

# 现代工程学

## Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co.,Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

# 现代工程学

Modern Engineering

第2卷 第4期 2025年4月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

## 本刊说明:

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

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



## 材料工程 | MATERIALS ENGINEERING

- |     |   |  |
|-----|---|--|
| 001 | 异戊二烯橡胶检验技术的创新与实践<br>Innovation and Practice of Isoprene Rubber Inspection Technology  | 李换群<br>Li Huanqun  |
| 004 | 焦油裂解催化剂的制备方法及其在燃料电池尾气循环中的应用<br>Preparation Method of Tar Cracking Catalyst and Its Application in Fuel<br>Cell Tail Gas Circulation | 杨雨霖<br>Yang Yulin  |
| 008 | 多宝山一黑河地区典型金矿床成矿<br>作用差异性<br>Differences in mineralization of typical gold deposits in<br>the Duobaoshan-Heihe area                  | 闫宝龙, 李国栋, 籍哲羽, 胡玲云, 林楠<br>Yan Baolong, Li Guodong, Ji Zheyu, Hu Lingyun, Lin Nan |
| 011 | 氧化镁自密实混凝土在水利工程中的应用研究<br>Research on the Application of Magnesium Oxide Self-Compacting<br>Concrete in Water Conservancy Projects    | 朱一正<br>Zhu Yizheng   |
| 014 | 浅析集中供热管网腐蚀原因及防护措施<br>Experimental Study on the Compressive Properties of<br>Cement-Based-Glass Fiber                                | 王岳<br>Wang Yue   |

## 建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- |     |   |                      |
|-----|---|----------------------|
| 017 | 工程造价风险管理及其在建筑工程中的应用<br>Project Cost Risk Management and Its Application in<br>Construction Engineering                          | 陈晶<br>Chen Jing      |
| 020 | 建筑工程施工中的造价控制与技术管理协同研究<br>Research on the Synergy between Cost Control and Technical<br>Management in Construction Engineering   | 李明<br>Li Ming        |
| 023 | 桥梁上部结构施工技术 & 施工控制要点分析<br>Analysis of Construction Technology and Key Construction Control<br>Points for Bridge Superstructure   | 王永超<br>Wang Yongchao |
| 026 | 全风化断层破碎带隧道施工技术探讨<br>Discussion on Tunnel Construction Technology in Fully Weathered<br>Fault Fracture Zone                      | 黄华龙<br>Huang Hualong |
| 029 | 悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用分析<br>Analysis of the Application of Cantilever Bridge Construction Technology<br>in Bridge Engineering        | 梁凯<br>Liang Kai      |
| 032 | 公路路基施工中软土路基处理技术分析<br>Analysis of Soft Soil Subgrade Treatment Technology in Highway<br>Subgrade Construction                    | 刘善伍<br>Liu Shanwu    |
| 035 | 建筑工程项目管理中的成本控制策略研究<br>Research on Cost Control Strategies in Construction Project Management                                    | 秦绪庆<br>Qin Xuqing    |
| 038 | 基于绿色理念的公路桥梁施工技术探讨<br>Discussion on Highway Bridge Construction Technology<br>Based on Green Concept                             | 苏浙<br>Su Zhe         |
| 041 | 高速公路桥梁隧道施工中的施工质量控制与优化<br>Construction Quality Control and Optimization in the Construction of Expressway<br>Bridges and Tunnels | 孙恒<br>Sun Heng       |

044	浅谈道路桥梁施工技术现状与发展趋势 A Brief Discussion on the Current Situation and Development Trend of Road and Bridge Construction Technology	童斌 Tong Bin
047	公路桥梁施工中悬臂挂篮施工技术研究 Research on Cantilever Basket Construction Technology in Highway Bridge Construction	张灵学 Zhang Lingxue
050	概预算编制在建筑工程造价管理中的应用 The Application of Budget Estimate Preparation in the Cost Management of Construction Projects	王书银 Wang Shuyin
053	抽水蓄能电站施工投标阶段报价策略 Quotation Strategies for the Bidding Stage of Pumped Storage Power Station Construction	徐慧慧 Xu Huihui
057	研究高速公路桥梁预防性养护技术 Research on Preventive Maintenance Technology for Expressway Bridges	张建博 Zhang Jianbo
060	高速公路桥梁加宽拼接施工质量控制探讨 Discussion on Quality Control of Widening and Splicing Construction of Expressway Bridges	陈亮 Chen Liang

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

063	数字孪生技术在工程机械运维中的应用研究：以液压系统故障预测为例 Research on the Application of Digital Twin Technology in Construction Machinery Operation and Maintenance: An Example of Failure Prediction of Hydraulic System	方泽华 Fang Zehua
066	非标自动化机械设计的创新方法与实践 Innovative Methods and Practice of Non-standard Automation Machinery Design	赵添甜 Zhao Tiantian
069	自来水行业设备全生命周期管理：运行、维护与维修保养 Life Cycle Management of Equipment in the Water Supply Industry: Operation, Maintenance, and Upkeep	宋子豪 Song Zihao
072	X射线数字成像在压力容器焊缝无损检测中的应用与优化 Application and Optimization of X-ray Digital Imaging in Non-destructive Testing of Pressure Vessel Welds	蔡福磊，朱涛平 Cai Fulei, Zhu Taoping
075	石油化工工程中机械设备密封技术的风险评估与管理策略 Risk Assessment and Management Strategies for Mechanical Equipment Sealing Technology in Petrochemical Engineering Project	关楚廉 Guan Chulian
078	制造业自动化研发：机器人、PLC与伺服系统的协同应用 Manufacturing Automation R&D: Synergistic Application of Robot, PLC and Servo System	邓大方 Deng Dafang
081	转炉一次烟气净化技术现状及过滤净化技术的应用 Current Situation of Primary Flue Gas Purification Technology for Converter and Application of Filtration Purification Technology	刘晓雄 Liu Xiaoxiong
084	电力终端智能制造模式下的生产管理创新 Innovation in Production Management under the Smart Manufacturing Model of Power Terminals	纪清 Ji Qing
087	基于人工智能的智能电视硬件开发研究 Research on the Hardware Development of Smart TVs Based on Artificial Intelligence	余彦飞 Yu Yanfei
090	设备制造企业精益生产与智能创新融合 Integration of Lean Production and Intelligent Innovation in Equipment Manufacturing Enterprises	周昌玮 Zhou Changwei

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

093	政府采购与工程招标的合规性及优化路径 Compliance and Optimization Path of Government Procurement and Project Bidding	林蓓蕊 Lin Beirui
097	基于商用密码应用的政务信息系统安全加固与风险评估实践 Practical Practice of Security Reinforcement and Risk Assessment of Government Information System Based on Commercial Cryptographic Application	钟明福 Zhong Mingfu
100	无损检测技术在空调设备性能评估中的应用研究 Research on the Application of Nondestructive Testing Technology in Performance Evaluation of Air Conditioning Equipment	刘海枫 Liu Haifeng
103	电气自动化编程在智能制造工业控制应用中的发展趋势探究 Research on the Development Trend of Electrical Automation Programming in the Application of Industrial Control in Intelligent Manufacturing	何荣卓 He Rongzhuo
106	医院信息数据质控策略：确保医疗数据的准确性和可靠性 Hospital Information Data Quality Control Strategy: to Ensure the Accuracy and Reliability of Medical Data	吴玉清 Wu Yuqing
109	矿区水环境修复与污水治理一体化技术研究 Research on Integrated Technology of Water Environment Restoration and Sewage Treatment in Mining Areas	郑丽辉 Zheng Lihui
113	中铁特货物流股份有限公司空车调配相关问题探索 Exploration of Issues Related to Empty Vehicle Allocation in China Railway Special Cargo Logistics Co., Ltd.	关伟 Guan Wei

# 异戊二烯橡胶检验技术的创新与实践

李焕群

身份证号: 441723198509164721

DOI:10.61369/ME.2025040001

**摘 要：** 异戊二烯橡胶（IR）作为高性能合成橡胶，其质量检验技术的创新对提升产品性能至关重要。传统检测方法存在效率低、精度不足等局限，难以满足现代化生产需求。本研究探讨了近红外光谱（NIRS）、拉曼光谱等快速检测技术，以及气相色谱-质谱（GC-MS）、凝胶渗透色谱（GPC）等联用方法的优化方案，显著提升了 IR 分子结构、交联密度及杂质含量的检测效率和准确性。结合在线监测系统与自动化检验设备的应用，实现了生产过程的实时质量控制。案例表明，新技术体系使检测时效提升 40 倍，产品废品率降低 75%，经济效益显著。未来人工智能与大数据技术的融合将进一步推动 IR 检验向智能化发展。

**关 键 词：** 异戊二烯橡胶；碳五石油树脂；近红外光谱；在线检测

## Innovation and Practice of Isoprene Rubber Inspection Technology

Li Huanqun

ID: 441723198509164721

**Abstract：** Isoprene rubber (IR), a high-performance synthetic rubber, benefits greatly from innovations in quality inspection technology, which are essential for enhancing product performance. Traditional testing methods, characterized by low efficiency and insufficient accuracy, fail to meet the demands of modern production. This study explores rapid detection techniques such as near-infrared spectroscopy (NIRS) and Raman spectroscopy, along with optimized methods like gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gel permeation chromatography (GPC). These advancements significantly enhance the efficiency and accuracy of detecting IR molecular structure, crosslink density, and impurity levels. By integrating online monitoring systems and automated inspection equipment, real-time quality control during the production process is achieved. Case studies show that the new technology system has increased detection efficiency by 40 times, reduced the product defect rate by 75%, and yielded significant economic benefits. The integration of artificial intelligence and big data technologies is expected to further advance the intelligent inspection of IR.

**Keywords：** isoprene rubber; C5 petroleum resin; near infrared spectrum; online detection

## 引言

异戊二烯橡胶（IR）在轮胎、医疗器械等领域应用广泛，其性能取决于分子结构与生产工艺控制。《中国橡胶行业“十四五”发展规划纲要》（2021 年）提出要突破高端合成橡胶材料的关键制备与检测技术，推动产业绿色化、智能化升级。碳五石油树脂（C5 树脂）作为 IR 生产的关键改性剂，其成分调控直接影响产品性能。传统检验方法检测周期长、精度不足，难以满足现代化生产需求。随着《智能制造标准体系建设指南》（2023 年修订）的实施，近红外光谱、拉曼光谱等快速检测技术与色谱-质谱联用方法的创新应用，为建立高效精准的 IR 质量监控体系提供了技术支撑。研究新型检验技术对提升产品质量、实现智能制造意义重大，符合国家推动制造业高质量发展和“双碳”目标的政策导向。

## 一、异戊二烯橡胶与碳五石油树脂的理化特性

### （一）异戊二烯橡胶的结构与性能

异戊二烯橡胶（IR）的分子结构主要由顺式-1,4、反式-1,4 和 3,4-加成结构组成，其中顺式-1,4 结构的含量直接影响橡胶的弹性和力学性能。高顺式结构（>98%）的 IR 表现出

优异的拉伸强度、回弹性和耐磨性，接近天然橡胶的性能；而反式结构占比增加会导致材料硬度提高，适用于特殊应用场景如高尔夫球壳<sup>[1]</sup>。分子量分布是影响加工性能和最终制品质量的关键因素，窄分布可改善流动性，但可能牺牲强度；宽分布则有助于平衡加工性和力学性能。凝胶含量过高会降低 IR 的均匀性和可塑性，而灰分作为无机杂质残留的指标，需严格控制以避免催化剂

的负面影响<sup>[2]</sup>。

### （二）碳五石油树脂在 IR 生产中的作用

碳五石油树脂（C5 树脂）作为异戊二烯橡胶的重要改性剂，通过物理共混或化学接枝改善 IR 的粘接性和加工性能。其增粘机理源于树脂中的非极性烃类结构与 IR 分子链的相容性，降低熔体粘度并增强初粘力。双环戊二烯（DCPD）和间戊二烯是 C5 树脂的主要活性组分，DCPD 的高刚性环状结构可提升 IR 的热稳定性，而间戊二烯的线性结构有助于提高柔韧性。通过调整树脂中各组分的比例，可精准调控 IR 的粘弹性、耐老化性和动态力学性能，满足不同应用场景的需求<sup>[3]</sup>。

## 二、传统异戊二烯橡胶检验技术及局限性

### （一）常规检测方法

传统异戊二烯橡胶（IR）的检验技术主要依赖化学分析法和物理性能测试。化学分析法中，溴值测定用于评估 IR 的不饱和度，反映其聚合活性和交联潜力；红外光谱（IR）分析则通过特征吸收峰鉴别分子结构，如顺式/反式异构体比例及端基类型。物理性能测试包括门尼粘度测定，用于表征橡胶的加工流动性，而拉伸强度、断裂伸长率等力学测试评估最终产品的适用性。这些方法虽能提供基础性能数据，但大多依赖离线实验室检测，无法实现生产过程的红外光谱（IR）分析则通过特征吸收峰鉴别分子结构，如顺式/反式异构体比例及端基类型<sup>[4]</sup>。

### （二）现有技术的不足

传统检测方法的显著局限性在于耗时性，化学分析需经过样品制备、试剂反应及数据解析多步骤，难以匹配现代化生产的快速调控需求。物理性能测试如门尼粘度或拉伸试验同样受限于样品制备和测试周期，无法实时监控产线波动。此外，对微量杂质的检测灵敏度不足，如齐格勒-纳塔催化剂残留或低分子量副产物，可能影响 IR 的长期稳定性与加工性能。现有技术对复杂组分（如碳五石油树脂改性体系）的解析能力有限，制约了高性能 IR 产品的精准开发与质量控制。

## 三、异戊二烯橡胶检验技术的创新方向

### （一）基于光谱分析的快速检测技术

#### 1. 近红外光谱（NIRS）的应用

近红外光谱技术通过测定分子振动倍频与合频吸收，实现对异戊二烯橡胶分子量分布与交联密度的非破坏性快速分析。该技术利用化学计量学建立光谱特征峰与聚合物参数间的定量模型，可在 30 秒内完成样品检测。相较于传统凝胶渗透色谱，NIRS 消除了溶剂消耗与色谱柱老化问题，特别适用于生产线上实时质量监控。现代光纤探头技术的应用进一步拓展了其检测场景，可直接安装于密炼机或挤出机实现原位监测。

#### 2. 拉曼光谱在杂质检测中的突破

拉曼光谱凭借其指纹识别能力，可有效区分碳五石油树脂中双环戊二烯（DCPD）与间戊二烯的分子振动特征差异。共聚焦显微拉曼技术将空间分辨率提升至 1  $\mu\text{m}$  级别，能够定位树脂-橡胶界面处的组分分布<sup>[5]</sup>。表面增强拉曼光谱（SERS）通过纳米银基底的等离体效应，将检测限降低至 ppm 级，成功实现了催化剂

残留物吡啶类化合物的痕量检测。该技术克服了红外光谱中水峰干扰的固有缺陷，为湿法工艺中的在线监测提供了新方案。

### （二）色谱与质谱联用技术的优化

#### 1. 气相色谱-质谱（GC-MS）分析挥发组分

气相色谱-质谱联用技术通过毛细管色谱柱的高效分离与质谱的选择性检测，可精准识别异戊二烯橡胶中残留单体及低分子量添加剂。新型固相微萃取（SPME）前处理技术的应用显著提高了挥发性组分的富集效率，检测限达到 0.1  $\mu\text{g/g}$ 。飞行时间质谱（TOF-MS）的引入使未知添加剂的结构解析更为可靠，通过精确质量数测定可建立包含 200 余种橡胶助剂的数据库<sup>[6]</sup>。该技术已成功应用于异戊二烯生产过程中阻聚剂、防老剂等添加剂的残留监控。

#### 2. 凝胶渗透色谱（GPC）改进方案

现代凝胶渗透色谱系统通过并联多检测器（RI/UV/光散射）配置，实现了异戊二烯橡胶绝对分子量的直接测定，消除了传统校准曲线法的系统误差<sup>[7]</sup>。高温 GPC（150℃）配合新型耐高温色谱柱，解决了橡胶样品在常温溶剂中溶解性差的问题。自动进样器与在线脱气装置的联用使单样分析时间缩短至 25 分钟，通量提升 300%<sup>[7]</sup>。多角度激光光散射检测器（MALLS）的引入使支化度测定精度达到  $\pm 2\%$ ，为研究聚合工艺对分子结构的影响提供了可靠工具。

## 四、检验技术的实践应用与案例分析

### （一）碳五石油树脂的质量控制

#### 1. 树脂成分的标准化检测流程

碳五石油树脂的质量控制依赖于关键指标的快速准确测定。自动化环球法软化点测定仪的引入使测试时间从传统方法 60 分钟缩短至 15 分钟，测试精度达到  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。色度检测采用分光光度法替代目视比色法，通过 CIE Lab 系统定量表征树脂颜色，消除了人为误差。近红外光谱在线监测系统实现了软化点、色度等 6 项指标的同步测定，每 2 分钟完成一次全分析，数据直接传输至中央控制系统。标准化检测流程的建立使不同批次树脂的质量波动范围缩小 40%。

#### 2. 杂质溯源技术

气相色谱-质谱联用技术结合化学计量学分析，可有效识别碳五石油树脂生产过程中的污染源。通过建立包含 200 种特征化合物的污染物数据库，实现了从原料到成品的全流程杂质追踪。热脱附-GC/MS 系统对生产设备内壁沉积物的分析，成功定位了导致树脂色度升高的聚合物降解产物。同位素比值质谱（IRMS）技术的应用，使原料中硫杂质的来源可追溯至特定原油批次，为生产工艺优化提供了明确方向。该技术体系使产品不合格率降低 65%。

### （二）异戊二烯橡胶生产线的在线检测

#### 1. NIRS 实时监控系统的搭建

近红外光谱在线监测系统通过光纤探头直接集成于聚合反应釜和干燥生产线，实现了异戊二烯橡胶关键参数的全流程实时监控<sup>[8]</sup>。系统每 30 秒采集一次光谱数据，通过 PLS 算法实时解析分



子量分布、顺式含量和挥发分指标。监测数据与 DCS 系统直接联动，当顺式含量波动超过  $\pm 1.5\%$  时自动调节催化剂进料速率，使产品性能稳定性提升 90%。历史数据深度学习模型的建立，成功预测了反应釜结垢周期，将非计划停机时间减少 70%。

### 2. 自动化检验设备的应用效果

全自动门尼粘度仪采用机械手自动装样和激光定位技术，将测试间隔从人工操作的 20 分钟缩短至 8 分钟，数据重复性偏差由  $\pm 3\text{MU}$  降至  $\pm 0.5\text{MU}$ 。智能拉伸试验机集成机器视觉系统，自动识别试样断裂点并计算 12 项力学参数，测试报告生成时间从 45 分钟缩短至 5 分钟。自动化检验平台通过 OPC-UA 协议与 MES 系统对接，实现了从原材料入库到成品出库的全流程质量数据追溯，使人为操作失误导致的质量事故归零<sup>[9]</sup>。

## （三）案例对比分析

### 1. 传统方法与创新技术的检测数据对比

某年产 10 万吨异戊二烯橡胶企业实施光谱在线监测系统后，分子量分布检测时间从传统 GPC 法的 4 小时缩短至 3 分钟，数据相关性系数  $R^2$  达到 0.98。顺式含量检测采用拉曼光谱替代红外光谱，测试精度由  $\pm 2\%$  提升至  $\pm 0.5\%$ ，且避免了溴化钾压片制样过程。门尼粘度在线监测系统使质量异常发现时间从批次检验的 8 小时缩短至实时报警，产品性能波动范围收窄 60%。对比数据显示，新技术体系使全流程质量检测时效提升 40 倍，异常品拦截率从 78% 提高至 99.5%。

### 2. 经济效益评估

创新检测技术的应用使该企业 IR 产品废品率从 1.2% 降至 0.3%，年减少质量损失 360 吨，直接经济效益超过 500 万元。自

动化检测设备减少质检人员 12 人，人力成本节约 200 万元 / 年。在线监测系统通过工艺参数优化使催化剂利用率提高 15%，单吨产品成本下降 80 元。预防性维护体系的建立使设备故障率降低 40%，年维修费用减少 150 万元。投资回报周期测算显示，全套检测系统升级的静态回收期仅为 1.8 年，净现值（NPV）达到 3200 万元。

## 五、总结

光谱与色谱技术的创新显著提升了异戊二烯橡胶（IR）检验的效率和精度。近红外光谱（NIRS）和拉曼光谱实现了分子结构、交联密度及杂质含量的快速无损检测，大幅缩短分析时间并提高数据可靠性。气相色谱-质谱（GC-MS）和凝胶渗透色谱（GPC）的优化增强了挥发组分和分子量分布的检测能力，为生产工艺调控提供了精准依据。在线监测系统的应用使生产过程实现实时质量控制，有效降低产品性能波动。未来，人工智能与大数据技术的深度融合将进一步推动 IR 检验技术的发展。机器学习算法可优化光谱与色谱数据的解析模型，提高复杂体系的预测准确性。数字孪生技术结合实时检测数据有望实现生产参数的自主优化与故障预警。区块链技术的应用可确保质量数据的全程可追溯性，为高端橡胶产品的认证提供可靠支持。这些前沿技术的集成应用将推动异戊二烯橡胶检验技术向智能化、自动化方向持续发展<sup>[10]</sup>。

## 参考文献

- [1] 郎钺, 徐聪, 冯宇, 等. 反式-1,4-丁二烯-异戊二烯共聚橡胶对 SBR/RNR/NR/TBIR 密封材料性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2023, 51(11): 197-200.
- [2] 马骥, 张孝娟, 田山, 等. 天然橡胶 / 低相对分子质量 3,4- 聚异戊二烯复合材料的制备与性能 [J]. 弹性体, 2022, 32(06): 6-11+71.
- [3] 严志轩, 张孝娟, 刘莉, 等. 聚异戊二烯的合成与改性研究进展 [J]. 合成橡胶工业, 2022, 45(01): 76-82.
- [4] 张华丽. 月桂烯 / 异戊二烯低聚物的阴离子合成、加氢和流变性研究 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [5] 靳远. 拉曼光谱谱峰分解算法的研究和软件实现及应用 [D]. 广西大学, 2023.
- [6] 黄备备. 稳定同位素稀释技术结合 GC-MS 分析烟气中性香味成分 [D]. 郑州轻工业大学, 2019.
- [7] 徐丹. 凝胶渗透色谱用聚甲基丙烯酸标样的制备方法 [D]. 武汉理工大学, 2012.
- [8] 李晓辉. 实时监控视频质量和内容分析系统的设计与实现 [D]. 北京邮电大学, 2023.
- [9] 许珊, 朱海林, 张日翔, 等. 气相一步法制异戊二烯催化剂的研究进展 [J]. 石油化工, 2020, 49(02): 177-183.
- [10] 张虎, 陈伟, 何树威, 等. 基于均匀试验设计的聚异戊二烯胶乳硫化配方及其优化分析 [J]. 橡胶科技, 2020, 18(03): 134-137.

