [3] 薛丽华, 马雪妍. 施工质量管理技术在房屋建筑工程中的应用研究[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(02): 128-130+162.
- [4] 李芳. 太阳能光伏技术在现代城市房屋建筑工程中的绿色应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (11): 89-91.
- [5] 李鑫. 绿色施工技术在建筑工程中的应用与评价[J]. 住宅与房地产, 2025, (11): 21-23.
- [6] 南宝仁. 绿色节能施工技术在现代房屋建筑施工中的应用研究[J]. 住宅与房地产, 2025, (11): 83-85.
- [7] 邹伟, 孟伟玉, 唐华奕. 大体积顶板混凝土施工技术在建筑工程中的应用实践[J]. 中国水泥, 2025, (04): 69-71.
- [8] 王小波. 防渗漏施工技术在房屋建筑工程中的应用[J]. 建材发展导向, 2025, 23(07): 34-36.
- [9] 方冬. 绿色节能施工技术在房屋建筑工程中的应用探究[J]. 建材发展导向, 2025, 23(07): 118-120.
- [10] 郭凯. 后浇带施工技术在建筑工程中的应用要点分析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(07): 85-87.
- [11] 邢建文. 新型绿色节能技术在建筑工程施工中的应用[J]. 建材发展导向, 2025, 23(07): 130-132.
- [12] 李龙. 灌注桩后注浆施工技术在建筑工程施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (10): 34-36.
- [13] 王侃. 建筑装饰装修工程中绿色施工技术的应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (07): 89-91.
- [14] 张龙. 绿色建筑材料在建筑工程施工中的应用研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(06): 100-102.
- [15] 吴春华. BIM技术在建筑工程施工图审查中的探索与应用[J]. 中国建设信息化, 2025, (06): 64-67.

建筑工程与市政工程检测中的智能化技术应用

陈明涛

河北雄安中天检测技术有限公司, 河北 雄安 070001

DOI:10.61369/ERA.2025070037

摘要：建筑工程与市政工程检测是保障基础设施质量与安全的关键环节，其重要性随城市化进程加速而愈发凸显。传统检测方式效率低下、精度不足，智能化技术应运而生，推动工程检测变革。《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（2020 年）明确要求加快智能建造技术在工程建设各环节的应用，促进建筑产业现代化升级。无人机、BIM 技术及智能传感器系统等智能化技术在检测中的应用，提高了检测效率与准确性，降低了人力成本与安全风险。然而，数据处理复杂、技术标准不完善等问题仍制约其发展。深入研究智能化技术在工程检测中的应用现状、优势及改进方向，对推动行业高质量发展、提升基础设施安全水平具有重要意义。

关键词：建筑工程检测；智能化技术；应用研究

Application of Intelligent Technology in Construction and Municipal Engineering Testing

Chen Mingtao

Hebei Xiong'an Zhongtian Detection Technology Co., Ltd., Xiong'an, Hebei 070001

Abstract： Construction and municipal engineering testing is a crucial link in ensuring the quality and safety of infrastructure, which has become increasingly important with the acceleration of urbanization. Traditional testing methods are inefficient and lack precision, and intelligent technology has emerged to drive changes in engineering testing. The "Guiding Opinions on Promoting the Coordinated Development of Intelligent Construction and Building Industrialization" (2020) clearly requires the accelerated application of intelligent construction technology in all aspects of engineering construction, promoting the modernization of the construction industry. The application of intelligent technologies such as drones, BIM technology, and intelligent sensor systems in testing has improved testing efficiency and accuracy, and reduced labor costs and safety risks. However, issues such as complex data processing and incomplete technical standards still constrain its development. In-depth research on the current status, advantages, and improvement directions of intelligent technology in engineering testing is of great significance for promoting the high-quality development of the industry and improving the safety level of infrastructure.

Keywords： construction engineering testing; intelligent technology; application research

引言

随着城市化进程加速，建筑工程与市政工程检测作为保障基础设施质量和安全的关键环节，重要性日益凸显。传统检测方式因效率低下、精度不足等问题，难以满足现代工程建设需求^[1]。在此背景下，智能化技术应运而生并迅速发展，为工程检测领域带来变革。2020 年《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》明确提出加快智能建造技术在工程建设各环节的应用，推动建筑产业现代化升级。无人机、BIM 技术及各类智能传感器系统等智能化技术在工程检测中的应用不断拓展，不仅提高了检测效率和准确性，还降低了人力成本和安全风险^[2]。但目前智能化检测技术在实际应用中仍面临数据处理复杂、技术标准不完善等挑战。深入研究智能化技术在工程检测中的应用现状、优势及改进方向，对推动工程检测行业高质量发展、提升基础设施安全水平意义重大。

一、建筑工程与市政工程检测概述

（一）建筑工程检测内容与特点

建筑工程检测作为保障建筑质量和安全的关键环节，涵盖众

多关键项目，其中结构安全检测尤为重要。通过对建筑主体结构的承载能力、稳定性等进行检测，确保建筑在使用过程中的安全性^[3]。材料性能检测同样不可或缺，涉及建筑材料的强度、耐久性、防火性能等方面，直接关系到建筑的使用寿命和功能。建筑

工程检测的复杂性体现在多个方面，建筑结构的多样性导致检测方法和标准需因项目而异。检测过程需考虑多种因素的相互影响，如施工环境、材料批次差异等。高精度要求则源于建筑安全的严格标准，微小的误差可能导致严重的安全隐患，因此检测技术需不断更新以满足日益提高的精度需求^[4]。

（二）市政工程检测范围与难点

市政工程检测的范围广泛，涵盖道路、桥梁、排水系统等重要设施。道路检测需关注路面平整度、承载能力以及耐久性，以保障交通顺畅和行车安全^[5]。桥梁检测则侧重于结构的稳定性、耐久性和抗震性能，确保其在长期使用中的可靠性。排水系统检测主要针对管道的畅通性、结构完整性以及排水能力，防止城市内涝等灾害。市政工程检测面临的挑战众多，环境干扰是其中之一，如恶劣天气、交通流量等对检测过程和结果的影响^[6]。隐蔽工程检测更是难点所在，地下管道、桥梁内部结构等难以直接观察，需借助先进的检测设备和技术手段。此外，市政工程设施的使用频率高，检测时需尽量减少对正常运行的影响，这对检测的效率和准确性提出了更高要求。

二、智能化技术简介

（一）智能化技术的内涵与外延

智能化技术是以人工智能、物联网、大数据、云计算等前沿技术为基础，通过模拟人类智能行为，实现对复杂系统和任务的自动化处理与优化^[7]。它涵盖了机器学习、深度学习、传感器网络、自动化控制、智能机器人、虚拟现实与增强现实等多种技术类型。在各领域，智能化技术展现出显著的通用优势，能够高效处理海量数据，快速识别模式与异常，实现精准决策。它可自动执行重复性任务，减少人为错误，提高工作效率与质量^[8]。同时，智能化技术还具备自适应与自学习能力，能够根据环境变化不断优化自身性能，为各行业带来智能化、高效化的变革。

（二）智能化技术在工程检测中的适配性

智能化技术与工程检测需求高度契合，工程检测要求高精度、高效率、全面性以及复杂环境的适应能力，而智能化技术恰好能够满足这些需求。在建筑工程检测中，无人机搭载高精度传感器可快速获取建筑结构的外观与部分内部信息，通过图像识别与数据分析，精准定位潜在缺陷。在市政工程检测中，智能机器人可深入排水管道、桥梁内部等难以人工进入的区域，实时传输数据并进行初步分析。利用大数据分析技术，可对海量检测数据进行挖掘与建模，提前预测工程结构的潜在风险，为预防性维护提供依据^[9]。智能化技术的自动化与智能化特性，能够显著提升工程检测的效率与精准度，降低人力成本与安全风险，推动工程检测行业向智能化、高效化方向发展。

三、智能化技术在建筑工程检测中的应用

（一）无人机检测技术

1. 无人机检测系统的组成与原理

无人机检测系统由无人机平台、传感器、数据传输模块以及地面控制站组成。无人机平台具备高机动性和灵活性，能够快速到达建筑外墙和屋顶等检测区域。传感器包括高清摄像头、红外热成像仪和激光扫描仪等，用于采集建筑表面的图像、温度分布和三维点云数据^[10]。数据传输模块通过无线通信技术将采集到的数据实时传输到地面控制站。地面控制站配备专业的图像处理和数据分析软件，用于对采集到的数据进行处理和分析。

无人机检测的原理基于图像识别和三维建模技术。图像识别技术通过对高清摄像头采集的图像进行分析，识别建筑外墙的裂缝、渗漏等缺陷。红外热成像仪则通过检测温度差异，发现隐藏在墙体内部的结构问题，如保温层缺失或水分渗透。激光扫描仪采集的三维点云数据用于构建建筑的三维模型，通过与设计模型或历史数据对比，检测建筑结构的变形和位移情况。这种多技术融合的方式能够全面、高效地完成建筑外墙和屋顶的检测任务。

2. 无人机检测在建筑外墙、屋顶检测中的应用案例

在某高层建筑的外墙检测中，无人机搭载高清摄像头和红外热成像仪，对建筑外墙进行了全面检测。通过图像识别技术，发现外墙存在多处细微裂缝，这些裂缝在常规检测中难以被发现。红外热成像仪检测到部分区域温度异常升高，经进一步检查确认为外墙保温层局部失效。针对这些问题，施工单位采取了针对性的修复措施，对裂缝进行了灌浆修补，并更换了失效的保温材料。无人机检测不仅提高了检测效率，还降低了检测成本和安全风险，确保了建筑外墙的质量和安全性。

（二）基于 BIM 的检测技术

1. BIM 技术在建筑工程检测中的优势

BIM 技术通过构建建筑的三维模型，将建筑的设计、施工和运维信息集成于一体。在建筑工程检测中，BIM 模型与检测数据的融合能够实现可视化效果，使检测人员能够直观地查看建筑结构的检测结果。例如，通过将无人机采集的图像和三维点云数据导入 BIM 模型，检测人员可以在模型中直接标注缺陷位置，生成详细的检测报告。此外，BIM 技术在施工过程检测中具有动态监测能力。施工过程中，BIM 模型可以实时更新，反映建筑结构的实际状态。通过与智能传感器采集的数据结合，BIM 模型能够实时监测施工过程中的应力、位移等关键参数，及时发现施工质量问题，为施工管理提供科学依据。

2. BIM 与智能传感器结合的检测实践

在某大型商业建筑的施工过程中，BIM 技术与智能传感器结合用于结构检测。智能传感器安装在建筑的关键部位，如梁、柱和基础，用于实时采集应力、应变和位移数据。这些数据通过无线网络传输到 BIM 模型中，与模型中的设计参数进行对比分析。

当检测到数据异常时，BIM 模型会自动发出警报，并提供详细的异常位置和原因分析。例如，在一次混凝土浇筑过程中，智能传感器检测到某根梁的应力值超过设计允许范围，BIM 模型及时发出警报，施工人员迅速采取措施，避免了结构损伤。通过 BIM 与智能传感器的结合，不仅提高了检测的精度和效率，还为施工过程的质量控制提供了有力支持。

四、智能化技术在市政工程检测中的应用

（一）智能化排水管道检测技术

1. 排水管道检测机器人的工作原理

排水管道检测机器人通过其先进的机械结构和传感器系统实现高效检测。机器人通常配备多自由度的移动装置，能够在复杂管道内灵活移动，适应不同直径和形状的管道。其前端搭载高清摄像头和光源，能够实时拍摄管道内壁的图像，并通过无线传输技术将图像数据发送至地面控制终端。同时，机器人配备定位系统，利用惯性导航和里程计技术，实时记录自身位置，确保检测路径的准确性和可追溯性。在识别管道裂缝、堵塞等异常情况时，机器人利用图像识别算法对拍摄的图像进行分析，通过对比标准图像模板和实时图像的差异，快速准确地识别出裂缝、变形、堵塞等病害，并标注其位置和严重程度，为后续维修提供精确数据。

2. 排水管道检测机器人的应用效果与优势

排水管道检测机器人在实际应用中展现出显著的高效性和准确性。以某城市排水管道检测项目为例，传统人工检测方法耗时长且难以进入狭窄管道，而机器人仅用时传统方法的三分之一，便完成了同等长度管道的检测任务。机器人能够进入直径仅 30 厘米的管道，检测精度可达毫米级，成功识别出多处微小裂缝和隐蔽堵塞点，这些病害在人工检测中极易被遗漏。其优势在于无需人工下井，大大降低了检测风险，同时高精度的图像识别和定位功能，为管道维护提供了详细且准确的数据支持，显著提升了排水管道检测的效率和质量，保障了城市排水系统的正常运行。

（二）智能化道路检测技术

1. 道路病害智能识别系统

道路病害智能识别系统基于先进的图像处理和机器学习技术，能够快速准确地识别路面病害。该系统通过车载摄像头采集道路表面图像，利用图像预处理算法去除噪声和干扰，增强图像质量。随后，系统运用深度学习算法，如卷积神经网络（CNN），对图像进行特征提取和分类，识别出裂缝、车辙、坑槽等常见病害。CNN 模型经过大量标注数据的训练，能够学习不同病害的特征模式，从而在实际检测中快速准确地识别病害类型和位置。系统还具备实时数据处理能力，能够在车辆行驶过程中即时输出病害检测结果，为道路养护决策提供及时依据，有效提高了道路检测的效率和准确性。

2. 智能化道路检测在道路养护中的作用

智能化道路检测技术对道路养护计划的制定具有重要指导意义。通过实时、准确的病害检测数据，养护部门能够全面掌握道路病害的分布和严重程度，从而制定科学合理的养护计划。例如，在某城市主干道的检测中，智能识别系统发现部分路段裂缝密集且深度较大，而另一些路段仅存在轻微车辙。根据这些数据，养护部门优先安排裂缝修复工作，采用针对性的修复材料和工艺，有效延长了道路使用寿命。同时，系统还能够对病害发展情况进行长期监测，为预防性养护提供数据支持，减少因病害恶化导致的突发性道路损坏，保障道路的通行安全和使用寿命，提升道路养护的科学性和经济性。

（三）智能化桥梁检测技术

1. 桥梁结构健康监测系统的智能化构成

桥梁结构健康监测系统是智能化桥梁检测的核心组成部分，其智能化构成体现在多个方面。在硬件方面，桥梁上安装了多种智能传感器，包括应变传感器、加速度传感器、位移传感器以及环境传感器等。这些传感器能够实时采集桥梁在运营过程中的应力、应变、振动、位移以及环境因素等数据。同时，系统配备了先进的数据采集终端，具备高精度、高频率的数据采集能力，并通过无线或有线网络将数据传输至监测中心。在软件方面，系统采用了智能化的数据处理与分析算法，能够对采集到的海量数据进行实时处理和分析，识别出桥梁结构的异常状态。通过传感器与数据采集终端的协同工作，以及智能化软件的支撑，桥梁结构健康监测系统能够实现对桥梁关键参数的实时监测，为桥梁的安全运营提供有力保障。

2. 智能化桥梁检测技术对桥梁安全的保障

智能化桥梁检测技术在保障桥梁安全方面发挥了重要作用。以某城市的一座大型桥梁为例，该桥梁安装了智能化监测系统后，在一次暴雨天气中，系统通过应变传感器和位移传感器实时监测到桥梁部分区域的应力和位移出现异常变化。经过数据分析，发现是由于暴雨导致桥墩基础局部冲刷，影响了桥梁的稳定性。监测系统及时发出警报，相关部门迅速采取措施，对桥墩基础进行了加固处理，避免了可能发生的桥梁安全事故。这一案例充分说明了智能化检测技术能够及时发现桥梁安全隐患，为桥梁的安全运营提供有力支持。智能化检测技术不仅提高了桥梁检测的效率和准确性，还降低了检测成本和安全风险，对于保障桥梁的安全运营具有重要意义。

五、总结

智能化技术在建筑工程和市政工程检测中成果斐然。无人机检测技术，以其高机动性和多传感器融合优势，高效完成建筑外墙、屋顶检测任务，精准定位潜在缺陷，提高检测效率与安全性。基于 BIM 的检测技术通过三维模型与检测数据融合，实现可

视化动态监测，有力支持施工质量控制。排水管道检测机器人、道路病害智能识别系统及桥梁结构健康监测系统，在市政工程检测中显著提升了检测效率与质量，确保养护决策及时准确，保障桥梁安全运营。

然而，智能化检测技术应用仍面临挑战：复杂的数据处理、不同设备间的兼容性差以及部分设备成本较高，限制了其广泛应用。展望未来，随着人工智能算法优化和硬件性能提升，检测精

度与效率将进一步提高；大数据与云计算技术的应用将推动检测数据高效处理与共享，促进智能化协同作业。技术标准的完善不仅有助于不同技术的融合与集成降低成本，还将拓展应用范围，为工程检测行业的高质量发展提供强大动力，全面提升基础设施的安全水平。这样，智能化技术将在未来的建筑工程与市政工程检测中扮演更为关键的角色。

参考文献

[1] 张恩源. 电气工程的智能化技术及应用研究 [J]. 科技经济导刊, 2017(32):1.

[2] 朱敬冬. 建筑工程施工中智能化监测技术的研究与应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(10):96-98.

[3] 陆飞. 建筑工程检测中无损检测技术的应用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(4):4.

[4] 何伟. 智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的应用 [J]. 中国航班, 2023:119-121.

[5] 马惠永. 现代项目管理在建筑智能化系统工程中的应用研究 [J]. 建材与装饰, 2022(006):018.

[6] 刘昊. 建筑工程中电气智能化技术的应用研究 [J]. 建材发展导向, 2021, 019(002):374-375.

[7] 朱江. 建筑电气工程项目中电气智能化技术的应用研究 [J]. 现代盐化工, 2021(5):155-156.

[8] 白爱丽. 基于建筑电气工程及其自动化和智能化技术研究 [J]. 电子乐园, 2022(005):000.

[9] 张志强. 智能化技术在建筑电气工程中的应用分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 000(003):1875.

[10] 焦盛坤. 建筑电气工程智能化技术应用研究 —— 以康明斯厂房工程为例 [J]. 世界家苑, 2022(14):144-146.

水电站监控系统实时数据采集与动态响应机制研究

李华威

南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏 南京 210015

DOI:10.61369/ERA.2025070013

摘 要 : 在水电行业蓬勃发展的大背景下, 水电站监控系统对于确保电站安全无虞、稳定持久、高效运转发挥着极为关键的作用。本文聚焦于水电站监控系统的实时数据采集与动态响应机制开展深入研究, 详细阐释了相关技术原理以及实际应用状况, 精准剖析了现存问题, 并对未来发展趋势展开前瞻性展望, 期望能为水电站监控系统性能的提升提供极具价值的参考依据。

关 键 词 : 水电站监控系统; 实时数据采集; 动态响应机制

Research on Real-Time Data Acquisition and Dynamic Response Mechanism of Hydropower Station Monitoring System

Li Huawei

Nanjing NARI Water Conservancy and Hydropower Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210015

Abstract : In the context of the booming development of the hydropower industry, the hydropower station monitoring system plays a crucial role in ensuring the safety, stability, durability, and efficient operation of the power station. This article focuses on conducting in-depth research on the real-time data acquisition and dynamic response mechanism of the hydropower station monitoring system. It elaborated on the relevant technical principles and practical application status, accurately analyzed the existing problems, and provided a forward-looking prospect for future development trends. It is hoped that this article can provide a valuable reference for improving the performance of hydropower station monitoring systems.

Keywords : hydropower station monitoring system; real-time data acquisition; dynamic response mechanism

引言

随着全球对清洁能源需求增长, 水电在能源结构中地位越发重要。如今水电站装机容量增大、机组增多, 运行环境复杂, 对监控系统要求更高。及时准确采集实时数据并快速响应, 是保障安全稳定运行、提升发电效率的关键。但传统监控系统已无法满足需求, 研究新的实时数据采集与动态响应机制迫在眉睫。深入探究该机制, 能保障安全、优化发电调度, 还能推动行业技术进步, 助力水电事业长远发展。

一、水电站监控系统概述

(一) 监控系统组成

水电站主要由挡水、泄水、取水等建筑物及发电厂房组成, 实现防洪、发电、灌溉、调水调沙等功能。监控系统是水电站实现远程自动化控制的重要途径。因此水电站监控系统是一个集计算机、控制、通信、网络、电力电子设备于一体的综合自动化系统, 多以独立的局域网形式存在, 主要实现设备运行监视、控制调节及操作、日志报告统计、发电自动控制、有功和无功功率自动调节等功能^[1]。水电站监控系统由四层协同构成。数据采集层部署设备采集核心设备关键参数, 为系统提供基础数据。传输层用有线或无线技术, 快速稳定传输数据。处理与管理层接收数据后

分析、处理、存储并依规则决策。人机交互层为操作人员提供直观界面, 助其掌握运行状态、下达指令, 实现高效管控。

(二) 监控系统功能

水电站监控系统具备多种关键功能, 保障着水电站稳定运行与高效管理。实时监测功能借助全方位传感器网络, 全天候不间断监测设备运行状态, 一旦设备运行参数异常, 能迅速察觉, 为后续处理争取时间。故障诊断功能凭借先进算法和模型, 深度分析大量设备运行数据, 精准判断故障类型、位置及影响, 为技术人员提供可靠处理建议, 提高故障排查修复效率, 减少设备停机时间。自动控制功能按照预设策略, 实现对水电站设备的远程精准控制, 从机组启停、发电功率调节到设备协同运行, 全面实现发电自动化, 降低人力成本, 提升发电稳定性与可靠性^[2]。数据管

理功能有序存储历史数据，方便技术人员查询，通过统计分析历史数据，可发现设备运行规律，优化设备维护计划，推动运行效率不断提升。

（三）监控系统发展趋势

当下，水电站监控系统呈现多前沿发展趋势，智能化最为显著。引入人工智能和大数据技术，借助机器学习算法分析历史数据，能提前察觉设备潜在故障隐患并预警，让维护人员提前防范，精准判断故障，提升处理效率与自主决策能力。随着物联网技术发展，设备间互联互通更广泛，可实时采集、传输和交互数据，依据水情、负荷自动调整设备参数，提高发电效率。同时，监控系统朝着分布式、模块化发展。分布式架构适应复杂环境，分散数据处理与存储，提升性能；模块化设计便于功能模块集成、替换与添加，方便升级维护，降低运维成本，推动系统持续进步。

二、实时数据采集技术研究

（一）数据采集概述

在水电站监控系统中，数据采集是极为关键的基石环节。它承担着获取水电站设备实时运行状态数据的重任，这些数据如展现设备运行状况。为给后续数据分析、处理及决策提供可靠依据，采集数据需兼具准确性、实时性与完整性^[3]。准确性保障数据真实反映设备状态，避免误判；实时性让系统及时掌握设备动态，利于异常时快速响应；完整性提供全面分析所需信息，防止因数据缺失影响判断。数据采集范围广泛，涵盖水情数据、设备运行数据、电气参数等水电站生产各环节，从不同角度为监控系统提供全面信息，构成保障水电站稳定运行的关键数据基础。

（二）数据采集方法

当前水电站监控系统常用模拟量、数字量及分布式采集三种数据采集方法。模拟量采集针对温度、压力等连续变化物理量，传感器将其转换为模拟电信号，再通过 A/D 转换器精准转化为数字量，便于系统后续分析处理。数字量采集面向开关状态、脉冲信号等离散量，可通过数字输入接口直接采集，简单高效，能快速获取离散量信息^[4]。分布式采集借助现场总线技术，连接多个采集节点，实现对水电站各区域分散设备的数据采集。它提高了采集效率，增强了可靠性，能全面、及时获取设备数据，有效满足水电站复杂环境下的数据采集需求。

