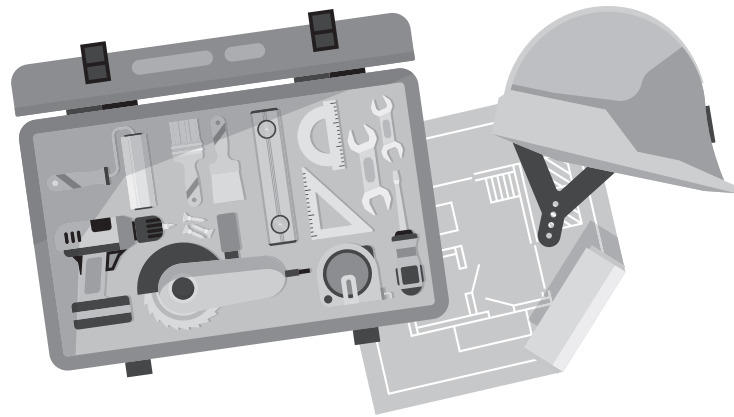


工程技术 与质量管理

Engineering Technology and Quality Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Yulei Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co. LTD.

Haizhong Gao

Zhejiang Zhongnan Construction Group Co. LTD.

Associate Editor

Pengyue Yu

Shandong Construction Engineering (Group) Co., LTD.

Editorial board member

Sanath Alahakoon

School of Engineering and Technology Centre for Railway Engineering

Salahuddin Azad

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

Yungang Wang

Ordos Sports Development Center

Qigui Chi

Expert Committee of China Construction Supervision Association

Danhui Chi

Fujian Provincial Institute of Engineering Supervision and Project Management
Association

Yahui Chi

Fujian Provincial Civil Engineering and Construction Industry Association

Chunxiu Liu

Fujian Provincial Association of Engineering Construction Quality and Safety

工程技术与质量管理

Engineering Technology and Quality Management

第3卷 第10期 2025年10月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程技术与质量管理》编辑部

ISSN(O): 2992-9806

ISSN(P): 2995-3170

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



工程技术 | ENGINEERING TECHNOLOGY

- | | | |
|-----|---|---|
| 001 | 起重机远控模拟舱动力学模型精度优化研究
Study on Accuracy Optimization of Dynamic Model of Remote Control
Simulation Cabin for Crane | 张宏波
Zhang Hongbo |
| 004 | 石化行业检维修与技改项目管理的协同优化: 以多类设备为例
Synergistic Optimization of Inspection-Maintenance and Technical Renovation Project
Management in Petrochemical Industry: A Multi-Equipment Case Study | 王涛
Wang Tao |
| 007 | BIM技术在建筑工程造价控制中的应用分析
Application Analysis of BIM Technology in Cost Control of Construction Projects | 姚力
Yao Li |
| 010 | 地铁站结合物业开发设计研究
Research on the Integration of Subway Station Design with
Property Development | 邹建武, 王佳栋
Zou Jianwu, Wang Jiadong |
| 014 | 浅谈人工智能在烟草质量在线检测中的应用
Application of Artificial Intelligence in Tobacco Quality Online Detection | 于富戎
Yu Furong |
| 017 | 糖香料厨房自动配料控制系统
及远程故障诊断技术研究
Research on Automatic Blending Control System and Remote Fault Diagnosis
Technology for Sugar and Flavor Kitchen | 朱德峰, 王红星, 董涛
Zhu Defeng, Wang Hongxing, Dong Tao |
| 020 | 化工工艺中节能降耗技术的应用
Application of Energy-Saving and Consumption Reducing Technologies in
Chemical Processes | 张娟
Zhang Juan |
| 023 | 市政公用工程施工成本控制问题及对策研究
Research on Issues and Countermeasures of Cost Control in Municipal
Public Works Construction | 张肖, 孙义, 张露
Zhang Xiao, Sun Yi, Zhang Lu |
| 026 | 全域综合整治下金融支持矿山修复的环境工程路径探索
Exploring the Environmental Engineering Path of Financial Support for Mine
Restoration under Comprehensive Rectification | 熊维豪
Xiong Weihao |
| 029 | 强夯在公路路基施工中的作用
The Role of Strong Ramming in Highway Subgrade Construction | 李海都
Li Haidu |
| 032 | 基于高分遥感影像和 DSM 数据的建筑物提取方法研究
Research on Building Extraction Methods Based on High-Resolution Remote
Sensing Images and Dsm Data | 丁汉栋
Ding Handong |
| 035 | 装配式叠合板厚度控制技术研究
Research on Thickness Control Technology for Prefabricated
Composite Slabs | 程芬
Cheng Fen |
| 038 | 国家计量基准自主可控能力建设路径探索
Exploration of the Path for Building the Capacity for Independent Control of
National Metrological Standards | 张楠
Zhang Nan |
| 041 | 浅谈如何通过现场管控开展高后果区
管理提升工作
A Brief Discussion on How to Enhance High-Consequence Area Management
Through On-Site Control | 韩松松, 杨文涛, 王卓, 王宁
Han Songsong, Yang Wentao, Wang Zhuo, Wang Ning |
| 044 | 超高层建筑深基坑支护中自适应支护新工艺的探索
Exploration of a New Adaptive Support Technology for Deep Excavation
Shoring in Super-High-Rise Building Construction | 黄超恒
Huang Chaocheng |
| 047 | 浅谈漏公河特大桥 3# 墩双壁钢围堰施工关键技术
Construction Techniques for the Double-Wall Steel Cofferdam
Pier 3# of Mekong River Major Bridge | 王希平
Wang Xiping |
| 050 | 公路工程风险隐患动态监测与排查体系构建
Construction of Dynamic Monitoring and Investigation System for Risks and
Hidden Dangers in Highway Engineering | 李懋
Li Mao |

053	高温环境下沥青路面施工质量控制技术研究 Research on Quality Control Techniques for Asphalt Pavement Construction in High-Temperature Environments	张启超 Zhang Qichao
056	安装工程中施工进度与造价协同控制机制研究 Research on the Coordinated Control Mechanism of Construction Progress and Cost in Installation Engineering	李娇 Li Jiao
059	BIM 技术赋能的城市燃气工程施工阶段安全风险智能识别与防控研究 Research on Intelligent Identification and Prevention of Safety Risks during the Construction Phase of Urban Gas Engineering Projects Empowered by BIM Technology	张成杰, 徐兵强 Zhang Chengjie, Xu Bingqiang
062	房建工程监理单位履职能力提升策略研究 Strategies for Enhancing the Professional Competence of Construction Supervision Units in Building Construction Projects	严锦春 Yan Jinchun
065	复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖与支护关键技术研究 Research on Key Technologies for Controlled Excavation and Support of Complex Soft Rock Ultra long Shallow Buried Large Section Tunnels	吴旺, 周祥 Wu Wang, Zhou Xiang
068	高层建筑工程施工关键技术与质量控制体系构建 Key Technologies for High-rise Construction and the Construction of Quality Control System	温梓琪 Wen Ziqi
071	绿色建筑施工中的节能环保技术研究 Research on Energy-Saving and Environmental Protection Technologies in Green Building Construction	钱俊超 Qian Junchao
074	施工现场智能化管理——数字化技术的实现路径探讨 Intelligent Management of Construction Sites — An Exploration of Implementation Pathways for Digital Technologies	丁勇 Ding Yong
077	智能建造背景下的工程管理模式创新研究 Research on Innovation of Engineering Management Modes in the Context of Intelligent Construction	毛华彪, 马一帆, 吴晨光 Mao Huabiao, Ma Yifan, Wu Chenguang

水电工程 | HYDROPOWER ENGINEERING

080	面向新能源电气节能工程的技术管理与风险评估体系构建 Construction of a Technical Management and Risk Assessment System for New Energy Electrical Energy-Saving Projects	李澎栋 Li Pengdong
083	一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统 A Method and System for Defect Identification of Drum Screen Mesh Panels in Nuclear Power Plants	李亚兴, 杨龙龙, 李贤广, 张周, 彭宁 Li Yaxing, Yang Longlong, Li Xianguang, Zhang Zhou, Peng Ning
086	机械设计在家电产品中的应用及质量管控策略：流体力学与机械运动的融合 Mechanical Design in Household Appliances: Application and Quality Control Strategies: Integration of Fluid Dynamics and Mechanical Motion	何领民 He Lingmin
089	核电站设备运维管理 Operation and Maintenance Management of Nuclear Power Plant Equipment	许乐 Xu Le
092	浅议冠县大沙河水库供水方案设计分析 Discussion on Design and Analysis of Water Supply Scheme of Dashahe Reservoir in Guanxian	刘涛, 杨涛 Liu Tao, Yang Tao
095	基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用 Accurate Detection and Prevention of Hidden Disaster Causing Water Bodies in Coal Mines Based on 3D Geophysical Technology	刘学霖 Liu Xuelin
098	输煤除灰系统协同优化对火电厂运行经济性的影响分析 Analysis of the Impact of Collaborative Optimization of Coal Handling and Ash Removal Systems on the Operational Economy of Thermal Power Plants	谭康 Tan Kang
101	核电厂蒸汽发生器沉积物问题及治理技术的深度剖析 In-depth Analysis of Steam Generator Deposits in Nuclear Power Plants and Treatment Technologies	杨龙龙, 李亚兴, 许小斌 Yang Longlong, Li Yaxing, Xu Xiaobin
105	水利工程管理对防汛抗旱能力的提升策略研究 Strategies for Enhancing Flood Control and Drought Resistance Capabilities through Water Conservancy Engineering Management	江莹莹 Jiang Yingying
108	用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化方法 Optimisation Method for Capacity Configuration of User-Side Energy Storage Participating in Virtual Power Plant Demand Response	汪波 Wang Bo

安全质量 | SAFETY QUALITY

111	实验室施工中的项目风险管理与质量技术协同机制 Project Risk Management and Quality Technology Coordination Mechanism in Laboratory Construction	黄永超 Huang Yongchao
114	建筑工程领域：安全和技术驱动的工程风险管理新模式 Construction Engineering Field: A New Model of Engineering Risk Management Driven by Safety and Technology	陈鹏 Chen Peng
117	精细化工生产管理中的风险防控与优化策略 Risk Prevention and Control and Optimization Strategy in Fine Chemical Production Management	陈楷城 Chen Kaicheng
120	环保工程项目管理中的全过程质量控制策略研究 Research on Whole Process Quality Control Strategy in Environmental Protection Project Management	周任文 Zhou Renwen
123	大体积混凝土浇筑作业现场安全风险识别与控制研究 Research on Safety Risk Identification and Control in Mass Concrete Pouring Operations	赵海 Zhao Hai
126	市政建筑工程建设施工中安全风险管控探讨 Discussion on Safety Risk Management in the Construction of Municipal Construction Engineering	房军 Fang Jun

起重机远控模拟舱动力学模型精度优化研究

张宏波

上海振华重工集团机械设备服务有限公司, 上海 200135

DOI:10.61369/ETQM.2025100004

摘 要： 为提升虚拟现实环境下集装箱起重机远程操作训练系统精度，基于多体系统动力学理论构建动力学模型，集成高精度物理引擎，耦合环境干扰因素，运用数据驱动方法优化模型。实验表明，优化后模型在负载动态响应与环境干扰模拟方面精度显著提升，有效增强训练系统真实性，受训人员作业完成时间缩短，操作规范性与突发故障处置正确率提高，为自动化码头操作人员培训提供有力支持。

关 键 词： 虚拟现实；集装箱起重机；远程操作；多体系统动力学；物理引擎；精度优化

Study on Accuracy Optimization of Dynamic Model of Remote Control Simulation Cabin for Crane

Zhang Hongbo

Shanghai Zhenhua Heavy Industry Group Machinery and Equipment Service Co., LTD., Shanghai 200135

Abstract： To enhance the accuracy of the remote operation training system for container cranes in a virtual reality environment, a dynamic model was constructed based on multi-body system dynamics theory. This model integrates a high-precision physics engine and incorporates environmental interference factors, using data-driven methods to optimize the model. Experiments show that the optimized model significantly improves the accuracy of load dynamic response and environmental interference simulation, effectively enhancing the realism of the training system. It reduces the time required for trainees to complete tasks, improves their operational standards, and increases the accuracy of handling sudden faults, providing strong support for the training of automated terminal operators.

Keywords： virtual reality; container crane; remote operation; multi-body system dynamics; physics engine; accuracy optimization

引言

集装箱起重机是港口物流的关键设备，其远程操作对动力学模型精度要求极高。传统模型简化处理导致与实际工况存在偏差，影响操作人员训练效果与自动化码头效率。随着虚拟现实技术的发展，构建高精度动力学模型并集成至虚拟现实远程操作训练系统，对提升操作人员技能水平、保障港口作业安全高效具有重要意义。^[1]

一、集装箱起重机动力学特性分析

（一）机械结构动力学特性

集装箱起重机机械结构包含桥架、小车等核心构件，其质量分布状况对动力学特性产生影响，传统模型将其简化成刚体系统，未能考虑弹性形变与阻尼效应，在远程操作时容易出现误判，同时也没有全面考虑构件磨损等时变因素，导致模型准确性下降^[2]。实际上，桥架、小车和起升机构组成刚柔耦合系统，桥架的弹性形变、钢丝绳的非线性振动以及各类时变因素，都会对起重机的运行产生作用。

（二）负载动态响应特性

集装箱门式起重机作为港口国际贸易的关键设备，大小车运行速度较快，因起重小车与被吊物为柔性连接，载荷难以完全约束，工作时摆动角度较大，这增加货物损坏风险与安全隐患。负载动态响应是重要特征，负载重量及分布对起升和运行特性有影响，重载会使响应延迟，偏载会引发吊具倾斜等情况，现有模拟系统多线性化处理，忽略非线性因素，导致操作适应性不足，模拟与实际存在较大偏差^[3]。

负载质量与分布对系统动力学行为影响显著：

惯性力耦合：40ft满载集装箱（30.48t）起升加速度为0.2m/

s²时，钢丝绳动态张力较静态值增加18.7%；

偏载效应：10%偏载会导致吊具倾斜角度达1.2°，钢丝绳张力差达23kN；

现有模型缺陷：线性化处理使重载工况下小车制动距离模拟误差达22%，无法反映实际操作中“过冲-回调”的非线性特征。

二、动力学模型精度优化方法

（一）多体系统动力学建模

基于多体系统动力学理论，把集装箱起重机拆解为刚柔单元，借助关节约束和力元连接进行建模，运用拉格朗日方程建立运动微分方程，将惯性耦合、弹性形变与阻尼效应纳入考量^[4]。针对桥架这类大跨度结构，引入有限元模态分析，对于钢丝绳等柔性构件，采用柔体动力学建模，如此能够实现动态响应同步，精确模拟操作过程中吊具的晃动情况，为使用者提供真实的操作体验。

基于拉格朗日方程构建系统运动微分方程： $M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+K(q)q=\tau+F_{enu}$

其中， $M(q)$ 为质量矩阵， $C(q,\dot{q})$ 为阻尼矩阵， $K(q)$ 为刚度矩阵， τ 为驱动力矩， F_{enu} 为环境干扰力。针对桥架结构，采用有限元模态分析将其离散为128个弹性梁单元，前3阶固有频率分别为2.3Hz、5.7Hz、9.1Hz；钢丝绳则通过柔体动力学建模，采用50个粒子的弹簧网络模拟，弹簧刚度系数随拉伸量动态调整：

$$k_{dyn}=k_0(1+\alpha\varepsilon^2),\alpha=0.15$$

其中 $k_0=2.4\times10^6\text{ N/m}$ 为初始刚度， ε 为应变。

（二）高精度物理引擎集成

选用NVIDIA PhysX等具备刚柔耦合计算功能的物理引擎作为核心，通过实测起重机部件参数来自定义引擎属性，利用引擎粒子系统与弹簧网络模型模拟钢丝绳等柔性体特性，通过调整粒子间距等方式优化计算精度，实现与远程控制模拟训练台硬件交互模块的实时映射。例如操作吊具下降时，可精确计算钢丝绳动态变化，让虚拟场景与实际操作保持同步。

1. 物理参数校准

参数类型	校准方法	实测值范围
构件质量	激光扫描+称重传感器	桥架：280~320t，小车：45t
转动惯量	扭摆实验+数值积分	小车绕z轴：1200kg·m ²
钢丝绳弹性模量	拉伸实验	1.85~1.95×10 ¹¹ Pa
接触摩擦系数	导轨摩擦实验	钢-钢干摩擦：0.15~0.2

2. 引擎核心参数配置

- ◆时间步长：1/60s，确保50ms内完成一次物理迭代；
- ◆求解器迭代次数：位置迭代10次，速度迭代8次；
- w柔体粒子间距：钢丝绳直径的1/5（12mm），弹簧阻尼比0.08；
- w碰撞检测精度：采用GJK算法，穿透深度阈值0.5mm。

（三）环境干扰因素耦合

建立含风载荷、船舶晃动等环境因素的干扰模型并与动力学模型实时耦合，风载荷模型依流体力学成分布力，船舶晃动模型将实测数据转化为基座振动激励。该模块可定制天气等环境参数以提供多样化训练环境。如强风时风载荷影响起重机运行，操作人员需依风况调整策略，模型能真实模拟以助其积累应对不同环境的经验^[6]。

1. 风载荷计算

基于流体力学理论，风载荷分布力表达式为： $F_w=\frac{1}{2}\rho v^2C_dA$ 其中空气密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ ，风速 u ，风载荷系数 C_d （桥架：1.8，小车：1.5），迎风面积 A 。6级风（10.8m/s）下，桥架受到的横向力达28kN，扭矩110kN·m。

2. 船舶晃动激励

将实测船舶六自由度运动数据（横摇±3°，纵摇±2°，垂荡±0.5m）转化为基座振动加速度：

$$a(t)=\begin{bmatrix}0.1\sin(0.8t),0.15\sin(0.6t),0.2\cos(t)\end{bmatrix}^T\text{ m/s}^2$$

（四）数据驱动模型优化

构建基于实际作业数据的模型校准机制，借传感器网络采集运行数据形成训练集，运用机器学习算法以均方误差为目标迭代优化动力学模型参数，自动调整刚度、阻尼系数等，优化成果存储于服务器，为学员操作数据评估提供参考^[7]。长期采集数据可挖掘规律，例如特定负载与风速组合下部件振动模式规律，据此优化参数提升模型准确性。

采用改进的粒子群优化（IPSO）算法迭代校准模型参数：

1. 适应度函数：

$$f=\sum_{i=1}^n\left(\frac{e_i}{\sigma_i}\right)^2,e_i=y_{sim,i}-y_{meas,i}$$

其中 e_i 为第 i 项指标误差， σ_i 为标准差， y_{sim} 与 y_{meas} 分别为模拟与实测值。

2. 参数优化范围：

- 结构阻尼系数：0.02~0.08（初始值0.05）；
- 物理引擎摩擦参数：0.1~0.3（初始值0.2）；
- 钢丝绳非线性系数：0.1~0.2（初始值0.15）。

三、实验验证与结果分析

（一）实验平台搭建

搭建融合VR技术的实验平台，由硬件与软件系统组成。硬件含远程控制模拟训练台、VR仿真服务器等，训练台机械布局与实际一致，主令控制器操作手感、反馈力度同真实操作，高清屏呈现虚拟场景，软件有动力学模型等，硬软件通过以太网交互^[8]。三维视景引擎逼真还原港口环境，平台可添加VR头盔和力反馈装置增强沉浸感与交互性，且具良好扩展性、兼容性，满足多样化实验需求。

模块	硬件配置	软件版本
模拟训练台	六自由度运动平台 + 力反馈手柄	自研控制软件 V1.2
VR 服务器	NVIDIA RTX A6000 × 2	Unreal Engine 4.27
物理引擎	NVIDIA PhysX 4.1	自定义插件 V3.5
数据采集	采样频率 100Hz, 精度 ± 0.5%	LabVIEW 2022

（二）对比实验设计

设计交叉实验方案，融合空载、额定负载、偏载三类负载工况与无风、微风、强风三种环境工况，由专业人员执行作业并同步记录动力学指标，实验定制环境参数模拟复杂港口情境，如偏载强风工况下评估模型表现，严格把控实验条件与流程，精确控制负载重量、分布及风速、风向，多次采集数据降低误差，引入同类训练系统开展对比实验，多维度评价模型性能^[9]。

（三）实验结果分析

优化后的动力学模型在负载动态响应与环境干扰模拟中表现优异，负载动态响应上，重载时小车启停模拟精度提升，偏载吊具倾斜角度模拟误差下降；环境干扰模拟中，强风下起重机运行阻力、船舶晃动致吊具附加晃动等模拟结果与实测高度吻合，增强训练真实性。强风工况优化前运行阻力模拟偏差大，优化后精准反映实际，提升操作训练真实难度。实验分析除动力学指标，还可多维度研究：观察操作人员动作与反应时间分析其对模型适应度与操作习惯；通过问卷访谈收集对训练系统满意度及建议；用数据分析技术挖掘实验数据，发现模型潜在问题与优化方向，为后续改进提供支撑。

（四）训练效果评估

为评估优化前后训练系统效果，选取两组受训人员分别开展培训，通过三维视景引擎生成的操作轨迹对比显示：

空载小车急停工况：优化前吊具因模型简化产生虚假振荡（振幅 ± 1.2m），优化后真实反映桥架弹性形变导致的衰减振动（振幅 ± 0.5m，衰减时间常数 2.3s）；

船舶晃动耦合工况：优化后吊具附加摆动频率（0.8Hz）与实测值完全一致，而优化前存在 0.3Hz 的频率偏差，导致操作人员误判船舶运动周期。

使用优化后模型的受训组作业完成时间缩短约 20%，操作规范度明显提升，突发故障处置正确率提高约 30%，且多数受训人员反馈该系统动态响应更贴近实际设备，契合训练评估需求。此次评估证实，优化后的训练系统可有效提升操作人员技能水平^[6]。为进一步完善评估体系，还能跟踪受训人员入职后的长期工作表现，分析训练系统对其实际工作能力的持续影响；同时开展成本效益分析，探究系统在提升培训效率与质量方面的经济、社会效益，以评估结果为导向持续优化训练系统，可更好适应自动化码头操作人员培训的动态需求^[10]。

四、结束语

集装箱起重机动力学模型精度优化研究取得显著成果，为虚拟现实远程操作训练系统提供更精准的模拟环境，有效提升操作人员培训质量。未来，随着技术的进一步发展，可探索更复杂的工况模拟与智能化训练方法，持续完善训练系统，以满足自动化码头日益增长的操作人员培训需求，推动港口物流行业的智能化发展。

参考文献

[1] 董杰恒. 集装箱门式起重机防摇摆多工况动力学仿真 [D]. 太原科技大学, 2024.

[2] 王照卓. 汽车起重机变幅系统动态特性分析及反馈补偿设计 [D]. 中南大学, 2022.

[3] 张志强. 平塔式起重机—货物体系的动力学仿真研究 [D]. 太原科技大学, 2021.

[4] 吴易鸣. 考虑复杂摆动效应的起重机系统防摆控制研究 [D]. 南开大学, 2021.

[5] 刘华森. 桥门式起重机多体刚柔耦合动力学与防摆控制研究 [D]. 西南交通大学, 2018.

[6] 康燕杰. 基于 Unity3D 的岸边集装箱起重机虚拟仿真及寿命预估 [D]. 华北水利水电大学, 2024.

[7] 王鑫玮. 标准化作业流程在智能化集装箱码头中的应用 [J]. 港口技术, 2022, 59(S1): 58–60.

[8] 赵斌, 马矜. 自动化码头岸边集装箱起重机控制技术 [J]. 港口装卸, 2019, (05): 35–37.

[9] 贾议翰, 白茹芸, 吴红辰, 等. 岸边集装箱起重机门架结构焊序优化仿真 [J]. 起重运输机械, 2025, (10): 83–88.

[10] 吕阳. 集装箱起重机电缆卷盘系统的电气调试方法研究 [J]. 模具制造, 2025, 25(05): 154–156.

石化行业检维修与技改项目管理的协同优化： 以多类设备为例

王涛

珠海裕珑石化有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ETQM.2025100007

摘要： 阐述石化行业设备管理特征，包括不同设备分类管理及难点。介绍 PDCA 循环与 RCM 理论结合的集成管理模型，以及项目组合管理相关评估体系。还涉及多种设备维护、改造及风险管控方法，强调协同管理的重要性与不足，展望数字孪生技术应用前景。

关键词： 石化设备管理；协同管理；PDCA 循环

Synergistic Optimization of Inspection-Maintenance and Technical Renovation Project Management in Petrochemical Industry: A Multi-Equipment Case Study

Wang Tao

Zhuhai Yulong Petrochemical Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： This paper elaborates on the characteristics of equipment management in the petrochemical industry, covering classification-specific management approaches and associated challenges. It introduces an integrated management model combining the PDCA cycle with Reliability-Centered Maintenance (RCM) theory, alongside an evaluation system for project portfolio management. The study also addresses diverse equipment maintenance, renovation, and risk control methodologies, emphasizing both the significance and existing gaps in collaborative management. Future applications of digital twin technology are also discussed.

Keywords： petrochemical equipment management; collaborative management; PDCA cycle

引言

石化行业设备管理至关重要，其涵盖动设备、静设备及特种设备等多种类型，各有独特管理需求，增加了管理复杂性。2023年发布的相关行业政策强调了设备管理的规范化与高效化。在此背景下，设备项目管理协同工作存在痛点，如项目优先级冲突、信息壁垒及特种设备监管合规性问题。PDCA 循环和 RCM 理论为设备管理提供思路，项目组合管理理论有助于构建评估体系。同时，针对不同设备的维护模型及风险管控方法不断发展，旨在实现设备全生命周期的高效管理，提升石化行业的生产效益与安全性。

一、石化行业设备项目管理现状与问题分析

（一）石化行业设备管理基本特征

石化行业设备管理具有独特的基本特征。动设备、静设备及特种设备需分类管理，形成各自的管理体系^[1]。动设备如压缩机、泵等，运行过程中涉及复杂的机械运动，其管理重点在于维护机械部件的正常运转，确保动力传输的稳定性。静设备如储罐、反应器等，主要承受压力和介质的腐蚀等作用，管理侧重于结构完整性和防腐措施。特种设备如锅炉、压力容器等，因其具有特殊的危险性，管理更为严格，需遵循专门的法规和标准。这

些不同类型设备的管理要求差异大，增加了管理的复杂性和难度，同时也为后续的检维修与技改项目管理带来了挑战。

（二）协同管理现存痛点

在石化行业设备项目管理的协同工作中，存在诸多痛点。项目优先级冲突是一大制约因素，不同部门或项目对于资源和时间的需求优先级不同，导致协同困难^[2]。设备状态信息壁垒也严重影响协同，各部门之间缺乏有效的信息共享机制，关于设备的运行状况、维护历史等关键信息无法及时准确传递，阻碍了协同决策。此外，特种设备监管合规性要求增加了协同的复杂性，不同地区和项目对于特种设备的监管标准存在差异，需要耗费大量精

力去协调和满足合规要求，影响了协同管理的效率和效果。

二、设备综合管理理论框架

（一）设备全生命周期管理理论

PDCA循环是一种质量管理方法，包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段。在石化设备管理中，计划阶段可制定设备管理目标和计划；执行阶段实施相关措施；检查阶段评估执行效果；处理阶段对问题进行改进。RCM理论以可靠性为中心，通过确定设备的功能、故障模式及其影响，制定针对性的维护策略^[3]。结合两者，构建包含购置-运行-维护-改造的集成管理模型。购置阶段需考虑设备的可靠性和适用性；运行阶段监测设备状态；维护阶段依据PDCA循环和RCM理论实施维护；改造阶段根据设备运行情况和企业需求进行优化，以实现石化设备全生命周期的高效管理。

（二）项目组合管理理论

在项目组合管理理论中，对于石化行业多类设备的检维修与技改项目，建立合理的评估体系至关重要。资源约束矩阵可明确各项目在资源方面的限制与需求，有助于筛选出符合实际资源条件的项目。风险关联树则能系统地分析项目可能面临的风险及其相互关系，为风险评估提供全面视角。通过这两者构建的项目优先级评估体系，能够科学地确定项目的优先级顺序。在此基础上，提出项目群动态协调方法论，以适应项目实施过程中的动态变化，确保项目之间的协同优化，提高整体管理效率^[4]。

三、检维修与技改协同优化模型构建

（一）多类设备特征建模

1. 动设备维护周期模型

对于动设备维护周期模型，基于振动频谱分析至关重要。通过对设备振动频谱的监测和分析，可以获取设备运行状态的关键信息。不同的频谱特征对应着设备不同的运行状况和潜在故障。根据这些频谱数据，可以建立起设备维护周期与频谱变化之间的关联模型。当频谱出现特定的变化模式时，预示着设备可能即将出现故障或性能下降，此时需要安排相应的维护措施。这种基于振动频谱分析的维护周期模型能够更加精准地确定维护时间窗，避免过早或过晚维护带来的不利影响，提高设备的可靠性和运行效率^[5]。

2. 压力容器技改机会识别

压力容器作为石化行业的关键设备，其技术改造机会的识别至关重要。基于剩余强度评价的窗口期决策树模型在此过程中具有重要应用价值。该模型通过对压力容器的剩余强度进行评估，结合设备的运行状况、历史维修记录以及行业相关标准规范等多方面因素构建决策树。例如，通过分析设备的运行时间、压力波动情况以及介质腐蚀性等因素对剩余强度的影响，确定合理的检维修与技改窗口期。在模型构建过程中，需充分考虑不同工况下压力容器的受力特点和失效模式，以准确识别技改机会，提高设备的可靠性和运行效率，保障石化生产的安全稳定进行^[6]。

（二）协同优化机制设计

1. 资源协同配置算法

考虑设备类型差异构建多目标整数规划模型，以实现检维修与技改的协同优化。模型需综合考虑成本、时间、质量等多方面因素，同时兼顾不同设备类型的特点及要求。对于设备类型的区分，可依据其功能、结构、运行环境等进行分类^[7]。在成本方面，涵盖检维修费用和技改投入；时间上，考虑维修时长和技改实施周期对生产的影响；质量则包括维修后设备的可靠性和技改提升的性能指标。通过合理设置目标函数和约束条件，使模型能够准确反映实际情况，为后续的协同优化机制设计和资源协同配置算法提供有效的数学基础。

2. 风险耦合控制策略

在石化行业中，构建HAZOP-LOPA与项目管理集成的风险管控矩阵是实现风险耦合控制的关键。HAZOP用于系统地识别潜在危险与可操作性问题，LOPA则进一步评估风险并确定必要的防护措施^[8]。将其与项目管理集成，可确保在检维修与技改过程中全面考虑风险因素。通过该矩阵，能够明确不同风险场景下的管控措施及责任主体，实现对风险的精准定位和有效控制。同时，在协同优化机制下，促进各部门之间的信息共享与协作，使风险管控措施能够及时、有效地实施，保障项目的顺利进行，降低因风险耦合带来的潜在损失。

四、实证分析与应用验证

（一）特种设备协同管理案例

1. 压力管道检验与改造联动方案

基于在线检验数据，实施压力管道的检验与改造联动方案。通过先进的检测技术获取管道实时数据，包括壁厚、腐蚀情况等关键指标^[9]。依据这些数据进行风险评估，精准定位需要改造的部位。对于腐蚀严重区域，制定针对性的改造措施，如局部更换管道、采用防腐涂层等技术。同时，在改造过程中，持续监测相关数据，确保改造效果符合安全标准。利用数字化管理系统，实现检验与改造数据的实时共享和追溯，为后续的维护和管理提供有力支持，提高压力管道的运行安全性和可靠性。

2. 安全阀校验与工艺改进衔接

在石化行业中，以安全阀为例，校验工作作为工艺改进提供了关键数据支撑。通过对安全阀的校验，可以精准获取其性能参数及潜在风险点^[10]。基于这些数据，利用先进的数据分析技术和算法，开发PSV性能预测模型。该模型能够模拟安全阀在不同工况下的运行状态，预测其可能出现的故障及性能变化趋势。这为预防性技改决策提供了科学依据，使工艺改进更具针对性和前瞻性。例如，当模型预测到安全阀在特定工艺条件下可能出现密封不严的情况时，可提前规划工艺改进措施，如调整操作参数或对安全阀密封结构进行优化，从而确保设备的安全稳定运行，提高石化生产的整体效率和可靠性。

（二）典型设备集群实施效果

1. 压缩机组群协同优化效果

在石化行业中，对压缩机组群进行协同优化后取得了显著效

果。通过预防性维护与大修技改同步实施，生产连续性得到了极大提升。具体数据表明，设备故障停机时间大幅减少，维修成本也随之降低。同时，机组的运行效率提高，能源消耗降低，这不仅有助于企业降低生产成本，还提升了产品质量和市场竞争能力。在实际应用中，通过优化维护和技改计划，合理安排资源，确保了压缩机组群在整个生产过程中的稳定运行，为石化企业的高效生产提供了有力保障。

2. 反应器系统综合改进效益

石化行业中，反应器系统综合改进效益显著。在量化机械完整性维护与催化剂升级联动方面，能效改善指标得以明确体现。通过对反应器系统的优化，设备运行更加稳定高效。机械完整性维护确保了设备的可靠性，减少了故障发生的概率，降低了维修成本。同时，催化剂升级提高了反应效率，增加了产品产量和质量。两者的联动作用，使得整个反应器系统的能源利用效率得到提升，减少了能源浪费，降低了生产成本，提高了企业的经济效益和市场竞争能力，为石化行业的可持续发展提供了有力支持。

（三）管理效能提升分析

1. 资源节约系数测算

通过曼哈顿距离法评估人力、备件等资源的协同利用效率，首先需确定各项资源在不同项目阶段的实际使用量和理论最优使用量。以人力为例，收集不同设备检维修与技改项目中各个环节所需的人工工时数据，以及理想状态下的工时标准。对于备件，统计其实际消耗数量和根据设备运行状况及维护计划预估的合理消耗数量。然后，根据曼哈顿距离公式，计算各项资源实际使用情况与最优情况之间的距离。将这些距离综合起来，通过特定的权重分配方法（可根据资源的重要性和成本等因素确定权重），

得出资源节约系数。该系数能够直观反映出在人力和备件等资源协同利用方面的管理效能提升程度，为进一步优化管理提供量化依据。

2. 合规性风险量化

通过蒙特卡洛模拟来验证特种设备双重预防机制的有效性。基于相关数据构建蒙特卡洛模型，考虑多种不确定性因素，如设备故障概率、检测误差、人员操作失误等。模拟不同场景下双重预防机制的运行情况，分析其对合规性风险的影响。通过大量模拟实验，获取风险量化结果，如风险发生的概率分布、可能造成的损失范围等。将模拟结果与实际数据进行对比验证，评估双重预防机制在实际应用中的效能，为进一步优化机制提供依据，同时也为石化行业检维修与技改项目管理中的合规性风险控制提供量化参考。

五、总结

多类设备协同管理方法论在石化行业检维修与技改项目管理中具有重要实践价值。它有效提升了资源利用率，通过合理配置人力、物力等资源，避免了浪费，提高了工作效率。同时，在降低非计划停机方面表现出色，减少了因设备故障导致的生产中断，保障了生产的连续性和稳定性。然而，该模型在智能化决策支持方面存在改进空间，需要进一步优化算法和数据处理能力，以提供更准确、及时的决策依据。展望未来，数字孪生技术的融合应用前景广阔。它可以为设备管理提供更真实、精确的虚拟模型，实现对设备全生命周期的实时监测和优化，进一步提升协同管理的效果，推动石化行业检维修与技改项目管理向更高水平发展。

参考文献

- [1] 刘世奎. B公司火电技改类 EPC 项目风险管理研究 —— 以 A 项目为例 [D]. 西南石油大学, 2022.
- [2] 童建翔. EPC 项目参建方协作机制优化研究 —— 以 KA 项目为例 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [3] 苏言海. 技改类环保设备采购决策研究 —— 以声波吹灰器为例 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [4] 程金. “双一流”建设视角下高校基建项目协同管理研究 —— 以 N 大学科研楼为例 [D]. 东北林业大学, 2021.
- [5] 储巍. 基于多目标优化的软件研发项目群协同管理研究 [D]. 西南财经大学, 2023.
- [6] 张正华, 段树乔, 刘昕. 基于协同演化模型的电力产业链系统协同管理研究 —— 以云南水电系统为例 [J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(2): 90-100.
- [7] 王辉, 王生. 浅谈设备管理模块在石化企业检维修作业中的实际应用 [J]. 中国设备工程, 2021(14): 3.
- [8] 王亦斌, 钟碧蓉. 基于 BIM 项目协同管理平台研究 [J]. 山西建筑, 2021, 047(8): 186-188.
- [9] 赵颢. 协同管理在建筑项目管理中的应用分析 [J]. 大众标准化, 2023(14): 161-163.
- [10] 王敦, 张凯虹, 陆坚, 等. 基于技术开发多项目协同管理策略优化及实施研究 [J]. 项目管理技术, 2021, 019(008): 89-94.

BIM技术在建筑工程造价控制中的应用分析

姚力

嘉兴市千秋工程咨询有限公司，浙江 嘉兴 314100

DOI:10.61369/ETQM.2025100010

摘 要： 建筑工程造价控制是项目经济效益的核心保障，传统管理模式因信息割裂、动态响应滞后等问题难以满足现代工程需求。建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）技术以三维数字化模型为载体，整合建筑全生命周期信息，为造价控制提供精准化、动态化的技术支撑。本文系统解析 BIM 技术在决策预控、设计优化、施工动态管理及竣工精准核算阶段的应用路径，揭示其通过可视化建模、实时数据联动与多维度协同机制重构成本管控范式。同时，探讨标准化管理体系与多方协同机制的关键支撑作用，结合技术应用效益与现存挑战，提出推动行业数字化升级的实践路径，为建筑工程造价控制的智能化转型提供理论参考与实践导向。

关 键 词： BIM技术；工程造价控制；全生命周期管理；协同机制

Application Analysis of BIM Technology in Cost Control of Construction Projects

Yao Li

Jiaxing Qianqiu Engineering Consulting Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314100

Abstract： Cost control in construction projects is the core guarantee of project economic benefits. Traditional management models, however, struggle to meet modern engineering demands due to issues such as information fragmentation and delayed dynamic responses. Building Information Modelling (BIM) technology uses three-dimensional digital models as a carrier to integrate information throughout the entire lifecycle of a building, providing precise and dynamic technical support for cost control. This paper systematically analyses the application pathways of BIM technology in decision-making and pre-control, design optimisation, dynamic construction management, and precise final settlement stages, revealing how it reconfigures cost control paradigms through visual modelling, real-time data linkage, and multi-dimensional collaborative mechanisms. Additionally, it explores the critical supporting roles of standardised management systems and multi-party collaboration mechanisms. By combining the benefits of technological application with existing challenges, it proposes practical pathways to drive industry digital transformation, providing theoretical references and practical guidance for the intelligent transformation of construction project cost control.

Keywords： BIM technology; engineering cost control; full lifecycle management; collaboration mechanisms

当前建筑工程项目日益呈现集成化与动态化发展趋势，使造价管理面临挑战^[1]。传统依赖二维图纸与离散式核算的模式，因信息传递失真与过程管控脱节，难以实现全周期成本精准管控^[2]。面对这一困境，建筑信息模型技术作为一种创新的数字化手段，正逐步展现出其在重构造价管理范式方面的潜力^[3,4]。本文立足 BIM 技术基本特性，系统解析其在造价控制中的创新路径与协同价值，以期为行业数字化升级提供可操作的解决方案。

一、BIM 技术在造价控制中的核心优势

（一）可视化建模与数据集成能力

传统建筑工程造价控制中，二维图纸的平面符号表达常导致

信息传递损耗，构件空间关系与材料属性需依赖人工解读，易引发工程量漏算或错算^[5]。BIM 技术通过三维数字化建模重构了信息传递模式，其可视化特性将建筑构件的几何参数、材料属性及空间关系等多维度信息整合为全生命周期动态模型^[6]。这使造价

人员能直观洞察构件细节与空间分布，减少解读偏差。

（二）动态关联与实时更新机制

传统模式中设计变更后需人工重算工程量与成本，超支风险难预警^[7]。BIM技术依托参数化设计的底层逻辑，将构件尺寸、材料规格等设计变量与工程量清单、造价数据库建立动态绑定^[8]。设计调整发生时，模型能自动触发关联计算引擎，同步更新该楼板的混凝土用量、钢筋含量及对应成本，并即时生成变更前与变更后的成本差异分析表。这种变更-数据-成本的即时映射机制，使造价人员能在设计调整的初期阶段，精准评估其对总造价的影响程度，从而提前介入控制，将成本风险消除在决策环节而非执行阶段。

（三）多维度协同管理效能

建筑工程造价控制的复杂性，本质上源于多参与方信息交互的低效率^[9]。多参与方，如设计、施工、造价等因工具与标准独立形成信息孤岛，导致协同低效与成本失控风险^[10]。BIM平台通过构建全生命周期统一数字化模型，为多参与方提供了单一可信数据源。设计团队在优化空间布局或调整结构形式时，造价人员可同步调用模型中的构件信息与成本数据库，实时测算方案调整对总造价的影响；施工单位制定进度计划时，能直接关联模型中各阶段的材料用量、设备需求等数据，实现资源配置与进度节点的精准匹配。这种基于同一模型的协同模式，可以有效减少跨部门信息传递的损耗与误差，使造价控制从单一环节的局部管理转向全流程的系统协同。

二、BIM 技术在造价控制各阶段的应用路径

（一）项目决策阶段的成本预控

项目决策阶段作为建筑工程造价控制的起点，其成本预控的准确性直接影响后续阶段的成本管理成效。BIM技术凭借其强大的可视化建模与数据集成能力，为该阶段提供了科学的成本预控路径。通过整合项目选址的地理信息、功能需求及建设标准，BIM可快速构建概念级三维模型，将抽象的项目规划转化为直观的可视化成果。在此基础上，技术人员通过参数化调整，如变更建筑规模、结构形式或材料选用，能够高效生成多方案比选模型，直观呈现不同设计方案的空间形态差异。模型内置的数据库可实时关联当地建材市场价格、人工成本及设备租赁费用等动态数据，结合历史项目造价信息，自动计算各方案的投资估算值并输出对比分析报告。这种可视化的成本预测方式，可以帮助决策者直观把握不同方案的成本构成与潜在风险，还能通过数据驱动的对比较分析，优化项目规模与建设标准，为后续阶段的成本控制奠定精准基础。

（二）设计阶段的造价联动控制

设计阶段是造价控制的关键环节，其方案合理性直接影响项目整体成本。BIM技术通过构建全专业协同的三维模型，实现设计与造价的深度联动。初步设计时，将总造价目标分解至各专业形成成本指标，依托BIM参数化特性，设计参数调整，如结构形式变化，会同步更新混凝土用量等造价数据，系统实时对比当前

方案与成本指标，超阈值即预警，推动设计团队优化材料选型或构造做法，实现“限额设计”的动态管控。施工图设计中，BIM模型集成多专业信息进行碰撞检测，提前发现管线交叉、设备空间矛盾等问题，减少施工阶段返工拆改。同时，模型内置的工程量计算模块可精准提取构件参数，与造价软件对接生成预算文件，能够提升算量效率与准确性。

（三）施工阶段的动态成本管理

建筑工程造价控制的核心实施阶段为施工环节，其成本管理效能对项目最终经济效益有直接影响。BIM技术通过构建多维模型，为施工阶段的动态成本管理提供了创新路径。将BIM三维模型与施工进度计划深度融合形成4D模型（3D+时间），可按时间维度精准分解各施工节点的工程量与资源需求，系统自动生成材料采购计划与人工配置方案，有效避免传统管理中因信息滞后导致的材料积压或窝工损耗。在此基础上，进一步集成成本维度构建5D模型（3D+时间+成本），通过实时关联现场进度数据与预算信息，可动态监控实际成本与目标成本的偏差。当遇到材料价格波动、设计变更或工序调整等情况时，模型能够快速识别成本变化趋势并触发预警机制，同步更新成本计划与资源配置方案，实现施工过程的动态造价控制。这种基于BIM的动态管理模式可以提升成本控制的实时性与精准性，有效应对施工阶段的不确定性因素，为项目成本目标的实现提供技术保障。

（四）竣工结算阶段的精准核算

传统结算模式依赖人工核对图纸与现场数据，易因信息不全、算量误差引发争议，而BIM技术凭借其全生命周期信息集成特性，为结算阶段的精准核算提供了新路径。BIM模型作为项目全周期信息的核心载体，完整记录了从设计到施工阶段的所有动态数据，包括设计变更单、现场签证记录、材料价格波动台账等过程信息。结算时，技术人员通过模型内置的工程量提取功能，可自动获取各构件的实际施工工程量，与合同清单中的计划量进行智能比对，系统生成差异分析报告，有效规避人工算量中常见的漏项、重复计算等问题。同时，模型中整合的材料调差记录、签证审批文件等数据，为合同外费用的核定提供了可追溯的原始依据，当出现结算争议时，可快速调取相关过程数据佐证，显著减少双方核对时间。竣工结算作为建筑工程造价控制的收尾环节，将核算效率大幅度提升，且误差率控制在一定范围内。

三、BIM 技术驱动的造价管理应用与协同机制

（一）标准化管理体系构建

为确保建筑工程造价管理的精度与效率，亟需构建基于BIM技术的标准化管理体系。建立BIM模型与造价标准的映射规则，统一构件编码、工程量计算规则及成本科目分类，是实现模型数据与造价规范一致性的关键。BIM技术能够将构件、材料、设备等参数集成于模型之中，涵盖二维图纸数据及成本价格、施工周期等属性数据，造价管理人员可据此精准提取工程量，进行造价估算，减少人为误差。企业应制定BIM造价应用标准，规范模型创建、数据录入、成本分析流程。例如，在模型创建时，明确

规定构件的命名规则、属性定义及几何形状构建要求；数据录入时，规范信息格式、精度及时间要求；成本分析时，统一分析方法、指标体系及报告格式。

（二）多参与方协同管理机制

构建基于云平台的 BIM 协同工作环境，能实现产业链各参与方的高效协同，促进信息共享与造价管控。业主可借此实时监控投资执行，设计单位能及时获取反馈优化设计，施工单位依模型动态调配资源，造价咨询单位则实现成本数据的实时更新。这种机制有效减少了信息不对称导致的造价失控风险。云平台为各参与方提供了统一的数据访问和共享接口，确保了信息的准确性和时效性。各参与方在项目全生命周期内紧密协作，共同推动项目的顺利进行。例如，施工单位可根据模型中的设计变更信息，及时调整施工计划和资源配置，避免因信息滞后造成的成本超支和工期延误。造价咨询单位则依据各方提供的实际数据，动态更新成本估算和预算，为项目投资控制提供精准依据。BIM 技术的应用，能够改变传统造价管理的模式，使各参与方从独立工作转向协同合作，提升工作效率和质量，降低项目风险。

四、结束语

BIM 技术通过数字化建模与全生命周期信息集成，重构了建筑工程造价控制范式，实现了从静态估算到动态协同管控的跨越。本文从 BIM 技术的核心优势挖掘入手，系统阐述了其在造价控制各关键阶段的创新应用路径，并深入探讨了标准化管理体系与多方协同机制的关键支撑作用，层层递进地揭示了 BIM 驱动造价管理范式变革的内在逻辑。其在全过程中的应用实践显著提升了成本控制的实时性与精确性。然而，当前应用仍面临软件兼容性不足、跨平台数据交互障碍导致的信息损耗，以及兼具 BIM 技术与造价管理能力的复合型人才短缺等挑战，制约了技术落地的深度与广度。未来需着力推进技术标准统一、强化基于云平台的多参与方协同机制，并加快跨学科人才培养体系建设。政府政策推动与产学研深度融合将在解决这些问题中发挥重要作用。随着建筑行业数字化转型深化，BIM 技术将持续驱动造价管理向智能化、精细化升级，为提升项目经济效益和行业高质量发展提供核心支撑。

参考文献

[1] 钟玲. BIM 技术在建筑工程造价控制中的应用研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (06): 102-104.

[2] 胡佳. 基于 BIM 技术建筑工程全寿命周期成本控制策略 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(09): 94-96.

[3] 徐家化. BIM 技术背景下的建筑工程造价自适应控制方法研究 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集 (一). 浙江圣川建设工程有限公司; , 2025: 1403-1406.

[4] 汤骛武. 基于 BIM 技术的建筑工程造价预算控制方法研究 [J]. 中国招标, 2025, (05): 174-176.

[5] 赵红. 基于 BIM 技术的建筑工程造价自适应控制方法 [J]. 山西建筑, 2025, 51(08): 179-182.

[6] 刘晓为. BIM 技术支持下的建筑工程造价标准化管理探究 [J]. 中国标准化, 2025, (04): 207-209.

[7] 邱涟漪. 智能化技术在铁路建筑工程造价管理中的应用与实践 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (02): 162-164.

[8] 孔令忠. BIM 技术在建筑工程造价控制中的应用研究 [J]. 中国招标, 2025, (01): 141-144.

[9] 王洋洋. 基于 BIM 技术的建筑工程造价标准化管理研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (06): 86-88.

[10] 刘微, 焦雨晗, 王玥. 基于 BIM 技术在建筑项目工程造价管理中的运用分析 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023, (10): 84-86.

地铁车站结合物业开发设计研究

邹建武, 王佳栋

中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300000

DOI:10.61369/ETQM.2025100012

摘 要： 本论文聚焦地铁车站结合物业开发设计研究，旨在探索高效的都市空间利用模式。通过系统梳理地铁车站本体及周边的空间资源，包括站厅层、站台层、设备层、上盖空间、地下空间和地面空间，分析其开发潜力与利用方式；归纳车站与物业结合的上盖物业开发、周边物业开发、站内商业开发三种主要方式，阐述其特点与优势。深入探讨该设计的价值体现，涵盖经济效益、社会效益和环境效益，明确以人为本、一体化、可持续发展和安全性等设计原则，总结基于客流分析与功能分区的布局规律，剖析建设时序对结合方案的影响，提炼人性化设计、防火设计、防洪涝设计等要点。最后提出引入前策划后评估机制、建立成体系技术标准和规范的发展建议。

关 键 词： 地铁车站；物业开发；空间资源；设计原则

Research on the Integration of Subway Station Design with Property Development

Zou Jianwu, Wang Jiadong

China Railway Sixth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Tianjin 300000

Abstract： This paper focuses on the design research of metro station integration with property development, aiming to explore efficient urban space utilisation models. By systematically analysing the spatial resources of the metro station itself and its surrounding areas, including the concourse level, platform level, equipment level, roof space, underground space, and ground-level space, this study examines their development potential and utilisation methods. It summarises three primary approaches to integrating stations with property development: roof-top property development, surrounding property development, and in-station commercial development, and elucidates their characteristics and advantages. It delves into the value of this design, covering economic, social, and environmental benefits, and clarifies design principles such as people-centricity, integration, sustainability, and safety. It summarises layout patterns based on passenger flow analysis and functional zoning, analyses the impact of construction sequencing on integrated schemes, and highlights key points such as human-centric design, fire protection design, and flood prevention design. Finally, it proposes development recommendations, including the introduction of a pre-planning and post-evaluation mechanism and the establishment of a systematic technical standards and regulations framework.

Keywords： subway station; property development; spatial resources; design principles

引言

随着城市化进程加快，城市人口越来越多，交通拥堵与都市空间资源紧张状况日益凸显。地铁这种高效，便捷，大运力公共交通方式对缓解城市交通压力起到了不可忽视的作用。同时地铁车站周围通常会形成强度较大的人流聚集区而极具商业开发价值。结合地铁车站进行物业开发，既可以实现土地资源高效利用、都市空间综合效益提升，又可以为地铁建设、运营等提供经费支持，从而形成可持续的城市发展模式。所以研究地铁车站与物业开发设计相结合是有现实意义的。

一、地铁车站结合物业开发的空间资源梳理

（一）车站本体空间资源

1. 站厅层空间

站厅层作为旅客出入车站，转乘，买票和检票的主要场所，

一般空间面积都比较大。除了满足基础的交通需求之外，还可以在站厅层的边缘和未被占用的空间内开设各种商业店铺，例如便利店、书店和咖啡店等，以便为乘客提供更加便利的服务和消费环境。另外站厅层公共空间可用来布置广告位和展示区，以提高商业收益。^[1]

2. 站台层空间

站台层多为旅客候车及上下车使用，空间的利用比较有限。而在某些大换乘车站或者客流量大的站点，则可以在站台层末端或者适当地点布置自动售货机，报刊亭之类的小商业设施来满足旅客即时需求。与此同时，站台层墙面，地面及其他空间还可以以广告和艺术装饰的方式实现商业开发以增加其商业价值。

3. 车站设备层空间

车站设备层是用来布置各种机电设备以保证地铁车站正常工作。一些设备层空间可以得到合理的规划与使用，同时又能满足设备安装，维修及安全等方面的需求。比如可以在设备层局部空间布置成设备管理用房和商业开发用房之间的过渡区，在充分利用空间资源的前提下，经过合理分隔与设计使设备管理和商业开发相对独立。

（二）车站周边空间资源

1. 上盖空间

车站上盖空间作为地铁车站与物业相结合开发中最重要的一个区域。为了实现地铁与物业之间的无缝连接，可以在车站的上方进行各种物业项目的建设，例如住宅、办公楼和商业综合体等。上盖物业可以通过内部通道直接连接到车站站厅或者站台，为旅客出行提供便利，还可以增加物业附加值。上盖物业的开发需要充分考虑结构安全，建筑布局 and 交通流线，以保证上盖物业和地铁车站之间的和谐统一。^[2]

2. 地下空间

站点周围地下空间开发潜力巨大。它可以通过修建地下商业街，地下停车场和地下商业广场与地铁车站地下空间互相贯通，从而构成整体地下空间体系。地下商业街可以集合多种商业业态为居民提供大量购物，娱乐和餐饮；地下的停车设施可以满足附近地区的停车需求，从而减轻交通拥堵。另外，开发地下空间可以和城市人防工程有机结合起来，增强城市综合防护能力。

3. 地面空间

站点周围地面空间以站前广场，地面道路和绿地为主。站前广场可以成为交通换乘枢纽与人流集散空间，还可以布置商业设施，文化景观等以增强广场功能与质量。地面道路通过合理的规划可以设置公交专用道和自行车道来优化交通组织和出行效率。绿色空间有助于优化城市的生态环境并增强城市的整体形象。地面空间开发时需要注意与周围环境协调统一、合理利用空间、可持续发展等。

三、地铁车站与物业结合的方式

（一）车站上盖物业开发

车站上盖物业开发是将住宅、商业、办公等物业类型建设在地铁车站上方，通过直接的竖向连接实现地铁与物业的一体化。这种结合方式具有便捷性高、空间利用效率高的优点。乘客可以通过站内通道直接进入上盖物业，无需出站，减少了出行时间和换乘成本。同时，上盖物业的开发也能为地铁车站带来稳定的客流，促进商业的繁荣。例如，香港的九龙站，其上方建设了大规

模的商业综合体和高档住宅，通过完善的内部通道系统，实现了地铁与物业的无缝对接，成为了“地铁 + 物业”开发的成功典范。^[3]

（二）车站周边物业开发

站点周边物业开发，就是对地铁站点周围一定区域内的各种物业项目进行开发和建设。尽管这些楼盘并不直接和站点连接，但是通过对步行系统和交通换乘设施的合理设计，使站点和周边楼盘之间能够方便地进行连接。站点周边楼盘开发可充分利用地铁所产生的交通优势增加楼盘价值。常见物业类型有商业中心，写字楼，宾馆，公寓。以日本东京新宿站为例，新宿站附近，聚集着大量商业大厦，写字楼以及娱乐设施等，新宿站通过完善的步行网络以及交通换乘系统将周边楼盘紧密连接在一起，构成高度繁荣的城市中心。

（三）车站内商业开发

地铁车站内的商业开发项目包括在车站内部布置各种商业设施，例如商店、餐厅、便利店和自动售货机等，旨在为乘客提供一个便利的购物和服务体验。站点内部商业开发可以充分利用站点客流资源提高商业收益。同时丰富商业业态还可以提升站点空间氛围和旅客出行体验。基于站点规模，客流量及功能定位等因素，站点内部商业开发形式及规模各不相同。在部分大型换乘车站或者处于商业中心区，商业开发规模更大、业态更丰富；但在某些小型车站或者客流量不大的站点，商业开发主要是针对旅客基本需求进行小型商铺、自动售货机等服务。^[4]

四、地铁车站结合物业开发设计的布局规律

（一）基于客流分析的布局规律

1. 商业布局与客流走向

通过分析地铁车站内客流方向，合理布置商业设施。通常情况下，为了最大化地利用客流资源，在乘客进出车站的主要通道和换乘中心，应当建立具有高人流量和强烈吸引力的商业模式，例如大型超市和品牌专卖店等。并且在某些次要通道或者客流比较小的地区，可以建立一些小型便利店和自动售货机之类的商业设施来满足旅客的基本需求。另外，在商业布局上也应该考虑到和周边楼盘功能互补、形成差异化竞争、提升商业整体效益。^[5]

2. 公共空间与客流聚集区

在客流密集的区域，例如车站的站厅和站前的广场，都应该为乘客提供宽敞且舒适的公共区域，以确保他们的休息、停留和疏散都能得到满足。公共空间可以与景观设计，文化展示相结合，增强空间质量与魅力。与此同时，应合理规划公共空间和商业设施的关系，以免商业设施过度蚕食公共空间，确保公共空间开放通达。

（二）基于功能分区的布局规律

1. 交通功能区布局

地铁车站交通功能区主要由站厅，站台，通道及出入口组成，要根据客流需求及交通流线合理布置。站厅应设于便于旅客出入车站及换乘之处，月台长与宽应视客流量而定，以保证旅客能安全舒适候车及上下客。通道、出入口设置要符合疏散要求，

与周围交通设施、物业等保持良好联系。

2. 商业功能区布局

商业功能区要按不同业态、经营特点分区布局。比如把餐饮区集中统一布置于一个范围内，方便统一管理、通风排烟；把零售区与娱乐区隔离开来，减少彼此的干扰。同时商业功能区布局要兼顾与交通功能区对接，便于旅客出入车站时购物消费。^[6]

3. 居住和办公功能区布局

若站点周围存在居住及办公物业发展时，居住功能区宜布置于较为安静且环境良好地区，远离商业及交通功能区，减少噪音及人流干扰。办公功能区可以根据其特性和需求，选择与商业功能区相邻或相对独立的位置，以方便员工的工作和出行。

五、地铁站结合物业开发设计中的要点

（一）人性化设计要点

1. 无障碍设计

地铁站及物业开发项目的无障碍设计要充分考虑，以保障残障人士，老年人及其他特殊人群的便捷出行与利用。应建立无障碍通道、无障碍电梯和无障碍卫生间，确保其连贯性与可达性。无障碍通道坡度、宽度、扶手设置等应符合有关标准，无障碍电梯应当有明显标志及操作说明，无障碍卫生间空间布置及设施配置应当符合特殊人群要求。^[7]

2. 舒适性设计

舒适性设计主要有提高室内环境质量和提供足够休息设施。就室内环境质量而言，应合理地进行通风，空调系统的设计，以保证车站及物业内空气新鲜，气温适宜。应充分利用自然采光和减少人工照明，在提高空间舒适度前提下减少能源消耗。就休息设施而言，车站站厅，站台及物业公共区域应有充足座椅供旅客及住户休憩。座椅在材料、造型及布置等方面都要充分考虑人体工程学原理以增加乘坐舒适度。

3. 标识系统设计

清晰、明确的标识系统，是地铁站及物业开发项目指引旅客，住户成功出行的一个重要保证。标识系统应当由导向标识，信息标识和警示标识组成，设置地点应当醒目易认，标识的内容应当简洁准确。导向标识应当指引旅客平稳出入站，寻找换乘通道及出入口；信息标识应当提供站点的运营时间，线路图，周边设施及其他有关情况；警示标识应当提示旅客注意安全事项，例如严禁吸烟，谨防触电。标识系统在设计时应该考虑到与整体环境相协调，使用统一风格及颜色，增加空间美观。^[8]

（二）防火设计要点

1. 防火分区划分

按照有关防火规范对地铁站和物业开发区域进行科学合理的防火分区，并通过防火墙，防火门和防火卷帘等防火分隔设施把火灾限制在一定区域之内，以制止火势扩散。各防火分区应有独立安全出口、疏散通道，其面积、疏散距离等要求符合规范要求。对人烟稠密的商业区域、交通枢纽区域需要适当减少防火分区面积、加大防火分隔措施以增强防火安全性。

2. 防排烟系统设计

设计一套行之有效的防排烟系统，是确保人员在火灾中安全撤离的关键所在。合理布置排烟口、送风口位置及个数，以保证发生火灾时能及时排烟、引进新鲜空气。排烟系统要有充分的排烟能力并能按规定时间排出火灾区域烟雾，确保疏散通道及人员停留区域能见度良好。同时防排烟系统要与火灾自动报警系统相联，做到自动控制与手动控制结合，增强系统可靠性。^[9]

3. 消防设施配置

按有关标准配齐消防设施有消火栓系统，自动喷水灭火系统，火灾自动报警系统和灭火器。消火栓系统要确保任何地点使用方便，水压、水量符合灭火要求。自动喷水灭火系统要针对不同地区火灾危险等级，选择适宜的型式及喷头布置形式，以保证能在初期对火灾进行及时、高效灭火。火灾自动报警系统要求高灵敏度、准确性、能及时检测到火灾信号并快速报警。与此同时，消防设施也要定期维护与检验，以保证消防设施运行在良好状态。

（三）防洪涝设计要点

1. 排水系统设计

设计合理的排水系统为防洪涝提供了依据。对排水管道走向及管径进行合理规划，以保证排水通畅。地铁站及物业开发区域内低洼处及出入口等容易积水处安装集水井及排水泵等设施，以便及时消除积水。排水系统排水能力要按当地暴雨强度公式及重现期的要求来计算决定，以保证极端天气情况下能高效地排水。同时，设置雨水调蓄设施，如雨水池、雨水罐等，调节雨水流量，减轻排水系统的压力。

2. 防洪设施设置

地铁站出入口及通风口等重要位置安装防洪挡板及防水闸门，避免洪水倒灌入车站及物业内。防洪设施设计要达到强度、密封性等要求，并能有效地抵抗洪水影响。对地下空间外墙及底板要采取可靠防水措施，例如使用防水混凝土，防水涂料及防水卷材以阻止地下水渗入。同时要加强对防洪设施日常养护管理，并定期检查试验，以保证防洪设施在洪水来临时能正常运行。^[10]

3. 防洪涝应急管理

编制完善防洪涝应急预案、明确部门及人员责任、建立应急响应机制。定期举办防洪涝应急演练等活动，增强突发事件处置能力。加强同气象和水利部门信息沟通，掌握洪水预警信息并提前准备预防。洪水来临时，快速启动应急预案并采取有效措施抢险救灾，确保了人员生命财产安全以及地铁站、物业正常运营。

六、结论

总之，本研究系统探讨了地铁站结合物业开发设计，通过对空间资源、结合方式、布局规律、设计要点等多方面的研究，揭示了该模式在城市发展中的重要价值与实践路径。对地铁车站本体及周边空间资源的梳理，明确了各空间的开发潜力与利用方向，为后续开发设计提供了基础依据；归纳的三种主要结合方

式，为项目实践提供了多样化选择；基于客流与功能分区的布局规律研究，以及人性化、防火、防洪涝等设计要点的提炼，为科学设计提供了指导准则。地铁车站结合物业开发设计实现了土地资源的集约化利用，通过商业开发、上盖物业等模式，显著提升

了城市空间的综合效益，创造了可观的经济效益，同时在缓解交通、提升城市形象、促进社区发展、减少能源消耗等方面产生了积极的社会与环境效益，有力推动了城市的可持续发展。

参考文献

- [1] 徐景安,李娟娟.深圳地铁站与周边物业连通通道规划建设管理实践 [J]. 现代城市轨道交通,2020 (06):114–119.
- [2] 李娜,王劲峰.地铁车站与物业开发相结合的模式探讨 [J]. 铁道建筑技术,2011 (S2):118–122.
- [3] 王勍.地铁车站建设结合物业开发设计初探 [J]. 现代经济信息,2019 (14):399.
- [4] 黄鼎曦,陈菁菁,黄嘉健,等.城市轨道交通段场与车站布置对物业开发的影响 [J]. 城市轨道交通研究,2019, 22 (6):4.
- [5] 张扬.地铁车站及上盖物业整体设计的研究与分析 [J]. 中国建筑金属结构,2018 (05):68–69.
- [6] 赵晨.地铁车站与物业开发结合 [J]. 河南建材,2020 (06):134–135.
- [7] 韩磊.对地铁物业开发的设计研究 [J]. 建筑工程技术与设计,2017 (19):5035.
- [8] 张晶晶.TOD 模式下的地铁车站预留物业设计 [J]. 山西建筑,2024,50 (10):141–143.
- [9] 宋孝春,赵春发.地铁车站与周边物业一体化设计探讨 [J]. 建筑与装饰,2020 (19):2.
- [10] 朱海峰.地铁车站与上盖物业一体化设计研究 [J]. 工程建设与设计,2020 (08):32–34+37.

浅谈人工智能在烟草质量在线检测中的应用

于富戎

西南大学, 重庆 400715

DOI:10.61369/ETQM.2025100015

摘 要 : 烟草作为国家财政收入的重要来源, 随着时代的不断发展, 市场也对烟草质量提出了更高的要求。以前传统的检测技术因设备体积大、适应能力差、结果不准确而基本被淘汰。随着自动化综合检测系统出现, 在线检验也应运而生, 目前在线检测在烟草系统已普及十余年。本文介绍目前烟草质量检验中的在线检测手段现状, 分析目前在线检测手段的优势, 同时探讨未来人工智能在线检测的应用研究。

关 键 词 : 在线检测; 烟草质量; 人工智能

Application of Artificial Intelligence in Tobacco Quality Online Detection

Yu Furong

Southwest University, Chongqing 400715

Abstract : As an important source of national fiscal revenue, with the continuous development of the times, the market also puts forward higher requirements for the quality of tobacco. The previous traditional detection technology was basically eliminated due to the large volume of equipment, poor adaptability and inaccurate results. With the emergence of automated comprehensive detection system, online inspection also came into being. At present, online detection has been popularized in tobacco system for more than ten years. This paper introduces the current situation of online detection methods in tobacco quality inspection, analyzes the advantages of current online detection methods, and discusses the application research of artificial intelligence online detection in the future.

Keywords : online detection; tobacco quality; artificial intelligence

随着烟草行业对产品质量要求的不断提升以及生产自动化水平的持续推进, 传统烟草质量检测手段已难以满足实时、高效、精准的检测需求。在线检测技术凭借其实时监测、动态分析、智能化处理等优势, 正逐渐成为烟草质量控制的革新性手段^[1]。本研究聚焦目前在线检测在烟草质量中的应用, 旨在探索其面临的挑战, 为烟草行业构建智能化、高效化的质量检测体系提供理论与参考, 助力行业在质量竞争与技术创新中实现新的突破。

一、烟草质量检测的目的与意义

近年来, 随着人们对健康和环境问题的关注度不断提高, 烟草中的有害物质如一氧化碳、尼古丁等, 对人体健康有严重影响, 因此, 严格控制这些成分的含量是烟草行业和监管机构必须管控的, 此外, 烟草的物理指标如重量、圆周、长度、吸阻、通风率、含水率、端部落丝等, 也是衡量烟草质量的重要标准。因此, 烟草质量检验技术的提升, 在线检测技术的应用, 贯穿了烟草种植、生产、加工全过程的严格监控, 成为了业界广泛关注的焦点^[2]。

二、在线检测在烟草质量检验中的检验方式

(一) 均衡连续取样

烟草行业对检验取样有明确要求, 如随机取样、烟支分切后的俩部分烟支都需抽取、样本需具有代表性。传统人工取样受人员取样习惯、人员素质、测量操作、时间等因素影响, 实际很难满足均衡连续取样和标准化检验。目前, 均衡连续取样常见于取样器和综合测试台的组合中, 该组合安装与卷烟机烟支出口处, 取样器通常采用顶部取样法, 间隔30s在不断运行中储烟通道抽取一支烟自动传送中综合测试台进行质量、圆周、长度、吸阻、通

风率等指标进行物测。因此取样器和综合测试台的组合设备能满足烟草检验严格的取样过程要求且结果可靠无误，同时自动化设备的应用避免了人员的影响，固定间隔时间抽样使样本具有代表性，同时运行过程中可不间断抽样，全过程对烟支质量做到实时监控。

（二）短距离实时检验

烟支在输送烟支在输送过程中，与输送带、管道等接触，烟支受到机械力作用，可能导致烟丝破碎，增加含末率，影响烟支的燃烧质量和外观，可能因摩擦和挤压导致滤嘴泡皱、变形，甚至烟支破裂。同时传统人工取样，烟支收集后置于密封袋内做好标识需经过一段路程送检，期间烟支易褶皱和造碎，影响检测结果。而在线检测自动化成套装置就地安装固定。以取样器和综合测试台组合为例，安装于取样点出，极大限度缩短的取样路径，减少了路径对结果的影响，样品被抽取第一时间送入综合测试台进行检验，即时上传检测数据，整个过程公开透明，对于异常数据，工作人员能第一时间发现异常，防止不合格产品流入下一道工序，避免流入市场带来进一步的影响和损失^[9]。

三、在线检测在烟草质量检验中的应用

（一）综合测试台

目前采样的烟支、滤嘴检测综合测试台可检测烟支的重量、圆周、长度、吸阻、通风率吸阻、硬度、以及滤嘴的吸阻和硬度。重量单元采用高精度电子秤、自动化上料装置、控制系统、数据采集模块。圆周、长度单元利用激光扫描技术对烟支进行旋转扫描，通过选取测量若干个样本点，通过光电传感器中光信号的变化来确定烟支的圆周、长度。吸阻和通风率单元采用压力传感器、负压发生器、橡皮套管密封装置，测试过程中会将烟支的一端密封，另一端连接至气流控制系统，通过调节气流速度，测量烟支两端的压力差，通过公式从而计算通风率、吸阻值。硬度单元采样光电传感器和全压法，通过光信号变化测量加压下的烟支变形程度来测量烟支硬度。因目前采用的烟支综合测试台属于精密仪器，为保证数据的准确和仪器的正常工作，每天需要用标准件对各版块进行标定和验证，同时对仪器内部进行清洁维护，特别是精密部位和光学部位，分别用毛刷和洗耳球轻轻擦拭。

（二）微波单元

微波单元安装用于烟条成型机出口末端，利用电磁谐振原理实时对烟支水分和密度（重量）进行监控，数据实时上传在卷烟机显示屏上即时显示，方便人员对于重量波动第一时间做出应对和调整。

（三）视觉图像系统

视觉图像系统是用于最广泛的在线检测系统，通常采用高分辨率相机拍摄烟支图像如 ccD 相机等，利用图像处理算法分析烟支的外观、尺寸等特征，判断是否存在缺陷。常见检测有烟支外观剔除检测、缺支检测、小盒外观检测、缺盒纸检测、散包检测、条盒拉带检测等。从烟丝到箱装烟条、从卷烟机到大箱机物流系统全过程皆有其工作运行。以散包检测为例，散包检测是检测烟包表面是否有透明纸以及透明纸是否热封平整均匀，对于无

透明纸和透明纸不平整均匀皆视为不合格品。当此类不合格品经过散包检测，高分辨率相机实时拍摄并与数据库中标准品进行对比，比对失败会触动检测头上红色二极管闪动一次，然后在后续相位的 CH 剔除口进行剔除，若有连续不合格品通过并被检测，散包检测会立即停机并报警，操作人员会第一时间排除故障，避免生产大量不合格品造成损失和浪费。以上图像检测技术原理皆以高速相机拍摄生产线上产品后与数据库标准品进行对比而判断是否剔除^[4]。

（四）其他检测系统

常见的其他检测系统还有，烟支漏气剔除检测、烟支重量剔除检测、光子剔除检测等。

漏气检测是通过给予烟支负压或正压，对于存在漏气的烟支进行剔除。重量剔除是通过重量控制系统，对过轻或过重的烟支进行剔除。对于光子剔除检测，通过记录人为制造缺陷产品通过记录光子检测的数据，同时记录合格品通过时的数据，将数据汇总，得到最终合格品通过时光子检测数据范围设置为通过，其余数据过高过低皆被剔除，常用于内部材料缺失检测如缺包检测、缺纸检测等。

（五）在线检测目前的缺点

目前，在线检测已广泛应用于烟草质量检验当中，剔除数据也能够及时上传，工作人员可针对某项剔除过多的问题进行及时整改，现代“智慧工厂”的时代潮流不可阻挡。但对于图像和光子等在线检测，如与更换牌号、材料、设备结构改进时，不及时更新数据库，有时会有错误剔除甚至罢工的风险。如何及时更新图像等在线检测的对比数据库，减少不合格品的生产以及材料的浪费和人工的过多干预成了目前烟草在线检测的一个难题。

四、人工智能与数据库融合创新方向与实践探索

近年来，随着人工智能技术的迅猛发展，数据库技术也在不断进步，两者正逐渐融合，在数据模型、数据管理、数据应用等方面实现全方位的结合。这种融合不仅提升了数据库的性能、易用性和可维护性，还为人工智能处理海量数据、训练模型提供了高效的支持。因此，当前的数据库技术与人工智能技术的结合促进了双方的协同创新与能力提升，主要表现在以下两个方面。

一方面，人工智能技术正在赋能数据库（AI for Database, AI for DB）。传统的数据库优化技术，如成本估算、连接顺序选择、参数调整、索引和视图顾问等，往往依赖于经验和规则，需要人工参与调整和维护。然而，面对大规模数据库实例和多样化的应用需求，这些传统方法难以满足高性能的要求。而借助人工智能技术，例如利用强化学习优化 Join 操作的顺序选择，使用深度强化学习自动配置数据库参数，可以有效解决这些问题^[5]。

另一方面，数据库技术也在赋能人工智能技术（Database for AI, DB for AI）。在实际应用中，人工智能的部署往往需要开发人员编写复杂的代码和训练模型，这增加了使用的复杂性。新兴的数据库技术可以简化这一过程，加速人工智能算法的实现，并在数据库内部提供人工智能能力。例如，数据库技术可以用于提高

数据质量，包括数据发现、清理、集成、标记和追溯，还能自动选择最优的模型参数，加速模型推理。

综上所述，数据库技术与人工智能的融合不仅提升了各自的技术能力，还为广泛的应用领域带来了创新和高效解决方案的可能，这种可能带来解决烟草质量在线检测搭建、优化、使用智能化数据库问题的契机。

五、人工智能与数据库融合的创新实践

目前，人工智能技术与数据库技术融合发展已经取得应用和实践，国内因人工智能技术和数据库技术融合目的是解决企业的实际业务和使用场景需要而重心在 AI for DB 领域，随着更多关键性的技术被攻克和解决，该融合技术落地和转化后，将形成更多的相关应用。

因自动化数据库维护与性能优化、数据库安全与风险防控、智能化数据备份与恢复数据库容量规划与资源调度等多个方面共同作用，数据库的使用以及运行维护会更加智能、安全和效率高。同时，数据库本身系统较复杂，对自身稳定性有极高要求，使用人工智能算法和数据库进行不断匹配和不断调试，也至少需要几十天乃至更长的调试周期，因此调试匹配的周期严重制约了人工智能技术和数据库技术融合成果的转化和落地。

六、浅谈人工智能赋能烟草在线检测数据库

同目前烟草质量检验在线检验一样，传统的数据库设计与使用，还需要人工参与调整、维护、更新。人工智能技术的出现能够极大程度上，减少人工的参与和影响，同时人工智能技术与数据库技术融合，易实现数据库的健康监控、性能预测、发现敏感数据、访问控制等。

智能数据库配置优化，在数据库参数调优领域，现代数据库系统通常包含数百个可配置参数。传统 DBA 依赖经验进行人工调优，不仅耗时耗力，在面对海量数据库实例时更显得力不从心。基于深度学习的自动化参数优化技术，通过分析工作负载特征与性能指标间的复杂映射关系，能够实现参数的智能动态调整，显著提升大规模数据库集群的管理效率。

智能查询优化，传统 SQL 重写技术多采用固定策略（如自上而下的规则应用），在处理大规模数据时易产生性能疲软。深度强化学习为查询优化提供了新范式：通过建立查询计划与执行效能的反馈机制，智能优化器能够自主选择最优执行路径，动态消除冗余操作符，实现查询效率的阶跃式提升^[6]。

智能索引设计革新，传统索引结构（B-tree、Hash 等）依赖预定义规则与静态统计信息，难以适应动态数据分布。基于机器学习的学习索引技术开创了新的解决方案：采用神经网络、决策树等模型预测数据分布特征；根据查询模式动态选择最优索引结构；实现索引参数的在线自适应调整；支持查询结果的直接预测（Point Query）。

路径上，通过人工智能技术对数据库进行优化，作用于烟草质量在线检测。一方面，人工智能的强大计算能力和深度学习技术，使得烟草在线检测系统能够处理更为复杂的数据和分析任务。通过先进的图像识别算法，人工智能系统可以精准地识别烟叶的外观特征，如颜色、纹理、斑点等，从而自动判定烟叶的品质和等级。这不仅极大地提高了检测的精度，还将检测速度提升至前所未有的水平。传统的人工检测方法往往受限于人眼的主观判断和疲劳问题，而人工智能系统则能够持续不断地进行高效、精准的检测，大幅降低了人为误差。

另一方面，人工智能在烟草在线检测中的应用还延伸到了生产过程的监控与优化。智能监测系统能够实时采集和分析生产数据，对生产过程中的各种参数进行精确控制。通过对大量数据的挖掘和分析，人工智能系统可以预测设备可能出现的故障，提前进行维护和保养，从而避免因设备故障导致的生产中断。这种预测性维护不仅保障了生产线的稳定运行，还有效延长了设备的使用寿命，降低了企业的维修成本。

此外，人工智能技术还帮助烟草企业实现了智能化管理。通过对生产数据的深入分析，企业能够更好地了解生产过程中的瓶颈和优化空间，从而制定更科学的生产计划和策略。这不仅提高了生产效率，还减少了资源浪费，推动了烟草行业的绿色可持续发展^[7]。

七、总结

随着人工智能技术的迅猛发展，烟草行业正迎来一场技术革新。人工智能在烟草在线检测中的应用，不仅提升了检测精度与效率，还推动了整个产业链的智能化升级。通过先进的图像识别技术，人工智能系统能够自动识别烟叶的品质、等级及瑕疵，实现高效、精准的质量控制。此外，智能监测系统实时分析生产数据，预测和诊断设备故障，保障生产线的稳定运行。这些技术的应用，显著降低了人工成本，提高了生产效率，为烟草企业带来显著的经济效益。未来，随着人工智能技术的不断深化，烟草行业将进一步实现智能化、绿色化发展，增强国际竞争力，推动行业可持续发展。

参考文献

[1]朱静.在线检测在烟草质量检验中的实践思路构架浅谈[J].硅谷,2015,8(04):275-276.
[2]王宁.在线检测在烟草质量检验中的实践思路构架[J].科技创新与应用,2016,(15):127.
[3]顾天鸾,董一民.人工智能时代数据库技术创新态势研究[J].信息通信技术与政策,2024,50(06):17-22.
[4]李若海.基于人工智能机器视觉处理的在线检测算法实例研究[J].自动化应用,2025,66(10):43-45+49.
[5]李中杰,贾成举,巨鑫.基于人工智能方法的数据库智能诊断方法探讨[J].数字技术与应用,2023,41(09):52-54.
[6]张倩,杜丽肖.人工智能在计算机网络技术中的应用[J].无线互联科技,2022,19(06):112-113.
[7]党霞,王建民.在线检测在烟草质量检验中的应用分析[J].轻工标准与质量,2017,(06):56+60.

