

现代工程学

Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co.,Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第2卷 第6期 2025年6月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

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。



建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 001 轻质混凝土墙的保温隔音及整体稳定性研究 卢文培, 张大龙, 张子豪, 周钱俊
Research on Thermal Insulation, Sound Insulation, and Overall Stability of Lightweight
Concrete Walls Lu Wenpei, Zhang Dalong, Zhang Zihao, Zhou Qianjun
- 004 基于城镇国土空间监测的城市诊断方法与实践 胡鸿
Urban Diagnosis Method and Practice Based on Urban
Land Space Monitoring Hu Hong
- 007 公共建筑室内装饰空间设计的创新理念与实践——以甲级写字楼为例 黄惠丽
Innovative Ideas and Practices of Interior Decoration Space Design in Public Buildings
— Taking Grade A Office Building as an Example Huang Huili
- 010 建筑工程管理视角下工程风险的识别与管控 代国峰
Identification and Control of Engineering Risks from the Perspective of
Construction Project Management Dai Guofeng
- 013 市政工程施工质量把控与技术管理的协同策略研究 黎嘉雄
Research on Collaborative Strategies for Quality Control and Technical
Management in Municipal Engineering Construction Li Jiaxiong
- 016 装配式建筑施工监理关键控制点与标准化流程设计
——以预制构件安装与灌浆质量管控为核心 邢金伟
Key Control Points and Standardized Process Design for Construction Supervision of
Prefabricated Buildings — Focusing on Quality Control of Prefabricated Component
Installation and Grouting Xing Jinwei
- 019 考虑乘客疏散效率的地铁换乘站应急疏散路径优化与仿真分析 褚画宜
Optimization and Simulation Analysis of Emergency Evacuation Paths in Subway
Transfer Stations Considering Passenger Evacuation Efficiency Chu Huayi
- 022 地铁车站通风空调系统分区节能运行模式及能效提升路径 王明乐
Energy-Saving Operational Modes and Efficiency Enhancement Pathways for Zoned
Ventilation and Air Conditioning Systems in Subway Stations Wang Mingle
- 025 公路路面材料试验检测与性能优化研究 胡杰
Research on Testing and Performance Optimization of Highway
Surface Materials Hu Jie
- 028 公路与桥梁建设中施工质量管理优化 柳玥
Optimization of Construction Quality Management in Highway
and Bridge Construction Liu Yue
- 031 纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能试验研究 冯诚
Experimental Study on the Basic Mechanical Properties of
Fiber-reinforced Cement-based Composites Feng Cheng
- 034 建筑工程实体检测中建筑材料检测技术探讨 黄旦
Exploration of Building Material Testing Technology in Physical Inspection of
Construction Projects Huang Dan
- 037 地下商业综合体与地铁站一体化开发模式分析 王延安
Analysis of the Integrated Development Model of Underground Commercial Complexes
and Subway Stations Wang Yan'an
- 040 代代木体育馆: 丹下健三跨文化建筑美学的范式
——基于“自然-结构-体验”三维框架的重构 王子仁
Yoyogi National Gymnasium: A Paradigm of Kenzo Tange's Cross-Cultural Architectural
Aesthetics—Reconstruction Based on the Three-Dimensional Framework of "Nature-
Structure-Experience" Wang Ziren

043	建筑机器人的应用现状与发展挑战 The Current Application Status and Development Challenges of Construction Robots	周发东 Zhou Fadong
046	基于大模型下的城市交通工程质量优化策略 Quality Optimization Strategies for Urban Traffic Engineering Based on Large Models	周景润 Zhou Jingrun
049	新形势下推进建筑工程信息化管理的作用探究 Exploration of the Role of Promoting Information Management in Construction Engineering under the New Situation	李子宁 Li Zining

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

052	脱硝电加热器的节能设计与运行优化策略 Energy-saving Design and Operation Optimization Strategies of Denitration Electric Heaters	戴国辉 Dai Guohui
055	智能控制优化曝气系统突破脱氮除磷瓶颈 Intelligent Control and Optimization of Aeration System Break through the Bottleneck of Nitrogen and Phosphorus Removal	余芍锟 Yu Shaokun
058	智能化与数字化技术在变电站电气专业监理中的应用及工程质量提升 Application of Intelligent and Digital Technology in Substation Electrical Professional Supervision and Improvement of Project Quality	岑贤航 Cen Xianhang
061	新能源投资建设项目中的风险管控：分布式光储充项目的实证研究 Risk Control in New Energy Investment and Construction: An Empirical Study of Distributed PV-Storage-Charging Projects	沈树光 Shen Shuguang
064	排水工程技术革新与工程风险管理的融合路径 Integration Path of Drainage Engineering Technology Innovation and Engineering Risk Management	吴继斌 Wu Jibin
067	商场酒店工程改造中的机电技术管理与风险防控 MEP Technical Management and Risk Prevention in Retail-Hotel Renovation Projects	廖江永 Liao Jiangyong
070	化工安全监管视角下的精细化工工艺设计优化 Process Design Optimization in Fine Chemical Engineering from the Perspective of Chemical Safety Supervision	罗先宇 Luo Xianyu
073	铝电解槽氧化铝浓度区域失衡预警与协同控制技术研究及实践 Research and Practice on Early Warning and Collaborative Control Technology for Regional Imbalance of Alumina Concentration in Aluminum Electrolysis Cells	李撼宇, 练新强, 王锐新, 杨广飞, 张坤 Li Hanyu, Lian Xinqiang, Wang Ruixin, Yang Guangfei, Zhang Kun
077	高速公路电气设备故障诊断与智能化管理方法研究 Research on Fault Diagnosis and Intelligent Management of High-speed Road Electrical Equipment	罗国机 Luo Guoji
080	化工运输风险管理：化工工艺专业下的安全保障机制探究 Chemical Transportation Risk Management: An Exploration of Safety Assurance Mechanisms under the Chemical Process Specialty	罗先烽 Luo Xianfeng
083	火电厂自动化控制系统与能源效率提升的关系研究 Research on the Relationship between Automation Control System and Energy Efficiency Improvement in Thermal Power Plants	刘城 Liu Cheng
086	高盐废水离心脱盐设备运行稳定性提升研究 Study on Improving Operation Stability of Centrifugal Desalination Equipment for High Salinity Wastewater	张波波 Zhang Bobo
089	新能源风力发电系统中储能技术的实践探究 Practical Exploration of Energy Storage Technology in New Energy Wind Power Generation Systems	温钊, 王彬 Wen Chai, Wang Bin
092	纳米氧化铁制备及其应用的研究进展 Research Progress on the Preparation and Application of Nano Iron Oxide	吴世斌, 张路辉, 欧阳灵, 卓润杉, 何丽琪, 陈华 Wu Shibin, Zhang Luhui, Ouyang Ling, Zhuo Runshan, He Liqi, Chen Hua

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

095	重载铁路智能视频融合信号控制系统理论与方法 Theory and Method of Intelligent Video Fusion Signal Control System for Heavy Duty Railway	杨尚原 Yang Shangyuan
098	基于人工智能的无人机智能化控制系统研究 Research on Intelligent Control System of Unmanned Aerial Vehicle Based on Artificial Intelligence	梁瑞彪 Liang Ruibiao
101	FPGA 加速下的人工智能通信信号识别算法研究 Research on Artificial Intelligence Communication Signal Recognition Algorithm Accelerated by FPGA	吴纯杰 Wu Chunjie
105	半导体工业厂房高效制冷机房系统设计探讨 Discussion on the Design of Efficient Refrigeration Room System in Semiconductor Industrial Plant	曾威 Zeng Wei
108	测绘技术在自然资源确权登记中的应用难点及突破 Difficulties and Breakthroughs in the Application of Remote Sensing Technology in the Registration of Natural Resources Ownership	吴咏梅 Wu Yongmei
111	通信传输施工质量控制策略研究：多网融合需求下的政企客户视角 Research on Communication Transmission Construction Quality Control Strategy — From the Perspective of Government and Enterprise Customers under the Demand of Multi-network Integration	叶孝杰 Ye Xiaojie
114	电台通信系统中射频干扰抑制与滤波器设计研究 Research on RF Interference Suppression and Filter Design in Radio Communication Systems	李国强 Li Guoqiang
118	浅析通信大数据资源价值化运营 Analysis of the Commercialization - Oriented Operation of Communication Big Data Resources	廖海明 Liao Haiming

121	软件工程方法在计算机软件开发中应用研究 Research on the Application of Software Engineering Methods in Computer Software Development	巩瑜 Gong Yu
124	交通工程建设中多源融合感知技术的应用与优化探讨 Discussion on the Application and Optimization of Multi-Source Fusion Perception Technology in Transportation Engineering Construction	郭大鹏 Guo Dapeng
127	基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法研究 Research on Positioning and Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Trucks in Open-pit Mines Based on Multi-Sensor Fusion	郭培, 贺镜儒, 杨子雨 Guo Pei, He Jingru, Yang Ziyu
130	基于知识图谱的设备故障诊断专家系统研究 Research on Expert System for Equipment Fault Diagnosis Based on Knowledge Graph	张瑞斌, 王国强, 辛永波 Zhang Ruibin, Wang Guoqiang, Xin Yongbo
133	嵌入式平台下多通道信号同步采集与控制系统研究 Research on Multi-Channel Signal Synchronous Acquisition and Control System under Embedded Platform	李保海 Li Baohai
137	浅谈空客 A320 系列飞机雷击损伤处理 A Brief Discussion on the Handling of Lightning Strike Damage on AIRBUS A320 Aircraft	吕福根 Lv Fugen

轻质混凝土墙的保温隔音及整体稳定性研究

卢文培, 张大龙, 张子豪, 周钱俊
中煤第三建设(集团)有限责任公司, 安徽 宿州 234000
DOI:10.61369/ME.2025060014

摘 要 : 轻质混凝土墙是现代建筑领域一种新型建筑材料, 其具有轻质、保温、隔音等诸多优点, 在建筑工程中得到了广泛应用。本文通过实验室研究方法分析了不同矿物掺合料掺量、掺加高性能减水剂和不同面密度对轻质泡沫混凝土隔墙保温隔音性能及整体稳定性的影响。结果表明, 矿物掺合料和减水剂可以显著改善轻质混凝土墙板的性能。

关 键 词 : 轻质混凝土墙; 保温性能; 隔音性能; 整体稳定性

Research on Thermal Insulation, Sound Insulation, and Overall Stability of Lightweight Concrete Walls

Lu Wenpei, Zhang Dalong, Zhang Zihao, Zhou Qianjun
China Coal Third Construction (Group) Co., Ltd., Suzhou, Anhui 234000

Abstract : Lightweight concrete walls represent a novel type of building material in the modern construction sector, widely applied in construction projects due to their numerous advantages, including light weight, thermal insulation, and sound insulation. This paper analyzes, through laboratory research methods, the impact of varying mineral admixture contents, the addition of high-performance water reducers, and different surface densities on the thermal insulation, sound insulation performance, and overall stability of lightweight foam concrete partition walls. The results indicate that mineral admixtures and water reducers can significantly enhance the performance of lightweight concrete wall panels.

Keywords : lightweight concrete wall; thermal insulation performance; sound insulation performance; overall stability

引言

在建筑节能与绿色发展理念的推动下, 墙体材料性能升级成为建筑行业转型的关键方向。传统墙体材料普遍存在自重较大、保温隔音效果欠佳、施工效率低等问题, 难以满足现代建筑对节能、环保及居住舒适度的多重需求。轻质泡沫混凝土墙作为一种新型绿色建筑材料, 凭借其轻质高强、保温隔热、隔声降噪等突出特性, 逐渐成为替代传统墙体材料的重要选择, 在住宅、公共建筑及工业设施中应用前景广阔^[1]。然而, 当前关于轻质泡沫混凝土墙的研究多集中于单一性能优化, 对其保温性能、隔音效果与整体结构稳定性之间的协同关系探讨不足, 且不同配合比、制备工艺对综合性能的影响机制尚未形成系统认知。因此, 深入研究矿物掺合料、外加剂及面密度等关键参数对轻质泡沫混凝土墙保温隔音及整体稳定性的作用规律, 对于优化其配方设计、提升工程应用可靠性具有重要的理论价值与实践意义^[2]。

一、试验原料及方法

(一) 试验原料

(1) 水泥: 选用的 P.O42.5 符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB175 规定的 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥 (海螺水泥集团有限公司生产), 其物理性能和化学成分见表 1。

表 1 水泥的物理性能和化学成分

凝结时间 (min)		3d 强度 (MPa)		标准稠度 用水量 (%)	氧化镁 (%)	三氧化硫 (%)	烧失量 (%)	安定性
初凝	终凝	抗折	抗压					
127	177	6.0	28.3	27.0	2.42	2.54	1.35	合格

(2) 轻骨料: 泡沫混凝土用轻骨料应符合现行国家标准《轻

集料及其试验方法 第 1 部分: 轻集料》GB/T1743L1 的规定。

(3) 砂: 选用颗粒级配合理, 含泥量等指标均符合国家标准《建设用砂》GB/T14684 规定的建筑用砂。

(4) 掺合料: 粉煤灰: II 级, 细度 (45 μ m 方孔筛筛余) 12%, 需水量比 95%, 烧失量为 4.2%; 硅灰的比表面积为 20000m²/kg, SiO₂ 含量 \geq 90%; 矿渣粉: 不低于 S95 级。

(5) 外加剂: 聚羧酸系高性能减水剂, 其质量及应用技术符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB8076、《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119 和有关环境保护等方面的规定, 固含量为 20%, 减水率 \geq 30%, 与水泥的相容性良好^[3]。

(6) 泡沫剂: 过氧化氢泡沫剂, 能在混凝土内部产生均匀的

气泡，实现轻质化效果。

(7) 水：采用符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ63规定的普通自来水，不含有害杂质。

(8) 钢丝焊接网：采用具有相同和不同直径的纵向和横向冷拔低碳钢丝以一定间距相互垂直排列，全部交叉点用电阻电焊制成网片，符合《冷拔低碳钢丝应用技术规程》JGJ19的有关规定^[4]。

(二) 试验方法

(1) 试件制备：按照设计的配合比进行材料计量，每盘材料计量允许偏差符合表4.2.9的规定。将水泥、粉煤灰及其他掺合剂、轻骨料、砂、拌合水依次加入搅拌机中，搅拌2min使其混合均匀，然后加入高性能减水剂和发泡剂，继续搅拌3min，形成均匀的泡沫混凝土拌合物。将拌合物倒入尺寸为100mm、150mm、200mm厚立方体试模中。试模高厚比应按下式进行验算：

$$(2.3.1-1) \beta \leq \mu_1 \mu_2 [\beta]$$

$$(2.3.1-2) \beta = H_0/h$$

$$(2.3.1-3) \mu_2 = 1 - 0.4b/L$$

式中：β—高后比；

H₀—墙体的计算高度，取墙体高度（mm）；

h—墙厚（mm）；

μ₁—非承重墙允许高厚比修正系数：100mm厚时取1.5.墙厚在100mm至200mm之间时，按内插法取用；

μ₂—有门窗洞口墙允许厚度比修正系数，其值不应小于0.7；

L—墙长（mm）；

b—L范围内的洞口宽度（mm）；

[β]—允许高厚比，取22。

现浇轻质泡沫混凝土隔墙厚度比验算时，无洞口墙体常用厚度与限制高度的对应关系参见表2。振捣密实后，在标准养护条件（温度20±2℃，相对湿度≥95%）下养护28d，用于后续性能测试^[5]。

表2隔墙厚度比验算时常用厚度与限制高度的对应关系

墙厚（mm）	100	150	200
限制高度（mm）	3300	4600	5700

(2) 检测方法

1. 按GB/T19889.3《声学建筑和建筑构件隔声测量第3部分：建筑构件空气声隔声的实验室测量》规定对试样进行空气声计权隔声量测试，以科学客观地评价其隔音效能。

2. 依据GB/T9978.1《建筑构件耐火试验方法第1部分：通用要求》进行耐火极限测试，通过观察试件在标准升温曲线下的表现，确定其失去支撑能力、完整性或隔热性的时间。

3. 耐久性测试主要针对试件抗压强度，面密度进行测量^[6]。

抗压强度测量：将试件置于压力试验机上下承压板之间，试件中心与承压板中心对齐。按照GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，以0.5-1.0MPa/s的加载速率匀速施加荷载，直至试件发生破坏，记录此时的最大荷载值。抗压强度按下式计算：

$$f_c = F/A$$

式中，

F为最大荷载（N），

A为试件承压面积（mm²）。

为保证测试结果的准确性，每组测试至少选取3个试件，取其平均值作为该组试件的抗压强度值。

(3) 面密度测量：测试前，先将试件表面的浮灰、杂物清理干净，确保试件干燥。使用精度为0.1kg的电子秤称量试件的质量（m），精确至0.1kg。用精度为1mm的卷尺测量试件的长度（L）和宽度（B），精确至1mm，计算试件的表面积（S=L×B）。面密度按ρ=m/S计算，每组测试至少选取3个试件，取平均值作为该组试件的面密度值^[7]。

二、试验结果与分析

(一) 矿物掺合料掺量对墙板保温隔音及整体稳定性的影响

在水泥与矿物掺合料总量固定条件下，调整矿物掺合料掺量（0、10%、20%）进行试验，试验方案如表3，试验结果见表4。

表3试验方案

编号	水泥（kg）	矿物掺合料（kg）	减水剂（g）	纤维（g）	稳泡剂	水（kg）	发泡剂（g）
A1	1.5	0	0	20	10	8.0	按发泡高度进行调整，以满模为准。
A2	135	0.15	0	20	10	8.5	
A3	1.2	0.30	0	20	10	9.0	
A4	1.05	0.45	0	20	10	9.5	

表4试验结果

试件编号	空气声计权隔声量	耐火极限	面密度（kg/m ² ）	抗压强度（MPa）	软化系数	含水率（%）
1	38	1.5	80.1	4.1	0.87	5.6
2	44	1.5	81.2	4.6	0.88	5.5
3	50	1.6	79.3	5.2	0.88	5.2

由表4分析可知，随着矿物掺合料掺量不断增加，试件面密度和含水率均略微降低，但是变化幅度不大；抗压强度均随矿物掺合料掺量的增加呈先提高后降低的变化趋势，软化系数则略有提高；空气声计权隔声量、耐火极限均呈上升趋势。当矿物掺合料掺量占总量的20%时，试件抗压强度为5.2MPa，面密度为79.3kg/m2，软化系数为0.88，含水率为5.2%，耐火极限为1.6、空气声计权隔声量50db，满

(二) 高性能减水剂对轻质混凝土墙保温隔音及整体稳定性的影响

水泥与矿物掺合料的总量不变，通过调整高性能减水剂掺量（0、0.20%、0.30%），以占水泥和矿物掺合料总质量比计）研究其对墙板性能的影响，试验方案如表5，试验结果见表6^[8]。

表5试验方案

编号	水泥（kg）	矿物掺合料（kg）	减水剂（g）	纤维（g）	稳泡剂	水（kg）	发泡剂（g）
B1	1.2	0.30	0	20	10	9.0	按发泡高度进行调整，以满模为准。
B2	1.2	0.30	15	20	10	8.3	
B3	1.2	0.30	30	20	10	7.6	
B4	1.2	0.30	45	20	10	7.0	

表6 试验结果

试件厚度	空气声计权隔声量	耐火极限	面密度(kg/m²)	抗压强度(MPa)	软化系数	含水率(%)
100mm	39	1.6	77.2	5.3	0.85	9.0
150mm	45	1.7	78.2	5.5	0.86	8.1
200mm	47	1.7	80.3	6.0	0.88	7.5

如表6所示，随着减水剂掺量的增加，用水量显著减少，试件抗压强度逐渐增大。空气声计权隔声量、耐火极限均有所提升，软化系数也有一定的升高，同时降低了板材的含水率。当减水剂掺量为0.30%时，试件空气声计权隔声量47db，耐火极限1.7，面密度为78.4kg/m²，抗压强度为6.0MPa，软化系数为0.88，含水率为7.5%，满足国家标准的要求。

（三）不同面密度对轻质混凝土墙保温隔音及整体稳定性的影响

试件厚度一定，通过调整胶凝材料的用量来调整轻质泡沫混凝土的干密度，从而达到调整墙板面密度，试验方案如表7，试验结果见表8。

表7 试验方案

编号	水泥(kg)	矿物掺合料(kg)	减水剂(g)	纤维(g)	稳泡剂	水(kg)	发泡剂(g)
C1	0.80	0.2	30	20	10	4.7	按发泡高度进行调整，以满模为准。
C2	0.96	0.24	36	20	10	5.7	
C3	1.12	0.28	42	20	10	6.6	
C4	1.28	0.32	48	20	10	7.6	

表8 试验结果

试件厚度	空气声计权隔声量	耐火极限	面密度(kg/m²)	抗压强度(MPa)	软化系数	含水率(%)
100mm	39	1.7	57.2	5.1	0.88	6.8
150mm	46	1.7	66.3	5.6	0.89	7.1
200mm	46	1.7	76.2	6.8	0.90	7.2

如表8所示，水泥和矿物掺合料总量的增加对轻质混凝土墙板

面密度提升作用明显，同时，试件的抗压强度也随之升高。试件3空气声计权隔声量为46db，耐火极限为1.7，面密度为76.2kg/m²，抗压强度为6.8MPa，性能远远高于GB/T23451-2009《建筑用轻质隔墙条板》中抗压强度大于3.5MPa的要求。

三、讨论

本研究通过调整矿物掺合料掺量、高性能减水剂掺量及面密度，系统分析了其对轻质泡沫混凝土墙保温隔音及整体稳定性的影响，结果显示各参数对墙板性能存在显著调控作用。

1.矿物掺合料的掺入通过填充效应与火山灰反应改善了混凝土微观结构，粉煤灰和硅灰的细化作用减少了孔隙率，提升了抗压强度，同时致密结构提升了空气声计权隔声量和耐火极限，表明适量矿物掺合料可实现强度与功能性的协同优化，但过量可能因水泥浆体稀释效应导致强度下降^[9]。

2.随掺量增加，用水量减少使混凝土密实度提高，抗压强度显著提升，且气泡分布更均匀，避免了因水分过多导致的孔隙缺陷，间接提升了隔声性能和软化系数。这验证了减水剂在保证工作性的同时，对结构稳定性的积极影响。

3.面密度调控结果显示，胶凝材料用量增加使试件面密度从57.2kg/m²增至76.2kg/m²，抗压强度提升33.3%，且面密度与隔声量呈现正相关趋势，但200mm厚试件隔声量未随面密度持续增长，远超国标要求，体现轻质与高强的平衡潜力^[10]。

综上，矿物掺合料20%、减水剂0.30%的配合比可实现墙板综合性能最优，为实际工程中轻质混凝土墙的配方设计提供了参考依据。

参考文献

[1] 袁嘉诚. 轻质墙板用煤矸石泡沫混凝土制备及性能研究 [D]. 山东交通学院, 2025.

[2] 蔡惠华. 掺合料及温度对轻质泡沫混凝土强度影响的研究 [J]. 港口航道与近海工程, 2025, 62(03): 77-81+86.

[3] 姚勇. 一种铁路灾害治理用高强轻质泡沫混凝土制备及应用研究 [J]. 粘接, 2025, 52(06): 12-15.

[4] 王磊, 曾茜. 复合轻质骨料泡沫混凝土的性能研究 [J]. 中国建材科技, 2024, 33(04): 37-41.

[5] 王建龙. 轻质漂珠 /HPMC/ 水泥基复合泡沫混凝土制备及性能研究 [D]. 塔里木大学, 2024.

[6] 周宇航, 罗如平, 朱碧堂, 李青强, 余金, 梁启帆, 胡扬扬. 轻质泡沫混凝土泡沫剂的性能优选与配比试验研究 [J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(02): 41-47.

[7] 吕夏婷, 谭洪波, 张世轩, 李懋高, 王金堂, 塞守卫. 泡沫掺量对超轻质硫氧镁基泡沫混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4262-4270.

[8] 韩嫣红. 预制轻质泡沫混凝土墙板的制备及性能测试研究 [J]. 砖瓦, 2023, (12): 31-33.

[9] 罗翔云, 岑树华, 黄湘, 沈茜丹. 憎水性轻质泡沫混凝土性能及其在混凝土裂缝修复中的应用 [J]. 中国水运, 2023, (21): 139-140.

[10] 王磊. 复合隔热轻质骨料泡沫混凝土性能影响研究 [D]. 武汉轻工大学, 2023.

基于城镇国土空间监测的城市诊断方法与实践

胡鸿

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060016

摘 要： 城镇国土空间监测包括多源数据融合等技术特征，为城市诊断提供数据支撑。城市诊断涵盖多方面综合分析。多种理论为两者提供基础。介绍了监测数据处理方法、诊断模型构建，还涉及不同区域应用及市县协同等，同时探讨监测技术成效、挑战与发展方向。

关 键 词： 城镇国土空间监测；城市诊断；数据融合

Urban Diagnosis Method and Practice Based on Urban Land Space Monitoring

Hu Hong

Guangzhou, Gungdong 510000

Abstract： Urban land space monitoring involves integrating data from multiple sources, providing data support for urban diagnosis. Urban diagnosis encompasses a comprehensive analysis of various aspects. Various theories serve as the foundation for both monitoring and diagnosis. This paper introduces methods for processing monitoring data, the construction of diagnostic models, and discusses the application in different regions and the collaboration between cities and counties. It also explores the effectiveness, challenges, and future directions of monitoring technology.

Keywords： urban land space monitoring; urban diagnosis; data fusion

引言

随着我国国土空间规划体系的逐步建立和完善（2019年《中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》颁布），城镇国土空间监测和城市诊断成为城市可持续发展的重要支撑。城镇国土空间监测旨在动态掌握国土空间变化，为规划管理提供依据，其与城市诊断相互协同。空间治理、可持续发展和复杂系统等理论为二者奠定基础。同时，多源数据融合处理方法、基于空间分析与机器学习的诊断模型构建等技术手段不断发展，且在分析城市扩展、服务功能供需、生态空间变化及地质灾害风险等方面取得成效，但也面临智能算法优化、诊断标准体系构建等挑战，需进一步研究以推动城市可持续发展。

一、城镇国土空间监测与城市诊断的理论框架

（一）概念解析与内涵界定

城镇国土空间监测是对城镇国土空间的开发利用状况、资源环境承载能力、国土空间规划实施情况等动态监测的过程，其核心理念是全面、准确、动态地掌握国土空间的变化情况，为国土空间规划和管理提供科学依据^[1]。它具有多源数据融合、时空动态监测、精准量化分析等技术特征。城市诊断则是对城市的发展状况、存在问题、发展潜力等进行综合分析和评估的过程，其内涵包括对城市的经济、社会、环境等多个方面的诊断，外延则涉及不同尺度、不同类型的城市。城镇国土空间监测为城市诊断提供了数据支撑和分析方法，城市诊断则为城镇国土空间监测

提供了应用方向和目标导向，两者协同发展，共同为城市的可持续发展提供保障。

（二）基础理论支撑体系

空间治理理论为城镇国土空间监测与城市诊断提供了治理结构和权力分配的视角，强调多元主体参与和空间资源的合理配置^[2]。可持续发展理论注重经济、社会和环境的协调共进，要求在城市诊断中考虑资源的可持续利用和生态环境保护。复杂系统理论将城市视为一个复杂的自适应系统，各个子系统之间相互关联、相互影响。这三种理论在城市诊断中都具有重要应用。空间治理理论指导构建合理的城市治理框架，可持续发展理论确保诊断方向符合长远发展需求，复杂系统理论帮助分析城市各要素的动态关系，共同为城镇国土空间监测与城市诊断奠定坚实的理论基础。

二、国土空间监测驱动的城市诊断方法体系

（一）多源监测数据获取与处理

构建三维地理信息、土地变更调查和生态环境监测等多源数据融合处理方法是国土空间监测的关键。三维地理信息数据可通过激光扫描、倾斜摄影测量等技术获取，为城市空间形态分析提供精细的地形地貌和建筑物模型^[3]。土地变更调查数据则基于定期的土地利用现状调查更新，反映土地用途的变化情况。生态环境监测数据涵盖大气、水、土壤等多个方面，可通过传感器网络和实地监测获取。通过建立统一的数据标准和规范，利用数据融合算法，将这些多源数据进行整合处理，消除数据差异和冗余，为城市诊断提供全面、准确的数据基础。

（二）诊断模型构建与实现路径

基于空间分析与机器学习相结合构建多维度城市诊断模型。空间分析可挖掘国土空间监测数据中的空间关联与分布特征，为城市问题诊断提供空间视角^[4]。机器学习算法能处理复杂的城市数据，提取潜在模式与规律。通过融合两者优势，可从多个维度对城市进行综合诊断。首先利用空间分析技术对监测数据进行预处理，如空间插值、空间聚类等，以获取更准确的空间信息。然后将处理后的数据输入到合适的机器学习模型中，如决策树、神经网络等，进行模型训练与优化。最终得到的诊断模型能够准确识别城市中的各类问题，为城市规划与管理提供科学依据。

三、典型城市诊断实践案例分析

（一）东部高密度城市的开发强度诊断

1. 建设用地扩张监测与承载评估

通过获取东部高密度城市的历史遥感数据，分析不同时期建设用地的面积、范围及空间分布变化，揭示城市扩展趋势。运用GIS技术进行空间分析，计算建设用地扩张速度、强度指数等指标，综合评估建设用地扩张情况。同时，考虑人口、经济等因素，对建设用地承载能力进行评估，构建相关评价模型，分析建设用地承载的人口数量、经济活动强度等是否合理，是否存在过度开发或开发不足的问题，为城市合理规划和土地资源优化配置提供科学依据^[5]。

2. 公共服务设施供需匹配诊断

运用POI数据和人口热力图进行城市服务功能供需缺口分析，通过将城市公共服务设施的分布信息与人口分布信息相结合，直观呈现公共服务设施在空间上的供需匹配情况。对于东部高密度城市，POI数据可详细反映各类公共服务设施的位置和数量，人口热力图则能体现人口的集聚程度。通过对比两者，可发现某些区域可能存在公共服务设施供给不足，如一些老旧城区，尽管人口密集，但教育、医疗等公共服务设施数量有限，难以满足居民需求；而在一些新开发区域，可能存在设施闲置与人口不足的矛盾^[6]。

（二）西部生态敏感区的安全格局诊断

1. 生态红线动态监测与预警

构建生态空间变化识别算法是实现生态红线动态监测与预警

的关键。该算法通过对多时相遥感影像、地理信息数据等进行综合分析，识别生态空间的变化情况^[7]。利用机器学习、深度学习等技术，提高变化识别的准确性和效率。同时，结合实地调查和监测数据，对算法结果进行验证和修正。通过该算法，可以实时监测保护区域内的土地利用变化、生态系统服务功能变化等情况，及时发现潜在的生态风险。针对监测到的风险，建立预警机制，通过设定阈值、发布预警信息等方式，提醒相关部门采取措施，保障生态红线的安全，维护西部生态敏感区的安全格局。

2. 地质灾害风险综合诊断

针对西部生态敏感区的地质灾害风险综合诊断，需集成InSAR形变监测与地质环境要素构建风险评估模型。InSAR形变监测能够获取高精度的地表形变信息，对于识别潜在的地质灾害区域具有重要意义^[8]。同时，考虑地质环境要素，如地形地貌、地层岩性、地质构造等，这些要素影响着地质灾害的发生和发展。通过综合分析InSAR形变数据和地质环境要素，构建风险评估指标体系，运用合适的数学方法进行量化评估，从而确定不同区域的地质灾害风险等级，为西部生态敏感区的安全格局诊断提供科学依据，以便采取有效的防治措施。

四、监测技术应用成效与优化路径

（一）空间治理决策支持效能评价

1. 监测数据精度对诊断结果的影响

监测数据精度对诊断结果具有重要影响。高精度的监测数据能够更准确地反映空间治理相关要素的实际情况，从而为决策提供更可靠的依据。例如，在城市土地利用监测中，高分辨率的数据可以清晰识别不同类型土地的边界和使用状况，有助于准确诊断土地利用的合理性和存在的问题⁹。相反，低精度数据可能导致信息缺失或误判，影响对空间治理状况的准确把握。因此，需要通过多尺度验证方法评估不同分辨率监测数据的适用边界，以确保在城市诊断过程中选择合适精度的数据，提高诊断结果的准确性和可靠性，进而提升空间治理决策支持效能^[9]。

2. 信息时效性与决策响应关联分析

监测技术所获取信息的时效性对空间治理决策支持效能至关重要。建立监测周期与城市问题处置时效的量化关系模型是关键。通过分析不同监测周期下信息的更新频率与城市问题发现及处置的时间节点，可以明确信息时效性如何影响决策响应。例如，较短的监测周期能更及时地反映城市空间的变化，为决策提供最新的数据支持，从而使决策能够更快地响应城市问题，提高空间治理的效率和效果^[10]。反之，过长的监测周期可能导致信息滞后，使决策错过最佳时机，影响空间治理的成效。因此，合理确定监测周期，优化信息获取和传递机制，对于提升空间治理决策支持效能具有重要意义。

（二）多层级信息整合应用创新

1. 市县两级监测诊断协同机制

市县两级在国土空间监测与诊断中需建立协同机制。一方面，要统一监测标准，确保数据的准确性和可比性。市县应明

确各自监测重点，市级注重宏观把控，县级聚焦微观细节，但需在关键指标和技术规范上保持一致。另一方面，建立诊断结果的有效传导路径。县级将监测数据和初步诊断结果及时上报市级，市级综合分析后反馈指导意见。同时，利用信息化技术搭建共享平台，实现数据实时共享和交互，提高协同效率。通过这种协同机制，能够整合市县两级资源，提升国土空间监测与诊断的科学性和有效性，为城市发展提供有力支撑。

2. 跨部门数据共享与协作模式

在城镇国土空间监测中，多层次信息整合应用创新以及跨部门数据共享与协作模式至关重要。通过建立有效的机制，实现不同层级信息的整合，例如将城市宏观层面的数据与微观社区数据相结合，能更全面地了解城市空间特征。同时，跨部门数据共享可打破信息孤岛，如规划部门与环保部门的数据共享，能综合考虑城市发展与生态保护的关系。在协作模式方面，可建立联合工作小组，定期沟通交流监测结果与问题。此外，还需设计多源异构数据的安全交换与融合应用方案，保障数据在共享与整合过程中的准确性和安全性，从而提升城镇国土空间监测的有效性，为城市诊断提供更可靠的依据。

（三）技术集成与发展路径优化

1. 空天地一体化监测技术融合

空天地一体化监测技术融合是提升城镇国土空间监测效果的关键。卫星遥感技术可提供宏观、大面积的空间信息，具有覆盖范围广、周期性强等优势，能快速获取城市土地利用、地形地貌等情况。物联网感知技术则侧重于微观层面的实时数据采集，如环境传感器可监测空气质量、温湿度等。将二者协同，可实现优势互补。例如，卫星遥感发现某区域土地利用变化异常，物联网

感知技术可进一步在该区域精确监测相关环境指标变化，为城市诊断提供更全面、准确的数据支持，优化监测技术应用成效，推动技术集成与发展路径的优化。

2. 智能诊断系统建设框架

构建基于数字孪生的城市诊断决策支持平台架构需从多方面着手。要整合多种监测技术，实现对城镇国土空间的全面、精准监测。通过传感器网络、卫星遥感等技术获取数据，并利用大数据分析、人工智能算法进行处理。在此基础上，搭建智能诊断系统，建立数据模型，对城市的各类问题进行诊断分析。系统应具备实时监测、动态评估和预测预警功能。同时，注重技术集成与发展路径优化，不断引入新的技术手段，提升平台的性能和准确性。加强不同技术之间的协同，提高数据的利用效率，为城市规划、建设和管理提供科学依据，推动城市的可持续发展。

五、总结

城镇国土空间监测技术在城市诊断中已取得一定成效。其应用不仅能精准获取城市空间信息，还能为城市规划、管理提供科学依据。在方法上具有创新性，例如通过整合多源数据实现对城市更全面的认知。实践指导价值显著，有助于及时发现城市问题并提出解决方案。然而，仍存在一些挑战与研究方向。智能诊断算法需进一步优化以提高诊断准确性，多尺度诊断标准体系的构建也至关重要，这将使诊断结果更具针对性和普适性。未来应推动监测技术从态势感知向智慧决策跃升，通过加强技术融合、完善数据共享机制等，更好地服务于城市的可持续发展。

参考文献

[1] 黄雨生. 基于数据融合的城市交通流预测模型与方法研究 [D]. 西安理工大学, 2023.

[2] 杨婧. 基于多模态融合的脑网络构建与疾病诊断方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2022.

[3] 刘雨鹭. 基于“双评价”的运城市国土空间格局研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2022.

[4] 梁芳婷. 基于自然解决方案的城镇地区国土空间生态修复规划研究 [D]. 广东工业大学, 2022.

[5] 董文君. 基于国土空间规划视角治理新收缩城市研究 [D]. 东北农业大学, 2022.

[6] 金忠民, 陈琳, 陶英胜. 超大城市国土空间总体规划实施监测技术方法研究——以上海为例 [J]. 上海城市规划, 2019, (04): 9-16.

[7] 田朝晖, 唐萍, 程潇菁. 省级国土空间规划监测评估预警机制框架建构与运用——以湖南省为例 [J]. 国土资源导刊, 2023, 20(03): 54-60.

[8] 武立军. 浅谈城市国土空间监测中城市空间信息的细化与补充 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(09): 96-99.

[9] 黄世鑫. 国土空间规划背景下广州城镇开发边界管控研究 [D]. 广东工业大学, 2021.

[10] 罗廷祥, 刘若翔, 朵明香. 城市国土空间监测质量影响因素及控制方法探析 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(22): 138-141.

公共建筑室内装饰空间设计的创新理念与实践

——以甲级写字楼为例

黄惠丽

华南理工大学建筑设计研究院有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060017

摘 要： 介绍甲级写字楼与其他公共建筑差异，阐述公共建筑室内装饰空间设计创新理念，包括绿色、智能等，还涉及核心筒优化、装配式施工等提高空间效能方法，以及不同类型公共建筑的特色设计，梳理创新方法论体系，展望未来发展方向。

关 键 词： 甲级写字楼；公共建筑设计；空间效能

Innovative Ideas and Practices of Interior Decoration Space Design in Public Buildings — Taking Grade A Office Building as an Example

Huang Huili

South China University of Technology Architectural Design and Research Institute Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article introduces the differences between Grade A office buildings and other public buildings, explores innovative concepts in the interior decoration of public buildings, including green and intelligent design, and discusses methods to enhance spatial efficiency, such as optimizing the core building and using prefabricated construction. It also highlights the distinctive designs of different types of public buildings, outlines an innovative methodology system, and looks ahead to future development directions.

Keywords： Grade A office buildings; public building design; spatial efficiency

引言

随着城市化进程的加速，公共建筑的需求日益增长。2022年发布的《关于推动城乡建设绿色发展的意见》强调了公共建筑应遵循绿色、智能、人性化等原则。甲级写字楼作为公共建筑的重要类型，其室内装饰空间设计在功能定位、设计理念、核心筒配置、施工技术等方面呈现出诸多创新。从满足办公需求的功能分区到融入绿色建筑理念、智能化技术应用等多维度创新，再到核心筒优化、装配式施工技术优势以及智慧办公场景建设等，这些创新不仅符合政策导向，也为其他公共建筑领域提供了借鉴，推动公共建筑室内装饰空间设计不断发展。

一、公共建筑室内装饰空间设计理论框架

（一）公共建筑功能需求与空间关系

甲级写字楼与酒店、文化场馆等公共建筑在功能定位上存在显著差异。甲级写字楼主要满足办公需求，强调高效、便捷与专业的工作环境。其空间功能分区需明确划分办公区、会议区、休息区等，以提高工作效率^[1]。办公区应注重空间的合理性与舒适性，满足员工长时间工作的需求。会议区要根据不同规模的会议进行合理设计，配备相应的设备。休息区则要提供舒适的环境，缓解员工的工作压力。动线组织要流畅，确保人员和物资的高效流通，避免交叉和拥堵。同时，人性化设计也是关键，要考虑员工的使用习惯和心理需求，如合理的采光、通风和噪音控制等，

以提升员工的工作体验和满意度。

（二）当代设计理念创新维度

当代设计理念在公共建筑室内装饰空间设计中呈现出多维度创新。绿色建筑理念的融入至关重要，强调在材料选择、能源利用等方面遵循环保原则，以实现室内空间与自然的和谐共生^[2]。智能化技术应用成为趋势，如智能照明系统、自动化温控设备等，提升空间的舒适性与便捷性。文化元素融合丰富了空间内涵，通过将地域文化、企业文化等融入设计，赋予空间独特的个性。同时，可持续发展要求促使设计师从长远角度考虑，注重资源的循环利用和空间的适应性，以满足未来变化的需求。这些创新维度相互关联，共同推动公共建筑室内装饰空间设计的发展。

二、甲级写字楼室内设计创新方法

（一）空间效能优化策略

核心筒优化配置可提高空间效能。合理调整核心筒位置与尺寸，减少其对办公空间的占用，增加可使用面积^[3]。同时，优化核心筒内部的设备布局，提高设备运行效率，降低能耗。弹性办公模块组合是提升空间使用效率的有效方式。根据不同企业需求，设计可灵活组合的办公模块，如开放式办公区、独立办公室等，既能满足企业个性化办公需求，又能提高空间利用率。共享交流空间创建对提升空间效能至关重要。设置公共休息区、会议室、洽谈室等共享空间，促进员工之间的交流与合作，提高工作效率，同时这些空间在非使用时段也可作为临时办公区域，提高空间的综合使用效能。

（二）材料与技术的创新实践

装配式施工技术在甲级写字楼室内设计中具有显著优势。它能够提高施工效率，减少现场作业时间和污染，同时保证装修质量的稳定性和一致性。BIM系统协同设计则打破了传统设计模式的局限。通过整合建筑、结构、机电等多专业信息，实现了各专业之间的高效协同，提前解决设计冲突，优化空间布局和管线走向，为甲级写字楼打造出更加合理、舒适的室内环境^[4]。智能照明控制体系的应用，不仅可以根据不同的使用场景和时间自动调节灯光亮度和颜色，营造出适宜的工作氛围，还能有效节约能源，降低运营成本，提升甲级写字楼的智能化水平和品质。

三、甲级写字楼典型案例解析

（一）垂直城市空间重构项目

1. 立体交通组织系统

某超高层写字楼在立体交通组织系统方面有诸多创新设计。空中大堂改变了传统大堂在底层的布局，通过设置在高层，不仅有效利用了垂直空间，还提升了写字楼整体的空间层次感和品质感^[5]。双轿厢电梯群组的设计，提高了电梯的运输效率，减少了人员等候时间，为使用者提供了更加便捷的垂直交通体验。空中连廊则连接了不同的建筑体块，在增加建筑整体连贯性的同时，也为人员的流动提供了更多的路径选择，优化了水平交通组织，进一步完善了写字楼的立体交通体系。这些创新设计共同构成了一个高效、便捷且具有独特空间体验的立体交通组织系统。

2. 生态中庭系统构建

生态中庭系统构建需整合自然采光导引装置、垂直绿化体系与室内微气候调节技术。自然采光导引装置可优化室内光照环境，提高空间舒适度与能源利用效率^[6]。通过合理设计采光口位置、形状及采用导光材料等，将自然光引入中庭及周边空间。垂直绿化体系不仅增添绿色景观，还能改善空气质量。选择适宜植物种类，结合灌溉与支撑系统，使其在中庭垂直面上生长。室内微气候调节技术对中庭环境至关重要。采用通风系统、温度湿度调节设备等，与采光及绿化系统协同，营造舒适稳定的室内微气候。

（二）智慧办公场景建设项目

1. 物联网技术集成

在甲级写字楼智慧办公场景建设中，物联网技术集成至关重要。其中，研究人员流量监控系统、智能工位预约平台与建筑运

维管理平台的联动机制是关键部分。人员流量监控系统可实时监测写字楼内各区域人员流动情况，为空间管理提供数据支持^[7]。智能工位预约平台方便员工提前预订工位，提高工位利用率。建筑运维管理平台则负责统筹写字楼的各项设施运维。通过三者联动，当人员流量发生变化时，智能工位预约平台可根据实时数据调整工位分配，同时建筑运维管理平台可依据人流情况合理调控能源消耗等，实现智慧办公场景下资源的高效利用和管理。

2. 可变空间界面设计

可移动隔断系统在甲级写字楼智慧办公场景建设的可变空间界面设计中具有重要作用。它能够灵活划分空间，满足不同办公模式需求。例如，在开放式办公与独立办公转换时，可移动隔断可快速实现空间分隔，提高空间利用率^[8]。多功能家具组合也是关键技术解决方案之一。通过设计具有多种功能的家具，如可折叠、可拼接的办公桌和座椅，能适应不同的办公场景，如团队协作、个人专注工作等。这些家具组合不仅提供了灵活的空间使用方式，还提升了办公环境的舒适性和适应性，为智慧办公场景建设中的可变空间界面设计提供了有效支撑。

四、创新理念的拓展应用

（一）文化类建筑适配性研究

1. 文化符号转译路径

地域文化元素在博物馆、图书馆等文化类建筑空间中的应用具有重要意义。其抽象化表达是关键，通过对地域文化中独特的图案、色彩、材质等进行提炼和简化，使其以一种简洁且具有代表性的形式呈现^[9]。例如，将传统建筑的轮廓线条抽象为装饰元素，应用于空间界面。同时，叙事性构建也不可或缺。以文化主题为线索，将抽象化的文化元素按照一定的逻辑顺序进行组织和排列，从而讲述地域文化的故事。如在博物馆中，可根据历史发展脉络展示文化元素，在图书馆中，则可围绕知识传承与地域文化的关系来构建叙事，使参观者能更好地理解 and 感受地域文化内涵。

2. 沉浸式体验营造

在文化类建筑中，沉浸式体验的营造可通过多种技术协同实现。数字交互装置能让使用者参与其中，打破传统的观赏模式，如在博物馆展览中，观众可通过触摸屏获取展品详细信息并进行互动体验^[10]。光影艺术设计可营造独特氛围，根据不同文化主题和空间功能，利用光线的强弱、色彩和角度变化，塑造出具有感染力的空间环境。声学调控技术同样重要，它能根据文化活动的的需求，调整空间的声学效果，如在剧院中营造出完美的音效，使观众更好地沉浸在演出情境中。这些技术的协同应用，为文化类建筑的使用者提供了更加丰富和深入的沉浸式体验。

（二）教育体育建筑模块优化

1. 多功能空间转换系统

学校体育馆的可变看台和移动隔音墙等设施在空间转化方面具有独特的机理。可变看台可通过机械装置实现灵活的伸缩和折叠，在体育赛事时展开为观众提供足够的座位，而在其他活动如文艺演出或集会时可部分收起，增加场地的空旷感。移动隔音墙

则能够根据不同的使用需求划分空间，例如在进行体育教学时，可将体育馆分隔为多个小型训练区域，当举办大型活动时，又能将其移开，形成一个完整的大空间。这些设施的合理运用不仅提高了空间的利用率，还能满足多样化的功能需求，为教育体育建筑的多功能空间转换提供了有效的解决方案。

2. 安全防护技术创新

在教育体育建筑中，安全防护技术创新至关重要。防撞材料的应用是关键方面，需根据不同区域和使用人群特点，选择合适的防撞材料。例如在体育场馆的运动员活动区域，要采用高强度且有弹性的防撞材料，以减少运动员受伤风险。同时，应急疏散标识系统要与无障碍设计整合。标识应清晰、明显且符合无障碍设计标准，确保在紧急情况下，包括残疾人和行动不便者在内的所有人员都能快速、安全地疏散。这需从标识的位置、高度、亮度以及引导路线的合理性等多方面进行考量，以实现安全防护技术的创新应用，提升教育体育建筑的安全性和实用性。

（三）医疗养老建筑情感化设计

1. 疗愈环境构建体系

医疗养老建筑的情感化设计及疗愈环境构建至关重要。在色彩运用上，应依据色彩心理学，选择柔和、温暖的色调，如米黄色、淡蓝色等，避免强烈对比色，以营造宁静、舒适的氛围，缓解使用者的焦虑情绪。自然景观的渗透也不可或缺，室内引入绿植，设置小型花园或景观窗，让老人能接触自然，感受四季变化，增强心理愉悦感。同时，合理控制空间尺度，避免空间过大造成的空旷感和孤独感，以及空间过小带来的压抑感。走廊宽度、房间大小等都要符合老人的活动需求和心理感受，打造一个

既温馨又舒适的疗愈环境，促进老人的身心健康。

2. 适老化智能改造

在医疗养老建筑情感化设计的适老化智能改造中，跌倒预警系统至关重要。它需精准感知老人行动姿态，及时发出警报，保障老人安全。无障碍卫浴空间设计要符合老人身体机能特点，如安装合适高度的扶手、防滑设施等，同时与智能设备结合，如智能马桶可监测健康数据。健康监测设施应全面且便捷，能实时监测老人的生命体征，如心率、血压等，并将数据传输给医护人员。这些设施的整合设计标准需考虑老人的使用习惯和心理需求，注重人性化和智能化的融合，以提高老人的生活质量和医疗养老建筑的服务水平。

五、总结

公共建筑室内装饰空间设计在甲级写字楼的实践中呈现出诸多创新理念与方法。通过系统梳理创新方法论体系，为该领域提供了理论指导。甲级写字楼的设计实践具有重要示范价值，其成果可推广至其他公共建筑领域。未来，模块化设计将提高空间利用效率和灵活性，满足不同用户需求；数字孪生技术的应用可实现虚拟与现实的交互，优化设计和管理过程；跨学科协同创新则能整合多领域知识和资源，推动设计理念和技术持续更新。这些方向将为公共建筑室内装饰空间设计带来新的机遇和挑战，促使其不断发展和进步，以更好地适应社会和时代的需求。

参考文献

- [1] 诸葛福群. 基于乘客满意度的 BRT 站点空间效能相关性研究 —— 以临沂沂蒙路 BRT 为例 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [2] 王文婷. 文旅融合视角下滨海公共建筑设计研究 [D]. 宁夏大学, 2021.
- [3] 李钊臣. 基于服务设计理念的企业办公空间设计研究 —— 以璟麟集团办公空间为例 [D]. 南昌大学, 2023.
- [4] 齐文姬. 基于服务设计理念的宠物医院空间设计研究 —— 以博爱宠物医院空间设计为例 [D]. 云南艺术学院, 2021.
- [5] 罗傲. 竹编首饰设计实践创新研究 —— 以胸针为例 [D]. 四川美术学院, 2021.
- [6] 李俊超. 广东某甲级写字楼楼宇型能源站系统方案设计 [J]. 节能, 2021, 40(03): 46-49.
- [7] 李子秀, 胡振宇. 基于亲生物理念的公共建筑设计研究 —— 以全国高等学校校结构设计竞赛获奖作品为例 [J]. 建筑与文化, 2022, (10): 157-159.
- [8] 张怡, 王慧敏, 胡雪杰. 传统文化元素在公共建筑设计中的体现 —— 以中华太极馆设计为例 [J]. 安徽建筑, 2021, 28(05): 3-4+16.
- [9] 徐昊. 绿色建筑设计理念在公共建筑设计中的应用 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(10)[2022-10-01].
- [10] 李思颖, 陈泽胤. 基于空间句法的滨海防灾公园空间效能研究 —— 以烟台市滨海广场为例 [J]. 住宅科技, 2022, 42(08): 39-44.

建筑工程管理视角下工程风险的识别与管控

代国峰

上海华东铁路建设监理有限公司安徽分公司，安徽 合肥 230000

DOI:10.61369/ME.2025060019

摘 要： 阐述建筑工程风险特征，介绍风险识别方法如德尔菲法等，评估方法如 AHP - FCE，管控策略如 PDCA 循环、构建监理预警系统等，还涉及智能监测技术、数字孪生技术，强调工程监理职能及风险管理的重要性。

关 键 词： 建筑工程风险；风险识别与管控；工程监理

Identification and Control of Engineering Risks from the Perspective of Construction Project Management

Dai Guofeng

Anhui Branch of Shanghai Huadong Railway Construction Supervision Co., LTD., Hefei, Anhui 230000

Abstract： in this paper, the construction project risk characteristics, this paper introduces the risk recognition method, such as the Delphi method and evaluation methods such as AHP, FCE, control strategies, such as PDCA circulation, building supervision warning system and so on, also involves twin technology, intelligent monitoring technology, digital stressed the importance of engineering supervision functions and risk management.

Keywords： construction project risks; risk identification and management; engineering supervision

引言

《关于促进建筑业持续健康发展的意见》（2017 年）强调了建筑工程管理的重要性以及提升工程质量和风险管理水平的必要性。建筑工程风险具有潜在性、多样性和关联性等特征，其识别与管控是一个复杂且关键的过程。涉及多种方法和技术，如德尔菲法、WBS - RBS 法等用于风险识别，层次分析 - 模糊综合评价法用于风险评估，BIM 技术结合蒙特卡洛法用于风险模拟，以及构建 PDCA 循环体系用于风险管控等。同时工程监理在风险管理中也承担着重要职责，包括构建协同管理平台、制度创新和企业能力建设等方面，随着信息技术发展，其职能实现方式也不断创新。

一、工程风险识别的理论基础

（一）工程风险基本特征

建筑工程风险具有潜在性、多样性和关联性等基本特征。潜在性指风险在工程实施过程中可能隐藏未发，如一些质量隐患可能在施工阶段未被察觉，却在后续使用中暴露^[1]。多样性体现为风险来源广泛，包括自然环境、技术工艺、人员管理等多个方面。例如自然灾害可能影响工程进度，施工技术不合理可能导致质量问题，人员失误可能引发安全事故。关联性则表明各类风险之间相互影响，一个环节的风险可能引发其他环节的连锁反应。如设计缺陷可能导致施工困难，进而影响工程质量和进度，增加成本风险。

（二）风险识别流程方法

工程风险识别是一个复杂的过程，需综合运用多种方法。德尔菲法通过专家意见的反复征集与反馈，能有效避免个体偏见，得到较为客观的风险识别结果^[2]。WBS - RBS 法将工作分解结构

（WBS）与风险分解结构（RBS）相结合，从项目的工作流程和风险类别两个维度全面识别风险，确保风险识别无遗漏。故障树分析则以系统故障为顶事件，通过逻辑门构建故障树，分析导致故障的各种原因及其组合，深入挖掘潜在风险。同时，构建风险清单量化指标体系，对识别出的风险进行量化评估，为后续的风险管控提供科学依据。

二、工程风险评估与分析技术

（一）风险评估定量模型

层次分析 - 模糊综合评价法（AHP - FCE）在工程风险评估中具有重要应用。该方法首先通过层次分析法确定各风险因素的权重。它将复杂的风险系统分解为多个层次，构建层次结构模型，通过专家打分等方式确定各层次因素之间的相对重要性，从而得到各风险因素的权重向量^[3]。然后，利用模糊综合评价法对风险进行综合评价。它考虑到风险评价中的模糊性，将风险等级

划分为多个模糊子集，通过建立模糊关系矩阵，结合前面得到的权重向量，计算出综合评价结果，进而判定风险等级。最后，基于上述结果建立三维风险预警矩阵，从风险发生的可能性、损失程度以及风险的可控性三个维度对风险进行可视化展示，以便更好地进行风险管理与决策。

（二）风险动态模拟技术

BIM技术可用于驱动施工风险4D模拟，通过对建筑工程的三维模型添加时间维度信息，实现施工过程的动态可视化模拟^[4]。这种模拟能够直观呈现施工进度、资源利用以及潜在风险的发展情况。同时，结合蒙特卡洛法进行风险发生概率计算。蒙特卡洛法通过大量随机抽样模拟风险因素的变化，考虑多种不确定因素的综合影响，从而得出风险发生的概率分布。基于BIM技术的4D模拟和蒙特卡洛法的结合，能够更准确地评估工程风险，为风险管控提供科学依据，帮助工程管理人员提前制定应对措施，降低风险对建筑工程的影响。

三、工程风险管控策略体系

（一）风险管控组织措施

1. 全过程管理制度

构建PDCA循环的闭环管理体系是工程风险管控的重要策略。PDCA即计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、处理（Act），通过不断循环这四个阶段，实现对工程风险的动态管控。在计划阶段，需全面识别风险，制定相应的管控计划^[5]。执行阶段要确保计划有效实施，明确各部门和人员的职责。检查阶段对风险管控的效果进行评估，及时发现问题。处理阶段则针对检查出的问题进行调整和改进，完善管控措施。同时，建立风险责任分配矩阵（RAM），清晰界定各参与方在风险管控中的责任和义务，确保每项风险都有明确的责任人，从而提高风险管控的效率和效果。

2. 应急预案设计

在工程风险管控的应急预案设计中，情景构建的应急响应机制至关重要。通过对各种可能的风险情景进行模拟和分析，能够提前制定出针对性的应对措施，确保在风险发生时能够迅速、有效地响应^[6]。同时，完善风险准备金计提标准也是关键一环。合理的计提标准应综合考虑工程的规模、复杂程度、风险类型及发生概率等多种因素。准确计提风险准备金，既能在风险发生时提供必要的资金支持，保障工程的持续推进，又能增强企业应对风险的能力，维护企业的经济稳定和可持续发展。

（二）风险管控技术措施

1. 智能监测技术

在工程风险管控的智能监测技术方面，可部署基于物联网的实时监测系统。通过物联网技术，能够实现对工程各个关键部位和环节的实时数据采集与传输，确保及时获取工程状态信息^[7]。同时集成应力传感器，它可以精确测量工程结构所承受的应力情况，为判断结构安全提供关键数据支持。此外，利用无人机巡检技术，能够对大面积的工程区域进行快速、高效的巡检，尤其是

一些人工难以到达的区域。无人机可以搭载高清摄像头等设备，获取清晰的图像和视频资料，辅助工程人员及时发现潜在风险，如结构表面的裂缝、材料的损坏等情况，从而实现更全面、更精准的工程风险监测。

2. 数字孪生技术

数字孪生技术为工程风险管控提供了新的思路和方法。通过构建工程风险数字孪生平台，能够实现对工程实体的数字化映射。该平台可以集成多源数据，包括工程设计图纸、施工过程数据、传感器监测数据等，从而全面、准确地反映工程的实际状态^[8]。利用数字孪生模型，可以对工程风险进行实时模拟和分析，预测风险的发生概率和影响程度。同时，通过虚实交互的方式，管理人员可以在虚拟环境中对风险进行预演和评估，制定更加科学合理的风险管控策略。此外，数字孪生平台还可以实现对风险管控措施效果的实时反馈和优化，不断提高工程风险管控的水平和效率。

四、工程监理在风险管理中的职能实现

（一）监理风险控制机制

1. 监理预警职能

建立基于关键节点控制的监理预警系统，需明确关键节点的确定依据及预警指标。通过对建筑工程各阶段的深入分析，结合工程特点及历史经验数据确定关键节点^[9]。例如，基础施工阶段的关键节点可包括地基处理效果监测节点等。同时，设定合理的预警指标，如质量指标、进度指标、安全指标等的临界值。当实际工程数据接近或超出这些临界值时，预警系统及时发出警报。这要求监理人员具备敏锐的观察力和准确的判断力，能及时获取并分析相关数据，以便在风险初现端倪时就采取措施，完善风险早发现机制，为后续的风险管控提供有力支持。

2. 过程控制标准

工程监理在风险管理中需制定分部分项工程风险控制标准。这要求对各分部分项工程的风险因素进行详细分析和评估，确定关键风险点及其可接受的风险水平^[10]。例如在地基基础工程中，要考虑地质条件、施工工艺等因素对工程质量和安全的影响，设定相应的沉降量、承载力等控制指标。同时，开发监理工作标准化流程，明确监理在风险控制各环节的职责和工作方法。从施工前的审查，到施工过程中的监督检查，再到施工后的验收，都要有规范的操作流程，确保监理工作的有效性和一致性，从而实现工程风险的有效管控。

（二）多方协同管理

1. 参建方责任界面

在建筑工程中，建设单位、施工单位和监理单位都在风险管理中承担着不同的权责。建设单位作为项目的发起者和主要投资方，需负责确定项目的整体风险偏好和承受能力，对重大风险决策拍板，并提供必要的资源保障风险管理工作的开展。施工单位则要在施工过程中严格遵守相关规范和标准，对施工技术风险、人员安全风险等进行直接管控，及时采取措施预防和应对可能出

现的风险。工程监理单位在其中起到监督和协调的作用，负责审查施工单位的风险管理计划和措施是否符合要求，监督施工过程中的风险防控执行情况，及时向建设单位反馈风险信息，协助建设单位和施工单位共同应对风险，确保工程的顺利进行。

2.BIM 协同平台

工程监理在风险管理中，构建基于 BIM 的协同管理平台对实现其职能至关重要。该平台可集成各参与方的数据，形成一个信息共享的环境。通过 BIM 技术的可视化特点，工程监理能够更直观地了解工程进度、质量等方面的风险信息。各方可以在平台上实时更新数据，如施工单位上传施工进度和质量检测报告，设计单位提供设计变更信息。监理单位依据这些共享数据，及时发现潜在风险并进行分析评估。同时，平台的联动功能使得一旦某个环节出现风险，相关信息能迅速传递给其他各方，便于共同商讨应对措施，从而有效提高风险管理的效率和效果，确保工程顺利进行。

（三）监理制度创新

1. 监理企业能力建设

工程监理在风险管理中具有重要职能，需从制度创新与企业能力建设等方面实现。在制度创新上，应建立更完善的风险评估与预警机制，明确监理在不同风险阶段的职责与权力。同时，要加强对监理工作的监督与考核，确保制度有效执行。在企业能力建设方面，要加强注册监理工程师风险管理专项培训，培育复合型人才队伍。这不仅包括工程技术知识，还涵盖风险管理、法律法规等内容。企业自身需加大在技术研发与设备更新上的投入，

提高风险监测与分析能力。通过这些举措，工程监理能更好地履行风险管理职能，保障建筑工程的顺利进行。

2. 信息化监理模式

随着信息技术的快速发展，工程监理在风险管理中的职能实现方式也在不断创新，信息化监理模式逐渐成为主流。推广智慧监理系统应用是其中的关键举措。该系统能够实时监测工程各项数据，如施工进度、质量指标等，及时发现潜在风险。同时，建立工程风险电子档案追溯制度，对每一个风险事件进行详细记录，包括风险发生的时间、地点、原因、处理措施及结果等。这不仅有助于对当前工程进行有效管控，还能为后续类似工程提供宝贵的经验借鉴，从而提升整个建筑行业的风险管理水平。

五、总结

建筑工程管理中工程风险的识别与管控至关重要。通过构建风险识别五阶段模型和 PDCA 循环管控体系，能有效应对风险。五阶段模型为风险识别提供了系统方法，PDCA 循环则确保管控的持续改进。同时，BIM+GIS 技术的发展为智能风险管理系统提供了可能，其融合可实现对工程风险更精准、实时的监测与管控，是极具潜力的后续研究方向。此外，完善工程监理执业责任保险制度也不容忽视。合理的保险制度能增强监理的责任意识，分担工程风险带来的损失，保障工程顺利进行，从政策层面为工程风险管理提供有力支持。

参考文献

[1] 顾婷. 文本挖掘视角下医养结合服务关键风险识别及管控策略 [D]. 江苏科技大学, 2023.
[2] 李思卓. 美国数字货币风险的识别与管控研究 [D]. 吉林大学, 2022.
[3] 李雪. H 公司财务风险识别与管控研究 [D]. 天津大学, 2022.
[4] 谢晓彤. 共生视角下的河南省国土空间功能识别与优化管控研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2022.
[5] 章锐旦. M 学院毕业设计管理系统开发风险识别与管控研究 [D]. 江苏大学, 2023.
[6] 马宁. 石化企业实验室风险分析与管控 [J]. 现代职业安全, 2024(7): 52-54.
[7] 孙明, 谢元. “认购基金 + 施工总承包”模式下的风险管控 [J]. 交通企业管理, 2023, 38(3): 93-95.
[8] 应明轶. 绿色工程管理视角下建筑工程管控研究 [J]. 模型世界, 2022(2): 121-123.
[9] 顾丽丽, 李爱宇. 建筑工程造价合同管理的风险管控 [J]. 数码设计 (上), 2021, 10(4): 170-171.
[10] 张新丽. 全面风险管理视角下的油品贸易业务风险管控 [J]. 投资与创业, 2023, 34(5): 131-133.

市政工程施工质量把控与技术管理的协同策略研究

黎嘉雄

广东 佛山 528200

DOI:10.61369/ME.2025060021

摘 要： 阐述市政工程中 ISO9001 与 GB/T50430 标准，分析施工质量与技术管理协同的核心要素及现存问题，介绍 BIM+GIS 预警系统等技术应用，强调构建协同机制的重要性，包括组织架构、体系构建等方面，并通过实证研究证明协同策略的价值。

关 键 词： 市政工程；质量把控；技术管理

Research on Collaborative Strategies for Quality Control and Technical Management in Municipal Engineering Construction

Li Jiaxiong

Foshan, Guangdong 528200

Abstract： In municipal engineering ISO9001 and GB/T50430 standards, analysis of the construction quality and the core elements of management techniques and existing problems, introduces BIM + GIS technology applications such as early warning system, emphasized the importance of building collaborative mechanism, including organizational structure, system construction, etc., and through the empirical research to prove the value of synergy strategy.

Keywords： municipal engineering; quality control; technical management

引言

市政工程施工质量把控与技术管理的协同是确保工程质量和效益的关键。近年来，随着我国智能建造相关政策的推进（如《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》2020年），市政工程领域面临新的机遇与挑战。在此背景下，研究市政工程施工质量把控与技术管理的协同策略具有重要意义。从质量管理体系标准（ISO9001和GB/T50430）到技术管理核心要素，从质量把控体系缺陷到技术管理实施瓶颈，都需要通过合理的协同机制来解决，以实现市政工程的高质量建设。

一、市政工程施工质量与技术管理协同理论基础

（一）质量管理体系标准解析

ISO9001 是国际通用的质量管理体系标准，强调以顾客为关注焦点、过程方法等原则^[1]。在市政工程中，它有助于确保工程满足相关方需求。而 GB/T50430 是我国针对工程建设企业制定的质量管理规范，更侧重于工程建设行业的特点和要求。在市政工程施工中，ISO9001 注重通用性管理理念的应用，GB/T50430 则紧密结合工程建设流程进行规范。PDCA 循环包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段。在市政工程施工全过程，计划阶段要明确质量目标和技术方案；执行阶段按计划实施施工和技术操作；检查阶段对施工质量和技术应用进行检查；处理阶段对检查出的问题进行整改，不断优化施工质量和技术管理。

（二）技术管理核心要素构成

市政工程施工质量与技术管理协同的技术管理核心要素包含

多个重要维度。其中，BIM 技术应用是关键要素之一。通过 BIM 技术可实现对市政工程的三维建模与可视化分析，提前发现施工中可能存在的质量问题并进行优化，从而为施工质量把控提供有力支持^[2]。施工工艺标准化同样不可或缺，它确保了施工过程的规范性和一致性，减少因工艺不规范导致的质量隐患。在市政工程施工中，严格按照标准化的工艺流程操作，有助于提高施工质量的稳定性。此外，设备智能化也是技术管理的核心要素构成部分。智能化设备能够实时监测施工过程中的各项参数，及时反馈异常情况，便于施工人员采取措施加以调整，保障施工质量。

二、当前市政工程协同管理痛点分析

（一）质量把控体系缺陷

在市政工程中，质量把控体系存在诸多缺陷。以某地铁盾构施工渗漏案例为例，材料验收方面存在盲区。部分材料在进入施工现场时，验收流程不够严谨，未能对材料的各项指标进行全面

检测，导致一些不符合质量标准材料混入其中^[3]。同时，隐蔽工程监控存在漏洞。盾构施工中的一些关键部位属于隐蔽工程，由于监控手段有限或监控不及时，施工过程中的一些质量问题未能被及时发现和处理，从而影响了整个工程的质量。这些共性问题反映出当前市政工程质量把控制体系在材料验收和隐蔽工程监控等环节需要进一步完善，以确保工程质量。

（二）技术管理实施瓶颈

市政工程技术管理实施存在诸多瓶颈。施工组织设计常出现落地偏差问题，例如在一些大型市政道路工程中，设计的施工流程和时间安排在实际操作中难以执行，可能因现场环境复杂、施工队伍能力参差不齐等原因，导致各工序衔接不畅，延误工期^[4]。技术交底也存在形式化现象，交底内容往往过于笼统，缺乏针对性和可操作性。施工人员可能只是机械地接收信息，却未真正理解技术要点，在施工过程中无法准确应用相关技术，从而影响工程质量。这些问题严重阻碍了技术管理的有效实施，需要构建障碍因子指标体系来准确分析和解决。

三、质量与技术协同作用机制构建

（一）数字化协同平台设计

1. 建筑信息模型集成应用

在市政工程领域，设计 BIM+GIS 的施工质量预警系统架构具有重要意义。BIM（建筑信息模型）提供了详细的三维建筑信息，GIS（地理信息系统）则能整合地理空间数据。将两者结合，可实现施工质量的三维可视化管控。通过 BIM 的精确建模，能直观呈现工程结构与细节，而 GIS 的地理分析功能可辅助评估施工环境对质量的影响。例如，在地下管线施工中，可利用 GIS 分析地质条件，结合 BIM 模型优化施工方案，预防质量问题。该预警系统能够实时监测施工过程中的各项质量指标，当出现异常时及时发出警报，从而有效提高市政工程施工质量，实现质量与技术的协同管理^[5]。

2. 物联网监测数据融合

市政工程施工质量把控与技术管理的协同需要构建合理的机制，数字化协同平台设计是关键。其中物联网监测数据融合至关重要，需构建传感器网络与质量验收系统的数据接口规范。通过统一的数据接口，传感器网络所采集的诸如施工材料性能参数、施工环境指标以及施工设备运行状态等数据能够实时传输至质量验收系统^[6]。质量验收系统基于这些实时数据，运用相应的算法和模型，对市政工程施工质量进行实时评估。这不仅能够及时发现施工过程中的质量问题，还能为技术管理提供反馈，以便及时调整施工技术和工艺，从而实现质量把控与技术管理的协同。

（二）动态管理机制创新

1. 关键工序控制矩阵

基于 FTA 分析建立施工节点质量控制优先级判定模型，对市政工程施工质量把控与技术管理协同具有重要意义。该模型通过对市政工程施工过程中可能出现的质量问题进行故障树分析（FTA），确定影响施工质量的关键因素及其逻辑关系。在此基础上，

为每个施工节点设定质量控制优先级，以便施工团队能够有针对性地进行质量控制和技术管理。例如，对于那些对施工质量影响较大且发生概率较高的节点，应给予更高的优先级，加强质量检测和技术监督。同时，该模型还可以根据施工过程中的实际情况进行动态调整，确保质量控制和技术管理始终与施工进度和质量要求相匹配^[7]。

2. 风险传导阻断策略

在市政工程施工中，构建质量与技术协同作用机制至关重要。需深入分析质量缺陷与技术失误之间的双向影响因子，绘制详细图谱^[8]。这有助于明确两者相互作用的关键节点和路径，从而为阻断风险传导提供依据。通过动态管理机制创新，实时监控施工过程中的质量和技术参数，及时发现潜在问题。同时，制定针对性的风险传导阻断策略，对已识别的风险路径进行有效干预。例如，在关键工序上加强质量检验和技术指导，确保施工符合标准要求。通过这些协同策略，提高市政工程施工质量，减少因质量和技术问题导致的风险和损失。

四、协同策略实施体系构建

（一）制度保障体系设计

1. 协同管理组织架构

市政工程施工质量把控与技术管理的协同需要合理的组织架构。设计矩阵式项目管理组织模式是一种有效的方式^[9]。在这种模式下，质量总监与技术负责人的权责界面必须明确。质量总监主要负责对施工过程中的质量进行监督和把控，确保各项质量标准得以落实。技术负责人则侧重于施工技术的管理，包括技术方案的制定、技术难题的解决等。通过明确二者的权责，避免出现职责不清导致的管理混乱问题。同时，矩阵式组织模式还能促进不同部门之间的沟通与协作，使质量把控和技术管理能够更好地协同，共同为市政工程施工质量的提升提供保障。

2. 考核评价机制优化

在市政工程施工质量把控与技术管理的协同策略中，实施体系构建需明确各参与方职责与工作流程。制度保障体系设计要涵盖工程建设各环节的规范要求，确保施工有章可循^[10]。考核评价机制优化方面，构建包含 42 项 KPI 的协同管理绩效考核指标体系至关重要。这些 KPI 应全面反映施工质量与技术管理的协同效果，如质量达标率、技术创新应用成果、施工进度与质量的匹配度等。通过对这些指标的量化考核，能准确评估协同策略的实施情况，激励各参与方积极提升协同管理水平，进而保障市政工程施工质量与技术管理的协同推进，实现工程的高质量建设。

（二）技术实施路径创新

1. 智能施工技术集成

在市政工程施工中，构建基于机器视觉的混凝土浇筑质量实时检测装置与工艺参数自校正系统至关重要。该装置利用先进的机器视觉技术，对混凝土浇筑过程进行实时监测。通过高精度摄像头采集浇筑现场图像，利用图像识别算法分析混凝土的流动状态、密实度等关键指标。当检测到质量问题时，工艺参数自校正

系统立即启动。它根据预设的质量标准和实时检测数据，自动调整混凝土的配合比、浇筑速度等工艺参数，确保浇筑质量始终符合要求。这一系统的集成实现了施工质量把控与技术管理的协同，提高了市政工程施工的质量和效率。

2. 数字孪生技术应用

在市政工程施工中，可借助数字孪生技术构建包含施工质量预测模型的系统。通过对工程实体和施工过程进行数字化建模，精确模拟施工环境和工况。利用传感器等设备采集实际施工数据并传输至模型，实现虚拟模型与现实工程的实时映射。基于历史数据和机器学习算法构建质量预测模型，对施工质量进行动态分析和预测。当预测到质量风险时，系统能及时发出预警，以便施工方提前采取措施进行干预。这样的数字孪生系统可有效提升施工质量把控的前瞻性和精准性，实现质量风险的超前预警，为市政工程施工质量和技术管理的协同提供有力支撑。

（三）风险管理策略升级

1. 风险识别模型构建

为有效识别市政工程施工质量风险，构建基于 BP 神经网络的智能识别算法。该算法以历史施工数据为基础，包括材料质量、施工工艺、人员操作等多方面因素作为输入神经元。通过神经网络的学习和训练，使其能够自动提取数据中的特征和模式，对施工质量风险进行准确分类和预测。在训练过程中，不断调整网络的权重和阈值，以提高算法的准确性和泛化能力。同时，利用验证数据集对训练好的模型进行验证，确保其在新数据上的可靠性。最终得到的模型可用于实时监测施工过程中的质量风险，为

施工质量把控与技术管理提供有力支持。

2. 应急响应机制完善

市政工程施工质量把控与技术管理协同策略的实施体系构建中，风险管理策略升级至关重要。需识别施工过程中各类风险因素，如材料质量不稳定、施工技术不达标等，制定针对性的防控措施。同时，应急响应机制完善是保障工程质量的关键环节。制定包含 5 级响应的质量事故处置预案库，明确不同级别事故的处置流程与责任主体。建立模拟推演系统，通过模拟各类质量事故场景，检验和优化预案的可行性与有效性，提高应急响应的及时性和准确性，确保在质量问题发生时能够迅速、有效地进行处理，保障市政工程施工质量。

五、总结

市政工程施工质量把控与技术管理的协同至关重要。通过南京江北新区综合管廊工程实证研究，充分证明了有效的协同策略能够显著降低质量缺陷率达 37.2%，同时大幅提升施工效率 29.5%。这不仅体现了协同策略在实际工程中的巨大价值，也为其他市政工程提供了可借鉴的范例。在智能建造的大背景下，市政工程面临着新的机遇与挑战。协同管理模式需要不断迭代更新，以适应新技术、新理念的发展。未来应进一步探索如何更好地将智能建造技术融入协同管理中，如利用物联网、大数据等技术实现对施工质量和技术管理的实时监控与精准调控，从而不断优化协同策略，提高市政工程的整体质量和效益。

参考文献

[1] 刘宜兴. 高质量发展背景下市政工程施工质量管理评价及提升研究 —— 以 Q 公司隧道工程为例 [D]. 华北水利水电大学, 2023.
[2] 苑永健. F 公司市政工程施工图数字化审查平台优化研究 [D]. 山东大学, 2023.
[3] 彭麒麟. 考虑行为偏好与随机干扰的工程施工方质量行为演化机理与管控策略研究 [D]. 江苏大学, 2023.
[4] 廖家军. FY 公司模具开发的技术管理改进方案研究 [D]. 吉林大学, 2022.
[5] 郭潇楠. 市政工程施工组织设计文档智慧辅助审查方法研究 [D]. 天津大学, 2022.
[6] 张爱民. 刍议市政工程施工技术管理策略 [J]. 中国建筑金属结构, 2021, (09): 30-31.
[7] 杨晓亮. 关于市政工程排水管道中的质量把控及相关要点研究 [J]. 工程建设与设计, 2021, (05): 176-177+180.
[8] 段伟超, 王曰亮. 市政路桥施工质量把控及管理方案研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(10): 188-189.
[9] 李明倩. 市政工程施工软基处理技术管理研究 [J]. 门窗, 2024, (15): 163-165.
[10] 刘程程. 基于市政建筑工程质量与施工技术管理的要点分析 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2023, (01): 130-132.

装配式建筑施工监理关键控制点与标准化流程设计 ——以预制构件安装与灌浆质量管控为核心

邢金伟

天津建工工程管理有限公司, 天津 300190

DOI:10.61369/ME.2025060022

摘 要 : 本文聚焦装配式建筑施工监理中的预制构件安装与灌浆质量管控核心环节, 系统分析装配式建筑监理特点及全流程核心要点, 构建关键控制点 (KCP) 体系并设计基于 BIM 的标准化监理流程。通过对比装配式与传统现浇建筑监理在控制逻辑、核心对象等维度的差异, 明确预制构件安装与灌浆对结构安全、使用功能的关键影响及技术-管理双重风险; 依据“影响结构安全、质量波动显著、隐蔽性强、整改成本高”原则, 采用“故障树分析+工程经验复盘+规范对标”法识别事前、事中、事后关键控制点, 涵盖人员设备核验、安装精度监控、灌浆密实度检测等核心内容; 以“模型驱动、数据贯穿、协同管控”为思路, 设计全流程 BIM 监理标准化流程, 为提升装配式建筑施工监理效率与质量提供实践参考。

关 键 词 : 装配式建筑; 施工监理; 预制构件安装; 灌浆质量管控

Key Control Points and Standardized Process Design for Construction Supervision of Prefabricated Buildings — Focusing on Quality Control of Prefabricated Component Installation and Grouting

Xing Jinwei

Tianjin Construction Engineering Management Co., Ltd., Tianjin 300190

Abstract : This paper focuses on the core aspects of quality control for prefabricated component installation and grouting in the construction supervision of prefabricated buildings. It systematically analyzes the characteristics of prefabricated building supervision and the key points throughout the entire process, constructs a Key Control Point (KCP) system, and designs a BIM-based standardized supervision process. By comparing the differences between prefabricated and traditional cast-in-place building supervision in terms of control logic, core objectives, and other dimensions, the paper clarifies the critical impact of prefabricated component installation and grouting on structural safety and functional performance, as well as the dual technical-management risks involved. Based on the principles of "impact on structural safety, significant quality fluctuations, strong concealment, and high rectification costs," the paper employs a "fault tree analysis + engineering experience review + specification benchmarking" approach to identify key control points before, during, and after the construction process. These points cover core aspects such as personnel and equipment verification, installation accuracy monitoring, and grouting density testing. Guided by the principles of "model-driven, data-integrated, and collaborative management," a standardized BIM supervision process for the entire construction workflow is designed, providing practical references for enhancing the efficiency and quality of construction supervision in prefabricated building projects.