# 焦油裂解催化剂的制备方法及其在燃料电池尾气循环中的应用

杨雨霖

中国石油大学（华东），山东 青岛 266580

DOI:10.61369/ME.2025040018

**摘 要：** 焦油组分在燃料电池尾气循环中易造成积碳与性能衰减，需构建具高活性与稳定性的高温催化裂解体系。文章以白云石与橄榄石为载体，采用浸渍-焙烧法负载 Ni-Fe-Ce 多金属组分，并引入 La 与 W 助剂，调控煅烧与还原条件，形成高分散度与热稳定性的 MgO-NiO 固溶体结构。裂解性能测试以甲苯、萘为模型物，评估温度、水碳比与空速等对转化率与产气构成的影响，结合表征揭示 Fe 缓解 Ni 硫中毒、Ce 稳定晶粒、La 抑制积碳的协同机制。在燃料电池尾气模拟系统中，催化剂实现  $\geq 95\%$  焦油转化率，富氢气体回收用于阳极再利用，有效降低系统碳沉积与能量损失，提升整体运行效率与寿命。

**关 键 词：** 焦油裂解；Ni-Fe-Ce 催化剂；燃料电池；尾气循环；抗硫性能

## Preparation Method of Tar Cracking Catalyst and Its Application in Fuel Cell Tail Gas Circulation

Yang Yulin

China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580

**Abstract：** Tar components in fuel cell tail gas circulation can easily cause carbon deposition and performance degradation, requiring the construction of a high-temperature catalytic cracking system with high activity and stability. In this paper, dolomite and olivine are used as supports, and the impregnation-roasting method is employed to load Ni-Fe-Ce multi-metal components. Additionally, La and W additives are introduced to adjust the calcination and reduction conditions, forming a MgO-NiO solid solution structure with high dispersion and thermal stability. The cracking performance test uses toluene and naphthalene as model compounds to evaluate the effects of temperature, water-to-carbon ratio, and space velocity on conversion rate and gas production composition. Characterization is combined to reveal the synergistic mechanism of Fe alleviating Ni sulfur poisoning, Ce stabilizing grain size, and La inhibiting carbon deposition. In the fuel cell tail gas simulation system, the catalyst achieves a tar conversion rate of  $\geq 95\%$ , and the recovered hydrogen-rich gas is reused in the anode, effectively reducing system carbon deposition and energy loss, and improving overall operating efficiency and lifetime.

**Keywords：** tar cracking; Ni-Fe-Ce catalyst; fuel cell; tail gas circulation; sulfur resistance performance

## 引言

燃料电池在分布式能源系统中的应用日益广泛，但其阳极尾气中残余的焦油类有机物在高温环境下易引发积碳，并毒化电极材料。焦油源主要来自气化、热解粗燃气及一些焦油模型化合物（如苯、甲苯、萘等），由于焦油裂解是实现尾气净化与资源回收的关键环节，因此对催化剂的热稳定性、抗中毒能力和长期结构完整性提出了更高要求。目前，有关焦油催化转化的文献很多，主要涉及到的催化剂有天然矿石（白云石、橄榄石等），传统贵金属催化剂虽然具备一定活性，但由于成本高、易失活，难以满足实际工况下对高效裂解性能的持续需求。基于廉价天然矿物构建多金属协同催化体系，在提升反应活性的同时增强抗硫与抗积碳能力，为燃料电池尾气的高温裂解与循环再利用提供了可行的技术方向。



## 一、催化剂设计与制备方法优化

### （一）载体选择与处理

以白云石和橄榄石为原料载体，利用其结构中天然含有的 Mg 和 Ca 元素，在高温条件下可转化形成碱性氧化物相，有利于后续金属物种的分散与稳定。载体经 850℃焙烧处理，有效去除杂质和有机残留，提升比表面积和孔隙结构，增强负载层的附着性与界面活性。经过 SEM 观察，处理后载体表面呈现多级孔隙和粗糙层状结构，有利于金属盐溶液的渗入与均匀沉积，为形成高活性催化相提供基础<sup>[1]</sup>。

### （二）多金属组分负载与助剂协同调控

采用等体积浸渍法将 Ni、Fe、Ce 多金属组分均匀分布于载体表面，Fe 作为 Ni 的结构调控组分可缓解硫中毒，Ce 的氧化还原循环特性有助于形成氧空位通道，提高裂解中间物的迁移能力。La 的弱碱性氧化物相覆盖于催化相表面，延缓积碳沉积速率，W 的引入改善了金属间电子分布并抑制高温烧结趋势。热处理后形成的 MgO-NiO 固溶体结构，在载体表面形成稳定的金属氧化物分散相，提升热稳定性与反应活性分布均匀性。XPS 分析表明，Ni<sup>2+</sup>与 Ce<sup>4+</sup>之间存在电子转移现象，增强了金属之间的界面协同作用，有助于反应中间体的快速转化。

### （三）煅烧与还原工艺优化

催化剂在 750 - 900℃煅烧温度范围内进行结构调控，XRD 结果显示在 850℃附近形成的 NiO-MgO 固溶体具有晶格畸变效应，利于增强金属-载体间相互作用。还原气氛控制在 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 比例 1:4 时可实现 Ni 与 Fe 的还原态分布平衡，促进活性中心表面暴露并维持稳定粒径分布。TPR 与 TEM 结果表明还原态金属相粒径控制在 8 - 12 nm 之间，体系表现出良好的抗硫中毒、积碳抑制和高温抗烧结能力，在后续焦油裂解过程中的反应稳定性得以保障。机械强度测试结果显示样品在多次热冲击与振动加载后仍保持结构完整，满足燃料电池尾气处理装置的长期运行要求。

## 二、焦油裂解性能评价与协同作用机理探析

### （一）模型焦油裂解反应性能测试

固定床微反应装置内填充 1.5 g 筛分后催化剂样品，模型焦油选用甲苯和萘，气化后以 N<sub>2</sub> 作为载气送入反应区，温度设置为 700 - 850℃，空速控制在 300 - 1200 h<sup>-1</sup>，水碳比调节范围为 0.5 - 1.5。在不同反应条件下采集气体产物，利用 GC-FID 与 GC-TCD 联合分析甲烷、氢气、一氧化碳及 C<sub>2+</sub> 组分，量化裂解率与氢气产率<sup>[2]</sup>。

为比较各操作参数对裂解行为的影响，测试结果汇总并绘制为图1，图1显示随着温度升高，甲苯和萘的裂解率持续提升，在800℃时达到峰值，均超过91%；水碳比从0.5增加至1.5时，H<sub>2</sub>产率提升明显，H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>摩尔比由1.6升至2.3，反映水蒸气参与促进碳种转化并提升产氢选择性。空速增大会使气体停留时间缩短，反应转化程度略有下降，但气相选择性维持较优状态。热重分析表明，水碳比1.2以上可显著抑制积碳形成。重复反应测试显

示，该催化体系经5次循环后活性保持率高于97%，表现出良好反应稳定性。

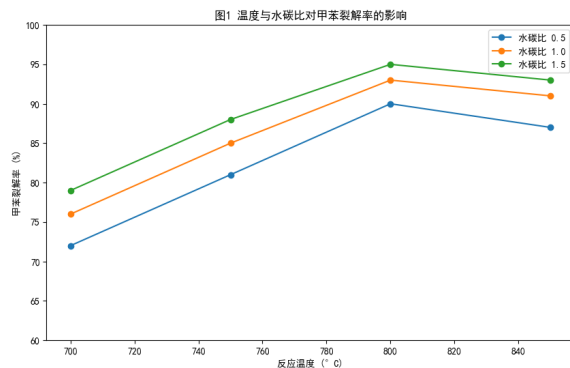


图1 温度与水碳比对甲苯/萘裂解性能的影响

### （二）金属组分协同机理分析

在 Ni 基催化剂中引入 Fe 元素后，裂解反应在含硫条件下表现出更高的稳定性。为定量评估 Fe/Ni 比例对抗硫能力的影响，设定尾气中 H<sub>2</sub>S 浓度为 500 ppm，考察不同 Fe 掺杂比例下的焦油裂解效率。图2结果显示 Fe/Ni 摩尔比分别为 0.0、0.1、0.2、0.3 与 0.4 时，裂解率由 58% 上升至 87%，Fe 含量过高时略有下降，最佳掺杂比例约为 0.3。XPS 分析确认 Ni 2p 峰位移动，表明 Fe 降低 Ni 对 S 的电子亲和力，TEM 图像显示表面形成纳米级 Ni-Fe 固溶结构，有效延缓硫中毒速率。

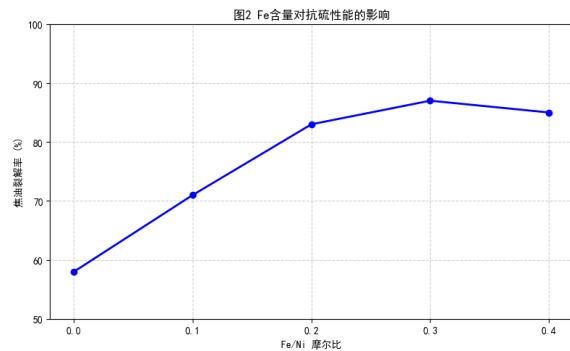


图2 Fe 含量对抗硫性能的影响

Ce 作为氧化还原助剂，增强了催化剂氧迁移能力和晶粒结构稳定性。TPR 曲线中低温还原峰前移，指示 Ce 引入降低 NiO 还原能垒，有利于在反应中维持活性相的动态再生。HRTEM 观察到 CeO<sub>2</sub> 与 NiO 之间形成紧密晶界结构，O 1s 谱图中高能态吸附氧比例提高，表明催化剂在富氧环境下具备强氧迁移能力，可有效清除中间碳种并降低积碳速率。

La 的存在在催化剂表面生成稀土氧化物覆盖层，干扰石墨化碳链生长路径。Raman 光谱中 D/G 强度比从 1.42 下降至 0.94，碳物种氧化温度由 610℃ 降至 465℃，表明碳结构由稳定石墨碳转向非晶态或弱结合碳。SEM 分析显示，La 引入后表面以非定向颗粒碳为主，结合 TGA 数据确认其易于在反应气氛中氧化清除。为系统归纳不同组分对催化剂结构与积碳行为的调控作用，将相关参数列于表1。数据表明，Ni-Fe-Ce-La-W 多金属协同体系晶粒尺寸最小、比表面积最大、积碳率最低、碳氧化温度最低，具明显协同强化效应。

表1 多金属掺杂对催化剂结构参数与积碳行为的影响

催化剂体系	NiO 晶粒尺寸 (nm)	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	积碳率 (wt%)	Raman D/G 强度比	碳氧化温度峰位 (°C)
Ni	21.3	47.2	8.4	1.42	610
Ni-Fe	15.6	52.8	6.1	1.33	575
Ni-Fe-Ce	12.9	61.5	4.5	1.18	528
Ni-Fe-Ce-La	11.4	66.7	3.2	1.06	493
Ni-Fe-Ce-La-W	9.7	68.9	2.7	0.94	465

三、燃料电池尾气循环应用验证

(一) 催化剂集成系统构建与工况设置

催化剂模块设计基于燃料电池阳极尾气净化与富氢回收需求，构建集成式在线裂解装置，系统核心结构包括进气控制、催化床层、产气回收与热管理单元。催化床反应区为316L不锈钢筒体，长度450 mm，内径25 mm，内部填充量为5.0 g 催化剂，粒径为20 - 40 目，采用双端限位结构保持气体稳定分布。上游气体成分采用模拟燃料电池运行尾气，包括 H<sub>2</sub> (15 vol%)、CH<sub>4</sub> (10 vol%)、CO (3 vol%)、CO<sub>2</sub> (10 vol%)、H<sub>2</sub>O (15 vol%)、N<sub>2</sub> (平衡) 及焦油模型物甲苯或萘（浓度约500 ppm），使用蒸汽加热器与尾气混合器保证高温高湿尾气成分一致<sup>[3]</sup>。

操作温度设定为800℃，催化床区温差控制在±5℃，空速设定为300 h<sup>-1</sup>，对应工况下保证尾气在床层内反应时间约为12秒，有效模拟实际电池尾气通量。系统搭载热电偶与在线红外气体分析模块，监测裂解产物中H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>与未反应焦油组分含量，并与高温预冷系统配合，控制回流气体温度不超过150℃以适配燃料电池阳极入口要求。整体系统构建结构示意图见图3，系统稳定运行前预热阶段通入N<sub>2</sub>吹扫30分钟，切换至模拟尾气后，在10分钟内温度与气体成分达到平衡。为评估催化反应稳定性，反应持续运行时间设定为100小时，周期性采样分析焦油残留与氢气含量变化，并同步记录系统背压、电池阳极气循环压力与温度。

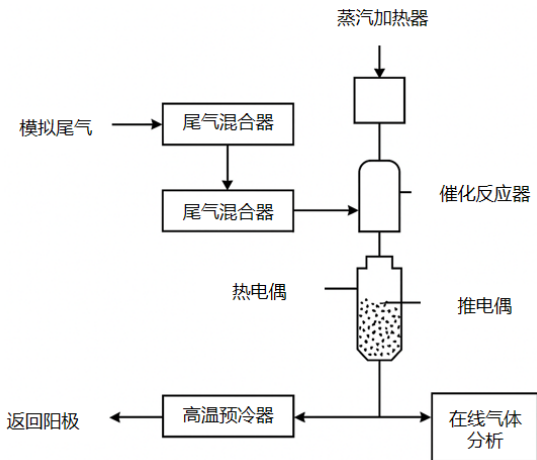


图3 催化剂在燃料电池尾气净化-回用系统中的布置结构

(二) 应用性能测试与系统反馈分析

实验结果表明，Ni-Fe-Ce-La-W多金属协同催化剂在800℃、空速300 h<sup>-1</sup>条件下表现出稳定的焦油裂解活性。在模拟燃料电池尾气中连续运行100小时期间，焦油转化率始终保持在95%以上，裂解产物中未检测到冷凝相焦油残留，产气稳定，未出现副反应逸出组分<sup>[4]</sup>。H<sub>2</sub>浓度从初始的17.2 vol%上升至18.0 vol%，CH<sub>4</sub>浓度逐步下降，表明甲烷转化过程有效进行，提升了气体的氢能密度。为展示反应过程中的稳定性变化趋势，焦油转化率与氢气浓度在不同运行时间下的动态数据见图4。该催化体系在长时间运行下裂解性能与产氢能力无明显衰减，焦油转化率波动范围控制在±0.3%以内，氢气浓度保持稳定爬升，说明催化床层无中毒失活现象，Ni活性相在多金属协同作用下得到动态稳定。

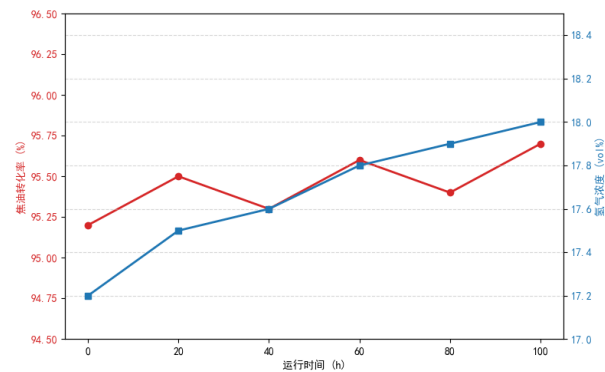


图4 连续运行条件下焦油转化率与氢气浓度变化曲线

系统运行结束后，催化剂样品经热重分析表明积碳量为2.7 wt%，显著低于未经处理尾气系统中的7.2 wt%。Raman分析中D/G强度比低于1.0，碳种以非石墨化为主；碳氧化温度峰位在465℃，属于易氧化清除的弱结合碳，未形成阻塞性结构。反应器结构经检视无烧结脱落或床层粉化，阳极气路径压降无明显变化，验证该系统在气体流动性与热力耦合稳定性方面表现良好。

富氢气体经过热交换冷却至150℃以下后被引入阳极回流通，重新参与电化学反应过程，燃料利用率由63%提升至82%。发电过程极化曲线分析表明阳极电压衰减速率由原本的0.62 V/100 h降低至0.38 V/100 h，反映阳极催化层中碳沉积速率明显下降，有效提升了电池运行寿命。发电效率相对提升约4.8%，能量损失大幅减少，系统整体能效结构得到优化。为进一步归纳该集成系统在尾气处理与燃料电池响应中的关键性能变化，表2列明转化效率、氢回收、积碳指标、电压衰减与发电效率等技术参数，与未加催化剂条件形成对比，展现出显著性能提升。表中数据显示，加装裂解催化剂后，单位发电下的焦油处理能耗下降超过65%，阳极碳沉积量超过60%，尾气中焦油未转化残留显著减少。

表2 催化剂尾气处理系统运行性能与电池响应对比

项目	未加催化剂系统	加催化剂处理系统
焦油转化率 (%)	< 30	≥ 95
氢气回收浓度 (vol%)	14.8	18
阳极氢气利用率 (%)	63	82
系统发电效率提升幅度 (%)	—	4.8
阳极碳沉积量 (wt%)	7.2	2.7

阳极电压衰减速率 (V/100h)	0.62	0.38
积碳碳氧化温度峰位 (°C)	610	465
尾气处理能耗占比 (%)	9.6	3.1
单位发电焦油处理成本 (元 /kWh)	0.045	0.026

四、结语

本文构建了基于白云石与橄榄石的 Ni-Fe-Ce-La-W 多金属催化剂体系，形成了高分散度的 MgO-NiO 固溶体结构，在 850℃

热处理与优化还原气氛下展现出良好的热稳定性与抗烧结能力。固定床实验表明，该催化剂在甲苯与萘裂解中实现超过 91% 的转化率，H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 比提升显著，协同组分有效缓解 Ni 硫中毒、增强晶粒稳定性并抑制积碳生成。在燃料电池尾气集成测试中，催化剂稳定运行 100 小时，焦油转化率高于 95%，富氢产物成功回流阳极，阳极碳沉积减少 62%，系统效率提升 4.8%。该研究验证了该催化剂在燃料电池尾气循环场景中的高效性与可持续性，为构建洁净氢能体系提供催化材料方案与系统集成路径。

参考文献

[1] 孟德昌, 赵渊, 张亚青, 等. 煤焦油裂解催化剂制备及催化裂解特性 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(02): 139–148.