糖香料厨房自动配料控制系统及远程故障诊断技术研究

朱德峰¹, 王红星², 董涛²

1. 无锡智瀚智能机器技术有限公司, 江苏 无锡 214000
2. 贵州中烟工业有限责任公司 贵阳卷烟厂, 贵州 贵阳 550000
DOI:10.61369/ETQM.2025100018

摘 要 : 本研究聚焦于糖香料厨房自动配料控制系统及远程故障诊断技术的开发与应用。系统设计采用移动罐灌装模式替代传统管道输送方式, 优化了成品料向制丝现场的供应流程。核心工艺流程涵盖原料处理、自动熬制、移动罐灌装、AGV 输送及余料回收清洗等环节。控制系统构建了设备控制层、集中监控层和生产管理层三层架构, 基于 ProfiNet 工业以太网实现高效数据通信。系统实现了精准配料调制、灌装动态补偿、移动罐自动对接、多模式控制及全流程防差错功能。远程故障诊断系统通过特征提取与建模, 结合分布式网络架构, 实现故障的快速识别与定位。安全设计融合了多重联锁机制与权限管理, 保障系统可靠运行。

关 键 词 : 糖香料厨房; 自动配料; 移动罐; AGV; 远程故障诊断; ProfiNet; 防差错

Research on Automatic Blending Control System and Remote Fault Diagnosis Technology for Sugar and Flavor Kitchen

Zhu Defeng¹, Wang Hongxing², Dong Tao²

1. Wuxi Zhihan Intelligent Machinery Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000
2. Guizhou Tobacco Industry Co., Ltd., Guiyang Cigarette Factory, Guiyang, Guizhou 550000

Abstract : This research focuses on the development and application of an automatic blending control system and remote fault diagnosis technology for sugar and flavor kitchens. The system design adopts a mobile tank filling mode to replace the traditional pipeline transportation method, optimizing the supply process of finished materials to the cigarette-making site. The core process flow includes raw material processing, automatic boiling, mobile tank filling, AGV transportation, and residual material recovery and cleaning. The control system is constructed with a three-layer architecture of equipment control layer, centralized monitoring layer, and production management layer, achieving efficient data communication based on ProfiNet industrial Ethernet. The system realizes precise blending modulation, dynamic compensation during filling, automatic docking of mobile tanks, multi-mode control, and full-process error prevention functions. The remote fault diagnosis system, through feature extraction and modeling, combined with a distributed network architecture, enables rapid identification and location of faults. Safety design integrates multiple interlock mechanisms and permission management to ensure reliable system operation.

Keywords : sugar and flavor kitchen; automatic blending; mobile tank; AGV; remote fault diagnosis; ProfiNet; error prevention

引言

在烟草加工领域, 糖香料厨房系统是卷烟生产的重要组成部分。该系统由机械设备、控制系统和管理系统三大部分组成, 其基本功能是实现糖香料调制、储存和输送。其中机械设备一般有熬制罐、原料罐、调制罐和储存罐, 熬制罐将固体原料制成液体原料储存在原料罐中, 原料罐储存单体原料并按照配方出料重量和误差的要求输送到调制罐中, 调制罐制成配方料输送到储存罐中, 储存罐存储配方成品料。该系统取代了原有的人工配料方式, 采用自动化配料工艺, 在现场的运行过程中, 取得了显著的效果, 实现了配料的自动化, 但配料精度还有待进一步提高。本研究设计开发了一套基于移动罐灌装模式的糖香料厨房自动配料控制系统。系统引入 RFID 识别、AGV 自动物流、动态灌装控制及自动对接技术, 并集成了远程故障诊断功能。

作者简介: 朱德峰 (1987—), 男, 汉族, 江苏宝应人, 本科, 工程师, 研究方向: 卷烟设备自动化与控制。

一、糖香料厨房自动配料控制系统工艺设计

（一）核心工艺流程框架

糖香料厨房自动配料流程起始于原料扫码入库环节。扫码枪自动审定料液代码与系统配方是否契合，校验无误的原料借助气动泵被抽进指定原料罐，配料进程依据生产任务单开展，由 PLC 控制系统自动计算各原料的出料数量，气动调节阀把控原料按比例进入计量罐加以混合^[1]。混合料液借助管道泵进入调制罐后，蒸汽加热系统依据预设温度曲线落实熬制工艺，自动配料流程如图1所示。成品料液灌装时采用移动罐模式开展工作：操作人员在触摸屏上选定目标储存罐及所需灌装量，输送泵跟气动球阀协同合作实现快慢双速的灌装流程，RFID读写器把诸如牌号、重量的信息写入移动罐芯片，满载移动罐被 AGV 小车运送至制丝车间里。自动对接站台依靠气缸驱动快换接头实现定位与管路连通，完成料液精准施加，成品料液施加流程如图2所示。

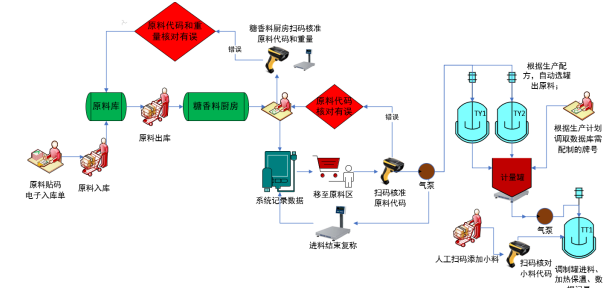


图1 自动配料流程图

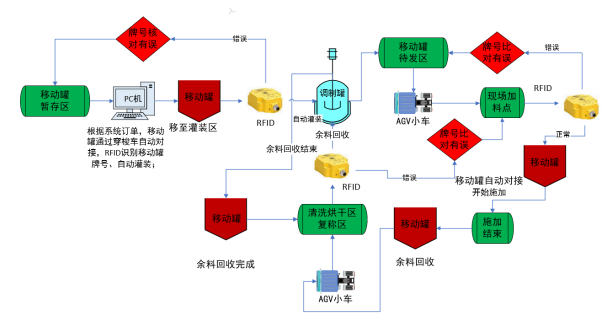


图2 成品料液施加流程图

（二）关键工艺环节技术要求

1. 熬制过程温度-时间协同控制标准

糖香料熬制工艺对温度控制精度要求达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，蒸汽加热罐配备的 PT100 温度传感器，可实时采集料液温度，PLC 借助 PID 算法对蒸汽调节阀开度实施动态调控^[2]。温度控制曲线可划分出三个阶段：初始阶段把升温速率调为 5°C 每分钟，升温至 75°C ，防止蛋白质出现变性现象；恒温阶段把温度稳定到 $75^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，持续 20 分钟时间，加快糖香料充分溶合；降温阶段把循环水冷却系统开启，用 3°C / 分钟的速度降至 40°C 以下，杜绝焦化现象。温度传感器每 10 秒把检测到的数据反馈给 PLC，一旦检测值与设定值出现 0.5°C 的偏差，且持续超 10 秒，系统触发报警接着自动对蒸汽流量补偿，历史数据记录模块归档各批次的温度曲线，作为质量追溯的凭据。

2. 成品灌装精度动态补偿机制

要将移动罐灌装精度控制在设定值正负偏差 0.2% 的范围里，灌装起始阶段气动球阀完全开启，输送泵按照 50Hz 频率运转实现高速灌装状态^[3]。若料液重量达到既定值的 95%，PLC 切换到精度补偿阶段：气动调节阀按线性算法逐步让阀门开启度降低，输送泵频率相伴同步降到 25Hz，灌装流速从 800 升每分钟下探至 80 升每分钟。称重传感器把重量数据实时反馈，PLC 依据所得差值对阀门开度实施动态调整。等阀门关闭结束，实际重量跟目标值的偏差小于 0.5kg，灌装完成的短暂瞬间，压缩空气系统把管路内残留料液回吹进储存罐，防范出现交叉污染情形，RFID 系统把实际灌装量记录好，然后绑定移动罐电子标签。

二、自动配料控制系统架构设计

（一）分层控制体系构建

设备控制层以西门子 S7-1516PLC 作为核心部分，依靠 ProfiNet 总线实现分布式 I/O 站与智能仪表的相连。此层直接掌管现场设备的执行机构，就如调节阀，其开度调节的精准程度为 0.1%，变频泵频率的响应时长不足 100ms。I/O 箱采用的是 ET200SP 类型防爆模块，就近安置于设备周边不超 3m 的范围，借助 4-20mA 模拟量输入模块采集液位传感器信号，把气动阀反馈信号引至数字量输入通道，集中监控层安置四台采用冗余设计的监控计算机，采用 INTOUCH 组态软件运行，即时显示各调制罐温度变化曲线、阀门情形及灌装进度情况。

（二）网络通信协议设计

控制系统采用环形的光纤以太网结构体系，借助 1000Mbps 光纤链路，糖香料厨房主交换机连接制丝车间核心交换机，达成跟加香加料工段的数据互通^[4]。设备层 ProfiNet 网络采用 PLC 作为控制器，38 个 I/O 子站借由交换机实现级联，把总线周期配置成 4ms 值，实现阀门连锁响应的预期目标。监控层以 OPCUA 协议为途径传输实时数据，每秒钟实现 2000 个工艺参数点的更新，管理层以 TCP/IP 为媒介与厂级 MES 通信，每日对诸如配方表、生产计划的静态数据进行同步。

三、核心控制功能模块实现

（一）设备控制层功能开发

依靠 PLC 编程实现设备控制层功能，实现糖香料厨房自动化流程全面覆盖。原料桶扫码验证成为原料处理功能的起点，固定式或手持的 RFID 读写工具 / 扫码用具对原料桶标签信息进行读取，PLC 把它和目标原料罐预设好的信息作一番比对，唯有匹配成功，抽料泵及相应阀门方可启动。自动计量配料功能凭借监控层下发的配方跟批量，PLC 精确核算各原料的需求数量，控制程序自主断定需求量是否低于原料罐计量下限，当需求量低于下限马上发出人工干预信号，配料的时候，PLC 依顺序调节相应原料罐出口气动调节阀的开启度与输送泵。

（二）监控管理层功能优化

监控管理层凭借 INTOUCH 组态软件开展深度化开发，打造直观、高效又安全的操作空间。人机交互界面（HMI）采用分层分级的布局规划，总貌画面全方位呈现系统运行状况、关键警报及生产批次详情，分工艺段（包含原料、熬制、灌装、回收等工艺部分）的流程图画面，动态呈现出设备符号（用颜色区分其状态如何）、实时参数（有温度、重量、液位、流量等数值）、阀门位置以及电机的启停状态信息。如调制罐这类关键设备给出详细子画面，展现更多参量、操作按键及历史态势。

四、远程故障诊断系统构建

（一）故障特征提取与建模

远程故障诊断系统效能依靠对设备运行状态特征信息的有效提取及建模。系统经由设备控制层（PLC）实时收集，随后上传丰富原始数据流，囊括了诸如传感器读数、执行器状态如何、设备反馈信号怎样以及关键控制变量（PID 输出、设定值跟实际值的偏差）等方面。特征提取进程起始便对原始数据进行预处理操作，含有滤波去噪（如运用移动平均或数字滤波器消除信号的干扰问题）、基于范围校验的无效值去除和数据标准化处理，就各类故障搭建特征向量，鉴于泵机械故障情况，特征向量或包含运行电流的有效值及对应的谐波分量、轴承振动频谱所呈现的特征、进出口压力差波动的特性特点。

（二）远程诊断架构设计

远程故障诊断系统通过分布式架构实现现场数据采集、边缘预处理然后与云端深度分析协同操作。现场层由糖香料厨房控制系统所组成，PLC 不只是执行控制工作，同时担当关键数据采集节点，PLC 所内置的诊断缓冲区，记录着设备错误代码、通信方面的故障以及程序异常等情况。集中监控层处监控计算机对轻量级边缘计算模块进行运行，这模块实时接收 PLC 上传过来的原始数据以及预处理后的特征数据，开展初步状态的阈值报警、简单规则甄别诊断与数据的精简工作。

五、系统防差错与安全设计

（一）全流程防差错体系

系统打造贯穿原料入库到余料回收全流程的防差错系统，最

大限度削减人为操作的失误隐患^[5]。在原料入库与进罐阶段设置关键防错要点，操作员采用无线扫码枪扫描原料桶的 RFID 标签也或条形码，系统自动获取料液代码详情，PLC 实时对比该代码跟目标原料罐预先设置好的允许接收代码，唯有代码彻底匹配之际，系统得以解锁，进而允许启动自动抽料泵及相关阀门。完成抽料相关工作后，系统自动读取原料桶抽料前后展现的重量差，得出实际进罐量然后和预期值做一番比对，保存资料为追溯所用，成品实施灌装的环节，待空移动罐放置于灌装位，RFID 读写器自动开展芯片信息读取^[6]。

（二）安全联锁保护机制

系统联结多阶段硬件与软件安全互锁保障措施，维持人员、设备和产品质量的安全水平。基础防护借助硬件安全回路得以构成，主控制站、灌装区、对接站台、高温设备旁等关键区域需安装紧急停止按钮，按下急停按钮之际，依靠硬接线直接掐断相关区域设备动力电源，像电机主回路、加热器的电源，做到让设备即刻停止运行这件事。急停状态信号一同输送至 PLC，导致 HMI 强报警且精准锁定急停源头。例如：调制罐加热功能开启需满足搅拌电机运转、液位超过最低安全液位且温度传感器正常这些条件；输送泵启动的先决条件是出口管路无堵塞（无堵塞报警信号）、相关阀门开位恰当且无过载故障；移动罐对接气缸动作前，需确认 AGV 已精准定位释放，且区域无人员干涉信号^[7-9]。

六、总结

本研究成功设计并实现了一套集成自动配料与远程故障诊断功能的糖香料厨房控制系统。系统采用移动罐灌装与 AGV 输送模式，优化了制丝现场供料流程。通过三层控制架构（设备层-PLC、监控层-HMI、管理层-数据库）和 ProfiNet/TCP/IP 融合网络，确保了控制的实时性与信息互通。核心工艺实现了精准温度-时间协同熬制、灌装动态补偿及移动罐高精度对接。开发的远程诊断系统基于特征提取与建模，支持故障的快速识别与定位。全流程防差错设计（RFID 牌号比对）与多重安全联锁机制显著提升了系统的可靠性与安全性^[10]。

参考文献

- [1] 张万全, 梁嘉, 孙成顺, 等. 基于 RFID 与条形码技术的烟草制丝香料厨房信息流转系统设计 [J]. 自动化应用, 2024, 65(22): 20-23.
- [2] 李强, 王爽果, 吴晓东, 等. 香料糖料管理系统设计与实现 [J]. 设备管理与维修, 2024, (19): 12-15.
- [3] 延龙, 石尧红, 张凯丽, 等. 基于 PLC 的小车自动配料控制系统设计 [J]. 机电信息, 2023, (06): 17-20.
- [4] 任嫩青. 隔膜板原料自动配料控制系统 V1.0. 河南省, 河南润资环保新材料科技有限公司, 2022-05-20.
- [5] 肖楠. 基于 PLC 的生产线自动配料控制系统设计 [J]. 电子制作, 2022, 30(05): 62-64.
- [6] 陈加坤, 刘银初, 彭斌, 等. 香料厨房桶装物料保温加热系统的设计与应用 [J]. 机械工程师, 2022, (10): 122-126.
- [7] 李冷瑾. 烟草香料厨房管理控制系统的设计与实现 [D]. 西南科技大学, 2021.
- [8] 丘柳明. 香料厨房尾料配料系统的设计与应用 [J]. 电工技术, 2019, (04): 84-86+90.
- [9] 姜滢, 李晓芬, 朱江. 烟草企业香料厨房配料校验系统研究与应用 [J]. 信息技术与信息化, 2018, (09): 141-143.
- [10] 罗庆华, 张福新. 糖香料厨房送配料系统设计改进 [J]. 中国设备工程, 2017, (06): 62-63.

化工工艺中节能降耗技术的应用

张娟

山西焦化设计研究院(有限公司), 山西 临汾 041600

DOI:10.61369/ETQM.2025100019

摘 要： 为了促进化工工艺的健康发展，降低能耗，提高产品质量，就要采取有效措施对化工工艺中的节能降耗技术进行应用，从而实现环境友好型工业生产模式。本文针对化工工艺中节能降耗技术的应用进行分析探讨，并提出相应的解决措施，以期能够为化工企业的可持续发展提供参考依据。

关 键 词： 化工；工艺；节能降耗；技术

Application of Energy-Saving and Consumption Reducing Technologies in Chemical Processes

Zhang Juan

Shanxi Coking Design and Research Institute (Co., Ltd.), Linfen, Shanxi 041600

Abstract： In order to promote the healthy development of chemical processes, reduce energy consumption, and improve product quality, effective measures should be taken to apply energy-saving and consumption reducing technologies in chemical processes, thereby achieving an environmentally friendly industrial production mode. This article analyzes and discusses the application of energy-saving and consumption reducing technologies in chemical processes, and proposes corresponding solutions in order to provide reference for the sustainable development of chemical enterprises.

Keywords： chemical industry; process; energy conservation and consumption reduction; technology

引言

目前，我国的经济发展进入到一个新的阶段，与之相适应的是对能源的需求也在不断增长。在能源紧缺的背景下，节能降耗成为各行各业共同关注的焦点问题之一。而化学工业作为工业生产中重要的组成部分，在为国民经济建设做出巨大贡献的同时，也带来了很多环境问题，严重制约着化工行业的健康发展。例如，由于传统的化工工艺能耗较高，会造成大量的废气、废液和废渣等污染物排放到空气中，造成环境污染；同时，化工工艺产生的噪声、振动等现象也会影响周围居民的正常生活，给人们的身心健康造成不利影响。因此，为了实现化工企业的可持续发展，必须采取有效措施，加强对化工工艺的节能降耗技术应用，提升化工工艺的整体水平。众所周知，化学工业是一个高耗能、高污染行业，其能源消耗量占整个工业部门能源总消耗的1/4左右。另外，化学工业所消耗的资源主要有三大类：一是原料；二是燃料（包括电力）；三是辅助材料。其中，原材料的消耗量占据全部消耗总量的90%以上，其种类繁多且价格不一，如果不进行科学管理就会导致资源浪费^[1]。同时，在工业生产过程中还会产生大量的固体废弃物和废水废渣等污染物，不仅会对环境造成污染，还会带来安全隐患，给人们的生命财产安全带来威胁。为了提高化工工艺的能源利用率，减少能源的损耗，就要积极探索和研究化工工艺中存在的问题并采取相应的对策进行解决，使化学工业朝着更加环保、绿色、高效的方向发展^[2]。近年来，我国政府高度重视节能减排工作，并且将其纳入国家可持续发展战略之中，要求企业树立起“节约资源”的理念，加大环保设施投入力度，以科技创新为依托，大力开发和推广节能减排技术，从而促进企业经济效益的增长。在这种背景下，化工工艺也应紧紧抓住这一契机，不断优化产品结构，开展技术创新，增强自主研发能力，实现绿色循环发展，最终达到节能降耗的目的。

一、节能降耗技术在化工工艺中的应用分析

由于我国化工行业起步较晚，行业发展时间相对较短，相关技术应用水平比较低。因此，在化工工艺中节能降耗技术的应

用存在很多不足之处，无法达到预期效果，需要不断地进行改进和完善。

（一）蒸汽冷凝水的回收利用

在化工生产过程中，会产生大量的水蒸气和液体产品，这些

物质往往通过管道运输到废水处理装置中，从而避免对环境造成污染。但其中有部分水分会凝结成水滴，如果不能及时收集起来，就会流入废水处理系统中，使水质变差。为了提高水资源利用率，可以将这些凝结水收集起来，然后用于其他方面的应用^[5]。例如，一些化工企业可以使用这种冷凝水作为原料，生产出多种化工产品，从而节约资源，降低成本，提升经济效益。此外，还可以将其应用于农业灌溉、城市绿化等方面，改善生态环境，促进可持续发展。

（二）实现能源梯级利用

能源梯级利用是指将一种能源分成几个层次进行重复应用，以满足不同需求。比如，石油开采之后，将剩余的原油重新加工，可以生产出柴油、汽油等。再比如，一些化工厂可以将废热废气等废料加以利用，制成新的能源。通过能源梯级利用，不仅能够充分发挥每种资源的作用，而且能够有效减少能源消耗，提高能源利用率。

（三）加强节能减排意识

现如今，我国已经进入了社会经济快速发展阶段，人们对生活质量的要求越来越高，对能源的需求也在不断增加。因此，化工企业要加强员工的节能意识，使其认识到节能减排工作的重要性，从而为实现企业绿色发展提供有力支持。另外，企业应采取多种形式开展节能培训活动，比如组织参观学习、举办竞赛、知识讲座等，以此来提高员工的综合素质。

二、降低化工工艺能耗的措施

（一）优化生产工艺，减少能源消耗

在我国化工工艺中，一些高耗能、高污染的生产过程仍然存在。因此，要根据当前的生产情况，对传统的生产流程进行改进，采取新型的环保节能技术，以最大限度地降低能源的消耗，达到节能降耗的目的。比如，在化工行业中，经常会使用到精馏塔等设备，但是这些设备在工作时需要消耗大量的电能，导致了能耗过高的问题^[6]。为此，可以通过添加高效催化剂来提高设备的热效率，从而降低能源消耗。

（二）合理运用余热回收技术

目前，多数化工企业都拥有冷却水和锅炉余热等资源，但由于管理不善，使其未能得到充分利用。因此，企业应加强对余热回收技术的研究与应用，尽量把废气余热转化为有用的能源，实现能源的重复利用，提高经济效益。比如，在石油化工工业中，主要用到加热炉、汽轮机等设备，这些设备在工作时不仅产生大量的热量，而且还伴随着大量的蒸汽。如果不加以有效利用，就会造成巨大的浪费。因此，企业应从根本上消除或减轻能源浪费现象，加强对余热回收技术的研究与应用。

（三）合理控制设备的运行时间

在实际生产过程中，往往有很多设备处于闲置状态，而有些设备又长期超负荷工作，这样做既不经济也不科学。针对这一问题，企业应严格控制设备的运行时间，并定期进行检查维护，以延长设备的使用寿命，减少故障的发生概率，降低设备的故障率，确保设备的正常运行，从而达到节能降耗的效果^[7]。此外，还要加强对生产人员的培训教育，使其能够正确使用设备，避免因操作不当导致设备损坏，进而影响企业的经济效益。

（四）加强对节能技术的研发投入

当前，随着社会的不断发展，人们对产品的需求也在不断增加，这就对化工企业的产品质量提出了更高的要求。为了满足市场需求，就要采用先进的科学技术，开发出符合市场发展趋势的新产品，以提高企业的核心竞争力。因此，化工企业要加大对节能技术的研发力度，积极引进国外先进的技术和设备，以增强自身实力。

三、案例分析

（一）装置概况

某煤化工企业合成氨装置设计产能为105万吨/年，主要生产原料为原煤，该煤化工企业主要产品为合成氨、甲醇和尿素。目前，该企业已经拥有煤制油、煤制烯烃、煤制天然气等多个煤化工项目，煤制甲醇和氨项目是该企业“十四五”期间的重点建设项目之一，于2019年3月正式投产，该煤制油项目采用固定床煤气化技术，设计规模为90万吨/年，主要产品为合成氨和甲醇，目前生产装置运行情况良好。该煤化工企业现有一套合成氨装置，主要设备包括：气化炉、氨水塔、合成塔、变换炉、循环氨压缩机及相关的管道和阀门。该企业现有一台气化炉，单台气化炉气化效率为98%，单位合成氨消耗蒸汽0.48t/t合成氨；一台氨水塔，单台氨水塔总液位为20m，单塔液位为30m，单台合成塔总液位为60m，单塔液位为60m；一台变换炉，单台变换炉总液位为65m，单塔液位为70m，单塔液位为35m；一台循环氨压缩机，单台循环氨压缩机总液位为110m，单塔液位为120m；一台合成氨合成塔，单台合成氨合成塔总液位为150m。从以上设备的结构来看，一是各设备的设计制造技术水平较高；二是设备的运行情况良好，总体运行状况良好。

（二）煤制合成氨工艺

在尿素生产中采用的是以氨作为合成气原料的一步法生产工艺。氨是一种重要的化工原料和气体燃料。由于它具有产量大、成本低、化学性质稳定、燃烧后生成无毒无害的二氧化碳和水等优点，被广泛用于石油工业、化学工业、食品工业以及民用建筑中。目前，尿素生产工艺主要有3种：固定床反应器生产工艺、流化床反应器生产工艺和流化床反应器+固定床反应器生产工艺。固定床反应器是煤气化过程中使用的主要气化技术之一，它利用空气和氢气在一定温度下发生化学反应来制备氨气体。流化床反应器是以气体为原料来制备氨气体。这3种工艺都存在着反应速度慢、反应转化率低等问题。其中，固定床反应器+流化床反应器的生产工艺具有装置流程短、反应效率高的特点，是目前尿素生产工艺中应用最广泛的一种生产工艺。

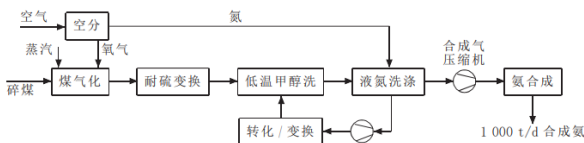
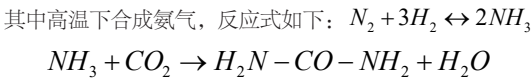


图1 原合成氨装置工艺流程示意图

在合成氨生产过程中使用的能源主要包括：天然气、焦炉气、二氧化碳以及各种高温高压蒸汽等。其中天然气和焦炉气是合成氨装置主要消耗能源之一；二氧化碳和高温高压蒸汽则是在

合成氨生产中起到重要作用的副产物。



(三) 工艺技术方案

采用低温低压蒸汽代替高压蒸汽, 通过调整生产工艺, 降低低压蒸汽的使用量, 节约能源消耗; 采用工业废水处理技术对企业的工业废水进行处理, 减少对环境的影响。通过分析表明, 采用改进后的生产工艺可实现节能降耗和资源节约, 对于提高企业经济效益具有重要意义。

1. 蒸汽优化技术

利用蒸汽优化技术可以使煤制合成氨生产装置中的低压蒸汽全部得到利用, 从而达到节能降耗的目的。采用低温低压蒸汽代替高压蒸汽, 不仅可以降低生产成本, 而且还可以减少设备磨损, 提高装置运行效率, 从而实现节能降耗的目的^[1]。

一般情况下, 煤制合成氨装置中高压蒸汽的消耗在整个装置能耗中占据了相当大的比例。由于低压蒸汽可回收利用于锅炉加热, 从而提高锅炉效率, 提高整个装置运行效率。

2. 天然气重整技术

天然气重整技术是通过将天然气进行催化重整, 在此过程中产生的氢气和甲烷的混合物, 可通过一定的技术手段, 将其分离出来, 从而使天然气的成分发生改变, 从而达到节能降耗、提高企业经济效益的目的。天然气重整技术能够将甲烷和氢气的比例从1:2降低到1:4左右, 可以在一定程度上提高企业的经济效益^[2]。通过对天然气进行催化重整, 可将氢气中的甲烷含量降至16%左右, 这不仅能够提高甲烷气体的纯度, 还能有效降低氢气中所含杂质的含量。在此基础上, 可以提高天然气转化效率、减少二氧化碳排放量^[3]。此外, 天然气重整技术还具有无污染、可再生等优势, 能够为企业带来可观的经济效益和社会效益。

3. 工业废水处理技术

工业废水处理技术包括化学法和生物法, 通过采用不同的方法对工业废水进行处理, 能够达到国家环保标准, 降低对环境的污染, 从而提高企业的经济效益。目前常用的工业废水处理技术主要有膜分离法、生化法、高级氧化法、紫外线催化氧化法等。其中, 膜分离技术具有操作简单、运行成本低、运行稳定等优点, 是目前比较热门的一种废水处理技术。膜分离技术主要应用于气体、液体、固体的分离, 并且可应用于处理高浓度有机废水和重金属废水等。生化法主要是将废水中的有机物分解为二氧化碳和水, 使其达到国家环保标准, 从而实现废水资源化。高级氧

化技术是利用化学氧化剂对废水中的污染物进行氧化处理, 可使其达到国家环保标准, 从而减少对环境的影响^[4]。紫外线催化氧化法是一种新型高效的污水处理技术, 该技术具有反应速度快、处理效率高等优点。目前我国也有多家企业使用紫外线催化氧化法进行污水处理, 取得了较好的效果。因此, 采用先进的工业废水处理技术可提高企业经济效益。

4. 水系统改造

改造前, 该装置采用的是“循环冷却水+蒸汽”的系统, 以水冷器为热交换器, 主要回收余热, 产生蒸汽。其优点是: 一是节省蒸汽; 二是可以降低蒸汽的耗量。但是由于水冷器入口温度较低, 导致汽轮机出口压力偏高, 机组耗电量较大; 三是存在不安全因素。改造后, 该装置采用“闭式循环冷却水系统”替代原有的“循环冷却水+蒸汽”系统, 通过增设高效冷却塔和循环水泵, 更换为高效板式换热器, 增设余热回收装置, 增加安全阀和泄压装置, 实现余热回收的自动调节, 最大化利用余热资源。该系统的优点是: 一是避免了水冷器出口温度偏高的问题; 二是可以提高机组的安全性。

四、结束语

总而言之, 随着我国经济建设的快速发展, 化工企业在社会经济发展中占据着举足轻重的地位, 因此必须保证化工工艺能够稳定、安全地运行, 不断提高生产效率。而在实际的生产过程中, 会受到多种因素的影响, 例如原料成本、产品种类、操作技术等, 如果不能有效地控制和调节这些因素, 就会造成资源浪费、能源污染等现象, 导致能源消耗增加。另外, 化工生产工艺是一项复杂的系统工程, 其中涉及多个环节, 任何一个环节出现问题, 都可能会对整个工艺流程产生影响。为了提升化工生产工艺的稳定性和安全性, 就需要针对各个环节进行全面分析和优化, 制定相应的管理措施, 并采取科学合理的技术手段来实现节能降耗的目标。现阶段, 我国的化工行业仍然存在一些问题和不足, 包括原材料消耗大、能耗高等。这就要求化工企业必须加强节能环保意识, 积极引进先进的节能降耗技术, 并结合自身实际情况, 制定出科学合理的管理措施。此外还应加大对节能技术的研发力度, 不断创新, 充分利用新技术和新材料, 在生产过程中尽量采用清洁能源, 减少对环境的影响。只有这样才能促进化工企业的健康发展, 实现可持续发展。

参考文献

- [1] 李善英, 钟芳. 低碳形势下化工工艺节能技术的发展 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(05): 163-165.
- [2] 张维强. 化工工艺中常见节能降耗技术探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(05): 190-192.
- [3] 石艳洁. 化工工艺中节能降耗技术的运用分析 [J]. 清洗世界, 2025, 41(02): 88-90.
- [4] 樊龙, 刘艳, 董养林. 化工工艺中节能降耗技术应用与优化研究 [J]. 产业创新研究, 2024, (24): 78-80.
- [5] 李良. 节能降耗技术在化工工艺中的应用研究 [J]. 当代化工研究, 2024, (17): 161-163.
- [6] 王化淳. 化工工艺中常见的节能降耗技术措施 [J]. 石化技术, 2024, 31(07): 170-172.
- [7] 丁聪, 张如竹, 戎楚楚. 低碳形势下化工工艺节能技术的发展 [J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(07): 55-57.

市政公用工程施工成本控制问题及对策研究

张肖¹, 孙义², 张露³

1. 国投经开(武汉)工程咨询有限公司, 湖北 武汉 430071

2. 武汉融科咨询有限公司, 湖北 武汉 430000

3. 武汉铁路职业技术学院, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ETQM.2025100020

摘 要 : 市政公用工程具有政府投资、民生属性和环境复杂的特殊性。因此, 需加强该类工程成本控制, 以保证财政资金合理使用并实现工程效益的最大化。但当前市政公用工程施工成本控制存在决策设计阶段估算不准、招投标与合同管理漏洞、施工过程成本管控不力、竣工结算审核不严等问题, 导致成本超支情况频发。本文系统剖析了当前市政公用工程施工成本控制各环节的痛点, 并针对性地提出全过程的成本管控策略, 涉及到优化决策设计、完善招投标与合同管理、强化施工过程动态管控、规范竣工结算与评价等几个方面。希望本文研究成果对提升市政公用工程成本管理精细化水平提供有益补充。

关 键 词 : 市政公用工程; 施工成本; 成本控制

Research on Issues and Countermeasures of Cost Control in Municipal Public Works Construction

Zhang Xiao¹, Sun Yi², Zhang Lu³

1. State Investment Economic Development (Wuhan) Engineering Consulting Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430071

2. Wuhan Rongke Consulting Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

3. Wuhan Railway Polytechnic Institute, Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Municipal public works have the particularities of government investment, public welfare attributes, and complex environments. Therefore, it is necessary to strengthen the cost control of such projects to ensure the rational use of financial funds and maximize the project benefits. However, currently, there are problems in the construction cost control of municipal public works, such as inaccurate estimation in the decision – making and design stage, loopholes in bidding and contract management, ineffective cost control during the construction process, and lax review of completion settlement, resulting in frequent cost overruns. This paper systematically analyzes the pain points in each link of the current construction cost control of municipal public works and pertinently proposes a whole – process cost control strategy, involving aspects such as optimizing decision – making and design, improving bidding and contract management, strengthening dynamic control during the construction process, and standardizing completion settlement and evaluation. It is hoped that the research results of this paper can provide a useful supplement to improving the fine – management level of the cost management of municipal public works.

Keywords : municipal public works; construction cost; cost control

引言

市政公用工程涵盖道路、桥梁、给排水、燃气、热力等, 是城市正常运转的物质保障。近年来, 在我国城市化进程快速推进的背景下, 市政公用工程建设规模持续扩大, 投资金额逐年攀升, 不仅为城市发展注入了新动力, 也对财政资金的合理利用提出了更高要求。因此, 市政公用工程建设等单位需要客观分析该类工程成本控制的特点, 总结同类工程易发的成本控制问题, 进而立足本项目采取有针对性的成本控制策略。

一、市政公用工程施工成本控制概述

（一）市政公用工程的界定与特点

前文提到，市政公用工程类型丰富多样，各类工程相互配合，共同构建起了城市正常运转的物质基础。因此，市政公用工程的显著特点之一是公共属性突出。即建设目的在于满足社会公众的基本需求，服务于城市集体利益。特点之二是投资模式多以政府投资或 PPP 为主，资金来源对财政的依赖性要较强。这就决定了资金的合理使用是工程建设与管理的中中之重。此外，市政公用工程涉及面广、建设环境复杂，既需要设计、施工等多个专业协同，又需要城市规划、土地利用、环境保护等多部门合作。且施工过程会面临地质条件多变、地下管线错综复杂的问题，增加了工程建设的难度和不确定性^[1]。

（二）施工成本控制的内涵与目标

由于市政公用工程具有如上特点，所以其施工成本都是由直接费、间接费、规费和税金共同构成的。对施工成本进行控制就是要对影响成本的各种因素加强管理并采取有效措施，从而将施工实际发生的各种支出严格控制在成本计划之内。同时，由于市政公用工程与一般工程项目相比具有特殊性，因此该类工程的施工成本控制还要达成合规性、效益性和社会性目标。即成本控制要遵循国家法律法规、政策制度和行业规范，以满足工程质量和进度要求为前提，并考虑该项工作对城市环境、居民生活、社会稳定等多方面的影响^[2]。

二、市政公用工程施工成本控制存在的主要问题

（一）决策与设计阶段的问题

当前，市政公用工程施工成本控制的问题出现在工程全生命周期。比如，决策与设计阶段就存在前期调研不充分、投资估算不准确、设计方案优化不足，以及限额设计执行不力等问题。具体而言，部分市政公用工程项目在前期调研时没能对项目所在地的地质条件、周边环境、市场需求等关键因素进行深入、细致地调查与分析，盲目立项。导致施工过程中因地基问题需多次加固，产生额外成本。同时，部分项目仅依据历史数据简单估算投资额，使得估算与实际成本脱节，为后续施工成本管控埋下隐患。此外，在设计阶段部分，设计人员追求设计效果和技术指标，忽视了经济性，导致方案存在功能冗余、材料选型不合理的浪费现象；或者限额设计不到位，设计估算超过投资估算。

（二）招投标与合同管理阶段的问题

在招投标与合同管理阶段，市政公用工程施工成本控制的主要问题为：其一，招标文件编制粗糙，工程量清单缺项、漏项或者描述不清楚。其二，恶性低价中标为施工成本风险管控埋下隐患。其三，合同条款不严谨，合同双方的成本风险分担不合理。例如，在签订合同时没有明确约定工程变更、索赔条件等关键条款，一旦施工主要材料市场价格大幅浮动，承包单位就会要求调整合同价款。但建设单位以合同未约定为由拒绝调整，双方僵持导致工程进度延误，进而增加施工成本。

（三）施工阶段的核心问题

项目施工阶段产生的成本在项目生命周期中所占比例最大，该阶段的成本控制问题也是最为突出的。从宏观上来看，该阶段的施工成本控制问题表现为成本管理体系问题、计划与预测问题、动态监控与核算问题。从微观层面来看，该阶段的施工成本控制问题表现为工程变更与现场签证管理问题、材料与设备管理问题、分包问题、进度与成本协同问题，以及安全与质量问题引发的成本风险。比如从宏观层面来看，部分市政公用工程施工单位和管理人员对成本控制重视不足，认为该工作仅属财务部门，导致项目缺少完善的成本管理组织体系，成本管理职责划分不明确，人员参与度低。再比如从微观层面上来看，部分施工企业缺乏科学的材料采购策略，没有通过充分的市场调研和比价拓宽采购渠道，导致采购价格偏高，推高了采购成本^[3]。

（四）竣工结算与后评价阶段的问题

项目竣工并不意味着成本管理结束。但由于部分管理人员意识缺失，结算审核不严，容易出现高估冒算等问题。即部分施工单位虚报工程量、高套定额、重复计取费用，但审核人员没能及时发现这些情况并纠正问题，导致建设单位多支付工程价款，造成财政资金浪费。另外，多数市政公用工程项目在竣工后并没有开展有效的成本后评价工作，不能及时总结项目成本控制的经验、教训。这种情况也不利于同类项目成本管理水平的持续提升。

三、市政公用工程施工成本控制的对策

（一）树立全过程成本管控核心理念

为有针对性地避免以上问题，提高市政公用工程施工成本控制质量，相关单位首先应当跳出仅关注施工阶段成本控制的局限，从全生命周期视角出发，综合考量各阶段成本因素，强化全生命周期成本最优的思想。基于此，再建立由建设、设计、施工、监理多方参与的成本管控协同机制：在项目启动之前，各方要明确各自成本控制的职责与分工，进而制定统一的成本管控目标和计划。比如决策阶段，建设单位要充分权衡项目功能需求和成本投入的关系，避免过度追求功能造成成本浪费；设计阶段，设计单位要注重经济与技术结合，通过多方案比选，确定成本最优的设计方案。在项目正式启动后，各方应加强信息沟通与共享。例如设计阶段，设计单位要及时向施工单位交底设计意图，说明成本控制要点；施工单位则需将现场情况反馈给设计单位，方便对方优化设计方案^[4]。

（二）决策与设计阶段成本控制对策

在全生命周期成本管控核心理念指导下，市政公用工程施工成本控制要突出适配各阶段的控制策略亮点。在决策与设计阶段，项目建设单位要组建专业调研团队，全面、深入调查项目所在地的地质条件、周边环境、市场需求和政策法规，全面掌握项目基础信息。在此基础上，建设单位要采用实物量法、类似工程预算法等科学方法，结合项目实际情况，准确进行投资估算。估算时还需要充分考虑市场波动风险因素，预留合理的成本弹性空间。设计单位则需要在满足项目质量要求前提下，以限额为标

准, 出具设计方案。例如, 运用价值工程原理系统性分析设计方案功能和成本, 找出价值最低的环节, 进而优化方案。同时, 设计单位要建立多级审核制度, 加强设计过程的审核把关, 确保最终方案具有经济性和可落地性^[5]。

（三）招投标与合同管理阶段成本控制对策

在招投标阶段, 项目建设单位应当组建专业的招投标文件编制团队, 确保文件内容完整、表述清晰、要求明确。例如, 在编制工程量清单时团队可以使用 BIM 技术, 通过建立三维建筑信息模型准确计算工程量, 并避免缺项、漏项情况。BIM 模型还可以直观展示项目结构与施工工艺, 确保投标人清晰理解本项目要求, 避免理解偏差导致的投标争议。此外, 建设单位应当综合技术标、商务标和信用标等因素, 通过综合评估防范恶意低价中标风险。比如, 商务标评审既需要关注投标报价, 还需要分析投标人的成本构成, 判断其报价是否合理。如果投标人给出明显低于成本价的投标报价, 建设单位应要求投标人作出合理解释并提供相关证明材料^[6]。在签订合同前, 项目建设单位要组织法律、经济、技术等专业人员细致审核合同条款, 确保合同严谨、规范、公平、合理。例如, 合同中必须明确规定工程变更的审批权限、程序和价款调整方法。若市场价格波动导致材料价格出现变化, 合同双方要在合同约定的调价公式和调整范围内协商解决问题^[7]。

（四）施工阶段关键成本控制对策

进入到正式施工阶段, 施工单位应当在建设单位指导和要求之下, 首先建立健全的成本管理组织体系。即明确项目经理是本项目成本管理的第一责任人, 成本经理负责执行具体的成本管理工作, 其他部门和岗位人员在成本管理中也相应的职责和权限。例如, 采购部门负责控制材料采购成本, 财务部门负责成本核算和资金管理。以确保成本管理责任层层分解落实至个人。在开工之前, 施工单位要依据设计方案、市场价格等资料将项目分解为若干个作业单元, 预测每个单元的成本, 进而编制详细的成本计划。例如, 将材料成本目标分解到采购、仓储、使用各个环节, 以便定期对成本计划执行情况进行精准检查和分析, 动态调整成本控制方式^[8]。

其次, 施工单位要引入项目管理软件, 建立实时成本监控系

统。该系统能够动态采集施工过程成本数据, 掌握成本变化情况, 利用挣值法对实际成本与计划成本进行对比分析, 计算成本偏差。系统在发现成本超支情况时会发出预警, 提醒管理人员采取调整措施。从而实现对成本控制风险的有效控制。

与此同时, 施工单位要针对施工阶段不同环节、不同因素引发的成本控制风险采取细化的施工成本控制方法。以材料成本控制为例, 施工单位要进行充分的市场调研以掌握材料价格动态, 再通过多方评选选择性价比更高的供应商。在执行采购计划时要通过批量采购、战略合作等方式进一步控制采购成本。在使用材料时要严格执行限额领料制度: 各班组需根据施工进度和材料消耗定额领取规定数量的材料。如果出现超领情况, 相关责任人必须做出说明。材料出库之后作业班组就是材料管理的第一责任人, 必须合理规划材料堆放场地, 减少材料浪费^[9]。

（五）竣工结算与后评价阶段成本控制对策

在竣工结算环节, 建设单位要组建专业的结算审核团队, 或者委托有资质的工程造价咨询机构进行竣工结算审核。包括按照法律法规、计价规范和合同条款, 遵循相关程序和方法, 认真核对工程量, 审查是否存在虚报、重复计算等问题; 工程价款定额套用、取费标准是否正确; 工程变更和现场签证是否真实、合法、有效。以防范高估冒算现象, 避免财政资金浪费。项目竣工后, 建设、施工等单位要及时整理和分析项目成本数据, 建立成本数据库, 并开展项目成本后评价工作, 以总结和评价项目成本控制全过程。包括分析成本控制目标的完成情况, 总结成本控制成功经验和存在的问题, 以将后评估成果应用于后续项目的成本管理^[10]。

四、结束语

综上所述, 市政公用工程施工成本控制在决策、设计、招投标、施工、竣工结算多个阶段均存在不同程度的问题。但项目建设、设计、施工等单位基于全过程成本管控思想, 强化全生命周期成本最优意识, 进而采取针对性策略, 可以提高项目施工成本管控质量。

参考文献

- [1] 黄立栋. 市政公用工程施工成本控制问题及对策研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(16): 117-119.
- [2] 韦宏岛. 关于市政公用工程施工成本控制探讨[J]. 房地产导刊, 2023(13): 171-173.
- [3] 丘金山. 既有复杂场景市政道路污水管道施工成本与质量控制研究[J]. 建材发展导向, 2023, 21(20): 48-51.
- [4] 周飞. 市政公用工程施工项目成本管理研究[J]. 建材与装饰, 2022, 18(20): 96-98.
- [5] 罗盛. 市政公用工程施工项目成本管理研究[J]. 电脑爱好者(校园版), 2022(20): 161-162.
- [6] 王晓红, 李永祥, 李雯涵. 建筑工程项目材料的成本控制管理分析[J]. 财会学习, 2022(11): 99-101.
- [7] 范国辉. 市政工程中全过程造价控制与管理的应用[J]. 越野世界, 2022, 17(12): 82-84.
- [8] 曲晓光, 李季珍. 市政公用工程施工成本控制存在的问题及对策研究[J]. 商品与质量, 2021(32): 179.
- [9] 杜小军. 市政公用工程施工成本控制问题及对策研究[J]. 电脑校园, 2021(12): 8304-8305.
- [10] 王刚. 市政工程施工中的造价成本控制与措施管理[J]. 电脑爱好者(普及版), 2021(11): 280.

全域综合整治下金融支持矿山修复的环境工程路径探索

熊维豪

旭普云智慧空间信息技术有限公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ETQM.2025100021

摘 要 : 本文探讨全域综合整治下金融支持矿山修复相关内容。阐述矿山修复内涵及金融资源配置作用, 分析金融资本介入机制、风险评估等, 探讨金融工具应用问题及关键技术成本控制难题, 还介绍多种金融支持模式及技术研发方向, 强调多部门合作及未来研究方向。

关 键 词 : 矿山修复; 金融支持; 全域综合整治

Exploring the Environmental Engineering Path of Financial Support for Mine Restoration under Comprehensive Comprehensive Rectification

Xiong Weihao

Xupuyun Smart Space Information Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : This article explores the relevant content of financial support for mine restoration under the comprehensive rectification of the entire region. Elaborate on the connotation of mine restoration and the role of financial resource allocation, analyze the mechanism of financial capital intervention, risk assessment, etc., explore the application of financial instruments and key technical cost control difficulties, and also introduce various financial support models and technology research and development directions, emphasizing multi departmental cooperation and future research directions.

Keywords : mine restoration; financial support; comprehensive improvement of the entire area

引言

随着我国对生态环境保护的重视程度不断提高, 2019年自然资源部发布的《关于开展全域土地综合整治试点工作的通知》强调了对土地利用的系统治理和优化。在此背景下, 矿山修复作为生态治理的重要组成部分, 其金融支持路径的探索具有重要意义。矿山修复涉及土地资源再利用、生态系统重建等多方面, 而金融资源配置在其中具有关键作用。合理的金融支持不仅能加速修复进程, 还能提升综合效益。然而, 当前金融工具应用面临资金缺口和制度不完善等问题, 同时修复技术成本控制难题也约束了金融支持。因此, 对金融支持矿山修复的环境工程路径进行探索十分必要。

一、全域综合整治与矿山修复的协同机制

(一) 全域综合整治理论框架

全域土地综合整治是对一定区域内的土地利用进行系统治理和优化的综合性政策举措。其内涵包括对土地利用结构的调整、生态环境的修复以及各类资源的统筹配置等方面^[1]。矿山修复作为生态治理的重要子系统, 应在全域综合整治的大框架下明确其理论定位。它不仅涉及对矿山地质环境的恢复, 还包括对周边生态系统的重建以及对土地资源的再利用。金融资源配置在生态治理中具有倍增效应, 合理的金融支持能够加速矿山修复的进程, 提高修复的质量和效率。通过整合金融工具和资金渠道, 可以为矿山修复项目提供充足的资金保障, 促进技术创新和项目实施, 从而实现生态、经济和社会效益的协同提升。

(二) 金融与环境工程协同机理

金融资本介入环境工程的利益驱动机制主要源于对潜在经济回报的追求以及社会责任的考量。一方面, 矿山修复后的土地再开发等可带来经济收益, 吸引金融资本投入^[2]。另一方面, 社会对环境保护的重视促使金融机构履行社会责任, 参与矿山修复等环境工程。在构建多维协同模型时, 风险评估至关重要。需考虑矿山修复项目面临的技术、市场、政策等风险, 以保障金融资本的安全。同时, 环境效益货币化是关键环节。通过将矿山修复带来的生态改善、资源节约等环境效益转化为货币价值, 能够更好地衡量项目的综合效益, 从而为金融资本的投入和决策提供科学依据。

二、矿山修复金融支持现状分析

（一）金融工具应用现状

绿色债券作为一种重要的金融工具，在矿山修复中已有所应用。部分企业通过发行绿色债券筹集资金用于矿山生态修复项目，包括土地复垦、植被恢复等方面^[9]。ESG基金也逐渐关注到矿山修复领域，一些ESG投资策略将矿山企业的环境责任履行情况纳入考量，对积极进行矿山修复的企业给予资金支持。然而，目前金融工具在矿山修复中的应用仍面临诸多问题。一方面，资金缺口较大，金融工具所提供的资金难以满足矿山修复的实际需求。另一方面，相关制度尚不完善，在金融工具的发行、监管以及资金使用等环节存在一定障碍，影响了金融对矿山修复的支持效果。

（二）环境工程技术掣肘

土壤重金属固化和生态覆绿是矿山修复的关键技术，但成本控制难题对金融支持产生了约束效应。土壤重金属固化技术成本较高，包括材料、设备和人力成本等，使得项目整体投资增加。生态覆绿技术也面临类似问题，如植被选择、种植和养护成本较高，且需要长期投入。这些高昂的成本导致矿山修复项目的经济可行性降低，金融机构在考虑提供支持时更为谨慎。一方面，较高的成本可能使项目收益难以覆盖投资，增加了金融风险；另一方面，成本的不确定性也使得金融机构难以准确评估项目价值和风险，从而限制了金融支持的力度和规模^[10]。

三、跨学科协同治理模式创新

（一）金融产品创新维度

1. 生态修复绩效债券设计

构建基于土壤修复指标完成度的分期兑付债券模式是生态修复绩效债券设计的关键。这种模式以土壤修复指标为核心，将债券兑付与修复工作的实际进展紧密相连。通过科学设定不同阶段的土壤修复指标，明确各阶段的目标和要求。在债券发行初期，根据项目规划和预期修复效果，确定总体兑付金额和分期计划。随着修复工作的推进，定期对土壤修复指标进行监测和评估。如果指标达到相应阶段的要求，则按照预定比例兑付债券金额；反之，则可能调整兑付计划或要求项目方采取进一步的修复措施，以确保生态修复的质量和效果，同时保障投资者的利益^[9]。

2. 环境权益质押融资机制

环境权益质押融资机制在矿山修复的金融支持中具有重要作用。通过对矿山修复产生的碳汇增量等环境权益进行金融转化，可有效解决资金短缺问题。一方面，明确环境权益的界定和评估标准是关键。合理评估碳汇增量等环境权益的价值，为质押融资提供准确的基础^[9]。另一方面，建立健全的质押融资制度和流程。包括质押登记、风险评估与防控等环节，确保融资过程的规范和安全。同时，金融机构应积极参与，创新金融产品和服务，如开发专门针对环境权益质押的贷款产品，以满足矿山修复项目的资金需求，推动矿山修复的顺利进行。

（二）工程技术优化维度

1. 低成本修复技术体系

建立经济可行性与生态效益双优的边坡稳定化与植被重建技术群是低成本修复技术体系的关键。应综合考虑矿山的地质条

件、生态环境以及修复成本等因素，研发和应用适宜的技术。例如，采用新型的边坡加固材料和技术，提高边坡的稳定性，同时降低成本^[7]。在植被重建方面，筛选适合当地生长的植物品种，采用高效的种植技术，提高植被的成活率和覆盖率，促进生态系统的恢复。通过这些技术的集成和应用，实现矿山修复的经济可行性和生态效益的双赢，为全域综合整治下金融支持矿山修复提供有力的技术支撑。

2. 全生命周期成本核算

开发涵盖闭坑治理、后期维护的工程成本动态评估模型对于全生命周期成本核算至关重要。需综合考虑矿山修复各阶段的成本要素，包括闭坑治理阶段的土地复垦、植被恢复、污染治理等成本，以及后期维护阶段的监测、修复效果巩固等费用。通过建立动态评估模型，能够实时跟踪成本变化，为金融支持提供准确的成本依据^[9]。同时，要考虑不同地区、不同矿山类型的差异，对模型进行优化和调整，以提高其适用性和准确性。这不仅有助于合理规划金融资源的投入，还能确保矿山修复工程的顺利实施和长期效果。

四、实施路径与保障体系

（一）管理协同路径

1. 多部门联动机制

自然资源部门与金融机构应建立定期会商制度，以加强部门间的协同合作。该制度能够促进信息共享，使双方及时了解矿山修复项目的进展、资金需求及金融支持的相关情况。通过定期会商，自然资源部门可向金融机构详细介绍矿山修复的规划、目标以及环境工程技术要求等关键信息，为金融机构准确评估项目风险和制定合理的金融支持方案提供依据。同时，金融机构也能向自然资源部门反馈金融市场动态、资金供给情况以及金融产品创新方向，有助于自然资源部门更好地规划矿山修复项目的资金安排和实施进度。这种定期会商制度是实现多部门联动的重要举措，有利于推动全域综合整治下金融支持矿山修复工作的顺利开展^[9]。

2. 信息共享平台构建

建立生态修复项目库与金融供需匹配的数字化系统，是信息共享平台构建的关键。该系统应整合矿山修复项目的各类信息，包括项目规划、进展情况、资金需求等，同时收集金融机构的供给信息，如资金规模、贷款条件等。通过大数据分析技术，实现项目与资金的精准匹配，提高金融支持的效率和效果。系统需具备开放性和交互性，允许相关部门和机构实时更新信息，确保数据的准确性和及时性。此外，应建立严格的信息安全保障机制，防止数据泄露和滥用，保障各方的合法权益^[10]。

（二）金融创新路径

1. 风险补偿机制

设计政府性担保基金与商业保险结合的风险缓释方案，对于金融支持矿山修复至关重要。政府性担保基金可由政府出资设立，为矿山修复项目提供信用担保，降低金融机构的风险预期，提高项目获得融资的可能性。同时，引入商业保险，针对矿山修

复过程中可能出现的自然灾害、工程事故等风险进行承保。通过合理设计保险条款和费率，使保险能够覆盖大部分潜在风险损失。这种结合方式，一方面利用政府的公信力和资源优势，增强项目的信用基础；另一方面借助商业保险的风险分散和经济补偿功能，为项目提供更全面的风险保障，从而促进金融机构积极参与矿山修复项目，推动环境工程的顺利实施。

2.绿色金融产品包

开发包含碳金融衍生产品的矿山修复综合融资方案可从多方面着手。在绿色金融产品包设计上，应结合矿山修复的特点与需求。一方面，考虑将碳排放权交易与矿山修复项目挂钩，通过量化修复过程中的碳减排量，使其能够在碳市场进行交易，为项目带来额外收益。另一方面，设计基于矿山生态修复绩效的绿色债券或绿色信贷产品，投资者根据修复效果获得相应回报。同时，探索开发与矿山生态系统服务价值相关的金融衍生品，如生态服务付费类金融产品，激励社会资本参与矿山修复，推动金融与环境工程在矿山修复领域的深度融合。

（三）工程技术路径

1.污染梯度治理技术

针对矿山重金属污染，可依据污染程度进行分区治理。对于污染严重区域，采用强化修复技术，如化学淋洗法，通过特定化学试剂将重金属从土壤中淋洗出来，降低其含量。同时，结合物理修复手段，如电动修复，利用电场作用驱动重金属离子迁移，提高修复效率。在中度污染区域，可采用植物修复技术，筛选对重金属具有富集能力的植物，如蜈蚣草对砷的富集，通过植物根系吸收和固定重金属，逐步改善土壤环境。对于轻度污染区域，以自然修复为主，辅以适当的人工干预，如添加有机物料改善土

壤结构，提高土壤微生物活性，促进土壤自身的净化能力，实现矿山重金属污染的梯度治理。

2.生态产品开发技术

研发尾矿资源化利用与景观再造相结合的价值转化技术需从多方面着手。要深入研究尾矿的成分与特性，为资源化利用提供基础数据。通过化学、物理等多种方法，探索尾矿中有价元素的提取技术，提高资源回收率。同时，结合景观设计原理，根据矿山的地理环境和生态条件，制定科学的景观再造方案。利用尾矿及周边的废弃材料，构建具有生态和美学价值的景观设施。建立监测与评估体系，实时监测技术应用过程中的环境指标和生态效益，及时调整优化技术方案，确保技术的可持续性和有效性，实现尾矿资源化利用与景观再造的协同发展，提升矿山修复的综合效益。

五、总结

金融支持矿山修复的环境工程路径探索是一个复杂且关键的课题。通过对金融工具与环境工程技术耦合机制的研究，得出了重要的理论贡献。在实践方面，为政策协调和市场培育提供了启示。同时，强调建立全口径成本核算体系、培育专业评估机构以及完善法治保障等建议，这些措施对于推动矿山修复工作至关重要。未来，基于区块链技术的修复成效金融转化等方向值得深入研究。这将进一步优化金融支持矿山修复的模式，提高修复工作的效率和质量，促进矿山生态环境的可持续发展，为全域综合整治提供有力支撑。

参考文献

[1] 贺俊儒. 陕西省金融支持乡村振兴战略的路径研究 [D]. 西安电子科技大学, 2021.

[2] 包家豪. 全域土地综合整治的景观规划路径及优化策略 [D]. 浙江大学, 2022.

[3] 李芬. 乡村振兴背景下全域土地综合整治项目的社会资本参与路径研究 [D]. 天津理工大学, 2023.

[4] 邓磊. 金融供给侧结构性改革背景下通道县黑老虎产业发展的金融支持研究 [D]. 中南林业科技大学, 2021.

[5] 谢均瑶. 温州市平阳县农村全域土地综合整治实施路径研究 [D]. 上海师范大学, 2023.

[6] 张思敏, 徐从广, 章慧明, 等. 国土空间背景下的矿山生态修复路径探索——以广德矿地融合示范区规划为例 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(07): 6-8.

[7] 朱江, 张守法, 包万隆, 等. 矿山修复湿地生态系统构建路径探索 [J]. 湿地科学与管理, 2023, 19(02): 57-60+65.

[8] 肖文魁. 废弃矿山生态修复存在的问题及路径 [J]. 南方农机, 2022, 53(24): 82-84+127.

[9] 王郁涵, 左洪振. 全域旅游背景下湘西州金融支持旅游产业发展研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2021, (20): 53-55.

[10] 代显峰. 辽宁省全域土地综合整治的路径探索 [J]. 辽宁自然资源, 2023, (7): 61-63.

强夯在公路路基施工中的作用

李海都

四川成都 610036

DOI:10.61369/ETQM.2025100022

摘 要： 强夯技术是利用重锤冲击夯实土体的地基处理方法，对公路路基施工至关重要。其核心作用在于显著改善土壤工程性质：通过强力冲击使土颗粒重新排列、孔隙减少，大幅提高土体的密实度、承载力和抗沉陷性，从而奠定路基稳定与长期使用的坚实基础。该技术优势明显：相比传统加固方法，强夯施工周期短、效率高，能快速、大面积改良土体，有效降低施工成本和时间。同时，其施工过程相对简便，质量易于监测和控制，有利于保障路基工程的整体质量与安全。此外，强夯技术也符合环保要求。强夯技术能有效提升公路路基工程的质量、稳定性、施工效率并节约成本，在公路建设中具有广泛的应用价值和重要意义。

关 键 词： 强夯技术；公路路基施工；强夯技术作用

The Role of Strong Ramming in Highway Subgrade Construction

Li Haidu

Chengdu, Sichuan 610036

Abstract： Strong tamping technology is a foundation treatment method that uses heavy hammer impact to compact the soil, which is crucial for highway roadbed construction. Its core role is to significantly improve the soil engineering properties: through the strong impact to make the soil particles rearrangement, pore reduction, significantly improve the compactness, bearing capacity and subsidence resistance of the soil body, so as to lay a solid foundation for the stability and long-term use of the roadbed. The advantages of this technology are obvious: compared with the traditional reinforcement methods, the strong tamping construction period is short, high efficiency, can be fast, large-area improvement of the soil body, effectively reducing the construction cost and time. At the same time, the construction process is relatively simple, and the quality is easy to monitor and control, which is conducive to guaranteeing the overall quality and safety of the roadbed project. In addition, the strong tamping technology also meets the environmental requirements. Ramming technology can effectively improve the quality, stability, construction efficiency and cost savings of highway roadbed project, which has a wide range of application value and important significance in highway construction.

Keywords： ramming technology; highway roadbed construction; the role of ramming technology

一、强夯技术概述

强夯技术是一种常用于地基处理的机械振实方法，通过利用专用设备，对土壤施加振动力，使土壤颗粒重新排列并填充孔隙，从而提高土体的密实度和承载力。这项技术在公路、桥梁、堤坝等工程中广泛应用，以增强地基稳定性和改善土壤工程性质^[1]。强夯技术是利用强夯锤或压路机等机械设备，通过向土壤施加垂直或倾斜方向的冲击或振动作用，使土壤颗粒发生水平和垂直位移，从而实现土壤的重振实。在振实过程中，土壤颗粒之间的摩擦阻力减小，孔隙率降低，土体密实度和抗压强度提高，最终实现地基改良的目的^[2]。

强夯技术在公路工程、桥梁建设及水利工程（堤坝、港口）中发挥关键作用^[3]。在公路工程中，该技术通过振实土壤层显著提升路基承载力、稳定性和路面使用寿命。桥梁建设中，强夯用于桥墩地基处理，保障桥梁结构安全稳固。水利工程领域，该技

术能高效改善堤坝和港口土体的密实度、抗渗性及承载力：对堤坝而言，可增强其抵御水压和外部荷载的能力，确保长期结构稳定；对港口而言，则提升码头、船坞土基的稳定性，使其能可靠承受船舶靠泊与货物装卸荷载。综上所述，强夯技术通过强化土体工程性质，为公路、桥梁、堤坝及港口等基础设施的安全性、稳定性和耐久性提供了高效可靠的技术支撑，对保障工程长期正常运行具有广泛应用价值^[4]。

二、强夯技术的优势

（一）施工效率高

强夯技术以其快速振实大面积土壤的特点，有效提高了施工效率。通过机械设备对土壤进行振实作用，可以在较短时间内，完成大量土壤的处理和改良。强夯技术以其快速振实大面积土壤的特点而闻名，显著提高了施工效率。利用机械设备对土壤进行

振实作用，能够在相对较短的时间内完成大规模土壤的处理和改良工作。另外，这种高效的施工方式不仅节约了时间成本，还降低了人力资源的投入，使得项目进度得以加快，从而更快地实现工程目标。强夯技术的快速振实特性为各类土地工程提供了便利，为工程建设的顺利推进和高效完成提供了有力支持。传统地基处理方法可能需要较长的施工周期，来达到相同的效果，而强夯技术则能够节约宝贵的时间资源，加快工程进度，降低施工成本。

（二）施工质量可控

强夯过程中的振实效果，可以通过监测和控制手段进行实时跟踪和调整，保证了施工质量的可控性。工程人员可以根据土壤情况和设计要求，对振实参数进行调整，确保土壤密实度和承载力达到预期标准，这种可控性使得强夯技术，在工程实施的过程中，更加稳定和可靠，有利于保证工程质量和安全性。

（三）环境友好

相较于传统地基处理方法中常使用的化学材料，强夯技术无需添加额外的化学物质，减少了对周边环境的影响。在振实过程中，不会产生有害废物或污染物质，符合环保要求，有助于维护周边生态环境的健康。同时，强夯技术在施工过程中，可以减少对土壤和水资源的消耗，体现了对环境可持续发展的支持和重视^[5]。

（四）节约资源

强夯技术通过振实土壤来改善土壤性质，减少了对土石方的开采和消耗。传统地基处理方法，需要大量的土方工程和填方作业，导致土地资源的浪费和破坏。而强夯技术通过最大限度地利用原有土壤资源，有效减少了对自然资源的开采和消耗，符合可持续发展的理念，为未来的工程建设留下更多的资源保障。

三、强夯技术在公路路基施工中的应用

（一）提高土壤稳定性和密实度

强夯技术在公路路基施工中被广泛应用，其中一个主要作用是提高土壤的稳定性和密实度。通过机械振实作用，强夯技术能够使土壤颗粒重新排列、填充孔隙，从而增加土壤的密实度和抗压强度。在路基工程中，土壤的密实度，直接影响着路基的承载能力和稳定性。相关部门采用强夯技术，能有效改善土壤的工程性质，提升路基的整体质量，降低路面沉降和变形的风险，延长路面使用寿命^[6,7]。

（二）增强路基承载能力

另一重要作用是强夯技术可以显著增强公路路基的承载能力。在公路交通运输中，路基的承载能力是保障道路安全和持久性的关键因素之一。相关部门通过对土壤进行振实处理，强夯技术可以大幅提高土壤层的承载能力，并使其达到设计要求。这样，不仅可以确保道路在各类车辆通行时具备足够的稳定性和支撑能力，还可以减少路基沉降带来的维护成本，从而提高公路的运行效率^[8]。

（三）改善公路长期使用条件

强夯技术在公路路基施工中的应用，还有助于改善公路的长

期使用条件。通过提高土壤的稳定性和密实度，强夯技术可以有效减少路基和路面的沉降和变形，延缓道路破损和老化速度，采用强夯技术处理的路基更加耐久、稳固，可以承受更长时间和更大荷载的使用，从而延长公路的使用寿命，减少维修频次，为用户提供更加可靠和安全的道路交通环境^[9]。

（四）提高施工效率和节约成本

最后，强夯技术在公路路基施工中的应用，还能显著提高施工效率和节约成本。相比传统的土石方处理方法，强夯技术通过机械振实作用，可快速处理大面积土壤，缩短了施工周期，降低了劳动力投入，优化了工程进度。同时，由于不需要额外添加化学材料，减少了对工程周边环境的污染和影响，更符合可持续发展的要求。这样的施工方式不仅提高了工程质量和稳定性，还有效降低了施工成本，为公路建设提供了经济效益和社会效益^[10]。

四、强夯技术体现的环境保护与资源节约

强夯技术作为一种机械振实方法，在公路路基施工中，不仅能够有效提高土壤的稳定性和承载能力，还具有重要的环境保护和资源节约效益。以下将详细探讨强夯技术在公路建设中对环境和资源的积极影响。

（一）减少土方开采与消耗

使用强夯技术处理土壤时，无需额外添加化学材料，而是通过机械振实作用，改善土壤性质。相比传统的土石方处理方法，强夯技术最大限度地利用了原有土壤资源，减少了对土石方的开采和消耗，有助于减少土地资源的浪费和破坏，并避免了因土石方运输和填方作业而产生的环境污染和能源消耗。使用强夯技术处理土壤时，无需额外添加化学材料，而是依靠机械振实作用，来改善土壤性质。这一特点使得强夯技术在土地工程领域备受青睐。相较传统的土石方处理方法，强夯技术最大限度地利用了原有土壤资源，同时，减少了对土石方的开采和消耗，为土地资源的可持续利用提供了重要保障。这种做法不仅减少了土地资源的浪费和破坏，还避免了因土石方运输和填方作业，而产生的环境污染和能源消耗。

通过强夯技术处理土壤，不仅有效改善了土壤性质，更实现了资源的最大化利用。传统的土石方处理方法，会导致大量的土石材料被运输到施工现场，不仅增加了能源消耗，也容易引起交通拥堵和环境问题。相比之下，强夯技术直接在原位进行土壤振实处理，无需外运土石材料，大大降低了施工过程中的耗能和排放。此外，强夯技术的应用，还有助于维护土地生态平衡。通过优化土壤结构，改善土壤的承载能力和稳定性，相关部门可以在尽可能保持土地原貌的同时，为公路建设提供可靠的基础。这种环保友好的施工方式，能够减少对土地生态系统的干扰，保护当地植被、水体和自然生态环境的完整性，符合现代社会对环境可持续性的追求。

（二）降低环境污染风险

在强夯技术的施工过程中，其独特之处在于无需使用化学添加剂或其他污染物，从而显著降低了对周边环境的污染风险。相

比一些地基处理方法可能造成的土壤污染和水体污染，强夯技术的施工环境影响更为轻微且可控。这种环保优势使得强夯技术成为公路建设领域受欢迎的选择之一。振实过程并不会对土壤结构和生物多样性造成破坏，因此，更有助于保护当地生态环境的稳定性。相对于传统地基处理方法可能引起的土地退化和生态系统扰动，强夯技术在土壤改良过程中能够较好地保持土地原貌，减少对环境的负面影响。这符合现代社会对于环境友好型建设的迫切需求，旨在打造更加可持续、生态友好的建设模式。

通过采用强夯技术，可以更好地平衡公路建设和环境保护之间的关系。这种技术的环保特点使得公路建设项目能够在提升交通基础设施的同时，尽可能减少对自然生态系统的损害，实现人与环境的和谐共生。未来，随着强夯技术在公路建设中的广泛应用，我们有望见证更多环保、低碳的交通基础设施建设，为建设绿色生态城市和可持续社会作出积极贡献。

总之，强夯技术的环保优势，不仅在于有效降低了环境污染风险，还促进了土地资源的合理利用和生态环境的保护，将这种技术融入公路建设领域，能够推动绿色、可持续发展理念的深入实践，并为未来的道路建设开创更为环保、生态友好的新局面。

（三）节约能源和减少碳排放

强夯技术通过机械设备振实土壤，相比传统土石方处理方法显著降低能源消耗。该技术大幅减少机械现场运行时间，直接削减碳排放、噪音及大气污染，减轻对居民和生态环境的影响。尤其在城市建设中，其高效施工能缓解交通拥堵，改善区域空气质量。这种低碳模式不仅革新了公路施工工艺，更契合环保与可持续发展的核心需求。推广强夯技术可同步提升施工效率、降低能耗、控制污染排放，为构建绿色健康的交通基础设施提供关键技术支撑。

（四）对资源可持续利用的促进

强夯技术通过机械振实显著提升土壤的工程性质与承载能

力，大幅延长公路路基及路面使用寿命，有效降低后期维护与翻新工程的资源消耗。该技术充分利用原位土壤资源，无需依赖化学添加剂或大量外部填料，最大限度减少对自然资源的开采，保护土地原貌和生态平衡。这种对原有土壤的高效改良既避免了土地破坏，又实现了资源的可持续开发与利用。同时，技术应用增强了路基整体质量与抗压稳定性，显著降低路基下沉和变形风险，提升道路承受交通负荷的可靠性。其资源节约与生态友好的特性，为公路建设注入了环保动力，推动行业向可持续发展转型。通过延长道路寿命、控制维护成本并减少生态影响，强夯技术为构建安全、经济、环境协调的现代化交通基础设施提供了关键支撑。

五、结束语

在公路路基施工中，强夯法作为一种高效、环保的地基处理技术展现出了巨大的应用潜力。通过机械振实作用，强夯法能够有效提高土壤的稳定性和密实度，增强路基的承载能力，同时，节约资源、减少环境污染，为公路建设注入新的活力。强夯法不仅可以快速改善土壤性质，提高公路路基的质量和稳定性，还能够加快施工进度，降低施工成本，提高工程效率。其无需添加化学材料的特点，减少了对周边环境的影响，符合可持续发展的要求，为建设更加绿色、智能的公路交通系统提供了重要支持。总而言之，强夯法在公路路基施工中展现出了明显的优势和应用前景。随着技术的不断完善和推广应用，相信强夯法将在未来的公路建设中发挥越来越重要的作用，为改善道路质量、提升交通运输效率、保护环境资源做出积极贡献。通过科学合理的工程设计和施工实践，强夯法必将成为推动公路建设进步的重要工具，为人们创造更安全、便捷、环保的出行环境。

参考文献

- [1] 缙振国. 强夯法在公路路基施工中的应用 [J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(08): 67-70.
- [2] 吕高军. 强夯法在公路路基施工中的运用 [J]. 四川建材, 2023, 49(09): 181-183.
- [3] 雷荣军. 分层填筑强夯技术在山区公路路基工程施工中的应用研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(08): 56-58. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2023.08.042.
- [4] 王志成. 强夯法在公路路基施工中的应用分析 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4(21): 55-58.
- [5] 张季超, 赵志杰, 王可怡, 等. 节能环保高性能强夯装备及复杂地基处理关键技术 [Z]. 广州大学. 2018.
- [6] 王海. 强夯法在高速公路盐渍土路基施工中的应用研究 [J]. 时代汽车, 2023, (21): 184-186.
- [7] 马金虎. 湿陷性黄土地区高速公路扩建施工关键技术研究 [J]. 交通世界, 2023, (30): 98-100. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.30.013.
- [8] 阳海龙. 湿陷性软土区公路路基加固施工处理技术 [J]. 工程机械与维修, 2023, (05): 123-125.
- [9] 李松松. 山区公路路基施工关键技术及质保措施研究 [J]. 运输经理世界, 2022, (32): 44-46.
- [10] 郑敏. 公路软土路基的强夯法施工技术探讨 [J]. 城市周刊, 2023(31): 36-38.