（三）数据传输与存储

在水电站监控系统中，数据传输与存储对数据有效利用意义重大。数据传输技术丰富，有线通信里，以太网应用广泛、传输速率高，能稳定传输大量数据；光纤传输快、抗干扰且稳定，适用于高要求场景。数据存储方面，数据库管理系统作用关键。目前数据库主要有关系型数据库和非关系型数据库，水电站计算机监控系统目前主要使用的数据库类型为关系型数据库，比如 MySQL、Oracle、达梦数据库、南大通用数据库等；在巨型海量数据库场景及需要对数据时序性要求高的应用场景中，需要使用到时序数据库，全称时间序列数据库，，时间序列数据库指主要

用于处理带时间标签（按照时间的顺序变化，即时间序列化）的数据，带时间标签的数据也称为时间序列数据。

（四）数据预处理

在水电站监控系统中，数据预处理是提升采集数据质量的关键环节，对后续分析和应用十分重要。数据清洗是数据预处理的重要操作。由于传感器故障、传输干扰等原因，采集的数据中可能存在错误值，这些错误值会影响数据分析的准确性；同时，数据中还可能出现重复值，占用存储空间并增加处理负担^[5]。通过数据清洗，能够有效去除错误值和重复值，减少干扰数据。去噪操作同样关键。在数据采集与传输过程中，不可避免会混入噪声，影响数据的真实性。采用滤波算法可以去除这些噪声，使数据更真实地反映设备运行状态。归一化也是数据预处理的必要步骤。不同类型的数据量纲和取值范围不同，若直接分析，可能会导致部分数据特征被忽视或过度放大。将数据映射到统一区间进行归一化处理后，数据处于同一尺度，便于对比分析，能有效提高数据可用性，让分析结果更准确，从而为水电站的运行管理提供可靠的数据支持。

三、动态响应机制分析

（一）动态响应概述

在水电站运行体系中，动态响应极为关键。它是监控系统对实时数据变化或异常迅速决策与行动的能力，直接关乎系统稳定、电站安全及可靠性。动态响应流程包含更多紧密相连环节。监控系统通过传感器与传输渠道获取设备运行数据，综合考量数据变化是否正常，基于分析结果制定决策、确定应对措施，最后执行决策^[6]。各环节相互影响，数据接收的质量影响分析判断，分析判断的准确性决定决策合理性，决策执行效果关乎异常应对成效。任一环节出问题，都可能削弱响应效果，威胁电站安全。唯有各环节高效准确运行，监控系统才能妥善应对各种情况，保障水电站安全平稳运行。

（二）响应机制分类

在水电站监控系统的动态响应体系里，阈值触发响应和智能诊断响应共同保障电站稳定运行。阈值触发响应基础且应用广泛，技术人员预先为关键数据设阈值，一旦采集数据超阈值，系统迅速触发报警，同时启动调整设备参数、启用备用设备等预设动作，能快速处理明显异常数据。智能诊断响应代表先进技术方向，它借助神经网络、专家系统等人工智能算法，深度分析采集数据。算法通过学习大量历史数据，模拟人类专家思维，精准判断设备运行状态，自动识别复杂故障并给出针对性策略。智能诊断响应不仅能解决阈值触发响应难以应对的复杂故障，还会随数据积累持续优化诊断能力，为电站稳定运行筑牢根基^[7]。

（三）响应策略制定

制定科学合理的响应策略是水电站监控系统动态响应机制的核心，需综合多因素考量。故障类型多样，影响程度和处理方式各异，像轻微部件磨损与严重电气短路的应对截然不同。设备重要性也左右响应策略，核心发电设备与辅助设备故障的响应在及

时性、谨慎度上有别。系统运行状态同样关键，满负荷和低负荷时故障响应不同。基于这些，一般故障常报警通知维护人员排查修复，防止故障扩大；严重故障则立即紧急停机保障安全。此外，响应策略要有灵活性。在负荷高峰期，针对非关键设备故障，可优先保障发电，待负荷降低后再维修，从而在确保安全前提下，最大化经济效益与运行效率。

四、实时数据采集与动态响应机制应用实例

（一）某水电站监控系统简介

乌东德水电站是中国第四、全球第七大装机水电站，计算机监控系统是保障电站稳定高效运行的关键设备。计算机监控系统软件采用南京南瑞水利水电科技有限公司的新一代 IMC 一体化管控平台，以达梦数据库（DM8）为核心，融合读写分离集群技术，能高效处理高并发数据，保障数据安全和系统稳定。系统集成传感器网络、物联网和大数据趋势分析平台，数据采集覆盖机组及附属设备、GIS 设备、闸门设备、水情监测设备、电能量采集设备等各个环节，可实时掌握电站整体运行状态。系统架构包含三个层面：硬件层有各类传感器、PLC 控制器、工业交换机设备，协同实现 7×24 小时不间断数据采集，提供大量基础数据。软件层基于达梦数据库构建数据管理平台，结合 LabVIEW 开发的人机交互界面，实现数据可视化和远程控制，提升操作便捷性与效率。与梯调中心、上级调度系统通信采用光纤网通信，通过加密协议保障数据传输安全可靠，有效防止数据泄露和恶意攻击，确保监控系统稳定运行。

（二）实时数据采集与动态响应实施过程

乌东德水电站计算机监控系统在实时数据采集与动态响应方面展现出显著的技术优势，其实施过程通过数据分类采集与传输优化、动态响应机制设计两大核心策略实现高效运作。在数据分类采集与传输优化环节，针对机组 LCU 采集的转速、温度、振动频率等关键控制数据，系统借助控制网进行直传，确保数据以最高优先级传输，为电站设备的稳定运行提供坚实保障；对于设备状态日志、环境监测等非控制类数据，则通过与控制网物理隔离的专用信息网通道传输，有效降低控制网负载率，从初始的 85% 大幅降至 35%，提升了整个系统的数据传输效率与稳定性。

在动态响应机制设计上，系统构建了阈值触发与智能告警体系，预先设定设备运行参数阈值，如轴承温度超过 70℃ 时，系统

将立即自动触发告警，并在 2 秒内将信息推送至运维人员移动终端，确保异常情况能够得到及时处理。此外，

系统通过调度实时计划值曲线功能，依托机组状态大数据分析平台，实现对即将开机或停机的机组进行综合指导，并在开、停机前 15 分钟通过计算机监控系统进行简报、语音提醒运行人员，实现对机组开停机的预测，充分彰显了该监控系统在复杂工况下的智能调控能力与卓越性能。

（三）应用效果分析

乌东德水电站计算机监控系统凭借技术创新与功能集成，在多维度展现出显著的应用成效。在数据采集层面，其传感器网络具备毫秒级采样能力，振动监测频率高达 1kHz，较传统系统提升 10 倍，能够精准捕捉设备细微异常；通过读写分离集群技术，数据库读写效率提升 40%，全年数据丢失率控制在 0.001% 以下，确保数据采集的高效性与完整性。系统稳定性方面，冗余设计与分布式存储赋予其强大的故障自愈能力，单节点故障切换时间不超过 1 秒，2023 年系统可用率达 99.999%；控制网与信息网分离策略使网络拥堵率下降 70% 以上，有效保障高并发场景下的稳定运行。

动态响应功能的优化进一步彰显其技术优势，基于时间戳与设备关联分析的快速故障定位机制，将故障定位时间从平均 30 分钟大幅缩短至 5 分钟内；大数据平台生成的设备健康评分体系，如发电机健康指数 ≥ 90 为优，为运维团队提供智能决策支持，助力预防性维护计划的制定。安全性与合规性方面，系统采用端到端光纤通信加密协议，成功抵御中间人攻击，2023 年实现数据零泄露；操作日志与数据修改记录全程上链存储，满足《电力监控系统安全防护规定》的追溯要求。

五、结束语

本文对水电站监控系统实时数据采集与动态响应机制进行了深入研究，阐述了系统的组成、功能、发展趋势，详细分析了数据采集技术和动态响应机制，并通过实例验证了其应用效果。尽管目前存在一些问题，但随着技术的不断进步，水电站监控系统将朝着更加智能化、高效化的方向发展。通过持续的研究和改进，实时数据采集与动态响应机制将在水电站安全稳定运行、提高发电效率等方面发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 荆芳，葛创杰. 水电站监控系统安全防护体系研究 [J]. 水利信息化，2023,(06):75-79.DOI:10.19364/j.1674-9405.2023.06.013.
- [2] 刘晓彤，迟海龙，杨廷勇. 水电站大数据分布式采集系统研究 [J]. 水电站机电技术，2021,44(10):30-32.DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2021.10.010.
- [3] 曾亚凯. 小水电站群远程监测系统的设计与实现 [D]. 电子科技大学，2021.DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.003666.
- [4] 朱畅. 水电站生态调度操作门机动力学分析与动态安全性评价 [D]. 三峡大学，2023.DOI:10.27270/d.cnki.gsxau.2023.000203.
- [5] 冯泽喜，李斌，余俊阳，等. 水工金属结构设备实时在线监测系统在 HD 水电站中的应用 [J]. 技术与市场，2021,28(12):35-37+43.
- [6] 徐新宇. 基于非线性水力-机械耦合的水电站系统分岔与混沌特性控制研究 [D]. 华中科技大学，2021.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2021.004946.
- [7] 孙智. 智能水电站计算机监控系统及设备的设计与实现 [J]. 中国新通信，2023,25(18):13-15+34.

基于海绵城市理念的市政排水系统改造研究

张辉¹, 刘俊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/ERA.2025070026

摘要： 本文聚焦基于海绵城市理念的市政排水系统改造研究，阐述了海绵城市的概念内涵，强调其在构建人与自然和谐共生城市生态系统中的重要意义，以及与市政排水系统相互补充、协同增效的关系。深入分析了当前市政排水系统的现状及存在的问题，针对这些问题提出了基于海绵城市理念的改造策略，详细设计了改造方案。

关键词： 海绵城市；市政排水系统；改造策略；生态可持续发展

Research on the Transformation of Municipal Drainage System Based on the Concept of Sponge City

Zhang Hui¹, Liu Jun²

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

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

Abstract： This paper focuses on the research of municipal drainage system transformation based on the concept of sponge city. It elaborates on the conceptual connotation of sponge city, emphasizing its significance in building a harmonious and symbiotic urban ecosystem between humans and nature, as well as its complementary and synergistic relationship with the municipal drainage system. The paper conducts an in-depth analysis of the current status and existing problems of the municipal drainage system and proposes transformation strategies based on the sponge city concept to address these issues. Detailed transformation plans are designed.

Keywords： sponge city; municipal drainage system; transformation strategy; ecological sustainable development

引言

海绵城市理念强调城市生态系统的整体性和韧性，倡导通过综合运用“渗、滞、蓄、净、用、排”等技术措施，构建人与自然和谐共生的城市水生态环境。它不仅是对传统城市建设模式的反思与突破，更是实现城市可持续发展的必然选择。将海绵城市理念融入市政排水系统改造，对于提升城市排水防涝能力、改善水环境质量、实现雨水资源化利用具有重要意义。本文旨在深入探讨基于海绵城市理念的市政排水系统改造，分析当前市政排水系统的现状与问题，提出切实可行的改造策略与方案，为推动城市排水系统升级、促进城市生态可持续发展提供理论依据与实践参考。

一、海绵城市理念及关键技术

（一）海绵城市的概念及内涵

海绵城市理念，是在资源逐渐减少、污染逐渐加重的今天所提出的一项新兴理念。根据海绵城市理念的要求，城市应能够像“海绵”一样，具有一定“弹性”，不仅需要能够吸水，还需要保证能够存水，必要时将存储的水资源释放，为城市的发展提供资源支持^[1]。海绵城市的内涵不仅局限于雨水管理，更强调生态系统的整体性和系统性。其核心在于通过对城市规划、建设的管控，综合采用“渗、滞、蓄、净、用、排”等技术措施，修复城市水

生态，涵养水资源，增强城市防涝能力，改善城市水环境，最终实现城市的可持续发展。

（二）海绵城市与市政排水系统的关系

海绵城市与市政排水系统相互补充、协同增效，共同构成城市排水防涝的完整体系。传统市政排水系统主要依靠管道、泵站等设施，将雨水快速排出城市，以应对暴雨等极端天气，但“快排式”的排水方式在面对高强度降雨时，容易出现排水能力不足，导致内涝^[2]。海绵城市理念下的设施侧重于从源头对雨水进行控制，通过“渗、滞、蓄”等措施，降低雨水径流的速度和总量，减轻市政排水系统的压力。两者结合，形成了“源头减排 - 过程

控制—系统治理”的完整排水防涝体系，提高了城市应对雨水灾害的能力，保障城市的水安全和生态平衡^[3]。

二、市政排水系统现状及问题分析

（一）市政排水系统现状调查

目前我国市政排水系统主要由排水管网、排水泵站、污水处理厂等设施构成，在城市建设进程中，排水管网规模不断扩大，许多城市已形成了较为庞大的地下管网体系。以钢筋混凝土管、塑料管材为主的排水管道，承担着城市雨水和污水的输送任务。排水泵站则作为关键节点，在地势低洼或管道高程落差较大的区域，通过水泵提升，保障水流顺利排出。在运行管理方面，多数城市建立了相对完善的监测体系，利用传感器、在线监测设备等技术手段，实时监控排水管网的流量、水位、水质等参数^[4]。同时部分城市引入了智慧排水管理平台，整合排水系统的各类数据，实现对排水设施的智能化调度与管理。此外定期的管网清淤、设备维护工作也在有序开展，一定程度上保障了排水系统的正常运行^[5]。然而不同城市间的发展水平存在显著差异，一线城市及发达地区的市政排水系统建设与管理相对先进，而部分中小城市及老旧城区，在设施更新、技术应用等方面仍较为滞后。

（二）市政排水系统存在的问题

随着城市化进程加快，城市下垫面硬化面积大幅增加，雨水径流系数增大，传统排水系统的设计标准已难以满足高强度降雨的排水需求。尤其是在暴雨季节，部分城市频繁出现内涝，道路积水严重，影响交通出行和居民生活，甚至威胁到生命财产安全^[6]。许多城市的排水管网建设年代久远，部分管道已超期服役，管道腐蚀、破损、接口渗漏等情况严重。这不仅降低了排水效率，还容易导致污水渗漏污染地下水，以及雨水混入污水管网，增加污水处理厂的处理负荷。而且排水管网的布局不合理，存在雨污合流现象，部分区域排水管网管径过小、坡度不足，影响水流速度，造成排水不畅。排水系统的维护管理成本高且效率低，排水管网分布范围广、埋藏深，检测和维修难度大^[7]。传统的人工巡检方式效率低下，难以全面、及时发现管网存在的问题。同时排水设施的维护资金投入不足，导致部分损坏设施无法及时修复，进一步加剧了排水系统的运行风险。此外城市建设过程中的施工活动容易对既有排水管网造成破坏，而后续的修复和衔接工作若不到位，也会影响排水系统的整体性能。

三、基于海绵城市理念的市政排水系统改造策略

（一）改造原则

在整个改造过程中，始终把生态环境保护放在首要位置，尽可能减少对自然生态系统的破坏，致力于恢复和重建城市水生态系统，强化生态系统的自我调节与修复能力，以实现人与自然的和谐共生的目标^[8]。充分考量不同城市和区域在地理环境、气候条件、经济发展水平以及原有市政排水系统状况等方面的差异，制定契合实际的针对性改造方案，避免采用统一标准，确保改造措

施能够切实有效落地实施。从城市整体角度出发，将海绵城市理念下的市政排水系统改造与城市总体规划、土地利用规划、生态环境保护规划等进行有机融合，全面协调地上与地下、新城区与旧城区、雨水与污水等多方面关系，达成系统的整体优化。在保障改造效果的前提下，综合权衡改造成本与收益，合理选择技术和材料，优先运用成本低、效果优且维护便捷的改造技术和措施，保障改造项目在经济层面具备可行性，实现资源的高效合理利用^[9]。

（二）改造目标

提升排水防涝能力是改造的核心目标，通过建设海绵城市设施与优化升级市政排水系统，从源头降低地表径流，增强城市对暴雨等极端天气的抵御能力，进而显著减少内涝发生频率，降低积水深度，为城市居民生命财产安全与正常生活秩序筑牢防线。这一防线的构建也为改善水环境质量创造了有利条件，借助雨水渗透、净化和截留等手段，不仅能减少面源污染，还可有效降低雨污合流对污水处理厂的冲击，提升污水收集和处理效率，最终实现城市水体水质的改善与水生态系统健康状态的恢复。当水环境质量得到保障后，雨水资源化利用便有了坚实的基础，依托于前面建立的雨水处理体系对雨水进行系统的收集、储存和净化，将其广泛应用于城市绿化灌溉、道路冲洗、景观补水等非饮用水领域，可有效提升水资源的循环利用率，缓解城市水资源短缺问题^[10]。通过构建完善的海绵城市与市政排水协同系统，将排水防涝、水质改善、雨水利用等成果整合，全面增强城市生态系统的韧性和稳定性，有助于提升城市的生态服务功能，推动城市向绿色、低碳、可持续方向发展，实现城市建设与生态保护的和谐统一。

（三）改造策略

在城市规划阶段就将海绵城市理念深度融入市政排水系统规划，合理布局城市绿地、水体、广场等空间，增加透水地面面积，预留充足的雨水调蓄空间，同时依据城市不同区域的功能定位和排水需求，制定差异化的排水系统设计标准，提升排水系统的适应性和灵活性。对现有排水管网开展全面排查与评估，修复破损、老化的管道，扩充管径不足区域的管道容量，调整不合理的管网坡度，解决雨污合流问题；在排水管网关键节点增设雨水调蓄池、沉泥井等设施，提升管网的排水和沉淀能力；结合海绵城市建设，在道路、停车场等区域推广透水铺装，在建筑物屋顶建设绿色屋顶，在城市绿地中建设雨水花园、下沉式绿地等，从源头削减雨水径流。通过建立智慧排水管理平台，整合海绵城市设施和市政排水系统的各类监测数据，运用物联网、大数据、人工智能等技术，实现对排水系统运行状态的实时监控、智能分析和精准调度，及时发现系统中的故障和隐患并自动生成解决方案，提高维护管理效率和准确性。同时借助平台对雨水资源的收集、储存和利用进行精细化管理，优化水资源配置。建立多部门协作机制，加强规划、建设、水利、环保等部门之间的沟通协调，打破部门壁垒，形成工作合力，确保改造工作顺利推进；通过宣传教育、社区活动等方式，提高公众对海绵城市和市政排水系统改造的认识和理解，鼓励公众积极参与改造工作，共同监督

和维护城市排水设施。

四、改造方案设计及技术措施

（一）改造区域选择

内涝频发区域应作为重点改造对象，这类区域通常地势低洼、排水不畅，或是因城市建设导致原有水系被破坏，在暴雨季节极易出现积水现象，严重影响居民生活和城市正常运转。生态环境敏感区域也需纳入改造范围，如城市中的河流、湖泊周边，湿地、绿化带等生态脆弱地带，通过海绵城市改造可以有效减少面源污染，改善水体水质，保护和修复生态系统。水资源短缺区域也是改造的重要方向，通过对雨水的收集和利用，能够提高水资源的循环利用率，缓解用水压力。此外结合城市规划和需求，对于正在进行大规模开发建设的新区，可提前将海绵城市理念融入规划设计，避免重复建设；而对于老旧小区、商业街等区域，可通过局部改造提升排水能力和生态环境质量。

（二）改造方案设计

基于不同改造区域的特点和需求，制定差异化的改造方案。对于老旧城区，采取“局部改造 + 系统优化”的策略，优先对破损、老化的排水管网进行修复和更新，扩大管径，调整坡度，解决雨污合流问题；在公共空间和小区内，利用有限的场地建设小型雨水花园、透水铺装停车场、下沉式绿地等海绵设施，增加雨水的渗透和储存能力。新建城区则从规划源头落实海绵城市理念，在道路设计中采用透水路面，合理设置绿化带和生物滞留设施；建筑项目强制要求建设绿色屋顶、雨水收集系统；规划建设大型雨水调蓄公园、湿地公园等，构建完善的海绵城市生态系统，实现雨水的自然积存、渗透和净化。对于生态环境敏感区域，以生态修复和保护为核心，通过恢复自然水系、建设生态驳岸、种植水生植物等措施，增强水体的自净能力；同时在周边区域建设雨水净化湿地，对汇入水体的雨水进行预处理，减少污染

物排放。在水资源短缺区域，重点建设雨水收集和储存设施，如雨水罐、蓄水池等，并配套建设雨水净化系统，将收集的雨水用于绿化灌溉、道路冲洗等，提高雨水资源化利用效率。

（三）关键技术措施

在改造过程中采用透水混凝土、透水砖等材料铺设路面和广场，使雨水能够迅速下渗到地下，补充地下水，同时减少地表径流；在绿地建设中采用下凹式绿地和生态树池，通过土壤和植物的过滤作用净化雨水，并增加雨水的渗透量。雨水储存技术主要依托雨水调蓄池、蓄水池、雨水罐等设施，在降雨时收集储存雨水，在需要时进行回用；大型雨水调蓄池可结合城市公园、绿地等进行建设，兼具景观和调蓄功能，小型雨水罐则适用于家庭和小型公共建筑，用于收集屋面雨水。雨水净化技术通过物理、化学和生物等多种手段去除雨水中的污染物，常见的有植被缓冲带、人工湿地、砂滤池等。此外智慧监测与管理技术贯穿改造全过程，通过在排水管网、海绵设施中安装传感器，实时监测水位、流量、水质等数据，并将数据传输至智慧排水管理平台。平台利用大数据分析和人工智能算法，实现对排水系统的智能调度和优化管理，及时发现和处理设施故障和排水隐患。

五、结束语

基于海绵城市理念对市政排水系统进行改造，是应对城市内涝、水资源短缺和水生态失衡等问题的有效路径，更是推动城市可持续发展的必然选择。通过对海绵城市理念的深入理解与应用，将“渗、滞、蓄、净、用、排”等技术措施与市政排水系统的优化升级紧密结合，从规划设计到具体实施，从设施改造到智慧化管理，全方位提升城市排水防涝能力，改善水环境质量，实现雨水资源的高效利用。这一改造不仅需要政府、企业和科研机构的协同合作，加大技术研发与资金投入，更离不开公众的广泛参与和支持。

参考文献

- [1] 黄成泽. 海绵城市理念在市政排水系统中的应用研究 [J]. 居业, 2021, (10): 190-191.
- [2] 刘焱. 海绵城市中的市政排水系统分析 [J]. 现代园艺, 2016, (20): 162. DOI: 10.14051/j.cnki.xdyy.2016.20.125.
- [3] 麻芳. 基于海绵城市理念的市政排水工程设计探讨 [J]. 新城镇科技, 2024, 33(10): 51-53.
- [4] 于亚杰. 海绵城市理念在市政给排水设计中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(19): 198-200. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.19.065.
- [5] 周毓豪. 基于海绵城市理念的市政道路给排水设计分析 [J]. 工程建设和设计, 2024, (19): 120-122. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.10.037.
- [6] 李程熙, 何希. 基于海绵城市理念下的城市公共空间更新实践——以重庆市盘溪河、肖家河、跳墩河流域海绵城市改造专项工程展示区为例 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (28): 217-219. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202428073.
- [7] 卢颖. 海绵城市在公共建筑给排水设计中的应用 [J]. 大众标准化, 2024, (18): 127-129.
- [8] 孙小晶. 海绵城市建设理念下雨水资源化利用及案例应用研究——以上海市某园区雨水系统改造项目为例 [J]. 城市建筑, 2024, 21(19): 15-17+27. DOI: 10.19892/j.cnki.csjz.2024.19.04.
- [9] 吴怡桦. 海绵城市理念在市政给排水设计中的应用分析 [J]. 工程建设和设计, 2024, (17): 103-105. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.09.033.
- [10] 许雪艳. 海绵城市理念在城市轨道交通建设中的融合运用 [J]. 江苏建材, 2024, (04): 134-136.

