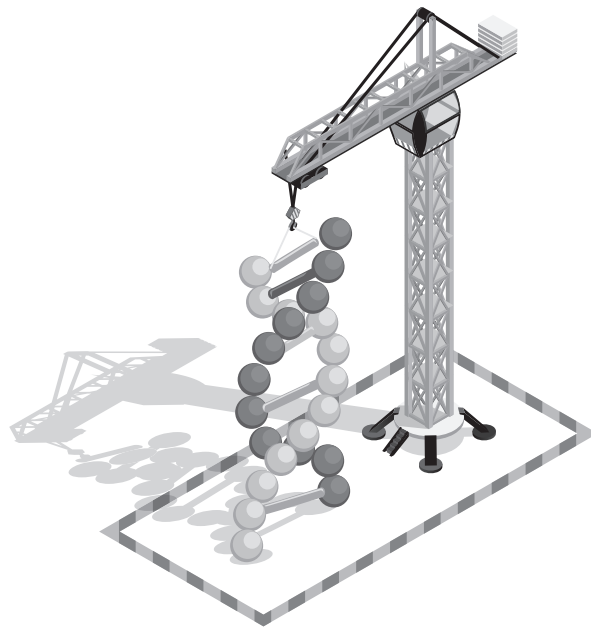


# 工程 研究与应用

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10期 2025年10月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》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.artdesignnp.com>

## 本刊说明:

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

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



## 工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- |     |   |  |
|-----|---|--|
| 001 | 轮机调试流程标准化建设与调试效率提升策略研究<br>Standardisation of Engine Commissioning Processes and Strategies for<br>Improving Commissioning Efficiency  | 王洪波<br>Wang Hongbo   |
| 004 | 综合物探技术在冻土地区勘察中的应用研究<br>Application of Integrated Geophysical Exploration Techniques<br>in Frozen Soil Region Surveys  | 王鹏, 张正阳<br>Wang Peng, Zhang Zhengyang  |
| 007 | 原材料波动下混凝土性能稳定控制技术研究<br>Study on Stable Control Technology of Concrete Performance Under<br>Fluctuation of Raw Materials   | 陈武钊<br>Chen Wuzhao   |
| 010 | 石油化工项目技术管理中的创新实践与应用<br>Innovative Practice and Application in Technical Management of<br>Petrochemical Projects   | 李建军<br>Li Jianjun  |
| 013 | 工程质量管理体系的构建与优化路径探究<br>Exploring the Construction and Optimization Pathways of an Engineering<br>Quality Management System   | 张孟良<br>Zhang Mengliang   |
| 016 | 智慧工地平台在市政工程项目中应用研究<br>Application Research of Smart Construction Site Platform in Municipal<br>Engineering Projects   | 王智宇<br>Wang Zhiyu  |
| 019 | Mg-MOF-74的合成温度优化及其冶金煤气<br>的碳捕集性能研究<br>Optimisation of Synthesis Temperature for Mg-MOF-74 and Study<br>on Its Carbon Capture Performance in<br>Metallurgical Gas                                    | 梁永儒, 商伟竟, 赵鸣烁, 郭静怡, 刘需申,<br>郑晨璐, 张子硕, 安海飞, 王佳<br>Liang Yongru, Shang Weijing, Zhao Mingshuo, Guo Jingyi,<br>Liu Peishen, Zheng Chenlu, Zhang Zishuo, An Haifei, Wang Jia |
| 023 | PLC 控制在智能汽车机电系统中的应用<br>Application of PLC Control Technology in Intelligent Vehicle<br>Electromechanical Systems  | 张娜, 何斌<br>Zhang Na, He Bin   |
| 027 | 土地工程中三维激光扫描技术在地形测绘的精度优化策略<br>Optimisation Strategies for Precision in Topographic Surveying Using 3D Laser<br>Scanning Technology in Land Engineering   | 梁源<br>Liang Yuan   |
| 030 | 电梯不同载荷下振动特性实验研究<br>Experimental Study on Vibration Characteristics of Elevators under<br>Different Loads  | 张志维, 顾永兵<br>Zhang Zhiwei, Gu Yongbing  |
| 033 | 食品添加剂对面包酵母发酵特性的影响机制分析<br>Analysis of the Mechanism by Which Food Additives Affect the Fermentation<br>Characteristics of Bread Yeast  | 高骏伟<br>Gao Junwei  |
| 036 | 炼油装置电气设备的继电保护与快切备自投技术应用<br>Application of Relay Protection and Fast Switching & Backup Automatic Transfer<br>Technology in Electrical Equipment of Oil Refining Units                               | 吴时孔<br>Wu Shikong  |
| 039 | 无桥 PFC 与第三代半导体在大功率电源中的应用:<br>充电器与路灯电源领域对比研究<br>Application of Bridge-Free PFC and Third-Generation Semiconductor in High Power<br>Supply: Comparative Study of Charger and Street Lamp Power Supply | 胡三义<br>Hu Sanyi  |

042	<b>印刷企业 ERP 系统与生产执行系统的深度集成研究</b> Research on the Deep Integration of ERP System and Production Execution System in Printing Enterprises	<b>罗忆辉</b> Luo Yihui
045	<b>PID 算法在工业自动化温控系统中的优化应用</b> The Optimal Application of PID Algorithm in Industrial Automation Temperature Control System	<b>刘功绍</b> Liu Gongshao
048	<b>重型电动汽车充电桩的发展现状与技术路径分析</b> Current Status and Technical Pathways for the Development of Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Stations	<b>吴俊强</b> Wu Junqiang
051	<b>涤纶固色剂的合成方法及应用研究</b> Research on the Synthesis Method and Application of Polyester Fixing Agent	<b>何兆源</b> He Zhaoyuan
054	<b>小投入快速实现整车涂装产能提升的实践探索</b> Exploration of Capacity Improvement in Vehicle Painting Workshop with Low Investment in the short term	<b>潘永亮</b> Pan Yongliang
058	<b>基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究</b> Research on Stability Analysis and Reinforcement Techniques for Steep Slopes Based on BIM and Numerical Simulation	<b>施炳军, 廖绍忠, 刘湘</b> Shi Bingjun, Liao Shaozhong, Liu Xiang
061	<b>浅析首件鉴定与首件检验</b> A Brief Analysis of First Article Identification and First Article Inspection	<b>曾俊杰, 田礼</b> Zeng Junjie, Tian Li
064	<b>电气自动化在智能制造与工业控制中的关键作用及效益分析</b> Analysis of the Key Role and Benefits of Electrical Automation in Intelligent Manufacturing and Industrial Control	<b>何荣卓</b> He Rongzhuo
067	<b>多宝山—黑河地区典型金矿床成矿模式</b> Typical Gold Deposit Formation Model in the Duobaoshan-Heihe Region	<b>闫宝龙, 林楠, 籍哲羽, 陈宇, 李国栋</b> Yan Baolong, Lin Nan, Ji Zheyu, Chen Yu, Li Guodong
070	<b>结构面层一体化精平地面的应用研究</b> Application Research on Integrated Precision-Leveled Ground with Structural Surface Layer	<b>夏俊戎, 刘学勇, 王炎震, 刘坤, 梁嘉威</b> Xia Junrong, Liu Xueyong, Wang Yanzhen, Liu Kun, Liang Jiawei
073	<b>低温环境下混合动力汽车动力系统适应性优化及维护策略</b> Optimisation of Adaptability and Maintenance Strategies for Hybrid Electric Vehicle Powertrains in Low-Temperature Environments	<b>苏勇威</b> Su Yongwei
076	<b>电梯检验检测数据在电梯风险评估中的应用探索</b> Exploring the Application of Elevator Inspection and Testing Data in Elevator Risk Assessment	<b>秦炼军, 莫兆雪, 胡翔侨</b> Qin Lianjun, Mo Zhaoxue, Hu Xuqiao
079	<b>金属铬制备过程中氢气还原技术的微观结构调控与性能评价</b> Microstructural Control and Performance Evaluation of Hydrogen Reduction Technology in the Preparation of Metallic Chromium	<b>肖棣, 白礼太, 谢友才, 黄先东, 冷建军, 樊诗贤, 杜威</b> Xiao Ling, Bai Litai, Xie Youcai, Huang Xiandong, Leng Jianjun, Fan Shixian, Du Wei
083	<b>地铁全自动运营管理系统的技术架构与应用研究</b> Research on the Technical Architecture and Application of the Fully Automatic Operation and Management System for Subways	<b>耿连庆</b> Geng Lianqing
086	<b>考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法</b> Digital Twin Security Emergency Drill Method for Urban Gas Systems Considering Multi-Source Heterogeneous Data Fusion	<b>丁勇, 刘锐</b> Ding Yong, Liu Rui

## 建筑科学 | BUILDING SCIENCE

089	<b>地铁建筑结构设计优化与安全性能分析</b> Optimisation of Subway Building Structural Design and Safety Performance Analysis	<b>包华锋, 邹建武</b> Bao Huafeng, Zou Jianwu
092	<b>基于 BIM 的智能建造施工数字化技术创新与实践</b> Innovation and Practice of Digital Technology in Intelligent Construction Based on BIM	<b>徐兵强, 丁勇</b> Xu Bingqiang, Ding Yong
095	<b>装配式结构施工精度控制方法探讨</b> A Discussion on Precision Control Methods for Prefabricated Structural Construction	<b>陈迪权</b> Chen Diqian
098	<b>公路桥涵施工质量通病成因分析与防治措施研究</b> Analysis of Common Defects in Highway Bridge and Culvert Construction and Measures for Prevention and Control	<b>李富田</b> Li Futian
101	<b>建筑工程施工阶段质量管理常见问题及改进措施</b> Common Issues and Improvement Measures in Quality Management During the Construction Phase of Building Projects	<b>刘东</b> Liu Dong
104	<b>“双碳”目标下数字建筑能源管控平台创新：基于负荷预测算法的光伏—储能—微网协同控制优化</b> Innovation of Digital Building Energy Management and Control Platform Under the "Dual Carbon" Goals: Collaborative Control Optimization of Photovoltaic-Energy Storage-Microgrid Based on Load Forecasting Algorithm	<b>霍励</b> Huo Li
107	<b>中小型建筑工程项目成本控制策略研究</b> A Study on Cost Control Strategies for Small and Medium-sized Construction Projects	<b>刘东</b> Liu Dong

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

110	<b>引调水工程软基箱涵沉降对工程结构影响</b> Analysis of Influence of Soft Foundation Box Culvert Settlement on Engineering Structures in Water Diversion Projects	<b>刘运才, 朱卫, 郭佳, 张玉华</b> Liu Yuncai, Zhu Wei, Guo Jia, Zhang Yuhua
114	<b>水利工程管理中水闸安全运行与检查养护</b> Safety Operation and Inspection Maintenance of Water Gates in Water Conservancy Engineering Management	<b>江莹莹</b> Jiang Yingying
117	<b>水利工程 BIM 技术应用与发展趋势研究</b> Research on the Application and Development Trends of BIM Technology in Water Conservancy Projects	<b>徐冉, 于坚, 殷海平, 李瞻, 王旭</b> Xu Ran, Yu Jian, Yin Haiping, Li Zhan, Wang Xu



电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

121	基于物联网技术的 MR/CT 设备远程监控与故障诊断研究 Research on Remote Monitoring and Fault Diagnosis of MR/CT Equipment Based on IoT Technology	戴新宇 Dai Xinyu
124	化工企业“工业互联网 + 安全生产”平台建设与应用管理实践 Construction and Application Management Practice of the "Industrial Internet + Work Safety" Platform in Chemical Enterprises	周洪武，程业宝 Zhou Hongwu, Cheng Yebao
127	电池管理在消防应急电子设备中的应用与研究 Application and Research of Battery Management in Fire Emergency Electronic Equipment	周俊赵 Zhou Junzhao
130	医院信息数据治理：提升医疗质量的关键路径 Hospital Information Data Governance: the Key Path to Improve Medical Quality	吴玉清 Wu Yuqing



# 轮机调试流程标准化建设与调试效率提升策略研究

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.2025100001

**摘 要：** 轮机调试作为船舶建造以及维护工作中的关键，其流程的标准化水平以及调试的高效程度，会直接对船舶的安全性能以及航运的经济收益产生影响。目前而言，轮机调试遇到新的状况，诸如数字化调试手段应用不足、跨系统协同调试面临重重困难、调试流程缺少动态优化的有效机制等。本文通过深入探究这些问题产生的根本原因，从流程的标准化打造以及技术的创新改良等层面提出解决办法，涵盖搭建数字化调试的标准体系、改善跨系统协同的操作流程、创建动态优化的有效机制等举措。其目的在于提高轮机调试的效率，确保船舶能够安全且稳定地行驶，为船舶行业的持续发展给予技术上的有力支持。

**关 键 词：** 轮机调试；标准化建设；调试效率；流程优化

## Standardisation of Engine Commissioning Processes and Strategies for Improving Commissioning Efficiency

Wang Hongbo

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

**Abstract：** Engine commissioning plays a critical role in shipbuilding and maintenance. The standardisation level of its processes and the efficiency of commissioning directly impact the safety performance of ships and the economic benefits of shipping. Currently, engine commissioning faces new challenges, such as insufficient application of digital commissioning methods, significant difficulties in cross-system collaborative commissioning, and the absence of effective mechanisms for dynamic optimisation of commissioning processes. This paper delves into the root causes of these issues and proposes solutions from the perspectives of process standardisation and technological innovation, including establishing a standardised digital commissioning framework, improving cross-system collaborative operational processes, and creating effective mechanisms for dynamic optimisation. The aim is to enhance the efficiency of engine commissioning, ensure safe and stable vessel operation, and provide robust technical support for the sustainable development of the shipping industry.

**Keywords：** engine commissioning; standardisation; commissioning efficiency; process optimisation

## 引言

作为船舶的核心动力的轮机装置，船舶航行安全和运营效益和其性能存在直接的关联。轮机调试是保证轮机设备安装无误、性能达标的重要步骤，其中涉及到设备功能测试、系统参数校准等许多复杂的事项。伴随着船舶技术不停地进步，轮机系统变得越来越复杂起来，传统的调试模式显露出不少的缺点，如调试流程没有标准化、效率不高等情况越来越显著。进行有关轮机调试流程标准化构建以及调试效率增进策略的探究，对促进船舶产业的高品质发展、保证航运行业的安全且稳定运行有着关键的意义<sup>[1]</sup>。

## 一、现存的轮机调试相关问题

### （一）数字化调试应用相对欠缺

目前，大部分轮机调试依旧依靠传统的人工操作以及纸质文档来记录，其数字化的程度不高。在进行设备参数测量的过程中，调试人员借助传统的仪表装置开展数据采集工作，并通过人工方式记录数据。上述操作方式效率较为低下，极易出现记录方

面的差错。由于缺乏统一的数字化调试平台，调试所产生的数据无法达成实时共享以及集中化管理，进而导致各个部门之间的信息传递不顺畅。例如，在针对轮机控制系统开展调试工作的进程中，机械部门跟电气部门由于未能及时地传递数据，进而使得调试工作的进度遭遇阻碍。除此之外，如大数据、人工智能等前沿技术，在轮机调试工作当中的运用情况较少，无法针对调试所产生的数据展开深入的分析，无法发觉潜在的问题，对调试工作的

质量以及效率造成一定影响。

## （二）跨系统协同调试困难

当代船舶轮机系统的集成程度颇高，关联到机械、电气、自动化等众多子系统，开展跨系统的协同调试工作具有较大难度。在调试进程中，各个子系统的调试团队之间缺少高效的沟通以及协作机制。比如，当进行轮机推进系统和电力系统的联合调试时，鉴于两个系统的调试人员对双方系统的工作原理以及调试要求认识不够充分，使得调试过程中频繁粗线参数不契合、接口兼容性不佳等状况，多次进行返工调试，给整体调试的进度造成严重的影响。另外，由于缺少统一且适用于跨系统的调试准则以及操作流程，使得各个子系统的调试工作难以达成协同一致的效果，进而增大调试过程的复杂程度和不可确定性。

## （三）调试流程缺少动态性的优化机制

目前的轮机调试流程大多为固定模式，缺少依据实际情形开展动态调整的机制。在调试操作进程中，一旦遭遇设备故障、设计变更等突发状况，调试流程难以在第一时间做出反应，会按照原本的计划去执行，进而使得调试所需的时间变长。比如，若是发现轮机主机存在着制造方面的瑕疵，需要更换零部件之时，调试团队无法快速地对调试计划进行调整，重新编排后续的调试工作，从而造成人力、物力以及时间方面的损耗。与此同时，由于缺少调试过程数据分析及反馈机制，因此无法对调试过程中的经验教训予以总结，进而达成调试流程持续开展改进与优化的目标较为困难。

## （四）调试人员技能和标准化设定不匹配

伴随轮机技术持续地革新，对调试人员技能方面的要求也日益提升。当下部分调试人员在新型轮机设备与先进调试技术的掌握程度上有所欠缺，难以契合标准化调试流程的需求。在开展调试工作时，鉴于调试人员操作不够规范、对调试标准的理解存在偏差，极易引发调试失误，进而加大调试的风险性。比如，在进行新型智能轮机控制系统的调试时，部分调试人员因为对系统的调试方法与标准不够熟悉，错误地进行参数设置，最终使得系统运行的稳定性受损，只能重新展开调试工作。除此之外，企业针对调试人员所构建的培训体系不完善，在具备针对性的技能培训以及考核机制方面有所欠缺，无法有效地提升调试人员的专业水平。

## （五）调试资源的配置呈现出不合理的状况

在轮机调试进程中，出现调试设备、人力这类资源配置缺乏合理性的状况。从某个方面来讲，部分调试设备呈现出老化的态势，并且精度不够理想，难以契合新型轮机设备调试方面的要求，进而对调试数据的精准性以及可信度产生不利影响。例如，当采用精度欠佳的压力传感器去测量轮机系统压力时，会使得测量数据的误差偏大，无法展现出系统实际运行时的状态。从其他方面入手，人力的配置并不均衡，在调试处于高峰期时，调试人员的数量不够充足，工作负担过于沉重，致使调试的质量有所降低。处于调试低谷期时，人员处于闲置状态，造成人力资源的白白浪费。同一时间，科学的资源调度与管理机制处于缺失状态，难以凭借调试任务的紧急状况与复杂情形合理地资源实施调配。

# 二、针对问题产生根源展开的剖析

## （一）技术的更新换代与管理理念的发展滞后

船舶工业的技术发展极为快速，新型的轮机装置以及数字化调试工艺不断涌现。然而，企业的管理观念却未能在时间上及时契合技术发展的节奏。部分企业对数字化调试工艺的关键意义理解不到位，依旧采用过去传统的调试管理方式，对新技术应用的投入力度较弱。在跨系统的协同调试领域，企业没有构建高效的协同管理体制，各个部门相互之间存在信息阻隔，合作的意愿匮乏，最终造成协同调试困难。与此同时，企业未能重视调试流程的动态优化，并未意识到依照实际情形来调整调试流程的必要性，导致调试流程过于死板。

## （二）标准化体系存在不完备状况

当下在轮机调试领域中，并未存在完备且具备系统性的标准化体系。现有的调试标准，零散地分布在各式各样的技术规范以及行业标准之内，缺少统一的整理与归纳。部分标准的内容无法适应当前时代发展，无法满足新型轮机设备和调试技术的进步要求，特别是在数字化调试、跨系统协同调试等新近兴起的领域，更是缺少对应的标准给予指引。除此之外，企业自身也未构建完善的关于调试流程标准化的管理体制，对于调试人员的操作准则和质量方面的要求，没有清晰的界定，导致调试工作具有较大的随意性，很难确保调试工作的质量和效率<sup>[2]</sup>。

## （三）人才培养的机制尚未达到健全的状态

船舶企业对于调试人员的培养所给予的重视程度不足，内部未能具备完善的人才培育机制。在培训内容方面，着重于传统调试技艺与办法的讲解传授，而针对新型轮机设备以及数字化调试技术所开展的培训相对较少，难以契合调试人员知识更新需要。培训手段呈现出单一性，大多以理论课程讲授作为主要方式，缺少实践操作以及案例剖析，培训成效欠佳。与此同时，企业缺少有效的考核与激励制度，对调试人员的工作表现以及技能水准缺少科学化的评估，无法激发调试人员学习和工作的主动性，进而导致调试人员技能提升的速度较为缓慢，很难顺应轮机调试技术发展的准则要求。

## （四）资源整合以及调配方面能力不足

企业在调试资源管理领域存在不足，欠缺对于调试设备、人力等诸类资源达成有效整合以及合理调配的能力。在设备管理方面，并未构建完备妥善的设备更新与维护体系，对新型调试设备的引入以及运用略显不足，导致设备出现老化现象，同时精度也有所降低。在人力资源管理情况中，没有具备科学性的人员配置和调度规划，难以依据调试任务所具有的特征和实际需求，对调试人员予以合理的安排，进而造成人力资源既出现浪费现象，又存在短缺状况。

# 三、轮机调试流程标准化建设以及提升运行效率的相关策略

## （一）搭建起数字化调试的标准体系架构

要想使轮机调试往数字化方向转变，就要搭建全方位的数字化调试标准体系。拟定关于数字化调试数据的采集、存储、传输以及分析方面的准则，使数据格式与接口标准达成统一，以保障

调试数据具备准确性和兼容性。研发专门的数字化调试平台，将设备监测、数据采集、故障诊断、调试记录等功能相整合，达成调试过程全流程的数字化管理。借助大数据、人工智能等技术，对调试数据予以深度探究，构建调试模型以及预测算法，预先察觉潜藏的问题，对调试方案加以优化。譬如通过剖析历史调试数据，预估设备或许会出现的故障，提前施行预防手段，提升调试的效率与质量<sup>[3]</sup>。

**（二）对跨越不同系统的协同调试流程加以优化**

构建开展跨系统协同调试的组织架构，同时设立相匹配的工作机制，明确各个子系统调试团队所肩负的职责以及对应的分工，强化不同团队彼此间的沟通和协作。拟定统一的、用于跨系统调试的标准以及操作流程，对各个子系统相互间的接口调试、参数匹配这类工作加以规范，以此保障调试工作能够协调推进。在开展调试工作之前，召集各个子系统调试团队开展技术方面的交底活动，以及调试方案的研讨会，从而明确调试工作的具体目标与详细要求。在调试作业进行期间，搭建一个可实现实时交流的平台，及时应对并解决调试过程中出现的各类问题。在调试工作完毕之后，各个子系统调试团队一同对调试结果开展评估以及验收工作。例如，在轮机推进系统和电力系统开展联合调试工作之前，调试轮机推进系统与调试电力系统的两个团队一同拟定调试的方案，明确自身的工作范围以及相互配合的模式，以此保障调试工作能够顺利地实施。

**（三）构建调试流程的动态优化体制**

依据实际情形构建调试流程动态优化方案，以此提升调试流程的灵活度与适应能力。拟定调试流程变更的管理举措，明确流程变更所需条件、审批的详细程序以及具体的实施步骤，当碰到诸如设备发生故障、设计出现变更等意外状况时，可以迅速开启流程变更的程序，对调试计划和资源分配予以重新调整。与此同时，搭建调试过程的数据反馈体系，及时收集和剖析调试进程中的数据与问题，并定时针对调试流程开展评估和优化工作。例如，按照调试进程中察觉到的具体状况，对调试程序当中的特定环节予以简化或者做出调整，进而让调试的时间周期得以缩减，使调试的工作效率获得提升<sup>[4]</sup>。

**（四）强化工作人员技能培育以及管控工作**

对调试人员培训体系加以完善，强化技能培训与管理力度。结合轮机调试技术发展需要，制订具有针对性的培训规划，增添新型轮机设备、数字化调试技术等范畴的培训内容，运用多样化的培训形式，例如理论讲授、现场实际操作、案例剖析、线上学习等，促使培训成效得以提升。构建调试人员技能考评与认证机制，定时对调试人员开展技能考核，对于考核通过的人员颁发对应的资格证书，以此作为人员上岗以及晋升的凭据。

**（五）对调试资源进行科学的配置**

对调试资源的配置予以优化，进而提升资源的利用效率。拟定调试设备的更新与维护规划，及时引入具备先进性的调试设备，将老化且精度不够的设备予以淘汰，以此保证调试设备能够契合新型轮机设备的调试要求。构建具有科学性的人力资源配置模型，依照调试任务所具有的特性、紧急程度以及复杂状况，合理地调试人员的数量与结构加以安排，达成人力资源的优化配置。与此同时，借助信息化的方式构建调试资源管理体系，实时把控调试设备与人员的使用情形以及状态，达成资源的动态调配与共享。比如，通过资源管理体系，依据不同调试项目的要求，灵活地对调试人员和设备予以调配，提升资源的运用效率，减短调试的时长周期<sup>[5]</sup>。

**四、结论**

船舶工业的发展，要求开展轮机调试流程的标准化建设并提升其调试效率。通过对当下轮机调试面临的诸如数字化应用欠缺、跨系统协同艰难等状况展开深度剖析，从技术、管理、人才、资源等多个维度探寻其中原因，进而有针对性地提出一系列策略，如构建数字化调试的标准体系、优化跨系统协同的流程等。实施上述策略，有助于增强轮机调试的标准化水平，提高其调试效率，同时降低调试过程中的成本与风险，为船舶轮机设备的安全且可靠运行提供保障。未来伴随船舶技术不断发展，需要完善轮机调试流程的标准化体系架构，对调试技术以及管理方法予以创新变革，促使船舶工业朝着质量更优的方向进步。

**参考文献**

[1] 张华威. 船舶轮机设备安装及调试中的问题及措施 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(10): 93-95.  
[2] 王天伦. 联合循环电站燃气轮机调试运行问题和建议 [J]. 大众标准化, 2022, (24): 160-162.  
[3] 梁月禧, 黄家浩, 莫健乐, 等. 船舶轮机设备安装及调试过程中的挑战与对策 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(02): 16-18.  
[4] 刘凯, 张宝诚, 马洪安. 某型燃气轮机燃烧室出口温度场的调试 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(06): 1387-1391.  
[5] 周宏俊. 船舶轮机设备安装及调试过程中的挑战与对策 [J]. 船舶物资与市场, 2020, (11): 47-48.



# 综合物探技术在冻土地区勘察中的应用研究

王鹏, 张正阳

上海电力设计院有限公司, 上海 200025

DOI:10.61369/ERA.2025100002

**摘要：** 为应对高寒地区电力工程建设中冻土冻胀、融沉等工程地质问题，本研究提出综合应用微动探测（SPAC 法）与电阻率测深技术，以提升冻土分布探测精度。通过青海果洛藏族自治州某特高压输电工程实例，在海拔 4400m 冻土区布设微动测线与电阻率测深点，结合钻探数据验证，分析了地层横波速度与电阻率特征。结果显示：微动探测获得的拟横波速度剖面（500–1400 m/s）与电阻率测深高阻区（ $850 \Omega \cdot m$ ）在冻土层（埋深 5–8m）分布上高度吻合；碎石土层（拟横波速度 500–600 m/s）与强风化板岩层（ $>2000 \text{ m/s}$ ）的分界亦与钻探岩性分层一致。研究表明，综合物探技术可有效克服单一方法的局限性，通过拟横波速度与电阻率的互补性解析冻土空间分布。该成果为高寒地区电力工程选址及冻土灾害防控提供了可靠的技术支撑。

**关键词：** 微动探测；SPAC 法；电阻率测深；综合物探

## Application of Integrated Geophysical Exploration Techniques in Frozen Soil Region Surveys

Wang Peng, Zhang Zhengyang

Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025

**Abstract：** To address engineering geological issues such as permafrost heave and thaw settlement in power engineering projects in high-altitude cold regions, this study proposes the integrated application of microtremor detection (SPAC method) and resistivity sounding technology to enhance the accuracy of permafrost distribution detection. Using a case study of a ultra-high voltage transmission project in Golok Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province, microtremor survey lines and resistivity sounding points were deployed in a permafrost zone at an altitude of 4,400 metres. Combined with drilling data verification, the study analysed the characteristics of shear wave velocity and resistivity in the strata. The results show that the pseudo-shear wave velocity profiles (500–1,400 m/s) obtained from microtremor detection and the high-resistance zones ( $850 \Omega \cdot m$ ) identified by resistivity sounding are highly consistent in their distribution within the permafrost layer (buried at a depth of 5–8 m); the boundary between the gravelly soil layer (simulated shear wave velocity 500–600 m/s) and the strongly weathered slate layer ( $>2000 \text{ m/s}$ ) also aligns with the lithological stratification identified by drilling. The study demonstrates that integrated geophysical techniques can effectively overcome the limitations of single methods by leveraging the complementary nature of pseudo-shear wave velocity and resistivity to analyse the spatial distribution of permafrost. This research provides reliable technical support for site selection in power engineering projects and permafrost hazard prevention in high-altitude cold regions.

**Keywords：** microtremor detection; SPAC method; resistivity sounding; integrated geophysical techniques

## 引言

随着国家双碳战略的稳步推进，国家不断在一些海拔高寒地区开展包括风力、光伏发电和高压输电网络等重大电力工程。上述地区广泛分布有冻土，冻土具有冻胀、融沉等不利于工程安全的性质，可能对工程施工造成不良影响，是勘察工作中应该重点查明的不良地质条件。冻土在冻融的不同阶段表现出不同的物理性质，例如冻土在冻结时电阻率显著增大、横波速度增大，这为通过物探方法测定冻

基金项目：上海电力设计院有限公司重点科研项目 (KY-2024-015-KC)。

作者简介：王鹏 (1987–)，男，硕士研究生，高级工程师，毕业于中国地质大学（武汉）地球物理学专业，长期从事工程物探、管线探测等工作。

土的埋深和厚度提供了前提条件<sup>[1]</sup>。

我国冻土物探技术发展历程可分为三个阶段。20世纪60年代初期，科研团队在青藏高原冻土勘察中首次引入电法勘探技术，黄以职团队开创了我国冻土地球物理探测的先河<sup>[2]</sup>。至90年代，探地雷达技术应用在高寒冻土区实现了对多年冻土层的系统性勘察<sup>[3]</sup>。21世纪初，随着综合物探技术体系的完善，我国冻土研究进入多方法协同探测阶段<sup>[4]</sup>。刘靖团队通过电测深法构建了永久冻土带三维分布模型<sup>[5]</sup>。朱占龙团队综合利用高密度电法与钻探资料，系统评估了高原冻土区的工程地质条件<sup>[6]</sup>。

目前，多采用单一方法物探来配合钻探来探明冻土，对冻土层的分布情况的认知难免有纰漏。本文旨在通过微动探测和电阻率测深的综合物探，探究如何在高寒地区高效进行冻土勘察的有效方法。

## 一、方法原理

微动探测技术通过布设规则或不规则台阵接收环境振动信号，其核心分析方法主要包含空间自相关法（SPAC）与频率-波数法（F-K）2类。SPAC法基于平稳随机过程理论<sup>[7]</sup>，将微动信号表征为频域-波数域联合分布的随机场模型：

$$X(t, \xi) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \exp(i\omega t + ik\xi) dZ(\omega, k) \quad (1)$$

式中， $\omega$ 为角频率， $k$ 为波数， $Z$ 为正交随机过程。

通过对噪声场功率谱进行归一化处理，可推导出方位平均空间自相关系数

$\rho$ 的数学表达式：

$$\rho(r, \omega_0) = J_0 \left( \omega_0 \cdot \frac{r}{c(\omega_0)} \right) \quad (2)$$

其中 $J_0$ 为零阶第一类贝塞尔函数。

式(2)表明，圆形台阵的空间自相关系数随频率变化且符合贝塞尔函数规律。因此，通过拟合 $\rho$ 与贝塞尔函数曲线，可直接反演出相速度 $c(\omega)$ 频散特性。

实际应用中，首先从微动信号中分离瑞利波并提取频散曲线，结合近邻法反演地层横波速度分布，再通过空间插值生成二维速度剖面，最终实现地下结构的精细化表征。相较传统方法，该技术无需人工震源即可获得大范围地质信息，在复杂环境勘探中具有显著优势。

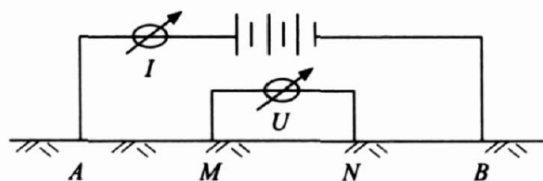


图1 电阻率法原理

电阻率法工作原理如图1所示，在AB两侧施加电流 $I$ ，测量电极MN之间的电位差 $U$ ，在无限半空间中的点电源场中，视电阻率 $\rho_s$ 为

$$\rho_s = \pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (3)$$

电阻率测深法的特点是：供电电极（A、B）在测点（O）两侧沿相反方向向外移动，而测量电极（M、N）不动或与AB保持一定比例同时移动，电阻率测深法主要用来探测地下不同深度范围内的垂向电性变化。

## 二、应用实例

青海省果洛藏族自治州位于青藏高原东北缘，平均海拔4200m以上，分布有大面积的多年冻土。某拟建特高压输电线路工程某一区段平均海拔为4400m左右，部分线路经过多年冻土区。工区典型地质分层为：0~2m，草甸土，主要成分以粉土为主，粉土摇振反应明显，含大量植物根系，为低阻低速层；2~20m，碎石土，中密-密实，稍湿-很湿，母岩以石英砂岩为主，其中间含粉土、砾砂充填，其电阻率和横波速度较草甸土明显增大，多年冻土多分布在此层；20~25m强风化板岩，主要成分以斜长石、黑云母等构成，节理裂隙发育，岩芯呈碎块状、短柱状，其电阻率和横波速度较碎石土层差别不明显；25m以下，中风化板岩，电阻率和横波速度较强风化板岩明显增大<sup>[8,9]</sup>。由此可见，工区内各地层物理性质差异较明显，这为开展微动探测法和电阻率测深法提供了地球物理前提。

### （一）微动探测

为查明冻土区分布及冻土层厚度，特在该线路N5012杆塔处布置了2条微动测线和1个电阻率测深点，工作量布置情况如图2所示：

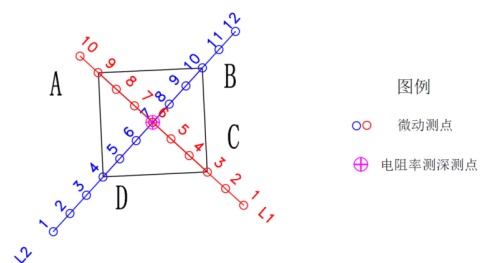
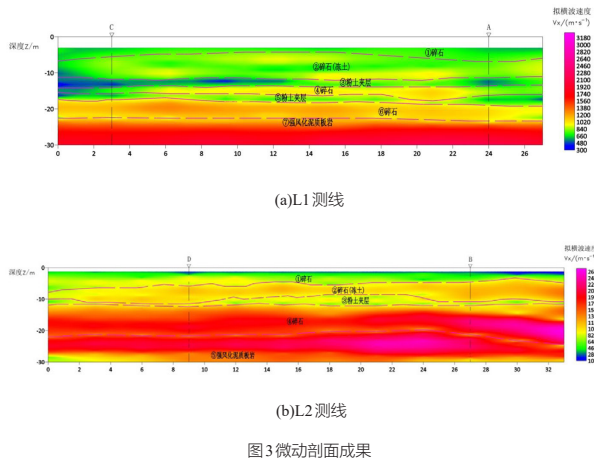


图2 物探方法布置

本次微动探测采用北京水电物探研究所生产的WD-2型智能微动探测仪，采用线性台阵（道间距3m），同步采集，采样率250Hz，单点采集时长约0.5h。



(二) 电阻率测深

电阻率测深采用重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A 直流电阻率仪，使用 200V 外接供电电源，使用温纳装置<sup>[10]</sup>，AB 值由 3m 变化至 40m。

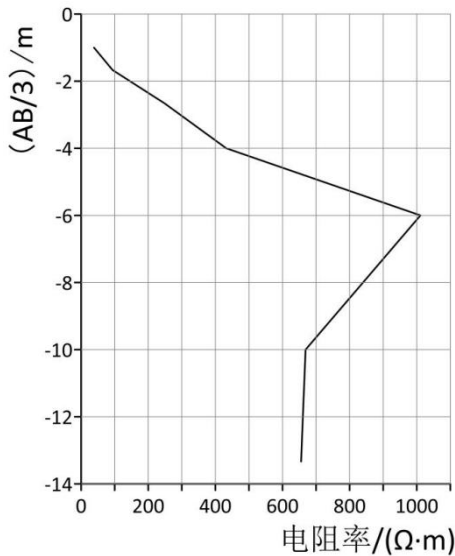


图4 电阻率测深成果

N5012 杆塔的塔位中心钻探的岩性分层如表 1 所示

表 1 N5012 杆塔中心岩性分层表		
层底深度 /m	岩性	岩性描述
0.5	草甸土	松散，主要成分以粉土为主，含大量植物根系。
20.5	碎石	中密~密实，母岩成为以石英砂岩为主，中间含粉土、砾砂充填。
25	强风化泥质板岩	岩质极软，节理裂隙发育，岩芯呈碎块状。

由图 3 分析可知，N5012 杆塔地层大致可以分为 2 层，即 22m 以上的碎石土层和 22m 以下的强风化板岩层，由于高频信号的缺失，L1 测线 0 ~ 3.5m、L2 测线 0 ~ 2m 无有效数据。

由于岩土层在不同深度时，上覆压力、含水性等外部条件的差异较大，故只能驻  $V_x$  值的相对值来作为判断分层界限的依据，无法用其绝对值来对岩土层的实际剪切波速进行测量。结合钻探成果（表 1），总体分层如下，第一层为碎石土，拟横波速度为 500 ~ 600m/s，层面埋深在 5 ~ 6m 左右；第二层为碎石土中的冻土层，拟横波速度为 800 ~ 1400m/s，电阻率测深法成果如图 4 所示，按半幅值法分层，冻土层分布在地表以下 5 ~ 8m，平均电阻率约为  $850\Omega \cdot m$ ，总体而言，冻土层表现为较明显的高电阻率高横波速度现象，2 种物探方法对应；第三层主要为碎石层，中间夹有粉土层，拟横波速度为 1200 ~ 2000 m/s，层面埋深为 22 ~ 25m；第三层为强风化板岩，拟横波速度大于 2000 m/s。

三、结论

微动探测法结合电阻率测深可以有效地对冻土的分布情况进行探测，实践表明拟横波速度的高速区域和电阻率高阻段对应良好。因现场条件所限，只在杆塔处进行了电阻率测深测量，如能在微动测线测得高密度电法剖面进行对比研究，将有利于不同方法的交叉验证。

参考文献

[1] 张振利, 张洪亮. 综合地球物理方法在冻土调查中的应用与研究 [J]. 低温建筑技术, 2021, 43(09): 157-159.  
[2] 苏州. 基于综合物探技术的大小兴安岭冻土层厚度反演及其影响因素 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.  
[3] 唐君辉, 刘国兴, 韩江涛, 等. 电测深法在漠河地区探测永久冻土层的应用 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2005, (S1): 104-108.  
[4] 刘靖, 姜凡, 刘石. 非闭合电极电容层析成像传感器在冻土测试中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(02): 363-368.  
[5] 袁蕾, 刘争平, 张欣, 等. 基于虚拟仪器技术的声-电效应观测系统及其在冻土模型研究中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2009, 24(03): 1142-1148.  
[6] 王浩. 物探技术在我国多年冻土勘测中的应用分析 [J]. 科技创新与应用, 2016(08): 299.  
[7] 冉有华, 李新. 中国多年冻土制图: 进展、挑战与机遇 [J]. 地球科学进展, 2019(10): 1015-1027.  
[8] 何乃武, 俞祁浩. 探地雷达在多年冻土地区工程勘测中的应用 [J]. 路基工程, 2006(05): 13-15.  
[9] 俞祁浩, 程国栋. 物探技术在我国多年冻土勘测中的应用 [J]. 冰川冻土, 2002(01): 102-108.  
[10] 王通, 俞祁浩, 游艳辉, 王武, 杜二计. 物探技术在多年冻土探测方面的应用 [J]. 物探与化探, 2011(05): 639-642.



# 原材料波动下混凝土性能稳定控制技术研究

陈武钊

广东金泰混凝土有限公司，广东 云浮 527300

DOI:10.61369/ERA.2025100003

**摘 要：** 本文围绕混凝土性能展开，探讨了水泥化学成分、砂石级配等原材料波动对其的影响及应对措施。介绍了多种检测技术、监测装置及算法模型，包括 X 射线衍射检测、微波传感监测等。还阐述了实验室智能化管理体系及配合比优化方法，最后通过工程验证和效益评估，强调了技术体系的工程价值和未来发展方向。

**关 键 词：** 混凝土性能；原材料波动；技术体系

## Study on Stable Control Technology of Concrete Performance Under Fluctuation of Raw Materials

Chen Wuzhao

Guangdong Jintai Concrete Co., LTD., Yunfu, Guangdong 527300

**Abstract：** This article focuses on the performance of concrete, exploring the impact of fluctuations in raw materials such as cement chemical composition and sand and gravel gradation, along with the corresponding measures to address these issues. It introduces various testing technologies, monitoring devices, and algorithm models, including X-ray diffraction testing and microwave sensing monitoring. The article also discusses the intelligent management system of laboratories and methods for optimizing mix proportions. Finally, through engineering validation and benefit assessment, it highlights the engineering value and future development direction of the technical system.

**Keywords：** concrete performance; raw material fluctuation; technical system

### 引言

随着建筑行业的发展，对混凝土性能的要求日益提高。2022 年发布的相关建筑材料政策强调了确保混凝土质量稳定的重要性。水泥作为混凝土的关键原材料，其化学成分如氧化钙含量受产地影响，不同含量对混凝土性能影响显著。同时，天然砂石级配波动也影响混凝土性能。为保障混凝土质量，开发了如基于 X 射线衍射的检测技术、基于微波传感的监测装置等一系列新技术，还建立了多种模型和规范，包括原材料检测数据标准录入规范、原材料性能波动预警模型等，这些都为混凝土性能稳定控制提供了技术支撑和理论依据。

### 一、原材料波动对混凝土性能的影响机理

#### （一）水泥质量波动特征分析

不同产地的水泥化学成分存在差异，其中氧化钙含量的波动对混凝土性能影响显著。氧化钙是水泥熟料的主要成分之一，其含量直接影响水泥的水化过程。较高的氧化钙含量会加速水泥的水化反应，使混凝土早期强度发展较快，但可能导致后期强度增长缓慢甚至倒缩，这是因为过多的氧化钙在后期可能会引起体积膨胀等不良现象<sup>[1]</sup>。相反，氧化钙含量较低时，水泥水化速度减慢，混凝土早期强度发展不足。此外，不同产地水泥中其他化学成分的差异也会协同影响水化过程，进而影响混凝土的强度发展和其他性能。

#### （二）骨料级配变化影响研究

天然砂石级配波动对混凝土性能具有显著影响。级配变化会

改变骨料的堆积状态，影响混凝土的空隙率。当级配不良时，空隙率增大，需更多的浆体填充，否则会降低密实度<sup>[2]</sup>。同时，骨料级配影响混凝土的工作性。合理的级配能使骨料与浆体更好地相互作用，提供良好的流动性和可塑性，保证坍落度在合适范围。反之，不合理的级配可能导致坍落度异常，影响施工性能。通过对不同级配参数下混凝土性能的试验研究，可建立级配参数与坍落度的量化关系模型，为控制混凝土性能提供理论依据，以应对天然砂石级配波动带来的不利影响。

### 二、原材料快速检测技术体系构建

#### （一）水泥关键指标快速检测方法

开发基于 X 射线衍射的矿物组成快速检测技术，可精确分析水泥中的矿物成分<sup>[3]</sup>。通过该技术能快速获取水泥中各种矿物的含

量及分布情况,为评估水泥质量提供关键数据。同时,建立SO<sub>3</sub>含量与凝结时间的关联预测模型。由于SO<sub>3</sub>含量对水泥的凝结时间有重要影响,通过大量实验数据和分析,确定两者之间的定量关系。这一模型能够根据水泥中SO<sub>3</sub>的含量快速预测其凝结时间,从而在水泥生产和使用过程中,及时调整工艺参数,确保水泥性能符合要求,提高混凝土质量的稳定性。

## （二）骨料含水率在线监测系统

设计基于微波传感的骨料含水率动态监测装置,该装置利用微波与物料中水分相互作用的原理,通过检测微波的传输特性变化来获取骨料的含水率信息。这种传感方式具有快速、准确、非接触等优点,能够实时反映骨料含水率的动态变化。同时,构建水分补偿算法的自适应调节模型,根据监测到的含水率数据,模型可以自动调整混凝土配合比中的用水量,以补偿骨料含水率波动对混凝土性能的影响。通过该监测系统和调节模型的协同作用,能够有效提高混凝土生产过程中对骨料含水率变化的应对能力,确保混凝土性能的稳定性<sup>[4]</sup>。

## 三、混凝土实验室智能化管理体系

### （一）检测数据云端管理系统

#### 1. 数据采集标准化流程

为建立原材料检测数据标准录入规范,实现试验数据的实时采集与分类存储,需从多方面着手。首先应确定统一的数据格式,包括各类原材料的基本信息、检测指标、检测方法及对应结果等,确保数据的完整性和准确性<sup>[5]</sup>。在数据采集过程中,利用先进的传感器和自动化设备,减少人为误差,提高采集效率。同时,对采集的数据进行实时验证,不符合规范的数据及时提示并修正。对于分类存储,可依据原材料种类、检测项目等维度建立数据库结构,便于后续的数据查询、分析和应用,为混凝土性能稳定控制提供有力的数据支撑。

#### 2. 大数据分析平台架构

在混凝土实验室智能化管理体系中,检测数据云端管理系统的大数据分析平台架构至关重要。基于Hadoop开发检测数据分析系统,Hadoop具有高效处理大规模数据的能力,能满足混凝土检测数据量大且复杂的需求<sup>[6]</sup>。通过该系统可对原材料的各项检测数据进行收集、整理和分析。同时构建原材料性能波动预警模型,利用大数据分析技术挖掘数据中的潜在规律,当原材料性能出现波动时能及时发出预警。这有助于在原材料波动的情况下,提前采取措施调整混凝土配合比等,从而实现混凝土性能的稳定控制。

### （二）试验环境智能监控系统

#### 1. 温湿度联动控制装置

设计可编程环境控制模块,其核心在于利用先进的传感器技术和智能算法,实现对养护室内温湿度的精确感知与调控。通过在养护室内合理分布高精度温湿度传感器,实时获取环境数据,并将其传输至控制中心。控制中心依据预设的温湿度范围及波动阈值,运用智能算法进行数据分析和决策。当温湿度偏离设定值

时,控制模块自动启动相应的调节设备,如加热、制冷、加湿或除湿装置,实现温湿度的联动调节。这种精确的联动调节机制能够有效模拟不同环境条件,为混凝土试块提供稳定的养护环境,确保实验结果的准确性和可靠性,这对研究原材料波动下混凝土性能稳定控制技术具有重要意义<sup>[7]</sup>。

#### 2. 振动干扰监测与补偿

混凝土实验室智能化管理体系中的试验环境智能监控系统包含振动干扰监测与补偿部分。在试验过程中,外界振动会干扰试验结果,因此需开发试验台微振动监测系统。通过高精度传感器实时监测试验台的振动情况,获取振动的频率、振幅等关键数据。同时,建立力学测试结果的振动修正算法,利用监测到的数据对测试结果进行修正。该算法需考虑振动对混凝土试件内部结构的影响,以及对力学性能测试指标的干扰。通过这种方式,可有效降低振动干扰对试验结果的影响,提高试验数据的准确性和可靠性,为混凝土性能研究提供更精确的数据支持<sup>[8]</sup>。

## 四、动态配合比优化设计方法

### （一）响应面法参数优化模型

#### 1. 多因素交互作用分析

Box-Behnken设计是一种常用的实验设计方法,可用于研究多个因素之间的交互影响规律。在混凝土配合比设计中,水胶比、砂率和矿物掺合料是影响混凝土性能的关键因素。通过Box-Behnken设计,可以系统地改变这些因素的水平,构建实验矩阵,并测量相应的混凝土性能指标。利用响应面法,可以建立混凝土性能与各因素之间的数学模型,从而分析各因素的主效应和交互效应。这种方法能够全面考虑多因素之间的复杂关系,为混凝土配合比的优化提供科学依据,以应对原材料波动带来的影响,确保混凝土性能的稳定性<sup>[9]</sup>。

#### 2. 目标函数构建与求解

建立兼顾工作性、强度和耐久性的多目标优化函数是关键。工作性可通过坍落度等指标衡量,强度需考虑抗压、抗折等强度值,耐久性涉及抗渗、抗冻等性能<sup>[10]</sup>。对于工作性,可设定合适的坍落度范围作为约束条件;对于强度,根据设计要求确定强度等级对应的数值作为目标值;对于耐久性,同样依据工程环境设定抗渗、抗冻等级等要求。在此基础上,将这些目标综合考虑构建多目标优化函数。开发改进型遗传算法求解器来求解该函数,利用遗传算法的全局搜索能力和自适应特性,不断迭代优化,找到满足多目标要求的最优解,从而实现混凝土配合比的优化设计。

### （二）实时补偿调整算法开发

#### 1. 波动因子识别与权重分配

构建原材料波动影响因子体系需综合考虑多种因素。从原材料的物理性能如颗粒大小、形状,到化学特性如化学成分含量等,均可能影响混凝土性能。同时,环境因素如温度、湿度以及施工工艺参数也应纳入该体系。熵权法是确定各参数调整优先级的有效方法。通过计算各因子的信息熵,能客观反映其提供的信

息量大小，从而确定权重。信息熵越大，表明该因子不确定性越大，权重应相应降低。根据权重可明确各参数在配合比调整中的优先级，以便在原材料波动时，优先调整关键参数，确保混凝土性能稳定。

2. 动态配合比调整策略

基于模糊控制理论，建立原料性能与配合比之间的模糊关系模型。通过传感器实时监测原材料的关键性能指标，如含水量、颗粒级配等。将监测数据输入到模糊控制器中，模糊控制器依据预设的模糊规则进行推理计算。这些规则是基于大量实验数据和工程经验总结得出的，能够准确反映原料性能变化对配合比的影响。根据推理结果，自动调整水泥、水、砂石等原材料的用量比例，实现配合比的动态优化。同时，算法要考虑到不同原材料之间的交互作用以及对混凝土工作性、强度等性能的综合影响，确保在原料波动情况下混凝土性能的稳定。

（三）工程验证与效果评估

1. 试点工程应用分析

选择典型工程项目进行技术验证。在试点工程应用中，严格按照动态配合比优化设计方法进行混凝土配合比的调整。通过对实际工程中使用的混凝土进行强度检测，统计强度合格率。同时，计算离散系数改进值，以评估混凝土性能的稳定性的。结果显示，采用该技术后，强度合格率达到显著提高，达到了预期的标准。离散系数改进值也表明混凝土强度的离散程度明显降低，性能更加稳定。这充分验证了在原材料波动下，该动态配合比优化设计方法能够有效控制混凝土性能，确保工程质量。

2. 全寿命周期效益评估

建立全寿命周期效益评估模型，综合考虑技术应用对混凝土结构从建设到运营维护各阶段的影响。从材料角度，分析动态配合比优化设计在原材料波动下对材料节约的贡献，通过实际工程数据对比，量化因配合比优化而减少的原材料浪费。从质量提升方面，评估其对混凝土性能稳定性的增强效果，以及由此带来的结构耐久性提升和维修成本降低。考虑结构在全寿命周期内的安全性和可靠性，结合经济因素，如建设成本、运营成本和维修成本等，以货币形式量化技术应用带来的综合效益，为技术的推广和进一步优化提供经济决策依据。

五、总结

本研究系统总结了原材料检测、实验室管理和配合比优化技术的集成创新成果。通过精准的原材料检测，能更好地把控质量源头；科学的实验室管理确保了实验数据的准确性和可靠性；合理的配合比优化技术则直接提升了混凝土的性能。这些成果构建的技术体系在提升混凝土质量稳定性方面具有显著的工程价值，能有效应对原材料波动带来的影响，保障工程质量。未来，在智能制造和人工智能融合方面具有发展方向，可进一步探索利用智能技术实现更高效的原材料检测、更精准的配合比设计以及更科学的实验室管理，推动混凝土性能稳定控制技术不断发展。

参考文献

[1] 唐晓萍. 化工原材料价格波动下 A 企业成本控制研究 [D]. 广西大学, 2022.  
[2] 姜梅英. 卵石机制砂颗粒级配混凝土性能影响及微观结构分析 [D]. 广西大学, 2021.  
[3] 黄森宝. 新型无碱速凝剂对混凝土性能及孔结构影响的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.  
[4] 杨发. 振动及真空搅拌对混凝土孔结构及性能影响的机理研究 [D]. 长安大学, 2022.  
[5] 吕炎. 再生骨料化学强化及其对混凝土力学性能的影响研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2022.  
[6] 游元德. 探讨混凝土原材料对混凝土性能的影响与检测控制 [J]. 绿色环保建材, 2019, (02): 18-19.  
[7] 贾正. 探讨混凝土原材料对混凝土性能的影响与检测控制 [J]. 门窗, 2019, (20): 181.  
[8] 靳璐. 混凝土原材料对水利工程混凝土性能的影响与检测控制 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(02): 73-74+123.  
[9] 拜生智. 原材料对预拌混凝土性能的影响及质量控制要点 [J]. 广东建材, 2022, 38(09): 67-70.  
[10] 杨菲. 探讨混凝土原材料对混凝土性能的影响与检测控制 [J]. 佛山陶瓷, 2022, 32(12): 86-88.

# 石油化工项目技术管理中的创新实践与应用

李建军

辽宁 锦州 121000

DOI:10.61369/ERA.2025100004

**摘要：**本文围绕石油化工领域技术管理创新展开。阐述其内涵包括理念与模式突破等，对比国内外差异，介绍 BIM 信息流转模型、风险管控系统等创新举措，还涉及组织模式、标准融合等方面，强调其对综合效益提升的作用及未来发展方向。

**关键词：**石油化工；技术管理创新；综合效益

## Innovative Practice and Application in Technical Management of Petrochemical Projects

Li Jianjun

Jinzhou, Liaoning 121000

**Abstract：** This article focuses on the innovation in technical management within the petrochemical industry. It explores the core aspects of this innovation, including breakthroughs in concepts and models, compares domestic and international practices, introduces innovative measures such as BIM information flow models and risk management systems, and discusses organizational models and standard integration. The article emphasizes the role of these innovations in enhancing overall efficiency and outlines their future development directions.

**Keywords：** petrochemical industry; technical management innovation; comprehensive benefit

### 引言

石油化工行业在国民经济中占据重要地位。近年来，随着我国《“十四五”原材料工业发展规划》（2021年）等政策的颁布，对石油化工行业的高质量发展提出了更高要求。在此背景下，技术管理创新成为行业发展的关键。它涵盖从理念到模式，从人才培养到风险管控等多个方面。国内外企业在技术管理上存在差异，为国内企业创新提供方向。同时，如 BIM 信息流转模型、基于区块链的风险管控系统等创新实践在项目各阶段发挥重要作用，对提升项目效益、保障安全稳定运行意义重大，推动着石油化工行业技术管理不断创新发展。

### 一、石油化工技术管理创新理论基础

#### （一）技术管理创新内涵解析

技术管理创新内涵解析在石油化工领域至关重要。它涵盖了对传统技术管理理念与模式的突破和拓展。从管理理念上，强调以创新思维引导技术应用与发展，不再局限于固有模式，注重激发团队的创造力和创新积极性<sup>[1]</sup>。在管理模式方面，涉及到对技术研发、应用以及推广等环节的重新架构。例如，引入先进的数字化技术，实现对技术数据的高效管理和分析，从而为技术决策提供更科学的依据。同时，技术管理创新还体现在对人才的培养和激励机制上，鼓励技术人员不断探索新技术、新方法，以适应石油化工行业快速发展的需求。

#### （二）国内外研究现状比较

国内外石油化工企业在技术管理方面存在诸多差异。国外跨国企业如 BP、埃克森美孚等，拥有成熟且完善的技术管理标准体系，涵盖技术研发、应用、安全管理等各个环节，其技术创新能

力和对新技术的应用效率较高，在全球石油化工市场占据领先地位<sup>[2]</sup>。国内中石化在智慧工地建设方面取得了一定成效，例如利用信息化技术提升了施工管理的效率和安全性，但与国外企业相比，在整体技术管理标准体系的完整性和先进性上仍存在差距，技术创新的协同性和对前沿技术的敏感度有待进一步提高。这些差距为国内石油化工企业技术管理创新提供了方向和动力。

### 二、技术管理创新方法体系构建

#### （一）全生命周期 BIM 技术集成

贯穿石油化工项目的设计、施工及运维三阶段构建 BIM 信息流转模型，可实现各阶段数据的高效传递与共享。在设计阶段，利用 BIM 的三维可视化特性进行精确设计，减少设计错误<sup>[3]</sup>。施工阶段，基于 BIM 模型进行施工进度模拟和施工方案优化，提高施工效率和质量。运维阶段，BIM 模型结合物联网技术，实时获取设备运行数据。同时，建立设备预知性维护的算法架构，



通过对设备运行数据的分析，提前预测设备可能出现的故障，制定合理的维护计划，降低运维成本，提高设备运行的可靠性和安全性。

### （二）风险智能管控系统设计

在风险智能管控系统设计方面，构建基于区块链的 HAZOP 评估云平台是重要举措。区块链技术的去中心化、不可篡改等特性，可确保 HAZOP 评估数据的真实性和安全性<sup>[4]</sup>。通过云平台，实现多用户、多地点的协同评估，提高评估效率和准确性。同时，开发施工作业风险熵值预测模型，对施工作业中的各种风险因素进行量化分析。该模型能根据实时数据动态计算风险熵值，提前预警潜在风险。配合可视化报警系统，将风险信息以直观的方式呈现给管理人员，便于及时采取措施进行风险管控，确保石油化工项目的安全稳定运行。

## 三、典型项目创新实践案例分析

### （一）南海炼化一体化项目实践

#### 1. 数字化协同设计应用

南海炼化一体化项目在数字化协同设计应用方面有诸多创新实践。该项目解析了 PDMS 三维设计参数化驱动方法，通过这种方法实现了高效的设计流程。在设计过程中，利用参数化驱动能够快速调整设计参数，提高设计的灵活性和准确性。同时，该项目对 30% 设计周期压缩效果进行了经济效益评估。结果显示，设计周期的压缩带来了显著的成本节约和效益提升。这种创新实践不仅提高了项目的设计效率，还为项目带来了可观的经济收益，为石油化工项目技术管理中的数字化协同设计应用提供了宝贵的经验<sup>[5]</sup>。

#### 2. 模块化施工技术创新

在南海炼化一体化项目中，模块化施工技术创新成果显著。针对 2000 吨级模块化装置整体吊装方案展开论证，通过精确的力学计算和模拟分析，确保吊装过程的安全性和稳定性<sup>[6]</sup>。同时，对高空组对工效提升的临界参数进行深入分析，考虑风速、温度、湿度等环境因素以及模块自身的结构特点，确定了最佳的施工条件和操作流程。这些创新实践不仅提高了施工效率，减少了现场施工时间和人力成本，还提升了工程质量，为石油化工项目的模块化施工提供了宝贵的经验。

### （二）西部氢能基地技术管理

#### 1. 绿色施工技术体系

在西部氢能基地技术管理的绿色施工技术体系中，建立碳足迹追踪监测平台是一项重要创新实践。该平台用于验证超临界二氧化碳萃取工艺的环境绩效数据。通过实时监测和分析，能够精准掌握工艺过程中的碳排放情况，为优化工艺提供数据支持。这不仅有助于提高能源利用效率，减少温室气体排放，还能更好地满足环保要求，推动绿色施工技术的发展。同时，该平台的建立也为其他类似项目提供了可借鉴的经验，促进整个行业的可持续发展<sup>[7]</sup>。

#### 2. 智能巡检系统应用

在西部氢能基地技术管理中，智能巡检系统的应用是关键创

新实践之一。其中，部署工业 AR 辅助决策系统发挥了重要作用。通过该系统，在装置区隐患识别方面取得了显著成效，响应时效大幅提升了 65%<sup>[8]</sup>。这一提升得益于工业 AR 技术的独特优势，它能够为巡检人员提供更加直观、准确的信息，帮助其快速识别隐患。同时，系统的实时数据传输和分析功能，使得决策能够及时做出，有效避免了潜在风险的发生，保障了氢能基地的安全生产和稳定运行。

## 四、技术管理创新实施路径优化

### （一）组织模式创新

#### 1. 矩阵式项目管理架构

在矩阵式项目管理架构下，构建跨部门技术委员会决策机制至关重要。该机制打破部门壁垒，整合各方资源与专业知识，提高决策的科学性和效率<sup>[9]</sup>。通过跨部门的合作与沟通，能够更全面地考虑项目中的技术问题以及各种影响因素。同时，量化资源配置效率改进的弹性系数，有助于精准评估资源投入与产出的关系。这使得在项目实施过程中，能够根据实际情况灵活调整资源配置，避免资源的浪费或短缺，保障项目的顺利进行，提升整体技术管理水平和项目的经济效益。

#### 2. 知识共享平台建设

组织模式创新可从多方面展开。对于石油化工项目技术管理，应打破传统的部门壁垒，构建跨部门协作团队，整合各方资源，提高技术方案的制定效率。同时，要建立灵活的项目组织架构，根据项目需求动态调整人员配置。在知识共享平台建设方面，设计基于云技术的 EPC 经验数据库是关键举措。云技术可确保数据的高效存储和便捷访问，方便项目团队成员随时随地获取所需经验知识。通过该数据库，实现技术方案复用率提高 40%，减少重复劳动，提升技术管理的整体效能，促进石油化工项目技术管理的创新实践与应用<sup>[10]</sup>。

### （二）标准体系完善

#### 1. 技术标准动态更新机制

建立 ASME 与 GB 标准融合实施路线图，需深入研究两种标准的差异与共性。分析石油化工项目关键设备在不同标准下的技术要求，确定融合的关键节点与步骤。以设备设计、制造、检验等环节为重点，明确各阶段的标准适用情况。形成关键设备合规性审查矩阵，要梳理关键设备清单，针对每类设备列出 ASME 和 GB 标准中的关键指标。构建矩阵框架，将设备类别与对应的标准指标一一对应。在项目实施过程中，依据矩阵对关键设备进行严格审查，确保其符合融合后的标准要求，保障项目技术管理的科学性和规范性，提升整体技术水平与质量。

#### 2. 质量追溯体系创新

在技术管理创新实施路径中，标准体系完善是重要基础。需结合行业最新规范与企业自身特点，对技术标准、操作流程等进行全面梳理与更新，确保各项工作有章可循。质量追溯体系创新则是关键环节。开发射频识别与量子追溯双系统，利用射频识别技术快速获取产品信息，量子追溯技术确保信息的准确性与不可

篡改。通过这两个系统的协同作用，实现对石油化工产品全生命周期的精准追溯。在质量事故发生时，能够迅速定位问题源头，实证质量事故溯源效率提升3倍，有效降低损失，提高企业质量管理水平和市场竞争力。

### （三）人才梯队培育

#### 1. 复合型人才培养模式

设计工程技术与数字技能二元培育方案，建立技能认证等级评价模型，是复合型人才培养的关键。在工程技术方面，结合石油化工项目特点，设置针对性课程与实践环节，让人才深入了解工艺流程、设备操作等核心知识。同时，注重数字技能培养，涵盖数据分析、模拟软件应用等，使其能适应数字化转型需求。通过建立技能认证等级评价模型，对人才技能水平进行量化评估。以实际项目成果、技能测试成绩等为依据，划分不同等级，激励人才不断提升自身能力，为石油化工项目技术管理创新提供坚实的人才支撑。

#### 2. 创新激励机制设计

技术管理创新实施路径优化需注重人才梯队培育和创新激励机制设计。在人才梯队培育方面，要制定系统的培养计划，结合石油化工项目特点，为不同层次人才提供针对性培训课程和实践机会。例如，为新员工安排基础技术操作培训，为资深员工提供

前沿技术研讨交流活动。同时，建立导师制度，促进经验传承。在创新激励机制设计上，构建合理的奖励体系，包括物质奖励和精神奖励。物质奖励可根据创新成果的经济效益给予奖金、股权等；精神奖励可设立创新荣誉称号，提升员工成就感。此外，设立创新基金，支持员工的创新项目，激发创新积极性，保障技术管理创新的持续推进。

## 五、总结

石油化工项目技术管理的创新实践至关重要。通过对22个重点项目的数据分析，明确了技术管理创新体系对EPC项目综合效益的显著提升作用，幅度可达15%–20%。在此基础上，提出建立国家石油化工技术创新联盟以及开发行业级数字孪生平台的战略建议，这将有助于整合资源、提高效率、优化项目管理。同时，人工智能在石油化工领域的应用前景广阔，特别是在过程安全预警和新材料研发方面，能够为项目的安全稳定运行和技术突破提供有力支持。未来，应进一步加强技术管理创新，推动石油化工行业的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 王海滨. 军事装备试验鉴定中项目管理的实践与应用 [D]. 南昌大学, 2021.
- [2] 刘智恒. 煤化工投资项目综合效益后评价研究 [D]. 宁夏大学, 2022.
- [3] 王俊杰. 智能配电网项目综合效益评价研究——以配电网T项目为例 [D]. 天津大学, 2021.
- [4] 车怡然. 碳中和下城市配电网项目综合效益评估研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [5] 卜令轩. 微山湖湿地公园生态保护工程项目综合效益评价 [D]. 新疆农业大学, 2022.
- [6] 王柄涵. 石油化工项目在集成化设计中的实践探索 [J]. 石油化工设计, 2023, 40(3): 60–62.
- [7] 李向东. 石油化工建设工程项目管理的应用 [J]. 石油化工建设, 2022, 44(11): 9–11.
- [8] 赵庆凯, 柳扬斌, 刘钰. 石油化工建设工程项目管理的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(7): 61–63.
- [9] 赵纲. 石油化工建设项目管理办法应用 [J]. 化工管理, 2023(15): 8–10.
- [10] 孙剑飞. 在石油化工项目管理中BIM技术的应用探讨 [J]. 石化技术, 2021, 28(1): 179–180.

# 工程质量管理体系的构建与优化路径探究

张孟良

湖南子宏生态科技股份有限公司，湖南 长沙 410100

DOI:10.61369/ERA.2025100005

**摘 要：** 本文围绕工程项目质量管理体系的构建与优化路径进行深入探究，旨在提升工程建设的整体质量水平和管理效率。文章从质量管理的基础框架出发，系统分析了现有体系中存在的问题，提出了科学完善的构建路径和优化策略。通过对组织架构、制度体系、标准执行、技术手段等方面的研究，探索信息化与智能化手段在质量管理中的应用路径，进一步强化工程全过程质量控制。文章强调全过程管控理念，注重实效性与系统性，为工程质量管理体系优化提供实践指导。

**关 键 词：** 工程质量管理；体系构建；优化路径；信息化手段；全过程控制

## Exploring the Construction and Optimization Pathways of an Engineering Quality Management System

Zhang Mengliang

Hunan Zihong Ecological Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410100

**Abstract：** This paper conducts an in-depth exploration of the construction and optimisation pathways of engineering project quality management systems, aiming to enhance the overall quality level and management efficiency of engineering construction. Starting from the foundational framework of quality management, the paper systematically analyses the existing issues within the current system and proposes scientifically sound and comprehensive construction pathways and optimisation strategies. Through research into organisational structure, institutional frameworks, standard implementation, and technical means, the paper explores the application pathways of information technology and intelligentisation in quality management, further strengthening quality control throughout the entire engineering process. The article emphasises the concept of full-process control, focusing on practicality and systematicity, and provides practical guidance for the optimisation of engineering quality management systems.

**Keywords：** engineering quality management; system construction; optimisation pathways; information technology; full-process control

## 引言

随着建筑工程行业的快速发展，质量问题已成为制约工程可持续发展的关键因素。科学构建与不断优化的质量管理体系是保障工程质量、控制项目风险、提升施工水平的重要手段。然而，当前部分工程项目在质量管理实践中仍存在体系不健全、执行不到位、监督机制缺失等问题。因此，研究工程质量管理体系的构建与优化路径，已成为提升建设工程管理水平的核心课题。本文结合当前行业实际，系统梳理质量管理体系构建思路，提出可行性优化策略，以期为行业实践提供理论参考与操作依据。

## 一、工程质量管理体系的基础构成

### （一）管理体系的组织架构设计

在工程质量管理体系的构建过程中，组织架构的科学性与合理性直接关系到管理效能的高低。工程项目涉及多个参与方，包括业主、设计单位、监理单位、施工单位及相关职能部门等，各方在质量管理中扮演着不同角色。业主作为项目的第一责任人，应制定总体质量目标与管理方向，建立项目质量考核机制；设计

单位需依据规范开展设计优化，并对设计变更进行严格控制；监理单位则承担质量监督与过程检查职责，是现场质量控制的第三方保障力量；施工单位则是质量管理的执行主体，必须对施工过程的每一工序负责，严格执行标准与规范。

### （二）制度标准与操作流程规范

质量管理体系和流程标准是工程项目执行的重要依据，是构建管理体系的基础要素。完善的质量管理制度不仅应涵盖施工准备、过程控制、检查验收、问题整改等各环节内容，还应与国家



标准、行业规范相一致，具备可执行性与适用性<sup>[1]</sup>。在制度建设中，应明确质量行为规范、操作规程、检验频次和验收标准等内容，配套制定作业指导书、检查表、技术交底等技术性文件，指导现场施工人员规范作业。同时，质量问题的发现、反馈、整改、复查必须形成闭环，制度中应对各环节责任单位、处理时限、处理流程等进行明确规定。此外，应建立质量管理档案制度，确保所有质量相关资料的完整性与可追溯性，从制度层面保障全过程质量控制，提升工程质量管理系统的系统性和可控性。

### （三）质量管理责任制建设

构建有效的工程质量管理体系，必须确立“责任到人、层层落实”的质量管理责任制。该制度的核心在于将质量目标逐级分解至各施工班组、各岗位人员，并明确相应的职责与考核标准。在实际操作中，项目经理对项目整体质量负总责，各专业工程师分别负责本专业范围内的技术指导与质量监督，施工班组长则需对具体工序质量承担直接责任。通过建立质量目标责任书、签订质量承诺书等形式，将责任具体化、书面化，增强各级人员的质量意识。同时，应构建质量奖惩机制，依据质量目标完成情况对相关责任人进行绩效评定，奖优罚劣，以激发管理与施工人员的积极性与责任感<sup>[2]</sup>。

## 二、现有工程质量管理体系问题分析

### （一）体系结构不完善

当前部分工程项目在质量管理体系构建上存在结构松散、职能划分模糊的问题，导致质量管控难以落实。一方面，项目单位缺乏统一的质量管理框架，未能将设计、采购、施工、监理等环节的质量控制标准进行系统整合，形成完整、闭环的质量控制流程。另一方面，项目内部不同层级、不同部门之间职责交叉、权限不清，管理层未能有效统筹协调，基层执行者缺乏明确的任务导向，易导致推诿扯皮、责任难以追溯<sup>[3]</sup>。此外，不少项目缺乏统一的质量目标和考核体系，质量计划流于形式，缺乏实际指导意义，无法有效对项目全过程实施质量控制。项目之间在管理方式、执行标准上存在较大差异，未能形成标准化、模块化、可复制的管理模式，不利于企业长期积累和持续改进质量管理水平，影响工程质量的整体可控性与稳定性。

### （二）质量监督机制薄弱

质量监督作为工程质量管理体系的重要组成部分，其作用在部分项目中未能得到充分发挥。一方面，监督流程不规范，监理单位或内部质量部门常常仅进行形式性巡查，缺乏深入的过程控制与技术核查，问题识别不及时，无法起到实质性的预防与干预作用。另一方面，质量监督缺乏科学手段与数据支持，依赖人工记录和主观判断，信息滞后且缺乏准确性，难以对施工质量进行实时、动态监控。部分项目没有建立有效的问题跟踪与整改机制，质量问题发现后往往得不到彻底解决，甚至反复发生。此外，监督人员专业能力参差不齐，对新技术、新工艺掌握不足，无法有效识别潜在的质量隐患<sup>[4]</sup>。

### （三）管理人员质量意识薄弱

工程质量管理能否落地，关键在于各级管理人员的质量意识。然而在实践中，部分管理人员对质量管理的重要性认识不足，仍停留在“应付检查”“被动整改”的层面。特别是在施工

现场，一线管理者更注重进度推进与成本控制，往往忽视了施工环节中的质量细节控制。在管理理念上存在“重结果、轻过程”的误区，缺乏对全过程质量控制理念的认同和执行。在管理行为上，质量检查不严、技术交底不到位、验收走过场等现象屡见不鲜。部分项目管理人员未经过系统的质量管理培训，对质量标准、规范掌握不熟，导致在实际执行中难以准确判断质量是否达标，甚至存在违规操作现象<sup>[5]</sup>。此外，高层管理者若缺乏质量战略思维，未将质量管理作为项目的核心要素进行资源投入与机制保障，也将进一步弱化全员质量意识，影响项目整体质量控制水平。

## 三、工程质量管理体系的优化路径

### （一）强化标准体系建设

标准体系是工程质量管理的基础，其完备性与科学性直接决定了项目执行中的质量控制水平。为有效提升质量管理的规范化、标准化水平，需推进质量标准的统一化与动态化更新，构建切实可行、契合现场实际的作业准则。在实践中，应依据国家标准、行业标准并结合项目具体特点，形成涵盖设计、施工、监理、验收等全过程的内部质量标准体系，建立适用于不同施工阶段和作业工种的操作细则与验收规范。同时，针对新材料、新技术、新工艺的应用，企业应设立专门技术委员会，定期评估更新标准条款，确保管理规范始终与施工技术发展同步。此外，应推动标准体系的信息化管理，借助数字化平台实现标准的分类、查询、调用与版本控制，提升制度传达与执行效率<sup>[6]</sup>。

### （二）建立全过程质量管控机制

全过程质量控制是保障工程项目整体质量水平的重要路径，其核心在于实现从设计源头到最终交付的全流程协同控制。在设计阶段，需强化设计成果质量评审机制，确保设计文件完整、清晰、可实施，减少施工阶段的变更与返工。在采购阶段，建立供应商资质审核与材料设备质量抽检制度，确保投入工程的原材料符合质量标准。在施工阶段，应加强施工组织设计与专项施工方案的编制审核，确保工艺流程合理、技术措施到位，同时设立关键工序控制点与质量巡查机制，实现动态过程监管。在竣工交付阶段，完善质量验收程序与成果移交制度，确保项目符合使用功能与安全要求<sup>[7]</sup>。此外，应建立统一的质量信息管理平台，实现各阶段质量数据的采集、分析与共享，支持问题追踪与过程回溯，构建数据驱动的闭环管控体系。

### （三）提升管理队伍素质

工程质量管理的有效实施离不开高素质的管理人才队伍。当前亟需通过多维度手段，系统提升管理人员的专业能力与质量意识，强化其在质量管理中的执行力与创新力。首先，应建立常态化质量培训制度，定期组织管理人员参加质量管理法规、施工工艺、新技术应用等相关课程，提高其专业技术水平和规范理解能力<sup>[8]</sup>。其次，企业应推动岗位持证上岗制度，对关键岗位如项目总工、质量总监、监理工程师等设定准入门槛，确保管理人员具备相应资质与能力。再者，应完善人才激励机制，将质量管理绩效与个人考核、晋升、奖励挂钩，激发管理人员主动提升质量管



理水平的内驱力。同时，鼓励管理人员参与质量改进活动与课题研究，营造“重质量、讲技术、促提升”的良好氛围。还需引入“质量责任倒查”机制，对因管理失误导致的重大质量问题实施责任追溯，强化管理人员的责任意识与风险意识。

## 四、数字化与智能化质量管理手段的应用

### （一）BIM与质量信息模型集成

建筑信息模型（BIM）技术的广泛应用为工程质量管理提供了全新的技术支撑手段。通过 BIM 技术可在项目设计初期构建三维可视化模型，实现从设计图纸到构造细节的全息呈现，为后续施工提供精准的技术基础。在质量管理方面，BIM 与质量信息模型集成后，可建立起涵盖结构、构件、材料、施工进度与质量状态等信息的动态数据库，实现项目质量数据的实时记录与同步更新。各阶段质量问题可在模型中定位标注、分类管理与图文关联，有效提升问题追踪与整改的效率<sup>[9]</sup>。此外，BIM 技术支持对施工流程的模拟与碰撞检测，提前发现施工冲突与潜在质量风险，减少现场施工误差。在竣工验收后，BIM 模型还能作为数字化交付资料，为后期运维提供精准、完整的质量数据支撑。

### （二）物联网与现场质量监控

物联网技术在工程质量现场管理中的应用日益广泛，成为实现实时监控与预警的重要手段。借助传感器、RFID 标签、摄像头、无人机等智能设备，可对施工现场关键节点进行全天候、多维度的数据采集，如混凝土养护温度、结构变形监测、焊接强度检测、环境湿度记录等。通过数据采集终端与云端平台连接，形成实时上传、集中分析、自动报警的智能质量监控系统，有效弥补传统人工巡检存在的滞后性与不确定性。一旦系统检测到施工参数异常或质量指标偏离标准，即可自动触发预警机制，提示相关管理人员及时干预处理，提升施工质量控制的前瞻性与反应速度。同时，无人机可辅助对大型工地进行高空巡查与图像采集，实现工程状态的快速掌握与可视化分析。通过构建物联网质量感

知体系，不仅可实现施工现场的信息透明与风险可控，还能为后续分析与决策提供完整的质量数据基础，推动质量管理向智能化、自动化方向发展<sup>[10]</sup>。

### （三）建立智能决策支持系统

在大数据与人工智能技术加速发展的背景下，构建智能决策支持系统成为工程质量管理的重要发展方向。智能决策系统以质量数据为核心，集成历史工程项目数据库、施工过程信息、质量问题案例、标准规范库等资源，运用机器学习、数据挖掘与知识图谱等技术，对质量问题的发生趋势、原因关联、风险等级进行智能分析与预判。系统可根据实时数据变化动态评估质量风险，并提供决策建议，如最优施工方案推荐、施工工序调整、人员调配优化等，有效辅助管理者实现科学决策与资源配置。同时，系统支持自动生成质量分析报表、问题追踪记录、管理绩效统计等内容，提升管理工作的数字化水平与工作效率。在施工现场，该系统还可联动 BIM 模型与物联网监测平台，实现数据的多源融合与集成应用，形成基于数据驱动的全过程智能质量管理闭环。通过构建以“数据为本、智能分析、辅助决策”为核心的质量管理体系，不仅提升了管理工作的专业化与系统化水平，也为未来实现工程质量“零事故、零容忍”目标提供了技术支撑与发展方向。

## 五、结束语

工程质量管理体系的构建与优化是保障项目高质量实施的基础。通过完善组织架构、健全标准制度、强化责任落实，能够夯实质量管理的制度根基；通过全过程控制和管理队伍能力提升，实现管理体系的高效运行；引入 BIM、物联网、智能决策系统等新技术手段，则进一步推动质量管理向数字化、智能化方向发展。未来，工程项目应持续优化质量管理体系，强化技术融合与机制创新，构建标准化、信息化、闭环式的质量管理生态体系，助力工程建设高质量、可持续发展。

## 参考文献

- [1]《通信建设工程质量提升和安全生产行动方案（2025-2027年）》[J]. 中国宽带, 2025, 21(08):5.
- [2] 康静怡. 加强公路工程管理与提高工程质量的策略研究 [J]. 时代汽车, 2025, (14): 29-31.
- [3] 董密. 提高建筑工程质量监督管理工作效果的措施探究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (18): 28-30.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202518010.
- [4] 丁超强. 市政工程施工现场管理存在的问题与对策探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (18): 193-195.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202518065.
- [5] 曾鹏. 基于道路桥梁工程现场施工管理难点及解决策略分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (18): 130-132.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202518044.
- [6] 魏云尘, 孙梦姣. 生物工程视角下的食品加工企业质量管理体系优化分析 [J]. 食品安全导刊, 2025, (18): 40-42.DOI: 10.16043/j.cnki.cfs.2025.18.053.
- [7] 魏春鹏. 住宅建筑工程施工全过程管理方法探讨 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(03): 159-160.DOI: 10.13824/j.cnki.cmtm.2025.03.005.
- [8] 周知. 广西高校基建项目施工现场管理优化措施探讨 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(03): 96-97+103.DOI: 10.13824/j.cnki.cmtm.2025.03.037.
- [9] 纪祥. 数字化转型助力中国铁建高质量发展路径探索 [J]. 企业研究, 2025, (03): 14-18.
- [10] 刘小龙. 地铁工程施工中的工程造价影响因素分析及其成本管控策略 [J]. 今日财富, 2025, (12): 25-27.