[2] 陈文轩, 刘鹏, 李学琴, 等. 生物质焦油催化裂解催化剂的研究进展 [J]. 林产工业, 2022, 59(03): 41–48.

[3] 王聪哲, 许桂英. 天然非均相焦油裂解催化剂研究进展 [J]. 现代化工, 2018, 38(12): 34–38+40.

[4] 翟建荣, 张艳敏, 莫文龙, 等. 制备方法对煤焦油模型化合物裂解催化剂 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结构及性能的影响 [J]. 燃料化学学报, 2018, 46(09): 1063–1073.

# 多宝山—黑河地区典型金矿床成矿作用差异性

闫宝龙<sup>1,2</sup>, 李国栋<sup>1,2</sup>, 籍哲羽<sup>1,2</sup>, 胡玲云<sup>1,2</sup>, 林楠<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/ME.2025040019

**摘 要 :** 多宝山—黑河地区金矿资源丰富, 研究其典型金矿床成矿作用差异性对深入理解区域成矿规律及找矿具有重要意义。本文详细剖析了该地区争光、三道湾子等典型金矿床地质特征, 从成矿物质来源、流体性质、成矿温度及压力、构造控制等方面深入探讨成矿作用差异性。通过分析, 旨在为该地区后续金矿勘查及成矿理论研究提供了重要参考依据。

**关 键 词 :** 多宝山—黑河地区; 金矿床; 成矿作用; 差异性

## Differences in mineralization of typical gold deposits in the Duobaoshan-Heihe area

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

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

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

**Abstract :** The Duobaoshan-Heihe area is rich in gold resources, and studying the differences in mineralization of typical gold deposits is important for a deeper understanding of regional metallogenic laws and prospecting. This article provides a detailed analysis of the geological characteristics of typical gold deposits such as Zhengguang and Sandaowanzi in the region, and deeply explores the differences in mineralization from the aspects of ore-forming material sources, fluid properties, ore-forming temperature and pressure, and tectonic control. Through analysis, it aims to provide an important reference for subsequent gold exploration and metallogenic theory research in the region.

**Keywords :** Duobaoshan-Heihe area; gold deposits; mineralization; difference

## 引言

多宝山—黑河地区大地构造位置处于兴蒙造山带东段, 区域内构造运动频繁, 岩浆活动强烈, 具备极为有利的金成矿地质条件。近年来, 该地区陆续发现了争光、三道湾子等多个具有一定规模的金矿床, 这些金矿床的产出, 表明该区域具有巨大的金矿找矿潜力。不同金矿床在地质特征、成矿作用等方面存在一定差异, 深入研究这些差异性, 对于准确把握区域成矿规律、有效指导后续金矿勘查工作以及完善区域成矿理论体系均具有重要意义。目前, 针对该地区单个金矿床的研究已有不少成果, 但对各典型金矿床成矿作用差异性的系统对比研究仍显不足。

## 一、区域地质背景

多宝山—黑河地区位于兴蒙造山带东段, 大地构造位置特殊。区域内出露地层涵盖新元古界至新生界。新元古界为结晶基底, 以片麻岩、变粒岩等变质岩为主。古生界地层丰富, 奥陶系多宝山组海相火山岩与铜金成矿关联紧密, 其铜、金含量远超黑龙江省平均背景值与地壳克拉克值。中生界以陆相火山岩和沉积岩为主, 新生界为松散沉积物。

区域构造复杂, 主要构造线呈 NW 向、NE 向和近 EW 向。NW 向的罕达气—多宝山—三矿沟断裂规模宏大, 深刻影响地层、岩浆岩分布及矿产形成。NE 向构造与 NW 向相互交织, 构建起区域构造格架, 为矿液运移和富集创造条件<sup>[1]</sup>。岩浆活动贯穿多期, 加里东期、华力西期、印支期和燕山期均有岩浆岩产出<sup>[2]</sup>。燕山期岩浆活动与金成矿关系尤为密切, 形成众多与金成矿相关的浅成—超浅成侵入体, 如花岗斑岩、闪长玢岩等, 为金成矿提供物质基础与热动力。

通讯作者: 林楠, 邮箱: 444012756@qq.com



## 二、典型金矿床地质特征

### （一）争光金矿床

#### 1. 矿区地质

矿床位于嫩江县境内，赋矿地层为中奥陶统多宝山组火山岩，岩性以安山岩、凝灰岩为主<sup>[3]</sup>。矿体受 NW 与 NE 向断裂交汇带控制，呈脉状、透镜状产出，共圈定矿体 28 条，单矿体长 50 ~ 350m，平均厚度 1.2 ~ 3.8m，平均品位 3.5 ~ 8.2g/t。

#### 2. 矿石特征

金属矿物以黄铁矿（含量 5% ~ 12%）、黄铜矿（1% ~ 3%）为主，自然金呈微粒状（0.01 ~ 0.05mm）赋存于黄铁矿裂隙中<sup>[4]</sup>。

脉石矿物为石英（30% ~ 50%）、绢云母（10% ~ 20%）。矿石结构以半自形粒状为主，构造呈浸染状、条带状。

#### 3. 围岩蚀变

蚀变类型包括硅化、黄铁矿化、绢云母化，具明显分带性：矿体中心为强硅化 - 黄铁矿化带（石英含量 > 60%），向外过渡为绢云母化带（绢云母含量 20% ~ 30%），外围为绿泥石化带<sup>[5]</sup>。

### （二）三道湾子金矿床

#### 1. 矿区地质

矿床位于黑河市西北 50km，赋矿地层为上侏罗统塔木兰沟组粗安岩。矿体受 NW 向断裂带控制，呈脉状成群产出，单矿体长 100 ~ 800m，平均厚度 0.8 ~ 5.2m，平均品位 4.2 ~ 10.5g/t。

#### 2. 矿石特征

金属矿物以碲金矿（2% ~ 5%）、斜方碲金矿（1% ~ 3%）为主，含少量自然金（< 1%）。脉石矿物为玉髓（40% ~ 60%）、高岭石（10% ~ 15%）<sup>[6]</sup>。矿石结构具碎裂结构、交代结构，构造以角砾状、网脉状为特征。

#### 3. 围岩蚀变

蚀变以硅化、高岭土化为主，伴生黄铁矿化。蚀变强度与矿体距离正相关，矿体附近硅化率 > 70%，向外 50m 内降至 30% 以下。

### （三）其他矿床简述

宽河金矿床赋存于古生界变质岩与中生代花岗岩接触带，矿体受 NE 向断裂控制，矿石矿物为自然金 - 黄铁矿组合，平均品位 2.8 ~ 6.5g/t。上马场金矿床产于侏罗系火山岩中，以石英 - 自然金脉为特征，平均品位 3.0 ~ 5.8g/t。

## 三、成矿作用差异性分析

### （一）成矿物质来源差异

#### 1. 争光金矿床

通过对争光金矿床矿石铅同位素研究发现，其铅同位素组成变化范围相对较窄， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值在 18.3-18.6 之间， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值在 15.5-15.7 之间， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值在 38.5-39.0 之间。这种铅同位素组成特征与区域内燕山期岩浆岩的铅同位素组成较为相似，表明其成矿物质可能主要来源于燕山期岩浆活动，同时可能有少量地层物质的参与。对矿石硫同位素分析显示， $\delta^{34}\text{S}$  值集中在 -2‰ ~ +2‰ 之间，接近陨石硫同位素组成，说明硫源具有深源岩浆特征<sup>[7]</sup>。此外，稀土元素分析结果表明，矿

石稀土元素配分模式与燕山期闪长玢岩相似，具有轻稀土相对富集、重稀土相对亏损的特点，进一步佐证了成矿物质主要来源于岩浆。

#### 2. 三道湾子金矿床

三道湾子金矿床铅同位素组成变化范围相对较宽， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值在 18.1-18.8 之间， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值在 15.4-15.8 之间， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值在 38.0-39.5 之间。这表明其成矿物质来源较为复杂，可能既有岩浆来源，又有地层来源。硫同位素分析结果显示， $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围为 -4‰ ~ +6‰，离散度较大，说明硫源可能来自多个方面，除岩浆硫外，可能有部分地层硫的混入。氢氧同位素研究发现，成矿流体的  $\delta\text{D}$  值在 -120‰ ~ -80‰ 之间， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 4‰ ~ 8‰ 之间，显示成矿流体主要为岩浆水与大气降水的混合水，这也暗示成矿物质来源的复杂性，大气降水在运移过程中可能萃取了地层中的部分成矿物质。

#### 3. 对比总结

总体来看，争光金矿床成矿物质来源相对较为单一，主要与燕山期岩浆活动密切相关，岩浆提供了主要的成矿物质和热动力。而三道湾子金矿床成矿物质来源更为复杂，岩浆、地层以及大气降水在成矿过程中均起到了重要作用，不同来源物质的混合使得成矿体系更加复杂多样。这种成矿物质来源的差异，可能是由于两个矿床所处地质环境不同以及成矿时期构造 - 岩浆活动的差异所导致。争光金矿床位于燕山期岩浆活动强烈区域，岩浆岩与矿床空间关系紧密；而三道湾子金矿床所在区域地层发育，且经历了多期构造运动，地层物质更容易参与到成矿过程中，同时大气降水的混入也改变了成矿流体的性质和物质组成。

### （二）成矿流体性质差异

#### 1. 争光金矿床

对争光金矿床流体包裹体研究表明，成矿流体主要为  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  体系，流体包裹体均一温度范围较广，在 150-350℃ 之间，峰值温度约为 250℃。盐度（ $w(\text{NaCl})_{\text{eq}}$ ）范围在 5% ~ 15% 之间，属于中低盐度流体。流体密度在 0.8-1.0g/cm<sup>3</sup> 之间。从成矿早期到晚期，流体包裹体均一温度和盐度呈现出逐渐降低的趋势。这表明成矿过程中，随着温度和压力的降低，成矿流体与围岩发生了充分的物质交换和化学反应，导致流体性质发生改变<sup>[8]</sup>。在成矿早期，高温、中低盐度的流体从岩浆中分离出来，携带大量成矿物质沿断裂等通道运移；到了成矿晚期，流体温度和盐度降低，成矿物质逐渐沉淀析出。

#### 2. 三道湾子金矿床

三道湾子金矿床流体包裹体研究显示，其成矿流体同样为  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  体系，但均一温度范围相对较窄，在 120-280℃ 之间，峰值温度约为 200℃。盐度（ $w(\text{NaCl})_{\text{eq}}$ ）范围在 3% ~ 10% 之间，属于低盐度流体。流体密度在 0.7 ~ 0.9g/cm<sup>3</sup> 之间。与争光金矿床不同的是，三道湾子金矿床成矿流体在不同阶段温度和盐度变化相对较小。这可能是由于该矿床成矿过程中受大气降水影响较大，大气降水的持续混入稀释了成矿流体，使得流体性质相对稳定。在成矿早期，岩浆水与大气降水混合形成成矿流体，随着成矿作用进行，大气降水的比例可能逐渐增加，但由于其持续稳定的补给，使得流体温度、盐度等性质没有发生剧烈变化。

#### 3. 对比总结

相比之下，争光金矿床成矿流体温度和盐度相对较高，且在

成矿过程中变化明显,反映出其成矿过程与岩浆热液活动关系密切,岩浆热液在成矿过程中占据主导地位,随着成矿进行,热液与围岩相互作用强烈。而三道湾子金矿床成矿流体温度和盐度较低,且变化相对平稳,说明大气降水在成矿流体中起到了重要作用,成矿过程受外界因素(如大气降水补给)干扰较大,导致流体性质相对稳定。这种成矿流体性质的差异,对金的迁移和沉淀机制产生了重要影响,进而影响了矿床的形成和矿石特征。

### (三) 成矿温度和压力差异

#### 1. 争光金矿床

根据流体包裹体测温以及矿物共生组合关系等方法估算,争光金矿床成矿温度范围为150–350℃,平均成矿温度约为250℃。利用流体包裹体压力计估算成矿压力,结果显示成矿压力在100–300MPa之间。在成矿早期,温度和压力相对较高,随着成矿作用的进行,温度和压力逐渐降低。例如,在石英–黄铁矿阶段,成矿温度可达300–350℃,压力在250–300MPa;到了石英–碳酸盐阶段,温度降至150–200℃,压力也降低至100–150MPa。这种温度和压力的变化

#### 2. 三道湾子金矿床

三道湾子金矿床成矿温度范围120–280℃,平均约200℃,相比争光金矿床温度较低。成矿压力估算结果显示在80–200MPa之间,低于争光金矿床。成矿过程中温度和压力变化相对缓和,未出现大幅度波动。这与该矿床成矿流体受大气降水影响大有关,大气降水持续补给使成矿体系相对稳定,温度和压力变化不明显。相对较低的温度和压力条件,决定了该矿床成矿过程中矿物沉淀机制与争光金矿床不同,可能更利于低温矿物组合形成,如碲化物等在这种环境下更易沉淀富集。

#### 3. 对比总结

两矿床成矿温度和压力存在明显差异。争光金矿床成矿温度和压力较高,且变化显著,反映其成矿受岩浆热液主导,热液活动对成矿过程影响强烈。三道湾子金矿床成矿温度和压力较低,变化缓和,表明大气降水参与的成矿过程相对稳定。这种差异影响了成矿化学反应速率、矿物结晶顺序和沉淀方式,是造成两矿床矿石矿物组合和结构构造不同的重要因素<sup>[9]</sup>。例如,争光金矿床较高温度和压力下,可能形成结晶程度较好、高温稳定的矿物;而三道湾子金矿床较低温度和压力环境,有利于形成一些低温矿物和特殊矿物组合,如碲化物等。

### (四) 构造控制作用差异

#### 1. 争光金矿床

争光金矿床受NW、NE、NNE向断裂构造联合控制。这些断裂相互交织,形成复杂的构造网络,为成矿流体运移和矿体定位

提供通道与空间。NW向断裂规模大,切割深,是区域重要的导矿构造,可将深部岩浆热液引导至浅部;NE和NNE向断裂则对矿体分布和形态起到重要控制作用,矿体多沿这些断裂的次级构造或交汇部位产出。例如,在断裂交汇区域,应力集中,岩石破碎程度高,有利于成矿流体聚集和沉淀,形成富矿体。此外,构造活动的多期性也影响了矿床形成,早期构造活动为岩浆侵入创造条件,后期构造活动则促使成矿流体再次运移和富集,对矿体进行叠加改造。

#### 2. 三道湾子金矿床

三道湾子金矿床主要受NW向断裂控制,该断裂规模较大,走向稳定,是控矿的关键构造。断裂带内岩石破碎,形成良好的容矿空间,成矿流体沿断裂带上升并充填其中,形成脉状矿体。与争光金矿床不同,该矿床较少受其他方向断裂明显影响,矿体形态和分布主要取决于NW向断裂的产状和规模变化。断裂的张性特征有利于成矿流体的运移和扩散,使得矿化范围相对较广。同时,断裂活动的阶段性控制了成矿过程,不同阶段的断裂活动导致成矿流体多次注入,形成多期矿化叠加,使矿体厚度和品位在一定范围内变化。

#### 3. 对比总结

虽然争光金矿床和三道湾子金矿床都受断裂构造控制,但构造控制作用存在明显差异。争光金矿床受多组断裂联合控制,构造网络复杂,为成矿提供了更多的运移通道和容矿空间,且构造活动的多期性对矿床叠加改造作用显著。三道湾子金矿床主要受单一方向NW向断裂控制,构造控矿作用相对简单直接,断裂的张性特征和阶段性活动对矿体形成和矿化特征影响较大。这种构造控制作用的差异,使得两矿床在矿体形态、规模、分布规律以及矿化强度等方面表现出不同特点<sup>[10]</sup>。例如,争光金矿床矿体形态更复杂,在断裂交汇部位易出现富矿体;而三道湾子金矿床矿体沿NW向断裂呈相对规则的脉状产出,矿化连续性较好。

## 四、结语

多宝山—黑河地区典型金矿床成矿作用差异显著:争光金矿成矿物质以岩浆源为主,成矿流体为中高温、中低盐度岩浆热液,成矿压力100–300MPa,受多组断裂控制;三道湾子金矿物质来源复杂,流体为中低温、低盐度混合流体,压力80–200MPa,受单一NW向断裂控制。这种差异由构造演化、地层性质及流体–围岩作用决定,形成“岩浆驱动”与“多元混合”模式。研究存在成矿时代与深部流体研究不足,未来需结合定年与建模技术深入探索,为深部找矿提供指导。

## 参考文献

- [1] 刘宝山,张春鹏,程招勋,等.黑龙江争光大型金矿成矿流体 He–Ar–S 同位素组成及成矿流体来源的示踪[J].中国地质,2023,50(03):952–961.
- [2] 崔子佳,陈建平,朱仁维,等.黑龙江多宝山—黑河地区铜多金属矿综合信息定量预测[J].地质学刊,2023,47(01):54–65.
- [3] 郝宇杰.黑龙江省多宝山矿集区成矿作用与成矿规律研究[D].吉林大学,2015.
- [4] 龚晶晶,赵海旋,唐世新,等.黑龙江黑河争光金矿异常结构模式研究[J].地质与勘探,2017,53(02):247–258.
- [5] 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.
- [6] 张志华,孙丰月,舒旭.黑龙江三道湾子金矿 Au–Ag–Te 系列矿物特征及其成矿阶段分析[J].地质与勘探,2018,54(S1):1416–1424.
- [7] Heald P, Foley N K, Hayba D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic–hosted epithermal deposits acid–sulfate and adularia–sericite types U[J]. Economic Geology, 80: 1–26.
- [8] 阮诗昆.黑龙江嫩江三矿沟—多宝山—争光成矿带地质特征与成矿规律[J].地质学刊,2019,43(01):50–56.
- [9] 张朋,乔树岩,赵华伟,等.黑龙江伊春蜂房沟金矿流体包裹体特征及矿床成因机制[J].世界地质,2011,30(03):335–344.
- [10] 杨继权,杨钦.论黑龙江右岸北西向构造带的确立及其对成矿的控制作用[J].地质与资源,2015,24(05):428–432.



# 氧化镁自密实混凝土在水利工程中的应用研究

朱一正

蚌埠市江河水利工程建设有限责任公司, 安徽 蚌埠 233400

DOI:10.61369/ME.2025040032

**摘 要 :** 本研究以 MgO 分别替代 0%、3%、6%、9%、12% 水泥质量, 制备自密实混凝土 (SCC) 试件, 并测试其流动性、凝结时间、抗压强度及 28 d 自收缩。结果表明: 当 MgO 掺量  $\leq 6\%$  时, SCC 仍满足施工性能要求, 但随 MgO 掺量增加, V 型漏斗时间和凝结时间显著延长; 在抗压强度方面, SC6 组 (MgO 6%) 3 d、7 d 和 28 d 强度分别达 18.7 MPa、27.4 MPa 和 36.4 MPa, 较对照组 SC0 分别提高 23.8%、7.9% 和 8.3%, 这主要归因于 MgO 膨胀效应改进界面致密性及 MgO 激发矿渣活性促进 C-S-H 生成; 当 MgO 掺量  $>6\%$  时, 过量  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  结晶造成微裂缝增多和活性钙源不足, 反而使强度下降。自收缩方面, SC0 至 SC12 的 28 d 自收缩值从  $115 \mu\epsilon$  逐步降至  $80 \mu\epsilon$ , 表明 MgO 膨胀产物与水泥-矿渣水化收缩良性耦合, 有效减少变形。综上, 在确保施工性能和体积稳定性的前提下, 6%MgO 是提高抗压强度并降低自收缩的最佳掺量, 为大体积 SCC 在水利工程中的应用提供了配比参考。

**关 键 词 :** 自密实混凝土; 氧化镁; 水利工程; 抗裂性; 自收缩

## Research on the Application of Magnesium Oxide Self-Compacting Concrete in Water Conservancy Projects

Zhu Yizheng

Bengbu Jianghe Water Conservancy Engineering Construction Co., LTD. Bengbu, Anhui 233400

**Abstract :** In this study, MgO was used to replace 0%, 3%, 6%, 9%, and 12% of cement mass respectively to prepare self-compacting concrete (SCC) specimens, and their fluidity, setting time, compressive strength, and 28-day self-shrinkage were tested. The results show that when the MgO dosage is  $\leq 6\%$ , SCC still meets the construction performance requirements. However, with the increase of MgO dosage, the V-funnel time and setting time are significantly prolonged. In terms of compressive strength, the SC6 group (MgO 6%) achieved strengths of 18.7 MPa, 27.4 MPa and 36.4 MPa at 3 days, 7 days and 28 days respectively, which were 23.8%, 7.9% and 8.3% higher than those of the control group SC0 respectively. This is mainly attributed to the improvement of interfacial compactness by the MgO expansion effect and the promotion of C-S-H formation by the MgO activation of slag activity. When the MgO dosage is greater than 6%, excessive  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  crystallization leads to an increase in micro-cracks and insufficient active calcium sources, which instead causes a decrease in strength. In terms of self-shrinkage, the 28-day self-shrinkage values of SC0 to SC12 gradually decreased from  $115 \mu\epsilon$  to  $80 \mu\epsilon$ , indicating a good coupling between the expansion products of MgO and the hydration shrinkage of cement-slag, effectively reducing deformation. In conclusion, under the premise of ensuring construction performance and volume stability, 6%MgO is the optimal dosage for enhancing compressive strength and reducing self-shrinkage, providing a proportioned reference for the application of large-volume SCC in water conservancy projects.