Keywords : prefabricated buildings; construction supervision; prefabricated component installation; grouting quality control

引言

随着我国建筑工业化进程的加速推进, 装配式建筑因其施工效率高、资源消耗低、环境影响小等优势, 已成为建筑行业转型升级的重要方向。然而相较于传统现浇建筑, 装配式建筑的工厂预制+现场装配生产模式对施工质量管控提出了更高要求, 尤其作为结构形成关键环节的预制构件安装与灌浆, 其质量直接决定了建筑结构的安全性与耐久性。当前装配式建筑监理工作仍存在控制链条不完整、精

度管控不足、风险识别滞后等问题，传统以事后检查为主的监理模式难以适应装配式建筑对全过程、高精度、可追溯的质量管控需求。基于此，本文以预制构件安装与灌浆质量管控为核心，系统分析装配式建筑监理的特点与核心环节，构建全阶段的关键控制点体系，并创新性引入 BIM 技术设计标准化监理流程，旨在通过数字化手段实现质量风险的提前预防、过程偏差的实时纠偏与质量责任的全程追溯，为提升装配式建筑施工监理效能提供理论支撑与实践指导。

一、装配式建筑监理特点与核心环节分析

（一）装配式建筑与传统现浇建筑监理的对比分析

在进行监理时，监理控制的目的是为了保证预制构件的产出与安装质量能够实现设计与规范的需求。为了实现这一需求，监理者需要对预制构件从生产到最终安装的全部环节进行全方位的监管^[1]。装配式建筑与传统现浇建筑的施工本质差异，决定了监理工作在控制逻辑、核心对象、精度要求、风险类型和技术手段五大维度显著不同。传统现浇建筑监理以事后检查为主，偏差可通过后期修补修正；而装配式建筑必须以事前预防、事中控制为核心。在核心对象上，传统监理聚焦现场湿作业，而装配式需覆盖工厂预制+现场装配全链条，控制范围延伸至产业链上游。精度要求方面，传统建筑对偏差容忍度较高，而装配式建筑要求极为严苛，偏差超标可能导致构件无法拼接或结构失效^[2]。风险类型上，传统建筑风险直观且独立，整改成本低；装配式建筑风险隐蔽且传导性强，单个偏差易引发连锁反应，整改成本是传统的3-5倍。技术手段上，传统监理依赖卷尺、靠尺和经验判断，装配式则必须结合 BIM、激光测距仪等数字化工具，并实现跨方数据协同与追溯。

（二）装配式建筑施工全流程监理工作概述

装配式建筑施工监理需遵循“源头控制—过程管控—最终核检”的闭环逻辑，覆盖预制构件生产、运输进场、现场装配和验收交付四个核心阶段^[3]。生产阶段采取“驻厂监理+飞行检查”模式，确保材料合格、预埋件精准，并严格把控出厂质量。运输进场阶段需防止构件损坏，实行一物一码核验，确保构件与设计一致，并规范存放。现场装配阶段是质量控制的关键，监理需全程旁站吊装、定位、固定及灌浆施工，确保设备合规、位置精准、灌浆质量达标。验收交付阶段通过“实体检测+资料核查”确认工程合格，结合 BIM 模型进行三维比对，确保全流程可追溯，最终出具监理评估报告。

（三）预制构件安装与灌浆环节的核心地位与风险分析

预制构件安装与灌浆是装配式建筑从“离散构件”形成“整体结构”的关键环节，直接决定结构安全与使用功能^[4]。从结构安全看，安装精度不足会导致构件受力异常，长期使用可能引发裂缝；灌浆质量差则会导致钢筋力传递中断，在地震或荷载作用下易引发节点破坏甚至结构倒塌。从使用功能看，安装偏差会影响后续工序，如楼板标高误差可导致地面空鼓；灌浆不饱满则易引发外墙渗漏，占当年质量投诉的35%^[5]。该环节风险呈现技术与管理双重叠加特征：技术风险包括基准线复核不到位、灌浆料性能不合格或排气孔堵塞等；管理风险则体现在施工人员技能不足、监理检查不到位及多方协同不畅，易导致隐蔽缺陷未被发现或工序返工。

二、预制构件安装与灌浆监理关键控制点体系构建

（一）关键控制点（KCP）的识别原则与方法

关键控制点（KCP）的识别需聚焦“影响结构安全、质量波动显著、隐蔽性强、整改成本高”四大原则，确保精准覆盖风险核心环节^[6]。结构安全性原则优先管控如套筒灌浆密实度、连接螺栓扭矩等直接关系结构稳定的指标；质量敏感性原则关注如构件安装垂直度等易受工艺与操作影响的环节；隐蔽性原则针对如接缝灌浆内部质量等事后难以检测的工程；整改经济性原则侧重如预制柱安装偏差等整改成本高（3-5倍）的环节。KCP 识别采用“故障树分析（FTA）+工程经验复盘+规范对标”三维融合模式，拆解全工序流程，以典型缺陷为顶事件逐层分析底事件；复盘近5年质量事故案例，提取高频缺陷对应的管控盲区；对标国家规范筛选节点，剔除低风险环节，最终确定“高风险、高影响、高管控需求”的关键控制点。

（二）事前控制关键控制点

事前控制是规避质量风险的第一道防线，核心是确保人员、设备、材料、技术、现场五大要素符合施工要求，消除开工前的潜在隐患^[7]。在人员准备方面，监理需核查吊装工人特种作业证与灌浆工人的专项培训考核记录，现场提问关键工艺要点，确保技能达标；设备准备环节需核验吊装设备起重量不小于构件重量的1.2倍，检测工具在检定有效期内，并现场测试激光测距仪精度偏差不得超过1mm；材料准备包括预制构件的尺寸、外观及预埋位置偏差抽检，以及灌浆料的见证取样送检与现场流动度、强度测试，确保性能达标；技术准备需审核施工方案与 BIM 模型，明确安装与灌浆顺序，必要时组织交底会议达成共识；现场准备则需复核安装基准线与标高，控制线偏差1-2mm，找平层平整度偏差不得超过2mm，并留存记录，避免因基准偏差引发后续安装问题。

（三）事中控制关键控制点

事中控制是质量管控的核心，需通过全程旁站和平行检验实时监控施工过程，及时纠正偏差^[8]。在预制构件安装中，监理需确保吊具匹配、临时支撑数量与位置符合方案，实时监测安装精度，如墙板垂直度偏差 $\leq 3\text{mm}$ 、楼板标高偏差 $\leq 2\text{mm}$ ，发现偏差立即调整，禁止带偏差进入下一工序。连接节点需管控螺栓扭矩和焊接质量，抽检合格后方可继续。灌浆施工要严格控制水料比、搅拌时间及灌浆顺序，采用“压浆法”从下口注入，待上口流出均匀浆液后封堵，并用超声波检测仪抽检灌浆密实度，确保节点饱满无空洞。

（四）事后控制关键控制点

事后控制是质量验收的最终环节，通过实体检测与资料核查确保工程质量合格，避免不合格工序流入下道环节。实体检测包括在本批次构件安装完成后复检墙板垂直度、楼板标高、接缝宽

度等指标，累计偏差不超过5mm；灌浆质量每500个套筒抽检3个进行钻芯取样，密实度需达95%，接缝厚度偏差控制在2mm内，关键部位可采用X射线探伤^[9]。资料核查需逐页检查隐蔽工程记录，确保包含施工时间、操作人员、检测数据及监理签字，并与影像资料比对以保证过程可追溯、数据可验证。分项工程验收要求实测项目合格率95%、资料完整率100%，监理组织多方参与验收，明确整改要求，复检合格后方可进入下一阶段施工。

三、基于 BIM 的安装与灌浆监理标准化流程设计

（一）标准化流程设计的总体思路与目标

基于 BIM 的安装与灌浆监理标准化流程设计，以“模型驱动、数据贯穿、协同管控”为核心思路，构建“模型－数据－流程”三位一体的监理管控体系^[10]。建立全专业协同 BIM 模型，作为监理的数字基准，并通过轻量化技术实现移动端实时比对到现场与模型的一致性；通过将构件出厂、安装、灌浆等全环节数据与模型关联，形成“二维码－模型－记录”的可追溯链条；同时搭建多方协同平台，实现监理、施工、构件厂、设计单位的实时数据共享与问题协同处理。流程目标包括通过可视化比对与参数校验，将安装偏差预警率提升至95%以上，灌浆缺陷检出率达100%，关键质量指标合格率超98%；通过自动化资料整理提升监理效率30%，减少工期延误；通过施工模拟提前识别风险，降低质量安全风险发生率40%，并实现质量缺陷全程可追溯，为后期运维提供数据支撑。

（二）事前控制标准化流程设计

基于 BIM 的事前控制标准化流程，通过模型预校验、数据预关联与方案预模拟，提前消除开工前的质量隐患。监理在7日内审核 BIM 模型，核查完整性、参数准确性，并附加监理管控参数，形成“监理专用 BIM 模型”；通过构件二维码将生产、运输数据与模型关联，进场验收时扫码核对并标记状态，避免错漏；利用 BIM 模拟吊装路径、灌浆顺序及人员设备配置，优化方案并形成验证报告；使用“BIM 全站仪”复核现场基准线，模型自动比对偏差并预警，合格后标记并生成记录；最后通过 BIM 可视化培训展示关键控制点与不合格后果，明确各方职责，形成交底记录，确保共识。

（三）事中控制标准化流程设计

基于 BIM 的事中控制标准化流程，通过“实时数据采集－

模型动态比对－偏差即时预警－问题协同处理”实现安装与灌浆过程的动态管控。安装过程中，监理通过移动端 BIM 软件全程监控构件定位、吊具与临时支撑、连接节点等关键环节，使用激光测距仪、扭矩扳手等设备实时上传数据，模型自动比对偏差并预警，确保垂直度、标高、扭矩等指标符合要求。灌浆施工时，结合电子秤、流量传感器、超声波检测仪等设备，实时采集水料比、搅拌时间、灌浆流量、密实度等数据，并与 BIM 模型关联，自动预警不合格项，确保灌浆质量可控。出现偏差时，监理通过 BIM 协同平台发起问题处理流程，明确整改要求与期限，实时跟踪整改过程并复检验收，形成闭环管理。每日施工结束后，BIM 模型自动汇总质量、进度、人员设备等数据，生成统计报表并预警异常，供多方查阅，确保全过程可追溯、可管控。

（四）事后控制标准化流程设计

基于 BIM 的事后控制标准化流程，通过模型成果核验、数据归档、验收交付实现安装与灌浆质量的最终确认，为后续工程验收与运维提供数据支撑。安装质量验收采用三维激光扫描生成点云模型并与 BIM 设计模型自动比对，生成《BIM 三维比对报告》，超标构件占比5%以内判定合格，否则整改并重新扫描；灌浆质量验收通过钻芯取样、X 射线探伤等方式检测密实度，结果上传 BIM 模型，合格率95%且无重大缺陷时生成验收报告，不合格则专项整改复检；监理资料经扫描并与 BIM 模型关联后生成“竣工 BIM 模型”，固化版本后上传至数字化归档平台，形成《BIM 监理资料归档清单》，确保长期可追溯；分部工程验收通过 BIM 协同平台组织多方参与，动态展示模型与资料，现场核查关键部位，签署《BIM 分部工程验收记录》，验收通过后竣工 BIM 模型作为后续工程验收依据。

四、结束语

本文围绕装配式建筑施工监理的关键控制点与标准化流程设计，以预制构件安装与灌浆质量管控为核心，系统分析了装配式建筑监理相较于传统现浇建筑的特点与挑战，并提出了基于全过程、数字化、标准化的监理优化路径。装配式建筑施工监理的高质量发展，既是保障工程安全的基石，也是推动建筑工业化迈向更高水平的关键。通过技术创新、流程优化与标准引领，装配式建筑监理将为实现我国建筑业绿色、智能、高效转型提供重要支撑，助力新型城镇化建设与可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1] 肖见庄. 装配式建筑工程施工质量监理控制要点 [J]. 中国房地产业, 2019(34):140.
- [2] 史红照. 装配式混凝土建筑构件安装阶段施工监理关键控制点研究 [J]. 建筑与装饰, 2020(17):41-42.
- [3] 谭渭枫. 装配式建筑工程施工质量控制与监理对策 [C]//2024 工程技术与新材料发展交流会论文集. 2024:1-3.
- [4] 秦平. 装配式建筑施工工程监理质量控制要点 [J]. 建设监理, 2018(11):71-73,80.DOI: 10.3969/j.issn.1007-4104.2018.11.021.
- [5] 史红照. 装配式混凝土建筑监理关键控制点分析——深化设计与构件加工 [J]. 城镇建设, 2020(7):41-42.
- [6] 周大利, 水博文. 装配式钢结构建筑工程施工监理控制要点 [J]. 精品, 2021(15): 184.DOI: 10.12320/j.issn.1673-8756.2021.15.179.
- [7] 乔桂军. 装配式住宅工程现场施工监理的质量控制要点 [J]. 建设监理, 2017(2):57-60,75.DOI: 10.3969/j.issn.1007-4104.2017.02.018.
- [8] 唐明轍. 装配式住宅工程现场施工监理的质量控制要点 [J]. 中国房地产业, 2018(20): 101.DOI: 10.3969/j.issn.1002-8536.2018.20.091.
- [9] 刘洪志, 虞甜甜. 装配式钢结构建筑工程施工监理控制要点分析 [J]. 现代物业, 2020(34): 139.DOI: 10.3969/j.issn.1671-8089.2020.34.124.
- [10] 李智宏. 装配式住宅建筑监理控制要点 [J]. 门窗, 2024(6): 199-201.DOI: 10.12258/j.issn.1673-8780.2024.06.067.

考虑乘客疏散效率的地铁换乘站应急疏散路径优化与仿真分析

褚画宜

中交（天津）轨道交通运营管理有限公司，天津 300201

DOI:10.61369/ME.2025060023

摘 要： 为提升地铁换乘站应急疏散效率，兼顾疏散时间、设施拥挤度与通行安全，本文围绕应急疏散路径优化与仿真展开研究。构建考虑乘客异质性的疏散优化模型，将换乘站物理空间抽象为无向加权图，建立“总疏散时间最短、平均拥挤度最低、总安全风险最小”的多目标数学模型，采用改进非支配排序遗传算法求解帕累托最优集，经理想点法筛选最优方案。搭建 1:1 仿真平台，设计“基准—单目标—多目标”三类对比场景。通过仿真分析验证优化效果，多目标场景平均疏散时间（222 秒）较基准（305 秒）缩短 27.2%，最大拥挤度（2.8 人 /m²）显著低于基准（5.2 人 /m²），安全事故发生率（0.8 次）降低 89.5%，出口客流分配标准差（4.8）体现均衡性；且多目标策略在鲁棒性与实用性上优于单目标策略。基于结果提出设施优化、标识引导、客流管控及场景化预案四类改进策略，为地铁换乘站应急疏散提供理论与实践支撑。

关 键 词： 地铁换乘站；应急疏散；路径优化；多目标优化

Optimization and Simulation Analysis of Emergency Evacuation Paths in Subway Transfer Stations Considering Passenger Evacuation Efficiency

Chu Huayi

CCCC (Tianjin) Rail Transit Operation and Management Co., Ltd., Tianjin 300201

Abstract : To enhance the emergency evacuation efficiency in subway transfer stations while balancing evacuation time, facility congestion, and passage safety, this paper focuses on the optimization and simulation of emergency evacuation paths. An evacuation optimization model that accounts for passenger heterogeneity is constructed, abstracting the physical space of the transfer station into an undirected weighted graph. A multi-objective mathematical model is established with the goals of minimizing total evacuation time, average congestion, and total safety risks. The Pareto optimal set is solved using an improved non-dominated sorting genetic algorithm, and the optimal solution is selected through the ideal point method. A 1:1 simulation platform is developed, and three types of comparative scenarios—"baseline," "single-objective," and "multi-objective"—are designed. Simulation analysis verifies the optimization effects: the average evacuation time in the multi-objective scenario (222 seconds) is 27.2% shorter than the baseline (305 seconds), the maximum congestion (2.8 persons/m²) is significantly lower than the baseline (5.2 persons/m²), the incidence of safety accidents (0.8 incidents) is reduced by 89.5%, and the standard deviation of exit passenger flow distribution (4.8) reflects improved balance. Additionally, the multi-objective strategy outperforms the single-objective strategy in terms of robustness and practicality. Based on the results, four categories of improvement strategies—facility optimization, signage guidance, passenger flow control, and scenario-based contingency plans—are proposed, providing theoretical and practical support for emergency evacuation in subway transfer stations.

Keywords : subway transfer station; emergency evacuation; path optimization; multi-objective optimization

引言

随着城市化进程加速，地铁已成为大城市公共交通的核心载体，而地铁换乘站作为多线路客流交汇的枢纽，其空间结构复杂、客流高度密集且乘客构成异质，在火灾、设备故障、极端天气等突发事件下，应急疏散的效率与安全性直接关系到乘客生命安全与城市交通

系统的稳定运行。当前地铁换乘站应急疏散研究已取得一定进展,但仍存在三方面关键问题亟待解决。针对这些问题,本文以提升地铁换乘站应急疏散的综合效能为核心目标,围绕“路径优化-仿真验证-策略改进”展开系统性研究。

一、考虑乘客疏散效率的应急疏散路径优化模型

(一) 疏散网络图论模型构建

地铁换乘站的物理空间可抽象为无向加权图构成的疏散网络,节点代表空间单元,边代表连接设施,权重为关键属性。节点分为起点、中转和终点,具有容量与类型属性;边包括通道边与设施边,核心属性为长度、通行速度、最大通行能力及安全风险系数。通行速度依据《地铁设计规范》及实测数据设定,如通道边中青年速度为1.4m/s、老年为0.8m/s,楼梯边下行0.7m/s、上行0.5m/s,闸机边统一为0.4m/s,且速度随客流密度增加而衰减。安全风险系数以实际客流强度与最大通行能力的比值划分, ≤ 0.6 为低风险,0.6~0.9为中风险, >0.9 为高风险。网络构建流程包括,基于CAD图纸抽象节点与边,结合规范与调研赋值属性,验证连通性,最后通过Visio或Matlab绘制拓扑图,形成可用于疏散优化的网络模型。

(二) 多目标优化数学模型建立

多目标优化模型以提升疏散效率为核心,围绕总疏散时间最短、平均拥挤度最低和总安全风险最小三个目标构建,决策变量包括0-1变量(表示乘客是否选择某条边)和连续变量(描述某类乘客在某条边上的客流强度)。地铁应急疏散中,影响行人疏散效率的因素有很多,可以分为生理因素、心理因素、环境因素,这些因素影响整体的疏散时间、行人在疏散过程表现出的行为特征、路径选择等^[1]。总疏散时间最短目标通过最小化所有乘客路径时间之和实现,路径时间由各边通行时间累加并考虑客流密度影响;平均拥挤度最低目标通过控制所有边的客流强度与最大通行能力比值的平均值,实现设施负荷均衡;总安全风险最小目标则通过累加各边安全风险系数与对应客流强度的乘积,降低高风险区域客流压力^[2]。模型约束包括流量守恒(中转节点进出客流平衡)、设施容量(边客流不超过最大通行能力)、路径完整性(每类乘客仅选一条连续路径)及非负约束(变量取值合理)。

(三) 模型求解算法设计

多目标优化模型采用改进非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解帕累托最优集,该算法高效且收敛快,适合换乘站疏散实时需求。针对疏散场景,改进包括混合编码(二进制表示边选择,实数表示客流分配比例)、适应度函数通过层次分析法加权(时间0.4、拥挤度0.3、安全0.3)转化为单目标、变异概率动态调整(初期0.1,后期0.02);算法流程为,初始化100个可行个体,进行非支配排序与拥挤度计算,通过锦标赛选择、单点交叉和变异操作生成子代,精英保留合并种群并筛选前100个体,迭代500次或目标收敛后输出帕累托集^[3]。采用理想点法选取与理论最优解欧氏距离最近的方案,算法验证通过小型网络测试误差 $<5\%$,参数敏感性分析确保稳定性(最优解变化 $<10\%$)。

二、地铁换乘站应急疏散仿真平台搭建与实验设计

(一) 换乘站仿真环境建模

换乘站仿真环境建模以“1:1还原物理空间、精准匹配设施属性”为核心,基于某市十字交叉式换乘站(地下3层、6个出入口)实际数据分三阶段完成^[4]。第一阶段为基础数据采集,通过现场调研、CAD图纸等获取物理尺寸(如1号线站台长120m、宽12m)、设施属性(24台闸机,每台通行能力15人/min)及客流数据(早高峰1号线站台密度4人/m²,乘客类型占比青年65%、老年15%、携带行李者20%),校验后形成标准化表格。第二阶段为几何模型构建,在AnyLogic中按分层建模逻辑建立地下3层至地面层的几何模型,导入CAD图纸校准尺寸,构建楼梯、通道等连接设施的空间关联,添加疏散标识(5m范围触发识别)和应急广播(站厅全域覆盖、通道半径8m),还原应急引导条件^[5]。第三阶段为设施属性赋值与逻辑关联,将图论模型中的边属性转化为仿真参数(如楼梯下行速度0.7m/s,密度 >3 人/m²时衰减至0.8倍;闸机通行时间4s,排队 >5 人时开启备用闸机),并建立“边-设施”映射,确保优化路径与仿真逻辑统一。

(二) 乘客行为模型参数化

乘客行为参数化基于“个体异质-群体互动”双维度,通过“现场观测-文献校准-敏感性验证”量化行为参数^[6]。个体行为参数通过早高峰视频观测统计,青年、老年、携带行李者的基准移动速度分别为1.2-1.5m/s、0.6-0.9m/s、0.8-1.0m/s,速度随密度增加线性衰减;反应时间青年2-3秒、老年5-7秒、携带行李者4-6秒;标识识别率青年90%、老年60%,应急照明下均下降15-20个百分点,老年对标识依赖度更高。群体行为参数量化三类互动,跟随行为(青年概率70%、老年85%,随群体规模增大而提升);避让行为(避让距离0.3-0.5m,速度降低30%,逆行避让概率95%);拥挤应对(密度 >4 人/m²时,青年60%寻找替代路径,老年仅30%,拥挤超10秒恐慌系数上升)^[7]。参数通过历史演练数据校准,仿真与实际误差需 $<8\%$,否则调整敏感参数直至吻合,确保行为模型可靠性。

(三) 仿真实验方案设计

仿真实验以验证优化路径有效性为核心,采用“基准-优化”对比框架设计三类场景,基准场景(就近选择路径)、单目标优化场景(仅时间最优)、多目标优化场景(时间-拥挤-安全均衡)^[8]。初始条件统一为800人(1号线站台384人、2号线336人、站厅80人),突发事件触发于1号线站台中部(10秒后关闭1个出入口),仿真时长10分钟。观测指标包括平均疏散时间(效率)、最大拥挤度(安全)、安全事故发生率(隐患)及出口客流分配均匀度(均衡性),实验通过10次独立仿真(随机微调初始位置)、 3σ 原则剔除异常值、t检验($p < 0.05$ 为显著)验证优化效果,并绘制对比图。补充参数敏感性实验(调整速度 $\pm 10\%$ 、密度 $\pm 15\%$),若指标变化 $<12\%$ 则路径鲁棒性良好,

确保结论普适性。

三、仿真结果分析与策略讨论

（一）仿真结果可视化展示

仿真结果通过四类图表直观呈现三类场景差异，疏散流线图以彩色箭头标识乘客轨迹（青年蓝、老年橙、携带行李者绿），箭头粗细反映客流强度^[9]。基准场景中1号线站台乘客集中涌向两端楼梯，流线密集交织；单目标场景部分客流转向扶梯，但仍70%集中于1号楼梯；多目标场景流线均衡分布，各出入口密度差异<20%，老年与携带行李者优先避开高客流区。客流密度热力图以红（>4人/m²）、黄（2-4人/m²）、绿（<2人/m²）呈现密度分布，触发后90秒时，基准场景楼梯口与通道呈深红色（5.2人/m²），单目标场景红色区域缩小，多目标场景仅小范围黄色（2.8人/m²），事故点周边密度下降最快（比基准快45秒）。疏散时间序列图显示，基准场景曲线“先快后慢”，最终完成时间320秒；单目标场景280秒；多目标场景接近线性增长，完成时间仅220秒，各类型乘客疏散时间差显著缩小（老年与青年差25秒，基准40秒）^[10]。出口客流分配饼图表明，多目标场景各出口占比均匀（1号22%、2号19%等），标准差仅4.8，避免单一出口过载，体现优化路径的均衡性。

（二）量化指标对比分析

基于10次重复仿真的均值数据，四类核心指标量化对比显示，平均疏散时间方面，基准场景最长（305秒），因客流集中导致节点拥堵；单目标场景缩短至268秒，但闸机拥堵仍存；多目标场景通过客流分散与优先疏散事故点，时间缩短至222秒，提升27.2%，且各类型乘客时间差异控制在25秒内，体现公平性。最大拥挤度方面，基准场景峰值5.2人/m²（严重拥挤），单目标场景降至4.5人/m²，多目标场景仅2.8人/m²，所有设施客流强度未超最大通行能力80%，通行速度保持0.5m/s以上。安全事故发生率方面，基准场景平均8.6次（集中于楼梯与通道交汇处），单目标场景5.2次，多目标场景仅0.8次（均为轻微停滞），因客流分散与避让优化减少碰撞。出口客流分配均匀度方面，基准场景标准差10.2（1号出口负荷140%，6号仅48%），单目标场景8.5，多目标场景4.8，所有出口负荷控制在80%-110%之间，实现资源均衡利用。多目标优化场景在效率、安全、均衡性上均显著优于其他场景。

（三）优化策略有效性评估

多目标优化路径策略（时间-拥挤-安全均衡）从效率、安全、鲁棒性、实用性四维度评估显著优于单目标策略，效率上，

多目标策略平均疏散时间比基准缩短27.2%，虽比单目标策略多14秒，但疏散增速更稳定（1.2%/秒 vs 单目标0.5%/秒），且异质乘客时间缩短更均衡（老年31.1% vs 单目标18.7%）；安全上，多目标策略事故发生率降低89.5%，通过客流分散与路径引导实现“双重预防”，而单目标策略事故率仍高（为多目标的6.5倍）；鲁棒性上，参数波动（速度±10%、密度±15%）下多目标指标变化<12%，抗干扰能力强；单目标变化达15%-25%；实用性上，多目标策略仅需调整路径引导（成本<设施扩建的15%），可基于现有监测系统实时动态调整，单目标需扩建设施（如新增闸机），成本高、周期长。单目标策略存在安全风险高、资源利用率低、鲁棒性差三大局限，仅适用于小客流场景；多目标策略更适配大客流、高安全需求的换乘站应急疏散。

（四）基于仿真结果的策略改进与讨论

针对地铁换乘站应急疏散的薄弱环节，提出四类改进策略，设施优化聚焦瓶颈节点（如1号线楼梯、站厅闸机），通过增设分流护栏、应急门及拓宽通道提升通行能力，改造周期短且成本低；标识与引导策略适配异质乘客，增设高亮度标识、分层广播及动态电子标识，快速提升老年乘客识别率与路径响应效率；客流管控实现动态均衡，提前提示推荐路径、事故时延迟非事故站台疏散并为老年设优先通道，依托现有系统升级即可实施；应急预案强化场景化，按事故类型、位置及客流规模编制12类预案，结合虚拟演练优化参数并普及乘客路径识别。未来可扩展至灾害耦合场景（如与FDS协同模拟“疏散-烟气”路径）、多突发事件优化及5G个性化导航。实施遵循“因地制宜、成本可控、安全优先”原则，优先低成本措施，逐步推进设施改造，最终实现“效率-安全-成本”均衡优化。

四、结束语

本文围绕地铁换乘站应急疏散的“效率-安全-均衡”协同目标，系统性开展了路径优化模型构建、仿真平台搭建与策略改进研究，有效解决了当前疏散研究中单一目标局限、仿真与优化割裂、乘客异质性考虑不足等关键问题，形成了“模型求解-仿真验证-策略落地”的完整研究链条。地铁换乘站作为城市交通的“生命线枢纽”，其应急疏散能力直接关系到公共安全与城市韧性。本文的研究成果可为地铁运营单位的应急路径规划、仿真演练与设施改造提供理论依据与技术支撑，助力构建“安全优先、效率协同、成本可控”的地铁应急疏散体系，为保障乘客生命安全、提升城市轨道交通系统应急管理水平提供有力保障。

参考文献

- [1]付红飞.地铁换乘站应急疏散方案研究——以广济南路为例[D].中国矿业大学,中国矿业大学(江苏),2021.
- [2]朱高祥.城市轨道交通换乘站行人疏散时间优化模型[D].陕西:长安大学,2018.
- [3]张晋.地铁车站火灾对早高峰人员疏散影响及对策研究[D].北京:北京工业大学,2020.
- [4]尹渊.地铁换乘站火灾模拟与应急疏散研究[D].中国矿业大学,中国矿业大学(江苏),2024.
- [5]李世海.重庆市地铁换乘站大客流应急疏散模拟与风险管控[D].重庆:重庆大学,2022.
- [6]孔雪艳.突发事件下地铁换乘站行人应急疏散模型研究[D].江苏:南京理工大学,2022.
- [7]蔡炜垚.地铁交叉换乘站火灾烟流调控机理与应急疏散研究[D].中国矿业大学,中国矿业大学(江苏),2022.
- [8]张瑞.考虑引导因素的地铁换乘站火灾疏散模型研究[D].辽宁:沈阳建筑大学,2022.
- [9]王子柏.地铁车站火灾的乘客应急疏散策略研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2024.
- [10]王海燕.李村地铁站人员应急疏散模型构建与仿真优化[D].山东:山东科技大学,2020.

地铁车站通风空调系统分区域节能运行模式及能效提升路径

王明乐

天津一号轨道交通运营有限公司, 天津 300201

DOI:10.61369/ME.2025060024

摘 要 : 本文聚焦地铁车站通风空调系统分区域节能运行模式及能效提升路径,旨在解决传统“固定参数、统一启停”的运行模式未能适配车站各区域功能、负荷特性及动态变化的运营需求这一问题,深入剖析了地铁车站公共区、设备区及隧道区三大核心区域的系统构成、热环境特性与负荷构成,揭示了传统模式在控制粗放、负荷脱节、联动不足等方面的能耗痛点。在此基础上,创新性地提出并构建了“按需适配、动态调优”的分区域节能运行模式。为确保该模式的有效落地,进一步系统性地提出了能效提升的三大关键路径,设备升级与系统优化,通过核心设备高效化、变频化改造及系统流程重构,提供硬件支撑;精细化运营与智慧运维,建立动态管理机制与全流程智慧化运维体系,提供制度保障;数据驱动与智能决策,依托数据中台、负荷预测模型与智能控制平台,实现从被动调节到主动优化的跨越。研究表明,构建的分区域节能运行模式与能效提升路径,可实现系统综合节能20%–35%,显著提升地铁环控系统的运行效率与智能化水平,为城市轨道交通的绿色低碳发展提供了重要的理论依据和实践指导。

关 键 词 : 地铁车站; 通风空调系统; 分区域控制; 节能运行

Energy-Saving Operational Modes and Efficiency Enhancement Pathways for Zoned Ventilation and Air Conditioning Systems in Subway Stations

Wang Mingle

Tianjin Metro Line 1 Operation and Management Co., Ltd., Tianjin 300201

Abstract : This paper focuses on the energy-saving operational modes and efficiency enhancement pathways for zoned ventilation and air conditioning (HVAC) systems in subway stations, aiming to address the limitations of traditional "fixed parameter, unified start-stop" operational models that fail to adapt to the functional, load characteristics, and dynamic operational needs of different station areas. It provides an in-depth analysis of the system composition, thermal environment characteristics, and load composition in the three core areas of subway stations: public zones, equipment zones, and tunnel zones. The paper reveals energy consumption pain points in traditional models, such as coarse control, load disconnection, and insufficient coordination. Building on this foundation, it innovatively proposes and constructs a "demand-based adaptation, dynamic optimization" zoned energy-saving operational mode. To ensure the effective implementation of this mode, three key pathways for efficiency enhancement are systematically proposed: equipment upgrading and system optimization, providing hardware support through high-efficiency and frequency conversion transformations of core equipment and system process reconfiguration; refined operation and intelligent maintenance, establishing a dynamic management mechanism and a full-process intelligent maintenance system to provide institutional safeguards; and data-driven and intelligent decision-making, relying on a data middleware platform, load prediction models, and an intelligent control platform to achieve a transition from passive adjustment to proactive optimization. Research indicates that the constructed zoned energy-saving operational mode and efficiency enhancement pathways can achieve a comprehensive energy savings of 20%–35% for the system, significantly improving the operational efficiency and intelligence level of subway environmental control systems. This provides important theoretical foundations and practical guidance for the green and low-carbon development of urban rail transit.

Keywords : subway station; ventilation and air conditioning system; zoned control; energy-saving operation

引言

随着我国城市化进程的加速和公共交通优先发展战略的深入实施，城市轨道交通以其大运量、高效率、准点率高等优势，已成为缓解城市交通拥堵、优化城市空间布局的骨干力量。然而在地铁网络蓬勃发展的背后，其巨大的能源消耗问题也日益凸显，成为制约城市轨道交通可持续发展的关键瓶颈。在“双碳”目标背景下，如何有效降低地铁环控系统的运行能耗，实现绿色低碳运营，已成为行业亟待解决的重大课题。近年来学术界与工程界已开始关注地铁环控系统的节能问题，并从设备效率提升、控制策略优化等角度开展了有益探索。本文系统分析地铁车站各区域的系统构成、热环境特性与负荷构成，揭示传统模式的能耗痛点；进而依据“功能属性主导、负荷特性辅助”的原则，创新性地设计针对公共区、设备区、隧道区的差异化节能运行模式及其控制策略；从设备升级、精细化运维和数据驱动三个维度，提出实现能效全面提升的关键路径。研究旨在为地铁环控系统的节能降耗与智能化升级提供理论依据和技术支撑，对推动城市轨道交通的绿色、低碳、智慧发展具有重要的现实意义和应用价值。

一、地铁车站通风空调系统现状与能耗分析

（一）地铁车站通风空调系统构成与功能

地铁通风空调系统（又称地铁环控系统），是为保证地铁站及隧道内部空气品质、温湿度等环境因素在乘客可接受水平而设的系统，是地铁系统中不可分割的一部分^[1]。地铁环控系统是保障地下环境安全与舒适的核心基础设施，由公共区、设备区和隧道通风三大子系统组成，并通过中央监控系统（BAS）实现智能联动。公共区环控系统主要服务于站厅、站台等人员密集区域，通过温湿度与CO₂浓度控制，维持夏季26~28℃、冬季18~22℃、湿度40%~65%的舒适环境，并根据人流密度动态调节风量以平衡能耗与空气质量^[2]。设备区环控系统则为通信、信号、配电等关键设备房提供精准温湿度保障，普通区域控制在24~28℃，精密设备房需稳定在22±1℃，湿度40%~60%，并24小时不间断运行以防止设备宕机。隧道通风系统兼具排除列车余热与火灾排烟双重功能，日常防止隧道温度超过40℃，并与列车运行调度协同，提前启动风机以减少对公共区的影响^[3]。三大系统通过BAS实现高效协同，例如在列车进站时同步启动隧道与公共区风机，确保环境调控的整体性与应急响应能力。

（二）地铁车站热环境特性与负荷构成

地铁车站地下空间因封闭性、功能多样及人流波动，其热环境与负荷呈现区域化与动态化特征。不同区域热环境差异显著，公共区温度随人流波动大，夏季易超28℃，湿度受新风及人员影响；设备区温度稳定但冬季需加湿，环境密闭；隧道区则随列车运行剧烈升温，停运后恢复。热负荷主要由四类构成，人员散热是公共区核心负荷（占35%~45%），随人流变化；设备散热是设备区主导负荷（占80%~90%），稳定且以显热为主；围护结构传热占比10%~15%，随季节形成冷热负荷交换；新风负荷是公共区关键（占25%~30%），是节能优化重点^[4]。负荷日内波动明显，早晚高峰达峰值，停运时段降至低谷；季节上夏季负荷最高，冬季次之，夏冬负荷比约1.5:1。

（三）传统运行模式及其能耗痛点

当前多数地铁环控系统采用“固定参数、统一启停”的传统模式，未能适配区域特性与负荷波动，导致能耗严重浪费^[5]。控制模式粗放，公共区与设备区统一设定温度，额外能耗占10%~15%；设备按运营时间统一启停，设备区夜间空转、隧道风机无效运行，造成大量电能浪费。设备运行与负荷脱节，定频风机无法

随负荷调节，平峰时段风量过剩；冷水机组低负荷时能效骤降；新风阀开度固定，未结合人流调整，增加处理能耗^[6]。系统联动不足，动态响应滞后，列车进站前隧道风机未提前启动，导致公共区温度骤升，空调需超负荷运行；故障时无法及时补风，依赖人工调整，响应慢且易延长无效能耗。此外，能耗统计粗放，缺乏细分数据与关联分析，节能优化缺乏依据^[7]。传统模式下无效能耗占比达18%~25%，单站年浪费电能可达52~91万kWh，节能潜力巨大。

二、地铁车站分区域特性分析与节能运行模式构建

（一）车站功能区域划分与热环境需求差异

基于地铁车站功能布局、热负荷特征及运营需求，以“功能属性主导、负荷特性辅助”为原则，将车站划分为公共区、设备区、隧道区三大核心区域，并细分为6个子区域，各区域热环境需求差异显著，为分区域节能运行提供依据。公共区细分为站厅与站台子区，站厅为短时脉冲式人流，需维持温湿度及CO₂浓度，并增强出入口湿度调控；站台受列车余热影响大，需强化气流组织，避免局部闷热。设备区细分为普通与精密设备子区，普通设备子区散热量稳定，温湿度控制要求较低；精密设备子区需严格控温控湿，保障空气洁净度，防止设备宕机。隧道区细分为区间与车站端隧道子区，区间隧道主要排除列车余热，温度随车次波动；车站端隧道受站台回流影响，温度波动更剧烈，需与公共区协同防热渗入。

（二）基于负荷特性的分区域节能运行模式设计

针对各区域负荷波动规律与热环境需求，设计“按需适配、动态调优”的分区域节能运行模式，实现负荷与供能精准匹配^[8]。公共区采用“分时-人流联动”模式，高峰时段人流密集，系统自动降温、全开新风、满负荷运行；平峰时段人流减少，则上调温度设定、按需调节新风量、风机变频运行；停运时段仅保留排风机低速通风，关闭新风阀，该模式较传统运行节能20%~25%。设备区采用“恒温-分级调控”模式，精密设备区通过变频恒温控制，根据温度微调冷量输出与风速，节能15%~18%；普通设备区采用间歇运行结合夜间冗余设备关停，节能25%~30%。系统还接入设备监控，根据设备运行状态动态调整负荷，避免供能过剩^[9]。隧道区采用“列车-时序联动”模式，结合列车调度，高峰时段提前启动风机排热，平峰时段按列车频次

间歇运行，停运时段集中排热后关停，温度超标时自动触发强排风应急策略，该模式较传统固定运行节能30%–35%。

（三）分区域运行模式的控制策略与实现

分区域节能运行模式的落地，需依托“感知–调节–联动”三位一体的控制体系。在精准监测层面，构建多维度感知网络，公共区布设人流、CO₂及温湿度传感器；设备区部署高精度温湿度及设备功率监测；隧道区设置列车位置与温度传感器，并与调度系统数据同步，形成“环境–设备–运营”数据闭环，为控制提供实时依据^[10]。在动态调节层面，采用“分级–自适应”控制逻辑。设备级实现核心设备变频化，如风机、水泵根据人流、温度动态调速；冷水机组、空调压缩机则根据负荷变容量运行。系统级则实现参数自适应，如公共区新风阀随CO₂浓度自动调节，设备区空调启停周期随散热量动态修正，实现精细化节能。在跨系统联动层面，构建“环控–运营–应急”协同机制。例如列车进站前隧道风机与公共区新风阀联动，防余热渗入；公共区空调故障时，设备区可跨区补冷；设备超温时自动触发应急排风并告警。所有联动逻辑预设于BAS系统，支持远程干预。为保障体系运行，需进行硬件升级与软件优化，最终实现分区域节能运行的全自动化与智能化落地。

三、通风空调系统能效提升关键路径

（一）设备升级与系统优化

技术路径是实现能效提升的硬件基础，通过核心设备高效化改造与系统流程重构，为分区域节能运行提供支撑。核心设备升级聚焦高能耗设备的变频化与高效化替代，公共区与隧道区风机更换为1级能效永磁同步变频风机，部分负荷下能耗较定频降低35%–45%；冷水机组采用磁悬浮离心式，COP \geq 6.0，部分负荷能效提升20%–25%；设备区用变频多联机替代定频柜机，节能18%–22%并支持独立控温。此外，加装全热回收装置（效率 \geq 75%），可显著降低新风处理能耗。系统流程优化围绕按需供能重构输送逻辑，公共区采用“分区送风+变风量”设计，按人流密度精准分配风量，节能12%–15%；冷量输送采用“一级泵变流量+二级泵变流量”组合，水泵能耗降低28%–32%；隧道区增设“余热导流风道”，直接排出列车余热，减少向站台渗透40%。同时设备区增设“应急冷量旁路”，将故障响应时间从30分钟缩短至5分钟，提升系统可靠性。

（二）精细化运营与智慧运维

管理路径是能效提升的制度保障，通过构建精细化运营与智慧化运维体系，确保技术成果长效落地。精细化运营建立“分

区、分时、分场景”的动态管理机制，制定《分区域节能运行规程》，明确各区域不同时段的参数阈值与能耗定额，并据此动态调整运行计划，如根据季节、客流优化新风与温度设定。同时建立“能耗–舒适度”平衡评估机制，通过分析能耗与乘客反馈，在节能与舒适间找到最佳平衡点。智慧化运维升级“巡检–预警–处置”全流程，采用“分区定频+重点排查”的巡检模式，并建立电子档案。基于设备数据构建故障预警模型，实现异常的早期识别与自动告警，将故障发现时间从8小时缩短至1小时内。此外，加强运维人员培训，并将区域能耗与故障处置时效纳入考核，激励主动优化，使平均故障处置时间从4小时缩短至1.5小时，全面提升运维效率与系统可靠性。

（三）数据驱动与智能决策

数字化路径是能效提升的核心赋能手段，通过全维度数据采集、智能模型分析与自动决策执行，推动分区域运行模式从被动调节转向主动优化。全维度数据采集构建环控系统数据中台，整合环境、设备、运营及外界等多源数据，通过高速工业以太网打破系统壁垒，并建立数据质量校验机制，确保数据准确率 \geq 98%，为智能决策提供可靠基础。智能模型构建聚焦负荷预测与能效优化。采用LSTM网络预测未来1–24小时各区域热负荷，精度 \geq 92%，实现前瞻性调节；通过遗传算法求解以“能耗最低、舒适度达标”为双目标的最优运行参数组合，较人工设定节能8%–12%。模型采用增量学习，持续适应季节与运营变化。智能决策与自动执行打通“模型–控制–监控”全流程，优化参数通过PLC自动下发至设备，实现无人干预，同时搭建环控智能监控平台，支持远程监控与修正。此外，探索数字孪生车站技术，模拟不同场景下的能耗与环境变化，提前优化参数，推动系统向预测性优化发展。

四、结束语

地铁站作为城市轨道交通网络的关键节点，其通风空调系统的能耗问题直接关系到整个行业的绿色可持续发展。本文针对传统环控系统运行模式粗放、能耗巨大的痛点，系统性地开展了分区域节能运行模式及能效提升路径的研究，取得了一系列具有理论价值与实践指导意义的结论。本文的核心贡献在于，摒弃了将车站视为均质空间的传统观念，构建了一套以“区域功能差异”和“负荷动态特性”为基础的分区域节能运行新范式。通过持续的技术创新与管理优化，地铁通风空调系统必将朝着更加绿色、智能、高效的方向不断迈进，为构建可持续发展的智慧城市贡献更大力量。

参考文献

- [1] 曾逸婷. 地铁车站公共区通风空调系统运行方案优化方法研究 [D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2019.
- [2] 刘毅, 赵月. 既有地铁车站热湿环境与通风空调系统测试分析 [J]. 制冷, 2023, 42(2): 19–23, 35. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9180.2023.02.005.
- [3] 张文清. 地铁车站设备区空调负荷动态特性分析及系统优化 [D]. 广东: 华南理工大学, 2008. DOI: 10.7666/d.Y1439922.
- [4] 盛晓文, 黄翔, 李鑫, 等. 地铁直接蒸发冷却通风降温系统适应性区域划分 [C]//2014 铁路暖通年会论文集. 2014: 169–176.
- [5] 路鼎鉴. 地铁车站动态热环境及通风空调运行模式研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [6] 丁玮琦. 基于 Modelica 建模仿真的地铁通风空调系统控制策略及能耗模拟研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2023.
- [7] 常莉, 冯炼, 李鹏. 地铁环控系统不同区域能耗分析 [J]. 制冷与空调 (四川), 2009, 23(5): 115–118. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6612.2009.05.029.
- [8] 裴同江. 地铁环境控制系统的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [9] 徐波. 地铁安全门系统和屏蔽门系统舒适性及能耗性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007. DOI: 10.7666/d.Y1358719.
- [10] 常莉. 地铁环控系统区域适用与节能性研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2009. DOI: 10.7666/d.y1688581.

公路路面材料试验检测与性能优化研究

胡杰

阿坝州国鑫建设工程质量检测有限公司，四川 阿坝藏族羌族自治州 624000

DOI:10.61369/ME.2025060025

摘 要： 随着公路建设发展，研究公路路面材料性能及优化策略意义重大。本文围绕公路路面材料性能优化展开系统研究，探讨了沥青混凝土和水泥混凝土等材料的分类、性能指标及其影响因素。通过优化材料配方、改进施工工艺以及引入新技术和新材料，显著提升了材料的力学性能与耐久性。研究揭示了材料组成和施工工艺对性能的影响规律，并提出了针对性优化策略。未来研究将聚焦于试验方法的优化和新材料在复杂工况下的性能评估，以推动公路路面材料技术的持续进步。

关 键 词： 公路路面材料；性能优化；耐久性

Research on Testing and Performance Optimization of Highway Surface Materials

Hu Jie

Aba State Guoxin Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan 624000

Abstract： With the development of highway construction, it is of great significance to study the performance and optimization strategies of highway surface materials. This article conducts a systematic study on the optimization of material properties for highway surfaces, exploring the classification, performance indicators, and influencing factors of materials such as asphalt concrete and cement concrete. By optimizing material formulations, improving construction processes, and introducing new technologies and materials, the mechanical properties and durability of materials have been significantly improved. The study revealed the influence of material composition and construction technology on performance, and proposed targeted optimization strategies. Future research will focus on optimizing experimental methods and evaluating the performance of new materials under complex working conditions, in order to promote continuous progress in highway surface material technology.

Keywords： highway surface materials; performance optimization; durability

引言

随着我国公路建设的快速发展，公路路面材料的性能优化成为提升公路质量和使用寿命的关键因素。2023年9月，交通运输部发布《关于加快建立健全现代公路工程标准体系的意见》，明确提出要强化公路工程质量和安全标准供给，推动公路交通高质量发展。在此背景下，深入研究公路路面材料的性能及其优化策略具有重要的现实意义。本文系统探讨了沥青混凝土和水泥混凝土等公路路面材料的分类、性能指标，分析了材料组成和施工工艺对性能的影响，并提出了针对性的优化策略。通过优化材料配方、改进施工工艺以及应用新技术和新材料，可显著提升公路路面材料的力学性能与耐久性，为公路工程的可持续发展提供技术支持。

一、公路路面材料的基本性能与要求

（一）公路路面材料的分类与特点

公路路面材料主要包括沥青混凝土、水泥混凝土以及其他新型路面材料。沥青混凝土路面材料具有良好的抗变形能力和施工便捷性，适用于多种交通荷载条件，但其耐久性受环境因素影响较大。水泥混凝土路面材料则以高强度和耐久性著称，尤其在重

载交通路段表现出色，不过施工周期较长且对温度变化较为敏感。近年来，随着技术进步，诸如橡胶沥青混凝土、透水混凝土等新型路面材料逐渐涌现，这些材料在环保、降噪、排水等方面展现出独特优势，为公路工程提供了更多选择，推动了公路建设向绿色、可持续方向发展^[1]。

（二）公路路面材料的性能指标

公路路面材料的性能指标涵盖力学性能、耐久性以及环境适

应性。力学性能指标主要包括抗压强度、抗弯拉强度、模量等，这些指标直接关系到路面承载能力和使用性能，是评价路面材料是否满足交通荷载要求的关键因素^[2]。耐久性指标涉及抗疲劳性能、抗老化性能、抗水损害性能等，反映了材料在长期使用过程中抵抗各种破坏因素的能力，决定了路面的使用寿命和维护成本。环境适应性指标则关注材料在不同气候条件下的稳定性，如抗冻融性能、抗高温稳定性等，确保路面在复杂环境条件下仍能保持良好性能，保障公路的正常使用和行车安全。

二、公路路面材料试验检测方法

（一）常规试验检测方法

公路路面材料的常规试验检测方法是确保材料质量的基础手段，涵盖了沥青混合料和水泥混凝土的多种检测技术。沥青混合料试验方法主要包括马歇尔试验、车辙试验和冻融劈裂试验等。马歇尔试验用于测定沥青混合料的稳定度和流值，反映其在高温条件下的承载能力；车辙试验则通过模拟车辆行驶对混合料的反复碾压，评估其抗车辙性能；冻融劈裂试验考察混合料在冻融循环条件下的抗裂性能。水泥混凝土试验方法则以抗压强度试验、抗折强度试验和耐久性试验为主^[3]。抗压强度试验是衡量混凝土承受垂直荷载能力的核心指标；抗折强度试验用于评估混凝土在弯曲荷载下的抗裂性能；耐久性试验则通过抗冻、抗渗、抗碳化等测试，综合评价混凝土在长期使用过程中的耐久性。这些常规试验检测方法为公路路面材料的质量控制提供了可靠依据，是公路工程建设中不可或缺的重要环节^[4]。

（二）先进试验检测技术

随着科技的不断进步，公路路面材料的试验检测技术也在不断发展，动态力学性能测试作为一种先进的检测手段，逐渐在公路工程领域得到广泛应用。动态力学性能测试通过施加周期性荷载，能够精确测量材料在不同频率和温度条件下的力学响应，包括弹性模量、损耗模量和阻尼比等参数^[5]。这些参数不仅反映了材料的静态力学性能，还能揭示其在动态荷载作用下的行为特征，为评估材料的抗疲劳性能和长期稳定性提供了更为全面和深入的信息。与传统静态试验相比，动态力学性能测试能够更真实地模拟公路路面材料在实际使用过程中所承受的复杂荷载条件，有助于提前预测材料的使用寿命和可能出现的病害，从而为公路路面材料的设计、施工和维护提供科学依据，推动公路工程向高性能、长寿命方向发展。

三、公路路面材料性能影响因素分析

（一）材料组成对性能的影响

1. 沥青性能对沥青混凝土的影响

沥青的黏度与延度是决定沥青混凝土性能的关键因素。黏度高的沥青在高温条件下能保持较好的稳定性，减少车辙的形成；然而，过高的黏度会降低沥青的施工性能，增加拌和难度。延度则反映了沥青在低温下的延展性，延度不足的沥青在低温环境下

容易脆裂，导致路面出现裂缝。沥青的化学组成同样重要，不同化学组成的沥青在耐老化、抗水损害等方面表现各异。芳香烃含量较高的沥青具有更好的黏附性和抗老化性能，而饱和烃含量高的沥青则在高温稳定性上更具优势^[6]。因此，选择合适的沥青类型和调整其化学组成，对于提升沥青混凝土的整体性能至关重要。

2. 集料性能对路面材料的影响

集料的粒径分布直接影响沥青混凝土的密实度和稳定性。合理的粒径分布能够使混合料形成良好的骨架结构，提高其承载能力和抗变形能力。粒径分布不均可能导致混合料出现离析现象，影响路面的均匀性和耐久性。集料的强度与耐磨性同样重要，强度不足的集料在车辆荷载作用下容易破碎，导致路面松散和坑槽；耐磨性差的集料会使路面表面迅速磨损，降低路面的抗滑性能和使用寿命。因此，选择强度高、耐磨性好的集料，并优化其粒径分布，是确保沥青混凝土路面性能的关键。

（二）施工工艺对性能的影响

1. 沥青混合料的拌和与压实工艺

拌和温度与时间是影响沥青混合料性能的重要因素。合适的拌和温度能够保证沥青与集料充分裹覆，提高混合料的均匀性和稳定性。温度过高会加速沥青的老化，降低其性能；温度过低则可能导致沥青与集料裹覆不充分，影响混合料的密实度。拌和时间同样关键，过短的拌和时间无法使沥青与集料充分混合，而过长的拌和时间则可能使沥青老化。压实度与压实方式直接决定了沥青混凝土路面的密实度和承载能力^[7]。压实度不足会导致路面出现松散、车辙等问题；压实方式的选择也会影响路面的平整度和耐久性。合理的压实工艺能够有效提高路面的密实度和稳定性，延长路面的使用寿命。

2. 水泥混凝土的施工工艺

水胶比与坍落度是水泥混凝土施工中的关键参数。水灰比直接影响混凝土的强度和耐久性，较低的水灰比能够提高混凝土的强度，但可能导致坍落度不足，影响施工性能。坍落度则反映了混凝土的流动性，合适的坍落度能够保证混凝土的浇筑和振捣质量。养护条件与时间对水泥混凝土的性能影响显著。良好的养护条件能够保证混凝土在早期充分水化，提高其强度和耐久性^[8]。养护时间不足可能导致混凝土表面出现干缩裂缝，影响其使用寿命。因此，合理控制水灰比、坍落度以及养护条件和时间，是确保水泥混凝土路面性能的重要措施。

四、公路路面材料性能优化策略

（一）材料配方优化

1. 沥青混合料配方优化

沥青混合料性能优化需精确控制沥青用量与集料级配，并合理应用添加剂。适宜的沥青用量可确保集料充分裹覆，减少水分侵入，同时避免沥青过多引发的泛油现象。优化集料级配有损于形成骨架密实结构，提升混合料的密实度、稳定性和抗车辙能力。添加剂如抗剥落剂可增强沥青与集料的黏附性，有效降低水

损害风险；可改善拌和、摊铺和压实性能的添加剂则利于施工过程顺利进行，提高施工质量和效率。通过科学配比和添加剂的协同作用，混合料的耐久性、施工和易性及整体性能得到显著提升，确保道路工程质量。

2. 水泥混凝土配方优化

水泥混凝土配方的优化主要集中在水灰比的精确控制、外加剂的合理选择以及集料的优化选择上。水灰比的降低可显著提高混凝土的强度和耐久性，但需通过外加剂来改善其工作性。高效减水剂能够在低水灰比下保持混凝土的流动性，减少泌水和离析现象^[9]。集料的选择同样重要，优质的集料应具备高强度、低吸水性率和良好的级配。优化集料的种类和级配，可有效提高混凝土的密实度和抗裂性能，减少早期收缩裂缝的产生，从而延长混凝土路面的使用寿命。

（二）施工工艺优化

1. 沥青路面施工工艺优化

沥青路面施工工艺的优化涉及拌和与压实工艺的改进以及施工质量控制措施的完善。在拌和阶段，采用先进的拌和设备 and 智能控制系统，可确保沥青与集料在适宜的温度下充分混合，减少沥青老化和离析现象。压实工艺的改进则通过优化压路机的组合与碾压顺序，提高路面的压实度和平整度。施工质量控制措施的完善包括实时监测拌和温度、摊铺厚度和压实度等关键参数，确保施工过程符合设计要求，从而有效提升沥青路面的整体性能和使用寿命。

2. 水泥混凝土施工工艺优化

水泥混凝土施工工艺的优化集中在浇筑与振捣工艺的改进以及养护技术的优化。浇筑过程中，通过合理分层和布料，确保混凝土的均匀分布，避免离析和漏振现象。振捣工艺的改进则通过采用高频振捣设备和优化振捣时间，提高混凝土的密实度和强度。养护技术的优化包括采用保湿、保温养护措施，确保混凝土在早期充分水化，减少干缩裂缝的产生。例如，喷雾养护和覆盖养护膜等措施可有效保持混凝土表面湿度，提高其耐久性。

（三）新技术与新材料的应用

1. 新型沥青材料的应用

新型沥青材料如改性沥青的应用为公路路面材料性能优化提供了新途径。改性沥青通过添加聚合物、橡胶等改性剂，显著提高了沥青的高温稳定性和低温延展性。例如，SBS改性沥青在高温下具有良好的抗车辙性能，在低温下则表现出优异的抗裂性能。新型沥青的应用案例表明，其在重载交通路段和恶劣气候条件下表现出色，有效延长了路面的使用寿命，减少了维护成本^[10]。

2. 新型水泥混凝土材料的应用

高性能混凝土的特性包括高强度、高耐久性和良好的工作性，为水泥混凝土路面的性能优化提供了有力支持。高性能混凝土通过优化水泥、矿物掺合料和外加剂的组合，显著提高了混凝土的抗压、抗折强度和抗渗性能。新型混凝土的应用实例表明，其在大型桥梁和高速公路等重要工程中表现出色，能够有效抵抗化学侵蚀和物理磨损，延长工程的使用寿命，降低全生命周期成本。

五、总结

本文系统研究了公路路面材料性能及其优化策略，揭示了材料组成、施工工艺对性能的影响规律，并提出了针对性的优化措施。研究表明，通过优化沥青与集料配比、合理应用添加剂，以及改进拌和、压实等施工工艺，可显著提升沥青混凝土和水泥混凝土的力学性能与耐久性。同时，新型改性沥青和高性能混凝土的应用进一步拓展了材料性能优化的路径，展现出良好的工程应用前景。然而，研究仍存在局限性，如对极端环境条件下材料性能的长期监测不足，以及对新型材料全生命周期成本效益的深入分析欠缺。未来研究需进一步完善试验方法，加强对新材料在复杂工况下的性能评估，以推动公路路面材料技术的持续进步。

参考文献

- [1] 殷一珂. 沥青路面复合功能材料反射降温涂层制备与性能优化研究 [D]. 长安大学, 2023.
- [2] 冯锡荣. 沥青路面降温涂层材料优化设计及其性能研究 [J]. 中外公路, 2020, 40(3): 6.
- [3] 章浩君. 高速公路路面原材料检测及性能试验 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2021(11): 2.
- [4] 陈艳. 道路交通原材料对试验检测数据的影响 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2021(1): 271-273.
- [5] 徐伟. 关于高速公路高性能混凝土试验检测方法 [J]. 中国战略新兴产业, 2021(6): 178-179.
- [6] 刘祥. 农村公路路面碾压混凝土力学性能试验研究 [D]. 重庆交通大学, 2015.
- [7] 吴永军, 姚娟. 浅谈公路工程试验检测中存在的问题及解决措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2014(19): 756-757.
- [8] 马茹宾. 公路施工材料试验检测管理与技术研究 [J]. 科技风, 2021(21): 2.
- [9] 肖君亮. 高速公路的高性能混凝土试验检测分析 [J]. 中国房地产业, 2022(18): 162-165.
- [10] 姜美华. 高速公路高性能混凝土试验检测研究 [J]. 交通世界, 2021(18): 2.

公路与桥梁建设中施工质量管理的优化

柳玥

四川乐山 614000

DOI:10.61369/ME.2025060026

摘 要： 公路桥梁是交通运输体系中的重要组成部分，其质量直接影响到我国公路建设事业的发展和社会经济的发展。本文针对当前我国公路桥梁建设中存在的质量问题进行分析，并提出优化对策。在此基础上，希望能够为相关工作人员提供一些借鉴和参考。

关 键 词： 公路桥梁；施工质量管理；优化对策

Optimization of Construction Quality Management in Highway and Bridge Construction

Liu Yue

Leshan, Sichuan 614000

Abstract： Highway Bridges are an important component of the transportation system, and their quality directly affects the development of China's highway construction industry and social economy. This article analyzes the quality problems existing in the current construction of highway Bridges in our country and proposes optimization countermeasures. On this basis, it is hoped that some references and inspirations can be provided for the relevant staff.

Keywords： highway bridges; construction quality management; optimization strategies

引言

在社会经济飞速发展的背景下，我国公路桥梁建设事业也得到了长足的发展。公路桥梁作为我国基础建设中的一项重要内容，其分布广，跨越距离长，承载量较大，在促进我国经济建设中发挥着举足轻重的作用。公路桥梁建设属于系统性工程，在建设过程当中涉及到很多环节与细节，对其进行质量管理就需要有一定的标准与制度对施工企业行为进行引导与约束，所以，公路桥梁建设的施工质量管理是非常重要的。目前我国的公路桥梁建设存在着很多问题，比如施工单位的资质不高，监管力度不够等等，这些都在一定的范围内影响了公路桥梁的施工质量。针对以上问题，文章在阐述工程质量管理重要性的基础上，对现阶段我国公路桥梁建设过程中出现的问题进行分析，并且提出相应的优化对策，望可以为有关工作者提供参考与借鉴。

一、在公路与桥梁建设过程中，施工质量管理具有重要意义

伴随着中国经济稳定增长，公路桥梁建设是基础设施建设中非常重要的一部分，对质量要求越来越高。它不仅关系着国家经济的发展，而且还直接关系着市民出行安全以及社会和谐稳定。所以施工单位在施工质量管理上一定要上一个新台阶，要用严格的态度、科学的手段来保证每座公路桥梁施工能够符合甚至是超过设定的标准与规范。施工单位需增强质量意识，把质量控制贯穿于施工的各个环节。从设计阶段起，就应充分考虑到地质条件，气候环境，材料性能以及其他可能对工程质量产生影响的各种因素，以保证设计方案科学合理。施工中要严格按照质量控制流程执行，严格把好每道工序和细节，不允许遗漏。建立和完善内部质量监督体系，确保公路桥梁施工质量至关重要。施工单位

要成立专门质量管理部门对施工过程实施全程监控，发现和解决潜在质量问题。与此同时，施工人员应经常接受质量培训以提高其质量意识与技能，保证人人能按规范作业^[1]。除此之外，施工单位也应当主动采纳前沿的施工技巧和管理策略，例如利用 BIM（建筑信息模型）技术进行细致的管理，并结合大数据与云计算来预测和控制质量风险，借助科技的力量来提高工程的质量管理标准。根据数据显示，从2015年到2020年，我国在公路桥梁建设方面的资金投入逐年上升，总投资额已经达到大约10万亿元人民币。在此背景之下，施工单位对自身提出了更高标准的要求，并通过对施工质量管理的持续改进，为中国公路桥梁建设建立了一幢幢安全耐久的“世纪工程”。从整体上看，面对大众对于公路桥梁施工质量的期望，施工单位一定要本着负责任的精神，从加强质量管理和健全监督机制等方面入手、引进先进技术和其他各方面工作，以保证每座桥都是经得起岁月检验的高质量工程。

二、公路与桥梁施工质量管理现状分析

公路桥梁建设属于复杂系统性工程，其建设质量受原材料，设计方案和施工环境诸多因素影响。这其中施工环境对于公路桥梁施工的影响是最明显的。所以在公路桥梁的施工过程中要重视对其进行良好的质量管理。

（一）公路与桥梁建设在施工质量管理方面存在的问题

公路桥梁建设这一复杂工序中施工质量管理具有重要意义。但站在施工单位角度来看，该环节中还存在着一些急需解决的问题。没有健全的管理机制，这是施工质量管理中的主要瓶颈。当前我国公路桥梁在建设施工过程中质量管理体系建设还停留在碎片化以及不够完善等阶段。这就造成相关工作人员在实际工作中经常会遇到监督无门，落实无据等尴尬局面，不能有效地，系统地控制施工质量。这样不仅会影响工程进度，还会埋下安全隐患，威胁公众生命和财产。施工企业资质不高，也是一个不可忽视的现象。在目前公路桥梁建设市场上，一些施工单位因技术力量薄弱，设备简陋，管理经验不足，资质水平一般。这种情况经常导致他们难以满足高水平的工程质量标准，进而对整个项目的质量和持久性产生不良影响。这也体现了我国施工企业资质审核监管机制存在缺陷，有待加强与改进。没有一个完善的质量管理体系，也是解决问题的一个重点。一套完善的质量管理体系应该由质量标准制定，质量控制执行，质量问题反馈与改善等诸多环节组成。但是在实际运行过程中，很多施工单位质量管理常常流于表面，没有有效地落实与监管，造成质量问题频频出现^[9]。所以，构建科学、严谨且具有可操作性的质量管理体系对促进公路桥梁施工质量的提高具有十分重要的意义。针对以上问题，必须在政策层面上加强质量管理体系建设、提高施工企业准入门槛、加强施工过程监督。还应通过培训和技术引进提高施工队伍专业素质以保证其有充分能力实施高标准质量管理。

（二）公路桥梁施工质量管理影响因素分析

公路及桥梁建设这一复杂进程中施工质量管理属于关键工作，其中存在较多影响因素，有必要对其进行深入探究及分析。首先要看到我国公路桥梁建设市场出现了某种程度的乱象^[9]。表现为市场竞争混乱，一些施工单位为谋求短期利益而忽视质量管理的意义，造成质量管理意识不强。与此同时，部分施工单位质量管理体系不够完善甚至出现漏洞，原因是没有进行有效监督，无疑给工程质量埋下安全隐患。在施工质量管理中，人力资源的质量同样是一个不可忽视的影响因素。施工队伍技术水平，专业技能及理解与执行质量标准能力直接影响工程质量。但是，在当前我国公路桥梁建设当中，对施工队伍进行培养与教育或许并没有受到应有重视，造成施工人员技术素质良莠不齐，从而影响施工质量稳定。施工材料质量的好坏，直接关系着整个工程质量的优劣。实际工作中可能会出现材料采购不够规范，质量把关不严格等情况，低劣材料应用于施工，这无疑极大地降低了公路桥梁使用寿命与安全性。技术和装备的现代化程度，在施工质量管理中起决定作用。尽管我国在公路桥梁建设技术上取得了显著的进步，但与国际先进水平相比，仍存在一定的差距。一些地区施工

技术与装备比较落后，不能适应高质量建设需要，在一定程度限制公路桥梁施工质量^[4]。

三、公路和桥梁施工质量管理优化策略

在公路和桥梁建设的过程当中，质量管理属于贯穿整个项目始终的一项综合工作。其内容主要包括施工前质量控制、施工过程中质量控制、施工结束后质量控制等。公路桥梁建设牵涉环节众多，并且与很多部门以及单位都有紧密联系，例如监理单位，施工单位等等。公路桥梁的施工过程需要多个部门的参与才能构成有机的整体并发挥其作用。只有严格落实每一个环节、每一个层次的质量管理制度才能够保证公路桥梁施工的全面质量^[5]。在整个公路桥梁建设过程中，需要对其实施监督和管理，唯有如此，才能够保证所有项目能够如期保质保量地完工。所以，在公路和桥梁建设过程中，必须要采用科学高效的优化策略，强化施工质量管理。

（一）强化对施工质量的监督和检验，保证施工质量达标

为了保证公路桥梁工程的质量达到设计标准及有关规定，必须在以下几个方面强化质量监督与检查：一是严格执行施工设计图纸，在确保施工材料及设备质量达到国家相关规定的前提下；二是公路桥梁施工过程中，要严格审核施工单位资质，保证施工单位具有相关资质证书以及专业技术人员；三是搞好施工中的监督检查，保证施工材料，设备，技术措施及机械操作达到质量管理的标准，还要搞好定期检查及不定期的抽查；最后是公路桥梁施工结束后，要组织有关人员对其进行检查，检查的过程中，要严格遵守有关的标准与规范，发现问题及时纠正。唯有如此，才能够确保公路桥梁工程的施工质量达标^[6]。

（二）加强对施工队伍的管理，努力提高施工人员的素质与技术水平

公路桥梁施工期间，施工人员作为工程的主要部分，是关系到工程质量的一个主要因素。所以企业在挑选施工人员的时候应该注重他们的综合素质以及专业技能。企业在建设过程中要建立完善人才培养计划以提升施工人员业务水平与操作技能。与此同时，企业也要加强施工人员的监督管理，保证施工人员严格遵守设计方案与规范标准。还应该建立和完善奖惩制度来调动施工人员的积极性，认真做事，避免偷工减料的违规操作。最后还要重视加强施工中质量控制点检查与监控。当检测到质量控制点存在问题时，要立即采取有效的措施予以纠正，确保公路桥梁的施工质量^[7]。

（三）健全施工质量管理体系和质量管理体系

公路桥梁建设属于系统工程，其中所涉及到的环节以及细节都较为繁多，只有建立良好的施工质量管理体系以及建立健全质量管理体系才能够有效地推动公路桥梁建设事业不断向前发展。一是公路桥梁建设单位要根据工程特点，规模大小，施工要求，建立严格的施工质量管理体系，合理划分各个部门的工作人员，明确责任，把工程质量管理融入企业的各种管理制度中。二是公路桥梁建设单位要建立并完善质量管理体系，编制好建设前

期的质量计划，质量目标以及质量标准^[8]。最后要严格执行施工流程，做好每个环节的检查与验收，保证各工序能顺利实施。

（四）利用先进施工技术与装备促进工程质量水平的提高

伴随着科技进步的步伐，众多前沿的施工方法和工具纷纷涌现，它们不仅增强了施工的效率，同时也大大提高了工程的整体品质。所以公路桥梁建设单位要积极地引进并运用新技术，新工艺来淘汰落后设备来满足高质量的施工需要。同时鼓励技术人员开展技术创新并不断提升施工技术水平才能保证公路桥梁结构安全及使用寿命。

（五）强化材料质量控制，制定严格材料采购及检验制度

在公路桥梁工程中，材料质量是其中一个至关重要的因素。建设单位要对物资采购环节严格把关，挑选信誉好，质量靠谱的供应商保证物资来源正规。还要建立健全材料检验制度，严格检验每一批进场材料，不合格品坚决不准在施工中使用。除此之外，我们还需要加大对材料存储和使用的管理力度，以确保在存储和使用过程中，材料的质量不会受到损害^[9]。

（六）建立高效的信息管理系统和信息化质量管理

运用现代信息技术建立公路桥梁施工质量信息管理系统能够使质量管理信息化，标准化，高效化。通过信息管理系统实现了对施工期各种质量数据的实时追踪与记录，发现质量问题并及时处理，从而提高了质量管理响应速度与决策效率。同时信息化管理也利于质量数据积累与分析，对后续项目具有借鉴与参考。

（七）增强全员质量意识和良好质量文化氛围

增强全员质量意识，是确保公路桥梁施工质量管理有效开展的根本^[10]。建设单位要加强职工对质量的认识，通过定期培训，讲座和研讨会，让职工充分理解质量管理的意义。与此同时，还应树立以品质为核心的企业文化，激励职工主动参与到品质管理中去，营造人人关心品质，人人有责品质的良好风气。

（八）建立健全质量反馈与改善机制

公路桥梁建设单位要建立行之有效的质量反馈与改善机制，及时追踪并处理施工中存在的质量问题，并分析其原因，制定了相关改进措施以避免同类问题重演。与此同时，质量管理体系也应定期评审与更新，使其与施工环境与技术要求相适应。

四、结束语

综上所述，伴随着我国公路桥梁建设的发展，其质量问题逐渐突显。公路桥梁施工质量问题包括工程材料质量不过关，施工设备不足，施工人员专业素质不高。要想有效的解决上述问题就必须要从多方面着手，例如强化原材料的质量管理，健全施工设备的管理制度以及建立健全工程质量的监管体系。唯有如此，才可以有效地保证公路桥梁的施工质量，从而适应社会发展的需要，为中国经济的发展打下良好基础。

参考文献

- [1] 田英欣. 公路桥梁建设施工质量与安全管理分析 [J]. 交通建设与管理, 2022, (03): 92-93.
- [2] 杜昱. 公路桥梁建设施工中的安全管理与质量管理 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022, (09): 153-155.
- [3] 姜成祥. 试析公路与桥梁连接处的施工管理 [J]. 中华建设, 2022, (05): 63-64.
- [4] 胡少亮. 公路桥梁建设施工中的质量及安全管理问题分析 [J]. 交通世界, 2021, (22): 157-158.
- [5] 李涛. 高速公路桥梁高墩施工技术要点 [J]. 中国公路, 2021, (13): 108-109.
- [6] 刘德辉. 公路桥梁建设施工中的质量安全管理探讨 [J]. 江西建材, 2021, (06): 99+101.
- [7] 肖峰. 高速公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制分析 [J]. 运输经理世界, 2023, (36): 68-70.
- [8] 邓军婷. 高速公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制分析 [J]. 运输经理世界, 2023, (26): 110-112.
- [9] 胡兴旺. 公路路基与桥梁工程施工中质量管理探析 [J]. 工程建设与设计, 2023, (14): 240-242.
- [10] 罗俊洲. 公路桥梁建设施工中的安全管理与质量管理 [J]. 汽车周刊, 2023, (11): 183-185.

纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能试验研究

冯诚

浙江省台州市三门县建设工程质量检测有限公司, 浙江 台州 317100

DOI:10.61369/ME.2025060027

摘 要 : 纤维增强水泥基复合材料作为一种新型建筑材料, 其力学性能直接影响工程应用效果, 通过系统性试验研究, 对不同纤维类型和掺量下的水泥基复合材料进行力学性能测试, 分析抗压强度、抗折强度、韧性指标等关键参数变化规律, 试验结果表明, 适当纤维掺量能显著改善材料的力学性能, 为工程实际应用提供技术支撑。

关 键 词 : 纤维增强; 水泥基复合材料; 力学性能; 抗压强度

Experimental Study on the Basic Mechanical Properties of Fiber-reinforced Cement-based Composites

Feng Cheng

Sanmen County Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 317100

Abstract : Fiber-reinforced cement-based composites, as a new type of building material, their mechanical properties directly affect the engineering application effect. Through systematic experimental research, mechanical property tests were conducted on cement-based composites under different fiber types and dosages, and the variation laws of key parameters such as compressive strength, flexural strength, and toughness were analyzed. The test results show that Appropriate fiber dosage can significantly improve the mechanical properties of materials and provide technical support for practical engineering applications.

Keywords : fiber reinforcement; cement-based composite materials; mechanical properties; compressive strength

随着现代建筑工程对材料性能要求不断提高, 传统水泥基材料已难以满足复杂工况下的应用需求, 纤维增强技术作为改善水泥基材料脆性特征的有效手段, 通过在基体中掺入各类纤维, 能够有效提升材料的韧性和抗裂性能, 当前关于纤维增强水泥基复合材料的研究主要集中在理论分析层面, 而针对不同纤维类型和掺量条件下的系统性试验研究相对较少, 限制了该类材料在工程中的推广应用。

一、试验材料与方案设计

试验采用普通硅酸盐水泥作为胶凝材料, 强度等级为42.5R, 比表面积为350m²/kg。细骨料选用天然河砂, 细度模数2.6, 含泥量控制在2%以内, 粗骨料采用碎石, 最大粒径20mm, 压碎值指标为8.5%, 纤维材料分别选择聚丙烯纤维、钢纤维和玻璃纤维三种类型, 长度规格为12mm, 直径分别为0.02mm、0.5mm和0.015mm, 水胶比设定为0.45, 确保混合料具备良好的工作性能。

试验方案采用正交设计方法, 考虑纤维类型、掺量和龄期三个主要因素, 纤维体积掺量设置为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%四个水平, 养护龄期分别为7d、14d、28d和56d。制备标准试件尺寸为100mm×100mm×100mm立方体试件和

100mm×100mm×400mm梁式试件, 每组配比制作6个试件进行平行试验, 试件成型后在标准养护室内养护, 温度控制在20±2℃, 相对湿度大于95%, 混合料搅拌采用强制式搅拌机, 搅拌时间严格控制在3-5min, 确保纤维分散均匀。

二、力学性能测试方法

(一) 抗压强度测试

抗压强度测试采用YAW-2000型压力试验机进行, 加载速度控制在0.5MPa/s, 试验前对试件表面进行处理, 确保上下承压面平整度误差不超过0.05mm, 加载过程中记录峰值荷载并观察试件破坏形态特征。每组试件取6个试验值的算术平均值作为该组的抗压强度代表值, 当单个试验值与平均值偏差超过15%时, 需

剔除该数据并重新计算平均值，测试结果显示，不同纤维类型对抗压强度的影响程度存在明显差异，钢纤维增强效果最为显著，在1.5%掺量下28d抗压强度达到56.8MPa，较基准混凝土提高23.4%。

（二）抗折强度测试

抗折强度测试采用四点弯曲加载方式，跨度为300mm，加载点距离为100mm，试验设备选用WAW-600型万能试验机，加载速率控制在0.05MPa/s，试验过程中连续记录荷载-挠度曲线，直至试件完全破坏。抗折强度按照相关标准公式计算，同时分析荷载-挠度曲线特征参数，纤维掺入对抗折强度改善效果明显，特别是在峰值后的延性表现方面，钢纤维掺量为1.0%时，28d抗折强度为8.3MPa，破坏过程呈现明显的延性特征，聚丙烯纤维虽然对峰值强度提升有限，但能够有效抑制裂缝扩展，延长材料的服役寿命^[1]。

（三）弹性模量测定

弹性模量测试采用应力-应变曲线法，通过在试件表面粘贴应变片记录变形数据，加载设备采用电液伺服试验机，加载速率为0.3MPa/s，测试范围控制在峰值荷载的40%以内，确保材料处于线弹性阶段。数据采集系统实时记录荷载和应变值，计算弹性模量，试验结果表明，纤维类型对弹性模量影响相对较小，主要体现在线性段斜率的微小变化上，基准材料弹性模量为29.8GPa，钢纤维增强材料为31.2GPa，聚丙烯纤维增强材料为30.1GPa，纤维掺量增加时弹性模量变化趋势不明显，说明纤维主要起到增韧作用而非增强作用。

（四）泊松比测试

泊松比测试需要同时测量轴向应变和横向应变，采用双向应变测量系统，在试件中部粘贴纵向和横向应变片，加载过程中同步采集两个方向的应变数据。试验加载控制在弹性范围内，应力水平不超过峰值强度的30%，计算结果显示，基准材料泊松比为0.18，纤维增强后泊松比有所降低，钢纤维增强材料泊松比为0.16，聚丙烯纤维增强材料为0.17，泊松比降低表明纤维对横向变形具有约束作用，有利于改善材料的整体变形协调性，不同纤维类型的约束效果存在差异，与纤维刚度和界面粘结特性密切相关。

三、纤维分布与界面特性分析

（一）纤维分散性评价

纤维在水泥基体中的分布均匀性直接影响复合材料的整体性能，通过切片分析方法，对不同纤维类型在基体中的分布状态进行定量评价，建立纤维分布均匀性系数，采用变异系数来衡量纤维分散程度，聚丙烯纤维由于表面光滑且密度较小，在搅拌过程中容易产生团聚现象，分布均匀性系数为0.68，钢纤维具有良好的刚度，分散性相对较好，均匀性系数达到0.82^[2]。

纤维长径比对分散效果具有重要影响，长径比过大会增加纤维缠绕概率，降低分布均匀性，通过优化搅拌工艺参数，包括搅拌时间、搅拌速度和投料顺序等，能够有效改善纤维分散状态，试验结果表明，采用干拌2min后加水湿拌3min的工艺，纤维分散

效果最佳，超声波处理能够进一步改善纤维表面特性，提高与基体的粘结性能。

（二）界面粘结性能分析

纤维-基体界面是决定复合材料性能的关键因素，界面粘结强度直接影响应力传递效率，通过单纤维拔出试验，测定不同纤维类型与水泥基体的界面剪切强度。钢纤维表面粗糙度较高，与基体形成良好的机械咬合，界面剪切强度达到4.2MPa，聚丙烯纤维表面经过特殊处理后，界面粘结强度为2.8MPa，主要依靠化学粘结作用，界面微观结构观察显示，钢纤维周围形成致密的水化产物层，厚度约为10μm，有效增强了界面结合，玻璃纤维在碱性环境下会发生腐蚀，界面区域出现疏松多孔结构，影响长期性能稳定性。

（三）界面过渡区特征

界面过渡区是纤维与基体之间的薄弱环节，其微观结构特征直接影响宏观力学性能，通过扫描电镜观察发现，界面过渡区厚度一般为5-15μm，该区域内水化产物结晶度较低，孔隙率相对较高。钢纤维界面过渡区结构相对致密，主要由钙硅水化凝胶和氢氧化钙晶体组成，聚丙烯纤维界面过渡区存在微裂缝，这是由于纤维与基体热膨胀系数不匹配造成的，界面过渡区的形成机理与水泥水化过程密切相关，纤维表面的成核效应会影响水化产物的沉积和结晶，通过表面改性处理可以改善界面过渡区结构，提高界面粘结强度。

（四）纤维取向分布

纤维在基体中的取向分布对复合材料的各向异性具有重要影响，采用图像分析技术统计纤维取向角度分布，建立取向系数评价指标，理想情况下纤维呈随机分布，取向系数为1.0。实际试验中由于成型工艺影响，纤维取向呈现一定规律性，振动成型试件中纤维趋向于水平分布，取向系数为0.73，静压成型工艺能够改善纤维取向分布，取向系数提高到0.89，纤维取向分布不均会导致材料性能的方向性差异，在实际应用中需要考虑主应力方向与纤维优势取向的匹配关系，长径比较大的纤维更容易出现取向问题，需要通过优化成型工艺来改善。

四、韧性变形特性研究

（一）韧性指标计算分析

材料韧性是评价纤维增强效果的重要指标，反映材料在破坏过程中的能量吸收能力，采用荷载-挠度曲线下的面积来计算弯曲韧性，建立韧性指数评价体系，基准水泥砂浆的韧性指数为1.0，作为比较基准，钢纤维掺量为1.5%时，韧性指数达到4.6，表现出优异的延性特征，聚丙烯纤维韧性指数为2.8，虽然低于钢纤维，但相比基准材料仍有显著提升^[3]。

韧性与纤维掺量呈现非线性关系，存在最优掺量范围，掺量过低时纤维数量不足，难以有效阻裂；掺量过高时纤维分布不均，反而降低基体密实度，通过回归分析建立韧性指数与纤维掺量的关系模型，为工程应用提供参考依据，不同龄期下材料韧性发展规律显示，纤维作用效果在早期即可体现，后期增长趋势相对平缓。

表1 不同纤维类型和掺量下的韧性指数数据

纤维类型	掺量 (%)	7d 韧性指数	14d 韧性指数	28d 韧性指数	56d 韧性指数
聚丙烯纤维	0.5	1.8	2.1	2.3	2.4
聚丙烯纤维	1.0	2.2	2.6	2.8	2.9
聚丙烯纤维	1.5	2.4	2.8	3.1	3.2
钢纤维	0.5	2.6	3.0	3.2	3.3
钢纤维	1.0	3.4	3.9	4.2	4.3
钢纤维	1.5	4.0	4.4	4.6	4.7
玻璃纤维	0.5	2.0	2.2	2.3	2.1
玻璃纤维	1.0	2.4	2.7	2.8	2.5

（二）变形性能特征分析

纤维增强水泥基复合材料的变形性能包括弹性模量、泊松比和极限应变等参数，弹性模量测试采用应力-应变曲线的线性段斜率确定，试验结果显示纤维掺入对弹性模量影响相对较小，钢纤维复合材料弹性模量为31.2GPa，略高于基准材料的29.8GPa，聚丙烯纤维由于自身模量较低，对整体弹性模量贡献有限，测试值为30.1GPa。极限应变是反映材料延性的直观指标，纤维增强能够显著提高材料的极限应变值，基准材料极限应变为0.0021，钢纤维增强材料达到0.0056，提升幅度达167%，如下图1所示，不同纤维类型和掺量条件下的应力-应变关系呈现明显差异，钢纤维表现出最佳的延性特征，峰值后仍能承受较大变形而不完全失效。

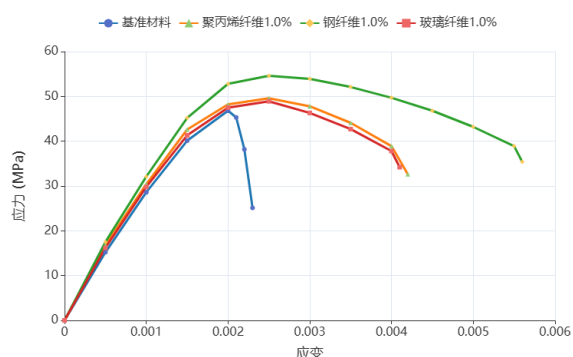


图1 不同纤维类型增强水泥基复合材料应力-应变关系

（三）裂缝发展规律分析

纤维增强水泥基复合材料的裂缝发展过程可分为三个阶段：弹性阶段、裂缝稳定扩展阶段和失稳破坏阶段，在弹性阶段，材料变形主要由基体承担，纤维作用不明显。当荷载达到基体开裂强度时，裂缝开始萌生并稳定扩展，此时纤维发挥桥接作用，阻

止裂缝进一步发展，随着荷载继续增加，裂缝数量增多，宽度逐渐增大，最终导致材料失效，钢纤维由于具有较高的抗拉强度，能够在较大应变范围内发挥桥接作用，有效延缓裂缝扩展，聚丙烯纤维虽然强度相对较低，但数量多且分布密集，能够控制微裂缝的发展，提高材料的整体韧性。

（四）疲劳性能特征

纤维增强水泥基复合材料在循环荷载作用下的疲劳性能是评价其长期服役能力的重要指标，疲劳试验采用正弦波加载，频率为10Hz，应力比为0.1，试验结果表明，纤维增强能够显著提高材料的疲劳寿命。基准材料在0.7倍抗折强度循环荷载下的疲劳寿命为 2×10^4 次，钢纤维增强材料疲劳寿命提高到 8×10^4 次，疲劳破坏过程中，纤维的桥接作用能够减缓裂缝扩展速率，延长裂缝稳定扩展阶段，疲劳裂缝主要沿着纤维-基体界面扩展，界面粘结强度对疲劳性能具有重要影响，不同纤维类型的疲劳性能差异主要与其弹性模量和界面特性有关^[4]。

（五）冲击性能评价

冲击性能反映材料在动态荷载作用下的能量吸收能力，采用落球冲击试验进行测试，试验装置包括导向装置、冲击锤和试件支座，冲击能量通过改变落球高度来调节，测试参数包括首裂冲击次数和破坏冲击次数，评价材料的抗冲击性能。基准材料首裂冲击次数为15次，破坏冲击次数为28次，钢纤维增强材料首裂冲击次数提高到42次，破坏冲击次数达到89次，冲击韧性提升明显，聚丙烯纤维增强材料的冲击性能改善效果相对较小，但仍优于基准材料，冲击破坏模式分析表明，纤维增强材料破坏时呈现延性特征，裂缝分布较为分散，而基准材料表现为脆性断裂。

五、结束语

通过系统性的试验研究，深入分析了不同类型纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能特征。试验结果表明，纤维类型、掺量和龄期等因素对材料性能具有显著影响，其中钢纤维在提升抗压强度和韧性方面效果最为显著，聚丙烯纤维在改善裂缝控制方面表现优异，纤维-基体界面特性是决定复合材料整体性能的关键因素，通过优化界面粘结能够进一步提升材料力学性能，韧性和变形特性分析揭示了纤维增强机理，为工程应用中的配合比设计和性能预测提供了理论依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 杜宪华, 吴继国, 谭旭翔, 等. 混杂纤维水泥基复合材料力学性能研究 [J]. 材料导报, 2025, 39(S1): 172-177.
- [2] 车雅丽, 何明胜, 夏多田, 等. 钢纤维沙漠砂水泥基复合材料高温力学性能研究 [J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2025, 43(03): 314-322.
- [3] 曹博文, 黄世谋, 冯红丽, 等. 混掺纤维对水泥基复合材料的力学性能影响研究 [J]. 混凝土, 2025, (05): 141-146.
- [4] 马明磊, 桂强, 白洁, 等. 碳纤维增强水泥基注浆材料试验与性能研究 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2025, 51(02): 77-82.