# 智慧工地平台在市政工程项目中应用研究

王智宇

上海城投公路投资（集团）有限公司，上海 200335

DOI:10.61369/ERA.2025100006

**摘 要：** 在新型城镇化建设与数字化转型深度融合的背景下，市政工程施工管理面临效率提升与精细化管控的双重需求。本文以某市政快速路智慧工地平台建设为研究对象，围绕“安、质、进、人、机”核心要素，构建了集基础应用与特色功能于一体的智慧工地管理体系。通过数字化中心集成、BIM 技术应用、智能门禁系统等关键技术的实践，实现了项目管理的集约化、可视化与智能化。研究结果表明，该平台在提升管理效率、降低安全风险、促进协同作业等方面具有显著效益，为同类市政工程智慧工地建设提供了可复制的实施路径。

**关 键 词：** 智慧工地；市政工程；数字化管理；BIM 技术；协同管控

## Application Research of Smart Construction Site Platform in Municipal Engineering Projects

Wang Zhiyu

Shanghai Urban Investment Highway Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai 200335

**Abstract：** Against the backdrop of the deep integration of new urbanisation and digital transformation, municipal engineering construction management faces dual demands for efficiency improvement and refined control. This paper takes the construction of a smart construction site platform for a municipal expressway as its research object, focusing on the core elements of 'safety, quality, progress, personnel, and machinery,' to establish an integrated smart construction site management system combining basic applications and specialised functions. Through the practical application of key technologies such as digital centre integration, BIM technology, and intelligent access control systems, the platform achieves centralised, visualised, and intelligent project management. The research findings indicate that the platform demonstrates significant benefits in enhancing management efficiency, reducing safety risks, and promoting collaborative operations, providing a replicable implementation pathway for similar smart construction site projects in municipal engineering.

**Keywords：** smart construction site; municipal engineering; digital management; BIM technology; collaborative control

## 引言

随着我国城市化进程的加速，市政快速路作为城市交通网络的重要骨架，其建设规模与技术复杂度不断提升。传统施工管理模式存在信息孤岛、管控滞后、资源配置低效等问题，难以满足高质量发展要求<sup>[1]</sup>。智慧工地通过物联网、大数据、BIM 等技术融合，构建了施工全过程数字化管理体系，成为破解市政工程管理难题的重要路径<sup>[2,3]</sup>。本文结合某市政快速路工程实践，系统探讨智慧工地平台的建设目标、核心内容及实施效益，为同类项目提供理论参考与实践借鉴。

## 一、智慧工地平台建设目标

### （一）构建集约化管理体系

智慧工地平台的首要目标是实现企业级的集约化管理体系。通过云端部署统一的多项目管理平台，打破传统“项目各自为政”的分散式管理模式，实现公司对各在建项目的集中监管与垂直管控。平台应具备良好的开放性与兼容性，能够对接企业现有的

ERP、财务、人力、采购等业务系统，形成数据贯通、功能互补的一体化管理架构。系统应支持多维度数据集成与统一呈现，减少人工统计与重复录入工作负担，提升工作效率与数据准确性，最终实现“数据一个库、管理一张图”的数字化治理新格局。

### （二）实现全要素数字化管控

智慧工地平台将围绕施工全过程的核心要素——安全、质量、进度、人员、材料、机械设备等，构建全面的数字化管控机

制。借助视频监控、传感器、RFID、AI 识别、智能穿戴设备等物联网手段，实现关键数据的实时采集与精准记录，形成覆盖全场景的原始数据体系。平台还应具备数据分析与可视化能力，通过算法模型实现异常预警、趋势分析与过程追溯，推动施工管理从经验驱动向数据驱动转型，切实提升项目现场的管控力度与精细化水平。

### （三）促进多方协同与决策支持

平台将打造一个涵盖建设单位、设计单位、施工单位、监理单位等多方参与者的统一协同工作平台，打通横向业务壁垒，实现各参与方的信息同步、流程互通。依托 BIM 技术构建数字孪生模型，与现场实景高度融合，构建三维可视化施工场景，使各方能够直观了解项目状态、进度偏差、风险点位等信息。管理者可通过数据看板、智能报表、移动终端等方式，随时获取关键决策数据，提升响应速度与管理决策的科学性，进一步增强项目执行的整体协同能力与风险控制水平。平台的最终目标，是打造高效透明、协同有序、智能可控的新一代工程项目管理模式。

## 二、智慧工地平台核心建设内容

### （一）基础应用：构建数字化管理底座

#### 1. 数字中心集成化建设

数字中心将采用双层数据集成架构，构建总部—项目部一体化的数据管理体系。在公司层面，通过统一的数据平台实现多项目数据的汇总、对比与全局调度，支撑企业战略决策与资源优化配置；在项目部层面，部署边缘计算能力，完成现场各类传感器、智能设备等采集的数据的实时处理与上传，提高数据时效性与现场响应效率。系统将深度集成“人员管理、质量控制、安全监管、施工进度、投资成本”等关键业务模块，打通数据链条，确保各方获取的信息来源一致、数据标准统一、接口规范清晰。通过构建统一的可视化数据门户，提升参建单位协同效率，为智慧工地全生命周期管理提供坚实的数据支撑与决策基础<sup>[3]</sup>。

#### 2. 关键要素定量化管理

证照管理定量化：建立证照节点库，通过对各个节点的计划完成时间及对实际完成的工可、初设、规划、行业批复等证照上传至平台内，供项目相关管理人员查阅使用，并通过计划完成节点数量和实际完成节点数量的对比，有效地控制项目相关证照的审批进度。

现场进度定量化：进度在线编制与状态上报，通过每日在线更新，确保进度管控及时有效，针对设计总量，累计完成量定量化管控，同时实现 WEB 和手机查看进度汇总信息，实现现场进度实时调取与查看，同时也可导出相关表格用于上报。进度完成情况统计分析，实现累计量、实际完成量、延期完工量的分析和统计。

投资管理定量化：通过对项目每月计划投资、完成投资额的填报，系统汇总项目的总投资额、累计完成投资额及本年完成投资百分比；同时汇总形成项目总体本年计划投资额、本年完成投资额以及本年完成率等信息在看板中进行展示，清晰地展现了项

目投资完成情况，以供领导查阅管控<sup>[4]</sup>。

设计变更定量化：根据事业部设计变更管理办法，对工程中涉及到的设计变更流程进行定量化管理，通过平台进行有效管控，及时跟进未完成的设计变更。后续计划通过提取关键字的方法对经常发生的问题类型进行统计，提供数据基础供事业部科学决策，减少设计变更。

现场安质整改定量化：现场安质整改定量化通过四级督查，对领导、集团、质监站、自身检查中存在的问题及时及时反馈、及时处理、及时获取处理数量，对整改问题的回复进展进行定量化跟踪，确保相关问题及时整改到位。

设备报验定量化：针对施工现场大型机械设备的管理，建立设备信息库，对设备的基本信息、资质证件信息、进出场状态、操作人员信息进行管理。通过 WEB 和手机端可查看进场设备所有状态，做到可追溯、可查询，确保设备使用安全有序。

重大风险源定量化：建立重大风险源信息库：对重大危险源信息进行录入，并根据项目实际进展实时跟踪完成情况，并根据 GIS 确定危险源位置信息；准确了解项目风险源的详细信息，以提高项目管理人员对现场安全状况的全面把控<sup>[5]</sup>。

人员管理定量化：建立人员信息库，对施工、监理等单位的进场人员进行采集登记入库，包括基本信息、资质证件信息、安全教育、进出场期限等，实现人员信息定量化管理，从而提高现场人员的有效管理。

### （二）特色应用：打造智能化管理场景

#### 1. 门禁管理智能化

• 多维核验系统：融合身份证、人脸、手机号等多源数据，与公安底库大数据联动，实现关键岗位人员（项目经理、安全主管等）的快速核验与在岗考勤。未完成三级安全教育或人员信息异常的人员自动禁止入场，筑牢人员管理第一道防线<sup>[6]</sup>。

• 数据对接与监管协同：打通与政府监管平台的数据接口，实时上传人员考勤数据，同步接收政策指令与预警信息，实现工地管理与政府监管的无缝对接，提升人员管理智能化水平。

#### 2. 环境与风险可视化管控

• 智能监测网络：集成视频监控、环境传感器（扬尘、噪音、气象等），在 GIS 地图与 BIM 模型中实时标记监测点位，支持 PC 与移动端多终端访问。通过智能分析模型，自动识别异常数据并推送预警信息，实现环境风险的动态防控。

• BIM 技术深度应用：利用 BIM 模型进行施工模拟与进度推演，将计划进度与实际进度关联至三维模型，直观展示工序衔接与延迟情况；针对深基坑、高支模等重大风险源，通过模型标记与数据集成，实现风险位置与状态的可视化管控<sup>[7]</sup>。

## 三、技术经济分析

### （一）成本构成与投资估算

智慧工地平台的建设费用涵盖软硬件系统的全流程投入，主要包括智能硬件设备采购、平台软件开发与集成、技术服务支持、运维及人员培训等多个方面。其中，硬件部分主要包括视频



监控终端、环境传感器、智能门禁、定位设备、无人机巡检工具、BIM 建模终端等智能设施，用于支撑现场数据的自动采集和可视化应用；软件平台方面则涵盖数据中心建设、物联网接入、BIM 系统开发、数据集成中台及可视化展示系统等模块。整体建设费用初步估算约为 700 万元，具体金额将因项目数量、场地条件、功能模块配置优先级等因素有所调整。各项成本构成比例约为：BIM 应用与数据集成平台占 40%，智能硬件设备约占 35%，技术服务、系统运维与培训等软性投入占 25%。该估算为项目的初始部署预算，具备一定的弹性空间以适配不同项目需求<sup>[8]</sup>。

### （二）经济性与适用性分析

尽管智慧工地平台建设初期投资较为集中，但其所带来的长期经济效益和管理价值是显著的。首先，平台通过自动化数据采集与分析，减少了大量人工统计与信息传递的成本，提高了管理效率与工作精度<sup>[9]</sup>；其次，系统具备风险预警与实时监控能力，能够及时发现并处置安全隐患，有效降低安全事故的发生率 and 由此产生的经济损失；再次，施工质量与进度的可视化监管有助于问题的提前发现与快速处理，缩短响应周期，减少工期延误。同时，平台采用模块化架构设计，可按需部署、灵活扩展，便于不同项目的复用和推广，显著提升整体投资回报率。随着平台覆盖项目数量的不断增加，其单位边际成本将逐步降低，形成规模效应，经济性优势将愈发凸显。因此，智慧工地平台不仅适用于当前项目，也具备良好的通用性与推广潜力，是支撑企业数字化转型的重要抓手<sup>[10]</sup>。

## 四、试点效益评估

### （一）质量安全双提升

通过全要素数据实时采集与风险智能预警，项目安全隐患整改效率提升 60%，质量问题闭环时间缩短 40%，实现了“隐患早发现、问题快处理”的主动管理模式。BIM 技术在施工模拟中的应用，提前发现图纸冲突 30 余处，避免了返工损失，工程一次验收合格率提升至 98% 以上。

### （二）协同效率与决策优化

参建各方通过统一平台实时共享数据，沟通成本降低 50%，

文件流转周期从平均 3 天缩短至 1 天。管理层基于可视化数据看板，可快速掌握现场进度、资源配置等情况，决策响应时间缩短 70%，项目整体管理效率提升 40%<sup>[11]</sup>。

## 五、保障措施

### （一）组织架构保障

建立“业主牵头、平台方技术支撑、施工方落地实施、监理方监督审核”的四方协同机制。业主单位负责总体协调与资源调配，平台方制定技术标准并提供运维支持，施工单位完成数据录入与现场应用，监理单位审核数据真实性，确保各环节责任清晰、高效联动。

### （二）技术支撑体系

组建由项目经理、技术经理牵头的数字化工作组，负责平台需求对接、技术攻关与培训推广。建立“日巡检、周例会、月评估”的技术保障机制，及时解决系统运行中的问题，确保平台稳定高效运行。

### （三）制度保障

制定《智慧工地应用管理制度》，明确各方权责与操作规范。建立智慧工地推进会制度，定期协商重大问题；实施人员名单制与月报制度，强化人员管理与进度追踪，通过考核激励机制调动参建各方积极性，形成“制度管人、流程管事”的长效管理模式<sup>[12]</sup>。

## 六、结论与展望

某市政快速路智慧工地平台通过“基础应用筑基、特色应用创新”的建设路径，有效解决了传统施工管理中的痛点问题，实现了质量、安全、效率的多维度提升。实践表明，智慧工地建设需坚持“需求导向、技术融合、多方协同”原则，通过数据驱动实现管理升级。未来，可进一步探索 AI 图像识别、数字孪生等新技术在施工管理中的深度应用，推动智慧工地向“无人化监测、自主化决策”方向发展，为市政工程高质量建设提供更强有力的支撑。

## 参考文献

- [1] 郝井玲. 建筑工程施工管理模式创新研究[J]. 工程与管理科学, 5.1(2023):34-36.
- [2] 李久林等. 智能建造背景下的智慧工地发展与实践研究[J]. 建筑技术, 54.6(2023):645-648.
- [3] 张迎庆. 市政工程施工中的智慧工地系统设计与应用研究[J]. Architectural Design & Research, 6.1(2025).
- [4] 焦磊, 刘鑫蕊, 王翠, 等. 智慧工地管理平台在工程项目中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(17):67-68.
- [5] 陈愿, 杜先顺, 洪广庭, 等. 智慧工地信息管理平台在市政工程中的应用[J]. 云南水力发电, 2022, 38(09):178-181.
- [6] 王艳庆. 智慧工地平台在大型市政项目中的应用探讨[J]. 四川水泥, 2022, (01):111-112.
- [7] 陈燕, 陈禹. 大型市政项目中智慧工地平台的应用[J]. 建筑施工, 2020, 42(08):1547-1549.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2020.08.064.
- [8] 易伟, 王一岗, 王剑非, 等. BIM+ 智慧工地平台在市政立交桥建设中的集成应用研究[C]// 中国图学会土木工程图学分会, 《土木建筑工程信息技术》编辑部. 《第12届 BIM 技术国际交流会——数智建造助力城市高质量发展》论文集. 云南省建设投资控股集团; , 2025:539-546.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.015764.
- [9] 李宝峰, 田宏亮, 杨孟宇, 等. 智慧工地安全管理平台在分布式光伏项目中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(04):157-160.DOI:10.26929/j.cnki.issn.2097-1672.2025.04.040.
- [10] 冀大亨, 刘佳杰, 王志坚. 基于智慧工地平台的监理管理创新研究[J]. 建设监理, 2025, (02):64-67.DOI:10.15968/j.cnki.jsjl.2025.02.028.
- [11] 张坤. 建筑工程项目智慧工地管理平台构建与评价[J]. 智慧中国, 2025, (01):112-113.
- [12] 李宾, 相有鑫, 李强. 基于 BIM+ 智慧工地平台的数字化管理体系建设[J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (18):99-101.

# Mg-MOF-74的合成温度优化及其冶金煤气的碳捕集性能研究

梁永儒<sup>1,2</sup>, 商伟竟<sup>1,2</sup>, 赵鸣烁<sup>1,2</sup>, 郭静怡<sup>1,2</sup>, 刘霏申<sup>1,2</sup>, 郑晨璐<sup>3</sup>, 张子硕<sup>3</sup>, 安海飞<sup>2\*</sup>, 王佳<sup>1\*</sup>

1. 石家庄学院地理科学与环境学院, 河北 石家庄 050035

2. 石家庄学院碳中和研究中心, 河北 石家庄 050035

3. 石家庄学院化工学院 / 生物医药学院, 河北 石家庄 050035

DOI:10.61369/ERA.2025100008

**摘 要 :** 本研究针对冶金煤气碳捕集环境, 采用水热法合成 Mg-MOF-74, 通过梯度实验系统探究了晶化温度 (95–155℃) 对其结构特性及气体吸附性能的影响。结果表明, 125℃为最佳晶化温度, 此时材料对冶金煤气主成分 CO<sub>2</sub>、CO 和 N<sub>2</sub> 的吸附容量分别为 8.5 mmol/g、6.8 mmol/g 和 0.6 mmol/g (273 K, 1 bar)。尽管 Mg-MOF-74 对 CO<sub>2</sub> 和 CO 表现出较高的吸附容量, 但其 CO<sub>2</sub>/CO 吸附选择性较低, 难以满足工业分离需求。这一发现为后续材料改性, 如开放金属位点调控或功能化修饰提供了明确方向, 同时也是实现冶金煤气梯级分离技术必须解决的关键问题。

**关 键 词 :** Mg-MOF-74; 晶化温度; 碳捕集; 冶金煤气

## Optimisation of Synthesis Temperature for Mg-MOF-74 and Study on Its Carbon Capture Performance in Metallurgical Gas

Liang Yongru<sup>1,2</sup>, Shang Weijing<sup>1,2</sup>, Zhao Mingshuo<sup>1,2</sup>, Guo Jingyi<sup>1,2</sup>, Liu Peishen<sup>1,2</sup>, Zheng Chenlu<sup>3</sup>, Zhang Zishuo<sup>3</sup>, An Haifei<sup>2\*</sup>, Wang Jia<sup>1\*</sup>

1. School of Geography Science and Environment, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei 050035

2. Carbon Neutrality Research Centre, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei 050035

3. School of Chemical Engineering/School of Biomedical Engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei 050035

**Abstract :** This study focused on the carbon capture environment of metallurgical gas and used the hydrothermal method to synthesise Mg-MOF-74. Through a gradient experimental system, the effects of crystallisation temperature (95–155℃) on its structural characteristics and gas adsorption performance were investigated. The results indicate that 125℃ is the optimal crystallisation temperature, at which the material exhibits adsorption capacities of 8.5 mmol/g, 6.8 mmol/g, and 0.6 mmol/g for the main components of metallurgical gas (CO<sub>2</sub>, CO, and N<sub>2</sub>) at 273 K and 1 bar. Although Mg-MOF-74 exhibits high adsorption capacities for CO<sub>2</sub> and CO, its CO<sub>2</sub>/CO adsorption selectivity is low, making it unsuitable for industrial separation requirements. This finding provides a clear direction for subsequent material modification, such as regulating open metal sites or functionalising modifications, and is also a key issue that must be addressed to achieve metallurgical gas cascade separation technology.

**Keywords :** Mg-MOF-74; crystallisation temperature; carbon capture; metallurgical gas

## 引言

Mg-MOF-74<sup>[1,2]</sup> 是一种经典的金属有机框架材料 (MOF), 由镁离子 (Mg<sup>2+</sup>) 与有机配体 2,5-二羟基对苯二甲酸通过配位键自组装形成。其独特的结构和高比表面积使其在气体吸附、储存和分离等领域具有重要应用价值<sup>[3]</sup>。合成条件对 Mg-MOF-74 的结构、结晶

### 基金项目:

河北省污染源智能监控技术创新中心 (SJ2023098);

河北省应用技术大学研究会研究项目 (JY2025212);

2024 年度石家庄市社科专家培养项目 (2024zjpy40);

2025 年度石家庄市社科专家培养项目 (2025zjpy164, 2025zjpy173);

石家庄学院博士科研启动基金项目 (25BS016)。

通讯作者: 安海飞, 邮箱: 2412007@sjzc.edu.cn

共同通讯作者: 王佳, 邮箱: wangjia5745@sina.com

度、孔隙率和性能具有显著影响,尤其是合成晶化温度显著影响。本论文以水热法制备 Mg-MOF-74,通过梯度实验研究晶化温度合成条件对 Mg-MOF-74 吸附性能的影响,确定其最佳制备条件。同时,讨论本体材料 Mg-MOF-74 在冶金煤气工况下碳捕集的优缺点,以明确改进方向。

## 一、实验方案

### (一) 实验化学试剂、气体及设备

本实验所用的药品为六水合硝酸镁、2,5-二羟基对苯二甲酸、N,N-二甲基甲酰胺、无水甲醇、无水乙醇和去离子水,其中去离子水为石家庄学院实验室自制,其余为国药集团化学试剂有限公司购买,均无进一步提纯。

### (二) 实验方法

优化 Mg-MOF-74 合成工艺,确定其最佳合成条件。首先通过查阅文献明确其水热法合成工艺<sup>[4,5]</sup>,然后确定合成工艺关键步骤,通过单因素变量法研究合成工艺对材料最终吸附性能的影响。

#### (1) Mg-MOF-74 水热法制备工艺

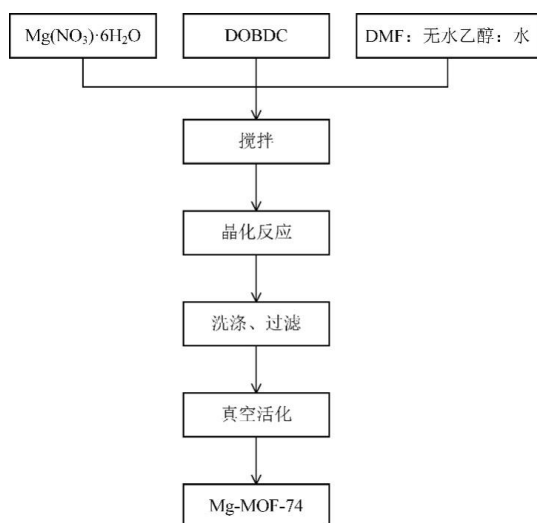


图1 Mg-MOF-74 制备技术路线图

Mg-MOF-74 材料水热合成方法如图1所示,主要由配料、晶化、洗涤和活化四部步组成。合成原料除了六水合硝酸镁和有机配体2,5-二羟基对苯二甲酸(摩尔比为3.3:1)外,还需N,N-二甲基甲酰胺、乙醇和去离子水组成的混合溶剂(体积比为15:1:1)。将原料和溶剂充分混合溶解放入反应釜在设计温度及自生压力下保持一段时间,合成初始 Mg-MOF-74 晶体。洗涤过程是用低沸点溶剂替换残留在初始晶体中的溶剂残留物<sup>[6]</sup>,一般是将初始 Mg-MOF-74 晶体置于洗涤溶剂中,每12小时换一次溶液持续三天。活化过程是在一定温度下的真空环境中将晶体中的残留物继续进一步清除,最后得到浅黄色多孔材料 Mg-MOF-74,将活性材料在真空下储存以备待用。

#### (2) 合成条件优化实验

如何优化反应条件,以期合成理想结构和性能的化合物,是

研究重点。在 Mg-MOF-74 合成工艺中,晶化温度显著影响 Mg-MOF-74 晶体结构,设置温度梯度(95℃、110℃、125℃、140℃、155℃)实验研究晶化温度对 Mg-MOF-74 吸附性能的影响。

## 二、实验结果

### (一) 晶化温度对 Mg-MOF-74 的影响

晶化时间在一定程度上决定了晶体的生长过程,而晶化温度更直接的决定了金属离子是否能与有机配体发生配位反应<sup>[7,8]</sup>。图2为不同晶化温度下 Mg-MOF-74 的 PXRD 图谱,其中由于 95℃ 时没有得到晶体产物,所以在图中没有显示。反应温度对金属有机骨架 MOF 的形成和结构有显著影响,直接影响反应热力学中的反应能量势垒,以及反应动力学中的反应速率。对于 Mg-MOF-74 的制备,95℃ 合成条件下提供的能量显然不足以克服反应能垒形成晶体产物。在晶化温度为 110℃、125℃ 和 140℃ 时,样品 PXRD 特征峰与文献报道的 Mg-MOF-74 的单晶衍射模拟特征峰(CCDC1863524<sup>[9]</sup>)保持一致,在 6.84°、11.86° 均出现了明显的衍射峰,分别对应晶体的(2-10)和(300)晶面,且 PXRD 图谱的杂峰很少,证明材料有完好的晶体结构,其中 125℃ 时特征峰强度最高。当晶化温度为 155℃ 时, PXRD 图谱在 10° 左右出现杂峰,可能是由于温度过高使溶剂的性质会发生一定程度的改变,晶体反应环境发生变化,配位形成其它杂质产物。所以,适宜的晶化反应温度对 Mg-MOF-74 的制备非常重要。

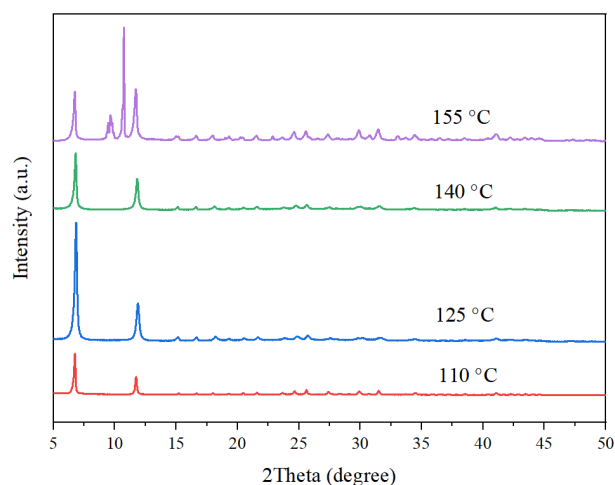


图2 不同晶化温度下 Mg-MOF-74 的 PXRD 图谱

图3为液氮温度下的 N<sub>2</sub> 吸附等温线,由此数据可计算得到各个样品的比表面积数值,见表1。110℃、125℃ 和 140℃ 时样品比表面积都保持较高水准,其中 125℃ 时最高,为 1021 m<sup>2</sup>/g,但当 155℃ 时样品比表面积急剧下降,同样由 CO<sub>2</sub> 吸附等温线上(图

4) 可以看到, 晶化温度 125 °C 时, CO<sub>2</sub> (273 K, 1 bar) 吸附容量最高, 达 5.3 mmol/g。因此, 综合 PXRD、比表面积及 CO<sub>2</sub> 吸附性能结果, 可以确定 Mg-MOF-74 的最佳晶化温度为 125 °C。

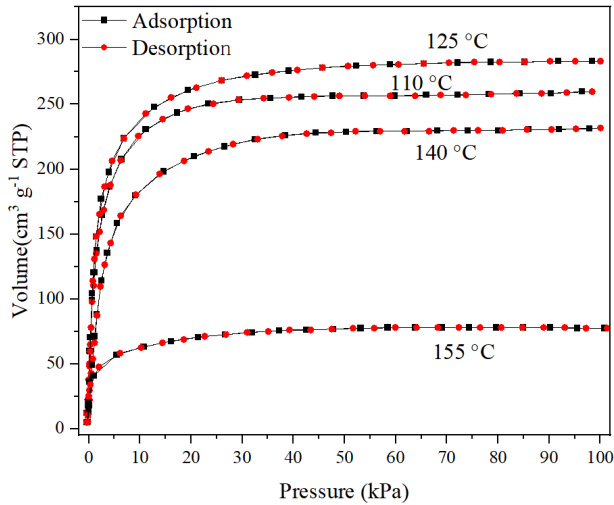


图3 不同晶化温度下 Mg-MOF-74 在 77 K 时的 N<sub>2</sub> 吸附等温线

表 1 不同晶化温度下 Mg-MOF-74 的比表面积

晶化温度/°C	110	125	140	155
BET 比表面积 m <sup>2</sup> /g	944	1021	886	270

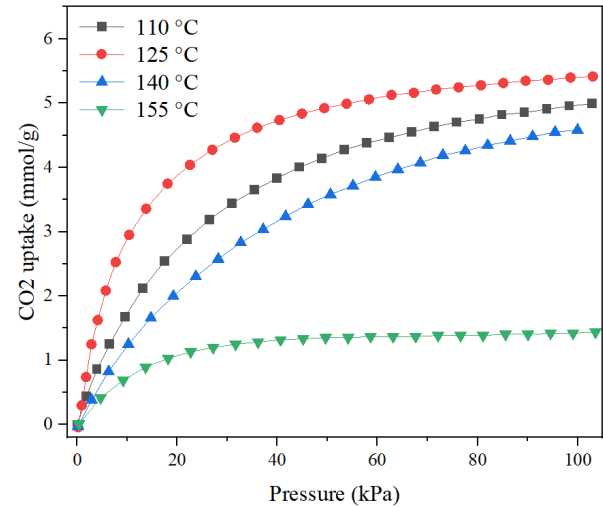


图4 不同晶化温度下 Mg-MOF-74 在 273 K 时的 CO<sub>2</sub> 吸附等温线

## (二) 最佳条件下的样品表征

通过单因素变量法研究了 Mg-MOF-74 制备工艺对晶体结构和吸附性能的影响, 确定了最佳晶化温度, 结合参考文献制定整体制备工艺。参数如下: 晶化时间 24 h, 晶化温度 125 °C, 金属源与有机配体摩尔比为 3.3: 1, 反应物浓度为 0.04 mol/L, 甲醇溶液洗涤, 活化温度 200 °C。最佳工艺条件下材料的综合性能如下。

### 1. 官能团分析

图5是最佳条件下制备的 Mg-MOF-74 的傅里叶红外光谱图, 除了少量杂峰外, 包含有机配体 (DOBDC) 的全部官能团吸收峰, 以及有机配体与金属镁离子配位形成的 Mg-O 键吸收峰, 说明制备条件下晶体结构完整良好。其中 585 cm<sup>-1</sup> 和 490 cm<sup>-1</sup> 处峰值为 Mg-O 键吸收峰。892 cm<sup>-1</sup> 和 823 cm<sup>-1</sup> 吸收峰为有机配体苯环上的 C-H 伸缩振动峰, 苯环 C=C 双键吸收峰在 1425 cm<sup>-1</sup>

处。配体 C=O 键吸收峰对应于 1580 cm<sup>-1</sup> 处, 但由于共轭效应产生微小移动, 1214 cm<sup>-1</sup> 处则为配体 C-O 键吸收峰。由于样品测试过程不可避免吸附水蒸气, 其中 3428 cm<sup>-1</sup> 对应水的 O-H 键伸缩振动峰。另外可能由于溶剂分子的残留, 检索出 C-N 键的吸收峰 (1123 cm<sup>-1</sup>), 但强度很低, 说明样品活化较为彻底。具体 FTIR 光谱特征峰的归属在表 2 中列出。

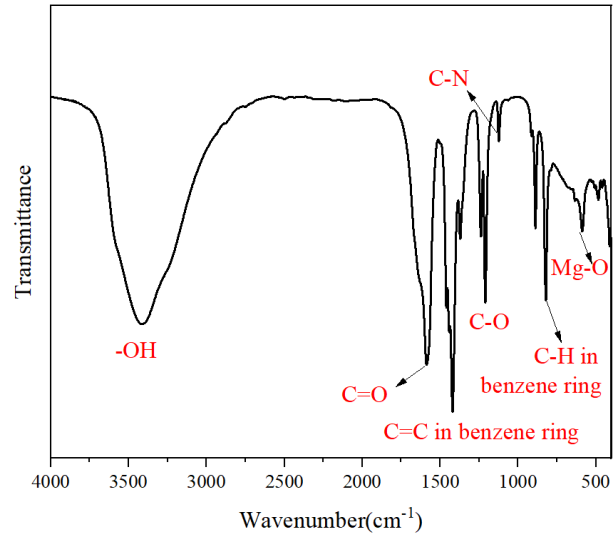


图5 Mg-MOF-74 的红外图谱

表 2 FT-IR 峰的位置 (cm<sup>-1</sup>) 和归属

归属	-OH	C=O	C=C	C-O	C-N	C-H	Mg-O
位置 (cm <sup>-1</sup> )	3428	1580	1425	1214	1123	892 823	585 490

### 2. 最佳条件样品对冶金煤气主成分的吸附性能分析

冶金煤气主要是以 CO<sub>2</sub>、CO 和 N<sub>2</sub> 为主的混合气体。吸附剂不仅要有较高的吸附容量, 还需具备较高的分离选择性, 才能应用于真实环境, 综合评判 Mg-MOF-74 在冶金煤气中碳捕集的应用潜力及改进方向。

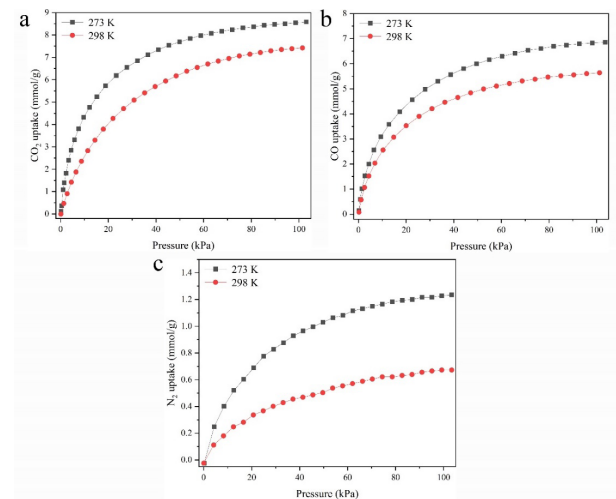


图6 Mg-MOF-74 在不同温度下对 (a) CO<sub>2</sub>、(b) CO 和 (c) N<sub>2</sub> 吸附等温线

图6为 Mg-MOF-74 在 273K、298K 时对 CO<sub>2</sub>、CO 和 N<sub>2</sub> 的吸附等温线。由于吸附过程是放热反应, 所以较低的温度有利于吸附容量的提高, 从图中可以看到, 在 273K 时气体的单体吸附容量都高于 298K 时的吸附容量。Mg-MOF-74 对 CO<sub>2</sub>、CO 和 N<sub>2</sub>

的吸附容量分别为 8.5 mmol/g、6.8 mmol/g 和 0.6 mmol/g。对 CO<sub>2</sub>和 CO 的吸附容量较高，这是因为 CO<sub>2</sub>和 CO 的四级矩较大 ( $43 \cdot 10^{-27} \text{esu}^{-1}\text{cm}^{-1}$ 、 $15 \cdot 10^{-27} \text{esu}^{-1}\text{cm}^{-1}$ )，而 Mg-MOF-74 有又大量极性表面基团，产生了较强的结合能。一般认为吸附剂的最佳吸附热在 35 ~ 50 kJ/mol 较为合适，吸附热过低对应较低的吸附容量，吸附热过高则会影响脱附能耗。因此从实际应用的角度来说，Mg-MOF-74 样品吸附热一般在 40 kJ/mol，具有合适的吸附热，符合工况高吸附量低能耗的要求。但发现 Mg-MOF-74 对 CO<sub>2</sub>和 CO 的吸附容量都较高，可预测其分离性能较差，为之后的研究工作指明了方向。

三、结论

本论文以水热反应合成 Mg-MOF-74，通过梯度实验探究了晶化温度条件对 Mg-MOF-74 晶体结构和吸附性能的影响，并确定了最佳合成条件，使其更加适合冶金煤气工况下的碳捕集；探究了 Mg-MOF-74 材料在冶金煤气环境中碳捕集的应用潜力，Mg-MOF-74 对 CO<sub>2</sub>和 CO 的吸附容量较高 (8.5 mmol/g 和 6.8 mmol/g)，有利于高效吸附，但预测其 CO<sub>2</sub>/CO 吸附选择性较低，不满足一般工业分离的要求，为后续改进提供了明确研究方向，也是实现冶金煤气梯级分离必须予以解决的关键问题。

参考文献

[1] 白皓, 刘奕杰, 安海飞, 等. 缺陷多级孔 Mg-MOF-74 的制备与 CO<sub>2</sub> 吸附性能 [J]. 工业加热, 2025, 54 (05): 1-5+15.

[2] 唐磊, 王振菲, 李聪利, 等. Co-MOF-74 和 Mg-MOF-74 的 CO 工作吸附容量及操作条件 [J]. 化工学报, 2025, 76 (05): 2279-2293.

[3] 李婕, 刘佳祥, 陶文铨, 等. 分子模拟研究 Mg-MOF-74 吸附工业废气中的 CS<sub>2</sub> [J]. 工程热物理学报, 2024, 45 (12): 3777-3782.

[4] 安海飞. 用于冶金煤气 CO<sub>2</sub> 捕集的吸附材料制备与分离性能研究 [D]. 北京科技大学, 2024. DOI:10.26945/d.cnki.gbjku.2024.000234.

[5] 纪茜, 刘伟, 肖天铸, 等. 镁合金表面 MgF<sub>2</sub>/Mg-MOF-74@壳聚糖涂层的制备及性能 [J]. 电镀与精饰, 2023, 45 (11): 32-39.

[6] 凌洁, 周安宁, 王文珍, 等. Cu/Mg 比对 Cu/Mg-MOF-74 的 CO<sub>2</sub> 吸附性能的影响 [J]. 无机材料学报, 2023, 38 (12): 1379-1388.

[7] 宋修铎, 蔡哲, 李晓云, 等. Mg-MOF-74 在 Knoevenagel 缩合反应中的催化性能研究 [J]. 无机盐工业, 2022, 54 (02): 111-116. DOI:10.19964/j.issn.1006-4990.2021-0326.

[8] 杨家佳, 丁玉栋, 廖强, 等. 合成前氨基改性 Mg-MOF-74 吸附分离 CO<sub>2</sub> 性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40 (02): 435-441.

[9] HENKELIS S E, VORNHOLT S M, CORDES D B, et al. A single crystal study of CPO-27 and UTSA-74 for nitric oxide storage and release[J]. Crystengcomm, 2019, 21(12): 1857-1861.



# PLC 控制在智能汽车机电系统中的应用

张娜, 何斌

西安明德理工学院, 陕西 西安 710100

DOI:10.61369/ERA.2025100009

**摘 要 :** 本文深入探讨 PLC 控制在智能汽车机电系统中的应用。首先阐述 PLC 控制技术原理与特点, 分析智能汽车机电系统对控制技术需求。接着详细介绍 PLC 在智能汽车动力、底盘、车身等机电系统中的具体应用, 包括发动机与电机控制、制动与转向系统控制、车窗与座椅调节等。同时分析应用中面临的挑战, 如通信实时性、网络安全性等。最后对未来发展进行展望, 强调 PLC 控制在推动智能汽车发展中的重要作用。

**关 键 词 :** PLC 控制技术; 智能汽车; 机电系统; 应用

## Application of PLC Control Technology in Intelligent Vehicle Electromechanical Systems

Zhang Na, He Bin

Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an, Shaanxi 710100

**Abstract :** This paper thoroughly explores the application of PLC control technology in intelligent vehicle mechatronic systems. It first explains the principles and characteristics of PLC control technology and analyses the control technology requirements of intelligent vehicle mechatronic systems. It then provides a detailed introduction to the specific applications of PLC in the power, chassis, and body mechatronic systems of intelligent vehicles, including engine and motor control, braking and steering system control, and window and seat adjustment. It also analyses the challenges faced in these applications, such as communication real-time performance and network security. Finally, it looks ahead to future trends and emphasises the important role of PLC control technology in driving the development of intelligent vehicles.

**Keywords :** PLC control technology; intelligent vehicles; mechatronic systems; applications

## 引言

在科学技术迅猛发展的今天, 智能汽车已经成为了汽车行业的一个重要发展方向。智能汽车集先进传感器技术, 通信技术和自动控制技术于一体, 使汽车智能化, 自动化行驶。在智能汽车的诸多关键技术当中, 机电系统能否高效、稳定地工作是非常关键的, 其中 PLC 控制技术以其特有的优点被广泛地应用于智能汽车机电系统当中。深入研究智能汽车机电系统 PLC 控制技术的运用, 对于提高智能汽车性能和促进汽车行业发展都有着十分重要的作用。

## 一、PLC 控制技术原理

PLC (可编程逻辑控制器) 是一个专门为工业应用场景打造的数字计算操作电子系统。该系统的关键组件涵盖了中央处理器 (CPU)、存储设备、输入输出 (I/O) 接口以及电源模块等多个部分。工作流程分为输入采样, 程序执行, 输出刷新 3 个环节。输入采样阶段 PLC 从输入接口获取现场各传感器, 开关和其他输入设备信号状态并保存到输入映像寄存器中; 在程序执行阶段, CPU 根据用户事先准备好并保存于存储器内的程序执行对输入映像寄存器及其他内部寄存器的数据读取, 逻辑运算, 算术运算及其他处理; 在程序的输出刷新过程中, CPU 会把程序的执行结果保存到

输出映像寄存器中, 并利用输出接口来驱动如继电器、接触器和电机等外部执行部件, 从而达到对目标对象的精确控制。<sup>[1]</sup>

## 二、智能汽车机电系统对控制技术的需求

### (一) 智能化需求

智能汽车要求具有自动驾驶, 智能巡航, 自动泊车等智能功能, 而这一切都要靠机电系统精确控制与协同工作。比如自动驾驶功能要求基于传感器采集到的道路信息, 汽车周边环境信息来对汽车行驶速度, 行驶方向和制动进行实时准确地控制, 它要求控制技术能对海量复杂的信息进行迅速的处理和精确的控制指令

输出。<sup>[2]</sup>

## （二）可靠性需求

车辆在运行时机电系统是否可靠直接影响行车安全。智能汽车机电系统处于高温,低温,潮湿,电磁干扰等复杂多样的环境中工作,需要有很高的可靠性与稳定性才能保证系统能够在多种工况中正常运行。控制技术需要具有较强的抗干扰能力和故障自诊断及容错处理的能力,以确保系统的可靠工作。

## （三）实时性需求

智能汽车机电系统对控制响应速度的要求是非常高。在汽车运行期间,当发生紧急情况时,例如前面突然遇到障碍物和汽车失控时,控制系统都要在极短的时间内作出响应,实施相应的控制动作如紧急制动和调整行驶方向以避免意外。所以控制技术要求数据处理速度快、实时控制能力强,以适应智能汽车实时性要求苛刻的特点。

## （四）集成化需求

智能汽车机电系统由动力系统,底盘系统和车身系统几个子系统组成,各个子系统需要密切的协同工作。为了改善系统的整体性能与可靠性、降低成本与体积,机电系统对控制技术有集成化的要求。控制技术应对各个子系统进行有效整合与统一管理,并通过通信网络对各个子系统进行数据共享与协同控制。<sup>[3]</sup>

# 三、PLC 控制在智能汽车机电系统中的具体应用

## （一）在动力系统中的应用

### 1. 发动机控制

传统燃油汽车发动机控制系统,可以采用 PLC 对发动机点火系统,燃油喷射系统和进气控制系统进行控制。通过实时监控和分析发动机的运行参数,例如转速、温度和压力等,PLC 能够根据预定的控制策略精确地控制点火的时刻、燃油喷射量与进气量共同作用,使得发动机能够在多种运行条件下保持较好的动力性能,燃油经济性与排放性能。比如当发动机处于怠速工况时,PLC 会依据发动机转速的反馈信号自动调整节气门开度及燃油喷射量以维持发动机怠速时的稳定性;加速工况时,PLC 依据驾驶员加速踏板的位置信号迅速增大燃油喷射量以提高发动机的输出功率,从而实现汽车的快速顺畅加速。<sup>[4]</sup>

### 2. 电机控制

新能源汽车的动力源以电机为主。利用 PLC 可以对电机进行转速,转矩,转向控制。PLC 在与电机控制器协同工作时,会根据车辆的行驶状况和驾驶员的操作意向,例如加速、减速或倒车等,向电机控制器发出相应的控制命令,对电机输入电压,电流及频率进行调整,以达到电机高效平稳运行。以电动汽车为例,当电动汽车运行时,PLC 基于车速传感器及加速踏板位置传感器的信号对电机输出转矩进行准确控制,使得汽车在各种道路条件及

行驶需求下均能维持适当的速度及动力性能;当汽车制动时,PLC 也可以控制电机回收能量,把汽车的动能转换成电能储存于电池内,从而提高了能源的利用效率。

## （二）在底盘系统中的应用

### 1. 制动系统控制

PLC 是智能汽车制动系统的核心。在防抱死制动系统 (ABS) 的运行中,PLC 利用轮速传感器来实时监控车轮的转速。一旦检测到车轮即将被抱死,PLC 会立即向制动压力调节器发送紧急指令,本实用新型对制动管路的压力进行了调整,使得车轮始终处于滚动的状态,从而避免了因车轮抱死而造成的汽车失控的情况发生,增加了制动的安全性与稳定性。在电子稳定程序 (ESP) 里,PLC 整合了车辆的各种传感器信号,如横向加速度、转向角和车速,以此来评估车辆的行驶状况是否处于稳定状态,在发现汽车有侧滑和甩尾的不稳定趋势的情况下,PLC 会自动作用在对应的车轮上进行制动以调整发动机的输出转矩来修正汽车的行驶姿态以维持汽车行驶的稳定性的。<sup>[5]</sup>

### 2. 转向系统控制

在电动助力转向系统 (EPS) 的运行中,PLC 依据车速传感器、转向角传感器以及转矩传感器的信号,准确地计算出所需的助力转矩,并且控制助力电机进行相应助力输出,使得驾驶员转向过程中更方便和灵活。速度更高时,由 PLC 控制的助力电机给予更大的帮助,降低司机的转向操作力;在速度比较高的情况下,PLC 降低了助力电机的输出助力,使得司机的转向手感更加冷静,增加了汽车高速行驶时的安全性。另外,PLC 能够实现主动转向的功能,并根据汽车的行驶状态及道路情况自动调节转向角度以改善汽车的操控性能及行驶的稳定性的。

## （三）在车身系统中的应用

### 1. 车窗控制

PLC 能够对智能汽车车窗进行自动控制。通过在车门处设置车窗控制按钮及车辆中央控制系统,使 PLC 收到车窗升降指令后控制车窗电机正转或反转以达到车窗升降及停车的目的。同时 PLC 可以集成防夹功能并通过车窗玻璃表面的红外传感器或者压力传感器对车窗升起时是否有障碍物进行监控,在发现障碍物后,PLC 马上控制车窗电机反转以降低车窗的高度,以免夹着乘客。<sup>[6]</sup>

### 2. 座椅调节控制

在智能汽车的座椅调节系统设计中,PLC 能够根据驾驶员或乘客的指令来控制座椅电机的运行,从而实现座椅的前后移动、上下升降和靠背角度的调整等多项功能。在多台座椅电机共同工作的情况下,利用 PLC 进行编程,实现了对每台电机的精准控制,保证了座椅调节动作流畅,精准,和谐。另外,部分高级座椅调节系统具有记忆功能,通过 PLC 可以将驾驶员或者乘客设置的座椅位置参数保存至存储器,下一次使用后可以一键回复至预设位置。

### 3. 照明系统控制

PLC 在智能汽车照明系统中可以实现智能控制。当汽车运行时,PLC 依据环境光线传感器所探测光线强度信号自动控制前照灯,尾灯及雾灯的启闭。比如在环境光线比较暗的情况下,PLC 会自动打开前照灯;车辆驶入隧道后,PLC 还可以及时的控制前照灯点亮。另外,PLC 可以实现灯光亮度调节,转向灯闪烁频率控制,提升照明系统智能化水平及行车安全性。<sup>[7]</sup>

## 四、PLC 控制在智能汽车机电系统应用中面临的挑战

### (一) 通信实时性问题

智能汽车机电系统中各子系统之间需要实时、准确地进行数据通信和信息交互,以实现协同控制。然而,PLC 在与其他设备进行通信时,可能会受到通信协议、网络带宽、传输延迟等因素影响,导致通信实时性难以满足智能汽车对快速响应的严格要求。例如,在自动驾驶过程中,传感器数据需及时传输给 PLC 进行处理和决策,若通信延迟过大,可能导致车辆无法及时对突发情况做出反应,引发安全事故。

### (二) 网络安全性问题

随着智能汽车和外界网络的联系越来越密切,使得 PLC 控制系统受到越来越大的网络安全威胁。黑客会通过网络对 PLC 控制系统进行攻击,篡改控制程序,盗用车辆信息等,造成车辆机电系统的故障并危害行车安全。如何确保 PLC 控制系统的网络安全,避免黑客攻击及数据泄露是 PLC 控制技术运用于智能汽车机电系统中急需解决的一个重要课题。<sup>[8]</sup>

### (三) 系统集成复杂性问题

智能汽车的机电系统构成了一个高度复杂的综合体系,包括多个子模块和大量的硬件设备。PLC 控制技术融入智能汽车机电系统,需兼顾对不同种类传感器,执行器,控制器及其他设备兼容性及协同工作能力。由于每台设备都可能出自不同的厂商,所使用的通信协议与接口标准也不相同,这样就加大了系统整合的复杂程度与难度,易造成系统整合时通信故障,数据传输错误。

### (四) 成本问题

尽管 PLC 自身价格比较低廉,但是在智能汽车机电系统的运用上,为了适应汽车行业对于可靠性,安全性以及性能等各方面的苛刻要求,要求使用高性能,高可靠性 PLC 产品和相关配套设备等,都会加大系统成本。另外,PLC 控制系统在研制,调试及维修过程中还需专业技术人员参与,人力成本比较高。如何在保证系统性能与可靠性的同时减少 PLC 控制技术应用于智能汽车机电系统的成本是汽车制造商必须思考的问题。

## 五、PLC 控制在智能汽车机电系统应用中面临挑战的对策

### (一) 提升通信实时性的对策

考虑到 PLC 通信的实时性,可以在软硬件上加以改进。在硬

件方面,利用千兆以太网接口、光纤传输介质等高速通信接口以及高带宽网络设备降低信号传输延迟;对 PLC 内部数据处理电路进行了优化,促进了 CPU 的运算速度和数据处理效率的提高。在软件方面,我们选择了具有高实时性的通信协议,例如时间敏感网络(TSN)协议,这种协议能够对网络流量进行精准的调度,确保关键数据得到优先的传输;制定了高效数据处理算法对传感器所采集到的数据进行预处理与压缩以降低数据传输量和传输时间;设置合理通信调度机制并按照数据优先级及紧急程度合理安排数据传输顺序及时间以保证自动驾驶及其他关键数据能及时到达 PLC 处理。<sup>[9]</sup>

### (二) 保障网络安全性的对策

针对 PLC 控制系统网络安全威胁需要建设多层次安全防护体系。在网络的边缘部署了防火墙、入侵检测系统(IDS)以及入侵防御系统(IPS),这些系统能够对进出的网络流量进行实时的监控和筛选,从而避免非法的访问和恶意的攻击行为;利用加密手段,对 PLC 和其他设备间的数据传输进行了加密操作,例如采用 SSL/TLS 协议来加密通讯数据,确保数据在传输时不被窃取或篡改;实现了 PLC 控制程序及配置文件的数字签名及加密存储,避免了非法篡改程序;定期开展 PLC 控制系统安全漏洞扫描、风险评估等工作,及时发现、修补系统安全漏洞;在强化网络安全管理、建立严格的接入控制策略、约束仅有授权人员才能接入并运行 PLC 控制系统的前提下,对运行人员开展网络安全培训以增强他们的安全意识与防范能力。

### (三) 降低系统集成复杂性的对策

解决系统集成复杂性需要推进行业标准化进程,采用开放的系统架构。汽车行业要加快统一通信协议标准,接口标准及数据格式标准的建立,以保证不同厂商制造的 PLC、传感器,执行器及其他设备之间能互操作;该系统采用了开放式的架构设计,例如基于以太网的车载网络结构,这样可以实现不同设备间的即插即用功能,从而降低了系统集成的难度;编制了通用设备驱动程序及中间件以实现设备及 PLC 的快速集成及通讯;系统集成之前,对其进行了全面的兼容性测试与模拟调试以验证设备间通信与协同工作的能力,以便预先发现与解决其中可能出现的问题;建立系统集成技术规范和流程,指导开发人员进行规范操作,提高系统集成效率和质量。<sup>[10]</sup>

### (四) 控制成本的对策

为了减少 PLC 控制技术应用于智能汽车机电系统的成本,可以从产品选型,开发流程以及技术创新入手。在产品选型时,充分考虑性能与成本等因素,选用性价比较好的 PLC 产品及配套设备,以免过分追求高性能,增加无谓的费用;对 PLC 控制系统设计方案进行了优化,减少了不必要的功能模块以及复杂电路的设计,简化了系统结构;从开发流程上看,使用标准化开发工具与方法提高了开发效率、缩短了开发周期、减少了人力成本;将仿真技术应用于 PLC 控制系统的虚拟调试中,缩短了现场调试的时

间,降低了费用;鼓励技术创新,开发拥有自主知识产权的 PLC 产品及控制技术,在减少对进口产品依赖的前提下,通过大规模生产来降低产品成本;建立了成本管理体系,实现了 PLC 控制系统在设计,研发到投产,维修整个过程中的成本监控与管理,发现和控制了成本超支现象。

六、结论

总之,PLC 控制技术具有可靠性高,灵活性好,编程方便,通信能力高等优点,被广泛运用于智能汽车机电系统,为智能汽

车动力系统,底盘系统,车身系统等高效,稳定地工作提供强有力的支撑。但在其应用的过程中面临着通信的实时性,网络的安全性,系统集成的复杂性以及成本方面的挑战。面对挑战,通过引入时间敏感网络、构建多层次安全防护体系、推进标准化建设及优化成本管理策略等措施,可有效提升 PLC 控制技术的适用性与竞争力。所以深入研究并不断优化 PLC 控制技术对智能汽车机电系统的运用有着现实意义与广阔前景。

参考文献

[1] 王强 .PLC 控制在智能汽车动力机电系统中的优化应用 [J]. 汽车科技 ,2023,(03):87-90.

[2] 李华 ,张伟 .PLC 技术在智能汽车底盘机电系统稳定性控制中的实践 [J]. 现代制造技术与装备 ,2022,(08):189-191.

[3] 陈丽 .PLC 控制技术于智能汽车车身机电系统自动化的实现路径 [J]. 电子制作 ,2022,(15):66-68.

[4] 赵刚 .基于 PLC 控制的智能汽车车窗与座椅机电系统设计 [J]. 机械制造与自动化 ,2021,(06):192-194.

[5] 孙悦 .PLC 控制在智能汽车照明机电系统智能化调控中的应用研究 [J]. 照明工程学报 ,2021,(S1):123-126.

[6] 吴迪 .PLC 控制技术助力智能汽车制动机电系统性能提升 [J]. 汽车实用技术 ,2020,(24):156-158.

[7] 周宁 .PLC 在智能汽车转向机电系统精准控制中的应用分析 [J]. 机电工程技 ,2020,(11):145-147.

[8] 刘辉 .智能汽车发动机机电系统中 PLC 控制策略优化 [J]. 内燃机与配件 ,2020,(18):217-218.

[9] 郭明 .PLC 控制在智能汽车电机调速机电系统的应用实践 [J]. 电气传动自动化 ,2020,(04):34-36.

[10] 张萌 .PLC 控制在智能汽车综合机电系统集成中的应用探讨 [J]. 自动化应用 ,2020,(07):45-47.



# 土地工程中三维激光扫描技术在地形测绘的精度优化策略

梁源

广西容县自良镇乡村建设综合保障中心，广西 玉林 537516

DOI:10.61369/ERA.2025100010

**摘要：** 随着三维激光扫描技术在土地工程地形测绘中的广泛应用，其测绘精度成为保障工程质量的关键。本文系统分析了设备、数据采集、数据处理以及控制与检核等层面影响三维激光扫描地形测绘精度的因素，针对这些影响因素，分别从多个方面提出精度优化策略。同时深入探讨了各策略间的关联性与互补性，提出建立系统化的精度优化管理流程，并根据不同土地工程类型的需求，对精度优化策略进行适应性调整。研究成果为提升三维激光扫描地形测绘精度、保障土地工程质量提供了理论依据与实践指导。

**关键词：** 三维激光扫描技术；地形测绘；精度影响因素；精度优化策略

## Optimisation Strategies for Precision in Topographic Surveying Using 3D Laser Scanning Technology in Land Engineering

Liang Yuan

Guangxi Rongxian County Ziliang Town Rural Construction Comprehensive Support Centre, Yulin, Guangxi 537516

**Abstract：** With the widespread application of 3D laser scanning technology in topographic surveying for land engineering projects, surveying accuracy has become a critical factor in ensuring engineering quality. This paper systematically analyses the factors influencing the accuracy of 3D laser scanning topographic surveying, including equipment, data collection, data processing, and control and verification. Based on these influencing factors, the paper proposes accuracy optimisation strategies from multiple perspectives. Additionally, the paper delves into the interconnections and complementarities among these strategies, proposing the establishment of a systematic precision optimisation management process. It also suggests adaptive adjustments to precision optimisation strategies based on the specific requirements of different types of land engineering projects. The research findings provide theoretical foundations and practical guidance for enhancing the precision of 3D laser scanning topographic surveying and ensuring the quality of land engineering projects.

**Keywords：** 3D laser scanning technology; topographic surveying; precision-influencing factors; precision optimisation strategies

## 引言

近年来三维激光扫描技术凭借其非接触式测量、数据采集速度快、能真实还原地形地貌等优势，逐渐取代传统测绘手段，成为土地工程地形测绘的重要技术支撑。然而随着土地工程项目对地形测绘精度要求的不断提高，三维激光扫描技术在实际应用中暴露出的精度问题日益凸显。测绘精度不仅关系到地形数据的准确性，更直接影响土地工程后续环节的科学性与可靠性。因此深入分析影响三维激光扫描地形测绘精度的因素，并针对性地提出优化策略，成为保障土地工程质量、推动行业技术进步的关键课题。

## 一、影响三维激光扫描地形测绘精度的因素分析

### （一）设备层面因素

三维激光扫描技术（3D Laser Scanning）是一项新兴的测量技术，发展于上世纪九十年代，又被称为“实景复制技术”，

具有无需接触、准确可靠、快速高效获取三维空间数据信息的能力<sup>[1]</sup>。设备的性能与状态是影响三维激光扫描技术测绘精度的基础，激光扫描仪的测距精度直接决定了测量点与仪器之间距离的准确性。不同型号的扫描仪，其测距误差存在显著差异，高精度的扫描仪能够提供更精确的距离数据，而测距误差较大的设备则

会导致地形测绘结果出现偏差。扫描仪的角度分辨率影响着点云数据的密度和分布均匀性,角度分辨率越低,在相同测量距离下,扫描获取的点云越稀疏,难以完整、准确地反映地形细节,从而降低测绘精度<sup>[2]</sup>。此外,仪器的稳定性和校准情况也至关重要,若扫描仪在使用过程中发生震动、位移,或者长时间未进行校准,其内部的坐标系和测量参数会发生变化,使得测量结果出现系统性误差,严重影响地形测绘的精度。

### (二) 数据采集层面因素

数据采集过程中的操作和环境条件对测绘精度有着直接影响,扫描距离和角度的选择不当,会导致测量误差增大。当扫描距离过远时,激光信号在传输过程中会发生衰减,受到环境干扰的可能性增加,从而降低测距精度;而扫描角度过大,可能会产生扫描盲区或数据重叠不充分的情况,影响点云数据的完整性和准确性<sup>[3]</sup>。另外扫描环境中的光照、大气条件等因素也不容忽视,强烈的光照可能会干扰激光信号的接收,导致数据采集错误;空气中的尘埃、水汽等会对激光产生散射和吸收作用,改变激光的传播路径和强度,进而影响测量精度。同时扫描过程中的人为操作因素也会带来误差,如扫描路线规划不合理,导致部分区域漏扫或重复扫描次数不足,使得点云数据存在缺失或密度不均匀的问题,最终影响地形测绘精度。

### (三) 数据处理层面因素

数据处理是将原始点云数据转化为可用地形测绘成果的关键环节,处理方法和技术的直接关系到测绘精度。在点云滤波过程中,如果滤波参数设置不合理,可能会误删有效地形点,或者无法去除噪声点和非地形点,导致地形模型失真<sup>[4]</sup>。数据配准环节中,若采用的配准算法精度不高,或者控制点选取不当,会使不同测站获取的点云数据无法准确拼接,产生拼接误差,影响地形的整体精度。此外,在地形建模过程中,选择的建模方法和参数也会对测绘结果产生影响。例如采用简单的插值方法进行建模,可能无法准确反映复杂地形的真实形态,而过于复杂的建模方法又可能引入不必要的误差,导致测绘精度下降。

### (四) 控制与检核层面因素

控制与检核是保证地形测绘精度的重要手段,若控制与检核措施不到位,会使测绘误差无法及时发现和纠正<sup>[5]</sup>。在控制测量方面,控制点的数量和分布不合理,会导致无法有效约束测量误差,使得测量结果出现偏差。例如控制点数量过少,无法满足平差计算的要求;控制点分布不均匀,在地形复杂区域控制点缺失,会导致该区域的测量精度无法得到保障。在检核过程中,如果检核方法不完善,如仅进行少量的抽检,或者检核标准不严格,可能无法发现存在的误差,使得错误的测绘成果流入后续应用环节,造成严重后果。

## 二、三维激光扫描地形测绘精度优化策略

### (一) 设备选型与维护优化策略

在设备选型阶段,应根据测绘项目的实际需求与精度标准,优先选择测距精度高、角度分辨率优的激光扫描仪<sup>[6]</sup>。例如对于高

精度地形测绘项目,可选用具有毫米级测距精度的扫描仪,以确保测量点距离数据的准确性;同时角度分辨率需满足地形细节捕捉要求,保证点云数据密度与分布均匀性。此外,设备的稳定性和环境适应性也是选型关键,优先考虑具备防震、防尘、防水功能的仪器,以适应复杂多变的野外作业环境<sup>[7]</sup>。在设备维护方面,建立定期校准与检查制度至关重要,依据仪器使用频率与工作环境,设定合理的校准周期,确保仪器内部坐标系和测量参数的准确性。每次作业前后,对设备进行全面检查,包括仪器的固定装置是否牢固、激光发射与接收部件是否正常等,及时发现并处理设备潜在问题,减少因设备故障或性能下降导致的测量误差。

### (二) 数据采集方案优化策略

优化数据采集方案,首先要合理规划扫描路线与站点布局。在作业前,需对测绘区域进行详细踏勘,结合地形地貌特征、通视条件等因素,确定最佳扫描站点位置与扫描路线,确保地形区域全覆盖且数据重叠度合理,避免出现漏扫或扫描盲区。同时严格控制扫描距离与角度,根据仪器性能和地形复杂程度,科学设置扫描参数,在保证数据质量的前提下,提高采集效率。此外,针对环境因素的影响,可采取相应的应对措施。在光照强烈时段,尽量选择阴影区域作业或采用遮光设备减少光照干扰;在大气条件较差时,如大雾、沙尘天气,可暂停作业或增加扫描次数,以提高数据采集的准确性。同时加强操作人员培训,规范操作流程,减少因人为操作不当导致的误差,确保数据采集的规范性与可靠性。

### (三) 数据处理流程优化策略

数据处理流程优化需从点云滤波、数据配准、地形建模等多个环节入手。在点云滤波环节,结合地形特征与数据特点,选择合适的滤波算法,并通过试验调整滤波参数,在有效去除噪声点和非地形点的同时,最大限度保留有效地形点,确保地形模型的真实性和完整性<sup>[8]</sup>。数据配准过程中,采用高精度配准算法,并合理布设控制点。通过增加控制点数量、优化控制点分布,提高点云数据拼接的准确性;同时利用多余观测数据进行平差计算,进一步降低拼接误差。在地形建模方面,根据地形复杂程度,选择适宜的建模方法,如对于简单地形,可采用基于规则格网的建模方法;对于复杂地形,采用三角网建模方法,并合理设置建模参数,以精确反映地形真实形态,提升测绘成果精度。

### (四) 精度控制与评估优化策略

完善精度控制体系,需科学布设控制点,确保控制点数量充足且分布均匀,尤其在地形复杂区域,应加密控制点布设,为测量误差约束提供可靠依据。同时建立严格的检核制度,采用多种检核方法相结合的方式,如内业数据检查、外业实地抽检等,对测绘成果进行全方位质量检测<sup>[9]</sup>。在精度评估方面,制定明确的精度评估指标与标准,结合项目需求,从平面精度、高程精度、点云密度等多个维度对测绘成果进行量化评估。通过与已知高精度数据对比分析,及时发现精度问题并采取针对性改进措施,确保测绘成果满足项目要求。

## 三、精度优化策略的综合应用与协同

### (一) 策略间的关联性与互补性

设备选型与维护优化策略是基础,为数据采集和处理提供可

靠保障。高精度、性能稳定的设备能够获取高质量的原始点云数据，降低数据采集环节的误差风险，减少数据处理过程中因数据质量问题导致的误差修正工作。例如稳定且测距精度高的扫描仪，采集的数据无需在点云滤波时花费过多精力剔除因设备误差产生的大量噪声点，为后续数据配准和地形建模节省时间与资源，也为精度控制与评估提供了可靠的数据基础<sup>[10]</sup>。数据采集方案优化策略是关键环节，直接影响原始数据质量，与数据处理流程优化策略紧密相连。合理的扫描路线和站点布局能确保点云数据完整、均匀，减少数据配准过程中因数据缺失或重叠不合理导致的拼接误差，同时也便于在点云滤波时保留有效地形点。而数据处理流程优化策略则是对采集数据的深加工，通过合适的算法和参数设置，将高质量的原始数据转化为精确的地形模型，进一步提升测绘精度，弥补数据采集过程中可能存在的细微误差。精度控制与评估优化策略贯穿整个测绘过程，对其他策略起到监督和反馈作用。科学的控制点布设和严格的检核制度，能及时发现设备性能、数据采集和处理环节存在的问题，从而反向推动设备选型与维护策略的改进、数据采集方案的优化以及数据处理方法的完善，形成闭环管理，确保各策略协同发挥作用，共同提升测绘精度。

### （二）建立系统化的精度优化管理流程

建立系统化的精度优化管理流程，需以项目目标为导向，将各环节优化策略有机整合。在项目前期准备阶段，依据测绘精度要求和项目特点，结合设备选型与维护优化策略，选择合适的激光扫描设备，并对设备进行全面校准和检查；同时开展测绘区域踏勘，运用数据采集方案优化策略，制定详细的扫描路线和站点布局方案，确定合理的扫描参数。在数据采集过程中，严格按照既定方案执行，实时监控设备运行状态和数据采集质量，如发现问题，及时依据设备维护策略和数据采集优化策略进行调整。数据采集完成后，进入数据处理阶段，运用数据处理流程优化策略，依次进行点云滤波、数据配准和地形建模，每一个步骤都需遵循精度控制与评估优化策略，对处理结果进行阶段性检查和评估，确保每一步的数据处理都符合精度要求。项目后期，通过精

度控制与评估优化策略，对最终测绘成果进行全面质量检测和精度评估，将评估结果反馈至整个管理流程，为后续类似项目提供经验参考，持续优化精度管理流程。

### （三）面向不同土地工程类型的策略适应性调整

不同土地工程类型对地形测绘精度的需求和关注重点存在差异，需对精度优化策略进行适应性调整。例如在土地平整工程中，更注重地形高程精度，在设备选型时应优先选择高程测量精度高的扫描仪；数据采集时，在地形起伏较大区域增加扫描密度和控制点布设；数据处理阶段，重点优化地形建模中高程数据的处理算法，确保地形模型的高程信息准确，为土地平整方案设计提供可靠依据。而在土地规划工程中，对地形的整体形态和平面位置精度要求较高，设备选型需兼顾平面精度和角度分辨率；数据采集时，确保测绘区域全覆盖且数据拼接无缝；数据处理过程中，加强数据配准精度，采用高精度的平面坐标转换算法，使地形模型能够准确反映土地现状，为规划设计提供精准的基础数据。在地质灾害监测类土地工程中，则需强调数据采集的时效性和设备的稳定性，可选择具备实时扫描和远程传输功能的设备，同时增加数据采集频率，及时捕捉地形变化信息，数据处理着重分析地形变化趋势，为灾害预警提供支持。

## 四、结束语

本文系统分析了设备、数据采集、数据处理以及控制与检核等多层面因素对三维激光扫描地形测绘精度的影响，提出了涵盖设备选型与维护、数据采集方案、数据处理流程以及精度控制与评估的优化策略，并深入探讨了策略间的协同应用及面向不同土地工程类型的适应性调整方法。随着土地工程领域的不断发展和技术创新，对地形测绘精度的要求将持续提高。后续研究可进一步结合人工智能、大数据等前沿技术，探索更高效、智能的精度优化策略，同时加强不同土地工程场景下的实践验证与策略迭代，推动三维激光扫描技术在土地工程地形测绘中发挥更大价值，助力土地工程行业向更高质量、更智能化的方向迈进。

## 参考文献

- [1] 许梁. 基于三维激光扫描技术的结构检测方法研究 [D]. 山东建筑大学, 2024.DOI:10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000448.
- [2] 钟磊, 苏杰. 三维激光扫描技术在建筑物立面测绘中的精度分析 [J]. 科学技术创新, 2024, (15): 131-134.
- [3] 李志远. 基于 TLS 扫描精度影响因素研究与分析 [D]. 吉林建筑大学, 2024.DOI:10.27714/d.cnki.gjljs.2024.000185.
- [4] 赵海波. 电力线路竣工验收中的高精度三维激光扫描技术应用研究 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 人工智能与工程管理学术交流会论文集. 嘉兴市众业供电服务有限公司海盐力源分公司, 2024: 108-110.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.020844.
- [5] 李鸿奎, 李静, 孔维枢. 三维激光扫描技术与传统测绘技术的精度分析 [J]. 资源导刊, 2024, (06): 44-47.
- [6] 周涛. 基于三维激光扫描技术的矿山地质测绘精度评估系统研究 [J]. 中国金属通报, 2024, (01): 138-140.
- [7] 欧阳静宣, 徐升亮, 肖礼兵, 等. 基于三维激光扫描的摩崖石刻重建技术与精度研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12): 1724-1728.DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.026.
- [8] 刘开红. 移动式三维激光扫描技术在矿山测量中的精度及误差分析 [J]. 世界有色金属, 2023, (20): 26-28.
- [9] 朱尚军, 岳迅, 李世保. 三维激光扫描作业中测量精度影响因素及控制措施 [J]. 现代矿业, 2023, 39(08): 43-46.
- [10] 鲍海恩. 基于三维激光扫描技术的矿山地质测绘精度评估系统研究 [J]. 世界有色金属, 2023, (05): 4-6.



# 电梯不同载荷下振动特性实验研究

张志维, 顾永兵\*

宁夏特种设备检验检测研究院, 宁夏 银川 750000

DOI:10.61369/ERA.2025100011

**摘 要 :** 为探究载荷变化对电梯振动特性及乘坐舒适性的影响规律, 本研究以某曳引式乘客电梯为对象, 构建覆盖空载至满载的6级载荷梯度(0%、20%、40%、60%、80%、100% 额定载荷), 通过标准砝码与人员组合精确加载, 并采用高精度加速度传感器(DT178A)采集轿厢Z向(垂直轿壁方向)振动数据。系统分析不同载荷下电梯运行时的振动加速度特征值。实验发现: 电梯振动强度与载荷呈非线性正相关; 在40%–60% 载荷区间振动速率显著提升, 其中60% 载荷时最大振动加速度达0.29g, 舒适性劣化最明显; 而100% 满载时振动曲线平缓(最大加速度0.25g)。结果表明, 特定载荷区间(尤其是60% 额定载荷)是振动控制的关键工况。本研究揭示了载荷梯度变化下振动特性的演变规律, 为电梯减振设计优化及科学载荷管理提供了理论依据与实践指导。

**关 键 词 :** 电梯振动; 载荷影响; 振动测试; 乘坐舒适性

## Experimental Study on Vibration Characteristics of Elevators under Different Loads

Zhang Zhiwei, Gu Yongbing\*

Ningxia Institute of Special Equipment Inspection and Testing, Yinchuan, Ningxia 750000

**Abstract :** To investigate the influence of load variation on elevator vibration characteristics and ride comfort, this study examines a traction passenger elevator. Six load gradients spanning from empty load to full load (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% of rated load) were implemented using a combination of standard weights and human occupants for precise loading. High-precision acceleration sensors (DT178A) were employed to collect vibration data in the Z-direction (perpendicular to the car walls). The characteristic values of vibration acceleration during elevator operation under different loads were systematically analyzed. Experimental findings reveal: elevator vibration intensity exhibits a nonlinear positive correlation with load; within the 40%–60% load range, vibration acceleration increases significantly, reaching a peak value of 0.29g at 60% load where ride comfort deterioration is most pronounced; while at 100% full load, the vibration curve stabilizes (maximum acceleration: 0.25g). Results indicate that specific load ranges – particularly 60% rated load – represent critical conditions for vibration control. This study elucidates the evolution of vibration characteristics under gradient load variations, providing theoretical foundations and practical guidance for optimizing elevator vibration-damping designs and scientific load management.

**Keywords :** elevator vibration; load effect; vibration testing; ride comfort

## 引言

随着城市化进程加速与高层建筑普及, 电梯已成为现代建筑不可或缺的垂直交通工具。乘客乘坐舒适性作为电梯核心性能指标, 直接影响用户体验与建筑价值, 而振动性能则是评价舒适性的关键因素。良好的振动舒适性不仅能提升用户满意度, 更能有效降低乘客的疲劳与不适感, 对于高层建筑中高频使用电梯的人群尤为重要。

电梯运行过程中, 载荷变化是不可避免的常态工况。不同载荷条件下, 电梯系统的动力学特性(如质量分布、导轨受力变形、驱动系统响应)将发生显著变化, 进而深刻影响其振动特性与舒适性。因此, 系统研究载荷变化对电梯振动特性的影响规律, 对于优化设计参数、改进减振措施、制定科学维护策略具有重要的理论与应用价值, 可为电梯制造与运维行业提供关键支撑。

国内外学者在电梯振动领域已开展了广泛研究。国内方面, 宋丹龙等通过导轨安装和变形误差分析, 建立了正弦激励、三角激励、

作者简介: 张志维(1992—), 男, 汉族, 甘肃武山人, 大学本科, 助理工程师, 从事特种设备检验检测工作。邮箱: 420487971@qq.com。

通讯作者: 顾永兵(1988—), 男, 回族, 宁夏银川人, 大学本科, 工程师, 过程装备与控制专业, 从事特种设备检验检测研究。邮箱: 919881845@qq.com。



阶跃激励和脉冲激励等4种导轨激励模型；通过状态空间方法求解了轿厢系统振动加速度响应，分析了导轨激励分布和模型、运行速度、导轨弹簧刚度及轿厢系统参数等因素对电梯横向振动响应的影响规律<sup>[1]</sup>；王威分析了电梯垂直方向的振动研究是提高电梯运行性能的关键，基于曳引比为2：1的电梯系统，建立垂直方向上的动力学模型，分析轿厢载重和提升高度等参数对轿厢振动的影响及参数变化时系统的谐振响应和惯性力响应<sup>[2]</sup>。国外方面取得了显著进展，Dongsheng Cong等基于O-sliceing多区域网格分层法建立三维非稳态数值模型，采用Newmark-b法求解多自由度电梯系统的振动响应<sup>[3]</sup>；Dong-Ho Yang等研究了建筑物和电梯绳索耦合振动的理论建模和实验验证。电梯绳由支撑罐笼的主绳和连接到补偿轮的补偿绳组成。电梯钢丝绳是一种低阻尼的柔性导线，因此容易产生振动。在高层建筑的情况下，绳索长度也显著增加，使电梯绳索的基频接近建筑物的基频，从而增加共振的可能性<sup>[4]</sup>。

尽管已有成果丰硕，但针对载荷连续变化与振动特性之间定量关系的系统性实验研究仍显不足，现有工作多聚焦于特定离散载荷点，缺乏对载荷梯度变化全过程中振动演变规律的深入刻画<sup>[5-7]</sup>；评价方法上，综合运用时域与频域分析进行多维度评价的研究较少。本研究旨在通过精心设计涵盖0%至100%额定载荷范围的梯度实验方案，采用测试设备与分析手段，系统探究电梯振动特性随载荷变化的规律，为电梯振动优化设计提供更全面的理论依据与实践指导。

## 一、实验设计与方法

### （一）实验对象与参数

本研究选用某品牌曳引式乘客电梯作为实验平台，其主要技术参数详见表1。

表1 实验电梯主要技术参数

额定载重量	额定运行速度	轿厢尺寸（宽×深×高）	导轨类型	曳引系统	控制方式	运行高度（总行程）
800 kg	1.0 m/s	1300 mm × 1450 mm × 2100 mm	T型钢导轨（规格T90/B）	永磁同步无齿轮曳引机	变频调速VVVF控制	12 m

### （二）加速度传感器的选型

在进行加速度测试之前，选择合适的加速度传感器至关重要。加速度传感器的选型需考虑多个因素，包括测量范围、灵敏度、频率响应、抗干扰能力等<sup>[8]</sup>，本研究对起重机空载启停加速度进行测试，为确保能够实时捕捉小车启停过程加速度，故选用

表2 实验载荷分级方案性

载荷比例	实际载荷(kg)	载荷比例	实际载荷(kg)	载荷比例	实际载荷(kg)	载荷比例	实际载荷(kg)	载荷比例	实际载荷(kg)	载荷比例	实际载荷(kg)
0%	0	20%	160	40%	320	60%	480	80%	640	100%	800

## 二、实验结果与讨论

### （一）轿厢20% 载荷

轿厢在20% 载荷下上下运行一个周期时，Y向最大振动加速度为0.22g，振动速率显著加快，加速度曲线如图2所示。

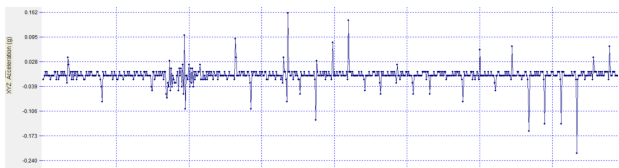


图2 轿厢20% 载荷振动加速度曲线

型号DT178A（测量范围±10g；分辨率0.00625g；最小采样率100ms；频率范围0-60Hz）加速度测试记录仪和笔记本电脑。

### （三）传感器的布置

为确保实验的准确性和全面性，传感器通过磁座分别安装于轿厢的左右轿壁（测点A和测点B），安装方向定义如1所示。



### （四）载荷分级与实施方案

为系统研究载荷影响，设计了覆盖空载至满载的6级载荷梯度（如表2）。载荷通过标准砝码与测试人员组合精确施加，测试人员均匀分布于轿厢内以避免偏载。每个载荷等级重复测试3次以确保数据可靠性及可重复性，试验分析中仅针对其中一台测试仪Z向（垂直轿壁方向）振动加速度特征值进行提取与分析。

### （二）轿厢40% 载荷

轿厢在40% 载荷下上下运行一个周期时，Y向最大振动加速度为0.26g，振动速率显著较快，加速度曲线如图3所示。

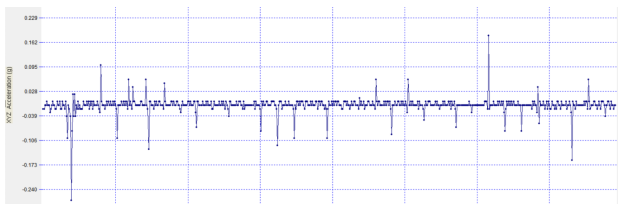


图3 轿厢40% 载荷振动加速度曲线

（三）轿厢60% 载荷

轿厢在60% 载荷下上下运行一个周期时，Y 向最大振动加速度为0.29g，振动速率显著较快，加速度曲线如图4所示。

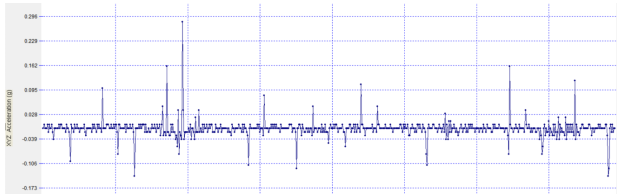


图4 轿厢 60% 载荷振动加速度曲线

（四）轿厢80% 载荷

轿厢在80% 载荷下上下运行一个周期时，Y 向最大振动加速度为0.18g，振动速率较快，加速度曲线如图5所示。

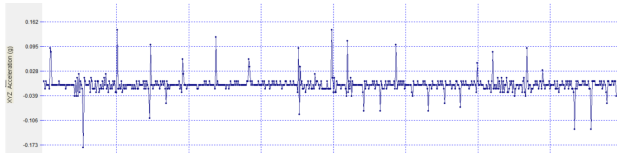


图5 轿厢 80% 载荷振动加速度曲线

（五）轿厢100% 载荷

轿厢满载（100% 载荷）上下运行一个周期时，Y 向最大振动加速度为0.25g，加速度曲线整体平缓，如图6所示。

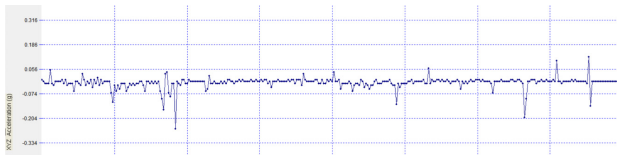


图6 轿厢 100% 载荷振动加速度曲线

（六）结果分析

通过对不同载荷条件下电梯运行的振动数据进行系统分析，

本研究揭示了电梯振动特性与载荷变化的关系规律。综合分析表明，电梯振动强度与载荷呈非线性正相关；在40%–60% 额定载荷区间，振动速率明显高于其他载荷，且在60% 载荷下振动加速度最大，舒适性显著降低。这一发现对电梯设计优化及载荷管理具有重要指导意义。

三、结论

本研究通过系统化的梯度载荷实验（0%、20%、40%、60%、80%、100% 额定载荷），结合高精度加速度传感器对电梯轿厢 Z 向（垂直轿壁方向）振动特性进行测试与分析，揭示了载荷变化对电梯振动特性及乘坐舒适性的影响规律。主要结论如下：

- （1）载荷与振动的非线性关系：电梯振动强度随载荷增加呈非线性正相关，但振动幅值变化存在显著区间性差异。
- （2）关键载荷区间识别：在 40% – 60% 额定载荷区间，电梯振动速率明显提升，其中 60% 载荷 时振动最为剧烈（最大振动加速度达 0.29g），导致乘坐舒适性显著劣化。
- （3）满载工况的稳定性：100% 额定载荷下振动曲线趋于平缓（最大加速度 0.25g），表明满载状态并非振动最恶劣工况。
- （4）建议在电梯运行管理中避免长期处于 40% – 60% 载荷区间，以提升乘客舒适性。

通过连续载荷梯度实验与多维度振动分析方法，为电梯振动控制提供了更全面的理论支撑与实践指导<sup>[9,10]</sup>。

参考文献

[1] 宋丹龙, 张鹏, 白洋洋, 等. 高速电梯系统横向动力学建模与振动特性分析 [J]. 机械设计, 2024, 41(10): 23–30.