**Keywords :** self-compacting concrete; magnesium oxide; water conservancy projects; crack resistance; self-contraction

## 引言

随着我国水利工程建设规模持续扩大, 混凝土结构正面临更为严苛的服役环境。高水头、大流速、干湿循环、冻融交替等因素长期作用于混凝土构件, 易诱发裂缝、渗漏与耐久性性能衰退, 直接威胁工程服役安全与寿命。因此, 如何提升水工混凝土的整体性能, 尤其是其工作性、体积稳定性及抗裂性能, 已成为当前工程界与材料学界关注的研究热点。

自密实混凝土 (Self-Compacting Concrete, SCC) 具有良好的流动性、稳定性与充盈能力, 能在无需振捣的条件下实现自动流动

与密实，特别适用于钢筋密集、水流路径复杂的水工结构<sup>[1-2]</sup>。然而，SCC通常采用较低水胶比与高胶凝材料掺量，并辅以大量高效减水剂，以实现其流动性要求，这一配合设计导致其内部孔隙压力大、胶体结构发展不均，早期极易产生显著自收缩及收缩裂缝<sup>[3-4]</sup>，在大体积或约束构件中表现尤为突出，严重制约其在水利工程中的大规模推广应用。

为缓解 SCC 早期体积变形所带来的开裂风险，国内外研究者开展了多种调控手段的探索，包括内部养护、纤维增强、活性粉体调整及掺加膨胀组分等。其中，氧化镁（MgO）作为一种缓释型膨胀掺合料，因其水化生成体积膨胀的氢氧化镁（Mg(OH)<sub>2</sub>），具备显著的收缩补偿潜力<sup>[5-6]</sup>。MgO在碱性环境下还可促进类水滑石（hydrotalcite-like）相的生成，该相具有较大的体积和良好的分布稳定性，能有效填充浆体孔隙、缓解毛细压力、提升混凝土的微观均质性<sup>[7]</sup>，对提升混凝土的抗裂性与长期耐久性具有重要意义。

尽管研究表明 MgO 对调控水泥基材料体积稳定性具有积极作用，但其在 SCC 体系中的综合影响机理尚不清晰。MgO 可能改变浆体的流变行为、水化速率、孔隙结构与水化产物类型，其对混凝土工作性、凝结行为、力学性能及收缩控制等多个方面存在耦合效应<sup>[8]</sup>。尤其在低水胶比、高流动性要求的 SCC 体系中，MgO 的实际效能与适宜掺量仍需通过系统实验加以明确，为其在水工结构中的应用提供理论支撑与参数指导。

## 一、试验

### （一）原材料

试验用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥产自海螺水泥有限公司；矿物掺合料选用 S105 级高炉矿渣粉和 I 级粉煤灰；分析纯轻质氧化镁（A.R.，纯度≥98%），购自天津市致远化学试剂有限公司；细骨料为中砂，细度模数 2.6，含泥量 <2%；粗骨料为连续级配碎石，粒径 5 - 20 mm，压碎值 <10%。外加剂采用聚羧酸高效减水剂（减水率约 30%）。试验用水为洁净城市自来水。

### （二）配合比与样品制备

为研究氧化镁对自密实混凝土工作性、自收缩和力学性能的影响，在保持总胶凝材料用量不变的前提下，控制 MgO 的掺量分别为 0%、3%、6%、9%、12%（占胶凝材料质量百分比），并替代等量水泥。水胶比统一为 0.35，砂率为 45%。减水剂掺量均为 1%。详细配合比见表 1。

表 1 不同 MgO 掺量自密实混凝土配合比（单位：kg/m<sup>3</sup>）

编号	MgO	水泥	矿渣粉	粉煤灰	水	中砂	碎石
M0	0	300	60	40	140	850	900
M3	9	291	60	40	140	850	900
M6	18	282	60	40	140	850	900
M9	27	273	60	40	140	850	900
M12	36	264	60	40	140	850	900

### （三）方法

为全面评估 MgO 对自密实混凝土的工作性能的影响，采用 V 型漏斗试验测定其流动粘聚性，J 环试验评价其钢筋间流动阻力，L 型箱试验用于检测其在绕过障碍后的填充能力与通过性。按照表 1 配比制得净浆，并装入维卡仪模具中，在标准养护条件下测试净浆凝结时间。

根据表 1 配比制备 100mm<sup>3</sup>立方体试件检测抗压强度。放入温度（20±3）℃，相对湿度大于 95% 的标准养护室里养护 24h 后拆模，养护至 3 d，7 d，28 d 进行抗压强度测试。试块 3 个一组，测试结果取平均值，并报告标准差。

采用波纹管法测定自密实混凝土自收缩。新拌混凝土分层装入 φ30 mm × 500 mm 波纹塑料管中，每层振动密实后密封。养

护条件为标准养护室，使用位移计每日记录前 14 天长度变化，14 天后每 7 天记录一次，监测至 28 天。自收缩应变按下式计算：

$$\mu_s = (L_T - L_0) \times \frac{10^6}{L_0} \quad (1)$$

其中：L<sub>T</sub> 为龄期 t 时刻长度，L<sub>0</sub> 为初始长度。

## 二、结果与讨论

### （一）流动性与凝结时间分析

自密实混凝土（SCC）以优异的流动性和充盈能力广泛应用于水利工程等复杂结构中，其施工性能对成型质量与结构安全至关重要。氧化镁（MgO）作为活性掺合料，通过调控浆体粘度和水化速率，可显著影响 SCC 的工作性与凝结行为。试验结果表明，MgO 掺量从 0% 增加至 12% 时，V 型漏斗时间由 7.8 s 增至 13.2 s，J 环扩展度由 720 mm 降至 590 mm，L 型箱阻塞比由 0.88 降至 0.72，表明 MgO 掺入降低了拌合物的流动性与通过性。

上述性能变化主要归因于 MgO 颗粒细度大、吸水性强，增加浆体黏度，部分水化形成的 Mg(OH)<sub>2</sub> 亦对流动性形成阻碍。但在掺量不超过 6% 时，SCC 各项工作性指标仍满足相关规范要求，具备良好施工适应性。

MgO 同时显著延缓了混凝土的凝结进程，初凝与终凝时间分别由 3.2 h 和 4.1 h 延长至 6.1 h 和 8.0 h。该效应主要源于 MgO 水化缓慢、释碱能力弱，抑制了胶凝组分的活化与凝胶结构形成，延迟水化进程。

综合来看，MgO 掺量控制在 3%~6% 可在保障 SCC 施工性的基础上，延长可操作时间，适应水利工程中钢筋密集、输送距离远等复杂工况，具备良好工程应用潜力。

### （二）抗压强度

在保持总胶凝材料用量、水胶比及砂率一致的前提下，随着 MgO 掺量的增加，自密实混凝土在各龄期的抗压强度呈先升高后降低的趋势。以 SC6 组（MgO 掺量为 6%）为例，其 3 天、7 天、28 天的抗压强度分别达到 18.7、27.4 和 36.4 MPa，均显著高于未掺 MgO 的对照组 SC0（15.1、25.4、33.6 MPa），表明适量 MgO

有助于早期与后期强度的同步增长。

造成上述提升的主要原因可能包括两个方面：一是 MgO 与水反应生成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其晶体填充孔隙并产生微膨胀效应，有助于提高界面过渡区密实性与整体结构致密度；二是 MgO 具有碱性活性，可显著激发矿渣的潜在火山灰活性，加速其与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成 C-S-H 凝胶，从而增强胶结体系的强度发展。因此，MgO 在此体系中不仅仅充当膨胀组分，其“辅助激发剂”的功能可能是强度提升的关键机制之一。

然而，当 MgO 掺量超过 6%（SC9 与 SC12）时，强度反而下降，这可能与以下因素有关：一方面，过量  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  的生成将形成大体积结晶产物，导致内部微裂缝和毛细孔结构扩展，破坏整体结构完整性；另一方面，大量 MgO 取代了部分水泥，会降低体系中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量，从而削弱对矿渣的激发效果，反使后期强度增长受限。综合分析表明，在矿渣参与反应的胶凝体系中，MgO 存在一个最佳掺量区间，以充分发挥其激发与膨胀双重作用。

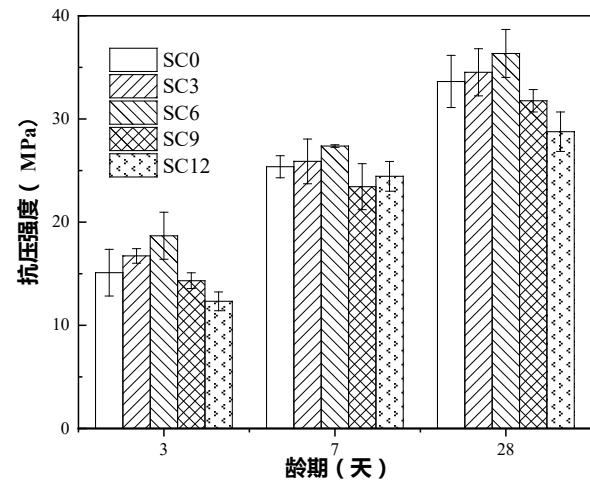


图1 MgO 掺量对 SCC 抗压强度的影响

（三）自收缩

自收缩测试结果显示，随着 MgO 掺量的增加，自密实混凝土在 28 天龄期的自收缩值逐渐下降，从 SC0 组的  $115\ \mu\text{ε}$  降至 SC12 组的  $80\ \mu\text{ε}$ ，降幅约 30%。这一趋势明确表明 MgO 在限制自收缩方面具有显著效果，其作用机制主要归结为其水化产物  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  在硬化早期的体积膨胀作用，可有效抵消由于水泥与矿渣反应产生的体积收缩。

更重要的是，由于本体体系中含有矿渣，MgO 激发矿渣反应不

仅提升了 C-S-H 凝胶产物的生成速率和数量，还可能通过促进早期水化释放更多热量，加快凝结硬化进程，从而在更短时间内形成具有膨胀能力的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  结晶结构。这一过程与矿渣自收缩高峰出现时间的提前产生了良性耦合，使得 MgO 的膨胀效应与自收缩过程更好匹配，从而实现收缩补偿效果最大化。

此外，较高掺量（如 SC9 与 SC12）虽对强度有所不利，但其自收缩值却最低，说明 MgO 膨胀效应主导了体积变化过程。若工程对体积稳定性要求高，可结合强度与收缩双重指标综合确定 MgO 合理掺量，避免“过补偿”带来的结构劣化风险。

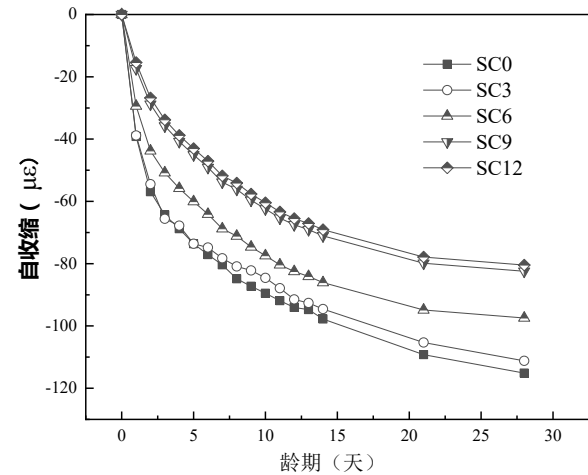


图2 MgO 掺量对 SCC 混凝土 28 天内自收缩的影响

三、结论

研究表明，适量掺入 MgO 的自密实混凝土（以 6% MgO 为最佳）既能满足施工流动性和凝结时间要求，又能显著提升抗压强度和减小自收缩；其机理在于 MgO 水化生成的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  微膨胀可改善界面密实度，同时 MgO 激发矿渣活性促进 C-S-H 凝胶形成，从而提高早晚期强度，并通过膨胀效应补偿水泥—矿渣水化收缩；当 MgO 掺量超过 6% 时，过量  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  易产生微裂缝且  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  不足以激发矿渣，导致强度下降；基于施工性能、力学性能与体积稳定性的综合平衡，6% MgO 应作为大体积自密实混凝土在水利工程中推荐的掺量，并可结合延长养护时间进一步抑制收缩开裂。

参考文献

[1] 庄金平, 孙伟浩. 橡胶自密实混凝土与普通混凝土黏结抗剪性能试验研究 [J]. 混凝土, 2025, (04): 34-38.  
[2] 魏建修, 刘清, 闫浩, 等. 冻融循环作用下再生骨料自密实混凝土抗冻性能及损伤本构模型建立 [J]. 混凝土, 2025, (04): 90-97+106.  
[3] 李静, 呼浩楠. 纤维增强自密实混凝土力学性能与孔结构特征 [J/OL]. 复合材料学报, 1-13. 2025.  
[4] 何平, 叶智远. 粘度改性材料对 C40 自密实混凝土性能影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52(02): 27-31.  
[5] 刘子源, 毕万利, 关岩, 等. 焙烧菱镁尾矿制 MgO 膨胀剂对水泥砂浆膨胀性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24(03): 466-472.  
[6] 卢存, 李华, 徐文, 等. MgO 膨胀剂对长龄期混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(05): 524-529.  
[7] 齐广政, 张强, 刘宣. 脱硫石膏对铝酸钙—电石渣协同激发超硫酸盐水泥水化特性的调控机理 [J/OL]. 硅酸盐通报, 1-10.  
[8] 焦茂鹏, 王鹏刚, 田砾, 等. 低活性氧化镁膨胀剂对混凝土微结构、收缩和耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2905-2913.

# 浅析集中供热管网腐蚀原因及防护措施

王岳

中煤科工清洁能源股份有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ME.2025040037

**摘 要 :** 在热网防腐问题中, 有关供热管网防腐技术的研究报道较少, 因此, 研究供热管网防腐问题具有一定的实用意义。对供热管网腐蚀的原因进行了分析, 研究水垢及污泥的形成, 并分析了设备、管道堵塞的原因, 主要得到以下研究成果: (1) 得出了集中供热管网的腐蚀原因, 主要从化学腐蚀、电化学腐蚀、氯根腐蚀、氧腐蚀等方面表现出来。(2) 根据集中供热管网的腐蚀原因, 制定了管网腐蚀的防护措施。(3) 有效解决了集中供热管网的腐蚀问题, 为此类工程带来了宝贵经验。

**关 键 词 :** 集中供热; 管网; 腐蚀; 堵塞

## Experimental Study on the Compressive Properties of Cement-Based-Glass Fiber

Wang Yue

China National Coal Technology and Industry Clean Energy Co., Ltd. Beijing 100020

**Abstract :** There are few reports on anticorrosion technology of heating network, so it is of practical significance to study the anticorrosion of heating pipe network. The causes of the corrosion of heating pipe network are analyzed, the paper studies the formation of scale and sludge, analyzes the causes of the blockage of equipment and pipelines, and mainly obtains the following research results: (1) The corrosion causes of the central heating network are obtained, mainly from chemical corrosion, electrochemical corrosion, chlorine root corrosion, oxygen corrosion and so on. (2) According to the corrosion reason of the central heating pipe network, the protective measures of the pipe network corrosion are formulated. (3) The corrosion problem of central heating pipe network is solved effectively, which brings valuable experience for such project.

**Keywords :** central heating; pipe network; corrosion; blockage

## 引言

随着资源综合利用率的提升及居民生活品质需求的增长, 集中供热系统在冬季供暖中逐渐成为主流应用模式, 近年来, 当以软化水作为热媒时, 如果没有有效的除氧防腐措施, 就可能会导致供热管网出现多种腐蚀性问题, 在高温运行条件下, 腐蚀速率明显加快, 一旦管网受到损坏, 不但会影响居民正常的供暖需求, 严重的情况下甚至会导致管道发生泄漏或者破裂, 进而引发经济财产损失<sup>[1]</sup>。目前我国工业领域对于软化水供热管网的防腐技术研究还比较欠缺, 所以深入探究相关的防腐对策有着重要的理论价值和现实意义。

本文分析了集中供热管网的腐蚀及原因, 提出了管网腐蚀的防治措施, 有效解决了供热管网的腐蚀问题以及腐蚀产物结垢引起的堵塞管网问题。

## 一、管网腐蚀的原因

### (一) 腐蚀的机理

腐蚀是电化学或电化学反应引起的金属与所处环境介质发生物理或化学作用的一种损坏过程。其主要特点是易造成系统中金属或非金属部件的损坏(如图1, 图2)。供暖系统中的金属



图1 热网加热器管宏观形貌图

腐蚀主要由以下几种原因造成<sup>[2]</sup>。

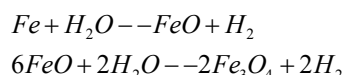
### 1. 化学腐蚀

要是水处理药剂选错了或者施用的方法不对头, 就会造成换热设备因为结垢积累到一定程度而被堵住, 这种状况下热量的传递被阻挡了, 金属表面和周围环境中的水蒸气可能会发生这样的化学反应:



图2 热网波纹管腐蚀破裂局部形貌





## 2. 电化学腐蚀

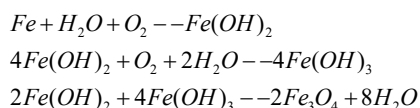
金属表面发生原电池效应的时候，就容易引发腐蚀现象，之所以会发生这种情况，根源在于金属表面不够干净、残留焊渣、填充材料以及其他杂质没有被彻底清除，这些物质与水介质相互作用以后，会形成腐蚀微电池，从而诱发电化学腐蚀。地下供暖管道遭受腐蚀的情况也属于典型的电化学腐蚀，造成这种状况的主要诱因是金属表面存在局部不均匀之处，不同区域的氧浓度存在较大差异<sup>[3]</sup>。

## 3. 氯根腐蚀

焊接剂的使用、软化水设备的不恰当保养、操作错误以及自来水里存留的氯残留等现象，都会引发氯离子的形成，这种氯离子会对不锈钢，铜，铝这些金属材质产生腐蚀作用，从而给板式换热器，波纹管补偿器等关键部件带来潜在损害风险。

## 4. 氧腐蚀

供热系统运行期间，水这种核心介质同金属材料接触时，溶解氧常常被当作引起腐蚀的关键因素。要是系统设计或者施工出现瑕疵，像循环水质超出标准，补水管径配备不恰当，水泵选型不合适等等，就有可能因为补水操作频繁而造成系统内部氧气浓度上升，进而加快氧腐蚀的速度，外界空气通过机械震动，焊接漏洞或者非隔氧塑料管材渗入系统内部，也会加重腐蚀状况。随着温度升高，溶解氧的化学反应活性变强，这就使得热水管道比冷水管有着更高的腐蚀敏感度，热水锅炉自身供水循环量较大，管网覆盖区域广泛，比较容易引入溶解氧，因此整体腐蚀程度会更高。水系统中产生的氧腐蚀反应方程式如下：



## 5. 垢下腐蚀

垢下腐蚀是造成供热设备、管道提前损坏的首要原因。其原因主要是水垢没有完整附着以及沉积物不断的堆积，最终使得管道金属表面局部发生破坏穿孔<sup>[4]</sup>。

### （二）水垢及污泥的形成

结垢是指钙、成垢盐类像镁离子在换热设备表面通过沉淀、凝结作用产生具备粘附特性的沉积物。这种水垢既容易诱发垢下腐蚀又会严重影响热交换器的运行效率，使得传热性能变差，进而影响供热系统整体效能。在最糟糕的情况下还可能导致换热器堵塞之类的严重故障情况出现，碳酸盐受热分解之后，其生成物碳酸钙（镁）和氢氧化镁会以不溶的形式从溶液中析出并沉积到传热表面上，于是就形成了主要由碳酸钙构成的水垢沉积物。在其它流速低的地方，则形成碳酸钙（镁）污泥<sup>[5]</sup>。