基于高分遥感影像和 DSM 数据的建筑物提取方法研究

丁汉栋

联通（山西）产业互联网有限公司，山西 太原 030032

DOI:10.61369/ETQM.2025100025

摘 要： 建筑物基础地理数据作为工程建设期间的关键数据，能够有效保障建筑物的使用效果，在目前遥感影像技术使用期间，需要将高分辨率遥感影像进行使用，确保建筑物数据提取的效果，加强建筑物检测的效果。目前，随着遥感技术使用的深入发展，应当将高分辨率遥感影像与 DSM 数据进行结合，加强建筑物数据提取的效率。根据研究结果，在高分遥感影像和 DSM 数据的结合使用下，建筑物数据提取的总体精度可以超过 92.3%，Kappa 系数可以达到 0.87，有效地解决建筑物数据提取期间阴影与植被覆盖带来的影像，将误报率控制在 4.2%。本文主要针对高分辨遥感影像和 DSM 数据的建筑物提取方法进行研究，期望能为后续建筑物提取算法的改进提供参考。

关 键 词： 高分遥感影像；DSM 数据；建筑物提取；数据提取

Research on Building Extraction Methods Based on High-Resolution Remote Sensing Images and Dsm Data

Ding Handong

China Unicom (Shanxi) Industrial Internet Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032

Abstract： As key data during engineering construction, basic geographic data of buildings can effectively ensure the usability of buildings. In the current application of remote sensing image technology, high-resolution remote sensing images need to be used to ensure the effectiveness of building data extraction and enhance building detection results. With the in-depth development of remote sensing technology application, high-resolution remote sensing images should be combined with DSM data to improve the efficiency of building data extraction. The research results show that under the combined use of high-resolution remote sensing images and DSM data, the overall accuracy of building data extraction can exceed 92.3%, and the Kappa coefficient can reach 0.87. This effectively addresses the impact of shadows and vegetation coverage during building data extraction, controlling the false alarm rate at 4.2%. This paper focuses on the research of building extraction methods using high-resolution remote sensing images and DSM data, aiming to provide a reference for the improvement of subsequent building extraction algorithms.

Keywords： high-resolution remote sensing image; DSM data; building extraction; data extraction

随着遥感技术的快速发展，高分辨率遥感影像与数字表面模型（DSM）数据的结合，作为城市在获取地理信息数据的全新技术手段被广泛使用。高分遥感影像可以通过高分辨率和多光谱成像的方式，对建筑物基本信息数据进行提取，DSM 数据通过三维地形建模精准对建筑物高程信息进行获取，在技术的协同应用中，可以确保建筑物多维度信息数据的提取效果。在城市规划建设期间，建筑物信息的精准提取可以对空间布局进行优化，加强基础设施管理的效果。同时，在土地资源管理工作开展期间，建筑物数据的提取能够对土地资源利用效率进行分析，进一步提升土地资源利用的效率。此外，将技术应用在环境监测中，可以对建筑物与植被区域生态环境变化进行掌握，对促进建筑行业的发展有重要作用。

一、DSM 数据处理与 DSM 生成

（一）DSM 与 DTM 的提取与差值计算

DSM 与 DTM 的提取作为建筑物提取技术的核心，DSM 将对

地表建筑物高程信息进行记录，在保留地形表面高程数据的基础上，去除非地面要素信息。在数据差值计算期间获得地表物体的高程信息，为建筑物识别提供直接的数据参考。在遥感数据处理的过程中，DSM 的生成需要以高分辨率影像的立体匹配技术或者

作者简介：丁汉栋（1978—），男，汉族，陕西汉中，人，研究生，高级工程师，研究方向：工业互联网、能源互联网、网络安全、数字经济、5G+物联网、云计算、图计算、边缘计算、区块链、数字孪生、信息系统项目管理师（高级）等。

机载激光雷达点云数据为主,根据光学遥感影像,将立体区域的网平差与影像匹配后构建 DSM 基础,根据 SIFT、SURF 等特征点匹配算法实现亚像素级的同名像点定位,结合激光束法平差可以提升三维坐标计算的精准度。针对地形较为复杂或者植被覆盖区域,在多源数据融合的方式下,提升 DTM 的准确性。在 DSM 与 DTM 数据集构建之后,插值运算可以通过逐项元相减的方式,生成归一化的 DSM 或者 NDSM 模型。在模型建立的过程中,应当确保空间的分辨率、坐标系统和地理覆盖范围的一致性。为了能够减少地形起伏对建筑物高程信息提取造成的影响,可以通过多尺度分析和三维点云分割技术,对高程信息数据进行优化,在获得差值结果后,使用数学形态学的开运算方式对影像信息进行有效去噪处理。在实际应用的过程中,差值计算的精准度会直接受到 DSM 与 DTM 生成质量的影像,保障对数据源的空间分辨率、点云密度以及处理算法进行评估,结合机器学习算法保障建筑物提取的自动化水平,为后续建筑物矢量化与三维建模奠定数据基础^[1]。

（二）规格化 DSM 的生成

高分遥感影像和 DSM 模型的应用过程中,规格化 DSM 模型的生成作为建筑物提取的关键技术,DSM 模型通过对地表自然起伏导致的建筑物高程影像,可以着重提取建筑物空间特征,为后续建筑边界划分与形态分析奠定基础。在生成期间需要根据 DSM 和 DTM 差值计算结果,构建地表高程基准面信息,确保可以有效将 DSM 中的地形信息与建筑物信息进行分离。首先,在 DSM 与 DTM 数据提取阶段中,高分遥感影像与激光雷达数据作为数据提取的关键,DSM 生成通常需要使用立体影像匹配或者 LiDAR (机载激光雷达) 点云分类技术。在 DTM 数据提取期间, LiDAR 点云分类技术可以对地面点位信息进行识别。其次,经过逐元计算的 DSM 与 DTM 高程差值,可以对地表建筑物绝对高度的 DSM 数据集进行整合,针对复杂地形区域来讲,DTM 拓扑优化可以消除平坦区域与复杂区域之间的高程异常数值。最后,在差值计算数据结果高程归一化处理期间,通过对噪声点的去除,保障建筑物轮廓信息的清晰展示。此外,还需对数据进行统计学异常值检测,通过设定高程阈值或利用马尔可夫随机场模型识别并修正异常高程值,最终生成的 DSM 数据需转换为标准化格式,并建立与原始影像的地理配准关系,以确保后续建筑物矢量化时的空间一致性^[2]。

二、建筑物提取与过滤

（一）标记控制的分水岭图像分割

在建筑物提取与过滤过程中,标记控制的分水岭图像分割方法,通过结合地形特征与影像纹理信息,有效解决传统分水岭算法因过分割,导致建筑物边界定位不准确的问题。标记控制的分水岭图像分割期间,需要使用归一化 DSM 数据为核心,通过系统化的处理过程中,可以对复杂场景建筑物区域的实际情况进行识别。针对 DSM 数据中存在的噪声干扰,可以采用多尺度滤波算法加强预处理工作的开展,其中高斯滤波器在使用期间,可以利用

高斯噪声对建筑物高程特征进行干扰,在形态学开闭运算的适用下,对噪声以及局部异常数值轮廓进行有效处理。在预处理后的 DSM 数据中,对建筑物主体高程特征进行保留,降低地形起伏与植被覆盖带来的建筑物提取噪声影像。在标记控制的分水岭图像分割期间,可以对高层建筑物与低矮建筑物共存区域的分布信息进行处理,通过动态标记生成的参数信息,自适应不同建筑密度与植被类型。实验研究表明,相较于未采用标记控制的传统分水岭算法,标记控制的分水岭图像分割方式,建筑物提取的精确度可以提升 15% 到 20%,分割率也会因为标记机制的引导,提升建筑物信息精确度 30% 以上。除此之外,结合数字表面模型与遥感影像的多源数据融合策略,进一步增强对屋顶材质复杂、阴影覆盖严重的区域的适应能力。在实际应用中,标记控制的分水岭图像分割方法通过参数优化可灵活适应 GF-1、GF-6 等不同高分遥感影像的数据特性,为城市三维建模与动态监测提供可靠的技术支撑^[3]。

（二）建筑物目标识别与提取

目标识别与提取环节是连接图像分割与结果优化的关键步骤,在完成标记控制的分水岭图像分割后,需要对分割结果进行特征分析与形态学处理,确保可以实现建筑物区域的精准识别。通过提取分割区域的几何特征参数,包括形状复杂度、面积阈值以及 DSM 数据提供的高程信息,有效区分建筑物与其他植被类型。建筑物区域通常具有规则的几何形态,如矩形或近似矩形的轮廓,并且面积分布符合城市建筑的典型尺度特征。结合 DSM 数据的高程信息,设定垂直方向上的阈值范围,确保可以排除植被、陡坡等具有非建筑高度特征的植被类型^[4]。此外,高分遥感影像的空间分辨率,将对分割单元的最小识别尺寸进行把控,在 DSM 数据的帮助下,对高度阈值的划分提供科学保障,在形态学参数处理期间应当通过实验验证,避免过度平滑造成的建筑物细节数据丢失。在未来目标识别与提取方法的使用期间,采用交叉验证的方式对提取的最终结果进行评估,通过对比提取数据的总体精确度、用户精度及 Kappa 系数,对参数处理的各个环节进行优化,保证可以在特定场景中对建筑物信息进行提取,保障目标识别与信息提取的整体质量^[5]。

（三）非建筑物对象的过滤

在高分辨率遥感影像与 DSM 数据融合的建筑物提取过程中,非建筑物对象的误识别问题是影响最终提取精度的关键因素。由于地表自然物体与人工建筑物在几何形态、空间分布特征及光谱反射特性上存在些许相似性,单一数据源或提取算法难以对物体精准区分,为保障非建筑物对象过滤的效果,需要建立非建筑物对象多层次过滤模型,提升建筑物提取结果的可信度和完整性。几何特征筛选作为过滤的初步环节,根据 DSM 数据中涵盖的三维空间信息,通过对高度阈值的设置,有效地将非建筑物对象进行排除。在形态特征过滤的基础上,机器学习分类技术进一步强化了非建筑物对象的识别能力。在形态特征过滤的基础上,机器学习分类技术将进一步加强 DSM 数据模型对非建筑物对象的识别效果,通过随机森林算法分类模型,对非建筑物重要特征信息进行筛选,在人工修正的样本迭代优化,对非建筑物分类边界进行优

化，有效改善样本中不平衡和特征冗余问题^[6]。

三、过度分割与错误割裂问题的解决策略

（一）错误割裂问题的解决方案

高分遥感影像和 DSM 数据建筑物提取过程中，错误割裂问题主要是由于分割算法不能适应复杂地物边界或阴影区域，导致数据错误识别和判断的情况，这种情况导致原本应该属于同一建筑物的连通区域被分割为多个独立对象。在研究工作开展期间，为了能够有效解决因问题带来的影响，需要将多源数据特征和后处理技术进行结合，不断对分割结果进行优化。其中，形态学计算作为基础，通过开闭运算、孔洞填充等操作，对小尺度分割噪声进行消除，加强相邻区域建筑物的连通效果。此外，结合 DSM 数据中建筑物高程信息的连通性分析，能够进一步提升数据合并的准确性。通过对高程相似性阈值范围的设定，对邻近区域的高程差异进行量化分析，如果相邻区域高程变化在合理的范围之内，可以将同一类建筑物信息进行何必处理，避免出现非连通区域误判情况^[7]。

（二）过滤效果的评估与优化

为了有效评估过度分割与错误割裂问题的过滤效果，加强过滤效果的优化，在多维度综合评估体系下，结合定量与定性分析的方式，建立可量化的反馈机制。在定量评估的过程中，根据地面实况数据构建混淆矩阵，通过计算漏检率与误检率建立核心评估指标。其中，漏检率为未被正确识别的建筑物区域占实际建筑物总面积的比例，其计算公式为：

$$\text{漏检率} = \frac{\text{未被检测的建筑物区域}}{\text{实际建筑物总面积}} \times 100\%$$

误检率则是反应非建筑物区域被错误标记为建筑物的概率，计算公式为：

$$\text{误检率} = \frac{\text{错误分类为建筑物的区域}}{\text{总非建筑物区域}} \times 100\%$$

通过对不同的过滤参数组合，对当前算法中的性能瓶颈进行预测，将 F1 分数与平均交并比作为补充指标，对平衡性进行综合

性评估，保证评估体系的全面性和有效性^[10]。

在定性分析的过程中，需要通过多维度可视化与专家验证，将过滤结果叠加在高分遥感影像和 DSM 模型上，重点对建筑物轮廓信息和空间分布信息进行整合，对疑似过度分割区域中，使用三维渲染技术对建筑物高程变化特征进行优化，直接判断分割边界的效果。同时，组织行业专家对过滤结果进行审核，在审核期间首先需要对由于阴影、植被覆盖或者相邻建筑物高程差异导致的错误分割；其次，审核因为细小附属结构被误判为独立分割的情况。通过对问题类型的整合，为后续过滤效果优化工作提供针对性地改善建议^[8]。

在参数优化的过程中，可以通过网格搜索的方式，系统性对形态学闭运算结构元素尺寸进行调整，结合边缘锐化算法加强建筑物轮廓数据的连贯性。在 DSM 数据中避免因为地形变化导致的过度分割问题，将高程梯度阈值动态化调整机制进行引入，将局部地形坡度作为连通域合并的约束条件。例如，当结构尺寸从原本的 3×3 扩张到 7×7 的情况下，高程梯度阈值需要设定为 15°，通过计算可得漏检率降低 8.2%，误检率可以减少 5.7%^[9]。

四、结束语

本文基于高分遥感影像与数字表面模型（DSM）数据，对建筑物信息数据提取方法进行系统性研究，通过多源数据的融合与算法优化，确保可以提升建筑物数据提取的精准度和有效性。在分析中针对高分遥感影像的处理技术进行研究，有效地加强影像的质量，保障建筑物光谱特征的可区分性效果。同时，针对建筑物区分难题进行分析后提出基于 NDVI 和 NDWI 的阴影与植被掩膜生成策略，结合形态学操作与自适应阈值分割技术，实现建筑物顶部区域的初步提取。在三维空间信息利用层面，通过 DSM 数据的梯度分析与多尺度分割，有效捕捉建筑物高度特征与边界轮廓，解决单波段影像难以处理的低矮建筑物与复杂屋面结构问题，克服单一数据源在纹理相似区域或局部阴影覆盖区域的误判问题。

参考文献

[1] 戴国梦. 基于对抗网络和迁移学习的高分影像建筑物变化检测 [J]. 中华建设, 2025, (07): 131-133.
[2] 李林宜, 杨云源, 谢文君, 李磊, 陈亮, 何厚军, 付建德, 孟令奎. 大型水利工程典型水工建筑物与施工阶段遥感智能监测 [J]. 水利信息化, 2025, (03): 41-46.
[3] 俞友, 吴强, 黄亮. 级联多注意力的遥感影像耕地变化检测方法 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 1-14.
[4] 任若天, 赵理君, 赵旭阳, 张正, 李宏益, 薛新华, 唐嫔. 知识引导下的遥感影像智能解译方法综述 [J]. 航空学报, 1-23.
[5] 黄薪豫, 孙睿, 徐雨飞. 森林火烧迹地雷达遥感响应特征及时间序列分析 [J]. 遥感技术与应用, 2025, 40(03): 509-519.
[6] 邢云飞. 基于高分遥感影像和 DSM 数据的建筑物提取方法研究 [D]. 太原理工大学, 2023.DOI: 10.27352/d.cnki.gylgu.2023.002431.
[7] 赵蒙韩. 联合高分影像与 DSM 数据的建筑物提取方法研究 [D]. 长安大学, 2023.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2023.001235.
[8] 范天航. 基于高分遥感影像数据的油田地区建筑物信息提取方法研究 [D]. 吉林大学, 2016.
[9] 王建霞, 刘文字, 王婵, 等. 基于高分遥感影像的农作物面积分割研究 [J]. 河北工业科技, 2025, 42(03): 212-220.
[10] 陈洪. 多源高分遥感影像在城市“两违”监测领域中的应用实践 [J]. 城市勘测, 2025, (02): 106-109.

装配式叠合板厚度控制技术研究

程芬

湖北商贸学院, 湖北 武汉 430079

DOI:10.61369/ETQM.2025100026

摘 要： 当前节能环保理念下，装配式建筑受到社会各界的广泛关注，装配式叠合板广泛应用于楼面、屋面等结构体系中，其厚度的准确性直接影响建筑的使用功能和空间布局。通过合理的厚度控制，可以保证结构安全，可以优化成本控制，还能提高施工效率。本文主要阐述了装配式叠合板厚度控制技术的应用价值。并从模具设计、混凝土材料调控工作、改进生产工艺等方面提出了相应的措施，为相关人员提供参考。

关 键 词： 装配式；厚度；叠合板

Research on Thickness Control Technology for Prefabricated Composite Slabs

Cheng Fen

Hubei Business College, Wuhan, Hubei 430079

Abstract： Under the current concept of energy conservation and environmental protection, prefabricated buildings have attracted widespread attention from all sectors of society. Prefabricated composite slabs are widely used in floor and roof structural systems, and their thickness accuracy directly affects the building's functional use and spatial layout. Through reasonable thickness control, structural safety can be ensured, cost control optimised, and construction efficiency improved. This paper primarily discusses the application value of thickness control technology for prefabricated composite slabs. It proposes corresponding measures from aspects such as mould design, concrete material regulation, and improved production processes, providing reference for relevant personnel.

Keywords： prefabricated; thickness; composite slab

引言

装配式叠合板具有预制构件工厂化生产的质量可控性，又可以通过现浇层与预制底板的良好结合，形成整体性强、受力性能优良的结构构件，然而在实际工程应用中，叠合板若厚度偏差过大，会导致结构安全隐患，厚度不均匀还会引发现浇层混凝土开裂、预制底板与现浇层结合不良等问题，降低叠合板的整体质量和耐久性。因此，企业应注重叠合板厚度控制技术的有效应用，企业应充分考虑叠合板生产的整合流程，采用先进的 CAD/CAM 技术进行模具设计，根据叠合板尺寸与混凝土侧压力计算，根据叠合板厚度、钢筋间距及浇筑方式，通过试验确定最佳坍落度范围，同时积极改进生产工艺，进而推动建筑行业的持续健康发展。

一、装配式叠合板厚度控制技术的应用价值

（一）保证结构安全

叠合板的厚度是经过精心设计计算的，与其所承受的荷载密切相关，精确的厚度控制可以确保叠合板在实际使用中满足设计承载能力的要求，若厚度不足，在长期荷载作用下，叠合板会出现挠度过大甚至开裂、断裂等破坏现象，而厚度控制技术可以保证叠合板有足够的截面高度来抵抗弯矩，从而保障结构的安全性，同时叠合板通过预留钢筋等方式与周边构件进行连接，当叠合板厚度准确时，其连接部位的受力性能更符合设计预期。正常

使用状态下，叠合板在荷载作用下会产生挠曲变形，若厚度过小，挠度会过大，导致结构构件的附加应力增加，通过厚度控制技术，可以保证叠合板具有足够的刚度，将挠度控制在允许范围内，从而保障结构的安全和使用功能。叠合板在混凝土收缩、温度变化以及荷载等因素的综合作用下容易产生裂缝，当厚度控制得当，叠合板的截面有效高度和配筋率等参数能够更好地协同工作，抑制裂缝的出现，同时荷载作用下，合适的厚度可以保证钢筋和混凝土之间的粘结力有效发挥，使裂缝宽度和分布处于可控状态，防止有害裂缝的扩展，保障结构的安全性^[1]。

课题项目：2023年湖北省住建厅建设科技计划项目（装配式叠合板厚度优化及取消桁架钢筋技术研究）。

作者简介：程芬（1981.12—），女，汉族，湖北天门人，管理学硕士，湖北商贸学院副教授，研究方向：工程管理、土木工程。

（二）提高工程质量

装配式建筑中，加强叠合板厚度控制技术的应用，可以确保叠合板厚度在一定的范围内，使其与其他构件更好地协同工作，共同承受荷载，提高结构的整体稳定性。地震等水平力作用下，合适的厚度能够保证叠合板在地震力作用下，具有良好的变形能力和耗能能力，有效地传递水平力，避免因板的刚度不足或过大导致结构在地震中出现过大变形或局部破坏；叠合板厚度的不均匀往往是导致裂缝产生的重要原因之一，通过严格的厚度控制技术，可以有效减少因厚度不均引起的裂缝，提高叠合板的抗裂性能，保证结构的完整性。此外，精确的厚度控制有助于保证叠合板在生产过程中的模具精度和成型质量，减少因模具变形或磨损等原因造成的尺寸偏差，从而减少质量通病的出现^[2]。

二、装配式叠合板厚度控制技术的应用路径

（一）模具优化

1. 模具设计阶段

叠合板是预制构件，相关企业应根据叠合板的设计厚度要求，对模具的型腔深度进行精确计算和设计，考虑混凝土的压缩量、钢筋的放置空间等因素，确保模具型腔深度与叠合板目标厚度相匹配，还应应对模具的边框高度也要精确设计，能对叠合板周边形成有效的约束，边框高度应略高于型腔深度，一般高出3 - 5mm为宜。企业应采用高强度、不易变形的材料制作模具，如优质钢材或铝合金等，对于较大尺寸的叠合板模具，应考虑增加加强肋等结构，进而提高模具的整体刚度，积极设计合理的脱模机构，可以采取液压顶升系统、机械螺杆顶升装置等，如在采用液压顶升系统时，应根据模具的尺寸和混凝土的重量合理配置液压缸的参数，确保顶升力均匀分布，使叠合板能够平稳地从模具中脱离。企业还应应对模具的型腔表面进行光洁度处理，使混凝土在浇筑后能够顺利脱模，一般要求模具型腔表面的粗糙度Ra值不超过3.2 μm ，可以通过打磨、抛光等工艺来实现这一要求，还可以在模具表面涂覆一层脱模剂，减少混凝土与模具之间的粘结力，常用的脱模剂有水性脱模剂、油性脱模剂等。

2. 模具制造阶段

企业应按照设计图纸的要求，采用高精度的加工设备和工艺来制造模具，模具的边框和加强肋等部件应保证其尺寸精度和垂直度，组装模具时使用高精度的测量工具对模具的各个部件进行测量和调整，还应应对模具的关键尺寸进行严格检验，如型腔深度、边框高度、脱模机构的行程等，若发现尺寸偏差超出允许范围（如型腔深度偏差超过 $\pm 0.5\text{mm}$ ），应及时对模具进行修复或报废处理。企业应建立严格的质量管理体系，对模具制造过程中的原材料、加工工艺、装配过程等进行全面质量控制，如钢模具用的钢材，应检查其碳、硅、锰等元素的含量是否符合要求，屈服强度和抗拉强度是否达到设计标准；加工工艺过程中，应对每一道工序进行质量检查，对于采用焊接工艺连接的模具部件，应进行无损检测，确保焊缝无裂纹、气孔等缺陷。此外，企业在装配过程中应对模具的各个连接部位进行紧固检查，防止出现松动

现象，影响模具的整体性能和叠合板厚度控制^[3]。

3. 模具使用阶段

施工现场组装模具时，企业应严格按照模具的组装说明书进行操作，确保模具的各个部件安装到位，连接牢固，组装完成后，使用水准仪检查模具型腔的平整度，使用经纬仪检查模具的垂直度，积极对脱模机构进行调试，检查其是否能够正常工作。企业在调试过程中，模拟脱模过程，观察脱模机构的动作是否同步、顶升力是否均匀，若发现脱模机构有问题，如某个液压缸顶升力不足，要及时进行调整或维修。混凝土浇筑过程中，企业应安排专人对模具进行看守和维护，观察模具是否有漏浆现象，若漏浆严重，应暂停浇筑，对模具进行检查和修复，浇筑现场，可以在模具周围设置警示标志，限制无关人员靠近，并且要求混凝土浇筑设备的管道不要直接撞击模具。混凝土施工中，企业应严格控制混凝土的浇筑速度和振捣方式，浇筑速度不宜过快，一般控制混凝土的浇筑速度在每平方米每分钟0.3 - 0.5立方米，振捣时要采用合适的振捣棒，对于厚度为60mm的叠合板，使用直径为30mm的振捣棒，振捣间距控制在300 - 400mm，振捣时间每个点控制在10 - 15秒，进而保证混凝土密实，同时避免因振捣过度而导致模具变形，影响叠合板厚度。

（二）做好混凝土材料调控工作

1. 原材料选择与质量控制

企业在装配式叠合板厚度控制技术应用中，应根据工程要求和施工条件，优先选用质量稳定、性能可靠的水泥品种，一般强度要求的叠合板可以选用普通硅酸盐水泥，考虑水泥的细度、安定性等指标，对每批进场水泥进行严格的质量检测；选用级配良好、颗粒形状规整的粗骨料，其粒径大小要符合叠合板设计要求，对于较薄的叠合板，粗骨料最大粒径不宜过大，积极对粗骨料的含泥量、泥块含量等杂质进行严格控制，含泥量过高会降低混凝土的强度和粘结性，增加收缩变形。企业在细骨料选择中可以采用中砂，其细度模数应适中，控制含泥量等杂质指标，还应合理选用高效减水剂，在保证混凝土工作性能的前提下降低水灰比，通过试验确定减水剂的最佳掺量，使混凝土具有良好的流动性、粘聚性和保水性，避免因混凝土流淌不均匀导致的厚度差异。企业应根据具体情况，添加引气剂、缓凝剂等外加剂，如缓凝剂可用于调节混凝土的凝结时间，适应不同施工环境和工艺要求，确保在浇筑过程中混凝土保持适宜的工作状态，选用质量合格、细度合适的粉煤灰，进而提高混凝土的稳定性，减少因混凝土收缩或膨胀引起的叠合板厚度变化^[4]。

2. 混凝土配合比设计

企业应依据叠合板的设计强度、施工工艺特点等内容，进行混凝土配合比设计，满足强度要求的前提下，尽量降低水泥用量，减少混凝土的收缩变形，积极保证混凝土具有良好的工作性能，以便于在模具内顺利浇筑和成型。企业应进行大量的混凝土配合比试验，通过试配不同水泥、外加剂等比例的混凝土，测试其坍落度、抗压强度、弹性模量等性能指标，根据试验结果，对配合比进行优化调整，找到最适合叠合板生产的配合比，若混凝土的抗压强度不足，则需要适当调整水泥或矿物掺合料的用量。

混凝土生产过程控制中,企业应采用先进的搅拌设备和合理的搅拌工艺,严格按照设计的配合比进行投料,控制搅拌时间和搅拌速度,使水泥、骨料、外加剂和水等材料充分混合;混凝土运输过程中,采取措施防止混凝土离析和分层,采用搅拌车运输时,控制搅拌车的转速和运输时间。在浇筑叠合板时,应控制好浇筑速度和浇筑高度,避免混凝土冲击力过大导致模具变形或混凝土溅出,可采用分层浇筑的方式,每层浇筑厚度不宜过大,且要在前一层混凝土初凝前浇筑后一层,以保证两层混凝土结合良好,整体厚度均匀。

3. 混凝土性能监测与调整

叠合板生产过程中,企业应现场监测混凝土的性能,通过定期抽检混凝土拌合物,及时掌握混凝土的工作性能变化情况,根据现场监测结果,对混凝土配合比或生产工艺进行动态调整,若混凝土的温度过高,可能会加速水泥水化反应,导致凝结时间缩短,影响浇筑和成型效果,此时可通过添加冰屑等降温措施来降低混凝土温度。此外,企业应在叠合板各个部位安装先进的传感器,构建基于人工智能的监测平台,进而提高监测效果。

(三) 改进生产工艺

1. 改进钢筋加工以及脱模工艺

企业在生产工艺改进中,应引入先进的技术,关注每个施工环节的处理,钢筋加工中,严格按照设计要求进行下料和弯曲成型,使用数控弯箍机、调直切断机等专业的钢筋加工设备,提高钢筋加工的精度和效率。钢筋绑扎中,应注意绑扎点的分布和绑扎力度的均匀性,尽量减少绑扎丝的外露长度,积极通过设置马凳筋等措施来加强两层钢筋网片的稳定性^[5]。

2. 加强后期养护与检测反馈

混凝土浇筑完成后,企业应根据混凝土的配合比、环境温度

和湿度等因素,制定合理的养护制度,一般情况下,应在混凝土终凝后及时进行覆盖保湿养护,以防止混凝土表面水分蒸发过快,产生干缩裂缝。养护时间应根据混凝土的强度增长情况确定,一般不少于7天,养护期间,应保持养护环境的湿度和温度相对稳定,可采用洒水、覆盖湿布或塑料薄膜等方法进行养护。此外,企业还应在当前时代背景下,将先进的技术应用在生产过程中,建立完善的质量检测体系,对叠合板的厚度进行全程监控和检测,可以利用超声波测厚仪等无损检测设备对叠合板的厚度进行非接触式检测;根据质量检测的结果,及时对生产工艺进行调整和优化,若发现叠合板的厚度存在偏差,要分析原因,找出问题所在,采取相应的措施进行改进。若是钢筋布置不当引起的厚度变化,应重新检查和固定钢筋的位置,通过不断地反馈和调整,使生产工艺逐渐完善,确保叠合板的厚度能够得到有效控制。

三、结束语

综上,装配式建筑的发展,其叠合板应用日益广泛,其厚度控制问题成为影响结构性能和施工质量的关键内容,企业在确定叠合板的厚度时,应充分考虑预制部分和现浇部分的协同工作性能,明确标注叠合板的预制层和现浇层的厚度要求,并考虑到施工过程中的各种误差因素,设计时预留一定的厚度调整余量。此外,企业还应制作高精度的模具,严格控制混凝土的配合比,预制构件生产中建立严格的质量检测制度,进而通过一系列的措施,保障装配式建筑品质。

参考文献

- [1] 林飞鹤. 装配式叠合板施工技术应用研究 [J]. 陶瓷, 2024, (12): 161-164.
- [2] 刘春岑. 叠合板施工技术在装配式建筑结构中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(21): 64-66.
- [3] 高谦. 装配式叠合板厚度控制技术研究 [J]. 工程质量, 2024, 42(02): 80-83+87.
- [4] 甘正正. 装配式建筑结构中叠合板施工技术研究 [J]. 中国高科技, 2022, (21): 68-70.
- [5] 姜新新. 装配式建筑中关于叠合板厚度的控制块 [J]. 中国住宅设施, 2021, (05): 16-17.

国家计量基准自主可控能力建设路径探索

张楠

北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076

DOI:10.61369/ETQM.2025100027

摘 要 : 国家计量基准是重要技术基础设施, 关乎各行业测量精准性。本调研报告深入学习相关指示批示精神, 立足新发展阶段, 从四方面分析加强其自主可控能力建设的重要意义, 并深入剖析现状: 185项计量基准中, 完全自主可控的仅占21.6%, 部分自主可控占50.8%, 不能自主可控占22.2%, 暂停使用或改造的占5.4%。调研发现, 我国计量基准自主可控能力不足, 原因有相关制造业产业链薄弱、核心元器件生产能力退化、缺乏市场迭代、研发难度大、人才队伍薄弱、面临国际技术封锁、体系开放性不够等。为此, 报告提出四条建议: 加强政策引导, 优化产业链布局; 加强项目攻关; 增强体系开放性; 培养创新人才。调研还形成台账, 为强化能力建设和争取经费投入提供支撑。

关 键 词 : 计量; 自主可控能力; 政策引导

Exploration of the Path for Building the Capacity for Independent Control of National Metrological Standards

Zhang Nan

Beijing Institute of Aerospace Metrology and Testing Technology, Beijing 100076

Abstract : National metrological standards are important technical infrastructure and are related to the measurement accuracy of various industries. This research report thoroughly studies the spirit of relevant instructions and comments, and based on the new stage of development, analyzes the significant meaning of strengthening its independent and controllable capacity building from four aspects, and deeply dissects the current situation: Among the 185 measurement standards, only 21.6% are fully independently controllable, 50.8% are partially independently controllable, 22.2% are not independently controllable, and 5.4% have been suspended from use or are undergoing renovation. Research has found that China's capacity for independent control of measurement standards is insufficient. The reasons include weak industrial chains in related manufacturing industries, degraded production capacity of core components, lack of market iteration, high difficulty in research and development, weak talent teams, facing international technological blockades, and insufficient openness of the system. To this end, the report puts forward four suggestions: strengthen policy guidance and optimize the layout of the industrial chain; Strengthen project breakthroughs; Enhance the openness of the system; Cultivate innovative talents. The research also formed a ledger, providing support for strengthening capacity building and securing financial input.

Keywords : measurement; independent controllability; policy guidance

一、加强国家计量基准自主可控能力建设的重要意义

党的十八大以来, 习近平总书记对计量能力建设作出了一系列重要指示批示, 特别要求做实计量、建设好维护好使用好计量基准、计量标准等国家计量战略资源。习近平总书记多次强调, 关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的, 把关键核心技术牢牢掌握在自己手中^[1]。国家计量基准是国民经济和社会发展的关键技术基础设施, 是我国法定最高测量能力的标志, 也是统一全国量值的最高依据, 其技术水平关乎经济社会各行各业的精准性, 是科技创新、产业发展、国防建设、民生保障的重要基础。

推动和实现计量基准中关键设备和关键技术自主可控及国产化发展, 是我国未来计量发展乃至维护国家安全急需解决的战略问题。

1. 国家计量基准是国家的重要战略资源, 必须自主可控。计量基准的战略地位是由其在国家质量技术基础中的独特位置和在经济社会发展, 以及在国家安全中发挥的重要作用决定的。计量基准位于国家量值传递(溯源)体系的源头, 具有很强的法制性、权威性和不可替代性, 全国的各级计量标准器具和工作计量器具的量值, 都需要直接或者间接地溯源到计量基准^[2]。计量基准能力水平关系到产业安全、粮食安全、科技安全、能源安全、

作者简介: 张楠(1990.04—), 女, 汉族, 北京人, 硕士, 工程师, 研究方向: 计量发展。

生态安全、生命安全、生物安全等各领域安全，必须牢牢把握自己手中，实现自主可控。比如，温度测量范围的延伸和精度的提升，将能准确监测核反应堆内和航天器表面的极高、极低温度的微小变化，对保障核安全和航天安全具有重要意义；在金融领域，时间精确是金融结算的关键，股票1秒的交易量要超过10万笔，每笔交易的“时间戳”精度至少达到微秒级^[3]。

2.以量子计量基准研究为代表的技术战场成为大国争夺的焦点。2018年计量量子化变革以“恒定不变”的基本物理常数取代实物作为基准，可以随时随地地高精度复现，打破了由国际计量局作为唯一权威标准的格局，谁占领了计量体系制高点，其他国家将与之进行“对标”校准，导致测量体系受制于人^[4]。当前，世界各国把强化计量发展作为塑造竞争优势的重要战略选择，积极抢占未来计量发展制高点和计量国际治理话语权，计量基准技术实力的争夺成为大国博弈的重要战场。比如，2021年美国国家计量院未来法案明确，美国政府将于2022到2026财政年度累计拨款给美国国家计量院70亿美元，其中平均每年用于科学研究和测量活动的拨款约10.53亿美元，主要用于人工智能、生物特征、温室气体、工程生物学等方面的测量研究和新型量值传递溯源技术研究^[5]。在我国，比如在质量基准“千克”定义的量子化研究方面，中国计量科学研究院完成的“能量天平质量量子基准研究”课题，使我国首次具备普朗克常数测量和千克基准稳定性绝对测量能力，成为国际上第4个可以独立测量普朗克常数的国家，步入国际计量前沿研究行列。该项研究对于建立我国独立自主的量子质量基准和计量体系，维护技术主权，应对国际单位制改革，取得“千克”重新定义话语权具有重要意义。量子化霍尔电阻、时间频率等计量基准研究的突破亦是如此。

二、国家计量基准自主可控能力不足的原因

1.相关制造业产业链自主可控能力薄弱。计量基准本身是科学仪器装置演化而来，与制造业能力息息相关。我国制造业产业基础依然薄弱，关键零部件、基础材料和核心元器件依赖进口的局面一时还难以改变。例如，目前我国的高端芯片生产不足，加上近年来西方一些政治势力推动搞技术封锁、科技鸿沟、发展脱钩，导致我国在集成电路产业、通信装备产业、工业软件等部分领域的“卡脖子”问题日益严峻。目前我国在声学、电离辐射、化学、时间频率等领域的国产化设备较少，共有50余项计量基准装置所购置的核心进口设备，与国内厂商的技术指标差距较大，无法在短期内完成国产化替代。新冠肺炎疫情爆发、要素成本上升等因素导致部分加工组装和低端制造环节出现外迁趋势，致使我国制造业存在占比较早较快下降、空间布局不合理、区域发展不平衡不协调等问题^[6]。尽管我国拥有最完整的工业体系和“世界制造中心”地位，但是“大而不强”“全而不优”问题仍然突出。

2.部分计量基准核心元器件生产能力退化。部分计量基准的核心元件是20世纪由我国企业生产加工，但受市场以国家计量基准自主可控能力提升台账及技术人员退休等因素的影响，在国内

甚至于全球已经没有该类核心器件的生产和销售。原有制造厂家在市场的压力下，已经倒闭或转产，原有的仪器设备工作状态无法维持，原有的技术能力面临失传的境地。

3.部分计量基准核心仪器缺乏市场迭代。在部分国家计量基准的核心仪器中，也存在着我国具备一定的技术积累，但计量基准所需的核心仪器和元件缺乏市场，国内厂家无法承受研发和生产的成本，导致少数国外企业垄断全球该类高端设备的市场^[7]。即使短期通过国内厂商与科研院所的联合攻关，实现了核心仪器和元件的国产化，但联合攻关项目结束后，如无法持续投入，生产厂商在短期用市场维持住相关能力，将来还将面临可控能力失传的困境。

4.部分计量基准核心部件研发难度和风险大。随着我国测量能力的整体提升，精密仪器研发有了必要基础，但相关学科依然大量缺乏具有专业背景及研发能力的人才团队和布局合理的人才梯队，人才储备跟不上发展需求，计量基准核心部件研制难度大，研发周期长。和我国面临的“芯片”难题一样，国家计量基准自主可控能力提升台账很难在短期内，通过科技攻关，一次到位解决计量基准自主可控的难题，还需要较长时间的技术积累^[8]。

三、相关意见建议

通过对我国计量基准自主可控现状和面临的问题分析可以看出，在全球面临“百年未有之大变局”的国际环境下，作为计量基准的“原材料”—国产精密仪器产业在技术、市场、竞争等方面存在差距，需要进一步加强顶层设计，统筹协调，整合国家、行业、企业等多方面资源，抓住重点领域和薄弱环节聚力攻关，在“十四五”期间继续加大计量基准自主可控支持力度，开展若干计量基准自主可控专项项目，保障国家计量基准量值溯源安全。

1.加强政策引导，优化制造业产业链布局。抓住计量基准国产仪器替代关键“卡点”精准施策。在国家层面专门组织相关技术人员进行全面系统梳理，找准计量基准主设备和配套设备所涉及的产业链、供应链的缺失环节，明确发力重点集中攻关。调整目前的产业扶持政策，“量身定做”服务计量基准等“大国重器”的产业政策，提高市场主体参与计量基准研制的积极性，在风险可控的前提下，采取“揭榜挂帅”工作机制，面向社会公开征集技术解决方案。坚持有所为，有所不为，重点加大对相关领域研究的支持力度，把有限资源优先投入最为急需的领域。对严重依赖进口且影响产业安全的高端精密仪器，给予经费支持，推动计量基准保存单位开展国产设备升级替代以及国产设备替代国外设备的技术考核和试验验证^[9]。在国家层面，设立计量基准专项研发、维护和技术改造经费，支持计量基准保存单位开展技术研究，重点组织开展关键设备、核心材料、先进工艺的技术攻关，补足基础科学研究短板，努力突破技术瓶颈，加快构建自主可控、安全可靠的国内生产供应体系，实现关键核心环节的自主可控。

2.加强项目引导,加大核心技术研发力度。开展针对我国原有已具备基准核心设备和元器件自主可控能力恢复与提高专项。联合原有厂商相关技术人员,抓紧时间恢复基准备件的生产能力,防止原有核心技术失传,并在此基础上,充分利用现代先进技术,进行自主可控能力升级。设立长期自主可控研究性项目。针对国内技术基础研究尚不充分的领域,并同步开展其他替代技术方案的探索,支持国家计量基准自主可控能力实现弯道超车。加强计量基础理论和核心技术的原始创新。实施“量子度量衡”计划,重点研究基于量子效应和物理常数的量子计量技术及计量基准、标准装饰小型化技术,突破量子传感和芯片级计量标准技术,形成核心器件研制能力。研究人工智能、生物技术、新材料、新能源、先进制造和新一代信息技术等领域精密测量技术^[10]。开展测量不确定度、测量程序与有效性评价、计量作用机理和效能评价等理论研究。

针对相对成熟技术开展联合攻关。联合国内有实力的科研院所及生产厂商的研发力量,开发国家计量基准专用计量仪器仪表及计量级传感器,逐步提高我国计量基准自主可控度。建立计量基准装置备份试验平台,针对无法一步到位实现替代的设备,可先采用项目支持研制的自主可控设备建立备份基准装置,并长期考察备份基准装置的稳定性和可靠性,持续联合研发并不断迭代升级,推进该类基准早日实现自主可控。对未来15-30年内可能的计量技术革命进行分析预测,提前锁定未来发展方向,采用换道超车的方式,提前布局、提前谋划,打造部分领域的先发优势。形成核心技术领先欧美、重点技术比肩欧美的态势。

3.增强国家计量基准体系的开放性,不断提升计量基准技术能力水平。按照计量法和计量基准管理办法的相关要求,创新国家计量基准全链条管理机制,建设好维护好使用好计量基准,全面系统审视和梳理我国计量基准体系,建立并完善计量基准建立、改造、维护和管理的科学评价和国家报告制度,以开放、合

作、共享为原则完善管理机制,切实发挥出国家计量基准战略资源在国民经济和社会发展中的战略作用。集结优势技术力量,发挥新型举国体制优势,发动政产学研各方面的精锐力量,依托重大科技创新示范区和实力雄厚的科研机构,建立国家计量基准策源地,鼓励更多有能力的大专院校、科研院所等技术机构参与研究和申请建立国家计量基准,探索建立计量基准战略备份制度。进一步优化计量基准建设管理工作机制,支持国家战略科技力量、计量技术机构和科技企业牵头组建若干计量创新联合体,推动国家计量基准与原创性、引领性基础研究融通发展,努力突破技术瓶颈,加快补齐我国计量基准技术短板,努力在全球计量竞争版图中占据一席之地。

4.培养创新型科技人才,完善计量人才发展机制。人才是第一资源。紧盯国际前沿,培育一批一流计量科学家,支持一批计量科技创新团队建设。鼓励计量技术机构创新岗位设置,建立首席计量师、首席工程师、首席研究员等聘任制度。完善创新人才培养模式,强化科学精神和创造性思维培养,加强科教融合、校企联合等模式,培养早就一大批青年科技人才。加强计量专业领域技术带头人和青年人才队伍培养与引进,吸引科技领军人才和高效优秀毕业生从事计量研究工作。赋予科研团队在人才引进、职称晋升、人才评价、经费使用等方面的更大自主权,让团队有足够多的资源和能力激励科研人员“啃硬骨头”,从而使理论研究和攻关协调发展。加快完善人才发展机制,大力激发人才创新创造活力。加强计量领域相关职业技能等级认定,改革注册计量师的职业资格管理模式,推进注册计量师职业资格与工程教育专业认证、职称、职业技能等级、职业教育学分银行等制度有效衔接。建立与完善高层次人才引进机制,打通引进使用流程中的痛点,形成有利于人才施展的科研环境。建立国际组织计量人才库和国际计量合作专家团队,支持科技人员开展多层次国际计量交流合作。

参考文献

[1] 郑俭,王语欣.国家档案局科技项目计量分析及发展建议[J].科技创新发展战略研究,2024,8(06):61-70.
[2] 王江南,龚亮,卢晓华.以国家计量发展规划引领标准物质高质量发展[J].中国计量,2024,(12):47-50+57.
[3] 纯水电导率量值国际计量互认结果首次公布[J].上海质量,2024,(11):87.
[4] 31项国家计量技术规范发布[J].上海质量,2024,(11):86.
[5] 崔靖雨.国家标准与行业标准的原油静态计量对比分析[J].石油化工自动化,2024,60(06):89-92.
[6] 国家市场监督管理总局开展计量标准监督检查工作[J].铁道技术监督,2024,52(09):43.
[7] 国家轨道衡计量站拓展大质量计量服务新领域[J].铁道技术监督,2024,52(09):48.
[8] 国家新能源汽车储能产业计量测试中心简介[J].中国计量,2024,(09):31-32.
[9] 国家市场监督管理总局发布33项国家计量技术规范[J].铁道技术监督,2023,51(11):71.
[10] 陈岳飞,赵鑫,王理,李刚,陈川,于连超.创新驱动发展战略下计量科技创新实现路径研究[J].中国测试,2023,49(09):23-30+62.

浅谈如何通过现场管控开展高后果区管理提升工作

韩松松, 杨文涛, 王卓, 王宁

国家管网集团北京管道有限公司, 北京 101500

DOI:10.61369/ETQM.2025100028

摘 要 : 本文聚焦如何通过现场管控提升高后果区管理工作。首先对高后果区的范围与等级划分、现有现场管控措施进行分析, 识别出范围与等级划分不精准、管控措施存在漏洞、责任落实不到位、风险辨识与应对能力弱、应急处置体系不完善及人员管理有短板等问题。进而从强化源头管控与风险辨识、完善现场管理制度与流程、优化物防与技防设施、提升人员管控与能力建设、加强应急准备与处置能力等方面提出具体的现场管控提升策略与措施。最后从组织领导与责任落实、资金与资源投入、监督检查与考核评价、信息共享与协同联动等维度构建实施保障与推进机制, 旨在全面提升高后果区的管理水平, 保障区域安全。

关 键 词 : 高后果区; 现场管控; 管理提升; 风险辨识

A Brief Discussion on How to Enhance High-Consequence Area Management Through On-Site Control

Han Songsong, Yang Wentao, Wang Zhuo, Wang Ning

Beijing Pipeline Co., Ltd., National Pipeline Group, Beijing 101500

Abstract : This paper focuses on how to enhance high-consequence area management through on-site control. First, it analyses the scope and classification of high-consequence areas, as well as existing on-site control measures, identifying issues such as imprecise scope and classification, gaps in control measures, inadequate implementation of responsibilities, weak risk identification and response capabilities, an incomplete emergency response system, and shortcomings in personnel management. Subsequently, specific strategies and measures for enhancing on-site control are proposed from the following aspects: strengthening source control and risk identification, improving on-site management systems and processes, optimising physical and technical security facilities, enhancing personnel control and capability building, and strengthening emergency preparedness and response capabilities. Finally, an implementation guarantee and promotion mechanism is established from the dimensions of organisational leadership and responsibility implementation, funding and resource allocation, supervision, inspection, and evaluation, as well as information sharing and collaborative coordination, aiming to comprehensively enhance the management level of high-consequence areas and ensure regional safety.

Keywords : high-consequence areas; on-site control; management improvement; risk identification

引言

随着城市化进程加快与各类基础设施的密集布局, 高后果区周边环境日趋复杂, 风险因素呈现多元化、叠加化特征, 传统的管理模式已难以满足新形势下的安全管控需求。现场管控作为高后果区管理的“最后一公里”, 是风险识别、隐患排查、应急响应等工作的前沿阵地, 其效能的强弱直接决定了风险防控的实际效果。当前如何通过科学有效的现场管控措施, 精准识别风险、堵塞管理漏洞、提升应急处置能力, 成为推动高后果区管理提质增效的核心课题。本文立足现场管控视角, 结合高后果区范围与等级划分的实际需求, 系统分析现有管控措施的短板与不足, 针对性提出优化策略与实施保障机制, 旨在为构建全链条、立体化的高后果区管理体系提供实践参考, 助力实现风险可控、隐患可治、安全可保的管理目标。

一、现状分析与问题识别

（一）高后果区范围与等级划分

范围界定需结合管道及设施走向，综合考量周边人口密度、建筑物类型及自然环境特征，同时严格遵循国家及行业相关标准规范中的具体条款与技术参数。以地理坐标为基准，辅以道路、河流等标志性地理要素，精准划定高后果区的四至边界，绘制清晰的区域分布图；同步统计区域内人口数量、各类建筑物的数量及空间分布情况，并明确周边重要基础设施的具体位置。等级划分需以事故可能引发的人员伤亡规模、经济损失额度、环境破坏范围等关键因素为核心，确立量化分级指标。参考行业通用的风险等级划分模式，明确不同等级对应的风险程度与影响范围。针对高后果区Ⅰ级，风险较小，可通过增加巡线频次保证安全。高后果区Ⅲ级执行最严格管理模式，如已形成重大安全隐患，必须采取改线方式消除安全隐患^[1]。

（二）现有现场管控措施评估

制度建设层面，需系统梳理相关规章制度，从完整性、科学性、合规性三个维度开展全面评估^[2]。流程执行评估聚焦巡线流程、作业审批流程、隐患排查整改流程，人员执行评估通过现场提问、专项考核等方式掌握作业人员对管控措施的知晓度与掌握程度，通过现场观察，研判作业人员是否严格遵守管控要求、有无习惯性违章行为，同时评估管理人员对现场的监督检查力度及对违规行为的处置效能。设施设备评估涵盖物防设施、技防系统、应急设施设备^[3]。措施有效性分析需综合多方面数据：统计一定周期内安全事件及事故发生数量，对比管控措施实施前后的风险变化趋势，广泛收集作业人员、管理人员及周边相关方的反馈意见，以此精准研判现有管控措施的合理性与实际成效。

（三）存在的主要问题与薄弱环节

范围与等级划分环节存在明显短板，区域范围界定精准度不足易出现漏判或误判，等级划分缺乏科学性导致管控资源错配，且未建立动态更新机制，难以适应周边环境变化带来的风险波动。管控措施层面，制度体系存在漏洞且条款衔接不畅形成管理盲区，流程执行刚性不足存在简化操作、违规作业等现象，物防与技防设施投入滞后，部分设备老化失修却未及时更换，防控效能衰减^[4]。责任落实机制上，部门职责划分模糊存在管理交叉或真空地带，岗位责任制流于形式未真正落地见效，且缺乏闭环的责任追究机制难以形成有效约束。风险辨识与应对能力薄弱，风险辨识仍沿用传统单一方法难以实现全域覆盖和精准识别，管控措施针对性不强、可操作性不足与实际风险场景脱节，未建立常态化风险跟踪与动态更新机制导致防控措施滞后于风险变化。应急处置体系有待完善，应急预案针对性与可操作性欠佳与现场实际需求匹配度低，应急演练频次不足且形式单一难以检验实战能力，应急物资储备数量不足、布局不合理影响响应时效^[5]。人员管理存在明显短板，安全培训缺乏系统性与深度且内容与实战需求脱节，人员准入门槛把控不严使资质审核流于形式，人员流动性较大导致管控工作连续性与稳定性受影响。

二、现场管控提升策略与措施

（一）强化源头管控与风险辨识

强化源头管控与风险辨识，需构建高后果区风险定期排查机制，结合区域特点与过往事故案例，制定详细排查计划，明确排查周期、内容与责任主体，确保无遗漏。引入无人机巡检、红外检测、大数据分析等先进技术，提高风险辨识的精准度与效率，对复杂地形或隐蔽区域重点监测^[6]。针对辨识出的风险，组织专业人员评估，依据风险等级、影响范围等制定专项管控方案，明确管控目标、具体措施、责任部门及完成时限，实行风险动态管理，及时更新管控方案。

（二）完善现场管理制度与流程

完善现场管理制度与流程，清晰划分各部门、各岗位在现场管控中的职责，避免交叉与空白，签订责任状确保责任落实到人^[7]。优化巡检流程，科学规划路线，合理设定频率，采用电子化记录工具规范记录内容与格式，建立快速报告通道；简化作业审批流程，同时严格审核标准，确保安全与效率平衡。建立奖惩制度，对严格执行管控要求、及时发现排除隐患的予以奖励，对违规操作、失职渎职的严肃处罚，通过定期检查与考核保障制度落地。

（三）优化现场物防与技防设施

优化现场物防与技防设施，根据高后果区等级与风险特点，合理设置隔离栏、防护墙等物理隔离设施，确保牢固可靠；在关键位置设置醒目的警示标识，标注风险类型、禁止行为等信息，定期检查维护，保证清晰完整^[8]。全面推广视频监控系统实现全覆盖，安装高精度泄漏检测设备与智能预警系统，实时监测异常情况并自动报警；安排专业人员定期检修维护设施设备，根据技术发展及时升级更新，提升防控能力。

（四）提升现场人员管控与能力建设

提升现场人员管控与能力建设，严格执行现场作业人员准入制度，核查资质证书与培训记录，不符合要求者严禁上岗^[9]。制定系统培训计划，定期开展高后果区安全知识、操作技能与应急处置培训，采用理论授课、案例分析、实操演练等多种形式，确保人员熟练掌握相关内容。通过安全例会、事故警示教育等方式，强化现场作业人员的安全意识与责任意识，建立个人安全绩效档案，将表现与奖惩、晋升挂钩。

（五）加强应急准备与现场处置能力

加强应急准备与现场处置能力，依据高后果区风险特点与可能发生的突发事件，制定详细应急预案，明确应急组织架构、职责分工、处置流程与救援措施。定期组织实战化演练，检验预案可行性并及时修订完善。按照应急预案要求，储备充足的应急救援物资与设备，如灭火器、急救药品、破拆工具等，规范存放并定期检查维护，确保处于良好状态。建立快速响应机制，明确突发事件报告程序与各部门联动方式，确保接到报警后迅速集结力量赶赴现场，高效开展应急处置工作，降低事故损失。

三、实施保障与推进机制

（一）加强组织领导与责任落实

为切实推进高后果区管理提升工作，成立由企业高层领导率

头、各相关部门负责人共同参与的高后果区管理提升工作领导小组^[10]。领导小组肩负整体工作的统筹规划、重要决策制定以及重大问题的协调解决等核心职责，下设专门工作执行机构，具体负责各项工作的组织实施、进度跟踪与信息反馈。为确保任务有效落实，将高后果区管理提升工作的各项任务细化分解至相关部门及具体岗位，并制定详尽的任务清单与责任清单，明确每一项工作的责任主体。此外，建立严格的责任追究制度，对工作推进不力、未按时完成任务或出现重大问题的部门及个人，依规进行严肃问责，以保障所有工作部署落到实处。

（二）保障资金与资源投入

根据高后果区管理提升工作的总体规划和具体任务，进行全面的资金需求测算，涵盖现场管控设施升级改造、技术研发与应用、人员培训、应急物资储备等各个方面，制定科学合理的资金预算方案。积极争取企业内部的资金支持，将高后果区管理提升工作所需资金纳入企业年度预算，并确保预算资金及时足额拨付。同时探索多元化的资金筹措渠道，如申请政府相关专项补贴、与相关合作单位共同投入等。合理调配人力、物力等资源，优先保障高后果区管理提升工作的需要。选派经验丰富、专业能力强的人员参与到工作中，确保人力资源的充足和高效利用。整合现有设备、物资等资源，避免资源浪费，提高资源的使用效率。

（三）建立监督检查与考核评价机制

建立常态化的监督检查机制，明确监督检查的主体、内容、频率和方式。监督检查主体可以包括领导小组、内部审计部门、专门的监督检查组等；检查内容涵盖现场管控措施的落实情况、制度执行情况、工作任务的完成进度和质量等；检查频率根据工作的重要性及进展情况合理确定，可采取日常检查、专项检查、定期检查相结合的方式。制定科学完善的考核评价指标体系，指标应涵盖工作成效、安全绩效、任务完成情况等多个维度，确保考核评价的全面性和客观性。定期对各部门和相关人员的工作进行考核评价，考核结果与奖惩机制挂钩，对表现优秀的部门和个人给予表彰和奖励，对考核不合格的进行约谈、通报批评，并督促其限期整改。

（四）强化信息共享与协同联动

建立高后果区管理信息共享平台，进行全面的需求分析，结合各部门在高后果区管理中的实际工作内容，确定平台需整合的信息类型。除了风险排查数据、现场巡检记录、设备运行状态、

应急处置情况外，还应纳入管道腐蚀数据、第三方施工信息、气象数据等与高后果区安全相关的各类信息。在信息共享范围上，明确哪些信息属于内部共享、哪些可与外部单位共享，以及不同类型信息的共享级别。权限设置方面，根据各部门和人员的工作职责，赋予不同的信息访问和操作权限，确保信息不被随意泄露和篡改。加强与地方政府相关部门的沟通与协作，建立多层次的定期沟通协调机制。可以每月召开一次工作例会，由企业和政府相关部门的负责人参加，通报高后果区管理工作的进展情况、存在的问题以及下一步工作计划。针对跨区域、跨部门的复杂问题，成立专项工作组，共同研究解决方案。与周边企业、社区建立良好的互动关系，签订安全合作协议，明确双方在高后果区安全管理中的责任和义务。定期开展联合安全检查，共同排查区域内的安全隐患，分享隐患整改经验。每季度组织一次联合应急演练，模拟不同类型的突发事件，检验双方的应急响应能力和协同配合水平，通过演练发现问题并不断完善应急预案。在社区宣传方面，定期开展高后果区安全知识宣传活动，通过发放宣传资料、举办讲座、设置宣传栏等方式，提高社区居民的安全意识，鼓励居民参与到高后果区的安全监督中来，形成多方参与、协同联动的管理格局，全面提高高后果区整体安全管理水平。

四、结束语

高后果区管理是保障公共安全、生态环境和经济社会稳定发展的关键环节，现场管控作为其中的核心抓手，其效能直接决定了高后果区风险防控的实际成效。本文通过对现状的深入剖析、问题的精准识别，以及针对性提升策略与实施保障机制的系统构建，为通过现场管控开展高后果区管理提升工作提供了清晰路径。

在实际推进过程中，需始终坚持问题导向与目标导向相统一，动态适配高后果区风险变化特征，持续优化现场管控体系。各相关主体应强化协同联动，将各项措施落到实处，不断提升风险预判能力、现场处置能力和长效管理能力。唯有如此，才能有效降低高后果区安全风险，筑牢安全防线，为经济社会高质量发展提供坚实的安全保障。未来，还需在技术创新应用、管理模式优化等方面持续探索，推动高后果区管理水平迈向新台阶。

参考文献

- [1] 施昊彤. 长输管道高后果区法规标准及管理现状探讨 [J]. 石油和化工设备, 2023, 26(07): 9-11.
- [2] 邱小群, 刘科, 杨嘉怡, 等. 长输燃气管道高后果区规划管控方法研究 [J]. 工程建设与设计, 2023, (02): 77-79. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.01.225.
- [3] 李枢一, 全佳, 刘颜, 等. 高后果区输气管道失效事故防范 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(19): 65-67.
- [4] 袁海, 王景巍, 刘小晖. 油气管道高后果区管理探讨 [J]. 云南科技管理, 2021, 34(01): 35-36. DOI: 10.19774/j.cnki.53-1085.2021.01.008.
- [5] 杨帆, 薛伟. 现代地理信息技术在管道高后果区管理中的综合应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(09): 115-117.
- [6] 陈思彬, 兰现明. 环境敏感型高后果区风险评价与管控实践 [J]. 化工管理, 2020, (06): 65-66.
- [7] 章跃平, 赵嘉程, 席有强. 管道建设期及运营期对高后果区的管控措施探讨 [J]. 科技风, 2019, (22): 239-240. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.201922206.
- [8] 张圣柱, 冯晓东, 王旭等. 中国油气管道高后果区现状与全过程管理体系 [J]. 油气储运, 2021, 40(5): 521-526, 544. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.05.006.
- [9] 黄韶丹. 武汉市油气管道高后果区监管研究 [D]. 华中科技大学, 2019.
- [10] 徐旭龙, 田宝林, 熊军等. 安塞油田管道高后果区安全管理的初期做法 [J]. 油气田地面工程, 2020, 39(1): 56-61. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2020.01.011.

超高层建筑深基坑支护中自适应支护新工艺的探索

黄超恒

湖北山河汇建设工程有限公司, 湖北 武汉 430062

DOI:10.61369/ETQM.2025100029

摘 要： 超高层建筑深基坑施工环境复杂，传统支护方法难以应对突发变化。本文探讨一种新型“自适应支护”工艺。该工艺通过在支护结构中安装传感器，实时监测压力、位移等关键数据，并连接自动控制系统。当监测数据异常时，系统能快速调整支撑力度或采取其他补偿措施，主动应对风险。这种技术显著提升了基坑施工的安全性和可控性，是未来深基坑工程的重要发展方向。

关 键 词： 深基坑；自适应支护；实时监测；自动控制

Exploration of a New Adaptive Support Technology for Deep Excavation Shoring in Super-High-Rise Building Construction

Huang Chaoheng

Hubei Shanhehui Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430062

Abstract： The construction environment for deep excavations in super-high-rise buildings is complex, and traditional shoring methods struggle to cope with sudden changes. This paper explores a novel ‘adaptive support’ technique. This technique involves installing sensors in the support structure to monitor key data such as pressure and displacement in real time, and connecting them to an automatic control system. When monitoring data deviates from normal ranges, the system can quickly adjust support force or implement other compensatory measures to proactively address risks. This technology significantly enhances the safety and controllability of foundation pit construction and represents an important future development direction for deep foundation pit engineering.

Keywords： deep foundation pits; adaptive support; real-time monitoring; automatic control

引言

城市中超高层建筑日益增多，其深基坑开挖深度大、周边环境复杂，安全风险高。传统基坑支护设计通常基于前期地质勘探数据，一旦施工中遇到未预料的地层变化、地下水波动或邻近施工干扰，原有支护可能不足以应对，容易引发变形过大甚至坍塌事故。事后补救不仅代价高，且效果有限。因此，工程界需要一种更灵活、更主动的支护方式。自适应支护新工艺应运而生，它让支护结构具备感知变化和即时调整的能力，变被动防御为主动适应，为复杂环境下的深基坑安全提供新的技术保障^[1]。

一、传统支护方法的困境

超高层建筑的深基坑开挖，对支护结构的安全性和稳定性要求极高。但传统方法在实际应用中，逐渐暴露出难以克服的局限性。

（一）设计依赖前期数据

传统支护设计完全基于施工前的地质勘探数据，而勘探点通常间隔20-50米布置，难以全面反映地层变化。勘探钻孔数量有限，可能遗漏局部软弱夹层或孤石等异常地质体。施工过程中若遇到未勘探到的流砂层或膨胀性黏土，原设计的安全系数可能不足。由于支护方案在施工前就已审批确定，现场发现地质差异时，修改设计需要重新计算、报审，耗时长达数周。在此期间，

施工单位只能按原方案继续施工或暂停等待，既影响进度又增加风险。即便后期调整设计，也常因施工条件限制而难以彻底优化。

（二）应对变化能力弱

传统支护结构采用刚性设计，无法自动适应施工中的动态变化。当基坑周边突然增加临时堆载（如土方堆放、混凝土泵车作业）时，支护桩承受的侧向压力可能超出设计值，但结构本身没有调节机制。地下水位受雨季或邻近工程降水影响骤升时，传统止水帷幕可能出现渗漏，而支护体系缺乏实时止水补偿功能。对于邻近工地打桩引起的振动传力，或重型车辆频繁通行产生的动荷载，传统支护只能被动承受，无法通过刚度调整来分散应力。这些突发情况往往超出原设计工况考虑范围。

（三）风险发现滞后

传统监测依赖人工定期巡检，监测频率通常为1-3天/次。当支护桩位移速率突然加快时，可能要到下次巡检才能发现。电子测斜仪等自动化设备虽能实时采集数据，但报警阈值设置较保守（通常为设计值的70%），等触发报警时变形已较明显。现场人员判断风险需要综合多项监测数据，从发现异常到决策加固常需数小时至数天。在此期间，基坑可能持续变形，导致后期加固成本成倍增加。某些情况下，等看到支护结构明显开裂或周边地面沉降时，事故已难以逆转。

二、自适应支护新工艺的核心思路

为了解决传统方法的不足，自适应支护技术应运而生。其核心是让支护结构“活”起来，具备感知和反应能力。

（一）实时监测系统

深基坑施工过程中，支护结构各关键部位需布置多种类型传感器形成监测网络。支护桩墙内部安装土压力盒，采用振弦式或光纤传感技术，量程通常选择0.1-2MPa，精度达到 $\pm 0.5\%FS$ 。支撑连接点布置应变计和倾角仪，监测杆件轴力变化和节点转角，采样频率不低于1Hz。基坑周边地表设置沉降观测点和测斜管，配合全站仪进行位移监测。地下水位监测采用投入式液位传感器，量程覆盖基坑开挖深度的1.5倍。所有传感器通过工业级总线或无线传输模块组网，防护等级达到IP68，确保在潮湿、振动环境下稳定工作。监测数据以1分钟为周期持续上传，形成完整的支护结构受力变形数据库。

（二）数据分析与风险识别

监测数据通过专用光缆传输至现场控制中心，采用工业计算机搭建数据处理平台。系统内置有限元计算内核，将实时监测数据与设计允许值进行比对分析。当土压力变化速率超过5kPa/h，或支撑轴力偏差达设计值的15%时，自动触发二级预警。软件集成机器学习算法，可识别支护桩位移的时空发展规律，预测未来8小时变形趋势。风险等级分为蓝黄橙红四级，对应不同的处置流程。系统自动生成包含风险位置、发展趋势和处置建议的报告，通过BIM模型三维可视化展示，供工程技术人员决策参考^[2]。

（三）动态调控机制

调控系统由可编程控制器、液压伺服机构和应急执行单元组成。液压支撑配备比例阀和压力传感器，调节精度 $\pm 2kN$ ，响应时间小于30秒。预应力锚杆安装液压千斤顶和荷载传感器，可实现50kN级差的张力补偿。局部加固采用双液注浆系统，配备流量计和压力传感器，注浆半径可控在0.5-1.5m范围。执行指令分为自动模式和人工确认模式，前者适用于预设参数的常规调整，后者用于重大风险处置。所有调控操作记录时间、位置和调整量，与监测数据形成闭环反馈。

三、实现自适应支护的关键技术点

（一）传感器选型与布置

基坑工程中的传感器需要满足特殊环境下的工作要求。在选型时需重点考虑防水防潮性能，通常选用IP68防护等级的传感器以应对地下水渗透。振动环境要求传感器具备抗机械冲击能力，

一般采用不锈钢外壳封装。压力传感器量程需覆盖基坑设计荷载的1.5倍以上，位移传感器精度应达到0.1mm级。布置位置需经过有限元分析确定，通常在支护桩弯矩最大处、支撑节点、基坑阳角等关键位置设置监测点。传感器安装间距根据基坑等级确定，一级基坑每15-20m布置一组，二级基坑可放宽至25-30m。所有传感器在安装前需进行现场标定，确保数据可靠性^[3]。

（二）可靠的数据传输

有线传输选用阻燃铠装电缆，通过预埋在支护结构内的金属线槽实现物理保护，可承受10吨机械压力并具备IP67防水等级。无线传输采用LoRa扩频技术，在基坑每50米布置中继节点，通过跳频机制规避2.4GHz频段干扰，实测传输距离达800米且丢包率低于0.1%。系统通过GB/T17626电磁兼容测试，能抵抗电焊机、塔吊等设备产生的30V/m电磁干扰。主备双通道采用心跳包检测机制，当主通道中断300毫秒内自动切换至4G备用链路，切换过程数据丢失量控制在3个采样点内。传输协议采用改进型MQTT，每个数据包附加CRC-32校验码，错误包通过滑动窗口协议自动重传，实测传输完整率达99.99%。控制中心部署双机热备缓存服务器，可存储72小时原始数据，网络中断时仍能维持系统运行。所有现场设备通过ATEX防爆认证，雷击保护达到IEC61643标准，确保在暴雨等极端天气下正常工作。

（三）智能分析控制系统

系统架构分为数据采集、智能分析和自动控制三个层级。采集层通过OPC-UA协议统一接入各类传感器，支持每秒2000点的并发采集，时延控制在50毫秒内。分析层部署的算法库包含改进的Terzaghi土压力模型、基于LSTM的变形预测模型和极限平衡稳定性模型，计算误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。控制层采用模糊PID算法，根据安全系数动态调节液压支撑压力，调节响应时间不超过2秒。预警系统严格按GB50497-2019设置三级阈值：当监测值达到设计值70%时触发黄色预警并启动人工复核；达到85%时橙色预警并自动发送短信通知；达到100%红色预警立即启动应急调控。系统每5秒计算更新基于蒙特卡洛模拟的全局安全系数，当系数低于1.3时自动触发补偿机制，同时生成包含调控建议的分析报告。数据存储采用时序数据库和关系型数据库双备份，原始数据保留3年并支持按工程桩号、时间维度等多条件检索。三维可视化界面通过WebGL渲染，可实时显示支护结构受力热力图和周边建筑物沉降等值线图，支持多视角缩放和剖面分析^[4]。

（四）可调控的执行机构

液压支撑系统采用电液比例阀作为核心控制元件，通过0-10V电压信号或4-20mA电流信号精确调节油压，压力控制精度可达 $\pm 0.5MPa$ （满量程 $\pm 2\%$ ）。阀芯采用镀铬工艺提升耐磨性，配合LVDT位移传感器形成闭环控制，响应时间小于50ms，可快速补偿基坑变形引发的压力波动。可调锚具集成电动张拉装置，伺服电机驱动滚珠丝杠实现10mm行程的精准补偿，最大输出力200kN，适用于砂土层或软岩地层的预应力损失修复。注浆系统配备双液速凝设备，通过比例流量阀控制水泥浆与水玻璃的混合比例，出浆量可在0.5-1m³/min范围内无级调节，凝胶时间可缩短至30秒以内。

执行机构均满足 IP65 防护标准，阀体密封件采用氟橡胶材质耐受 -20℃ 低温，液压油选用高粘度指数抗磨油品确保 60℃ 高温工况下的稳定性。应急响应指标严格量化：液压支撑需在 30 秒内完成压力调整，锚索补偿动作限时 2 分钟，注浆设备从接收到指令到出浆不超过 5 分钟。所有设备均设置机械式手动操作接口，当自动控制系统失效时，现场人员可通过手动泵、棘轮扳手等工具直接操控执行机构，确保极端情况下的应急干预能力。

（五）人机协同的工作流程

系统采用分级响应机制，监测数据超过预设阈值 70% 时自动记录异常点位并标记时间戳；达到 85% 阈值触发短信报警，同步推送至项目经理、监测工程师等 5 个预设手机号；突破 100% 限值立即启动多方视频会议，要求 15 分钟内完成技术团队集结。每日 8 时生成包含位移变化率、支撑轴力极值等 12 项指标的监测简报，每周五输出 7 日数据趋势分析报告，重点标注累计变形量超过 3mm 的区域。

涉及支撑力调整超过 10%、注浆量大于 2m³ 等重大决策时，需由项目经理签发指令，监理工程师复核地质风险，设计代表确认结构安全后方可执行。系统自动记录操作日志，包括调控时间、执行人员工号、调整参数（如液压压力设定值变化量），数据保存期限不少于工程竣工后 5 年。交接班流程规定需核对传感器在线率（要求 ≥ 98%）、备用电源状态、通信链路延迟（要求 < 500ms）等 6 项指标，异常情况需在交接记录中红色标注^[9]。

四、自适应支护的优势与挑战

（一）主要优势

自适应支护技术通过实时监测与动态调整，显著提升了深基

坑工程的安全性和效率。该工艺在支护结构中部署传感器网络，持续采集土压力、位移和地下水位等关键数据。当监测值接近预警阈值时，系统自动触发补偿机制：液压支撑可 30 秒内完成压力调节，预应力锚索实时补张拉，局部注浆设备快速加固薄弱区域，从而将风险干预提前至事故萌芽阶段。这种主动防御模式相比传统事后补救，可降低 30%–50% 的基坑变形量，有效避免支护结构失稳引发的坍塌事故，尤其适用于周边存在地铁、古建筑等敏感构筑物的工程场景。

（二）当前面临的挑战

尽管前景广阔，自适应支护的推广仍受多重制约。初期投入成本较高，单套监测系统需部署数十至上百个高精度传感器（如倾角传感器、轴力计等），配合 5G 边缘计算平台及液压调控设备，造价可达传统支护的 1.5 倍以上。技术集成复杂度陡增，要求土木工程师与自动化、信息技术专业人员协作完成三大关键环节：传感器在振动潮湿环境的可靠布设、毫秒级数据传输的抗干扰处理、执行机构在高压条件下的精准响应，任一环节失误均可能导致系统失效。

五、结束语

自适应支护新工艺为超高层建筑深基坑的安全保障提供了创新思路。它通过赋予支护结构实时感知和动态调整的能力，显著提升了工程应对复杂多变环境的安全性和主动性。虽然在实际应用中还面临成本、技术和标准方面的挑战，但其带来的安全效益和效率提升是明确的。随着相关技术的不断成熟、工程经验的积累和配套标准的完善，自适应支护有望成为未来复杂深基坑工程的标准配置，为城市建设的安全高效推进提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李春燕. 超高层建筑地下主体深基坑支护结构施工质量控制 [J]. 石材, 2024(2): 64–66.
- [2] 张鹏宇. 超高层建筑的深基坑支护施工技术研究 [J]. 建筑·建材·装饰, 2024(6): 118–120.
- [3] 向苗, 徐亮, 王大庆. 超高层建筑施工中深基坑支护承压结构抗震效果分析 [J]. 建筑施工, 2023, 45(1): 209–212.
- [4] 刘奕男. 超高层建筑深基坑支护施工技术 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(22): 50–51.
- [5] 赵杨杨, 徐倩倩. 超高层建筑工程深基坑支护施工技术 [J]. 数字化用户, 2025(12): 52–54.

浅谈湄公河特大桥3#墩双壁钢围堰施工关键技术

王希平

四川二滩国际工程咨询有限责任公司, 四川 成都 611130

DOI:10.61369/ETQM.2025100030

摘 要 : 桥梁深水围堰施工技术复杂、质量控制要求高,其施工技术、工艺直接影响工程质量和进度。文章结合老挝芭莱水电站湄公河特大桥3#墩双壁钢围堰施工,介绍跨江桥梁钢围堰设计、制作、组拼、下放、封底混凝土等施工技术,可供类似工程参考。

关 键 词 : 3#墩; 双壁钢围堰; 施工技术

Construction Techniques for the Double-Wall Steel Cofferdam Pier 3# of Mekong River Major Bridge

Wang Xiping

Sichuan Ertan International Engineering Consultation Co.,Ltd Chengdu, Sichuan 611130

Abstract : Deep-water cofferdams require technical precision and quality control, impacting project outcomes. This paper summarizes the design, fabrication, assembly, lowering, and base concreting for the double-wall steel cofferdam Pier 3 of Mekong River Major Bridge in Laos' Paklay Hydropower Station, offering references for similar projects.

