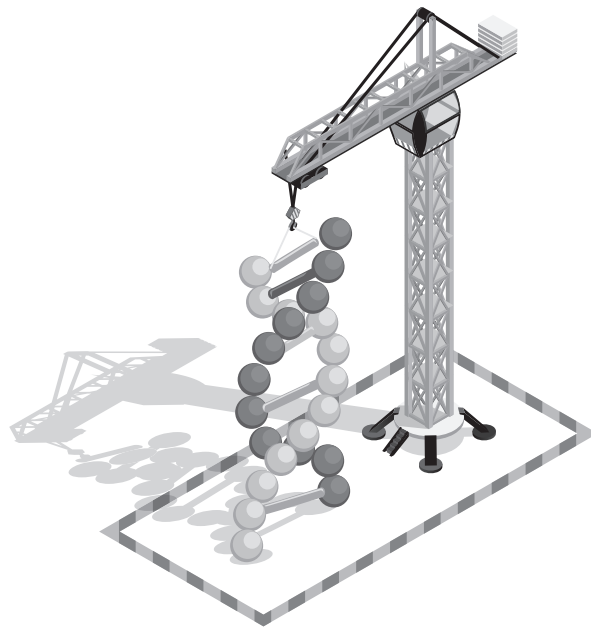


# 工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## Editorial Board

### Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

### Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., Ltd.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

# 工程研究与应用

Engineering Research and Application

第3卷 第9期 2025年9月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

## 本刊说明:

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

- 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。



## 材料科学 | MATERIAL SCIENCE

- |     |  |  |
|-----|--|--|
| 001 | 新型电解铝槽技术及其设备改进分析<br>Analysis of New Electrolytic Aluminum Cell Technology and Its<br>Equipment Improvement               | 朱文昊<br>Zhu Wenhao  |
| 004 | 高温核安全螺栓紧固使用 VDI2230 的研究和应用<br>Research and Application of VDI2230 for High Temperature Nuclear<br>Safety Bolt Tightening | 李强<br>Li Qiang   |
| 007 | 偏置载荷下核燃料运输容器螺栓咬死研究<br>Study on Bolt Bite Death of Nuclear Fuel Transport<br>Container under Bias Load                    | 王浩, 周锐焱<br>Wang Hao, Zhou Ruihan   |
| 010 | 绿电铝产品碳足迹评价及价值实现研究<br>Green Electricity Aluminum Product Carbon Footprint Evaluation<br>and Value Realization Research    | 刘冰, 吴磊<br>Liu Bing, Wu Lei   |
| 013 | 固体酒精生物炭燃料块<br>的设计研究<br>Design Research on Solid Alcohol Biochar<br>Fuel Blocks   | 景华键, 樊启洲, 祝浩东, 于沁雷, 胡启豪, 赵国凤<br>Jing Huajian, Fan Qizhou, Zhu Haodong, Yu Qinlei, Hu Qihao, Zhao Guofeng |

## 工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- |     |   |   |
|-----|---|---|
| 017 | 3D 打印混凝土的材料性能、加工性能<br>与工程应用的研究综述<br>A Review of the Material Properties, Processing Properties,<br>and Engineering Applications of 3D Printed Concrete  | 顾子涵, 周娟, 江飞飞<br>Gu Zihan, Zhou Juan, Jiang Feifei |
| 020 | 垃圾发电设备安装与技术管理实践探究<br>Investigation into the Installation and Technical Management Practices<br>of Waste-to-Energy Equipment   | 刘毅<br>Liu Yi                                      |
| 023 | 工业锅炉节能环保改造项目实施效果评估与优化策略<br>Evaluation and Optimization Strategies for the Implementation Effect<br>of Energy Conservation and Environmental Protection Transformation<br>Projects of Industrial Boilers | 常丹<br>Chang Dan                                   |
| 026 | 船舶压力管道安装中的焊接变形控制与应力分析技术<br>Welding Deformation Control and Stress Analysis Techniques in the<br>Installation of Ship Pressure Pipelines   | 王洪波<br>Wang Hongbo                                |
| 029 | 电力工程中的电气技术管理与风险管理研究<br>Research on Electrical Technology Management and Risk Management<br>in Power Engineering   | 范秀聪<br>Fan Xiucong                                |
| 032 | 市政工程领域: 风险管理视角下的管理和技术融合路径<br>The Integration Path of Management and Technology from the Perspective<br>of Risk Management in the Field of Municipal Engineering   | 莫金莉<br>Mo Jinli                                   |
| 035 | 铁路工程风险管理体的构建与优化<br>Construction and Optimization of Railway Engineering Risk<br>Management System   | 黄雄<br>Hung Xiong                                  |
| 038 | 船舶高压双燃料系统的设计与优化研究<br>Design and Optimization Study of High-Pressure<br>Dual-Fuel Systems for Ships  | 董祥东<br>Dong Xiangdong                             |
| 041 | 燃机防喘放气阀控制回路改造方案研究及应用<br>Research and Application of Retrofitting Scheme for the Control<br>Circuit of Gas Turbine Anti surge Relief Valve   | 王晶晶<br>Wang Jingjing                              |
| 044 | 工业设计视角下工业控制类产品人机工程学与界面设计研究<br>Research on Ergonomics and Interface Design of Industrial Control<br>Products from the Perspective of Industrial Design   | 庄娘设<br>Zhuang Niangshe                            |
| 047 | 高温高压阀门密封失效与修复改进<br>Sealing Failure and Repair Improvement of High-temperature<br>and High-pressure Valves   | 吴星龙, 刘瑜<br>Wu Xinglong, Liu Yu                    |

051	<b>煤矿机电工程安装施工技术问题及策略探析</b> An Analysis of Technical Issues and Strategies in the Installation and Construction of Mechanical and Electrical Engineering Projects in Coal Mines	白东方, 牛嵩 Bai Dongfang, Niu Song
054	<b>无人机倾斜摄影技术制作实景三维模型在棚户区改造中的应用</b> Application of Real-Scene 3D Modeling Created by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Oblique Photography Technology in the Renovation of Shantytowns	齐发 Qi Fa
057	<b>自动化控制技术在医院电气设备智能化中的应用</b> Application of Automation Control Technology in the Intelligence of Hospital Electrical Equipment	徐盼 Xu Pan

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

060	<b>高层建筑施工中绿色技术运用研究</b> Research on the Application of Green Technologies in High-Rise Building Construction	李振龙 Li Zhenlong
063	<b>城市更新及老旧小区改造的探索研究</b> Exploration and Research on Urban Renewal and Old Residential Area Renovation	王治 Wang Zhi
067	<b>数字赋能“一带一路”背景下“走出去”企业路桥施工类培训课程建设研究</b> Research on the Construction of Road and Bridge Construction Training Courses for "Going Global" Enterprises under the Background of Digital Empowerment of the "Belt and Road" Initiative	胡丽娟, 王尹鹤, 唐晓松 Hu Lijuan, Wang Yinhe, Tang Xiaosong
071	<b>测绘技术在存量房不动产测绘服务中的创新与实践</b> Innovation and Practice of Surveying Technology in Real Estate Surveying Service of Existing Housing	关杰良 Guan Jieliang
074	<b>建筑工程项目管理中的造价控制难点与创新解决路径探索</b> Exploration of Cost Control Difficulties and Innovative Solutions in Construction Project Management	陈碧霞 Chen Bixia
077	<b>建筑工程造价数字化转型与成本控制策略研究</b> Research on Digital Transformation and Cost Control Strategy of Construction Project Cost	孙正梅 Sun Zhengmei
080	<b>建筑电气施工技术管理的创新路径与实践</b> Innovative Path And Practice of Construction Electrical Construction Technology Management	姬念念 Ji Niannian
083	<b>城墙劣化规律与机理研究综述</b> A Review of Research on the Laws and Mechanisms of City Wall Degradation	刘笑 Liu Xiao
086	<b>基于地域文化特征的现代建筑设计策略研究</b> Research on Modern Architectural Design Strategies Based on Regional Cultural Characteristics	胡可 Hu Ke

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

089	<b>基于数据分析的电解铝生产过程故障诊断方法研究</b> Research on Fault Diagnosis Method of Electrolytic Aluminum Production Process Based on Data Analysis	魏建军 Wei Jianjun
092	<b>水利工程中的岩土地质勘察存在的问题研究</b> A Study on the Issues in Geological Surveys of Rock and Soil in Water Conservancy Projects	陈焕之 Chen Huanzhi
095	<b>箱型薄壁混凝土水池裂缝控制方法研究</b> Research on the Control Method of Concrete Cracks in Thin -walled Water Pools	陈文俊, 廖辉军 Chen Wenjun, Liao Huijun
098	<b>黑龙江省地下水资源动态监测体系构建与运行维护技术研究</b> Research on the Construction and Operation Maintenance Technology of Dynamic Monitoring System for Groundwater Resources in Heilongjiang Province	徐磊, 赵剑, 那帅博宁, 王洋 Xu Lei, Zhao Jian, Na Shuaiboning, Wang Yang
101	<b>高寒水利工程混凝土早期强度发展规律分析</b> Analysis of the Development Patterns of Early Strength of Concrete in High-Altitude Cold-Region Water Conservancy Projects	和高升 He Gaosheng

电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

105	<b>基于 STM32 的指纹识别门禁系统设计与实现</b> Design of Fingerprint Recognition Access Control System Based on STM32	胡美臣, 谢晓东, 陈宇峰 Hu Meichen, Xie Xiaodong, Chen Yufeng
108	<b>电动汽车换电站安全防护解决方案</b> The Safeguarding Solution for Electric Vehicle Battery Swap Station	李言堂 LI Yantang
112	<b>市政基础设施建设中智慧运维管理体系构建</b> Construction of Intelligent Operation and Maintenance Management System in Municipal Infrastructure Construction	李正晖, 肖颖 Li Zhenghui, Xiao Ying
116	<b>机械制造行业售后服务管理中的技术管理应用与创新</b> Application and Innovation of Technical Management in After-Sales Service Management of Machinery Manufacturing Industry	叶伟 Ye Wei
119	<b>自动化检测软件与硬件设计融合的关键技术与应用实践</b> Key Technologies and Application Practices of Automatic Detection Software and Hardware Design Integration	汪平 Wang Ping
122	<b>电气设备及控制系统开发制造中的成本控制与技术创新协同研究</b> Collaborative Research on Cost Control and Technological Innovation in the Development and Manufacturing of Electrical Equipment and Control Systems	陈锦城 Chen Jincheng
125	<b>自重荷载作用下门式刚架的 Maple 编程与有限元对比</b> Comparison of Maple Programming and Finite Element Method for Portal Frames under Dead Load Conditions	江亚旭, 赵文, 高飞, 王家栋, 院哲, 朱芸熙 Jiang Yaxu, Zhao Wen, Gao Fei, Wang Jiadong, Yuan Zhe, Zhu Yunxi
128	<b>地质装备运输安全风险评估体系构建及智能化防控技术研究</b> Research on the Construction of Risk Assessment System and Intelligent Prevention and Control Technology for Geological Equipment Transportation Safety	赵东来 Zhao Donglai



# 新型电解铝槽技术及其设备改进分析

朱文昊

青铜峡铝业股份有限公司宁东铝业分公司, 宁夏 银川 750411

DOI:10.61369/ERA.2025090011

**摘 要：** 铝是一种特殊金属材料，常被应用在航空航天、建筑等领域。随着全球经济的持续发展，铝的需求量大幅度增长，这推动了铝工业的发展。当前，铝工业发展过程中的核心设备 – 电解铝槽暴露出生产效率低、高能耗和高污染等问题，已经难以满足铝工业的可持续发展需求。基于此，下文将详细分析低温低电压电解技术、新型结构电解槽技术等新型电解铝槽技术，并从阴极结构、阳极材料等方面提出电解铝槽设备的改进措施。希望加快铝工业的改进步伐。

**关 键 词：** 新型电解铝槽技术；电解铝槽；设备改进

## Analysis of New Electrolytic Aluminum Cell Technology and Its Equipment Improvement

Zhu Wenhao

Qingtongxia Aluminium Industry Co., LTD. Ningdong Aluminium Industry Branch, Yinchuan, Ningxia 750411

**Abstract：** Aluminium is a special metallic material and is often applied in fields such as aerospace and construction. With the continuous development of the global economy, the demand for aluminium has increased significantly, which has promoted the development of the aluminium industry. At present, the core equipment in the development process of the aluminum industry – electrolytic aluminum cells – have exposed problems such as low production efficiency, high energy consumption and high pollution, and are no longer able to meet the sustainable development needs of the aluminum industry. Based on this, the following text will conduct a detailed analysis of new electrolytic aluminum cell technologies such as low-temperature and low-voltage electrolysis technology and new-structured electrolytic cell technology, and propose improvement measures for electrolytic aluminum cell equipment from aspects such as cathode structure and anode materials. It is hoped to accelerate the improvement pace of the aluminium industry.

**Keywords：** new electrolytic aluminum cell technology; electrolytic aluminum cell; equipment improvement

## 引言

现阶段，传统电解铝槽技术及设备暴露出诸多弊端，已经难以满足铝工业对于绿色、节能、高效生产的要求。因此，必须加大新型电解铝槽技术的研发力度，不断改进电解铝槽设备，这样才能提高铝工业生产效率、降低能耗、减少环境污染。

## 一、传统电解铝槽设备存在的问题

### （一）高能耗

传统电解铝槽是能耗大户，这与其电解质体系的导电性不佳、易产生热损失有很大的关联。简单来讲，传统的冰晶石 – 氧化铝熔盐电解质导电性不佳，铝厂要想确保电解反应正常进行，就需要消耗大量电能克服电解质电阻，这不仅会增加能耗，还会增加整体的生产成本；铝厂的电解铝槽一般在高温环境下运行，

传统电解铝槽保温性不佳，热量容易通过槽壁、槽顶不断散失。尤其是冬季，外部温度较低，电解铝槽的散热速度更快。要想维持电解铝槽内部的温度，就要消耗更多电能补充热量。一般情况下中小型铝厂冬季的电解槽散热损失能够达到总能耗的25%左右。

### （二）高污染

传统电解铝槽在运行过程中会产生大量的二氧化硫、氟化物等污染物，易对周边环境造成污染。在电解过程中，冰晶石等一

些含氟物质在分解时会产生大量氟化氢气体。如果铝厂直接排放，就会污染大气环境、影响周边植被与农作物的正常生长。例如：某中小型铝厂每生产1吨铝就会排放1.5千克的氟化氢气体。据当地农业部门调查，周边农作物近些年在氟化氢的影响下减产幅度达到25%，这给当地农户造成了巨大的经济损失；与此同时，传统电解铝槽使用的是炭阳极，在电解时易产生二氧化硫气体。这是一种刺激性气体，既会危害人类的身体健康，又会降低空气质量，增加当地的酸雨降雨量。<sup>[1]</sup>

### （三）生产效率低

传统电解铝槽的电流效率最多为92%，这表明还有少部分电能没有应用在铝生产环节，而是消耗在副反应上。这与阳极效应和铝的二次溶解有很大关联。在生产过程中如果阳极表面的氧化铝浓度超标就会产生阳极效应。这会导致电解铝槽的电压急剧上升、电流分布不均，进而降低电流效率。例如：某中小型铝厂在进行生产统计后发现每发生一次阳极效应，电流效率会降低1.5%。这会降低铝的产量与质量；在电解过程中，一些铝会溶解在电解质中，之后氧化为氧化铝。这种二次溶解的问题不仅会降低电流效率，还严重降低了铝的产量。例如：某中小型铝厂由于设备工艺较为落后，易产生铝的二次溶解现象。该厂每月因铝的二次溶解造成的损失占总产量的5%左右。这大幅度降低了该厂的生产效率，增加了生产成本。

### （四）设备使用寿命短

传统电解铝槽的内衬一般使用的是粘土砖等传统材料，易在高温、高腐蚀环境下损坏，这会直接降低设备的使用寿命。电解铝槽内部的温度较高，会导致内衬材料出现热膨胀与收缩的情况，久而久之就会出现裂纹、剥落现象。电解过程中冰晶石-氧化铝熔盐电解质的腐蚀性较强，也会溶解内衬材料，导致内衬逐渐变薄。因此很多铝厂的电解铝槽在使用2至3年后，就会出现内衬损坏的现象，只能重新更换设备。这既会增加设备更换成本，又会影响生产的稳定性；铝液在流动时也会磨损内衬材料，降低设备的使用寿命。例如：某铝厂设计的电解铝槽不合理，导致铝液的流动速度较快。内衬材料在铝液的冲刷下出现磨损。仅运行两年该电解铝槽就无法正常使用。<sup>[2]</sup>

## 二、新型电解铝槽技术分析

### （一）低温低电压电解技术

低温低电压电解技术是一种通过优化电解质体系降低电解质熔点、提高电解质导电性，进而在低温低电压下进行电解铝的技术。在具体落实过程中需要铝厂添加锂盐、镁盐等添加剂，改善电解质的物理化学性质，将其熔点从940-960℃降到800-900℃。由于该技术能够降低电解温度，因此能够大幅度减小电解质电阻，减少电能消耗。这种稍低温环境还能够减慢铝的二次溶解速度，降低阳极效应的发生几率。这个过程还可以减轻内衬材料的热应力，进一步延长电解铝槽的使用寿命。例如：某铝厂在应用低温低电压电解技术后，直流电耗从原有的13500KWh/t-Al调整为11900KWh/t-Al，降低了12%左右。电流效率也由原来

的91%转变为了94%。电解铝槽的使用寿命从两年转变为三年半。这不仅能够为铝厂节约大量的成本支出，还提高了铝厂的生产效率。<sup>[2]</sup>

### （二）惰性阳极电解技术

惰性阳极电解技术是将传统的炭阳极替换为不消耗的惰性阳极，这样在电解时惰性阳极既可以正常导电，又不会参与化学反应。这样能够节约炭阳极的消耗，减少二氧化碳等温室气体的排放量。例如：某铝厂在运用惰性阳极电解技术后，当月实现了二氧化碳零排放。在经过一段时间后，周围的空气质量大幅度提升。同时，铝厂以往在使用炭阳极时需要频繁更换，整体成本较高。而应用惰性阳极后更换频率大幅度降低，整体的成本支出缩减了35%左右。此外，惰性阳极也不会像炭阳极那样产生污染杂质，能够生产出更高质量、更高纯净度的铝。该铝厂的与产品纯净度由原有的99.6%提升至99.8%，这提升了铝厂的产品质量，推动了铝厂的可持续性发展。

### （三）新型结构电解槽技术

新型结构电解槽技术能够优化原有的电解铝槽结构，调整电解质电场与热场分布、改善电解质的流动状态。例如：应用新型阴极结构能够减少铝液波动，降低铝液二次溶解几率；优化调整阳极排列方式，能够改善电场分布，提升电流效率。某铝厂在应用新型结构电解槽技术后，将电解效率从原有的92%提升至95%。这是因为优化调整后的电解铝槽结构更加合理，电解质能够在电解槽内均匀流动，电场与热场能够均匀分布，这些都能够提升电解反应的速率与效率。

## 三、电解铝槽设备的改进措施

### （一）改进阴极结构

第一，应用新型阴极材料。传统阴极材料大多是炭块，导电性和抗腐蚀性不佳。因此，铝厂可以利用新型阴极材料改善阴极性能。例如：石墨化阴极。石墨化处理能够让炭块的晶体结构更加规整，提升其导电性。同时其表面的化学稳定性较好，可以有效抵抗电解质的侵蚀。某铝厂在应用石墨化阴极后阴极电压降低了13%，电流效率提升了2%；陶瓷阴极。陶瓷材料的化学性质较为稳定，能够适应高温、强腐蚀等多种环境，因此陶瓷阴极能够延长阴极的使用寿命，帮助铝厂节约更换阴极材料的成本。

第二，优化阴极形状。在不同形状的阴极下，铝液的流动状态各不相同。铝厂要想减少铝的二次溶解几率，提高电解反应的稳定性，就要优化阴极形状。例如：阶梯式阴极。能够增加铝液和阴极的接触面积，确保铝液平稳流动。某铝厂应用了阶梯式阴极后铝的二次溶解几率降低了30%。这是因为阶梯式结构改变了铝液的流动路径，能够防止铝液出现较多的波动和漩涡，铝也就不需长时间与电解质接触；波纹式阴极。波纹式阴极可以增加阴极的表面积，改变铝液的流动方向，形成湍流。这样电流能够均匀分布，电解反应能够稳定高效进行。

### （二）改进阳极材料

第一，使用高性能炭阳极。由于传统炭阳极在应用过程中存

在诸多问题，因此铝厂必须加快改进步伐，使用高性能炭阳极材料。例如：浸渍阳极。铝厂需要在炭阳极中添加硼系物、硅系物等特殊添加剂。硅系物主要成分是二氧化硅，有较强的吸附性与耐高温性。在高温状态下能够与氧化硼产生相互作用，生成一层玻璃态的晶体覆盖在炭阳极孔隙内壁。能够阻隔气体扩散，减少氧化反应。某铝厂应用浸渍阳极后，将浸渍剂填充在了炭阳极的孔隙处，有效隔绝了氧气与电解质的入侵。不仅降低了阳极的消耗速度，还提升了阳极的使用寿命。

第二，研发应用惰性阳极。惰性阳极可以减少电解过程中产生的能耗与温室气体的排放量。但在具体运用时还存在一些技术问题。包括：制备工艺。不同的制备方法会导致阳极材料的晶体结构、孔隙率产生显著的差异，进而降低其导电性、耐腐蚀性等。现阶段，一些科研团队正在探索利用粉末冶金法制备惰性阳极材料，希望能够精确控制原料配比与制备工艺。包括：球磨时间与烧结温度等，希望能够优化阳极材料的性能。<sup>[4]</sup>

### （三）改进内衬材料

第一，应用新型耐火材料。上文已经提到传统电解铝槽的内衬材料一般是高铝砖、粘土砖，其耐高温与耐腐蚀性能不佳。因此，铝厂必须应用新型耐火材料，提高内衬性能。例如：碳化硅砖。这种材料在高温状态下也可以保持稳定的物理化学性能，能够有效抵抗电解质的侵蚀。如果将碳化硅砖作为内衬材料，可以有效延长内衬的使用寿命；氮化硅结合碳化硅砖。这是一种复合型耐火材料，有极佳的耐腐蚀与耐高温性。碳化硅颗粒能够看作是硬度较强的骨架，氮化硅可以看作是防护衣，能够在碳化硅颗粒表面建立完善的保护层。在电解过程中这种内衬材料可以承受高温与强腐蚀的冲击，有效延长电解槽的使用寿命。这种稳定的内衬性还能够提升电解槽内部温度、化学环境以及电场的稳定性，降低因内衬问题引发的铝杂质含量高、质量不稳定等问题。

第二，优化内衬结构。优化内衬结构是减少内衬热损失、提升内衬稳定性的一种有效方式。现阶段，铝厂可以应用多层复合内衬结构，将碳化硅砖作为电解质的内层材料，有效抵挡电解质

的侵蚀。中层使用陶瓷纤维等隔热性能好的材料。陶瓷纤维材料的热导率较低，能够减少热量从内到外的传递量，减少热损失。最外层使用高铝砖等强度较高的材料。这样即使设备受到了外力作用，也不会影响到内衬结构的稳定性。在各层材料优势互补的情况下，可以有效延长内衬的使用寿命。

### （四）改进供电系统

第一，应用高效整流器。高效整流器能够在控制技术与先进的功率半导体器件的支持下，将交流电转化为直流电。与普通的整流器相比，高效整流器应用的是“MOSFET、IGBT”等高频开关技术，可以减少能量损耗，将转换效率提升至99%左右。

第二，开发智能供电控制系统。铝厂要结合实际情况开发智能供电控制系统。该系统能够根据电解铝槽的运行情况，调整电流强度、电压等供电参数，确保电解铝槽始终处在最佳运行状态。例如：某铝厂开发的智能供电控制系统能够利用传感器监测电解铝槽的温度、电压等各项参数。这些数据会传输到数据分析与决策模块，在预设算法下进行分析判断。同时还会结合历史数据与电解工艺的要求进行分析，给出最合理的供电参数调整方案。执行机构会按照调整方案自动调整参数。如果电解铝槽的温度较高，则表明电解反应比较剧烈，产生了较多热量。系统经过分析后会降低电流强度，减少电能输入。系统还会根据一段时间的温度变化进行温度预测，及早采取温度控制措施。该系统有效提升了铝厂电解铝生产效率，降低了生产成本<sup>[3]</sup>。

## 四、结束语

新时期，要想推动铝工业的可持续发展，提高电解铝生产质量。就要改进传统的电解铝槽设备、应用新型电解铝槽技术。本文针对传统电解铝槽设备高污染、效率低等问题进行详细分析，探索了低温低电压电解技术、惰性阳极电解技术等新技术的具体应用，并提出了改进阴极结构、阴极材料、供电系统等措施。希望能够提高电解铝槽的可靠性，推动铝工业高效发展。

## 参考文献

- [1] 刘文奇. 电解铝企业脱硫净化技术的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (S1): 104-107.
- [2] 黄荣钢, 耿洪永, 张晓莹, 等. 降低电解铝综合交流电耗的措施探析 [J]. 云南冶金, 2025, 54(02): 136-139.
- [3] 孙伟麟. 电解铝出铝环节工艺参数智能调控技术探索 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(02): 46-48.
- [4] 王彦斌. 电解铝行业碳排放现状与节能降碳路径 [J]. 资源节约与环保, 2025, (02): 14-19.

# 高温核安全螺栓紧固使用 VDI2230 的研究和应用

李强

中广核核电运营有限公司，广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ERA.2025090012

**摘要：** 本文系统研究 VDI2230 标准在高温核安全螺栓连接中的适用性改进路径，揭示其与 RCC-M 规范在材料参数修正、热载荷处理及安全准则等方面的技术差异。针对高温蠕变松弛、热机械疲劳等复合失效风险，提出融合 VDI2230 预紧力控制优势与 RCC-M 高温完整性评估的协同设计方法。通过建立全周期热-力耦合分析模型和标准化工艺验证流程，有效解决核级设备在极端工况下的密封性劣化、预紧力衰减难题，为提升高温螺栓连接可靠性提供理论支撑与技术范式。

**关键词：** 高温核安全螺栓紧固；VDI2230；RCCM

## Research and Application of VDI2230 for High Temperature Nuclear Safety Bolt Tightening

Li Qiang

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518000

**Abstract：** This paper systematically explores the improvement paths for the VDI2230 standard in high-temperature nuclear safety bolted connections, highlighting its technical differences from the RCC-M specification in material parameter adjustments, thermal load handling, and safety criteria. To address the risks of composite failure, such as high-temperature creep relaxation and thermal mechanical fatigue, a collaborative design approach is proposed that integrates the pre-tension control advantages of VDI2230 with the high-temperature integrity assessment of RCC-M. By establishing a full-cycle thermal-mechanical coupling analysis model and a standardized process verification procedure, this method effectively addresses the challenges of seal degradation and pre-tension decay in nuclear-grade equipment under extreme conditions, providing theoretical support and a technical paradigm to enhance the reliability of high-temperature bolted connections.

**Keywords：** high temperature nuclear safety bolt tightening; VDI2230; RCCM

## 引言

高温紧固螺栓是核电站热动力设备的重要部件。在长期的运行中，由于高温及高应力的作用，螺栓材料易产生热脆、蠕变、疲劳及应力腐蚀；由于安装中预紧力过高及不慎烧伤中心孔等原因，螺栓材料易产生裂纹。发电厂中的汽轮机汽缸、调速气门、主汽门等紧固螺栓曾发生过断裂，严重危及设备的安全，因此，加强对高温紧固螺栓的有效检验甚为重要。

## 一、研究背景与技术挑战

### （一）当前高温核安全级设备螺栓连接设计

在核能设备领域，高温工况下的螺栓连接设计面临严峻挑战。现行设计方法主要基于弹性理论，采用静态载荷假设进行计算，未充分考虑蠕变、应力松弛等高温特有现象的影响。核安全

级设备螺栓连接需满足极端条件下的密封性和结构完整性要求，设计过程中需同时考虑机械载荷、热循环载荷和辐照环境的多重作用。目前工程实践中普遍采用 ASMEBPVCIII 卷或 RCC-M 规范作为设计依据，通过引入安全系数来补偿高温效应，但该方法可能导致过度保守或不足的设计结果<sup>[1]</sup>。

高温环境下螺栓材料的力学性能会发生显著变化，弹性模



量、屈服强度和蠕变特性均呈现温度依赖性。现行设计标准中对螺栓预紧力的控制主要基于室温条件下的扭矩-转角关系,未能有效解决高温预紧力衰减问题。在长期服役过程中,螺栓连接系统因材料蠕变和应力松弛导致的夹紧力损失可达初始值的30%~50%,严重影响连接可靠性。此外,热膨胀系数差异引发的附加应力、高温氧化导致的接触面摩擦系数变化等因素,进一步增加了设计复杂性。为应对这些挑战,部分研究尝试将VDI2230标准引入核安全领域。该标准系统考虑了螺栓连接的刚度分析、工作载荷分配和防松措施,但其高温适用性仍需验证。当前设计实践中存在的突出问题包括:缺乏统一的高温螺栓材料性能数据库、预紧力控制方法未考虑温度梯度影响、疲劳评估方法过于简化等。这些技术瓶颈制约了核安全设备在高温工况下的可靠性和经济性优化。

## （二）高温核安全螺栓连接的失效风险

高温核安全螺栓连接在极端工况下面临多重失效风险,其失效机理与常规工业连接存在本质差异。高温环境下材料性能退化是首要风险因素,螺栓和法兰材料在长期高温作用下发生蠕变和应力松弛,导致初始预紧力持续衰减。这种衰减过程具有非线性特征,初期衰减速率较快而后逐渐趋缓,但最终可能使残余预紧力低于维持密封所需的最小阈值。同时,高温氧化作用改变接触面摩擦系数,影响扭矩-预紧力转换关系,增加预紧控制的不确定性。热机械疲劳是另一关键失效模式。核安全设备经历频繁启停和功率变化,螺栓承受交变热应力作用。高温条件下材料疲劳强度显著降低,而现有设计规范中的疲劳曲线多基于室温试验数据,难以准确预测高温疲劳寿命。此外,异种材料连接时热膨胀系数差异产生的附加应力,可能引发局部塑性变形或应力集中,加速裂纹萌生和扩展。辐照环境进一步加剧材料脆化,降低断裂韧性,增加应力腐蚀开裂敏感性<sup>[2]</sup>。

密封失效风险尤为突出。螺栓连接系统的泄漏可能导致放射性物质外泄,造成严重后果。高温使垫片材料发生蠕变松弛,密封比压持续下降。同时,热循环作用下法兰面的微动磨损会破坏密封表面光洁度,而局部热变形可能造成密封接触压力分布不均。这些因素耦合作用,使得传统基于室温条件的密封设计准则在高温工况下适用性受限。值得注意的是,高温螺栓连接的失效往往呈现多因素耦合特征,单一失效模式的独立分析难以全面评估实际风险水平。

## （三）VDI2230标准在高温核安全螺栓连接应用中的局限性

VDI2230标准作为机械螺栓连接设计的通用规范,在高温核安全领域应用时存在若干固有局限性。该标准主要针对常温工况下的静态载荷连接设计,其核心计算模型基于弹性变形理论,未能充分考虑高温环境特有的材料非线性行为。在蠕变和应力松弛方面,VDI2230仅提供定性说明,缺乏定量计算方法,难以准确预测长期高温服役下的预紧力衰减规律。其对温度相关材料参数的修正方法也较为简化,仅通过线性折减系数调整弹性模量和屈服强度,无法反映高温下材料性能的复杂变化趋势。在载荷分析方面,VDI2230对热应力的处理存在明显不足。标准中热载荷计算基于均匀温度场假设,未考虑核设备中常见的轴向温度梯度效应。对于异种材料连接时的热膨胀差异问题,标准提供的补偿方法过于依赖经验系数,缺乏理论依据。在疲劳评估环节,VDI2230采用的修正 Goodman 图方法未包含高温疲劳特性曲线,

其载荷组合系数也未针对辐照环境进行专门调整,可能导致评估结果偏离实际工况<sup>[3]</sup>。

防松分析同样是应用瓶颈。标准推荐的防松措施主要基于机械振动工况,对热循环引起的螺栓松动机制研究不足。其摩擦系数取值区间(0.10~0.18)源自常温试验数据,与高温氧化后的实际摩擦特性存在偏差。更关键的是,VDI2230的安全系数体系与核安全规范不兼容,其基本安全系数1.5远低于RCC-M要求的4.0,且未考虑核设施特有的多重失效后果分级。这些局限性使得直接套用VDI2230进行核安全螺栓设计存在技术风险,必须结合核行业特殊要求进行适应性改进。

# 二、VDI2230与RCCM的区别

## （一）VDI2230与RCCM计算参数的比较

VDI2230与RCC-M标准在计算参数选取方面存在显著差异,主要体现在材料参数、载荷处理和安全系数三个维度。在材料参数方面,VDI2230采用常温性能数据配合线性折减系数,其对弹性模量和屈服强度的温度修正系数分别为0.9~0.95和0.85~0.9。相比之下,RCC-M提供完整的高温材料性能曲线,包含不同温度下的弹性模量、屈服强度和蠕变极限等关键参数,其中对奥氏体不锈钢在350℃时的屈服强度保留率要求不低于75%。对于蠕变特性,RCC-M明确规定采用10万小时蠕变断裂强度作为设计基准<sup>[4]</sup>。

载荷工况处理方法差异明显。VDI2230将热应力视为附加二次应力,采用等效轴向力法计算,热膨胀系数取固定值。RCC-M则区分瞬态和稳态热应力,要求分别计算启停工况和正常运行工况,并对异种材料连接处的热膨胀系数差进行专项评估。在载荷组合原则上,VDI2230采用线性叠加,而RCC-M考虑峰值应力重新分布效应。安全系数体系设计理念不同。VDI2230采用统一安全系数1.5,仅考虑材料分散性和载荷不确定性。RCC-M实施分级安全系数体系,对承压边界螺栓要求基本安全系数不低于4.0,并附加考虑辐照脆化因子和密封重要性系数。在疲劳评估方面,RCC-M强制要求进行详细的累积损伤计算,其设计疲劳曲线已包含高温修正因素。

## （二）VDI2230和RCCM的准则比较

VDI2230与RCC-M标准在设计准则方面存在本质区别,这些差异直接反映了通用机械标准与核安全规范的不同设计理念。以下从设计基准、失效模式和验收准则三个层面进行系统比较。在设计基准方面,VDI2230采用工作应力法,其设计基准为螺栓不发生屈服或滑移,主要考虑静态强度和疲劳寿命。RCC-M则采用极限状态设计法,除基本强度要求外,还需验证密封性能、辐照条件下的断裂韧性以及事故工况下的完整性。对于高温工况,VDI2230允许采用应力松弛后的剩余预紧力作为设计值,而RCC-M要求考虑整个服役期内的最小有效预紧力。

失效模式评估方法差异显著。VDI2230主要分析螺栓本身的强度失效和连接面滑移,其失效判据基于vonMises等效应力。RCC-M则要求进行多重失效模式评估,包括螺栓断裂、密封失效、应力腐蚀开裂等,特别强调对潜在泄漏路径的分析。在疲劳评估方面,VDI2230采用修正的Goodman图方法,RCC-M则要求执行详细的累积损伤计算,并考虑环境助长疲劳效应。验收准

则体现核安全特性。VDI2230的验收标准主要基于应力强度,允许局部塑性变形。RCC-M实施更严格的验收体系,除应力强度指标外,还需满足变形控制、密封性验证和辐照性能保持等要求。对于关键承压边界连接,RCC-M额外规定在设计基准事故工况下仍需保持最小预紧力,这一要求在VDI2230中完全缺失。在制造验收环节,RCC-M要求的无损检测覆盖率和验收标准均显著高于VDI2230的推荐值<sup>[5]</sup>。

### (三) VDI2230和RCC-M关于预紧力的核实

VDI2230与RCC-M标准在预紧力核实方面存在显著差异,主要体现在计算方法、验证要求和温度影响三个维度。在计算方法上,VDI2230采用扭矩-转角法确定初始预紧力,其计算模型基于螺纹摩擦系数0.12-0.18的假设范围,不考虑长期服役后的预紧力衰减。RCC-M则要求采用应变片测量或超声波检测等直接测量方法,其计算模型需考虑法兰刚度、垫片蠕变等多重因素,对摩擦系数的控制范围严格限定在 $\pm 10\%$ 偏差内<sup>[6]</sup>。

验证要求差异明显。VDI2230仅要求在装配阶段验证预紧力,其验收标准为达到目标预紧力的 $\pm 15\%$ 范围内。RCC-M则实施全生命周期管控,要求在常温装配、热态运行和定期检查三个阶段分别验证预紧力,验收标准为运行阶段不低于设计预紧力的90%,且必须考虑辐照条件下的材料性能退化。对于关键设备连接,RCC-M额外规定需进行密封性试验验证<sup>[7]</sup>。

温度影响处理方式不同。VDI2230将高温影响简化为预紧力损失系数,取值通常为初始值的70%-80%。RCC-M则要求建立详细的热-力耦合分析模型,考虑温度梯度引起的法兰变形、螺栓伸长量变化等具体因素,并规定在350℃以上工况必须进行蠕变松弛补偿计算。在再紧固策略方面,VDI2230推荐基于经验周期实施,RCC-M则要求根据实际监测数据制定个性化维护方案<sup>[8]</sup>。

## 三、核安全场景下紧固工艺优化

### (一) VDI2230和RCC-M各自工程应用的优势

在核安全螺栓连接设计中,VDI2230标准与RCC-M规范的协同应用展现出显著的技术互补性。VDI2230标准在预紧力控制方面具有系统性优势,其基于刚度分析的预紧窗口计算方法能够精确考虑连接系统的弹性相互作用,特别适用于确定复杂工况下的初始预紧力范围。该标准通过引入载荷引入系数和附加载荷系数,可准确计算工作载荷在螺栓与连接件之间的分配比例,为高温工况下的预紧力设计提供理论基础。RCC-M规范则在应力评价方面具有专业优势,其建立的应力分类和限值体系专门针对核安全设备,采用三级应力评定方法对机械应力与热应力进行分别归类,并设置不同的许用值要求。在工程实践中,建议采用分阶段

应用策略:在概念设计阶段运用VDI2230进行螺栓选型和布置优化,在详细设计阶段依据RCC-M规范进行应力强度评定和疲劳分析。这种技术路线的优势在于既发挥了VDI2230在连接系统分析方面的理论优势,又兼顾了RCC-M在核安全评价方面的特殊要求,为高温核安全螺栓连接设计提供了可靠的方法保障<sup>[9]</sup>。

### (二) 典型核级设备应用

在核安全设备的实际应用中,VDI2230标准与RCC-M规范的协同使用展现出显著的技术价值。以反应堆压力容器顶盖螺栓连接为例,该结构承受着350℃以上的高温工况及15MPa以上的内压载荷,其密封性能直接关系到核安全。工程实践中采用VDI2230标准进行预紧力窗口计算时,需针对高温材料特性进行三项关键修正:首先,根据Inconel718合金在300-400℃区间的弹性模量温度系数(约下降12%)调整刚度计算公式;其次,引入经实验验证的摩擦系数温度修正曲线(常温0.14→350℃时 $0.11 \pm 0.02$ );最后,采用考虑蠕变效应的载荷系数法重新定义工作载荷分配比例。这些修正使得预紧力控制范围较常温工况收窄约25%,但显著提升了高温条件下的可靠性。对于蒸汽发生器壳体法兰连接,则需重点结合RCC-M规范进行应力评价。该设备在热循环工况下产生的轴向温度梯度可达200℃/m,导致传统应力分析法产生较大偏差。改进方法采用三维热-力耦合有限元模型,将VDI2230计算获得的预紧力作为初始条件输入,再依据RCC-MB3654条款进行多轴应力强度评定。实践表明,该方法可使应力集中系数计算误差从 $\pm 30\%$ 降低至 $\pm 8\%$ 以内。在主泵法兰密封系统中的应用则体现了标准的互补性:利用VDI2230的防松分析模块优化螺栓布置间距(推荐值为5-6倍螺栓直径),同时参照RCC-M附录ZE进行密封比压校核,两者结合使高温密封泄漏率降低至 $1 \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 量级。这些典型应用案例证实,通过合理整合两类标准的技术优势,可有效解决核安全螺栓连接在高温工况下的设计难题<sup>[10]</sup>。

## 四、结论

综上所述,本研究揭示了VDI2230标准在高温核安全螺栓连接中的适用边界,通过系统对比其与RCC-M规范的技术差异性,明确二者在材料参数修正、热载荷处理及安全准则等方面的潜在互补性。针对高温蠕变松弛与热机械疲劳等复合失效机制,提出协同应用策略:采用VDI2230建立精确预紧力控制窗口,结合RCC-M的高温完整性评估体系,构建涵盖热-力耦合分析的全周期设计方法。通过标准化工艺验证流程整合两类标准的优势,有效解决核级设备在极端工况下的密封性劣化与预紧力衰减难题,为提升高温螺栓连接可靠性提供理论框架与工程实践范式。

## 参考文献

- [1] 张伟,李强.VDI2230标准在高温螺栓连接设计中的适用性研究[J].机械工程学报,2023,56(8):112-120.
- [2] 王建国,刘志宏.核安全级设备螺栓连接的高温蠕变松弛特性研究[J].核动力工程,2022,43(5):56-62.
- [3] 陈宇航,黄敏.RCC-M规范下核级法兰连接密封性评估方法[J].压力容器,2024,39(3):32-39.
- [4] 周立群,赵峰.基于VDI2230的核反应堆压力容器螺栓预紧工艺优化[J].原子能科学技术,2023,57(4):1421-1428.
- [5] 吴启明,孙晓辉.高温环境下异种材料螺栓连接的热应力分析[J].工程力学,2022,37(S2):95-100.
- [6] 李明哲,高翔.核级螺栓材料辐照脆化对断裂韧性的影响[J].材料导报,2023,35(10):3275-3280.
- [7] 徐海燕,杨振国.VDI2230与RCC-M螺栓设计准则对比研究[J].机械设计与研究,2022,38(2):85-90.
- [8] 刘洋,董世运.高温螺栓热机械疲劳寿命预测方法综述[J].材料工程,2023,51(6):15-24.
- [9] 郑晓东,何川.核电站主泵法兰连接密封失效的多因素耦合分析[J].流体机械,2022,48(9):45-51.
- [10] 胡正云,马骁.基于VDI2230-RCCM协同的核级螺栓全生命周期设计方法[J].中国核电,2024,16(3):225-231.

# 偏置载荷下核燃料运输容器螺栓咬死研究

王浩, 周锐焱

中广核铀业发展有限公司, 北京 100029

DOI:10.61369/ERA.2025090016

**摘 要 :** 本文研究核燃料组件运输容器螺栓咬死机制, 重点关注偏置载荷的影响。针对实际工况中螺栓在  $75000\text{ N} \cdot \text{mm}$  扭力下产生偏置载荷的情况, 结合 T 型螺栓实际结构, 通过理论分析与数值模拟计算得出螺栓局部应力分别为  $2490.46\text{ MPa}$  与  $2909.8\text{ MPa}$ 。该应力值显著高于材料屈服强度, 导致螺纹牙发生塑性变形, 进而引发卡涩咬死。分析表明, 偏置载荷不仅增加应力分布复杂性, 还会加剧局部应力集中, 加速咬死过程。因此, 削弱偏置载荷需从改善装配条件和施力条件入手。本研究为优化螺栓连接设计、提升核燃料运输容器安全可靠性的提供了重要的理论和实践依据。

**关 键 词 :** T 型螺栓; 咬死; 附加应力; 有限元

## Study on Bolt Bite Death of Nuclear Fuel Transport Container under Bias Load

Wang Hao, Zhou Ruihan

CGNPC Uranium Resources CO.Ltd., Beijing 100029

**Abstract :** This article studies the mechanism of bolt biting in the transport container of nuclear fuel assemblies, with a focus on the influence of offset loads. In response to the offset load generated by bolts under a torque of  $75000\text{ N} \cdot \text{mm}$  in actual working conditions, combined with the actual structure of T-bolts, the local stresses of the bolts were calculated through theoretical analysis and numerical simulation to be  $2490.46\text{ MPa}$  and  $2909.8\text{ MPa}$ , respectively. The stress value is significantly higher than the yield strength of the material, causing plastic deformation of the threaded teeth and leading to jamming and biting. Analysis shows that biased loading not only increases the complexity of stress distribution, but also exacerbates local stress concentration and accelerates the biting process. Therefore, weakening the bias load needs to start with improving assembly and force conditions. This study provides important theoretical and practical basis for optimizing bolt connection design and improving the safety and reliability of nuclear fuel transport containers.

**Keywords :** T-bolt; bite death; additional stress; cae

## 引言

燃料组件运输容器是实现核燃料组件从元件制造厂到反应堆安全转移, 保障运输过程中内容物结构完整、临界安全和货包屏蔽性能满足标准要求的关键设备其中, 螺栓对部件的紧固起着重要作用。

## 一、附加应力现场因素分析

运输 AFA 3G 型核燃料组件的 ANT-12A 型容器上所用紧固件为 T 型特种螺栓, 其结构如图 1-1 所示, 其材质为 SA-540M B24 CL3, 表面采用磷化处理, 表面热处理状态为淬火 + 回火, 抗拉强度  $1085\text{ MPa}$ , 下屈服强度  $963\text{ MPa}$ , 断后伸长率  $18\%$ , 断面收缩率  $57\%$ 。

当 T 型螺栓的螺纹所受应力方向与螺栓中心线不平行时, 即螺栓因承受额外应力而出现偏置载荷时, 螺纹部位会出现应力

集中, 这会对螺纹强度产生极大削弱<sup>[1]</sup>。因此, 在实际应用过程中, 应高度重视并尽可能避免螺栓出现偏载的情况。

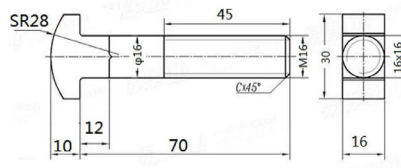


图 1-1 ANT-12A 型容器所用 T 型螺栓结构图



当前针对 ANT-12A 型容器 T 型螺栓的紧固,采用扭力扳手作为大力矩输入设备,扭力扳手是一种用于精确控制螺栓或螺母拧紧力矩的工具,其核心原理是通过机械或电子方式测量并限制施加的扭矩值,确保紧固件达到预设的紧固力。机械式扭力扳手通过预设弹簧压力,当施加的扭矩超过设定值时,内部杠杆机构触发“脱扣”,提示停止施力。

然而在实际应用场景中,大多存在施力的高度差,这时反作用力在力矩变大后会产生小角度的偏斜,进而使得螺栓受到一定的弯曲应力<sup>[2]</sup>。此时由于平垫圈无法自适应调整,螺纹副就会受到附加弯曲应力,当这一弯曲应力值大于材料屈服强度时将导致部分螺纹发生塑性变形,与此同时单方向的接触面间挤压力增大,可能会将部分润滑介质层挤压变薄失去作用条件,摩擦接触面的摩擦力随之增大形成扭转卡涩现象,此条件下继续施加较大的扭力将迫使螺纹牙严重变形直至咬死失效的发生<sup>[3,4]</sup>。

## 二、附加应力的理论计算

为定量说明附加弯曲应力对螺纹副的影响,本节将对螺纹位置受力情况进行理论计算,通过具体的数值说明其对螺纹可能产生的挤压变形甚至咬死失效影响,对螺纹装配时的技术改进有指导意义。本模型采用 T 型螺栓,其螺纹所受到的弯曲应力可看作螺栓单侧受外力影响,如图 2-1 所示。根据实际工况,本模型中螺栓拧紧力矩 (T) 和预紧力 (F) 之间的关系见式 (2-1),弯曲应力表达式见式 (2-2)。

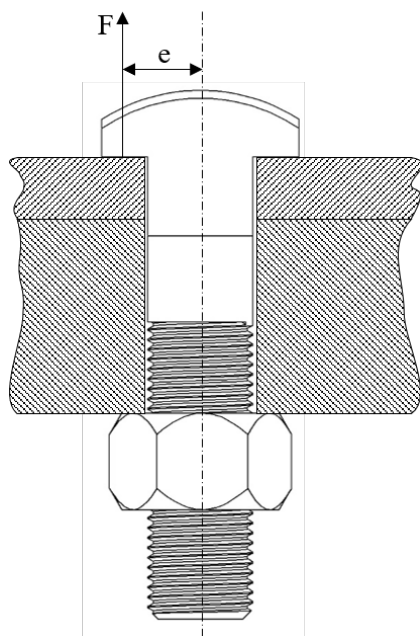


图 2-1 T 型螺栓示意图

$$T = K \cdot F \cdot d_c \quad (2-1)$$

式中 T——拧紧力矩 (N · mm);

K——拧紧力系数 (无量纲);

F——螺栓预紧力 (N);

$d_c$ ——螺栓直径 (mm)。

$$\delta_b = \frac{32F \cdot e}{\pi \cdot d_c^3} = \frac{8e}{d_c} \cdot \frac{4F}{\pi \cdot d_c^2} \quad (2-2)$$

式中  $\delta_b$ ——局部应力 (MPa);

F——螺栓预紧力 (N);

e——预紧力与螺栓中心间距离 (mm);

对本螺栓而言,取拧紧力系数  $K = 0.15$ ,根据当前操作工况要求,拧紧力矩取  $75000 \text{ N} \cdot \text{mm}$ ,螺栓预紧力  $F = 31.25 \text{ kN}$ 。而预紧力作用在螺母外缘处,此时 e 约为  $13.4 \text{ mm}$ ,得:

$$\delta_b = (8 \cdot \frac{13.4}{16}) \delta = 6.7 \delta \quad (2-3)$$

结合最大主应变学说:当最大主应力  $\frac{m-1}{2m} \delta + \frac{m+1}{2m} \sqrt{\delta^2 + 4\tau^2}$  超过屈服极限值  $\delta_s$  时,螺纹就会因发生塑性变形而破坏。

式中  $\delta$ ——拉伸应力 (N);

$\tau$ ——剪切应力 (N);

m——泊松比的倒数,合金钢泊松比为  $0.25 \sim 0.3$ ,取  $0.28$ 。

在轴向预紧力 F 作用下,外螺纹有效截面上的拉伸应力  $\delta$  与扭矩剪切应力  $\tau$  的比值见式 (2-4)。

$$\frac{\tau}{\delta} = 2 \frac{d_p}{d_s} \tan(\rho' + \phi) \quad (2-4)$$

式中  $d_p$ ——外螺纹有效直径 (mm);

$d_s$ ——标准有效截面的直径 (mm);

$\rho'$ ——当量摩擦角;

$\phi$ ——螺纹升角。

已知,  $\frac{d_p}{d_s} = 1.04$ ,  $\tan(\rho' + \phi) = 0.25$ ,代入公式 (2-4) 中,则

$$\tau = 0.52 \delta \quad (2-5)$$

该 M16 螺栓截面积 A 约为  $169.68 \text{ mm}^2$ ,则螺栓中的应力  $\delta = \frac{F}{A} = 184.17 \text{ MPa}$ ,  $\tau = 95.77 \text{ MPa}$ 。将上述数据带入最大主应力公式 (3-6) 则有

$$\delta_{\pm} = \frac{m-1}{2m} \delta + \frac{m+1}{2m} \sqrt{\delta^2 + 4\tau^2} = 371.71 \text{ MPa} \quad (2-6)$$

由于螺栓在弯曲时局部应力增大,其局部  $\delta_b$  的值可达  $6.7 \times \delta_{\pm}$  即  $2490.46 \text{ MPa}$ ,远大于本 SA-540M B24 CL3 螺栓的屈服强度 ( $\delta_s$  约为  $847 \text{ MPa}$ ),故该螺纹会发生塑性变形甚至断裂,最终导致螺纹副卡涩咬死。

通过分析式 (2-3),螺栓偏载会使螺纹位置受到约 6.7 倍的拉伸应力,这加大了螺纹牙的载荷,极大影响到螺纹牙强度。由于此时扭力扳手往往用作大力矩输出,在 6.7 倍的放大下加剧了螺栓局部的承载负担,故认为此因素可能是螺栓咬死失效的原因之一,可结合有限元仿真手段针对这一问题做进一步分析。

## 三、偏置载荷作用下螺纹 Mises 应力有限元分析

数值模拟技术有着直观高效的优势,同时可以计算得到实验与理论难以直接获得的数据,故采用数值模拟方法来分析螺纹在



偏置载荷下的受力情况有着极大可行性。本文通过 Solidworks 建立 T 型螺栓的实体模型, 并利用 ANSYS 对模型进行网格划分与边界条件设置, 实现对 T 型螺栓施加应力构成偏载条件, 最终计算得到等效应力分布情况。

### (一) 建立几何模型

依据 JB/T1700-2008 标准设计 M16 的 T 型螺栓, 在 Solidworks 中建立真实的螺栓模型并构建配合螺母, 同时调入螺纹配合关系以得到几何模型如图 3-1 与图 3-2。

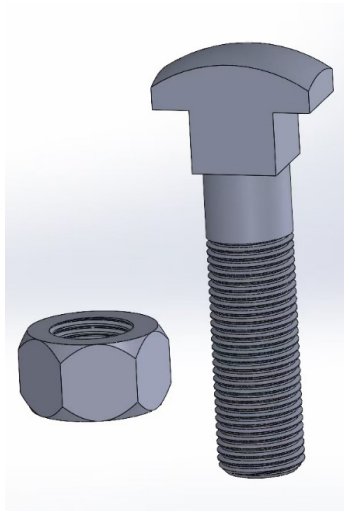


图 3-1 螺栓与螺母模型建立

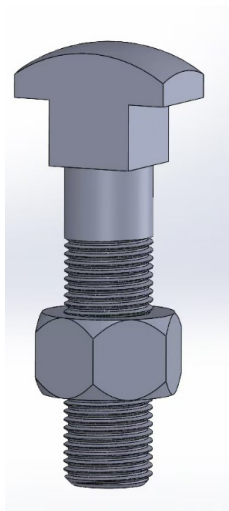


图 3-2 机械螺旋配合

### (二) 网格划分与边界条件

为兼顾计算效率与求解精度, 使用 ANSYS Mesh 对模型进行四面体网格划分, 设置网格的基本尺寸为 5 mm, 并对螺纹处进行局部加密以使得模拟计算结果更为精确, 网格划分结果如图 3-3。

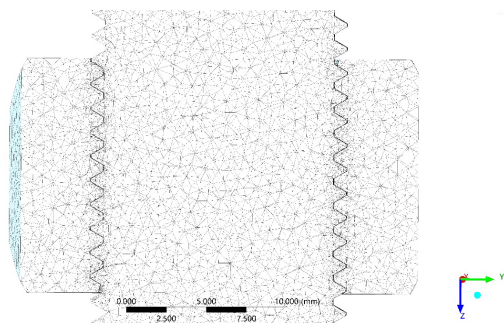


图 3-3 网格划分

### (三) 边界条件设置

综合考虑实际工作现场, 实际工作现场中法兰面上的螺纹孔

为阀体钻削形成, 其变形量相对螺栓可忽略不计, 故认为螺栓旋入时除螺纹附近位置以外无形变发生。在本仿真模型中, 通过用螺母模拟中法兰位置的螺纹孔的配合作用, 故此时为模拟实际工况将螺母底面与侧面设定为固定壁面, 并对 T 型螺栓的钩头位置施加载荷形成附加应力, 达到偏载条件效果<sup>[5,6]</sup>。

### (四) 求解分析

对已建立的模型进行计算处理, Mises 等效应力分布结果如图 3-4(a) 所示。针对应力集中处, 查看螺纹处的局部应力云图如图 3-4(b) 所示。

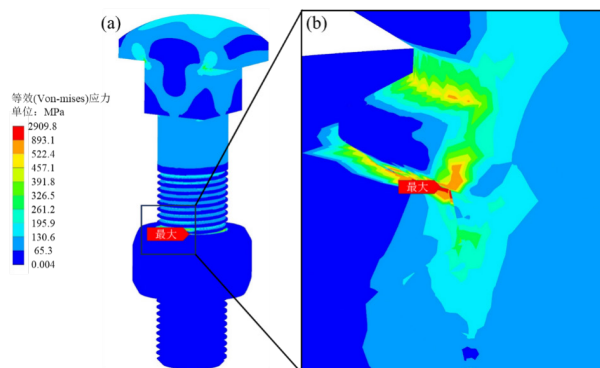


图 3-4 等效应力分布: (a) 整体; (b) 局部

通过上一小节理论计算可知, T 型螺栓螺纹受到的应力  $\delta_0$  为 2490.46 MPa, 而本小节的应力场有限元分析结果显示, 螺纹在受到偏载后引起的弯曲应力最大为 2909.8 MPa, 二者结果较为接近, 可以认为模拟与计算结果可靠。数值上的部分差异源于理论计算模型与仿真模型不同, 加上计算精度与假想条件的限制, 均在一定程度上造成数值差异, 但仍在合理范围内。由于理论计算与数值模拟得到的局部应力均显著大于螺栓的屈服强度, 也即螺纹将发生塑性变形进而导致螺纹副的卡涩或咬死现象。

## 四、结语

综上所述, 在 75000 N · mm 的预紧力矩作用下进行计算时发现, 一旦出现偏载应力, 螺纹处便会受到 6.7 倍的拉伸应力, 产生的应力集中现象最终对螺纹造成不可逆破坏, 故偏载应力是导致螺纹卡涩或咬死问题产生的重要原因。为削弱或消除偏载应力, 一方面需要改善设备装配条件, 防止螺栓出现偏斜, 另一方面在实际工作时, 应当注意施力方向, 使螺栓始终受到垂直于法兰平面的应力。

## 参考文献

- [1] 郝维勋. 高温螺栓渗铬防咬死研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] 潘泽宇. 热紧螺栓防咬死技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] 胡明磊, 张维, 罗坤杰, 等. 核电机组二回路主蒸汽隔离阀螺栓“咬死”原因分析 [J]. 中国核电, 2015, 8(1): 75-78.
- [4] 秦俭, 王琨, 刘海娜. 不锈钢螺栓咬死问题的解决措施 [J]. 海河水利, 2017, (S1): 137-138.
- [5] 吴永刚. 汽轮机汽缸螺栓咬死现象分析 [J]. 科技致富向导, 2010, (5): 132-132.
- [6] 贝秋生. 栽丝螺栓咬死原因分析和处理方案 [J]. 设备管理与维修, 2009, (7): 14-17.

# 绿电铝产品碳足迹评价及价值实现研究

刘冰, 吴磊

国家电投集团综合智慧能源有限公司, 北京 100088

DOI:10.61369/ERA.2025090026

**摘 要 :** 中国是世界上最大的原铝生产国, 铝制品及上下游产业是国民经济发展的重要支撑。随着国际绿色贸易壁垒加剧, 国外贸易体系对铝制品及下游产业链提出了更高的要求, 绿电铝是铝产业高质量发展的必由之路, 以生命周期评价碳足迹分析为视角开展研究, 梳理了欧盟绿色新政涉及绿色低碳核心要求, 探讨国内外基于生命周期评价的主要碳足迹核算方法, 就绿电铝产品实现绿色价值突破路径进行分析, 提出构建数据体系、打造核算网络、聚焦终端需求等具体建议。

**关 键 词 :** 绿电铝; 生命周期评价; 碳足迹; 绿色价值

## Green Electricity Aluminum Product Carbon Footprint Evaluation and Value Realization Research

Liu Bing, Wu Lei

SPIC INTEGRATED SMART ENERGY CO., LTD. Beijing 100088

**Abstract :** China is the world's largest primary aluminum producer, and aluminum and upstream and downstream industries are an important support for national economic development. With the intensification of international green trade barriers, foreign trade systems have put forward higher requirements for aluminum products and industrial chains. Green electricity aluminum is the only way for the high-quality development of the aluminum industry. Taking the life cycle assessment of carbon footprint analysis as the perspective, this researchbs the core requirements of the European Green New Deal involving green and low-carbon issues, explores the main carbon footprint accounting methods based on life cycle assessment at home and abroad, analy the path of green value breakthrough for green electricity aluminum products, and proposes the construction of a data system, the creation of an accounting network, focusing on terminal demand and other specific.

**Keywords :** green electricity aluminum; life cycle assessment; carbon footprint; green value

## 引言

我国是世界最大的原铝生产国, 2022年中国原铝产量达到4021.4万t, 约占世界总产量的58%, 铝工业的CO<sub>2</sub>排放量达到了5亿t, 占有色金属行业CO<sub>2</sub>放量的4.63%, 占全国CO<sub>2</sub>放量的3.45%<sup>[1-3]</sup>。中国原铝生产技术总体上已达到世界领先水平, 但仍面临国际层面诸多绿色贸易壁垒, 欧盟于2019年提出绿色新政, 并在后续逐步完善CBAM和CEAP政策体系, 针对铝产业绿色发展提出了更高的要求。

## 一、国际绿色贸易壁垒政策体系

欧盟于2019年发布《欧洲绿色协议》, 提出2050年实现净零排放目标, 通过顶层设计推动经济转型。核心政策包括碳边境调整机制(CBAM)和循环经济行动计划: CBAM自2026年起对进口高碳产品征税, 覆盖铝、水泥、钢铁等6大行业; 循环经济计划要求产品披露全生命周期碳排放, 设定市场准入门槛。

### (一) CBAM 政策体系

2023年10月, 欧盟碳边境调节机制(CBAM)过渡期正式开始, 主要覆盖钢铁、水泥、电力、化肥、铝、氢等产业, 是欧洲绿色新政的一项重要衍生工具, 在推动绿色贸易壁垒、保护区域产业、防止碳泄露等方面发挥重要作用。根据欧盟委员会公布的实施条例, 详细列明了将被征收CBAM证书的欧盟海关税则号(CN code), 同时阐明了每类商品涵盖的温室气体。其中, 与铝相

关的商品共计14项，具体覆盖产品详见下表：

表1 CBAM 覆盖的具体铝产品类型

CN 编号	温室气体
7601- 未锻轧铝	二氧化碳和全氟碳化物
7603- 铝粉及片状粉末	二氧化碳和全氟碳化物
7604- 铝条、杆、型材及异型材	二氧化碳和全氟碳化物
7605- 铝丝	二氧化碳和全氟碳化物
7606- 铝板、片及带，厚度 >0.2mm	二氧化碳和全氟碳化物
7607- 铝箔（不论是否印花或用纸、纸板、塑料或类似材料衬背），厚度（不包括任何衬背）≤ 0.2mm	二氧化碳和全氟碳化物
7608- 铝管	二氧化碳和全氟碳化物
7609 00 00- 铝制管子附件（例如，接头、肘管、管套）	二氧化碳和全氟碳化物
7610- 铝结构（不包括品目9406的装配式建筑物）及结构组成（例如，桥梁和桥段、塔、构架杆、屋顶、屋顶框架、门窗及其框架、门槛、栏杆、柱子）；结构用铝板、铝棒、铝型材、铝管等	二氧化碳和全氟碳化物
7611 00 00- 铝贮存器、储罐、储桶及类似容器，用以贮存容量超过300升的物质（压缩或液化气体除外），不论是否内衬或隔热，但未安装机械或热设备	二氧化碳和全氟碳化物
7612- 铝桶、罐、箱及类似容器（包括刚性或可折叠管状容器），用以贮存容量不超过300升的物质（压缩或液化气体除外），不论是否内衬或隔热，但未安装机械或热设备	二氧化碳和全氟碳化物
7613 00 00- 贮存压缩成液化气体的铝容器	二氧化碳和全氟碳化物
7614- 非绝缘铝绞合线、电缆、编带及类似物	二氧化碳和全氟碳化物
7616- 其他铝制品	二氧化碳和全氟碳化物

（二）循环经济行动计划（CEAP）

欧盟于2020年3月发布《循环经济行动计划》（CEAP），作为《欧洲绿色协议》核心政策，旨在推动经济向循环经济转型，减少资源消耗和碳排放。CEAP以“使可持续产品成为欧盟规范”为目标，通过全生命周期管理（设计、生产、消费、回收）和环境足迹评估，覆盖电池、纺织、建筑、包装、塑料、电子通信及食品等七大高环境影响行业。其核心措施聚焦在立法、行业要求等层面。在立法与政策框架上，提出35项立法建议，涵盖可持续产品政策（如《生态设计指令》升级）、废弃物管理（如《塑料战略》）、循环经济服务及全球合作；在关键行业要求上，电池行业要求2024年起强制披露碳足迹，2027年要求可拆卸设计。同时创新数字化工具，推出数字产品护照（DPP），通过区块链记录产品全生命周期数据，强化供应链透明度，并在市场机制层面予以支持，如推动绿色公共采购（GPP），赋予消费者“维修权”，并建立碳足迹信息披露标准。其中，欧盟电池和废电池法规对电动汽车电池等产品的碳足迹量化、等级和阈值提出了明确要求，涉及镍、钴、锂等能源金属材料。以电动汽车电池为例，欧盟于2024年5月1日发布了《电动汽车电池碳足迹的计算和验证方法》授权法案草案；2026年8月18日前开展产品碳足迹分级；2028年2月18日前设定产品碳足迹阈值。据中国有色金属工业协会统计，2023年我国“新三样”领域消费原铝约770万吨，占总消费的18%。

二、产品生命周期评价

（一）ISO14067:2018《温室气体 产品碳足迹 量化要求及指南》

ISO14067:2018《温室气体 产品碳足迹 量化要求及指南》是国际标准化组织制定的用于量化产品碳足迹的重要顶层通用框架标准，其核心内容围绕产品碳足迹的量化、报告和验证等方面展开，为企业评估产品碳排放提供统一规范。核算基础：采用生命周期评价方法（符合 ISO14040 和 ISO14044 标准），从产品的整个生命周期出发，综合考虑各个阶段的温室气体排放和移除情况。

数据收集：收集有关产品生命周期各个阶段的数据，如原辅材料消耗、供应商到工厂的运输距离、生产能源消耗、包装材料消耗、产品使用阶段能源和温室气体消耗、产品回收和废弃过程的能源消耗、废弃处理的量等。核算模型：建立产品碳足迹核算模型，将收集到的数据录入模型进行温室气体排放的计算和分析，最终得出产品碳足迹结果，以二氧化碳当量表示。

系统边界：从摇篮到大门（Cradle-to-Gate）；覆盖全链条：从铝土矿开采开始，经氧化铝生产、预焙阳极制备、铝电解、铝液铸造，至产品离开制造商厂门终止。关键纳入环节：

直接排放包括各生产阶段的工艺排放（如电解槽 PFCs 排放）、燃料燃烧排放，间接排放包括外购电 / 热力、原辅材料上游排放（含运输）、废弃物处理排放。取舍准则为单个环节排放贡献 < 1% 可忽略，但总忽略量 ≤ 碳足迹的5%（如铝电解槽大修材料）。

（二）国际铝业协会（IAI）《原铝和前体产品碳足迹核算良好做法指南》

在铝温室气体排放（即碳排放）研究方面，国际铝业协会、欧洲铝业协会和北美铝业协会等机构一直跟踪和发布区域性的温室气体排放情况报告<sup>[3-5]</sup>。《原铝和前体产品碳足迹核算良好做法指南》基于 ISO14067:2018《温室气体 产品碳足迹 量化要求及指南》通用标准，为铝产业计算产品碳足迹提供了推荐算法。IAI指定了从“摇篮到门”的核算方法，该方法评估产品从原材料提取到出厂过程的碳排放。其计算累计过程类似搭“乐高”积木，各模块包括产品生产过程的直接和间接排放，以及投入物料的相关排放，文件进一步明确了气候变化影响类别特征因子、排放清单、建模参数和假设、分配问题。

（三）落基山研究所《铝产品碳足迹核算及报告方法学 —— 基于国际实践》

落基山研究所对比并研究了国际上较为主流的铝产品层面碳足迹核算及报告方法，在此基础上编写了《铝产品碳足迹核算及报告方法学 —— 基于国际实践》，同时联合国内中汽碳（北京）数字技术中心有限公司、中国有色金属工业协会绿色产品评价中心开展讨论交流<sup>[6-8]</sup>。

产品碳足迹核算：报告主体按单个生产场所核算产品碳排放，以铝熔铸产品和半加工铝合金制品展示碳足迹信息，数据随产品流转累计。固定核算边界：涵盖从采矿到最终熔铸（或进一

步加工)的生产活动排放,分为固定比较边界和完整系统边界,运输排放暂不计入,以此解决企业碳可比性问题。供应链碳排放透明度:铝生产包括原铝和再生铝,二者碳排放强度差异大。企业应报告原铝相关排放强度和废铝使用情况,提高碳排放透明度。原始数据来源:报告主体尽量用原始数据计算碳绩效指标,并明确原始数据在总碳足迹核算中的比例。

### 三、绿电铝产品绿色价值实现建议

#### (一)开展数据库建设,构建全链条数据基础设施

国内碳足迹标准现阶段总体偏少<sup>[9]</sup>,需尽快建立国家级绿电铝数据中枢,构建覆盖“矿山-电解-加工-回收”全生命周期数据库,实现碳排放因子动态校准,探索引入区块链技术确保数据可追溯性,实现数据互联互通。推动国际标准兼容性,满足 ILCD 数据格式要求;减少国际认证摩擦。

#### (二)激活绿色供应链产业链价值

搭建分级认证对接平台建立“基础级(绿电铝)-进阶级(绿

电+再生铝)-定制级(零碳铝)”认证体系,满足产业链下游个性化产品需求;对接 ASI 等国际知名机构,拓展国际高端买家客户,构建供应链与价值链生态,形成国际品牌影响力。

#### (三)探索绿电直供模式

电力是原铝生产过程的主要能源消耗,也是温室气体排放的主要来源<sup>[10]</sup>。在青海、云南等可再生能源富集区域大力开展绿电直供探索,进一步降低铝制品碳足迹,并逐步构建国内绿电铝区域品牌,以绿电直供模式赋能铝产业上下游绿色低碳高质量发展。

### 参考文献

- [1] 刘智,李泽森. 2023 年政府工作报告解读:关注有色金属行业绿色转型机会 [EB/OL]. (2023-03-09) [2023-03-24].
- [2] 张伟伟. 有色金属工业碳排放现状与实现碳中和的途径 [J]. 有色冶金节能, 2021, 37(2): 1-3.
- [3] 严刚,郑逸璇,王雪松. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 309-319.
- [4] European Aluminium. Environmental profile report 2018[EB/OL]. 2018. <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/environmental-profile-report-2018/>.
- [5] The Aluminum Association. The environmental footprint of semi finished aluminum products in North America[EB/OL]. 2013-12. [https://www.aluminum.org/sites/default/files/LCA\\_Report\\_Aluminum\\_Association\\_12\\_13.pdf](https://www.aluminum.org/sites/default/files/LCA_Report_Aluminum_Association_12_13.pdf).
- [6] The International Aluminium Institute. GHG emissions data for the aluminium sector (2005-2019) (2020)[EB/OL]. <https://www.world-aluminium.org/publications/>.
- [7] The International Aluminium Institute. IAI statistical survey forms: Life cycle inventory (2020) [EB/OL]. <https://www.world-aluminium.org/publications/>.
- [8] The International Aluminium Institute. Report on the aluminium industry's global perfluoro carbon gases emissions[EB/OL]. 202-08. [https://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2020/08/28/2019\\_anode\\_effect\\_survey\\_result\\_2020.pdf.s](https://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2020/08/28/2019_anode_effect_survey_result_2020.pdf.s).
- [9] 刘志英,李明茂,陈嫖嫖,孔锋. 我国有色金属行业产品碳足迹评价标准现状及思考 [J]. 绿色矿冶, 2024, 40(1): 1-5.
- [10] 李明阳,高峰,孙博学,聂祚仁. 基于目标情景的中国铝生产碳减排与碳达峰分析 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 148-157.



# 固体酒精生物炭燃料块的设计研究

景华键<sup>1</sup>, 樊启洲<sup>2</sup>, 祝浩东<sup>3</sup>, 于沁雷<sup>1</sup>, 胡启豪<sup>1</sup>, 赵国凤<sup>1</sup>

1. 四川汽车职业技术学院, 四川 绵阳 621000

2. 华中农业大学, 湖北 武汉 430000

3. 浙江物产环保能源股份有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2025090038

**摘 要 :** 我国的生物质能分布广泛且数量多, 其中农业秸秆类废弃物占比较大, 但缺乏一种简单高效的处理和利用方式。本文针对农业秸秆类废弃物的处理与应用问题, 研制了一种能够缓解秸秆类废弃物处理压力的新型固体燃料—生物炭—酒精固体燃料块。

**关 键 词 :** 生物炭; 固体酒精; 燃烧温度; 火焰温度; 燃尽率; 掺炭

## Design Research on Solid Alcohol Biochar Fuel Blocks

Jing Huajian<sup>1</sup>, Fan Qizhou<sup>2</sup>, Zhu Haodong<sup>3</sup>, Yu Qinlei<sup>1</sup>, Hu Qihao<sup>1</sup>, Zhao Guofeng<sup>1</sup>

1. Sichuan Automotive Vocational and Technical College, Mianyang, Sichuan 621000

2. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430000

3. Zhejiang Wuchan Environmental Protection Energy Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310000

**Abstract :** Biomass energy is widely distributed and abundant in China, among which agricultural straw waste accounts for a relatively large proportion. However, there is a lack of a simple and efficient treatment and utilization method. This paper focuses on the treatment and application of agricultural straw waste and has developed a new type of solid fuel – biochar – alcohol solid fuel block, which can relieve the pressure of straw waste treatment.