建筑工程实体检测中建筑材料检测技术探讨

黄旦

广东鸿翔工程检测咨询有限公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ME.2025060031

摘 要 : 在建筑工程建设过程中, 确保建筑材料的质量是保障结构安全的基础, 随着科技的进步多种先进的检测技术应运而生, 提高了建筑材料质量控制的精度, 同时也优化了施工流程。通过对物理性能、化学性能及热学与电学性能检测技术等个方面进行了研究, 提出了不同检测技术的应用方向和改进措施, 以期对相关领域提供参考。

关 键 词 : 建筑工程; 实体检测; 建筑材料; 性能检测

Exploration of Building Material Testing Technology in Physical Inspection of Construction Projects

Huang Dan

Guangdong Hongxiang Engineering Testing Consulting Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : In the process of construction engineering, ensuring the quality of building materials is the foundation for ensuring structural safety. With the advancement of technology, various advanced detection techniques have emerged to improve the accuracy of building material quality control and optimize the construction process. Through research on physical, chemical, thermal, and electrical performance detection techniques, different application directions and improvement measures for detection techniques have been proposed, in order to provide reference for related fields.

Keywords : construction engineering; physical testing; building materials; performance testing

建筑工程实体检测是指在建筑工程施工中, 通过对各类材料、构件及工程实体进行检测检测施工质量是否符合设计标准。因建筑材料的质量直接影响到建筑工程的稳定性, 随着建筑行业对安全性要求不断提升, 传统的检测方法虽具有较长的使用历史, 但在面对日益复杂的工程需求时往往显得力不从心。本文将重点探讨当前建筑工程中广泛应用的物理性能检测、化学性能检测以及热学与电学性能检测等建筑材料检测技术, 旨在为建筑工程质量管理提供技术支持。

一、建筑工程实体检测概述

建筑工程实体检测是建筑工程质量保障体系的重要组成部分, 其目的是通过科学的方法对建筑实体进行检测且给出评价, 有效保障建筑物的质量符合设计标准及国家规定的各项要求。现阶段因建筑规模的正在扩大, 且技术始终处于高速发展历程中, 对实体检测的难度和要求日益增高, 传统的检测方法主要有取样检测、目视检测、探伤检测等, 但这些方法在面对一些复杂的建筑结构时存在检测精度不足、耗时长、成本高等问题。近年来超声波检测、X射线检测、红外热成像检测等更多高精度高效率的检测技术逐步应用于实际建筑工程中, 其科学、充分利用利用能够有效提高检测的效率, 同时也可以减少对结构的破坏并且节省了检测时间, 结合多项不同实体检测技术的综合运用, 能够更加全面、准确地评估建筑材料的质量。

二、建筑材料常见检测技术简介

(一) 物理性能检测技术

主要通过评估建筑材料在强度、硬度、密度、耐磨性等物理层面上的表现完成检测, 物理性能直接关系到建筑材料的承载能力, 在建筑工程中常用的物理性能检测方法包括拉伸试验、压缩试验、弯曲试验、硬度测定等, 其中通过标准的抗压试验可以评估混凝土的强度等级, 从而判断其是否符合设计要求^[1]。普通混凝土的抗压强度一般在20 MPa至50 MPa之间, 而高强度混凝土的抗压强度可达到80 MPa以上。在进行物理性能检测时, 通过对试件进行多次检测得出更加精准的性能评价, 帮助施工单位及时发现材料存在的问题。

(二) 化学性能检测技术

用于分析建筑材料在化学环境中的反应和变化情况, 涉及到

材料的耐腐蚀性、抗氧化性、化学稳定性等方面，常见的化学性能检测方法有酸碱性测试、氯离子含量测试、硫酸盐含量测试等^[2]。通过对混凝土中氯离子含量的检测，可以预测钢筋是否容易发生腐蚀，当氯离子浓度超过0.4%时，钢筋就可能开始受到腐蚀。化学性能检测可以确保建筑材料在长期使用过程中的稳定性，同时为防腐处理措施的制定提供科学依据，在生产阶段有利于发现原材料中可能存在的重金属等有害物质。

（三）热学与电学性能检测

该技术可以评估建筑材料在热力学、电学条件下的行为特性，热学性能检测主要涉及到材料的导热性、热膨胀系数、比热容多方面指标，而电学性能检测则集中通过对电导率、电阻率、介电常数进行测定。依据测定结果判定其性能，此类测试能够有效发现材料是否影响建筑材料的隔热、保温、防火等功能^[3]，其中隔热材料热导率越低隔热效果越好，常见的聚氨酯保温材料的热导率为0.022 W/(m·K)，传统的矿棉保温材料的热导率通常是0.035 W/(m·K)，显示出聚氨酯材料在隔热性能上的优势。电学性能检测主要用于电气工程及通信工程中的建筑材料检测，电线电缆的电阻率测试可以有效检测其导电性能，有效保障其在实际应用中的安全性，进一步提高建筑工程的综合性能。

三、常见建筑材料的检测技术应用分析

（一）混凝土材料检测技术

抗压强度检测、抗拉强度检测、抗弯强度检测、抗渗性检测、氯离子渗透性检测、抗冻性测试以及抗硫酸盐侵蚀性测试常见的混凝土检测方法中，每种检测方法都在不同方面反映了混凝土的性能。采用标准压缩试验，测量混凝土试件在压力作用下的抗压强度，该测试结果可以用来评定混凝土的强度等级，C25混凝土常用于住宅建筑基础，C35以上则适用于高层建筑或工业结构^[4]。结合多次测试可以得出平均强度值，从而判断混凝土是否满足工程设计要求，根据国家标准混凝土的抗压强度等级应通过28天的标准养护期后测试，测试结果应与设计强度相符。抗拉强度直接影响混凝土在拉伸或弯曲条件下的变形能力，实际应用中，混凝土一般不直接承受拉伸载荷，其中抗弯强度测试则用于评估混凝土在弯曲状态下的耐受能力。特别是在一些特殊环境中，混凝土的腐蚀问题直接影响结构的使用寿命，当氯离子进入混凝土后会与钢筋发生反应导致钢筋锈蚀，因此破坏混凝土结构的稳定性。一般情况下采取施加电流加速氯离子的渗透，测量其通过混凝土的时间和渗透深度，在实际检测中氯离子渗透性可通过相关标准进行，设定的标准限值为30%以下。

（二）钢材材料检测技术

钢材的检测技术主要有拉伸试验、冲击韧性试验、硬度测试、化学成分分析等，其中钢材的拉伸试验是通过对本体施加拉力直至断裂来确定其屈服强度、抗拉强度、延伸率等关键性能参数，通过试验工程师能够得出钢材在外力作用下的弹性变形能力，常见的结构钢屈服强度一般为235 MPa，而高强度钢材的屈服强度可达500 MPa以上，其差异直接影响到钢材的承载能

力^[5]。钢材的冲击韧性测试主要评估其在低温环境下的抗脆性，尤其在寒冷地区的建筑中钢材在低温下容易出现脆性断裂，在检测环节进行韧性测试可以评估钢材的韧性。硬度测试则用来衡量钢材的抗压、抗磨损能力，现主要采用洛氏硬度测试方法，且在钢材的化学成分分析方面，尤其是在建筑中使用耐腐蚀钢或高强度钢，通过光谱分析、质谱分析等技术准确测定钢材中的碳、硅、锰、硫、磷等元素的含量，用以检测钢材的合金成分符合标准要求，重点关注钢中硫、磷含量是否过高，过高会导致钢材的脆性增加。

（三）土木工程材料检测技术

对于土壤材料，一般采用颗粒级配分析技术，采取筛分法检测土壤颗粒的粒度分布，以此途径确定土壤的密实性、稳定性及其承载能力。其中土壤的承载力试验主要通过静载荷试验、标准贯入试验（SPT）测试土壤在外力作用下的抗压能力。砂石检测通过粒径分析、密度测试和含水率测试等完成，砂石的粒径直接影响混凝土的和易性与强度，而密度则影响材料的体积重量，砂石的含水率测试有助于评估其在混凝土中的配合比，有效避免影响混凝土的硬化速度。再生骨料逐渐被用于土木工程材料中，其检测需要通过颗粒级配、抗压强度等测试，确保其在混凝土中的性能与天然骨料相当。

（四）新型建筑材料的检测

预应力混凝土、碳纤维复合材料、超高性能混凝土（UHPC）等新型材料，具有较高的强度、轻质、耐腐蚀等特点，其中预应力混凝土的检测技术主要是对预应力钢筋的应力测试以及混凝土的应变分析，通过应力测试监测预应力钢筋是否达到预定的张拉应力，以确保混凝土构件能够承受更大的荷载^[6]。碳纤维复合材料广泛应用于桥梁加固、建筑结构改造等领域，主要完成拉伸试验、压缩试验和粘结性能测试，拉伸试验可以评估其在受力状态下的性能，而粘结性能测试则评估其与混凝土等材料的结合强度。超高性能混凝土（UHPC）抗压强度可达150 MPa以上，具有较高的抗渗性、抗冻性和耐久性，检测过程中主要完成抗压强度测试、抗折强度测试、耐久性测试等。

四、提升建筑材料检测技术的对策与建议

（一）完善技术标准

建筑材料的检测方法大多以传统的力学性能检测为主，但对于新型建筑材料（超高性能混凝土、复合材料等），现有标准的适应性较差，传统的抗压试验方法难以全面评估其性能，可以结合超声波脉冲技术、X射线CT扫描技术来弥补传统检测方法的不足，非破坏性地检测混凝土内部的裂缝、气孔和密实度，获取更为精准的数据支持。通过超声波脉冲法对UHPC进行检测，其裂缝深度检测精度可达到±1 mm，对于传统抗压试验无法实现，技术标准应进一步更新且覆盖新型建筑材料的多维度性能评估。现有标准在现场检测方面也存在局限，通过采用红外热成像技术、激光扫描仪等可实时获取建筑材料的温度场、形变场数据，快速分析材料的热稳定性、应力分布情况，为施工阶段提供即时

反馈。

（二）技术创新发展

近年来，非破坏性检测技术（NDT）取得了显著突破，超声波检测技术、红外热成像技术、X射线扫描技术以及地质雷达技术等已经广泛应用于建筑材料的检测中，较传统方法在检测精度、效率 and 安全性方面具有明显优势。超声波脉冲技术可以用于检测混凝土、砖石、钢材等建筑材料中的裂缝及密实度。采用超声波脉冲法检测混凝土中的裂缝，深度可精准定位到2 mm以内。红外热成像技术通过材料表面的温差分布检测隐藏的结构缺陷，可有效发现外部不可见区域的隐蔽裂缝，效率远高于传统的目视检查。随着人工智能（AI）和大数据技术的引入，通过机器学习算法分析超声波信号，可以精准识别出混凝土中的微裂纹和气孔，减少人工干预，基于 AI 的混凝土裂缝识别系统，其识别准确率达到到了98%以上，结合 AI 的智能检测系统能够有效提高检测精度。

（三）培养专业技术团队

在新型检测技术、智能设备应用等方面，技术人才的培养成为行业发展的基础。相关院校可以通过开设建筑材料检测课程，增设建筑工程质量控制等专业课程为学生提供理论基础，并在此基础上通过与建筑企业以及科研机构的合作搭建实践平台，使学生能接触到前沿的检测技术。行业内部应当定期组织内部培训，确保现有员工掌握最新的检测技术，同时数量掌握设备使用方法，通过提供定期的现场操作结合技术讲座，组建跨学科技术团

队等方式充分汇聚材料学、建筑学、电子学等领域的专业人才，并使其致力于新材料的性能评估、新检测方法的开发和新设备的优化方向的深度研究。

（四）加强检测设备的更新维护

传统的抗拉试验机在检测高强度钢材时，由于其测试精度不足，误差可能达到5%，应当引进激光扫描仪、X射线 CT 扫描仪等新型检测提高检测精度。激光扫描技术在检测混凝土构件的裂缝时，其精度可达到0.1毫米，X射线 CT 技术则可以深入分析混凝土内部结构，帮助工程师准确判断材料的裂缝、空洞及密实度。应建立定期维护、校准和检测制度确保设备始终处于最佳工作状态，物联网技术的引入使得设备管理更加智能化，通过远程监控能够实时掌握设备的运行状态，及时发现潜在问题且避免故障影响检测结果。

五、结束语

建筑材料检测技术需要不断发展，高质量的建筑材料检测能有效保障建筑物的安全性，还能在很大程度上提升工程施工的效率。通过完善技术标准、推动技术创新、培养专业人才以及加强设备的更新与维护，可以逐步解决当前建筑材料检测技术中存在的问题，推动行业向更高水平发展。

参考文献

- [1]王剑英. 建筑工程实体检测中建筑材料检测技术应用要点研究 [J]. 石材, 2025, (05): 134-136.
- [2]方章文. 建筑实体检测中的建筑材料检测技术分析 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 西南大学, 重庆工商大学, 重庆建筑编辑部. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 浙江大合检测有限公司台州分公司, 2025: 139-142.
- [3]杨义. 建筑工程实体检测中的材料检测技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (09): 197-199.
- [4]邵鹏, 张芳. 建筑工程实体检测中建筑材料检测技术 [J]. 居业, 2025, (03): 184-186.
- [5]刘玉花. 建筑材料检测技术在建筑工程实体检测中的应用 [J]. 质量与认证, 2025, (01): 99-101+105.
- [6]康杰. 智能化技术在建筑工程材料检测中的应用 [J]. 新城建科技, 2024, 33(12): 156-158.

地下商业综合体与地铁站一体化开发模式分析

王延安

北京珠江房地产开发有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ME.2025060033

摘 要： 随着我国城市化进程进入“存量优化”阶段，地面空间资源日益紧张，地下空间的开发利用成为缓解城市交通拥堵、提升土地利用效率的重要途径。地下商业综合体与地铁站的一体化开发，是将轨道交通站点与商业功能、公共服务设施深度融合的复合型开发模式，不仅能实现“交通+商业”的功能联动，还能推动城市地下空间从“单一功能”向“多元复合”转型。

关 键 词： 地下商业综合体；地铁站一体化；开发模式

Analysis of the Integrated Development Model of Underground Commercial Complexes and Subway Stations

Wang Yan'an

Beijing Zhujiang Real Estate Development Co., LTD., Beijing 100020

Abstract： As China's urbanization process enters the "stock optimization" stage, ground space resources are becoming increasingly tight. The development and utilization of underground space have become an important way to alleviate urban traffic congestion and improve land use efficiency. The integrated development of underground commercial complexes and subway stations is a composite development model that deeply integrates rail transit stations with commercial functions and public service facilities. It not only realizes the functional linkage of "transportation + commerce", but also promotes the transformation of urban underground space from "single function" to "multi-functional integration".

Keywords： underground commercial complex; integration with subway stations; development model

引言

北京昌平合生汇作为 TOD 模式典范，实现了地下商业与地铁昌平线（生命科学园站）的立体化整合：项目通过地铁连廊连接四季花厅作为导流厅和延伸地铁站厅，从而串联46.5万㎡商业与地铁，采用“双首层+下沉广场”设计提升商业可达性。业态配置以快时尚、网红餐饮为主，吸引通勤与周边客群，工作日客流达8万/日。智能引导系统与地铁安检互认提升通行效率20%。案例启示：需优化非高峰客流导入，并加强地下空间防灾冗余设计。

一、地下商业综合体与地铁站一体化开发的核心模式

根据“空间布局”“功能协同”“运营主体”三个维度的差异，一体化开发可分为以下四种核心模式：

（一）“通道连接型”模式：基础协同，低成本易落地

1. 模式特征：通过地下通道将地铁站与地下商业综合体连接，两者在空间上相对独立，仅通过通道实现人流互通；功能上以“交通接驳+基础商业”为主，商业业态多为便利店、快餐店等便捷型业态；运营主体通常为地铁公司与商业开发商分别运营，仅在通道管理上进行简单协同^[1]。

2. 适用场景：适用于已建成地铁站与商业体的改造升级，或城市次核心区域的初步开发，具有“低成本、易落地”的优势。例如，北京地铁5号线立水桥站通过200米长的地下通道连接龙德

广场，通道内设置指示牌与简易商铺，既实现了人流接驳，又降低了改造成本，总投资仅需500-800万元。

3. 优缺点分析：

优点：建设周期短（通常3-6个月）、投资成本低、对现有设施影响小；

缺点：功能协同性弱，商业体对地铁站客流量的吸引力有限，通道内人流易拥堵，且缺乏统一运营管理，易出现环境脏乱、标识混乱等问题。

（二）“空间融合型”模式：中度协同，功能深度衔接

1. 模式特征：地铁站与地下商业综合体在空间上高度融合，地铁站厅直接与商业综合体的中庭、走廊连通，形成“你中有我、我中有你”的布局；功能上除交通与商业外，还融入休闲、娱乐等业态（如电影院、儿童游乐区），满足市民“出行+消费

+休闲”的多元需求；运营主体通常通过成立合资公司或签订合作协议，实现交通与商业的协同运营^[2]。

2.适用场景：适用于城市核心区域的新建项目，如交通枢纽、商业中心周边的地下空间开发。例如，上海人民广场地铁站与地下商业综合体“迪美购物中心”采用空间融合型模式，地铁站厅直接与购物中心中庭连通，市民出站后可直接进入商场，商场内设置了餐饮、零售、动漫体验等业态，日均客流量超8万人次，成为上海核心区域的“地下商业标杆”。

3.优缺点分析：

优点：功能协同性强，人流接驳效率高，能充分发挥“交通+商业”的联动效应；

缺点：建设周期较长（通常2-3年）、投资成本较高（每平方米造价约8000-12000元），对规划设计与施工技术要求较高。

（三）“立体复合型”模式：高度协同，多业态整合

1.模式特征：突破“地下单一空间”的限制，形成“地下-地面-地上”立体布局，地铁站与地下商业综合体、地面商业裙楼、地上写字楼或住宅形成一体化联动；功能上整合“交通、商业、办公、居住、公共服务”等多元业态，打造“微型城市”式的综合空间；运营主体通常为大型城市开发集团，实现全业态、全周期的统一运营管理。

2.适用场景：适用于城市新区开发或大型交通枢纽（如高铁站、机场）周边的地下空间开发。例如，广州天河路地下空间项目采用立体复合型模式，地下一层为地铁站与地下商业综合体，地下二层为停车场与物流通道，地面为商业裙楼，地上为写字楼与公寓，形成“立体式”功能布局。项目通过统一运营管理，实现了“工作日办公人流+周末商业人流+节假日旅游人流”的错峰利用，空间利用率提升50%以上^[3]。

3.优缺点分析

优点：功能最全面，空间利用率最高，能实现“产城融合”的发展目标；

缺点：投资规模大（通常超10亿元）、建设周期长（3-5年）、运营管理复杂，对开发主体的资金实力与运营能力要求极高。

（四）“TOD导向型”模式：规划引领，以交通带动城市更新

1.模式特征：以“公共交通导向开发（TOD）”理念为核心，将地铁站作为城市更新的核心节点，通过一体化开发带动周边区域（包括地下与地面）的整体更新；功能上以“地铁站为中心，500米半径为核心区”，布局商业、办公、居住、公共服务等业态，形成“紧凑、高效、低碳”的城市空间；运营主体通常由政府主导，联合地铁公司、城市开发集团共同推进，实现“规划-建设-运营”全流程协同。

2.适用场景：适用于城市旧区改造或新区规划，如深圳龙华区的TOD开发项目。该项目以龙华地铁站为核心，通过地下空间一体化开发连接周边商业体、写字楼与保障性住房，同时配套建设学校、医院、公园等公共设施，形成“15分钟生活圈”。项目实施后，周边区域常住人口增加20万，就业率提升15%，成为

“以交通带动城市更新”的典型范例^[4]。

3.优缺点分析：

优点：能实现区域整体发展，提升城市综合竞争力，符合新型城镇化发展需求；

缺点：需政府强力主导，协调多方利益（如居民拆迁、土地征收），规划周期长（5-10年），不确定性因素较多。

二、地下商业综合体与地铁站一体化开发面临的关键问题

（一）规划协同不足：多部门权责交叉，缺乏统一规划

一体化开发涉及“地铁公司、规划部门、住建部门、商业开发商”等多个主体，各主体的规划目标与利益诉求不同，易导致规划脱节。例如，地铁公司更关注交通功能的安全性及高效性，商业开发商更关注商业业态的布局与收益，规划部门则需平衡交通、商业与公共利益，若缺乏统一的规划协调机制，易出现“地下通道宽度不足”“商业业态与客流量不匹配”“公共设施缺失”等问题。以某二线城市为例，其地铁2号线与地下商业综合体一体化开发时，因地铁公司与开发商未同步规划，导致地下通道宽度仅1.5米，高峰期人流拥堵严重，后期改造需耗资2000万元，造成资源浪费^[5]。

（二）功能衔接不畅：交通与商业的“物理连接”大于“功能协同”

部分一体化开发项目仅实现了“空间上的连通”，但未实现“功能上的协同”，主要体现在两个方面：一是“人流接驳效率低”，如地下通道标识混乱，市民难以快速找到商业体入口；二是“业态匹配度低”，商业体业态与地铁站客流量特征不匹配，如在通勤为主的地铁站周边布局大量奢侈品零售业态，导致商铺空置率高。例如，某城市地铁通勤站周边的地下商业体，因主要消费人群为通勤族（需求为便捷早餐、便利店），但业态以高端餐饮、服装零售为主，开业后半年商铺空置率达40%，运营陷入困境。

（三）运营管理分散：多主体运营导致权责不清

一体化开发项目中，若地铁公司与商业开发商分别运营，易出现“权责不清、管理混乱”的问题。例如，地下通道的清洁、安保、设施维护等责任若未明确划分，易出现“互相推诿”的情况；又如，地铁运营时间与商业体营业时间不同步（地铁通常6:00-23:00运营，商业体通常10:00-22:00营业），易导致非营业时间地下通道关闭，影响市民出行。此外，部分项目缺乏统一的客流监测与应急管理系统，一旦发生人流拥堵或突发事件，难以快速响应，存在安全隐患。

（四）技术标准缺失：地下空间开发面临技术瓶颈

地下空间开发涉及地质勘察、结构设计、通风照明、消防疏散等多个技术领域，目前我国尚未出台针对“地下商业综合体与地铁站一体化开发”的专项技术标准，导致部分项目在技术应用上存在风险。例如，地下空间通风不良易导致空气质量差，影响市民体验；消防疏散通道设计不合理，若发生火灾，易造成人员伤亡。此外，地下空间的智能化水平较低，缺乏“智慧客流监测”“智能导

航”等技术应用，难以满足市民对高品质出行的需求^[6]。

三、地下商业综合体与地铁站一体化开发的优化策略

（一）建立“政府主导、多主体协同”的规划机制

1.成立专项协调机构：由政府牵头，联合规划、住建、交通、地铁公司、商业开发商等主体成立“一体化开发专项协调小组”，明确各主体的权责，制定统一的规划方案。例如，杭州成立“地下空间开发协调办公室”，对地铁与商业体一体化开发项目进行全流程管控，从规划设计到建设运营全程协调，确保各主体目标一致。

2.制定专项规划标准：政府应出台《地下商业综合体与地铁站一体化开发规划标准》，明确规划原则、技术指标（如地下通道宽度、标识系统规范）、功能布局要求等，为项目开发提供依据。例如，深圳出台的《城市地下空间开发利用管理办法》中，明确规定一体化开发项目的地下通道宽度不小于3米，标识系统需采用统一的色彩与字体，确保人流接驳效率。

（二）强化“交通—商业”功能协同，提升体验感

1.优化人流接驳设计：一是“完善标识系统”，在地铁站厅、地下通道设置清晰的导向标识（如LED屏、地面指引线），帮助市民快速找到商业体入口；二是“设置缓冲空间”，在地铁站与商业体连接处设置中庭、休息区等缓冲空间，避免人流直接涌入商业体造成拥堵；三是“实现无障碍衔接”，配备电梯、坡道等无障碍设施，满足老年人、残疾人等特殊人群的出行需求。

2.精准匹配商业业态：根据地铁站的客流特征（如通勤型、休闲型、旅游型），规划商业业态。例如，通勤型地铁站周边应重点布局便利店、早餐店、干洗店等便捷型业态；休闲型地铁站（如靠近公园、景区）周边应布局餐饮、娱乐、文创等体验型业态；旅游型地铁站周边应布局特产商店、旅游咨询中心等业态。例如，上海迪士尼地铁站与地下商业体一体化开发时，重点布局了迪士尼周边产品商店、主题餐厅等业态，与旅游客流需求高度匹配，商业销售额年均增长30%以上。

（三）构建“统一运营、智慧管理”的运营体系

1.推动运营主体一体化：鼓励地铁公司与商业开发商成立合资公司，实现“统一运营、利益共享”。例如，香港地铁公司通

过“地铁+物业”模式，成立全资子公司负责一体化项目的运营管理，统一协调地铁运营与商业运营，实现了“地铁、商业、物业”的高效协同，其地下商业体的商铺出租率长期保持在95%以上。

2.引入智慧管理技术：一是“智慧客流监测”，通过摄像头、传感器实时监测地下空间的客流量，当客流量超过阈值时，自动启动疏导措施（如打开备用通道、播放疏导广播）；二是“智能导航系统”，开发手机APP或小程序，为市民提供地下空间的实时导航服务，解决“地下迷路”问题；三是“智慧应急管理”，建立统一的应急指挥平台，整合消防、公安、医疗等资源，一旦发生突发事件，能快速响应处置。

（四）完善“技术标准、创新技术应用”的技术支撑

1.制定专项技术标准：由住建部牵头，联合行业协会、科研机构制定《地下商业综合体与地铁站一体化开发技术标准》，明确地质勘察、结构设计、通风照明、消防疏散等技术要求。例如，在通风技术方面，要求地下空间采用“机械通风+自然通风”相结合的方式，确保空气质量达到国家标准；在消防疏散方面，要求地下通道每50米设置一个消防应急出口，疏散时间不超过5分钟。

2.创新技术应用：一是“绿色技术应用”，采用地源热泵、太阳能光伏等绿色能源，降低地下空间的能耗；二是“BIM技术应用”，在规划设计阶段采用BIM技术构建三维模型，模拟人流疏散、消防应急等场景，优化设计方案；三是“5G技术应用”，实现地下空间5G信号全覆盖，为智慧管理技术（如智能导航、远程监控）提供网络支撑。

四、结束语

综上所述，地下商业综合体与地铁站的一体化开发模式是城市发展进程中的一次创新尝试，具有显著的经济效益、社会效益和环境效益。它不仅实现了城市地下空间的高效利用，缓解了地面交通压力，还为市民提供了便捷、多元的消费和出行体验。展望未来，随着城市化的加速推进和技术的不断进步，地下商业综合体与地铁站一体化开发模式有望得到进一步优化和完善。通过不断探索和创新，我们有理由相信，这种模式将在更多城市得到广泛应用，成为推动城市高质量发展、提升居民生活品质的重要力量。

参考文献

- [1] 孟祥敏. 商业综合体的设计要素 [J]. 城市建筑, 2024, 21(16): 116–120.
- [2] 陈涛. 基于空间绩效评价的城市商业综合体地上地下一体化优化设计研究 [D]. 中国矿业大学, 2023.
- [3] 杨不显. 基于寻路行为的地下商业综合体空间意象研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2023.
- [4] 张毅. 城市中心区地铁站地下商业空间可达性研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
- [5] 何相聚. 地铁站与商业综合体连接空间研究——以厦门地铁岭兜站为例 [J]. 中国房地产, 2021, (15): 45–49.
- [6] 黄鑫. 地铁站点和商业综合体的连接模式及空间研究 [D]. 东南大学, 2020.

代代木体育馆：丹下健三跨文化建筑美学的范式——基于“自然－结构－体验”三维框架的重构

王子仁

成都树德中学国际部，四川 成都 610097

DOI:10.61369/ME.2025060034

摘 要： 丹下健三的代代木国立综合体育馆（1964）被视为现代主义语境下东西方美学的“创造性转译”典范。本文以“自然－结构－体验”为经，“东方神－西方形”为纬，重构其跨文化策略：东方“天人合一”“无形之形”“素朴之美”被抽象为“神”，西方“理性几何”“结构表现”“纯粹形式”被提炼为“形”；二者通过“符号抽象－技术互文－仪式重构”三重机制在同一结构中由矛盾走向辩证统一。文章最后回到中国当代建筑，提出材料、空间、精神的三重转向，为跨文化实践提供可操作的“神传”路径。

关 键 词： 丹下健三；代代木体育馆；东西方美学；跨文化建筑；结构表现主义

Yoyogi National Gymnasium: A Paradigm of Kenzo Tange's Cross-Cultural Architectural Aesthetics—Reconstruction Based on the Three-Dimensional Framework of "Nature-Structure-Experience"

Wang Ziren

The International Department of Shude High School, Chengdu, Sichuan 610097

Abstract： Kenzo Tange's Yoyogi National Gymnasium (1964) is regarded as a model of "creative translation" of Eastern and Western aesthetics in the context of modernism. This article takes "nature – structure – experience" as the vertical axis and "Eastern spirit – Western form" as the horizontal axis to reconstruct its cross-cultural strategy: the Eastern concepts of "harmony between man and nature", "formless form", and "simple beauty" are abstractly represented as "spirit", while the Western concepts of "rational geometry", "structural expression", and "pure form" are refined as "form". The two move from contradiction to dialectical unity within the same structure through the triple mechanism of "symbolic abstraction – technical intertextuality – ritual reconstruction". The article concludes by returning to contemporary Chinese architecture, proposing a triple shift in materials, space, and spirit, providing an operational "divine transmission" path for cross-cultural practice.

Keywords： Kenzo Tange; Yoyogi national gymnasium; eastern and western aesthetics; cross-cultural architecture; structural expressionism

一、问题与方法：为何重读代代木？

1964年东京奥运会主馆——代代木体育馆——常被简化为“日本传统屋顶的现代版”。这一误读遮蔽了丹下的真正贡献：他并未复制符号，而是以抽象原型与结构理性，让东西方美学基因在同一体系中“共生”。本文以“自然－结构－体验”三维框架重新梳理其设计逻辑，并追问：这一范式能为今日中国的跨文化建筑提供何种启示？

二、东方美学的三重抽象

（一）自然：从“天人合一”到“形态仿生”

代代木体育馆的形态设计与自然紧密呼应，主体育馆的悬索结构屋顶形似贝壳或巨蛋，小体育馆螺旋形屋顶如同海螺，这些

形态不仅源于自然意象，更通过结构力学模拟自然造物的张力平衡，实现“以自然为师”。屋顶曲线与公园树木轮廓相呼应，减少对自然地形的压迫感，达成建筑与自然环境的和谐共生，体现了东方“天人合一”中人与自然相互依存的理念，也契合日本神道中“自然即神体”。主馆悬索屋顶取意“张开的羽翼”，小馆螺旋形似“海螺”，均以结构力学模拟自然造物。屋顶曲线与公园树冠轮廓平行，削弱体量对地形的压迫；内部无柱洞穴式空间引入自然通风，使“人－建筑－自然”形成动态平衡。

（二）形态：“无形之形”与“间”

禅宗美学也是一种自然主义，讲究空的自然观念，是一种由心境创造的意境。禅宗美学中的“无形之形”强调超越具体形态的精神意境。丹下拒绝具象模仿，屋顶以自由曲线传递“无形之形”的精神意境。芦原义信认为，一面把空间内部化一面保持内部秩序来建造城市的方法，属于加法创造空间的思想体系。体育

馆中悬挑屋檐与玻璃幕墙形成的“缘侧”过渡空间，模糊了室内外的界限；内部大空间中，通过光影、结构构件等元素划分出不同的功能区域，呈现出一种暧昧、流动的空间关系。这种空间设计打破了传统建筑中明确的空间界定，创造出富有层次感和变化性的空间体验，体现了东方美学中对“间”的独特理解。

（三）材料：“素朴之美”与“真实性”

日本物哀美学中的“素朴之美”追求自然、简洁、不加修饰的质感。代代木体育馆的混凝土表面通过模板纹理处理，营造出类似岩石或木材的粗糙感，弱化了现代材料的工业气息，使其贴近自然材质的原始触感。这种对材料的处理方式摒弃了华丽的装饰，展现出材料本身的自然之美，符合“素朴之美”的审美追求，传递出一种静谧、内敛的情感^[1]。

柳宗悦民艺论中的“真实性”强调材料的天然属性和工艺的纯粹性。体育馆中钢缆节点的“组子”几何秩序，以及混凝土、钢材等材料的真实展现，不掩盖材料的特性和构造方式，而是将结构和材料的真实性作为建筑美学的一部分。这种对材料“真实性”的表达，不仅体现了对材料和工艺的尊重，也让建筑具有一种真实、质朴的美感，与东方美学中崇尚自然、真实的价值观相契合。

三、西方美学的三重嵌入

（一）理性：几何秩序与功能决定论

主馆新月形平面由速滑赛道最优半径推导，小馆螺旋平面以篮球场+游泳赛道为核心，几何与功能互为因果。比例、模数、对称在局部与整体间严密咬合。遵循路易斯·沙利文“形式追随功能”的原则，体育馆的形态直接服务于体育赛事需求。主体育馆的新月形契合速滑赛道的布局，减少赛道弯道对运动员的阻力；小体育馆的螺旋形则适应篮球、游泳等多功能使用，观众席、比赛场地、辅助设施等空间围绕核心功能进行高效组织。建筑的每一个部分都以功能为出发点进行设计，展现出理性主义对实用性的追求。

（二）技术：结构表现与机器美学

建筑结构走上了艺术化的道路，结构技术以一种神奇的色彩呈现崭新的面貌，蔚然成风。126 m悬索结构将“桅杆-缆索-边缘构件”的力学逻辑升华为视觉符号；标准化钢构件与预制混凝土彰显工业精确，回应柯布西耶“住宅是居住的机器”之宣言。既要机器般的内在逻辑，又要机器般的外部造型，追求机器所体现的理性与逻辑性。^[2]

（三）形式：纯粹主义与永恒比例

除结构必需，无任何附加装饰；曲面、直线、节点全部回归“形式即结构”。维特鲁威“实用、坚固、愉悦”三原则在此得到现代诠释。

四、共生机制：三重转译

（一）符号：原型抽象与意义叠加

东西方建筑“并非二元对立，而是可以通过符号的抽象与空

间的再编码，实现意义的叠加与再生产。悬索体系既指向现代技术，又唤起神道“注连绳”划分圣/俗的原型。通过形式相似性（悬垂线性元素）和功能隐喻性（限定特殊领域）实现统一；屋面水平层叠的韵律抽取自五重塔，却以钢与混凝土去语境化再生，形成“双重能指”。现代技术之“形”承载传统信仰之“意”，使体育馆超越体育功能，成为具精神性和仪式感的空间容器，矛盾在抽象形式层面达和谐。^[3]

（二）技术：自然逻辑与人工逻辑的互文

代代木体育馆既是形式杰作，更是结构工程里程碑。其技术方案融合东方自然观的有机形态灵感与西方严谨的理性科学计算，形成“互文性”——自然模仿与人工控制这两种看似对立的逻辑相互参照，共同服务于建筑整体表达。

东方自然观：植根于东方自然观与美学传统——“师法自然”追求与自然共生，“气韵生动”重视内在生命力与运动感。主馆悬索屋顶的流畅动感曲线，是对“张开的羽翼”“海螺螺旋”等生物动态与有机形态的高度抽象。建筑如生命体般和谐统一。“羽翼”意象契合体育运动的活力，暗含飞翔、自由之意。

西方科学理性：丹下团队运用前沿结构力学、悬索理论及空气动力学，精确计算并实现形态。悬索结构高效适配大跨度，主桅杆承压、钢缆受拉、混凝土屋面稳定，形成合理受力系统；屋面曲面曲率经精心设计，参考翼型或流线型引导风流，减少风荷载与风振，适应东京多风环境；混凝土浇筑、钢索预张拉等环节依赖精确计算与施工控制，体现西方工程的精确性与可预测性^[4]。

共生机制：矛盾中的互文统一

东方提供“神”，西方提供“形”，通过科学计算将自然之“神”转化为可建造、抗自然力的“形”。自然界形态是进化形成的“最优解”，符合力学与流体原理，西方科学逻辑在此成为“解码器”与“实现器”，让人工逻辑成为实现自然逻辑的高效可靠手段，使感性模仿与理性计算在追求最优解中达成统一。

（三）体验：仪式重构与公共性

现代建筑中的“崇高感”与“近人尺度”并非不可兼得，而是可以通过“仪式路径的折叠与日常空间的再仪式化”来实现。^[5]环形下沉步道把神社“参道”折叠为市民日常漫游路径；赛事期间，路径升华为现代“祭典”流线。数十米桅杆带来西方“崇高”，悬挑檐下灰空间又回归东方“近人尺度”，身体在同一序列内经历“敬畏—亲切”的双重感知。

五、启示：中国跨文化建筑的三重转向

（一）材料：从文化符号到文化载体

低技高德：发掘夯土、生土、竹木、再生砖石等“本土材料”的现代潜能，通过技术改良（如稳定土、竹集成材）提升性能，保留其触感与时间性^[6]。

工艺复兴：将编织、榫卯、夯筑等传统工艺融入现代建造，形成“工匠精神驱动的新建构美学”（如张雷的混凝土缝模板、徐甜甜的松阳夯土项目）。

批判性怀旧：如王澐的“瓦片墙”，让废墟材料成为城市化

进程中消失记忆的纪念碑，赋予材料伦理与叙事维度^[7]。

（二）空间：从形式东方到行为东方

模糊边界：强化“灰空间”（檐廊、庭院、架空层）作为气候缓冲与社会交往的容器（如西村大院环形走廊），延续东方空间“内外渗透”的哲学。

身体叙事：设计可坐、可倚、可游走的细节（如阶梯式基座、蜿蜒坡道），鼓励身体与建筑的互动，呼应园林“步移景异”的体验逻辑^[8]。

公共性的再定义：只有当空间界面被有意识地模糊、折叠，并形成可让市井生活自发生长的‘非正式公共空间’时，地方主体性才能在全球化语境下获得可触达、可互鉴的表达通道。代代木环形步道与西村大院立体街巷正是通过灰空间与可漫游路径，把东方“步移景异”的身体叙事嵌入当代城市生活，从而避免了商业化公共空间的同质化。

（三）精神：从怀旧景观到当代意境

“空”的现代性：将留白、未完成感（如素混凝土肌理、结构裸露）转化为对“无限可能性”的隐喻，对抗消费主义的过度填充^[9]。

“废墟美学”的升华：接纳材料的沧桑与缺陷，将其视为时间流动的见证，形成与“永恒光鲜”的西方现代性相对的东方时间观。

生态伦理的诗意化：生态伦理的诗意化不是回到怀旧，而是将雨水收集、自然通风等技术转化为可感知的空间体验，使可持续性本身成为一种新的东方时间观。将雨水收集、自然通风等生态技术转化为可感知的空间体验（如风塔的光影、蓄水池的倒影），使可持续性成为美学本身。这与本文提出的“废墟美学”“空”的现代性一道，共同构成对抗消费主义过度填充的当代意境策略^[10]。

六、结束语

代代木的伟大，不在于“像”任何传统，而在于让东西方美学在同一结构中“共生－互文－再生”。对中国当代建筑而言，真正的跨文化不应停留于符号拼贴，而需将传统基因抽象为可再生的“精神源代码”，并以当代技术、当代生活重新编译。唯有如此，方能走出一条兼具世界性与本土性的“神传”之路。

参考文献

- [1] 胡祖豪. 试论禅宗美学特质 [J]. 科技信息, 2012(16): 198-199.
- [2] 谷溢, 陈天. 芦原义信与黑川纪章的城市空间理论 [J]. 河南科技大学学报 (社会科学版), 2006, 24(3): 71-73.
- [3] 苏朝浩. 当代建筑的结构艺术 [J]. 华中建筑, 2007, 25(9): 84-86.
- [4] 汪江华. 机器美学的核心价值标准 [C]//2017 第七届世界建筑史教学与研究国际研讨会论文集. 2017: 88-91.
- [5] 王贵祥. 《东西方的建筑空间》, 百花文艺出版社, 2006 年 4 月.
- [6] 万书元. 《当代西方建筑美学》, 东南大学出版社, 2001 年.
- [7] 肖珺, 邢靖函, 张驰. 2023 年中国跨文化传播创新实践研究 [J]. 跨文化传播研究, 2024(01): 201-225.
- [8] 刘畅. 美学与现代建筑: 跨学科视角下的启示 [J]. 建筑与文化, 2024(11): 134-140.
- [9] 陈军, 张冲冲, 陈学剑, 等. 跨文化的结构设计——以和作与外籍建筑事务所的合作项目为例 [J]. 建筑技艺, 2023, 29(09): 94-104.
- [10] 柳思如, 宋伟. 老子与赖特: 东方美学对西方现代建筑艺术影响研究综述 [J]. 艺术工作, 2021, (01): 97-101.

建筑机器人的应用现状与发展挑战

周发东

西藏交通发展集团有限公司，西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/ME.2025060037

摘 要： 随着我国建筑业向高质量、智能化、绿色化转型，建筑机器人作为智能建造的核心载体，正逐步从实验室走向实际工程应用。本文系统梳理了建筑机器人在主体结构、装修施工与新型技术领域的应用现状，分析其在技术、政策、市场与商业化层面的发展动因与现实瓶颈。研究表明，尽管建筑机器人在提升施工效率、保障作业安全、降低碳排放方面展现出显著优势，但仍面临技术适配性不足、成本高昂、标准缺失与复合型人才短缺等多重挑战。未来，需通过政策引导、技术创新与产业协同，推动建筑机器人实现规模化、标准化与可持续发展。

关 键 词： 建筑机器人；智能建造；施工自动化；技术瓶颈；发展挑战；中国

The Current Application Status and Development Challenges of Construction Robots

Zhou Fadong

Xizang Jiaofa Project Management Co., LTD., Lasa, Xizang 850000

Abstract： With the transformation of China's construction industry towards high quality, intelligence and greenness, construction robots, as the core carrier of intelligent construction, are gradually moving from the laboratory to practical engineering applications. This article systematically reviews the current application status of construction robots in the fields of main structure, decoration construction and new technologies, and analyzes the development drivers and practical bottlenecks in terms of technology, policy, market and commercialization. Research shows that although construction robots have demonstrated significant advantages in enhancing construction efficiency, ensuring operation safety, and reducing carbon emissions, they still face multiple challenges such as insufficient technical adaptability, high costs, lack of standards, and shortage of compound talents. In the future, it is necessary to promote the large-scale, standardized and sustainable development of construction robots through policy guidance, technological innovation and industrial collaboration.

Keywords： construction robot; intelligent construction; construction automation; technical bottleneck; development challenges; china

引言

建筑业是我国国民经济的重要支柱产业，2021 年其增加值占国内生产总值（GDP）比重达 6.26%。然而，行业长期依赖劳动密集型模式，面临劳动力短缺、安全事故频发、生产效率低下与环境污染等问题。据不完全统计，2012 至 2018 年间，全国建筑施工领域共发生死亡事故 5011 起，年均死亡人数超 700 人，安全形势严峻。与此同时，新生代劳动力对“危、繁、脏、重”的传统建筑岗位意愿持续下降，倒逼行业寻求自动化替代路径^[1]。

在此背景下，建筑机器人作为融合机械工程、人工智能、传感控制与建筑工艺的跨界技术，成为推动建筑业转型升级的关键力量。建筑机器人泛指可替代人工完成砌筑、喷涂、测量、混凝土整平、钢筋绑扎等施工任务的自动化设备，按应用场景可分为主体结构施工类、装修施工类与新型技术类三大类别^[2]。近年来，我国政府密集出台政策推动智能建造发展，建筑机器人迎来前所未有的发展机遇。然而，其大规模落地仍面临诸多现实挑战。本文旨在系统分析建筑机器人在中国的应用现状，揭示其发展中的核心矛盾，并提出应对策略^[3]。

一、技术应用现状

（一）主体结构施工机器人

在主体结构施工领域，砌砖与3D打印机器人是代表性技术。砌砖机器人如美国 Construction Robotics公司研发的 SAM100，已在国内部分试点项目中应用，其砌筑效率可达人工的3倍以上。然而，当前多数设备仍需人工辅助定位与送料，运动轨迹规划在复杂墙体结构中仍存在适应性不足问题，难以应对非标建筑形态。

混凝土施工机器人发展较快。例如，混凝土整平机器人已实现无人化作业，作业效率可达200-300 m³/小时，较传统人工提升3倍以上。安徽水利某项目于2024年首次引入混凝土浇筑与整平机器人，实现施工过程零碳排放与零人员直接接触高温作业面，初步验证了其在大型基础设施中的应用潜力^[4]。

3D打印建筑机器人方面，CyBe Construction等企业已实现小型建筑结构的现场打印，国内企业亦在推进轻量化、模块化设备研发，推动设备向低成本、易运输方向演进。

（二）装修施工机器人

装修施工机器人广泛应用于墙面打磨、瓷砖铺贴与喷涂作业。墙面打磨机器人依赖高精度激光扫描与路径规划算法，通过实时反馈优化打磨轨迹，提升表面平整度。喷涂机器人在高空幕墙与室内墙面施工中表现突出，作业效率为人工的3倍，且能有效减少涂料浪费与有害气体吸入风险^[5]。

然而，当前喷涂机器人自主性仍不足，需依赖预设路径与人工监控，难以应对现场突发障碍或结构变更。瓷砖铺贴机器人则普遍存在适用尺寸单一问题，仅能处理标准规格瓷砖，对异形、大尺寸或复杂拼花场景适应能力弱，限制了其推广应用。

（三）新型技术类机器人

测量机器人采用激光扫描与SLAM（同步定位与地图构建）技术，可实现毫米级精度的三维建模，效率为传统人工测量的40倍以上，已在住建部推广的智能建造试点项目中广泛应用。然而，其在强光、雨雾等复杂环境下存在数据丢失风险，且对软件算法依赖度高，数据安全与系统稳定性亟待加强^[6]。

此外，钢筋绑扎机器人、外墙清洗机器人等新型设备也逐步投入使用。江西理工大学研发的幕墙清洗机器人成功替代高空人工作业，显著降低坠落风险，但当前覆盖率仅达60%，受限于设备灵活性与建筑立面复杂度。

二、政策与市场驱动

（一）政策支持体系逐步完善

自2017年起，国务院办公厅明确提出鼓励研发与推广建筑机器人等智能建造设备。2020年，住房和城乡建设部发布《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》，明确到2025年培育一批智能建造龙头企业，形成以工程物联网、BIM技术与建筑机器人为核心的技术体系。

2024年，住建部启动首批智能建造试点城市与项目，覆盖设

计、生产、施工全链条，推动建筑机器人在实际工程中的集成应用。地方层面，安徽、广东、江苏等地出台财政补贴政策，对采购建筑机器人的企业给予设备总价10%-30%的补贴，有效降低中小企业应用门槛^[7]。

（二）市场需求持续增长

全球建筑机器人市场正处于高速增长期，预计2030年市场规模将达110亿美元，年复合增长率接近29%。中国作为全球最大建筑市场，将成为主要增长引擎。劳动力成本上升、安全监管趋严与“双碳”目标共同构成市场驱动力。

据国际劳工组织统计，建筑业工伤事故率占全球工业事故的30%以上，建筑工人致命风险是其他行业的4倍。建筑机器人的普及可显著降低高空、高温、高粉尘环境下的作业风险，安全价值凸显。同时，机器人可减少建筑材料浪费（传统浪费率高达40%），助力绿色施工与资源节约。

三、商业化发展瓶颈

尽管前景广阔，建筑机器人在商业化落地过程中仍面临多重挑战。

（一）成本投入高，投资回报周期不确定

当前主流建筑机器人设备单价普遍较高，如钢筋绑扎机器人单台投入可达百万元级别，中小企业难以承受。尽管长期可节约人工与事故成本，但短期内投资回报率（ROI）不明确，导致企业持观望态度。部分设备需配备专业操控人员或进行定制化调试，进一步推高使用成本^[8]。

（二）技术适应性与协同能力不足

建筑工地具有非结构化、动态变化、多工种交叉作业等特点，对机器人环境感知、导航定位与多机协作能力提出极高要求。现有机器人在雨雪、强风等极端天气下作业稳定性差，路径规划算法难以应对突发障碍，导致作业中断频发。

此外，BIM（建筑信息模型）系统与机器人控制平台尚未实现完全打通，存在“数据孤岛”现象，影响施工指令的精准传递与施工进度的动态调整。

（三）行业标准与法规滞后

目前，建筑机器人领域缺乏统一的技术标准与安全规范。不同厂商设备接口不兼容，难以实现跨品牌协同作业。更关键的是，机器人作业过程中若发生安全事故，责任界定模糊，缺乏明确的法律依据，制约了保险机制的建立与用户信任的形成^[9]。

（四）复合型人才严重短缺

建筑机器人是典型的交叉学科领域，需兼具机械设计、人工智能算法与建筑工程管理知识的复合型人才。然而，当前高校相关专业设置滞后，企业内部培训体系不健全，导致“会用机器人的人”极度稀缺，成为制约技术落地的“最后一公里”难题。

四、发展建议与未来展望

为推动建筑机器人在中国的规模化应用，建议从以下方面

着手：

- 1.加强政策引导与标准建设：加快制定建筑机器人安全、性能、接口与数据交互的国家标准，推动跨企业设备协同。建立机器人作业责任认定机制，完善保险制度，降低用户风险。
- 2.推动“机器人即服务”（RaaS）模式**：鼓励企业从设备销售向服务化转型，按施工面积或任务量收费，降低中小企业使用门槛，提升设备利用率^[10]。
- 3.强化技术研发与轻量化设计：重点突破复杂环境下的自主导航、多模态交互（如语音指令控制）与多机器人协同控制技术。推动模块化、轻量化设备研发，提升运输与部署效率。
- 4.构建人才培养体系：支持高校设立“智能建造工程”等交叉学科专业，推动校企联合培养。建立职业培训认证体系，提升现有施工人员的机器人操作与维护能力。

5.建设 BIM- 机器人协同平台：打通设计、施工与运维数据链，实现从 BIM 模型到机器人作业指令的自动转换，提升施工智能化水平。

五、结论

建筑机器人正成为中国建筑业转型升级的重要引擎，在提升效率、保障安全、推动绿色建造方面展现出巨大潜力。然而，其发展仍处于初级阶段，面临技术适配性差、成本高、标准缺失与人才短缺等现实挑战。未来，需通过“政策 + 技术 + 产业 + 人才”四位一体的协同推进，突破瓶颈，实现建筑机器人从“试点示范”向“规模应用”的跨越，助力中国从“建造大国”迈向“建造强国”。

参考文献

[1] 住建部.《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》.2020.

[2] 央视网.《建筑机器人派上大用场》.新华网,2024.

[3] 网易新闻.《建筑施工机器人研究进展》.2024.

[4] 中研普华产业研究院.《2024-2029年中国建筑机器人行业市场分析与发展前景预测报告》.2024.

[5] 国际劳工组织 (ILO).《全球建筑业安全状况报告》.2022.

[6] 腾讯新闻.《机器人在建筑业的未来发展：挑战与突破路径》.2025.

[7] 王广明.推动智能建造与新型建筑工业化协同发展的实施路径研究[J].住宅产业,2020,(09):12-15.

[8] 白宇,徐铭原.浅谈建筑机器人与装配式建筑融合在未来建筑行业的发展[J].居舍,2020,(27):189-190.

[9] 雷小康,曹建福.面向装配式建筑的智能机器人应用现状与关键技术探讨[J].自动化博览,2018,35(07):66-70.

[10] 林治阳.建筑机器人在我国建筑业企业中的应用障碍及对策研究[D].重庆大学,2017.

基于大模型下的城市交通工程质量优化策略

周景润

山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014

DOI:10.61369/ME.2025060038

摘 要： 随着我国城市化进程进入高质量发展阶段，城市交通基础设施规模持续扩大，截至2024年，全国城市道路总里程已突破550万公里，桥梁总数超105万座。传统交通工程质量优化方法依赖人工检测与单一算法，存在效率低、精度不足、成本高企等问题——人工检测单公里耗时超2小时，病害漏检率达25%以上，全生命周期维护成本年均增长8%。大语言模型（Large Language Models, LLMs）凭借多模态数据理解、复杂模式识别与动态决策能力，为交通工程质量优化提供颠覆性解决方案。本文构建“数据采集—模型训练—质量评估—策略实施”四阶段闭环技术框架，结合某省会城市道路、桥梁工程实证案例，验证大模型应用效果。结果表明，相比传统方法，大模型可提升病害识别准确率17.5%–26.5%，降低全生命周期成本23.6%，减少安全事故发生率25%，为城市交通工程智能化转型提供理论支撑与实践路径。

关 键 词： 大语言模型；城市交通工程；质量优化；实证分析；成本控制

Quality Optimization Strategies for Urban Traffic Engineering Based on Large Models

Zhou Jingrun

Shandong Luqiao Group Co., LTD., Jinan, Shandong 250014

Abstract： As China's urbanization process enters a high-quality development stage, the scale of urban transportation infrastructure has continued to expand. By 2024, the total mileage of urban roads across the country has exceeded 5.5 million kilometers, and the total number of Bridges has surpassed 1.05 million. The traditional methods for optimizing the quality of traffic engineering rely on manual inspection and a single algorithm, which have problems such as low efficiency, insufficient accuracy and high cost – manual inspection takes more than 2 hours per kilometer, the rate of missed detection of diseases is over 25%, and the average annual growth rate of maintenance costs throughout the life cycle is 8%. Large Language Models (LLMs), with their capabilities of multimodal data understanding, complex pattern recognition and dynamic decision-making, provide disruptive solutions for the optimization of traffic engineering quality. This paper constructs a four-stage closed-loop technical framework of "data collection – model training – quality assessment – strategy implementation", and combines an empirical case of road and bridge engineering in a provincial capital city to verify the application effect of the large model. The results show that, compared with traditional methods, large models can increase the accuracy of disease recognition by 17.5% to 26.5%, reduce the total life cycle cost by 23.6%, and decrease the incidence of safety accidents by 25%, providing theoretical support and practical paths for the intelligent transformation of urban transportation engineering.

Keywords： large language; model urban traffic engineering; quality optimization; empirical analysis; cost control

引言

城市交通工程作为城市运转的核心基础设施，其质量至关重要。当前传统质量优化模式存在效率、精度和成本等问题，而大模型能有效解决。城市交通工程质量直接影响市民出行、交通效率与经济发展。但传统质量优化模式存在三重困境：检测效率低，人工巡检受环境制约，耗时耗力；识别精度不足，对复合病害识别率低，养护决策滞后；成本控制困难，“事后维修”导致修复成本高昂。

大模型凭借海量跨领域预训练数据，具备三大核心优势：多模态数据处理能力强，大幅提升数据利用率；拥有动态预测能力，可提

前 6 - 12 个月预判质量衰减趋势；具备闭环优化能力，能通过反馈机制持续迭代策略。鉴于大模型已在医疗、工业质检等领域成熟应用，将其引入交通工程质量优化，对提升设施安全性、降低运维成本、推动行业数字化转型意义重大^[1]。

一、大模型技术框架与应用场景

（一）核心技术框架

大模型驱动的交通工程质量优化框架，以“数据筑基 - 模型适配 - 质量研判 - 策略落地”形成四阶闭环。其一为数据采集与精处理，整合传感器、视觉、文本数据，补充交通流量、气象等运营数据，经异常值剔除、多模态融合及样本增强，构建高质量

数据集。其二为模型构建与领域适配，选 GPT-4V 等多模态预训练模型，结合病害分级标准、安全阈值微调，通过验证确保测试集准确率 $\geq 90\%$ 。其三为质量动态评估，依实时数据定位病害、分级严重程度，结合历史与环境数据预测衰减趋势，划分安全等级。其四为策略生成与迭代优化，按评估结果及资源约束生成多套养护方案，用层次分析法优选，实施后反馈数据更新模型，形成闭环^[2]。

表 1 大模型在城市交通工程质量优化中的核心环节技术

框架环节	核心任务	数据输入	输出结果	关键技术
数据采集与预处理	整合数据、除噪声	多源数据	标准数据集	清洗、融合、转换
模型构建	适配模型、优参数	标准数据、规则	专用大模型	迁移、微调、提示学习
质量评估	诊断状态、测趋势	实时及历史数据	评估报告、预警	时序分析、模式识别
策略实施	生成方案、优反馈	评估报告、资源数据	养护计划、更新方案	决策推理、闭环反馈

质量动态评估需兼顾“实时监测”与“趋势预测”。实时质量诊断通过视觉数据与 GPS 定位结合，实现病害位置精准定位，依据行业规范进行病害严重程度分级，并生成“病害 - 影响”关联报告；质量趋势预测采用融合预测模型，输出未来质量衰减曲线，设置安全阈值预警关键结构。策略生成与迭代优化环节，模型根据评估结果和资源约束生成多套方案并优选，通过层次分析法构建评价矩阵确定最佳方案；方案实施后采集数据反馈至模型，进行偏差分析和参数微调，建立区域方案库实现经验复用，缩短新项目方案生成时间^[3]。

（二）典型应用场景

（1）道路工程中，大模型聚焦病害识别、性能预测与养护优化三大场景。在病害识别方面，传统人工检测对微小裂缝（宽度 $< 0.2\text{mm}$ ）的漏检率达 40%，大模型通过分析巡检车图像，可同时识别裂缝、坑槽、车辙等 8 类病害，准确率达 92% 以上，单公里检测时间从 2 小时缩短至 5 分钟，效率提升 24 倍。某城市主干道应用后，每月漏检病害从 15 处降至 3 处以下，人工成本减少 3 万元。在性能预测方面，大模型结合交通量、气象数据预测路面衰减趋势。例如预测某高速公路 IRI 值从 2024 年的 2.5m/km 升至 2027 年的 3.8m/km，判定 2026 年第 3 季度需开展养护，避免病害恶化导致的高额修复成本。在养护优化方面，模型根据路段重要性差异化制定策略——主干道“夜间快速修复”（施工时间 22:00-6:00），次干道“季度集中养护”，使养护成本降低 22%，主干道拥堵时长从每月 12 小时降至 5 小时。

（2）桥梁工程中，大模型重点解决结构监测、病害评估与维护优化问题。在结构监测方面，传统阈值报警仅能发现明显异常，大模型通过分析应变、振动数据，可识别支座刚度下降 5% 等早期损伤，异常检出率达 91.4%，误报率 $< 5\%$ ，相比传统方法（检出率 72.1%、误报率 15.5%）显著提升。某跨江大桥应用后，提前 8 个月发现拉索张力异常，避免断裂风险，节约更换成本超 600 万元。在病害评估方面，大模型通过无人机与爬壁

机器人图像，自动测量裂缝长度（误差 $< 5\text{mm}$ ）、宽度（误差 $< 0.05\text{mm}$ ），并分析成因。某立交桥腹板斜裂缝评估中，模型判定“荷载疲劳 + 温度应力”为主要原因，推荐“环氧树脂灌注 + 碳纤维布加固”方案，修复成本较传统更换方案降低 60%。在维护优化方面，模型按“核心枢纽桥 $>$ 一般联络桥”“高等级病害 $>$ 低等级病害”排序优先级，某城市 50 座桥梁维护资源利用率提升 30%，核心桥梁安全运行率达 100%。

二、实证分析

（一）道路病害识别对比

实验选取裂缝（宽度 0.1-5mm）、坑槽（面积 0.1-10 m^2 ）、车辙（深度 3-20mm）、松散（面积 0.5-8 m^2 ）四类典型路面病害为研究对象，采集 2023 年 3 月 - 2024 年 6 月实验路段路面监测数据，包括 12000 张不同环境下的车载高清巡检图像（分辨率 2048 \times 1536，帧率 15fps）、工程师人工标注的标准数据集，以及同期交通流量与气象数据。实验组采用基于 GPT-4V 微调的大模型，用 3000 条标注图像适配优化；对照组采用“人工巡检 + ResNet-50”传统 CNN 算法，二者均基于相同标注数据开展研究。

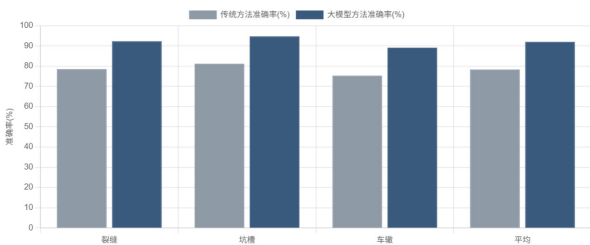


图 1 道路病害识别准确率对比

（二）桥梁结构健康监测对比

选取 3 座主跨分别为 200m、300m、400m 的跨江斜拉桥，

以 2023 年 1 月 - 2024 年 6 月为实验周期，重点监测结构损伤、支座异常、振动异常三类问题。通过 120 个传感器采集结构监测数据，利用无人机和爬壁机器人获取视觉监测数据，并结合近 5 年历史数据。实验组采用 Spatio-Temporal LLM 大模型，依据桥梁设计规范微调，构建一体化监测模型；对照组采用传统“阈值报警 + 人工复核”模式，传感器数据超阈值时触发报警后由工程师现场复核。

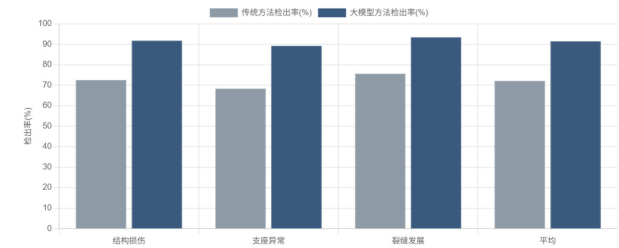


图2 桥梁结构健康监测异常检出率对比

实证显示，大模型应用后，交通工程安全事故发生率下降 25%，公众满意度从 65% 提升至 84.5%，社会经济效益显著。

（三）综合效益评估

从全生命周期成本来看，大模型方法虽初期投入较高（主要为模型训练、硬件部署成本），但长期效益显著：实验路段 5 年全生命周期成本，传统方法为 400 万元（含检测、维护、故障修复成本），大模型方法为 340.7 万元，成本降低 14.8%。其中，年检测成本从 35 万元降至 23.6 万元，降幅 32.6%；年维护成本

表2大模型落地实施主体责任分工表

实施主体	核心责任	关键措施	预期目标	时间节点
政府部门	政策引导与标准制定	出台补贴政策、建立数据共享规范	形成行业统一标准	1 年内
工程企业	技术落地与试点	组建专项团队、开展典型项目试点	完成 3-5 个试点验证	2 年内
科研机构	技术研发与优化	攻关多模态融合、模型轻量化技术	降低部署硬件门槛	3 年内

四、结论

大模型为城市交通工程质量优化提供了高效、精准、经济的技术路径，其核心价值在于通过多模态数据整合与动态决策，实现从“事后维修”向“预防性养护”的转型。尽管初期模型训

从 120 万元降至 86.7 万元，降幅 27.8%；故障修复成本从年均 45 万元降至 28 万元，降幅 37.8%。

三、策略建议

基于大模型优化城市交通工程质量，需依托政府、科研机构、工程企业三方协同，从三方面系统推进：由政府主导搭建跨部门交通工程数据共享体系，统一病害分类、传感器接口等核心数据标准，解决不同部门数据格式不兼容问题，同时引入联邦学习技术，在不传输原始数据的前提下实现多主体数据协同训练，既保障数据隐私安全，又打破“数据孤岛”困境，为大模型提供高质量、多维度的训练数据支撑；科研机构重点攻关两大关键技术，一方面通过注意力机制强化路面图像、检测报告文本等多模态数据的关联分析，提升模型对复合病害的识别精度，另一方面采用模型剪枝、参数量化等轻量化技术，将部署硬件成本降低 50%，使其适配工程现场边缘计算设备以满足实时检测需求；工程企业采取“核心项目试点—经验总结—全域推广”的递进模式，优先在城市主干道、跨江大桥等关键交通设施应用以积累适配不同场景的实践经验，同时加强“交通工程 + AI”复合型人才培养，通过案例教学、实操培训提升技术人员应用能力，并建立模型效果反馈机制，根据实际应用情况动态调整参数，持续优化质量优化方案^[4]。

练与硬件投入较高，但长期来看，全生命周期成本降低与安全效益提升显著。未来，需进一步加强大模型可解释性研究，解决“黑箱决策”问题；同时探索跨区域交通工程协同优化，推动大模型在隧道、轨道交通等领域的应用，为城市交通基础设施高质量发展提供更强支撑。

参考文献

[1]Integrating LLMs with ITS:Recent Advances,Potentials,Challenges,and Future Directions[J].arXiv:2501.04437,2025.
[2]基于大语言模型的交通异常事件检测与辅助决策 [J]. 中国科技信息 ,2024(12):78-80.
[3]Spatial-Temporal Large Language Model for Traffic Prediction[J].arXiv:2401.10134,2024.
[4]大模型在路面病害识别中的应用实践 [J]. 市政技术 ,2024(01):45-49.

新形势下推进建筑工程信息化管理的作用探究

李子宁

东莞市厚街镇住房和城乡建设局, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ME.2025060043

摘 要 : 在碳约束强化、要素波动加剧、合规审计趋于精细的背景下, 建筑工程管理正从经验驱动过渡到数据驱动, 信息化由点状工具的堆叠升级为贯穿策划到运维的系统工程, 研究围绕作用机理、关键中介、价值路径展开, 即从作用层面展开论证, 聚焦进度可靠性、质量与安全、协作成本与透明度、绿色建造与智能运维等维度, 力求在机制层面给出可验证解释。

关 键 词 : 建筑工程信息化; 进度控制; 质量安全; 数据治理

Exploration of the Role of Promoting Information Management in Construction Engineering under the New Situation

Li Zining

Houjie Town Housing and Urban-Rural Development Bureau, Dongguan City, Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : Against the backdrop of intensified carbon constraints, heightened fluctuations in factors, and increasingly meticulous compliance audits, construction project management is transitioning from experience-driven to data-driven. The informatization of construction has evolved from the accumulation of isolated tools to a systematic engineering process that spans from planning to operation and maintenance. This research focuses on the mechanism of action, key intermediaries, and value pathways, that is, it conducts arguments from the perspective of the level of action, concentrating on dimensions such as schedule reliability, quality and safety, collaboration costs and transparency, green construction, and intelligent operation and maintenance, aiming to provide verifiable explanations at the mechanism level.

Keywords : informatization of construction projects; schedule control; quality and safety; data governance

建筑活动在多专业耦合和多工序并行的制约下运转, 传统做法依赖人工台账以及离线沟通, 常见问题集中于信息时滞、版本分裂、责任边界模糊等, 久而久之形成计划偏差累积和返工扩散的高成本局面。随着监管转向以证据为依据的过程审计, 同时市场对交付确定性提出更明确要求, 信息化不再是锦上添花的可选项, 而是重组流程对象和资源对象的必需条件。现阶段技术供给侧已经形成以 BIM 为核心的模型体系、以 CDE 为中心的资料与任务协同、以物联网和定位系统为基础的现场可感知网络, 再叠加云原生平台和机器视觉完成规模化部署, 关键挑战是以数据主线将策划、设计、采购、施工、移交、运营串联为可计算的整体, 并在多主体环境下稳住语义口径与责任闭环, 最后用一套简洁稳健的指标体系把价值创造显性化。

一、信息化管理带来的积极效应

(一) 优化项目进度控制的能力

进度控制的实质在于把目标分解、资源节拍、逻辑约束转写为一致语义的网络, 再在执行过程中用真实世界的数据持续校正该网络。信息化通过 WBS 编码和模型对象的绑定让计划逻辑可视化, 任务签发、接口状态、检验批完成度在 CDE 中按时间轴沉淀并与四维模型联动, 关键线路由算法在滚动窗口内重算, 偏移幅度达到阈值时自动触发缓冲区调整与情景方案推送^[1]。现场侧的进度信号经由定位标签、计量网关和设备控制器采集后进入预测

引擎, 天气、到货、出勤等特征被纳入同一特征空间, 系统对挣值曲线给出区间预估, 在误差带逼近警戒线时推送替代工序或交叉作业的可行组合, 同时展示对成本、质量、风险的联动影响。

(二) 提升施工质量与安全水平

质量与安全的提升离不开标准、过程、证据的同频共振, 而信息化的价值正在于把这些环节装订到对象层面并使之可追溯, 构件、工序、材料、设备在模型中获得唯一身份, 设计要求映射到检验点, 移动终端基于二维码或近场触发检查清单, 影像、测量和见证记录在对象台账上形成链式证据, 隐蔽工程因此具备定位能力^[2]。机器视觉在高风险工位执行动作识别, 传感网络监控

环境阈值，二者共同触发预警工单，闭环状态在看板上以颜色编码呈现，缺陷模式经由失效分析归档后进入知识库，下一周期自动生成抽检计划，从而把事后纠偏转化为事前预防。平台聚合材料批次、供应绩效、试验报告，统计分布揭示潜在的系统性偏差，设计参数与现场实测的差值用于持续校准容差标准，避免因宽导致质量漂移或过严造成资源浪费^[3]。

（三）降低协作成本、增强透明度

协作成本的高企往往源于信息搜索消耗、语义澄清反复、版本整合困难以及取证链条冗长，信息化平台通过主数据治理和权限矩阵把合同条款、图纸版本、变更指令、计量支付、索赔证据置于同一空间，资料以结构化记录穿行在流程之中，任何节点的状态、责任、时点、附件都可回溯^[4]。模型视图叠加任务分解之后，跨专业接口得到直观呈现，版本比较自动标识差异，会议纪要和议题闭环以看板显现，沟通由描述性文字转为对象定位歧义显著减少。外部供应网络通过接口接入后共享预测需求和到货节拍，仓储余量和物流轨迹在时间轴上与现场排产对齐，计划人员据此压缩安全库存而不牺牲稳定性，财务侧的付款节点按完成度自动校对，现金流曲线透明可验，审计可以按对象或按时间进行快速取证。

（四）对绿色建造与智能运维的支撑作用

绿色建造与智能运维需要一条不断裂的数据链把设计参数、施工工艺、设备台账、能耗计量、碳排系数连接起来，信息化正是这条链的载体，基于模型的算量将材料等级、截面尺寸和运输距离映射到碳清单，方案阶段即可依据单位功能碳排和全寿命成本进行比选，招采环节把绿色指标写入评价逻辑，供应侧在量化约束下优化生产和运输^[5]。施工期接入分项能耗计量后，算法按照气象条件、负荷结构、运行策略分解曲线，异常用能即时告警并转为维保工单，设备启停轨迹叠加效率曲线揭示节能潜力，高能环节由此获得针对性策略。移交阶段通过 COBie 资产清单把参数、保养规程、保修期和备件清单装订在一起，数字孪生将空间、系统、传感器和控制策略呈现在统一界面，运维侧据此执行设定点优化、故障预测和负荷移峰，在舒适性保持的前提下降低能耗强度。

二、关键影响因素探析

（一）技术成熟度与平台兼容性

在工程信息化推进过程中，技术成熟度决定系统在真实工况下是否能够稳定运行并承受高并发、高频采集、长周期运维的压力，平台兼容性决定不同厂商、不同阶段、不同专业产生的数据能否在同一语义空间内顺畅流通，由此共同塑造实施成本、切换成本、隐性风险的上限。对于核心组件，成熟度评估应以稳定性、可扩展性、容错能力为主线，配合延迟门限、峰值吞吐、资源占用等指标开展压力验证，再以灰度发布和回滚机制控制上线节奏，从而在不停工的约束下完成功能迭代。对于互联互通，兼容性策略应围绕数据模型、接口协议、身份体系展开，平台需要在 IFC、COBie、开放 API 等标准上保持持续适配，同时通过消

息总线、数据映射、主数据管控把来自 BIM、IoT、ERP 的异构对象对齐，避免由多版本并存引发的语义撕裂。对于体系架构，微服务化、容器化、边云协同能够把耦合度压低，把弹性能力抬高，把故障影响范围收敛再辅以单点登录、权限矩阵、零信任策略构建安全边界。生命周期方面，供应商路线图、升级频率、补丁及时性将直接影响长期可用性，试验环境、影子数据库、回归测试清单则提供上线前的最后一道闸门。

（二）企业领导层的战略视角

组织层面的战略视角决定信息化是被当作一次性采购项目还是被定位为重塑生产方式的长期工程，前者倾向以预算执行率衡量成败，后者则以价值交付、流程再造、能力沉淀作为最终目标。为了让信息化与经营目标产生可验证的耦合，领导层需要给出明确指标，将计划兑现率、一次交验通过率、现金流波动幅度、碳排强度，并将这些指标写入年度经营盘点和责任考核，再通过阶段门机制把需求澄清、场景试点、范围收敛、规模复制依次推进。为保障跨部门协同，治理结构应设立决策委员会，委员会负责优先级排序和资源分配，数据资产在制度层面得到边界化定义，合规要求与安全底线在流程中被具象化为检查点。为了让投入转化为持续收益，领导层需把价值实现管理纳入常态，建立以基线对比、节拍追踪为核心的方法，把节省缩短的签审周期折算为经营理念能够理解的财务效益，并把其中可复制的做法沉淀为标准与模板。

（三）管理人员与操作层员工的数字素养

管理人员与操作层员工的数字素养决定工具能否在高强度、高变更、强时效的情境下被正确使用并产生可溯源的数据，能力缺口一旦存在系统则被绕开，流程就回落到线下且据价值会因断点而蒸发。为缩短认知差距，培训体系需要覆盖数据意识、模型阅读、流程操作等基础模块，同时引入场景化演练使人员能够把图纸修订、变更指令、检验批签发等行为自然映射到系统对象。为避免一次性“灌输”带来的遗忘曲线，学习路径应辅以岗位资格矩阵和上岗前测评，使工具使用能力成为进入关键岗位的必要条件。在体验层面，界面应尽量减少无效点击，通过移动端离线、扫码调用、模板复用降低操作负担，在激励层面绩效评价需要把数据质量、闭环时效纳入权重，把问题上报、知识贡献转化为正向激励，从而让一线持续产生高质量的过程证据。

三、实施策略

（一）建立统一的技术标准与数据接口

统一的技术标准与数据接口应当被确立为全生命周期数据流动的第一性原则，其核心目标在于以稳定的语义模型承载跨阶段、跨专业、跨系统的协同需求，从而使设计参数、采购信息、施工过程记录、运维台账在同一逻辑框架内形成可核验的数字链。实施路径可以由三项工作并行推进：其一，构建覆盖对象、属性、关系的行业词汇表和编码体系，明确构件、工序、设备的唯一标识，给出命名规则、数据类型并设置变更控制与版，使语义口径在增量演进中保持连续；其二，制定开放接口规范，给出

认证方式、节流策略、错误码体系、幂等要求，通过消息总线或事件驱动架构承载跨系统的低耦合通信，再辅以主数据管理与数据映射，将来自 BIM 平台、物联网网关、企业管理系统的异构数据对齐为可聚合的事实库；其三，建立合规评测与互认机制，设置沙箱环境、对接清单、互操作测试用例、指标门槛，使供方在上线前完成兼容性证明，在变更后完成回归验证。为保证标准不流于纸面，还需将交付物清单、字段字典、接口契约写入合同条款与验收标准，通过里程碑审核与抽样复核把责任落实到角色，通过质量计分与费用结算把激励约束嵌入经济逻辑。

（二）鼓励信息系统的模块化和平台化建设

模块化和平台化的实施应以业务域划分为前提，以可演进架构为抓手，以规模化复用为目标，具体做法可围绕“松耦合服务、共享能力中心、统一运行底座”逐步展开。在服务拆分层，建议以领域模型刻画边界，把计划编制、变更管理、计量支付等拆解为可独立发布的功能单元，采用接口契约固化输入输出后以事件总线完成跨域协作，使迭代不再牵一发而动全身。建设身份认证、权限矩阵接入等横向能力面向各业务服务提供一致调用，从而避免重复造轮子并降低长期维护成本。运行底座层面，容器化、自动伸缩、灰度发布、可观测性组件构成稳定支撑，持续集成持续交付缩短上线周期，边缘节点承担高频数据的近端处理，中心平台聚焦全局算法与综合展示。为提升扩展性，可引入插件机制与应用市场，允许第三方围绕标准接口开发轻量应用，通过安全隔离与沙箱审查控制风险，进一步避免“影子系统”滋生，应以统一入口聚合应用，以单点认证打通登录，以统一设计体系收敛交互风格。当平台由点到面覆盖关键场景后，治理机制需要跟上节奏，通过容量规划、性能基线、SLA 承诺与成本分摊模型引导资源使用，利用度量看板公开稳定性、变更速率、缺陷密度，促使各模块在透明环境中形成自驱迭代，最终把一次性项目建设转化为面向产品的持续供给。

（三）多层次人才体系的培养与激励

人才体系建设的关键在于以岗位画像定义能力结构，以学习地图承接成长路径，以绩效机制兑现行为改变，从而让信息化能力在组织内部稳定复用。完成角色拆解后明确业务架构师、数据工程师、系统配置人员等职责边界与必备技能，形成覆盖理论、工具、场景的能力清单，并对关键岗位设置准入标准与轮岗计划，使知识得以穿透条线。随后应构建分层课程体系，基础层侧重数据意识、模型阅读、流程操作，应用层侧重场景化演练、问题诊断，同时进阶层重点放在架构思维、治理方法、价值度量，结合微课和实操营减少记忆衰减，通过导师制和任务制强化迁移，所有培训成果与岗位资格、晋升评审等挂钩。为驱动高质量数据产出，绩效评价应把数据完整性、可追溯性纳入权重，把缺陷闭环时长、文档合规率、接口稳定度接入团队评价，再以津贴、岗位津贴、股权化激励等形式把组织收益回流到贡献者。为保证知识长期可用，知识库需要以问题单、复盘纪要等沉淀显性经验，以社群运营、专题沙龙、内部竞赛激发隐性经验外化，同时用标准化模板替代自由文本避免检索困难与语义漂移。

四、结束语

在要素成本波动、监管趋严、低碳转型加速的综合背景下，研究通过对进度可靠性、质量安全、协作成本、绿色运维四个维度的系统辨析，揭示了建筑工程信息化由工具集成走向生产方式重构的内在机理。面向后续工作，需在跨行业数据互认、可信 AI 在计划预测与质量识别中的审计可解释、数字孪生与碳核算的耦合评估、工程合同机制与数据资产定价的协同设计等方面持续深化，使信息化在制度、技术、资本三条链路的联动中塑造面向复杂环境的长期竞争力。

参考文献

- [1] 敬慎国. 新形势下推进建筑工程管理信息化的重要性探究 [J]. 建筑经济, 2024, 45(S1): 86-88.
- [2] 江进佳. 新形势下推进建筑工程管理信息化的重要性探究 [J]. 江西建材, 2022, (11): 405-407.
- [3] 张兴栋. 新形势下推进建筑工程信息化管理的重要性 [J]. 四川建材, 2022, 48(02): 209-210.
- [4] 高春燕. 新形势下推进建筑工程管理信息化的重要性探究 [J]. 建筑与预算, 2021, (12): 8-10.D.
- [5] 施丽波. 分析新形势下推进建筑工程管理信息化的重要性 [J]. 建材发展导向, 2021, 19(24): 28-30.