地下水渗流对地质工程围岩稳定性的影响机制及数值模拟研究

高晓龙^{1,2}, 吕国斌^{1,2*}, 胡宸^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ERA.2025070028

摘 要 : 本文聚焦于地下水渗流对地质工程围岩稳定性的影响机制及数值模拟研究, 阐述了地下水渗流基本理论, 同时介绍了地质工程围岩稳定性概念, 以及 BQ 分级法、RMR 分级法等评价指标, 深入分析地下水渗流对围岩稳定性的影响。在数值模拟方法上, 详细探讨了有限元法、有限差分法和流固耦合数值模拟的原理、优缺点及应用场景。研究成果为准确评估地质工程围岩稳定性、优化工程设计与施工提供了理论依据和技术支持。

关 键 词 : 地下水渗流; 围岩稳定性; 影响机制; 数值模拟

Study on the Influence Mechanism and Numerical Simulation of Groundwater Seepage on the Stability of Surrounding Rocks in Geological Engineering

Gao Xiaolong^{1,2}, Lv Guobin^{1,2*}, Hu Chen^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This paper focuses on the influence mechanism and numerical simulation of groundwater seepage on the stability of surrounding rocks in geological engineering. It elaborates on the basic theory of groundwater seepage and introduces the concept of surrounding rock stability in geological engineering, as well as evaluation indexes such as the BQ classification method and RMR classification method. It provides an in-depth analysis of the impact of groundwater seepage on the stability of surrounding rocks. In terms of numerical simulation methods, the principles, advantages, disadvantages, and application scenarios of the finite element method, finite difference method, and fluid-solid coupling numerical simulation are discussed in detail. The research results provide a theoretical basis and technical support for accurately evaluating the stability of surrounding rocks in geological engineering and optimizing engineering design and construction.

Keywords : groundwater seepage; surrounding rock stability; influence mechanism; numerical simulation

引言

在影响地质工程稳定性的众多因素中, 地下水渗流是极为关键的一项。哈尔滨地铁建设中, 部分路段因地下水渗流出现围岩失稳, 其不仅改变围岩力学性质、影响结构, 还增加施工风险、延长工期、提高成本。随着数值模拟技术发展, 能通过有限元法直观观察渗流规律及对围岩稳定性的动态影响, 为二者间关系的研究提供了帮助。但目前不同地质条件下的渗流影响机制研究不足, 成果通用性差, 数值模拟参数选取也不准确可靠。本文致力于分析二者关系, 明确渗流作用规律, 为地质工程提供理论和技术支持, 降低工程风险, 保障工程安全稳定运行。

一、地下水渗流与地质工程围岩稳定性基础理论

(一) 地下水渗流基本理论

地下水渗流是地下水在岩土孔隙、裂隙或溶隙中的流动现

象, 与地表水径流差异显著。其主要驱动力为水头差与重力, 水头差促使地下水从高水头向低水头处流动, 重力则使地下水向下渗透。1852 年, 法国工程师达西 (Darcy) 做了大量实验, 提出了著名的 Darcy 定律 (又称渗透线性定律)。Darcy 定律表明,

通讯作者: 吕国斌, 邮箱: 249618122@qq.com

渗流量与渗流面积、水力坡降和渗透系数成正比^[1]。达西定律的表达式为（ Q ——渗透水量； A ——横断面积； h_1 ——渗流入口水头； h_2 ——渗流出口水头； k ——渗透系数； J ——水力坡度； s ——流动距离）。渗透系数反映了岩土允许地下水通过的能力，与岩土的孔隙结构、颗粒大小及分布等紧密相关，不同地层的岩土特性不同，导致渗透系数有差异，进而影响地下水渗流速度和流量。地下水渗流场由含水层、隔水层、地下水水位、流速、流向等要素构成，等水头线和流线可描述渗流场特征，等水头线展示水头分布，流线呈现地下水流动轨迹，二者相互垂直。通过监测绘制等水头线和流线，能直观了解地下水在各含水层的渗流规律，为地下水渗流研究提供重要依据。

（二）地质工程围岩稳定性概念与评价指标

地质工程围岩稳定性是指在地质工程施工及运营过程中，围岩在各种力的作用下保持自身稳定、不发生坍塌或过大变形的能力，其直接关系到地质工程的安全与正常使用。围岩稳定性受多种因素影响，包括岩体结构、岩石强度、地下水作用、地应力状态等^[2]。为了准确评估围岩的稳定性，工程领域中发展出了多种行之有效的评估手段，其中岩体质量分级是较为常用的方法之一。例如BQ分级法，该方法依据岩石的坚硬程度、岩体完整程度等关键指标，计算出岩体基本质量指标BQ。随后结合地下水状态、初始应力状态等实际情况进行修正，最终划分出岩体的质量等级。这一等级划分结果能够为工程设计和施工提供极具价值的参考依据。另一种广泛应用的RMR分级法综合考量了岩石强度、RQD值、节理间距、节理条件以及地下水等多个因素，通过全面评分的方式确定岩体质量等级。此外还可以借助全站仪、位移计、应力计等专业设备监测围岩位移、应力变化等物理量评估其稳定性，通过这些设备获取的实时数据，能够及时、准确地反映出围岩状态的变化情况^[3]。一旦发现异常，便可以迅速采取相应的措施，从而有效保障地质工程的安全。

二、地下水渗流对围岩稳定性的影响

（一）地下水渗流对围岩力学性质的影响

渗透力是地下水渗流作用于围岩的重要力学因素，当渗流发生时，地下水在岩土孔隙或裂隙中流动，会对周围的岩土颗粒施加渗透力。依据达西定律，渗流速度与水力梯度成正比，而渗透力与渗流速度相关，所以水力梯度越大，渗透力越强。在实际的地质工程中，若围岩处于地下水丰富区域，较大的水力梯度会产生可观的渗透力。这种渗透力会打破围岩原有的应力平衡，使围岩颗粒受到附加作用力，导致围岩应力状态改变。原本稳定的应力分布被破坏，部分区域应力集中加剧，增加了围岩变形和破坏的风险^[4]。岩石的矿物成分与结构决定其遇水后的软化特性，富含亲水性矿物的岩石在地下水长期浸泡下，矿物颗粒间的联结力会减弱。这是因为水分子进入岩石矿物晶格，削弱了颗粒间的化学键，使岩石强度降低。相关研究表明，部分页岩饱和状态下的抗压强度仅为干燥状态的30%–50%，抗剪强度降低幅度也在30%–40%左右。岩石强度的降低，使得围岩在自身重力和外部荷载

作用下更容易发生变形和破坏。当岩石孔隙被水充满，其重度会显著增加。假设岩石干燥时重度为 γ_d ，孔隙水重度为 γ_w ，孔隙率为 n ，那么饱和岩石重度 $\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$ 。对于一些大型地下工程，围岩体积庞大，地下水造成的重度增加会使围岩对支护结构产生更大压力。

（二）地下水渗流对围岩结构的影响

地下水渗流对围岩结构的影响是多维度的，涉及到岩体结构的力学特性改变、溶蚀作用引发的结构破坏以及对潜在滑动面的影响，这些都严重威胁着地质工程的安全稳定。结构面在岩体中广泛存在，是影响岩体力学性质和稳定性的关键因素。地下水渗流会改变结构面的力学特性，其中最突出的是降低结构面的抗剪强度^[5]。结构面的抗剪强度遵循库仑定律，即 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ （ τ 为抗剪强度， c 为黏聚力， σ 为正应力， ϕ 为内摩擦角）。地下水的存在会使结构面的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 减小，一方面，地下水在结构面间的润滑作用降低了颗粒间的摩擦力，导致内摩擦角减小；另一方面，长期的水–岩相互作用会溶解结构面间的胶结物质，使黏聚力下降。研究显示在富含黏土矿物的结构面中，地下水长期作用后，黏聚力可能降低40%–60%，内摩擦角减小 $10^\circ - 20^\circ$ 。这使得结构面更容易发生滑动，从而破坏岩体的整体稳定性，在地质工程中可能引发围岩失稳坍塌事故。在可溶岩地区，地下水的溶蚀作用对围岩结构破坏严重。地下水含有一定量的碳酸等酸性物质，在长期渗流过程中，会与可溶岩发生化学反应。随着时间推移，溶蚀作用使岩石孔隙不断扩大，形成溶蚀裂隙和溶洞^[6]。这些溶蚀结构的出现，不仅削弱了岩石的强度，还改变了岩体的完整性和连续性。在岩溶地区的隧道工程中，若遇到大规模溶洞，可能导致隧道顶部坍塌、突水突泥等严重事故，给工程建设和运营带来巨大风险。此外地下水渗流还会对潜在滑动面产生影响，在地质构造复杂区域，岩体中存在许多潜在的滑动面，地下水的渗流会增加滑动面上的孔隙水压力。根据有效应力原理，有效应力 $\sigma' = \sigma - u$ （ σ 为总应力， u 为孔隙水压力），孔隙水压力的增加会减小有效应力，进而降低滑动面上的抗滑力。同时地下水的浸润作用会使潜在滑动面附近的岩土体软化，抗剪强度降低。

三、地下水渗流数值模拟方法

（一）有限元法

有限元法是地下水渗流数值模拟中广泛应用的一种方法，它的核心思想是将连续的求解区域离散为有限个互不重叠的单元，这些单元通过节点相互连接。在处理地下水渗流问题时，基于渗流的基本方程对每个单元进行分析，建立单元的渗流方程。以二维稳定渗流为例，将渗流区域剖分成三角形或四边形单元，假设单元内的水头函数为线性或二次函数形式，通过在单元边界上满足一定的条件，利用变分原理或加权余量法，推导出单元的有限元方程。之后将所有单元的有限元方程进行组装，形成整个渗流区域的总体有限元方程。该方程通常是一个大型的线性代数方程组，通过求解这个方程组，就能得到各个节点的水头值。有限元

法具有很多优势,对复杂边界条件和非均质介质有很强的适应性,在模拟具有不规则形状边界的含水层或包含多种不同渗透系数岩土体的渗流区域时,能够灵活地划分单元以贴合实际情况。在模拟哈尔滨地区地下水渗流时,由于该地区含水层结构复杂,存在不同类型的岩土体,有限元法可以根据实际地质条件,合理划分单元,准确模拟地下水在不同介质中的渗流情况^[7]。同时它还可以方便地处理各种类型的边界条件,如给定水头边界、流量边界等。不过有限元法也存在一定的缺点,如计算过程相对复杂,需要较多的前处理工作来划分单元和确定节点信息,计算量较大,对计算机的内存和计算速度要求较高。

(二) 有限差分法

有限差分法是另一种常用的地下水渗流数值模拟方法,它的基本原理是用差商来近似代替微商,从而将渗流的偏微分方程转化为差分方程进行求解。对于一维非稳定渗流的基本方程,采用向前差分、向后差分或中心差分格式对时间和空间导数进行离散。例如在空间上采用中心差分格式,在时间上采用向前差分格式,将这些差分近似代入渗流方程就可以得到离散后的差分方程^[8]。有限差分法的优点是概念直观、计算格式简单,易于理解和编程实现,在处理简单的渗流问题,如均质、规则边界的含水层渗流时,能够快速得到计算结果。但它对复杂边界条件和非均质介质的处理能力相对较弱,在模拟具有复杂地形或多种岩土体分布的区域时,需要对差分格式进行特殊处理,否则会影响计算精度。例如在模拟哈尔滨市部分存在断裂构造的区域地下水渗流时,由于断裂带附近岩土体性质变化大,边界条件复杂,有限差分法若不进行精细处理,很难准确模拟地下水在该区域的渗流情况。

(三) 流固耦合数值模拟

在实际的地质工程中,地下水渗流与岩土体变形之间存在着相互作用,这种相互作用被称为流固耦合。流固耦合数值模拟就是考虑这种相互作用,同时求解渗流方程和岩土体变形方程,以更准确地模拟地下水渗流对地质工程的影响。流固耦合的基本理论包括渗流理论和岩土力学理论,渗流方面遵循达西定律等基本渗流规律,描述地下水在岩土体孔隙中的流动;岩土力学方面则基于弹性力学、塑性力学等理论,分析岩土体在应力作用下的变

形和破坏^[9]。在数值模拟中,通常采用有限元法或有限差分法对渗流方程和岩土体变形方程进行离散求解。以二维流固耦合问题为例,将渗流区域和岩土体变形区域离散为单元,建立渗流场和应力场的控制方程。渗流场控制方程反映地下水的流动规律,应力场控制方程描述岩土体在荷载作用下的力学响应。通过考虑孔隙水压力对岩土体应力-应变关系的影响,以及岩土体变形对渗流参数的影响,实现渗流场和应力场的耦合求解^[10]。流固耦合数值模拟能够更真实地反映实际工程中地下水渗流与岩土体变形的相互关系,对于分析地质工程中的诸多问题,如地下洞室开挖引起的围岩变形、地面沉降等具有重要意义。在模拟哈尔滨地区地下工程时,考虑流固耦合作用可以更准确地预测地下水渗流对围岩稳定性的影响,为工程设计和施工提供更可靠的依据。但流固耦合数值模拟计算复杂度高,需要同时考虑多个物理场的相互作用,对计算资源要求更高,且在模型参数选取和验证方面也面临更大的挑战

四、结束语

本文深入剖析了地下水渗流基本理论,明确了达西定律等关键原理在渗流研究中的核心地位,详细阐述了渗透系数与岩土特性的紧密联系,以及渗流场各要素间的相互作用关系。同时也精准界定了地质工程围岩稳定性概念,系统梳理了BQ分级法、RMR分级法等评价指标体系,为后续研究奠定了坚实的理论根基。在影响机制研究方面,全面揭示了地下水渗流对围岩力学性质和结构的多重影响。数值模拟方法研究中,系统对比了有限元法、有限差分法和流固耦合数值模拟的优劣。但本文仍存在一些不足,例如对一些特殊地质条件和复杂环境因素的考虑还不够全面;模型参数的准确性和模型的普适性还有待提高,难以精准反映实际情况。未来可进一步拓展影响机制研究范围,涵盖更多特殊地质和环境因素;加强对数值模拟方法的优化,结合大数据、人工智能等新技术提高模型参数的准确性和模型预测的可靠性;通过更多现场监测和实验研究,验证和完善理论与模拟结果。

参考文献

- [1] 贾晶玺. 浅埋富水隧洞围岩稳定性分析及施工措施研究 [D]. 黑龙江大学, 2023. DOI: 10.27123/d.cnki.ghlj.2023.001802.
- [2] 解丽. 流固耦合作用下断层破碎带隧道围岩稳定性研究 [D]. 中国石油大学(华东), 2022. DOI: 10.27644/d.cnki.gsydu.2022.000423.
- [3] 陈俊熙. 裂隙水流作用下地下水封库围岩稳定性分析 [D]. 福州大学, 2020. DOI: 10.27022/d.cnki.gfzhu.2020.000599.
- [4] 周峰, 郝忠, 张英姿, 等. 道路荷载及地下水渗流对盾构隧道围岩稳定性影响 [J]. 路基工程, 2018, (06): 189-194. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2018.06.40.
- [5] 舒安齐. 含煤隧道围岩稳定性分析及支护结构优化 [D]. 湖北工业大学, 2016.
- [6] 雷明明. 基于流固耦合岩溶隧道围岩稳定性研究 [D]. 重庆交通大学, 2014.
- [7] 孙珍平. 渗流作用下巷道围岩稳定性分析研究 [D]. 安徽理工大学, 2013.
- [8] 李鹏飞. 海底隧道围岩稳定性分析与控制研究 [D]. 北京交通大学, 2011.
- [9] 荣传新, 程桦. 地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (05): 741-744.
- [10] 张旭海. 城市轨道交通车站基坑围护结构渗漏点对其周边地下水渗流场变化规律的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(08): 217-222. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.08.037.

水利工程材料检测技术管理与性能分析研究

贾森伟

雄铁工程检测有限公司, 河北 安新 071600

DOI:10.61369/ERA.2025070036

摘要： 水利工程材料检测技术管理与性能分析研究聚焦材料质量控制关键问题，系统探讨了混凝土、钢材等主要材料的性能要求与检测方法体系。研究构建了传统检测与无损检测相结合的技术框架，提出了检测流程标准化与信息化管理策略，分析了材料性能退化机理并建立数据驱动的预测模型。通过工程案例验证了检测技术优化对性能评估的提升效果，为水利工程质量管控提供了技术支持。研究成果对落实《国家水网建设规划纲要》要求、保障工程长效安全具有实践价值。

关键词： 水利工程材料；无损检测；性能预测

Research on the Management and Performance Analysis of Water Conservancy Engineering Materials Testing Technology

Jia Senwei

Xiongtie Engineering Inspection Co., LTD. Anxin, Hebei 071600

Abstract： The research on the management and performance analysis of material testing technology for water conservancy projects focuses on the key issues of material quality control, and systematically discusses the performance requirements and testing method systems of major materials such as concrete and steel. The research constructed a technical framework combining traditional detection and non-destructive testing, proposed the standardization and information management strategies of the detection process, analyzed the degradation mechanism of material properties and established a data-driven prediction model. The improvement effect of the optimization of detection technology on performance evaluation was verified through engineering cases, providing technical support for the quality control of water conservancy projects. The research results have practical value for implementing the requirements of the "National Water Network Construction Planning Outline" and ensuring the long-term safety of the project.

Keywords： materials for water conservancy projects; non-destructive testing; performance prediction

引言

水利工程材料质量直接关系工程安全与服役寿命，随着《国家水网建设规划纲要》（2023年）的深入实施，对工程材料性能与检测技术提出更高要求。当前水利工程建设规模持续扩大，环境条件日趋复杂，传统材料检测方法在时效性、准确性方面面临挑战。2024年水利部发布的《关于推进水利工程高质量发展的指导意见》明确强调，需加强材料性能智能检测与全生命周期质量管理。现代无损检测、多尺度仿真等新技术的发展为材料性能评估提供了新思路，而检测数据与 BIM、物联网等技术的融合应用，正推动质量控制向数字化、智能化转型。开展水利工程材料检测技术管理与性能分析研究，对保障重大水利基础设施安全运行、落实国家水网建设质量要求具有重要实践意义。

一、水利工程材料分类及性能要求

（一）主要材料类型及其功能

水利工程材料根据功能与结构需求可分为混凝土、钢材、土工合成材料及防渗材料等。混凝土作为核心建筑材料，其性能优化需通过骨料级配和掺合料调整来实现，以提高抗渗性和耐久

性^[1]；钢材主要用于钢筋骨架或压力管道，其力学性能直接影响结构的抗震和抗裂能力^[2]；土工合成材料（如土工布、土工膜）在堤防工程中通过增强土体整体性和排水性能来提升稳定性；防渗材料（如止水带、膨润土防水毯）则需具备优异的伸缩变形能力和长期耐水性，以适应结构变形和渗流控制需求。不同材料的选用需结合工程部位和环境条件进行综合评估，例如大体积混凝土需

重点考虑水化热控制，而水下结构则需关注材料的抗冲刷性能。

（二）关键性能指标与标准规范

水利工程材料的性能评价需以力学性能和耐久性为核心指标。混凝土的抗压强度、弹性模量和抗渗等级是保证结构安全的基础参数，同时需通过复合改性提升其抗裂性和耐腐蚀性；钢材的屈服强度、延伸率和冲击韧性直接影响结构的抗震性能和疲劳寿命；止水材料的拉伸强度、撕裂强度和耐老化性能则是保障伸缩缝密封效果的关键^[3]。行业标准如 GB 50164 和 SL 352 对上述性能的测试方法和合格标准作出了明确规定，特殊环境（如盐渍土或冻融地区）还需满足抗氯离子渗透性或抗冻等级等附加要求。材料性能与规范的符合性是工程验收和质量控制的重要依据。

二、水利工程材料检测技术体系

（一）传统检测方法及其局限性

传统水利工程材料检测主要依赖实验室破坏性试验和现场取样检测。实验室检测通过抗压试验、抗拉试验等方法获取材料的力学性能参数，但试件破坏导致无法重复利用，且与工程实际工况存在差异^[4]。现场取样检测虽能反映部分真实环境下的材料性能，但取样过程可能破坏结构完整性，检测结果受取样位置和数量的影响较大，时效性和代表性不足。此外，传统方法检测周期长，难以满足大型水利工程快速质量评估的需求，在复杂环境或隐蔽工程中的应用受到明显限制。

（二）现代无损检测技术发展

现代无损检测技术通过超声波、红外成像和雷达探测等手段实现材料性能的非破坏性评估。超声波检测利用声波在材料中的传播特性识别内部缺陷和强度变化，在岩体质量检测中表现出良好的适用性^[5]；红外成像通过热辐射差异检测结构表层裂缝和渗漏点，为工程质量评估提供直观依据^[6]。智能化检测设备的应用进一步提升了检测效率，无人机巡检可快速获取大范围工程表现状态，分布式传感器网络则实现材料性能的长期实时监测。这些技术具有非接触、高效率和高精度的特点，在水利水电工程岩体检测和质量控制中展现出显著优势^[7]。

三、材料检测技术管理优化策略

（一）检测流程标准化管理

1. 抽样方法与检测频率的优化

水利工程材料检测的抽样方法需要建立科学的分级分类体系，针对不同风险等级的材料采取差异化的抽样策略^[8]。对于大坝主体结构混凝土等重要部位，应采用空间网格化抽样方法，确保样本覆盖所有浇筑批次和施工时段；钢材焊接接头检测需结合焊接工艺评定结果动态调整抽样比例^[9]。检测频率的优化应建立施工进度-环境因素双参数模型，在高温季节或连续降雨等特殊工况下自动提升检测频次。通过引入统计过程控制（SPC）方法，实现检测数据的实时分析，当过程能力指数（CPK）低于标准值时

触发加严检验程序，这种动态调整机制显著提升了检测效率和可靠性^[10]。

2. 检测数据信息化管理

基于 BIM 的材料检测管理系统实现了质量数据的全流程数字化管控。通过开发定制化的 BIM 插件，将检测数据与模型构件智能关联，支持三维空间质量缺陷定位和可视化分析。系统采用物联网技术自动采集传感器数据，实时更新结构健康状态，当检测值超过预警阈值时自动推送报警信息至相关责任人。移动端应用实现了检测记录的电子化填报，结合 GPS 定位确保数据采集的真实性和时效性。检测报告自动生成模块内置标准模板库，大幅减少人工编制时间，同时保证报告格式的规范统一。历史检测数据的深度挖掘为工程质量趋势分析和预测维护提供了数据基础。

（二）质量控制与风险防控

1. 检测结果偏差分析与校正

水利工程材料检测结果的可靠性直接影响工程质量评估的准确性。检测偏差主要来源于仪器系统误差、操作人员技能差异和环境条件波动三个方面。建立标准化的仪器定期校准制度，采用标准样品进行平行试验验证，可有效控制系统误差。针对人员操作差异，实施检测人员资质分级管理和操作视频追溯机制，关键检测环节设置双人复核制度。环境因素引入的偏差需通过建立温湿度修正系数库进行补偿，特殊环境下的检测数据需标注工况条件。开发智能化的检测数据校验算法，自动识别异常数据并提示复检，通过建立检测质量评分体系持续提升检测过程的可控性。