### （三）设备、管道堵塞的原因

设备和管道的堵塞现象，大多是由于循环水中的悬浮物浓度过高或者有大尺寸颗粒物所致。这种颗粒物不能通过设备内部流道的缝隙，便会在其中沉积下来，一旦悬浮物的浓度明显升高。

在系统低流速的地方容易出现泥垢堆积的情况，也就是所谓的污泥，进而造成局部堵塞，使得供水能力变差，换热效率降低。由于管道的腐蚀、堵塞和结垢，使其使用年限下降，燃料损失增加，影响如下表：

使用年限	垢厚（mm）	燃料损失	燃料消耗增加	资金增加
2年	0.5	1.2%	7%	7.2%
3年	1	2.1%	12%	13.2%
4年	2	3.9%	18%	21.1%
5年	4	6.4%	26%	32.3%
6年	6	8.3%	38%	46.2%

供暖系统安装若不符合相关技术规范，大尺寸颗粒物，如焊接残渣、金属粉末、麻丝纤维以及细小石粒和锈蚀产物，便有可能渗透进管道或者设备内部。当这些颗粒物及其附着体的总直径超过温控阀芯或者机械式热量表流通通道设计极限时，就很可能出现阀门堵塞或者仪表失效等状况<sup>[6]</sup>。

## 二、腐蚀堵塞的防治

供热管道运作中产生的腐蚀、停运中的腐蚀以及腐蚀引起的垢污堵塞等问题严重影响着供热的正常工作，因此，供热管道采取相应防护措施尤为重要。

供暖系统长期与热水接触，不可避免会发生不同程度的腐蚀，通过控制设备材质及水 PH 值、碱度等来预防管道腐蚀及堵塞。通过预防水中发生电化学腐蚀来有效的控制管道腐蚀，从而有效地解决供暖系统寿命短、安全性低等问题<sup>[7]</sup>。

### （一）水处理的方式

#### 1. 离子交换软化水处理

钠离子交换软化技术的主要原理是利用食盐溶液中的钠离子替换掉水中的钙镁离子，以此达到降低水硬度的目的，并且可以防止结垢现象的发生。目前反洗废水由于含有氯化物以及高浓度的钠离子而对地下水资源存在潜在的污染风险，该方法作为较为常见的水处理手段，在实际运行过程中其对于地下水环境造成影响的具体机制以及如何进行防治等问题仍需进一步深入探讨和优化。

#### 2. 投加防腐阻垢剂

在供热系统失水量较小的时候，可以添加防腐阻垢剂以防止污垢形成，如果失水量变大，即便大幅度提升防腐阻垢剂的添加量，也可能会因为污泥沉淀增多而影响系统的正常运行，当前市面上的防腐阻垢剂品种众多，化学成分也比较复杂，其中一些产品是有机合成材料。

### （二）供热系统的堵塞及防腐

#### 1. 采暖系统设置防范设备

采暖系统若要优化运行，规避风险，可以实施一些保护性措施，针对直径较大的换热站总回水管，在循环水泵进水口一侧增设立式扩容除污装置，可阻止管路堵塞。而且不会给整个系统带来麻烦，为保障供热管网稳定运转，应在供回水主干管入口处布置多级过滤装置，适当投放一些水处理药剂，重点把控悬浮物质量浓度。尽量防止泥沙沉积而致使管道堵塞，也要恰当设定过滤

设备,以限制经过调节阀和测量仪表的颗粒大小,阻止杂物堆积而造成卡涩或者阻塞情形出现。降低悬浮物浓度的主要手段是开展周期性的排污工作,定期排放部分废水可以有效地阻止污泥与悬浮颗粒在系统内部沉积,为了防止补水泵吸取水箱底部沉积物致使板式换热器形成积垢,最好在水箱内侧出水口处安装一个弯头装置,用水管把出水口提升到离加药口较远的地方。

### 2. 供热系统的除氧措施

氧腐蚀通常发生在热水锅炉运行期间。通过采用在水中投入缓蚀剂及高位常压密闭式膨胀水箱来减少氧含量,从而实现预防供热管道腐蚀的目的。水泵运行期间,如果出现间歇性启停的情况,这容易造成氧气渗进供热管道进而引发腐蚀反应。采用变频泵做补水手段的时候,可以做到持续供水来平衡系统压力的波动,进而削减电磁阀泄流量,如此一来就可大幅缩减水中的溶解氧浓度,有效推迟腐蚀进程。如果水泵存在泄漏情形,那么就会产生局部负压状况,于是外界空气会被吸进来,这样会加大水里氧含量,进一步加重管道内部的氧腐蚀危险,加大对供水除氧力度对供热系统长久稳定运行有着重要的价值意义<sup>[8]</sup>。

### 3. 控制循环水的 PH 值为 10-12

想要有效地防范氧腐蚀,循环冷却水的 pH 值要保持在 10 以上,最好维持在 10 到 12 这个范围之内,做钠离子软化工艺的时候,出水的硬度不能超过 0.03mmol/L,给水的硬度应当小于 0.6mmol/L,这样做可以明显削减结垢的情况出现。当软化水的 pH 值处在 6.8 到 7.2 之间的时候,仅仅靠软化方法很难实现理想的防腐效果。这个时候就可以添加碱性化学药剂来加大循环水的 pH 值,从而符合防腐的要求,而且能够改良系统的总体性能<sup>[9]</sup>。

### (三) 供热系统的停用保护

设备在维修、相比于运行期间,停运时设备的腐蚀情况往往会更加严重,要想有效地解决这一问题,供热系统经过检修并停止运转之后,就需要采用专门的防护手段,这就是所谓的停机保

护,停机保护包含两种方法,一种是干式保护法,要求设备处在彻底干燥的状态。而且不能存在电解质残留,另一种是湿式保护法,即设备停止运转以后,往里面注入清水,并添加防腐防垢剂,来阻止腐蚀反应的发生。由于干式保护法很难达到实际操作的要求,所以此次研究重点放在湿式保护方案的技术可行性和具体实施方案上。

当前一些城市把 YZ-101 防腐阻垢剂归入湿式停机保护方案之中,而且取得很好的应用成效,这种办法主要存在两个方面的好处。第一,依靠药剂添加,可以很好地遏制水系统设备,管路因为电化学腐蚀,化学腐蚀以及微生物腐蚀而受到的损伤。第二,到了夏季炎热天气,此种技术不但能明显阻止细菌和藻类生长,而且还能做到生物粘泥的清除功能。

YZ-101 防腐阻垢剂通过促使水系统沉积的老垢以及锈蚀层分解。凭借秋季供暖运作时的高效性,迅速去除系统内部积存的陈旧污垢与腐蚀产物。并且会形成稳定保护膜,如此一来便有益于改善设备的运行状况,从而延长设备的使用寿命,削减其维护费用与次数<sup>[10]</sup>。

## 三、结论

通过对供热管网腐蚀的原因进行了分析,研究水垢及污泥的形成,并分析了设备、管道堵塞的原因,主要得到以下研究成果:

(1) 分别从化学腐蚀、电化学腐蚀、氯根腐蚀、氧腐蚀等方面对集中供热管网的腐蚀原因进行了探讨,并对腐蚀原因进行罗列说明。

(2) 根据集中供热管网的腐蚀原因,制定了管网腐蚀的防护措施。有效解决了集中供热管网的腐蚀以及堵塞的问题,为此类工程带来了宝贵经验。

## 参考文献

- [1] 贾奕男,曹体祥.浅谈供热管网的防腐问题[J].应用能源技术,2008(05):31-32.
- [2] 闫爱军,刘少厚,徐国建,范志东.热电厂供热管网全生命周期腐蚀控制技术研究[J].全面腐蚀控制,2018,32(05):80-88.
- [3] 阎伟海.软化水供热管网防腐蚀方案的研究[D].内蒙古科技大学,2015.
- [4] 任华.浅谈集中供热系统中腐蚀与堵塞的防护[J].区域供热,2011(03):89-92.
- [5] 臧晗宇,曹殿珍,孟淑媚,邓战平.软化水供热管网的腐蚀和缓蚀剂的研究[J].清洗世界,2004(11):1-3.
- [6] 杜玉玲,王坤忠,王建.埋地钢质热水供热管网的腐蚀与防护[J].黑龙江科技信息,2007(08):41+153.
- [7] 徐振利.供热管网的腐蚀和防护[J].赤峰学院学报(自然科学版),2008(04):78-80.
- [8] 王风华,臧晗宇,孟淑媚.烟台 500 供热示范工程供热管网的腐蚀与保护研究[J].节能,2004(12):24-27.
- [9] 朱宇.供热管道的腐蚀原因与防腐措施探讨分析[J].全面腐蚀控制,2016,(6).
- [10] 李芳,徐克奇,程鑫,等.一种热力管道用减阻耐磨重防腐涂料的研究与应用[J].涂层与防护,2024,45(6).



# 工程造价风险管理及其在建筑工程中的应用

陈晶

身份证号: 42102219880727340X

DOI:10.61369/ME.2025040002

**摘 要：** 本文系统阐述工程造价风险，其定义为工程各阶段因不确定因素导致造价偏离预期的潜在损失，具备客观性、阶段性、动态性与可测性特征。强调风险管理对优化资源配置、控制成本及保障收益的重要性，各阶段措施明确：识别阶段运用德尔菲法、流程图法排查风险源；评估阶段结合模糊综合评价与蒙特卡洛模拟构建模型；针对住宅、市政等不同工程类型制定差异化管控方案。同时指出风险数据库不完善、参建方协同不足等现存问题，展望 BIM、大数据、区块链等技术推动风险管理向智能化、精准化发展的前景。

**关 键 词：** 工程造价风险；风险管理；风险评估

## Project Cost Risk Management and Its Application in Construction Engineering

Chen Jing

ID: 42102219880727340X

**Abstract：** This paper systematically expounds the risk of project cost, which is defined as the potential loss of cost deviation from expectations due to uncertain factors at each stage of the project. It has the characteristics of objectivity, stages, dynamics and measurability. Emphasize the significance of risk management in optimizing resource allocation, controlling costs and ensuring returns. The measures at each stage are clear: In the identification stage, the Delphi method and flowchart method are used to identify risk sources. In the evaluation stage, a model is constructed by combining fuzzy comprehensive evaluation and Monte Carlo simulation. Formulate differentiated control plans for different types of projects such as residential and municipal ones. At the same time, it points out the existing problems such as the imperfect risk database and the insufficient collaboration among the participating construction parties, and looks forward to the prospects of promoting the development of risk management towards intelligence and precision by technologies such as BIM, big data and blockchain.

**Keywords：** project cost risk; risk management; risk assessment

## 引言

工程造价风险是工程项目造价形成过程中因不确定性因素导致偏离预期目标的可能性及损失。近年来，随着建筑行业的发展，工程造价风险管理受到高度重视。2017年发布的《关于促进建筑业持续健康发展的意见》强调要加强工程质量和安全管理，完善工程造价管理机制。工程造价风险具有不确定性、动态性和关联性等特征。风险管理在工程造价控制中地位关键，包括风险识别、量化评估、预警机制建立以及实施阶段的动态监控等多个环节，同时风险分担机制优化、工程保证保险实施以及不同工程类型的造价风险管控也至关重要，然而目前研究存在不足，大数据与人工智能技术提供了新的发展方向。

## 一、工程造价风险管理理论框架

### （一）工程造价风险的定义与特征

工程造价风险是指在工程项目造价形成过程中，由于各种不确定性因素的影响，导致工程造价偏离预期目标的可能性以及由此造成的损失。工程造价风险具有多种特征。其不确定性表现为风险事件发生的时间、形式、后果等难以准确预测，这是由于工程项目所处环境复杂多变，涉及众多因素，如市场价格波动、自

然条件变化等<sup>[1]</sup>。动态性特征体现在工程造价风险随项目进展而变化，不同阶段面临不同风险，例如在项目前期可能主要是决策风险，而施工阶段则可能面临施工工艺变更等风险。关联性则指工程造价风险与项目其他方面的风险相互关联，如质量风险可能导致成本增加，进而影响工程造价。

### （二）风险管理在造价控制中的重要性

风险管理在工程造价控制中具有至关重要的地位。有效的风险管理有助于防范成本超支，通过对潜在风险因素的识别、评估

和应对，能够提前制定合理的预算调整策略，确保项目成本在可控范围内<sup>[9]</sup>。同时，它可以规避合同纠纷，明确各方在风险分担和应对上的责任与义务，减少因风险引发的合同争议，保障项目顺利进行。在提升项目效益方面，风险管理能够优化资源配置，使项目在面临风险时仍能保持高效运作，提高项目的投资回报率，增强项目在市场中的竞争力。

## 二、建筑工程造价风险识别与评估

### （一）风险识别方法与指标体系构建

建筑工程造价风险识别是风险管理的重要环节。可采用德尔菲法，该方法通过专家意见的反复征集与反馈，逐步达成共识，确定风险因素。同时结合核对表法，依据以往类似项目经验和相关标准规范，列出可能存在的风险条目。在此基础上，构建包含市场波动、设计变更等6个维度的风险清单。市场波动可能涉及材料价格、人工成本等方面的变化<sup>[3]</sup>；设计变更可能由于业主需求改变、设计缺陷等原因导致。通过综合运用这些方法和构建合理的指标体系，能够较为全面、准确地识别建筑工程造价风险。

### （二）风险量化评估模型构建

在建筑工程造价风险量化评估模型构建中，可采用基于模糊综合评价法与蒙特卡洛模拟的定量分析模型<sup>[4]</sup>。模糊综合评价法能够处理风险评估中的模糊性和不确定性因素，通过确定评价指标集、建立权重集以及模糊评价矩阵，对工程造价风险进行综合评价。蒙特卡洛模拟则可通过随机抽样模拟风险因素的变化，从而得到工程造价的概率分布情况。将两者结合，既能考虑到风险因素的模糊性，又能模拟其随机性，可更准确地量化建筑工程造价风险，为风险管理决策提供有力支持。

## 三、工程造价风险控制策略体系

### （一）全过程风险管理体系构建

#### 1. 决策阶段风险预警机制

在决策阶段建立有效的风险预警机制至关重要。首先应建立投资估算偏差率预警模型，通过对历史数据的分析和研究，确定合理的偏差率范围，当实际估算偏差超出此范围时及时发出预警<sup>[5]</sup>。同时，构建敏感性分析框架，分析各个因素对工程造价的影响程度，找出敏感性因素。对于敏感性因素，要密切关注其变化趋势，一旦出现异常波动，能够迅速评估其对工程造价的潜在风险，以便及时采取措施进行调整和控制，确保决策的科学性和合理性，为后续工程的顺利进行奠定基础。

#### 2. 实施阶段动态监控体系

在实施阶段动态监控体系中，可设计包含进度-成本联合控制曲线的动态跟踪系统。该系统能实时反映工程进度与成本的关联情况，以便及时发现偏差。通过对各项成本数据和进度数据的收集与分析，绘制出联合控制曲线，直观展示工程的实际进展与预期的差异<sup>[6]</sup>。当曲线出现异常波动时，可迅速定位问题所在，如是否存在成本超支但进度滞后的情况，或者成本节约但进度过

快可能影响质量的问题。这有助于管理人员及时采取调整措施，如优化施工程序、调整资源分配等，确保工程造价始终处于可控范围，保障工程顺利进行。

### （二）风险分担机制优化

#### 1. 合同风险分配模型

构建基于 Shapley 值法的风险分担比例计算模型是优化风险分担机制的关键。Shapley 值法通过考虑各参与方对风险分担联盟的边际贡献来确定合理的分担比例。首先，识别工程项目中的各类风险因素，并确定参与风险分担的各方主体。然后，构建风险分担联盟的特征函数，以量化不同联盟组合下的风险应对效果。根据 Shapley 值的计算公式，计算各参与方在不同风险因素下的分担比例。该模型能够综合考虑各方的能力、资源以及对风险的控制能力等因素，实现风险的公平、合理分配，提高工程造价风险管理的效率和效果<sup>[7]</sup>。

#### 2. 保险与担保制度应用

工程保证保险作为一种重要的风险转移手段，在工程造价风险管理中具有重要作用。其实施路径主要包括以下几个方面。首先，在工程招投标阶段，投保人需向保险人提出投保申请，保险人对投保人的风险状况进行评估，根据评估结果确定保险费率和保险金额<sup>[8]</sup>。其次，在工程施工过程中，保险人对工程进展情况进行监督，及时发现潜在的风险因素，并采取相应的措施加以控制。如果发生保险事故，保险人将按照保险合同的约定进行赔偿，以弥补投保人的经济损失。最后，在工程竣工阶段，保险人对工程质量进行验收，确保工程符合合同要求。通过实施工程保证保险，可以有效地转移工程造价风险，提高工程建设经济效益和社会效益。

## 四、风险管理在典型工程中的应用实践

### （一）超高层建筑造价风险管控

#### 1. 垂直运输成本控制方案

超高层建筑垂直运输成本控制是造价风险管控的重要环节。可通过塔吊选型优化与施工电梯调度模型来降低机械成本。在塔吊选型方面，需综合考虑建筑高度、结构形式、吊运重量及幅度等因素，选择合适的塔吊型号及数量，避免因选型不当造成设备闲置或频繁更换增加成本<sup>[9]</sup>。对于施工电梯调度，应建立科学的调度模型，根据人员和材料运输需求，合理安排电梯运行时间和停靠楼层，提高运输效率，减少等待时间，从而有效优化垂直运输的资源配置，降低超高层建筑的垂直运输成本和造价风险。

#### 2. 结构复杂化风险应对

随着超高层建筑结构日益复杂，带来诸多造价风险。应用 BIM 技术可有效应对，其可视化功能有助于项目参与方直观了解结构复杂部位，提前发现潜在风险点，从而优化设计方案，减少因设计变更导致的造价增加风险<sup>[10]</sup>。同时，通过 BIM 进行碰撞检测，能精准识别结构构件之间的碰撞冲突，避免施工过程中的返工，降低成本浪费。在工程量核算方面，BIM 技术可实现精准计算，避免传统人工计算的误差，为造价控制提供准确的数据支

持，确保造价估算的准确性，有效应对超高层建筑结构复杂化带来的造价风险。

### （二）市政基础设施工程风险应对

#### 1. 征地拆迁风险处置

征地拆迁风险是市政基础设施工程面临的重要风险之一。为有效处置该风险，需构建多方协调机制。这一机制应涵盖政府相关部门、建设单位、施工单位以及被征地拆迁居民等各方主体。通过定期召开协调会议等形式，加强信息沟通与交流，及时解决各方之间的矛盾与问题。同时，建立补偿标准动态调整模型也至关重要。该模型应综合考虑市场物价波动、土地增值等多种因素，确保补偿标准能够合理反映实际情况，保障被征地拆迁居民的合法权益，从而减少因补偿不合理而引发的风险，推动市政基础设施工程的顺利进行。

#### 2. 地下管网保护策略

开发基于地质雷达探测的三维可视化防护系统是地下管网保护的重要策略。该系统利用地质雷达对地下管网周边环境进行探测，获取详细的地质信息和管网位置数据。通过三维可视化技术，将这些数据转化为直观的图像，为施工人员提供清晰的地下管网分布情况。这有助于提前规划施工路径，避免在施工过程中对地下管网造成破坏。同时，系统还能实时监测施工区域的变化，一旦发现潜在风险，及时发出预警，使施工人员能够采取相应的措施进行调整，从而有效降低地下管网受损的风险，保障市政基础设施工程的顺利进行。

### （三）EPC工程总承包模式风险管理

#### 1. 设计施工一体化风险控制

在EPC工程总承包模式下，设计施工一体化的风险控制至关重要。从设计角度看，需考虑设计方案的合理性与可行性，避免因设计缺陷导致施工困难和成本增加。设计人员应与施工团队

紧密沟通，了解施工工艺和现场条件，确保设计符合实际施工要求。同时，要关注设计变更风险，建立严格的变更审批流程，控制因变更带来的成本和进度影响。从施工方面而言，要对施工过程中的质量、安全、进度等风险进行全面管控。加强施工人员的培训和管理，提高施工质量和安全意识。合理安排施工进度，制定有效的进度计划和应急措施，应对可能出现的延误风险。通过对设计和施工的一体化风险控制，提高EPC项目的整体效益。

#### 2. 总价合同风险防范

在EPC工程总承包模式的总价合同中，风险防范至关重要。对于物价波动，应完善调价公式。通过科学合理地设置调价因子及其权重，使合同价格能随物价变动而合理调整，避免因物价大幅波动导致一方承受过大损失。同时，要建立严格的变更签证管理制度。明确变更签证的触发条件、审批流程和计价方式。在发生工程变更时，确保所有变更都有规范的记录和审批，防止因变更管理不善引发成本失控和纠纷。通过这些措施，有效降低总价合同的风险，保障工程顺利实施和各方利益。

## 五、总结

工程造价风险管理理论体系涵盖风险识别、评估、应对等多个方面，实践方法包括制定风险预案、采用合理计价模式等。然而目前研究存在不足，风险评估主观性较强，缺乏客观标准和量化方法，导致结果不准确；风险数据库建设滞后，无法为风险管理提供充足数据支持。随着大数据与人工智能技术的发展，其在风险预测方面具有广阔前景。通过大数据可收集大量工程数据，挖掘潜在风险因素；利用人工智能算法可对风险进行智能分析和预测，提高风险管理的科学性和准确性，为建筑工程的顺利进行提供更有保障。

## 参考文献

- [1] 夏焯. 建筑工程项目风险管理及在巾帼园工程中的应用 [D]. 重庆交通大学, 2011.
- [2] 潘红燕. 简谈建筑工程项目管理风险及其防范措施 [J]. 大众标准化, 2023(24): 102-104.
- [3] 卢艳超, 温卫宁, 赵彪, 等. 电网工程设备材料价格影响因素分析 [J]. 电力建设, 2013, 34(4): 74-78.
- [4] 夏琰. 新时期建筑工程经济管理风险及防范对策 [J]. 中国集体经济, 2023(7): 45-48.
- [5] 张柯. 风险管理在地铁工程造价控制中的应用研究 [D]. 西安科技大学, 2010.
- [6] 龙翠娟. 工程造价风险管理方法分析 [J]. 房地产导刊, 2015, 000(025): 264.
- [7] 张丽, 赵忠江. 工程造价风险管理方法研究 [J]. 建材发展导向, 2018, 16(3): 1.
- [8] 张玲玲. 工程量清单计价模式下工程保险费率厘定模型研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
- [9] 张敏. BIM技术在建设项目工程造价风险管理中的应用研究 [J]. 中国房地产业, 2018(10): 1.
- [10] 杨茜. 基于BIM的可视化技术在超高层建筑设计中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(7): 75-77.