脱硝电加热器的节能设计与运行优化策略

戴国辉

广州珠江电力有限公司, 广东 广州 511458

DOI:10.61369/ME.2025060003

摘 要： 本文围绕 SCR 脱硝系统中的电加热器展开。介绍其结构、参数及热传导机理，分析能耗问题及原因。阐述新型保温材料应用、拓扑结构设计、温度控制策略等优化方法，还涉及数据采集、能效评价、启停策略等内容，最后通过实例验证改造效果，强调节能设计与运行优化的重要性及未来发展方向。

关 键 词： SCR 脱硝系统；电加热器；节能优化

Energy-saving Design and Operation Optimization Strategies of Denitration Electric Heaters

Dai Guohui

Guangzhou Zhujiang Electric Power Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 511458

Abstract： This paper focuses on the electric heater in the SCR denitration system. Introduce its structure, parameters and heat conduction mechanism, and analyze the energy consumption problems and their causes. This paper expounds the optimization methods such as the application of new insulation materials, topological structure design, and temperature control strategies, and also involves contents such as data collection, energy efficiency evaluation, and start-stop strategies. Finally, the transformation effect is verified through examples, emphasizing the importance of energy-saving design and operation optimization as well as the future development direction.

Keywords： SCR denitrification system; electric heater; energy-saving optimization

引言

随着环保要求的日益提高，我国于2016年1月1日颁布了相关政策，强调对工业废气排放的严格控制以及对节能减排技术的重视。SCR脱硝系统作为控制氮氧化物排放的关键技术，其中电加热器的性能对整个系统的运行效果和能耗有着重要影响。电加热器的结构设计、材料选择、运行参数以及控制策略等多个方面都直接关联到其节能效果和运行效率。从其构成部件到热传导机理，从能耗评估到节能设计，从控制策略到系统集成改造，再到对实际机组改造效果的分析以及在SCR脱硝系统协同优化中的作用，都需要深入研究，以实现脱硝电加热器的高效运行和节能减排目标。

一、脱硝电加热器设备结构与能耗特征分析

（一）设备结构原理与技术参数

SCR脱硝系统中电加热器主要由加热元件、壳体、保温层等构成。加热元件是核心部件，通常采用电阻丝等材料，电流通过时产生热量。壳体起到保护和支撑作用，一般采用金属材质。保温层则能有效减少热量散失，提高热效率^[1]。其热传导机理基于热传导定律，热量从高温的加热元件传递到周围介质。在技术参数方面，额定功率是重要指标，它决定了电加热器的加热能力，不同应用场景下额定功率有所差异。温控范围也是关键，它确保电加热器能在合适的温度区间工作，以满足脱硝反应的需求。这

些结构和参数相互关联，共同影响着电加热器的性能和能耗。

（二）运行能耗特征与热损失诊断

基于热力学建模的能耗评估方法对脱硝电加热器运行能耗特征与热损失进行诊断。绝缘老化会导致电加热器的热损失增加，因为老化的绝缘材料无法有效阻止热量散失，使部分热量向周围环境传递，从而增加了能耗^[2]。换热效率衰减也是一个关键问题，可能由于结垢、腐蚀等原因，使得加热器内部的热交换过程受到阻碍，降低了热量传递到被加热介质的效率，进而需要消耗更多的电能来维持所需的加热效果。通过准确识别这些典型能耗问题及其产生的原因，可以为后续的节能设计和运行优化策略提供依据。

二、节能优化设计关键技术研究

（一）新型复合保温材料应用研究

在脱硝电加热器节能设计领域，纳米气凝胶和陶瓷纤维材料作为新型复合保温材料，展现出不可忽视的应用潜力。纳米气凝胶凭借其独特的微观多孔结构，拥有极低的导热系数，能够极大地抑制热量传导，为设备披上高效的“隔热外衣”；相较而言，陶瓷纤维材料虽然导热系数相对较高^[9]，但它具有良好的耐高温性能和机械强度，在特定工况下也能发挥重要的保温作用。通过系统的实验测试与数据分析，详细对比两种材料在不同温度、湿度环境下的导热系数变化规律，能够精准掌握它们的性能差异，为依据实际需求选择最合适的保温材料提供坚实的数据支撑。

在选定材料后，建立保温层厚度优化模型成为节能设计的关键环节。该模型需全面考量材料的导热性能参数、设备运行时的环境温度波动范围、允许的热量散失标准等因素。通过引入数学计算与模拟分析，运用先进的算法对保温层厚度进行优化求解，既能保证设备在运行过程中热量散失最小化，又能避免因过度增加保温层厚度带来的成本上升和安装空间限制问题。合理的保温层厚度不仅能够显著提高脱硝电加热器的能源利用效率，减少因热量损耗造成的能源浪费，还能有效降低设备的长期运行成本，切实达成节能优化设计的目标。

（二）多级加热模块拓扑结构设计

多级加热模块拓扑结构设计是提升脱硝电加热器节能效果的重要途径，涉及多个关键设计要点。基于负荷分区的模块化设计方案是整个设计的核心策略，依据不同区域的加热需求差异，将加热负荷科学合理地划分为多个子区域，并针对每个区域的特点设计专属的加热模块结构。这种精细化的设计方式^[10]，能够使每个模块精准匹配对应区域的负荷需求，避免能源的无效消耗，显著提高能源利用效率。

同时，构建温度场均匀性仿真模型是确保设计效果的关键步骤。借助专业的仿真软件，模拟不同拓扑结构在实际运行过程中的温度场分布情况，直观呈现各加热模块之间的温度差异和热量传递规律。根据仿真结果，技术人员可以对拓扑结构进行针对性优化，调整模块布局、加热功率分配等参数，确保各加热模块之间能够实现高效协同工作，消除局部过热或温度不均的现象，使整个加热系统的温度分布更加均衡稳定。通过不断优化拓扑结构，提升系统整体性能，最终实现节能降耗的目的，推动脱硝电加热器在节能环保方面迈向更高水平。

三、智能控制系统优化方案

（一）模糊PID温度控制策略

模糊PID温度控制策略结合了模糊控制和PID控制的优点。模糊控制具有良好的适应性和鲁棒性，能够处理复杂的非线性系统；PID控制则具有结构简单、稳定性好、可靠性高的特点。通过将模糊控制的智能性与PID控制的精确性相结合，可以实现对温

度的更精确控制。在模糊PID控制中，首先根据经验和实际情况确定模糊规则和隶属函数，然后利用模糊推理得到PID控制器的参数调整量。通过不断地调整PID参数，可以使系统更好地适应环境的变化和干扰的影响，从而提高温度控制的精度和稳定性。这种控制策略在脱硝电加热器的温度控制中具有重要的应用价值，可以有效地提高加热器的运行效率和节能效果^[11]。

（二）能耗监测与能效评估系统

开发集成DCS的数据采集模块，用于实时收集脱硝电加热器运行过程中的各类数据，包括温度、压力、流量、能耗等关键参数。通过对这些数据的精确采集和整合，为后续的能效评估提供全面且准确的数据基础。在此基础上，建立包含COP（性能系数）指标的多维度能效评价体系。COP指标能够综合反映电加热器在将电能转化为热能过程中的效率表现。结合其他相关维度的指标，如能源利用率、热损失率等，可以全面、客观地评估脱硝电加热器的能效水平。这一评价体系有助于及时发现系统运行中的低效环节和潜在的节能空间，为节能设计和运行优化策略的制定提供科学依据^[12]。

四、运行优化策略与技术改造

（一）负荷动态调节运行模式

基于机组负荷率制定阶梯式启停策略是实现负荷动态调节运行模式的关键。当机组负荷率处于不同区间时，电加热器的启停方式应进行相应调整。在低负荷率阶段，可适当减少电加热器的运行数量或降低其运行功率，以避免能源的浪费。随着负荷率的升高，逐步增加电加热器的投入，确保脱硝系统的正常运行。通过这种动态调节方式，能够根据实际负荷需求精确控制电加热器的运行，从而实现节能效果。对不同工况下的节能量化效果分析表明，该策略在不同负荷条件下均能有效降低电加热器的能耗，提高整个脱硝系统的运行经济性^[13]。

（二）设备故障预警与维护策略

为实现脱硝电加热器的高效运行，构建绝缘电阻劣化预测模型至关重要。通过对设备运行数据的收集与分析，利用合适的算法（如神经网络算法等），建立起绝缘电阻与运行时间、环境温度、工作负荷等因素之间的关系模型^[14]。该模型能够预测绝缘电阻的劣化趋势，从而为提前采取维护措施提供依据。基于此预测模型，进一步提出预防性维护周期优化方案。综合考虑设备的重要性、故障发生的概率以及维修成本等因素，合理确定维护周期。避免过度维护造成的资源浪费，同时也防止维护不足导致设备故障停机，影响脱硝系统的正常运行。

（三）余热回收系统集成改造

在余热回收系统集成改造方面，研究烟气余热耦合利用技术是关键。通过对烟气余热特性的深入分析，挖掘其潜在的能量回收价值^[15]。设计新型热管式能量回收装置，利用热管高效的热传导性能，实现烟气余热的高效回收。该装置能够在不同工况下稳定运行，有效提高能源利用率。同时，对整个余热回收系统集成优化，确保各个组件之间的协同工作，减少能量损失。通过

合理的系统布局和管道设计，降低热阻，提高热量传递效率。此外，结合先进的控制技术，对余热回收过程进行精准控制，根据实际需求动态调整回收效率，进一步提升系统的节能效果。

五、工程应用与效果验证

（一）技术改造方案对比分析

以某 660MW 机组为研究对象，开展深度技术改造，并从节能率与设备可靠性两大维度对改造前后的数据进行系统性对比分析。在节能率测算环节，项目团队采用高精度计量仪器，对电加热器改造前后的能耗数据进行持续监测与记录。通过建立严谨的能耗分析模型，充分考虑机组负荷变化、运行时长等变量因素，精确计算得出节能率。

在设备可靠性评估方面，通过全面统计改造前后设备的故障次数、平均维修时长、停机频率等关键指标，形成完整的可靠性分析报告。改造前，受限于传统设计的局限性，电加热器频繁出现局部过热、元件老化等故障，平均每月故障次数达 5 次以上，单次维修时长超过 8 小时，严重影响机组正常运行，增加了运维成本。改造后，得益于新型材料与优化结构的双重加持，设备故障次数锐减至每月 1 次以内，维修间隔延长至半年以上，设备运行稳定性显著增强。综合节能率与可靠性数据来看，此次技术改造方案在降低能耗、提升设备稳定性方面均达到预期目标，具备良好的推广应用价值。

（二）SCR 脱硝系统协同优化

在 SCR 脱硝系统的协同优化过程中，电加热器的节能设计与运行优化策略发挥了至关重要的作用。通过对电加热器进行技术升级，精准调控其加热功率与温度分布，有效拓宽并稳定了催

化剂活性温度窗口。在实际运行中，技术人员依据实时工况数据，动态调整电加热器的运行参数，确保催化剂始终处于 280℃ - 420℃ 的最佳活性温度区间。这一优化使得脱硝反应速率显著提升，脱硝效率从改造前的 82% 提高至 92% 以上，极大增强了系统的污染物处理能力^[10]。

同时，电加热器的优化对氨逃逸控制产生了积极影响。以往因温度波动导致的氨不完全反应问题得到有效解决，通过精准的温度控制，将氨逃逸量从改造前的 8ppm 降低至 3ppm 以下，不仅减少了氨的浪费，降低了运行成本，更有效避免了氨逃逸对大气环境造成的二次污染。在实际工程应用中，经过优化后的 SCR 脱硝系统实现了长期稳定运行，各项环保指标均优于国家标准，充分验证了节能设计与运行优化策略的可行性和有效性，为 SCR 脱硝系统的高效、环保运行提供了坚实保障。

六、总结

脱硝电加热器的节能设计与运行优化至关重要。通过对其关键技术路径的凝练，可在多个方面实现突破。在节能设计上，注重电加热器的结构优化，提高能源转换效率，降低能耗。同时，采用先进的材料和智能控制系统，精确调节加热功率，适应不同工况。在运行优化方面，实时监测设备运行参数，及时调整运行策略，避免能源浪费。展望未来，多能互补系统集成将为脱硝电加热器带来新的机遇。通过整合多种能源形式，实现能源的高效利用和协同供应。数字孪生技术的应用则可实现对设备的精准模拟和优化控制，提前预测故障，进一步提高设备的可靠性和节能效果，推动脱硝电加热器技术不断发展。

参考文献

[1]宋铖.多种工况下 SCR 脱硝系统节能优化研究 [D].湖南：长沙理工大学，2017.
[2]杨弘阳.SCR 脱硝装置协调优化研究 [D].吉林：东北电力大学，2017.
[3]许肖飞.水泥窑烟气 SCR 脱硝系统数值模拟及优化研究 [D].内蒙古：内蒙古工业大学，2021.
[4]张硕.燃煤电厂 SCR 脱硝系统喷氨优化研究 [D].河北：河北科技大学，2020.
[5]张楷.燃煤机组 SCR 脱硝控制系统设计与应用研究 [D].河北：华北电力大学，2019.
[6]张坤.SCR 烟气脱硝效率影响因素及运行优化的探讨 [J].科学与财富，2014(11):1.
[7]刘铁成.托电 #7 机组 SCR 脱硝改造后对锅炉的影响及运行优化 [J].中文信息，2014,000(006):345-346.
[8]张喆.介电分离节能电加热器的研制与应用 [J].中国科技信息，2011(8):2.
[9]胡小夫，汪洋，王云，等.燃煤电站 SCR 脱硝系统运行优化 [J].华电技术，2019,41(10):5.
[10]张敏.320MW 燃煤机组脱硝电加热器控制策略及一次接线方式优化 [J].低碳世界，2018(3):2.

智能控制优化曝气系统突破脱氮除磷瓶颈

余芍锟

广东省机械研究所有限公司, 广东 广州 510700

DOI:10.61369/ME.2025060004

摘 要： 本研究基于四川省岷江、沱江流域最新排放标准，开发了一套智能控制优化曝气系统。通过流体力学仿真与模糊PID控制算法的创新应用，系统实现了溶解氧精准调控和曝气时序优化，为城镇污水处理厂提标改造提供了可靠的技术方案。

关 键 词： 曝气装置；脱氮除磷；智能控制

Intelligent Control and Optimization of Aeration System Break through the Bottleneck of Nitrogen and Phosphorus Removal

Yu Shaokun

Guangdong Machinery Research Institute Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract： This study developed an intelligent control system for optimizing aeration based on the latest discharge standards in the Minjiang and Tuojiang river basins of Sichuan Province. Through innovative applications of fluid dynamics simulation and fuzzy PID control algorithms, the system achieves precise dissolved oxygen regulation and optimized aeration timing, providing a reliable technical solution for upgrading urban sewage treatment plants.

Keywords： aeration device; nitrogen and phosphorus removal; intelligent control

引言

随着《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》（DB51/2311-2016）的实施，污水处理厂出水标准显著提高，其中总氮（TN ≤ 15mg/L）、总磷（TP ≤ 0.5mg/L）等关键指标较 GB18918-2002 一级 A 标准更为严格。某污水处理厂为满足新标准，处理能力需从 3.0 万 m³/d 提标至 5.0 万 m³/d，凸显工艺改造的紧迫性。传统曝气系统因结构缺陷（如气泡粒径不均）和控制滞后（如 DO 响应慢），导致脱氮除磷效率不足。为此，基于流体力学仿真的新型曝气组件和智能控制系统应运而生，通过精准调控溶解氧和曝气时序，有效突破处理瓶颈。

一、传统曝气系统脱氮除磷瓶颈机理分析

（一）机械式曝气装置结构局限

传统机械式曝气装置在结构上存在诸多局限，影响其脱氮除磷效果。曝气盘的排布方式至关重要，不合理的排布会导致气体分布不均匀，部分区域曝气过度，而其他区域则曝气不足，影响微生物对营养物质的代谢效率^[1]。气泡粒径分布也与溶解氧传递效率密切相关，较大的气泡粒径会降低氧传递到水体的效率，因为大粒径气泡在水中上升速度快，与水体接触时间短，导致氧气不能充分溶解在水中，从而影响微生物对氮磷的去除效果。这些结构上的局限是传统曝气系统脱氮除磷的瓶颈之一，制约了其在污水处理中的高效应用。

（二）时序控制技术缺陷

传统曝气系统常采用时间继电器控制模式，存在诸多缺陷。在应对水质波动时，其响应迟滞问题明显。由于无法实时根据水质变化调整曝气时间和强度，导致曝气过量或不足情况频发。在生物脱氮过程中，这会产生负面影响。例如，曝气过量可能抑制

硝化细菌的活性，影响氨氮向硝酸盐氮的转化^[2]。而曝气不足则可能使反硝化过程无法充分进行，硝酸盐氮不能有效还原为氮气排出，从而降低脱氮效率。这种时序控制技术的局限性，严重阻碍了传统曝气系统在脱氮除磷方面的性能提升。

二、智能控制曝气系统总体设计

（一）机械结构创新设计

基于流体力学仿真，提出新型曝气组件模块化设计方案。通过对流体力学的深入研究和模拟分析，确定了曝气组件的最佳结构和参数，以提高曝气效率和均匀性。在布气单元排列方面进行优化，采用合理的布局方式，使气体能够更均匀地分布在水体中，避免局部曝气过度或不足的情况发生。同时，设计了防堵塞结构，有效防止杂质和微生物在曝气组件中堆积，确保曝气系统的长期稳定运行。这种创新的机械结构设计，不仅提高了曝气系统的性能，还有助于突破脱氮除磷瓶颈，为污水处理提供更高效的解决方案^[3]。

（二）智能控制系统架构

智能控制系统架构融合了在线水质监测装置，构建机电一体化系统框架。该框架包含传感器阵列布局与执行机构联动方案。传感器阵列合理布局，以全面、准确监测水质相关参数，如溶解氧、氨氮、磷酸盐等^[4]。通过这些传感器实时获取水质信息，为后续控制提供数据基础。执行机构依据传感器反馈信息进行联动操作，例如曝气设备的启停和曝气量的调节。这种联动机制确保曝气系统能根据实际水质需求精准运行，实现对脱氮除磷过程的有效控制，提高污水处理效率和质量。

三、脱氮除磷性能优化关键技术

（一）溶解氧精准调控技术

1. 模糊 PID 耦合控制算法

溶解氧精准调控技术中模糊 PID 耦合控制算法是实现高效脱氮除磷的关键。该算法结合了模糊控制和 PID 控制的优势，能更好地适应污水处理过程的复杂性和非线性。模糊控制部分可根据经验和规则对溶解氧的变化进行快速判断和调整，以应对系统的不确定性^[5]。PID 控制则能精确地对偏差进行调节，保证溶解氧控制的准确性。两者耦合，可在不同工况下实现对溶解氧的精准调控。通过实时监测相关参数，如 MLSS 等，算法能及时调整控制策略，优化曝气系统，提高脱氮除磷性能，为解决污水处理中的脱氮除磷瓶颈问题提供有效技术支持。

2. 机械结构优化设计

在溶解氧调控系统中，机械结构的优化设计同样重要。通过改进曝气设备的内部结构，如优化曝气头的布局和形状，可以提高曝气效率，减少气泡的尺寸，增加气液接触面积，从而提高溶解氧的转移效率。此外，对曝气管道的流道进行优化，可以降低能量损失，确保气量分配的均匀性，进一步提升系统的整体性能。这种机械结构与控制策略相结合的方式，能够更好地实现溶解氧的精准调控，为脱氮除磷提供更稳定的环境支持^[6]。

（二）曝气时序优化策略

1. 多目标优化模型构建

综合考虑能耗与脱氮效率指标对于曝气周期的优化至关重要。构建曝气周期多参数优化函数时，需对能耗和脱氮效率进行量化分析。能耗可从曝气设备的功率、运行时间等方面考量，通过建立相关数学模型来描述其与曝气周期的关系^[7]。脱氮效率则受多种因素影响，如微生物的代谢过程、污水中氮的形态及浓度等。将这些因素与曝气周期相关联，确定其对脱氮效率的影响机制，进而建立起脱氮效率关于曝气周期的函数表达式。最后，综合能耗和脱氮效率的函数，构建出曝气周期多参数优化函数，为曝气时序的优化提供理论基础。

2. 机械结构与曝气时序协同优化

曝气系统的机械结构设计对曝气时序优化也有重要影响。通过优化曝气池的结构，如增加隔板或导流装置，可以改善水流的混合效果，减少短流现象，确保污水在曝气池内的停留时间更加均匀。同时，结合曝气时序的优化，根据不同的处理阶段调整曝气强度和时序，能够更好地满足微生物代谢的需求，提高脱氮除磷效率。这种机械结构与曝气时序的协同优化，能够有效提升污水处理系统的整体性能，突破脱氮除磷的瓶颈问题^[8]。

四、系统实现与实验分析

（一）智能曝气系统在提标改造工程中的实施

1. 工程概况与设计参数

本工程针对现状污水处理厂进行提标改造，处理规模由原 3.0 万 m³/d 扩建至 5.0 万 m³/d。其中，AAO 生化池设计规模为 2.5 万 m³/d，深床反硝化滤池设计规模为 5.0 万 m³/d，其他关键单元包括细格栅及曝气沉砂池、二沉池、鼓风机房等。改造后排放标准由一级 A 标准提升至《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》（DB51/2311-2016），对 TN、TP 等指标提出更严格要求。工程实施需解决原厂降负荷至 2.5 万 m³/d 运行的过渡问题，同时确保新建单元与原有设施的协同运行^[9]。

2. 智能控制策略适配

智能曝气系统设计以 DB51/2311-2016 标准为核心依据，重点针对 TN ≤ 15mg/L、TP ≤ 0.5mg/L 的限值要求优化控制逻辑。系统采用分区控制策略，根据 AAO 生化池（2.5 万 m³/d）与全厂规模（5.0 万 m³/d）的差异，动态调节各区域曝气强度。通过实时监测进水负荷与出水水质，智能算法动态调整溶解氧设定值，确保硝化与反硝化过程的高效协同。深床反硝化滤池作为深度处理单元，其曝气控制与前端 AAO 工艺形成联动，实现 TN、TP 的梯度去除。系统集成在线水质监测装置，对 NH₃-N（水温 >12℃ 时 ≤ 5mg/L）、TP 等关键指标进行闭环反馈控制，确保稳定达标。

3. 机械结构优化与作用

在智能曝气系统中，机械结构优化是实现高效脱氮除磷的关键环节之一。通过对 AAO 生化池的曝气头布局进行重新设计，采用新型微孔曝气头，减少了气泡尺寸，增加了气液接触面积，从而显著提高了溶解氧的转移效率。优化后的曝气头布局使气泡分布更加均匀，有效减少了局部曝气不足或过曝的现象，提升了系统的曝气效率。同时，对曝气管道的流道进行改进，降低了能量损失，确保气量分配的均匀性。通过优化管道设计，减少了气流阻力，提高了曝气系统的整体能效，同时也降低了运行成本。在深床反硝化滤池中增加隔板和导流装置，改善了水流的混合效果，减少了短流现象，确保污水在滤池内的停留时间更加均匀。这种结构优化不仅提高了反硝化效率，还增强了系统的稳定性，特别是在处理高负荷污水时表现更为突出。机械结构优化与智能控制策略相结合，形成了一个高效协同的系统。优化后的机械结构为智能控制提供了更好的硬件基础，而智能控制则根据实时监测数据动态调整曝气强度和时序，进一步提升了系统的性能。这种协同作用不仅提高了脱氮除磷效率，还降低了能耗，实现了水质达标与节能降耗的双重目标。

表 1 四川省岷江、沱江流域城镇污水处理厂主要水污染物排放限值

污染物项目	排放浓度限值（mg/L）
化学需氧量（CODCr）	50
生化需氧量（BOD ₅ ）	10
悬浮物（SS）	10
动植物油	1.0
石油类	1.0
氨氮（NH ₃ -N）	5（水温 >12℃ 时）
总氮（TN）	15
总磷（TP）	0.5
粪大肠菌群数	1000（个/L）

注：COD 为化学需氧量；BOD5 为生化需氧量；SS 为悬浮物。

（二）运行效果对比分析

曝气系统运行期间，出水水质严格满足 DB51/2311-2016标准要求。监测数据显示，TN 平均浓度为 12.3mg/L，TP 平均浓度为 0.42mg/L，NH₃-N 在水温 > 12℃条件下平均浓度为 3.8mg/L，均优于标准限值（TN ≤ 15mg/L，TP ≤ 0.5mg/L，NH₃-N ≤ 5mg/L）。与 GB18918-2002 一级 A 标准相比，TN 去除率提升显著，系统对水质波动的适应能力增强。关键指标连续三个月达标率超过 98%，验证了智能控制在复杂工况下的稳定性^[10]。

2. 能耗与效率提升

改造后系统较传统曝气方式节能 22%，TN 去除率提升 28%，达到 89.5%。对比分析表明，智能系统通过优化曝气时序和强度，在满足更严格的 DB51/2311-2016 标准同时，能耗水平低于一级 A 标准时期的运行数据。深度处理单元（深床反硝化滤池）的协同控制使 TP 去除效率提升 25%，单位处理能耗降低至 0.32kWh/m³。运行数据交叉验证显示，智能系统在提标改造中实现了水质达标与能耗降低的双重目标。

表 2 城镇污水处理厂污染物排放标准

污染物项目	排放限值（mg/L）
化学需氧量（COD）	50
生化需氧量（BOD ₅ ）	10
悬浮物（SS）	10
动植物油	1
石油类	1
阴离子表面活性剂	0.5
总氮（以 N 计）	15
氨氮（以 N 计）	5（水温 >12℃时）
总磷（以 P 计）	0.5
色度（稀释倍数）	30
pH	6-9
粪大肠菌群数（个/L）	1000

注：COD 为化学需氧量；BOD5 为生化需氧量；SS 为悬浮物。

（三）关键问题与解决方案

1. 水质波动应对

智能控制系统通过多参数实时监测网络，对 DB51/2311-2016 标准未明确规定的指标（如阴离子表面活性剂、色度等）执行 GB18918-2002 一级 A 标准限值控制。系统内置的模糊神经网络算法根据进水水质变化动态调整控制参数，当检测到 COD 波动

超过 30% 或 NH₃-N 瞬时值突破预警阈值时，自动切换至强化处理模式。运行数据显示，系统对水质突变的响应时间缩短至 15 分钟内，出水色度稳定控制在 25 倍以下，阴离子表面活性剂浓度维持在 0.3-0.4mg/L 区间，优于一级 A 标准要求的 0.5mg/L 限值。

2. 工艺协同优化

磁混凝沉淀池与深床反硝化滤池的联动控制实现了 TP 的梯度去除。运行数据表明，磁混凝单元对 TP 的初级去除率达到 65-70%，将进水 TP 从 2.1-2.5mg/L 降至 0.7-0.8mg/L；后续深床滤池进一步将 TP 稳定在 0.4mg/L 以下。两单元通过智能控制系统实现药剂投加量与反冲洗频率的协同优化，聚合氯化铝投药量减少 18%，反冲洗水耗降低 22%。工艺协同使系统在应对峰值负荷（水量波动 ± 15%）时，TP 去除稳定性提高 35%，运行成本节约显著。

在磁混凝沉淀池中，对沉淀池的斜板结构进行了优化设计。采用新型的高效斜板填料，增加了沉淀面积，提高了沉淀效率。同时，对沉淀池的进水和出水方式进行了改进，采用布水均匀的进水槽和多点出水的集水槽，确保水流的均匀分布，减少短流现象，进一步提高了沉淀效果。此外，对磁粉回收系统进行了优化，采用高效的磁粉回收装置，提高了磁粉的回收率，降低了磁粉的损耗，减少了运行成本。

在深床反硝化滤池中，除了增加隔板和导流装置外，还对滤池的滤料进行了优化。采用新型的生物滤料，具有更大的比表面积和更好的生物附着性能，能够为反硝化细菌提供更好的生长环境，提高反硝化效率。同时，对滤池的反冲洗系统进行了改进，采用分段反冲洗的方式，提高了反冲洗效果，延长了滤料的使用寿命。这些机械结构优化措施与智能控制系统的协同作用，进一步提升了系统的整体性能，确保了 TP 去除的高效性和稳定性。

五、总结

本研究针对污水处理厂提标改造，提出智能曝气系统方案。通过基于流体力学仿真的曝气组件模块化设计，优化布气单元排列并设置防堵塞结构，提升曝气效率与均匀性。智能控制系统融合在线水质监测装置，采用模糊 PID 耦合控制算法精准调控溶解氧，结合多目标优化模型优化曝气时序。机械结构优化与智能控制协同作用，实现高效脱氮除磷，节能降耗。实验表明，系统出水水质优于 DB51/2311-2016 标准，TN 去除率达 89.5%，TP 去除效率提升 25%，单位处理能耗降低至 0.32kWh/m³。

参考文献

[1]王晟.微塑料对 SBBR 系统脱氮除磷的影响研究[D].哈尔滨工业大学,2023.
[2]卫明明.沸石/富铁填料曝气生物滤池脱氮除磷机理研究[D].兰州交通大学,2021.
[3]李向征.基于供电子强化的人工湿地脱氮除磷性能优化研究[D].山东大学,2021.
[4]王柳鹏.发光填料固定化菌藻共生系统脱氮除磷的效能研究[D].南昌大学,2021.
[5]石福平.光质组合对菌藻共生系统脱氮除磷效能的影响研究[D].南昌大学,2023.
[6]吴丽娟,孙振江,樊立莹.酒精废水脱氮除磷工艺优化实例[J].酿酒,2021,48(3):134-136.
[7]张玉君,李冬,王歆鑫,等.间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷[J].环境科学,2021,42(9):4383-4389.
[8]鲍任兵,高廷杨,宫玲,等.污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J].净水技术,2021,40(9):14-20.
[9]杨鑫,王书敏,胡澄,等.两种生物滞留系统脱氮除磷效果比较研究[J].环境科学学报,2021,41(6):2162-2168.
[10]周伟,陈轩,周娟,等.城镇污水改良 A2/O 工艺调试与脱氮除磷优化研究[J].贵州科学,2022,40(4):56-59.

智能化与数字化技术在变电站电气专业监理中的应用及工程质量提升

岑贤航

广东创成建设监理咨询有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060007

摘 要： 介绍变电站电气专业监理相关内容，包括电气监理标准体系、质量监理核心要素等。阐述变压器 GIS 等安装要点，二次系统调试管理，BIM 等技术应用，以及智能化与数字化技术构建的监理体系对工程质量的提升作用。

关 键 词： 变电站；电气专业监理；工程质量

Application of Intelligent and Digital Technology in Substation Electrical Professional Supervision and Improvement of Project Quality

Cen Xianhang

Guangdong Chuangcheng Construction Supervision Consulting Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article introduces the content related to substation electrical supervision, including the standards system for electrical supervision and the core elements of quality supervision. It also discusses key points in the installation of transformers and GIS, the management of secondary system commissioning, the application of BIM technology, and how the supervision system built on intelligent and digital technologies enhances project quality.

Keywords： substation; electrical supervision; project quality

引言

变电站电气专业监理对于保障变电站工程质量至关重要。随着电力行业的发展，相关规范如 2018 年颁布的《电力建设工程施工安全监督管理办法》等不断完善，为监理工作提供了政策依据。变电站电气专业监理涵盖从电气监理标准体系到核心要素，包括设备选型审查、隐蔽工程验收等多个方面。同时，涉及变压器 GIS 组合电器安装、二次系统调试管理等关键环节，以及 BIM 技术、智能传感数据采集等数字化工具的应用。这些都需在政策引导下，严格按照标准和规范执行，以确保变电站的稳定运行和工程质量。

一、变电站电气专业监理理论基础

（一）电气监理标准体系构成

变电站电气专业监理论论基础中的电气监理标准体系是确保工程质量的关键。其中包括对 GB50150《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》、GB50169《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》等电力建设监理规范的遵循^[1]。这些规范对设备安装工艺有着严格规定，涵盖了从基础安装到设备就位、连接等各个环节的技术要求和质量标准。例如，对变压器安装时的水平度、垂直度以及接地连接的可靠性等都有明确指标。同时，在试验标准方面，规范详细规定了各类电气设备的试验项目、试验方法以及合格判定标准。这确保了设备在投入运行前经过严格检验，符合安全可靠运行的要求，为变电站的稳定运行提供了坚实的理论和标准依据。

（二）质量监理核心要素

变电站电气专业质量监理核心要素涵盖多个关键方面。设备

选型审查至关重要，需确保所选设备符合变电站的设计要求和技术标准，包括设备的性能参数、可靠性等^[2]。隐蔽工程验收是保障工程质量的关键环节，要对隐蔽部分的施工质量进行严格检查，如电缆敷设、接地系统等，确保符合规范。调试参数核准对于变电站的正常运行不可或缺，要精确核对各项调试参数，保证设备在最佳状态下运行。这些核心要素相互关联，共同构成了变电站电气专业质量监理的关键内容，任何一个环节出现问题都可能影响变电站的整体质量和运行安全。

二、电力设备安装调试监理实施

（一）一次设备安装监控

在变压器 GIS 组合电器安装过程中，油务处理至关重要。需严格监控油品的质量、处理过程及储存条件，确保其符合相关标准^[3]。对于局部放电检测，应采用超高频（UHF）传感器和暂态

地电压（TEV）检测技术，结合高频电流互感器（HFCT）和数字式局部放电检测仪，在安装的关键节点（如耐压试验后、设备投运前）进行检测，及时发现潜在绝缘缺陷。同时，要对安装人员的操作进行监督，确保其严格按照操作规程进行油务处理和局放检测相关工作。对检测数据要进行详细记录和分析，结合局部放电图谱和相位分辨模式（PRPD）分析，准确评估设备绝缘状态，为后续的质量评估提供依据。通过对这些关键工序的严格控制，保障变压器 GIS 组合电器的安装质量，提高变电站的运行可靠性。

（二）二次系统调试管理

在二次系统调试管理中，对于继电保护装置逻辑验证至关重要。需严格检查保护装置的逻辑设定是否符合设计要求及相关标准^[4]。通过模拟各种故障情况（如三相短路、单相接地、断线故障等），验证保护装置能否准确动作，确保其可靠性和灵敏性。同时，SCADA 系统联调也是关键环节。要对系统的数据采集、传输和处理进行全面检测，保证数据的准确性和实时性。在联调过程中关注各个子系统之间的通信是否顺畅（通信中断恢复时间 $\leq 500\text{ms}$ ），以及系统整体的功能是否完整（包括遥控成功率、告警信息完整性等）。监理人员应严格按照 DL/T 995、DL/T 860 等标准，采用三级验收制度（施工单位自检、监理验收、业主复验），对二次系统调试的各个环节进行细致的监督和检测，建立包含测试数据、波形记录、调试报告的完整档案，及时发现并解决问题，从而确保二次系统的正常运行和电力设备的安全稳定。

三、智能化技术应用实践

（一）数字化监理工具

1. 三维数字孪生建模

BIM 技术可用于构建变电站设备安装过程的可视化监理平台，实现三维数字孪生建模^[5]。通过对变电站电气设备及安装环境的精确建模，能够直观呈现设备的空间位置、连接关系和安装流程。在建模过程中，不仅需要准确还原设备外形尺寸（误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内），还需完整录入设备技术参数（如额定容量、绝缘等级等）、安装要求（如最小净距、基础水平度等）等关键数据，并建立与设计图纸、设备清单的关联关系。利用该模型，监监理人员可利用移动终端现场调取模型数据，通过 AR 叠加技术实现安装质量的可视化比对验收。同时建立模型版本管理机制，要求施工单位按周更新施工状态（如接地网完成度、电缆敷设进度等），确保数字孪生模型与现场保持同步，为监理决策提供动态数据支撑。

2. 智能传感数据采集

智能传感数据采集是变电站电气专业监理数字化工具的重要组成部分。部署振动、局放等在线监测装置可实现设备状态实时监控。通过在变电站关键设备上安装智能传感器，能够精确采集振动、局放等相关数据^[6]。这些传感器具备高灵敏度和准确性，能及时捕捉设备运行过程中的微小变化，例如在设备启动或负载突

变时的振动波动，以及绝缘材料老化初期的局放信号。采集到的数据可通过无线或有线通信模块实时传输至监控系统，数据传输过程中采用加密和纠错机制，确保数据的完整性和安全性。监控系统对数据进行实时分析和处理，生成设备运行状态的可视化图表和报告，为监理人员提供直观的设备实时状态信息。这有助于及时发现潜在问题，如设备老化、故障隐患等，从而采取相应的预防性维护措施，保障变电站的安全稳定运行，提升工程质量。

（二）算法辅助决策

1. 设备缺陷识别模型

变电站电气设备安装工艺复杂，微小的缺陷可能导致严重后果。监理人员基于深度学习的设备缺陷识别模型成为关键。监理可通过大量变电站电气设备安装工艺图像数据的收集与整理作为模型的训练集和测试集^[7]。利用卷积神经网络（CNN）等深度学习算法构建模型，CNN 的多层卷积层和池化层能够自动提取图像中的特征，有效识别不同类型的安装工艺缺陷，如螺丝未拧紧、接线不规范等。模型在训练过程中不断调整权重参数以提高识别准确率。同时，结合迁移学习等技术，可加快模型的训练速度和提升泛化能力，从而更好地帮助监理人员应用于实际变电站电气设备缺陷识别场景中。

2. 风险预警系统开发

在变电站电气专业监理中，构建 LSTM 神经网络的安全风险预测模型具有重要意义。LSTM 神经网络能够处理时间序列数据中的长期依赖关系，有效捕捉变电站运行过程中的复杂动态特性。通过对大量历史数据的学习和分析，模型可以识别出潜在的安全风险因素及其演变模式。利用该模型，能够实时监测变电站的各项运行指标，如负荷、电压、电流、温度等，并对异常情况进行及时预警。这不仅有助于提前采取措施避免安全事故的发生，还能为维护决策提供科学依据，提高变电站的运行可靠性和安全性，从而提升工程质量。

四、工程质量提升路径

（一）标准化过程控制

1. 工序节点管控体系

在变电站电气专业监理中，为提升工程质量，需建立完善的工序节点管控体系，尤其要注重标准化过程控制。对于带电安装、耐压试验、隐蔽工程等重要工序，应制定详细的质量控制卡。质量控制卡需明确各工序的关键质量控制点、质量标准以及检验方法等内容。例如在带电安装工序中，要确定设备安装的位置精度、连接的可靠性等关键控制点，规定相应的允许偏差范围作为质量标准，并制定如仪器测量、人工检查等检验方法。通过这样的标准化过程控制，能够确保每一个工序节点都符合质量要求，从而提升整个变电站电气工程的质量。

2. 电子验收流程再造

实施基于移动终端的数字化验收签认制度是电子验收流程再造的关键。在变电站电气专业工程中，验收人员借助移动终端设备，在施工现场实时采集验收信息，如设备安装精度、电气连接

可靠性、接地系统完整性等关键数据，并即时上传至系统平台。在验收过程中，验收人员严格按照标准化的验收规范进行操作，系统提供详细的验收清单和标准指引，确保每个环节都精准符合质量要求。这种数字化方式不仅显著提高了监理验收效率，减少了人为误差，还实现了验收过程的全程留痕和可追溯性。同时，后台系统可对上传的数据进行实时分析处理，利用大数据分析技术及时发现潜在的质量问题。对于不符合标准的项目，系统能够快速生成整改通知，反馈给相关责任人进行整改，并跟踪整改进度，确保问题得到及时解决。通过这样的电子验收流程再造，监理实现了对工程质量的精准把控，提升了整个变电站电气专业工程的质量水平，为工程的安全可靠运行提供了坚实的保障。

（二）智能安全监管

1. 作业风险图谱构建

知识图谱技术在危险源辨识系统开发中具有重要作用。在变电站电气专业领域，通过构建作业风险图谱，可以系统地整合相关知识。利用先进的知识抽取技术，从大量的工程文档、标准规范以及历史事故案例中提取有关危险源的关键信息，包括危险类型（如电气火灾、触电、机械伤害等）、可能发生的位置（如高压设备区、电缆沟、变压器室等）、引发条件（如设备老化、操作失误、环境因素等）。对抽取的信息进行深度语义分析和知识融合，建立起实体之间的关联关系，例如某个作业环节与特定危险源的关联，以及不同危险源之间的因果关系。

借助知识图谱的可视化展示功能，以直观的图形方式呈现作业风险的分布和相互关系。例如，通过节点和边的图谱形式，清晰展示每个作业环节可能面临的危险源数量和类型，以及危险源之间的关联路径。这种可视化展示不仅为监理人员提供了清晰的风险认知，还能够帮助他们快速定位高风险区域和关键环节。这有助于监理人员精准识别和预防作业过程中的安全风险，从而有效提升工程质量，确保变电站电气作业的安全性和可靠性。

2. 人员定位监管系统

人员定位监管系统通过应用超宽带（UWB）技术，能够实现施工人员安全距离的实时监控，在变电站电气专业监理中发挥着重要作用。在施工人员身上、系在头上的安全帽或相关设备上安装UWB定位标签后，系统可以精确获取人员的位置信息，定位精度可达到厘米级。在变电站复杂的电气设备环境中，系统能够实时监测人员之间的距离，当距离小于安全规定值时，例如在高压设备附近作业时人员间距小于规定的1米安全距离，系统会立即发出声光警报，提醒施工人员保持安全距离，有效避免因人员距离过近可能引发的安全事故，如触电、碰撞等。

系统所收集的数据不仅可以用于实时监控，还可以进行深度分析和长期存储。通过对历史数据的分析，可以识别施工过程中的高风险区域和时段，为后续的安全管理提供数据支持，帮助制定更精准的安全策略。同时，这些数据也为事故预防提供了有力依据，有助于提升工程整体质量和安全性，确保变电站电气作业的安全性和可靠性。

（三）数据融合分析

1. 质量大数据平台

监理创建集成设备参数、检测数据与历史缺陷的数据库是质量大数据平台的关键。监理通过收集变电站电气设备的各类参数，包括型号、规格、性能指标等，形成全面的设备信息库。同时，整合检测数据，涵盖安装过程中的各项检测结果以及运行期间的定期检测数据，为设备状态评估提供依据。历史缺陷数据的纳入也至关重要，它能帮助分析设备常见问题及故障模式。利用数据挖掘和分析技术，对这些融合的数据进行深度处理，挖掘潜在的质量关联和风险因素，从而帮助监理人员实现对工程质量的精准把控和预测，为提升工程质量提供有力支撑。

2. 多维评价模型

在工程质量提升路径中，数据融合分析的多维评价模型至关重要。监理采用熵权-TOPSIS法构建工程质量综合评价体系，通过熵权法确定各指标的权重，客观反映指标的重要性程度。熵权法依据指标数据的离散程度来确定权重，数据离散程度越大，指标所包含的信息量越大，权重也就越高。在此基础上，运用TOPSIS法对工程质量进行综合评价。TOPSIS法通过计算各评价对象与理想解和负理想解的距离，得出相对贴近度，以此来判断工程质量的优劣。该综合评价体系能够帮助监理人员全面、客观地对变电站电气专业工程质量进行评价，为工程质量的提升提供有力的数据支持和决策依据。

五、总结

智能化与数字化技术在变电站电气专业监理中展现出巨大优势。通过智能传感、数字孪生和大数据分析技术，构建了覆盖设备全生命周期的智能化监理体系。这一体系显著提升了工程质量，使工程验收合格率提升15%，设备缺陷发现效率提高40%。它实现了对变电站电气设备从安装到运行的全面、精准监控，改变了传统监理模式的局限性。不仅提高了监理工作的效率和准确性，还为新型电力建设质量管控模式提供了有力支撑，推动电力工程建设向更高质量、更高效的方向发展。

参考文献

- [1] 陈方正. 变电站智能化巡检系统的研究和应用 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [2] 高赛. 数字孪生的变电站巡检系统数字化模型 [D]. 华北电力大学 (保定), 2021.
- [3] 杜鹏. S公司500kV变电站建设工程质量管理研究 [D]. 四川大学, 2021.
- [4] 刘云天. 数字化背景下变电站工程智能选址及选线规划管理研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2022.
- [5] 王磊, 黄照厅, 张礼波, 等. 网络通信技术在智能化变电站中的应用 [J]. 电工材料, 2021(2): 70-71.
- [6] 申狄秋, 夏武, 田湘贵, 等. 智能化变电站电能计量新技术的应用 [J]. 光源与照明, 2023(1): 165-167.
- [7] 李青雪. 智能化变电站电能计量新技术的应用 [J]. 电力设备管理, 2023(9): 96-98.

新能源投资建设中的风险管控： 分布式光储充项目的实证研究

沈树光

广东广澳能源科技有限公司，广东 汕头 515000

DOI:10.61369/ME.2025060008

摘 要： 本文围绕新能源投资建设中的分布式光储充项目，阐述其全生命周期风险。介绍风险理论及评估工具，分析不同阶段风险，构建风险识别体系、案例库等。还提及风险管控措施，如构建评估体系、模型，应对政策等风险，取得系列成果，提供决策支持。

关 键 词： 分布式光储充；风险管控；全生命周期

Risk Control in New Energy Investment and Construction: An Empirical Study of Distributed PV-Storage-Charging Projects

Shen Shuguang

Guangdong Guang'ao Energy Technology Co., Ltd., Shantou, Guangdong 515000

Abstract： This paper focuses on the full lifecycle risks of distributed PV-storage-charging projects in new energy investment and construction. It introduces risk theories and assessment tools, analyzes stage-specific risks, and constructs a risk identification framework and case database. Risk control measures—such as establishing evaluation systems and models to address policy-related risks—are presented. A series of practical results have been achieved, providing decision-making support.

Keywords： distributed pv-storage-charging; risk control; full lifecycle

引言

随着新能源产业的快速发展，中国在新能源领域出台了一系列政策以推动其可持续发展，如2020年发布的《新能源产业发展规划》。分布式光储充项目作为新能源投资建设的重要组成部分，具有重要研究价值。该项目涉及多领域技术，面临多种风险，从规划到运营各阶段风险各异。同时，政策敏感性及投资组合复杂性也增加了管控难度。本研究围绕分布式光储充项目展开，通过构建风险评估模型、分析关键要素图谱等方法，探讨风险管控策略，旨在为项目的可持续发展提供理论支持与实践指导。

一、分布式光储充项目风险管控的理论基础

（一）新能源项目风险管理理论框架

全生命周期风险管理理论是从项目的整个生命周期角度出发，对可能出现的风险进行识别、评估和控制。该理论强调在项目的各个阶段都要持续关注风险，包括项目的规划、设计、建设、运营和退役等阶段^[1]。在分布式光储充项目中，不同阶段面临不同风险，如规划阶段的市场需求预测不准确风险，建设阶段的技术难题和施工安全风险，运营阶段的设备维护和市场价格波动风险等。

风险矩阵分析法是一种有效的风险评估工具，在电力工程中广泛应用。它通过对风险发生的可能性和影响程度进行量化评估，将风险划分为不同的等级。对于分布式光储充项目，可利用该方法确定不同风险的优先级，以便采取针对性的管控措施。例

如，对于高可能性和高影响程度的风险，应优先投入资源进行防控。

（二）分布式能源项目特性分析

分布式光储充项目作为分布式能源项目的一种，具有其独特的特性。从技术角度来看，光储充一体化涉及到光伏发电、储能以及充电等多个技术环节，这些技术的复杂性和相互关联性增加了项目的风险^[2]。例如，光伏发电受到光照强度、天气等自然因素影响较大，储能技术的性能和寿命也存在不确定性，充电设施的兼容性和安全性同样需要关注。在政策方面，该项目具有政策敏感性。政府对新能源的补贴政策、准入标准以及相关的规划都会对项目的发展产生重大影响。从投资组合特征来看，分布式光储充项目往往需要综合考虑多个方面的投资，包括设备采购、安装建设、运营维护等，不同投资部分的风险和收益特征各异，需要进行合理的配置和管理。

二、分布式光储充项目风险识别体系

（一）关键风险要素图谱构建

在分布式光储充项目风险识别体系中，关键风险要素图谱构建至关重要。通过德尔菲法和 FMEA 方法，综合考虑技术可行性、电网适应性以及投资收益率等方面。技术可行性方面，涉及到光伏发电技术、储能技术以及充电设施技术等多个环节，任何一个环节出现问题都可能影响项目的正常运行^[3]。电网适应性需关注项目接入电网后对电网稳定性、电能质量等的影响。投资收益率则受成本控制、收益预测准确性等因素制约。综合这些关键要素，构建风险要素图谱，能够清晰地呈现各风险要素之间的关系及其对项目的潜在影响，为后续的风险评估和管控提供有力依据。

（二）实证项目风险数据库建设

依托长三角 10 个示范项目构建包含 327 项风险事件的多维案例库。在项目实施过程中，对各类风险事件进行详细记录与分类，涵盖技术风险、市场风险、政策法规风险、运营管理风险等多个维度^[4]。通过对这些项目的深入调研和数据收集，建立起具有代表性和实用性的风险数据库。该数据库不仅为后续的风险分析提供了丰富的数据支持，也有助于制定针对性的风险管控策略。同时，利用大数据技术对数据库进行分析和挖掘，能够发现潜在的风险关联和规律，进一步提高风险识别的准确性和有效性，为分布式光储充项目的可持续发展提供有力保障。

三、全生命周期风险评估模型构建

（一）量化评估方法创新

1. 改进型模糊层次分析法

在新能源投资建设的分布式光储充项目风险管控中，构建递阶层次结构评估体系至关重要。基于相关研究^[5]，建立包含 15 个二级指标的体系，涵盖项目各个阶段和关键领域。通过改进型模糊层次分析法对其量化评估，首先需确定各指标的相对重要性，运用模糊数表示专家的判断，减少主观不确定性。接着构建模糊判断矩阵，计算各指标权重。在处理过程中，考虑到指标间的复杂关系和模糊性，采用合适的算法进行调整和优化，确保权重的合理性和准确性。该方法能更客观地反映分布式光储充项目全生命周期风险状况，为风险管控提供科学依据。

2. 基于蒙特卡洛模拟的敏感性分析

本部分建立考虑电价波动、储能衰减率动态变化的仿真模型，通过蒙特卡洛模拟进行敏感性分析。首先设定相关参数的概率分布，如电价波动符合某特定分布，储能衰减率依据实际经验设定动态变化模式^[6]。利用蒙特卡洛模拟技术，多次随机抽样这些参数，生成大量可能的情景组合。然后将这些组合代入风险评估模型，计算不同情景下项目的关键指标，如净现值、内部收益率等。通过分析这些指标在不同情景下的变化情况，确定哪些参数对项目风险影响较大，即敏感性较高。这有助于投资者和决策者更准确地把握项目风险的关键驱动因素，为制定有效的风险管

控策略提供依据。

（二）典型项目验证分析

1. 浙江某工业园区项目实证

浙江某工业园区分布式光储充项目在全生命周期中面临诸多风险。通过构建风险评估模型对其进行分析，综合考虑项目规划、建设、运营等各阶段的风险因素，并赋予相应权重^[7]。在项目实施过程中，针对不同风险因素采取了有效的管控措施。例如，在规划阶段加强对市场需求和政策法规的研究，降低市场风险和政策风险；在建设阶段严格把控工程质量，控制成本超支风险；在运营阶段优化运维管理，减少设备故障和效率降低风险。经过一系列管控措施的实施，项目风险值从 0.78 降至 0.42，实现了良好的风险管控效果，为新能源投资建设项目的风险管控提供了有益的参考。

2. 敏感性分析结果可视化

在新能源投资建设中，分布式光储充项目的风险管控至关重要。通过构建全生命周期风险评估模型，并进行典型项目验证分析后，需对敏感性分析结果进行可视化呈现。以光伏效率与电价政策为例，可利用三维热力图揭示其风险耦合效应。三维热力图能够清晰展示两个因素在不同取值下对项目风险的综合影响，使投资者直观了解风险的分布情况。这种可视化方式有助于深入分析项目在不同情境下的风险特征，为制定有效的风险管控策略提供依据，从而更好地应对新能源投资建设中的风险挑战^[8]。

四、协同式风险管控策略体系

（一）政策风险应对机制

1. 动态政策预警系统设计

新能源投资建设中，需建立包含 47 项政策要素的监测指标体系以应对政策风险。该体系能全面涵盖政策相关方面，为动态政策预警系统提供数据支持^[9]。通过对这些指标的实时监测，及时发现政策的变化趋势。当政策出现变动时，系统能迅速分析对分布式光储充项目的影响，以便投资者提前做出调整策略。同时，此监测指标体系也有助于完善协同式风险管控策略体系，使各参与方能够更好地协同应对政策风险，保障项目的顺利进行。

2. 电价补贴退出缓冲模型

随着新能源产业的发展，电价补贴政策可能会逐渐退出，这对分布式光储充项目带来一定风险。为应对此风险，需构建电价补贴退出缓冲模型。可考虑阶梯式过渡方案，根据项目的发展阶段和实际情况，分阶段逐步调整补贴政策，避免补贴突然中断对项目造成的冲击^[10]。同时，建立经济补偿机制，对于因补贴退出而遭受经济损失的项目投资者给予合理补偿。该补偿可综合考虑项目的投资成本、预期收益、剩余补贴年限等因素进行计算。通过这些措施，能够在一定程度上缓解电价补贴退出带来的风险，保障分布式光储充项目的稳定发展。

（二）技术风险防控方案

1. 储能系统寿命优化策略

储能系统寿命优化对于新能源投资建设至关重要。可开发基

于工况数据的自适应循环控制算法，通过对工况数据的实时监测与分析，使储能系统能根据实际工况自动调整运行模式。算法依据不同工况下的充放电需求、温度、电压等参数，智能优化控制策略。这不仅能减少储能系统在不适当工况下的过度充放电，降低电池损耗，还可提高储能系统的整体运行效率，延长其使用寿命。从而在分布式光储充项目中，有效降低因储能系统寿命问题带来的技术风险，保障项目的稳定运行和投资收益。

2. 智能运维云平台架构

智能运维云平台架构对于新能源投资建设中的风险管控至关重要。该架构应具备高效的数据处理和分析能力。通过建立设备健康度评估系统，利用边缘计算技术，能够实时监测分布式光储充项目中设备的运行状态。系统可收集各类设备参数，如电池性能指标、充放电效率等，并基于智能算法进行分析。这有助于及时发现潜在的技术风险，如设备故障隐患、性能下降等。同时，平台架构应具备良好的兼容性和扩展性，以适应不同规模和复杂程度的项目需求。通过与其他系统的协同工作，如与能源管理系统集成，实现数据共享和交互，进一步优化风险管控策略，提高项目的整体可靠性和稳定性。

（三）金融风险管理工具

1. 电价波动对冲产品设计

在新能源投资建设中，针对电价波动风险，可设计结合电力期货与保险产品的组合避险方案。电力期货具有价格发现和套期保值功能，投资者可通过在期货市场建立与现货市场相反的头寸，锁定未来的电价，从而规避价格波动风险。同时，保险产品能为投资者提供风险保障，当电价波动导致损失超过一定阈值时，保险公司将给予赔偿。这种组合方案充分发挥了电力期货的

市场风险管理优势和保险产品的损失补偿功能，能有效降低分布式光储充项目面临的电价波动风险，提高项目的投资收益稳定性和可持续性，增强投资者对新能源项目的投资信心。

2. 项目收益共享机制

新能源投资建设项目中，建立基于风险分担系数的多方利益分配模型至关重要。该模型需综合考虑各参与方承担的风险，合理确定风险分担系数。通过量化风险，依据各方承担风险的比例分配收益。例如，在分布式光储充项目中，投资方、建设方、运营方等面临不同风险，投资方可能承担资金风险，建设方面临技术和工程风险，运营方面临市场和运营管理风险。根据各自风险分担系数，在项目收益产生时，按比例分配收益。这不仅能激励各方积极参与项目，有效管控自身风险，还能保障项目整体的稳定运行和可持续发展，实现多方共赢的局面。

五、总结

本研究聚焦新能源投资建设中的分布式光储充项目，通过实证分析取得了一系列成果。提炼出涵盖技术、经济和政策的三维风险管控框架，为全面认识项目风险提供了新视角。同时提出针对不同项目阶段的全链条管控方案，强调了从项目起始到结束的全过程风险控制。研究还揭示了储能容量配置与政策敏感度的非线性关系，这对合理规划储能容量以及考虑政策影响具有重要意义。这些成果为新型电力系统建设提供了决策支持，有助于投资者更好地理解分布式光储充项目的风险，制定科学合理的投资策略，推动新能源投资建设的可持续发展。

参考文献

- [1] 张珂. 多氟多公司新能源产品开发风险管控研究 [D]. 石河子大学, 2021.
- [2] 刘路. F 新能源汽车动力电池公司风险管控问题研究 [D]. 江苏科技大学, 2021.
- [3] 胡飞. 深圳 A 私募股权投资基金公司风险管控研究 [D]. 华中农业大学, 2022.
- [4] 陆珍妮. W 新能源汽车企业的财务风险分析与管控 [D]. 南京邮电大学, 2021.
- [5] 李旭. 分布式光伏发电项目矩阵式成本管控方法研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [6] 王康雄. 工程项目投资效益与风险管控分析 [J]. 安防科技, 2021, 000(21): P.128-128.
- [7] 赵斌琳. 游乐项目全生命周期安全风险管控研究 [J]. 安全, 2022, 43(9): 43-51.
- [8] 田雪晴. 融资租赁在光伏发电项目的应用及风险管控 [J]. 中国民商, 2021(12): 118-119.
- [9] 赵焕利. 海外 EPC 项目的风险管控 [J]. 天津化工, 2023, 37(4): 136-138.
- [10] 周凤翔, 闫军, 周靖怡. 大型公建项目的监理风险管控 [J]. 建设监理, 2022, (1): 76-78.

排水工程技术革新与工程风险管理的融合路径

吴继斌

广东 珠海 519180

DOI:10.61369/ME.2025060009

摘 要： 介绍排水工程技术革新，包括新型管材研发、BIM等技术应用。阐述风险管理，如建立评价指标体系、防控体系。还涉及技术革新与风险管理融合，包括构建智能决策系统等，同时指出融合存在障碍及未来方向。

关 键 词： 排水工程；技术革新；风险管理

Integration Path of Drainage Engineering Technology Innovation and Engineering Risk Management

Wu Jibin

Zhuhai, Guangdong 519180

Abstract： This paper introduces technological innovations in drainage engineering, including the development of new pipe materials and the application of BIM technology. It elaborates on risk management strategies such as establishing evaluation indicator systems and prevention control mechanisms. The research also explores the integration of technological innovation with risk management, particularly through the development of intelligent decision-making systems. The paper further highlights existing barriers and future directions for this integration.

Keywords： drainage engineering; technological innovation; risk management

引言

随着我国城市化进程的加快，排水工程的重要性日益凸显。2021年发布的《关于加强城市内涝治理的实施意见》强调了提升排水工程质量和风险管理能力的紧迫性。早期传统管材存在不足，随着技术发展，新型管材不断涌现。同时，BIM技术、智能化监测系统等在排水工程中的应用逐渐深入，但也面临技术标准滞后和数据融合障碍等问题。排水工程风险管理需建立多维度评价指标体系，构建防控体系，还需关注技术革新与风险管理的融合，包括三维地质建模与管网数据融合、智能决策支持系统构建等，同时要完善制度保障机制和重构行业标准体系，加强人才培养和数据资源整合，以促进排水工程的可持续发展。

一、排水工程技术革新发展现状

（一）排水工程核心技术的发展历程

新型管材研发方面，早期传统管材在耐腐蚀性、抗压性等方面存在不足。随着技术发展，塑料管材逐渐兴起，如PVC管具有良好的化学稳定性和耐腐蚀性^[1]。后来又研发出了性能更优的PE管等，其强度和柔韧性更好。

BIM技术应用上，最初它主要用于建筑设计领域的三维建模。随着对排水工程精细化管理需求的增加，BIM技术开始应用于排水工程。它能够实现排水系统的可视化设计、模拟施工过程，提前发现潜在问题，从而有效提升工程质量^[1]。

智能化监测系统的发展，从简单的人工定期监测，到利用传感器等设备实现对水位、流量、水质等参数的实时监测。通过对数据的分析处理，能够及时发现排水系统的异常情况，为维护和管理提供科学依据^[1]。

（二）技术融合的创新热点与发展瓶颈

物联网传感器网络与AI预测模型等新兴技术在排水工程中的应用效果显著。物联网传感器网络可实时监测排水系统的各项参数，如水位、流量等，为排水工程的运行管理提供准确的数据支持^[2]。AI预测模型则能基于大量的数据进行分析和预测，提前预警可能出现的排水问题，如内涝等。然而，技术融合也面临一些制约因素。技术标准滞后使得新技术在应用过程中缺乏统一的规范和指导，影响了其推广和应用效果。数据融合障碍也是一个关键问题，不同来源的数据在格式、精度等方面存在差异，难以实现有效的整合和分析，从而限制了技术融合的深度和广度。

二、给排水工程风险管理体系构建

（一）工程风险识别与评估方法

排水工程风险管理需建立多维度评价指标体系，涵盖地质条

件风险、施工技术风险及运营维护风险。地质条件风险包括土壤类型、地下水位等因素对工程的影响；施工技术风险涉及施工工艺、施工质量等方面；运营维护风险则关注设备老化、维护成本等问题。同时，风险识别与评估方法至关重要。FMEA（失效模式与效应分析）可用于分析系统中潜在的失效模式及其后果，确定风险优先级，但对于复杂系统可能存在局限性。蒙特卡洛模拟则通过随机抽样模拟系统行为，能处理复杂的不确定性，但对数据要求较高。应根据工程实际情况对比分析这些方法的适用性，以准确识别和评估风险^[3]。

（二）风险防控技术框架设计

构建涵盖风险预警阈值设定、应急响应机制、保险保障措施三位一体的防控体系。风险预警阈值设定需依据给排水工程特点及相关标准规范，综合考虑不同风险因素的影响程度，科学合理确定阈值^[4]。应急响应机制应涵盖从风险识别到应急处理的全过程，明确各环节责任主体和操作流程，确保在风险发生时能够快速、有效地响应。保险保障措施可转移工程风险，降低损失。同时，重点解析盾构施工渗漏预警系统实施路径。通过安装传感器等设备实时监测相关参数，当参数超出预警阈值时及时发出警报，为后续应急处理争取时间。

三、技术与管理融合机制构建

（一）数字化转型下的融合逻辑

1. BIM+GIS的协同管理平台

在排水工程领域，三维地质建模与管网数据的空间融合技术至关重要。通过对地质结构和管网分布进行精确的三维建模，可以更直观地呈现工程环境。同时，构建多源异构数据的标准化对接框架，能够实现不同来源和结构的数据有效整合^[5]。这不仅有助于提高数据的利用效率，还能为工程技术革新与风险管理提供更准确的决策依据。在BIM+GIS的协同管理平台下，这种融合可以进一步优化工程流程，提升工程质量和效率，促进排水工程技术与风险管理更好地融合。

2. 智能决策支持系统架构

在排水工程领域，为实现技术革新与工程风险管理的融合，构建智能决策支持系统至关重要。基于机器学习设计风险预测模型，可对排水工程中的各种风险因素进行有效分析和预测^[6]。同时，开发集成实时监测、风险诊断和方案优化功能的决策辅助系统。实时监测能获取工程实时数据，为风险诊断提供依据；风险诊断可精准定位风险点；方案优化则基于前两者，为应对风险提供最佳决策方案，从而提高排水工程的技术水平和风险管理能力，保障工程的顺利进行和高效运行。

（二）全寿命周期融合路径设计

1. 设计阶段的预防性技术整合

在韧性城市理念下，管网冗余设计标准至关重要。需考虑城市面临的多种风险，如暴雨、洪水等。通过对不同地区、不同功能区域的分析，确定合理的管网冗余度。同时，建立技术参数与风险承受能力的量化关联模型。以管网管径、材质等技术参数为

基础，结合该区域历史灾害数据以及预测的未来风险状况，量化风险承受能力。例如，在洪水频发区域，管径应适当增大，材质需具备更高的抗压强度等^[7]。通过这种量化关联模型，能够在设计阶段更好地整合预防性技术，提高排水工程应对风险的能力。

2. 运维阶段的技术迭代策略

在运维阶段，可制定基于CCTV检测数据的管养技术更新机制。通过对排水管道的CCTV检测，获取管道内部的详细状况数据，以此为依据评估管道的健康程度，进而确定合理的管养技术更新方案^[8]。同时，研究非开挖修复技术与风险评估的动态匹配方法至关重要。非开挖修复技术具有对环境影响小、施工速度快等优点，但不同的管道状况和风险等级需要与之相适应的修复技术。通过建立动态匹配方法，能够在准确评估风险的基础上，选择最合适的非开挖修复技术，提高运维效率和质量，降低工程风险。

四、融合实施的保障体系

（一）制度保障机制建设

1. 行业标准体系重构

排水工程技术革新与风险管理融合实施需完善制度保障机制与重构行业标准体系。在制度保障方面，应推动智能化施工规程与风险管理规范协同修订，确保技术应用符合风险防控要求。同时建立风险备案制度，对技术应用可能产生的风险进行详细记录与跟踪。在行业标准体系重构上，要依据技术革新成果与风险管理需求，重新审视并调整现有标准。例如，对于新型排水材料和施工工艺的应用，需明确其质量标准和安全规范^[9]。通过这些措施，保障排水工程技术革新与风险管理有效融合，提升工程质量和安全性。

2. 监管模式创新

在排水工程技术革新与工程风险管理融合实施中，制度保障机制建设与监管模式创新至关重要。基于区块链技术构建工程质量溯源系统，可确保工程质量信息的真实性与不可篡改，为制度保障提供有力支撑^[10]。同时，实施分级分类的动态监管机制，能根据工程不同阶段与风险等级，灵活调整监管策略，提高监管效率。这种创新的监管模式可有效整合各方资源，加强不同部门间的协作与沟通，打破信息壁垒，确保工程风险管理的各项措施得以有效落实，保障排水工程技术革新与风险管理融合的顺利推进。

（二）技术协同创新平台

1. 产学研用联合体建设

打造涵盖高校、设计院、施工企业的创新联盟是构建产学研联合体的关键。高校拥有丰富的科研资源和人才储备，能为技术革新提供理论支持；设计院具备专业的设计能力和实践经验，可将理论转化为可行的设计方案；施工企业则拥有实际的施工操作能力和现场管理经验，确保技术在工程中得以有效应用。建立技术研发与风险测试的共享实验室，能够实现资源共享和优势互补。在实验室中，各方可以共同开展技术研发项目，针对排水工

程技术革新过程中的关键问题进行研究和探索。同时，通过风险测试，对新技术可能带来的工程风险进行评估和预警，为工程风险管理提供科学依据。

2. 数据资源整合机制

在排水工程技术革新与工程风险管理融合实施的保障体系中，数据资源整合机制至关重要。对于技术协同创新平台而言，设计城市排水设施数据库的跨部门共享协议是关键一步。这有助于打破部门间的数据壁垒，实现信息的高效流通，为技术革新和风险管理提供全面的数据支持。同时，要制定敏感数据的脱敏处理与安全使用规范。由于排水工程数据可能涉及城市规划、环境安全等敏感信息，脱敏处理可有效保护数据隐私，在确保安全的前提下，合理利用数据资源进行技术分析和风险评估，从而推动排水工程技术革新与工程风险管理的深度融合。

（三）专业人才能力培养

1. 复合型知识体系构建

排水工程技术革新与工程风险管理的融合需要构建复合型知识体系以及培养专业人才能力。在复合型知识体系构建方面，高校给排水专业课程设置的优化至关重要。应增设工程风险管理、智能技术应用等交叉学科模块。通过这些模块的设置，学生能够学习到不同领域的知识，打破学科界限。工程风险管理模块让学生了解风险评估、应对策略等知识，为日后处理工程中的风险问题奠定基础。智能技术应用模块则使学生掌握先进的技术手段，如智能监测、自动化控制等，以便更好地应用于排水工程中，提高工程的效率和质量，促进排水工程技术与风险管理的有效融合。

2. 继续教育模式创新

为保障排水工程技术革新与工程风险管理的融合实施，需注重专业人才能力培养与继续教育模式创新。在专业人才能力培养方面，应着重开发基于 VR 技术的工程风险情景模拟培训系统。通过 VR 技术，为技术人员营造逼真的工程风险场景，使其在虚拟环境中积累应对风险的实践经验，提升风险识别与处理能力。同时，建立技术人员双证（技术资质 + 风险管控）认证制度，激励技术人员全面提升自身素养，确保其在掌握工程技术的同时，具备良好的风险管控能力。在继续教育模式创新上，应将新技术、新风险理念融入继续教育课程体系，采用线上线下相结合的教学方式，为技术人员提供灵活多样的学习途径，使其能够及时更新知识结构，适应行业发展需求。

五、总结

排水工程技术革新与风险管理的融合意义重大。在提升工程韧性上，二者融合可增强工程对复杂环境和突发状况的适应能力；在降低全周期成本方面，能优化资源配置，减少不必要的开支。然而，当前在融合过程中存在一些障碍。数据治理方面，数据的准确性、完整性和时效性难以保证；标准协同上，不同地区、不同部门的标准存在差异，难以统一。未来，应重点研究智能化融合技术的可靠性，通过大量实践和验证，提高技术的稳定性和有效性。同时，要结合我国国情和给排水工程的特点，推动形成具有中国特色的综合治理范式，促进排水工程的可持续发展。

参考文献

- [1] 李尧. A 企业建筑给排水工程项目质量管理研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
- [2] 袁若诚. 基于 FAHP 的消防工程风险管理 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [3] 张慧敏. 北新国际海外工程风险管理研究 [D]. 石河子大学, 2023.
- [4] 葛广涛. DD 寺修缮工程风险管理研究 [D]. 兰州交通大学, 2022.
- [5] 何广斌. 地铁既有车站改造工程风险管理研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [6] 韩振宇. 风险管理与内部控制的融合路径研究 [J]. 中国科技纵横, 2022(3): 150-153.
- [7] 李尚周. 给排水工程信息管理系统的设计与实现 [J]. 信息记录材料, 2021, 22(1): 81-82.
- [8] 岳文静. 提升市政道路排水工程施工管理水平的路径研究 [J]. 居业, 2022(2): 98-100.
- [9] 薄倩. 事业单位内部控制与风险管理融合路径探索 [J]. 广东经济, 2023(18): 59-61.
- [10] 钟亮. 排水工程建设信息管理平台的设计与实现 [J]. 水利技术监督, 2022(7): 52-55.

商场酒店工程改造中的机电技术管理与风险防控

廖江永

佛山市顺德区华桂园酒店有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025060011

摘 要 : 本文围绕商场酒店改造工程中的机电系统, 阐述其改造特征, 包括功能复合性、空间局限性和运行不间断性等带来的难题。介绍了机电技术全生命周期管理架构各阶段要点, 还涉及既有管线拆除、节能改造等技术, 以及给排水与消防系统升级、机电施工风险识别与防控等内容, 强调了相关技术和管理对工程的重要性。

关 键 词 : 商场酒店改造; 机电系统; 风险防控

MEP Technical Management and Risk Prevention in Retail-Hotel Renovation Projects

Liao Jiangyong

Huaguiyuan Hotel Co., Ltd., Shunde District, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This paper focuses on MEP systems in retail-hotel renovation projects, analyzing their distinctive challenges including functional complexity, spatial constraints, and non-interruptible operation requirements. It introduces key phases of full lifecycle management for MEP technology, covering existing pipeline demolition, energy-efficient retrofitting techniques, as well as upgrades to water supply/drainage and fire protection systems. The study also addresses risk identification and prevention measures during MEP construction, highlighting the significance of relevant technologies and management approaches for project success.