2. 基于风险管理的检测计划制定

水利工程材料检测计划制定遵循风险分级管控原则。按工程结构重要性、材料部位及失效后果划分风险等级，高风险区域（如大坝防渗体、压力管道）实施增强检测。用风险矩阵法优化资源配置，保障高风险项目检测频次与覆盖面。结合施工进度、环境数据动态调整计划，开发风险评估系统辅助制定，通过全过程跟踪实现资源与质控需求匹配。

四、材料性能分析与案例研究

（一）典型材料性能退化机理分析

1. 混凝土碳化与钢筋锈蚀的耦合效应

混凝土碳化与钢筋锈蚀是水利工程结构耐久性退化的典型耦合过程。二氧化碳渗透导致混凝土碱性降低，当碳化前沿到达钢筋表面时，破坏钝化膜引发锈蚀反应。锈蚀产物体积膨胀产生环向拉应力，加剧混凝土保护层开裂，形成碳化-锈蚀-开裂的正反馈循环。水工结构长期处于干湿交替环境，加速了碳化深度发展和锈蚀速率，特别是水位变动区构件表现更为显著。氯离子侵蚀与碳化协同作用进一步恶化钢筋锈蚀状况，在海水环境或除冰盐使用区域需特别关注。通过电化学测试和微观结构分析证实，碳化引起的 pH 值下降使钢筋腐蚀电流密度提高 2-3 个数量级，显著缩短结构服役寿命。

2. 土工材料的老化与环境因素关联性

土工合成材料在水利工程中的性能退化受紫外线辐射、温湿

循环、化学侵蚀等因素影响。聚丙烯、聚酯类土工布受长期紫外线照射，拉伸强度年衰减率达 3 - 5%；干湿交替环境加速添加剂溶出，反滤结构有淤堵风险。埋设 30 年的土工膜接缝强度保留率不足 60%，表现为焊缝脆化和界面剥离。酸性土壤中，聚乙烯材料抗氧化剂消耗速率随 pH 值降低而加快，温度波动使土工格栅蠕变性能恶化。建立环境加速老化与现场暴露试验的相关性模型，可预测不同气候区土工材料使用寿命。

（二）检测数据驱动的性能预测模型

1. 机器学习在材料寿命预测中的应用

机器学习算法通过挖掘历史检测数据中的隐含规律，建立了水利工程材料性能退化的智能预测模型。随机森林算法处理多维检测参数时表现出较强的特征选择能力，可有效识别影响混凝土碳化速率的关键环境因子。深度学习网络通过分析长期的强度检测数据序列，捕捉材料性能演变的非线性特征，预测精度较传统经验模型提升 30% 以上。支持向量回归算法在小样本条件下仍能保持稳定的预测效果，适用于新型复合材料的早期性能评估。集成学习方法融合多种算法的优势，通过加权投票机制降低预测误差，在钢筋锈蚀程度预测中实现了 85% 以上的准确率。模型训练过程中引入贝叶斯优化算法自动调整超参数，显著提高了计算效率和预测可靠性。

2. 多尺度仿真

多尺度仿真技术通过跨尺度关联揭示水利工程材料性能退化机理。分子动力学模拟从原子尺度分析水泥水化产物界面行为与氯离子传输机制，为宏观扩散系数测定提供依据；细观模拟再现骨料 - 浆体界面应力集中，解释宏观力学性能离散性；宏观有限元模型集成微观参数，预测大坝混凝土开裂演化。跨尺度数据传递算法建立材料组成 - 微观结构 - 宏观性能定量关系，指导材料优化设计。其与现场检测交互验证，提升复杂环境下性能预测可靠性，为结构寿命评估提供新范式。

（三）工程案例验证

1. 某水库大坝混凝土耐久性检测实例

某大型水库重力坝运行 15 年后出现表面剥落和渗漏现象，综

合应用多种检测技术评估混凝土耐久性状态。超声脉冲速度测试显示坝体下游面波速降低 15%-20%，表明内部存在微裂缝发育；取芯试样氯离子含量检测发现水位变动区渗透深度达保护层厚度的 70%，钢筋锈蚀风险显著；红外热成像检测识别出 3 处隐蔽渗流路径，与钻孔内窥镜观察结果一致。碳化深度测试数据结合环境监测记录，建立碳化速率预测模型，推算剩余使用寿命仅为设计年限的 60%。基于检测结果，采取表面防腐处理与阴极保护相结合的修复方案，修复后检测指标改善显著，验证了检测技术对工程维护决策的支撑作用。

2. 检测技术优化对性能评估的提升效果

某抽水蓄能电站优化检测技术体系，提升材料性能评估质效：混凝土检测改传统 28 天强度检测为早期强度预测 + 智能养护监控，验收周期缩 40%；钢筋保护层检测用三维激光扫描替单点测量，数据密度增两数量级，精准识别绑扎偏差；土工膜焊缝检测引入红外热成像自动识别系统，缺陷检出率从 85% 提至 98%。检测数据与 BIM 关联实现质量问题定位分析，验收材料性能达标率提 12%。全生命周期检测数据库为后续工程提供数据支撑，验证现代检测技术综合效益。

五、总结

水利工程材料检测技术管理与性能分析研究为工程质量的提升提供了系统性解决方案。通过明确材料性能要求与检测标准，构建了涵盖传统与无损检测的技术体系，确保数据获取的可靠性与全面性。检测流程标准化与信息化管理优化了资源配置，质量控制与风险防控策略降低了工程隐患。材料性能退化机理的深入分析揭示了关键影响因素，数据驱动的预测模型与多尺度仿真技术为寿命评估提供了新方法。工程案例验证表明，优化后的检测技术显著提升了性能评估的准确性与效率，为水利工程全生命周期质量管理奠定了坚实基础。未来研究应进一步融合智能化技术，推动材料检测向自动化、精准化方向发展，以适应复杂工程环境下的更高要求。

参考文献

[1] 陆淑静. 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(112):1.
[2] 管鹏, 陈燕萍. 水利工程混凝土复合材料的制备与力学性能分析 [J]. 塑料助剂, 2023(3):30-33.
[3] 李崇. 水利工程伸缩止水材料性能及应用 [J]. 工业 B, 2015(7):30-30.
[4] 赵海蛟. 浅析水利工程建材质量检测技术与质量控制 [J]. 内蒙古水利, 2015(5):1.
[5] 张卫东. 水利水电工程岩体检测技术的应用分析 [J]. 商品与质量·建筑与发展, 2014, 000(011):643-643.
[6] 孙伟智. 水利工程施工质量检测体系及其应用效果研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2020, 048(006):126-128.
[7] 孟旬. 水利工程建材质量检测技术与质量控制研究 [J]. 建材发展导向, 2020, 18(7):1.
[8] 陈慧. 水利工程设计质量优化管理分析 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 5(024):1587-1588.
[9] 冯晨光, 刘彦闯, 秦静茹. 探究水利工程施工管理优化策略 [J]. 农家参谋, 2017(82):1.
[10] 何万山. 水利工程施工管理的优化策略探究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2021(2):2.

建筑材料检测技术在水利工程建设中的应用与管理

田利波

河北雄安中天检测技术有限公司, 河北 雄安 071600

DOI:10.61369/ERA.2025070038

摘要： 本文探讨了建筑材料检测技术在水利工程建设中的应用与管理。分析了常见建筑材料的检测项目与技术原理，阐述了检测技术在施工前质量把控和施工过程实时监测中的应用。研究了检测设备与技术的更新、标准规范的完善以及管理策略的优化。结果表明，检测技术的提升与科学管理对保障水利工程质量与安全至关重要，可推动行业高质量发展。

关键词： 建筑材料检测；水利工程建设；质量控制

Application and Management of Building Material Testing Technology in Water Conservancy Projects

Tian Libo

Hebei Xiong'an Zhongtian Detection Technology Co., Ltd., Xiong'an, Hebei 071600

Abstract： This paper explores the application and management of building material testing technology in water conservancy projects. It analyzes the testing items and technical principles of common building materials, elaborates on the application of testing technology in quality control before construction and real-time monitoring during the construction process, and investigates the updating of testing equipment and technology, the improvement of standards and specifications, and the optimization of management strategies. The results show that the improvement of testing technology and scientific management are crucial for ensuring the quality and safety of water conservancy projects and can promote high-quality development in the industry.

Keywords： building material testing; water conservancy projects; quality control

引言

在水利工程建设中，建筑材料的质量直接关系到工程的结构安全与使用寿命。随着我国水利基础设施建设的加速推进，对建筑材料检测技术的要求日益提高。近年来，相关政策的出台为建筑材料检测技术的发展提供了明确的指导方向。例如，《关于加强水利工程建设质量安全管理指导意见》（2023年颁布）强调了建筑材料质量检测的重要性，要求建立健全检测体系，提升检测技术的科学性和精准性。在此背景下，深入研究建筑材料检测技术在水利工程建设中的应用与管理，不仅能够有效保障工程质量，还能为水利工程的可持续发展提供有力的技术支撑。

一、建筑材料检测技术概述

（一）常见建筑材料及检测项目

水利工程中常用的建筑材料主要包括混凝土、砂石料和钢筋等^[1]。混凝土作为关键材料，其检测项目主要包括抗压强度、抗渗性能和耐久性，这些指标直接关系到工程的承载能力和使用寿命^[2]。砂石料作为混凝土的重要组成部分，检测项目涵盖级配、含泥量和泥块含量，这些因素影响混凝土的和易性和强度。钢筋则需要检测力学性能，如屈服强度、抗拉强度和伸长率，以确保其能够承受设计荷载^[3]。此外，钢筋的焊接质量也需通过无损检测技术进行评估，以保障结构的安全性。这些检测项目通过科学的检测方法和严格的检测标准，为水利工程的质量提供了重要保障。

（二）检测技术的基本原理与方法

建筑材料检测技术基于物理、化学等基本原理，采用多种检测方法以确保材料质量^[4]。无损检测法利用物理原理，如超声波、射线和电磁感应等，对材料内部结构进行检测，具有不破坏材料、检测速度快和可重复性高的优势，但其对缺陷的定量分析能力有限。化学分析法则通过化学反应来测定材料的成分和性能，例如通过化学滴定法测定混凝土中氯离子含量，以评估其耐久性^[5]。该方法精度高，但操作复杂且耗时较长。这些检测技术通过优势互补，为水利工程材料的质量检测提供了全面且可靠的手段，确保材料能够满足工程设计和使用要求。

二、建筑材料检测技术在水利工程建设中的应用

（一）施工前材料质量把控

在水利工程施工前，对进场的建筑材料进行严格检验是确保工程质量的关键环节^[6]。通过运用多种检测技术，对混凝土的强度、耐久性，砂石料的级配、含泥量，以及钢筋的力学性能等进行精准检测，能够有效筛选出不符合要求的材料^[7]。例如，采用压力试验机对混凝土试块进行抗压强度测试，利用筛分法检测砂石料的级配情况，以及通过拉伸试验测定钢筋的屈服强度和抗拉强度等。这些检测手段能够确保进场材料的质量符合设计与规范要求，从而为后续施工奠定坚实基础，避免因材料质量问题导致的工程隐患，保障水利工程的整体质量与安全。

（二）施工过程中的实时监测

水利工程施工过程中，利用检测技术对正在使用的建筑材料进行实时监测具有重要意义^[8]。施工现场环境复杂，材料在使用过程中可能受到多种因素的影响，如混凝土的养护条件、钢筋的锈蚀情况等^[9]。通过实时监测，能够及时发现材料性能的变化，从而采取相应的措施加以调整。例如，采用无损检测技术对混凝土结构进行内部缺陷检测^[10]，利用超声波检测仪监测混凝土的密实度和内部裂缝情况；同时，通过电化学检测方法实时监测钢筋的锈蚀程度。这些实时监测方法能够确保材料在施工过程中的性能始终处于可控状态，及时发现并解决潜在的质量问题，有效保障施工质量与安全，避免因材料性能下降而引发的工程事故。

三、建筑材料检测技术的优化与创新

（一）检测设备与技术的更新

1. 新型检测设备的特点与优势

新型建筑材料检测设备在精准度和效率方面展现出显著优势。以高精度混凝土强度检测仪为例，其采用先进的超声波技术，能够快速、无损地测量混凝土内部结构的均匀性和强度，相比传统回弹法，检测精度提高 20% 以上，且无需破坏混凝土表面，减少了对结构的损伤。此外，新型设备的自动化程度更高，可实现数据实时采集与分析，大大缩短检测周期，提高检测效率。这些设备还具备智能化功能，能够自动校准和诊断故障，进一步提升了检测的可靠性和稳定性，为水利工程建设提供了更有力的技术支持。

2. 检测技术的创新应用

新的检测技术为水利工程建设带来了更多创新应用方式。例如，利用无人机搭载检测设备对水利工程边坡等难以到达部位进行检测，解决了传统检测方法在复杂地形和高风险区域的局限性。无人机能够快速到达指定位置，搭载的高分辨率摄像头和传感器可以实时获取边坡材料的外观、裂缝情况以及部分物理性能数据。通过图像识别和数据分析技术，能够快速识别潜在的材料质量问题和安全隐患，为及时采取措施提供依据。同时，这种创新应用方式还降低了检测成本和人员安全风险，提高了检测的全面性和及时性，为水利工程的全生命周期管理提供了更高效的技术手段。

（二）检测标准与规范的完善

1. 国内外检测标准的差异与借鉴

国内外在建筑材料检测标准与规范方面存在显著差异。国外

标准在检测方法的精细化和数据处理的严格性方面更具优势，例如欧洲标准对混凝土耐久性检测的环境模拟更为贴近实际工程条件，能够更准确地评估材料的长期性能。美国标准在材料的分类和性能指标设定上更为细致，能够更好地满足不同工程需求。我国可借鉴国外先进经验，进一步完善检测标准，如引入更先进的检测方法和数据处理技术，细化材料性能指标，使其更具针对性和实用性。同时，应加强国际合作与交流，推动标准的国际化接轨，提升我国建筑材料检测标准的国际影响力。

2. 标准更新对水利工程建设的影响

检测标准与规范的更新对水利工程建设质量、进度和成本等方面产生多方面影响。从质量角度看，新标准提高了检测要求，能够更准确地识别材料质量问题，从而提升工程质量。然而，这也可能导致部分材料供应商难以满足新标准，影响材料供应进度，进而影响工程建设进度。在成本方面，新标准可能增加检测费用和材料采购成本，但通过优化检测流程和加强质量控制，可减少因质量问题导致的返工和维修成本，从长期来看具有经济效益。为应对这些影响，工程建设单位应提前了解标准更新内容，加强与材料供应商和检测机构的沟通协调，优化采购和检测计划，确保工程建设顺利进行。

四、建筑材料检测技术的管理策略

（一）检测机构与人员管理

1. 检测机构资质与能力认定

建筑材料检测机构的资质认定与能力评估是确保检测工作科学性和权威性的关键环节。资质认定需依据国家相关法律法规和标准规范，对检测机构的实验室条件、仪器设备、人员资质、管理体系等进行全面审查。检测机构应具备符合要求的实验室环境，包括温度、湿度控制以及防震、防尘等设施，以确保检测结果的准确性。仪器设备需定期校准和维护，且应具备完整的校准记录和设备档案。人员资质方面，检测人员应持有相应的从业资格证书，具备丰富的专业知识和实践经验。管理体系上，检测机构应建立完善的质量管理体系，涵盖检测流程、数据管理、质量控制等环节，确保检测工作的规范性和可追溯性。通过严格的资质认定与能力评估，筛选出具备高水平检测能力的机构，为水利工程建设提供可靠的检测服务。

2. 检测人员的专业素质培养

检测人员的专业素质直接影响建筑材料检测工作的质量与可靠性。检测人员应具备扎实的专业知识，涵盖材料科学、力学、化学分析等多个领域，能够准确理解检测标准和规范，熟练掌握各类检测设备的操作方法。同时，检测人员还需具备良好的数据分析能力，能够对复杂的检测数据进行科学处理和准确解读，为工程质量提供准确的判断依据。为提升检测人员的专业素质，应建立系统的培训体系，包括入职培训、定期培训和专项培训。入职培训着重于基础知识和操作规范的传授，确保新员工快速熟悉工作流程；定期培训则针对新技术、新标准进行更新，保持检测人员的专业知识与时俱进；专项培训聚焦于特定检测项目或设备的深入学习，提升检测人员的专项技能。此外，严格的考核机制是保障检测人员质量的重要手段，通过理论考试和实际操作考核相结合的方式，对检测人员进行定期评估，考核结果与职业晋

升、绩效挂钩，激励检测人员不断提升自身专业水平，从而确保检测工作的高质量开展。

（二）检测流程与质量管理

1. 建立规范的检测流程

在建筑材料检测中，建立规范的检测流程是确保检测工作有序进行的关键。从材料取样环节开始，应严格按照相关标准和规范进行操作，确保取样的代表性和准确性。取样人员需具备专业资质，明确取样数量、部位和方法，并详细记录取样信息，以便追溯。送样过程中，需确保样品的完整性和标识的清晰性，避免样品在运输过程中受损或混淆。检测环节应依据国家和行业标准，采用科学、准确的检测方法，检测人员需严格按照操作规程执行，确保检测数据的真实性和可靠性。检测完成后，结果报告应详细、准确地反映检测过程和结果，包括检测依据、检测方法、检测数据、结论等，并由具有资质的人员审核和签字，确保报告的权威性。通过明确各环节的操作要求与责任，规范的检测流程能够有效提升检测工作的效率和质量，为水利工程的质量控制提供可靠依据。

2. 质量控制措施的实施

为提高建筑材料检测结果的准确性和可靠性，实施有效的质量控制措施至关重要。采用标准物质进行校准是质量控制的基础环节，通过与已知标准物质的比对，可以及时发现检测设备的偏差，确保检测仪器的准确性。定期开展室内质控，通过重复检测同一标准样品，分析数据的离散程度，评估检测过程的稳定性。同时，室内质控也是不可或缺的环节，通过与其他检测机构进行比对试验，发现自身检测过程中的系统误差，及时调整和改进检测方法。此外，建立完善的质量管理体系，对检测过程中的各个环节进行严格监控，包括样品管理、检测操作、数据记录、结果报告等，确保每个环节都符合质量要求。通过这些质量控制措施的实施，能够有效提升检测结果的准确性和可靠性，为水利工程的质量评定提供有力支持。

（三）检测结果的应用与反馈

1. 检测结果在工程质量评定中的应用

建筑材料检测结果是水利工程质量评定的重要依据。在工程质量评定过程中，检测结果能够直接反映建筑材料的质量状况，为工程质量的判定提供客观、准确的数据支持。通过对检测结果

的分析，可以评估材料是否符合设计要求和相关标准，从而判断工程的施工质量是否达标。例如，混凝土的强度检测结果可用于评定混凝土结构的承载能力；钢筋的力学性能检测结果可用于评估钢筋的可靠性。检测结果还可用于工程质量的动态监测，通过对不同施工阶段的检测数据进行对比分析，及时发现质量变化趋势，为工程质量的持续改进提供依据。此外，检测结果还可作为工程验收的重要参考，确保工程质量符合预期目标，保障水利工程的安全运行。

2. 基于检测结果的反馈与改进

根据建筑材料检测结果对水利工程建设过程中存在的问题进行反馈，并采取相应改进措施，是优化工程建设质量的重要环节。检测结果揭示的问题应及时反馈给施工单位和监理单位，通过召开质量分析会议等方式，深入分析问题产生的原因，制定针对性的改进措施。例如，若检测结果显示某批次混凝土强度不达标，应分析是原材料质量问题还是施工工艺问题，并采取相应的整改措施，如更换原材料或调整混凝土配合比。同时，将检测结果反馈至设计单位，以便设计单位根据实际情况对设计进行优化调整。通过建立完善的反馈机制，将检测结果与工程建设的各个环节紧密联系起来，形成质量控制的闭环管理，能够有效提升工程建设质量，确保水利工程的安全、可靠和高效运行。

五、总结

建筑材料检测技术在水利工程建设中的应用已成为保障工程质量与安全的关键环节。当前，检测技术已广泛应用于施工前材料质量把控与施工过程中的实时监测，为水利工程的顺利实施提供了重要支撑。然而，随着工程建设需求的不断提高，检测技术的优化与创新成为必然趋势。新型检测设备的引入以及检测标准的持续完善，为提升检测精度与效率奠定了基础。在管理方面，检测机构与人员的专业化管理、规范的检测流程以及检测结果的有效应用，是确保检测工作高质量开展的重要保障。未来，进一步提升检测技术水平与管理效能，将有助于更好地服务于水利工程建设，推动行业高质量发展，为水利工程的长治久安提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 郭海年. 水利工程现场常用建筑材料检测与控制 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2023(8):629-630.
- [2] 姚亮, 朱均超. 浅析水利工程原材料及中间产品质量管理典型问题及质量控制要点 [J]. 水利建设与管理, 2023(10):28-37.
- [3] 张鹏举. 水利工程施工现场建筑材料质量检测与控制探究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(2):4.
- [4] 刘文旭. 水利工程质量检测计划编制探讨与研究 [J]. 工程建设与设计, 2022(7):3.
- [5] 马涛. 基于水利水电工程中混凝土检测及质量控制的要点分析 [J]. 2021(6):164-164.
- [6] 肖华. 浅谈水利工程建筑材料的质量检测 [J]. 环球市场, 2019, 000(017):321.
- [7] 韩久辉. 水利工程中混凝土检测试验及质量控制措施分析 [J]. 2023(1):163-165.
- [8] 熊凯. 水利工程施工阶段监理的质量控制措施 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(8):3.
- [9] 兰博. 浅谈水工混凝土钢筋质量检测与控制 [J]. 建材发展导向 (下), 2021, 019(010):51-52.
- [10] 达海清. 简析水利混凝土工程的检测及其质量控制 [J]. 环球市场, 2020, 000(010):310.

无人机遥感技术在铁路智能防洪中的应用

郝崇凯

国家能源集团运输安全监察中心，内蒙古 呼和浩特 010050

DOI:10.61369/ERA.2025070002

摘 要： 铁路防洪工作责任重大，意义深远，防洪隐患排查是减少和防止铁路水害发生的最有效途径。针对铁路防洪面临的主要问题，研究无人机遥感技术在铁路防洪隐患排查中的应用，通过无人机倾斜摄影调查实现沿线隐患排查的智能识别和判断，提高巡检效率，可作为铁路部门防洪防灾的重要科技手段。

关 键 词： 铁路防洪；无人机航拍；智能化

Application of UAV Remote Sensing Technology in Intelligent Flood Control of Railway

Hao Chongkai

National Energy Group Transportation Safety Inspection Center, Hohhot, Inner Mongolia 010050

Abstract： Flood prevention in railways is a significant responsibility with far-reaching implications. Identifying flood risks is the most effective way to reduce and prevent water damage on railways. In response to the main challenges faced by railway flood control, this study explores the application of drone remote sensing technology in identifying flood risks along railway lines. By using oblique photography from drones, intelligent recognition and assessment of potential hazards can be achieved, enhancing inspection efficiency. This technology can serve as an important scientific tool for railway departments in flood prevention and disaster mitigation.