[2] 王威. 曳引电梯轿厢垂直振动特性研究 [J]. 机械管理开发, 2024, 39(06): 24–26.

[3] Dongsheng Cong et al. Characterization of Horizontal Vibration Response of High-speed Elevator During Intersection with Counterweight after Deflector Optimization[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2025, 13(6) : 396–396.

[4] Dong-Ho Yang et al. Dynamic modeling and experiments on the coupled vibrations of building and elevator ropes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 390 : 164–191.

[5] 程红玫. 导轨支架结构参数对电梯振动抑制效果的影响分析 [J]. 高科技与产业化, 2024, 30(09): 29–31.

[6] 帅学超. 基于模型的电梯制动性能评估方法的研究 [D]. 杭州电子科技大学, 2022.

[7] 宋丹龙, 张鹏, 白洋洋, 等. 高速电梯系统横向动力学建模与振动特性分析 [J]. 机械设计, 2024, 41(10): 23–30.

[8] 韩伟, 黄奕勇, 张翔, 等. 空间对接机构碰撞试验系统的开发研究 [J]. 空间科学学报, 2013, 33(05): 548–553.

[9] 韩楠. 探究电梯系统垂直振动分析与抑制 [J]. 中国设备工程, 2024, (16): 100–101.

[10] 罗富方. 曳引驱动乘客电梯振动监测方法及研究进展 [J]. 机械研究与应用, 2024, 37(03): 166–172.

# 食品添加剂对面包酵母发酵特性的影响机制分析

高骏伟

佛山市质量和标准化研究院, 广东 佛山 528041

DOI:10.61369/ERA.2025100013

**摘 要：** 面包制作中, 酵母发酵是影响面包品质的核心环节, 食品添加剂的科学使用能有效调控酵母发酵特性。本研究全面剖析不同种类食品添加剂对面包酵母发酵特性的作用机制, 先阐述酵母发酵的基本原理及食品添加剂的应用现状, 再深入探究糖类、盐类、乳化剂、酶制剂等添加剂通过渗透压调节、代谢路径干预、界面性质改变等途径, 对酵母生长代谢、产气能力、发酵稳定性产生影响的机制, 同时提出食品添加剂在面包制作中的优化应用策略, 并对其未来发展趋势进行展望, 为提高面包品质、优化生产工艺提供理论支撑。

**关 键 词：** 食品添加剂; 面包酵母; 发酵特性; 影响机制; 面包品质

## Analysis of the Mechanism by Which Food Additives Affect the Fermentation Characteristics of Bread Yeast

Gao Junwei

Foshan Institute of Quality and Standardisation, Foshan, Guangdong 528041

**Abstract：** In bread making, yeast fermentation is a core process that affects bread quality, and the scientific use of food additives can effectively regulate yeast fermentation characteristics. This study comprehensively analyses the mechanisms by which different types of food additives affect the fermentation characteristics of bread yeast. It first explains the basic principles of yeast fermentation and the current status of food additive applications, then delves into how additives such as sugars, salts, emulsifiers, and enzymes influence yeast growth metabolism, gas production capacity, and fermentation stability through mechanisms such as osmotic pressure regulation, metabolic pathway intervention, altering interfacial properties, to influence yeast growth metabolism, gas production capacity, and fermentation stability. It also proposes optimised application strategies for food additives in bread making and outlines future trends, providing theoretical support for improving bread quality and optimising production processes.

**Keywords：** food additives; bread yeast; fermentation characteristics; influence mechanisms; bread quality

## 引言

发酵面食是以面粉为主要原料, 以酵母菌为主要发酵剂, 经面团调制、发酵、成型、醒发、蒸制或油炸、烘焙及烙制等方法熟成的食品。我国发酵面食主要是靠蒸制熟成或经发酵烘焙而成的食品, 包括馒头、花卷、饼类、面包等食品。其中面包因其口感适宜, 携带方便等优点已逐步成为一项必需品出现在消费者的日常生活中。面包作为全球广受欢迎的烘焙食品, 其品质与酵母发酵紧密相关, 伴随食品工业进步, 食品添加剂在面包制作中应用广泛, 不仅可改善面包感官品质、延长货架期, 还能优化发酵工艺, 不同添加剂对酵母发酵特性的影响有别, 机制复杂, 深入探究其影响机制, 对指导添加剂科学使用、提升面包品质与生产效率, 具有重要理论和实践价值。

## 一、面包酵母发酵与食品添加剂应用基础

### (一) 面包酵母发酵原理

面包酵母发酵属复杂生物学过程, 依托酵母细胞内系列酶促反应实现, 有氧环境中, 酵母以葡萄糖等糖类为底物, 借有氧呼

吸大量增殖, 生成二氧化碳与水, 释放能量维持生长代谢, 待面团内氧气耗尽, 酵母转入无氧发酵, 糖类被转化为乙醇、二氧化碳及少量代谢产物<sup>[1]</sup>。二氧化碳于面团内积聚促使其膨胀, 塑造面包多孔结构; 乙醇与挥发性代谢物则赋予面包独特风味, 酵母发酵受温度、pH 值、底物浓度、氧气含量等多重因素制约, 底物类

作者简介: 高骏伟 (1990—), 男, 汉族, 广东佛山人, 学士, 质量工程师, 主要从事宏观质量研究、食品安全管理研究。

别与浓度直接左右酵母代谢活性及发酵效率，环境条件改变亦会影响酵母细胞内酶活性与代谢路径。

## （二）食品添加剂在面包制作中的应用现状

食品添加剂于面包制作领域的应用拥有悠久历程，且品类持续拓展，当下糖类、盐类、乳化剂、酶制剂、防腐剂等诸多食品添加剂被广泛运用于面包生产环节，糖类除了为酵母发酵供给能量，还可调控面团渗透压、改良面包色泽与风味；盐类能够增强面团韧性、调节酵母发酵速率；乳化剂可改善面团的流变学特征，提升面包的柔软程度与保鲜期限；酶制剂可优化面团的加工性能，增进面包品质；防腐剂则用于抑制微生物繁殖，延长面包的货架周期，不过食品添加剂的不合理使用或许会对酵母发酵产生不良影响，过高浓度的盐和糖会抑制酵母活性，部分防腐剂可能对酵母的正常代谢造成干扰。消费者对食品健康与安全的关注度日益提高，对食品添加剂在面包制作中的科学使用提出更高标准。

## 二、食品添加剂对面包酵母发酵特性的影响机制

### （一）糖类添加剂的影响机制

糖类作为酵母发酵的核心能量供给物质，其不同类别与浓度对酵母发酵特性的作用存在明显差异，葡萄糖、果糖这类单糖可被酵母直接吸收利用，能够快速启动发酵进程，进而推动酵母增殖与二氧化碳生成，酵母细胞借助特定转运蛋白将葡萄糖和果糖摄入细胞内，之后通过糖酵解途径实现快速代谢。蔗糖等双糖需要在酵母分泌的蔗糖酶作用下，水解为葡萄糖和果糖后才能被利用，其发酵启动速度相对迟缓，但具备较强的持续供能能力，麦芽糖等多糖在面团中需经过淀粉酶水解后才能被酵母利用，整个发酵过程更为缓慢，较高浓度的糖类会提升面团渗透压，促使酵母细胞内的水分向外渗出，造成细胞脱水，从而对酵母的生长和代谢活性产生抑制作用，这种渗透压抑制效应在蔗糖、葡萄糖等高渗糖类中表现得尤为突出。糖类参与美拉德反应，其代谢产物会对面团的 pH 值和氧化还原状态产生影响，进而间接调控酵母的发酵环境，美拉德反应生成的类黑精物质具有抗氧化特性，能够延缓面团的氧化进程，同时也可能改变面团的酸度，对酵母的生长造成影响。在面团发酵的后期阶段，随着糖类的不断消耗，酵母的代谢速率会有所下降，此时添加适量的麦芽糖能够维持发酵活力，确保面包的体积和质地符合要求。

### （二）盐类添加剂的影响机制

盐类在面包制作中对酵母发酵具备双重效应。适量的盐能强化面筋网络构造，提升面团弹性与韧性，为酵母发酵生成的气体提供稳固支撑架构，有益于面包体积膨胀和质地改良，盐离子和面筋蛋白里的极性基团相互作用，增强蛋白质分子间的交联，提升面筋强度<sup>[2]</sup>。盐离子还可调节酵母细胞内的渗透压平衡，维持细胞膜完整性与功能，促进酵母细胞对营养物质的吸收，盐浓度过高时，会提升面团渗透压，抑制酵母细胞水分吸收和代谢活性，延长发酵时长，盐亦会影响酵母细胞内酶的活性，像抑制己糖激酶活性，阻碍糖类代谢起始步骤，进而降低酵母发酵速度，盐能与面团中蛋白质和脂质相互作用，改变面团流变学特性，间

接影响酵母发酵环境。实际生产中，面包配方里的盐含量通常控制在 1.5% – 2%，既能赋予面包风味，又不明显抑制酵母活性，盐含量超过 3% 时，酵母发酵速率显著下降，面团发酵时间延长，且面包内部结构紧实，影响口感。

### （三）乳化剂的影响机制

乳化剂凭借改变面团界面性质与物理化学特征，对酵母发酵产生多维度作用，乳化剂分子兼具亲水与亲油基团，可和面团中脂质、蛋白质相互作用，形成稳定复合物。一方面，乳化剂与面筋蛋白结合，增强面筋网络韧性及弹性，提升面团持气能力，让面包在发酵与烘焙阶段体积更膨大、质地更松软；其插入面筋蛋白分子间隙，形成交联结构，增加机械强度；另一方面，乳化剂与淀粉结合，抑制淀粉老化，延缓面包硬化速率，延长货架周期；于淀粉颗粒表面形成保护膜，阻碍淀粉分子重结晶，乳化剂还能降低气 – 液界面表面张力，促进二氧化碳气泡形成与稳定，改善面团发酵性能。部分乳化剂可调节酵母细胞膜流动性和通透性，影响酵母细胞对营养物质摄取及代谢产物排出，进而间接调控发酵活性，卵磷脂作为天然乳化剂，可与酵母细胞膜中磷脂相互作用，增强膜稳定性，促进酵母对糖类吸收利用，在冷冻面团制作时，添加硬脂酰乳酸钠等乳化剂，能有效防止面团在冷冻及解冻过程中面筋结构被破坏，维持良好发酵性能。

### （四）酶制剂的影响机制

酶制剂于面包制作中借助催化特定化学反应，优化面团加工性能与酵母发酵环境，淀粉酶可将面团中淀粉水解为麦芽糖和葡萄糖，为酵母发酵提供更多可利用底物，加速发酵进程，增加二氧化碳生成量，促使面包体积扩大， $\alpha$  – 淀粉酶随机水解淀粉分子内部的  $\alpha$  – 1,4 糖苷键， $\beta$  – 淀粉酶则从淀粉分子非还原端依次水解产生麦芽糖<sup>[3]</sup>。蛋白酶能适度水解面筋蛋白，改善面团延展性与可塑性，降低面团硬度，利于酵母发酵时气体扩散和面团膨胀，不同来源的蛋白酶作用位点及水解程度存在差异，选用适宜蛋白酶可精准调控面筋蛋白水解程度，脂肪酶可分解面团中脂质，生成脂肪酸和甘油，脂肪酸与面筋蛋白、淀粉相互作用，增强面团韧性与稳定性，同时改善面包风味和色泽。氧化酶如葡萄糖氧化酶可促进面筋蛋白交联，强化面筋网络结构，提升面团持气能力，为酵母发酵营造良好物理环境，葡萄糖氧化酶催化葡萄糖生成葡萄糖酸和过氧化氢，过氧化氢促使面筋蛋白中巯基氧化形成二硫键，进而强化面筋网络，在全麦面包制作中，添加木聚糖酶可降解全麦粉中的阿拉伯木聚糖，改善面团流变学特性，提高面包体积和柔软度。

## 三、食品添加剂在面包制作中的应用策略与发展趋势

### （一）优化添加剂配方与用量

依据面包品种与品质需求，科学搭配不同类型食品添加剂并精准把控其用量，在高糖面包制作时，适当减少糖的添加量或选用发酵性能优良的酵母，以此减轻高糖对酵母发酵的抑制作用；针对咸味面包，优化盐的添加用量，在保障风味的同时避免对酵母活性产生过度抑制。运用复配添加剂技术，将乳化剂、酶制剂



等多种添加剂按一定比例混合使用，从而发挥协同增效作用，像淀粉酶与蛋白酶复配能够同时改善面团的发酵性能和加工性能，进而提升面包品质，通过开展实验并进行数据分析，构建不同面包产品的添加剂配方数据库，为工业化生产提供科学依据。针对法式面包追求大孔洞、薄脆表皮的特性，在配方中减少乳化剂用量，增加淀粉酶和氧化酶的比例，以促进面团发酵并形成独特结构；对于软质甜面包，则提高乳化剂和糖的添加量，同时搭配适量脂肪酶，以增强面包的柔软度和风味，工业化生产过程中，借助响应面分析法优化添加剂配方，能够快速确定各添加剂的最佳配比，从而降低研发成本和时间。

（二）关注添加剂安全性与健康需求

随着消费者对食品健康与安全关注度的提升，优先选用天然、安全的食品添加剂成为趋势，大豆磷脂等天然乳化剂以及天然酶制剂，因安全性高且来源天然，正逐步成为人工合成添加剂的优质替代品，减少甚至避免使用部分人工合成防腐剂等可能对人体健康产生潜在风险的添加剂<sup>[4]</sup>。同时开发具有抗氧化、抗菌、调节肠道菌群等功能的功能性食品添加剂，在满足面包品质要求的基础上，赋予面包更多健康属性，以顺应食品消费市场的发展趋势，从植物中提取迷迭香提取物作为天然抗氧化剂，可替代合成抗氧化剂 BHT，延长面包的氧化稳定性；添加益生菌作为发酵剂，既能调节酵母发酵过程，又能改善人体肠道微生态。食品企业通过与科研机构合作，持续挖掘天然产物中的功能性成分，开发新型健康添加剂，严格遵循食品添加剂使用标准，加强生产过程中的质量控制，确保添加剂使用合规，保障消费者健康。

（三）结合现代生物技术与工艺创新

借助基因工程、蛋白质工程等现代生物技术，研发性能更为优良的食品添加剂，通过基因改造技术优化酵母菌种，增强其对高糖、高盐等恶劣环境的耐受能力及发酵效率；研制新型酶制剂，提升酶的稳定性与催化活性。运用基因编辑技术敲除酵母中影响发酵效率的基因片段，或导入耐高糖基因，培育出适应高糖环境的酵母菌株，结合冷冻面团技术、3D 打印技术等现代食品加工工艺，探究食品添加剂在新工艺中的应用方式与效果，冷冻面团制作时，挑选合适的乳化剂和酶制剂，改善冷冻面团的解冻稳

定性及发酵性能，为面包制作工艺创新提供支撑。3D 打印技术能够实现面包的个性化定制，添加剂需满足打印过程中面团的流变学要求，添加增稠剂调节面团黏度，确保打印成型，利用微胶囊技术对不稳定的添加剂进行包埋，提高其在加工过程中的稳定性与靶向释放效果，拓展添加剂的应用范围。

（四）加强添加剂作用机制研究与应用指导

深入开展食品添加剂对面包酵母发酵特性影响机制的研究，借助代谢组学、蛋白质组学等先进技术手段，从分子层面揭示添加剂与酵母细胞的相互作用机制，通过代谢组学分析不同添加剂作用下面团发酵过程中代谢产物的变化，明确添加剂对酵母代谢通路的调控节点；利用蛋白质组学研究添加剂对酵母细胞蛋白表达的影响，确定关键作用靶点<sup>[5]</sup>。构建添加剂-酵母-面团体系的数学模型，模拟不同添加剂组合及用量下酵母发酵过程的动态变化，预测面包品质指标，结合人工智能算法对大量实验数据进行学习分析，优化模型预测准确性。将研究成果转化为实际生产中的应用指南和操作规范，为面包生产企业提供技术指导，助力企业优化生产工艺，提升产品质量与生产效率，推动面包产业可持续发展，通过举办技术培训、发布行业白皮书等方式，加强产学研合作与知识传播，促进研究成果快速转化应用。

四、结束语

食品添加剂对面包酵母发酵特性的影响机制繁复多元，不同类别添加剂通过渗透压调控、代谢路径干预、界面特性改变等多种途径，对酵母生长代谢、产气效能及发酵稳定性产生作用。科学应用食品添加剂，优化添加剂配方与使用剂量，关注安全性和健康需求，结合现代生物技术与工艺革新，加强作用机制探究与应用指导，是提升面包品质、推动面包产业发展的核心，随着研究的持续深入和技术的不断创新，食品添加剂在面包制作中的应用将更趋科学合理，为消费者提供品质更优、更具健康属性的面包产品。

参考文献

[1] 翁业勋. 亲水胶体对黑小麦全麦面包的品质及体外消化性的影响机制研究 [D]. 江南大学, 2024.  
[2] 段梦杰. 混菌发酵对小麦面包中丙烯酰胺的调控作用及机制研究 [D]. 上海应用技术大学, 2023.  
[3] 杨烁. 膳食纤维对冷冻面团烘焙品质影响及其作用机制研究 [D]. 华南理工大学, 2023.  
[4] 郭璐楠. 面团冻藏过程中酵母稳定性变化及其对面团品质的影响 [D]. 江南大学, 2021.  
[5] 田野. 复配抗冻保护剂对冷冻酵母影响的研究 [D]. 哈尔滨商业大学, 2020.

# 炼油装置电气设备的继电保护与快切备自投技术应用

吴时孔

洛阳三隆安装检修有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ERA.2025100014

**摘 要 :** 炼油装置电气系统的高连续性与危险性对供电可靠性提出严苛要求。传统继电保护技术面临响应速度与选择性问题, 易导致越级跳闸或故障切除延迟, 难以满足毫秒级故障响应需求。研究提出继电保护与快切备自投技术协同优化方案, 通过 IEC61850 协议构建通信架构, 实现保护动作与电源切换的时序配合。快速切换技术将备用电源投入时间压缩至 100ms 内, 结合差动保护与残压闭锁策略, 确保故障隔离与供电恢复无缝衔接。仿真与实验表明, 协同策略使故障停电时间缩短至 80ms 以下, 电动机转速波动控制在  $\pm 5\%$ , 切换成功率超过 99%。某炼油厂应用案例显示, 年均非计划停机时长由 36 小时降至 2 小时, 设备损伤率减少 42%。该方案有效提升供电可靠性与设备寿命, 降低安全风险, 为炼油装置智能化供电系统发展提供技术支撑。

**关 键 词 :** 继电保护; 快切备自投技术; 协同优化; 炼油装置供电系统

## Application of Relay Protection and Fast Switching & Backup Automatic Transfer Technology in Electrical Equipment of Oil Refining Units

Wu Shikong

Luoyang Sanlong Installation and Maintenance Co., Ltd. Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524000

**Abstract :** The high continuity and hazardous nature of oil refining unit electrical systems impose stringent requirements on power supply reliability. Traditional relay protection technologies face challenges in response speed and selectivity, leading to cascading tripping or delayed fault clearance, which struggles to meet millisecond-level fault response demands. This study proposes a collaborative optimization scheme integrating relay protection and fast switching & backup automatic transfer technology. By establishing a communication architecture based on the IEC61850 protocol, temporal coordination between protection actions and power source switching is achieved. The fast switching technology reduces backup power restoration time to within 100 milliseconds, while differential protection and residual voltage blocking strategies ensure seamless fault isolation and power recovery. Simulations and experiments demonstrate that the collaborative strategy shortens fault-induced outage time to below 80 ms, confines motor speed fluctuations within  $\pm 5\%$ , and achieves over 99% switching success rate. A refinery case study shows annual average unplanned downtime duration reduced from 36 hours to 2 hours, with equipment damage rate reduced by 42%. The solution effectively enhances power supply reliability and equipment lifespan, mitigates safety risks, and provides technical foundations for intelligent power systems in oil refining units.

**Keywords :** relay protection; fast switching & backup automatic transfer technology; collaborative optimization; oil refining unit power supply system

## 引言

炼油装置作为能源产业链的核心环节, 其电气系统可靠性直接关系到生产连续性与本质安全水平。随着《“十四五”现代能源体系规划》(2021年9月)明确提出强化炼化行业智能运维与供电韧性要求, 传统继电保护技术面临的响应速度与选择性问题愈发凸显。炼油装置电气设备运行环境复杂, 电动机启动电流冲击、变压器高负载率运行及谐波干扰等特征, 使得传统过流保护与延时跳闸机制易引发越级跳闸或故障切除延迟, 造成非计划停机与安全风险。快切备自投技术虽能提升供电连续性, 但其与继电保护的协同逻辑设计仍存在时序配合与参数整定难题。近年来基于 IEC61850 标准的数字化保护技术发展为多保护单元协同提供了新路径, 但如何在炼油装置特殊工况下实现毫秒级故障隔离与电源快速切换的精准配合, 仍需系统性解决方案。本研究聚焦炼油装置供电系统的保护优化需求, 探索继电保护与快切技术的深度协同机制, 旨在为构建符合国家能源安全战略的高可靠供电体系提供理论支撑。

## 一、炼油装置电气系统概述

### （一）炼油装置电气设备组成与运行特点

炼油装置电气系统主要由电动机、变压器及配电系统构成。电动机作为核心动力设备，需适应频繁启停与大转矩负载，其启动电流可达额定值的5-8倍，对电网冲击显著；变压器承担电压等级转换与电能分配功能，长期处于高负载率运行状态；配电系统则通过母线、断路器等实现电能传输与控制。炼油生产具有高连续性、高危险性特征，供电中断可能导致反应器失控、高温高压介质泄漏等重大安全事故，因此供电系统需满足99.9%以上的可靠性标准，且需符合防爆、防腐等特殊环境要求。



图 1.1 工业控制面板

### （二）炼油装置供电系统的典型问题与挑战

炼油装置供电系统面临短路故障、电压暂降及谐波干扰等多重威胁。短路故障易引发设备绝缘击穿与热应力损伤；电压暂降可能造成电动机堵转或控制系统误动作；非线性负荷产生的谐波则加剧设备过热与保护装置误判风险。传统继电保护方案依赖过流保护与延时跳闸机制，在复杂工况下难以兼顾快速性与选择性，易导致故障切除延迟或越级跳闸，扩大停电范围，难以满足炼油装置对毫秒级故障响应的严苛需求。

## 二、炼油装置继电保护技术研究

### （一）继电保护的基本原理与配置方案

炼油装置继电保护基于故障特征检测实现设备保护。过流保护通过监测电流幅值识别短路或过载故障，适用于配电线路及电动机后备保护；差动保护利用电流矢量和判断定位变压器、母线等设备内部故障，具有高选择性；接地保护通过零序电流检测漏电或单相接地故障，保障人身与设备安全<sup>[1]</sup>。保护整定需兼顾灵敏度、速动性与可靠性：灵敏度确保轻微故障可识别，速动性要求毫秒级动作以限制故障扩散，可靠性则依赖冗余配置与抗干扰设计，避免误动或拒动<sup>[2]</sup>。

### （二）炼油装置典型继电保护案例分析

炼油装置供电系统面临短路故障、电压暂降及谐波干扰等多重威胁。根据《中国石化炼化企业电气预防性工作策略》（2024

版）》，企业应通过定期性维护、预知性维修和季节性维护等手段，确保设备运行可靠性。例如，对高压电缆进行振荡波局放检测，对变压器开展油色谱分析，以及对开关柜进行红外成像检测等，以提前发现潜在缺陷并降低非计划停机风险。

## 三、快切备自投技术（BZT）在炼油装置中的应用

### （一）快切备自投技术原理与实现方式

#### 1. 快速切换与同期捕捉切换的对比分析

快速切换基于故障后母线残压与备用电源电压的幅值、相位差实时判断，在故障后60-100ms内完成切换，适用于对供电连续性要求苛刻的场景；同期捕捉切换则通过跟踪残压衰减曲线，在相位差接近零时合闸，切换时间延长至200-500ms，适用于允许短时断电但需避免冲击电流的工况<sup>[3]</sup>。快速切换依赖高精度电压检测与快速断路器动作，同期捕捉切换需配置相位预测算法，两者在切换逻辑与时间要求上形成互补。合理配置快切装置，应将快速保护作为快切装置的启动条件，以确保在故障发生时能够迅速响应，保障供电的连续性和稳定性。

#### 2. 炼油装置备用电源切换的关键参数设计

切换时间需控制在100ms以内以维持电动机惰转转速，避免生产中断；残压闭锁条件设定为母线残压低于30%额定值时禁止切换，防止非同期合闸；合闸角差通过动态相位补偿限制在 $\pm 30^\circ$ 以内，降低合闸涌流对设备的冲击<sup>[4]</sup>。参数设计需结合炼油装置负荷惯性特性与断路器机械响应特性，采用自适应算法实时调整阈值，确保切换成功率与设备安全。

### （二）快切备自投技术的实际应用效果

#### 1. 某炼油厂母线失压后的快速切换实例

某炼油厂因雷击导致10kV母线失压，快切装置在85ms内完成备用电源切换，母线电压恢复至95%额定值。电动机转速仅下降12%，未触发低电压保护跳闸，催化裂化装置未中断运行。实验数据表明，切换时间低于100ms时，电动机惰转转速维持在临界值75%以上，可避免重启导致的数小时生产停滞，验证了快速切换对连续生产的核心保障作用。

#### 2. 与传统备自投技术的性能对比

传统备自投依赖电压检测与固定延时（500ms以上），故障恢复时间长达2-3分钟，导致电动机群停与重启损耗；BZT技术将恢复时间压缩至200ms内，年故障停机次数由12次降至2次。量化分析显示，BZT合闸涌流峰值降低40%，变压器绕组应力减少35%，设备寿命延长约20%，故障电流冲击导致的绝缘老化风险显著下降。

## 四、继电保护与快切备自投的协同优化设计

### （一）协同保护系统的架构设计

#### 1. 继电保护与快切装置的通信接口方案

基于 IEC 61850 协议的通信架构实现继电保护与快切装置的信息交互，通过标准化建模（如 GOOSE、SV 报文）传输故障信



号、断路器状态及母线残压数据。GOOSE 报文实现微秒级保护动作信号传递，SV 采样值同步精度达  $1\mu\text{s}$ ，确保装置间协同决策的实时性与可靠性<sup>[5]</sup>。该协议支持多厂商设备互操作，通过订阅-发布机制动态配置信息流，解决传统硬接线通信的延迟与兼容性问题，为多保护单元协同提供底层支撑。

#### 2. 保护动作与电源切换的时序配合策略

故障发生时，继电保护优先动作切除故障区间，快切装置接收闭锁信号后延迟 5–10ms 启动电源切换，避免故障未隔离时误合闸。优先级逻辑设定为：短路故障触发差动保护跳闸并闭锁快切，电压暂降则直接启动快速切换<sup>[6]</sup>。自适应延时算法根据故障类型动态调整切换时序，残压闭锁阈值与角差限值随负荷特性实时优化，确保故障隔离与供电恢复的无缝衔接，降低设备二次冲击风险。

### （二）系统仿真与实验验证

#### 1. 基于 ETAP/Matlab 的协同保护仿真模型

通过 ETAP 搭建炼油装置供电网络模型，集成变压器、电动机及母线参数，Matlab/Simulink 嵌入自定义保护逻辑与快切算法。仿真模拟三相短路、单相接地等故障场景，动态分析继电保护动作与快切切换时序：差动保护在 15ms 内隔离故障，快切装置随后 60ms 完成备用电源投入，母线电压恢复至 90% 额定值。对于大容量高压电机的再起启动，仿真模型还进行了系统仿真校核，校核所需的关键参数包括电机的起动倍数、机组起动转动惯量、快切装置动作参数、元件过流保护参数等。仿真结果表明，协同策略可将故障停电时间压缩至 80ms 以下，电动机转速波动控制在  $\pm 5\%$  以内，验证了理论设计的可行性和可靠性。

#### 2. 实际装置测试结果分析

在某炼油厂试点项目中，协同保护系统完成了 300 次模拟故障测试，切换成功率达到 99.2%，保护动作准确率为 98.5%。实测数据显示，在短路故障下，差动保护动作时间的平均值为 18ms，快切切换时间的平均值为 82ms，相较于传统方案缩短了 65%。同时，合闸角差被有效控制在  $\pm 25^\circ$  以内，涌流峰值降低至额定电流的 1.8 倍，设备损伤率显著下降了 42%。对于少数切换失败的案例，经过分析发现主要原因是断路器的机械延迟。通过实施自适应参数修正措施后，系统的鲁棒性得到了显著提升，达到了 99.6%。这些测试结果充分验证了协同保护系统在提高供电可靠

性、减少设备损伤以及提升系统整体性能方面的显著优势。

### （三）工业应用案例分析

#### 1. 某炼油厂供电系统改造项目

某炼油厂对催化裂化装置供电系统实施协同优化改造，集成差动保护、快切备自投及 IEC 61850 通信架构<sup>[7,8]</sup>。改造后系统年均故障次数由 9 次降至 0.5 次，供电可靠性提升至 99.99%，关键机组非计划停机时长从年均 36 小时缩短至 2 小时。运行数据表明，母线失电后备用电源切换成功率提升至 99.5%，故障切除与切换协同时间误差低于 5ms，电动机群再启动需求减少 80%，避免了因电压暂降导致的催化剂结焦风险，保障了连续重整工艺的稳定运行。

#### 2. 经济效益与安全效益评估

协同优化系统使炼油厂年非计划停机损失减少约 1200 万元，设备维修成本下降 45%，主要源于短路电流冲击与频繁启停导致的绕组损伤减少<sup>[9,10]</sup>。安全方面，故障电弧引发火灾的风险概率降低 70%，瓦斯保护误动次数由年均 8 次降至 1 次。冗余通信与自适应逻辑设计将人为操作失误导致的事故率从 12% 压缩至 0.3%，设备平均寿命延长 3–5 年，全生命周期成本节约预估达 5800 万元，验证了技术协同在经济效益与安全生产中的双重价值。

## 五、总结

炼油装置的供电系统因其高连续性和高危险性对供电可靠性提出了严苛要求。传统继电保护方案在复杂工况下难以兼顾快速性与选择性，易导致故障切除延迟或越级跳闸，难以满足毫秒级响应需求。本文提出继电保护与快切备自投技术的协同优化设计，通过基于 IEC 61850 协议的通信架构实现信息交互与实时协同决策。快速切换逻辑与保护整定方法的创新设计，确保故障隔离与供电恢复的无缝衔接，显著提升供电可靠性。实验与仿真验证表明，协同策略可有效缩短故障停电时间，降低电动机转速波动，减少设备损伤风险。工业应用案例显示，该技术显著减少了非计划停机损失和设备维修成本，降低了故障电弧引发火灾的风险，为炼油装置供电系统的智能化、自适应发展方向提供了理论与实践支撑。未来研究可进一步探索智能化与自适应保护技术在炼油领域的应用潜力。

## 参考文献

- [1] 崔立强. 高压电源快切对继电保护影响的研究 [D]. 天津理工大学, 2012.
- [2] 吕文峰张政学岳阳张艺宁. 660 V 供电系统在石化行业应用分析 [J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(4): 65–68.
- [3] 周雪松, 周金程, 马幼捷, 等. 基于快切技术的高压电源投切系统的研究 [J]. 电工电能新技术, 2014, 33(1): 5.
- [4] 高子波. 快速快切装置替代备自投的应用 [J]. 科技创新导报, 2016, 13(13): 3.
- [5] 王文涛. 低压快切与传统备自投装置的比较分析 [J]. 电子世界, 2017(7): 2.
- [6] 吴杰. 快切装置替代备自投装置提高供电系统可靠性 [J]. 通用机械, 2015(3): 4.
- [7] 罗文新, 崔春全, 张宏达, 等. 快切与传统备自投系统优缺点分析 [J]. 当代化工, 2016, 45(4): 4.
- [8] 韩旭. 快切装置在炼油部电网中的应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2016(12): 00221–00222.
- [9] 郝娟. 浅析快切装置在炼化企业中的应用 [J]. 信息周刊, 2019(36): 1.
- [10] 于哈培, 孟祥军, 郝思佳. 快切装置在炼化企业的应用 [J]. 科技创新导报, 2018, 15(11): 5.



# 无桥 PFC 与第三代半导体在大功率电源中的应用： 充电器与路灯电源领域对比研究

胡三义

河南 驻马店 463699

DOI:10.61369/ERA.2025100015

**摘要：** 本文针对充电器与路灯电源领域的大功率电源设计需求，对比分析无桥 PFC 与第三代半导体（SiC/GaN）的技术适配性与经济性差异。研究表明，无桥 PFC 通过高频特性与拓扑简化适配充电器的动态响应及小型化，而 SiC 器件的高温稳定性更契合路灯电源的长期可靠性；GaN 的高频优势推动快充效率提升，但其成本压力与工艺瓶颈制约规模化应用。技术局限性集中于 EMC 复杂度与材料缺陷率，未来需通过宽禁带材料创新与拓扑优化实现突破。基于对比结论，提出充电器侧重高频集成与协议兼容、路灯电源强化智能电网交互的差异化研发策略，为行业技术选型与政策部署提供参考。

**关键词：** 无桥 PFC；第三代半导体；大功率电源

## Application of Bridge-Free PFC and Third-Generation Semiconductor in High Power Supply: Comparative Study of Charger and Street Lamp Power Supply

Hu Sanyi

Zhumadian, Henan 463699

**Abstract：** Aiming at the design requirements of high-power power supplies in the field of chargers and street lamps, this paper compares and analyzes the technical adaptability and economic differences between bridge-free PFC and third-generation semiconductor (SiC/GaN). The research shows that the dynamic response and miniaturization of the adaptive charger are simplified by the high frequency characteristics and topology of the bridgeless PFC, and the high temperature stability of the SiC device is more suitable for the long-term reliability of the street lamp power supply. The high frequency advantage of GaN promotes the fast charging efficiency, but its cost pressure and process bottleneck restrict the large-scale application. Technical limitations focus on EMC complexity and material defect rate, and breakthroughs need to be achieved through wide band gap material innovation and topology optimization in the future. Based on the comparison conclusions, the differentiated research and development strategy of chargers focusing on high-frequency integration and protocol compatibility and street lamp power to strengthen smart grid interaction is proposed, which provides a reference for industry technology selection and policy deployment.

**Keywords：** bridgeless PFC; third generation semiconductor; high power supply

## 引言

随着新能源汽车普及与智慧城市升级，大功率电源在充电器与路灯领域需求增长，高效、高可靠性及小型化成为技术迭代方向。无桥 PFC 通过简化拓扑结构省却整流桥较大损耗，第三代半导体（SiC/GaN）凭借宽禁带特性提升频率与高耐温性能，二者协同推动电源性能跃迁。然而，充电器的动态响应需求与路灯电源的长期稳定性要求存在技术路径分化，且成本控制与复杂环境适应性仍是产业化难点。政策层面，2023年国务院《新型电力系统发展蓝皮书》提出“高效电能转换与智能化配电”任务，2024年工信部政策强调第三代半导体在新能源装备中的规模化应用。本文对比两大场景的技术需求、成本结构及环境约束，揭示无桥 PFC 与第三代半导体的差异化适配机制，为行业研发与部署提供理论依据。

## 一、无桥 PFC 与第三代半导体技术概述

### （一）无桥 PFC 技术原理及优势

无桥 PFC (Power Factor Correction) 通过消除传统 PFC 拓扑中的整流桥这一元件,其典型拓扑采用双向开关器件直接连接交流输入与直流母线,避免了传统 Boost PFC 中整流桥的二极管压降损耗<sup>[1]</sup>。传统 PFC 电路中,输入电流需经过整流桥二极管,导致其损耗显著,特别是输入低电压时,整流桥上损耗巨大,导致整体效率下降明显,较大损耗需要通过较大的散热器和产品体积来散热,并增加成本,而无桥 PFC 通过交流直接连接至 PFC 电感及功率管端。消除了整流桥损耗。极大的提高了效率,缩小产品体积,且成本进一步降低。从而降低整体损耗<sup>[2]</sup>。在高功率密度场景下,无桥 PFC 的损耗优化特性尤为突出:其导通损耗降低可提升整机效率 1%~3%,同时高频开关特性支持更小体积的磁性元件设计,进一步压缩电源体积<sup>[2]</sup>。此外,无桥拓扑可通过动态调整开关策略减少电磁干扰 (EMI),为紧凑型大功率电源提供技术基础<sup>[3]</sup>。

### （二）第三代半导体的特性及应用潜力

以碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 为代表的第三代半导体材料,凭借宽禁带特性 (SiC: 3.3 eV, GaN: 3.4 eV),具备高临界击穿场强 (SiC: 3 MV/cm, GaN: 3.3 MV/cm) 与高热导率 (SiC: 4.9 W/cm·K),其性能显著优于传统硅基器件。SiC 器件适用于高压场景 (>1200 V),其低导通电阻与高温稳定性可降低大功率电源的开关损耗,而 GaN 器件凭借高电子迁移率 (2000 cm<sup>2</sup>/V·s) 更适配高频开关 (MHz 级),可大幅缩减变压器与滤波器体积。在高频与高温性能方面, SiC MOSFET 在 150℃ 下仍保持低导通损耗,支持电源系统在严苛环境中的稳定运行; GaN HEMT 的高频特性则使开关频率提升至传统硅器件的 10 倍以上,推动电源设计向超高频、高密度方向演进<sup>[4]</sup>。两者的材料特性共同赋能大功率电源的高效化与小型化,成为充电器与工业电源升级的核心技术路径,并推动第三代半导体产业的规模化发展。

### （三）无桥 PFC 架构种类及特点

无桥 PFC 包含多种架构形式:

1. 其中主要应用包括交错并联无桥 PFC 和图腾柱无桥 PFC,交错并联无桥 PFC 这种架构工作模式包括 CRM 模式,和 CCM 模式,CRM 模式通常用在中小功率段产品上,主要由两个硅 MOSFET 管和两个升压超快恢复二极管组成。其特点是 ZVS 开通,因而没有开通损耗,升压二极管没有反向恢复。但其峰值电流相对较高。纹波电流较大一点。效率与 CCM 模式等功率下高约 0.6%;而 CCM 同样由两个开关管组成,两个升压二极管组成,由于 CCM 连续导通工作特性,此二极管必须使用 SiC 二极管,以此减少反向恢复损耗。但 CCM 模式由于其较小的纹波电流,可显著减少输入 X 电容及母线电解电容容量,减少输入元件电流应力。而开关管使用第三代半导体更有效率优势。此架构需要两个相同规格的 PFC 电感。

2. 图腾柱无桥 PFC 近年来应用越来越广泛,因其复杂的技术特性和对 PCB 布局超高的要求,及对第三代半导体器件的深入研究,使得应用起来有较高的技术挑战与难度,以及相对较高的

成本。通常用在功率较大的产品上以此释散成本压力,图腾柱无桥 PFC 仍然主要包括 DRM,CRM 和 CCM 工作模式,图腾柱无桥 PFC 架构共需要四只功率管;两只快管必须使用第三代半导体,慢管可以使用硅 MOSFET 管。与交错无桥 PFC 相比,图腾柱无桥 PFC 仅需一个 PFC 电感,而交错并联无桥 PFC 则需要两个同规格的 PFC 电感,体积和效率相对低于图腾柱无桥 PFC。下面的介绍均包含交错无桥 PFC 和图腾柱架构的应用。

## 二、充电器领域的大功率电源设计应用

### （一）无桥 PFC 在充电器中的设计与优化

无桥 PFC 在大功率充电器及快充方案中通过优化拓扑结构与控制策略实现效率提升与体积压缩。以大功率充电器及 200W 以上大功率快充电源为例,采用交错并联无桥 PFC 架构 (如 Dual-Sepic 拓扑) 可将输入电流纹波降低 30%~50%,同时减少整流损耗,整机效率提升至 95% 以上,满足高功率密度需求 [5]。体积压缩依赖于高频开关特性:无桥 PFC 支持 200 kHz 以上开关频率,搭配平面变压器及分段式气隙技术与贴片电容,使电源体积较传统方案缩小 30% [6]。电磁兼容性 (EMC) 挑战主要源于高频开关引起的传导与辐射干扰,通过优化开关管驱动时序、引入共模滤波器及磁屏蔽技术,结合闭环控制参数设计,可将 EMI 噪声抑制至 CISPR 32 Class B 标准以下。

### （二）第三代半导体在充电器中的技术突破

第三代半导体的高频开关性能显著缩短充电时间: GaN 器件支持 MHz 级开关频率,结合零电压开关 (ZVS) 技术,可将大功率充电器功率转换损耗降低至 2% (PFC 级) 以内,同时缩短 90% 的充电周期,这一技术突破推动第三代半导体在消费电子领域的产业化进程 [7]。SiC MOSFET 在高压大电流场景中通过低导通电阻 (<50 mΩ) 减少热损耗,支持 100~277V 宽电压输入下的稳定快充,其性能优势已在电力电子系统的高效电能转换中得到验证 [8]。热管理方案基于材料特性创新: GaN 的高电子迁移率允许芯片面积缩小,结合铜基板与氮化铝陶瓷散热片,实现热流密度均匀分布; SiC 的高热导率支持直接冷却设计,通过 PCB 埋铜或微通道液冷技术将结温控制在 85℃ 以下,此类散热技术的高价值专利布局为规模化应用奠定基础<sup>[9]</sup>。

## 三、路灯电源领域的大功率电源设计应用

### （一）无桥 PFC 在 LED 驱动电源中的适配性

在 LED 路灯电源中,无桥 PFC 技术通过省去整流桥的较大损耗,大幅提升效率,降低整机温度,满足长寿命与高可靠性需求。传统 Boost PFC 因整流桥损耗易致电解电容老化,而无桥拓扑让输入交流直连 PFC 电感及功率管,关键元件寿命超 10 万小时,适配户外长期运行。DC/DC 采用 LLC 软开关技术与次边同步整流策略,进一步提高效率。PFC 电感和 DC/DC 谐振电感运用平面绕组工艺及分段性气隙技术,减少涡流损耗; LLC 变压器采用无骨架平面变压器,优化初次级绕组叠加方式,增强耦合

度，且无骨架设计利于散热。模块化电路技术提升空间利用率，支持产品系列化开发。本人在公司开发的 MXS 系列超大功率室外路灯电源，融合无桥 PFC 方案与第三代半导体技术，并结合本人发明多项专利应用于此平台。如“一种无桥 PFC 电路 ZCD 信号采集电路”（专利号：ZL 2024 1 1027428.5）用于检测退磁及开机信号；“一种无桥 PFC 输入欠压保护电路”（专利号：ZL 2023 1 1721924.6）在输入电压异常低于限时保护关机；“一种低温启动及快速关机电路”（专利号：ZL 2023 1 1454828.X）确保极寒天气正常启动且关机无回闪，为产品性能与可靠性提供保障。

### （二）第三代半导体在路灯电源中的实践

近年来路灯电源功率不断增大，从百瓦级迈向 1500 瓦以上，输出电流达几十安培，且采用宽电压、宽电流范围设计。图腾柱无桥 PFC 及第三代半导体器件提升了路灯电源效率，助力低碳目标实现，如 SiC MOSFET 或 GAN 配合无桥 PFC，在 430V 直流母线、230V 交流输入下，转换效率近 99%，谐波畸变率低于 6%。在户外适应性方面，SiC 器件高热导率减少散热器体积，结合防护封装可在 -40℃ - 125℃稳定运行；GaN 低栅极电荷降低损耗，通过防护工艺延长在高湿地区使用寿命。

## 四、充电器与路灯电源领域的对比分析

### （一）技术性能与可靠性对比

#### 1. 效率与功率密度差异

充电器设计聚焦动态响应优化，需在毫秒级时间内完成功率调整以适应快充协议切换，其效率提升依赖于高频开关（如 GaN 器件支持 MHz 级开关）与拓扑简化，功率密度可达 30 W/in<sup>3</sup> 以上。路灯电源则侧重稳态效率与散热设计，需在额定负载下维持 95% 以上转换效率超过 10 万小时，通过 SiC MOSFET 的低导通损耗与多级散热结构（如散热鳍片与热管组合）平衡效率与温升，功率密度通常低于 15 W/in<sup>3</sup>。动态响应与稳态性能的差异源于应用场景需求：充电器需快速响应用户插拔与协议握手，而路灯电源需在恒定负载下实现能源利用最优化及更高的可靠性。

#### 2. 可靠性要求差异

充电器的可靠性集中于短时高负载耐受性，例如大功率充电器及 120W 以上快充需在 30 分钟内承受峰值电流（如数 A 以上）而不触发过温保护，其元件选型以瞬时抗冲击能力为核心，通常

采用低 ESR 固态电容与 GAN MOSFET。路灯电源的可靠性则依赖长期运行稳定性，需在 -40℃至 70℃环境温度下连续工作，通过冗余设计（如并联 PFC 模块）与抗老化材料（如长寿命电解电容）降低故障率，通常选用 SIC MOSFET。环境适应性要求进一步分化：充电器仅需满足室内温湿度范围，而路灯电源需通过 IP67 防护与盐雾测试以应对户外极端气候。

### （二）经济性与应用场景适应性对比

#### 1. 成本结构差异

第三代半导体在路灯电源中因规模化应用具备显著降本潜力：SiC 与 GaN 器件的成本随晶圆尺寸扩大（如 6 英寸向 8 英寸升级）及制造工艺成熟逐年上升，规模化采购可使单颗器件成本降低 30%-50%，且长寿命特性减少全生命周期更换成本。大功率充电器领域面临快速迭代压力：消费电子快充协议频繁更新（如 PD 3.1 至 PD 3.2）迫使电源方案需频繁适配，研发投入与模具成本占比高达总成本 25%，叠加市场竞争导致的低价策略，压缩第三代半导体高端器件的渗透空间。

#### 2. 场景适配性

大功率充电器的便携性需求驱动拓扑简化与小型化：基于 GaN 的平面磁性元件与无桥 PFC 结合，使 200W 及以上大功率充电器体积缩小至传统方案的 1/3，适配移动场景的轻量化需求。路灯电源则需强化智能化与电网交互能力：集成物联网（IoT）模块支持远程调光与故障诊断，通过 SiC 高抗冲击性满足智能电网的动态负载调节需求。场景差异导致设计优先级分化：大功率充电器追求极致的功率密度与用户交互体验及较短的充电时间，而路灯电源需兼顾电网稳定性与多设备协同管理，形成技术路径的天然区隔。

## 五、总结

无桥 PFC 与第三代半导体在大功率充电器和路灯电源领域适配性不同。无桥 PFC 结合 GAN 高频特性满足充电器动态响应与小型化需求，但在路灯电源复杂环境应用受限；GaN 是大功率充电器核心，SiC 则因高温稳定契合路灯电源户外需求。技术局限于成本和工艺成熟度，如 GaN 衬底缺陷、SiC 加工精度及无桥 PFC 共模噪声等。未来可通过材料创新、拓扑优化、AI 融合发展。行业应差异化布局，前者强化高频集成与协议兼容，后者推动 SiC 电源标准化及与分布式能源融合。

## 参考文献

- [1] 王慧贞, 张军达. 一种新型无桥 Boost PFC 电路 [J]. 电工技术学报, 2010(5):7.
- [2] 易俊宏, 马红波, 孟庆伟. 高效率、高功率密度无桥 PFC 设计 [J]. 电力电子技术, 2017, 51(12):5.
- [3] 谭乐彬, 李志忠, 龙淑群, 等. 一种无电流采样的无桥 PFC 变换器研究 [J]. 电力电子技术, 2023, 57(5):102-105.
- [4] 吴玲, 赵璐冰. 第三代半导体产业发展与趋势展望 [J]. 科技导报, 2021, 39(14):20-29.
- [5] 曹太强, 李清, 王军, 等. 无桥 Dual-Sepic PFC 变换器分析与设计 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2):6.
- [6] 杨雁勇, 戴慧纯, 王正仕. 无桥 PFC 的性能改善及控制参数设计 [J]. 电工技术, 2018, 000(005):42-45.
- [7] 李楠, 徐欢. 发展第三代半导体 打造千亿级未来产业 [J]. 浙江经济, 2023(3):70-71.
- [8] 黄灵钟. 基于第三代半导体技术的电力电子应用发展浅析 [J]. 新潮电子, 2023(12):43-45.
- [9] 柏松, 张弛, 王亚利, 等. 第三代半导体电力电子器件模块高价值专利培育模式与机制探析 [J]. 江苏科技信息, 2019(5).

# 印刷企业 ERP 系统与生产执行系统的深度集成研究

罗忆辉

广州日报报业集团有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025100016

**摘 要：** 本文探讨印刷企业 ERP 与 MES 系统集成。阐述 ERP 各模块应用及问题，MES 局限性，强调两化集成管理闭环需求，涉及成本核算、五层架构、核心模块划分等，还包括工单信息传输、实绩反馈等机制，分析集成效果及后续研究方向。

**关 键 词：** 印刷企业；ERP-MES 集成；系统应用

## Research on the Deep Integration of ERP System and Production Execution System in Printing Enterprises

Luo Yihui

Guangzhou Daily Press Group, Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** This article explores the integration of ERP and MES systems in printing enterprises. Elaborate on the application and issues of various modules in ERP, the limitations of MES, and emphasize the closed-loop requirements for integrated management of two industries, involving cost accounting, five layer architecture, core module division, and mechanisms such as work order information transmission and performance feedback. Analyze the integration effect and future research directions.

**Keywords：** printing enterprises; ERP-MES integration; system application

### 引言

随着数字化时代的发展，印刷企业面临着提升管理效率和竞争力的挑战。2023年发布的相关产业政策强调了制造业企业应加强信息化建设，推动系统集成与协同。在此背景下，ERP 系统与 MES 系统在印刷企业中的应用及集成受到关注。ERP 系统在物料管理、财务核算等方面有重要作用，但存在数据孤岛问题；MES 系统在工艺管理、排产调度等环节有局限性且与 ERP 缺乏数据互通。印刷企业在两化集成过程中需构建管理闭环，提升成本核算精度，而集成系统的五层架构、核心功能模块划分、信息传输标准、实绩反馈机制等方面都对实现 ERP - MES 深度集成至关重要，这将促进印刷企业精细化管理和智能化发展。

### 一、印刷企业信息化系统集成现状分析

#### （一）ERP 系统在印刷企业的应用现状

ERP 系统在印刷企业的应用涉及多个关键模块。在物料管理方面，它有助于实现对原材料采购、库存的有效管控，提高资源利用效率<sup>[1]</sup>。财务核算模块能够自动化处理财务数据，提供准确的成本核算和财务报表，辅助企业决策。订单跟踪模块可实时监控订单状态，从下单到交付的全过程清晰可见，提升客户满意度。然而，ERP 系统在实际应用中也存在数据孤岛问题。不同模块的数据可能无法实时共享和交互，导致信息不一致和决策延误。例如，物料管理模块的数据更新可能无法及时反映在财务核算模块中，影响成本核算的准确性。这需要企业进一步优化系统集成，打破数据孤岛，提升 ERP 系统的整体应用效果。

#### （二）生产执行系统的独立运行弊端

MES 系统在印刷企业的工艺管理、排产调度等环节存在诸多

局限性。在工艺管理方面，由于缺乏与 ERP 系统的数据互通，MES 系统难以获取全面准确的物料信息和产品设计要求，可能导致工艺参数设置不合理，影响产品质量<sup>[2]</sup>。在排产调度环节，MES 系统独立运行无法及时了解订单的优先级和企业的整体生产能力，容易造成生产计划不合理，延误交货期。更为严重的是，这种缺乏数据互通的情况会导致成本失控。MES 系统无法将生产过程中的实际成本数据及时反馈给 ERP 系统，使得企业难以进行成本核算和控制，增加了企业的运营风险。

### 二、印刷企业两化集成需求分析

#### （一）管理闭环构建需求

印刷企业两化集成过程中，管理闭环构建需求至关重要。从印刷订单全生命周期管理角度来看，销售接单、生产排程、物料供应等环节的流程贯通十分必要。销售接单是企业生产运营的起



始点，准确获取订单信息是后续环节顺利开展的基础<sup>[9]</sup>。生产排程需依据订单要求合理安排生产计划，确保按时交付产品。物料供应环节要与生产排程紧密配合，及时提供所需物料，避免因物料短缺导致生产延误。只有实现这些环节的流程贯通，才能构建起有效的管理闭环，提高企业的运营效率和管理水平，增强企业在市场中的竞争力。

### （二）业务数据协同需求

印刷企业在成本核算精度提升方面，对印刷原辅料损耗数据与生产实绩数据的匹配有强烈需求。成本核算的准确性依赖于精确的原辅料损耗数据以及与之对应的生产实绩数据。原辅料损耗数据涉及采购量、使用量以及剩余量等信息，这些数据需与生产过程中的实际产量、生产时间等生产实绩数据紧密关联。只有实现两者的准确匹配，企业才能清晰了解每一个生产环节中原辅料的真实消耗情况，从而精准核算成本。这种匹配需求对于企业优化生产流程、控制成本以及提高生产效率至关重要<sup>[4]</sup>。

## 三、ERP-MES 深度集成框架设计

### （一）集成系统总体架构

#### 1. 五层架构体系设计

该集成系统采用五层架构体系。设备接入层负责连接各类生产设备，确保设备与系统的通信顺畅，实现数据的实时传输<sup>[9]</sup>。数据采集层对生产过程中的各类数据进行收集，包括设备运行数据、生产进度数据等。业务逻辑层对采集到的数据进行处理和分析，依据预设的业务规则进行逻辑判断和运算。决策支持层基于业务逻辑层的处理结果，为企业决策提供数据支持和决策建议。用户交互层则为企业管理人员和操作人员提供友好的界面，方便他们与系统进行交互，获取所需信息并进行相关操作。通过这五层架构的协同作用，实现 ERP 与 MES 的深度集成，提升印刷企业的生产管理效率和决策科学性。

#### 2. 核心功能模块划分

印刷企业 ERP-MES 深度集成框架的核心功能模块划分需结合行业特色。其中印前工单管理模块至关重要，它负责工单的创建、分配与跟踪，确保印前工作有序进行<sup>[6]</sup>。在制品跟踪模块能实时监控印刷品在生产线上的位置与状态，及时反馈生产进度，以便企业合理安排后续工序。成本归集模块则对印刷过程中的各项成本进行精确核算，包括原材料、人工、设备损耗等，为企业成本控制提供有力依据。这些特色模块相互协作，构成了印刷行业专用的集成组件，有效提升印刷企业的生产管理效率与竞争力。

### （二）系统接口设计规范

#### 1. 印刷工单信息传输标准

印刷工单信息传输需制定包含纸张规格、油墨配比、模切参数等专业字段的 XML 交互标准。对于纸张规格，应详细描述纸张的类型、克重、尺寸等信息，确保 ERP 系统和 MES 系统对纸张资源的准确识别和管理。油墨配比字段需涵盖油墨的颜色、成分比例等关键数据，以指导印刷过程中的色彩调配。模切参数则应包括模切刀具的规格、模切压力、模切速度等，保障模切工序的精确执行。通过这

种 XML 交互标准，实现印刷工单信息在 ERP 和 MES 系统间的准确、高效传输，提高印刷企业的生产效率和质量控制水平<sup>[7]</sup>。

#### 2. 生产实绩反馈机制

在生产实绩反馈机制方面，需建立涵盖机台效率、废品率、能源消耗等 KPI 指标的自动回传机制。通过系统接口的规范设计，确保生产过程中的相关数据能够准确、及时地从生产执行系统（MES）反馈至企业资源计划系统（ERP）。这不仅有助于企业实时掌握生产状况，还能为后续的决策提供数据支持。例如，机台效率数据的回传可帮助企业了解设备的运行情况，合理安排生产任务；废品率数据能促使企业分析原因，改进生产工艺；能源消耗数据则有利于企业进行成本控制和节能减排措施的制定<sup>[8]</sup>。

## 四、集成系统实施与应用效果

### （一）典型应用场景实践

#### 1. 印刷成本实时归集

印刷企业通过 ERP 系统与生产执行系统的深度集成，在印刷成本实时归集方面取得了显著成效。通过设备直连的方式，能够精准获取油墨消耗、纸张损耗等关键数据<sup>[9]</sup>。这些数据为生产工序级成本核算提供了坚实基础。系统可以根据实时采集的数据，准确计算每个生产工序所产生的成本，包括原材料使用成本、设备损耗成本等。这不仅有助于企业更精确地了解生产成本的构成，还能为成本控制和优化提供有力依据。同时，实时归集成本也使得企业在定价决策、利润分析等方面能够更加科学合理，提升了企业在市场竞争中的综合实力。

#### 2. 销售订单全流程追溯

在印刷企业中，通过 ERP 系统与生产执行系统的深度集成，构建了从客户询价、合同评审到产品交付的端到端可视化追踪体系，实现了销售订单的全流程追溯<sup>[10]</sup>。在客户询价阶段，系统记录相关需求和沟通细节。合同评审时，各项条款和评审意见得以留存。进入生产环节，生产执行系统实时反馈生产进度、质量数据等。交付阶段，相关信息也被准确记录。这一体系使得企业能够随时掌握订单状态，快速响应客户查询，提高客户满意度。同时，通过对全流程数据的分析，企业可以发现潜在问题，优化业务流程，提升运营效率和管理水平。

### （二）系统部署方法论

#### 1. 印刷工艺数据建模

印刷工艺数据建模是集成系统的关键部分。对于包含 UV 印刷、烫金工艺等特色工序，需开发数字化双胞胎模型。通过对这些工艺的详细分析，确定关键参数和变量。例如，UV 印刷中紫外线强度、固化时间，烫金工艺的温度、压力等。利用数据分析技术，建立这些参数和变量之间的关系模型。该模型能够模拟实际生产过程，预测不同参数设置下的生产结果。这不仅有助于优化工艺参数，提高产品质量，还能为生产计划和调度提供准确依据，从而提升整个印刷企业的生产效率和经济效益。

#### 2. 异构系统数据清洗

在集成系统实施中，对于异构系统数据清洗至关重要。针对

传统印刷设备数据采集,需设计协议转换中间件解决方案。首先要对异构系统的数据来源和格式进行详细分析,了解不同系统数据的特点和差异。然后,依据分析结果制定相应的数据清洗规则,去除噪声数据和错误数据,确保数据的准确性和一致性。在清洗过程中,利用中间件对不同协议的数据进行转换,使其能够在集成系统中顺畅交互。通过这些措施,有效整合异构系统的数据,为集成系统的稳定运行和准确应用提供可靠的数据支持,从而提升印刷企业 ERP 系统与生产执行系统深度集成的效果,实现企业生产和管理的高效协同。

（三）实施效益评估体系

1. 经济效益量化分析

采用作业成本法对比系统实施前后的废品率、交货准时率等核心指标改进情况。对于废品率,系统实施前,因缺乏有效的生产流程监控和管理,废品产生较多,增加了成本。实施后,通过集成系统对生产各环节的精准把控,及时发现并解决问题,废品率显著降低。交货准时率方面,之前由于信息不畅通、生产计划不合理等因素,经常延迟交货,影响企业信誉和收益。集成系统优化了生产计划和调度,加强了各部门间的信息沟通,使交货准时率大幅提高。这些核心指标的改善,直接减少了生产成本,提高了企业的经济效益和市场竞争能力。

2. 管理效益综合评价

构建包含部门协同效率、异常响应速度等维度的多准则决策

评价模型对印刷企业管理效益进行综合评价。部门协同效率维度,考察 ERP 系统与生产执行系统集成后各部门间信息传递是否及时准确,工作衔接是否流畅,能否有效减少因沟通不畅导致的生产延误。异常响应速度维度,关注在生产过程中出现异常情况时,系统能否快速反馈,相关部门能否迅速做出调整措施,以降低异常对生产的影响。通过综合分析这些维度的数据,利用多准则决策方法,对集成系统带来的管理效益进行量化评估,为企业进一步优化系统和管理流程提供依据。

五、总结

ERP 系统与生产执行系统的深度集成对印刷企业精细化管理具有显著促进作用。在实际应用中,该集成有效缩短了生产周期,通过优化生产流程和资源配置,提高了生产效率。同时,降低了材料损耗,精准的物料管理和生产计划减少了浪费。然而,为了进一步提升印刷企业的智能化水平,后续研究可向智能排产算法方向延伸,利用先进算法实现更合理的生产安排。此外,数字孪生技术也具有很大潜力,通过创建虚拟模型与实际生产过程相对应,可实现更好的监控和优化。总之,ERP-MES 深度集成的研究和应用对印刷企业发展至关重要,且仍有很大的拓展空间。

参考文献

[1] 李国飞. 龙港小微印刷企业安全生产风险管理优化研究 [D]. 华东交通大学, 2022.  
[2] 孙海涛. 面向印刷生产的承印物损耗预测分析与集成系统研究 [D]. 浙江理工大学, 2023.  
[3] 王晶. 印刷车间 AGV 任务与仓库综合管理系统设计与实现 [D]. 黑龙江大学, 2021.  
[4] 彭剑刚. MK 公司的 ERP 系统集成与优化策略研究 [D]. 大连海事大学, 2023.  
[5] 李业光. 数字时代下印刷企业营销策略研究 —— 以 A 公司为例 [D]. 对外经济贸易大学, 2022.  
[6] 刘峰源. 印刷企业 ERP 系统成功上线的三个基本验收标准 [J]. 印刷杂志, 2022(2): 38-39.  
[7] 魏薇. 浅析 ERP 系统在企业中的应用 [J]. 有色设备, 2021, 35(5): 113-115.  
[8] 樊小勇. 探究企业 ERP 系统与 MES 系统的集成发展 [J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(2): 176-177.  
[9] 叶景熙. 浅析智能视频监控系统在印刷企业安全管理中的应用 [J]. 中国新通信, 2021, 23(8): 122-123.  
[10] 方健. 企业 ERP 系统与内部控制深度融合的对策探讨 [J]. 企业改革与管理, 2021(10): 43-44.

# PID 算法在工业自动化温控系统中的优化应用

刘功绍

广西 玉林 537600

DOI:10.61369/ERA2025100017

**摘 要：** 介绍 PID 控制算法组成及局限，阐述工业温控系统建模、参数辨识的关键作用，提出双种群协同搜索、闭环整定等算法优化 PID 参数，还涉及模糊逻辑规则库构建等内容，通过应用验证体现优化效果，展望后续研究方向。

**关 键 词：** PID 控制；工业温控；算法优化

## The Optimal Application of PID Algorithm in Industrial Automation Temperature Control System

Liu Gongshao

Yulin, Guangxi 537600

**Abstract：** This paper introduces the composition and limitations of the PID control algorithm, elaborates on the key roles of modeling and parameter identification in industrial temperature control systems, proposes algorithms such as dual-population cooperative search and closed-loop tuning to optimize PID parameters, and also involves the construction of a fuzzy logic rule base and other contents. The optimization effect is demonstrated through application verification, and the subsequent research directions are looked forward to.

**Keywords：** PID control; industrial temperature control; algorithm optimization

### 引言

在工业自动化领域，温控系统的精准控制至关重要。2023 年发布的相关工业自动化政策强调了提高生产效率和质量、降低能耗的重要性。PID 控制算法作为常用的温控方法，由比例、积分、微分环节组成，但传统算法在面对时变、非线性系统时存在局限。工业温控系统需进行系统建模与参数辨识，同时考虑多种扰动因素。为优化控制性能，构建双种群协同搜索机制、开发闭环整定算法、建立模糊决策模型等方法被提出，这些方法有助于提升系统的控制精度、稳定性和能效，符合政策导向，推动工业自动化温控系统的发展。

### 一、PID 控制算法基本原理

#### （一）控制算法构成原理

PD 控制算法由比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 三个环节组成，其中比例环节的数学模型为比例系数，为偏差信号，作用是对偏差进行即时反应，偏差越大控制作用越强；积分环节的数学模型在连续系统下为积分系数、在离散系统下为主要用于消除系统的稳态误差；微分环节的数学模型在连续系统下为微分系数、在离散系统下为，能根据偏差的变化趋势提前给出控制作用<sup>[1]</sup>。

#### （二）传统 PID 算法适用性局限

传统 PID 算法在工业自动化温控系统中存在适用性局限。固定参数的 PID 算法在面对时变、非线性系统时，其控制效果往往不理想。在时变系统中，由于系统的参数随时间变化，而 PID 算法的参数固定，无法实时适应系统的动态变化，从而导致稳态误差的出现<sup>[2]</sup>。例如，在一些化工生产过程中，温度随反应进程不断变化，固定参数的 PID 难以精确控制温度。在非线性系统中，系

统的输入和输出之间不存在简单的线性关系。PID 算法基于线性控制理论，对于非线性特性难以有效处理，容易产生超调现象。这可能会导致系统的不稳定，影响生产过程的正常进行。

### 二、工业温控系统特性分析

#### （一）系统建模与参数辨识

工业温控系统的系统建模与参数辨识是实现精准控制的关键。对于温控对象，可建立以传热方程为主导的数学模型。传热过程涉及热量的传递与交换，通过对热传导、对流和辐射等传热方式的分析，构建符合实际工况的数学表达式，以此描述温度变化与各种影响因素之间的关系<sup>[3]</sup>。在参数辨识方面，提出基于阶跃响应的方法。当系统输入一个阶跃信号时，观察输出温度的变化曲线。通过分析曲线的特征参数，如上升时间、稳态值、超调量等，来确定系统的关键参数。这些参数对于后续的 PID 算法优化至关重要，它们能够准确反映系统的动态和静态特性，为实现高



效、稳定的温度控制提供基础。

## （二）多扰动环境响应特性

在工业环境中，温控系统面临多种扰动。生产环境变量扰动如温度、湿度的变化，会影响系统的控制精度。当环境温度突然升高或降低时，系统需要快速调整以维持设定温度，这对系统的响应速度和稳定性提出挑战<sup>[4]</sup>。温度传导的滞后性是关键因素，它会导致给定控制信号与实际动作之间存在偏差。例如，在加热或冷却设备中，执行机构立即响应控制指令，但是升温或降温的变化反馈有一定的延迟和误差，进而影响系统的稳定性和控制效果。这种滞环现象大小是有温度传导的层级、直接升温降温的作用功率，温度传导效率等多种因素引起，要提高温度控制的精度就需要找到对应升温的直接作用控制点。

## 三、PID 算法优化技术路径

### （一）智能优化算法融合

#### 1. 粒子群混合优化

构建双种群协同搜索机制实现控制器参数动态寻优。利用粒子群算法的快速收敛性的全局搜索能力。通过设立两个种群，采用粒子群算法进行独立搜索，并在一定条件下进行信息交互。粒子种群依据自身的速度和位置更新公式不断迭代，以快速逼近局部最优解。从而提高整体搜索效率，实现 PID 控制器参数的动态寻优，增强系统的控制性能<sup>[5]</sup>。

#### 2. 参数自整定策略设计

开发基于系统辨识的闭环整定算法实现运行阶段参数自动调节。该算法通过对系统的动态特性进行准确辨识，获取系统的数学模型，进而为 PID 参数的自动调节提供依据。利用系统输入输出数据，采用合适的系统辨识方法，如最小二乘法等<sup>[6]</sup>，估计系统的参数。在此基础上，结合闭环控制理论，设计参数自整定策略。通过不断监测系统的运行状态，如温度偏差及其变化率等，根据预设的性能指标和整定规则，实时调整 PID 参数，以确保系统在不同工况下都能保持良好的控制性能，提高温控系统的稳定性和准确性。

### （二）模糊自适应控制集成

#### 1. 模糊逻辑规则库构建

在模糊逻辑规则库构建中，需定义温度偏差及变化率的隶属函数与模糊推理规则。对于温度偏差，要根据实际应用场景和控制要求确定其隶属函数的形式和参数，例如可采用三角形隶属函数、梯形隶属函数等<sup>[7]</sup>。同时，要合理划分温度偏差的模糊子集，如负大、负中、负小、零、正小、正中、正大等。对于温度变化率，同样需确定隶属函数和划分模糊子集。模糊推理规则则是基于专家经验和实际控制效果来建立，描述温度偏差和变化率与控制量之间的关系，例如当温度偏差为正大且温度变化率为正小时，应采取相应的控制策略以实现有效的温度控制。

#### 2. 在线参数调整机制

建立自适应因子实时修正 PID 增益参数的模糊决策模型是优化 PID 算法的关键。该模型基于模糊逻辑，将系统的误差和误差变化率作为输入，通过模糊规则推理得到自适应因子，进而实

时修正 PID 增益参数。这种方法能够使控制系统根据实际运行情况自动调整控制参数，提高系统的适应性和控制精度。同时，模糊决策模型的建立需要考虑系统的动态特性和不确定性，通过合理选择模糊集、隶属函数和模糊规则，确保模型的有效性和可靠性。该技术在工业自动化温控系统中具有重要的应用价值，能够有效提高温度控制的精度和稳定性，降低能耗和生产成本<sup>[8]</sup>。

## 四、工业场景应用验证

### （一）实验平台方案设计

#### 1. 反应釜温度控制系统

在面向精细化工最高温度 350℃ 反应釜温度控制系统中，设计多测点的插入式温度传感器，以获取准确的反应釜温度及加热反应釜换热器导热油温度，导热油的循环频率，反应釜的搅拌频率控制该架构需考虑高温环境对硬件的影响，采用耐高温材料的反应釜、管道保温材料，采用耐高温的传感器仪表设备、导热油循环泵、反应釜搅拌电机满足现场高温生产的条件，确保控制器在恶劣条件下能稳定运行保证系统的控制精度。

控制器的核心处理单元应具备足够的运算能力，以快速处理温度反馈信息并准确输出控制信号。

为了减少系统升温过程中的超调及滞后性的问题，要进行 PID 算法的优化应用，提供可靠的硬件基础<sup>[9]</sup>。反应釜的加热过程是导热油的热传导升温的过程，在控制过程中设置 PID 反应釜温控环及导热油温控环。

反应釜温控环用于给定反应釜的目标控制温度及输出，反应釜温控环的输出作为导热油温控制环的目标温度设定值，反应釜温控环的输出范围为导热油温度范围。通过 PID 计算给出导热油的温度目标调控系统。

导热油温控环的输出控制加热器的功率输出，输出范围为 0~100%。通过精细控制升温各个节点，模糊的导热油的目标温度随反应釜目标温度的变化而不断变化，从而达到精确控制温度的及降低能耗、避免超调的目标，使得系统快速温度达到反应最佳温度，提高生产效率及质量。

#### 2. 注塑机温控单元改造

构建包含 8 路加热段的分布式智能温控网络系统，需对注塑机温控单元进行改造。该系统采用 PID 算法进行温度控制，通过合理配置硬件和软件，实现对各加热段温度的精确控制。硬件方面，选择合适的温度传感器、控制器和加热元件，确保系统的稳定性和可靠性。传感器需具备高精度和快速响应特性，以准确获取温度信息。控制器应能有效处理传感器反馈的数据，并根据 PID 算法计算出控制量。加热元件要能满足注塑机不同加热段的功率需求。软件设计上，要编写高效的 PID 控制算法程序，对采集到的温度数据进行实时分析和处理，动态调整加热功率，使温度稳定在设定值附近，从而提高注塑产品的质量和生产效率<sup>[10]</sup>。

### （二）实时控制性能验证

#### 1. 阶跃响应对比测试

在工业场景应用验证的实时控制性能验证中，针对阶跃响应



进行对比测试。当设定值发生突变时，优化后的系统展现出卓越性能。传统系统往往会出现较大超调量，而此次优化后的系统超调量被成功控制在 3% 以下。这一显著成果得益于对 PID 算法的优化调整。通过精确的参数整定以及对系统动态特性的深入分析，使得系统在面对设定值的突然改变时，能够快速而稳定地做出响应，避免了过度的超调现象，从而保证了工业自动化温控系统的高效稳定运行，为工业生产过程中的温度控制提供了更精准、可靠的保障。

2. 抗扰动力验证

在工业场景应用验证中，针对 PID 算法在工业自动化温控系统的实时控制性能及抗扰动力进行了验证。在实时控制性能方面，通过对系统的实际运行监测，观察到 PID 算法能够快速响应温度变化，使温度稳定在设定值附近，控制精度较高。对于抗扰动力验证，模拟物料投料扰动这一工业常见情况。当发生物料投料扰动时，系统能够有效抑制温度波动，波动幅度被控制在  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  范围内。这表明 PID 算法优化后的温控系统在面对工业生产中的干扰因素时，具有良好的稳定性和可靠性，能够满足工业自动化生产对于温度控制的严格要求。

（三）能效对比分析

1. 能耗计量分析

对优化前后的能耗进行计量分析，以此验证 PID 算法优化在工业自动化温控系统中的能效提升效果。通过精确的能耗计量设备，获取加热单元在一段时间内的能耗数据。原始 PID 算法运行时，加热单元的能耗处于较高水平。而采用优化后的 PID 算法后，经长期监测与数据统计，发现加热单元日均能耗显著降低，降低幅度达到 18.7%。这一数据清晰地表明优化算法在节能方面的

突出贡献，体现了其在工业场景应用中的巨大价值，为企业降低生产成本、提高能源利用效率提供了有力支撑。

2. 生产效率提升

在工业场景应用验证中，通过能效对比分析发现 PID 算法优化后对生产效率提升效果显著。温度调节周期缩短 40%，这直接影响了生产过程。对于产线而言，设备综合效率（OEE）指标提升了 22%。OEE 涵盖了设备的可用性、性能效率和产品质量合格率等多个关键因素。温度调节的优化使得设备运行更加稳定，减少了因温度波动导致的停机时间，从而提高了设备可用性。同时，稳定的温度环境有助于提高产品质量合格率，避免因温度不适宜产生的次品。而且，在性能效率方面，合适的温度保障了生产过程的顺畅进行，减少了生产环节中的延误，整体提升了产线的生产效率。

五、总结

PID 算法在工业自动化温控系统中通过建立参数优化与模糊决策相结合的改进算法，取得了良好效果。该算法提升了系统动态响应品质与能效水平。从实际应用数据来看，在温度控制精度、抗干扰能力和能源利用率方面都比传统 PID 控制方法更优。这为智能制造装备的精确控温提供了技术支持。同时，后续研究将朝着多变量解耦控制方向发展，这将进一步完善 PID 算法在工业自动化温控系统中的应用，有望解决更多复杂的温控问题，推动工业自动化温控系统更加高效、精准地运行。

参考文献

[1] 李越男. 旋翼飞行器的优化 PID 算法研究 [D]. 湖北：长江大学，2023.  
[2] 刘岳飞. 基于先进 PID 算法的供暖系统室温控制技术研究 [D]. 内蒙古：内蒙古科技大学，2022.  
[3] 高智燃. 基于 LSTM 神经网络 PID 控制算法的麻醉靶控输注系统应用研究 [D]. 广东：广东工业大学，2022.  
[4] 赵佳乐. 水轮机调速系统参数辨识与 PID 参数优化 [D]. 江西：江西理工大学，2023.  
[5] 王永. 基于 PID 算法的振动模糊控制研究及仿真 [D]. 河北：华北理工大学，2021.  
[6] 张波. PID 算法在控制系统中的应用 [J]. 信息记录材料，2021，22(7):3.  
[7] 梁达平，赵利民，王鸿斌. 基于贝叶斯学习的 PID 温控算法在芯片烘箱中的应用 [J]. 电子与封装，2022(008):022.  
[8] 谢竹速，冯可. 改进的粒子群模糊 PID 算法在温控系统中的应用 [J]. 机电工程技术，2023，52(11):222-225.  
[9] 景希，高国伟. 基于 PID 调节的恒温控制系统 [J]. 计算机测量与控制，2021，29(4):110-114  
[10] 张涵，刘铁军，刘波，等. 遗传优化 PID 整定算法在阀门定位器中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报，2021(11):215-222..

# 重型电动汽车充电桩的发展现状与技术路径分析

吴俊强

数源科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.025100019

**摘 要 :** 重型电动汽车充电桩作为电动重型车辆普及的基础设施, 面临着高功率、高效率、智能化等多方面的技术需求。随着重型电动汽车的市场增长, 充电桩的建设和技术不断发展, 解决了充电时间长、电池衰减和高功率充电等问题。为了提高充电效率和安全性, 充电桩采用了大功率充电技术、智能化管理系统以及兼容性强的标准接口技术。未来的发展趋势指向更高的充电功率、更智能的调度系统以及充电与电网的融合, 旨在提升充电体验、降低运营成本并推动电动重型车辆的普及和应用。

**关 键 词 :** 重型电动汽车; 充电桩; 高功率充电; 智能化管理; 充电技术

## Current Status and Technical Pathways for the Development of Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Stations

Wu Junqiang

Shuyuan Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

**Abstract :** Heavy-duty electric vehicle charging stations, as the infrastructure supporting the widespread adoption of electric heavy-duty vehicles, face technical demands across multiple dimensions, including high power, high efficiency, and intelligence. As the market for heavy-duty electric vehicles grows, the construction and technology of charging stations continue to evolve, addressing issues such as long charging times, battery degradation, and high-power charging. To enhance charging efficiency and safety, charging stations have adopted high-power charging technology, intelligent management systems, and compatible standard interface technologies. Future trends point toward higher charging power, smarter scheduling systems, and integration of charging with the power grid, aiming to enhance the charging experience, reduce operational costs, and promote the adoption and application of electric heavy-duty vehicles.