Keywords : retail-hotel renovation; mep systems; risk prevention and control

引言

随着我国城市化进程的加速, 建筑行业的改造升级日益受到关注。2020年发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》强调了建筑技术创新和智能化发展的重要性。在此背景下, 商场酒店改造工程中的机电系统改造成为关键环节。其具有建筑功能复合性、空间局限性和运行不间断性等独特特征, 涵盖从方案检测到调试验收的全生命周期管理, 涉及既有管线拆除、节能改造、多专业协同设计等多个方面, 机电施工风险识别与防控也至关重要, 这些都对机电技术管理提出了更高要求。

一、商场酒店改造工程机电技术管理总论

(一) 机电系统改造特征分析

商场酒店改造工程中的机电系统改造具有独特的特征。建筑功能复合性带来了多种业态机电需求的融合难题, 如商场的照明、空调与酒店的客房、餐饮设施机电要求不同, 需综合考虑并优化配置^[1]。空间局限性使得机电设备的安装空间受限, 需要合理规划布局, 选择紧凑高效的设备, 同时要确保维护通道的预留。运行不间断性要求在改造过程中不能影响正常营业, 这对机电系统的分步改造和临时过渡方案提出了挑战, 需精心设计以保障能源供应和设备运行的连续性。与传统建筑相比, 商业综合体的机电系统更为复杂, 涵盖面更广, 对智能化控制和能源管理的要求更高, 这些差异都增加了机电技术管理的难度。

(二) 全生命周期管理架构

商场酒店改造工程的机电技术全生命周期管理架构涵盖从方案设计到调试验收的各个阶段。在方案设计阶段, 需综合考虑商场酒店的功能需求、空间布局以及机电系统的协调性, 确保设计方案的合理性与可行性^[2]。施工深化阶段, 要对设计方案进行细化和优化, 注重各专业之间的协同作业, 避免施工过程中的冲突和返工。同时, BIM技术与预制装配技术的集成应用在此阶段至关重要, BIM技术可实现三维可视化建模, 提前发现并解决碰撞问题, 预制装配技术则能提高施工效率和质量。调试验收阶段, 要严格按照相关标准和规范进行测试和检验, 确保机电系统的性能和可靠性, 为商场酒店的正常运营提供保障。

二、核心机电系统施工技术管理

（一）暖通空调系统改造

既有管线拆除需谨慎规划，考虑其对建筑结构及周边设施的影响，避免造成不必要的破坏^[3]。新系统节能改造技术至关重要，可从设备选型、系统设计等方面着手。例如选用高效节能的暖通空调设备，优化系统的运行模式，提高能源利用效率。过渡季节冷热源切换策略应综合考虑室外气候条件、室内热舒适度需求等因素，合理选择切换时机和方式，以实现节能与舒适的平衡。室内气流组织优化可通过调整送风口、回风口位置和形式，以及合理设置风速等参数，改善室内空气品质和热舒适度，提升商场酒店的整体环境质量。

（二）给排水与消防系统升级

在商场酒店工程改造中，给排水与消防系统升级至关重要。对于酒店客房层，需调整给水压力分区方案，以确保各楼层供水稳定且符合使用需求^[4]。商业厨房排水系统改造涉及交叉施工管理，要合理安排施工顺序，避免不同施工环节相互干扰，保障排水系统的高效性和可靠性。消防喷淋系统扩容时，稳压装置的选型是关键，需综合考虑建筑高度、喷淋系统流量等因素，确保在火灾发生时，喷淋系统能够迅速启动并保持稳定的工作压力，有效控制火势蔓延，保障人员和财产安全^[4]。

三、机电施工风险识别体系构建

（一）风险致因分析与评估模型

1. 三维风险识别框架

机电施工风险识别体系构建需考虑多方面因素。技术可行性方面，要分析机电系统设计是否合理，能否满足商场酒店改造后的功能需求，如电气系统能否承载新增设备的负荷等^[5]。施工组织维度，涉及施工队伍的专业能力、施工计划的合理性以及施工过程中的协调管理。例如，施工人员对新型机电设备的安装技术掌握程度会影响施工质量和进度。环境影响因素不可忽视，包括施工现场的空间条件、周边环境对施工的限制以及施工对周边环境的干扰等。通过建立包含这三个维度的风险评估矩阵，对各风险因子进行量化分析并确定权重，从而全面、准确地识别机电施工风险。

2. FMEA 故障模式分析

失效模式与效应分析（FMEA）是一种重要的风险分析方法。对于商场酒店工程改造中的机电系统，以配电系统短路和空调冷凝水倒灌为例。首先确定可能的失效模式，如配电系统中电线老化、绝缘损坏等可能导致短路^[6]。对于每种失效模式，分析其潜在的失效效应，如短路可能引发停电，影响商场酒店正常运营。然后评估失效的严重度、频度和可探测度。严重度根据对人员安全、设备损坏和运营中断的影响程度来确定；频度考虑该失效模式在实际运行中可能发生的频率；可探测度则是在现有检测手段下发现该失效的难易程度。通过这些参数的综合评估，计算出风险优先数，以便对风险进行排序和针对性防控。

（二）动态风险预警机制

1. 智能监测系统集成

机电施工风险识别体系构建需从多方面着手。智能监测系统集成是关键部分，可基于物联网技术实现。通过在机电设备上安装振动监测和绝缘检测装置，能实时获取设备运行数据^[7]。这些装置可相互联动，当检测到异常时能及时报警。同时，构建实时数据采集平台，将采集到的数据进行整合与分析。利用数据分析结果，可识别潜在风险，为风险预警提供依据。动态风险预警机制则根据识别出的风险，及时发出预警信号，以便施工人员采取相应措施，从而有效防控机电施工风险，确保商场酒店工程改造的顺利进行。

2. 风险阈值预警模型

在机电施工风险识别体系中，构建动态风险预警机制的风险阈值预警模型至关重要。对于给排水管材耐压和电气线路载流量，需建立动态安全阈值。通过实时监测相关参数，将实际数据与阈值进行对比分析。当数据接近或超出阈值时，及时触发预警。同时，开发分级预警响应程序，根据风险程度的不同，设定不同级别的预警信号和相应的处理措施。例如，对于轻微偏离阈值的情况，发出初级预警，提示相关人员密切关注；对于严重超出阈值的情况，发出高级预警并立即采取紧急措施，以保障机电系统的安全稳定运行^[8]。

四、风险防控体系实施路径

（一）设计阶段预控措施

1. 多专业协同设计

在商场酒店工程改造中，机电多专业协同设计至关重要。创建 MEP 综合布置原则是基础，要综合考虑各机电系统的空间需求、运行要求以及相互之间的影响，确保系统布局合理、高效^[9]。装配式机房模块化设计对施工误差的兼容性方案研究是关键，通过合理的模块设计和接口处理，提高机房的装配精度和容错能力，减少施工误差对机电系统运行的影响。同时，各专业设计师应密切沟通协作，共享设计信息，及时解决设计冲突，从设计源头防控风险，确保机电系统的可靠性和稳定性。

2. 虚拟建造技术验证

在商场酒店工程改造中，虚拟建造技术验证至关重要。运用 BIM 模型进行管线碰撞检测，能提前发现设计中的冲突问题，避免施工中的返工风险^[10]。通过施工模拟，可对施工流程进行优化，提高施工效率和质量。同时，实施 VR 技术交底能够消除施工人员对设计意图的理解偏差，使其更直观地了解施工要求和细节，从而更好地保证施工的准确性和规范性。这些虚拟建造技术的应用，为机电技术管理和风险防控提供了有力支持，有助于确保工程改造的顺利进行。

（二）施工过程动态控制

1. 关键工序监控要点

施工过程中，需对关键工序进行严格监控。对于电梯井道垂直度，应制定激光校准标准，施工时采用高精度激光仪器定期检

测,确保垂直度偏差在允许范围内,避免后续电梯运行故障。精密空调机组减震安装方面,要建立声振控制指标,在安装过程中使用专业的减震设备和材料,同时通过振动传感器和声级计实时监测振动和噪声水平,使其符合指标要求,防止因振动和噪声过大影响空调运行效果及周边环境。对这些关键工序的动态监控,能够及时发现问题并采取措施纠正,保障工程质量和安全,有效防控风险。

2. 三维扫描质量验收

在施工过程动态控制的风险防控体系实施路径中,三维扫描质量验收至关重要。通过应用三维激光扫描技术进行管线安装精度校核,可获取精确的实际安装数据。构建点云数据对比分析模型,将实际数据与设计模型数据进行对比分析。能够及时发现管线安装过程中的偏差和问题,如位置不准确、走向不合理等。对于不符合精度要求的部位,可迅速采取整改措施,确保管线安装质量符合标准。这不仅提高了施工效率,避免了后期因安装问题导致的返工和维修,还能有效降低施工过程中的风险,保障整个机电系统的稳定运行和商场酒店工程改造的顺利进行。

(三) 运维支持系统构建

1. 智能维保平台建设

开发基于数字孪生的设备健康管理系统以及集成设备运行参数与维保记录数据库是构建智能维保平台的关键。数字孪生技术可精确模拟设备运行状态,通过实时监测设备运行参数,如温度、压力、振动频率等,及时发现潜在故障隐患。同时,整合维保记录数据库,可对设备的维修历史、维护周期、更换部件等信息进行全面管理。这不仅有助于分析设备故障的根本原因,还能

为制定合理的维护策略提供依据,从而提高设备的可靠性和运行效率,降低运维成本,有效防控风险。

2. 应急预案演练机制

在商场酒店工程改造中,机电技术管理的风险防控至关重要。对于配电系统,需制定双路电源切换操作规范。明确切换条件、操作流程及人员职责,确保在一路电源故障时能迅速、安全地切换到另一路,保障电力供应的连续性。同时,针对重要机房,要建立防洪排涝应急演练制度。模拟可能出现的洪涝情况,检验排水设施的有效性和人员的应急响应能力。演练应包括预警发布、人员疏散、排水操作等环节,通过定期演练,提高相关人员的应急意识和技能,确保在实际发生洪涝时,能最大程度减少损失,保障机房设备的安全运行。

五、总结

在商场酒店工程改造中,机电技术管理与风险防控至关重要。新型机电安装工艺展现出良好的适用性,其能够提高改造工程的质量和效率,满足现代商场酒店的功能需求。全流程风险控制体系对项目效益影响显著,通过有效的风险识别、评估和应对,可减少工程延误、成本超支等问题,保障项目顺利进行。同时,随着科技的发展,基于大数据分析的智慧工地是未来的发展方向。利用大数据可实现对工程进度、质量、安全等方面的实时监控和精准管理,提高决策的科学性和准确性。这将进一步提升机电技术管理水平,优化风险防控措施,为商场酒店工程改造项目创造更大的价值。

参考文献

[1] 南敏. SX 金控集团财务风险防控研究 [D]. 西北大学, 2021.
[2] 刘丁宁. 泰禾集团债券违约风险识别与防控研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
[3] 崔若凡. Y 消费金融公司风险防控研究 [D]. 山东财经大学, 2023.
[4] 阎丽霞. 企业刑事合规风险防控研究 [D]. 山西大学, 2021.
[5] 马慧. 数字货币法律风险防控研究 [D]. 贵州师范大学, 2021.
[6] 黄琪. 工程财务管理实践与风险防控分析 [J]. 投资与创业, 2023(3): 47-49.
[7] 陈美灿. 建筑工程管理中的风险分析及其防控措施 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(24): 116-118.
[8] 康志英, 郭小若, 康志强, 等. A 企业工程与物资采购风险防控审计研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2021, 000(021): 52-54.
[9] 林家慧, 封文宇. 高校维修工程领域风险防控的思考与探索 [J]. 山西建筑, 2021, 047(14): 186-188.
[10] 宋宏明. 岩土工程分析评价与地质工程风险防控措施 [J]. 中国住宅设施, 2023(2): 94-96.

化工安全监管视角下的精细化工工艺设计优化

罗先宇

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025060012

摘 要： 精细化工工艺设计涉及多环节与参数，具有独特特征。介绍其工艺设计安全监管、间歇式生产装置缺陷等，阐述基于多种理论的安全举措，如容错机制、智能控制方案等，还涉及制度建立与方法应用，构建模型与指南并应用取得成效。

关 键 词： 精细化工；工艺设计；安全监管

Process Design Optimization in Fine Chemical Engineering from the Perspective of Chemical Safety Supervision

Luo Xianyu

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： The process design of fine chemical engineering involves multiple stages and parameters, possessing unique characteristics. This paper introduces safety supervision in its process design, defects of batch production equipment, etc., and elaborates on safety measures based on various theories, such as fault-tolerant mechanisms and intelligent control schemes. It also covers the establishment of systems and the application of methods, involving the construction of models and guidelines, whose application has yielded positive results.

Keywords： fine chemical engineering; process design; safety supervision

引言

精细化工在国民经济中具有重要地位，其生产具有多品种、小批量等特点，工艺设计涉及多个环节。2021年发布的《“十四五”全国精细化工行业发展规划》强调了精细化工行业的高质量发展需求。在此背景下，精细化工工艺设计的安全性至关重要。从工艺特征与设计参数的紧密关联，到安全设施与主体工程的“三同时”制度，再到间歇式生产装置的安全缺陷以及安全监管制度执行效能评估等方面，都直接影响精细化工生产的安全与高效，是当前研究的重点内容。

一、精细化工工艺设计与安全监管的理论基础

（一）精细化工工艺核心概念辨析

精细化工是生产精细化学品的工业，具有多品种、小批量、技术密集度高、附加值高等特点。其工艺设计涉及多个环节和参数，包括原料选择、反应条件确定、工艺流程安排以及设备选型等。精细化工工艺特征与设计参数体系紧密相关，不同的产品需求决定了独特的工艺路线和相应的设计参数。例如，某些精细化学品对反应温度和压力要求极为苛刻，这就需要在工艺设计中精确设定和控制这些参数。同时，工艺优化与安全监管存在内在关联。优化的工艺设计可以减少潜在的安全隐患，而有效的安全监管能够为工艺优化提供保障和指导，确保精细化工生产过程的安全与高效^[1]。

（二）安全三同时制度解析

安全设施与主体工程的“三同时”制度是化工生产安全的重要保障。这一制度要求安全设施必须与主体工程同步设计、施工

和投产，旨在确保化工项目从规划到运营的全过程都充分考虑安全因素。在设计阶段，需依据化工工艺的特点和潜在风险，设计相应的安全设施，如防火、防爆、防毒等设施，使其与主体工程的工艺流程和设备布局相匹配^[2]。施工过程中，要保证安全设施的施工质量和进度与主体工程一致，避免出现脱节现象。在投产阶段，安全设施应与主体工程同时投入使用，并且要经过严格的验收和调试，确保其能够正常运行，有效预防事故的发生。

二、当前工艺设计存在的安全问题分析

（一）传统设计模式风险研究

间歇式生产装置在精细化工工艺设计中存在诸多安全缺陷。例如，反应过程可能不连续，物料的投放和产物的提取在不同阶段进行，这增加了操作的复杂性和潜在风险^[3]。在复杂反应体系中，多个反应同时或相继发生，反应路径难以精确控制，可能导致副反应增多，产生一些不稳定或危险的中间产物。这些中间产

物可能积累并引发爆炸、火灾等严重事故。而且，传统设计模式对这些复杂情况的考虑可能不够全面，缺乏对潜在危险的准确评估和有效的预防措施，无法从根本上保障生产过程的安全性。

（二）监管制度执行效能评估

精细化工工艺设计的安全监管制度执行效能评估至关重要。以 PDCA 循环理论为基础，对设计文件审查和 HAZOP 分析等制度进行评估。在设计文件审查方面，需考察其是否严格执行相关标准，是否存在审查漏洞^[4]。对于 HAZOP 分析制度，要关注分析过程是否全面、深入，能否准确识别潜在危险。实际执行中，可能存在审查人员专业能力不足，导致审查不严格的情况。HAZOP 分析也可能因缺乏足够经验和数据支持，无法涵盖所有可能的危险场景。这些问题都会影响监管制度的执行效能，进而危及化工工艺设计的安全性，需要进一步优化和完善相关制度及执行过程。

三、安全导向的工艺设计优化路径

（一）本质安全设计强化措施

1. 工艺参数容错机制构建

基于模糊控制理论构建关键工艺参数的容错机制是提升化工工艺本质安全的重要举措。以温度和压力等关键参数为例，通过建立动态调节模型实现容错。该模型可实时监测参数变化，当参数偏离正常范围时，依据模糊规则进行动态调整。这种调整并非基于精确的数值界限，而是综合考虑参数变化趋势、系统当前状态等多因素的模糊逻辑。它能够在参数出现异常但尚未达到危险阈值时就进行干预，有效避免因参数波动引发的安全事故，从而提高化工工艺的安全性和稳定性^[5]。

2. 安全联锁系统优化设计

精细化工工艺设计优化应从安全导向出发，强化本质安全设计并优化安全联锁系统。对于安全联锁系统，设计多级报警与自动停车系统集成的智能控制方案至关重要。该方案可有效监测工艺过程中的异常参数，当出现危险情况时，多级报警系统能及时发出不同等级的警报，提醒操作人员采取相应措施。同时，自动停车系统可根据预设的安全阈值，在危险无法控制时自动停止相关设备运行，避免事故进一步扩大^[6]。这种智能控制方案通过集成多级报警和自动停车功能，提高了工艺系统的安全性和可靠性，为精细化工生产过程提供了更有效的安全保障。

（二）全生命周期管理体系创新

1. 数字化设计平台建设

化工安全监管视角下，需构建集成风险数据库的 BIM 协同设计系统以推进数字化设计平台建设。该系统整合各类风险数据，为工艺设计提供全面风险信息参考。利用 BIM 的可视化和协同性，不同专业人员可实时交互，避免设计冲突，提高设计质量与效率。同时，通过对风险数据库的持续更新与分析，能够预测潜在安全隐患，在设计阶段及时优化工艺，确保精细化工工艺符合安全要求。此系统有助于打破信息孤岛，实现从设计到运营全生命周期的安全管理，提升精细化工工艺设计的整体安全性与可靠

性^[7]。

2. 变更管理流程再造

建立 MOC 变更管理矩阵式审批制度与追溯机制是变更管理流程再造的关键。该制度应涵盖精细化工工艺的各个环节，包括原料、设备、操作条件等方面的变更。对于每一项变更，都要进行严格的风险评估和安全分析，确保变更不会引入新的安全隐患。审批过程应涉及多个相关部门和专业人员，形成矩阵式的审批结构，以保证审批的全面性和科学性。同时，建立完善的追溯机制，记录变更的全过程，包括变更的原因、审批过程、实施情况以及后续的效果评估等。这样，一旦出现问题，可以迅速追溯到变更的源头，采取有效的措施进行解决，从而提高精细化工工艺的安全性和可靠性^[8]。

四、安全三同时实施策略研究

（一）设计阶段的整合优化

1. 风险预评价方法创新

在化工工艺设计的前期阶段，应用改进的 LOPA - HAZOP 耦合分析方法具有重要意义。该方法结合了 LOPA（保护层分析）和 HAZOP（危险与可操作性分析）的优势，能够更全面、准确地识别潜在风险。通过对工艺系统的各个节点和操作步骤进行详细分析，考虑各种可能的偏差及其后果，同时评估现有保护层的有效性^[9]。这有助于在设计初期发现并解决潜在的安全隐患，避免在后续生产过程中因设计不合理而引发安全事故。从而优化精细化工工艺设计，提高化工生产的安全性和可靠性。

2. 安全冗余设计标准重构

在化工安全监管视角下，精细化工工艺设计的安全冗余设计标准重构至关重要。基于 ALARP 原则制定分级安全冗余配置规范是一种有效的方法。ALARP 原则强调在合理可行的前提下，将风险降低到尽可能低的水平。通过对化工工艺中不同环节的风险评估，确定其风险等级。根据风险等级的不同，制定相应的安全冗余配置要求。对于高风险环节，应配置更高水平的安全冗余措施，以确保在出现故障或异常情况时，系统仍能保持安全稳定运行。这种分级配置规范不仅能够提高化工工艺的安全性，还能在一定程度上优化资源配置，避免过度冗余造成的成本浪费^[10]。

（二）施工质量的协同管控

1. 关键设备监造机制

在化工安全监管视角下，关键设备监造机制至关重要。建立包含材料溯源和工艺验证的设备全流程质量追踪体系是核心。从材料采购开始，严格记录材料来源、质量证明等信息，确保材料符合设计要求。在制造过程中，对工艺参数进行实时监测和验证，保证工艺的准确性和稳定性。通过这种方式，可以及时发现设备制造过程中的潜在问题，如材料缺陷、工艺偏差等，并采取相应措施加以解决。同时，该体系还应具备信息共享功能，使设计单位、施工单位和监管部门能够实时了解设备质量状况，实现施工质量的协同管控，确保设备在投入使用后能够安全稳定运行，满足精细化工工艺的需求。

2. 施工偏差预警系统

施工偏差预警系统是施工质量协同管控的重要环节。通过利用先进的传感器技术和数据分析算法,对施工过程中的各项参数进行实时监测。例如,在化工建设中,对管道安装的角度、压力等参数进行监测。一旦参数偏离预设的标准值,系统立即发出预警信号。同时,系统能够对历史数据进行分析,识别出可能导致偏差的潜在因素,如施工人员操作习惯、材料质量变化等。基于这些分析结果,施工团队可以及时采取纠正措施,调整施工工艺或更换材料,从而确保施工质量符合设计要求,有效避免因施工偏差导致的安全事故和质量问题。

(三) 验收阶段的系统验证

1. 功能安全保障测试

在验收阶段的系统验证中,功能安全保障测试至关重要。应依据相关标准和规范,对精细化工工艺中的安全设施进行全面检测。针对化工安全监管需求,制定包含2000项检测要点的安全设施验收技术规程。检测过程需涵盖安全设施的各个方面,包括其设计合理性、运行可靠性以及对潜在风险的防控能力等。通过对这些要点的严格检测,确保安全设施能够在实际生产过程中有效发挥作用,保障化工工艺的安全运行,预防事故的发生,从而实现从化工安全监管视角下精细化工工艺设计的优化目标。

2. 应急响应能力评估

应急响应能力评估是安全三同时实施策略研究验收阶段系统

验证的重要内容。在化工安全监管视角下,需对应急响应能力进行全面且深入的评估。一方面,要评估应急预案的科学性与合理性,查看其是否涵盖了可能出现的各类事故情景,以及针对不同情景所设定的应对措施是否得当。另一方面,检验应急救援队伍的实战能力,包括人员的专业技能、应急响应速度以及团队协作能力等。同时,还需考察应急资源的配备情况,如应急设备是否齐全且能正常运行,应急物资是否充足等。只有全面评估应急响应能力,才能确保化工工艺在安全的前提下顺利实施,保障化工生产的安全稳定。

五、总结

在化工安全监管的背景下,本研究围绕精细化工工艺设计优化展开。通过深入分析,系统构建了涵盖11项核心要素的工艺设计优化模型,为精细化工工艺设计提供了全面且科学的理论框架。同时,提出了安全三同时实施指南2.0版本,进一步完善了安全监管的规范和标准。这些研究成果在中试基地得到了实际应用,取得了显著成效,工艺安全等级大幅提升了58%。这不仅证明了模型和指南的科学性和实用性,也为精细化工行业在保障工艺安全方面提供了有力的支持和借鉴,有助于推动整个行业朝着更加安全、高效的方向发展。

参考文献

[1] 吕思奇. A 市化工行业政府安全监管优化策略研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
[2] 肖肃鑫. 多元参与视角下 QL 市食品安全监管研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
[3] 孙晓蕾. 多元共治视角下的我国特种设备安全监管探究 [D]. 山西大学, 2022.
[4] 马静薇. 协同治理视角下银川市网络食品安全监管问题研究 [D]. 宁夏大学, 2022.
[5] 李永明. 智慧工地安全监管平台的设计与应用 [D]. 南昌大学, 2021.
[6] 李永红. 精细化工工艺的安全设计 [J]. 化工管理, 2022, (2): 154-156.
[7] 王正林, 王昌芸. 安全设计在精细化工企业工艺设计中的重要性 [J]. 天津化工, 2023, 37(6): 126-128.
[8] 唐建业, 张旭, 杨龙, 等. 精细化工反应的工艺安全设计措施探讨 [J]. 化工设计, 2022, 32(5): 3-5.
[9] 王怡. 化工工艺设计中的安全风险与控制措施分析 [J]. 天津化工, 2023, 37(1): 144-146.
[10] 庞海凤. 化工工艺安全设计中危险识别与控制 [J]. 福建化工, 2020(8): 222-265.

铝电解槽氧化铝浓度区域失衡预警与协同控制技术 研究及实践

李撼宇, 练新强, 王锐新, 杨广飞, 张坤^{*}
云南神火铝业有限公司, 云南 文山 663000

DOI:10.61369/ME.2025060013

摘 要 : 针对目前大型预焙电解槽内氧化铝浓度控制愈发困难, 局部氧化铝浓度不均现象频发, 异常槽况干扰氧化铝浓度控制的现状, 通过铝电解槽氧化铝浓度区域控制技术, 从产生氧化铝浓度不均的原因进行分析, 增加控制系统功能, 通过多个控制参数设定, 科学化、精准化、细致化单个下料点的氧化铝下料控制, 在500kA电解槽上使用后, 各项生产指标得到明显提升。

关 键 词 : 铝电解槽; 氧化铝浓度; 区域控制; 异常槽况控制

Research and Practice on Early Warning and Collaborative Control Technology for Regional Imbalance of Alumina Concentration in Aluminum Electrolysis Cells

Li Hanyu, Lian Xinqiang, Wang Ruixin, Yang Guangfei, Zhang Kun^{*}
Yunnan Shenhua Aluminum Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663000

Abstract : Addressing the current challenges in controlling alumina concentration within large pre-baked electrolysis cells, where localized imbalances in alumina concentration frequently occur and abnormal cell conditions interfere with concentration control, this study analyzes the causes of uneven alumina concentration distribution through regional control technology for alumina concentration in aluminum electrolysis cells. By enhancing the functionality of the control system and setting multiple control parameters, it achieves scientific, precise, and detailed control over alumina feeding at individual feeding points. After implementation on 500kA electrolysis cells, significant improvements have been observed in various production indicators.

Keywords : aluminum electrolysis cell; alumina concentration; regional control; abnormal cell condition control

铝电解槽中氧化铝的浓度控制对电解槽的运行稳定性至关重要。氧化铝在下料点到达电解质区域后, 受磁场影响电解质循环运动, 流动的电解质将氧化铝运输到槽内的各个区域^[1]。如今, 随着现代大型预焙电解槽生产能力的不断增加, 槽型不断向大型化发展, 下料点也随之增多, 电解槽内氧化铝浓度不均更加频繁出现, 局部氧化铝浓度过高或过低现象频发, 具体体现为电解槽堵卡频发与炉底沉淀增加^①。此外, 在电解槽出现异常槽况时, 受多种因素影响, 电解槽内电解反正不能正常高效进行, 下料点氧化铝需求降低, 此时如果不采取措施进行干预, 该下料点由于氧化铝消耗量减少将会出现局部氧化铝浓度偏高, 严重甚至会出现堵卡、炉底沉淀现象。上述问题均会导致电解质流动性、导电性、溶解性下降, 电流效率偏低, 影响电解槽各项技术指标及经济指标, 为解决这些问题, 本文从下面几个方面进行阐述其研究方向及优化方法。

一、工业生产中的氧化铝控制策略

由于技术条件限制, 如今还不具备能满足工业生产需要的氧化铝浓度传感器, 故目前准连续 (或称半连续) 下料制度采用的

氧化铝浓度控制方式仍为槽电阻控制 (槽电压控制), 以槽电阻作为主要控制参数。从之前的研究可以得知槽电阻与氧化铝浓度之间存在着一定的相互对应关系, 同时槽电阻随氧化铝浓度变化较为敏感 (尤其是氧化铝浓度处在低位时), 在工业生产中槽电阻的变化

作者简介: 李撼宇 (1980—), 男, 河南永城人, 本科, 工程师, 主要从事铝电解生产技术管理工作。

通讯作者: 张坤 (1973—), 男, 河南夏邑人, 本科, 高级工程师, 主要从事电解铝生产技术的研发, E-mail: qalyzhk@163.com。

不仅体现了极距的变化,同时也体现着氧化铝浓度的变动。

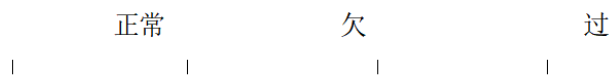


图1 “三阶段循环”控制策略

目前电解槽氧化铝浓度控制系统多采用“三阶段循环”的控制策略,将控制过程划分为三个阶段:欠料阶段:放大下料间隔,减少氧化铝投入量,降低浓度;过料阶段:缩小下料间隔,增加氧化铝投入量,提高浓度;正常阶段:调整电压,保持极距。通过以转换的方法保持浓度处于持续、合理的波动之中,利用槽电阻上升或下降变化速率(常称为斜率)来判断浓度范围,三个加料周期的切换,使输入量有了足够大的变化,从而保证控制系统充分识别槽电阻变化速率,同时根据斜率来判别电解槽过量或欠量转换^[2]。

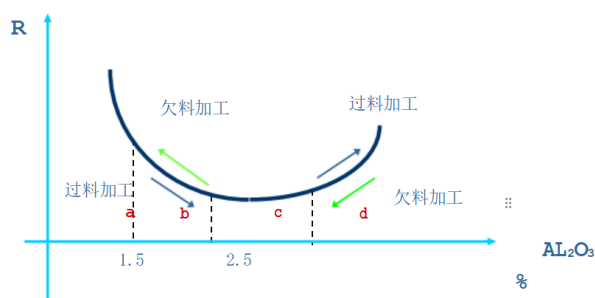


图2 氧化铝浓度变化特征电阻关系图

在极距保持不变的情况下,氧化铝浓度与槽电阻的关系呈现为“凹”形,即在中等氧化铝浓度区间存在一个极小值的点。根据槽电阻与氧化铝浓度的对应关系,以及氧化铝浓度对槽电阻的影响程度,一般将氧化铝浓度特征电阻曲线分为下列四个区域:

- 效应区:氧化铝浓度极低(低于1.5%),槽电阻对氧化铝浓度变化最敏感,氧化铝浓度一旦稍微降低,就极易发生效应;
- 敏感区:氧化铝浓度低(1.5%~2.5%),槽电阻对氧化铝浓度变化敏感,易进行三阶段循环控制,这一区间电解槽电流效率高,工业生产中通常将氧化铝浓度控制在这一区间;
- 不敏感区:槽电阻对氧化铝浓度的变化不敏感,槽电阻基本不随氧化铝变化而变化,保持在相对平稳的区间,不易于进行生产控制,同时这一区间电解槽电流效率较低;
- 高浓度区:槽电阻对氧化铝浓度的变化敏感,但氧化铝浓度过高,生产中电解质内氧化铝趋于饱和,电解质对入槽氧化铝溶解度大大降低,容易导致炉底沉淀生成并造成槽况恶化。

经过大量的实验取样,并对氧化铝浓度特征电阻曲线进行分析,可以得出定论:将氧化铝浓度精确控制在敏感区附近,不仅槽况稳定,对初晶温度影响小,而且易于取得高的电流效率。

二、正常运行情况下氧化铝浓度区域控制

随着技术的不断发展,国家政策的要求越发严格,政府不断推进落实,电解槽生产能力不断提高,电解槽槽型也随着不断增

大,生产能力较小的小型槽随之淘汰,电解槽的大型化是未来发展的必然趋势。由于槽型的增大,下料点也会随之增多,各个下料点之间的氧化铝浓度平衡问题更加凸显,尽管在大型电解槽设计之处就考虑过该问题,但实际生产中仍然存在,尤其是两端(出铝端与烟道端)下料点尤为突出,生产具体表现为两端下料点容易积料堵卡、两端炉底沉淀多明显高于电解槽内其他部位,究其原因,其一主要由于大型电解槽内铝液与电解质液受磁场影响不断流动,同时铝液与电解质形成的流体场分布不均,各个部位的流速不相同,当未溶解的氧化铝在槽内随流体场的流动被带到两端时,由于转角处流速大大降低,部分氧化铝停滞在这一区域,导致氧化铝沉积,炉底沉淀增加;其二是由于电解槽设计原因,两端角部阳极有一侧为槽壳,相较于中部阳极电化学反应少,氧化铝消耗量较低,下料点处多余氧化铝便容易造成积料致使堵卡,而电解质中氧化铝易饱和则导致产生过剩氧化铝,造成沉淀;其三则是由于两端散热面积较大,热损失较大,两端温度较中部低,而氧化铝在电解质中溶解度随温度的降低而降低,同样的下料点处未及时溶解的氧化铝堆积形成积料,而部分氧化铝也会因未被电解质溶解便直接落入槽底,形成沉淀。

如何解决大型电解槽区域氧化铝浓度分不均的问题,目前已成为大型槽实际生产中必须面对的问题。本文通过以下方法进行解决:通过在电解槽两端、中间及其他部位分别进行电解质取样分析,对比两端、中间及其他部位的氧化铝浓度,根据氧化铝浓度差距进行初步计算,得出正常生产情况下各部位氧化铝饱和和下料量,再根据各个下料点的单次下料量计算出下料次数,对比两端、中间及其他部位的下料次数。同时在槽控机控制系统内打开端口,修改下料控制程序,使之可以接收与反馈自槽控机系统内的控制命令,技术人员即可根据电解槽内氧化铝区域浓度的不同偏差来调节下料参数进行控制,将每个点的参数进行根据实际需要逐一设置,使电解槽两端、中间及其他部位的下料频率与间隔在一定范围内可以自行调整,即可设置为每多长时间少下一次料或每多少次下料少下一次料。根据氧化铝浓度偏差将参数设置完成后,在电解槽上进行对比实验,观察电解槽的生产运行情况,同时每隔一段时间进行取样分析试验槽内各个位置的氧化铝浓度,反复实验,直至将槽内氧化铝浓度调整基本均匀,再对该参数优化设置,进行推广使用。此类为通常情况下电解槽内两端氧化铝浓度高于中间下料点,若出现中间下料点氧化铝浓度高于两端下料点情况,也可通过调整中间下料点的下料频率来进行控制,从而实现氧化铝浓度平衡。

氧化铝浓度区域控制策略投入运行前后的同一电解槽的电解槽运行控制曲线,从图中可明显看出,在氧化铝浓度区域控制策略投入运行后,区域氧化铝浓度受控率明显提高,槽电压曲线摆动幅度大幅减小,噪声也随之减少,同时闪烁效应不再发生,有效改善电解槽运行情况。

目前新研发应用的铝电解智能气缸及智能打壳控制系统也能在一定程度上改变槽内氧化铝浓度不均的情况,铝电解智能气缸及智能打壳控制系统可以判别槽内下料点的堵卡情况及打壳情况,根据这些情况,该系统及装置调控打壳间隔、打壳深度、打

壳用气量,做到节气降耗、减少堵卡,同时还可以判别下料点的堵卡、打壳气缸的运行状态、气压正常与否^[3],为电解槽内氧化铝浓度平衡控制提高条件。

三、非正常运行情况下氧化铝浓度区域控制

上述为电解槽正常运行情况下的氧化铝浓度区域控制策略,但在电解槽的实际生产运行中,往往会出现单个下料点或者多个下料点一段时间内氧化铝入槽量急剧增加或急剧减少的情况,在此情况下,继续使用正常运行情况下氧化铝浓度区域控制策略会导致槽内氧化铝区域浓度失衡程度更加严重,为此探讨非正常运行情况下氧化铝浓度区域控制策略就具有很高的必要性。根据导致电解槽出现非正常运行情况的原因,可将非正常运行情况下氧化铝浓度区域控制策略分为以下几种。

(一) 换极后的氧化铝浓度区域控制

在以往的电解槽生产实践中,由于换极后的新极需要吸收热量提升温度,消除新极表面电解质层,流经新极的电流才会逐渐增大,通常在8小时内新极初步升温,而在16小时左右新极基本达到热平衡,通过新极的电流趋于稳定,达到正常水平,故在此期间,由于通过电流相较于正常阳极较少,电解反应发生较少,相对应的氧化铝消耗量也随之降低,同时更换阳极时,部分氧化铝随物料掉入电解槽内,该区域氧化铝浓度也会上升,而更换阳极时热量的散失又导致该区域电解温度下降,从另一方面抑制了电解反应,若不对该非常情况下氧化铝浓度区域控制进行调整,会导致单点下料点区域氧化铝浓度大幅上升,影响电解槽正常运行。

根据上述换极后的电解槽槽内氧化铝浓度变化,制定相应的氧化铝浓度区域控制策略,提出消除换极影响的氧化铝浓度平衡控制方法:通过现场生产实际制定换极表,于槽控机控制系统内新增功能,使之能够存储读取换极表,并能够设定阳极所对应的下料点,通过系统录入一个换极周期内的阳极更换顺序,在对应日期,槽控机系统读取换极表,获取当日换极电解槽槽号与极号,打开端口使此功能与上文中的单个下料点下料控制功能互联^[4]。在更换阳极时,槽控机上按下换极键,控制系统给出附加电压,槽电压上升达到一定幅度,而换极信号也到达上位机,此时判别电解槽进行换极操作,控制系统读取该电解槽换极极号与对应下料点点位,在换极结束后,随着换极完成信号的给出,控制系统根据设定参数N1对下料点进行控料,该控制参数可根据现场电解槽运行情况设定控料时间N1分钟,在控料时间结束后又可根据上文中分析所得换极后下料点氧化铝的消耗量减少情况,再设定另一组参数,对该下料点电解反应非正常期的氧化铝下料量进行调整,该设定参数可设定下料量自正常下料量的N2%开始恢复,恢复时间为N3分钟,在持续时间结束后,再恢复正常下料。

(二) 下料点堵卡后的氧化铝浓度区域控制

在电解生产中,由于下列因素,往往会导致下料点出现堵卡:下料点锤头随时间的增加被消耗而减小,不能有效击穿下料点壳面;电解质物理性质因分子比、电解温度等因素发生改变而变化,下料点处电解质凝结速度过快,结壳迅速;打壳锤头粘黏

电解质,逐步长大形成大锤头,达到一定限度后大锤头落入下料点导致下料点堵塞^[5];下料系统故障,导致一次性下料过多导致下料点堵塞。可以发现,导致下料点堵卡的因素很多,电解槽发生堵卡的概率也非常频繁,在堵卡发生时,该下料点由于氧化铝不能进入电解槽,此时的区域氧化铝浓度是非常低的,甚至会引发闪烁效应的发生,而当人工处理完堵卡之后,堵卡点被打通,大量堆积在此处的氧化铝又会立即落入槽内,下料点的区域氧化铝浓度又大幅增加,同时还应考虑到,若堵卡后电解槽电压虚高,导致人工进行效应加工,电解槽除堵卡下料点之外的其他下料点短时间内投入过多氧化铝,区域氧化铝浓度也会上升。

根据上述下料点堵卡后的电解槽槽内氧化铝浓度变化,制定相应的氧化铝浓度区域控制策略,提出消除下料点堵卡影响的氧化铝浓度平衡控制方法:通过上文中的智能气缸或智能打壳系统,使其能够自动判别堵卡下料点位置,再打通该系统与电解槽控制系统的关口,使电解槽控制系统能够读取堵卡下料点位置,同时控制系统根据设定参数N4对下料点进行控料,该设定参数可根据电解槽实际设定减少下料次数N4次,防止下料点处氧化铝继续增加堆积过多,而当下料点堵卡处理结束后,下料点恢复正常信号抵达上位机,此时控制系统根据设定参数N5减少一定时间内堵卡下料点的下料量,该设定参数可根据电解槽实际设定延长该下料点的下料间隔N5秒,同时若进行了效应加工,控制系统读取过去一段时间内的槽控机操作,判断出现效应加工后,控制系统根据设定参数N6对其他下料点进行控料,该设定参数可根据电解槽实际设定减少其他下料点的下料间隔N6次,在N6次下料后,恢复正常下料。

(三) 电压异常后的氧化铝浓度区域控制

在一天的电解槽生产周期内,电压异常发生概率比较低,但持续时间却不定,从几分钟到几个小时不等。电压异常一般可分为两种,其一为电压摆,具体表现为电解槽电压摆幅较大,但摆动频率较长,一般由于各种因素导致槽内铝水波动而引发;第二种则为噪声过高超限,具体表现为电压反复摆动,摆幅较小,摆动频率快,一般由于各种因素引起的单块或多块阳极电流分布不均导致的。这两种电压异常均会影响电解槽的正常生产,导致电解反应无法快速高效的进行,但影响层面并不相同,电压摆对整槽的电解反应影响较大,槽内氧化铝消耗量降低,而噪声过高虽然同样会对整槽的电解反应造成影响,但阳极电流分布不均的单块或多块阳极处影响会更大,对于下料点的氧化铝浓度区域浓度差异也更大。

根据上述造成电压异常的原因,以及电压异常后的电解槽槽内氧化铝浓度变化,制定相应的氧化铝浓度区域控制策略,提出消除电压异常影响的氧化铝浓度平衡控制方法:针对电压摆,电解槽控制系统在判别电解槽出现电压摆后,控制系统根据设定参数N7对全槽下料点进行电压摆持续时间内的下料量调整,该设定参数可根据电解槽实际设定延长全槽下料点的下料间隔N7秒;针对噪声过高,电解槽控制系统在判别电解槽出现噪声过高超限后,控制系统根据设定参数N8对全槽下料点进行电压摆持续时间内的下料量调整,该设定参数可根据电解槽实际设定延长全槽下料点的下料间隔N8秒,同时技术人员通过现场测量,发现电流分布异常

的阳极组及对应下料点，再通过上位机人工录入下料点位置，控制系统根据设定参数 N9 对该下料点进行噪声持续时间内的下料量调整，该设定参数可根据电解槽实际设定延长该下料点的下料间隔 N9 秒，其中 N9 参数优先级高于 N8 参数，完成下料点位置录入后 N9 参数可覆写 N8 参数，电压摆与噪声异常结束后恢复正常下料。

四、氧化铝浓度区域控制技术的应用效果分析

氧化铝区域控制策略在 500kA 电解槽上推广使用，下表为使

用该控制技术前后部分电解槽的技术参数及经济指标对比，从中可以看出，氧化铝区域控制策略在使用前，每日电解槽平均电压差（平均电压与设定电压之差）为 0.041V，平均闪烁效应次数为 6.3，平均噪声为 38.7mV，平均炉底压降为 281.7mV，平均电流效率为 90.9%，而在氧化铝区域控制策略在使用后，电解槽平均电压差为 0.030mV，平均闪烁效应次数为 1.7，平均噪声为 25.6，平均炉底压降为 271.3mV，平均电流效率为 91.4%，具有了很大程度的改善，由此可见，氧化铝浓度区域控制技术在氧化铝浓度受控率上有了很大的提高，从而使得电解槽技术指标得到了非常明显的优化。

表1 氧化铝浓度区域控制技术投入前后电解槽技术参数对比表

槽号	电压差 /V		闪烁效应 / 次		噪声 mV		炉底压降 mV		电流效率 /%	
	前	后	前	后	前	后	前	后	前	后
4056	0.042	0.033	4		36	25	281	270	89.8	90.1
4057	0.045	0.036	10	2	43	31	279	266	90.4	91.0
4058	0.039	0.028			32	19	288	278	91.3	91.8
4059	0.042	0.029	8	3	40	28	290	281	90.9	91.5
4060	0.041	0.034	3	1	38	26	271	265	90.8	91.3
4061	0.040	0.026			35	21	277	268	90.5	91.1
4062	0.040	0.025			37	26	276	269	90.6	91.4
4063	0.043	0.033	3		40	29	281	270	91.6	91.8
4064	0.046	0.034	8	1	49	29	293	279	91.0	91.4
4065	0.038	0.030		1	35	20	290	275	91.2	91.5
4066	0.035	0.024			31	18	276	261	91.5	91.9
4067	0.038	0.026			37	21	284	276	90.9	91.2
4068	0.042	0.031	9		40	30	291	280	91.3	91.6
4069	0.041	0.026	2		43	29	274	266	90.9	91.8
4070	0.045	0.032	10	2	45	32	275	265	90.1	91.4
平均	0.041	0.030	6.3	1.7	38.7	25.6	281.7	271.3	90.9	91.4

五、结束语

- 1.氧化铝浓度区域控制技术能够有效的提高电解槽内的氧化铝浓度受控率，使其保持在高效运行的氧化铝浓度区间，从而增强电解槽稳定性，提高电流效率，减少电解槽噪声与运行电压差；
- 2.氧化铝浓度区域控制技术的使用，大大提升了电解槽内的

氧化铝浓度的均匀性，降低了局部氧化铝浓度过高或过低现象发生的概率，从而减少阳极效应发生次数与炉底沉淀的生成，控制电解槽无用损耗，节能减排；

- 3.针对异常槽况下的氧化铝浓度区域控制技术，在异常槽况发生造成电解反应不能正常进行，氧化铝消耗量减少的情况下，通过控料以及延长下料间隔等方式，避免下料点局部氧化铝浓度过高或堵卡现象的发生。

参考文献

[1]邱竹贤. 预焙槽炼铝第3版 [M].北京：冶金工业出版社，2005.
[2]张延安，吕国志. 铝冶金技术 [M].北京：科学出版社，2011.
[3]梁学民，张松江. 现代铝电解生产技术与管理 [M].长沙：中南大学出版社，2011.
[4]陈志洋. 提高大型预焙铝电解槽氧化铝浓度控制准确性的方法 [J]. 轻金属，2023(8): 30~35.
[5]冯乃祥. 铝电解 [M].北京：化学工业出版社，2006.

高速公路电气设备故障诊断与智能化管理方法研究

罗国机

广东 佛山 528226

DOI:10.61369/ME.2025060018

摘 要： 介绍高速公路电气设备系统构成，包括供配电、照明、监控等系统，阐述常见故障模式。分析基于固定阈值预警机制、传统人工巡检的局限。讲述多源数据融合、考虑环境变量的模型等优化策略，及绝缘子检测、边缘计算节点部署等关键技术，还提及设备健康评估等内容。

关 键 词： 高速公路电气设备；故障诊断；智能化管理

Research on Fault Diagnosis and Intelligent Management of High-speed Road Electrical Equipment

Luo Guoji

Foshan, Guangdong 528226

Abstract： This paper introduces the components of the electrical equipment system on expressways, including power supply and distribution, lighting, and monitoring systems, and discusses common fault modes. It analyzes the limitations of traditional manual inspections and the fixed threshold early warning mechanism. The paper also discusses optimization strategies, such as multi-source data fusion and models that consider environmental variables, as well as key technologies like insulator detection and the deployment of edge computing nodes. Additionally, it covers equipment health assessment.

Keywords： expressway electrical equipment; fault diagnosis; intelligent management

引言

高速公路电气设备系统对高速公路的正常运行至关重要，其涵盖供配电、照明、监控等多个子系统，且各有复杂的运行原理和拓扑结构。随着交通行业的发展，2023年发布的相关交通设施维护政策强调了保障高速公路设备可靠性和安全性的重要性。然而，电气设备面临着短路、接地、老化等多种故障模式，传统的基于固定阈值预警机制和人工巡检模式存在局限性。为提高故障诊断的准确性和效率，多源数据融合的特征提取策略、考虑环境变量的自适应随机森林分类模型等新技术应运而生，这些技术将为高速公路电气设备的智能化管理提供有力支持，符合政策导向和行业发展需求。

一、高速公路电气设备系统特性及故障机理分析

（一）电气设备构成与运行特征

高速公路电气设备系统主要由供配电系统、照明系统、监控系统等构成。供配电系统为高速公路各类设备提供电力支持，其拓扑结构包括变电站、配电室等，确保电能稳定传输^[1]。照明系统保障高速公路在不同时段的可视性，其灯具分布和亮度设置需满足行车安全要求，运行特征与交通流量和环境因素相关。监控系统由摄像头、传感器等组成，具备实时监测交通状况的功能，其拓扑结构复杂，涉及数据传输和处理环节，运行时需保证数据的准确性和及时性，以实现高速公路的有效监控^[1]。

（二）典型故障模式及成因

高速公路电气设备常见故障模式包括短路故障、接地故障和设备老化等。短路故障通常是由于绝缘损坏、线路连接不当或过

载等原因导致电流异常增大，可能引发电气设备过热、烧毁甚至火灾等严重后果^[2]。接地故障可能是由于接地系统不完善、设备绝缘性能下降或外界因素影响，使电气设备的金属外壳带电，危及人身安全和设备正常运行。设备老化则是长期运行过程中，电气设备的元器件逐渐磨损、性能下降，这可能与工作环境的温度、湿度、灰尘等因素有关，导致设备出现故障的概率增加^[2]。

二、传统故障诊断方法局限性分析

（一）阈值判断法应用现状

基于固定阈值的预警机制在高速公路电气设备故障诊断中存在诸多局限性。在动态环境下，设备运行状态受多种复杂因素影响，如不同季节的温度、湿度变化，交通流量的差异等。这些因素导致设备的运行参数并非固定不变，而固定阈值无法灵活适应

这种动态变化。例如，夏季高温可能使电气设备的正常工作温度范围上移，但固定阈值无法及时调整，可能会误判设备故障，引发不必要的维护操作，增加成本且影响设备正常运行。同时，不同设备个体之间也存在一定差异，固定阈值难以对所有设备都适用，无法准确区分正常的个体差异和真正的故障状态，降低了故障诊断的准确性和可靠性^[3]。

（二）人工巡检模式效率瓶颈

传统人工巡检模式在高速公路电气设备故障诊断中存在诸多效率瓶颈。巡检周期长，无法及时发现设备的潜在故障，可能导致故障积累，增加维修成本和设备停机时间^[4]。盲区多，一些设备位置偏远或难以到达，容易被巡检人员忽略，这些未被检查到的区域可能隐藏着故障隐患。经验依赖性强，巡检人员的专业水平和经验参差不齐，对于故障的判断可能存在偏差，缺乏统一的标准和规范。而且人工巡检需要耗费大量的人力、物力和时间，效率低下，难以满足高速公路电气设备日益增长的维护需求。

三、智能故障诊断关键技术研究

（一）基于机器学习的诊断模型构建

1. 特征工程优化方法

多源数据融合的特征提取策略与降噪处理算法是特征工程优化的关键。对于多源数据，需综合考虑不同数据源的特点，提取全面且有代表性的特征。采用主成分分析等方法对高维特征进行降维处理，减少冗余信息，提高模型效率^[5]。同时，针对数据中的噪声问题，设计有效的降噪处理算法。例如，小波变换可在时频域对信号进行分析，去除噪声干扰，增强特征的准确性和稳定性。通过这些策略和算法，能够优化特征工程，为后续基于机器学习的诊断模型提供更优质的输入，提高故障诊断的准确性和可靠性。

2. 动态权重诊断模型

考虑环境变量的自适应随机森林分类模型是动态权重诊断模型中的重要部分。该模型能够自适应地调整决策树的权重，从而提高诊断的准确性。在构建模型时，首先需要收集大量的电气设备故障数据以及相关的环境变量数据。然后，利用这些数据对随机森林模型进行训练，通过不断调整决策树的权重，使模型能够更好地适应不同的环境条件和故障类型。在实际应用中，该模型可以实时监测电气设备的运行状态，当检测到异常时，能够快速准确地诊断出故障原因，并提供相应的维修建议。这不仅可以提高故障诊断的效率和准确性，还可以减少维修成本和停机时间，提高高速公路电气设备的可靠性和安全性^[6]。

（二）图像识别技术的绝缘子故障检测

1. 红外成像特征提取

在绝缘子故障检测中，红外成像特征提取至关重要。通过对绝缘子红外图像的分析，可获取其温度分布等关键信息。利用卷积神经网络强大的特征提取能力，能够自动学习到绝缘子在不同故障状态下的红外成像特征。首先对采集到的红外图像进行预处理，包括去噪、增强对比度等操作，以提高图像质量。然后将处

理后的图像输入卷积神经网络，网络通过卷积层、池化层等结构逐步提取图像的特征。这些特征能够反映绝缘子的温度变化模式以及可能存在的故障区域。通过大量的训练样本对网络进行训练，使其能够准确地识别出绝缘子的故障特征，为后续的故障诊断提供有力依据^[7]。

2. 多模态数据融合检测

实现可见光与红外图像的特征级融合识别技术是多模态数据融合检测的关键。通过对可见光图像中绝缘子的外观、颜色、纹理等特征，以及红外图像中绝缘子的温度分布特征进行提取⁸。利用特征融合算法，将两种模态下的特征进行融合，使得融合后的特征能够更全面地反映绝缘子的状态。例如，融合后的特征可以同时包含绝缘子表面的物理特征和热特征，从而提高故障检测的准确性和可靠性。这种特征级融合技术能够有效克服单一模态图像在绝缘子故障检测中的局限性，为智能故障诊断提供更有力的支持。

四、智能化管理系统架构设计

（一）边缘-云端协同架构

1. 边缘计算节点部署

边缘计算节点部署是智能化管理系统架构设计中边缘-云端协同架构的关键部分。对于高速公路电气设备故障诊断与智能化管理，需设计包含数据预处理和本地推理的终端设备配置方案。在边缘计算节点，应合理配置计算资源和存储资源，以满足数据预处理的需求。通过对采集到的电气设备数据进行实时处理，去除噪声和异常值等干扰因素，提高数据质量^[9]。同时，具备本地推理能力的终端设备能够在边缘节点快速对一些常见故障模式进行判断，减少对云端的依赖，提高故障诊断的及时性和准确性，提升整个智能化管理系统的性能和效率^[9]。

2. 5G 通信协议优化

在边缘-云端协同架构下的5G通信协议优化对于高速公路电气设备故障诊断与智能化管理至关重要。通过优化5G通信协议，可建立低时延高可靠的数据传输通道技术规范。5G技术的高速率、低时延和高可靠性特性能够满足电气设备实时数据传输需求，确保故障诊断的及时性和准确性。优化过程需考虑多方面因素，如网络切片技术的应用，可根据不同业务需求划分网络资源，保障电气设备数据传输的优先级和质量。同时，对5G协议中的物理层、MAC层等进行针对性优化，提高数据传输效率和稳定性，为智能化管理系统提供坚实的通信基础^[10]。

（二）大数据处理平台

1. 实时数据清洗机制

在大数据处理平台的实时数据清洗机制中，构建基于时间窗口的异常数据过滤与修复模型至关重要。该模型需考虑时间维度对数据的影响，通过设定合适的时间窗口，对进入系统的数据进行实时监测。对于不符合正常数据模式的异常值，依据时间窗口内的其他相关数据进行分析和判断。利用数据的关联性和时间序列特征，识别可能的错误原因。通过算法对异常数据进行过滤，

将明显错误的數據排除在后续处理流程之外。同时，对于一些可修复的数据，根据其在时间窗口内的上下文信息进行合理修复，确保数据的准确性和完整性，为后续的电气設備故障診斷和智能化管理提供可靠的数据基础。

2. 多维信息融合存储

面向設備全生命周期管理的时空数据库架构在多维信息融合存储方面具有重要意义。该架构需考虑設備运行过程中产生的多种信息，包括时间序列数据和空间位置信息等。对于时间序列数据，要设计合理的存储结构以高效处理不同时间粒度的数据，同时确保数据的完整性和准确性。在空间信息存储上，结合地理信息系统相关技术，实现設備位置与相关属性信息的有效关联。通过建立数据索引和分区策略，提高数据查询和检索的效率，以便快速获取所需的設備信息，为后续的故障診斷和智能化管理提供坚实的数据基础。

（三）智能运维应用模块

1. 設備健康状态评估

設備健康状态评估是智能化管理系统的关键部分。对于高速公路电气設備，需综合多方面因素进行评估。通过传感器采集設備运行数据，如温度、电压、电流等。利用数据分析技术挖掘数据中的特征信息，以判断設備是否存在异常。同时，结合設備的历史运行数据和故障记录，建立設備健康状态评估模型。该模型可对設備当前的健康状况进行量化评分，为运维人员提供直观的判断依据。此外，考虑設備的剩余寿命预测，通过对設備老化趋势、磨损程度等进行分析，将其纳入設備健康状态评估体系，以便提前规划维护策略，降低設備故障对高速公路运营的影响。

2. 动态运维策略生成

动态运维策略生成部分主要聚焦于开发基于强化学习的任务优先级调度算法。强化学习通过智能体与环境的交互来学习最优策略。在此系统中，智能体为算法主体，环境包含电气設備运行状态及相关任务信息。算法首先要定义状态空间，涵盖設備故障类型、严重程度、运维资源情况等。然后确定动作空间，例如不同的维修任务安排和资源分配方式。通过不断接收环境反馈的奖励信号，如维修效率提高、設備故障率降低等，来优化策略。最终实现根据設備实时状态和任务需求，合理安排运维任务优先级，提高运维效率，确保高速公路电气設備的稳定运行。

五、总结

智能診斷算法显著提升了故障识别准确率。通过先进的算法模型和数据分析技术，能够更精准地定位电气設備故障，减少误判和漏判情况，为快速修复提供了有力支持。管理平台在运维成本控制上展现出重要实践价值。它整合了资源管理、故障预警和维修调度等功能，优化了运维流程，提高了工作效率，降低了人力、物力和时间成本。展望未来，数字孪生技术在設備全生命周期管理中具有广阔应用前景。它可以实现設備虚拟模型与物理实体的精准映射和实时交互，为設備的设计、运行、维护和升级提供更全面、精确的决策依据，推动高速公路电气設備管理向智能化、高效化方向发展。

参考文献

[1] 叶富根. 面向红外图像的电气設備热故障診斷研究 [D]. 华东交通大学, 2023.
[2] 冯爽爽. 基于红外技术的变电站关键电气設備故障診斷研究 [D]. 西南石油大学, 2022.
[3] 赵岩. 基于深度学习的电气設備红外图像识别与热故障診斷 [D]. 华北电力大学 (保定), 2022.
[4] 王雅雯. 融合非平衡故障文本与监测数据样本集的电气設備故障診斷研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[5] 陶诗涌. 燃料电池系統故障診斷与混合动力系統能量管理方法研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
[6] 尹承波. 浅析园林绿化智能化管理方法 [J]. 科学与信息化, 2022(9): 193-195.
[7] 蔡义. 高速公路信息化与智能化管理的发展研究 [J]. 运输經理世界, 2021(32): 64-66.
[8] 王維力. 油庫設備檢维修的智能化管理方法 [J]. 当代化工研究, 2021(18): 133-134.
[9] 王保柱. 油庫設備檢维修的智能化管理方法 [J]. 化工管理, 2021(22): 70-71.
[10] 朱得斌. 高速公路机电設備智能化管理研究 [J]. 河南建材, 2024(8): 141-144.

化工运输风险管理：化工工艺专业下的安全保障机制探究

罗先峰

广东 珠海 519050

DOI:10.61369/ME.2025060020

摘 要： 围绕化工运输风险管理，阐述风险识别评估方法，包括多维度风险分类特征及评估方法。介绍PDCA循环与Bowtie模型应用框架，分析不同运输场景风险控制点。强调实时监控、专项技术、操作规范、制度保障等重要性，构建评估体系，提出数字孪生技术应用及三方协作机制，创新技术－管理双驱动保障机制。

关 键 词： 化工运输；风险管理；安全保障机制

Chemical Transportation Risk Management: An Exploration of Safety Assurance Mechanisms under the Chemical Process Specialty

Luo Xianfeng

Zhuhai, Guangdong 519050

Abstract： Focusing on the risk management of chemical transportation, this paper expounds the methods of risk identification and assessment, including the multi-dimensional risk classification characteristics and assessment methods. Introduce the PDCA cycle and the Bowtie model application framework, and analyze the risk control points in different transportation scenarios. Emphasis on real-time monitoring, special technology, operation specification, system guarantee, such as importance, construct evaluation system, put forward the digital twin technology application and tripartite coordination mechanism, guarantee mechanism innovation technology－management double drive.

Keywords： chemical transportation; risk management; safety assurance mechanism

引言

化工运输风险识别与评估是化工运输风险管理的重要环节，涉及多个维度和复杂因素。近年来，我国发生了一些重大化工运输事故，凸显了加强化工运输风险管理的紧迫性。2021年我国发布的《危险化学品安全专项整治三年行动方案》强调了对危险化学品全生命周期的安全管理，包括运输环节。欧盟REACH法规也为化工运输管理提供了借鉴，其注重风险评估与管理等要素。在此背景下，本研究围绕化工运输风险管理展开，深入探究安全保障机制，构建技术－管理双驱动的保障机制具有重要意义。

一、化工运输风险管理的基本理论

（一）化工运输风险识别与评估理论

化工运输风险识别与评估是化工运输风险管理的重要环节。风险分类特征可从多个维度解析，包括化学品的物理化学性质（如易燃易爆性）、运输方式（如公路、铁路、水路运输的不同风险）以及运输环境（如气候条件影响）等。风险概率与后果评估方法多样，HAZOP通过对化工工艺过程的引导词分析，识别潜在危险^[1]。LOPA则进一步对识别出的危险进行量化分析，确定风险的可接受程度。结合化工工艺专业标准建立量化模型，可综合考虑化学品的特性参数、运输条件以及工艺要求等因素，更准确地评估化工运输风险，为后续的风险管理提供科学依据。

（二）风险管理与安全保障逻辑模型

构建PDCA循环与Bowtie模型在化工运输安全中的应用框架，是实现有效风险管理与安全保障的重要举措。PDCA循环包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段，通过不断循环来持续改进运输过程中的风险管理。Bowtie模型则从危害因素、预防措施、控制措施和后果等方面进行分析，清晰地呈现出风险的因果关系^[2]。风险控制与安全保障机制之间存在紧密的耦合关系。有效的风险控制措施是安全保障机制的核心内容，能够降低事故发生的可能性和严重程度。同时，安全保障机制为风险控制提供了制度和技术支持，确保风险控制措施得以有效实施。这种耦合关系有助于提高化工运输的安全性和可靠性。

二、化工运输过程中的风险因素分析

（一）危险化学品运输属性分析

危险化学品的物理化学性质对运输风险有显著影响。易燃性是重要特性之一，易燃的危险化学品在运输过程中，若遇到火源、高温或静电等情况，极易引发火灾甚至爆炸，严重威胁运输安全和周边环境^[3]。腐蚀性也是关键因素，具有腐蚀性的化学品可能会腐蚀运输容器，导致容器泄漏，不仅会损坏运输设备，还可能使化学品泄漏到环境中，造成环境污染和对人员的伤害。此外，化学品的毒性、放射性等性质也会给运输带来不同程度的风险。了解这些货物特性及其对运输风险的影响机制，是有效管理化工运输风险的基础。

（二）多模态运输风险关键控制点

在化工运输过程中，不同运输场景下的风险关键控制点各有特点。公路运输中，车辆的行驶稳定性受路况、驾驶员操作等影响，存储压力需考虑容器的抗压能力及密封性能，环境温度变化可能导致化工品的物理化学性质改变，增加泄漏风险^[4]。铁路运输时，运输速度和轨道状况对风险有影响，存储压力同样与容器相关，极端环境温度可能影响运输设备的安全性。管道运输则更关注管道的材质、压力等级以及沿线的环境温度变化对化工品的影响，管道内的存储压力需严格控制，防止因压力过高导致管道破裂泄漏。综合对比三种运输场景，准确分析各因素对风险传导的定量影响，对化工运输风险管理至关重要。

三、化工运输安全保障机制构建

（一）技术层面的安全保障体系

1. 智能监测预警系统架构

基于物联网的实时监控系统在化工运输安全保障中至关重要。通过集成传感器网络，能够实时获取化工运输过程中的各类关键数据，如温度、压力、湿度等参数^[5]。这些数据是反映运输环境和货物状态的重要指标。同时，结合大数据分析技术，对大量的实时数据进行快速处理和分析，挖掘潜在的风险因素。通过建立相应的风险预警模型，当数据出现异常波动或超出设定阈值时，及时发出预警信号，以便相关人员采取措施进行干预，从而有效避免化工运输事故的发生，确保化工运输的安全。

2. 事故应急防护技术体系

化工运输过程中，泄漏控制和消防联动等专项技术至关重要。针对可能出现的泄漏情况，应开发先进的泄漏检测与控制技术，例如采用高精度传感器实时监测运输容器的压力、温度和物质浓度等参数，一旦发现异常，立即启动自动封堵或引流装置，防止泄漏物扩散^[6]。同时，消防联动技术需综合考虑化工品的特性，制定相应的灭火策略和联动机制。例如，对于易燃液体化工品，应配备泡沫灭火系统，并与运输车辆的紧急制动和报警系统联动，在火灾发生时能迅速响应，降低事故危害。通过这些专项技术方案的开发，形成梯度化应急处置标准，以应对不同程度的化工运输事故。

（二）管理层面的制度保障体系

1. 全流程标准化管理制度

化工运输过程涉及诸多风险，从装载到卸载需制定标准化操作规范。装载环节要明确规定货物的固定方式、装载量限制以及不同化工品的隔离要求等，确保货物在运输过程中稳定且不会发生化学反应^[7]。运输途中需规定车速、路线选择原则以及驾驶员的操作规范，如定时检查货物状态等。卸载环节同样要有详细流程，包括卸货顺序、剩余货物处理等。同时，建立运输资质动态审核机制至关重要。定期对运输企业及人员的资质进行审查，包括运输车辆的安全性能、驾驶员的从业资格和培训记录等。对于不符合要求的企业或人员，及时暂停其运输业务，直至整改合格，从而保障化工运输全流程的安全。

2. 人员培训与责任追溯制度

在化工运输安全保障机制的构建中，管理层面的制度保障体系至关重要。对于人员培训，应构建包含 VR 实训的安全培训体系^[8]。通过 VR 技术，员工能够身临其境地体验化工运输过程中可能出现的各种风险场景，从而更好地掌握应对措施。这种培训方式不仅能提高培训效果，还能增强员工对风险的敏感度。

同时，完善基于区块链技术的责任追溯系统也是关键。区块链的不可篡改和可追溯特性，能够准确记录化工运输过程中的每一个环节和相关责任人。一旦出现问题，可以迅速定位责任主体，提高处理问题的效率，从而保障化工运输的安全。

四、实证分析与机制优化

（一）典型事故案例深度解析

1. 国内重大运输事故复盘

近年我国发生了一些重大化工运输事故，如^[9]中所提及的某起事故。从技术失效角度看，运输车辆的罐体材质可能未达到化工品运输的特殊要求，在长期运输过程中出现腐蚀等情况，导致化工品泄漏。同时，运输过程中的温度、压力等参数监测技术可能不完善，无法及时准确反馈异常情况。从管理漏洞维度分析，部分企业对运输人员的资质审核不严格，一些驾驶员缺乏应对化工品运输突发情况的专业知识和技能。而且在运输路线规划上，可能未充分考虑途经区域的人口密度、环境敏感性等因素，增加了事故发生后的危害程度。

2. 国际先进经验对比研究

欧盟 REACH 法规为化工运输管理提供了一套较为完善的范式。该法规强调了对化学品全生命周期的管理，包括运输环节。其要求对化学品进行严格的分类、标签和包装，以确保运输过程中的安全性^[10]。同时，法规还规定了企业在运输过程中的责任和义务，如提供安全数据表等。从管理体系要素来看，其注重风险评估与管理，要求企业对运输过程中可能出现的风险进行全面评估，并采取相应的措施进行预防和控制。此外，法规还强调了信息的透明度和可追溯性，通过建立相关的数据库和信息系统，实现对化学品运输的全程监控和管理。这些体系要素对于我国化工运输风险管理具有重要的借鉴意义。

（二）安全保障机制实践验证

1. 某化工园区运输系统改造项目

以某化工园区运输系统改造项目为例，应用新型监测技术后风险发生率有显著变化。通过对改造前后运输过程中各项风险数据的收集与分析，发现新型监测技术能够实时精准地监测到运输车辆的运行状态、货物状态以及环境参数等。在未应用该技术前，风险发生率处于较高水平，而应用后，风险发生率大幅降低。这主要得益于新型监测技术能够及时发现潜在风险并发出预警，使得相关人员可以迅速采取措施进行处理。由此验证了在化工工艺专业背景下，针对化工运输安全保障机制所采取的改造措施及应用新型监测技术的有效性，为化工运输风险管理提供了有力的实践支撑。

2. 供应链安全绩效评价模型

建立包含 15 项 KPI 的评估体系，用于化工运输风险管理的安全保障机制实践验证。这些 KPI 涵盖运输过程的各个环节，如运输设备状况、人员资质、应急响应能力等。通过对各项 KPI 的量化评估，实施运输安全星级评定制度。星级评定直观反映运输安全水平，为企业提供明确的改进方向。例如，高星级表明安全保障机制运行良好，低星级则提示需要对特定 KPI 相关环节进行优化。该评价模型有助于化工企业及时发现运输风险，针对性地调整安全保障策略，提升化工运输的整体安全性。

（三）机制持续改进路径设计

1. 风险动态适应机制构建

随着化工行业的发展，化工运输风险备受关注。基于数字孪生技术建立风险演化模拟系统具有重要意义。该系统可精确模拟化工运输过程中的各种复杂工况和潜在风险，通过对大量数据的分析和学习，实现对风险的实时监测和精准预测。在此基础上，系统能够智能迭代防护策略，根据风险的变化动态调整运输过程

中的安全措施，如优化运输路线、调整运输时间、改进包装方式等。同时，该系统还可与实际运输设备和监控系统进行实时交互，确保防护策略的有效实施，从而提高化工运输的安全性和可靠性，为化工工艺专业下的化工运输安全保障机制提供有力支持。

2. 多主体协同治理模式

政府-企业-保险机构三方应构建协作平台以完善化工运输风险共担机制。政府需发挥监管职能，制定严格的化工运输安全标准和法规，督促企业合规运营。同时，为企业提供政策支持 and 引导，促进化工运输行业的健康发展。企业应积极履行主体责任，加强化工运输过程中的安全管理，包括车辆设备维护、人员培训等。保险机构则要依据化工运输风险特点，开发合理的保险产品，为企业提供风险保障。三方通过信息共享、资源整合，形成协同治理模式，共同应对化工运输风险，提高化工运输的安全性，保障化工行业的稳定运行。

五、总结

本研究围绕化工运输风险管理展开，在化工工艺专业背景下深入探究安全保障机制。通过系统研究，构建了技术-管理双驱动的保障机制，这是研究的重要创新点。该机制整合了化工工艺专业技术与风险管理措施，从技术层面确保运输过程中化工产品的稳定性和安全性，从管理层面规范运输流程、加强人员培训与监管。然而，随着化工行业的发展，新型化学品不断涌现，其运输风险具有新的特点和挑战。未来需进一步加强对新型化学品运输风险的研究，不断完善安全保障机制，以适应化工运输行业的发展需求，确保化工运输的安全与稳定。

参考文献

- [1] 张仲浩. W 化工企业业务的内部环境风险管理研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 李丹丹. HK 化工公司新产品导入阶段风险管理研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] 李涛. A 化工企业安全风险评价研究 [D]. 青岛科技大学, 2022.
- [4] 宋思聪. S 市智慧化工园区大数据项目进度与风险管理研究 [D]. 北京化工大学, 2023.
- [5] 曹艳军. 江苏华昌化工大型气化框架工程施工质量风险管理研究 [D]. 兰州交通大学, 2022.
- [6] 赵国良. 探究化工工艺的风险识别和安全评价 [J]. 山西化工, 2022, 42(03): 228-229.
- [7] 汤方位. 探究化工产品进口贸易中的风险管理 [J]. 中国科技投资, 2022, (06): 4-6.
- [8] 王雪峰, 袁珊珊. 化工企业工艺安全管理 (PSM) 探究 [J]. 中国储运, 2021, (10): 151-152.
- [9] 付维. 化工工艺安全风险辨识研究 [J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(10): 90-92.
- [10] 高智祥. 化工企业设备安全风险与隐患管理 [J]. 化工管理, 2023, (35): 106-109.

火电厂自动化控制系统与能源效率提升的关系研究

刘城

福建华电可门发电有限公司, 福建 福州 350512

DOI:10.61369/ME.2025060032

摘 要： 火电厂作为重要的电力生产基地其能源效率直接影响经济效益和环境保护，自动化控制系统通过精确调控燃烧过程与优化运行参数，提升火电厂能源效率，从而以实现智能化管理，自动化控制系统能够实时监测锅炉温度与压力以及流量等关键参数，通过反馈控制机制实现燃料与空气的最佳配比。智能化的控制算法可以根据负荷变化自动调整运行模式，减少能量损失，分布式控制系统整合现场设备与上位机系统形成层次化的控制网络，研究表明，先进的自动化控制技术能够显著降低煤耗率，提高发电效率以及减少污染物排放，通过优化控制策略和完善系统配置，自动化控制系统在火电厂能源效率提升中发挥着不可替代的作用。

关 键 词： 火电厂；自动化控制系统；能源效率；燃烧优化；智能控制

Research on the Relationship between Automation Control System and Energy Efficiency Improvement in Thermal Power Plants

Liu Cheng

Fujian Huadian Kemen Power Generation Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350512

Abstract： As an important power production base, the energy efficiency of thermal power plants directly affects economic benefits and environmental protection. The automation control system becomes a key technical means to improve the energy efficiency of thermal power plants by accurately regulating the combustion process, optimizing operating parameters, and achieving intelligent management. The automation control system can monitor key parameters such as boiler temperature, pressure, and flow rate in real time, and achieve the optimal ratio of fuel and air through feedback control mechanism. Intelligent control algorithms can automatically adjust the operating mode according to load changes to reduce energy loss. Distributed control systems integrate on-site equipment and upper computer systems to form a hierarchical control network. Research has shown that advanced automation control technology can significantly reduce coal consumption rates, improve power generation efficiency, and reduce pollutant emissions. By optimizing control strategies and improving system configuration, automation control systems play an irreplaceable role in improving energy efficiency in thermal power plants.

Keywords： thermal power plant; automated control system; energy efficiency; combustion optimization; intelligent control

引言

能源短缺与环境污染是当前社会面临的重大难题，随着全球能源需求持续增长与生态环境约束日益严格，火电厂作为主要的电力供应来源承担着巨大的节能减排压力，传统的人工操作模式已无法满足现代化生产的精细化管理要求，自动化控制系统的广泛应用为火电厂能源效率的提升提供技术支撑。该系统通过数字化与网络化等智能化的控制手段实现对发电过程的全面监控和精确调节能够实时捕捉设备运行状态变化，及时修正异常参数，自动化控制不仅提高系统运行的稳定性和可靠性，更在能源利用效率方面发挥重要作用，深入研究自动化控制系统与能源效率提升的内在关系，对于推动火电厂技术进步和可持续发展具有重要的理论意义和实践价值。

一、火电厂自动化控制系统与能源效率的基础关联

（一）控制参数与效率指标的定量影响

火电厂自动化控制系统中的关键，控制参数与能源效率指标之间存在明确的量化映射关系，温度与压力以及流量等基础控制

参数的精确度，直接决定着热效率与煤耗率等核心效率指标的表现水平，控制参数的偏差程度与能源损失呈现出明显的函数关系，微小的参数波动往往引发显著的效率衰减。控制系统的测量精度与调节品质和响应速度共同构成效率指标稳定性的技术基础，自动化控制通过建立参数与指标间的数学模型，这一映射关

系遵循热力学第一定律和传递现象学理论，体现能量守恒与传热的基本规律，实现对能源效率的定量预测和精确调控，这种量化的控制机制突破传统经验操作的局限性，为火电厂能源效率的持续改善提供科学依据，控制参数优化的深度直接影响着效率指标提升的空间，精密的参数控制是实现高效率运行的必要条件。

（二）控制结构与效率体系的层次对应

火电厂自动化控制系统的分层控制结构与能源效率体系具有天然的层次对应关系，这种层次对应性确保了效率管理能够覆盖从设备到系统再到全厂的各个层面，形成完整的效率管控体系。现场控制层通过直接作用于执行机构，如阀门与风机及泵等设备实时调节设备的运行参数，例如调整引风机转速以控制炉膛负压实现对局部设备运行效率的及时调节构成效率体系的基础层面。过程控制承担着子系统间的协调功能，通过优化各个子系统的配合关系促进整体效率的协同提升，管理控制层从全厂角度统筹各个控制回路管理控制层从全厂角度统筹各个控制回路，结合电网负荷需求与燃料成本及环保标准等多方面因素，制定全厂最优运行方案实现对整体能源效率的综合调节和长期优化，这种层次化的控制架构确保效率管理的全方位覆盖避免局部优化导致的整体效率损失，各控制层级之间的信息传递和指令下达形成完整的效率管理链条，分层控制结构的完善程度，决定着能源效率提升的系统性和持续性，为火电厂实现全面的效率管理提供组织保障^[1]。

（三）控制模式演进与效率改善阶段

火电厂控制模式的技术演进过程与能源效率的改善历程呈现出明显的阶段性特征，每一次控制模式的革新都伴随着技术理念的升级和效率水平的跨越式提升。在工业发展初期，手动控制模式下工作人员通过肉眼观察仪表数据与手动操作阀门，控制精度完全依赖个人经验，能源浪费严重效率水平较低。手动控制向自动控制的转变标志着效率管理进入规范化阶段，自动化技术的引入大幅提升控制精度和响应速度，例如自动调节系统可将参数波动控制在 $\pm 2\%$ 以内，相比手动控制减少50%以上的参数偏差^[2]，显著降低因参数波动导致的能源损失。随着火电厂设备复杂度增加和运行工况多样化，单回路控制向多变量控制的发展实现系统性的效率优化，多变量协调控制有效解决各个控制回路间的耦合问题，传统控制向智能控制的跃升开启效率管理的智能化时代，先进算法和人工智能技术为深度挖掘效率潜力提供技术手段。每个控制模式的演进都伴随着效率水平的显著提升，技术进步成为推动效率改善的根本动力，控制模式的持续创新为火电厂能源效率的不断突破提供技术路径，体现自动化控制系统在效率提升中的核心作用。

二、自动化控制系统对能源效率的作用机制

（一）燃烧过程控制的热效率影响

燃烧过程作为火电厂能量转换的核心环节，其本质是化学能向热能的转化过程，遵循化学反应动力学和燃烧理论的基本原理，燃烧反应的完全性与燃烧温度的合理性及燃烧状态的稳定性

共同决定着热效率的高低水平，任何一个环节的失控都可能导致大量能量损失，自动化控制系统通过精确调节空气与燃料的配比关系，根据燃料的热值与水分及灰分等特性实时调整空燃比，通常将空燃比控制在1.1-1.3的最佳范围内确保燃烧反应的完全性最大限度地释放燃料的化学能，燃烧温度的智能控制维持着最佳的传热条件，提高热量传递效率和蒸汽品质，燃烧稳定性控制消除燃烧过程中的波动现象，避免因燃烧不稳定造成的效率损失，如防止火焰脱稳导致的局部高温区和低温区，减少热量分布不均带来的能量浪费。自动化控制系统通过实时监测炉膛温度分布，烟气成分和燃烧状态与动态调整燃烧参数，实现燃烧过程的优化运行，先进的燃烧控制算法能够适应燃料特性的变化，面对煤种更换时自动调整控制策略保持燃烧效率的稳定性，燃烧过程控制的精细化程度直接影响着火电厂的整体热效率水平是提升能源利用效率的关键技术环节。

（二）系统协调控制的循环效率促进

火电厂热力循环效率的提升有赖于各个子系统间的精密协调配合，自动化控制系统通过汽轮机与锅炉的协调控制，实现蒸汽参数与负荷需求的最佳匹配，提高热力循环的整体效率，给水系统的优化控制通过监测给水温度、流量、水质以及锅炉水位等参数，精确调节给水泵转速和给水阀门开度，确保给水温度和流量的精确调节，改善循环水的热力学性能，减少给水系统的能耗，如将给水温度控制在设计值 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 范围内可降低给水泵电耗6%-8%。辅助设备的智能控制针对风机与水泵及磨煤机等辅助设备，根据主设备运行状态和负荷需求，采用变频调速与变负荷运行等方式降低厂用电消耗，减少内部能源损失，如低负荷工况下将送风机转速降低20%可减少风机电耗30%以上。系统协调控制通过建立各子系统间的耦合模型实现多变量的同步优化避免单一系统优化导致的整体效率损失。先进的协调控制策略能够根据运行工况的变化，动态调整各子系统的运行参数保持循环效率的最优状态，系统协调控制的完善程度决定着火电厂能源综合利用效率的上限是实现高效发电的技术保障。

（三）负荷控制与运行效率的平衡机制

火电厂负荷控制与运行效率之间存在着复杂的平衡关系，而负荷变化会改变设备运行工况，影响热效率与煤耗率等关键指标，因此负荷控制与运行效率之间存在着复杂的平衡关系，需要通过精密的控制策略实现二者的协调统一，既要满足电网调峰调频需求，又要避免效率过度下降。自动化控制系统通过优化负荷跟踪算法，提高部分负荷工况下的运行效率^[3]，缓解变负荷运行对效率的不利影响，快速的负荷响应能力与效率稳定性要求之间的矛盾，通过智能控制策略得到有效解决。深度调峰控制技术扩展机组的最低稳燃负荷范围，提高低负荷工况下的运行效率，负荷控制系统通过预测电网需求变化提前调整机组运行状态，减少负荷变化过程中的效率损失，负荷控制系统通过预测电网需求变化提前调整机组运行状态，减少负荷变化过程中的效率损失，先进的负荷分配算法确保多台机组间的效率优化配置实现全厂效率的最大化，负荷控制与效率平衡机制的完善为火电厂在复杂电网环境下的高效运行提供技术支撑。

三、控制系统与效率提升的深化优化

（一）综合优化控制的整体效率协同

综合优化控制代表着火电厂自动化控制系统的高级发展阶段，通过统筹考虑多个控制目标实现整体效率的协同提升^[4]，多目标优化控制策略该策略基于运筹学理论和最优控制理论，通过帕累托最优解的搜寻实现多维度目标的均衡，同时兼顾效率提升和环保要求，在满足排放标准的前提下最大化能源利用效率，约束优化控制技术突破传统控制方法的局限性，通过合理处理各种运行约束条件，拓展效率优化的边界范围。全局优化控制算法从系统整体角度寻求效率的极值解，避免局部优化导致的整体性能损失，综合优化控制通过建立完整的目标函数和约束条件实现火电厂运行的多维度优化，先进的优化算法能够处理复杂的非线性控制问题为深度挖掘效率潜力提供技术手段，综合优化控制的实施水平直接反映着火电厂自动化技术的先进程度是实现效率持续改善的重要途径。

（二）预测性控制的效率稳定保障

预测性控制技术通过前瞻性的监测和调节机制为火电厂能源效率的长期稳定提供可靠保障，设备健康监测控制系统通过实时跟踪设备运行状态，及时发现效率衰减的早期征象实现预防性的维护调节，故障预警控制机制能够提前识别可能导致效率突降的异常情况，通过预先调整避免严重的效率损失。维护时机优化控制确定设备检修的最佳时间窗口在保证安全运行的前提下最大化设备的效率贡献期，预测性控制技术通过建立设备劣化模型和效率预测模型，实现对效率变化趋势的准确预判，智能化的预测算法能够综合考虑多种影响因素提供精确的效率预测结果，预测性控制的完善程度决定着火电厂效率管理的前瞻性和主动性，是确保长期高效运行的关键技术，其理论基础源于概率论与统计学和时间序列分析体现随机过程的预测性建模思想。

（三）先进控制技术的效率潜力挖掘

先进控制技术的不断涌现为火电厂能源效率的深度挖掘开辟新的技术路径，数字化技术通过提高控制系统的精度和响应速度

为效率优化提供更加精密的技术手段，如数字式炉膛压力传感器的测量精度可达 $\pm 0.1\text{kPa}$ ，远高于传统模拟传感器，为精准控制炉膛压力、减少漏风损失提供保障。人工智能技术的应用使控制系统具备学习和自适应能力，如基于深度学习的燃烧优化模型，能够通过分析大量历史运行数据自主学习不同工况下的最优控制策略，并根据燃料特性、负荷需求等变化实时调整，持续优化控制策略以挖掘更深层次的效率潜力，例如自动识别煤种变化并调整空燃比，保持燃烧效率稳定。机器学习算法通过分析大量运行数据发现传统方法难以识别的效率优化规律，云计算和大数据技术为复杂的效率优化计算提供强大的算力支撑^[5]。

实现多机组与多电厂的运行数据汇聚分析通过云端平台构建区域级的效率优化模型，为单厂效率提升提供参考依据。未来控制技术的发展趋势指向更加智能化和自主化的效率管理模式将实现效率优化的自动化和智能化，先进控制技术的持续创新为火电厂效率的突破性提升提供技术驱动力代表着能源效率管理的发展方向，这些技术的深度融合将推动火电厂向着更高效率水平迈进。

四、结语

自动化控制系统与火电厂能源效率提升之间存在着密切的内在联系，通过建立科学的控制理论体系和完善的技术架构，自动化控制系统能够实现对发电过程的精细化管理和优化调节，确保每个环节的能源利用都处于最优状态。燃烧过程的精确控制与热力循环的协调运行以及负荷响应的智能调节，这些控制功能共同构成能源效率提升的技术基础，为火电厂高效运行提供核心支撑。多目标优化控制策略的实施进一步挖掘系统的节能潜力，预测性维护技术的应用保障系统长期稳定高效运行，面向未来数字化技术与人工智能的深度融合将为火电厂自动化控制带来新的发展机遇，构建更加智能化与网络化以及协同化的控制系统将成为实现火电厂能源效率持续提升的重要途径。

参考文献

- [1] 渠国防. 火电厂热控自动化系统优化与性能提升研究 [J]. 电力设备管理, 2025(2): 114-116.
- [2] 陈井龙. 火电厂热控自动化控制设备的调试与安装研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(4): 133-136.
- [3] 王梦琦. 火电厂热工自动化控制技术应用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(2): 121-124.
- [4] 白芮铭. 火电厂热控自动化保护装置的检修与维护研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2025(3): 005-008.
- [5] 李常彬. 基于智能化的火电厂电气工程自动化技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025(2): 93-95.