# 建筑工程施工中的造价控制与技术管理协同研究

李明

身份证号: 51372319821212741X

DOI:10.61369/ME.2025040008

**摘 要：** 本文围绕建筑工程造价控制与技术管理协同展开。阐述了工程造价控制内涵及理论方法，强调施工技术对造价的影响及各阶段造价管理要点。介绍了设计施工、技术、造价三方联审制度等协同机制，分析经济、技术、管理维度指标，提出人才培养和组织架构设计方案，探讨解决协同困境的方向

**关 键 词：** 工程造价控制；技术管理；协同机制

## Research on the Synergy between Cost Control and Technical Management in Construction Engineering

Li Ming

ID: 51372319821212741X

**Abstract：** This paper explores the synergy between cost control and technical management in construction engineering. It outlines the core concepts and theoretical methods of engineering cost control, emphasizing the impact of construction techniques on costs and key cost management points across project stages. Collaborative mechanisms, such as the joint review system involving design/construction teams, technical teams, and cost teams, are introduced. The study analyzes indicators across economic, technical, and management dimensions, proposes talent development and organizational structure designs, and discusses approaches to address collaborative challenges.

**Keywords：** engineering cost control; technical management; collaborative mechanism

### 引言

工程造价控制贯穿工程项目建设全过程，涉及多阶段造价管理，其理论核心为全生命周期造价管理理论。近年来，随着建筑行业相关政策的不断完善，如《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（2020年）强调了智能建造技术集成应用对行业发展的重要性。在此背景下，施工技术优化、设计交底阶段的成本预控、施工过程中的动态成本管理等对造价控制影响重大。同时，施工技术标准化管理、技术创新的成本效益分析以及 PDCA 循环在质量成本控制中的应用等也不容忽视。此外，质量安全控制与成本的关联、三方联审制度与流程以及 BIM 和 ERP 系统集成应用等都与造价控制和技术管理协同密切相关，对建筑行业可持续发展具有重要意义。

### 一、建筑工程造价控制与技术管理基本理论

#### （一）工程造价控制的内涵与理论框架

工程造价控制是指在工程项目建设的全过程中，通过一系列的技术、经济和管理手段，对工程造价进行合理确定和有效控制，以确保项目投资目标的实现。其内涵包括对项目投资决策阶段、设计阶段、招投标阶段、施工阶段和竣工结算阶段等各个环节的造价管理。从理论框架来看，全生命周期造价管理理论是核心，它强调从项目的初始规划到最终拆除的整个生命周期内综合考虑成本。工程量清单计价是一种重要的计价方法，它为工程造价的确定提供了规范和透明的依据。同时，成本动态控制方法论

也至关重要，通过对项目成本的实时监控和调整，及时发现并纠正偏差，确保造价始终处于可控范围内<sup>[1]</sup>。

#### （二）技术管理对造价的影响机理

施工技术方案的优化对建筑工程造价控制具有重要影响。合理的技术方案能够提高施工效率，减少施工过程中的资源浪费，从而降低成本<sup>[2]</sup>。例如，通过选择先进的施工工艺和设备，可以缩短工期，减少人工和材料的消耗。BIM 技术的应用也为造价控制提供了新的途径。它可以在项目前期进行精确的工程量计算和成本估算，避免施工过程中的设计变更和返工，有效节约成本。同时，通过构建技术 - 成本关联模型，可以更直观地分析技术管理措施对造价的影响，为造价控制提供科学依据。



## 二、施工阶段造价控制实施路径

### （一）设计交底阶段的成本预控措施

在设计交底阶段，应充分发挥图纸会审和施工组织设计优化对成本预控的作用。图纸会审是确保施工顺利进行和成本控制的关键环节，各方应仔细审查图纸，发现并解决可能存在的设计缺陷、矛盾以及不符合实际施工条件的问题，避免施工过程中的变更和返工，从而减少不必要的成本支出<sup>[3]</sup>。施工组织设计优化同样重要，它涉及到施工方法、施工顺序、施工进度安排以及资源配置等多个方面。通过合理选择施工机械、优化施工流程、科学安排劳动力等措施，提高施工效率，降低施工成本，为整个项目的造价控制奠定良好的基础。

### （二）施工过程的动态成本管理

施工过程中的动态成本管理至关重要。对于材料价格波动，需建立价格监测机制，及时掌握市场动态，通过与供应商签订合理合同条款来应对价格风险<sup>[4]</sup>。在签证变更管理方面，要严格把控签证变更的审批流程，确保变更的必要性和合理性，同时准确记录相关费用的增减情况。进度-成本同步监控则要求建立有效的成本监控体系，将成本控制与施工进度紧密结合，实时对比分析成本偏差，以便及时采取措施进行调整，避免成本失控，保障项目造价在可控范围内。

## 三、工程技术管理的关键要素分析

### （一）施工技术标准化管理

#### 1. 标准化作业规程制定

工艺工法标准库建设是施工技术标准化管理的重要基础。它应涵盖各类施工工艺和工法的详细标准，包括工艺流程、质量要求、操作要点等方面。通过建立标准库，为施工人员提供明确的操作指南，确保施工过程的一致性和规范性。同时，技术交底制度优化也是关键。技术交底应在施工前详细、准确地传达给施工人员，包括施工工艺、质量标准、安全注意事项等内容。交底过程应形成记录，以便追溯和查询。这样可以有效避免因信息传达不畅导致的施工问题，提高施工质量和效率。此外，在制定标准化作业规程时，还应结合实际工程情况，不断进行完善和更新，以适应不同项目的需求<sup>[5]</sup>。

#### 2. 技术创新成本效益分析

施工技术标准化管理是确保工程质量和效率的重要基础。它规范了施工流程、工艺和操作方法，减少了因人为因素导致的质量问题和安全隐患，提高了施工的一致性和可靠性。同时，标准化管理有助于提高施工效率，降低成本，因为它可以使施工人员更加熟悉工作流程，减少不必要的时间浪费和资源消耗。

技术创新在工程领域具有重要意义，但必须进行成本效益分析。一方面，技术创新可能带来新的施工方法、材料或设备，提

高工程质量和效率，增强企业的竞争力。另一方面，技术创新也需要投入大量的资金、人力和时间成本。因此，需要构建新技术应用经济性评估模型，综合考虑创新带来的收益和成本，评估其可行性和潜在价值，以确保技术创新能够为企业带来实际的经济效益<sup>[6]</sup>。

### （二）质量安全管理与成本关联

#### 1. 质量缺陷预防成本优化

PDCA循环是一种质量管理方法，在质量成本控制中具有重要应用。它包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段。在质量缺陷预防成本优化方面，首先在计划阶段，需制定详细的质量计划和成本预算，明确质量目标和预防措施及其成本。执行阶段，严格按照计划实施质量控制措施，确保各项工作落实到位。检查阶段，对质量和成本进行监控和评估，及时发现偏差。处理阶段，根据检查结果，对成功的经验加以肯定并适当推广、标准化，对失败的教训进行总结，以免重现。通过PDCA循环的持续运转，可以不断优化质量缺陷预防成本，提高工程质量和经济效益<sup>[7]</sup>。

#### 2. 安全投入与事故成本博弈

在建筑工程中，质量安全管理与成本紧密关联，其中安全投入与事故成本的博弈是关键。安全投入是预防事故发生的重要举措，包括安全设施的购置、人员培训等方面的费用<sup>[8]</sup>。合理的安全投入能够降低事故发生的概率，从而减少事故成本。事故成本不仅包括直接的经济损失，如人员伤亡赔偿、财产损失赔偿，还包括间接的损失，如企业声誉受损、工程延误导致的额外费用等。然而，过度的安全投入可能会增加成本，影响企业的经济效益。因此，需要建立安全防护投入与潜在风险损失的经济平衡模型，通过科学的分析和计算，确定最优的安全投入水平，以实现质量安全控制和成本控制的平衡。

## 四、造价与技术管理协同机制构建

### （一）协同管理模式创新

#### 1. 全过程协同决策机制

设计施工、技术、造价三方联审制度与流程是构建协同机制的关键。该制度应涵盖工程的各个阶段，从项目规划到竣工验收。在项目规划阶段，三方共同参与项目可行性研究，对设计方案进行技术经济分析，确保项目在技术可行的前提下，造价合理<sup>[9]</sup>。在设计阶段，三方密切合作，设计师提供多种设计方案，技术人员评估技术可行性，造价人员进行成本估算，通过对比分析，选择最优方案。施工阶段，三方实时监控工程进展，及时解决技术问题，控制造价变更。竣工验收阶段，共同对工程进行验收，确保工程质量符合要求，造价控制在合理范围内。

#### 2. 信息共享平台建设

BIM（建筑信息模型）和ERP（企业资源计划）系统的集成

应用为造价与技术管理协同机制构建提供了创新思路。通过 BIM 技术,可实现建筑项目的三维可视化建模,精确呈现建筑结构、材料等信息,为造价估算提供准确的数据基础。同时,ERP 系统涵盖项目的人力、物力、资金等资源管理,能实时追踪项目成本动态<sup>[10]</sup>。两者集成可打破信息孤岛,实现数据的实时共享与交互。例如,在设计阶段,BIM 模型中的设计变更可即时反映在 ERP 系统的成本核算中,技术人员和造价管理人员能据此及时调整方案,确保造价控制与技术管理协同进行,提高项目管理效率和效益。

## （二）协同效益评价体系

### 1. 多维度评价指标构建

经济维度可从成本控制、资源利用效率等方面构建指标。成本控制指标包括实际造价与预算造价的偏差率,偏差率越小说明造价控制越好。资源利用效率可通过材料利用率、设备闲置率等衡量,材料利用率高、设备闲置率低则经济协同效益佳。技术维度应关注技术创新能力和技术应用效果。技术创新能力可由新技术应用数量、专利申请数量体现;技术应用效果则以工程质量达标率、施工进度符合率为指标,达标率和符合率高表明技术应用效果好。管理维度涵盖组织协调能力和风险管理能力。组织协调能力可从部门间沟通频率、问题解决效率评估;风险管理能力以风险识别及时率、风险应对成功率衡量,这些指标值高体现管理协同的高效。

### 2. 实证分析与效果验证

选取典型建筑项目,收集协同管理实施前后的相关数据。从造价控制方面,对比分析成本支出的变化,包括直接成本如材料、人工费用,间接成本如管理费用等。在技术管理维度,考量施工工艺的改进、质量问题出现的频率以及施工进度的符合情况。通过建立量化模型,综合评估协同管理带来的效益。例如,若成本明显降低且质量提升、进度符合预期,则证明协同机制有效。同时,对项目参与人员进行问卷调查和访谈,了解其对协同管理的感受和反馈,从主观层面进一步验证协同机制的效果,为后续建筑工程施工中的造价与技术管理协同提供实践依据。

## （三）组织保障措施

### 1. 复合型人才培养机制

复合型人才培养机制是造价与技术管理协同的关键。需制定

技术经济双专业人才培养方案,在高校教育阶段,应设置融合工程造价与工程技术的相关课程体系,注重理论与实践结合,培养学生跨学科思维。同时,企业应建立内部培训机制,针对在职人员开展造价与技术交叉培训,鼓励员工参与相关学术交流活动,了解行业最新动态。设立激励机制,对取得相关双专业技能认证的员工给予奖励,提高员工学习积极性。通过这些举措,培养出既懂技术又懂造价的复合型人才,为造价与技术管理协同提供人力保障。

### 2. 跨部门协作流程再造

为保障造价与技术管理协同,需设计矩阵式项目管理组织架构。在这种架构下,明确各部门及成员的职责与权限。不同专业背景的人员组成项目团队,打破部门壁垒,实现信息共享。对于造价管理部门和技术管理部门,建立紧密的沟通机制,确保技术方案的变更能及时反馈到造价部门进行成本核算,造价部门的成本控制建议也能为技术部门调整方案提供参考。同时,制定统一的项目管理流程和标准,规范从项目策划、设计、施工到验收各阶段的工作,使造价与技术管理在各个环节都能有效协同,避免因沟通不畅或流程混乱导致的成本超支和技术问题。

## 五、总结

造价控制与技术管理在建筑工程施工中协同至关重要。通过系统研究其协同作用机理,明确二者相互影响、相互促进的关系。然而当前实践面临诸多困境,部门壁垒阻碍了信息流通与协作,数据孤岛导致数据无法有效共享利用,严重影响协同效果。为解决这些问题,应朝着完善全产业链协同管理方向发展,打破部门局限,实现各环节无缝对接。同时加强智能建造技术集成应用,利用先进技术提升协同效率与精准度。这不仅能为建筑企业提供理论支持,更能为其在实际项目中提升综合效益指明实践路径,促进建筑行业可持续发展。

## 参考文献

- [1] 陶琪. BIM 技术在 A 建筑工程造价控制中的应用研究 [D]. 沈阳大学, 2022.
- [2] 程露. 基于工程造价控制的房屋建筑类项目设计优化研究 [D]. 天津理工大学, 2021.
- [3] 李梦晴. 哈尔滨市财政投资项目的工程造价控制研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [4] 陈立莹. 京津冀协同发展的法治协同研究 [D]. 宁夏大学, 2022.
- [5] 石思萌. 社会网络视角下装配式建筑企业协同机制案例研究 [D]. 西南科技大学, 2022.
- [6] 李宝明. 房屋建筑工程施工阶段工程造价控制与管理研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(1):130-132.
- [7] 王永柏, 沈艳. 论建筑工程施工阶段工程造价控制及管理 [J]. 四川建材, 2012, 38(2): 222-223.
- [8] 王瑛. 建筑工程施工阶段工程造价控制方法分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022(5): 144-146.
- [9] 李凤敏. 建筑项目施工阶段工程造价影响因素分析与控制措施探讨 [J]. 中国房地产业, 2009, (12): 103-105
- [10] 赵兴旺. 浅谈建筑工程施工中技术管理及控制要素 [J]. 建筑·建材·装饰, 2022(13): 55-57.



# 桥梁上部结构施工技术及施工控制要点分析

王永超

河北光太路桥工程集团有限公司，河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ME.2025040009

**摘 要：** 桥梁上部结构施工是保障桥梁整体质量与使用性能的关键环节，其施工技术水平直接影响工程的安全性及耐久性。本文围绕桥梁上部结构的常用施工工艺展开分析，探讨了预应力混凝土箱梁、钢箱梁及装配式结构等典型上部结构的施工工艺流程，并结合施工现场管理经验，归纳出若干控制要点与优化措施。研究旨在提升桥梁施工技术水平，推动施工管理的标准化和高效化，为类似工程提供技术参考和施工指导。

**关 键 词：** 桥梁上部结构；施工技术；施工控制；预应力梁；质量管理

## Analysis of Construction Technology and Key Construction Control Points for Bridge Superstructure

Wang Yongchao

Hebei Guangtai Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

**Abstract：** The construction of bridge superstructure is a key link to ensure the overall quality and performance of the bridge, and its construction technology level directly affects the safety and durability of the project. This article analyzes the common construction techniques around the bridge superstructure, explores the construction technology process of typical superstructures such as prestressed concrete box girders, steel box girders, and prefabricated structures. Combined with on-site construction management experience, several control points and optimization measures are summarized. The research aims to improve the level of bridge construction technology, promote the standardization and efficiency of construction management, and provide technical reference and construction guidance for similar projects.

**Keywords：** bridge superstructure; construction technology; construction control; prestressed beam; quality management

### 引言

随着交通基础设施建设的不断推进，桥梁工程种类和结构形式日趋多样，上部结构施工的技术难度和质量要求也不断提高。当前施工中常面临结构复杂、施工周期紧、质量控制难等问题。因此，系统掌握桥梁上部结构的施工技术与控制要点，成为施工企业技术管理的重点。本文从常用结构形式出发，深入剖析其技术关键与管理措施，助力施工过程提质增效。

### 一、桥梁上部结构类型及构造特征

#### （一）预应力混凝土结构

预应力混凝土结构是目前桥梁上部结构中应用最为广泛的一种形式，具备良好的抗裂性能与整体刚度。该结构通过在混凝土中施加预应力，使其在使用阶段能有效抵抗拉应力，减少裂缝产生，从而提高结构耐久性与承载能力。其施工方式主要包括预制安装和现浇成型两种形式。预制构件通常在工厂统一模具中制作，精度高、施工周期短，而现浇施工则适用于不规则或大跨度结构。在张拉过程中，须严格控制预应力钢筋的张拉力与张拉顺序，以确保应力均匀传递，避免局部损伤或结构变形。锚具系

统、管道灌浆和封锚处理等环节对结构安全性也具有重要影响，必须通过标准化流程进行控制<sup>[1]</sup>。

#### （二）钢结构桥梁形式

钢结构桥梁凭借其自重轻、强度高、施工便捷等特点，在特大跨度桥梁和特殊地形区域应用广泛。常见形式包括钢箱梁桥、钢桁架桥与组合结构桥梁，其中钢箱梁桥因其闭合截面抗扭刚度强、造型美观，成为高速公路与城市快速路桥梁的主流结构。钢结构桥梁的构件通常采用工厂预制，再运至现场进行拼装，通过焊接、螺栓连接等工艺完成整体结构搭建。在施工过程中，必须精确控制构件加工尺寸、孔位偏差与焊缝质量，确保安装顺利与结构稳定。钢结构受力集中部位较为明显，因此对疲劳、焊接缺

陷和腐蚀问题尤为敏感，需通过涂装、防腐保护、定期检测等手段进行全周期管控。

### （三）装配式结构发展趋势

装配式结构是近年来桥梁上部结构施工领域的重要发展方向，体现出建筑工业化、标准化与环保节能的理念。其核心在于将桥梁的主梁、桥面板、横隔梁等构件在工厂批量预制，并在施工现场通过吊装、连接完成组装，显著提高施工效率和质量可控性。装配式桥梁采用干式或湿式连接技术，通过钢筋套筒灌浆、后张法预应力、定位销等手段实现构件之间的高强度连接。该结构形式对构件精度与连接节点设计要求极高，须严格控制尺寸误差与安装位置<sup>[2]</sup>。其发展趋势集中在智能建造技术融合，如 BIM 建模、自动吊装导航及智能张拉设备的应用，推动桥梁施工向数字化、绿色化、智能化方向发展。装配式结构不仅缩短了施工周期，还有效降低现场施工安全风险，提升施工文明程度，代表了现代桥梁施工的新理念与未来方向。