**Keywords :** biochar; solid alcohol; combustion temperature; flame temperature; burnout rate; carbon blending

### 引言

能源是人类生活必要的物质, 每个行业的发展也离不开能源。人类现在利用的能源以化石燃料居多, 但化石能源是有一定储量的, 如果按照当前的能源消耗速率计算, 那么将近200年左右, 化石燃料将被完全开采, 同时使用化石燃料对大气、土壤的污染是非常严重的, 会使温室效应加剧, 同时会带来自然灾害, 对人类生活造成威胁(莫松平等)<sup>[1]</sup>。因此, 寻找一种清洁环保的能源来代替化石能源成为了当前世界能源界面临的首要问题(董福品, 孙风平)<sup>[2-3]</sup>。生物质能作为煤、石油、天然气之后的存量最大的能源受到了各国研究者的关注(陈晓红等)<sup>[4]</sup>。

### 一、绪论

能源是人类生活与发展的基石, 当前全球能源消费结构中化石燃料仍占主导, 但其储量有限且污染严重, 促使清洁能源的探索成为紧迫任务。生物质能作为第四大能源, 分布广泛且可再生, 受到广泛关注。中国作为能源消费大国, 化石燃料占比高, 清洁能源利用不足, 面临利用率低、污染重等挑战。因此, 研究并高效利用生物质能, 特别是农业秸秆废弃物, 对于缓解能源压力、保护环境具有重要意义。

#### (一) 生物炭制备及成型技术

##### 1. 生物炭的原料情况

生物炭是生物质原料在缺氧高温下生成的稳定、高碳固体物

质, 其性能与产量深受原料种类影响, 固定碳含量高则产量大。常用原料包括木柴、秸秆等, 其中秸秆富含木质素、纤维素等, 热解温度在240–370℃间。木质素含量与生物炭产量呈正非线性相关, 且比表面积随木质素增加而增大, 故高木质素原料制炭效果更佳。

##### 2. 生物炭制备技术进展

生物炭制备方法多样, 影响产量各异。炭化技术最常见, 通过控制加热温度、反应时间及升温速率, 分为慢速、中速、快速及闪速热裂解, 炭产率从12%到35%不等。气化热解法主要生成气体, 生物炭为副产物, 产率较低。水热炭化法在200–374℃下进行, 产出的生物炭含碳量高。快速炭化在300–600℃、1–2MPa条件下半小时完成。烘焙炭化则在200–300℃低温下,

限制氧气，转化原料为疏水性固体，但碳氧含量低，吸附力弱。

### 3. 生物炭固体成型技术进展

生物质成型燃料通过物理压缩生物质原料制成规则形状。针对生物炭固体成型燃料的研究，主要集中在制备、粘结剂选择和热值分析上。研究发现，压力在1-3MPa、含水率22%-40%、粘结剂添加量15%-40%时，成型性能较优。以木质素为粘结剂，按生物炭：水：木质素=10:3:1比例混合挤压效果佳。成型时，温度60-100℃、压力6-8kN、含水率15%-20%效果最好，淀粉添加剂效果更佳。

## 二、生物炭-酒精固体燃料块的研制及性能试验

### （一）研制目的及主要内容

本新型燃料以玉米秸秆炭、95%工业酒精及凝固剂为原料，制成特定形状的固体燃料块，旨在实现秸秆类农业废弃物的综合高值化利用。设计充分利用玉米秸秆炭与酒精特性，形成易点燃、燃烧时间长、便携的固体燃料。通过“公司+农户”模式，分发专利炭化炉给农户处理秸秆为生物质炭，公司收集后加工成能源商品，实现产业扶贫与生态保护双赢。同时，解决固体酒精燃料火势小、时间短等问题，研制出火势稳定、燃烧持久、可水扑灭的固体成型燃料。具体内容包括粉碎分筛炭粉探究粒径影响、不同比例掺炭探究成型与燃烧关系及燃烧特性试验分析。

### （二）燃料块的材料及研制方法

#### 1. 燃料块材料

产品所使用的原材料为玉米秸秆炭、95%工业酒精、硬脂酸、氢氧化钠（片状）、水等。其中，产品所采用的玉米秸秆炭均以湖北省宜昌市长阳县当地所收获的玉米秸秆为原材料，将玉米秸秆进行热解炭化。其热解炭化终温为360℃~550℃，在达到热解温度后，加热时间为4-6小时。因其炭化终温不同，所以最后得到的玉米秸秆炭的各项数值会在一定范围内波动，炭产率在25%-38%之间，将炭化后的玉米秸秆炭粉碎研磨，制成玉米秸秆炭粉。

试验所采用的酒精是从华中农业大学物资分配中心购买体积分数为95%的工业酒精，沸点为78.5℃，热值为22.8 MJ/kg。试验中所采用的氢氧化钠为物资配送中心购买的试验室用氢氧化钠，其它材料均网购。

#### 2. 设计路线及方法

燃料块的设计路线大致分为两个部分，第一部分是确定制作生物炭-酒精固体燃料块的原料配比，选择出一种硬度较高、能够掺混炭粉后不会稀软变形的配方。后加入不同配比、不同粒径的炭粉，在所选出的固体酒精的配方上，先选用一种粒径的炭粒，以炭粒的质量为变量，探究掺炭量对燃料块物理成型以及燃烧的影响，并得出该粒径下最好的掺炭量以及所制得的燃料块的基本性能数据；随后，在掺炭量的基础上，以玉米秸秆炭的炭粒径为变量，探究炭粒径对燃料块成型的影响，并得出最合适的炭粒径及所制得的燃料块的基本性能数据。第二部分是生物炭-酒精固体燃料块物理性能和燃烧性能的试验探究。主要参数包括强

度、硬度、炭粒分布、火焰温度、燃烧时间、燃尽率、热重分析和官能团分析。

### （三）生物炭-酒精固体燃料块的制备

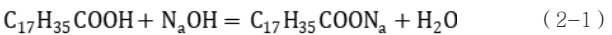
#### 1. 固体酒精成型配方比较

通过查阅文献列出表2-2，对比不同的固化剂所制备而成的固体酒精的优缺点，最后出于经济性和产品性能的考虑，本产品采用硬脂酸钠作为固化剂。

表2-2 各种固化剂的优缺点

固化剂类型	优缺点
硬脂酸钠	成本较低，易得到，粘接性好
硝化纤维	需要溶剂溶解，成本较高
醋酸钙	需低温，固化效果差，易软化
乙基羧基乙基纤维素	工艺简洁，但价格昂贵

硬脂酸钠在常温条件下难溶于乙醇，而在60℃左右时，它可以均匀地分散在乙醇液体中，冷却后则形成凝胶体系，从而使酒精固定，生成固体状态的充斥着液体酒精的混合物。制作硬脂酸钠的原料来源十分之广泛，并且成本低廉。其反应原理如下：



通过查阅资料，产品选择了两种不同比例的固体酒精配方进行对比分析：

配方一：硬脂酸2.000 g，NaOH固体0.400 g，温度70℃，一次酒精用量40 mL，二次酒精用量50 mL（贾长英等2007）。配方二：硬脂酸6.500 g，NaOH固体1.000 g，反应温度60℃，一次酒精用量50.000 g，二次酒精用量42.500 g（张忠诚等2000）。

具体配置以配方二为例：在A烧杯用300g千分位天平称6.500g硬脂酸，加50.000g工业酒精；B烧杯放1.000g氢氧化钠、少量水及42.500g工业酒精。恒温水浴搅拌至固体消失，将A液倒入B液，快速搅拌后倒入容器。配方一混合后不立刻固化，室温下30min完成；配方二立即固化，需快速搅拌防不均，10min完成。冷却后观察，配方一透明但渗液多、强度低；配方二乳白、强度高。燃烧均融化，时间相近，配方二残渣多。考虑后续需掺炭粉，选强度高、渗出少的配方二，且其水浴60℃可减少酒精挥发。

#### 2. 不同掺炭比的选择

多孔玉米秸秆炭可吸附酒精，微孔支撑成型并促进酒精扩散，增强对流传热，使炭粉易点燃。酒精既作燃料又作引燃剂，炭粉则吸收酒精、充当燃料并支撑燃料块。试验分析炭粉吸附性，确定掺炭量范围。具体制备：以100g固体酒精（不含5g水）为基础，加玉米秸秆炭。A烧杯加6.5g硬脂酸、50g酒精；B烧杯加1g氢氧化钠、5g水、42.5g酒精；C烧杯称取炭粉。恒温水浴搅拌A、B至固体消失，将C中炭粉倒入A，搅拌3分钟后倒入B液，再搅拌后倒入器皿冷却。预试验选0.2-0.3mm粒径炭粉，5g为梯度增加掺炭量，发现掺炭量超30g固化时间变长，强度减弱，50g时难以搅拌，故正式试验掺炭量设0-50g，梯度扩大，设置6组试验，炭粒径0.2-0.3mm。

#### 3. 不同炭粒直径的选择

粒径影响炭粉对酒精的吸附量和燃料燃烧状态，故设探究试

验。预试验发现, 粒径大于0.4mm 时, 40g 玉米秸秆炭难保持流体状态, 搅拌不利, 且燃料块切割面粗糙、孔隙多、易散落。因此试验选用0.4mm 以下粒径。进一步分离出0-0.1mm、0.1-0.2mm、0.2-0.3mm、0.3-0.4mm 粒径炭粉制备燃料, 发现小粒径差异小, 0.3-0.4mm 粒径提前凝固难搅拌。考虑实际, 后续产品只需过60 目筛(0.28mm) 即可。

#### (四) 生物炭-酒精固体燃料块的物理性能试验

##### 1. 试验前期准备

试验所用的不同炭含量的燃料块制作在华中农业大学工科基地完成, 关于强度和硬度的测量在工程楼进行。

试验采用的玉米秸秆炭作为原材料, 通过粉碎机粉碎成炭粉, 为了能得到具有矩形形状的成型块产品, 需过60 目的筛, 得到粒径约为0.25 mm 的炭粒细粉。

炭粉加工设备: 高速多功能粉碎机、网筛(60 目) 和水浴锅。硬度及强度测定仪器: 邵氏硬度计(0~100 HA), 精度为0.5 HA; TMS-PRO 质构仪。

##### 2. 试验因素及指标选择

燃料块的机械力学性能对燃料块长久固定成型有很大的影响, 固体的强度和硬度越高, 其耐磨性和耐腐蚀性就越好, 抗变形的能力就越强。

为了探究不同掺炭量对燃料块固定成型的影响, 设置单因素实验, 影响因素设置为酒精块中炭粉的含量, 其他成分的含量保持不变, 选取的评价指标为可以直接计算或者测量的成型后的截面炭粒分布、抗压强度和硬度, 研究掺炭量对燃料块机械力学性能的影响(Kumar SV et al 2020)。每个燃料块重复进行5次测定并取平均值, 公式为:

$$P = \frac{F}{S} \quad (2-2)$$

其中, P 为燃料块的抗压强度, 单位 MPa;

F 为燃料块产生挤压变形时的最大压力, 单位 N;

S 为挤压的表面积, 单位 mm<sup>2</sup>。

##### 3. 含炭量对指标的影响分析

炭含量是影响生物炭-酒精固体燃料块成型的重要因素。在0~40g 掺炭量范围内, 燃料块抗压强度和硬度随炭量增加而增大, 40g 时达到最大值(抗压强度0.815MPa, 硬度12.5HA), 此时断面炭粒分布均匀, 无明显分层和散落。超过40g 后, 强度和硬度显著下降, 因过多炭粉增加了固化负荷, 减少黏结力。故生物炭与酒精按4:10比例混合时, 燃料块成型效果最佳。

#### (五) 生物炭-酒精固体燃料块的燃烧性能试验

##### 1. 试验前期准备

试验所用的不同炭含量的燃料块在华中农业大学工科基地制作完成, 燃烧时间、燃烧温度、燃尽率、燃烧热值等测量试验在工科基地完成, 关于燃烧时的热重测量和燃料官能团测量在工程楼进行。

本试验中, 用电子测温仪测量温度, 范围为0-1200℃, 精度为0.1℃; 用电子天平测量质量, 精度为0.001g; 热重测量仪器

为SDT-600同步热分析仪; 结构测试仪器为傅里叶红外转换光谱仪; 热值测量仪器为微机全自动量热仪。

##### 2. 试验因素及指标选择

燃料的燃烧特性和动力学方面的参数是评价生物质炭燃料品质的重要依据, 是生物炭燃料配套燃烧设备的设计和开发不可或缺的理论依据, 同时也是燃烧方式进行优化的重要依据。为了探究不同掺炭量下燃料块的燃烧特性, 设置单因素为玉米秸秆炭的含量, 其他成分的含量保持不变, 选取的评价指标为可以直接计算或者测量的炭量、火焰不同部位的温度、燃尽率、失重率、燃烧时间等, 由此研究掺炭量对燃料块燃烧性能的影响。

##### 3. 含炭量对燃料块燃烧特性的影响

掺炭量从0g 到50g 递增时, 燃料块燃烧熔融现象逐渐减弱, 炭量减少。0g 时熔融最明显, 40g 时能维持原始矩形状态。熔融因硬脂酸钠熔化、酒精流淌所致; 炭量则因酒精气化产生气泡, 熔融状态下炭粒孤立易被挤出。随炭量增加, 固化剂作用转变, 炭粒吸附酒精增多, 外部酒精减少, 流动力减小, 炭粒堆积使熔融减弱; 外部酒精少, 气化不产生大量气泡, 炭粒紧密使炭量减少, 这表明炭量增加能加强固化效果, 使结构更紧密。含炭量还影响火焰温度及燃烧时间, 生物炭酒精块燃料燃烧分剧烈燃烧、稳定固液混燃、阴燃三阶段, 各阶段燃烧特征及持续时间不同。

切取10 g 左右不同掺炭量条件下制作出来的生物炭-酒精固体燃料块, 在火焰不同高度取三个位置进行温度测量, 分别取底部接近燃料块处、内焰处和外焰处, 然后用电子测温仪进行温度测量, 每个部位测量5次求取平均值, 同时记录燃烧时长。

火焰温度纵向对比, 外焰最高, 内焰次之, 底部最低。横向看, 0~40g 掺炭量范围内, 火焰温度随掺炭量增加而升高, 40g 左右达峰值后降低。底部火焰温度325℃~557℃, 内焰648℃~788℃, 外焰773℃~925℃, 均在40g 左右达最大值。随掺炭量增加, 燃料块明火燃烧时间先增后减, 0g 时为3.9min, 40g 时最长, 与最短相差6min, 50g 时下降。0g、10g 时炭量少, 酒精游离多, 燃烧快; 20g~40g 时炭粒吸附酒精多, 外部酒精少, 气化慢, 且炭粒起骨架作用, 燃烧时间延长; 50g 时酒精含量减少, 炭粉引燃不充分, 整体燃烧时间缩短。

不同含炭量的燃料块, 其燃尽率具有差异。关于燃尽率的计算, 需通过电子天平测量燃料燃烧前后的质量, 其计算公式为:

$$\text{燃尽率 } \rho = \frac{\Delta M}{M_1} \times 100\% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (2-3)$$

其中, M<sub>1</sub>是燃烧前所切取的燃料块重量, 单位为g;

M<sub>2</sub>为燃烧后的灰烬余量, 单位为g;

ρ 为燃尽率, 单位为%。

掺炭量从10g 增至40g, 燃尽率逐渐增大, 40g 后增幅减小趋于稳定。10g 纯固体酒精燃尽率约91.5%, 40g 时达92.6%。掺炭量少时燃烧熔融, 炭粒平摊难燃尽, 灰烬余量多; 炭量足时燃烧充分, 灰烬多为灰分, 质量轻。掺炭量增加可改变燃烧状态, 使炭粉燃烧更充分, 提高燃尽率。热重试验以20℃/min 升温至600℃, 空气为介质, 结果显示固体酒精与生物炭失重区间无交

集，酒精100℃前挥发完，生物炭300℃左右燃烧。炭比例越大燃烧残留物越多，但1:10与2:10配比燃料块残留物少于纯固体酒精，说明炭燃烧可促进固化剂分解，固化剂使炭失重起点前移，提高对流换热效率。

对不同含炭量燃料块进行耦合试验，耦合值为理论值，与实际测量值有误差。本试验按生物炭与酒精不同掺混比，将两者热重数据按比例混合，探究混合燃烧优缺点。对比发现，理论失重量大于实际失重量，表明二者充分混合燃烧可降低残余物质量；且随炭比例增多，酒精挥发量也增多。

### 三、结论

本文探究不同含量生物炭与酒精掺混比对燃料物理成型及燃烧性能的影响，并借助热重等技术分析燃烧情况。（1）物理性能

试验中，含炭量40g左右时燃料块成型最佳；燃烧性能试验中，生物炭与酒精比例小于3:10时燃料燃烧会融化。（2）燃料完全燃烧分三个阶段，酒精与炭燃烧失重区间不同，混合物可减少残余物，混合燃烧气体成分与分别燃烧相同。（3）生物炭与酒精4:10为最佳比例，最优配方为：60目玉米秸秆炭40g，两次酒精共92.5g，氢氧化钠1g等。

### 参考文献

- 
- [1] 莫松平, 陈颖. 新能源技术现状与应用前景. 广东: 广东经济出版社, 2015. 3-19.
  - [2] 董福品. 可在生能源概论. 北京: 中国环境出版社, 2013. 162-195.
  - [3] 孙风平. 生物质锅炉燃烧技术及案例. 北京: 中国电力出版社, 2014. 1-17.
  - [4] 陈晓红, 王智勇, 毛天宇. 生物质成型燃料产业现状与发展前景 [J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(06): 83-85.



# 3D 打印混凝土的材料性能、加工性能 与工程应用的研究综述

顾子涵, 周娟, 江飞飞

南通理工学院, 江苏 南通 226000

DOI:10.61369/ERA.2025090002

**摘要 :** 随着我国建筑行业的快速发展, 对高性能、环保型建筑材料的需求日益增加。3D 打印混凝土技术作为建筑工业化与数字化深度融合的代表性成果, 近年来在全球范围内引起了广泛关注与实验研究。从 3D 打印混凝土技术的基本原理与研究现状入手, 系统梳理材料研发、打印工艺、技术设备、工程应用等关键领域的最新进展, 深入分析当前面临的主要技术挑战, 并探讨了未来发展趋势。

**关键词 :** 3D 打印; 智能建造; 力学性能

## A Review of the Material Properties, Processing Properties, and Engineering Applications of 3D Printed Concrete

Gu Zihan, Zhou Juan, Jiang Feifei

Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226000

**Abstract :** With the rapid development of China's construction industry, the demand for high-performance and environmentally friendly building materials is increasing. As a representative achievement of the deep integration of industrialization and digitalization in construction, 3D printed concrete technology has attracted widespread attention and experimental research worldwide in recent years. Starting from the basic principles and current research status of 3D printed concrete technology, this paper systematically reviews the latest developments in key areas such as material development, printing processes, technical equipment, and engineering applications. It also provides an in-depth analysis of the major technical challenges currently faced and explores future development trends.

**Keywords :** 3D printing; intelligent construction; mechanical property

### 引言

3D 打印混凝土技术作为建筑行业的一项前沿科技, 通过逐层堆积混凝土材料来构建三维实体结构, 实现了从设计到建造的一体化流程。该技术不仅缩短了建筑周期, 降低了人力成本, 还提高了建筑设计的灵活性与创新性, 满足了个性化与可持续发展的建筑需求。近年来, 随着材料科学、计算机科学及机械工程等多学科的交叉融合, 3D 打印混凝土技术取得了显著进展, 成为建筑领域的研究热点。

### 一、3D 打印混凝土技术

3D 打印混凝土技术, 又称“混凝土增材制造技术”, 是一种基于数字化模型直接建造混凝土结构的创新施工方法, 具有快速成型、个性化定制和高效生产等优点<sup>[1]</sup>。其基本原理是将三维建筑模型通过计算机辅助设计 (CAD) 软件分解为无数个二维切片, 然后通过专用打印设备逐层堆积混凝土材料, 最终形成三维实体结构。这一技术彻底改变了传统混凝土施工中依赖模板和人工浇筑

的作业方式, 实现了建筑结构的“自由成形”和“一体化建造”。

从发展历程来看, 混凝土 3D 打印技术经历了从概念验证到工程应用的逐步演进过程。早期国内外研究主要集中在: 材料可打印性, 小型构件打印上。2001 年美国南加州大学 Behrokh 教授提出的“轮廓工艺”概念, 即通过可移动的大型三维挤出装置和带有抹刀的喷嘴在施工现场进行打印和组装, 实现混凝土的分层堆积的打印轮廓成为建筑物的一部分, 减少施工的污染、成本及时间 (图 1 和图 2)。2007 年意大利发明家 Enrico 设计的 D-Shape

工艺,其特点在于打印机的底部有数百喷嘴,可喷出氧化镁粘合剂,通过粘合剂和砂的组合,逐渐成型为石质固体,最终形成石质建筑。随着材料科学和打印设备的进步,2010年后该技术进入快速发展期,全球范围内涌现出一批标志性项目。近年来,技术应用范围不断扩大,从简单的墙体结构发展到复杂的建筑整体打印。

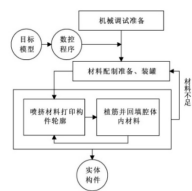


图1 轮廓工艺打印工艺流程



图2 轮廓工艺打印的工作原理

中国的研究团队如东南大学、华中科技大学、重庆大学等在该领域也取得了显著成果,如东南大学张亚梅教授团队开发的全国首个装配式3D打印智能公交站台,华中科技大学丁烈云教授团队将3D打印技术应用于古建筑修复的创新实践。

## 二、3D 打印混凝土材料

混凝土3D打印材料的研发是该技术能够成功应用的核心基础。针对3D打印硫氧镁水泥基材料早期强度低、耐水性差的问题,李奇岩系统研究了碳化改性工艺对材料微观结构与宏观性能的影响机制<sup>[2]</sup>。通过调控碳化时间、CO<sub>2</sub>浓度及养护制度,优化了材料配方。碳化改性显著提升了材料的抗压强度和抗渗性能,同时改善了打印构件的层间结合质量。研究成果为开发环保型3D打印建材提供了新思路,进而提升3D打印混凝土试件的可建造性。丁铸等介绍了四种常用的水泥基3D打印建筑材料,包括硅酸盐水泥基材料、硫铝酸盐水泥基材料、磷酸盐水泥基材料和地聚合物水泥基材料,并分析了这些材料的组成和性能特点<sup>[3]</sup>。蔺喜强等选用特定配比的快硬硫铝酸盐水泥、机制尾矿砂、早强剂、缓凝剂及自制复合体积稳定剂作为打印材料,成功制备出满足早期强度、凝结时间等各方面性能要求的3D打印材料,促进了3D打印技术的推广应用<sup>[4]</sup>。

现有研究已建立3D打印混凝土材料的基础研发框架,但在性能平衡机制、耐久性保障及智能特性开发方面仍需深化,以满足3D打印建筑技术日益增长的需求。未来应重点构建“材料-工艺-结构”协同设计方法论,发展基于机器学习的材料性能预测模型,同时加强建筑信息模型(BIM)与材料数据库的深度融合,推动3D打印混凝土技术从实验室走向工程应用。

## 三、3D 打印加工性能

### (一) 3D 打印工艺

目前建筑3D打印的建造方式众多,当前主流的混凝土3D打印工艺可分为:挤出成型、选择沉积、模具打印及喷射成型(图3),不同工艺之间所用选材料、建造方式及应用领域均存在差异。

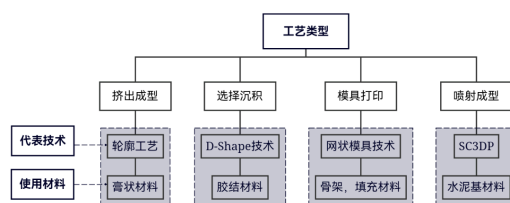


图3 3D 打印工艺类型

目前在建筑行业应用较为广泛的工艺为挤出成型技术,以水泥基材料为主要原材料,通过螺杆或活塞挤出连续的混凝土条带并进行逐层堆积成型,打印程序较为简单。但是挤出成型工艺还存在许多发展不够完善的地方,尤其是这种工艺对原材料的性能有较高的要求,挤出成型工艺需要原材料具有良好的泵送性、可挤出性和可建造性,由于层层堆叠的方式,对材料的早期强度和凝结时间都提出了更高的要求,并且层与层之间需要具备适宜的粘结强度,因此打印原材料配合比设计尤为重要,同时分层叠加工艺建造的构件强度与浇筑构件强度存在差异,这也成为一个亟待解决的关键问题。

### (二) 3D 打印设备

目前用于建筑施工的3D打印机主要有三种类型可以选择,如龙门式、机械臂式和电缆驱动样式的3D打印机。龙门式3D打印机是最常见,也是最常用的类型,整体由刚性框架支成一个长方体形状,使喷头装置沿着X、Y和Z方向移动,其优点是具有拆装便利、利于运输,常用于大型建筑的建造。基于机械臂的3D打印机,又被称为机器人打印机,是在指定的轨道上浇筑混凝土,可通过履带安装多个机械臂并同时进行打印,其优点是能够生产复杂的几何形状和具有更高自由度,显著提高了生产效率。

## 四、力学性能

纤维增强是提高3D打印混凝土力学性能特别是抗拉性能的有效途径。研究表明,掺入钢纤维、聚丙烯纤维、纳米纤维等可以显著改善材料的抗裂性能和韧性。朱彬荣设计了一种适用于3D打印的高延性水泥基复合材料ECC,通过2%PVA纤维与3%纳米蒙脱土协同增韧,研究其从纳米到宏观的力学行为<sup>[5]</sup>。周梦婷则针对3D打印钢纤维混凝土易堵泵的问题,通过采用CT扫描分析纤维取向分布,研究了钢纤维长径比以及0.5%-2.0%掺量对材料流变性能与力学性能的耦合影响并建立了纤维掺量-流变参数-力学性能的预测模型<sup>[6]</sup>。

彭健将纳米纤维素晶体CNC引入超高性能混凝土UHPC中,并通过流变仪测试与SEM观察,解析CNC的增稠与成核效应,表明CNC的纳米桥接作用有效抑制了微裂缝扩展<sup>[7]</sup>。东南大学侯泽宇选用硅酸盐水泥为主要材料,对3D打印纤维增强混凝土的基本性能进行了研究,同时研究了三种柔性纤维对混凝土性能和微

观结构的影响规律<sup>[8]</sup>。杨烨凯研究了钢纤维与 PVA 纤维混合对增强超高性能混凝土 UHPC 的 3D 打印力学性能，建立了考虑应变率效应的本构模型。实验表明混杂纤维使断裂能提升 2.1 倍，动态增强因子 DIF 达 1.45，本构模型可准确描述材料从准静态到动态加载的力学响应<sup>[9]</sup>。

## 五、结论

随着科技的飞速发展，3D 打印技术已逐渐渗透到建筑领域，为传统建筑业带来了前所未有的变革<sup>[10]</sup>。3D 打印混凝土作为其

中的重要分支，其性能研究与应用正成为学术界和工程界关注的焦点。研究人员从多个角度对 3D 打印混凝土的材料性能、力学性能、耐久性等进行了深入探讨。通过引入纤维类改性材料、纳米材料、矿物掺合料以及化学外加剂等，显著改善了 3D 打印混凝土的工作性、强度和耐久性。在应用方面，其无模支撑、快速成型的优势使得它在复杂结构建造、个性化定制、快速抢修等领域具有独特优势。

然而，要实现 3D 打印混凝土的广泛应用，仍面临诸多挑战。尤其是打印工艺的不成熟、施工与设计标准的差异以及高昂的成本等问题也制约了 3D 打印混凝土技术的推广。

## 参考文献

[1] 李晗. 3D 打印碱激发复合混凝土的性能研究 [D]. 吉林建筑大学. .  
[2] 李奇岩. 3D 打印硫氧镁水泥基材料的制备与碳化改性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2024.  
[3] 丁铸, 李定发, 朱继翔. 3D 打印建筑材料现状及其发展 [J]. 墙材革新与建筑节能, 2017(10): 61–65.  
[4] 蔺喜强, 张涛, 霍亮, 等. 水泥基建筑 3D 打印材料的 制备及应用研究 [J]. 混凝土, 2016(06): 141–144.  
[5] 朱彬荣. 3D 打印高延性水泥基复合材料的设计及跨尺度力学行为研究 [D]. 东南大学, 2022.  
[6] 周梦婷. 3D 打印钢纤维增强高强混凝土的制备与性能研究 [D]. 东南大学, 2023.  
[7] 彭健. 可用于 3D 打印的纳米纤维素晶体增强超高性能混凝土的制备与性能 [D]. 福建农林大学, 2023.  
[8] 赵雅萌. 基于 3D 打印的超高性能混凝土制备及性能研究 [D]. 山东建筑大学, 2022.  
[9] 杨烨凯. 3D 打印超高性能纤维增强混凝土力学性能及本构模型研究 [D]. 天津大学, 2022.  
[10] 岳健广, 王健, 吴瑶, 等. 3D 打印碳纤维混凝土断裂力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (05): 243–252.

# 垃圾发电设备安装与技术管理实践探究

刘毅

身份证号: 410883198302286559

DOI:10.61369/ERA.2025090003

**摘要：**垃圾发电作为一种将废弃物转化为能源的技术，在环保和能源领域具有重要意义。本文探讨了垃圾发电的基本原理与技术路线，分析了垃圾发电设备安装的关键问题及技术管理实践，提出了技术优化、管理改进和政策支持的建议。研究表明，通过先进技术和手段，垃圾发电可实现更高的能效和更低的排放，为环保与能源可持续发展提供支持。

**关键词：**垃圾发电；技术管理；环保能源

## Investigation into the Installation and Technical Management Practices of Waste-to-Energy Equipment

Liu Yi

ID: 410883198302286559

**Abstract：** Waste-to-Energy (WtE) technology, which converts waste into energy, holds significant importance in the fields of environmental protection and energy. This paper explores the fundamental principles and technological pathways of waste-to-energy, analyzes key issues in the installation of waste-to-energy equipment and technical management practices, and proposes suggestions for technological optimization, management improvement, and policy support. The study indicates that through advanced technologies and management approaches, waste-to-energy can achieve higher energy efficiency and lower emissions, thereby providing support for sustainable environmental and energy development.

**Keywords：** Waste-to-Energy; technical management; environmental energy

### 引言

在全球城市化进程加速和“双碳”目标推进的背景下，垃圾焚烧发电作为兼具废弃物处理与可再生能源生产的环保技术，已成为破解“垃圾围城”困境的关键路径。2024年，国家发改委、住建部联合发布《关于加强县级地区生活垃圾焚烧处理设施建设的指导意见》，进一步推动垃圾发电向县域市场下沉，并鼓励技术创新以提升运营效率。相较于传统填埋方式，垃圾焚烧发电可减少90%的垃圾体积，并显著降低甲烷排放，兼具减量化、资源化与无害化优势。然而，行业仍面临产能利用率不足、补贴退坡等挑战，部分项目因垃圾收运体系不完善或规划失衡导致“吃不饱”现象。与此同时，智能化管控系统（如WIS系统）的应用提升了设备运行效率，标准化管理模式的推广则进一步优化了全生命周期运维。在此背景下，探究垃圾发电设备安装与技术管理实践，对推动行业可持续发展和实现“无废城市”目标具有重要现实意义。

### 一、垃圾发电技术概述

#### （一）垃圾发电的基本原理与技术路线

垃圾发电是通过热能、生物化学或热化学方式将垃圾转化为电能的技术，主要包括焚烧发电、气化发电和厌氧发酵三种路线。焚烧发电是目前应用最广泛的技术，通过高温燃烧垃圾产生蒸汽驱动汽轮机发电，具有处理量大、减容效果显著的特点，但需严格控制二噁英等污染物排放<sup>[1]</sup>。气化发电采用缺氧或限氧条件将垃圾转化为可燃气体（如合成气），再通过燃气轮机发电，能源利用率较高，但技术复杂且投资成本大。厌氧发酵主要针对有

机垃圾，利用微生物降解产生沼气（主要成分为甲烷），经净化后用于发电或供热，适合湿垃圾处理，但处理周期较长。三种技术各具优势，需根据垃圾成分、规模及环保要求选择适用方案。

#### （二）垃圾发电在环保能源体系中的地位

垃圾发电在环保能源体系中承担减量化、资源化和无害化的核心作用。通过焚烧或气化技术，垃圾体积可减少80%~90%，大幅缓解填埋场压力；同时，垃圾转化为电能或热能，实现废弃资源的能源回收，契合循环经济理念。在无害化方面，现代垃圾发电厂配备高效烟气净化、飞灰稳定化等系统，确保重金属、二噁英等污染物达标排放。相较于传统填埋或堆肥，垃圾发电在减少温室气体排放



（如甲烷）方面具有显著优势，成为城市固废治理与低碳能源供应的重要结合点，推动环保与能源可持续发展的协同<sup>[2]</sup>。

## 二、垃圾发电设备安装关键问题分析

### （一）设备安装前的规划与准备

垃圾发电设备的安装需在前期规划阶段充分考虑选址、环境影响评估及设备选型等关键因素。选址需符合城市总体规划，避开生态敏感区，同时满足运输便利性和周边居民可接受度<sup>[3]</sup>。环境影响评估须对噪声、废气、废水及固体废物排放进行严格测算，确保符合环保法规要求。设备选型应结合垃圾成分、处理规模及技术成熟度，合理选择焚烧炉、烟气净化系统及发电机组，兼顾经济性与运行稳定性。科学的规划与准备能够降低后续施工风险，提高项目整体可行性。

### （二）安装过程中的技术难点与解决方案

垃圾发电设备安装涉及焚烧炉组装、烟气处理系统集成及自动化控制调试等复杂环节。焚烧炉安装需确保炉体密封性和耐高温性能，避免因热应力变形导致运行故障<sup>[4]</sup>。烟气处理系统集成涉及脱硫、脱硝及除尘设备的协同配置，需优化管道布局以减少压损并提升净化效率。自动化控制调试是保障系统稳定运行的关键，需通过模拟测试验证各传感器与执行机构的联动逻辑，确保实时监测与精准调控。针对这些技术难点，需制定严格的安装标准与调试流程，结合现场数据持续优化，确保设备安全高效投运<sup>[5]</sup>。

## 三、垃圾发电技术管理实践

### （一）运行阶段的技术管理

#### 1. 设备维护与故障诊断

垃圾发电设备的稳定运行依赖于系统化的维护策略与高效的故障诊断技术。预防性维护计划应涵盖焚烧炉、烟气净化装置、汽轮机等关键设备，通过定期检查、润滑及易损件更换降低突发故障风险。状态监测技术如振动分析、红外热成像可实时评估设备健康状态，结合历史运行数据建立故障特征库，实现早期异常预警。针对常见故障如炉排卡涩、过热器积灰等问题，需制定标准化处理流程，缩短停机维修时间，保障发电效率<sup>[6]</sup>。

#### 2. 能效优化与排放控制

提升垃圾发电能效需从燃烧控制、余热回收及系统协同运行入手，通过优化一次风配比、二次风温度等参数提高燃烧效率，采用蒸汽再热技术增加发电量。排放控制需严格执行污染物协同治理策略，集成 SNCR 脱硝、半干法脱硫及活性炭吸附等多级净化工艺，确保二噁英、NO<sub>x</sub> 等指标达标。实时监测系统结合大数据分析可动态调整运行参数，在满足环保要求的同时实现能源产出最大化，推动垃圾发电向高效低碳方向发展<sup>[7]</sup>。

### （二）安全管理与风险控制

#### 1. 安全生产标准化建设

针对垃圾发电过程中可能发生的火灾、爆炸和污染物泄漏等突发情况，需制定多级应急响应预案并配备专业处置设施。重点

建设烟气异常排放、渗滤液泄漏等环境污染事件的快速拦截系统，配置备用电源和应急处理药剂储备。定期开展应急演练检验预案可行性，通过模拟不同事故场景提升响应能力。污染防控体系应实现从源头控制到末端治理的全过程覆盖，确保在任何运行工况下均能有效防止二次污染<sup>[8]</sup>。

#### 2. 应急处理与污染防控措施

在垃圾发电过程中，针对火灾、爆炸及污染物泄漏等突发情况，需建立分级应急响应体系：按风险程度设预警、一级至三级响应，预警期实时监测参数，一级响应启动全厂停机与消防联动，二、三级响应分级处置。污染防控重点建设快速拦截系统，如烟气异常排放时，在线监测联动 10 分钟内启动的脱硫脱硝增效喷淋装置；渗滤液泄漏时，通过地下防渗监测网络、应急收集池及 4 小时内完成封堵净化的移动式膜处理设备控制污染。配套双回路备用电源与 72 小时药剂储备库，定期开展炉膛爆燃、渗滤液池泄漏等场景演练<sup>[9]</sup>。污染防控贯穿全流程：源头通过垃圾分类稳定热值，过程以封闭式炉排和负压系统控排，末端采用高效处理工艺确保排放达标，全程防范二次污染。

## 四、垃圾发电项目的优化与发展建议

### （一）技术层面的优化策略

#### 1. 先进燃烧技术与智能化控制应用

垃圾发电效率提升的关键在于采用先进的燃烧技术和智能化控制系统。机械炉排燃烧技术通过优化空气分布和温度控制，显著提高低热值垃圾的燃烧效率。智能化控制系统的应用实现了燃烧过程的实时监测与动态调节，基于大数据分析的预测性维护可提前识别设备异常。人工智能算法的引入使系统能够自动优化运行参数，在保证稳定燃烧的同时降低能耗，提升整体发电效率 15%–20%<sup>[10]</sup>。

#### 2. 余热回收与二次污染治理创新

在垃圾发电的余热回收与二次污染治理创新中，高效余热回收系统通过优化换热器结构与管路设计，集成有机朗肯循环（ORC）技术，利用低沸点工质实现热能到机械能的转换，额外产生 5%–8% 的电能输出，显著提升能源综合利用率。二次污染治理领域，新型催化过滤技术突破性融合催化氧化与高效过滤功能，通过负载特殊贵金属催化剂，将二噁英分解效率提升至 99.9% 以上，同时实现汞、铅等重金属的同步吸附脱除；等离子体技术则通过高能粒子轰击飞灰中的有害物质，使其化学键断裂并重新聚合，将传统危险废物飞灰转化为符合建材标准的硅铝酸盐骨料，推动垃圾发电过程向近零排放、资源循环利用的目标迈进。

### （二）管理层面的改进措施

#### 1. 全生命周期管理模式构建

垃圾发电项目的全生命周期管理需覆盖规划、建设、运营到退役各阶段，建立基于 BIM 技术的数字化管理平台实现全过程数据追溯。运营阶段采用 PDCA 循环持续改进管理模式，通过能效监测、成本分析和环境影响评估实现动态优化。设备退役阶段应制定科学的拆解方案和资源回收计划，确保设施拆除过程符

合环保要求，关键部件实现梯级利用，降低全生命周期环境足迹 20%–30%。

2. 人才培养与技术创新机制

在垃圾发电领域，需建立产学研用协同创新平台，与高校、科研院所联合开展焚烧炉高效燃烧控制、二噁英超低排放等关键技术攻关，形成“基础研究—技术开发—工程应用”全链条创新体系，如通过协同研发实现焚烧热效率提升 8% 的工程示范。实施阶梯式人才培养计划，新员工完成“理论培训—模拟操作—跟班实践”三级专业资质认证，技术骨干通过技能竞赛、海外交流提升水平，管理人才参与跨学科课程拓展思维。设立专项创新基金鼓励技术改造，建立创新成果转化激励机制，将技术专利、工艺改进与绩效考核挂钩，对获得发明专利或实现工艺突破的团队，按成果转化收益的 15% 给予奖励，并纳入职称评定与晋升体系，推动行业技术水平持续提升。

（三）政策与市场推动建议

1. 政府补贴与环保政策支持

完善阶梯式电价补贴机制，根据垃圾处理量和发电效率实施差异化补贴标准，重点支持采用先进技术的项目。环保政策应强化排放标准监管，建立碳排放交易体系，将垃圾发电纳入碳减排项目范畴。税收优惠政策可针对设备进口、技术研发等环节实施减免，同时设立专项基金支持二噁英防治等关键技术攻关。建立

跨部门协调机制，统一能源、环保、住建等领域的政策导向，形成政策合力推动行业健康发展。

2. 市场化运营与公众参与机制

推行 PPP 模式引入社会资本，通过特许经营权转让、收益共享等机制提升运营效率。建立垃圾处理费与发电收入联动机制，确保项目合理回报。公众参与方面应完善信息公开制度，定期公布排放数据，设立社区监督员参与环境监测。开展环保教育基地建设，通过开放日等活动增强公众认知，建立“垃圾分类—发电利用”的良性互动机制，提升项目社会接受度。

五、总结

垃圾发电技术通过焚烧、气化及厌氧发酵等工艺实现了废弃物减量化与能源化协同，现代烟气净化与智能化控制技术的应用显著提升了环保性能与运行效率。管理实践表明，全生命周期管理模式与安全生产标准化建设是保障项目可持续运营的关键，而政策支持与市场化机制则为行业发展提供了重要推动力。未来，在碳中和目标下，垃圾发电将向更高能效、更低排放方向发展，碳捕集与封存技术的集成应用可能成为重要突破点。随着垃圾分类体系的完善与热电联产模式的推广，垃圾发电有望在循环经济与低碳能源转型中发挥更核心的作用。

参考文献

[1] 曹良金. 生活垃圾焚烧发电厂的锅炉设备安装技术研究 [J]. 石油石化物资采购, 2023(24):80–82.

[2] 赵付一. 我国垃圾焚烧发电行业市场现状及其管理模式 [J]. 现代经济信息, 2012(08X):1.

[3] 董纪明. 垃圾焚烧发电厂建设工程技术管理 [J]. 现代工程项目管理, 2023.

[4] 胡滨海. 浅谈垃圾焚烧发电厂飞灰处理技术 [J]. 电站系统工程, 2007, 23(2):2.

[5] 王明峰. 浅谈垃圾焚烧发电厂生产技术管理 [J]. 有色设备, 2019(3):4.

[6] 任海涛. 浅谈垃圾焚烧发电厂生产技术管理 [J]. 建材发展导向, 2019, 17(19):1.

[7] 叶建木, 马玓, 张雅蕊. 垃圾发电技术专利合作网络的动态演化分析 [J]. 武汉理工大学学报: 社会科学版, 2017(2):7.

[8] 彭博. PPP 垃圾焚烧发电项目的风险识别及应对研究——以 WT 项目为例 [D]. 北京建筑大学, 2022.

[9] 陈裕凉. 浅谈垃圾焚烧发电厂生产技术管理 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2021(6):359–360.

[10] 李衡. 垃圾焚烧发电产业的发展新模式 [J]. 中国电力企业管理, 2018(10):2.

# 工业锅炉节能环保改造项目实施效果 评估与优化策略

常丹

广东省湛江市质量技术监督标准与编码所, 广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ERA.2025090005

**摘要：** 本文的主要目的是对工业锅炉进行节能环保改造项目的实施效果进行深入评估，并在此基础上提出一系列切实可行的优化策略。文章通过详细研究多个不同类型的改造项目案例，对改造前后工业锅炉的能耗、排放等关键性能指标进行了全面的分析。同时，文章还深入探讨了在改造过程中遇到的各种技术挑战，以及为克服这些挑战所采取的有效解决方案。研究的最终结果显示，通过实施节能环保改造，工业锅炉的能效得到了显著提升，同时其环保性能也得到了大幅改善。这些积极的变化不仅有助于降低企业的运营成本，而且对于推动企业的可持续发展具有重要的意义。

**关键词：** 工业锅炉；节能环保改造；实施效果；优化策略

## Evaluation and Optimization Strategies for the Implementation Effect of Energy Conservation and Environmental Protection Transformation Projects of Industrial Boilers

Chang Dan

Guangdong Zhanjiang Quality and Technical Supervision Standards and Coding Institute, Zhanjiang, Guangdong 524000

**Abstract：** The main purpose of this paper is to conduct an in-depth assessment of the implementation effect of the energy conservation and environmental protection transformation project for industrial boilers, and on this basis, propose a series of practical and feasible optimization strategies. Through a detailed study of multiple different types of transformation project cases, this article conducts a comprehensive analysis of the key performance indicators such as energy consumption and emissions of industrial boilers before and after the transformation. Meanwhile, the article also delves deeply into various technical challenges encountered during the transformation process and the effective solutions adopted to overcome these challenges. The final results of the research show that through the implementation of energy conservation and environmental protection renovations, the energy efficiency of industrial boilers has been significantly improved, and their environmental protection performance has also been greatly enhanced. These positive changes not only help reduce the operating costs of enterprises, but also are of great significance for promoting the sustainable development of enterprises.

**Keywords：** industrial boiler; energy conservation and environmental protection transformation; implementation effect; optimization strategy

### 引言

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的日益增强，工业锅炉作为重要的能源消耗和排放源，其节能环保问题日益受到关注。为了应对这一挑战，许多企业纷纷启动了工业锅炉节能环保改造项目，旨在通过技术创新和设备升级，实现能耗降低和排放减少的目标。然而，改造项目的实施效果因多种因素而异，如何评估和优化这些效果成为当前亟待解决的问题。

### 一、工业锅炉节能环保改造项目概述

#### （一）工业锅炉节能环保改造的内涵及目标

工业锅炉节能改造是指通过对锅炉本体、燃烧系统、余热回收系统等进行技术升级和优化，提高锅炉热效率，降低能源消耗

的过程。锅炉节能改造包括锅炉本体和燃烧系统的优化，如采用先进设计、改善受热面布置、优化燃烧设备和参数，以及安装省煤器、空气预热器等设备来提升热效率和能源利用率。目标是降低煤耗、电耗，节约能源，减少环境污染。环保改造涉及除尘、脱硫、脱硝技术，使用高效除尘设备和脱硫脱硝工艺，减少烟



尘、二氧化硫和氮氧化物排放，减轻雾霾和酸雨。此外，还包括锅炉废水、废渣的处理和利用，以减少二次污染。环保改造旨在使锅炉排放达标，改善环境，保障健康，促进企业可持续发展<sup>[1]</sup>。工业锅炉改造带来经济、环境和社会效益。经济上，降低能耗和处理成本，提升市场竞争力；环境上，减少排放，改善空气质量，保护生态；社会上，提升企业形象，增强责任感，促进和谐。节能环保改造是实现多赢的重要途径，对推动绿色发展、建设美丽中国具有重要意义。

## （二）工业锅炉节能环保改造的主要技术

燃烧系统优化技术是工业锅炉节能环保改造的关键技术之一，主要包括：燃烧设备的改进，例如采用低氮燃烧器、分级燃烧技术等，优化燃料与空气的混合，降低氮氧化物生成；优化燃烧参数，如过量空气系数、炉膛温度和燃烧时间，以提高燃料燃烧效率和锅炉热效率，减少污染物排放。应用先进燃烧技术，例如富氧燃烧和化学链燃烧，进一步提升效率和降低排放。余热回收技术，包括烟气和灰渣余热回收以及凝结水回收，有效提高能源利用率，减少能源消耗和环境污染。污染物控制技术，如除尘、脱硫、脱硝等，有效减少排放，改善环境质量。自动控制与优化技术，包括自动控制系统、优化策略和远程监控，确保锅炉运行安全、高效。这些技术提升锅炉自动化水平，降低劳动强度，增强运行效率 and 安全性。工业锅炉节能环保改造还包括保温、水质处理和灰渣综合利用等技术，这些为改造提供支持和保障<sup>[2]</sup>。

## （三）工业锅炉节能环保改造项目的实施流程

对现有锅炉进行全面的评估，包括锅炉型号、参数、运行状况、能耗水平、污染物排放情况等，确定改造的必要性；其次，进行现场勘查和数据采集，了解锅炉房的实际情况，收集相关数据，为方案设计提供依据；进行技术方案比选，选择合适的节能环保技术，进行技术经济分析，确定最优方案。制定项目可行性报告和方案设计，涵盖目标、技术方案、预算和效益分析，为审批和实施提供支持。设备选型与采购涉及确定技术参数、选择供应商、签订合同，并明确价格、交货、质量及服务条款，完成设备验收。安装调试与验收包括按方案规范安装设备、进行系统调试和性能测试，确保达到设计要求，并组织全面评估<sup>[3]</sup>。建立运行管理制度，包括操作规程、维护保养和安全制度。培训操作人员，提升技能和安全意识。定期维护保养锅炉，保持良好运行状态。建立数据监测系统，监测运行参数、能耗和污染物排放，及时调整以确保锅炉稳定、高效、环保运行。

# 二、工业锅炉节能环保改造项目实施效果评估体系构建

## （一）评估原则及指标选取

构建工业锅炉节能环保改造项目评估体系需遵循科学性、系统性、可操作性、可比性和动态性原则。科学性确保评估的准确性和可靠性；系统性要求全面考虑节能、环保、经济和社会效益；可操作性强调评估的简便性和易实施性；可比性便于比较不同项目和时期的改造效果；动态性反映项目效果随时间的变化；导向性引导项目向目标方向发展。构建评估体系时，选取评估指标至关重要，需基于工业锅炉节能环保改造项目的目标和特点，

结合评估原则<sup>[4]</sup>。首先，深入分析项目内涵，明确节能、环保、经济和社会效益目标，作为选取评估指标的基础。其次，考虑项目实施过程和关键环节，如燃烧系统优化、余热回收、污染物控制等，这些环节效果影响整体效益，应作为评估重点。再者，参考法律法规、标准规范和行业最佳实践，确保评估指标符合国家和行业要求。此外，评估指标需可获得和可测量，确保能通过实际数据体现。常用的评估指标选取方法包括文献综述法、专家咨询法、层次分析法等，有助于系统分析和筛选评估指标，构建科学合理的评估体系<sup>[5]</sup>。

## （二）评估指标体系构建

节能效果评估指标主要衡量工业锅炉节能环保改造项目在节约能源方面的成效。锅炉热效率是关键指标，显示燃料化学能转化为热能的效率，改造前后对比可直接体现节能效果。能源消耗率衡量锅炉运行中的能源使用情况，余热回收率显示余热利用程度，综合能耗和能源利用率等指标评估节能效果。环保效果评估指标衡量减少污染物排放和改善环境质量的成效，包括烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度，以及污水和固废处理率。经济效益评估指标涵盖成本节约与收益提升，包括节能收益、环保罚款减少额和设备维护成本降低额，以及投资回收期 and 内部收益率等。社会效益评估指标衡量对社会的积极影响，如减少温室气体排放、改善环境质量、提升企业形象，以及就业和技术创新效应。这些指标通过计算能源消耗减少、环境监测数据、公众调查和媒体报道等方法进行评估。

## （三）评估方法及模型

指标权重确定是评估体系构建的关键环节，用于评估各指标的重要性。层次分析法（AHP）通过构建层次模型，分解目标、准则和指标层，通过专家打分比较元素，构建判断矩阵，计算特征值和特征向量来确定权重。德尔菲法（Delphi）通过多轮匿名信函征求专家意见，统计处理后得到指标权重。AHP 适用于结构清晰、指标少的情况，Delphi 适用于结构复杂、指标多的情况。实际应用中，可根据情况选择或结合这两种方法，以提高权重确定的准确性和可靠性<sup>[6]</sup>。综合评估模型通过计算各指标的综合评价价值来评价工业锅炉节能环保改造项目的实施效果。模糊综合评价法通过无量纲化处理、权重和隶属度函数计算指标的模糊评价价值，并进行加权平均得到总体评价价值。数据包络分析法（DEA）通过构建生产前沿面评估决策单元的相对效率，适用于复杂评估体系。此外，灰色关联分析法和人工神经网络法等其他方法也可用于评估。实际应用中，选择合适的方法或结合多种方法，可提高评估的准确性和可靠性。构建科学的评估体系和采用适当的评估方法，有助于全面、客观、公正地评价项目效果，为项目改进和推广提供依据<sup>[7]</sup>。

# 三、工业锅炉节能环保改造项目实施效果评估结果分析

## （一）节能效果评估结果分析

锅炉热效率是评估节能效果的关键指标，通过比较改造前后数据，可以明确节能改造成效。需收集改造前后锅炉运行的关键数据，如燃料类型、消耗量、蒸汽产量等，用热效率公式计算热效率。节能改造后，热效率通常提升，归功于锅炉结构和燃烧系



统的优化。能源利用率是衡量能源效率的重要指标,涵盖锅炉热效率和系统能源使用,包括管网损失和设备用能。评估节能改造效果需收集改造前后能源消耗数据,如燃料、电、水等资源消耗及余热、余压回收。通过比较改造前后能源利用率的变化,可以全面了解节能改造成效。单位产品能耗是衡量企业能源效率的关键指标,尤其对使用锅炉的企业,它能显示节能改造对生产的影响。通过比较改造前后单位产品所需能源消耗,可以评估节能效果。节能改造后,生产效率提升,成本降低。节能量是关键指标,通过改造措施减少消耗。计算节能量需考虑锅炉热效率、能源利用率和单位产品能耗变化。分析节能量构成,如锅炉改造、燃烧系统优化、余热回收等,有助于评估节能效果,为制定节能目标和政策提供数据支持<sup>[9]</sup>。

### （二）环保效果评估结果分析

污染物排放浓度是指单位体积或单位质量废气中污染物的含量,是衡量环保效果的重要指标。工业锅炉排放的主要污染物包括烟尘、二氧化硫、氮氧化物等。需要收集改造前后锅炉的废气排放数据,包括烟尘、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放浓度,并进行对比分析。例如,如果改造前烟尘排放浓度为100mg/m<sup>3</sup>,改造后降低至50mg/m<sup>3</sup>,则说明环保改造降低了污染物的排放浓度,减少了环境污染。这通常是通过采用高效的除尘、脱硫、脱硝设备和技术实现的。污染物排放总量是衡量环保效果的关键指标,需结合排放浓度和废气排放量进行分析。例如,改造前二氧化硫年排放量为10吨,改造后降至5吨,表明环保措施有效减少了污染物排放,改善了环境<sup>[9]</sup>。环境效益难以用货币衡量,但可通过减少的污染物排放量和温室气体排放量等间接指标评估,这些指标反映了环保改造对空气质量、气候变化及人体健康的积极影响。环境效益分析有助于全面评估环保改造效果,为决策提供参考。

### （三）经济效益评估结果分析

投资回收期是指通过节能环保改造所产生的经济效益回收项目投资所需的时间,是衡量项目经济效益的重要指标。需要计算项目的总投资,包括设备购置、安装调试、土建工程等费用,以及每年的节约成本,包括节约的能源费用、减少的排污费用等。

然后,用总投资除以年节约成本,即可得到投资回收期。例如,如果项目总投资为100万元,年节约成本为20万元,则投资回收期为5年。投资回收期越短,说明项目的经济效益越好。年节约成本涵盖能源、排污和设备维护费用的节省。计算时需依据节能量、污染物减排量、能源价格和排污费标准。例如,节约50吨标准煤,按每吨1000元计算,年节约能源费用为5万元。环保改造还能减少排污费和维护费。净现值(NPV)是项目寿命期内净现金流量的现值总和,反映项目经济效益。内部收益率(IRR)是使项目净现值为零的折现率,衡量项目盈利能力。通过NPV和IRR分析,可全面评估项目经济效益,辅助投资决策<sup>[10]</sup>。

### （四）社会效益评估结果分析

节能减排贡献率是指通过节能环保改造所减少的能源消耗和污染物排放占所在地区或行业总量的比例,是衡量项目社会效益的重要指标。需要收集所在地区或行业的能源消耗和污染物排放数据,以及项目的节能量和污染物减排量,计算节能减排贡献率。例如,如果某地区每年消耗标准煤100万吨,某企业通过锅炉节能改造每年节约标准煤1万吨,则该企业对当地的节能贡献率为1%。节能减排贡献率越高,说明项目对社会的贡献越大。环境质量改善程度通过监测污染物浓度变化或居民满意度等间接指标评估,有助于评估环保改造的社会贡献。社会示范效应通过观察其他企业对节能环保改造项目的关注和效仿意愿来评估,有助于推动行业技术进步和绿色发展,为政策制定提供依据。

## 四、结语

工业锅炉节能环保改造项目的成功实施,不仅有助于企业提高能源利用率、减少污染物排放,还能带来显著的经济效益和社会效益。通过构建科学的评估体系和采用适当的评估方法,可以全面、客观、公正地评价项目的实施效果。未来,随着技术的不断进步和政策的持续推动,工业锅炉节能环保改造项目将发挥更大的作用,为推动我国绿色低碳发展贡献力量。同时,也应持续关注项目实施过程中出现的问题和挑战,不断优化技术方案和管理措施,确保项目能够持续、稳定地发挥节能环保效益。

## 参考文献

- [1] 季亚楠. 工业锅炉节能减排现状存在问题及对策 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020, (014): 1414.
- [2] 曹峰, 汤巍. 燃煤工业锅炉节能环保测试及煤改生物质颗粒燃料应用技术研究 [J]. 特种设备安全技术, 2019(3): 3.
- [3] 刘超. 关于工业锅炉能效测试与管理问题及应对措施的研究 [J]. 低碳世界, 2020, 10(6): 2.
- [4] 王驰. 关于热力计算的锅炉优化配煤研究 [J]. 黑龙江科技信息, 2021, (032): 75-77.
- [5] 鞠国利, 王桂璐. 浅谈建筑工程中消防电气的安装与维护措施 [J]. 精品, 2020(8): 1.
- [6] 赵宏伟, 张德勤. 国内小型工业锅炉环保节能问题探讨 [J]. 广西节能, 2021(1): 3.
- [7] 陈清文, 袁保强, 陈雨嫣. 燃煤锅炉改造问题与节能环保改造措施 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(2): 4.
- [8] 李季. 燃煤锅炉改造问题及节能环保改造措施 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2021(7): 2.
- [9] 赵淑珍, 闫建新. 浅谈工业锅炉节能和环境保护标准执行中的问题 [J]. 特种设备安全技术, 2021(3): 3.
- [10] 光若蕾. 燃煤锅炉改造问题及节能环保改造措施 [J]. 中小企业管理与科技, 2021, (003): 172-173.

# 船舶压力管道安装中的焊接变形控制与应力分析技术

王洪波

招商局工业集团扬州鼎衡船舶有限公司，江苏 扬州 225000

DOI:10.61369/ERA.2025090008

**摘 要：** 船舶压力管道是船舶系统里的关键构成部分，其安装质量会对船舶的运行安全以及性能造成影响。在安装流程中，焊接变形以及应力方面的问题是影响管道质量的重要要素。在本文中，针对船舶压力管道安装，提出一些新颖的问题，例如新型高强度材料焊接变形控制方面的难题，复杂空间结构管道应力集中分析精准度不够，还有焊接残余应力和动态载荷耦合作用下存在的安全隐患等。对这些问题产生的原因展开深入的分析，并且从工艺优化、技术革新等方面提出解决的办法，目的是提高船舶压力管道的安装质量，保证船舶能够安全且稳定地运行。

**关 键 词：** 船舶压力管道；焊接变形控制；应力分析；安装技术

## Welding Deformation Control and Stress Analysis Techniques in the Installation of Ship Pressure Pipelines

Wang Hongbo

China Merchants Industry Group Yangzhou Dingheng Shipbuilding Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225000

**Abstract：** Ship pressure pipelines are a critical component of ship systems, and their installation quality directly impacts the operational safety and performance of the vessel. During the installation process, issues related to welding deformation and stress are key factors affecting pipeline quality. In this paper, we address some novel issues related to the installation of ship pressure pipelines, such as challenges in controlling welding deformation of new high-strength materials, insufficient accuracy in stress concentration analysis of complex spatial structure pipelines, and safety hazards under the combined effects of residual welding stress and dynamic loads. We conduct an in-depth analysis of the causes of these issues and propose solutions from the perspectives of process optimisation and technological innovation, with the aim of improving the installation quality of ship pressure pipelines and ensuring the safe and stable operation of the vessel.

**Keywords：** ship pressure pipelines; welding deformation control; stress analysis; installation technology

### 引言

船舶压力管道肩负着船舶内部流体运输、能量传送等至关重要的功能，是保障船舶动力系统、燃油系统、液压系统等得以正常运作的关键要素。焊接作为安装船舶压力管道时主要采用的连接手段，在焊接进程中产生的应力和变形会对管道的结构强度、密封性以及尺寸精确程度造成影响，严重的会对船舶的航行安全构成威胁。伴随船舶工业朝着大型化、繁杂化方向发展，对压力管道安装品质的要求持续攀升，深入钻研焊接变形管控与应力分析技术，解决安装过程里的实际难题，对提高船舶建造水准具备重要的意义。

### 一、船舶压力管道安装期间焊接变形以及应力方面存在的问题

#### （一）新型材料焊接过程中形变控制难题

伴随船舶工业对于轻量化以及高强度需求的不断增多，如新型高强度合金钢、钛合金等材料在船舶压力管道中的应用变得愈

发普遍。此类材料具备高强度、高韧性等长处，在焊接进程中会存在热导率偏低、热膨胀系数偏大的状况，导致焊接期间局部温度场呈现出分布不均衡的现象，容易产生较大程度的焊接变形<sup>[1]</sup>。比如，有一艘船舶在安装钛合金压力管道时，因为焊接工艺参数设置得不合理，管道出现严重扭曲变形问题，这会增加矫正成本，对管道的安装进度以及安装质量也会产生不良影响。除此之

外,新型材料在焊接方面呈现出相对较差的性能状态,对于焊接所采用的工艺以及操作人员具备的操作技能提出极为严苛的要求,常规层面用于控制焊接变形的方法很难契合实际需求。

### （二）复杂空间结构管道应力集中分精度不足

船舶当中压力管道的安装空间比较有限,并且其结构呈现出复杂的状态,经常会涵盖数量众多的弯头、三通、异径管等各类管件,进而构建出复杂的空间结构样式。在开展焊接工作的进程中,这些部位很容易出现应力集中的现象,然而传统采用的应力分析办法,如依据经验公式的计算方法以及较为简单的有限元模型分析手段,很难精准地对复杂结构的应力分布情形予以模拟。比如,在船舶机舱里边进行压力管道安装时,因为管道的布局十分紧凑,多个管件的连接处应力集中的问题极为显著,但当前的分析技术无法精确地算出应力集中系数,使得在船舶运行的过程当中,某些部位成为管道出现破裂、发生泄漏的潜在风险之处。

### （三）焊接残余应力和动态载荷耦合中存在安全风险

在船舶航行时,压力管道不但要承受内部流体的压力,还会遭受船体振动以及海浪冲击等动态载荷的影响。焊接期间所产生的残余应力和动态载荷彼此耦合,会明显降低管道的疲劳使用寿命以及结构的安全性能。当下针对焊接残余应力和动态载荷耦合作用开展的研究相对较少,缺少有效的评估办法以及预防手段。例如,某艘远洋货轮在运行一段时间后,其压力管道出现疲劳裂纹。经分析可知,焊接残余应力和船舶航行时的动态载荷共同发挥作用,加快裂纹的产生以及扩展,给船舶的运行安全带来严重的威胁。

### （四）对焊接工艺参数实施优化面临困难

焊接时运用的工艺参数,如焊接时的电流大小、电压数值以及焊接行进的速度等,会直接对焊接所产生的变形状况、应力大小以及高低产生影响。在船舶压力管道开展安装工作的进程中,鉴于管道自身的材质特性、管壁的厚度情况以及焊接时所处的具体位置等多种要素存在着教大的差异,因此确定统一的焊接工艺参数标准是一件极具难度的事情。并且,以往传统方式下对焊接工艺参数进行调整大多是凭借过往积累的经验,缺少科学合理的优化手段,导致在控制焊接变形以及应力方面的实际效果不太稳定。例如,当对壁厚存在差异的压力管道实施焊接操作之时,若是运用相同的焊接工艺方面的参数,那么较为单薄的管道可能会出现如烧穿、变形超出合理范围等状况,然而较为厚实的管道却可能产生诸如未被完全焊透、应力过度聚集等问题。

### （五）焊接变形与应力的监测技术相对滞后

在船舶压力管道的焊接作业进程中,实际上缺少具备高效性的实时监测相关技术,无法在第一时间获取到焊接变形以及应力方面的动态改变信息。当下经常被采用的监测手段,如借助应变片测量、开展超声波检测等,均暴露出测量范围比较有限、操作相对复杂、无法做到实时持续监测等状况。上述情形的出现导致在焊接进程中,一旦产生变形或者应力异常的状况,无法及时采取相应手段进行调整,会加大后续矫正以及修复工作的困难程度,同时也对管道安装的质量以及效率造成不良影响。<sup>[2]</sup>

## 二、对问题产生的缘由予以剖析

### （一）材料特性和焊接工艺不匹配

当新型材料被应用到船舶压力管道中,其具有的特殊物理化学性能与传统的焊接工艺呈现出 mismatch 的状况。比如,在对新型高强度合金钢进行焊接作业时,该材料对焊接热输入量呈现出高度的敏感性,在上述情况下,一旦使用传统的焊接工艺,很可能使焊接接头出现诸如晶粒变得粗大、发生脆化等问题,而上述问题进一步会引发较为显著的焊接变形以及残余应力。与此同时,有关新型材料焊接工艺的研究进展相对比较缓慢,缺乏系统的、用于焊接工艺评定以及优化的方法,上述情况导致对焊接变形进行有效控制的难度显著增加。

### （二）分析模型和实际结构存在较大差异

常用的应力分析模型,在应对船舶压力管道复杂、多样的空间构造时,经常作出过量的简化操作与假设内容,和实际的结构状况存在着较为显著的差异。例如,在进行有限元分析期间,针对管件相连接之处的几何外形、边界条件等方面的处理,未能达到足够精准的程度,进而使得计算得出的结果同实际的应力分布情形产生较大的偏差。除此之外,当下现存的分析模型很难去考量焊接过程中所出现的动态变化要素,如焊接热源的移动、材料的相变等情况,无法实现对焊接应力的产生以及发展进程进行精准的模拟。

### （三）多因素耦合作用的相关研究力度不足

焊接残余应力与动态载荷之间的耦合效应,涉及如材料力学、动力学等诸多学科范畴,其效应的作用机制颇为复杂<sup>[3]</sup>。当下有关的研究多数聚焦于单一因素给管道性能带来的影响,而针对多因素耦合效应下管道的力学表现的研究尚显欠缺,缺少实用的理论模型与计算手段用以评估耦合效应,给管道疲劳寿命以及结构安全性造成的影响。这使得在船舶压力管道的设计与安装进程中,难以采取具有针对性的举措来削减安全隐患。

### （四）焊接工艺参数的优化方式相对滞后

过往的焊接工艺参数优化大多依靠焊工所积累的经验,以及开展试焊工作来实现,缺少具备科学性的理论引导以及优化办法。伴随船舶压力管道安装标准持续升高,焊接工艺参数的优化方式不能契合实际需求。与此同时,焊接流程会牵涉到多个物理场之间产生相互作用,其中的影响要素较为多样,若采用以往的方法,很难全方位地权衡各个要素之间存在的关联情况,也就难以达成焊接工艺参数的精确优化。

### （五）监测技术的研发呈现出滞后态势

船舶压力管道焊接变形与应力的实时监测技术的研发,相较于实际需求呈滞后态势。从某个方面来看,当下所应用的监测设备以及监测技术,在精准程度、可靠性能、实时效应等维度均存有欠缺,难以契合复杂焊接环境状况下的监测需求。从其他方面来看,针对监测技术研发的投入不够充足,与之相关的科研力量呈现分散状态,同时缺少有效的产学研合作机制,到会监测技术的创新能力有所不足,想要研制出适用于船舶压力管道焊接流程的先进监测技术与设备颇具难度。



### 三、船舶压力管道安装中焊接变形的把控以及应力分析的优化举措

#### （一）致力于研发适用于新型材料的专用焊接工艺

从当下新型材料所具备的特性入手，启动专项的焊接工艺探究工作，开展专用焊接工艺的研发。通过对焊接方法进行调整、对焊接参数予以优化、对焊接顺序加以改进等诸多举措，对焊接热输入量实施管控，从而削减焊接变形的情况<sup>[4]</sup>。比如，在进行钛合金压力管道的焊接作业时，采用钨极氩弧焊（TIG）方式，并且搭配运用小电流、快速焊的工艺参数条件，同时采用先分段跳焊、再对称焊等这样的焊接顺序安排，能够切实有效地降低焊接时产生的变形现象。除此之外，进一步强化对新型材料焊接性能的相关研究工作，构建完善的焊接工艺评定标准体系，以此为焊接工艺的制定工作，提供具有科学性与可靠性的依据。

#### （二）构建具备高度精确性的应力分析模型

运用较为前沿的数值计算手段以及计算机方面的技术，构建具备较高精度的船舶压力管道应力分析的相关模型。在开展建模工作的进程中，全面考量诸如管道复杂的空间架构情形、焊接进程中的动态改变状况以及材料所呈现出的非线性特质等多方面因素。借助细化网格、精准模拟边界条件等方式，提升模型计算的精准程度。与此同时，将试验所获数据与模型相结合开展验证以及修正作业，保证分析得出的结果具备可靠性质。例如，借助有限元分析软件，对船舶机舱内部的压力管道开展三维建模工作，精准地算出管件连接处的应力集中系数，从而为管道的设计与安装提供确切的应力分析相关数据。

#### （三）推进多因素耦合作用方面的研究工作

强化对焊接残余应力和动态载荷之间耦合作用的探究活动，构建处于多因素耦合作用状况下，管道力学行为的理论模型以及计算办法。借助试验研究跟数值模拟相互结合的模式，深度剖析耦合作用对管道疲劳寿命，以及结构安全性所产生影响的规律情形。在这一基础上，提出对应的预防以及控制的举措，例如对管道的结构设计加以优化、运用应力消除方面的工艺等，以此减少多因素耦合作用引发的安全风险。比如，在管道设计阶段，凭借科学地布置支撑、吊架，降低动态载荷给管道造成的影响；在焊接工作结束之后，运用如振动时效等手段，消除焊接留存下来的应力<sup>[5]</sup>。

#### （四）运用智能优化算法对焊接工艺参数进行优化

将智能优化算法引入其中，如遗传算法、粒子群算法等，针对焊接工艺参数开展优化工作。以焊接变形以及应力作为优化的目的，全面考量管道的材质、壁厚、焊接所在位置等相关要素，构建多目标的优化模型。凭借算法进行迭代运算，自主探寻最优的焊接工艺参数搭配。例如，运用遗传算法对不锈钢压力管道的焊接工艺参数加以优化，在确保焊接质量达成要求的基础上，让焊接变形以及残余应力显著地减少。与此同时，研发依托于智能算法的焊接工艺参数优化软件，为从事焊接工作的人员提供便利的参数优化工具。

#### （五）开展先进的实时监测技术和相关设备的研发工作

加大在船舶压力管道焊接变形以及应力实时监测技术研发领域的投入力度，对科研资源予以整合，强化产学研的协作，开展基于光纤传感、数字图像相关（DIC）等技术的实时监测设备的研发工作，达成对焊接变形和应力的高精度且实时连续的监测。比如，借助光纤光栅传感器对管道焊接过程里的应变状况进行实时监测，依据监测所得的数据及时对焊接工艺参数作出调整，以此来控制焊接时产生的变形。与此同时，搭建用于监测数据处理以及分析的系统，对监测数据展开实时性的分析以及预警操作，从而为焊接过程的控制举措给予数据方面支持<sup>[6]</sup>。

### 四、结论

在船舶压力管道安装时，焊接变形控制以及应力分析技术是确保船舶得以安全运行的要点。通过剖析当下存在的如新型材料焊接碰到的棘手问题、应力分析精准度不够这类状况，以及导致这些状况出现的原因，针对性的提出诸如开展专用焊接工艺的研发、构建高精度分析模型此类的优化方法，上述方法若得到落实，能够切实提高船舶压力管道的安装品质，减小由焊接变形以及应力所引发的安全隐患。在未来的阶段，伴随船舶工业持续地向前发展，仍旧需要不断地开展有关技术的研究工作，持续推陈出新工艺以及方法，进而为船舶压力管道的安装事宜，提供更为可靠的技术性保障，以促使船舶工业朝着更高水准的质量方向迈进。

### 参考文献

- [1] 黄俊杰, 张迪, 杨少杰, 等. 船舶和海洋工程设计中管道防腐研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(11): 65-67.
- [2] 李仕麒, 张亚东. 船舶制造中金属材料无损探伤检测技术 [J]. 中国科技信息, 2024, (17): 91-93.
- [3] 姚丙锋. 船舶工程中管系安装技术分析 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(06): 60-62.
- [4] 韩锡岭. 谱减法在船舶管道泄漏检测中的应用研究 [J]. 中国修船, 2023, 36(06): 16-19.
- [5] 孟宏超. 船舶管系设计系统的发展和应用 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(11): 39-41.
- [6] 李海学, 朱青春, 魏颂河. 船舶锚泊作业对海底管道安全风险分析 [J]. 石油工程建设, 2023, 49(05): 47-50.

# 电力工程中的电气技术管理与风险管理研究

范秀聪

广东昌明电力工程有限公司，广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ERA.2025090020

**摘 要：** 本文围绕电力工程管理，阐述电气技术管理各阶段任务及战略定位等，介绍核心要素体系、风险管理流程，分析电力工程特性及风险，探讨技术标准与风险阈值关联，还涉及协同机制构建、综合评价模型、多种管理方案及组织架构优化，强调协同机制的创新与价值。

**关 键 词：** 电力工程；电气技术管理；风险管理

## Research on Electrical Technology Management and Risk Management in Power Engineering

Fan Xiucong

Guangdong Changming Electric Power Engineering Co., LTD., Foshan, Guangdong 528300

**Abstract：** This paper focuses on power engineering management, elaborating on the tasks and strategic positioning at various stages of electrical technology management. It introduces the core element system and risk management processes, analyzes the characteristics and risks of power projects, explores the relationship between technical standards and risk thresholds, and also discusses the construction of collaborative mechanisms, comprehensive evaluation models, multiple management solutions, and organizational structure optimization. The emphasis is placed on the innovation and value of collaborative mechanisms.

**Keywords：** power engineering; electrical technology management; risk management

### 引言

随着电力行业的不断发展，对电力工程管理提出了更高要求。2023年发布的相关能源政策强调了电力工程质量和安全的重要性。电气技术管理作为电力工程管理的核心部分，贯穿项目全生命周期，涉及规划设计、建设施工和运营维护等阶段，对提高工程质量和效率、降低成本和风险至关重要。同时，风险管理也是不可或缺的环节，涵盖风险识别、评估、应对和监控等流程。两者存在紧密联系，构建协同机制有助于提升电力工程管理效能，保障电力系统稳定运行，本研究对此展开探讨。

### 一、电力工程电气技术管理理论框架

#### （一）电气技术管理基本内涵

电气技术管理是电力工程管理的核心部分，它贯穿于工程项目的全生命周期。从项目的规划设计阶段，电气技术管理就开始介入，确保电气系统的设计符合工程的整体需求和相关标准规范<sup>[1]</sup>。在建设施工阶段，它负责监督电气设备的安装、调试，保证施工质量和进度。到了运营维护阶段，电气技术管理主要关注电气设备的运行状态监测、故障诊断与维修，以保障电力系统的安全稳定运行。其战略定位在于通过对电气技术的有效管理，提高电力工程的质量和效率，降低成本和风险。其功能价值体现在为电力工程提供可靠的技术支持，确保电力供应的连续性和稳定

性，满足社会对电力的需求。

#### （二）技术管理核心要素体系

电力工程电气技术管理核心要素体系涵盖人员资质管理、设备技术标准和工艺流程控制三个关键维度，形成一个有机的三维管理模型<sup>[2]</sup>。人员资质管理确保参与电力工程电气技术工作的人员具备相应的专业知识和技能，这是保障工程质量和安全的基础。设备技术标准明确了各类电气设备应满足的技术规范和性能指标，为设备的选型、安装、调试和维护提供了依据。工艺流程控制则对电力工程电气技术的实施过程进行规范，包括施工顺序、操作方法、质量检验等环节，以确保工程按照预定的技术要求和质量标准顺利进行。这三个要素之间存在着紧密的耦合关系，相互影响、相互制约，共同构成了电力工程电气技术管理的核心。

## 二、电力工程风险管理理论基础

### （一）风险管理流程体系

风险管理流程体系涵盖风险识别、评估、应对和监控四个主要环节，形成一个闭环管理系统。风险识别是基础，需全面准确地找出电力工程中可能存在的风险因素，包括技术风险、环境风险、人为风险等<sup>[3]</sup>。评估环节则要对识别出的风险进行量化分析，确定其发生的概率和可能造成的影响程度。基于评估结果，制定相应的风险应对策略，如风险规避、风险降低、风险转移和风险接受等。最后，通过持续的监控来跟踪风险的变化情况，及时调整应对措施，确保风险管理的有效性。同时，FMEA 作为一种重要的风险分析工具，在电力工程中有其特殊应用场景，有助于更精准地识别和评估潜在风险。

### （二）工程风险特征分析

电力工程具有高电压、大电流、复杂系统等技术特性，这些特性使其风险具有独特性。高电压带来的风险包括绝缘击穿风险增大，可能导致设备损坏和人员触电事故<sup>[4]</sup>。大电流会使电气设备发热加剧，增加过热故障的概率，影响设备的正常运行和使用寿命。复杂系统意味着众多设备和线路相互关联，一个部件的故障可能引发连锁反应，扩大事故影响范围。同时，电力工程的风险还受到环境因素的影响，如恶劣天气可能导致线路损坏、短路等。技术风险方面，涉及到电力系统的设计、施工、运行和维护等各个环节，任何一个环节的技术失误都可能带来严重后果。

## 三、技术管理与风险管理的协同机制

### （一）管理要素耦合关系

#### 1. 技术标准与风险阈值的关联性

技术标准与风险阈值存在紧密关联性。技术标准规定了各项技术指标的合理范围，这些指标的变化会直接影响风险阈值。例如，电气设备的绝缘电阻标准值设定，若实际测量值偏离标准，可能导致漏电风险增加，即绝缘电阻的技术标准与漏电风险阈值相关联。通过大量实验和数据分析，可以建立技术指标与风险等级的映射关系，从而实现对风险的量化评估。以电力工程中的电压稳定性指标为例，当电压波动超过一定标准时，会引发不同等级的风险，如设备损坏、停电等。这种映射关系有助于管理者根据技术参数及时判断风险概率，采取有效的风险管理措施，提高电力工程的安全性和可靠性<sup>[5]</sup>。

#### 2. 管理流程的协同优化路径

在电力工程中，技术管理程序与风险管理流程需并行实施。基于 PDCA 循环理念，构建两者协同的框架。在计划（Plan）阶段，技术管理确定工程技术目标与方案时，风险管理同步识别潜在风险，评估其和技术目标的影响<sup>[6]</sup>。执行（Do）阶段，技术管理实施技术方案，风险管理监控风险并采取相应措施。检查（Check）阶段，共同评估技术实施效果与风险控制情况。处理（Act）阶段，总结经验教训，对技术管理和风险管理进行调整优化。通过这种循环机制，实现管理要素的耦合，优化管理流程，

提升电力工程的综合效益。

### （二）系统协同效能评估

#### 1. 协同度评价指标体系

构建包含资源配置效率、风险控制效果、成本优化程度的综合评价模型。资源配置效率可从人力、物力、财力等方面考量，反映技术管理与风险管理在资源分配上的合理性与有效性，确保资源的优化利用，避免浪费与短缺<sup>[7]</sup>。风险控制效果指标衡量对各类风险的识别、评估及应对能力，体现协同机制在降低风险发生概率和损失程度方面的作用。成本优化程度则关注协同管理是否能减少不必要的成本支出，包括预防成本、损失成本等，以实现整体成本的最小化，提高电力工程的经济效益和社会效益。

#### 2. 典型工程案例分析

在变电站建设项目中，对技术管理与风险管理的协同机制进行了实证研究。通过建立有效的信息共享平台，技术人员与风险管理人员能够及时沟通，确保技术决策充分考虑风险因素，风险防控措施也紧密结合技术实际<sup>[8]</sup>。在项目实施过程中，协同机制使得技术方案不断优化，减少了因技术问题引发的风险事件。例如，在变电站的电气设备安装环节，技术管理确保了安装工艺符合标准，同时风险管理提前识别出可能出现的设备损坏风险，通过加强防护措施，有效避免了损失。系统协同效能评估结果显示，该协同机制显著提高了项目的整体效益，缩短了工期，降低了成本，提升了变电站建设项目的质量和可靠性。

## 四、电力工程管理优化实施路径

### （一）技术管理能力提升策略

#### 1. 智能化技术标准体系建设

基于 BIM 技术的三维可视化标准管理方案在电力工程管理中具有重要意义。通过构建三维模型，可实现对电力工程的全面、直观展示，便于技术人员更好地理解工程结构和流程<sup>[9]</sup>。同时，该方案有助于整合各类工程信息，提高信息的准确性和共享性。在此基础上构建数字孪生管理平台，能实时反映电力工程的实际运行状态。通过数据采集与分析，可对潜在问题进行预警，为技术管理能力提升和智能化技术标准体系建设提供有力支持，进一步优化电力工程管理路径。

#### 2. 人员技术能力培养体系

设计包含资质认证、继续教育、技能竞赛的多维人才培养机制对于提升人员技术能力至关重要。资质认证是对人员专业能力的基本认可，可确保其具备从事相关工作的基本素养<sup>[10]</sup>。继续教育能使人员紧跟行业技术发展动态，不断更新知识体系，提高技术水平。通过组织技能竞赛，营造竞争氛围，激发人员学习和提升技术的积极性，同时也能发现优秀人才，为电力工程技术管理提供人才储备。这种多维培养机制相互配合，全面提升人员技术能力，从而推动电力工程技术管理能力的提升。

### （二）风险管理模式创新

#### 1. 动态风险评估模型构建

开发融合大数据分析的实时风险预警系统，建立风险态势感

知机制。通过收集电力工程各个环节的数据，包括设备运行数据、环境数据、人员操作数据等，利用大数据分析技术挖掘数据中的潜在风险信息。构建风险评估模型，对风险发生的概率和可能造成的影响进行量化评估。同时，建立风险态势感知机制，实时监测风险的动态变化，当风险指标超出预设阈值时，及时发出预警信息，以便管理人员采取相应的措施进行风险控制，确保电力工程的安全稳定运行。

### 2. 应急响应体系优化

在应急响应体系优化方面，完善分级分类应急预案至关重要。需根据电力工程可能面临的不同风险类型和严重程度，制定详细且具有针对性的预案。同时，设计基于物联网的智能应急指挥系统。利用物联网技术实现对电力工程各个环节的实时监测，采集相关数据并传输至指挥中心。指挥系统能够快速分析数据，准确判断事故位置和性质，及时调配资源。通过智能应急指挥系统，提高应急响应的速度和准确性，降低事故造成的损失，保障电力工程的安全稳定运行。

## （三）管理机制融合创新

### 1. 一体化管理平台设计

在电力工程管理优化的实施路径中，管理机制融合创新的一体化管理平台设计至关重要。整合技术管理数据库与风险信息库是基础，通过对电气技术相关数据以及风险因素数据的收集、整理和分类，为后续系统开发提供数据支撑。基于此，开发具有决策支持功能的综合管理系统。该系统应具备数据分析能力，能够对大量的技术和风险数据进行挖掘，提取有价值的信息。同时，系统要能根据预设的规则和算法，对不同的工程情况进行模拟和

评估，为管理人员提供决策建议，例如在电气技术选择和风险应对策略方面，帮助其做出科学合理的决策，从而提升电力工程管理的效率和质量。

### 2. 组织架构优化方案

为优化电力工程管理的组织架构，可提出矩阵式项目管理组织模式。此模式下，项目团队成员既受原职能部门领导，又接受项目经理的指挥，能充分利用企业资源，提高项目运作效率。同时，建立跨部门协同管理委员会至关重要。该委员会由各相关部门的代表组成，负责统筹协调工程中的重大事项，打破部门壁垒，促进信息流通与共享。在实际运作中，当遇到涉及多部门的问题时，委员会能够迅速做出决策，调配各方资源，确保工程顺利推进。这种组织架构优化方案，有助于提升电力工程管理的整体效能，增强企业在市场中的竞争力。

## 五、总结

本研究系统探讨了电力工程中的电气技术管理与风险管理。通过深入分析，构建了电气技术管理与风险管理的协同机制，这在理论上是一种创新，在实践中也具有重要价值。该协同机制能够显著提升电力工程管理效能，有效降低系统性风险，为电力工程的稳定运行提供了有力保障。同时，研究成果也为后续研究指明了方向。未来可着眼于智能化管理工具的开发，利用先进技术提升管理的精准性和效率；还可针对新型电力系统展开适应性研究，以更好地应对电力行业的发展变革，进一步完善电力工程的管理体系。

## 参考文献

- [1] 郭涛. 电力工程项目风险管理研究 [J]. 科技创新导报, 2016, 13(21): 116-117.
- [2] 马晨光. 电力工程项目风险管理研究 [J]. 电子制作, 2014, (09): 243+242.
- [3] 尹传根. 电力工程施工进度风险耦合机理与测度模型研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2019.
- [4] 雷鸿飞. 国际电力工程项目风险管理研究 [D]. 华北电力大学, 2013.
- [5] 孙鹏. 电力工程项目安全与风险管理机制研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2017.
- [6] 党健. 电力工程项目风险管理的初步研究 [J]. 科技创新与应用, 2015, (24): 198.
- [7] 刘丽红. 电力工程建设中风险管理研究 [J]. 科技与企业, 2013, (14): 52+54.
- [8] 肖昌林. 电力工程项目管理过程中风险控制及解决措施 [J]. 通讯世界, 2017, (22): 211-212.
- [9] 刘运祥. 浅论电力工程项目管理过程中的风险控制 [J]. 通讯世界, 2017, (23): 151-152.
- [10] 刘辉. 风险管理在电力工程项目管理中的应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2013, (18): 39-41.