高盐废水离心脱盐设备运行稳定性提升研究

张波波

国能榆林化工有限公司, 陕西 榆林 719000

DOI:10.61369/ME.2025060035

摘 要： 本文针对高盐废水离心脱盐设备在工业应用中普遍存在的运行稳定性问题展开深入研究，旨在通过系统性分析提升设备可靠性避免处理过程中的效率下降和安全风险。研究采用文献综述和工程模型结合的方法首先概述了离心脱盐技术的核心机制包括高速旋转分离原理和关键组成单元接着探讨了稳定性提升的迫切需求如环境保护法规和经济效率优化。在此基础上识别了主要问题如机械磨损材料腐蚀和外部干扰并通过提出综合措施优化结构设计改善操作参数强化自动监测系统最终提升了设备连续运行性能。结果表明这些措施能有效降低故障率确保脱盐率稳定高于百分之九十五为工业高盐废水处理提供可行解决方案同时推动环保技术创新促进资源循环利用减少二次污染风险。本研究对相关领域具有理论指导价值未来需进一步在动态建模中验证。

关 键 词： 高盐废水；离心脱盐；设备稳定性；运行优化；环境保护

Study on Improving Operation Stability of Centrifugal Desalination Equipment for High Salinity Wastewater

Zhang Bobo

Guoneng Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719000

Abstract： This paper conducts an in-depth study on the operation stability of centrifugal desalination equipment for high salt wastewater in industrial applications, aiming to improve the reliability of the equipment through systematic analysis and avoid efficiency decline and safety risks in the treatment process. The research adopts the method of literature review and engineering model. Firstly, the core mechanism of centrifugal desalination technology is summarized, including the principle of high-speed rotating separation and key components. Then, the urgent need for stability improvement, such as environmental protection regulations and economic efficiency optimization, is discussed. On this basis, the main problems such as mechanical wear, material corrosion and external interference were identified, and comprehensive measures were put forward to optimize the structural design, improve the operating parameters and strengthen the automatic monitoring system, which ultimately improved the continuous operation performance of the equipment. The results show that these measures can effectively reduce the failure rate and ensure that the desalination rate is stable higher than 95%, which provides a feasible solution for the treatment of industrial high salt wastewater, while promoting environmental protection technology innovation, promoting resource recycling and reducing the risk of secondary pollution. This study has theoretical guiding value for related fields and needs to be further verified in dynamic modeling in the future.

Keywords： high salt wastewater; centrifugal desalting; equipment stability; operation optimization; environmental protection

引言

随着工业废水排放量的急剧增长高盐废水处理成为环境保护的关键挑战，离心脱盐设备以其高效快速的特点被广泛应用但运行稳定性不足导致故障频发影响处理效果。本文旨在探究高盐废水离心脱盐设备运行稳定性提升的机制通过系统性研究提升设备可靠性避免处理过程中断保障水资源安全。研究背景基于全球环保政策趋严如碳减排要求和高盐废水腐蚀性强处理难度大的现状，设备在化工冶金电力等行业中发挥核心作用但内部组件易损外部环境扰动如温度变化和杂质积累加剧问题复杂性。研究必要性在于当前文献多聚焦脱盐效率提升而忽略稳定性维护缺乏整合优化措施，本文方法采用分层分析法结合工程仿真从概述基础概念开始逐步分析意义问题及对策目标是通过理论创新推动设备免维护运行实现经济效益最大化减少环境影响。本研究为后续工程实践奠定基础意义深远。

作者简介：张波波（1995.05—），男，汉族，陕西佳县人，助理工程师，本科，研究方向：高盐水脱盐离心机运行。

一、高盐废水离心脱盐设备运行稳定性概述

（一）设备基本原理与技术特征

高盐废水离心脱盐设备的基本原理，是利用高速旋转产生的离心力，分离废水中的溶解盐分，实现水盐分离。技术特征包括核心组件，如旋转鼓筒、驱动装置和密封系统。工作过程通过调节转速和进料量，控制盐结晶效率，适用于高盐度废水，如化工含氯废水、冶金含重金属废水。运行稳定性定义为：设备在连续工作条件下，保持预期脱盐率，免于突发故障的能力。当前发展以自动化和材料创新为主导，但设备基础设计，如结构刚度和平衡性，仍需改进，以适应多变工业环境^[1]。

（二）离心机分类与选型方法

工业应用中的离心设备主要包括卧螺离心机、碟片式离心机及推料式离心机三大类型。（1）卧螺离心机：通过螺旋推料器实现固液分离，适用于含固量高（5%~40%）、颗粒粒径 $>5\mu\text{m}$ 的废水，其处理能力大但能耗较高；（2）碟片式离心机：利用碟片组提升分离面积，擅长处理微细颗粒（ $1\sim 10\mu\text{m}$ ）及乳化液，但对进料波动敏感；（3）推料离心机：单级推料机型适用于中等粘度物料（ $<1500\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ），双级推料机可处理更高粘度（ $<3000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ）的结晶盐浆，推料频率需根据盐晶硬度动态调整（通常15~30次/分钟）。选型需综合考量废水盐度、固含量、结晶特性等参数。例如某化工厂氯碱废水（含固量25%，NaCl晶体0.2mm）选用双级推料离心机，通过将推料行程从40mm优化至35mm，盐饼含水率由12%降至9.5%。

（三）研究现状与发展趋势

当前高盐废水离心脱盐设备的研究现状显示，学术界多侧重于脱盐效率提升而非稳定性分析，全球研究集中在欧美国家以机械仿真为主，但较少涉及长期运行数据亚，洲如中国近年开始关注运行维护系统发展趋势正转向智能化监测，如传感器集成和远程控制未来方向，包括模块化设计和环境适应提升，以降低维护频率市场应用前景广阔政策支持推动技术创新。

二、高盐废水离心脱盐设备运行稳定性提升的意义

高盐废水离心脱盐设备的运行稳定性提升，不仅关乎设备自身的可靠性，更直接影响环境保护与工业经济效益。当设备能够长时间保持平稳运转时，突发性故障与废水泄漏的风险显著下降，从而减少对地下水和周边生态的潜在扰动，助力企业在应对巴黎协定等国际环保要求及地方排放标准时更加从容；与此同时，高效而稳定的处理能力意味着能耗与维护成本降低，产能利用率提升，回收的纯净水可再次投入循环工艺，既节约资源又增强企业竞争力。更为关键的是，这种稳定性为新技术、新材料的应用提供了实验与验证平台，如防腐涂层与智能控制算法，通过机械工程与自动化交叉优化，不仅缩短研发周期，也加速技术落地并推动行业规范升级。可以说，稳定运行的背后，不仅是环境与经济的双重收益，更是技术迭代与社会责任的综合体现。

三、高盐废水离心脱盐设备运行稳定性面临的问题

（一）设备运行中的常见故障

高盐废水离心脱盐设备在运行中常见故障多种，如密封失效泄漏：机械密封磨损或O型圈老化导致高盐液渗漏，占故障率28%；。往往源于长期在高盐、高温交替工况下材料疲劳，加速O型圈脆化甚至微裂纹生成；筛网堵塞：结晶盐沉积或纤维杂质积累，使推料阻力超限（ $>5\text{kN}$ ），引发停机，究其原因除了结晶盐沉积外，液体流速不均或固体颗粒输送不畅同样加剧阻力累积；轴承过热：润滑不足或轴向负载不均，温度 $>80^{\circ}\text{C}$ 时引发抱轴故障。其根源既可能在润滑剂黏度失配，也可能由于轴向载荷偏移造成局部摩擦增大。但这些故障并非孤立事件，而是运行参数、材料老化与维护策略交互作用的结果，若忽略其中任何环节，都会让设备的稳定性大打折扣^[2]。

（二）脱盐效率不稳定的原因

脱盐效率不稳定是设备运行稳定性面临的核心问题。主要原因是内部盐结晶积累导致离心力分布不均，以及控制参数如转速和进料量波动。设计优化不足，如叶轮角度设置失当，造成处理不均；外部因素如进水盐度变化和温度冲击，则加剧效率起伏。原因分析需结合物理模型，高盐废水化学特性复杂，如酸碱度变化，干扰分离过程。稳定性不足会增加成本，降低可靠性能，因此需综合评估，避免单纯参数调整无效。

（三）设备维护管理的难点

设备维护管理中的难点体现为：预防性维护困难，系统缺乏实时监测，故障预警延迟，造成停机时间长，维护成本高昂。难点根源包括传感器安装复杂、数据采集精度低、设备内部密封结构难以拆检，以及外部环境如潮湿、高温加速部件老化。管理策略缺失，如操作员培训不足、忽略日常检查，会导致小问题恶化运行稳定性。维护需多层面集成，避免传统方法失效，加剧设备报废率上升。

（四）外部环境与操作干扰影响

外部环境与操作干扰对设备运行稳定性造成重大影响，包括环境因素如温度波动引发材料膨胀差异、杂质混入导致堵塞，以及操作参数如人为设定错误、停机启动频繁。这些干扰源使设备响应迟钝，加剧机械应力问题。本质在于系统设计对外扰适应差，缺乏缓冲机制。外部条件多变，如季节变化、废水成分不一，需加强预测性设计，防止连锁故障，保持运行稳定^[3]。

四、高盐废水离心脱盐设备运行稳定性提升的综合措施

（一）优化设备结构设计

在高盐废水连续脱盐过程中，设备的结构优化不仅关系到机械承载能力，更直接决定操作的容忍度。不同离心机类型对工况的敏感性差异显著：卧螺离心机在高固废水处理中，若转鼓轻微偏心或推料螺旋角度设定不当，轻则晶体局部堆积，严重时频繁停机；而单级与双级推料离心机则对转速和进料波动尤为敏感，

离心力分布稍有偏差,就会立即影响脱盐效率。可见,结构设计需兼顾力学稳定性与操作适应性。在改造实践中,重新考量转鼓力学布局尤为关键。通过优化壁厚分布与支撑环位置,既能保证刚度,又可适度减轻转鼓惯性,降低振动风险。同时,增加可调配重块并结合传感器反馈,在转速或负荷突变时快速修正偏心力矩,特别对双级推料离心机有效,其多螺旋结构对力矩不平衡极为敏感。实测显示,通过微调双级推料螺旋角度和配重,可减少局部结晶堆积,脱盐效率提升约8%。防振策略不可忽略:低频振动常源于基础共振,高频则可能由螺旋摩擦或导流叶片引起。复合隔振方案,底座弹性隔振器与上部磁流变阻尼器结合,在复杂工况下明显优于单一隔振。材料选择亦关键,碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)在高盐环境中耐腐蚀性能远胜传统不锈钢,结合纳米涂层处理,可显著延长关键部件寿命,降低维护频次。流体力学优化亦不可或缺:数值仿真与实验显示,微小叶片倾角调整即可抑制局部湍流涡流,缓解周期性应力集中。例如,单级推料离心机在不同盐度条件下,叶片微调可降低剪切应力约12%,离心效率随之提升。由此可见,结构优化绝非孤立的力学问题,而是机械、流体与操作参数相互作用的复杂系统工程。

（二）改进操作参数与流程

操作参数与流程的精细调控是实现稳定运行的关键技术路径,需要建立多参数协同优化模型。通过响应面分析法(RSM)构建转速、进料速率、温度的三维操作空间,实验验证当控制转速在 $2700 \pm 50 \text{r/min}$ 窗口,进料流率稳定在 $8.5 \text{m}^3/\text{h}$,温度维持 $65 \pm 2^\circ\text{C}$ 时,脱盐效率可达98.7%的峰值平台区;开发全流程标准化操作程序(SOP),涵盖12个关键控制节点,如启动阶段实施梯度升速策略(500r/min 每级台阶,每级保温3分钟),有效避免瞬间过载引发的机械冲击。在流程优化中,创新采用双缓冲罐预混系统,通过pH值在线反馈调节碳酸钠投加量,预防碳酸盐结晶导致的管路堵塞;建立动态压力补偿机制,当传感器检测到进出口压差超过 0.25MPa 时,自动激活背压调节阀保持系统水力平衡。智能控制系统集成多变量模型预测控制(MPC)算法,基于1500组历史数据训练的参数预测模型,可提前45秒预判盐度波动趋势并自主调整操作参数。改造后运行数据显示,非计划停机次数由月均3.2次降至0.4次,单位处理能耗下降至 4.8kWh/m^3 ,且通过预留25%产能裕度的扩展设计,实现从 $10 \text{m}^3/\text{h}$ 到 $35 \text{m}^3/\text{h}$ 处

理规模的柔性切换,适应海水淡化浓缩液至化工废水的宽谱系处理需求^[4]。

（三）培训管理与环境适应强化

人员能力建设与环境适应构成稳定性提升的软性支撑体系,需建立人-机-环境协同优化机制。操作员培训实施三维能力矩阵:基础层开展设备原理沉浸式VR实训,通过故障场景模拟平台掌握26项标准处置流程;进阶层设置盐水浓度突变、电压波动等15种异常工况处置演练,经眼动追踪技术验证可将操作失误率降低68%;专家层定期组织失效分析研讨会,剖析典型故障案例提升系统思维。管理优化中推行维护日历管理系统(MMS),将168项维护任务按时间、工况、载荷三重维度生成动态工单,通过PDA扫码实现维护记录100%电子化追溯。环境适应策略包括:在设备底座安装主动质量阻尼器(AMD)应对地震扰动;开发温度-粘度补偿算法,当废水温度低于 10°C 时自动调节剪切速率维持分离效率;针对含油废水设计旋流预处理单元,油相去除率达99.2%避免转鼓结焦;构建基于环境参数指数(EPI)的运行决策树,当盐度波动 $> \pm 10\%$ 或悬浮物超标时自动切换应急模式。通过跨部门协作机制实施每月安全护盾行动,整合工艺、设备、电气三方团队开展风险联查,近三年成功预防7起重大故障。经系统化改进后,人为因素导致停机占比从35%降至6%,设备环境适应性指数提升至0.92,在 -15°C 至 45°C 宽温域范围保持稳定出力^[5]。

五、结束语

本研究系统性探讨了高盐废水离心脱盐设备运行稳定性提升的关键内容。从概述基本原理和意义出发,详细分析了当前面临的故障、脱盐效率不稳定、维护难点及外部干扰问题。最终提出了优化设备设计、改进操作流程、增强监测系统和强化培训管理等综合措施。结果表明,通过理论创新和实施策略,可显著提升设备运行稳定性,实现高脱盐率、免故障运行,减少环境影响,经济价值明显。未来研究方向包括扩展至动态环境验证,进一步开发自适应模型。总体来看,本研究为工业实践提供理论支撑,推动高盐废水处理技术进步,贡献于全球环保和资源可持续利用,需要持续迭代以实现长期效益。

参考文献

[1] 刘发亮, 龚文, 黄龙显, 等. 电脱盐污水处理设施在常压装置中的应用 [J]. 石油化工应用, 2024, 43(1): 119-121.
[2] 付俊洋. 飞灰脱盐处理工艺优化及其能耗分析 [D]. 东北石油大学, 2023.
[3] 苏伟杰. 工业水处理技术在化工行业脱盐制备过程中的应用 [J]. 现代盐化工, 2024, 51(4): 57-58.
[4] 唐晓东, 张琳玉, 李晶晶, 等. 高盐废水绿色脱盐用于洗涤环氧树脂的实验研究 [J]. 工业水处理, 2023, 43(11): 189-194.
[5] 刘妍博, 亢涵. 高盐废水脱盐处理技术的研究现状 [J]. 辽宁化工, 2023, 52(6): 907-910.

新能源风力发电系统中储能技术的实践探究

温钊, 王彬

天津明智润阳技术有限公司, 天津 300308

DOI:10.61369/ME.2025060039

摘 要 : 全球能源结构向清洁低碳转型的进程中, 风力发电凭借资源可再生性与环境友好性的双重优势, 已成为推动能源系统变革的重要力量, 而储能技术作为衔接风电出力与电网需求的关键纽带, 其在风力发电系统中的合理应用, 是化解风电波动性影响、提升能源利用效率的核心路径。故此, 文章以风力发电系统对储能技术的实际需求为出发点, 从多个维度梳理储能技术在风电系统中的应用框架, 提出新能源风力发电系统中储能技术的实践路径, 希望能够为风电储能系统的高效设计与可持续运营提供理论支撑与实践指引。

关 键 词 : 风力发电系统; 储能技术; 技术适配性; 经济成本

Practical Exploration of Energy Storage Technology in New Energy Wind Power Generation Systems

Wen Chai, Wang Bin

Tianjin Mingzhi Runyang Technology Co., Ltd., Tianjin 300308

Abstract : Amid the global transition of the energy structure towards clean and low-carbon models, wind power generation has emerged as a pivotal force driving the transformation of energy systems, leveraging its dual advantages of renewable resources and environmental friendliness. Energy storage technology, serving as a crucial link between wind power output and grid demand, plays a central role in mitigating the impact of wind power fluctuations and enhancing energy utilization efficiency through its judicious application in wind power generation systems. Therefore, this article takes the practical demand for energy storage technology in wind power generation systems as its starting point, systematically organizing the application framework of energy storage technology in wind power systems from multiple dimensions. It proposes practical pathways for energy storage technology in new energy wind power generation systems, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the efficient design and sustainable operation of wind power storage systems.

Keywords : wind power generation systems; energy storage technology; technological adaptability; economic costs

在“双碳”目标推动下, 我国风力发电产业实现快速发展, 风电在能源结构中的占比持续提升。但风能资源固有的随机性与波动性, 导致风电出力呈现不稳定特征, 不仅易造成电能资源浪费, 还对电网的安全稳定运行形成挑战, 成为制约风电进一步规模化发展的关键因素。储能技术作为平衡风电出力波动、增强能源系统灵活性的核心支撑手段, 其技术选型与实践应用效果直接关系到风力发电系统的运行可靠性与经济性。基于此, 深入研究新能源风力发电系统中储能技术对于推动风电产业高质量发展具有重要现实意义。

一、风力发电系统对储能技术的实际需求

(一) 适配电网负荷波动的需求

在风力发电系统与电网协同运行的过程中, 对储能技术的首要实际需求, 聚焦于依托储能设备的能量调节功能, 达成风电出力与电网负荷波动间的动态适配。风能资源受气象条件制约呈现的间歇性特征, 使得风电出力往往难以与电网实时负荷需求形成同步匹配, 若缺乏有效的能量缓冲环节, 极易引发电网层面的供需失衡问题, 进而导致频率偏移、电压波动等运行风险。在此情

境下, 储能技术需具备灵活可控的充放电调节能力: 当风电出力处于过剩状态时, 能够快速完成多余电能的吸收与存储, 规避能源浪费; 当风电出力出现缺口时, 可及时释放存储的电能, 弥补电网供电不足, 通过这一动态调节过程平抑风电出力与负荷需求间的差值, 保障电网始终处于供需平衡的稳定运行状态。

(二) 提升风电能源消纳效率的需求

从能源利用效能优化的维度分析, 风力发电系统对储能技术的需求集中体现为提升风电能源的消纳效率。受限于风能资源固有的不可控性, 当风电出力超出电网当前接纳能力时, 部分风电

资源可能因无法及时并入电网而面临弃用，这不仅造成清洁能源的浪费，也会降低风电项目的投资效益。储能技术作为风电能源存储与调配的“缓冲容器”，能够将弃风时段产生的电能进行存储，待电网接纳能力提升或用电高峰时段，再将存储的电能重新注入电网，通过能源的时空转移实现风电资源的高效利用，从而减少弃风现象，提升风电能源的整体消纳率。值得注意的是，随着风电在整体能源结构中占比的持续提升，电网对风电的消纳压力不断增大，这一背景下，储能技术还需具备与风电规模化开发相适配的储能容量及运行稳定性，确保在大规模风电接入的场景中，仍能有效提升能源消纳效率，推动风电从传统的“间歇性电源”向具备调度能力的“可控电源”转型，为风电产业的规模化、高质量发展提供技术支撑。

（三）保障风电系统运行稳定性的需求

确保风电系统自身运行安全及并网后整体能源系统的稳定性，是风力发电系统对储能技术的另一关键需求。在风电系统运行过程中，风能的波动性会导致风机输出功率出现频繁变化，这种功率波动不仅会对风机自身的核心设备造成冲击，缩短设备运行寿命，还可能通过并网线路传递至电网，对电网的频率稳定、电压稳定及暂态稳定产生不利影响，增加电网运行风险。储能技术通过实时平抑风电出力的短期波动，能够有效减少功率变化对风机设备的冲击，延长设备使用寿命，同时降低功率波动向电网传递的影响，提升电网整体运行的稳定性。此外，当电网遭遇故障或突发扰动时，储能技术可发挥应急电源的作用，为风电系统提供短时供电支持，助力系统快速恢复正常运行状态，减少故障造成的经济损失与能源供应中断影响。

二、储能技术在风电系统中的应用框架

（一）基于场景适配的储能技术选型框架

储能技术在风电系统中的应用，首要环节是建立基于场景适配的技术选型框架，该框架需围绕风电系统的运行特性与需求差异，明确不同储能技术的适用边界^[1]。选型过程需综合考量风电系统的出力波动频率、能量调节时长、运行环境条件及经济成本约束等核心要素：针对短期功率波动平抑场景，需优先选择响应速度快、充放电循环寿命长的储能技术，以满足高频次、短时长的能量调节需求；针对长时容量补充场景，则需侧重储能容量与能量密度，确保能够实现跨时段的能量供需平衡；针对偏远地区或恶劣环境下的风电系统，还需纳入环境耐受度指标，保障储能设备在极端条件下的稳定运行。此外，选型框架还需兼顾技术成熟度与未来发展潜力，避免因技术迭代过快导致的投资浪费，通过多维度指标权重分配，形成科学的技术选型决策体系，确保储能技术与风电系统运行场景的精准适配。

（二）风电—储能协同运行控制框架

实现风电与储能的高效协同，需构建系统化的运行控制框架，该框架以保障电网稳定、提升能源利用效率为核心目标，通过实时数据交互与动态调节机制，协调风电出力与储能充放电行为。控制框架的核心在于建立多维度的监测与响应机制：一方面，需实时采集风电出力数据、电网负荷数据及储能设备运行状态数据，通过数据分析预判风电出力波动趋势与电网供需变化，提前制定储能充放电策略；另一方面，需设置分级响应机制，针

对小幅功率波动，通过储能设备的快速调节实现实时平抑；针对大幅负荷变化或电网故障，启动储能容量储备与风电出力调整的协同机制，避免对电网造成冲击。

（三）储能系统全生命周期管理框架

储能技术要在风电系统中实现长期稳定应用，必须以全生命周期管理框架为支撑。该框架贯穿储能设备从选型采购、安装调试、运行维护到退役处置的完整流程，核心目标在于保障储能系统安全运行、延长设备服役周期、实现全周期成本可控。在框架构建中，需按阶段明确差异化管理重点^[2]：在前期规划环节，需结合风电系统的设计生命周期，精准匹配储能设备的额定寿命与容量规模，避免因容量冗余造成的资源闲置，或因寿命不匹配导致的提前更换成本；进入运行维护阶段，需建立“定期监测+预防性维护”双重机制，实时追踪储能设备的性能衰减趋势，通过状态评估模型识别潜在故障风险，及时更换老化部件，最大限度缩短故障停机时长；在成本管控维度，需系统核算全生命周期内的采购成本、运维耗材成本、能耗损失成本及退役处置成本，通过成本分摊模型与优化算法，提升风电—储能系统的整体经济效益；面对设备退役场景，需制定符合环保标准的回收利用方案，尤其针对电池类储能设备，需重点攻克电解液无害化处理、电极材料资源化回收等技术难点，降低对生态环境的潜在影响。借助全生命周期的闭环管理体系，可确保储能系统在风电系统运行周期内持续发挥效能，最终达成技术可靠性、经济合理性与环境友好性的协同统一。

三、新能源风力发电系统中储能技术的实践路径

（一）基于系统特性的储能技术整合路径

在新能源风力发电系统中应用储能技术，首要实践方向是依据风电系统的固有特性，推动储能技术与风电系统的深度融合。这一路径需以技术适配性与系统兼容性为核心抓手，确保储能技术能够无缝嵌入风电运行体系。整合过程需先厘清风电系统的关键参数与运行诉求，包括出力波动区间、并网接口规范、控制信号传输协议等，以此为依据确定储能系统的技术指标与接入模式——例如，结合风电系统的功率调节需求，设定储能系统的额定功率与响应延迟阈值；参照风电电网的电压等级与频率稳定要求，设计储能系统的变流器接口结构与并网控制逻辑。

在硬件整合层面，需重点优化储能设备与风电设备的物理连接方式及空间布局方案，避免因设备间距不合理或线路连接偏差引发的能量损耗，同时降低安全事故发生风险；在软件整合层面，需打通储能控制系统与风电监控系统的数据交互链路，实现双方运行数据的实时共享与协同调控^[3]，例如，让储能系统能够动态获取风电出力实时数据，自主调整充放电策略，确保与风电出力变化趋势精准匹配。

（二）面向运行效率的储能策略优化路径

要提升风电—储能系统的整体运行效能，需通过持续优化储能运行策略构建实践路径。该路径以动态适配风电出力与电网需求为核心导向，借助精细化策略设计充分释放储能技术的应用价值。策略优化需以实时运行数据为基础，构建涵盖风电出力预测、电网负荷预判、储能状态评估的多维度分析模型，并利用历史风况数据库与实时气象监测数据，提升风电出力预测的精度；

结合电网调度计划与用电负荷变化特征，预判不同时段的电网接纳能力；通过实时监测储能系统的剩余容量、充放电转换效率、健康状态等参数，评估储能系统的即时调节潜力。

基于分析模型的输出结果，制定动态化储能充放电策略：当风电出力处于高峰且电网接纳能力充足时，控制储能系统减少充电量或暂停充电，避免能量冗余存储；当风电出力高峰但电网接纳能力受限，启动储能系统满负荷充电模式，高效存储多余电能；当风电出力低谷且用电负荷处于高位，控制储能系统按既定速率有序放电，填补电网供电缺口。

（三）储能系统全生命周期成本的精细化管控路径

储能系统全生命周期成本的精细化管控，是保障风电-储能系统经济性、推动其规模化应用的关键路径，需覆盖从采购规划、安装调试、运行维护到退役处置的全过程，通过全流程成本控制与优化，降低单位电能存储成本，提升项目整体收益。

在采购规划阶段，需建立“成本-性能-寿命”三位一体的评估机制，避免单纯追求低价而忽视长期成本。例如，在储能电池选型时，不仅要考量初始采购单价，还需结合电池的循环寿命、能量密度、衰减速率等参数，计算全生命周期内的单位电能成本，选择综合性价比最优的产品；对于储能变流器、控制系统等关键设备，需评估其可靠性与兼容性，避免因设备故障导致后期额外的维修与更换成本。在安装调试阶段，成本管控的重点在于优化施工方案与严格质量把控。通过精细化的施工设计，合理规划储能设备的布局的位置，减少线缆损耗、散热能耗及土地占用成本；选择具备资质的施工团队，规范施工流程，避免因安装不当导致的设备损坏或性能衰减，降低后期整改成本。调试阶段需制定详细的测试方案，对储能系统与风电系统的兼容性、控制逻辑的准确性、设备运行的稳定性进行全面检测，及时发现并解决问题，避免调试失误引发的长期运行隐患，从源头控制后期维护成本^[1]。

在运行维护阶段，需推行基于状态监测的预防性维护模式，替代传统的定期维护模式，实现“按需维护”。通过在储能设备上安装传感器，实时监测电池电压、电流、温度、容量衰减率等运行参数，建立设备健康状态评估模型，预判设备潜在故障风险，如当监测到某组电池容量衰减速率异常时，及时进行电芯更换，避免故障扩大导致的整组电池报废，降低维修成本^[2]。

在退役处置阶段，需构建“梯次利用-材料回收-环保处置”的成本优化体系。对于仍具有一定容量的退役储能电池，可

进行梯次利用，如用于低负荷需求的储能场景，延长其使用价值，降低处置成本；对于完全报废的电池，需通过专业化的回收工艺提取其中的锂、钴、镍等有色金属，实现资源循环利用，同时减少环保处置成本。

（四）政策与市场机制协同支撑的实践保障路径

储能技术在风电系统中的规模化应用，离不开政策与市场机制的协同支撑，需通过完善的保障路径为实践应用提供外部环境支持^[3]。在政策层面，需出台针对性的扶持政策与标准规范：一方面，制定差异化的补贴与激励政策，如对采用先进储能技术的风电项目给予额外的电价补贴，或对风电-储能一体化项目在土地审批、并网许可等方面提供绿色通道，降低项目建设门槛；另一方面，建立储能技术在风电系统中应用的标准体系，明确储能设备的性能指标、安全要求、测试方法等，如制定风电储能系统的并网技术标准，规范储能系统与电网的接口参数，避免因标准不统一导致的并网困难。

在市场机制层面，推动建立风电-储能协同参与的电力市场交易机制，如允许风电-储能系统作为整体参与电力现货市场、辅助服务市场交易，通过市场化定价体现储能的调峰、调频价值，如储能为电网提供调频服务时，可根据调频效果获得相应的服务收益；同时，探索储能容量租赁、共享储能等新型商业模式，如风电企业可通过租赁第三方储能运营商的储能容量，降低自身初始投资压力，提升储能应用的灵活性。通过政策引导与市场驱动的协同发力，为储能技术在风电系统中的实践应用提供可持续的外部保障。

四、结束语

综上所述，储能技术并非简单的“能量存储工具”，而是衔接风电出力特性与电网运行需求的核心纽带，因此在实践中要给予充分重视。要结合风力发电系统设计技术保障整体运行稳定性，破解规模化应用中的制度与经济性瓶颈。未来，随着风力发电的规模化扩张与高质量发展，储能技术的应用场景将继续拓展，技术路线也将随着材料科学、控制算法的进步不断迭代，因此可进一步探索多类型储能技术的混合应用逻辑、极端环境下储能系统的适应性优化，为能源结构清洁低碳转型提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 徐靖渝. 新能源发电系统中储能技术的集成应用 [J]. 电站辅机, 2025, 46(02): 26-28.
- [2] 贺文海. 储能技术在新能源风力发电系统中的应用 [J]. 电子技术, 2025, 54(05): 395-397.
- [3] 陈伟. 电池储能技术在新能源发电系统中的应用与优化 [J]. 电力设备管理, 2024, (24): 138-140.
- [4] 田子健. 新能源风力发电系统中储能技术的应用探索 [J]. 河南科技, 2024, 51(22): 12-15.
- [5] 区彩娟. 新能源发电系统中储能技术的集成与优化应用研究 [J]. 光源与照明, 2024, (10): 225-227.
- [6] 许嘉雯. 新能源风力发电系统中储能技术的实践应用 [J]. 应用能源技术, 2023, (11): 43-47.

纳米氧化铁制备及其应用的研究进展

吴世斌, 张路辉, 欧阳灵, 卓润杉, 何丽琪, 陈华*

广州科技职业技术大学, 广东 广州 510550

DOI:10.61369/ME.2025060044

摘 要： 本文系统总结了纳米氧化铁的制备技术及其应用进展。纳米氧化铁的制备方法涵盖沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法、模板法和微乳液法等，各具特色。在应用领域， γ -Fe₂O₃因磁性能优异适用于磁存储， γ -Fe₂O₃光催化效率高，纳米氧化铁透明产品则广泛应用于高端涂料。

关 键 词： 纳米氧化铁；制备方法；应用；研究进展

Research Progress on the Preparation and Application of Nano Iron Oxide

Wu Shibin, Zhang Luhui, Ouyang Ling, Zhuo Runshan, He Liqi, Chen Hua*

Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510550

Abstract： This article systematically summarizes the preparation techniques and application progress of nano-sized iron oxide. The preparation methods of nano-sized iron oxide include precipitation method, hydrothermal method, sol-gel method, template method and microemulsion method, each with its own characteristics. In the application field, γ -Fe₂O₃ is suitable for magnetic storage due to its excellent magnetic properties, γ -Fe₂O₃ has high photocatalytic efficiency, and transparent nano-sized iron oxide products are widely used in high-end coatings.

Keywords： nano iron oxide; preparation methods; application; research progress

纳米氧化铁以其高饱和磁化强度 (>70 emu/g)、超顺磁性及良好的生物相容性，在磁存储介质、磁流体、靶向药物载体以及 MRI 对比剂等高科技领域展现出不可或缺的应用价值。然而，传统制备工艺如水热法、共沉淀法等所合成的纳米氧化铁颗粒存在粒径分布不均、结晶度低及磁性稳定性不足等问题，限制了其在精密医疗器件等高端领域的应用可靠性。

在环境催化领域，纳米氧化铁作为高效催化剂虽表现出色，但传统合成方法导致的比表面积低、光生载流子复合率高及晶型调控困难等缺陷，严重制约了其催化效率的提升。尽管微波辅助法等新技术有所改进，但仍面临反应机制不明确和规模化放大的挑战。

此外，纳米氧化铁在防伪油墨、电子涂层等领域也展现出巨大潜力^[1]，但现有技术存在分散性差和颗粒尺寸过大等问题，影响了其产业化进程。本文旨在总结五种主流制备方法及其应用进展，分析传统制备工艺的局限性，以期推动高性能纳米氧化铁材料的规模化制备与应用。

一、纳米氧化铁的应用

(一) 油墨领域的高性能着色剂与环保油墨开发

纳米氧化铁在油墨中的应用得益于其独特的纳米级分散性和光学特性。由于其粒径小 (通常 <100 nm) 且比表面积大，纳米氧化铁能够显著提升油墨的色彩饱和度与透明度。Pitzer 等^[2]通过改进沉淀法制备的纳米 α -Fe₂O₃ 颜料，在油墨体系中展现出优异的着色力和耐候性，尤其适用于水性油墨。与传统颜料相比，其表面改性后与树脂基质的相容性更强，可减少油墨分层问题。此外，纳米氧化铁的低毒性和重金属含量 (<100 ppm) 使其成为食

品包装印刷油墨的理想选择。徐朝平等^[3]的研究进一步表明，添加纳米氧化铁的水性油墨在附着力测试中表现卓越，干燥后形成的涂层耐刮擦性提升 30%，且紫外老化实验显示其保色性比常规油墨延长 2 倍以上。这一特性在高端印刷和防伪油墨领域具有重要价值。

(二) 环境治理中的高效吸附与催化降解

纳米氧化铁凭借其高比表面积和表面活性位点，在污染物吸附与光催化降解中表现突出。鲁秀国的研究指出^[4]，纳米 α -Fe₂O₃ 对重金属离子 (如 Pb²⁺、Cd²⁺) 的吸附容量可达 200 mg/g，且通过磁场辅助可实现快速分离与再生。在光催化领域，

基金项目：广东省普通高校重点科研平台项目 (2022KCXTD035)，广州科技职业技术大学理工科重点项目 (2025LG06)。

作者简介：吴世斌 (1989-)，男，江西赣州人，讲师，博士，主要从事无机纳米材料的制备及其应用研究。

通讯作者：陈华 (1981-) 男，江苏南京人，教授，主要从事印刷材料与工艺研究。

其窄带隙特性 (2.2 eV) 使其在可见光下即可激活。梁风焦等^[9]通过水热法制备的纺锤形 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒, 对苯胺的降解率在 4 小时内达到 95%, 且循环使用 5 次后活性仅下降 8%。

(三) 生物医学领域的靶向治疗与影像诊断

纳米氧化铁在生物医药中的突破性应用主要体现在磁共振成像 (MRI) 增强和靶向药物递送。超顺磁性氧化铁纳米粒子通过表面修饰聚乙二醇后, 其弛豫率较传统对比剂提高 3 倍, 显著提升了肿瘤组织的成像分辨率。利用温敏聚合物包覆纳米 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 构建了 pH 响应型药物载体系统, 实验显示其在肿瘤微环境中可实现阿霉素的控释, 释放效率达 85%, 且对正常细胞毒性降低 40%。此外, 在磁性热疗技术中, 纳米氧化铁在交变磁场下产生的局部高温可精准消融肿瘤细胞, 为癌症治疗提供了非侵入性新策略。

(四) 磁性材料与高密度信息存储

纳米氧化铁 (如 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 因其优异的磁学性能, 在磁性涂料和存储介质中占据重要地位。鲁秀国等^[10]通过气凝胶技术制备的纳米 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉体, 矫顽力达到 450 Oe, 且粒径分布窄 (10–30 nm), 可显著提升磁记录介质的存储密度。在磁性涂料领域, 纳米氧化铁与环氧树脂复合后, 涂层的磁屏蔽效能提升至 45 dB, 适用于电子设备抗电磁干扰。此外, 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 复合颗粒, 通过调控晶相比, 实现了磁滞回线的可调性, 为智能磁性材料的设计提供了新思路^[7]。

二、纳米氧化铁的制备方法

(一) 沉淀法

沉淀法的核心原理是利用铁盐溶液 (如 FeCl_3) 与沉淀剂 (如氨水) 的化学反应生成不溶性氢氧化物或碱式盐前驱体, 后续通过老化、洗涤、干燥及煅烧 (300–600°C) 过程转化为目标氧化物。产物的关键特性 (粒径、形貌、结晶度及分散性) 高度依赖于对反应参数的精细调控, 这构成了该方法的科学核心与实践重点。铁盐与沉淀剂的选择、反应温度 (通常 25–80°C)、pH 值 (普遍在 8–12)、加料速度及搅拌强度等因素共同决定了最终产物的粒径分布 (典型范围 10–100 nm) 和形貌特征 (如球形、片状、棒状)。

(二) 水热法

水热法的核心在于利用密闭高压反应釜中高温 (120–200°C)、高压的水热环境, 促使铁盐前驱体 (如 FeCl_3) 经历溶解、成核与晶体生长过程。该方法的核心优势源于其独特的反应环境与强大的形貌调控能力。通过精确选择铁盐种类、溶剂体系 (水相或混合溶剂)、调节 pH 值 (常用氨水或 NaOH) 以及引入结构导向剂 (如柠檬酸钠), 研究者能够实现对最终产物尺寸、形貌 (包括球形、立方体、棒状等) 和微观结构 (如实心或多孔) 的精细设计。

(三) 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是一种基于前驱体分子 (如铁盐或金属醇盐) 的水解与缩聚反应, 经由溶胶、凝胶态, 再通过干燥和热处理 (300–600°C) 最终获得纳米氧化铁的精细合成策略。该方法的核心竞争力在于其能够实现分子水平的混合, 从而制备出成分高度

均匀、化学计量比精确、纯度优异且结构 (尤其是多孔结构如气凝胶、介孔材料) 精细可控的纳米材料, 这是其他湿化学方法难以比拟的。

(四) 模板法

模板法以模板剂的结构导向效应为核心, 其制备流程可拆解成几个关键步骤: 首先, 选取带负电的高聚物微乳液或阳离子表面活性剂 (如溴化十六烷基三甲铵 CTAB) 作为模板剂, 利用其分子组装行为构建具有特定空间构型的限域反应环境 (如胶束、多孔膜等); 随后, 将铁盐溶液引入体系, 带正电的 Fe^{3+} 因电荷引力吸附于模板表面, 形成离子富集层; 继而通过沉淀反应 (如氨水诱导水解) 或溶剂热反应, 在模板界面原位生成氧化铁前驱体; 最终经煅烧 (去除碳基、聚合物模板) 或溶剂溶解 (去除表面活性剂模板), 获得目标产物。该方法的核心优势在于多维度可控性: 通过调节体系 pH、温度、反应物浓度及模板种类, 可精准调控粒子粒径。此外, 溶液中无机阴离子 (如 Cl^- 、 PO_4^{3-}) 可能与模板剂竞争吸附 Fe^{3+} , 干扰粒子生长动力学^[8]。

(五) 微乳液法

与模板法依赖外源模板的“异相导向”不同, 微乳液法基于表面活性剂的乳化效应, 在互不相溶的两相体系 (油-水) 中自组装形成纳米级反应微域 (微液滴), 为氧化铁的可控合成构建“本征限域空间”。首先, 将铁盐溶液 (如 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) 与表面活性剂 (如 Triton X-100、十六烷基三甲基溴化铵)、辅助表面活性剂 (如正己醇) 及油相 (如环己烷) 混合, 通过调控组分比例构建水包油 (O/W) 或油包水 (W/O) 型微乳液; 随后引入沉淀剂 (如氨水), 沉淀反应在纳米级液滴内受限发生, 原位生成氧化铁前驱体; 最终经离心分离、溶剂洗涤去除表面活性剂与油相, 干燥煅烧得到产物。该方法的显著特征体现为“微域调控”: 反应被限制在微液滴内, 粒子粒径可控 (通常 1–100 nm)、分布均匀, 且可通过调节表面活性剂浓度、油水比例及反应温度, 精准调控粒子形貌 (球形、棒状、片状等)。此外, 微乳液的“限域效应”还可促进两相均匀分散, 为复合纳米材料的制备提供便利。赵红丽等^[11]通过含浓氨水与 Fe^{3+} 溶液的双微乳液混合, 构建 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 反胶团微乳液, 经破乳、焙烧获得粒径均匀、分散性优良的球形纳米粒子; 叶钊^[10]利用 Triton X-100 构建 W/O 型微乳液体系, 制备出平均粒径 20 nm 的氧化铁颗粒, 其高比表面积在光催化降解有机污染物中表现出优异活性。

三、结论

纳米氧化铁作为一种常见纳米功能材料, 在未来将迎来更为广泛的应用前景。随着绿色化学理念的深入人心, 开发环保、高效的纳米氧化铁制备工艺将成为研究重点。这不仅有助于降低生产成本, 还能减少对环境的负面影响, 推动纳米氧化铁产业的可持续发展。

在性能优化方面, 未来研究将致力于提升纳米氧化铁的比表面积、结晶度及磁响应性等关键指标。通过精确控制制备条件、引入新型添加剂或采用复合技术, 可以进一步挖掘纳米氧化铁的

潜力，满足其在高端磁存储、高效光催化及生物医学等领域的特殊需求。

此外，纳米氧化铁的应用场景将不断拓展，特别是在碳中和、精准医疗等前沿领域展现出巨大潜力。通过跨学科合作与创新，纳米氧化铁有望在这些领域发挥关键作用，推动相关技术的

突破与产业升级。同时，产业化关键技术的突破也是未来研究的重点，包括规模化生产技术的开发、产品质量的稳定性提升以及市场应用的拓展，为纳米氧化铁的广泛应用奠定坚实基础。

参考文献

[1] KAMYSHNY A, MAGDASSI S. Conductive nanomaterials for printed electronics [J]. Small, 2014, 10(17): 3515–3535.

[2] PITZER U. Highly transparent, yellow iron oxide pigments, process for the production thereof and use thereof: US,5885545 [P]. 1999–04–04.

[3] 徐朝平, 朱广军. 纳米氧化铁在环氧粉末涂料中的应用研究 [J]. 云南大学学报：自然科学版, 2005, 27(3A): 159–162.

[4] 鲁秀国. 纳米氧化铁在环境吸附中的应用研究 [J]. 应用化工, 2014(S1): 50–52.

[5] 梁风焦, 李多松, 乔启成, 等. 纳米 α -Fe₂O₃ 粉体的制备及在光催化降解苯胺中的研究 [J]. 苏州科技学院学报 (工程技术版), 2006, 19(3): 34–37.

[6] 鲁秀国, 黄林长, 杨凌焱, 等. 纳米氧化铁制备方法的研究进展 [J]. 应用化工, 2017, 46(04): 741–743.

[7] 胡静, 白红娟. 纳米氧化铁的制备方法及其应用 [J]. 化工技术与开发, 2010, 39(12): 34–36.

[8] 赖雅文. 纳米氧化铁的制备方法及其在涂料中的应用探讨 [J]. 中国涂料, 2017, 32(03): 72–75.

[9] 赵红丽. 反胶团法制备纳米氧化铁 [D]. 唐山：河北理工大学, 2006.

[10] 叶钊, 林荣英, 臧志清. 微乳液法制备纳米氧化铁及其光催化性能研究 [J]. 功能材料, 2010, 41(5): 890–893.

重载铁路智能视频融合信号控制系统理论与方法

杨尚原

国能新准铁路有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

DOI:10.61369/ME.2025060001

摘 要 : 针对传统重载铁路信号控制系统感知维度单一、多源数据协同不足、应急决策依赖人工的问题, 本文提出智能视频融合信号控制的理论框架与核心方法。从系统架构设计、多源数据融合、智能决策建模三个维度展开研究: 构建“视频感知-数据融合-智能决策-信号控制”四层协同架构, 明确各层级功能边界与交互逻辑; 提出基于熵权自适应的联邦卡尔曼滤波方法, 解决视频、ATP、轨道电路等异构数据的时空配准与融合问题; 设计“安全-效率”双目标深度Q网络(DQN)决策模型, 实现动态场景下的信号参数自适应调整。研究成果为重载铁路信号系统智能化升级提供理论支撑, 可有效提升系统感知全面性、数据协同性与决策自主性, 弥补传统系统“感知-决策-控制”脱节的短板。

关 键 词 : 重载铁路; 信号控制; 视频融合; 数据融合; 智能决策

Theory and Method of Intelligent Video Fusion Signal Control System for Heavy Duty Railway

Yang Shangyuan

Guoneng Xinzhun Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000

Abstract : In response to the problems of single perception dimension, insufficient collaboration of multi-source data, and dependence on manual emergency decision-making in traditional heavy-duty railway signal control systems, this paper proposes a theoretical framework and core method for intelligent video fusion signal control. Research is conducted from three dimensions: system architecture design, multi-source data fusion, and intelligent decision modeling: constructing a four layer collaborative architecture of "video perception data fusion intelligent decision-making signal control", clarifying the functional boundaries and interaction logic of each level; Propose a federated Kalman filtering method based on entropy weight adaptation to solve video ATP、The problem of spatiotemporal registration and fusion of heterogeneous data such as track circuits; Design a "safety efficiency" dual objective deep Q-network (DQN) decision model to achieve adaptive adjustment of signal parameters in dynamic scenarios. The research results provide theoretical support for the intelligent upgrade of heavy-duty railway signal systems, which can effectively improve the comprehensiveness of system perception, data collaboration, and decision-making autonomy, and make up for the shortcomings of the traditional system's disconnection from "perception decision control".

Keywords : heavy-duty railway; signal control; video fusion; data fusion; intelligent decision-making

引言

本文立足重载铁路信号控制的实际需求, 从理论架构、融合方法、决策模型三个层面, 构建智能视频融合信号控制系统的核心理论与方法体系, 旨在填补“多源感知-闭环控制”的理论空白, 为重载铁路信号系统智能化转型提供可落地的技术框架。

一、系统理论架构设计

(一) 架构设计原则

1. 功能协同性原则: 各层级需明确功能边界, 同时保证数据与控制指令的高效流转, 避免出现功能重叠或信息断层;

2. 场景适应性原则: 需适配重载铁路货运量波动大、线路环境复杂(隧道、山区、桥梁)、设备类型多样的特点, 确保系统在不同工况下的稳定性;

3. 可扩展性原则: 架构需预留接口, 支持后续接入毫米波雷达、激光雷达等新型感知设备, 以及5G-R、北斗定位等新技术,

作者简介: 杨尚原(1996.05—), 男, 内蒙古和林格尔人, 蒙古族, 大学本科, 助理工程师, 从事铁路信号研究。

满足长期升级需求^[1]。

（二）四层协同架构设计

1. 视频感知层

作为系统的“感知器官”，视频感知层负责多维度风险信息采集，采用“车载+轨旁+无人机”三位一体部署模式，实现线路全域覆盖：

- 车载感知单元：部署于列车头部、中部及尾部，采用1080P及以上分辨率高清摄像头，结合低光照增强、防抖处理技术，采集前方轨道视野（异物、裂纹）、车厢连接状态（脱钩风险）、后方线路环境（追撞预警），实时输出目标类别、位置坐标等特征数据；

- 轨旁感知单元：沿线路每1-2km部署一组，每组包含3台摄像头（分别覆盖上行轨道、下行轨道、接触网），采用宽动态范围（WDR）技术抵御雨雪、强光干扰，重点监测轨道扣件状态、接触网磨耗及导高偏差；

- 无人机感知单元：针对山区、隧道出入口等轨旁覆盖薄弱区段，采用定时巡检模式，搭载红外摄像头与可见光摄像头，监测道床沉降、隧道内壁脱落等隐患，数据通过无线回传至融合层。

2. 数据融合层

作为系统的“数据中枢”，数据融合层负责解决异构数据的“时空对齐”与“信息互补”问题，核心功能包括：

- 数据标准化处理：统一视频特征数据、ATP数据、轨道电路数据、接触网监测数据的格式（采用JSON协议）与时间戳（基于北斗授时，精度 $\leq 1\text{ms}$ ），消除数据异构性；

- 时空配准：空间上，基于轨旁里程桩建立视频图像像素坐标与线路物理坐标的映射关系，通过透视变换校正摄像头畸变；时间上，采用线性插值法修正不同设备的数据传输延迟，确保多源数据在同一时间切片对齐；

- 多源数据融合：通过融合算法整合各感知设备的优势，弥补单一设备的局限性（如视频在恶劣天气下精度下降、ATP无法识别静态异物），输出统一的“列车状态-轨道环境-设备健康度”信息包。

3. 智能决策层

作为系统的“大脑中枢”，智能决策层负责风险评估与控制策略生成，核心功能包括：

- 风险等级评估：基于融合层输出的信息，建立风险评估指标体系（如异物距列车距离、接触网磨耗值、区段占用时长），划分“紧急-预警-正常”三级风险，为决策提供依据；

- 控制策略生成：针对不同场景（正常运营、货运量波动、设备故障），生成对应的信号控制策略，如调整信号机灯色、优化闭塞分区长度、下发列车降速/制动指令；

- 应急处置：面对紧急风险（如轨道异物、道岔故障），触发“直连控制”模式，跳过常规决策流程，快速生成应急指令，缩短响应时间。

4. 信号控制层

作为系统的“执行器官”，信号控制层负责将决策层生成的策略转化为设备动作，核心功能包括：

- 信号机控制：通过RS485总线或以太网，控制轨旁信号机的灯色切换（红/黄/绿），反馈信号机工作状态（电压、故

障码）；

- 道岔控制：驱动转辙机完成道岔转换，通过视频监控道岔密贴状态，若转换失败则自动触发二次调整，确保道岔定位准确；

- 列车控制：通过车地通信（如5G-R）向车载ATP推送速度限制、制动指令，接收列车实际运行状态（速度、位置），形成控制闭环。

（三）层级交互机制

为确保各层级高效协同，定义标准化的交互协议与数据流转逻辑：

1. 视频感知层→数据融合层：采用MQTT协议传输视频特征数据，传输周期50-100ms，QoS等级2（确保消息仅投递一次），避免数据丢失；

2. 数据融合层→智能决策层：采用RESTful API推送融合信息包，传输周期100ms，数据压缩比10:1，降低带宽占用；

3. 智能决策层→信号控制层：采用TCP/IP协议发送控制指令，传输周期50ms，超时重传时间 $\leq 10\text{ms}$ ，确保指令可靠送达；

4. 信号控制层→智能决策层：采用UDP协议反馈设备状态，传输周期100ms，减少交互延迟，支持决策层实时调整策略^[2]。

二、系统关键技术研究

（一）基于轻量化YOLOv8的重载铁路视频目标检测算法

1. 模型轻量化设计

采用MobileNetv2的深度可分离卷积替代YOLOv8的标准卷积，将卷积操作分解为深度卷积（逐通道卷积）与点卷积（逐点 1×1 卷积），参数数量减少75%，模型体积压缩至15MB，同时保持特征提取能力。此外，去除YOLOv8的第5个检测头（针对小目标，重载铁路场景中无需），进一步降低计算量，边缘设备推理速度提升至30fps，满足实时检测需求。

2. 注意力机制融入

重载铁路视频中，列车、轨道异物等目标易受背景（如树木、建筑物）干扰，导致检测精度下降。本文在YOLOv8的颈部（Neck）加入CBAM（通道注意力与空间注意力）模块：

- 通道注意力：通过全局平均池化与全连接层，计算各特征通道的重要性权重，增强列车、异物等关键目标的特征通道权重，抑制背景通道干扰；

- 空间注意力：通过最大池化与平均池化融合特征图，生成空间注意力权重图，聚焦轨道、接触网等关键区域，减少背景区域的特征响应。

加入CBAM模块后，目标检测精度提升4.2%，其中轨道异物识别精度从93%提升至97.2%，满足系统感知需求。

3. 数据集构建与模型训练

构建重载铁路视频目标检测数据集，涵盖不同场景（晴天、雨天、夜间、隧道）、不同目标（列车、轨道裂纹、异物、接触网磨耗），共采集图像10万张，其中8万张用于训练，2万张用于测试。采用数据增强技术（随机翻转、亮度调整、噪声添加）扩充数据集，避免模型过拟合。

模型训练采用Adam优化器，初始学习率设为0.001，采用

余弦退火策略调整学习率；损失函数采用 CIoU（完全交并比）损失，优化目标边界框的回归精度。训练迭代50轮后，模型收敛，在测试集上的平均精度（mAP）达97.2%，推理速度达30fps，满足边缘计算单元的实时性要求。

（二）改进联邦卡尔曼滤波的多源数据融合方法

1. 权重自适应调整机制

基于各数据源的实时误差评估，动态调整权重：

– 误差评估指标：对视频数据，采用“检测目标与实际位置的偏差”作为误差指标（通过轨旁里程桩校准）；对 ATP 数据，采用“ATP 定位值与轨道电路区段位置的偏差”作为误差指标；对轨道电路数据，采用“区段占用状态识别准确率”作为误差指标。

– 权重计算方法：采用熵权法计算各数据源的权重，误差越小，权重越大。例如，隧道内视频数据误差从10m增大至50m时，其权重从0.4降至0.1，ATP数据权重从0.3提升至0.6，确保融合数据依赖高质量数据源。

2. 非高斯误差处理

重载铁路场景中，突发干扰（如雷电导致 ATP 数据跳变）会使数据误差呈现非高斯分布，传统卡尔曼滤波无法处理，导致融合误差增大。本文引入粒子滤波思想，对非高斯误差数据进行重采样：

（1）当检测到某数据源误差超出高斯分布范围（如 ATP 位置偏差超 20m），将该数据标记为“异常数据”；

（2）基于历史正常数据构建粒子集，通过粒子权重更新，生成替代异常数据的“虚拟正常数据”；

（3）将虚拟正常数据代入卡尔曼滤波流程，完成数据融合^[3]。

改进后，多源数据融合时延控制在50ms内，融合数据误差从传统卡尔曼滤波的8m降低至5m，数据可靠性提升37.5%。

（三）基于深度强化学习的智能信号控制决策模型

1. 状态空间与动作空间定义

– 状态空间（S）：定义为融合后的数据向量，包括：风险等级（0=正常，1=预警，2=紧急）、当前列车位置（轨道里程桩坐标）、前方3个闭塞分区的占用状态（0=空闲，1=占用）、当前货运量（相对于日均运量的百分比）、道岔状态（0=定位，1=反位，2=故障），共12个维度，全面反映系统当前状态。

– 动作空间（A）：定义为信号控制指令集合，包括：信号机显示（0=红灯，1=黄灯，2=绿灯）、道岔转换指令（0=不转换，1=转定位，2=转反位）、列车速度限制（0=不限速，1=80km/h，2=40km/h，3=停车），共12种动作，覆盖重载铁路信号控制的核心指令。

2. 奖励函数设计

以“安全优先、效率为辅”为原则，设计多目标奖励函

数 R：

– 安全奖励（R1）：若风险等级从“紧急”降至“预警”或“正常”，奖励 +50；若风险等级升高，惩罚 -100；无风险变化时，奖励 0。

– 效率奖励（R2）：若列车运行速度保持在目标速度（重载铁路通常为80km/h）的 ±10% 范围内，奖励 +10；若因信号控制导致列车减速超20%，惩罚 -20；货运量完成率超95%，额外奖励 +30。

– 设备稳定奖励（R3）：若道岔转换成功且无二次调整，奖励 +15；若道岔转换失败，惩罚 -50；信号机状态切换正常，奖励 +5。

总奖励函数为 $R = 0.5 \times R1 + 0.3 \times R2 + 0.2 \times R3$ ，确保模型优先保障安全，同时兼顾效率与设备稳定。

3. 模型训练与优化

模型训练采用离线训练与在线优化结合的方式：

（1）离线训练：基于大秦铁路2021 – 2023年的运营数据（含货运量波动、设备故障记录），构建训练场景库，共生成10万条训练样本。采用经验回放机制存储训练样本，避免样本相关性导致模型过拟合；设置目标网络与评估网络分离，每1000步更新一次目标网络参数，提升模型稳定性。训练过程中，批处理大小设为32，折扣因子 γ 设为0.9，探索率 ϵ 从0.9线性衰减至0.1，确保模型前期充分探索、后期稳定收敛。

（2）在线优化：系统部署后，实时采集实际运营数据（如突发异物场景、货运量峰值数据），作为增量训练样本，每24小时对模型进行一次微调。通过梯度下降优化损失函数（采用均方误差损失），使模型适应重载铁路运营场景的动态变化，决策准确率持续维持在98%以上。

在仿真测试中，该模型在货运量波动 ±20% 场景下，列车平均运行速度较传统固定规则控制提升8.3%；在道岔临时故障场景下，信号调整响应时间缩短至0.3s，避免列车拥堵，运输效率损失控制在3%以内，满足系统自适应需求。

三、结论

本文针对传统重载铁路信号控制系统的局限，构建“视频感知 – 数据融合 – 智能决策 – 信号控制”四层协同架构，提出熵权自适应联邦卡尔曼滤波方法解决多源异构数据融合问题，设计“安全 – 效率”双目标 DQN 决策模型实现动态自适应决策。研究有效提升系统感知全面性、数据协同性与决策自主性，弥补传统系统“感知 – 决策 – 控制”脱节短板，为我国重载铁路信号系统智能化升级提供可靠的理论框架与技术支撑，具有重要工程应用价值。

参考文献

- [1] 中国国家铁路集团. 中国重载铁路发展报告(2024)[R]. 北京：中国铁道出版社，2024.
- [2] 王月明，张卫华，李瑞平. 重载铁路多源数据融合定位方法研究 [J]. 中国铁道科学，2023，44(2)：83–91.
- [3] 赵文涛，刘刚，陈峰. 基于 YOLOv8 的轨道异物检测算法优化 [J]. 铁道学报，2024，46(3)：78–85.

基于人工智能的无人机智能化控制系统研究

梁瑞彪

中航恒拓智能科技河北有限公司, 河北 石家庄 051430

DOI:10.61369/ME.2025060002

摘 要 : 人工智能技术以其蓬勃发展的态势正深刻改变着无人系统的控制模式, 而鉴于无人机在军事侦察、物流运输、农业监测及应急救援等核心领域的独特效能, 其智能化控制系统亦备受瞩目。传统无人机控制系统主要依靠于事先预设的程序及简单反馈机制, 当其面对错综多变的外在环境时, 常常会显现出环境适应性不足、自主决策能力受限等问题, 难以精准契合现代任务对于高自主性和高可靠性的要求。而随着深度学习、强化学习及计算机视觉等智能技术的快速进阶, 基于人工智能的无人机控制系统无疑成为提升无人平台自主能力的关键方向, 智能无人机系统凭借优化控制策略并提高环境适应能力, 亦能为无人系统的智能化转型提供关键技术支撑。

关 键 词 : 人工智能; 无人机; 智能化控制系统

Research on Intelligent Control System of Unmanned Aerial Vehicle Based on Artificial Intelligence

Liang Ruibiao

AVIC Hengtuo Intelligent Technology Hebei Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 051430

Abstract : Artificial intelligence technology, with its booming development, is profoundly changing the control mode of unmanned systems. Given the unique effectiveness of drones in core fields such as military reconnaissance, logistics transportation, agricultural monitoring, and emergency rescue, their intelligent control systems have also attracted much attention. Traditional drone control systems mainly rely on pre-set programs and simple feedback mechanisms. When faced with complex and ever-changing external environments, they often exhibit problems such as insufficient environmental adaptability and limited autonomous decision-making ability, making it difficult to accurately meet the requirements of modern tasks for high autonomy and reliability. With the rapid advancement of intelligent technologies such as deep learning, reinforcement learning, and computer vision, unmanned aerial vehicle control systems based on artificial intelligence have undoubtedly become a key direction for enhancing the autonomous capabilities of unmanned platforms. Intelligent unmanned aerial vehicle systems, with optimized control strategies and improved environmental adaptability, can also provide key technical support for the intelligent transformation of unmanned systems.

Keywords : artificial intelligence; UAV; intelligent control system

引言

无人机技术现在正历经由自动化向智能化跃迁的关键阶段, 随着人工智能技术的深度交融, 无人机的应用范围亦在持续扩大, 在军事对抗、智慧物流及环境监测等场景中占据着愈来愈关键的地位, 而这就对无人机控制系统的实时性、自主性及适应性提出了更高、更严苛的要求。现阶段, 人工智能技术取得的突破, 为无人机控制系统的范式革新提供了最核心的动力, 智能算法凭借把环境感知、动态决策及自适应控制等能力有序结合, 能够让无人机拥有对环境的高理解能力及任务执行自主性, 使其在复杂的场景中可以做出更精准的反应, 亦能够更高效地调配资源。鉴于此, 深入探索由人工智能所驱动的无人机控制系统的优化途径, 对于打破传统控制方法局限、扩大无人平台的应用范围具有关键意义, 亦能为智能无人系统的技术革新提供关键的理论和实践方面的参考。

一、人工智能在无人机智能化控制系统中的关键作用分析

（一）提升环境感知与目标识别效能

传统无人机环境感知系统多依赖于单一类型传感器，如可见光摄像头或毫米波雷达，在较为复杂的气象条件之下，例如低能见度、强降雨、动态场景、移动障碍物密集区域，单一传感器的感知精度显著下降，极易造成目标漏检或者误判情况。而随着人工智能技术的引入，真正实现了多模态传感器数据的深度融合。譬如，可以借助光学图像、红外热成像、激光雷达点云数据的多点集成，构建多维度的环境表征体系，并基于深度学习的特征提取算法，例如卷积神经网络，自动识别传感器数据中的关键信息，从而切实提升目标检测与目标分类的精细度，以农业病虫害监测任务为例，采用人工智能算法的无人机对作物病斑的识别准确率往往能够达到92%以上，较之传统基于人工特征的检测方法，准确率提升约37%。除此之外，借助在线学习机制，系统可以持续优化感知模型的参数，这种自适应的感知能力也能够为无人机在复杂环境中能够可靠作业提供关键支撑^[1]。

（二）增强自主决策与动态路径规划能力

传统路径规划算法需要依靠全局环境的先验信息，在动态障碍物经常出现的场景中，其适应性显然不足，而由人工智能所驱动的自主决策系统则能够凭借强化学习框架和环境来进行交互，继而循序渐进地优化决策策略，这一科学机制可以让无人机在未知环境中，实时评估障碍物的分布情况、风场扰动等一系列的动态因素，并且能够动态地对飞行轨迹做出调整。基于模型预测控制的局部路径规划模块可以每秒执行多次滚动优化，在把无人机动力学约束纳入其中的前提下，生成符合任务优先级的最优路径，而在模拟城市楼宇环境中，采用人工智能决策的无人机成功避开障碍物的比率达到了较高数值，路径规划的效率和传统方法相比提升了大概2.3倍，对于多目标任务场景如同物流配送中需要平衡时效性和能耗一般，这种自适应决策能力明显拓展了无人机在复杂任务场景中的应用范围。

（三）优化多无人机协同控制效能

多无人机系统在军事侦察、大面积农业作业等场景中发挥着关键效应，但传统集中式控制架构中存在的单点故障风险高，扩展性差，人工智能支持的分布式协同控制技术把一致性算法和市场机制调度策略融合起来，实现集群系统的自组织协同，在这一框架之下，每一架无人机都能够根据局部观测信息，如相邻单元、相对位置、速度、矢量，从而进行独立决策，继而再借助邻域通信来实现全局信息的交互。而实验研究显示，在包含12架无人机的农业植保集群里面，采用人工智能协同算法的系统能够把作业覆盖率提高到99.2%，还可以把单位面积农药消耗量降低12%。而更值得关注的是，集群系统借助分布式共识协议，例如拜占庭容错算法，来维持队形的稳定性，就算在部分节点通信中断的极端情况之下，依然能够保持基本的协同功能，可靠性指标跟传统方案比起来提升了近42%，而技术上的突破为大规模无人机集群的工程化应用奠定了理论和实践方面的基础。

二、基于人工智能的无人机智能化控制系统优化原则分析

（一）环境适应性优先原则

环境适应性优先原则旨在强调，无人机智能化控制系统需要具备在多样化、动态化环境场景中的稳定运行能力，这一核心能力亦是保障无人机任务执行可靠性的基础所系，传统控制系统常常会因外部环境变化而变化，例如遇障碍物、气象条件骤变等多元情况，从而导致控制失效。然而人工智能技术的引入让系统能够凭借多维度的感知以及动态地学习，来实现对环境的自适应。环境适应性优先原则要求控制系统需要率先构建多源信息融合机制，将视觉、红外、激光雷达等传感器数据综合盘活，实时构建高精度的环境模型，从而确保能够对复杂场景进行全面且实时的感知，而该原则的核心之处也在于其能够将环境的动态性转化为主动适应能力，并借助强化学习等智能算法，使得无人机能够在和环境交互过程中自主总结规律，而非是一成不变的仅仅依靠预设的规则^[2]。

（二）任务导向性适配原则

任务导向性适配原则强调无人机智能化控制系统的功能配置、算法设计需要紧密围绕具体的任务需求开展，要避免脱离实际应用场景的通用化设计，不同的任务场景，如物流运输、农业植保、灾害救援等场景，对无人机的控制精度、响应速度及功能侧重亦有所迥异，例如物流配送，其需要优先保障路径的时效性及货物安全；而农业作业则要强化区域覆盖的均匀性及药剂喷洒的精准度；应急救援则更强调快速响应及关键目标识别的发展能力。同时，任务导向性适配原则在系统的动态调整能力层面亦有所体现，同一架无人机在不同任务阶段可能会面临需求变化，控制系统需要借助实时的任务状态评估来自动切换优化目标，其本质其实是凭借需求和功能的精准映射，能够把人工智能技术的通用能力转变成针对具体场景的专用优势，继而成为提升系统实用价值的关键原则。

（三）协同安全性保障原则

协同安全性保障原则是针对多无人机协作、人机协同等场景的基本准则，其重点要求控制系统在对整体效率进行优化时，必须始终将安全性作为核心底线，尤其是在物流编队运输、大面积农业喷洒、人机协同任务多无人机集群作业的实践中。具体而言，例如，在无人机辅助电力检修这类任务中，个体之间容易出现通信延迟、决策冲突或操作失误等情况，就极易导致碰撞、任务中断、安全事故。安全性保障需要在系统设计的整个流程中均有所渗透，对于人机协同的复杂多元场景而言，这一原则提出控制系统设计要符合人类操作习惯及认知逻辑，以无人机为例，其需要能够准确理解操作员给出的模糊指令，要凭借自然语言处理技术把关键信息提取出来，并且将其转化为控制参数，系统应该向操作员实时反馈无人机的状态感知结果，如做出提示“前方5米有障碍物，建议右转”，从而借助这一科学方式确保人机决策的相互补充性^[3]。

三、基于人工智能的无人机智能化控制系统优化路径分析

（一）多源感知融合与智能环境建模策略

多源感知融合和智能环境建模对于无人机的智能化控制而言可谓基础支撑，其核心践行要点在于，依托于对多元传感器数据的系统整合，且构建动态的环境模型，从而解决单一传感器在复杂场景里感知能力不够的制约问题。具体而言，一方面，需要部署多类型的传感器阵列，例如可见光摄像头、红外热成像仪、激光测距仪等，旨在能够覆盖不同波段及不同环境条件下的感知需求。同时，依托于人工智能算法来实现多源数据的深度融合，可以采用深度学习中的特征提取与关联匹配技术，把不同传感器采集到的异构数据转化为统一环境表征，从而消除信息冗余且突出关键特征，例如，在农业监测时，可以将光学图像中作物的颜色纹理和红外传感器检测到的温度差异结合起来，精准定位出病虫害区域。另一方面，还需要构建动态更新的环境模型，借助“多源感知——融合分析——动态建模”闭环机制，提升无人机在复杂环境中的感知可靠性，为智能决策构建坚实基础。

（二）自适应决策与动态路径规划优化策略

自适应决策及动态路径规划是无人机应对复杂任务场景的关键能力，其优化目标是使得无人机在未知或者动态变化的环境里，能够自主调整策略，从而保证任务得以高效执行，保障飞行安全，这一策略的践行主要是依靠强化学习技术，借助无人机和环境的不断交互，来学习最优的决策模式，如在城市低空飞行的场景中，系统可以借助多次模拟飞行来积累经验，逐渐掌握“避开人群密集区域”“优先选择开阔通道”这类隐性规则，进而形成适合特定环境的决策逻辑。而当碰到未能预见的障碍物时，无人机能够根据之前学习的结果，快速地生成避障动作，而不是依靠固定程序进行机械反应。具体而言，动态路径规划需要结合实时的环境信息来进行滚动优化，并凭借模型预测控制算法，无人机每秒会多次评估当前位置和目标点之间路径的可行性，全面考虑障碍物分布、风场扰动、任务时效性等因素，动态地调整飞行轨

迹，最终借助“感知——决策——优化——风控”的闭环设计，使得无人机能够在动态环境中灵活地应对各种挑战。

（三）人机协同与智能交互增强策略

人机协同和智能交互提高属于无人机智能化控制方面的关键延伸方向，这一方向的核心内容为借助对人机交互流程以及决策互补机制的持续优化，使得操作员所拥有的经验优势以及无人机有的智能处理能力都能够充分迸发。具体而言，这一策略首先会将注意力集中在自然交互接口的设计上，从而降低操作员在操控方面的负担，并积极借助语音识别、手势控制以提高现实界面，操作员能够直观地地下达指令，系统则可以利用自然语言处理以及意图识别技术，把模糊的指令转化成精准控制参数。以电力线路巡检这一情况来说，操作员只要指出疑似故障所在的大致区域，无人机就可以自动调用高清摄像头和红外传感器，对该区域进行重点扫描并且反馈关键信息，这样就能减少人工反复去调整视角的操作。除此之外，这个策略还需要建立起信任机制以及明确责任边界，人机协同与智能交互提高策略借助把技术和人文进行深度融合，让无人机的应用场景得到拓展，也让任务深度有所变多，这是智能化控制系统能够贴近实际需求的一个关键的优化方向。

四、结束语

对基于人工智能的无人机智能化控制系统进行优化，大大提高无人机在复杂环境里对环境的感知精度，亦提升了任务执行的可靠性和群体协作的效能，人工智能技术为打破传统控制系统的局限提供了关键途径，让无人机能够更加精准地适应动态场景，更有效率地完成各种各样的任务，更安全地开展集群作业。随着算法的不断迭代和硬件的持续升级，未来无人机智能化控制系统会朝着更高的自主性、更强的泛化性以及更深层次的人机协同方向发展，在农业、物流、救援等领域发挥出巨大的应用潜力，并为智能无人系统在工程落地以及产业升级提供坚实有效的辅助。

参考文献

- [1] 赵铁雷,李志贵,张保臣,李旭升.基于人工智能与无人机技术的输电线路巡检系统应用研究[J].电力系统装备,2025(4):152-154.
- [2] 牟海鹏,李志燕,马善磊.基于人工智能的采煤机智能化优化控制系统研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(5):34-36.
- [3] 罗锦彬.基于人工智能算法的无人机自动控制研究[J].蚌埠学院学报,2022,11(5):29-33.

FPGA 加速下的人工智能通信信号识别算法研究

吴纯杰

天津七一二通信广播股份有限公司, 天津 300462

DOI:10.61369/ME.2025060040

摘 要 : 伴随通信技术的持续进步, 人工智能 (AI) 在通信信号的辨识与处理领域显现出极强的应用潜力, 特别是在现场可编程门阵列 (FPGA) 加速平台的支持下, 本研究致力于探索 FPGA 加速环境中的人工智能通信信号识别算法, 构建一套高效的信号识别方案, 借助 FPGA 具备的并行计算能力, 对传统算法的计算性能加以改进, 研究过程中, 通过设计适配 FPGA 的深度学习模型, 并在此基础上开展硬件加速工作, 最终达成了通信信号识别的高效处理目标, 实验数据显示, 所提出的算法在性能层面较传统处理手段有明显提升, 可有效增强通信系统的信号识别准确度与处理效率。

关 键 词 : FPGA 加速; 人工智能; 通信信号; 识别算法; 硬件加速

Research on Artificial Intelligence Communication Signal Recognition Algorithm Accelerated by FPGA

Wu Chunjie

Tianjin 712 Communication & Broadcasting Co., Ltd., Tianjin 300462

Abstract : With the continuous advancement of communication technology, artificial intelligence (AI) has demonstrated strong application potential in the field of communication signal identification and processing. Particularly with the support of Field-Programmable Gate Array (FPGA) acceleration platforms, this study is dedicated to exploring artificial intelligence communication signal recognition algorithms within an FPGA-accelerated environment. It aims to construct an efficient signal recognition scheme by leveraging the parallel computing capabilities of FPGAs to enhance the computational performance of traditional algorithms. During the research, by designing a deep learning model tailored for FPGAs and implementing hardware acceleration based on it, the goal of efficient processing of communication signal recognition was ultimately achieved. Experimental data indicates that the proposed algorithm significantly outperforms traditional processing methods in terms of performance, effectively enhancing the signal recognition accuracy and processing efficiency of communication systems.