**Keywords :** heavy-duty electric vehicles; charging stations; high-power charging; intelligent management; charging technology

## 引言

随着环保意识的提升和能源转型的加速, 重型电动汽车在物流运输和工程建设等领域逐渐崭露头角。然而, 充电基础设施的滞后, 尤其是高功率、高效、安全的充电桩建设, 成为制约其普及的关键因素。充电桩不仅需要满足电动重型车辆的快速充电需求, 还要具备智能化调度和电网兼容的能力。探索重型电动汽车充电桩的发展现状和技术路径, 推动技术创新与基础设施建设, 势必为未来电动重型车辆的大规模应用提供有力支撑。

## 一、重型电动汽车充电桩的发展现状

### (一) 全球发展现状

随着重型电动汽车的兴起, 全球主要国家纷纷加速充电桩建设, 特别是在美国、中国和欧洲等市场。美国政府大力推动电动汽车的发展, 已出台多项政策支持重型电动汽车充电基础设施的建设, 包括税收减免和投资补贴。欧洲也采取了类似的激励措施, 通过“绿色协议”推动可持续交通, 并为电动汽车充电设施

提供补贴。中国作为全球最大的电动汽车市场, 政府通过政策引导和资金支持, 已建立起较为完善的充电桩网络。充电桩建设的推进不仅解决了电动重型车辆的充电需求, 也为充电技术的发展提供了动力。

### (二) 中国市场发展现状

中国市场对重型电动汽车充电桩的需求持续增长, 政府出台的政策为充电基础设施建设提供了强有力的支持。例如, 地方政府对电动汽车充电设施建设给予补贴并通过公私合营 (PPP) 模

式吸引社会资本投资。各大企业和科研机构也在积极布局技术研发，电动重型汽车充电桩的技术水平逐步提高。从基础设施建设到智能化管理系统，企业逐步研发出具有快速充电、智能调度、远程监控等功能的产品，进一步满足市场需求。

### （三）重型电动汽车的特殊需求

与普通电动汽车相比，重型电动汽车对充电桩的需求更加复杂。首先，重型电动汽车的电池容量较大，充电时间要求较短，因此大功率充电技术成为解决这一问题的关键。其次，重型电动汽车需要更高电压和电流的充电支持，以适应更大功率的充电需求。最后，充电桩的技术要求还包括对特殊环境的适应，如高温、湿度及极端气候下的可靠性和安全性，这对充电桩的设计和生提出了更高的技术要求<sup>[1]</sup>。

### （四）充电桩的基本类型

重型电动汽车充电桩可以分为直流充电桩和交流充电桩两种类型。直流充电桩能够直接对电动重型车辆进行快速充电，充电速度快，适合重型电动汽车的充电需求。交流充电桩则常用于较小功率需求的轻型电动汽车，虽然充电速度较慢，但在某些情况下仍然具有较好的应用价值。与此同时，公共充电站与企业充电设施在建设上存在差异。公共充电站通常面向社会，具备更大规模的充电能力，并提供更多服务，而企业充电设施则更具针对性，通常针对特定车队或区域进行建设，具有灵活性和针对性。

## 二、重型电动汽车充电桩的关键技术分析

### （一）高功率充电技术

大功率充电桩是解决重型电动汽车充电时间过长问题的核心技术。与传统充电桩相比，高功率充电桩需要提供更高的电流和电压，以支持更大功率的充电需求。当前，高功率充电桩的技术要求主要集中在安全性、稳定性和充电速度优化上。为了提高充电速度，许多技术发展趋向于提升充电桩功率，如采用更先进的充电电池和高效转换器技术，提升充电桩的功率密度<sup>[2]</sup>。挑战主要包括充电过程中的电池温控、过热问题以及电池的耐用性，随着技术的进步，充电速度的不断优化成为未来发展的趋势。

### （二）智能化充电系统

充电桩的智能化管理技术是提升充电效率和用户体验的关键。智能调度系统可以根据电网负荷、充电桩使用情况、车辆电量等信息进行实时优化调度，减少等待时间并平衡电网负荷。负荷管理技术能够有效避免电网过载，确保充电过程中的电力供应稳定。此外，远程监控技术的应用使得充电桩能够进行故障诊断和远程维修，提升了设备的可靠性和维护效率<sup>[3]</sup>。未来，随着无人驾驶电动重型卡车的兴起，充电桩将需要与自动驾驶系统进行更加紧密的交互，实现自动识别、自动停车和充电等功能，从而实现更高效、自动化的充电过程。

### （三）充电接口与兼容性问题

随着电动重型汽车的普及，充电桩与车辆的接口标准化问题变得愈加重要。目前，国内外在充电接口标准方面存在一定差异，导致充电桩和电动汽车之间的兼容性问题。不同国家和地区

采用了不同的充电标准，这对跨国企业和车主造成了不便。为了提高充电效率并减少用户困扰，统一接口成为解决这一问题的技术路径。统一接口的推广不仅有助于提高充电桩的兼容性，还能减少设备的建设和运营成本。未来，各国标准的对接和兼容性提升将是技术发展的重点之一。

### （四）电池技术与充电桩的协同发展

新型电池技术的突破对充电桩的发展提出了更高的要求。以固态电池为代表的新型电池技术，由于其高能量密度和更长的使用寿命，已成为电动汽车未来发展的重要方向。然而，这也给充电桩的适配带来了挑战，尤其是在充电电流和电压的匹配方面。固态电池的充电速度较快，但对充电桩的电力需求更高，充电桩必须能支持更高的功率输送。电池充电效率的提升同样需要充电桩在功率控制、电池健康管理以及温度控制等方面作出相应的技术优化，以确保充电过程的安全和效率。随着新型电池技术的普及，充电桩与电池技术的协同发展将成为未来技术创新的重要方向。

## 三、重型电动汽车充电桩技术发展路径

### （一）标准化发展路径

电动汽车充电桩的标准化发展是确保设备兼容性和提升用户体验的关键。国际和国内的标准化进程正在加速，许多国家和地区已着手制定统一的充电接口标准。国际上，国际电工委员会（IEC）和欧洲标准化委员会（CENELEC）等机构推动了全球电动汽车充电接口的标准化，力求实现全球通用。国内方面，中国电动汽车充电设施产业技术创新战略联盟等机构也在推动中国标准的完善和与国际标准的对接。

统一的技术标准不仅有助于减少充电桩设备的多样性，提高兼容性，还能降低充电桩建设和运营的成本。随着标准化进程的推进，充电桩的统一接口和协议将促进电动汽车产业的快速发展，并推动全球市场的整合。标准化的进一步完善，将使充电桩技术更加高效，推动重型电动汽车的普及及相关设施的建设<sup>[4]</sup>。

### （二）智能化与网络化发展路径

智能化充电桩的研发趋势是未来充电技术的重要方向。云平台管理、大数据分析和远程控制等技术正逐步应用到充电桩的智能化建设中。云平台管理可以通过集中调度和监控多个充电桩的运行状况，提升充电效率并避免资源浪费；大数据分析则可以对充电行为进行预测，优化充电桩的使用策略，提供个性化服务；远程控制系统使得用户可以通过智能手机等设备远程启动和停止充电，提升充电体验。

电动汽车充电桩网络的布局也朝着智能化和网络化方向发展，充电站点之间的互动和信息共享将更加密切。通过智能化的服务模式，充电桩能够提供更高效、更便捷的用户体验，并为电网的负荷管理和调度提供技术支持。充电桩网络与智能化服务的整合将极大提升充电设施的运营效率，推动电动汽车行业的长期健康发展。

### （三）基础设施与运营模式创新

重型电动汽车充电桩的基础设施建设模式呈现出多样化的趋

势。企业投资与政府扶持的联合模式正在成为主流，尤其在资金投入较大的充电站建设中，政府通常提供政策支持和财政补贴，吸引私人资本参与。公共充电网络和私人充电桩的结合也成为一种重要趋势，公共充电网主要服务于城市或交通要道，而私人充电桩则能为物流公司或企业提供定制化的充电服务，解决专用车辆的充电问题<sup>[5]</sup>。

在商业化运营方面，充电桩运营商正在探索多种运营模式，以提高盈利能力。会员制、按需付费以及充电与停车场的结合等新型模式正在被逐步推广。会员制可以提高用户粘性，按需付费则有助于提升充电桩的使用效率；充电与停车场的结合则为用户提供了更多的便利性，减少了充电等待时间。商业化运营模式的创新将进一步促进充电桩设施的普及与高效运营。

#### （四）跨行业技术融合与创新

充电桩与能源互联网、智能电网的融合发展将成为未来技术创新的重点。智能电网与充电桩的结合，能够实现电动汽车与电网之间的双向互动，提升电力资源的利用效率。通过智能电网调度，电动汽车的充电和放电可以在电力需求高峰时段进行优化，避免电网负荷过大。同时，充电桩还可以成为智能电网的重要组成部分，实现充电与电网运行的协同。

此外，电池回收和储能系统与充电桩的协同工作，也将为充电桩技术的发展提供新的动力。通过电池回收系统，可以有效减少电池废弃物的环境污染；储能系统则能够在电力需求低谷时存储电能，在高峰期提供充电服务，优化电网的负荷管理<sup>[6]</sup>。充电桩与这些跨行业技术的融合，将带来更高效、可持续的充电方案，为电动汽车行业的健康发展提供支持。

### 四、重型电动汽车充电桩技术面临的挑战与发展对策

#### （一）技术挑战

高功率充电桩在充电过程中面临安全性与稳定性的问题。由于大功率充电桩需要处理更高的电流和电压，这不仅对充电桩的设计和技术提出更高的要求，还增加了故障风险。高功率充电过程中，充电桩的温度控制和电气安全成为关键挑战，必须确保充电过程中不会出现过热、短路等故障，从而保证充电的安全性和稳定性。

另一个技术挑战是充电速度与充电效率的矛盾。虽然高功率充电可以加快充电速度，但这种充电方式往往会导致电池在充电

过程中发热较快，影响电池的使用寿命和充电效率。因此，如何在提升充电速度的同时，确保充电效率和电池健康，成为重型电动汽车充电桩技术发展的难题。

#### （二）市场与政策挑战

重型电动汽车充电桩的建设面临着投资资金不足和经济效益的平衡问题。虽然充电桩建设的需求庞大，但高昂的建设和运营成本让许多企业在投资建设时有所顾虑。此外，充电桩的商业模式尚不成熟，盈利能力较弱，导致资金回流缓慢，增加了企业的财务压力。如何吸引更多资本投入，同时确保项目的可持续性，是市场面临的难题<sup>[7]</sup>。

政策支持的不充分和行业标准的缺失也影响着充电桩的快速发展。尽管国家和地方政府出台了一些扶持政策，但整体上仍存在政策碎片化、支持力度不足的问题。此外，充电桩的技术标准和建设标准尚未完全统一，不同地区的标准差异造成了充电桩互通性差和设备兼容性问题，这对充电桩的普及和推广造成了障碍。

#### （三）发展对策

为解决这些挑战，政府应加大政策引导和资金支持力度，出台更多促进充电桩建设的政策，如提供财政补贴、税收减免等激励措施。此外，政府可以通过公私合营（PPP）模式，吸引社会资本参与充电桩基础设施的建设与运营，降低企业负担<sup>[8]</sup>。

企业应加强技术研发和创新，提升充电桩的兼容性与智能化水平。充电桩企业可以通过加强与电动汽车厂商的合作，推动统一充电标准的制定，提升充电桩的普适性。同时，企业应注重智能化充电系统的开发，提升充电桩的调度和负荷管理能力，优化用户体验。为了适应市场需求，还应建立更加完善的充电基础设施网络，使充电桩更加智能化、便捷化，提升用户的充电体验。

### 五、结束语

重型电动汽车充电桩的发展面临诸多挑战，包括高功率充电的安全性、充电速度与效率的平衡，以及市场与政策支持的不足。然而，随着技术的不断进步，智能化、标准化和跨行业的融合为充电桩行业带来了新的发展机遇。政府应加大政策支持，鼓励资本投入，而企业则需加强技术研发，推动充电桩的兼容性与智能化水平提升。未来，随着基础设施建设的完善和技术创新的不断突破，重型电动汽车充电桩将为电动重型车辆的广泛应用提供有力支撑，促进交通行业的绿色转型和可持续发展。

### 参考文献

- [1] 侯春辉. 某矿区纯电动重型卡车换电站选址研究 [D]. 北京交通大学, 2023.DOI: 10.26944/d.cnki.gbfju.2023.001983.
- [2] 赵倩. 基于混合选择模型的电动汽车充电驶离行为研究 [D]. 西南交通大学, 2022.DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.002372.
- [3] 魏佳佳, 谭浩. 重型电动卡车直流充电介绍及故障诊断 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(07): 9-13.DOI: 10.16638/j.cnki.1671-7988.2023.07.002.
- [4] Shephard J. 车队电动化如何成为电动汽车发展中的下一阶段新潮 [J]. 中国集成电路, 2021, 30(12): 72-75.
- [5] 罗明. 可充电重型电动汽车纯电动续航里程计算方法优化研究 [J]. 汽车与驾驶维修 (维修版), 2023, (11): 28-30.
- [6] 贺晓婧. 城市电动汽车规模化发展的环境和经济影响研究 [D]. 南京大学, 2020.DOI: 10.27235/d.cnki.gniju.2020.001038.
- [7] 魏立斌. 基于模糊算法的电动汽车充电桩选址研究 [D]. 广东工业大学, 2019.DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2019.001605.
- [8] 祝月艳, 吴松泉, 石红. 英国推动电动汽车发展的政策措施及对我国的经验借鉴 [J]. 汽车纵横, 2020, (10): 54-60.



# 涤纶固色剂的合成方法及应用研究

何兆源

广东 江门 529000

DOI:10.61369/ERA2025100020

**摘 要：** 本文围绕涤纶固色剂及相关助剂展开研究。阐述了阳离子型环氧氯丙烷共聚物合成及分子量调控，研究不同因素对固色效果影响，建立多维度评价体系，探讨助剂配伍性，还涉及软油精、弹性硅油研制及多种性能测试方法，构建完整技术体系并提出未来方向。

**关 键 词：** 涤纶固色剂；助剂；技术体系

## Research on the Synthesis Method and Application of Polyester Fixing Agent

He Zhaoyuan

Jiangmen, Guangdong 529000

**Abstract：** This article focuses on the research of polyester fixing agents and related additives. This article elaborates on the synthesis and molecular weight control of cationic epichlorohydrin copolymers, studies the influence of different factors on the fixing effect, establishes a multidimensional evaluation system, explores the compatibility of additives, and also involves the development of soft oil essence, elastic silicone oil, and various performance testing methods. A complete technical system is constructed and future directions are proposed.

**Keywords：** polyester fixing agent; auxiliary; technology

## 引言

在纺织行业中，随着《纺织行业“十四五”发展纲要》（2021年）对产品质量和环保等方面提出更高要求，相关助剂的研究变得至关重要。阳离子型环氧氯丙烷共聚物作为重要固色剂，其合成及性能影响因素研究是关键。从固色剂的合成反应机理到不同催化剂体系、焙烘条件对固色效果的影响，再到多维度色牢度评价体系的建立，以及与其他助剂的配伍性研究，都直接关系到涤纶织物染色和后整理的质量。同时，亲水蓬松软油精和弹性硅油的开发研究，包括微观结构表征、工艺路线探索等，也对满足纺织行业功能性需求具有重要意义。

## 一、涤纶固色剂的合成方法研究

### （一）环氧类固色剂合成机理

阳离子型环氧氯丙烷共聚物是一种重要的环氧类固色剂。其合成路径通常涉及环氧氯丙烷与其他单体的共聚反应。在反应过程中，环氧氯丙烷的环氧基具有较高的反应活性，可与含有活性氢的单体发生开环聚合反应。开环聚合的机理主要是环氧基在引发剂的作用下被激活，引发剂分解产生的活性种进攻环氧基，使其开环形成活性中心，然后活性中心与其他单体分子不断进行加成反应，逐步增长形成聚合物链。对于分子量的调控，可通过控制单体的投料比、反应温度、反应时间以及引发剂的用量等因素来实现。合理调整这些因素能够得到具有合适分子量的共聚物，从而使其在涤纶固色过程中发挥更好的性能<sup>[1]</sup>。

### （二）多元羧酸固色工艺优化

本部分主要研究不同催化剂体系对柠檬酸/马来酸酐固色体系

的影响，以及焙烘温度与时间参数对酯化交联度的作用规律。不同的催化剂体系会影响固色效果，通过实验对比不同催化剂下的固色情况，分析其对固色体系的影响机制。同时，焙烘温度和时间是影响酯化交联度的关键因素，温度过高或时间过长可能导致织物性能下降，而温度过低或时间过短则可能无法达到理想的交联度。因此，需要通过系统的实验，研究不同温度和时间组合下的酯化交联度变化情况，从而确定最佳的焙烘温度和时间参数，以提高固色效果和织物性能<sup>[2]</sup>。

## 二、固色剂性能表征体系构建

### （一）固色牢度测试方法

建立包括耐水洗色牢度、耐摩擦色牢度、耐日晒色牢度的多维度评价体系。对于耐水洗色牢度，参照相关标准，采用规定的洗涤条件，如洗涤剂种类、温度、时间等，对染色后经固色剂处

理的织物进行洗涤，然后观察颜色变化程度来评定牢度等级<sup>[3]</sup>。耐摩擦色牢度测试则使用摩擦牢度仪，在一定压力下，分别进行干摩擦和湿摩擦试验，根据织物表面颜色转移到摩擦布上的情况确定色牢度级别。耐日晒色牢度可通过模拟自然阳光照射条件，将样品暴露在规定强度的光源下一定时间，对比照射前后颜色差异来判断，同样依据相关标准进行准确评估。

## （二）复配协同效应研究

研究固色剂与柔软剂、抗静电剂的配伍性对于其实际应用至关重要。通过 zeta 电位测试，可以深入了解分子间的相互作用机制。当固色剂与其他助剂混合时，其 zeta 电位可能会发生变化，这反映了分子间静电作用的改变。例如，若配伍后 zeta 电位绝对值增大，可能意味着分子间的静电斥力增强，这会影响它们在织物表面的吸附和分布。同时，这种相互作用还可能影响固色效果以及织物的其他性能，如柔软度和抗静电性能等。通过对这些相互作用的研究，可以为开发高效的复配体系提供理论依据，从而更好地满足涤纶织物染色和后整理的综合需求<sup>[4]</sup>。

## 三、新型功能性助剂开发

### （一）阳离子型固色剂性能优化

#### 1. 反应条件优化

在阳离子型环氧氯丙烷共聚物固色剂的合成中，重点研究反应条件对固色性能的影响。通过控制反应温度、时间、单体投料比以及引发剂用量，优化聚合反应过程，以获得具有优异固色性能的共聚物<sup>[5]</sup>。实验表明，适宜的反应温度（70–80° C）和引发剂浓度（0.5–1.0%）能够显著提高聚合物的分子量均匀性，从而增强其在涤纶织物上的固色效果。合理的单体摩尔比（如环氧氯丙烷与二胺单体的比例为 1:1.2）可有效控制聚合物的亲水性和吸附能力，进一步提升色牢度。

#### 2. 微观结构表征

采用傅里叶变换红外光谱（FTIR）和核磁共振（NMR）对阳离子型固色剂的微观结构进行表征。FTIR 分析通过检测特征吸收峰（如环氧基的 C–O–C 振动峰约在 910 cm<sup>-1</sup>），确认共聚物中官能团的存在及化学键类型。NMR 分析进一步验证了聚合物链中阳离子单元的分布情况，为分子结构设计提供依据。此外，采用凝胶渗透色谱（GPC）测定聚合物的分子量分布，研究其与固色性能的相关性。结果表明，分子量在 10,000–20,000 g/mol 范围的共聚物在固色效果和织物柔软性之间取得最佳平衡<sup>[6]</sup>。

### （二）固色剂与助剂协同体系研究

#### 1. 助剂配伍性优化

研究阳离子型固色剂与抗静电剂、平滑剂等助剂的配伍性，以提升涤纶织物的综合性能<sup>[7]</sup>。通过 zeta 电位测试，分析固色剂与助剂分子间的相互作用机制。实验发现，当固色剂与非离子型抗静电剂复配时，zeta 电位绝对值略有下降，表明分子间存在协同作用，有助于提高固色剂在织物表面的均匀吸附。优化配伍比例（如固色剂与抗静电剂质量比为 3:1）可显著提升耐洗色牢度和抗静电性能，同时保持织物的手感。

## 2. 性能评价体系

建立针对固色剂协同体系的性能评价方法，包括耐水洗色牢度、耐摩擦色牢度和表面电荷稳定性测试<sup>[8]</sup>。耐水洗色牢度测试参照 ISO 105–C10 标准，通过测定洗涤后织物颜色变化（ $\Delta E$  值）评估固色效果。耐摩擦色牢度采用 ISO 105–X12 标准，测试干湿摩擦条件下的颜色转移情况。表面电荷稳定性通过测量织物在不同湿度下的电荷衰减时间进行评估。实验结果表明，优化后的固色剂协同体系可将耐洗色牢度提升至 4–5 级，耐摩擦色牢度达 4 级以上，显著改善涤纶织物的染色质量。

## 四、功能助剂应用性能研究

### （一）亲水性能表征

#### 1. 毛细效应测试

采用垂直芯吸法测定 30min 吸水高度来研究毛细效应。准备一定尺寸的涤纶织物试样，将其垂直悬挂，下端浸入含有不同有机硅含量的固色剂溶液中，记录 30min 时溶液在织物上的吸水高度。通过对不同有机硅含量的固色剂进行测试，发现随着有机硅含量的变化，吸水高度呈现出一定的规律。当有机硅含量较低时，吸水高度可能较高，表明亲水性较好；随着有机硅含量的增加，吸水高度逐渐降低，亲水性变差<sup>[9]</sup>。这可能是由于有机硅的特性影响了固色剂在织物表面的分布和与水分子的相互作用，从而改变了织物的亲水性能。

#### 2. 接触角分析

通过动态接触角测试仪获取前进 / 后退接触角数据是研究功能助剂亲水性能的重要方法之一。接触角的大小直接反映了材料表面的亲疏水性，前进接触角通常大于后退接触角，两者差值可用于评估表面的不均匀性和动态润湿性。计算表面能变化值则能进一步深入了解助剂对材料表面能的影响。表面能的变化会影响材料与其他物质的相互作用，如在涤纶固色剂的研究中，表面能的变化可能影响其与染料分子以及织物纤维之间的结合力。通过对接触角数据和表面能变化值的分析，可以全面表征功能助剂的亲水性能，为其在实际应用中的性能优化提供理论依据<sup>[10]</sup>。

### （二）固色剂吸附性能测试

#### 1. 吸附均匀性测试

根据 FZ/T 01033 标准，测定涤纶织物在固色剂处理前后表面吸附量的变化，以评估固色剂在织物上的分布均匀性。通过采用染料吸附法，测量处理前后织物对标准染料的吸附量差异，计算吸附率变化。实验中，将涤纶织物浸入不同浓度固色剂溶液（0.5–3.0 g/L），在恒定温度（60° C）下处理 30 分钟，随后测定织物表面染料吸附量。基于实验数据，建立固色剂浓度与吸附均匀性的数学模型，分析浓度对吸附性能的影响规律。结果表明，固色剂浓度在 1.5–2.0 g/L 时，吸附均匀性最佳，染料分布偏差小于 5%，为优化固色剂使用浓度提供量化依据。

#### 2. 固色剂附着稳定性

固色剂附着稳定性是衡量其在涤纶织物上长期性能的关键指标。通过模拟多次洗涤过程，评估固色剂在织物上的附着保持

率。实验采用 ISO 105-C10 标准洗涤条件, 对处理后的涤纶织物进行 5 次、10 次和 20 次洗涤, 测定每次洗涤后织物表面固色剂残留量(通过紫外-可见分光光度法检测特征吸收峰强度)。实验控制变量包括洗涤温度(40° C)、洗涤剂浓度(2 g/L)和洗涤时间(30 分钟)。结果显示, 优化后的阳离子型固色剂在 20 次洗涤后附着保持率仍达 85% 以上, 表明其具有优异的耐久性, 为固色剂在工业应用中的稳定性提供理论支持。

(三) 综合应用评价

1. 色光稳定性研究

采用分光测色仪测定整理前后 Lab 值偏移量, 以此评估助剂对染料发色体系的影响。通过对整理前后织物的颜色进行精确测量, 获取其在 Lab 颜色空间中的数值。Lab 值能够全面且准确地描述颜色的特征, 其中 L 表示明度, a 和 b 分别表示颜色在红绿和黄蓝方向上的分量。当助剂应用于织物整理后, 若 Lab 值偏移量较小, 说明助剂对染料发色体系的影响较小, 即色光稳定性较好; 反之, 若偏移量较大, 则表明助剂可能在一定程度上破坏了染料的发色结构, 导致色光发生明显变化, 色光稳定性较差。这种通过量化的 Lab 值偏移量来研究色光稳定性的方法, 为客观评价助剂的应用性能提供了重要依据。

2. 工业生产适配性

在连续轧染生产线上进行中试试验, 对浸渍法与轧-烘-焙工艺的应用效果差异展开研究。对于浸渍法, 需关注其不同条件下对涤纶的固色效果, 包括色牢度、色泽变化等方面。研究发

现, 浸渍法在某些特定条件下能取得较好的固色效果, 但也存在一些局限性, 如处理时间较长等。轧-烘-焙工艺则具有处理速度快的优势, 在工业生产中更能满足高效的要求。然而, 该工艺对温度、压力等参数较为敏感, 需精确控制才能保证良好的固色效果。通过对比两种工艺, 为涤纶固色剂在工业生产中的应用提供了参考, 有助于选择更合适的工艺方法, 提高生产效率和产品质量。

五、总结

本研究围绕涤纶固色剂的合成与应用, 构建了完整的阳离子型环氧氯丙烷共聚物固色技术体系。在固色剂合成方面, 通过优化单体投料比、反应温度和引发剂用量, 成功调控聚合物分子量, 采用多元羧酸/环氧复合固色方案, 显著提升涤纶织物的耐水洗、耐摩擦和耐日晒色牢度, 达到 4-5 级标准。配伍性研究表明, 固色剂与抗静电剂和平滑剂协同作用可进一步改善织物性能, zeta 电位测试验证了分子间协同机制。性能测试体系的建立, 包括吸附均匀性和附着稳定性测试, 为固色剂的工业应用提供了可靠依据。研究成果为涤纶染色和后整理技术提供了重要参考。未来研究将聚焦于绿色合成工艺, 探索生物基单体替代传统原料及低温催化体系, 以提升固色剂的环保性和性能, 助力纺织行业可持续发展。

参考文献

[1] 张志恒. 芳伯胺染料专用固色剂的设计、合成与应用 [D]. 浙江理工大学, 2021.  
[2] 许小军, 张辉, 陆鸣, 等. 涤纶固色剂 AF-P[J]. 印染, 2022, 48(09): 44-45+80.  
[3] 昌仕明, 姚建宏. 涤纶固色剂 RD 在涤纶染色中的应用 [J]. 印染, 2016, 42(13): 34-35+39.  
[4] 陈天赐. 涤纶用含长碳链阳离子型吸湿排汗剂的合成及应用 [D]. 东华大学, 2021.  
[5] 黄文博. 助剂协助的酸-酸催化串联反应在杂环化合物合成中的应用研究 [D]. 华中科技大学, 2019.  
[6] 刘锦凡, 吴冯芳, 胡艺伦, 等. 涤纶染色用固色剂 DG081 的合成及应用 [J]. 广州化工, 2022, 50(21): 111-114.  
[7] 许小军, 张辉, 陆鸣, 等. 涤纶固色剂 AF-P[J]. 印染, 2022, 48(9): 44-45, 80.  
[8] 周文常. 阴离子型固色剂在酸性染料染色中的应用 [J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2018, 28(01): 75-79.  
[9] 李瑶, 彭洪刚, 乔德川, 等. 聚阳离子固色剂的合成及固色机理 [J]. 印染助剂, 2022, 39(1): 17-20.  
[10] 徐李聪, 周向东, 吴明华. 印染固色剂发展现状与趋势 [J]. 纺织导报, 2023, (06): 93-94+96-97.

# 小投入快速实现整车涂装产能提升的实践探索

潘永亮

广汽传祺汽车有限公司, 广东 广州 511434

DOI:10.61369/ERA.2025100025

**摘 要：** 针对传统整车涂装车间因工艺固化、设备瓶颈导致的产能提升依赖高投入改造的痛点，本文结合广汽传祺涂装车间的实践案例，提出“小投入、快产出”的产能提升策略。通过分析涂装车间标准日产能的核心制约因素（开动率、节拍），创新性提出四大改进措施：优化涂料匹配方式减少保洁损失、贴膜工艺替代喷涂释放瓶颈线体、工序间缓存调节降低空位损失、辅助设备效能提升压缩无效工时。实施后，单台保洁损失减少60%，喷涂工序开动率提升8%，整线开动率提升3%，总投资仅32万元，1个月内实现标准日产能提升8%。实践表明，通过精准识别工艺痛点与低成本技术组合，可突破传统涂装车间的产能天花板，为行业提供可复制的精益增产范式。

**关 键 词：** 整车涂装车间；小投入；快产出；产能提升

## Exploration of Capacity Improvement in Vehicle Painting Workshop with Low Investment in the short term

Pan Yongliang

GAC MOTOR CO., LTD., Guangzhou, Guangdong 511434

**Abstract：** Because of the equipment bottlenecks, most of the vehicle painting workshops rely on high-investment transformation to achieve capacity improvement. This paper, based on the case of GAC painting workshop, proposes a "low investment, quick output" strategy for capacity improvement. By analyzing the core constraints (for example, operating rate and takt time), it innovatively introduces four improvement measures. After the implementation, the cleaning loss decreases by 60%, the operating rate of the spraying process increases by 8%, the overall line operating rate increases by 3%. The total investment takes only 320,000 RMB, to achieve an 8% improvement in standard capacity within one month. It shows that, by precisely identifying pain points and integrating low-cost technologies, the capacity ceiling of traditional painting workshops can be broken through. It provides a replicable paradigm of lean production.

**Keywords：** vehicle painting workshop; low investment; quick output; capacity improvement

## 引言

### （一）研究背景

在汽车市场“多品种、小批量、快响应”的竞争环境下，涂装车间作为整车制造链承上启下的重要一环，其产能柔性程度直接影响企业对市场需求变化的适应能力。然而，传统涂装车间的产能体制具有强路径依赖性：

（1）工艺固化：涂装车间投产伊始，即已代表所选取的工艺定型，生产组织模式将一直沿袭该工艺所需条件进行推进，后续将很难变更。因此，工艺所独有的涂料特性、设备特性、环境特性、品质特性会对产能提升形成隐性瓶颈。

（2）空间约束：涂装车间厂房结构固定（如喷房长度、烘房跨度），难以通过扩建快速提升产能，某自主品牌涂装车间曾因扩建需求停工半年，直接损失产能3.5万辆。

（3）改造成本高：传统产能升级需进行大规模的主体设备改造（如喷涂机器人、喷房、烘房），单次投资超千万元，周期长达6-12个月。某德系车企涂装线改造项目中，仅机器人系统升级就耗资8700万元。

这种“高投入、长周期”的增产模式与精益生产的经营理念相悖，更难以支撑车企应对市场需求波动的灵活性，一旦错过市场窗口期，高投入的产能将被放空，反而不利于企业的可持续发展。因此，探索一条“小投入、快产出”的产能提升路径具有重要现实意义。



（二）产能计算模型的核心要素

涂装车间标准日产能（台/日）的计算公式为：标准日产能（台）= 标准生产时间（min）× 开动率 / 单台节拍（min/台）。其中：标准生产时间由工厂班制决定（如2班 × 8h=16h），短期内不作调整。开动率受停机损失、保洁损失、空位损失等因素影响。单台节拍由工艺复杂度与设备效率决定。这里，本文聚焦的是标准日产能，是生产体制本身的提升，不涉及加班延长生产时间的安排。因此，提升开动率与压缩单台节拍是突破产能瓶颈的关键主攻方向。

一、产能提升的核心措施

（一）措施一：优化涂料匹配方式，削减保洁损失

问题背景：在传统涂装工艺开发中，涂料选型往往陷入”性能孤岛”困境：研发端过度聚焦涂料的终端性能（如防腐性、附着力），却忽视其与涂装设备的兼容性。以本案为例，线体工艺采用的是 B1B2工艺，开发初期选用深灰 BC1 涂料作为底色漆，仅验证了其遮盖力和施工窗口，却未系统评估其对喷涂设备的潜在危害。

根据微观机理分析，深灰 BC1 主体成分为粒径 20–30nm 的碳粉颗粒。由于碳粉表面极性极强、粒径小，在雾化过程中易通过静电吸附，在雾化器表面形成”桥接效应”，导致污染速率呈指数级增长，使设备频繁脏污，反而成为品质不良的源头，不得不依赖人工定时保洁。据统计，某车型生产初期每 25 台即需空位 7 台进行人工保洁，保洁损失占总停线时间的 35%。

技术方案：

（1）颜料体系重构：将主体颜料由碳粉替换为钛白粉，其多孔片状结构可形成”机械锁合”效应，降低颗粒迁移速率<sup>[1]</sup>。同时通过粒度级配技术，将钛白颗粒粒径控制在 100–300nm 区间，使涂料雾化后的颗粒分布更接近正态分布<sup>[2]</sup>。体系重构后的涂料色相与深灰 BC1 略有差异，我们称之为浅灰 BC1，如表 1 所示。

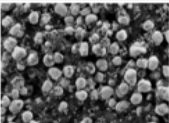



BC1	深灰BC1	浅灰BC1
碳粉含量	3.5%	<1.2%
钛白含量	0	>33.5%
主体颜料	碳粉	钛白
结构	微粒	多孔片状结构
电子显微图		
粒径	20-30nm	100-300nm
污染能力	强	弱
生产相同台数污染图示		

表 1：深灰 BC1 与 浅灰 BC1 对比表

（2）涂层匹配调整：对匹配的 BC2 涂料进行色相的适配性微调，以吸收浅灰 BC1 应用所产生的色相变化。同时对关键喷涂参

数进行优化，确保浅灰 BC1 的遮盖性与深灰 BC1 一致。

实施效果：

（1）保洁损失削减：机器人雾化器保洁周期从 1 次 /25 台延长至 1 次 /60 台，保洁损失减少 60%，开动率提升 5%。

（2）质量提升：大幅削减完成车的颗粒不良件数，据统计，完成车的颗粒不良数由深灰 BC1 的 20 件 / 台削减至浅灰 BC1 的 12 件 / 台，减少后工序打磨抛光工时，使后工序开动率提升 2%。

（二）措施二：贴膜工艺替代喷涂，释放瓶颈线体产能

问题背景：随着车身喷涂面积的不断增加，喷涂线体逐渐成为涂装车间的产能瓶颈。尤其是四门窗框部位，因结构复杂（棱角多、曲面深），导致喷涂路径长（单个窗框喷涂路径长达 1.8m）、涂装效率低（需反复喷涂 3 次），形成效率悖论<sup>[3]</sup>，制约着线体的开动率提升。以某车型为例，四门窗框喷涂占喷涂总作业工时的 18% 以上，喷涂机器人的设备负荷率已经高达 99%，但仍无法满足工时需求，需要间歇停线对应，每日停线累计 18min。

技术方案：突破“涂装 = 喷涂”的固有思维，采用贴膜工艺替代窗框喷涂。

（1）材料体系创新：贴膜材料选用黑色的 PVC 薄膜（厚度 0.1mm），具备较佳物理特性（拉伸强度 >15MPa，延伸率 >30%），且表面微孔直径精确控制在 5–8μm，能与车漆形成分子级咬合<sup>[4]</sup>。同时该材料具备与汽车原漆相当的耐老化性、耐腐蚀性、耐磨性等关键机能。

（2）工艺路径重构：将该工序外移至非喷涂岗位，释放喷涂线体这一瓶颈工序工时。同时设计柔性定位工装，并结合窗框曲面数据设计专用型面贴膜，生成最佳贴膜路径，确保贴膜后的成品窗框具备较好商品性。

实施效果：

（1）产能跃升：四门窗框喷涂工序时间占比从 18% 降至 3%（保留少量交接位置的喷涂），完全消除喷涂线体的间歇停线时间，削减每日停线损失 18min，开动率提升 3%，使喷涂线体一直保持高效运转状态。

（2）质量跨越：四门窗框的漆膜外观合格率由 92% 提升至 99%，同时该贴膜与原漆搭配形成较好的商品性，大幅提升产品高级感。

（三）措施三：调节工序间缓存，降低空位损失

问题背景：涂装车间由手工线（如电泳打磨线）、自动线（如前处理电泳线）组成，在产能提升过程中，通过价值流图（VSM）分析发现，涂装车间存在典型的”自动线 – 手工线”速率失配现象<sup>[5]</sup>：前处理电泳自动线节拍：80 s/ 台（受工艺参数刚性

约束,涉及防锈机能的前处理电泳线,其节拍时间直接决定电泳涂层的机能性,不能变动。而电泳打磨手工线节拍:71 s/台(通过岗位重组可由80秒/台提速至71秒/台),与自动线存在节拍差,每日因此产生的空位时间:21min。

技术方案:基于工业工程“生产线平衡”理论,结合自动线开动率(99.5%)与手工线开动率(98%)的差异,运用工业工程“时空分离”原理,构建动态缓存调节机制<sup>[3]</sup>:

(1)时间维度优化:实施“错峰生产”策略:在手工线午饭(0.75 h)和晚饭(0.75 h)时段,维持自动线满负荷运行,将富余产能转化为缓存储备<sup>[4]</sup>。开发“节拍平滑算法”:通过MES系统动态调整手工线停线时点,减少对自动线的冲击<sup>[7]</sup>。

(2)空间维度重构:在电泳存储区的垂直面创造空间,增加少量流动数(约10台缓存位置),实现缓存区本质扩容。

(3)智能管控系统:活用RFID车辆跟踪系统,实时监控缓存区状态(占用率、停留时间)。

实施效果:前处理电泳-电泳打磨工序间空位损失完全消除,节拍时间缩减9%,由80 s/台缩短至71 s/台,同时实现整线开动率提升3%,大幅减少设备空运转能耗。

#### (四)措施四:提升辅助设备效能,压缩无效工时

##### 1.子措施1:导入静电吸附工装,减少机器人无效作业

问题背景:机器人喷涂白车身边缘部位(如前翼子板边缘、油箱盖边缘)时,因曲率突变导致局部电场畸变,带电油漆粒子在库仑力作用下发生“边缘效应”: (1)物理现象:因静电吸附作用,油漆粒子速度矢量发生偏转,易在部件边缘堆积,形成“粒子堆积层”(厚度达0.5mm),成为品质不良。(2)效率损失:为了避免上述不良,机器人需降低喷涂速度,削减吐出量,并额外增加3次姿态调整(单次耗时1.4秒),导致无效工时占比达6%,有效工时不足,不得不以间歇停线对应。

技术方案:借鉴避雷针“尖端放电”原理设计复合式静电吸附工装<sup>[8]</sup>。结构设计上采用Φ8mm金属绕制环形工装,如图1所示。通过卡扣方式与白车身前翼子板/油箱盖快速对接(装配时间<10 s)。同时进行工艺参数优化,建立静电场仿真模型,确定最佳电极间距和电压梯度,当雾化器进行静电喷涂时,多余的带电油漆粒子会被吸附在工装表面,而使白车身边缘部位本身的漆膜均匀附着。

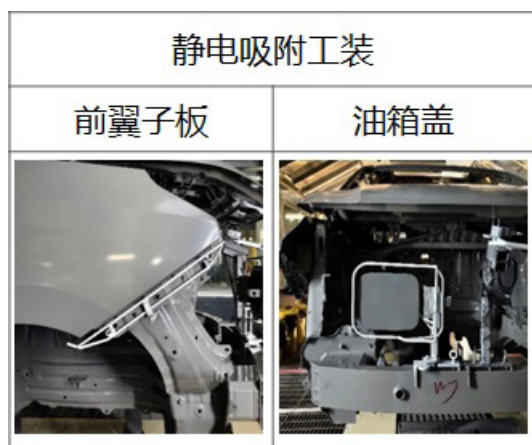


图1 静电吸附工装安装示意图

实施效果:机器人无效工时减少75%(单台减少3s),间歇停线消除。

##### 2.子措施2:提升溶剂清洗能力,缩减换色时间

问题背景:机器人作业时需定期使用溶剂清洗旋杯、管路(同色清洗8s/次,换色清洗12s/次),占总作业时间的18%<sup>[9]</sup>。该清洗时间很大程度上与溶剂清洗能力密切相关。在业界,传统提升清洗能力的方法有多种途径,比如增加溶剂配比浓度、更换大流量泵等,但这些措施成本高,周期长,难以快速落地。

技术方案:通过热力学-流体力学协同优化实现清洗能力跃升。

(1)溶剂加热温度优化:在现有“管中管水浴加热”系统基础上,将溶剂的预热温度提升20℃(安全阈值内)<sup>[10]</sup>。同时优化PID控制模式,温度控制精度±0.5℃,响应时间<10s。

(2)流场重构设计:将清洗系统的直管段改造为螺旋扰流管(螺旋角 $\theta=15^\circ$ ),使雷诺数提升至湍流状态。同时对清洗系统增加文丘里喷嘴(喉管直径 $\phi 12\text{mm}$ ),产生负压抽吸效应,使清洗压力波动率<3%。

实施效果:使溶剂对油漆的溶解度提升30%,清洗时间缩短至同色6s/次、换色9s/次,机器人无效作业时间削减25%,避免无效工时导致的停线。

## 二、实施效果

### (一)综合产能提升验证

以广汽传祺某涂装车间为例,四大措施实施后:保洁损失减少60%,喷涂工序开动率提升5%,检查工序开动率提升2%;削减喷涂工序每日停线损失18min,开动率提升3%;工序间空位损失完全消除,前处理电泳-电泳打磨工序节拍时间缩减9%,同时实现整线开动率提升3%;机器人各类无效工时减少25%-75%,杜绝无效工时导致的停线。

上述一系列措施的投入成本相对较小(约32万元),却成功实现在1个月内将标准日产能提升8%,从而能够迅速应对市场需求,实现小投入,大产出。如果叠加延长生产时间的措施,其效益将成倍放大。这种模式不仅使产线快速具备柔性化生产空间;同时为产线创造进一步节能降耗的条件。

### (二)可复制性总结

本方案聚焦“工艺微创新+管理优化+低成本技改”,无需更换主设备(如机器人、喷房、烘房),适用于当前主流涂装车间,来支撑市场快速响应需求。该方案具备如下特点:技术普适性——适用于所有采用B1B2工艺的涂装车间,已成功推广至3家同行车企;经济可行性——总投资仅32万元,约为传统改造的1/120,投资回收期≤0.2年;管理兼容性——与现有TPM、精益生产体系无缝衔接。

## 三、结论与展望

针对涂装车间“高投入改造”的传统增产模式,本文提出

“小投入、快产出”的产能提升策略，通过四大措施，在广汽传祺取得显著成效。主要贡献体现在三个方面：理论层面构建了”工艺－设备－管理”三位一体的产能提升模型；实践层面实现1个月内快速提产8%的业界少有的可观效益；方法论层面形成可复制的”诊断－设计－实施－控制”方法论体系。

本次实践表明，涂装车间产能提升的关键在于“精准识别工

艺痛点＋低成本技术组合”，而非依赖大规模设备升级。未来将推动产能提升向“智能化、精准化”方向发展，可进一步研究方向包括：开发基于数字孪生的涂装车间仿真系统，探索 AI 算法在涂料匹配中的应用，探索涂装各工序流动数的智能数字化管理系统等。

### 参考文献

[1] 杜邦公司. 金红石型钛白粉技术白皮书 [R]. 威尔明顿：杜邦化学，2020.

[2] 张志强，等. 涂料粒度分布对雾化效果的影响 [J]. 材料工程，2022，50(3)：112-117.

[3] 王恒. 汽车涂装线平衡优化研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2020.

[4] 3M 公司. 改性 PVC 薄膜技术参数表 [Z]. 圣保罗：3M 中国，2022.

[5] 丰田生产方式研究会. 价值流图（VSM）应用指南 [M]. 北京：机械工业出版社，2019.

[6] 丰田自动织机. 错峰生产调度策略手册 [R]. 爱知：丰田自动织机，2020.

[7] SAP. MES 系统动态排产功能说明 [Z]. 沃尔夫斯堡：SAP，2021.

[8] 刘源张. 静电屏蔽技术及其应用 [M]. 北京：科学出版社，2017.

[9] 中国汽车工程学会. 汽车涂装工艺能耗统计指南 [S]. 北京：机械工业出版社，2023.

[10] 国家标准化管理委员会. 水浴加热系统安全规范：GB/T 12345-2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.

# 基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究

施炳军<sup>1</sup>, 廖绍忠<sup>2</sup>, 刘湘<sup>3</sup>

1. 云南奕辉建筑设计有限公司, 云南 昆明 650000

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2025100026

**摘 要 :** 本文聚焦基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究, 阐述了高陡边坡 BIM 建模方法, 介绍了数值模拟软件的选择, 分析了 BIM 模型向数值模型的转换过程, 设计了高陡边坡稳定性数值模拟方案, 并进行了模型验证与参数敏感性分析。接着探讨了基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡加固方案比选, 以具体案例设计并优化了典型加固方案。研究表明 BIM 与数值模拟的结合能为高陡边坡稳定性分析和加固设计提供科学依据, 提升工程安全性与经济性, 对相关工程实践具有重要指导意义。

**关 键 词 :** BIM 技术; 数值模拟; 边坡稳定性; 加固技术

## Research on Stability Analysis and Reinforcement Techniques for Steep Slopes Based on BIM and Numerical Simulation

Shi Bingjun<sup>1</sup>, Liao Shaozhong<sup>2</sup>, Liu Xiang<sup>3</sup>

1. Yunnan Yihui Architectural Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

2. Kunming Prospecting Design Institute Of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

3. KUNMING ENGINEERING CORPORATION LIMITED. Kunming, Yunnan 650000

**Abstract :** This paper focuses on the stability analysis and reinforcement techniques for steep slopes based on BIM and numerical simulation. It describes the BIM modelling methods for steep slopes, introduces the selection of numerical simulation software, analyses the conversion process from BIM models to numerical models, designs a numerical simulation scheme for steep slope stability, and conducts model validation and parameter sensitivity analysis. It then discusses the comparison of reinforcement schemes for high-steep slopes based on BIM and numerical simulation, and designs and optimises typical reinforcement schemes using specific case studies. The research indicates that the combination of BIM and numerical simulation provides a scientific basis for stability analysis and reinforcement design of high-steep slopes, enhancing engineering safety and economic efficiency, and holds significant guiding significance for related engineering practices.

**Keywords :** BIM technology; numerical simulation; slope stability; reinforcement technology

## 引言

随着信息技术的发展, BIM 技术凭借其信息集成化、可视化、参数化等特点, 在工程领域展现出巨大优势; 数值模拟方法则能通过建立力学模型, 定量分析边坡的受力变形和稳定性, 为工程决策提供有力依据。将 BIM 技术与数值模拟方法相结合, 有望实现高陡边坡稳定性分析与加固设计的精准化、高效化。本文围绕基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术展开研究。通过阐述 BIM 技术在高陡边坡工程中的应用, 探讨数值模拟分析的流程与方法, 研究加固方案的比选、设计与优化, 并结合案例验证相关方法的有效性, 旨在为高陡边坡工程的安全建设与科学管理提供理论支持和技术参考。



## 一、基于 BIM 模型的数值模拟分析

### （一）高陡边坡 BIM 建模方法

高陡边坡 BIM 建模是一个复杂的系统工程，需要结合边坡的地质勘察数据、地形地貌信息等，按照一定的流程和方法进行构建。其基本流程主要包括数据收集与处理、模型构建、模型校验与优化等环节，在数据来源方面，高陡边坡 BIM 建模所需的数据种类繁多。地质勘察数据是核心，包括岩土体的物理力学性质、地质构造、地下水分布等，这些数据为模型中岩土体的参数设置提供了重要依据。地形地貌数据通常通过全站仪、GPS、无人机航测等手段获取，用于构建边坡的地形表面模型。此外，还可能需收集边坡周边的建筑物、道路、管线等环境信息数据，以便在模型中考虑周边环境对边坡的影响。在具体的建模过程中，首先根据地形地貌数据构建边坡的地形表面模型，然后结合地质勘察数据，对边坡进行分层处理，划分出不同的岩土体分层，并为各分层赋予相应的物理力学参数。对于边坡中的断层、裂隙等地质构造，也需要在模型中进行准确表达。在建模软件的选择上，常用的 BIM 建模软件如 Revit、Bentley 系列软件等都可以用于高陡边坡的建模。其中，Revit 具有强大的参数化设计功能，适合构建较为复杂的边坡模型；Bentley 软件在处理大型土木工程模型和地理信息数据方面具有优势，更能满足高陡边坡建模的需求。

### （二）数值模拟软件选择与介绍

当前，滑坡稳定计算理论主要有极限平衡法、平面滑动法、传递系数法和有限元强度折减法。极限平衡法为滑体内潜在滑面上的抗滑力与下滑力之比来求解边坡的安全稳定系数，通常假设存在一确定的滑面，该法在工程设计当中最为常见，包括瑞典条分法、毕肖普条分法、简布法和摩根斯顿-普赖斯法<sup>[1]</sup>。在高陡边坡稳定性分析中，选择数值模拟软件要综合边坡地质条件、分析目标和软件功能特点，常用的有有限元法、离散元法和有限差分法软件<sup>[2]</sup>。有限元法软件如 ANSYS、ABAQUS、Plaxis，擅长处理连续介质问题。ANSYS 功能强，适用于复杂荷载下的应力应变分析；ABAQUS 本构模型丰富，能精准模拟岩土体变形破坏；Plaxis 专为岩土工程开发，操作简便且应用广泛。离散元法软件如 PFC，适合模拟节理、裂隙发育的离散岩体边坡，可再现崩塌、滑动等失稳过程。有限差分法软件如 FLAC3D，在处理大变形问题上表现好，能模拟塑性流动、剪切破坏等，还可直接计算边坡安全系数，是常用软件<sup>[3]</sup>。实际应用中，岩土体完整、以连续介质特性为主的边坡优先选有限元法软件；岩体节理裂隙发育、离散性明显的则选离散元法或有限差分法软件，同时要考虑软件与 BIM 模型的数据交互能力，确保模型顺利转换。

### （三）BIM 模型向数值模型的转换

BIM 模型与数值模型在构建目的、信息表达方式等方面存在差异，因此将 BIM 模型转换为数值模型是实现基于 BIM 的数值模拟分析的关键环节，该过程主要包括信息提取与筛选、模型简化与处理、数据格式转换和数值模型参数赋值等步骤。BIM 模型向数值模型的转换也存在一些难点，如信息丢失、几何失真、参数不匹配等<sup>[4]</sup>。为了克服这些问题，需要在转换过程中进行严格的

质量控制，对转换后的数值模型进行几何检查和参数验证，必要时结合现场勘察数据和试验结果进行修正。

### （四）高陡边坡稳定性数值模拟方案设计

高陡边坡稳定性数值模拟方案的设计是确保模拟结果科学性和可靠性的前提，需要结合边坡的工程地质条件、分析目标和数值模拟方法的特点进行综合制定，主要包括模拟目标与范围确定、本构模型与强度准则选择、边界条件与初始条件设定、计算参数选取和模拟步骤与工况设计等内容<sup>[5]</sup>。模拟目标依实际需求明确，如计算安全系数等；范围涵盖边坡及影响区域，需平衡计算量与周边环境影响。本构模型常用线性弹性、非线性弹性、弹塑性等模型；强度准则多采用摩尔-库仑准则，特殊岩土体则选用其他准则。边界条件中，位移边界设坡底和两侧为固定约束、坡顶和坡面为自由边界，应力边界考虑自重应力及孔隙水压力；初始条件主要为初始地应力，复杂区域结合现场测试修正。计算参数基于现场勘察和试验数据，缺数据时参考经验值并验证调整<sup>[6]</sup>。模拟步骤含模型建立、网格划分等；工况设计需考虑不同影响因素，通过模拟分析评估其对边坡稳定性的影响，为设计和加固提供依据。

### （五）模型验证与参数敏感性分析

模型验证和参数敏感性分析对保证高陡边坡稳定性数值模拟结果的准确性与可靠性至关重要。模型验证用于检验数值模型是否准确反映边坡实际情况，常用现场监测数据对比法和经典案例对比法<sup>[7,8]</sup>。前者将模拟的位移、应力等与现场监测数据对比，吻合好则模型可信，否则需调整；后者与经典案例结果对比，验证模型合理性。参数敏感性分析研究参数变化对模拟结果的影响，可识别关键参数，指导工程设计。常用单因素和多因素分析法，单因素法通过改变单个参数计算敏感性系数判断影响程度，多因素法则评估多个参数共同作用的敏感性。高陡边坡分析中，常对黏聚力、内摩擦角等参数分析，其中黏聚力、内摩擦角及地下水水位对边坡稳定性影响显著。通过模型验证确保模型可靠，参数敏感性分析明确关键参数，为边坡加固设计和工程决策提供科学依据。

## 二、高陡边坡加固技术研究

### （一）基于 BIM 与数值模拟的加固方案比选

在高陡边坡加固工程中，方案比选是确保加固效果、节约成本的关键环节，而 BIM 技术与数值模拟方法的结合，为科学、高效地进行方案比选提供了有力支持<sup>[9]</sup>。以某山区高速公路高陡边坡为例，该边坡最大坡高 80m，平均坡度 65°，由中风化砂岩和泥岩互层组成，节理裂隙发育，存在潜在失稳风险。针对此边坡，拟定了“抗滑桩+锚索”和“土钉墙+喷射混凝土”两种加固方案，基于 BIM 的方案可视化与信息集成成为比选奠定了基础。利用 BIM 技术构建两种方案的三维模型，直观展示加固结构的布置<sup>[9]</sup>。“抗滑桩+锚索”方案中，抗滑桩长 20m，截面 2m×3m，间距 5m，锚索长 30m，张拉吨位 500kN；“土钉墙+喷射混凝土”方案中，土钉长 8m，间距 1.5m×1.5m，喷射混

凝土厚 10cm。同时 BIM 模型集成了各方案的工程量，“抗滑桩 + 锚索”方案混凝土用量约 800m<sup>3</sup>，钢材用量约 120t；“土钉墙 + 喷射混凝土”方案混凝土用量约 300m<sup>3</sup>，钢材用量约 50t。数值模拟为方案的力学性能评估提供了量化依据，将 BIM 模型转换为 FLAC3D 数值模型后计算，“抗滑桩 + 锚索”方案加固后边坡安全系数为 1.35，最大位移 3cm；“土钉墙 + 喷射混凝土”方案安全系数为 1.20，最大位移 8cm。多维度指标体系的建立与综合比选是方案决策的核心，安全性上，“抗滑桩 + 锚索”方案更优；经济性上，“土钉墙 + 喷射混凝土”方案造价约 200 万元，“抗滑桩 + 锚索”方案约 500 万元；施工可行性方面，“土钉墙 + 喷射混凝土”施工更简便，工期短约 15 天。综合权衡，考虑边坡的高风险性，最终选择“抗滑桩 + 锚索”方案。此外，利用 BIM 技术的协同性，工程各参与方在同一模型平台上对方案进行讨论评审，及时提出修改意见，提高了方案比选的效率 and 科学性。

（二）典型加固方案设计与优化

典型加固方案的设计与优化需要结合边坡的工程地质条件、稳定性分析结果以及加固技术的特点，同时充分利用 BIM 技术与数值模拟方法，以实现方案的安全可靠、经济合理<sup>[10]</sup>。仍以该山区高速公路高陡边坡为例，设计“抗滑桩 + 锚索”典型加固方案并优化。典型加固方案的设计流程如下：根据数值模拟结果，确定潜在滑动面位于边坡中上部，需重点加固。初步选择抗滑桩与锚索组合方案，利用 BIM 技术详细设计，抗滑桩长 20m，截面 2m×3m，间距 5m，嵌入稳定岩层 8m；锚索长 30m，锚固段 15m，张拉吨位 500kN，与水平面夹角 25°，构建 BIM 模型。通过数值模拟验算，加固后安全系数 1.35，满足要求。方案

优化从三方面开展：一是基于数值模拟优化加固参数，改变抗滑桩间距，模拟间距 4m、5m、6m 时的情况，间距 5m 时安全系数 1.35，桩体应力 2.5MPa，间距 4m 时安全系数 1.38，桩体应力 2.3MPa，但造价增加 10%，故最优间距为 5m。调整锚索张拉吨位至 400kN，安全系数降至 1.28，不满足要求，确定 500kN 为合理值。二是利用 BIM 技术设计优化，通过碰撞检测发现部分锚索与地下管线冲突，调整锚索角度至 20° 避免冲突；精确计算工程量，将抗滑桩截面调整为 1.8m×2.8m，混凝土用量减少 8%，成本降低，且安全系数仍为 1.32。三是施工过程优化，结合 BIM 4D 模拟，先施工抗滑桩，再张拉锚索，最后喷射混凝土，此顺序使边坡变形量减少 2cm，工期缩短 5 天。通过优化，方案在保证安全的前提下，降低了成本，提高了施工效率。

三、结束语

本文系统开展了基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究，取得了一系列具有实践意义的成果。在加固技术研究中，结合具体案例，验证了基于 BIM 与数值模拟进行加固方案比选、设计与优化的科学性和有效性。实践表明，两者的有机结合能够显著提升高陡边坡稳定性分析的精准度，优化加固方案的经济性与安全性，为工程决策提供了有力支撑。然而研究仍存在一定局限性，复杂地质条件下参数敏感性分析的深度有待加强。未来可进一步探索更高效的数据交互技术，不断完善基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡工程技术体系，为类似工程提供更全面、更可靠的理论与实践指导。

参考文献

[1] 白永宏. 高陡边坡的稳定性分析及抗滑桩加固数值模拟 [J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(12): 49–55.  
[2] 蓝宇. 基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(03): 77–82.DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2023.03.029.  
[3] 董立巍, 朱仰勇. 圣雄黑山煤矿高陡边坡稳定性数值模拟分析 [J]. 现代矿业, 2019, 35(02): 209–211.  
[4] 戚铨钟, 时伟, 刘通, 等. 锚杆——土工网垫喷播防护技术下植被根系长度与岩质高陡边坡稳定性影响关系数值模拟分析 [C]//《建筑科技与管理》组委会. 2013 年 10 月建筑科技与管理学术交流会论文集. 青岛理工大学土木工程学院, 2013: 18+27.  
[5] 朱华碧, 陶干强, 段利波. 采矿爆破荷载作用下高陡边坡稳定性数值模拟分析 [J]. 现代矿业, 2010, 26(03): 70–73.  
[6] 朱相龙, 李鑫, 杨焯. 复杂艰险山区高陡边坡稳定性分析及加固措施研究 [C]// 中国建筑学会工程勘察分会, 中国水利学会勘测专业委员会, 中国铁道学会工务委员会, 西藏自治区水力发电工程学会, 中国灾害防御协会交通分会. 第十六届边坡工程技术大会论文集. 中国铁路设计集团有限公司, 2024: 127–130.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.064025.  
[7] 吴迪. 基于参数敏感性分析的重大铁路沿线典型高陡边坡稳定性研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2024.DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2024.001170.  
[8] 汪超, 付晓东, 万道春, 等. 高陡边坡多源数据融合模型构建方法及稳定性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(03): 57–64.DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2024.03.007.  
[9] 蓝宇. 基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(03): 77–82.DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2023.03.029.  
[10] 刘均利, 廖恒彬, 张炳辉. 基于 BIM 技术的岩溶发育区岩质高陡边坡稳定性分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(05): 274–283.DOI: 10.19815/j.jace.2021.06063.

# 浅析首件鉴定与首件检验

曾俊杰<sup>1</sup>, 田礼<sup>2</sup>

1. 西南电子技术研究所, 四川 成都 610036

2. 93147 部队, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025100028

**摘 要 :** 文章着重从首件鉴定和首件检验两方面进行了剖析, 并通过对二者定义的界定, 阐明了首件鉴定就是对第一次加工零部(组)零件进行综合工艺和产品检查来检验生产条件是否连续稳定; 首件检验就是针对批量加工后的第一件产品进行自检和专检相结合的活动, 重点研究单件产品是否满足。结合有关标准依据对标准内容的不同进行了比较。以实施要点为切入点, 对首件鉴定组织流程, 审查要求和首件检验操作规范分别进行了阐述, 并对二者在验证范围和执行主体上存在的重点差异进行了分析。最后, 结合应用场景讨论了二者在不同生产阶段, 变更影响以及军民项目下的应用情形和选择依据, 以期对实际工作中首件鉴定和首件检验的准确判别和运用有所借鉴。

**关 键 词 :** 首件鉴定; 首件检验; 标准依据; 实施要点; 应用场景

## A Brief Analysis of First Article Identification and First Article Inspection

Zeng Junjie<sup>1</sup>, Tian Li<sup>2</sup>

1. Southwest Institute of Electronic Technology, Chengdu, Sichuan 610036

2. Unit 93147 of PLA, Chengdu, Sichuan 610000

**Abstract :** This article focuses on analyzing the first article identification and first article inspection from two aspects. Through the definition of the two, it clarifies that the first piece identification is to conduct a comprehensive process and product inspection of the first processed parts (groups) to verify whether the production conditions are continuous and stable. First article inspection is an activity that combines self-inspection and specialized inspection for the first product after batch processing, with a focus on whether a single product meets the requirements. The differences in the contents of the standards were compared in combination with relevant standard bases. Taking the implementation key points as the entry point, the organization process of the first article appraisal, the review requirements and the operation norms of the first article inspection were respectively expounded, and the key differences in the verification scope and the implementing subject between the two were analyzed. Finally, the application scenarios and selection basis of the two in different production stages, change impacts, and military and civilian projects were discussed in combination with application scenarios, with the aim of providing some reference for the accurate discrimination and application of first-piece identification and first-piece inspection in practical work.

**Keywords :** first article identification; first article inspection; standard basis; key points of implementation application scenarios

### 一、首件鉴定与首件检验的定义解析

#### (一) 首件鉴定的概念界定

首件鉴定指针对试制或批生产过程中第一次加工出的零部(组)件进行综合过程及产品检查<sup>[1]</sup>。目的是检验所指定的工艺, 方法, 环境条件和人等因素, 是否有能力连续, 稳定地生产出满足设计要求的产品。在执行期间, 需要涵盖与该产品有关的全部属性和工艺要求, 以保证生产条件和随后的批生产相一致。进行首件鉴定需要以符合条件的配套零件和部件作为依据, 并通过设

置专门程序明确责任分工, 以受控状态完成鉴定任务。如认定为不合格品, 要找出原因, 采取整改措施重新安排认定, 未通过认定的零部(组)件一律不得投入批生产环节。

#### (二) 首件检验的含义阐释

首件检验, 就是对批量加工后第一件产品所进行的自检和专检相结合的检验。它的作业重点是经过生产者的自主检查和检验人员的专业检验双重验证来证实单件产品能否满足设计图样和工艺文件的规定。在执行过程中需要以清晰的检验规范为支撑, 逐一验证产品关键尺寸, 性能指标等, 并形成可溯源的检验记录<sup>[2]</sup>。

作者简介:

曾俊杰(1987.03—), 男, 汉族, 四川大英人, 硕士研究生, 工程师, 从事项目管理工作。

田礼(1979—), 男, 汉, 重庆, 工程师, 硕士研究生, 93147 部队, 610000, 研究方向为通信导航系统研制生产监督。



检验活动要在生产工序结束后立即进行，以保证检测到的问题能够及时反馈到生产环节中去。检验结果需要为后续生产提供初步依据，如有不合格品，需要马上停止批量加工和纠正。

（三）两者定义的核心差异

首件鉴定着眼于生产条件整体验证，突出过程稳定性及持续生产能力评价。它所涵盖的范围不仅仅是成品的检验，更重要的是对生产过程的工艺方法，设备状态和人员资质进行全要素的审核<sup>[3]</sup>。首次检验主要集中在单一产品的质量一致性评估上，以特定产品的性能指标作为检查的中心，而不是对整个生产系统能力的全面评价。首件鉴定结果直接确定批生产是否可行，首件检验结果则主要是指导随后同批产品加工调整<sup>[4]</sup>。首件鉴定需要多部门成立专门小组进行，而首件检验主要是生产人员与检验人员合作进行。

二、首件鉴定与首件检验的标准依据

（一）首件鉴定的适用标准

首件鉴定以 GJB908A-2024《首件鉴定》为主，并进行了相应的工作。本标准明确了首件鉴定工作的界定、范围、时间、内容和程序。该标准规定组织制定首件鉴定程序并明确责任分工，对试制或批生产阶段第一次加工零部（组）件进行鉴定。该标准明确指出，鉴定流程必须与后续的批量生产方法相匹配，并涵盖产品的所有属性和流程要求。对认定为不合格的项目，标准中规定须查清原因，采取措施予以改正，经再次认定合格后才能投入批生产<sup>[5]</sup>。与此同时，该标准还规定组织必须将首件鉴定的有关要求传达给供方，以保证供应链上的各个环节都达到规范的要求。

（二）首件检验的参考规范

在国内的军事项目中，首次检验可以参照 GJB1405A-2006《装备质量管理术语》里的相关定义来进行<sup>[6]</sup>。本规范定义首件检验是指批量加工后第一件产品自检和专检活动。根据 SAE AS 9102B《航空航天首件检验要求》，国际合作项目以及国内的民用项目都在执行中。这一标准规定，首件检验必须有明确的计划，并进行全面、独立且文档化的检查和过程验证<sup>[7]</sup>。该规范明确指出，在进行检验时，必须全面涵盖工程图纸、数字化产品的定义以及采购订单等设计文件的各项要求，并对不符合规定的项目处理和记录控制等环节进行详尽的规定。

（三）标准内容的侧重区别

GJB908A-2024《首件鉴定》对军队装备及其配套产品的有关组织是适用的，它明确了试制产品应列入鉴定的内容，并规定了工艺技术部门或者质量部门应组织鉴定小组进行。SAE AS 9102B《航空航天首件检验要求》的应用范围更为广泛，涉及航空，航天和国防组织等多个领域，没有对具体的负责部门进行限制，使组织能够独立地确定执行主体。前者规定组件鉴定需建立在合格的部件和分组件上，而后者则允许部件和组件检验相互独

立。前者对关键特性和重要特性实施百分之百检验，后者要求对所有产品特性进行全面核查。

三、首件鉴定与首件检验的实施要点

（一）首件鉴定的执行要求

首件鉴定工作需要组织工艺技术部门的领导下，与质量和生产部门共同组成鉴定小组，并明确成员之间的责任划分。实施前需编制首件鉴定目录，列明需鉴定的零部（组）件号、版次、名称及关键/重要件标识，经质量部门及顾客代表会签确认<sup>[8]</sup>。生产过程需要使用和批生产相同的制造方法并在可控条件下完成，以保证所使用的设备经过测试并具有证明文件以及人员资质，设备状态和环境条件都达到要求。鉴定过程中需要综合审核生产流程卡，原始记录和特殊过程的确认资料，并逐个验证产品特性。对检出的不合格品需要找出原因并采取措施进行整改再确认，合格品才能开始批生产。鉴定记录需要随着产品的全寿命周期进行保存以保证可追溯性。

（二）首件检验的操作规范

首件检验是指生产人员首先自检并对照设计图样及工艺文件对其加工尺寸，表面质量及其他特征进行检验，证实满足要求后，填写自检记录。检验人员接着进行专检并按照检验规范独立审查首件产品，着重验证关键工序及特性指标并形成专检报告<sup>[9]</sup>。检验需要涵盖产品的全部指定的属性，数字化产品的定义，工艺参数的匹配验证等等。发现不符项需要立即告知生产部门进行纠正，纠正后再进行检测。检验记录中需要包括自检和专检的结果，并对不合格项的处理意见进行清楚的说明，并由当事人签名确认，存档保存。

（三）实施过程的关键差异

首件鉴定突出了生产条件总体能力的核查，需要对整个生产过程进行符合性审查，其中包括工艺文件，设备状态和人员资质，并有多部门组成鉴定小组对鉴定结果进行综合评判。首件检验以单件产品特性符合性为中心，以自检和专检相结合为主，生产人员与检验人员分工负责。首件鉴定要求在产品列装定型之前或者发生较大变化之后进行，涵盖试制、批生产等诸多环节；首件检验是在每一批产品的第一个加工过程中完成的，它贯穿于批量生产的整个过程。首件鉴定不合格需全面整改并重新鉴定，首件检验不合格仅需针对不合格项返工后复验。首件鉴定记录需要对产品的全生命周期进行长时间的保存和关联，而首件检验记录则主要应用于当批生产的追溯。

四、首件鉴定与首件检验的应用场景

（一）首件鉴定的适用范围

首件鉴定主要针对试制产品中的零部（组）件生产环节，并在新产品设计定型之前，组织对首次试制出的具有代表性的零部（组）件进行专业鉴定，核查生产条件有无持续制造出合格产品。



这种鉴定需要建立在成熟的工艺方案之上，以保证试制过程中所用制造方法和随后批生产过程中保持一致，以免由于工艺差异而造成鉴定结果无效。鉴定需要涵盖产品的全部性能和工艺要求，与之相匹配的部件和部件需要处于合格状态并经过综合审查证实生产条件是否可靠。

首件鉴定也适用于批生产过程中有较大改动之后的情景，产品设计图样上关键特性的改动，生产工艺方法，材质等、工装发生变更、生产线改线或检修、停产后恢复生产都需要对初次加工零部（组）件进行确认。当客户或其代表有鉴定要求的时候，需要组织按照规定开始鉴定程序以保证更改生产过程达到设计要求。经认定为不合格品的零部（组）件，不得投入批生产，需经过问题纠正和再次认定后才能继续投入生产。

### （二）首件检验的应用领域

首件检验运用到批量加工初始环节中，在每一批产品制造过程中都要组织好对第一件竣工产品进行检查，并经过生产者自检和检验员专检双重核查，证实零件的产品与设计图样和工艺文件的要求相符。检验要求在生产工序结束后立即进行，以免不合格品进入下一工序，并为同一批后续制品的处理提供质量基准。

首件检验也被运用到了生产过程稳定性的监测场景中，在生产过程发生人员变动，设备调整，物料更换等问题时，需要对经过调整处理的第一件产品进行检查，以核实工艺的改变是否会影响产品质量。检验结果需要形成书面记录以清楚地判断合格或不合格，并以此为基础继续进行批量生产。经检验不合格者，需要立即停产，在找出原因和采取整改措施的情况下，再对首件进行处理和检测，直到合格者才能复工。

### （三）场景选择的主要依据

场景选择需要根据产品的生产阶段而定，在新产品试制阶段由于生产工艺还没有完全凝固，生产条件还在摸索阶段，需要进行首件鉴定来综合验证生产过程是否可行，以便为之后的批生产打下基础。在批量生产阶段，技术已经比较成熟，关键是要对单批产品进行初始质量控制，这时适用于首件检验以保证每批次首件产品都满足要求<sup>[10]</sup>。

场景的选择需要根据改变的影响程度来决定，当产品或者生

产过程中出现较大的改变时，这种改变可能会涉及到设计，工艺和设备的诸多方面，对生产条件有较深远影响，需要进行首件鉴定来综合评价更改后生产能力。一般性调整或者常规生产波动对生产条件影响幅度不大，经首件检验可核实调整产品的质量状态。

### （四）军民项目中场景适用的区分

军用项目，首件鉴定是法定要求并按照有关规定和军用标准负责组织军队装备及其配套产品的开发，生产，新产品试制和生产定型之前的试生产以及批生产发生较大变化时，零部（组）件须进行首件评审，评审目录需由军事代表签字，评审程序由军事代表负责。

民用项目和国际合作项目的主要途径是首件检验。根据行业规范要求，航空，航天和其他民用领域在批量生产过程中组织对首件产品进行检测，着重核查产品特性是否满足设计文件要求，检验流程及记录要求可以由各组织根据自己的实际情况来决定，不需要外部代表进行强制性会签，其核心是满足客户对产品质量提出的基本要求，检验结果是批次生产过程中质量控制的基础。

## 五、结论

首件鉴定和首件检验虽然同属于质量控制的手段，但其定义内涵，标准依据，实施要求和应用场景等方面都有明显区别。首件鉴定注重生产条件总体能力系统性核查，涵盖试制和重大改动后综合复核，是确保批生产可行性关键环节；首件检验着眼于对单件产品是否合格的判断，它贯穿于批量生产的整个过程，并为单批产品提供了质量初始基准。

在实际生产中，需要根据产品的生产阶段，变更的影响程度和项目属性（军民）等因素进行理性选择：在新产品的试制和重大变更中，首件鉴定被优先考虑，批量生产的常规环节适用于首件检验；军用项目需要严格按照首件鉴定法定要求执行，而民用和国际合作项目则可以重点灵活运用首件检验。正确把握二者的边界，规范执行，有利于加强对生产过程的质量控制，从而为产品全生命周期的质量稳定性提供坚实的保证。

## 参考文献

- [1] 吴瑕，李开. 浅谈首件鉴定在实践中的应用 [J]. 中国科技纵横，2022(8):66-68.
- [2] 国防科技工业局. GJB 908A-2024：首件鉴定 [S]. 北京：国防科技工业局，2025-01-07.
- [3] 中国人民解放军总装备部. GJB 1405A-2006：装备质量管理术语 [S]. 北京：中国人民解放军总装备部，2006-05-17.
- [4] 美国机动车工程师协会. SAE AS 9102B：航空航天首件检验要求 [S]. 美国：美国机动车工程师协会，2014-10-06.
- [5] 李爱军. 军工产品生产过程中的首件检验研究 [J]. 新丝路，2021，000(001):1-1.
- [6] 邹永振，李兴泉，杨纯辉. 某特种产品首件检验与首件鉴定的区别与应用 [J]. 船舶标准化工程师，2024，57(3):6-9.
- [7] 张文斌，辛明超. 谈航空机电设备的首件鉴定 [J]. 质量与可靠性，2024(3):9-11.
- [8] 毛炎云. 谈谈首件工程认可制及其监理的几个问题 [J]. 建设监理，2024(1):59-61.
- [9] 周大伟. 浅谈印刷企业如何做好首件管理 [J]. 印刷质量与标准化，2022(3):18-20.
- [10] 肖盼，燕舒乐，龙进良，等. 基于电子样稿的柔印首件“粗-精”检测方法 [J]. 电子与信息学报，2022，44(5):9.

# 电气自动化在智能制造与工业控制中的关键作用及效益分析

何荣卓

广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ERA.2025100029

**摘要：** 本文阐述了电气自动化在智能制造与工业控制中的多方面应用及面临的问题。介绍了 PLC、工业机器人等相关技术，强调 DCS 与 FCS 的演进。阐述了柔性制造系统优化等原理，提及多物理场协同控制等技术应用，也指出异构系统集成等障碍及数字孪生与边缘计算融合的发展方向。

**关键词：** 电气自动化；智能制造；工业控制

## Analysis of the Key Role and Benefits of Electrical Automation in Intelligent Manufacturing and Industrial Control

He Rongzhuo

Foshan, Guangdong 528300

**Abstract：** This paper expounds the multi-faceted applications and problems faced by electrical automation in intelligent manufacturing and industrial control. The related technologies such as PLC and industrial robots are introduced, and the evolution of DCS and FCS is emphasized. The principles such as the optimization of flexible manufacturing systems are expounded. The application of technologies such as multi-physical field cooperative control is mentioned. The obstacles such as the integration of heterogeneous systems and the development direction of the integration of digital twins and edge computing are also pointed out.

**Keywords：** electrical automation; intelligent manufacturing; industrial control

### 引言

随着《中国制造 2025》（2015 年颁布）等政策的推进，智能制造成为制造业发展的重要方向。电气自动化作为智能制造与工业控制的关键技术，在多个方面发挥着重要作用。从可编程逻辑控制器等基础技术到分布式控制系统与现场总线技术的演进，再到基于工业物联网的柔性制造系统优化，以及多物理场协同控制等前沿技术，都离不开电气自动化。它在汽车制造、石油化工、电力系统等众多领域都有应用，同时面临异构系统集成和人才短缺等挑战，数字孪生与边缘计算融合是其前沿发展方向。

### 一、电气自动化关键技术体系解析

#### （一）智能制造核心支撑技术

可编程逻辑控制器（PLC）作为一种专门为在工业环境下应用而设计的数字运算操作电子系统，它采用一类可编程的存储器，用于其内部存储程序，执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数与算术操作等面向用户的指令，并通过数字或模拟式输入/输出控制各种类型的机械或生产过程<sup>[1]</sup>。工业机器人技术是智能制造的关键，它能够在危险、恶劣环境下替代人类进行高精度、高效率的生产作业，其核心在于精确的运动控制和智能的编程算法。传感器网络则是实现自动化系统数据采集的重要手段，它能够实时感知环境信息，并将这些信息反馈给控制系统，以便系统做出

相应的决策，确保生产过程的稳定和高效。

#### （二）工业控制技术演进特征

分布式控制系统（DCS）和现场总线技术（FCS）在工业控制技术演进中具有重要地位。DCS 在早期工业控制中发挥了关键作用，它采用集中管理、分散控制的策略，实现了对复杂工业过程的有效监控和管理。然而，随着工业技术的发展，其局限性逐渐显现。现场总线技术（FCS）应运而生，它具有数字化、双向传输、多分支结构等特点，能够更好地满足现代工业对实时性、准确性和灵活性的要求。FCS 在一定程度上是对 DCS 的迭代和升级，它不仅提高了系统的性能和可靠性，还降低了成本和布线复杂度。在现代工业应用中，两者也常常结合使用，以发挥各自的优势，共同推动工业控制技术的进步<sup>[2]</sup>。

## 二、智能生产系统的建构作用

### （一）生产流程重构效能

基于工业物联网的柔性制造系统优化机理及实时监控能力提升路径是智能生产系统建构作用中生产流程重构效能的关键方面。工业物联网为柔性制造系统提供了强大的连接能力，使得设备之间能够高效通信和协同工作，实现生产流程的优化。通过实时收集和分析生产数据，能够精准地识别生产过程中的瓶颈和问题，从而对生产流程进行动态调整。这种实时监控能力不仅提高了生产效率，还能有效降低生产成本，提升产品质量。同时，柔性制造系统的优化还能够更好地适应市场需求的变化，提高企业的竞争力<sup>[3]</sup>。

### （二）设备集成创新模式

多物理场协同控制技术是智能生产系统设备集成创新模式中的关键。它通过整合多种物理场，如电磁场、温度场、应力场等，实现对加工过程的精确控制。在加工精度方面，该技术能够实时监测和调整加工参数，减少因物理场相互作用而产生的误差，从而提高产品的尺寸精度和表面质量<sup>[4]</sup>。在能源效率提升上，多物理场协同控制技术可以优化加工过程中的能量分配，避免能源的浪费。例如，根据不同物理场的需求合理调整应力场的强度和分布，使加工过程中的能量利用更加高效，降低能源消耗，提升整体生产效益。

## 三、典型工业场景应用实证

### （一）汽车制造领域应用

#### 1. 激光焊接生产线智能优化

在汽车制造的激光焊接生产线智能优化中，视觉引导系统发挥了关键作用。该系统能够实时监测焊接过程，获取焊接路径的实际位置信息。通过先进的算法对这些信息进行处理和分析，实现焊接路径的动态补偿。当焊接过程中出现工件位置偏差或变形等情况时，系统可迅速调整焊接路径，确保焊接质量的稳定性和一致性。这不仅提高了焊接的精度和效率，减少了焊接缺陷的产生，还降低了人工干预的需求，节省了人力成本。同时，该技术的应用提升了整个焊接生产线的智能化水平，增强了生产线对不同生产任务和工况的适应性，为汽车制造企业带来了显著的经济效益和竞争优势<sup>[5]</sup>。

#### 2. 装配工艺质量追溯

在汽车制造领域，电气自动化在装配工艺质量追溯方面发挥着重要作用。基于 MES 系统，可实现装配参数的有效管理与追溯。通过对装配过程中各类参数的实时采集与记录，如零部件装配顺序、拧紧力矩、装配时间等，为后续质量追溯提供详细数据。当出现质量问题时，能够快速准确地定位问题发生的环节与原因，实现从成品到零部件、从生产工序到具体操作参数的全面追溯。这不仅有助于提高产品质量，减少次品率，还能提升生产效率，降低生产成本，增强企业在市场中的竞争力<sup>[6]</sup>。

### （二）医疗生物领域应用

在体外诊断测试卡的生产过程中，由于行业特性有着不同工

艺的生产专属设备，现代电气自动化则可以通过网络总线型式统筹各个专属设备的联动、数据互换；建立整个从物料自动上料、物料排列、装配、激光喷码、自动入袋包装等等闭环的生产过程，从而确保整个过程中的流转速度更高效、数据统计更准确、喷码溯源更可靠，也使整个生产过程更数字化清晰化；减少大量的人力操作成本和管理成本、减少物料原来在不同专属设备间的流转被污染的风险。

### （三）电力系统智能调度

在电力系统智能调度方面，电气自动化技术起着至关重要的作用。通过自动化控制系统，能够实时监测电力系统的各项参数，如电压、电流、功率等<sup>[7]</sup>。根据监测到的数据进行分析和处理，实现对发电、输电、配电等环节的智能调度。例如，在负荷高峰期，自动化系统可以合理调配发电资源，确保电力供应的稳定性。同时，对于故障的检测和处理也更加迅速和准确，当系统出现故障时，能够快速定位故障点，并采取相应的措施进行修复，减少停电时间和损失，提高电力系统的可靠性和运行效率。

## 四、综合效益与发展趋势研判

### （一）技术经济性分析

#### 1. 生产效率提升维度

电气自动化在生产效率提升维度展现出显著优势。通过优化生产流程，实现生产节拍的有效压缩。自动化系统能够精准控制设备运行，减少不必要的停顿和延误，提高单位时间内的生产数量<sup>[8]</sup>。同时，设备稼动率得以提升，减少设备闲置时间，确保设备在生产过程中保持高效运行状态。这不仅提高了生产效率，还降低了生产成本。从长期来看，电气自动化技术的应用有助于企业在市场竞争中占据优势，提高产品的市场占有率和企业的经济效益。

#### 2. 质量控制改进效益

自动化系统在质量控制方面具有显著效益。通过运用六西格玛方法评估，其对产品合格率提升贡献明显。电气自动化技术可实现生产过程的精准控制，减少人为因素导致的误差，确保产品质量的稳定性和一致性。在智能制造与工业控制中，自动化系统能够实时监测生产参数，对异常情况及时预警并调整，从而避免大量不合格产品的产生。这不仅提高了产品在市场上的竞争力，还降低了因质量问题导致的成本增加，如返工、报废等费用。同时，高质量的产品有助于提升企业的品牌形象，为企业带来长期的经济效益和社会效益<sup>[9]</sup>。

### （二）战略价值评估

#### 1. 企业数字化转型

电气自动化在企业数字化转型中具有重要战略价值。通过自动化系统，企业运营数据得以有效沉淀。在生产过程中，自动化设备能够实时采集大量数据，包括生产参数、设备状态等。这些数据经过分析处理后，可转化为有价值的知识。一方面，为企业优化生产流程提供依据，例如通过分析数据发现生产瓶颈，进而调整工艺参数提高生产效率。另一方面，有助于企业进行知识管

理，将经验和技术知识以数据形式存储，便于传承和共享。同时，随着技术发展，电气自动化还将推动企业向智能化制造迈进，进一步提升企业在市场中的竞争力，实现可持续发展。

2. 产业链协同效应

电气自动化在智能制造与工业控制中具有显著的战略价值和产业链协同效应。从战略价值看，它提升了企业在全球市场的竞争力，促使制造业向高端化、智能化转型。在产业链协同方面，电气自动化技术打破了各环节之间的信息壁垒，实现了上下游企业间的高效沟通与协作。例如，在生产环节，自动化设备与系统的应用确保了生产过程的精准控制和高效运行，同时能实时将生产数据反馈给上下游企业，以便其及时调整生产计划和物料供应。这不仅提高了整个产业链的生产效率，还降低了库存成本和运营风险，增强了产业链的稳定性和灵活性，推动了智能制造产业的可持续发展。

（三）技术挑战与发展趋势

1. 当前实施障碍分析

电气自动化在智能制造与工业控制中面临诸多实施障碍。异构系统集成复杂度是一大挑战，不同系统在架构、通信协议等方面存在差异，使得集成过程困难重重，难以实现数据的高效交互和协同工作。同时，专业人才缺口也对其发展产生制约。电气自动化技术涉及多个领域的知识和技能，对人才要求较高，但目前相关专业人才数量不足，且培养体系与实际需求存在差距。这导致技术研发、应用和维护等环节缺乏足够的人力支持，延缓了技术的推广和应用，影响了电气自动化在智能制造与工业控制中关

键作用的充分发挥以及综合效益的提升。

2. 前沿发展方向预测

数字孪生技术与边缘计算的融合是电气自动化在智能制造与工业控制领域的前沿发展方向。数字孪生通过构建物理实体的虚拟模型，实现对生产过程的精确模拟和优化。边缘计算则将计算和数据存储推向网络边缘，减少数据传输延迟。二者融合可使工业自动化系统具备更高效的实时决策能力。例如，在复杂的生产环境中，实时获取设备数据并在边缘端进行分析处理，同时利用数字孪生模型进行模拟预测，从而实现精准控制和故障预防。这不仅提高了生产效率和产品质量，还降低了维护成本，推动智能制造与工业控制向更高水平发展。

五、总结

电气自动化在智能制造与工业控制中具有至关重要的作用。在智能制造系统重构方面，它推动了生产模式的变革，提高了生产效率和灵活性。对于工业控制精度提升，能够实现更精准的操作和监测，减少误差。从全生命周期角度看，其综合经济效益显著，包括降低生产成本、提高产品质量、缩短生产周期等。然而，随着技术的发展，也面临一些挑战。未来需重点突破人工智能算法融合，以进一步提升自动化的智能水平，更好地适应复杂的生产环境。同时，要加强网络信息安全加固，保障生产系统的稳定运行，防止数据泄露和恶意攻击等安全问题，确保电气自动化在智能制造与工业控制中持续发挥关键作用并带来更大效益。

参考文献

[1] 魏相站. 深度学习在面向边缘计算的智能制造中的研究 [D]. 贵州：贵州大学，2021.  
[2] 孙寒梅. 智能制造背景下 F 电子制造服务企业成本控制优化研究 [D]. 江苏：苏州大学，2022.  
[3] 刘会凯. 航天产品智能制造中多余物控制视觉关键技术研究 [D]. 北京：中国科学院大学，2022.  
[4] 艾艳儒. 智能制造背景下制造业企业培训体系改革现状与对策研究 [D]. 重庆：重庆大学，2021.  
[5] 吕玉琳. 基于工业 4.0 技术的智能制造系统开发及其调度优化 [D]. 安徽：安徽大学，2021.  
[6] 王钦. MES 在中国汽车企业信息化中的应用研究 [J]. 无线互联科技，2012(12): 179, 182.  
[7] 陈倩，张艺潇. 分析智能制造技术在工业自动化中的应用 [J]. 信息技术时代，2023(6): 28-30.  
[8] 郎瑞峰. 电气自动化控制在煤矿生产中的应用探讨 [J]. 工业设计，2015(5): 81-82.  
[9] 许铭轩，郝丽娟. 电气自动化技术在工业控制中的应用 [J]. 科学与信息化，2023(5): 142-144.