Keywords : pier 3#; double-walled steel cofferdam; construction technology

一、工程简介

老挝芭莱水电站湄公河特大桥全长567m,桥跨布置为(88+2×160+107+41)m单箱室三向预应力砼连续-刚构组合体系桥,3#墩位承台设计为矩形,四角呈圆弧,圆弧半径2.4m,承台横桥向宽14m,纵桥向宽12m,承台顶高程+215.5m,承台底高程+211m,承台厚度4.5m,承台下布置4根(直径2.8m、桩长34.5m)钻孔灌注桩。

二、总体施工方案

3#墩承台总体施工方案:利用老挝旱季(11月至次年4月)枯水期完成冲孔桩、承台施工,施工最高水位参照枯水期五年一遇洪水位222.9m。采用双壁钢围堰封底方案施工承台,双壁钢围堰结构图见图1。

3#墩双壁钢围堰设计外径尺寸为16.2m*14.2m*15.00m(横向*纵向*高),钢围堰厚度1m;钢围堰材料采用国标Q235B钢材,内外壁板采用6mm厚钢板,环板、加劲板、隔舱板采用12mm厚钢板,分底节4米高(含刃角),中节2节(4米高),顶节1节(3米高)。双壁钢围堰结构的制作宜在工厂按设计要求进行,各节、块应按预定的顺序对称组装拼焊,制作完成后应进行焊接质量检验,并应进行水密性试验^[1]。整个双壁钢围堰分为40个单元块,根据履带吊的起重量最终将每节围堰分为8个块段在桥位现场焊接。围堰焊接完成后,利用安装在护筒上的下

放系统下放围堰至设计标高,然后浇筑封底混凝土,围堰施工完成^[2,3]。

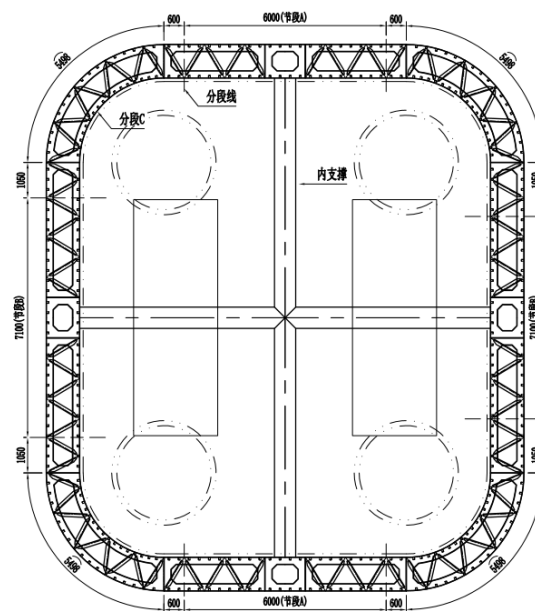


图1 双壁钢围堰结构图(单位:mm)

围堰施工流程为:钻孔灌注桩施工(钢围堰设计)→钢平台拆除(钢围堰分块加工制作运输现场)→接高护筒上焊接牛腿→牛腿上拼接钢围堰→安装下放系统、定位导向分隔板→下放钢围堰至河床→浇筑隔舱砼→围堰内抽砂→浇筑封底砼→围堰抽水清

作者简介:王希平(1967.08—),男,汉族,四川雅安人,本科,高级工程师,主要研究方向:路桥施工管理。从事水利水电及公路施工技术与管理工。

理→桩基检测合格→承台施工→墩身施工→低水位部分围堰切割拆除^[4]。

三、钢围堰制作

（一）钢围堰加工流程

双壁钢围堰在右岸加工厂加工。加工流程为：施工准备（放样及胎架制作）→原材料检验、进场→构件数控切割开坡口（内壁板上胎架定位、划线→内壁板、隔舱板构件及桁架安装→外壁板及其构件安装→单元件制作→单元块焊接→质检（材料→结构→密性）→吊装上船水运→墩位总拼装^[4]。

（二）钢围堰分块制作

根据钢围堰的结构形式，围堰单元件由内、外壁板、隔舱板、水平桁架及竖肋等部件组焊而成。钢围堰壁体在加工厂分单元、分块加工。单元件组装顺序：胎架平台制作→按围堰线型焊接支撑→铺设内壁板→划线（竖向型材及隔舱板的位置、水平环形板的位置）→安装内壁板竖肋→安装水平环板→安装内隔舱板→安装环形板的水平桁架→安装外壁水平环板→安装外壁板竖肋→铺设外壁板焊接内部构件^[5]。3#墩双壁钢围堰加工见图2。



图2 钢围堰加工块段

四、双壁钢围堰现场施工

（一）墩位围堰范围钻孔施工平台拆除

围堰拼接前先在钻孔平台上标出双壁钢围堰的安装位置，拆除影响围堰的拼装部分钻孔平台18*18m区域，拆除围堰区域的分配梁、贝雷片和枕头梁，拔除围堰区域的钢管桩。

（二）水上工作平台搭设

在围堰范围内利用四根桩基护筒连接搭设水上工作平台，并与设计钢围堰刃角底标高齐平。

（三）围堰块段组拼

双壁钢围堰每节围堰分8个块段（4节，每节圆弧段4个、纵向直线段4个、纵向直线段2个），装船运在桥墩位现场拼装，每块设4个吊耳，利用2台50吨履带吊在钢栈桥施工平台上双点起吊将壁体起吊至安装位置就位后，上部利用手拉葫芦另一端与底板或钢护筒固定。在水上工作平台从下游侧开始拼装，底层围堰

刃角踏板内边线靠在内侧定位型钢上，最后围堰块在3#墩位上游方向中间合拢，再进行水平环板安装焊接；拼装完成后对焊缝进行检查，并进行水密性试验^[6,7]。待底层围堰下放后，在底层围堰上依次进行二、三、四节围堰组拼。

（四）吊挂系统安装

在四根桩基护筒顶上横桥向分别设置焊接2组双拼工字钢做牛腿，形成围堰下放平台；纵桥向下放梁采用2组2根双拼工45a型钢配合吊杆精轧螺纹钢，整层钢围堰总共设置四个吊点，利用钢护筒上采用型钢作为分配梁，千斤顶下为双拼工45工字钢，100吨穿心式千斤顶4套，每根吊杆精轧螺纹钢配1台100吨穿心式千斤顶，形成围堰下放吊挂系统。依次安装横梁、纵梁、吊杆及4套千斤顶，安装过程中，确保每一组吊挂系统的主梁处于水平状态，确保主梁开孔与下锚座开孔在同一竖直面，以便吊杆Φ32mmPSB830精轧螺纹钢穿接。

（五）安装下放导向装置

第一层（四米高）钢围堰合拢后，利用4根桩基护筒外侧与围堰内侧壁之间，在围堰内侧壁根据设计图纸焊接导向装置（可顺桩基护筒壁下滑），双壁钢围堰共四层（节），整个钢围堰共有导向四层32个（每层8个），四边各2个，竖直方向上分别设置在底节钢围堰距离上下边缘各一米，中节和顶节双壁钢围堰中心上；导向一端焊接在钢围堰内壁体上，另一端导向设置滑轮，以便围堰顺着护筒外壁滑动下放围堰。导向安装固定好后对其垂直度和位置进行检查。

（六）拆除临时拼装平台

在围堰导向装置及吊挂系统安装完成后，转换受力体系并提升第一层钢围堰，拆除临时拼装牛腿。利用吊挂系统将钢围堰吊起，使之脱离临时拼装平台0.5米，静置30分钟并调平，进行受力体系的转换，之后拆除临时拼装平台。

（七）围堰下放

经测量河床高程上游侧为209.05m，下游侧为209.35m，当日水面高程为217.00m，水流流速1.0m/s。经检查双壁舱不漏水，检查钢围堰下放导向装置、吊杆精轧螺纹钢及千斤顶，检查所有双壁舱水泵数量与功能正常，开始下放围堰，启动控制系统，收紧所有精轧螺纹钢，使其受力均匀一致；四台100吨穿心式千斤顶同时均匀增加提升力，将围堰吊起5cm，进行试吊，试吊至少悬停10分钟；底层围堰入水后，通过吊挂系统缓慢均匀下放底节钢围堰，底节围堰达到自浮下沉状态后，对称、均匀向围堰双壁舱内灌水，使围堰缓慢、均匀下沉，并同步松动提升装置^[8]；吊杆每隔10cm做好标记，保证围堰4个吊点围堰平行下沉^[9]，依次类推，至顶节围堰下放入水。在围堰下放前需要将连通孔打开（在围堰壁上高程217m位置开八个连通孔），壁板连通孔用于调节围堰内外水平平衡（抽水时须堵住连通孔）。围堰拼装完成正式下放前，先对称浇筑刃角砼，再往隔舱对称注水，直至双壁钢围堰着床。吊挂系统及围堰下放见图3。

（八）抽砂下沉

因围堰河床地质有砂夹卵、砾石，采取两台空压机配合两套抽砂设备分别在两侧支栈桥区块对称抽砂，通过纠偏式抽砂的方式

辅助围堰进行下沉。抽砂时，抽砂管在钢围堰内分块对称抽砂，先吸围堰中间，再两边，始终保持围堰内部是一个“锅底”。循环往复，抽砂过程中监测高程，达到高程208.5m即刻停止抽砂。



图3 吊挂系统及围堰下放

（九）钢围堰井壁砼灌注

围堰着床后，增加围堰重量，对井壁内对称浇筑填充 C30 水下砼，灌注至设计高度。

（十）围堰河床处理

围堰下放到位后，对围堰内部进行清淤、抽砂，潜水员下水进行封堵及围堰河床处理。根据实际情况在围堰外围河床沟槽底部填大吨袋处理；为减少水流对封底砼的影响，在围堰刃脚内侧堆码沙袋^[10]；并在流沙表层采取回填石渣防止流沙在封底砼时裹入水下砼中。

（十一）围堰封底

围堰设计封底砼厚度2.5m，封底砼底标高208.5m，封底砼顶标高211m，分两次浇筑，先浇筑2.2m，后浇0.3m的调平层，采用 C30 砼按水下砼浇筑工艺施工。

为保证封底砼灌注一次性成功，必须确保砼连续供应，启动左右岸砼拌合站同时生产，左右岸拌合站每小时供应能力为60m³，2艘大船，6辆罐车，天泵1台，吊车2台，设置4组导管

+料斗，49m天泵按顺序泵送砼进料斗入导管灌注。当日水位为217.1m，封底砼灌注前对导管下口铺设1厘米厚2*2m钢板；封底前准备工作完成后，进行封底混凝土的浇筑，封底砼初灌采用止浆板拔出法，在施工前应根据各集料斗的具体情况做好翻板，初灌时导管下口距底板20cm左右，止浆板拔出后连续灌注，直至混凝土达到设计标高，灌注顺序从上游至下游方向，料斗在上游布料点向下游方向依次顺序持续灌注砼，一次性灌注至210.7m高程（设计高程211m），每车砼进行检测；灌注时应注意测量砼面，期间测量导管底口处砼顶标高，根据实测重新调整导管底口高度，需要提管时采用吊车缓慢对导管进行提升，每次提升的高度都严格控制在30cm之内，使砼面整体均匀上升，时刻测量灌注点影响直径范围内的砼高度，灌注过程中注意控制布料点标高及周围2m范围内的测点都要测一次，期间保证导管始终埋在砼面下，严禁导管口脱离砼面，二次灌注时对于局部灌注不到的位置及时进行补灌。封底砼从上午09:10开仓，下午17:24收仓，灌注耗时6小时14分钟，施工过程正常，实际浇筑方量为402m³。

五、围堰切割拆除

围堰封底完成后对作业面进行设备清理，搭设人行通道，砼待凝后抽水，进行钢围堰下放系统拆除，割除桩基护筒及凿除桩基砼，清理封底砼表面淤泥，对桩基进行无损检测合格后启动承台、墩柱施工。待后续施工完成且汛期过后对承台以上钢围堰进行拆除回收。

六、结束语

老挝湄公河特大桥3#墩围堰施工具有地质复杂、施工难度大、质量控制要求高的特点；围堰封底砼达到设计强度后抽水，效果良好，无漏水现象。3#墩双壁钢围堰的加工制造、拼装、下放、下沉、砼封底等施工关键技术与质量控制的成功，为该桥及水电站前期工程取得了较好的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1]2020版《公路桥涵施工技术规范》(JTG / T 3650-2020)第14.3.6条。
- [2]李大伟.双壁钢围堰关键施工技术研究[J].城市建筑,2022,19(12):180-184.
- [3]兰胜强,蔺鑫磊,齐勤华.黄河流域大埋深桩基永久钢护筒下放工艺改进[J].公路,2022,67(06):135-138.
- [4]张爱华,徐亮.武穴长江公路大桥14#墩双壁钢围堰施工关键技术[J].价值工程,(2022)26:82-84
- [5]曾雄星,方铁桥.深水复杂地质下的钢围堰设计及施工技术[J].四川水泥,2022(05):246-248.
- [6]何千里.龙山大桥双壁钢围堰施工关键技术[J].山西建筑,2022,48(04):149-151.
- [7]隋丰年.桥梁水中墩双壁钢围堰施工技术[J].设备管理与维修,2022(02):142-144.
- [8]郭煜.新白沙沱长江特大桥3号双壁钢围堰设计与施工[J].交通科技,2016(1):41-44.
- [9]李海龙,罗进洲.浅析双壁钢围堰施工控制要点[J].建筑安全,2016,31(07):50-52.
- [10]王帅帅.新白沙沱长江特大桥3号墩双壁钢围堰施工关键技术分析[J].企业科技与发展,2018,(02):74-76.

公路工程风险隐患动态监测与排查体系构建

李懋

云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ETQM.2025100032

摘 要： 公路工程在我国交通基础设施建设快速发展的进程中是重要的组成部分，其建设质量与运营安全直接关系到人民群众的生命财产安全和社会经济的稳定发展。但公路工程具有建设周期长、涉及范围广、地质条件复杂、施工环境多变等特点，因此在建设和运营过程中面临着诸多风险隐患，如地质灾害、结构病害、施工事故等。

关 键 词： 公路工程；风险；隐患；动态监测；排查

Construction of Dynamic Monitoring and Investigation System for Risks and Hidden Dangers in Highway Engineering

Li Mao

Yunnan Highway Science and Technology Research Institute, Kunming, Yunnan 650051

Abstract： Highway engineering is an important component of the rapid development of transportation infrastructure in China, and its construction quality and operational safety are directly related to the safety of people's lives and property, as well as the stable development of the social economy. However, highway engineering has the characteristics of long construction period, wide coverage, complex geological conditions, and variable construction environment. Therefore, it faces many risks and hidden dangers in the construction and operation process, such as geological disasters, structural diseases, construction accidents, etc.

Keywords： highway engineering; risk; hidden dangers; dynamic monitoring; troubleshooting

引言

交通是兴国之要、强国之基，而公路是综合交通运输体系中覆盖最广、通达最深的基础网络，它在支撑区域经济协调发展、保障民生出行等方面发挥着不可替代的作用。近些年来，我国公路建设实现了跨越式发展，截至2024年底，全国公路总里程已突破了540万公里。但随着公路里程的持续延伸和服役年限的增长，加之极端天气频发、交通荷载日益繁重等因素地影响，现阶段公路工程在建设与管理过程中的风险隐患问题愈发凸显。

一、公路工程风险隐患的特点与构建动态监测与排查体系的必要性

（一）公路工程风险隐患的特点

公路工程风险隐患具有多样性、隐蔽性、动态性和危害性等特点。其中，多样性体现在风险隐患的来源广泛，包括了自然因素、人为因素以及工程自身因素。隐蔽性则表现为许多风险隐患在初期不易被发现，它往往隐藏在公路结构内部或周边环境中，只有当风险积累到一定程度时才会显现出来，而这给风险的早期发现和处理带来了困难。

（二）构建动态监测与排查体系的必要性

首先构建公路工程风险隐患动态监测与排查体系，能够提高

风险隐患发现的及时性。因为通过动态监测，可以实时地掌握公路工程的运行状态和周边环境的变化，保障及时地发现潜在的风险隐患，避免了风险积累和扩大。其次有助于提升风险隐患排查的准确性。由于动态监测与排查体系采用先进的技术手段和科学的方法，其能够对风险隐患进行全面、细致的排查和分析，可以准确地判断出风险的类型、程度和发展趋势，进而为风险治理提供可靠依据。

二、公路工程风险隐患动态监测与排查体系构建的原则

（一）全面性原则

公路工程风险隐患动态监测与排查体系的构建应坚持全面性

原则，即涵盖公路工程的各个环节和各个方面。就空间来说，要覆盖公路的路基、路面、桥梁、隧道、涵洞、边坡等结构物以及周边的地质环境、水文环境等；在时间上，则要贯穿公路工程的建设阶段、运营阶段和维护阶段；而内容方面，需要包括各类风险隐患的监测、排查、评估、预警和治理等环节。

（二）实时性原则

由于公路工程风险隐患具有动态性，因此必须通过实时监测的手段，及时地获取相关数据和信息，以此掌握风险隐患的动态变化情况。基于实时性原则，要求监测设备能够快速采集数据，数据传输网络需要高效地传递信息，且数据处理系统也能够及时地分析和处理数据，以便于在第一时间发现风险隐患并发出预警。

（三）科学性原则

体系的构建要基于科学的理论和方法，再采用先进的技术手段和合理的流程设计。即在风险隐患的识别、监测指标的选取、监测设备的布置、排查方法的选择以及风险评估模型的建立等方面，都要遵循科学规律，确保体系的科学性和可靠性。

（四）实用性原则

体系的设计一定要充分地考虑公路工程的实际需求和现有条件，应避免过于复杂和繁琐的流程，进而确保监测和排查工作能够顺利地开展^[1]。为此，在设备选型上要选择性价比高、易于安装维护的设备，在数据处理和分析方面则要开发简单易用的软件系统，便于工作人员进行操作和使用。

（五）联动性原则

公路工程风险隐患的监测与排查涉及到了多个部门和单位，如建设单位、施工单位、运营管理单位、监理单位、科研机构等，还需要与气象、地质、交通等部门进行信息共享和协作。所以体系的构建应坚持联动性原则，在各部门之间要建立健全的协调联动机制，从而实现信息互通、资源共享、协同应对，最终形成风险隐患治理的合力。

构建原则要点一览表

原则名称	核心要点
全面性原则	涵盖公路工程各个环节和方面，空间上覆盖路基、路面等结构物及周边环境；时间上贯穿建设、运营、维护阶段；内容上包括监测、排查、评估、预警和治理等环节，确保不遗漏风险隐患。
实时性原则	针对风险隐患的动态性，通过实时监测获取数据信息，要求监测设备快速采集数据，数据传输网络高效传递信息，数据处理系统及时分析处理数据，以便第一时间发现隐患并预警。
科学性原则	基于科学理论和方法，采用先进技术手段和合理流程设计，在风险识别、监测指标选取、设备布置、排查方法选择、风险评估模型建立等方面遵循科学规律，吸收借鉴先进经验技术，结合实际优化完善体系。
实用性原则	充分考虑实际需求和现有条件，避免复杂繁琐流程，确保工作顺利开展。设备选型注重性价比和易安装维护，数据处理分析开发简单易用的软件系统，方便工作人员操作。
联动性原则	涉及多个部门和单位，需与气象、地质等部门信息共享协作，建立健全协调联动机制，实现信息互通、资源共享、协同应对，形成风险隐患治理合力。

三、公路工程风险隐患动态监测与排查体系的构建策略

（一）建立完善的风险隐患监测网络

完善的风险隐患监测网络是动态监测与排查体系的基础，所以要根据公路工程的特点和风险分布情况，科学地布置监测点，并配备先进的监测设备，最终构建全方位、多层次的监测网络。

就监测点地布置而言，对于高风险路段、桥梁、隧道等关键部位，需要加密监测点的设置，以提高监测的密度和精度；对于一般路段，则可按照一定的间距设置监测点，确保能够全面地掌握公路的整体状态。而监测设备的选择应根据监测内容和精度要求来确定，一般包括了以下几类：一是应变计、位移计、加速度计等结构监测设备，主要用于监测公路结构的应力、应变、位移、振动等参数；二是雨量计、水位计、风速仪、温湿度传感器等环境监测设备，通常用于监测公路周边的气象、水文和地质环境参数；三是称重系统、视频监控设备、交通流量检测器等交通监测设备，在实践中可用于监测交通流量、车辆载重、行驶状态等信息；四是探地雷达、超声波检测仪等无损检测设备，此类设备能够对公路结构内部的病害进行检测。

与此同时，还要建立高效的数据传输网络，借助该网络将监测设备采集到的数据实时传输到数据中心。建议利用有线通信（如光纤）和无线通信（如 4G、5G、物联网）相结合的方式，如此能够确保数据传输的稳定性和及时性。而对于偏远地区或信号不稳定的区域，可以采用卫星通信等方式进行数据地传输。

（二）构建一体化的数据管理与分析平台

数据管理与分析平台主要负责对监测数据进行存储、处理、分析和应用。而构建一体化的数据管理与分析平台，能够实现数据的集中管理和高效利用，最终为风险隐患的识别、评估和预警提供有力的支持。

一方面是数据地管理，平台需要具备强大的数据存储能力，要能够容纳海量的监测数据，并保证数据的安全性和完整性。并且，还要建立统一的数据标准和格式，对不同来源、不同类型的数据应进行规范化地处理，以确保数据的一致性和可比性^[2]。

另一方面是数据地分析，该平台应集成多种数据分析算法和模型，确保能够对监测数据进行实时地分析和深度地挖掘。即通过对比分析、趋势分析、关联分析等方法，可以识别出数据中隐藏的风险信息，并判断风险隐患的类型、程度和发展趋势。如通过对桥梁结构的应变数据进行分析，可以判断出桥梁是否存在过度受力的情况。

（三）制定规范的风险隐患排查流程

排查流程一般涵盖了排查计划制定、现场排查实施、隐患识别与记录、隐患评估与分级、隐患治理与跟踪等多个环节。

排查计划制定：根据公路工程的特点、风险分布情况以及以往的排查经验，制定出详细的排查计划，在其中明确排查的范围、内容、方法、频率和责任人。

现场排查实施：排查人员应按照排查计划的要求，自觉地携带必要的排查工具和设备，深入到现场进行排查。实际在排查过

程中，一定要仔细地观察公路结构的外观状况、周边环境的变化情况以及交通运行状态等，为此可以采用目测、量测、无损检测等方法，旨在获取第一手的资料。

隐患识别与记录：对发现的疑似风险隐患排查人员要进行认真地识别和确认，务必明确隐患的具体位置、表现形式和特征，并将其详细地记录在排查记录表中。

隐患评估与分级：以隐患的性质、程度、影响范围和发展趋势等因素作为依据，对于识别出的风险隐患进行评估和分级。一般可以将风险隐患分为重大隐患、较大隐患和一般隐患三个等级，而针对不同等级的隐患要采取不同的治理措施。

5、隐患治理与跟踪：对于排查出的风险隐患，要及时地制定治理方案，且要明确治理责任单位、治理措施和治理期限。治理单位则按照方案的要求，需要尽快地组织实施治理工作。

（四）建立健全风险隐患预警机制

风险隐患预警机制能够在风险隐患演变成事故之前及时地发出预警信号，进而为采取应急措施争取时间。而预警机制包括了预警指标设定、预警阈值确定、预警信息发布和预警响应等环节。

1. 预警指标设定：根据公路工程的风险特点和监测数据，选取能够反映风险隐患变化的关键指标作为预警指标。

2. 预警阈值确定：针对于每个预警指标，根据相关的规范标准、工程经验和风险可接受程度，确定出合理的预警阈值。

3. 预警信息发布：当系统发出预警信号之后，应当通过短信、电话、微信、电子显示屏等多种方式，及时地将预警信息发布给相关的管理部门、施工单位、运营单位和社会公众。

4. 预警响应：相关单位和人员在收到预警信息之后，第一时间按照应急预案的要求采取相应的响应措施。

四、公路工程风险隐患动态监测与排查体系的保障措施

（一）加强组织领导

由交通主管部门、公路建设单位、运营单位、监理单位等相关方的负责人组成专门的公路工程风险隐患动态监测与排查工作领导小组，主要负责统筹协调体系构建和运行过程中的各项工

作。此小组要明确各个成员单位的职责和分工，并建立健全的工作协调机制，还要定期召开工作会议，进而确保各项工作的顺利推进^[3]。

（二）完善法律法规和标准体系

只有加快完善公路工程风险隐患动态监测与排查相关的法律法规和标准体系，才能为体系的构建和运行提供法律依据和技术支撑。一方面要制定和修订公路工程风险评估、监测技术、排查规范、隐患治理等方面的标准和规范，务必明确监测与排查的技术要求、操作流程和质量标准。另一方面要加强对于法律法规和标准体系的宣传和培训，旨在提高相关单位和人员的法律意识和标准意识。

（三）加大资金投入

公路工程风险隐患动态监测与排查体系的构建和运行需要大量的资金投入，其中包括了监测设备的购置与安装、数据管理平台的建设与维护、排查人员的培训与薪酬、隐患治理的费用等。因而要建立多元化的资金筹措机制，加大财政投入力度，并鼓励社会资本参与，使得体系构建和运行的资金需求得以满足。

（四）强化技术研发与人才培养

公路工程风险隐患监测与排查技术的研发与创新目前需要加强，即要鼓励科研机构、高等院校和企业开展产学研合作，促使其开发具有自主知识产权的监测设备、数据分析软件和风险评估模型等。基于此，还要加强对于相关专业人才的培养，通过学历教育、职业培训、实践锻炼等多种方式，培养出一批既懂公路工程专业知识，又掌握监测与排查技术的复合型人才。

五、结束语

公路工程风险隐患动态监测与排查体系地构建是一项系统工程，该系统对于保障公路工程的安全稳定运行具有重要的意义。实际在体系构建过程中，要遵循全面性、实时性、科学性和实用性原则，再建立完善的监测网络、数据管理与分析平台，并制定规范的排查流程。往后随着科技的不断进步和管理水平的不断提高，公路工程风险隐患动态监测与排查体系将不断地被完善和优化。

参考文献

[1] 桑运龙. 隧道施工安全风险动态评估与隐患排查及数字化技术应用 [J]. 施工技术, 2019, 48(24): 64-67.
[2] 陈柏鹤. 双重预防机制在公路工程安全管理中的应用 [J/OL]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024(11)[2024-11-01]
[3] 肖殿良. 公路桥梁工程施工安全风险分级管控与隐患排查治理双重预防体系构建 [C]. 第25届海峡两岸及香港、澳门地区职业安全健康学术研究会暨中国职业安全健康协会学术年会暨科学技术奖颁奖大会摘要集. 中国新疆省乌鲁木齐市, 2017: 64-64.

高温环境下沥青路面施工质量控制技术研究

张启超

河北翔舟工程检测有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ETQM.2025100033

摘 要 : 高温环境对沥青路面施工质量造成显著影响, 易引发早期病害、压实困难与施工安全隐患。本文从高温环境下的材料性能变化、施工工艺调整及质量控制措施三方面入手, 系统分析了沥青路面施工中存在的问题, 并提出了相应的技术优化路径。研究表明, 合理调整施工时间、采用改性材料与智能化监测手段, 可有效提升高温条件下的施工质量与道路耐久性, 具有显著的工程实用价值。

关 键 词 : 高温环境; 沥青路面; 施工质量控制; 压实工艺; 技术优化

Research on Quality Control Techniques for Asphalt Pavement Construction in High-Temperature Environments

Zhang Qichao

Hebei Xiangzhou Engineering Testing Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract : High-temperature environments significantly impact the quality of asphalt pavement construction, often leading to early-stage defects, compaction difficulties, and construction safety hazards. This paper addresses three aspects: changes in material properties under high-temperature conditions, adjustments to construction processes, and quality control measures. It systematically analyses the issues encountered in asphalt pavement construction and proposes corresponding technical optimisation pathways. The study indicates that by reasonably adjusting construction schedules, using modified materials, and employing intelligent monitoring methods, construction quality and road durability under high-temperature conditions can be effectively improved, demonstrating significant practical engineering value.

Keywords : high-temperature environment; asphalt pavement; construction quality control; compaction process; technical optimisation

引言

随着城市化建设加速, 夏季高温时段道路施工日益频繁, 高温环境对沥青混合料的温度控制、施工时机、压实质量等环节提出更高要求。若控制不当, 极易导致路面早期损坏, 降低使用寿命, 增加运维成本。本文聚焦高温背景下的沥青路面施工特性, 探讨关键工艺环节中应对高温影响的质量控制方法, 旨在为保障施工质量和行车安全提供技术参考。

一、高温环境下沥青材料性能变化分析

(一) 沥青混合料热敏性分析

沥青混合料作为一种典型的热塑性材料, 其力学性能高度依赖环境温度变化。在高温条件下, 沥青的黏度大幅下降, 混合料塑性增强但稳定性显著降低, 易发生流动、车辙与推移等变形问题。研究表明, 当环境温度升高至40℃以上时, 混合料的剪切强度可下降20%以上, 致使其在摊铺与碾压过程中更加敏感, 压实难度加大。这种热敏性使得施工时间窗口显著缩短, 一般控制在90分钟内完成初压、复压与终压作业, 若超过时限, 压实质量和密实度将明显下降, 影响路面结构强度和使用寿命。与此同时,

高温导致混合料流动性增强, 容易出现局部离析、碾压不均等问题, 从而造成路面平整度差异大, 早期破损率上升。为确保成型质量, 施工现场需结合实时温度监测, 合理调整运输距离、摊铺速度与碾压节奏, 严格控制混合料在130 ~ 160℃的最佳成型温度区间内作业, 提升施工的适应性和稳定性^[1]。

(二) 集料与沥青结合特性变化

在高温环境下, 沥青与集料之间的界面粘结力显著减弱, 其主要原因是沥青受热软化后表面张力降低, 无法形成稳定的包裹膜, 导致对集料的附着力下降, 甚至出现剥离现象。研究表明, 当沥青温度超过160℃时, 其黏附力可下降30%以上, 极易在碾压后期或冷却阶段发生脱黏, 进而引发“油斑”“麻点”“浮油”

等路面外观缺陷。施工阶段若混合料温度控制不当,则更容易造成包裹不均,形成弱界面结构,影响整体密实性和力学强度。同时,高温下集料的表面干燥度和洁净度对粘结效果也有关键影响。若集料中粉尘残留过多或含水率超标,会严重阻碍沥青膜的均匀附着,降低界面结合性能^[2]。因此,在施工过程中应强化材料预处理工艺,采用高效干燥设备和集料筛分系统,确保集料清洁、干燥且粒径稳定。同时建议使用表面活性剂、抗剥离剂等添加材料,以提高沥青与集料之间的亲和力和耐久性,从根本上减少因高温环境引起的结构破坏风险。

(三) 改性沥青材料的高温适应性

为提升沥青混合料在高温环境下的性能稳定性,采用聚合物改性沥青成为当前道路工程中的关键技术途径。其中,SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)和SBR(苯乙烯-丁二烯橡胶)改性沥青具有优异的高温性能,其软化点一般可提升至75℃以上,相比普通基质沥青提高约20%,显著增强了路面的抗车辙性和抗塑性流动能力。研究数据显示,使用SBS改性沥青的路段,其高温稳定性指标(动态稳定度)可达3000次/mm以上,是普通沥青混合料的2~3倍,特别适用于气温超过35℃、交通负荷较大的城市主干道与高速公路。此外,改性沥青在抗老化方面表现更优,其氧化诱导期延长约40%,有效减缓沥青膜硬化和脆裂风险。实际施工中应结合气候特点、交通等级和设计年限等因素,科学选用改性剂类型与掺量,同时优化混合料级配设计,配合抗车辙剂或纤维材料,进一步增强其温度稳定性和耐久性,为高温区域道路建设提供坚实可靠的材料保障^[3]。

二、高温条件下施工工艺控制措施

(一) 施工时间段科学安排

在高温环境下,科学安排施工时间段是保障沥青路面施工质量的前提。由于沥青混合料在高温条件下降温速度较慢,容易造成“过热软化”或“失油”现象,因此应避开正午和午后高温时段,优先选择日出前后或傍晚至夜间等相对低温时段进行摊铺与碾压作业。在昼夜温差较大的地区,还可采用夜间施工机制,通过灯光与智能化辅助设备保障施工精度与安全性。此外,施工调度人员应依据天气预报动态调整作业计划,合理安排材料拌和、运输、摊铺与压实时间节点,确保混合料在适宜的温度窗口内完成施工全过程,避免因温度异常造成质量缺陷。通过高温作业时间的科学避让与分段组织,可显著降低温控风险,提高作业质量与效率。

(二) 运输与摊铺温度控制

沥青混合料自拌合站出料后至摊铺机摊铺之间的温度控制是影响成型质量的关键环节。高温天气下,外部气温对混合料温度变化影响较大,尤其在运输过程中易出现局部过热或散热不均问题。为保障混合料到达现场时的温度稳定,应采用保温性能良好的运输车辆,必要时在车厢内设置隔热层或采用遮盖布防止热量流失与直晒^[4]。此外,摊铺设备应具备实时温度监测与反馈功能,确保摊铺温度始终控制在最佳施工范围内,避免因温度偏高

造成离析、流动性增强或油膜溢出等质量隐患。为实现精细化控制,可结合红外线温控装置与智能摊铺系统协同使用,实现温度全程可视化、数据化管理,提升高温环境下的摊铺均匀性与施工适应性。

(三) 压实作业关键参数调整

压实是决定沥青路面密实度、结构稳定性与使用寿命的核心环节,高温条件下更需对压实参数进行精细化调整。首先,应依据混合料类型与环境温度确定最佳压实起始温度与终止温度范围,控制在温度窗口期内完成压实作业。高温天气下,初压可适当提前,缩短中间延迟时间,同时加强复压与终压的碾压次数,以弥补混合料温度下降缓慢导致的压实不均。其次,压路机类型与吨位配置也需合理选择,建议采用振动式钢轮压路机搭配橡胶轮压路机进行组合压实,提高密实度与表面均匀性。最后,推广智能压实系统可实现压实度、温度、速度等参数的实时感应与自动调节,增强现场压实精度与一致性。通过对压实参数的科学设定与动态控制,有效规避高温施工过程中出现的路面起皮、滑移与沉陷等病害问题^[5]。

三、高温环境下施工质量问题与防治技术

(一) 常见质量问题类型

在高温环境下进行沥青路面施工,常见的质量问题主要包括早期车辙、泛油、离析、裂缝、压实不足与表面滑移等。车辙多出现在交通荷载集中区域,是由于沥青混合料在高温下软化,抵抗剪切变形能力下降,压实不充分,导致结构层产生塑性变形。泛油现象表现为路面表层沥青上浮,形成光滑膜层,降低摩擦力,存在极大行车风险。离析问题是由于高温下混合料温度不均或运输振动,使粗细集料分布不均,影响路面整体密实度。裂缝则常发生在混合料降温过快或结合层粘结不良时,导致结构应力集中。压实不足与滑移多由温控失衡、碾压参数未按标准执行(如未控制压实温度在120℃~150℃之间)等原因引起,最终影响路面使用寿命与承载能力^[6]。

(二) 问题成因深度剖析

上述问题的产生与高温施工环境中的物理、化学变化密切相关。首先,在气温超过35℃、地表温度达到55℃以上时,沥青黏度下降至过低水平($< 0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$),使其失去原有结构稳定性与抗剪能力,易发生流动变形。其次,混合料长时间暴露在高温环境中,温差过大(超过30℃)导致混合料中不同粒径集料热传导不一致,诱发离析与热应力集中。第三,运输与摊铺过程中如未及时保温或温度控制不到位,会造成“冷接缝”或热损失,使压实过程中材料未达到设计压实度(压实度不达标低于96%),从而埋下质量隐患。此外,管理层施工组织不当、作业流程安排不合理、操作工人缺乏针对高温施工的经验,也是导致质量问题频发的主观因素。

(三) 预防与补救技术路径

针对高温环境下的质量问题,可从预防与补救两个层面制定技术路径。预防方面,建议采用抗车辙能力强的SBS改性沥青,

其软化点提升至80℃以上,可有效降低高温蠕变率($<1.5\times10^{-4}$ mm/mm),提高混合料高温稳定性。施工过程中应合理控制摊铺与压实温度,压实作业应在混合料温度为135℃~145℃之间进行,并确保碾压遍数达到6~8遍,同时引入智能压实监测系统实时跟踪密实度。为防止离析与泛油,推荐使用双层摊铺技术与分离析装置,有效均匀混合料分布与温度分布。补救方面,对已形成的质量缺陷区域应进行快速检测与标定,如利用红外热成像识别温度异常区,采用乳化沥青洒布修复轻度剥离与滑移,或通过局部切除与再压实方式处理严重车辙与裂缝区域^[7]。整体而言,通过材料选型优化、参数标准化控制与智能化监管手段,可有效提升高温环境下沥青路面的整体施工质量与使用性能。

四、施工质量智能监测与动态调控技术

(一) 施工过程信息化监控体系建设

在高温环境下提升沥青路面施工质量的核心在于构建全过程信息化监控体系,实现从材料出厂、运输、摊铺到碾压各环节的温度、压实度、时间等关键指标的动态监控与联动控制。该体系可基于物联网架构,结合高精度红外温度传感器、GPS定位模块和无线通信设备,在沥青混合料运输车、摊铺机及压路机等关键节点布设监控装置,实时采集温度(误差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)、位置、作业时间等数据,并传输至中央处理系统进行分析。系统可实现温度异常预警,如混合料中心温度降至低于120℃或高于170℃,将自动提示施工人员调整操作。此外,可利用热成像技术动态获取摊铺面热分布图,及时发现局部热损失和冷接缝风险,提升摊铺均匀性。通过信息化系统协助管理人员进行科学决策与调度,实现对高温条件下施工全过程的闭环质量控制与可追溯管理^[8]。

(二) 智能压实系统的集成与优化

智能压实系统是提升沥青路面施工质量与压实效率的关键装备,尤其在高温环境下,其自动识别与动态调控功能优势更加明显。该系统主要由GPS定位模块、振动监控传感器、温度探头、加速度计以及数据处理终端构成,能够实时监测压路机位置、行驶轨迹、碾压遍数、速度、振幅及混合料表层与内部温度等参

数。系统通过与既定压实曲线对比分析,自动判断是否达到设计压实度(通常为96%以上),并发出压实不足或过度的预警提示,指导驾驶员及时进行补压或调整。为提高适应性,部分系统还具备自动路径规划与碾压轨迹智能纠偏功能,有效避免碾压重叠不足或遗漏。此外,结合地质雷达与高频探头的集成应用,可实现对路基密实度与厚度的深层检测,避免结构层压实虚空问题。通过压实全过程智能跟踪与闭环优化控制,有效提升施工一致性和路面承载性能,降低人为操作误差。

(三) 施工管理平台与调度系统融合

为实现高温条件下施工效率与质量的双重保障,构建一体化施工管理平台并融合调度系统成为必然趋势。该平台集成温度监测、施工进度、设备运行状态、材料消耗与运输路径等多维信息,通过大数据算法进行实时分析与智能优化调度。例如,当某一摊铺段温度即将超过上限或运输车辆滞后,系统将自动调整碾压顺序或重新调配车辆,确保压实操作在合适时间窗内完成。平台还可建立施工任务库与资源池,实现对施工人员、设备与物料的精细化管理,提升资源配置效率。在数据分析方面,平台可生成温度-压实度关联图、压实轨迹图、质量评估报告等,便于管理层进行质量追溯与改进。借助云计算与远程控制技术,还可实现多工地远程协同管理,确保各个施工现场在高温天气下均按规范、安全、高质量执行作业任务,推动施工质量智能化、数字化、规范化转型。

五、结束语

高温环境对沥青路面施工质量提出了更高要求,若控制不当易导致路面早期病害、结构变形与使用寿命下降。本文从材料热敏感性变化、施工工艺调整、质量缺陷防治及智能化监测四方面进行了系统研究,提出了多项具有可操作性的控制技术与管理策略。通过合理安排施工时段、精控温度参数、优化压实工艺并引入信息化监测平台,可显著提升施工质量与效率。未来应加快智能技术集成应用,构建更加科学、高效的高温施工质量保障体系。

参考文献

- [1] 廖小权. AC 沥青路面改性在高温多雨环境下的应用分析 [J]. 中国新技术新产品, 2025(11): 71-73. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2025.11.039.
- [2] 韩志文. 高温高湿环境下沥青路面抗滑劣化特性研究 [J]. 交通世界, 2024(23): 23-25. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2024.23.054.
- [3] 贺玉婷, 张毅, 叶敏. 高温强辐射环境下"金港高速"沥青路面变形场模拟研究 [J]. 公路工程, 2024, 49(06): 93-100. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2024.06.014.
- [4] 潘志华. 高温多雨地区活化胶粉/SEBS 复合改性沥青制备及其性能研究 [D]. 重庆交通大学, 2024. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.000909.
- [5] 零银珠, 韦万峰. 橡胶沥青混合料 ARAC-20G 高温车辙疲劳试验研究 [J]. 西部交通科技, 2025(02): 1-4. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2025.02.001.
- [6] 武继开. 碳纳米管/SBS 复合改性沥青性能试验研究 [D]. 吉林建筑大学, 2024. DOI: 10.27714/d.cnki.gjljs.2024.000203.
- [7] 姜博. 含盐高湿环境下复合纤维沥青混合料路用性能研究 [D]. 重庆交通大学, 2024. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.000185.
- [8] 董硕. 环氧树脂改性乳化沥青半柔性混合料高温性能研究及离散元分析 [D]. 青岛理工大学, 2024. DOI: 10.27263/d.cnki.gqudc.2024.000320.

安装工程施工进度与造价协同控制机制研究

李娇

浙江科菲科技股份有限公司, 浙江 嘉兴 314001

DOI:10.61369/ETQM.2025100034

摘 要 : 施工进度与造价控制作为安装工程管理的核心内容, 其协同控制对工程质量、成本效益及项目整体效能具有显著影响。通过分析施工进度与造价之间的相互关系, 构建信息共享、动态调整与责任协同的控制机制, 实现资源优化配置和过程精准管控。引入全过程控制理念与信息化手段, 有效规避施工延期与预算超支等风险, 提升工程管理的科学性和系统性, 促进项目目标的同步达成, 增强安装工程的综合竞争力。

关 键 词 : 施工进度控制; 造价管理; 协同机制; 安装工程; 动态调控

Research on the Coordinated Control Mechanism of Construction Progress and Cost in Installation Engineering

Li Jiao

Zhejiang Kefei Technology Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314001

Abstract : Construction progress and cost control are core components of installation engineering management, and their coordinated control significantly impacts engineering quality, cost-effectiveness, and overall project efficiency. By analysing the interrelationship between construction progress and cost, this study proposes a control mechanism based on information sharing, dynamic adjustment, and collaborative responsibility to achieve optimal resource allocation and precise process control. By incorporating the concept of full-process control and information technology, this mechanism effectively mitigates risks such as construction delays and budget overruns, enhances the scientific and systematic nature of engineering management, promotes the simultaneous achievement of project objectives, and strengthens the comprehensive competitiveness of installation engineering.

Keywords : construction progress control; cost management; collaborative mechanism; installation engineering; dynamic adjustment

引言

在现代建筑行业中, 安装工程因其技术复杂、工序繁多而对施工进度与造价控制提出更高要求。进度滞后可能引发连锁反应, 造价失控则影响投资效益, 二者相互制约、相互影响。如何实现进度与造价的协同控制, 已成为工程管理中的关键议题。随着项目体量扩大与管理模式转型, 传统控制手段面临挑战, 亟须建立科学、高效的协同机制, 以提高项目执行效率, 确保工程目标顺利实现。

一、安装工程施工进度与造价关系分析

安装工程作为建筑工程的重要组成部分, 其施工进度与工程造价之间存在着密切且复杂的关联。由于安装工程涉及的专业种类繁多、施工环节交错, 进度计划与成本预算的制定和执行显得尤为关键。施工进度是项目时间控制的核心内容, 而造价则是项目成本控制的体现, 二者在实际实施过程中常常相互影响, 相辅相成。若进度安排不合理, 可能导致资源闲置或重复投入, 从而推高造价; 反之, 盲目压缩工期也可能引发施工质量下降或加班费用增加, 进一步影响项目整体经济效益^[1]。因此, 准确把握进度与造价之间的动态关系, 是提升安装工程管理水平的基础。

在实际工程中, 进度控制的不确定性常常成为造价波动的重要诱因。例如, 材料供应滞后、技术工序衔接不畅或外部环境变化, 均可能引起计划调整, 进而引发成本偏差。同时, 造价的约束力也反作用于进度安排, 当预算紧张时, 项目管理方往往不得不对进度计划进行压缩或调整, 以降低各类费用支出。然而这种短期行为往往会埋下更大的管理隐患, 导致工期拖延、返工频发, 形成“越控制越失控”的恶性循环。可见, 单一的进度控制或造价控制策略已难以适应安装工程复杂多变的实际需求, 亟须建立基于全生命周期视角的协同控制机制, 以实现多目标之间的动态平衡。

随着建设项目管理模式的不断更新和信息化手段的广泛应

用，进度与造价的协同管理具备了更为广阔的实现空间。通过构建统一的数据平台，整合项目各阶段信息，能够实现进度状态与成本支出的实时联动，提升决策的时效性和精准性。同时，基于大数据与智能分析手段，可以对施工过程中的关键节点和高风险环节进行动态监测和预测，提前制定调整策略，降低控制失效的概率。将进度与造价放在统一框架中统筹考虑，不仅有助于提升项目执行效率，也为工程管理体系的优化升级提供了可行路径^[2]。因此，深入分析安装工程中施工进度与造价之间的互动关系，是推动协同控制机制构建与落地实施的前提。

二、协同控制的关键影响因素识别

在安装工程项目中，施工进度与造价的协同控制是一项系统性极强的管理任务，其有效实施依赖于对关键影响因素的准确识别。首先，组织管理能力是决定协同控制成效的基础。项目组织是否具备高效的协调机制、明确的职责分工和良好的沟通体系，直接影响进度执行与造价调控的同步性。如果施工单位与设计、采购、监理等环节之间缺乏有效配合，极易出现信息滞后、决策冲突等问题，从而打破原有的计划平衡，造成进度延误或成本失控。此外，管理团队的专业能力和经验水平也在一定程度上决定了对问题的预判能力和应对效率，是影响协同控制质量的核心因素之一。

技术因素同样对进度与造价的协同控制起着关键作用。安装工程涉及大量机械设备、管线系统与自动化设施，其施工工艺复杂且技术标准要求高。若施工方案缺乏合理性，或施工技术存在短板，势必影响施工效率，进而带动成本上升。同时，技术变更、设计优化等因素也可能对原有的进度计划与造价预算产生较大冲击，因此，必须在项目初期就加强对技术路径的优化分析，控制变更频次，提高施工的可控性与稳定性。此外，施工技术与信息技术的融合程度，诸如 BIM 技术、进度模拟系统、成本管控平台等工具的应用水平，已成为提升协同效率的重要支撑手段^[3]。

外部环境因素也是不可忽视的变量，对施工进度与造价的协同控制构成不确定性挑战。例如，政策法规变化、市场材料价格波动、人工成本上涨、自然气候条件等，均可能影响施工计划和成本核算。在大型安装工程中，材料采购周期长、供应链环节多，一旦受到外部因素影响，常常会引发连锁反应，造成计划延误和造价失衡。因此，在开展协同控制工作时，必须构建风险预警与应对机制，建立灵活的资源配置方案，以增强对外部不确定因素的抵御能力。同时，通过合同管理、激励约束机制等方式，调动各参建方的积极性和强化责任意识，进一步提升协同控制的主动性和执行力^[4]。综合来看，只有全面识别并系统管理上述关键因素，才能为施工进度与造价协同控制机制的有效运行奠定坚实基础。

三、施工进度与造价协同控制机制构建

施工进度与造价协同控制机制的构建，核心在于打破传统“单点控制”的管理思维，转向全过程、全要素的集成式管控。

首先，应建立统一的控制目标体系，在项目前期通过多方协商明确施工进度与成本控制的关键节点、控制目标和容许浮动范围，将进度计划与造价预算进行有机融合，形成清晰的控制基线。这一阶段需同步完成施工组织设计与成本策划，确保计划编制与费用测算逻辑一致，避免脱节。同时，采用基于里程碑节点的分段控制策略，将项目分解为多个阶段性子目标，实现管理重心由“整体控制”向“重点突破”的转变，提升管理的针对性和操作性^[5]。

在机制运行层面，需建立信息共享与动态反馈系统，保障进度与造价控制数据的实时交互与更新。依托信息化平台整合工程管理信息，推动进度执行情况、实际成本支出与资源使用状况的同步可视化展示，使管理者能够准确掌握施工全过程的运行状态。通过引入 BIM、ERP、项目管理系统等工具，实现进度模型与成本模型的数据联动，提高多部门之间的协作效率和应变能力。此外，建立动态调整机制亦不可或缺，针对施工过程中不可预见因素引发的计划偏差，应及时进行滚动预测和方案优化，灵活调整施工方案与资金安排，使控制策略始终保持适应性与前瞻性，降低系统性风险的发生概率。

协同控制机制的有效落地还需配套制度与激励约束机制的支持。在制度层面，应明确各参与方在协同控制中的权责界限与协作流程，强化跨部门之间的联动响应，确保管理机制可执行、可监督。在激励机制上，可通过设立与进度绩效和成本节约挂钩的奖惩制度，激发项目团队对协同目标的内在认同和外在动力。同时，鼓励承包商、供应商等外部合作单位参与协同机制建设，将其纳入整体控制体系中，形成“责任共担、成果共享”的合作生态。因此，施工进度与造价协同控制机制的构建，是一个集目标整合、信息互通、动态调控与制度保障于一体的系统工程，其科学性与系统性决定了安装工程项目能否实现效益与效率的双重提升。

四、信息化手段在协同控制中的应用路径

在施工进度与造价协同控制机制中，信息化手段的引入已成为提升管理效能的重要路径。通过信息技术的支撑，传统依赖人工监控与经验判断的管理方式得以转型为以数据驱动、系统响应为特征的智能化管控体系。首先，BIM 技术作为信息化手段的代表，能够实现建筑信息的可视化、参数化和动态化管理。在施工准备阶段，通过构建 BIM 模型，可对各专业系统进行协同排布，优化安装顺序，减少返工和冲突，提升工效；在施工执行阶段，通过进度模拟与成本估算联动，实时反馈施工状态与预算使用情况，为决策提供精确支撑。BIM 技术打破了信息孤岛，使进度与造价控制基于同一数据基础运行，为协同控制机制提供了坚实的数据支撑和技术平台^[6]。

除 BIM 外，项目管理信息系统（如 ERP、PMS 等）的应用也是实现协同控制的关键手段。这些系统通过整合进度计划、成本预算、材料供应、合同履行等模块，实现项目全周期信息的集成化管理。例如，在 ERP 系统中，工程量签证、合同结算与实际付款可自动生成并与计划数据比对，发现异常后自动预警；在 PMS

平台上，任务分配、进度跟踪、资源配置等内容可实现图表化展示，提高协作效率与透明度。同时，施工现场数据采集技术的应用，如物联网感知设备、RFID、无人机巡检等，也极大提升了现场管理的实时性与准确性，为协同控制提供了第一手数据来源。通过这些信息化工具的协同运作，不仅提升了工程数据的处理效率，还实现了进度与造价之间的自动联动与协调反馈。

在信息化手段的推广过程中，还应注重应用路径的系统设计与管理机制的适配性。首先，应根据项目规模与管理需求选取适宜的信息系统平台，避免盲目“技术堆砌”造成管理资源浪费。其次，应在组织内部建立专门的信息化管理团队，负责系统建设、数据维护与技术支持，保障平台运行的稳定性与持续性。此外，应通过标准化管理流程的再造，确保信息技术真正融入项目管理流程，而非作为孤立工具使用。培训与知识转移亦不可忽视，应针对各参与方开展操作培训与管理理念的宣贯，增强其对信息化手段的理解与使用能力。最终，通过信息技术与管理制度的深度融合，使施工进度与造价协同控制由“事后被动响应”转向“过程主动预警”，实现从粗放管理到精细化管理的根本转变，推动安装工程项目管理水平持续提升^[7]。

五、协同控制机制的优化策略与实践效果分析

在施工进度与造价协同控制机制的实施过程中，为了提升其实际效果和可持续性，有必要不断优化机制运行的策略。首先，应构建多维度的信息反馈机制，打通项目内部与外部各层级之间的信息壁垒，确保进度和成本数据的准确性、实时性与完整性。通过设置关键控制点、风险预警节点与过程控制指标，实现对施工全过程的动态监测与闭环管理。同时，引入人工智能、大数据分析等新兴技术手段，对历史项目数据进行智能分析与模型训练，辅助制定更为科学的资源调配与计划优化方案，提升管理决策的前瞻性和系统性。

为了保障协同控制机制的高效运行，还应在管理制度和组织

结构上进行相应的优化调整。明确各参与方在控制机制中的权责界限，推动合同机制、考核机制、激励机制的协同化设计，提升协同治理的制度刚性与执行力。在组织管理上，建议设立项目协同控制专责小组，统筹调度计划编制、成本审核、变更控制、数据分析等环节，形成多部门之间的信息共享和快速响应机制。同时，应重视人员能力的提升，强化对项目经理、计划工程师、成本控制人员的信息化素养与协同思维培训，使其具备协同控制的意识与实操能力，构建一支高效、专业的实施团队^[8]。

在部分安装工程项目的实践中，协同控制机制的优化已取得显著效果。例如，通过 BIM 与进度成本联动系统的应用，实现了安装工序之间的精准排布和预算的动态调整，有效减少了非计划变更和资源浪费；在某大型公共建筑项目中，通过构建一体化信息平台 and 滚动优化机制，工程总工期压缩约 12%，造价节约超过 5%，并实现了项目团队间的高效协作。这些实践表明，协同控制机制一旦形成制度化、平台化和智能化体系，便可显著提升工程项目的综合管理水平，促进施工进度与造价目标的同步实现，增强项目执行的经济性与可靠性。同时，这也为其他类型工程提供了可借鉴的管理模式与技术路径，推动行业整体向数字化、集约化与高效化方向不断迈进。

六、结束语

施工进度与造价的协同控制是安装工程管理中的关键环节，关系到项目效益、工期目标与资源配置的全面优化。通过构建科学的控制机制，识别关键影响因素，合理引入信息化手段，并不断优化管理策略，能够实现工程全过程的精细化、动态化管控。在实际应用中，协同机制的有效运行显著提升了项目的执行效率与经济效益。未来，需进一步推动技术融合与管理创新，不断完善协同体系，为安装工程的高质量建设提供坚实保障。

参考文献

- [1]唐铁.BIM技术在机电安装工程中的应用分析[D].长沙理工大学,2017.
- [2]付艺丹.IPD模式下基于BIM的水利工程建设全过程造价管理研究[D].长沙理工大学,2018.
- [3]夏晴.基于BIM技术的地铁项目施工阶段造价控制方法研究[D].广州大学,2020.DOI:10.27040/d.cnki.ggzdu.2020.001130.
- [4]蒋相凤.BIM在机电安装工程造价控制中的应用[J].交通世界,2020,(20):164-165.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2020.20.072.
- [5]许慧.基于BIM技术的市政工程项目全过程造价管理研究[D].河北地质大学,2024.DOI:10.27752/d.cnki.gsjzj.2024.000037.
- [6]王碧莲.宁化县医院安装工程造价的界面管理[D].兰州交通大学,2024.DOI:10.27205/d.cnki.gltcc.2024.000129.
- [7]甘建娟.BIM技术在安装工程造价管理中的应用[J].新城建科技,2024,33(05):142-144.
- [8]徐斌.BIM技术在机电安装工程造价控制中的应用研究[J].现代工程科技,2024,3(24):51-53+81.

BIM技术赋能的城市燃气工程施工阶段安全风险智能识别与防控研究

张成杰, 徐兵强

中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ETQM.2025100035

摘 要 : 本文聚焦城市燃气工程施工阶段安全风险的智能识别与防控, 深入探索 BIM 技术与多学科技术的融合应用路径。在风险智能识别方面, 构建了多源信息融合方法体系, 搭建五层框架, 整合 BIM、IoT、计算机视觉与大数据技术, 实现物理风险实时感知、人员行为智能识别及多源异构数据融合判定。在风险智能防控与决策支持层面, 建立了 BIM 闭环管理机制, 开发了基于 BIM 4D/5D 的动态评估模块, 构建智能决策支持与应急预案模拟体系, 并设计“云-边-端”三层架构的一体化系统原型, 实现全周期数据互通与流程联动。研究通过技术融合与体系构建, 推动施工安全风险“识别精准化、评估动态化、防控闭环化、决策科学化”, 为提升建筑行业安全管理信息化水平提供理论方法与技术支撑。

关 键 词 : BIM 技术; 城市燃气工程; 施工安全; 风险智能识别

Research on Intelligent Identification and Prevention of Safety Risks during the Construction Phase of Urban Gas Engineering Projects Empowered by BIM Technology

Zhang Chengjie, Xu Bingqiang

CNPC (Xinjiang) Petroleum Engineering Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000

Abstract : This paper focuses on the intelligent identification and prevention of safety risks during the construction phase of urban gas engineering projects, delving into the integrated application pathways of BIM technology with multidisciplinary techniques. In terms of intelligent risk identification, a multi-source information fusion methodology framework has been established, featuring a five-tier architecture that integrates BIM, IoT, computer vision, and big data technologies. This enables real-time perception of physical risks, intelligent recognition of personnel behaviors, and fusion judgment of multi-source heterogeneous data. At the level of intelligent risk prevention and decision support, a BIM closed-loop management mechanism has been established, with the development of a dynamic assessment module based on BIM 4D/5D. An intelligent decision support and emergency plan simulation system has been constructed, along with the design of an integrated system prototype with a "cloud-edge-end" three-tier architecture, facilitating full-cycle data interoperability and process linkage. Through technological integration and system construction, this research promotes "precision in identification, dynamism in assessment, closed-loop in prevention, and scientificity in decision-making" for construction safety risks, providing theoretical methods and technical support for enhancing the informatization level of safety management in the construction industry.

Keywords : BIM technology; urban gas engineering; construction safety; intelligent risk identification

引言

本研究以提升城市燃气工程施工阶段安全管理智能化水平为目标, 聚焦安全风险的智能识别与精准防控两大核心问题开展研究。构建多源信息融合的施工安全风险智能识别方法, 整合 BIM、IoT 与计算机视觉技术, 实现物理风险、行为风险与状态风险的全面感知与精准判定; 设计基于 BIM 的安全风险智能防控体系, 开发 BIM 4D/5D 风险动态评估模块与智能决策支持系统, 建立“识别-评估-预警-处置-优化”的闭环管理机制; 通过系统原型开发与测试验证, 为城市燃气工程施工安全管理提供可落地的技术方案。本研究的开展不仅能够丰富 BIM 技术在特种设备工程施工安全领域的应用理论, 更能为降低城市燃气工程施工安全事故发生率、保障城市公共安全提供重要的技术支撑与实践指导。

一、多源信息融合的施工安全风险智能识别方法

（一）智能识别总体框架

近年来，随着建筑业信息化水平的快速发展，许多新兴信息技术为施工现场安全管理提供了一定的技术支持和新的监管视角，施工安全智能化安全管理趋势必不可免。在多种信息技术发展和融合使用的背景下，目前对施工现场安全问题的研究也逐渐形成了一个智能安全管理体系，这对于全面推进建筑行业的安全管理信息化水平有着重要的意义^[1]。多源信息融合的施工安全风险智能识别总体框架以“数据驱动、多技协同、分层识别、综合判定”为核心思路，整合 BIM、IoT、计算机视觉与大数据分析技术，构建“感知层-传输层-处理层-识别层-应用层”五层架构，实现对燃气工程施工阶段物理、行为与状态风险的全面感知与精准识别^[2]。感知层通过 IoT 传感器、计算机视觉设备及 BIM 与既有系统获取多源异构数据；传输层采用“5G+边缘计算”混合架构保障数据高效安全传输；处理层对数据进行清洗、转换与关联，为识别提供高质量支撑；识别层以“分层识别+协同联动”模式分别识别物理、行为与状态风险，并通过数据交互提升识别针对性；应用层则通过风险推送、BIM 可视化呈现与历史数据查询，为管理人员提供直观、及时的风险决策支持，形成闭环管理。

（二）基于 BIM 与 IoT 的物理风险智能感知

基于 BIM 与 IoT 的物理风险智能感知，通过深度融合传感器与 BIM 模型，实现对燃气工程施工中设备、环境、材料三类物理风险的实时感知与预警^[3]。其核心在于传感器部署优化、感知数据与 BIM 的动态关联、风险阈值模型构建三大环节^[4]。传感器部署采用“关键区域重点部署、全域覆盖补充”策略，针对焊机、起重机等设备部署电流、温度、振动传感器，在管道区、受限空间等区域安装燃气浓度、有毒气体传感器，为关键材料配备 RFID 标签与质量检测传感器，并通过 BIM 仿真优化部署方案^[5]。感知数据通过实时映射机制写入 BIM 构件属性，实现模型状态动态更新，同时 BIM 为传感器提供空间与逻辑支持，二者通过 API 接口与联动插件实现双向交互。风险阈值模型则结合施工规范、设备参数与历史数据建立分级预警机制，如焊机电流超标 10% 预警、20% 报警，燃气浓度达爆炸下限 10% 预警、20% 报警，PE 管道壁厚偏差超 5% 判定缺陷，焊接合格率低于 98% 触发质量预警，并利用机器学习算法动态优化阈值灵敏度，提升预警准确性，为施工安全提供智能化支撑。

（三）基于计算机视觉的行为与状态风险智能识别

基于计算机视觉的行为与状态风险智能识别，通过对施工区域图像视频数据的实时分析，识别人员违规行为、设备状态异常及施工环境隐患^[6]。核心技术包括视觉数据采集与预处理、行为风险识别算法、状态风险识别算法及识别结果与 BIM 关联四大环节，视觉数据采集根据识别目标选择适配设备，如高清摄像头用于识别安全帽佩戴，红外摄像头用于夜间设备监测，全景摄像头实现大场景覆盖，并结合 BIM 模型在风险高发区域优化部署位置。预处理环节通过降噪、增强和分割提升图像质量，并根据识

别需求调整帧提取频率^[7]。行为风险识别采用“目标检测+行为分析”两阶段算法，通过 YOLOv8 等检测人员目标与关键部位，结合动作序列判断是否违规，如未佩戴安全帽、违规攀爬脚手架等。状态风险识别通过特征比对分析设备与环境状态，如焊机火花异常、基坑无防护等^[8]。识别结果通过空间坐标映射与 BIM 构件属性更新实现精准关联，并在模型中以颜色标注和图标提示可视化呈现，实现风险的空间化与可视化管理。

（四）多源异构数据融合与风险综合判定

通过整合 BIM、IoT、计算机视觉及历史管理等多源异构数据，采用数据层、特征层与决策层三级融合架构，结合多维度融合算法消除数据歧义与冗余，实现对燃气工程施工安全风险的全面、精准判定^[9]。数据层对同源异构数据进行加权平均、卡尔曼滤波等整合与一致性校验；特征层提取多源数据特征，经降维与归一化后构建统一特征向量；决策层采用多分类器融合策略输出最终风险等级。风险综合判定从发生概率、后果严重程度和可控性三维度建立量化评估体系，结合泊松分布、贝叶斯模型与模糊综合评价等方法，动态计算风险值并划分等级。融合结果通过离线与在线双重验证，确保模型准确率、漏报率、误报率及管理人员满意度等指标达标^[10]。该体系不仅解决了单一数据源识别精度低、覆盖范围有限的问题，还实现了风险的全方位感知、多维度评估与精准化判定，为后续风险智能防控与决策支持提供了科学、可靠的信息基础。

二、基于 BIM 的安全风险智能防控与决策支持

（一）智能防控闭环管理机制

基于 BIM 的燃气工程施工安全风险智能防控闭环管理机制，以“风险识别—风险评估—风险预警—风险处置—效果验证—持续优化”为核心流程，通过 BIM 平台实现全周期数据互通与流程联动，形成“发现—管控—反馈—改进”的闭环体系。风险识别与评估环节将多源融合结果自动同步至 BIM 平台，结合构件参数与历史数据可视化模拟风险影响范围；风险预警采用分级推送策略，根据风险等级触发差异化通知方式，并联动 BIM 模型精准定位风险位置；风险处置环节自动匹配责任人与处置方案，通过内置方案库与操作规范指导现场执行，并实时跟踪处置进度；效果验证通过数据核验与现场复核双重方式确认风险消除，未通过则重新触发处置；持续优化环节基于闭环数据定期生成防控报告，分析风险规律并更新方案库与评估模型，推动防控机制不断迭代提升，实现风险防控的精准化、可视化与智能化。

（二）基于 BIM 4D/5D 的风险动态评估

基于 BIM 4D/5D 的风险动态评估通过融合时间（进度）、成本与三维模型，结合实时风险数据，实现“时空联动、成本关联”的动态风险管控。其核心包括 BIM 4D 动态评估、BIM 5D 成本关联评估、评估结果可视化与趋势预测三大模块，BIM 4D 动态评估以“进度—空间—风险”三维联动为核心，将施工进度计划与 BIM 模型绑定形成 4D 模型，关联实时风险数据，实现风险随进度的动态评估，包括分析风险对工期的影响、量化延误时

间并模拟后续工序影响，以及评估不同施工阶段的风险分布与变化趋势。BIM 5D成本关联评估在4D基础上融入成本维度，构建5D模型，整合工程量清单、材料单价、人工费用等数据，将风险分为直接成本损失（如维修费、返工费）和间接成本损失（如违约金、信誉损失），自动计算风险成本占比，支持处置策略的成本对比分析。评估结果通过4D风险进度图、空间风险热力图和成本风险关联表进行可视化呈现，直观展示风险在进度、空间和成本上的分布与影响。趋势预测采用时间序列算法（如ARIMA、LSTM），基于历史风险数据与未来进度计划，预测后续工序的风险发生概率与成本损失，生成预警提示，实现前瞻性管控。整体而言，该评估方法实现了风险在时间、空间、成本维度的全面联动，为燃气工程施工风险提供精准、动态、前瞻的评估与决策支持。

（三）智能决策支持与应急预案模拟

智能决策支持与应急预案模拟基于BIM平台与多源数据，为燃气工程施工风险防控提供科学决策依据与应急演练支撑。风险处置决策支持采用“数据驱动+规则匹配+多方案对比”模式，整合风险基础数据、资源数据、历史案例与规范标准，自动匹配处置流程并结合实时资源优化方案，提供多方案量化对比与推荐，辅助管理人员快速决策。应急预案数字化建模将文本预案转化为BIM可视化模型，实现空间化、流程化、参数化，构建应急资源模型、关联处置流程与责任人，并设置可调参数，支持直观漫游查看。应急预案模拟与优化通过虚拟演练检验预案可行性，动态展示应急处置全过程，自动监测漏洞并生成报告，提出优化建议，反复模拟直至关键指标达标，确保预案科学可执行。

（四）系统原型设计与开发

基于BIM的安全风险智能防控与决策支持系统原型设计与开发，以“实用性、易用性、可扩展性”为原则，整合风险识别、动态评估、智能防控与决策支持功能，构建面向燃气工程施工安全管理的一体化系统，核心包括系统架构设计、功能模块开发、数据库设计、界面设计与测试验证五大环节。系统架构采用“云-边-端”三层结构，云端部署核心数据库与算法模块，负责全局协同与复杂计算；边缘端就近处理实时数据，支持本地预警与离线缓存；终端包括PC端、移动端与现场大屏，提供差异化交

互入口，三者通过5G/4G/Wi-Fi网络与MQTT/HTTPS协议实现高效安全的数据交互。功能模块开发涵盖BIM模型管理、风险识别与评估、风险防控闭环、决策支持与应急模拟、系统管理五大模块，各模块独立运行且协同联动。数据库采用“关系型+非关系型+时序数据库”混合存储架构，分别处理结构化、非结构化与高频IoT数据，建立索引与分区策略，支持高效查询与安全备份。界面设计针对三类终端进行差异化布局，PC端采用顶部导航+左侧功能栏+中间主视图，移动端以底部导航+简洁界面为主，现场大屏则分屏展示风险热力图、统计指标与实时预警，确保操作便捷与视觉清晰。测试验证采用四阶段体系，包括单元测试、集成测试、系统测试和现场试用，从功能、性能、安全、易用性四维度全面评估系统表现，并在实际项目中部署1-2个月，收集反馈进行优化迭代。通过系统原型设计与开发，实现燃气工程施工安全风险“识别精准化、评估动态化、防控闭环化、决策科学化”，为提升城市燃气工程施工安全管理水平提供有力技术支撑。

三、结束语

本研究围绕城市燃气工程施工阶段安全风险管控的核心需求，以BIM技术为核心载体，深度融合IoT、计算机视觉、大数据分析等新兴技术，系统构建了“多源信息融合的风险智能识别—BIM驱动的风险智能防控—一体化系统支撑”的完整技术体系，有效破解了传统安全管理中“感知滞后、评估片面、防控被动”的痛点问题，为城市燃气工程施工安全管理的数字化转型提供了理论方法与实践路径。未来研究可引入数字孪生技术，构建“物理实体-虚拟模型”实时映射的动态管控平台，实现风险演化过程的可视化模拟与预判；结合区块链技术优化数据共享机制，保障多参与方数据传输的安全性与不可篡改性，提升跨主体协同管理效率；开展多场景实证研究，在不同规模、不同地质条件的燃气工程中验证技术方案的通用性，进一步完善风险评估模型与防控策略，推动研究成果向行业标准与实践规范转化，为城市燃气工程施工安全管理的智能化、标准化发展贡献更大力量。

参考文献

- [1] 吴晗. 施工人机碰撞事故风险智能识别与预警方法研究 [D]. 江苏: 江苏大学, 2024.
- [2] 朱昊梁. 数字孪生驱动的弦支梁结构施工安全智能管理方法研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2022.
- [3] 刘增辉. BIM驱动的水电工程施工区安全管控方法研究与系统开发 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [4] 张萌. 基于深度学习的脚手架高空作业险态智能识别方法研究 [D]. 江苏: 江苏大学, 2022.
- [5] 靳鲁生. 燃气工程施工风险防控分析 [J]. 数码精品世界, 2020(2): 240. DOI: 10.12277/j.issn.1009-0428.2020.02.211.
- [6] 王士铭. 基于BIM技术的燃气管线工程项目安全风险管控研究 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [7] 王胥朋. 燃气工程安全管理措施的分析与研究 [J]. 机械与电子控制工程, 2022, 4(8). DOI: 10.37155/2717-5197-0408-19.
- [8] 黄文浩. 城市燃气工程施工阶段的项目管理问题与对策 [J]. 百科论坛电子杂志, 2018(4): 193.
- [9] 谢城, 董晓, 商玉姣. 建筑工程施工阶段燃气管道安全防护关键技术探讨 [J]. 数字化用户, 2024(46): 19-20.
- [10] 王华波. 简谈燃气工程施工中的安全管理工作 [J]. 大众标准化, 2020(22): 152-153. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1350.2020.22.070.

房建工程监理单位履职能力提升策略研究

严锦春

新疆生产建设兵团草湖项目区托云牧场城镇建设和生态保护中心，新疆 乌恰 845450

DOI:10.61369/ETQM.2025100036

摘 要： 在城市化加速推进的背景下，房建工程作为民生保障与城市发展的核心载体，其建设质量与管理效率备受关注。监理单位作为连接建设单位、施工单位的关键纽带，其履职能力直接影响项目全生命周期的质量控制、安全管理、进度统筹与造价优化。本文从建设单位项目管理需求出发，结合房建与市政工程的共性与差异，分析当前监理单位在履职中存在的制度执行、人才结构、技术应用等问题，提出针对性提升策略，并通过典型案例验证其有效性，为监理行业高质量发展提供实践路径。

关 键 词： 房建工程；监理履职；能力提升

Strategies for Enhancing the Professional Competence of Construction Supervision Units in Building Construction Projects

Yan Jinchun

Urban Construction and Ecological Conservation Centre, Tuoyun Pasture, Caohu Project Area, Xinjiang Production and Construction Corps, Wuqia, Xinjiang 845450

Abstract： Against the backdrop of accelerating urbanisation, housing construction projects, as the core carriers of livelihood guarantee and urban development, have drawn significant attention to their construction quality and management efficiency. As the key link between the construction unit and the contractor, the professional competence of supervision units directly impacts quality control, safety management, progress coordination, and cost optimisation throughout the project lifecycle. This paper starts from the project management needs of construction units, combines the commonalities and differences between housing construction and municipal engineering, analyses the existing issues in the performance of supervising units, such as system implementation, talent structure, and technology application, proposes targeted improvement strategies, and verifies their effectiveness through typical cases, providing a practical path for the high-quality development of the supervising industry.