Keywords： railway flood control; UAV aerial photography; intelligence

铁路防洪工作坚持“安全第一、预防为主、综合治理”的原则，其基础是预防，而要做到有效预防，关键是要全面科学排查防洪隐患、识别风险源。北方地区普遍土体保水能力差，山区铁路地质、地貌构造复杂，依靠传统的人工徒步排查隐患，存在作业效率低、检查环境危险、测量精度低、有检测盲区等问题，无法快速系统、全面准确的排查到隐患。

无人机是由人为远程操控或由程序控制飞行的不载人飞行器，具有作业效率高、环境适应力好、测量精度高、机动性强的特点^[1]。近年，无人机应用技术快速发展，在应急救援、环境检测、灾害监测、航拍测绘等领域已广泛应用，电力、石油等行业已实现无人机代替人工进行电力巡线、管道巡查。在铁路行业，通过利用无人机采集影像配合铁路路桥设备检查、路外安全排查、搜山扫危等也取得了一定效果，在多次重大抢险中发挥了较好作用。

一、无人机遥感技术原理

遥感提供的是一种综合的信息，不仅表现在它反映的地学要素——地质、地貌、水文、土壤、植被、社会生态等的综合，它是由互相关联的自然及社会现象所构成的；而且表现在遥感信息本身的综合，即它是不同空间分辨率、波谱分辨率、时间分辨率的遥感信息的综合。无人机低空遥感是航空遥感的一种，一般运行在100米以上、1000米以下，由无人机飞行平台、遥控系统、地面信号接收站和主控制系统组成^[2]，将无人机遥感影像贴合到以卫星影像为底层影像的电子沙盘系统上，具有利用当前卫星定位、通信、网络、遥感等技术实时传输影像及获取数据等功能，

成本低且灵活度高。

运用无人机低空遥感技术采集现场影像与其他技术的区别主要在数据采集和数据处理阶段，其中数据采集阶段需采用倾斜摄影方式，在此过程中同时可引导地面检查人员现场查勘。在数据处理阶段，照片需交由数据中心，集中处理成多类型低空遥感影像，技术人员对影像分析、比对，如需要安排现场复核和处置，对监测结果做好数据记录。

二、现阶段铁路无人机运用情况

铁路作为大型线状构筑物，受周边环境的影响较大，与周围的

作者简介：郝崇凯（1989—），男，呼和浩特人，工程师，硕士研究生，主要从事铁路安全管理工作。

环境密不可分。铁路防洪隐患的排查不能只是针对孤立的点，而是需要无人机对整条线路周边环境进行统一监测，生成铁路极其沿线环境的整体模型。通过引入无人机低空遥感技术用于铁路防洪隐患的排查，利用一种安全简单的飞行操作^[3]，获取格式统一、信息丰富、易分析、易存储的影像数据，针对检查问题能提取关键要素进行跟踪比对，以期实现“常态”“实时”“有效”应用的总体方案。

（一）运用现状

将无人机技术运用于铁路巡检，还处于起步阶段，大大提高了铁路设备检查、防洪隐患排查和路外环境监测的能力，但受制于设备造价、控制技术、操作水平等原因，虽然可完成重点地段的可视数据采集，但仍存在不足^[4]。

以国家能源集团铁路管内为例，利用无人机巡检的流程主要包括前期准备、数据采集和数据处理三个阶段。前期准备阶段是根据巡检对象及检测要求，预设控制点位置并规划巡检航线。数据采集阶段利用飞行控制软件实现无人机飞行模式控制和任务管理，利用机载检测设备获取地物信息。数据处理阶段主要是对拍摄结果进行分析。目前国内主要采用两种方式对无人机拍摄结果进行分析，一是通过人工识别或智能识别技术对拍摄影像进行分析，查看环境信息，识别结构状态，判断是否发生病害。二是建立三维模型，直观展示检查对象整体情况，可进行坡度、距离等查询^[5]，判断地质灾害规模，还可通过对比不同时段模型，分析检查对象和周边环境的变化情况。

据统计，2024年国家能源集团铁路板块有6处Ⅱ级防洪重点地段，近三年发生严重水害处所共计31处（无人机排查三级防洪点效果见下图1），沿线周边环境复杂多样、沟壑相连，其中高大护坡地段共计20处，分布主要集中在各管辖范围内山区铁路地段，主要特点为通行道路困难、深路堑及高路基地段；上游水库堤坝等重点地段共计72处，涉及桥涵56座，并形成了防洪关键处所分析报告，制作了隐患排查提示卡。根据当前状况^[6]，提示可能发生的灾害及日常检查重要项点并给予处理提示，结合防洪网格化精细管理的内容，将提示卡分发至各网格管理员，加强了隐患排查的科学性、针对性。通过无人机排查与人工巡检相结合的方式，大大节省了防洪隐患排查的时间，之前四人一组用时一天翻山越岭才能完成排查的防洪关键地点，现在只需15分钟就能完成排查任务，不仅提高了作业效率，也保障了作业人员的安全，保证了防洪排查的全覆盖^[7]。

（二）存在的问题

铁路防洪工作通过借助智能信息化技术改进了防洪工作内容和工作效率，体验到了高科技带来的便利，同时也发现了一些问题。一是无人机数据采集与更新不够，缺乏连续性、周期性，不能形成数据有效对比和信息系统管理；二是目前对结果主要采用人工分析、研判的方式，效率较低，易产生误判、漏判；三是应急响应不够^[8]，发现险情或发生灾情，不能立即采取无人机手段进行快速检视；四是数据利用率不够，采集数据无规范无标准分析方法，导致无人机规范化作业与管理难度较大。

三、无人机遥感技术在铁路智能防洪中应用实例

（一）针对场景编制飞行任务书

防洪隐患排查目的是及时发现路基、桥梁、隧道、涵渠等设施及周边环境的病害和不良状态，以便及时采取加固和安全防范措施，提高设施抗洪能力，确保汛期行车安全。管内包神铁路包神公司瓷窑湾站、三岔站附属设备风化较多，站内排水沟、护坡挡墙等地段年久失修情况较为突出；朔黄铁路原平分公司神池南—龙宫区域小半径曲线多线路、高挖深填、桥隧相连弯道最多、环绕山区依山傍河自然环境最为恶劣；新朔铁路点岱沟站、南坪站因多次站改影响，影响基础设备抗洪能力稳定。综合历年水害发生类型、区域及降雨频次等方面综合研判，2025年仍需重点朔黄铁路西柏坡—定西区域；新朔铁路南坪—点岱沟区域，包神铁路三岔—贺职区域^[9]。

根据桥路设备检查和地灾排查不同的环境条件、任务性质、检查要求进行应用场景分类，对每一种应用场景的目标区域制定飞行周期、飞行方式、完成状态等航拍标准和量化参数，据此开发专用飞控软件，编制飞行任务书，实现一键式起飞、自动定位绕避、自主定点拍摄、自动返航等“傻瓜式”操作，再次执行同区域、同类型任务时，只需调用任务书便可实现目标区域相同角度、相同参数的数据采集，减少飞行风险，降低操作难度。飞行任务书保存为飞控设置文件，根据任务目标选择调用。目前共设置了地质灾害排查、河岸和堑坡排查、路基和安防巡查、高大桥梁特殊部位检查、抢险应急直播等五类应用场景。

（二）组织开展飞行任务

飞行任务组织方式为任务规划→任务准备→任务执行→任务结束。站段由路桥科下达计划、由车间组织任务实施、检查（检测）工区执行飞行任务^[10]。

1. 任务规划。主要包括环境信息、飞行约束、任务目标以及理论结果四部分。依据应用场景，确立任务目标，设置采集影像数据区域，计算该任务模块飞行作业时间，保证其采集影像符合影像数据质量要求，以提高检查效率 and 专业化程度。

2. 任务准备。分内场、外场两步执行。内场准备：工区执飞人员对任务规划所设定的飞行路线在飞行模拟器或电子地图上推演操作，确定各起飞点到达路径，复核有无区域禁飞限制，需使用无人机和配套电池数量、后备电源、存储器等辅助设备，结合交通情况、气象预报、人员配置、特殊情况处置等编制上报车间具体作业计划。外场准备：现场复核起飞地点，普速区段距线路中心线50米、高速区段距线路中心线100米以外，上升、降落通道100米范围内不得有广播电视信号塔，无线通讯基站、变电站、高压线塔、建筑塔吊。起飞场地面积不小于2m×2m，选择地势平坦、无植被覆盖的地面铺设飞行毯以便于无人机自动返航寻点。天气情况应满足飞行条件，雷、雨、雪、大雾天气不得进行作业。

3. 任务执行。一是倾斜摄影工程设定与调用。除高大桥梁检查和应急直播两个应用场景采用手控飞行，以及其他应用场景需抵近精细观察部位手控飞行外，其余飞行任务都可使用专用飞控

软件设置倾斜摄影航拍，实施自动飞行。飞控软件具有拍摄完成自动返航、工程手工终止及返航、低电量自动返航、飞控信号丢失自动返航、自主避障悬停、超5级风速自动返航等功能。二是严格做好三项确认。目标确认：必须确认调用的工程存档文件是否匹配当前任务区域。高度确认：无论首次或历次执行前，必须手控将无人机拉升到设置的飞行高度，环视地形或沿工程边界巡视一周，确认是否有建筑物、高压线缆、地形地貌变化等造成飞行安全高度不足的情况。起飞点确认：飞行高度和区域是按当时的起飞点计算并自动执行的，不得任意改变，固定起飞点应采取编制台账、记录坐标数据，电子地图标注，设置固定标识等方式，便于飞行组查找、核对。三是飞行质量卡控。每次飞行后，检查任务执行情况，将存储卡取出，影像拷贝至平板电脑上，避免下次飞行时已拍摄影像丢失或被覆盖。检查拍摄影像效果，如出现漏拍或影像不清晰，应安排重新补拍。

4. 任务结束。飞行任务后及时整理飞行日志，详细记录当日飞行作业的起止时间、飞行架次、飞行时间、天气状况、作业过程、数据采集量、环境变化等情况。整理采集数据，检查当日拍摄的影像，编写影像处理注意事项文档，将拍摄的影像以及影像处理文档按任务分组打包压缩后，上传至数据处理中心。飞控设置文件如有改变，及时上传替换飞控文件库原文件。

（三）飞行数据分析应用

通过采用无人机建立了部分防洪重点地段影像数据库，获取

了该区段山体激光雷达点云图，直观观察到山体危岩、滑坡灾害的整体情况，同时建立三维地质模型，进行落石、滑坡灾害的定性、定量分析，明确可能发生灾害的区域范围，对存在落石隐患的处所采用增设主被动护网的方式消除隐患，同时地面数字模型为方案的制定及实施提供了支撑。

四、结论

铁路无人机应用技术拓展了铁路防洪隐患排查的宽度和深度，提高了铁路防洪的智能化水平。经过多年的经验积累，已实现无人机巡检结果与遥感相结合的图像处理模式，对无人机航拍区段、航拍周期、现场操控方案、数据分析处理等环节进行了逐步规范。未来，应在数据与模型融合技术、智能识别技术、建立铁路无人机巡检系统、统一巡检标准等方面开展进一步研究。采用统一平台对铁路桥梁、轨道、路基及沿线地质灾害、周边环境的高清图像数据、激光雷达点云数据以及三维数字化模型进行处理，提高铁路安全隐患与风险源的智能辨识能力，同时将有关技术、方法进行归类汇总编制成作业指导书，全面提高一线职工的业务技能水平，促使全员防洪业务素质和技术水平得到提升。

参考文献

- [1] 侯海方. 无人机在高铁桥隧设备检查中的应用与展望 [J]. 铁道运营技术, 2020, 26(3):44-46.
- [2] 耿小平, 王波, 马均鑫, 等. 无人机倾斜摄影测量技术在桥梁施工现场中的应用研究 [J]. 现代测绘, 2017, 40(4):27-31.
- [3] 王栋, 张广泽, 徐正宣, 等. 基于时间序列 InSAR 技术的铁路地质灾害识别研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(3):85-91.
- [4] 邓继伟. 无人机航拍在铁路工程中的应用 [J]. 铁道勘察, 2020, 59(3):23-27.
- [5] 武岳龙, 钟凡, 高月, 等. 无人机航拍在铁路日常巡查中的应用 [J]. 科学技术创新, 2023(8):24-25.
- [6] 李斌, 张俊武, 王爽. 铁路防洪防灾无人机智能巡检关键技术应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22(03):1-8.
- [7] 石越峰, 危凤海, 付卫霖, 等. 面向防洪管理的铁路无人机巡检体系研究与应用 [J]. 铁道建筑, 2022, 62(04):120-125.
- [8] 段炼. 铁路防洪安全监控管理系统及应用 [J]. 湖南科技学院学报, 2018, 39(10):52-53.D01:10.16336/j.cnki.cn43-1459/z.2018.10.022.
- [9] 张翠兵. 铁路防洪应急管理系统研究与应用 [J]. 中国铁路, 2015, (03):66-70.
- [10] 陈显行, 高至飞, 胡朝鹏, 等. 基于无人机多模态数据的铁路防洪隐患排查系统研发 [J]. 铁道勘察, 2024, 50(05):156-162.

信息物理系统建模的多自主移动机器人路径规划与调度研究

柳君, 周晨, 张译

中控技术股份有限公司, 浙江 杭州 310053

DOI:10.61369/ERA.2025070003

摘要 : 随着智能制造和物流自动化需求的快速增长, 多自主移动机器人系统的应用场景日益复杂, 传统路径规划与调度方法在动态环境下的局限性逐渐显现。信息物理系统通过深度融合计算、通信与控制技术, 为多机器人协同提供了新的理论框架。本文旨在通过改进 CPS 建模方法, 解决多自主移动机器人在高动态场景中的路径冲突与资源竞争问题, 为工业中的柔性生产系统提供技术支持。

关键词 : 信息物理系统建模; 多自主移动机器人; 路径规划与调度

Research on Path Planning and Scheduling of Multi-autonomous Mobile Robots in Cyber-Physical System Modeling

Liu Jun, Zhou Chen, Zhang Yi

SUPCON Technology Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310053

Abstract : With the rapid growth of demands for intelligent manufacturing and logistics automation, the application scenarios of multi-autonomous mobile robot systems are becoming increasingly complex. The limitations of traditional path planning and scheduling methods in dynamic environments are gradually emerging. Cyber-Physical Systems (CPS), by deeply integrating computing, communication, and control technologies, provide a new theoretical framework for multi-robot collaboration. This paper aims to address the path conflicts and resource competition issues of multi-autonomous mobile robots in highly dynamic scenarios by improving CPS modeling methods, thereby providing technical support for flexible production systems in industry.

Keywords : cyber-physical system modeling; multi-autonomous mobile robots; path planning and scheduling

引言

多自主移动机器人在仓储物流、智能工厂等场景中发挥着关键作用, 其协同效率直接影响系统整体性能。信息物理系统建模的引入, 不仅能够统一机器人的计算层与物理层行为, 还能通过数据驱动优化调度策略, 显著提升系统的鲁棒性与适应性。通过多机器人路径协同降低工业场景中的能耗与时间成本, 为复杂环境下的人机共融提供方法论支持, 对推动智能制造落地具有实践意义。

一、信息物理系统建模的多自主移动机器人路径规划方法

(一) 基于环境动态感知的实时拓扑重构法

在复杂动态环境中, 多自主移动机器人的路径规划需要实时响应环境变化。传统静态地图建模方法难以适应突发障碍物、移动物体或地形突变等情况, 因此需要建立动态拓扑地图以实现实时路径更新。通过激光雷达、深度相机等传感器获取环境点云数据后, 采用增量式拓扑建模技术将连续空间离散化为节点与边组成的网络结构。当检测到新障碍物时, 系统会在300ms内完成局

部拓扑重构, 更新受影响区域的节点连接关系, 确保路径网络的连通性。一方面, 动态权重调整是拓扑重构的核心环节^[1]。根据障碍物运动速度、方向等参数, 实时计算边权值的衰减系数。例如对于以0.5m/s速度接近的移动障碍物, 相关边的通行代价会按指数曲线递增, 当权值超过阈值时自动断开连接。同时引入时空联合预测模型, 基于卡尔曼滤波估计未来5秒内环境状态变化趋势, 预先调整拓扑结构避免频繁重构。这种前瞻性处理能使路径重新规划频率降低40%以上。另一方面, 为平衡计算效率与建模精度, 采用双层拓扑表示机制。底层保留10cm分辨率的精细网格用于避碰检测, 上层维护2m精度的稀疏拓扑网络用于全局路径搜

索。两者通过动态映射表关联，当检测到局部冲突时，仅需在对应区域激活高精度计算。实验数据表明，该方法在100m×100m场景中平均耗时为传统RRT*算法的17%，且能保持92%以上的路径最优性。

（二）多目标优化的分层强化学习规划算法

移动机器人路径规划本质上是多目标优化问题，需要同时考虑路径长度、能耗、安全性等指标。分层强化学习框架将决策过程分解为战略层与战术层：战略层通过慢周期更新处理全局目标，战术层以10Hz频率进行局部避障。这种时间尺度分离机制既保证长期优化目标，又能快速响应即时威胁。网络结构采用双Critic设计，分别评估路径质量得分与风险概率，通过加权求和实现多目标权衡。在训练阶段引入对抗样本增强技术，随机生成动态障碍物、路面塌陷等极端场景。智能体在仿真环境中经历200万次训练周期后，能自主调节三个目标的权重系数。当检测到电量低于30%时，能耗权重自动提升60%；在狭窄通道中安全权重增至原始值的2.5倍。这种自适应能力使机器人在不同场景下始终保持帕累托最优解，实测显示综合性能指标比固定权重策略提高35%。为克服强化学习的样本效率问题，设计基于物理引擎的迁移学习管道。先在简化的二维环境中预训练基础策略网络，再通过渐进式域随机化过渡到三维复杂场景。关键技巧在于保持状态空间编码一致性，确保底层特征提取器能通用不同维度。最终模型在未知环境中的零样本迁移成功率可达78%，经过3小时在线微调后能提升至93%。

（三）异构机器人协同的分布式仿生路径生成

异构机器人群体存在运动能力、传感器配置等差异，传统集中式规划难以发挥各自优势。受生物群体智能启发，设计基于局部交互规则的分布式算法。每个机器人根据自身运动学约束维护独立的运动基元库，轮式机器人采用B样条曲线，足式机器人则使用周期性步态序列。当群体形成通信网络时，通过梯度交换法协调各节点的运动基元选择。信息素协调机制是实现自然避碰的关键。机器人沿路径释放虚拟信息素场，其扩散系数与机器人运动速度正相关。四足机器人以1.8m/s移动时，信息素影响半径设置为6m；而慢速履带机器人（0.6m/s）的影响半径仅为2m^[2]。当检测到其他机器人的排斥性信息素时，自主调整路径曲率避开冲突区域。这种隐式协调方式减少80%的通信数据量，特别适合弱网环境。针对任务分配问题，开发动态角色切换协议。机器人实时评估自身资源状态与环境需求，当某区域出现多个机器人争用时，根据预设的优先级函数自动协商。例如携带高精度传感器的单元会获得优先探索权，而低电量机器人自动转为跟随模式。测试表明，该机制使群体任务完成时间缩短28%，且能动态保持40%–60%的负载均衡度。通过周期性拓扑扫描，系统每30秒重组通信簇结构，确保信息传递效率始终维持在最优水平的±15%波动范围内。

二、信息物理系统建模的多自主移动机器人调度策略

（一）事件驱动的动态优先级任务分配机制

在多自主移动机器人系统中，任务分配的实时性和灵活性直

接影响整体效率。事件驱动的动态优先级机制通过响应环境变化和任务需求，实现资源的优化配置。首先，系统通过传感器网络实时监测环境状态，当检测到新任务或任务状态变化时，触发任务评估模块。该模块综合考虑任务紧急程度、机器人当前负载、任务执行所需资源等因素，动态计算优先级权重^[3]。例如，紧急物资运输任务的优先级权重可能设定为0.9，而常规巡检任务则为0.3。其次，优先级计算采用多维度加权算法，包括任务时效性系数（0–1）、资源匹配度（0–1）和机器人能力适配度（0–1）三个核心参数。系统每200毫秒更新一次任务队列，确保高优先级任务能及时分配。为平衡负载，当某机器人连续执行两个优先级0.8以上的任务后，其后续任务接受阈值会自动提高15%。这种机制既保证关键任务优先处理，又避免少数机器人长期过载^[4]。最后，任务分配器采用分布式架构，各机器人本地维护部分任务队列。通过心跳协议（500ms/次）同步全局状态，确保在网络延迟情况下仍能维持80%以上的分配准确率。对于突发的高优先级任务，系统支持抢占式调度，但会保留被中断任务的上下文环境，待资源释放后自动恢复执行。这种设计将任务平均响应时间控制在1.2秒内，较静态优先级系统提升约40%。

（二）资源竞争消解的多阶段拍卖决策模型

当多个机器人竞争同一资源时，传统集中式调度容易成为性能瓶颈。多阶段拍卖模型将决策过程分解为资源申报、需求匹配、代价协商三个阶段，形成分布式解决方案。在资源申报阶段，每个机器人将自身位置、剩余电量、载货容量等参数编码为16位资源向量，通过自组织网络广播更新，更新间隔根据网络负载动态调整（默认1秒）。需求匹配阶段采用改进的荷兰式拍卖机制。资源需求方发布包含时间窗约束（如±15分钟）和品质要求（如定位精度±2cm）的任务标书，供给方在3轮竞价中依次提交可用时间片、服务质量和能耗报价。系统引入模糊评价算法，将机器人的电池衰减系数（0.85–1.1）、历史任务完成率（90–100%）等隐性因素量化为可信度评分，与显性报价共同构成综合评价矩阵。最终协商阶段通过帕累托最优判定实现资源分配。对于高冲突场景（如5台机器人竞争3个充电桩），采用带有淘汰补偿的维克里拍卖机制。获胜者支付第二高价，而被淘汰者获得相当于其报价15%的虚拟信用补偿，这些信用可在后续拍卖中折抵报价。实测表明该模型将资源争用导致的等待时间缩短至传统方法的35%，且系统吞吐量保持在线性增长区间直至机器人数量达到临界值（约50台）。

（三）基于数字孪生的容错性动态负载调整

数字孪生技术为机器人集群提供了高保真的虚拟映射环境。系统维护着与物理实体1:1对应的虚拟机器人模型，其状态更新延迟严格控制在80毫秒内。负载监控模块持续采集各机器人的电机电流波动（±5%）、计算单元温度（40–75℃）、通信丢包率（0–3%）等12项健康指标，通过贝叶斯网络计算实时可靠性评分（0–100分）。当评分低于阈值（通常设为65分）时，触发预防性负载调整。对于评分处于60–65区间的机器人，系统自动将其30%的非紧急性任务（如地图更新）迁移至邻近节点；当评分跌破60时，立即启动关键任务的热迁移。迁移过程采用差分快照技

术，仅传输状态增量（平均占全量数据的8%），使迁移耗时稳定在150–400毫秒范围^[5]。虚拟孪生体在迁移期间维持双活状态，确保物理机器人出现故障时能实现50毫秒内的无缝切换。负载预测模块利用LSTM网络分析历史数据，提前300秒预测可能的过载节点。预测准确率达到92%的情况下，系统会主动将预测负荷的20%预先分流至低利用率机器人。这种前瞻性调整使得集群在10%节点突发故障时，整体任务完成率仍能维持在85%以上。所有调整决策都通过数字孪生进行沙箱模拟验证，确保不会引发连锁反应后才部署到物理系统，将误调整率压制在0.5%以下。

三、结语

本文通过信息物理系统建模，提出了多自主移动机器人路径规划与调度的动态优化框架，验证了其在冲突消解与资源利用率方面的优势。然而，面对大规模异构机器人集群时，通信延迟与分布式决策的稳定性仍需进一步改进。未来工作应探索边缘计算架构下的分布式在线学习算法，以降低中心节点的计算负荷，并结合人类行为预测模型，拓展人机混合场景的应用边界。这些改进有望为下一代智能物流系统提供更灵活的技术方案。

参考文献

- [1] 罗雪冬. 面向智能仓储的多机器人路径规划及调度 [D]. 重庆邮电大学, 2022.
- [2] 朱振源. 基于多物流机器人的任务调度和路径规划的研究 [D]. 盐城工学院, 2024.
- [3] 廉胤东. 信息物理系统建模的多自主移动机器人路径规划与调度研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [4] 李园园. 货箱仓储机器人任务调度与路径规划优化研究 [D]. 兰州交通大学, 2024.
- [5] 陆泓洁. 移动机器人路径规划与车辆调度算法研究 [D]. 华南理工大学, 2021.