# 多宝山—黑河地区典型金矿床成矿模式

闫宝龙<sup>1,2</sup>, 林楠<sup>1,2</sup>, 籍哲羽<sup>1,2</sup>, 陈宇<sup>1,2</sup>, 李国栋<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.2025100032

**摘 要 :** 多宝山—黑河地区作为兴蒙造山带东段重要的金矿集区, 发育有争光、三道湾子等典型金矿床。本文通过系统分析区域地质背景、矿床地质特征及成矿作用参数, 构建了两类典型成矿模式: 争光金矿床的“岩浆热液充填—交代型”模式与三道湾子金矿床的“浅成低温热液—构造蚀变岩型”模式。研究表明, 岩浆活动强度、构造系统演化及地层地球化学背景是控制成矿模式差异的核心因素, 相关数据与模式可为区域金矿勘查提供精准指导。

**关 键 词 :** 多宝山—黑河地区; 金矿床; 成矿模式; 岩浆热液; 构造控矿

## Typical Gold Deposit Formation Model in the Duobaoshan-Heihe Region

Yan Baolong<sup>1,2</sup>, Lin Nan<sup>1,2</sup>, Ji Zheyu<sup>1,2</sup>, Chen Yu<sup>1,2</sup>, Li Guodong<sup>1,2\*</sup>

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Centre, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Geocryosphere Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

**Abstract :** The Duobaoshan–Heihe region, as an important gold mineralisation zone in the eastern segment of the Xingmeng Orogenic Belt, hosts typical gold deposits such as Zhengguang and Sanduowanzi. This study systematically analysed the regional geological background, ore deposit geological characteristics, and mineralisation process parameters to establish two typical mineralisation models: the "magmatic hydrothermal filling–metamorphic type" model for the Zhengguang gold deposit and the "shallow–temperature hydrothermal–structural alteration rock type" model for the Sandaowanzi gold deposit. The study indicates that the intensity of magmatic activity, the evolution of the tectonic system, and the stratigraphic geochemical background are the core factors controlling the differences in mineralisation patterns. The relevant data and patterns can provide precise guidance for regional gold mineral exploration.

**Keywords :** Duobaoshan–Heihe region; gold deposits; mineralisation patterns; magmatic hydrothermal; tectonic control of mineralisation

## 引言

多宝山—黑河地区位于兴蒙造山带东段, 是我国东北地区金矿资源的重要富集区域。其大地构造位置独特, 经历了古亚洲洋构造域和太平洋构造域的多期次地质演化过程, 地质构造复杂, 岩浆活动频繁, 为金矿的形成提供了极为有利的地质条件<sup>[1]</sup>。近年来, 随着矿产资源勘查工作的不断深入, 在该地区发现了多个具有重要经济价值的金矿床, 如争光、三道湾子等典型金矿床, 因其独特的成矿特征和显著的资源潜力, 成为地质学界研究的热点。这些矿床在成矿环境、矿化特征、成矿物质来源等方面存在一定差异, 反映出不同的成矿模式。成矿模式是对矿床形成过程中各种地质作用及其相互关系的高度概括, 它能够揭示矿床的形成机制、分布规律和找矿方向。目前, 针对多宝山—黑河地区金矿床的研究多集中在单个矿床的地质特征和成因分析上, 对区域内不同类型金矿床成矿模式的系统研究相对较少。因此, 开展该地区典型金矿床成矿模式的研究, 对于深入理解区域成矿规律、提高找矿效率具有重要的理论和实际意义。

## 一、区域成矿地质条件

区域处于多宝山岛弧与黑河断陷带过渡带, 基底为新元古界

变质岩系, 盖层主要为奥陶系多宝山组火山—沉积岩(安山岩、凝灰岩)及侏罗—白垩系塔木兰沟组粗安岩、光华组流纹岩。奥陶系地层 Au 背景值达 1.2–1.8ppb, 侏罗系粗安岩 Te 含量异常

通讯作者: 李国栋, 邮箱: 1098747236@qq.com

(0.5–1.0ppm)，为成矿提供物质基础。

构造以 NW 向罕达气—多宝山断裂（长度 > 150km，切割深度 > 10km）为主干，与 NE 向次级断裂（长度 20 ~ 50km）构成“网格状”导矿—容矿系统。断裂活动具多期性，早白垩世伸展阶段（130–120Ma）与晚白垩世挤压阶段（100–80Ma）分别对应不同成矿期。

岩浆岩以燕山期侵入体为主，包括花岗闪长岩（160–150Ma）、闪长玢岩（140–130Ma）及花岗斑岩（120–110Ma），其中闪长玢岩与金矿化时空关联显著，锆石 Hf 同位素显示其具壳幔混源特征（ $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.5 \sim +3.8$ ）。

## 二、典型矿床成矿特征解析

### （一）争光金矿床成矿特征

#### 1. 矿化空间分布

矿床由 28 条脉状矿体组成，呈 NW 向展布，集中分布于闪长玢岩与多宝山组火山岩接触带 300m 范围内。主矿体（V-1 号）长 350m，平均厚度 3.8m，平均品位 8.2g/t，沿 NE 向断裂膨大部位形成富矿段（品位 > 15g/t）<sup>[2]</sup>。

#### 2. 成矿流体系统

流体包裹体分析显示，成矿流体具阶段性演化特征：早期高温阶段（300–350℃）以富 CO<sub>2</sub> 流体为主（CO<sub>2</sub> 含量 15% ~ 20%），盐度 12% ~ 15%；中期中温阶段（200–300℃）为 H<sub>2</sub>O–NaCl 体系，盐度 8% ~ 12%；晚期低温阶段（150–200℃）盐度降至 5% ~ 8%。氢氧同位素（ $\delta D = -90\text{‰} \sim -70\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 6\text{‰} \sim 10\text{‰}$ ）表明流体主要源于岩浆水（占比 70% ~ 80%）。

#### 3. 成矿物质迁移与沉淀

硫同位素（ $\delta^{34}\text{S} = -2\text{‰} \sim +2\text{‰}$ ）与铅同位素（ $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.3 \sim 18.6$ ）显示，Au、S 等成矿物质主要来自燕山期闪长玢岩（岩体 Au 含量 0.05–0.1ppm）。成矿过程中，Au 以 [AuCl<sub>2</sub>]<sup>-</sup> 络合物形式迁移，在断裂交汇部位因压力骤降（从 250MPa 降至 100MPa）导致络合物分解，形成黄铁矿—石英脉型矿化<sup>[3]</sup>。

### （二）三道湾子金矿床成矿特征

#### 1. 矿化空间分布

矿床由 12 条平行脉状矿体组成，沿 NW 向断裂带呈带状分布，单矿体长 100 ~ 800m，平均厚度 2.5m，平均品位 6.8g/t。矿体赋存于塔木兰沟组粗安岩构造破碎带中，矿化强度与破碎带宽度正相关（相关系数  $R^2 = 0.82$ ）。

#### 2. 成矿流体系统

流体包裹体以低盐度气液两相包裹体为主，均一温度集中于 180–220℃，盐度 3% ~ 6%，密度 0.85 ~ 0.95g/cm<sup>3</sup>。氢氧同位素（ $\delta D = -120\text{‰} \sim -80\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 4\text{‰} \sim 8\text{‰}$ ）表明流体为岩浆水与大气降水混合（比例 6:4），大气降水参与使流体 pH 值降至 5.0–6.5<sup>[4]</sup>。

3. 成矿物质迁移与沉淀硫同位素（ $\delta^{34}\text{S} = -4\text{‰} \sim +6\text{‰}$ ）呈双峰分布

反映岩浆硫（占比 50%）与地层硫（占比 50%）混合特征。Au 主要以碲化物（AuTe<sub>2</sub>）形式迁移，在构造减压（80–

120MPa）与低温条件下，于玉髓—高岭石蚀变带中沉淀，电子探针分析显示碲金矿中 Au 含量达 35% ~ 40%。

## 三、典型成矿模式构建

### （一）争光金矿床“岩浆热液充填—交代型”模式

该模式的成矿过程可分为三个主要阶段：

#### 1. 岩浆分异阶段（140–130Ma）

燕山期闪长玢岩侵位（锆石 U–Pb 年龄为  $135 \pm 2\text{Ma}$ ），在岩浆演化的晚期阶段，由于岩浆的分异作用，分离出富含 Au、S 等成矿物质的流体。该阶段流体中 H<sub>2</sub>O 的含量达 6% ~ 8%，Cl<sup>-</sup> 浓度为 2000–3000ppm，为成矿物质的溶解和迁移提供了有利条件。

#### 2. 流体运移阶段

富含成矿物质的流体在压力差的驱动下，沿 NW 向主干断裂向上运移。当流体运移至 NE 向次级断裂处时，受到次级断裂的阻挡，在闪长玢岩与多宝山组火山岩的接触带形成流体汇聚区<sup>[5]</sup>，此时流体压力维持在 200–250MPa。

#### 3. 矿化沉淀阶段

汇聚的流体与多宝山组火山岩发生强烈的交代反应，形成绢云母化蚀变。通过对蚀变强度与 Au 品位的统计分析发现，二者呈显著正相关关系（ $R^2 = 0.76$ ），表明蚀变作用与矿化富集密切相关。同时，由于断裂活动导致流体压力骤降，使得流体中 Au 的络合物稳定性被破坏，Au 在裂隙中充填沉淀，形成脉状矿体。

该模式的关键标志包括闪长玢岩与多宝山组火山岩的接触带、NW 向与 NE 向断裂的交汇部位、硅化—黄铁矿化蚀变组合以及中高温流体包裹体（250–300℃）。（二）三道湾子金矿床“浅成低温热液—构造蚀变岩型”模式

该模式的成矿过程主要包括以下三个阶段：

#### 1. 流体混合阶段（120–110Ma）

花岗斑岩岩浆在演化过程中分离出富含 Te、Au 的流体，该流体与大气降水发生混合（岩浆水占比 60%，大气降水占比 40%），形成成矿流体。此时流体中 Te 的浓度可达 5–8ppm，为 Au 以碲化物形式迁移奠定了基础。

#### 2. 构造驱动运移阶段

在 NW 向断裂的伸展作用下，含矿流体沿断裂带向上运移。在运移过程中，流体不断与周围的塔木兰沟组粗安岩发生相互作用，萃取其中的 Te 元素，使流体中的成矿物质不断得到补充和富集<sup>[6]</sup>。

#### 3. 蚀变与矿化阶段

含矿流体与围岩发生反应，形成高岭土化—硅化蚀变带，蚀变带宽度一般为 5 ~ 20m。在 180–220℃ 的温度条件下，由于构造减压作用，流体中的 Au 与 Te 结合形成碲化物沉淀下来，在矿体的角砾状构造中形成富矿段。该模式的关键标志为 NW 向断裂破碎带、侏罗系塔木兰沟组粗安岩地层、玉髓—高岭土化蚀变组合以及低温流体包裹体（180–220℃）。

## 四、成矿模式控制因素对比

### （一）岩浆活动控制

岩浆活动是金矿成矿的重要控制因素之一，其强度和性质对成矿模式的形成具有重要影响<sup>[7]</sup>。

争光金矿床所在区域岩浆活动强烈，燕山期闪长玢岩的侵入次数达5期，岩体出露面积超过50km<sup>2</sup>。强烈的岩浆活动不仅为成矿提供了充足的热源（岩浆温度为750–850℃），还提供了丰富的成矿物质，该岩体 Au 的丰度是地壳克拉克值的5–8倍。岩浆热液的持续补给，使得矿床的成矿期长达5–8Ma，有利于成矿物质的充分富集。

相比之下，三道湾子金矿床所在区域的岩浆活动相对较弱，仅发生2期岩浆侵入活动，岩体出露面积小于10km<sup>2</sup>。岩浆活动提供的热源和物质相对有限，导致成矿期缩短至2–3Ma，需要大气降水的参与来弥补流体量的不足，从而形成了与争光金矿床不同的成矿模式<sup>[9]</sup>。

### （二）构造系统控制

构造系统在金矿的成矿过程中起着导矿、容矿和控矿的重要作用，不同的构造组合样式控制着不同成矿模式的形成。争光金矿床受NW向主干断裂和NE向次级断裂构成的“立交桥”式构造系统控制。NW向断裂作为导矿构造，将深部的成矿流体引导至浅部，而NE向断裂则作为容矿构造，与NW向断裂的交汇部位形成了良好的扩容空间（孔隙度达15%~20%），有利于流体的汇聚和矿化的富集，从而形成了复杂的矿体形态<sup>[9]</sup>。

三道湾子金矿床则主要受单一的NW向断裂带控制，该断裂带的持续活动形成了“张裂–充填”的多期循环过程。每期断裂活动都会形成1~2m厚的矿脉，经过多期叠加，使得矿体厚度可达5m以上。这种单一的断裂构造控制使得矿体形态相对简单，呈脉状沿断裂带分布。

### （三）地层条件控制

多宝山组安山岩具有较高的渗透性（渗透率为10<sup>-15</sup>–10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>），这种物理性质有利于争光金矿床成矿流体与围岩发生交代作用，促进成矿物质的沉淀和富集，为“岩浆热液充填–交代型”成矿模式的形成提供了有利的地层条件<sup>[10]</sup>。而塔木兰沟组粗安岩的富Te特征（其Te含量是地壳平均值的3倍–5倍），则为三道湾子金矿床碲化物矿化提供了重要的物质基础，使得Au能够以碲化物的形式进行迁移和沉淀，从而形成了“浅成低温热液–构造蚀变岩型”成矿模式。

## 五、成矿模式的找矿应用

### （一）争光式矿床找矿标志

地质标志：燕山期闪长玢岩与奥陶系火山岩接触带、NW–NE断裂交汇部位、硅化–黄铁矿化蚀变组合（蚀变强度>50%）。

地球化学标志：土壤测量Au异常>50ppb，伴生As、Sb异常（As>20ppm，Sb>5ppm）；流体包裹体均一温度250–300℃。

物探标志：激电中阻异常（500~1000Ω·m）与磁异常梯度带叠加区。

### （二）三道湾子式矿床找矿标志

地质标志：NW向断裂破碎带（宽度>10m）、侏罗系粗安岩分布区、玉髓–高岭土化蚀变（高岭石含量>20%）<sup>[11]</sup>。

地球化学标志：岩石测量Au>100ppb，Te异常>2ppm，伴生Hg异常（Hg>0.1ppm）；流体包裹体均一温度180–220℃。

物探标志：低阻异常带（100~500Ω·m）与土壤气Rn异常（>30Bq/L）。

## 六、结束语

多宝山—黑河地区典型金矿床呈现“岩浆热液充填–交代型”与“浅成低温热液–构造蚀变岩型”两类成矿模式，其差异源于岩浆活动强度、构造系统样式及地层地球化学背景的协同作用。争光矿床依赖强岩浆活动提供物质与热源，多组断裂交汇促进矿化富集；三道湾子矿床则因弱岩浆活动与大气降水参与，形成以碲化物为特征的低温矿化。

本研究构建的成矿模式及提炼的找矿标志，为该地区金矿资源的勘查工作提供了有效的理论指导 and 实践依据。但仍有诸多问题有待深入探索，如深部成矿流体的演化轨迹、成矿作用与区域构造演化的精准耦合关系等。未来可借助三维地质建模、高精度年代学测定等技术手段，进一步完善成矿理论体系，提升区域金矿资源潜力评价的准确性，为我国东北地区的矿产资源保障贡献力量。

## 参考文献

- [1] 侯贺晟, 韩江涛, 符伟, 等. 黑龙江多宝山矿集区岩石圈结构: 孙吴–劲松廊带深地震反射与大地电磁联合探测结果 [J]. 地质通报, 2024, 43(11): 1985–2000.
- [2] 刘宝山, 张春鹏, 寇林林, 等. 黑龙江争光金矿床方铅矿黄铁矿 Rb–Sr 年龄及地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(01): 102–111.
- [3] 李运, 符家骏, 赵元艺, 等. 黑龙江争光金矿床年代学特征及成矿意义 [J]. 地质学报, 2016, 90(01): 151–162.
- [4] 车合伟, 周振华, 马星华, 等. 大兴安岭北段争光金矿床成因探讨: 来自流体包裹体及稳定同位素的制约 [J]. 矿床地质, 2016, 35(03): 539–558.
- [5] 孙刚, 杨云宝, 赵世猛, 等. 黑龙江完达山成矿带金矿地质特征与成矿模式 [J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(04): 57–64.
- [6] 赵天宇, 赵海滨, 孙丰月, 等. 黑龙江三道湾子金矿床同位素年龄对成矿时代的约束 [J]. 中国地质, 2013, 40(04): 1202–1208.
- [7] 孙刚, 杨云宝, 赵世猛, 等. 黑龙江完达山成矿带金矿地质特征与成矿模式 [J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(04): 57–64.
- [8] Liu Baoshan, Lü Ju. 2006. Geological, geochemical and genetic study of the Sandaowanzi quartz vein–type gold deposit in heihe city, Helongjiang Province [J]. Geotectonica et Metallogenia, 30(4): 481–485.
- [9] 杨永胜, 吕新彪, 高荣臻, 等. 黑龙江争光金矿床英云闪长斑岩年代学、地球化学及地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(04): 674–700.
- [10] 王京彬, 王玉往, 李庆哲, 等. 造山型金矿容矿建造分类、成矿模式及找矿勘查 [J]. 地质学报, 2024, 98(03): 898–919.
- [11] 赵忠海, 曲晖, 郭艳, 等. 黑龙江多宝山成矿区金矿成矿规律及找矿方向 [J]. 地质与资源, 2011, 20(02): 89–95.

# 结构面层一体化精平地面的应用研究

夏俊戎, 刘学勇, 王炎震, 刘坤, 梁嘉威  
中煤第三建设(集团)有限责任公司, 安徽 宿州 234000  
DOI:10.61369/ERA.2025100033

**摘 要 :** 本文以某棚户区改造项目地下车库为研究对象, 探讨结构面层一体化精平地面施工技术施工流程、质量控制措施。实践表明该技术可提升地面质量与耐磨性, 实现降本增效, 为类似工程提供参考。

**关 键 词 :** 结构面层一体化; 精平地面; 施工工艺; 质量控制; 耐磨性能

## Application Research on Integrated Precision-Levelled Ground with Structural Surface Layer

Xia Junrong, Liu Xueyong, Wang Yanzhen, Liu Kun, Liang Jiawei  
China Coal Third Construction (Group) Co., Ltd., Suzhou, Anhui 234000

**Abstract :** This paper takes the underground garage of a shantytown renovation project as the research object, exploring the construction process and quality control measures for the integrated precision-levelled ground construction technology with a structural surface layer. Practical application demonstrates that this technology can enhance ground quality and wear resistance, achieving cost reduction and efficiency improvement, thereby providing a reference for similar projects.

**Keywords :** integrated structural surface layer; precision-levelled ground; construction technique; quality control; wear resistance

### 引言

随着建筑行业对施工质量与效率要求的提升, 传统地面施工工艺易出现空鼓、起砂、开裂等质量通病, 难以满足现代工程需求。2017年建筑业10项新技术中混凝土楼地面一次成型技术为解决上述问题提供了思路。本文研究的结构面层一体化精平工艺, 在某棚户区改造项目地下车库中应用, 通过整合激光自动整平、机械提浆等方法, 实现结构与饰面一体化施工, 不仅能节省材料用量、降低成本, 还能攻克传统工艺弊端, 对提高地面施工质量、推动建筑施工技术创新具有重要意义。

### 一、项目概况

某棚户区改造项目为综合性建筑群, 集住宅、人防、车库为一体, 总建筑面积约291835.59m<sup>2</sup>, 其中地上面积约235786.35m<sup>2</sup>, 地下面积约54049.24m<sup>2</sup>。主要包括15栋单体住宅及10栋商业、普通地下车库、人防地库, 其地库地面采用细石混凝土耐磨工艺, 施工面积约54049.24m<sup>2</sup>。

### 二、施工方案设计

工程设计参照2017年建筑业10项新技术中混凝土楼地面一次成型技术, 拟采用结构面层一体化精平工艺技术, 即在混凝土浇筑后, 使用智能机器人收平抹面, 并应用激光自动整平与机械提浆方法, 有效节省找平层混凝土用量, 实现降本增效。同时, 在初凝前铺撒水磨石颗粒, 以磨光机磨平并完成饰面, 攻克地面空鼓、起砂及开裂等质量通病, 提升地面耐磨性能。结合工程质

控目标, 对施工技术进行了适度创新: 1. 在结构楼板施工阶段同步完成建筑耐磨面层, 实现结构与饰面一体化施工, 从根本上杜绝空鼓与开裂; 2. 将耐磨地面混凝土厚度增加5cm, 增大筏板钢筋骨架高度, 保护层厚度在设计基础上加高2-3cm后期打磨, 通过增大面层自重增强与基层粘结可靠性; 3. 借鉴屋面抗裂工艺, 取消建筑层配置抗裂网片, 提高面层整体性与抗裂能力; 4. 在成型地面均匀涂刷两遍固化剂, 加强成品保护, 避免后续施工造成损坏。

### 三、结构面层一体化精平地面施工实施

#### (一) 施工准备

施工之前, 完成材料、设备与技术交底等工作全面部署, 对提前进场的细石混凝土材料进行坍落度检测, 确保其满足激光整平对流动性的要求; 水磨石颗粒选用粒径3~5mm的玄武岩材质, 经筛分去除杂质后密封存放; 固化剂采用双组分环氧树脂



型,进场时需提供环保检测报告。同时,对激光整平机进行水平校准,通过三脚架将激光发射器固定于距地面1.2m处,开机后让整平机沿基准线往返行走3次,确保刮板误差不超过 $\pm 2\text{mm}$ 。技术交底采用BIM模型可视化方式,向班组明确结构层与面层的标高控制线,其中车库柱边300mm范围内设置5%的排水坡度,墙角处预留20mm宽伸缩缝。此外,对作业面进行清扫,用高压水枪冲洗基层浮灰,干燥后涂刷界面剂,增强基层与混凝土的粘结力。

### （二）安装筏板钢筋

已将建筑面层50mm厚度纳入图纸设计同步施工,原筏板结构厚度为300mm,现增加建筑面层50mm,总厚度调整为350mm。上下双层双向钢筋的规格、数量及间距均保持不变,通过调整钢筋支撑高度以满足保护层厚度要求:下部保护层为40mm,上部保护层为40mm,其中上部保护层在设计时预留20mm,供后续打磨固化工序减除。

### （三）结构筏板层浇筑

结构筏板层浇筑采用C30细石混凝土,设计厚度350mm,实际施工时按350mm控制,额外加厚的50mm作为后续精平施工打磨固化调整的余量。混凝土采用泵送方式输送,布料时由远及近分区推进,每个浇筑段长度不超过6m,避免出现冷缝。振捣作业采用插入式振捣棒与平板振捣器配合,振捣棒插入深度至基层表面,振捣间距400mm,每点振捣时间20~30s,直至混凝土表面泛浆且无气泡溢出;平板振捣器沿浇筑方向往返振捣2遍,确保混凝土密实度。浇筑过程中需严格控制标高,利用激光水准仪实时监测,智能机器人收抹抹面。为减少收缩裂缝,混凝土初凝前需进行2次抹压,第一次在收面完成后用木抹子搓平,第二次在混凝土表面出现裂缝时进行,以闭合表面裂缝。完成后及时覆盖棉毡保湿,养护时间不少于7d,期间禁止人员踩踏。

### （四）撒布水磨石颗粒

在混凝土初凝后,指压测试混凝土表面无明显痕迹且能留下清晰指纹时开始撒布水磨石颗粒。撒布水磨石颗粒分两次进行,第一次按 $3\text{kg}/\text{m}^2$ 的用量均匀抛撒,确保颗粒嵌入混凝土深度不小于1/2粒径;待颗粒吸水湿润后,用木抹子轻压使颗粒与混凝土结合紧密,间隔20min后进行第二次撒布,用量 $1\text{kg}/\text{m}^2$ ,重点填补第一次撒布的空隙。撒布顺序按“先周边后中间”的原则,沿柱边、墙角等部位先铺设1m宽范围,再向中部推进,避免漏撒。对于地漏、排水沟等排水节点,颗粒撒布时需向排水口方向做出2%的坡度,确保排水顺畅。撒布完成后,检查颗粒分布均匀性,对局部堆积的颗粒进行分散处理,对稀疏部位进行补撒,确保每平方米颗粒覆盖率达到60%以上。

### （五）机械整平

使用专业洗地机清除原有地面垃圾、灰尘、浮浆,打开原有地面表面更多的毛细孔,以利混凝土密封固化剂更多、更好地渗入地面,清除至露出混凝土清洁新鲜的表面为宜。再用专业打磨机配50、100、300目环氧树脂磨碟多遍进行全面打磨,将水泥毛细孔充分显露,此过程中辅助专业测量仪器检查,消除自然间地面极差、平整度爆点情况现象。

### （六）涂刷固化剂

均匀喷洒于打磨处理后并清理干净干燥的地面(每平方米用量: $0.4\text{kg}$ ),约2~4小时后,或当表面变粘稠时用清水清洗整体基面,将明水全部清除,自然干燥12小时以上。再用专业打磨机配500目环氧树脂磨碟进行全面细磨2~3遍,对整体基面进行初步抛光。

施工效果见图1。



图1 结构面层一体化精平地面成型效果图

## 四、结构面层一体化精平地面施工质量控制措施

为确保本工程地下车库大面积耐磨地面达到一次成型质量目标,避免空鼓、开裂、起砂等质量通病,特制定以下四项核心质量控制措施对施工全过程进行精细化管控。

### （一）健全前期技术准备与基层处理标准

在作业前,组织施工、测量及班组人员进行全方位技术交底,使其掌握激光整平仪的操作规程、混凝土坍落度控制范围、打磨收光时机等关键技术要点。测量工作必须精准,同时,按分仓缝设计图精准放样,确保模板支设位置正确、牢固,接缝严密无漏浆可能。在浇筑面层混凝土前,对结构楼板基层进行彻底处理,使用专业清渣设备清除浮浆、尘土、油污等松散物,确保基层露出坚实面。对于局部不平或标高偏低处,需进行凿毛处理并用同标号细石混凝土修补找平。提前24小时对基层进行充分湿润,但在浇筑前不得有明水积聚,保持饱和面干状态,以降低收缩开裂风险。所有进场材料,包括水泥、骨料、钢筋、金刚砂耐磨料、固化剂等,必须提供出厂合格证、质量检验报告,并按规定进行现场抽样复检,确认其品种、规格、性能符合设计及国家现行标准要求后方可使用。严禁使用不合格材料。

### （二）强化过程控制与精细化作业管理

要求采用强度等级不低于C25、水灰比不大于0.5的耐磨混凝土,粗骨料最大粒径不宜大于15mm,混凝土浇筑一次连续完成,严禁出现冷缝。混凝土初步摊铺后,应用激光整平机进行精平作业,确保刮板精准地将混凝土刮至预设标高,平整度误差须控制在 $\pm 3\text{mm}/2\text{m}$ 之内。之后视表面硬化情况换用机械抹光机带金属刀片进行至少三遍的收光作业,纵横交叉进行,后一遍与前一遍

方向垂直，直至表面达到要求的密实度和光洁度。钢筋网片安装严格按照创新方案要求进行，网片搭接长度不小于100mm，并用绑扎丝牢固连接，形成整体受力体系，有效抑制混凝土塑性收缩和温度应力引起的裂缝。

（三）加强成品保护与养护

在地面完成收光作业后，及时覆盖一层不透水的养护薄膜或铺设专用无纺布进行洒水养护。覆盖物要搭接严密，保持内部始终处于潮湿状态。养护时间不得少于14天。期间要安排专人负责巡查、补水，确保护养不间断。规范的养护能保证水泥充分水化，是防止表面失水过快导致起砂、开裂的最有效措施。

在完成地面施工的区域周边立即设置醒目的警戒线和“作业完成、禁止通行”的标识牌。养护期间及强度未达到5MPa前（通常为3~5天），严禁任何人员、设备进入踩踏或在该区域堆放材料。强度达到要求后，如需进行后续上部结构施工，必须在耐磨

地面上满铺一层不少于12mm厚的多层板或厚度适宜的橡胶垫，对地面进行全封闭物理防护，防止因材料搬运、设备移动、工具掉落等造成的磕碰、划痕和污染。

五、结束语

综上所述，结构面层一体化精平地面技术在某棚户区改造项目地下车库的应用，通过科学的施工方案设计、规范的施工流程及严格的质量控制措施，有效解决了传统地面施工的质量问题，提升了地面的耐磨性能与整体质量。该技术实现了结构与饰面的一体化施工，达到了降本增效的目的，验证了其在实际工程中的可行性与优越性。未来，可进一步优化工艺细节，扩大应用范围，为更多建筑项目的地面施工提供高效、优质的技术方案。

参考文献

[1] 肖婷婷, 刘翰宇. 建筑内隔墙磷石膏装饰面层一体化施工工艺与质量控制 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(11):97-99.

[2] 翁颖平. 大孔隙排水降噪沥青面层结构设计与施工技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (06):124-126.

[3] 赵鹏. 钢结构楼承板建筑面层一体化浇筑施工技术. 天津市, 中建二局第四建筑工程有限公司, 2023-06-19.

[4] 王鹏, 张朋, 刘胜欢, 孙平, 孙广浩, 王禹贺. 住宅类保温与结构一体化施工应用前景分析 [A] 中国土木工程学会总工程师工作委员会第二届总工论坛会议论文集 [C]. 中国土木工程学会总工程师工作委员会, 施工技术编辑部, 2022:3.

[5] 史学文. 浅议结构施工中耐磨地面一体化施工 [J]. 中国建材, 2022, (05):107-109.

[6] 范杰, 宋千军, 纪家亮, 杨文涛, 刘尚. 车库地坪开裂起砂问题的研究与创新解决方案 [J]. 安徽建筑, 2020, 27(07):53-54.

[7] 王晓倩. 地下车库防水设计及其面层材料选择 [J]. 城市建筑, 2020, 17(15):96-97.

[8] 廖晓红. EPS 保温与结构一体化外保温系统施工技术 [J]. 浙江水利水电学院学报, 2019, 31(06):44-48.

[9] 雷一鸣. 无面板涂装饰面保温装饰一体板面层砂浆的制备及其性能研究 [D]. 济南大学, 2023.

[10] 殷俊超. 人致作用下考虑装饰面层影响的大跨度预应力次梁楼盖竖向振动实测研究 [D]. 重庆大学, 2023.

# 低温环境下混合动力汽车动力系统适应性优化及维护策略

苏勇威

内蒙古乌兰察布市交通运输综合行政执法支队, 内蒙古 乌兰察布 012000

DOI:10.61369/ERA.2025100036

**摘要：** 本文聚焦低温环境下混合动力汽车（HEV）动力系统的适应性问题，从硬件优化、控制策略及维护使用三个维度展开研究。在硬件层面，针对动力电池、发动机及整车热管理系统提出优化方案，包括选用低温性能优异的电池材料、优化发动机启动与燃油喷射系统、构建智能化热管理集成系统等；在控制策略方面，设计了基于环境温度感知的整车能量管理策略、动力系统协调控制策略及电池管理系统（BMS）低温专项控制策略，以动态适配不同低温工况；在维护与使用层面，提出了低温专项维护措施、基于车联网与大数据的预测性维护方案，以及面向用户的低温使用建议与驾驶引导。研究旨在提升 HEV 在低温环境下的动力性能、经济性与安全性，为其低温适应性优化及维护提供全面参考。

**关键词：** HEV（混合动力汽车）；低温环境；动力系统；适应性优化

## Optimisation of Adaptability and Maintenance Strategies for Hybrid Electric Vehicle Powertrains in Low-Temperature Environments

Su Yongwei

Ulanqab Municipal Transportation Comprehensive Administrative Enforcement Brigade, Ulanqab,  
Inner Mongolia 012000

**Abstract：** This paper focuses on the adaptability issues of hybrid electric vehicle (HEV) powertrains in low-temperature environments, conducting research from three dimensions: hardware optimisation, control strategies, and maintenance and usage. At the hardware level, optimisation schemes are proposed for the battery pack, engine, and vehicle thermal management system, including selecting battery materials with excellent low-temperature performance, optimising engine start-up and fuel injection systems, and constructing an intelligent integrated thermal management system; In terms of control strategies, the study designs vehicle energy management strategies based on environmental temperature sensing, coordinated control strategies for the powertrain system, and special low-temperature control strategies for the battery management system (BMS) to dynamically adapt to different low-temperature operating conditions; In terms of maintenance and usage, the study proposes special low-temperature maintenance measures, predictive maintenance solutions based on vehicle-to-vehicle communication and big data, as well as low-temperature usage recommendations and driving guidance for users. The research aims to enhance the power performance, economy, and safety of HEVs in low-temperature environments, providing comprehensive references for their low-temperature adaptability optimisation and maintenance.

**Keywords：** HEV (hybrid electric vehicle); low-temperature environment; powertrain system; adaptability optimisation

### 引言

低温环境对 HEV 动力系统的性能表现构成严峻挑战，成为制约其在高纬度、高海拔等寒冷地区推广应用的关键瓶颈。目前国内学者针对 HEV 低温适应性已开展部分研究，但现有成果多聚焦单一部件优化，缺乏对动力系统整体协同性的考量，且在极端低温（-20℃以下）工况下的适应性方案仍待完善。此外，低温环境下的长效维护机制与用户使用规范研究相对滞后，导致车辆实际服役过程中故障发生率偏高。本文立足 HEV 动力系统的多部件耦合特性，系统探究低温环境下的适应性优化路径：通过硬件结构改进提升核心部件的低温耐受能力，借助智能化控制策略实现能量流与热流的动态协同，结合预测性维护与用户引导构建全生命周期保障体系。研究成果可为 HEV 在寒冷地区的推广应用提供技术支撑，对推动新能源汽车产业的高质量发展具有重要现实意义。



## 一、HEV 动力系统低温适应性硬件优化策略

### （一）动力电池系统硬件优化

动力电池系统在低温下的性能衰减是影响 HEV 低温适应性的关键问题，针对这一情况，可从多个硬件层面进行优化。在电池单体层面，可选用低温性能更优异的电池材料。例如采用镍钴锰酸锂（NCM）与钛酸锂（LTO）混合的电池体系，LTO 材料具有出色的低温充放电性能和循环寿命，能有效提升电池在低温环境下的容量保持率和充放电效率。同时优化电池单体的结构设计，减小电极厚度、增大电极表面积，可缩短离子扩散路径，提高离子在低温下的迁移速度。电池包的结构设计也至关重要。采用高效的保温隔热结构，在电池包外壳内侧添加高性能保温材料，减少外界低温环境对电池内部的影响。同时合理设计电池包的密封结构，防止湿气和冷空气进入，避免电池内部结霜或结冰。此外，在电池包内部设置独立的加热装置，可在低温启动前对电池进行预热，使电池快速达到适宜的工作温度。加热装置的布置应均匀合理，确保每个电池单体都能被均匀加热，避免局部过热或加热不足的情况。电池管理系统（BMS）的硬件也需要优化，采用高精度的温度传感器，提高对电池温度的检测精度，确保 BMS 能准确掌握电池的温度状态，为加热和充放电控制提供可靠依据。同时增强 BMS 的运算处理能力，使其能更快速、准确地分析电池状态，优化充放电策略，避免低温下的过度充放电。

### （二）发动机系统硬件优化

汽油发动机的最佳工作温度为 90℃ 左右，该温度下发动机内部的摩擦力比冷启动时降低约 1.5 倍，可有效提高发动机的燃油经济性，温度过高易导致发动机爆震，缩短发动机使用寿命<sup>[1]</sup>。发动机系统在低温下启动困难、燃烧效率低等问题，可通过硬件优化得到改善。在发动机启动方面，优化启动电机的性能，选用功率更大、扭矩更高的启动电机，以应对低温下发动机启动阻力增大的情况<sup>[2]</sup>。同时改进启动电机与发动机的连接结构，减少启动过程中的能量损失，提高启动效率。此外，采用快速预热装置，在发动机启动前对进气和缸体进行预热，降低启动时的阻力，提高燃油雾化效果，使发动机更易启动。为提升发动机在低温下的燃烧效率，可优化燃油喷射系统。采用高压共轨燃油喷射技术，提高燃油喷射压力，使燃油雾化更充分、均匀，改善混合气的形成质量。同时调整喷嘴的结构和喷射角度，确保燃油能准确喷射到燃烧室的合适位置，提高燃烧效率。优化发动机的压缩比，适当提高压缩比可提高缸内温度和压力，有利于燃油在低温下的燃烧<sup>[3]</sup>。发动机的润滑系统也需要针对低温环境进行优化。选用低温粘度小、流动性好的专用机油，减少低温下机油的粘度增加，提高润滑效果。同时改进机油泵的结构，提高机油在低温下的泵送能力，确保发动机各部件能得到及时、充分的润滑。

### （三）整车热管理集成优化

整车热管理系统的集成优化能有效利用各部件产生的热量，提高 HEV 在低温环境下的能量利用效率和舒适性。构建智能化的热管理控制系统，通过多个温度传感器实时监测发动机、电机、电池、驾驶室等部位的温度，并根据监测数据智能调节热量的分

配和流动。同时利用电机和电子元件工作时产生的废热，通过热交换器将其回收利用，减少能量浪费<sup>[4]</sup>。优化热交换系统的结构和布局，采用高效的热交换器，提高热量交换效率。合理布置热交换器的位置，缩短热量传递路径，减少热量损失。此外，加强整车的保温隔热设计，减少热量的散失。在车身、发动机舱、电池包等部位采用高性能的保温材料，提高整车的保温性能。优化车门、车窗的密封结构，减少冷空气渗入，降低驾驶室的热量损失<sup>[5]</sup>。通过整车热管理的集成优化，实现各部件之间的热量高效利用和合理分配，提升 HEV 在低温环境下的动力性能、经济性和舒适性。

## 二、HEV 动力系统低温适应性控制策略优化

### （一）基于环境温度感知的整车能量管理策略

环境温度是影响 HEV 动力系统性能的关键因素，基于环境温度感知的整车能量管理策略能根据实时温度动态调整能量分配，提升低温适应性<sup>[6]</sup>。通过布置在车身不同位置的温度传感器，实时采集外界环境温度、车内温度、电池温度、发动机温度等关键温度参数，并利用数据融合算法对采集到的温度数据进行处理，提高温度感知的准确性和可靠性。当处于轻度低温（0℃至 -5℃）时，适当提高发动机的工作优先级，让发动机更早介入工作，利用发动机产生的热量为电池和驾驶室供暖，同时保持电池在较高的 SOC（State of Charge）水平，一般控制在 40%–60%，以避免电池深度放电<sup>[7]</sup>。当处于中度低温（-5℃至 -15℃）时，进一步增加发动机的工作时间和负荷，优先保证电池的加热需求，将电池温度维持在 10℃–20℃ 的适宜区间，同时减少电机的大功率输出，降低电池的放电压力。当处于重度低温（低于 -15℃）时，启动发动机强制工作模式，即使车辆处于低速行驶或怠速状态，发动机也持续运转，为电池和整车热管理系统提供充足的热量，此时电池主要作为辅助动力源，避免深度充放电。

### （二）低温工况下的动力系统协调控制策略

低温工况下，发动机、电机等动力部件的性能特性发生变化，需要通过协调控制策略实现各部件的高效配合<sup>[8]</sup>。在发动机与电机的动力分配方面，采用动态扭矩分配策略。根据发动机和电机在当前温度下的效率特性曲线，实时计算两者的最佳扭矩分配比例。当车辆需要急加速或爬坡时，综合考虑发动机和电机的动力输出能力，在保证动力充足的前提下，优先利用效率较高的部件，减少能量浪费。针对发动机的冷启动问题，制定预启动与暖机控制策略。当系统检测到发动机温度过低时，在车辆启动前通过电机带动发动机进行短时间的预运转，使机油充分润滑各部件，同时利用电机产生的热量对发动机进行预热。启动后，控制发动机在较高转速下运行一段时间，加快发动机的暖机过程，待发动机温度达到设定阈值后，再根据驾驶需求调整转速<sup>[9]</sup>。电机的控制策略也需要优化。在低温下，限制电机的最大输出功率和扭矩，避免电机因过载而损坏。同时通过电机绕组加热控制，利用电机自身的电阻发热对电机进行预热，提高电机的工作温度。当电机温度低于 -10℃ 时，可通过向电机绕组通入小电流，使电机



缓慢升温，待温度升高至 0℃以上后，再允许电机进行正常的功率输出。

（三）电池管理系统低温专项控制策略

电池管理系统（BMS）的低温专项控制策略是保障电池低温安全高效工作的核心。其采用分级预热策略，依据电池温度和 SOC 选择预热方式，确保温度均匀升至 15℃以上停止；充电时用阶梯式电流控制，严格把控截止电压，低于 - 20℃禁止充电；提高电池均衡控制频率和精度，维持单体电压一致；增加参数监测频率，发现异常立即采取保护措施并记录故障信息。

三、HEV 低温环境下的智能维护与用户使用策略

（一）低温环境下的专项维护策略

低温环境下 HEV 各部件损耗加剧，需针对性专项维护以延长寿命、保障低温性能。动力电池系统要定期检测维护，每周查外观，每月测单体参数，冬季前全面检查加热系统；发动机系统每 2 - 3 个月换低温机油，定期检查火花塞、维护燃油系统，冬季重点检查冷却系统并换低温防冻液；电机和动力耦合系统每月查电机绝缘性能，定期润滑耦合装置部件并检查其密封情况。

（二）基于车联网与大数据的预测性维护

借助车联网与大数据可实现 HEV 低温预测性维护，提前处理潜在故障。通过构建数据采集与分析平台，实时采集并分析车辆各类数据，建立性能衰减和故障预警模型，预测部件状态并预警；实现分级故障预警与维护提醒，制定个性化维护周期；利用远程诊断与维护技术，远程调整软件解决部分问题，提高效率并减少车辆停运时间。

（三）面向用户的低温使用建议与驾驶引导

向用户提供科学的低温使用建议和驾驶引导，能帮助用户更好地操作 HEV，提升车辆在低温环境下的性能和安全性。在车辆启动与预热方面，建议用户在低温环境下启动车辆前，先通过手机 APP 远程启动车辆的预热功能，对电池和发动机进行预热，预热时间一般为 5-10 分钟，待车辆各项参数达到正常范围后再启动行驶<sup>[10]</sup>。启动后，避免立即高速行驶，应保持低速行驶一段时

间，让发动机和电机逐步升温，减少冷启动对部件的磨损。驾驶过程中，需注意能量管理与动力输出。尽量避免急加速、急刹车等激烈驾驶行为，因为急加速会导致电机大功率输出，增加电池的放电压力，而急刹车在低温下能量回收效果不佳，还可能影响制动安全性。合理使用空调制热功能，可采用分区制热模式，减少不必要的能量消耗；当车内温度达到适宜水平后，可适当降低空调温度或切换为通风模式，降低对动力系统能量的消耗。在充电与停车方面，建议用户尽量选择在室内停车场或有保温设施的充电站点进行充电，避免在极端低温环境下长时间露天充电。充电前，确保电池温度不低于 - 10℃，若电池温度过低，可先启动车辆预热功能，待电池温度升高后再进行充电。停车时，尽量将车辆停放在避风、向阳的位置，减少车辆受低温和寒风的影响；停车后，及时关闭车载电器设备，避免电池不必要的放电。此外，向用户提供冬季应急处理指南，如遇车辆在低温环境下无法启动，指导用户检查电池电量、发动机机油粘度等；如遇电池故障报警，告知用户应立即停车并联系维修人员，切勿继续强行行驶。通过这些使用建议和驾驶引导，提高用户对 HEV 低温性能的认知和操作水平，确保车辆在低温环境下的安全、高效运行。

四、结束语

低温环境对混合动力汽车（HEV）动力系统的性能制约是新能源汽车产业发展中亟待突破的关键问题，其核心矛盾在于低温下多部件性能衰减的协同效应与能量供需失衡。本文通过系统性研究，构建了涵盖硬件优化、控制策略与维护体系的低温适应性解决方案。研究成果不仅为 HEV 在寒冷地区的推广提供了技术支撑，更构建了“硬件 - 控制 - 维护”三位一体的低温适应性框架，为其他新能源汽车的低温性能优化提供了可借鉴的思路。然而极端低温（-30℃以下）工况下的材料极限与能量平衡、长期低温服役后的部件老化规律等问题仍需深入探索。未来可结合新材料技术与智能算法，进一步提升系统的鲁棒性与适应性，推动 HEV 在更广泛气候区域的高效应用，为全球新能源汽车产业的可持续发展贡献力量。

参考文献

[1] 李凯. 面向低温环境的增程式电动汽车能效优化与控制 [D]. 吉林大学, 2024.  
[2] 刘小飞. 低温条件下 Plug-in 柴油混合动力汽车综合优化控制策略研究 [D]. 重庆交通大学, 2016.  
[3] 王天泽. 低温运行状态下插电式混合动力客车能量管理策略研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2019.  
[4] 张涛. 考虑冷却系统能耗的 PHEV 综合能量管理策略研究 [D]. 江苏大学, 2020.  
[5] 李峰. 插电式混合动力汽车热管理系统开发及其控制算法研究 [C]. //2016 Siemens PLM Software 仿真与试验技术大会论文集. 2016:1-21, 23-45, 47-57, 59-.  
[6] 修玲玲. 混合动力汽车概述及其维护与保养 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2017, 19(4): 15-17.  
[7] 周林. 混合动力汽车的维护与保养 [J]. 时代汽车, 2022, (8): 175-176. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2022.08.072.  
[8] 混合动力汽车的维护与保养 [J]. 汽车工程师, 2019, (1): 59.  
[9] 王峰, 王安新. 混合动力电动汽车的使用与维护 [J]. 客车技术与研究, 2011, 33(3): 58-60. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3331.2011.03.019.  
[10] 郑晨飞, 姚晓山, 曹晓雨等. 两轴驱动混合动力汽车动力系统的优化设计 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2021, 42(1): 22-27. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2021.01.004.

# 电梯检验检测数据在电梯风险评估中的应用探索

秦炼军, 莫兆雪, 胡栩侨

广东省特种设备检测研究院, 广东 佛山 528200

DOI:10.61369/ERA.2025100037

**摘 要 :** 随着城市化进程的加快, 电梯作为高层建筑中不可或缺的垂直运输工具, 其安全运行直接关系到公众的生命财产安全。电梯风险评估是确保电梯安全运行的重要手段之一, 而检验检测数据是进行风险评估的基础。本文旨在探索电梯检验检测数据在风险评估中的应用, 分析数据的收集、处理和应用方法, 以及如何通过这些数据提高电梯的安全性和可靠性。

**关 键 词 :** 电梯安全; 风险评估; 检验检测数据

## Exploring the Application of Elevator Inspection and Testing Data in Elevator Risk Assessment

Qin Lianjun, Mo Zhaoxue, Hu Xuqiao

Guangdong Provincial Institute of Special Equipment Inspection and Testing, Foshan, Guangdong 528200

**Abstract :** With the acceleration of urbanisation, elevators, as indispensable vertical transportation tools in high-rise buildings, directly impact public safety and property security. Elevator risk assessment is an important means of ensuring elevator safety, and inspection and testing data form the foundation for such assessments. This paper aims to explore the application of elevator inspection and testing data in risk assessment, analyse data collection, processing, and application methods, and discuss how these data can enhance elevator safety and reliability.

**Keywords :** elevator safety; risk assessment; inspection and testing data

## 引言

近年来, 我国电梯的数量不断增加。电梯作为现代城市生活中不可或缺的一部分, 给人们的工作和生活带来了极大的便利, 同时, 特种设备电梯也带来了一定的生命财产安全隐患, 电梯的安全性始终是社会关注的焦点。根据国家市场监管总局的统计数据显示, 截至2024年年底, 电梯总量达1153.24万台, 电梯开始走入越来越多人的生活, 因此, 提高电梯设备的安全性就显得尤为重要。

电梯风险评估是预防事故、确保乘客安全的关键手段。检验检测数据是评估过程中的核心支撑, 其精确度和可信度直接决定了评估结果的可靠性。因此, 深入探讨如何更高效地运用检验检测数据进行风险评估, 对于提高电梯安全管理水平具有至关重要的意义。

## 一、电梯检验检测数据及其特点

### (一) 电梯检验检测数据类型

电梯检验检测数据涵盖了在定期和监督检验过程中收集的各类信息, 它们为评估电梯安全、指导运行维护以及进行故障诊断提供了关键依据。具体而言, 这些数据主要包括以下几类: 首先是设备参数, 它包括电梯的基本信息, 如制造商、型号、额定载重量、额定速度、提升高度等, 这些参数是评估电梯基本性能的关键指标。其次是运行数据, 这类数据记录了电梯日常运行的状

态, 例如运行次数、运行时间、启停次数、门锁状态、制动器状态等, 它们反映了电梯的使用频率和运行状况。再次是维护记录, 详细记录了电梯的日常维护保养信息, 包括维护时间、维护内容、更换部件等, 这些记录对于评估电梯的维护保养情况至关重要。此外还有故障记录, 这类数据记录了电梯发生故障的时间、现象、处理结果等, 对于分析电梯的故障原因和预防故障发生具有重要意义。最后是检验报告, 它是电梯检验检测工作的最终成果, 包含了检验检测的过程、结果、结论以及整改意见等, 是电梯安全评估的重要依据。这些不同类型的数据相互关联、相

作者简介:

秦炼军 (1979.02—), 男, 辽宁科技大学, 本科, 专业: 机械设计制造及其自动化; 从事工作: 电梯检测等工作, 邮编: 528200;

莫兆雪 (1986.01—), 男, 北京理工大学珠海学院, 本科, 专业: 自动化; 从事工作: 电梯检测等工作, 邮编: 528200;

胡栩侨 (1996.08—), 男, 东莞理工学院, 本科, 专业: 电子信息工程; 从事工作: 电梯检测等工作, 邮编: 528200。

互补充，共同构成了一个完整的电梯检验检测数据体系<sup>[1]</sup>。

## （二）电梯检验检测数据特点

电梯检验检测数据呈现出几个显著特征：首先，数据量庞大。随着电梯数量的持续增长以及物联网技术的普及，所产生的数据量呈指数级增长。其次，数据类型繁多。如前所述，这些数据涵盖设备参数、运行数据、维护记录、故障记录、检验报告等多种类型，它们格式各异，为数据的采集、存储和分析带来了挑战。第三，数据具有时效性。电梯的运行状态和维护情况是动态变化的，因此，检验检测数据需要不断更新和维护，以确保其准确性和有效性。最后，数据具有地域性。不同地区的电梯使用环境、维护水平、监管力度等方面存在差异，这导致了数据的地域性特征，需要进行特定的分析和处理。这些特征使得处理和分析电梯检验检测数据变得复杂，因此必须采用先进的技术和方法来提取有价值的信息，为电梯的安全运行提供保障。

## （三）数据质量及标准化

数据质量构成了电梯风险评估的根基，而精确的风险评估依赖于高质量的数据。尽管如此，目前电梯检验检测数据在质量和标准化方面仍面临挑战。首先，数据质量不一，受到数据采集方法、设备精度、操作人员技能等多种因素的影响，电梯检验检测数据质量波动较大，一些数据可能包含错误、遗漏、重复等问题，这些问题会显著影响风险评估的精确性。其次，数据标准化程度有待提高，目前电梯检验检测数据在格式、定义、编码等方面缺乏统一标准，导致不同地区、不同机构的数据存在差异，难以实现有效整合和利用<sup>[2]</sup>。这些问题限制了电梯检验检测数据的应用潜力，也妨碍了电梯风险管理水平的提升。因此，强化数据质量管理，推进数据标准化建设，是电梯行业当前迫切需要解决的问题。必须制定统一的数据标准，规范数据采集、存储、处理和交换流程，以提升数据的准确性和一致性。同时，还需加强数据质量控制，建立数据质量评估体系，对数据进行清洗、校验和修复，确保数据的可靠性。只有当数据质量和标准化程度得到提升，我们才能更有效地利用电梯检验检测数据进行风险评估，确保电梯的安全运行<sup>[3]</sup>。

# 二、电梯检验检测数据的处理与分析

## （一）数据预处理

电梯检验检测数据的预处理是数据分析流程中不可或缺的一环，旨在提升数据的品质，并为后续的特征提取与分析工作打下坚实的基础。预处理步骤主要涵盖数据清洗、数据转换以及数据集成等技术。数据清洗涉及对原始数据中出现的错误、缺失值和重复项等进行针对性地处理。数据转换旨在使数据更适应后续分析，常见的转换手段包括数据类型转换、数据标准化、数据归一化等。例如，将文本数据转换为数值数据，以便进行数值运算；对不同量纲的数据执行标准化或归一化处理，以消除量纲差异，确保数据的可比性。数据集成则是将不同来源的数据合并成一个统一的数据集。在电梯检验检测数据中，可能包含来自不同设备和系统的数据，这些数据需要经过集成处理，以便进行综合分

析。例如，电梯运行数据可能来源于安装在电梯上的传感器，而维护记录和故障记录则可能来自维护人员的记录，这些数据需整合在一起，以进行全面的电梯安全评估。通过执行数据清洗、数据转换和数据集成等预处理措施，可以显著提升电梯检验检测数据的品质，为后续的数据分析提供坚实的数据支持，进而更精确地识别潜在的安全隐患，确保电梯的安全运行<sup>[4]</sup>。

## （二）数据特征提取

数据特征提取是从经过预处理的数据中识别和提取与电梯安全相关的关键信息的过程。这些特征信息对于后续的风险评估和故障诊断至关重要，它们构成了连接原始数据与分析结果的关键桥梁。例如，关键部件的状态是反映电梯安全性的一个重要指标。通过提取制动器、钢丝绳、导轨、安全钳等关键部件的运行参数、磨损情况、故障记录等特征信息，我们可以评估其安全状态。具体而言，我们可以提取制动器的制动力矩、磨损厚度、动作时间等参数，以判断其制动性能是否良好；提取钢丝绳的直径、磨损量、断丝数等参数，以判断其是否需要更换；提取导轨的垂直度、平行度、磨损情况等参数，以判断其是否影响电梯的运行平稳性；提取安全钳的动作速度、制停距离等参数，以判断其是否能在紧急情况下可靠地制停电梯。运行参数的异常也是电梯安全风险的一个重要体现。我们可以通过提取电梯的运行速度、加速度、加减速时间、运行次数等参数，并与正常值进行比较，来识别是否存在异常情况<sup>[5]</sup>。历史故障信息可以为电梯的故障预测提供重要参考。我们可以通过提取故障发生的时间、类型、频率、处理结果等特征信息，来分析故障的规律和趋势，并预测未来可能发生的故障。例如，如果某种类型的故障频繁发生，或者故障发生的频率逐渐增加，就需要重点关注，并采取措施进行预防。此外，我们还可以提取维护保养记录、环境因素等信息，作为评估电梯安全性的辅助特征。例如，提取维护保养周期、内容、人员等信息，判断工作是否到位；提取环境温度、湿度、粉尘等信息，判断是否影响电梯安全。通过多维度提取电梯安全特征信息，全面了解电梯的运行状态，为数据分析提供丰富信息，准确评估安全风险，采取预防措施<sup>[6]</sup>。

## （三）数据分析技术

数据分析技术是挖掘电梯检验检测数据中隐藏安全风险的有力工具，常用的技术包括统计分析、趋势分析、关联分析等。统计分析通过描述性统计手段，如均值、方差、最大值、最小值等，揭示数据的分布特征和总体状况。例如，通过统计电梯的运行次数、故障次数等关键指标，可以评估其使用频率和故障率。趋势分析则通过研究数据随时间变化的趋势，预测未来的发展动向。例如，分析电梯运行参数随时间的变化趋势，可以预测其性能退化情况。关联分析通过识别数据间的关联性，揭示潜在的安全风险。例如，分析电梯故障类型与运行参数之间的关联，可以找出导致故障的关键因素。此外，还可以借助机器学习技术，如聚类分析、分类分析等，对电梯检验检测数据进行更深入地分析，以识别潜在的安全风险。运用这些数据分析技术，可以从电梯检验检测数据中提取重要信息，为电梯的安全管理提供决策支持，并采取预防措施，避免事故的发生<sup>[7]</sup>。



### 三、基于检验检测数据的电梯风险评估方法

#### （一）风险评估指标体系构建

构建一个科学合理的电梯风险评估指标体系，是利用检验检测数据进行电梯风险评估的根基。该指标体系必须能够全面且客观地体现电梯的安全状况，并且具备高度的可操作性和实用性。基于电梯的检验检测数据，我们可以从设备状态、运行状态以及维护管理三个维度来构建电梯风险评估指标体系。设备状态指标主要揭示电梯关键部件的技术状况，例如导轨的垂直度、钢丝绳的磨损程度、制动器的制动力矩等，这些指标可通过定期的检验检测来获取。运行状态指标则主要反映电梯的运行参数和性能，如运行速度、加减速速度、振动幅度、噪声水平等，这些指标可以通过安装在电梯上的传感器进行实时监测<sup>[8]</sup>。维护管理指标则主要反映电梯的维护保养情况和历史故障信息，例如维护保养记录的完整性、故障发生的频率和类型、维修的及时性等，这些指标可以通过查阅维护保养记录和故障记录来获得。此外，一些外部因素，如电梯的使用年限、使用频率、使用环境等，也可以作为评估电梯安全性的辅助指标。

#### （二）风险等级划分

在构建了电梯风险评估指标体系之后，接下来的步骤是依据该指标体系制定电梯风险等级的划分标准。这一划分旨在对电梯的安全状况进行分级，从而实施差异化的管理措施。通常情况下，电梯的风险等级可以分为三个等级：低风险、中风险和高风险。低风险等级意味着电梯的安全状况处于良好状态，运行正常，允许继续投入使用；中风险等级则表明电梯存在一定的安全隐患，需要增强监控和维护工作；而高风险等级则暗示电梯存在严重的安全隐患，必须立即停止使用，并进行必要的整改。具体的划分标准应结合实际情况和相关法规来制定，例如参照国家、行业以及地方的标准<sup>[9]</sup>。同时，结合具体状况进行适当调整，以确

保风险等级划分的合理性和有效性。

#### （三）风险评估流程

电梯风险评估流程，基于检验检测数据，是一个系统化的过程。它涵盖了数据收集、数据处理、风险识别、风险等级判定以及风险评估报告生成等关键步骤。首先，数据收集构成了风险评估的基石，涉及搜集电梯检验检测过程中产生的各类数据，如设备参数、运行数据、维护记录和故障记录等。数据的收集可以通过自动化采集或人工录入等多种方式实现。接着，数据处理阶段包括对收集到的数据进行清洗、转换和集成等操作，旨在提升数据质量，确保后续风险识别和等级判定的准确性。随后，风险识别阶段运用数据分析方法，对处理后的数据进行深入分析，以识别潜在风险。最终，风险评估报告应详尽地包含电梯的基本信息、风险评估指标体系、风险等级判定结果、主要风险因素分析以及相应的整改建议等内容<sup>[10]</sup>。

### 四、结束语

电梯检验检测数据在进行电梯风险评估时扮演着至关重要的角色。尽管目前在数据准确性、标准化流程以及风险评估方法等方面仍面临一些挑战，但随着技术的不断进步和行业规范的持续完善，我们有充分的理由相信这些问题将会得到妥善解决。展望未来，通过进一步强化对电梯检验检测数据的采集、处理、分析和应用，持续改进风险评估指标体系和等级划分标准，优化风险评估流程，我们能够更精确地评估电梯的安全风险状况。这不仅能够提升电梯的安全运行水平，有效预防电梯事故的发生，确保乘客的生命安全，还能提高电梯的维护管理效率，降低运营成本，进一步提高乘客的乘坐体验和满意度。

### 参考文献

- [1] 蔡一蓝. 电梯使用安全风险评价及应用探索 [J]. 中国电梯, 2018, 29(10): 3. DOI: CNKI: SUN: ZGDT. 0. 2018-10-024.
- [2] 夏崇峻. 基于大样本检验数据的电梯风险预估方法 [J]. 数字化用户, 2017, 23(033): 115. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0843.2017.33.108.
- [3] 谢建雄, 陈奕波. 老旧电梯安全评估方法及主要部件风险分析 [J]. 中国电梯, 2024(002)035.
- [4] 郭森, 潘锋, 李斌, 等. 基于大数据的电梯检验检测技术认可及故障分析应用研究 [J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(07): 63-67.
- [5] 任晓峰. 大样本检验数据对电梯风险评估的应用 [J]. 电子元件与信息技术, 2018(7): 4. DOI: CNKI: SUN: DYXU. 0. 2018-07-006.
- [6] 芮妮欣, 张媛媛, 吴占稳. FMECA 在电梯安全评估中的应用 [J]. 中国特种设备安全, 2022(007): 038.
- [7] 刘明升. 电梯风险评价体系的应用研究与分析 [J]. 商品与质量, 2022(34): 49-51.
- [8] 李嘉华. 探讨 FMEA 分析法在电梯检验检测分析中的实际应用 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2023(11): 34-36.
- [9] 李博伟. 风险评价和风险降低在电梯检验中的应用研究 [J]. 2020. DOI: 10.12253/j.issn.2096-3661.2020.17.2856.
- [10] 杨耀旺, 魏彤, 韩佳. 风险评价和风险降低在电梯检验中的应用研究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(21): 252-254.



# 金属铬制备过程中氢气还原技术的微观结构调控与性能评价

肖棱, 白礼太\*, 谢友才, 黄先东, 冷建军, 樊诗贤, 杜威

四川省银河化学股份有限公司, 四川 绵阳 622650

DOI:10.61369/ERA.2025100040

**摘要 :** 金属铬因其优异的耐蚀性、高硬度和稳定性, 在冶金、化工及航空航天等领域具有广泛应用。传统制备工艺能耗高、污染严重, 已难以满足绿色发展需求。氢气还原技术凭借清洁、高效和低碳排放的优势, 成为制备高纯金属铬的重要途径。通过调控还原过程中的温度、气氛与反应动力学, 可有效影响晶粒尺寸、孔隙率及缺陷类型, 进而决定材料的力学、化学和物理性能。系统评价微观结构与性能的关联性, 不仅有助于优化工艺参数, 还为高性能金属材料的应用拓展提供科学支撑。

**关键词 :** 金属铬; 氢气还原; 微观结构调控; 性能评价; 工艺优化

## Microstructural Control and Performance Evaluation of Hydrogen Reduction Technology in the Preparation of Metallic Chromium

Xiao Ling, Bai Litai\*, Xie Youcai, Huang Xiandong, Leng Jianjun, Fan Shixian, Du Wei

Sichuan Yinhe Chemical Co., Ltd., Mianyang, Sichuan 622650

**Abstract :** Metallic chromium is widely used in metallurgy, chemical engineering, and aerospace due to its excellent corrosion resistance, high hardness, and stability. However, traditional preparation processes suffer from high energy consumption and severe pollution, making them difficult to meet the demands of green development. Hydrogen reduction technology, with its advantages of cleanliness, efficiency, and low carbon emissions, has emerged as an important method for producing high-purity metallic chromium. By regulating the temperature, atmosphere, and reaction kinetics during the reduction process, it is possible to effectively influence grain size, porosity, and defect types, thereby determining the material's mechanical, chemical, and physical properties. A systematic evaluation of the correlation between microstructure and performance not only aids in optimizing process parameters but also provides scientific support for the expanded application of high-performance metallic materials.

**Keywords :** metallic chromium; hydrogen reduction; microstructural control; performance evaluation; process optimization

## 引言

金属铬因具备优异的耐蚀性和高温稳定性, 被广泛应用于冶金、化工及航空航天等领域。然而, 传统制备方法能耗高、污染严重, 限制了其可持续发展。氢气还原技术以低碳、高效的特点受到广泛关注, 国外在反应机理与工艺设计方面积累了丰富成果, 国内则在工艺参数优化和性能提升上开展了探索, 但仍存在结构调控不足与评价体系不完善等问题。围绕氢气还原过程中的微观结构演化规律及性能关联性进行深入研究, 对推动高性能金属铬的制备与应用具有重要意义。

## 一、氢气还原制备金属铬的工艺机理

### (一) 热力学与动力学分析

氢气还原氧化铬的过程实质上是氢气与氧化铬之间的气固反应, 涉及多步电子转移与氧化物分解。该反应在热力学上是可行

的, 但具体路径受温度与气氛的影响显著。通常情况下, 氧化铬在氢气氛下依次发生部分还原和完全还原, 形成中间产物如  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  或低价氧化铬, 再进一步生成金属铬。在温度较低时, 反应速率主要受扩散过程限制, 随着温度升高, 化学反应成为速率决定环节。气氛中氢气分压的变化会改变反应的自由能, 进而影响平衡

本文系 2023 年中央引导地方科技发展资金项目 + “铬铁矿资源高值化利用工程技术研究中心新材料实验室创新能力提升” + (2023ZYDF079)。

通讯作者: 白礼太

常数及反应方向。动力学分析显示，反应过程受限于界面迁移、扩散通道畅通性及颗粒孔隙结构的演化，不同阶段呈现出化学反应控制、气体扩散控制和产物层扩散控制等多种机制交替主导的特征<sup>[1]</sup>。

### （二）工艺流程与关键条件

氢气还原制备金属铬的工艺流程包括原料选择、预处理、还原反应以及后续冷却与纯化环节。常用原料多为三氧化二铬或含铬氧化物，其纯度和颗粒粒径直接影响还原效率。预处理过程通过球磨、造粒或高温煅烧改善原料活性与比表面积，以利于氢气渗透与反应均匀性。在还原反应阶段，温度分布的合理性尤为关键，过低不利于反应完全进行，过高则可能引发晶粒粗化和能耗增加。氢气纯度与流量决定了反应驱动力和还原速率，高纯氢气有助于降低副反应发生率，而合理流量则确保气固接触充分，避免因传质受限导致反应停滞。因此，工艺条件的优化不仅关系到金属铬产物的收率与纯度，还直接影响其显微结构与性能。

### （三）实验与模拟研究进展

近年来，实验与模拟手段的结合为揭示氢气还原金属铬的机理提供了重要支撑。实验研究表明，不同升温速率和氢气流量条件下，氧化铬的还原产物在晶粒尺寸、孔隙率和纯度方面表现出显著差异，这为结构调控提供了可靠依据。透射电子显微镜和 X 射线衍射等技术揭示了还原过程中晶格缺陷的生成与演化规律，为性能预测提供了实验数据支撑。同时，数值模拟与热力学计算方法能够从分子和原子尺度上刻画气体扩散、界面迁移及能量变化，帮助确定最佳工艺窗口。多尺度模拟还揭示了温度梯度与氢气浓度分布对反应动力学的影响，进一步解释了实验现象与理论计算之间的差异<sup>[2]</sup>。这种实验与模拟相结合的研究模式，为深入理解氢气还原机理和实现金属铬制备工艺优化奠定了坚实基础。

## 二、氢气还原过程中微观结构的形成机制

### （一）晶体形貌演化规律

在氢气还原氧化铬的初期阶段，表面活性位点处优先形成晶核，晶核的生成受到还原温度、气氛浓度及氧化物颗粒表面能的综合影响。随着反应的深入，晶粒逐渐长大并通过相互聚并形成致密区域，但同时也可能因晶界迁移不均而产生孔洞。孔隙结构在整个还原过程中不断演变，最初为大量微孔和不规则通道，随着晶粒尺寸增加，部分孔隙被填充或封闭，而部分则因气体逸出而扩展成宏观孔隙。这种形貌变化决定了最终产物的致密度和力学性能，是氢气还原过程中微观结构调控的关键节点<sup>[3]</sup>。

### （二）界面反应与缺陷生成

氢气与氧化铬的反应主要发生在气固界面，界面的迁移速度直接影响整体反应速率。随着还原的进行，界面不断向内部推进，形成反应产物层与未反应核心共存的结构。在这一过程中，不可避免地产生多种缺陷，包括晶体生长过程中的位错、氢气扩散导致的空位以及晶界偏聚现象。这些缺陷一方面提供了扩散通道，加快了反应速率，另一方面也可能降低结构稳定性，导致应力集中与材料脆化。尤其是高温条件下的缺陷聚集，会显著影响

晶体的均匀性和最终性能，因此对缺陷生成机制及其调控具有重要意义。

### （三）显微组织调控方法

为获得理想的显微组织结构，需要通过多种工艺手段进行调控。温度梯度的合理控制能够平衡晶粒生长与孔隙演化，避免晶粒过度粗化或孔隙异常扩展。气氛中氢气的分压调节则可改变还原速率与缺陷生成的类型与数量，适当提高分压有助于加快反应，但过高则可能造成晶粒快速长大并降低致密度。此外，添加剂或催化剂在调控显微组织方面也发挥积极作用，如过渡金属离子的掺杂能够促进晶核均匀成核，提高晶粒细化效果，表面活性剂则可改善气体传质条件<sup>[4]</sup>。通过上述多维度方法的综合运用，可以实现微观结构的精细调控，为高性能金属铬的制备提供坚实基础。

## 三、微观结构调控策略与实验优化

### （一）温度与时间参数优化

温度和时间是决定氢气还原效果的关键因素。不同升温速率会直接影响晶粒的成核与生长过程。实验表明，在 5 °C/min 的升温速率下，获得的金属铬晶粒平均尺寸约为 0.8 μm，分布均匀；当升温速率提高至 15 °C/min 时，晶粒尺寸迅速增大至 1.5 μm 以上，出现明显团聚现象。保温时间的延长则会影响孔隙率与致密度，2 h 保温条件下的孔隙率为 18%，致密度仅 81%；当保温时间延长至 6 h 时，孔隙率下降至 9%，致密度提高至 92%，但过长的时间（如 10 h）会导致晶粒粗化并降低材料强度<sup>[5]</sup>。因此，温度与时间的最优窗口通常控制在 1100 – 1200 °C、4 – 6 h 区间，可在保证还原完全的同时获得细小而均匀的晶粒结构。

### （二）氢气流量与浓度调节

气体扩散速率决定了氢气在固体颗粒间的传质效率，进而影响反应均匀性。当氢气流量控制在 200 mL/min 时，还原效率约为 85%，而在 500 mL/min 时提高到 96%，晶体组织更加均匀。氢气纯度也是重要因素，高纯氢气（99.999%）条件下产物纯度可达 99.8%，而在 H<sub>2</sub>/Ar=80/20 的混合气氛中，纯度下降至 97.5%，还原速率也降低约 20%。在工业化过程中，氢气的循环利用成为提高经济性的重要措施<sup>[6]</sup>。数据显示，采用三级循环系统时，氢气消耗量可减少 35%，单位产品能耗下降 12%，为规模化应用提供了有力支撑。

### （三）助剂与材料界面改性

在还原过程中引入助剂或进行界面改性，能够显著改善微观结构与反应速率。实验发现，掺杂 1.0 mol% Ni 离子可使平均晶粒尺寸由 1.2 μm 降低至 0.7 μm，同时硬度提高约 15%；而添加 0.5 mol% Mo 离子则可提高还原速率 10%，并改善致密性。表面涂层和包覆技术同样具有积极作用，例如在氧化铬表面施加一层 TiO<sub>2</sub> 包覆层，可以促进氢气均匀扩散，使最终产物的纯度提升至 99.9%（如表 1 所示）。此外，少量助剂还能有效抑制副反应生成，提高整体反应选择性和产物稳定性。

表 1 不同工艺参数对金属铬显微结构与性能的影响

工艺参数	晶粒尺寸 (μm)	孔隙率 (%)	产物纯度 (%)	致密度 (%)	备注
升温速率 5 °C /min	0.8	15	99.5	85	晶粒细小均匀
升温速率 15 °C /min	1.5	22	98.7	78	团聚明显
保温 6 h (1200 °C)	1.0	9	99.6	92	最优区间
H <sub>2</sub> 流量 500 mL/min	0.9	10	99.8	90	反应均匀
H <sub>2</sub> /Ar=80/20 混合气氛	1.3	18	97.5	82	速率下降
掺杂 1.0 mol% Ni	0.7	8	99.7	93	硬度提升 15%
TiO <sub>2</sub> 包覆	0.9	7	99.9	94	气体扩散更均匀

数据表明，温度与时间的优化可在控制晶粒细化和降低孔隙率方面发挥决定作用；氢气流量和纯度的调节直接影响反应效率与产物纯度；助剂与表面改性则能进一步提升致密度与性能。三者结合形成了系统性的微观结构调控策略，为制备高性能金属铬提供了实验依据与工程指导。

四、金属铬性能的多维度评价

（一）力学性能测试

金属铬的力学性能主要通过显微硬度计、万能试验机和断口形貌分析进行表征。硬度测试显示，当晶粒尺寸控制在1 μm 左右时，维氏硬度可达620 HV，而晶粒粗化至3 μm 时硬度下降至480 HV，说明晶粒细化具有显著的强化作用。强度测定中，抗拉强度随晶粒减小而提高，体现出典型的“细晶强化”效应。在断口分析中，细小晶粒样品表现出以韧窝为主的断裂特征，显示较好的塑性；而粗大晶粒样品则出现沿晶断裂和微裂纹扩展的迹象，反映出脆性倾向增强<sup>[7]</sup>。因此，晶粒结构对力学性能具有决定性影响，细化与均匀化是提升强度与韧性的核心途径。

（二）物理与化学性能表征

在物理性能方面，电阻率测试结果表明，致密度达到92% 以上的金属铬电阻率可稳定在12.5 μΩ · cm，而孔隙率较高的样品则升至15.8 μΩ · cm，说明微孔缺陷会加剧电子散射，降低导电性能。磁性测试显示，晶粒尺寸对磁化率有一定影响，细小晶粒有助于降低磁损耗。化学性能评价中，高温氧化实验表明，1200 °C下经过50 h 氧化处理，致密结构样品的质量增重率仅为2.1%，而疏松样品超过5.6%，说明致密组织能够显著提升抗氧化性。耐腐蚀测试结果显示，在3.5% NaCl 溶液中，细晶样品的腐蚀电流密度为2.5 μA/cm²，仅为粗晶样品的60%，揭示了组织均匀性与耐蚀性能之间的密切联系。

（三）性能与结构关联性分析

金属铬的宏观性能与显微组织之间存在紧密的关联性。晶粒尺寸、孔隙率及缺陷分布等微观参数共同决定了硬度、强度、电阻率与耐蚀性的表现。多因素耦合模型表明，当晶粒尺寸控制在0.8 - 1.2 μm、孔隙率低于10%、缺陷分布均匀时，金属铬可兼具高硬度（>600 HV）、低电阻率（<13 μΩ · cm）与优异的耐腐蚀性。在此基础上，性能预测机制可通过建立“结构—性能”数据库实现工艺参数与性能指标之间的快速反馈，例如通过机器学习方法预测在不同温度、氢气分压条件下的最终性能，从而实现工艺优化与目标性能的精准匹配。这一结构—性能关联性分析为

金属铬的工程化应用和质量控制提供了科学依据<sup>[8]</sup>。

五、氢气还原金属铬的应用与发展趋势

（一）工业应用前景

高纯金属铬因其优异的硬度、耐蚀性和高温稳定性，在特种钢和超合金领域中扮演着不可替代的角色。数据显示，在高铬不锈钢中添加2% - 3% 的铬元素可显著提高耐蚀性，而在镍基超合金中加入5% - 10% 的铬则能够改善材料在1200 °C下的抗氧化性能，使其使用寿命延长30% 以上。在航天器发动机、燃气轮机等关键部件中，高纯金属铬不仅能提升强度和耐热性，还能确保在极端环境下的可靠性。在新能源产业中，金属铬作为电极材料和涂层添加剂，也展现出优异的耐腐蚀和导电性能<sup>[9]</sup>。相比传统制备工艺，氢气还原技术能够实现低碳排放与高纯度产物结合，契合绿色制造与可持续发展的战略需求，因此在工业领域的应用前景广阔，具有显著的产业价值和推广潜力。

（二）存在的问题与挑战

尽管氢气还原技术在实验和中试阶段取得了积极进展，但在实际工业化应用中仍存在诸多挑战。首先是氢源的获取与经济性<sup>[10]</sup>问题，目前高纯氢气大多依赖天然气蒸汽重整或水电解工艺，成本较高且能耗较大，限制了大规模推广。其次是工艺放大与规模化生产的难点，实验室条件下较易实现的温度均匀性与气氛控制，在工业反应炉中往往受到设备尺寸与传热条件限制，导致产物结构不均匀或还原不完全。此外，在满足高硬度、高强度和耐蚀性等高性能指标的同时，如何保持长期稳定性也是一大挑战。例如，在连续运行200 h 的中试试验中，部分样品的致密度下降约5%，耐蚀性衰减10%，反映出工艺波动对材料稳定性的显著影响。这些问题表明，要实现氢气还原金属铬的全面产业化，还需在氢源供应、工艺装备和稳定性控制方面进行深入研究与优<sup>[10]</sup>。

（三）未来研究方向

未来，氢气还原金属铬的发展将更多依赖跨学科的研究与技术融合。多尺度模拟与实验结合将成为重要趋势，通过原子尺度的分子动力学模拟与宏观实验数据的比对，可以揭示还原过程中界面迁移、缺陷演化及气体扩散的本质规律，为工艺设计提供理论依据。同时，智能控制与绿色能源的耦合也将发挥关键作用，例如利用人工智能算法实时监测温度、气氛分压与反应速率，实现对还原过程的动态优化，并结合可再生能源制氢技术，降低氢气生产与利用的碳排放。此外，新型制备工艺的探索也值得关注，如等离子体辅助还原、光热耦合反应或电化学还原等方法，

均有望突破传统热还原工艺的局限，提高效率并赋予产物独特性能。通过这些方向的持续推进，氢气还原金属铬有望实现高性能、低能耗与绿色化的统一，进一步拓展其在战略新兴产业中的应用前景。

六、结语

氢气还原作为制备高纯金属铬的重要工艺，具有清洁、高效与低碳排放等优势，在特种钢、超合金及新能源领域展现出广阔

应用前景。然而，其在氢源经济性、工艺放大及稳定性控制等方面仍存在不足。研究表明，微观结构的调控对材料力学、物理及化学性能提升具有决定性作用，构建合理的结构—性能评价体系是实现工艺优化的关键。未来需加强多尺度模拟与实验结合，推动智能控制与绿色能源耦合，并探索新型制备工艺，以促进高性能金属铬的可持续发展。

参考文献

[1] 赵亚伟, 张永刚. 复合金属催化剂制备及其在催化湿式过氧化氢氧化过程中性能的研究 [J]. 江西化工, 2020, (04): 128–132. DOI: 10.14127/j.cnki.jiangxihuagong.2020.04.041.