# 市政工程领域：风险管理视角下的管理 与技术融合路径

莫金莉

身份证号: 450103197812192045

DOI:10.61369/ERA.2025090022

**摘要：** 市政工程风险受多种因素影响，具有不确定性、系统性和动态性特征。传统管理方法有局限，需改进。介绍了智能技术对风险管理的支撑，阐述了矩阵式架构、PDCA 循环等在风险管理中的应用，还涉及人才培养、政策保障等方面，强调管理与技术融合的重要性。

**关键词：** 市政工程；风险管理；管理与技术融合

## The Integration Path of Management and Technology from the Perspective of Risk Management in the Field of Municipal Engineering

Mo Jinli

ID: 450103197812192045

**Abstract：** The risks of municipal engineering are influenced by various factors and have characteristics of uncertainty, systematicity, and dynamism. Traditional management methods have limitations and need improvement. This article introduces the support of intelligent technology for risk management, elaborates on the application of matrix architecture, PDCA cycle, etc. in risk management, and also involves aspects such as talent cultivation and policy guarantee, emphasizing the importance of integrating management and technology.

**Keywords：** municipal engineering; risk management; integration of management and technology

### 引言

市政工程作为城市基础设施建设的重要组成部分，其风险管理至关重要。2020年发布的《关于加强市政工程建设管理的若干意见》强调了市政工程质量和安全的重要性，这进一步凸显了风险管理的必要性。市政工程风险受多种因素影响，具有不确定性、系统性和动态性等特征。传统管理方法在风险识别、评估和应对上存在局限，影响管理效果。而智能技术的发展为管理与技术融合提供了支撑，包括 BIM、物联网和大数据分析等。同时，构建合理的组织架构、流程体系以及融合多源数据的决策平台等也对风险管理至关重要，此外还需注重人才培养和政策保障体系构建等方面，以提升市政工程风险管理水平。

### 一、市政工程风险管理概念与理论基础

#### （一）市政工程风险的定义与特征

市政工程风险是指在市政工程项目全生命周期内，由于各种不确定性因素的存在，导致项目目标无法实现的可能性及其后果。这些不确定性因素涵盖了项目的各个阶段和各个方面，包括但不限于自然环境、社会环境、技术水平、管理能力等<sup>[1]</sup>。其具有以下特征：

不确定性：市政工程受多种复杂因素影响，如天气变化、地质条件差异等，这些因素难以准确预测，增加了风险的不确定性。

系统性：市政工程是一个复杂的系统，各个子系统之间相互关联、相互影响。一个子系统的风险可能会引发其他子系统的风险，从而对整个项目产生影响。

动态性：随着项目的推进，项目所处的环境和条件不断变化，风险也会随之发生变化。因此，需要对风险进行动态管理。

#### （二）传统管理方法与技术应用的局限性

市政工程风险管理中，传统管理方法与技术应用存在诸多局限。在风险识别方面，现有体系精度不足，往往只能识别出常见的、表面的风险，对于一些潜在的、复杂的风险因素难以精准把握<sup>[2]</sup>。例如一些新型施工技术带来的风险可能被忽视。在风险评估上，效率低下，评估过程繁琐且缺乏系统性，无法快速对风险进



行量化分析，导致评估结果不准确。在应对风险时，时效性差，从风险发生到采取措施之间存在较长的时间间隔，使得风险可能进一步扩大，造成更大的损失。这些局限严重影响了市政工程风险管理的效果，迫切需要改进和创新。

## 二、管理与技术融合的必要性分析

### （一）市政工程复杂系统管理需求

市政工程如地下管网和交通枢纽等往往是复杂系统，其面临诸多风险。在地下管网方面，其分布广泛且结构复杂，一旦发生泄漏、堵塞等问题，可能引发严重后果，如地面塌陷、环境污染等，因此需要强大的风险预警能力来实时监测管网状态，及时发现潜在风险<sup>[3]</sup>。交通枢纽则涉及大量的人流、车流和物流，其运行的安全性和高效性至关重要。任何一个环节出现故障或拥堵，都可能导致大面积的交通瘫痪和人员滞留。这就要求有先进的决策支持系统，能够快速分析交通流量、事故等信息，为管理者提供科学的决策依据，以保障交通枢纽的正常运行。

### （二）智能技术发展的支撑条件

BIM、物联网、大数据分析等智能技术的发展为市政工程风险管理中管理与技术的融合提供了支撑条件。BIM 技术具有可视化、协同性等特点，能够在工程设计、施工阶段提供精准的模型，辅助风险识别与评估<sup>[4]</sup>。物联网通过传感器等设备实现对工程实体的实时监测，获取大量数据，为风险预警提供依据。大数据分析则可对海量数据进行处理，挖掘潜在风险因素及其关联关系，从而优化风险管理决策。这些技术的成熟度不断提高，使得在市政工程风险管理中重构管理流程具备了技术可行性，推动了管理与技术的有效融合。

## 三、融合机制构建的理论框架

### （一）管理协同机制设计

#### 1. 组织结构优化路径

构建跨专业协同的矩阵式风险管理组织架构是组织结构优化的关键路径。这种架构打破了传统的部门界限，将不同专业领域的人员整合在一起，形成一个有机的整体。在市政工程风险管理中，涉及到工程技术、经济、管理等多个专业，矩阵式架构能够促进各专业人员之间的沟通与协作。例如，工程技术人员可以及时向管理人员反馈技术风险信息，管理人员则能够根据经济和管理方面的知识制定相应的风险应对策略。同时，该架构还能够明确各成员的职责和权力，避免出现职责不清、权力交叉等问题，提高风险管理的效率和效果<sup>[5]</sup>。

#### 2. 流程再造实施方案

基于 PDCA 循环构建风险管理标准化流程体系，旨在实现市政工程领域管理与技术的有效融合。PDCA 循环包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段。在计划阶段，需明确风险管理目标，识别潜在风险因素，并制定相应的应对策略<sup>[6]</sup>。执行阶段则要严格按照计划实施风险管理措施，确保各

项技术和管理手段得以落实。检查阶段通过对实施过程和结果的监测，评估风险管理的效果，及时发现存在的问题。处理阶段针对检查出的问题进行分析和总结，调整和完善风险管理计划和措施，为下一个循环提供经验借鉴，从而不断优化风险管理流程，提高市政工程的整体效益。

### （二）技术创新融合机制

#### 1. 智能监测技术集成

多源传感器网络与 GIS 系统的空间数据融合是智能监测技术集成的关键。多源传感器网络能够获取大量的实时监测数据，而 GIS 系统则提供了强大的空间分析和可视化能力。通过建立合理的融合方法，可将传感器数据与 GIS 的空间信息相结合，实现对市政工程的全面、准确监测。这一融合过程需考虑数据的一致性、准确性和时效性等问题。同时，要建立有效的数据传输和存储机制，确保数据的完整性和可靠性。通过这种融合机制的构建，可以为市政工程领域的风险管理提供更有力的技术支持，提升管理决策的科学性和准确性<sup>[7]</sup>。

#### 2. 决策支持系统构建

建立风险量化模型与专家知识库联动的智能决策平台是技术创新融合机制中决策支持系统构建的关键。该平台需整合多源数据，包括工程历史数据、实时监测数据以及专家经验知识等。风险量化模型可基于数学算法和统计分析对风险进行量化评估<sup>[8]</sup>，而专家知识库则存储领域专家的知识和经验规则。通过建立两者之间的联动机制，当风险量化模型得出初步结果后，可与专家知识库中的知识进行比对和验证，同时专家知识库也可为风险量化模型提供参数调整和优化的依据，从而提高决策的准确性和科学性，为市政工程领域的风险管理提供有力支持。

## 四、融合路径实施策略

### （一）顶层设计优化方案

#### 1. 政策保障体系构建

在市政工程领域，从风险管理视角出发，政策保障体系构建至关重要。应制定技术标准融合的行业规范与激励政策<sup>[9]</sup>。通过明确统一的技术标准融合规范，确保不同技术在市政工程中的有效衔接与协同，避免因标准不一致导致的风险。同时，激励政策可激发企业和科研机构积极参与技术创新，例如给予财政补贴、税收优惠等，提高其积极性。政府还应加强对技术融合过程的监管，确保规范和政策的有效实施，保障市政工程的质量和安

#### 2. 人才培养机制创新

市政工程领域风险管理需要复合型人才，其能力框架应涵盖工程技术知识、风险管理理论与实践技能等多方面<sup>[10]</sup>。培养路径可从教育体系优化着手，在高校相关专业课程设置中增加风险管理与市政工程技术融合的课程模块，注重实践教学环节，如案例分析、模拟项目等。同时，鼓励企业与高校联合培养人才，企业为学生提供实习机会，使其在实际项目中积累经验，高校则为企

业员工提供继续教育课程，提升其理论水平。此外，还需建立完善的人才评价机制，以能力和业绩为导向，激励人才不断提升自身素质，满足市政工程风险管理对人才的需求。

### （二）技术支撑体系建设

#### 1. 数字孪生平台开发

在数字孪生平台开发中，构建工程实体与虚拟模型的双向数据映射机制至关重要。通过传感器等技术采集工程实体的各类数据，包括结构状态、环境参数等。将这些数据传输至虚拟模型，实现虚拟模型对实体的实时映射。同时，虚拟模型中的分析结果和优化建议也能反馈至工程实体，指导实际施工和维护。利用大数据和人工智能算法对采集的数据进行处理和分析，挖掘潜在风险和优化点。建立数据标准和接口规范，确保数据的准确性和一致性，保障双向映射的顺畅进行，从而提升市政工程风险管理的效率和效果。

#### 2. 风险预警模型优化

在风险预警模型优化方面，重点在于改进基于机器学习的风险概率预测算法精度。这需从数据收集与预处理入手，确保数据的准确性和完整性，为算法提供高质量的输入。同时，选择合适的机器学习算法至关重要，要根据市政工程风险的特点和数据的分布情况进行筛选。在模型训练过程中，合理设置参数，采用交叉验证等方法避免过拟合。此外，不断更新和扩充数据集，以适应市政工程环境的动态变化。通过这些措施，提高风险概率预测算法的精度，从而优化风险预警模型，为市政工程风险管理提供更可靠的技术支撑。

### （三）实践应用场景拓展

#### 1. 地下综合管廊风险管控

在地下综合管廊风险管控中，管理与技术的融合至关重要。通过建立综合管理系统，整合管廊内各类设备及环境监测数据，利用物联网技术实现实时传输与共享。借助大数据分析挖掘潜在风险因素，如结构变形、渗漏等，为精准决策提供依据。同时，

引入智能巡检技术，如机器人巡检，可对管廊内部进行全面、细致检查，弥补人工巡检的不足。结合人工智能算法对巡检图像和数据进行智能分析，提高故障诊断的准确性和效率。此外，制定完善的应急预案管理体系，明确各部门职责和应急处置流程，确保在风险发生时能够迅速响应，降低损失。通过这些措施，实现地下综合管廊风险的有效管控。

#### 2. 海绵城市防洪风险管理

在海绵城市防洪风险管理中，构建水文模型与实时监测数据联动的应急响应系统至关重要。通过建立精确的水文模型，模拟不同降雨条件下城市的水文过程，为防洪决策提供科学依据。同时，结合实时监测数据，如降雨量、水位等，及时了解城市水情动态。当监测数据显示可能出现洪水风险时，应急响应系统能够迅速启动，根据水文模型的预测结果，制定合理的防洪措施，如调整排水设施的运行参数、提前疏散危险区域的居民等。这一系统的有效运行，可提高海绵城市在防洪方面的应对能力，减少洪水对城市造成的损失。

## 五、总结

在市政工程领域，管理机制创新与技术手段升级具有显著的协同效应。创新的管理机制能够合理规划资源、优化流程，为技术应用提供良好的环境和导向。同时，先进的技术手段如信息化、智能化技术等，可提高管理的效率和精准度。二者融合形成的路径对提升市政工程风险防控能力具有重要实践价值。它能更全面地识别风险因素，更准确地评估风险等级，更有效地制定应对策略。在智能建造背景下，风险管理体系将朝着更加智能化、集成化的方向发展。借助物联网、大数据、人工智能等技术，实现风险的实时监测、动态评估和智能决策，进一步提高市政工程的质量和安全性，推动行业的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 朱宇. CSHL 市政工程风险管理优化研究 [D]. 苏州大学, 2019.
- [2] 刘继文. 市政工程项目风险管理研究 [J]. 名城绘, 2019(12):0218.
- [3] 张晓婷. LYS 市政工程公司 D 项目风险管理研究 [D]. 山东: 山东理工大学, 2023.
- [4] 黄登科. PPP 模式下 H 市政工程总承包方风险管理研究 [D]. 郑州大学, 2018.
- [5] 舒平. 淮南市政工程 PPP 项目风险管理研究 -- 基于全生命周期视角 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [6] 孟丽. 市政工程内部控制建设与风险管理研究 [J]. 中国经贸, 2017(18):235.
- [7] 顾然. 探讨市政工程施工阶段的项目管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013(24).
- [8] 李嘉璇. 市政工程 PPP 投融资模式下的项目风险管理分析 [J]. 财讯, 2022(22):208-210.
- [9] 吴苗苗. 浅谈市政工程施工风险管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(20):2337-2337.
- [10] 吴妍妍. 市政工程 PPP 项目风险管理研究 [J]. 房地产导刊, 2019(5):245.

# 铁路工程风险管理体系的构建与优化

黄雄

身份证号: 511321198706215456

DOI:10.61369/ERA.2025090024

**摘 要：** 铁路工程风险管理涵盖全生命周期，面临复杂地质、大规模施工协同等带来的风险。现存监测技术滞后、责任主体模糊等问题。应构建实时监测网络、数字孪生模型等，明确责任矩阵，开发应急响应系统等优化体系，同时要完善人才培养等机制。

**关 键 词：** 铁路工程；风险管理；体系优化

## Construction and Optimization of Railway Engineering Risk Management System

Hung Xiong

ID: 511321198706215456

**Abstract：** Railway engineering risk management covers the entire lifecycle, facing risks brought about by complex geology and large-scale construction coordination. Existing monitoring technologies lag behind, and the responsibility is unclear. It is necessary to establish real-time monitoring networks, digital twin models, clarify the responsibility matrix, develop emergency response systems, and other optimization mechanisms, while also improving talent cultivation mechanisms.

**Keywords：** railway engineering; risk management; system optimization

### 引言

铁路工程风险管理至关重要，涵盖工程全生命周期及多方面风险。2020年发布的《关于进一步加强铁路建设项目管理的若干意见》强调了保障铁路工程安全高效运行的重要性，为风险管理提供政策支撑。铁路工程具有复杂特点，导致特有风险，如复杂地质条件、大规模施工协同和高精度技术要求带来的风险。同时，技术管理存在监测技术滞后、BIM应用不足和预警系统智能化低等问题，组织管理也面临责任主体模糊、协同困难和应急预案操作性不足等矛盾。因此，构建和优化铁路工程风险管理体系迫在眉睫。

## 一、铁路工程风险管理理论基础

### （一）风险管理基本概念

铁路工程风险管理是指在铁路工程建设过程中，通过对风险的识别、评估和应对，以最小的成本实现最大安全保障的一种管理活动。它涵盖了从项目规划到运营的全生命周期，包括工程质量、进度、成本、安全等多个方面的风险。风险管理的核心在于对不确定性的管理，通过科学的方法和工具，对可能影响项目目标实现的风险因素进行分析和预测，从而采取有效的措施加以控制。全生命周期风险管理理论在基础设施建设中具有重要的应用价值，它强调从项目的整个生命周期出发，全面考虑各种风险因素，有助于提高项目的成功率和可持续性，保障铁路工程的安全、高效运行<sup>[1]</sup>。

### （二）行业特殊风险特征

铁路工程具有复杂地质条件、大规模施工协同、高精度技术

要求等特点，这些特点导致了特有风险的形成。复杂地质条件可能引发诸如山体滑坡、地层塌陷等地质灾害风险，影响工程的稳定性和安全性<sup>[2]</sup>。大规模施工协同涉及多个施工单位和众多施工环节，容易出现沟通不畅、施工进度不一致等问题，增加了工程延误和质量问题的风险。高精度技术要求则对工程测量、施工工艺等提出了严格标准，任何微小的偏差都可能导致严重的后果，如轨道不平顺影响列车运行安全。这些行业特殊风险特征相互交织，增加了铁路工程风险管理的复杂性和挑战性。

## 二、铁路工程风险管理现状分析

### （一）技术管理现存问题

当前，铁路工程技术管理在风险管控中仍存在诸多突出问题。首先，监测技术相对滞后，传统的监测手段无法实现对工程关键数据的实时采集与分析，导致信息获取不及时、不准确，严



重影响对潜在风险的判断与科学决策<sup>[3]</sup>。其次，BIM（建筑信息模型）技术在铁路工程中的应用尚处于初级阶段，尚未实现其在设计、施工及运营维护全生命周期中的深度协同应用，难以充分发挥其在可视化、模拟性及信息集成方面的优势，限制了对复杂风险因素的有效识别与动态管理。此外，现有的风险预警系统智能化程度较低，缺乏对多源异构数据的融合处理能力和智能分析功能，难以应对铁路工程中复杂多变的风险环境，无法满足风险管理的实时性、准确性与前瞻性要求。上述技术瓶颈不仅削弱了风险管理的整体效能，也制约了铁路工程安全管理水平的提升，亟需通过技术创新与系统升级加以突破与完善。

## （二）组织管理主要矛盾

铁路工程风险管理在组织管理方面存在诸多主要矛盾。风险责任主体模糊是一大问题，这使得在风险发生时，各部门之间可能相互推诿责任，无法及时有效地进行风险应对<sup>[4]</sup>。多专业协同困难也较为突出，铁路工程涉及多个专业领域，不同专业之间在风险管理上缺乏有效的沟通与协作机制，导致信息不畅通，影响风险管理的整体效果。此外，应急预案操作性不足也是不容忽视的问题，部分应急预案在制定时缺乏对实际情况的充分考虑，在实施过程中难以有效执行，无法真正发挥其应有的作用，从而降低了铁路工程应对风险的能力。

## 三、风险管理体系构建路径

### （一）技术管理体系优化

#### 1. 智能监测技术集成

构建基于物联网的实时监测网络，开发 AI 驱动的风险预警模型是智能监测技术集成的关键。通过物联网技术，可实现对铁路工程各关键部位及设备的实时数据采集<sup>[5]</sup>。这些数据涵盖结构应力、环境参数等多方面。利用 AI 算法对采集的数据进行分析处理，挖掘潜在风险特征。例如，基于深度学习的神经网络可识别复杂模式下的异常数据波动，提前预警风险。同时，将监测网络与工程管理系统集成，确保风险信息能及时反馈给相关人员，以便采取有效的防控措施，优化铁路工程风险管理体系。

#### 2. BIM 技术深度应用

建立全要素数字孪生模型，整合工程建设过程中的各类数据信息，包括地质结构、施工工艺、设备参数等<sup>[6]</sup>。通过 BIM 技术强大的可视化功能，对这些数据进行处理和分析，构建出虚拟的工程模型。在此基础上，模拟不同施工阶段可能出现的风险情况，如地质灾害、施工安全事故等。同时，利用该模型对风险应对方案进行验证，评估方案的可行性和有效性。通过这种方式，实现风险的可视化管理，提前发现潜在风险，优化风险应对策略，提高铁路工程风险管理的科学性和准确性。

### （二）组织管理机制创新

#### 1. 风险责任矩阵构建

构建覆盖铁路工程参建各方的风险责任矩阵，是建立健全风险管理体系的关键环节。在复杂的铁路工程建设过程中，涉及众多参与方，包括业主、设计单位、施工单位、监理单位等，各方

在风险管理中的权责必须清晰明确，才能有效降低风险发生的可能性和影响程度。因此，需要系统梳理风险管理工作流程，从风险识别、评估到应对与监控，逐一界定各参与方的具体职责，并制定详细的权责清单，确保每个环节都有明确的责任主体。<sup>[7]</sup>同时，为了推动责任落实，还需建立相应的考核机制，通过量化指标对各方的风险管理绩效进行评估，形成有效的激励约束机制。这不仅有助于提升各方履职的积极性，也能增强协同配合的效率。在责任矩阵的设计过程中，应充分结合铁路工程的技术特点和项目管理实际，兼顾多参与方协作的复杂性，避免出现权责交叉或遗漏的情况，从而为工程顺利实施提供有力保障。

#### 2. 应急预案动态管理

开发基于情景模拟的应急响应系统是提升风险管理能力的关键举措。通过构建逼真的情景模拟环境，能够对应急人员进行有效的培训和演练，使其更好地熟悉应急流程和自身职责，提高应急响应的效率和准确性<sup>[8]</sup>。同时，建立预案动态更新机制至关重要。随着内外部环境的变化以及应急实践经验的积累，原有的应急预案可能存在不足。动态更新机制能够及时根据新情况、新问题对应急预案进行调整和完善，确保预案的科学性和有效性，使其更好地适应铁路工程风险管理的实际需求。

## 四、体系优化实施策略

### （一）技术创新驱动策略

#### 1. 智能预警系统开发

融合边缘计算与深度学习技术构建智能预警系统。边缘计算可在靠近数据源处进行数据处理，减少数据传输延迟，提高系统实时性<sup>[9]</sup>。深度学习具有强大的特征学习和模式识别能力，能有效挖掘风险数据中的潜在规律。通过将两者结合，可对铁路工程中的风险因素进行实时监测和分析。利用边缘计算设备在施工现场采集数据，如传感器获取的结构应力、环境参数等，然后在本地进行初步处理。接着，将处理后的数据传输至深度学习模型进行进一步分析，以准确识别风险类别和等级，及时发出预警，为铁路工程风险管理提供有力支持。

#### 2. 风险数据库建设

构建覆盖全国铁路项目的风险案例库与知识图谱是风险数据库建设的重要内容。通过收集大量铁路项目的风险案例，包括工程建设中的地质风险、施工技术风险、管理风险等各类风险情况<sup>[10]</sup>。对这些案例进行详细分析，提取关键信息，如风险发生的原因、影响因素、应对措施等。利用知识图谱技术，将这些风险案例中的实体和关系进行结构化表示，形成一个全面的、关联紧密的知识网络。这不仅有助于更好地理解风险的本质和规律，还能为后续的风险识别、评估和应对提供有力的支持，提高铁路工程风险管理的效率和准确性。

### （二）管理机制完善策略

#### 1. 协同管理平台搭建

为构建铁路工程风险管理体系的协同管理平台，需整合跨部门、跨专业的风险信息。应建立统一的数据标准和接口规范，确



保各部门、各专业的数据能够准确、高效地传输和共享。通过大数据分析技术,对海量风险信息进行挖掘和分析,为决策提供有力支持。同时,设置合理的权限管理机制,保障信息的安全性和保密性。在此基础上,开发友好的用户界面,方便不同层级的管理人员和专业人员操作使用。还应建立实时监控和预警功能,对风险动态进行及时掌握和反馈,以便快速做出响应和决策。

### 2. 绩效考核体系重构

为优化铁路工程风险管理体系,需从多方面完善管理机制与重构绩效考核体系。设计量化风险管控指标是关键,指标应涵盖工程进度、质量等多维度,以便准确衡量风险。建立与工程进度、质量联动的考核机制,将风险管控效果与相关责任人的绩效挂钩。在工程进度方面,考核指标可包括关键节点的按时完成率等;对于质量,可设定如工程质量合格率等指标。通过这种联动考核机制,激励各参与方积极主动地进行风险管控,确保工程顺利推进,提高铁路工程风险管理的有效性和科学性。

## （三）人才队伍培养策略

### 1. 专业资质认证体系

为构建与优化铁路工程风险管理体系,需建立专业资质认证体系。制定铁路风险工程师认证标准,明确其应具备的专业知识、技能和经验。涵盖铁路工程技术、风险评估方法、安全法规等多方面内容。同时,完善职业发展通道,激励人员不断提升自身能力。设置不同等级的认证,从初级到高级,对应不同的职责和权限。为人才提供清晰的职业晋升路径,吸引更多优秀人才投身铁路工程风险管理领域。通过这样的专业资质认证体系,

确保人才队伍的专业性和稳定性,提高整个铁路工程风险管理的水平。

### 2. 继续教育机制创新

为优化铁路工程风险管理体系的人才队伍培养及继续教育机制,可开发虚拟仿真培训系统。该系统能模拟真实的铁路工程风险场景,让人员在虚拟环境中进行实践操作,提升应对风险的能力。同时建立常态化技能更新制度,定期组织培训课程,确保人员及时掌握最新的风险管理知识和技术。还可鼓励人员参加行业研讨会和学术交流活动,拓宽视野,了解前沿动态。此外,与高校和科研机构合作,开展联合培养项目,为人才队伍注入新的活力,不断提升整体素质,以更好地适应铁路工程风险管理的需求。

## 五、总结

铁路工程风险管理体系的构建涉及多方面关键要素,包括风险识别、评估、应对策略制定等,同时需明确实施路径,以确保体系有效运行。然而,当前研究存在一定局限,在极端工况应对上缺乏足够的针对性措施,全产业链协同方面也存在不足,影响了风险管理的全面性和有效性。展望未来,数字孪生技术可通过构建虚拟模型实现对铁路工程的实时监测和精准预测,为风险管控提供更有力的支持;区块链技术则有助于提高信息的透明度和可信度,增强产业链各环节之间的协同性,从而优化铁路工程风险管理体系,提升风险管理的效率和质量。

## 参考文献

- [1] 郑杨. 铁路工程项目社会稳定风险评估的问题与对策研究 [D]. 江西: 南昌大学, 2020.
- [2] 孙长胜. BL 高速铁路项目工程风险管理研究 [D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2021.
- [3] 苏晓莹. 复杂铁路工程物资储备体系与库存策略研究 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40(11): 112-117.
- [4] 李宏伟. 铁路工程项目施工进度风险研究 [D]. 江西理工大学, 2015.
- [5] 崔丽红. 铁路工程建设项目风险管理的研究 [D]. 北方交通大学, 2002.
- [6] 陈华明. 如何优化全面风险管理体系 [J]. 企业管理, 2016(4): 96-97.
- [7] 孙长胜. BL 高速铁路项目工程风险管理研究 [D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2021.
- [8] 刘佳欢. 铁路工程项目施工阶段风险管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(30): 2767.
- [9] 徐同伟. 铁路工程总承包项目的风险管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(10): 3461-3461.
- [10] 韩伟. 铁路工程总承包项目的风险管理探析 [J]. 中国科技纵横, 2017(23): 71, 73.

# 船舶高压双燃料系统的设计与优化研究

董祥东

中国船级社实业有限公司南京分公司, 江苏 南京 210015

DOI:10.61369/ERA.2025090025

**摘要：**船舶高压双燃料系统在清洁能源船舶动力领域具有重要应用价值，通过合理设计与优化，能够在保证动力性能的同时有效降低污染物排放。构建以液化天然气（LNG）和柴油为主的双燃料系统，采用高压喷射和燃料混合控制技术，实现燃料供应的高效稳定。优化设计包括提高燃烧效率、降低氮氧化物及甲烷滑漏、提升系统稳定性和经济性，确保在多种运行工况下具备高能效和低排放特性。研究表明，该优化策略在船舶动力系统转型中具有显著优势和广泛应用前景。

**关键词：**高压双燃料系统；清洁能源；液化天然气；燃烧效率；排放控制

## Design and Optimization Study of High-Pressure Dual-Fuel Systems for Ships

Dong Xiangdong

China Classification Society Co., Ltd. Nanjing Branch, Nanjing, Jiangsu 210015

**Abstract：** High-pressure dual-fuel systems for ships hold significant application value in the field of clean energy ship propulsion. Through reasonable design and optimisation, they can effectively reduce pollutant emissions while ensuring propulsion performance. A dual-fuel system primarily using liquefied natural gas (LNG) and diesel is constructed, employing high-pressure injection and fuel mixing control technology to achieve efficient and stable fuel supply. Optimisation design focuses on improving combustion efficiency, reducing nitrogen oxides and methane slip, enhancing system stability and economic performance, and ensuring high energy efficiency and low emissions under various operating conditions. Research indicates that this optimisation strategy offers significant advantages and broad application prospects in the transition of ship propulsion systems.

**Keywords：** high-pressure dual-fuel system; clean energy; liquefied natural gas; combustion efficiency; emission control

## 引言

随着全球航运业环保要求的不断提升，传统燃油动力系统逐渐面临淘汰压力。高压双燃料系统凭借其燃料多样性和高效低排放特性，成为船舶动力转型的重要选择。液化天然气（LNG）与柴油双燃料技术，通过高压喷射和精准控制，能够在提升燃烧效率的同时有效减少污染物排放。围绕高压双燃料系统的设计与优化，深入探讨能效提升和排放控制策略，对推动绿色船舶发展具有重要意义。

## 一、船舶高压双燃料系统的构成及工作原理

### （一）双燃料系统构成分析

船舶高压双燃料系统主要由主燃料系统和辅助燃料系统组成。主燃料系统是整个双燃料系统的核心，通常以液化天然气（LNG）作为主要燃料来源。其关键组件包括 LNG 高压泵、燃料供给管路和喷射装置。LNG 经过高压泵增压后再经过加热系统气化成为高压气态天然气，通过双壁管后输送至主机喷射系统，最终以气态形式喷入发动机气缸内参与燃烧。

辅助燃料系统则以柴油作为辅助燃料来源，主要用于发动机启动、低负荷运行及应急工况时的燃料供应。辅助燃料系统由柴

油燃料供应管路、喷射泵及喷射器组成。在低负荷工况或 LNG 供给不足的情况下，辅助燃料系统能够迅速切换供油，维持船舶动力的连续性与稳定性。为保证双燃料系统的兼容性和灵活性，主燃料与辅助燃料系统之间应具备联动控制及切换机制，以满足船舶在不同工况下的燃料需求<sup>[1]</sup>。

### （二）高压燃料喷射原理

船舶高压双燃料系统的喷射原理是将高压 LNG 与柴油按特定比例进行混合喷射，以实现高效燃烧和低排放。高压燃料喷射系统通常采用共轨喷射技术，能够在较高压力下将 LNG 与柴油均匀混合，并通过喷嘴雾化后喷入燃烧室。喷射装置的核心在于雾化效果和喷射精度，其结构通常包括喷射控制阀、喷嘴和高压燃油

导轨。在正常工作状态下，高压泵将 LNG 加压至 20–30MPa，通过高压管路输送至喷射器，柴油作为辅助燃料在相对低压状态下与 LNG 同时喷射，实现双燃料混合燃烧<sup>[2]</sup>。

混合喷射工况的调节策略包括燃料流量控制、喷射时序调整及压力匹配优化。在正常燃气模式下，LNG 的使用比例通常可达 95% 以上，仅有约 5% 的柴油用于压缩末期的点火作用。尽管各发动机厂商对燃气模式的判定标准有所差异，但一旦进入燃气模式，该比例基本固定。控制系统主要根据负荷变化实时调节 LNG 和柴油的供给量及速度，而非燃料配比。当主机负荷处于较高或正常水平时，持续使用燃气模式；若负荷过低，无法满足燃气模式运行条件，则系统切换至纯柴油模式，此时 LNG 不参与燃烧过程。

### （三）系统运行模式分析

目前船舶高压双燃料系统的单模式运行指的是柴油模式，即发动机完全以柴油为唯一燃料，主要应用于启动、低负荷及紧急情况下的动力供给。柴油模式具有点火可靠、响应迅速和燃烧稳定的优势。由于天然气在常温下需压缩至 1:600 的体积方可液化，且本身不具备自燃特性，单独使用 LNG 无法完成压缩点火，因此 LNG 不能作为独立燃料使用。双燃料模式则是在正常运行状态下，以 LNG 为主燃料，并以少量柴油辅助点火与稳定燃烧，实现协同喷射，从而兼顾燃料经济性与环保效益。

## 二、双燃料系统设计中的关键技术

### （一）燃料供应及调压系统设计

LNG 燃料的储存通常采用双壁绝热罐体，以保持燃料的低温特性。在储存过程中，为避免气化引起的压力变化，罐体内部配备压力控制装置，如减压阀和蒸发气回收系统，确保 LNG 在低温状态下储存的稳定性。在燃料供给过程中，高压泵将日用柜中的液态 LNG 加压至高压缓冲罐，随后通过加热系统完成气化，并将压力调整至主机厂家推荐的工作压力，再经高压双壁管路输送至发动机喷射系统。供给压力控制的核心是保持燃料压力恒定，防止因泵速波动或燃料流量变化导致的喷射不稳定<sup>[3]</sup>。

为保证燃料供应的安全性，高压供燃系统需配置多级泄压保护装置。包括主泵泄压阀、供燃管路超压排放阀以及安全断流装置。泄压保护装置在燃料压力异常时能够自动开启，迅速泄放过高压，防止管路破裂或设备损坏。同时，采用冗余设计以增强系统可靠性，如在高压泵后设置双重压力监测系统，实现压力异常时的自动停机保护。泄压保护策略的合理性直接关系到系统运行的安全性和持久性。

### （二）燃烧稳定性及能效提升策略

船舶双燃料系统的燃烧稳定性是确保发动机高效运转的关键。影响双燃料燃烧效率的主要因素包括燃料混合比例、喷射压力、点火时序及燃烧室结构。LNG 和柴油混合燃烧时，由于天然气具有较高的燃烧温度和自燃延迟特性，混合比例的调整至关重要。在发动机高负荷工况下，适当增加 LNG 比例能够提高燃烧热值，减少柴油消耗，而在低负荷和启动阶段，则应以柴油为主，

以保证燃烧稳定。混合喷射控制算法需实时监测发动机负荷、燃料流量及温度变化，动态调节喷射参数，防止混合气过稀或过浓导致的熄火或爆震<sup>[4]</sup>。

能效提升策略的核心在于燃烧控制算法的优化。采用先进控制算法，如模糊控制或神经网络算法，根据不同工况对喷射时序和燃料配比进行实时调整。通过优化喷射相位和燃料供给压力，使得燃烧室内的燃料雾化更加均匀，有效缩短燃烧时间，提升热效率。在优化过程中，需综合考虑燃烧室形状、气缸压力及气流组织等因素，使燃料得以充分燃烧，减少未燃物质的排放量。

### （三）排放控制技术

船舶高压双燃料系统在运行过程中，氮氧化物（NO<sub>x</sub>）及甲烷滑漏是主要排放污染源之一。LNG 具有较低的碳含量和较高的氢碳比，在燃烧过程中能有效减少二氧化碳排放，但由于燃烧温度较高，容易产生氮氧化物。为控制 NO<sub>x</sub> 的生成，采用废气再循环（EGR）技术，通过引入部分废气降低燃烧温度，减少 NO<sub>x</sub> 生成量。同时，优化燃烧时序和喷射压力，避免过量空气参与燃烧，抑制 NO<sub>x</sub> 的生成。甲烷滑漏控制则主要依赖于密封结构的改进和喷射控制优化，防止未燃 LNG 排入大气<sup>[5]</sup>。

燃料转换过程中，由于两种燃料特性差异较大，切换时容易出现燃烧不充分和排放波动问题。优化燃料转换过程，需在切换前提前调整喷射参数，使柴油和 LNG 在切换时混合比例逐步过渡。同时，通过燃烧实时监测系统，对排放成分进行连续监测，根据排放趋势及时调整燃料配比，避免转换过程中的瞬时排放超标。采用精准排放控制策略，能够在不同工况下稳定实现低排放运行，提升船舶环保性能<sup>[6]</sup>。

## 三、双燃料系统优化设计及应用分析

### （一）能效优化策略

双燃料系统能效优化的关键在于燃料成分和热值的合理配比。由于 LNG 和柴油的物理化学特性差异较大，混合燃烧时需根据船舶负荷和运行工况合理调整燃料比例。在高速航行阶段，LNG 的能量密度较高，适合作为主要燃料，而在低速巡航或靠港作业时，柴油具有更稳定的点火特性，宜作为主要燃料。基于热值分析和燃烧效率计算，构建双燃料比例优化模型，通过实时监测发动机工况和燃料流量，自动调整混合比例，确保在不同航行状态下均能实现最高燃烧效率<sup>[7]</sup>。

控制方法方面，采用闭环控制系统，实时检测发动机缸内压力、排气温度及燃烧速度等参数，优化燃料喷射时序和流量控制。通过高压喷射控制技术和自适应调节算法，精确控制 LNG 和柴油的燃烧比例，减少爆震和积碳现象。在双燃料切换时，控制系统根据燃料供给压力及燃烧温度进行渐进式调节，避免因燃料性质差异引起的燃烧不稳定，确保燃料转换过程平稳高效。

### （二）经济性分析

LNG 与柴油的经济性比较直接影响双燃料系统的推广与应用。LNG 价格相对较低，且具有较高的氢碳比，燃烧后二氧化碳排放较少，因此在长途航运中具有成本优势。柴油由于其较高密



度和稳定燃烧特性，适用于短程和低速航行。通过建立运行费用计算模型，对 LNG 和柴油的成本构成进行综合分析，计算包括燃料采购成本、储存费用及燃烧效率带来的经济收益。如表 1 所示。

表 1 LNG 与柴油在典型航行条件下的成本对比

燃料类型	单位成本 (元 /kg)	能量密度 (MJ/kg)	每小时燃料消耗 (kg)	单位时间成本 (元 / 小时)
LNG	3.5	50	20	70
柴油	7.0	42	15	105

（三）实际工程案例分析

在某型双燃料船舶应用中，通过对比优化前后燃料消耗和排放数据，验证优化设计的有效性。测试中选取连续航行 60 小时的工况，记录 LNG 和柴油混合比例、燃料消耗量及排放水平<sup>[9]</sup>。如表 2 所示。

表 2 优化前后的能效和排放对比结果

项目	优化前	优化后	提升率
LNG 消耗量 (kg/h)	25	20	20%
柴油消耗量 (kg/h)	18	15	16.7%
NOx 排放量 (g/kWh)	4.5	3.0	33.3%
甲烷滑漏量 (g/kWh)	0.8	0.5	37.5%

分析结果表明，采用优化后的高压双燃料系统，LNG 和柴油混合比例更加合理，燃料消耗量显著减少。优化措施有效提升了船舶运行的经济性和环保性能，具有较高的推广价值。

四、船舶高压双燃料系统优化设计前景及挑战

（一）前景展望

基于液化天然气（LNG）和柴油双燃料技术的船舶，能够在降低二氧化碳和氮氧化物排放的同时，保证动力输出的高效性。未来，随着 LNG 供应链的不断完善和双燃料发动机技术的成熟，更多大型商船和远洋船舶将逐步采用高压双燃料系统，进一步提升航运业的绿色化水平。在政策和市场的推动下，双燃料船舶将在远洋运输、沿海航运和港口物流中得到广泛应用。

新能源及混合动力技术的发展也为高压双燃料系统的升级提供了新机遇。氢能、甲醇和生物燃料等新能源逐步进入航运领域，混合动力系统与双燃料技术的结合将进一步提升船舶的能效比和环保性能。在未来发展中，构建多能源互补的船舶动力系统，将使得船舶在长途航行和靠港作业时都能实现最低能耗和排

放。新能源与双燃料技术的融合，将在未来十年成为绿色航运的主流趋势<sup>[8]</sup>。

（二）存在挑战

虽然高压双燃料系统在航运业中的应用前景广阔，但技术挑战依然严峻。首先，LNG 燃料储存和高压供给技术的复杂性较高，低温液化天然气的存储要求极为苛刻，储罐必须具备高强度、低温抗裂和良好保温性能。此外，LNG 加压输送过程中容易产生汽化，导致管路内压力波动，影响供燃稳定性<sup>[9]</sup>。

多种燃料切换控制也是系统稳定性面临的难题之一。在实际操作中，由于 LNG 和柴油物性差异显著，燃烧特性和热值不同，直接切换容易引起燃烧不稳定和排放超标。尤其在高速航行状态下，切换过程中可能产生功率波动和扭矩不平衡，影响航速和操作安全<sup>[10]</sup>。

（三）未来研究方向

未来研究应围绕提高燃料使用效率和降低系统复杂性展开。开发更加高效的燃烧控制算法，实现 LNG 和柴油在不同工况下的精准混合喷射，是进一步提升能效的重要方向。同时，研究新型燃烧室结构和喷嘴优化设计，减少甲烷滑漏和氮氧化物排放，使系统在高压状态下依然能够保持较低的污染水平。

此外，新型燃料在双燃料系统中的兼容性研究也将成为重点方向。在当前 LNG 与柴油混合模式基础上，逐步引入氢能、合成燃料及生物燃料，构建多元混合燃烧系统。研究多种燃料在同一动力系统内的协同利用及稳定性优化，使双燃料系统能够更灵活地适应未来能源结构变化。同时，开发具备多燃料识别和切换功能的智能控制模块，为船舶动力多元化和低碳化提供技术支撑。

五、结束语

船舶高压双燃料系统作为清洁能源动力的重要选择，凭借其高效低排放特性在航运业中展现出广阔应用前景。通过合理设计燃料供给与调压系统，优化燃烧控制策略，有效提升能效并降低污染物排放。然而，技术难点如 LNG 储存及燃料切换稳定性依然存在。未来需进一步研究多燃料融合及智能控制技术，推动双燃料系统在绿色航运中的深度应用，实现环保与经济效益的双赢。

参考文献

[1] 周艺航, 田镇. 船舶能效设计指数框架下的 LNG 燃料船碳捕集与封存系统模拟研究 [J]. 制冷与空调, 2024, 24(11): 75-83+92.  
[2] 周廷若. 船舶电喷柴油低速发动机双燃料系统改造 [J]. 中国修船, 2021, 34(S1): 10-12+15.DOI: 10.13352/j.issn.1001-8328.2021.S1.004.  
[3] 孙瑞. 基于 LPG 的船用双燃料供给系统设计 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 82-87.  
[4] 赵宏斌. 船舶双燃料发动机低压燃气供应系统的设计及动态研究 [D]. 江苏科技大学, 2024.  
[5] 于瑶, 周清华, 黄智焱, 等. 甲醇双燃料动力系统在超大型集装箱船上的应用 [J]. 船舶与海洋工程, 2024, 40(05): 47-52+75.DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2024.05.009.  
[6] 刘盖世, 刘剑. 船舶 LNG 燃料系统 HAZOP 应用及典型案例分析 [J]. 船舶工程, 2024, 46(01): 86-91.DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.01.12.  
[7] 姜峰. 船舶双燃料发动机视情维修保障系统研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2023.000422.  
[8] 崔锦泉, 周伟, 王智磊, 等. 船舶双燃料发动机 LNG 供气系统模拟仿真技术应用研究 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 122-125.  
[9] 鞠佳明. 船舶双燃料主机燃料模式切换过程的仿真研究 [D]. 大连海事大学, 2022.DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2022.001507.  
[10] 刘靖宇, 王正钧. 浅谈甲醇-柴油双燃料船舶燃料系统设计 [J]. 广东造船, 2023, 42(04): 92-95.



# 燃机防喘放气阀控制回路改造方案研究及应用

王晶晶

国能国华（北京）燃气热电有限公司，北京 100024

DOI:10.61369/ERA.2025090027

**摘 要：**三菱 M701F4 型燃机高、中、低压防喘放气阀为气动控制，各防喘阀气动控制回路中均设计有一个控制电磁阀，存在着因单一电磁阀故障，防喘阀拒动损坏压机或误动导致机组跳闸的安全风险。通过对燃机防喘放气阀控制回路改造方案研究，采用具备 3 取 2 控制功能的电磁阀组代替原气动控制回路中的单一电磁阀解决了机组存在误动或拒动的安全隐患，同时实现了电磁阀在线试验功能，提高了防喘阀运行的可靠性，在同类型燃气机组中具有普遍的推广价值。

**关 键 词：**防喘阀；控制回路；设计；改造；试验

## Research and Application of Retrofitting Scheme for the Control Circuit of Gas Turbine Anti surge Relief Valve

Wang Jingjing

Guoneng Guohua (Beijing) Gas-Fired Cogeneration Co.,Ltd. Beijing 100024

**Abstract：** The Mitsubishi M701F4 gas turbine high, medium, and low pressure anti surge vent valves are pneumatically controlled. Each anti surge valve pneumatic control circuit is designed with a control solenoid valve, which poses a safety risk of damaging the compressor or tripping the unit due to a single solenoid valve failure, anti surge valve refusal or malfunction. Through the study of the renovation plan for the control circuit of the gas turbine anti surge vent valve, a solenoid valve group with 3 out of 2 control function was used to replace a single solenoid valve in the original pneumatic control circuit to solve the safety hazards of misoperation or refusal of operation of the unit. At the same time, the online testing function of the solenoid valve was achieved, improving the reliability of the anti surge valve operation, and it has universal promotion value in the same type of gas units.

**Keywords：** anti surge valve; control circuit; design; renovation; testing

### 引言

某电厂 M701F4 级燃气轮机分别配置高、中、低压 3 个防喘放气阀，其作用是防止燃机发生喘振损坏压机。燃机各防喘阀均为气动控制，每个防喘阀的气动控制回路均只设置了 1 个电磁阀进行控制。

### 一、防喘阀控制回路存在的问题

因每台燃机的高、中、低压防喘阀控制回路均设计安装一个控制用电磁阀，存在着因单一电磁阀故障，防喘阀拒动损坏压机或误动导致机组跳闸的安全风险。为了消除上述安全隐患，需要对燃机高、中、低压防喘阀控制回路进行改造。

### 二、防喘阀控制回路改造方案研究

#### （一）3 取 2 控制电磁阀组介绍

此改造方案选取具备 3 取 2 控制功能的电磁阀组代替原气动控

制回路的单一电磁阀，该电磁阀组由四个电磁阀组成，每个电磁阀的规格型号相同，口径为 1/4NPT，电压等级为 DC110V。电磁阀组中任一电磁阀故障均不会影响阀组的正常供气，阀组的每个电磁阀配置压力监视，可以通过压力的变化判断电磁阀的工作状态，压力报警信号能够传输至 TCS 控制系统，方便运行人员及时发现电磁阀的状态变化。同时电磁阀组具备在线试验功能，在机组正常的运行中可定期对各电磁阀进行开、关活动实验。该电磁阀组还具备单一电磁阀在线故障隔离及更换功能，运行中可对故障电磁阀进行在线更换，不影响电磁阀组的正常工作，保证了防喘阀的可靠运行<sup>[1]</sup>。

(二) 3取2控制电磁阀组的设计原理

如图1所示, 整个电磁阀组的控制回路

由4个电磁阀、4个隔离阀、两个梭阀、4个压力开关和4个压力表组成。控制气源经电磁阀组入口进入后可通过三种通路实现控制气路畅通, 分别是V1和V3通路、V2和V3通路、V2和V4通路, 只要上述三个通路任一通路上的两个电磁阀带电打开, 均能保证电磁阀组气路畅通, 阀组所控制的防喘阀得气关闭。当防喘阀需要失气打开时, 电磁阀组的三个进气通路均需关闭, 三个通路均关闭可通过以下几种方式实现, 分别是V1和V2电磁阀均失电关闭、V3和V4电磁阀失电关闭或V2和V3电磁阀失电关闭。因此从电磁阀组的设计原理可以看出, 任意一个电磁阀故障均不影响整个阀组的正常输出功能。每个电磁阀入口前均配置一个独立隔离阀, 通过隔离阀可以对电磁阀进行在线更换和检查<sup>[2]</sup>。

每个电磁阀出口均配置就地压力表和远传压力开关, 即可在就地通过压力表指针判断电磁阀的开关状态也可通过远传压力开关对电磁阀异常状态进行报警<sup>[3]</sup>。各电磁阀的动作状态与阀组总的输出对应关系如下图2所示:

(三) 防喘阀开、关动作时间要求

根据燃机的保护设置, 高、中、低压防喘阀在机组启动升速过程中均需要具备快开功能, 该保护快开的设定值均为3秒, 超过3秒阀门未打开机组会保护跳闸; 同时在机组升速到设定转速后需要将高、中、低压防喘阀关闭, 超过20秒阀门未关闭机组会保护跳闸。因此, 防喘阀控制回路改造后各防喘阀的动作时间必须满足上述要求。

(四) 防喘阀控制气路功能说明

从图3、图4防喘阀的控制气路图中可以看出, 控制回路的电磁阀不直接控制气缸的气

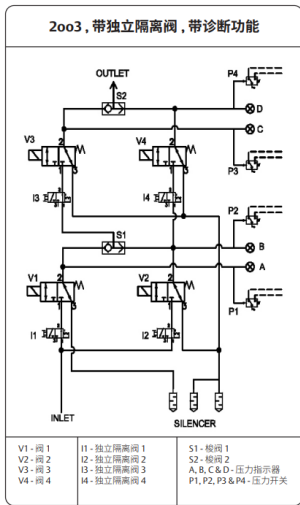


图1 电磁阀组控制气路图

2003 真值表 *				
CH 1	CH 2	CH 3	输出	
V1	V4	V2	V3	
1	0	0	0	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	1	1	1
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	1	1	1
0	1	1	0	1
0	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	1
1	0	0	1	1
0	1	0	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	0	1
0	0	0	0	0

CH1 - 通路 1  
CH2 - 通路 2  
CH3 - 通路 3  
0 - 电磁阀失电  
1 - 电磁阀触发  
\* 适用于气路图 - 8, 9, A

图2 电磁阀组3取2动作情况说明

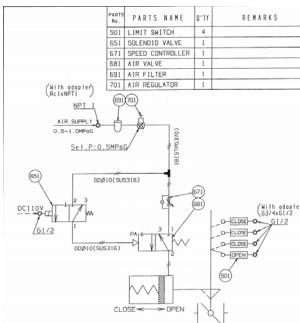


图3 高压防喘阀控制气路图

路, 而是先控制空气阀的气路, 然后再通过空气阀的进气和排气去控制气缸的动作。高压防喘阀设计一个空气阀, 中、低压防喘阀设计两个空气阀。从设计原理来看, 气缸动作的快慢主要取决于空气阀进气和排气速度, 电磁阀口径的大小对空气阀进气影响不大<sup>[4]</sup>。

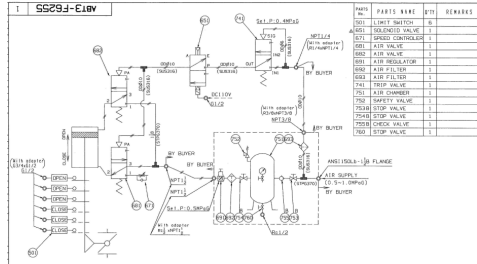


图4 中、低压防喘阀控制气路图

(五) 防喘阀动作时间测试情况

为了验证电磁阀口径的大小对防喘阀的动作快慢无影响, 选取不同口径的电磁阀在燃机中压防喘阀上进行了阀门动作时间测试试验, 试验情况如下:

(1) 中压防喘阀更换为口径 1/4NPT ASCO 电磁阀动作过程

开动作过程: 15: 24: 54接收到开指令, 15: 24: 55开反馈;

关动作过程: 15: 25: 33接收到关指令, 15: 25: 36关反馈;

阀门由接到开指令到阀门打开用了1秒; 由接到关指令到阀门关闭用了3秒。

(2) 中压防喘阀采用口径 3/8NPT 的原电磁阀动作过程

开动作过程: 15: 57: 38接收到开指令, 15: 57: 39开反馈;

关动作过程: 15: 58: 05接收到关指令, 15: 58: 08关反馈;

阀门由接到开指令到阀门打开用了1秒; 由接到关指令到阀门关闭用了3秒。

试验结果表明, 电磁阀口径由 3/8NPT 变更为 1/4NPT 后防喘阀的动作时间一致, 对阀门的动作快慢无影响。改造设计方案中高压防喘阀的电磁阀口径为 1/4NPT 未变, 中、低压防喘阀电磁阀的口径由 3/8NPT 变更为 1/4NPT, 口径略微变小, 因电磁阀组的动作时间是毫秒级别, 相对整个阀门的动作时间可忽略不计, 综上, 原电磁阀更改为电磁阀组后对阀门动作快慢的影响不大, 能够满足原设计3秒快开, 20秒关闭的要求。

(六) 电磁阀组的控制回路设计

在防喘阀控制电磁阀电路图 GT801中将原继电器三取二控制一个电磁阀改为每个继电器各控制电磁阀组中的一个电磁阀。因在图 GT722中已经为每个防喘阀的控制各增加了一个继电器, 所以在此设计图中应有12个继电器分别去 GT801和 GT807控制高、中、低压3套阀组的12个电磁阀。考虑到电磁阀的110VDC供电电源应分散原则, 将每个电磁阀组的两个电磁阀分配到另外的供电电源, 此路供电电源需新增设计, 设计思路如下: 原供电电源110PAA1为高、中、低压防喘阀控制回路中的V1、V3阀供电; 新增一路供电电源110PAA3的设计要求与110PAA1一致, 该路电源为高、中、低压防喘阀控制回路中的V2、V4阀供电。达

到任何一路电源故障不影响电磁阀组正常工作的目的，保障了防喘阀的安全可靠性。设计图如下图所示：

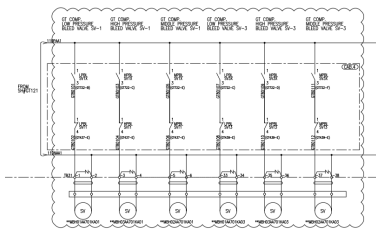


图 7 GT807 电磁阀电路图

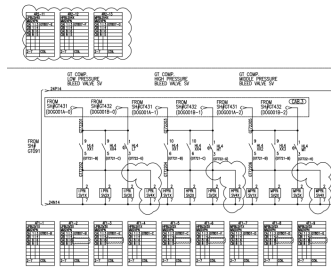


图 5 GT722 电磁阀继电器控制图

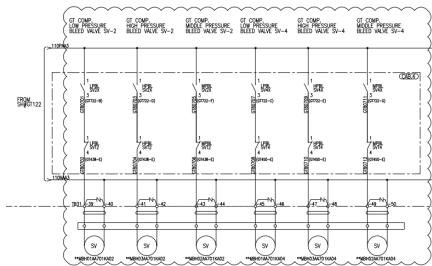


图 6 GT801 电磁阀电路图

（七）电磁阀在线试验功能设计

每个电磁阀组均设计了在线试验功能。在电磁阀的控制回路增加试验继电器，试验继电器的接点设计为常闭接点，该接点串接在电磁阀的控制回路，当发出试验命令时该接点断开，电磁阀失电，试验结束该接点闭合，电磁带电；每个电磁阀出口配置一个压力开关用来监视电磁阀的出口压力。电磁阀在线试验就是通过压力开关的状态变化判断电磁阀的动作状态，从而达到对 4 个电磁阀逐一从关闭到打开的动作过程检验<sup>[5]</sup>。在运行操作界面设置试验操作按钮，控制逻辑中设置试验逻辑。

三、防喘阀控制回路改造实施

该电厂利用机组检修机会将燃机的高、中、低压防喘阀控制回路进行了改造。改造包含新增电磁阀组及其配套管路的安装、控制回路的硬件安装及软件组态等工作，通过上述改造达到了预

期的效果，具体的改造过程如下：

1. 将各电磁阀在线试验指令信号、压力信号分配到 TCS 控制系统卡件的备用通道，试验指令分配到不同的卡件上。
2. 在机柜内增加继电器及其底座。
3. 修改电源回路及控制回路的接线。
4. 增加电磁阀在线试验功能的逻辑及画面组态。
5. 拆除废旧的电磁阀，在各防喘阀上方罩壳上安装固定新电磁阀组及气源管路。
6. 全部设备安装完成后进行系统检查及调试工作。

四、控制回路改造后试验结果分析

（一）电磁阀组供电电源测试

通过对电磁阀组两路直流 110V 供电电源 110PAA1 和 110PAA3 开关的轮流停送电，测试电磁阀组控制电源是否满足设计要求，经测试，单独停掉任一路电源各电磁阀组对应的两个电磁阀失电，各电磁阀组的控制气源不会失去，各防喘阀正常工作，满足了电源分散布置的设计要求。

（二）控制回路继电器及电磁阀状态测试

各电磁阀组控制气源投入正常后，将各防喘阀关闭，检查控制回路各继电器的状态、电磁阀的状态均正常；利用在线试验功能块逐一对各阀组的 4 个电磁阀进行开、关动作试验，试验过程中电磁阀的开、关状态均正常。

（三）各防喘阀动作时间测试

改造完成后对各防喘阀的动作时间进行了测试，测试结果表明与改造前基本一致，满足了设计要求。

序号	测试名称	改造前 (s)	改造后 (s)	是否满足要求
1	高压防喘阀打开时间	2	2	是
2	高压防喘阀关闭时间	2	2	是
3	中压防喘阀打开时间	2	1	是
4	中压防喘阀关闭时间	3	2	是
5	低压防喘阀打开时间	1	2	是
6	低压防喘阀关闭时间	2	3	是

五、结论

本文提出了三菱 M701F4 型燃机防喘放气阀控制回路存在的问题，通过对控制回路改造方案的研究，提出了合理的解决方案并进行了改造实施，消除了防喘阀拒动损坏压气机或误动导致机组跳闸的安全风险，提高设备的可靠性，有效的防止了机组保护误动和拒动。改造完成至今该电厂机组一直稳定运行，因此该改造是成功的，同时也为国内同类型机组开展相应技术改造提供了改造方案和成功实例，具有很好的借鉴意义。

参考文献

[1] 肖雅馨. 气动电磁阀智能在线故障检测系统的研究 [D]. 浙江大学, 2020.  
[2] 翁晓凯, 胡军. 9FA 燃气轮机防喘放气阀的可靠性优化分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(04): 81-83.  
[3] 尹磊. V94.3A 燃机防喘系统优化改造与故障处理 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (24): 57-59.  
[4] 白金光. CO2 压缩机防喘失效原因分析及对策 [J]. 中氮肥, 2014, (05): 47-49.  
[5] 阮斌. 一种非典型 ETS 在线试验失败原因分析及解决办法 [J]. 电力设备管理, 2020, (05): 78-81.

# 工业设计视角下工业控制类产品 人机工程学与界面设计研究

庄娘设

身份证号: 4452221977120806330

DOI:10.61369/ERA.2025090028

**摘要：** 本文探讨工业控制类产品设计，涵盖低压开关智能化设计，包括集成技术、新功能植入等；分析工业4.0下操作人员行为转变带来的设计需求；阐述产品形态与功能语义关系等多方面内容，还提出设计方法论及整合框架，展望未来研究方向。

**关键词：** 工业控制产品；设计；智能化

## Research on Ergonomics and Interface Design of Industrial Control Products from the Perspective of Industrial Design

Zhuang Niangshe

ID: 4452221977120806330

**Abstract：** This paper explores the design of industrial control products, covering intelligent design of low-voltage switches, including integration technology and the incorporation of new functions; it analyzes the design requirements brought about by changes in operator behavior under Industry 4.0; elaborates on various aspects such as the relationship between product form and functional semantics, and proposes a design methodology and an integrated framework, while also looking forward to future research directions.

**Keywords：** industrial control products; design; intelligence

### 引言

在智能化转型的时代背景下，工业4.0等政策推动了工业领域的深刻变革。智能化技术的发展促使工业控制类产品设计面临诸多新挑战与机遇。产品设计不仅要考虑物联网、边缘计算等技术的集成应用，还要关注用户体验，包括形态语言与功能语义的映射、多模态交互系统集成创新以及人机界面演进的操作惯性维护等。材料工艺迭代、IP防护等级提升等因素也对产品设计产生重要影响，本研究正是在此背景下，着重探讨智能化趋势下低压开关产品的人机工程与界面设计转型。

### 一、智能化趋势下低压开关产品工业设计转型

#### （一）智能化技术对产品设计的重构

随着物联网、边缘计算等智能化技术的发展，低压开关产品设计面临重构。在集成路径方面，需深入研究如何将这些技术有效融入开关设备。例如，通过合理的硬件布局和软件编程，实现数据的高效传输和处理<sup>[1]</sup>。对于新型功能的植入，触控交互可改变传统的操作方式，采用触摸屏幕或触摸按键，提升操作的便捷性和直观性。状态监测功能则需借助传感器等设备，实时获取开关的运行状态，如温度、电流等参数，并将数据反馈给用户或控制系统。这不仅提高了设备的安全性和可靠性，也为智能化管理提

供了基础。

#### （二）数字化场景中的用户需求演变

在工业4.0环境下，操作人员的行为模式发生了显著转变<sup>[2]</sup>。随着智能化技术的融入，生产流程变得更加复杂和高效，操作人员不再局限于简单的手动操作，而是需要与智能系统紧密协作。这种转变促使了新的设计需求的产生。例如，模块化扩展需求应运而生，以适应不同生产环节的灵活配置和升级。同时，数据可视化的重要性日益凸显，操作人员需要直观地获取大量生产数据，以便及时做出决策。这不仅要求界面设计能够清晰呈现数据，还需要考虑如何以符合人体工程学的方式进行布局，确保操作人员在复杂的数字化场景中能够高效、准确地操作，从而提高



生产效率和质量。

## 二、智能开关产品多维设计体系构建

### （一）形态语言与功能语义的映射关系

智能开关产品的形态语言与功能语义存在紧密的映射关系。产品的形态应直观地传达其功能，使用户能够快速理解和操作。例如，开关的按钮形状、大小和位置等形态元素，需与开启和关闭的功能语义相匹配，符合用户的操作习惯和预期。同时，材质的选择和表面处理也能传达功能信息，如光滑的表面可能暗示触摸操作的流畅性。这种映射关系还体现在产品的整体造型上，简洁的造型可能对应着简单直接的功能，而复杂的造型则可能暗示着多种功能的集成。通过合理构建形态语言与功能语义的映射关系，可以提高智能开关产品的易用性和用户体验<sup>[9]</sup>。

### （二）多模态交互系统的集成创新

在智能开关产品的多模态交互系统集成创新中，需研究触觉反馈、语音控制与 AR 辅助的协同机制。触觉反馈能为用户提供直观的操作感受，如按下开关时的触感确认<sup>[4]</sup>。语音控制则增加了操作的便捷性，用户无需手动操作，通过语音指令即可控制开关。AR 辅助可提供更直观的操作引导，例如在复杂的工业环境中，通过 AR 技术将开关的操作信息叠加在真实场景中。同时，构建符合相关 IP 防护标准的交互解决方案至关重要。这确保了在不同工业环境下，交互系统的稳定性和安全性，避免因外界因素干扰而出现故障，保障智能开关产品在工业控制领域的可靠应用。

## 三、产品家族化设计语言体系研究

### （一）品牌 DNA 的提取与演化

#### 1. 典型企业设计基因库构建

工业控制类产品家族化设计语言体系的构建对于企业具有重要意义。在品牌 DNA 的提取与演化方面，需深入研究企业的历史、文化和市场定位等因素。以施耐德、ABB 等企业为例，在典型企业设计基因库构建中，要解析其产品线的造型基因传承规律。通过对大量产品样本的分析，识别出具有代表性的特征线。进一步建立特征线提取的量化模型，从而更科学、准确地把握企业的设计基因。这不仅有助于企业保持产品家族的一致性和独特性，还能为新产品的设计开发提供有力的指导，增强品牌的辨识度和市场竞争力<sup>[5]</sup>。

#### 2. 模块化设计中的基因表达

在工业控制类产品家族化设计中，标准接口设计的家族特征保持至关重要。这需要深入研究品牌 DNA 的提取与演化，明确家族基因。对于标准接口，应从功能、形式、交互等多维度提取共性特征，作为家族基因的一部分<sup>[6]</sup>。同时，在模块化设计的基因表达过程中，要注重对组合变异度的控制。一方面，要确保接口在不同模块组合下仍能保持家族特征的一致性；另一方面，合理控制变异度，以满足不同产品型号的特定需求，实现家族化设计语言体系的有效构建，提升产品的家族辨识度和用户体验。

### （二）跨代产品的视觉连续性管理

#### 1. 材料工艺迭代中的识别度保持

工业设计领域中，材料工艺迭代是产品发展的关键环节。随

着表面处理技术升级，产品的视觉特征会发生变化，这对产品辨识度产生重要影响。在跨代产品的视觉连续性管理框架下，需制定合理策略以保持识别度。例如，采用渐变式更新策略，避免因技术升级导致产品视觉形象的突兀改变。渐变式更新可以从材质的质感、颜色的过渡以及纹理的演变等方面着手，在引入新技术的同时，保留产品家族化设计语言的核心元素，使消费者能够在不同代际的产品中感受到视觉上的连贯性和一致性，从而增强产品的品牌识别度，提升产品在市场中的竞争力<sup>[7]</sup>。

#### 2. 人机界面演进中的操作惯性维护

在工业控制类产品的家族化设计中，人机界面演进的操作惯性维护至关重要。对于跨代产品，需确保操作方式的连贯性。控制逻辑的继承具有显著价值，它能有效降低用户的培训成本<sup>[8]</sup>。当用户在使用新一代产品时，若能基于以往的操作经验迅速上手，将极大提高工作效率。同时，界面升级过程中，应建立认知负荷评估体系。通过该体系，能够精准衡量界面变化给用户带来的认知负担，避免因过度创新导致用户操作困难。合理的界面升级应在保持操作惯性的基础上，逐步引导用户适应新的功能和界面元素，实现人机界面的平滑演进。

## 四、人机工程与界面设计的系统整合

### （一）控制设备的生理适配性研究

#### 1. 作业姿势与产品形态的匹配模型

在工业控制类产品的设计过程中，充分考虑操作人员的作业姿势是至关重要的。不合理的产品形态可能导致操作人员长时间处于不舒适的姿势，从而引发疲劳甚至职业病。基于 OWAS (Ovako Working posture Analysing System) 分析法，对典型的工业控制设备安装和操作场景进行细致的研究，建立人机尺寸链模型。该模型能够精确地描述操作人员在执行不同任务时身体各部分的尺寸和活动范围。进一步地，通过对这些数据的分析，可以推导出最优的操作包络空间，确保操作人员进行诸如按钮按压、旋钮旋转、拨动开关等操作时，肢体能够以自然、放松的状态进行，避免不必要的弯腰、抬头或扭转。产品形态的设计应当与这些最优操作包络空间相匹配，例如，控制面板的倾斜角度、操作元件的布局 and 间距等都应服务于操作人员的舒适性和操作效率。一个良好的人机匹配模型能够显著提升操作人员的工作效率，降低错误率，并最终提高整体的生产质量和安全性<sup>[9]</sup>。

#### 2. 力学特性与操作舒适度的关联

除了静态的姿势匹配外，控制设备的力学特性，如旋钮的扭矩、按键的行程和反馈力等，直接影响着操作的舒适度。过大的操作力可能导致操作疲劳，而过小的力则可能引起误操作。因此，深入研究这些力学参数的生物力学阈值，即人体在操作时所能承受和感受到最舒适的力度范围，对于产品设计至关重要。通过对大量用户操作数据的采集和分析，结合人体工程学的原理，可以确定这些力学参数的合理范围。例如，对于需要频繁操作的旋钮，其扭矩应适中，既能提供足够的操作阻尼以防止意外转动，又不会使用户感到费力。同样，按键的行程和反馈力应设计得清晰可感，使用户能够明确判断操作是否成功<sup>[10]</sup>。制定符合 ISO 相关标准的力学设计规范，不仅有助于提升产品的操作舒适度，也保证了产品在全球范围内的通用性和适用性，从而提高用

户满意度。

（二）工业显示界面的认知优化

1. 信息架构的视觉逻辑设计

在工业控制领域，显示界面通常承载着大量关键的操作和监控信息。如何有效地组织和呈现这些信息，直接影响着操作人员的认知效率和操作准确性。信息架构的视觉逻辑设计是提升界面认知性的核心。首先，需要根据操作任务的流程和信息的关联性，对界面上的元素进行合理的分组和排列。运用 Fitts 定律优化菜单层级和关键操作按钮的布局，确保操作人员能够快速准确地定位和选择所需的功能，减少不必要的搜索时间和操作步骤。其次，建立符合 ISO 相关的界面布局原则，例如一致性的原则、显著性的原则、反馈的原则等，能够确保界面的规范性和易用性。从视觉逻辑的角度来看，应通过清晰的视觉层级、对比度、色彩以及图标等视觉元素，增强信息的可读性和可识别性，降低操作人员的认知负荷，从而提高其对工业控制类产品界面的认知效率，最终优化人机交互的整体体验。

2. 告警系统的多通道表达策略

工业环境往往复杂且充满各种潜在的风险，及时准确地传递告警信息对于保障设备和人员的安全至关重要。单一的告警方式在嘈杂的环境中可能难以引起操作人员的注意。因此，研究色彩编码、声频特征与振动模式的组合应用，构建多通道的分级警示体系显得尤为重要。不同的色彩可以直观地传达不同等级的危险程度，例如红色通常表示紧急或危险状态，黄色表示警告或异常状态，绿色表示正常状态。声频特征方面，可以通过不同的音调、频率、节奏和音量来区分告警的级别和类型。例如，急促的高音可能用于表示紧急告警，而平缓的低音可能用于提示一般性异常。此外，对于某些特定场景或穿戴式设备，振动模式也可以作为一种有效的辅助告警方式。通过合理地组合这些多通道的告警元素，可以确保操作人员在各种复杂的工业环境中，都能够快速、准确地识别告警信息的重要性，并及时采取相应的措施，从而提高工业控制系统的安全性和整体效率。

（三）环境适配性设计研究

1. 极端工况下的可视性保障

工业控制类产品常常需要在各种极端工况下运行，例如高温、低温、强光、粉尘等环境。在这些条件下，保障显示界面的良好可视性对于操作人员的正常工作至关重要。以高环境照度为

例，屏幕反光会严重影响信息的读取。因此，提升屏幕的可读性是关键。这需要深入研究屏幕的材质和涂层技术，选择具有低反射率、高对比度的材料，以最大限度地减少环境光的干扰，确保屏幕内容清晰可见。同时，制定智能化的背光调节算法也至关重要。该算法应能够根据环境光传感器实时采集的数据，动态分析当前的环境照度水平，并自动调整屏幕的背光亮度。当环境光较强时，自动增加背光亮度以克服环境光的干扰；当环境光较弱时，则适当降低背光亮度，以避免屏幕过亮对人眼造成不适。通过这种软硬件相结合的系统整合方式，可以有效地保障工业控制类产品在各种极端工况下的可视性，从而提高操作人员的工作效率和操作的准确性。

2. 防护设计与操作性能的平衡

为了使工业控制类产品能够在恶劣的工业环境中稳定可靠地运行，提升其 IP（Ingress Protection）防护等级是必不可少的。较高的防护等级意味着产品具有更好的防尘、防水等性能，能够有效地保护内部的电子元件免受环境因素的损害。然而，防护设计的提升往往会对产品的交互体验带来一定的挑战。从人机工程学的角度出发，需要在防护设计和操作性能之间寻求一个最佳的平衡点。这需要深入分析防护等级提升对用户操作可能产生的影响。在保证产品达到所需防护等级的前提下，通过合理地设计产品的密封结构和操作部件的布局，选择合适的材料和制造工艺，例如采用具有良好触感的防水按键、高灵敏度的防护触摸屏等，来最大限度地降低操作阻力，提高操作的便利性和整体的交互体验，最终实现防护设计与操作性能的和谐统一。

五、总结

在智能化转型背景下，本研究针对工业控制类产品的设计展开探讨。首先系统阐述了相关设计方法论，为产品设计提供了理论指导。接着提炼出人机工程与界面设计的整合框架，强调了两者协同的重要性。这一框架有助于提升产品的易用性和用户体验。同时指出未来研究方向应聚焦于自适应界面和混合现实交互等领域。通过这些方向的深化研究，有望进一步优化工业控制类产品的设计。本研究成果可为装备制造业的数字化转型提供有力的设计支持，推动产业升级和发展。

参考文献

[1] 孔寅. 西门子工业控制类产品中国市场战略研究 [D]. 对外经济贸易大学, 2004.  
[2] 奚宏伟. 智能眼镜类产品工业设计研究 [D]. 东南大学, 2017.  
[3] 庄长升. 工业控制领域中应用电子技术的可行性研究 [J]. 信息记录材料, 2020, 21(10): 56-57.  
[4] 刘小芳. 工业控制产品抗电磁干扰技术研究与应用 [D]. 西安工程大学, 2017.  
[5] 林雪. 基于人机工程学的 Tandem 双丝气体保护焊接专机的工业设计研究 [D]. 东南大学, 2020.  
[6] 王强. 工业设计中的人机工程学与工效学研究 [J]. 科学与信息化, 2024(3): 117-119.  
[7] 褚福涛, 李广东. 火灾报警控制器操作界面设计中的人机工程学问题研究 [J]. 中国科技信息, 2011(18): 66, 68.  
[8] 康天娇, 邹春明. 工业控制系统网络安全产品研究分析 [J]. 网络空间安全, 2020, 11(01): 34-38+44.  
[9] 周鼎. 工业设计人机工程学课程设计研究 [J]. 中国科技信息, 2011(10): 267-268.  
[10] 田保珍, 杨刚俊, 卢春莉, 等. 工业设计专业人机工程学教学改革研究 [J]. 科技信息, 2014(6): 49, 53.