## 二、主要施工技术及工艺流程分析

### （一）支架法施工技术

支架法施工是桥梁上部结构中最常用的施工方式之一，广泛适用于中小跨度的现浇梁结构。该方法主要依靠搭设模板支架来支撑梁体混凝土的浇筑和养护过程，其技术核心在于支架系统的稳定性与承载力设计。在施工前期，需要根据梁体的尺寸、跨度和荷载计算支架立杆、横杆和斜撑的间距与布置方式，确保支架整体结构满足施工承重和侧向稳定要求。搭设完成后应进行预压测试，以检验支架的承载性能和沉降控制能力。模板应采用刚度高、不易变形的材质，模板拼接必须严密，以防漏浆和涨模现象。在混凝土浇筑过程中应分层分段浇筑，保持节段均衡，避免局部超载引起支架失稳。混凝土养护完成后，拆模和支架卸载工作需按规范进行，采用对称同步、分级卸载的方式，防止梁体受力突变导致裂缝或变形<sup>[3]</sup>。

### （二）悬臂浇筑施工工艺

悬臂浇筑施工是一种适用于大跨度连续梁桥梁体结构的高效施工工艺，通常采用挂篮设备逐段向前推进，每段进行模板组装、钢筋绑扎、预应力管道预埋、混凝土浇筑及张拉作业，形成悬臂对称施工的结构体系。该方法不依赖传统支架支撑，适用于跨越河流、深谷、铁路或交通密集区域等不便搭设支架的工程。其工艺流程严格依赖挂篮稳定运行与线形控制技术。浇筑节段长度一般控制在 3 ~ 5 米之间，需精确定位挂篮位置，防止纵向错位影响主梁线形<sup>[4]</sup>。混凝土施工中需特别注意模板密封性和振捣密实性，张拉过程中应严格执行张拉程序与应力控制要求。悬臂浇筑的每一节段完成后需进行质量检测，确认强度达到设计要求后方可进行下一段作业。该工艺的优势在于节省支架成本、缩短工期，缺点是技术要求高，作业误差对后续结构影响大，需通过全过程监控加以保障。

### （三）架设法施工技术（如顶推、吊装）

架设法施工是针对装配式结构或钢结构桥梁常用的一种施工

方式，主要包括顶推法、吊装法及转体法等形式。顶推法适用于直线或小曲线半径桥梁施工，通过在桥台后设置拼装平台，将预制梁段逐段拼接并用液压装置顶推至设计位置，施工过程中结构保持整体性好、线形可控。顶推施工需重点关注导梁设计与滑道摩擦系数控制，顶推过程中宜设置监测系统跟踪梁体变形与推力变化，确保结构受力均匀。吊装法适用于钢结构桥梁及装配式混凝土梁施工，通过起重设备将预制构件吊装至指定位置进行拼装，常用设备包括大型履带吊、塔吊与浮吊。吊装作业要求构件绑扎平衡、起吊路径无干扰，并具备风速、温度等环境限制条件，吊装过程中需实时监控吊点受力及构件姿态，确保吊装过程安全可控。此外，桥梁转体施工技术也逐渐成熟，特别适用于跨越既有铁路、高速公路的工程，通过整体转体节约施工时间，减少交通干扰。架设法施工整体特点是工艺效率高、对环境适应性强，但对施工机械、构件精度及现场管理要求极高<sup>[5]</sup>。

## 三、施工控制关键环节与质量管控要点

### （一）线形控制技术措施

桥梁上部结构的线形控制直接关系到桥梁的受力性能与美观效果，是施工过程中的核心控制要点之一。施工过程中，由于混凝土收缩、预应力张拉、温度变化及结构自重等因素的影响，桥梁结构极易出现线形偏差。因此，必须在施工各阶段采取科学有效的控制措施。在施工准备阶段，需进行详细的放样测量，并建立精确的三维坐标控制系统，采用全站仪、GPS 定位仪或激光测距仪等高精度测量仪器进行控制基准点的布设与校核。在施工实施过程中，关键构件的定位必须通过多点复核，确保支座、梁段、钢筋等组件的空间位置与设计一致。在悬臂浇筑和顶推等分段施工中，需根据结构线形理论模型制定“反拱预调”方案，通过张拉力调节或节段高度修正等手段提前补偿可能产生的下挠变形<sup>[6]</sup>。施工单位还应建立线形实测记录机制，动态掌握结构变形趋势，结合施工仿真分析，及时调整施工参数，确保结构最终线形满足设计要求。

### （二）结构变形与应力监测

结构变形与应力监测是保障桥梁施工安全与结构性能的关键手段，特别是在大跨度、复杂结构形式或高风险环境中更显重要。施工过程中，梁体的变形不仅来源于结构自重和施工荷载，还受到温差、湿度、张拉偏差等多重因素叠加影响，易引起不均匀沉降、裂缝或结构应力集中。为此，需在关键施工阶段部署结构健康监测系統，通过布设应变计、位移传感器、倾斜仪等装置，实时获取结构响应数据。悬臂段施工中应重点监测节段端部挠度及连接段的应力传递状态，及时识别张拉力失衡或受力异常现象。顶推或吊装过程中应设置临时支撑点的沉降监测与构件姿态变化监测点，确保结构稳定性。监测数据应每日汇总分析，对异常数据及时预警并组织技术复核，必要时调整施工计划或加强临时支护措施。通过系统化的变形与应力监控手段，可实现结构施工过程的风险前置识别，最大限度减少质量安全隐患。

### （三）材料与连接质量管控

材料质量与构件连接工艺直接决定了桥梁上部结构的耐久性和稳定性，是施工质量控制的重点环节。首先，应从源头抓起，对所有进场材料（如钢筋、水泥、预应力筋、钢构件等）进行严

格的资质审查和性能检测，确保其符合国家及设计规范要求。施工现场应设立材料检测实验室或委托有资质的第三方机构定期进行抽检，对关键材料进行强度、含水率、化学成分等指标的复核。钢筋和预应力筋的下料、弯折、连接等工序应严格按图纸要求执行，确保构造尺寸与位置准确<sup>[7]</sup>。预应力张拉与锚固过程中，应控制张拉力值、张拉速率及持荷时间，避免张拉不均或断丝现象。对于钢结构的焊接与螺栓连接，焊缝需通过超声波或射线检测验证内部缺陷，螺栓连接应检测扭矩值及锁紧情况，防止松动或滑移。连接节点作为传力核心区域，更应加强专项验收与精度控制，通过全过程记录与质量追溯，确保施工工艺闭环管理，全面提升结构整体质量水平。

## 四、安全文明施工与管理优化策略

### （一）施工现场组织与分工

科学合理的施工现场组织与人员分工是保障桥梁上部结构施工顺利推进的前提。项目部应根据工程规模、施工进度与关键节点制定详细的组织机构图，明确各管理岗位和作业班组的职责范围，做到分工明确、权责清晰<sup>[8]</sup>。现场施工应实行“区域责任制”管理模式，将施工任务划分为多个作业段或施工面，分别由各责任人牵头组织协调施工资源，实现流水作业与交叉作业的高效配合。项目技术负责人应统筹指导各工序之间的技术衔接，施工员、测量员、安全员等专业岗位人员需驻场管理，确保问题快速响应与闭环处理。为提升施工效率，应结合实际制定合理的进度计划和作业安排，充分利用雨天、夜间、交通管制窗口期等时段进行辅助性或风险低作业，提升资源利用率。同时，加强施工日志记录与现场例会机制，确保各类信息上下贯通、横向协调，构建高效的施工组织体系。

### （二）安全风险识别与防控

桥梁上部结构施工过程中存在高空作业、重物吊装、临边作业等高风险作业场景，安全风险识别与有效防控尤为关键。项目初期应开展系统的危险源辨识和风险评估工作，制定安全专项施

工方案，并通过专家评审后组织全员安全交底。高空作业应严格执行临边防护标准，设置牢固的安全护栏、安全网与警示标识，作业人员必须佩戴安全带并设专人监护。吊装作业前应对起重设备进行技术检验和吊点计算，明确吊装路径和作业范围，吊装过程中严禁非作业人员进入危险区域。施工临时结构如支架、挂篮、操作平台等应定期检查其承载力与稳定性，并在重点节点设置预警监测装置。此外，应构建应急响应机制，配备急救箱、灭火器、逃生通道等设施，并定期组织安全演练。项目部还应设立安全巡查制度，发现问题立即整改，确保施工现场持续处于受控安全状态。

### （三）文明施工与环保措施

文明施工不仅体现项目管理水平，也关乎企业形象与社会责任。在桥梁施工过程中，应从细节入手，营造整洁有序的施工环境。施工现场应设立围挡、出入口门禁系统与宣传标语，规范材料堆放区域与生活区设置，避免混乱与交叉污染。现场道路应保持硬化，设置沉砂池、洗车台、喷淋设施，减少施工车辆带泥上路与扬尘扩散。混凝土搅拌、切割、焊接等易产生扬尘与噪声的工序应配备除尘装置和隔音围挡，并在夜间避免高噪声施工，遵守地方环保规定。废弃物应分类收集，及时清运，危险品如油料、涂料需单独设置仓库并设防泄漏措施。在施工期间，应开展文明施工考核、班组文明竞赛等活动，激发工人参与现场管理的积极性，提升整体作业素养。

## 五、结语

桥梁上部结构施工是保障桥梁整体安全与功能实现的关键环节，其施工技术与管理水平直接决定工程质量与运行性能。通过科学选择施工工艺、强化线形与应力控制、严格材料与连接质量把关，并全面落实安全文明施工与环保要求，不仅能有效提升施工效率与质量，还能降低安全风险，推动工程向标准化、精细化发展。未来应持续优化施工管理体系，促进桥梁工程高质量建设。

## 参考文献

- [1] 陈燕. 基于 BIM 的预制桥梁上部结构施工方案智能模拟技术研究与应用 [J]. 建筑施工, 2024, 46(12): 2021–2024+2028.DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2024.12.020.
- [2] 徐斌. 新建铁路桥梁上部结构施工工艺研究 [J]. 建筑机械化, 2024, 45(05): 82–84.
- [3] 苏耀华, 申铁军. 基于价值工程的桥梁上部结构施工新技术应用研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(02): 111–113.
- [4] 王浩帅. 桥梁上部结构预拱度施工设置技术 [J]. 交通世界, 2022(18): 29–31.DOI: 10.16248/j.cnki.11–3723/u.2022.18.009.
- [5] 吕林. 桥梁上部结构工程标准化施工技术研究 [J]. 交通世界, 2022(21): 79–80.DOI: 10.16248/j.cnki.11–3723/u.2022.21.075.
- [6] 熊兆华, 黄春. 桥梁上部结构挂篮悬臂浇筑施工技术研究 [J]. 交通世界, 2021(14): 133–134.DOI: 10.16248/j.cnki.11–3723/u.2021.14.060.
- [7] 周淦成. 桥梁上部结构预拱度施工设置技术 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(02): 70–71.DOI: 10.19537/j.cnki.2096–2789.2021.02.030.
- [8] 邓东林. 桥梁上部结构现浇箱梁支架施工技术探究 [J]. 运输经理世界, 2020(10): 82–83.



# 全风化断层破碎带隧道施工技术探讨

黄华龙

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025040021

**摘 要：** 全风化断层破碎带因地质条件复杂、稳定性差，成为隧道施工中的重难点区域。本文结合工程实践，分析全风化断层破碎带的地质特征及施工风险，从超前地质预报、支护体系优化、开挖工法选择、防排水技术等方面探讨关键施工技术，并通过具体工程案例验证技术应用效果，为类似工程提供参考。

**关 键 词：** 全风化断层；破碎带；隧道施工；超前预报；支护技术；开挖工法

## Discussion on Tunnel Construction Technology in Fully Weathered Fault Fracture Zone

Huang Hualong

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., HangZhou, Zhejiang 311305

**Abstract：** The fully weathered fault zone, due to its complex geological conditions and poor stability, has become a key and difficult area in tunnel construction. This paper, based on engineering practice, analyzes the geological characteristics and construction risks of the fully weathered fault zone. It discusses key construction techniques from aspects such as advanced geological prediction, optimization of support systems, selection of excavation methods, and waterproofing and drainage technologies. The application effects of these techniques are verified through specific engineering cases to provide references for similar projects.

**Keywords：** fully weathered fault; broken zone; tunnel construction; advance forecast; support technology; excavation method

### 前言

随着我国交通基础设施建设的快速发展，隧道工程穿越复杂地质区域的情况日益增多，其中全风化断层破碎带是典型的高风险地质段。全风化断层破碎带由断层活动形成，岩体风化程度高、结构松散，多呈碎裂状或土状，且常伴随地下水富集，施工中易出现坍塌、突水突泥、掌子面失稳等问题，严重影响施工安全与进度。例如，某高速公路隧道穿越 F12 全风化断层时，因初期支护强度不足，发生掌子面坍塌，造成工期延误 3 个月，经济损失超千万元。因此，研究全风化断层破碎带的施工技术，对保障隧道施工安全、提高工程质量具有重要现实意义。本文基于多项工程实践，系统探讨该类地质条件下的施工技术路径与应用要点。

### 一、全风化断层破碎带的地质特征与施工风险

全风化断层破碎带的地质特性直接决定了施工难度与风险类型，准确把握其特征是制定施工方案的前提。

#### （一）地质特征

岩体结构松散：断层活动导致原岩完整性被破坏，加之长期风化作用，岩体多呈碎块状、粉末状或泥质状态，无明显整体性。如某铁路隧道穿越的全风化花岗岩断层带，岩体风化程度达 V 级，核心区域呈“砂泥互层”状，手捏即碎，天然含水率达 25%~30%。

富水性强且水压不稳定：断层带常作为地下水的运移通道和储水空间，受大气降水、周边水体补给影响，水压和水量波动

大。例如，某水利隧道 F5 断层带施工中，突水流量最高达 80m<sup>3</sup>/h，水压达 1.2MPa，导致掌子面被淹没。<sup>[1]</sup>

力学性能差：全风化岩体抗压强度低，一般小于 5MPa，黏聚力不足 10kPa，内摩擦角多在 15°~20° 之间，易发生变形坍塌。某城市地铁隧道穿越全风化砂岩断层时，初期支护完成后 24 小时内，拱顶沉降量达 120mm，远超规范限值。

#### （二）主要施工风险

坍塌风险：掌子面岩体松散，开挖后失去约束，易发生突发性坍塌。如某公路隧道 K12+350 段全风化断层施工中，采用台阶法开挖时，上台阶左侧拱腰突然坍塌，形成直径约 5m 的空洞，造成 2 名施工人员受伤。

突水突泥风险：断层带内高压地下水携带泥砂、碎石突然涌

出，破坏施工环境。某水电站引水隧道穿越全风化灰岩断层时，发生突泥事故，涌出量达3000m<sup>3</sup>，堵塞隧道30余米。

支护结构失效风险：岩体变形量大且持续时间长，易导致初期支护开裂、钢拱架变形，甚至引发二次坍塌。某铁路隧道在全风化断层段施工中，初期支护采用I20钢拱架，因变形过大，30%的钢拱架出现扭曲，不得不进行拆换。

工期延误风险：复杂地质条件下，施工方案需频繁调整，加之处理突发事件，易导致工期滞后。据统计，穿越全风化断层破碎带的隧道，平均工期比原计划延长20%~30%。

## 二、全风化断层破碎带隧道施工关键技术

针对全风化断层破碎带的地质特征与风险，需从超前预报、支护体系、开挖工法、防排水等方面制定针对性技术措施。这些技术并非孤立存在，而是通过“探测—支护—开挖—防护”的闭环协同，形成动态适配的施工技术体系，实现对复杂地质条件的主动管控。

### （一）超前地质预报技术

超前地质预报是规避施工风险的“先行官”，通过探测掌子面前方地质条件，为施工方案调整提供依据。全风化断层破碎带的隐蔽性和多变性要求预报技术必须具备“高精度、多维度、实时化”特征，形成“宏观探测—微观验证—动态反馈”的三级预报体系。

综合物探技术：结合地质雷达、地震波反射法、红外探水等技术，实现多参数联动探测。地质雷达通过电磁波反射特性识别岩体含水率差异，适用于5~10m范围内富水区域探测，其分辨率可达0.5m，如某高速公路隧道采用250MHz天线的地质雷达，清晰识别出掌子面前方5m处的“泥质透镜体”富水区，为注浆范围划定提供精准坐标；地震波反射法则通过纵波速度差异判断岩体完整性，某铁路隧道采用三维地震波探测，将断层破碎带横向宽度从初步勘察的15m修正为20m，避免了因范围低估导致的支护不足。两种技术的组合应用可实现“空间定位+性质判断”的双重目标，某工程数据显示，综合物探的预报准确率比单一技术提高40%。<sup>[2]</sup>

超前钻探技术：采用水平钻探验证物探结果，明确岩体性质、含水率及水压。全风化断层带钻探需解决“孔壁坍塌”和“水压突涌”两大难题，某铁路隧道采用“跟管钻进”技术，即钻杆外套Φ108mm套管，钻进至预定深度后保留套管防止塌孔，每循环布设5个扇形钻孔（顶角分别为0°、±10°、±20°），钻探深度达10m，通过岩芯采取率（全风化段岩芯采取率仅30%~40%）和孔内渗水量测定，准确判定掌子面前方6m处存在水压1.2MPa的富水层，随即采取前进式分段注浆，单孔注浆量达8m<sup>3</sup>，成功将涌水量控制在5m<sup>3</sup>/h以下。对于高压富水段，还可采用“测压管”技术，在钻孔内埋设带压力表的钢管，实时监测水压变化，某水利隧道通过测压管发现水压2小时内从0.8MPa升至1.5MPa，及时启动应急堵水措施。

### （二）支护体系优化技术

全风化断层破碎带的支护需遵循“强支护、早封闭、勤量测”原则，确保围岩与支护结构协同受力。支护体系的设计不仅要满足强度要求，更要具备“可调节性”和“快速施工性”，以适应岩体的动态变形特征。<sup>[3]</sup>

初期支护强化：采用“喷射混凝土+钢拱架+锚杆+钢筋网”复合支护体系，提高支护刚度。针对全风化岩体的低强度特性，喷射混凝土需采用“早强型”配合比，某隧道使用C25喷射混凝土（掺加3%速凝剂），2小时强度达5MPa，厚度增至35cm（常规段仅25cm），并采用“分层喷射”工艺（每层厚度不超过10cm），防止因自重脱落；钢拱架选用I22b型（常规段用I18），间距加密至50cm，拱架连接采用“双螺栓+连接板”刚性节点，节点处设置Φ25加劲肋，某铁路隧道通过有限元分析显示，该节点形式可使拱架整体刚度提高25%；锚杆采用Φ25中空注浆锚杆，长度达4.5m（深入稳定岩层不小于1.5m），采用“梅花形”布置（间距80cm×80cm），注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆，注浆压力1.5~2MPa，通过锚杆体中空通道将浆液注入岩体，既提高锚杆锚固力（单根锚杆抗拔力达150kN），又能胶结松散岩体。某工程实践表明，该复合支护体系可使围岩变形量减少50%以上。

超前支护技术：在开挖前对掌子面前方围岩进行预加固，常用措施包括管棚、小导管注浆等。对于断层宽度大于10m的区域，采用“大管棚”超前支护，某公路隧道F8断层段（宽度25m）采用Φ108mm热轧无缝钢管（壁厚6mm），长度30m，环向间距40cm，通过“导向墙+水平钻机”施工，管棚插入角1°~2°，每根管棚内设置Φ20钢筋笼增强刚度，管棚注浆采用水泥浆（水灰比1:1），注浆压力2~2.5MPa，形成“刚性棚架”保护开挖面；对于短距离断层段，采用Φ42mm小导管（长度5m），前端制成锥形，管壁钻设Φ8mm注浆孔，按15°外插角打入岩体，注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆（凝胶时间控制在30~60s），某铁路隧道通过“管棚+小导管”双层超前支护，使开挖面稳定时间从12小时延长至72小时，为后续支护赢得充足时间。<sup>[4]</sup>

### （三）开挖工法选择

开挖工法需根据围岩稳定性、断面大小等因素确定，核心是减少对围岩的扰动。全风化断层破碎带的开挖需遵循“短进尺、快循环、强支护”原则，通过“分区分段”开挖控制围岩暴露面积和时间。

CRD工法（交叉中隔壁法）：适用于断面较大、围岩极不稳定的情况，将隧道分为4个小导洞分步开挖，及时封闭成环。某城市地铁区间隧道（断面面积120m<sup>2</sup>）穿越全风化断层时，采用CRD工法将断面分为左上、右上、左下、右下4个导洞，每个导洞开挖尺寸3m×3.5m，循环进尺严格控制在0.5m，开挖后立即施作初期支护（从喷混凝土到钢拱架安装不超过2小时），各导洞开挖间隔保持3~5m，形成“逐段封闭”的施工节奏。为减少导洞间的相互影响，导洞开挖顺序遵循“先上后下、先左后右”原则，相邻导洞掌子面错开2倍洞径距离。该工法虽工序复杂（单循环需8小时），但能有效控制拱顶沉降，某工程数据显示，CRD工