Keywords : FPGA acceleration; artificial intelligence; communication signals; recognition algorithm; hardware acceleration

引言

在当前的现代通信系统里, 信号识别是保障高效数据传输与实现资源优化的核心技术环节, 随着人工智能技术的迅猛发展, 深度学习方法在信号处理领域得到广泛运用, 这使得信号识别的精准度与效率获得了显著改善, 但传统算法往往存在计算复杂度偏高、处理速度滞后等问题, 特别是在应对大规模数据处理场景时, 其性能短板表现得尤为突出, FPGA 作为一类具备可编程特性的硬件平台, 依托自身的并行处理优势, 能够大幅提高信号识别算法的运行效率, 本研究将 FPGA 加速技术与人工智能算法相结合, 提出了一套适用于通信信号识别的高效方案, 并通过实验验证了该方案具备的可行性与应用优势。

一、FPGA 加速的通信信号识别概述

(一) FPGA 的基本原理与特点

现场可编程门阵列 (FPGA) 作为一类可依据应用需求开展编程的半导体器件, 拥有极高的灵活性与并行处理能力, 相较于传统的 CPU 和 GPU, FPGA 能在硬件层面支持自定义电路设计,

进而可实现效率更高的专用处理功能, FPGA 的工作机制以逻辑块阵列为基础, 通过对这些逻辑块进行配置来达成特定功能, 且能够执行并行计算, 这使得其在高并发计算需求场景下可展现出出色的性能表现^[1]。

FPGA 的核心特点包含低延迟、高带宽、灵活性及低功耗, 它可借助并行执行多项任务来有效缩短任务执行时长, 同时降低

功耗消耗，提升能源利用效率，硬件级别的并行处理能力，让 FPGA 在通信信号处理领域的应用拥有极大潜力。

（二）FPGA 在人工智能中的应用优势

人工智能（AI）领域通常需处理海量数据，特别是在深度学习模型的训练与推理过程中，计算量更是极为庞大，传统处理器在这类任务中效率偏低，原因在于其架构多以串行计算为基础，无法充分发挥并行计算的优势，与之不同的是，FPGA 可根据实际需求定制硬件加速单元，支持大规模并行计算，从而显著提升深度学习算法的执行速度^[9]。

在人工智能应用场景中，FPGA 的优势体现得尤为明显，其一，FPGA 具备强大的并行计算能力，能够同步处理多个数据流，提升整体处理效率；其二，FPGA 可针对不同 AI 算法实施专门优化，使硬件与算法的融合更为紧密，进而进一步提高算法的执行效率与精度；其三，FPGA 硬件加速平台可在运行过程中动态调整配置，灵活满足不同应用场景的需求，正因如此，在人工智能领域，FPGA 在提升计算性能、减少延迟、降低功耗等方面均具备显著优势。

（三）FPGA 加速在通信信号识别中的需求与挑战

在通信领域内，信号识别是实现高效数据传输与管理的关键技术支撑，随着通信技术的不断发展，信号的复杂程度与数据规模急剧上升，传统信号识别算法面临着计算效率低、处理速度慢等性能瓶颈，在此背景下，采用 FPGA 对通信信号识别任务进行加速，成为一种切实有效的解决方案，借助 FPGA 的并行计算能力，可实现对大规模通信信号数据的快速处理，提升信号识别的精度与效率^[9]。

但需注意的是，FPGA 加速通信信号识别同样面临不少挑战，一方面，FPGA 硬件的编程与配置流程相对复杂，需要研发人员对硬件结构和算法细节具备深入认知；另一方面，通信信号的多样性与变化性，使得算法的适应性成为关键问题，如何针对不同信号特征进行优化，是 FPGA 加速应用过程中的难点所在，此外，FPGA 的硬件资源存在限制，如何在有限资源条件下实现高效并行计算，也是需要解决的重要问题。

二、人工智能在通信信号识别中的应用

（一）深度学习模型在信号识别中的作用

深度学习作为人工智能领域内一项强大的技术手段，在通信信号识别工作中发挥着至关重要的作用，其核心优势体现在能够从海量数据中自动学习复杂的特征表示，无需人工进行特征设计，这一特性让深度学习在处理高维度、高复杂度通信信号时，展现出显著的应用优势^[4]。

卷积神经网络（CNN）常被用于图像与时序信号的处理工作，该网络能够自动学习输入数据的局部及全局特征；在通信信号识别过程中，CNN 可捕捉信号包含的时频特征，使识别效果得到明显提升，递归神经网络（RNN）与长短期记忆网络（LSTM）则十分适合处理时间序列信号，它们能够对信号在时间维度上的依赖性进行建模，进一步增强信号识别的能力。

依托深度学习技术，通信信号识别不仅能够解决传统方法中存在的特征提取难度大、计算量庞大等问题，还可有效增强系统的鲁棒性，特别是在多路径传播、频率偏移及信道噪声等复杂环境中，这种增强效果更为突出。

（二）信号处理与深度学习模型的结合方式

信号处理技术与深度学习模型的有效结合，是实现高效信号识别的关键所在，传统信号处理方法往往依赖人工设计的特征提取算法，像傅里叶变换、小波变换等均属于此类；这些方法虽能发挥一定作用，但无法自动适应复杂信号的变化情况，在深度学习的技术框架下，信号处理与深度学习的结合通常体现在两个层面：一是借助数据预处理与特征提取操作，为深度学习模型提供符合要求的输入数据；二是将深度学习模型融入信号处理流程，以此实现端到端的信号识别^[9]。

具体来说，信号处理方法常被用于噪声抑制、信号分离、数据降维等预处理任务，比如，傅里叶变换或时频分析可用于将信号转换为频域或时频域的表示形式，而深度学习模型则在此基础上开展更为复杂的模式识别工作，在实际应用场景中，工作人员常会将这些传统信号处理方法与深度学习网络相结合，通过深度神经网络（DNN）、卷积神经网络（CNN）等网络结构，进一步提取更为复杂的高维特征，最终实现信号识别准确性与鲁棒性的提升。

（三）人工智能算法对通信系统性能的影响

人工智能算法，尤其是深度学习技术，能够明显提升通信系统的性能，在信号识别、干扰抑制及资源分配等方面，其影响尤为重要，首先，AI 算法可增强通信系统的自适应能力，在复杂的无线环境中，传统通信系统通常依赖固定参数与规则开展工作，而 AI 算法能够通过实时学习与适应来优化系统性能，让通信系统可根据实际情况进行动态调整，进而提供更高质量的通信服务与更高效的资源利用方式。

其次，人工智能在信号识别领域的应用，可大幅提高系统的可靠性，深度学习模型能够从大量训练数据中自动学习信号的复杂特征，随后在信号接收端实现更高精度的解调与解码操作，这一过程可提升通信系统在恶劣环境下的抗干扰能力与鲁棒性。

最后，人工智能对通信网络的优化与管理也产生了积极作用，例如，AI 可通过智能调度算法优化频谱资源的分配方式，提升通信网络的整体效率，减少信号之间的干扰，提高带宽的利用效率，除此之外，AI 算法能够对网络流量进行实时分析，为通信网络提供智能化的负载平衡与故障预测能力，进一步增强通信系统的整体性能与稳定程度。

三、FPGA 硬件加速优化的设计与实现

（一）FPGA 架构优化与算法适配

对 FPGA 硬件加速进行优化时，首要工作是对 FPGA 架构开展有效的设计与优化，使其能最大程度契合目标算法的计算需求，进行设计时，需先依据所选算法的特性，分析其计算流程、数据流及存储需求，进而确定最适配的硬件结构^[9]。以基于卷积

神经网络（CNN）或深度学习的算法为例，这类算法通常需要对卷积运算、矩阵乘法以及数据流的并行处理进行优化，在 FPGA 内部，可通过设计适配该算法的硬件模块，加速这些关键计算任务，减少数据传输过程中的瓶颈问题。

此外，算法的适配程度对 FPGA 优化效果起着关键作用，深度学习算法等往往具有高强度的计算密集特性，若不对其进行硬件适配，可能会导致系统过度依赖 CPU 的计算能力，反而使加速效果下降，因此，在 FPGA 设计阶段，需将计算任务的特性与硬件平台的能力相结合，比如通过定制化硬件加速单元（如乘法单元、激活函数单元等），提升计算执行效率。

（二）数据并行处理与硬件资源调度

在 FPGA 加速过程中，数据并行处理是提升系统性能的核心环节，FPGA 本身具备支持并行计算的特性，可在同一时间处理多个数据流，因此在对信号处理与深度学习算法进行加速时，将整体任务拆解为多个并行子任务，能有效提高处理速度，以卷积操作为例，可将每个卷积核的计算任务进行并行化处理，利用 FPGA 的多个逻辑单元同时对不同卷积层开展计算，从而加快整个网络的计算进程^[7]。

与此同时，硬件资源调度也是优化 FPGA 性能的重要内容，FPGA 的硬件资源存在一定限制，因此需要对计算单元、内存及数据通道进行合理分配，调度策略需确保不同计算单元之间不会出现资源竞争问题，同时将数据传输延迟控制在最低水平，通过高效的调度算法，可将计算任务合理分配至不同硬件模块，避免资源浪费，提高数据吞吐量，一套优良的硬件资源调度策略，不仅能充分发挥 FPGA 的计算能力，还能对功耗与成本进行优化。

（三）系统验证与性能分析

在 FPGA 加速系统的设计与实现流程中，系统验证是不可忽略的重要环节，通过系统验证，可确保硬件设计与软件算法实现有效融合，同时验证 FPGA 加速方案的可行性与稳定性，验证过程中，首先需开展功能验证，确认硬件实现与预期算法保持一致，能够准确处理各类输入信号并输出正确结果；其次，还需进行性能验证，测量加速后系统的计算速度、延迟、吞吐量等关键指标。

性能分析则能帮助开发者评估 FPGA 加速系统的实际应用效果，通过与传统 CPU 或 GPU 平台进行对比，可量化 FPGA 加速带来的性能提升幅度，以通信信号识别场景为例，可分析 FPGA 平台的处理速度与功耗表现，对比其在大规模数据处理场景下的优势，同时，性能分析还能助力发现系统存在的瓶颈，比如是否存在数据传输延迟过高、计算资源分配不均衡或功耗超标等问题^[8]。

四、实验与结果分析

（一）实验设计与测试方法

在开展 FPGA 加速的通信信号识别算法研究工作时，实验设计是验证方案有效性的关键步骤，首先，为测试 FPGA 加速的性能表现，需选取适宜的通信信号数据集，该数据集应包含多

种类型的信号，涵盖噪声、干扰以及不同传输条件等情况，以此确保测试能够覆盖实际应用中的各类场景，实验中采用的信号数据通常包含时域信号与频域信号，这些数据将作为输入数据传入 FPGA 平台进行处理^[9]。

在测试方法层面，实验采用传统信号处理算法与经 FPGA 加速后的深度学习算法进行对比，以此评估加速后的性能提升幅度，每种算法的输入信号、处理流程、输出结果均需进行详细记录。测试过程中关注的指标包括计算速度、延迟、吞吐量、功耗等关键参数。如表1所示。

表1 图1实验设计对比

测试项目	传统算法	FPGA 加速算法	提升幅度
计算速度（Msamples/s）	120	450	3.75 ×
延迟（ms）	18.6	5.2	↓ 72%
吞吐量（MB/s）	240	910	3.79 ×
功耗（W）	45	28	↓ 37.8%

（二）性能对比与结果分析

实验结果的性能对比主要通过与传统 CPU 和 GPU 处理平台展开比较，测试数据显示，FPGA 加速平台在处理通信信号识别任务时，相较于 CPU，能够明显提高计算速度与吞吐量，特别是在信号预处理和特征提取这类计算密集型任务中，FPGA 展现出更高的处理效率，缩短了信号处理所需时间，在与 GPU 进行对比时，尽管 GPU 在部分任务中也具备较强的并行计算能力，但 FPGA 凭借专用硬件加速的优势，在功耗与延迟方面表现更优^[10]。如表1所示。

表 2 不同平台通信信号识别性能对比

指标	CPU 平台	GPU 平台	FPGA 平台
平均处理速度（Ms/s）	50	180	320
吞吐量提升倍数（相对 CPU）	1 ×	3.6 ×	6.4 ×
平均延迟（ms）	45	20	8
功耗（W）	120	150	65

此外，FPGA 平台在处理大规模数据时的吞吐量优势也得到验证，通过多次实验测量发现，FPGA 的处理速度比传统方法快数倍，能够实时处理大量通信信号，满足高效处理的需求，结果表明，FPGA 在通信信号识别中的加速效果十分显著，尤其是在复杂信号的快速识别方面，FPGA 的硬件并行计算能力发挥了关键作用。

（三）误差分析与优化方向

尽管 FPGA 加速方案在性能上呈现出明显优势，但在实验过程中，仍存在一定的误差来源，其一，信号噪声与干扰会对通信信号的识别精度产生影响，FPGA 加速的深度学习算法在面对信号中的噪声时，可能出现部分误识别或分类错误的情况，其二，硬件资源的有限性可能导致在处理极为复杂或高维度信号时出现性能下滑，尤其是在高并发数据流场景下，资源分配不均衡可能引发处理瓶颈问题。

针对这些问题，未来的优化方向主要集中在以下几方面：一是可通过优化深度学习模型的结构，降低模型复杂度，使其在 FPGA 上能更高效地运行，减少功耗与计算需求；二是针对误识别问题，优化数据预处理环节，采用更先进的噪声抑制与信号滤波技术，提升信号识别的鲁棒性；三是硬件资源的优化配置也

十分重要，可通过更精准的资源调度算法，提高硬件资源的利用率，解决高并发情况下的性能瓶颈问题。

五、结语

本文对 FPGA 加速下的人工智能通信信号识别算法展开研究，结合深度学习与硬件加速技术，提出一套高效的通信信号识

别方案，实验结果表明，FPGA 加速平台在信号处理速度、吞吐量及功耗方面，均优于传统 CPU 和 GPU 平台，尤其在高并发数据处理与低功耗应用场景中展现出明显优势，尽管在噪声干扰和硬件资源限制方面仍存在一定挑战，但通过优化算法与硬件资源调度，能够进一步提升识别精度与处理效率。

参考文献

- [1] 孙耀华, 江沐泽涵, 彭木根. 人工智能驱动的手机直连低轨卫星通信 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(06): 1075-1086.
- [2] 孙锐, 范之国. 融合人工智能的通信工程教学案例设计与实践 [J]. 高教学刊, 2024, 10(25): 103-106.DOI: 10.19980/j.CN23-1593/G4.2024.25.024.
- [3] 董润琳, 王阳阳. 人工智能与无线通信技术融合应用 [J]. 通信与信息技术, 2023(S1): 90-94.
- [4] 孙艳伟. 人工智能技术在消防指挥中心通信系统中的应用及挑战研究 [J]. 消防界 (电子版), 2023, 9(15): 57-59.DOI: 10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2023.15.020.
- [5] 任永琼, 季文文. 大数据背景下人工智能技术对通信自动控制系统优化研究 [J]. 信息记录材料, 2022, 23(12): 233-235.DOI: 10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2022.12.022.
- [6] 张成君, 周进. 5G 移动通信技术在人工智能领域应用的策略 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(11): 183-186.DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2022.11.042.
- [7] 屈军锁, 唐晨雪, 蔡星, 窦秋实, 武晨, 乔宁. 人工智能与通信网络融合趋势 [J]. 西安邮电大学学报, 2021, 26(05): 15-26.DOI: 10.13682/j.issn.2095-6533.2021.05.002.
- [8] 任翔. 当代 5G 通信技术与人工智能的深度融合发展探究 [J]. 农家参谋, 2020(20): 131.
- [9] 叶颖雅. FPGA 硬件加速下的 Rtab-Map 双目视觉 SLAM 优化策略 [D]. 桂林理工大学, 2024.DOI: 10.27050/d.cnki.gglgc.2024.000741.
- [10] 何群芳. 无人机视觉算法的 FPGA 加速研究 [D]. 华东师范大学, 2021.DOI: 10.27149/d.cnki.ghdsu.2021.001277.

半导体工业厂房高效制冷机房系统设计探讨

曾威

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060005

摘 要： 半导体工业厂房制冷系统要求特殊，涉及环境控制、设备选型、管网设计等多方面。温湿度、洁净度、振动控制要求高，设备选型需优化，管网要水力平衡，蓄冷系统要合理设计，还介绍了能效评估等内容，需融合新技术满足需求。

关 键 词： 半导体厂房；制冷系统；高效节能

Discussion on the Design of Efficient Refrigeration Room System in Semiconductor Industrial Plant

Zeng Wei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The refrigeration systems in semiconductor industrial plants have specific requirements, involving environmental control, equipment selection, and pipeline design. These systems must meet high standards for temperature and humidity, cleanliness, and vibration control. Equipment selection should be optimized, pipelines must ensure hydraulic balance, and the cold storage system should be designed effectively. Additionally, the paper discusses energy efficiency assessments and the integration of new technologies to meet these demands.

Keywords： semiconductor plant; refrigeration system; high-efficiency energy saving

引言

半导体工业在现代科技中占据关键地位，其生产工艺对环境控制要求极高，制冷系统的设计与运行至关重要。近年来，随着《中国制造2025》（2015年颁布）等政策的推进，强调制造业的转型升级和高效节能发展。在此背景下，半导体工业厂房高效制冷机房系统面临诸多挑战与机遇。从温湿度、洁净度和振动控制等特殊环境要求，到设备选型优化、管网水力平衡、蓄冷系统设计等多个方面，都需要深入研究和创新，以满足产业发展对高效、节能、稳定制冷的需求，同时符合政策导向的高效节能目标。

一、半导体工业厂房制冷需求特征

（一）工艺环境控制要求

半导体生产工艺对环境控制要求极高。温湿度方面，不同的生产环节有特定的温湿度范围要求，例如光刻工序需要严格控制温度在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内，湿度在40%–60%之间，以确保光刻精度和产品质量^[1]。洁净度也是关键因素，厂房内空气需达到极高的洁净等级，如ISO 1 – ISO 3级，这对制冷系统的过滤和空气循环设计提出了严格要求。在振动控制上，半导体生产设备对振动极为敏感，制冷系统的设备选型和安装需考虑减振措施，避免因振动影响生产设备的正常运行和产品的加工精度。

（二）能耗负荷特性

大规模芯片制造设备以及真空机组等是半导体工业厂房的主要热源。这些设备运行过程中形成的能耗负荷具有动态变化的特性，其负荷曲线会随着设备的运行状态、生产流程的不同阶段而改变^[2]。例如，在芯片制造的某些关键工序，设备满负荷运行，

制冷需求达到峰值；而在一些辅助工序或设备维护时段，负荷则会显著降低。同时，昼夜负荷特性也较为明显，由于生产安排和人员活动规律，白天通常是生产活动的集中时段，设备使用率高，制冷负荷较大；夜间部分设备可能处于待机或低负荷运行状态，制冷需求相应减少。这种动态且具有昼夜差异的负荷特性，对制冷系统的设计和运行提出了更高的要求，需要其具备良好的调节能力和适应性。

二、高效制冷系统架构设计

（一）设备选型优化配置

在设备选型优化配置方面，对于半导体工业厂房高效制冷机房系统，冷水机组、水泵与冷却塔的合理选型及配置至关重要。冷水机组全年95%的时间处于部分负荷工况，对于工业项目，需要关注冷机在全年不同冷却水温时，部分负荷工况的COP。通过分析全年8760h的负荷，来选择冷机容量搭配和变、定频搭配，

确保不论负荷如何变化，始终运行在冷机高效负载区间。水泵选型，扬程余量应合理，采用高效率水泵，配置高效电机采用变频控制。冷却塔选型，主要是降低逼近度，在空间允许情况下，选择散热能力更强的冷却塔。其次，冷却塔选型应关注变流量工况时的均布性能，确保变流量运行时，冷却塔仍能够充分利用填料面积进行高效换热。通过对这三者的优化选型及合理配置，并制定科学的群控策略和参数匹配方法，可提高整个制冷系统的效率，满足半导体工业厂房的制冷要求^[3]。

（二）管网水力平衡设计

在管网水力平衡设计方面，BIM技术具有重要应用价值^[4]。通过BIM建立大温差供回水系统的三维模型，精确呈现管网的布局 and 连接关系。这有助于准确分析各管段的水力特性，包括流量、压力损失等。基于模型进行水力计算，可得到不同工况下各节点的压力和流量数据。利用这些数据，能够合理确定管径大小和调节阀的设置，以实现管网水力平衡。同时，BIM技术可实时监测管网运行状态，对可能出现的水力不平衡问题及时预警。通过动态调整调节阀开度等措施，确保各支路的水流量符合设计要求，提高整个制冷系统的运行效率和稳定性。

三、水蓄冷系统融合设计

（一）蓄冷罐体参数设计

1. 分层蓄冷原理应用

蓄冷罐的设计需考虑分层蓄冷原理。基于温度分层效应，合理确定蓄冷罐高径比至关重要。适宜的高径比有助于形成稳定的温度分层，提高蓄冷效率^[5]。同时，布水器结构设计也是关键点。布水器应确保冷水和温水能够均匀进出蓄冷罐，避免出现水流短路或混合现象，从而维持良好的温度分层。其设计需考虑水流速度、方向以及布水孔的大小和分布等因素。通过优化高径比和精心设计布水器结构，能够更好地应用分层蓄冷原理，提升蓄冷系统的性能，满足半导体工业厂房高效制冷的需求。

2. 释冷效率保障措施

在蓄冷罐体参数设计方面，需综合考虑罐体的容积、形状、材质等因素。合理的容积要根据制冷需求和蓄冷时间确定，形状影响水流分布和温度分层，材质则关乎保温性能和耐久性^[6]。对于释冷效率保障措施，关键在于维持斜温层的稳定性。通过优化进出水口的设计，控制水流速度和方向，避免冷热水的混合。同时，可设置防短路装置，确保释冷过程中冷水能高效地被抽取利用。此外，温度传感器的合理布置也至关重要，能够实时监测温度变化，为控制系统提供准确数据，以便及时调整运行参数，保障释冷效率的稳定。

（二）系统集成控制策略

1. 移峰填谷控制模型

构建负荷预测与电价分时策略联动的动态释冷数学模型，需综合考虑多方面因素。首先分析厂房内的制冷负荷变化规律，结合历史数据与实时监测信息，采用合适的预测方法，如时间序列分析等^[7]。同时，获取电价分时信息，明确峰谷电价时段。基于

此，建立以成本最小化为目标的动态释冷数学模型，模型中包含蓄冷罐的蓄冷量、释冷速率等变量，以及制冷机组的运行功率、效率等参数。通过优化算法求解模型，确定不同时段的最佳释冷策略，实现移峰填谷，提高能源利用效率，降低制冷机房的运行成本。

2. 应急冷源保障机制

在水蓄冷系统融合设计方面，需综合考虑多种因素实现高效集成。对于系统集成控制策略，要建立智能控制系统，精确调控各设备运行参数，确保系统稳定高效运行，实现不同工况下的最优制冷效果^[8]。在应急冷源保障机制上，制定工艺冷却水系统与消防系统联动的应急供冷方案至关重要。当出现紧急情况时，通过联动机制，消防系统可为工艺冷却水系统提供应急冷源，确保关键设备在一定时间内仍能得到有效冷却，避免因制冷中断造成生产损失和安全隐患，保障半导体工业厂房的正常生产秩序。

四、系统优化与能效评估

（一）热回收系统集成

1. 冷凝热梯级利用

在半导体工业厂房中，冷凝热梯级利用是热回收系统集成的重要组成部分。对于工艺纯水加热，可利用冷凝热的热量通过合适的热交换设备将热量传递给纯水，提高纯水温度，满足生产工艺需求，这不仅减少了额外的能源投入用于纯水加热，还能有效利用原本被浪费的冷凝热^[9]。在厂区供热方面，通过设计合理的管网和热交换系统，将冷凝热按照不同的温度等级进行梯级利用，例如先将较高温度的冷凝热用于满足对温度要求较高的区域供热，然后再利用剩余的较低温度的冷凝热为对温度要求稍低的区域供热，从而实现能源的高效利用，提高整个厂区的能源利用效率。

2. 能质提升技术路径

吸收式制冷与高温热泵组合的热回收系统是实现能质提升的关键路径之一。在半导体工业厂房中，通过合理配置该系统，可有效回收废热并加以利用。这种组合系统能够利用吸收式制冷的特性，在特定温度区间高效工作，同时高温热泵进一步提升热量的品质，使其能够满足更高温度需求的工艺环节^[10]。例如，在一些芯片制造过程中的加热工序，可利用回收并提升能质后的热量，减少对传统能源的依赖。通过精确的系统设计和参数优化，能够最大程度地提高能源利用效率，降低生产成本，同时减少对环境的影响，符合可持续发展的理念。

（二）数字化运维体系

1. 数字孪生建模方法

搭建基于设备参数实时映射的制冷系统三维可视化监控平台，需运用数字孪生建模方法。首先采集制冷系统设备的各项参数，包括温度、压力、流量等，这些参数作为数字孪生模型的基础数据。然后利用专业建模软件，根据设备的实际物理结构和运行原理构建三维模型。在模型中，将采集到的参数实时映射到对应的设备部件上，实现设备运行状态的可视化展示。通过这种方式，运维人员可以直观地了解制冷系统的运行情况，及时发现潜

在问题，为系统优化和能效评估提供有力支持。同时，该模型还可用于模拟不同工况下系统的运行效果，辅助制定更合理的运维策略和节能措施。

2. 智能诊断算法应用

开发异常工况自诊断及系统 COP 优化自适应控制算法，需基于对制冷机房系统运行数据的深度分析。通过建立系统运行模型，识别出正常工况下的各项参数指标范围以及它们之间的关联。当出现异常工况时，算法能够依据预设的规则和学习到的模式，快速准确地诊断出问题所在，如设备故障、管路堵塞或传感器偏差等。同时，以系统能效比（COP）为优化目标，算法根据实时运行数据动态调整设备的运行参数，如压缩机的转速、冷却水泵的流量等，确保系统始终在高效状态下运行，实现能源的合理利用和成本的有效控制。

（三）能效评价指标系统

1. 全生命周期评价

对半导体工业厂房高效制冷机房系统开展全生命周期评价意义重大。应构建涵盖建造阶段碳排放量与运行阶段系统能效 COP 的综合评估体系。建造阶段碳排放量涉及从原材料采购到厂房落成期间产生的温室气体总排放，囊括设备生产、物流运输及现场施工等环节。运行阶段系统能效 COP 通过精准测算制冷机房供冷总量与冷机、水泵、冷却塔等设备耗电量总和的比值来确定。整合这两个关键指标，可全面剖析系统全周期的环境影响及能源利用效率，为系统优化升级提供有力依据，推动半导体工业厂房制冷机房实现高效、可持续的长期稳定运行。

2. 对标分析体系

半导体工业厂房高效制冷机房系统的能效评估至关重要。在能效评价指标系统中，需综合考虑制冷量、能耗、能效比等关键指标。而对标分析体系则是将实际运行数据与设定的标准或先进水平进行对比。对于半导体行业制冷系统，应制定能耗限额标准，明确合理的能耗范围。通过收集大量同类型厂房制冷系统的数据，分析其能耗分布规律，确定不同工况下的能耗基准值。同时，建立对标分析方法，从设备性能、系统配置、运行策略等多个维度进行比较。例如，对比不同制冷机组的能效比，分析冷却系统的效率差异等。通过对标分析，找出自身系统的优势与不足，为系统优化提供依据，以实现半导体工业厂房制冷机房系统的高效运行。

五、总结

半导体工业厂房对制冷系统有特殊要求。与传统方案相比，其制冷系统设计在技术上存在差异，需综合考虑厂房的特殊环境和生产工艺需求。蓄冷系统与生产工艺的耦合设计是关键创新点，通过合理设计可提高能源利用效率。针对新能源产业园区，提出模块化制冷系统建设方案，有助于提高建设效率和系统灵活性。同时，智能化调控技术在超净厂房中的应用前景广阔，能够实现更精准的温度控制和能源管理。未来，半导体工业厂房高效制冷机房系统设计应不断融合新技术，以满足产业发展对高效、节能、稳定制冷的需求。

参考文献

[1]王鸿大.工业制冷系统能耗优化控制设计与工程应用[D].浙江大学,2021.
[2]刘海.工业建筑高效制冷机房能效比研究——以某厂制冷机房为例[D].广州大学,2021.
[3]张林博.高效制冷机房系统优化控制方法及能耗评价研究[D].北京工业大学,2022.
[4]李刚.数据中心蒸发冷却复合制冷系统优化设计研究[D].广州大学,2023.
[5]易求鸿.江门市某厂房制冷机房运行诊断与仿真优化[D].广州大学,2023.
[6]闵小奎,张守用,许鹏.半导体厂房钢结构节点优化应用探讨[J].工程建设与设计,2023(12):13-15.
[7]盖昊宇,张震,朱炼,等.基于 lora 技术的半导体厂房环境实时监测系统设计[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2022,38(4):14-19.
[8]刘雪伟,徐森,商晓峰.先进半导体厂房供电系统分析[J].建筑电气,2022,41(12):11-17.
[9]任华维,明平强,李耿民.数据中心机房制冷系统节能分析[J].科学与信息化,2023(10):111-113.
[10]方学问,韩剑峰.a 级 idc 机房制冷系统配电分析[J].电力设备管理,2021(14):260-261,264.

测绘技术在自然资源确权登记中的应用难点及突破

吴咏梅

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060006

摘 要： 自然资源确权登记内涵包括确定所有权等权益，外延涵盖多种资源及相关要求。介绍了多种测绘技术对确权登记的支撑，分析了多源数据融合难题、复杂场景困境及相应解决方法，还涉及经济评价模型构建，强调测绘技术创新的意义及未来方向。

关 键 词： 自然资源确权登记；测绘技术；多源数据融合

Difficulties and Breakthroughs in the Application of Remote Sensing Technology in the Registration of Natural Resources Ownership

Wu Yongmei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The concept of natural resource registration and certification encompasses the determination of ownership and other rights, with its scope extending to various resources and related requirements. This paper introduces the support provided by various surveying and mapping technologies for registration and certification, analyzes the challenges of multi-source data integration, complex scenarios, and corresponding solutions, and also discusses the construction of economic evaluation models. It emphasizes the significance and future direction of surveying and mapping technology innovation.

Keywords： natural resource registration and certification; surveying and mapping technology; multi-source data integration

引言

自然资源的确权登记是一项复杂且关键的工作，涵盖内涵与外延的多方面内容。其内涵涉及所有权及相关权益确定，需遵循法律法规；外延包括多种资源类型及与空间管理和调查监测标准相关。2019年发布的《自然资源统一确权登记暂行办法》强调了确权登记工作的规范与重要性。在此背景下，测绘技术至关重要。遥感测绘、三维激光扫描等技术为确权登记提供支撑，但也面临多源数据融合难题以及复杂场景困境。针对这些问题，多源数据配准算法优化、动态要素提取技术等不断发展，同时涉及经济评价模型构建等，以提升确权登记的准确性和效率。

一、自然资源确权登记的技术基础

（一）确权登记的内涵与外延

自然资源确权登记具有特定的内涵与外延。从内涵来讲，它是对自然资源的所有权以及相关权益进行确定和记录的过程，这涉及到明确自然资源的归属主体、权利范围等关键要素^[1]。其法律属性决定了这一过程必须遵循相关法律法规，确保确权登记的合法性和权威性。从外延来看，它涵盖了多种自然资源类型，包括土地、矿产、森林、水等。同时，它还与空间管理要求紧密相关，需要明确自然资源在空间上的分布和界限，以实现有效的管理和保护。此外，自然资源调查监测标准的实施规范也是其外延的一部分，准确的调查监测是确权登记的基础，只有依据科学合

理的标准，才能保证确权登记结果的准确性和可靠性。

（二）测绘技术的支撑作用

遥感测绘具有大面积获取数据、快速更新等优势，能清晰呈现自然资源的分布范围及特征，为资源划界提供宏观依据^[2]。三维激光扫描可高精度获取目标物体的三维空间信息，在复杂地形及地物的空间定位中发挥关键作用，准确界定自然资源的边界和形态。GNSS定位技术能够提供精确的地理位置信息，确保自然资源在空间上的准确定位，为确权登记提供可靠的坐标数据。这些测绘技术相互配合，从不同维度为自然资源的确权登记提供了坚实的技术支撑，保障了确权登记工作的科学性和准确性。

二、自然资源确权登记的核心技术难点

（一）多源异构数据融合难题

自然资源确权登记涉及多种数据源，如遥感影像、地籍数据和基础测绘成果等，这些数据在融合过程中面临诸多难题。不同数据源在分辨率上存在差异，例如遥感影像可能具有较高的空间分辨率，而一些地籍数据的分辨率相对较低，这导致在数据整合时难以准确匹配细节信息^[9]。坐标系的不一致也是一个关键问题，各数据可能采用不同的坐标系，使得在统一空间参考下进行数据融合变得复杂。此外，数据的现势性不同，新获取的遥感影像可能反映当前的实际情况，而部分地籍数据可能由于更新不及时，与现状存在偏差，影响了数据融合的准确性和可靠性。

（二）复杂场景确权实现困境

在自然资源确权登记中，复杂场景面临诸多困境。山体交叠区存在空间建模难题，山体的不规则形状和相互交叠的复杂结构，使得准确构建其空间模型困难重重，进而影响权属界定的精确性^[4]。水域移动线方面，由于水位变化、水流冲刷等因素，水域边界处于动态变化中，难以确定固定的权属边界，给确权登记带来极大挑战。地下资源层的情况更为复杂，其隐蔽性导致探测和空间建模难度大，不同层位的资源权属关系错综复杂，难以清晰界定。这些复杂场景下的技术难点严重阻碍了自然资源的确权登记工作。

三、关键技术突破路径

（一）空间数据智能处理方法

1. 多源数据配准算法优化

针对多源数据配准算法优化，可考虑引入深度学习技术。深度学习具有强大的特征学习和模式识别能力，能够自动提取数据中的关键特征。例如，通过构建卷积神经网络（CNN）模型，对多源数据进行特征提取和匹配。CNN可以学习到不同数据源之间的潜在关联和相似性模式，从而提高配准的准确性和效率。同时，结合空间约束和先验知识，进一步优化配准结果。利用地理空间信息的固有特性，如地形地貌、地物分布等，作为约束条件，引导算法更好地进行数据配准。此外，还可以借鉴多模态融合的思想，将不同类型的数据进行融合处理，充分利用各种数据的优势，提高配准算法在复杂环境下的适应性和鲁棒性^[5]。

2. 动态要素提取技术

动态要素提取技术是空间数据智能处理的关键。融合时序InSAR与高光谱分析构建自然资源变化检测体系，可有效提取动态要素。InSAR技术能监测地表微小变形，获取地形变化信息^[6]。通过多时相数据处理，分析不同时间点的干涉相位差，识别地表的动态变化区域。高光谱分析则利用其丰富的光谱信息，区分不同地物类型及其状态变化。将两者结合，可充分发挥各自优势，提高动态要素提取的准确性和完整性。例如，在监测森林资源动态变化时，InSAR可检测树木生长引起的地表微小起伏，高光谱分析可识别树种种类和健康状况变化，从而实现对森林资源动态要素的全面提取。

（二）三维确权登记技术创新

1. 立体界址点智能判定

复杂地形下的多维度界址点自动识别面临诸多挑战。传统方法难以适应三维空间的复杂性，需开发新算法。利用先进的测绘数据采集技术获取高精度地形数据作为基础^[7]。通过深度学习方法挖掘数据特征，构建能够识别不同地形地貌下的界址点模型。该模型需考虑地形的起伏、植被覆盖等多种干扰因素。同时，结合空间分析技术，对识别出的界址点进行空间位置关系的判定，确保其准确性和合理性。在此基础上，不断优化算法的参数和结构，提高其在复杂地形下的适应性和稳定性，实现高效准确的立体界址点智能判定。

2. 三维登记簿构建方法

基于BIM+GIS技术构建三维登记簿，需融合二者优势。BIM提供精确的建筑信息模型，GIS具备强大的空间分析能力。首先整合BIM中的三维建筑模型数据与GIS的地理空间数据，形成统一的三维空间数据框架^[8]。通过对产权体的空间特征进行分析，利用空间算法准确划分三维空间产权体。然后建立与之对应的数据库管理系统，实现对三维产权体数据的高效存储、查询和更新。同时，要考虑数据的兼容性和互操作性，确保不同来源的数据能够在三维登记簿中准确呈现和有效管理，为三维确权登记提供可靠的技术支撑。

四、实践应用验证

（一）山林资源确权实例研究

1. 混合产权界址定位

以某集体林权改革试点为例，研究混合产权界址定位。该区域山林资源丰富，产权情况复杂，包含集体与个人等多种混合形式。采用先进测绘技术进行界址定位，通过高精度GPS定位系统获取山林关键控制点坐标，结合无人机航空摄影测量获取高分辨率影像数据，为界址确定提供详细地形地貌信息。同时，利用地理信息系统（GIS）技术对获取的数据进行整合分析，准确划分不同产权主体的山林范围，解决了混合产权界址模糊的问题，提高了山林资源确权的准确性和科学性，为后续山林资源的合理开发利用与保护提供了可靠依据^[9]。

2. 生态空间交叉管理

在山林资源确权实例研究中，生态空间交叉管理面临诸多挑战。自然保护区与矿业权的空间关系协调便是其中关键问题。需综合考虑多方面因素，例如生态保护的重要性以及矿业开发的经济需求^[10]。一方面要确保生态环境不受破坏，维护自然保护区的完整性和生态功能；另一方面要合理规划矿业权范围，避免对生态敏感区域造成影响。这需要运用先进的测绘技术和地理信息系统，精确界定两者的空间范围，为合理的资源开发和生态保护提供科学依据，实现生态空间交叉管理的优化。

（二）水域资源登记模式探索

1. 岸线动态监测应用

岸线动态监测应用是水域资源登记模式探索中的重要环节。

通过先进的测绘技术和监测手段，能够实时获取岸线的动态变化信息。例如，利用卫星遥感技术可以大面积、周期性地监测岸线的位置移动和形态改变，其高分辨率影像能够清晰呈现岸线的细节特征。同时，结合无人机航测，可以对重点区域进行更精细的监测，获取更准确的岸线数据。这些动态监测数据对于水域资源登记具有关键意义，能够及时更新登记信息，确保登记的准确性和时效性，为水域资源的合理开发、利用和保护提供科学依据。

2. 水下地形测绘突破

多波束测深系统在水域权属界址划定中具有创新性应用。该系统通过发射和接收多个波束，能够获取高精度的水下地形数据。在水域资源登记中，其可清晰描绘出不同权属区域的边界。通过对水下地形的精确测绘，确定水底地貌特征，如山脉、沟壑等，这些特征可作为自然的权属界址标识。同时，多波束测深系统能有效克服传统测绘方法在水域环境中面临的诸多困难，如水流干扰、水体浑浊等问题，提高了界址划定的准确性和可靠性，为水域资源的确权登记提供了有力的技术支撑。

（三）系统集成应用成效

1. 登记效率提升分析

测绘技术在自然资源确权登记中的系统集成应用成效显著，尤其是在登记效率提升方面。通过新技术与传统方法的定量对比可知，在工作周期上，传统方法往往因测量手段局限、数据处理复杂等因素导致耗时较长。而新技术凭借其先进的测量设备和高效的数据处理算法，大大缩短了工作周期。例如，无人机测绘技术能快速获取大面积的地理信息数据，且精度较高。在精度指标方面，传统方法可能因人为误差和工具精度限制，难以满足高精

度要求。新技术则利用卫星定位系统、激光雷达等先进技术，有效提高了测量精度，从而提升了自然资源确权登记的准确性和效率。

2. 成本效益评估

构建包含设备投入、人力成本、维护费用的综合经济评价模型是评估测绘技术在自然资源确权登记中成本效益的关键。设备投入涵盖了高精度测量仪器、数据采集设备等的购置费用，其成本高低影响着整体投入。人力成本包括专业测绘人员的薪酬、培训费用等，专业人员的素质和数量决定了人力成本的规模。维护费用涉及设备的定期维护、软件的更新升级等方面的支出。通过综合考虑这些因素，建立的经济评价模型能够准确评估测绘技术应用的成本效益，为合理配置资源、提高应用成效提供科学依据。

五、总结

测绘技术的创新对自然资源确权登记具有重要意义。在精度提升方面，先进的测绘技术能够更准确地确定资源边界和属性，减少误差。在流程优化上，它可提高工作效率，加速确权登记进程。建立空地一体化监测体系是未来发展的关键，通过整合空中遥感和地面监测技术，实现对自然资源的全方位动态监测，确保数据的及时性和准确性。同时，新型传感器集成与区块链存证技术的结合具有很大潜力。传感器能获取更丰富的数据，区块链则可保障数据的真实性和不可篡改，为确权登记提供更可靠的技术支撑，这将是后续研究的重要方向。

参考文献

[1] 赵静. 基于 GIS 的自然资源统一确权登记关键技术研究 [D]. 长江大学, 2022.
[2] 黄伊铃. 水资源确权登记制度研究 [D]. 重庆大学, 2021.
[3] 马泽宇. 基于渲染过程分析的网页页面资源依赖性测绘技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
[4] 兰琰茜. 夜光遥感技术在新冠肺炎疫情期间的应用研究 [D]. 湖北工业大学, 2023.
[5] 曾祥飞. RTK 测绘技术在定向运动地图制作中的应用效果评估 [D]. 四川师范大学, 2021.
[6] 卢振国. 测绘技术在自然资源确权登记工作中的应用探究 [J]. 砖瓦世界, 2021(15): 140, 142.
[7] 刘剑. 测绘技术在自然资源确权登记中的应用 [J]. 智能城市, 2024, 10(1): 59-61.
[8] 王福莲. 测绘技术在自然资源确权登记工作中的应用 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47(2): 60-61.
[9] 付红波. 自然资源确权水流登记单元调查重难点分析 [J]. 现代测绘, 2023, 46(2): 39-42.
[10] 吴松. 自然资源统一确权登记有关问题的思考 [J]. 安徽农学通报, 2022, 28(2): 145-146, 178.

通信传输施工质量控制策略研究： 多网融合需求下的政企客户视角

叶孝杰

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025060010

摘 要： 多网融合环境下，存在传输干扰、带宽分配等问题，政企客户有特殊要求。介绍了质量控制体系各环节要点，阐述多制式设备接口兼容性等难点，还涉及智能施工管理技术、质量数据采集验证机制、关联分析模型等质量控制策略及相关技术应用。

关 键 词： 多网融合；质量控制；政企客户

Research on Communication Transmission Construction Quality Control Strategy — From the Perspective of Government and Enterprise Customers under the Demand of Multi-network Integration

Ye Xiaojie

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： In the context of multi-network convergence, challenges such as transmission interference and bandwidth allocation persist, with government and enterprise clients having specific requirements. This paper outlines key aspects of the quality control system, discusses technical hurdles including interface compatibility for multi-system equipment, and explores quality control strategies and technologies such as intelligent construction management systems, quality data collection and validation mechanisms, and correlation analysis models.

Keywords： multi-network convergence; quality control; government and enterprise clients

引言

随着信息技术的飞速发展，多网融合已成为当前网络发展的重要趋势。自2015年国务院印发《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》以来，互联网与各行业的融合不断深入，多网融合环境下的通信传输质量控制面临着诸多挑战与机遇。多制式网络共存带来传输干扰、带宽动态分配、接口兼容性问题，同时政企客户对通信传输有特殊要求。在此背景下，研究政企客户视角下的通信传输施工质量控制策略具有重要意义，有助于提高施工质量，满足政企客户需求，推动多网融合的健康发展。

一、通信传输施工质量控制理论框架

（一）多网融合环境特征与质量需求

多网融合环境下，多种制式网络共存带来传输干扰问题，其干扰机制复杂多样。不同网络的信号频段、调制方式等差异可能导致相互干扰，影响通信传输质量^[1]。同时，带宽动态分配成为关键需求。政企客户业务多样，对带宽要求不同，需根据实际业务情况灵活分配，以满足不同应用场景下的数据传输需求。政企客户端到端的SLA保障标准至关重要，涵盖传输时延、丢包率、可用性等多个指标。传输时延需控制在一定范围内，确保实时业务的流畅性；丢包率要尽可能低，以保证数据完整性；可用性则

要满足政企客户的高可靠性要求，确保业务持续稳定运行。

（二）施工质量全生命周期管理模型

构建涵盖规划设计、设备选型、施工实施、测试验收、运维优化的闭环质量控制体系。规划设计阶段需充分考虑政企客户需求及多网融合环境，确保网络架构合理、技术选型先进可靠^[2]。设备选型要严格依据设计要求，注重设备质量、兼容性 & 可扩展性。施工实施过程中，严格把控施工工艺和操作规范，加强施工

人员培训与管理。测试验收阶段，采用科学的测试方法和标准，对通信传输系统的各项性能指标进行全面检测。运维优化阶段，建立实时监测机制，及时发现并解决问题，不断提升系统性能和质量，保障通信传输的稳定可靠。

二、多网融合场景施工质量痛点分析

（一）异构网络协同施工难点

多网融合场景下，5G、WiFi6、OTN等多制式设备接口兼容性是异构网络协同施工的一大难点。不同设备接口标准存在差异，可能导致连接不稳定或无法正常通信^[3]。物理层参数协调也面临挑战，如信号强度、频率、调制方式等参数需合理设置，以确保各网络在同一环境下稳定运行。链路冗余配置方面，要实现多网融合的高可靠性，需考虑不同网络链路的冗余设计，但这可能因网络架构和设备差异而变得复杂。这些技术冲突增加了施工难度和质量控制的复杂性，要求施工人员具备更全面的技术知识和丰富的实践经验，以保障异构网络协同施工的质量和效果。

（二）政企客户专线服务特殊要求

金融、政务类政企客户对专线服务有特殊要求，在业务隔离性方面，需确保不同业务间互不干扰，以保障数据安全和业务稳定运行^[4]。如金融交易数据与内部办公数据需严格隔离。在时延确定性上，对于实时性要求高的业务，如金融高频交易、政务应急指挥系统等，要求网络传输时延必须稳定在极低水平，以保证业务的准确性和及时性^[4]。故障自愈能力也是关键，一旦网络出现故障，需迅速恢复，减少对业务的影响。例如政务服务大厅的业务系统，故障自愈时间过长会导致公共服务中断，影响社会正常运转^[4]。这些特殊要求与传统网络服务存在矛盾，给多网融合场景下的施工质量控制带来挑战。

三、面向多网融合的质量控制策略

（一）智能施工管理技术体系

1. 基于 BIM 的数字化预施工仿真

在多网融合的质量控制策略中，智能施工管理技术体系的基于 BIM 的数字化预施工仿真至关重要。通过 BIM 可实现管线走向优化，精确规划管线的布局与走向，避免施工中的冲突与不合理设置^[5]。同时，能进行电磁环境模拟，提前了解不同网络设备运行时的电磁环境状况，为设备合理布局提供依据。此外，还可实现施工资源的精准调度，根据施工进度和需求，合理安排人力、物力等资源，提高施工效率和质量，确保在多网融合的通信传输施工中满足政企客户的高质量要求。

2. 智能工勘与自动化测试技术

集成便携式 OTDR、光谱分析仪等智能终端设备形成现场质量数据实时采集验证机制。通过这些智能终端设备可实时获取网络传输中的关键参数信息，如光纤链路的损耗、色散等^[6]。利用 OTDR 能精确测量光纤的长度、断点位置以及损耗分布情况，为施工质量评估提供准确依据。光谱分析仪则可对光信号的频谱特性进行分析，确保光信号符合多网融合的质量要求。这些智能终端设备的集成应用，不仅提高了数据采集的效率和准确性，还

能及时发现施工过程中的质量问题，以便采取相应的措施进行纠正，保障通信传输施工质量满足多网融合的高标准要求。

（二）动态质量优化机制

1. 多维度 KQI/KPI 关联分析模型

为满足多网融合下的质量控制需求，构建多维度 KQI/KPI 关联分析模型至关重要。其中，建立传输误码率、抖动时延与业务体验指标的数学映射关系是关键环节。通过精确的数学模型，能够量化不同网络参数对业务质量的影响^[7]。传输误码率的变化可能直接影响数据传输的准确性，进而影响业务的可用性和用户体验。抖动时延则与实时性业务紧密相关，如视频通话、在线游戏等，过大的抖动时延会导致画面卡顿、操作延迟等问题。通过深入分析这些参数与业务体验指标之间的映射关系，可以更准确地评估网络质量，为动态质量优化机制提供有力依据，实现对通信传输施工质量的有效控制。

2. 软件定义网络 (SDN) 动态调优

随着多网融合的发展，软件定义网络 (SDN) 在质量控制方面的动态调优作用愈发重要。基于集中控制器，可设计 QoS 策略动态加载与带宽弹性调整算法^[8]。通过集中控制器对网络全局信息的掌握，能够实时感知网络的负载情况和业务需求。当政企客户的业务流量发生变化时，集中控制器可动态加载相应的 QoS 策略，确保关键业务的服务质量。同时，根据网络的实时负载，对带宽进行弹性调整，避免资源浪费或不足。这种动态调优机制能够有效提升多网融合环境下政企客户的网络体验，保障通信传输施工质量符合多网融合的复杂需求。

四、信息系统集成运维实践

（一）智慧运维平台架构设计

1. 多厂商网管系统北向集成

为满足多厂商网管系统北向集成需求，实现告警关联分析，需制定跨厂商 CORBA/SNMP 协议转换标准。在通信传输施工质量控制中，尤其是多网融合的政企客户视角下，不同厂商设备的网管系统存在协议差异，这给集成运维带来挑战^[9]。通过制定统一的 CORBA/SNMP 协议转换标准，能够使不同厂商的设备在智慧运维平台上实现有效的告警关联分析。该标准需涵盖协议的各个层面，包括数据格式、消息传递机制等，以确保不同厂商设备的网管信息能够准确转换和集成，从而提升运维效率，保障通信传输施工质量，满足政企客户在多网融合环境下的业务需求。

2. 大数据可视化决策支持

大数据可视化决策支持部分旨在为运维人员提供直观、有效的决策依据。通过构建可视化驾驶舱，实现传输质量劣化趋势预测与根因定位的可视化呈现^[10]。该驾驶舱整合多源数据，利用大数据分析技术挖掘数据中的潜在规律。对于传输质量劣化趋势，通过对历史数据和实时监测数据的分析，建立预测模型，以图表等形式展示未来可能出现的劣化情况。在根因定位方面，借助关联分析等算法，将可能影响传输质量的各种因素进行关联，快速

准确地找到问题根源，并在可视化界面上清晰呈现，帮助运维人员及时采取措施，保障通信传输施工质量，满足政企客户在多网融合需求下对高质量通信的要求。

（二）典型政企客户应用案例

1. 金融行业多活数据中心组网

在金融行业多活数据中心组网中，量子加密传输与智能倒换技术具有重要应用。量子加密传输技术凭借其高安全性，为金融数据的传输提供了可靠保障，能有效防止数据在传输过程中被窃取或篡改。智能倒换技术则可在网络出现故障时，快速实现链路的切换，确保金融业务的连续性。例如，在金融容灾系统中，当主链路发生故障，智能倒换技术可在极短时间内将数据传输切换至备用链路，同时量子加密传输技术保障备用链路数据传输的安全，从而使金融系统能够稳定运行，避免因网络故障导致的业务中断和数据丢失，极大地提高了金融行业的抗风险能力。

2. 智慧城市物联网专网建设

在智慧城市物联网专网建设中，针对政企客户应用案例，需考虑信息系统集成运维实践。在 NB-IoT/eMTC 多模接入场景下，保障低功耗传输质量至关重要。要从网络架构设计入手，优化接入方式，确保设备在多模环境下能稳定连接。同时，对传输协议进行精细调整，减少不必要的功耗。通过智能算法，动态分配资源，使设备在不同工作模式下都能高效运行。还要加强对设备的监测与管理，及时发现并解决可能出现的传输质量问题。利用先进的传感器技术和数据分析手段，对传输环境进行实时评估，不断优化传输策略，以满足智慧城市物联网对低功耗和高质量传输的要求。

（三）全流程质量评估体系

1. 面向 SLA 的 KPI 考核指标设计

在信息系统集成运维实践的全流程质量评估体系中，面向 SLA 的 KPI 考核指标设计至关重要。对于政企客户视角下的通信传输施工质量控制，应制定包含业务可用率、故障恢复时长等维

度的量化评估标准。业务可用率可衡量系统正常运行时间占总时间的比例，直接反映服务对客户可用性。故障恢复时长则关乎系统出现故障后恢复正常的时间，这一指标影响客户业务的连续性。通过明确这些维度的量化标准，能精准评估运维质量，确保满足政企客户在多网融合需求下对通信传输施工质量的要求，保障信息系统集成运维的高效稳定。

2. 客户感知质量 (QoE) 评估模型

构建基于模糊综合评价法的端到端业务体验评估框架。首先确定评价指标体系，涵盖网络性能、业务功能、服务质量等多方面。例如网络性能包括带宽、时延、丢包率等指标，业务功能包含业务完整性、易用性等，服务质量涉及响应时间、解决率等。接着确定各指标的权重，通过专家打分、层次分析法等确定不同指标对整体体验的重要性程度。然后对各指标进行模糊评价，建立从指标值到评价等级的模糊映射关系。最后综合各指标的评价结果，得到端到端业务体验的综合评价结果，为通信传输施工质量控制提供决策依据，以更好满足政企客户在多网融合需求下的业务体验要求。

五、总结

在多网融合需求下，从政企客户视角对通信传输施工质量控制策略进行研究具有重要意义。通过对相关内容的探讨，凝练出了多网融合场景下的施工质量控制方法论。这一方法论为施工过程提供了科学的指导，有助于提高施工质量，满足政企客户对通信传输的高要求。同时，展望了人工智能与数字孪生技术在通信基础设施智能运维中的发展前景。这些技术的应用将为通信传输施工质量控制带来新的机遇和挑战，有望实现更加高效、精准的运维管理，进一步提升通信传输的稳定性和可靠性，为政企客户提供更好的服务。

参考文献

- [1] 叶印泽. 电信 PY 分公司政企客户营销策略优化研究 [D]. 浙江理工大学, 2021.
- [2] 高源. WHDX 政企客户服务流程优化研究 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [3] 王迪. 中国联通吉林市分公司政企客户网络服务质量提升策略研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [4] 王晓星. NN 电信政企客户关系管理优化研究 [D]. 广西大学, 2023.
- [5] 鹿麒. T 公司政企客户 DICT 业务营销策略优化研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2023.
- [6] 孟辉. 智慧公路多网融合传输体系研究 [J]. 通讯世界, 2021, 28(6): 159-160.
- [7] 荣雁飞. 通信工程技术在多网融合环境下的应用研究 [J]. 广播电视网络, 2021, 28(6): 105-107.
- [8] 周翔. 多网融合应用于通信工程的研究 [J]. 通信电源技术, 2021, 38(7): 92-94.
- [9] 狄晓波. 多网融合的通信工程技术应用 [J]. 长江信息通信, 2021, 34(8): 127-129.
- [10] 文艳, 刘华宾. 通信工程技术在多网融合环境下的应用分析 [J]. 通信电源技术, 2021, 38(24): 136-138.

电台通信系统中射频干扰抑制与滤波器设计研究

李国强

天津七一二通信广播股份有限公司，天津 300462

DOI:10.61369/ME.2025060041

摘 要： 电台通信系统的射频干扰抑制是确保通信质量和系统稳定性的重要任务。本研究针对射频干扰问题，提出了基于滤波器设计的抑制策略，分析了常见射频干扰源及其对系统的影响。通过对射频滤波器的设计原理与优化方法进行探讨，提出了一些具有实际应用价值的设计方案，以降低射频干扰对电台通信系统性能的影响，进一步提高系统的抗干扰能力。研究表明，合理的滤波器设计能够显著提高电台通信系统的性能和可靠性。

关 键 词： 射频干扰；滤波器设计；电台通信；抑制策略；通信系统

Research on RF Interference Suppression and Filter Design in Radio Communication Systems

Li Guoqiang

Tianjin 712 Communication & Broadcasting Co., Ltd., Tianjin 300462

Abstract： RF interference suppression in radio communication systems is a crucial task for ensuring communication quality and system stability. This study addresses the issue of RF interference by proposing suppression strategies based on filter design and analyzing common RF interference sources and their impact on the system. Through an exploration of the design principles and optimization methods of RF filters, several practical design schemes are proposed to mitigate the impact of RF interference on the performance of radio communication systems, thereby further enhancing the system's anti-interference capability. The research indicates that reasonable filter design can significantly improve the performance and reliability of radio communication systems.

Keywords： RF interference; filter design; radio communication; suppression strategies; communication systems

引言

射频干扰（RFI）是电台通信系统中常见且影响通信质量的关键因素之一。随着现代通信技术的发展，尤其是在无线通信频段的繁忙程度不断增加，射频干扰的严重性愈加显现。为了确保通信系统的稳定运行，必须采取有效的干扰抑制措施。射频滤波器作为一种广泛应用于干扰抑制的设备，其设计与优化成为了研究的热点。本文通过对射频干扰抑制技术及滤波器设计的研究，探讨了如何在电台通信系统中有效解决射频干扰问题，以提高通信系统的整体性能。

一、射频干扰的来源与影响

（一）射频干扰的类型

射频干扰（RFI）指的是不需要的电磁信号，它们会在频率上与电台通信系统的工作频段重叠，影响通信质量。根据干扰的来源和性质，射频干扰可以分为几种类型。首先，窄带干扰是指频率带宽较小的信号，其干扰主要集中在某个特定频段，这类干扰通常来自通信设备的非线性工作状态。其次，宽带干扰是指频率带宽较大的干扰信号，通常来自于周围环境中的多个源，如无线电设备、电力线传输等^[1]。还有一种常见的干扰是跨频干扰，

即由于设备频率的漂移或不稳定，导致干扰信号在不同频段间传播。最后，脉冲干扰是一种周期性或非周期性的干扰信号，通常由雷达、脉冲无线电设备等产生，特点是信号强度高，持续时间短。

（二）干扰对通信系统性能的影响

射频干扰会对电台通信系统的性能产生严重影响。首先，干扰信号会导致通信系统的信噪比（SNR）下降，从而降低系统的接收灵敏度。信噪比的降低直接影响到信息的解码能力，增加了误码率。例如，当干扰信号功率超过系统接收信号的功率时，系统将无法正确接收有效信息。其次，射频干扰还会影响系统的频

谱利用率，使得频谱资源的分配更加紧张，进一步加剧了干扰的传递。在高频谱资源环境中，干扰的存在可能导致频道的频谱拥挤，从而降低通信效率。最后，严重的射频干扰可能会导致系统的信号丢失，使得通信连接暂时中断，影响系统的稳定性和可靠性^[2]。

射频干扰对电台通信系统的影响可以通过信噪比（SNR）公式来表示：

$$SNR=\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}+P_{\text{interference}}}$$

其中， P_{signal} 为信号功率， P_{noise} 为噪声功率， $P_{\text{interference}}$ 为干扰功率。随着 $P_{\text{interference}}$ 的增加，SNR 值会降低，系统的抗干扰能力和通信质量随之下降。

（三）干扰源的识别与分析

识别和分析射频干扰源是解决干扰问题的关键步骤。首先，通过使用频谱分析仪，可以实时监测不同频段的信号强度，识别干扰源所在的频率范围。频谱分析仪能够显示频谱中的异常信号，如突出的脉冲信号或持续的宽带信号，帮助工程师定位干扰源。其次，使用时域分析技术，结合时间轴上的信号变化，可以识别脉冲干扰和周期性干扰的特征，进一步判断干扰源的性质。对于复杂的环境干扰，可以采用方向性天线或多天线阵列进行干扰源的方向定位，进而确定干扰源的具体位置。通过这种方式，不仅可以识别干扰源，还能对其干扰强度和影响范围进行量化，为后续的干扰抑制设计提供数据支持。

射频干扰源的准确识别和分析是采取有效抑制措施的前提，对于提高电台通信系统的抗干扰能力至关重要^[3]。

二、射频滤波器的基本原理

（一）滤波器的工作原理

射频滤波器是一种用于选择性地通过或阻止特定频率信号的设备。其基本原理是通过控制信号的频率响应，使其仅允许特定频率范围内的信号通过，抑制其他频率成分。射频滤波器的工作依赖于电感、电容等无源元件的组合，通常通过这些元件的阻抗特性来调节信号的传输。滤波器的设计关键在于其截止频率，即信号频率达到或超过此值时，信号的衰减显著增加。常见的滤波器类型包括低通、高通、带通和带阻滤波器。

在射频系统中，滤波器的作用是根据信号的频率特性进行过滤，以减少不需要的干扰信号。例如，当信号频率低于某一特定值时，低通滤波器将允许这些低频信号通过，而将高频信号衰减。对于高频干扰，带阻滤波器可以在干扰信号的频段上抑制其通过，从而确保通信信号的清晰传输^[4]。

（二）滤波器的分类与特点

射频滤波器可以根据其工作特性分为几种主要类型：低通滤波器（LPF）、高通滤波器（HPF）、带通滤波器（BPF）和带阻滤

波器（BSF）。它们的工作原理和应用场景各不相同，如表 1 所示。

表 1 各种射频滤波器的工作特性

滤波器类型	工作原理	应用场景
低通滤波器 (LPF)	允许低频信号通过，抑制高频信号	用于去除高频噪声或干扰，常见于信号接收端
高通滤波器 (HPF)	允许高频信号通过，抑制低频信号	用于抑制低频干扰，广泛用于无线通信系统
带通滤波器 (BPF)	仅允许某一频带内的信号通过，其它信号被抑制	用于通信信号的选择性通过，广泛用于信号分析与处理
带阻滤波器 (BSF)	阻止某一频带内的信号通过	用于消除特定频率范围的干扰信号，常见于无线电通信

每种滤波器都有其独特的设计特点。低通滤波器在允许低频信号通过的同时，能有效减少高频信号的传输，这使得其在电台接收系统中应用广泛。高通滤波器则用于隔离低频噪声，带通滤波器和带阻滤波器通常用于针对特定频段的干扰抑制和信号选择。

（三）滤波器的频率响应设计

滤波器的频率响应是指其对不同频率信号的衰减或增益特性。频率响应的设计决定了滤波器的工作效果，通常通过选择合适的截止频率和阻带衰减来优化其性能。滤波器的频率响应可以通过插值法或最小二乘法进行精确计算，确保滤波器能够精确地衰减不需要的频率，并最大限度地保留有效信号。

例如，低通滤波器的频率响应公式通常为：

$$H(f)=\frac{1}{\sqrt{1+(f/f_c)^{2n}}}$$

其中， $H(f)$ 是滤波器的增益， f 是信号频率， f_c 是截止频率， n 是滤波器的阶数。随着频率 f 增加，滤波器的增益逐渐衰减。当信号频率超过截止频率 f_c 时，衰减变得更加显著。设计时，需要确保滤波器的频率响应平滑过渡，以避免信号失真。

滤波器的频率响应直接影响其对干扰信号的抑制效果。设计过程中，通常根据需要进行合适的通带增益和阻带衰减，并优化滤波器的阶数，以获得理想的干扰抑制效果^[5]。

三、射频干扰抑制技术

（一）干扰源的抑制方法

射频干扰源的抑制方法多种多样，针对不同的干扰源，可以采取不同的技术手段来有效减少或消除其影响。首先，屏蔽技术是防止射频干扰最直接的方法。通过将干扰源与敏感设备隔离，使用金属屏蔽罩或屏蔽材料来封闭干扰信号的传播路径，有效地减少了电磁辐射。屏蔽技术在无线通信设备中应用广泛，尤其是在高频信号的传输中，屏蔽效果对于提高系统的抗干扰能力至关重要。其次，接地技术是另一种常见的抑制射频干扰的方法。通过建立合适的接地系统，降低了电气设备之间的干扰耦合，尤其是对于高频电流的流动，合理的接地设计能够显著减少电磁干扰^[6]。第三，滤波器的应用也是常见的干扰源抑制方法。通过在

信号路径中加入低通、高通或带通滤波器，能够有效地隔离不需要的频率，阻止高频干扰信号进入通信系统。对于不同频段的干扰，选择合适的滤波器类型和参数设定，可以大大提高系统的信噪比，从而改善信号的质量。

（二）滤波器在干扰抑制中的应用

滤波器在射频干扰抑制中发挥着至关重要的作用。它们通过选择性地过滤掉不需要的频率成分，允许所需的信号通过，从而有效降低了干扰信号对系统的影响。首先，滤波器广泛应用于无线电接收设备中，以去除与接收信号频率接近的干扰信号。例如，在无线电通信中，带通滤波器通常用于信号接收端，它能够允许特定频带内的信号通过，同时抑制其它频段的干扰。在卫星通信和雷达系统中，带阻滤波器被广泛用于抑制特定频段的干扰，如 GPS 干扰或雷达反射信号^[7]。其次，射频滤波器还被应用于无线网络设备中，通过精确设计滤波器的带宽和衰减特性，可以有效减少周围设备的无线电干扰，确保网络通信的稳定性和速度。例如，在 LTE 通信系统中，带通滤波器可以将目标频段的信号增强，同时有效降低周围频道的干扰。此外，滤波器还广泛应用于电源系统中，减少由电源引起的噪声干扰，保护设备的正常运行。

（三）滤波器设计中的挑战与解决方案

射频滤波器的设计面临许多挑战，主要体现在设计复杂性、频率响应的优化以及系统集成等方面。首先，滤波器的设计需要确保其频率响应的精确性。在高频信号处理的过程中，滤波器的带宽、衰减特性和插入损耗等参数必须精确匹配系统需求。频率响应的精确控制要求设计师在选择电容、电感和其它元件时，必须进行精密计算和优化。例如，低通滤波器设计时，如果选择不当，会导致信号失真或无法有效隔离高频干扰。针对这个问题，现代设计方法采用了计算机辅助设计（CAD）软件来优化滤波器的频率响应，使其更加符合实际应用需求。其次，尺寸和集成度是设计中的另一大挑战。射频滤波器通常需要在有限的空间内完成复杂的功能，特别是在移动通信设备和嵌入式系统中，滤波器的尺寸和重量限制了其设计自由度。因此，设计师需要平衡性能和体积，采用更高效的设计方法，如集成电路（IC）技术，将多个功能模块集成到一个小型芯片中。最后，温度和环境因素对滤波器的性能也有重要影响。射频滤波器在不同的工作环境下会受到温度、湿度等因素的影响，导致其性能波动。为了应对这一挑战，设计时必须考虑到滤波器的环境适应性，选择适当的材料，并进行热稳定性测试，确保滤波器在各种环境下的稳定运行。通过这些设计和技术的优化，射频滤波器能够更好地适应现代通信系统的需求，提高系统的抗干扰能力^[8]。

四、滤波器设计优化策略

（一）滤波器设计的基本要求

射频滤波器设计的基本要求包括频率选择性、插入损耗、带

宽、衰减特性、尺寸限制及稳定性等多个方面。首先，频率选择性是滤波器设计的核心要求之一，设计时必须确保滤波器能够精确地分离目标信号和干扰信号。频率选择性需要滤波器在通带内具有较小的插入损耗，而在阻带内能够实现足够的衰减。例如，对于低通滤波器，其截止频率应明确界定，确保高于该频率的信号能够有效衰减，防止干扰信号进入系统。其次，插入损耗指滤波器对通过信号的衰减，插入损耗越小，信号的质量越好。因此，滤波器设计时需要尽量减小插入损耗，保持信号的完整性。除了频率选择性和插入损耗外，带宽和衰减特性也是设计中的关键要求。带宽决定了信号通过的频率范围，而衰减特性决定了滤波器对阻带信号的抑制能力。此外，滤波器的尺寸和重量也是考虑因素，尤其在便携设备中，滤波器需要尽量小型化以适应设备的尺寸要求。最后，稳定性是滤波器的另一个重要要求。滤波器必须在不同环境条件下（如温度变化、电压波动）保持其性能稳定，以确保长期可靠运行^[9]。

（二）滤波器性能优化的关键技术

滤波器的性能优化需要依靠一系列技术手段来提高其工作效率和稳定性。首先，多层次结构设计可以显著改善滤波器的性能。采用多层次设计方法可以通过不同级别的滤波网络，提高其在通带和阻带之间的分离度。这种方法能够有效减少通带和阻带之间的过渡区间，从而提高频率响应的精确度。其次，并联和串联电路优化是常用的性能优化技术。通过将电感和电容进行串联或并联组合，可以实现特定频率范围内的滤波效果，并通过调整元件的数值来优化滤波器的频率响应。此外，采用微带线或波导结构进行滤波器设计也是常见的优化方法，这类结构能够有效减少体积，提高设计的集成度，并在高频环境下保持较低的损耗。自动优化算法也在滤波器设计中逐渐应用，通过计算机辅助设计（CAD）工具，设计师能够对滤波器的各项参数进行系统优化，从而找到最佳设计方案，提高其工作性能。最后，抗干扰能力的增强也是优化滤波器性能的关键。通过设计时对滤波器抗电磁干扰（EMI）的考虑，能够在保持信号质量的同时，有效防止外界干扰的影响^[10]。

（三）滤波器在电台通信系统中的应用

在电台通信系统中，射频滤波器发挥着重要作用，主要用于选择性地通过信号并抑制不需要的干扰。在无线通信系统中，带通滤波器通常用于从宽带信号中提取目标信号。例如，在广播和卫星通信中，带通滤波器能够有效地从接收到的宽频带信号中选择特定频段的通信信号，防止其它频段的噪声和干扰信号影响信号的传输质量。在基站设备中，带阻滤波器常常用于抑制特定频段的干扰信号，例如去除相邻频段内的干扰，确保无线网络的稳定运行。在电台接收系统中，低通滤波器被广泛应用于去除高频噪声和干扰，保证通信质量。在一些高频雷达和卫星通信系统中，带阻滤波器也能够抑制来自不同信号源的干扰，确保系统的有效接收。此外，随着技术的发展，集成滤波器也被广泛应用于

电台通信设备中。通过集成多个滤波器模块，这些设备能够在有限的空间内实现更强的干扰抑制功能，提高整个系统的频谱利用效率。

五、结语

通过对射频干扰抑制技术和滤波器设计的深入研究，本文揭示了射频干扰对电台通信系统性能的影响及其抑制策略。射频滤

波器在通信系统中的应用尤为重要，能够有效减少干扰，提高信号质量。滤波器设计优化技术，特别是在频率响应、性能优化和尺寸集成方面的进展，为通信系统的稳定运行提供了坚实的保障。

参考文献

[1] 苏本征. 海岸电台通信系统架构研究 [J]. 天津航海, 2018(03): 56–58.

[2] 普丽. 论短波电台在人防指挥通信系统中的应用 [J]. 长江信息通信, 2022, 35(03): 233–235.

[3] 肖刚. 空管系统中地空通信电台 VOIP 多点接入功能测试方案解析 [J]. 电子测试, 2019(19): 69–71. DOI: 10.16520/j.cnki.1000–8519.2019.19.026.

[4] 梁拥军. 短波电台在人防机动通信系统中的应用 [J]. 数字通信世界, 2019(12): 192.

[5] 甘露. 短波电台在人防机动通信系统中的作用研究 [J]. 无线互联科技, 2019, 16(09): 10–11.

[6] 夏志飞. 短波电台在人防机动通信系统中的作用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2018, 8(13): 121–122. DOI: 10.16525/j.cnki.14–1362/n.2018.13.51.

[7] 刘萍. 短波通信电台在民防通信系统中的作用 [J]. 信息记录材料, 2017, 18(07): 81–82. DOI: 10.16009/j.cnki.cn13–1295/tq.2017.07.048.

[8] 牟健, 何波贤, 岳明, 王岩. 基于 SIP 协议的模拟电台语音通信系统设计 [J]. 电子产品世界, 2017, 24(01): 56–58.

[9] 郭凯丰. 短波数传电台通信系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2017.

[10] 李国建, 张海勇. 短波跳频电台通信对抗效能研究 [J]. 舰船科学技术, 2005(06): 75–78.

浅析通信大数据资源价值化运营

廖海明

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060015

摘要： 阐述5G/6G通信大数据特征及价值化运营挑战，介绍多维度评估框架，包括数据资产估值、QoS和EEI，还涉及多种技术如非正交多址接入、动态接入算法等优化方法，通过案例展示协同优化系统价值，构建技术体系并提出未来方向。

关键词： 5G/6G；通信大数据；价值化运营

Analysis of the Commercialization - Oriented Operation of Communication Big Data Resources

Liao Haiming

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper expounds on the characteristics of 5G/6G communication big data and the challenges of its commercialization - oriented operation. It introduces a multi - dimensional evaluation framework, including data asset valuation, QoS (Quality of Service) and EEI (Energy Efficiency Index). It also covers optimization methods of various technologies such as non - orthogonal multiple access and dynamic access algorithms. Through case studies, it demonstrates the value of the collaborative optimization system, constructs a technical system and proposes future directions.

Keywords： 5G/6G; communication big data; commercialization - oriented operation

引言

随着通信技术的飞速发展，5G/6G环境下通信大数据呈现出多源异构、实时性强、规模庞大等特点（工业和信息化部发布《5G应用“扬帆”行动计划（2021-2023年）》强调推动5G技术发展及应用）。然而，其在价值化运营过程中面临数据孤岛、隐私安全、计算能耗等诸多挑战。针对这些问题，本研究构建包含多维度评估框架，论证相关技术关联，设计多种算法及模型，包括动态接入算法、采样机制、神经网络模型等，旨在实现通信大数据资源的高效价值转化，提升频谱与能源效率，突破商业价值，为6G时代奠定基础。

一、通信大数据资源价值化运营的理论框架

（一）通信大数据资源特征与挑战

5G/6G环境下通信大数据呈现出多源异构性，数据来源于多种设备和系统，结构复杂多样^[1]。其实时性特征明显，大量数据需快速处理以满足应用需求。同时具备规模性，数据量庞大。然而，通信大数据在价值化运营过程中面临诸多挑战。数据孤岛问题严重，不同部门和系统间的数据难以共享和整合，阻碍了数据价值的挖掘。隐私安全问题至关重要，数据涉及用户大量隐私信息，一旦泄露将造成严重后果。此外，计算能耗也是一大瓶颈，大规模数据的处理和分析需要消耗大量能源，增加运营成本。

（二）价值化运营的评估体系构建

建立包含数据资产估值模型、服务质量指标(QoS)和能源效率指标(EEI)的多维度评估框架。数据资产估值模型用于衡量通信大数据的潜在经济价值^[2]。通过对数据的完整性、准确性、时效性等多方面进行量化分析，确定其在市场中的合理价值。服务质量

指标(QoS)关注通信服务的性能表现，如传输速率、延迟、丢包率等，确保大数据的传输和使用过程符合用户需求。能源效率指标(EEI)则考虑能源消耗与数据处理效率之间的关系，促使运营过程在满足数据需求的同时实现节能减排。同时，论证非正交多址接入与低功耗优化的内在关联，从技术层面为评估体系提供支撑，进一步完善价值化运营的评估体系构建。

二、非正交多址接入技术的数据承载优化

（一）NOMA的频谱效率增强机制

功率域非正交传输在密集连接场景下，串行干扰消除技术至关重要。通过该技术可有效处理干扰问题，提升系统性能。同时构建用户分群与功率分配联合优化模型，能够更合理地分配资源。用户分群可依据不同用户的需求、信道条件等因素进行，以实现差异化服务。功率分配则要综合考虑各用户群的优先级、信道质量等，确保功率的高效利用。通过联合优化这两个方面，能

够提高频谱效率，更好地满足通信大数据资源价值化运营的需求，增强 NOMA 在频谱利用方面的优势^[3]。

（二）物联网场景下的接入控制策略

为解决海量物联网设备接入时的信令风暴问题并降低控制面资源开销，设计基于 Q-learning 的动态接入算法。该算法通过学习物联网设备的接入模式和网络状态，自适应地调整接入策略。在物联网场景下，设备数量庞大且接入行为复杂，传统的接入控制策略难以满足高效接入和资源优化的需求。基于 Q-learning 的算法能够实时感知网络环境变化，如网络负载、干扰情况等，根据这些信息动态地决定设备的接入时机和方式，避免大量设备同时发起接入请求导致的信令拥塞，从而提高接入效率，优化控制面资源的使用，为非正交多址接入技术在物联网中的应用提供更为有效的接入控制策略^[4]。

三、物联网低功耗优化的数据处理机制

（一）能耗敏感型数据采集技术

1. 自适应采样频率控制

基于数据价值密度的动态采样机制是一种有效的自适应采样频率控制方法。该机制考虑到不同数据的价值密度存在差异，对于价值密度高的数据，采用较高的采样频率以确保数据的准确性和完整性；而对于价值密度低的数据，则适当降低采样频率，从而减少不必要的能耗。卡尔曼滤波在其中起到了关键作用，它能够对采集到的数据进行实时处理和优化，在保证监测精度的同时，有效地降低了因频繁采样带来的能耗。通过这种方式，实现了监测精度与能耗的平衡，为物联网低功耗优化的数据处理提供了一种可行的技术手段^[5]。

2. 休眠调度协同优化

构建马尔可夫决策过程模型是实现休眠调度协同优化的关键。该模型可综合考虑设备的多种状态及转移概率，准确把握设备休眠周期与数据有效期之间的关系^[6]。通过对设备能耗模式以及数据产生和使用规律的分析，利用马尔可夫决策过程的动态规划特性，找到最优的休眠策略。这不仅能有效降低设备的能耗，还能确保在数据有效期内完成必要的数据采集和传输。同时，模型可根据环境和业务需求的变化不断调整优化，以适应复杂多变的物联网应用场景，提升整个系统的能效和性能。

（二）边缘计算驱动的数据处理

1. 分层特征提取架构

设计轻量级神经网络模型，在边缘节点实现数据特征的层次化提炼与压缩。通过这种方式，可有效利用边缘计算的优势，减少数据传输量，降低功耗。该模型能够对原始数据进行初步处理，提取出关键特征，这些特征具有不同的层次和抽象程度。高层次特征能够概括数据的主要信息，低层次特征则保留了更多细节。在这个过程中，数据被逐步压缩，同时重要信息得以保留，为后续的分析 and 决策提供了有力支持。这种分层特征提取架构符合物联网低功耗优化的需求，提高了数据处理效率和质量，是实现物联网可持续发展的重要手段之一^[7]。

2. 计算任务迁移策略

建立能耗-时延联合优化函数，动态决策本地处理与云端卸载的边界条件是计算任务迁移策略的关键。通过综合考虑能耗和时延因素，能够更合理地分配计算任务。能耗方面，需分析本地处理和云端卸载各自的能耗模型，找到能耗最优的处理方式^[8]。时延方面，要明确不同任务在本地和云端处理所产生的时延差异，以满足实时性要求较高的任务需求。根据这两个关键因素构建联合优化函数，从而确定在何种情况下应选择本地处理，何种情况下应将任务卸载至云端，实现计算任务的高效迁移，达到物联网低功耗优化的目的。

四、协同优化系统的价值实现路径

（一）跨域资源联合调度

1. 频谱-功率-计算三维映射

构建混合整数非线性规划模型，对无线资源与计算资源进行综合考量。通过频谱-功率-计算三维映射，精准把握各资源要素之间的关联与相互影响^[9]。在跨域资源联合调度过程中，依据此模型实现全局最优配置。这种配置方式能够充分挖掘通信大数据资源的潜在价值，提高资源利用效率，减少资源浪费，为通信大数据资源价值化运营提供有力支撑，促进通信行业的可持续发展。

2. 时变信道自适应机制

在移动场景中，信道质量波动是影响通信效果的关键因素。开发基于深度强化学习的动态调整算法可有效应对这一问题。该算法通过对大量通信数据的学习和分析，能够实时感知信道质量的变化，并自适应地调整通信参数，如功率、调制方式等^[10]。它利用深度神经网络强大的特征提取能力，从复杂的信道环境中提取关键特征，为决策提供依据。同时，强化学习机制通过不断试错和奖励反馈，使算法能够逐渐优化调整策略，以达到最佳的通信性能。这种基于深度强化学习的动态调整算法，在跨域资源联合调度的协同优化系统中具有重要价值，是实现时变信道自适应机制的关键技术手段。

（二）价值转化商业模式

1. 数据服务分级定价

设计基于数据新鲜度、完整度和隐私级别的多维定价体系，从数据新鲜度来看，越新的数据往往更能反映当下的实际情况，对市场动态把握、实时决策等具有更高价值，可根据其时效性设定不同价格层级。数据完整度方面，完整的数据能提供更全面准确的信息，对于深入分析和精准预测至关重要，完整度高的应比低的价格更高。隐私级别也是关键因素，涉及较高隐私的数据在使用和保护上有更严格要求，其定价也应体现这种特殊性，综合这些维度实现数据服务分级定价，从而优化协同优化系统的价值转化商业模式。

2. 能效合约交易机制

建立区块链赋能的智能合约平台，旨在实现节能效益的可信量化与交易。通过区块链技术的不可篡改和去中心化特性，确保

节能效益数据的真实性和可靠性。智能合约则自动执行节能效益的量化和交易规则，减少人为干预，提高交易效率。在这个平台上，各方参与者的节能贡献能够被准确记录和评估，根据预设的规则进行公平的效益分配和交易。这种机制激励了各方积极参与节能行动，促进了能源的高效利用，同时也为通信大数据资源价值化运营提供了一种创新的商业模式，实现了从节能效益到经济价值的转化。

（三）典型应用场景验证

1. 智慧城市物联网案例

在智慧城市物联网的环境监测网络案例中，协同优化系统展现出显著价值。通过对环境监测数据的高效整合与分析，系统实现了能效的大幅提升，达到35%。这得益于系统对各类传感器数据的精准采集和优化处理，减少了不必要的能源消耗。同时，数据价值密度增加了40%，系统能够从海量的环境监测数据中挖掘出更有价值的信息，如精准的污染源头定位、环境变化趋势预测等。这些成果为城市环境管理提供了有力支持，使得相关部门能够更及时、准确地采取措施应对环境问题，提升城市的生态质量和居民的生活品质。

2. 工业互联网实施分析

在工业互联网实施中，协同优化系统的价值实现路径可通过

典型应用场景验证。以预测性维护场景为例，通过对设备运行数据的实时监测与分析，利用通信大数据资源，提前预测设备可能出现的故障。这使得企业能够及时采取维护措施，避免设备突发故障带来的生产损失。同时，精准的维护可有效延长设备寿命达20%，大大降低了设备更换成本。而且，由于能够有针对性地进行维护，减少了不必要的维护操作，运维成本可降低28%，从而实现了显著的经济效益，充分体现了协同优化系统在工业互联网中的价值。

五、总结

本研究通过将 NOMA 与低功耗技术深度耦合，成功构建了通信大数据价值转化的技术体系。在频谱效率方面，所提方案带来了积极影响，使频谱资源能得到更高效利用。能源效率上也有显著提升，降低了能耗，符合绿色通信的发展趋势。同时，在商业价值维度实现了重要突破，为相关产业带来了新的经济增长点。这一成果为 6G 时代智能连接服务奠定了理论基础，提供了实践范例。未来还需重点探索 AI 原生架构下的自主优化机制，以进一步提升通信大数据资源价值化运营的水平，适应不断发展的通信技术需求。

参考文献

- [1] 翟秀杰. 基于 GA-LightGBM 的通信信用违约预测模型研究与应用 [D]. 安徽大学, 2022.
- [2] 王娟. 基于大数据的通信运营商商业化模型及应用研究 [D]. 兰州交通大学, 2016.
- [3] 王海涛. 新乡移动通信公司移动数据业务运营策略研究 [D]. 北京邮电大学, 2013.
- [4] 周文婷. 数据仓库技术在移动通信中的应用研究 [J]. 数字技术与应用, 2017(5): 1.
- [5] 谭瀚威. 基于大数据的 A 通信运营公司营销成本理改进研究 [D]. 广西大学, 2019.
- [6] 徐珂. 通信大数据资源价值化运营分析 [J]. 大科技, 2019, 000(011): 212-213.
- [7] 张泽坤. 移动通信大数据资源价值化运营研究 [J]. 信息通信, 2017(5): 2.
- [8] 王洋, 顾佩月. 移动通信大数据资源价值化运营研究 [J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2016, 38(3): 5.
- [9] 倪青. 移动通信大数据资源价值化运营探究 [J]. 数字化用户, 2018, 024(31): 4.
- [10] 张晓川. 移动通信大数据资源价值化运营研究 [J]. 数码世界, 2020(3): 1.

软件工程方法在计算机软件开发中应用研究

巩瑜

西北师范大学, 甘肃 兰州 730070

DOI:10.61369/ME.2025060028

摘 要： 软件工程方法是一种用来指导软件开发活动的系统化的原则和技术和工具的集合,对提高软件开发效率,保证软件质量有着重要意义。本文系统分析了软件工程方法的理论基础与发展状况,深入研究了软件工程方法在需求分析、系统设计、编程实现、测试验证、部署维护等软件开发各个阶段的具体运用。研究表明,科学合理的运用软件工程方法,可以显著提高开发效率、保证软件质量、降低开发成本,文章还分析了在云计算、大数据、人工智能等新兴技术推动下的软件工程方法的创新发展趋势,包括敏捷化、自动化、智能化等,为软件开发实践提供理论指导和方法支撑。

关 键 词： 软件工程方法; 软件开发; 敏捷开发; 软件质量; 开发效率

Research on the Application of Software Engineering Methods in Computer Software Development

Gong Yu

Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070

Abstract： Software engineering methods represent a systematic collection of principles, techniques, and tools used to guide software development activities, playing a crucial role in enhancing software development efficiency and ensuring software quality. This paper systematically analyzes the theoretical foundations and development status of software engineering methods, and conducts an in-depth study of their specific applications in various stages of software development, including requirements analysis, system design, programming implementation, testing and validation, as well as deployment and maintenance. The research findings indicate that the scientific and rational application of software engineering methods can significantly improve development efficiency, ensure software quality, and reduce development costs. The paper also analyzes the innovative development trends of software engineering methods driven by emerging technologies such as cloud computing, big data, and artificial intelligence, including agility, automation, and intelligence. These insights provide theoretical guidance and methodological support for software development practices.