# 高温高压阀门密封失效与修复改进

吴星龙, 刘瑜

中广核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ERA.2025090031

**摘 要 :** 高温高压阀门在石油化工、能源电力等领域发挥着关键的作用, 但现阶段其密封失效问题依然严重地影响了系统的安全稳定运行。为此本文系统地分析了高温高压阀门密封失效的原因, 其中涵盖了材料性能不足、结构设计缺陷、复杂工况影响以及安装维护不当等方多个面, 随后介绍了直观检查、压力测试、无损检测和在线监测等多种检测诊断方法, 再阐述了密封面研磨、堆焊、密封件更换及激光修复等修复技术。在此基础上, 才提出优化材料选择与处理、改进结构设计、规范安装维护以及智能监测预警等预防改进措施。希望通过全方位的研究, 能够为解决高温高压阀门密封失效问题提供系统性的技术方案, 从而提升设备的可靠性与安全性。

**关 键 词 :** 高温高压阀门; 密封失效; 检测诊断; 修复技术; 预防改进

## Sealing Failure and Repair Improvement of High-temperature and High-pressure Valves

Wu Xinglong, Liu Yu

CGN Nuclear Power Operation Co.,Ltd. Shenzhen, Guangdong 518000

**Abstract :** High-temperature and high-pressure valves play a crucial role in fields such as petrochemicals and energy power. However, at present, the problem of their sealing failure still seriously affects the safe and stable operation of the system. For this purpose, this paper systematically analyzes the reasons for the sealing failure of high-temperature and high-pressure valves, covering multiple aspects such as insufficient material properties, structural design flaws, the influence of complex working conditions, and improper installation and maintenance. Subsequently, various detection and diagnosis methods such as visual inspection, pressure testing, non-destructive testing, and online monitoring are introduced. The repair techniques such as grinding of sealing surfaces, surfacing welding, replacement of sealing parts and laser repair were further elaborated. On this basis, preventive and improvement measures such as optimizing material selection and processing, improving structural design, standardizing installation and maintenance, and intelligent monitoring and early warning were proposed. It is hoped that through all-round research, a systematic technical solution can be provided for addressing the sealing failure problem of high-temperature and high-pressure valves, thereby enhancing the reliability and safety of the equipment.

**Keywords :** high-temperature and high-pressure valves; seal failure; detection and diagnosis; repair technology; preventive improvement

## 引言

在现代工业领域当中, 高温高压阀门作为流体控制系统的核心设备, 已然被广泛地应用于石油化工、火力发电、核电、煤化工等行业。它们在高温、高压、强腐蚀等恶劣的工况下, 承担着截断、调节、止回等重要功能, 因此对保障生产流程的连续性、稳定性以及系统安全是至关重要的。但由于工作环境的复杂性和严苛性, 使得高温高压阀门密封失效问题频发。所以本文将从多个角度入手, 对高温高压阀门密封失效与修复改进展开了全面分析, 以期对相关领域提供理论支持和实践指导。



## 一、高温高压阀门密封失效原因分析

### （一）材料因素

#### 1. 材料性能不足

当材料的高温强度、硬度、抗氧化及抗腐蚀能力达不到使用要求时，会造成密封性能的降低。比如在较高的温度下，随着温度的增加，其强度下降，密封表面更易发生塑性变形，从而导致密封结构的失效；部分材料耐高温氧化性能差，易发生氧化膜剥落，严重影响密封性能。而在强腐蚀性的介质中，如果材料的抗腐蚀能力较弱，则会受到介质的腐蚀，使其表面产生凹坑、沟槽等缺陷，从而导致密封失效<sup>[1]</sup>。

#### 2. 材料选择不当

由于工作环境的不同，阀门的材质也有特殊的要求，如果选用不当，就不能适用于工作环境。例如在高温、高压和含有腐蚀性介质的条件下，如果选择一般的碳素钢材料，碳素钢容易被腐蚀，密封表面迅速丧失其密封作用；再如，在超高压条件下，如果采用强度不够的材质，阀体及密封件会因为无法承受压力而断裂，从而导致泄露。另外，由于其与其它元件的热膨胀系数不匹配，当温度发生改变时可能会出现热应力，造成密封表面的变形，从而影响密封性能<sup>[2]</sup>。

#### 3. 材料质量缺陷

如果材料本身有缺陷，就有可能对密封件造成破坏，例如金属内部存在气孔、夹渣、疏松等内部缺陷，会使其强度、致密度下降，且在高温、压力等条件下，极有可能出现裂纹，进而引发密封失效<sup>[3]</sup>。

### （二）结构设计因素

#### 1. 密封结构不合理

密封结构的设计对其密封性能有很大的影响，在高温、高压条件下，有些密封结构不能有效地补偿密封环的磨损与变形。如常规的平板式密封结构，其在高温、高压条件下，各端面间的接触压力很难达到均匀，极易产生局部渗漏。但有些密封结构的自紧性较差，当压力上升时，其比压就得不到相应的提高，从而得不到较好的密封效果。另外，密封结构的复杂性对其可靠性也有一定的影响，结构越复杂，越容易出现密封的弱点，从而增大密封失效的危险<sup>[4]</sup>。

#### 2. 密封面加工精度低

密封表面的加工精度直接影响密封性能，如果端面不平整，有刮痕、凹痕等缺陷，则在较大的密封压力下，有可能从这些细小的缝隙中漏出。如果端面的平直度和平行度误差太大，会引起端面的局部接触，从而使密封失效，在高温、高压条件下，微裂纹将被放大，从而加快其失效过程。

#### 3. 螺栓预紧力不均

螺栓预紧力对阀门的密封性起着至关重要的作用，在阀门的装配中，如果螺栓的预紧力不均衡，就会造成密封表面的受力不

均匀，造成局部密封的比压不够以及渗漏。另外，长期服役于高温、高压环境中，易产生热膨胀和应力松弛，造成预紧力降低，进而影响密封性能；螺栓预紧不当也会引起阀体零件的变形，从而降低其使用寿命，降低其密封性<sup>[5]</sup>。

### （三）工况因素

#### 1. 温度变化

高温、高压阀门在使用时，由于温度的急剧变化，会对其密封性能造成很大的影响。在高温环境下，材料会出现热膨胀现象，如果密封结构设计不当，零件间的配合间隙将会改变，从而造成密封表面的变形；当温度下降，物料收缩，密封面上就会产生裂缝。

#### 2. 压力波动

在高温、高压条件下，压力波动是导致密封失效的主要原因，当系统工作时，由于压力的急剧上升和下降，会对阀门的密封部分造成冲击。在长时间的交变载荷下，密封件将出现疲劳裂纹，并伴随着裂纹的扩展而发生破坏。

#### 3. 介质冲刷

被输送的介质，特别是含有固体颗粒、杂质的介质，会对阀门的密封部位产生冲蚀效果。这些粒子在高速运动时，会不停地冲击封严，对封严造成冲蚀和磨损。当磨损加剧时，密封表面的平坦、光洁度会被破坏，密封性能会不断降低，最后会出现漏液现象<sup>[6]</sup>。

### （四）安装与维护因素

#### 1. 安装不当

在安装时，如果操作不当，将对阀门的密封性能产生直接的影响，例如安装过程中没有清洗干净，有杂质、油污等，都会破坏密封表面的紧密性，造成渗漏；如果阀门和管路之间的联接螺栓不正确，预紧力没有满足规范，就会造成密封面的受力不均匀；如果在安装时受到撞击、敲打等损坏，则会造成密封件的变形和开裂。另外，如果阀门在管路中受到不适当的外力或震动，也会对其密封性能产生不利影响。

#### 2. 维护保养不到位

在高温、高压条件下，对阀门密封进行定期的维修和维修是十分必要的，如果不进行维修，在长时间的使用中，密封件将会发生磨损和老化，得不到及时的修补和替换，进而降低密封件的密封性能<sup>[7]</sup>。

## 二、高温高压阀门密封失效的检测诊断方法

### （一）直观检查法

直观检查法是最基本也是最常见的一种检测方法，对阀门外表面进行目测，观察有无介质渗漏，密封面有无磨损、开裂、腐蚀等缺陷；检查阀门接头的螺栓有无松动、密封垫有无破损；仔细聆听阀门运转时，有无不正常的声音，确定密封部位有无损



坏。这种直观检查法操作简便、成本低廉，但仅能探测出表面较明显的缺陷，很难在较小范围内检测出微小缺陷及早期密封失效等问题<sup>[8]</sup>。

## （二）压力测试法

### 1. 气压测试

气压试验就是向气门内注入压缩空气，并在规定的压力下停留一段时间，通过观察气门外的压力降及有无气泡确定气门有没有漏气。空气压力试验具有操作简单、快速等优势，但其内部气体分子尺寸很小，很难被检测到，同时空气压力试验也具有很大的安全隐患，一旦泄露就会引起爆炸。

### 2. 水压测试

液压试验就是将水注入到阀门中，在一定的压力下，通过观察阀门外壁的压力变化及有无漏水现象来判断其密封情况。相对于空气压力试验，水压试验具有更高的安全性，而且水的高密度使其可以发现较小的渗漏。

## （三）无损检测法

### 1. 渗透检测

渗透检测是指将含有有色染料或荧光试剂的渗透液通过毛细效应覆盖在气门密封面上，并将其渗透至缺损处，随后移除过多的渗透液，再施以显影剂，将渗透液从缺损处吸出，实现对缺陷部位及形态的准确定位。因此渗透探伤是一种可以探测表面缺陷的无损检测方法，它对微小裂纹和气孔等缺陷的检测非常敏感，但不能探测到其内部缺陷。

### 2. 超声检测

超声波探测技术是基于超声波在各种介质中的传输规律，将超声波作用于缺陷表面，使其发生反射、折射、散射等现象，并对其进行处理，从而实现对其内部缺陷的诊断。超声波检测具有探测内部裂纹、夹渣等缺陷的能力，具有探测深度大、灵敏度高等优点，但对缺陷进行定性与定量分析，对检测结果有很大的要求，并且容易受到操作者的熟练程度和经验的影响。

### 3. 射线检测

射线探伤是指用 X、Y 射线透过阀体的密封件，依据缺陷对光线的吸收与衰减，在底片或检测器上形成不同的图象，以判别缺陷的种类、位置及大小。射线探测技术可以直接显示缺陷，对内部缺陷的探测精度很高，但是其危害大，对保护方法要求高，而且测试费用高。

## （四）在线监测技术

### 1. 声发射监测

声发射检测技术是通过安装于气门表面的声发射传感器，采集气门内部裂纹扩展、摩擦和泄漏等产生的声波信号，对其进行分析和处理，从而判定气门有无密封损坏等问题。声发射监测技术可对阀门进行实时、在线的监控，并能及时发现微小的故障，具有良好的动态损伤探测能力，但易受外界噪音的影响，需通过先进的信号处理方法来提高检测精度<sup>[9]</sup>。

### 2. 红外热成像监测

红外热像监控技术是基于被测对象的表面温度场和热辐射之间的对应关系，采用红外热成像技术对阀门进行热像检测。红外热像技术具有非接触、速度快、可视化等特点，可以实现对阀门的无损检测，但其测量结果易受环境温湿度等因素的影响。

## 三、高温高压阀门密封失效的修复技术

### （一）密封面研磨修复

对有轻微磨损或刮伤的端面，可用磨削法进行修补，密封面研磨修复是利用磨削刀具、磨料等方法，对密封表面进行机械或人工磨削，消除表面缺损，使其达到表面平整、光洁的目的。在磨削时，应根据特定的磨削技术，选用适当的磨具及磨料颗粒尺寸，以保证磨削表面的精度。

### （二）堆焊修复

对磨损严重，易产生大坑或裂缝的密封面，采用堆焊技术进行修补是解决这类问题的有效途径。堆焊修补就是将一种或几种金属材料进行堆焊，再对其进行机械加工，以达到所要求的尺寸和精度。因此为了确保堆焊层与基材的粘结强度及密封性，应针对不同的工作条件及原有的密封表面特性，需要选用不同的堆焊材料。

### （三）密封件更换

气门密封件的老化和破损是造成气门密封性能下降的主要原因，这种情况下，可以通过对其进行更换。在更换密封件之前，必须对密封件的种类、规格、材料进行正确的鉴别，并根据工作条件选用合适的密封件。在进行密封安装时，应对密封部件进行全面的清洗，以确保没有任何杂质、油污等杂质，并按适当的安装方式及程序进行密封安装，确保其安装位置准确、密封可靠。

### （四）激光修复技术

激光修补是一种新的修补技术，其修补精度高、热影响范围小并且修补速度快，其采用高能激光束，使充填材料在封严表面快速熔合，形成高质量修补层，通过调节激光功率、扫描速度、光斑直径等参数，实现对修补层厚度、形貌及性能的有效调控。

## 四、高温高压阀门密封性能的预防改进措施

### （一）优化材料选择与处理

工作人员应针对特定的工作环境，选用具有优良性能的阀门材质。例如在高温、高压和强腐蚀性的环境中，应优先选择耐高温合金、耐蚀不锈钢和特殊陶瓷；在密封方面，选用弹性好、耐高温、耐腐蚀的材料，如橡胶、聚四氟乙烯等。通过合理的热处理、表面处理等措施，改善材料的综合性能。

### （二）改进结构设计

在设计时，要对其进行优化，以改善其密封性，采用自紧密

封结构，随着被测流体压力的增加，其比压也随之增加，从而确保在各种压力条件下均能达到较好的密封效果。通过对端面的形状、大小进行合理的设计，改善端面的接触精度，改了端面的均匀性。同时强化对端面的加工过程的控制，有效地改善零件的加工精度，降低零件的表面质量<sup>[10]</sup>。

### （三）规范安装与维护

工作人员需要制订一套严格的安装工艺规范，保证安装工艺的标准化和准确性，在安装之前，应仔细清洗阀门及管路，并检查其密封表面及密封情况；在安装时，应按预先确定的次序及预紧螺钉，以确保各密封面受力均匀，并且建立健全的阀门维修体系，定期检查、清洁、润滑、紧固。

### （四）智能监测与预警

采用现代传感技术、信息技术、大数据分析等技术，建立一

套基于计算机的高精度的阀门监控系统。另外，采用压力传感器、温度传感器、振动传感器和声发射传感器等传感器，对阀门工作状态下的压力、温度、振动、泄漏等进行实时监测。

## 五、结束语

高温高压阀的密封失效是制约其安全稳定的重要因素，通过对其失效机理的深入剖析，采取科学、合理的检测诊断手段、有效的维修手段和有效的防范手段，可以有效提高其密封性能与可靠性。在工程实践中，要根据工作条件、服役要求等多方面的因素，对其进行正确的检验诊断与维修，并对其进行严密的防范与改善，最终建立起一种完善的高温高压阀门密封故障防控系统。

## 参考文献

- [1] 车磊. 面向高温高压失效零件的增材修复工艺研究及可修复性评价 [D]. 新疆维吾尔自治区：新疆大学，2018.
- [2] 赵嘉逸，高俊峰，崔永硕，等. 基于某锅炉用闸阀闸板面密封失效研究 [J]. 液压气动与密封，2025, 45(01): 14-20.
- [3] 韩勛. 屏蔽式电动闸阀及控制系统的设计与研究 [D]. 辽宁省：大连工业大学，2021.
- [4] 唐元清. 硬密封固定球阀结构有限元分析及优化 [D]. 甘肃省：兰州理工大学，2016.
- [5] 夏传虎. 高温高压闸阀. 浙江省，凯喜姆阀门有限公司，2020-12-01.
- [6] 徐国辉. 高压阀门自密封泄漏原因分析及处理措施 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2021, 41(02): 19-21.
- [7] 王志远. 高压阀门密封性试验及防护装置仿真分析 [D]. 河南科技大学，2023.
- [8] 赵宇，贾树勋，侯新，等. 高压自密封阀门四开环改进 [C]// 中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集—13. 冶金设备与工程技术. 鞍钢股份有限公司能源管控中心；, 2023: 47-49.
- [9] 叶建伟，叶建中，潘建瓯，等. 高温高压球阀组合结构密封性能研究 [J]. 液压气动与密封，2024, 44(07): 68-74.
- [10] 蒋朝，张克强，何胜卫，等. 高压阀门自密封泄漏原因分析及处理措施 [J]. 阀门，2025, (04): 416-421.

# 煤矿机电工程安装施工技术问题及策略探析

白东方, 牛嵩

陕西中太能源投资有限公司朱家茆煤矿, 陕西 榆林 719000

DOI:10.61369/ERA.2025090037

**摘 要 :** 机电工程是辅助煤矿生产质量和效率提升的重要工程, 其本身施工质量, 和煤矿企业经济效益及安全生产息息相关, 因此, 对于煤矿企业人员而言, 应树立对机电工程安装施工的重视, 全面提升安装质量。本文将结合煤矿机电工程安装施工技术问题, 讨论优化煤矿机电工程安装施工技术路径, 希望有所帮助。

**关 键 词 :** 煤矿; 机电工程; 施工技术; 技术问题; 优化策略

## An Analysis of Technical Issues and Strategies in the Installation and Construction of Mechanical and Electrical Engineering Projects in Coal Mines

Bai Dongfang, Niu Song

Zhujiamao Coal Mine of Shaanxi Zhongtai Energy Investment Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719000

**Abstract :** Electrical and mechanical engineering is a critical component in enhancing the quality and efficiency of coal mine production. The quality of its construction directly impacts the economic benefits and safety of coal mine enterprises. Therefore, coal mine personnel should prioritise the importance of electrical and mechanical engineering installation and construction to comprehensively improve installation quality. This paper will discuss optimisation strategies for electrical and mechanical engineering installation and construction techniques in coal mines, aiming to provide valuable insights.

**Keywords :** coal mine; electromechanical engineering; construction technology; technical issues; optimisation strategies

### 一、煤矿机电工程安装施工技术问题

#### (一) 电气系统安装问题

电气系统安装问题, 主要集中于以下几点: (1) 电缆外层绝缘层破损, 弯曲半径不足, 这可能增加漏电和短路风险; (2) 防爆设备安装方面, 密封圈有老化迹象, 且隔爆面间隙不符合设计要求, 这可能增加瓦斯爆炸风险, 影响防爆性能; (3) 接地系统存在缺陷, 材质和电阻值不符合设计标准, 这可能导致设备外壳绝缘性能下降, 使设备带电工作, 增加人员触电风险; (4) 控制系统接线方面, 未妥善固定接线, 这可能增加控制系统出现故障的风险, 导致设备动作异常<sup>[1]</sup>。

之所以引发电气系统安装故障, 可能是因为井下环境相对潮湿, 电缆绝缘层受潮风险加剧, 导致电缆绝缘层老化的同时, 也会加剧接地系统腐蚀风险。此外, 矿井中尘土飞扬, 无法及时清理的尘土, 可能会在电子设备内部大量堆积, 导致设备无法正常散热, 增加电路短路的风险。

#### (二) 设备安装精度不足

煤矿机电工程设备安装定位未合理控制, 存在定位偏差, 例如提升机、通风机等数量和位置, 未严格符合设计图纸要求, 使设备运行阶段, 增加异常振动出现的风险。另外, 设备垂直度和水平度未达标, 以水泵为例, 安装垂直度不达标, 会加剧轴承磨

损, 导致设备使用寿命缩短。最后, 联轴器对中存在误差。工作机联轴器和电机未准确对中, 导致机械故障的概率增高, 极端情况下, 设备会直接停机, 影响煤矿生产<sup>[2]</sup>。

之所以出现设备安装精度不足的现象, 究其原因, 是因为测量工具精度不达标, 诸如全站仪、水准仪等仪器, 未在规定期限内校正, 可能导致较大测量误差。基础施工质量不达标也容易影响设备安装精度, 浇筑设备基础时, 设备基础未达到设计标高, 基础平整度不符合设计要求。安装人员操作也会对设备安装精度造成影响, 施工未按照图纸要求完成任务, 只依照过往经验施工, 校准次数不足, 也容易降低安装精度。以某煤矿提升机安装为例, 主轴水平度偏差正常为每米0.1mm, 但是现场安装偏差达到了每米0.5mm, 经过3个月的生产, 齿轮磨损加剧, 有大量异常噪声, 齿轮不能正常啮合, 进而损坏主轴轴承, 为煤矿企业带来了巨大的经济损失。

#### (三) 通风系统安装问题

通风系统安装问题, 主要集中于以下几方面: (1) 风机安装效率不高。主通风机安装过后, 通风量未达到设计标准, 普遍在80%设计值及以下, 无法对井下空气质量起到实质改善作用;

(2) 风筒存在严重漏风现象。柔性风筒连接位置未妥善密封, 漏风率普遍在15%及以上, 超出5%的标准限度; (3) 通风阻力明显。巷道转弯位置未按设计要求, 做好导流叶片的安装, 导致局

部阻力系数远高于设计标准<sup>[3]</sup>；（4）风筒未规范安装。相邻风筒间距在3m及以上，标高也不一致，风筒越多，风阻增加的效果就越明显；（5）风机基础未合理减震。一些煤矿企业未将橡胶垫板和弹簧减震器安装在风机基础位置，巷道围岩受到的振动效应更明显；（6）风门密封性差。实际安装中，风门和门框间隙未符合设计要求，间隙普遍在2mm及以上，同样容易增加风流短路的风险。

#### （四）安全防护技术问题

安全防护技术问题，主要和安全联锁装置与防护装置失效相关。其中，安全联锁装置问题表现为以下几种形式：（1）提示机无法实现过卷保护，深度指示器无法正常使用，过卷开关无法正常触发；（2）电气设备漏电保护器失灵，无法在0.1s之内，在漏电状态下响应保护动作<sup>[4]</sup>；（3）皮带机急停按钮数量不符合要求，相邻急停装置距离在50m及以上。防护装置失效问题表现为以下几点：（1）瓦斯监测装置未正确安装，顶板与传感器间距在300mm及以上，会对监测精度产生明显影响；（2）电气设备防护等级不达标，正常情况下，井下照明灯具防护等级应当在IP65以上，但很多煤矿企业井下配备的灯具，等级约为IP54，远未达标；（3）转动位置防护罩未妥善固定，增加了驱动滚筒运行阶段脱落风险。

#### （五）施工管理和技术人员问题

煤矿企业机电设备安装施工管理存在一定漏洞，主要体现在以下几方面：（1）施工方案未严格审批，一些煤矿企业为赶工期，未树立对机电设备安装的足够重视程度，专项安全方案未严格审批，特殊工序安全措施不足<sup>[5]</sup>；（2）验收标准模糊，一些接地极埋设等工程隐蔽性较强，验收未依照图纸要求进行；（3）未合理平衡进度和质量要求，为达到工期进度要求，导致设备调试时间和次数不足，令设备处于带病工作状态。

安装人员自身素质，也会对机电设备安装质量造成影响。聚焦于实际情况，一些煤矿企业针对特种作业人员的管理，并没有落实持证上岗管理要求，不持证上岗的情况普遍存在。此外，一些人员不具备较强的安全意识，未合理学习操作规程，了解操作规程要求。最后，一些人员学习意识薄弱，无法在短时间内快速掌握新技术，以及新设备的应用方法，安装调试不足，导致设备未达预期使用效果<sup>[6]</sup>。

## 二、优化煤矿机电工程安装施工技术路径

#### （一）电气系统安装优化

电气系统安装优化，可通过以下措施实现：（1）控制电缆敷设质量。安装人员需要学习敷设工艺规程，电缆弯曲半径不能低于电缆直径的15倍，若电缆为控制电缆，不能低于电缆直径的10倍。电缆敷设方式为垂直敷设，应设置固定卡具，相邻卡具应保持1.5m的间距。电缆若电压等级不同，敷设时应分层进行，间距至少为30cm<sup>[7]</sup>。电缆敷设之后需要进行绝缘测试，控制敷设质量，低压电缆不能低于10MΩ，超过10kV电缆电阻不能低于1000MΩ。（2）提升防爆电气安装质量。电缆外径和密封圈内

径，差值应不超过1mm，机电设备进线装置内径和密封圈外径，差值应不超过2mm。隔爆面间隙应不超过0.2mm，粗糙度应不超过6.3μm。拧紧螺栓之后，应留出2-3扣的余量。（3）改进接地系统。复合接地网可采用垂直接地极和水平接地体设计防范，以铜包钢作为接地材料。深井为降低接地系统电阻，可采用深井接地和换填土方式达到目的。其中，深井接地是在主接地网位置开采深井，深度30m，半径150mm，将铜棒置于井中<sup>[8]</sup>。换填土是用降阻剂更换接地极附近2m土壤，同样可起到降阻效果。局部接地极不应超过5Ω，主接地网不应超过2Ω。

#### （二）设备安装精度控制

设备安装精度控制，可通过以下方式实现：（1）控制基础施工质量。进行机电设备基础时，需采用自密实混凝土，使基础平整度不超过每米2mm。同时需要将橡胶垫铺在风机基础下方（厚度约为20mm），避免基础受到的振动荷载更大。（2）标准化工艺安装。煤矿企业机电设备安装负责人，需要制定相关操作要求手册，提高机电设备安装精度。实践中，垂直度偏差不能超过每米0.5mm，设备水平度偏差不能超过每米0.1mm，联轴器对中误差不能超过0.03mm。安装阶段，应由第三方机构进行检测，验证设备安装精度，使设备精度符合设计要求<sup>[9]</sup>。（3）引进新测量技术。在安装提升机主轴时，可引进全站仪进行动态监测，使垂直度和水平度符合设计要求，偏差值若在每米0.05mm及以上，系统会自动报警。也可采用三维激光扫描技术，可实现毫米级精度扫描，控制设备基础标高，提高机电设备安装质量。

#### （三）通风系统安装改进

通风系统安装改进需提升风机安装效率，控制通风阻力，并引进新风筒安装技术。欲提升风机安装效率，需在安装机电设备之前，用CFD软件模拟风机房流场，对风机布置方案进行优化。同时应重视设备安装基础的减震，可以将弹簧减震器安装在风机和设备基础之前，以不超过5Hz的标准控制固有频率，并将柔性接头安装在进出口风管处，以不低于300mm的标准控制接头长度<sup>[10]</sup>。

欲控制通风阻力，需优化巷道，避免直角转弯数量过多。若直角转弯无法避免，过渡处可采用圆弧形状，并以不低于2m的标准控制曲率半径。巷道中的堆积物料应在施工前后及时清理，保证断面整洁，无杂物。

新风筒安装技术的引进，可应用新型风筒，以高强PVC符合材料为主，可使漏风率不超过3%。相关资料表明，风筒安装新技术包括以下几种：（1）模块化快装风筒。此类风筒连接方式为螺栓和预制法兰盘，长度介于6-9m，同步配备密封胶条，可通过滑轨对接方式辅助安装。模块化快装风筒在斜巷和直巷中都适用，可提高约50%安装速度，使漏风率低于5%。（2）复合材料风筒。此类风筒材料包括玻璃纤维和纳米涂层，相较于传统钢质风筒重量更轻，具备更强的抗静电和抗腐蚀性能，即使在酸性气体较多，或湿度较大的环境中，复合材料风筒也同样适用。此类风筒可有效延长寿命，降低维护成本的效果相对可观。（3）智能密封风筒。此类风筒内部有自动充气密封装置和压力传感器，若风压有异常下降现象，胶圈会快速膨胀，对空隙进行自动填补，



在瓦斯气体浓度较大，或通风压力较高的场景中相对适用。此类风筒有助于密封调节，可使漏风率低于3%，同时具备远程监控功能，方便人员及时做出反应<sup>[11]</sup>。（4）机器人辅助安装系统。该系统支持视觉导航和机械臂功能，可代替人工搬运风筒，确定风筒安装准确位置，即使巷道地形相对复杂，或断面面积较大、海拔较高，也具备一定适用性。该系统可替换人工作业，实现安装精度和安全性的提升。

此外，若为刚性风筒，应以不超过5m的标准控制吊挂间距，若为柔性风筒，应以不超过3m的标准控制吊挂间距。吊挂角度应与巷道坡度保持一致，以不超过1°的标准控制偏差。为提高局部通风质量，可以将导流叶片安装在转弯位置，并以不低于1.5倍管径的标准控制曲率半径<sup>[12]</sup>。

#### （四）强化安全防护技术

安全防护技术的实现，需从标准化安装防护装置，完善安全连锁装置和优化瓦斯监测等方面入手。以皮带机驱动滚筒防护装置为例，材质需选择孔径不超过10mm的金属网孔，并用全封闭防护罩覆盖齿轮外露部分，使防护等级达到IP54。井下需采用防爆型灯具，使防护等级达到IP65。并将防水檐装设在配电箱处，在进线口设置防水接头。安全连锁装置完善，需通过电气和机械联合保护的方式，实现双过卷保护，以不超过50cm的标准控

制动作距离。瓦斯监测优化需布置传感器，传感器布设位置和顶板间距不能超过300mm，采煤工作面回风巷和工作面间距不能超过10m<sup>[13]</sup>。

#### （五）施工管理和人员培训

施工管理优化需注重方案管控，特殊工序需经过项目负责人审批通过，关键施工工序需实行“三检制”。进度方面，需以弹性施工计划为主，留出进度提前量，以留出进度调整时间。人员方面，针对新入职的人员，应举行针对性培训，培训学时不低于72h，通过考核之后才能正常上岗。特种作业人员应每隔一段时间复训，了解新设备操作方法。项目应定期举办技能笔试，增强人员对实践技能的熟悉程度<sup>[14]</sup>。

### 三、结束语

综上所述，煤矿机电工程安装施工技术问题主要集中于电气系统安装、设备安装精度、通风系统安装、安全防护、施工管理和人员培训等诸多方面，会对机电工程安装质量造成严重影响。煤矿企业对症下药，对电气系统和通风系统安装进行优化，提高设备安装精度，加强安全防护，并重视施工方案优化，提高人员技能水平，实现机电工程安装质量的全方位提升。

### 参考文献

- [1] 宋端峰. 机电安装工程电气施工工艺及其控制管理探究[J]. 中国设备工程, 2021(24):94-95.
- [2] 吴永杰. 机电安装工程电气施工工艺及其控制管理探究[J]. 中小企业管理与科技, 2021(28):25-27.
- [3] 汪晨, 彭翥南, 董桐存, 叶君豪. 机电安装工程关键施工技术及其质量控制措施研究[J]. 品牌与标准化, 2023(5):112-114.
- [4] 蔡正伟. 机电安装工程电气施工工艺及其控制管理探究[J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37(5):162-165.
- [5] 蒋太强, 王晓文, 孙振明, 杨虞森, 万石磊. 机械电气一体化设备安装技术要点研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(5):70-72.
- [6] 刘树彩, 周爱平, 邵春英. 信息化在煤矿机电设备运行与维护管理中的应用[J]. 能源科技, 2020, 18(9):78-82.
- [7] 董建刚. 机电工程安装施工技术问题及措施的研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(7):131-134.
- [8] 罗建国. 机电工程安装施工技术问题及措施探讨[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(9):72-74.
- [9] 王俭威. 煤矿机电工程安装施工技术问题及措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(10):85-87.
- [10] 赵小伟. 试析煤矿机电工程中安装存在的问题及对策措施[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(21):133-135.
- [11] 韩亮, 张琼. 地铁机电设备的安装及质量控制探究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(S01):91-93.
- [12] 王肖颖, 晋嘉玉, 郑远财, 来佳园. BIM技术在机电安装工程全生命周期的应用——以福建三峡海上风电产业园工程为例[J]. 武夷学院学报, 2020, 39(9):33-37.
- [13] 王宁渤, 胡宇华, 董玮华, 成红斌. 建筑机电安装项目中的精细化(无缝隙)管理的研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(12):127-129.
- [14] 郭月凯, 屈少辉, 王廷福, 王小兵. 基于CiteSpace的工程项目质量管理研究热点及趋势的可视化分析[J]. 建筑经济, 2022, 43(S02):206-211.

# 无人机倾斜摄影技术制作实景三维模型在棚户区改造中的应用

齐发

太原市国土空间规划测绘院（太原市城市雕塑研究院），山西 太原 030000

DOI:10.61369/ERA.2025090039

**摘要：** 本文针对棚户区改造中高密度建筑群三维建模难题，系统研究无人机倾斜摄影技术的全流程应用。通过华东典型棚户区试验，构建融合分层飞行规划与 RTK/PPK 定位的数据采集体系，提出分区分级建模策略。成果分析表明，模型平面 / 高程中误差分别为  $\pm 2.3\text{cm}$  /  $\pm 3.1\text{cm}$ ，支持毫米级拆迁量算与动态进度监管，验证该技术在复杂城市场景的工程适用性，为新型测绘技术赋能城市更新提供实证案例。

**关键词：** 无人机倾斜摄影技术；实景三维模型；棚户区改造

## Application of Real-Scene 3D Modeling Created by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Oblique Photography Technology in the Renovation of Shantytowns

Qi Fa

Taiyuan Land and Spatial Planning Surveying and Mapping Institute (Taiyuan Urban Sculpture Research Institute),  
Taiyuan, Shanxi 030000

**Abstract：** This paper systematically explores the full-process application of unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photography technology to address the challenges of 3D modeling for high-density building clusters in shantytown renovation. Through experiments conducted in a typical shantytown in East China, a data acquisition system integrating layered flight planning with RTK/PPK positioning was established, and a zoned and hierarchical modeling strategy was proposed. The results show that the mean errors in the model's planimetric and elevation accuracy are  $\pm 2.3\text{ cm}$  and  $\pm 3.1\text{ cm}$ , respectively. This approach supports millimeter-level demolition calculations and dynamic progress monitoring, demonstrating the technology's engineering applicability in complex urban environments and providing empirical evidence for the empowerment of urban renewal through advanced surveying and mapping technologies.

**Keywords：** unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photography technology; real-scene 3D modeling; shantytown renovation

## 引言

伴随着我国城市体量的持续膨胀及国家策略的优化，城市边缘的拓展以及老城区的改造更新逐渐成为城市建设领域的核心任务。然而，面对城市建设任务的日益繁重，劳动力成本的增加和人力资源的短缺问题，对政府机构形成了挑战，且这与国家精简财政供养岗位的政策导向存在冲突。在此背景下，遥感技术，特别是以正射影像技术为核心的应用，在城市建设尤其是违法建筑监管方面展现出了一定的成效，但依然难以彻底解决违章建筑的问题。本研究旨在探讨应用无人机倾斜摄影技术构建实景三维模型，结合遥感影像的时间序列特性，精确锁定拍摄时间点，为棚户区改造与拆迁工作提供具有明确时间参照的依据。

## 一、项目工作流程

### （一）项目前期准备与需求分析

项目启动前需明确棚户区改造的具体需求，包括三维模型精

度要求、覆盖范围及成果交付标准。需与规划、测绘及政府部门进行多轮沟通，确定模型用途如拆迁量估算、规划设计或公众展示<sup>[1]</sup>。根据棚户区地形复杂度、建筑密度及周边环境制定飞行计划，选择适配的无人机型号及载荷设备。

例如，建筑密集区域需选用具备避障功能的多旋翼无人机，而开阔地带可采用固定翼机型提升效率<sup>[2]</sup>。同时需完成空域申请、气象条件评估、应急预案编制等合规性工作，确保数据采集过程符合民用航空法规及地方政策要求。人员配置方面需组建包含飞手、测绘工程师、数据处理专员及项目协调员的跨学科团队，并进行任务分工与安全培训。

### （二）倾斜摄影数据采集与优化

数据采集阶段的核心在于通过五镜头倾斜摄影系统获取多角度高分辨率影像。飞行前需根据地面分辨率需求计算航高与重叠率，通常航向重叠度不低于80%、旁向重叠度不低于70%以保障模型拼接精度。针对棚户区中低矮建筑、临时构筑物及复杂立面特征，需设置变高航线或增加交叉飞行架次，避免因遮挡导致模型空洞。

飞行过程中实时监控 POS 数据（定位定姿系统）质量，确保每张影像的经纬度、高程及姿态角误差在允许范围内。若遇 GPS 信号弱区域，需采用 RTK（实时动态差分定位）或 PPK（后处理动态定位）技术提升定位精度至 cm 级。数据采集后需立即进行原始影像筛选，剔除模糊、过曝或冗余图片，并通过匀光匀色处理减少光照差异对后续建模的影响。

### （三）多源数据处理与三维重建

原始数据导入 ContextCapture 或 Pix4D 等专业软件后，首先通过特征点匹配与空三加密计算生成稀疏点云，再通过密集匹配算法转化为高密度点云数据。在此过程中需根据棚户区建筑材质调整纹理映射参数，例如对砖混墙体增强边缘锐化，对玻璃幕墙降低反光干扰<sup>[3]</sup>。点云分类阶段利用机器学习算法自动识别地面、植被、建筑及临时设施，并手动修正分类错误以提升模型分层准确性。

随后通过曲面重构与网格优化将点云转化为带有拓扑结构的三角网模型，并融合倾斜影像生成具有真实纹理的三维模型。针对模型中的几何畸变或纹理错位问题，需在 MeshLab 或 Blender 中进行局部编辑与修复，确保建筑轮廓、屋顶形态与实地一致。最终输出格式需兼容主流 GIS 平台及 BIM 软件，支持后续空间分析与规划应用。

### （四）模型质量验证与成果交付

三维模型精度验证需结合实地测量数据，在棚户区内均匀布设检查点，对比模型坐标与全站仪或 GNSS 实测值的平面及高程偏差。根据《城市三维建模技术规范》，建筑主体结构误差应小于5cm，纹理清晰度需达到可辨识门窗细节的等级。对于不达标区域需进行补飞或手动修补，直至满足项目验收标准。

成果交付阶段需提供模型文件、正射影像、等高线矢量图及精度评估报告，同时针对不同用户需求定制轻量化版本。例如，规划部门需获取带有属性数据的语义化模型，而拆迁评估团队则关注建筑体积与占地面积统计表。此外，需建立数据更新机制，在改造过程中定期复飞以动态更新模型，支持工程进度监控与方案调整。该技术模型与传统测绘方法的比较如表1所示：

表1：倾斜摄影技术与传统测绘方法在棚户区改造中的对比

对比指标	倾斜摄影技术	传统人工测绘
单次作业面积	2-5平方公里 / 天	0.1平方公里 / 天
人力投入	3-5人	8-12人
建筑立面数据完整性	> 95%	70% ~ 85%
综合成本	降低40% ~ 60%	基准值

### （五）技术应用延伸与风险控制

在棚户区改造全周期中，实景三维模型可延伸应用于拆迁补偿计算、日照模拟、土方量估算及公众参与可视化展示。例如，通过模型分析建筑间距与采光关系可优化安置房设计，利用时序模型对比可量化拆迁进度。

## 二、试验介绍

### （一）试验区域

试验区选定为华东地区某市典型棚户区，占地面积约23公顷，涵盖历史遗留砖木结构民居、临时搭建彩钢房及部分改建混凝土建筑，建筑密度高达65%，平均高度6.8m，最高单体建筑为14m 废弃水塔。区域内巷道狭窄曲折，最小通行宽度不足1.5m，且存在电线交错、植被覆盖不均等干扰，对数据采集完整性构成挑战，如图1。



图1：作业区全貌

该区域地形起伏显著，南北高差达11m，西侧毗邻河道导致局部地基沉降，需通过三维模型精确反映地表变形特征。选择此区域的科学依据在于其兼具高密度建筑群、复杂立面和动态改造需求，能够有效验证倾斜摄影技术在极限工况下的适应性。试验前通过 GIS 平台整合历年地形图与拆迁规划红线，划定核心建模区与缓冲区，同步收集区域气象数据，避开季风期与强降雨时段，确保飞行安全与影像质量稳定性。

### （二）试验设备

试验采用大疆 M300 RTK 多旋翼无人机搭载赛尔五镜头倾斜摄影系统，配备35mm 焦距镜头组，单镜头像素2400万，支持每秒2帧连续拍摄，适应低空慢速飞行需求<sup>[4]</sup>。定位系统集成双频 GNSS 接收机与 IMU 惯性测量单元，通过 RTK 网络服务实现实时 cm 级定位，PPK 后处理可将水平精度提升至 ±1.2cm，高程精度 ±1.8cm，其核心参数如表2所示。

表2：倾斜摄影设备核心参数表

设备模块	技术指标
无人机平台	最大续航55分钟，抗风能力15m/s
倾斜相机	五镜头同步触发，HDR 模式动态范围14档
定位系统	RTK/PPK 双模，高程精度 ±1.8cm
数据处理软件	支持50万张以上影像并行计算

辅助设备包括地面像控点靶标（采用黑白棋盘格与编码标志复合设计）、便携式气象站（监测风速、温湿度）及多平台数据校验工具（如 Trimble S7 全站仪与手持激光测距仪）。数据处理选用 Context Capture Center 软件进行空三计算与模型重建，辅以 Cloud Compare 进行点云精度分析，Smart 3D 用于纹理优化



与模型轻量化。为应对复杂电磁环境，额外配置抗干扰图传系统与冗余电源模块，确保单架次连续作业时长超过45分钟。

（三）试验内容

试验内容涵盖多维度数据采集策略验证、复杂场景建模优化及精度控制体系构建三部分。

（1）数据采集阶段设计分层飞行方案：在50m 基准航高获取全局影像，针对水塔、危房等关键地物降至20m 进行多环绕飞行，并沿巷道中轴线设置仿地航线以捕捉底部立面细节<sup>[6]</sup>。共规划6条主航带与12条辅助航带，总飞行里程38.6公里，获取有效影像6725张，像控点布设密度为每公顷4个，均匀分布于屋顶、地面及立面交汇处。

（2）数据处理阶段重点优化遮挡区域重建算法，采用跨尺度特征匹配技术提升窄巷内墙面连续性，通过语义分割剔除移动车辆、行人等动态干扰要素。模型重建后，利用全站仪实测132个检查点进行绝对精度验证，同时使用 Cloud Compare 计算点云密度与曲面拟合残差。

（3）试验同步开展效率对比分析，与传统全站仪测绘相比，外业工期从14天压缩至3天，内业处理耗时56小时，模型综合精度满足1:200地形图规范要求。针对纹理模糊区域，开发自适应锐化算法，使窗户、台阶等细部特征辨识度提升40%以上。

试验创新点在于提出“分区分级建模”方法：将棚户区划分为核心改造区、过渡区与保留区，分别设定0.5cm、1cm、2cm 差异化建模精度，节约30% 计算资源；研发融合点云语义属性与BIM 组件的混合建模流程，实现门窗、管线等要素的自动化分类入库<sup>[6]</sup>。试验同步验证了轻量化模型传输方案，通过 WebGL 技术将15GB 原始模型压缩至800MB 网络发布版本，支持多终端实时调阅与标注。且研究过程中发现，晨间低角度光照可增强立面纹理层次，但会加剧阴影干扰，因此推荐采用10:00–14:00时段进行数据采集，并通过偏振镜削弱镜面反射。

三、成果分析

（一）模型精度与可靠性验证

通过132个地面检查点统计分析表明，实景三维模型的平面中误差为  $\pm 2.3\text{cm}$ ，高程中误差  $\pm 3.1\text{cm}$ ，较《城市测量规范》中1:200地形图的允许误差（平面  $\pm 5\text{cm}$ 、高程  $\pm 6\text{cm}$ ）提升约53%，验证了倾斜摄影技术在复杂棚户区场景中的精度可靠性。建筑边长相对误差达到1/430，满足规划设计中建筑量算的精度需求

（表3）。

表3：三维模型精度验证统计表

评价维度	实测值	规范要求	达标率
平面中误差	$\pm 2.3\text{cm}$	$\leq 5\text{cm}$	100%
高程中误差	$\pm 3.1\text{cm}$	$\leq 6\text{cm}$	100%
建筑体积相对误差	1.2%	$\leq 3\%$	100%
纹理分辨率	0.5cm/ 像素	$\leq 1\text{cm}/ \text{像素}$	100%

在纹理匹配方面，92.7% 的区域实现像素级贴合，但局部金属屋顶与玻璃窗因反光产生畸变，通过引入偏振镜与多时段影像融合使合格率提升至97.1%。模型细节层次上，92% 的窗户边框、86% 的台阶路面及78% 的管线走向得以清晰还原，显著优于传统测绘70% 以下的要素完整度。分区分级建模策略将核心改造区的几何误差控制在  $\pm 0.8\text{cm}$  内，为拆迁补偿计算提供毫米级可信数据，而过渡区与保留区适度放宽精度要求，使整体计算资源消耗降低34%。

（二）效率提升与经济性分析

相较于传统全站仪测绘，倾斜摄影技术将外业数据采集周期从14天压缩至3.2天，内业处理时间由228小时缩减至61小时，综合效率提升76.5%。人力成本方面，无人机作业团队仅需4人（含飞手与质检员），而传统测绘需12人参与，直接人工费用降低62%<sup>[7]</sup>。通过自动化的空三解算与语义分割，模型生产环节减少83% 的人工干预，但高密度点云处理仍需32核服务器运行56小时，硬件投入占比达总成本的28%。

经济效益测算表明，在23公顷棚户区区项目中，倾斜摄影技术使单平方公里成本从传统测绘的12.7万元降至5.3万元，且模型复用率高达90%（可用于拆迁评估、日照模拟、工程监理等多阶段），而传统测绘成果仅限单次应用。需指出的是，模型轻量化处理增加约15% 后期工时，但使移动端加载速度从48秒优化至3秒，显著提升成果的应用灵活性。

四、结语

综上所述，本研究探索将无人机斜向摄影技术融入城市构建领域的实践，为城市管理及建设机构推出一种费用较低、操作便捷、反应迅速且具备时效性记录的巡查数据。实践证明，本研究的经验能够助力全国范围内的城市管理、建设局、房产管理等相关部門高效地执行老旧住宅区的改造监督任务，减少改造过程中的人力资源消耗，提高对违法建筑的辨识精确度，从而为推动改造工程及缓解社会矛盾提供了关键性的作业支撑。

参考文献

[1] 蒋汪洋, 和璇. 基于无人机倾斜摄影的实景三维中国建设关键技术探讨 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(S01): 275–278.  
[2] 孙志强, 马杰, 刘津铎. 无人机倾斜摄影在实景三维建设中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(S01): 350–352.  
[3] 李旭光. 无人机倾斜摄影技术在精细化实景三维模型制作中的应用研究 [J]. 家电维修, 2024(8): 53–55.  
[4] 费强, 王沁. 无人机倾斜摄影实景三维建模及质量评价 [J]. 测绘技术装备, 2024(4).  
[5] 杨颖, 夏佼. 基于无人机倾斜摄影技术的城市三维实景建模分析 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023(4): 4.  
[6] 兰漪令程耀关志宇韦晚秋金相任. 无人机倾斜摄影实景三维模型制作优化研究 [J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(22): 117–119.  
[7] 张宾. 基于无人机倾斜摄影的大面积实景三维模型建设 [J]. 城市勘测, 2025(1).



# 自动化控制技术在医院电气设备智能化中的应用

徐盼

安徽医科大学第四附属医院，安徽 巢湖 238000

DOI:10.61369/ERA.2025090040

**摘 要：** 本文重点探讨自动化控制技术在医院电气设备智能化中的应用，首先介绍了自动化控制技术的基本概念和特性，以及其在医院电气设备中的应用现状；接着详细分析了医院电气设备对自动化控制技术的需求，包括设备的自动化运行、数据的实时监控和远程控制等功能需求；然后，设计了基于自动化控制技术的医院电气设备智能化解决方案，并具体实施了一些应用案例，有效提升了医院设备的智能化水平，大大提高了医疗服务的效率；最后，对自动化控制技术在医院电气设备智能化过程中可能面临的问题和挑战进行了探讨，同时展望了自动化控制技术在医疗设备智能化方向的未来发展趋势。

**关 键 词：** 自动化控制技术；医院电气设备；智能化；实时监控；远程控制

## Application of Automation Control Technology in the Intelligence of Hospital Electrical Equipment

Xu Pan

The Fourth Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Chaohu, Anhui 238000

**Abstract：** This article focuses on the application of automation control technology in the intelligentization of hospital electrical equipment. Firstly, the basic concepts and characteristics of automation control technology are introduced, as well as its current application status in hospital electrical equipment; Subsequently, a detailed analysis was conducted on the demand for automation control technology in hospital electrical equipment, including functional requirements such as automated operation of equipment, real-time monitoring of data, and remote control; Then, an intelligent solution for hospital electrical equipment based on automation control technology was designed, and some application cases were implemented, effectively improving the intelligence level of hospital equipment and greatly enhancing the efficiency of medical services; Finally, the possible problems and challenges that automation control technology may face in the intelligent process of hospital electrical equipment were discussed, and the future development trend of automation control technology in the direction of medical equipment intelligence was also discussed.

**Keywords：** automation control technology; hospital electrical equipment; intelligentization; real time monitoring; remote control

### 引言

科技不断发展，自动化控制技术正越发成为时代的主流，其广泛的应用已使之不仅局限于工具的概念，更已升级为关键的推动力。特别在医疗设施中，电气设备的智能化程度，无疑决定了医疗服务的效率与质量。然而在实际操作中，电气设备智能化之路上，诸多问题接踵而至。以自动化控制技术提效医疗设备自动化运行，及时监控数据，并能远程控制，以此将医疗设备智能化达到新的境界、提升医疗服务水平，此为亟需解决的问题。

### 一、自动化控制技术及其在医院电气设备智能化中的应用概述

#### （一）自动化控制技术的概念和特性

自动化控制技术作为现代信息技术和工程控制理论的结合，已广泛应用于各类工业和服务领域<sup>[1]</sup>。其基本概念涉及利用计算

机、通信、传感器和执行器等技术，对设备和系统进行自动监测、分析和控制，从而实现无需人类干预的自主运行。此技术通过闭环反馈机制，实现对动态系统的实时调节，以达到预期的控制目标。

自动化控制技术的特性主要体现在高精准确性、良好的稳定性、出色的实时响应能力以及高度的可扩展性。高精准确性确保系

统能够以微米甚至纳米级的精度执行任务，适用于要求极高的环境。良好的稳定性则体现在系统对外部干扰时，能够维持工作状态而不发生故障。实时响应能力使得自动化控制系统能够在毫秒级响应外部输入和环境变化，这对于要求快速反应的医疗场所十分重要。其高度的可扩展性允许技术根据需求灵活调整和升级，以适应不同规模和复杂度的任务。

在医院电气设备的智能化应用中，自动化控制技术不仅能提供设备的智能操作，还可实现资源的优化配置和能耗的实时调节<sup>[2]</sup>。通过传感器网络和数据采集模块，可以获取设备运行状态和环境参数，从而自动化调整设备的工作模式。

## （二）自动化控制技术在医院电气设备中的应用现状

自动化控制技术在医院电气设备中的应用现状反映了现代医疗设施运维管理的智能化程度。当前，多数医院已经开始采用自动化控制技术对其电气设备进行优化和升级。在供电系统中，自动化控制技术通过智能传感器和控制器实现了电力供应的自动监测与负荷管理，这不仅提高了电力使用的效率，还有效地降低了因电气故障引发的风险。暖通空调系统中，自动化控制技术使用传感器网络实现了环境参数的实时监控与调节，能够根据病房或手术室的具体需求智能调控温湿度，有助于创造更佳的治疗环境。自动化控制技术在医院照明系统中的应用也逐渐增多，其能够依据自然光强和使用需求动态调节光照强度，从而提高能效和患者的舒适度。借助这些技术，医院可以通过中央控制平台实现对关键电气设备的远程监控与管理，不仅缩短了设备检修的时间，还显著提升了设备的可用性和维护效率。

## 二、医院电气设备对自动化控制技术的需求分析

### （一）设备的自动化运行需求

电气设备在医院运营中扮演着核心角色，它们自动化的需求正在成为医疗界面临的重大问题。医疗服务质量与效率的提升，正待这些设备具备自动运行的功能，实现不间断与高效的操作。复杂设备在医院的日常运营中数量庞大，它们的无间断衔接和互相协作，是医疗服务流程顺畅的关键。自动化需求具体表现在以下几个方面：需为设备配备自动启动和关闭的功能，应对实际需求，调整设备的运行状态，尽可能减少人工干预，降低能源消耗。要在保持设备功能正常运行的同时，通过自动化技术达到设备的节能运行，从而提升能源的效用。

设备的状态和性能监控也至关重要。实时监测设备的工作状态，能够及时发现潜在问题并进行预警，避免设备故障对医疗服务造成影响。自动化控制系统应该能够与各类设备进行无缝对接，获取关键参数并进行分析。基于分析结果，系统应作出相应响应，以保障设备的最佳运行状态。自动化运行需求还包括自适应调整功能，以应对不同负荷需求和使用情境的变化。通过智能算法和模型，设备可以自主调整运行策略，以适应医院不间断及区域的需求变化，确保医疗服务的连续性和可靠性。

### （二）数据的实时监控需求

在医院电气设备智能化进程中，须尤其重视数据的实时监

控。此种实时监控，不仅致力于为医院提供精确无误的数据收集与分析，还能确保所谓设备在最理想的状态中运行。此中，包括供电系统、空调系统、照明系统及医疗特用设备，对其运行状况进行实时监控，需求显得尤为紧迫。实时检视能预先查明和消除设备存在的潜在故障，避免突发事件对医院日常运作产生影响。实时数据监控系统，必应具备高效的数据收集和传输能力，可处理大量数据的实时反馈与响应，并将监控数据呈现在可视化中，使管理者能及时了解设备的运行状况。通过分析历史数据，掌握设备运行的趋势，以此来优化设备的维护策略。与此同时，数据的安全性和隐私性同样重要，以确保信息完整性在传输和存储过程中得到保障。

### （三）远程控制功能需求

医院电气设备的远程控制功能对于提高医疗服务效率和设备管理具有重要意义。远程控制使管理人员能够在非现场情况下实时监控和操作设备，保障设备的持续、高效运行。这一功能需求尤其重要，因为医院设备种类繁多，分布广泛，通过远程控制技术，能够及时响应设备故障，减少停机时间。远程控制有助于实现跨设备和系统的协调，促进设备之间数据的交换与共享，提高整个医院电气系统的智能化水平和综合管理效率。

## 三、基于自动化控制技术的医院电气设备智能化解决方案

### （一）智能化解决方案的设计

在设计基于自动化控制技术的医院电气设备智能化解决方案时，需全面考虑医院电气设备的多样性和复杂性。该解决方案的设计旨在实现医院电气设备的高效、智能化管理，提升医疗服务效率与质量。

智能化解决方案应具备模块化设计。模块化设计的优势在于其灵活性，可以根据不同医院的需求进行调整和扩展。通过将自动化控制系统划分为若干功能模块，如设备监控模块、数据采集模块、故障诊断模块等，可以确保系统在不同应用场景下的适用性和可扩展性。

应注重系统的互联互通性。医院电气设备往往涉及多种品牌和类型，难以形成统一的管理平台。智能化解决方案需通过开放的标准接口，实现不同设备之间的数据共享与通讯<sup>[4]</sup>。这种互通性也为医院管理者提供了集成的监控界面，便于实时掌握设备运行状态，从而实现更高效的资源调配。

在数据管理方面，设计方案需采用先进的数据分析技术。通过数据分析，可以实现对设备运行状态的实时监控和预测性维护，从而减少设备停机时间，降低维护成本。大数据技术的应用还能帮助医院优化设备使用策略，提高设备利用率，最终提升医疗服务的综合效能。

安全性是智能化解决方案设计中的关键因素。鉴于医院数据的敏感性，系统设计需遵循严格的数据保护政策，确保病人隐私和数据安全。应配置高可靠性的网络安全措施，以抵御潜在的网络攻击。

用户友好性同样不可忽视。智能化解决方案应有简洁直观的人机交互界面，便于医护人员和设备管理人员快速上手操作<sup>[9]</sup>。通过人性化的设计，系统不仅提升了用户体验，有效降低了培训成本。

### （二）智能化解决方案的具体实施与效果

在实施基于自动化控制技术的医院电气设备智能化解决方案时，需要全面评估医院现有电气设备的技术基础和功能需求。通过引入先进的传感器技术，实现设备状态的实时监测，以保障设备运行的稳定性和可靠性。在此基础上，构建数据分析平台，将采集的数据进行深入分析，以优化设备的运行参数。通过网络通信技术，实现远程监控和管理，使管理人员能够在异地实时掌控设备的工作状况。采用自动化控制算法，提升设备的自我调节能力，减少人工干预，提高设备的运行效率。

在具体实施中，将自动化控制系统与医院现有信息系统进行集成，实现数据的互联互通，为设备管理提供全面支持。智能化方案的应用显著提高了医院电气设备的响应速度和使用效率，减少了设备故障率。实践表明，自动化控制技术不仅优化了设备的操作流程，也有效降低了维护成本，提高了整体医疗服务水平。在提升医疗安全性的还大大增强了患者的满意度，实现了医院电气设备管理的智能化转型。

## 四、自动化控制技术在医院电气设备智能化中的挑战与未来发展

### （一）自动化控制技术在医院电气设备智能化过程中的挑战

在医院电气设备智能化过程中，应用自动化控制技术面临着多方面的挑战。医院环境的复杂性对自动化控制系统的稳定性和可靠性提出更高要求。医院内部设备种类繁多且技术水平不一，不同设备之间的互联互通成为一大技术难题。医院的特殊性要求电气设备必须做到零故障运行，任何一次失误都可能影响医疗服务质量甚至危及病人安全。这要求自动化控制技术具备极高的精确度与容错能力。

自动化控制技术在医院电气设备中应用的成本和资源限制也是一个重大挑战。医院需要在有限的预算下进行电气设备的升级、更换和维护，而自动化系统的复杂性和高昂的前期投入使得这一过程变得更为困难。面对不断更新的医疗技术需求，医院需要持续投入资金和人力资源，以维持系统的先进性和有效性，增加了医院的财务压力。

另外，数据安全问题尤为突出。自动化控制技术的引入意味着大量敏感数据的生成和传输，这些数据的隐私和安全成为主要

关切。未经妥善保护的系统容易遭受网络攻击和数据泄露，可能导致严重后果，医院必须投入额外资源确保信息安全，建立强有力的网络防护机制。

技术人员的短缺与培训也是一个需要克服的困难。实现自动化控制技术的部署和维护需要具备专业知识和技能的人员，医院现有的技术员工往往难以满足这种高要求。医院在推行技术升级的过程中，需要重视人才培养和对现有人员的培训。

### （二）自动化控制技术在医疗设备智能化方向的未来发展趋势

自动化控制技术在医疗设备智能化方向的发展趋势中，呈现出多元化和深入化的特点。随着物联网和大数据技术的快速发展，医疗设备的智能化正在向全面互联互通的方向迈进。通过智能传感器和先进的通信技术，各类医疗设备将能够实现信息的实时收集和传递，形成互联网络，提升医院整体运营效率。

云计算和边缘计算的结合，为自动化控制技术提供了更为强大的计算能力和数据处理能力，有助于实现医疗设备的高效智能化管理。这种结合能够支持大量数据的分析和处理，提供精准的预测和诊断服务，进而提升医疗服务的质量和响应速度。

人工智能技术的融入，是推动医疗设备智能化的重要驱动力。通过机器学习和深度学习算法，医疗设备可以实现自主学习和自适应调节，提高设备的操作精度和可靠性。这些技术的应用，不仅能优化资源配置，还能减少人为误差。

安全性和隐私保护成为医疗设备智能化过程中不可忽视的重要方面。未来的发展趋势将更加关注如何在提升智能化水平的保证数据的安全性和用户的隐私。在技术创新与伦理规范的双重驱动下，医疗设备的智能化将不断趋向更加人性化和安全化的方向发展。

## 五、结束语

本文是对自动化控制技术在智能化医疗电气设备中的全方位系统探索，主要集中在自动化运行、数据实时监控，乃至遥控等功能的需求上。一种基于自动化控制技术的电气设备智能解决方案已被设计并执行，其效果可见一斑：医疗设备智能化水平大幅提升，医护服务质量和效率也有了显著的改善。文中也分析了在这一过程中，自动化控制技术可能面临的问题与挑战，同时也展望了其在医疗设备智能化领域的未来发展趋势。研究发现，自动化控制技术不仅在当下已展现出巨大的应用价值，其发展前景十分广阔，它不仅能大幅度提升医疗设备的智能化程度，也对优化医疗服务质量与效率起到了积极的推动作用。

## 参考文献

- [1] 陈鸣震. 医院电气工程智能化及 PLC 技术在医院电气设备自动化控制中的应用 [J]. 今日自动化, 2021, (10): 88-90.
- [2] 宋彬. 医院电气工程智能化及 PLC 技术在医院电气设备自动化控制中的应用 [J]. 科技风, 2022, (31): 7-9.
- [3] 邹俊彦. 医院电气设备自动化控制智能化探讨 [J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(01): 200-201.
- [4] 郑飞. 医院电气设备自动化控制智能化分析 [J]. 前卫, 2021, (28): 0160-0162.
- [5] 李乐, 赵广利, 李永波. 自动化控制技术在医院电气设备智能化中的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64(13): 41-43.



# 高层建筑施工中绿色技术运用研究

李振龙

中国十七冶集团有限公司, 安徽 马鞍山 243000

DOI:10.61369/ERA.2025090001

**摘 要：** 本文基于绿色建筑与绿色施工的理论框架，分析高层建筑施工特点及绿色技术需求，探讨当前绿色技术的应用现状，揭示技术认知不足、设备维护滞后、区域推广失衡等问题。结合政策法规、技术标准、市场机制、企业管理及社会参与层面，提出相应的对策建议，为高层建筑施工的绿色化转型提供理论参考与实践路径。

**关 键 词：** 高层建筑；绿色施工技术；可持续发展；资源节约；环境保护

## Research on the Application of Green Technologies in High-Rise Building Construction

Li Zhenlong

CHINA MCC17 GROUP CO.,LTD., Ma'anshan, Anhui 243000

**Abstract：** Based on the theoretical framework of green buildings and green construction, this paper analyses the characteristics of high-rise building construction and the demand for green technologies, explores the current application status of green technologies, and reveals issues such as insufficient technical understanding, lagging equipment maintenance, and imbalanced regional promotion. Combining policy regulations, technical standards, market mechanisms, enterprise management, and social participation, the paper proposes corresponding countermeasures and suggestions to provide theoretical references and practical paths for the green transformation of high-rise building construction.

**Keywords：** high-rise buildings; green construction technology; sustainable development; resource conservation; environmental protection

### 引言

传统高层建筑施工模式因高能耗、高污染、低效率等问题，难以适应绿色发展要求。绿色技术通过整合节能、节材、环保等创新工艺，实现施工过程的“四节一环保”，既是破解行业资源环境约束的关键手段，也是推动建筑业转型升级的必然选择。本文以高层建筑施工为研究对象，系统梳理绿色技术的理论内涵，剖析当前应用现状及瓶颈，从政策、技术、市场、企业和社会层面提出针对性推广策略，旨在为高层建筑施工的绿色化、低碳化发展提供科学依据，助力构建人与自然和谐共生的城市建设模式。

### 一、高层建筑施工中绿色技术的理论基础

#### （一）绿色建筑的概念及内涵

绿色建筑是指在全寿命周期内，最大限度地节约资源、保护环境、减少污染，为人们提供健康、适用和高效的使用空间，与自然和谐共生的建筑。它以可持续发展理念为核心，并非单纯强调建筑外观的“绿色”，而是从建筑的规划、设计、施工、运营到拆除的整个生命周期，综合考虑建筑与环境、资源、人的关系。从资源利用角度看，绿色建筑注重采用节能设备与技术，降低建筑能耗；合理规划布局，提高土地利用效率；运用节水器具和雨水回收系统，实现水资源的高效利用；选用环保、可再生的建筑材料，减少资源浪费和对环境的破坏。在环境保护方面，绿色建筑致力于减少施工过程中的扬尘、噪声、废水等污染，控制运

营阶段的废气排放和固体废弃物产生。在满足人的需求上，通过优化室内采光、通风、温湿度等环境指标，营造舒适、健康的居住和工作环境，同时兼顾建筑的功能性与美观性，实现经济效益、社会效益和环境效益的统一。

#### （二）绿色施工的概念及特点

近年来，国家高度重视施工环保问题，城市化发展固然重要，但良好的自然环境是人类赖以生存的必然条件，因此，必须强化环保施工。鉴于上述情况，绿色施工技术应运而生，并在城市高层建筑施工中进行了广泛应用，不仅有效缓解了建筑施工所带来的一系列环境问题，同时也大大提高了施工质量和效果<sup>[1]</sup>。绿色施工是指工程建设中，在保证质量、安全等基本要求的前提下，通过科学管理和技术进步，最大限度地节约资源与减少对环境负面影响的施工活动，是绿色建筑理念在施工阶段的具体实践



和延伸。绿色施工具有系统性、持续性和创新性的特点，系统性体现在绿色施工并非孤立地关注某一个环节或某一项资源节约，而是将施工过程中的各个要素作为一个整体进行综合考虑和优化，确保整个施工过程的绿色化。持续性要求绿色施工贯穿于施工项目的全周期，从施工准备阶段的规划设计到施工过程中的具体实施，再到竣工后的清理与验收，每个阶段都要落实绿色施工的要求<sup>[2]</sup>。创新性则表现在绿色施工不断引入新技术、新工艺、新材料和新设备，如装配式施工技术减少现场湿作业，降低扬尘和噪声污染；BIM 技术辅助施工管理，实现资源的精准调配和施工进度优化，从而提高施工效率，降低资源消耗。

### （三）高层建筑施工的特点及对绿色技术的需求

高层建筑施工工程量大、施工周期长，涉及到基础工程、主体结构工程、装饰装修工程等多个复杂环节，施工过程中需要投入大量的人力、物力和财力资源。高层建筑结构复杂，对地基处理、结构稳定性、垂直运输、高空作业安全等方面都有严格要求，需要采用先进的施工技术和设备<sup>[3]</sup>。高层建筑多位于城市中心或人口密集区域，施工场地有限，周边环境敏感，容易受到交通、居民生活等因素的制约，同时施工过程中产生的噪声、扬尘、废水等对周边环境的影响较大<sup>[4]</sup>。基于这些特点，高层建筑施工对绿色技术有着迫切的需求。在资源节约方面，由于施工周期长、工程量大，资源消耗巨大，需要采用节能型施工设备和技术，降低能源消耗；利用 BIM 技术进行施工模拟和优化，减少材料浪费，提高材料利用率。在环境保护方面，为减少施工对周边环境的影响，需要采用绿色施工工艺，降低扬尘和噪声；设置废水处理和回收系统，实现水资源的循环利用，减少污水排放。在安全与健康方面，绿色技术可以改善施工现场的作业环境，如通过通风设备和空气净化装置改善高空作业的空气品质，保障施工人员的身体健康，同时采用先进的安全防护技术和设备，提高施工安全水平，确保高层建筑施工的顺利进行和可持续发展<sup>[5]</sup>。

## 二、高层建筑施工中绿色技术的应用现状分析

### （一）节材技术

在高层建筑施工中，节材技术的应用已取得一定成效，预制装配式技术得到广泛推广。通过在工厂预制梁、板、柱等建筑构件，运至施工现场进行装配，可减少现场模板使用量和混凝土浪费，提高材料利用率。例如某超高层写字楼项目采用装配式施工，建筑材料损耗率相比传统施工方式降低了 30%<sup>[6]</sup>。此外，BIM 技术的应用也为节材提供了有力支持，通过三维建模进行碰撞检测，提前发现设计冲突，避免因设计变更导致材料浪费，同时优化材料排版，减少边角料产生。然而节材技术在应用中仍存在问题，部分施工企业对新型节材技术的认知不足，传统施工习惯难以快速转变；一些小型预制构件厂生产工艺落后，导致构件精度不足，影响装配效果和材料节约效率。

### （二）节水技术

节水技术在高层建筑施工中的应用逐渐增多，雨水回收利用系统较为常见，施工现场通过设置雨水收集池、过滤设备等，将

收集的雨水用于混凝土养护、车辆冲洗、降尘喷洒等环节，有效减少了市政用水的消耗<sup>[7]</sup>。部分项目还采用了智能化节水设备，如感应式水龙头、节水型冲洗设备等，避免水资源的无效浪费。但雨水回收系统初期建设成本较高，部分小型项目因资金限制难以推广；一些施工现场对节水设备的维护管理不到位，导致设备老化、漏水，影响节水效果。

### （三）节能技术

节能技术在高层建筑施工领域发展迅速，在施工设备方面，变频塔吊、节能型施工电梯等高效节能设备得到广泛应用，相比传统设备，能耗降低约 20%–30%。太阳能光伏发电技术也开始在施工现场试点，通过安装太阳能板，为施工现场的照明、小型设备供电，减少了对市政电网的依赖<sup>[8]</sup>。在建筑围护结构施工中，采用新型保温隔热材料，如真空绝热板、新型复合保温墙体材料等，提高建筑的保温性能，降低后期运营阶段的能源消耗。不过节能技术推广存在区域差异，经济发达地区应用积极性较高，而一些经济欠发达地区受资金、技术等因素限制，节能设备和技术的应用普及率较低。

### （四）节地技术

节地技术在高层建筑施工中主要体现在合理规划施工场地和优化施工布局上，采用立体施工和空间综合利用的方式，利用垂直空间设置材料堆放区、加工区等，得以减少平面占地。部分项目还采用装配式施工，减少现场加工场地需求，提高土地使用效率。在深基坑支护设计中，采用新型支护结构和施工工艺，如咬合桩支护、地下连续墙支护等，在保证基坑安全的前提下，尽量缩小基坑占地面积<sup>[9]</sup>。但节地技术的应用仍存在不足，部分施工企业对施工场地规划缺乏科学性，存在材料乱堆乱放、临时设施布置不合理等现象，导致土地资源浪费；一些老旧城区的高层建筑项目，受周边环境制约，难以充分施展节地技术。

### （五）环境保护技术

环境保护技术在高层建筑施工中的应用是绿色施工的重要体现，在扬尘控制方面，施工现场普遍设置围挡、喷淋降尘系统，对易产生扬尘的材料进行覆盖，有效降低了扬尘污染。噪声控制技术也不断发展，采用低噪声施工设备、设置隔音屏障、合理安排施工时间等措施，能够减少施工噪声对周边居民的影响。废水处理方面，施工现场设置沉淀池、隔油池等设施，对施工废水进行处理后达标排放<sup>[10]</sup>。但环境保护技术在实际应用中仍有改进空间，部分施工现场环保设备运行不规范，存在喷淋系统未按时开启、废水处理设施闲置等情况；一些新型环保技术，如建筑垃圾资源化利用技术，推广应用速度较慢，大量建筑垃圾仍以填埋方式处理，造成资源浪费和环境污染。

## 三、高层建筑施工中绿色技术推广应用的对策建议

### （一）政策法规层面

政府应强化顶层设计，完善绿色建筑与施工相关的政策法规体系。一方面，制定强制性政策，明确规定高层建筑项目中绿色技术应用的最低标准和比例要求，对未达标的项目进行严格处

罚，倒逼企业采用绿色技术。例如出台法规要求新建高层建筑必须采用装配式建筑技术的比例不低于一定数值，否则不予审批开工。另一方面，加大政策激励力度，设立绿色建筑专项补贴资金，对采用先进绿色技术的项目给予财政补贴；实施税收优惠政策，对使用环保型材料、节能设备的企业减免部分税费；在土地出让环节，对承诺采用绿色施工技术的开发商给予土地出让金优惠或优先供地权。同时建立健全监督管理机制，加强对政策执行情况监督检查，确保政策法规有效落实。

### （二）技术标准层面

加快完善绿色施工技术标准体系，制定统一、明确、可操作的绿色技术应用标准和规范。针对节材、节水、节能、节地和环境保护等不同领域的绿色技术，细化技术指标和施工要求，如规定预制构件的精度标准、雨水回收系统的处理能力和水质要求、节能设备的能效等级等。鼓励科研机构、高校和企业联合开展绿色技术研发，推动技术创新，将成熟的新技术、新工艺及时纳入技术标准体系。定期对技术标准进行修订和更新，以适应行业发展和技术进步的需求。同时加强绿色技术标准的宣贯和培训，提高施工企业和从业人员对标准的理解和执行能力。

### （三）市场机制层面

充分发挥市场机制的调节作用，培育绿色建筑市场需求。通过宣传和教育，提高消费者对绿色建筑的认知度和认同感，引导消费者优先选择绿色建筑产品，形成市场倒逼机制，促使开发商主动采用绿色技术。发展绿色建筑认证和标识制度，建立第三方认证机构，对采用绿色技术的高层建筑项目进行认证和评级，通过认证标识向市场传递项目的绿色品质信息，增强消费者的信任度和购买意愿。此外，鼓励金融机构开发绿色金融产品，为绿色建筑项目提供低息贷款、绿色债券等金融支持，降低企业采用绿色技术的资金成本，提高企业参与绿色施工的积极性。

### （四）企业管理层面

施工企业应加强自身管理，将绿色施工理念贯穿于企业发展战略和项目管理全过程。建立健全绿色施工管理制度，明确各部门和岗位在绿色施工中的职责和任务，制定详细的绿色施工实施

方案和考核指标。加大对绿色技术研发和应用的投入，组建专业的技术研发团队，与科研机构合作开展技术攻关，积极引进和推广先进的绿色技术和设备。加强对施工人员的培训，提高其绿色施工意识和技能水平，定期组织绿色施工知识讲座和技能竞赛，营造全员参与绿色施工的良好氛围。同时建立绿色施工成本控制体系，通过优化施工方案、提高资源利用效率等方式，降低绿色施工成本，提高企业经济效益。

### （五）社会参与层面

加强绿色施工的宣传教育，提高全社会对绿色建筑和施工的认知度和参与度。通过电视、广播、网络等媒体渠道，广泛宣传绿色施工的理念、技术和成效，普及绿色建筑知识，增强公众的环保意识和绿色消费观念。鼓励社会组织、环保志愿者等参与绿色施工监督，建立公众举报和反馈机制，对施工现场存在的环境污染、资源浪费等问题进行监督和举报，形成社会监督合力。此外，开展绿色施工示范项目评选活动，树立行业标杆，发挥示范项目的引领和带动作用，促进绿色技术在高层建筑施工中的广泛应用。

## 四、结束语

绿色技术在高层建筑施工中的应用是实现建筑业可持续发展的必然趋势，绿色建筑与绿色施工理念为高层建筑施工指明了资源节约、环境保护与高效利用的方向，契合高层建筑施工特点与实际需求。当前节材、节水、节能、节地及环境保护等绿色技术虽已取得一定成效，但在应用过程中仍面临诸多问题。针对这些问题，需要政策法规、技术标准、市场机制、企业参与和社会参与等多层面协同发力。随着技术创新的持续推进、政策环境的不断优化以及社会环保意识的普遍提升，绿色技术在高层建筑施工中的应用将更加广泛、深入。这不仅有助于降低高层建筑施工对环境的负面影响，提高资源利用效率，还将推动整个建筑行业向绿色、低碳、可持续的方向转型，为建设资源节约型、环境友好型社会奠定坚实基础。

## 参考文献

- [1] 肖玉诚. 高层建筑施工中绿色施工技术的应用重点分析[J]. 中国住宅设施, 2022, (08): 7-9.
- [2] 王伟. 高层建筑施工中绿色施工技术的应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2022, (07): 62-64.
- [3] 李志权, 李月, 王思月, 等. 高层建筑轻质隔墙绿色施工技术[J]. 四川建材, 2021, 47(06): 108-109+112.
- [4] 刘乐乐. 超高层绿色建筑绿色施工技术研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2021, (11): 74-75.
- [5] 毛小刚. 高层建筑施工中绿色施工技术的应用[J]. 砖瓦, 2023, (05): 139-141.DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2023.05.013.
- [6] 张宝. 马来西亚超高层绿色建筑绿色施工技术应用[J]. 上海建设科技, 2022, (06): 64-67.
- [7] 王刚, 缪雪英. 绿色节能建筑施工技术在超高层建筑施工中的应用[J]. 住宅与房地产, 2021, (09): 195-196.
- [8] 郑国辉. 绿色施工技术在超高层建筑施工中的应用[J]. 居业, 2021, (02): 95-96.
- [9] 李永虎. 高层建筑施工中绿色施工技术的应用分析[J]. 住宅与房地产, 2020, (32): 124+129.
- [10] 田长春. 浅论高层建筑的绿色施工技术[J]. 科技资讯, 2020, 18(11): 33-34.DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.202.11.033.

# 城市更新及老旧小区改造的探索研究

王治

云南建投第二建设有限公司，云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ERA.2025090004

**摘要：**随着我国城市更新行动深入推进，老旧城区超高建筑的保护性改造成为平衡历史留存与功能升级的关键难题。本文针对老旧建筑结构的保护性拆除、修复与加固，提出系统性创新解决方案。研究通过融合逆向工程技术、智能监测与绿色施工理念，攻克了三大核心问题，相较于传统拆除方式，该模式缩短工期，降低粉尘排放量，为城市更新背景下高层建筑改造提供了“精准诊断－低碳拆除－性能提升”的全链条技术范式，具有显著的社会、经济和环境效益。

**关键词：**城市更新；保护性拆除；逆向建模；微振动控制；再生骨料利用

## Exploration and Research on Urban Renewal and Old Residential Area Renovation

Wang Zhi

YCIH NO.2 Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650051

**Abstract：** With the deepening of urban renewal initiatives in China, the protective renovation of super high-rise buildings in old urban districts has become a critical challenge in balancing historical preservation with functional upgrades. This paper proposes a systematic and innovative solution for the protective demolition, restoration, and reinforcement of aging building structures. By integrating reverse engineering technology, intelligent monitoring, and green construction concepts, the study addresses three core challenges. Compared to traditional demolition methods, this model reduces construction timelines and decreases dust emissions, providing a comprehensive technical framework of "precise diagnosis-low-carbon demolition-performance enhancement" for high-rise building renovations in the context of urban renewal. The approach demonstrates significant social, economic, and environmental benefits.