Keywords： housing construction projects; supervising performance; capability enhancement

引言

在房建工程建设的复杂体系中，监理单位扮演着不可或缺的角色，肩负着保障工程质量、确保施工安全、控制工程进度和造价等多重重要职责。监理单位履职能力的高低，不仅关乎单个房建项目的成败，更对整个建筑行业的稳健发展、社会公共安全以及人民群众的切身利益有着深远影响^[1]。

一、研究背景与意义

随着《建设工程质量管理条例》《监理工程师职业资格制度规定》等政策的深化实施，监理单位在房建工程中的法定职责愈发清晰。建设单位作为项目投资主体，对监理单位的核心诉求已从“合规性监督”转向“价值创造型服务”——既要求监理单位守住质量与安全底线，又需在进度协调、成本节约、风险预警等方面提供专业支持。然而，当前部分监理单位仍存在“重形式轻实效”“重施工轻前期”等问题，与建设单位的管理需求存在明显

脱节。

从建设单位视角研究监理履职能力，具有双重实践价值：一方面，能精准锚定建设单位在项目全周期中的核心诉求——既需监理单位严格执行法律法规，守住工程质量与施工安全的底线，更期待其超越传统“旁站监督”的被动角色，转向主动介入管理：例如在风险防控中，对深基坑支护变形、高支模沉降等隐患发出预警并推动整改。这种转型可显著减少建设单位的管理精力投入，通过监理单位的专业协同，将项目各参与方（施工、设计、勘察）的工作节奏与建设单位的目标节点深度绑定，从而提

升整体项目管理的协同效率与决策响应速度。另一方面，房建工程与市政工程虽分属不同领域，但监理履职的底层逻辑相通，且各有专业经验可相互借鉴。通过这种跨领域经验的整合，既能帮助监理单位拓展服务边界，从单一房建或市政监理向综合型项目管理服务转型，也能推动整个监理行业跳出“仅靠资质承揽业务”的同质化竞争怪圈，形成以专业能力差异为核心的竞争优势，最终为建设单位提供更具针对性的增值服务。

二、房建工程监理单位的履职范围

基于建设单位项目管理目标，监理单位的履职需覆盖“前期策划—施工实施—竣工交付”全流程，核心职责包括：

质量管控：从建材进场复试（如钢筋力学性能检测、混凝土强度回弹）到分部分项工程验收（如地基基础验槽、主体结构验收），形成可追溯的质量档案，满足建设单位对工程耐久性的要求。

安全监理：针对房建工程高空作业多、临时用电密集等特点，监督施工单位落实“三宝四口五临边”防护，排查深基坑、高支模等危大工程安全隐患，降低建设单位的安全责任风险。

进度协调：依据建设单位的节点要求（如预售节点、交付节点），优化施工组织设计，协调土建、安装、装修等交叉作业，避免因工序脱节导致的工期延误。

造价控制：对设计变更、签证单进行合理性审核（如核实施工方案是否存在“过度施工”），提出成本优化建议（如替代材料的性价比分析），协助建设单位实现投资效益最大化。

三、当前房建工程监理单位履职存在的问题

（一）制度执行与监管衔接不足

政策落地偏差：部分监理单位对建设单位的管理制度（如《项目管理手册》）执行不到位，例如在隐蔽工程验收中，未严格履行“建设单位代表签字确认”流程，导致责任追溯困难。

政企监管协同弱：面对住建部门的飞行检查，监理单位与建设单位的信息互通滞后，如未及时将现场问题同步至建设单位，影响整改时效性。

（二）人才结构与专业能力失衡

监理行业的人才供给与房建、市政工程的现代化发展需求之间存在明显错位，集中体现为技能单一化与年龄断层的双重困境，难以满足建设单位对“复合型、创新型”监理服务的需求。传统房建监理人员的知识结构多局限于混凝土结构、砌体工程等传统工艺，对建筑行业新技术、新模式的监理能力明显不足。这种技能单一化导致监理单位只能承接技术含量较低的基础项目，难以参与高端房建或复杂市政工程的监理服务，进一步加剧了行业的低端化竞争。

年龄断层明显：监理行业的年龄分布呈现“两极分化”：50岁以上的资深监理工程师虽具备丰富的传统施工监理经验，但多数对数字化工具持抵触态度，对 BIM 模型的碰撞检查、智慧工地

系统的实时数据监测等功能应用生疏，甚至依赖“手算、手绘”完成监理记录，无法满足建设单位对项目“数字化归档、可视化管理”的要求；而30岁左右的年轻监理人员虽对新技术接受度高，能熟练操作工程管理 APP、BIM 软件，但普遍缺乏实践历练，在突发问题处理中暴露能力短板。

（三）技术应用与管理需求脱节

信息化工具闲置：部分监理单位虽配备工程管理系统，但仅用于文档存档，未实现“实时数据上传—自动预警”功能（如未通过传感器监测模板沉降数据并及时推送建设单位）。

前期介入不足：建设单位在设计阶段亟需监理单位提供“可施工性审查”（如户型设计是否便于后期装修），但多数监理单位仍局限于施工阶段监理，导致设计缺陷在施工中暴露，增加返工成本。

（四）市场环境与服务价值错位

低价竞争恶性循环：为承接业务，部分监理单位以低于成本价投标，导致现场监理人员配置不足（如10万㎡项目仅配备2名监理工程师），难以满足建设单位对旁站监理的频次要求。

服务边界模糊：部分监理单位过度依赖建设单位指令，缺乏主动管理意识，例如未提前预判材料涨价风险并向建设单位预警，导致后期造价超支。

四、提升房建工程监理单位履职能力的策略

（一）构建“建设单位需求导向”的履职体系

建设单位作为项目全生命周期的责任主体，其需求贯穿“投资回报、风险防控、品牌口碑”三大核心维度。监理单位需以此为出发点，构建从方案设计到执行落地的全链条履职体系，实现与建设单位管理目标的深度耦合。定制化监理方案的精准落地，需基于建设单位的项目定位与核心诉求，形成“一项目一方案”的差异化监理策略。

协同沟通机制的闭环设计：需建立“动态反馈+目标对齐”的沟通体系，确保建设单位实时掌握项目状态并同步决策。具体可通过三级机制实现：周例会聚焦“短期执行”，监理单位需向建设单位汇报本周质量问题整改清单、下周进度计划匹配度，并协调解决施工单位提出的需建设单位决策的问题；月度报告侧重“阶段复盘”，以数据化形式呈现核心指标，对比建设单位的年度目标分析偏差原因，并附具体纠偏建议；应急专题会则针对突发情况启动，监理单位需在1小时内提交初步处置方案，4小时内联动施工、设计单位形成正式方案报建设单位审批，确保风险处置的时效性。此外，可借助数字化平台（如项目管理 APP）建立“问题—整改—验收”的线上闭环流程，建设单位可随时查看监理单位的履职痕迹，实现沟通的透明化与可追溯。

（二）打造“房建+市政”复合型队伍

监理单位的履职能力，核心载体是具备跨领域专业素养与主动服务意识的人才团队。针对当前房建与市政工程监理人才“各成体系、能力单一”的痛点，需通过分层培养与机制创新，构建“一专多能”的复合型队伍，满足建设单位对综合化监理服务的

需求。

针对资深监理工程师，需突破“经验依赖”瓶颈，强化数字化工具与跨领域知识的融合能力。例如，开展 BIM 技术深度应用培训，不仅掌握模型碰撞检查基础操作，更要能结合房建工程的机电管线综合和市政工程的地下管廊三维建模，为建设单位提供可视化的施工方案优化建议；同时增设市政工程核心技术课程，如城市道路基层碾压工艺、地下管线非开挖施工的监理要点，使其从“房建专家”或“市政专家”升级为“综合型技术顾问”。

针对年轻监理人员，实施“双导师+跨项目历练”培养模式：由房建与市政领域各一名资深工程师共同带教，同时，安排年轻人员参与跨领域项目的协调会议（如房建项目周边市政道路改移协调会），提升其在复杂场景下的沟通能力，快速积累“房建+市政”的复合经验。

建立以“建设单位价值贡献”为核心的考核体系，打破传统“以考勤、报告数量为主”的粗放模式。将建设单位满意度纳入绩效考核核心指标，考核结果直接与薪酬晋升挂钩。

（三）推动“技术赋能+管理升级”融合应用

监理单位履职能力的提升，需以技术工具为支撑、以管理模式创新为核心，实现从“事后纠偏”向“事前预防”“过程优化”的转变，深度契合建设单位对项目“可控、高效、增值”的管理需求。

数字化监理工具的深度落地与场景化应用：依托智慧监理平台构建全流程数字化管控体系，将技术工具与监理职责深度绑定，而非停留在“工具摆设”层面。建材全生命周期追溯，通过二维码+区块链技术，不仅记录建材出厂合格证、复试报告等基础信息，更关联进场验收记录、养护记录等动态数据，建设单位可通过扫码实时查看“材料-施工-验收”全链条信息，解决传统纸质资料易篡改、难追溯的问题。施工现场智能监控系统的协同应用，在 AI 自动识别未戴安全帽、高空抛物等基础功能上，结合项目类型增加定制化监测模块：房建项目可增设外架搭设合规性识别（如立杆间距、扫地杆设置）、塔吊作业半径内人员闯入预警等功能，监理单位通过系统生成的每日违规清单，针对性督促整改，大幅降低建设单位的安全管理压力。基于 BIM+ 进度管理的可视化预警，将施工计划转化为 4D BIM 模型（3D 模型+时间维度），实时采集现场施工数据，系统自动对比计划与实际进度偏差，当偏差超过 5% 时提前 7 天向建设单位和监理单位发出预警，并模拟不同纠偏方案的效果，辅助建设单位决策，避免传统“事后发现滞后”的被动局面。

（四）规范市场行为与价值定价

监理行业的健康发展，离不开规范的市场秩序与合理的价值定价机制。当前监理市场存在的“低价竞争—服务缩水—价值贬低”恶性循环，既损害建设单位的长远利益，也制约监理单位履职能力的提升。需通过行业引导、制度约束与模式创新，重构“优质优价、价值匹配”的市场生态。

多维度抵制低价竞争，筑牢服务质量底线：业协会应发挥自律作用，联合建设单位、监理单位共同制定科学的监理服务成本指导价，明确不同类型项目的监理成本构成为市场定价提供参考基准。成本指导价需动态更新，结合人工成本上涨、技术工具升级等因素每年调整一次，避免“指导价脱离实际”的形式化问题。建设单位在招标环节应主动打破“唯价格论”的评标倾向，将“服务方案可行性”“人员配置专业性”“技术工具先进性”等纳入核心评分项，权重不低于 40%。同时，在招标文件中明确监理人员配置的“硬标准”：例如房建项目按建筑面积每 5000 m² 配备 1 名专业监理工程师（其中至少 1 名具备 5 年以上同类型项目经验）。对投标报价低于成本指导价 80% 的单位，要求提供详细的成本构成说明，杜绝“先低价中标、后削减服务”的套路，从源头避免“低价低质”陷阱。

改变传统“固定费率”的单一付费方式，建立与建设单位项目目标深度绑定的“基础酬金+绩效奖金”付费体系。基础酬金按项目监理服务成本的 80%-90% 确定，覆盖监理单位的人员薪酬、办公开支等基本运营成本，保障监理服务的稳定性；绩效奖金则与建设单位的核心目标（如质量、进度、成本、安全）挂钩，占总费用的 10%-20%，具体设定可灵活调整。这种模式将监理单位的收益与建设单位的项目成败紧密关联，既避免了“干好干坏一个样”的消极心态，也激励监理单位主动挖掘服务价值，从“按流程办事”转向“为结果负责”，最终实现建设单位与监理单位的“风险共担、利益共享”。

五、结论与展望

监理单位履职能力的提升，本质是与建设单位项目管理需求的深度适配。未来，随着 EPC 模式推广，监理单位需进一步向“全过程工程咨询”转型，在房建与市政工程中整合设计管理、招标代理等服务，成为建设单位的“一站式项目管理伙伴”。同时，行业需加强诚信体系建设，对履职不力的监理单位实施市场禁入，推动监理行业从“数量扩张”转向“质量提升”。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建设工程监理规范 (GB/T 50319-2013)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖 与支护关键技术研究

吴旺, 周祥

浙江交工金筑交通建设有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ETQM.2025100037

摘 要 : 本文通过综合运用理论分析、数值模拟以及现场监测等手段, 深入研究了该类隧道的控制开挖与支护关键技术。首先, 对浅埋偏压软弱围岩隧道洞口段施工技术进行剖析, 提出了针对性的施工策略; 其次, 探究大断面软岩隧道开挖围岩卸荷机制, 揭示围岩应力应变的变化规律; 再者, 对大断面软岩隧道变形特性进行分析并构建预测分级体系; 同时, 研究大断面软岩隧道支护结构施工期力学行为, 为支护设计提供理论支撑; 最后, 整合各项技术形成复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖与支护施工技术体系。研究成果对于指导同类隧道工程的设计与施工, 提高工程安全性与经济性具有重要意义。

关 键 词 : 复杂软岩; 超长浅埋; 大断面隧道; 控制开挖; 支护技术

Research on Key Technologies for Controlled Excavation and Support of Complex Soft Rock Ultra long Shallow Buried Large Section Tunnels

Wu Wang, Zhou Xiang

Zhejiang Jiaogong Jinzhu Transportation Construction Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : This article deeply studies the key technologies of controlled excavation and support for this type of tunnel through the comprehensive application of theoretical analysis, numerical simulation, and on-site monitoring. Firstly, an analysis of the construction technology for the entrance section of shallow buried and biased weak surrounding rock tunnels was conducted, and targeted construction strategies were proposed; Secondly, explore the unloading mechanism of surrounding rock during excavation of large section soft rock tunnels, and reveal the variation law of surrounding rock stress-strain; Furthermore, analyze the deformation characteristics of large section soft rock tunnels and construct a predictive grading system; At the same time, studying the mechanical behavior of the support structure during the construction period of large section soft rock tunnels provides theoretical support for support design; Finally, integrate various technologies to form a complex soft rock ultra long shallow buried large section tunnel control excavation and support construction technology system. The research results are of great significance for guiding the design and construction of similar tunnel projects, improving engineering safety and economy.

Keywords : complex soft rock; ultra long shallow burial; large section tunnel; control excavation; supporting technology

引言

在交通基础设施持续建设的过程当中, 复杂软岩且超长、浅埋以及大断面的隧道工程逐渐增多。这类隧道, 由于围岩性质较差、埋深相对较浅、断面尺寸大, 所以在施工时, 就会碰到诸如围岩失稳、变形不好控制等一系列棘手的难题。以往常规的施工技术, 在面对这些复杂情况时存在着诸多局限, 所以当下迫切地需要探究创新型的控制开挖以及支护技术。本文把多学科的相关理论综合加以运用, 同时将数值模拟和现场实践紧密结合, 以突破现有的技术瓶颈, 从而为同类型隧道工程能够安全且高效地开展建设, 打下坚实的理论与实践基础。

一、浅埋偏压软弱围岩隧道洞口段施工技术

（一）工程特性分析

浅埋偏压软弱围岩隧道的洞口段呈现出独特的工程特性。从地质层面来看，其围岩强度较低，完整性欠佳，大多是呈现破碎状态的岩体或者土体，如常见的软岩、砂土以及粉质土等等，这类围岩的抗剪强度以及承载能力均较为有限。浅埋致使隧道顶部的覆盖层相对较薄，难以形成具备足够承载作用的拱，围岩压力便会直接施加于支护结构之上。而偏压，是因为地形、地质构造等因素，使得隧道两侧的围岩压力出现不平衡的状况，往往是一侧的压力显著地大于另一侧，进一步加大了隧道结构在受力复杂程度^[1]。例如，在山区的隧道当中，一侧是山体，而另一侧则是经由填方或者挖方所形成的临空面，这种情形造成了明显的偏压。

（二）施工技术要点

就上述这些特性而言，在洞口段展开进洞施工时，多个关键技术需要加以把握。在洞内进行超前支护时，常用到的手段有超前小导管注浆，即通过注入水泥浆或者化学浆液的方式，填充存在的空隙，以此让围岩的稳定性能得以增强；管棚支护是沿着轴线打入大直径的钢管，从而形成类似棚架的结构，这样就能承托住上部的围岩，防止出现坍塌。而在洞外的地表部分，要借助削坡以及运用锚杆、锚索、挡土墙等相关措施对边仰坡进行加固处理，避免因开挖作业而引发滑坡或者坍塌等危险状况。开挖的方法则要依据围岩的具体条件做出选择。若遇到极软弱的围岩，要采用双侧壁导坑法、CRD法等这类分步开挖的方式，如此可以减少对围岩的扰动；若围岩条件相对较好，那么可以选择台阶法，它能兼顾施工速度和变形控制。另外，初期支护工作需要及时开展，要采用喷混、钢拱架、钢筋网联合的形式，其中喷混能够起到封闭表面防止松动的作用，钢拱架可以承担重量，钢筋网则能抵抗开裂。等到初期支护稳定之后，再施作二次衬砌，增强工程的耐久性。在施工的各个环节当中，都要严格遵守相关的规范要求，确保施工过程安全。

二、大断面软岩隧道开挖围岩卸荷机制

（一）理论基础

岩体卸荷力学以及围岩变形空间效应理论，构成了探究大断面软岩隧道开挖时围岩卸荷机制的关键根基。就岩体卸荷力学而言，在隧道开挖的进程当中，围岩原本所具有的应力状态会被打破，应力出现重新分布的情况，使得围岩出现卸荷变形现象。这种变形并非仅仅取决于岩体自身的力学性质，实际上，开挖方式、开挖顺序等一系列施工因素，也都和它有着紧密的关联。围岩变形的空间效应主要体现在围岩变形在空间维度上表现出显著的非均匀性特征以及明显的时效性特征，也就是说，不同位置的围岩，其变形程度以及速率都是存在差别的，并且这种变形还会顺着时间的流逝持续不断地发展。

（二）数值模拟研究

借助 FLAC3D 构建大断面软岩隧道的三维数值模型，能够很

好地对围岩卸荷机制展开研究。在该模型里，要精准地对诸如台阶法、CD 法等不同开挖方法，还有支护时机以及参数等各类工况加以模拟，通过监测点追踪拱顶、边墙等关键部位的应力以及位移所发生的变化。模拟的情况表明，在开挖开始时，围岩应力会迅速地释放，拱顶与边墙会有应力集中的现象出现，并且会随着开挖的不断推朝着深部转移；从位移方面来看，拱顶下沉的情况以及边墙收敛的情况都比较明显，在开挖面附近的变形速率可观。通过对分析结果的研究，能够清楚地了解围岩应力应变在空间上的变化过程，揭示出在不同施工条件之下荷载释放的机制，为理解失稳机理以及优化施工和支护设计给予一定的参考^[2]。

三、大断面软岩隧道变形特性及预测分级

（一）变形特性分析

典型的软岩隧道存在着多种多样的变形破坏模式。就水平层状软岩隧道来讲，因为层面所产生的影响，隧道的顶部与底部是较易出现拉伸破坏，而其边墙则是有发生剪切破坏的可能性，致使隧道断面的形状出现改变，呈现出顶沉、底鼓以及边墙内挤等一系列的现象。斜倾软岩隧道以及陡倾软岩隧道，它们的变形破坏情况更为繁杂。除了上述所提到的破坏形式之外，还极有可能因为岩层的倾斜而引发偏压效应，从而使得隧道的一侧变形程度明显要比另一侧更大。通过岩石力学试验能够发现，软岩有着变形模量比较低、泊松比偏大的特点，在受到力的作用时就很容易产生相对较大的塑性变形。与此同时，软岩所具有的流变特性也较为显著，即便在恒定荷载持续作用的情况下，它的变形也会随着时间的推移而不停地发展变化，给隧道的长期稳定性带来了相当大的挑战。

（二）预测分级指标构建

为了能切实对大断面软岩隧道的变形情况做出有效预测，提出大变形预测分级指标，此指标适用于处在高地应力环境下的层状软岩隧道。该指标把多个因素都综合加以考量，如围岩所具有的物理力学参数，包含岩石强度、变形模量以及泊松比等；隧道自身的几何参数，比如断面尺寸、埋深；地应力的大小以及其方向情况；施工因素如开挖采用的方法、支护选择的时机等等。经过对大量工程案例展开细致分析以及进行数据的详尽统计之后，建立各因素和隧道变形之间存在的量化关系，并且以数学模型或经验公式的形式呈现。例如，可以运用多元线性回归分析方法，构建回归方程，在方程里把围岩强度、地应力大小以及开挖方法作为自变量，而将隧道变形量作为因变量。依据所提出的这个预测分级指标，能够把隧道变形划分成不同的等级，如轻微变形、中等变形以及严重变形等。针对这些不同的变形等级，分别制定与之相对应的预警机制以及处理措施，便可以给隧道施工过程中的变形控制提供具有科学性的依据，从而能够提前采取有效的加固以及支护手段，确保隧道施工能够安全开展，让隧道的结构

始终保持稳定状态^[3]。

四、大断面软岩隧道支护结构施工期力学行为

（一）现场测试研究

挑选诸多具有典型性的隧道类别，如穿越断层破碎带的隧道、围岩软弱的隧道、浅埋偏压隧道、存在高地应力的硬岩隧道以及高地应力的软岩隧道等，针对支护结构受力状况展开现场测试研究。在隧道的支护结构中埋入传感器，土压力盒用于对围岩和支护结构彼此间的接触压力予以测量，混凝土应变计则可对混凝土结构的应变情形加以监测，而钢筋轴力计能够对钢筋的受力状态进行检测。通过长期且不间断的监测，得到不同种类隧道在施工期间其支护结构所呈现出的受力数据。

（二）影响因素分析

对测试结果展开的对比性分析，清晰地呈现多种因素给隧道支护结构力学行为带来的明显影响。软弱围岩的强度偏低，其自稳能力较差，会让支护结构承受较大的围岩压力，使得支护结构出现变形，其内力也随之增大。断层破碎带使围岩的完整性遭受严重的破坏，在开挖的过程当中，易出现围岩坍塌，对支护结构形成冲击荷载，让支护结构受力的复杂程度有所增加^[4]。地形偏压会导致隧道两侧的围岩压力不均匀，致使支护结构受力呈现出不对称的特点，容易引发支护结构局部出现破坏现象。在高地应力的环境之下，无论是硬岩隧道还是软岩隧道，支护结构都得承受较大的地应力作用，特别是软岩隧道，鉴于软岩所具有的高压缩性以及流变特性，支护结构的变形以及应力会随着时间的推移而持续地增长。层理构造会对围岩的力学性质以及破坏模式产生影响，进一步影响到支护结构的受力状态。对这些影响因素有所了解，能够有助于在支护结构设计以及施工环节当中采取具有针对性的措施，以提升支护结构的安全性及可靠性，确保隧道在施工期间以及运营期间都能保持稳定状态。

五、复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖与支护施工技术

（一）技术体系整合

综合前文提及的各类技术，应构建完备的复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖以及支护施工技术体系。在正式施工之前，务必要针对隧道工程地质条件展开详尽的勘察工作，如围岩的岩性状况、结构特点、地下水情形、地应力状态等等方面，都需细致考察。与此同时，还要对隧道的各项设计参数加以分析，例如

断面的具体尺寸、埋深程度、线路的走向等方面。依据勘察结果，合理挑选施工工法。对于浅埋偏压且围岩软弱的路段，应当优先选用契合实际的分部开挖办法，并和有效的超前支护举措相结合。在开挖作业开展期间，务必要严格依照“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭、勤量测”的原则执行，以减少对围岩产生的扰动，而且要及时施作支护结构，从而确保围岩能够保持稳定状态。借助数值模拟技术针对施工过程实施动态模拟操作，依据模拟结果来对施工参数以及支护方案做出相应调整。除此之外，还要进一步强化现场监测工作，通过对监测数据的反馈情况加以分析，从而能够实时掌握围岩以及支护结构所承受的力以及变形状况，一旦发现有异常情况出现，就要即刻采取加固处理措施^[5]。

（二）工程应用验证

依托实际工程，对这一技术体系展开应用验证工作。在某复杂软岩且超长、浅埋以及大断面的隧道工程里，运用上述技术体系来开展施工活动。在洞口那区域，依照针对浅埋偏压且围岩软弱的隧道洞口段施工所设定的技术要求，实施了有效的超前支护措施，同时也对边仰坡进行了加固处理，从而顺利实现进洞施工的目标。在隧道进行开挖的过程当中，依据对围岩卸荷机制以及变形特性所取得的研究成果，挑选合理的开挖方法与支护参数，并且借助数值模拟的方式来加以优化完善。从现场监测所获取的数据能够看出，隧道围岩发生的变形的得到了有效的把控，支护结构所承受的力处于安全的范围之内，施工过程进展顺利，并没有出现围岩失稳以及坍塌事故情况。这一工程得以成功实施，充分证实了针对复杂软岩、超长、浅埋且大断面隧道的控制开挖以及支护施工技术体系具备合理性与可行性，给类似的工程贡献了宝贵的实践经验以及可资借鉴的范例，对推动该技术在隧道工程领域广泛地应用以及进一步的发展起到了助力作用。

六、结束语

论文聚焦于复杂软岩且呈现超长浅埋状况的大断面隧道，全面且细致地对诸多内容展开了剖析，包含洞口段施工直到支护结构所呈现出的力学行为等各个环节。清晰地明确了处在浅埋偏压状况下且围岩软弱的隧道，其洞口段在施工时所涉及的关键技术要点。同时，揭示了大断面软岩隧道在开挖过程当中围岩出现卸荷的机制，并构建了一套用于变形预测的分级体系，切实地掌握了支护结构在施工期间其力学行为所遵循的规律。在此基础上，进一步形成了一套完备的施工技术体系，而且这一体系经过相关的工程应用实践，也得到了有效的验证。

参考文献

- [1] 韩宇豪，王海军，马媛. 高地应力软岩隧道开挖及支护技术优化设计 [J]. 中华建设，2025，(08): 189-191.
- [2] 李俊. 高地应力软岩小近距隧道支护变形控制技术研究 [J]. 低温建筑技术，2025，47 (06): 74-77+86. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2025.6.017.
- [3] 胡美华. 富水软岩隧道复合式衬砌支护施工关键技术与质量控制 [J]. 交通世界，2025，(18): 95-97. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.18.032.
- [4] 胡祺. 大凉山1号隧道软岩大变形处置研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版)，2025，(18): 136-138. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202518046.
- [5] 李晓渭. 软岩隧道变形特征及其施工控制技术研究 [J]. 科学技术创新，2025，(15): 95-98.

高层建筑工程施工关键技术与质量控制体系构建

温梓琪

宁都县城市建设投资集团有限公司, 江西 赣州 342800

DOI:10.61369/ETQM.2025100038

摘 要 : 随着城市化进程的加速, 高层建筑在城市建设中占据着越来越重要的地位。本文深入探讨高层建筑工程施工的关键技术, 包括深基坑支护技术、桩基施工技术、钢筋工程技术、混凝土工程技术、模板工程技术等, 并针对各关键技术要点与难点进行分析。同时, 详细阐述构建全面且科学的质量控制体系, 涵盖施工前的准备工作、施工过程中的质量控制以及施工后的质量验收与评估, 旨在提升高层建筑工程的施工质量与安全性能, 为相关工程实践提供理论支持与实践指导。

关 键 词 : 高层建筑; 施工关键技术; 质量控制体系; 深基坑支护; 桩基施工

Key Technologies for High-rise Construction and the Construction of Quality Control System

Wen Ziqi

Ningdu County City Construction Investment Group Co., LTD., Ganzhou, Jiangxi 342800

Abstract : With the acceleration of urbanization, high-rise buildings occupy an increasingly important position in urban construction. This paper deeply explores the key technologies in construction of high-rise building engineering, including deep foundation pit support technology, pile foundation construction technology, reinforcement engineering technology, concrete engineering technology, template engineering technology, etc., andzes the key points and difficulties of each key technology. At the same time, it elaborates the construction of a comprehensive and scientific quality control system, covering the preparation work before construction the quality control during construction, and the quality acceptance and evaluation after construction, aiming to improve the construction quality and safety performance of high-rise building engineering, and to provide theoretical and practical guidance for relevant engineering practice.

Keywords : high-rise building; key construction technology; quality control system; deep foundation pit support; pile foundation construction

引言

高层建筑以其能有效利用城市土地资源、满足日益增长的居住和办公需求等优势, 成为现代城市发展的标志性建筑。然而, 高层建筑工程施工面临着诸多挑战, 如复杂的地质条件、高空作业的安全风险、施工技术的复杂性等。确保高层建筑工程施工质量与安全, 关键技术的合理应用和科学的质量控制体系构建至关重要。

一、高层建筑工程施工关键技术

(一) 深基坑支护技术

高层建筑的基础通常埋深较大, 需要进行深基坑开挖, 深基坑支护技术成为保障基坑安全和周边环境稳定的关键。常见的深基坑支护形式有排桩支护、地下连续墙支护、土钉墙支护、内支撑和锚杆支护等。排桩支护是将钢筋混凝土桩或钢板桩等按一定

间距排列, 形成支护结构, 适用于较浅基坑和土质较好的情况; 地下连续墙则是通过在基坑周边浇筑连续的钢筋混凝土墙体, 具有挡土和止水的双重功能, 适用于对变形控制要求较高的深基坑; 土钉墙支护利用土钉与土体的摩擦力和粘结力, 增强土体的稳定性, 一般用于土质较好且基坑深度较浅的工程; 内支撑和锚杆支护则是通过在基坑内部设置支撑结构或在土体中锚固锚杆, 来平衡土体的侧压力, 保证基坑的稳定^[1]。

在实际施工中,需根据基坑的深度、地质条件、周边环境等因素综合选择合适的支护形式。例如,在软土地质条件下,地下水位较高且周边建筑物密集时,采用地下连续墙结合内支撑的支护方式较为合适,能够有效控制基坑变形,减少对周边环境的影响;而在土质较好、周边空旷的场地,土钉墙支护则可能是更经济的选择。同时,施工过程中要加强对基坑的监测,包括位移监测、沉降监测、地下水位监测等,根据监测数据及时调整施工方案,确保基坑施工安全。

（二）桩基施工技术

桩基是高层建筑的重要基础形式,其承载能力和稳定性直接影响到整个建筑的安全。常见的桩基类型有预制桩和灌注桩。预制桩是在工厂或施工现场预先制作,然后通过锤击、静压等方式将桩沉入地基土中;灌注桩则是在施工现场利用机械或人工成孔,然后在孔内放置钢筋笼并浇筑混凝土而成^[2]。

预制桩具有质量稳定、施工速度快等优点,但对施工场地和施工设备要求较高,且在沉桩过程中可能会对周边土体产生较大的扰动。灌注桩则适应性强,可以根据不同的地质条件和设计要求进行灵活调整,但施工过程中容易出现塌孔、缩颈等质量问题。在桩基施工中,要严格控制桩的垂直度、桩长、桩径等参数,确保桩的质量符合设计要求。例如,对于灌注桩,要控制好泥浆的性能,防止塌孔;在浇筑混凝土时,要保证混凝土的浇筑质量,避免出现断桩等缺陷。同时,要进行桩基检测,包括桩身完整性检测和承载力检测,确保桩基的质量和承载能力满足设计要求。

（三）钢筋工程技术

钢筋是高层建筑结构中的主要受力材料,其质量和施工质量直接影响到建筑结构的安全性。钢筋工程技术包括钢筋的原材料检验、加工、连接和绑扎等环节。在钢筋原材料检验方面,要严格检查钢筋的出厂质量证明文件,对钢筋的外观、直径、力学性能等进行检验,确保钢筋质量符合国家标准和设计要求^[3]。

钢筋加工时,要按照设计要求进行钢筋的调直、切断、弯曲等加工,保证钢筋的形状和尺寸准确。钢筋连接是钢筋工程中的关键环节,常见的连接方式有焊接、机械连接和绑扎连接。焊接连接包括电弧焊、电渣压力焊等,具有连接强度高、成本低等优点,但对焊接工艺要求较高,焊接质量不稳定;机械连接如直螺纹套筒连接、锥螺纹套筒连接等,具有连接可靠、施工速度快等优点,但成本相对较高;绑扎连接则适用于较小直径的钢筋连接,操作简单,但连接强度相对较低。在实际施工中,要根据钢筋的直径、位置、受力情况等因素选择合适的连接方式,并严格控制连接质量,确保连接部位的强度和可靠性。钢筋绑扎时,要按照设计要求的间距和位置进行绑扎,保证钢筋的布置符合设计要求,同时要注意钢筋的保护层厚度,防止钢筋锈蚀。

（四）混凝土工程技术

混凝土是高层建筑结构的主要材料之一,其质量和施工质量对建筑结构的耐久性和安全性至关重要。混凝土工程技术包括混凝土的配合比设计、原材料选择、搅拌、运输、浇筑、振捣和养护等环节。在混凝土配合比设计方面,要根据工程的设计要求、

施工条件和原材料性能等因素,通过试验确定合理的配合比,保证混凝土的强度、耐久性、工作性等性能满足要求。

原材料选择时,要选用质量稳定的水泥、骨料、外加剂等,水泥要符合国家标准,骨料的级配和含泥量要符合要求,外加剂的种类和掺量要根据混凝土的性能要求合理选择。混凝土搅拌时,要控制好搅拌时间和搅拌速度,保证混凝土的均匀性;运输过程中要采取措施防止混凝土离析和坍落度损失。混凝土浇筑是混凝土工程的关键环节,要根据结构特点和施工条件选择合适的浇筑方法,如分层浇筑、分段浇筑等,保证混凝土浇筑的连续性和密实性。在浇筑过程中,要加强振捣,使混凝土充分密实,防止出现蜂窝、麻面等缺陷。混凝土浇筑完成后,要及时进行养护,养护时间和养护方法要根据混凝土的类型和环境条件合理确定,保证混凝土的强度正常增长和耐久性^[4]。

（五）模板工程技术

模板工程是保证混凝土结构形状、尺寸和位置准确的重要手段,同时也为混凝土施工提供作业平台。模板工程技术包括模板的设计、制作、安装和拆除等环节。在模板设计方面,要根据混凝土结构的形状、尺寸、荷载等因素,进行模板的强度、刚度和稳定性计算,选择合适的模板材料和支撑体系。常见的模板材料有木模板、钢模板、铝合金模板等,木模板具有重量轻、加工方便、成本低等优点,但周转次数较少;钢模板和铝合金模板则具有强度高、刚度大、周转次数多等优点,但成本相对较高。

模板制作时,要保证模板的尺寸准确、表面平整,拼接严密,防止漏浆。模板安装时,要按照设计要求进行安装,保证模板的位置准确、垂直度符合要求,支撑体系牢固可靠。在安装过程中,要注意模板与钢筋的配合,避免相互干扰。模板拆除时,要根据混凝土的强度增长情况和结构特点,按照规定的顺序和方法进行拆除,防止过早拆除导致混凝土结构受损。

二、高层建筑工程质量控制体系构建

（一）施工前的质量控制

施工前的质量控制是整个质量控制体系的基础,主要包括施工图纸审核、施工组织设计编制、施工人员培训、原材料和构配件检验等工作。施工图纸审核是确保工程质量的重要环节,施工单位要组织专业技术人员对施工图纸进行认真审核,检查图纸是否存在设计错误、遗漏、矛盾等问题,及时与设计单位沟通解决。通过图纸审核,可以提前发现问题,避免在施工过程中出现不必要的变更和返工,保证工程质量和进度^[5]。

施工组织设计是指导施工的纲领性文件,要根据工程的特点、施工条件、质量要求等因素,编制详细的施工组织设计,包括施工方案、施工进度计划、施工平面布置、质量保证措施、安全保证措施等内容^[6]。施工组织设计要经过专家论证和审批,确保其科学性、合理性和可行性。施工人员是工程施工的直接参与者,其技术水平和质量意识直接影响到工程质量。施工单位要对施工人员进行全面的培训,包括技术培训、安全培训、质量意识培训等,使施工人员熟悉施工工艺和质量标准,掌握操作技能,

提高质量意识和责任心^[7]。

原材料和构配件的质量是工程质量的基础，要严格进行检验和控制。施工单位要建立健全原材料和构配件的采购、验收、保管制度，选择质量可靠的供应商，对进场的原材料和构配件要进行严格的检验，包括外观检查、尺寸检验、性能检验等，检验合格后方可使用。同时，要做好原材料和构配件的保管工作，防止其受潮、生锈、变质等，影响质量^[8]。

（二）施工过程中的质量控制

施工过程中的质量控制是质量控制体系的核心，主要包括工序质量控制、隐蔽工程质量控制、施工质量检验和验收等工作。工序质量控制是保证工程质量的关键，要对每一道工序进行严格的质量控制。施工单位要建立工序质量控制点，对关键工序和重要部位进行重点控制，制定详细的质量控制措施和操作规程，要求施工人员严格按照操作规程进行施工。在工序施工过程中，要加强质量检查，及时发现和纠正质量问题，确保每一道工序的质量符合要求。只有上一道工序质量验收合格后，才能进行下一道工序施工，防止出现质量隐患^[9]。

隐蔽工程是指在施工过程中被下一道工序所掩盖，无法直接进行质量检查的工程部位。隐蔽工程的质量直接影响到整个工程的质量和安全，因此要加强隐蔽工程的质量控制。在隐蔽工程施工前，施工单位要进行自检，自检合格后报监理单位进行验收。监理单位要组织专业监理工程师对隐蔽工程进行认真验收，检查隐蔽工程的施工质量是否符合设计要求和规范标准，验收合格后方可进行隐蔽。在隐蔽工程验收过程中，要做好验收记录和影像

资料，以备日后查阅^[10]。

施工质量检验和验收是保证工程质量的重要手段，要按照国家和地方的相关标准、规范进行。施工单位要建立健全质量检验制度，配备必要的质量检测设备和人员，对施工过程中的原材料、构配件、分项工程、分部工程等进行及时的质量检验。质量检验包括自检、互检和专检，自检是施工人员对自己所完成的工作进行自我检查；互检是施工班组之间或施工人员之间相互检查；专检是由专业质量检验人员进行的检查。通过多层次的质量检验，确保施工质量符合要求。在分项工程、分部工程和单位工程施工完成后，要及时进行验收，验收合格后方可进行下一个阶段的施工或交付使用。

三、结束语

高层建筑工程施工关键技术的合理应用与质量控制体系的有效构建，是保障高层建筑工程质量与安全的核心要素。通过深入研究和掌握深基坑支护、桩基施工、钢筋工程、混凝土工程、模板工程等关键技术，以及从施工前、施工过程和施工后三个阶段全面构建质量控制体系，严格把控各个环节的质量要点，可以有效提升高层建筑工程的施工质量，降低安全风险，推动高层建筑行业的健康、可持续发展。在未来的高层建筑工程实践中，还需不断总结经验，持续创新技术和管理方法，以适应不断发展的建筑需求和更高的质量标准。

参考文献

- [1] 李开树. 超高层建筑机电工程施工重难点分析与优化对策 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(12): 180-182.
- [2] 王云波. 高层住宅的房建施工技术 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(23): 84-86.
- [3] 黄睿. 高层建筑消防工程施工中常见问题及质量控制措施 [J]. 中华建设, 2024, (12): 52-54.
- [4] 陈燕坤. 高层住宅建筑深基坑支护工程施工技术要点分析 [J]. 中华民居, 2024, 17(08): 172-174.
- [5] 孙景超. 高层房屋建筑工程施工中的安全管理措施探析 [J]. 中华民居, 2024, 17(07): 163-165.
- [6] 张磊. 高层住宅建筑工程施工安全风险管控措施思考 [J]. 居舍, 2024, (29): 173-176.
- [7] 焦钦伟. 高层房屋建筑工程施工安全风险管控探究 [J]. 四川水泥, 2024, (10): 127-129.
- [8] 张秋利. 建筑工程施工过程中基坑受力变形特点研究 [J]. 江西建材, 2024, (09): 321-323.
- [9] 展国海. 高层房屋建筑工程施工安全风险管控措施探析 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(18): 118-120.
- [10] 李坤洋. 高层住宅建筑地下防水工程施工技术研究 [J]. 居舍, 2024, (24): 26-29.

绿色建筑施工中的节能环保技术研究

钱俊超

中南建筑设计院股份有限公司，湖北 武汉 430060

DOI:10.61369/ETQM.2025100039

摘 要： 绿色建筑对于推进可持续发展与环境保护具备关键价值，而节能环保技术作为绿色建筑的核心构成要素，在降低能源耗费、削减碳排放以及优化环境质量方面发挥着不可或缺的作用。建筑施工阶段，借助采用高效节能设计方案、环保型材料以及先进施工工艺，能够明显增强建筑的能源利用效率与环保性能，具体来看，这些技术涵盖优化建筑结构设计、选用低碳环保类材料、对施工废弃物开展回收与二次利用等措施，它们在减少资源消耗和废物排放量的同时，还进一步提升了施工过程中的环境友好程度，落实这些技术手段，不仅可有效降低建筑全生命周期内的能源消耗，还能为社会层面的可持续发展贡献力量，强化节能环保技术在绿色建筑施工环节的应用力度，能够推动建筑行业向绿色化方向转型，为达成节能减排与环境保护的目标提供坚实支撑。

关 键 词： 绿色建筑；节能技术；环保材料；施工技术；废弃物回收

Research on Energy-Saving and Environmental Protection Technologies in Green Building Construction

Qian Junchao

Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430060

Abstract： Green buildings hold significant value in advancing sustainable development and environmental protection. As a core component of green buildings, energy-saving and environmental protection technologies play an indispensable role in reducing energy consumption, cutting carbon emissions, and improving environmental quality. During the construction phase, the adoption of efficient energy-saving design solutions, eco-friendly materials, and advanced construction techniques can markedly enhance the energy efficiency and environmental performance of buildings. Specifically, these technologies encompass measures such as optimizing building structural design, selecting low-carbon and eco-friendly materials, and recycling and reusing construction waste. While reducing resource consumption and waste emissions, they further enhance environmental friendliness during the construction process. Implementing these technological measures can effectively lower energy consumption throughout the entire life cycle of buildings and contribute to sustainable development at the societal level. Strengthening the application of energy-saving and environmental protection technologies in green building construction can drive the transformation of the construction industry towards green development, providing solid support for achieving energy conservation, emission reduction, and environmental protection goals.

Keywords： green building; energy-saving technology; eco-friendly materials; construction techniques; waste recycling

引言

伴随全球范围内对环境保护与可持续发展重视程度的持续加深，绿色建筑已成为建筑行业发展的趋势，其也是实现环境保护与可持续发展目标的关键路径。在建筑全生命周期中，施工阶段是极为关键的环节，该阶段节能环保技术的应用情况，会直接影响建筑最终的能源利用效率与环境影响程度，在施工过程中采用创新性的节能设计思路、环保属性材料以及高效施工技术，不仅能够大幅降低建筑运行过程中的能源消耗，还能减少施工环节产生的废弃物排放量，实现对各类资源的优化使用，节能环保技术在绿色建筑施工场景中的广泛应用，正推动着建筑行业逐步完成绿色转型，这也为实现低碳经济发展模式与可持续发展目标提供了强有力的保障。

一、绿色建筑施工中的节能技术

（一）建筑节能设计

在绿色建筑施工工作里，建筑节能设计是减少建筑能源消耗的核心环节。建筑朝向选择、外立面构造方式、采光安排与通风设计等要素，都会对建筑能源消耗产生直接作用，科学规划建筑朝向，能够充分利用自然光照与热能，进而减少人工照明设备和空调系统的启用频率，建筑物采用朝南布局时，可最大程度接收阳光照射，使冬季采暖所需能耗得到降低，相关研究数据显示，朝南建筑的采暖能耗比朝北建筑低大约 15% 至 20%。

建筑外立面设计同样拥有不可忽视的地位，建筑外立面的热传导能力，会直接影响建筑热量的散失情况与能源利用效率，运用高性能外墙保温系统，像聚氨酯、XPS（挤塑聚苯乙烯）这类材料，能够有效阻隔外界热量的传递，降低空调系统的运行负荷，建筑外立面的玻璃窗应选用低辐射玻璃，这种玻璃可有效减少太阳辐射热量进入室内，同时提升室内采光效果，高效的采光设计能够减少白天对人工照明的需求，从而降低电力消耗。

优化建筑的通风设计，采取自然通风与机械通风相融合的模式，能在不同季节减少空调和暖气设备的使用次数，进一步提升能源利用效率。

（二）节能材料的应用

节能材料在绿色建筑施工过程中发挥着重要作用，其核心目标是提升建筑的热工性能与资源利用效率，在墙体、屋顶以及窗户等建筑结构部位，采用高效保温材料可有效减少能量损耗，维持室内温度的稳定状态，常见的节能保温材料包含聚苯乙烯（EPS）、聚氨酯、玻璃棉和岩棉等，这些材料的导热系数较低，能有效阻止热量散失，以聚氨酯泡沫板为例，其导热系数通常低于 0.02 W/(m · K)，大幅增强了建筑的保温效果。

此外，低辐射玻璃作为节能材料，应用范围正不断扩大，这种玻璃通过在表面涂抹一层金属氧化物薄膜，可有效阻挡红外线与紫外线的辐射，减少建筑内部吸收的热量，市场研究结果表明，使用低辐射玻璃的建筑，夏季空调系统消耗的能源可降低约 15% 至 20%，绿色建筑中还可选用透光性强、热隔离效果好的智能窗户，这类窗户能依据温度变化自动调整透光比例，有效控制室内温度。

（三）施工过程中的节能措施

在绿色建筑施工期间，节能措施并非仅局限于设计方案制定与材料挑选，还涉及施工阶段的资源管控和工艺改进，采用高效施工设备是实现节能的重要方式之一，现代建筑施工机械正逐步向节能、环保类型转变，比如使用电动驱动的机械替代传统燃油驱动机械，能够减少能源消耗与污染物排放，运用先进施工设备，如智能混凝土搅拌机和自动化起重设备，也有助于降低能源消耗，提高施工工作效率。

合理调配施工过程中所需能源，同样能有效减少能耗，借助施工现场的能耗监测系统，可实时跟踪施工过程中用电、用水等能源的消耗状况，及时进行调整与优化，以施工现场照明为例，采用节能型 LED 照明系统替代传统照明设备，可使电力消耗减少约 30% 至 50%。

改进施工工艺与优化施工流程也是节能的重要手段，在混凝土浇筑作业中，使用预拌混凝土替代现场搅拌混凝土，不仅能提

高施工效率，还能减少水泥的使用量，通过精细化的施工管理工作，如合理安排施工工序、优化施工时间规划，可减少不必要的能源浪费。

二、绿色建筑施工中的环保技术

（一）废弃物回收与再利用

在绿色建筑施工活动里，废弃物回收与再利用技术是减少施工现场资源损耗、减轻环境污染的关键环节，建筑施工流程中产生的废弃物，主要包含建筑垃圾、废弃混凝土、废旧金属以及木材等类别，对这些废弃物开展有效分类、回收与再利用工作，不仅有利于降低废物对环境造成的影响，还能节约各类资源，减少建筑项目的成本投入。

施工现场需先对废弃物实施分类处理操作，将其划分为可回收、不可回收以及有害废弃物三大类别，像钢筋、混凝土、砖块这类建筑废料，可进行回收处理，经过再加工后重新投入使用，以废弃混凝土为例，经过破碎处理后，可用于基础施工建设或者作为道路铺设的填料；钢筋废料则需经过清洗、除锈处理，之后能再生产加工成新的钢筋。

依据 2019 年的统计数据，中国建筑行业产生的建筑垃圾数量已接近 10 亿吨，其中可回收部分的占比达到了 60%，由此可见，推广建筑废弃物的再利用模式，减少垃圾填埋量，推进建筑垃圾的绿色化处理，已成为当前绿色建筑发展的重要方向。如表 1 所示。

表 1 建筑废弃物回收与再利用

废弃物种类	年产量（万吨）	可回收比例
建筑垃圾	100,000	60%
废弃金属	20,000	90%
木材	10,000	80%

（二）施工现场的环境保护措施

施工现场的环境保护措施，涵盖对施工过程中产生的废水、废气以及噪音进行有效管控，确保施工流程不会对周边生态环境造成过大影响，施工废水是建筑施工期间常见的污染源，这类废水中含有大量泥浆、油污以及化学物质，若直接排放会对水体造成严重污染。

针对这一问题，在绿色建筑施工过程中，应配备沉淀池、过滤池等设施对废水进行初步处理，去除水中的固体杂质与有害物质，对于含有油污的废水，还需使用油水分离设备进行进一步净化，达标后才可排放，废气排放同样需要严格管控，尤其是在喷涂、焊接等施工工艺环节，产生的有害气体必须通过高效排放系统处理后再排放。

噪音污染也是施工过程中需重点关注的问题，在城市建筑施工现场中表现更为突出，采用低噪音设备并科学规划施工时间段，是减少噪音污染的有效方法，比如，使用电动设备替代传统燃油驱动设备，能够明显降低施工产生的噪音；对施工车辆的噪音排放进行管控，同时在施工区域设置隔音屏障，也能有效减少噪音对周边居民生活及生态环境的影响。

（三）绿色施工技术与设备的应用

随着绿色建筑快速发展，绿色施工技术与设备的应用成为推动环保目标达成的重要途径，在挑选施工机械与建筑材料时，采用低碳环保型的设备与材料，既能减少能源的消耗，又能降低

对环境产生的负面影响，绿色施工机械包含电动起重机、自动化运输车辆以及节能型搅拌设备等，这些设备具备高效能、低排放的特点，不仅能提高施工效率，还能有效减少对空气与土壤的污染。

在绿色建筑的设计与施工过程中，建筑材料的选择是实现环保目标的关键要素之一。为降低对环境的负面影响，越来越多的建筑项目开始选用低环境影响水泥替代传统普通水泥，这类水泥不仅在生产过程中消耗的能源更少，还能有效减少二氧化碳的排放量，与此同时，可回收建筑材料的应用也逐渐广泛，例如使用再生骨料替代天然砂石、选用可回收钢材等，这些材料的应用能够有效减少建筑废弃物的产生量，降低对自然资源的依赖程度，随着人们环保意识的增强，绿色认证与环保标准在建筑行业中的影响力不断提升，推动着建筑行业向更具可持续性的方向发展。

除了材料选择，智能化施工管理技术的应用在绿色建筑中也发挥着重要作用，物联网、大数据技术的广泛运用，使得施工现场的能源消耗与排放情况能够实现实时监控，帮助管理人员及时发现问题并优化能源使用方式，以施工现场的照明系统为例，可通过智能传感器自动调节灯光亮度，确保仅在需要照明时消耗能源，从而避免能源浪费。

三、绿色建筑施工中的节能环保技术的优化与前景

（一）技术的创新与提升

在绿色建筑施工领域，节能环保技术的创新首先体现在新型节能环保材料的研发工作上，最近几年，超高效隔热材料、智能调温建筑外立面以及节能涂料等新型材料已逐步进入市场，以“气凝胶”材料为例，将其用作建筑外墙的隔热层时，其导热系数可低至 $0.013 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，相比传统保温材料，具备更为显著的隔热效果，据预测，到 2030 年，气凝胶材料的市场规模将突破 500 亿元人民币，成为建筑节能领域里的关键材料。

智能化施工技术是节能环保技术创新的另一个重要方向，随着物联网、大数据以及人工智能技术的持续发展，建筑施工过程中已逐步引入智能化设备与施工管理系统，比如智能化施工机械中的自动化塔吊、智能混凝土搅拌机，借助实时数据监测与自动化操作，能够明显提高施工效率，同时减少能源浪费。

（二）节能环保技术在施工管理中的实施

要实现节能环保技术的有效应用，离不开施工管理层的科学规划与合理组织。在施工工作开展之前，制定出合理的节能施工

方案具有重要意义，通过规划合理的施工流程与能源管理方式，可避免因无序施工而造成的能源浪费，以施工现场实时能耗监控系统为例，该系统能在施工过程中自动分析能耗数据，并依托大数据分析优化设备运行模式。

施工人员的专业培训以及环保意识的增强，同样是成功实施节能环保技术的重要因素，定期开展节能环保技术培训，加深员工对绿色建筑技术的理解并促进其应用，能够有效提高施工阶段技术的执行效果，通过定期组织环保意识提升活动，帮助施工工人掌握绿色施工的核心理念，如减少建筑材料浪费、对建筑废料进行回收利用等，从而实现全员参与，提升绿色施工的整体效益。

（三）绿色建筑施工技术的未来发展趋势

从未来发展来看，绿色建筑施工过程中的节能环保技术将朝着更智能、更系统的方向迈进，智能建筑有望成为未来建筑行业的主流发展趋势，通过人工智能与物联网技术，可实现对建筑全生命周期的能源监控与管理，例如，建筑材料的选择、施工工艺的优化、能耗的实时监控等工作，都能借助智能化系统实现自适应调整，据预计，到 2040 年，智能建筑系统的市场渗透率将达到 60%，大型建筑项目将普遍运用智能化系统开展全过程的能效管理工作。

绿色建筑相关法规的不断完善，将为节能环保技术的广泛应用提供推动作用，在未来，政府部门会进一步健全绿色建筑的标准与认证体系，通过制定更为严格的节能环保建筑法规，推动绿色建筑技术的创新与推广，以 2019 年发布的《绿色建筑评价标准》为例，其中已明确提出对建筑节能环保技术的要求，预计在未来几年内，国家层面还将出台更为严格的绿色建筑施工规范，进一步推动节能环保技术的普及应用，提升建筑行业的绿色发展水平。

四、结语

在推动建筑行业可持续发展的过程中，绿色建筑施工中的节能环保技术发挥着至关重要的作用，通过创新节能材料、引入智能化施工技术，再结合废弃物回收与再利用等措施，施工阶段的资源利用效率得到显著提升，对环境的影响也大幅降低，随着技术的不断优化与发展，未来的绿色建筑将具备更高的智能化与系统化水平，而绿色建筑法规的完善，将进一步推动节能环保技术的广泛应用。加强技术创新力度与管理实施效果，促进绿色建筑建设的普及，将为实现低碳经济发展与环境保护目标贡献积极力量。

参考文献

- [1] 张艺龄, 陈惠娟, 马星宇, 等. 绿色建筑下的施工管理创新研究 [J]. 城市建筑, 2022, 19(24): 79-81+85. DOI: 10.19892/j.cnki.csjz.2022.24.21.
- [2] 陈珂, 徐长柱. 绿色建筑施工技术在节能与环保方面的实践 [J]. 新城镇科技, 2024, 33(06): 46-48.
- [3] 许二猛. 建筑绿色节能环保技术的应用 [J]. 江西建材, 2022, (02): 184-185+190.
- [4] 程凌龙. 绿色建筑给排水设计施工中环保节能新技术的应用 [J]. 节能与环保, 2022, (11): 90-91.
- [5] 鲁言言. 现代绿色建筑给排水设计施工中环保节能新技术的应用分析 [J]. 安徽建筑, 2021, 28(05): 68-69. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2021.05.035.
- [6] 张子建. 关于节能环保技术在土木工程中的应用探讨 [J]. 大众标准化, 2021, (06): 16-18.
- [7] 赵彬. 节能环保技术在建筑工程中的应用分析 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(04): 32-34. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2020.04.014.
- [8] 王红兵. 探析建筑施工节能环保技术推进绿色工程建设 [J]. 黄冈职业技术学院学报, 2021, 23(01): 100-102.

施工现场智能化管理——数字化技术的实现路径探讨

丁勇

中油（新疆）石油工程有限公司，新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ETQM.2025100040

摘 要： 本文围绕施工现场智能化管理展开研究，聚焦数字化技术的应用与实现路径。在核心应用领域，数字化技术通过物联网、AI、BIM、大数据、云计算等手段，分别在智能安全管理、智能进度管理、智能质量管理、智能物料与设备管理及智能协同与决策管理五大维度，有效解决传统施工现场管理中覆盖有限、响应滞后、数据不互通等痛点，显著提升管理效率与质量。研究旨在为施工现场智能化管理的落地提供理论参考与实践指引，助力建筑行业数字化转型。

关 键 词： 施工现场管理；智能化管理；数字化技术；物联网

Intelligent Management of Construction Sites — An Exploration of Implementation Pathways for Digital Technologies

Ding Yong

PetroChina (Xinjiang) Petroleum Engineering Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000

Abstract： This paper focuses on the research of intelligent management of construction sites, emphasizing the application and implementation pathways of digital technologies. In core application areas, digital technologies leverage means such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), Building Information Modeling (BIM), big data, and cloud computing to effectively address pain points in traditional construction site management, including limited coverage, delayed responses, and lack of data interoperability. These technologies operate across five key dimensions: intelligent safety management, intelligent progress management, intelligent quality management, intelligent material and equipment management, and intelligent collaboration and decision-making management, thereby significantly enhancing management efficiency and quality. The study aims to provide theoretical references and practical guidance for the implementation of intelligent management at construction sites, facilitating the digital transformation of the construction industry.

Keywords： construction site management; intelligent management; digital technologies; Internet of Things

引言

传统施工现场管理以人工主导、纸质化记录、经验化决策为核心，在安全监管覆盖不足、进度偏差追溯困难、质量缺陷事后补救、物料设备粗放浪费及多方协同信息壁垒等问题的制约下，已难以适应现代工程对效率、安全、成本与质量的精细化要求，成为行业高质量发展的关键瓶颈。在此背景下，数字化技术的突破为施工现场管理升级提供了核心驱动力。基于此，本文聚焦施工现场智能化管理的核心需求，系统剖析数字化技术在安全、进度、质量、物料设备及协同决策五大核心领域的应用逻辑与实践成效，明确技术如何破解传统管理痛点；进而构建“顶层设计—基础设施—试点优化—全面集成”的四阶段系统性实现路径，为企业提供从战略规划到落地执行的完整指引。研究旨在填补施工现场数字化管理“应用碎片化、路径模糊化”的研究空白，为推动建筑行业施工现场管理的智能化转型提供理论支撑与实践参考。

一、数字化技术在施工现场的核心应用领域

（一）智能安全管理

数字化施工管理的理论基础及技术支撑应包括空间信息技术、系统仿真计算、可视化与虚拟现实、多智能体施工等几个部

分^[1]。传统施工现场安全管理以人工巡查和事后整改为主，存在覆盖有限、响应滞后、预判不足等问题。数字化技术通过构建实时感知—智能识别—自动预警—联动处置”的全流程管理体系，将管理重心从事后应对前移至事前预防。在实时感知环节，物联网技术通过智能安全帽和大型机械传感器，实时追踪人员状态与

设备运行参数，一旦发现异常立即预警，有效预防事故^[2]。在智能识别方面，AI视觉算法可24小时自动识别安全违规行为，准确率高达95%，实现“违规即预警、即时可处置”，大幅缩短响应时间。在风险管控与应急联动层面，大数据技术整合历史与实时数据，对风险点进行分级管理，并建立应急联动机制，事故发生时可自动定位、推送救援指令、关联应急物资，显著提升处置效率。这一系列技术协同应用，共同构筑了施工现场的主动式安全防线。

（二）智能进度管理

传统进度管理依赖“甘特图+人工汇报”，存在数据更新滞后、偏差原因难追溯、调整依赖经验等问题，常导致进度延误发现晚、应对不精准。数字化技术通过“BIM进度模拟+实时数据追踪+AI预测优化”，实现了进度的动态监控与精准调控^[3]。在进度模拟环节，BIM技术将进度计划与三维模型关联，构建4D-BIM模型，直观展示各阶段进度，提前发现工序逻辑冲突，优化施工顺序。在实时追踪方面，物联网与移动终端让施工人员可现场上传工序验收结果，并通过RFID或二维码追踪构件全流程，数据自动同步平台并与计划对比，实时生成偏差报表^[4]。在预测优化层面，AI与大数据技术整合历史、实时及外部环境数据，构建预测模型，提前预警进度延误风险，精准分析原因并生成针对性调整方案，再通过4D-BIM模拟验证可行性^[5]。这一系列技术应用，让进度管理真正有数据可依、预测可循，有效将进度偏差率控制在较低水平。

（三）智能质量管理

传统质量管理以“事后抽样检查”为主，依赖人工检测，缺陷发现晚、返工成本高。数字化技术通过“过程数据采集+AI质量检测+全流程追溯”，将质量管理贯穿施工全过程，实现“缺陷早发现、过程可管控、责任可追溯”^[6]。在过程数据采集环节，移动终端与物联网技术让施工人员可实时上传钢筋间距、混凝土坍落度等关键数据，并通过RFID标签关联材料检测报告，确保数据真实、可追溯，某项目因此将材料问题发现时间大幅提前，返工成本降低30%。在AI智能检测方面，计算机视觉技术通过无人机、高清摄像头结合AI算法，自动识别混凝土裂缝、墙面空鼓等缺陷，不仅检测效率提升80%，还能发现人工难以察觉的细微问题，检出率显著提高^[7]。在质量追溯层面，BIM技术将过程数据与检测结果关联至模型构件，点击即可查看其从材料到施工的全流程信息，一旦发现问题，能快速追溯根源、明确责任，并跟踪整改，形成“发现问题-追溯原因-整改验证”的闭环管理，全面提升质量管理水平。

（四）智能物料与设备管理

传统物料与设备管理多属粗放式，常面临库存积压、停工待料、设备利用率低、维护不及时等问题，造成资源浪费^[8]。数字化技术通过全流程追踪+智能优化，实现精益化管理，有效降本增效。在智能物料管理方面，形成了BIM算量+物联网追踪+AI优化的核心模式，BIM模型精准提取工程量，结合进度计划生成物料需求，大数据分析预测价格走势以优化采购时机；RFID或二维码技术实时追踪物料出入库，自动触发补货提醒，AI算法优化库存布局；实际消耗与BIM工程量对比，识别浪费并分析原

因，某项目因此库存成本降低22%，损耗率减半。在智能设备管理方面，物联网监测+AI故障预测+效率优化”实现全生命周期管理，物联网传感器实时采集设备运行参数，远程监控状态；AI算法分析历史数据，提前7-14天预警潜在故障并推荐维护方案，大幅减少突发停机；大数据分析设备利用率与能耗，优化调度与运行参数，某项目设备利用率提升18%，能耗降低12%。这些技术的综合应用，彻底改变了传统资源管理模式，实现了成本与效率的双重优化。

（五）智能协同与决策管理

传统施工现场各参与方依赖纸质文件、邮件和会议进行信息传递，存在信息滞后、传递失真、数据不互通等问题，形成信息孤岛，导致协同效率低下、决策响应缓慢^[9]。数字化技术通过构建“统一协同平台+数据共享+可视化决策”体系，打破各方信息壁垒，实现数据实时共享、协同高效联动与决策有据可依^[10]。在统一协同平台构建方面，云计算与BIM技术搭建了多方协同、数据互通的基础，整合BIM模型、进度、质量、安全等核心信息，各参与方可根据权限实时获取所需内容。在实时信息交互与联动层面，移动终端与即时通讯技术实现沟通即时化与问题快速解决，平台内置即时通讯功能，各方可针对具体问题发起精准沟通并关联相关数据，形成“发现问题-沟通-整改-复核”的快速闭环。在可视化决策支持环节，大数据与数据可视化技术让决策直观、精准、高效，通过整合项目全维度数据生成“项目驾驶舱”，以图表形式呈现关键指标，管理人员可直观掌握项目状态，快速识别问题并基于数据制定决策，避免传统经验决策的主观性。

二、施工现场智能化管理的系统性实现路径

（一）顶层设计与战略规划

智能化管理的初期阶段是方向锚定期，核心目标是明确“为什么做、做什么、谁来做、资源如何配”，避免盲目投入。关键任务围绕需求调研、目标制定、技术选型、组织保障四大维度展开，为后续落地奠定战略基础。在需求与目标梳理上，需坚持“问题导向、业务驱动”，通过调研收集各参与方痛点，结合企业战略制定量化目标，并明确优先级领域，优先选择痛点突出、见效快的场景。在技术选型与方案设计上，需兼顾兼容性、实用性与扩展性，梳理核心技术清单，优先选择与企业现有系统兼容的方案，结合项目规模与预算选择高性价比产品，并制定详细实施方案，确保各方对技术路径达成共识。在组织与资源保障上，需构建权责清晰、资源到位的执行体系，成立专项工作组明确各层级职责，并制定资金、人才、制度等资源保障计划。某央企通过调研将“智能安全管理”“智能进度管理”列为优先领域，某市政集团选择轻量化技术组合降低成本40%，某民企设立专项基金并开展人才培养，均为后续智能化落地提供了有力支撑。

（二）基础设施建设与数据治理

智能化管理的第二阶段是硬件与数据底座建设期，核心目标是搭建“感知-传输-存储-治理”的基础体系，解决“数据从哪来、怎么存、如何用”的问题。基础设施建设聚焦感知设备

部署、网络搭建与平台开发，数据治理则围绕数据标准制定、清洗与安全展开，为后续应用打通“数据血脉”。在基础设施搭建上，需按“按需部署、分步完善”原则推进，根据优先级领域，针对性部署智能安全帽、AI摄像头、RFID 标签等工业级感知设备；构建“有线+无线”全覆盖网络，确保数据实时上传；开发或部署具备数据接入、可视化与权限管理的核心平台。在数据治理方面，需制定统一的数据标准，明确采集格式与存储规范，避免格式不兼容；通过自动化工具进行数据清洗与整合，剔除无效数据、补全缺失记录，形成全要素数据集；同时加强数据安全管控，通过权限控制、数据加密与备份机制，确保数据不泄露、不丢失。这一系列举措共同构建了稳定可靠的数据底座，为智能化应用的深度落地奠定了坚实基础。

（三）应用试点与迭代优化

智能化管理的第三阶段是验证与优化期，核心目标是通过小范围试点、快速迭代，验证技术方案的可行性，解决实际问题，为全面推广积累经验。试点选择需遵循代表性强、风险可控”原则，优先选取痛点突出、管理基础好、配合度高的项目，并按分模块推进、分阶段验证”的思路实施。试点过程中，需安排专项工作组驻场指导，解决操作问题，并建立试点日志，详细记录设备运行、数据质量与使用效果，形成问题解决方案库。在效果评估与迭代优化上，需建立量化评估与多方反馈相结合的评价体系，对照目标检验成效，同时收集各方意见，形成反馈-调整-验证”的闭环机制。基于评估与反馈，制定优化方案，针对设备、功能、数据等问题进行改进，并总结试点经验，形成可复制、可推广的实施手册。某企业通过超高层项目试点，聚焦智能安全与进度管理，累计解决23个落地问题，将安全帽续航提升至12小时，AI识别准确率提高至96%，参与方满意度从75%升至92%，为后续全面推广奠定了坚实基础。

（四）全面集成与持续创新

智能化管理的第四阶段是成熟与升级期，核心目标是实现全

项目覆盖、全模块集成、全要素协同，并通过持续创新保持领先性。全面集成聚焦技术融合与业务贯通，需将试点验证的智能安全、进度、质量、物料设备、协同决策等模块推广至所有项目，实现模块间协同，如物料短缺预警自动触发进度调整建议；同时构建企业级数据中台，打破数据壁垒，形成历史项目知识库，为新项目提供数据支撑；并基于智能化技术重构业务流程，如将纸质验收改为移动端在线验收，大幅提升管理效率。在持续创新方面，需探索5G、数字孪生、区块链等新技术应用，如5G远程操控塔吊提升安全与效率，数字孪生构建虚拟映射实现模拟演练，区块链实现物料溯源；同时推动管理模式升级，通过数据分析实现人岗精准匹配、设备全生命周期管控与项目精益化管理，并构建产业链协同生态，联合设计、供应商等伙伴共享数据，缩短物料供应周期与项目工期。最后，需建立创新专项基金、激励制度与产学研合作机制，确保智能化管理持续迭代，始终适应行业发展与企业需求变化。

三、结束语

本文系统探讨了数字化技术在施工现场智能化管理中的核心应用场景与系统性实现路径，形成了兼具理论性与实践性的研究结论。未来随着5G、数字孪生、区块链等新技术与施工场景的进一步融合，施工现场智能化管理将向“全要素数字化映射、全流程智能化决策、全产业链协同化联动”的更高阶段迈进。期待更多企业以本文研究为参考，结合自身实践持续探索创新，推动数字化技术在施工现场从应用落地向价值创造升级，共同助力建筑行业高质量发展，为新型建筑工业化的全面推进注入更强动力。

参考文献

[1] 方满胜. “数字化施工”在民用机场场道建设中的应用 [J]. 安徽建筑, 2020, 27(9): 189, 204. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2020.09.092.

[2] 唐龙. BIM技术在建筑施工现场管理中的运用实践解析 [J]. 中国住宅设施, 2024(z1): 76-78.

[3] 黄鑫. BIM技术在装配式建筑施工中的应用 [J]. 房地产导刊, 2024(24): 16-18.

[4] 何训林. 物联网技术及 BIM技术在智能建造中的应用 [J]. 交通企业管理, 2024, 39(1): 94-96. DOI: 10.3963/j.issn.1006-8864.2024.01.029.

[5] 罗庆志, 余杰, 庞道济, 等. 基于绿色施工智能信息平台的建筑施工企业数字化转型实践 [J]. 重庆建筑, 2022, 21(11): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2022.11.09.

[6] 周健. 施工现场智能化安全管理探讨 [J]. 科学与信息化, 2024(6): 175-177.

[7] 兰洪奎. 油田施工现场监督智能化管理装置的研究 [J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(3): 14-18. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1346.2021.03.005.

[8] 李迺. 施工现场智能化安全管理应用研究 [J]. 施工技术, 2017, 46(20): 139-141. DOI: 10.7672/sjgs2017200139.

[9] 伍洲. 基于智能化安全管理体系的建筑施工现场安全管理 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(20): 134-136. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3818.2021.20.060.

[10] 李迺. 施工现场智能化安全管理应用研究 [C]// 中国建筑学会工程管理研究分会 2016 年年会论文集. 2016: 155-160.

智能建造背景下的工程管理模式创新研究

毛华彪，马一帆，吴晨光

中国建筑技术集团有限公司，北京 100013

DOI:10.61369/ETQM.2025100041

摘 要： 智能建造技术的快速演进为工程管理领域带来了以往难以想象的变革契机。将 BIM、大数据、人工智能等技术融入建筑行业后，项目在规划、设计、施工及运维各环节均实现了信息化、精细化与智能化的综合管控，本文深入研究智能建造背景下工程管理模式的创新方向，剖析现有管理模式存在的挑战及改进需求，并结合国内外实际应用案例，提出智能化技术与管理理念深度结合的管理模式创新方法，这些创新模式不仅显著提高了项目效率、减少了管理成本，还优化了资源配置，为建筑行业朝着绿色、智能、可持续的方向发展打下了坚实基础。

关 键 词： 智能建造；BIM；大数据；人工智能；工程管理

Research on Innovation of Engineering Management Modes in the Context of Intelligent Construction

Mao Huabiao, Ma Yifan, Wu Chenguang

China Academy of Building Research Group Co., Ltd., Beijing 100013

Abstract： The rapid evolution of intelligent construction technologies has brought about unprecedented opportunities for transformation in the field of engineering management. By integrating technologies such as Building Information Modeling (BIM), big data, and artificial intelligence into the construction industry, projects have achieved comprehensive management and control that is information-based, refined, and intelligent across all stages, including planning, design, construction, and operation and maintenance. This paper delves into the innovative directions of engineering management modes in the context of intelligent construction, analyzes the challenges and improvement needs of existing management modes, and, drawing on practical application cases both domestically and internationally, proposes innovative management methods that deeply integrate intelligent technologies with management concepts. These innovative modes not only significantly enhance project efficiency and reduce management costs but also optimize resource allocation, laying a solid foundation for the construction industry to develop towards a green, intelligent, and sustainable direction.

Keywords： intelligent construction; BIM; big data; artificial intelligence; engineering management

引言

智能建造技术持续进步的过程中，建筑行业正在经历深刻的变革，传统工程管理模式在应对越来越复杂的项目需求时，效率低下、信息不畅通、决策迟缓等问题逐渐凸显，BIM、大数据、人工智能等智能化技术为建筑项目提供了全新的解决思路，不仅提高了管理效率，还推动建筑行业向绿色、智能、可持续的方向迈进，在智能建造背景下如何实现工程管理模式的创新，已成为当前行业发展过程中需要重点解决的问题。

一、智能建造背景下工程管理模式的创新需求

（一）智能建造技术驱动下的管理需求变化

在智能建造技术持续发展的背景下，工程管理领域面临的挑战逐步增多，传统工程管理方法已难以适配现代建筑项目的复杂需求，故而需依托新兴技术提升项目管理的效率与精准度，智能建造技术可借助 BIM（建筑信息模型）技术、物联网、人工智

能、大数据等手段，在项目全生命周期内实现精细化管理，像 BIM 技术能够为项目构建三维可视化模型，助力管理者更精准地预判项目进度、成本及潜在风险，进而提升项目管理的精确性。

另外，智能建造技术还能显著增强项目的安全保障水平，在施工阶段，借助传感器与实时数据监测，施工现场的安全状况可得到及时反馈与调整，例如物联网技术可对施工现场的环境条件及设备运行状态展开实时监测，对潜在安全隐患进行及时预警，

降低事故发生的概率。

（二）从传统管理模式向智能化转型的必要性

传统工程管理模式普遍存在信息孤岛、沟通效率不高、决策迟缓等问题，难以应对当前建筑项目愈发复杂的需求，特别是在大型、跨领域项目中，传统管理模式常常依赖人工判断与手工操作，信息传递效率及决策执行速度均受到限制，随着建筑项目规模的逐步扩大，项目自身的复杂性及跨专业协同的需求也不断提升，这使得传统管理方法越来越难以满足项目的管理要求。

向智能化转型是解决这些问题的核心途径，通过引入数字化技术，项目管理可实现信息共享、实时更新及远程监控等功能，大幅提升管理效率与决策质量，智能建造技术让项目从设计、施工到运维的各个环节都能达成高度集成与协同，破解了传统管理模式中信息滞后与管理分散的难题。

（三）政策、标准与法规对智能建造管理模式的影响

智能建造的推广与应用，离不开政策、标准及法规的引导与支持，国家及地方政府陆续出台相关政策，推动建筑行业的智能化转型，比如政府通过提供资金补助、税收减免及技术扶持等举措，鼓励建筑企业投入智能建造技术研发与应用，加快技术的普及速度，与此同时，政策还着重强调绿色建筑、节能减排等可持续发展目标，这进一步推动了智能建造技术在各类项目中的落地应用。

此外，智能建造管理模式创新，同样需要完善的行业标准与法规体系作为支撑，当前，不少国家和地区已着手制定智能建造相关标准，以确保新技术应用符合行业规范、保障项目质量。管理模式创新需与这些政策、标准相契合，推动行业实现健康发展。

二、智能建造技术在工程管理中的应用

（一）BIM技术的应用与优化

BIM（建筑信息模型）技术作为智能建造领域的核心支撑技术，已在建筑项目全生命周期各环节展开深度应用，项目规划与设计阶段所构建的三维数字化模型，能为设计团队搭建起精度高且数据实时更新的工程信息平台，该平台可实现建筑信息的集中化管理，对设计方案加以优化，减少设计层面的变更次数，同时增强设计过程的可视化呈现效果与多方协同能力，设计环节中，BIM 技术可精准核算建筑材料的具体用量、施工流程的先后顺序及项目所需成本，由此降低资源不必要的消耗，提升资源调配的整体效率。

施工与运营阶段，BIM 技术能够达成项目全过程的数字化管控，施工环节将其与施工进度管理系统相融合，可实时匹配项目整体进展与现场实际施工状况，自动对施工计划及进度安排作出调整，从而最大限度减少工期滞后问题与预算超额现象的发生，运营环节里，BIM 技术通过与设施管理系统的对接整合，可对建筑物内部各类设施实施实时监测与维护作业，提升建筑物全生命周期管理的效能，保障设施长期处于稳定运行状态。

（二）物联网与传感技术的管理应用

物联网技术借助对建筑施工现场各类设备及传感器的连接，

可实现工程项目实时监测与数据收集的目标，施工现场的环境参数，包括温度、湿度、气压、噪音等指标，以及施工设备的运行状况、作业人员的身体健康数据等，均能通过传感器进行实时捕捉并上传至云端管理系统，这些采集到的数据不仅可助力管理者及时掌握项目当前进展情况与施工安全动态，还能依托数据分析提前判断设备可能出现的故障、施工进度可能发生的延迟等问题，进而实现有效的风险预警与设备维护工作。

物联网技术与设备管理系统相结合，还可实现设备的智能化调度与预防性维护，通过对机械设备使用频次、故障发生概率等数据的分析，物联网技术能够提前判断设备发生故障的潜在可能性，并自动规划维修安排，防止因设备故障停机而造成工期延误。

（三）大数据与人工智能的管理决策支持

大数据与人工智能技术在建筑项目管理决策过程中发挥着关键作用，项目管理团队通过对历史项目数据、市场动态数据、项目进度数据等进行深度挖掘与分析处理，能够更精准地开展风险评估工作，对项目进展趋势作出预测，并优化资源的配置方案，人工智能预测模型能够对工程项目进度进行实时追踪与提前判断，精准计算项目可能出现的延误时长，为项目管理者提供及时的决策依据，大数据技术则可帮助管理团队发掘项目中潜在的风险要素，像预算超支、工期延误等问题，依托数据驱动的决策模式，降低决策过程中的偏差，提升管理工作的科学性与精准程度。

人工智能在质量控制领域同样可发挥重要价值，施工过程中借助智能化检测技术，AI 能够实时监控建筑工程质量，分析建筑结构的安全性能，找出潜在的质量隐患并及时采取修正措施，计算机视觉技术的应用使 AI 可对施工质量开展自动化检测与分析，发现建筑结构中的细微裂缝、结构尺寸偏差等问题，为工程质量提供可靠保障。

三、创新的工程管理模式探索与案例分析

（一）基于协同工作的智能化管理模式

伴随工程项目规模的扩大与复杂程度的提升，传统单一部门管理模式已难以满足现代建筑项目的实际需求，智能化管理模式通过搭建跨部门、跨领域的协同工作平台，将设计、施工、采购、运营等各环节的资源与信息进行有效整合，这种协同工作模式借助信息技术打破信息孤岛现象，推动不同部门之间的协同合作，保障项目顺利推进，BIM 技术与云计算平台的结合，能让项目团队在设计阶段实现信息共享，减少部门间的沟通阻碍，确保设计与施工环节的无缝衔接。

借助智能化协同工作平台，施工团队可实时获取设计变更信息，及时调整施工方案，规避因沟通不顺畅引发的施工误差与进度延误问题，该模式不仅提升了工作效率，还增强了项目的透明度与可追溯性，企业将供应链管理、资源调度、项目进度管理等模块集成到管理系统中，实现对项目全生命周期的监控与管理，进而提高整体运营效率，降低运营成本。

（二）精细化管理与数字化双重驱动的创新模式

精细化管理与数字化管理的融合，使工程项目各环节能够实现精确控制，精细化管理注重对每个细节的把控，依托先进技术手段，对项目各项指标进行精确测量、监控与调整，在建筑施工过程中，通过精确的施工进度控制与资源配置优化，可确保项目每个环节都严格依照计划推进，数字化管理则通过信息化平台对项目全程数据进行记录、监控与分析，借助大数据挖掘为项目管理提供决策支持。

二者相结合，能够实现对项目的精确控制，减少资源浪费，提升项目质量，采用 BIM 技术开展全过程数据管理，利用物联网技术实时监控设备运行状态，可及时发现设备故障并开展维修工作，降低因设备故障造成的停工时间，数字化管理还能通过人工智能算法预测项目潜在问题，提出优化方案，提升项目决策的科学性与准确性。

（三）国内外智能建造案例分析

在国内，智能建造技术的应用已取得诸多显著成果，华润集团在北京大兴国际机场建设期间，运用 BIM 技术与物联网技术对建筑进度、质量、安全等方面实施智能化管理，通过全程信息化管理，华润集团有效控制了项目成本，缩短了建设周期，实现了高效的资源配置与项目协调，BIM 技术与大数据的结合，提供了实时决策支持，保障了项目的高质量与高效交付。

国外具有代表性的案例为新加坡滨海湾金沙项目，该项目开发团队利用 BIM 与自动化技术，实现了设计与施工过程的精细化管理，项目所采用的智能建造管理系统集成了所有工程数据，通过实时数据分析为项目管理决策提供支持，确保工程精确执行，该项目的成功不仅体现在技术应用层面，更在于依据具体项目需求调整智能建造模式，优化施工资源，减少工期与成本消耗。

四、智能建造管理模式创新的挑战与实施路径

（一）技术实施难题

智能建造管理模式在落地过程中面临多项技术实施难题，其中技术整合与设备维护两方面问题尤为突出。BIM、物联网、大数据、人工智能等各类智能建造技术，在实际应用阶段常缺乏统一的标准与操作平台，这直接导致技术集成工作难以推进，不同供应商提供的设备与系统可能存在兼容性差异，使得信息流无法顺畅传递，进而影响整个系统的高效运转，除此之外，施工现场部

分硬件设施与设备可能较为老旧，难以充分支撑新技术的应用需求，针对技术整合这一难题，必须在技术选型、平台搭建、数据接口设计等方面开展深入优化工作，同时制定统一的技术标准与操作流程，确保各项技术能够协同发挥作用。

（二）组织管理与人力资源的适应性问题

智能建造的推进不仅涉及技术层面的革新，更需要组织架构与人力资源体系进行深度调整，随着智能化管理模式的逐步推广，传统的组织结构需做出相应变革，特别是跨部门、跨领域协作机制的构建工作亟待完善，各部门之间的沟通与协作方式，必须从传统的分工协作模式转变为更具集成性、注重信息共享的新模式，这就要求组织结构具备更高的灵活性与适应能力。在此过程中，人员培训与再提升也成为一大挑战，不少传统工程管理人员对智能建造技术缺乏了解，也没有相关应用经验，迫切需要通过系统化培训提升专业技能，此外，人才引进工作也变得至关重要，智能建造领域需要具备跨学科能力的复合型人才，像 BIM 技术专家、数据分析师、AI 算法工程师等，这类人才需求对建筑行业现有人才结构提出了全新要求。

（三）管理创新的实施路径

为破解智能建造管理模式创新过程中面临的各类挑战，需从政策、技术、管理等多个维度制定切实可行的实施路径，在政策维度，政府应加强对智能建造技术的支持力度，通过提供资金扶持、税收优惠等政策，激励企业开展技术研发与创新应用，在技术维度，需加大技术试点推广力度，尤其在大型工程项目中，可开展小范围的智能化技术应用测试，积累实践经验，为后续全面推广提供实际依据，在管理维度，则应构建系统化的培训体系，为行业从业人员提供具有针对性的技能提升课程，重点覆盖智能建造相关技术的应用与操作内容。

五、结语

智能建造技术的持续发展，为工程管理模式创新提供了强劲动力，推动建筑行业朝着更高效、更智能、更绿色的方向迈进，尽管在技术实施、组织管理、人才培养等方面仍存在挑战，但借助政策支持、技术整合与管理创新，智能建造的实施路径已逐渐清晰，未来，随着技术的不断优化与行业的持续探索，智能建造必定会在工程管理领域发挥更重要的作用，推动建筑行业实现全面转型与升级。

参考文献

- [1]王璐琪,冯为民.面向智能建造的工程项目管理课程模块化案例教学模式[J].高等建筑教育,2024,33(06):85-90.
- [2]刘伟,林成,王永祥,等.智能建造理念下工程管理专业应用型创新人才培养模式构建[J].西部素质教育,2023,9(08):1-4.DOI:10.16681/j.cnki.wcqe.202308001.
- [3]李丰,曾莹莹.智能建造背景下基于 OBE 理念的人才培养模式改革研究——以建设工程管理专业为例[J].科教文汇,2024,(17):95-98.DOI:10.16871/j.cnki.kjwh.2024.17.022.
- [4]廖龙辉,温宇航,甘翠萍,等.智能建造背景下工程管理研究生培养模式创新与实践[J].工程管理学报,2023,37(06):150-154.DOI:10.13991/j.cnki.jem.2023.06.027.
- [5]吴志江,朱亚茹,汪俊文.智能建造背景下工程管理专业人才培养模式的质量监管研究[J].西部素质教育,2024,10(24):96-100.DOI:10.16681/j.cnki.wcqe.202424020.