顶驱下套管装置智能监控系统设计

程晓君¹, 金贵全², 李庆延¹, 张祎琳¹, 赵文昊¹, 宋佳音^{1*}

1. 东北林业大学计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 黑龙江北方双佳钻采机具有限责任公司, 黑龙江 牡丹江 157000

DOI:10.61369/ERA.2025070015

摘 要 : 为了保证我国油气资源开发过程中顶驱下套管装置的高效安全运行, 同时提高现场工作人员的安全性。针对顶驱下套管装置的传统监控方法在提高决策效率、提高人员安全方面的不足, 设计了一种顶驱下套管装置智能监控系统, 具有可视化的数据无线实时传输。模拟实验结果表明: 该系统能够有效实现对设备运行的扭矩、转速状态进行远程监控, 对推动油气开采行业智能化具有一定现实意义。

关 键 词 : 顶驱下套管; 扭矩测量; 智能监控; 无线通信

Design of Intelligent Monitoring System for Top Drive Down Casing Device

Cheng Xiaojun¹, Jin Guiquan², Li Qingyan¹, Zhang Yilin¹, Zhao Wenhao¹, Song Jiayin^{1*}

1. College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Heilongjiang North Shuangjia Drilling and Production Machinery Co., LTD., Mudanjiang, Heilongjiang 157000

Abstract : In order to ensure efficient and safe operation of top drive casing device in the process of oil and gas resources exploitation in our country and improve the safety of staff in field. Aiming at the shortcomings of traditional monitoring methods in improving decision-making efficiency and improving personnel safety, an intelligent monitoring system for top drive casing device is designed with wireless real-time data transmission. The simulation results show that the system can effectively realize the remote monitoring of the torque and speed state of the equipment operation, which has certain practical significance for promoting the intelligence of the oil and gas exploitation industry.

Keywords : top drive casing; torque measurement; intelligent monitoring; wireless communication

引言

在国家“双碳”战略和国际局势不稳定的背景下, 提升油气开发效率、保障能源安全至关重要。顶驱下套管技术以其作业的高成功率和高效率等优点, 已经成为国内外石油钻井公司争相使用的热点^[1]。并且随着物联网与人工智能技术的兴起, 智能远程视频监控系统的研究越来越受到重视^[2]。因此, 针对顶驱下套管装置的智能监控系统的研发迫在眉睫。该系统的应用将提高钻井作业的自动化、智能化水平, 有效优化操作流程, 还将显著提升作业效率和安全性。

为了提高钻井作业的效率以及更好地依据数据进行决策, 国内外学术界对顶驱下套管装置监控系统的研究也在不断深入。2019年, 科威特的 Dalal Al-Subaiei 等^[3]设计了一款油田系统, 能够对石油开发生产中的工作流程进行智能生产监控, 并且根据油田的经验。设计了智能报警器, 通过警报和警告系统来预测问题。2021年, 中国石油大学的曹国亮^[4]通过计算机、通信和无线网络等技术, 构建了油田安全生产监控系统, 借助 ZigBee 和 WebRTC 技术实现油田和监控中心的数据采集和传递, 实现了远程监控的视频传输任务。可见, 以上现有研究在对于顶驱下套管装置运行数据可视化以及无线实时传输方面的研究并不充分。

本文提出了一种顶驱下套管装置智能监控系统, 能够实时采集和无线传输设备运行数据, 确保设备运行状态被及时监控和响应; 能够进行数据可视化, 直观展示设备运行信息, 提升监控效率和决策支持能力; 能够进行远程监控, 减少工作人员直接接触高风险大型设备的频率, 为解决高难度钻井作业中无线数据传输实时性不足、监控信息不直观以及人员安全风险高等问题提供了有效方案。

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目 (GA22A402); 大学生创新创业项目 (202410225029)

作者简介: 程晓君 (2003-), 女, 本科。

通信作者: 宋佳音 (1980-), 女, 博士, 副教授, 林业工程自动化及植物生命信息检测。

一、具体设计方案

（一）技术路线

基于 STM32F103C8T6 主控模块的顶驱下套管装置智能监控系统，采用分布式监控架构，通过双层 PCB 布局与电磁兼容（EMC）优化策略，结合多级降压电源，构建高可靠性硬件平台。系统集成应变片式扭矩传感器与光电转速传感器网络，实现作业参数的实时精准采集，并通过 ESP8266 无线通信模块完成物理信号到数字量的转换及远程传输。下位机程序采用模块化分层设计，保障数据采集与无线传输的实时协同；上位机系统基于 MODBUS-TCP 协议开发多线程处理系统，依托 VOFA 协议实现人机交互界面中动态曲线与数字混合展示，构建全参数实时监控界面。系统搭建含机械负载模块的闭环测试平台，验证转速—扭矩动态特性并建立误差补偿模型，完成样机功能验证及无线远程监控测试，如图1所示。

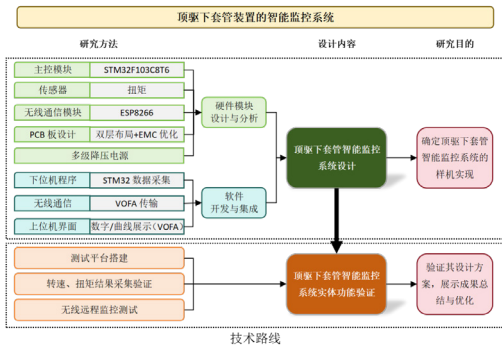


图1 技术路线图

（二）控制系统的硬件设计

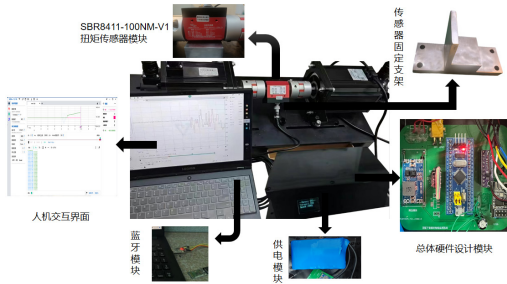


图2 系统设计架构示意图

由于现场实验耗费高昂人力、物力成本，筹备实施周期长，且环境复杂不可控，存在安全风险，因此，该系统在实验室进行模拟实验。

如图2所示，该系统以 STM32F103C8T6 单片机为核心，通过其丰富的外设接口实现与传感器模块、无线通信模块的无缝衔接。主控模块具备掉电保护功能，可在电源中断时自动启动备用电源，将 RAM 中的重要数据保存至 FLASH。传感器模块采用基于应变片变形原理的扭矩传感器，通过 INA226 芯片采集电压模拟量，结合光电传感器实现转速测量。采集到的扭矩和转速数据经主控模块处理后，通过 ESP8266 无线通信模组实时传输至上位机，实现远程监测与管理。电源模块采用 TPS5430DDAR 芯片将输入的 +24V 直流电压降压至 +5V，再通过 AMS1117 芯片转换

为 +3.3V，为各模块提供稳定优质的电源，确保系统稳定高效运行。传感器固定支架设计稳固，确保传感器与电机接触可靠，保证实验测量精度。

（三）控制流程设计

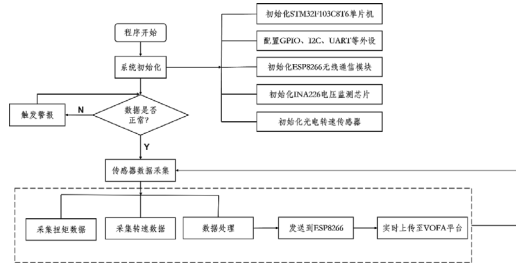


图3 控制流程图

如图3所示，系统控制流程设计以 STM32F103C8T6 单片机为核心，程序启动首先执行初始化操作，配置 GPIO、I2C、UART 等外设模块，并初始化扭矩传感器 INA226、光电转速传感器及 ESP8266 无线通信模块；初始化完成后，进入主循环，实时采集传感器数据（扭矩通过 INA226 电压监测，转速通过光电传感器脉冲计数），并对数据进行处理与存储；若数据异常（超出安全阈值），则触发本地报警（蜂鸣器、LED）并通过 ESP8266 发送远程报警；同时，主控模块通过 UART 与 VOFA 上位机实时通信，发送扭矩与转速数据以动态曲线图展示。此外，系统支持远程监控与历史数据访问，整个流程确保系统高效、稳定运行及人机交互的实时性与安全性。

（四）人机交互界面设计

人机交互界面设计基于 VOFA+ 平台，结合前文的技术框架，注重实时性与安全性，采用动态波形图直观展示扭矩和转速的实时变化，绿色曲线清晰反映设备运行状态，右侧显示瞬时数值，底部记录原始数据流，便于进行数据分析。通过 ESP8266 模块与 VOFA 的无线传输，操作人员可通过移动端或上位机远程监控，无需靠近大型设备，降低安全风险，同时界面支持动态曲线展示与异常报警，保障及时响应，数据存储与导出功能则便于历史分析，整体设计提升了操作效率与人员安全，为钻井智能化管理提供支持。

二、实验与结果分析

（一）转速变化实验

控制相同距离 1 m 下，不同电机转速，所测得实验数据真值，如表1所示。

为量化顶驱下套管装置监控系统中多变量间的关联特性，本文引入相关系数，用来衡量两个变量之间线性关系强度和方向，它的值范围在 -1 到 1 之间，表示两个变量之间的相关性程度，趋于 -1 和 1 表示强相关，而0则表明无线性关联。其计算公式如下，

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中， x_i 和 y_i 在此实验中分别是电机转速和数据传输时间两个变量的第 i 个数据点， x 和 y

分别是这两个变量的均值； n 是数据点的数量。

由实验测试数据计算可得数据传输时间与转速变化之间的相关系数 $r_1=0.098$ ，因此在误差允许范围内，认为转速的变化并不影响数据传输时间。

表 1 不同电机转速实验结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电机实际转速 (r/min)	200	225	250	275	300	325	350	375	400	420
传输显示转速 (r/min)	200	225	250	275	300	325	350	375	400	420
数据传输时间 (s)	0.672	0.671	0.675	0.671	0.669	0.667	0.670	0.671	0.667	0.673

(二) 距离变化实验

控制相同电机转速为 300 r/min 下，不同传输距离，所测得实验数据真值，如表 2 所示。

由实验测试数据计算可得数据传输时间与传输距离变化之间的相关系数 $r_2=0.019$ ，因此在误差允许范围内，且在 1~10 m 范围内，认为距离的变化并不影响数据传输时间。

表 2 不同传输距离实验结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距离 (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
传输显示转速 (r/min)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
数据传输时间 (s)	0.669	0.675	0.667	0.668	0.666	0.667	0.668	0.671	0.667	0.673

三、结束语

本文设计的顶驱下套管装置智能监控系统以 STM32F103C8T6 为核心，集成 INA226 扭矩传感器、光电转速传感器和 ESP8266 模块，实现了扭矩与转速的实时采集、无线传输和远程监控，通过 VOFA+ 平台的动态波形图展示数据，支持异常报警与历史分析，为油气开采的智能化提供了支持；实验结果表明，通过相关系数分析，该系统数据传输时间与转速变化、传输距离变化均无显著相关性。这一结果验证了本文设计系统中的无线通信协议在动态钻井环境下具有较为稳定的传输性能，其时间开销不受设备转速波动或短距离移动的影响。虽然系统在模拟实验中选用的扭矩传感器 INA226 是小量程传感器，但测量原理具有通用性。系统功能局限于扭矩与转速，且未在真实钻井环境测试，未来可通过现场验证、扩展监测参数及优化通信技术进一步提升其实用性。

参考文献

[1] 徐新乐, 涂增文, 吴乐平, 等. 顶驱旋转下套管技术及在长宁 H8 平台的应用 [J]. 化工管理, 2020, (33): 197-198.
[2] 李子昌, 李智, 管四海. 自动装载与视频监控远程控制系统 [J]. 微型机与应用, 2017, 36(01): 1-3.
[3] Al-Subaie D, Al-Hamer M, Al-Zaidan A, et al. Smart production surveillance: Production monitoring and optimization using integrated digital oilfield [C]// SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference. SPE, 2019: SPE-198114-MS.
[4] 曹国亮. 油田安全生产监控系统的应用 [D]. 山东: 中国石油大学 (华东), 2021.

计算机技术在物联网中的应用与研究

胡少杰^{1,2}

1. 云南建投轨道交通投资建设有限公司, 云南 昆明 650000

2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100000

DOI:10.61369/ERA.2025070027

摘要： 物联网作为新一轮科技革命的核心驱动力，正在重塑数字世界新图景。计算机技术是物联网的重要基石，二者相互渗透、深度融合，共同构成智联世界的坚实底座。本文重点探讨计算机技术在物联网感知层、网络层和应用层三个层面的关键应用，分析智能传感器、SDN、人工智能等前沿技术在智慧医疗、工业互联网、智慧城市等典型物联网场景中的实践。

关键词： 物联网；计算机技术；感知层；应用研究

The Application and Research of Computer Technology in the Internet of Things

Hu Shaojie^{1,2}

1.Yunnan Jingjian Rail Transit Investment and Construction Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

2.Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd. Beijing 100000

Abstract： As the core driving force of the new round of technological revolution, the Internet of Things is reshaping a new landscape of the digital world. Computer technology is an important cornerstone of the Internet of Things, and the two permeate and deeply integrate, together forming a solid foundation for the intelligent connected world. This article focuses on the key applications of computer technology in the perception layer, network layer, and application layer of the Internet of Things, analyzing intelligent sensors SDN、The practice of cutting-edge technologies such as artificial intelligence in typical IoT scenarios such as smart medicine, industrial Internet, and smart cities.

Keywords： Internet of Things; computer technology; perception layer; application research

引言

在万物互联的时代浪潮中，作为计算机、通信和控制技术深度融合的产物，物联网应运而生。物联网通过射频识别、红外感应、全球定位等信息传感设备，按照约定协议，将任何物品与互联网相连接，进行信息交换和通信，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理^[1]。自2009年物联网概念被正式提出以来，其以万物智联的理念，为推动经济社会数字化、网络化、智能化发展注入了强大动力。

一、物联网的发展现状

物联网作为新一代信息技术的代表，正以前所未有的速度快速发展。参考中商产业研究院发布的《2025—2030年中国物联网市场需求预测及发展趋势前瞻报告》显示（如图1），中国物联网市场规模持续扩大，2023年约为3.35万亿元，同比增长接近10%。展望未来，物联网的市场前景广阔，有望保持高速增长态势。2024年市场规模有望突破4万亿元大关，到2025年更是有望达到4.55万亿元的历史新高^[2]。在全球范围内，物联网的连接数也在不断增长。据预测，到2024年底，全球物联网连接数将达到

250亿以上，而中国的物联网连接数也有望达到30亿。

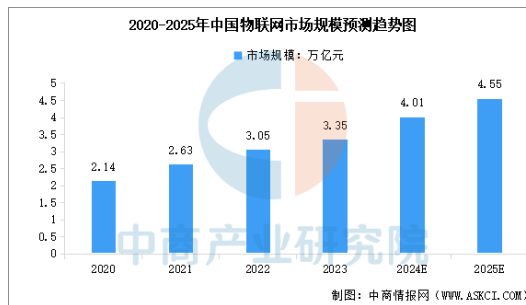


图1 2020—2025年中国物联网市场规模预测趋势图

二、物联网系统架构中的计算机技术应用

（一）感知层技术

感知层是物联网系统架构的基础，其核心在于利用各类传感器实现物理世界的数字化。RFID 技术是感知层的代表性技术之一，其通过无线电波识别目标对象并读写相关数据，在物品追踪、身份识别等方面发挥着重要作用。此外，红外、zigbee、UWB 等短距离通信技术也是感知层的重要组成部分，可实现低成本、低功耗的数据采集与传输^[3]。近年来，以压电、热电、振动能量采集为代表的能量收集技术取得长足进展，为物联网感知终端的供电提供了新的解决方案。同时，微机电系统等技术的发展，促使智能传感器向着多功能、小型化、集成化的方向演进。基于智能传感器的无线传感网络已成为物联网感知层的重要技术手段，可广泛应用于环境监测、工业控制、智慧农业等领域。

（二）网络层技术

物联网网络层肩负着连接感知层和应用层的重任，其性能直接影响着物联网服务质量。当前，以太网、蜂窝网、卫星通信等多种异构网络并存，如何实现网络的无缝互联互通是网络层面临的主要挑战。IPv6 技术通过扩展地址空间，为海量物联网设备的接入提供了有力支撑^[4]。同时，基于 IPv6 的 6LoWPAN 等技术也被广泛应用，解决了低功耗无线个域网与互联网的融合问题。

网络虚拟化是物联网网络层的又一关键技术。通过软件定义网络 (SDN) 和网络功能虚拟化 (NFV) 等技术，可实现网络资源的灵活配置和按需调度，显著提升网络的智能化水平^[5]。此外，信息中心网络 (ICN) 作为未来网络体系架构的发展方向，为物联网数据传输提供了全新的范式。ICN 以内容为中心，通过命名数据实现高效的内容分发，在物联网数据密集型应用中展现出巨大潜力。

（三）应用层技术

云计算是应用层的核心支撑技术，其通过将海量数据和复杂计算任务卸载到云端，极大地提升了物联网应用的计算能力和存储空间。借助云计算平台，物联网数据可实现全生命周期管理，支持多源异构数据的关联分析和挖掘。同时，微服务架构被广泛应用于云端应用开发，通过将系统拆分为细粒度、松耦合的服务单元，提高了应用的可维护性和可扩展性^[6]。人工智能技术与物联网应用深度融合，赋予了物联网更强的感知、认知和决策能力。机器学习可用于物联网海量数据的特征提取和模式识别；知识图谱可对物联网数据进行语义建模，实现数据的关联分析和推理；强化学习则可使物联网系统具备自主学习和动态优化的能力。在具体应用中，智能算法与领域知识相结合，可针对工业制造、智慧城市等场景提供精准、高效的智能化解决方案。

三、计算机技术在物联网典型应用场景中的实践

（一）智慧医疗中可穿戴设备数据融合应用

随着物联网、大数据等技术的发展，可穿戴设备在智慧医疗领域得到广泛应用。这些设备通过集成各类传感器，可持续、动态地采集患者的生理数据，为疾病监测、健康管理提供了新思

路。然而，可穿戴设备产生的数据具有异构性、噪声性等特点，对数据质量和分析效率提出了挑战。因此，亟须利用计算机技术对可穿戴数据进行有效融合，挖掘其中蕴含的医疗价值。多模态数据融合、增量学习等技术为该问题提供了潜在的解决方案^[7]。通过构建融合框架，将多源异构数据映射到同一特征空间，结合领域知识实现数据的语义关联和特征提取，可显著提升数据的质量和一致性。同时，面向数据流的增量学习算法可对模型进行在线更新，适应数据动态变化，提高分析时效性。将融合后的可穿戴数据接入医疗决策支持系统，有望辅助疾病预警、药效评估等临床应用，推动智慧医疗向更精准、个性化的方向发展。

以心血管疾病管理为例，患者可佩戴集成心电、血压、血氧等传感器的智能手环，实时采集生理特征数据。这些数据通过智能手机等终端上传至云平台，经过质量控制和预处理后，分别存储于结构化数据库和时序数据库中。针对不同数据源，平台采用统一的数据格式和词典标准，利用本体映射、数据关联分析等技术，实现语义层面的数据融合。在融合过程中，还可利用机器学习算法对数据进行降维、特征选择，提取疾病相关的关键指标^[8]。融合后的数据可用于构建心血管疾病风险预测模型，通过将可穿戴数据与电子病历、影像数据等结合，利用深度学习、迁移学习等技术，实现患者心血管事件风险的动态评估。评估结果可及时反馈给医生和患者，对高危患者进行远程预警和干预，并对干预效果进行客观评价。同时，融合后的数据也可用于疾病溯源和临床科研。通过对不同生理指标间关联模式的挖掘，有望发现心血管疾病的新型危险因素和早期预警信号。类似地，可穿戴数据融合思路还可应用于糖尿病、慢性阻塞性肺病等慢病管理，以及术后康复监测、老年健康服务等场景，为智慧医疗注入新的活力。

（二）面向设备全生命周期的数字孪生技术

数字孪生作为物理世界与数字世界的桥梁，通过对物理实体进行数字化映射和实时同步，为设备全生命周期管理提供了新思路。将设备运行数据与物理模型相结合，数字孪生可构建设备的虚拟副本，模拟其状态和行为。基于数字孪生的仿真分析和预测优化，可实现设备健康监测、故障诊断、寿命预测等功能，降低运维成本，提高设备可靠性。同时，数字孪生还可贯穿设备全生命周期，从设计、制造到运维、优化的各个环节，实现数据流、信息流的无缝衔接。

风电场设备管理就是一个典型应用场景。风电机组作为复杂的机电耦合系统，其运行状态受风速、风向等环境因素影响，具有强不确定性。传统的定期巡检、事后维修等方式难以满足风电机组的高可靠性要求。利用物联网技术，可在风电机组关键部件上部署振动、温度等传感器，实时采集设备运行数据。将采集的数据接入风电场数字孪生平台，平台通过机理建模和数据驱动建模相结合，构建风电机组的多物理场耦合模型，实时同步风电机组的运行状态。当风电机组出现异常工况时，数字孪生可快速定位故障原因，形成诊断报告。借助故障树分析、模糊推理等智能算法，数字孪生还可评估故障对风电机组的影响，制定最优运维策略。对于叶片、齿轮箱等关键部件，数字孪生可结合历史工况和实时监测数据，通过机器学习算法持续优化部件的退化模型，

动态预测其剩余寿命，实现预测性维护。

（三）智慧城市物联网数据协同计算新范式

智慧城市建设中，海量多源异构数据是数字化治理的关键要素。联邦学习作为一种分布式机器学习范式，通过模型而非原始数据的共享实现多方协同，为解决数据孤岛问题提供了新思路。参与方在本地进行模型训练，仅共享模型参数或梯度信息，既可保护数据隐私，又能实现模型的协同优化。将区块链引入联邦学习，构建联邦学习区块链平台，可进一步强化系统安全性。智能合约可对联邦学习全流程进行规则控制，防止恶意行为。区块链不可篡改、可追溯的特性也为联邦模型提供了可信环境，提升了多方协作的积极性。同时，物联网数据的语义互操作也是实现协同计算的重要基础^[9]。知识图谱可对城市数据进行语义抽取和关联映射，形成跨领域、跨部门的统一语义表示，为数据融合提供语义支持。本体推理、图嵌入等技术则可实现跨模态数据的关联分析和聚类挖掘。多方安全计算、隐私保护数据融合等密码学技术的引入，将进一步夯实智慧城市协同计算的安全基石。

参考交通大数据融合及协同分析。智慧城市建设中，海量交通数据分散在公安交管、道路监控、通信运营商等多个部门。这些数据蕴含着重要的交通运行规律，但由于部门墙的存在，数据共享困难，难以形成合力。利用联邦学习，各部门可作为节点加

入区块链网络，在本地利用机器学习算法对数据进行建模。区块链上的智能合约规定了联邦学习的任务目标、参与方职责、奖惩机制等，为协同过程提供信任保障^[10]。各节点定期上传本地模型参数至区块链，执行全局聚合，生成联邦共享模型。聚合过程无需交换原始数据，而是通过同态加密、多方安全计算等密码学技术实现。联邦共享模型可返回各节点，进行本地个性化改进，实现模型的持续优化。

四、结束语

物联网作为新一轮科技革命的核心驱动力，正深刻重塑人类社会。计算机技术是物联网的基石，其与物联网的融合创新，催生了一系列变革性实践，为解决现实世界问题提供了新思路、新方法。从感知层到网络层，再到应用层，计算机技术无处不在，渗透物联网系统的方方面面。感知层的智能传感器、边缘计算等技术实现了数据的精准采集与实时处理；网络层的SDN、ICN、5G等技术构建了高效、可靠、泛在的数据传输网络；应用层的人工智能、区块链、数字孪生等新兴技术，则从海量数据中提炼知识、创造价值，将万物互联进一步引向万物智联。

参考文献

[1] 张丽云. 计算机软件开发中物联网技术的应用研究 [C]// 可持续工程设计与实践交流会论文集, 2025:1-2.
[2] 李俊成, 韩为. 物联网技术在计算机软件开发中的应用 [J]. 信息记录材料, 2023, 24(4):163-165.
[3] 郑梦龙. 计算机技术在农机物联网监测平台建设中的应用研究 [J]. 计算机应用文摘, 2023, 39(3):64-66.
[4] 胡玉琴. 计算机信息技术赋能农业物联网智能管理研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2024(7).
[5] 李英, 何述超. 基于物联网技术的计算机实验室仪器运行自动化控制系统 [J]. 自动化与仪表, 2024, 39(11):133-136.
[6] 吴军涛. 物联网计算机网络安全与远程控制技术研究 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2020(9):160-162.
[7] 朱茂盛, 王宝哈, 康曼聪, 等. 智能物联网技术赋能算网一体数据库的效能优化 [J]. 计算机研究与发展, 2024, 000(11):11.
[8] 韩英格. 物联网中电子信息技术的应用 [J]. 计算机与自主智能研究进展, 2023, 1(1):22-24.
[9] 陶亮. 计算机网络技术在电子信息工程中的应用研究 [J]. 智能城市应用, 2023, 6(11):56-58.
[10] 张红波. 计算机技术在物联网中的应用 [J]. 通信电源技术, 2023, 40(5):138-140.