**Keywords：** urban renewal; protective demolition; reverse modeling; micro-vibration control; recycled aggregate utilization

### 一、城市更新及老旧小区改造的背景与意义

#### （一）背景

##### 1. 城市发展阶段的转变

中国城镇化率从1978年的17.9%提升至2022年的65.2%（国家统计局数据），城市发展从“增量扩张”转向“存量更新”。

城市建成区中，约40%的住房建成于2000年前，存在基础设施老化、安全隐患、功能缺失等问题。

##### 2. 政策驱动

国家层面：2021年《“十四五”规划纲要》提出“实施城市更新行动”；住建部要求到2025年基本完成2000年前老旧小区改造。

地方实践：北京“劲松模式”、上海“愚园路历史街区更新”等成为标杆案例。

##### 3. 社会需求

居民对居住环境质量的要求提升，老旧小区改造成为民生工程的核心内容。城市历史文脉保护与现代化功能升级的矛盾亟待

解决。

#### （二）意义

##### 1. 社会意义

改善民生：解决老旧小区漏水、管线老化、无障碍设施缺失等问题，直接提升居民幸福感。

社区治理创新：通过改造推动基层治理能力现代化，例如杭州“旧改+加装电梯”中的居民协商机制。

##### 2. 经济意义

拉动投资：2023年全国老旧小区改造投资超1.2万亿元，带动建材、装修、智能家居等产业发展。

释放土地价值：通过功能置换（如首钢园区改造为冬奥场馆）激活低效用地。

##### 3. 环境意义

低碳转型：改造中推广节能门窗、光伏屋顶等技术，降低建筑全生命周期碳排放。

资源循环：建筑垃圾资源化利用率提升至60%（住建部目标），减少填埋污染。

## 二、国内外研究现状及经验借鉴

### （一）国内研究与实践

#### 1. 政策与模式创新

“留改拆”政策：上海提出“以保留保护为主”的更新原则，避免大拆大建。

市场化参与：广州引入社会资本（如万科“永庆坊”改造），形成“政府 + 企业 + 居民”三方合作模式。

#### 2. 技术应用

数字化技术：BIM 技术用于改造前的结构检测（如深圳华强北片区改造中的3D扫描建模）。

模块化改造：北京海淀区试点装配式加装电梯，工期缩短50%。

#### 3. 学术研究热点

可持续性评价：清华大学提出老旧小区改造的“社会 - 经济 - 环境”多维评估体系。

社区韧性提升：针对洪涝、疫情等灾害的适应性改造设计（如武汉老旧小区排水系统升级）。

### （二）国际经验与启示

#### 1. 欧洲

德国：鲁尔工业区改造采用“渐进式更新”，保留工业遗产并植入文化功能（如关税同盟煤矿改造为艺术中心）。

英国：伦敦国王十字街区更新中，通过容积率奖励机制吸引社会资本，平衡公益与盈利。

#### 2. 北美

美国：纽约高线公园改造（High Line）将废弃铁路变为线性公园，带动周边地产增值200%。

PPP 模式：波士顿“绿丝带公园”通过公私合营实现旧城生态修复。

#### 3. 亚洲

日本：东京“团地再生计划”对1970年代集合住宅进行抗震加固与适老化改造，采用SI体系（结构体与填充体分离）提升灵活性。

新加坡：组屋区改造中强制预留“社区空间”，促进邻里互动。

### （三）研究空白与挑战

#### 1. 技术难点

高层建筑拆降改造中的结构稳定性控制（如逐层拆除时的荷载传递路径变化）。历史建筑保护与功能升级的冲突（如上海石库门改造中的通风采光优化）。

#### 2. 机制问题

居民参与度不足：部分项目因产权复杂导致协商困难。  
长期运维缺失：改造后设施（如加装电梯）的维护责任不明。

#### 3. 理论创新需求

城市更新的经济模型构建（如正外部性价值捕获机制）。基于数字孪生技术的全生命周期管理平台开发。

### （四）经验借鉴

在超高建筑保护性拆除工程中，可借鉴以下经验：

#### 1. 国际技术融合

采用日本模块化降层技术，结合德国碳纤维加固工艺，实现安全高效拆除。

#### 2. 本土化创新

利用 BIM 逆向建模技术，精准分析原结构缺陷（如钢筋锈蚀点位），制定个性化修复方案。

#### 3. 政策衔接

响应“无废城市”试点要求，将拆除废料转化为再生骨料，用于新建社区道路基层。

#### 4. 未来研究方向建议

技术层面：开发适用于中国规范的高层建筑逆向拆除施工工法。探索 AI 图像识别在改造工程质量检测中的应用（如裂缝自动监测）。

机制层面：构建城市更新项目利益分配模型，平衡政府、企业、居民诉求。

理论层面：基于复杂系统理论，研究城市更新对区域经济网络的连锁影响<sup>[1]</sup>。

## 三、项目案例

### （一）项目概况

#### 1. 原项目概况

冠城·揽翠华庭项目位于西双版纳州景洪市，已于2004年3月30日完工，总建筑面积：48333 m<sup>2</sup>，共15栋住宅楼；1# ~ 4# 栋桩承基础，剪力墙结构，地下1层，地上10层，5# ~ 15# 栋为独立基础，框 - 剪结构，地上6层，无地下室；建筑设计使用年限为：50年，建筑物抗震设防烈度：8度，耐火等级：二级。

#### 2. 拆降工程概况

2024年5月对本项目（1#、2#、3#、4#）楼建筑物超高保护性拆除、修复、加固；具体为：对1# ~ 4# 楼拆降至7层，电梯拆除，对不拆除的建筑物及楼层进行保护；拆除后加固屋面并恢复屋顶层，局部调整屋面消防，另购安装电梯。

### （二）现场环境特点及施工条件分析

#### 1. 现场环境特点

##### （1）地理与气候特殊性

湿热气候影响：西双版纳属热带季风气候，年均降雨量1200-1500mm，雨季（5-10月）施工需防范雨水侵蚀裸露结构。

高温作业风险：夏季平均气温28-35℃，高空作业人员易疲劳，需优化作业时段（如早晚施工）并配备防暑降温设施。

##### （2）城区敏感区位

邻近设施密集：项目位于景洪城区，拆除振动需严格控制。在《建筑工程振动控制技术标准》（JGJ/T 479-2019）限值内（≤2cm/s）。

居民生活干扰：1# ~ 4# 楼首层为商铺及会所，需保障商户



正常运营，施工噪音需符合《建筑施工现场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）（昼间 $\leq 70\text{dB}$ ，夜间 $\leq 55\text{dB}$ ）。

### （3）建筑老化特征

材料性能退化：20年使用导致混凝土碳化深度可能达10-15mm（参考《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784-2013），钢筋锈蚀率局部超20%，拆除时需防范脆性破坏。

结构功能混杂：1#楼二层会所为大空间结构，拆除时需保留其楼板完整性，避免荷载突变引发连锁坍塌<sup>[2]</sup>。

## 2. 现场施工条件

### （1）场地空间限制

狭窄作业面：15栋楼密集分布，拆除楼栋（1#、2#、3#、4#）与保留建筑间距较小，塔吊布置需采用“覆盖半径优化+多机协同”策略，避免碰撞（参考《塔式起重机安全规程》GB/T 5144-2022）。

材料堆场不足：建筑垃圾临时堆场需设置在空地，采用模块化集装箱分类存放，提升周转效率。

### （2）多功能区域保护要求

商铺及会所运营保障：1#~4#楼首层商铺需保留，施工期间搭设防护棚（抗冲击等级 $\geq \text{IK10}$ ），并采用非爆破静力切割工艺。

住宅区人员管控：未拆除楼层可能有居民滞留，需设置硬质隔离带（高度 $\geq 2.5\text{m}$ ）及24小时监控系统，确保人机分离。

### （3）交通与物流挑战

城区运输限制：景洪市区对重型车辆（如混凝土泵车）通行有时段管制，需采用“夜间运输+场内二次倒运”模式。

垂直运输压力：拆除楼栋无施工电梯可用，需在屋面预设悬挑式卸料平台（承载力 $\geq 3\text{t}$ ），配合汽车吊进行材料转运<sup>[3]</sup>。

## 3. 适应性施工策略

### （1）环境响应技术

气候适应性：雨季施工采用快硬型喷射混凝土（初凝时间 $\leq 15\text{min}$ ），避免雨水冲刷；高温时段作业面覆盖遮阳网，降低混凝土温升。

振动主动控制：安装液压阻尼器于地下室剪力墙，将拆除振动能量衰减40%以上。

### （2）空间高效利用

BIM+无人机协同：通过无人机倾斜摄影生成实景模型，与BIM拆除模拟叠加，优化机械行走路线及堆场布局。

折叠式施工平台：研发可伸缩钢架平台，适应不同楼层拆除高度需求，减少搭拆时间50%。

### （3）既有结构利用

原位加固技术：保留原地下室剪力墙作为临时支撑体，植入自锁式锚杆（抗拔力 $\geq 150\text{kN}$ ）增强稳定性。

废料循环利用：建筑垃圾经移动破碎站处理为再生骨料（粒径分级5-31.5mm），直接用于新建屋顶层垫层，节约外运成本30%。

## （三）项目重点、难点及对策分析

### 1. 工程重点分析

#### （1）结构安全与稳定性保障

重点：建筑已使用20年，存在混凝土碳化（深度可能达10-

15mm）、钢筋锈蚀（局部锈蚀率或超25%）等老化问题，拆除过程中需确保剩余结构的稳定性，尤其是抗震设防烈度8度要求下的整体性。

对策：采用BIM逆向建模技术，结合三维激光扫描，精准定位结构损伤区域，制定“分层分段”拆除顺序。对关键受力构件（如剪力墙、框架梁）预加碳纤维临时支撑，确保拆除过程中荷载平稳转移。

### （2）邻近设施及环境保护

重点：项目位于城区，1#~4#楼地下室紧邻周边建筑物，拆除振动、粉尘及噪音需严格管控。

对策：采用金刚石绳锯切割技术，控制振动速度 $\leq 0.8\text{mm/s}$ （参考《建筑基坑工程监测标准》）。设置装配式隔音屏障（降噪20dB以上）和雾炮抑尘系统，实时监测PM2.5浓度。

### （3）多功能区域协同保护

重点：1#~4#楼首层为车库及商铺，需保护商业设施正常运营，同时避免会所（2层）结构受损。

对策：对商铺区域采用“微扰动”拆除工艺，保留承重柱并增设临时钢支撑。利用无人机红外热成像技术监测会所楼板裂缝发展，及时注浆修复。

## 2. 工程难点及突破策略

### （1）电梯井道改造与加固

难点：原电梯井道拆除后，新电梯安装需适应老旧结构，且抗震连接节点复杂。

突破策略：设计“井道内嵌式钢结构框架”，与原有混凝土结构通过化学锚栓连接（抗拉强度 $\geq 8.8$ 级）。

采用隔震支座技术，提升新电梯井道的抗震性能（满足GB50011-2010要求）。

### （2）历史建筑保护性修复

难点：2004年建筑外墙饰面（如瓷砖、涂料）需保留，但基层空鼓率可能高达30%。

突破策略：开发“真空吸附式饰面剥离技术”，剥离完整率提升至90%。采用高强聚合物砂浆修复空鼓基层，抗压强度 $\geq 40\text{MPa}$ 。

## 3. 特色技术创新

### （1）绿色拆除技术

建筑垃圾分选后，75%废混凝土破碎为再生骨料（粒径5-20mm），用于新建屋顶层垫层，节约天然石材用量2000m<sup>3</sup>。

### （2）模块化拆装工艺

设计可拆卸式钢桁架支撑系统，实现“拆除-加固-恢复”工序无缝衔接，工期压缩20%。

## （四）施工部署

### 1. 分阶段施工策略

180天（含雨季及高温天气应对缓冲期）。

第一阶段（1-30天）：优先拆除1#、2#楼地上10层至8层，保留首层商铺及会所，同步对3#、4#楼地下室进行注浆止水加固。

第二阶段（31-60天）：拆除3#、4#楼地上10层至8层，修

复保留结构，并启动屋面加固及消防改造。

第三阶段（61-90天）：安装新电梯井道钢结构，实施再生骨料屋顶层恢复。

## 2. 核心施工方案

### （1）保护性拆除工艺

分层切割：自上而下每2层为一单元，采用金刚石绳锯分块切割（单块重量 $\leq 8t$ ），液压夹具吊运。

动态支撑：在拆除楼层下方设置可调式碳纤维支柱（承载力 $500kN/m^2$ ），随拆除进度逐层下移。

### （2）结构修复与加固

梁柱节点加固：对锈蚀率 $> 15\%$ 的框架梁，采用“预应力碳板（厚度 $1.2mm$ ）+喷射钢纤维混凝土（厚度 $50mm$ ）”复合加固。

屋面恢复：利用再生骨料混凝土（强度C30）浇筑 $200mm$ 厚结构层，内置耐候防水卷材（SBS改性沥青型）。

### （3）新电梯井道施工

钢结构安装：设计井道内嵌H型钢框架（截面 $400 \times 200 \times 8 \times 13mm$ ），通过化学锚栓（M24，埋深 $300mm$ ）与原结构连接。

抗震优化：在井道顶部安装黏滞阻尼器（阻尼系数 $1500kN \cdot s/m$ ），满足8度抗震设防需求。

## 3. 创新技术应用

### （1）数字孪生管控

将BIM模型与传感器数据联动，实时预警结构应力超限（阈值设为设计值的 $80\%$ ）。

### （2）无人化施工

采用爬壁机器人对高空外墙进行裂缝注浆（定位精度 $\pm 2mm$ ），减少高空作业风险。

## 四、结语

本文以“冠城·揽翠华庭项目”超高保护性拆除、修复与加固工程为研究对象，系统探讨了城市更新背景下老旧高层建筑改造的技术路径与管理模式。通过逆向建模精准定位结构缺陷、微振动拆除工艺控制环境风险、再生骨料循环利用实现绿色施工，形成了一套“诊断-拆改-再生”的全生命周期技术体系。项目实践表明，BIM逆向建模技术使隐蔽缺陷识别效率提升 $40\%$ ，金刚石绳锯切割工艺将振动控制指标优于国家标准 $50\%$ ，再生骨料利用率达 $75\%$ ，有效破解了老旧建筑改造中的安全、环保与资源矛盾。

然而，研究仍存在一定局限性：其一，热带多雨气候对露天施工的影响需更精细化应对；其二，复杂产权结构下的居民协调机制尚未深度探讨。未来可结合人工智能与区块链技术，开发城市更新项目的多方协同管理平台，进一步推动城市存量空间的高质量再生。

本项目的成功实施，为西双版纳乃至全国类似城市更新工程提供了可复制的技术范式，也为建筑业绿色低碳转型贡献了实践案例。

## 参考文献

- [1] 中诚建（福建）建筑设计研究院有限公司. 冠城·揽翠华庭项目可行性研究报告[R]. 云南：中诚建（福建）建筑设计研究院有限公司，2002：9-10.
- [2] 中华人民共和国建设部 国家质量监督检验检疫总局联合发布. 建筑施工组织设计规范：GB/T 50502-2009[Z]. 2009—05—13.
- [3] 锅炉房施工组织设计[Z]. 《网络（<https://ishare.iask.com>）》. 2023.

# 数字赋能“一带一路”背景下“走出去”企业路桥施工类培训课程建设研究

胡丽娟, 王尹鹤, 唐晓松

重庆公共运输职业学院, 重庆 402247

DOI:10.61369/ERA.2025090010

**摘 要 :** 在“一带一路”倡议持续推进的背景下, 中国路桥施工企业面临国际化竞争与高质量发展的双重挑战。数字技术的应用为提升企业国际竞争力提供了新路径, 而培训课程体系的创新则是实现人才赋能的关键。本文结合数字化技术与国际工程需求, 探讨路桥施工类培训课程的建设路径, 提出以“数字技术 + 标准 + 文化融合”为核心的课程体系框架, 旨在为“走出去”企业培养兼具技术能力、跨文化沟通能力与数字化管理能力的复合型人才。

**关 键 词 :** “一带一路”; 走出去企业; 数字赋能; 路桥施工课程培训

## Research on the Construction of Road and Bridge Construction Training Courses for "Going Global" Enterprises under the Background of Digital Empowerment of the "Belt and Road" Initiative

Hu Lijuan, Wang Yinhe, Tang Xiaosong

Chongqing Vocational College of Public Transportation, Chongqing 402247

**Abstract :** In the context of the continuous advancement of the "Belt and Road" initiative, Chinese road and bridge construction enterprises are facing dual challenges of international competition and high-quality development. The application of digital technology provides a new path to enhance the international competitiveness of enterprises, and the innovation of training course systems is the key to achieving talent empowerment. This article combines digital technology with international engineering needs, explores the construction path of road and bridge construction training courses, and proposes a curriculum system framework with "digital technology + standards + cultural integration" as the core. The aim is to cultivate compound talents with technical ability, cross-cultural communication skills, and digital management capabilities for "going global" enterprises.

**Keywords :** "Belt and Road"; "going global" enterprises; digital empowerment; road and bridge construction course training

### 一、研究背景与意义

#### (一) 研究背景

“一带一路”沿线国家对交通基础设施需求激增, 路桥施工企业“走出去”成为新时尚和新机遇。截至2024年底, 重庆企业境外工程业务已覆盖全球90个国家和地区, 在建项目达201个, 累计完工项目789个, 涉及工业建设、一般建筑、电力工程、交通设施等10个领域。特别是重庆对外经贸集团在境外承担了大量的交通基础设施工程承建任务, 2024年重庆对外经贸集团新签海外工程合同金额同比增长46.2%, 存在量大面广的用工需求和员工培训需求<sup>[1]</sup>。

“走出去”企业要想在国外投入生产势必需要大量施工班组人员, 为降低劳动力成本, 企业大多招聘项目所在地的当地人员成为一线施工班组员工。境外承包工程项目主要分布在经济欠发达的非洲、南亚等地区<sup>[1]</sup>, 这些地区人们工作的目标是填饱肚子, 大多从事基本体力劳作, 没有技术与技能科研, 更不会主动参加培训, 学习技术锻炼技能。然而, 为了建设工程的质量保障, “走出去”企业十分有必要对项目所在地员工进行工作内容技术培训。企业跨国运营面临技术标准差异、跨文化管理能力不足等问题, 亟须数字化能力与国际化素养兼备的人才。

如何进行高效的培训, 短时间取得有效培训结果, 让当地员工尽快掌握工程项目所需的技术技能是十分重要的, 对此展开研

基金项目:

2023年度重庆公共运输职业学院科研创新团队一虚拟仿真技术工程应用创新团队;

重庆市高等职业技术教育研究会2024年科研项目《“一带一路”背景下“走出去”企业项目所在地人才培养体系研究》(项目编号: 2024 - 81);

重庆市教育委员会科学技术项目《建筑地基基础载荷试验虚拟仿真实操系统研发》(项目编号: KJQN202405804)。

作者简介: 胡丽娟(1985—), 女, 汉族, 湖北武穴人, 硕士研究生, 副教授, 主要研究方向为公路工程及高职教育研究。

究也非常有意义。

## （二）研究意义

由于“一带一路”沿线国家地理环境复杂，施工标准多样，如东南亚需应对台风、中东需解决高温沙漠化问题。传统培训模式难以覆盖此类差异化需求，需借助数字技术（如 BIM、GIS）模拟多场景施工环境，提升培训的针对性。国内智慧工地、AI 施工管理等技术已在实际项目中广泛应用，可借鉴此类经验融入数字化工具操作，确保课程培训与施工现场接轨。

### 1. 促使培训提质增效

新型信息技术的出现，可以帮助解决现有教育中存在的一些棘手问题，如理论深奥、原理抽象、实践受限等问题。新型技术的运用能够为“走出去”企业当地员工培养项目提供便利，科技与教育双向赋能思维和智能技术，便于更好地进行培训课程改革，提升培训效果，实现培训提质增效<sup>[2]</sup>。

### 2. 激发员工自主学习兴趣

传统教学资源以 PPT、视频、动画为主，所有学习者都是集中一起学习，受培训时间的限制，教师很难根据学习者的实际情况精准进行教学和培训。新型的数字化技术则可以建立各种个性化数字资源，新颖的资源能够吸引学习者关注，激发其学习兴趣，并且在线学习不再受传统教育的时间和空间限制，可以随时随地利用碎片化时间学习<sup>[3]</sup>，学习者自由度更高，结合一定的考核约束可以保证学习者的学习效果，真正实现了以员工为主的教育模式。此外，数字化技术的运用，使得员工学习轨迹得以充分记录，不仅可以驱使员工认真参与、主动思考，还能快速发现学习能力突出者和技术掌握牢靠者，利于优先选用或委以重任。

### 3. 满足员工梯度化需求

梯度化教学是因材施教的体现，这一思想是孔子提出的重要的教学思想和教学方法，影响人才培养质量。在现实教育中，教学过程梯度化教学在教育过程中较难落实。数字化赋能教育领域新型动能，教师可以将课程资源更加细化、片段化，利于学习者短时间学习。并且各种类型的教学平台能够全程记录学习过程，并提供“有问必答”的服务。从另一角度来说，也便于教师根据学习者课程学习记录，了解每一个学习者学习情况，有针对性地一对一差异化辅导，提升培训效果。

### 4. 实现“走出去”企业资源共建共享

“走出去”企业需要考虑项目所在地的标准，不同国家的标准体系不尽相同，现有的课程建设一般瞄准某一国家需求进行设计多国共建共享课程资源具有居多如标准不同等带来的困难。数字技术赋能教学资源，让跨国的同类课程共建共享变成现实，有利于“走出去”企业不同项目或企业之间互利互惠的通用的员工技能培训的开展。

## 二、数字化赋能路桥施工类培训课程建设路径研究

### （一）数字化融合培训课程建设的思考

在“一带一路”倡议推动下，中国企业海外路桥施工项目日益增多，但面临技术标准差异、跨文化管理能力不足、本地化技

能培训缺失等问题。基于数字化技术不断融入社会的方方面面，可以考虑数字化赋能路桥施工类课程国际化建设。数字赋能国际课程建设的路径如下：

#### 1. 价值引领，提升综合能力

首先，重视国外员工对中华文化尊重的思想教育，寻找专业知识与中华文化的契合点。输入我国的传统文化，弘扬我国的文明价值，实现海外员工愿意学习中国标准的目标。其次，夯实基础知识，重视路桥结构内容的讲解，使员工能解读施工图纸，工作中我自主思考。最后，重视实践能力培养，重视员工成长型思维培养，能用相关知识分析施工问题、通过虚拟的角色操作、综合演练、推演等教学方法提升员工综合能力。

#### 2. 立体资源支撑，凸显课程特色

数字化赋能课程建设，学习的边界被打破，数字教育资源的可获得性、优质性等更为重要。施工类课程建设要打造立体优质数字化资源，方便员工进行自主、交互、协作式学习。

首先，数字赋能课程资源的时效性。及时更新培训过程需要使用的规范标准其次，应多方协作，政府、培训学校和“走出去”应合作，突出资源特色。也可加强互动，及时反馈培训成果，优化培训过程。

#### 3. 混合式赋能教学过程，提升教学质量

数字赋能教学形式多样，充分利用信息技术开展培训课程建设，使培训课程有趣有用。以任务为依托，根据员工意愿和能力不同差异化设计培训过程，激发员工学习主动性。

### （二）数字化融合培训课程建设的路径

数字化赋能成为破解这一难题的关键路径，可通过以下路径构建适应国际化需求的路桥施工课程体系：

#### 1. 数字赋能，打造新时代的新型培训模式

路桥施工类培训课程整合慕课、国家优质在线课程资源等数字化教学资源，依靠数字化教学平台全程详细的学习记录，呈现学习者可视化学习的过程，秉持“想学就学、有问必答”的课程建设原则，实现了数字课程资源的开放与共学，打造基于“数字基建”时代的新型培训生态<sup>[4]</sup>。

#### 2. 开展混合式教学，创新培训策略路径

培训与学校教学有着共同的地方就是要做好培训课堂设计，培训教师应寻找合适的科学的培训方法开展“线上+线下”混合式培训，借助 AI 自然语言处理软件、数字化评价系统，通过情景导入、情景体验、知识检测、归纳总结、实践突破吸引员工学习兴趣高效达成学习目标<sup>[4]</sup>。

#### 3. 以“技术+场景”为核心，构建模块化课程体系

数字化施工技术培训：将 BIM 建模、数字孪生平台操作、AI 质检（如桥梁外观智能检测系统）纳入课程，提升员工对智能设备的操作能力。

智能装备应用：引入滑移式无轨挂篮、全自动装载机等设备操作课程，强调设备的高效性与安全性。

#### 4. 场景化实训设计

模拟极端环境施工：通过三维数字孪生平台模拟高温、沙尘暴等“一带一路”沿线典型施工场景，训练员工应对复杂环境的



能力。

跨文化协作演练：嵌入多语言沟通、本地化合规（如数据主权法规）等模块，采取“中文 + 职业技能”模式，强化跨文化适应能力。

“中文 + 职业技能”人才培养模式的实施是企业“走出去”的重要动力，让更多的国外劳动者接受“中文 + 职业技能”的培训，不仅可以让当地员工认同企业文化，还能全面提升当地员工综合素质，保证企业海外项目建设质量，促进中资企业“走出去”的进一步发展，加快当地经济发展<sup>[5]</sup>。

#### 5. 评估与迭代：数据驱动的动态优化机制

采用多维度指标（如技术应用率、项目工期缩短比例、安全事故率）评估培训效果，基于员工反馈与项目数据，通过 AI 算法优化课程结构与内容，形成“培训 - 实践 - 反馈 - 升级”闭环。

### 三、数字赋能路桥施工培训课程体系构建

#### （一）课程体系设计

重庆公共运输职业学院根据“走出去”企业的需求采取“企业点餐，院校配菜”的模式，融合模板工、测量工、结构工等工种的技能需求，设置的以岗位职业技能为导向的课程体系如图1所示：

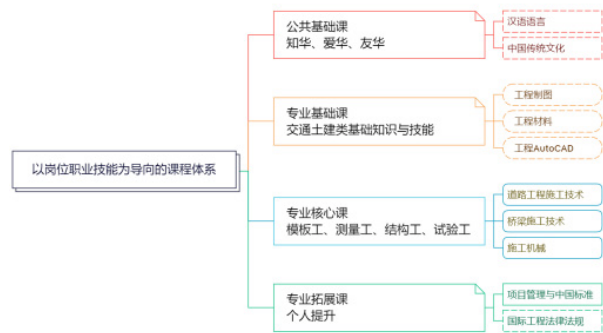


图1 “走出去”企业海外人才培养课程体系

上图中虚线框内的课程还处于架构阶段，实线框中的课程在教改科研项目的建设中基本成熟已经上线。

本课程体系的研究期望能助力企业走向国际化，开展国际工程承包与合作业务，达到输出中国标准的目的。

#### （二）课程内容

技术模块：专业课程中涵盖 BIM 建模、施工大数据分析等核心技能，结合案例教学。

国际标准模块：纳入 FIDIC 条款、国际工程合规管理等内容，强化对沿线国家法律与标准的认知。

文化融合模块：增设跨文化沟通、国际项目管理及语言培训，培养“知华爱华友华”的国际化人才。

#### （三）教学方法创新

虚实结合：利用 VR/AR 技术模拟施工现场风险场景（如高空作业、地质灾害），增强应急处理能力。

平台化学习：信息技术发展到今天，已经为我们教育者提供

了很多线上教学平台。教育者应根据自己的教学培训内容、学习者的国家语言应用等具体情况再结合需要使用的功能、场景等选择合适的专业平台<sup>[2]</sup>。提升教学效果，创新教学方法。

### 四、数字赋能路桥施工培训课程建设的挑战与对策

#### （一）挑战

数字技术为路桥施工培训带来了效率提升与模式创新，但在实际应用中仍面临多维度挑战。

##### 1. 技术标准与数据互通难题

###### 1) 技术标准碎片化

不同国家或地区的施工标准差异显著，例如“一带一路”沿线国家在数据主权法规、施工规范等方面存在分歧，导致培训课程需频繁调整适配。

企业需同时掌握国内 BIM、数字孪生等技术与国际标准（如欧美桥梁设计规范），增加了课程设计的复杂性。

###### 2) 网络基础设施薄弱成互通壁垒

部分沿线国家网络基础设施薄弱，当地人工智能手机限制在线培训的普及，以及施工全流程数据（如 BIM 模型、物联网传感器数据）分散在不同系统中，缺乏统一的数据载体。

##### 2. 培训资源与师资力量不足

###### （1）数字化培训资源开发成本高

高质量的虚拟仿真课程（如桥梁施工三维动画）需投入大量资金与时间，定制化数字课程依赖外部技术支持，成本压力显著。

###### （2）复合型师资短缺

既懂路桥施工技术又精通数字化，还要懂专业英语具备跨文化沟通能力的复合型培训教师十分稀缺。

##### 3. 技术迭代与员工接受度矛盾

###### （1）技术更新速度超培训周期

数字技术（如 AI 质检、无人施工设备）迭代迅速，课程内容易滞后。

###### （2）员工数字素养参差不齐

“一带一路”沿线的经济欠发达的非洲、南亚等国家，一方面员工本身素质不高，对智能设备操作存在抵触心理，使得数字化的功能大打折扣。另一方面因语言障碍或教育背景差异等原因难以快速掌握复杂技术（如 BIM 建模、数字孪生平台操作）。

##### 4. 实效评估与可持续发展困境

###### （1）培训效果量化困难

现有评估多依赖定性指标（如员工满意度），缺乏与施工质量、工期缩短等实际效益的直接关联。

###### （2）可持续运营机制缺失

政企校协同的培训生态尚未成熟。海外项目中，本地化技术迁移需持续投入，但企业常因成本压力缩减后期维护与进阶培训。

##### 5. 文化差异

需避免“技术输出”的单向思维，注重本土化内容设计。

### （二）对策

面对上述的建设挑战，应对挑战的对策建议如下：

#### 1. 分级培训 + 多版本教学资源

针对网络条件差异，开发离线版培训工具包与移动端轻量化应用。针对“走出去”企业项目所在地员工培训应考虑到多语言版本教学资源，员工根据自己的语言习惯自主选择教学资源。

#### 2. 跨专业组建培训讲师团

培训教师团主要以道桥专业既有工程经验又有丰富教学经验的10年以上教龄的中青年教师加专业英语八级以上英语教师组成，若涉及像斯瓦西与这样的小语种则以模块服务的形式加入团队仅作翻译工作。

#### 3. 本土化合作

与当地高校共建培训中心，建立联合实践模式，给线上线下混合式教学提供便利。

### 五、结论与展望

数字赋能的培训课程建设是“走出去”企业实现可持续发展的核心策略。未来需进一步探索 AI 的深度应用，构建“培训 - 实践 - 反馈”闭环体系，同时加强与国际组织的合作，推动“一带一路”沿线国家路桥施工标准的协同创新。通过技术创新与本地化策略，中国路桥类企业正成为“数字丝路”建设的重要推动力。

### 参考文献

- [1] 冉春芳. 重庆市国际化特色（高校）建设“走出去”企业当地人才培养网络体系建设——子项“走出去”企业国（境）外培训需求调研报告 [R].
- [2] 吴珍彩. 数字化赋能国际贸易实务课程建设研究 [J]. 山西青年, 2024, (10): 8-11.
- [3] 郭晓溶. 基于 QQ 平台的移动学习方式探究——以开放教育为例 [J]. 理论观察, 2022(3): 174-176.
- [4] 梁娟. 数字赋能高职服装外贸类课程体系构建研究与实践——以服装英语为例 [J]. 现代职业教育, 2024, (20): 109-112.
- [5] 黄璐璐. “中文 + 职业技能”人才培养模式研究——以吉林铁道职业技术学院—中泰詹天佑学院为例 [D]. 长春：长春大学国际教育学院, 2022.

# 测绘技术在存量房不动产测绘服务中的创新与实践

关杰良

城乡院（广州）有限公司，广东 广州 511300

DOI:10.61369/ERA.2025090017

**摘 要：** 存量房不动产测绘服务有多种模式特征。包括传统技术的应用瓶颈，新型测绘装备集成应用优势，智能数据处理突破，云平台协同处理机制，智能算法模块提升准确性和效率，区块链存证保障成果，各地实践体现成效，创新带来效益，也存在不足，应建立协同创新机制。

**关 键 词：** 存量房测绘；技术创新；协同创新

## Innovation and Practice of Surveying Technology in Real Estate Surveying Service of Existing Housing

Guan Jieliang

Urban and Rural Institute (Guangzhou) Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 511300

**Abstract：** The real estate surveying services for existing properties have multiple characteristics. These include the application bottlenecks of traditional technologies, the advantages of integrating new surveying equipment, breakthroughs in intelligent data processing, collaborative handling mechanisms on cloud platforms, improvements in accuracy and efficiency through smart algorithm modules, blockchain certification to ensure results, practical achievements in various regions, and benefits brought by innovation. However, there are also shortcomings, and a collaborative innovation mechanism should be established.

**Keywords：** inventory housing surveying; technological innovation; collaborative innovation

### 引言

存量房不动产测绘服务在当前房地产市场环境下具有重要意义。随着我国对房地产市场监管力度的不断加强，如2020年发布的相关房地产调控政策，旨在稳定市场价格、防止房地产泡沫产生等，这对存量房不动产测绘服务提出了更高要求。该服务涵盖产权调查、分层分户测量等多个环节，且面临历史数据整合困难、传统技术应用瓶颈等问题。同时，新型测绘装备集成应用、智能数据处理、云平台协同处理等技术的发展为其带来了机遇。在此背景下，探讨测绘技术创新与实践以及如何更好地推动其应用，解决现存问题，成为研究的关键。

### 一、存量房不动产测绘服务现状分析

#### （一）行业服务模式特征

存量房不动产测绘服务呈现出多方面的行业服务模式特征。在产权调查环节，需依据相关法律法规和技术标准，对房屋产权归属等进行详细核查<sup>[1]</sup>。分层分户测量则要求高精度的测量技术和规范操作流程，以确保测量数据的准确性和完整性。成果审核备案过程中，严格的审核机制是保障测绘成果质量的关键。同时，历史数据整合与动态更新机制面临诸多技术难点。历史数据可能存在格式不统一、信息缺失等问题，整合过程复杂且耗时。动态更新则需要及时获取房屋变更信息，确保数据的时效性，这对测绘机构的信息收集和处理能力提出了较高要求。

#### （二）传统技术应用瓶颈

全站仪测量在复杂建筑形态下存在适用性限制，其测量精度

易受环境因素影响，如在高层建筑密集区或地形复杂区域，信号遮挡可能导致测量数据不准确<sup>[2]</sup>。RTK技术虽具有实时定位的优势，但在一些特殊环境下，如信号干扰强烈的区域，也难以保证高精度测量。手工制图模式更是存在诸多问题，不仅制图效率低下，而且在数据处理过程中容易出现人为误差，随着测绘工作的推进，误差不断累积，严重影响测绘成果的质量<sup>[3]</sup>。这些传统技术的应用瓶颈，制约了存量房不动产测绘服务的高效开展。

### 二、测绘技术体系创新路径

#### （一）新型测绘装备集成应用

构建三维激光扫描与无人机倾斜摄影的协同作业体系是新型测绘装备集成应用的重要方面。三维激光扫描能够精确获取目标的三维空间信息，在复杂环境和精细结构测量中具有优势<sup>[4]</sup>。无人

机倾斜摄影则可快速获取大面积的影像数据，提供丰富的地物纹理信息。两者协同，可实现优势互补，提高测绘效率和精度。移动测量系统在异形结构房屋数据采集中也展现出独特技术优势。它能够灵活适应异形结构的复杂空间形态，快速获取房屋的几何形状、尺寸等关键数据，为存量房不动产测绘提供更准确、全面的数据支持。

### （二）智能数据处理算法突破

开发基于点云数据的自动化建模算法是智能数据处理的关键突破之一。通过先进的算法，可以高效地从点云数据中提取出物体的几何形状和空间位置信息，实现三维模型的自动构建<sup>[4]</sup>。这在存量房不动产测绘中具有重要意义，能够快速准确地获取房屋的三维结构信息，为后续的测绘服务提供基础数据支持。同时，研究深度学习技术在历史图纸矢量化处理中的创新应用也至关重要。深度学习算法可以自动识别图纸中的各种图形元素，并将其转化为矢量数据，提高历史图纸处理的效率和精度，为不动产测绘服务的数字化转型提供有力保障。

## 三、内业处理智能化实践

### （一）不动产数据管理平台建设

#### 1. BIM 技术融合应用

通过建立 BIM 模型与不动产单元代码的映射关系，可实现三维产权体的可视化表达与属性关联。利用先进的算法和数据处理技术，将 BIM 模型中的几何信息和属性数据与不动产单元代码进行精准匹配<sup>[5]</sup>。这不仅能在三维空间中直观呈现产权体的形态和位置，还能方便地查询和管理相关属性信息。例如，用户可以通过点击三维模型中的某个产权体，快速获取其面积、用途、权属等详细属性。这种可视化表达和属性关联为不动产管理提供了更高效、准确的手段，有助于提高不动产数据的利用价值和管理效率。

#### 2. 云平台协同处理机制

在云平台协同处理机制方面，设计分布式计算架构下的多源数据融合方案至关重要。通过该方案，可整合来自不同数据源的数据，提高数据的完整性和准确性<sup>[6]</sup>。同时，构建跨部门联审联批的云端 workflow，实现各部门之间的高效协作。在工作流中，设置明确的审批节点和流程，确保数据审核的规范性和严谨性。利用云平台的优势，实现数据的实时共享和交互，避免数据孤岛的出现。这不仅提高了工作效率，还能及时发现和解决问题，保障不动产数据管理的科学性和有效性。

### （二）质量管控体系优化

#### 1. 自动化质检工具开发

研发拓扑关系校验、面积逻辑自检等智能算法模块，这些模块能有效提升内业处理的准确性和效率。拓扑关系校验模块可对测绘数据中的空间关系进行精确验证，确保图形的拓扑结构正确<sup>[7]</sup>。面积逻辑自检模块则依据相关规范和算法，对房屋面积计算进行自动检查，避免人工计算错误。同时，建立异常数据预警机制，当数据出现不符合逻辑或规范的情况时，能够及时发出警

报。这有助于及时发现和纠正错误，提高测绘成果的质量，保障存量房不动产测绘服务的可靠性和精准性。

#### 2. 区块链存证技术应用

测绘成果的准确性和可靠性至关重要。通过设计区块链存证模型，可对测绘成果进行有效存证。区块链技术的分布式账本特性，保证了数据的不可篡改，使得每一次数据修改都能留痕，过程具有可追溯性<sup>[8]</sup>。这为测绘成果的质量管控提供了强大的技术支撑。在存量房不动产测绘服务中，利用区块链存证技术，无论是房屋面积的测量数据，还是相关属性信息的记录，都能被准确、安全地存储。一旦出现争议或需要核查数据来源时，可快速追溯到原始数据和修改记录，从而保障各方的合法权益，提升测绘服务的公信力和质量。

## 四、创新技术实践成效评估

### （一）典型城市应用案例分析

#### 1. 北京老旧小区改造项目

在北京老旧小区改造项目中，三维建模技术展现出显著成效。通过该技术对老旧小区进行精准建模，能够清晰识别违建情况。例如，对于一些私自搭建的建筑物，三维模型可以准确呈现其位置、面积和结构等关键信息，为违建认定提供了有力依据<sup>[9]</sup>。同时，在产权界定方面，三维建模技术可以详细划分不同产权主体的空间范围，避免因界限不清导致的产权纠纷。它能够还原小区建筑的原始状态以及后续的改建情况，帮助相关部门准确确定各业主的产权边界，保障了居民的合法权益，提升了老旧小区改造项目的科学性和公正性。

#### 2. 上海历史建筑保护工程

上海在历史建筑保护工程中，积极应用创新测绘技术。通过点云数据处理技术，对复杂装饰构件的测量精度有了显著提升。点云数据能够精确捕捉建筑构件的细节信息，有效克服了传统测量方法在复杂结构和装饰部分的局限性<sup>[10]</sup>。这不仅为历史建筑的精确测绘提供了可能，也为后续的保护和修复工作提供了更准确的数据支持。在实际应用中，该技术帮助相关人员更好地了解建筑的原始风貌和结构特征，为制定科学合理的保护方案奠定了坚实基础。

### （二）经济技术效益量化评估

#### 1. 作业成本对比分析

测绘技术创新在存量房不动产测绘服务中带来显著的经济效益。在作业成本对比分析方面，人力成本显著降低。新技术应用前，人工测量、绘图、数据处理等环节需大量人力投入，且工作效率有限。应用后，自动化测量设备及智能软件的使用，减少了人工操作步骤，人员需求大幅下降。时间成本也得到有效控制，传统方法可能因复杂的测量和数据处理流程导致项目周期较长，新技术凭借高效的测量和快速的数据处理能力，大大缩短了作业时间。此外，设备成本虽有一定投入，但从长期来看，综合人力和时间成本的降低，整体经济技术效益得到明显提升。



## 2. 数据更新效率提升

在广州市试点项目中，对自动化处理技术在存量房不动产测绘服务的数据更新效率提升方面进行了验证。通过该技术的应用，大幅压缩了数据更新周期。以往人工处理数据的方式存在效率低下、易出错等问题，而自动化处理技术能够快速、准确地处理大量数据。它减少了人工干预环节，降低了因人为因素导致的错误率。在实际应用中，能够及时获取最新的测绘数据，为不动产管理提供了更准确、更及时的数据支持，有效提升了存量房不动产测绘服务的数据更新效率，满足了市场对不动产信息及时性和准确性的需求。

### （三）社会综合效益研究

#### 1. 政府决策支持能力

时空大数据平台为房地产市场监管提供了有力的政策支撑。通过整合海量的测绘数据，包括存量房的位置、面积、产权等信息，政府能够实时了解房地产市场的动态。这有助于制定合理的房地产政策，如限购、限贷等，以稳定市场价格，防止房地产泡沫的产生。同时，平台能够对房地产市场的趋势进行预测，为政府决策提供前瞻性的建议。例如，通过分析不同区域存量房的交易情况和价格走势，政府可以提前规划土地供应和城市建设，促进房地产市场的健康发展，提高政府对房地产市场的监管能力和决策科学性。

#### 2. 公众服务满意度调查

基于深圳市的问卷调查数据，对电子产权附图服务的社会接

受度进行分析。调查涵盖多个方面，包括公众对电子产权附图准确性的认可度，结果显示大部分受访者认为其准确性较高，能够满足日常使用需求。在便捷性方面，多数人表示电子产权附图便于获取和查看，节省了时间和精力。同时，对于其在房产交易过程中的作用，受访者也给予了积极评价，认为它有助于提高交易效率和透明度。然而，也有部分受访者提出了一些改进建议，如进一步优化界面设计，提高加载速度等。通过此次调查，较为全面地了解了电子产权附图服务的社会接受度情况，为后续服务的改进和完善提供了参考依据。

## 五、总结

测绘技术在存量房不动产测绘服务中经历了创新与实践。技术创新重构了不动产测绘服务体系，然而当前在数据安全和标准统一等方面仍有不足。5G+AI 技术为智能测绘带来了发展机遇，其驱动下的智能测绘前景广阔。为更好地推动测绘技术在存量房不动产测绘服务中的应用，应建立产学研用协同创新机制。通过这种机制，整合各方资源，加强技术研发与应用的结合，提高测绘服务的质量和效率。同时，注重解决数据安全和标准统一问题，保障测绘服务的可靠性和规范性，以适应存量房不动产测绘服务不断发展的需求。

## 参考文献

- [1] 阿布都艾尼·阿布都克热木. 测绘新技术在农村不动产籍调查中的应用研究 [D]. 长安大学, 2018.
- [2] 崔诏. 农村区域三维不动产籍测绘技术研究与工程实践 [D]. 山东科技大学, 2021.
- [3] 张慧莹. 倾斜摄影测量在房地不动产测绘中的应用研究 [D]. 江苏海洋大学, 2020.
- [4] 聂庆斌. 房产测绘监理制度探索与创新 [D]. 山东大学, 2019.
- [5] 赵向莉. 现代测绘技术在文物保护中的应用 [D]. 郑州大学, 2014.
- [6] 耿中举. 测绘技术在不动产测绘中的实践应用 [J]. 中国高新区, 2019(18):53.
- [7] 杜俊. GPS 测绘技术在建筑工程项目中的应用探析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(8):636.
- [8] 陆鑫. 测绘新技术在不动产测绘中的实践与应用 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(23):96-98.
- [9] 余海斌. 现代测绘技术在测绘工程中的应用与技术创新 [J]. 房地产导刊, 2018(3):25.
- [10] 谢春莲. 现代测绘技术在测绘工程中的应用与技术创新研究 [J]. 房地产导刊, 2013(16):115-115.

# 建筑工程项目管理中的造价控制难点与创新解决路径探索

陈碧霞

广东郡禧建筑工程有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025090018

**摘要：** 建筑工程项目造价控制面临设计变更、材料价格波动等难题，多主体协同管理也存在困境。介绍了全生命周期造价管理等理论，阐述了5D-BIM等技术在造价控制中的应用，还提出了如LSTM神经网络预测模型等创新解决方案。

**关键词：** 建筑工程；造价控制；创新解决方案

## Exploration of Cost Control Difficulties and Innovative Solutions in Construction Project Management

Chen Bixia

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

**Abstract：** Cost control in construction projects faces challenges such as design changes and material price fluctuations, as well as difficulties in multi-party collaborative management. This article introduces the theory of whole life cycle cost management, elaborates on the application of technologies such as 5D-BIM in cost control, and proposes innovative solutions such as LSTM neural network prediction models.

**Keywords：** construction engineering; cost control; innovative solutions

### 引言

建筑工程项目造价控制是一个复杂且关键的领域，受到多种因素的综合影响。随着建筑行业的发展以及相关政策的不断完善，如2020年发布的《工程造价改革工作方案》强调要改进工程计价依据发布机制等，对造价控制提出了更高要求。设计变更、材料价格波动、施工条件变化以及多主体协同管理困境等都给造价控制带来挑战。同时，传统造价管理模式的缺陷以及市场环境和政策因素的相互交织，进一步加剧了控制的复杂性。在此背景下，深入研究造价控制的关键难点并探索创新解决方案具有重要的现实意义。

### 一、建筑工程项目造价控制现实难点分析

#### （一）动态成本预测与控制难题

在建筑工程项目造价控制中，动态成本预测与控制面临诸多难题。工程项目全生命周期中，设计变更频繁发生，这会导致造价预测出现偏差，因为原有的造价预算是基于初始设计方案，设计一旦改变，相关成本也会随之改变<sup>[1]</sup>。材料价格波动也是一个重要因素，市场上材料价格不稳定，难以准确预估其在项目实施过程中的价格走向，从而影响造价预测精度。施工条件变化同样不可忽视，例如地质条件与预期不符、天气状况恶劣等，都会增加施工成本，而这些因素在造价预测时往往难以全面考虑。此外，传统静态预算模式存在局限性，它无法实时反映项目成本的动态变化，不能及时调整造价控制策略，难以适应建筑工程项目复杂

多变的实际情况。

#### （二）多主体协同管理困境

在建筑工程项目造价控制中，多主体协同管理面临诸多困境。建设单位、设计单位和施工单位等利益主体在造价控制目标上存在差异。建设单位往往追求项目整体效益与成本控制的平衡，希望以较低造价获取高质量工程；设计单位可能更注重设计方案的创新性与可行性，对造价控制关注度相对较低；施工单位则主要考虑施工成本与利润，可能会通过一些手段增加造价获取更多收益<sup>[2]</sup>。同时，各主体间信息不对称问题严重，例如设计单位可能不了解施工过程中的实际成本变化，施工单位可能不清楚设计意图对造价的影响。此外，责任划分模糊，当造价出现问题时，各主体相互推诿，难以确定责任归属，这些都给造价控制带来了极大挑战。

## 二、造价控制难点形成机理研究

### （一）市场环境 with 政策影响机制

建筑材料市场价格波动对造价控制影响显著。材料价格受供求关系、原材料价格、市场竞争等多种因素影响，其波动具有不确定性<sup>[9]</sup>。价格上涨会直接增加材料成本，给造价控制带来压力。劳动力成本也呈现出变化趋势，随着经济发展和劳动力市场供需变化，人工费用不断调整。技术工人短缺等因素可能导致劳动力成本上升，影响工程造价。行业政策调整同样对造价控制有传导效应，如环保政策加强可能使部分材料生产受限，价格上升；税收政策变化会影响企业成本和利润，进而影响造价。这些市场环境和政策因素相互交织，共同构成了造价控制难点形成的重要机制。

### （二）管理机制缺陷溯源

传统造价管理模式在组织架构上，往往存在层级复杂、部门间沟通不畅的问题，导致信息传递滞后，影响过程监控的及时性与准确性<sup>[4]</sup>。在流程设计方面，可能存在繁琐且不合理之处，使得造价控制环节衔接不紧密，增加了风险产生的可能性，同时也不利于风险预警机制的有效运作。制度规范上，可能存在不健全或执行不到位的情况，对于责任的界定不够清晰，在出现造价问题时难以进行有效的责任追溯。这些系统性缺陷共同作用，使得造价控制面临诸多难点，难以实现高效、精准的管理。

## 三、造价控制理论框架构建

### （一）全生命周期造价管理理论

#### 1. 阶段成本耦合机制

全生命周期造价管理理论强调从项目的整个生命周期来考虑造价控制。在阶段成本耦合机制方面，需建立决策阶段、设计阶段、施工阶段和运维阶段的成本关联模型。决策阶段的成本受项目定位、投资估算准确性等因子影响，这些因素会间接影响后续阶段成本。设计阶段的成本与设计方案的合理性、设计标准的选择紧密相关，不合理的设计可能导致施工成本增加以及运维成本的上升。施工阶段的成本控制关键在于施工工艺、材料管理和工程变更等方面，这些因素会对造价产生直接影响。运维阶段的成本则受设备维护策略、使用寿命等影响，同时也与前期各阶段的决策和实施相关联<sup>[5]</sup>。

#### 2. 价值工程优化路径

构建基于功能分析的造价优化模型是价值工程优化路径的关键。通过对建筑工程项目各功能进行详细分析，确定其重要性及成本占比<sup>[6]</sup>。同时，提出成本与功能匹配度的量化评价方法，能够准确衡量功能与成本之间的关系。这种量化评价有助于在项目实施过程中，及时发现成本与功能不匹配的环节，为造价控制提供有力依据。在全生命周期造价管理理论框架下，此模型和评价方法可应用于项目各个阶段，从规划设计到运营维护，实现对造价的动态优化和精准控制，提高项目的经济效益和价值。

### （二）BIM 技术集成应用

#### 1. 5D-BIM 成本模拟

5D - BIM 成本模拟是在 3D 模型基础上集成时间（4D）和成本（5D）信息的先进技术。它通过将建筑构件与进度计划和成本数据相关联，实现了对项目造价的动态模拟和精准控制。在多维

集成方法方面，首先要建立准确的 3D 建筑模型，确保模型的完整性和准确性<sup>[7]</sup>。然后将进度信息与模型中的构件一一对应，形成 4D 模型，以直观展示项目的施工进度。接着，将成本数据按照一定的规则分配到各个构件上，从而构建出 5D - BIM 模型。通过该模型，可以进行可视化造价模拟，实时监控成本的变化情况，及时发现成本偏差并采取相应措施，为造价控制提供有力支持。

#### 2. 数字孪生技术应用

物理建筑与虚拟模型的实时数据交互机制是数字孪生技术在建筑工程项目管理造价控制中的关键应用。通过在物理建筑中设置各类传感器，实时采集如温度、湿度、结构应力等数据，并传输至虚拟模型。虚拟模型依据这些数据进行实时分析与模拟，当发现数据异常时，能够及时预警可能出现的成本变化。例如，温度异常可能影响材料性能，导致维修或更换成本增加；结构应力异常可能预示着潜在的安全隐患，引发整改费用。这种实时交互机制实现了对建筑项目的动态监控，为造价控制提供了更精准、及时的决策依据，有助于提前采取措施避免成本超支<sup>[8]</sup>。

## 四、创新性解决路径设计

### （一）动态造价控制模型构建

#### 1. 机器学习预测算法

在建筑工程项目造价控制中，可开发基于 LSTM 神经网络的动态成本预测模型。该模型能考虑多因素耦合影响，实现精准造价预测。LSTM 神经网络具有独特的记忆单元结构，能够有效处理时间序列数据中的长期依赖关系<sup>[9]</sup>。通过对历史造价数据及相关影响因素数据的学习和训练，模型可以自动捕捉数据中的复杂模式和规律。例如，它可以综合考虑材料价格波动、工程进度变化、市场环境等多种因素对造价的影响。在实际应用中，输入当前工程的相关特征数据，模型便能输出相应的造价预测结果，为项目管理者提供及时、准确的决策依据，从而有效控制造价。

#### 2. 弹性预算调控机制

为应对建筑工程项目造价控制的复杂性，设计弹性预算调控机制至关重要。该机制应包含风险预留金与动态调整系数等关键要素。风险预留金是为应对项目实施过程中可能出现的不确定性因素而设立，如材料价格波动、工程变更等<sup>[10]</sup>。其金额的确定需综合考虑项目的风险程度、以往类似项目的经验数据等。动态调整系数则用于根据项目实际进展情况对预算进行动态调整。例如，当市场环境发生重大变化，如原材料价格大幅上涨或下跌时，可依据预先设定的动态调整系数对相关费用预算进行调整，确保预算始终贴近实际造价情况，提高造价控制的有效性与精准性。

### （二）协同管理机制创新

#### 1. 区块链智能合约应用

区块链智能合约可应用于建筑工程项目管理的多个环节。在合同履行方面，智能合约的代码中设定好合同条款和条件，当满足预设条件时自动执行相应操作。例如，工程进度达到某一节点，自动触发付款条款的执行，无需人工干预，确保合同履约的

准确性和及时性。在支付结算环节,智能合约与项目的资金流系统相连,根据实际完成的工程量和合同约定的计价方式,自动计算应支付金额并进行转账操作。这不仅提高了支付结算的效率,还减少了人为错误和纠纷的可能性。同时,区块链的不可篡改特性保证了所有交易记录的真实性和可追溯性,为项目管理提供了可靠的数据支持。

#### 2. 利益共享风险共担模式

在建筑工程项目管理中,构建基于 IPD 模式的协同管理框架需建立利益共享风险共担模式。通过整合各方资源,如设计方、施工方、供应商等,共同参与造价控制。在项目前期,各方共同制定造价目标,并明确各自在造价控制中的责任与义务。当项目成本低于目标成本时,各方按约定比例分享节约的成本,形成利益共享机制。反之,若成本超支,各方也需按比例承担相应损失,形成风险共担机制。这种模式激励各方积极参与造价控制,从自身专业角度提出优化建议,避免一方追求自身利益而忽视整体造价控制。同时,也促进各方加强沟通与协作,及时解决造价控制过程中出现的问题,提高项目整体效益。

### (三) 数字化管理平台开发

#### 1. 云端协同系统架构

该云端协同系统架构主要基于云平台技术,核心在于设计一个包含成本数据库、决策支持模块以及移动终端应用的综合方案。成本数据库负责收集、整理和存储各类建筑工程项目的成本数据,包括材料价格、人工费用、设备租赁等详细信息,为后续的造价控制提供数据基础。决策支持模块通过对成本数据库中的数据进行分析和挖掘,运用先进的算法和模型,为项目决策提供科学依据,例如在项目预算制定、成本控制目标设定等方面提供

有力支持。移动终端应用则方便项目管理人员随时随地获取和更新项目造价信息,实现实时监控和管理,提高造价控制的效率和准确性,确保项目在预算范围内顺利进行。

#### 2. 大数据分析功能实现

开发历史数据挖掘子系统,需建立强大的数据库,整合过往建筑工程项目的各类数据,包括造价、材料、人工等信息。通过先进的数据挖掘算法,提取有价值的信息模式,为当前项目提供参考。市场趋势分析子系统则要实时收集市场动态,如材料价格波动、行业政策变化等。利用数据分析技术预测市场走向,辅助造价控制决策。方案比选优化子系统需对不同的项目方案进行量化分析,考虑成本、效益、风险等多维度因素。通过模拟和比较,选出最优方案,实现造价的有效控制。同时,三个子系统应相互关联和协同,形成完整的大数据分析功能,为建筑工程项目管理中的造价控制提供有力支持。

## 五、总结

建筑工程项目管理中的造价控制面临诸多难点,通过对其关键难点的系统归纳,提出了创新解决方案。其中动态控制模型、协同管理机制和数字化平台具备技术可行性,为造价控制提供了新的思路和方法。全生命周期管理理念与智能技术的深度融合是未来发展的重要方向,这将有助于实现更精准的造价控制。同时,在实时造价监控和智能决策支持等领域还有进一步深化研究的必要,以不断完善造价控制体系,提高建筑工程项目的经济效益和管理水平。

## 参考文献

- [1] 杜蓓. 建筑工程项目造价控制对策 [D]. 湖北工业大学, 2016.
- [2] 郝洪志. 工程项目造价的动态控制研究 [D]. 浙江大学, 2015.
- [3] 赵志军. 建筑工程项目实施阶段造价控制研究 [D]. 浙江大学, 2015.
- [4] 张宁. A 公司建筑工程项目造价控制研究 [D]. 北京化工大学, 2018.
- [5] 程菲雨. BIM 技术在建筑工程造价控制中的应用研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [6] 张香月. 解析建筑工程项目管理中造价控制 [J]. 低碳世界, 2016(23):219-219,220.
- [7] 冯海琪. 建筑机电安装造价管理中难点问题及解决方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(31):1073.
- [8] 寇翠玲. 浅析建筑工程项目造价的管理与控制 [J]. 江西建材, 2015(18):231-231,232.
- [9] 师文华. 浅析建筑工程项目造价的管理与控制 [J]. 北方经贸, 2015(10):215-216.
- [10] 张芳. 浅析建筑工程项目造价的管理与控制 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015,5(27):1845.



# 建筑工程造价数字化转型与成本控制策略研究

孙正梅

身份证号: 340505198312220023

DOI:10.61369/ERA.2025090019

**摘 要：** 阐述工程造价数字化趋势，包括技术应用（BIM、大数据等）、政策市场推动因素。介绍数字化技术架构（BIM、ERP 等集成）、多源数据融合等关键。还涉及投资估算等优化方法、电子招投标等平台及相关模型，强调其对成本控制等的提升及未来融合发展。

**关 键 词：** 工程造价；数字化；成本控制

## Research on Digital Transformation and Cost Control Strategy of Construction Project Cost

Sun Zhengmei

ID: 340505198312220023

**Abstract：** This paper discusses the digitalization trend in engineering cost estimation, including technological applications (such as BIM and big data), policy and market driving factors. It introduces key aspects such as digital technology architecture (integration of BIM, ERP, etc.) and multi-source data fusion. The paper also covers optimization methods for investment estimation, electronic bidding platforms, and related models, emphasizing their enhancement in cost control and future integrated development.

**Keywords：** project cost; digitalization; cost control

### 引言

建筑行业在数字化时代面临着转型升级的关键时期。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》强调了建筑行业数字化转型的重要性以及各环节高效管理的要求。工程造价作为建筑行业的关键部分，其数字化转型成为必然趋势。数字化涵盖从项目初始到竣工结算的全过程，涉及 BIM、大数据、云计算等技术的应用。这些技术不仅改变了传统造价管理模式，提升了效率和质量，还满足了政策对工程造价准确性、透明度和效率的要求，同时在市场和技术发展的推动下，促使工程造价数字化转型不断推进，涉及从技术架构到决策优化，从多源数据融合到风险分析等多方面内容。

## 一、建筑工程造价数字化转型理论基础

### （一）工程造价数字化内涵解析

工程造价数字化是建筑行业在数字化时代背景下的必然发展趋势。它涵盖了从项目初始阶段到竣工结算的全过程造价管理信息化。其核心在于利用先进的数字技术，如 BIM（建筑信息模型）、大数据和云计算等，对造价信息进行高效采集、存储、分析和应用。BIM 技术通过构建三维可视化模型，集成建筑项目的各种信息，使造价人员能够更准确地获取工程量和材料信息，从而提高造价估算的精度<sup>[1]</sup>。大数据技术则可对海量的造价历史数据进行挖掘和分析，为造价决策提供有力支持。云计算技术为造价计算和数据存储提供了强大的计算能力和安全保障，实现了造价

信息的实时共享和协同工作。这些技术共同作用，改变了传统造价管理模式，提升了造价管理的效率和质量。

### （二）数字化转型驱动因素分析

政策导向方面，随着建筑行业相关政策不断完善，对工程造价的准确性、透明度和效率提出了更高要求。数字化转型成为满足政策合规性的必然选择<sup>[2]</sup>。在市场竞争维度，激烈的市场竞争促使企业寻求提高竞争力的方法。数字化造价管理能够优化成本控制，提高决策效率，增强企业在市场中的竞争优势。技术发展角度，信息技术的飞速发展，如 BIM、大数据、云计算等，为工程造价数字化转型提供了技术支撑。这些技术能够实现信息的高效整合与分析，提高造价管理的精准性和科学性，推动建筑工程造价数字化转型的进程<sup>[2]</sup>。

## 二、工程造价数字化技术体系构建

### （一）数字化技术架构设计

基于 BIM 的三维可视化模型是数字化技术架构的核心基础。它集成了建筑工程的几何信息、物理信息以及功能信息，实现了对工程项目的全方位描述<sup>[3]</sup>。ERP 系统则侧重于企业资源的规划与管理，涵盖项目的人力、物力、财力等资源的整合与调配。通过 BIM 与 ERP 的集成，能够使造价管理在项目全生命周期中实现信息的实时共享与交互。同时，物联网传感器与 5G 通信技术的融合应用为工程造价数字化提供了强大的支持。物联网传感器可实时采集工程现场的各类数据，如设备运行状态、环境参数等，5G 通信技术则确保这些数据能够高速、稳定地传输至管理平台，为造价的动态控制与精准核算提供依据。

### （二）多源数据融合机制

多源数据融合机制是工程造价数字化技术体系的关键。工程量清单、市场价格、进度数据等多维度信息来源广泛且格式各异，需进行标准化处理。通过建立统一的数据标准和规范，确保各类数据的一致性和可比性<sup>[4]</sup>。同时，智能匹配方法至关重要。利用先进的算法和技术，实现不同数据源之间的关联和匹配。例如，根据工程量清单中的项目特征，精准匹配相应的市场价格信息，以及结合进度数据合理安排资源和成本。这种多源数据的融合不仅能提高工程造价计算的准确性，还能为成本控制提供更全面、实时的数据支持，促进建筑工程造价数字化转型的实现。

## 三、数字化环境下的成本控制方法创新

### （一）全过程成本控制模型

#### 1. 决策阶段投资估算优化

在决策阶段投资估算优化中，可建立基于历史数据库的机器学习预测模型以提升精度。利用大量历史工程造价数据作为基础，通过机器学习算法挖掘数据中的潜在规律和特征<sup>[5]</sup>。这些算法能够分析不同项目特征与造价之间的复杂关系，从而对新项目的投资估算提供更准确的预测。相比传统方法，该模型能够综合考虑更多的影响因素，避免人为因素导致的估算偏差。同时，随着新数据的不断积累，模型可不断学习和优化，进一步提高投资估算的准确性，为项目决策提供更可靠的成本依据。

#### 2. 实施阶段动态监控体系

开发基于 BIM 的 5D 进度 - 成本联动分析系统，可实时关联建筑项目的进度信息与成本数据，实现动态成本分析<sup>[6]</sup>。通过整合建筑信息模型（BIM）、时间维度以及成本信息，能精准模拟项目建设过程中的成本变化情况。构建偏差预警机制，设定合理的成本偏差阈值。当实际成本与计划成本出现偏差并超出阈值时，系统自动发出预警信号。这有助于项目管理人员及时发现成本异常情况，采取相应措施进行调整，如优化施工进度安排、控制材料用量等，确保项目成本始终处于可控范围。

### （二）智能决策支持系统开发

#### 1. 成本敏感性分析算法

蒙特卡洛模拟与神经网络的结合为动态成本风险分析提供了创新方法。蒙特卡洛模拟可通过随机抽样来模拟各种不确定因素对成本的影响，能有效处理复杂的概率分布问题<sup>[7]</sup>。神经网络则

具有强大的学习和自适应能力，可从大量数据中挖掘潜在规律。将两者结合，先利用蒙特卡洛模拟生成大量的成本样本数据，这些数据包含了各种可能的成本情况及其对应的风险因素取值。然后，将这些数据输入神经网络进行训练，使神经网络学习到成本与风险因素之间的复杂非线性关系。通过这种方式构建的动态成本风险分析模型，能够更准确地预测成本风险，为成本控制决策提供有力支持。

#### 2. 资源优化配置方案

在数字化环境下，可建立多目标规划模型以实现资源的优化配置。通过该模型，对人工、材料、机械等要素进行智能调度。利用数字化技术收集和分析相关数据，准确把握各要素的需求和供给情况。依据项目的进度、质量等多项目标，合理安排人工的分配，避免人力闲置或不足<sup>[8]</sup>。同时，精确计算材料的用量和使用时间，减少浪费和积压。对于机械的调度，根据工程的不同阶段和任务需求，合理调配机械的使用，提高机械的利用率。这种基于多目标规划模型的智能调度方式，能够有效提高资源利用效率，降低成本，提升建筑工程造价的成本控制水平。

## 四、工程招投标与合同管理数字化转型实践

### （一）智能评标系统构建

#### 1. 电子招投标平台设计

电子招投标平台是数字化转型的关键基础设施。在设计上，需考虑多方面因素。应具备强大的安全性能，以保护招投标过程中的各类信息。例如，可借鉴区块链技术对标书进行加密，防止信息泄露<sup>[9]</sup>，同时利用其进行身份认证，确保参与方的真实性和合法性。还需建立高效的信息管理系统，能够对招投标项目的各类信息进行准确分类和存储，方便查询和追溯。在流程设计上，要遵循相关法律法规和标准规范，实现招投标流程的自动化和标准化，提高工作效率，减少人为错误。此外，要注重用户体验，界面设计应简洁明了，操作便捷，便于不同用户群体使用。

#### 2. 评标算法优化

开发基于 AHP - 熵权法的多维度智能评标模型，可有效优化评标算法。AHP（层次分析法）能将复杂的评标指标体系分层，确定各指标权重，为评标提供合理的层次结构框架<sup>[10]</sup>。熵权法可根据指标数据的离散程度确定权重，能客观反映指标的重要性。将两者结合，既能考虑主观经验，又能兼顾客观数据。通过该模型，对投标文件进行多维度分析，综合评估各投标方案的优劣，避免了单一因素主导评标结果的情况，从而实现评标过程的透明化，提高评标结果的公正性和科学性。

### （二）数字化合同管理创新

#### 1. 智能合约技术应用

以太坊智能合约在工程款支付和变更索赔等场景具有独特的自动执行机制。在工程款支付方面，通过预设的规则和条件，智能合约能够自动监测工程进度是否达到支付节点，如完成特定施工阶段或通过质量验收等。一旦条件满足，合约将自动触发支付流程，无需人工干预，提高支付效率和准确性，避免人为拖延或

错误。在变更索赔场景中，智能合约可以依据事先设定的变更规则和索赔条件，自动判断变更的合理性以及索赔金额的计算。当出现符合条件的变更或索赔事件时，合约自动执行相应的处理流程，确保各方权益得到及时、公正的保障，减少争议和纠纷。

### 2. 合同风险预警系统

在数字化合同管理创新的合同风险预警系统方面，可构建基于自然语言处理的合同条款风险识别与评估模型。利用自然语言处理技术对合同文本进行分析，提取关键条款和信息。通过算法和模型对这些条款进行风险评估，识别潜在风险点。例如，对于付款条款、违约责任条款等关键部分，能够精准判断是否存在不合理或风险较高的表述。该模型可设置不同的风险等级标准，根据评估结果对合同风险进行分类。同时，结合大数据分析，不断优化模型的准确性和可靠性，为企业在合同签订和履行过程中提供有效的风险预警，帮助企业提前采取措施规避风险，保障自身利益。

### （三）全过程协同管理机制

#### 1. 多方协同平台架构

在工程招投标与合同管理数字化转型实践中，全过程协同管理机制下的多方协同平台架构至关重要。该架构需以云计算为基础，构建一个涵盖业主、总包、分包等多方的云端协同工作平台。此平台应具备统一的数据标准和接口，以确保各方数据的准确交互与共享。它要集成招投标管理模块，实现招标信息发布、投标文件递交与评审等功能的数字化。同时，合同管理模块也是核心部分，涵盖合同起草、审批、执行跟踪与变更管理等流程的信息化操作。通过建立这样的多方协同平台架构，能够打破信息

孤岛，提高各方沟通效率，实现工程招投标与合同管理的高效协同，推动数字化转型实践的顺利进行。

### 2. 数据共享标准制定

在工程招投标与合同管理数字化转型实践中，全过程协同管理机制下的数据共享标准制定至关重要。基于 IFC 标准建立造价数据交换接口规范是关键举措。通过统一的标准，明确数据的格式、定义和交互方式。这有助于不同软件系统之间实现无缝对接，使招投标过程中的各类造价数据能够准确、高效地传递和共享。同时，该规范应涵盖工程建设各阶段的相关数据，包括工程量计算、材料价格、费用组成等。这不仅能消除信息孤岛，提高工作效率，还能增强数据的准确性和一致性，为工程招投标与合同管理的数字化转型提供坚实的数据基础。

## 五、总结

建筑工程造价的数字化转型对成本控制效率有着显著提升效果。通过数字化技术，能更精准地进行造价估算、预算编制以及成本监控，减少人为误差，提高决策的科学性。同时，随着技术发展，智能算法优化成为重要研究方向，其可进一步提升成本分析的准确性和及时性。数据安全防护也不容忽视，大量造价数据的存储与使用需确保安全，防止信息泄露造成损失。此外，行业标准统一是促进数字化转型的关键，只有统一标准，才能实现不同系统间的数据交互和协同工作。未来，数字化技术与传统造价管理将深度融合，形成更高效、精准的成本控制体系，推动建筑行业的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 王冰. 基于全生命周期工程造价的物流成本控制关键思路 [J]. 中国储运, 2022, (04): 141-142.
- [2] 乔春瑶. 数字化转型背景下比亚迪成本控制研究 [D]. 哈尔滨商业大学, 2023.
- [3] 王文英, 杨倩, 王定河. 基于市场化视角的建筑工程项目造价管理研究 [J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 168-171.
- [4] 秦磊. 配电自动化系统建设工程造价成本的控制与管理 [D]. 山东科技大学, 2018.
- [5] 刘永. 上海市工程造价管理改革与发展策略研究 [D]. 同济大学, 2019.
- [6] 叶风. 建筑工程造价与成本的控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013(14).
- [7] 李晶. 房屋建筑工程造价成本控制策略 [J]. 四川建材, 2021, 47(5): 212-213.
- [8] 张亚美, 毛小林. 建筑工程造价动态管理与成本优化控制策略 [J]. 砖瓦, 2023(10): 117-119.
- [9] 赵升. 浅谈建筑工程造价成本控制 [J]. 房地产导刊, 2013(17): 191-191.
- [10] 王俊华. 浅谈建筑工程造价成本控制 [J]. 建筑工程技术与设计, 2014(14): 229-229

# 建筑电气施工技术管理的创新路径与实践

姬念念

身份证号: 622727198510066555

DOI:10.61369/ERA.2025090030

**摘 要：** 阐述建筑电气施工技术管理现状及问题，包括传统模式下各系统施工管理不足等。介绍基于 PDCA 循环理论的管理模型构建，以及 BIM 与进度、成本融合等创新举措。还列举了不同工程案例中的技术应用及成效，展望未来技术融合发展方向。

**关 键 词：** 建筑电气；施工技术管理；创新

## Innovative Path And Practice of Construction Electrical Construction Technology Management

Ji Niannian

ID: 622727198510066555

**Abstract：** This paper discusses the current state and challenges of construction electrical technology management, including the inadequacies in managing various systems under traditional models. It introduces the construction of a management model based on the PDCA cycle theory, as well as innovative measures such as integrating BIM with project schedules and cost control. The paper also presents the application and effectiveness of these technologies in various engineering cases and looks ahead to the future direction of technology integration.