面向新能源电气节能工程的技术管理 与风险评估体系构建

李彭栋

广东新力能源有限公司，广东 中山 528415

DOI:10.61369/ETQM.2025100002

摘 要： 本文围绕新能源电气节能工程，阐述其涵盖技术及协同节能机理，介绍全生命周期管理机制、多维风险量化评估框架等内容，还涉及风险预警指标体系、传导模型等，以及在实际工程中的应用与验证，最后提出当前局限及未来技术应用前景。

关 键 词： 新能源电气节能；技术管理；风险评估

Construction of a Technical Management and Risk Assessment System for New Energy Electrical Energy-Saving Projects

Li Pengdong

Guangdong Xinli Energy Co., LTD., Zhongshan, Guangdong 528415

Abstract： This paper focuses on new energy electrical energy-saving projects, elaborating on the covered technologies and collaborative energy-saving mechanisms, introducing the full life cycle management mechanism, multi-dimensional risk quantitative assessment framework, and other contents. It also involves the risk early warning index system, transmission model, etc., as well as the application and verification in actual projects. Finally, it puts forward the current limitations and future technical application prospects.

Keywords： energy conservation in new energy electrical systems; technical management; risk assessment.

引言

随着全球对能源可持续利用的关注度不断提高，新能源电气节能工程成为能源领域的研究热点。我国2020年发布的《新能源汽车产业发展规划（2021 - 2035年）》等一系列政策强调了新能源发展的重要性以及节能减排的目标。新能源电气节能工程涵盖光伏、储能和智能电网等技术，其协同节能机理值得深入研究。同时，工程需建立全生命周期管理机制，构建多维风险量化评估框架以及风险预警指标体系等。为更好地实现工程目标，还需在技术管理与风险评估协同机制、数字孪生平台架构等方面进行探索，以提高能源利用效率，推动新能源电气节能工程的可持续发展。

一、新能源电气节能工程技术管理体系构建

（一）多维度节能技术架构设计

新能源电气节能工程涵盖多种技术，如光伏、储能和智能电网等，需深入分析其协同节能机理。光伏技术通过光电转换将太阳能转化为电能，储能技术则可对电能进行存储和调节，智能电网实现电能的高效传输与分配。三者协同作用，光伏产生电能，储能在电能过剩时储存，不足时释放，智能电网确保电能合理流动。基于此，构建分层递进式技术体系框架，底层为基础技术层，包含各种新能源发电及储能技术；中层为整合层，实现不同技术的协同整合；上层为应用层，将整合后的技术应用于实际节

能工程中，以提高能源利用效率，实现节能目标^[1]。

（二）全生命周期管理机制

新能源电气节能工程需建立涵盖各阶段的全生命周期管理机制。在规划阶段，应综合考虑能源需求、资源分布等因素，制定科学合理的目标与方案^[2]。设计阶段注重系统集成与优化，确保各组件匹配高效。实施过程严格控制施工质量与进度，保障工程按计划进行。运维阶段则要建立实时监测与反馈系统，及时发现并解决问题。同时，构建动态优化模型，根据各阶段实际情况与数据反馈，不断调整技术标准与管理策略，以适应新能源电气节能工程的发展需求，提高工程的整体效益与可持续性。

二、节能工程风险评估体系构建

（一）风险量化评估模型

基于 FMEA-熵权法构建技术、经济、环境多维风险量化评估框架。FMEA（失效模式与效应分析）用于识别潜在风险及其影响程度，通过对新能源电气节能工程的各个环节进行详细分析，确定可能出现的失效模式以及对技术、经济和环境方面的影响^[3]。同时，熵权法用于确定各风险因素的权重，避免主观因素的干扰。该方法根据各风险因素所包含的信息量来确定其权重，使得评估结果更具客观性和科学性。综合 FMEA 和熵权法，能够全面、准确地量化新能源电气节能工程的多维风险，为后续的风险管理提供有力依据。

（二）风险预警指标体系

新能源电气节能工程风险预警指标体系应涵盖多方面核心指标。设备可靠性是关键因素之一，它直接影响工程的稳定运行，通过对设备故障频率、维修周期等数据的监测与分析来评估^[4]。能效偏离度指标能反映节能工程实际能效与预期能效的差异，通过对比实际能耗与理论能耗，及时发现节能效果不佳的环节。市场波动率指标则关注能源市场价格波动对节能工程成本的影响，包括原材料价格、电力价格等波动情况，为工程成本控制提供依据。这些核心指标相互关联，共同构成了一个全面的风险预警指标体系，有助于及时识别和应对新能源电气节能工程中的风险。

三、技术管理与风险评估协同机制

（一）风险驱动的技术优化路径

1. 风险传导模型构建

在新能源电气节能工程中，构建风险传导模型对于揭示技术缺陷与系统风险间的非线性传导规律至关重要。该模型需综合考虑多种因素，包括技术参数的变化、环境因素的影响以及系统各组件间的相互作用^[5]。通过对大量实际工程数据的分析和挖掘，确定关键风险因素及其传导路径。例如，技术缺陷可能导致设备性能下降，进而影响整个系统的稳定性，引发一系列风险。同时，环境因素如温度、湿度等的变化也可能加剧技术缺陷的影响，加速风险的传导。模型应能够量化这些传导关系，为技术管理和风险评估提供科学依据，以便及时采取有效的优化措施，降低风险。

2. 动态反馈调节机制

风险评估结果为技术参数的实时修正提供了依据。通过建立算法，可依据风险动态调整技术参数。例如，当风险评估显示某项技术在特定环境下的风险概率增加时，算法可相应地调整该技术的关键参数，以降低风险水平^[6]。这种实时修正机制确保了技术始终能在风险可控的状态下运行，实现了技术与风险评估的协同优化。同时，动态反馈调节机制使得技术在实施过程中能够不断根据风险反馈进行自我调整，形成一个良性的循环，提高新能源电气节能工程的整体效率和可靠性。

（二）管理决策支持系统设计

1. 多目标优化决策模型

在新能源电气节能工程的技术管理与风险评估协同机制中，管理决策支持系统的多目标优化决策模型至关重要。该模型可采用融合 TOPSIS 和灰色关联分析的技术经济综合决策方法。通过

这种融合方法，能综合考虑多个目标，如技术性能、经济成本、环境影响等^[7]。它利用 TOPSIS 的优势对各方案进行排序，同时结合灰色关联分析处理数据的不确定性，更准确地评估各方案与理想方案的接近程度。这种综合决策方法有助于在众多技术方案中筛选出最优方案，为新能源电气节能工程的技术管理和风险评估提供科学依据，实现资源的合理配置和风险的有效控制。

2. 数字孪生平台架构

在新能源电气节能工程中，构建基于 BIM 与大数据分析的虚实映射管理系统的数字孪生平台架构至关重要。该架构需整合多源数据，包括电气设备运行数据、能源消耗数据等，以实现对工程全生命周期的精确模拟与管理。通过 BIM 技术构建虚拟模型，与实际工程数据进行实时映射，为技术管理提供直观的可视化界面。同时，利用大数据分析挖掘数据背后的规律，为风险评估提供有力支持。系统应具备数据采集、传输、存储、分析和可视化展示等功能模块，各模块之间紧密协作，确保信息的高效流通与利用。这样的数字孪生平台架构能够有效提升新能源电气节能工程的技术管理水平和风险评估能力，为工程的可持续发展提供保障^[8]。

四、体系应用与验证

（一）典型工程实例分析

1. 某工业园区项目应用

在某工业园区项目中，该体系在光伏-储能联合系统得以应用。该工业园区具有较大的能源需求和丰富的太阳能资源，为体系应用提供了良好条件。通过对园区能源消耗情况的详细分析，结合光伏-储能联合系统的特点，制定了针对性的技术管理与风险评估方案。在实施过程中，精确监测和控制光伏系统的发电效率以及储能系统的充放电状态，依据评估体系对潜在风险进行实时预警和处理，确保系统稳定运行，有效提高了新能源利用效率，降低了能源成本，为工业园区的可持续发展提供了有力支持^[9]。

2. 运行数据对比分析

在典型工程实例中，通过对运行数据的对比分析，清晰展现了节能效率提升与风险概率降低的效果。对比传统工程，采用构建的技术管理与风险评估体系后，在新能源电气节能工程中，能源消耗数据显著降低，体现出节能效率的提升^[10]。同时，从设备故障频率、安全事故发生率等多方面数据来看，风险相关数据均呈现下降趋势，表明风险概率得以降低。这些运行数据的对比，有力地验证了该体系在实际工程中的有效性和优越性，为新能源电气节能工程的进一步发展提供了可靠的技术支持和管理保障。

（二）体系有效性评估

1. AHP-模糊综合评价

AHP-模糊综合评价在评估体系中具有重要作用。通过层次分析法（AHP）确定各指标的权重，能合理反映不同维度在评估中的相对重要性。例如在技术成熟度和经济可行性等维度上，AHP 可明确其权重占比。在此基础上，运用模糊综合评价方法对

评估对象进行综合评价。该方法能处理评价过程中的模糊性和不确定性,更符合实际情况。对于新能源电气节能工程的技术管理与风险评估体系,结合 AHP 确定权重后的模糊综合评价,可准确判断体系在各维度上的有效性,为进一步优化体系提供有力依据,确保其能更好地服务于新能源电气节能工程。

2. 敏感性分析

体系应用与验证阶段中的敏感性分析旨在评估关键参数波动对系统稳定性的影响程度。通过改变关键参数的值,观察系统输出的变化情况,从而确定系统对各参数的敏感程度。这有助于识别哪些参数对系统稳定性影响较大,为后续的优化和风险控制提供依据。在新能源电气节能工程中,关键参数可能包括能源转换效率、设备故障率、环境温度等。通过敏感性分析,可以模拟这些参数在不同取值下系统的性能表现,例如能源转换效率降低时系统的节能效果变化,设备故障率增加对整体工程运行的干扰,以及环境温度波动对电气设备性能和节能指标的影响等,进而为工程的技术管理和风险评估提供有力支持。

(三) 持续改进策略

1. 自适应学习机制

在自适应学习机制方面,基于机器学习的风险模式识别算法至关重要。该算法通过对大量新能源电气节能工程相关数据的学习和分析,能够自动识别潜在的风险模式。它可以从历史数据中提取特征,构建风险模型。利用神经网络等机器学习技术,不断优化模型参数,以适应不同工程环境和工况的变化。通过对实时数据的监测和分析,算法能够快速准确地判断是否出现新的风险模式,并及时发出预警。这一机制不仅提高了风险评估的准确性

和时效性,还为持续改进技术管理与风险评估体系提供了有力支持,使其能够更好地应对新能源电气节能工程中的复杂情况。

2. 标准化推广路径

为实现新能源电气节能工程技术管理与风险评估体系的有效应用与验证,需制定分区域、分场景的差异化实施方案。不同区域的能源资源分布、气候条件以及用电需求等存在差异,应根据这些特点调整技术管理策略。例如,在太阳能资源丰富的地区,重点优化太阳能发电相关技术管理。不同场景如工业用电、居民用电等对电气节能的要求和影响因素也不同。对于工业场景,需考虑生产流程对电能的需求特点,制定针对性的风险评估指标和节能措施。通过这种差异化实施,在实际应用中不断验证体系的科学性和有效性,同时根据应用反馈持续改进体系,为标准化推广奠定基础。

五、总结

新能源电气节能工程的技术管理与风险评估体系构建具有重要意义。该体系提炼出创新价值,为工程管理提供新视角。然而,当前研究在复杂场景适应性上存在局限,制约了体系的全面应用。未来,数字孪生、区块链等技术展现出应用前景。数字孪生可模拟工程实际运行,精准分析风险,为管理提供决策依据。区块链技术能确保数据安全、透明、不可篡改,增强体系可信度。通过应用这些技术,有望完善体系,提升其在复杂场景下的适应性,更好地服务新能源电气节能工程,推动行业可持续发展。

参考文献

- [1] 时召伟. 面向 Android 应用风险评估体系的设计与实现 [D]. 南京理工大学, 2018.
- [2] 朱燕婷. 新能源产业投资风险分析与评估体系的构建 [D]. 浙江大学, 2011.
- [3] 胡瑾. 面向创新 LED 灯开发的风险评估体系研究 [D]. 重庆大学, 2013.
- [4] 李瑞冰. 面向链长制的新能源汽车产业链风险评估研究 [D]. 中国科学技术信息研究所, 2022.
- [5] 池利娟. 股权众筹投资风险评估体系构建 [D]. 天津商业大学, 2017.
- [6] 汪大为, 王宝平. 基于风险评估的状态检修技术管理体系研究 [J]. 科学家, 2012(5): 200-201.
- [7] 韩志超, 朱军, 霍世平, 等. 阵地工程改造施工风险评估指标体系构建研究 [J]. 军事运筹与评估, 2022, 37(5): 51-57.
- [8] 杨倩. 构建国库资金风险评估体系的探索 [J]. 西部金融, 2014(2): 4.
- [9] 张为民. 全体系企业风险评估机制的构建实践 [J]. 上海化工, 2020, 45(2): 4.
- [10] 马荆涛. 浅析电气设备节能降耗技术管理 [J]. 农村经济与科技, 2016(4): 2.

一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统

李亚兴¹, 杨龙龙¹, 李贤广¹, 张周², 彭宁²

1. 阳江核电有限公司, 广东 阳江 529500

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ETQM.2025100005

摘 要 : 核电厂海水过滤系统关键设备鼓网在日常运行过程中承担海生物等杂物的拦截功能, 鼓网网片完整性的检查目前主要依赖人工目视的方式, 存在主观性强、效率低和缺乏缺陷管理的问题。本文研究一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统, 基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统, 通过现场布置高分辨率工业相机采集鼓网网片图片数据, 通过边缘计算装置, 对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别, 异常图片通过4G传输到后台进行预警, 从而实现鼓网网片缺陷的智能化检测, 降低运检人员工作量, 提高运检效率。

关 键 词 : 核电厂鼓网网片缺陷识别; 缺陷识别; 深度学习

A Method and System for Defect Identification of Drum Screen Mesh Panels in Nuclear Power Plants

Li Yaxing¹, Yang Longlong¹, Li Xianguang¹, Zhang Zhou², Peng Ning²

1. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract : The drum screen, a critical component of the seawater filtration system in nuclear power plants (NPPs), serves to intercept marine organisms and other debris during routine operation. Currently, the inspection of drum screen mesh panel integrity primarily relies on manual visual methods, which suffer from subjectivity, low efficiency, and a lack of systematic defect management. This paper presents a method and system for intelligent defect identification of drum screen mesh panels in NPPs. The proposed system leverages image recognition technology to enable intelligent defect detection. High-resolution industrial cameras are deployed on-site to capture image data of the drum screen mesh. Utilizing edge computing devices, the system automatically and promptly identifies defects in the mesh panel images. Abnormal images are transmitted via 4G to a backend system for early warning. This approach achieves intelligent defect detection for drum screen mesh panels, reduces the workload of operation and maintenance personnel, and enhances inspection efficiency.

Keywords : drum screen mesh defect identification (nuclear power plant); defect identification; deep learning

序言

核电厂海水过滤系统关键设备鼓网在日常运行过程中承担海生物等杂物的拦截功能^[1], 其直径20米, 由384片孔径为3mm的网片组成。网片破损将会导致微小海生物或杂质进入下游用户, 直接影响重要厂用水系统贝类捕集器和设备冷却水系统板式换热器的压差, 甚至堵塞设备, 丧失冷源, 威胁机组安全运行。维修人员通常在日常巡检和大修期间, 通过目视检查网片的完整性, 耗时耗力且容易遗漏。亟需开展视觉识别装置研发, 实现网片缺陷的智能化识别和管理, 助力冷源关键设备的安全可靠运行。如下图所示

视觉识别技术的进步和人工智能技术的发展使得以上问题的解决成为了可能^[2-10]。基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统, 通过现场布置高分辨率工业相机采集鼓网网片图片数据, 以像素格式存储在电脑中, 不仅便于保存和分享, 也能够使用常用的图像处理软件对图片进一步处理, 甚至利用人工智能算法和边缘计算装置, 对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别, 异常图片通过4G传输到后台进行预警, 从而实现鼓网网片缺陷的智能化检测。

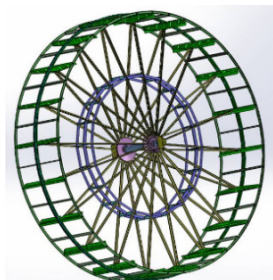


图1 鼓网结构简图

作者简介: 李亚兴 (1989.04—), 男, 汉族, 广东广州人, 本科, 工程师研究方向: 核电站冷源设备, 现供职单位: 阳江核电有限公司。

针对鼓网网片缺陷智能化识别的需求,本文研发一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统,实现网片缺陷的数字化、图像数据存储和管理、网片缺陷的智能识别、识别结果的数字化管理以及网片缺陷追溯的功能。该系统能够提高鼓网网片缺陷识别技术的自动化水平,相关技术和设备可向核电领域进一步推广。

一、核电厂鼓网网片缺陷识别方法

(一) 总体构架

基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统,通过现场布置高分辨率工业相机采集鼓网网片图片数据,通过边缘计算装置,对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别,异常图片通过4G传输到后台进行预警,从而实现鼓网网片缺陷的智能化检测,降低运检人员工作量,提高运检效率。

(二) 硬件方案

硬件部分包含数据采集端的两台全景工业相机、边缘分析端两台边缘计算设备、网络接入端的光电交换机和后台分析端的工控机。

(三) 机器视觉实施方案

整体设计方案含一台相机配套两台照明灯,两台照明灯位于相机左右,通过快拆连接件一同放置于墙壁支架上,共部署两套相机装置,相机距离网面距离可根据实际情况调整,距离范围为2000到3000mm。支架中心距离边缘1500mm,保证一台相机视场能覆盖4个网片。

(四) 图像采集方案

现场鼓网网片共8排,每排实际宽度为740.5mm,实际总宽度大于5924mm。采用2台高分辨率相机固定拍摄的方式对网片进行图像数据采集。左侧相机对1-4网片进行拍摄,右侧相机对5-8网片进行拍摄。采用相机分辨率为9344*7000,图像精度达到0.32mm/pixel,选择精度为0.35mm/pixel,视场范围为3270mm*2450,可完全覆盖4个网片。在初始行位置安装标记块,作为定位基准。

(五) 图像处理方案

单个工业相机对4个网片区域进行拍摄,拍摄后进行盐雾图像处理,随后利用目标匹配模块将4个网片区域提取出来,紧接着将每个网片区域在竖直方向上切成3块,分别利用鼓网缺陷检测算法进行缺陷检测,检测后将图像进行拼接,得到最终图像识别结果。

1. 鼓网缺陷检测算法:

由于鼓网缺陷目标尺寸极小,本方案采用基于针对小目标检测进行了优化的模型进行检测。模型训练和测试具体流程如下图2所示。

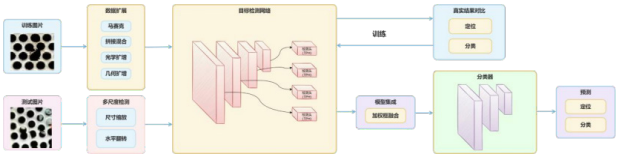


图2 检测模型流程图

上图中,为了提高模型性能,在训练过程中采用了数据增强技术,提高了模型对图像中缺陷目标因外部环境干扰而产生剧烈

变化的适应性。在推理过程中增加了多尺度测试(ms-testing)和多模型集成策略,以获得更有说服力的检测结果。为了提升分类效果,增加检测准确性,检测模型提供了一个自训练的分类器,它使用从训练数据中裁剪的图像块作为分类训练集。

检测模型网络(Object Detection Network)结构包含骨干网络、颈部网络和头部网络。

骨干网络 Backbone。常用的骨干网络包括 VGG、ResNet、DenseNet、MobileNet、EfficientNet、CSPDarknet53、Swin Transformer等。因为这些网络已经证明在分类等问题上具有很强的特征提取能力。但研究人员也将对主干进行微调,使其更适用于鼓网网片缺陷识别任务。

颈部网络 Neck。颈部的设计是为了更好地利用脊柱提取的特征。它对 Backbone 在不同阶段提取的特征图进行再加工和合理利用。通常,颈部由多条自底向上的路径和多条自顶向下的路径组成。颈部是目标检测框架中的关键环节。neck 中常用的路径聚合块有:FPN、PANet、NAS-FPN、BiFPN、ASFF、SFAM。这些方法的共性是反复使用各种上下采样、拼接、点和或点积来设计聚合策略。还有一些额外的 block 在颈部使用,如 SPP, ASPP, RFB, CBAM。

头部网络 Head。骨干网作为一个分类网络,不能完成定位任务,而头部则负责通过从骨干网中提取的特征图来检测目标的位置和类别。四个头结构可以缓解剧烈的目标尺度变化带来的负面影响。最上方的 Head1 添加的预测头是由 low-level、高分辨率的 feature map 生成的,对微小物体更加敏感。增加检测头后,虽然增加了计算和存储成本,但对微小物体的检测性能得到了很大的提高。

2. 盐雾环境优化算法:

由于鼓网房间盐雾大,因此需要考虑盐雾对拍摄质量的影响,极端情况下,需要通过单独的算法模型对盐雾进行修正,以提升拍摄质量。

盐雾去除算法通常采用局部对比度增强(Local Contrast Enhancement)技术,以增强图像中的边缘信息,进而去除盐雾噪声。该技术的实现可以通过以下步骤完成:

- 将输入图像分解成小尺寸的图像块。
- 对每个图像块进行对比度增强,以增强图像中的边缘信息。
- 将增强后的图像块重新组合成整个图像。
- 对整个图像进行后续处理,包括去除残余噪声、色彩校正等。

通过上述处理,可以对图像进行进一步的调整,包括调整图像的亮度、对比度、色彩平衡等,以获得更好的视觉效果。该方案可以通过使用基于深度学习的神经网络算法进行优化,提高盐雾去除的效果。此外,为了进一步提高方案的准确性和实用性,还可以在实验室环境下进行多次实验,对算法进行优化和调整,以适应不同的实际应用场景。

3. 后台管理:

后台鼓网缺陷检测管理平台对缺陷图片进行分析, 将正确分类的缺陷图片作为数据集投入模型中, 对模型进行二次训练, 优化所述缺陷检测模型, 提高模型准确率。

二、核电厂鼓网网片缺陷识别系统

(一) 系统结构

本文建立核电厂鼓网网片缺陷识别的系统, 基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统, 通过现场布置工业相机采集鼓网网片图片数据, 通过边缘计算装置, 对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别, 异常图片通过4G传输到后台进行预警, 从而实现智能化的鼓网网片检测和一体化管理。

(二) 系统功能

核电厂鼓网网片缺陷识别的系统主要包括图像采集、边缘计算、后台管理三部分, 由如下模块组成: 图像采集模块、图像标注模块、模型训练模块、模型优化模块、视频获取和提取模块、算法运行模块、存储模块、图像管理模块, 完成核电厂鼓网网片智能缺陷识别全流程。

1) 图像采集模块: 包括全景相机和显示设备, 获取鼓网网片图像。

2) 图像标注和预处理模块: 对获取的鼓网图像进行标注, 第一步标注鼓网网片, 用于鼓网网片识别和提取, 第二步标注鼓网网片中的各类缺陷, 将标注后的鼓网图片分为训练集和测试集。

3) 模型训练模块: 用于构建鼓网网片识别模块和鼓网网片缺陷模块, 对构建的模型进行训练。

4) 模型优化模块: 通过超参数的优化提高模型的准确率和召回率, 同时通过剪枝器等工具轻量化模型, 提高模型计算速度。

5) 视频获取和提取模块: 用于采集鼓网的监控视频数据, 传输给边缘计算设备, 边缘计算设备再进行解码, 获得图像信息。

6) 算法运行模块: 部署于边缘计算设备上, 融合如盐雾去除、图像增强等传统图像处理算法和深度学习模型, 形成图像处理流程, 处理输入的图像, 进行鼓网网片分割提取、鼓网上缺陷识别和定位, 并将结果传给后台存储模块和鼓网缺陷检测管理模块。

7) 存储模块: 用于存储经过算法处理的鼓网图像、缺陷信息数据。

8) 图像管理模块: 研发鼓网网片缺陷管理平台用于日志记录, 用于网片的缺陷汇总、统计和展示, 可视化缺陷情况, 具体包括机组/网片缺陷状态统计、缺陷记录、导出缺陷报表/缺陷图片, 及基础设备信息的维护管理、用户管理等功能。平台支持全部网片一张图/一张表式展示, 统计各机组的缺陷状态和缺陷

参考文献

数量、单个网片的缺陷状态和缺陷数量。支持用户浏览、复核鼓网缺陷, 支持汇总查看所有已检测的缺陷记录, 包含缺陷所在的机组编号、鼓网网片编号、缺陷类型、缺陷发现时间、缺陷图片(缺陷图片中标注缺陷在网片中的位置)等信息; 支持将缺陷记录导出为Excel报表, 支持单独/批量将缺陷图片导出至本地, 为缺陷/检修报告提供依据。

(三) 应用实例

本节展示缺陷识别算法的识别效果。核电厂鼓网网片缺陷包括穿孔点、油漆点、堵塞点等。网片缺陷识别结果如图3所示, 图中的穿孔点、油漆点、堵塞点缺陷均能准确识别。经试验测试, 实际工程项目测试, 鼓网网片缺陷识别系统的性能表现即缺陷识别准确率达到95%以上, 满足实际应用要求。

网片缺陷由计算机软件鼓网网片缺陷管理平台呈现出一体化的结果, 使用时可将该识别结果作为参考依据, 由检测人员最终审定, 进一步区分确认穿孔点、油漆点或堵塞点, 从而指导维修人员开展相应的维修, 相比于通过目视检查的方式效率和精确性均大大提升。

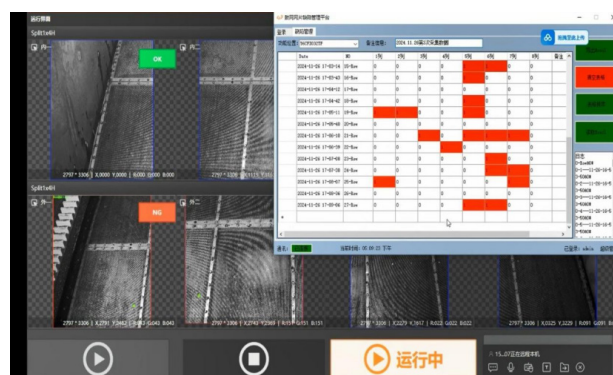


图3 网片缺陷识别结果

三、结论

(1) 本文研究边缘计算和图像处理算法, 完成图像的盐雾去除、图像增强等传统图像处理算法, 突出缺陷特征显示; 构建深度学习模型, 形成图像处理流程, 处理输入的图像, 进行鼓网网片分割提取、鼓网上缺陷识别和定位, 并将结果传给后台存储模块和鼓网缺陷检测管理模块。

(2) 本文开发核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统, 实现了网片缺陷的智能识别和一体化管理, 并在实际工程项目中对识别准确率和稳定性进行验证, 有效提升了网片缺陷检测的效率和可靠性, 提高了核电厂鼓网网片检测领域的数字化程度。

[1] 欧鸣雄. 一种核电站用旋转鼓形滤网结构 [P]. CN201988257U, 2011-09-28.

[2] 殷溢益, 熊友亮, 孙全, 等. 基于改进YOLOv5的排水管网缺陷识别研究 [J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(10): 41-45.

[3] 刘胜峰, 杨学成, 王子俊. 基于机器视觉的核电厂巡检机器人冷却设备水迹检测方法 [J]. 智能物联技术, 2024, 56(02): 122-125.

[4] 黄三傲. 机器视觉在水下核设备表面缺陷检测中的应用研究 [D]. 北京科技大学, 2022.

[5] 祝相博. 基于机器视觉的滤网缺陷检测与尺寸测量技术研究 [D]. 河南科技学院, 2024.D01:10.27704/d.cnki.gbnkj.2024.000263.

[6] 刘彬. 铸造用泡沫陶瓷过滤网外观缺陷检测系统研究 [D]. 沈阳工业大学, 2019.

[7] 林泽泉, 沈新生, 付国庆, 等. 核电厂B型滤网腐蚀状态的监测方法和监测装置 :CN202111621620.3[P].CN202111621620.3[2025-05-14].

[8] 许勇, 蔡云泽, 宋林. 基于数据驱动的核设备状态评估研究综述 [J]. 上海交通大学学报(自然版), 2022, 56(3): 267-278.

[9] 周刚, 杨立. 核电厂智能诊断方法研究的进展 [J]. 原子能科学技术, 2008, 42(S1): 92-97.

[10] 刘洪泉, 陈少林, 孙晓莹, 吴绍恒. 基于神经网络的核电厂设备易损性分析 [J]. 力学学报, 2021, 53(6): 1460-1470.

机械设计在家电产品中的应用及质量管控策略： 流体力学与机械运动的融合

何领民

广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ETQM.2025100006

摘 要： 阐述家电产品机械设计中流体力学与机械运动融合的相关技术，包括边界层理论等在散热风扇等中的应用，介绍机械运动与传动系统建模，如齿轮传动链等，还涉及 CFD 仿真、多物理场联合仿真、质量管控等方面内容，最后展望前沿方向并提出智能化升级路线图。

关 键 词： 家电产品；机械设计；流体力学与机械运动融合

Mechanical Design in Household Appliances: Application and Quality Control Strategies: Integration of Fluid Dynamics and Mechanical Motion

He Lingmin

Foshan, Guangdong 528300

Abstract： This paper elaborates on the integration of fluid dynamics and mechanical motion in the mechanical design of household appliances, covering technologies such as boundary layer theory applied in cooling fans. It introduces modeling of mechanical motion and transmission systems (e.g., gear transmission chains), along with CFD simulation, multiphysics co-simulation, and quality control strategies. Finally, it outlines future directions and proposes an intelligent upgrade roadmap.

Keywords： household appliances; mechanical design; integration of fluid dynamics and mechanical motion

引言

随着科技的发展，家电产品机械设计不断面临新的挑战与机遇。2021年发布的《中国制造2025》强调了制造业的智能化升级，这对家电产品机械设计提出了更高要求。流体力学中的边界层理论、湍流模型以及流体-结构相互作用原理等，在家电产品的散热、水流运动和风机性能等方面起着关键作用。同时，机械运动与传动系统建模、CFD仿真、涡动力学理论等技术也广泛应用于家电产品设计。此外，多物理场联合仿真验证、质量管控、制造过程控制以及装配应力场预测等环节也至关重要。跨学科协同研发模式下的人机工程学与功能设计融合更是提升用户体验的关键。这些技术的综合应用及不断创新，是实现家电产品智能化升级，提升性能和质量的核心路径。

一、家电产品机械设计的理论基础

（一）流体力学在机械系统中的作用机制

边界层理论是流体力学中的重要基础。在机械系统中，边界层的存在影响着流体与固体表面的相互作用，如在家电产品的散热风扇设计中，边界层的特性决定了空气流动的阻力和传热效率^[1]。湍流模型对于理解复杂流场至关重要。不同的湍流模型可用于描述流体的湍流特性，以优化家电产品中如洗衣机的螺旋搅拌装置的水流运动，提高洗涤效果。流体-结构相互作用原理揭示了流体对结构的作用力以及结构变形对流体流动的反作用。例如在离心式风机中，叶片的结构设计需考虑流体的作用力，同时叶片的变形也会影响流场特性，进而影响风机的性能。

（二）机械运动与传动系统建模方法

在家电产品机械设计中，机械运动与传动系统建模至关重要。对于齿轮传动链，需研究其动态响应^[2]。通过建立精确的模型，分析在不同工况下齿轮的受力、转速变化以及可能产生的振动等情况，这有助于优化齿轮设计，提高传动效率和稳定性。凸轮机构的运动学分析也是关键部分。准确描述凸轮的轮廓曲线与从动件的运动规律之间的关系，考虑凸轮转速、从动件的位移、速度和加速度等参数，以确保凸轮机构能满足家电产品特定的运动要求。此外，振动传递特性对产品性能影响显著。了解振动在传动系统中的传递路径和衰减规律，通过合理设计隔振、减振措施，减少振动对产品的不良影响，提升家电产品的整体性能。

二、典型家电产品的应用案例分析

（一）洗衣机搅拌系统的流体力学优化设计

通过 CFD 仿真可深入研究波轮结构参数对衣物运动轨迹的影响。CFD 能够模拟复杂的流体流动情况，分析不同波轮结构下水流的速度、压力分布等。在此基础上，建立衣物载荷-水流场耦合的有限元模型。该模型考虑了衣物在水流中的受力情况以及对水流场的反作用，能够更准确地描述洗衣机搅拌系统的工作过程。通过对模型的分析，可以优化波轮结构参数，提高衣物的洗净率，减少衣物的磨损。同时，该模型还可以为洗衣机的节能设计提供参考，降低洗衣机的能耗。这种基于流体力学的优化设计方法，为洗衣机搅拌系统的设计提供了新的思路和方法，有助于提高洗衣机的性能和质量^[3]。

（二）吸尘器涡轮机械的噪声抑制研究

在吸尘器涡轮机械的噪声抑制研究中，应用涡动力学理论具有重要意义。通过该理论改进叶片型线设计，能够优化涡轮机械内部的气流流动情况，减少因气流紊乱产生的噪声^[4]。同时，采用 LES 大涡模拟方法，可以精确分析气动噪声源的分布规律。这有助于针对性地采取措施来抑制噪声。例如，根据噪声源分布，可以对关键部位进行结构优化或采用吸声材料。通过这些方法的综合应用，能够有效降低吸尘器涡轮机械的噪声，提高产品的使用舒适性和市场竞争力。

三、质量管控的多维度实施策略

（一）设计验证技术体系

1. 多物理场联合仿真验证流程

构建包含流固耦合、热力学及电磁场的集成仿真平台是多物理场联合仿真验证的关键。通过该平台，可模拟家电产品在实际工况下的多种物理场相互作用情况。在此基础上，需制定模型验证的量化标准体系^[5]。该体系应涵盖对各物理场参数准确性的评估指标，确保仿真模型能够真实反映实际产品的性能。同时，对于不同物理场之间的耦合关系，也应有相应的验证标准，以保证多物理场联合仿真的可靠性。通过严格遵循这些标准，可有效提高设计验证的准确性，为家电产品的质量管控提供有力支持。

2. 原型机实验验证方法学

质量管控的多维度实施策略在设计验证技术体系及原型机实验验证方法学中至关重要。对于开发非接触式 PIV 流场测试装置，需从多维度确保其质量。从装置设计角度，要依据流体力学原理精确设计结构，保证测试的准确性^[6]。在材料选择上，要考虑其对流体的适应性以及耐用性。对于建立振动模态与声学品质的关联评价指标，要通过大量实验数据进行分析验证。在原型机实验验证过程中，严格控制实验条件，确保实验结果的可靠性。同时，利用先进的数据分析方法对实验数据进行处理，以准确评

估产品质量，为后续的优化提供依据。

（二）制造过程控制策略

1. 关键尺寸链统计过程控制

在机械设计质量管控中，制造过程控制至关重要。对于关键尺寸链统计过程控制，可应用 6σ 方法控制注塑模具形位公差，通过严格的数据分析和过程优化，确保尺寸的准确性和稳定性，减少偏差^[7]。同时，建立基于 IoT 的在线检测数据闭环系统，实时监测生产过程中的关键尺寸数据。利用 IoT 技术实现数据的快速采集和传输，一旦发现尺寸异常，能够及时反馈并调整生产参数，保证整个制造过程处于可控状态，从而提高产品质量，满足家电产品对机械设计的高精度要求。

2. 装配应力场预测技术

在装配应力场预测技术方面，开发接触应力有限元模型是关键。通过该模型，可以深入研究预紧力对传动系统寿命的影响规律。接触应力有限元模型能够模拟实际工况下的应力分布情况，为准确预测装配应力场提供理论基础。预紧力作为影响传动系统寿命的重要因素，其与传动系统各部件之间的相互作用关系复杂。借助模型分析，可以量化这种影响规律，从而为优化装配工艺、提高产品质量提供依据。这有助于在制造过程中更好地控制质量，避免因装配应力问题导致的产品故障，提高家电产品的可靠性和稳定性^[8]。

四、技术创新与质量提升路径

（一）新型功能材料应用研究

1. 梯度复合材料的流体性能优化

金属基复合材料在高温流体环境下的性能优化至关重要。其表面疏水改性技术可有效降低流体对材料表面的粘附，提高材料在高温流体中的稳定性。通过改变材料表面的化学组成和微观结构，使其具有疏水特性，从而减少流体与表面的接触面积和摩擦力。同时，耐磨涂层技术能够增强材料的耐磨性，在高温流体的冲刷下保持良好的性能。这种耐磨涂层可以采用多种方法制备，如物理气相沉积、化学气相沉积等。这些技术的应用不仅可以提高金属基复合材料在高温流体环境下的性能，还为其在相关领域的广泛应用提供了可能，例如在航空航天、汽车发动机等高温流体环境中的应用^[9]。

2. 智能材料在减振降噪中的应用

形状记忆合金作为一种智能材料，在减振降噪领域具有独特优势。其阻尼器在压缩机振动控制方面展现出重要应用价值。形状记忆合金具有特殊的相变特性，能够根据温度或应力的变化而改变自身的形状和力学性能。在压缩机运行过程中，会产生振动，形状记忆合金阻尼器能够利用其自身特性，对振动产生的能量进行吸收和耗散。通过合理设计阻尼器的结构和参数，可以使其在不同的振动频率下都能有效地发挥减振作用。同时，对其动

态响应特性的研究有助于深入了解其减振机制，进一步优化其在压缩机振动控制中的应用，提高家电产品的稳定性和可靠性，为提升产品质量提供技术支持^[10]。

（二）数据驱动优化设计方法

1. 大数据辅助的参数敏感性分析

在大数据辅助的参数敏感性分析中，应用 Sobol 指数评估设计变量对 NVH 性能的影响权重是关键步骤。Sobol 指数能够量化各设计变量对目标性能的贡献程度，通过大量的数据计算分析，确定哪些变量对 NVH 性能影响更为关键。在此基础上，构建自适应优化算法。该算法能够根据参数敏感性分析的结果，自动调整优化策略。它可以动态地适应不同设计变量的变化情况，以更高效地寻找最优设计方案。通过这种数据驱动的方法，能够在机械设计中更好地考虑各种因素对产品性能的影响，从而实现产品质量的提升，尤其在家电产品的设计中，有助于融合流体力学与机械运动，提升整体性能。

2. 数字孪生技术在产品迭代中的应用

数字孪生技术在家电产品设计中具有重要应用。通过创建产品的虚拟模型，能够整合流体力学与机械运动相关数据。利用传感器获取实际运行中的大量数据，反馈到虚拟模型中，实现物理实体与虚拟模型的实时交互。这种融合使得在虚拟环境中可模拟各种工况，精准分析流体力学特性对机械运动的影响，提前发现潜在的设计缺陷和故障模式。基于数据分析结果，对产品设计进行优化，从而提高产品质量和性能，加速产品迭代过程，更好地满足市场需求。

（三）跨学科协同研发模式

1. 机电液一体化集成设计方法

在机电液一体化集成设计方法中，跨学科协同研发至关重要。对于伺服电机—液压执行机构的匹配设计，需综合考虑机械结构、电学控制以及液压传动的特性。从机械角度，要确保结构的合理性与稳定性，以适应不同工况。电学方面，精确控制电机

的转速、扭矩等参数，实现与液压执行机构的良好匹配。在液压传动上，优化液压油的流量、压力等参数。同时，开发能耗最优的控制算法是关键。通过建立精确的数学模型，分析系统的能量损耗环节，结合智能控制策略，如模糊控制、神经网络控制等，动态调整电机和液压执行机构的工作状态，提高能源利用效率，提升整体性能和质量。

2. 人机工程学与功能设计的融合

在机械设计应用于家电产品的过程中，跨学科协同研发模式下的人机工程学与功能设计融合至关重要。构建用户操作行为模式数据库是基础，通过收集大量用户操作数据，分析其行为习惯和偏好。在此基础上，建立人机界面与机械结构的映射关系模型。该模型要综合考虑用户在操作界面上的指令输入与机械结构的实际响应，确保用户操作的便捷性和舒适性。例如，在设计家电的按键布局时，依据用户操作频率和习惯，合理安排按键位置，并通过映射关系模型，使按键操作能精准地驱动机械结构完成相应功能，实现人机工程学与功能设计的无缝对接，提升产品的用户体验和质量。

五、总结

机械设计在家电产品中的应用涉及流体力学与机械运动的融合。通过系统梳理相关技术路径，明确了融合的关键环节与方法。同时，总结数字化质量控制体系构建要点，为保障产品质量提供了方向。在此基础上，展望前沿方向，如 AI 自动化仿真平台和环境自适应流体元件等，这些将为家电产品带来新的发展机遇。基于此提出的智能化升级技术路线图，涵盖了从设计理念到实际应用的各个环节，有望推动家电产品在性能、质量和智能化水平上的全面提升，满足市场不断变化的需求，增强产品竞争力，为行业发展注入新动力。

参考文献

- [1] 牟培荣. 仿生设计在小家电产品中的应用研究 [D]. 四川师范大学, 2021.
- [2] 邹芳芳. H 公司家电产品的电商直播营销策略研究 [D]. 广州大学, 2023.
- [3] 邱伟特. 新电商环境下 A 公司家电产品营销策略研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [4] 王雁君. H 公司家电产品窜货治理研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [5] 王艳喆. 面向方面的家电产品评论情感倾向性分析与评价体系研究及应用 [D]. 青岛科技大学, 2021.
- [6] 王英. 数学方法在机械设计中的应用策略 [J]. 造纸装备及材料, 2021(009):050.
- [7] 管江明. 简析工业设计及机械设计的融合应用 [J]. 河北农机, 2021,000(3):P.52-53
- [8] 车帅, 俞小成, 朱培鑫, 等. 生命周期评价在家电产品中的应用研究 [J]. 日用电器, 2023(5):79-84.
- [9] 宁扬. 财务精细化管理在家电产品中的应用研究 [J]. 投资与创业, 2022(14):88-90.
- [10] 曾德局, 单小伟. CAD 在机械设计中的应用及机械制造技术的应用 [J]. 数字农业与智能农机, 2021,(1):127-128

核电站设备运维管理

许乐

中广核核电运营有限公司，广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ETQM.2025100008

摘 要： 在全球能源低碳化转型与“双碳”目标推进的背景下，核电作为清洁、稳定的能源支柱，其安全运行对能源供应保障与生态目标实现具有战略意义。核电站设备的可靠运行是机组稳定性的核心，而设备缺陷的高效管理直接影响机组的安全性、经济性与可靠性，因此构建科学的缺陷管理体系成为核电运营的关键课题。本文聚焦运营公司项目部的设备缺陷管理实践，阐述了“分级管理+数字化平台”模式的构建与应用：通过基地项目部统筹协调与项目队基层处置的分级架构，形成“发现-跟踪-处置-汇总”的闭环管理链条；依托数字化平台实现缺陷信息的结构化采集、多维度筛选与深度分析，破解传统管理中数据分散、分析滞后等瓶颈。该平台通过统计分析模型挖掘机组运行循环内的缺陷规律，为大修规划提供数据驱动的决策支持，推动缺陷管理从“经验驱动”向“精准化、预见性”转型。研究表明，该模式有效提升了设备缺陷处置效率与机组可用率，为核电行业智慧运维转型提供了可借鉴的实践范式。

关 键 词： 设备缺陷管理；数字化平台；核电运营

Operation and Maintenance Management of Nuclear Power Plant Equipment

Xu Le

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： Against the backdrop of global energy transition towards low-carbon and the advancement of "dual carbon" goals, nuclear power as a clean and stable energy pillar holds strategic significance for ensuring energy supply security and achieving ecological objectives. The reliable operation of nuclear plant equipment is the core of unit stability, while efficient management of equipment defects directly impacts unit safety, economy, and reliability. Therefore, establishing a scientific defect management system has become a key challenge in nuclear power operations. This paper focuses on the equipment defect management practices of an operational company's project department, elaborating on the construction and application of a "tiered management + digital platform" model. Through a tiered framework where base project departments coordinate at the headquarters level and project teams handle grassroots-level issues, a closed-loop management chain of "discovery-tracking-rectification-aggregation" is formed. The digital platform enables structured defect data collection, multi-dimensional screening, and in-depth analysis, addressing bottlenecks like data fragmentation and delayed analysis in traditional management. By mining defect patterns through statistical models, the platform provides data-driven decision support for major overhaul planning, driving defect management from "experience-driven" to "precision and predictive" approaches. Research shows this model effectively enhances equipment defect resolution efficiency and unit availability, offering a replicable practical paradigm for smart operation transformation in the nuclear industry.

Keywords： equipment defect management; digital platform; nuclear power operation

引言

全球能源体系正朝着低碳化、清洁化转型，核电因技术成熟、近零排放、出力稳定等优势，成为实现“双碳”目标的关键能源。截至2024年，全球在运核电机组440余台，年发电量占全球总电量10%以上，中国在运机组达58台，装机容量居世界前列，其规模化发展对优化能源结构、保障能源安全意义重大。然而，核电运营对安全要求极高，设备缺陷可能引发严重后果，因此缺陷全流程管理是运营核心，其效率与精准度直接影响机组可靠性与经济性。传统模式存在局限：缺陷信息依赖纸质或分散电子文档，形成“信息孤岛”，跨部门汇总难；分析依赖人工，维度单一滞后，难寻规律与关联，导致大修规划依赖经验，预防性维护针对性不足。随着机组老化、系

作者简介：许乐（1991-），男，汉族，湖北仙桃人，职称：工程师，学历：本科，研究方向：项目管理及数字化应用。

统复杂度提升，传统模式已不适应精细化管理需求。为此，核电运营公司探索分级管理与数字化技术融合的创新路径：构建“基地项目部-项目队”分级体系，实现“处置-汇总-决策”闭环；引入数字化平台，将缺陷信息标准化为结构化数据，通过多维度筛选与趋势分析挖掘规律，为大修提供量化依据，推动从“被动应对”向“主动预防”转变。

一、流程管理介绍

（一）管理框架

在缺陷管理流程中，项目部与基地各项目队依托明确的组织结构，制定了标准化的闭环处理机制。当缺陷信息反馈至项目部后，工程师通过数字化平台精准派发分析任务，由各项目队对应责任人员深入开展原因溯源，并填写原因。报告经项目队QC组长严格审核把关，确保分析逻辑严谨、结论可靠后，提交至ETPG组进行专业评审，ETPG组结合技术规范与实践经验给出最终指导性意见^[1-3]。项目部每周对当周产生的缺陷信息及处理结果进行系统归集、汇总分析，组织专题会议完成集中收口，明确整改责任与时限。针对大修工作，项目部工程师提前一个月启动专项筹备，对拟大修机组上一运行循环内的设备缺陷数据进行全面梳理、筛选分类，形成专项清单。各项目队责任QC组长依据清单内容，组织技术骨干制定针对性处理措施或检修方案，经多层级复核后形成最终答复，为大修工作的高效开展提供精准技术支持。

（二）任务流程介绍

在分析任务的填写与流转环节，需严格遵循标准化流程确保

信息传递精准高效。任务发起阶段，项目部工程师需逐项明确核心要素：精准记录任务发起时间以锚定流程节点；清晰标注缺陷设备对应的功能位置，为定位排查提供依据；详细描述缺陷信息，涵盖现象特征、发生频次、关联参数变化等关键细节；同时注明所属机组编号及相关通知单编号，实现与前期记录的追溯衔接^[4-7]。信息提交后，流程自动流转至责任项目队，由设备负责人或责任田负责人牵头开展首轮原因分析，结合设备台账、运行记录等资料排查潜在诱因，形成初步分析报告。报告随后提交技术组长进行深度审核，重点校验分析逻辑的严密性、关联因素的完整性，并补充专业技术判断。审核通过后，任务推送至ETPG组进行最终技术评审，ETPG组依据设备重要度、缺陷等级及技术规范，明确处理措施的实施场景——区分日常消缺或纳入大修计划，并标注具体工艺要求、资源需求及风险控制要点。全部意见确认后，流程返回项目部工程师处，工程师对整体分析结论、处理方案的可行性进行最终审核，确认无误后完成任务流程关闭，同时将相关数据同步至缺陷管理数据库，为后续统计分析提供支撑。（见表1）

表1

流程阶段	执行主体	核心工作内容	关键信息/输出
任务发起	项目部工程师	明确任务发起时间；标注缺陷设备功能位置；详细描述缺陷信息；注明所属机组编号及相关通知单编号	包含完整基础信息的分析任务单
首轮原因分析	责任项目队设备负责人/责任田负责人	结合设备台账、运行记录排查潜在诱因，形成初步分析报告	初步原因分析报告
技术审核	技术组长	审核分析逻辑严密性、关联因素完整性，补充专业技术判断	经审核的原因分析报告（含技术组长意见）
最终评审	ETPG组	依据设备重要度、缺陷等级及技术规范，明确处理措施（区分日常消缺或大修计划），标注工艺要求、资源需求及风险控制要点	含处理措施及实施场景的最终评审意见
流程关闭	项目部工程师	审核整体分析结论及处理方案可行性，确认无误后关闭流程，同步数据至缺陷管理数据库	已关闭的任务流程记录、更新后的缺陷管理数据

（三）缺陷信息数据库的用处

缺陷信息的收集工作，绝非简单的记录与存档，而是一项贯穿设备全生命周期的系统性工程。当这些信息经过长期积累形成规模化数据库后，其价值便会从零散的“数据碎片”转化为支撑设备管理决策的“智慧基石”。一个完善的缺陷数据库，往往覆盖特定周期内基地所有机组的运行痕迹，小到阀门异响的细微记录，大到主机振动超标的紧急告警，每一条数据都承载着设备状态的原始密码。从这样的数据库中挖掘深层信息，就如同为设备管理装上“透视镜”。通过对历史数据的纵向比对，可以精准统计各类设备的故障发生频率：比如某型号给水泵在三年周期内出现密封泄漏的次数占比，某批次传感器的误报率是否显著高于行业均值。这种频率分析能直接指向“高危设备”，为备品备件储备、重点巡检计划提供量化依据。进一步追踪故障根源，更能发现隐藏的管理盲区^[8-10]。数据库会清晰呈现同类缺陷的发生原因是否

存在共性，当同一原因导致的缺陷多次出现时，便暴露了前期整改措施的失效，促使技术团队从设计标准、维护规程等源头进行优化。时间维度的分析则像一把“标尺”，丈量着设备状态与检修工作的关联性。通过筛选数据可以发现：缺陷集中发生在大修后一个月内，可能意味着检修工艺存在疑问。更关键的是，将缺陷设备与大修期间的检修记录交叉验证，能快速判断：是未检修的部位频发故障，还是检修过的组件反而出现新问题？前者提示需补充检修范围，后者则要追溯检修质量与验收标准。而缺陷集中爆发的阶段特征，更是制定预防策略的核心依据。这些基于数据的精准分析，让预防措施从“大水漫灌”转向“精准滴灌”——既能避免过度维护造成的资源浪费，又能确保关键节点的防控力度，最终实现缺陷处理从“被动应对”到“主动预防”的质变，显著提升设备运行的可靠性与经济性。在工业领域，这样的数据库分析尤为重要。当每一条缺陷信息都能被充分解读，每一次异

常波动都能被提前预判，设备管理便真正迈入了智能化、精细化的新阶段，为企业稳定生产筑牢防线。（见表2）

表2

分析维度	核心内容	实际应用场景举例	管理价值
数据基础特性	贯穿设备全生命周期的系统性记录，覆盖周期内基地所有机组；包含从细微异常到紧急故障的全类型信息	记录阀门异响、主机振动超标等各类缺陷，形成覆盖全机组的规模化数据库	将零散数据转化为决策“智慧基石”，为后续分析提供完整原始依据
故障发生频率	分析通过纵向比对历史数据，统计各类设备故障发生的频率及占比	统计某型号给水泵三年周期内密封泄漏次数占比、某批次传感器误报率与行业均值对比	精准定位“高危设备”，为备品备件储备、重点巡检计划提供量化支撑
故障根源共性分析	追踪同类缺陷的发生原因，判断是否存在共性及重复出现的问题	分析轴承磨损是否始终源于润滑脂选型不当、管道腐蚀是否集中在特定水质处理环节	发现管理盲区，倒逼技术团队从设计标准、维护规程等源头优化整改措施
时间维度关联性	分析分析缺陷发生时间与检修工作的关联，包括大修后缺陷集中时段、设备运行周期与缺陷的关系	发现缺陷集中在大修后一个月内（提示检修工艺问题）、某类缺陷在机组运行2000小时左右频发（关联设备疲劳周期）	明确检修质量与缺陷的关联，指导补充检修范围或追溯验收标准
缺陷集中爆发阶段特征	识别缺陷在周期内的集中爆发阶段，结合环境等因素分析规律	夏季高温时段冷却系统缺陷激增、冬季启机阶段电气回路故障频发	为制定针对性预防策略提供依据，如提前改造散热装置、强化低温预启动检测流程
整体管理提升作用	推动预防措施从“大水漫灌”转向“精准滴灌”，实现缺陷处理从被动到主动的质变	避免过度维护浪费资源，同时确保关键节点防控力度	提升设备运行可靠性与经济性，推动设备管理迈入智能化、精细化新阶段，保障企业稳定生产

二、结语

本文以核电运营公司项目部的设备缺陷管理实践为研究对象，系统阐述了“分级管理+数字化平台”模式在核电设备缺陷全流程管理中的构建逻辑与应用成效。在全球能源低碳转型与“双碳”目标推进的背景下，核电作为清洁稳定的能源支柱，其设备缺陷管理的科学化、精准化水平直接关系到机组运行的安全性、经济性与可靠性，而传统管理模式中“信息孤岛”、分析滞后等痛点，需通过组织架构革新与数字化技术融合加以破解。本文提出的“基地项目部-项目队”分级管理架构，通过明确基层处置与统筹决策的权责边界，构建了“发现-跟踪-处置-汇总”的闭环管理链条，既保障了缺陷响应的时效性，又实现了跨机组、跨部门的资源协同；数字化平台的引入则进一步打破了数据壁垒，通过结构化信息采集、多维度筛选与深度分析模型，将零散的缺陷数据转化为支撑决策的“智慧基石”，为大修规划提

供了数据驱动的量化依据，推动缺陷管理从“经验驱动”向“精准化、预见性”转型。从实践成效来看，该模式通过故障频率分析精准定位“高危设备”，通过根源共性分析优化维护规程，通过时间维度关联校验检修质量，通过阶段特征分析制定针对性预防策略，有效提升了设备缺陷处置效率与机组可用率，为核电运营的稳定性提供了坚实保障。这一探索不仅验证了分级管理与数字化技术在设备缺陷管理中的适配性，更形成了可复制、可推广的实践范式，为核电行业智慧运维转型提供了有益参考。未来，随着核电机组运行年限的增长与系统复杂度的提升，设备缺陷管理将面临更高要求。后续研究可进一步深化数字化平台的智能化应用，例如引入机器学习算法实现缺陷风险的实时预警，或通过数字孪生技术模拟缺陷演化路径，从而持续提升缺陷管理的前瞻性与精准度。同时，也需加强跨基地的数据共享与标准统一，推动核电行业缺陷管理体系的整体升级，为全球能源低碳转型与核电可持续发展贡献更大力量。

参考文献

[1] 顾松鹰;尹闻;岳亮.核电厂复杂系统的维修规则可靠性指标的制定技术改进 [J].核科学与工程,2023(05)989-995.
[2] 姜峥嵘;孙洪波;成印健;王洪礼.电力工程建设汽车式起重设备施工技术研究.现代制造技术与装备,2024(03)91-93+97.
[3] 谢筱亮;郝赛;吴英昌.进口起重设备自主维修研究与应用 [J].中国电力企业管理,2022(12)88-89.
[4] 安宏灿;张弛;陈培.通用型变频器在起重设备中的应用 [J].机电信息,2011(24)91-92.
[5] 刘宝松;李忠宝;唐永峰.多卷扬电机悬架起重设备系统的设计与应用 [J].化学工程与装备,2019(11)156-157.
[6] 韩伟.核电厂设备状态维修研究及应用 [J].中国核电,2023(01)31-37.
[7] 陈明泉;江会福.三峡水电站厂内起重设备选择 [J].人民长江,2000(S1)22-23.
[8] 张树轶;房永顺浅析集装箱起重设备电缆安装工作可能存在的问题及解决方法. [J].科技风,2018(28).
[9] 张建;范如谷;徐建洪;蒋红;彭家彬.水电站起重设备控制系统国产化运用研究 [J].四川水力发电,2024(S1)19-26.
[10] 周洋;战蓉洁;袁巍;唐兴贵.核电厂起重设备管理及维护保养 [J].科技视界,2019(06)77-78.

浅议冠县大沙河水库供水方案设计分析

刘涛, 杨涛

冠县水利局, 山东 冠县 252500

DOI:10.61369/ETQM.2025100009

摘 要 : 大沙河水库位于山东冠县辛集镇, 距冠县县城 19.0km, 设计总库容 1179.7 万 m^3 , 是在建水库。水库建成后可高效调蓄黄河水及长江水, 解决控制范围内水资源分配不均、农村饮水安全等问题, 提高供水保证率。本文在对水库供水两种方案中的引水量、供水量、保证率等方面进行了分析对比, 选取了最佳供水方案。

关 键 词 : 水库; 引水量; 供水量; 保证率

Discussion on Design and Analysis of Water Supply Scheme of Dashahe Reservoir in Guanxian

Liu Tao, Yang Tao

Guanxian Water Conservancy Bureau, Guanxian, Shandong 252500

Abstract : The Dashahe Reservoir is located in Xinji Town, Guan County, Shandong Province, 19.0 km away from the county seat of Guan County. With a designed total storage capacity of 11.797 million cubic meters, it is currently under construction. Upon completion, the reservoir will efficiently regulate and store water from the Yellow River and the Yangtze River, addressing issues such as uneven water resource distribution within its control area and ensuring rural drinking water safety, thereby improving the reliability of water supply. This paper analyzes and compares aspects such as water diversion volume, water supply volume, and reliability in two proposed water supply schemes for the reservoir, ultimately selecting the optimal water supply plan.

Keywords : reservoir; water diversion volume; water supply volume; reliability

一、基本情况

冠县人均当地水资源占有量 168.7 m^3 , 仅占全省人均当地水资源量的 56.6%, 属于人均占有量小于 500 m^3 的严重缺水地区, 且冠县为地下水超采区, 有地下水压采任务, 当地急需合理利用长江水、黄河水。大沙河水库建设规模为中型, 位于山东冠县辛集镇, 距冠县县城 19.0km, 设计总库容 1179.7 万 m^3 , 设计年供水量 2421.3 万 m^3 , 是在建水库。水库建成后可高效调蓄黄河水及长江水, 可初步形成冠县水网两大中枢, 通过店子水库、大沙河水库联调联供, 解决控制范围内水资源分配不均、农村饮水安全等问题, 提高供水保证率。满足当地人民群众生活和生产需求, 推进冠县国民经济快速发展。

二、方案一：双源双供、联合调度

(一) 方案布置

大沙河水库、店子水库均引江水、引黄河水, 两库联合调度、联合调算。大沙河水库利用南水北调管道引长江水, 利用岳胡庄输水渠及冠县三干渠引黄河水。店子水库利用南水北调输水管道引长江水, 利用冠县三干渠、南水北调输水管道引黄河水。方案一示意图见图 1。

(二) 充库时间及流量

1. 引水原则

(1) 每年 12 月至翌年 2 月份为引黄济津 (入卫) 送水期, 12 ~ 2 月份不引水;

(2) 大沙河水库利用岳胡庄输水干渠及冠县三干渠引水, 三干渠为灌排两用河道, 汛期有排涝行洪任务, 为了错开汛期 6 ~ 9 月期间不引水。

(3) 位山灌区农作物灌水时间主要集中在 3、4、5、7、11 月份, 主要粮食作物冬小麦集中在 11、3、5 月份灌溉, 灌水时间为 10 天, 夏玉米集中在 7 月份灌溉, 灌水时间为 10 天, 春作在 4 月份灌溉, 灌水时间为 5 天, 详见表 1。水库引水时间不占用农田灌溉时间。

表 1 位山灌区灌溉制度

农作物	种植比例	灌溉次数	灌水定额	灌水日期		灌水延续时间
				起	止	
冬小麦	0.76	1	40	11月1日	11月10日	10
		2	40	3月1日	3月10日	10
		3	40	5月10日	5月20日	10
夏玉米	0.67	1	35	7月15日		10
春作	0.05	1	50	4月18日	4月22日	5
花生	0.05	4	50	7月4日	7月13日	10

2. 充库时间

大沙河水库、店子水库两水库均利用黄河水、长江水水源充库。

(1) 引黄河水

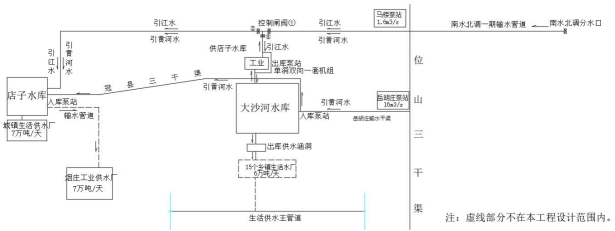


图1方案一示意图（双源双供、联合调度）

大沙河水库引黄引水口为位山三千渠桩号41+500岳胡庄泵站，由于该引水口处没有位山三千渠的引水天数、引水量、引水流量等统计资料，本次选用引水口下游13.1km处的位山三千渠郭庄闸处1995 ~ 2022年的资料进行分析。

(2) 引长江水

根据《南水北调东线一期工程鲁北段七一、六五河输水工程初步设计报告（报批稿）》^[1]，南水北调东线一期工程工程鲁北段输水工程输水时间为10月、11月和翌年的4月和5月，总输水期122天。冠县分水口在输水期内分水，其中10月分水31天，11月分水30天，4月分水30天，5月分水27天：分水流量1.6m³/s，年分配水量1633万 m³。

3. 充库流量的确定

本工程方案一大沙河水库引黄河水采用岳胡庄泵站引水。根据位山三千渠郭庄引黄闸多年平均逐月引水量及沿线分水量统计（详见第二章），同时结合工程建设规模，综合确定大沙河水库工程引水流量为12.0m³/s。大沙河水库主要利用岳胡庄输水渠及冠县三千渠输水，岳胡庄泵站设计流量为16m³/s，冠县三千渠为灌排两用河道，冠县三千渠经清淤治理后设计排涝流量可达到43.5 ~ 52.8m³/s，完全满足向水库输水的要求。

店子水库引黄河水有两种途径：一是通过岳胡庄泵站引水，泵站自位山灌区三千渠提水入岳胡庄输水渠，通过岳胡庄输水渠、冠县三千渠输水至店子水库引黄入库泵站，入库泵站设计流量9.2m³/s。二是通过冠县2021年度国家地下水超采综合治理项目中已建成的马楼泵站，利用已建成的南水北调输水管道输水，输水流量为1.6m³/s。

大沙河水库引长江水引水流量为1.6m³/s，与南水北调分水口流量一致。

(三) 水库供水

大沙河水库与店子水库联合调度，有城镇农村生活及工业、建筑业、服务业、大牲畜5类用水户，总需水量为3881.4万 m³/年，供水保证率为95%。店子水库供水1883.2万 m³/年，大沙河水库供水量为1998.1万 m³/年，供水保证率为95%。供水方式为全年均匀直供。

(四) 兴利调节计算

1. 调节计算原则

(1) 调算时段为月，从死库容起调。调算时按照完全年调

节，不出现弃水。

(2) 根据来水过程，确定起调月份，店子水库兴利调算起调月份为10月，且根据位山灌区灌溉制度，10月份不引水灌溉。为保持供水的时间一致，本次大沙河水库起调月份也为10月。

(3) 调算首先保证充分利用店子水库现有库容，在此基础上调算大沙河水库^[2]。

2. 兴利调节计算成果

95%保证率下两水库兴利调算成果见表5。

表5 方案一两水库兴利调算成果表

水库	保证率			95%
大沙河水库	充库水源	黄河水	设计引水天数（天）	21.08
			引水流量（m³/s）	12.0
			设计年充库水量（10⁴m³）	2185.3
		长江水	设计引水天数（天）	42.75
			引水流量（m³/s）	1.60
			设计年充库水量（10⁴m³）	591.0
	供水量	15个乡镇居民生活、大牲畜总用水量（10⁴m³）		1998.1
		店子水库（10⁴m³）		423.2
蒸发渗漏水量（万 m³）			354.9	
店子水库	充库水源	黄河水	设计引水天数（天）	7.14
			引水流量（m3/s）	1.60
			设计年充库水量（10⁴m³）	638.4
		长江水	设计引水天数（天）	75.38
			引水流量（m3/s）	1.60
			设计年充库水量（10⁴m³）	1042.0
	大沙河水库	水量（10⁴m³）	423.2	
	供水量	居民生活（10⁴m³）		644.9
		工业（10⁴m³）		954.8
		建筑业（10⁴m³）		45.3
		第三产业（10⁴m³）		238.3
	蒸发渗漏水量（万 m³）			220.4
	两水库总供水量（万 m³）			3881.4

(五) 成果分析

方案一，冠县大沙河水库总库容1260.0万 m³。水库调节库容1179.7万 m³，死库容80.3万 m³，最高水位出现在10月份，最高库水位为44.90m，死水位33.50m，库底高程32.50m。

方案一95%保证率下，大沙河水库设计年取用黄河水2185.3万 m³，设计引水天数21.08天，年取用长江水591万 m³，设计引水天数42.75天，设计年供水量2421.4万 m³（包括给店子水库供水423.2万 m³），蒸发渗漏量为354.9万 m³。店子水库年入库水量2103.6万 m³（其中黄河水638.4万 m³，长江水1042万 m³，大沙河水库调水423.2万 m³），设计年供水量1883.2万 m³，蒸发渗漏量为220.4万 m³。方案一大沙河水库、店子水库年总供水量3881.3万 m³。

两库共同调蓄需引黄河水2823.7万 m³，长江水1633万 m³。

三、方案二：双源单供、相机调节

（一）方案布置

为恢复店子水库为城区工业、第三产业及生活供水任务，店子水库只引长江水，大沙河水库只引黄河水。新增出库泵站与南水北调输水管道之间连通段，达到两库连通、相机给店子水库供水的目的。

（二）充库时间及流量

1. 引水原则

引水原则同方案一，12 ~ 2 月份不引水；汛期 6 ~ 9 月不引水；水库引水时间不占用灌溉时间。

2. 充库时间

大沙河水库只引黄河水充库。方案二大沙河水库黄河水充库时间与方案一一致，黄河水充库时间为 10 月、3 月、4 月三次。店子水库只引长江水，充库时间与方案一一致，长江水充库时间为 10 月、11 月、4 月、5 月四次。

3. 充库流量的确定

方案二大沙河水库引黄河水采用岳胡庄泵站引水。引水流量为 12.0m³/s；店子水库引长江水引水流量为 1.6m³/s，与南水北调分水口流量一致。

（三）水库供水

冠县大沙河水库与店子水库供水范围内，有城镇农村生活及工业、建筑业、服务业、大牲畜 5 类用水户，总需水量为 3881.4 万 m³/年，

供水保证率为 95%。两水库分开供水，店子水库供水 1460 万 m³/年，大沙河供水量为 2421.4 万 m³/年，供水保证率为 95%。供水方式为全年均匀直供^[3]。

（四）兴利调节计算

1. 调节计算原则

调节计算原则同方案一。

2. 兴利调节计算成果见表 6

表 6 方案二两水库兴利调算成果表

水库	保证率			95%
大沙河水库	充库水源	黄河	设计引水天数（天）	26.82
			引水流量（m3/s）	12.0
			设计年充库水量（10 ⁴ m ³ ）	2780.4
	供水量	15个乡镇居民生活、大牲畜总用水量（10 ⁴ m ³ ）		1998.1
		工业（10 ⁴ m ³ ）		423.2
	蒸发渗漏水量（万 m ³ ）			359.1

店子 水库	充库 水源	长江 水	设计引水天数（天）	118.13
			设计年充库水量（10 ⁴ m ³ ）	1633
	供水 量	居民生活（10 ⁴ m ³ ）		644.9
		工业（10 ⁴ m ³ ）		531.5
		建筑业（10 ⁴ m ³ ）		45.3
		第三产业（10 ⁴ m ³ ）		238.3
	蒸发渗漏水量（万 m ³ ）			173.0
两水库总供水量（万 m ³ ）			3881.4	

（五）成果分析

方案二，冠县大沙河水库总库容 1482.2 万 m³。水库调节库容 1401.9m³，死库容 80.3 万 m³，最高库水位出现在 10 月份，最高库水位为 46.76m，死水位 33.50m，库底高程 32.50m。

方案二 95% 保证率下，大沙河水库设计年取用黄河水 2780.4 万 m³，设计引水天数 26.82 天，设计年供水量 2421.4 万 m³，蒸发渗漏量为 359.1 万 m³；店子水库年取用长江水 1633 万 m³，设计引水天数 118.13 天，设计年供水量 1460 万 m³，蒸发渗漏量为 173 万 m³。方案二大沙河水库、店子水库年总供水量 3881.4 万 m³。

两库共需引黄河水 2780.4 万 m³，长江水 1633 万 m³。

四、水库供水方案确定

通过上述比较，两个方案在引江水总量不变的情况下，引黄水量相差不大。方案二大沙河水库库容较大，投资较大，方案一为双水源，联调联供，灵活性好，供水保证率高，还可以满足店子水库给工业供水的需求与充分利用已实施的马楼引黄泵站工程，符合当地水网规划思路，库容小节省投资。故推荐供水方案一，双源双供，联合调度。

五、结语

水库供水方案的设计是一项复杂的系统工程，需要综合考虑多方面的因素。通过对冠县水资源现状和用水需求的分析，确定了合理的供水方案设计原则和目标，并从水源选择、取水方式、输水系统、调蓄设施和供水系统等方面进行详细的设计比对，同时，对供水方案的可行性、可靠性和经济性进行了分析评估，为大沙河水库的建设和运行提供了科学依据。在后续的工程实施过程中，还需要进一步加强对供水方案的优化和完善，确保大沙河水库能够高效、稳定地为冠县的经济社会发展提供可靠的水资源保障。

参考文献

[1] 张晓曼. 三原县小道口水库供水提升改造设计方案初探 [J]. 陕西水利, 2023(08).
[2] 张纪智. 路花水库供水及发电建筑物综合布置设计 [J]. 广西水利水电, 2022(02).
[3] 徐荣昌. 某偏远山区规模化集中供水工程设计分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2023(04).

基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用

刘学霖

宁夏煤业公司羊场湾煤矿，宁夏 银川 751410

DOI:10.61369/ETQM.2025100011

摘 要： 本文研究煤矿隐蔽致灾水体探测与防治难题，深入分析三维物探技术体系。建立三维地震勘探、电阻率成像、电磁法等技术体系，结合多源数据融合与三维可视化建模平台，实现隐蔽水体精准探测；探寻数据采集优化、信号处理、反演算法等精准探测技术方法；开发防治水决策支持系统，包含风险评估、预警、防治工程设计等功能；最后开展技术经济性与适用性分析。研究显示，三维物探技术能有效提升煤矿隐蔽致灾水体探测精度与防治水平，对保障煤矿安全生产十分重要。

关 键 词： 三维物探技术；隐蔽水体；精准探测；水害防治

Accurate Detection and Prevention of Hidden Disaster Causing Water Bodies in Coal Mines Based on 3D Geophysical Technology

Liu Xuelin

National Energy Group Ningxia Coal Industry Co., LTD. Yangchangwan Coal Mine, Yinchuan, Ningxia 751410

Abstract： This paper studies the detection and prevention of hidden disaster-causing water bodies in coal mines, and deeply analyzes the three-dimensional geophysical technology system. It establishes a technical system of three-dimensional seismic exploration, resistivity imaging, electromagnetic method, etc., and combines it with a multi-source data fusion and three-dimensional visualization modeling platform to achieve precise detection of hidden water bodies. It explores the optimization of data collection, signal processing, inversion algorithm and other precise detection technology methods. It develops water prevention and control decision support system, including risk assessment, early warning, and prevention and control engineering design functions. Finally, it carries out a technical and economic analysis and applicability. The research shows that the three-dimensional geophysical technology can effectively improve the accuracy and prevention level of the hidden disaster-causing water bodies in coal mines, which is important for ensuring the safe production of coal mines.