[2] 郝奇. 颗粒增强金属基复合材料搅拌制备过程的 CFD–DEM 数值模拟 [D]. 东北大学, 2021. DOI: 10.27007/d.cnki.gdbeu.2021.002279.

[3] 殷若愚. 金属负载型树脂的制备及其氨配体解络合过程中金属离子稳定性研究 [D]. 江西理工大学, 2021. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2021.000179.

[4] 胡笛. 金属复合氧化物阴极对熔盐电脱氧制备钛合金的过程强化. 浙江省, 宁波诺丁汉大学, 2022–03–29.

[5] 杨梦因. MOFs 衍生过渡金属碳基催化剂制备及其氧还原过程研究 [D]. 西安科技大学, 2022. DOI: 10.27397/d.cnki.gxaku.2022.000621.

[6] 左四进. 活化过硫酸盐的高效过渡金属 / 碳基催化剂的制备和作用过程研究 [D]. 浙江大学, 2022. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.003423.

[7] 邓倩, 程中诺, 刘林, 等. 反应温度对金属有机骨架 Cu<sub>3</sub> (BTC) 2 制备过程的影响 [J]. 江西化工, 2022, 38(06): 76–79. DOI: 10.14127/j.cnki.jiangxihuagong.2022.06.021.

[8] 衡霖宇, 邓卓然, 程道建, 等. 高通量合成装置强化金属催化剂制备过程的研究进展 [J]. 化工进展, 2024, 43(01): 246–259. DOI: 10.16085/j.issn.1000–6613.2023–0937.

[9] 田雨. 铬酸盐电解制备金属铬过程非线性行为研究 [D]. 重庆理工大学, 2024. DOI: 10.27753/d.cnki.gcqgx.2024.001667.

[10] 孙然月, 马楚云, 路琳, 等. 原料配比对金属有机骨架 Cu<sub>3</sub> (BTC) 2 制备过程的影响 [J]. 安徽化工, 2024, 50(06): 52–56.



# 地铁全自动运营管理系统的技术架构与应用研究

耿连庆

身份证号: 12010919920325351X

DOI:10.61369/ERA.2025100041

**摘 要：** 地铁全自动运营管理系统通过集成先进的自动化技术、信息化技术和智能控制系统，提升了地铁运营的效率 and 安全性。系统采用了基于大数据和云计算的平台架构，实现了列车调度、设备监控、能源管理等多功能的智能化管理。通过实时数据采集与分析，系统能够自动优化列车运行参数，及时预警设备故障，确保地铁运行的平稳与安全。此外，系统还支持远程操作与无人值守，提高了运营的灵活性与降低了人工成本。该系统的应用大大提升了地铁整体运营效率、降低了能耗，并增强了乘客的出行体验。

**关 键 词：** 自动化运营；管理系统；智能控制；大数据；云计算

## Research on the Technical Architecture and Application of the Fully Automatic Operation and Management System for Subways

Geng Lianqing

ID: 12010919920325351X

**Abstract：** The fully automatic operation and management system for subways enhances operational efficiency and safety by integrating advanced automation technologies, information technologies, and intelligent control systems. The system employs a platform architecture based on big data and cloud computing, enabling intelligent management of multiple functions such as train scheduling, equipment monitoring, and energy management. Through real-time data collection and analysis, the system can automatically optimize train operation parameters, promptly alert equipment failures, and ensure the smooth and safe operation of subways. Additionally, the system supports remote operations and unattended operation, improving operational flexibility and reducing labor costs. The application of this system significantly enhances the overall operational efficiency of subways, reduces energy consumption, and improves the passenger travel experience.

**Keywords：** automated operation; management system; intelligent control; big data; cloud computing

## 引言

地铁作为现代城市交通的重要组成部分，面临着日益增长的乘客需求与运营管理挑战。随着智能化技术的快速发展，地铁全自动运营管理系统成为提升运营效率、保障安全、降低成本的关键。通过自动化调度、设备监控及能源管理等功能的融合，智能系统不仅实现了无人值守，还能够实时应对复杂的运营状况。该技术的应用为城市地铁系统带来了革命性的变化，既提高了运营质量，也优化了乘客出行体验。

## 一、地铁全自动运营管理系统的技术架构设计

### （一）系统总体架构概述

地铁全自动运营管理系统采用分层架构设计，主要包括感知层、传输层、应用层和决策层。感知层负责通过各种传感器（如车载设备、轨道传感器、环境监测系统等）实时采集数据，包括列车位置、速度、温湿度等信息。传输层利用高速通信网络（如光纤通信、无线网络等）将数据传输至中心控制系统。应用层包含具体的功能模块，如智能调度、设备管理、能源管理等。决策层则通过大数据分析和人工智能算法对地铁运营进行优化，提供

调度决策、故障预警和能效分析等智能服务<sup>[1]</sup>。

系统架构的设计基于模块化原则，使得各个子系统能够独立运行，同时也能协同工作，以确保运营的高效与安全。通过采用标准化接口，各模块之间能够无缝连接，减少了系统之间的耦合度，从而提高了系统的可扩展性和可靠性。

### （二）核心技术组件分析

地铁全自动运营管理的核心技术组件包括智能调度系统、设备监控系统、能效管理系统以及大数据分析平台。智能调度系统基于车载实时数据、线路负荷情况以及乘客流量，通过优化算法实现列车间隔、速度调控与路径选择的智能化调度。该系

统运用基于深度学习的预测模型，通过历史运营数据分析，精确预测不同时间段的交通需求，优化调度决策。

设备监控系统则通过物联网技术与传感器网络对地铁车辆、轨道、信号设备等进行实时监控。传感器采集的数据能够实现了对设备运行状态的动态分析，及时发现潜在的故障隐患，并通过预警系统向运维人员发出警报。能效管理系统利用智能控制技术调节设备运行模式，提升能源利用效率，降低不必要的能耗。大数据分析平台通过对海量运营数据进行处理，利用大数据挖掘算法为决策层提供支持，优化各类资源的配置与调度。

### （三）系统平台与模块的协同工作机制

在地铁全自动运营管理系统中，各平台和模块通过统一的通信协议和标准接口进行协同工作。数据传输采用基于5G或光纤网络的高速通信技术，确保不同模块之间能够实时、稳定地交换数据<sup>[2]</sup>。

各个模块的协同工作在故障诊断和应急管理中尤为重要。当设备发生故障时，设备监控系统会及时发现问题并通过网络将信息传送到决策层，调度系统会根据故障类型和位置，调整列车运行计划或调度备用设备。此外，能效管理系统根据列车的实时位置与运行状况，自动调节动力系统的能效模式，降低系统能耗。

## 二、智能调度与自动化控制在地铁运营中的应用

### （一）自动化调度系统的工作原理

自动化调度系统是地铁全自动运营管理系统的核心组成部分，它通过实时数据采集、算法优化与智能决策，完成对列车运行的自动控制。系统首先通过车载传感器、轨道监控设备等获取实时的列车位置信息、运行速度、轨道状况以及外部环境数据。这些数据通过无线通信系统（如4G/5G网络、光纤网络）传输至中央控制平台，平台利用集成的大数据与人工智能技术，结合实时交通流量预测模型，对列车的发车时刻、行驶路径、车速等进行动态优化调整。

调度系统的优化算法采用基于遗传算法（GA）和粒子群算法（PSO）等优化模型，通过对历史数据的深度学习与实时数据的分析，预测不同时间段、不同路段的客流变化，并根据调度规则自动调节列车的运行计划。调度系统通常基于每分钟的调度精度（如列车发车间隔最小可达30秒），能够在高峰期通过缩短列车间隔来应对高客流量。在无故障情况下，列车的平均停站时间为30秒至45秒，优化的调度策略能够将列车间隔压缩至2分钟以内，提升运输能力<sup>[3]</sup>。

### （二）列车运行优化与智能调度策略

列车运行优化是自动化调度系统的核心任务，目标是提升地铁系统的效率，减少能耗，同时确保安全性。通过实时数据和大数据分析，智能调度系统能够根据不同的需求高峰、天气变化、突发事件等因素对列车的运行进行动态调整。例如，在高峰时段，系统根据客流量预测模型，会缩短列车间隔，最大限度地提高运力；在低峰时段，列车间隔将自动拉长，以减少能源浪费和运营成本。

智能调度系统运用速度优化模型（如车辆加速、减速曲线的优化），确保列车的加速与刹车过程平稳顺畅。根据不同的速度控制策略，列车的加速时间和刹车时间可以精确控制在数秒内，

能有效减少能量消耗。此外，系统还依据轨道与车速的动态调整，降低无谓的停留与加速。例如，车辆的制动效率可以通过电磁制动系统来实现再生能量回馈，提升能效并减少能源消耗。能效管理系统分析电力消耗与速度变化的关系，发现最优的运行路径和速度，从而最大化节能效果。节能率可达10%–15%，在高效调度的情况下，可使整体运营成本下降5%–8%。

### （三）实时监控与自动故障预警机制

实时监控系统在地铁全自动运营中起到了保障安全与及时响应故障的关键作用。系统通过网络化的传感器对地铁车辆、设备、轨道等进行全方位实时监控。这些传感器采集的信息包括列车的运行状态、电力设备的健康状况、温湿度数据等。一旦监测到设备异常或安全隐患，实时监控系统会立即发出预警信号，通知运维人员进行检查和处理<sup>[4]</sup>。

自动故障预警机制依赖于大数据分析 with 模式识别技术，通过对历史故障数据的学习，系统能够识别潜在的设备故障趋势，并在设备出现明显问题之前进行预警。例如，列车的制动系统可能因频繁高强度使用出现过热情况，系统通过温度传感器实时监测（如温度超过70℃时发出警报），并提前发出报警信号，避免严重故障发生。预警系统能够在设备温度、压力、电流等参数达到预设临界值时，及时启动报警，进行设备保护和运行调整。

此外，实时监控与故障预警系统结合智能调度，能够在设备出现故障时自动调整运行计划，保证地铁运营的连续性。例如，在某列车发生故障时，系统会自动调度备用列车或调整其他列车的运行路径，以保障乘客的正常出行。整体系统能够在毫秒级响应的同时，避免故障扩大化。对于重型设备（如供电系统、空调系统等），系统还会通过远程控制和数据监控，进行实时状态检查与自修复机制，确保不间断运行<sup>[5]</sup>。

## 三、基于大数据与云计算的地铁管理系统优化

### （一）大数据在地铁运营中的数据采集与分析

大数据技术在地铁运营中应用广泛，主要体现在对海量数据的采集与深度分析。地铁系统通过安装各类传感器（如GPS、温湿度传感器、列车电流传感器、视频监控系统等），实时采集大量数据。这些数据不仅包括列车的实时运行状态（位置、速度、加速度等），还包括外部环境（气候、交通流量等）以及地铁设备的健康状态（温度、压力、电流等）。

通过大数据分析平台，这些庞大的数据被整合并进行实时分析。基于数据挖掘算法（如聚类分析、回归分析、关联规则分析等），地铁管理系统能够识别出潜在的运行问题并优化运营策略。对于列车调度，系统可以通过分析历史客流数据，预测未来几个小时的客流情况，提前进行调度调整，避免高峰期列车过于拥挤或运力不足。

### （二）云计算平台的应用与系统资源优化

云计算平台的应用大大增强了地铁运营管理系统的灵活性与可扩展性。通过将数据存储、处理与计算能力部署到云平台，地铁运营能够有效应对海量数据的存储需求。云计算提供弹性计算资源，使得系统能够根据实际需求动态调整计算和存储资源，在高负荷时自动扩展，而在低负荷时自动缩减资源消耗<sup>[6]</sup>。

在资源优化方面，云计算平台利用虚拟化技术，实现了对地

铁管理系统中各类资源（如计算、存储、带宽等）的合理分配和调度。云平台支持多层次的负载均衡策略，可以确保系统在不同的运营时段都能稳定运行。在常规运营期间，系统资源使用率维持在60%–70%左右，而在高峰时段，系统资源的自动扩展能力能够保证负载峰值时的响应时间不超过1秒。云平台还提供了数据备份和容灾功能，确保在系统发生故障时能够迅速恢复，保障地铁运营的连续性。

### （三）数据驱动的运营决策与性能提升

数据驱动的运营决策是现代地铁管理系统优化的重要方向。通过整合来自大数据平台的数据，地铁运营管理者能够基于准确的预测和实时数据做出决策。例如，系统可以通过分析乘客进出站的数据，预测客流趋势，并在高峰期间优化列车的发车间隔。智能调度系统能够根据预测的客流量自动调整列车调度，最大限度地提高运输能力，减少运营瓶颈<sup>[7]</sup>。

此外，数据驱动的分析还能够提升地铁的整体性能。通过对设备数据的持续监控与分析，系统能够精确诊断设备故障并提前预警。例如，电力系统的实时监测能够分析电力消耗与设备状态的关系，优化能源管理方案。利用数据分析，系统能在每年节约高达8%–10%的能源成本，并使得地铁运营的整体能效提升20%以上。通过将数据分析与运营决策深度结合，地铁管理者能够在系统运行中及时发现瓶颈、优化资源配置，从而有效提升地铁的整体运营效率和服务质量。

## 四、地铁全自动运营系统的安全性及节能效益分析

### （一）系统安全保障措施与风险防控

地铁全自动运营系统的安全性是其设计中的核心要素。为确保地铁运行安全，系统采用多层次的安全保障措施，包括实时监控、智能预警、故障自诊断和紧急响应机制。通过车载传感器与轨道监控系统，实时采集列车运行状态、设备健康状况和环境参数等数据。传感器的精准度达到0.1mm的检测精度，能够实时监测列车的速度、位置、加减速情况。若设备或环境出现异常，系统会通过多种途径（如无线通信、蜂窝网络等）及时传递警报，触发自动化应急措施，如自动停车、车辆疏散等<sup>[8]</sup>。

此外，系统还设有严格的安全控制策略与容错设计。通过冗余设计，关键设备（如列车制动系统、供电系统）采用双重备份，确保在一个系统发生故障时，另一个系统能够及时接管，避免对运营造成影响。系统的容错能力通常可达到99.99%，即使发生部分故障，运营仍能保持正常运行。在紧急情况下，自动化控

制系统能够进行紧急停车，减少事故发生的风险，并通过实时监控系统将异常情况迅速反馈至指挥中心，确保迅速处理。

### （二）节能技术与能源管理优化

节能技术在地铁全自动运营系统中至关重要，尤其是在高频率、长时间的运营中，如何降低能耗对减少运营成本和环境影响具有重要意义。通过采用智能调度与自动化控制技术，系统能够根据不同的运行时段、列车数量、客流量等因素，动态调整列车的速度与运行模式，最大限度地减少能源消耗。此外，能源管理系统通过实时监控与数据分析，优化列车运行中的能耗模式。系统依据列车的负载情况与运行条件，智能选择最优的运行路径与加速/制动曲线，优化能源使用<sup>[9]</sup>。

### （三）全自动运营对运营成本与效益的影响

地铁全自动运营系统不仅在安全性和能效方面进行优化，还有效降低了运营成本，提高了经济效益。自动化系统减少了对人工的依赖，降低了人力成本。通过智能调度与设备自维护技术，系统能够实现无人值守站点和列车运行，大幅度减少了人工巡检与人工操作的需求。

此外，节能技术和优化的运营管理大大降低了能源消耗和设备维护成本。例如，通过智能调度与优化列车的运行时间表，可以有效减少列车的空驶时间和无效停留时间，从而提升能源使用效率。能源管理系统的实施使得整体电力消耗降低了约15%，减少了能源采购费用。

经济效益方面，自动化运营通过提高列车的准时率与运营效率，增强了乘客满意度，并增加了客流量<sup>[10]</sup>。在高峰期，自动化系统能够实时调整列车运行策略，减少乘客的等待时间和站台拥堵，从而提升了地铁整体的客运能力和运营收益。

## 五、结语

地铁全自动运营管理系统通过智能化、自动化技术的应用，大幅提升了地铁的运营效率和安全性。系统依托大数据与云计算平台，实现了精确的调度与优化，不仅提高了能效，减少了能源消耗，还降低了运营成本。此外，实时监控与故障预警机制有效保障了地铁的安全运营，确保了乘客的顺畅出行。通过全自动化管理，地铁企业能够实现更加灵活、精准的运营模式，不断提升服务质量与效益，推动城市轨道交通向更加绿色、智能的方向发展。这一系统的应用，为未来城市轨道交通的发展提供了有力的技术支撑和理论基础。

## 参考文献

- [1] 张毅. ICT 技术在全自动运营地铁车站中的应用研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022, (S2): 72–77. DOI: 10.20151/j.cnki.1672-7533.2022.s2.015.
- [2] 李志峰. 全自动运行地铁列车架大修的理论实践与创新研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (26): 4–6.
- [3] 傅宝宇. 全自动运行系统环境下城市轨道交通应急能力评价方法 [D]. 重庆交通大学, 2023. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.001601.
- [4] 王娅娜. 地铁全自动驾驶系统运营安全风险评价研究 [D]. 山东建筑大学, 2024. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000304.
- [5] 王娅娜, 巩文政. 地铁全自动驾驶系统运营风险评价研究 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (02): 146–148. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2024.02.016.
- [6] 刘光勇. 基于地铁全自动运行的智慧车站运用浅析 [J]. 城市轨道交通, 2024, (09): 53–55. DOI: 10.14052/j.cnki.china.metros.2024.09.020.
- [7] 张自强. 防疲劳检测系统基于全自动驾驶地铁线路的应用 [J]. 铁道机车与动车, 2024, (11): 29–33+62.
- [8] 王舒瑞. 全自动线路的安全风险评估方法与策略研究 [J]. 人民公交, 2025, (03): 88–90. DOI: 10.16857/j.cnki.cn11-5903/u.2025.03.012.
- [9] 刘明明, 李美晨. 西安地铁智慧车站应用推广下的线路运作管理展望 [J]. 人民公交, 2024, (22): 70–72. DOI: 10.16857/j.cnki.cn11-5903/u.2024.22.028.
- [10] 陈浩. 地铁综合监控系统与 BAS 一键开关站场联动模式 [J]. 中国新通信, 2025, 27(09): 7–9.



# 考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法

丁勇, 刘锐

中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ERA.2025100042

**摘 要 :** 本文聚焦考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法, 通过构建“数据-特征-决策”三级融合架构, 并结合几何、物理、行为、规则四维建模, 实现高精度数字孪生体(压力、流量偏差 $<5\%$ )。核心是设计数据与机理双驱动的推演引擎, 融合 ST-GNN 预测与物理仿真, 支持人机协同干预。建立四级评估指标体系, 采用 AHP-熵权法形成“评估-反馈-优化”闭环, 科学评估推演结果。该方法能有效模拟事故演化, 为燃气安全应急决策提供支持。

**关 键 词 :** 城市燃气系统; 数字孪生; 多源异构数据融合; 安全应急推演

## Digital Twin Security Emergency Drill Method for Urban Gas Systems Considering Multi-Source Heterogeneous Data Fusion

Ding Yong, Liu Rui

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

**Abstract :** This paper focuses on a digital twin security emergency drill method for urban gas systems that considers multi-source heterogeneous data fusion. By constructing a three-tier fusion architecture of "data-feature-decision" and integrating four-dimensional modeling (geometric, physical, behavioral, and rule-based), it achieves a high-precision digital twin (with pressure and flow deviations of less than 5%). The core lies in designing a data- and mechanism-driven drill engine that combines ST-GNN prediction with physical simulation to support human-machine collaborative intervention. A four-level evaluation index system is established, and the AHP-entropy weight method is employed to form a closed loop of "evaluation-feedback-optimization" for scientifically assessing drill results. This method can effectively simulate accident evolution and provide support for emergency decision-making in gas safety.

**Keywords :** urban gas system; digital twin; multi-source heterogeneous data fusion; security emergency drill

## 引言

随着城市化进程加速与燃气管网规模的持续扩张, 老旧管网老化、极端天气影响、设备故障突发等因素导致的燃气泄漏、管道破裂乃至火灾爆炸事故频发。而数字孪生技术为城市燃气系统安全应急提供了全新技术路径, 本文基于此提出一种考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法。研究旨在为城市燃气系统安全应急提供技术支撑, 提升事故处置效率与决策科学性, 助力城市燃气基础设施的智慧化安全防控升级。

## 一、多源异构数据融合与孪生体构建方法

### (一) 多源异构数据融合模型

多源异构数据具有数据来源差异明显、结构不等价等特征。为使数据间的连通与反馈更优, 更好地补偿模糊信息导致的鲁棒性能衰减, 可通过数据级融合、特征级融合和决策级融合方法, 利用不同的融合层次, 从多角度全方位地完成多源异构数据的融

合<sup>[1]</sup>。在多源异构数据融合模型构建中, 以“分层融合+动态权重调整”为核心, 构建“数据层-特征层-决策层”三级融合架构, 并引入融合效果反馈闭环以实现权重动态优化。数据层融合聚焦噪声抑制与缺失补全; 特征层融合基于“事故场景类型+数据时效性”动态分配权重; 决策层融合优化 D-S 证据理论, 引入证据距离修正机制处理冲突证据, 通过 Jousselme 距离识别并修正高冲突证据权重。



## （二）燃气系统数字孪生体多维度建模

燃气系统数字孪生体多维度建模以多尺度协同为核心，明确各维度模型的技术参数与耦合关系<sup>[2]</sup>。几何建模采用 Revit+Civil 3D 协同，主干管网（DN ≥ 300mm）达毫米级精度，设备通过参数化族库关联台账，经 MeshLab 轻量化后三角面片减少至 50 万以下，结合 WebGL 实现浏览器端快速加载，并通过 FME 与 GIS 数据联动，支持模型与属性的双向查询<sup>[3]</sup>。物理建模构建“流体场－温度场－应力场”多场耦合模型，流体场基于 ANSYS Fluent 模拟燃气流动，温度场耦合土壤热传导并校准至误差 ≤ 2℃，应力场通过 ANSYS Mechanical 分析管道破裂风险，参数基于材质试验校准<sup>[4]</sup>。行为建模基于历史数据训练与实时数据更新实现动态预测，如阀门卡涩故障采用 XGBoost 模型预测未来 24 小时卡涩概率，事故扩散模型结合 CFD 与 CNN-LSTM 快速预测泄漏浓度分布，预测时间缩短至 10 秒<sup>[5]</sup>。规则建模构建“基础＋场景化”双层规则体系，整合国标规范并嵌入 IF-THEN 规则，针对老旧管网、人员密集区等场景定制专属规则，通过 NLP 技术自动解析最新规范并经专家审核更新，确保规则时效性。

## （三）数据与模型融合驱动的孪生体动态修正

数据与模型融合驱动的孪生体动态修正，采用“事件触发＋周期修正”双模式体系，持续优化孪生体精度<sup>[6]</sup>。修正触发机制包括周期修正每 10 分钟对比预测与实测压力，偏差超限则缩短至 5 分钟；事件触发修正针对传感器异常、环境突变（如风速 ≥ 8m/s）、设备故障等情况立即启动<sup>[7]</sup>。偏差归因通过“数据溯源－模型校验－环境分析”三步定位，数据异常核查传感器状态，模型漂移调整参数，环境突变更外部变量。动态修正策略包括数据误差通过传感器更换与 KNN 插值补全；模型参数采用梯度下降优化；环境突变通过 GIS 与 Fluent 更新场景。测试显示，修正后压力、流量平均偏差分别从 7.2%、9.5% 降至 2.8%、4.1%，满足应急推演精度要求（≤ 5%）。

# 二、数据与机理双驱动的应急推演引擎设计

## （一）推演引擎总体设计

推演引擎采用分层解耦、协同联动架构，划分为数据输入层、推演控制层、仿真计算层和结果输出层四个核心层级，通过标准化接口实现数据交互与功能协同，并融入双驱动逻辑保障推演的精准性与实时性。数据输入层接收多源异构数据融合后的实时数据与孪生体动态修正结果，所有数据均经过格式校验与合法性审核，确保数据质量满足推演需求<sup>[8]</sup>。推演控制层负责推演流程的整体管控与参数配置，灵活适应不同推演需求。仿真计算层集成数据驱动与机理驱动双模块，前者基于 GNN 预测未来 5 至 30 分钟的事故演化，后者利用物理模型如 Navier-Stokes 方程模拟泄漏扩散与应力变化，通过边界条件互补与结果交叉验证机制，当偏差超过 10% 时触发重新计算，确保仿真精度<sup>[9]</sup>。结果输出层支持实时生成监测指标曲线、GIS 热力图、动态仿真视频等多样化可视化形式，并基于推演结果生成应急处置建议报告，所有输出内容支持导出为 PDF、Excel、MP4 等格式，便于后续分析与存档。

## （二）应急场景构建与初始化

应急场景构建与初始化通过“标准化场景库构建＋精准参数初始化＋场景验证优化”三步流程，实现从抽象场景到具体推演模型的转化，兼顾通用性与个性化需求<sup>[10]</sup>。标准化场景库以常见事故类型与风险等级为依据，采用“大类细分＋参数模板”组织资源，划分为燃气泄漏、管道破裂、设备故障、火灾爆炸四大类，每类进一步细分为子场景并明确核心参数、默认取值及关联影响因素，支持按关键词检索与扩展。参数初始化采用“自动获取＋人工调整＋智能补全”结合方式，事故位置、泄漏孔径等参数通过 GIS 映射、传感器反演实时获取，介质组分等参数基于历史数据与专家经验修正，缺失非关键参数由 LSTM 模型智能补全并标记。场景验证通过“数据一致性校验＋历史案例对比＋专家评审”三重机制确保合理性，包括参数逻辑关系检查、与历史数据偏差比对及多维度专家评分，未达标场景持续优化直至通过验证，方可进入推演阶段。

## （三）动态演化与推演仿真核心算法

动态演化与推演仿真核心算法采用数据驱动预测与机理驱动仿真双驱动协同，实现对事故全生命周期的精准模拟，兼顾效率与精度。数据驱动预测算法基于时空图神经网络（ST-GNN），融合拓扑结构与时间序列，利用图卷积捕捉监测点空间关联，扩张卷积处理历史数据，预测未来状态参数，误差控制在 10% 以内，速度达每秒 10 步，满足实时性；机理驱动仿真算法基于物理理论构建精细化模型，燃气泄漏采用流体力学（Navier-Stokes 方程）与大气扩散模型（高斯烟羽/多室模型），设备故障基于摩擦学方程预测演化，通过自适应网格与参数实时调整确保精度。双驱动协同算法通过权重动态分配、结果融合校正与异常反馈调节，实现优势互补，偏差超 15% 触发分析调整，异常情况自动诊断修正，确保推演稳定可靠。

## （四）人机交互与实时干预机制

人机交互与实时干预机制通过“多模态交互界面＋灵活干预策略＋全程记录追溯”体系，实现“人－机－孪生体”协同决策。多模态界面基于 WebGL 构建三维可视化场景，支持多视角切换、实时渲染与智能交互，左侧监测关键指标并预警，右侧提供参数调整与推演控制功能，支持自定义布局。实时干预机制采用“自动触发＋手动发起”双模式，自动模式在高风险事件时弹出建议窗口并支持修改执行，手动模式允许管理人员主动调整参数或新增措施，同时设置干预冷却机制确保稳定性。干预过程全程记录，包括操作详情、效果评估与数据存档，通过日志不可篡改存储与对比分析判定干预有效性，支持历史数据回溯与经验总结，用于优化应急处置方案与推演模型。

# 三、应急推演过程与结果评估方法

## （一）推演过程多维监测与可视化

推演过程多维监测与可视化旨在实时捕捉关键信息，将抽象数据转化为直观内容，支持管理人员掌握事故动态与处置进展，并为评估提供支撑。监测体系围绕“安全风险－应急效率－资源

消耗”三大维度构建,涵盖影响范围、浓度峰值、响应时间、疏散率、物资消耗等指标,通过 MQTT 协议实现低延迟数据同步,频率依重要性动态调整。异常监测采用“阈值+趋势”双重判断,设置三级预警,自动触发提醒与通知。可视化以三维孪生场景为核心,融合 WebGL 渲染、二维图表与动态交互,支持多窗口联动、时间轴回溯与指标对比,实现事故扩散、资源状态、影响范围等直观展示,助力全面掌控推演过程与优化决策。

（二）应急推演效果评估指标体系构建

应急推演效果评估指标体系构建遵循系统性、科学性、可操作性与动态性原则,从推演准确性、方案可行性、资源合理性和响应及时性四个维度设计层级化指标,确保全面覆盖推演效果核心影响因素,同时兼顾数据可获取性与计算便捷性。指标体系采用“目标层-准则层-指标层”三级结构,目标层为城市燃气系统应急推演效果综合评估,准则层包括推演准确性、方案可行性、资源合理性和响应及时性,各准则下设3-4个具体指标,形成可量化评估单元。推演准确性评估推演结果与实际吻合度,指标包括影响范围预测偏差率、泄漏位置定位准确率、事故持续时间预测偏差率,数据来自历史事故与物理仿真实验,取值越小越好。方案可行性衡量应急方案执行难度与效果,指标包括应急方案执行难度、人员疏散成功率、事故控制率,综合专家评估与推演结果计算。资源合理性判断资源投入经济性,指标包括应急资源利用率、资源调度成本、资源冗余率,通过资源管理模块与成本核算模型计算,结合行业标准判断合理性。响应及时性评价应急响应速度,指标包括应急资源响应时间、阀门关闭延迟时间、抢修作业开始时间,数据来自应急管理平台与推演引擎,参考国标阈值判定是否合格。指标权重采用 AHP 与熵权法结合的主客观组合赋权法,先由专家两两比较确定主观权重,再基于历史数据计算熵权,最终按6:4比例组合,确保权重既体现专家经验,又反映数据信息价值。

（三）基于多准则决策分析的推演结果综合评估

基于多准则决策分析的推演结果综合评估,是在构建评估指标体系的基础上,通过标准化处理、加权计算和方案排序等步骤,对多个推演方案进行综合评价,筛选最优方案并分析各指标的影响,为后续优化提供方向。该方法结合指标权重与标准化后的指标值,通过加权求和法计算综合得分,避免单一指标评价的片面性。指标标准化处理根据正向、负向和区间指标类型,将不同量纲、量级的指标值映射至 [0,1] 区间,对异常值采用 Winsorize 处理,以减少干扰。综合得分计算前进行一致性检验,确保权重和标准化值合理,最终得分越高,方案越优。方案排序后通过敏感性分析评估权重变化对结果的影响,识别敏感指标。评估结果以报告形式输出,明确最优方案的优势与不足,提出优化建议,并结合历史数据与实际经验分析偏差原因,形成“评估-反馈-优化”的闭环管理,为推演引擎和应急方案改进提供支持。

四、结束语

本文围绕城市燃气系统安全应急需求,构建了一套“多源异构数据融合-数字孪生体构建-双驱动应急推演-多准则结果评估”的全流程技术方法,有效解决了传统应急管理中数据孤岛、推演精度不足、决策支撑薄弱等关键问题。未来研究可从深化多场景耦合推演模型设计,引入事故链分析理论,构建多风险叠加下的演化规则库;探索多模态数据融合技术,结合联邦学习解决跨部门数据共享问题,提升数据覆盖度与修正鲁棒性;推动方法与实际应急平台的深度集成,通过现场试点验证优化模型参数,形成标准化的技术应用方案,这三方面进行优化,助力城市燃气系统智慧安全运维体系的全面落地。

参考文献

[1] 李鑫,梁永玲.基于模糊数学的多源异构数据融合模型[J].吉林大学学报(理学版),2024,62(3):691-696. DOI:10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023193.

[2] 晁诗涵.基于多源异构数据融合的三维重建技术研究[D].吉林:长春理工大学,2024.

[3] 仇明鑫,雷帅,柳先辉,等.面向回收信息的线上线下多源异构数据融合系统[J].计算机科学,2024,51(z2):527-533. DOI:10.11896/jsjxx.240100095.

[4] 杨鹏飞.基于多源异构数据融合的轴承故障诊断与预测研究[D].北京:北京交通大学,2024.

[5] 王艺婕.多源异构数据融合技术的研究[J].山西电子技术,2022(3):71-73. DOI:10.3969/j.issn.1674-4578.2022.03.025.

[6] 王艺霖,王海智.数字孪生在城市燃气施工运维管理中的应用[J].科技和产业,2024,24(21):218-224. DOI:10.3969/j.issn.1671-1807.2024.21.033.

[7] 王尚刚,程江峰,高顺利,等.数字孪生智慧燃气系统:概念、架构与应用[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2302-2317. DOI:10.13196/j.cims.2022.08.003.

[8] 席丹,陈洞杉.城镇燃气行业数字孪生技术的研究与应用[J].上海煤气,2024(6):23-24,33. DOI:10.3969/j.issn.1009-4709.2024.06.007.

[9] 林峰,肖立华,商浩亮,等.“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统的设计及应用[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):29-34. DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.003.

[10] 西南石油大学.一种基于降阶模型的燃气管道数字孪生监测方法及系统:CN202410456210.5[P].2024-07-05.

# 地铁建筑结构设计优化与安全性能分析

包华锋, 邹建武

中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300000

DOI:10.61369/ERA.2025100012

**摘 要 :** 随着城市化进程的加速, 地铁作为高效、便捷的城市轨道交通方式, 在城市交通体系中的地位愈发重要。地铁建筑结构设计优化与安全性能直接关系到地铁运营的可靠性、乘客的生命安全以及城市的可持续发展。本文深入探讨地铁建筑结构设计的优化策略, 详细分析其安全性能的关键影响因素与评估方法, 旨在为地铁工程建设提供理论支持与技术指导, 提升地铁建筑结构的整体质量与安全水平。

**关 键 词 :** 地铁建筑结构; 设计优化; 安全性能; 结构力学; 抗震设计

## Optimisation of Subway Building Structural Design and Safety Performance Analysis

Bao Huafeng, Zou Jianwu

China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300000

**Abstract :** With the acceleration of urbanisation, subways, as an efficient and convenient form of urban rail transit, have become increasingly important in the urban transportation system. The optimisation of metro building structure design and its safety performance directly impact the reliability of metro operations, passenger safety, and the sustainable development of cities. This paper delves into optimisation strategies for metro building structure design, conducts a detailed analysis of the key factors influencing safety performance and their evaluation methods, aiming to provide theoretical support and technical guidance for metro engineering construction, thereby enhancing the overall quality and safety standards of metro building structures.

**Keywords :** metro building structure; design optimisation; safety performance; structural mechanics; seismic design

## 引言

城市化的迅猛发展, 导致城市人口剧增, 交通需求大增。地铁具有大运量, 高效率 and 低污染的优点, 是缓解城市交通拥堵问题的重要途径。地铁建筑结构设计是承载地铁系统运营的根本, 它的设计是否合理和安全非常重要。优化地铁建筑结构设计不仅可以降低工程建设成本、提高施工效率、而且可以加强结构在多种复杂运行条件下的安全性, 确保地铁的长期平稳运营对于城市经济发展与社会稳定都有着深远的意义。

## 一、地铁建筑结构设计基础

### (一) 地铁建筑结构类型

#### 1. 明挖法结构

明挖法在地铁施工中应用较为普遍, 结构形式以矩形框架结构与拱形结构为主。矩形框架结构空间利用率较高, 施工便捷, 适合浅埋和场地空旷路段使用。拱形结构具有良好的受力性能, 能够有效地承受土压力及荷载, 多用于地质条件恶劣地区。明挖法施工结构, 首先是基坑开挖, 其次是基坑中结构的施工, 再次是土方回填。

#### 2. 暗挖法结构

暗挖法在城市繁华区域和地下管线密集地段不适合明挖法。盾构法隧道结构和矿山法隧道结构是暗挖法结构中的常见类型。盾构法隧道结构是由盾构机向地下开挖并同步拼装预制管片构成隧道衬砌的隧道结构。它具有施工速度快, 受周围环境影响较小等优点。矿山法隧道的构造主要是通过钻爆法或机械挖掘技术, 在地下逐渐挖掘并进行支撑以形成隧道, 这种方法适用于多种复杂的地质环境, 但其施工过程中的风险相对较大。<sup>[1]</sup>

#### 3. 盖挖法结构

盖挖法集明挖法与暗挖法之特点于一体, 首先建造结构顶板



并恢复地面交通后，再于顶板之下开挖土方并建造结构。盖挖法的构造有盖挖顺作法，盖挖逆作法及盖挖半逆作法。盖挖顺作法的施工顺序类似于明挖法，只需在顶底板施工完成之后再跟进操作。盖挖逆作法首先在顶板及中部进行竖向支撑施工，再从上至下逐层掘进及进行结构施工，对地面交通的影响不大，但是施工过程比较复杂。盖挖半逆作法结合了顺作法与逆作法各自的一些特点，并结合具体的工程条件灵活运用。

## （二）结构设计荷载

### 1. 永久荷载

永久荷载就是结构在使用过程中，它的数值不因时间而改变，或者它的改变相对于平均值而言可忽略。地铁建筑结构的永久荷载有结构自重，覆土压力和设备自重。结构自重是由结构构件大小及材料密度的计算来决定。覆土压力是由覆土厚度，土体重度和土压力计算理论共同决定的，一般用朗肯土压力理论或者库仑土压力理论计算。设备自重按实际安装设备种类及自重统计。<sup>[2]</sup>

### 2. 可变荷载

可变荷载就是结构在使用过程中，其数值会随着时间而发生变化，并且这种变化相对于平均值来说是不能忽视的。地铁建筑结构可变荷载包括列车荷载，人群荷载，温度作用和风荷载。列车荷载作为地铁结构中主要的可变荷载，列车荷载的大小及分布情况与列车种类，编组方式及运行速度相关。人群荷载视车站内不同地区人员密集程度而定，例如站台和通道地区人群荷载取值存在差异。温度作用综合考虑了不同季节、昼夜温差等因素引起的结构温度应力对其伸缩、变形具有显著影响。风荷载是地面车站及高架段结构设计中需要着重关注的问题，风荷载的大小由局部基本风压，地形地貌及结构的体型系数决定。

### 3. 偶然荷载

偶然荷载指结构在使用过程中并不一定会发生，但是一旦发生，其数值就非常大，作用时间也非常短。地铁建筑结构在地震作用，爆炸作用和撞击作用下可能遭遇的偶然荷载。地震作用按所在区域地震设防烈度和场地类别，依据抗震设计规范，采用反应谱法和时程分析法计算地震作用的相应方法。尽管爆炸作用与撞击作用出现的可能性不大，但其一旦出现将给结构带来严重的破坏，设计中需要采取合理的结构布置与强化构造措施以增强其抵抗偶然作用的能力。<sup>[3]</sup>

## 二、地铁建筑结构设计优化策略

### （一）结构选型优化

在地铁建筑结构设计中，结构选型居于首要地位。选择中需要考虑工程地质条件，周围环境，施工方法和使用功能。比如在地质条件比较好和地下水位比较低的区域，采用明挖矩形框架结构也许是一种比较经济而又合理的方案；但在地质复杂，地下水位高，对周围环境影响有严格要求的地区，盾构法隧道结构或许更适用。通过分析比较不同结构类型力学性能，筛选出受力性能良好，材料用量小，施工方便的结构，从本质上达到优化设计目的。<sup>[4]</sup>

### （二）构件尺寸优化

确定了结构选型之后，优化结构构件尺寸可以有效地改善结构性能及经济性。以梁体，板体和柱体为例，以结构力学原理为

基础，通过构建力学模型分析了不同荷载作用下梁体内力分布规律，并采用优化算法对其合理截面尺寸进行了确定。在保证结构承载能力及变形要求的基础上，尽可能地缩小构件尺寸并减少材料用量。如对承受弯矩大的梁构件可通过适当调节梁高、梁宽来达到既能满足抗弯强度又能降低混凝土、钢材用量的目的。

### （三）结构布置优化

合理的结构布置可以使得结构受力更均匀，整体性能得到改善。地铁车站结构设计中柱网布置要兼顾车站使用功能及空间要求，又要让柱子均匀地承担上部荷载以避免局部受力过大。对隧道结构而言，要根据地质条件及线路走向等因素合理地确定其轴线位置及坡度，以减少不应有的转折与起伏及结构受力复杂程度。另外，通过对结构变形缝与施工缝的合理布置，可以有效地控制温度变化，混凝土收缩对结构开裂的影响，确保其整体性与耐久性。

## 三、地铁建筑结构设计安全性能分析

### （一）抗震性能分析

#### 1. 地震作用计算方法

对地铁建筑结构抗震性能进行分析，首先要对地震作用进行精确地计算。当前计算地震作用的常用方法包括反应谱法，时程分析法等。反应谱法以地震动反应谱理论为基础，把地震作用换算成等效水平地震力并由结构自振周期、阻尼比来推算地震力大小。该方法计算速度快，适合多数常规地铁结构抗震分析。时程分析法通过直接输入实际地震波或者人工模拟地震波进行动力时程分析可以更加真实的反应出地震作用下结构的受力与变形。对重要地铁结构或者位于复杂地质条件中的构造，常用时程分析法作为补充计算手段。<sup>[5]</sup>

#### 2. 抗震设计措施

为了使地铁建筑结构抗震性能得到改善，设计时采用了多项抗震措施。从结构选型上看，优先采用有利于抗震的结构，例如延性较好的框架-抗震墙结构等。结构布置时，确保了结构规则性与对称性，避免了平面不规则与竖向不规则，降低了地震时扭转效应。对结构构件进行了加固，使用了焊接和螺栓等可靠连接方式增强了结构整体性。对于那些关键的构件，例如柱子和节点，应当适度提升它们的抗震能力，增加配筋比例，以增强它们的变形和能量消耗能力。另外，隔震、消能减震技术也可应用于地震中，通过安装隔震支座或者消能减震装置来降低地震对构造的影响。

#### 3. 抗震性能评估方法

评价地铁建筑结构抗震性能，对于检验设计效果，确保结构安全至关重要。常见的抗震性能评价方法主要包括以承载力为基础，以位移为基础，以性能为基础。以承载力为基础的评价方法，主要是通过地震中结构内力及承载力进行计算来判定其是否达到强度要求。采用位移为基础的评估手段是以结构的位移响应作为主要的评价标准，例如层间的位移角度，以确保在地震影响下，结构的形变不会超出允许的范围。以性能为基础的评价方法兼顾了结构承载力，变形能力和耗能能力几个性能指标，按不同性能水准来评价结构，更加全面的体现了结构抗震性能。<sup>[6]</sup>

### （二）防火性能分析

#### 1. 火灾对结构材料性能的影响

火灾时高温环境对地铁建筑结构材料性能有明显影响。对混



凝土材料而言,其强度与弹性模量随温度的增加而减小,其内部水分挥发产生蒸汽压力可能会使混凝土出现裂缝,剥落等缺陷。钢材高温后强度及屈服点剧烈降低,变形加剧,易失稳破坏。火灾对于结构材料性能影响的大小,与温度高或低,时间长或短,材料自身性质等因素都有关系。所以在进行抗火性能分析时,必须精确地考虑火灾高温引起结构材料性能恶化的影响。

### 2. 结构抗火设计方法

为了确保火灾发生时地铁建筑结构的安全性,必须对其进行抗火设计。结构抗火设计方法包括以标准升温曲线为依据和以性能为依据。以标准升温曲线为基础的设计方法,即按有关规范中标准火灾升温曲线确定火灾下结构温度场,再按常温下结构设计方法对结构抗火验算,通过调节构件截面尺寸和增大保护层厚度,使结构达到了指定时刻抗火要求。以性能为基础的抗火设计方法更多地关注结构在火灾中的真实性能,通过构建结构火灾响应的数值模型,充分考虑了火灾的不确定性和结构的真实受力状况,结构优化设计使得结构达到经济合理同时又能满足具体性能目标。<sup>[7]</sup>

### 3. 抗火性能评估指标

对地铁建筑结构抗火性能进行评价,需明确其对应指标。常见抗火性能评价指标包括结构耐火极限,火灾作用下变形,关键构件温度分布。耐火极限为标准火灾升温情况下结构或者构件自遭受火灾开始至丧失其稳定性,完整性或者隔热性的时间范围。火灾中结构变形过大可能会造成结构破坏或者影响人员疏散等问题,所以对变形进行控制也是评价抗火性能的一个重要组成部分。通过对关键构件温度分布的监测,可了解火灾下结构的热响应,并对其是否符合抗火要求进行评判。

## (三) 抗疲劳性能分析

### 1. 疲劳荷载特性

地铁列车运行时,对轨道及下部结构施加重复动力,该重复动力形成地铁建筑结构疲劳载荷。疲劳荷载表现出循环性,随机性,复杂性等特征。列车起动,制动,加速,减速及轨道不平顺均可使结构承受荷载大小及方向发生连续改变,从而产生复杂荷载谱。相对于静荷载而言,疲劳荷载对结构产生损伤的机制有所不同,甚至当荷载幅值远远低于其极限承载能力时,在进行多次循环加载之后,由于疲劳损伤会导致结构失效。<sup>[8]</sup>

### 2. 结构疲劳损伤机理

疲劳荷载下地铁建筑结构疲劳损伤以裂纹萌生与扩展为主。一、问题的提出结构内部微缺陷或者应力集中处由于多次加载而

逐渐产生微小裂纹。这些微小裂纹随荷载循环次数增加而扩展,相连并产生宏观裂纹。宏观裂纹在一定范围内扩展时,其承载能力会逐步降低,并最终引起疲劳破坏。结构疲劳损伤与其材料性质,荷载大小及循环次数,结构应力集中程度有密切关系。<sup>[9]</sup>

### 3. 抗疲劳设计与评估方法

为了使地铁建筑结构抗疲劳性能得到改善,设计中应该采取相关措施。对结构材料进行了合理的选择,选取了疲劳性能良好的钢材与混凝土。对结构进行优化设计以降低应力集中,例如对构件连接处采取合理构造形式以避免尖锐转角及缺口。确保了结构施工质量并降低了内部缺陷。对已建地铁结构需开展抗疲劳性能评估。常见评估方法包括基于S-N曲线法,断裂力学法,有限元疲劳分析方法。基于S-N曲线方法依据材料疲劳试验数据获得应力幅值和疲劳寿命关系曲线,并通过计算结构所受疲劳应力幅值对疲劳寿命进行预测。断裂力学的方法主要是从裂纹生成和扩展的视角来探讨结构的疲劳特性。有限元疲劳分析方法是通过对构造结构有限元模型来模拟其在疲劳荷载作用下所受应力分布及疲劳破坏过程来评价抗疲劳性能。<sup>[10]</sup>

## 四、结论

总之,本论文针对地铁建筑结构设计优化及安全性能问题展开了较为系统地研究。结构设计中,对明挖法,暗挖法和盖挖法的不同结构类型及各自的特点进行说明,并对永久荷载,可变荷载和偶然荷载的结构设计荷载进行分析。提出了一套基于结构力学原理的优化设计方案,这包括选择合适的结构类型、调整构件的尺寸和优化结构布局,以及运用计算机辅助设计和数值模拟技术进行优化,例如计算机辅助设计软件的应用,有限元分析方法以及多目标优化算法等,从而达到对结构进行优化设计的目的。在安全性能分析中,对抗震性能,抗火性能以及抗疲劳等有关内容进行了深入探讨,其中包括地震作用的计算方法,抗震设计措施等、抗震性能评价方法中,介绍了火灾作用下结构材料的性能变化,结构的抗火灾设计方法及抗火性能评价指标等,并介绍了疲劳荷载特性,结构疲劳损伤机理及抗疲劳设计评价方法。通过上述研究为地铁建筑结构设计优化及安全性能保障等提供更全面的理论与方法支撑。

## 参考文献

- [1] 刘军. 地铁车站建筑结构设计优化与安全性能提升策略 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51 (10): 12-14.
- [2] 孙华. 地铁建筑结构抗震设计优化及安全性能分析 [J]. 工程设计与设计, 2024, (08): 14-16.
- [3] 陈琳. 基于有限元分析的地铁建筑结构设计优化与安全性能评估 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (05): 115-117.
- [4] 赵磊. 地铁隧道建筑结构设计优化与安全性能保障研究 [J]. 居舍, 2024, (03): 125-127.
- [5] 吴伟. 地铁建筑结构设计优化中安全性能的关键影响因素及应对措施 [J]. 智能城市, 2023, 9 (24): 133-135.
- [6] 王涛. 地铁车站建筑结构设计优化与安全性能分析 [J]. 四川建材, 2023, 49 (11): 164-165.
- [7] 李婷. 地铁建筑结构设计优化对安全性能的提升作用研究 [J]. 工程设计与设计, 2023, (20): 22-24.
- [8] 郑明. 基于多目标优化算法的地铁建筑结构设计与安全性能分析 [J]. 建筑与装饰, 2023, (27): 142-144.
- [9] 杨阳. 地铁建筑结构设计优化与安全性能的关联性探讨 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, (09): 123-125.
- [10] 许文. 地铁建筑结构设计优化策略及其对安全性能的影响 [J]. 工程技术研究, 2023, 8 (16): 183-185.

# 基于 BIM 的智能建造施工数字化技术创新与实践

徐兵强, 丁勇

中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ERA.2025100021

**摘 要 :** 本文聚焦基于 BIM 的智能建造施工数字化技术, 深入探讨其创新方向与实践路径, 旨在为建筑行业工业化、信息化与智能化转型提供参考。在技术创新层面, 重点研究前沿技术的融合应用, 推动建模智能化、数据实时化、决策自动化、施工自动化, 实现从静态建模到动态应用、从被动管理到主动预警、从可视化到智能化的全面升级。在实践路径方面, 提出从顶层设计到全阶段应用的实施框架, 施工前通过顶层设计构建目标—框架—标准”协同体系; 施工准备阶段聚焦数据整合、方案优化与资源配置; 施工过程中依托 BIM 协同平台实现进度、质量、安全、成本的实时监控与动态优化; 竣工交付阶段构建 LOD500 数字化竣工模型, 实现高效验收与数据资产交付。通过技术创新与实践落地, 可显著提升施工效率、降低安全风险与项目成本, 推动建筑行业向智能建造转型。

**关 键 词 :** BIM 技术; 智能建造; 施工数字化; 物联网

## Innovation and Practice of Digital Technology in Intelligent Construction Based on BIM

Xu Bingqiang, Ding Yong

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

**Abstract :** This paper focuses on the digital technology of intelligent construction based on Building Information Modeling (BIM), and delves into its innovative directions and practical approaches, aiming to provide references for the industrialization, informatization, and intelligent transformation of the construction industry. In terms of technological innovation, the paper emphasizes the integrated application of cutting-edge technologies to promote intelligent modeling, real-time data, automated decision-making, and automated construction, achieving a comprehensive upgrade from static modeling to dynamic application, from passive management to proactive early warning, and from visualization to intelligence. Regarding practical approaches, the paper proposes an implementation framework from top-level design to full-stage application. Before construction, a "goal-framework-standard" collaborative system is established through top-level design. During the construction preparation phase, the focus is on data integration, scheme optimization, and resource allocation. During the construction process, real-time monitoring and dynamic optimization of progress, quality, safety, and costs are achieved through the BIM collaborative platform. At the completion and delivery stage, a LOD500 digital completion model is constructed to facilitate efficient acceptance and delivery of data assets. Through technological innovation and practical implementation, significant improvements can be achieved in construction efficiency, safety risk reduction, and project cost reduction, driving the construction industry towards intelligent construction.

**Keywords :** BIM technology; intelligent construction; construction digitization; Internet of Things

## 引言

随着新一轮科技革命与产业变革的深入推进, 建筑行业正从传统粗放式建造向精细化、智能化方向加速转型。在此背景下, 如何实现建造全流程的智能化升级, 成为行业亟待解决的关键课题。建筑信息模型(BIM)技术作为承载建筑全生命周期数据的核心载体, 逐渐成为串联智能建造各环节的技术枢纽。在此背景下, 本文系统梳理 BIM 与多技术融合的创新方向, 构建从顶层设计到竣工交付的全阶段实践框架。深入剖析 BIM 核心技术的深化应用路径, 以及 BIM 与物联网、人工智能、大数据分析、自动化/机器人技术的融合创新点, 明确各技术在施工进度、质量、安全、成本管理中的应用机制; 结合工程实践需求, 提出施工数字化顶层设计方案与全阶段实施路径; 通过技术创新与实践路径的结合, 为建筑企业提供可落地的数字化解决方案, 助力行业突破传统建造模式束缚, 实现施工效率提升、安全风险降低、成本精准控制的目标, 推动智能建造在工程领域的规模化应用与高质量发展。

# 一、基于 BIM 的智能建造施工数字化关键技术创新

## （一）BIM 核心技术的深化应用

智能建造是在建造过程中充分利用智能化信息技术，通过将智能系统应用于建筑行业，提高建造过程的智能化水平，构建涵盖建筑全生命周期的智能化体系，减少施工管理中对人的依赖，达到高效安全建造的目的，实现建筑工业化、信息化和智能化<sup>[1]</sup>。BIM 核心技术的深化应用，通过建模技术的智能化、协同管理的高效化以及模型应用的轻量化，实现了从静态建模到动态应用的转变。在参数化建模方面，通过引入智能驱动引擎，将构件信息参数化关联，使得修改核心参数时模型能自动更新所有关联构件并同步生成工程量清单，有效解决了复杂结构建模周期长、易出错的问题<sup>[2]</sup>。在协同管理方面，基于云计算的跨平台协同技术打通了设计与施工等全周期数据壁垒，支持多软件数据的实时同步与动态权限分配，将问题解决时间从数天缩短至小时级。在模型应用方面，轻量化技术通过算法压缩，使庞大的 BIM 模型能在手机等移动端秒级加载，并结合 AR 技术进行现场比对，显著提升了技术交底效率，降低了施工返工率。

## （二）BIM 与物联网的融合技术

BIM 与物联网的融合，构建了“虚拟模型 + 实体感知”的施工数字化闭环，通过实时数据采集赋予 BIM 模型动态感知与实时反馈的能力，推动施工管理从被动管理向主动预警转变<sup>[3]</sup>。在施工数据采集方面，通过在现场部署各类传感器，实时采集人员、设备及环境数据，并利用无线通信技术将其与 BIM 模型自动关联，实现数据可视化与风险预警，例如在深基坑施工中成功预警位移风险，避免了安全事故<sup>[4]</sup>。在设备管控方面，通过在施工设备上安装智能终端，实时监控运行状态并绑定至 BIM 模型，形成数字化台账，一旦设备异常即可自动触发预警并智能生成维修方案，显著缩短了故障响应时间，提升了设备利用率。在材料追溯方面，利用 RFID 标签或二维码记录材料全生命周期信息，并在关键节点自动采集数据，实现材料从采购到使用的全程追溯，有效降低了材料浪费率，提升了库存周转效率。

## （三）BIM 与人工智能的结合技术

BIM 与人工智能的结合，借助 AI 的数据分析与智能决策能力，推动施工数字化从可视化呈现升级为智能化决策，其创新应用主要体现在进度、质量与安全三个领域<sup>[5]</sup>。在进度管理方面，AI 通过构建进度预测模型，综合分析 BIM 模型数据、历史项目数据及实时环境、设备状态等多维信息，动态预测施工进度，并在发现潜在滞后时自动生成优化方案，显著提高了进度预测准确率，降低了工期延误风险<sup>[6]</sup>。在质量检测方面，利用“计算机视觉 + 深度学习”技术，对现场采集的图像或点云数据进行智能分析，自动识别如墙面空鼓、构件尺寸偏差等质量问题，并将结果与 BIM 模型关联，生成检测报告与整改建议，大幅提升了检测效率与隐蔽问题的发现率。在安全管理方面，AI 通过构建“安全预警模型”，利用图像识别与点云比对技术，实时监控人员不安全行为和安全隐患，一旦发现风险便在 BIM 模型中定位并自动报警，有效提升了施工现场的安全管控水平，显著降低了安全事

故发生率。

## （四）BIM 与大数据分析技术

BIM 与大数据分析技术的融合，依托大数据的海量处理与深度挖掘能力，整合施工全流程的分散数据，为施工数字化提供数据驱动的决策支持<sup>[7]</sup>。在数据整合方面，通过构建施工大数据平台”，采用分布式存储与 ETL 工具，将来自不同载体和格式的结构化、半结构化及非结构化数据进行清洗、转换与关联，形成统一的“施工数据资产库”，打破了传统“数据孤岛”，实现了多项目数据的高效统一管理。在成本分析方面，通过构建“5D 成本模型”并实时采集施工成本数据，结合历史项目与市场波动信息进行多维度分析，精准识别成本超支因素，并自动生成优化方案，实现了从事后核算到动态控制的转变，有效降低了项目总成本<sup>[8]</sup>。在施工过程优化方面，通过挖掘历史数据中的资源配置与施工工艺规律，找到最优资源比例与最适合的施工方案，实现了资源利用率和施工效率的显著提升，避免了资源浪费与工期延误。

## （五）BIM 与自动化 / 机器人技术

BIM 与自动化 / 机器人技术的融合，将 BIM 的精准建模与路径规划能力，与自动化设备的高效执行优势相结合，推动施工从人工操作向自动化作业转变。在施工机器人路径规划方面，通过“BIM 模型 + 路径优化算法”，使机器人能够基于三维空间数据智能规划最优作业路径，避开障碍物并实现高效全覆盖，大幅提升作业效率与施工质量。在自动化施工设备协同方面，构建“设备协同管理平台”，实现各设备间的实时数据交互与智能调度，确保供需平衡，避免资源浪费，显著提升整体施工效率<sup>[9]</sup>。在装配式构件自动化安装方面，结合“BIM 模型定位 + 自动化吊装设备”，实现构件的精准定位与安装，并通过实时比对与校正确保安装精度，同时利用自动化连接设备完成高质量连接作业，形成完整的质量追溯档案。此外，该技术还在施工场地智能化布置与维护中发挥重要作用，通过“BIM 场地模型 + 自动化巡检机器人”，实现场地设施的动态规划与智能巡检，及时发现并处理安全隐患，提升场地利用率与管理效率。

# 二、基于 BIM 的智能建造施工数字化实践路径与方法

## （一）施工数字化顶层设计与规划

施工数字化顶层设计与规划是确保 BIM 驱动的智能建造成功落地的前提，需从项目全生命周期视角出发，构建“目标 - 框架 - 标准”三位一体的协同体系。结合项目类型与建设需求制定量化目标，如工期缩短、返工率降低、安全事故率控制等，并细化模型精度、数据覆盖率等可衡量指标<sup>[10]</sup>。在此基础上，搭建“组织 - 技术 - 数据”三位一体的数字化框架：组织上成立跨部门专项小组，明确各方职责；技术上规划硬件与软件体系，构建以 BIM 协同平台为核心的技术生态；数据上明确采集范围、标准与安全策略，避免数据孤岛。同时制定完善的实施标准与流程，包括模型交付标准、协同工作标准和数据管理标准，规范从模型创建、数据采集到成果归档的全流程操作，确保各环节标准化、规范化，



为数字化实践提供方向指引与制度保障。

（二）施工准备阶段的数字化应用

施工准备阶段的数字化应用聚焦于“数据整合—方案优化—资源配置”，通过 BIM 技术打通设计与施工的衔接壁垒，提前解决潜在问题，为高效施工奠定基础。在设计数据转化方面，将二维图纸转化为三维 BIM 模型，进行碰撞检测与施工属性补充，形成“施工可用”模型，避免返工。在方案优化方面，通过 4D 进度模拟与三维可视化模拟验证施工顺序、优化关键工序，结合 VR 技术提升人员培训效果，降低施工风险。在资源配置方面，基于 BIM 模型与资源管理软件，实现人工、材料、设备的精准规划与调配，生成采购计划与进场安排，确保资源供需平衡，避免浪费或短缺，为施工顺利开展提供全面保障。

（三）施工过程阶段的数字化管理

施工过程阶段的数字化管理是施工数字化实践的核心，依托 BIM 协同平台融合物联网、人工智能、大数据等技术，实现对进度、质量、安全、成本的实时监控与动态优化，确保施工过程可控、可管、可追溯。在进度管理方面，通过“BIM+ 物联网+ 进度管理软件”构建 4D 进度模型，实时采集人员、设备、工序数据，自动分析进度偏差并动态调整资源配置，结合大数据预测趋势，提前制定纠偏预案。在质量管理方面，利用激光扫描、无人机巡检、AI 图像识别等技术精准检测施工质量，建立“问题发现—整改—验收—关闭”的数字化闭环流程，实现质量问题全追溯，并通过统计分析减少同类问题重复发生。在安全管理方面，通过智能安全帽、物联网传感器与 AI 预警系统实时监控人员位置、设备参数及环境数据，自动识别不安全行为与隐患，及时报警并触发处置措施，构建全方位安全防控体系。在成本管理方面，构建 5D 成本模型实现工程量与成本的自动关联，实时核算实际成本与预算偏差，利用大数据分析优化资源配置与施工方案，避免成本超支，提升项目经济效益。

（四）竣工交付阶段的数字化应用

竣工交付阶段的数字化应用聚焦于“数字化竣工模型构建—数字化验收—数字化交付”，通过 BIM 技术整合施工全过程数据，形成与实际建筑一致的 LOD500 竣工模型，为后续运维提供数据支撑。在模型构建方面，遵循“数据整合—模型修正—成果审核”流程，将设计变更、验收记录、设备参数等数据整合至模型，确保模型与实体建筑完全一致。在数字化验收方面，通过“BIM 模型+ 智能检测+ 线上协同”实现验收流程的高效化与精准化，将验收标准嵌入平台，结合智能设备采集数据，实现验收结果实时上传与线上协同，大幅缩短验收周期。在数字化交付方面，将竣工模型与配套数据资产（如设计变更台账、设备档案、质量检测数据库）交付给运维单位，通过标准化交付流程确保数据完整性与可用性，并为运维单位提供培训，确保其熟练运用交付数据。数字化交付的价值贯穿建筑全生命周期，在设备维护、能耗管理、应急处理及建筑改造中发挥重要作用，推动建筑行业向“智能建造—智慧运维”深度融合的方向迈进。

三、结束语

本文围绕基于 BIM 的智能建造施工数字化技术展开系统研究，从技术创新与实践路径两个核心维度，构建了 BIM 与多前沿技术融合的应用体系，明确了全生命周期数字化管理的实施框架，为建筑行业智能化转型提供了理论支撑与实践参考。随着 5G、数字孪生、元宇宙等技术的快速发展，基于 BIM 的智能建造施工数字化将向更深层次演进。相信随着技术迭代与实践深化，基于 BIM 的智能建造施工数字化技术将持续赋能建筑行业，推动行业向更高质量、更高效益、更可持续的方向发展，为实现“碳达峰、碳中和”目标与新型城镇化建设提供重要支撑。

参考文献

[1] 负江华. 大数据环境下基于 BIM 技术的高校综合建筑智能建造施工管理研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(10): 162-164. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.10.053.

[2] 郭蕾. 基于 BIM 的装配式复合保温外墙板智能建造关键技术研究 [D]. 山东: 山东建筑大学, 2024.

[3] 黄轩安, 史月霞, 陈可楠, 等. 基于 BIM 技术的装配式建筑全过程信息化管理与数字化建造方法研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(1): 45-60. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2022.01.07.

[4] 李潇聪. 基于 BIM+GIS 的长大隧道 智能建造技术应用研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2022.

[5] 徐伟, 闫雪萌, 李志鹏. 浅析基于 BIM 技术的建筑全生命周期绿色数字化建造 [J]. 上海节能, 2021(12): 1365-1369. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2021.12.010.

[6] 吴瑜灵. 基于 BIM 技术的建设项目智能建造应用研究 [J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(12): 1-4, 14. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2023.12.001.

[7] 徐刚强, 张少杰, 张嗣铭, 等. 基于 BIM 的数字化水稳施工技术应用研究 [J]. 中国港湾建设, 2023, 43(7): 49-54. DOI: 10.7640/zggwjs202307009.

[8] 张敬军. 智能建造技术在高层建筑施工中的应用研究 [J]. 新城建科技, 2025, 34(4): 25-27.

[9] 谭旺, 全美娜, 赵欣, 等. 基于 BIM 的全过程智能建造技术研发及综合应用 [J]. 中国勘察设计, 2024(4): 74-77. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9607.2024.04.022.

[10] 殷艺霖, 冷吉涛, 刘勇. 基于 BIM 的数字化施工技术在航道工程中的研究与应用 [J]. 水上安全, 2023(3): 28-30.



# 装配式结构施工精度控制方法探讨

陈迪权

山东省烟台市市属直管公房管理服务中心，山东 烟台 264000

DOI:10.61369/ERA.2025100024

**摘 要：** 随着装配式建筑在现代建筑行业的广泛应用，施工精度控制成为影响工程质量的重要因素。装配式结构施工的精度要求较高，涉及构件的生产、运输、安装等多个环节。为确保结构安全与功能的完整性，必须在各阶段加强精度控制，包括严格的施工规范、精密的测量设备、施工人员的培训以及现场施工管理。通过有效的精度控制措施，可以显著提高装配式结构的施工质量，缩短工期，降低成本，为建筑行业的可持续发展提供有力支持。

**关 键 词：** 装配式结构；施工精度；质量控制；施工管理；建筑工程

## A Discussion on Precision Control Methods for Prefabricated Structural Construction

Chen Diqun

Shandong Yantai Municipal Directly-Administered Public Housing Management Service Centre,  
Yantai, Shandong 264000

**Abstract：** With the widespread application of prefabricated buildings in the modern construction industry, construction precision control has become a critical factor influencing engineering quality. Prefabricated structure construction requires high precision, involving multiple stages such as component production, transportation, and installation. To ensure structural safety and functional integrity, precision control must be strengthened at all stages, including strict construction standards, precise measurement equipment, training of construction personnel, and on-site construction management. Through effective precision control measures, the construction quality of prefabricated structures can be significantly improved, construction schedules shortened, costs reduced, and strong support provided for the sustainable development of the construction industry.

**Keywords：** prefabricated structures; construction precision; quality control; construction management; construction engineering

## 引言

随着建筑工业化的推进，装配式结构因其施工周期短、质量稳定等优势，逐渐成为主流建筑方式。然而，装配式结构的施工精度直接关系到建筑的安全性和使用功能，任何细微的偏差都可能导致严重的质量问题。因此，精度控制成为装配式结构施工中的关键环节。如何在多变的施工环境中确保高精度施工，已成为亟待解决的难题。通过科学的精度控制方法，不仅能提升工程质量，还能为行业标准化、规范化发展奠定基础。

## 一、装配式结构施工精度控制的重要性与挑战

装配式结构施工精度控制在现代建筑工程中扮演着越来越重要的角色。随着建筑工业化的发展，装配式建筑因其施工周期短、质量稳定等优点得到广泛应用。这种结构形式通过大量预制构件的工厂化生产，使得施工现场的施工量大大减少，进而提高了施工效率。然而，装配式建筑的精度要求远高于传统建筑方式，精度的微小偏差可能会导致整体结构的安全隐患。因此，如何在整个施工过程中严格控制精度，确保每个环节符合设计要求，是当前装配式建筑面临的主要挑战之一<sup>[1]</sup>。

装配式结构施工精度的控制不仅仅是一个简单的技术问题，更是一个系统性工程。从构件的生产、运输到现场安装，每个环节的精度都需要得到严格把控。在构件生产阶段，任何工艺的失误都可能导致构件尺寸的误差，从而影响后续施工的精度。而在运输过程中，构件的碰撞、晃动等因素也可能导致其发生形变或损坏，进而影响施工精度。更为复杂的是，施工现场的环境因素，比如气候变化、土壤沉降、设备精度等，也会对构件的安装精度产生影响。因此，如何在多种变量的影响下保持精度，成为装配式建筑施工中的一大难题。

为了应对这些挑战，精度控制的技术手段和管理措施显得尤

为重要。首先，精密测量设备的应用能够有效提高测量的准确性，尤其是在构件定位和安装过程中，现代化的测量技术如激光测量、三维扫描等可以提供实时的数据支持，帮助施工人员及时发现偏差并进行调整。其次，施工人员的培训和施工规范的完善也是确保施工精度的关键。只有通过专业培训提高施工人员的精度意识和操作技能，才能有效避免人为因素对精度的影响。最后，精确的施工管理体系同样不可忽视。施工过程中，必须严格按照设计方案和标准执行，每个环节都需要进行全面的监督和检查，确保施工精度不受疏忽。

## 二、装配式构件生产与运输阶段的精度控制

装配式构件的生产和运输是装配式建筑施工过程中的两个关键环节，精度控制在这两个阶段的实施对于确保整体工程质量至关重要。在构件的生产阶段，首先需要保证构件尺寸和形状的准确性。由于装配式构件通常采用标准化的设计和大规模的生产模式，任何在生产过程中的偏差都可能积累成严重的施工问题。生产环节中，需要依赖先进的生产设备和精准的模具来确保构件的准确度。数字化和自动化的生产线可以有效减少人为操作误差，提高生产精度。同时，生产过程中需要实时进行质量监控，使用激光测量、三维扫描等现代技术来检测每个构件的尺寸和形状，确保其符合设计要求。在生产完成后，构件还需进行严格的检验和确认，只有通过检验的构件才能进入运输环节，避免由于构件不合格而影响后续的施工。

运输是另一个对构件精度控制至关重要的环节。在运输过程中，构件将面临多种外部环境的挑战，如振动、碰撞、气候变化等因素，这些都可能导致构件的变形或损坏，从而影响施工精度。为了确保构件在运输过程中的安全性和稳定性，运输工具的选择和运输过程中的管理显得尤为重要。首先，运输车辆和设备需要根据构件的尺寸和重量进行专门设计，确保构件在运输过程中得到合理固定，避免产生任何晃动或移动。其次，在运输过程中，需要特别关注道路状况和运输速度，过度的震动和急剧的变动可能对构件造成不必要的损害。此外，运输过程中的气候变化也可能影响构件的质量，特别是在雨季或寒冷天气下，构件的材料可能会因温度变化或湿度过高而发生性能退化。因此，运输团队需要根据不同天气条件采取相应的防护措施，以确保构件在运输过程中的精度和完整性<sup>[2]</sup>。

构件生产和运输阶段的精度控制不仅仅依赖于设备和技术的支持，还需要精细的管理和规范的操作流程。在生产过程中，必须确保工艺和设备的稳定性，防止设备故障或工艺不当导致构件出现偏差。在运输阶段，除了对运输工具和过程进行严格控制，还需要合理规划运输路径，尽量避免运输过程中遇到不必要的障碍。此外，加强对生产和运输人员的培训也是提高精度控制水平的重要手段。精度控制不仅仅是一个技术问题，更是一个涉及人员、设备、流程和环境等多方面因素的系统性问题。

## 三、施工现场精度控制的关键技术与方法

施工现场精度控制在装配式建筑中起着至关重要的作用，直接影响到整体结构的质量与安全性。在施工现场，构件的精确定

位和安装是实现建筑设计精度的关键环节。为确保精度控制，首先需要依赖先进的测量技术。现代化的测量工具，如全站仪、激光扫描仪、三维激光定位系统等，为施工现场提供了高精度的测量支持。这些设备能够精确地测量构件位置、标高、水平度及垂直度等重要参数，实时反馈现场的偏差情况，从而帮助施工人员及时进行调整，避免由于精度不达标而导致的后期修复问题。通过精确的测量，能够在安装过程中迅速识别并纠正偏差，保证构件的安装精度与设计要求一致。

施工过程中的质量控制和技术方法同样至关重要。在装配式结构施工中，由于大部分构件均为工厂预制，施工现场的主要任务是将构件准确安装并拼接成完整结构。为此，合理的施工工艺和严格的操作规程是确保精度的关键。施工过程中，首先要根据设计图纸和施工方案，制定详细的施工计划和质量控制措施。同时，施工人员需要掌握高精度安装技术，包括对构件的预定位、对接及加固等操作。在实际施工中，采用临时支撑和定位装置，可以有效保证构件在安装过程中的稳定性和精度。此外，安装过程中还要密切关注构件之间的拼接和连接部位，确保连接精度和强度满足设计要求，避免由于接缝不严或错位导致的整体结构问题<sup>[3]</sup>。

施工现场精度控制不仅仅依赖于高精度的设备和先进的技术，还需要有完善的管理体系和团队协作。精度控制涉及多个环节，任何环节的疏忽都可能导致整体精度的偏差。因此，施工现场的管理人员必须建立健全的质量管理制度，确保每个环节都按照规范执行。同时，要加强施工人员的技术培训，提高其精度意识和操作技能，确保每一位施工人员都能够正确使用设备并严格按照操作流程进行工作。此外，施工现场的环境管理也是精度控制的重要组成部分。例如，天气变化、地面沉降等因素都可能对构件的安装产生影响，因此要根据不同的环境条件采取相应的措施，如防止雨水积聚、地基加固等，减少外部因素对施工精度的影响。

## 四、施工精度控制的规范体系与质量管理

施工精度控制的规范体系与质量管理是保证装配式结构施工质量的重要保障。规范体系的建立为整个施工过程提供了明确的指导方针，确保施工各环节的精度达到设计要求。首先，施工精度控制的规范体系应当涵盖从构件生产、运输到安装等多个环节，制定详细的质量标准和操作流程。在构件生产阶段，需依据国家标准和行业规范对生产工艺进行严格把控，确保预制构件的尺寸精度和几何形状符合设计要求。而在施工现场，规范体系要求施工人员严格按照设计图纸和施工方案进行作业，并使用先进的测量工具和技术进行实时监控，以确保构件在安装过程中的精度控制。通过这样的系统化规范，不仅可以减少施工中的人为失误，还能提高施工的整体效率和质量。

质量管理体系的完善是施工精度控制的另一重要组成部分。质量管理不仅仅是对精度的控制，更多的是对整个施工过程的全面把控，包括施工前的准备工作、施工过程中的质量监控和施工

后的验收环节。为了确保施工精度，质量管理体系需要设立专门的质量控制部门，负责监督施工全过程的质量管理，确保每一个环节都符合标准。质量管理的核心在于实施全过程控制，具体措施包括施工前的精度检查、施工过程中的实时监控，以及施工后的精度验收等。同时，施工过程中应及时对出现的精度偏差进行调整，采用合适的技术手段进行修正，避免偏差的扩大和带来的后续问题<sup>[4]</sup>。

质量管理体系的核心在于人员素质和细致管理。在施工精度控制中，技术手段固然重要，但施工人员的操作水平和精度意识同样关键。施工企业需加强技术培训，提高人员对精度要求的认知和操作技能，使其能及时发现并调整偏差。同时，管理人员须具备高度责任心和组织能力，确保各环节质量有效控制。施工现场管理人员应定期检查，及时发现问题并协调解决。此外，质量管理体系应有完备的档案管理和数据跟踪系统，记录施工过程、检测结果及偏差调整，便于后续追溯与分析。通过规范管理和严格控制，确保施工进度和项目顺利完成，推动建筑行业的高质量发展。

## 五、精度控制对装配式结构工程质量的影响与保障

精度控制在装配式结构工程中起着至关重要的作用，直接关系到工程质量的优劣和建筑物的安全性。装配式建筑的优势之一就是构件在工厂中预制，能够有效提高施工效率和质量，但这一优势的实现前提是施工过程中的精度严格控制。精度控制确保了构件在生产、运输和现场安装的每一个环节都能精准匹配设计要求，从而避免因偏差产生的结构安全隐患。任何在施工中产生的精度偏差，都会影响到整体结构的稳定性、耐久性甚至使用功能，甚至可能导致建筑物的裂缝、变形或局部失稳等严重问题。因此，精度控制对装配式结构工程质量的影响不可忽视，它直接决定了建筑物是否能够顺利交付，并长期稳定运行。

为了确保装配式结构工程质量，精度控制的保障措施必须贯

穿于整个施工过程，从构件的设计、生产、运输到现场安装，每个环节都需要严格把关。首先，精度控制的实施需要精密的技术手段支持，现代化的测量工具和设备如激光定位仪、全站仪、三维扫描仪等都能实时监控施工精度，确保每个构件在安装过程中都能够精准对接，避免由于精度偏差而导致的连接不严密、错位或结构不稳定等问题。其次，施工人员的技术水平和质量意识同样至关重要。通过培训和规范操作，确保施工团队熟练掌握精度控制技术，能够及时识别并纠正施工中的精度问题，保证每一个细节都能符合标准。在此基础上，施工现场还需要配备专门的质量管理人员，对施工过程进行全面监督，确保每一个环节都按照标准执行，确保最终工程的整体质量<sup>[5]</sup>。

精度控制不仅是避免施工问题的手段，更是保障装配式建筑长期质量稳定和使用安全的基础。它直接影响建筑物的使用功能，如门窗的开合、墙体的平整、楼层的垂直等，微小的误差可能导致日常不便或安全隐患。精度控制还对建筑物的长期维护和使用寿命至关重要。不合格的精度可能导致应力分布不均、材料老化、基础沉降等问题，影响耐久性。通过严格的精度控制，能够提升结构的长期稳定性和使用寿命，减少后期维护成本，为业主和使用者提供更安全、舒适的生活环境。精度控制不仅是建设阶段的质量保证，还为建筑的可持续发展提供有力保障。

## 六、结束语

装配式结构施工的精度控制是确保工程质量和建筑安全的关键。通过科学的技术手段、严格的规范体系和精细的质量管理，能够有效控制生产、运输、安装各环节的精度，避免偏差对结构安全和功能的影响。精度控制不仅提高了施工效率，也延长了建筑物的使用寿命，降低了维护成本。未来，随着技术的不断进步和管理模式的优化，装配式结构的精度控制将进一步促进建筑行业的质量提升与可持续发展。

## 参考文献

- [1] 阎四雄. 高层住宅楼施工中预制装配式结构的应用 [J]. 科学技术创新, 2020, (17): 141-142.
- [2] 高庆峰. 电站出线竖井装配式结构施工关键技术 [J]. 四川水泥, 2023, (01): 123-125.
- [3] 薛伟. 基于实景三维模型的装配式结构施工精度检测研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2023.DOI: 10.27049/d.cnki.gglde.2023.000989.
- [4] 王灿灿, 刘建国, 李一川, 等. BIM 技术和三维激光扫描技术在装配式结构中的应用 [C]//《施工技术（中英文）》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2023年全国工程建设行业施工技术交流会论文集（下册）. 云南建投第七建设有限公司, 2023: 274-277.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.042374.
- [5] 范琪, 郭强, 张迪. 预制装配式结构施工技术分析 [J]. 居舍, 2024, (21): 53-56.



# 公路桥涵施工质量通病成因分析与防治措施研究

李富田

河北光太路桥工程集团有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2025100031

**摘 要：**公路桥涵工程作为道路的重要组成部分，其施工质量直接关系到通行安全与工程寿命。然而，在实际施工过程中，由于施工管理不规范、材料使用不当、施工技术落后等多种因素，常常出现诸如裂缝、蜂窝麻面、漏水、沉降不均等质量通病。本文围绕桥涵施工中常见质量通病类型，系统分析其产生的主要成因，并针对性提出科学合理的防治措施，以期提高公路桥涵工程质量提供参考，促进施工管理水平与工程耐久性的全面提升。

**关 键 词：**公路桥涵；质量通病；施工缺陷；成因分析；防治措施

## Analysis of Common Defects in Highway Bridge and Culvert Construction and Measures for Prevention and Control

Li Futian

Hebei Guangtai Highway and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

**Abstract：** Highway bridge and culvert engineering, as an important component of road transportation, directly impacts traffic safety and the lifespan of the structure. However, during actual construction, due to factors such as improper construction management, inappropriate material use, and outdated construction techniques, common quality defects such as cracks, honeycomb surfaces, leaks, and uneven settlement frequently occur. This paper focuses on common quality defects in bridge and culvert construction, systematically analyses their primary causes, and proposes scientific and reasonable preventive measures to enhance the quality of highway bridge and culvert engineering, thereby improving construction management standards and engineering durability.