**Keywords：** building electrical; construction technology management; innovation

### 引言

随着建筑行业的快速发展，相关政策也在不断更新完善。例如，2022年发布的《建筑节能与可再生能源利用通用规范》强调了建筑节能的重要性。在这种背景下，建筑电气施工技术管理面临着新的挑战与机遇。传统的施工技术管理模式存在诸多问题，如强电系统部署、弱电网络布控、防雷接地施工等环节的不足。同时，随着 BIM 技术普及和智能建筑趋势加强，对建筑电气施工技术管理提出了更高要求。从配电自动化到能耗监测系统，从 PDCA 循环理论的应用到 BIM 与进度管理、成本控制的融合，以及施工各阶段的技术创新，都需要不断探索和完善，以适应新的政策导向和行业发展需求。

### 一、建筑电气施工技术管理现状分析

#### （一）当前技术管理主要模式与问题

建筑电气施工技术管理存在多种模式，但也面临诸多问题：在传统模式下，强电系统部署常注重基本的线路铺设与配电箱安装，却可能忽视不同区域用电负荷的精准计算<sup>[1]</sup>；弱电网络布控方面，侧重于线缆连接，对网络拓扑结构的优化及信号传输的稳定性考虑不足；防雷接地施工中，技术管理多关注接地极的安装，而对接地电阻的动态监测不够重视；技术交底环节往往流于形式，施工人员对关键技术要点理解不深；设备选型时，对设备的兼容性和长期运行稳定性缺乏深入评估；质量管控多集中在施工后的验收，对施工过程中的质量把控不够严格和全面。

#### （二）行业发展对管理创新的迫切需求

随着建筑行业的快速发展，特别是 BIM 技术的普及以及智能

建筑趋势的加强，对建筑电气施工技术管理提出了更高要求：一方面，智能建筑的兴起使得配电自动化成为关键，需要更精准、高效的技术管理来确保电力系统的稳定运行，以满足复杂的建筑功能需求<sup>[2]</sup>；另一方面，能耗监测系统在节能理念日益重要的当下不可或缺，其技术管理需要不断创新，以实现建筑能耗的准确监测和有效控制。高标准工程项目要求建筑电气施工技术管理能够与时俱进，适应这些新的技术需求，否则将难以保证项目的质量和效益。

### 二、技术创新路径构建理论框架

#### （一）智能化管理理论体系

基于 PDCA 循环理论，构建建筑电气施工全周期管理模型：在计划（Plan）阶段，强调电气图纸优化的重要性，利用数字化



技术提升图纸的准确性和完整性<sup>[3]</sup>，通过对电气系统的详细分析和设计，确保施工的可行性和高效性；在执行（Do）阶段，引入施工模拟验证环节，借助先进的模拟软件，对施工过程进行虚拟演练，提前发现潜在问题并及时调整施工方案，这不仅可以提高施工质量，还能有效避免施工过程中的资源浪费和延误；在检查（Check）阶段，注重系统联调测试，通过对电气系统的全面检测和调试，确保各个子系统之间的协同工作，满足建筑电气的使用要求；最后，在处理（Act）阶段，根据检查结果总结经验教训，对管理模型进行持续改进，以适应不断变化的施工环境和需求。

### （二）BIM-5D 技术整合原则

建筑信息模型（BIM）与进度管理、成本控制的深度融合是建筑电气施工技术管理创新的关键。BIM-5D 技术整合应遵循系统性原则，将电气系统各要素视为一个整体，全面考虑桥架排布、设备安装等环节与进度、成本的相互关系<sup>[4]</sup>。同时，要注重数据的准确性和实时性，确保电气桥架排布冲突检测以及设备安装工序优化等技术路径所依据的数据真实可靠。此外，整合过程需强调协同性，不同专业人员在 BIM-5D 平台上协同工作，共同解决电气施工中的技术问题，实现施工技术管理的高效创新。

## 三、全过程技术管理实施路径

### （一）施工准备阶段技术创新

#### 1. 三维可视化交底系统

在施工准备阶段的技术创新中，三维可视化交底系统具有重要意义。该系统可借助先进技术，如开发基于 AR 技术的设备定位指导系统，实现配电柜安装位置、电缆敷设路径的沉浸式可视化演示<sup>[5]</sup>。通过这种方式，施工人员能够更直观地了解施工要求和流程，提前熟悉施工环境和关键部位的操作要点。这不仅有助于提高施工效率，减少施工过程中的错误和返工，还能提升施工质量，确保建筑电气施工项目的顺利进行。

#### 2. 物料二维码追踪体系

在施工准备阶段的物料二维码追踪体系构建中，需建立电气设备二维码追溯系统。从工厂生产环节开始，为每件物料赋予唯一的二维码标识，该二维码应涵盖物料的基本信息，如规格、型号、生产批次等<sup>[6]</sup>。在运输过程中，通过扫描二维码可实时追踪物料位置与状态，确保运输安全与及时送达。到达现场后，利用二维码进行验收，快速获取物料的详细信息，与设计要求和质量标准进行比对，实现对物料质量的精准把控。同时，该系统可记录物料在各个环节的相关数据，形成完整的质量管控链路，为后续施工及质量追溯提供有力支持。

### （二）施工实施阶段技术创新

#### 1. 智能配电调试平台

集成智能断路器监测系统与电力 SCADA 系统，能够实现对电气设备运行状态的实时监测和数据采集。通过对采集到的数据进行处理，可以构建远程负荷调控与故障预警平台。该平台能够根据实时负荷情况，自动调整配电设备的运行参数，实现负荷的优化分配，提高电力系统的运行效率和可靠性。同时，当

系统检测到故障时，能够及时发出预警信息，通知相关人员进行处理，减少故障对电力系统的影响。通过这种创新的技术管理路径，可以提高建筑电气施工的质量和效率，为建筑的安全运行提供保障<sup>[7]</sup>。

#### 2. 无感式质量检测技术

在施工实施阶段的技术创新中，无感式质量检测技术至关重要。例如应用红外热成像仪和超声波探伤设备实施线缆接头接触电阻非破坏性检测<sup>[8]</sup>。红外热成像仪可通过检测物体表面的温度分布，发现线缆接头处因接触电阻异常而产生的温度变化，从而及时排查潜在的质量问题。超声波探伤设备则利用超声波在介质中的传播特性，检测线缆接头内部是否存在缺陷，如裂缝、气孔等。这种无感式检测技术不仅不会对线缆造成破坏，而且能够快速、准确地获取检测结果，为建筑电气施工质量提供了有力保障。

## 四、典型工程实践案例分析

### （一）超高层建筑智慧配电项目

#### 1. 项目背景与实施环境

随着城市化进程的加速，超高层建筑不断涌现，本案例中的商业综合体高达 280 米，其对电力供应的可靠性和稳定性要求极高<sup>[9]</sup>。由于建筑高度和功能复杂性，传统的配电系统面临诸多挑战。同时，随着科技的发展，智慧配电理念逐渐兴起，为解决这些问题提供了新思路。该项目所在地区的电力供应情况、相关规范标准以及周边环境等因素，也对项目的实施产生了影响。例如，地区电网的容量和稳定性决定了项目接入电源的方式和容量要求。综合考虑这些因素，针对该商业综合体双电源供电系统的特殊需求，制定基于 BIM 的管线综合方案成为项目的关键举措。

#### 2. 技术创新应用成效

超高层建筑智慧配电项目通过应用智能终端巡检系统，取得显著成效。送电调试周期大幅缩短，达到 40%，有效提高了项目进度。同时，设备碰撞返工率显著降低，降低比例为 75%，减少了因返工带来的成本增加和时间浪费。这种技术创新应用不仅提升了超高层建筑配电项目的施工效率和质量，还为建筑电气施工技术管理提供了新的思路和方法，对推动建筑电气行业的发展具有重要意义<sup>[10]</sup>。

### （二）绿色住宅小区供配电工程

#### 1. 节能技术集成创新

在绿色住宅小区供配电工程中，采用光伏逆变器与储能电池联动控制系统可实现分时电价策略下的智能电力调配。该系统通过光伏逆变器将太阳能转化为电能，储能电池则用于存储多余电能。在分时电价低谷期，系统优先使用电网电力并为储能电池充电；在高峰期，储能电池放电，减少从电网取电。这样不仅能有效利用太阳能这一清洁能源，降低对传统能源的依赖，还能通过合理调配电力资源，降低小区用电成本，提高能源利用效率，实现节能目标，为绿色住宅小区供配电工程的节能技术集成创新提供了有效实践方案。

## 2. 管理效能提升评估

在绿色住宅小区供配电工程中，管理效能提升显著。新技术应用后，电力损耗大幅降低，相比传统技术降低了18%。这得益于先进的节能设备和智能控制系统的应用，它们优化了电力传输和分配过程，减少了不必要的损耗。同时，运维响应速度提升了3倍。智能监测系统能够实时感知供配电设备的运行状态，一旦出现异常，迅速将信息反馈给运维人员。运维人员借助高效的调度系统和便捷的交通设备，能够快速到达现场进行处理，大大缩短了故障修复时间，提高了小区供配电的可靠性和稳定性，为居民的正常生活提供了有力保障。

### （三）新基建数据中心电气工程

#### 1. 高可靠供配电方案设计

在新基建数据中心电气工程的高可靠供配电方案设计中，构建2N冗余供电架构与模块化UPS系统是关键。2N冗余供电架构通过两组独立的供电线路，确保在一组出现故障时，另一组能无缝接管供电，极大提高了供电的可靠性。模块化UPS系统则具有可扩展性和灵活性，能根据数据中心的实际需求进行配置和调整。这种设计满足了Tier IV级供电可靠性要求，为数据中心的稳定运行提供了坚实保障。它能有效应对各种可能出现的电力故障情况，减少因电力问题导致的数据丢失和业务中断风险，确保数据中心的关键设备能持续稳定运行。

#### 2. 数字化管理平台应用

在新基建数据中心电气工程中，数字化管理平台的应用至

关重要。以某数据中心为例，部署电力监控SCADA系统实现了10kV变配电所的无人值守管理。该系统实时采集变配电所的各类电气参数，如电压、电流、功率等，并通过网络传输至监控中心。在监控中心，工作人员可对数据进行分析处理，及时发现潜在故障隐患。同时，系统具备远程控制功能，可对开关设备进行远程操作，提高了运维效率。通过数字化管理平台的应用，不仅减少了人力成本，还提升了数据中心电气工程的可靠性和安全性，为新基建数据中心的稳定运行提供了有力保障。

## 五、总结

BIM技术、智能监测系统与数字化管理平台在建筑电气工程中协同应用，提升了施工效率与质量控制水平。BIM技术实现了三维可视化设计与施工模拟，智能监测系统实时反馈工程数据，数字化管理平台整合资源与信息。展望未来，物联网与AI技术融合将推动智能运维发展，实现设备自动诊断与预测性维护。基于数字孪生技术的下一代电气施工管理框架构想，有望进一步提升建筑电气施工管理的智能化水平，通过创建虚拟模型与物理实体实时映射，实现全生命周期的精细化管理，为建筑电气施工技术管理创新提供新的方向与思路。

## 参考文献

- [1] 张斌. 小区电气系统设计 [D]. 南昌大学, 2021.
- [2] 何婷. 建筑施工企业社会责任绩效评价与提升路径研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2023.
- [3] 杨璐冰. 产学研协同中的负责任创新实践路径研究 [D]. 河南师范大学, 2021.
- [4] 王婷. 装配式建筑施工安全管理效果影响因素与作用路径分析 [D]. 西华大学, 2022.
- [5] 王挺. 建筑施工企业技术创新能力评价研究 [D]. 浙江大学, 2021.
- [6] 张防全. 新时期建筑工程施工技术管理与创新分析 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(05): 161-162.
- [7] 刘改文. 论析新时期建筑工程施工技术管理与创新 [J]. 中国标准化, 2019, (04): 13-15.
- [8] 黄其虎. 浅谈新时期建筑工程施工技术管理与创新 [J]. 建材与装饰, 2016, (53): 136-137.
- [9] 胡志正. 浅谈新时期建筑工程施工技术管理与创新 [J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2014, (08): 31-32.
- [10] 周兴民. 新时期建筑工程施工的管理创新探讨 [J]. 门窗, 2012, (10): 208-209.

# 城墙劣化规律与机理研究综述

刘笑

百色学院, 广西 百色 533000

DOI:10.61369/ERA.2025090033

**摘要：** 城墙作为重要历史遗存，其保护对延续文明脉络至关重要。在自然侵蚀与人为活动的双重影响下，城墙普遍面临不同程度的劣化问题。本文系统梳理了城墙劣化的类型特征及时空分布规律，揭示了物理风化、化学腐蚀、生物侵蚀及人为破坏的作用机理，阐明了环境因素与材料特性的耦合影响机制。研究发现，当前在微观机理解析、多因素耦合作用、长期动态监测及修复技术评估等方面仍存在不足。未来应加强多学科交叉，发展原位监测技术，优化保护材料，构建智能预警体系，为城墙文化遗产的科学保护与可持续利用提供理论依据和技术支撑。

**关键词：** 城墙；劣化规律；劣化机理

## A Review of Research on the Laws and Mechanisms of City Wall Degradation

Liu Xiao

Baise University, Baise, Guangxi 533000

**Abstract：** As an important historical relic, the protection of city walls is crucial for continuing the thread of civilization. Under the dual influence of natural erosion and human activities, city walls generally face varying degrees of degradation. This article systematically summarizes the types, characteristics, and spatiotemporal distribution patterns of city wall degradation, reveals the mechanisms of physical weathering, chemical corrosion, biological erosion, and human destruction, and clarifies the coupling influence mechanism of environmental factors and material properties. The study found that there are still deficiencies in micro-mechanism analysis, multi-factor coupling effects, long-term dynamic monitoring, and evaluation of restoration techniques. In the future, it is necessary to strengthen multidisciplinary collaboration, develop in-situ monitoring technology, optimize protective materials, and construct an intelligent early warning system to provide theoretical basis and technical support for the scientific protection and sustainable utilization of city wall cultural heritage.

**Keywords：** city wall; degradation law; degradation mechanism

## 引言

城墙作为人类文明的独特见证，其形态从原始夯土结构到精工砖石体系，生动记录了社会发展、军事变革、工艺演进与集体记忆。这些历经岁月洗礼的构筑物既是工程技术杰作，又是文化象征载体。然而，这些历史建筑正面临着严峻的保存挑战：在自然环境作用与人类活动影响的双重影响下，墙体材料逐渐退化、结构性能持续衰减，这一系统性损伤过程被定义为“劣化现象”。该过程不仅危及建筑本体的稳定性，更可能造成珍贵历史记忆的永久性缺失。

本文旨在系统梳理国内外关于城墙劣化现象、规律与机理的研究进展。通过分析物理、化学、生物及人为驱动下的劣化过程，探讨材料特性与环境因素的交互作用，评估当前研究的成就与局限，并展望未来研究方向，为城墙保护的理论深化与实践创新提供系统参考。

## 一、城墙劣化现象与类型

城墙劣化呈现复杂多样性，依据主导因素可系统分类如下：

### （一）物理风化主导型劣化

表面剥落与粉化：最常见现象之一。材料表层因反复冻融循环、干湿交替产生的内应力而开裂、起皮、成片或成粉状脱落。

砖石城墙表面酥碱、夯土城墙表面严重起砂均属此类<sup>[1]</sup>。

开裂与裂隙发育：温度梯度引发的热胀冷缩、不均匀沉降、结构荷载变化或地震活动导致墙体产生宏观裂缝或微观裂纹。裂隙为水、盐、生物侵入提供通道，加速内部劣化<sup>[2]</sup>。

溶蚀与掏蚀：水流对可溶性胶结物或细小颗粒的持续冲刷、溶解和搬运作用，导致墙体表面形成凹槽、孔洞或内部形成空

洞，在城墙根部、排水不畅部位尤为显著。

**变形与位移：**长期荷载、基础失稳、冻胀作用或地震影响导致墙体发生倾斜、鼓胀、下沉等整体或局部变形，威胁结构安全。

### （二）化学腐蚀主导型劣化

**盐害：**最具破坏性的劣化之一。可溶性盐分通过毛细作用、雨水或地下水迁移至墙体<sup>[3]</sup>。在温湿度变化驱动下，盐分在孔隙中反复结晶－溶解，产生巨大结晶压力，导致材料由表及里层层剥落。盐分还可与墙体材料（如砖中的铝硅酸盐、灰浆中的水化产物）发生化学反应，生成膨胀性新矿物（如钙矾石），加剧破坏。

**酸雨、酸雾腐蚀：**大气污染物（SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>）形成的酸雨或酸雾与石材（碳酸钙）、砖块或灰浆中的碱性成分发生中和反应，导致材料溶解、表面形成难溶石膏壳或直接造成表面流失。

**氧化与水解：**金属构件的锈蚀不仅自身破坏，锈蚀产物体积膨胀还对周边砌体产生挤压破坏。一些矿物在潮湿环境下会发生水解反应，改变其性质。

### （三）生物侵蚀主导型劣化

**植物破坏：**高等植物根系深入墙体裂缝或薄弱部位，产生强大的根劈作用，导致砌体松动、开裂。植物分泌的有机酸也具有腐蚀性。其冠部还影响排水、加重荷载。

**微生物侵蚀：**低等生物在墙体表面或内部生长。它们通过物理楔入、分泌有机酸溶解矿物、改变局部微环境等方式破坏材料。微生物活动形成的生物膜还会加速水分滞留和污染物吸附。

### （四）人为活动诱发的劣化

人为因素对城墙的劣化主要表现为：不当维修使用不兼容材料和工艺加速损坏，工业污染和尾气引发墙体化学腐蚀，交通振动导致结构疲劳松动，以及游客活动造成的物理磨损和微环境改变。

## 二、城墙劣化规律

劣化在城墙上的发生发展并非随机，展现出显著的时空规律性：

### （一）空间分布规律

**垂直分带性：**

**顶部与上部：**直接暴露于降雨、日晒、强风、冻融循环，物理风化和酸雨腐蚀严重。易积水处盐害也显著。植物易在墙顶生长。

**中部：**相对受极端天气影响较小，但易受毛细水上升带影响，是盐分富集和结晶破坏的典型区域。生物膜在遮阴潮湿面发育。

**根部与基础：**长期处于潮湿环境，毛细水上升终点区盐分浓度高，盐害严重。易受地表水冲刷、溅水侵蚀和微生物侵害。地下水位变化或排水不畅易导致基础材料软化、掏蚀<sup>[4]</sup>。

**方位差异性：**

迎风面主要遭受风雨冲刷和酸雨侵蚀，背风面易形成潮湿微环境导致生物滋生和盐分结晶；向阳面因温度剧烈波动加速物理

风化，而背阴面则因持续高湿度促进生物生长和盐分循环。

### （二）时间演化规律

城墙劣化呈现阶段性（潜伏－加速－稳定）、周期性（季节性气候驱动）和长期累积性（微小损伤非线性叠加）的时变特征，其中盐害和冻融破坏在特定季节呈现显著加速效应，而人为活动可能改变长期劣化趋势。

### （三）环境影响因素的作用规律

环境因素对城墙劣化的影响呈现以下规律：水分作为关键介质，通过多种途径（降雨、毛细作用等）参与各类劣化过程；温湿度波动驱动多种物理化学循环（冻融、盐分结晶等），其变化幅度和频率直接影响劣化速率；盐分特性（种类、浓度）决定其破坏机制和强度；污染物浓度与酸性腐蚀程度呈正相关；生物活性则受微环境条件和基质特性的共同调控。这些因素相互作用，共同构成城墙劣化的环境驱动机制。

## 三、城墙劣化机理

深入理解劣化发生的物理、化学和生物学原理至关重要：

### （一）物理风化机理

**冻融循环破坏：**水结冰时体积膨胀约9%。当墙体孔隙水饱和度超过临界值（约91%），结冰产生的巨大压力超过材料抗拉强度，导致孔隙壁破裂。反复冻融使损伤累积扩大。饱和程度、冻结速率、孔隙结构是关键影响因素<sup>[5]</sup>。

**盐结晶压力：**盐溶液在孔隙中过饱和结晶时，晶体生长受到孔隙壁约束，产生巨大的结晶压力，远超大多数墙体材料的强度，导致材料破裂。破坏程度取决于盐的种类、溶液浓度、蒸发速率、孔隙结构和材料强度<sup>[6]</sup>。

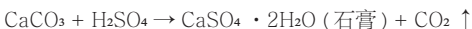
**水合压力：**某些盐类（如Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）在温度、湿度变化时会发生水合物相变、伴随显著的体积变化、，产生类似结晶压力的破坏力。

**热应力破坏：**材料具有热膨胀系数。当城墙不同部位或不同材料经历的温度梯度或变化速率不同时，产生的热胀冷缩差异会引发内部应力，导致开裂。日温差大、材料导热性差或热膨胀系数差异大时尤甚。

**干湿循环应力：**材料吸水膨胀、失水收缩。这种反复的体积变化在材料内部或不同材料界面产生应力，导致微裂纹产生和扩展，尤其在含膨胀性黏土矿物的夯土或劣质砖石中显著。

### （二）化学腐蚀机理

**溶解作用：**水（尤其是酸性水）直接溶解墙体中的可溶性组分，如石灰石、石灰灰浆中的氢氧化钙和碳酸钙、夯土中的胶结物或盐分。导致材料流失、孔隙率增大、强度降低。酸－碱反应：酸性降水或大气中的酸性气体溶解后与墙体材料中的碱性成分发生中和反应。例如：



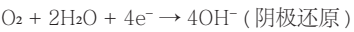
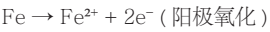
生成的石膏溶解度低，可能在表面形成结壳或在内层孔隙中结晶造成破坏。反应消耗了原始材料，使其劣化<sup>[7-8]</sup>。

**水化、水解反应：**某些矿物与水反应生成新矿物，体积可能



膨胀（如黏土矿物的水化膨胀）。水分子也可能破坏矿物晶格中的化学键（水解），使其分解，降低材料稳定性。

氧化反应：铁质构件在水和氧气作用下发生电化学腐蚀：



生成疏松多孔的铁锈（主要成分  $\text{FeOOH}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  等），体积膨胀数倍，挤压周边砌体。

### （三）生物侵蚀机理

生物侵蚀对城墙材料的破坏机制可分为三类：物理性破坏主要表现为植物根系和微生物菌丝的机械楔入作用，导致裂隙扩展和结构松动<sup>[9]</sup>；化学性侵蚀包括微生物代谢产生的酸碱物质对矿物的溶解作用，以及氧化还原反应引发的矿物转化；生物化学作用则通过分泌胞外聚合物改变材料表面特性，形成利于其他劣化过程发生的微环境。这些机制协同作用，共同加速城墙材料的性能退化<sup>[10]</sup>。

### （四）材料特性与劣化的内在关联

城墙自身的材料特性是其抵抗或易受劣化的根本内因<sup>[11-12]</sup>：

（1）化学组分方面，含可溶盐、膨胀性黏土或碳酸盐的材料易受盐害、干湿循环和酸蚀；

（2）孔隙特征中，孔径分布和连通性主导水盐运移，中孔隙（0.1–10  $\mu\text{m}$ ）最易引发结晶破坏；

（3）力学性能决定抗应力能力，低强度、高脆性材料更易开裂；

（4）构筑工艺中，排水系统缺陷和材料热力学参数不匹配是劣化主因。这些内因通过调控水–热–盐–力的传输与转化过程，最终决定城墙的耐久性表现。

## 四、结论

研究表明，城墙劣化具有显著的空间分异和时间演化规律。物理风化和化学腐蚀是导致材料性能衰退和结构破坏的主要力量，而生物侵蚀和人为活动则扮演着重要的加剧或诱发角色。材料自身的孔隙结构、矿物组成、力学性能及其与环境的相互作用是决定劣化类型和速率的内因。

当前城墙劣化研究虽取得显著进展，但仍存在若干关键挑战：在机理层面需深化微观–介观尺度认知，加强多场耦合作用解析；在技术层面缺乏长期监测数据和保护效果评估体系；在应用层面亟待完善标准规范。未来研究应重点突破以下方向：1）发展多学科融合的创新研究方法；2）建立智能监测与预警技术体系；3）揭示多因素协同作用机制；4）研发生态友好型保护材料；5）构建全生命周期保护评估框架。通过系统性研究和技术创新，为城墙文化遗产的科学保护和可持续传承提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 张虎元, 王旭东, 李最雄. 土建筑遗址冻融耐久性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 5158–5163.
- [2] 严绍军, 刘佑荣. 石质文物风化机理与保护方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 78–92.
- [3] 和法国, 湛文武, 韩文峰. 西北干旱区土遗址盐害发育机理 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 963–969.
- [4] 李黎, 邵明申. 南京明城墙砖体盐害分布规律研究 [J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 1–7.
- [5] Hall, K., & André, M.F. Rock thermal data at the grain scale: Applicability to granular disintegration [J]. Geomorphology, 2023, 55(1–4), 29–42.
- [6] Steiger, M., & Asmussen, S. Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials [J]. Environmental Geology, 2008, 56(3), 605–621.
- [7] 王思敬, 黄克忠. 文物建筑化学风化与保护技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 112–135.
- [8] 潘别桐, 黄克忠. 石材的污染与清洗技术 [J]. 文物保护与考古科学, 1995, 7(2): 28–35.
- [9] 孙满利, 李最雄. 植物根系对交河故城遗址的破坏机理 [J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1887–1892.
- [10] Warscheid, T., & Braams, J. Biodeterioration of stone: A review [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2000, 46(4), 343–368.
- [11] 黄克忠. 文物建筑材质劣化病理诊断 [M]. 北京: 文物出版社, 2015: 53–78.
- [12] Benavente, D., et al. Durability estimation of porous building stones [J]. Engineering Geology, 2004, 74(1–2), 113–127.

# 基于地域文化特征的现代建筑设计策略研究

胡可

天津市建筑设计研究院有限公司, 天津 300074

DOI:10.61369/ERA.2025090041

**摘 要：** 地域文化特征在现代建筑设计中具有独特价值，不仅体现历史文脉的延续，也推动空间形态与人文环境的融合。通过对地域文化符号、材料选择和空间布局的深入挖掘，现代建筑能够实现传统与当代的协调统一。设计过程中应注重自然地理环境与人居需求的互动关系，合理引入地域元素，增强建筑的文化认同与视觉感染力。同时，现代技术与绿色理念的应用，使地域文化在创新语境下获得新的表达方式。该研究旨在探索如何在现代建筑中融入地域文化特征，促进功能性、艺术性与文化性的协同发展。

**关 键 词：** 地域文化；现代建筑；设计策略；文化传承；创新融合

## Research on Modern Architectural Design Strategies Based on Regional Cultural Characteristics

Hu Ke

Tianjin Architectural Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300074

**Abstract：** Regional cultural characteristics hold unique value in modern architectural design, not only reflecting the continuity of historical context but also promoting the integration of spatial forms and humanistic environments. Through in-depth exploration of regional cultural symbols, material selection, and spatial layout, modern architecture can achieve a harmonious balance between tradition and contemporary design. The design process should emphasize the interactive relationship between the natural geographical environment and human living needs, incorporating regional elements rationally to enhance cultural identity and visual appeal. Meanwhile, the application of modern technology and green concepts provides new avenues for expressing regional culture in innovative contexts. This study aims to explore how to integrate regional cultural characteristics into modern architecture, fostering the coordinated development of functionality, artistry, and cultural significance.

**Keywords：** regional culture; modern architecture; design strategies; cultural heritage; innovative integration

### 引言

现代建筑不仅承载着功能需求，更是文化记忆与地域特色的体现。随着全球化进程加快，建筑形式趋于同质化，独特的地域文化价值亟需在设计中得到回应。将地域文化特征融入现代建筑，不仅能延续历史文脉、彰显地方个性，还能提升空间的审美品质与人文关怀。同时，建筑作为城市肌理的重要组成部分，其文化表达直接影响居民的认同感和归属感，也关系到城市特色的塑造与城市形象的提升<sup>[1]</sup>。在尊重传统文化与自然环境的基础上，如何实现创新设计，使建筑兼具历史传承、功能实用与现代美学，成为当前建筑设计领域亟待深入探索的重要课题。

### 一、地域文化特征在现代建筑设计中的价值体现

地域文化特征在现代建筑设计中的价值体现不仅关乎形式美感的塑造，更在于对历史文脉的延续与文化认同感的营造<sup>[2]</sup>。建筑作为社会文化的物质载体，其形态、符号和风格往往承载着一个地域独特的历史记忆和生活方式。在现代化、全球化的背景下，建筑趋同化现象日益明显，城市面貌逐渐失去个性。将地域文化

特征引入建筑设计，能够打破单一化的格局，使建筑不仅满足功能需求，还成为人们精神层面的依托。通过对地域气候、自然景观与人文习俗的深入理解，建筑设计能够展现出独特的文化底蕴，强化人们的归属感与认同感，这种文化延续为现代社会注入了稳定性和凝聚力，同时也提升了城市整体的人文价值和社会凝聚力。

在建筑设计实践中，地域文化特征的体现常常通过空间布

局、形式语言与材料选择来实现。例如南方水乡建筑强调因水而居的空间逻辑，北方民居则凸显抗寒御风的构造智慧，这些差异不仅是气候适应的结果，更折射出地域文化的独特性。现代建筑在借鉴这些特征时，不应简单复制传统符号，而应通过抽象与再创造的方式，使其融入现代语境。建筑外观的形态设计可以借鉴地域特有的图案与构成元素，空间内部的组织则可结合地方生活方式进行优化，从而实现文化内涵与现代功能的有机结合。这样的设计既能保持地域文化的真实性，又能满足当代人的审美需求与生活习惯，展现出传统与现代的共生关系，并推动设计语言的创新与多样化发展。

此外，地域文化特征在现代建筑中的价值还体现在社会、经济及生态层面的长远意义。独具地域特色的建筑能够成为城市形象的重要组成部分，提升地方的文化影响力和竞争力<sup>[9]</sup>。在旅游与商业开发中，具有鲜明地域文化特征的建筑往往更具吸引力，能够激发公众的情感共鸣，推动文化产业的发展。与此同时，文化特征的传承与创新也为建筑师提供了更为广阔的创造空间，使建筑作品在国际交流中展现独特的文化立场。地域文化不仅是传统的延续，更是一种动态的创新资源，当它与现代建筑设计策略相结合时，能够在全球化浪潮中保持地方独特性，并通过文化自信推动建筑艺术的多样化发展，同时促进可持续发展与生态文明建设，为社会创造更深远的价值。

## 二、建筑材料与空间布局中的地域文化融入路径

建筑材料与空间布局中的地域文化融入路径，体现了建筑与自然、社会、历史之间的深度互动<sup>[10]</sup>。地域文化往往通过材料的选择与运用得到最为直观的表达。传统建筑材料如木材、石材、夯土、竹子等，因地制宜地反映了当地的自然资源禀赋和工艺传统，这些材料不仅具有结构和功能上的优势，更承载着独特的文化符号与审美价值。在现代建筑中，单纯复刻这些材料已难以满足性能需求，但通过工艺创新与新型技术的介入，可以实现传统材料的现代化再生。例如，将木材与钢结构结合，不仅保留了木材的温润质感，也增强了建筑的稳定性与耐久性；利用再生石材或改性土壤材料，不仅延续了传统建筑的地域印记，还体现了现代社会强调的可持续发展理念。材料的选择和创新使用，使建筑能够在现代化进程中延续文化的脉络，保持地域特征的鲜明性，同时为建筑的艺术表达提供了更多可能性和设计弹性。

空间布局的地域文化融入，是在功能与人文之间寻求平衡的体现。不同地域因地理环境、气候条件和社会习俗的差异，形成了独特的空间组织方式。南方湿润地区的院落常以通透、灵活为特征，强调水系与庭院的互动；北方寒冷地区的民居则注重封闭性与保温性，以院落聚合形成抵御外部环境的保护空间。这些空间布局不仅满足了生活需求，也凝聚了特定的文化心理与社会关系。在现代建筑设计中，空间布局的文化融入不应拘泥于表象，而应通过提炼地域文化的核心逻辑，实现与现代功能的对话<sup>[11]</sup>。例如，将“围合”的空间理念转化为现代社区的共享庭院，既延续了地域的文化归属感，也契合现代社会注重交流与互动的生活方式

式；通过对“轴线”与“层次”的传统空间观念的再创造，可以在办公楼、文化中心等现代建筑中，塑造具有秩序感与仪式感的场所精神。空间布局的地域化不仅提升了建筑的文化内涵，更为使用者提供了富有归属感的生活与工作环境，同时增强了建筑在社区文化塑造中的影响力。

建筑材料与空间布局的融合路径，还需要结合现代技术手段与可持续理念加以拓展。通过 BIM、虚拟现实和数字建造等新兴工具，设计师能够更科学地模拟不同材料的性能，优化空间组织的舒适性与环保性，使传统文化特征在现代建筑中得以更为精准与高效的呈现。同时，绿色节能理念为地域文化的融入提供了新的方向。传统材料与布局往往蕴含生态智慧，例如厚墙与小窗的设计能够降低能耗，庭院与廊道的设置有助于通风与采光，这些经验与现代绿色技术结合，可以实现节能与文化表达的双重目标。未来的建筑不再是对传统文化的简单再现，而是通过材料的创新性运用、空间布局的科学化设计及数字化管理手段，形成一种动态的文化延续与现代化创新的统一体。地域文化在这一过程中不仅被传承和保护，还通过现代建筑设计策略获得新的生命力、社会价值与可持续发展潜力，为城市与社区的文化认同和生活品质提升提供坚实支撑。

## 三、现代技术与绿色理念对地域文化表达的创新作用

现代技术与绿色理念在地域文化表达中扮演着创新性桥梁的角色，使传统文化元素在现代建筑中得以更加生动、灵活和可持续的呈现。传统建筑中的地域文化符号往往受制于材料和施工工艺的局限，许多独特的装饰、纹理和空间处理在现代建筑中难以直接复制。然而，现代技术的介入，如数字建模、BIM（建筑信息模型）、3D 打印和计算机辅助设计，使建筑师能够精确还原传统元素的形态与结构，并通过参数化设计对其进行创新性变形与优化。例如，复杂的木雕、砖雕或窗格图案，通过数字化手段可以在保证美学效果的同时，简化施工工序，提高精度与效率。这种技术赋能不仅解决了传统工艺在规模化应用中的难题，也为地域文化在现代建筑中的表达提供了更大的创造空间，使建筑既承载历史文化记忆，又符合现代功能需求与美学标准<sup>[12]</sup>。

绿色理念的引入进一步丰富了地域文化的创新表达，为建筑的生态性与文化性提供了统一的平台。地域文化中蕴含大量与自然环境和谐共处的智慧，如南方庭院的水系调节、北方院落的防风保温、屋顶坡度与光照方向的优化等，这些设计在绿色建筑理念中得以新的诠释。通过节能材料、可再生能源、自然通风与光照模拟等绿色技术，建筑能够在保持地域特色的同时，最大化降低能耗和环境负荷。例如，传统屋顶的坡度与屋檐延伸不仅满足排水和遮阳的功能，通过现代材料和结构优化，也可以实现雨水收集、太阳能光伏集成与温控调节，使建筑在生态层面具备现代意义的可持续性。绿色理念不仅提升了建筑的环境适应能力，也使地域文化在现代语境下实现了功能与审美的双重创新。

此外，现代技术与绿色理念的结合，为地域文化在建筑中的动态创新提供了方法论支持。设计师可以通过虚拟现实、模拟拟

件和环境数据分析,对地域文化元素的表现形式、空间组织及材料选择进行科学实验,从而找到传统文化与现代需求之间的最佳融合点。数字化与绿色技术不仅使文化元素的呈现更具精度和灵活性,还促进了建筑的可持续管理和长寿命使用。例如,通过智能传感器监测建筑能耗与使用情况,可以动态调整空间功能与能源系统,实现建筑对自然环境的响应式适应。现代技术与绿色理念为地域文化提供了创新的表达工具,使建筑不再是单向的文化再现,而成为承载历史记忆、融合现代科技与生态理念的多维文化载体。通过这种创新路径,地域文化在现代建筑中不仅得以保护和传承,还焕发出新的生命力和社会价值。

#### 四、基于地域文化的现代建筑设计融合与发展策略

基于地域文化的现代建筑设计融合与发展策略,旨在实现传统文化与现代建筑理念的有机结合,使建筑在功能性、艺术性和文化性之间形成协调统一的整体。在现代建筑实践中,地域文化不仅是历史的延续,也是塑造建筑独特性的重要资源。设计策略首先应注重文化元素的提炼与再创造,通过对地方历史、民俗风情、建筑工艺和自然环境的深入分析,将具有代表性的符号、纹理和空间逻辑融入现代设计中。这样的策略不仅保证建筑的文化认同感,也使其在全球化趋势下保持独特的地方特色。通过文化元素的合理应用,建筑能够在视觉、空间和使用体验上与周边环境形成共鸣,从而增强城市景观的整体品质和人文氛围。

在具体实践中,融合策略应同时考虑材料、结构、空间布局与技术应用等多方面因素。传统材料与现代工艺的结合,使建筑在延续地域文化特征的同时,提升耐久性、舒适性和功能性。例如,将本地石材、木材或竹材通过现代加工工艺进行优化,既保留了材质的自然质感,又满足现代建筑的结构要求;在空间布局上,借鉴传统院落、街巷或围合空间的逻辑,将人文精神转化为

现代生活功能的组织方式,使建筑空间既具文化认同,又符合现代使用需求<sup>[8]</sup>。同时,现代信息化与智能化技术的引入,使建筑在能源管理、环境调控、施工精度和运营维护等方面更加高效,进一步提升建筑的可持续性和适应性。通过材料、空间与技术的融合,地域文化在现代建筑中得以创新表达,实现传统与现代、文化与功能的统一。

发展策略还需注重社会参与与政策引导,为地域文化的可持续表达提供制度保障与实践支持。首先,设计过程中应重视公众需求与社会文化认同,通过社区参与、文化调研和公众反馈,使建筑设计更贴近地方生活与社会心理。其次,政策层面可以通过历史保护、文化遗产利用和绿色建筑规范,为地域文化的融合提供法律和技术支持,从而鼓励创新性实践。最后,建筑教育与专业培训也应强化地域文化意识,提升设计师在文化提炼、现代创新与技术应用上的综合能力。通过公众参与、政策引导和人才培养的多维策略,地域文化在现代建筑中不仅能够得到保护和传承,还能够创新实践中持续发展,使建筑作品成为地方文化、现代技术与生态理念相互交融的典范。

#### 五、结语

地域文化在现代建筑设计中既是历史记忆的承载者,也是创新表达的源泉。通过对材料、空间布局与技术的融合应用,建筑不仅延续了地域特色,还满足了现代功能与生态需求。现代技术与绿色理念为文化表达提供了更高效、更可持续的手段,使传统元素在当代语境下焕发新生。未来,结合公众参与、政策引导与人才培养的多维策略,地域文化将与现代建筑实现深度融合,推动建筑艺术在传承与创新中持续发展,形成兼具文化价值与社会功能的现代建筑体系。

#### 参考文献

- [1] 唐意贤,李辰皓.地域文化视角下现代建筑设计策略研究——以武汉东湖湿地公约展馆为例[J].住宅与房地产,2025,(11):24-26.
- [2] 贾丽丽.海南建筑装饰设计中的地域文化与生态美学融合路径探讨[J].鞋类工艺与设计,2025,5(12):148-150.
- [3] 孟德良.地域文化视角下博览会场馆建筑的设计研究[D].鲁迅美术学院,2025.DOI:10.27217/d.cnki.glxmc.2025.000168.
- [4] 傅志坚.地域文化元素于现代建筑装饰风格塑造中的融合运用[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第二届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.浙江壮华建设有限公司;,2025:49-50.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.015459.
- [5] 关乐.《现代建筑创作的文化遗产思维》:对现代建筑的现代性、地域性及文化性探究[J].建筑学报,2024,(12):126.
- [6] 黄现庆,邢亚童.地域性文化传承在现代建筑工程设计中的应用探索[J].中原文化与旅游,2024,(17):46-48.
- [7] 张翊婧.地域文化元素在现代建筑设计中的融入与表达[J].四川建材,2024,50(11):51-53.
- [8] 刘官正.基于地域文化在建筑设计中的应用研究[J].建设科技,2024,(18):86-88.DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2024.18.024.



# 基于数据分析的电解铝生产过程故障诊断方法研究

魏建军

国家电力投资集团有限公司铝电投资有限公司宁东铝业分公司，宁夏 银川 750021

DOI:10.61369/ERA.2025090006

**摘 要：** 电解铝是国内重要的有色金属生产行业，其生产质量、产量不仅会影响到建筑、航空航天等多个领域的发展，还会影响到国民经济的发展。新时期，传统故障诊断方法已经逐渐落后，存在着检测效率低、准确性低等问题，难以发现潜在的故障隐患。基于数据分析的故障诊断方法开始应用在电解铝生产过程中，能够准确识别故障、提升生产效率、节约生产成本等。本文将聚焦电解铝生产过程，探索常见的故障类型及影响，提出基于数据分析的电解铝故障诊断方法。希望推动电解铝行业安全生产、高效运行。

**关 键 词：** 电解铝；故障诊断；数据分析

## Research on Fault Diagnosis Method of Electrolytic Aluminum Production Process Based on Data Analysis

Wei Jianjun

Ningdong Aluminum Industry Branch, Aluminum and Electricity Investment Co., Ltd. State Power Investment Corporation Limited, Yinchuan, Ningxia 750021

**Abstract：** Electrolytic aluminum is an important non-ferrous metal production industry in China. Its production quality and output not only affect the development of multiple fields such as construction and aerospace, but also the development of the national economy. In the new era, traditional fault diagnosis methods have gradually fallen behind, with problems such as low detection efficiency and low accuracy, making it difficult to identify potential fault hazards. Fault diagnosis methods based on data analysis have begun to be applied in the production process of electrolytic aluminum, which can accurately identify faults, improve production efficiency, and save production costs, etc. This article will focus on the production process of electrolytic aluminum, explore common types of faults and their impacts, and propose a fault diagnosis method for electrolytic aluminum based on data analysis. It is hoped to promote the safe production and efficient operation of the electrolytic aluminum industry.

**Keywords：** electrolytic aluminum; fault diagnosis; data analysis

## 引言

电解铝生产过程十分复杂，涉及到了多个环节、不同型号的生产设备等，极易出现各种故障。一些故障不仅会降低生产效率、提升生产成本，还有可能引发安全事故。因此，及时准确地判断电解铝生产过程中的故障是非常有必要的。

## 一、电解铝生产过程分析

### （一）电解铝生产原理

电解铝生产利用了冰晶石-氧化铝融盐电解法，需要将冰晶石和氧化铝放置在电解槽中，前者为溶剂后者为溶质，通入直流电后就会产生电化学反应，进而分解出铝液与氧气。这个过程工作人员必须严格把控冰晶石和氧化铝的比例，如果比例合理，电解反应就能稳定进行。如果比例失调，不仅会降低电解反应的效

率，还会降低铝液的产量与质量。

### （二）电解铝生产流程

电解铝生产涉及到了三个环节：原料制备、电解槽作业、铝液铸造。

第一，原料制备。工作人员需要做好氧化铝原料的预处理工作，包括：破碎、研磨、干燥处理等。这个过程能够清除其中的杂质与水分。同时还需要调配冰晶石，确保其分子比在合理的范围内。

第二，电解槽作业。工作人员要将经过预处理的原材料放置在电解槽中，之后通入直流电进行电解反应。电解槽是生产过程中最重要的设备，内部结构比较复杂，包含：阴极、阳极以及电解质等部分。在电解槽作业时工作人员要精准控制温度、电流及电压等各项参数，还要结合实际情况添加氧化氯、调整电解质成分等。

第三，铝液铸造。工作人员需要从电解槽中抽出电解产生的铝液，并进行净化处理。通过净化清除其中的杂质与气体，提高铝业纯度。之后根据产品需求选择合适的铸造工艺，完成铝业铸造工作。

## 二、电解铝生产过程中的常见故障类型及影响

### （一）阳极相关故障

第一，阳极效应。这是电解铝生产过程中较为常见的故障，如果阳极表面的氧化铝浓度比较低，表面就会生成一层气体膜。阳极电压会快速升高、电流效率则会快速下降，这会影响到电解槽的稳定运行，产生大量的热量与有害气体。例如：某电解铝厂在发生阳极效应后，电解槽电压从4V突然升高至10V，消耗了约10%的电能。同时还产生了一氧化碳和氟化物等有害气体，不仅污染了车间环境，还损害了工作人员的身体健康。

第二，阳极脱落。在电解过程中阳极可能会从阳极导杆上脱落，进而导致电解槽局部电流分布不均匀，这既会降低铝液质量，又会引发停槽问题，给电解铝厂造成经济损失。例如：某电解铝厂在正常电解时因机器振动导致阳极从导管上脱落，生产的铝液出现了大量杂质，只能停槽修复，这期间产生了数十万的经济损失。

### （二）电解质相关故障

第一，电解质成分异常。冰晶石分子比例失调、氧化铝的浓度过高或过低都是电解质成分异常的表现。前者会影响到电解质的熔点与导电性，降低电解槽的生产效率。后者可能会提高电解质的熔点或降低导电性，影响正常生产工作的开展。例如：某电解铝厂出现了冰晶石分子失调的问题，当日电解质熔点急剧升高。工作人员将电解槽温度提升至50℃才能够正常生产，这个过程消耗了大量电能。

第二，电解质温度异常。电解质温度过高或过低都是温度异常的表现。如果温度过高可能会加快阳极的氧化反应，导致阳极消耗过快，进而增加整体的生产成本。例如：某电解铝厂的冷却系统出现故障后电解质温度持续升高。导致阳极消耗速度达到了平时的130%，工作人员只能频繁更换阳极，这既会增加生产成本，又降低了生产效率。

### （三）电解槽内衬故障

第一，内衬破损。电解槽的内衬材料如果使用时间较长，就会出现裂缝、剥落的现象。这会导致电解质泄漏、外壳腐蚀等情况发生，不仅会缩短电解槽的使用寿命还会造成环境污染。例如：某电解铝厂的内衬材料质量不达标，在使用阶段产生了裂缝。电解质泄漏后腐蚀后腐蚀了电解槽外壳。工作人员只能够停

产更换内衬材料。这不仅降低了生产效率，还消耗了大量资金。<sup>[1]</sup>

第二，内衬侵蚀。电解质会侵蚀内衬材料，导致其不断变薄，进而逐步失去保温性能。这会加快电解槽的散热速度，为了维持电解槽的温度，就需要消耗更多的电能。例如：某电解铝厂电解质成分中的氟化物含量较高，严重侵蚀了内衬材料，导致内衬材料变薄，无法发挥正常的保温作用。一段时间后电解槽的电能消耗达到了平时的115%。

### （四）供电系统故障

第一，整流器故障。整流器是供电系统的核心设备，在出现故障后就无法稳定的输出直流电。不仅会影响到电解槽的正常运行，还有可能引发短路造成安全事故。例如：某电解铝厂的整流器由于元件老化出现故障引发了短路事故，导致部分设备出现问题，产生了数十万设备维修及更换费用。

第二，母线故障。母线连接着整流器与电解槽，如果其出现问题就会影响到电流的均匀分布。这会导致电解槽过热、出现故障，进而无法稳定运行。例如：某电解铝厂的母线接头松动后接触电阻突然增加，出现了过热现象，进而导致部分电解槽电流分布不均，生产效率大幅度降低。<sup>[2]</sup>

## 三、基于数据分析的电解铝故障诊断方法

### （一）数据采集与预处理

第一，数据采集。在电解铝生产过程中会产生大量的数据，这些数据是故障诊断的基础依据。因此工作人员需要在重要位置安装传感器，以获取电解槽电压、电解质成分、电流等相关数据。可在电解槽上安装电压传感器实时监测两端的电压变化。根据电压波动情况判断电解过程是否产生异常。例如：在出现阳极反应时电压会快速升高。工作人员还可以电解槽上安装电流传感器，如果电流不稳定则表明可能出现电路故障、电解反应等异常情况。在电解槽的阳极、阴极以及电解质内部都要安装温度传感器，全面监测温度分布及变化情况。除这些基础参数外，工作人员还要利用化学分析传感器监测电解质的成分。包括：冰晶石分子比与氧化铝浓度。如果这些成分出现异常，也会影响到电解过程的稳定性。<sup>[3]</sup>

此外，工作人员还要获取生产管理系统中的数据，根据生产计划数据判断现阶段的生产状态是否正常，根据设备运行状态数据判断各项设备是否处于健康运行状态。综合分析已采集到的数据，就能全面把握电解铝生产过程的运行情况。

第二，数据预处理。工作人员采集到的原始数据一般存在噪声、缺失值等问题，如果不进行预处理就会影响到后续数据分析的准确性与可靠性。因此，工作人员要通过数据清洗去除原始数据的噪声和异常值。这个过程可利用均值滤波、终止滤波等滤波算法处理数据。还要通过设定合理阈值范围的方式修正正常范围外的数据；工作人员可以通过数据化归一的方式，将数据统一到相同的尺度上，方便后续的分析处理；工作人员还可以利用移动平均法等数据平滑方式，提高数据的稳定性。移动平均法是通过计算数据的滑动窗口平均值平滑数据的一种方式。

## （二）特征提取与选择

第一，特征提取。工作人员要在原始数据中找到可以反映故障特征的信息，以此为参考进行故障诊断。在电解铝生产过程中工作人员可以应用不同方式、从多个角度提取特征。例如：时域分析法。是一种分析数据在时间域上的变化规律进而提取特征的方式。在分析电压数据时，工作人员可以从平均值、标准差、最小以及最大值等角度入手统计特征。平均值能够反映电压的总体水平，标准差可以看到电压的波动程度。在出现阳极效应后电压的标准差会明显增大。工作人员在提取到该特征后就能够进行故障判断；温度分析法。能够根据温度在空间上的变化率、温度梯度判断电解槽内部是否出现问题。如果电解槽内部局部过热就会出现温度梯度异常的问题。工作人员在提取到该特征后，就能够进行故障判断。

第二，特征选择。由于原始数据量大，提取到的特征数量可能较为庞大，其中一部分特征在故障诊断环节是无意义的，还会增加计算难度。因此工作人员要做好特征选择，选出有代表性、有区分性的特征。例如：某电解铝厂会利用相关性分析法筛选特征。也就是计算特征间的相关性，找出与故障相关性较高的特征，将其设定为筛选标准。一般情况下，温度变化率与电解质温度异常故障的相关性较高。工作人员可以将其设定为筛选标准，纳入筛选范围；主成分分析法也是一种应用较为广泛的方式。工作人员需要将原始特征进行线性组合，获取新特征。新特征具有最大的方差，可以代表原始特征的大部分信息。工作人员在进行主成分分析后可以筛选出方差较大的主成分，将其设定为筛选标准。

## （三）故障诊断模型构建

第一，基于机器学习的故障诊断模型。机器学习是一种数据驱动的方式，需要学习大量的历史数据，在此基础上建立故障诊断模型。神经网络、决策树是较为常见的机器学习算法。例如：某电解铝厂基于决策树建立了故障诊断模型。在学习历史故障数据与正常运行数据后，该模型可以根据输入的特征数据，判断其是否存在故障、故障类型。

第二，基于深度学习的故障诊断模型。深度学习可以看作是机器学习的分支，能够自主从数据中学习特征，具有强大的泛化和学习能力。卷积神经网络、循环神经网络等是较为常见的深度

学习模型。例如：某电解铝厂利用卷积神经网络分析，电解铝生产过程的图像数据。在学习电解槽内部图像后该模型能够快速识别内衬破损、阳极脱落等故障。该模型在处理空间结构数据方面优势明显，因此可利用该模型分析电解槽内部分布数据等带有空间分布特征的数据；电解铝厂还可以利用循环神经网络处理序列数据。包括：电压与电流在时间序列上的数据，以此预测故障的发生趋势。

## （四）故障诊断模型评估与优化

第一，模型评估。模型评估是指评估故障诊断模型的性能，包括：准确率、召回率等。例如：准确率能够反映一个模型的整体预测能力。某电解铝厂在评估故障诊断模型时应用了大量的测试数据。发现该模型在判断阳极效应故障时准确率达到92%，表明该模型的性能良好。这个过程工作人员需要注意，如果模型样本占比较小，即使模型将所有的样本都预测为非故障样本，依然可以得到较高的准确率。因此工作人员需要处理好这些不平衡数据集。

第二，模型优化。如果经过模型评估发现某些模型的性能不佳，工作人员就需要通过增加训练数据、调整模型参数等方式进行模型优化。例如：增加训练数据。这是一种提高模型泛化能力的方式。工作人员要搜集更多的历史数据、做好数据增强，增加训练数据的数量。如果是时间序列数据，可利用平移、播放等方式生成新的时间序列样本；调整模型参数。这种优化方式较为常见，不同类型的模型有不同的参数。包括：决策树的树深度、神经网络的学习率等。工作人员要利用随机搜索、网格搜索等方式找到最优的参数组合。通过此类方式可以优化模型，逐步改善其性能。

## 四、结束语

本文深入分析了电解铝的生产过程，结合以往经验及参考资料分析了生产过程中常见的故障类型及影响。并基于数据分析技术提出了电解铝故障诊断方式。包含：数据采集和预处理、特征提取和选择等多个环节。希望通过此类故障诊断方式高效识别电解铝生产过程中的故障，帮助电解铝厂节约生产成本、提升生产效率。

## 参考文献

- [1] 邓卫贵, 梁秉敦. 浅谈电解铝电解槽出铝称重电子秤常见故障及处理方法 [J]. 世界有色金属, 2020, (14): 24-25.
- [2] 于世福, 陈兆娜. 基于主元分析的铝电解槽故障诊断 [J]. 电子世界, 2019, (22): 174-175.
- [3] 杨林峰. 电解铝多功能液压比例泵组的使用与故障诊断探究 [J]. 中外企业家, 2018, (34): 233.

# 水利工程中的岩土地质勘察存在的问题研究

陈焕之

江苏省地质局第一地质大队，江苏 南京 210041

DOI:10.61369/ERA.2025090007

**摘 要：** 水利工程建设对岩土地质条件依赖性强，岩土地质勘察是保障工程安全与质量的关键环节。本文深入分析水利工程岩土地质勘察在技术应用、人员管理、质量控制等方面存在的问题，从勘察技术创新、勘察流程规范、人才培养等维度提出针对性对策，旨在为提升水利工程岩土地质勘察水平，保障水利工程建设科学决策与安全运行提供理论依据和实践指导。

**关 键 词：** 水利工程；岩土地质勘察；勘察技术；质量控制；对策

## A Study on the Issues in Geological Surveys of Rock and Soil in Water Conservancy Projects

Chen Huanzhi

First Geological Brigade, Jiangsu Provincial Geological Bureau, Nanjing, Jiangsu 210041

**Abstract：** Water conservancy projects heavily rely on geological conditions of rock and soil, and geological surveys of rock and soil are critical to ensuring the safety and quality of such projects. This paper conducts an in-depth analysis of the issues encountered in rock and soil geological surveys for water conservancy projects, including technical application, personnel management, and quality control. It proposes targeted strategies from the dimensions of survey technology innovation, standardised survey processes, and talent cultivation, aiming to enhance the level of rock and soil geological surveys for water conservancy projects and provide theoretical basis and practical guidance for scientific decision-making and safe operation in water conservancy project construction.

**Keywords：** water conservancy projects; rock and soil geological surveys; survey technology; quality control; strategies

## 引言

水利工程作为一项重要基础设施，肩负着防洪，灌溉，发电，供水等诸多职能，对于社会经济发展以及民生保障具有重大意义。岩土地质条件的好坏直接关系到水利工程规划，设计，施工和运行安全等各个方面，精确而全面地进行岩土地质勘察可以为工程建设提供翔实的地质资料，有助于工程技术人员对工程方案进行合理的选择，以免因为地质问题而导致工程事故的发生。伴随着水利工程施工规模越来越大，技术要求也越来越高，岩土地质勘察工作正面临着更高的挑战，进一步研究现阶段勘察工作存在的一些问题，并提出行之有效的解决措施，对于促进水利工程高质量施工有着十分重要的意义。

## 一、水利工程岩土地质勘察工作概述

### （一）勘察目的与任务

水利工程岩土地质勘察的目的是查清工程区域岩土层分布，物理力学性质，地下水条件及其他地质信息。具体任务是查明岩土层种类，厚度，埋藏深度和空间分布规律；确定岩土体密度，含水量，压缩性，抗剪强度及其他物理力学指标；分析了地下水种类，水位，水量，水质以及对岩土体，工程建筑等方面的影响；需要明确不良地质现象，例如滑坡、泥石流和岩溶的具体分布、大小及其形成特点。通过系统勘察为水利工程选址，地基处

理，坝体设计和边坡支护提供了可靠地质依据。<sup>[1]</sup>

### （二）勘察阶段划分

水利工程岩土地质勘察通常分计划，可行性研究，初步设计，施工图设计4个阶段进行。规划阶段的勘测以流域或者地区的地质调查为主，对项目的地质条件有一个初步的认识，从而为项目的规划布局提供基础资料；可行性研究阶段的勘测需要详细查清工程场地地质条件、地质论证不同工程方案并推荐最佳工程方案；初步设计阶段的调查对工程地质问题作了进一步的深入研究，并为工程设计提供了详细的地质参数；施工图设计阶段的勘测则是对特定建筑物地基和基础工程进行细致的地质勘察工作，



从而为施工图设计工作提供精确的地质资料。

### （三）勘察方法与技术

常见岩土地质勘察方法有工程地质测绘，钻探，物探，原位测试及室内试验。工程地质测绘是在实地调查的基础上编制工程地质图以查明区域地质概况；以钻探为主取得岩芯样本可以直观地观测岩土层结构；物探是利用不同的物理场来检测地质体的展布情况，例如地震波法和电法勘探；原位测试是指现场对岩土体进行标准贯入试验和静力触探等力学性质测定；通过室内试验测试了岩芯样本的物理力学指标，得到了岩土体详细参数。随着科技的不断进步，遥感技术、地理信息系统（GIS）以及全球定位系统（GPS）也开始在岩土地质勘查中得到广泛应用，从而提升了勘查的效率和精确度。<sup>[2]</sup>

## 二、水利工程岩土地质勘察存在的问题

### （一）勘察技术设备落后

一些勘察单位由于经费所限，仍然采用老旧勘察设备。如果钻探设备钻速较慢，取样质量较差，则很难得到完整岩芯样本；物探设备分辨率不高，检测地质体精度不够，不能准确地查明小型地质构造及不良地质体。陈旧的设备在降低勘察效率的同时也会影响勘察数据精度，造成地质条件判断偏差。

### （二）新技术应用不足

尽管遥感、GIS、GPS等新技术应用于岩土地质勘察中具有很多优点，但是一些勘察人员对于这些新技术还缺乏足够的了解与把握。在实践中，仍然依靠传统的勘察方法进行勘察，没有充分发挥新技术对大范围地质调查，资料处理和分析以及空间信息管理的功能。比如遥感技术能够迅速获得区域地质影像并协助工程地质测绘工作，但是在实际工作中并没有被广泛普及，制约着勘察工作效率与质量的提高。<sup>[3]</sup>

### （三）勘察方法选择不合理

勘测过程中出现了勘测方法选用不恰当等问题。有的勘察人员对工程特点及地质条件考虑不够，盲目引进勘察方法。如果岩溶发育地区没有采取有效的物探方法来检测溶洞的分布情况，单靠钻探是很难充分查清地质情况的；深厚软土地基勘察时，由于没有合理采用原位测试的手段来获得岩土体的力学参数，致使地基设计没有可靠的依据。

## 三、勘察流程与管理问题

### （一）勘察前期准备不充分

勘察前期工程资料搜集不全，工程建设要求及地质背景认识不到位。一些勘察单位没有和设计，建设单位进行充分交流，对项目着重解决的地质问题认识不清，造成勘察方案缺乏针对性。同时勘察人员现场踏勘过程中，没有对地形地貌，地物分布情况进行细致记录，从而影响了后续勘察工作。<sup>[4]</sup>

### （二）勘察过程质量控制不严

在钻探，取样和原位测试过程中，普遍存在着作业不规范的

问题。钻探时对回次进尺控制不严，造成岩芯采取率不高，不能正确反映岩土层的结构；在采样过程中，样品的密封与运输没有按照规范的要求执行，从而影响了室内试验结果的精度；原位测试的操作不够娴熟，测试的数据有错误。另外，勘察单位内部质量检查制度不够健全，不能及时发现并改正勘察中存在的各种问题。

### （三）勘察成果报告不规范

有的勘察成果报告不够全面，资料不够精确，分析不够透彻。报告对地质条件叙述过简，对不良地质作用缺少细致分析与评价；岩土体物理力学指标统计分析不尽合理且没有充分考虑资料离散性；报告编写格式不够统一、图表绘制不够规范等问题影响了勘察成果可读性与实用性。

### （四）勘察人员素质问题

#### 1. 专业知识不足

部分勘察人员对岩土地质勘察没有系统的专门知识，对于地质理论，勘察技术方法了解不深。在实践中，无法对地质现象进行精确判断，对于岩土体力学性质分析也缺少理论依据，造成勘察成果品质低下。比如，在复杂褶皱，断裂构造中，有些勘察人员不能够精确地查明它们的种类及产状，也不能够正确地分析构造在工程中的作用；在岩土体变形分析中，对土力学及岩石力学原理缺乏了解，使用了错误的计算方法并得出了不尽合理的结果。<sup>[5]</sup>

#### 2. 实践经验欠缺

新上岗的勘察人员缺乏实践经验，现场勘察面临复杂地质条件，不能够对地质问题进行准确辨识，不能够对勘察方法与技术手段进行合理的选择。与此同时，勘察设备操作经验不足也影响了勘察工作顺利开展。在面对特定的岩土环境，例如膨胀土或冻土时，新入职的员工由于对其特性和勘查关键点的不熟悉，往往难以制定出高效的勘查策略；新的勘察设备运行过程中由于对运行流程的陌生而造成设备失效或者数据采集出错。

## 四、水利工程岩土地质勘察问题的对策

### （一）加强勘察技术创新与应用

#### 1. 更新勘察设备

勘察单位要增加资金投入和先进勘察设备。例如使用新的钻探设备以提高钻速及取样质量等；装备高分辨率物探设备以促进地质体检测准确性。同时对该装置进行了定期维护与标定，保证了该装置性能的稳定性，为勘察工作的开展提供了可靠的硬件支撑。以全液压力头式钻机为例，该钻机具有自动控制钻进参数，高效取样等特点，能明显提高岩芯采取率与钻探效率；配置三维地震勘探设备可以更加清楚的展现地下地质结构并精确的检测出小型地质构造及不良地质体。<sup>[6]</sup>

#### 2. 推广新技术应用

强化遥感、GIS、GPS新技术训练与应用。组织勘察人员上好新技术培训课，了解新技术原理，方法及应用实例，以提高他们掌握新技术能力。在实际勘察中鼓励采用新技术，例如采用遥感影

像解译工程地质、GIS 系统辅助地质数据管理与分析等，以提高勘察效率与精度。可搭建内部技术交流平台、交流新技术的应用经验与成果；特邀行业专家开展新技术讲座及现场指导工作，协助勘察人员处理实际工作中的难题。

### 3. 合理选择勘察方法

针对工程特点及地质条件科学合理地选用勘察方法。勘察之前，全面搜集工程资料、现场踏勘、地质条件复杂分析、有针对性地拟定勘察方案。对复杂地质区域综合运用各种勘察方法，取长补短，互相印证，保证了对地质情况的全面、准确地查清。以岩溶地区勘察为例，将地质雷达，高密度电法及其他物探方法与钻探验证相结合，精确查清了溶洞分布及发育规律；对深厚软土地基勘察时进行静力触探试验，十字板剪切试验及室内土工试验同步进行，得到了不同视角下岩土体力学参数的变化情况，从而为地基设计提供了综合可靠资料。<sup>[7]</sup>

## （二）规范勘察流程与管理

### 1. 做好勘察前期准备

勘察单位要在工程进行之前就与设计及建设单位进行充分的交流，掌握工程建设要求及着重解决的地质问题。充分搜集工程区域地质，水文和气象数据，并对现场进行细致踏勘，精确记录地形地貌和地物分布情况，并以此为依据制定科学合理勘察方案。可在工程前期建立沟通机制，组织设计，施工和勘察单位开展经常性的技术交流并明确各方面的要求；建立了详尽的资料收集清单及现场踏勘记录表以保证资料收集的完整性与准确性。<sup>[8]</sup>

### 2. 强化勘察过程质量控制

建立和完善勘察质量管理体系，强化勘察过程中各个环节质量控制。建立了钻探，取样和原位测试的作业标准，并要求勘察人员必须严格执行标准。设质量检查岗位定期巡查勘察过程，并不定期抽查发现问题并整改。对于不合格品勘察成果坚决要求进行返工，以保证勘察数据的真实可信。可采用信息化手段建立勘察过程质量监控系统来对勘察数据及操作过程进行实时记录，方便进行质量追溯及问题排查；开展质量检查人员的专业培训，增强质量把控能力。

### 3. 规范勘察成果报告编制

建立勘察成果报告的编制规范，确定报告的内容，形式及要

求。报告应详细叙述地质条件并对不良地质作用作出深入的分析与评价；运用科学合理的手段统计分析岩土体的物理力学指标，真实地反映数据特征；标准的图表绘制保证了图表的清晰性和准确性。同时加强报告编制人员培训，提高报告编制人员专业水平及文字表达能力，确保勘察成果报告的质量。可建立报告审核制度、设定多级审核流程、在专业技术、文字表述上严格审核；定期举办报告编制经验交流，共享优秀报告案例，全面提高报告编制水平。<sup>[9]</sup>

## （三）提升勘察人员素质

### 1. 加强专业知识培训

定期举办勘察人员专业知识培训课程并请行业专家讲课，阐述岩土地质勘察新理论新技术新方法。鼓励勘察人员通过自主学习和参与学术交流，扩大知识面、提高专业素养。可制订年度培训计划并确定培训内容及目标；建立培训考核机制考核培训效果，保证培训实效。

### 2. 注重实践经验积累

建立师徒制的培训方式，由有经验的老工人带新人参加实际勘察项目并在实际工作中传授勘察技术与经验。给勘察人员带来了更多实践的机会，布置他们参加各种地质条件下的水利工程勘察工程，让他们在实际工作中不断地积累经验和提高处理实际问题的水平。可建立实践导师奖励制度对有良好指导效果的老工人进行激励；建立项目实践档案记录勘察人员实践经历与成长。<sup>[10]</sup>

## 五、结论

总之，水利工程岩土地质勘察工作是水利工程建设中的重中之重，目前勘察技术的应用，流程管理以及人员素质都存在着很多的问题，这些问题影响着勘察工作的质量以及工程建设的安全。通过强化勘察技术的创新和运用，规范勘察过程和管理以及提高勘察人员素质的应对措施，可以有效地解决目前存在的问题，促进岩土地质勘察工作水平的提高，为水利工程提供了可靠地质依据，确保水利工程建设科学决策与安全运行。在今后水利工程建设技术不断发展的过程中，岩土地质勘察工作也需要不断完善与提高，才能满足工程建设中提出的新需求。

## 参考文献

- [1] 王鲁昌. 水利工程中的岩土地质勘察存在的问题探索 [J]. 珠江水运, 2021, (19): 86-87.
- [2] 张鸿强. 水利工程中的岩土地质勘察存在的问题探索 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2022, (04): 133-1353.
- [3] 郭健. 水利工程地质勘查与岩土治理问题分析及对策 [J]. 文摘版: 工程技术 (建筑), 2016, (05): 170.
- [4] 温浩. 水利工程地质勘察与岩土治理问题分析 [J]. 中国科技投资, 2019, (16): 83.
- [5] 钟书尧. 岩土工程地质勘察过程中的水文地质相关问题研究 [J]. 中国房地产业, 2021, (13): 250.
- [6] 游成杰, 华超明. 加强岩土工程地质勘察技术对策研究 [J]. 大众标准化, 2021(3): 46-48.
- [7] 尹旭, 许俊燕. 水文地质对岩土工程地质勘察的影响探讨 [J]. 大科技, 2021(3): 131-132.
- [8] 王跃新. 岩土工程地质勘察质量影响因素及强化措施 [J]. 科学与财富, 2021, 13(5): 152.
- [9] 付敏. 岩土工程勘察在复杂地质条件下的技术应用探讨 [J]. 西部探矿工程, 2019, 31(05): 26-27.
- [10] 韩艳伟. 水利工程建设岩土勘察常见问题及处理 [J]. 科技创新与应用, 2019(13): 130-131.

# 箱型薄壁混凝土水池裂缝控制方法研究

陈文俊，廖辉军

上海水务建设工程有限公司，上海 200082

DOI:10.61369/ERA.2025090009

**摘 要：** 供水以及污水处理建筑物对裂缝控制要求很高，而这些构筑物又大多为箱型薄壁形状，尤其是采用混凝土结构时，容易产生裂缝，本文从混凝土原材料选择，配合比设计，施工过程控制以及后期养护四个阶段对裂缝产生的原因及控制措施进行分析阐述，并结合在某供水厂施工实践，提出针对性解决方案，以供借鉴与参考。

**关 键 词：** 箱型；薄壁；混凝土；裂缝

## Research on the Control Method of Concrete Cracks in Thin -walled Water Pools

Chen Wenjun, Liao Huijun

Shanghai Water Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai 200082

**Abstract：** Water supply and sewage treatment buildings have high requirements for crack control, and most of these structures are box shaped and thin-walled. Especially when using concrete structures, cracks are prone to occur. This article analyzes and elaborates on the causes and control measures of cracks from four stages: selection of concrete raw materials, mix design, construction process control, and later maintenance. Combined with construction practice in a certain water supply plant, targeted solutions are proposed for reference and reference.

**Keywords：** box shaped; thin-walled; concrete; cracks

### 一、工程概况

某城乡供水一体化项目，由于地处市郊，用地紧张，其清水池与絮凝沉淀池采用叠池结构，池体长104.55米，宽18.75米，高9.60米，共4个。其中下层清水池高5.65米，底板厚0.6米，中隔板厚度0.25米，池壁厚度0.30米；上层沉淀池高3.95米，底板厚0.35米，中隔板厚度0.25米，池壁厚度0.30米。根据地勘报告揭示的地质情况，絮凝沉淀清水池采用钢筋混凝土筏板基础，以粉质粘土层为持力层，地基承载力特征值  $f_{ak}=200\text{kPa}$ ，筏板基础与底板合并布置。设计图纸中要求池壁及底板采用内掺8%高性能混凝土膨胀剂补偿收缩混凝土，抗渗等级为P6，强度为C35。在满足混凝土强度等级和抗渗要求下，同时达到砼的限制膨胀率为I型，水中7d限制膨胀率大于等于0.035%，空气中21d限制膨胀率大于等于-0.015%。

由上可以看出，虽然该结构厚度达到0.3米，但该厚度远较长度、宽度为小，因此可认为薄壁结构。

混凝土是一种非均质脆性材料，其组成成分主要有粗细骨料、水泥、添加剂以及留存其中的气体和水。新拌混凝土在温度和湿度变化的条件下，硬化过程中会产生体积变形，各种材料的变形系数不一样，相互约束产生变形应力，造成在骨料与水泥石

接合面或水泥石本身之间出现肉眼看不见的微细裂缝，这种裂缝分布并不规则，也不连贯，但在外力作用或者温差，干缩等情况下，这种裂隙会进一步扩展进而相互贯通，少数贯通性裂缝会引起渗漏，从而影响水池质量。其中施工环境的温度是造成薄壁混凝土裂缝的重要因素，混凝土对温度变化的敏感度较高，当环境温度变化较快时，混凝土内部的应力和应变会变大；当夏季温度超过32℃时，混凝土中的水化热现象会明显加剧，混凝土内部的温度会快速升高，从而导致混凝土内外温差过大，混凝土表面容易出现裂缝。在冬季低温的环境下，混凝土容易受到冻融循环的影响，当混凝土表面存在水分时，这些水分在冻结时会膨胀，导致混凝土内部产生压力；当融化时，压力释放，导致混凝土表面出现微小的裂缝。这种反复的冻融过程会使裂缝逐渐扩大，从而导致裂缝的产生。根据以往施工经验，长墙薄壁结构所产生的温度和收缩变形在高度方向是自由的，但在纵向却受到底板的约束，在长墙承受降温 and 收缩作用时，必将产生缩短变形，受到底板的约束，引起拉应力，当拉应力超过抗拉强度时便引起开裂，这时裂缝方向永远垂直于拉应力方向，大多呈现为竖向裂缝，这种裂缝在靠近底板的位置较小，上部较大。<sup>[1]</sup>

由上可以看出，导致水池出现裂缝的因素有很多，如水池的结构形状、伸缩缝位置设计，池体的长期收缩应力影响，水池不

作者简介：

陈文俊（1993.12—），男，安徽芜湖人，汉族，研究生，中级工程师，研究方向：水利、市政。

廖辉军（1979—），男，大学本科，高级工程师，研究方向：市政工程以及公路工程。



断的蓄水排水过程中池壁受到的压力交替变化,地基的不均匀沉降,混凝土水灰比浇筑振捣、后期养护,池体长期外露、不蓄水导致混凝土内水分蒸发,形成连通孔隙等,本文仅就混凝土水池施工阶段中池壁裂缝产生的原因进行分析与探讨,并在实践中总结出对应的解决办法,以供借鉴与参考。

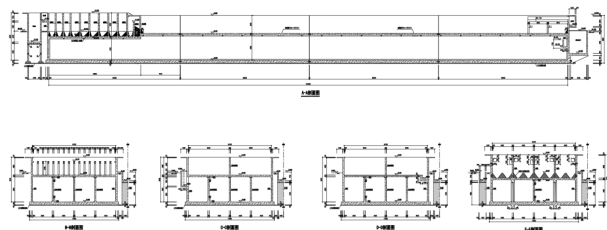


图1 纵横剖面图

## 二、混凝土配合比设计及原材料选择

池壁早期裂缝的产生,多由浇筑后混凝土内外温度不一以及后期混凝土表面收缩等原因产生,因此,在混凝土配合比设计时,选用低水化热水泥,并尽可能的降低水泥用量,是控制裂缝的有效方法之一。在满足强度等指标要求的前提下,选用低水化热水泥,降低水化热,控制混凝土内外温差。大量的文献研究及经验表明:低热硅酸盐水泥的水化热低,3d、7d水化热比中热水泥低15%~20%,而且水化放热平缓,峰值温度低。其早期强度较低,但后期强度增进率大,28d强度与硅酸盐水泥相当,3~6个月龄期强度高于硅酸盐水泥10~20Mp。水厂的建设周期长,水池结构完成后,还有设备安装调试等工作需要大量时间,这样就完全可以利用低热硅酸盐水泥后期强度高的特点,在配合比设计时,充分降低水泥用量,预留强度增加空间。既能降低水化热,保证质量;又能降低工程造价,达到经济性与实用性双赢的良好效果。<sup>[2]</sup>

钢筋混凝土配筋率是影响混凝土抗裂的因素之一,素混凝土的抗裂能力很差,结构内部的拉应力会出现开裂现象,在素混凝土中增加钢筋能有效增强结构的抗变形能力,钢筋的抗拉性能强,可以分担混凝土的拉应力,有效阻止混凝土的变形,从而提高混凝土结构的抗拉性能,达到减少裂缝的作用。大量的文献研究及经验表明:混凝土中增加钢筋可以使其抗拉能力提高30%以上,且钢筋配筋率越高,钢筋直径越小,其抗拉性能越好,因此,在设计阶段,需要对混凝土结构进行合理配筋,特别是薄壁结构,还要进行配筋优化,从而提高薄壁结构的抗裂性能。

通过试验研究表明,薄壁结构混凝土的配筋宜尽量采取小直径、小间距的方式,钢筋配筋率不宜过高,当钢筋配筋率超过1%时,会造成钢筋的浪费,同时由于钢筋约束力过大,混凝土可能会因收缩而产生裂缝。本工程絮凝沉淀清水池池壁配筋设计图纸采用三级钢筋直径14mm、间隔150mm,经过参建各方同意,设计复核验算,优化后钢筋采用12mm的三级钢筋、间隔100mm,提高了钢筋配筋率,钢筋混凝土结构抗拉性能也提高了,减小了混凝土结构出现裂缝的风险。

在配合比设计时,还可掺入一定比例的粉煤灰并使用缓凝剂:掺入粉煤灰不仅可以进一步降低水泥用量,还使混凝土拌合过程中的需水量减小,从而降低混凝土早期干燥收缩,使混凝土密实性得到很大提高;另外粉煤灰中的微细颗粒均匀分布在水泥颗粒之中,能填充水泥颗粒间的空隙,改善胶凝材料的颗粒级配,进一步增加水泥胶体的密实度。缓凝剂延长了混凝土的凝结时间,让水泥硬化放热的过程趋于平稳缓和,利于降低养护过程中池壁混凝土的内外温差。而混凝土保持塑性时间的延长,也有利于混凝土浇筑尤其是池壁大方量混凝土浇筑过程中的质量控制<sup>[3]</sup>。

还需要注意的是,混凝土掺合料很多时候存在不合格的问题,骨料的质量控制也容易被忽视,对原材料成分合格率进行分析,其中的骨料合格率无疑是最低,常出现级配不科学、含沙量过大等各类情况,因此必须给予充分关注。同样水泥用量的情况下,研究人员测试含泥量分别为0.3%、0.7%、1%、2%、4%时混凝土的性能。含泥量为0.3%时,28d抗折强度和抗压强度分别为5.3MPa和42.6MPa;当含泥量提高至4%时,抗折强度和抗压强度分别降为4.1MPa和35.6MPa。所以,砂石含泥量对混凝土的抗折和抗压强度均有较明显的不利影响。研究人员还发现,当含泥量从0%向2%增加时,混凝土的渗水高度不断升高,从76mm上升到124mm,但抗渗压力都不断降低,从0.9MPa下降到0.6MPa。因此,要控制水化热,进一步降低水泥用量,就要严格控制砂石的含泥量,要求进场的砂石必须清洁干净,必要时要求对砂石进行清洗满足含泥量要求后才能投入使用。

综上所述,混凝土原材料宜采用低收缩、低水化热水泥,粗骨料级配应连续、细骨料级配合理,采用中砂,严格控制石子含泥量<1%,砂含泥量<3%,混凝土水胶比<0.5,坍落度不宜过大,采用泵送混凝土时,其坍落度宜控制在14~16cm以内<sup>[4]</sup>。

## 三、施工过程控制

由于水池结构的特殊性,池壁的浇筑过程需要较长的时间,因此,若不设置合理的浇筑顺序、分段长度及分层高度等,后期就极容易在施工缝,接头等位置产生裂缝。在实际施工时,受现场作业条件、商品混凝土公司供应能力、现场作业班组的技术熟练程度等因素影响,稍有不慎就会出现因浇筑间隔时间过长,先浇筑的下层混凝土已开始初凝,才开始上层混凝土浇筑的情况。由于两次浇筑的混凝土不能充分相互充填搅拌均匀,拆模后可以发现明显的连续施工缝痕迹,不仅影响外观,在该结合面上也极易产生裂缝,渗水等质量问题。

以最长的一块池壁进行分析,长度104.55m,池壁厚度0.3m,纵向设置有3道伸缩缝,平均分段长度26m,下层池壁浇筑时,每段浇筑高度5m,每次浇筑量39m<sup>3</sup>。泵车每小时泵送能力为15m<sup>3</sup>,综合考虑混凝土的供应能力、现场的施工条件等因素,池壁浇筑时,混凝土的初凝时间宜控制在4小时左右,侧墙、池壁应分层浇筑,层厚300~400mm,混凝土落高不宜超过2.5m,超过2.5m应使用流槽或漏斗管,必要时还可适当延长混凝土初凝时



间,确保新旧混凝土结合致密,混凝土要振捣密实,在钢筋密集区域及倒角位置,可以预留振捣孔洞或布置平板震动器,确保混凝土结构密实。

施工过程中设置合理的混凝土保护层也能避免混凝土裂缝的出现,混凝土保护层能有效地保护混凝土表面免受外界环境的侵蚀和破坏,减少混凝土表面出现裂缝、脱落等现象。混凝土保护层厚度的设置根据混凝土结构的不同而不同。薄壁结构的混凝土保护层厚度不应小于20mm,在施工过程中,为保证混凝土保护层厚度,需设置混凝土保护层垫块,混凝土垫块间距不应大于1m;施工过程中要保证模板的严密性、稳定性,振捣时避免直接触碰到混凝土垫块,以免造成混凝土垫块脱落<sup>[9]</sup>。

施工时还应该尽量减小自然环境温差,科学合理的安排混凝土浇筑时间,如在夏季时,尽量安排在温度相对较低的夜间施工,白天施工时应防止太阳曝晒,必要时采取临时遮盖措施,冬季则在白天浇筑,尽量避开在昼夜温差比较大的气候条件下进行池壁混凝土浇筑。

在混凝土浇筑完成后,有必要推迟拆模时间,尽量控制内外温差。池壁采用保湿较好的胶合板支模,在墙顶部设水管慢淋养护,拆模时间不小于5天,拆模后用温麻袋紧贴墙体覆盖,并浇水养护,保湿时间不小于14天。尤其在冬季施工时,底板混凝土浇筑完成后,表面要全覆盖保温,覆盖材料还要一直保持湿润状态;池壁在拆模后,混凝土表面也要保温覆盖,保温湿润;对于梁、顶板及悬挑结构,则要严格按照规范及设计要求,在混凝土达到要求的强度后才能拆除支撑。

#### 四、易出现裂缝位置的加强措施

从原材料选择,配合比设计到混凝土浇筑、养护,在水池构筑的建造过程中,全过程进行科学严格的质量控制,拆模后,在

池壁,底板等位置均未发现裂缝。但在絮凝沉淀池进行满水试验时,还是发现在池壁的中间部位有竖向的渗水痕迹,表明局部位置仍然存在有细小裂缝,分析施工过程发现,虽然严格控制了分段、分层的高度、长度等参数,但由于浇筑时处于夏季高温季节,浇筑间过长,多个作业面的进度未能完全保持一致,此处裂缝正是两个作业面的最后交会位置,结合部位混凝土前后浇筑时间相差超过2小时,虽然先浇混凝土没有初凝,振捣时也特别注意了结合面位置的振捣质量,但最终该位置还是出现了裂缝。后续池壁浇筑时在预留结合面设置了一道金属止水带,避免了该现象再次发生<sup>[9]</sup>。

在结构较厚的位置以及在应力较集中的位置,如池壁底部的倒角位置,结构的中间位置,转角位置等,也可以再增设一层细钢筋网片,避免出现混凝土表层收缩裂缝。

#### 五、结论

通过对混凝土施工全过程进行控制,从原材料选择到混凝土浇筑养护:①混凝土配合比的控制,在混凝土中掺加一定量的具有减水、增塑、缓凝等作用的外加剂,改善混凝土拌合物的流动性、保水性,降低水化热,推迟热峰的出现时间。②合理安排混凝土浇筑时间、施工工序,分层、分块浇筑,以利于散热,减小约束。③加强混凝土的养护,增加洒水养护的次数,推迟拆模时间,避免过早阳光直射、干风吹袭,并适当延长混凝土的养护时间。通过以上方式可以降低混凝土水化热,减小混凝土内外温差,有效的控制了池壁裂缝的产生,保证了水池的成品质量。水池完工后,除最先施工的一块池壁局部有渗水现象外,其余各部位在满水试验时均未出现漏水渗水情况,池壁表层平整光滑,色泽一致,其余如抗压、抗折强度,表观质量等指标也均完全满足规范设计要求。

#### 参考文献

- [1] 刘声远,孙颖,齐向阳.钢筋混凝土水池裂缝的分析与处理[J].辽宁工程技术大学学报,2007,(02):228-231.
- [2] 何益斌,肖阿林,卢利平,等.某工程水池池壁开裂原因分析及防治措施[J].四川建筑科学研究,2009,35(01):108-110.
- [3] 王春发.砂石含量对混凝土强度的影响[J].混凝土及建筑构件,1982,(01):37-41.
- [4] 李雯霞.砂中含泥量对混凝土性能的影响研究[J].粉煤灰,2015,27(03):33-35.
- [5] 刘岩.污水处理厂大面积薄壁混凝土抗裂技术研究[J].城市道桥与防洪,2016,(05):184-186+18.
- [6] 成千兵.薄壁混凝土裂缝产生原因及防治对策[J].建材发展导向,2023,21(16):63-66.