Keywords： three-dimensional geophysical prospecting technology; concealed water bodies; precise detection; water disaster prevention and control

引言

煤矿水害是威胁煤矿安全生产的重要因素，隐蔽致灾水体因为其隐蔽性和复杂性，常引发突水事故，造成人员伤亡和财产损失。传统物探方法在探测精度和准确性方面存在局限，难以满足煤矿安全生产需求。随着地球物理勘探技术发展，三维物探技术凭借高精度、高分辨率和全方位探测优势，逐渐成为煤矿隐蔽致灾水体探测重要手段。本文目的是研究基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用，为煤矿安全生产提供技术支持。

一、三维物探技术体系构建

（一）三维地震勘探技术

三维地震勘探技术以弹性波传播理论为基础，使用宽线观

测、高密度采样以及三维偏移成像技术，能够对煤矿井下断层、陷落柱等地质构造进行精细解释。在水体界面识别过程，面波抑制、初至拾取、速度建模等关键技术发挥重要作用。面波抑制技术可有效减少干扰波，提高有效信号清晰度；准确的初至拾取能

作者简介：刘学霖（1990.06—），男，汉族，陕西榆林人，硕士研究生，地质工程助理工程师，研究方向：矿井地质保障及水害防治。

为后续速度建模提供可靠数据；合理的速度建模是实现水体界面精确成像的关键。通过研究和优化这些关键技术，可显著提升三维地震勘探技术对水体界面的识别能力，为煤矿隐蔽致灾水体探测提供重要依据。

（二）三维电阻率成像技术

三维电阻率成像技术利用岩体之间的电性差异，在煤矿井下布设高密度电极，运用三维反演算法，构建电阻率分布模型。不同电极排列方式，像温纳装置、偶极-偶极装置等，对含水层分辨率有不同影响。温纳装置适合浅层地质体探测，具有数据采集稳定、抗干扰能力强的特点；偶极-偶极装置对深部地质体探测有较高分辨率。通过研究和优化不同排列方式，可根据实际地质条件选择合适电极排列，从而提高对含水层的分辨率，准确探测隐蔽水体分布情况^[1]。

（三）三维电磁法技术

三维电磁法技术主要有瞬变电磁法（TEM）与可控源音频大地电磁法（CSAMT）。瞬变电磁法基于电磁感应原理，通过观测二次场随时间变化探测地下地质体；可控源音频大地电磁法则利用人工激发的电磁场，通过测量不同频率下的电场和磁场分量研究地下地质结构。在深部水体探测中，频率-深度转换、多频观测等技术有重要应用价值。频率-深度转换技术可将观测到的频率数据转换为深度信息，实现对深部水体的定位；多频观测能够获取不同深度地质信息，提高探测准确性和可靠性。通过研究和应用这两种电磁法技术，可有效探测煤矿深部隐蔽致灾水体（表1）。

表1 三维物探技术体系构建

技术分类	物理原理	分辨率（dB）	探测深度（m）	最佳应用场景	技术局限性
三维地震勘探	弹性波阻抗差异	≥ 25	50-1500	构造断层成像（误差 <3m）	受地表耦合条件影响显著
三维电阻率成像	岩层电性各向异性	18-22	20-500	含水层空间定位（精度 ± 5m）	高阻屏蔽效应
三维瞬变电磁法	电磁感应涡流衰减	20-24	100-2000	深部水体探测（信噪比 >15dB）	浅部盲区（<50m）

二、隐蔽水体精准探测技术路径

（一）数据采集优化设计

数据采集是三维物探技术的基础环节，其质量直接影响后续探测结果。根据矿区地质条件，比如地层结构、岩石性质等，制定合理的三维物探观测系统参数，包括道间距、偏移距、覆盖次数等。通过建立探测深度与分辨率的量化关系模型，明确不同参数设置下的探测效果，从而优化数据采集方案。例如，在探测深部水体时，适当减小道间距和偏移距，增加覆盖次数，可提高探测分辨率和准确性；在浅层探测时，则可根据实际情况调整参数，以提高数据采集效率。

（二）噪声抑制与信号增强

煤矿井下环境复杂，存在各种强干扰信号，严重影响物探数据质量。为解决这个问题，研究小波变换、经验模态分解（EMD）等信号处理技术。小波变换能够对信号进行多尺度分析，有效去除噪声，同时保留信号特征；经验模态分解则可以将复杂信号分解为多个本征模态函数，从而实现信号的降噪和增强。通过应用这些技术，可显著提升微弱水体异常信号的识别能力，提高物探数据质量，为隐蔽水体精准探测提供可靠数据支持。

（三）反演算法迭代优化

反演算法是将物探数据转换为地质模型的关键环节。对比最小二乘法、遗传算法、深度学习等反演方法的适用性，最小二乘法计算简单，但容易陷入局部最优解；遗传算法具有全局搜索能力，但计算效率较低；深度学习方法能够处理复杂的非线性问题，但需要大量训练数据。为提高模型收敛速度与解释精度，构建基于正则化约束与先验地质信息融合的反演框架。这个框架通过引入正则化约束，防止模型过拟合；融合先验地质信息，为反演提供更多约束条件，从而提高反演结果准确性和可靠性^[2]。

（四）水体边界智能划定

利用边缘检测、区域生长等图像处理算法，结合含水层电性/弹性参数阈值，实现水体三维边界的自动提取与动态修正。边缘检测算法能够识别图像中水体与周围岩体的边界；区域生长算法则可以根据一定规则，将具有相似特征的像素点合并为一个区域，从而实现水体区域的划分。通过结合含水层的电性/弹性参数阈值，可进一步提高水体边界划定的准确性。同时，随着探测数据不断更新，能够对水体边界进行动态修正，实时反映水体变化情况。

三、防治水决策支持系统开发

（一）水害风险动态评估模型

集成水体赋存条件、导水通道发育特征、采掘工程扰动等因素，构建基于模糊综合评价与层次分析法（AHP）的风险评估矩阵。模糊综合评价方法能够处理模糊不确定性问题，将多个因素的影响程度进行综合评价；层次分析法可以确定各因素的权重，从而更科学地评估水害风险。通过这个模型，能够实时对煤矿水害风险进行动态评估，为煤矿安全生产提供风险预警，使煤矿企业能够及时采取相应防范措施，降低水害事故发生概率^[3]。

（二）突水预警阈值体系

通过实验室岩样测试与现场监测数据，确定含水层水位、水压、渗透系数等关键参数的预警阈值。实验室岩样测试能够获得岩石的物理力学性质，为确定预警阈值提供理论依据；现场监测数据则反映实际地质条件和水文情况。根据不同预警阈值，建立分级预警机制，当监测数据达到相应阈值时，及时发出不同级别的预警信号，以便煤矿企业能够根据预警级别采取相应应对措施，避免突水事故发生或降低事故造成的损失。

（三）防治工程优化设计

结合水体空间分布特征，提出疏水降压、注浆封堵、留设防

水煤柱等防治措施的三维空间布局方案。疏水降压通过降低含水层水位，减少水体对采掘工程的压力；注浆封堵能够堵塞导水通道，防止水体涌入采掘空间；留设防水煤柱则是通过保留一定厚度的煤柱，起到隔离水体的作用。利用数值模拟方法对不同防治方案进行验证，评估其治理效果，从而选择最优的防治工程设计方案，提高防治水工程的有效性和经济性。

（四）应急响应决策支持

开发基于多智能体系统（MAS）的突水事故应急决策模型，这个模型能够模拟不同抢险方案下的人员撤离路径、排水能力匹配等关键指标。多智能体系统通过模拟多个智能体之间的相互作用和决策过程，实现对应急抢险方案的优化。在突水事故发生时，这个模型能够快速评估不同抢险方案的可行性和有效性，为煤矿企业提供科学的应急决策支持，指导人员安全撤离和抢险救援工作，最大限度减少事故造成的人员伤亡和财产损失^[4]。

四、技术经济性与适用性分析

（一）成本效益对比

对比三维物探与传统物探在设备投入、施工周期、探测精度等方面的差异，量化分析单位探测成本与事故损失降低率的关联性（如表2）。三维物探技术虽然设备投入相对较高，但探测精度显著提升，能够更准确发现隐蔽致灾水体，从而降低水害事故发生概率，减少事故损失。通过建立成本效益分析模型，计算出三维物探技术在不同条件下的成本效益比，为煤矿企业选择合适的物探技术提供经济依据。

表2 成本效益对比

评估维度	三维地震勘探	三维电阻率	三维电磁法	二维地震勘探
单位成本 (万元 / km ²)	12-18	8-12	15-22	5-8
数据采集效率 (km ² / d)	0.8-1.2	1.5-2.0	1.0-1.5	2.5-3.5
垂向分辨率 (m)	2-5	3-8	5-10	8-15
解释置信度 (%)	85-92	78-85	80-88	65-75

（二）复杂地质条件适应性

研究深部矿井、厚煤层、高瓦斯等特殊环境下物探技术的适用性。在深部矿井中，由于地质条件复杂，信号衰减严重，对物探技术的探测能力提出更高要求；厚煤层地区存在煤层厚度变化大、地质结构复杂等问题；高瓦斯环境则对物探设备的安全性提

出特殊要求。针对这些特殊环境，提出抗干扰数据采集与处理的技术改进方案，比如采用特殊的天线设计、优化数据采集参数、加强设备的防爆性能等，以提高三维物探技术在复杂地质条件下的适用性。

（三）技术标准化建设

梳理三维物探从数据采集、处理到解释的全流程技术规范，制定符合煤矿行业特点的标准化操作流程。标准化建设有助于提高三维物探技术的应用水平和可靠性，确保不同地区、不同煤矿企业在使用三维物探技术时遵循统一标准，保证探测结果的可比性和准确性。同时，标准化操作流程也有助于提高技术人员的工作效率和质量，降低人为因素对探测结果的影响^[5]。

（四）人员能力培训体系

构建“理论教学+虚拟仿真+现场实操”的三维物探技术培训模式。理论教学为技术人员提供扎实的专业知识基础；虚拟仿真通过模拟实际探测场景，让技术人员在安全环境下进行操作练习，提高其操作技能和应对复杂情况的能力；现场实操则使技术人员能够将理论知识和虚拟仿真中的经验应用到实际工作中，进一步提升其对异常数据的解读能力与系统操作熟练度。通过这个培训模式，培养出一批高素质的三维物探技术人才，为三维物探技术的推广和应用提供人才保障。

（五）政策与市场环境分析

结合国家安全生产法规与煤矿智能化建设要求，探讨三维物探技术在市场推广中的政策支持需求与商业模式创新路径。国家对煤矿安全生产的重视程度不断提高，出台一系列相关法规和政策，为三维物探技术的应用提供政策支持。同时，随着煤矿智能化建设的推进，对高精度物探技术的需求也日益增加。在市场推广方面，需要进一步加强政策支持，如提供财政补贴、税收优惠等；在商业模式创新方面，可以探索合作开发、技术服务等多种模式，促进三维物探技术的广泛应用和发展。

五、结束语

文章通过研究基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用，构建完整的三维物探技术体系，探寻精准探测技术路径，开发防治水决策支持系统，并进行技术经济性与适用性分析。研究表明，三维物探技术能够有效提高煤矿隐蔽致灾水体的探测精度和准确性，为煤矿防治水工作提供科学的决策依据。

参考文献

[1] 刘会磊. 物探技术在煤矿地质开采方面的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (14): 187-189.
[2] 武鹏. 物探技术在煤矿地质开采方面的应用探讨 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(07): 95-97.
[3] 赵亮. 物探技术在煤矿地质探测中的应用分析 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(07): 139-141+145.
[4] 王泽. 物探技术在探测煤矿地质中的应用 [J]. 矿业装备, 2022, (05): 140-142.
[5] 曹武庆. 物探技术在煤矿地质开采方面的应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, (25): 174-175.

输煤除灰系统协同优化对火电厂运行经济性的影响分析

谭康

贵州金元鸭溪发电运营分公司，贵州 遵义 563000

DOI:10.61369/ETQM.2025100013

摘 要： 随着能源需求的增长和环境问题的日益突出，火电厂的运行经济性和环保性受到了广泛关注。输煤除灰系统作为火电厂的重要组成部分，其协同优化对于提高火电厂的运行效率、降低运行成本具有重要意义。本文深入分析了输煤除灰系统的特点和运行现状，探讨了协同优化的策略和方法，并从多个角度阐述了协同优化对火电厂运行经济性的影响。通过对输煤除灰系统协同优化的研究，旨在为火电厂的可持续发展提供理论支持和实践指导。

关 键 词： 输煤除灰系统；协同优化；火电厂；运行经济性

Analysis of the Impact of Collaborative Optimization of Coal Handling and Ash Removal Systems on the Operational Economy of Thermal Power Plants

Tan Kang

Guizhou Jinyuan Yaxi Power Generation Operation Branch, Zunyi, Guizhou 563000

Abstract： With the growing demand for energy and the increasing environmental concerns, the economic efficiency and environmental protection of thermal power plants have gained significant attention. As a critical component of thermal power plants, the synergistic optimization of coal conveying and ash removal systems is crucial for enhancing operational efficiency and reducing costs. This paper provides a detailed analysis of the characteristics and current status of coal conveying and ash removal systems, explores strategies and methods for synergistic optimization, and discusses the impact of synergistic optimization on the economic efficiency of thermal power plants from various perspectives. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for the sustainable development of thermal power plants through research on the synergistic optimization of coal conveying and ash removal systems.

Keywords： coal conveying and ash removal system; synergistic optimization; thermal power plant; operational efficiency

引言

火电厂是我国电力供应的主要来源之一，在保障国家能源安全和经济发展方面发挥着重要作用。然而，火电厂的运行也面临着诸多挑战，如能源消耗大、环境污染严重等问题。输煤除灰系统作为火电厂的关键环节，其运行状况直接影响着火电厂的效率和成本。输煤系统负责将煤炭从储存地输送至锅炉，而除灰系统则负责排出锅炉燃烧产生的灰渣。两系统的协同运行对火电厂的稳定运行至关重要。目前，虽然已有不少关于输煤系统和除灰系统的研究，但对于它们之间协同优化的研究相对较少。因此，深入研究输煤除灰系统的协同优化对火电厂运行经济性的影响具有重要的现实意义。

一、输煤除灰系统概述

（一）输煤系统

输煤系统是火电厂中将煤炭从外部运输到锅炉燃烧设备的一系列设备和过程的统称。它主要包括煤炭的卸载、储存、输送等环节。煤炭通常通过铁路、公路或水路运输到火电厂，然后通过

卸煤设备（如翻车机、卸船机等）将煤炭卸载到煤场。煤场用于储存煤炭，以保证火电厂的持续供应。从煤场到锅炉的输送过程则通过皮带输送机、给煤机等设备完成。输煤系统的稳定运行对于保证锅炉的正常燃烧至关重要，如果输煤过程中出现故障，如煤炭供应中断、输送设备损坏等，将直接影响锅炉的运行，甚至导致停机事故。

（二）除灰系统

除灰系统的主要任务是将锅炉燃烧产生的灰渣从锅炉中排出，并进行妥善处理。锅炉燃烧产生的灰渣包括飞灰和底渣。飞灰是在锅炉燃烧过程中随烟气携带的细小颗粒，底渣则是沉积在锅炉底部的较大颗粒。除灰系统通常包括除尘设备（如电除尘器、布袋除尘器等）、除渣设备（如刮板捞渣机、螺旋捞渣机等）以及灰渣输送和储存设备。除尘设备用于捕捉烟气中的飞灰，除渣设备则将底渣从锅炉底部排出。排出的灰渣通过灰渣输送设备（如气力输送系统、机械输送系统等）输送到灰渣储存场地进行进一步处理或综合利用。除灰系统的正常运行对于保证锅炉的热效率和环保要求至关重要，如果除灰不及时，会导致锅炉受热面结渣，影响传热效果，降低锅炉效率，同时也会增加烟气排放中的污染物含量^[2]。

（三）输煤除灰系统的关联性

输煤系统和除灰系统虽然是两个相对独立的系统，但它们之间存在着密切的关联。首先，输煤系统输送的煤炭质量和数量直接影响着锅炉的燃烧状况，进而影响除灰系统的负荷。如果煤炭质量不佳，如灰分含量高、挥发分低等，会导致锅炉燃烧不充分，产生更多的灰渣，增加除灰系统的负担。其次，除灰系统的运行状况也会对输煤系统产生一定的影响。例如，除灰不及时导致锅炉受热面结渣，会影响锅炉的热效率，进而可能需要调整输煤量来维持锅炉的正常运行。因此，实现输煤除灰系统的协同优化，能够提高整个火电厂的运行效率和经济效益。

二、输煤除灰系统运行现状及问题分析

（一）运行现状

目前，我国大多数火电厂的输煤除灰系统已经实现了自动化控制，采用了先进的设备和控制技术。在输煤方面，皮带输送机、给煤机等设备实现了远程监控和自动化操作，提高了输煤效率和准确性。在除灰方面，电除尘器、布袋除尘器等除尘设备的性能不断提高，能够有效捕捉烟气中的飞灰。同时，气力输送系统、机械输送系统等灰渣输送设备的应用也越来越广泛，提高了灰渣输送的效率和可靠性。然而，尽管输煤除灰系统在技术上取得了一定的进步，但在实际运行中仍然存在一些问题。

（二）存在的问题

1. 设备老化与故障频发：部分火电厂的输煤除灰设备使用年限较长，存在不同程度的老化现象。老化的设备容易出现故障，以皮带输送机为例，长期运行会导致皮带表面磨损严重，特别是在落煤点等受力集中区域，经常出现纵向撕裂的情况。给煤机由于长期与煤炭接触，内部部件如叶轮、壳体等容易磨损变形，导致给煤量不稳定，有时甚至会出现卡涩现象。除尘器的滤袋在长期高温、高粉尘环境下工作，容易出现破损、板结等问题，导致除尘效率下降。

2. 协同性不足：虽然输煤系统和除灰系统在技术上有一定的联系，但在实际运行中，两个系统的协同性往往不足。输煤系统调整煤炭供应量时，往往只考虑锅炉负荷需求，而忽视了除灰系

统的处理能力。比如在负荷突增时，输煤系统会加大供煤量，导致灰渣产生量激增，但除灰系统可能还按原计划运行，造成灰渣堆积^[1]。反过来，除灰系统在处理能力受限时，也没有及时反馈给输煤系统调整供煤量，导致系统失衡。更严重的是，两个系统的运行数据往往分散在不同部门，缺乏实时共享机制，导致问题出现时反应滞后。

3. 能源消耗较高：输煤除灰系统的能耗问题确实不容忽视，如皮带输送机的电力消耗、除尘设备的风机能耗等。而皮带输送机作为主要的运输设备，其电机功率往往很大，长时间运行耗电量惊人。由于设备老化，这些设备的运行效率都在下降，比如皮带打滑会增加电机负荷，风机叶轮磨损会降低效率。此外，很多电厂的除灰系统仍采用水力除灰方式，不仅耗水量大，还需要额外的水泵能耗。

4. 环保压力大：随着环保要求的不断提高，火电厂的除灰系统面临着越来越大的环保压力。首先是灰渣排放问题，一些电厂的除灰系统设计年代较早，除尘效率无法满足现行标准，导致排放超标。其次是灰渣综合利用问题，虽然理论上灰渣可以用于水泥生产、筑路等，但实际操作中存在运输成本高、市场需求不稳定等问题，导致大量灰渣只能填埋处理，既浪费资源又污染环境。部分火电厂的除灰系统在处理灰渣时，存在灰渣排放不达标、灰渣综合利用程度低等问题，不仅对环境造成了污染，也浪费了资源。现在电厂都在想办法改进除灰系统，比如增加除尘器、改进灰渣处理工艺等，但投入成本确实不小。

三、输煤除灰系统协同优化策略

（一）设备升级与改造

在火电厂长期运行过程中，输煤除灰设备会因持续磨损、技术迭代等因素逐渐暴露出性能瓶颈。针对这类问题，实施系统性设备升级与改造是提升整体运行可靠性的核心路径。对于皮带输送机，可以采用新型的耐磨皮带，提高皮带的使用寿命；对于给煤机，可以进行技术改造，实现更精确的给煤控制。在除尘设备方面，可以更换高效的滤袋，提高除尘效率；对于除渣设备，可以采用新型的耐磨刮板，减少刮板磨损。通过设备升级与改造，可以降低设备故障率，提高系统的运行效率^[5]。

（二）建立协同控制模型

建立输煤除灰系统的协同控制模型是实现两个系统协同优化的关键。协同控制模型可以根据锅炉的燃烧需求、输煤系统的运行状况和除灰系统的处理能力等因素，实时调整输煤量和除灰策略。例如，当锅炉燃烧需增加煤炭供应量时，协同控制模型可根据除灰系统的处理能力，合理调整输煤量，防止因煤炭供应过剩导致除灰系统负荷过大。同时，协同控制模型还可以根据除灰系统的运行状况，及时调整输煤系统的运行参数，保证输煤除灰系统的协同运行。

（三）优化运行参数

通过对输煤除灰系统的运行参数进行优化，可以提高系统的运行效率和降低能源消耗。在输煤方面，可以优化皮带输送机的

运行速度、给煤机的给煤频率等参数，提高输煤效率；在除灰方面，可以优化除尘设备的风机转速、除渣设备的刮板速度等参数，提高除灰效率。同时，还可以根据煤炭的质量和锅炉的燃烧状况，调整输煤量和除灰策略，实现系统的最优运行。此外，还应探索不同工况下的参数组合库，为操作人员提供更具针对性的调整建议。

（四）加强信息化管理

利用信息技术实现输煤除灰系统的信息化管理，可以提高系统的管理水平和运行效率。通过建立输煤除灰系统的信息管理系统，可以实时监测系统的运行状态、设备故障情况等信息，并及时进行处理。在信息化管理框架下，系统可实现从传统的人工管理模式向数字化、智能化方向的转变，从而优化管理流程，提高响应速度。这种转变对于提升火电厂整体运营水平具有重要意义，也是实现智慧电厂建设的关键环节。同时，信息管理系统还可以实现输煤除灰系统与其他系统（如锅炉控制系统、环保监测系统等）的信息共享和协同工作，提高火电厂的整体运行效率。

四、输煤除灰系统协同优化对火电厂运行经济性的影响

（一）降低设备维修成本

通过系统性设备升级（如采用耐磨性更强的输煤皮带、高频振动除灰设备）和智能化改造（如安装振动传感器、温度监测模块），可显著提升设备可靠性。信息化管理系统能实时采集设备运行数据（如电流波动、轴承温度），结合 AI 算法预测潜在故障，提前安排预防性维护。设备故障的减少意味着维修次数和维修成本的降低^[3]。同时，协同控制模型的建立可以实现对设备的实时监测和优化控制，进一步降低设备的磨损和损坏，延长设备的使用寿命，从而降低设备的维修成本。例如，某电厂通过振动监测发现碎煤机轴承异常，及时更换部件避免了主轴断裂事故。协同控制模型可动态调整设备负载（如根据煤量自动调节输煤皮带转速），减少设备长期超负荷运行导致的磨损。

（二）提高能源利用效率

输煤除灰系统的能源利用效率提升依赖于多维度的优化策略。在理论框架下，输煤系统的能耗主要来源于皮带输送机的机械摩擦、破碎设备的动力消耗以及物料转运过程中的势能损失。通过建立精确的运行参数模型可以找到最优操作条件以减少无效能耗。除灰系统的能源优化则聚焦于灰渣输送方式的选择和输送路径的规划。协同控制模型的价值在于将输煤与除灰过程视为统一系统，根据锅炉燃烧状态的实时反馈动态调整两者协同策略。例如当锅炉负荷降低时，模型可同步减少输煤量并调整除灰频

率，避免因过量输煤导致的后续处理能耗增加^[4]。这种全局优化方法突破了传统单点优化的局限，从系统层面实现了能源利用效率的最大化。

（三）减少停机时间

输煤除灰系统的停机时间可分为计划内维护停机和意外故障停机两类。理论上，协同优化对这两类停机均有显著改善作用。对于计划停机，通过设备健康状态评估和剩余寿命预测技术，可以制定更精准的维护计划，将传统定期维护升级为基于设备实际状态的预测性维护，从而减少不必要的停机时间。对于意外故障停机，协同控制模型的快速响应机制至关重要。从系统工程的角度看，这种优化还体现在运行参数的动态匹配上：通过建立输煤量、除灰速率与锅炉负荷之间的实时耦合关系，确保各子系统始终工作在最佳匹配状态，从根本上消除因参数失调导致的非计划停机风险。理论分析表明，这种多层次的停机时间控制策略能够显著提升电厂的运行连续性。

（四）降低环保成本

输煤除灰系统的环保成本主要来自灰渣处理、粉尘排放控制以及环保设施运行三个方面。通过建立灰渣成分分析数据库和综合利用效益评估模型，可以优化灰渣分选工艺，从而减少填埋处置量。粉尘控制方面，协同优化强调从源头治理——通过精确计算输煤转运点的封闭风速、优化除尘器滤袋材质与清灰周期参数，实现粉尘排放浓度与除尘能耗的最佳平衡。环保设施运行成本的降低则依赖于系统协同：例如根据实时监测的粉尘浓度动态调节除尘器运行功率，或在灰渣湿度较高时自动启动烘干装置以保障输送效率。从全生命周期角度看，这种将环保要求融入系统设计理念的优化方法，不仅能够满足日益严格的排放标准，还能通过资源化利用创造附加经济效益，最终实现环保成本与经济效益的双赢。

五、结论

本文深入分析了输煤除灰系统的特点和运行现状，探讨了协同优化的策略和方法，并阐述了协同优化对火电厂运行经济性的影响。通过对输煤除灰系统进行设备升级与改造、建立协同控制模型、优化运行参数和加强信息化管理等协同优化策略，可以降低设备维修成本、提高能源利用效率、减少停机时间和降低环保成本，从而提高火电厂的运行经济性。在未来的研究中，还需要进一步深入探讨输煤除灰系统协同优化的理论和方法，不断完善协同控制模型，提高系统的智能化水平，为火电厂的可持续发展提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 章勇, 朱天柱. 火电厂运煤除灰系统中变频调节的应用与节能分析 [J]. 能源与环境, 2016, (03): 98-100.
- [2] 范嘉良. 火电厂运煤系统出力不足的原因处理探讨 [J]. 清洗世界, 2023, 39(11): 4-6.
- [3] 张建南. 优化火电厂输煤系统的能效与可靠性分析 [J]. 今日制造与升级, 2023, (11): 174-176.
- [4] 王宜民. 火电厂燃料输煤系统的运行安全研究 [J]. 中外企业家, 2019, (27): 216.
- [5] 李智文. 火电厂锅炉输煤系统除尘分析与应用 [J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(05): 92-94.

核电厂蒸汽发生器沉积物问题及治理技术的深度剖析

杨龙龙, 李亚兴, 许小斌

阳江核电有限公司, 广东 阳江 529941

DOI:10.61369/ETQM.2025100014

摘 要 : 作为核电厂的核心设备, 蒸汽发生器的沉积物问题对核电厂安全与经济运行构成严重威胁。本文凭借一线维修经验, 深入探究沉积物来源、类型、分布规律及其对传热性能的影响, 详细阐述预防性与纠正性清洗等治理技术的实际应用与发展方向, 为核电厂解决沉积物问题提供实用的技术方案, 助力核电厂安全、稳定、高效运行。

关 键 词 : 核电厂; 蒸汽发生器; 沉积物; 传热性能; 治理技术

In-depth Analysis of Steam Generator Deposits in Nuclear Power Plants and Treatment Technologies

Yang Longlong, Li Yaxing, Xu Xiaobin

Yangjiang Nuclear Power Co.,LTD.,Yang jiang, Guangdong 529941

Abstract : As a core piece of equipment in nuclear power plants, the issue of deposits in steam generators poses a serious threat to the safety and economic operation of nuclear power plants. Drawing on first-hand maintenance experience, this paper delves into the sources, types, distribution patterns, and impact of deposits on heat transfer performance,detailed explanations of the practical application and future directions of preventive and corrective cleaning technologies, and provides practical technical solutions for nuclear power plants to address deposit issues, supporting safe, stable, and efficient plant operations.

Keywords : nuclear power plant; steam generator; deposits; heat transfer performance; treatment technologies

引言

在核电厂日常运维中, 蒸汽发生器承担着一、二回路热交换的关键任务, 其运行状况直接关乎核电厂的安全与经济效益。尽管我们在材料选用、设计优化及水化学控制等方面持续改进, 但沉积物问题始终是影响蒸汽发生器性能的“老大难”。沉积物在管束、支撑板和管板等关键部位不断累积, 导致热力性能下降、传热管腐蚀、水位波动甚至传热管失效等一系列棘手问题, 严重威胁核电站的稳定运行。因此, 深入研究并解决蒸汽发生器沉积物问题, 是我们核电维修工程师日常工作中的重中之重, 具有极其重要的现实意义。

一、蒸汽发生器沉积物的根源与类别

(一) 沉积物的来源

从多年现场维修观察来看, 蒸汽发生器内沉积物来源广泛且复杂。管道系统和热交换器表面的腐蚀产物膜, 会不断释放离子态和可溶解态金属物质, 同时在流体冲刷下产生颗粒态物质, 尤其在高压缸湿蒸汽下游区域, 这种现象更为明显。凝汽器的管道或水箱密封区域一旦出现泄漏, 会引入氧气、二氧化碳等气体, 以及阴阳离子、颗粒和可溶性物质, 其自身管道及支撑结构的腐蚀产物也会成为沉积物的一部分。此外, 设备维修保养时残留的

油脂或涂敷物、补给水处理系统无法去除的有机物、补给水中溶解的气体、排污及精处理系统产生的树脂碎片和残留化学药剂等, 都可能在蒸汽发生器内沉积下来^[1]。其中, 铁基腐蚀产物占比约90%, 是沉积物的主要成分, 其沉积过程受蒸发器内水流速、干度和热流密度等因素显著影响。在实际维修中, 我们常常能看到这些因素共同作用下形成的不同形态沉积物。

(二) 沉积物的具体类型

不同电厂由于设备材质、制水工艺及pH控制策略的差异, 蒸汽发生器内沉积物的化学组成也不尽相同。常见的沉积物可分为颗粒态、离子态和可溶物三类。颗粒态物质如Fe₃O₄、

$\text{FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_2O_3 等,在传热管表面堆积,影响传热效率;离子态物质有 Na^+ 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 等,会参与腐蚀反应,加速设备损坏;可溶物包括 O_2 、 CO_2 、 N_2 、 H_2SiO_3 等,它们在不同工况下可能会发生相变或化学反应,进一步影响蒸汽发生器的运行性能。像硅、铝、钙等属于硬性物质,沉积后较难清除;而硫酸根、氯离子等腐蚀性杂质,对传热管的腐蚀作用不容忽视,这在我们日常检查中经常能发现相关腐蚀痕迹^[2]。

二、蒸汽发生器沉积物的分布规律

(一) 总体分布特征

通过对多个核电站蒸汽发生器的现场检查和数据分析,我们发现沉积物分布存在一定规律。通常热侧上部沉积物较多,U型管区域越靠上部沉积越明显,冷侧沉积物量相对较少。例如西屋公司F型蒸汽发生器,热侧上部腐蚀产物沉积量明显高于其他部位,分布如图1所示。

大亚湾电厂的腐蚀产物集中在热侧上部和冷侧下部。总体而言,多数蒸汽发生器上部管束,

特别是热侧弯管区,是沉渣最为集中的位置,这在设备检修打开后能直观看到^[3]。

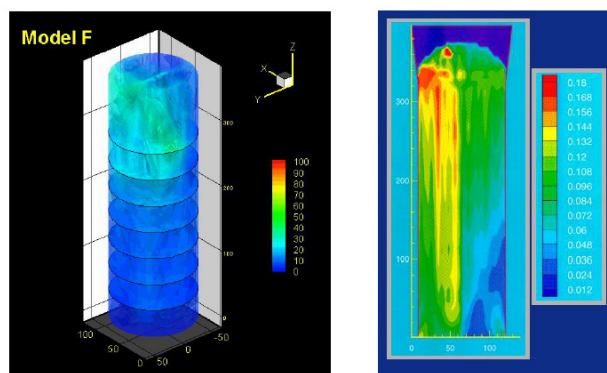


图1 F型蒸汽发生器泥渣分布图

(二) 基于检测技术的分布呈现

低频涡流检测技术是我们在日常检测中常用的手段,它能有效帮助我们了解沉积物的分布情况。通过检测发现,不同区域沉积物分布差异明显。热侧轴向区域在不同径向位置,沉积量呈现特定比例分布;U型管热侧和冷侧弯管区域也各有独特的沉积特点。这些检测结果为我们制定针对性的清洗和维护方案提供了直观、准确的依据,让我们能更精准地处理沉积物问题^[4]。

(三) 沉积位置与机理分析

在管板上,中心区由于流速最低,大颗粒沉积物受重力作用易于在此沉积,这也是排污管布置在中心区的原因。而在传热管上,流速、干度和热流密度对沉积影响显著。流速大、干度高、热流密度大的区域,更有利于沉渣附着和积累。我们在维修中发现,热流密度大的部位往往沉积物更多,对传热性能影响也更大,这与理论分析结果相符。

三、沉积物分布对传热性能的影响

(一) 传热性能影响的理论分析

从实际运行经验和理论原理来看,蒸汽发生器传热管上沉积物分布对传热效率影响重大。热流密度在热腿到冷腿的传热管上存在较大偏差,沉渣产生的热阻会阻碍热流传递,热量倾向于从热阻小的区域通过。因此,热腿积垢通常比冷腿严重,冷侧沉渣对传热影响相对较小。

在实际维修中,我们通过测量不同部位的温度和热传递效率,能明显感受到这种差异带来的影响^[5]。

(二) 基于模拟研究的结果

DEI公司的White博士等人利用EPRI的ATHOS软件进行分区模拟,设定不同区域沉积物厚度代表不同热阻,模拟中等程度($10.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$)和严重程度($35.22 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$)积垢情况,研究发现整体热阻对压降的影响大于空间分布不均匀性。不同程度污垢引起的蒸汽压力差显著,不均匀分布时压力降低相对较小,均匀分布时压力降低更大,因为不均匀分布时热量可从污垢少的区域补偿。EDF利用3D两相流软件模拟时,考虑到沉渣分布不均匀,结果显示多数情况下热腿积垢影响最大,污垢沉积到一定程度时,冷热腿均匀分布对热阻影响最突出,这与我们在实际维修中观察到的热侧传热性能下降更为明显的情况相符^[6]。

(三) 对蒸汽发生器运行的实际意义

沉积物分布对传热性能的影响,直接关系到核电站的安全与经济运行。在实际工作中,我们通过掌握这种影响规律,能更合理地优化蒸汽发生器运行参数,制定科学的维护和清洗计划。

比如根据沉积物分布情况,提前安排针对性的清洗作业,避免因传热性能下降导致设备过热、效率降低等问题,从而保障蒸汽发生器高效稳定运行,减少安全风险和经济损失。

四、蒸汽发生器沉积物治理技术

(一) 预防性清洗技术

1. 水化学控制技术:在日常运维中,我们深知二回路以铁基腐蚀产物为主,蒸汽发生器中堆积的铁基腐蚀物量较大,常规管板冲洗难以去除大部分腐蚀产物。水化学控制技术通过添加合适pH控制剂、联氨除氧、连续排污和控制给水杂质浓度等措施来调节二回路水化学性质。虽然该技术在减少设备腐蚀、降低杂质和腐蚀产物沉积方面有一定作用,但由于蒸汽发生器运行工况复杂,即使严格控制水化学工艺,仍难以完全避免沉渣富集。我们在实际操作中,会定期监测水化学参数,根据变化及时调整控制措施,但仍需结合其他清洗技术共同作用。2. 成膜胺(FFA)技术:成膜胺技术自20世纪60-70年代应用以来,原理是在管道表面形成隔离膜,减少腐蚀产物生成并抑制氯离子腐蚀。从实际应用数据看,成膜胺可延长化学清洗间隔。部分电厂应用后,给水

中铁离子含量降低,排污效率提高,蒸汽发生器脏污程度减轻。如法国 Almaraz 核电厂 1、2 号机组实施 FFA 在线应用后,通过对相关参数变化的研究,实其能有效减少二回路腐蚀产物向蒸汽发生器迁移,OSART 组织也推荐使用^[7]。在国内火电厂,成膜胺技术在锅炉给水水质处理和停运保护方面有应用,能在金属表面形成保护膜。在国内核电厂也有部分应用,也在持续关注其长期效果和稳定性。

2. 在线分散剂(PAA)技术:在线分散剂技术是国际水化学领域前沿技术,在蒸汽发生器积污控制方面有成果。分散剂能改变微粒表面电荷,抑制腐蚀产物沉积并去除松散腐蚀产物。

自 1998 年提出应用计划以来,国际上有多次应用案例,如比利时 Doel3 核电厂和瑞典 Vattenfall 核电厂的在线应用,结果显示其能提高排污除铁效率、改善结垢程度且不影响二回路水化学参数和系统材料,还能提高蒸汽出口压力。目前国内核电厂虽未应用,但相关研发工作正在推进,我们也在密切关注其进展,期待能引入这一新技术^[8]。

预防性清洗技术在机组正常运行期间应用成熟,对保障蒸汽发生器运行有重要意义,但无法完全清除沉积物,在电厂停机大修时,仍需依靠纠正性清洗技术。

(二) 纠正性清洗技术

1. 物理清洗技术

- 管板水力清洗:作为最早应用的清洗技术之一,自 20 世纪 70 年代起用于清除管板松软泥渣。经过多年发展,安全性和可靠性不断提高,设备也更加智能化。以阳江核电厂的清洗系统为例,根据管板检修口确定清洗工艺,通过手孔和眼孔清洗减少盲区。单台清洗时间约 24 小时,清洗泥渣量因设备运行年限和工况而异,需进行清洁度检查。但该技术对管板泥渣清除不彻底,残留泥渣可能变硬,在中心管廊热侧中心区域后续清除困难,这在多次大修中都有体现。

- 强化水力清洗:针对次硬性或硬性泥渣,在管板水力清洗基础上发展而来。原理相似但枪杆承压更高,清洗压力 250~300bar。根据法国 EDF 公司策略,未形成硬性泥渣时每 4 个大修周期清洗一次,形成后每 2 个大修周期清洗一次。我们在实际操作中,会根据泥渣硬度和设备情况灵活调整清洗周期和参数。

- 柔性水力清洗:主要用于清洗管间硬性泥渣,具备清洁度检查和异物取出功能。与传统刚性清洗不同,喷嘴可灵活进入管间,通过机械装置驱动,部分情况下上下对称布置减小反作用力。美国 FOSTER-MULLER 公司的 CECIL 技术为基础,法国相关公司进一步发展,清洗压力可达较高水平。国内中核武汉核动力运行技术研究所在机组大修中应用效果良好,能有效清除硬质泥渣,我们也在不断总结经验,优化该技术应用。

- 反向清洗技术:2014 年国内针对蒸汽发生器主蒸汽压力降低问题开发,用于扩大刚性水力清洗范围,清洗分流板和第一支撑板区域泥渣。苏州热工研究院和中核武汉核技术运行有限公司

提供技术服务,与管板水力清洗共用系统,清洗时间约 12 小时,效果显著。但国外尝试该区域清洗效果不佳,考虑到国内外设备差异,我们在国内应用中按计划推进,每两个大修周期进行一次,保障传热管安全^[9]。

- 上部管束水力清洗(UBHC):由英国 Rolls-Royce 公司开发,通过高压水射流冲洗管束上部

支撑板间泥渣和污垢,可进行全范围管束视频检查。但该技术适用于特定类型蒸汽发生器国内现有 55/19B 型蒸汽发生器不适用,我们也在关注其技术改进,看是否有适配可能。

- 鼓泡清洗(PPC):由于蒸汽发生器结构特点,部分水力清洗只能实现局部清洗,鼓泡清洗技术可利用水力震荡和水流冲刷实现全管束清洗,消除支撑板间疏松沉积物,清洗后结合管板清洗工艺。在实际应用中,我们常将其与化学清洗或其他水力冲洗结合,提高清洗效率。

- 低压喷淋清洗(UBF):针对传热管外壁松散泥渣,通过大流量水循环,利用重力使泥渣沉落,再经抽吸过滤循环作业。可解决支撑板梅花孔堵塞问题,清除管壁积垢,对蒸汽压力降低和性能下降问题有改善作用。国外应用较多,国内尚无案例。若积垢坚硬或粘着性高,清洁效果不佳,需结合软化学清洗。该技术冲洗时间长,占用大修工期,同时对传热管顶部的防震条可能会有影响,我们在考虑如何优化^[10]。

2. 化学清洗技术

- 硬化学清洗:即高浓度高温化学药剂清洗,旨在去除 95% 以上二回路腐蚀产物。20 世纪 80 年代左右开发,代表技术有 EPRI/SGOG 和 AREVAHTCC,EPRI/SGOG 应用较多,适用于 Inconel600 材料传热管。清洗后性能可恢复,但设备复杂昂贵,单次费用高达 2000 万 RMB 以上。

但可能对蒸汽发生器有一定的腐蚀,在实际大修中,我们会综合评估设备状况和成本,谨慎选择该技术。

- 软化学清洗:2000 年前期为解决硬化学清洗的不足而开发,采用低温低浓度化学药剂,对传热管腐蚀小,废液处理方便,更侧重预防性清洗。代表性技术如美国 DominionEngineeringInc 的 ASCA 和 AREVANPInc 的 DMT,ASCA 应用广泛。软化学清洗可防止沉渣增加和传热恶化,避免硬化学清洗的高成本和高风险,降低支撑板堵塞,去除铜等杂质,优化传热。在日常维护和大修中,我们会根据沉积物情况优先考虑软化学清洗技术。

五、结论

通过长期在核电厂的维修实践和研究,我们全面深入地了解了蒸汽发生器沉积物问题及治理技术。预防性清洗技术在日常运行中对减少沉积物积累起到一定作用,但无法完全解决问题。

纠正性清洗技术种类繁多,各有优劣,在电厂停机大修时发

挥着关键作用。在实际工作中，我们核电维修工程师需要根据蒸汽发生器的具体运行状况、沉积物的特性和分布等因素，灵活选择和组合不同的治理技术，制定个性化的解决方案。同时，我们也应持续关注相关技术的研发进展，不断引入新技术、新方法，进一步提升蒸汽发生器沉积物治理的效果和效率，保障核电站安

全、稳定、高效运行。未来，随着技术的不断进步，我们有信心在沉积物治理方面取得更好的成果，为核电站的可靠运行提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 卢净. 核电站蒸汽发生器密封堵板控制系统的开发 [J]. 设备管理与维修, 2024, (17): 179-181.
- [2] 马强. 某压水堆核电站蒸汽发生器排污系统排污效率与碱化剂回收效果试验与研究 [J]. 广东化工, 2024, 51(17): 122-124.
- [3] 马武江, 宣禹澄, 单鹏晨, 等. 核电蒸汽发生器关键特厚管板锻件锻造成形方法 [J]. 模具技术, 2024, (05): 76-81.
- [4] 李双燕. 核电蒸汽发生器最终环缝焊接技术 [J]. 装备机械, 2021, (03): 47-50.
- [5] 张跃, 王岩, 张灵宇, 等. 第三代核电蒸汽发生器管板锻件制造工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46(10): 44-48.
- [6] 朱景艳. 核电蒸汽发生器热工水力稳态特性分析 [J]. 机电信息, 2021, (28): 40-41+44.
- [7] 张龙. 三代核电蒸汽发生器金属反射式保温安装施工风险分析 [J]. 中国高科技, 2021, (22): 45-46.
- [8] 赵清森, 王世勇. 核电机组蒸汽发生器和汽轮机裕度匹配研究 [J]. 核动力工程, 2021, 42(06): 174-178.
- [9] 万积俊, 邱建. 核电机组蒸汽发生器支撑用大规格螺纹装配技术研究 [J]. 设备监理, 2022, (02): 38-41.
- [10] 王浩, 王臣, 高俊, 等. 核电站蒸汽发生器管板异物分析评价 [J]. 材料保护, 2022, 55(10): 213-217.

水利工程管理对防汛抗旱能力的提升策略研究

江莹莹

寿县淮河河道管理所, 安徽 淮南 232200

DOI:10.61369/ETQM.2025100024

摘 要 : 水利工程作为防汛抗旱的重要基础设施, 其管理水平直接影响着防灾减灾的成效。本文结合我国水利事业发展的相关政策与实践, 分析当前水利工程管理在防汛抗旱中存在的问题, 从工程维护、科技应用、机制完善、协同联动等维度, 探讨提升防汛抗旱能力的具体策略, 旨在为优化水利工程管理、增强防灾减灾实效提供参考, 保障人民生命财产安全和社会经济稳定发展。

关 键 词 : 水利工程管理; 防汛抗旱; 提升策略; 防灾减灾

Strategies for Enhancing Flood Control and Drought Resistance Capabilities through Water Conservancy Engineering Management

Jiang Yingying

Shouxian Huaihe River Waterway Management Office, Huainan, Anhui 232200

Abstract : Water conservancy engineering, as a critical infrastructure for flood control and drought resistance, directly impacts the effectiveness of disaster prevention and mitigation. This paper combines relevant policies and practices in China's water conservancy development to analyse the current issues in water conservancy engineering management during flood control and drought relief. It explores specific strategies to enhance flood control and drought relief capabilities from dimensions such as engineering maintenance, technological application, mechanism improvement, and collaborative coordination. The aim is to provide references for optimising water conservancy engineering management, enhancing the effectiveness of disaster prevention and mitigation, and ensuring the safety of people's lives and property as well as the stable development of the social economy.

Keywords : water conservancy project management; flood control and drought relief; enhancement strategies; disaster prevention and mitigation

水称得上生命开端、生产要件、生态依托点, 水利工程为调控水资源、应对水旱灾害的关键依托, 因全球气候改变影响, 我国极端天气情况屡屡出现, 洪涝、干旱灾害交替冒头, 对水利工程防汛抗旱能力赋予更高标准, 《中华人民共和国水法》《防汛条例》等各类法律法规清晰载明, 应增强水利工程管理力度, 保障工程平稳运行状态, 提升应对灾患的能力, 基于这一背景, 深度剖析水利工程管理提升防汛抗旱能力的策略路径, 于我国防灾减灾体系的完备、社会经济可持续发展有显著现实意义。

一、水利工程管理与防汛抗旱的关联性分析

(一) 水利工程是防汛抗旱的物质基础

水利工程由水库、堤坝、水闸、渠道、泵站等组成, 依靠蓄水、对水进行调配、排放多余水等功能, 在防汛抗旱事宜里发挥着不可取代的功用, 从应对洪涝灾害角度, 水库可达成拦蓄洪水的效果, 弱化洪峰流量的量级, 舒缓下游地区防洪的沉重压力; 堤坝可抵御洪水的进犯, 保障沿岸城镇跟农田; 水闸可实施对河道水位及流量的调节, 限制洪水下淌。在应对旱情的相关事宜中, 以水库、塘坝为例的蓄水工程可储存水资源, 干旱时段内为

农业灌溉、工业生产及城乡生活供水保供; 像渠道、泵站这些输水工程可把水资源送往缺水区域, 改善干旱造成的不利局面, 在长江流域防汛工作期间, 三峡水库凭借科学调配, 多回成功截住洪峰, 有效降低中下游防汛方面的压力^[1]。

(二) 管理水平决定防汛抗旱效能的发挥

水利工程防汛抗旱效能, 并非仅仅依靠工程规模和质量来体现, 而关键在于管理水平好坏, 科学合理管理可保障水利工程一直维持良好的运行状况, 实现其功能的充分运用; 管理若有缺陷会导致工程老化失修、功能不断弱化, 甚而引发一系列安全事故, 降低抵御洪涝与干旱的能力。个别小型水库因为管理方面存

在漏洞，存在坝体渗透、闸门失准等情形，汛期或有溃坝之虞，难以充分达成防洪使命；若碰上干旱时候，鉴于渠道出现淤积、泵站产生故障等管理难题，无法做到及时输送水资源，加剧了干旱引发的不良后果。

二、当前水利工程管理在防汛抗旱中存在的问题

（一）工程设施老化失修，安全隐患突出

少量水利工程建设距离现今年代久远，因当时技术水平和资金投入方面的局限，工程水准不高，历经持久的运行阶段，诸多工程出现了一定程度的老化与损坏现象，就我国现有的小型水库而言，大概三分之一呈现坝体渗漏、溢洪道损坏、闸门启闭装置老化等情形；个别灌溉渠道淤积严重的情况凸显，输水能力急剧下降，老化失修工程于防汛抗旱时难正常发挥功效，乃至成为了安全层面的隐忧，

（二）管理体制有欠缺，责任落实未达预期

水利工程管理牵扯到多个部门以及层级，面临管理主体界定不明、职责交叉甚至缺失等难题，有部分地区的水利工程管理责任制未健全搭建好，导致管理责任难以有效实施，问题出现后相互推卸，处于防汛抗旱工作开展时段，未具备统一的调度指挥规划，各部门协同合作未实现顺畅衔接，妨碍了应急响应效率与效果的达成。

（三）科技应用水平低，监测预警能力不足

我国水利工程管理当中科技应用水平相对偏低，监测与预警体系有漏洞，诸多水利工程的监测器具陈旧不堪，自动化、智能化水准不高，难以即时、精准掌握工程运行状况及水情、雨情、旱情等数据，在实施防汛抗旱决策期间，多依靠经验实施判断，未得到科学数据的有力支撑，让决策在及时与准确方面受负面影响。

（四）资金投入不足，管理维护保障乏力

水利工程管理及维护离不开持续的资金投入，只是现阶段我国水利工程管理资金缺口处于高位，尤其是基层地带，缘于地方财政窘迫，对水利工程管理维护的资金投入欠缺，致使工程不能及时开展维修与养护工作，资金利用的效率不高，出现诸如挤占、挪用的问题，造成管理维护保障乏力状况的进一步升级。

（五）公众参与度低，防灾意识薄弱

公众作为防汛抗旱的重要支撑力量，不过目前公众对水利工程管理及防汛抗旱工作参与的活跃度欠佳，应对灾害的意识淡薄，诸多人员对水利工程功能和重要性的认识不充分，缺少节水意识与保护水利设施的实际行动，在灾害起始的阶段，公众在自救互救操作上能力较差，引发灾害损失的上扬。

三、提升水利工程管理以增强防汛抗旱能力的策略

（一）加强工程维护与升级改造，夯实防汛抗旱基础

1. 开展针对工程安全隐患的排查治理活动：依时对水利工程做全面排查，创建隐患明细单，谋划整改实施计划，限定时间消

除潜在安全隐患，着重对水库大坝、堤坝、水闸等关键工程的结构稳固性、运行状态及防汛设备展开排查，针对存在问题的工程迅速开展维修加固工作，针对坝体渗漏的水库开展帷幕灌浆方面的处理，对损坏的闸门加以替换，保障工程安稳运转。

2. 推进老旧工程升级改造：依照“真有需要、生态安全、持续可行”的原则，对年久失修、效能减退的水利工程实施升级改造，增进工程防洪标准范畴与抗旱能力程度，处于改造作业阶段，引入新兴技术、材料及工艺，增进工程质量及持久度，给灌溉渠道做防渗处置，减轻水资源渗漏造成的损失，提升输水成效；实施针对泵站的自动化改建，实现远程把控及精准调度^[9]。

3. 加强工程日常管护：构建并完善水利工程日常管护制度体系，明晰管护责任归属及管护范畴，保证工程获得及时修护调养，着重实施对工程运行状态的监测，以固定周期开展巡查及检测活动，即时找出且应对状况，任用专人开展对水库的日常巡查，记录诸如水位、渗流量的数据，若检测到异常情况，迅速上报且马上采取行动。

（二）完善管理机制与制度建设，提升管理效能

1. 健全管理责任体系：厘定各级政府、水利部门及工程管理单位的职责，搭建“政府主领、部门配合、社会介入”的水利工程安全管理责任框架，把防汛抗旱责任归入地方政府绩效考核范畴，对工作成效差、引发严重损失情况的单位及个人进行追责，应用水库“库长责任体系”，各级政府领导担当库长一职，担负起水库安全管理及防汛抗旱调度工作。

2. 完善防汛抗旱调度机制：设立统筹、高效的防汛抗旱调度指挥体系，增进各部门相互配合，实现信息交互共享、资源统筹利用、携手联合行动，设计科学且合理的防汛抗旱调度预案，按照水情、雨情、旱情的实时变动，实时调整调度相关策略，水利、气象、水文等部门携手合作，及时传达洪水预警内容，共同执行水库泄洪、河道行洪相关工作；碰上干旱时期，统筹协调水资源调配，着重保障城乡居民生活用水与关键工业用水。

3. 加强制度建设：健全针对水利工程管理的法规及制度规范，令工程建设、运行、维护等环节管理行为合乎规范，制定水利工程安全运维管理、防汛抗旱应急管控、水资源科学调度等范畴的制度与标准，保障管理工作依规有序开展，构建《小型水库安全管理办法》《防汛抗旱应急预案》等体系，规定工程管理详细要求跟应急处置流程。

（三）推进科技应用与信息化建设，增强监测预警能力

1. 构建智能化监测网络：扩充水利工程监测设备的投入规模，在水库、堤坝、河道等关键位置设置自动化监测器具，诸如水位监测装置、雨量监测装置、渗压监测装置、位移监测装置之类，做到对工程运行状况跟水情、雨情、旱情的实时监测，利用诸如物联网、大数据、人工智能等技术，搭建覆盖所有区域的水利信息化监测脉络，增强监测数据精准度与及时性，依靠卫星遥感技术监测土壤的墒情及植被覆盖的具体状况，为抗旱决策给出凭据；借助视频监控体系对水库及河道的水位与水流状况开展实时监测，快速识别潜在险情。

2. 提升预警预报水平：加强针对水文气象预报的研究探索，

增强洪水、干旱等灾害预报的精准度与可预见时长，健全预警信息发布的相关机制，采用电视、广播、手机短信、微信公众号等不同渠道方式，及时精准地向社会公众群体发布预警内容，增强预警信息覆盖范围与传播及时性，开发面向防汛抗旱的预警APP，为用户配备个性化预警服务内容，使公众可及时掌握灾害信息并实施防范举措。

3.推进智慧水利建设：采用大数据、云计算、人工智能等先进技术，搭建智能化水利平台，实现水利工程管理向智能精准转变，依靠平台对水利工程的各类信息、监测数据、调度方案等资源进行整合，为防汛抗旱决策供给科学层面支撑，采用人工智能算法对历史数据进行解析，预估未来水情的变化走向，为水库调度和水资源分配这两项工作提供决策建言；采用数字孪生技术构建出水利工程虚拟模型，对工程于不同工况下的运转情形开展模拟，为工程养护与应急处理给予可视化依据。

（四）加大资金投入与监管力度，保障管理工作开展

1.拓宽资金筹措渠道：开拓多样化水利工程管理资金筹集途径，增大政府财政投入的比重，倡导社会资本参与到水利工程建设及管理工作，采用PPP模式招引社会资本参与水库、供水工程等的建设及运营事务；筹备水利工程管理专项经费，保证资金专款施用。

2.提高资金使用效率：着重对水利工程管理资金实施监管，确立资金使用效益的衡量机制，保证资金有效投放至关键节点，优化资金投放结构，着重保障工程维护、监测预警、应急处置等关键任务资金供应，按周期对资金使用情况实施审计，严肃查处挤占、挪用资金的行径。

3.建立长效投入机制：把水利工程管理维护资金归入地方财政预算，按照经济社会发展情形与物价水平恰当调整，设立长期稳定的投入格局，进一步加强资金使用的绩效把控，提高资金运用的实际效益，实施水利工程管理资金使用效果的量化评定，把评估结果与下一年度资金分配构建关联^[3]。

（五）强化公众参与与宣传教育，营造良好社会氛围

1.加强防灾减灾宣传教育：依靠多种媒体及宣传手段，普遍

开展防汛抗旱和水利工程保护宣传教育相关活动，推动公众防灾减灾及水安全意识的增长，处在“世界水日”“中国水周”等关键节点，实施主题宣传工作，经由发放宣传资料、开展知识传授、进行应急实操等方式，普及防汛抗旱常识以及水利工程保护法律条例。

2.倡导公众投身水利工程管理事宜：构建起完善的公众参与机制，激励社会各界投身水利工程的建造、管控与督导，组建针对水利工程管理的志愿者队伍，组织志愿者开展工程查巡、宣传教导等事宜；把水利工程管理信息进行公开，纳入社会监督范畴，增进管理工作的透明展现与公信力度。

3.提高公众自救互救能力：开展针对防汛抗旱的应急演练行动，强化公众面对险情的应急自救互助力，在社区、学校、村庄这类地点开展防汛抗旱应急演练，让民众熟知应急疏散路径、避险地点及自救办法，增进面对灾害的实力。

四、结束语

水利工程管理为增强防汛抗旱能力的核心要点，与民众生命财产安全及社会经济发展全局紧密相连，我国水利工程管理在防汛抗旱工作中，依旧面临着工程老化失修、管理机制不健全完备、科技应用水平偏低、资金投入不充分、公众参与度不足等困境，利用增强工程维护与升级改进、健全管理机制跟制度建设、推动科技应用与信息化推进、增加资金投入和监管举措、提升公众参与及宣传教育等策略实行，可明显提升水利工程管理的综合水平，加强防汛与抗旱的应对水平。

跟着我国水利领域不断拓展和科技不断突破，水利管理会迈向智能化、精细化及社会化方向，我们当持续聚焦水利工程管理中的新矛盾、新挑战，持续在管理理念与方法上进行创新探索，持续增进防汛抗旱的能力水平，为维护国家水安全、促进社会经济可持续良好发展增添更多助力。

参考文献

[1]徐瑞华.水利工程管理对防汛抗旱能力的提升策略研究[J].水上安全,2025,(06):82-84.
[2]于俊升.科学提高农田水利防汛抗旱管理水平探讨[J].农业机械,2025,(02):94-96.
[3]李娜.探析水利工程在防汛抗旱中的作用与对策[J].水上安全,2024,(09):85-87.

用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化方法

汪波

华电陕西综合能源有限公司, 陕西 西安 710016

DOI:10.61369/ETQM.2025100031

摘 要： 本文针对用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置问题，深入剖析用户侧储能与虚拟电厂需求响应的理论特性与协同关系，构建以经济效益最大化和响应效能最大化为目标的容量配置优化模型，并设计改进粒子群优化算法进行求解。通过算例分析验证模型与算法的有效性，量化关键参数对容量配置结果的影响，为用户侧储能在虚拟电厂需求响应中的合理配置提供科学依据与技术支持。

关 键 词： 用户侧储能；虚拟电厂；需求响应；容量配置；优化模型；改进粒子群优化算法

Optimisation Method for Capacity Configuration of User-Side Energy Storage Participating in Virtual Power Plant Demand Response

Wang Bo

Huadian Shaanxi Comprehensive Energy Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016

Abstract： This paper addresses the capacity allocation issue of user-side energy storage participating in virtual power plant demand response. It thoroughly analyses the theoretical characteristics and synergistic relationship between user-side energy storage and virtual power plant demand response, constructs a capacity allocation optimisation model aimed at maximising economic benefits and response efficiency, and designs an improved particle swarm optimisation algorithm for solution. Through case study analysis, the effectiveness of the model and algorithm is verified, and the impact of key parameters on capacity configuration results is quantified, providing scientific basis and technical support for the reasonable configuration of user-side energy storage in virtual power plant demand response.

Keywords： user-side energy storage; virtual power plant; demand response; capacity configuration; optimisation model; improved particle swarm optimisation algorithm

引言

随着全球能源结构向低碳化、智能化转型，分布式能源的广泛接入对电网的稳定性与灵活性提出更高要求。虚拟电厂作为一种新型电力系统组织形式，通过聚合分布式电源、储能系统和可控负荷，实现资源的协同优化调度，在需求响应中发挥重要作用。用户侧储能作为虚拟电厂的关键组成部分，其容量配置的合理性直接影响虚拟电厂需求响应的效果与经济效益。目前，用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置研究仍存在优化目标单一、约束条件考虑不全等问题，亟需系统性的优化方法以提升虚拟电厂运行效能与经济价值，本文研究对推动能源互联网发展具有重要的理论与实践意义。

一、用户侧储能与虚拟电厂需求响应理论概述

（一）用户侧储能特性分析

在技术层面，锂电池、铅炭电池、液流电池等常见用户侧储能设备各具特性。锂电池凭借较高的能量密度（100–265Wh/kg）、快速的响应时间（毫秒级）以及良好的循环寿命（2000–5000次），在用户侧储能领域广泛应用；铅炭电池充放电效率可达80%–85%，适用于对成本敏感且充放电频率较低的场景；液流

电池则以超长循环寿命（10000次以上）和大容量存储优势，在大规模储能项目中崭露头角。

运行特性方面，用户侧储能的充放电行为受多种因素影响。用户用电习惯决定了储能设备的充放电时段，如工商业用户在工作日白天用电高峰时段，储能倾向于放电以降低用电成本；分时电价政策驱动储能在谷电时段充电、峰电时段放电，实现峰谷电价套利；气候条件对分布式电源出力的影响，间接改变储能的运行模式，如光照充足时光伏出力增加，储能可优先充电^[1]。

经济特性上，用户侧储能投资成本涵盖设备购置、安装调试等费用，锂电池储能系统单位容量投资成本约为1500–2000元/kWh。运行维护费用包括设备检修、电池更换等支出，约占投资成本的1%–3%/年。收益来源主要有参与电力市场需求响应获得的补偿、峰谷电价差收益以及政府补贴，合理配置容量可有效缩短成本回收周期。

（二）虚拟电厂需求响应机制

需求响应是指电力用户根据价格信号或激励机制，调整自身用电行为，实现电力供需平衡的过程。在虚拟电厂中，需求响应类型多样，可中断负荷通过在特定时段减少或中断非关键负荷用电，快速响应电网需求；可转移负荷将部分用电从高峰时段转移至低谷时段；储能调节则凭借灵活的充放电特性，精准匹配电力供需。

虚拟电厂需求响应运作遵循规范流程。首先接收电网调度指令，明确需求响应的目标与要求；接着聚合用户侧的分布式电源、储能和可控负荷等资源，评估可调节能力；随后制定响应策略，确定各资源的调度计划；执行响应操作时，通过能量管理系统实时监控与控制资源运行；最后进行效果评估，分析响应的实际成效，为后续调度提供经验参考^[2]。

虚拟电厂需求响应应具有多方面价值。对电网而言，能够有效削峰填谷，缓解高峰时段供电压力，提升供电可靠性；对用户来说，可降低用电成本，如通过储能的峰谷电价套利实现电费节省；对市场主体，参与需求响应可获取额外收益，增强市场竞争力。

（三）用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的协同关系

用户侧储能与虚拟电厂需求响应协同具备显著优势。储能的快速响应与灵活调节特性，增强了虚拟电厂需求响应的灵活性，使其能更迅速地应对电网波动；精准的充放电控制提升了响应精度，确保满足电网调度要求；同时优化了资源利用效率，实现储能与其他分布式资源的协同互补。

然而，协同过程也面临诸多挑战。用户侧储能分布广泛且分散，加大了虚拟电厂的聚合与管理难度；不同用户参与需求响应的意愿存在差异，部分用户因担心影响正常用电而参与积极性不高；信息交互滞后可能导致调度指令传达不及时，影响响应效果；此外，复杂的运行环境与多目标需求使得储能容量优化配置难度增大^[3]。

二、用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化模型

（一）目标函数构建

经济效益最大化目标综合考虑各项收支。用户侧储能参与需求响应可获得补偿收益 R_{dr} ，利用峰谷电价差获取收益 R_{pv} ，以及政府补贴收入 R_{sub} ；成本方面则包括设备投资成本分摊 C_t^{inv} 、运行维护成本 C_t^{om} 和充放电损耗成本 C_t^{loss} 。响应效能最大化目标以虚拟电厂需求响应满足度、响应及时性、响应精度等为指标构建。满足度衡量储能提供的响应电量与电网需求的匹配程度，响

应及时性关注从接收指令到执行响应的时间间隔，响应精度则体现实际响应电量与计划响应电量的偏差。采用线性加权法整合上述两个目标函数，得到综合优化目标函数：

$$MaxZ = \omega_1 \sum_{t=1}^T (R_{dr} + R_{pv} + R_{sub}) - \sum_{t=1}^T C_t^{inv} + C_t^{om} + C_t^{loss} + \omega_2 \sum_{t=1}^T E_{idr}$$

其中， Z 为综合目标函数值； ω_1 、 ω_2 为权重系数，且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ； T 为总时段数； R_{dr} 为 t 时刻需求响应收益； R_{pv} 为 t 时刻峰谷电价差收益； R_{sub} 为 t 时刻政府补贴收入； C_t^{inv} 为 t 时刻投资成本分摊； C_t^{om} 为 t 时刻运行维护成本； C_t^{loss} 为 t 时刻充放电损耗成本； E_{idr} 为 t 时刻需求响应效能指标值。

（二）约束条件设定

储能容量需满足最小和最大容量限制， $E_{min} \leq E_t \leq E_{max}$ ，确保储能能在合理容量范围内运行。充放电功率约束为 $-P_{max}^d \leq P_t \leq P_{max}^c$ ，防止功率超出设备额定范围。能量守恒约束通过 $E_t = E_{t-1} + \eta_c P_t^c \Delta t - \frac{P_t^d \Delta t}{\eta_d}$ 保证各时段能量变化符合充放电规律。需求响应任务约束要求储能提供的响应电量 Q_{idr} 满足虚拟电厂需求 Q_{dr} ，即 $Q_{idr} \geq Q_{dr}^{req}$ 。功率爬坡约束限制相邻时段充放电功率变化幅度， $|P_t - P_{t-1}| \leq \Delta P_{max}$ ，避免功率突变对设备造成损害。

三、用户侧储能容量配置优化算法设计

（一）算法选择与改进思路

遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法等智能算法在多目标优化问题求解中各有优劣。遗传算法通过选择、交叉、变异操作搜索最优解，但计算复杂度较高，收敛速度较慢；模拟退火算法基于热力学原理，能避免局部最优，但参数设置对结果影响较大；粒子群优化算法通过粒子间信息共享搜索最优解，具有收敛速度快、易实现等优点，但存在易陷入局部最优的问题。综合考虑，本文采用改进粒子群优化算法，从惯性权重和学习因子调整等方面进行改进，以提升算法性能^[4]。

（二）改进粒子群优化算法设计

动态惯性权重调整策略通过非线性变化公式实现。随着迭代次数增加，惯性权重 ω 逐渐减小，初期较大的惯性权重保证算法全局搜索能力，后期较小的惯性权重增强局部搜索精度，公式为：

$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \times \left(\frac{iter}{iter_{max}} \right)^2$$

其中 ω_{max} 、 ω_{min} 为惯性权重最大值和最小值， $iter$ 为当前迭代次数， $iter_{max}$ 为最大迭代次数。自适应学习因子调整策略根据粒子分布状态动态调整学习因子 c_1 和 c_2 。当粒子分布较为分散时，增大 c_1 以加强个体学习能力，促进粒子向自身历史最优位置移动；当粒子趋于集中时，增大 c_2 以增强全局学习能力，引导粒子向全局最优位置靠拢。

算法流程如下：首先初始化粒子群，设定粒子数量、位置、速度、惯性权重和学习因子初始值等参数；然后计算每个粒子的适应度，即综合目标函数值；接着更新粒子的位置和速度，根据

动态惯性权重和自适应学习因子调整更新公式；再更新个体最优和全局最优位置；判断是否达到最大迭代次数或满足收敛条件，若不满足则返回计算适应度步骤，否则输出最优解^[5]。

（三）算法性能验证

选取标准测试函数 ZDT1、ZDT2 等对改进粒子群优化算法进行测试。与传统粒子群优化算法、遗传算法对比，从收敛速度、解的质量、稳定性等指标评估算法性能。通过多次重复实验，统计不同算法在各测试函数上的平均收敛代数、解集的超体积指标等。结果表明，改进粒子群优化算法在收敛速度和解的质量上均优于传统算法，具有更好的稳定性和寻优能力。

四、算例分析

（一）算例基础数据

虚拟电厂需求响应场景设定如下：需求响应时段为工作日的 10:00–12:00 和 16:00–18:00，响应电量要求每次不低于 500kWh，补偿价格为 0.5 元 / kWh。用户侧储能选用锂电池，容量范围设定为 200–1000kWh，额定充电功率 $P_{max}^c=200\text{kW}$ ，额定放电功率 $P_{max}^d=200\text{kW}$ ，充放电效率 $\eta_c=\eta_d=0.9$ ，循环寿命 5000 次，单位容量投资成本 1800 元 / kWh。

电价数据采用分时电价政策，峰时段（10:00–15:00，18:00–22:00）电价 0.8 元 / kWh，平时段（7:00–10:00，15:00–18:00，22:00–23:00）电价 0.5 元 / kWh，谷时段（23:00–7:00）电价 0.3 元 / kWh。

改进粒子群优化算法参数设置为：粒子数量 30，最大迭代次数 100，惯性权重最大值 $\omega_{max}=0.9$ ，最小值 $\omega_{min}=0.4$ ，学习因子初始值 $c_1=c_2=2$ 。

（二）容量配置结果

分别设定经济效益权重 ω_1 为 0.3、0.5、0.7，响应效能权重 ω_2 为 0.7、0.5、0.3，计算不同权重组合下的用户侧储能最优容量配置方案。当 $\omega_1=0.3$ ， $\omega_2=0.7$ 时，最优储能容量为 600kWh，

充放电策略为谷时段（23:00–7:00）以 200kW 功率充电，两个需求响应时段（10:00–12:00 和 16:00–18:00）以 200kW 功率放电。

对比不同方案的经济效益和响应效能指标发现，随着经济效益权重增加，需求响应收益和峰谷电价差收益显著提升，但响应效能指标略有下降；反之，响应效能权重增加时，需求响应满足度和响应精度提高，经济效益有所降低。

（三）敏感性分析

分析电价波动、需求响应补偿价格变化、储能投资成本变动、充放电效率改变等关键参数对容量配置结果的影响。通过改变各参数值，重新运行优化模型，计算容量配置结果的变化量。量化分析得到关键参数敏感性排序如表 1 所示：

表 1 不同关键参数对用户侧储能容量配置结果的敏感性系数排序表

参数名称	敏感性系数
需求响应补偿价格	0.82
峰谷电价差	0.75
储能投资成本	0.68
充放电效率	0.62

可见，需求响应补偿价格对容量配置结果影响最为显著，其提高时，为获取更多收益，储能容量倾向于增大；峰谷电价差、储能投资成本和充放电效率也对容量配置有不同程度影响。

五、结束语

本文系统研究了用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化方法。通过理论分析明确用户侧储能与虚拟电厂需求响应的特性及协同关系，构建多目标优化模型并设计改进粒子群优化算法进行求解，经算例验证了模型与算法的有效性，揭示了关键参数对容量配置的影响规律。后续研究可进一步考虑更多不确定性因素，拓展模型在复杂场景下的应用，探索不同类型储能与虚拟电厂需求响应的协同优化策略。

参考文献

- [1] 肖凯. 考虑低碳需求响应的用户侧储能模式分析与优化 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13 (06): 1977–1979.
- [2] 黄莹. 虚拟电厂动态聚合及电碳协同决策方法研究 [D]. 华南理工大学, 2024.
- [3] 马少洁. 虚拟电厂与电动汽车用户的主从博弈定价策略 [D]. 陕西理工大学, 2024.
- [4] 冀瑞强. 基于博弈论的电力用户侧储能资源共享研究 [D]. 山东理工大学, 2024.
- [5] 李炯. 考虑需求响应的虚拟电厂多目标优化 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024.

实验室施工中的项目风险管理与质量技术协同机制

黄永超

广州泛美实验室系统科技股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ETQM.2025100001

摘 要： 实验室施工项目因技术复杂性和高标准要求，面临风险管控与质量协同管理的双重挑战。本文剖析实验室施工风险特征与分类，阐述风险管理流程及方法，探讨质量技术管理的关键指标与工具。基于风险与质量的交互关系，构建协同管理机制，通过组织与技术层面的实施路径，实现风险预警与质量预控的有机统一。结合案例分析，提出政策优化、技术升级及未来研究方向，为提升实验室施工项目管理水平提供理论支撑与实践参考。

关 键 词： 实验室施工；风险管理；质量技术协同

Project Risk Management and Quality Technology Coordination Mechanism in Laboratory Construction

Huang Yongchao

Guangzhou Fanmei Laboratory System Technology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Laboratory construction projects face dual challenges of risk management and quality coordination due to their technical complexity and high standards. This paper analyzes the characteristics and classification of laboratory construction risks, elaborates on the risk management process and methods, and explores key indicators and tools for quality and technical management. Based on the interactive relationship between risk and quality, a collaborative management mechanism is constructed. Through implementation paths at both organizational and technical levels, it achieves an organic unity of risk warning and quality pre-control. By combining case studies, policy optimization, technological upgrades, and future research directions are proposed, providing theoretical support and practical references for improving the management level of laboratory construction projects.