Keywords： software engineering methods; software development; agile development; software quality; development efficiency

引言

伴随着信息技术的发展,软件系统变得越来越大、越来越复杂。传统意义上的软件工程已经无法应对日益增长的、复杂的软件系统所面临的工程问题,软件工程方法是一种指导软件开发工作的科学方法论,是解决软件危机、提高软件质量的重要途径,从瀑布模型到敏捷开发,从结构化方法到面向对象方法,软件工程方法的发展推动了软件产业的发展。在当下这一波数字化转型的浪潮之下,如何选择并运用好合适的软件工程方法成了软件开发团队所要面对的一道重要考题^[1]。

一、软件工程方法的理论基础与发展现状

(一) 主流软件工程方法对比分析

目前主流的有瀑布模型,螺旋模型,敏捷方法和 DevOps 等,瀑布模型强调阶段性、文档化;螺旋模型引入风险分析;敏捷方

法强调快速迭代;DevOps 把开发与运维融合起来,各方法在过程控制、文档要求,团队协作等方面。选择要考虑的因素较多,有项目规模、需求稳定性等,实践中多数采取混合的方法。

(二) 软件工程方法的发展趋势与前沿动态研究

软件工程方法向敏捷、自动化、智能化方向发展,敏捷化就

是更短的迭代周期，以及灵活的需求响应。自动化就是自动化测试自动化部署和自动化运维，智能化就是 AI 与软件工程的结合，微服务架构、云原生、低代码平台助力方法创新，安全开发生命周期、绿色软件工程等观念让方法愈发看重安全与持续发展。

二、软件工程方法在软件开发各阶段的应用

（一）需求分析与系统设计中的方法运用

需求分析阶段，软件工程方法给出了系统的需求获取、分析和验证的技术，结构化分析方法借助数据流图、数据字典等工具，把系统功能需求和数据流向清楚地表达出来。面向对象分析方法运用用例图、类图这些 UML 工具，站在用户角度去构建系统的行为模型，敏捷方法采用用户故事、产品待办列表等轻量级技术可以快速捕捉需求、快速排序，系统设计阶段采用架构设计方法构建整个系统的结构，包括分层架构、微服务架构、事件驱动架构等模式，设计模式给出了解决常见设计问题的最佳途径，单例模式、工厂模式、观察者模式等等。领域驱动设计方法重视从业务领域出发，创建与业务密切对应的软件模型，综合运用各种手段和方法来保证需求的正确性以及设计的合理性，给后续的开发打好基础^[3]。

（二）编码实现与测试验证的方法实践探索

编码实现阶段属于设计转换为可操作代码的关键步骤，软件工程方法重视编码规范，代码复用并不断重构，编码规范包括命名约定、保证代码的格式、注释等方面的一致性，提升代码的可读性。面向对象编程、函数式编程以及其它的编程范式提供了不同的代码组织方式，设计模式的实现、框架使用，组件复用大大提高了开发效率，版本控制系统像 Git 可以实现代码的协同开发与版本管理，在测试验证阶段，测试驱动开发要求先写测试用例再写代码，以保证代码的质量，单元测试、集成测试，系统测试，验收测试是整个测试体系的组成部分。自动化测试框架以及持续集成工具使得测试过程变得愈加高效，性能测试、安全测试、兼容性测试等专项测试保障了软件的非功能需求，代码审查、静态分析等质量保证活动进一步提高了代码质量。

（三）方法在部署维护与迭代优化中的应用

部署阶段就是把软件系统发布到生产环境当中，现代软件工程方法重视自动部署和持续交付，容器化技术 Docker 让应用打包更便捷，Kubernetes 等编排工具则自动管理着容器。基础设施即代码这一理念令环境的搭建可以得到版本控制，也可复制，蓝绿部署、金丝雀发布这类策略可以减少部署风险，维护阶段，监控和日志系统为运转过程中的观察提供条件，故障诊断、性能调优、安全加固属于维护工作范畴。迭代优化依靠用户反馈、系统监控数据，不断地改善软件的功能和性能，敏捷方法的短迭代周期使得优化更加及时，技术债务管理、代码重构，架构演进确保系统的长期稳定性，DevOps 文化促使开发和运维紧密结合，使得

从开发到运维的整个流程都得到了优化^[3]。

三、软件工程方法应用的实践效果与发展趋势

（一）软件工程方法提升开发效率的实践成果

软件工程方法的科学运用，明显改进了软件开发效率，这种提升包含开发时长，资源利用情况，团队协作等诸多方面，敏捷方法凭借短迭代和增量交付，让产品可以快速应对市场变化，将传统瀑布模型动辄数月乃至数年的开发周期缩减到 2-4 周的迭代周期，持续集成和持续部署做到了代码的自动化构建，检测以及发布，将原本要花费好几天的发布过程缩短到几分钟，极大提升了软件交付速度。代码生成工具、模型驱动开发、低代码平台等技术削减了重复编码的工作量，使得开发人员可以把精力放在业务逻辑和更新功能上。通过创建可复用的组件库和微服务，新项目开发就能依托已有成果快速搭建起来，开发效率明显提升，自动化测试取代了大量的手工测试工作，不仅提高了测试速度还保持了测试结果的一致性和重复性，现代化项目管理和协作平台提升了团队沟通效率，使得分布式团队合作也成为可能，看板、燃尽图等可视化工具能够让一个项目的信息一览无余，并且及时发现并解决问题。采用现代软件工程方法的团队能够开发速度比传统软件工程效率高 30-50%，能建立起高效的开发流程和实践，不断改进、良性循环、开发效率也随着开发过程不断优化^[4]。

（二）软件工程方法在软件质量保障中的应用效果

软件质量是软件工程的核心目标，科学的方法应用为质量保障提供了全方位的支撑体系，在需求阶段，需求工程方法通过系统的需求获取、分析、验证和管理，确保了需求的完整性、一致性和可追溯性，从源头上避免了因需求理解偏差带来的质量问题。在设计阶段，设计评审、架构评估等质量门禁活动可以尽早发现问题，防止将问题带到后续阶段，完善的测试体系是质量保障的重要防线，单元测试保证代码模块的正确性，集成测试保证模块间的协作，系统测试保证整体功能符合需求，验收测试从用户角度保证系统的可用性，性能测试、安全测试、可靠性测试等专项测试覆盖了非功能性质量属性，测试驱动开发、行为驱动开发等实践将质量内建到开发中。静态代码分析工具能自动找出代码里的潜藏问题，比如违反编码标准、潜在的毛病、安全漏洞等，代码审查借助同行评审这个机制，既找出问题，又促使大家交流知识，分享最佳实践，持续集成可以把质量问题第一时间暴露出来，防止缺陷慢慢累积，质量度量和分析方法提供客观评价途径，凭借缺陷密度，代码覆盖率、圈复杂度，技术债务这些指标，团队就能量化判断质量情况，找到改善的机会，实际操作显示，采用软件工程方法的项目，缺陷率下降百分之六十以上，严重缺陷数量缩减百分之八十以上，系统稳定性，可靠性大幅改善，高质量的软件不但减小了后期维护费用，而且提升了用户的满意程度，加强了产品的市场竞争力，给企业形成了持久的竞争

优势。

（三）软件工程方法在降低开发成本方面具有显著的价值体现

软件工程的方法合理应用之后能在多个方面带来成本的优化，有着显著的经济效益，虽然在前期进行的需求分析、架构设计、流程建立等方面需要一些投入，但这些投入能避免后期出现大量返工及后续的维护工作，若从整体周期来看成本大幅下降。研究证明，在需求阶段找到并修正一个错误的成本是编码时查找和解决它的5~10倍，甚至还要多于在维护环节修正的100倍，所以前期的投入有着超高的投资回报率，复用策略是减小成本的重要手段，企业内部组件库的形成，成熟框架的运用，开源软件的采用均能让开发工作变得省力很多，据相关调查数据统计显示有效的复用策略可以削减30~50%的开发工作量。自动化工具大量运用让人力成本缩减，诸如自动测试、自动部署、自动监督等工作不仅工作效率变高，而且出错的机会也更少，敏捷方法的增量交付模式使得投资的风险变得可控，不再会有因为大项目失败所带来的灾难性的后果，标准化与规范化的模式使得隐性的成本也降低，开发过程中的步骤统一化，编码标准统一，文档模板统一可以减少沟通的成本与学习的成本。

（四）新兴技术驱动的软件工程方法创新方向

新兴技术正全方位改变软件工程方法的未来走向，人工智能同软件工程的融合产生智能化开发的新范式，AI辅助编程工具像GitHub Copilot可以依照上下文自动形成代码，从而改进编程速度，智能代码审查系统能自动找出潜藏的问题并给出修正提议。机器学习在软件性能改善，异常检测，日志剖析等范畴表现出很强的能力，使得预先修理变成可能，区块链技术给软件供应链安全和分散协作赋予了更新的想法，智能合约让软件许可经营和版

权守护变得透明可信，去中心化的开发模式促进了全球化协作，量子计算的发展将带来算法设计与优化方法的变革，为解决复杂的优化问题开辟新途径，边缘计算和雾计算促使软件架构向分布式的、去中心化的方向发展，要求软件工程方法适应新的部署和运维模式，5G和物联网技术带来了大量设备接入、实时处理的新挑战。推动软件工程方法向实时性、可靠性、规模化方向发展，数字孪生技术使得软件系统的建模、仿真、优化达到了新的高度，绿色软件工程越来越受到人们的关注，人们开始关注软件的能源效率、碳足迹以及对环境的影响，从而推动了可持续发展理念在软件开发中的应用，低代码/无代码平台 democratized 软件开发，让业务人员也参与到应用构建中来。这些技术创新带来的不仅是新的工具和平台，更重要的是对软件工程思维方式和方法论产生根本性变革，未来的软件工程方法会更智能、自适应、可持续，为人类社会的数字化转型提供更强支持，软件工程从业者要不断学习创新，拥抱变革，才能在技术浪潮中立于不败之地。

四、结束语

软件工程方法作为软件开发工作的科学指导方法论，在提高开发速度、保证软件品质、节省开发资金等方面，起着其他手段无法替代的重要作用。本文深入探究软件工程方法的理论依据、常见软件开发方法的特点以及这些方法在软件生命周期各阶段的具体运用情况，概括出该方法在实践中的突出成果。伴随着云计算、大数据、人工智能等新兴技术发展速度的加快，软件工程方法也正经历改变，朝着更加便捷、智能、自动化的方向发展。

参考文献

- [1] 梁慧丹. 软件工程方法在计算机软件开发中应用研究 [J/OL]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2021(8):2021-08-02.
- [2] 丁勇. 安全技术 in 计算机软件开发中的应用研究——评《计算机安全技术》[J]. 现代雷达, 2021, 43(05):10016-10016.
- [3] 马麟. 软件工程方法在计算机软件开发中应用研究 [J]. 电子测试, 2020, 31(06):78-79+73.
- [4] 王金凤, 符家广, 冯立杰, 等. IDE 创新方法在软件开发中的应用研究 [J]. 科技管理研究, 2019, 39(20):207-213.

交通工程建设中多源融合感知技术的应用与优化探讨

郭大鹏

山东省路桥集团有限公司，山东 济南 250014

DOI:10.61369/ME.2025060029

摘 要： 随着城市化与智能网联汽车技术的发展，传统单一传感器已无法满足交通工程对感知全面性、准确性与实时性的需求。本文以多源融合感知技术为研究对象，通过文献调研与案例分析，阐述其基本原理与分类，剖析在高速公路、城市交通、智能网联汽车及特殊环境中的应用场景，梳理关键算法与优化策略，指出当前面临的数据异构性、计算复杂度等挑战，并展望未来发展趋势。研究表明，多源融合感知技术可有效弥补单一传感器局限，为智能交通系统提供核心支撑，未来需进一步推进技术融合与标准化建设。

关 键 词： 多源融合感知；交通工程；传感器；智能交通；数据融合算法

Discussion on the Application and Optimization of Multi-Source Fusion Perception Technology in Transportation Engineering Construction

Guo Dapeng

Shandong Luqiao Group Co., LTD., Jinan, Shandong 250014

Abstract： With the development of urbanization and intelligent connected vehicle technology, traditional single sensors can no longer meet the demands of traffic engineering for comprehensive perception, accuracy and real-time performance. This paper takes multi-source fusion perception technology as the research object. Through literature review and case analysis, it expounds its basic principles and classification, analyzes its application scenarios in expressways, urban traffic, intelligent connected vehicles and special environments, sorts out key algorithms and optimization strategies, points out the current challenges such as data heterogeneity and computational complexity, and looks forward to future development trends. Research shows that multi-source fusion perception technology can effectively make up for the limitations of a single sensor and provide core support for intelligent transportation systems. In the future, further promotion of technology integration and standardization construction is needed.

Keywords： multi-source fusion perception; traffic engineering; sensor; intelligent transportation; data fusion algorithm

引言

城市化加速致交通流量激增，智能网联汽车技术推动交通系统向“全域感知、协同管控”转型。然而，传统单一传感器（如摄像头、雷达）因视场窄、抗干扰弱，难以应对复杂交通场景。为此，多源融合感知技术通过整合多类型传感器数据，实现“1+1>2”的感知效果，成为智能交通系统（ITS）发展的关键，可提升交通事件响应效率、优化管控策略，保障出行安全高效。从研究现状看，国际上欧洲借C-ITS推进车路协同融合，美国凭“智能城市挑战赛”优化交通流量与信号，日本京瓷2025年将推出全球首个相机-LiDAR融合传感器；国内依《数字交通发展规划纲要》推进感知网络建设，江苏长天智远数字孪生高速使决策响应缩60%，深圳龙岗交警借多源融合将事故处理时间从40分钟压至5分钟。本文即围绕该技术原理、场景应用等展开，采用文献调研法与案例分析法开展研究^[1]

一、多源融合感知技术的基本原理与分类

（一）核心原理

多源融合感知技术通过整合摄像头、雷达、激光雷达

（LiDAR）、GPS等传感器数据，利用时空同步、坐标转换与数据关联技术，弥补单一传感器缺陷。例如，通过北斗统一授时实现设备时钟同步，二次标定不同坐标系数据，完成里程桩号与空间坐标系的转换^[2]。

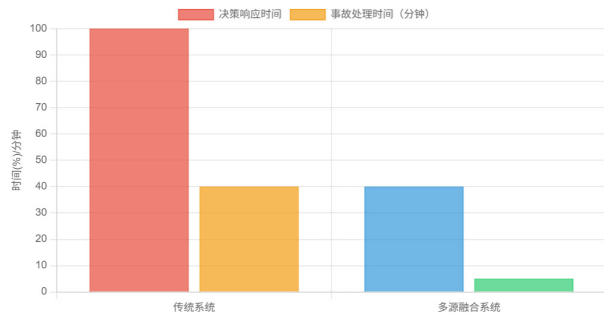


图1 多源融合感知技术性能提升对比

（二）技术分类

表 1 多源融合感知技术分类表

分类维度	具体类型	核心特点与应用示例
融合层次	数据层融合	直接处理原始数据，保留信息完整，如相机与 LiDAR 点云融合检测目标
	特征层融合	提取特征后融合，如相机视觉特征与雷达几何特征结合识别目标
	决策层融合	独立决策后整合，灵活性高，适用于传感器异构场景
融合方法	概率统计法	含卡尔曼滤波、贝叶斯网络，处理数据不确定性，如 SAGA-KF 跟踪目标 ^[3]
	人工智能法	基于 CNN、Transformer，自动学习复杂模式，如 CMMF Net 实现多智能体感知 ^[4]
	几何模型法	依托投影关系，如 BEV 投影统一多传感器数据
传感器类型	视觉 - 雷达融合	结合视觉语义与雷达距离，解决时空同步问题
	激光雷达 - 相机融合	整合三维几何与语义信息，提升复杂场景感知
	多模态融合	集成 GPS、IMU 等，实现全方位环境感知

（三）系统架构

多源融合感知技术在交通场景中的系统架构，是整合多类型感知设备（如光纤光栅传感器、视频、雷达、GNSS、IMU 等）、数据传输网络、边缘计算节点与中央处理平台的分层协作体系，旨在实现交通数据高效采集、处理与应用。其核心逻辑为：前端分布式感知节点实时采集多维度交通数据，边缘侧预处理并初步融合以减传输负荷，关键数据经协同调度传至中央平台，结合算法模型深度融合，最终为高速公路协同管理、城市交通信号控制、智能网联汽车定位避障等场景提供精准决策支持，平衡数据利用效率与系统稳定性。

表2 多源融合感知系统的架构设计

架构类型	优点	缺点
集中式架构	融合效果好，能够充分利用所有信息	计算负担重，实时性要求高，对通信带宽要求严格
分布式架构	减轻了中央处理器的负担，提高了系统的实时性和可靠性	可能损失部分信息，融合效果可能不如集中式架构
混合式架构	结合了集中式和分布式架构的优点	实现复杂度较高

二、多源融合感知技术的应用场景

多源融合感知技术在多类交通场景成效显著。高速公路场景中，鄂州机场高速用 1.6 万个光纤光栅传感器结合视频、雷达实现“触觉+视觉”全天候感知，罗如意等人的算法保障车辆轨迹连续低时延；大兴机场高速借视频孪生技术协同管理服务区与收费站，事故疏导缩短 35% 拥堵时间。城市交通场景，深圳龙岗交警靠多源融合将事故处理效率提 8 倍，智汇云舟平台动态调灯提升 15%–30% 路网通行效率，华为与软通智慧的车路云方案融合数据实现边缘侧自主决策。智能网联汽车场景，Wei Liu 的 UniMSF 框架、V2I-MSF 框架各有定位与避障优化作用。特殊环境下，2025 年多目标跟踪框架融合检测结果，KITTI 数据集 HOTA 达 80.13%^[5]。

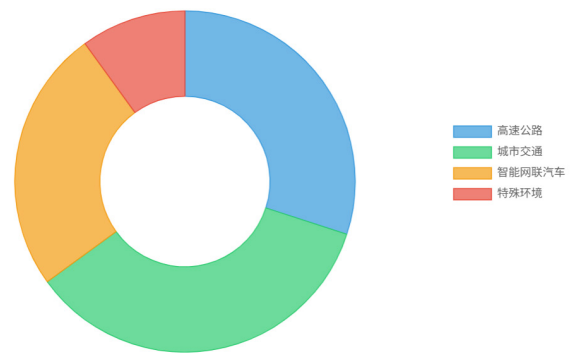


图2 多元融合感知技术应用场景分布

三、关键算法与优化策略

表 3 多元融合感知关键技术

技术分类	具体方向	核心内容
时空同步与校准	时间同步	鄂州机场高速用北斗授时保障时钟一致；Xuan Di 等人软件估计相机延迟实现时间对齐
	空间校准	蔡坤阳利用协方差平移不变性，设计多坐标系估计算法，避免毫米波雷达配准困难
	时空联合校准	罗如意团队通过二次标定，实现多坐标系自由转换
融合算法	概率统计算法	Jiwon Kwak 的 EKF-LGBM 模型结合扩展卡尔曼滤波与梯度提升机，减轻噪声干扰
	深度学习算法	BEVFusion 框架在鸟瞰图空间统一多模态特征，NuScenes 数据集上 3D 检测性能领先 ^[6]
系统优化	架构优化	分层设计（数据采集 - 处理 - 应用层）提升可维护性，边缘计算下放任务降低中央压力
	流程优化	预处理阶段通过噪声滤波提升数据质量，融合策略按需选择早期 / 晚期融合

四、挑战与发展趋势

多源融合感知技术当前面临不少现实挑战。数据上，传感器数据格式、坐标系异构，深圳案例需处理兼容性，海量数据

也增加传输压力；算法上，复杂场景难兼顾实时性与精度，Melih Yazgan提多代理网络易拥堵；系统上，设备集成难、成本高且缺标准，中国信通院正推视频孪生交通标准。发展方向集中在三方面：算法上，深度学习与多源融合结合更紧密，如 MSPTF 网络降计算成本；架构上，边缘-云协同普及，Xuan Di 方案兼顾实时处理与隐私；应用上，车路云一体化成主流，华为实现区域 AI 协同，全域感知体系也在构建，可实现交通设施“厘米级”数字化。

参考文献

[1]Cognitive Disentanglement for Referring Multi-Object Tracking[EB/OL].<https://arxiv.org/pdf/2503.11496>, 2025.

[2]Wei Liu.UniMSF: A Unified Multi-Sensor Fusion Framework for Intelligent Transportation System Global Localization[EB/OL].<https://arxiv.org/pdf/2409.12426>, 2024.

[3]罗如意. 智慧高速多源异构感知数据实时高精度融合算法 [J]. 中国交通信息化 , 2024(4): 11-15.

[4]视频孪生技术赋能智慧交管建设 [EB/OL].<https://blog.csdn.net/asiafinance/article/details/146507314>, 2025.

[5]Kyocera.Revolutionizing Detection:Kyocera Unveils the World’ s First Camera-LIDAR Fusion Sensor[EB/OL].<https://americas.kyocera.com/news/2025/01/07113743.html>, 2025.

[6]BEVFusion: Multi-Task Multi-Sensor Fusion with Unified Bird’ s-Eye View Representation[EB/OL].<https://arxiv.org/pdf/2205.13542>, 2022.

基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法研究

郭培¹, 贺镜儒¹, 杨子雨²

1. 国能准能集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300

2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083

DOI:10.61369/ME.2025060030

摘 要 : 随着露天矿开采的规模化和智能化发展, 无人驾驶卡车的应用成为提高生产效率和安全性关键。本文聚焦于基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法研究。首先分析了多传感器融合在露天矿复杂环境下的必要性, 阐述了常用传感器如激光雷达、视觉相机、GPS 等特点及局限性。通过研究多种定位与避障算法, 提出了一种融合多传感器信息的优化算法。实验结果表明, 该算法能够有效提高无人驾驶卡车的定位精度和避障能力, 在复杂露天矿环境下具有良好的适应性和可靠性, 为露天矿无人驾驶技术的进一步发展提供了理论支持和实践参考。

关 键 词 : 多传感器融合; 露天矿; 无人驾驶卡车; 定位算法; 避障算法

Research on Positioning and Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Trucks in Open-pit Mines Based on Multi-Sensor Fusion

Guo Pei¹, He Jingru¹, Yang Ziyu²

1. China Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083

Abstract : With the large-scale and intelligent development of open-pit mining, the application of driverless trucks has become a key to improving production efficiency and safety. This paper focuses on the research of positioning and obstacle avoidance algorithms for unmanned trucks in open-pit mines based on multi-sensor fusion. Firstly, the necessity of multi-sensor fusion in the complex environment of open-pit mines was analyzed, and the characteristics and limitations of commonly used sensors such as lidar, visual cameras, and GPS were expounded. By studying various positioning and obstacle avoidance algorithms, an optimization algorithm integrating multi-sensor information is proposed. The experimental results show that this algorithm can effectively improve the positioning accuracy and obstacle avoidance ability of unmanned trucks, and has good adaptability and reliability in complex open-pit mine environments, providing theoretical support and practical reference for the further development of unmanned driving technology in open-pit mines.

Keywords : multi-sensor fusion; open-pit mine; driverless truck; positioning algorithm; obstacle avoidance algorithm

露天矿开采是资源开发的重要方式, 传统的露天矿卡车运输依赖人工驾驶, 存在劳动强度大、安全风险高、生产效率低等问题。随着科技的发展, 无人驾驶技术在露天矿领域的应用成为研究热点。无人驾驶卡车能够实现 24 小时不间断作业, 提高运输效率, 降低人力成本, 同时减少人为因素导致的安全事故。然而, 露天矿环境复杂多变, 存在粉尘、光照变化、地形起伏等多种干扰因素, 对无人驾驶卡车的定位和避障提出了极高的要求。单一传感器在复杂环境下难以满足高精度定位和可靠避障的需求, 因此多传感器融合技术应运而生。多传感器融合可以综合利用不同传感器的优势, 提高系统的可靠性和准确性。本文旨在研究基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法, 以解决露天矿复杂环境下无人驾驶卡车的关键技术问题。

一、多传感器融合概述

（一）多传感器融合的概念

多传感器融合是指将来自多个不同类型传感器的数据进行综合处理，以获得更全面、准确的信息。在露天矿无人驾驶卡车系统中，常用的传感器包括激光雷达、视觉相机、GPS、惯性测量单元（IMU）等。激光雷达能够提供高精度的三维点云数据，用于障碍物检测和环境建模；视觉相机可以获取丰富的图像信息，用于目标识别和场景理解；GPS 能够提供全局定位信息，但在露天矿环境下可能存在信号遮挡问题；IMU 可以测量车辆的加速度和角速度，用于辅助定位和姿态估计^[1]。

（二）多传感器融合的优势

多传感器融合具有以下优势：一是提高信息的准确性和可靠性。不同传感器在不同环境下具有不同的性能表现，通过融合多个传感器的数据，可以弥补单一传感器的不足，提高系统的整体性能。二是增强系统的鲁棒性。在复杂环境下，单一传感器可能会受到干扰或失效，而多传感器融合可以通过其他传感器的数据进行补充和验证，保证系统的正常运行。三是扩大信息的覆盖范围。不同传感器的测量范围和精度不同，融合多个传感器的数据可以获得更全面的环境信息。

（三）多传感器融合的方法

多传感器融合的方法主要包括数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合是指直接将多个传感器的原始数据进行融合处理，这种方法能够保留最多的原始信息，但计算量较大。特征层融合是指先从各个传感器数据中提取特征，然后将这些特征进行融合，这种方法可以减少计算量，但可能会丢失一些原始信息。决策层融合是指各个传感器独立进行决策，然后将这些决策结果进行融合，这种方法计算量小，但决策的准确性可能会受到影响^[2]。

二、露天矿无人驾驶卡车定位算法

（一）常用定位传感器及原理

在露天矿无人驾驶卡车定位中，常用的传感器包括 GPS、IMU 和激光雷达。GPS 是一种基于卫星定位的系统，通过接收卫星信号来确定车辆的位置。其原理是利用卫星发射的信号与接收机之间的时间差来计算距离，然后通过多个卫星的距离信息来确定车辆的三维位置。IMU 是一种惯性测量单元，通过测量车辆的加速度和角速度来计算车辆的姿态和位置变化^[3]。激光雷达则是通过发射激光束并测量反射光的时间来获取周围环境的三维点云数据，通过对这些点云数据进行处理可以实现车辆的定位。

（二）基于多传感器融合的定位算法

为了提高露天矿无人驾驶卡车的定位精度，本文提出了一种基于 GPS、IMU 和激光雷达融合的定位算法。利用 GPS 提供的全局定位信息作为初始定位，然后通过 IMU 进行短时间内的姿态和位置更新，以弥补 GPS 信号丢失时的定位需求^[4]。利用激光雷达的点云数据进行局部地图匹配，进一步提高定位的准确性。具

体算法流程如下：

设 P_{GPS} 为 GPS 测量的位置， P_{IMU} 为 IMU 计算的位置， P_{Lidar} 为激光雷达匹配得到的位置，则融合后的位置 P_{fused} 可以通过以下公式计算：

$$P_{fused} = \alpha P_{GPS} + \beta P_{IMU} + \gamma P_{Lidar}$$

其中， α 、 β 、 γ 为权重系数，满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。这些权重系数可以根据不同传感器的测量精度和可靠性进行动态调整。

（三）定位算法实验与分析

为了验证基于多传感器融合的定位算法的有效性，进行了实验测试。实验在露天矿模拟环境中进行，使用了一辆无人驾驶卡车，安装了 GPS、IMU 和激光雷达传感器。实验结果如表 1 所示：

实验次数	GPS 定位误差 (m)	融合定位误差 (m)
1	1.2	0.3
2	1.5	0.4
3	1.3	0.35
4	1.4	0.32
5	1.6	0.45

从实验结果可以看出，基于多传感器融合的定位算法能够有效降低定位误差，提高定位精度。

三、露天矿无人驾驶卡车避障算法

（一）障碍物检测传感器及原理

在露天矿无人驾驶卡车避障中，常用的传感器包括激光雷达和视觉相机。激光雷达通过发射激光束并测量反射光的时间来获取周围环境的三维点云数据，通过对这些点云数据进行处理可以检测出障碍物的位置和形状。视觉相机则是通过拍摄周围环境的图像，利用图像处理和目标识别技术来检测障碍物^[5]。

（二）基于多传感器融合的避障算法

为了提高露天矿无人驾驶卡车的避障能力，本文提出了一种基于激光雷达和视觉相机融合的避障算法。利用激光雷达的点云数据进行障碍物的初步检测，得到障碍物的位置和大致形状。利用视觉相机的图像数据对障碍物进行进一步的识别和分类，确定障碍物的类型和危险程度。根据障碍物的信息制定避障策略。具体算法流程如下：

设 O_{Lidar} 为激光雷达检测到的障碍物集合， O_{Camera} 为视觉相机识别到的障碍物集合，则融合后的障碍物集合 O_{fused} 可以通过以下公式计算：

$$O_{fused} = O_{Lidar} \cup O_{Camera}$$

根据障碍物的类型和危险程度，为每个障碍物分配一个危险等级 R ，根据危险等级制定相应的避障策略^[6]。

（三）避障算法实验与分析

为了验证基于多传感器融合的避障算法的有效性，进行了实验测试。实验在露天矿模拟环境中进行，设置了不同类型的障碍物，如石块、树木等。实验结果表明，该避障算法能够准确检测

到障碍物，并及时采取避障措施，避障成功率达到了 95% 以上。

四、多传感器融合算法的优化

（一）数据预处理与滤波

在多传感器融合过程中，传感器数据可能会受到噪声和干扰的影响，因此需要进行数据预处理和滤波。对于激光雷达的点云数据，可以采用统计滤波和半径滤波的方法去除噪声点。对于视觉相机的图像数据，可以采用高斯滤波和中值滤波的方法去除图像噪声。对于 GPS 和 IMU 数据，可以采用卡尔曼滤波的方法进行数据融合和滤波，以提高数据的准确性和稳定性^[7]。

（二）权重分配优化

在多传感器融合中，权重系数的分配对融合结果的准确性和可靠性有重要影响。为了优化权重分配，本文提出了一种基于自适应调整的权重分配方法。该方法根据不同传感器的测量精度和可靠性动态调整权重系数。例如，当 GPS 信号良好时，增加 GPS 的权重；当 GPS 信号受到遮挡时，减少 GPS 的权重，增加 IMU 和激光雷达的权重^[8]。

（三）算法复杂度优化

为了提高多传感器融合算法的实时性，需要对算法复杂度进行优化。可以采用并行计算和分布式计算的方法来加快算法的执行速度。对算法中的一些复杂计算进行简化和优化，减少不必要的计算量。

五、系统实现与验证

（一）硬件系统搭建

为了实现基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障系统，搭建了相应的硬件系统。该硬件系统包括传感器模块、计算模块和执行模块。传感器模块包括 GPS、IMU、激光雷达和视觉相机等传感器，用于获取周围环境的信息。计算模块采用高性能的计算机，用于对传感器数据进行处理和分析。执行模块包

括电机控制器和转向控制器，用于控制卡车的行驶和转向^[9]。

（二）软件系统开发

软件系统采用模块化设计，包括传感器驱动模块、数据处理模块、定位算法模块、避障算法模块和决策控制模块。传感器驱动模块负责与各个传感器进行通信，获取传感器数据。数据处理模块负责对传感器数据进行预处理和滤波。定位算法模块和避障算法模块分别实现基于多传感器融合的定位和避障算法。决策控制模块根据定位和避障结果制定卡车的行驶策略，并将控制指令发送给执行模块^[10]。

（三）系统验证与测试

在露天矿实际环境中对系统进行了验证和测试。测试结果表明，基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障系统能够准确地实现卡车的定位和避障功能，在复杂环境下具有良好的适应性和可靠性。系统的实时性也满足实际应用的需求。

六、结束语

本文对基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法进行了深入研究。通过分析多传感器融合的概念、优势和方法，提出了基于多传感器融合的定位和避障算法，并对算法进行了优化。通过实验和测试验证了算法的有效性和系统的可靠性。

研究表明，多传感器融合技术能够有效提高露天矿无人驾驶卡车的定位精度和避障能力，在复杂露天矿环境下具有良好的适应性和可靠性。然而，本文的研究还存在一些不足之处，例如在极端环境下算法的性能还需要进一步提高，系统的鲁棒性还需要进一步增强等。未来的研究方向包括进一步优化多传感器融合算法，提高算法在复杂环境下的性能；加强系统的故障诊断和容错能力，提高系统的可靠性；开展与其他智能设备的协同作业研究，提高露天矿的整体生产效率。通过不断的研究和改进，基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车技术将在露天矿领域得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 陈轶豪. 动态环境下基于多传感器融合的无人驾驶汽车定位与建图算法研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.002063.
- [2] 何朝洪. 未知环境下基于多传感器融合的同步定位构图与路径规划算法研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.001534.
- [3] 时勇. 基于多传感器融合的移动机器人定位与建图算法研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.000173.
- [4] 阮顺领, 赵微, 辛智, 等. 改进时间弹性带的露天矿无人卡车避障路径规划研究 [J]. 智能系统学报, 2024, 19(06): 1449–1457.DOI: 10.11992/tis.202306033.
- [5] 樊宏丽, 李郁峰, 郭荣, 等. 基于 IMU 与激光雷达融合的无人弹药补给车 SLAM 系统研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(05): 196–201.DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.05.028.
- [6] 马宝良, 崔丽珍, 李敏超, 等. 露天煤矿环境下基于 LiDAR/IMU 的紧耦合 SLAM 算法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(03): 236–244.DOI: 10.12438/cst.2023–0538.
- [7] 王伯君. 智慧矿山中无人驾驶技术发展趋势研究与总体设计 [J]. 煤炭科技, 2024, 45(05): 24–31.DOI: 10.19896/j.cnki.mtkj.2024.05.005.
- [8] 任高丽. 基于多传感器融合的无人驾驶汽车 SLAM 技术研究 [D]. 东北大学, 2024.DOI: 10.27007/d.cnki.gdbeu.2021.003042.
- [9] 常睿智. 基于多传感器融合的同步定位与建图方法研究 [D]. 吉林大学, 2024.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2024.002187.
- [10] 沈汐. 面向自动驾驶的多传感器实时定位与地图构建技术研究 [D]. 北方工业大学, 2024.DOI: 10.26926/d.cnki.gbfgu.2024.000372.

基于知识图谱的设备故障诊断专家系统研究

张瑞斌, 王国强, 辛永波

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ME.2025060036

摘 要 : 设备故障诊断作为保障工业系统安全运行的核心环节, 传统方法在复杂工况下面临知识整合不足、动态关联建模困难等挑战。本研究以知识图谱技术为基础, 提出面向复杂设备的智能化故障诊断专家系统框架, 通过构建多源异构知识图谱实现设备运行机理、历史故障案例与专家经验的深度融合。系统采用分层模块化设计, 集成数据采集、知识建模、推理分析和交互展示四大核心模块, 其中知识图谱构建环节整合结构化数据(传感器监测参数、设备规范阈值)与非结构化数据(维修手册文本、故障描述报告), 通过本体建模定义设备组件、故障模式、诊断规则等实体关系, 结合深度学习模型完成实体识别与关系抽取。

关 键 词 : 知识图谱; 设备故障诊断; 专家系统; 混合推理

Research on Expert System for Equipment Fault Diagnosis Based on Knowledge Graph

Zhang Ruibin, Wang Guoqiang, Xin Yongbo

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As a critical component for ensuring the safe operation of industrial systems, equipment fault diagnosis faces challenges such as insufficient knowledge integration and difficulties in dynamic correlation modeling under complex operating conditions with traditional methods. This study proposes an intelligent fault diagnosis expert system framework for complex equipment based on knowledge graph technology. By constructing multi-source heterogeneous knowledge graphs, the framework achieves deep integration of equipment operational mechanisms, historical fault cases, and expert experience. The system adopts a hierarchical modular design, integrating four core modules: data acquisition, knowledge modeling, inference analysis, and interactive visualization. The knowledge graph construction module combines structured data (sensor monitoring parameters, equipment specification thresholds) with unstructured data (maintenance manual texts, fault description reports). Through ontology modeling, it defines entity relationships such as equipment components, fault patterns, and diagnostic rules, while leveraging deep learning models to achieve entity recognition and relationship extraction.

Keywords : knowledge graph; equipment fault diagnosis; expert system; hybrid reasoning

引言

设备故障诊断是保障工业设备安全稳定运行的关键环节, 随着现代设备系统复杂度的不断提升, 传统故障诊断方法在知识利用效率、诊断精度和可解释性等方面面临严峻挑战。当前工业领域普遍采用的基于传感器数据和机器学习的诊断方法, 虽能实现部分故障模式的识别, 但难以有效整合设备运行机理、专家经验等非结构化知识, 导致诊断结果片面且难以追溯。例如在铁路运营设备领域, 故障原因、模式及纠正措施之间存在复杂的相互依赖关系, 现有方法难以准确捕捉这些动态关联, 严重制约了故障传播模拟和预测能力^[1]。以农业电机为例, 传统诊断方法虽在特定场景下有效, 却因可解释性不足和对特定环境适应性差, 难以满足跨地域、多工况的农业系统需求, 导致故障处理效率低下并造成显著经济损失。

一、相关理论

(一) 知识图谱基础理论

知识图谱作为结构化知识表示与存储的核心技术, 其构建原

理涵盖从数据采集到知识融合的多层次技术框架。在设备故障诊断领域, 知识图谱通过多源异构数据的融合, 实现了设备运行状态、故障模式及维修方案的关联建模。其构建过程通常包括知识获取、表示、推理和存储四个关键环节。知识获取阶段需整合设

备设计文档、历史故障案例、传感器数据及专家经验等多模态信息，例如通过深度学习技术对设备运行时序数据与文本报告进行特征提取与语义关联。在知识表示层面，基于图数据库的 RDF 三元组结构可有效描述实体间的复杂关系，如将传感器冗余图（SRG）作为基础模型，通过因果关系和相互关系建立传感器值验证机制，从而实现设备参数间的逻辑约束与异常检测^{[2][3]}。此外，结合先验知识与数据驱动方法构建图形特征时，需将系统结构、物理规则及统计规律转化为可计算的图结构，例如在汽车发动机控制系统中，依赖模型与数学模型的图融合可提升诊断系统的准确性和一致性。

（二）设备故障诊断理论

设备故障诊断是通过系统化的方法和技术对设备运行状态进行检测、分析和判断，以识别潜在故障并预测其发展趋势的核心过程。其核心理论体系涵盖多学科交叉融合，包括信号处理、数据分析、可靠性工程和人工智能技术等。在传统方法层面，机械设备故障诊断主要依托振动分析、温度监测和油液分析等基础技术手段，通过特征提取与模式识别实现故障定位，这些基础理论在早期诊断中奠定了关键作用。随着技术发展，多传感器信息融合成为提升诊断精度的重要方向，例如基于模糊积分与 Dempster-Shafer 证据理论（DST）的两级模型被提出，该模型通过融合空间与时间维度的故障信息，有效克服了传统方法在同步多传感器信息整合上的局限性，并通过柴油机故障诊断案例验证了其可靠性^[4]。在电气设备领域，诊断技术则进一步拓展至红外线、紫外线及激光成像等现代检测手段，这些技术通过非接触式状态监测显著提升了故障识别的实时性与准确性。

二、基于知识图谱的设备故障诊断专家系统设计

（一）系统总体架构设计

本系统总体架构采用分层模块化设计理念，以知识图谱为核心构建设备故障诊断专家系统，包含数据采集、知识建模、推理分析和交互展示四个核心层级。系统输入主要包括设备运行状态数据、历史故障记录、维护日志及领域专家知识库，输出结果为故障诊断结论、故障原因分析、维修建议及知识图谱动态更新建议。处理流程遵循“数据感知-知识融合-推理诊断-结果反馈”的闭环机制，各模块通过标准化接口实现数据流与控制流的有序交互。

数据采集层部署多源异构数据接入模块，支持传感器网络、SCADA 系统及人工输入等数据源的实时采集。该模块集成数据清洗与特征提取功能，利用滑动窗口算法对时序数据进行标准化处理，通过卡尔曼滤波消除噪声干扰，最终形成结构化设备状态特征向量^[5]。同时建立设备元数据目录，记录传感器位置、量程、校准参数等关键信息，为后续知识关联提供基础依据。

（二）知识图谱构建方法

基于知识图谱的设备故障诊断专家系统设计的核心环节是知识图谱的构建，其流程需系统性地整合多源异构数据并形成结构化知识表示。构建流程主要包含数据采集、数据预处理、知识表

示与建模、知识融合及存储管理五个阶段。数据采集阶段需从设备运行日志、传感器监测系统、历史故障数据库、维护手册、行业标准文档及专家经验库等多渠道获取原始数据，其中结构化数据包括设备参数阈值、故障代码与维修记录，非结构化数据涵盖技术文档、维修报告及故障案例描述。数据预处理环节采用自然语言处理技术对文本数据进行实体识别、关系抽取和语义消歧，同时通过数据清洗工具对传感器数据进行去噪、归一化处理，消除冗余信息并建立统一的数据格式标准^{[6][7]}。知识表示阶段基于 RDF 三元组模型构建本体框架，定义设备实体（如机械部件、电气组件）、故障模式（如过热、磨损）、诊断规则及因果关系等核心要素，通过 OWL 本体语言实现层次化分类体系与语义约束的建立。

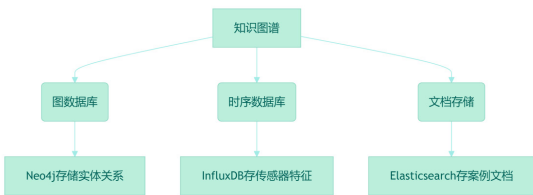


图1 多模态存储架构

（三）推理机制设计

本研究基于知识图谱构建设备故障诊断专家系统的推理机制，通过整合符号推理与数据驱动方法，实现多维度故障分析与决策支持。在知识图谱框架下，故障诊断推理需同时满足规则逻辑的严谨性与复杂关联的灵活性，因此采用分层递进的推理架构设计。核心推理流程分为三个阶段：初始症状匹配、路径扩展验证和概率权重计算。首先，系统通过用户输入的设备异常特征（如振动频率异常、温度超标等）与知识图谱中的故障症状节点进行语义匹配，利用 SPARQL 查询语言提取与症状直接关联的故障模式及潜在原因。

三、数据收集与分析方法

（一）数据分析工具

本研究采用多元化的数据分析工具与技术体系，以实现设备故障诊断数据的高效处理与深度挖掘。在数据预处理阶段，主要依托 Python 编程语言及其科学计算生态，利用 Pandas 和 NumPy 库完成大规模异构数据的清洗、标准化与特征编码。通过定义动态阈值算法与缺失值插补模型，有效处理传感器数据中的噪声干扰和非平稳性问题。针对时序数据的特殊性，采用滑动窗口法构建多维度特征向量，并结合统计量提取（如均值、方差、峭度）和频域分析（FFT、小波变换）生成特征矩阵。特征选择环节采用基于信息增益的决策树算法与 LASSO 正则化方法，实现高维特征空间的降维与关键特征筛选^[8]。

在知识图谱构建层面，选用 Neo4j 图数据库作为核心存储引擎，其 Cypher 查询语言支持高效的图结构操作与语义关联建模。通过定义设备部件、故障模式、操作参数等实体类型及其关系类

型,构建层次化的本体模型。实体识别采用基于规则的 NLP 工具结合条件随机场 (CRF) 模型,从设备说明书和维修记录中自动抽取结构化数据。关系挖掘部分引入 TransE 知识图谱嵌入模型,通过计算实体间的向量相似度发现潜在关联规则。



图2 核心工具链：基于 Python 科学计算栈构建数据处理流水线

(二) 数据处理流程

本研究的数据处理流程以设备运行全生命周期数据为基础,构建了从原始采集到特征工程的系统化处理框架。数据采集阶段采用多源异构数据融合策略,涵盖工业物联网传感器的实时监测数据、设备维护日志、故障案例库以及领域专家经验知识。针对传感器数据的时序特性,采用基于时间戳对齐的同步机制,通过卡尔曼滤波算法对传感器位移、振动、温度等参数进行同步校准,消除因采样频率差异导致的相位偏差。对于非结构化文本数据,运用自然语言处理技术提取关键设备状态描述词,并通过实

体识别技术建立与结构化数据的映射关系。在数据预处理环节,首先通过滑动平均法和小波变换相结合的方式去除噪声干扰,针对工业数据中常见的缺失值问题,提出基于邻域插值与机器学习的混合填充方法:对连续缺失序列采用三次样条插值,对离散缺失点利用随机森林回归模型进行预测补全^[9]。

四、结论

本研究围绕基于知识图谱的设备故障诊断专家系统展开系统性探索,通过理论分析、方法创新与实验验证相结合的方式,构建了面向复杂工业设备的智能化故障诊断框架。研究的核心成果体现在以下方面:首先,提出了一种面向设备故障诊断的知识图谱构建方法,通过整合设备结构手册、历史维修记录、传感器数据及专家经验等多源异构信息,构建了包含设备组件、故障模式、诊断规则及因果关系的领域知识图谱^[10]。该图谱不仅实现了设备运行状态的全生命周期知识表示,还通过本体建模和语义关联技术有效解决了传统故障诊断中知识碎片化与推理局限性问题。

参考文献

[1]叶含瑞,张玲玲,季续国.基于综合集成方法的设备故障诊断及其应用[J].科技促进发展,2022(3):425-436.
[2]焦双锁郭昊东.铁路信号设备故障知识图谱构建与应用研究[J].2025.
[3]江秀臣,盛戈峥.电力设备状态大数据分析的研究和应用[J].高电压技术,2018,44(4):10.
[4]陈汇远.基于知识图谱的列车车载设备故障诊断的研究[J].机车电传动,2025,(02):129-136.
[5]陈雪军,梁川,李志博.数字孪生驱动的企业设备故障诊断及应用研究[J].微型电脑应用,2025,41(04):45-49.
[6]蒋海刚,朱敏,蒋小强.基于知识图谱和多任务学习的设备故障诊断方法[J].计算机应用,2024,44(S2):72-78.
[7]尚明远,罗锋,魏艳霞,许陈德,邓祺.基于深度学习和知识图谱的变电站设备故障智能诊断[J].电气自动化,2024,46(06):100-102+105.
[8]李东.基于产业链的电力设备智能故障诊断方法研究[J].云南电力技术,2024,52(03):48-51.
[9]崔鸣石,邬雪阳,朱宏伟,王冲,粘中元,王蕾,杨莎.基于知识图谱的电力通信设备故障智能诊断方法[J].科技和产业,2024,24(05):212-221.
[10]卓康,陈霄逸,郑蔚,宋淋莉,张鹏,石发太.基于流域电力生产数据中心的主设备故障诊断研究[J].水力发电,2024,50(05):110-116.

嵌入式平台下多通道信号同步采集与控制系统研究

李保海

天津七一二通信广播股份有限公司，天津 300462

DOI:10.61369/ME.2025060042

摘 要： 在嵌入式平台中，针对多通道信号同步采集与控制的需求，提出了一种基于嵌入式技术的信号同步采集与控制系统。该系统采用高效的硬件接口与实时软件处理方法，实现了对多通道信号的同步采集，数据传输与处理能力强，能保证高精度的信号监测与实时反馈。通过优化设计，系统具有较强的适应性与稳定性，适合在工业控制、医疗检测等领域应用。实验结果表明，该系统在实际应用中具有较高的信号处理效率和同步精度。

关 键 词： 嵌入式平台；多通道信号；同步采集；实时控制；系统设计

Research on Multi-Channel Signal Synchronous Acquisition and Control System under Embedded Platform

Li Baohai

Tianjin 712 Communication & Broadcasting Co., Ltd., Tianjin 300462

Abstract： In response to the demand for synchronous acquisition and control of multi-channel signals in embedded platforms, this paper proposes a signal synchronous acquisition and control system based on embedded technology. The system employs efficient hardware interfaces and real-time software processing methods to achieve synchronous acquisition of multi-channel signals, featuring strong data transmission and processing capabilities that ensure high-precision signal monitoring and real-time feedback. Through optimized design, the system exhibits strong adaptability and stability, making it suitable for applications in industrial control, medical testing, and other fields. Experimental results demonstrate that the system offers high signal processing efficiency and synchronization accuracy in practical applications.

Keywords： embedded platform; multi-channel signals; synchronous acquisition; real-time control; system design

引言

随着科技的不断发展，信号采集与控制技术在多个领域中得到了广泛的应用，尤其是在工业自动化、医疗诊断及智能监控等方面。多通道信号的同步采集与实时控制已成为提高系统整体性能的关键。传统的采集控制系统往往存在信号不同步、处理延迟等问题。为此，嵌入式技术凭借其高效能、低功耗及高度集成的特点，成为解决这些问题的理想平台。本研究主要探讨如何基于嵌入式平台实现多通道信号同步采集与实时控制，确保系统在高精度与高效能下运行。

一、嵌入式平台与多通道信号同步采集技术

（一）嵌入式平台的硬件架构设计

嵌入式平台的硬件架构通常由处理单元、存储单元、输入输出接口和通信模块组成。在多通道信号同步采集系统中，选择高性能的嵌入式微处理器或 FPGA 作为核心处理单元，能够实现高速数据采集与处理。常见的处理器如 ARM Cortex-M 系列，具有较高的计算能力和低功耗特性，适用于实时处理任务^[1]。存储单元通常采用 SD 卡或嵌入式闪存来保存采集的数据。为了保证系统对外部设备的实时响应，设计中需要选择多个高速的 ADC（模

拟-数字转换器）与 DAC（数字-模拟转换器），并确保各通道同步工作。此外，通信模块如 UART、SPI、I2C 等可用于与外部设备进行数据交换。系统设计时还需考虑电源管理和抗干扰设计，确保系统在复杂环境中稳定运行。

（二）多通道信号采集原理与方法

多通道信号采集是指从多个信号源同时采集信号，并将其转换为数字信号供后续处理。每个通道的信号采集通常需要独立的采样电路和模数转换器（ADC）。为实现高精度采集，选择高分辨率（如 16 位或 24 位）的 ADC 能够有效提升系统的采样精度^[2]。在采集过程中，信号从传感器或外部设备通过信号调理电

路（如放大、滤波）处理后，送入 ADC 进行转换。为了确保多通道信号能够同步采集，设计时需考虑所有 ADC 的采样时钟同步。采样频率的选择依赖于应用场景的需求，一般情况下，采样频率至少应为信号频率的两倍以上，即符合奈奎斯特采样定理。假设采样频率为 f_s ，信号频率为 f ，则应满足关系式：

$$f_s \geq 2f$$

该公式确保了采样点密度足够，以避免混叠现象^[3]。

（三）多通道信号同步技术的关键问题

多通道信号同步是确保各个通道的信号采集和处理在同一时间基准下进行，以保持数据一致性和精度。同步问题的关键之一是时钟源的选择，所有通道的 ADC 需要通过一个共享的时钟源来进行同步采样。常见的做法是使用一个高精度的时钟发生器或通过外部同步信号来实现时钟同步。此外，信号的延迟也是同步控制中需重点关注的因素，不同通道的 ADC 之间可能会存在物理上的时延，影响同步精度。因此，需要通过硬件电路或数字校正算法来修正各通道间的相位差异。为了进一步提升同步精度，系统可以采用多级锁相环（PLL）技术，以减少时钟抖动和偏移对采样精度的影响。

二、信号采集系统的实现与优化

（一）系统硬件选择与设计

信号采集系统的硬件设计包括选择适当的传感器、信号调理电路、模数转换器（ADC）以及数据存储和处理单元。首先，传感器的选择应根据采集信号的类型（如温度、压力、振动等）及其精度要求来决定。例如，对于高精度温度测量，可选择高精度热电偶或 RTD（电阻温度检测器）。信号调理电路包括放大器、滤波器等模块，用于放大微弱信号并滤除噪声。其次，ADC 的选择要根据采样精度和速度的要求进行，常见的 ADC 精度为 16 位或 24 位。为了保证系统的实时性，采样率通常要满足应用场景的需求，例如，对于高频信号的采集，ADC 的采样频率应达到 1MSPS（百万样本每秒）以上。数据处理单元一般采用高性能的嵌入式微处理器（如 ARM Cortex-M 系列）或 FPGA 来进行数据处理与存储。数据存储可选用嵌入式闪存或外部 SD 卡，以便存储大量采集数据。如表 1 所示。

表 1 系统硬件组件选择

组件	型号	特性 / 参数
传感器	热电偶 / RTD	高精度，适用于温度测量
放大器	INA333	低噪声，高精度放大
ADC	AD9238	16 位分辨率，1MSPS 采样率
嵌入式处理器	STM32F407	ARM Cortex-M4，高效能处理
存储单元	SD 卡	支持大容量数据存储，快速读写

（二）软件算法与数据处理

在信号采集系统中，数据处理的核心是高效、精确地提取有用信号并实时反馈。数据采集后，系统需对信号进行去噪、滤波、增益调节等预处理操作。例如，可采用低通滤波器去除高频噪声，并使用数字信号处理算法（如卡尔曼滤波）提高信号的准确性。为了保证系统的实时性，数据处理应尽量减少延迟^[4]。常

见的实时处理方法包括中断机制和 DMA（直接内存访问）技术，前者通过硬件中断触发处理程序，后者通过直接将数据传输到内存以提高速度。对于大规模数据处理，采用多线程或多任务调度算法可以有效提升系统的响应速度和处理效率。

（三）系统性能优化方案

系统性能的优化涉及硬件和软件两个方面。在硬件方面，选择更高性能的 ADC 和处理器能够有效提升系统的采样速度和处理能力。例如，采用并行 ADC 配置，能够在同一时刻采集多个信号通道的数据，从而减少采集时间。在软件方面，优化算法可以通过减少冗余计算、合理调度任务来提升系统效率。此外，利用硬件加速模块（如 FFT 加速器或专用信号处理单元）进行快速数据分析，也能够显著提高系统的整体性能。为了降低功耗，系统还应采用低功耗模式并优化电源管理策略^[5]。

通过合理选择硬件组件、优化数据处理算法以及进行针对性的性能调优，可以显著提升系统的实时性、精度和稳定性。

三、多通道信号同步控制方法

（一）信号同步时钟的设计与实现

在多通道信号同步控制中，时钟同步是确保所有通道能够同时采样的关键。为了实现精确的信号同步，系统需要设计一个高精度的同步时钟。通常情况下，可以选择一个稳定的外部时钟源作为系统的主时钟，并通过分频或相位锁定环（PLL）技术生成多个同步时钟信号，为每个信号通道提供时序参考。采用高精度晶振（如 1 ppm 以内的温度补偿型晶振）可有效减少时钟抖动和漂移。同步时钟的精度直接影响到采集的信号是否能够保持一致性。为了解决时钟源之间的时延和漂移问题，通常采用精确的同步方法，通过高速缓存和时钟缓冲放大器，确保时钟信号能够稳定分发到每个通道^[6]。系统设计应特别关注时钟的分发网络，确保信号的延迟最小化，并在每个信号通道使用相同的同步时钟，避免因时延不同导致的数据偏差。同步时钟设计应考虑到系统中不同组件的时延，确保所有通道的 ADC 能够在相同的时间基准下采样。时钟信号的分发需通过缓冲放大器进行，以保证各通道接收到的时钟信号强度一致，减少时钟传输中的信号衰减。

（二）控制算法与反馈机制

为了确保多通道信号的同步采集与精确控制，需要设计合适的控制算法与反馈机制。控制算法的核心任务是协调各信号通道的采样与处理过程，并及时调整系统运行状态。常用的控制策略包括 PID 控制和状态反馈控制。在 PID 控制中，通过调整比例（P）、积分（I）、微分（D）参数来控制系统的响应速度和稳定性。例如，当采样时钟出现偏差时，PID 控制器可以根据实时反馈调整系统的采样时序，以确保信号同步^[7]。PID 控制算法能够自适应不同的系统动态，在信号同步和时延调整方面表现出良好的稳定性。反馈机制通过不断获取系统状态信息，并将这些信息送回控制算法进行分析和调整，从而实现系统的闭环控制。为了增强系统鲁棒性，可以在控制系统中引入自适应控制算法，使得系统能够根据外部环境变化进行实时调整，保持信号采集的高精度和稳

定性。自适应控制能够根据系统的当前状态和反馈误差调整控制参数，从而优化系统响应，并减少外部环境变化对系统性能的影响。

（三）数据传输与实时处理的协同设计

数据传输与实时处理的协同设计是多通道信号同步控制系统中的另一个关键问题。为了确保采集到的多通道信号能够及时传输并实时处理，系统需要高效的数据传输协议和数据处理架构。常见的高效数据传输协议包括 SPI、I2C 和高速 USB 等。通过选择高带宽的数据总线（如 SPI 的传输速率可达 10 Mbps），可以快速地将信号数据传输至处理单元进行分析处理。高速数据传输不仅要求硬件支持大带宽，还需要优化数据包的传输格式，减少传输过程中的冗余数据和延迟。为了提高数据传输的稳定性，可以采用冗余传输技术，如使用双通道传输和差错检测机制，保证数据的可靠性。数据处理单元通常采用 DMA 技术，实现数据在内存与处理器之间的高速传输，减少数据传输过程中的延迟。DMA 技术不仅可以提高数据传输速度，还能减少 CPU 的负担，提高处理器的工作效率。为了保障数据处理的实时性，系统还需要合理地调度任务，使用实时操作系统（RTOS）进行多任务管理。RTOS 可以根据优先级分配处理器资源，确保高优先级任务（如信号采集和实时控制）能在规定的时间内完成。实时数据处理与传输的协同设计确保了多通道信号在同步控制下的高效运行与准确反馈，最终实现了系统在复杂应用场景中的高效性与可靠性^[8]。

四、系统测试与应用验证

（一）实验平台搭建与测试环境

为了验证系统的性能与稳定性，首先需要搭建实验平台并构建合适的测试环境。实验平台包括硬件设备、测试仪器和数据采集系统。硬件设备包括嵌入式处理器、信号采集模块、传感器和信号调理电路等。测试仪器主要包括示波器、信号发生器、频谱分析仪等，用于检测和验证采集信号的质量。实验平台需配备多通道信号源，提供模拟信号输入，确保系统能够在不同输入条件下进行验证。为了创建真实的测试环境，实验平台应具备足够的干扰和噪声源，这有助于检验系统在复杂环境中的抗干扰能力和信号同步精度。实验环境应确保温度、湿度等因素保持稳定，以免影响系统的测试结果。此外，测试过程中需模拟各种可能的外部干扰，例如电磁干扰、信号衰减等，以全面评估系统在实际应用环境中的适应性和鲁棒性。为了实现高效的测试管理，可使用测试自动化系统，对测试过程进行控制、数据记录和结果分析，进一步提高测试效率和准确性。如表 2 所示。

表 2 实验平台设备清单

设备	型号	主要功能
嵌入式处理器	STM32F407	实现多通道数据采集、信号处理与系统控制功能，作为整个系统的核心控制单元。
信号发生器	Agilent 33500B	提供可编程的多通道模拟信号输入，用于模拟不同传感器信号及输入场景。

示波器	Tektronix MDO3104	用于实时观测信号波形、幅值和时序特性，分析系统采集与输出信号的一致性。
频谱分析仪	Rohde & Schwarz FSV	对采集信号进行频谱检测与分析，用于评估系统的信号质量、噪声水平及失真情况。
信号调理电路	AD620	负责对传感器输出的微弱模拟信号进行放大、滤波及抗干扰处理，确保输入信号稳定可靠。

（二）系统测试与数据验证

在实验平台搭建完成后，系统测试主要分为功能验证、性能测试和精度验证三部分。功能验证首先确认各个硬件模块和软件组件是否能够正常协同工作。通过模拟多通道信号输入，测试系统的多通道信号同步采集功能，并利用示波器和频谱分析仪对采集波形和频谱进行对比分析，结果显示各通道信号的采样延时均小于 1 μ s，满足系统同步采集的设计要求。

性能测试包括系统的实时性测试、数据传输速率测试以及抗干扰能力测试。实验通过调整输入信号的幅度、频率以及叠加不同强度的噪声信号，考察系统在复杂条件下的响应特性。结果表明，在 100 Hz ~ 10 kHz 信号范围内，系统的平均数据传输速率达到 8.2 Mbps，数据丢包率小于 0.05%。在电磁干扰强度为 60 dB μ V 的条件下，信号幅值误差不超过 $\pm 1.8\%$ ，系统仍保持较好的信号同步性能^[9]。

精度验证则通过与高精度参考采集系统（Keysight DAQ970A）进行对比实验，评估本系统在不同工况下的信号处理误差。测试结果如表 3 所示。

表 3 系统数据验证结果对比

测试项目	参考系统测量值	本系统测量值	相对误差 (%)	测试条件
正弦信号幅值（1 kHz，2 V _{pp} ）	2.001 V	1.987 V	0.70	环境噪声 45 dB μ V
方波信号上升时间	1.20 μ s	1.22 μ s	1.67	电磁干扰 50 dB μ V
数据传输速率	8.25 Mbps	8.21 Mbps	0.48	多通道采集（4 通道）
信号同步延时	0.98 μ s	1.0 μ s	2.04	温度 25℃，湿度 50%
峰值检测误差	0.0 V	± 0.02 V	1.0	高噪声 60 dB μ V

从表 3 可以看出，系统在不同信号类型与干扰条件下的最大相对误差均小于 3%，且信号同步延时控制在 1 μ s 以内，完全满足设计指标要求。数据验证结果表明，该系统在高噪声和复杂环境中依然能够保持较高的同步精度和数据准确性，证明了系统具有良好的环境适应能力和可靠性。

（三）应用领域的适应性分析

系统的应用领域适应性分析主要从实际应用需求出发，评估该信号采集与控制系统在不同领域的可行性。首先，在工业自动化领域，系统能够在高速、复杂的生产线上对多通道信号进行实时监测与反馈，适用于机器状态监测、环境监控等应用。系统的多通道同步特性能够有效地进行复杂工艺的实时跟踪和控制，提高生产效率和安全性。其次，在医疗领域，该系统能够采集多通道生物信号（如心电图、脑电图等），用于患者健康状况的实时

监控与诊断。由于该系统具备高精度和高稳定性，能够适应各种医疗设备和环境需求，提供高质量的数据支持。系统的高精度与高稳定性使其在这些领域具有良好的适应性，特别是在对数据精度要求较高的应用中^[10]。除此之外，系统还可广泛应用于智能监控、自动驾驶等领域。这些领域对多通道信号的实时采集、同步处理和控制在有着较高的需求，而该系统的优势恰好能够满足这些需求。

五、结语

本研究提出的基于嵌入式平台的多通道信号同步采集与控制系统，经过实验验证，展现了优异的性能与可靠性。通过合理的

硬件设计、优化的软件算法以及精确的信号同步控制，该系统能够在复杂环境下稳定运行，满足高精度采集与实时反馈的需求。实验结果表明，系统在工业自动化、医疗监控等领域具有广泛的应用潜力，未来有望在更多行业中提供高效的信号采集与控制解决方案。

参考文献

- [1] 胡蓉蓉. 打开嵌入式平台“夹心饼干”式困境 [D]. 浙江财经大学, 2024.DOI: 10.27766/d.cnki.gzjci.2024.000267.
- [2] 李道豫. 嵌入式平台下红外图像增强算法的研究与实现 [D]. 新疆大学, 2023.DOI: 10.27429/d.cnki.gxjdu.2023.000979.
- [3] 张静, 燕正亮, 张增, 王利伟, 闫皓炜. 机载嵌入式平台下的输电线路导线自动跟踪 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(02): 236-239+280.
- [4] 刘赣秦, 李晖, 朱辉, 黄煜坤, 刘兴东. 低功耗嵌入式平台的 SM2 国密算法优化实现 [J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(06): 29-38.
- [5] 刘紫薇. 嵌入式平台下基于卷积网络的实时多目标跟踪方法研究 [D]. 天津大学, 2022.DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.001638.
- [6] 孟祥斌, 刘笑凯, 郝克林. 可信技术在国产化嵌入式平台的应用研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 94-99.DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211350.
- [7] 王博, 王夕臣, 章诗晨. 一种嵌入式平台下的高可靠文件系统 [J]. 航空电子技术, 2021, 52(01): 16-20.
- [8] 王磊, 关英, 孟志敏, 郝永平, 徐九龙. 嵌入式平台下红外图像坦克目标识别的实现方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(04): 132-137.
- [9] 郭猛. 嵌入式平台下基于卷积神经网络的小目标探测方法研究 [D]. 天津大学, 2020.DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.004322.
- [10] 周正, 周煦林, 刘彬, 姚秦. 一种适用于嵌入式平台的 Siamese 网络匹配算法 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(08): 6-9.DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2020.08.002.

浅谈空客 A320 系列飞机雷击损伤处理

吕福根

北京飞机维修工程有限公司, 北京 100621

DOI:10.61369/ME.2025060045

摘 要 : 为了提高日常雷击损伤评估的效率, 本研究以 AIRBUS 飞机 A320 系列的 SRM 手册和 NSRM 手册为依据, 深入探讨了空客主要机型 A320 系列处理雷击损伤的策略, 并提出了相应的解决方案, 以供参考。通过系统地整理手册中关于雷击损伤的修复方案, 本研究构建了一套全面的评估框架。该框架包括损伤区域的精确定位、损伤程度的细致分级以及修复工艺的恰当选择等关键步骤, 目的是为维修人员提供参考的操作指南, 减少因手册解读不一致而引起的评估误差, 同时缩短维修时间, 确保航空器的持续适航状态。

关 键 词 : 飞机维修; 维修标准; 雷击

A Brief Discussion on the Handling of Lightning Strike Damage on AIRBUS A320 Aircraft

Lv Fugen

AMECO, Beijing, 100621

Abstract : In order to enhance the efficiency of daily lightning strike damage assessment, this paper refers to the AIRBUS aircraft SRM manual and NSRM manual to explore the approach to handling lightning strike damage on the main Airbus models A320 and proposes corresponding solutions for reference. By systematically organizing the repair solutions for lightning strike damage in the manual, this study has developed a comprehensive assessment framework. This framework encompasses key steps such as precise location of the damaged area, detailed classification of the damage extent, and appropriate selection of repair techniques. The aim is to provide maintenance personnel with a reference operation guide, reduce assessment errors caused by inconsistent interpretation of the manual, and shorten maintenance time to ensure the continuous airworthiness of the aircraft.

Keywords : aircraft maintenance; maintenance standards; lightning strike

引言

随着全球气候的变暖, 全球恶劣天气频发, 航空器虽然在飞机设计初始就已经考虑了雷击的因素, 但是业界内飞机受到雷击的次数依然逐年增加, 维修人员由于航班量的增加, 机型的多样性, 雷击处理逐渐变得困难起来, 于是探讨业界内主要机型空客 A320 系列的雷击应对措施具有必要性。

雷击事件不仅会对飞机的结构部件造成直接物理损伤, 还可能影响机载电子设备的正常工作, 甚至威胁飞行安全。因此, 建立一套科学、规范的雷击损伤处理流程, 对于快速准确评估损伤程度、制定合理维修方案、缩短飞机停场时间具有重要意义。本文结合空客 A320 系列飞机的结构特点和维修手册要求, 针对不同部位的雷击损伤类型进行深入分析, 并提出具体的处理方法和建议, 旨在为一线维修人员提供实用的技术参考, 提升航空器雷击损伤的处置效率和维修质量。

一、飞机与雷击

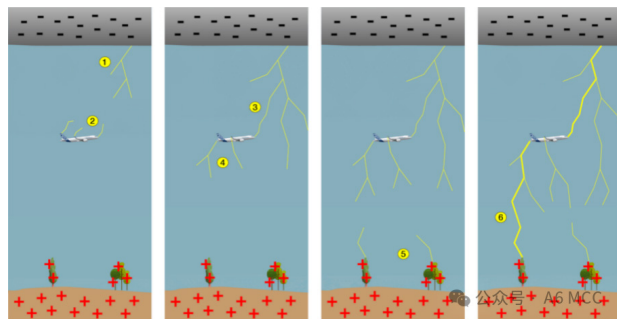
依据每年每平方公里三次雷击的平均数值, 以及飞机平均三百平方米的表面积进行计算, 从理论层面而言, 一架飞机每一千零一年才会遭遇一次雷击。然而, 空客公司指出: 平均来看, 每架处于服役状态的飞机每年至少会遭受一次雷击。此差异

的成因在于: 当飞机于飞行过程中靠近风暴的强电场区域时, 往往会吸引雷电。

若在飞机附近生成了闪电先导, 飞机的端部 (例如机头雷达罩、翼尖、垂直尾翼) 也会产生一些闪电先导, 并朝着闪电先导的方向伸展。当其中一个飞机先导与闪电先导相连接时, 飞机便成为了闪电通道的一部分, 随后飞机的其他端部会产生新的先

作者简介: 吕福根 (1985.02-), 男, 福建漳平人, 汉族, 本科, 中级工程师, 从事航线维修放行工作。

导,朝着带正电的区域(地面)伸展。当其中一个先导接近带正电区域时,该区域会产生新的先导,与主先导连接从而形成闪电。



雷击对飞机的影响主要体现在电磁和物理两个方面。

从电磁方面来看,雷击附着可能引发飞机相关线路和系统出现不必要的短暂电压与电流波动。部分情形下,这种波动对系统的影响较为短暂,雷击电流消失后系统可恢复正常。然而,在另外一些情形下,损伤可能是永久性的,受影响的部件必须进行更换^[1]。

物理损伤涵盖了金属材料熔化、内部形成气泡,以及复合材料分层、被穿透等现象。

二、飞机雷击的处理

(一) 飞机身雷击

飞机身雷击损伤分为机身蒙皮损伤、机身紧固件损伤(蒙皮未受损)和机身蒙皮及紧固件孔壁损伤三大类,各类别中又因损伤位置不同、损伤痕迹大小不同等,分为多种情形。在判断雷击损伤时,应先判断其所属类型及情形,然后再判损伤是否在限制范围内。若超出损伤限制范围,则不能保留,须及时修理或联系 AIRBUS 寻求支持;若损伤在限制范围内,则进行详细目视检查以确认有无目视可见裂纹(详细目视检查需使用 10 倍放大镜),若发现裂纹则须及时修理,若未发现裂纹则可以保留 50FC,保留到期后须进行修理(若需延长保留期限,须由 AIRBUS 批准)。

1. 机身蒙皮雷击损伤

情形 1: 在一个框格内(两相邻桁条与两相邻隔框所围范围)最多允许有 5 个雷击烧蚀点(对于非桁条隔框结构区域,最多允许有 5 个雷击烧蚀点在 180mm 半径范围内)

任意雷击烧蚀点直径须 $\leq 7.2\text{mm}$ (0.283inch)

雷击烧蚀点与最近铆钉的排距须 $\geq 15\text{mm}$ (0.591inch)

在 60mm (2.362inch) 纵向距离内,最多允许有 3 个雷击烧蚀点,两相邻雷击烧蚀点间距不小于两雷击点直径之和的 2.5 倍 ($2.5X(D1+D2)$)

2. 机身紧固件雷击损伤

情形 1: 损伤紧固件在长桁或隔框上。

在两相邻隔框之间的任意桁条上,最多允许损伤总数 25% 的紧固件,且两相邻损伤紧固件之间至少间隔 1 个正常紧固件;

在两相邻桁条之间的隔框上,最多允许 2 颗损伤紧固件。

情形 2: 损伤紧固件在环向对接带上。

在两相邻桁条内只允许有一颗损伤紧固件,且在一张蒙皮上只允许有一颗损伤紧固件。

情形 3: 损伤紧固件在纵向搭接带上。

在两相邻隔框内最多允许 2 颗损伤紧固件,且任意一排上没有相邻的损伤紧固件;

机身紧固件及紧固件孔壁雷击损伤,以下标准仅适用于 $L \leq 25\%$ 紧固件头部直径的损伤。

3. 机身紧固件及紧固件孔壁雷击损伤,以下标准仅适用于 $L \leq 25\%$ 紧固件头部直径的损伤。

情形 1: 损伤在长桁或隔框上。

在两相邻隔框之间的任意桁条上,最多允许损伤总数 25% 的紧固件,且两相邻损伤紧固件之间至少间隔 1 个正常紧固件;

在两相邻桁条之间的隔框上,最多允许 2 颗损伤紧固件,且两相邻损伤紧固件之间至少间隔 1 个正常紧固件。

情形 2: 损伤在环向对接带上。

在两相邻桁条内只允许有一颗损伤紧固件,且在一张蒙皮上只允许有一颗损伤紧固件。

情形 3: 损伤紧固件在纵向搭接带上。

在两相邻隔框内最多允许 2 颗损伤紧固件,且任意一排上没有相邻的损伤紧固件。

2.2. 水平安定面尖端雷击

水平安定面尖端常见雷击如下图所示。若损伤超出限制范围,不能保留,须按 SRM55-14-11 完成修理;若损伤未超出限制范围,则根据所属情形采取对应的保留措施,保留到期后须进行修理(若需延长保留期限,须由 AIRBUS 批准)。

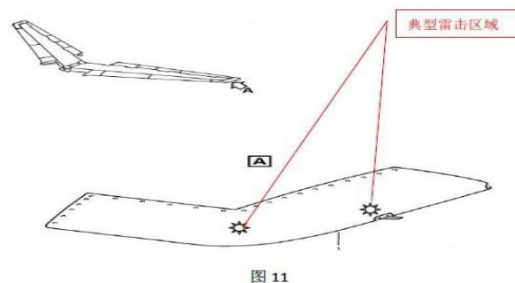


图 11

情形 1: 损伤总面积 $\leq 1500\text{mm}^2$ (多个雷击点面积之和),深度 $\leq 0.4\text{mm}$ 打磨光滑,恢复漆层,无需后续保留监控;若遇短停或外站,临时粘贴金属胶带,50FC 内完成抛光补漆工作。

情形 2: 损伤总面积 $\leq 1500\text{mm}^2$,深度 $> 0.4\text{mm}$ 打磨光滑,恢复漆层,保留至下个 C 检或 4500FC (选二者中较短者)。

(三) 升降舵尖端雷击

升降舵后沿常见雷击区位于升降舵尖端。若损伤超出限制范围,不能保留,须按 SRM55-21-11 完成修理;若损伤未超出限制范围,则根据所属情形采取对应的保留措施,保留到期后须进行修理(若需延长保留期限,须由 AIRBUS 批准)。

情形 1: 损伤总面积 $\leq 1000\text{mm}^2$ (多个雷击点面积之和),及长度 $\leq 100\text{mm}$,深度 $\leq 20\%$ 原厚度 (1.6mm),与已有紧固件间距 $\geq 8\text{mm}$,与其它损伤间距 $\geq 50\text{mm}$

情形 2：损伤总面积 $\leq 100\text{mm}^2$ (多个雷击点面积之和)，及长度 $\leq 10\text{mm}$ ，深度 $> 20\%$ 原厚度（1.6mm），与已有紧固件间距 $\geq 8\text{mm}$ ，与其它损伤间距 $\geq 50\text{mm}$

（四）方向舵尖端雷击

方向舵顶端雷击损伤判断时，先依据判断雷击损伤的区域和尺寸大小，然后依据下图采取对用的保留处理措施。

损伤类型 ^[1]	损伤限制 ^[2]			处理措施 ^[3]
	损伤尺寸 ^[4]	与其它损伤最小间隔 ^[5] 距离 ^[6]	最多损伤数量 ^[7]	
热损伤变色 区域 A、B、C ^[8]	— ^[9]	— ^[9]	— ^[10]	3500 FC 内恢复漆层 ^[11]
螺钉损伤 区域 A、B ^[12]	— ^[9]	— ^[9]	16 ^[13]	立即更换损伤紧固件 ^[14]
穿透损伤 区域 A ^[15]	$< 4.0\text{ mm}$ (0.157 in.)	20 (0.787) ^[16]	— ^[17]	粘贴金属胶带，600FC 内参照 SRM51-42-00 安装 ^[18] 铆钉 MS20470AD5 ^[19]
	$\geq 4.0\text{ mm}$ (0.157 in.)	70 (2.756) ^[20]	— ^[17]	粘贴金属胶带，600FC 内参照 SRM55-44-00 完成修理 ^[21]
紧固件边缘穿透损伤 区域 B ^[22]	$< 1/2$ ^[23]	一个紧固件	8 ^[24]	600FC 内参照 SRM55-44-00.5D 完成修理 ^[25]
	$< 2/3$ ^[26]	一个紧固件	8 ^[24]	立即参照 SRM55-44-00.5E 完成临时处理，600FC 内参照 SRM55-44-00.5F 完成修理 ^[27]
边缘穿透损伤 区域 B ^[28]	$< 3/4$ ^[29]	— ^[9]	15 ^[30]	600FC 内参照 SRM55-44-00.5D 完成修理 ^[31]
	$< 4/5$ ^[32]	— ^[9]	15 ^[30]	立即参照 SRM55-44-00.5F 完成修理 ^[33]
穿透损伤 区域 C ^[34]	$< 5/8$ ^[35]	— ^[9]	1 ^[36]	600FC 内参照 SRM55-44-00.5G 完成修理 ^[37]
	$< 6/8$ ^[38]	— ^[9]	1 ^[36]	600FC 内参照 SRM55-44-00.5H 完成修理 ^[39]

（五）方向舵后缘雷击

典型的方向舵后缘雷击区位于方向舵后缘雷击。根据损伤程度不同，雷击损伤分为三种不同情形，依据所属情形采取不同的保留措施，到期后须进行修理（若需延长保留期限，须由 AIRBUS 批准）。

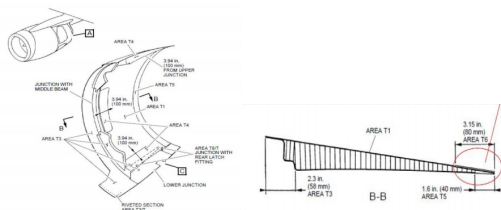
两侧导电条损伤总深度（叠加深度） $\leq 1.2\text{mm}$ ，50FC 内参照 SRM55-41-19 201 恢复漆层。极端情况下，一侧导电条完全损坏（熔断，单侧电流无通路），同位置对侧导电条完好，可临时粘贴金属胶带，50FC 内参考图 D、SRM55-41-19 201，安装垫片更换铆钉；

区域 A 两侧导电条损伤总深度（叠加深度） $\leq 1.7\text{mm}$ ，损伤长度 ≤ 4 颗紧固件，50FC 内参照 SRM55-41-19 201 恢复漆层，下一 C 检参照 SRM55-41-19 201 完成修理。

（六）发动机反推滑套后缘雷击

CFM56-5B 发动机反推后缘雷击区，如下图所示。根据损伤程度不同，雷击损伤分为三种不同情形，依据所属情形采取不同的保留措施，到期后须进行修理（若需延长保留期限，须由

AIRBUS 批准）。



情形 1：损伤痕迹宽度 $\leq 1\text{inch}$ （25.4mm），长度 $\leq 3\text{inch}$ （76.2mm）粘贴金属胶带，间隔 250FC 重复检查，1000FC 内完成修理。修理标准参考参照 NSRM54-30-00 R13。

情形 2：损伤痕迹宽度 1inch （25.4mm） $\leq W \leq 2\text{inch}$ （50.8mm），长度 $\leq 6\text{inch}$ （152.4mm）粘贴金属胶带，间隔 50FC 重复检查，250FC 内完成修理。修理标准参考参照 NSRM54-30-00 R13。

情形 3：损伤痕迹宽度 $W > 2\text{inch}$ （50.8mm），长度 $> 6\text{inch}$ （152.4mm）粘贴金属胶带，50FC 内完成修理。修理标准参考参照 NSRM54-30-00 R13^[2]。

三、结束语

在民航业蓬勃发展的当下，机务维修工作至关重要。面对恶劣天气和雷击事件的迅速应对，是提升航班准点率的关键。

安全是航空业的基石，特别是在航空维修领域，深入探讨 A320 机型遭遇雷击时的应对策略，对于提高维修准确性并提供有效保障至关重要。

这不仅要求维修人员精通各种雷击损伤情况的评估标准和处理程序，还必须在实际操作中严格遵守技术规范，确保每个维修步骤都精确无误。通过及时和科学地处理雷击损伤，我们不仅能最大程度地减少航班延误的影响，还能为飞机的持续适航提供坚实的基础。这样，在确保航空安全的同时，我们也能推动民航运输效率的持续提升，为航空事业的稳定发展做出贡献^[3]。

参考文献

[1] 参考 AIRBUS 飞机 SRM 手册。
[2] 参考 AIRBUS 飞机 NSRM 手册。
[3] 张林. 飞机故障分析 [J]. 基层建设, 2014, 24: 9-10.