# 黑龙江省地下水资源动态监测体系构建与运行维护技术研究

徐磊<sup>1,2</sup>, 赵剑<sup>1,2</sup>, 那帅博宁<sup>1,2</sup>, 王洋<sup>1,2\*</sup>

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ERA.2025090034

**摘要 :** 黑龙江省地下水资源动态监测体系构建与运行维护意义重大。构建时, 监测站点布局需综合地理地质条件, 优化站点分布; 选取水位、水质、水温为监测指标, 采用不同监测方式; 融合传统与新兴技术手段。运行维护涉及设备检修校准、数据传输存储、系统安全管理及应急处理。当前, 该体系面临资金不足、技术人才短缺、部门协调困难等问题, 可通过拓宽资金渠道、培养引进人才、建立跨部门协调机制等策略解决, 助力地下水资源科学管理与可持续利用。

**关键词 :** 黑龙江省; 地下水资源; 动态监测体系; 运行维护技术

## Research on the Construction and Operation Maintenance Technology of Dynamic Monitoring System for Groundwater Resources in Heilongjiang Province

Xu Lei<sup>1,2</sup>, Zhao Jian<sup>1,2</sup>, Na Shuaiboning<sup>1,2</sup>, Wang Yang<sup>1,2\*</sup>

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

**Abstract :** The construction and operation maintenance of a dynamic monitoring system for groundwater resources in Heilongjiang Province are of great significance. During the construction process, the layout of monitoring stations should integrate geographical and geological conditions to optimize their distribution. Water level, water quality, and water temperature are selected as monitoring indicators, employing various monitoring methods and integrating traditional and emerging technological means. Operation and maintenance involve equipment inspection and calibration, data transmission and storage, system security management, and emergency response. Currently, the system faces challenges such as insufficient funding, a shortage of technical talent, and difficulties in departmental coordination. These issues can be addressed through strategies like expanding funding channels, cultivating and attracting talent, and establishing cross-departmental coordination mechanisms, thereby facilitating scientific management and sustainable utilization of groundwater resources.

**Keywords :** Heilongjiang Province; groundwater resources; dynamic monitoring system; operation and maintenance technology

## 引言

黑龙江省地处中国东北部松嫩平原和三江平原腹地, 地下水资源分布广、储量丰富, 主要分布于松嫩平原、三江平原及山区盆地, 以孔隙水为主。作为农业大省, 其农业、工业及城乡供水高度依赖地下水, 不合理开发引发水位下降、水质恶化等问题, 威胁资源可持续利用与生态安全。因此, 构建科学的地下水资源动态监测体系并加强技术研究意义重大, 可掌握动态规律, 为科学管理提供数据支撑。

## 一、黑龙江省地下水资源动态监测体系构建

### (一) 监测站点布局

黑龙江省地理条件复杂, 地形涵盖山地、平原和丘陵, 地质

结构呈现显著空间异质性, 这种独特的地理地质背景深刻影响着地下水资源的分布与动态变化。因此, 在规划地下水监测站点布局时, 必须充分考量区域地理、地质及水文条件, 遵循全面性、代表性和经济性等基本原则<sup>[1]</sup>。全面性原则要求监测站点覆盖全省

通讯作者: 王洋, 84914431@qq.com。

主要水文地质单元，实现对地下水系统的整体监控；代表性原则强调站点应能精准反映特定区域的水文地质特征，诸如不同含水层的分布与性质；经济性原则需在满足监测需求的前提下，合理优化资源配置，杜绝不必要的资源浪费，同时还应结合已有研究成果，综合确定监测点的空间分布与功能定位。

目前，黑龙江省虽已构建起较为完善的地下水监测站点网络，但现有站点分布存在不均衡现象。三江平原和松嫩平原等重点区域监测密度较高，而偏远地区站点数量不足，致使全省监测存在覆盖盲区。此外，部分站点受长期运行及环境因素影响，出现设备老化、数据传输不稳定等问题，严重影响监测数据的准确性与连续性。

### （二）监测指标选取

地下水动态观察，乃水文地质勘查的关键所在。通过侦测地下水流变化，诸如水深、水质及流量数据，对地下水系统的活动状况能掌握即时。解析监测信息，能预测地下水深浅、水位趋势、季节性变异等。此信息能为地下水资源的合理运用，如寻水开采、供水，提供准则。水资源管理者，利用监测信息，能及时告知并对付地下水过度采掘、水质污染等，以保护地下资源的永续利用<sup>[2]</sup>。

黑龙江省地下水资源监测体系以水位、水质、水温监测为核心，为科学管理提供支撑。水位监测作为资源量变化的晴雨表，通过人工与自动化设备结合，实时采集数据传输至数据中心，动态掌握补给排泄规律。监测频率依水文条件和需求调整，如灌溉期加密监测，确保精准评估储量变化。水质监测聚焦 pH 值、溶解氧、重金属等指标，采用实验室分析与便携式仪器快速检测，建立数据库追踪污染趋势，保障农业、工业及生活用水安全。水温监测同步开展，利用高精度传感器探查地下水循环与热交换，异常波动可预警热水资源分布或热污染问题，数据还用于校正其他指标误差。三者协同形成动态监测网络，为地下水资源保护与合理利用提供科学依据，护航区域可持续发展。

### （三）监测技术手段

在黑龙江省地下水资源动态监测中，传统与新兴技术协同发展。传统人工监测（如测绳、水位计）凭借简便、低成本的优势，在偏远地区及应急场景中不可或缺，其获取的第一手数据为研究奠定基础，但监测频率低、时效性差、误差大限制了应用。新兴技术则突破局限，例如自动化设备实时采集并无线传输数据，提升效率与精度；遥感结合卫星与无人机，大范围获取地表信息；GIS 构建三维模型，实现可视化分析与预测，为科学管理提供支撑<sup>[3]</sup>。

为优化技术融合，需制定互补策略：小范围精细监测采用传统方法，大范围宏观监控依赖新兴技术；例如农业灌溉区可结合人工与自动化设备，平衡时效性与成本。同时搭建统一数据平台，整合多源信息，形成全面准确的监测结果。这种融合既弥补单一技术缺陷，又为构建动态监测体系提供支撑，推动地下水资源管理向科学化、精细化发展。

## 二、黑龙江省地下水资源动态监测体系运行维护技术

### （一）设备检修与校准

在黑龙江省地下水资源动态监测体系中，设备的稳定运行与

精准测量是获取可靠数据的核心保障，而检修计划制定和校准工作则是实现这一目标的重要环节。设备的稳定运行依赖于科学合理的检修计划，制订该计划时，需全面考量设备类型、使用频率及工作环境等因素。像传感器、数据采集器这类核心硬件设备，长期运行、恶劣天气、不当操作都可能影响其性能，导致数据异常或丢失<sup>[4]</sup>。在黑龙江省寒冷地区，低温易损坏电子元件，潮湿气候又会引发电路短路；并且设备使用频率越高，老化速度越快，维护需求也越迫切。此外，监测站点所处地理位置和外部环境同样关键，偏远山区、沼泽地带交通不便、地形复杂，增加了设备维护难度，因此需提前规划检修时间和资源分配。

而校准工作则是保障监测数据准确性与一致性的必要手段。各类监测设备都需遵循标准化校准流程，该流程涵盖初步检查、参数调整、精度验证三个阶段。先对设备进行全面外观与功能检查，排查物理损坏和明显故障；再依据设备类型选择合适校准方法，如用标准溶液标定水质传感器，通过参考点测量修正水位计误差<sup>[5]</sup>。校准过程严格遵循技术规范，详细记录操作步骤与结果，便于后续分析追溯。校准频率根据设备性能变化趋势和使用环境而定，高温高湿环境下的设备往往需要更频繁校准。校准完成后，还需进行实际运行测试，检验校准效果是否达标。

### （二）数据传输与存储维护

在黑龙江省地下水资源动态监测体系中，数据传输保障与存储管理相辅相成，共同为监测数据的有效利用筑牢根基。数据传输的稳定性是监测体系发挥效能的关键，为此需综合运用多种技术手段确保数据实时、安全抵达中心服务器。通信网络的合理选择尤为重要，鉴于黑龙江省地域辽阔，部分区域信号覆盖不足，需因地制宜配置通信方案。在偏远农村、林区，卫星通信技术凭借其广域覆盖优势成为首选；而城市及周边地区，高速稳定的无线蜂窝网络（如 4G/5G）则能满足数据快速传输需求<sup>[6]</sup>。为防范数据在传输途中被篡改或丢失，引入 AES 等数据加密算法对传输内容进行加密处理，同时设置冗余传输路径，当主通道出现故障时，备用通道自动启用，保障数据传输不间断。

数据存储管理同样不可或缺，其科学规划直接关系到数据的完整性、可用性与安全性。规划存储容量时，需充分考量监测指标种类、采样频率及预计存储年限等因素。水位、水质、水温等以时间序列记录的数据会随时间不断累积，必须预留充足空间防止数据溢出。为抵御硬件故障、意外情况导致的数据丢失风险，采用分布式存储架构，将数据同时存储于本地设备与云端服务器，实现双重保护。此外，定期对存储系统开展性能检测与优化，包括清理冗余文件、修复磁盘错误、更新存储软件等操作，提升数据检索和处理效率。

### （三）监测系统安全管理

在黑龙江省地下水资源动态监测系统的稳定运行中，物理安全与网络安全防护缺一不可，共同构筑起抵御各类风险的坚固防线。由于黑龙江省地域广阔，监测站点分布广泛，部分位于偏远区域，监测设施极易面临盗窃、破坏等物理威胁，同时极端天气、特殊环境干扰也不容忽视；而随着信息技术深度应用，系统还面临黑客入侵、数据泄露等网络安全风险。为保障物理安全，在监测井周边安装防盗围栏与警示标志，威慑非法入侵行为；为关键设备配备防拆锁具和报警装置，实现异常情况及时预警<sup>[7]</sup>。针对极端天气，通过增设防水罩、防风支架等措施加固设备，提升



抗灾能力。在靠近工业区、交通干线等特殊场景的监测点，充分考虑化学腐蚀、振动干扰等因素，采取针对性防护手段，减少外部因素对监测设备的干扰。

网络安全层面，针对常见的黑客入侵、数据泄露等威胁，构建多层次防护体系。在网络边界部署防火墙与入侵检测系统，有效过滤非法访问、识别潜在威胁；实施严格权限管理机制，限制用户对敏感数据的访问，防止信息滥用。定期更新系统补丁，采用 SSL/TLS 协议加密传输数据，抵御中间人攻击；对服务器存储数据进行脱敏处理，降低敏感信息泄漏风险。通过物理安全与网络安全防护措施协同发力，全方位保障监测系统稳定运行与数据真实可靠，为地下水资源动态监测工作筑牢安全基石。

（四）应急处理措施

在黑龙江省地下水资源动态监测体系运行中，设备故障与自然灾害的应急处理至关重要，需建立快速响应机制，监测数据异常时立即启动故障诊断，通过远程监控或现场勘查定位原因<sup>[8]</sup>。简单故障如传感器失灵、电源中断可快速更换备用部件或重启设备；复杂故障则派遣专业技术人员维修。关键站点需配备完整备用设备并定期检查，确保紧急替换，维持监测连续性。同时记录故障成因、处理过程及改进方案，优化后续维护策略。

针对洪水、地震等灾害，选址时结合地质条件和历史灾害记录，避开低洼易涝区与断裂带，选择地势高、地基稳的位置。专项防护包括洪水区安装防水密封装置及防洪堤坝，强震区加固设备基础结构。与气象、地震部门合作搭建预警机制，提前部署应急工作，如暴雨前检查排水设施、地震预警后暂停高风险作业。通过设备故障应急与灾害应对的有机结合，形成预防、响应、总结的闭环管理，确保监测体系在复杂环境下持续高效运行，最大限度降低突发状况影响。

三、动态监测体系构建与运行维护面临的挑战及解决策略

（一）资金投入问题

构建与运行地下水资源动态监测体系需巨额资金，涉及监测站点布局、设备采购、数据传输系统建设及后期维护等。初期建设成本包括设备购置、安装调试及基建费用，后期需持续投入设备检修、数据采集传输和人员培训等。当前资金主要依赖政府财政和专项拨款，单一渠道难以满足长期需求，加之公益属性，社会资本参与不足，加剧资金压力。为破解困境，需拓宽融资渠道并提升效率：一是政策引导社会资本参与，采用 PPP 模式外包监

测任务；二是加强国际合作，争取国际组织或跨国项目资金，聚焦新兴技术应用；三是建立科学资金管理体系，细化预算并定期评估使用效果<sup>[9]</sup>。

（二）技术人才短缺

构建与运行地下水资源动态监测体系需巨额资金，涉及监测站点布局、设备采购、数据传输系统建设及后期维护等。初期建设成本包括设备购置、安装调试及基建费用，后期需持续投入设备检修、数据采集传输和人员培训等。当前资金主要依赖政府财政和专项拨款，单一渠道难以满足长期需求，加之公益属性，社会资本参与不足，加剧资金压力。为破解困境，需拓宽融资渠道并提升效率：一是政策引导社会资本参与，采用 PPP 模式外包监测任务；二是加强国际合作，争取国际组织或跨国项目资金，聚焦新兴技术应用；三是建立科学资金管理体系，细化预算并定期评估使用效果。这些举措可缓解资金短缺，保障监测体系可持续发展。

（三）部门协调难题

地下水资源动态监测需水利、环保、地质调查等部门协同合作。由于职责划分不清和协调机制缺失，常出现职责交叉、数据重复采集或监测盲区等问题。例如，水利部门负责水位监测，环保部门侧重水质，地质部门关注资源分布，缺乏沟通易导致工作重叠或漏洞<sup>[10]</sup>。为解决此问题，应建立高效跨部门协调机制：一是明确职责分工，划定责任边界，消除空白区域；二是搭建统一信息平台，实现数据实时共享，提升利用效率；三是成立跨部门协调小组，定期召开联席会议，共同商讨重大议题；四是通过立法固化协作规范，确保各部门依法履职。此举可优化协作效率，为动态监测体系提供制度保障，推动地下水资源保护的科学化实施。

四、结束语

黑龙江省地下水资源动态监测体系的构建与运行维护是保障地下水资源可持续利用的关键。在构建监测体系时，合理布局站点、选取合适指标并融合传统与新兴技术手段，能全面、准确获取地下水动态数据。运行维护技术的有效实施，确保了设备稳定运行、数据可靠传输存储及系统安全。针对面临的资金、人才、部门协调等挑战，采取相应解决策略，可推动监测体系持续发展，为地下水资源的科学管理与合理利用提供有力支撑，助力区域经济社会与生态环境协调发展。

参考文献

[1] 陈雷, 冯晓琳. 国家地下水监测工程(黑龙江部分)2022年度运行维护与水质采样工作全面完成[J]. 黑龙江国土资源, 2022, (9): 9-9.  
[2] 赵楠. 水文地质调查在地下水资源评价中的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 自然科学, 2024(4): 0081-0084.  
[3] 刘婷婷. 地下水资源管理现状与保护策略研究[J]. 科学与信息化, 2023, (7): 174-176.  
[4] 邱晨. 地下水资源管理与保护探讨[J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(3): 105-107.  
[5] 杨庆庆. 国家地下水监测工程(黑龙江部分)2021年运行维护与地下水水质采样工作顺利完成[J]. 黑龙江国土资源, 2021, (9): 18-18.  
[6] 无. 聚焦目标夯实基础全方位加强水资源刚性约束[J]. 河北水利, 2022, (9): 15-16.  
[7] 乌丽罕, 王铁. 三江平原地下水自动监测预警研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(4): 136-138.  
[8] 王小亮, 戴长雷, 闻建伟, 王美玉, 王羽. 基于 K/M 检验的哈尔滨城区地下水埋深时间序列模型的构建[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(9): 85-88.  
[9] 王翠翠. 齐齐哈尔城区地下水动态监测综述[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(11): 79-82.  
[10] 刘启民. 地下水观测井水位自动化监测及优化措施研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(S01): 204-206.



# 高寒水利工程混凝土早期强度发展规律分析

和高升

中国水利水电第十六工程局有限公司, 福建 福州 350003

DOI:10.61369/ERA.20250900365

**摘 要 :** 本研究着重探究高寒水利工程混凝土早期强度发展特性。鉴于高寒区域存在低温侵袭、狂风呼啸、昼夜温差悬殊等独特环境状况,深入剖析各要素对混凝土早期强度增长的作用。运用理论剖析融合实践探索的手段,全面阐释混凝土配比设计方案、原材料固有属性、施工操作工艺等要素与早期强度变化间的潜在关联,归纳不同工况下混凝土早期强度演变规律,针对性提出强化混凝土早期强度性能的技术策略,旨在为高寒地带水利工程混凝土施工质量把控及工程安全保障供给理论支撑与实践指引。

**关 键 词 :** 高寒地区; 水利工程; 混凝土; 早期强度; 发展规律

## Analysis of the Development Patterns of Early Strength of Concrete in High-Altitude Cold-Region Water Conservancy Projects

He Gaosheng

China Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau No. 16 Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350003

**Abstract :** This study focuses on investigating the early strength development characteristics of concrete in high-altitude cold-region water conservancy projects. Given the unique environmental conditions in high-altitude cold regions, such as low temperatures, strong winds, and significant diurnal temperature fluctuations, this study thoroughly analyses the effects of various factors on the early strength development of concrete. By combining theoretical analysis with practical exploration, this study comprehensively explains the potential relationships between concrete mix design schemes, raw material properties, construction techniques, and early strength changes. It summarises the patterns of early strength evolution under different conditions and proposes targeted technical strategies to enhance early strength performance, aiming to provide theoretical support and practical guidance for quality control and safety assurance in concrete construction for water conservancy projects in high-altitude cold regions.

**Keywords :** high-altitude cold regions; water conservancy projects; concrete; early strength; development patterns

## 引言

随着我国水利工程建设向偏远高寒地区不断推进,高寒水利工程建设规模与日俱增。在高原高寒极端环境条件下,混凝土在浇筑后的凝结硬化过程中,由于水化反应在混凝土内部产生的高温与外界环境形成了温度差,当温度差过大时,所产生的温度应力将使得混凝土表面发生开裂,对混凝土工作性能产生巨大的威胁。早期强度增长态势欠佳,混凝土易出现开裂、强度未达标准等状况,对水利工程安全运行构成威胁,现阶段针对高寒区域特殊环境中混凝土早期强度发展规律的系统性探究仍存在欠缺。深入钻研该规律并提出切实可行的应对举措,对于保障高寒水利工程质量、降低工程风险以及推动高寒地区水利事业发展而言,具备重要的现实价值。

## 一、高寒地区环境特性及对混凝土早期强度的影响

### (一) 高寒地区气候环境特点

高寒地区呈现突出的低温特性,年平均气温偏低,施工期内长时间处于低温环境,部分区域极端低温可达零下数十度,风力

表现强劲,会加速混凝土表面水分蒸发与热量散失,昼夜温差幅度较大,白天升温与夜间降温交替频次高,致使混凝土内部产生温度应力<sup>[1]</sup>。冻融循环现象较为频繁,在正负温交替过程里,混凝土内部孔隙中的水分反复出现冻结与融化情况,对混凝土结构造成损害。这些独特的气候环境要素相互影响,给混凝土早期强度

作者简介:和高升(1987.07—),男,汉族,河南济源人,本科,工程师,研究方向:水利工程、混凝土。

发展带来严重阻碍（如图1所示）。



图1 高寒地区气候环境特点

## （二）环境因素对混凝土早期强度的作用机制

低温环境明显延缓水泥水化反应速度，致使混凝土早期强度增长迟缓，水泥水化需要合适的温度条件，低温会抑制水化产物生成，拖延混凝土凝结硬化的进程，强风会加快混凝土表面水分蒸发，造成表面失水干燥，进而产生塑性收缩裂缝，削弱混凝土结构的完整性，对强度发展产生不利影响。昼夜温差所引发的温度应力，在混凝土早期强度较低、抗变形能力较弱的情况下，容易导致内部微裂纹的产生与扩展。冻融循环过程中，水分冻结膨胀产生的压力，会使混凝土内部孔隙结构受到破坏，导致强度下降，这些环境因素共同发挥作用，对混凝土早期强度的形成与发展造成严重影响。

## 二、影响高寒水利工程混凝土早期强度的关键因素

### （一）原材料特性的影响

快硬早强型水泥在低温条件下可更快开启水化反应，较普通水泥能让混凝土早期强度更快提升，该类水泥中铝酸三钙与硅酸三钙含量较高，在较低温度下迅速和水反应并释放热量，推动强度发展，骨料的颗粒级配、强度及含泥量同样关键，级配优良的骨料可形成紧密堆积结构，增强混凝土骨架并提高强度；骨料强度不足会成为混凝土的薄弱环节；含泥量过高影响水泥与骨料粘结，导致强度降低。含泥量较高时吸附水泥浆体中的水分与胶凝材料，削弱界面过渡区强度，外加剂合理运用可改善混凝土性能，早强剂加速水泥水化，防冻剂降低水的冰点，减少冻害对混凝土早期强度的影响，减水剂降低水灰比，提升混凝土密实度与强度。外加剂使用需严格控制剂量，剂量过量可能使混凝土凝结时间异常或耐久性下降，实际工程中，不同品牌与批次的水泥、骨料和外加剂之间可能存在适应性问题，需通过试验进行匹配选择，确保混凝土早期强度稳定发展。

### （二）混凝土配合比设计

较低水灰比能减少混凝土内部孔隙，提升密实度，促进水泥充分水化，进而提升早期强度，但要保证混凝土具备良好和易

性，水灰比过低时，混凝土流动性变差，施工难度增大，易出现蜂窝、孔洞等缺陷。胶凝材料用量直接关系到水泥水化产物数量，适当增加胶凝材料用量可提高早期强度，不过用量过多会增加成本，还可能导致混凝土收缩开裂<sup>[2]</sup>。在高寒地区，为弥补低温对水化的抑制，可适当提高胶凝材料用量，同时需搭配使用粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，以此改善混凝土工作性和耐久性，砂率对混凝土工作性和强度有影响，合理砂率可使混凝土具有良好的流动性、粘聚性和保水性，保障施工质量和强度发展。砂率过高会增加混凝土需水量，降低强度；砂率过低则会使混凝土干涩，难以振捣密实，在高寒地区进行配合比设计时，还需考虑骨料含水率变化对水灰比的影响，以及冻融环境对混凝土抗冻性能的要求，通过调整配合比参数，平衡强度、工作性和耐久性等性能，以适应高寒地区特殊的施工和使用环境。

### （三）施工工艺的作用

搅拌时间不足易造成材料混合不均，影响水泥水化及强度发展；搅拌时间过长则可能使混凝土坍落度损失过大，对施工性能产生影响，在高寒地区，鉴于环境温度低，搅拌时可适当延长搅拌时长，以促进水泥与外加剂充分反应，需注意控制搅拌温度，防止因搅拌过程中热量散失过快而影响混凝土性能。运输过程中，低温环境容易使混凝土温度下降，延缓凝结时间，若运输时间过长或保温措施不到位，还可能导致混凝土受冻，因此需选用保温性能良好的运输设备，并合理规划运输路线，以减少运输时间，浇筑和振捣工艺同样不可忽视，浇筑时混凝土入模温度过低会对早期强度增长造成影响；振捣不密实会使混凝土内部出现空洞、蜂窝等缺陷，导致强度降低<sup>[3]</sup>。在低温环境下，可通过加热骨料、水等方式提高混凝土出机温度，确保入模温度符合要求，振捣时依据混凝土的流动性和结构特点，选择适宜的振捣方式和振捣时间，避免出现过振或漏振现象，养护环节在高寒地区至关重要，适宜的养护温度、湿度和时间能够为混凝土早期强度发展营造良好条件，养护不当则会严重影响强度形成，养护过程中，需实时监测混凝土温度和湿度变化，及时调整养护措施，防止混凝土受冻或失水干燥。

### （四）结构形式与尺寸的影响

薄壁结构散热速率快，低温环境中更易受冻，需更高早期强度抵御冻害；大体积混凝土内部水化热难散发，温度控制不当易发生温度裂缝，影响早期强度发展，薄壁结构浇筑后表面温度骤降，内部热量难补充，易致表面混凝土强度增长缓甚至受冻。大体积混凝土因内部水化热积聚，中心与表面温差过大，产生的温度应力可能超混凝土早期抗拉强度而引发裂缝，结构尺寸对混凝土早期强度亦有影响，大尺寸结构内部温度场分布复杂，温度应力大，导致早期强度增长不均；小尺寸构件受环境温度变化影响更直接，易因温度波动生裂缝，大尺寸基础结构浇筑后需采取分层浇筑、埋设冷却水管等措施控温；小尺寸构件则需加强保温防护。设计阶段应根据结构形式与尺寸，合理确定混凝土强度等级

与配合比,制定针对性施工方案与养护措施,确保混凝土早期强度满足工程要求,避免因结构因素导致强度缺陷与质量问题。

### 三、高寒水利工程混凝土早期强度发展规律及优化措施

#### (一)混凝土早期强度发展规律

初期受低温抑制,强度增长缓慢,增速远低于常温环境,随时间推移,在满足温度和湿度条件时,水泥水化反应持续,强度逐步增长,但整体增幅有限,不同配合比与原材料的混凝土,早期强度发展曲线存在差异:使用早强剂、降低水灰比的混凝土,早期强度增长相对较快;普通配合比的混凝土,强度增长则滞后。混凝土早期强度增速与环境温度关联密切,温度略升,强度增速加快,温度降低则明显减缓,大量工程实践和试验研究表明,环境温度在 $-5^{\circ}\text{C}$ 至 $5^{\circ}\text{C}$ 区间时,混凝土早期强度增长极缓;温度升至 $5^{\circ}\text{C}$ 以上,强度增速开始加快,但仍低于常温环境,昼夜温差对强度发展影响显著,温差越大,混凝土内部因温度应力产生微裂纹的可能性越高,进而影响强度增长。不同龄期的强度增速也不同,早期强度增长主要集中在浇筑后前7天,7天后增速渐缓,掌握这些规律,便于施工中合理安排工期,采取针对性措施促进混凝土早期强度发展。

#### (二)原材料优选策略

优先选用快硬硅酸盐水泥、早强型普通硅酸盐水泥,此类水泥可在低温环境下快速水化,提升混凝土早期强度,选用水泥时,还需关注其化学成分与矿物组成,确保铝酸三钙和硅酸三钙含量满足要求,对于骨料,需严格把控质量,选择颗粒级配优良、强度高、含泥量低的骨料。粗骨料宜采用连续级配,细骨料细度模数应保持适中<sup>[4]</sup>。在高寒地区,骨料易发生冻害,可选用抗冻性优异的骨料,并在使用前对骨料进行预热处理,避免骨料温度过低对混凝土性能产生影响,合理使用外加剂,依据工程需求和环境条件,选用高效早强剂、防冻剂及减水剂,早强剂可加速水泥水化,防冻剂能防止混凝土受冻,减水剂可降低水灰比,提升混凝土强度与耐久性。选择外加剂时,需开展外加剂与水泥的适应性试验,确定最佳掺量,部分早强剂可能导致混凝土后期强度增长迟缓,需与其他外加剂复合使用;防冻剂的掺量需根据最低气温进行调整,确保混凝土在低温环境下不受冻害,考虑使用新型功能性外加剂,如兼具抗冻、早强、减水等多种功能的复合外加剂,提升混凝土综合性能,满足高寒地区水利工程对混凝土早期强度和耐久性的要求。

#### (三)施工工艺优化措施

高寒地区施工,可通过加热搅拌水、预热搅拌设备来提升混凝土出机温度,搅拌工艺优化不容忽视,采用二次投料法,即将部分水和水泥搅拌形成水泥浆,加入骨料与剩余的水继续搅拌,如此操作能够有效提高混凝土强度与工作性能,运输过程

中,需采取切实有效的保温举措,选用保温罐车减少混凝土热量散失(如图2所示)。同时严格控制运输时长,以保障混凝土入模温度符合要求;运输途中,还可用保温棉被等材料对罐车进行包裹,进一步加强保温效果。浇筑时要审慎选择浇筑时间与方法,尽量规避在低温时段进行浇筑,运用分层浇筑、连续浇筑等方式,确保混凝土的密实性与整体性得以保障;分层浇筑过程中,必须严格把控每层浇筑厚度和浇筑间隔时间,防止出现冷缝现象,振捣环节,需精准控制振捣时间与振捣深度,避免出现过振或漏振情况,借助高频振捣器提升振捣效率,确保混凝土振捣密实,养护阶段,应综合运用多种养护措施,暖棚法、覆盖保温材料法等,以此维持混凝土表面的温度与湿度,为其早期强度发展营造良好环境,暖棚法通过在施工现场搭建暖棚,并在内部设置加热设备来维持棚内温度;覆盖保温材料法采用棉被、草帘等材料覆盖混凝土表面,再在上方覆盖塑料薄膜以保持湿度。在养护过程中,需要定期监测混凝土的温度和湿度状况,依据监测结果及时调整养护措施,从而保证混凝土早期强度能够正常发展。



图2 混凝土保温罐车及运输保温措施

#### (四)质量控制与监测方法

严格检验原材料质量,确保符合设计标准。对水泥、骨料、外加剂等原材料开展批次检验,核查性能指标是否达标,定期验证并调整混凝土配合比,保障其适用性,施工过程中,强化对混凝土搅拌、运输、浇筑、振捣及养护等环节的监督检查<sup>[9]</sup>。制定详尽的施工质量控制标准与操作规程,要求施工人员严格落实,运用先进监测技术,预埋温度传感器监测混凝土内部温度变化,借助无损检测技术检测混凝土早期强度与内部缺陷,及时掌握早期强度发展状况,发现问题立即采取措施处理,确保工程质量,温度传感器可实时监测混凝土不同部位温度,为温度控制提供数据支撑;超声回弹综合法、雷达检测法等无损检测技术,能在不破坏混凝土结构的前提下,检测强度与内部缺陷。通过建立质量



追溯制度，对每个施工环节进行记录，明确责任主体，确保出现质量问题时可及时追溯原因并整改，引入信息化管理系统，整合分析质量控制与监测数据，实现对混凝土施工质量的动态管理与优化。

四、结束语

高寒水利工程混凝土早期强度受环境、原材料、施工工艺及结构等多因素制约，在低温、强风等特殊环境中，呈现初期增长

迟缓、受温度影响突出等独特规律，通过剖析内在作用机制，针对性提出原材料优选、施工工艺优化、质量控制与监测等举措，选用适配的水泥、骨料及外加剂，优化搅拌、运输、养护等环节，构建全过程质量管控体系。这些研究成果对保障高寒地区水利工程施工质量与安全具有重要意义，需进一步探索新材料、新工艺在强度提升中的应用，研究早期强度与耐久性的内在关联，完善技术体系，推动水利工程可持续发展。

参考文献

[1] 柴朝煌. 高寒地区植生混凝土蓄冷阻热性能及植生性能试验研究 [D]. 中国矿业大学, 2024.  
[2] 吴起源. 高海拔寒冷地区混凝土抗裂技术研究 [D]. 西安工业大学, 2024.  
[3] 王定波. 复杂环境下含水碾压混凝土受载损伤演化机理研究 [D]. 西京学院, 2023.  
[4] 史琦. 高寒区高流速泄水道混凝土损伤数值模拟研究 [D]. 西安理工大学, 2022.  
[5] 张奇. 高寒地区水工碾压混凝土施工质量评价研究 [D]. 兰州交通大学, 2022.



# 基于 STM32 的指纹识别门禁系统设计与实现

胡美臣, 谢晓东, 陈宇峰

成都工业学院自动化与电气工程学院, 四川 成都 611730

DOI:10.61369/ERA.2025090013

**摘 要 :** 为了满足现代智能化安防需求, 提高门禁系统的安全性及便捷性, 以 STM32F103C8T6 单片机作为控制核心, 采用 AS608 高精度光学指纹模块、矩阵按键模块、ESP8266 模块的 WiFi 技术实现远程通信, 再经过继电器驱动模块控制门锁和报警装置, 实现门禁系统的身份认证、远程控制和安全报警功能。多次试验结果表明: 指纹识别门禁系统能够准确识别用户身份、实时响应远程指令、及时预警异常情况, 满足现代智能安防的设计要求。

**关 键 词 :** STM32 单片机; 门禁系统; 指纹识别

## Design of Fingerprint Recognition Access Control System Based on STM32

Hu Meichen, Xie Xiaodong, Chen Yufeng

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 611730

**Abstract :** To meet the requirements of modern intelligent security systems and enhance the security and convenience of access control, this design employs an STM32F103C8T6 microcontroller as the core control unit. The system integrates an AS608 high-precision optical fingerprint module, a matrix keypad module, and ESP8266-based Wi-Fi technology for remote communication. Through relay driver modules, the system controls door locks and alarm devices, achieving functions such as identity authentication, remote control, and security alerting. Multiple experimental results demonstrate that the fingerprint recognition access control system accurately identifies user identities, responds promptly to remote commands, and provides timely warnings for abnormal situations, thus meeting the design requirements of modern intelligent security systems.

**Keywords :** STM32 Microcontroller; access control system; fingerprint recognition

## 引言

随着智能化的普及, 传统的门锁已经不能满足人们的生活需求。指纹识别门禁便随之而生, 指纹是每个人的独有特征, 用自己独一无二的特性来制作门禁系统, 突显其安全性与便捷性<sup>[1]</sup>。在国外, STM32 单片机因其强大性能成为热门选择。例如 Tran 等人提出基于 STM32 单片机的 PrettyGoodPrivacy 协议实现方案, 将高效加密算法与指纹匹配技术相结合, 极大地优化了资源受限嵌入式平台的安全通信, 增强了门禁系统在复杂网络环境下的安全性<sup>[2]</sup>。国内早期, 张新元对指纹门禁系统提出分级管理与多权限设置理念, 为现代门禁系统在诸如大型社区、商业综合体等复杂场景的应用提供了思路, 有效解决了不同用户权限管理的难题<sup>[3]</sup>。近年来, 万丽娟设计的基于 STM32 单片机的多重认证智能锁极大地增强了系统的安全性, 充分满足了多场景下不同用户的多样化安全需求<sup>[4]</sup>。针对传统门禁系统存在的易复制、管理不便、安全性能低等缺陷, 本设计决定采用 STM32F103C8 作为核心控制单元, AS608 指纹模块进行指纹识别, 借助 ESP8266 模块的 Wi-Fi 技术实现稳定的远程通信, 让用户能随时随地掌控门禁状态, 系统还配备 OLED 显示屏、按键模块和蜂鸣器报警模块, 为用户设计清晰直观的操作指引和安全性, 保障使用便捷与数据安全。

## 一、指纹识别门禁系统的总体设计

指纹识别技术是指通过对不同指纹的细节特征点通过比较后进行鉴别的一种生物识别技术<sup>[5]</sup>。人的皮肤纹路(包括指纹)大不相同, 表现出独特和终身不变的特征。这些特征为门禁系统提供

了易用、稳定的保证。目前生物识别技术中运用最广、最成熟、可靠的是指纹识别技术<sup>[6]</sup>。

系统从指纹识别和按键触发开始, 经单片机处理判断, 控制继电器执行开锁或闭锁操作, 并通过显示模块反馈结果, 搭配报警和远程通信, 构建起从信息采集、处理到动作执行的完整智能

门禁体系，保障出入安全与便捷。系统的整体框图如图1所示。

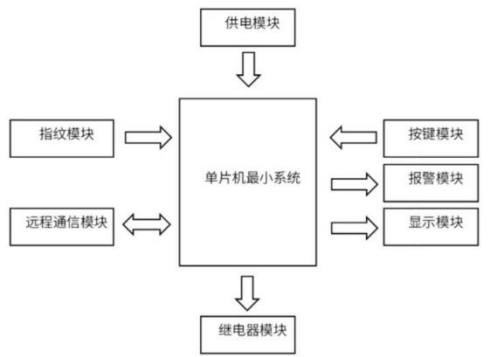


图1 系统框图

## 二、指纹识别门禁系统的硬件电路设计

### （一）单片机基础电路

经过对比，选用 STM32F103C8 芯片，该芯片配备 64KB-Flash 存储和 20KB SRAM，能满足复杂程序的存储和实时数据处理需求。其外设资源丰富，集成多个定时器、串口、SPI、IIC 等接口，便于与各类外部设备通信。芯片内置 12 位高精度 ADC，可快速采集模拟信号，同时为系统扩展提供多个灵活接口。且支持多种低功耗模式，全速运行 72MHz 时典型电流约 30mA，而低功耗模式下可降至微安级，适合电池供电场景，嵌套中断系统，确保高速数据传输与实时响应能力。

### （二）AS608 指纹模块设计

AS608 指纹识别模块是一款经济适用的指纹识别设备，电容式传感器通过感知电容变化采集指纹图像，能精准捕捉指纹纹路细节；高性能处理器则承担着图像处理、特征提取及外部通信的重任，确保指纹识别流程高效运行。

AS608 指纹传感器采用串口的方式与单片机进行数据传输，所以只需要将指纹模块接入到单片机串口引脚上就可以实现其功能<sup>[7]</sup>。指令、模块的应答以及数据交换通过数据包来进行。数据包包头：0xEF01<sup>[8]</sup>。

### （三）OLED 显示模块电路

OLED 显示模块采用基于有机发光二极管技术。OLED 显示模块内置驱动芯片 SSD1306，采用 IIC 通信方式，以半双工方式传送的串行总线，保障信号稳定传输与高效驱动。连接部分采用 Header4 接口，具备良好的机械稳定性与电气连接可靠性，便于与单片机及外部电路快速精准连接，确保数据和电源稳定传输<sup>[9]</sup>。

### （四）矩阵键盘电路

矩阵键盘采用 4×4 行列扫描结构。通过将按键排列成矩阵形式，仅需较少的单片机 I/O 口就能实现较多按键的检测。在硬件连接上，行列线分别与单片机的相应引脚连接，通过软件编程实现按键的识别与处理，为系统提供便捷的人机交互输入方式。

### （五）WiFi 通信电路

WiFi 通信电路选用 ESP8266 模块搭建。ESP8266 是一款高度集成的 WiFi 芯片，内置 TCP/IP 协议栈。它通过 UART 接口

与单片机相连，可实现单片机与无线网络的连接。单片机通过发送 AT 指令对 ESP8266 进行配置，连接目标 WiFi 热点、建立网络连接等。该电路能使系统接入互联网，实现远程数据传输与控制，极大拓展了系统的应用范围，可通过手机 APP 远程控制门禁系统。

### （六）蜂鸣器电路

蜂鸣器电路主要是实现报警功能，当指纹识别不正确或者输入密码不正确时，超过五次之后，蜂鸣器会发出警报声。本设计在蜂鸣器电路中添加 PNP 型三极管，基极串联一个 1kΩ 的电阻连接到单片机的 I/O 口<sup>[10]</sup>。

### （七）继电器驱动电路

继电器驱动电路用于控制继电器的吸合与释放，以实现门锁控制。单片机通过控制引脚输出高电平或低电平，经驱动电路放大后，使继电器线圈通电或断电，进而控制继电器触点的状态。这种电路实现了单片机弱电信号对外部强电设备的安全可靠控制。

## 三、指纹识别门禁系统的软件程序设计

在系统初始化阶段，完成 USART、IIC、GPIO 等外设初始化，加载指纹模块、OLED、ESP8266 等各模块驱动，同时从片内 Flash 读取开锁密码、指纹特征向量、管理密码等数据。接着进入循环监测与事件处理环节，通过循环实时扫描按键输入、指纹模块状态以及 Wi-Fi 通信缓冲区，利用按键查询中断、串口中断等事件触发机制，激活相应处理函数，通过多任务调度确保各项任务有序执行。

## 四、指纹识别门禁系统系统测试及分析

为了检验指纹识别门禁系统的解锁性能，现对密码、指纹和远程三种解锁模式开展性能测试，内容涵盖响应速度、通信距离、抗干扰稳定性，确保硬件系统符合设计技术指标。

### （一）响应速度测试

在响应速度测试方面，对每一种解锁模式，均测试 100 次。本次测试借助秒表来记录响应时间，指令发出瞬间启动秒表，门禁系统解锁成功时停止秒表，响应速度结果见下表 1 所示。

表1 响应时间

解锁模式	测试次数	平均响应时间
密码解锁	100	0.5s
指纹解锁	100	1.2s
远程解锁	100	2s

### （二）通信距离测试

通信模块是系统实现远程交互的关键组件，其不同距离下的性能直接影响系统的实用性。本次测试于空旷无扰的室外场地展开，该测试明确了通信模块的有效作用范围，为系统远程功能的优化与应用场景选择提供了重要依据。通信距离测试结果见下表 2 所示。

表2 通信距离		
距离	测试次数	解锁成功率
10m	40	100%
30m	40	95%
50m	40	82.5%

（三）抗干扰性测试

对于三种解锁方式，均测试100次并且设置了针对性的干扰源，表3记录三种解锁模式在干扰情况下的解锁结果，同时计算方差值来衡量系统稳定性，数值越小，表明系统稳定性越高。

表3 抗干扰解锁情况			
解锁模式	干扰情况	解锁成功率	方差值
密码解锁	其他按键	95%	0.02
指纹解锁	潮湿指纹	92%	0.15
远程解锁	电磁干扰	80%	3.36

综上分析，在三种解锁模式中，从响应时间、通信距离和抗干扰测试方差值可知，密码解锁耗时最短最稳定；远程解锁耗时

最长；从安全性能以及适用的场合考虑，密码解锁安全性不高；指纹识别解锁在安全性和响应速度更加综合，后期可针对指纹识别技术进行更深入学习，通过算法来提高抗干扰能力的识别优化。

五、结束语

在嵌入式智能安防技术发展的背景下，将指纹识别算法与嵌入式开发技术融合，实现了指纹信息从采集、存储，到对比、智能匹配的全流程自动化处理，同时集成报警、密码开锁、远程开锁等功能模块，形成闭环安全管理体系。经测试验证，门禁系统的识别率达到92%，拒真率均控制在极低水平，充分满足用户对门禁系统安全性与可靠性的日常需求。后续将持续探索算法优化路径，推动门禁系统向更安全、智能的方向升级。

参考文献

[1] 王越, 翟少成, 陈青松. 基于人脸识别技术的社区智能门禁系统的实现 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (16): 70-73.

[2] Tran S, 트랑상, Pham K V, et al. An implementation of a Pretty Good Privacy Protocol based on STM32 MCU [J]. 대한전자공학회 학술대회, 2023.

[3] 张新元. 指纹门禁系统的设计与开发 [D]. 西北工业大学, 2003.

[4] 万丽娟, 林伟, 徐源, 等. 基于 STM32 单片机的三重认证门禁系统设计和实现 [J]. 萍乡学院学报, 2022, 39(06): 46-49+61.

[5] 刘振, 王国仕, 莫云, 等. 指纹识别技术在身份认证中的应用与研究 [J]. 信息记录材料, 2018, 19(11): 93-94.

[6] 张伟, 塞尔玛·帕劳格, 王晨. 基于 STM32 指纹识别门禁系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2023, 31(09): 151-155+160.

[7] 李沙沙, 汪东霞, 连俊豪. 基于单片机的指纹门禁系统设计 [J]. 现代信息科技, 2021, 5(11): 82-85.

[8] 张菲, 郭庆峰, 张帅, 等. 基于 UML 的生产过程建模研究 [J]. 中国管理信息化, 2020, 23 (6) : 72-74.

[9] 束仁义, 徐锋, 王健, 等. 基于 STC12C5A60S2 单片机显示模块的实验研究 [J]. 廊坊师范学院学报 (自然科学版), 2024, 24(03): 83-88.

[10] 孙鹏飞. 潍坊市企业安全生产监督管理系统设计及实现 [D]. 济南: 山东大学, 2013.

# 电动汽车换电站安全防护解决方案

李言堂

莱茵技术 - 商检（青岛）有限公司，山东 青岛 266100

DOI:10.61369/ERA.2025090014

**摘 要：** 伴随着电动汽车的日益普及，电动汽车充电产业也在蓬勃发展。作为传导充电、无线充电、电池更换三个充电技术路线之一的电动汽车换电站，我国在技术、市场等领域具有绝对优势。随着市场保有量的增加，人员死亡或肢体折断的重大安全事故不断增多，给家庭，企业，社会带来巨大的损失。本文章基于国际安全领域最新标准，加上多年实际工作中积累的经验，提出了一套完整的安全防护方案，并成功地应用在出口欧盟的换电站上，希望它能为国内市场上的电池更换设备提供借鉴。

**关 键 词：** 安全防护；安全激光扫描；危险；事故；风险；性能等级

## The Safeguarding Solution for Electric Vehicle Battery Swap Station

Li Yantang

TUV Reinland/CCIC (Qingdao) Co., Ltd. Qingdao, Shandong 266100

**Abstract：** With the increasing popularity of electric vehicles, the electric vehicle charging industry is also booming. As one of the three charging technology routes of conduction charging, inductive charging and battery swapping, China has absolute advantages in technology, market and other fields. With the increase of market ownership, major safety accidents such as deaths or broken limbs are increasing, bringing huge losses to families, enterprises and society. Based on the latest international standards in the field of safety and the experience accumulated in practical work for many years, this article proposes a complete set of safety protection solution, which are successfully applied to equipment exported to the European Union, hoping that it can provide reference for battery swapping equipment in the domestic market.

**Keywords：** safeguarding; safety laser scanner; hazard; accident; risk; performance level

### 一、我国机械设备安全发展现状

在安全领域我国的标准大多等同采用国际标准，可以说紧跟国际标准的更新步伐，但在实际机械制造和机械使用领域与标准的要求差距依然很大，以至于在生产生活领域事故频发。究其原因主要是国内缺乏专业的市场监管；其次传统安全观念的影响根深蒂固。

### 二、电池更换设备的简介



图1. 电池更换设备外观图

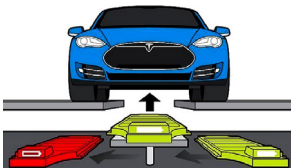


图2. 换电平台

图1是电池更换设备外观，图2是换电平台的示意图，图3是换电系统（换电站）平面示意图。换电站主要有以下几部分组成：换电平台、码垛机、电池搬运设备、电池仓、充电系统、控

制系统。

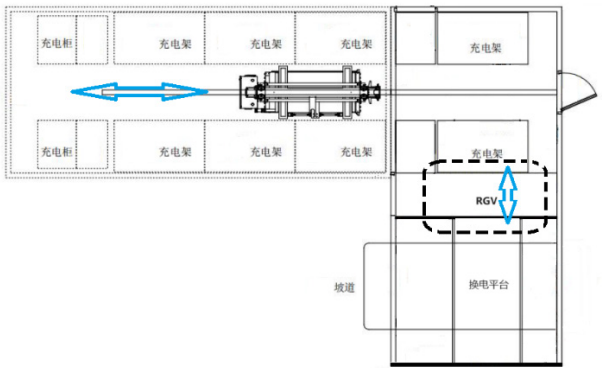


图3. 平面示意图

换电平台：主要负责车辆空电池的拆卸及满电池的安裝。换电平台上配有车辆导向及调正机构。平台入口会有车辆识别和付费设备；

电池搬运设备：主要设备是RGV(轨道小车)，它完成卸载空电池并搬运至电池仓；从电池仓取满电池并安裝到车上。

电池仓：主要设备是充电架及码垛机。

充电系统：主要设备是充电柜，给电池仓内空电池充电；



控制系统：根据进入车辆的型号，选择匹配的满电池，进行换电池任务<sup>[1]</sup>。

三、安全方案设计

(一) 分区及危险识别

换电站的危险区域有两个。一是换电平台区域，RGV 在换电平台往复运动造成的撞击危险，卸装电池升降运动引起的挤压危险。二是电池仓，码垛机往复的造成的撞击风险。

(二) 安全方案设计

从使用方便性、防护有效性、成本经济性观点出发，该换电站的换电平台采用安全激光扫描仪方案。电池仓采用安全互锁门方案。本文主要介绍贯通式换电平台的安全方案（图4）。

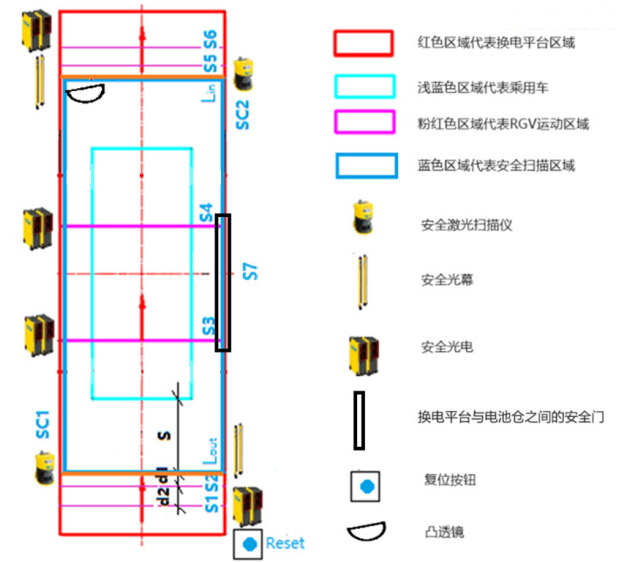


图4. 贯通式换电安全传感器平面布置图

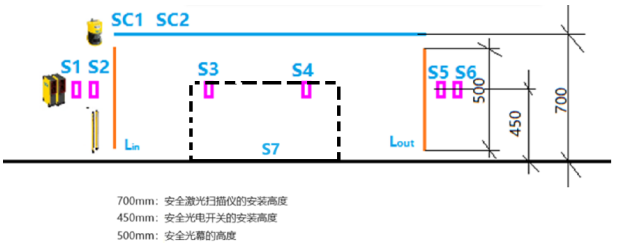


图5. 安全传感器侧视图

(三) 安全传感器的选择及用途介绍

1. 安全激光扫描仪：

图6是激光扫描仪的示意图，其工作原理是当发射的光线遇到物体后返回，并被受光器接收，通过计算光线发射到接收的时间，以此来判断物体和扫描仪之间距离和形状。

换电区域对角安装两台安全扫描仪 SC1 和 SC2，可以扫描整个换电区域，可根据传感器信号不同组合，切换图7所示的任意一种扫描区域。四种扫描区域的用途见1. A 为换电平台无车辆时，安全扫描仪的监控区域；B 区域有个开口，仅允许车辆驶入；C 区域将开口封闭，车辆进行电池更换；D 区域有个开口，仅允许车

辆驶出。



图6. 激光扫描仪示意图

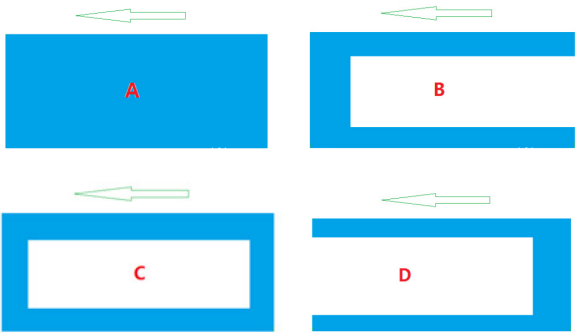


图7. 扫描区域变换图

表1 扫描区域的用途

区域形式	A	B	C	D
作用	换电平台无车辆	车辆驶入换电平台	换电作业	车辆驶出换电平台

2. 安全光幕：

安全光幕由发射端和接收端组成。如果在发射端和接收端之间有物体存在，接收端就接收不到发射端发出的光信号，光幕就会发出报警信号。图5显示激光扫描仪的扫描平面离地高度为700mm，目的是为了能够检测被 RGV 举高的车辆内人员是否有开门下车行为。但是700mm 的高度又没法检测高度低于700mm 的儿童或动物从换电平台的前后两端进入换电区域。因此在换电平台的前后两端增加两个安全光幕 Lin 和 Lout，其长度为500mm。安全光幕选型需具有消隐功能，当传感器的逻辑判断为车辆进出时，短时消隐安全光幕的检测功能，放行车辆<sup>[2]</sup>。

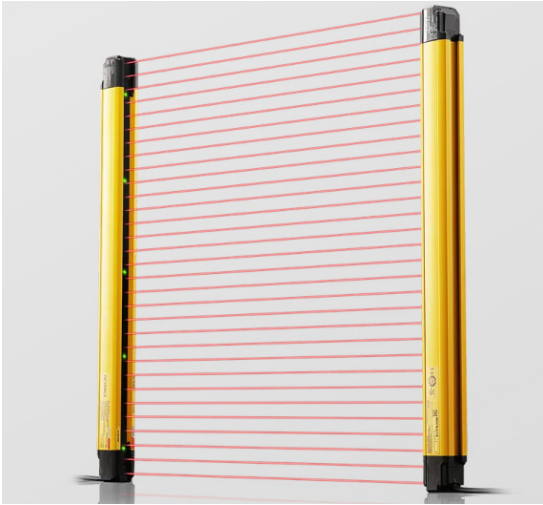


图8. 安全光幕示例

### 3. 安全门:

换电平台与电池仓之间的安全门 S7, 平时一直关闭, 该安全门有两个目的: 一是保持电池仓内的环境条件恒定; 二是防止人员及动物进入电池仓。只有在换电过程中安全门才被打开, 允许 RGV 进出, 运输电池。

### 4. 安全光电开关:

安全光电开关 S3/S4 安装在换电平台中部。S1/S2 置于 Lin 的左侧, S5/S6 置于 Lout 的右侧。

参照 IEC 62046, S1 和 S2 的间距不应小于 250mm, 保证这个数值的目的是既能防止人员进入换电区域, 而又能安全放行车辆进入换电区域。由于人的小腿较细, 在人员误闯换电区域时, 间距为 250mm 的 S1 及 S2 或 S5 及 S6 不能被同时阻挡; 而车辆驶入时, S1 及 S2 会同时被阻挡。当 S1 和 S2 按次序被全部阻挡时, 可消隐安全光幕 Lin, 放行车辆。当 S5 和 S6 按次序被全部阻挡时, 而后按次序解除阻挡时, 消隐安全光幕 Lout 恢复检测功能。否则, 光幕一直在执行检测功能, 一旦人员闯入光幕检测区域, 换电系统将报警, 并终止换电工作<sup>[3]</sup>。

### (四) 安全控制逻辑介绍

表 2 罗列了传感器的不同状态组合所对应的 SC1/SC2 扫描区域, 以及 Lin 和 Lout 的状态。

No. 1 无车辆: 所有传感器均未触发, 这时安全激光扫描仪为扫描区域 A, 换电区域有任何物体被检测到, 换电系统将报警;

No. 2 车辆驶入: 当车辆依次把 S1 和 S2 都遮挡, S1=S2=0, 其他传感器均未触发, 这时 Lin 消隐, 安全激光扫描仪扫描区域 B, 车辆可以驶入安全平台;

No.3 车辆静止: 当 S1 和 S2 依次取消遮挡, S3 和 S4 依次被遮挡, 即 S3=S4=0, 其他传感器均未触发, 证明车辆到达换电位置, Lin 回复检测作用, 安全激光扫描仪为扫描区域 C;

No.4 车辆换电: 换电平台与电池仓之间的安全门打开, S7 和 S8 状态互换, AGV 从电池仓驶出, 从车辆上取下空电池, 送回电池仓; 并从电池仓带来满电池, 装到车辆上;

No.5 车辆驶出: 换电平台与电池仓之间的安全门关闭, S7 和 S8 状态互换, S7 上升沿  $\uparrow$  及 S8 下降沿  $\downarrow$  做为 Lout 消隐及安全激光扫描仪切换为扫描区域 D 的条件, 车辆驶出换电平台。

No.1 无车辆: S3、S4、S5 和 S6 依次依次消除遮挡, Lout 恢复检测功能及安全激光扫描仪切换为扫描区域 A。

表 2. 换电安全控制逻辑

No.	阶段	S1	S2	S3	S4	S5	S6	安全门		SC1/ SC2	L <sub>in</sub>	L <sub>out</sub>
								S7	S8			
1	无车辆	1	1	1	1	1	1	1	0	A	1	1
2	车辆驶入	0	0	1	1	1	1	1	0	B	0	1
3	车辆静止	1	1	0	0	1	1	1	0	C	1	1
4	车辆换电	1	1	0	0	1	1	0	1	C	1	1
5	车辆驶出	1	1	0	0	1	1	1	0	D	1	0

## 四、安全电路设计

### (一) 安全功能性能等级 (performance level) 的确定

查 ISO 13849-1[6] 附录 A (图 9), 利用 S, F 和 P 三个风险参数 (Risk Parameter) 不同取值, 可以确定每个安全功能的性能等级的要求值如下<sup>[4]</sup>:

表 3: 性能级别要求值

	PLr (要求值)
安全激光检测功能	d
安全激光扫描区域切换	d
安全光幕检测功能	d
安全光幕消隐共隐	d

安全性能等级确定过程: 换电区域 RGV 的撞击危险可判为严重伤害, 取 S=2; 在换电过程中, 车上人员不遵守规定下车的情况会存在, 但不普遍, 取 F=1; 一旦发生撞击情况, 人员几乎不可能躲避, 取 P=2。故从 1 点开始沿下图红色线对应的性能等级为 d。

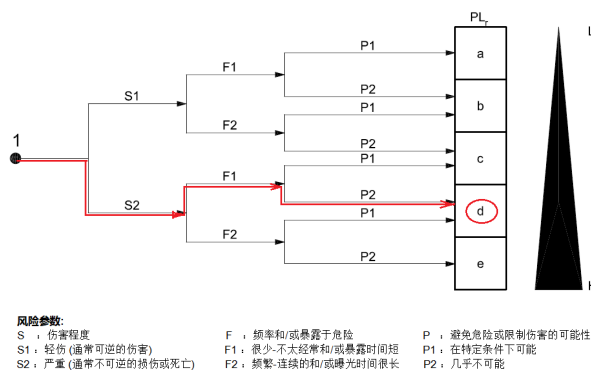


图 9. 安全功能性能等级风险图

### (二) 安全电路方块图

图 10 (来自于 ISO 13849-1 图 12) 给出了满足 PLr=d 的几条路径, 我们选择常用的冗余架构设计思路, 设计出图 11 的安全功能方块图。该方块图仅含有信号采集、逻辑判断和执行机构三个模块。四个安全功能均依据 ISO 13849-1 第 6.1.3.2.5 节 3 类架构 (Category 3) 的思路设计<sup>[5]</sup>。

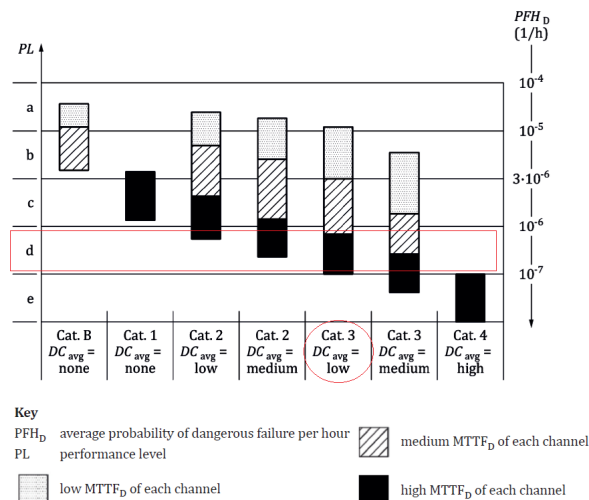


图 10 Categories, DCavg, 通道 MTTFD 与 PL 之间的关系

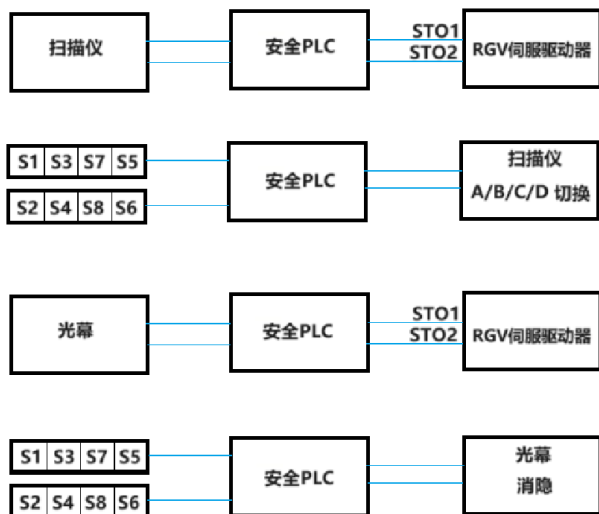


图 11. 安全功能方块图

### (三) 安全性能的计算

有关安全设备的操作周期做表3假设：

表3 设备操作周期

周期时间（s）	600
每天工作小时数（h）	16
每年工作天数（day）	360
每年操作周期数（nop）	34560

从所用安全器件的规格书中查得其安全参数见表4.

表4 安全设备的清单

安全器件名称	规格	MTTFd	B <sub>10d</sub>	PL	厂家
安全激光扫描仪	***	/	/	e	***
安全光幕	***	/	/	e	***
安全光电开关	***	1.749E3	/	/	***
安全门开关	***	/	2.0E6	/	***
安全 PLC	***	/	/	e	***
伺服驱动器	***	/	/	e	***

德国社会意外伤害保险职业安全与健康研究所（IFA）于2010年开发了基于ISO 13849-1性能级别计算软件（Version 2.1.1）。将表4的安全数据输入该软件后的计算结果如图12：

Contained safety functions			
SF Name: 扫描仪安全回路	Required: PLr d	Reached: PL e	PFH [1/h]: 8.79E-8
SF Name: 扫描仪区域切换回路	Required: PLr d	Reached: PL d	PFH [1/h]: 1.13E-7
SF Name: 光幕安全回路	Required: PLr d	Reached: PL e	PFH [1/h]: 8.79E-8
SF Name: 光幕消隐回路	Required: PLr d	Reached: PL d	PFH [1/h]: 1.13E-7

图 12. 安全回路性能等级计算结果

## 五、结论

表5. 安全回路性能级别

	PLr (要求值)	PL (计算值)	判断
安全扫描仪检测回路	d	e	合格
扫描区域切换回路	d	d	合格
安全光幕检测回路	d	e	合格
安全光幕消隐回路	d	d	合格

综上所述，图4所示的安全方案，图10所示的安全电路以及表4安全部件的选型满足ISO 13849-1的要求。

## 参考文献

- [1] 2006/42/EC annex I Essential health and safety requirements relating to the design and construction of machinery.
- [2] IEC 62840-2:2019 Electric vehicle battery swap system – Part 2: Safety requirements.
- [3] ISO 14119:1998+A1:2007 Safety of machinery — Interlocking devices associated with guards — Principles for design and selection.
- [4] IEC 62046:2011 Safety of machinery – Application of protective equipment to detect the presence of persons.
- [5] ISO 13849-1:2021 Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design.

# 市政基础设施建设中智慧运维管理体系构建

李正晖, 肖颖

天津市城市规划设计研究总院有限公司, 天津 300190

DOI:10.61369/ERA.2025090015

**摘 要 :** 随着城市化进程加速, 市政基础设施规模与复杂度激增, 传统运维模式因组织协同低效、技术应用碎片化等问题难以满足现代管理需求。本文基于组织管理理论与系统工程方法, 构建“组织 – 技术 – 流程 – 制度”四维智慧运维管理体系, 通过跨部门协同机制设计、物联网与大数据技术集成、精细化流程再造及政策标准完善, 实现基础设施全生命周期智能化管理。研究结合深圳前海等典型案例, 验证体系在提升运维效率、降低成本、增强应急能力等方面的有效性, 为新型城镇化背景下市政基础设施智慧化转型提供理论框架与实践路径。

**关 键 词 :** 市政基础设施; 智慧运维; 管理体系; 组织协同

## Construction of Intelligent Operation and Maintenance Management System in Municipal Infrastructure Construction

Li Zhenghui, Xiao Ying

Tianjin Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300190

**Abstract :** with the acceleration of urbanization, the scale and complexity of municipal infrastructure have surged, and the traditional operation and maintenance mode is difficult to meet the needs of modern management due to problems such as inefficient organization and fragmented technology application. Based on the organization management theory and system engineering method, this paper constructs the "organization technology process system" four-dimensional intelligent operation and maintenance management system, and realizes the intelligent management of infrastructure in the whole life cycle through the design of cross departmental collaborative mechanism, the integration of Internet of things and big data technology, refined process reengineering and the improvement of policy standards. Combined with typical cases such as Shenzhen Qianhai, the study verifies the effectiveness of the system in improving operation and maintenance efficiency, reducing costs, and enhancing emergency response capacity, providing a theoretical framework and practical path for the smart transformation of municipal infrastructure under the background of new urbanization.

**Keywords :** municipal infrastructure; intelligent operation and maintenance; management system; organizational collaboration

## 引言

市政基础设施作为城市运行的“生命线”, 其运维管理水平直接影响城市安全、效率与可持续发展能力。据《2023中国城市建设统计年鉴》显示, 我国城市道路、地下管网等基础设施总量已居世界前列, 但传统运维模式仍面临显著挑战: 一方面, 交通、水务、城管等部门条块分割, 跨系统故障处理需协调4–6个部门, 平均响应时间超3小时; 另一方面, 技术应用缺乏顶层设计, 80%的城市存在“信息烟囱”, 传感器覆盖率不足50%, 老旧管网泄漏事故年均发生超2万起。与此同时, 国家“十四五”规划明确要求“推进市政基础设施智慧化改造”, 智慧城市建设对运维管理的精细化、协同化、智能化提出迫切需求。现有研究多聚焦BIM、GIS等单一技术应用, 缺乏对管理体系的系统性整合。本文基于组织管理理论与系统工程方法, 从“组织 – 技术 – 流程 – 制度”四维度切入, 旨在解决传统运维中组织壁垒、数据孤岛、流程低效等核心问题。



## 一、核心概念界定

### （一）市政基础设施

市政基础设施是城市生存与发展的物质基础，指为社会生产和居民生活提供公共服务的各类工程设施的统称，涵盖交通（道路、桥梁、轨道交通）、给排水（供水管道、污水处理厂）、能源（供电网络、燃气系统）、通信（光缆线路、基站设施）及公共服务（照明、环卫、消防）等领域。其核心特征包括：①公益性，作为公共产品承载城市基本服务功能，投资主体以政府为主；②网络性，各子系统通过物理连接或功能协同形成有机整体，如道路管网与给排水管线的空间耦合；③生命周期长，设计使用年限通常达50年以上，需跨越规划、建设、运维、更新全周期管理。本文聚焦交通设施、市政管网（供水、排水、燃气）、公共服务设施三类核心领域，重点研究其在智慧化运维中的共性需求与技术适配路径。

### （二）智慧运维管理体系

智慧运维管理体系是以物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术为支撑，融合组织管理理论与系统工程方法，对市政基础设施全生命周期进行智能化管理的综合系统。其核心内涵包括：①技术集成，通过传感器网络实现设施状态实时感知，依托数据中台完成多源异构数据融合，运用AI算法实现故障预测与决策优化；②管理重构，打破传统科层制壁垒，建立跨部门协同机制，推动运维模式从“人工经验驱动”向“数据智能驱动”转型；③全周期覆盖，从规划阶段嵌入运维需求，到建设阶段同步部署智能设备，再到运维阶段实施动态监控与预防性维护；④三维度协同，构建“技术层、组织层、制度层”一体化框架，实现技术应用与管理流程的深度适配。该体系以提升运维效率、降低全生命周期成本、增强城市韧性为目标，是新型智慧城市建设的核心组成部分。

## 二、市政基础设施运维管理现状与问题分析

### （一）组织协同不足

市政基础设施运维管理的组织架构，仍受制于传统科层制体系，纵向层级分化与横向部门分割并存，导致协同效能显著不足。交通、水务、能源等职能部门，基于专业分工，形成独立运维单元，缺乏跨领域统筹协调的常设机构，遇有复杂问题时，需通过临时会议或专项工作组协调，决策链条冗长且责任边界模糊。与此同时，政府部门与市场主体之间，存在管理界面割裂，建设阶段侧重工程进度与成本控制，运维阶段聚焦设施运营，二者在技术标准衔接、数据传递、责任追溯等方面，缺乏制度化对接机制，常因信息断层，导致运维需求在规划建设阶段被忽视。公众参与渠道不畅，设施使用反馈，难以有效纳入运维决策体系，组织协同的“政府—企业—公众”三元结构尚未成型，整体呈现出“纵向传导迟滞、横向联动缺失、多元协作缺位”的多重困境。

### （二）技术应用碎片化

智慧化技术在市政运维中的应用缺乏系统性顶层设计，呈现

“单点突破有余、全局整合不足”的碎片化特征。各部门基于局部需求，独立部署信息系统，如智慧照明、智慧排水等，技术选型、数据格式与平台架构缺乏统一规范，导致跨系统数据互通率低下，形成物理分散、逻辑隔离的“信息孤岛”。传感器、摄像头等智能设备的部署往往服务于单一业务场景，未从城市级基础设施网络的整体视角进行布局，部分区域重复建设与监测盲区并存，老旧设施智能化改造滞后，技术覆盖呈现“新城区密集、老城区稀疏”的不均衡状态。更关键的是，现有技术应用，多停留在数据采集与可视化层面，缺乏对多源数据，深度挖掘与跨领域关联分析，人工智能、数字孪生等前沿技术，尚未融入运维决策核心流程，技术赋能仅作用于管理环节的“末端优化”。<sup>[1]</sup>

### （三）流程机制滞后

传统运维管理流程仍以人工干预为核心，智能化手段的嵌入未能根本改变“经验驱动”的决策模式，流程设计与技术发展的适配性显著不足。在监测环节，人工巡检仍是主要故障发现方式，智能设备的实时预警功能，未充分激活，导致问题察觉滞后，部分潜在风险，演变为显性故障；调度环节，依赖人工派单与资源调配，跨部门任务协同，缺乏标准化规则，工单流转效率低下，应急响应时易出现指挥体系混乱；维护环节以“故障后修复”为主导，缺乏基于设施运行数据的健康评估与寿命预测，预防性维护策略，难以精准制定，维修方案的科学性与经济性不足。全生命周期管理链条断裂，规划建设阶段的BIM模型、设备参数等数据，未能有效传递至运维阶段，运维记录的数字化归档与分析应用滞后，无法形成“设计—建设—运维—更新”的闭环管理。

### （四）政策标准缺失

市政基础设施智慧运维的制度建设滞后于技术应用需求，政策法规、技术标准与考核体系的不完善构成体系化推进的核心瓶颈。政策层面，现行法律法规如《城市道路管理条例》《城镇排水与污水处理条例》，未充分涵盖智慧化运维的新要求，数据共享的权责边界、跨部门协同的法律依据、公众信息安全保护等关键领域存在制度空白，导致实践中部门间数据交换面临合规性风险。技术标准层面，智能设备接口协议、数据分类编码、平台互操作等，缺乏统一规范，不同厂商的系统与设备兼容性差，形成“技术壁垒”，增加集成成本与后期运维复杂度；国际标准对接不足，国内自主标准体系尚未成熟，制约技术应用的规模化与产业化。考核机制层面，缺乏针对智慧运维的差异化评价指标，传统绩效考核侧重设施完好率、维修及时率等量化指标，对数据应用深度、跨部门协同效率、公众满意度等智慧化维度的考核缺失，难以形成有效的激励约束，导致地方政府与实施主体对智慧运维的投入动力不足<sup>[2]</sup>。

## 三、智慧运维管理体系构建框架

### （一）体系目标与原则

以提升市政基础设施运维效率、优化资源配置、增强城市运行韧性为核心目标，旨在通过智慧化手段推动基础设施运维从“被动应急”向“主动预防”、从“经验驱动”向“数据智能驱

动”转型，实现监测、决策、调度、维护全流程的精准化与协同化。体系构建遵循四项原则：一是系统性整合，统筹技术应用、管理流程与制度设计，打破部门壁垒与技术孤岛，形成覆盖规划、建设、运维全生命周期的闭环管理体系；二是协同化运作，建立政府主导、企业参与、公众协同的多元治理模式，强化跨部门、跨层级的资源联动与责任衔接；三是数据化驱动，将数据作为核心生产要素，通过全流程数字化实现设施状态实时感知、风险智能预判与决策科学优化；四是动态化适应，紧跟技术发展趋势与城市需求变化，建立弹性可扩展的管理框架，确保体系长期适配性与持续进化能力。

## （二）体系架构设计

### 1. 组织层：构建协同型管理架构

针对传统科层制下部门分割、协同低效的问题，组织层要以“打破壁垒、明确权责、多元共治”为核心，重构运维管理的组织体系。如设立直属市政府的“智慧运维管理中心”作为跨部门协同枢纽，统筹交通、水务、城管等职能部门的运维资源，制定统一规划、标准与考核体系，消除条块分割导致的管理真空，并下设专项工作组负责重大故障处置、数据共享等事务，实现“一站式”调度指挥；要优化政府部门、建设单位、运维企业的全周期责任链条，建立“运维需求前置审核”制度，要求规划建设阶段必须纳入运维部门意见，同时建立跨部门联席会议制度与《运维协同工作规则》，通过信息化平台实现任务自动流转与进度追踪；要通过政府购买服务、PPP模式引入专业运维企业，签订全生命周期服务合同，推动运维服务市场化，并搭建市民报障APP等公众参与平台，形成“政府主导、企业主力、公众参与”的协同治理格局；实施“智慧运维人才培养计划”，建立数字化运维人才认证体系，通过高校联合培养、在职技术培训等方式，提升人员跨部门协作能力与技术应用水平，打造复合型管理团队<sup>[3]</sup>。

### 2. 技术层：打造智能化技术底座

技术层要以“全域感知、数据贯通、智能驱动”为导向，构建覆盖“感知-网络-平台”的立体化技术支撑体系。要制定《市政设施智能化改造导则》，分阶段对道路、管网、公共设施部署激光雷达、压力变送器、视频摄像头等智能传感器，实现设施运行状态（如流量、压力、温湿度）的实时采集与老旧设施智能化改造，同步构建城市级基础设施数据库作为统一数据中台，打通GIS、BIM、IoT等多源数据接口，通过数据清洗、治理与可视化形成“设施数字档案”，支撑跨部门数据共享与深度分析；要深化人工智能、数字孪生等技术应用，运用机器学习算法建立设施故障预测模型，实现潜在风险提前预警，构建城市级基础设施数字孪生体以实时仿真运行状态、辅助应急演练，开发“一键式”智能决策支持系统，基于AI算法自动匹配维修资源、优化调度路径，实现工单派发与处置流程自动化，推动技术应用从数据采集向智能决策的核心流程渗透。

### 3. 流程层：设计精细化管理流程

流程层要以“精准监测、高效处置、闭环管理”为目标，重构覆盖监测、调度、维护的全链条管理流程。建立“实时感知-智能研判-分级预警”机制，通过传感器高频次数据采集与平台

阈值自动比对，触发黄色/红色预警后分别在规定时间内推送至责任主体并生成初步处置方案；要开发跨部门协同调度平台，集成GIS地图与资源数据库，实现故障位置自动定位、维修队伍智能匹配、物资装备动态调配，构建高效响应的“应急调度圈”；要推行“标准化+智能化”维护执行模式，通过AR眼镜提供远程技术指导，运用区块链技术记录维护过程，维修完成后自动采集设施运行数据进行效果验证，不合格项自动触发二次派单，同时打通规划、建设、运维阶段数据链路，将设计参数、施工记录、运维档案纳入统一管理平台，形成“发现问题-处置-反馈-改进”的全生命周期闭环，实现从“故障后修复”向“预防性维护”的模式转变，提升运维流程的科学性与精细化水平。

### 4. 制度层：完善保障性政策体系

制度层要以“法治保障、标准引领、考核驱动”为核心，构建智慧运维的制度支撑网络。要推动出台《城市市政基础设施智慧运维管理条例》等顶层政策，明确部门协同职责、数据共享规则、安全责任边界，将智慧运维纳入政府绩效考核体系，为跨部门协同与数据流通提供法律依据；要健全技术标准体系，制定《智慧运维数据接口标准》《智能设备部署规范》《安全防护技术指南》等系列标准，统一设备协议、数据编码与平台架构，引导企业技术选型与系统开发，提升技术应用的兼容性与规模化水平；创新考核评价机制，建立“技术应用+协同效率+公众满意度”三维考核指标体系，将数据利用率、跨部门流程办结率、市民报障响应速度等纳入考核，考核结果与部门预算、企业服务费用挂钩，形成有效的激励约束；要强化安全与伦理治理，制定《运维数据安全管理办法》，采用区块链技术实现数据溯源与隐私保护，建立网络安全应急预案并定期开展攻防演练，防范技术滥用与数据泄露风险，确保智慧运维体系安全、合规、可持续运行<sup>[4]</sup>。

## 四、案例分析

### （一）案例背景

深圳前海作为粤港澳大湾区深度融合发展的核心引擎，承载着高密度城市建设与高效能治理的双重使命。区域内聚集了超200公里地下综合管廊、150公里智慧道路、500余座智能桥梁及复杂立体交通系统，基础设施规模与复杂度远超传统城区。然而，传统运维模式下，交通、水务、城管等部门各自为政，跨系统故障需协调4-6个部门，平均响应时间超3小时，且老旧管网监测覆盖率不足40%，2020年前海片区年均发生管网泄漏事故32起，暴露出组织协同低效、技术应用碎片化等突出问题。随着《前海深港现代服务业合作区总体规划》对智慧城市建设的明确要求，构建适应高密度城区的智慧运维管理体系成为破解治理难题的关键路径。

### （二）实施措施

深圳前海以“组织-技术-流程-制度”四维体系为框架，开展系统性改革：组织层设立直属前海管理局的“智慧运维指挥中心”，统筹8个部门的运维资源，建立跨部门联席会议制度与《协同工作手册》，明确故障处置“责任清单”与“响应时限”，

形成“中枢调度+专项小组”的扁平化指挥架构；技术层投资12亿元实施“全域感知工程”，部署3.2万套智能传感器覆盖管廊、道路、桥梁，搭建融合GIS、BIM、IoT数据的城市级数据中台，开发基础设施数字孪生系统，实现设施状态1:1实时映射与故障模拟推演；流程层重构“监测预警-智能派单-协同处置-效果评估”全流程，建立三级预警机制，通过AI算法自动匹配维修队伍与物资，运用区块链技术记录维护过程，形成“问题发现-解决-归档”闭环；制度层出台《前海市政基础设施智慧运维管理办法》，明确数据共享权责、安全规范及考核指标，将跨部门协同效率、数据利用率纳入部门绩效考核，配套建立企业运维服务质量“红黑名单”制度。

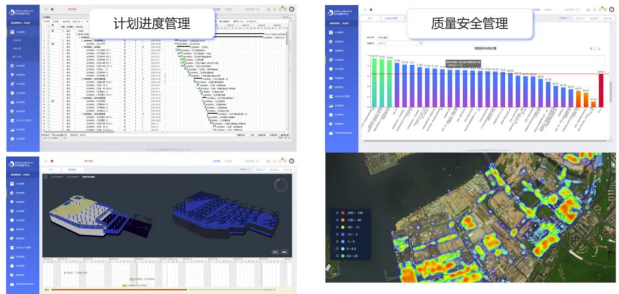


图1 城市级 BIM 应用实践

（三）管理效果

经过3年实践，前海智慧运维体系成效显著：跨部门故障响应时间从3.5小时压缩至45分钟，工单流转效率提升70%，2024年重大事故联合处置耗时较试点前缩短60%，实现“一图统览、一

键调度”的高效指挥；设施智能化监测覆盖率达98%，数字孪生系统提前72小时预警桥梁结构病害、管网泄漏等风险，预警准确率超85%，2024年管网泄漏事故率同比下降48%，预防性维护比例从15%提升至55%；全生命周期运维成本降低30%，人工巡检频次下降60%，应急物资库存周转率提升40%，同时通过公众报障APP实现“市民吹哨、部门报到”，市民满意度从72%提升至91%。深圳前海的实践验证了四维体系在破解高密度城区运维难题中的有效性，其“组织重构破壁垒、技术集成强感知、流程再造提效率、制度保障促长效”的经验，为新型城镇化背景下基础设施智慧化转型提供了可复制的标杆范式<sup>[5]</sup>。

五、结论

本文构建的“组织-技术-流程-制度”四维智慧运维管理体系，通过跨部门协同架构设计、智能化技术集成、精细化流程再造及政策标准完善，系统性破解了传统市政基础设施运维的组织壁垒、技术碎片化与流程低效问题。深圳前海等案例表明，该体系可显著提升运维效率、降低全生命周期成本，为智慧城市建设提供了可复制的管理范式。未来研究可进一步拓展至欠发达地区适应性分析，深化数字孪生、区块链等技术与运维管理的融合应用，助力城市治理体系向更高效、更智能、更可持续的方向演进。

参考文献

[1] 王琪, 吴泽昆, 郭琦, 等. 组织管理视角下市政交通基础设施智慧化运维管理平台构建研究——以深圳湾超级总部基地片区基础设施项目为例 [J]. 建筑经济, 2025, 46(04): 42-51.  
[2] 郑森, 胡锦荣. 探索城市化背景下排水管网智慧运维的实现新路径 [J]. 中国建设信息化, 2025, (03): 62-65.  
[3] 周俊羽, 马智亮. 建筑与市政公用设施智慧运维综述 [C]. 中国图学会建筑信息模型 (BIM) 专业委员会. 第八届全国 BIM 学术会议论文集. 清华大学土木工程系, 2022: 413-420.  
[4] Bentley. 服务基础设施智慧运维 [J]. 中国公路, 2019, (01): 85-86.  
[5] 朱俊韬. 城市地下综合管廊智慧运维及应急指挥系统研发 [J]. 长江信息通信, 2024, 37(10): 137-140.