Keywords： laboratory construction; risk management; quality technology coordination

引言

实验室施工项目因其技术复杂性、功能特殊性和高标准要求，在风险管控与质量技术管理上面临严峻挑战。近年来，随着《建设工程质量管理条例》（2023年修订）和《“十四五”建筑业发展规划》（2021年）的深入推进，国家对施工项目的风险防控与质量协同管理提出了更高要求，强调通过技术创新和系统化管理提升工程效能。当前研究多聚焦单一领域，或侧重风险管理，或偏重质量控制，而忽视了两者的动态协同关系，导致实际施工中风险与质量脱节，影响项目整体效益。因此，构建风险与质量技术的协同机制，成为优化实验室施工管理的核心议题。本文结合政策导向与行业实践，探讨风险管理与质量技术的交互作用，并提出集成化解决方案，以期提升实验室施工项目的综合管理水平提供理论支撑和实践参考。

一、实验室施工项目风险管理的理论基础

（一）实验室施工风险的特征与分类

实验室施工风险具有多维度、高敏感性的特征，主要可分为技术风险、环境风险和管理风险三大类。技术风险源于实验室的特殊功能需求，如精密仪器的安装调试、通风系统的气密性控制等，若施工工艺不达标，可能导致设备运行异常或实验数据失真。环境风险包括场地条件限制（如振动、电磁干扰）及外部环境变化（如温湿度波动），尤其对生物安全实验室（BSL-3/4级）

的洁净度与负压维持构成挑战。管理风险则涉及跨专业协调不足、进度与成本失控等问题，例如施工方与设计方对特殊建材标准、施工工艺的理解偏差^[1]。此外，实验室的安全性要求（如防爆、防辐射、防泄露污染）进一步放大了风险后果，需通过精细化分类与动态管控降低潜在影响。

（二）风险管理流程与方法

实验室施工风险管理需遵循系统化流程，其核心环节包括风险识别与评估。风险识别阶段可采用 FMEA（失效模式与效应分析）方法，通过结构化分析潜在失效模式及其影响，特别适用于

实验室特殊设备安装等关键工序；德尔菲法则适用于专家意见收集，能有效识别隐蔽性风险。风险评估需采用定性与定量相结合的方法，定性分析通过风险矩阵评估风险等级，定量分析则运用蒙特卡洛模拟等方法计算风险发生概率及影响程度。这种综合评估方法能够全面把握实验室施工中的各类风险特征，为后续风险应对提供科学依据。

二、实验室施工质量技术管理的核心要素

（一）质量技术管理的关键指标

实验室施工质量技术管理的关键指标体系包括材料标准、工艺规范和验收标准三个层级^[9]。材料标准需依据《科研建筑设计标准》（JGJ91-2019）等规范，重点控制建材的防火等级、耐腐蚀性等参数；工艺规范则针对实验室特殊需求，如洁净室施工的密封工艺、防微振基础处理等关键技术要求；验收标准需结合GB 50300系列规范制定，重点关注气密性、洁净度等核心指标。实验室功能性指标的量化要求尤为严格，通风系统需满足换气次数8-12次/小时，生物安全实验室的负压梯度应控制在-5Pa至-20Pa区间，抗震设计需达到重点设防类标准，这些量化指标直接决定了实验室的使用效能和安全性能。

（二）质量管理工具与技术

PDCA循环在实验室施工质量控制中具有系统性优势，通过计划阶段的质量目标设定、实施阶段的工艺参数监控、检查阶段的质量检测评估以及处理阶段的持续改进，实现质量管理闭环。统计过程控制（SPC）适用于关键工序的实时监控，如利用控制图分析洁净室施工的粒径浓度波动；六西格玛方法则通过DMAIC流程，可有效降低实验室通风系统的噪声超标率等质量缺陷。这些工具在实验室特殊环境施工中展现出独特的适用性，其中SPC更适用于参数化控制要求高的工序，六西格玛则更适合解决系统性质量问题，二者的协同应用能显著提升质量管理效能^[10]。

三、风险与质量协同机制的构建与实施

（一）协同机制的理论框架

1. 风险与质量的交互关系

风险事件与质量目标存在多维度的交互影响关系。施工过程中的风险事件可能通过直接或间接路径影响最终质量，例如材料供应风险可能导致替代材料的使用，进而影响实验室墙体的气密性指标；施工工艺风险可能造成洁净室焊接缝的密闭性不足，导致微粒浓度超标。风险传导机制研究表明，管理层面的风险往往最先显现，如进度压缩风险会引发工序跳步，最终转化为设备安装精度等质量问题^[11]。这种交互关系具有累积效应，单个风险事件可能触发连锁反应，使质量缺陷呈指数级增长，特别是在实验室这类对施工精度要求极高的项目中表现尤为明显。

2. 协同管理的必要性

某P3生物实验室建设项目案例显示，单一的风险管理或质量管理模式存在明显局限性。该项目初期采用传统的分段管理模式，

风险管理团队重点关注成本超支和进度延误，而质量团队仅关注最终验收指标，结果导致通风系统安装时发现管道尺寸与设计不符的重大质量缺陷，返工造成近30天的工期延误和200万元的经济损失^[12]。类似案例证明，风险与质量要素在实验室施工过程中具有不可分割性，材料选择风险可能转化为耐久性问题，施工组织风险可能演变为工艺质量问题。这种内在关联性决定了必须建立协同管理机制，通过信息共享和决策联动实现风险预警与质量预控的有机统一。

（二）协同机制的实施路径

1. 组织层面的协同

构建跨部门协同团队是实现风险与质量协同管理的组织保障。该团队应整合风险管理、质量控制和施工管理三个核心部门的专业力量，通过矩阵式组织结构打破部门壁垒。风险管理专员负责风险识别与预警，质量工程师主导标准制定与过程检验，施工管理人员统筹现场作业协调。关键是要建立联合决策机制，例如设立每日风险-质量联席会，将风险评估结果直接转化为质量控制要点^[13]。通过明确各岗位的协同职责和考核指标，形成从风险预判到质量管控的闭环管理体系，确保风险防控措施与质量验收标准在施工全过程保持动态一致。

2. 技术层面的协同

BIM技术与物联网的集成应用为风险与质量协同监控提供了技术支撑。BIM模型可模拟施工过程中的风险热点区域，并与质量验收标准进行智能比对，提前发现设计冲突或工艺缺陷。物联网传感器网络实时采集施工现场的温湿度、振动等环境参数，以及材料性能和设备运行数据，通过大数据分析预测潜在质量风险。特别在实验室洁净区域施工中，这种技术协同能实现微粒浓度的实时监测与预警，当检测值偏离标准时自动触发风险应对预案，形成从数据采集、风险分析到质量调控的智能化闭环管理^[14]。

四、案例分析与实践建议

（一）典型案例分析

1. 案例背景

某生物安全二级实验室建设项目（建筑面积650平方米）包含2间核心实验区及配套辅助用房，采用模块化设计理念，要求空气洁净度达到ISO 14644-1标准8级，压力梯度实现-10Pa至-5Pa动态控制，围护结构泄漏率控制在1.5%以内（采用烟雾法检测）。该项目总工期5个月，投资1800万元，采用设计-施工总承包模式，重点控制彩钢板拼接密封工艺、直径150-300mm风管综合排布以及应急系统响应时间（≤1秒）等关键环节。施工过程中面临空间利用率高（达85%）、管线排布密集（走廊区域占用净空50%）等技术难点，通过建立24小时快速响应机制确保工程顺利推进。竣工检测数据显示，核心实验区压差控制合格率98.2%，气密性性能优于标准要求25%，为同类规模实验室建设提供了可借鉴的工程实践案例。

2. 协同机制的应用效果

实施风险与质量协同管理后，项目取得显著成效。风险预警

系统提前识别并规避了23项潜在风险，其中材料替代风险8项，工艺偏差风险15项，规避直接经济损失约680万元。质量指标方面，核心区域密闭性检测一次合格率从传统项目的82%提升至96%，送排风系统调试周期缩短40%，最终验收时的气溶胶泄漏率控制在0.18%以下，优于设计标准。通过对比同期未采用协同机制的项目数据，发现返工率降低55%，工期延误减少62%，证明协同管理在保障施工质量和控制项目风险方面具有显著优势。

（二）行业实践建议

1. 政策与标准优化

现行《建设工程项目管理规范》GB/T50326-2017需针对实验室特殊工程补充风险与质量协同管理的专项条款，建议在修订中增设“科研建筑风险质量一体化控制”章节。行业标准制定应建立风险等级与质量指标的对应矩阵，如将三级以上风险事件与关键质量控制点强制关联。参考FDA cGMP规范中的质量风险管理框架，构建适用于我国实验室建设的QRM标准体系，明确风险识别频率与质量验证节点的匹配要求。通过修订《实验室建设验收规范》，将风险评估报告列为竣工验收的必要文件，实现风险管理程序与质量验收流程的制度化衔接^[8]。

2. 技术升级方向

建议在实验室施工中部署基于机器学习的风险-质量预测系统，通过训练历史项目数据建立多参数关联模型。具体可开发三类智能模块：材料缺陷预测模块通过扫描进场材料的物联网检测数据，提前48小时预警潜在质量问题；工艺偏差预警模块利用BIM+AR技术实时比对施工状态与标准工艺的三维偏差；环境风险推演模块结合气象数据和洁净度监测值，模拟未来72小时环境参数变化对密闭性的影响。这类AI工具应具备持续学习能力，每完成一个项目自动更新算法参数，逐步提升对特殊实验室施工风险的预测准确率至90%以上。

（三）未来研究方向

1. 理论深化

动态风险评估与质量控制的耦合模型构建是理论深化的关键

方向。该模型需突破传统静态评估局限，建立风险传导与质量波动的数学映射关系^[9]。重点研究施工参数实时变化对最终质量指标的敏感性影响，开发基于贝叶斯网络的风险-质量关联算法。模型应能自动识别关键控制链，如材料含水率波动对生物实验室墙体气密性的递进式影响路径。通过引入施工过程数字孪生技术，实现风险概率分布与质量达标率的动态可视化呈现，为协同决策提供量化依据。理论突破点在于揭示风险事件与质量缺陷之间的非线性作用机制，建立多参数耦合作用下的预警阈值体系。

2. 实践拓展

针对化学、物理、生物三类实验室的差异化特征，需开发分类协同策略。化学实验室重点构建腐蚀性物质防护与通风系统的风险-质量联动机制，建立材料耐腐蚀等级与设备使用寿命的对应关系模型。物理实验室侧重振动敏感设备的微扰动控制策略，将地基沉降风险与仪器安装精度标准动态关联。生物实验室需完善生物污染防控的质量追溯体系，开发气溶胶泄漏风险与洁净度指标的实时反馈系统^[10]。各类实验室应制定特征参数数据库，如化学实验室的挥发性有机物浓度阈值、物理实验室的振动加速度限值等，为差异化协同提供数据支撑。

五、总结

实验室施工项目的风险管理与质量技术协同机制研究，从理论与实践层面为行业提供了有益的探索与借鉴。通过对实验室施工风险特征的深入剖析，结合风险管理流程与方法的系统阐述，明确了风险识别、评估及应对的科学路径。在质量技术管理方面，聚焦关键指标与管理工具，构建了精准的质量管控体系。协同机制的构建与实施，从组织架构与技术应用两个维度，实现了风险与质量的有机整合，通过案例分析进一步验证了协同管理的显著优势。未来，应持续深化理论研究，拓展实践应用，推动实验室施工项目管理水平迈向更高台阶。

参考文献

- [1] 夏为威. 香港科技大学声学测试实验室施工技术要点及质量控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2022(5): 56-58.
- [2] 谢仕丽. 实验室项目建设质量控制研究 [D]. 昆明理工大学, 2022.
- [3] 王学彦, 谭春腾. 新建实验室项目施工质量管控 [J]. 科技资讯, 2018, 16(33): 135+137.
- [4] 苏雪妮. 实验室基础设计以及施工过程控制浅析 [J]. 轻工科技, 2017, 33(09): 94-95.
- [5] 王志伟, 袁明利, 代超, 等. 临床实验室规划设计、建设施工的基本原则 [J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(07): 119-121+124.
- [6] 郭汉丁, 张印贤. 既有建筑节能改造项目风险共担与激励协同机理研究概况 [J]. 项目管理技术, 2020, 18(12): 9.
- [7] 李淑珍. 既有建筑抗震加固改造设计项目的风险管理研究 [D]. 中国科学院大学 (工程管理与信息技术学院), 2016.
- [8] 马新朝, 邢洋. 如何有效做好施工单位实验室的监督检查工作 [C]// 全国理化测试学术研讨会暨《理化检验》创刊50周年大会论文集. 2012: 195-198, 201.
- [9] 王学彦, 谭春腾. 新建实验室项目施工质量管控 [J]. 科技资讯, 2018, 16(33): 135, 137.
- [10] 叶世龙. 高标准实验室独立接地施工技术 [J]. 安装, 2023, (12): 32-35.

建筑工程领域：安全和技术驱动的工程风险管理新模式

陈鹏

广东中山建设监理咨询有限公司，广东 中山 528400

DOI:10.61369/ETQM.2025100003

摘 要： 建筑工程传统风险管理有局限，如依赖人工经验、缺乏动态监控等。介绍了多种技术应用现状及问题，提出安全文化、标准化作业等三维安全驱动模型，阐述数字孪生等技术在风险预演等方面作用，还涉及风险共担协议等内容，分析新模式应用案例及效果，探讨其经济效益，指出新模式价值与局限及未来方向。

关 键 词： 建筑工程；风险管理；新模式

Construction Engineering Field: A New Model of Engineering Risk Management Driven by Safety and Technology

Chen Peng

Guangdong Zhongshan Construction Supervision Consulting Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract： Traditional risk management in construction projects has limitations, such as relying on manual experience and lacking dynamic monitoring. This article introduces the current status and problems of various technological applications, proposes three-dimensional safety driven models such as safety culture and standardized operations, elaborates on the role of digital twins and other technologies in risk simulation, and also involves risk sharing agreements. It analyzes the application cases and effects of new models, explores their economic benefits, points out the value and limitations of new models, and future directions.

Keywords： construction engineering; risk management; new mode

引言

建筑工程领域的风险管理至关重要，随着行业的发展，传统风险管理模式已难以满足需求。2021年发布的《关于推动城乡建设绿色发展的意见》强调了建筑工程质量和安全管理的重要性，这凸显了改革风险管理模式的紧迫性。传统模式存在依赖人工经验、缺乏动态监控、安全事故响应滞后等问题，导致大量安全事故发生。BIM等新技术虽有潜力，但在风险识别与评估环节存在实践缺口。在此背景下，构建包含安全文化培育、智能监测装置等的三维安全驱动模型，以及利用数字孪生技术等进行风险预演等新模式应运而生，这些新模式对提升风险管理水平具有重要意义。

一、建筑工程风险管理现状与挑战

（一）传统安全管理模式的局限性

建筑工程领域传统风险管理存在诸多局限。传统模式高度依赖人工经验，管理人员的知识和经验参差不齐，导致风险评估和决策缺乏一致性和科学性^[1]。同时，缺乏动态监控体系，难以实时掌握工程进展中的风险变化。在施工过程中，各种风险因素不断变化，如天气、材料质量、施工工艺等，但传统管理无法及时捕捉这些动态信息。此外，安全事故响应滞后，往往在事故发生后才采取措施，而不能在事故发生前或初期进行有效干预。近十年行业事故数据也表明，这些问题导致了大量安全事故的发生，给建筑工程行业带来了巨大损失，因此改革传统安全管理模式具

有迫切的必要性。

（二）技术驱动力的应用不足

BIM、物联网、大数据等技术在建筑工程风险管理中具有巨大潜力，但目前在风险识别与评估环节存在实践缺口。一方面，这些技术在实际应用中往往各自为政，缺乏有效的系统集成。例如，BIM模型可能未与物联网传感器数据充分融合，无法实时获取建筑实体的动态信息用于风险识别^[2]。另一方面，技术应用的深度和广度不足。大数据分析可能仅停留在表面数据处理，未能深入挖掘潜在风险因素。这种技术系统集成度低的情况，严重制约了风险防控效能的提升，导致无法及时、准确地识别和评估风险，增加了建筑工程面临风险的可能性。

二、安全与技术双驱动理论框架

（一）安全驱动要素分析

在建筑工程领域，构建了包含安全文化培育、标准化作业体系、智能监测装置的三维安全驱动模型。安全文化培育是基础，它营造了一种重视安全的氛围，使所有参与者从意识层面重视安全，规范自身行为，从而减少人为失误导致的风险^[9]。标准化作业体系是核心，通过制定详细、规范的作业流程和标准，确保每个环节都有章可循，降低因操作不规范带来的风险。智能监测装置是重要保障，它能够实时监测工程中的各种参数和状态，及时发现潜在的安全隐患，为风险防控提供准确的数据支持，以便采取有效的措施加以应对。

（二）技术驱动要素整合

在建筑工程领域，数字孪生技术为风险预演提供了可能。通过构建虚拟模型，精确映射物理实体的特征与行为，实现对工程全生命周期的动态模拟^[4]。智能传感器网络则负责实时采集工程现场的各类数据，包括结构应力、环境参数等。这些数据传输至AI决策算法，算法依据深度学习模型进行数据分析和模式识别。AI决策算法能够从大量数据中挖掘潜在风险因素，为风险预演提供决策依据。智能传感器网络与AI决策算法相互协同，前者为后者提供数据支持，后者为前者赋予智能分析能力，共同提升工程风险管理的效率和准确性。

三、双驱动风险管理模式构建路径

（一）协同管理机制设计

1. 多主体联动机制

在建筑工程领域，建立设计方、施工方、监理方与技术供应商的风险共担协议框架至关重要。各方需明确在不同风险情境下的责任归属，形成责任矩阵。设计方应确保设计方案符合安全与技术标准，对因设计缺陷导致的风险负责^[9]。施工方需严格按照设计和规范施工，承担施工过程中的操作风险。监理方要监督整个过程，对未能及时发现并纠正问题导致的风险负责。技术供应商则要保障所提供技术的可靠性和适用性，对技术故障引发的风险负责。通过这样的协议框架和责任矩阵，促进各主体在风险管理中协同合作，实现多主体联动，有效应对工程中的各种风险。

2. 动态评估机制

设计包含地质参数实时监测、结构应力智能预警的量化风险评估指标体系，能够实时、准确地反映建筑工程的风险状况。通过在施工现场设置各类传感器，对地质参数进行实时监测，如土壤湿度、地下水位等，及时发现潜在的地质风险^[6]。同时，利用智能传感器对结构应力进行监测，当应力超过设定阈值时发出预警，以便及时采取措施。该指标体系应综合考虑各种风险因素，通过科学的方法确定各指标的权重，从而实现对建筑工程风险的量化评估，为风险管理提供有力的决策依据。

（二）技术支撑体系构建

1. 技术选型标准

在构建双驱动风险管理模式的技术支撑体系时，技术选型至关重要。对于不同工程规模，需制定与之相适应的风险防控技术匹配矩阵。这要求综合考虑工程特点、风险类型及防控需求等多

方面因素。例如，明确无人机巡检与BIM5D技术的应用边界，确保技术应用的合理性和有效性。无人机巡检在大面积场地巡查、高空结构检测等方面具有优势，可快速获取直观数据；BIM5D技术则侧重于施工过程的模拟、进度和资源管理等，能提前预警潜在风险^[7]。通过合理选型和准确界定技术应用范围，为风险管理提供精准有效的技术支撑。

2. 实施路径规划

从数据采集层到决策应用层提出五阶段技术集成方案，首先是数据采集层，通过多种传感器技术广泛收集工程数据，为后续分析提供基础。接着是数据传输层，确保数据的稳定、高效传输。然后是数据存储层，采用合适的存储架构对海量数据进行存储和管理。再是数据分析层，运用先进的数据分析算法挖掘数据价值。最后是决策应用层，将分析结果应用于风险管理决策。同时，合理部署边缘计算节点，在靠近数据源的位置进行数据处理，降低数据传输延迟和网络负载，提高系统的实时性和可靠性，为建筑工程领域的风险管理提供有力的技术支撑^[8]。

四、模式验证与效能分析

（一）实证案例选取

1. 超高层建筑项目

以某典型超高层建筑项目为例进行分析。该项目所处区域地质条件复杂，存在多种地质结构，如软土地层与岩石地层交错分布，给基础工程施工带来巨大挑战^[9]。在施工技术方面，超高层建筑对垂直度控制要求极高，施工过程中需采用先进的测量技术和设备确保建筑的垂直精度。同时，高空作业安全风险大，如何保障施工人员安全以及物料的高效运输是关键问题。此外，超高层建筑的结构设计复杂，需综合考虑风荷载、地震等多种因素，对结构材料和设计理念要求先进且合理，这些都体现了超高层建筑项目在安全和技术方面面临的诸多难题，从而验证新模式在这类复杂项目中的应用需求。

2. 地下管廊工程

地下管廊工程是建筑工程领域中一个典型的实证案例。在其建设过程中，受限空间作业面临诸多特殊风险场景。例如，通风条件受限可能导致有害气体积聚，威胁施工人员的生命安全^[10]。同时，空间狭窄增加了设备操作和人员活动的难度，容易引发碰撞等事故。从技术应对需求来看，需要先进的通风系统来保障空气质量，实时监测有害气体浓度。还需采用适合狭窄空间的小型化、灵活化施工设备，提高作业效率和安全性。通过对地下管廊工程的研究，可以更好地验证安全和技术驱动的工程风险管理新模式的效能，为其他类似工程提供借鉴。

（二）模式应用过程

1. 风险识别阶段

智能巡检机器人采集的3D点云数据在风险识别阶段具有重要作用。通过与人工检查结果对比分析，可验证新模式的有效性。机器人能精确获取建筑结构等详细信息，其3D点云数据可直观呈现建筑各部位状况。与人工检查相比，数据更全面、准确，能发

现人工难以察觉的细微隐患。例如，在建筑结构裂缝检测中，机器人可通过3D点云数据的深度分析，准确识别裂缝位置、宽度等关键信息，而人工检查可能因视角、经验等因素出现遗漏。这种对比分析为新模式在风险识别阶段提供了有力支撑，有助于提高工程风险管理的效能。

2. 风险处置阶段

在风险处置阶段，基于数字孪生技术的应急预案模拟推演至关重要。通过构建建筑工程的数字孪生模型，精确还原工程实体及其运行环境。将各类风险因素纳入模型，模拟不同风险场景下应急预案的实施过程。在推演中，分析人员可观察资源调配是否合理，如人员、设备的调度是否及时准确。同时评估应急措施的有效性，例如疏散通道是否畅通，防护设施是否能正常发挥作用。根据推演结果对应急预案进行调整优化，确保在实际风险发生时，能够迅速、高效地进行处置，最大程度降低损失，保障建筑工程的安全和顺利进行。

（三）实施效果评估

1. 安全指标提升

通过对比应用前后的核心安全指标，如百万工时伤害率和重大隐患发现率等，可直观评估新模式的安全指标提升效果。在应用新模式前，百万工时伤害率可能处于较高水平，反映出施工过程中人员受伤风险较大。而应用后，该比率呈现下降趋势，表明新模式在保障人员安全方面发挥了积极作用。重大隐患发现率方面，应用前可能因检测手段和管理漏洞，导致一些隐患未能及时发现。新模式实施后，借助先进技术和完善的管理流程，重大隐患发现率显著提高，这意味着潜在的安全风险能够更早被察觉和

处理，从而有效避免安全事故的发生，提升了建筑工程的整体安全性。

2. 经济效益分析

在建筑工程领域，对于新模式的经济效益分析至关重要。通过计算风险防控成本节约比例以及事故损失降低额度来衡量其经济影响。风险防控成本的节约可能源于有效的风险预测与防控措施，减少了不必要的资源投入。事故损失降低额度则直接反映了新模式在避免工程事故方面的成效，包括减少人员伤亡赔偿、工程修复费用等。运用净现值法进行投入产出评估，考虑资金的时间价值，综合评估新模式在整个项目周期内的经济效益。若净现值为正，说明新模式在经济上是可行的，能够为企业带来实际的经济收益，提升企业在建筑工程领域的竞争力。

五、总结

建筑工程领域的风险管理新模式以安全和技术为驱动，具有重要创新价值。双驱动模式在提升风险管理前瞻性与精准度上表现突出，为工程风险管控提供了更有效的手段。然而，当前研究存在一定局限，在技术伦理和数据安全方面的问题亟待解决。尽管如此，未来仍充满希望，5G+边缘计算、建筑机器人等新技术的融合应用将为该领域带来新的机遇。这些新技术有望进一步提升风险管理的效率和效果，推动建筑工程风险管理朝着更加智能化、精准化的方向发展，同时也需要在发展过程中注重解决可能出现的新问题，以实现可持续的进步。

参考文献

- [1]王勇. 建筑工程项目安全风险研究[J]. 建材与装饰, 2019(17):117-118.
- [2]韦永雨. 建筑工程安全监理风险管理研究[D]. 西南交通大学, 2014.
- [3]林媛媛. 建筑工程项目安全风险研究[J]. 电子乐园, 2019(13):0412.
- [4]赵冬伟. 建筑工程施工安全风险研究[D]. 扬州大学, 2015.
- [5]阎超峰. 乌鲁木齐建筑工程安全风险评价与对策研究[D]. 西安建筑科技大学, 2008.
- [6]张泽晖. 建筑工程中管理的新模式[J]. 数码设计(上), 2021, 10(6):196-197.
- [7]王铁柱. 建筑工程安全风险研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(17):721-721.
- [8]李师航. 浅析建筑工程施工安全风险管理与防范[J]. 房地产导刊, 2017(29):106.
- [9]王金刚. 建筑工程施工安全风险研究[J]. 装饰装修天地, 2015(z1):133-133.
- [10]鲁海霞, 鲁海祥. 浅析高层房屋建筑工程施工安全风险[J]. 四川水泥, 2016(6):254-254.

精细化工生产管理中的风险防控与优化策略

陈楷城

广东比格莱科技有限公司, 广东 揭阳 522000

DOI:10.61369/ETQM.2025100016

摘 要 : 精细化工行业有产品多样等特性, 研发管理存在知识产权保护等问题, 生产管理涉及风险因子分析等内容, 还介绍了多种技术应用及管理模式, 强调构建风险防控体系和协同创新体系对生产管理优化的重要性。

关 键 词 : 精细化工; 生产管理; 风险防控

Risk Prevention and Control and Optimization Strategy in Fine Chemical Production Management

Chen Kaicheng

Guangdong Bigely Technology Co., LTD., Jieyang, Guangdong 522000

Abstract : The fine chemical industry has the characteristics of product diversity, research and development management has issues such as intellectual property protection, production management involves risk factor analysis and other contents, and introduces a variety of technology applications and management models, emphasizing the importance of building risk prevention and control system and collaborative innovation system for the optimization of production management.

Keywords : fine chemical industry; production management; risk prevention and control

引言

精细化工行业在国民经济中占据重要地位, 其产品多样化、工艺流程复杂且质量管控要求高。近年来, 随着相关政策的出台, 如《中国制造2025》(2015年颁布) 强调制造业的转型升级, 精细化工行业面临着新的机遇与挑战。在研发管理方面, 知识产权保护、工艺安全验证及产研衔接等问题亟待解决; 生产管理中, 风险因子聚类分析、多系统联用监测防控、先进反应器应用等至关重要; 同时, 质量预测模型构建、敏捷研发组织模式、成果转化机制、新型管理架构、人才培养机制、数字孪生系统搭建以及工业物联网集成应用等均是精细化工生产管理优化的关键环节, 对行业发展具有重要意义。

一、精细化工行业管理现状分析

(一) 精细化工生产管理特征

精细化工行业具有产品多样化、工艺流程复杂化、质量管控精准化等特性。在产品方面, 精细化工涵盖众多领域, 包括医药、农药、涂料等, 产品种类丰富多样^[1]。这使得生产管理需面对不同产品的特殊要求。工艺流程上, 从原料到成品往往涉及多道复杂工序, 且各工序间相互关联和影响。例如, 在某些药物合成过程中, 反应条件苛刻, 对温度、压力、催化剂等要求精准控制。质量管控更是关键, 由于精细化工产品常用于高端领域, 对质量要求极高, 需精准把控产品的纯度、稳定性等指标, 任何微小偏差都可能影响产品性能和使用效果^[1]。

(二) 研发管理突出矛盾解析

在精细化工行业的研发管理中, 存在诸多突出矛盾。高附加值产品研发过程中, 知识产权保护至关重要。由于精细化工行业技术密集, 研发成果易被窃取, 缺乏有效的保护措施会打击企业

创新积极性^[2]。工艺安全验证也是关键问题, 精细化工生产工艺复杂, 一些新工艺在研发阶段可能未充分考虑安全因素, 导致在放大生产时出现安全隐患。产研衔接机制不完善同样困扰着行业发展。研发部门与生产部门之间沟通不畅, 研发成果难以顺利转化为实际生产力, 影响企业的经济效益和市场竞争能力^[2]。这些问题相互交织, 制约了精细化工行业的研发管理水平提升。

二、生产风险识别与防控体系

(一) 全流程风险因子聚类分析

在精细化工生产管理中, 风险因子聚类分析至关重要。通过对反应工程、分离过程和三废处理环节进行分析, 可采用HAZOP-LOPA集成方法建立风险矩阵^[3]。对于反应工程, 需考虑反应物的性质、反应条件等因素, 识别可能导致失控反应等风险的因子, 并聚类分析其关联性。在分离过程, 关注分离方法、设备运行状况等, 确定影响分离效果及可能引发安全和质量问题的风险

因子类别。三废处理环节则要针对废弃物的种类、处理工艺的复杂性，分析可能出现的环境污染和安全风险因子，将相似风险因子聚类，以便更有效地制定防控策略，全面提升精细化工生产的安全性和可靠性。

（二）数字化监测防控系统构建

DCS（分布式控制系统）、SIS（安全仪表系统）与PLS（偏最小二乘法）联用体系在精细化工生产风险监测防控中具有重要应用。在温度异常监测方面，该体系可实时采集温度数据，通过先进算法分析数据偏差，及时发现潜在风险^[4]。对于压力监测，能精确感知压力变化，结合系统预设阈值进行判断，一旦超出安全范围立即预警。在投料量监测上，可准确计量投料量，利用PLS等方法分析其与生产标准的差异，确保投料的准确性和安全性。此联用体系通过多系统协同工作，实现了对精细化工生产关键参数的全方位、高精度监测，有效提升了生产风险防控能力。

三、管理优化策略体系构建

（一）生产过程优化方向

1. 连续流工艺改造方案

微通道反应器在精细化工生产中具有重要应用价值，尤其是在危险中间体合成方面。其通过特殊的结构设计，能够实现物料的高效混合和快速反应，从而显著提升反应效率^[5]。在本质安全方面，微通道反应器的小尺寸通道和精确的温度控制能力，可有效避免因局部过热等原因导致的危险情况发生。同时，其连续流的特性使得反应过程更加稳定，减少了物料的积累和潜在的安全风险。对于危险中间体合成，微通道反应器能够精确控制反应条件，提高产品质量和收率，进一步体现了其在精细化工生产过程优化中的优势，为连续流工艺改造提供了有力的技术支持。

2. 质量大数据建模应用

PAT技术驱动的过程分析化学质量预测模型构建是质量大数据建模应用的关键。通过对精细化工生产过程中的各类数据进行收集与整合，包括原材料特性、生产工艺参数、环境因素等^[6]。利用先进的数据分析算法，挖掘数据之间的潜在关联。基于这些关联建立质量预测模型，能够实时监测生产过程中的质量变化趋势。该模型可对可能出现的质量问题进行提前预警，为生产过程的优化调整提供科学依据。同时，模型的不断更新与完善能够适应生产过程中的各种变化，确保其预测的准确性和有效性，从而实现精细化工生产质量的有效控制与提升。

（二）研发管理创新路径

1. 敏捷研发组织模式

在精细化工生产管理中，构建敏捷研发组织模式至关重要。基于QBD理念设计研发-中试-量产三阶段迭代开发体系是一种有效的创新路径^[7]。这种体系强调在研发阶段充分考虑质量源于设计的原则，从源头把控产品质量。在中试阶段，对研发成果进行小规模试验，验证其可行性和稳定性。量产阶段则是在前面两个阶段的基础上，实现大规模生产。通过这三个阶段的迭代开发，能够快速响应市场需求的变化，提高研发效率，降低研发成

本。同时，敏捷研发组织模式还需注重团队成员之间的沟通与协作，打破部门壁垒，形成一个高效、灵活的研发团队，以更好地适应精细化工行业的快速发展和不断变化的市场环境。

2. 研发成果转化机制

建立知识产权评估-工艺包开发-技术许可的全链条转化路径是研发成果转化机制的重要内容。通过对知识产权进行准确评估，确定其价值和潜在应用领域，为后续转化提供基础^[8]。工艺包开发则是将知识产权中的核心技术进行整合和优化，形成可实际应用的工艺方案。这一过程需要跨学科团队的协作，包括化学工程师、工艺工程师等。技术许可环节则是将开发好的工艺包授权给相关企业进行生产应用，实现技术的商业化。在整个转化路径中，要注重各环节的衔接和沟通，确保信息流畅，提高转化效率，促进精细化工生产管理的创新和发展。

四、管理优化实施保障体系

（一）组织结构重构方案

1. 矩阵式管理架构设计

构建技术委员会垂直领导与生产单元横向协同的新型管理架构。技术委员会负责制定整体技术战略和标准，对各生产单元进行垂直指导和监督，确保技术的一致性和先进性^[9]。生产单元之间建立横向协同机制，促进信息共享和资源优化配置。例如，不同生产单元可在原材料采购、设备维护等方面进行合作，提高整体效率。这种矩阵式管理架构结合了垂直管理的专业性和横向协同的灵活性，能够更好地应对精细化工生产管理中的复杂情况，提升风险防控能力和生产优化效果。

2. 人才梯队培养机制

为建立有效的人才梯队培养机制，应制定复合型人才培育方案。采用仿真培训，让员工在虚拟环境中模拟实际操作，熟悉生产流程和应对风险的方法，提高操作技能和应急处理能力^[10]。岗位轮换制度可使员工接触不同岗位工作，拓宽视野，增强对整个生产系统的理解，培养综合业务能力。积极鼓励员工获取国际认证，这不仅能够提升员工自身素质，还能使企业在国际竞争中更具优势。通过这些措施，打造一支具备扎实专业知识、丰富实践经验和国际视野的复合型人才队伍，为精细化工生产管理提供坚实的人才保障。

（二）数智技术融合路径

1. 数字孪生系统搭建

数字孪生系统搭建是精细化工生产管理优化的关键。该系统需整合多源数据，包括设备运行参数、工艺指标等，以构建精确的虚拟模型。利用物联网技术实现物理实体与虚拟模型间的数据实时交互，确保虚拟模型能准确反映生产实际状态。同时，引入人工智能算法对数据进行分析挖掘，预测潜在风险和优化生产流程。基于虚拟现实技术搭建全厂级工艺仿真平台，模拟不同工况下的生产过程，为操作人员提供逼真的培训环境，提高其应对风险的能力。通过不断更新和完善数字孪生系统，使其在精细化工生产管理中发挥更有效的风险防控和优化作用。

2. 工业物联网集成应用

在工业物联网集成应用方面，通过将各类生产设备接入物联网，实现设备之间的互联互通和数据共享。利用传感器采集设备运行数据，包括温度、压力、流量等关键参数，实时传输至数据中心。借助数智技术对数据进行分析处理，挖掘潜在的风险因素和优化点。例如，通过对设备运行数据的趋势分析，预测设备可能出现的故障，提前安排维护保养，减少生产中断的风险。同时，结合生产流程和工艺要求，对生产过程进行实时监控和调整，确保生产的稳定性和产品质量。在5G+边缘计算架构下，进一步提升数据传输的速度和可靠性，实现设备健康管理系统的高效运行，为精细化工生产管理提供有力保障。

（三）政策协同支持机制

1. 标准规范对接策略

精细化工生产管理的优化实施需建立在完善的保障体系之上。政策协同支持机制至关重要，政府应出台相关政策鼓励企业进行风险防控与管理优化，如给予环保达标、安全生产的企业税收优惠等，同时加强各部门间政策的协同性，避免出现政策冲突。在标准规范对接策略方面，企业要深入解析 REACH 法规、GMP 标准等在精细化学品全生命周期管理中的应用要点。积极与国际标准接轨，确保产品质量和生产过程符合全球市场要求。加强内部培训，使员工熟悉并遵循相关标准规范。建立监督机制，定期检查标准执行情况，及时发现并纠正偏差，保障企业生产管理的优化和风险防控能力的提升。

2. 产学研用协同创新

精细化工生产管理的优化需要构建政府引导 - 高校研发 - 企业转化 - 用户反馈的四位一体协同体系。政府应制定相关政策，引导高校和企业在精细化工领域的合作方向，提供资金和政策支持。高校利用自身科研优势，开展前沿技术研发，为企业提供技术支撑。企业将高校研发成果进行转化应用，实现产业化生产。同时，用户反馈至关重要，企业根据用户反馈及时调整生产策略和产品质量，高校也可依据反馈进一步优化研发方向。通过这种协同创新模式，各方紧密合作，形成一个有机整体，共同推动精细化工生产管理的优化和风险防控能力的提升。

五、总结

精细化工生产管理面临诸多风险，构建有效的风险防控体系至关重要。通过对工艺技术创新，可提高生产过程的安全性和效率，减少潜在风险。管理系统重构能够优化管理流程，明确各环节责任，增强风险应对能力。数字技术融合则为生产管理提供更精准的数据支持和实时监控，进一步提升本质安全和运营效能。综合这三个维度，能为精细化工生产管理打造全面的风险防控与优化策略。同时，AI辅助决策系统在化工过程优化中的应用前景广阔，有望进一步提升风险防控和管理决策的科学性与准确性，推动精细化工行业向更安全、高效的方向发展。

参考文献

- [1]王舒羽.K公司合同管理风险防控体系优化研究[D].西南石油大学,2022.
- [2]万爱红.我国生物医药私募基金风险防控策略优化研究[D].上海财经大学,2022.
- [3]吴臻昊.上海住房公积金购房类支取业务的风险分析与防控策略[D].上海财经大学,2022.
- [4]焦济舟.A保险NX分公司车险欺诈风险防控体系优化研究[D].宁夏大学,2023.
- [5]陈夏贤.L铁路车辆修造公司安全风险防控优化研究[D].广西大学,2022.
- [6]曹大成.分析精细化工生产管理存在的问题及对策[J].化工管理,2021(29):88-89.
- [7]严泽华.精细化工生产管理存在的问题及改进建议探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(1):35-37.
- [8]张海涛.生态养猪生产管理与疫病防控[J].畜牧业环境,2021(1):43.
- [9]黄巨一.电视播出网络维护技术与风险防控策略[J].中国宽带,2023,19(1):131-133.
- [10]林婷婷.企业融资风险及其防控策略探讨[J].企业改革与管理,2021(17):118-119.

环保工程项目管理中的全过程质量控制策略研究

周任文

广东 梅州 514400

DOI:10.61369/ETQM.2025100017

摘 要： 本文围绕环保工程项目管理展开，阐述其基本特征，基于相关理论介绍质量控制模型各阶段要点。包括立项决策、设计施工等阶段的质量控制，还涉及设备技术管理各环节，如选型、维护等，强调全过程质量控制策略对提升项目质量和效益的重要性。

关 键 词： 环保工程；项目管理；质量控制

Research on Whole Process Quality Control Strategy in Environmental Protection Project Management

Zhou Renwen

Meizhou, Guangdong 514400

Abstract： This article focuses on the management of environmental protection projects, outlining their fundamental characteristics and introducing key aspects of the quality control model at various stages, based on relevant theories. It covers quality control during project initiation, design, and construction phases, as well as equipment technology management, including selection and maintenance. The article emphasizes the importance of a comprehensive quality control strategy in enhancing project quality and efficiency.

Keywords： environmental protection projects; project management; quality control

引言

随着环保意识的日益增强，我国在2020年颁布的《中华人民共和国环境保护法》对环保工程项目提出了更高要求。环保工程项目管理涵盖全生命周期各阶段，从规划到后期维护紧密相连。其质量受工程建设和设备技术双重影响，设备技术管理有特殊要求。基于相关理论，质量控制模型涵盖多个关键阶段，各阶段都需严格把控。从立项到设计、选型、调试运营等，都关乎项目质量。同时，在设备技术管理体系构建及工艺优化等方面，都需注重质量控制，以符合政策要求，实现环保工程的高质量发展。

一、环保工程项目管理理论框架

（一）环保工程项目管理基本特征

环保工程项目管理具有多方面基本特征。从全生命周期角度看，其涵盖项目的规划、设计、施工、运营及后期维护等各个阶段，每个阶段都紧密相连且相互影响，需进行系统性管理^[1]。环保工程的质量不仅取决于工程建设本身，还与设备技术密切相关。环保设备技术管理存在特殊要求，如对设备的环保性能、运行稳定性及处理效率等方面要求较高。这些特殊要求在一定程度上制约着质量控制。设备的选型、安装调试以及后期的维护保养等都直接关系到项目整体质量，任何一个环节出现问题都可能导致环保工程无法达到预期的环境改善效果。

（二）全过程质量管理模型构建

基于PDCA循环和全生命周期理论，环保工程项目质量控制模型涵盖多个关键阶段。在立项决策阶段，需充分考虑环境影

响评估、项目可行性等因素，确保项目符合环保要求和实际需求^[2]。设计施工阶段，依据相关标准和规范进行设计，注重施工过程中的质量监督和管理，保证工程质量达到预期目标。设备选型方面，要结合项目特点和环保要求，选择性能优良、节能环保的设备。调试运营阶段，对设备和系统进行全面调试，确保其正常运行，并在运营过程中持续监测和改进，以实现全过程的质量控制。

二、环保工程关键环节质量控制

（一）项目立项阶段质量预控策略

在项目立项阶段，需从环境效益评估和技术可行性论证维度建立严格的项目准入标准，以确保烟气处理工艺路线选择的科学性。环境效益评估方面，要综合考虑项目对周边环境空气质量、水体环境等的潜在影响，采用科学的评估模型和方法进行量化分

析^[3]。技术可行性论证则需对各种烟气处理技术进行深入研究，包括技术原理、应用案例、处理效率、运行成本等。通过对比不同技术的优缺点，结合项目的实际需求和特点，选择最适合的工艺路线。只有这样，才能在项目立项阶段就对质量进行有效的预控，为后续环保工程的顺利实施奠定坚实基础。

（二）工程设计阶段技术规范优化

在环保工程设计阶段技术规范优化中，基于 BIM 技术进行环保设备参数化设计验证至关重要。BIM 技术可精确模拟设备运行环境及性能，确保设计符合实际需求^[4]。同时，制定脱硫脱硝工艺关键设计参数的质量控制阈值是关键环节。通过对大量工程实践数据的分析和研究，确定合理的阈值范围，以此作为设计参数的质量控制标准。这不仅能保证脱硫脱硝工艺的高效运行，还能有效减少污染物排放，提高环保工程的整体质量和效益。

三、环保设备技术管理体系构建

（一）设备选型与采购质量控制

1. 全流程供应商评价体系

在环保设备技术管理体系构建的设备选型与采购质量控制环节，全流程供应商评价体系至关重要。应建立包含环保设备性能指标、环保认证资质、案例业绩的多维度供应商遴选机制^[5]。通过对环保设备性能指标的考量，确保所采购设备符合环保项目的技术要求。环保认证资质是供应商具备生产符合环保标准设备能力的重要证明。同时，参考案例业绩可了解供应商在实际项目中的表现，包括设备的稳定性、可靠性以及售后服务质量等。综合这些维度对供应商进行评价，能够有效筛选出优质供应商，保障环保设备的选型与采购质量，从而为环保工程项目的顺利实施奠定基础。

2. 设备监造与验收标准

在环保设备技术管理体系构建中，设备选型与采购质量控制至关重要。需综合考虑设备性能、适用性及成本等因素，确保所选设备符合环保项目要求^[6]。对于设备监造与验收标准，应制定详细方案。以烟气处理核心设备为例，驻厂监造方案要明确监造人员职责、监造流程及关键控制点。同时，建立振动、密封、耐腐蚀性能等专项检测规程，通过科学的检测方法和标准，对设备进行全面检测，保证设备质量达到预期标准，为环保工程项目的顺利实施提供可靠保障。

（二）设备运行维护管理策略

1. 预防性维护体系设计

在环保设备预防性维护体系设计中，可运用大数据分析建立相关预测模型。以除尘设备为例，通过收集其运行过程中的大量数据，包括工作时长、处理粉尘量、环境温度湿度等信息，分析这些数据与设备磨损之间的关系，从而建立磨损周期预测模型。依据该模型，能够精准预测设备的磨损情况以及可能出现故障的时间节点。在此基础上，制定差异化维保计划，针对不同设备的磨损程度和潜在风险，合理安排维护保养的时间、内容和方式，提高设备维护的效率和效果，确保环保设备的稳定运行，减少因设备故障导致的环境问题^[7]。

2. 在线监测技术应用

在环保设备技术管理体系构建中，设备运行维护管理策略至关重要。其中，在线监测技术应用是关键环节。通过部署环保设备运行状态智能监测系统，可实现设备故障的早期预警与质量隐患精准识别。利用先进的传感器技术和数据分析算法，对设备运行过程中的各项参数进行实时监测。一旦参数出现异常波动，系统能够迅速发出预警信号，提醒管理人员及时采取措施。同时，通过对大量监测数据的分析，还可以挖掘潜在的质量隐患，为设备的预防性维护提供依据，从而提高设备运行的可靠性和稳定性，确保环保工程项目的顺利进行^[8]。

四、烟气处理工艺质量优化实践

（一）脱硫脱硝工艺参数控制

1. 工艺路线匹配性分析

在烟气处理中，针对不同烟气成分，需对 SNCR 与 SCR 工艺进行合理选择。通过开展敏感性分析，明确各因素对工艺选择的影响程度。例如，烟气温度、含氧量、NO_x 初始浓度等因素对两种工艺的脱硝效果均有影响。建立工艺适配性评价矩阵，综合考虑各种因素的权重，对 SNCR 和 SCR 工艺在不同工况下的适用性进行量化评估^[9]。这有助于根据具体的烟气成分和工况条件，选择最适合的脱硫脱硝工艺路线，从而提高烟气处理工艺质量，实现更好的环保效果。

2. 关键参数动态优化

在脱硫脱硝工艺中，关键参数的动态优化至关重要。以吸收塔 PH 值和喷氨量为例，运用模糊控制算法可实现其实时调控^[10]。模糊控制算法能够根据系统的实时运行状态和设定的目标值，对这些关键参数进行动态调整。对于吸收塔 PH 值，通过监测其实际值与理想范围的偏差，算法可及时调整相关操作，确保 PH 值维持在最佳水平，从而提高脱硫效率。同样，对于喷氨量，根据烟气中氮氧化物的含量以及脱硝反应的需求，模糊控制算法能够精确控制喷氨量，避免氨逃逸等问题，保障脱硝效果的同时降低运行成本，提升整个烟气处理工艺的质量。

（二）工艺系统协同控制策略

1. 多污染物协同处理机制

脱硫除尘一体化装置中，SO₂ 去除与 PM_{2.5} 捕集存在紧密的相互作用机理。从化学角度看，某些脱硫反应的产物或中间产物可能会影响颗粒物的物理化学性质，进而影响 PM_{2.5} 的捕集效率。例如，一些脱硫剂在反应过程中生成的微小颗粒可以作为凝结核，促进 PM_{2.5} 的团聚，便于后续的捕集。同时，PM_{2.5} 表面的化学成分也可能对 SO₂ 的吸附和反应产生影响。为实现协同增效，一方面可优化脱硫剂的配方和反应条件，提高其对 SO₂ 的去除效率，同时增强对 PM_{2.5} 的凝聚作用；另一方面，改进除尘设备的结构和操作参数，提高对团聚后颗粒物的捕集能力，从而在整体上提升脱硫除尘一体化装置对多污染物的处理效果。

2. 能耗与排放双重控制

在烟气处理工艺中，构建基于能源流分析的工艺系统优化模

型至关重要。通过深入分析能源流，能够精准把握系统中能量的输入、转换和输出过程。以此为基础，平衡处理效率与运行成本这两个质量控制目标。在追求高效处理烟气的同时，关注能源的合理利用，避免不必要的能耗浪费。同时，考虑排放指标，确保在降低运行成本的情况下，依然能满足严格的环保排放要求。通过该优化模型，实现工艺系统的协同控制，使各环节紧密配合，达到能耗与排放的双重控制，提升整个烟气处理工艺的质量和可持续性。

（三）质量追溯与持续改进

1. 质量缺陷溯源机制

在烟气处理工艺质量优化实践中，质量缺陷溯源机制至关重要。对于烟气排放超标这一质量问题，需建立全要素追溯体系。从设计参数角度，检查是否合理设定，如处理风量、温度等参数是否符合实际工况，若不合理可能导致处理效果不佳。设备故障方面，排查设备是否正常运行，例如风机是否正常转动、过滤器是否堵塞等，任何设备故障都可能影响烟气处理质量。操作流程也不容忽视，查看操作人员是否严格按照规程操作，如药剂添加量是否准确、设备启停顺序是否正确等。通过对设计参数、设备故障和操作流程的全面追溯，精准定位质量缺陷根源，为后续改进提供依据。

2. 质量改进 PDCA 循环

在烟气处理工艺质量优化实践的质量追溯与持续改进环节

中，质量改进 PDCA 循环至关重要。计划（Plan）阶段，需依据大数据平台收集的异常工况数据，分析当前烟气处理工艺的问题，设定质量改进目标和计划。执行（Do）阶段，按照既定计划实施改进措施，如调整工艺参数等。检查（Check）阶段，对比改进前后的数据，评估改进效果是否达到预期目标。处理（Act）阶段，若改进有效，则将成功经验标准化并推广；若改进未达预期，则总结教训，分析原因，为下一轮 PDCA 循环提供参考，如此循环往复，形成工艺参数自优化的闭环改进机制，不断提升烟气处理工艺质量。

五、总结

环保工程项目管理中的全过程质量控制策略至关重要。应构建涵盖从设计源头到设备生命周期以及工艺优化过程的质量控制策略体系。在设计阶段，注重质量管理前置，确保项目规划合理。设备方面，贯穿其全生命周期的质量把控可提高设备运行稳定性及可靠性。工艺优化过程融入质量控制，有助于提升项目整体质量。同时，智能化监测技术的应用可为质量控制提供更精准的数据支持，多目标协同优化能更好地平衡环保工程中的各项指标。未来研究需聚焦这些方向，进一步完善质量控制策略，以提升环保工程项目的质量和效益，推动环保工程行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 牟海英. 荣成市青山小学新校区建设工程项目质量管理研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [2] 肖海伟. BG 机械制造公司辊列修复项目全过程质量控制研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.
- [3] 张智超. 建筑工程项目施工质量控制体系优化研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [4] 张巍. 威海市 K 村改造 A6 楼工程项目质量管理研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [5] 熊雪琴. S 工业园天然气专线工程项目质量改进研究 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [6] 房宁, 林富强. 基于环保工程的全过程控制管理策略分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(9): 44-45.
- [7] 何林钰, 张传滨. 环保工程项目管理存在的问题及对策 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(1): 169-171.
- [8] 刘佳佳. 电厂环保工程项目的风险管理研究 [J]. 南北桥, 2023(24): 178-180.
- [9] 姜丽秀, 王子波. 环保工程的全过程控制管理分析 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(13): 1866.
- [10] 曹久博. 环保工程的全过程控制管理分析 [J]. 清洗世界, 2021, 37(5): 119-120.

大体积混凝土浇筑作业现场安全风险识别与控制研究

赵海

中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/ETQM.2025100023

摘 要 : 大体积混凝土浇筑作业具有持续时间长、水化热集中、裂缝易发等特点, 其施工现场面临诸多安全风险。通过分析作业各环节的危险源, 识别出模板支撑系统失稳、高温作业引发的中暑、电气设备短路、坍塌度控制不当导致的泵管堵塞等关键风险因素, 并结合现场环境特点, 提出相应的控制措施, 包括完善风险评估机制、优化施工工序布置、加强人员培训与现场监管等, 为保障施工安全提供理论依据和实践指导。

关 键 词 : 大体积混凝土; 浇筑作业; 安全风险; 危险源识别; 控制措施

Research on Safety Risk Identification and Control in Mass Concrete Pouring Operations

Zhao Hai

China Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau No. 4 Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

Abstract : Mass concrete pouring operations are characterised by long duration, concentrated hydration heat, and a high incidence of cracks, posing numerous safety risks at construction sites. By analysing the hazard sources at each stage of the operation, key risk factors such as instability of the formwork support system, heatstroke caused by high-temperature work, electrical equipment short circuits, and pump pipe blockages due to improper slump control were identified. Based on the characteristics of the site environment, corresponding control measures were proposed, including improving the risk assessment mechanism, optimising the layout of construction processes, strengthening personnel training, and enhancing on-site supervision, providing theoretical basis and practical guidance for ensuring construction safety.

Keywords : large-volume concrete; pouring operations; safety risks; hazard identification; control measures

引言

随着建筑工程规模的不断扩大, 大体积混凝土因其优良的结构性能被广泛应用于各类基础和主体结构施工中。然而, 其在浇筑过程中存在的水化热集中、裂缝易发及施工周期长等问题, 极易引发多种安全隐患。如何有效识别并控制施工现场的安全风险, 成为保障工程质量和人员安全的关键所在。深入探讨其浇筑作业中潜在的危险源及应对措施, 对于推动安全管理水平提升具有重要现实意义。

一、大体积混凝土浇筑作业的特点与施工难点

大体积混凝土作为重要的结构材料, 广泛应用于桥梁基础、大型工业厂房、地铁车站、水工建筑等工程中, 其施工质量直接关系到结构的安全性与耐久性。与普通混凝土相比, 大体积混凝土浇筑具有体积大、浇筑周期长、水化热集中等特点, 容易在内部产生温差裂缝, 对施工工艺及现场安全管理提出了更高要求。浇筑过程中, 混凝土内部温度可迅速升高, 在未及时进行有效散热或养护的情况下, 温度梯度增大会引发温差应力, 从而诱发结构裂缝, 影响整体稳定性。此外, 大体积混凝土对施工缝的处理、振捣密实度以及浇筑连续性等均有较高标准, 稍有不慎就可

能埋下安全隐患^[1]。

在施工组织方面, 大体积混凝土浇筑通常需要长时间连续作业, 涵盖夜间作业、高空作业、高温作业等多个高风险场景。这些因素不仅增加了现场人员的劳动强度, 也提高了作业过程中的安全风险概率。例如, 夜间照明不足可能导致机械误操作或人员跌落, 高温季节易引发作业人员中暑或疲劳作业, 进而造成安全事故。同时, 由于浇筑强度大、施工设备多, 泵送系统故障、电气短路、模板支撑不稳等工程安全问题亦频发。施工现场人员构成复杂, 技术水平参差不齐, 安全意识薄弱, 也是加剧事故发生的重要因素。因此, 识别和防控作业过程中的风险源, 是确保安全高效完成大体积混凝土施工的关键。

从技术与管理双重视角来看，施工中的难点不仅体现在对混凝土材料性能的控制，还包括施工流程组织、环境条件适应及安全管理的协同配合。现场施工需协调好混凝土供应与泵送路径，合理安排分层分段浇筑计划，并实时监测温度变化，采取有效的温控与保温措施，如覆盖保温材料、设置冷却水管等^[2]。同时，加强对施工人员的安全培训，建立健全的风险评估与应急处理机制，提升突发事件的响应能力，是防范安全事故的保障手段。大体积混凝土浇筑需技术与管理并重，以提升施工安全水平。

二、浇筑作业现场主要安全风险类型分析

在大体积混凝土浇筑过程中，作业现场涉及多个施工工序与机械设备，环境复杂、人员密集，极易诱发各类安全风险。首先是结构类风险，主要集中在模板支撑系统失稳与脚手架倒塌等方面。由于大体积混凝土浇筑量大、荷载重，对模板与支撑体系的承载力和稳定性要求极高。若支撑设置不规范、材料选用不当，或因连续浇筑产生较大侧压力，极易导致模板胀模、垮塌等事故。此外，施工缝处理不当或施工中断也可能造成结构弱点，增加裂缝及渗漏风险，严重时甚至引发整体结构破坏，给现场安全带来重大威胁^[3]。

其次是人员作业安全风险，主要表现在高温中暑、高空坠落和机械伤害等方面。大体积混凝土浇筑常发生在气温较高的季节，且为保证施工连续性，往往安排长时间作业，极易引起施工人员中暑或疲劳作业，进而降低操作准确性，增加事故概率。同时，高空部位的浇筑、振捣及抹面作业若未设置有效防护栏杆或佩戴安全防护设备，一旦操作失误或地面湿滑，便可能造成坠落事故。此外，浇筑过程中涉及混凝土泵、振捣器、电缆、配电箱等多种设备，稍有疏忽就可能引发机械碰撞或电击伤害，特别是在潮湿环境中作业，更需加强电气设备绝缘和接地防护，以防触电事件的发生。

最后，还存在物料与环境因素引发的安全风险。例如，混凝土浇筑前后的材料堆放若未规范管理，易造成施工通道堵塞、现场拥挤，不仅妨碍应急疏散，也可能因堆放不稳而发生滑落伤人事件^[4]。在运输过程中，混凝土罐车、泵送设备运行路径复杂，若无专人指挥或未设置警示标志，极易出现交通碰撞或人员误入危险区域等问题。此外，由于浇筑产生大量水分与热量，施工现场湿滑、高温、粉尘等不良环境因素也会影响作业人员状态，进而诱发安全事件。由此可见，大体积混凝土浇筑现场的安全风险类型广泛，具有交叉性、隐蔽性和突发性，必须通过全面的风险识别与动态管控，才能有效提升作业安全水平。

三、大体积混凝土施工危险源的系统识别方法

在大体积混凝土浇筑作业中，危险源广泛分布于施工各个环节，系统识别是实现有效控制的前提。首先应从施工工艺流程出发，采用分阶段识别法，将整个施工过程划分为准备阶段、浇筑阶段、养护阶段等多个环节，对每一阶段可能存在的安全隐患逐

项分析^[5]。例如，在准备阶段重点关注模板支撑系统的搭设是否符合设计要求，施工用电设备是否规范布置；在浇筑阶段则关注泵送压力、人员站位、机械运行状态等动态因素；而在养护阶段，需识别高温蒸养、高湿环境带来的滑倒和触电风险。通过阶段性细化分析，可以避免因整体认知模糊导致的遗漏问题，实现对施工全过程的全面覆盖。

结合“人、机、料、法、环”五要素分析模型，可进一步深化危险源识别的系统性。人员方面，重点分析操作人员的技术水平、安全意识和作业行为是否存在不规范；机械方面，识别泵车、振捣器、电缆等设备的运行状态是否稳定、维护是否及时；材料方面，分析混凝土配合比、外加剂使用和入模温度是否存在偏差引发质量问题；方法方面，检查施工组织设计和技术交底是否充分、作业流程是否具备可操作性；环境方面，则应关注施工现场照明、气温、风力、湿度等外部因素对作业安全的影响。通过五要素逐项分析，有助于构建多维度、系统化的危险源识别逻辑，提升风险预控的科学性和准确性^[6]。

为了增强识别结果的可操作性和时效性，可引入多种辅助识别工具与方法。例如，采用安全检查表法（Checklist）对每一类风险进行条目式审核，避免遗漏关键节点；结合作业现场实际应用场景模拟或专家评估法，开展针对性强的风险分析；通过事故案例归纳法，总结历史工程中的典型问题，作为风险预警的重要参考。此外，借助 BIM 技术、传感器监控与数据分析平台，可实时采集现场温度、压力、湿度等数据，辅助判断施工状态下潜在的危险源动态变化趋势。通过多方法协同融合，可有效提升危险源识别的系统性、前瞻性与实时性，为后续安全控制措施的制定与执行奠定坚实基础。

四、常见安全风险的控制技术与管理对策

针对大体积混凝土浇筑作业中常见的安全风险，必须从技术与管理两方面同步发力，构建立体化的防控体系。在技术控制方面，首要任务是保障结构稳定性，特别是模板和支撑系统的安全^[7]。应严格按照施工方案和图纸进行模板搭设，使用合格的支撑材料，并设置足够的横向与纵向拉结系统，防止因侧压力过大导致结构失稳。同时，在泵送混凝土过程中，应合理控制浇筑速度和节奏，避免局部区域荷载集中。此外，温控技术也是大体积混凝土施工中不可忽视的关键手段，应根据设计要求采取分层分段浇筑、设置冷却管、水冷循环、使用低水化热水泥等措施，有效降低水化热积聚引发的温差裂缝风险。

人员安全防护是控制风险的另一核心环节。在施工现场，应根据作业特点设立相应的安全区域和警示标识，特别是在泵车作业半径、高空作业平台及电缆分布区域内，防止人员误入危险区。对操作人员必须进行严格的岗前安全教育与技术培训，确保其掌握施工工艺和安全操作规程，具备应对突发情况的能力。施工期间应合理安排班组轮换时间，防止疲劳作业，尤其是在高温季节，需提供充足的饮水、通风和防暑设备，减少中暑及热应激诱发的事故可能。同时，加强对电气设备的巡检和维护，配置漏

电保护器与绝缘措施，在潮湿、高温环境下采用防水防爆型设备，全面降低触电风险^[8]。

管理对策的有效执行是确保安全技术措施落地的保障。首先应建立健全施工现场的安全责任制度，明确各层级管理人员的职责，实行“横向到边、纵向到底”的管理机制。同时推行全过程风险评估制度，对施工方案进行前期安全审核，动态评估各阶段的风险等级，并根据风险变化及时调整安全防护措施。建立现场巡查和隐患排查机制，实行安全检查“日查、周查、专项查”相结合，发现问题立即整改并落实闭环管理。此外，应构建应急预案体系，定期组织应急演练，提高项目人员对火灾、高空坠落、设备故障等突发事件的处置能力。引入信息化手段也是提升管理效率的有效路径，如通过 BIM 平台模拟施工过程，辅助优化工序安排；利用智能监测系统对模板应力、混凝土温度、电气运行状态进行实时监控，为风险预警提供数据支持。通过技术措施与管理手段协同作用，可有效应对大体积混凝土浇筑中的安全挑战，确保施工过程的稳定与高效。

五、构建全过程安全风险管控体系的路径探索

在大体积混凝土浇筑作业中，构建全过程安全风险管控体系是实现施工安全与质量同步提升的关键路径。全过程管控要求从项目前期准备、施工实施到后期养护的每一个环节都建立清晰的风险识别与控制机制，确保安全管理不留死角。前期应以科学的风险评估为起点，组织施工、设计、安全等多方人员联合开展施工方案审查，分析各类危险源的可能性与后果严重程度，制定有针对性的防控措施^[9]。同时，应细化作业计划与资源配置，确保人员、设备、材料、安全投入等满足高风险施工的要求，为后续工作的顺利推进打下坚实基础。

施工阶段是风险最为集中和易发的时期，必须强化动态管控

能力。在实际操作中应将安全管控责任层层分解，落实至岗位与个人，构建“网格化”管理格局。通过建立实时监测系统，对混凝土温度、模板应力、泵压波动等关键指标进行持续跟踪，及时发现异常情况并作出响应。同时，完善现场巡视机制，结合每日安全交底、专项检查与隐患整改记录，实现问题的闭环管理。对于可能出现的高温、雨雪等极端天气，应提前研判并启动相应的应急预案，调整作业时间与方式，防止环境变化放大风险隐患。此外，施工阶段应重视施工人员的状态管理，确保其具备充分的安全意识和技术能力。

在施工完成后的养护与交付阶段，同样不可忽视风险控制的延续性。大体积混凝土结构在早期使用期仍存在温度裂缝和沉降变形的可能，因此应制定合理的养护方案并严格执行，包括覆盖保温、控制环境湿度、延迟拆模时间等措施。同时，应开展安全回顾与总结，对施工过程中发现的问题、处置效果进行系统归纳，为后续类似工程提供改进依据。推动施工安全信息的标准化记录与数据化积累，有助于构建项目层面向企业层面延伸的安全管理知识库，从而提升整体行业的风险应对能力。通过制度建设、技术手段与组织保障的深度融合，全过程安全风险管控体系将成为保障大体积混凝土浇筑安全的有力支撑^[10]。

六、结束语

大体积混凝土浇筑作业具有结构复杂、风险高度集中的特点，施工现场面临诸多安全挑战。通过系统识别危险源，分析常见风险类型，采取科学的技术控制与管理对策，并构建全过程的安全风险管控体系，可有效提升施工安全水平与工程质量。未来应持续推动技术手段与信息化管理的融合，加强人员培训与现场执行力，实现从风险预防到动态控制的全面覆盖，确保施工安全可控、可管、可追溯。

参考文献

[1] 杨柳. 浅谈地下室底板大体积混凝土浇筑施工技术 [J]. 中外建筑, 2016(05): 164–165. DOI: 10.19940/j.cnki.1008-0422.2016.05.048.

[2] 余维春. 建筑工程大体积混凝土浇筑施工技术的研究 [J]. 江西建材, 2017(10): 69+75.

[3] 汪璐灵. 大体积混凝土浇筑技术在建筑工程的应用探讨 [J]. 河南建材, 2018(04): 203–205. DOI: 10.16053/j.cnki.hnjc.2018.04.106.

[4] 郭永伟. 某工程底板大体积混凝土施工技术 [J]. 建材技术与应用, 2018(05): 24–26. DOI: 10.13923/j.cnki.cn14-1291/tu.2018.05.007.

[5] 徐柳清. 论桥梁项目大体积混凝土结构裂缝控制技术 [J]. 城市建筑, 2020, 17(36): 104–106. DOI: 10.19892/j.cnki.csjz.2020.36.31.

[6] 李新周, 郑培明, 李嘉琛. 深基坑大体积混凝土浇筑技术研究 [J]. 砖瓦, 2021(12): 144–145. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2021.12.066.

[7] 李慧. 大体积混凝土浇筑技术在建筑施工中的应用分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022(12): 165–167.

[8] 万桂军. 高速公路桥梁承台大体积混凝土浇筑施工工艺分析 [J]. 运输经理世界, 2023(14): 77–79.

[9] 栾亚磊, 齐立强, 薛宏涛. 后浇带施工技术在房建大体积混凝土浇筑工程中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(31): 92–94. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202431030.

[10] 赵成岳. 基于智能监测技术的大体积混凝土浇筑时脚手架安全评估 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(11): 52–54. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.11.018.

市政建筑工程建设施工中安全风险管理的探讨

房军

德城区城乡建设局, 山东 德州 253000

DOI:10.61369/ETQM.2025100042

摘 要： 本文聚焦于市政建筑工程建设施工中安全风险研究，先阐述了施工安全风险管理的意义，如有利于筑牢城市安全防线、有利于确保工程建设质量、有利于推动行业转型升级等，然后又提出了几点切实可行的管理措施，主要包括健全法规标准体系，筑牢风险管理制度根基、强化技术创新应用，提高风险管理科技赋能水平、优化人员管理体系，务实风险管理人力基础、完善多方协同机制，形成风险管理合力。通过这些措施，不仅能规避安全隐患的发生，还能推动市场行业安全化和规范化发展。

关 键 词： 市政建筑工程；建设施工；安全风险

Discussion on Safety Risk Management in the Construction of Municipal Construction Engineering

Fang Jun

Decheng District Urban and Rural Construction Bureau, Dezhou, Shandong 253000

Abstract： This paper focuses on the study of safety risk management in the construction of municipal construction engineering. It first elaborates on the significance of construction safety risk management, such as its benefits in strengthening urban safety defenses, ensuring the quality of engineering construction, and promoting industry transformation and upgrading. Subsequently, it proposes several practical management measures, including improving the regulatory and standard framework to solidify the foundation of risk management systems, enhancing technological innovation and application to elevate the technological empowerment of risk management, optimizing personnel management systems to strengthen the human resource foundation of risk management, and perfecting multi-party collaboration mechanisms to form a synergistic force in risk management. Through these measures, not only can potential safety hazards be avoided, but also the safe and standardized development of the market and industry can be promoted.

Keywords： municipal construction engineering; construction; safety risk management

引言

市政建设工程作为城市基础设施建设的最重要组成部分，涵盖多个关键领域，如道路、桥梁和给排水以及轨道交通领域，其建设质量和安全会关系到城市功能的正常运转和市民生命财产安全。近年来，随着社会不断的发展和新型城镇化进程加快，市政建筑工程已经形成了规模，呈现出结构复杂化和施工环境多样化的特点，这给工程施工安全带来不确定的因素。所以，安全风险已经成为了市政建筑工程建设施工最重要的环节。基于此，在今后需要探索市政建筑工程建设施工中安全风险管理的措施，因为这具有重要的意义。在理论层面上进行分析，通过对市政建筑施工中安全风险因素进行分析，构建风险评估模型和管理框架，丰富建筑工程安全管理理论体系。在实践层面上进行分析，研究成果能指导施工企业完善风险管理流程，提高风险预警和应急处置能力，避免发生安全隐患，确保工程顺利的开展。

一、市政建筑工程建设施工中安全风险管理的意义

（一）有利于筑牢城市安全防线

在城市基础设施中，市政建筑工程占据着关键性地位，其施

工安全与城市公共安全体系安全性与规范性存在着紧密的关联。

在社会快速发展，城市化进程也随之加快，城市内部人口密度逐年增加，促使市政工程施工和市民生活变得越来越近，甚至地铁施工可能就紧挨居民生活区域，同时道路改造也会发生穿越商业

重要区域，相关人员在维修地下管线过程中，经常在人口密集区域，久而久之就会增加安全风险出现概率，容易变成威胁市民生命财产安全公共事件。而开展安全风险管理工作突显的非常关键，基于提前识别、科学分析、及时应对这一流程管控，不仅可以减少安全事故出现概率，更为市民筑起一道“隐形安全屏障”。必要时构建健全应急处置预案，即便出现突发事件，可以立即应对，最大限度降低事故对市民生活的影响。可见，市政工程安全风险管理工作主要的作用就是把工程建设变成对市民生活的保障，使市民可以在城市不断发展期间感到受到安全感，这也成为了民生福祉主要体现。

（二）有利于确保工程建设质量

市政建筑工程的质量和安全的相辅相成，在具体施工的期间，一些安全质量隐患和安全风险存在“同源性”，比如在混凝土浇筑的过程中，如果施工人员操作的不规范，会出现结构强度不足等质量问题，严重的情况下产生安全隐患。但通过加强市政建筑工程建设施工安全风险管理工作，落实风险管理的措施，建立“全员参与、全过程管控、全方位覆盖”的管理体系，推动施工企业对技术规范和操作标准严格的执行，将原材料进场检验、施工工序验收、设备维护保养和人员操作培训等环节向风险管理范畴中纳入，实现“安全和质量”双保障。同时，实施市政建筑工程建设施工安全风险管理工作，将结构健康监测系统应用在桥梁施工中，能实时的对桥梁受力和变形的情况进行监控。在道路建设中严格管控施工工艺，保障路基强度达标，以提高工程的可靠性，延长工程使用寿命，确保工程的建设质量。

（三）有利于推动行业转型升级

市政建筑行业作为传统劳动密集型产业，面临着安全管理效率不高和资源浪费严重等问题。在建筑行业向智能化和绿色化转型下，安全风险管理工作已经成为了推动行业转型的主要抓手。一方面，通过实施市政建筑工程建设施工安全风险管理工作，推动企业完善管理模式，引进先进的技术，以提高风险管理水平。另一方面，营造出良好的发展范围，推动“安全和效益、质量和效率”协同发展。

在技术创新上，安全风险管理工作催生一系列技术在市政工程中的应用。比如，施工企业发挥“BIM+物联网”技术的优势，利用这项技术，通过三维建模模拟施工过程，在对基坑变形和地下水位变化实时的监测，能提前预警风险，降低出现安全隐患的概率。而且对“无人机巡检+AI图像识别”技术充分的应用，在全方位巡查施工区域，发现安全隐患。通过这些技术创新，实现风险安全管理，推动市政工程施工向“精细化”转变。在行业管理模式变革上，市政建筑工程建设施工安全风险管理工作推动施工企业建立标准化和信息化的管理体系。比如，建筑企业打造安全生产管理云平台，将项目安全台账和人员信息记录以及排查隐患的情况等信息向平台管理中纳入，能实现动态监控项目安全风险。

二、市政建筑工程建设施工中安全风险管理的措施

（一）健全法规标准体系，筑牢风险管理制度根基

1 制定细化标准规范

市政建筑工程建设施工中安全风险管理工作需要有相应标准规划，这就需要在今后根据市政工程施工的实际情况，在地

方层面制定市政工程施工安全风险管理工作技术标准，在对风险识别、评估、应对和监控的具体流程和技术要求进行细化。比如，在风险识别标准中，明确道路、桥梁、地铁和管廊等不同类型的市政工程，并制定识别风险源清单^[1]。以道路工程为例，需要对地下管线破裂和路基坍塌等风险进行识别。同时，在风险评估标准当中，对“风险发生可能性”和“影响程度”的具体指标进行量化。

在风险监控标准中，对不同风险等级的监控频率和数据要求详细的规定，比如，对于重大风险，需要实时监控，每小时上传数据，一般风险需要每日监测，数据每天进行汇总。在对《市政工程施工安全风险管理工作操作手册》进行制定，利用图文结合的形式将标准规范转化为操作流程^[2]。

例如，在“深基坑风险识别操作流程”中，明确第一步对勘察报告中的地质参数进行分析，第二步，现场对基坑周边建筑物距离进行核查，第三步，对照事故安全数据库对类似风险进行排查，保障管理人员和作业人员能正确理解，大力的执行。

2 制定动态更新机制，适应行业发展新需求

在装配式施工和智能化设备应用等市政工程技术创新下，法律法规随着要不定期的进行更新，防止由于标准化滞后导致风险管理不理想。具体要专门成立“法规标准更新工作组”，由住建部门牵头，和施工企业、科研院所以及行业协会等单位联合，每3年全面梳理和修订市政工程安全风险管理工作法规标准^[3]。以“BIM+物联网”风险监控技术为例，在标准中新增加一些内容，如智能化监测设备的安装要求和数据传输标准以及设定预警阈值等。对于装配式桥梁施工工艺增加一些条款，如构件运输风险识别和吊装作业安全管控以及现场拼接质量。对于“双碳”目标下绿色施工要求，增加环境风险管控标准，保障法规标准和行业发展相同步，为风险管理提供重要制度保障。

（二）强化技术创新应用，提高风险管理科技赋能水平

1 推广 BIM 技术深度应用，实现风险可视化管控

BIM 技术拥有可视化、协同化等特点，能把市政工程所包含多项信息收集到一起，如结构模型、周边环境等，有效的建设三维模型，在一定程度上为开展风险识别工作、风险评估工作、风险应对工作提供了可视化支持^[4]。其一，在开展风险识别工作过程中，应加大对 BIM 模型应用力度，如此一来，就能够实现模拟勘察，随后把所获得土层分布数据、地下水位数据等融入到模型中，基于三维可视化把软土地基所在区域直观展示出来，防止因信息不对称提高风险概率；在开展风险评估工作过程中，引入 BIM 模型实现施工过程模拟，详细来说，模拟深基坑开挖过程中支护结构的受力变化、周边建筑物的沉降趋势，基于数值计算分析风险出现可能性，为风险风机划分提供了巨大的支持；在开展风险应对工作过程中，引入 BIM 模型实现应急方案模拟，比如模拟深基坑坍塌后的救援路线规划、人员疏散途径、设备调度计划，基于模拟优化计划实用性，实应急处理行之有效。比如，某城市地铁9号线施工中，围绕着 BIM 模型，及时探究出盾构区间内的4处地下管线冲突风险，基于模型调整盾构施工参数，就能够减少了管线破裂出现概率^[5]。

2 利用大数据和 AI 技术，实现风险智能分析和预测

在进行市政建筑工程建设施工安全风险管理工作，管理人员可充分利用大数据和 AI 技术，并通过这些技术深度分析市政工程中产生现场监测数据和气象数据以及人员设备等大量风险数据，实现风险的智能识别和精准评估以及趋势预测，以提高风险管理的前瞻性^[6]。必要的情况下，打造市政工程施工安全风险大数据平台，有效的对地方事故类型和发生原因以及处置措施等阿全事故案例数据和现场监测数据，打造“风险源－风险因素－风险后果”的数据库。借助机器学习和深度学习等 AI 算法训练数据库数据，构建“风险识别模型”，并在现场监控视频中，自动实现风险识别，以提高识别准确率^[7]。构建“风险预测模型”，通过对未来一段时间内风险变化趋势进行识别，预测未来3天沉降速度，如果预测值超过安全阈值，提前发生预警，为风险应对争取时间。

（三）优化人员管理体系，务实风险管理人力基础

市政建筑工程建设施工安全风险管理工作离不开安全风险管理人员参与，他们的综合素质会影响到安全风险管理水平。所以在今后有必要健全人员管理体系，对安全风险管理人员进行培训，提高安全风险管理人员的综合素质。

具体可以从以下两个方面入手：一方面制定培训计划，并加大培训力度开展各种各样的培训活动，以定期或者是不定期的方

式为主培训安全风险管理人员。在实际培训的过程中，向安全风险管理人员传授 BIM 模型风险标注和物联网监测数据解读等技能以及专业的知识^[8]。通过培训帮助安全风险管理人员给予充分掌握，以增强安全风险管理人员自身的素质。另一方面，制定责任考核和激励机制，形成全员安全责任清单，对安全风险管理人员的职责合理明确，在将考核结果和晋升相挂钩，进而调动安全风险管理人员工作的积极性^[9]。

（四）完善多方协同机制，形成风险管理合力

市政建筑工程建设施工安全风险涉及多方，不仅有建设方和施工方以及监理方，还有政府监管、管线产权等外部主体，而单一主体难以覆盖全流程风险^[10]。需要根据市政建筑工程建设施工安全风险的需求，制定内部联动、外部协同、平台支撑的多方协同机制，打破部门壁垒，明确权责分工，强化资源整合，凝聚分散管理的力量，并将为统一的风险管理合力，实现市政建筑工程建设施工风险全链条管控。具体在项目内部参建方协同上，制定常态化沟通和决策机制。

结束语：综上所述，将市政建筑工程建设施工风险管理贯穿工程全生命周期，并做好施工风险管理工作，不仅能防范安全隐患，还能确保市政工程建设稳步推进。未来在风险管理中，利用数字化技术，组织多方参与，能发挥风险管理效能。

参考文献

[1] 金祖耕. 市政建筑工程建设施工中安全风险管理的分析 [J]. 新疆有色金属, 2025, 48(04): 93-94.
[2] 段春风. 强化市政公用工程危险作业安全管理的方法与实践 [J]. 建筑安全, 2025, 40(08): 69-72.
[3] 陈雪萍, 杜兴艳. 房屋市政工程施工阶段风险管理策略研究 [J]. 建筑科技, 2025, 9(07): 27-30.
[4] 文杰轩. 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), 2025, (20): 46-48.
[5] 金祖耕. 市政建筑项目施工现场管理策略研究 [J]. 新疆有色金属, 2025, 48(03): 92-93.
[6] 王建文. 房建市政工程建筑施工安全专项整治研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (04): 184-186.
[7] 谢长春. 房屋建筑与市政工程施工消防安全管理探讨 [J]. 今日消防, 2024, 9(12): 82-84.
[8] 郭小龙, 张伟光, 顾晨帆, 文晓林, 闫宝东. 市政工程施工安全风险预警机制研究 [J]. 山西建筑, 2022, 48(13): 192-195.
[9] 唐启. 市政工程安全生产特点及风险防范对策 [J]. 四川建材, 2021, 47(11): 230+233.
[10] 刘建宝. 探究市政工程安全生产特点及风险防范 [J]. 居舍, 2021, (11): 169-170.