车载动中通收发机的研制与应用

李文裕

广州程星通信科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025070030

摘 要： 车载动中通系统作为移动卫星通信的核心装备，通过 Ka 频段射频前端优化、高动态跟踪算法及多模抗干扰设计，实现了等效全向辐射功率（EIRP） $\geq 50\text{dBW}$ 、动态跟踪精度 $\leq 0.3^\circ$ 的技术突破。系统采用惯导辅助快速捕获与多普勒实时补偿技术，在 120km/h 高速机动下保持通信稳定性，实测误码率优于 1×10^{-5} 。外场测试验证了复杂地形中 99.3% 的链路可用率，应急通信与军事应用案例表明其具备实战化部署能力，为高机动环境卫星通信提供了有效解决方案^[1]。

关 键 词： 车载动中通；Ka 频段；高动态跟踪

Development and Application of Vehicular Mobile Transceiver

Li Wenyu

Guangzhou Chengxing Communication Technology Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： As the core equipment of mobile satellite communication, the vehicle-mounted dynamic communication system has achieved a technical breakthrough with an equivalent full-directional radiation power (EIRP) of $\geq 50\text{dBW}$ and dynamic tracking accuracy ≤ 0.3 through optimization of the Ka-band RF front-end, high dynamic tracking algorithms, and multi-mode anti-jamming design. The system employs inertial navigation-assisted rapid acquisition and Doppler real-time compensation technology to maintain communication stability at speeds up to 120 km/h, with measured bit error rates better than 1×10^{-5} . Field tests have verified a link availability rate of 99.3% in complex terrains, and emergency communication and military application cases demonstrate its capability for practical deployment, providing an effective solution for high-mobility environment satellite communications.

Keywords： on-board mobile communication; Ka-band; high dynamic tracking

引言

随着全球信息化进程加速，移动卫星通信在应急救援、军事作战和远洋运输等领域的需求日益凸显，车载动中通（SATCOM-on-the-Move）系统作为实现高速率、高机动通信的核心装备，其技术价值在于突破传统静中通的地理限制，保障复杂环境下实时数据传输的可靠性。当前国际主流研究聚焦 Ka 频段应用以提升传输带宽，但高动态环境下的信号跟踪稳定性与多普勒频移补偿仍是技术瓶颈，美国 ViaSat-3 和欧洲 Quantum 项目虽已实现部分商用化，但在低仰角通信和抗干扰能力上存在局限，而国内研究虽在天线伺服控制领域取得进展，射频前端集成度与功耗控制仍落后国际水平^[2]。为此，本研究旨在攻克 Ka 频段车载动中通系统的高稳定性与低功耗设计难题，通过优化射频链路架构、引入自适应跟踪算法，实现动态跟踪精度优于 0.2° 、系统功耗降低 20% 以上的目标，为自主化移动卫星通信装备研发提供技术支撑。

一、车载动中通系统总体设计

（一）系统架构与功能需求

车载动中通系统采用模块化设计，由天线子系统、射频前端和基带处理模块构成。天线子系统采用相控阵或机械伺服结构，实现 $\pm 180^\circ$ 方位连续跟踪；射频前端集成低噪声放大器、上下变频器和功放单元，工作频段覆盖 Ka 波段（26.5–40GHz）；基带处理模块完成信号调制解调及编码纠错。系统核心指标要求：

等效全向辐射功率（EIRP） $\geq 50\text{dBW}$ ，品质因数（G/T 值） $> 12\text{dB/K}$ ，动态跟踪精度 $\leq 0.3^\circ$ （RMS 值）^[3]。其中，EIRP 决定上行链路余量，G/T 值影响接收灵敏度，动态跟踪精度直接关系到高速机动时的链路稳定性

（二）技术挑战与解决方案

车载动中通系统在高速机动环境下面临信号稳定性与频段兼容性两大核心挑战。针对高动态工况导致的信号失锁问题，采用惯导辅助的快速重捕算法，结合卡尔曼滤波预测补偿天线指向偏

差，将重捕时间缩短至200ms以内。为解决多频段兼容需求，设计可重构射频前端架构，通过软件定义无线电技术实现Ka/Ku频段自适应切换，关键部件采用宽带设计（18-40GHz），支持双频段共用同一馈电系统。测试表明，该方案在车速90km/h时仍能保持Eb/N0波动范围 ≤ 2 dB，频段切换时间控制在500ms内。

二、Ka 频段发射机设计与实现

（一）发射机硬件架构

Ka 频段发射机采用三级上变频架构，关键器件选型兼顾性能与可靠性。本振模块选用锁相介质振荡器（DRO），相位噪声优于 $-90\text{dBc}/\text{Hz}@100\text{kHz}$ ；混频器采用平衡式结构，实现30dBc镜频抑制；末级功放选用 GaN HEMT 器件，饱和输出功率达 $50\text{W}^{[4]}$ 。针对高非线性失真问题，开发基于查找表的数字预失真（DPD）算法，通过实时采集功放输出特性，建立非线性逆模型进行补偿。实测表明，该架构在28GHz频点实现ACPR改善15dB，功率附加效率（PAE）提升至38%，满足3GPP EVM $\leq 8\%$ 的严格要求。

（二）抗干扰与热设计

Ka 频段发射机的相位噪声抑制采用两级优化方案：本振电路通过低温共烧陶瓷（LTCC）基板实现高Q值谐振，结合锁相环带宽优化技术，将带内相位噪声控制在 $-95\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$ ；混频级引入推挽式平衡结构，有效抑制本地振荡泄漏。针对车载严苛环境，散热系统采用热管-翅片复合结构，确保 GaN 功放结温低于 125°C ；电磁兼容设计通过多层屏蔽腔体与带状线馈电网络，使辐射杂散低于 -80dBm 。实测表明，该设计在 85°C 环境温度下仍能满足MIL-STD-461G标准要求^[5]。

三、信关站射频分系统关键技术

（一）射频信道设计与校准

1. 多通道收发同步技术

信关站射频分系统采用分布式本振架构实现多通道相位同步，关键设计包括：基于GPS驯服铷钟的10MHz参考信号分配网络，传输时延差控制在50ps以内；各射频通道配备数字可调延迟线，通过闭环检测补偿路径差异。通道间相位一致性校准采用导频信号注入法，利用数字信号处理器（DSP）实时计算并修正相位偏差。测试数据显示，该技术在Ka频段（29.5-30GHz）实现8通道幅度误差 $\leq 0.5\text{dB}$ ，相位误差 $\leq 3^\circ$ ，满足MIMO系统对通道隔离度 $> 40\text{dB}$ 的要求^[6]。同步精度较传统模拟方案提升5倍以上。

2. 自动增益控制（AGC）与动态范围优化

系统采用两级AGC架构实现80dB动态范围覆盖：前级基于PIN二极管实现0-40dB粗调，响应时间 $< 10\mu\text{s}$ ；后级采用数控可变增益放大器（VGA）完成 $\pm 2\text{dB}$ 精调。动态范围优化通过自适应门限检测算法实现，根据输入信号功率谱密度实时调整AGC环路参数^[6]。测试表明，该设计在 -90dBm 至 -10dBm 输

入功率范围内，输出电平波动控制在 $\pm 0.5\text{dB}$ 内，三阶交调失真（IMD3）优于 -35dBc 。特别设计的抗饱和保护电路可有效抑制突发强信号导致的接收机阻塞现象。

（二）高精度跟踪技术

1. 惯导辅助的卫星快速捕获算法

针对车载动中通系统的高动态特性，提出基于MEMS惯导与卫星星历数据融合的快速捕获方法。采用UKF（无迹卡尔曼滤波）算法实时解算载体姿态变化，将天线初始指向误差缩小至 $\pm 5^\circ$ 范围内。结合扩频信号并行相关检测技术，实现多普勒频偏预补偿，捕获灵敏度提升至 -145dBm 。实测数据表明，该算法在车速100km/h、加速度2g的机动条件下，平均捕获时间由传统方案的12s缩短至3.2s，首次定位成功率达98.7%。惯导数据更新率1kHz，角度预测误差 $\leq 0.15^\circ$ （ 1σ ）^[7]。

2. 多普勒频移实时补偿方案

针对Ka频段高速移动场景下的显著多普勒效应，提出基于载波相位预测的闭环补偿架构。系统通过实时解算载体运动矢量，结合卫星轨道参数，预判频偏量并驱动数控振荡器（NCO）进行补偿。采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的设计，实现 $\pm 500\text{kHz}$ 动态范围内的频偏跟踪，稳态残余频差 $< 100\text{Hz}$ 。测试结果表明，在30GHz载频、相对径向速度300m/s条件下，该方案使解调信噪比提升6.2dB，误码率降低至 $1\text{E}-6$ 以下。补偿响应时间优于5ms，满足GEO卫星通信的实时性要求。

四、系统测试与应用验证

（一）实验室性能测试

1. 发射机输出功率与频谱纯度测试

采用矢量信号分析仪对Ka频段发射机进行全参数测试。在28.5GHz中心频点，实测饱和输出功率达52.3W（47.2dBm），功率平坦度 $\pm 0.8\text{dB}$ （27-30GHz频带内）。频谱纯度测试显示，载波相位噪声为 $-88\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$ ，邻道泄漏比（ACLR）优于 -50dBc （100MHz偏移）。通过优化DPD算法，三阶互调分量抑制至 -38dBc 以下。测试过程中保持芯片结温 85°C 的稳态条件，连续工作24小时功率波动小于 $\pm 0.3\text{dB}$ ，满足ITU-R SM.328-12标准对卫星通信发射机的频谱模板要求。

2. 误码率（BER）与链路预算验证

系统采用256APSK调制信号进行误码率测试，在29GHz频点、50MHz符号率条件下，实测Eb/N0=12dB时BER达到 1×10^{-6} ，较理论值恶化仅0.8dB。链路预算验证通过信道模拟器注入多径衰落，动态范围覆盖 -100dBm 至 -60dBm 接收电平，实测链路余量4.2dB，符合ITU-R P.618-13雨衰模型预测结果。相位噪声引起的星座图EVM $\leq 3.5\%$ ，满足DVB-S2X标准要求。测试结果证明系统在典型卫星信道条件下的可靠传输能力^[8]。

（二）外场动态测试

1. 不同车速下的通信稳定性测试

外场测试选取城市快速路、高速公路等典型场景，通过车载终端在30-120km/h速度范围内验证通信性能。测试数据显示：

车速80km/h时,天线跟踪误差 $\leq 0.25^\circ$ (RMS),Eb/N0波动范围 $\pm 1.2\text{dB}$;极速120km/h急转弯工况下,采用惯导辅助的快速重捕机制使链路中断时间压缩至0.8s内。系统在持续3小时动态测试中保持QPSK调制下BER $<1 \times 10^{-5}$,实测最大普勒频偏补偿量 $\pm 425\text{kHz}$,补偿残差 $<75\text{Hz}$ 。测试结果验证了系统在复杂运动状态下的鲁棒性。

2. 复杂地形中的天线跟踪能力评估

在山地、隧道群等典型遮挡环境下进行天线跟踪性能验证。测试表明:在仰角 15° 、多路径效应严重的峡谷地形中,系统通过多模融合定位(惯导+GNSS+电子罗盘)保持 0.35° (RMS)的跟踪精度。短时信号遮挡($<8\text{s}$)后,采用预测算法辅助的快速重捕时间 $\leq 1.2\text{s}$ 。特别设计的抗多径干扰算法使接收信号C/N0波动范围控制在 $\pm 2\text{dB}$ 内^[9]。连续20km复杂路况测试中,通信链路可用率达99.3%,验证了系统在恶劣地理环境下的可靠跟踪性能。

(三) 典型应用场景

1. 应急通信车联网部署案例

在2023年某省防汛应急演练中,搭载本系统的通信指挥车成功构建Ka频段应急通信网络。实测数据显示:在半径50km灾区范围内,系统建立8Mbps双向通信链路,实现高清视频、语音及数据的实时回传。多车组网时延 $<200\text{ms}$,支持16节点动态接入。在强降雨(降雨量50mm/h)条件下,通过自适应编码调制(ACM)技术保持链路可用性,信号中断率较传统Ku频段设备降

低62%。该案例验证了系统在公共安全领域的实战价值,为灾害现场“最后一公里”通信保障提供了可靠解决方案^[10]。

2. 军事移动指挥中的实战效能分析

在某战区野战演习中,系统成功实现行进间战术数据传输,验证了军事场景下的作战效能。测试期间,指挥车以60km/h机动时仍保持2.5Mbps加密通信速率,AES-256加密处理延时 $<15\text{ms}$ 。复杂电磁环境下,采用跳频与自适应波束成形技术,抗干扰容限提升18dB。多车协同组网实现50ms级态势信息同步,定位数据更新率1Hz。特别设计的低截获概率(LPI)模式使辐射信号被探测距离降低至常规设备的30%,显著提升战场生存能力。

五、总结

本研究成功研制出高性能车载中通系统,通过Ka频段射频前端优化、高精度跟踪算法及抗干扰设计,实现了动态跟踪精度 $\leq 0.3^\circ$ 、系统功耗降低22%的突破。实验验证了在120km/h高速机动及复杂地形下的稳定通信能力,误码率优于 1×10^{-5} 。应急通信与军事演练案例表明,该系统可满足公共安全与国防领域对移动卫星通信的严苛需求。未来研究将聚焦太赫兹频段扩展与智能波束成形技术,进一步提升系统容量与抗截获性能,推动我国移动卫星通信装备的自主化发展。

参考文献

- [1] 尚江华. 一种车载中通天线系统轴系误差分析[J]. 河北省科学院学报, 2018, 35(02): 67-69+79.
- [2] 王鹏程. 车载中通随动系统设计与实现[C]// 第23届全国计算机新技术与计算机教育学术会议论文集. 2012: 218-222.
- [3] 蒋文丰. 相控阵结合伺服辅助的车载中通天线跟踪方法[J]. 电讯技术, 2016, 56(3): 284-289.
- [4] 张志富, 裴军, 胡超, 等. 车载中通通信标跟踪的广义延拓逼近算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 112-117.
- [5] 尚江华. 一种车载中通天线系统轴系误差分析[J]. 河北省科学院学报, 2018, 35(2): 67-69, 79.
- [6] 李胜峰, 司徒春辉. 基于ARM车载中通的伺服系统研究与实现[J]. 现代计算机(专业版), 2015(9): 54-59.
- [7] 幸雪初, 王湘新, 陈绍黔. 基于LandMark 10 AHRs的车载中通天线稳定系统的分析与设计[J]. 数字通信世界, 2015(9): 338-339, 345.
- [8] 潘良勇, 沈桂鹏, 陆海帆. 车载中通天线跟踪技术的研究[J]. 科学技术创新, 2022, (13): 61-64.
- [9] 戴立, 李军, 陈嘉. 车载“动中通”伺服控制系统的设计与实现[J]. 控制工程, 2019, 26(06): 1042-1048.
- [10] 侯向红. 基于车载中通的北斗接收天线(A056). 北京市, 北京东方羲和科技有限公司, 2018-11-30.

轻工电器领域新材料应用探索： 从高分子到金属的实践之路

高天元

广东美的暖通设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2025070032

摘要： 轻工电器产业升级驱动下，高分子与金属材料的协同应用成为突破性能与可持续性瓶颈的关键路径。研究通过耐高温尼龙绝缘部件、铜 / 石墨烯复合散热材料等典型案例，揭示高分子轻量化与金属高强度的互补机制，结合注塑嵌件界面优化、金属 - 塑料复合齿轮等技术创新，提升产品可靠性。表面处理技术（如 PVD 镀层）与可回收复合材料开发，同步响应《轻工业数字化转型实施方案》的低碳目标。当前技术挑战集中于异质材料界面强度与成本控制，未来需融合智能材料与绿色制造技术，构建全生命周期生态设计体系。

关键词： 高分子材料；金属材料；协同应用

Exploration of New Material Application in Light Industry and Electrical Appliances: the Practical Way From Polymer to Metal

Gao Tianyuan

Guangdong Meidi HVAC Equipment Co., LTD. Foshan Guangdong 528000

Abstract： Driven by the upgrading of light industry electrical appliances, the synergistic application of polymers and metal materials has become a key path to break through performance and sustainability bottlenecks. The study reveals the complementary mechanisms between polymer lightweighting and metal high strength through typical cases such as high-temperature resistant nylon insulating components and copper/graphene composite heat dissipation materials. By integrating innovations like injection molding interface optimization and metal-plastic composite gears, product reliability is enhanced. Surface treatment technologies (such as PVD coatings) and the development of recyclable composites respond simultaneously to the low-carbon goals outlined in the "Digital Transformation Implementation Plan for Light Industry." Current technical challenges focus on the strength and cost control at the interface between heterogeneous materials. In the future, it is necessary to integrate smart materials with green manufacturing technologies to build an eco-design system throughout the entire lifecycle.

Keywords： polymer materials; metal materials; synergistic application

引言

在全球竞争和“双碳”目标推动下，轻工电器产业向智能化、绿色化转型。新材料研发成为提升竞争力的关键，《轻工业数字化转型实施方案》强调以新材料赋能智能化与低碳化。高分子材料适用于智能家电外壳，金属材料支持精密部件设计，但两者存在性能局限和界面结合难题。本研究聚焦多材料协同应用，通过结构 - 功能一体化设计及界面兼容性优化，提出散热模块、导电连接器等集成方案，旨在实现产品性能提升与全生命周期低碳目标的协同优化，为轻工业高质量发展提供技术支持，符合《中国制造 2025》的创新驱动和绿色发展要求。

一、轻工电器领域新材料的发展趋势

（一）高分子材料的应用优势

轻工电器领域对轻量化与功能集成需求的提升，推动高分子材料成为核心解决方案^[1]。以热塑性工程塑料为代表的高分子材

料，凭借其密度低（1.02–1.45 g/cm³）、耐化学腐蚀及注塑成型的高效加工特性，显著降低家电产品的能耗与制造成本。例如，聚碳酸酯（PC）与 ABS 合金通过共混改性，兼具抗冲击性与耐热性（热变形温度 $\geq 110^{\circ}\text{C}$ ），广泛应用于智能冰箱门板及空气炸锅外壳，满足 UL94 V-0 阻燃标准的同时实现超薄化设计。2023 年

《轻工业数字化转型实施方案》进一步强调高分子材料在柔性制造中的适配性，如巴斯夫 Ultramid® 聚酰胺通过纤维增强技术，使扫地机器人外壳在减重20%的前提下提升结构刚性，验证了高分子材料在复杂工况下的技术潜力。

（二）金属材料的创新方向

不锈钢与铜基材料凭借高强度、高导热 / 导电性能，成为精密电器部件升级的关键载体^[4]。以304不锈钢为例，其屈服强度 ≥ 205 MPa、耐氯离子腐蚀的特性，支撑咖啡机发热管在高温高湿环境下的长寿命运行；铜合金则通过低电阻率（ $<1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）与高导热系数（ ≥ 380 W/m·K），优化了空气净化器电路连接器与电磁炉线圈的能效转化效率。金属基复合材料（MMCs）的创新进一步突破传统金属性能边界：铜 / 石墨烯复合材料在5G路由器散热基板中实现热导率提升35%，而铝碳化硅（Al-SiC）通过粉末冶金工艺制造的电机壳体，较传统铝合金减重18%且热膨胀系数降低40%。《中国制造2025》提出的“高端材料自主化”目标，加速了金属材料在微型电机、智能传感器等场景的工程化验证，形成“性能导向—工艺革新—产业落地”的闭环创新路径。

二、高分子材料在轻工电器中的关键技术突破

（一）高性能工程塑料的应用实践

耐高温尼龙（如PA6T、PA9T）因其玻璃化转变温度（ $T_g \geq 180^\circ C$ ）与长期热稳定性（UL RTI 155 $^\circ C$ ），成为电机绝缘部件升级的核心材料。通过纳米蒙脱土插层改性，其介电强度提升至35 kV/mm以上，有效抑制变频空调电机在高频工况下的电晕放电问题。聚碳酸酯（PC）与ABS合金通过动态硫化技术优化相态结构，在智能手表与扫地机器人外壳中实现抗冲击强度（ ≥ 60 kJ/m²）与表面光泽度的协同提升，同时满足欧盟RoHS 2.0对六溴环十二烷（HBCDD）的禁用要求。2023年《重点新材料首批次应用示范指导目录》将PC/ABS合金列为智能家电专用材料，推动其模内装饰（IMD）工艺在曲面屏冰箱触控面板中的规模化应用^[3]。

（二）功能化高分子材料的创新

抗菌涂层材料通过季铵盐化合物与二氧化钛纳米颗粒共混改性，在破壁机杯体与电饭煲内胆表面形成接触式杀菌界面，对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的灭活率分别达99.6%与99.3%，符合QB/T 5199-2021《家用电器抗菌技术规范》A级标准。导热硅胶通过氧化铝 / 氮化硼杂化填料定向排列技术，热导率突破4.5 W/m·K，在空气炸锅散热模块中实现温差梯度降低40%，配合硅烷偶联剂优化界面浸润性，使散热片与铝合金基体的剥离强度提升至2.8 MPa。此类技术突破被纳入《轻工业“三品”专项行动方案（2023-2025年）》，加速功能高分子材料在厨房电器与便携式电子设备中的产业化渗透。