**Keywords：** highway bridges and culverts; quality defects; construction defects; cause analysis; preventive measures

### 引言

随着我国交通基础设施建设的不断推进，公路桥涵工程数量显著增加，质量要求也日益提高。然而在施工实践中，各类质量通病频发，严重影响结构安全与后期运营维护。通病治理不仅涉及技术层面，更关联施工组织与监管机制。本文以实际施工问题为基础，梳理主要通病类型，分析其成因，探索系统化的防治路径，为相关施工项目提供实践性对策建议。

### 一、公路桥涵常见施工质量通病类型分析

#### （一）混凝土结构表面缺陷问题

混凝土结构表面缺陷是桥涵施工中最常见的质量通病之一，主要包括蜂窝麻面、裂缝、露筋和表面色差等。蜂窝麻面多由于模板缝隙过大、漏浆或振捣不密实造成，既影响结构耐久性，也破坏结构的外观完整性。表面裂缝则可能由水灰比过大、模板拆除过早、养护不到位或温差收缩引起，轻则影响观感，重则影响结构承载能力。此外，若混凝土浇筑过程中未严格控制施工间歇时间、未采用分层分段连续浇筑，极易导致冷缝产生，降低整体结构性。模板安装质量不高、脱模剂使用不当等也会造成混凝土表面拉毛或起皮，严重影响结构密实性和后期防水处理效果。这

类缺陷一旦发生，修复难度大、成本高，因此施工中必须严格控制工艺细节，确保振捣密实、模板封闭严密及规范养护。

#### （二）钢筋工程相关通病

钢筋工程作为结构受力体系的骨架，其质量直接关系到整体结构的安全稳定性。常见通病包括钢筋布置错误、位置偏移、保护层厚度不符、钢筋锈蚀及焊接质量不合格等。在钢筋加工与绑扎过程中，若未按图纸要求布设或未采取加固措施，极易出现偏位现象，影响结构受力性能。保护层厚度不足会导致钢筋过早暴露于空气和水中，加剧锈蚀速度，降低使用寿命。反之，保护层过厚则减弱了有效截面，也不利于结构性能的发挥<sup>[1]</sup>。部分施工现场钢筋未加盖防雨布堆放或长时间裸露在潮湿环境中，容易出现锈蚀，埋下安全隐患。另外，焊接接头强度不足或焊缝质量不合格，也会导致局部



受力不均,从而影响整体结构的可靠性。因此,必须从源头控制钢筋质量,加强施工操作规范化,严格实施验收程序。

### （三）地基基础施工问题

地基基础施工质量直接影响桥涵结构的稳定性与耐久性,常见通病包括不均匀沉降、局部下陷、承载力不足和垫层虚铺等问题。不均匀沉降多因地基勘察不详、土质变化未充分评估、基础处理不到位等因素引起,导致桥台、墩柱产生裂缝或错台,进而影响行车安全。在施工过程中,如未按规定深度开挖、未分层夯实回填土或采用未经压实的弃土作垫层材料,极易造成地基空鼓和承载力降低。此外,若地下水位未有效控制,基坑排水措施不到位,也会引发软土涌入、塌方等安全问题。一些施工单位为赶工期,压缩基础施工时间或简化质量检测程序,最终导致基础变形无法预控。为此,必须加强施工前期的勘察设计合理性、施工过程的土方处理规范性及后期地基检测验收的科学性,切实保障桥涵基础的工程质量<sup>[2]</sup>。

## 二、质量通病产生的主要原因分析

### （一）施工工艺不规范

施工工艺的不规范是造成桥涵施工质量通病的首要原因,表现为工序不完善、操作不标准和现场执行力差。混凝土施工中,若未按照规范进行分层浇筑、连续施工及充分振捣,就极易出现蜂窝麻面、夹层和冷缝等问题。在模板工程方面,模板安装不牢固、拼缝未密封或未设支撑加固,会导致混凝土成型尺寸偏差,甚至局部塌模。养护不到位则容易使混凝土早期脱水,造成干缩裂缝。钢筋绑扎方面,施工人员常因图纸理解偏差或缺乏技术交底,出现钢筋布设错误或保护层厚度不达标现象。基础施工中,常因施工周期紧张而未进行充分夯实或跳仓施工,导致地基松软、承载力不足,进而出现沉降问题<sup>[3]</sup>。部分施工单位对工艺流程掌握不全,对关键节点如墩柱连接、翼缘钢筋锚固等部位处理粗糙,留下安全隐患。所有这些问题归根结底,是现场作业过程未严格按规范执行,施工人员操作随意性强,缺乏有效的技术指导与质量控制。

### （二）材料质量与使用问题

桥涵工程对材料性能要求较高,若材料质量不合格或使用方式不当,也会诱发多种质量通病。首先,混凝土原材料中的砂石级配不合理、水泥过期或掺杂杂质,都会影响混凝土拌合物和易性和强度,造成浇筑后结构强度不足、表面不密实等问题。其次,配合比未根据气温、湿度等施工环境动态调整,也会导致混凝土开裂或强度偏差。钢筋方面,若采用未检合格的劣质钢筋、存在锈蚀或机械性能不达标现象,将大幅削弱结构受力性能。此外,施工现场材料堆放管理混乱,如钢筋露天堆放、砂石被雨淋湿、粉料受潮结块,都会影响使用性能。在使用环节中,若混凝土运输时间过长或中途加水搅拌,极易造成凝结时间失控,最终形成冷缝、离析等缺陷。一些施工单位为降低成本,存在偷工减料、以次充好现象,使工程质量隐患增大<sup>[4]</sup>。

### （三）管理制度与监督缺失

管理制度缺失和现场监管薄弱是质量通病难以及时发现和纠

正的根本原因。当前许多项目现场存在“重进度、轻质量”的现象,施工单位为赶工期往往忽视质量控制环节,对工序验收流于形式。部分项目管理人员专业能力不足,对关键工艺和技术标准掌握不深,无法有效指导现场施工,导致施工随意性强、技术交底不到位。质量管理制度方面,缺乏系统化的质量检查流程和质量责任追溯机制,质量问题往往无人负责,处理措施不到位。监督机制缺失也使得隐蔽工程、关键节点等质量问题无法有效曝光。例如,浇筑前钢筋未验收即进行混凝土浇筑,模板未封严即开始施工等现象时有发生。此外,建设单位、监理单位履职不到位,缺乏实地巡查和抽检手段,也使质量通病屡禁不止<sup>[5]</sup>。

## 三、公路桥涵施工质量通病的防治措施

### （一）完善施工技术方案

针对桥涵施工过程中普遍存在的技术通病问题,必须优先从施工技术方案的完善入手,通过系统化、标准化的技术流程控制来提高整体施工质量。首先,应在施工前组织技术交底会议,明确图纸要点、施工规范和质量控制重点,确保施工人员统一标准、明确职责。对于混凝土施工,应优选泵送性能好、和易性强的混凝土设计配合比,确保坍落度控制在160~200mm之间,以满足施工连续性与密实性需求。混凝土振捣应采用插入式与平板式相结合方式,振捣时间不少于20秒/点,避免蜂窝麻面和夹层问题。其次,应加强模板设计与支撑系统布置,模板加固间距一般应控制在50cm以内,重点部位设置斜撑,以防止胀模、变形等问题<sup>[6]</sup>。在钢筋施工中,要严格按图施工,使用钢筋定位卡具控制钢筋位置偏差不得超过±5mm,同时采用保护层垫块控制保护层厚度,确保质量一致性。特别是在基础施工中,应采用分层夯实技术,层厚控制在30cm以内,压实系数不得小于0.95。针对不同地质条件,应制定专项基础加固措施,如CFG桩、预压法等,确保地基稳定与承载能力。

### （二）加强材料管理与使用控制

材料是工程质量的基础,强化材料质量管理与使用控制是杜绝质量通病的重要保障。首先要建立严密的材料采购与验收制度,所有原材料须具备出厂合格证和第三方检测报告,进场后再进行抽样复检,确保符合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50)中规定的性能标准。例如,钢筋抗拉强度不得低于HRB400级,混凝土水泥必须符合P.O42.5及以上等级。混凝土拌合物应在90分钟内完成运输与浇筑,运输途中严禁二次加水。钢筋使用前必须除锈,防止锈蚀影响结合性能。对砂石、水泥等材料要分类堆放并加盖防雨布,避免雨淋导致含水率变化,从而影响混凝土强度控制。对于特种材料如外加剂、膨胀剂等,应由专人负责投料,并按称量误差±2%控制。为实现材料全生命周期管理,应建立材料台账,对各类材料的进场时间、使用部位、使用数量进行详细记录,便于溯源追责<sup>[7]</sup>。

### （三）健全施工组织与监管体系

科学高效的施工组织体系和严格的监管机制是防治施工质量通病的重要支撑。施工单位应配备具备中级及以上职称的技术

管理人员比例不低于15%，并根据项目规模设立质量控制小组，专人专岗负责重点工序监管。项目部要建立“日巡查、周例会、月考评”机制，实行现场问题动态登记、整改闭环处理制度。对隐蔽工程、关键节点如桥墩与盖梁连接处、基础底板浇筑前应实行旁站监督，确保每道工序合格后再进入下一道施工流程。在施工过程中，应积极引入信息化监管手段，如布设施工摄像监控系统、采用无人机巡检等，提升监管覆盖率与实效性。监理单位则应强化独立监督职能，按“抽检+见证”方式参与原材料试验、钢筋下料、混凝土浇筑等关键环节，抽检频率应不低于每周一次，对发现问题要及时下发整改通知单并跟踪验收。

## 四、质量管控与持续改进机制构建

### （一）建立质量管控体系

构建科学系统的质量管控体系是实现桥涵施工全过程质量保障的首要步骤。质量管控应贯穿施工前、中、后的每一个环节，确保从源头上消除质量隐患。在施工准备阶段，应编制详尽的施工组织设计及专项施工方案，明确关键控制节点、重点工序与技术参数。开工前应组织质量技术交底与岗前培训，覆盖率达到100%，使一线作业人员充分理解工艺要求。在施工过程中，应以样板引路制度为依托，设置样板段，作为后续施工的标准模板，从结构尺寸、工艺流程、成品效果等方面进行全过程控制。同时，对施工设备、人员、技术、材料等投入要进行动态管理，确保各项资源匹配到位。各工序施工前须开展“三检”制度，即自检、互检、专检，特别是对于混凝土浇筑、钢筋绑扎、模板安装等关键工序，要设置质量控制点，由专人审核确认<sup>[8]</sup>。

### （二）推行全过程质量管理闭环

质量管理闭环是将质量问题从发现、分析、整改、反馈再到预防形成逻辑闭合系统，是质量管理现代化的核心环节。在桥涵施工过程中，应设置专职质量巡查人员每天对现场工序、材料、操作工艺进行动态巡检，发现问题及时登记，形成问题台账，并设置问题编号与处理时限，做到责任可追、问题可查。质量问题

一经发现，应立即启动纠偏机制，由施工技术人员组织原因分析，明确责任单位与责任人，制定整改措施并限时完成，整改完成后须进行复验与验证，确认合格后方可销项。在此基础上应形成质量数据记录与汇总机制，将施工过程中每次质量问题的数据、处理方式及结果录入项目质量管理体系，形成质量问题数据库，为后期分析提供支撑。同时，强化工程资料与现场实体同步检查，避免“资料合格、实体失控”的现象发生。

### （三）构建持续改进与评估机制

在保障工程质量的基础上，还应建立长效的质量持续改进与评估机制，推动质量管理由合格向优质迈进。首先，应以PDCA循环理论为基础，对每一阶段施工质量管理效果进行评估和总结，找出存在的问题与改进空间，并制定下一阶段的优化措施。建立质量评估月报制度，由项目质量管理部牵头，每月对照质量标准、工程实测实量数据及质量问题发生率进行评估，形成质量分析报告，明确改进方向。其次，建立质量激励与约束机制，对连续三个月无重大质量问题、无整改复检记录的施工班组予以奖励，对重复发生相同问题的班组或责任人进行通报批评或经济处罚。引入第三方质量评估机构参与阶段性和竣工阶段质量检查，对施工单位形成客观评价，评估内容包括结构实体质量、工艺执行程度、工程资料完整性等，并以评估结果作为后续工程承包评标依据之一。

## 五、结束语

公路桥涵工程作为交通基础设施的重要组成，其施工质量直接关系到结构安全与使用寿命。本文从常见质量通病类型出发，系统分析了成因，并提出了切实可行的防治措施与质量管理策略。实践表明，只有从施工技术、材料控制、组织管理到质量预控等环节全面发力，构建科学、闭环、可持续的质量管理体系，才能有效遏制质量通病的发生，全面提升桥涵工程的施工品质，为交通工程安全稳定运行提供坚实保障。

## 参考文献

- [1] 李剑雄. 对桥涵构造物施工质量管理的研究[J]. 四川建材, 2022, 48(07): 112-113.
- [2] 赵静. 高速公路桥涵台背回填施工工艺质量控制措施[J]. 低碳世界, 2024, 14(09): 127-129. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2024.09.012.
- [3] 涂荣招. 公路桥涵施工技术要点研究[J]. 中国住宅设施, 2023(10): 103-105.
- [4] 高军. 高速公路桥涵台背回填施工工艺质量控制[J]. 运输经理世界, 2020(16): 103-104.
- [5] 邹志宁. 高速公路桥涵施工技术及其质量控制措施探究[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(09): 265-266. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2021.09.145.
- [6] 李同军. 高速公路桥涵施工技术及其质量控制措施[J]. 汽车周刊, 2025(05): 91-92.
- [7] 张哲. 探究公路桥涵维修与加固[J]. 居舍, 2021(16): 43-44+46.
- [8] 李泽智. 高速公路桥涵施工技术及其质量控制[J]. 工程建设与设计, 2020(24): 157-158. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2020.12.274.

# 建筑工程施工阶段质量管理常见问题及改进措施

刘东

国正工程咨询(江苏)有限责任公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2025100034

**摘 要 :** 本文聚焦建筑工程施工阶段的质量管理, 深入剖析了该阶段在人员、材料设备、施工工艺与方法、管理体系与制度、环境等方面存在的常见问题。针对这些问题, 相应提出了强化人员管理、严格材料设备管控、优化施工工艺与方法、健全质量管理体系、改善施工环境等改进措施, 旨在为提升建筑工程施工质量提供有效参考, 保障工程安全稳定, 促进建筑行业高质量发展。

**关 键 词 :** 建筑工程; 施工阶段; 质量管理; 常见问题

## Common Issues and Improvement Measures in Quality Management During the Construction Phase of Building Projects

Liu Dong

Guozheng Engineering Consulting (Jiangsu) Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract :** This paper focuses on quality management during the construction phase of building projects, conducting an in-depth analysis of common issues in this phase related to personnel, materials and equipment, construction techniques and methods, management systems and regulations, and the construction environment. In response to these issues, corresponding improvement measures are proposed, including strengthening personnel management, strictly controlling materials and equipment, optimising construction processes and methods, improving the quality management system, and enhancing the construction environment. These measures aim to provide effective references for improving construction quality, ensuring engineering safety and stability, and promoting high-quality development in the construction industry.

**Keywords :** construction engineering; construction phase; quality management; common issues

### 引言

建筑工程作为国民经济发展的重要基础设施, 其质量不仅关乎人民生命财产安全, 更影响社会经济的可持续发展。施工阶段是将设计蓝图转化为实体工程的关键环节, 此阶段的质量管理贯穿于人员操作、材料使用、工艺执行、制度落实及环境适应等全过程, 任何环节的疏漏都可能引发质量隐患, 甚至导致工程事故。近年来, 随着建筑行业的快速发展, 施工技术不断更新, 工程规模逐渐扩大, 但施工阶段的质量管理问题仍屡见不鲜, 如因人员违规操作导致的结构缺陷、因材料质量不达标引发的工程返工等, 这些问题不仅增加了工程成本, 延长了施工周期, 更削弱了建筑工程的使用价值。因此, 系统分析施工阶段质量管理的常见问题, 探究科学有效的改进措施, 对于规范施工行为、提升工程质量、推动建筑行业高质量发展具有重要的现实意义。本文基于建筑工程施工实践, 结合相关理论与案例, 对施工阶段质量管理的问题与对策展开研究, 以期为工程质量管理实践提供借鉴。

### 一、建筑工程施工阶段质量管理常见问题分析

#### (一) 人员因素相关问题

对于一项建筑工程来说, 其项目的完成是要由多个单位来共同协作最终完成建造的。在这其中, 也就存在了多个主体单位, 包括监理单位、建设单位以及施工单位等。这些主体单位中会由于一些主客观因素的作用出现管理质量不到位的问题<sup>[1]</sup>。人员作为施工过程的直接参与者, 在质量管理中暴露出的问题较为突出。

多数一线作业人员来自农村, 缺乏系统的建筑知识培训, 对施工规范和技术标准的理解仅停留在表面, 在实际操作中常出现偏差。部分项目管理人员受传统观念影响, 过度追求施工进度, 将质量管理置于次要位置。在施工计划安排上, 为了赶工期, 随意压缩必要的质量检查时间, 对现场出现的质量隐患视而不见。一些施工员在进行工序验收时, 只是简单查看, 不严格按照验收标准执行, 导致不合格工序被放行, 为后续施工埋下质量隐患<sup>[2]</sup>。质量责任划分模糊也加剧了人员因素带来的问题。在一些工程项目



中,质量管理责任没有明确落实到个人,当出现质量问题时,各岗位人员相互推诿,难以追究具体责任。这种责任不清的状况,使得施工人员缺乏质量管控的主动性和积极性,进一步降低了施工质量。此外,特种作业人员违规操作现象时有发生,部分施工单位为节省成本或赶进度,让无证人员上岗作业,这些人员缺乏专业的安全 and 质量知识,操作过程中极易引发触电、火灾、设备损坏等安全事故,同时也会对工程质量造成严重影响。

## （二）材料设备因素相关的问题

在材料方面,材料采购环节把关不严是首要问题,部分施工单位为降低成本,选择价格低廉但质量不达标的材料供应商,采购的钢筋、水泥、砂石等主要材料的强度、耐久性等指标不符合设计要求<sup>[9]</sup>。材料进场验收环节也存在诸多漏洞,一些施工单位对进场材料的检验流于形式,仅查看材料的出厂合格证和外观,未按规定进行抽样送检。在设备方面,施工机械设备老化、性能不稳定是常见问题。一些施工单位为减少设备投入,使用超过使用年限或长期未进行维护保养的机械设备。例如混凝土搅拌机搅拌叶片磨损严重,导致混凝土搅拌不均匀;塔吊等起重设备的制动系统失灵,不仅影响施工进度,还可能引发安全事故。

## （三）施工工艺与方法因素相关的问题

施工工艺与方法是保证工程质量的关键,但其在应用过程中存在不少问题。部分施工方案设计不合理,编制时未充分考虑地质、气候等实际情况,缺乏针对性和可行性,如软土地基未用合适处理工艺导致建筑物沉降开裂,高温季混凝土施工因降温措施不足产生表面裂缝<sup>[4]</sup>。施工工艺执行不到位,施工人员不严格按方案和规范操作,随意简化工序,像墙体砌筑砂浆饱满度不够降低整体性和抗震性,屋面防水层卷材搭接长度不足引发漏水。新技术、新工艺应用困难,部分施工单位技术人员掌握不够,无法正确应用,影响工程质量和效率<sup>[9]</sup>。隐蔽工程验收不规范,施工单位不重视,未通知监理和建设单位验收就擅自覆盖,导致地基处理、管线预埋等隐蔽工程的质量隐患难以及时发现处理,如地下管线渗漏隐蔽后难修复,影响建筑物使用。

## （四）管理体系与制度因素相关的问题

完善的管理体系和制度是保障工程质量的重要基础,但其实际运行中缺陷诸多。质量管理体系不健全,部分施工单位未建立完善体系,质量管理部门职责不明、沟通协作不足,工作缺乏系统性和规范性,难以全程有效管控质量,如施工准备阶段未认真会审图纸,导致施工中设计变更频繁,影响质量和进度<sup>[9]</sup>。质量管理制度执行不力,一些施工单位虽有“三检制”、质量追溯制度等,却流于形式,施工人员检查敷衍、记录造假,质量追溯无法落实,出现问题难究其因、难施整改。质量监督机制不完善,内部监督部门受制约、独立性不足,难以公正履职;外部监理人员责任心欠缺,甚至与施工单位串通掩盖隐患;政府监管检查频次和力度不够,难以及时发现查处质量违法行为<sup>[7]</sup>。合同管理不规范,工程承包合同对质量标准、责任等约定不明,易引发纠纷;部分施工单位签约时承诺高标,施工中却降低要求谋利,且合同中质量违约金约定不合理,难以形成有效约束。

## （五）环境因素相关的问题

环境因素对建筑工程施工质量的影响具有不确定性和复杂性,其带来的问题不容忽视。气候方面,雨季暴雨致现场积水影响施工,还可能引发地质灾害;冬季低温延长混凝土、砂浆凝结

时间,保温不足会使其受冻破坏;高温使混凝土水分蒸发快产生干缩裂缝;强风影响高空作业安全与精度。工程所在地的地质和水文条件直接影响地基基础的施工质量,若在施工前未对地质和水文条件进行详细勘察,会导致地基处理方案不合理<sup>[8]</sup>。此外,施工现场周边的环境也会对施工质量产生影响,例如施工产生的噪音、粉尘会影响居民的正常生活,同时居民的投诉也可能导致施工中断,影响施工进度和质量;施工现场周边有地下管线和建筑物,若在施工过程中对其保护不当,会导致地下管线破裂、建筑物沉降等问题,引发安全事故和质量纠纷。

# 二、建筑工程施工阶段质量问题的改进措施

## （一）强化人员管理

针对人员因素导致的质量问题,需从技能提升、意识培养和责任落实三方面入手<sup>[9]</sup>。构建系统化培训机制是基础,施工单位应定期组织一线作业人员参加技能培训,内容涵盖施工规范、技术标准及实操要点,可邀请技术骨干进行现场示范教学,并通过模拟操作考核确保工人掌握核心技能;同时对特种作业人员实行严格的持证上岗制度,定期开展资格复审,杜绝无证操作。通过质量事故案例宣讲、质量奖惩制度公示等方式,让施工人员深刻认识质量问题的严重性。在施工现场设置质量宣传栏,张贴关键工序的质量标准和违规后果,时刻提醒工人规范操作。管理人员需率先垂范,在日常巡查中主动指出质量隐患,引导工人形成“质量优先”的工作理念。此外,明确质量责任体系不可或缺,要建立“岗位-责任-奖惩”联动机制,将质量管理责任细化到项目经理、施工员、班组长及每个作业人员,一旦出现质量问题可直接追溯到个人。

## （二）严格材料设备管控

材料设备的质量管控需贯穿采购、验收、储存及使用全流程,在采购环节应建立供应商准入与评估机制,制定合格供应商名录,优先选择资质齐全、信誉良好的企业合作。签订采购合同时明确材料质量标准及违约责任,对于钢筋、水泥等关键材料,要求供应商提供出厂合格证、检测报告,并实地考察其生产工艺,确保材料性能稳定<sup>[10]</sup>。材料进场验收环节,执行“双检”制度,由施工单位材料员与监理工程师共同对进场材料进行检验,除核查外观、规格外,必须按规范抽样送检,检测项目包括钢筋的屈服强度、水泥的抗压强度、砂石的含泥量等,未经检测或检测不合格的材料坚决退场,并建立材料退场记录台账。在储存与使用方面,优化材料管理流程是重点,根据材料特性设置专用仓库,同时制定材料领用制度,明确领用数量和使用部位,避免错用、滥用材料;对于施工设备,要建立定期维护保养计划,确保设备性能符合施工要求。

## （三）优化施工工艺与方法

施工工艺与方法的优化需兼顾方案合理性与执行规范性。编制施工方案时,需结合工程地质、气候条件等实际情况,邀请地质专家、结构工程师参与论证。施工前进行详细的技术交底,将施工方案中的工艺要点、质量标准以图文结合的形式传达至班



组，确保工人理解到位。关键工序施工时，监理工程师需全程旁站监督，例如梁柱节点钢筋绑扎时，核对钢筋规格、锚固长度是否符合设计要求；屋面防水施工时，检查卷材搭接宽度、粘结强度等参数，发现违规操作立即停工整改。此外，规范隐蔽工程验收流程同样重要，隐蔽工程覆盖前，施工单位需提前通知建设、监理单位共同验收，验收合格后签署《隐蔽工程验收记录》方可进行下道工序，对于地基处理、管线预埋等重要隐蔽工程，可引入第三方检测机构进行复核，确保质量无隐患。同时推广应用 BIM 技术、无人机巡检等新技术，通过三维建模模拟施工过程，及时发现工艺冲突问题，提升质量管控效率。

（四）健全质量管理体系

管理体系的完善需从制度建设、执行监督和责任追究多维度发力，施工单位应依据 ISO9001 质量管理标准，建立涵盖施工准备、材料进场、工序施工、竣工验收等环节的质量管理流程，明确各部门职责，形成“横向到边、纵向到底”的管理网络。严格落实“三检制”，要求班组自检、工序互检、专职质检员专检均需形成书面记录，记录内容包括检查时间、部位、结果及整改情况，杜绝虚假记录，设立质量监督小组，定期对制度执行情况进行抽查，对未按规定开展质量检查的责任人进行通报批评。内部监督方面，赋予质量监督部门独立职权，使其不受施工进度、成本等因素干扰，可直接向企业高层汇报质量问题；外部监督方面，建设单位应加强对监理单位的管理，要求监理日志详细记录质量巡查情况，对监理失职行为追究连带责任，同时引入社会监督力量，公布质量举报电话，鼓励公众参与工程质量监督。

（五）改善施工环境

环境因素的改善需结合自然条件与现场管理实际。针对自然环境，要制定专项方案，雨季前疏通排水、设边坡防护网；冬季

用热水拌合混凝土并覆盖养护；高温时调整作业时间、遮阳洒水降温。对于地质与水文条件，需加强前期勘察与动态监测，依据勘察报告优化地基处理方案，安装沉降观测点，高水位区采用井点降水。施工周边环境方面，建立协调与防护机制不可或缺，施工前与周边居民、管线产权单位沟通，明确施工时间、噪音控制标准及管线保护措施，例如采用低噪音设备、设置围挡隔音；对地下管线进行定位标识，机械开挖时保持安全距离，同时规范施工现场管理，划分材料堆放区、作业区和成品保护区，实行“工完场清”制度，减少施工垃圾对环境的污染，为质量管控创造良好条件。

三、结束语

本文通过分析施工阶段在人员、材料设备、工艺方法、管理体系及环境等方面的常见问题，提出了针对性的改进措施，涵盖了从人员素质提升到制度体系完善、从材料管控到环境优化的全流程管理要点。在实际工程实践中，施工单位需充分认识质量管理的重要性，将各项改进措施落到实处——既要强化全员质量意识，又要通过制度建设形成长效机制；既要严控材料设备等硬件质量，又要通过工艺优化和技术创新提升施工精度。唯有将质量管理贯穿施工全过程，实现各环节、各要素的协同管控，才能有效减少质量隐患，降低工程风险。随着建筑行业的持续发展和技术迭代，施工阶段的质量管理需不断适应新要求，结合智能化、信息化手段提升管理效率，推动质量管理从“事后补救”向“事前预防、过程控制”转变。通过持续优化管理模式、创新管控方法，切实提升建筑工程质量水平，为行业高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] 李琳. 建筑工程施工中常见的管理问题和质量管理办法探析 [J]. 中国设备工程, 2022, (16): 270-272.

[2] 谭斌. 房屋建筑工程施工阶段的质量管理问题及对策研究 [J]. 房地产世界, 2024, (17): 77-79.

[3] 张一礼. 建筑工程施工质量管理常见问题及解决 [J]. 居舍, 2018, (08): 132.

[4] 姬乃彪. 建筑工程现场施工阶段质量管理存在的问题及对策 [J]. 科技信息, 2009, (22): 634.

[5] 王振. 建筑工程项目施工阶段的质量控制管理 [J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(06): 163-164. DOI: 10.13824/j.cnki.cmtm.2024.06.039.

[6] 裴耀宗. 建筑工程施工阶段工程质量控制策略分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024, (07): 116-117.

[7] 李宁, 周志健, 姚文山, 等. 建筑工程施工阶段全过程质量管理 [C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 中建交通建设集团有限公司, 2023: 839-841. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.105259.

[8] 王波, 彭涛. 建筑工程施工阶段质量管理相关措施研究 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022, (30): 22-24.

[9] 蔡随心. 建筑工程施工阶段的质量控制 [J]. 科学技术创新, 2023, (17): 121-124.

[10] 陈琤. 浅谈建筑工程施工阶段质量控制的措施 [J]. 智能城市, 2021, 7(19): 95-96. DOI: 10.19301/j.cnki.znzs.2021.19.046.

# “双碳”目标下数字建筑能源管控平台创新：基于负荷预测算法的光伏－储能－微网协同控制优化

霍励

广东省电信规划设计院有限公司，广东 广州 510630

DOI:10.61369/ERA.2025100038

**摘 要：** 本文围绕数字建筑能源管控平台创新展开研究，核心聚焦基于负荷预测算法的光伏－储能－微网协同控制优化。研究提出了一种基于负荷预测算法的光伏－储能－微网协同控制优化方法，以提升建筑能源系统的经济性、稳定性与环保性。研究结果表明，本文提出的创新方法与平台能够显著提升建筑负荷预测精度，优化光伏－储能系统运行效率，有效降低建筑运行成本与碳排放，为实现“双碳”目标下的建筑绿色低碳转型提供了重要的理论依据与实践路径。

**关 键 词：** 双碳目标；数字建筑；能源管控平台；负荷预测

## Innovation of Digital Building Energy Management and Control Platform Under the "Dual Carbon" Goals: Collaborative Control Optimization of Photovoltaic-Energy Storage-Microgrid Based on Load Forecasting Algorithm

Huo Li

Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co.,Ltd. Guangzhou, Guangdong 510630

**Abstract：** This paper focuses on the innovation of digital building energy management and control platforms, with a particular emphasis on the collaborative control optimization of photovoltaic-energy storage-microgrid systems based on load forecasting algorithms. The study proposes a method for optimizing the collaborative control of photovoltaic-energy storage-microgrid systems using load forecasting algorithms, aiming to enhance the economic efficiency, stability, and environmental friendliness of building energy systems. The research findings indicate that the innovative method and platform proposed in this paper can significantly improve the accuracy of building load forecasting, optimize the operational efficiency of photovoltaic-energy storage systems, and effectively reduce building operational costs and carbon emissions. This provides a crucial theoretical foundation and practical pathway for achieving the green and low-carbon transformation of buildings under the "Dual Carbon" goals.

**Keywords：** "Dual Carbon" goals; digital building; energy management and control platform; load forecasting

### 引言

可再生能源固有的间歇性、波动性和随机性，与建筑负荷需求的动态性、不确定性之间形成了尖锐的矛盾。这种“源－荷”双侧的不匹配，若缺乏有效的协调管控，不仅会降低能源利用效率、增加对电网的冲击，还可能造成能源浪费，甚至影响系统的安全稳定运行。为弥补现有研究的不足，本文立足于“双碳”战略目标，聚焦数字建筑能源管控平台的创新性研究，旨在构建一套从精准预测到协同优化的闭环解决方案。研究不仅有望在理论上丰富建筑能源优化控制的方法体系，更在实践中为推动建筑领域的绿色低碳转型、助力“双碳”目标的实现提供有力的技术支撑和可行的解决方案。

### 一、基于负荷预测算法的建筑用能需求分析

#### （一）建筑负荷特性分析与影响因素识别

建筑领域节能的关键，在于对公共建筑的能耗控制。公共建筑的能耗量在我国建筑能耗中占比最高。数据显示，截止2014年

我国公共建筑面积约100亿平方米，能耗高达3.26亿tce，约占总建筑能耗的40%<sup>[1]</sup>。建筑负荷是建筑运行中的能源需求总量，具有显著的时空动态性，其特性分析与影响因素识别是预测模型构建的基础。在时间维度上，负荷随日内、周内及季节周期波动，与建筑使用规律、工作日与非工作日差异及气候条件密切相关；在

空间维度上，负荷因建筑功能、结构布局、朝向及围护结构保温性能呈现差异化分布；在类型维度上，办公、住宅、商场、工业等不同功能建筑的负荷基准值、波动幅度及核心来源差异显著，与使用场景和生产排程紧密相关<sup>[9]</sup>。建筑负荷受外部环境、内部使用及建筑本身三类因素共同作用，外部环境以气象条件为主，多为不可控；内部使用涉及人员活动、用能习惯及设备运行，多为可控或半可控；建筑本身则为固定属性，包括面积、物理参数及功能布局，是负荷形成的基础。通过多维度特性与影响因素的综合分析，可为建筑负荷预测与能源优化提供科学依据。

### （二）负荷预测数据预处理与特征工程

负荷预测精度依赖数据质量与特征有效性，需通过数据预处理解决数据质量问题，借助特征工程构建有效输入特征，避免垃圾数据致模型误判、无效特征增模型复杂度<sup>[9]</sup>。数据预处理是将原始数据转化为干净数据的过程，先进行数据采集与整合，明确来源与时间粒度，确保预测粒度与数据粒度匹配；再处理缺失值，依据缺失率分别采用插值、模型预测、删除或补充数据等方式；检测并处理异常值，同时通过归一化或标准化消除特征量纲差异<sup>[4]</sup>。特征工程分两步，是提升预测精度的关键，一是特征构造，基于原始数据构建有意义的新特征，包括捕捉周期性的时间特征、增强解释力的气象衍生特征、反映历史趋势的负荷衍生特征，以及融合多因素的交叉特征；二是特征筛选，剔除冗余与弱相关特征，通过相关性分析、方差分析、模型嵌入筛选等方式，保留与负荷强相关、对模型有价值的特征，降低模型复杂度。

### （三）一种融合多源信息的建筑负荷预测模型构建

传统单一模型因难充分利用多源信息致预测精度受限，时序模型 + 机器学习模型混合架构通过分解负荷、多模型拟合再融合，实现多源信息互补，提升复杂场景预测能力<sup>[6]</sup>。其核心思路是将建筑负荷拆分为趋势项、周期项、随机项，分别用 XGBoost、LSTM 拟合，再经误差修正模块优化随机项。该模型采用三层架构，第一层为数据输入与特征分配，将预处理后的时序特征分配给 LSTM，非时序特征分配给 XGBoost，避免信息混淆；第二层为子模型训练与局部预测，LSTM 捕捉时序依赖输出周期项预测值，XGBoost 处理高维非时序特征、捕捉非线性关系输出趋势项预测值；第三层为结果融合与误差修正，通过加权融合结合两子模型输出，再用误差预测模型修正偏差，得到最终预测值<sup>[9]</sup>。模型训练与参数优化中，数据集按时间序列划分避免数据泄露；用网格搜索或贝叶斯优化调整 LSTM、XGBoost 关键参数；训练时 LSTM 采用早停策略防过拟合，XGBoost 用交叉验证提升泛化能力。

### （四）预测模型性能评估与结果分析

模型性能评估需从定量指标、定性分析与误差归因三方面展开，综合判断模型精度并指导优化<sup>[7]</sup>。定量指标包括平均绝对误差、均方根误差和平均绝对百分比误差，分别从平均偏差、大偏差敏感性和跨场景可比性角度评估模型表现。定性分析通过可视化对比预测与真实负荷曲线，判断模型是否准确捕捉周期性、峰值特征，识别趋势吻合但局部偏差的问题。误差归因则从数据、特征、模型三维度剖析原因，排查数据异常、特征构造不足或模

型结构不匹配等问题，为后续优化提供依据。整体评估需兼顾整体精度、局部偏差与趋势一致性，确保模型鲁棒性与实用性。

## 二、光伏 - 储能 - 微网协同控制优化策略

### （一）协同控制优化目标与约束条件

光伏 - 储能 - 微网协同控制的核心在于构建“目标 - 约束”体系，即在保障系统安全运行的前提下，通过平衡经济性、稳定性与环保性三大目标，满足物理、运行与政策等多重约束，实现综合效益最优<sup>[9]</sup>。经济性目标以最小化系统运行成本为核心，通过光伏优先消纳、储能错峰充放电降低购电成本，优化设备运行工况减少运维成本，并利用储能与负荷调节提高光伏消纳率，减少弃光损失。稳定性目标聚焦于维持微网电压与频率的稳定，通过储能快速响应平抑光伏出力波动，并在负荷突变或电网扰动时及时补能，确保电能质量在安全范围内。环保性目标则致力于最大化清洁能源就地消纳，降低对化石能源的依赖，减少碳排放<sup>[9]</sup>。同时协同控制必须严格遵守各类约束条件，物理约束基于设备特性，如光伏出力上限、储能充放电功率与荷电状态安全区间、线路变压器容量限制；运行约束保障系统协同与供电可靠，如满足电网调度要求、确保重要负荷不间断供电；政策约束则需符合并网技术标准、电力市场规则及能源监管规定。

### （二）基于负荷预测的“源 - 网 - 荷 - 储”协同控制架构

基于建筑负荷预测结果构建的“源 - 网 - 荷 - 储”协同控制架构，采用分层控制 + 集中决策模式，以负荷预测为基础、集中决策为核心、分布式执行为支撑，通过感知层、决策层、执行层的协同配合，实现各环节信息交互与动态联动，解决光伏出力随机性与负荷波动性的匹配问题，形成数据采集 - 策略制定 - 指令执行 - 状态反馈的闭环控制<sup>[10]</sup>。感知层作为通过传感器、智能仪表等采集关键数据；决策层作为以中央控制器为核心，结合感知层数据与负荷预测结果，通过多目标优化模型，制定光伏出力分配、储能充放电、负荷调节及微网 - 电网交互功率等策略，并具备动态修正能力，在负荷或光伏出力偏差超限时快速重算指令，保障供需平衡；执行层由光伏逆变器、储能 PCS、智能负荷控制器等设备组成，将决策指令转化为具体动作，同时将设备运行状态实时反馈至感知层，确保指令准确执行。

## 三、数字建筑能源管控平台设计与实现

### （一）平台总体架构设计

数字建筑能源管控平台采用分层解耦、协同联动的设计思路，构建感知层 - 传输层 - 平台层 - 应用层四层架构，各层级功能独立且相互衔接，满足不同规模建筑的能源管控需求。感知层作为数据源头，通过部署光伏逆变器、储能监测传感器、智能电表、负荷监测传感器及环境感知设备，实时采集“源 - 网 - 荷 - 储”全环节运行状态与环境参数，具备低功耗、高可靠性及动态调整采集频率的能力。传输层采用有线 + 无线混合方式，将感知层数据安全稳定传输至平台层，支持数据预处理、格式转换



与加密传输，确保数据实时性与安全性。平台层采用云-边协同架构，边缘节点实现本地实时处理与快速响应，云端负责海量数据存储、大数据分析 with 多建筑协同优化，内置负荷预测、能源调度及故障诊断等核心算法，为上层提供决策支持。应用层面向不同用户角色，提供 Web 端与移动端结合的可视化功能，支持大屏监控、报表分析、告警推送及个性化模块配置，如商业综合体的能耗计量或工业园区的光储协同控制，确保平台应用贴合实际需求。

（二）平台核心功能模块实现

数字建筑能源管控平台围绕数据管理、监测监控、优化控制、运维管理和决策支持五大核心需求构建，形成完整能源管控闭环，切实解决建筑能源管理中的实际问题。数据管理模块作为平台基础，负责能源数据的全生命周期管理，通过 Modbus、BACnet 等协议自动采集能耗、设备状态及环境数据，支持手动录入运维记录与电价政策，采用多维度校验规则进行数据清洗，结合时序数据库与关系型数据库实现高效存储与共享，确保数据准确性、完整性与可用性。监测监控模块通过可视化界面实时展示建筑能源系统运行状态，以三维模型叠加能源流、关键指标及分区能耗，动态监控设备运行参数，超阈值自动告警并记录，帮助管理人员直观掌握系统运行情况。优化控制模块基于负荷预测与协同调度策略，通过粒子群算法生成最优控制方案，自动下发指令至光伏、储能、空调等设备，实时监测执行效果并动态修正偏差，实现能源系统的经济、环保、稳定运行。运维管理模块通过设备台账记录全生命周期信息，结合算法诊断潜在故障，自动生成运维任务并跟踪执行，统计分析故障率与维护成本，优化运维策略，提升设备可靠性。决策支持模块通过能耗统计、节能潜力评估、碳排放核算等功能，结合行业基准与模拟分析，自动生成节能改造方案与决策建议。

（三）平台关键技术选型与部署

数字建筑能源管控平台的稳定运行与功能实现，依赖于合理的技术选型与科学的部署方案，需综合考虑性能需求、场景特点和成本预算，确保平台具备高可靠性、可扩展性和安全性。技术选型涵盖硬件与软件两方面，硬件包括感知层的智能计量设备、传感器和执行设备，传输层的工业级交换机、无线网关等，平台层则采用时序数据库与关系型数据库组合，结合边缘计算与云端计算框架；软件方面集成开源算法库与前端可视化框架，支持负荷预测、故障诊断与实时监控。部署模式分为私有云、公有云和混合云，分别适用于高安全需求、中小规模和大型复杂场景，实施过程需经过规划、部署、测试、上线和运维全流程管理，确保平台有序上线与长期稳定运行。安全保障方面，从数据加密、权限控制、网络分区、防火墙部署到应用安全认证，构建全方位防护体系，防止数据泄露与系统攻击，保障平台整体安全可靠。

四、结束语

本文围绕“双碳”目标下建筑能源系统的智能化转型需求，聚焦于数字建筑能源管控平台的创新性研究，系统性地探讨了如何通过先进的负荷预测算法与协同控制优化策略，提升建筑光伏-储能-微网系统的运行效能。研究通过理论创新与工程实践相结合，不仅显著提升了建筑负荷预测的精度和能源系统运行的经济性与环保性，也为“双碳”目标下的建筑绿色低碳转型提供了兼具理论价值与实践意义的解决方案。未来研究可进一步探索在数据稀疏场景下的模型迁移学习能力，引入随机优化或模型预测控制等更先进的控制理论以应对系统不确定性，并将平台功能拓展至建筑群、园区乃至城市级的区域能源互联网，探索与需求响应、虚拟电厂及碳交易等新兴市场机制的融合。

参考文献

[1] 张军. 公共建筑能耗监测系统及能耗数据挖掘方法的研究 [D]. 陕西：长安大学，2017.

[2] 包胜，陈超，楼笑笑，等. 基于 BIM 的建筑能耗分析 [J]. 科技通报，2024，40(1)：49-54. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2024.01.008.

[3] 曹瑞，张晓兰. 建筑能耗影响因素及节能优化设计研究 [J]. 智能建筑与工程机械，2025，7(5)：29-31.

[4] 胡真齐，赵何超，张茂强，等. 基于 IAFSA-LSSVR 的办公建筑能耗预测模型 [J]. 制冷与空调，2025，25(7)：8-15. DOI: 10.20245/j.issn.1009-8402.2025.07.002.

[5] 蒲靖，刘婉莹，祁照鹏，等. 基于 BIM+CIM 数据集成的建筑能耗管理应用 [J]. 土木建筑工程信息技术，2025，17(1)：43-49. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2025.01.08.

[6] 陈龙，李明月. 基于 BIM 的建筑能耗模拟与优化策略研究 [J]. 佳木斯大学学报（自然科学版），2025，43(2)：146-149. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1402.2025.02.039.

[7] 要陶然，陈奕帆，祝晨阳，等. 基于 Python 的建筑能耗回归模型与可视化系统 [J]. 科技与创新，2025(13)：122-125. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2025.13.033.

[8] 黄险峰. 建筑能耗模拟策略 [J]. 广西城镇建设，2007(3)：63-65. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7045.2007.03.026.

[9] 张进，方海燕，马雪源. 基于 BIM 技术的绿色建筑能耗模拟方法设计 [J]. 石材，2025(6)：174-176.

[10] 马文韬，刘兴成. 基于 Transformer 神经网络的建筑能耗预测模型 [J]. 建筑节能（中英文），2024，52(10)：114-121. DOI: 10.3969/j.issn.2096-9422.2024.10.016.



# 中小型建筑工程项目成本控制策略研究

刘东

国正工程咨询(江苏)有限责任公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2025100035

**摘 要 :** 本文聚焦中小型建筑工程项目成本控制, 阐述其理论基础与研究进展, 分析全过程成本控制要点, 探讨影响成本控制的关键因素, 并提出相应策略及新技术应用前景。研究表明, 精准预算编制是成本控制基础, 施工过程监控需围绕人、材、机展开, 竣工核算为效益评估提供依据。人工、材料、工期是主要影响因素, 可通过优化预算、强化过程管理、建立预警机制应对。

**关 键 词 :** 中小型建筑工程项目; 成本控制; 施工过程管理

## A Study on Cost Control Strategies for Small and Medium-sized Construction Projects

Liu Dong

Guozheng Engineering Consulting (Jiangsu) Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract :** This paper focuses on cost control in small and medium-sized construction projects, outlining its theoretical foundations and research progress, analysing key points in full-process cost control, exploring critical factors influencing cost control, and proposing corresponding strategies and the application prospects of new technologies. The study indicates that precise budget preparation is the foundation of cost control, construction process monitoring should centre on labour, materials, and machinery, and final settlement provides the basis for evaluating project benefits. Labour, materials, and schedule are the primary influencing factors, which can be addressed through optimised budgeting, strengthened process management, and the establishment of early warning mechanisms.

**Keywords :** small and medium-sized construction projects; cost control; construction process management

### 引言

在建筑行业竞争日益激烈的背景下, 成本控制成为中小型建筑企业生存与发展的核心环节。现代中小型建筑企业成本管理正从传统的成本核算向全过程成本控制、从静态管理向动态监控转变。国内外研究已从单一环节管控演进至全流程动态管理, 国内侧重动态成本分析体系构建, 国外则注重技术创新应用。

### 一、相关概述

#### (一) 成本控制理论基础

成本管理是企业在营运过程中实施成本预测、成本决策、成本计划、成本控制、成本核算、成本分析和成本考核等一系列管理活动的总称。建筑企业成本管理具有明显的行业特点。现代中小型建筑企业成本管理应由注重成本核算向注重成本控制转变, 从静态成本管理向动态成本管理转变。中小型建筑企业成本管理要与企业实际相适应, 并以提高企业核心竞争力为终极目标<sup>[1]</sup>。成本控制作为企业管理的重要组成部分, 其核心在于通过科学的方法和技术手段对成本进行预测、计划、监控与分析, 从而实现资源的高效利用与经济效益的最大化。在建筑工程项目中, 常见的成本控制方法包括

目标成本法、作业成本法以及动态成本管理法等。

#### (二) 中小型建筑工程项目成本控制研究进展

国内外中小型建筑工程项目成本控制研究呈现显著发展演进特征, 经历了从单一环节管控到全过程管理、从静态分析到动态监控的转变。研究初期, 探索多集中于成本核算与预算编制等具体环节, 核心是通过精准计算工程量和套用定额, 提升预算编制准确性。随着建筑行业快速发展, 研究重心转向全过程成本控制, 强调对项目从前期策划到竣工交付的全流程成本管理。近年来, 国内学者聚焦动态成本管理在中小型建筑企业的应用, 提出构建动态成本分析体系, 实时追踪成本变动并灵活调整策略。国外研究则更注重技术创新应用, 如利用 BIM 技术开展成本预测与监控, 借助大数据和人工智能提升成本管理的智能化水平。

## 二、中小型建筑工程项目成本控制全过程分析

### （一）项目前期预算编制

精准的预算编制是中小型建筑工程项目成本控制的基础，其科学性与准确性直接影响项目经济效益。施工前的详细预算编制，可为成本控制提供重要依据，有效避免因资源浪费或计划不周导致的成本超支。同时，它通过对项目人力、物力和财力的全面评估，能预测突发状况并提前准备，增强项目抗风险能力，还为资金分配指明方向，助力提高资金使用效率与经济效益最大化<sup>[2]</sup>。预算编制涵盖收集资料、计算工程量、套用定额及审核预算等环节。收集资料需实地考察，结合图纸和技术参数明确需求；计算工程量要严格按图纸规范核算，确保数据准确；套用定额需依据市场价格和行业标准选择并调整。常用方法有单价法和实物量法，需按项目特点选用，单价法适用于工程量明确的项目，实物量法适合复杂多变工程。

### （二）施工过程成本监控

施工过程中的成本监控核心围绕材料、人工和机械成本三个关键环节展开。材料成本占比大，需严格管理采购、运输、储存及使用环节，通过限额领料制度和责任追究机制减少浪费。人工成本控制需合理安排人员、优化劳动组织并提高劳动生产率；机械成本控制要关注设备使用效率和维护成本，避免闲置或过度使用增加费用。实现成本监控需采用实时跟踪、定期核算和对比分析等方法。实时跟踪动态监控现场支出以纠正偏差；定期核算汇总阶段性数据，评估实际与预算差异并找原因；对比分析通过横向和纵向比较为后续控制提供参考<sup>[3]</sup>。施工中设计变更和环境变化易致成本变动，需建立灵活成本管理机制，及时应对不确定性，确保成本始终可控。

### （三）竣工阶段成本核算

竣工阶段的成本核算主要涵盖直接成本和间接成本两大类费用。直接成本包括与工程施工直接相关的人工费、材料费和机械费等支出；间接成本涉及管理费、运输费、临时设施费等非直接生产性费用。同时，核算需纳入税费、保险费等其他可能发生的费用，通过详细分类和统计，为项目成本控制和效益评估提供可靠数据支持。竣工阶段成本核算通常采用实际成本法，依据实际发生的费用支出核算以确保数据真实可靠，同时可结合目标成本法和作业成本法开展辅助分析。通过对比实际成本与预算成本的差异，识别成本控制薄弱环节，为未来项目提供改进方向<sup>[4]</sup>。准确的成本核算既是对项目成本控制效果的总结，也是未来改进的重要依据，还能评估项目经济效益，为企业决策层制定经营策略提供科学依据，助力企业市场竞争。

## 三、影响中小型建筑工程项目成本控制的因素

### （一）人工成本因素

中小型建筑工程项目人工成本波动受劳动力市场供求变化和 policy 调整等因素综合影响。劳动力市场方面，行业对技能型劳动力需求有强季节性，供给受人口流动、技能水平分布不均制约。经济发达地区因项目集中，劳动力需求大但供给不足，推高人工成本；经济欠发达地区虽劳动力充足，但技能水平低，增加培训和用工成本。政策调整影响显著，国家加大劳动者权益保护力

度，最低工资标准提高、社保福利完善，在提升劳动者收入的同时，直接增加企业人工成本负担，地方区域性政策也可能间接导致成本波动。人工成本波动给项目管理带来挑战，作为直接成本重要组成部分，其波动直接影响预算执行和经济效益，前期预算未考虑不确定性时超支风险突出。同时增加管理复杂性，需协调分包商和临时工利益，可能引发合同纠纷，还可能导致劳动力短缺延误工期或降低施工质量，影响整体效益，因此应对人工成本波动至关重要。

### （二）材料成本因素

建筑材料价格变化是中小型建筑工程项目成本控制的重要影响因素，其波动主要源于市场供需关系和原材料价格变动。市场供需方面，建筑行业周期性特征使材料需求波动明显；经济扩张期项目增多，钢材、水泥等主要材料需求激增致价格上涨；经济下行期需求下降则价格回落。供应链不稳定性也加剧波动，关键材料生产集中时，产能不足或运输中断会直接推高价格<sup>[5]</sup>。原材料价格变动影响显著，如铁矿石和焦炭价格波动会传导至钢材市场，影响采购成本；国际市场波动、汇率变化也会影响进口材料价格，增加控制难度。

材料价格变化给成本控制带来严峻挑战，显示增加预算编制不确定性，前期预测不准易导致实施中资金短缺或超支。之后价格上涨直接增加总成本，在材料成本占比超60%的住宅项目中，微小波动都影响经济效益。企业常通过集中采购、签订长期合同锁定价格，建立限额领料和责任追究制度提高效率，以缓解价格变化压力。

### （三）施工工期因素

施工工期延误是中小型建筑工程项目成本控制的常见风险，主要成因包括设计变更和施工组织不当。设计变更是重要诱因，项目实施中因业主需求变化、设计优化或审批延误等导致变更频繁，这不仅增加施工复杂性、需调整原有计划，还可能引发材料重购、工艺调整等连锁反应，延长项目周期。施工组织不当也常致工期延误，中小型建筑企业因资源有限、管理水平低，易出现人员调配不合理、设备利用率低、工序安排不科学等问题，导致进度缓慢；恶劣天气、地质复杂等外部因素会加剧风险<sup>[6]</sup>。工期延误对成本控制负面影响显著，管理团队人工成本、办公租赁等日常开支持续增加却无效益；大型设备租赁时间延长费用上升；还可能导致材料存放损坏或二次搬运产生额外支出，更严重的是引发违约风险面临业主索赔，因此有效避免工期延误至关重要。

## 四、中小型建筑工程项目成本控制策略

### （一）优化预算编制策略

预算编制是建筑工程项目成本控制的基石，其准确性直接影响经济效益与资源分配效率。提高预算准确性需强化资料收集，项目前期分析所在地市场价格、政策法规及类似工程历史数据，为预算提供可靠参考。同时采用先进预算软件，模拟不同施工方案成本变化以识别风险、优化资源配置；结合 BIM 技术实现工程量精准计算与动态调整，避免人为误差导致的预算偏差，使预算既贴合实际需求，又为后续成本控制奠定基础。建筑工程中，人工、材料价格波动等不确定性因素对成本控制构成挑战<sup>[7]</sup>。因此预算编制需充分考虑这些因素，设置合理预备费应对风险。可建立价格波动预测模

型，结合历史数据与市场趋势科学预测未来价格；针对政策调整、自然灾害等不可控因素，在预算中预留应急资金，确保项目遇突发情况时仍能维持正常进度与成本控制水平。

（二）加强施工过程成本管理策略

材料成本占建筑工程项目总成本比重较大，严格管理是成本控制关键。需健全采购与领用制度：采购阶段通过招标选择高性价比供应商，严把质量与价格关，避免因质量问题导致返工或额外支出；施工中推行限额领料制度，按计划与需求合理分配材料，防止浪费；建立专门材料货运部门，优化运输与存储流程，减少物流问题引发的成本上升<sup>[8]</sup>。人工成本管理需合理调配人力资源，按进度计划与任务需求安排施工人员，避免冗余或不足造成浪费；通过培训与激励机制提高劳动生产率，引入现代化施工技术提升操作熟练度，缩短工期降低成本；签订明确施工合同，明确职责与绩效指标，防止疏漏增加成本。机械成本管理要按项目需求调配设备，高峰期租赁补充，低峰期及时退租闲置设备；定期维护保养延长使用寿命，减少故障停工损失；引入智能化管理系统监控运行与能耗，优化管理效果，实现经济效益与社会效益双赢。

（三）建立成本预警机制策略

建筑信息模型（BIM）技术是基于数字化三维模型的工程管理工具，核心是集成建筑设计、施工和运营等全生命周期信息数据，实现项目可视化管理与协同作业。其基本原理是将传统二维图纸转化为多维度数字模型，既包含几何信息，又涵盖材料属性、进度安排、成本预算及维护需求等关键数据。通过该平台，各参与方可实时共享更新信息，减少沟通误差与重复工作；参数化建模让设计变更自动反映到成本分析和进度计划中，为动态管理提供支持，提升效率并为成本控制提供新方法<sup>[9]</sup>。在中小型建筑工程项目成本控制中，BIM 技术优势显著。工程量计算上，自动化算量功能减少人工误差，可快速生成准确工程量清单并结合市场价完成成本估算，为预算编制提供可靠依据。

五、新技术在成本控制中的应用前景

（一）BIM 技术在成本控制中的应用

建筑信息模型（BIM）技术是基于数字化三维模型的工程管

理工具，核心是集成建筑设计、施工和运营等全生命周期信息数据，实现项目可视化管理与协同作业。其基本原理是将传统二维图纸转化为多维度数字模型，不仅包含几何信息，还涵盖材料属性、进度安排、成本预算及维护需求等关键数据<sup>[10]</sup>。通过该平台，项目各参与方可实时共享更新信息，减少沟通误差与重复工作；参数化建模使设计变更能自动反映到成本分析和进度计划中，为动态管理提供技术支持，提升工程管理效率，为成本控制提供新方法论。BIM 技术在中小型建筑工程项目成本控制中优势显著。工程量计算上，自动化算量功能减少人工误差，可快速生成准确工程量清单并结合市场价完成成本估算，为预算编制提供可靠依据。成本预测中能模拟不同方案成本变化，提前识别风险并制定应对措施。施工中可实时跟踪成本变动，对比实际与预算数据及时纠偏，还支持多维度成本分析，提升管理精细化和科学化水平。

（二）其他新技术应用展望

在建筑工程项目成本控制领域，除 BIM 技术外，大数据、人工智能（AI）等新兴技术正逐步渗透，应用前景广阔。大数据技术通过采集分析海量历史数据，构建精准成本预测模型。它整合过往项目成本数据、市场价格波动及行业趋势，生成动态成本基准线，为当前项目预算编制和成本监控提供可靠参考。人工智能则借助机器学习算法优化成本管理流程，通过分析历史项目成本偏差模式，自动识别可能导致成本超支的关键因素并发出预警。同时，AI 结合自然语言处理技术，能从合同文件、会议记录等非结构化数据中提取成本信息，提升处理效率与准确性。

六、结束语

中小型建筑工程项目成本控制是系统性工程，其科学性与有效性直接关乎项目效益与企业竞争力。通过全过程管理，从前期精准预算、施工中人材机动态监控到竣工核算，可实现成本管控。人工波动、材料涨价、工期延误是主要影响因素，需通过优化预算、健全制度、调配资源及建立预警机制应对。BIM 技术在成本管理中优势显著，大数据、AI 为智能化提供可能。企业应引入先进技术理念，完善体系以提升抗风险能力与效益。

参考文献

[1] 陈丽香. 中小型建筑企业成本管理问题及改进措施 [J]. 现代企业, 2021, (04): 28-29.  
[2] 赖钰. 中小型建筑企业成本控制管理存在的问题及其对策 [J]. 中国经贸, 2022, (1): 82-84.  
[3] 李文岩, 刘利娜, 贾学志. 基于项目管理模式的中小企业建筑工程管理优化 [J]. 中小企业管理与科技, 2023, (17): 76-78.  
[4] 王文龙. 建筑工程项目的成本控制分析 [J]. 江西建材, 2021, (6): 268-268.  
[5] 叶海燕. 建筑工程管理中常见问题及相关管理策略研究 [J]. 地产, 2023, (21): 160-162.  
[6] 崔娟. 中小型建筑企业成本管理问题探讨与分析 [J]. 市场周刊·理论版, 2021, (12): 29-30.  
[7] 范海勇. 建筑工程管理中的成本控制 [J]. 门窗, 2024, (3): 147-149.  
[8] 李运玲. 中小建筑施工企业项目成本管理分析 [J]. 门窗, 2017, (1): 168-168.  
[9] 董慧云. 建筑成本管理的影响因素及其优化措施 [J]. 城市情报, 2023, (12): 118-120.  
[10] 宋晶晶. 建筑工程施工项目成本控制管理探究 [J]. 营销界（理论与实践）, 2019, (12): 71-71.

# 引调水工程软基箱涵沉降对工程结构影响

刘运才<sup>1</sup>, 朱卫<sup>2</sup>, 郭佳<sup>2</sup>, 张玉华<sup>3</sup>

1. 中国南水北调集团中线有限公司天津分公司, 天津 300393

2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222

3. 天津市水务规划勘测设计有限公司, 天津 300204

DOI:10.61369/ERA.2025100007

**摘 要 :** 某长距离引调水工程基于地形和水文条件, 采用浅埋箱涵的自流输水方式。自工程建成投运以来, 为保障输水系统安全稳定运行, 持续运用水准观测、三角高程测量、InSAR 卫星等多种先进手段, 对工程开展系统性、长期性的沉降监测工作。观测数据表明, 工程沿线存在两处覆盖范围广、沉降程度较为显著的区域。大范围地基沉降导致输水箱涵结构发生沉降变形, 改变了箱涵内部的水力条件, 造成箱涵内水压力明显增大。为此, 需对箱涵结构的安全性进行全面复核, 深入分析沉降对箱涵整体结构受力及变形缝密封性能、结构稳定性的影响。

**关 键 词 :** 长距离引调水; 沉降; 箱涵结构

## Analysis of Influence of Soft Foundation Box Culvert Settlement on Engineering Structures in Water Diversion Projects

Liu Yuncai<sup>1</sup>, Zhu Wei<sup>2</sup>, Guo Jia<sup>2</sup>, Zhang Yuhua<sup>3</sup>

1.Tianjin Branch of China South-to-North Water Diversion Group Middle Route Co., Ltd., Tianjin 300393

2.Bei Fang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222

3.Tianjin Water Planning Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

**Abstract :** A long-distance water diversion project adopts the gravity water delivery method with shallow-buried box culverts based on topographic and hydrological conditions. Since the project was completed and put into operation, in order to ensure the safe and stable operation of the water delivery system, systematic and long-term settlement monitoring work has been carried out on the project by continuously using various advanced means such as leveling observation, trigonometric leveling measurement, and InSAR satellite. The observation data shows that there are two areas with a wide coverage and relatively significant settlement along the project. The large-scale foundation settlement has caused the settlement deformation of the water delivery box culvert structure, changed the hydraulic conditions inside the box culvert, and resulted in a significant increase in the water pressure inside the box culvert. Therefore, it is necessary to comprehensively review the safety of the box culvert structure, and deeply analyze the impact of settlement on the overall structural stress of the box culvert, the sealing performance of the deformation joints, and the structural stability.

**Keywords :** long-distance water diversion; settlement; box culvert structure

## 引言

在长距离引调水工程中, 输水结构的安全稳定至关重要<sup>[1]</sup>。某引调水工程依地形水文条件, 采用浅埋箱涵自流输水。工程投运后, 借助持续运用水准观测、三角高程测量、InSAR 卫星技术等<sup>[2]</sup>, 持续开展沉降监测。结果显示, 沿线存在两处显著沉降区域, 致使箱涵结构变形, 内部水力条件改变、水压力增大。因此, 亟需全面复核箱涵结构安全性, 深入剖析沉降对其受力、变形缝密封及稳定性的影响。

## 一、工程概况

某长距离引调水工程起于保定徐水区西黑山村, 止于天津西青区, 全长约 155km, 途经十一个县区。工程以钢筋混凝土箱涵

为主要建筑, 调节池以上为无压输水, 以下为有压输水, 设计流量 18–50m<sup>3</sup>/s, 加大流量 28–60m<sup>3</sup>/s, 箱涵浅埋, 采用复合型遇水膨胀橡胶止水带止水。

作者简介: 刘运才 (1990.3–), 男, 汉, 天津宁河人, 本科, 工程师, 从事水利水电工程安全监测技术、引调水工程安全监测技术研究。



## 二、天津干线沉降区段基本情况

### （一）建筑物高程实测成果

2023年10月，采用水准仪按二等水准对出露建筑物顶高程进

行观测，通气孔及保水堰等较高建筑物的顶部，采用全站仪按三角高程法进行观测。通过出露建筑物实测顶高程与设计顶高程对比，计算工程现状沉降量。根据沉降幅度，将工程分成9个段落，沉降情况如表2.1-1所示。

表2.1-1 沉降情况分段表

序号	段落		区段范围	桩号	备注
1	徐水段	小幅抬升 (-0.20 ~ 0.00m) 调节池至12# 通气孔	西黑山进口闸至调节池（无压段）	XW0+000 ~ XW10+660	抬升0.1m 左右
			XW10+660 ~ XW28+000		
2	容城段	小幅沉降 (0.00 ~ 0.20m)	12# 通气孔至大清河	XW28+000 ~ XW57+075	大部分沉降0.1m 左右 其中，18# 通气孔沉降较大，为0.48m
3	高碑店段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	大清河至29# 通气孔	XW57+075 ~ XW62+000	沉降0.25m 左右 其中，27# 通气孔沉降较小，为0.04m
4	雄县段	大沉降 ( > 0.40m )	30# 通气孔至郑村排干5# 分水口	XW62+000 ~ XW78+949	其中，33#、34# 通气孔沉降1.0m 左右
5	固安霸州段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	郑村排干至牯牛河41# 通气孔	XW78+949 ~ XW92+000	其中，40# 通气孔沉降较大，为0.64m
6	霸州市段	小幅沉降 (0.00 ~ 0.20m)	42# 通气孔至44# 通气孔	XW92+000 ~ XW98+000	沉降0.15m 左右
7	永清霸州段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	44# 保水堰至王泊排干倒虹吸	XW98+000 ~ XW108+772.5	其中，7# 保水堰沉降较小，为0.18m
8	霸州市安次天津子牙河以北段	大沉降 ( > 0.40m )	王泊排干倒虹吸至子牙河分流井	XW108+772.5 ~ XW148+731	其中，57# 通气孔沉降1.04m，为最大沉降值
9	天津子牙河以南段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	子牙河分流井至外环河口闸	XW148+731 ~ XW155+232	沉降0.35m 左右 其中，出口闸沉降较小，为0.12m

### （二）沿线地面沉降实测成果

2016-2022年卫星 InSAR 监测地面沉降成果显示，西侧沉降区域最大沉降速率为98mm/ 年，东侧沉降区域最大沉降速率为90mm/ 年，其他段落基本平稳。根据卫星 InSAR 选取的5个典型点位2016年至2022年监测成果显示见图2.2-1。

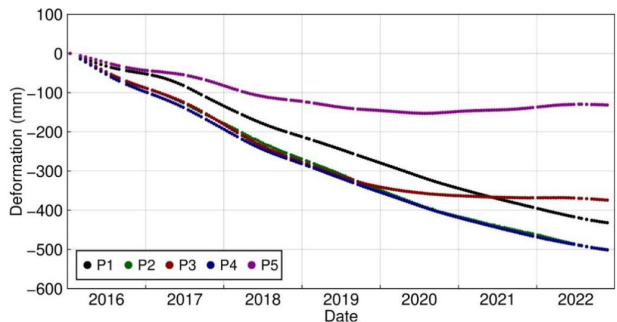


图2.2-1 2016-2022年卫星 InSAR 监测典型点位的沉降过程线

P1位于西侧沉降区域内36号通气孔附近；P2位于西侧沉降区域内33号通气孔附近；P3位于东侧沉降区域内62号通气孔附近；P4位于东侧沉降区域内；P5位于东侧沉降区域附近。

由图可知，天津干线两处区域最大沉降量达500mm，沉降速率有减缓趋势，典型点位具体分析如下：（1）P1和P2在西侧沉降漏斗区，2016 - 2020年快速沉降，2021 - 2022年速率减缓，与区域趋势一致。（2）P3在东侧沉降漏斗区，2016 - 2019年沉降速率减缓，2020 - 2022年稳定；P4与P2趋势同；P5近东侧漏斗区，2016 - 2020年沉降，2021 - 2022年抬升。

### （三）工程沉降综合结论

实测建筑物顶高程沉降和地面沉降成果表明，两者沉降趋势基本一致，部分建筑物沉降量大于原地地面沉降量。工程存在两处大沉降（含中幅沉降）区段：一是高碑店至霸州城区段（桩号XW57+705 ~ XW92+000），雄固霸沟33# 通气孔（XW70+000）沉降1.00m、34# 通气孔（XW71+950）沉降0.97m；二是霸州以东至天津段（桩号XW100+000 ~ XW155+232），57# 通气孔（XW126+000）沉降1.04m。此外，容城段18# 通气孔沉降0.48m，存在个别建筑物沉降较大情况。

## 三、沉降对工程结构的影响研究

针对大范围沉降导致输水箱涵沉降、内水压力增大的情况，分析沉降对箱涵结构及变形缝的影响，复核结构安全性<sup>[3]</sup>。

### （一）原设计条件及箱涵配筋情况

工程水工混凝土结构初设依SDJ 20-78规范设计，后按SL 191-2008规范复核，采用结构力学法，经多因素考量选定36种典型断面计算，明确有压段16个断面需复核及配筋情况，确定不同区段箱涵最大裂缝宽度限值<sup>[4]</sup>。根据设计成果、资料及规范复核，确定牯牛河倒虹吸以上段箱涵最大裂缝宽度限值0.25mm，以下段0.20mm。

### （二）结构复核断面选取

根据表3.2-1统计，工程有压段16个断面需结构复核，其中

仅正常运行工况超设计值的有7个，正常运行与单孔检修工况均超 的有7个，三种工况均超的有2个。

表3.2-1 箱涵内水压力变化对比分析表

序号	断面 代号	计算埋 深 (m)	原设计内水压力 (m)			运行内水压力 (m)			内水压力超出设计值 (m)		
			正常运 行工况	检修 工况	事故 工况	正常运 行工况	检修 工况	事故 工况	正常运 行工况	检修 工况	事故 工况
1	A	2.6	10	7	11	10.32	6.62	11.02	0.32	-0.38	0.02
2	B	2.2	10	6	11	10.74	7.04	10.82	0.74	1.04	-0.18
3	C	2.45	10	6	10	10.14	6.41	9.32	0.14	0.41	-0.68
4	E1	2	10	7	11	10.33	6.63	10.58	0.33	-0.37	-0.42
5	E3	2	9	7	10	9.99	6.05	9.55	0.99	-0.95	-0.45
6	E33	2	9	7	10	9.23	7.28	9.42	0.23	0.28	-0.58
7	G	2	12	8	13	12.44	7.49	13.02	0.44	-0.51	0.02
8	J	3	12	8	13	12.38	7.45	12.94	0.38	-0.55	-0.06
9	J1	3	11	6	12	11.27	6.09	11.58	0.27	0.09	-0.42
10	I33	3	9	7	10	9.98	7.97	9.66	0.98	0.97	-0.34
11	F1	3	8	5	9	8.42	4.88	8.55	0.42	-0.12	-0.45
12	H	3	7	7	8	8.46	7.27	8.22	1.46	0.27	0.22
13	H2	3	7	7	7	7.55	7.47	7.25	0.55	0.47	0.25
14	K3	4	5	5	6	5.84	5.83	5.69	0.84	0.83	-0.31
15	L4	6	8	6	9	9.04	7.05	8.81	1.04	1.05	-0.19
16	L5	7	8	7	9	9.37	7.38	9.14	1.37	0.38	0.14

（三）箱涵结构复核计算

（1）计算模型

将箱涵视为弹性地基上的闭合框架，输水箱涵结构计算采用结构力学方法<sup>[9]</sup>，地基反力按直线分布进行简化。

（2）计算工况及荷载组合

根据规范 SL 191-2008中的有关规定<sup>[9]</sup>，结合工程实际运行

情况，经综合考虑，确定箱涵的计算工况及荷载组合。本次复核中，7个仅正常运行工况超原设计的断面，只复核该工况，为单工况复核断面见表3.3-1；7个正常运行与单孔检修工况均超设计值的断面，复核这两种工况，为双工况复核断面见表3.3-2；2个三种工况均超设计值的断面，复核全部三种工况，为三工况复核断面见表3.3-3。

表3.3-1 单工况复核断面计算工况及荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷 载							备 注
		结构自重	土压力	外水压力	内水压力	浮托力	活荷载	地震荷载	
基本组合	1、正常运行	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用

表3.3-2 双工况复核断面计算工况及荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷 载							备 注
		结构自重	土压力	外水压力	内水压力	浮托力	活荷载	地震荷载	
基本组合	1、正常运行	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用
	2、单孔检修	√	√	√	√	√	√	×	一边孔检修，其余两孔输水

表3.3-3 三工况复核断面计算工况及荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷 载							备 注
		结构自重	土压力	外水压力	内水压力	浮托力	活荷载	地震荷载	
基本组合	1、正常运行	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用
	2、单孔检修	√	√	√	√	√	√	×	一边孔检修，其余两孔输水
偶然组合	3、事故工况	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用

（3）内力计算

依据 SL191-2008，荷载效应组合设计值在承载能力极限状态下的计算，内力计算采用了《SAP84微机结构分析程序》（版本6.5）及《水工结构工具箱 SGTools》（V2.9）结构计算软件，只需复核16个断面控制工况下的内力（M，Q，N）计算结果<sup>[7]</sup>。

（四）配筋及裂缝开展宽度计算

依据 SL191-2008，钢筋混凝土箱涵需进行强度计算与裂缝宽度验算<sup>[8]</sup>。箱涵各荷载组合工况按承载能力极限状态计算配筋面积，单工况下中墙轴上受力、弯矩可略则不配筋。按正常使用极限状态，以荷载标准值验算裂缝宽度，采用实际配筋。复核显

示, 16个断面承载力和裂缝基本达标。

#### 四、沉降对变形缝的影响研究

地下箱涵管节长15m, 变形缝设橡胶止水带, 原设计允许沉降差30mm。因区域沉降连续, 无突变因素, 变形缝不考虑错台。沉降使箱涵纵轴线变曲、拉长, 变形缝变宽。从安全考虑, 以最大沉降梯度假设, 分析沉降偏转对变形缝的影响。

按区域最大沉降梯度  $-1.21\text{mm/m}$  计算, 箱涵两端相对沉降18.2mm, 变形缝上宽下窄。15m 单节箱涵伸长 0.011mm, 止水带变形率 0.04%, 结构缝长度增加及伸长率可忽略。

#### 五、结论与建议

针对沉降对结构影响分析, 主要结论如下: XW30+000以上位于徐水小幅抬升段, 对结构受力基本无影响。部分受沉降

影响断面箱涵受力超出原设计, 经承载能力极限状态复核<sup>[9]</sup>, 如XW35+811 ~ XW36+303等区间, 虽实际配筋略小于计算值, 但仍满足承载要求<sup>[10]</sup>, 其余断面实际配筋均大于计算值, 沉降区整体承载能力达标, 目前无需工程措施。按正常使用极限状态复核, 现状配筋均满足要求, 也无需工程措施。不过, 部分断面配筋和裂缝宽度接近限值, 表明箱涵承受沉降影响空间有限。建议: 箱涵受力与内水压力关联大, 应论证通过运行调度降低末端水位, 以抵消沉降引发的内水压力增加的可行性。

#### 参考文献

- [1] 余宣兴, 陆日壮, 辛守哲. 沉降监测在保障南水北调工程安全方面的作用 [J]. 水利水电工程设计, 2007, 26(1): 42-50.
- [2] 石菊, 葛坤, 褚峰. 浅谈混凝土输水箱涵施工——以南水北调中线一期工程天津干线为例 [J]. 中国水利, 2019, (4): 37-40.
- [3] 周景峰, 刘扬, 黄运玉. 南水北调中线天津干线工程输水箱涵结构计算分析 [J]. 海河水利, 2009, (5): 87-89.
- [4] 何利华, 李善岩, 刘卫其, 董立红. 南水北调中线天津干线工程充水期安全监测分析 [J]. 海河水利, 2019, (2): 37-39.
- [5] 董丹丹, 李成, 毕京龙, 赵海超. 南水北调天津干线有压输水箱涵实际糙率研究 [J]. 水利水电工程设计, 2022, 41(3): 14-17.
- [6] 王宁, 王伟, 湛东海. 典型水利工程配套智慧管理系统设计研究 [J]. 水电站机电技术, 2022, 45(12): 28-31.
- [7] 路红敏, 高恒岭. 现代水利工程施工质量监测中的图像识别与模式识别技术研究 [C]// 中国水利学会. 2023中国水利学术大会论文集 (第六分册). 聊城黄河河务局东阿黄河河务局; 东阿县职业教育中心学校; , 2023: 111-113.
- [8] 邸国辉, 李冬平, 陈翠婵. 水利监测总体解决方案的研究 [J]. 地理空间信息, 2015(2): 4-5, 8.
- [9] 李琳琳. 长距离引调水工程的质量管理对策 [C]// 辽宁省水利学会2023学术年会论文集. 2023: 98-101.
- [10] 秦朋, 谭勇, 牛广利, 等. 某长距离引调水工程安全预警管理体系 [J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(11): 1-4, 11.

# 水利工程施工管理中水闸安全运行与检查养护

江莹莹

寿县淮河河道管理所, 安徽 淮南 232200

DOI:10.61369/ERA.2025100027

**摘 要 :** 水闸作为水利工程中的关键控制性建筑物, 在防洪排涝、水资源调配、灌溉供水等方面发挥着不可替代的作用。其安全运行直接关系到人民生命财产安全和社会经济的稳定发展。本文结合我国水利工程施工管理相关法规与实践, 分析当前水闸安全运行与检查养护中存在的问题, 从安全运行管理机制、检查养护体系构建、技术应用与创新等维度, 探讨提升水闸安全运行水平的具体策略, 旨在为水闸的精细化管理提供参考, 保障水闸工程的长期稳定运行。

**关 键 词 :** 水利工程; 水闸; 安全运行; 检查养护

## Safety Operation and Inspection Maintenance of Water Gates in Water Conservancy Engineering Management

Jiang Yingying

Shouxian Huaihe River Waterway Management Office, Huainan, Anhui 232200

**Abstract :** As a key control structure in water conservancy projects, sluice gates play an irreplaceable role in flood control and drainage, water resource allocation, irrigation, and water supply. Their safe operation is directly related to the safety of people's lives and property, as well as the stable development of the social economy. This paper analyzes the existing problems in the safe operation, inspection, and maintenance of sluice gates in China by integrating relevant regulations and practices in water conservancy project management. It explores specific strategies to enhance the safe operation level of sluice gates from the perspectives of safe operation management mechanisms, the establishment of inspection and maintenance systems, and technological application and innovation. The aim is to provide references for the refined management of sluice gates and ensure their long-term stable operation.