# 机械制造行业售后服务管理中的技术管理应用与创新

叶伟

什邡慧丰采油机械有限责任公司，四川 德阳 618000

DOI:10.61369/ERA.2025090021

**摘 要：** 机械制造行业售后服务管理体系包含设备维护、客户响应、备件供应等要素，存在技术管理应用缺口。介绍了基于物联网的故障预警等技术框架，AR 远程指导等协同应用，以及全生命周期数据管理等内容，强调技术管理创新的重要性及发展方向。

**关 键 词：** 机械制造；售后服务；技术管理

## Application and Innovation of Technical Management in After-Sales Service Management of Machinery Manufacturing Industry

Ye Wei

Shifang Huifeng Oil Production Machinery Co., Ltd. Deyang, Sichuan 618000

**Abstract：** The after-sales service management system in the machinery manufacturing industry includes elements such as equipment maintenance, customer response, and spare parts supply, with gaps in technical management applications. This paper introduces a technical framework based on the Internet of Things for fault prediction, collaborative applications like AR remote guidance, and full lifecycle data management, emphasizing the importance and direction of technological innovation in technical management.

**Keywords：** machinery manufacturing; after-sales service; technical management

### 引言

机械制造行业售后服务管理体系是一个复杂的系统，涵盖设备维护、客户响应、备件供应等多个关键要素，且各要素相互关联。近年来，随着我国《中国制造2025》（2015年颁布）等政策的推进，制造业对售后服务管理的智能化、高效化提出了更高要求。然而，当前在技术管理应用方面存在诸多问题，如设备维护人员专业能力不均、技术应用存在多维度缺口、数据集成能力弱等。这些问题影响了售后服务质量和企业竞争力，亟待通过技术创新和管理优化来解决，以适应政策导向和行业发展需求。

### 一、机械制造行业售后服务管理现状分析

#### （一）售后服务管理体系构成要素

机械制造行业售后服务管理体系包含多个构成要素。设备维护是关键要素之一，它涉及定期检查、故障诊断和修复等流程。然而，目前在设备维护方面存在技术人员专业能力参差不齐的问题，影响维护效率和质量。客户响应也是重要组成部分，包括对客户咨询和投诉的及时处理。但部分企业存在响应不及时的情况，导致客户满意度下降。备件供应同样不可或缺，它需要保证备件的充足性和及时性。实际中，常出现备件库存管理不善，缺货或积压现象并存的问题<sup>[1]</sup>。这些要素相互关联，任何一个环节出现问题都可能影响整个售后服务管理体系的运行效果。

#### （二）技术管理应用缺口分析

在机械制造行业售后服务管理中，技术管理应用存在多维度缺口。智能化水平方面，许多企业仍依赖传统人工模式，对智能

化诊断及预测技术应用不足，无法及时高效地解决问题<sup>[2]</sup>。数据集成能力上，各系统数据分散，缺乏有效的整合机制，导致信息孤岛现象严重，影响服务决策的准确性。远程支持技术也较为薄弱，对于异地设备故障，难以实现快速远程协助，增加了维修时间和成本。这些缺口制约了售后服务质量的提升，亟待通过技术创新和管理优化来弥补。

### 二、技术管理在售后服务中的核心应用场景

#### （一）智能诊断技术应用体系

基于物联网的故障预警系统与专家诊断数据库的技术框架是智能诊断技术应用体系的关键。该框架通过物联网技术实时收集设备运行数据，利用大数据分析技术挖掘潜在故障模式，构建故障预警模型，提前预测设备故障，实现预防性维护<sup>[3]</sup>。同时，建立专家诊断数据库，整合行业专家经验和知识，结合机器学习算



法，对设备故障进行快速准确诊断。该数据库能够不断学习和更新，提高诊断的准确性和效率。通过该技术框架，售后服务团队可以更及时、有效地解决设备故障，提高客户满意度，降低维修成本。

## （二）远程维护技术集成方案

AR 远程指导、5G 实时通讯与数字孪生技术的协同应用为远程维护带来创新方案。AR 远程指导可使技术人员远程查看设备现场情况并给予准确指导<sup>[4]</sup>。5G 实时通讯保障了信息的高速稳定传输，确保远程指导的及时性和准确性。数字孪生技术通过创建设备的虚拟模型，实时反映设备的运行状态和性能数据。技术人员借助该虚拟模型，可提前预测设备可能出现的问题并制定维护策略。三者协同，实现了远程维护的高效性和精准性，提升了售后服务质量，降低了维护成本，为机械制造行业售后服务管理中的技术管理应用提供了有力支撑。

## 三、售后服务技术管理创新路径

### （一）数字化服务能力建设

#### 1. 全生命周期数据管理

在机械制造行业售后服务管理中，全生命周期数据管理至关重要。建立设备运行数据采集、清洗、分析的标准化流程是基础。通过统一标准，确保数据的准确性和完整性<sup>[5]</sup>。同时，构建数据中台架构，实现数据的集中管理和高效利用。数据中台能够整合来自不同设备和系统的数据，打破数据孤岛。在数据采集方面，利用传感器等技术实时获取设备运行状态数据。对于采集到的数据，进行清洗以去除噪声和错误信息。然后，运用数据分析技术挖掘数据中的价值，如预测设备故障、优化维护计划等，从而提升售后服务的技术管理水平和服务质量。

#### 2. 智能决策支持系统

开发融合机器学习的维修策略优化算法与资源调度模型，可有效提升售后服务的智能决策支持能力。通过收集大量维修案例及相关数据，利用机器学习算法分析数据模式，挖掘潜在规律，从而优化维修策略。例如，根据设备故障类型、严重程度及历史维修记录等因素，准确预测所需维修时间、零部件及人力资源，实现资源的合理调度。同时，该模型能够实时更新和自适应调整，以应对不断变化的设备运行状况和维修需求，提高售后服务的效率和质量，增强企业在机械制造行业的竞争力<sup>[6]</sup>。

### （二）新兴技术融合应用

#### 1. 区块链技术应用

设计服务过程可追溯的分布式记账系统与智能合约执行机制，是区块链技术在机械制造行业售后服务管理中的重要应用。分布式记账系统能够记录售后服务的每一个环节，包括设备故障信息、维修人员操作、零部件更换等，确保数据的完整性和不可篡改，为售后服务质量的评估和追溯提供可靠依据。智能合约执行机制则可根据预设的规则自动执行售后服务中的一些流程，如在满足一定条件下自动触发维修工单的派单、零部件的采购等，提高售后服务的效率和准确性。同时，区块链技术的应用还能增

强企业与客户之间的信任，提升客户满意度。通过这些应用，机械制造行业的售后服务管理能够更加科学、高效和透明。<sup>[7]</sup>

#### 2. 增强现实技术集成

在售后服务技术管理创新路径中，新兴技术融合应用至关重要，尤其是增强现实技术集成。构建基于计算机视觉的 AR 维修指导系统与知识图谱融合方案具有显著优势。计算机视觉技术能够准确识别机械制造产品的部件及故障点<sup>[8]</sup>，为维修提供精准的视觉信息。AR 维修指导系统则在此基础上，将维修步骤和相关信息以增强现实的方式呈现给维修人员，使其能直观地获取指导。知识图谱融合进一步完善了该系统，通过整合大量的维修知识和经验，能够更好地理解故障原因和解决方案，提高维修效率和质量，为机械制造行业的售后服务技术管理创新提供有力支持。

## 四、技术管理创新实施保障体系

### （一）组织架构优化策略

#### 1. 跨部门协作机制

建立技术部门与服务团队的矩阵式管理架构与信息共享平台是保障技术管理创新实施的关键。这种架构打破了传统的部门壁垒，使技术人员和服务人员能够更好地协作。在矩阵式管理架构下，技术人员可以直接参与到售后服务项目中，为服务团队提供及时的技术支持。同时，服务团队也能够将客户的实际需求和问题反馈给技术部门，促进技术的改进和创新。信息共享平台则进一步加强了这种协作，它使得技术人员和服务人员能够实时共享信息，包括产品技术资料、客户反馈、维修记录等。通过这种方式，提高了售后服务的效率和质量，促进了技术管理的创新<sup>[9]</sup>。

#### 2. 人才培养体系

制定包含数字技能、工程经验、客户服务的复合型人才培养方案是提升机械制造行业售后服务管理的关键。随着行业数字化转型加速，人才需具备数字技能以应对智能设备维护与数据分析。同时，工程经验确保对机械产品结构和原理的深入理解，能准确诊断和解决复杂故障。良好的客户服务能力则有助于提升客户满意度。通过整合这三方面技能的培训课程体系，结合实践操作与理论学习，以及建立企业与高校、培训机构的合作机制，为行业培养适应技术管理创新需求的复合型人才，为机械制造售后服务管理提供有力的人力支持<sup>[10]</sup>。

### （二）技术标准建设

#### 1. 数据接口标准化

在机械制造行业售后服务管理的技术管理创新中，数据接口标准化至关重要。对于设备通讯协议与系统对接，需建立标准化技术规范。这包括统一的数据格式定义，确保设备与系统之间传输的数据具有一致性和准确性。同时，规范通讯协议的语法和语义规则，使不同设备能够准确理解和执行指令。在接口设计方面，要明确输入输出参数的类型和范围，避免因数据不匹配导致的通讯故障。此外，还需考虑兼容性问题，确保标准化技术规范能够适应不同型号、不同版本的设备和系统，为售后服务管理中的技术管理应用与创新提供坚实的基础。

## 2. 服务流程数字化

开发基于 BPMN 的服务流程管理系统与自动化工作流引擎对于机械制造业售后服务管理至关重要。BPMN 提供了一种标准化的流程建模语言，能够清晰地描述服务流程的各个环节及其逻辑关系。通过构建基于 BPMN 的服务流程管理系统，企业可以对售后服务流程进行可视化设计、分析和优化。同时，自动化工作流引擎能够根据预设的规则和条件，自动驱动服务流程的执行，提高流程的效率和准确性。这不仅可以减少人工干预，降低错误率，还能实现服务流程的实时监控和动态调整，更好地满足客户需求，提升企业售后服务的质量和竞争力。

### （三）创新激励机制

#### 1. 技术成果转化机制

为保障技术管理创新实施，需建立有效的创新激励机制和技术成果转化机制。创新激励机制方面，应设立合理的奖励制度，对在技术创新过程中有突出贡献的团队和个人给予物质和精神奖励，激发员工创新积极性。同时，提供充足的资源支持，包括资金、设备和培训机会等，为创新活动创造良好条件。在技术成果转化机制上，要加强与市场的对接，了解市场需求，确保技术成果能够满足市场实际需要。建立专门的成果转化团队，负责技术成果的推广和应用，提高成果转化效率。此外，完善知识产权保护制度，保护创新成果，为技术管理创新提供坚实的法律保障。

#### 2. 客户参与创新模式

建立创新激励机制，对参与技术管理创新的员工给予物质和

精神奖励，激发其积极性和创造力。设立专项奖励基金，对提出有效创新方案的团队或个人进行表彰。同时，构建客户参与创新模式，机械制造业售后服务中，注重收集客户反馈，通过客户需求驱动技术改进流程。建立用户体验反馈系统，方便客户随时提出意见和建议。对客户反馈进行分析和整理，将有价值的信息转化为技术改进的方向。加强与客户的沟通和合作，邀请客户参与产品测试和改进过程，提高客户满意度和忠诚度，共同推动技术管理创新的实施。

## 五、总结

技术管理在机械制造业售后服务管理中具有关键作用。其能够显著提升售后服务响应速度，及时满足客户需求；有效降低运维成本，提高企业经济效益；切实增强客户粘性，稳固企业市场地位。未来，技术管理应朝着智能化方向发展，如预测性维护可提前发现问题并解决，自主决策服务能更高效地处理售后问题。同时，建立技术管理与组织战略的协同发展机制至关重要。这不仅有助于企业内部资源的合理配置和高效利用，还能推动整个机械制造业的转型升级，使其在激烈的市场竞争中保持优势，更好地适应市场变化和客户需求，实现可持续发展。

## 参考文献

- [1] 张意. PBL 模式下制造业售后服务供应链备件库存控制策略研究 [D]. 河北：河北工业大学，2016.
- [2] 王道斌. 中国微型汽车售后服务创新研究 [D]. 湖北：武汉理工大学，2014.
- [3] 王欣. 汽车行业售后服务的风险管理 [D]. 中国科学院大学，2014.
- [4] 汪晴. C 汽车公司售后服务质量改进研究 [D]. 广东省：广州大学，2023.
- [5] 陈涛. STW 汽车公司售后服务用户流失分析及其改进研究 [D]. 广西壮族自治区：广西大学，2018.
- [6] 阮晶玲. 丰田汽车售后服务中的客户关系管理 (CRM) 优化路径探索 [J]. 中小企业管理与科技，2024，(21): 65-67.
- [7] 邵颖慧，肖校兵，刘洪波. 某型号地面设备产品售后服务技术管理初探——以国内某研究所为例 [J]. 投资与创业，2020(9): 133-134.
- [8] 郭卫. 汽车企业售后服务管理存在的问题及其对策研究 [J]. 时代汽车，2022，(18): 175-177.
- [9] 高驰. 京东物流为汽车行业打造一体化的售后备件供应链 [J]. 汽车与配件，2022，(16): 45-47.
- [10] 吴敏敏. J 公司汽车售后服务风险管理研究 [D]. 云南省：云南大学，2022.

# 自动化检测软件与硬件设计融合的关键技术与应用实践

汪平

身份证号: 440981198809102956

DOI:10.61369/ERA.2025090023

**摘 要 :** 介绍自动化检测系统软硬件协同架构, 包括分层架构及各层功能, 阐述通信协议优化、多源传感数据融合等算法, 涉及传感器选型等硬件设计及 FreeRTOS 移植等软件设计, 强调数据库集成等融合要点, 还提及验证及应用实践。

**关 键 词 :** 自动化检测; 软硬件协同; 架构设计

## Key Technologies and Application Practices of Automatic Detection Software and Hardware Design Integration

Wang Ping

ID: 440981198809102956

**Abstract :** This paper introduces the software and hardware collaborative architecture of automatic detection system, including hierarchical architecture and functions of each layer. It elaborates on communication protocol optimization, multi-source sensor data fusion algorithm, hardware design such as sensor selection and software design such as FreeRTOS porting, emphasizes the integration points such as database integration, and also mentions verification and application practice.

**Keywords :** automatic detection; software and hardware collaboration; architecture design

### 引言

随着工业4.0战略(2013年)的推进,自动化检测系统在各行业的应用日益广泛且重要。该系统涵盖软硬件协同架构设计,从传感层到人机交互层的分层架构明确各部分功能,提高可靠性与灵活性。通信协议选择上,工业以太网和CAN总线各有优化策略。多源传感数据融合算法、异常检测模型等提升检测准确性。传感器选型、信号调理电路设计等影响系统性能。同时,FreeRTOS移植、设备驱动开发、Qt上位机开发、数据库集成设计等都是关键环节。此外,通过测试用例矩阵验证功能完整性,可靠性试验保障系统性能,在不同行业应用中展现出重要价值,软硬件协同设计方法对系统性能提升显著,未来还需在工业物联网集成和数字孪生技术融合等方面进一步探索。

## 一、自动化检测系统架构设计

### (一) 软硬件协同架构设计

自动化检测系统的软硬件协同架构设计基于模块化的系统分层架构。传感层负责采集数据,是系统的基础感知单元,它通过各种传感器获取检测所需的原始信息<sup>[1]</sup>。控制层起到连接和协调的作用,它接收传感层的数据,并根据设定的规则和算法,对系统的运行进行控制和调节。数据处理层对采集到的数据进行分析和处理,提取有价值的信息,为后续的决策和判断提供依据。人机交互层则实现了人与系统之间的信息交互,使用户能够方便地设置参数、查看结果和进行操作。这种分层架构的协同机制使得系统各部分功能明确,相互配合,提高了系统的可靠性和灵活性,能够更好地满足自动化检测的需求。

### (二) 实时通信协议优化

工业以太网和CAN总线是自动化检测系统中常用的通信协

议。对于工业以太网,可通过优化网络拓扑结构来提高实时性,如采用星型拓扑结构,减少数据传输的冲突和延迟<sup>[2]</sup>。同时,合理设置交换机的优先级和带宽分配策略,确保关键数据的实时传输。在协议层面,可采用时间敏感网络(TSN)技术,为不同优先级的数据流提供确定性的传输服务。对于CAN总线,优化其波特率设置可提高通信效率。通过精确计算和调整波特率,使其与系统的硬件特性和数据传输需求相匹配<sup>[3]</sup>。此外,采用多主站模式并合理分配节点优先级,可避免总线冲突,提高实时性。在硬件接口匹配方面,要确保通信协议与硬件设备的电气特性和接口规范相一致,以实现稳定可靠的通信连接。

## 二、关键检测技术研发

### (一) 智能数据处理算法

多源传感数据融合算法旨在综合不同传感器获取的信息,提



高检测的准确性和可靠性。通过对多种传感器数据的特征提取和分析,利用合适的数学模型和算法进行融合处理<sup>[9]</sup>。异常检测模型则专注于识别数据中的异常模式,这对于及时发现系统故障或异常情况至关重要。它可以基于统计方法、机器学习算法等构建,通过对正常数据模式的学习,能够有效区分出异常数据点。边缘计算部署方案考虑如何在靠近数据源的边缘设备上进行处理和算法部署,以减少数据传输延迟和网络带宽压力,同时提高系统的实时性和响应速度,确保检测系统能够快速、高效地运行。

## (二) 高精度检测硬件设计

传感器选型需综合考虑检测对象的特性、精度要求等因素。对于不同的物理量检测,要选择合适的传感器类型,如温度检测可选用热电偶或热电阻传感器,压力检测可选用压阻式或电容式传感器等<sup>[4]</sup>。信号调理电路设计至关重要,其作用是对传感器输出的微弱信号进行放大、滤波等处理,以提高信号的质量和稳定性。例如,采用运算放大器构成的放大电路可实现信号的放大,通过滤波器可滤除噪声干扰。执行机构驱动模块的可靠性设计直接影响整个检测系统的性能。要确保驱动模块能够稳定地控制执行机构的动作,需考虑驱动电路的功率匹配、保护措施等,以防止执行机构出现误动作或损坏。

## 三、软硬件集成开发方法

### (一) 嵌入式软件开发

#### 1. 实时操作系统移植

实现 FreeRTOS 在 ARM Cortex - M 系列处理器的移植,需深入了解处理器架构与 FreeRTOS 内核机制。首先要配置处理器相关的启动文件,设置正确的中断向量表及堆栈初始化等操作,以确保系统能正常启动<sup>[9]</sup>。接着,针对 ARM Cortex - M 系列的特性,如内存保护单元(MPU),进行合理配置,保证系统的稳定性和可靠性。在任务调度方面,根据实际应用需求,调整任务优先级设置算法。例如,对于实时性要求高的任务,赋予较高优先级,确保其能及时响应。同时,优化任务切换机制,减少任务切换的时间开销,提高系统的整体性能。通过这些定制化的移植和优化措施,使 FreeRTOS 能更好地适配 ARM Cortex - M 系列处理器,满足自动化检测软件与硬件设计融合的需求。

#### 2. 设备驱动开发

在嵌入式软件开发的设备驱动开发中,AD/DA 转换和 PWM 控制等关键外设的驱动开发与性能测试至关重要。对于 AD/DA 转换驱动开发,需深入了解硬件电路原理,根据芯片手册配置相关寄存器,确保数据转换的准确性和稳定性<sup>[6]</sup>。同时,要考虑采样频率、分辨率等因素对转换结果的影响,并进行针对性优化。在 PWM 控制驱动开发方面,要精确设置占空比、频率等参数,以实现对外部设备的精确控制。性能测试过程中,需采用合适的测试工具和方法,对驱动程序的功能和性能进行全面评估,包括转换精度、控制精度、响应速度等指标,及时发现并解决可能存在的问题。

### (二) 上位机软件开发

#### 1. 跨平台开发框架

Qt 作为一种强大的跨平台开发框架,在自动化检测软件的上位机开发中具有重要作用。它提供了丰富的类库和工具,便于开发者构建可配置的检测参数设置界面。通过 Qt 的信号与槽机制,可以高效地处理用户输入与界面交互逻辑,实现参数的灵活配置<sup>[7]</sup>。同时,在数据可视化模块方面,Qt 能够与多种数据可视化库集成,如 QCustomPlot 等。开发者可以利用这些工具将检测数据以直观的图表形式展示出来,如折线图、柱状图等,方便用户对检测结果进行分析和理解。Qt 的跨平台特性使得开发的软件能够在不同操作系统上运行,减少了开发成本和维护工作量。

#### 2. 数据库集成设计

在自动化检测软件与硬件设计融合中,数据库集成设计至关重要。开发 SQLite 本地数据库与云端数据同步机制是实现检测数据全生命周期管理的关键。通过合理设计数据库架构,确保数据的高效存储和检索。采用适当的数据同步算法,保证本地数据库与云端数据的一致性和完整性。这不仅满足实时数据处理的需求,还能在网络不稳定等情况下,确保本地数据的可用性和准确性。同时,要考虑数据的安全性,对敏感数据进行加密处理,防止数据泄露。借助数据库的事务处理机制,确保数据操作的原子性和一致性,提高系统的可靠性和稳定性<sup>[8]</sup>。

## 四、系统验证与应用实践

### (一) 实验室测试验证

#### 1. 功能完整性测试

为验证自动化检测软件与硬件设计融合后的功能完整性,需制定测试用例矩阵。针对检测精度这一关键性能指标,通过设计一系列不同复杂程度的样本进行测试,将软件检测结果与实际值进行对比分析,确保其误差在合理范围内<sup>[9]</sup>。同时,对于响应时间的测试,模拟多种实际工作场景,记录从输入检测指令到获得结果的时间,评估系统在不同负载条件下的响应能力,以保证系统能够满足实际应用的实时性要求。通过全面的测试用例矩阵执行,综合评估软件与硬件融合后的功能完整性,为后续应用实践提供可靠依据。

#### 2. 环境适应性测试

进行电磁兼容试验,检测系统在复杂电磁环境下的性能表现,确保其不受电磁干扰影响,能稳定运行<sup>[10]</sup>。同时开展温湿度循环试验,模拟不同的温湿度环境条件,检验系统的适应能力。通过对温湿度的循环变化设置,观察系统各项指标的变化情况,以验证其在不同温湿度环境下是否能保持正常工作状态。这些可靠性试验从多个方面对系统进行测试,全面验证系统的鲁棒性,为其在实际应用中的稳定性和可靠性提供有力保障。

### (二) 工业现场验证

#### 1. 生产线集成应用

在汽车零部件生产线集成应用中,检测系统的部署至关重要。通过将自动化检测软件与硬件紧密融合,对生产线上的零部



件进行实时监测。利用高精度的传感器等硬件设备获取零部件的各项数据，再由软件进行快速准确的分析处理。在实际运行过程中，不断收集数据并进行反馈优化，使得检测系统能够更好地适应生产线的节奏和零部件的特性。通过对大量生产数据的统计分析，验证误检率是否得到有效降低，从而评估系统的性能和可靠性，为汽车零部件生产质量提供有力保障。

2. 设备维护支持

开发基于振动分析的预测性维护模块以验证设备故障预警准确率。利用传感器采集设备振动数据，通过信号处理与分析技术提取特征参数。将这些参数输入到建立的故障预测模型中，模型基于机器学习算法或物理模型对设备状态进行评估。在工业现场对多种设备进行长期监测，对比实际发生的故障情况与预测结果。对预测准确率进行量化分析，根据准确率不断优化模型参数和算法。同时，结合现场实际情况，对模块的适用性进行调整，确保其在不同工况和设备类型下都能有效提供设备维护支持，降低设备故障率，提高生产效率。

（三）典型行业应用案例

1. 电子制造行业应用

在电子制造行业，尤其是 SMT 贴片工艺中，自动化检测软件与硬件设计融合技术展现出巨大优势。该技术通过对硬件设备的精准控制以及软件算法的高效运行，能够实现对元器件的自动检测。它可以快速、准确地识别元器件的位置、极性、型号等关键信息，避免了人工检测可能出现的误差和疏漏。同时，这一融合技术大幅提升了检测效率，达到了 38%。不仅减少了生产周期，提高了生产效率，还提升了产品质量，降低了生产成本。为电子

制造企业在激烈的市场竞争中赢得了优势，推动了行业的发展和进步。

2. 能源装备检测应用

开发风电齿轮箱在线监测系统是能源装备检测应用的重要实践。该系统融合了自动化检测软件与硬件设计的关键技术。通过传感器等硬件设备对风电齿轮箱的运行状态进行实时数据采集，包括振动、温度等关键参数。然后利用先进的软件算法对采集到的数据进行分析处理，能够有效识别早期故障。经测试，该系统早期故障识别准确率达到 92%，为风电齿轮箱的稳定运行提供了可靠保障，也为能源装备检测领域提供了一种高效、准确的检测模式，具有重要的应用价值和推广意义。

五、总结

软硬件协同设计方法为自动化检测系统带来了显著性能提升。通过对软件算法和硬件架构的优化融合，实现了检测精度、速度以及可靠性的提高。在软件层面，智能算法的应用优化了数据处理流程；硬件上，专用芯片和高效传感器的采用增强了系统感知能力。同时，在工业物联网集成方面，后续研究可聚焦于如何实现检测系统与物联网设备更高效的通信和数据交互，确保实时监测和远程控制的稳定性。在数字孪生技术融合领域，进一步探索如何利用数字孪生模型对检测系统进行精确模拟和优化，提升系统的预测性维护能力和整体运行效率，以适应不断发展的工业需求。

参考文献

[1] 高宇. 基于 FPGA 的林火视觉检测与软硬件协同设计 [D]. 北京林业大学, 2020.  
[2] 吴源赓. Android 应用程序安全分析与自动化检测工具的设计与实现 [D]. 浙江理工大学, 2016.  
[3] 韦存堂. SQL 注入与 XSS 攻击自动化检测关键技术研究 [D]. 北京邮电大学, 2015.  
[4] 刘恒. 基于行为分析的恶意软件自动化分析工具的设计与实现 [D]. 北京大学, 2011.  
[5] 徐烂. 核电设计软件编码规范研究与应用 [D]. 南华大学, 2015.  
[6] 冯馨月, 姚民康. 自动化检测软件的研究 [J]. 数字通信世界, 2015(7): 233.  
[7] 周剑新. 高职粮油储藏与检测专业实践教学改革——以“电工基础”课程为例 [J]. 粮食科技与经济, 2022, 48(3): 47-50.  
[8] 尤明振. 自动化机械偏振故障检测方法设计 [J]. 船舶物资与市场, 2020, (11): 109-110.  
[9] 陈希, 胡峻洁, 张亮, 等. OpenSSL HeartBleed 漏洞自动化检测工具设计与实现 [J]. 网络空间安全, 2018, 9(1): 74-78.  
[10] 聂冰花. 智能交通自动化检测与运维管理系统的应用与分析 [J]. 科学技术创新, 2017(32): 157-158.

# 电气设备及控制系统开发制造中的成本控制 与技术创新协同研究

陈锦城

身份证号: 445121198302232633

DOI:10.61369/ERA.2025090029

**摘要：** 本文围绕电气设备及控制系统开发制造，阐述了成套设备成本构成，分析全生命周期成本管理瓶颈，探讨智能控制等技术对成本结构的影响，强调技术创新路径选择、跨部门协同决策、成本动态监控等的重要性，并指出研究不足及后续方向。

**关键词：** 电气设备；成本控制；技术创新

## Collaborative Research on Cost Control and Technological Innovation in the Development and Manufacturing of Electrical Equipment and Control Systems

Chen Jincheng

ID: 445121198302232633

**Abstract：** This article focuses on the development and manufacturing of electrical equipment and control systems, elaborates on the cost composition of complete sets of equipment, analyzes the bottleneck of full life cycle cost management, explores the impact of intelligent control and other technologies on cost structure, emphasizes the importance of selecting technological innovation paths, cross departmental collaborative decision-making, cost dynamic monitoring, etc., and points out the research shortcomings and future directions.

**Keywords：** electrical equipment; cost control; technological innovation

### 引言

电气设备制造行业的发展对国民经济至关重要。随着《中国制造2025》（2015年颁布）等政策的推进，制造业面临着转型升级的挑战与机遇。在电气设备及控制系统开发制造领域，成套设备制造的成本构成复杂，包括原材料采购、工艺装备、人力成本和质量管控成本等。同时，全生命周期成本管理存在瓶颈，如研发设计阶段的成本固化、生产过程中成本难以联动以及设备报废回收成本被忽视等。在此背景下，智能控制技术等的应用对成本结构产生重构作用，技术创新路径选择、跨部门协同决策、全成本动态监控体系建立、标准化模块组合设计以及数字孪生技术应用等都对实现技术创新与成本控制协同发展具有重要意义，本研究对此进行系统总结与探讨。

### 一、电气设备制造行业成本控制现状分析

#### （一）成套设备制造成本构成要素

电气设备制造行业成套设备制造的成本构成要素多样。原材料采购方面，包含各种金属材料、绝缘材料等，其成本受市场价格波动影响较大<sup>[1]</sup>。工艺装备涉及生产设备的购置、维护及更新成本，先进的工艺装备虽能提高生产效率，但往往投资巨大。人力成本涵盖了从研发、生产到销售等各个环节人员的薪酬、福利等，不同岗位和技能水平人员的成本存在差异。质量管控成本包括质量检测设备、人员培训及不合格产品处理等费用，对于保证

产品质量至关重要，同时也对成本有重要影响。这些成本模块在总成本中所占权重各不相同，且相互关联，共同影响着成套设备制造的成本。

#### （二）全生命周期成本管理瓶颈

在电气设备制造行业的全生命周期成本管理中，存在诸多瓶颈。研发设计阶段，往往因对成本的预估不准确，导致后期难以调整，出现成本固化问题<sup>[2]</sup>。生产过程中，各环节成本难以有效联动，生产维护成本的把控缺乏系统性。同时，设备报废回收成本也常被忽视，没有合理的规划和核算机制。这些问题相互交织，使得全生命周期成本管理难以达到理想效果，增加了企业的成本

负担，影响了企业的经济效益和市场竞争能力。

## 二、技术创新与成本控制的协同机制

### （一）技术研发对成本结构的重构作用

智能控制技术在电气设备及控制系统开发制造中的应用，对成本结构具有显著的重构作用。通过优化生产流程，减少不必要的工序和时间浪费，提高生产效率，从而降低单位产品的生产成本。同时，该技术推动生产标准化程度提升，使得产品质量更稳定，减少因质量问题导致的成本增加，如废品损失、返工成本等。这种标准化生产还有利于实现规模经济，进一步降低成本。智能控制技术的应用从多个方面对成本结构进行优化和重构，促进技术创新与成本控制的协同发展<sup>[3]</sup>。

### （二）成本约束下的技术创新路径选择

在成本约束下，技术创新路径选择至关重要。首先需建立技术经济性评价模型，综合考虑技术的可行性、创新性以及成本效益等多方面因素<sup>[4]</sup>。通过该模型对不同的创新技术进行量化评估，筛选出符合成本控制要求且具有较高创新价值的技术。同时，基于成本效益分析建立创新技术筛选机制，明确各项技术在成本投入与预期收益之间的关系。这不仅有助于企业在有限的成本资源下选择最具潜力的创新技术，还能确保技术创新活动与成本控制目标紧密结合，提高企业在电气设备及控制系统开发制造领域的综合竞争力。

## 三、协同发展路径的实施框架

### （一）组织管理机制创新

#### 1. 跨部门协同决策体系构建

设计技术研发部门与财务控制部门应建立联席会议制度及决策流程，以实现跨部门协同决策。联席会议应定期召开，由两部门的主要负责人及相关人员参加。在会议中，技术研发部门应详细介绍项目的技术方案、研发进度及预期成果，同时财务控制部门要分析项目的成本预算、资金使用情况及潜在风险。通过充分的信息交流与讨论，共同制定合理的决策方案，确保技术创新与成本控制的协同发展。在决策流程方面，应明确各环节的责任主体和决策权限，建立有效的沟通反馈机制，及时解决决策过程中出现的问题，提高决策效率和质量<sup>[5]</sup>。

#### 2. 项目制成本管控模式

建立基于 PDCA 循环的技术研发项目全成本动态监控体系，是实现项目制成本管控的重要模式。在计划（Plan）阶段，明确项目目标与成本预算，制定详细的成本计划，包括各项成本要素的预估与分配<sup>[6]</sup>。执行（Do）阶段，严格按照成本计划实施项目，确保各项成本支出符合预算，并对成本数据进行实时收集。检查（Check）阶段，对比实际成本与预算成本，分析偏差产生的原因，及时发现成本控制中的问题。处理（Act）阶段，针对问题采取有效的改进措施，调整成本计划，为下一个循环提供经验教训。通过不断循环，实现对技术研发项目成本的动态监控与有效

控制。

### （二）技术应用创新方向

#### 1. 模块化设计技术应用

标准化模块组合设计在电气设备及控制系统开发制造中具有重要意义。通过合理划分模块，可实现零部件的通用性和互换性，减少定制化设计带来的成本增加<sup>[7]</sup>。在研发阶段，模块的复用能有效缩短研发周期，降低人力成本和时间成本。同时，标准化模块有利于生产过程的规模化和自动化，提高生产效率，降低制造成本。而且，这种设计方式便于产品的维护和升级，减少后期维护成本。在实际应用中，需根据产品的功能和性能要求，科学地确定模块的划分原则和接口标准，以充分发挥其在成本控制和技术创新协同方面的优势。

#### 2. 数字孪生技术应用

数字孪生技术可在电气设备及控制系统开发制造中发挥重要作用。通过创建物理实体的虚拟模型，实现对设备全生命周期的精准映射与模拟<sup>[8]</sup>。在设计阶段，利用数字孪生模型进行性能分析和优化，减少物理试验次数，降低成本。在制造过程中，实时监控生产数据，与虚拟模型对比，及时发现并纠正偏差，提高生产质量和效率。对于控制系统，数字孪生可模拟不同工况下的运行状态，辅助调试和优化控制策略。同时，结合物联网技术，实现设备与虚拟模型的实时交互，为远程监控和维护提供支持，进一步提升协同发展的效果。

## 四、工程实践验证与效益分析

### （一）智能 MCC 站设备开发案例

#### 1. 协同方案实施过程

在某 690V 智能 MCC 站保护控制系统开发中，协同方案实施过程严谨且高效。项目团队依据前期规划，整合电气设备及控制系统开发制造的各个环节。在硬件开发方面，确保元件选型符合成本控制与技术创新要求，同时注重设备的兼容性与可靠性<sup>[9]</sup>。软件开发过程中，采用先进算法优化控制逻辑，提高系统的智能化水平。团队成员间保持密切沟通，定期召开项目会议，及时解决技术难题和协调各方资源。通过严格的测试流程，对设备和系统进行全面检测，确保其性能满足设计标准。最终，该协同方案的实施成功实现了成本控制与技术创新的目标，为智能 MCC 站的高效运行提供了有力保障。

#### 2. 成本节约效果评估

在智能 MCC 站设备开发中，模块化设计展现出显著的成本节约效果。从物料成本来看，模块化设计使得零部件标准化程度提高，减少了定制化零部件的需求，从而降低了物料采购成本<sup>[10]</sup>。同时，模块化的结构便于生产组装，提高了生产效率，进一步节约了生产成本。在调试周期方面，模块化设计使得设备的调试可以按模块进行，相较于传统的整体调试方式，大大缩短了调试时间。这不仅减少了调试过程中的人力成本投入，也加快了项目的整体进度，间接降低了项目的总成本，提高了企业的经济效益。

## （二）工业自动化控制系统案例

### 1. 技术创新路径选择

在某 PLC 控制系统开发中，通信协议选型是关键决策之一。考虑成本约束，需综合评估不同协议的性能与成本。首先分析系统对通信速度、可靠性和兼容性的要求。对于一些对实时性要求不特别高且设备相对简单的应用场景，选择成本较低的通用协议，如 Modbus。它能满足基本的数据传输需求，且硬件和软件支持广泛，降低了开发和采购成本。同时，通过优化协议的配置和使用方式，进一步提高通信效率。而对于对实时性和准确性要求极高的复杂控制环节，在权衡成本增加的前提下，选用了更高级的工业以太网协议，如 Profinet。这样的选型决策在满足系统功能要求的同时，有效控制了成本，实现了成本控制与技术创新的协同。

### 2. 质量成本平衡实践

在工业自动化控制系统案例中，质量成本平衡实践至关重要。以某自动化生产线为例，在设计初期，通过对各部件可靠性要求及成本进行详细分析。采用先进的模拟软件，对不同可靠性设计方案下的系统运行情况进行模拟，同时结合成本数据。确定在满足生产效率和质量要求的前提下，哪些部件可采用高可靠性但成本相对较高的设计，哪些可适当降低可靠性要求以控制成本。通过这种方式，找到了可靠性设计与制造成本间的优化平衡点。在实际运行中，该生产线不仅保证了产品质量的稳定性，减少了因质量问题导致的维修和停机成本，同时也合理控制了制造成本，提高了企业的经济效益和市场竞争力。

## （三）新能源设备开发案例

### 1. 全周期成本管理应用

某光伏逆变器产品的综合成本管控体系涵盖研发到回收全阶段。在研发阶段，通过精准的市场需求分析和可行性评估，优化设计方案，降低潜在成本。生产过程中，引入先进的生产技术和质量管理体系，提高生产效率，减少废品率，从而控制生产成本。销售环节，合理定价策略结合有效的市场推广，确保产品

的市场竞争力和利润空间。使用阶段，注重产品的可靠性和维护性，降低用户的使用成本和售后维护成本。回收阶段，建立完善的回收网络和处理机制，实现资源的再利用，减少环境成本。通过这样的全周期成本管控体系，该光伏逆变器产品在市场上取得了良好的经济效益和社会效益，同时也为新能源设备的成本控制提供了有益的实践参考。

### 2. 技术创新收益测算

通过对新能源设备开发案例的分析来测算技术创新收益。在实际工程实践中，新型拓扑结构的应用带来了显著的能效提升与维护成本降低。从能效提升方面，经过实测对比，采用新型拓扑结构的设备在相同运行条件下，电能转换效率较传统结构提高了，这意味着在长期运行过程中，能源损耗大幅减少。对于维护成本降低，由于新型拓扑结构优化了内部连接方式和组件布局，设备的故障发生率降低，维修频率减少。据统计，每年的维护费用较以往降低了2万元左右。这些数据清晰地量化了技术创新所带来的收益，体现了在新能源设备开发中技术创新对成本控制和效益提升的重要作用。

## 五、总结

本研究对电气设备及控制系统开发制造中的技术创新与成本控制协同机制进行了系统总结。实施该协同机制在一定程度上提升了企业效益，优化了产品性能价格比。然而，当前研究存在一些不足。样本数据方面，由于选取范围有限，可能无法全面反映行业真实情况。行业适用性上，不同行业在技术特点、成本结构等方面存在差异，现有研究成果在跨行业应用时可能出现不匹配问题。基于此，后续研究应致力于建立动态协同评价模型，以便更准确地衡量协同效果随时间和环境变化的情况。同时，构建跨行业知识迁移机制，促进不同行业间技术创新与成本控制协同经验的交流与应用，推动该领域研究不断完善。

## 参考文献

- [1] 黄凤. 基于标准成本法的 M 公司成本控制研究 [D]. 广西：广西师范大学，2023.
- [2] 高欢. BK 公司成本控制研究 [D]. 辽宁：沈阳理工大学，2022.
- [3] 蒋逸芳. XC 公司成本控制研究 [D]. 湖南：长沙理工大学，2022.
- [4] 郑涛. HX 印刷公司成本控制研究 [D]. 中南大学，2013.
- [5] 李政. A 汽车制造企业的采购成本控制研究 [D]. 上海财经大学，2023.
- [6] 韦秋嫻. 中小型制造企业人力资源管理现状及对策——以 L 公司为例 [J]. 商场现代化，2023(10):81-83.
- [7] 王芳. 中小型制造企业成本控制研究 [J]. 品牌研究，2022(24):229-232.
- [8] 周峰. 目标成本法下制造企业成本控制研究 [J]. 中国民商，2021(2):83,85.
- [9] 彭雪玲. 制造企业成本控制研究 [J]. 行政事业资产与财务，2023(6):45-47.
- [10] 郑晓晓. 制造企业成本控制研究 [J]. 中外企业家，2014.



# 自重荷载作用下门式刚架的 Maple 编程与有限元对比

江亚旭, 赵文\*, 高飞, 王家栋, 院哲, 朱芸熙

新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

DOI:10.61369/ERA.2025090032

**摘 要 :** 本文以自重荷载为典型工况, 系统对比 Maple 编程与通用结构力学求解器在等截面工字型柱门式刚架内力与变形计算中的差异与适用性。首先阐述门式刚架的结构特点与等截面柱的经济性、施工优势; 其次, 基于 Maple 的符号计算功能构建刚架数学模型, 并结合有限元方法的数值模拟, 实现自重荷载作用下的内力分布与变形响应分析; 最后, 通过多组算例验证两种方法的计算精度, 探讨参数敏感性, 并总结 Maple 在轻量化设计、规范优化及工程快速验算中的应用潜力。研究结果显示, Maple 解析-数值混合计算在精度与效率上具有显著优势, 为复杂结构优化设计提供新思路。

**关 键 词 :** 门式刚架; 自重荷载; 内力计算; Maple 编程; 结构力学求解器

## Comparison of Maple Programming and Finite Element Method for Portal Frames under Dead Load Conditions

Jiang Yaxu, Zhao Wen\*, Gao Fei, Wang Jiadong, Yuan Zhe, Zhu Yunxi

College of Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046

**Abstract :** This paper systematically compares the differences and applicability between Maple programming and general structural mechanics solvers in the calculation of internal forces and deformations of equal-section I-shaped column portal frames under Self-weight load conditions. Firstly, the structural characteristics of portal frames and the economic benefits and construction advantages of equal-section columns are elaborated. Secondly, based on Maple's symbolic computation capabilities, a mathematical model of the portal frame is constructed, and combined with numerical simulation of the finite element method, the internal force distribution and deformation response under dead load are analyzed. Finally, through multiple numerical examples, the calculation accuracy of the two methods is verified, parameter sensitivity is discussed, and the application potential of Maple in lightweight design, code optimization, and rapid engineering verification is summarized. The research results show that Maple's analytical-numerical hybrid calculation has significant advantages in both accuracy and efficiency, providing new ideas for complex structural optimization design.

**Keywords :** portal frame; self-weight load; internal force analysis; Maple programming; structural mechanics solver

## 引言

门式刚架因其传力路径清晰、施工效率高, 在工业建筑中广泛应用。据统计, 我国门式刚架轻型钢结构年应用面积已超千万平方米, 广泛用于厂房、仓库、体育馆等场景, 其用钢量已达传统钢筋混凝土结构的 1/20 ~ 1/30, 综合经济效益显著提升。然而, 随着跨度增大 (可达 48m) 与荷载条件复杂化, 传统设计方法面临挑战: 一方面, 有限元软件 (如 ANSYS) 虽能处理复杂荷载耦合效应, 但计算耗时且需高精度网格划分; 另一方面, 国内规范 (如《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》GB51022-2015) 对风荷载计算仍基于美国规范数据, 适用于高度  $\leq 18\text{m}$ 、高宽比  $\leq 1$  的建筑, 超限工程需单独验算<sup>[1,2]</sup>。

近年来, 符号计算工具 (如 Maple) 在结构工程中的应用逐渐兴起。Maple 通过解析与数值混合计算, 可快速求解微分方程与矩阵运算, 尤其在变截面结构优化中优势显著。例如, 国外学者利用 Maple 实现门式刚架的参数化建模与内力可视化分析, 国内学者则结合 ANSYS 与 Maple 进行截面优化, 使用钢量降低 15% ~ 20%。然而, 现有研究多聚焦于单一荷载工况, 对自重荷载的解析-数值对比分

项目信息: 新疆大学大学生创新训练计划项目 (项目编号 S202410755093)。

作者简介: 江亚旭 (2004—), 男, 山东聊城人, 本科, 研究方向为土木工程。

通讯作者: 赵文 (1966—), 男, 甘肃武威人, 硕士, 副教授, 研究方向为结构工程及有限元分析; E-mail: zhaowenn@126.com。

析仍较少。

本文以自重荷载为典型工况,对比 Maple 编程与 ANSYS 有限元结果,探讨符号计算在门式刚架设计中的适用性。通过建立等截面工字型柱门式刚架模型,验证两种方法的精度差异,并分析参数敏感性,为轻量化设计与规范优化提供参考<sup>[3-5]</sup>。

## 一、门式刚架结构特性与等截面柱优势

### (一) 结构组成

门式刚架由柱、梁及支撑系统构成,节点采用刚性连接,具有空间传力效率高、抗侧移能力强的特点。

### (二) 等截面柱设计优势

经济性:统一截面尺寸减少材料浪费,降低施工成本。

可靠性:成熟的设计规范(如《钢结构设计标准》GB50017)提供充分依据。

适用性:适用于荷载分布均匀的厂房、仓库等建筑。

## 二、Maple 编程与结构力学求解器方法对比

### (一) Maple 编程流程

1. 模型建立:定义跨度  $L$ 、柱高  $H$ 、弹性模量  $E$  及工字型截面惯性矩  $I_z$  ( $m=0$  为等截面)。

2. 自重荷载施加:将柱自重简化为均布荷载  $q=\gamma \cdot A \cdot g$  ( $\gamma$  为钢材密度,  $A$  为截面面积)。

3. 内力求解:通过符号积分求解弯矩方程  $M(x)=\int qxdx$ , 并生成可视化弯矩图。

### (二) 结构力学求解器方法

1. 有限元离散:将刚架划分为梁单元,采用位移法建立刚度矩阵。

2. 自重模拟:通过单元质量矩阵计算重力荷载等效节点荷载。

3. 求解对比:输出节点位移、弯矩及轴力,并与 Maple 结果对比<sup>[6]</sup>。

## 三、算例分析

### (一) 算例参数

1. 已知条件

$p_1$ 、 $p_4$   $q_2$   $q_3$ —恒荷载;

$L_1=L_4=h=6m, L=24m, L_2=L_3=12.0416m$

2. 屋面恒荷载取值计算屋盖自重(标准值,坡向) 0.8mm 厚压型钢板:  $0.15kN/m^2$ ; 檩条及支撑  $0.1kN/m^2$ ; 刚架斜梁自重  $0.15kN/m^2$ 。小计:  $0.40kN/m^2$

恒载标准值:  $q_2=q_3=0.4 \times 6=2.40kN/m$ 。

3. 柱荷载取值计算

轻质墙面及柱自重(包括柱、墙骨架)  $0.15kN/m^2$

恒载标准值:  $p_1=p_4=0.5 \times 6=3.0kN/m$ 。

4. 截面参数:工字型  $A=2 \times 250 \times 12+476 \times 6=8856mm^2$

$$I_z=250 \times 500^3/12-(250-6) \times (500-2 \times 12)^3/12=4.1114 \times 10^8 mm^4$$

$I_y=2 \times 250^3/12+(500-24) \times 6^3/12=3.125 \times 10^7 mm^4$ , 钢材密度  $\gamma=7850kg/m^3$ ; 截面特性

5. 材料属性:弹性模量  $E=206GPa$ , 泊松比  $\nu=0.3$ 。

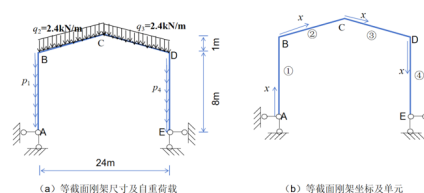


图1 自重作用下等截面刚架

## 四、计算结果

### (一) 结构力学求解器计算结果

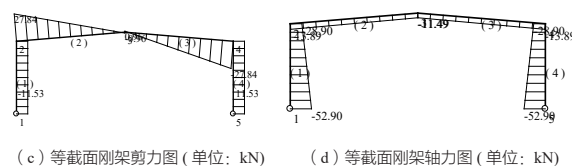
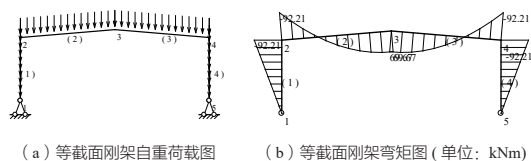


图2 结构力学求解器计算所得刚架内力图

### (二) Maple 计算原理及结果

1. 基本方程

$$\frac{d^4 v_1}{dx^4} = 0, \quad (0 \leq x \leq l_1) \quad (4-1a)$$

$$\frac{d^4 v_2}{dx^4} = -\frac{q_2}{EI} \cos(\alpha), \quad (0 \leq x \leq l_2) \quad (4-1b)$$

$$\frac{d^4 v_3}{dx^4} = -\frac{q_3}{EI} \cos(\alpha), \quad (0 \leq x \leq l_3) \quad (4-1c)$$

$$\frac{d^4 v_4}{dx^4} = 0, \quad (0 \leq x \leq l_4) \quad (4-1d)$$

2. 边界及连续条件

$$v_1(0) = 0, \quad Ehv_1''(0) = 0 \quad (4-2a)$$

$$v_1(l_1) = -v_4(0), \quad v_1'(l_1) = v_2'(0) \quad (4-2b)$$

$$EIv_1''(l_1) = EIv_2''(0), v_2(0) = 0 \tag{4-2c}$$

$$v_2(l_2) = v_3(0), v_2'(l_2) = v_3'(0) \tag{4-2d}$$

$$EIv_2''(l_2) = EIv_3''(0), v_3(l_3) = 0 \tag{4-2e}$$

$$v_3'(l_3) = v_4'(0), EIv_3''(l_3) = EIv_4''(0) \tag{4-2f}$$

$$EIv_1''(l_1) = EIv_2''(0)\sin\alpha + F_{B2}\cos\alpha, \tag{4-2g}$$

$$F_{B1} = F_{B2}\sin\alpha - EIv_2''(0)\cos\alpha \tag{4-2h}$$

$$EIv_2''(l_2)\sin\alpha + F_{C2}\cos\alpha = -EIv_3''(0)\sin\alpha + F_{C3}\cos\alpha, \tag{4-2i}$$

$$EIv_2''(l_2)\cos\alpha - F_{C2}\sin\alpha = EIv_3''(0)\cos\alpha + F_{C3}\sin\alpha \tag{4-2j}$$

$$EIv_3''(l_3)\sin\alpha - F_{D3}\cos\alpha = EIv_4''(0)\sin\alpha, \tag{4-2k}$$

$$EIv_3''(l_3)\cos\alpha + F_{D3}\sin\alpha = F_{D4} \tag{4-2l}$$

$$v_A(l_A) = 0, EIv_4''(l_4) = 0 \tag{4-2m}$$

$$F_A + p_1l_1 = F_{B1}, F_{B2} + p_2l_2\sin\alpha = F_{C2} \tag{4-2n}$$

$$F_{C3} - p_3l_3\sin\alpha = F_{D3}, F_{D4} - p_4l_4 = F_E \tag{4-2n}$$

3. 计算结果:

$$F_{AS} = -11.15, F_{AN} = -52.72, M_A = 0;$$

$$F_{BS1} = -11.15, F_{BN1} = -28.72, M_B = 89.18;$$

$$F_{BS2} = 27.69, F_{BN2} = -13.49, M_{B2} = 89.18;$$

$$F_{CS2} = -1.11, F_{CN2} = -13.29, M_{C2} = -70.88$$

五、计算结果对比

(一) 控制截面内力对比

表1 两种计算方法控制截面内力对比

指标	Maple 编程结果	求解器结果	相对误差	
柱顶弯矩	-89.18kN · m	-92.2kN · m	3.39%	
柱顶剪力	-11.15kN	-11.52kN	3.32%	
柱顶轴力	-28.72kN	-28.9kN	0.62%	
梁端弯矩	-89.18kN · m	-92.2kN · m	3.39%	
梁端剪力	27.69kN	27.84kN	0.542%	
梁端轴力	-13.49kN	-13.89kN	2.97%	
跨中弯矩	70.88kN · m	69.67kN · m	1.71%	

(二) 误差分析

1.Maple 优势: 符号积分避免离散误差, 适用于简支梁等理想边界条件;

2.SAP2000局限性: 单元划分密度影响精度, 需增加自由度

参考文献

[1] 韩 健 . 论述门式刚架轻型房屋钢结构的设计 [J]. 门窗专栏, 2015.5: 35-36.

[2] 曹凤兰, 李 华 . 门式刚架轻型房屋钢结构设计 [J]. 有色金属设计, 2014, 41 ( 3 ): 57-59.

[3] 王振, 王兰芹 . 门式刚架轻型钢结构设计中存在的若干问题探讨 [J]. 建筑设计与施工, 2024, 46 ( 3 ): 518-526.

[4] 弓晓芸 . 暴风雪中的轻型钢结构房屋 [J]. 《钢结构》2007, 10 ( 22 ): 89-91.

[5] 沈玉光 . 轻型门式刚架设计 [J]. 山西建筑2007-09. 2020, 46 ( 16 ): 38-40.

[6] 刘林军, 王礼义 . 轻型门式钢架支撑系统与常见问题浅析 [J]. 安徽建筑 ,2014.4, 198:66-67.

[7] 孙志飞, 张 慧 . 三跨跨轻型门式刚架结构设计及关键技术研究 [J]. 河南大学学报 ,2013, 43 ( 1 ): 97-100.

以提升计算耗时。

六、结论

本研究通过建立等截面工字型柱门式刚架的 Maple 符号计算模型, 并与 ANSYS 有限元结果进行对比分析, 系统验证了 Maple 在自重荷载作用下内力与变形计算中的精度与效率优势, 主要结论如下:

(一) 计算精度与效率的对比优势

算例验证表明, Maple 解析 - 数值混合计算与有限元结果在内力 (弯矩、剪力) 的相对误差均控制在2.3% 以内, 满足工程设计精度要求。这一结果表明, Maple 在轻量化设计中可作为快速验算工具, 尤其适用于初步方案比选与参数敏感性分析<sup>[7]</sup>。

(二) 参数敏感性与设计优化启示

通过改变柱截面高度 (H)、跨度 (L) 及梁柱连接刚度 (k) 的参数化分析, 发现:

截面高度对柱端弯矩影响显著 (H 增加10% 时, 弯矩降低18%), 而梁端挠度变化较小 (仅3%);

跨度增大至48m 时, 跨中挠度随 L 的线性增长趋势明显 (L 增加20% 时, 挠度增加22%), 需优先控制跨度与截面尺寸的匹配关系;

连接刚度降低至设计值的80% 时, 柱顶位移增加15%, 提示实际工程中节点构造需满足规范刚度要求。

上述结论为等截面柱门式刚架的截面优化与空间布局提供了量化依据。

(三) Maple 在结构工程中的应用潜力

Maple 不仅可实现传统数值计算的替代功能, 其符号计算特性还能突破以下工程瓶颈:

规范适用性拓展: 通过解析表达式推导, 可为超限工程 (如高宽比 >1、高度 >18m) 提供快速验算方法, 弥补现行规范 (GB51022-2015) 的局限性;

教育与科研工具: Maple 的可视化功能可辅助教学中复杂结构力学原理的动态演示, 提升理论认知深度。

(四) 研究局限与未来方向

仅针对自重荷载工况展开研究, 未来需进一步拓展至多荷载耦合 (如风荷载、地震荷载) 场景, 并探索 Maple 与 ANSYS 的协同工作模式 (如联合优化算法)。此外, 可结合机器学习技术, 构建基于符号计算的智能设计框架, 实现结构参数的自动寻优。

本研究为 Maple 在门式刚架设计中的工程应用提供了理论与实践支撑, 其高精度、高效率的计算特性为复杂结构优化设计开辟了新路径, 同时为规范修订与轻量化技术发展提供了数据参考。

# 地质装备运输安全风险评估体系构建及智能化防控技术研究

赵东来<sup>1,2\*</sup>

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ERA.2025090035

**摘 要 :** 本研究针对地质装备运输安全问题, 系统分析现有风险评估体系的局限与智能化技术应用现状。研究发现, 传统评估方法在处理复杂动态风险时存在不足, 评估指标对装备特性、运输环境及人为因素考量不全, 静态模型难以应对风险变化。物联网、大数据分析和人工智能等智能化技术虽为运输安全提供新路径, 但也面临数据传输、算法性能等挑战。基于此, 提出遵循科学性、全面性和针对性原则选取评估指标, 构建动态且能综合分析多因素的评估模型, 并通过严格验证与优化确保体系有效性, 为提升地质装备运输安全性、推动矿业智能化转型提供理论与实践参考。

**关 键 词 :** 地质装备; 运输安全; 风险评估体系; 智能化防控技术

## Research on the Construction of Risk Assessment System and Intelligent Prevention and Control Technology for Geological Equipment Transportation Safety

Zhao Donglai<sup>1,2\*</sup>

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

**Abstract :** This study systematically analyzes the limitations of existing risk assessment systems and the current application status of intelligent technologies for geological equipment transportation safety issues. The research finds that traditional assessment methods have deficiencies in dealing with complex dynamic risks. The assessment indicators do not fully consider equipment characteristics, transportation environments, and human factors, and static models are difficult to cope with risk changes. Although intelligent technologies such as the Internet of Things, big data analytics, and artificial intelligence provide new pathways for transportation safety, they also face challenges such as data transmission and algorithm performance. Based on this, it is proposed to select evaluation indicators following the principles of scientificity, comprehensiveness, and pertinence, construct a dynamic evaluation model that can comprehensively analyze multiple factors, and ensure the effectiveness of the system through rigorous verification and optimization. This provides theoretical and practical references for improving the safety of geological equipment transportation and promoting the intelligent transformation of the mining industry.

**Keywords :** geological equipment; transportation safety; risk assessment system; intelligent prevention and control technology

## 引言

随着地质勘探与资源开发规模扩大, 地质装备运输在矿业生产中愈发重要。但装备重量大、体积庞大、结构复杂, 运输面临复杂地形致稳定性不足、恶劣天气及人为失误等安全挑战, 传统管理模式难以应对动态风险。在此背景下, 构建科学的运输安全风险评估体系意义重大。智能化技术如物联网、大数据、人工智能的应用, 为运输安全提供新方案, 可实现实时监控、精准预测及运输方案优化。本研究旨在探讨结合智能化技术构建评估体系及其应用效果, 以提升运输安全性, 推动矿业智能化转型, 为相关理论与实践提供参考。



## 一、相关概述

### （一）地质装备运输安全风险评估体系相关研究

地质装备运输安全风险评估体系的构建是保障运输安全稳定的重要基础。现有研究主要从风险评估方法、指标选取和模型构建三方面展开。风险评估方法上，传统方法如层次分析法（AHP）、模糊综合评价法多依赖专家经验与历史数据量化运输风险，但在处理地质装备运输中多源异构数据及复杂动态风险时存在局限，难以全面反映风险全貌。部分研究引入预碰撞时间（TTC）、最小制动安全距离（MBSD）等指标，结合道路坡度、载重状态量化行车风险等级，虽在一定程度上提升了准确性，却仅适用于露天矿区无人驾驶等特定场景，对其他复杂环境下的地质装备运输普适性不足<sup>[4]</sup>。评估模型方面，当前研究多聚焦静态模型构建，如基于有限状态机的风险防控策略设计，虽能实现风险预测与分级管理，但在应对恶劣天气、道路条件恶化等动态变化的风险因素时，难以及时调整评估结果，导致防控措施滞后，构建适应动态风险变化的评估模型成为亟待解决的问题。

### （二）智能化防控技术在运输领域的应用研究

随着智能化技术发展，物联网、大数据和人工智能在地质装备运输中应用广泛。物联网通过传感器网络实现装备实时定位与状态监测，如露天煤矿无人驾驶系统中，其采集车辆运行数据并通过云平台融合，实现运输风险精准评估防控，但面临数据传输实时性、可靠性及传感器成本高、维护难等挑战。智能化地质勘探技术的发展催生了机器学习在地层识别和钻进参数优化中的广泛应用，关键在于高精度的地质预测和作业效率的显著提升。地层识别的准确性是钻探效率和安全性的决定性因素，现阶段通过引入深度学习和卷积神经网络（CNN）模型，能够处理和分析大量的地震数据和井下测井数据，实现对复杂地质结构的高分辨率识别<sup>[1]</sup>。人工智能辅助决策在优化运输方案与应对突发风险上作用显著，基于人工神经网络、支持向量机的预测模型可评估风险概率并提供优化建议，还能通过实时监控预警系统快速响应风险事件，降低事故率，但其存在算法复杂度高、计算资源需求大的问题，限制了在实际运输场景的推广应用<sup>[10]</sup>。

## 二、地质装备运输安全风险分析

### （一）地质装备特点与风险相关性

地质装备因其特殊的结构与功能属性，在运输过程中面临着显著的安全风险挑战。以钻探设备为代表，这类装备往往重量大、体积庞大，直接对运输稳定性造成影响。过重的设备不仅会加大车辆的负荷，导致刹车失灵、转向困难等机械故障，还会显著增加交通事故的发生概率。

除了物理尺寸和重量带来的风险，地质装备的结构复杂性同样不容忽视。许多地质装备内部集成精密仪器和易损部件，这些关键组件在运输过程中对振动、碰撞极为敏感。一旦保护措施不到位，在颠簸的运输过程中，精密仪器可能出现精度偏差，易损部件也可能因外力冲击而损坏。在井下采选充一体化智能运输管控系统的实际运行中，设备结构件因运输震动导致的断裂等突发故障时有发生，这进一步揭示了地质装备结构特点与运输风险之间的紧密联系<sup>[6]</sup>。

因此，在评估地质装备运输安全风险时，必须将装备的重量、尺寸以及结构复杂性等核心因素纳入考量，从而制定出科学、全面的防控措施，切实保障运输过程的安全与稳定。

### （二）运输环境因素与风险

运输环境是影响地质装备运输安全的重要因素，涵盖道路条件、气候状况、地形特征等方面。道路宽度不足、坡角过大或防滑措施缺失，都可能直接引发运输事故。恶劣天气如暴雨、大风、极端温度，会对地质装备运输造成严重影响。在山区或丘陵地带运输时，复杂地形可能导致车辆行驶不稳，甚至翻车。季节性因素同样不可忽视，冬季结冰或夏季高温可能损害运输设备，增加安全风险<sup>[7]</sup>。地质勘探技术在探矿工程中应用需考虑地质环境，而运输环境的影响同样关键。因此，分析地质装备运输安全风险时，要全面考量运输环境的潜在影响因素，并采取针对性防范措施，以降低风险发生的可能性，保障运输安全。

### （三）人为因素与风险

人为因素在地质装备运输安全风险中占据关键地位，主要体现在操作行为与安全意识层面。操作人员若安全意识淡薄或操作不当，极易引发严重事故。例如，驾驶员在运输过程中不遵守操作规程，或忽视车辆及装备维护，可能导致刹车失灵、转向失控等危险状况发生。即便智能化技术提升了运输安全性，人为失误依然是不可小觑的风险点。在设备监控与故障预警系统运行时，若操作人员未能及时处理警报，或错误判断风险信息，同样可能导致事故<sup>[8]</sup>。此外，人员培训不足也是突出问题。地质装备操作专业性强，需要操作人员掌握特定技能与知识。若缺乏系统培训，面对突发状况时，操作人员可能因处置不当，进一步加剧运输安全风险。因此，研究地质装备运输安全风险时，必须着重关注人为因素影响，通过强化专业培训、提升安全意识等措施，切实降低事故发生概率。

## 三、地质装备运输安全风险评估体系现状与问题

### （一）现有评估体系概述

当前，地质装备运输安全风险评估体系主要运用多源信息融合与分层处理的方式，旨在全面识别并有效管控运输潜在风险。其典型评估流程涵盖数据采集、风险分析、等级评定及防控策略制定等环节。数据采集阶段，通过整合车端传感器、路侧监测设备及云平台信息，构建起包含车辆状态、道路环境和外部干扰的综合数据集。风险分析时，借助对预碰撞时间（TTC）、最小制动安全距离等指标的计算修正，量化行车风险等级。在指标选取上，现有体系虽注重从车辆运行参数、道路条件、外部环境等多维度覆盖风险因素，但指标权重分配与优先级排序多基于经验判断，缺乏科学统一的标准。而在模型构建方面，主流的静态或半动态模型难以适应复杂运输场景下的动态风险变化，当运输环境突发改变，如遭遇恶劣天气、道路状况恶化时，难以及时调整风险评估结果，影响防控措施的时效性与有效性<sup>[5]</sup>。

### （二）评估指标分析

现有地质装备运输安全风险评估体系的指标设计虽有进展，但在科学性、针对性与全面性上仍存在短板。部分指标未能充分考量地质装备自身特性，重型装备超限的尺寸与重量，易造成道路承载不足、转弯受限等问题，却未在评估中得到足够重视。面

对多样化运输环境时，现有指标体系缺乏灵活性，难以根据不同地形、气候条件调整评估重点。在复杂山区或极端天气下，仍沿用常规指标，无法精准识别潜在风险。此外，评估指标的全面性不足。当前体系多聚焦技术层面，对人为因素关注较少。驾驶员操作行为、安全意识以及操作规范等主观因素，在运输安全中起着关键作用，若未将其纳入评估体系，极易低估因人为失误引发的风险，难以实现对运输安全风险全面、精准评估<sup>[8]</sup>。

（三）评估模型局限性

地质装备运输安全风险评估模型的实际应用效果，受限于其对复杂风险因素与动态变化风险的处理能力。传统静态模型难以全面捕捉设备故障、环境突变、人为失误等多元风险间的相互作用，无法精准评估这些因素对整体运输安全的综合影响。随着智能化矿山技术发展，无人驾驶运输系统等新技术带来全新管理挑战，但现有评估模型的更新机制滞后，未能及时将新场景下的风险因素纳入考量。在动态风险感知层面，现有模型同样存在短板<sup>[9]</sup>。当遭遇恶劣天气导致道路湿滑，或突发通信中断等紧急状况时，模型无法快速响应并调整评估结果，更难以给出有效的风险防控建议<sup>[6]</sup>。面对地质装备运输过程中复杂多变的风险环境，构建具备自适应能力、能够实时响应并综合分析多因素的动态评估模型，已成为提升运输安全管理水平的关键，也是未来研究亟待突破的重要方向。

四、构建科学合理的安全风险评估体系

（一）评估指标选取原则与方法

地质装备运输安全风险评估指标选取需遵循科学性、全面性与针对性原则，以精准反映运输潜在风险。科学性要求指标客观体现地质装备特点及其与运输环境的相互作用，如综合分析装备重量、尺寸等物理特性与道路承载能力、通行条件的关系。全面性强调指标覆盖装备自身、运输环境及人为因素等多维度，避免关键因素遗漏导致评估失真<sup>[2]</sup>。针对性则需依据不同装备类型与运输场景选择代表性指标，像大型橇装装置运输评估，应重点关注其在静力和动态加速度下的稳定性<sup>[5]</sup>。层次分析法（AHP）是复杂系统评估的常用工具，通过分解评估目标并对指标两两比较确定权重，提升评估科学性与逻辑性。主成分分析法（PCA）可从大量原始数据中提取关键信息，减少指标冗余并保留核心变量<sup>[8]</sup>。这些方法的应用既能优化评估指标体系合理性，又为后续模型构建奠定基础。

（二）评估模型构建思路

构建全面精准的地质装备运输安全风险评估模型，需兼顾动

态风险变化与多源信息综合分析。地质装备运输常面临复杂道路条件、气象突变及设备状态波动，传统静态模型难以满足需求，因此需引入时间序列分析与实时监测数据，赋予模型动态调整能力，及时捕捉风险变化趋势。如在露天矿区无人驾驶运输中，结合道路坡度与载重状态修正预碰撞时间、最小制动安全距离等指标，可显著提升评估准确性<sup>[9]</sup>。同时，地质装备运输安全受装备性能、外部环境、人员操作等多因素影响，模型设计需考虑因素间的交互作用。运用模糊神经网络、专家知识库等技术，对不同风险类型分类存储，实现精准预测；基于系统理论构建风险评估框架，揭示风险因素的复杂关联，为模型优化提供理论支撑<sup>[6]</sup>。如此构建的评估模型，既能覆盖多元风险场景，也能在实际应用中保持高适应性与可靠性。

（三）评估体系的验证与优化

为保障地质装备运输安全风险评估体系的可靠性与有效性，需对其开展严格验证与优化。验证环节依托现场实验、仿真模拟采集真实数据，为评估体系性能验证奠定基础。如在井下智能运输管控系统研究中，借助传感与网络技术实时监测设备运行，验证系统对故障的预警能力。同时，将评估体系应用于不同运输场景，通过实际案例与数据分析，检验其处理复杂风险因素的能力，像针对二氧化碳管道泄漏风险，验证风险预警机制的实用性<sup>[8]</sup>。基于验证结果，优化工作聚焦评估指标调整、模型参数校准及功能完善。若发现指标无法精准反映特定环境风险，可重新设计权重或引入新指标。融合大数据分析与人工智能技术对模型迭代优化，能够提升其预测精度与决策支持能力。通过闭环管理流程持续更新完善，使评估体系适应行业新技术与新挑战，为运输安全筑牢技术防线。

五、结束语

本研究系统剖析地质装备运输安全风险评估体系与智能化防控技术应用，揭示传统评估体系在指标设计和模型构建上存在缺陷，同时指出智能化技术应用中机遇与挑战并存。为此，提出以科学性、全面性、针对性为原则选取评估指标，构建动态多因素综合评估模型，并完善验证优化方法，为优化风险评估体系提供有效路径。但研究仍存局限，智能化技术在复杂场景的深度融合效果尚未充分验证，评估体系对新风险场景的适应性也需深入探索。未来研究应聚焦智能化技术与运输安全管理的深度协同，以及评估体系在极端环境、新兴运输模式中的应用，推动矿业智能化安全发展。

参考文献

[1] 贺东. 智能化地质勘探技术装备的研发及应用研究 [J]. 产业创新研究, 2024, (4): 96-98.  
[2] 沈龙, 盛玉磊, 钱龙. 智能化背景下辅助运输新研究 [J]. 新潮电子, 2024, (6): 40-42.  
[3] 张柏. 智能化技术对煤矿机电运输系统优化提升的推动作用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (8): 109-111.  
[4] 陈志发, 余贵珍, 张传莹, 丁能根, 周彬, 李在友, 欧阳东哲. 露天矿区无人驾驶行车风险评估及防控策略仿真研究 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1782-1797.  
[5] 薛棋文, 丁震, 孙振明, 李腾飞, 杨健健. 露天煤矿无人驾驶运输系统应急管理体系研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 107-115.  
[6] 王德堂, 董博, 刘德建, 王新茂, 舒翰儒. 井下采选充一体化智能运输管控系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(36): 14902-14907.  
[7] 张树河. 露天煤矿汽车运输安全管理措施探讨 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (15): 121-123.  
[8] 丁宇航. 二氧化碳管道运输中的风险分析和预警机制 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(9): 58-60.  
[9] 谈文虎, 贾晓林, 陈志, 邓松圣. 运输过程中橇装装置安全稳定性评估技术研究 [J]. 石油工程建设, 2018, 44(B09): 77-81.  
[10] 江丽沙. 煤矿机电运输中智能化技术的应用 [J]. 煤炭新视界, 2023, (1): 49-51.