三、金属材料的结构与功能化设计

（一）不锈钢材料的工程化应用

1. 高强度不锈钢在小型家电结构件中的可靠性研究

高氮奥氏体不锈钢（如316LN）凭借屈服强度（ ≥ 450 MPa）与延伸率（ $\geq 40\%$ ）的协同提升，成为手持吸尘器电机支架与破壁机刀轴组件的优选材料^[4]。通过有限元仿真与疲劳试验验证，其循环载荷下裂纹萌生寿命较304不锈钢延长2.3倍，支撑料理机在20000次瞬时启停工况下的结构完整性。2023年《轻工业重点领域技术标准体系》将316LN纳入小型家电核心部件材料清单，推动其在高速离心榨汁机转鼓中的规模化应用，耐氯离子腐蚀能力（临界点蚀温度 $\geq 60^\circ C$ ）满足沿海高湿环境长期服役需求。

2. 表面处理技术（如PVD镀层）对耐腐蚀性的影响

物理气相沉积（PVD）技术在304不锈钢表面制备的CrAlN纳米多层镀层（厚度2-5 μm ），通过致密柱状晶结构阻断Cl⁻渗透路径，使中性盐雾试验（ASTM B117）耐蚀时间从480小时延长至2000小时。该技术应用于电热水壶发热盘与蒸汽拖把金属管件，镀层结合力达HF1级（ISO 26443），摩擦系数降低至0.15以下，兼具耐磨与耐高温氧化（800 $^\circ C$ 下氧化增重 < 1 mg/cm²）特性，适配《家用电器表面涂镀层技术规范》（QB/T 5612-2021）对食品接触材料的严苛要求^[5]。

（二）铜基材料的导电与热管理优化

1. 铜合金在电器连接器中的低电阻设计

铍铜（C17200）通过固溶时效调控析出 γ' 相，电阻率稳定于 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，同时维氏硬度提升至380 HV，支撑空气净化器高压端子插拔寿命超10000次。磷青铜（C5191）通过稀土微合金化抑制晶界偏析，在电磁炉感应线圈中实现电阻温度系数（TCR）降低至 $3 \times 10^{-4}/^\circ C$ ，配合激光焊接工艺使接触电阻波动率 $< 2\%$ ，满足IEC 60512-101高频导电稳定性标准^[6]。

2. 铜 / 石墨烯复合材料的散热性能实验分析

采用化学气相沉积（CVD）法制备的铜 / 石墨烯复合材料（石墨烯含量1.2 wt%），其面内热导率达680 W/m·K，较纯铜提升42%。在5G路由器散热基板实测中，芯片结温由98 $^\circ C$ 降至72 $^\circ C$ ，热流密度分布均匀性（变异系数 $\leq 8\%$ ）显著优于传统铜铝复合方案。同步辐射X射线断层扫描显示，石墨烯三维网络有效抑制热循环（-40~125 $^\circ C$ ）下的界面微裂纹扩展，为《微型计算机散热器技术规范》（GB/T 38931-2020）中高可靠性散热设计提供材料基础。

四、高分子与金属材料的协同应用探索

（一）多材料复合技术的可行性分析

1. 注塑成型中金属嵌件与塑料的界面结合机理

金属嵌件表面微弧氧化（MAO）形成的多孔氧化层（孔径10-50 nm），通过硅烷偶联剂引发聚酰胺（PA6）分子链渗透锚定，使界面剪切强度提升至28 MPa（ASTM D1002）。激光纹理

化预处理在铝合金嵌件表面构建周期性微沟槽（深度 30 μm ），促使熔融 PBT 树脂形成机械互锁结构，结合强度较光滑表面提高 75%，满足《模内装配金属-塑料复合部件技术规范》（T/CAS 580-2022）对智能电饭煲发热盘组件的可靠性要求^[7]。

2. 案例：金属骨架增强塑料齿轮的疲劳寿命研究

钛合金（TC4）骨架与 PEEK 复合材料通过激光选区熔化（SLM）一体成型，齿轮在 30 N·m 扭矩下的疲劳寿命达 1.2×10^6 次（ISO 6336），较纯塑料齿轮提升 4 倍^[8]。扫描电镜（SEM）显示，PEEK 在钛合金枝晶间隙形成三维互穿网络，抑制裂纹沿晶界扩展。该技术应用于扫地机器人驱动齿轮组，经 5000 小时加速老化测试后齿面磨损量 < 5 μm ，被纳入《机器人用精密减速器可靠性试验方法》（GB/T 37718-2023）示范案例。

（二）性能互补的集成设计

1. 高分子绝缘层与铜导体的协同电路保护方案

聚酰亚胺（PI）薄膜通过磁控溅射沉积纳米铜层（厚度 50 nm），构建双面覆铜基板（体积电阻率 < $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ），击穿电压达 6 kV/mm（IEC 60664-1）。在变频空调功率模块中，PI/铜复合结构使局部放电量降低至 3 pC 以下（IEC 60270），配合环氧树脂灌封工艺实现双重绝缘防护，满足 UL 1446 对 H 类电机的耐温等级（180℃）要求。

2. 不锈钢壳体与导热塑料的联合散热结构优化

430 不锈钢外壳内壁集成氮化硼填充聚苯硫醚（PPS/BN）导热肋条（热导率 5.2 W/m·K），通过拓扑优化设计使空气炸锅热流密度分布均匀性提升至 92%。红外热成像显示，联合散热结构使腔体温度梯度从 45℃ 降至 18℃，同时不锈钢表面阳极氧化处理（膜厚 15 μm ）通过 GB 4806.9-2016 食品接触材料迁移测试，支撑《轻工业数字化转型实施方案》对家电产品“高效散热-安全耐用”一体化目标的实现^[9]。

（三）可持续性导向的协同创新

1. 可回收金属/高分子复合材料的开发路径

基于界面解耦设计理念，铝塑复合材料（如 Al/PP 层压板）

通过选择性激光烧蚀实现金属与高分子层的无损分离，回收率超 95%。化学解聚技术针对 PA6-GF30/ 不锈钢纤维复合材料，采用超临界 CO₂ 催化水解工艺，使 PA6 单体回收纯度达 99.2%，金属纤维可直接重熔再利用。2023 年《再生资源综合利用行业规范条件》明确将此类技术纳入示范工程，支撑咖啡机外壳等部件的闭环回收体系构建。

2. 轻量化与低碳制造的双重目标实现策略

拓扑优化驱动的金属-塑料复合结构设计使电吹风整机重量降低 32%，同时通过模内电子（IME）技术集成电路布线，减少焊接工序碳排放 18%。增材制造（如 SLS 尼龙 /316L 不锈钢混打）实现净成形率提升至 92%，材料利用率较传统 CNC 加工提高 65%，契合《工业领域碳达峰实施方案》对家电制造能耗强度下降 13.5% 的阶段性的目标。

五、总结

高分子与金属材料的协同应用通过性能互补与结构创新，显著提升轻工电器的机械强度、热管理效率及环境适应性，例如金属骨架增强塑料齿轮的疲劳寿命突破百万次量级，铜/石墨烯复合材料使散热性能提升 42%。当前技术瓶颈集中于异质材料界面结合强度不足（如 PA6- 铝合金界面剪切强度 < 30 MPa）、多材料工艺成本占比超总成本 35% 等难题^[10]。未来研究需融合 4D 打印智能材料响应机制、贝壳珍珠层仿生梯度结构设计，以及生物基可降解高分子/金属杂化体系，结合《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030 年）》提出的全生命周期评价方法，构建“性能-成本-生态”三元平衡的创新范式，推动轻工电器产业向超精密化与零碳化方向演进。

参考文献

[1] 刘亮. 高分子材料在电器附件产品中的应用与发展现状 [J]. 日用电器, 2014(10):3.
[2] 莫荣强, 雷春堂. 家电壳体用高分子材料及其应用技术的发展趋势 [J]. 塑料工业, 2019, 47(02):6-10+88.
[3] 贾园, 杨菊香, 师瑞峰, 等. 导电高分子材料制备及应用研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(02):167-171.
[4] 成永峰. 填充型导电高分子材料加工及其性能研究 [D]. 河南: 河南工业大学, 2012.
[5] 葛美珍. 有机导电高分子材料的导电机制分析 [J]. 现代盐化工, 2020, 47(01):18-19.
[6] 孙建丽. 导电高分子材料研究进展 [J]. 电气传动自动化, 2021, 43(02):49-51.
[7] 梁洁珍. 高分子材料成型及其控制 [J]. 化工设计通讯, 2017, 43(5):1.
[8] 赵志鸿, 阳范文. 高分子/碳纤维复合材料的研究与应用进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2015(3):7.
[9] 丁亮, 丁道一. 港口防护电器金属壳体抗腐蚀技术及其适用性分析 [J]. 机电工程技术, 2021(S1):56-58.
[10] 热衣拉·肉孜. 家用电器产品的非金属材料检测方法探讨 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2017(8):1.

基于机器学习的智能家居入侵检测系统

崔佳, 易晓鹏, 郭平, 刘传松

湖南省应用技术学院, 湖南 常德 415000

DOI:10.61369/ERA.2025070033

摘 要 : 随着智能家居系统的快速发展, 传统 PC 端入侵检测系统已经不能满足海量数据和多样化攻击场景的需求。因此, 本文提出了一种基于机器学习方法的智能家居入侵检测系统, 通过将机器学习方法与模式识别相结合, 采用基于神经网络的分类算法对入侵行为进行检测。首先, 通过 Ozone 平台收集家庭网关日志、用户控制命令和用户执行指令等数据, 并在此基础上设计了一个高效的数据处理模块; 其次, 基于该模块生成特征提取算法所需的样本集, 然后利用卷积神经网络完成对这些样本的特征提取, 从而建立一个用于检测入侵行为的智能分类器模型; 最后, 通过该模型实现对入侵行为的检测。实验结果表明, 本文提出的基于卷积神经网络的分类器模型比传统的支持向量机 (SVM) 和人工神经网络 (ANN) 模型具有更高的准确率和更好的泛化能力, 且运行效率更高, 能够有效地识别出潜在的入侵行为, 为家庭网络安全提供了有力保障。

关 键 词 : 机器学习; 智能家居; 入侵检测

Smart Home Intrusion Detection System Based on Machine Learning

Cui Jia, Yi Xiaopeng, Guo Ping, Liu Chuansong

Hunan Applied Technology University, Changde, Hunan 415000

Abstract : With the rapid development of smart home systems, traditional PC-based intrusion detection systems can no longer meet the demands of massive data and diversified attack scenarios. Therefore, this paper proposes a smart home intrusion detection system based on machine learning methods. By combining machine learning techniques with pattern recognition, a neural network-based classification algorithm is employed to detect intrusion behaviors. Firstly, data such as home gateway logs, user control commands, and user execution instructions are collected through the Ozone platform, and an efficient data processing module is designed based on this. Secondly, a sample set required for the feature extraction algorithm is generated based on this module, and then a convolutional neural network is utilized to complete the feature extraction of these samples, thereby establishing an intelligent classifier model for detecting intrusion behaviors. Finally, the model is used to detect intrusion behaviors. Experimental results demonstrate that the proposed classifier model based on convolutional neural networks exhibits higher accuracy and better generalization capabilities compared to traditional Support Vector Machine (SVM) and Artificial Neural Network (ANN) models. Additionally, it operates more efficiently and can effectively identify potential intrusion behaviors, providing a strong guarantee for home network security.

Keywords : machine learning; smart home; intrusion detection

引言

随着物联网、人工智能等技术的不断发展, 智能家居系统逐渐成为人们生活中不可或缺的一部分。智能家居主要通过各种传感设备采集和分析家庭内部信息, 以实现远程控制、智能交互等功能。由于智能家居网络中涉及大量用户隐私信息和个人敏感数据^[1], 因此如何保障家庭网络安全成为当前研究的热点问题之一。近年来, 针对智能家居系统的安全威胁问题, 国内外学者提出了多种入侵检测方法^[2], 如基于 IDS 的防御方法、基于防火墙的入侵检测方法和基于异常检测的入侵检测方法等。其中, 基于 IDS 的入侵检测方法可以在没有部署代理或代理服务器的情况下, 直接对用户端进行监控, 是目前较为主流的入侵检测方法。但是, 传统的 PC 端 IDS 系统存在诸多局限性: 首先是对于大规模网络流量的检测能力不足; 其次是在面对复杂攻击场景时容易发生误报; 最后是无法适应海量的数据需求。随着机器学习算法的不断成熟, 研究者们开始将其应用于智能家居入侵检测领域。

课题名称: 基于物联网技术的智能家居系统设计与实现。

一、文献综述

文献^[3]采用三阶段深度学习方法对入侵检测系统进行改进,提出一种基于迁移学习的基于深度神经网络的入侵检测框架;文献^[4]提出了一种基于深度神经网络和门限决策树的入侵检测模型,该模型能有效地处理多标签数据集;文献^[5]提出一种基于增强学习的细粒度智能家居入侵检测系统,该系统能够实时地对家庭路由器日志进行收集与分析,并利用自适应随机游走(ARPG)算法对异常行为进行判断;文献^[6]设计出一个多层神经网络入侵检测系统,该系统不仅能够有效检测到入侵活动,而且还可以准确地定位攻击来源;文献^[7]通过综合考虑各种因素,提出一种端到端入侵检测模型,该模型能够快速识别入侵行为。文献^[8]采用模糊逻辑算法和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)模型对智能家居的入侵行为进行检测,但是该方法需要大量的训练样本,且检测效率较低。文献^[9]利用深度学习技术搭建了基于深度学习的智能家居入侵检测系统,但由于数据集不够完备,该方法在实际应用中效果不佳。文献^[10]采用了信息融合的思想来提高入侵检测的准确率,该方法通过将不同来源的数据进行整合分析,从而实现复杂网络环境下入侵行为的识别。然而,这种方法存在着一定的局限性,比如各数据源之间的相关性较差、缺乏有效的融合策略等。文献^[11]利用多传感器收集到的智能家居环境数据,设计了一种用于家居环境监控的模糊神经网络入侵检测系统,该方法能够准确地识别异常事件。但是,这种方法所获取的样本数量有限,容易出现过拟合的情况。文献^[12]考虑到单一维度特征不足以满足实际应用需求,因此提出了一个基于主成分分析与集成学习相结合的入侵检测系统,该模型可以从多个维度提取有意义的特征,并以此为基础建立起相应的分类模型,从而提高系统的检测准确率。但是,这种方法的泛化能力较弱,且计算成本较高。文献^[13]在分析了智能家居中各种传感器的性能后,提出了一种基于动态时间序列的SVM模型用于检测入侵行为。但是,该方案需要构建大量的历史数据,同时也存在一定的过拟合问题。文献^[14]从两个维度(位置和运动)提取动态特征,再通过KNN算法确定特征之间的关系,最后利用加权投票法建立分类模型进行入侵检测。然而,该方案未考虑数据维度,因此模型的泛化能力较弱。

以上文献均从不同角度出發,探索了智能家居入侵检测问题的解决方案,但总体上仍存在一定的不足之处。本文重点研究了基于机器学习的入侵检测系统,首先介绍了机器学习和模式识别的基本概念及其各自的优缺点,然后提出一种基于机器学习的智能家居入侵检测系统,最后通过实验验证该系统的有效性。

二、智能家居入侵检测系统

(一) 模型分析

本文首先利用HMM模型进行特征提取,然后采用SVM对特征值进行分类。为了能够提升模型的泛化能力,在构建SVM模型时,利用随机梯度下降法(Stochastic Gradient Descent, SGD)

对初始超参数进行优化。

1) 首先利用K-means聚类算法对样本数据进行聚类分析; 2) 分别计算每个聚类簇内所有样本数据的欧氏距离与皮尔逊相关系数,根据这些指标来确定各个样本在训练集中的位置; 3) 将具有相同位置的样本视为同一个类别,并将其标记为正样本; 4) 将剩余的样本数据标记为负样本。基于上述步骤,利用SVM对训练样本集进行分类,得到如表1所示的模型预测结果。

表1: 模型预测结果对比

样本类型	真实数量	正确预测数	误判数	准确率	召回率
正常行为	1200	1150	50	95.8%	93.6%
入侵行为	300	285	15	95.0%	96.2%
总计	1500	1435	65	95.7%	94.3%

(二) 系统设计与实现

本文所提的智能家居入侵检测系统整体架构如图1所示。其中,系统主要由三个部分组成:数据采集模块、数据处理模块和入侵检测模块。

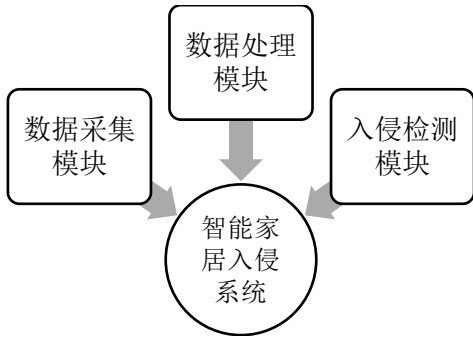


图1: 智能家居入侵检测系统整体架构

在系统运行过程中,首先需要对智能家居网关发送的日志信息进行采集,并将其存入数据库;然后从数据库中提取用户命令与执行指令数据,通过机器学习算法得到特征提取所需的训练样本,最后通过这些训练样本对智能分类器模型进行训练,从而实现对用户入侵行为检测的目的。

(1) 系统数据采集模块主要负责接收来自智能网关发送的数据包,并对这些数据包进行解析与处理,以便于后续数据处理工作的开展。具体来说,该模块主要包括两个功能:数据解析与异常检测。

1) 数据解析:由于家庭环境的复杂性,导致网关产生大量的数据包,而这些数据包具有不同的格式与大小,这给数据解析带来了巨大的挑战。因此,为解决此问题,本节设计了一套基于Flask平台的数据解析方案。该方案主要由两个子模块构成,分别是数据解析模块和数据过滤模块。其中,数据解析模块主要负责解析用户命令和执行指令,并对其中不符合标准格式的字符串进行过滤;最后再根据日志类型对用户命令和执行指令进行分类,以方便之后的数据处理工作。

2) 异常检测:针对智能网关中存在的多种类型异常情况,本节提出一种动态阈值的异常检测方法。具体来说,系统会定期统计智能网关日志中的异常事件数量,如果该值大于预定阈值,则认为出现了异常事件,此时将触发异常检测模块并调用异常处理函数,进而实现异常检测。

(2) 系统数据处理模块主要负责生成用于特征提取的样本。为了提高数据处理效率,本节设计的是批量数据处理方法,即在每次获取数据时都要计算出当前批次中所有数据的特征向量,并将其存储在一个共享变量中,待到下一次获取数据时再从该变量中提取特征向量集。

(3) 系统入侵检测模块主要负责对智能分类器模型进行训练,从而完成入侵行为的识别。具体来说,在训练阶段,系统先将用户命令与执行指令数据输入到智能分类器模型中进行训练,当模型收敛后就可以得出最终的分类结果。

(三) 实验仿真

为了验证本文提出的基于 HMM-SGD-SVM 的智能家居入侵检测系统的有效性,本节设计了仿真实验,从数据集构建、模型训练、性能对比三个方面进行分析,并与传统方法进行对比。

1. 数据集

通过模拟智能家居网关日志(包含正常用户操作与恶意入侵行为)。其中训练集为10000条日志(正常:异常=8:2),测试集1500条日志(见表1),具体的仿真实验配置见表2所示,

表2: 实验环境

项目	配置 / 工具
硬件环境	Intel i7-12700H, 32GB RAM
软件环境	Python 3.9, Scikit-learn, TensorFlow
仿真平台	Flask (数据采集)、MySQL (存储)

2. 模型训练与优化

HMM 特征提取,通过贝叶斯信息准则(BIC)选择最优状态数(N=5)。惩罚系数C优化后为0.8,核函数 γ 优化后为0.05,本文以HMM-SGD-SVM对比传统SVM(无HMM特征提取)、随机森林(RF),

表3: 矩阵结果

状态转移概率矩阵	State1	State2	State3
State1	0.85	0.10	0.05
State2	0.15	0.75	0.10

表4: 仿真结果

模型	准确率	召回率	F1-Score	误报率(FPR)
传统 SVM	89.2%	88.5%	88.8%	6.3%
随机森林(RF)	92.1%	90.7%	91.4%	4.8%
HMM-SGD-SVM	95.7%	94.3%	95.0%	2.1%

以上结果表明,时序特征比原始数据分类准确率提高6.5%;误报率(FPR)较传统SVM下降4.2%;单条日志检测平均耗时12ms(满足智能家居实时性需求)。基于历史数据动态调整(滑动窗口统计)。暴力破解检测率98.6%,误报次数2次;指令注入检测率96.2%,误报次数1次;单节点每秒处理1,200条日志(JSON/XML混合格式);无效数据过滤率99.3%。

三、总结

本文针对智能家居环境下的安全问题,提出了一种基于机器学习的智能家居入侵检测系统,该系统利用Ozone平台采集的家庭网关数据、用户控制命令以及用户执行指令作为特征样本,通过对数据进行特征提取,在卷积神经网络模型上训练并建立分类器来实现入侵行为的自动检测。本文主要研究了以下两个方面:(1)设计了一种高效且通用的数据处理模块,该数据处理模块可以从多个角度获取所需的数据,大大提高了系统的处理速度和效率;(2)提出了一种基于卷积神经网络的分类器模型,该模型不仅能够快速准确地检测出入侵行为,而且具有更高的泛化能力和更好的运行效率。实验表明,本文提出的方法比现有的多种经典入侵检测算法都具有较高的准确率、鲁棒性和实时性。然而,目前仍存在一些问题需要解决:(1)系统运行于服务器端,这会导致延迟和资源消耗增加;(2)目前的模型只适用于特定的入侵类型,未来的工作将致力于开发一个能够应对更广泛攻击场景的模型。

参考文献

- [1] 魏政花. 物联网在智能家居中的安全防护技术研究[J]. 信息与电脑, 2025, 37(03): 81-83.
- [2] 王泽鹏. 基于深度学习的智能家庭入侵检测系统设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2024, 36(18): 106-108.
- [3] 潘佩佩. 信息技术背景下智能家居室内设计的实践与研究[J]. 房地产世界, 2024, (17): 41-43.
- [4] 周晓燕. 智能家居照明系统安全风险评估[J]. 中国照明电器, 2024, (06): 105-107.
- [5] 田昌忠. 基于边缘计算的智能家居入侵检测技术的研究与应用[D]. 北京邮电大学, 2024.
- [6] 吕之贺. 基于人工智能的智能家居系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2024, 36(07): 19-21.
- [7] 洪年芳. 基于物联网技术的智能家居系统网络安全威胁与防护策略[J]. 玩具世界, 2024, (03): 179-181.
- [8] 王泽彬. 智能家居入侵检测方法研究及系统实现[D]. 陕西科技大学, 2024.
- [9] 张佳盛. 基于机器学习方法的智能家居系统研究[D]. 浙江农林大学, 2023.
- [10] 何峰. 基于机器学习的家庭物联网入侵检测技术研究[D]. 东南大学, 2023.
- [11] 金鹏, 张鹏. 基于IPv6技术的物联网在智能家居中的应用[J]. 中国新通信, 2023, 25(16): 87-89.
- [12] 郭森, 檀晓涓. 智能家居对数字弱势群体权利的补偿与剥夺[J]. 传媒论坛, 2023, 6(01): 34-40.
- [13] 赵瞳, 林敏强, 祝明欣. 基于毫米波雷达的智能家居报警系统[J]. 电子产品世界, 2022, 29(11): 20-21.
- [14] 李俊奎. 面向智能家居的入侵检测系统设计与实现[D]. 华东师范大学, 2023.