**Keywords :** water conservancy project; sluice gate; safe operation; inspection and maintenance

水闸是可调节水位且控制流量的一类水利设施, 大量存在于江河湖海、水库渠道等各类水利项目里, 在防汛抗旱相关工作期间, 水闸凭借科学调度运作, 可在汛期实现泄洪与排涝, 弱化洪水的威胁性, 又能在干旱时期开展蓄水引水相关事务, 实现生产生活用水供应。《中华人民共和国水法》《水闸安全管理办法》等相关法规明确作出规定要求, 狠抓水闸安全管理环节, 按规定周期开展检查养护, 维持其正常开展, 跟着水闸运行年限的递增, 鉴于自然老化、人为干扰和极端气候冲击, 水闸的安全隐患渐渐显露端倪, 深度探究水闸安全运行及检查养护的有效办法, 对提高水利工程施工管理效能、维护水安全意义重大。

### 一、水闸安全运行的重要性与影响因素

#### (一) 水闸安全运行的重要性

水闸安全运作有着多层面的关键意义, 从减轻洪涝灾害角度而言, 身为防洪体系里的关键构成, 汛期开启闸门实施泄洪, 可有力削减洪峰流量, 进而降低河道水位, 保障沿岸城镇、农田及基础设施安稳, 好比长江中下游区域的节制闸在梅雨时候做科学部署, 可引导洪水流入湖泊蓄滞洪区, 弱化干流防洪的压力态势; 从水资源调控角度看, 可实现对水资源时空分布的调节, 枯水季拦蓄地表水, 维持农业灌溉、工业生产与城乡生活的用水保

障度, 恰似我国北方地区引黄灌区的那些水闸, 依靠精准把控引水流量, 实现数百万亩农田灌溉用水需求; 在生态保育这一维度, 实施合理调度可促进河道生态环境优化, 维持河道底层水流, 保障水生生物栖息空间范围, 如同定期开闸进行放水, 给河道补充生态用水, 缓和水体富营养化局势, 助力水生态系统维持平衡格局。

#### (二) 影响水闸安全运行的主要因素

多种因素可影响到水闸的安全有效运行, 在自然因素这一范畴, 历经长期水流冲刷、泥沙堆积及水位变动等作用, 水闸的闸室、闸墩、闸门等结构, 容易出现诸如混凝土碳化、钢筋锈蚀、



地基渗漏等状况，好比沿海地域水闸受海水侵害，混凝土强度减退，闸门金属部件锈蚀速率加速上升；说到人为因素这一块，管理维护未到位、操作未依规范、超标准运转情形等会直接影响安全状态，少数管理人员专业培训缺失，未严格按照规程对闸门进行操作，也许会使启闭失灵，超设计水位进行运行，会增强结构的荷载，引发安全方面的隐患；工程老化难题凸显，20世纪50—70年代，我国落成了数量庞大的水闸，因当时技术条件的约束，工程所采用的标准偏低，运行数十年之久，普遍显现出设施老化、功能退化态势，按照水利部所做统计，就统计而言，全国约40%水闸存在不同程度的安全相关隐患，小型水闸老化现象的突出性更为明显；异常天气状况带来的挑战十分严峻，极端暴雨、台风、高温干旱等现象频繁登场，强降雨引发水位快速上涨，让水闸承受的冲击力变强，由台风引发的风暴潮或许会超出设计标准数值，引发闸门的变形、堤岸的溃决<sup>[1]</sup>。

## 二、当前水闸安全运行与检查养护中存在的问题

### （一）管理机制不健全，责任落实缺位

现阶段水闸安全运行与检查养护管理机制存在缺陷，管理主体界定处于不明状态，有部分水闸存在“多头操控管理”或“管理缺位”情形，水利、农业、交通等部门职责界限模糊交叉，导致管理责任落实陷入困境，以跨行政区水闸为例，常因管理权限存在争议，呈现养护资金未落实、日常巡查缺失现象；制度建设的步伐滞后，安全管理规章存在缺陷，没有针对实际情况的操作细则与应急策略，有部分水闸未制订闸门启闭的调度安排，应急处置流程呈现模糊态势，面临突发险情难以即刻响应；考核机制匮乏，地方政府绩效考核体系没有把水闸管理纳入进去，管理人员工作积极性欠佳，对安全运行重视远未达标，致使检查养护工作仅具形式。

### （二）检查养护体系不完善，技术水平偏低

检查养护体系面临诸多难题，检查手段具有单一性，不少水闸依旧采取传统人工巡视途径，频次稀少、覆盖范围狭小，发现隐蔽性病害存在障碍，诸如闸门水下部分的腐蚀现象、闸基渗漏状况难以凭肉眼及时发觉，易造成安全隐患的累积；养护经费匮乏，大多依靠财政给予款项，基层水利部门面临较大资金亏空，难以承担定期做检测、更新设备和实施大修改造的费用，部分小型水闸因资金不充裕，仅在明显故障浮现时开展临时维补，未开展预防性的养护活动；技术手段陈旧化，先进技术支撑这方面存在欠缺，未大范围应用无人机巡检、水下机器人探测、无损检测等相关技术，针对混凝土强度检测，还是采用钻芯取样方式，造成结构的二次毁坏，对于闸门启闭设备状态监测采用人工记录方式，数据精确状况与时效程度差。

### （三）人员素质参差不齐，专业能力不足

人员层面显现明显欠缺，专业人才数量极为有限，水闸管理人员中兼职或转岗人员占比较大，没有水利工程、机械电气等专业范畴背景，对水闸结构原理与运行机制领悟不透彻，在复杂病害判断上存在短板，如有些管理人员不能对闸门启闭机电气控制

系统图纸作出解读，导致设备故障出现状况时无法及时查探排除；培训机制存在漏洞，未构建系统的培训体系，管理人员知识的更新未能跟上技术发展节奏，新设备、新技术应用起来后，操作培训未马上开展，造成先进设施的作用难以充分施展，就像部分水闸装配了自动化监控系统，可管理人员操作熟练程度未达标，还是依靠人工实施调度。

## 三、水闸安全运行管理策略

### （一）健全管理机制，明确责任体系

健全管理机制应多法齐施，认定管理的相关主体，依据“谁掌管谁担责”原则，划分水闸管理的责任归属主体单位，落实好行政、技术、巡查的对应责任人，落实安全责任书签订，把管理责任精准细化至岗位、切实落实到个人，以实行“闸长包干制”为例，县级水利部门领导出任大型水闸闸长，使乡镇水利站负责人成为小型水闸闸长；健全制度体系范畴，拟定《水闸安全运行管理办法》《闸门操作规程》《应急处置预案》等规章，对日常运行、检查养护、调度操作流程加以规范，为不同类型水闸（像节制闸、排涝闸、挡潮闸）量身定制差异化管理规章，提升管理靶向性；搭建考核架构，把水闸安全运行的效果纳入地方政府水利工作的考核要点，按规定周期开展督查评价，考核优劣与资金分派、评优选模挂钩，对管理规范无误、运行安全可靠的单位给予奖赏，对存在重大隐患且整改行动迟缓的单位开展问责<sup>[2]</sup>。

### （二）优化运行调度，科学管控风险

优化运行调度可借助三个方面达成，编排调度实施预案，结合水闸设计规范、流域防洪规划及用水实际需求，筹划年度运行调度预案，设定不同季节、不同水位情形下闸门的开阖规则，就如灌溉期调度，把保障灌溉用水当作首要目标，限制引水流量不超过渠道承载能力的边界，汛期优先达成防洪方面的要求，依照洪水调度预案精准执行开闸泄洪操作；采用分级管控方式，参考水闸的规模水平、重要性程度和安全情况的实际表现，实施以安全等级划分为基础的分级管控，对大型水闸和关键防洪闸采用“一闸一策”模式，建立实时监测平台以动态调整调度方针，把小型水闸的日常巡查工作做扎实，杜绝运行超出既定标准；切实增强荷载管理效能，切实限制运行荷载值，禁止在运行中超出设计水位、流量范围，若处于汛期，洪水超过设计所定标准，立刻实施应急避险的预案，安排周边人群疏散，避免水闸出现溃决现象，当闸前水位靠近警戒水位这个阶段，预先把闸门打开进行预泄，减轻洪峰冲击力。

### （三）应用智能技术，提升运行水平

采用智能技术能切实提升运行效能，创建自动化监控架构，在水闸处装设水位、流量、雨量、闸门位移等各类传感器，即刻采集运转数据，依靠物联网将数据传输至监控中心，完成远程监控进而实现智能预警，若闸门的启闭作用力超出了预先设定的阈值，系统马上报警同时暂停相关操作，防止设备因负荷过大而损坏；推动无人值守相关技术普及，针对符合条件的水闸实施无人值守方案，凭借视频监控、远程操纵、自动巡检机器人等技术替

代人工行动，就如同利用无人机有计划地巡查闸室周边环境，探寻堤岸裂隙、闸门形变等故障迹象，借助远程控制体系实现对闸门启闭的精准操控，缩减人为操作差错；创建数字孪生的仿真模型，借助 BIM 技术搭建水闸数字孪生模型，进行不同水文条件、结构损伤情形下运行状态的模拟，为调度决策给出科学依据内容，以模拟闸门局部锈蚀对结构承载能力的影响为例，提早制订维修规划，避免故障骤然降临。

#### 四、水闸检查养护体系构建

##### （一）完善检查制度，实现全覆盖

完备检查制度要实现全维度覆盖，就日常巡回检查而言，每日指派专人实施巡查，着重审视闸门启闭设备运行态势、闸室是否存在渗漏现象、堤岸有无塌陷情况、标识标牌是否完好无损等，对巡查结果记录后签字确认无误，若发现闸门有异响、水位异常等问题显现，需及时上报并立即采取应急操作；定期检查每月开展一回，安排专业技术人员对水闸结构、机电设备及安全设施展开全面检查，包含了混凝土表层碳化深度的实际状况、钢筋锈蚀程度的实际表现、闸门密封性能的实际效果、启闭机润滑油位的实际高度等，形成检查报告后归档留存；每年委托第三方机构实施专项检测，借助无损检测的技术（像回弹法去检测混凝土强度、电磁感应法查看钢筋锈蚀）对水闸结构做深入的评估，开展对如闸门、启闭机等关键设备的性能测验，判定安全系数高低；特殊检查需在暴雨、台风、地震这类灾害过后马上开展，主要针对结构损伤、设备故障、地基沉降等状况开展排查，若以台风过后而言，检查闸门是否出现形变、电机是否进水，保障水闸回归正常运作状态。

##### （二）强化养护措施，保障结构性能

增强养护手段可维护结构性能，结构养护就混凝土碳化、裂缝等问题开展，采用表面喷涂防腐涂料、压力灌注等手段修复，强化养护措施能保障结构性能，结构养护针对混凝土碳化、裂缝

等方面的问题，利用表面涂刷防腐涂料、压力灌浆等办法进行修复，对钢筋锈蚀之处进行除锈、阻锈处理，强化结构的耐久性。如对沿海挡潮闸的闸墩采用硅烷浸渍技术，增强混凝土抗渗、抗盐雾侵蚀的效能，提高结构经久性，如对沿海挡潮闸闸墩采用硅烷浸渍相关技术，增强混凝土抗盐雾侵蚀及抗渗透的能力；闸门养护需按周期对表面的泥沙与杂物加以清理，检验止水橡皮的完好与否，即刻替换老化的止水带，每年对金属构件至少开展一次除锈后涂漆工作，使防腐层完好无损，像钢制闸门这般，每两年开展一次喷砂除锈事宜，实施环氧富锌底漆与面漆的涂抹，增长服役时长；机电设备的养护，要定期对诸如启闭机、电机、变速箱等进行保养，审视线路连接、轴承的磨损状况及润滑的实际情况，适时替换老化部件，卷扬式启闭机需每月对钢丝绳磨损程度做检查，每季度开展一回润滑油替换，对液压启闭机定期开展液压油品质的检测工作，预防油液受污染引起系统故障；每年汛前启动清淤排障相关工作，开展针对闸前闸后河道的清淤事宜，驱离泥沙、废弃物等妨碍体，维持河道过流水平，如通过链斗式挖泥船清除闸前淤积的泥沙，保证闸门开启时水体畅通，杜绝因淤积问题造成水位攀高<sup>[3]</sup>。

#### 五、结束语

水闸安全运行与检查养护是水利工程管理的核心内容，直接关系到防洪安全、水资源保障和生态保护。当前，我国水闸管理仍面临管理机制不健全、检查养护技术落后、人员素质不足等问题，需通过健全责任体系、创新技术应用、加强人才培养、强化应急能力等措施，全面提升水闸管理水平。未来，随着智慧水利建设的推进，水闸管理将向智能化、精细化方向发展。通过构建数字孪生系统、推广无人值守技术、应用新型材料，可实现水闸安全运行的精准管控和全生命周期养护。同时，需持续加大资金投入，完善法律法规，形成“政府主导、社会参与、科技支撑”的水闸管理新格局，为水利工程高质量发展提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1] 卜祥禹，马建强. 论水利工程管理及养护问题 [J]. 绿色环保建材，2020(05):223+226.
- [2] 姜斌. 大都市水利工程管理问题和对策研究 [D]. 华东理工大学，2019.
- [3] 严剑卫，蔡惠飞，陆红芳，王靓，刘圣亚. 江苏省太湖地区水闸闸门漏水检测技术需求分析 [J]. 江苏水利，2018(01):55-58.

# 水利工程 BIM 技术应用与发展趋势研究

徐冉<sup>1</sup>, 于坚<sup>2</sup>, 殷海平<sup>3</sup>, 李瞻<sup>4</sup>, 王旭<sup>5</sup>

1 淮安市淮泗涵闸管理所, 江苏 淮安 223001

2 淮安市淮涟灌区管理所, 江苏 淮安 223001

3 淮安市高良涧水利工程管理站, 江苏 淮安 223001

4 淮安市洪金灌区管理所, 江苏 淮安 223001

5 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2025100039

**摘 要 :** BIM (建筑信息模型) 技术在水利工程中应用日益广泛, 成为提升工程设计、施工、运营与管理效率的重要工具。通过数字化建模和信息共享, BIM 技术能够优化水利工程设计, 提升施工精度, 降低成本, 并增强项目管理的协同性。然而, 技术应用过程中仍面临诸如高昂的技术投入、人才缺乏以及跨行业协作难题等挑战。随着智能化技术的发展, BIM 与大数据、人工智能等技术的融合将进一步推动水利工程的创新应用, 提升行业整体效益。未来, BIM 技术将在水利工程的可持续发展、跨领域协同及运营管理等方

**关 键 词 :** BIM 技术; 水利工程; 项目生命周期; 施工效率; 智能化管理

## Research on the Application and Development Trends of BIM Technology in Water Conservancy Projects

Xu Ran<sup>1</sup>, Yu Jian<sup>2</sup>, Yin Haiping<sup>3</sup>, Li Zhan<sup>4</sup>, Wang Xu<sup>5</sup>

1. Huaisi Sluice Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huailian Irrigation District Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

3. Gaoliangjian Water Conservancy Project Management Station, Huai'an, Jiangsu 223001

4. Hongjin Irrigation District Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

5. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

**Abstract :** BIM (Building Information Modeling) technology is increasingly being applied in water conservancy projects, serving as a crucial tool for enhancing the efficiency of engineering design, construction, operation, and management. Through digital modeling and information sharing, BIM technology optimizes water conservancy project design, improves construction accuracy, reduces costs, and enhances project management collaboration. However, challenges such as high technological investment, a shortage of skilled personnel, and difficulties in cross-industry collaboration persist during the application process. With the advancement of intelligent technologies, the integration of BIM with big data, artificial intelligence, and other technologies will further drive innovative applications in water conservancy projects and improve overall industry efficiency. In the future, BIM technology will demonstrate greater potential in the sustainable development, cross-sector collaboration, and operational management of water conservancy projects.

**Keywords :** BIM technology; water conservancy projects; project lifecycle; construction efficiency; intelligent management

## 引言

水利工程在保障水资源合理利用、防洪抗灾及环境保护等方面具有重要作用, 对社会经济发展至关重要。然而, 传统水利工程管理面临着设计精度、施工协调和运营管理等方面的挑战。BIM 技术作为数字化工具, 已在建筑、基础设施等领域取得显著进展, 并在水利工程中逐步应用。通过优化设计、提升施工效率和促进跨部门协作, BIM 技术有望解决现有问题, 提高工程质量与管理效率。未来, BIM 与智能化技术的融合将进一步推动水利工程的发展, 为行业带来新的创新机遇。



## 一、BIM 技术在水利工程中的应用现状

### （一）BIM 在设计阶段的应用

BIM 技术在水利工程的设计阶段能够提供可视化的三维模型，帮助设计人员更直观地理解项目的空间布局 and 各个组成部分。以水库大坝、渠道、泵站等项目为例，BIM 能够通过精确的数字模型进行设计优化，确保结构的安全性与稳定性。在水库大坝设计中，BIM 能够对大坝的坝体结构、溢洪道和基础设施等进行精确建模，及时发现设计冲突并进行调整，避免传统设计过程中可能出现的错误。对于水利渠道和泵站，BIM 技术可以对水流动向、设施布置和设备安装进行模拟与优化，从而提高设计方案的科学性与可行性<sup>[1]</sup>。此外，BIM 技术还能支持跨专业的协同设计，使得水利工程各相关方能够实时共享数据，提升设计效率和准确性，减少设计变更和不必要的返工。

### （二）BIM 在施工阶段的应用

在施工阶段，BIM 技术的应用可以显著提高施工管理的效率与精度。通过 BIM 模型，施工单位可以更好地进行施工计划与进度管理，提前识别施工过程中的潜在问题，制定详细的施工方案。例如，在水利工程的施工中，BIM 技术可以帮助施工团队提前进行虚拟建造，模拟施工过程中的每个环节，确保各项资源的协调与施工顺利进行。同时，BIM 还能施工现场提供详细的三维施工图纸，确保施工人员能够准确理解各项施工任务，减少因图纸不清晰或误解而导致的施工失误。在进度管理方面，BIM 技术能够将施工计划与实时进度相结合，通过数据实时更新进度，保证各项工作按时完成<sup>[2]</sup>。BIM 技术还可以帮助协调各类资源，如材料、设备及劳动力，确保资源的合理调配，避免浪费和等待时间，从而提高工程的施工效率，降低施工成本。

### （三）BIM 在运营与维护阶段的应用

在水利工程的运营与维护阶段，BIM 技术通过提供全面的设施管理数据，为工程的长期运行提供支持。通过集成 BIM 模型，运营管理人员可以实时获取设施的详细信息，包括结构、设备、维护历史及保养要求等。对于大型水利工程，如水库、泵站等，BIM 模型可以帮助管理人员了解设施的使用情况及状态，及时发现潜在的运营风险和维护需求，提前进行故障排查，避免重大设备故障的发生。例如，在水库的日常维护中，BIM 技术能够提供坝体结构的实时监测数据，帮助运营团队分析坝体的健康状况，及时进行检修。BIM 还能够支持生命周期管理，帮助项目管理者制定合理的维修和更新计划，延长工程设施的使用寿命。此外，结合物联网技术，BIM 与实时监测数据的结合使得水利工程的运营更加智能化，提高了管理效率和运营安全性。

## 二、BIM 技术在水利工程中的优势与挑战

### （一）提升设计质量与精度

BIM 技术通过三维可视化模型在水利工程设计中显著提高了设计精度。与传统二维图纸相比，BIM 能直观展示项目布局 and

设备位置，帮助设计人员全面理解空间关系，避免设计冲突。例如，水库大坝项目中，BIM 能够展示坝体、闸门、溢洪道等部件的相对位置，避免尺寸误差和设备冲突。BIM 技术还集成了水流量、土壤性质等关键数据，为设计提供精准依据，确保工程的可行性与安全<sup>[3]</sup>。图1展示了水库大坝、泵站、渠道等项目的三维模型，突出设施空间布局与相对位置，展现 BIM 如何提升设计质量与精度，避免设计冲突并优化方案。

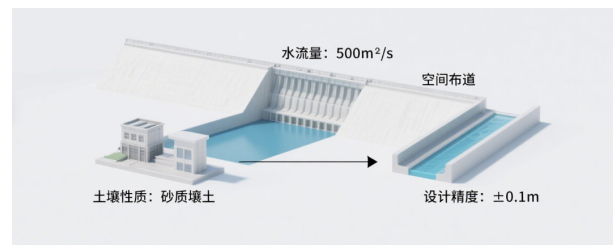


图1 BIM 技术在水利工程设计中的应用示意图

### （二）提高施工效率与减少成本

在施工过程中，BIM 技术能够帮助施工单位准确理解设计要求，减少图纸理解误差与返工。BIM 提供的三维模型为施工提供详细的施工顺序、工期安排与材料需求，优化了资源调配与施工计划管理。施工模拟可提前发现潜在的施工冲突，优化施工流程，提高施工效率。例如，在泵站建设中，BIM 技术可以模拟管道布置与设备安装，避免空间障碍和工期延误。此外，BIM 帮助精准计算材料需求，减少浪费和过度采购，从而降低工程成本，提升成本控制的精准性。

### （三）挑战与瓶颈

尽管 BIM 技术在水利工程中具有巨大的潜力，但其应用仍面临一些挑战。首先，BIM 的实施需要高昂的技术投入，尤其在水利工程这样的复杂项目中，软件采购、模型建立和系统维护都需要较大的资金支持。其次，BIM 的成功应用依赖于技术人员的专业能力，但目前水利工程领域的设计与施工人员对 BIM 技术的掌握程度不足，导致技术推广困难。此外，BIM 技术涉及多个领域的协同工作，不同部门和专业间的软件工具不兼容，导致模型共享与整合出现障碍。需要完善的标准与规范来保障信息的流通与一致性。最后，现有的 BIM 软件更多适用于建筑与基础设施项目，水利工程具有特殊需求，要求 BIM 技术在水利行业中进一步定制和深化应用<sup>[4]</sup>。

## 三、BIM 技术在水利工程中的未来发展趋势

### （一）BIM 与智能化技术的融合

随着科技的不断进步，BIM 技术与人工智能、物联网、大数据等智能化技术的融合将成为未来水利工程发展的趋势。通过将 BIM 与人工智能结合，可以实现自动化的设计优化与施工监控。例如，人工智能可以通过分析历史数据，预测项目中的潜在风险，提出解决方案并自动优化施工进度和资源分配。物联网技术



的引入，使得水利工程中的各类设施、设备与传感器能够实时与 BIM 模型连接，提供实时监控数据，帮助工程师更好地了解施工和运营状态。在大数据的支持下，BIM 能够实现对水利工程全生命周期的高效数据管理与分析，从而提升决策质量与精准度<sup>[9]</sup>。通过智能化技术融合，BIM 提升水利工程设计与施工效率，并在运营阶段实现智能监控与维护，推动水利工程向更高效、智能方向发展。

（二）BIM 技术的可持续性发展

BIM 技术在水利工程中的应用，不仅可以提升效率和降低成本，还能促进水利工程的可持续性发展。随着全球对环保和资源节约的日益重视，水利工程也必须遵循绿色发展理念。BIM 技术能够通过提供精确的资源需求预测，帮助项目团队减少材料浪费、优化资源配置。例如，在水库建设中，BIM 可以模拟不同设计方案的环境影响，帮助决策者选择最环保且节约资源的方案。通过在设计阶段进行模拟与分析，BIM 还可以帮助识别能效低下的设计部分，优化能耗和运营成本，减少对自然资源的消耗。此外，BIM 能够有效整合水利工程的数据，支持工程项目在全生命周期内的可持续管理，提升工程的运营效率和环境友好性，为推动绿色建筑与可持续发展做出贡献。

（三）BIM 在跨行业协作中的应用

BIM 技术不仅是水利工程领域的一个技术工具，它还具有促进跨学科和跨行业协作的潜力。在大型水利工程项目中，涉及多个学科和行业，包括设计、施工、环境保护、监测、运营等，传统的项目管理方式往往存在沟通不畅和信息孤岛的问题。而 BIM 技术通过建立一个统一的数字模型，能够将不同专业领域的数据和信息整合在一起，提升各方的协同工作效率。各方可以通过 BIM 平台实时共享项目数据，减少信息传递中的误差与滞后，确保项目决策的及时性与准确性<sup>[10]</sup>。在水利工程施工与运营中，BIM 提供统一工作平台，减少技术不兼容带来的冲突与误解，促进跨学科、跨行业的深度协作。

四、水利工程 BIM 技术应用案例分析

（一）国内典型水利工程项目案例

国内某典型水利工程项目——三峡水库扩建项目，是 BIM 技术在水利工程中的成功应用案例之一。在该项目中，BIM 技术被广泛应用于项目设计、施工以及后期运营阶段。设计阶段，BIM 技术通过创建三维数字模型，精确展示了坝体、闸门、水道等关键设施的空间关系，确保了设计方案的协调性，并避免了设计冲突。施工阶段，BIM 技术帮助优化了施工方案，提高了施工精度和效率。根据项目管理部门提供的数据，应用 BIM 技术后，施工周期缩短了约 15%，施工成本降低了 8%。在运营阶段，BIM 技术与智能监控系统结合，实时监控水库设施的运行状态，提供了便捷的维护管理平台，为工程提供了长效的运营支持<sup>[7]</sup>。该项目表

明，BIM 技术显著提升水利工程质量与效率，减少资源浪费。

（二）国际水利工程 BIM 应用对比

与国内应用情况相比，国际上在 BIM 技术应用方面也有许多先进的实践，尤其是在欧美等发达国家。以荷兰阿姆斯特丹水坝项目为例，该项目在设计和施工过程中广泛应用了 BIM 技术，结合传感器和物联网技术实现了实时数据监控。与国内项目不同，荷兰的 BIM 应用更加注重智能化与数据分析的结合，实时反馈施工进度和质量，进一步推动了项目的效率提升。根据项目的统计，BIM 应用让项目的总成本减少了约 10%，且施工质量得到了显著提高。相较之下，国内虽然在部分大型项目中已开始推广 BIM 技术，但在智能化应用与跨行业协作的深度上仍存在一定差距。国际项目更多地融合了大数据分析和物联网技术，推动了水利工程在智能化管理和资源调配上的创新<sup>[8]</sup>。

（三）未来发展与建议

结合当前的国内外水利工程 BIM 应用案例，未来 BIM 技术在水利工程中的发展应该向以下几个方向迈进：首先，需进一步完善 BIM 技术的标准化和规范化，尤其是在水利工程中如何更好地与其他技术（如大数据、物联网）融合，以提高工程管理的智能化水平。其次，应加强技术人员的培训，提升从业人员的 BIM 应用能力，以确保 BIM 技术能够在工程中得到充分利用。最后，跨行业协作是水利工程成功的关键，未来应加强 BIM 在不同领域间的信息共享与整合，推动跨学科、跨部门的协同合作。预计随着技术的不断进步和应用的深入，BIM 技术将成为水利工程不可或缺的核心工具。如表 1 所示

表 1：国内外水利工程 BIM 技术应用对比表

项目名称	国家 / 地区	BIM 技术应用阶段	成效描述
三峡水库扩建项目	中国	设计、施工、运营	施工周期缩短 15%，成本降低 8%
阿姆斯特丹水坝项目	荷兰	设计、施工、运营	成本降低 10%，施工质量提升，实时数据监控
长江大桥项目	中国	设计、施工	提高施工精度，减少设计冲突

通过对国内外水利工程项目对比分析，BIM 技术在设计、施工和运营中已显著提高项目效率与成本控制。国内如三峡水库扩建项目，国际如阿姆斯特丹水坝项目，强调智能化与实时数据监控。未来，BIM 技术应向智能化、数据化发展，并加强跨行业协作与标准化建设。

五、结语

BIM 技术在水利工程中的应用展现出显著的优势，不仅优化了设计、提升了施工效率，还促进了运营和维护的智能化管理。其在项目生命周期中的重要作用，尤其是在提高工程质量、降低成本和增强跨部门协作方面，已得到广泛验证。随着技术的不断

进步，BIM 技术未来将在水利工程中发挥更大潜力，推动智能化与可持续发展的实现。然而，技术应用仍面临一些挑战，如高投入、人员培训和技术整合等，未来需加大创新与技术推广力度，以更好地应对这些挑战。

参考文献

[1] 王瑶. 引洋入连水利工程征占地图档管理系统开发与应用研究 [D]. 辽宁大学, 2024.DOI: 10.27209/d.cnki.glniu.2024.001134.

[2] 刘利兵, 袁丽. BIM 技术应用于水利工程设计的实践探讨 [J]. 电气技术与经济, 2024, (05): 98-100.

[3] 李维国, 李仁俊. 数字孪生黄河水利建设中 BIM 深化应用 [C]// 河海大学, 江苏省水利学会, 浙江省水利学会, 上海市水利学会. 2024 (第十二届) 中国水利信息化技术论坛论文集. 黄河水利委员会上游水文水资源局; , 2024: 692-698.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.009414.

[4] 黄振国, 周昀, 陈欢欢, 等. 水利工程建设 BIM 应用情况及未来发展趋势研究 [J]. 四川水利, 2024, 45(05): 150-153.

[5] 黄卫华, 魏伶芸. 人工智能辅助水利工程监管的探索与应用 [J/OL]. 水利水电快报, 1-10[2025-08-27].https://link.cnki.net/urlid/42.1142.TV.20241104.1217.002.

[6] 叶煜. BIM 技术在水利工程施工管理中的应用研究 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第六届工程技术与数字化转型学术交流会论文集. 杭州中邦生态环境有限公司, 2025: 359-361.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.007275.

[7] 柴周晓. BIM 技术在水利工程规划设计中的应用研究 [J]. 水上安全, 2025, (04): 70-72.

[8] 万方舟, 王晖. BIM 技术应用于水利工程设计的实践探讨 [C]// 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. 2025 人工智能与工程管理学术交流会论文集. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 2025: 11-12.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.018608.

# 基于物联网技术的 MR/CT 设备远程监控 与故障诊断研究

戴新宇

设维施医疗科技（广州）有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025100018

**摘 要：** 阐述物联网在医疗设备监控应用，包括核心技术架构。以 MR/CT 设备为例，探讨其监控需求及数据采集传输优化，介绍相关协同架构、特征提取方法等。还涉及故障诊断、自适应诊断系统、维保周期预测等内容，最后说明系统临床验证情况及局限与未来方向。

**关 键 词：** 物联网；医疗设备监控；MR/CT

## Research on Remote Monitoring and Fault Diagnosis of MR/CT Equipment Based on IoT Technology

Dai Xinyu

Service Healthcare Technology (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** This paper elaborates on the application of the Internet of Things (IoT) in medical equipment monitoring, including its core technical architecture. Taking MR/CT equipment as an example, it discusses their monitoring requirements and optimizations for data collection and transmission, introducing related collaborative architectures and feature extraction methods. It also covers fault diagnosis, adaptive diagnostic systems, maintenance cycle prediction, and other aspects. Finally, it explains the system's clinical validation status, limitations, and future directions.

**Keywords：** Internet of Things (IoT); medical equipment monitoring; MR/CT

### 引言

随着科技的发展，物联网在医疗设备监控领域的应用日益重要。2020年发布的《关于推动医疗服务高质量发展的意见》强调了利用先进技术提升医疗服务质量和效率的重要性。物联网的核心技术架构，包括传感器网络、云计算和边缘计算等，为医疗设备监控提供了适配性原理。医学影像设备如 MR/CT 的远程监控需求具有多维度特性，涉及设备参数、环境适应性和临床服务连续性等方面。针对这些需求，研究涵盖了数据采集与传输优化、边缘计算与云平台协同架构、关键参数特征提取、多模态数据融合、自适应诊断系统构建、维保周期预测、预防性维护策略优化、应急响应机制设计以及跨平台协同维修支持等多个关键环节，旨在实现高效、准确的医疗设备监控和故障诊断，提升医疗服务质量。

### 一、物联网技术在医疗设备监控中的理论基础

#### （一）物联网核心技术架构解析

物联网在医疗设备监控中的应用基于其核心技术架构。传感器网络是关键，它能实时采集医疗设备的各种数据，如温度、压力等，通过无线通信方式将数据传输，为后续分析提供基础<sup>[1]</sup>。云计算技术提供强大的计算能力和存储资源，能够处理大量的医疗设备数据，实现数据的高效管理和分析。边缘计算则在靠近设备端进行数据处理，减少数据传输延迟，提高实时性，对于医疗设备监控中对及时性要求较高的场景尤为重要。这些技术相互配合，共同构成了物联网在医疗设备监控中的适配性原理，为实现

高效、准确的医疗设备监控提供了理论支撑。

#### （二）医学影像设备监控需求分析

医学影像设备如 MR/CT 在医疗诊断中至关重要，其远程监控需求具有多维度特性。从设备参数特征来看，MR/CT 设备涉及复杂的电磁、机械等多种参数，这些参数的实时准确监控是确保设备正常运行的基础，任何微小偏差都可能影响成像质量<sup>[2]</sup>。环境适应性方面，设备对温度、湿度、磁场等环境因素敏感，需要实时监测环境参数以保障设备性能稳定。临床服务连续性角度，MR/CT 设备的故障可能导致临床诊断中断，因此远程监控需能及时发现潜在故障，确保临床服务的连续性，减少对患者诊断治疗的影响。

## 二、MR/CT 设备监控系统的关键技术优化

### （一）多源异构数据采集与传输优化

针对 MR/CT 设备的多源异构数据采集与传输优化至关重要。对于数据采集，需研究 DICOM 数据流与设备状态参数的同步采集方法。DICOM 数据包含了丰富的医学图像信息，而设备状态参数对于设备的运行状况监测不可或缺。通过合理的同步采集机制，确保两者在时间和逻辑上的一致性，为后续的分析 and 诊断提供准确的数据基础<sup>[3]</sup>。在传输方面，设计支持医疗专网的安全传输协议栈。医疗专网对数据的安全性和稳定性要求极高，专用的协议栈能够保障数据在传输过程中的完整性和保密性，防止数据泄露和被篡改，满足医疗环境下对数据传输的严格要求。

### （二）边缘计算与云平台协同架构

为实现高效的 MR/CT 设备监控，构建了边缘计算与云平台协同架构。在该架构中，基于智能网关的实时预处理机制至关重要。智能网关可在设备端对采集的数据进行初步处理，过滤掉无用信息，减少数据传输量<sup>[4]</sup>。同时，建立分级存储与并行计算相结合的高效数据处理模型。分级存储可根据数据的重要性和使用频率进行合理安排，提高存储效率。并行计算则能加速数据处理过程，提升系统的实时性。通过这种协同架构，边缘计算在本地进行快速处理，云平台进行更复杂和全面的分析，两者优势互补，共同优化 MR/CT 设备监控系统的性能。

## 三、基于深度学习的故障诊断算法研究

### （一）多维特征融合诊断模型

#### 1. 设备运行参数特征提取

对于磁共振超导线圈温度、CT 球管电流等关键参数，设计有效的时序特征提取方法至关重要。首先分析这些参数的时间序列特性，了解其随时间变化的规律和模式<sup>[5]</sup>。通过合适的数学工具和算法，如采用小波变换对原始数据进行分解，提取不同尺度下的特征信息，这些特征能够反映设备运行状态在不同频率段的表现。同时，利用滑动窗口技术截取一定时间长度的序列数据进行局部特征提取，以捕捉参数在短时间内的动态变化。对于提取到的多种特征，进一步进行筛选和优化，去除冗余信息，保留对故障诊断有重要价值的特征，为后续的深度学习模型提供高质量的输入数据。

#### 2. 多模态数据融合算法

针对 MR/CT 设备故障诊断中的多模态数据融合问题，提出一种基于注意力机制的机械振动信号与电气参数联合分析模型。该模型首先对机械振动信号和电气参数进行特征提取，然后利用注意力机制对不同模态数据的特征进行加权融合，突出重要特征，抑制噪声和无关特征的干扰。通过这种方式，能够更有效地整合多模态数据中的信息，提高故障诊断的准确性和可靠性。实验结果表明，该模型在 MR/CT 设备故障诊断中具有良好的性能表现<sup>[6]</sup>。

### （二）自适应诊断系统构建

#### 1. 增量式学习框架设计

构建自适应诊断系统的增量式学习框架是提升故障诊断能力

的关键。弹性神经网络架构为此提供了可能。该架构能够适应新的故障类型，实现快速集成。通过不断学习新的数据特征，它可以动态调整网络结构和参数，增强对不同故障模式的识别能力。这种增量式学习机制避免了传统学习方法在面面对新故障时需要重新训练整个模型的弊端，提高了学习效率和诊断准确性。同时，它能够利用已有的知识和经验，更好地处理复杂的故障情况，为基于物联网技术的 MR/CT 设备远程监控与故障诊断提供了有力支持<sup>[7]</sup>。

#### 2. 诊断结果可视化表达

在自适应诊断系统构建方面，需综合考虑多种因素以确保系统的准确性和高效性。利用深度学习算法，对大量的故障数据进行学习和分析，使系统能够自适应地调整诊断策略<sup>[8]</sup>。对于诊断结果的可视化表达，通过直观的图表、图形等方式呈现故障信息。例如，利用折线图展示故障发生的频率随时间的变化，用柱状图对比不同部件的故障概率，用流程图清晰地呈现故障诊断的过程和路径。这样的可视化表达不仅有助于维修人员快速理解诊断结果，还能为后续的设备维护和管理提供有力的决策支持。

## 四、医疗设备智能运维管理体系

### （一）预防性维护策略优化

#### 1. 基于健康度评估的维保周期预测

基于健康度评估的维保周期预测对于医疗设备的预防性维护至关重要。通过对设备运行数据的实时监测和分析，构建健康度评估指标体系，以准确反映设备的运行状态<sup>[9]</sup>。利用先进的数据分析算法，如机器学习和深度学习方法，对历史数据和实时数据进行挖掘，识别设备健康度的变化趋势。基于健康度的评估结果，结合设备的使用频率、工作环境等因素，建立维保周期预测模型。该模型能够动态调整维保周期，避免过度维护或维护不足的情况发生，提高设备的可用性和可靠性，同时降低维护成本。

#### 2. 备件库存智能调度算法

随着医疗设备的复杂性不断增加，预防性维护策略优化和备件库存智能调度算法成为关键。对于预防性维护，应基于设备运行数据和故障历史，运用数据分析技术建立精准的维护模型，确定合理的维护周期和项目<sup>[10]</sup>。同时，考虑不同院区设备的使用频率、环境等差异，制定个性化的维护计划。在备件库存智能调度算法方面，需综合考虑设备故障率、备件消耗速度、采购周期等因素。构建智能算法模型，实时监控备件库存水平，当库存低于阈值时自动触发采购或调配指令，确保在设备故障时能及时获取所需备件，提高设备的可用性和运维效率。

### （二）应急响应机制设计

#### 1. 多级报警响应体系构建

医疗设备智能运维管理体系中的应急响应机制设计至关重要，其中多级报警响应体系构建是关键部分。需制定基于故障严重程度等级的分级响应流程与处置规范。对于不同级别的故障报警，应设定相应的响应时间和处理措施。轻微故障可触发一级报警，通知相关技术人员在一定时间内进行检查和处理；较严重故障触



发二级报警，要求技术人员立即响应并采取初步措施，同时准备进一步的维修方案；严重故障则触发三级报警，需迅速组织专家团队进行会诊和抢修，以确保医疗设备能尽快恢复正常运行，保障医疗工作的顺利开展。

2. 跨平台协同维修支持

为实现跨平台协同维修支持，开发 AR 远程协作系统与设备原厂技术支持对接机制至关重要。AR 远程协作系统可利用增强现实技术，使现场维修人员与远程专家实时共享设备故障信息及维修环境。通过设备上的传感器及物联网连接，将设备运行数据和故障代码等传输给远程专家，专家借助 AR 系统直观了解设备状况，给予精准维修指导。同时，建立与原厂技术支持的对接机制，确保在复杂故障或需要特殊技术支持时，能迅速获取原厂的技术资源和专业知识。这不仅提高了维修效率，降低了维修成本，还保障了医疗设备的正常运行，减少对医疗服务的影响。

（三）全生命周期管理平台

1. 设备状态大数据分析模块

在医疗设备智能运维管理体系的全生命周期管理平台中，设备状态大数据分析模块至关重要。通过收集医疗设备运行过程中的大量数据，包括设备的各项参数、运行时间、故障记录等。利用先进的数据分析算法，可以对设备的状态进行实时监测和评估。例如，分析设备的性能变化趋势，预测可能出现的故障，提前进行维护。同时，还能结合能耗数据，对设备的能耗成本进行分析，为医院优化设备使用策略提供依据。通过对全院设备运行效率和能耗成本的多维度评估，帮助医院合理配置资源，提高

设备的整体使用效益，降低运营成本，保障医疗服务的高质量提供。

2. 管理决策支持系统

管理决策支持系统在医疗设备智能运维管理体系的全生命周期管理平台中至关重要。它基于大量设备运行数据，通过数据分析和挖掘技术，为管理者提供决策依据。例如，系统可分析设备的故障率、维修频率和使用时长等数据，预测设备可能出现的故障，提前安排维护计划，降低设备停机时间。同时，该系统还能评估不同维修方案的成本和效益，辅助管理者选择最优方案。此外，它可以根据设备的性能变化趋势，为设备的更新改造提供决策支持，如确定合理的更新时间 and 改造方向，确保医疗设备始终处于良好的运行状态，提高医疗服务的质量和效率。

五、总结

本研究构建的物联网监控系统在三甲医院临床验证中取得了一定成果，设备故障识别准确率达92.7%，平均响应时间大幅缩短。然而，该系统也存在一些问题，如医疗数据隐私保护机制需强化，异构设备接入标准未统一。针对这些局限，未来研究方向明确。一方面，探索联邦学习框架在分布式场景的应用，有望提升系统性能与数据处理能力；另一方面，积极参与制定医疗物联网国际标准，促进系统的规范化与兼容性，推动基于物联网技术的 MR/CT 设备远程监控与故障诊断系统不断完善和发展。

参考文献

[1] 朱可龙. 基于物联网的轧机远程故障诊断方法的研究 [D]. 华北理工大学, 2022.  
[2] 王宁宁. 基于物联网的鲍鱼菇大棚远程环境监控与预测系统 [D]. 华中师范大学, 2023.  
[3] 冯相旭. 基于物联网的矿井通风机监控与故障诊断系统研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2021.  
[4] 刘梦. 基于物联网的电动汽车电池管理系统的远程监控 [D]. 华北理工大学, 2021.  
[5] 金达凤. 基于物联网的钨矿破碎设备润滑监控系统 [D]. 江西理工大学, 2021.  
[6] 周章谦. 基于物联网的机电设备远程监控与故障诊断研究 [J]. 模型世界, 2023.  
[7] 孟范鹏, 李浩, 李晨, 乔绪龙, 王坤田. 基于物联网的设备远程监控系统研究 [J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(1): 39-41.  
[8] 伍宏鹏, 张顺琦, 应申舜, 等. 基于物联网机床设备远程监控系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2021, 034(002): 116-117, 120.  
[9] 周永光, 熊理想. 基于物联网的临时电源设备远程监控系统设计 [J]. 电工技术, 2023(9): 188-190.  
[10] 谢维军, 张家铭, 张鞍豪. 基于物联网的场站设备智能监控技术研究 [J]. 工程与建设, 2021(005): 035.

# 化工企业“工业互联网+安全生产”平台建设 与应用管理实践

周洪武, 程业宝

湖北十堰 442700

DOI:10.61369/ERA.2025100022

**摘 要 :** 围绕化工企业“工业互联网+安全生产”技术展开。通过科学部署温湿度、压力等多类型传感器,实现危险化学品生产、存储等环节的实时监测;运用大数据、人工智能技术进行多源数据采集分析,挖掘潜在风险。开发先进安全控制算法,实现智能预警与自动调控;构建风险评估指标体系,完成风险分级管控,全方位保障化工企业安全生产。

**关 键 词 :** 化工企业;工业互联网;安全生产

## Construction and Application Management Practice of the "Industrial Internet + Work Safety" Platform in Chemical Enterprises

Zhou Hongwu, Cheng Yebao

Shiyan, Hubei 442700

**Abstract :** It focuses on the "industrial Internet + Work Safety" technology for chemical enterprises. By scientifically deploying multiple types of sensors such as temperature, humidity and pressure sensors, real-time monitoring of the production and storage of hazardous chemicals can be achieved. Utilize big data and artificial intelligence technologies to collect and analyze multi-source data and explore potential risks. Develop advanced security control algorithms to achieve intelligent early warning and automatic regulation and control; Establish a risk assessment index system, complete risk classification and control, and comprehensively ensure the safe production of chemical enterprises.

**Keywords :** chemical enterprises; industrial internet; safe production

### 引言

随着化工行业的发展,安全生产至关重要。2021年发布的《“工业互联网+安全生产”行动计划(2021-2023年)》强调了利用工业互联网提升安全生产水平的重要性。化工企业中危险化学品的管理涉及多个环节,从实时监测到风险分级管控,从隐患排查治理到应急处置等。基于工业互联网,通过传感器网络部署、多源数据采集技术、融合机器视觉与工艺参数联锁的安全控制算法开发等多种手段,可实现对化工企业生产过程的全面监控与管理,提升安全生产的效率和准确性,保障化工企业的稳定运行。广东腾龙化工科技有限公司作为一级重大危险源,通过建设安全风险智能化管控平台,实现了安全生产信息的电子化管理,打破了信息孤岛,提升了安全监督及异常决策的科学性和效率。

### 一、危险化学品安全监测技术体系

#### (一) 危险化学品实时监测技术

化工企业中危险化学品的实时监测至关重要。基于工业互联网,传感器网络的合理部署是基础。通过在危险化学品储存、生产等关键区域科学放置各类传感器,如气体传感器、温度传感器等,可实时获取相关数据<sup>[1]</sup>。多源数据采集技术则进一步确保数据的全面性和准确性。它不仅涵盖传感器采集的数据,还包括生产流程中的相关参数、操作人员的行为记录等。广东腾龙化工科技有限公司通过人员定位系统,采用GPS/北斗+蓝牙+4G/5G的

融合定位方案,在保证精度的同时降低整体建设成本50%,实现了人员实时定位、轨迹追踪、电子围栏、人员聚集警报管理等功能,有效防范了人员误闯入作业区域的风险。

#### (二) 危险作业智能控制技术

融合机器视觉与工艺参数联锁的安全控制算法开发是危险作业智能控制技术的关键。机器视觉技术能够实时监测危险化学品作业现场的图像信息,准确识别操作人员的行为、设备状态以及环境情况等关键要素<sup>[2]</sup>。广东腾龙化工科技有限公司的特殊作业许可管理系统与人员定位、视频监控联动,实现了作业全流程信息化管理。2024年较2023年,特殊作业开票效率提高了262.5%,

节省签票审批时间共638小时，违章代签 / 未到现场签批数量由2023年的23件降至0件，错开重开电子票由2023年28件降至0件。

## 二、双重预防机制数字化建设

### （一）风险分级管控数字化

在风险分级管控数字化方面，基于知识图谱的危险源辨识与风险评估指标体系构建是关键<sup>[3]</sup>。广东腾龙化工科技有限公司通过数字化双重预防管理系统，实现了风险分级动态管控、隐患排查治理闭环管理等功能。系统上线以来，共采集报警记录2230条，通过时序和因果分析算法模型，报警数量降至1183个，整体降低46.95%。中控室人均处理效率从50次 / 班提升至90次 / 班（提升80%），值班人员从6人 / 班减少至4人 / 班（减少33%）。

### （二）隐患排查治理智能化

化工企业可利用工业互联网技术构建隐患数据库<sup>[4]</sup>。广东腾龙化工科技有限公司的安全风险智能化管控平台实现了隐患排查治理的全员参与化。通过系统将各级管控的风险隐患排查任务自动下发到个人，通过移动终端实现排查，真正做到了全员参与。系统记录的巡检数据可作为考核巡检人员工作绩效的依据，激励员工提高工作质量。

## 三、安全生产平台架构设计

### （一）平台系统架构设计

#### 1. 边缘计算层架构

边缘计算层在化工企业“工业互联网 + 安全生产”平台中具有关键作用。它涉及分布式数据采集终端与边缘计算节点的合理部署<sup>[5]</sup>。广东腾龙化工科技有限公司的设备完整性与预测性维修模块基于数字孪生对聚合工艺装置精细化建模，实时接入工艺生产参数，对生产过程进行复刻，实时掌握风险。同时，基于AI算法模型对设备健康度进行评估，实现预测性维修。

#### 2. 平台服务层构建

在化工企业“工业互联网 + 安全生产”平台的服务层构建中，需充分考虑微服务架构下安全预警与应急指挥功能模块<sup>[6]</sup>。安全预警模块可通过实时数据采集与分析，对设备运行状态、工艺参数等进行监测，提前识别潜在风险并发出预警；应急指挥模块则需整合多方资源，构建高效协同的指挥体系，确保在突发事件发生时能快速响应、科学决策。以江苏某大型石化企业为例，其部署的智能安全预警系统通过5G+工业互联网技术，实时采集反应釜温度、压力等3000余个关键参数，结合AI算法实现毫秒级异常检测，成功将事故预警时间从原来的15分钟缩短至30秒内。在应急指挥方面，该系统联动DCS控制系统、消防设施和应急预案库，2023年成功处置7起重大险情，平均应急响应时间较传统模式减少68%，有效避免了因人为误判导致的次生事故。

### （二）核心功能模块开发

#### 1. 动火作业智能管控模块

动火作业智能管控模块是化工企业“工业互联网 + 安全生产”

平台的重要组成部分<sup>[7]</sup>。该模块深度融合物联网、大数据与人工智能技术，实现动火作业全流程智能化管理。以广东腾龙化工科技有限公司为例，其特殊作业许可管理系统与人员定位系统、AI视频智能分析紧密联动。在动火作业申请阶段，系统自动核查作业环境风险；作业过程中，人员定位系统实时追踪作业人员动态，AI视频智能分析通过摄像头捕捉现场画面，对违规操作、安全隐患等进行智能识别。安全管理人员借助平台，可实时跟进现场状况，一旦发现异常，能迅速采取措施，如远程叫停作业、下达整改指令等，有效保障作业安全，降低事故发生概率。

#### 2. 聚合工艺安全优化模块

聚合工艺安全优化模块涉及反应过程参数优化与失控预警联锁控制技术<sup>[8]</sup>。在化工聚合反应中，温度、压力、物料配比等参数的精准控制至关重要。广东腾龙化工科技有限公司通过自动化过程控制优化，对聚合反应的各项参数进行实时监测与动态调整，显著提高了自控率。同时，运用PID在线离线整定技术，不断优化控制系统性能，使反应过程更加稳定。此外，该模块具备强大的失控预警联锁控制功能，当监测到反应参数偏离安全阈值时，系统会立即发出预警，并自动触发联锁装置，及时切断危险物料供应、启动降温降压措施，从根源上提升了聚合工艺的本质安全水平，避免因工艺失控引发重大安全事故。

## 四、关键技术应用与管理实践

### （一）应急处置技术研究

#### 1. 泄漏扩散模拟技术

基于计算流体动力学（CFD）的泄漏扩散模拟技术在化工企业应急处置中具有重要应用<sup>[9]</sup>。此技术借助专业软件，能够对化工生产过程中可能发生的化学品泄漏场景进行精准建模。通过输入泄漏源位置、泄漏速率、气象条件（如风速、风向、温度、湿度）以及周边地形地貌等关键参数，模拟化学品泄漏后在大气或特定空间内的扩散路径、浓度分布随时间的动态变化。例如在广东腾龙化工科技有限公司，一旦发生泄漏事故，该技术可迅速生成直观的扩散云图，为应急指挥人员清晰呈现危险区域范围。与此同时，公司的人员定位系统设置“紧急集合点”，紧急撤离时，系统通过后台发送撤离指令及最优撤离路线至人员定位终端，引导人员快速撤离，并实时统计安全区、非安全区的人员数量，助力应急指挥高效有序开展，最大程度降低事故损失。

#### 2. 应急救援决策支持

多源信息融合的应急指挥辅助决策系统开发是应急救援决策支持的关键<sup>[10]</sup>。该系统广泛收集化工企业内部的生产工艺数据、设备运行状态、人员分布信息，以及外部的气象数据、周边环境信息等多源数据，并运用先进的数据融合与分析算法，深度挖掘数据背后的关联与趋势。以广东腾龙化工科技有限公司为例，其承包商管理系统涵盖承包商准入、入厂、开工准备、现场管理、作业监控、考核评价、续用与退出、黑名单管理等全流程信息化、规范化动态管理。在应急救援时，该系统能将承包商相关信息，如人员位置、作业状态等，与其他应急数据整合，为救援决

策提供全面准确依据。而且,公司的数据与政府监管端同步共享,构建全省承包商黑名单库,进一步强化行业监管与应急协同能力,确保在关键时刻做出科学合理的救援决策,提升应急救援效率与效果。

### (二) 特种装备研发应用

#### 1. 防爆型侦检装备研发

防爆型侦检装备研发在化工企业安全生产中至关重要。通过采用特殊的防爆材料和结构设计,确保装备在危险环境下能正常运行且不会引发爆炸。其研发涉及到对传感器技术的优化,提高对危险气体等的检测精度和灵敏度。同时,在通信技术方面,要保证装备能在复杂的化工环境中稳定传输数据。装备的外壳设计需符合严格的防爆标准,具备足够的强度和密封性。此外,研发过程还需考虑装备的便携性和操作的便捷性,以便在应急情况下能够快速部署和使用,为化工企业的安全生产提供可靠的侦检保障。

#### 2. 应急堵漏技术装备

快速固化封堵材料在应急堵漏技术装备中具有重要应用。这类材料的开发注重其快速固化特性,能够在短时间内形成高强度的封堵结构。在工程化应用方面,其与应急堵漏技术装备紧密结合。例如,在化工企业中,当出现泄漏情况时,可通过特定的装备将快速固化封堵材料准确输送至泄漏点,材料迅速固化,有效阻止泄漏物质的进一步扩散。其研发过程需考虑化工环境的复杂性,确保材料在不同化学物质和温度、压力条件下都能发挥良好性能。同时,在应用管理实践中,要对材料的储存、运输和使用进行严格规范,以保障其在应急堵漏时的有效性和可靠性。

### (三) 高危领域安全对策

#### 1. 硝化工艺安全优化

硝化工艺是化工生产中的高危工艺,其安全优化至关重要。在“工业互联网+安全生产”背景下,利用先进技术实现反应热失控预警与紧急泄放系统联动控制是关键。通过在硝化反应装置

上安装高精度的温度、压力等传感器,实时采集反应数据并传输至工业互联网平台。平台利用智能算法对数据进行分析,一旦监测到热失控迹象,立即自动触发紧急泄放系统。同时,系统还可根据实时数据动态调整工艺参数,如进料速度、冷却水量等,确保反应在安全范围内进行。此外,对相关设备进行定期维护和检查,并建立完善的应急预案和人员培训机制,提高企业应对突发事件的能力,保障硝化工艺的安全生产。

#### 2. 氟化工艺本质安全

在化工企业“工业互联网+安全生产”平台建设中,针对氟化工艺本质安全至关重要。利用先进的传感器技术实时监测氟化工艺中的温度、压力、流量等关键参数,确保工艺运行在安全范围内。通过数据分析和智能算法,对工艺参数进行优化,提高生产效率的同时保障安全。在设备完整性管理方面,采用物联网技术对氟化设备进行实时状态监测,预测设备故障,及时进行维护和更换。建立严格的操作规程和应急预案,对操作人员进行专业培训,提高其对氟化工艺风险的认知和应对能力,确保在任何异常情况下都能迅速采取措施,避免事故发生。

## 五、总结

工业互联网在化工安全生产中的应用带来诸多创新。通过整合各类数据资源,实现对生产过程的实时监测与精准分析,有效提升风险预警能力。数字孪生技术为智慧安全管理系统开辟新路径,它能构建虚拟工厂模型,模拟各类工况,辅助决策制定,优化安全管理策略。展望未来,5G+边缘计算在重大危险源监控中具有广阔前景。5G的高速率、低延时特性可确保数据实时传输,边缘计算则能在本地快速处理数据,减少数据传输延迟和网络负载,两者结合将进一步提高监控的准确性和及时性,为化工企业安全生产提供更强大的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 路鹏飞. M 化工企业安全生产管理优化研究 [D]. 南昌大学, 2019.
- [2] 李鑫. 化工企业生产安全风险画像技术应用与研究 [D]. 青岛科技大学, 2020.
- [3] 王少莉. 化工企业安全生产预警模型研究 [D]. 天津理工大学, 2017.
- [4] 陆祺. Z 市化工企业安全生产监管现状分析与完善对策研究 [D]. 江苏大学, 2023.
- [5] 席孝东. 镇江新区化工企业安全生产监管分级方法研究 [D]. 江苏大学, 2018.
- [6] 张国之, 王云龙, 穆波. 工业互联网在化工企业安全生产中的研究现状和发展趋势 [J]. 应用化工, 2022, 51(5):5.
- [7] 曾春焱, 张岚. 化工企业做好安全生产信息化管理平台建设工作 [J]. 化工管理, 2020(17):2.
- [8] 顾陆铭. 工业互联网时代工厂安全生产的思考与实践 [J]. 安家, 2022(10):0028-0030.
- [9] 付树亮. 简析化工企业安全生产与管理 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 5(026):5110.
- [10] 赵洪波. 新时期化工企业安全生产与管理探讨 [J]. 管理观察, 2016(26):3.



# 电池管理在消防应急电子设备中的应用与研究

周俊赵

广东东君照明有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025100023

**摘 要 :** 介绍消防应急电子设备相关内容, 包括消防应急照明和疏散指示系统和火灾自动报警系统的硬件架构。阐述电池管理的特殊要求及不同电池性能差异, 说明智能充放电控制策略等。还涉及供电保障策略、失效预警机制等多方面, 指出取得突破的同时存在不足及未来发展方向。

**关 键 词 :** 消防应急电子设备; 电池管理; 疏散指示系统

## Application and Research of Battery Management in Fire Emergency Electronic Equipment

Zhou Junzhao

Guangdong Dongjun Lighting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract :** This article introduces the relevant content of fire emergency electronic equipment, including the hardware architecture of Fire emergency lighting and evacuate indicating system and automatic fire alarm system. Elaborate on the special requirements for battery management and the performance differences of different batteries, and explain intelligent charging and discharging control strategies. It also involves multiple aspects such as power supply guarantee strategies and failure warning mechanisms, pointing out that while breakthroughs have been made, there are still shortcomings and future development directions.

**Keywords :** fire emergency electronic equipment; battery management; evacuation indication system

### 引言

随着消防安全意识的不断提高, 我国颁布的相关消防政策对应急设备提出了更高要求。消防应急照明和疏散指示系统以及火灾报警系统作为消防应急电子设备的关键部分, 其核心组件在火灾发生时作用重大。电池管理是应急电子设备的核心需求, 包括备用供电时长、充放电能力和环境适应性等方面。根据新版国家标准, 禁止使用含镍钴锰等三元成分的锂电池, 锂电池选型仅限磷酸铁锂电池, 而当前市场主流仍以铅酸蓄电池为主。磷酸铁锂电池与铅酸蓄电池在性能上存在差异, 需综合考虑选型。智能充放电控制策略、多模式供电策略、失效预警机制等对电池管理至关重要。同时, 低功耗待机设计、应急供电切换机制、SOC 估算精度提升、多参数融合诊断技术以及硬件可靠性强化设计等方面均影响电池管理系统在消防应急电子设备中的应用成效。尽管已有技术突破, 但仍存在不足, 物联网与 AI 技术有望为电池管理带来新的发展机遇。

### 一、消防应急电子设备系统概述

#### (一) 消防应急设备构成分析

消防应急照明和疏散指示系统是消防应急电子设备的重要组成部分。其硬件架构通常包括应急照明控制器、消防应急灯具等。应急照明控制器作为核心, 负责接收并处理相关信号, 应急照明控制指示灯具的工作状态<sup>[1]</sup>。消防应急灯具则分布在建筑物各个区域, 为人员疏散提供明确的疏散指示。火灾自动报警系统同样关键, 其硬件架构包含探测器、警报器、火灾报警控制器等。探测器能够感知火灾相关的物理量变化, 如烟雾浓度、温度升高等, 这些感应量达到报警阈值或上升趋势达到报警趋势时, 将信

号传输给火灾报警控制器。火灾报警控制器接收信号后发出警报并传输给声光警报器和启动消防应急广播系统, 提醒人员及时疏散。这些核心组件各自具有独特的功能特征, 共同构成了消防应急电子设备系统, 在火灾发生时发挥着至关重要的作用。

#### (二) 电池管理核心需求

消防应急电子设备在备用供电时长、充电安全性和环境适应性等方面存在特殊技术要求, 这些要求构成了电池管理的核心需求。应急设备需要在突发火灾等紧急情况下持续可靠供电, 因此备用供电时长至关重要, 电池管理系统需确保电池能满足规定的供电时长需求 [2]。消防环境中对电池充电有严格限制, 最大充电电流和充电时长需符合安全规范, 以确保充电过程的安全性。同

时,消防环境复杂多变,电池管理需考虑温度、湿度、烟尘等因素对电池性能的影响,使电池在恶劣环境下仍能正常工作,确保消防应急电子设备的稳定运行。

## 二、应急设备电池管理关键技术

### (一) 电池选型与容量配置

磷酸铁锂电池和聚合物锂电池在高温环境下的性能存在差异。磷酸铁锂电池具有较高的热稳定性,在高温下电池结构相对稳定,不易发生热失控等危险情况,且循环寿命较长<sup>[3]</sup>。然而,其能量密度相对较低。聚合物锂电池能量密度较高,但在高温环境下,其电解质等材料的性能可能会受到较大影响,导致电池性能下降,且安全性方面可能面临一定挑战。在电池选型时,需综合考虑应急设备的使用环境、对能量密度的要求以及安全性等因素。根据 GB17945-2024 与 GB4717-2024 对不同类型锂电的使用提出了明确的要求,同时对于高温环境且对安全性要求极高的消防应急电子设备,磷酸铁锂电池可能是更优选择;。

### (二) 智能充放电控制策略

智能充放电控制策略对于应急设备电池管理至关重要。在充电方面,恒流恒压充电算法是常用的方法。它能够在充电初期以恒定电流充电,快速提升电池电量,当电池电压达到一定值后,转为恒压充电,确保电池安全充满,避免过充现象<sup>[4]</sup>。在放电过程中,动态负荷追踪放电算法具有优势。它可以根据应急设备的实际负荷需求,动态调整电池的放电电流和电压,使电池能够更高效地为设备供电,延长电池的使用时间,确保在应急场景下设备能够持续稳定运行。这些算法的合理应用,能够提高应急设备电池的性能和可靠性,为应急救援工作提供有力保障。

## 三、电池管理在应急系统中的应用实践

### (一) 疏散指示系统供电保障

#### 1. 多模式供电策略

在疏散指示系统供电保障的多模式供电策略中,市电/电池无缝切换电路的设计至关重要。该电路可确保在市电出现故障时迅速切换到电池供电,保障系统的持续运行[5]。根据 GB17945-2024 的要求,消防应急启动时,疏散指示标志的亮度不得进行调节,以确保在紧急情况下提供稳定且清晰的指示亮度,保障人员疏散的安全性。在非消防联动和非紧急强启状态下,可采用节能方案,通过环境光线和实际需求调节疏散指示标志的亮度,以有效节省电池能量,延长电池供电时间。这种多模式供电策略综合考虑了不同供电情况和节能需求,提高了疏散指示系统在应急状况下的可靠性和有效性,为人员疏散提供了更有力的保障。

#### 2. 电池失效预警机制

电池失效预警机制在疏散指示系统供电保障中至关重要。通过开发基于阻抗谱分析的电池健康度评估模型与预警系统,能够实时监测电池状态。阻抗谱分析可获取电池内部的电化学反应信息,反映电池的老化程度、性能衰减等情况。基于这些数据构建的评

估模型,可准确判断电池的健康度。当电池出现异常,如健康度低于设定阈值时,预警系统及时发出警报,提示相关人员进行维护或更换电池,确保疏散指示系统在紧急情况下能获得可靠的电力供应,保障人员安全疏散<sup>[6]</sup>。

### (二) 火灾报警系统电源优化

#### 1. 低功耗待机设计

在低功耗待机设计方面,电源管理芯片选型至关重要。需选择能够实现  $\mu\text{A}$  级静态电流的芯片,以降低待机功耗。例如,某些先进的芯片具有独特的低功耗模式,可在设备待机时大幅减少电量消耗<sup>[7]</sup>。同时,电路优化也是关键环节。通过合理设计电路布局,减少不必要的电流通路,降低线路损耗。采用高精度的电阻、电容等元件,提高电路的能效。此外,还可利用智能控制技术,根据设备的实际工作状态动态调整电源供应,进一步提高能源利用效率,确保火灾报警系统在待机状态下也能保持良好的电源性能,随时准备应对可能发生的火灾情况。

#### 2. 应急供电切换机制

在应急供电切换机制方面,构建基于超级电容的瞬时大电流补偿与主备电源协同控制方案至关重要。超级电容可在短时间内提供较大电流,弥补电源切换瞬间的功率缺口,确保火灾报警系统等应急电子设备的稳定运行<sup>[8]</sup>。通过合理设计协同控制策略,实现主电源和备用电源之间的无缝切换。当主电源出现故障或供电不足时,能迅速切换到备用电源,并由超级电容提供瞬时大电流支持,避免设备因供电中断或电流不稳定而出现故障或误报警情况,提高应急系统的可靠性和有效性。

## 四、电池管理系统优化策略

### (一) 智能监控算法改进

#### 1. 自适应 SOC 估算模型

为提升电池管理系统中荷电状态(SOC)估算精度,融合卡尔曼滤波与神经网络算法是一种有效的策略。卡尔曼滤波算法具有对线性系统状态进行最优估计的能力,能有效处理测量噪声等问题。神经网络算法则具有强大的非线性映射能力,可学习复杂的电池特性。将两者结合,可充分发挥各自优势。例如,利用卡尔曼滤波对神经网络的输入输出进行优化处理,同时神经网络可弥补卡尔曼滤波在非线性系统处理上的不足,从而提高 SOC 估算的准确性和可靠性,为消防应急电子设备的稳定运行提供更好的电池管理支持<sup>[9]</sup>。

#### 2. 多参数融合诊断技术

电池管理系统的多参数融合诊断技术是提高电池性能和安全性关键。通过整合温度、电压、内阻等多种参数,可以构建更为精确的故障诊断专家系统<sup>[10]</sup>。利用智能算法对这些参数进行综合分析,能够更准确地识别电池的健康状态和潜在故障。例如,温度异常可能影响电池的化学反应效率,电压波动可能暗示电池内部结构的变化,内阻增大则可能是电池老化或出现局部短路的信号。通过融合这些参数的信息,可以避免单一参数诊断的局限性,实现对电池状态的全面评估,从而为消防应急电子设备提供

更可靠的电源保障。

（二）硬件可靠性强化设计

1. 防火防爆结构优化

电池管理系统的硬件可靠性强化设计中的防火防爆结构优化至关重要。研制复合型阻燃材料是关键举措之一，这种材料应具备高效的阻燃性能，能在高温或意外火源情况下有效阻止火势蔓延。同时，多层防护的电池封装工艺也不可或缺。通过多层结构设计，如外层采用高强度、耐高温的防护层，中层设置防火隔热层，内层确保对电池的紧密包裹且具备一定的缓冲性能，可有效防止电池在受到外部冲击或内部热失控时引发爆炸或火灾。这种复合型的设计方案能够极大地提高电池管理系统在消防应急电子设备中的安全性和可靠性，保障设备在特殊环境下的正常运行。

2. 电磁兼容性提升

在电池管理系统的硬件可靠性强化设计及电磁兼容性提升方面，改进 PCB 布局与滤波电路设计至关重要。合理的 PCB 布局可减少电磁干扰，例如将敏感元件与干扰源分开布局，缩短高频信号线长度，降低信号传输过程中的电磁辐射。同时，优化接地设计，采用单点接地或多点接地方式，确保接地良好，减少地环路干扰。滤波电路设计能有效滤除干扰信号，针对不同频率的干扰，选择合适的滤波元件，如电容、电感等组成低通、高通或带通滤波器。在电源输入端和信号线上设置滤波电路，可阻止外部干扰进入系统，提高系统的电磁兼容性和硬件可靠性，确保电池管理系统在消防应急电子设备中稳定运行。

（三）系统集成测试验证

1. 极端环境模拟测试

在极端环境模拟测试方面，构建高温高湿实验环境下的电池组循环寿命测试平台至关重要。通过精确控制温度和湿度参数，模拟消防应急电子设备可能面临的恶劣环境。利用该平台对电池组进行循环充放电测试，监测电池的各项性能指标，如电压、电

流、容量等的变化情况。分析在高温高湿环境下电池的衰减规律，以及电池管理系统的适应性和可靠性。根据测试结果，对电池管理系统的控制策略进行优化，例如调整充电截止电压、放电截止电压、均衡控制参数等，以提高电池组在极端环境下的使用寿命和性能，确保消防应急电子设备在关键时刻能够正常运行。

2. 多系统联动验证

在电池管理系统优化策略的系统集成测试验证及多系统联动验证中，针对与消防报警主机联动的整机供电可靠性测试至关重要。通过模拟实际消防场景，对电池管理系统与消防报警主机等多系统进行集成测试。检验在不同工况下，电池能否稳定为整机供电，确保消防应急电子设备正常运行。同时，分析系统间的通信是否顺畅，数据传输是否准确无误。在多系统联动过程中，关注电池管理系统对整机功耗的动态调整能力，以及与消防报警主机的协同工作效果，保障在紧急情况下消防设备能迅速响应，提高消防应急电子设备的可靠性和实用性。

五、总结

电池管理系统在消防应急电子设备中取得了关键技术突破，应用成效显著。通过有效的管理，提升了电池性能和设备可靠性。然而，目前在极端环境适应性和系统集成度等方面仍存在不足。在极端环境下，电池管理系统可能无法稳定工作，影响设备在特殊消防场景中的使用；系统集成度不够高，增加了设备的复杂性和成本。展望未来，物联网与 AI 技术在电池健康管理领域具有广阔的发展前景。物联网可实现电池数据的实时监测与远程传输，AI 技术能对电池状态进行精准预测和故障诊断，有助于进一步提高电池管理系统在消防应急电子设备中的性能和效率，更好地保障消防安全。

参考文献

[1] 李洋. 一种基于电池管理的 RFID 系统设计与应用 [D]. 西安电子科技大学, 2017.  
[2] 周俊成. 电池管理系统设计研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2015.  
[3] 谷苗. 电动汽车电池管理系统的研究与设计 [D]. 天津: 天津大学, 2018.  
[4] 顾东杰. 车载锂电池正弦波充电与电池管理技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2017.  
[5] 马贝贝. 电动汽车电池管理系统的研究与设计 [D]. 山东: 济南大学, 2016.  
[6] 程璐. 消防应急照明和疏散指示系统在轨道交通中的应用 [J]. 建筑与装饰, 2020(12): 110, 114.  
[7] 周伟. 消防疏散照明及疏散指示系统在城市轨道交通工程中的应用研究 [J]. 光源与照明, 2023(4): 10-12, 104.  
[8] 汪海鑫. 浅谈消防应急照明和疏散指示系统的设计与应用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(12): 5621-5621.  
[9] 卢振保. 浅谈消防应急照明和疏散指示系统的设计与应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(12): 1495-1495.  
[10] 林丽敏. 智能消防应急照明及疏散指示系统的特点与应用 [J]. 环球市场, 2016(23): 234.

# 医院信息数据治理：提升医疗质量的关键路径

吴玉清

广州开发区医院（广州市黄埔区人民医院，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025100030

**摘 要：** 医院信息数据治理涉及多个维度，包含核心要素、对循证医学的支撑作用以及对医疗流程的优化功能等。本文剖析了医院信息系统现状、医疗数据质量挑战、分析体系构建及实际应用场景，同时介绍了数据安全及质控策略以及多维评价模型等内容。重点强调了数据治理在提升医疗质量方面的重要意义，分析了当前面临的问题，并对未来发展方向进行了展望。

**关 键 词：** 医院信息数据治理；医疗质量；数据安全

## Hospital Information Data Governance: the Key Path to Improve Medical Quality

Wu Yuqing

Guangzhou Development District Hospital ( Guangzhou Huangpu District People's Hospital ), Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** Hospital information data governance encompasses multiple aspects, including core elements and its role in evidence-based medicine and medical processes. It also discusses the current state of hospital information systems, the challenges in medical data quality, the construction of analysis systems, and related applications. Additionally, it introduces strategies for data security and quality control, as well as multi-dimensional evaluation models, emphasizing the importance of these measures in enhancing medical quality and the issues they face, along with future development directions.

**Keywords：** hospital information data governance; medical quality; data security

### 引言

医院信息数据治理是提升医疗质量的关键环节。近年来，随着《“健康中国2030”规划纲要》（2016年颁布）等政策的推进，对医疗数据的高效管理和利用提出了更高要求。医院信息数据治理涉及多方面，包括将数据作为资产进行管理，元数据管理以及保障数据安全等核心要素，其理论基础源于医疗行业标准。同时，它为循证医学提供支持，可依据PDCA循环理论优化医疗流程。然而，医院信息系统存在数据孤岛等问题，医疗数据质量面临诸多挑战，数据分析体系构建及相关技术应用至关重要，且在数据安全治理、采集质控、存储治理等方面都有相应策略，这些都与提升医疗质量紧密相关。

### 一、医院信息数据治理的理论基础

#### （一）数据治理的概念框架

医院信息数据治理是一个综合性的概念，旨在借助一系列的策略、流程和技术，对医院内的各类数据进行有效的管理和利用。其核心是将数据视为一种重要的资产进行识别和管理，这涉及到对数据的分类、分级以及确定其价值和潜在用途。元数据管理也是关键要素之一，它为数据提供了定义、描述和结构信息，有助于提升数据的可理解性和可用性。同时，数据安全至关重要，包括保护数据的完整性、保密性和可用性，防止数据泄露和滥用。这些核心要素的理论基础可追溯到国内外医疗行业标准，这些标准为医院信息数据治理提供了规范和指导框架<sup>[1]</sup>。

#### （二）质量提升的关联机理

循证医学强调临床决策应基于最佳的研究证据、临床经验以及患者的价值观和意愿。医院信息数据治理通过整合和分析大量临床数据，为循证医学提供了数据支撑，使临床医生能够获取更准确、全面的研究证据，从而优化临床决策<sup>[2]</sup>。PDCA循环理论包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段。在医院信息数据治理中，可依据该理论对医疗数据进行持续监测和分析。通过对医疗流程各环节数据的收集与分析，发现问题并制定改进计划，接着执行计划并检查效果，最后对有效的措施进行标准化处理，实现医疗流程的持续优化，进而提升医疗质量。



## 二、医疗信息数据治理现状分析

### （一）医院信息系统架构现状

医院信息系统通常涵盖 HIS（医院信息系统）、EMR（电子病历系统）、PACS（医学影像存储与传输系统）等多个子系统。这些系统往往呈现分布式架构特点。例如，HIS 主要负责医院的行政管理和基本医疗业务流程管理；EMR 聚焦于患者病历的电子化记录与管理；PACS 则专门处理医学影像的存储和传输。然而，各系统在建设过程中缺乏统一标准，系统间接口不规范。这就导致了数据孤岛现象的出现，不同系统之间的数据难以有效共享和交互，严重影响了医疗信息数据的整合与利用，阻碍了医疗质量的进一步提升<sup>[9]</sup>。

### （二）数据质量主要挑战

医疗数据质量面临多维度挑战。在完整性方面，部分医疗记录存在关键信息缺失，如患者过敏史、家族病史等未完整记录，影响后续诊断与治疗<sup>[4]</sup>。在准确性上，数据录入错误频发，例如医生录入电子病历文档时可能出现错别字、数据错误等情况。同时，不同科室间数据标准不一致，也导致数据整合后的准确性问题。就时效性而言，医疗数据更新不及时，如检验结果未能及时录入系统，使医生无法获取最新信息进行决策。这些问题严重影响了医疗数据质量，阻碍了医疗信息数据治理的有效推进。

## 三、医疗数据分析体系构建

### （一）数据分析技术框架

#### 1. 多模态数据处理技术

医疗数据分析体系构建中，多模态数据处理技术至关重要。在医疗领域，存在结构化病历数据与非结构化影像数据等多种模态数据。对于这些数据的融合处理，首先需解决数据格式的差异问题。通过特定算法将不同格式的数据转换为可处理的形式，以便后续分析<sup>[5]</sup>。同时，要考虑数据的特征提取，挖掘出每种数据模态中对医疗分析有价值的特征。再者，建立合适的模型来整合这些特征，使不同模态的数据能够在一个统一的框架下进行联合分析，从而更全面地反映患者的病情信息，为提升医疗质量提供有力支持。

#### 2. 智能分析算法应用

机器学习模型在医疗数据分析体系应用广泛。在疾病预测方面，可通过对大量医疗数据的学习，挖掘疾病发生的相关因素及其关联模式，构建预测模型，如基于神经网络的疾病风险预测模型，用于预测心血管疾病等慢性疾病的发病风险<sup>[6]</sup>。在诊疗方案优化上，利用机器学习算法分析临床治疗数据，包括患者的症状、检查结果、治疗过程及疗效等信息，为医生提供更科学的治疗方案参考。例如，通过决策树算法分析不同治疗方法对特定疾病的疗效，辅助医生选择最佳治疗方案，提高医疗质量。

### （二）临床应用实现路径

#### 1. 临床决策支持系统

临床决策支持系统在医疗数据分析的临床应用中扮演着至关

重要的角色。它能够借助先进的算法和机器学习技术，分析大量患者数据，包括病史、症状和检测结果等。通过与知识图谱的整合，该系统能为医生提供更加精准和个性化的临床路径建议。例如，它可以识别知识图谱中的类似病例，并推荐相应的治疗方案和程序。这有助于医生做出更明智的决策，减少误诊和不当治疗的风险，最终提升医疗服务的质量<sup>[7]</sup>。

#### 2. 资源效能优化分析

建立手术室利用率、药品周转率等运营指标的智能监测模型对于资源效能优化至关重要。通过对手术室相关数据的收集与分析，如手术时间安排、设备使用频率等，可以构建模型来监测手术室的实际利用率，识别闲置时间和高峰时段，从而合理安排手术排班，提高手术室的使用效率<sup>[8]</sup>。对于药品周转率，分析药品的采购量、使用量、库存等数据，建立智能监测模型，能够及时发现药品积压或短缺情况，优化药品采购计划和库存管理，减少浪费，确保药品的合理供应，提升医院的资源效能和运营管理水平。

## 四、数据质控关键路径设计

### （一）标准化治理体系

#### 1. 元数据标准建设

诊疗项目编码、医学术语等数据元的国家标准映射方案在元数据标准建设中不可或缺。通过制定统一的映射方案，可确保不同医疗机构间数据的一致性和可比性<sup>[9]</sup>。这有助于整合医疗信息资源，提高数据的准确性和可用性。在构建映射方案时，需充分考虑医疗行业的特点和实际需求，结合现有的国际、国内标准，对诊疗项目编码和医学术语进行规范和统一。同时，要建立相应的审核机制，确保映射的准确性和完整性，为医院信息数据治理提供坚实的基础，进而提升医疗质量。

#### 2. 数据安全治理策略

在数据安全治理策略中，设计包含权限管理、脱敏处理、审计追溯的三级防护体系至关重要。权限管理明确不同角色对数据的访问权限，确保数据的保密性和完整性，只有授权人员能够获得相应数据<sup>[10]</sup>。脱敏处理针对敏感信息，通过特定算法和规则对其进行变形处理，在不影响数据分析使用的前提下保护患者隐私。审计追溯则记录数据的操作过程，包括访问、修改、删除等行为，以便在出现问题时能够追踪溯源，确定责任主体，保障数据的安全性和合规性。

### （二）全生命周期管理

#### 1. 数据采集质控机制

建立电子病历录入的实时校验规则与自动化修正流程是数据采集质控机制的重要部分。通过设定严格的校验规则，对录入的各项数据进行实时监测。例如，对患者基本信息的格式、必填项进行检查，确保数据的完整性和准确性。对于医学术语的使用，建立标准术语库进行比对，防止错误或不规范表述。同时，设计自动化修正流程，当检测到一些常见错误时，系统能够自动提示并提供修正建议，如拼写错误、数据单位错误等。这样可以在数

据采集源头就进行有效的质量控制，减少因人为疏忽或错误操作导致的数据质量问题，为后续的数据应用和分析提供可靠的数据基础。

#### 2. 数据存储治理策略

构建分级存储架构与数据血缘追踪系统是数据存储治理策略的重要部分。分级存储架构可依据数据的重要性、访问频率等因素进行划分。对于频繁访问的关键数据，采用高性能存储设备，确保快速响应；而对于低频访问的数据，可使用成本较低的存储介质。数据血缘追踪系统则能记录数据的来源、处理过程和流向。它有助于在出现数据问题时，快速定位根源，明确是在数据采集、传输还是处理环节出现偏差。通过这两个系统的协同作用，可提高数据存储的合理性和可追溯性，为数据质控和全生命周期管理提供有力支持。

### （三）质量评价指标体系

#### 1. 多维评价模型构建

构建多维评价模型需从多方面考量。设计涵盖完整性、一致性、及时性的综合评价指标矩阵是关键。完整性指标确保数据无缺失，例如患者基本信息应完整记录。一致性指标保证数据逻辑相符，如诊断结果与治疗方案应相互匹配。及时性指标强调数据更新的时效性，如临床数据需及时录入。通过量化这些指标，为每个维度设定合理权重，以反映其在数据质量评估中的重要性。利用数学模型将这些指标综合起来，形成一个全面评估数据质量

的多维评价模型，从而为医院信息数据治理提供科学依据，有效提升医疗质量。

#### 2. 动态监测预警系统

医疗质量 KPI 实时监控仪表盘基于大数据平台开发。首先需明确关键质量评价指标，涵盖医疗服务效率、医疗安全、医疗效果等多维度。利用大数据技术收集、整合医院各信息系统的数据，包括电子病历、检验检查结果等。通过数据清洗、转换和分析，确保数据质量。然后依据设定的指标体系进行实时计算和呈现。当指标出现异常波动时，动态监测预警系统及时触发，可通过短信、邮件等方式通知相关人员。同时，系统能提供数据追溯功能，帮助分析异常原因，以便采取针对性措施改进医疗质量。

## 五、总结

医院信息数据治理对提升医疗质量至关重要。通过系统梳理，形成了从数据治理到质量提升的闭环路径，且在区域性医疗集团实践中取得成效。然而，仍面临一些技术难点，如跨机构数据共享和隐私计算等需要突破。数据治理作为智慧医院建设的核心基础，其战略定位已明确。未来，质量持续改进体系将朝着更完善的方向发展，需进一步攻克技术难题，加强数据治理，以实现医疗质量的不断提升，更好地服务患者，推动医疗行业的进步。

## 参考文献

- [1] 魏磊. A 医院数字医疗信息服务质量提升研究 [D]. 广西师范大学, 2021.
- [2] 胡松年. 中医医院医疗质量评价指标体系研究 [D]. 湖北中医药大学, 2021.
- [3] 秦豪. 医疗纠纷化解机制与解决路径——以 M 市 A 医院 2012-2019 年医疗纠纷为例 [D]. 西南科技大学, 2021.
- [4] 冯思琪. 中医医院医疗质量管理体系研究 [D]. 湖北中医药大学, 2021.
- [5] 江庆玲. 医院竞争与医疗质量：指标构建、影响分析和机制探索 [D]. 四川大学, 2022.
- [6] 马丽平. 对全面提升医院医疗质量的思考 [J]. 中国医院管理, 2023, 43(12): 56-59.
- [7] 张书豪, 李禄全. 信息化建设在儿童专科医院医疗质量提升中的价值 [J]. 信息系统工程, 2022(9): 95-98.
- [8] 梁少庆. 通过医院医保管理提升医疗质量的策略分析 [J]. 智慧健康, 2022, 8(36): 9-11, 42.
- [9] 郭敬鹏, 冯国斌, 刘艳亭, 等. 医院数据安全治理框架设计及实践路径探讨 [J]. 中国卫生信息管理杂志, 2022, 19(6): 879-883.
- [10] 王韶锋, 赵善斌, 杨静. 医院数据治理与数据质量提升研究 [J]. 现代医院, 2021, 21(11): 1761-1763.