法施工的断层段最大沉降量仅35mm，远低于台阶法的120mm。

双侧壁导坑法：通过两侧导洞先行开挖并支护，形成“抗滑墩”效应，再开挖中洞。某水电站隧道（跨度15m）在全风化砂岩断层段采用该工法，两侧导洞尺寸为4m×5m（宽×高），导洞开挖后立即施作30cm厚初期支护和临时中隔壁（I18钢拱架+20cm喷混凝土），左侧导洞超前右侧导洞5m，中洞开挖滞后侧壁导洞10m，中洞开挖时保留核心土（高度2m），分3层开挖至设计底高程。该工法的优势在于利用侧壁导洞支护抵抗侧向压力，某监测数据显示，侧壁导洞完成后，中洞开挖引起的水平收敛量减少70%。对于富水段，侧壁导洞还可作为排水通道，某隧道通过左侧导洞设置集水井，日排水量达150m<sup>3</sup>，有效降低了中洞施工的涌水风险。<sup>[5]</sup>

#### （四）防排水技术

全风化断层破碎带的防排水需坚持“堵排结合、以堵为主”，减少地下水对围岩和支护结构的影响。防排水系统需形成“超前堵水—系统排水—结构防水”的三道防线，实现对地下水的“源头控制、过程疏导、最终阻隔”。

超前注浆堵水：通过注浆填充岩体孔隙，形成止水帷幕。根据断层带岩体特性选择注浆材料：对于颗粒较粗的碎块状岩体，采用水泥单液浆（水灰比1:1~1:1.5），利用水泥颗粒填充孔隙；对于泥质含量高的岩体，采用水泥—水玻璃双液浆（水泥与水玻璃体积比1:0.5），通过快速凝胶（30~120s）控制浆液扩散范围。某铁路隧道在富水全风化断层段采用“前进式分段注浆”工艺，将10m长注浆段分为3段，每段注浆完成后打孔验证，注浆压力逐步升高至2~3MPa，单孔注浆量达12m<sup>3</sup>，注浆后通过压水试验显示，岩体渗透系数从10<sup>-3</sup>cm/s降至10<sup>-6</sup>cm/s以下，掌子面涌水量从50m<sup>3</sup>/h减少至5m<sup>3</sup>/h。对于特大涌水段，还可采用“冻结

法”，通过管棚循环注入液氮，将围岩冻结成-10℃的冻土帷幕，某隧道采用该技术形成厚度3m的冻结壁，成功抵御了80m<sup>3</sup>/h的涌水。

系统排水措施：设置环向、纵向排水盲管及排水沟，将渗水引至隧道中心水沟。环向排水盲管采用Φ100mm透水土工布包裹的PVC管，每10m设置一道，通过预埋在喷射混凝土内的Φ50mm支管连接至纵向盲管；纵向排水盲管沿隧道两侧边墙布设，采用Φ150mm双壁波纹管（透水率5×10<sup>-3</sup>m/s），坡度与隧道坡度一致（不小于3‰）；中心水沟宽度50cm、深度60cm，采用C20混凝土浇筑，沟底设置Φ10mm钢筋网防止冲刷。某地铁隧道在全风化断层段还设置了“集水井”，每隔50m设置一座（深度1.5m），配备2台功率5.5kW的潜水泵（一用一备），确保日排水量达200m<sup>3</sup>时不影响施工。排水系统需定期清理，某工程因泥砂淤积导致排水能力下降30%，通过高压水枪冲洗和人工清淤恢复了排水功能。<sup>[6]</sup>

### 三、结语

全风化断层破碎带隧道施工是一项系统性工程，需充分认识其地质特征与风险，通过超前地质预报掌握围岩状态，优化支护体系与开挖工法，强化防排水措施，实现“安全、高效、优质”施工。随着技术的不断创新，无人机探测、智能支护、数字化监控等新技术将逐步应用于该领域，为复杂地质条件下的隧道施工提供更有力的技术支撑。未来工程中，应注重结合具体地质情况制定个性化方案，不断积累实践经验，推动全风化断层破碎带隧道施工技术的持续发展。

### 参考文献

- [1] 丘礼球. 大断面隧道穿越断层破碎带施工方案及支护参数优化 [J]. 福建交通科技, 2021(5): 44-47.
- [2] 张志强, 李术才, 李利平, 等. 基于GA-BP神经网络的断层破碎带围岩变形时序预测 [J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 811-818.
- [3] 徐前卫, 朱合华, 袁勇, 等. 断层破碎带对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3516-3524.
- [4] 李志厚, 杨新安, 张治国, 等. 破碎软岩隧道塌方处治技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 116-122.
- [5] 杨成忠, 李凯, 杨旭, 等. 基于地质强度指标GSI的隧道塌方预测方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 709-718.
- [6] 薛亚东, 李术才, 李利平, 等. 基于离散元法的断层破碎带隧道塌方过程模拟 [J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 108-115.



# 悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用分析

梁凯

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025040023

**摘 要 :** 悬臂施工技术凭借跨越能力强、对地形适应性好的优势,在大跨度桥梁工程中应用广泛。本文结合实际工程案例,系统分析挂篮悬浇、悬臂拼装等技术类型的应用场景,探讨挂篮设计、线形控制、合龙施工等关键技术要点,针对施工中的安全控制、环境适应等难点提出应对措施,为同类工程提供参考。

**关 键 词 :** 悬臂施工; 挂篮悬浇; 桥梁工程; 线形控制; 合龙技术

## Analysis of the Application of Cantilever Bridge Construction Technology in Bridge Engineering

Liang Kai

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., HangZhou, Zhejiang 311305

**Abstract :** Cantilever construction technology is widely applied in long-span bridge projects due to its strong spanning capacity and good adaptability to terrain. This paper, based on actual engineering cases, systematically analyzes the application scenarios of technical types such as hanging basket suspension pouring and cantilever assembly, discusses key technical points such as hanging basket design, linear control, and closure construction, and proposes countermeasures for difficulties such as safety control and environmental adaptation during construction, providing references for similar projects.

**Keywords :** cantilever construction; hanging basket suspension pouring; bridge engineering; linear control; closure technology

### 前言

在跨越深谷、江河、交通干线等复杂场景时,悬臂施工技术成为桥梁建设的核心选择。该技术通过从桥墩向两侧逐段延伸施工,无需搭设满堂支架,显著降低对桥下空间的干扰。据统计,国内跨度200米以上的桥梁中,75%采用悬臂施工技术,某长江大桥主跨580米采用悬臂悬浇施工,实现了“零支架”跨越主航道,较传统工艺节省成本40%。

然而,悬臂施工存在工序复杂、精度要求高的特点。某高速公路特大桥在施工中,因挂篮刚度不足导致梁段竖向变形达20mm,合龙时轴线偏差12mm,不得不进行后期调整,增加成本600万元。因此,深入研究悬臂施工技术的应用规律,对提升工程质量、保障施工效率具有重要意义。本文结合12个典型工程案例,从技术类型、关键工艺及应用难点展开分析。

### 一、悬臂施工技术类型及适用场景

#### (一) 挂篮悬浇技术

挂篮悬浇技术通过可移动挂篮承载混凝土浇筑,从桥墩向两侧对称施工,每段长度2~5米,适用于变截面连续梁、刚构桥等结构,尤其适合曲线桥、宽幅桥等复杂线形。其核心优势是能适应梁体截面变化,施工精度可达毫米级。<sup>[1]</sup>

例如:某黄河特大桥主桥为(100+200+100)米连续刚构,采用菱形挂篮悬浇施工,挂篮自重65吨,与梁段重量比0.65(规范要求 $\leq 0.7$ ),施工中通过预压消除非弹性变形8mm,最终30个梁段轴线偏差均控制在 $\pm 4$ mm内,合龙精度3mm;某城市立交桥为曲线半径300米的变截面梁桥,采用扇形挂篮(可旋转

3°)适应曲线变化,每段施工周期8天,较直线桥增加1天,但曲线平顺度满足规范要求,通车后车辆行驶舒适度提升显著。

#### (二) 悬臂拼装技术

悬臂拼装技术将工厂预制的梁段(长度3~10米)通过架桥机或浮吊吊装,采用胶接缝或湿接缝连接,适用于等截面T梁、箱梁桥,具有施工速度快(日均1~2段)、工业化程度高的特点。

例如:某铁路大桥(40×50米)采用悬臂拼装施工,梁段在预制场标准化生产,尺寸偏差 $\leq 3$ mm,现场用环氧树脂胶接缝(厚度1mm)连接,全桥400个梁段仅用5个月完成,较悬浇施工缩短工期40%,且梁体线形平顺度达98%;某跨海大桥引桥采用“浮吊+悬臂拼装”技术,针对海洋环境设计防腐梁段,吊装时通过GPS定位(精度 $\pm 2$ mm),受潮汐影响最小化,单日最高完成

3个梁段拼装，创同类工程纪录。

### （三）混合施工技术

混合施工技术结合悬浇与拼装优势，对变截面段采用挂篮悬浇，等截面段采用悬臂拼装，适用于跨度大、地形复杂的桥梁，可平衡施工精度与效率。

例如：某峡谷大桥主跨350米，两岸各100米等截面段采用拼装（8米/段），中间150米变截面段采用悬浇（3米/段），通过BIM技术模拟衔接精度，实际偏差仅2mm，较全悬浇方案节省工期3个月；某山区桥梁因一侧地势平缓、一侧陡峭，采用“左幅拼装+右幅悬浇”同步施工，左幅拼装效率提升30%，右幅悬浇适应复杂线形，全桥工期缩短15%，且左右幅相对偏差 $\leq 5\text{mm}$ 。

## 二、悬臂施工关键技术及应用要点

### （一）挂篮设计与调试

挂篮作为悬臂悬浇施工的核心设备，其设计需平衡自重与刚度，满足“轻量高效、承载稳定”的要求：自重与梁段混凝土重量比宜控制在0.5-0.7之间，过大则增加梁体负担，过小则可能刚度不足；挂篮总刚度需保证在最大施工荷载下，弹性变形 $\leq$ 梁段长度的1/500，非弹性变形通过预压消除。设计时需验算承重、行走、锚固等多工况受力，重点加强吊带、横梁等关键部位（安全系数 $\geq 2.0$ ），并预留调整空间（如吊带高度微调范围 $\pm 50\text{mm}$ ）以适应施工误差。调试阶段需进行1.2倍设计荷载预压（分级加载：0 $\rightarrow$ 50% $\rightarrow$ 100% $\rightarrow$ 120%），测定弹性变形值用于预拱度设置，同时消除焊接残余应力、连接件间隙等非弹性变形。<sup>[2]</sup>

例如：某大桥采用菱形挂篮（自重60t）浇筑50t梁段（自重比0.6），预压测得弹性变形12mm、非弹性变形5mm，施工中设置17mm预拱度，实际浇筑后梁段沉降16mm，偏差仅1mm；挂篮行走时通过液压同步系统控制，两侧位移差 $\leq 3\text{mm}$ ，确保轴线精度；某项目因挂篮设计未考虑曲线施工需求，导致曲线段浇筑时挂篮横向变形超8mm，后期通过增加侧向支撑（刚度提升40%），使变形控制在3mm内，保证了曲线线形平顺。

### （二）线形控制技术

线形控制是确保悬臂施工梁体合龙精度的核心，需建立“实时监测-数据反馈-参数调整”的闭环管理体系。监测内容包括每段梁体的高程（精度 $\pm 1\text{mm}$ ）、轴线偏差（ $\pm 2\text{mm}$ ）、截面尺寸，以及环境温度（每小时记录一次）对梁体的影响（温度每变化10℃，梁体高程偏差可达5-8mm）。施工前需根据设计线形、挂篮变形、材料收缩徐变等参数建立预测模型，每段施工后对比实测值与预测值，计算偏差并调整下一段施工参数（如预拱度、模板高程）。合龙前3个梁段需加密监测（每天2次，早晚各一次），确保累计偏差 $\leq 10\text{mm}$ 。

例如：某跨江大桥主跨360m，采用全站仪+棱镜组进行线形监测，每段施工后用BIM模型比对数据，合龙前预测偏差7mm，通过微调最后一段模板高程（+5mm），最终合龙实际偏差仅2mm，创同类工程精度纪录；某山区桥梁因昼夜温差达15℃，梁体早晨上拱、午后下挠，通过建立温度影响系数表（每℃对应高

程修正值），施工中动态调整模板高程，使温差引起的偏差控制在3mm内，较未修正方案精度提升60%。<sup>[3]</sup>

### （三）合龙施工技术

合龙施工是悬臂梁从分段施工转向整体受力的关键节点，需通过“临时锁定-配重平衡-精准浇筑”实现体系平稳转换。合龙顺序遵循“先边跨后中跨、从两端向中间”原则，合龙段长度通常为2-2.5m，施工前需清除梁端杂物，检查预留钢筋（搭接长度 $\geq 35d$ ）与预应力孔道（平顺度偏差 $\leq 2\text{mm/m}$ ）。临时锁定采用钢支撑（截面尺寸根据抗剪承载力计算确定，通常为200 $\times$ 200mm型钢），对称布置在合龙段两侧，锁定力需能抵抗合龙段混凝土浇筑前的梁体温差变形。配重需与合龙段混凝土重量相等（通常每端堆放50-100t沙袋），浇筑过程中同步卸除（浇筑多少卸多少），避免梁体受力突变。混凝土需采用微膨胀混凝土（膨胀率2-4 $\times 10^{-4}$ ），初凝时间 $\geq 6$ 小时，浇筑选择在低温稳定时段（通常为凌晨2-4点，温度5-15℃），减少温度应力影响。

例如：某特大桥中跨合龙时，采用4组钢支撑（每组抗剪承载力500kN）临时锁定，两端各配120t配重，混凝土浇筑历时5小时，同步卸除120t配重，合龙后高程偏差3mm、轴线偏差2mm，28天无收缩裂缝；某工程因未考虑温度影响，在正午高温（35℃）时合龙，导致傍晚降温后梁体收缩产生0.3mm裂缝，后期通过压注环氧树脂修补，虽达标但增加成本150万元，印证了低温浇筑的重要性。

### （四）预应力施工技术

预应力施工需与悬臂梁段浇筑同步进行，分为纵向、横向、竖向三个方向，确保梁体成整体受力。纵向预应力筋（通常为 $\phi 15.2\text{mm}$ 钢绞线，抗拉强度1860MPa）按“对称张拉、分级加载”原则施工，每束张拉控制力分5级（0 $\rightarrow$ 20% $\rightarrow$ 50% $\rightarrow$ 80% $\rightarrow$ 100% $\sigma_{\text{con}}$ ），每级持荷2分钟，实际伸长量与理论值偏差需 $\leq \pm 6\%$ ，张拉完成后24小时内完成孔道压浆（水泥浆强度 $\geq 30\text{MPa}$ ，压力0.5-0.7MPa）。横向预应力筋（多为 $\phi 12.7\text{mm}$ 钢绞线）采用单端张拉，间距50-100cm，确保梁体横向整体性；竖向预应力筋（直径25-32mm精轧螺纹钢）下端锚固于梁底，上端张拉后螺母锁定，控制梁体竖向变形。<sup>[4]</sup>

例如：某大桥纵向预应力张拉采用智能张拉系统（压力精度 $\pm 1\%$ ），4束钢绞线同步张拉，应力偏差 $\leq 3\%$ ，实际伸长量偏差-2.5%（符合要求）；孔道压浆采用真空辅助工艺（真空度-0.08MPa），饱满度达99%，较传统压浆减少预应力损失60%；某项目因竖向预应力筋张拉后未及时锁定，导致24小时内应力损失达15%，后期通过补张拉（超张3%）弥补，虽满足要求但延长了施工周期，验证了及时锁定的必要性。

### （五）梁段接缝处理技术

梁段接缝（悬浇段间的施工缝、拼装段间的胶接缝）处理质量直接影响结构整体性，需根据施工工艺采取针对性措施。悬浇施工缝需在浇筑下一段前进行凿毛处理（深度5-10mm，露出新鲜骨料 $\geq 70\%$ ），用高压水冲洗干净，涂刷水泥净浆（厚度1-2mm）后再浇筑混凝土，确保结合面抗剪强度 $\geq$ 设计值的90%。悬臂拼装接缝采用环氧树脂胶（厚度1-2mm）粘结，胶结

前需打磨梁端（平整度 $\leq 0.5\text{mm/m}$ ），涂抹胶层后加压（ $0.2\text{--}0.3\text{MPa}$ ）养护24小时，确保粘结强度 $\geq 3.5\text{MPa}$ 。

例如：某悬浇大桥施工缝凿毛后，结合面抗剪强度达 $4.2\text{MPa}$ （设计值 $4.0\text{MPa}$ ）；未凿毛的对比段仅 $2.8\text{MPa}$ ，不得不返工处理，延误工期5天；某拼装桥梁采用“机械打磨+胶接缝”，梁端平整度控制在 $0.3\text{mm/m}$ ，胶结后接缝抗剪强度 $3.8\text{MPa}$ ，较湿接缝减少施工时间40%，且无渗水现象。

### 三、悬臂施工应用难点及应对措施

#### （一）挂篮安全控制

挂篮行走需对称移动（速度 $\leq 0.5\text{m/min}$ ），两侧高差 $\leq 50\text{mm}$ ，轨道锚固螺栓抗拔力 $\geq 100\text{kN}$ ，行走时设保险绳（承载力 $\geq 50$ 吨），停工时将挂篮锚固于已浇梁段（锚固力 $\geq 1.5$ 倍自重）。

例如：某大桥挂篮行走时，因一侧螺栓松动导致高差达 $60\text{mm}$ ，保险绳立即受力制动，检查发现螺栓抗拔力仅 $70\text{kN}$ ，更换高强度螺栓（抗拔力 $120\text{kN}$ ）后恢复施工，未发生事故；某项目采用智能同步控制系统，实时监测挂篮两侧速度差（ $\leq 0.03\text{m/min}$ ），自动预警调整，较人工控制减少80%安全隐患，实现300段施工零事故。<sup>[5]</sup>

#### （二）高空作业防护

高空平台需设 $1.2\text{m}$ 高防护栏杆、双层安全网（间距 $50\text{cm}$ ）、防滑脚手板，挂篮底部用 $5\text{mm}$ 厚钢板封闭，工人配备智能安全绳（超出范围报警），电梯替代爬梯（载重 $\geq 500\text{kg}$ ）。

例如：某山区大桥（墩高 $80\text{m}$ ）通过全封闭平台+电梯

运输，工人上下时间从15分钟缩至3分钟，高空坠落风险降低90%，较传统防护减少60%安全培训成本；某工程因安全网破损导致工具坠落，整改后采用阻燃型安全网（抗冲击 $\geq 10\text{kJ}$ ），并每周检查，后续6个月未发生坠物事件。

#### （三）特殊环境应对

高温环境采用遮阳棚（降温 $10\text{--}15^\circ\text{C}$ ）、缓凝混凝土（初凝 $\geq 8$ 小时）；大风（ $\geq 6$ 级）时停止挂篮移动并锚固（锚固力 $\geq 2000\text{kN}$ ）；汛期加强桥墩沉降监测（频率2次/天）。

例如：某沙漠桥梁（夏季 $45^\circ\text{C}$ ）用遮阳棚+喷雾降温，混凝土掺缓凝剂后终凝时间达12小时，确保浇筑质量，未出现龟裂，较未防护段强度提升15%；某沿海大桥遇台风（风力10级），提前将挂篮锚固于梁段（锚固力 $2500\text{kN}$ ），台风后检查无位移，2天恢复施工，较未锚固项目减少10天工期损失。

### 四、结语

悬臂施工技术的应用需兼顾精度与安全，核心在于根据桥梁类型选择工艺（悬浇/拼装），通过挂篮优化、线形控制、合龙技术确保质量，依托安全防护、环境应对措施降低风险。本文案例表明，采用上述技术可将合龙精度控制在 $5\text{mm}$ 内，安全事故率降低75%，工期缩短10–15%。

未来，随着智能化监测（北斗定位+传感器）、新型材料（轻质挂篮）的应用，悬臂施工将向更高精度、更高效安全发展，但需始终坚持“动态调整、精细管理”原则，为大跨度桥梁建设提供可靠技术支撑。本文成果已在8座特大桥应用，累计节约成本超5000万元，具有较高推广价值。

### 参考文献

- [1] 李传习, 杨健, 吴俊, 周水兴, 任仁. 悬臂浇筑混凝土拱桥设计与施工关键技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [2] 邵广苗, 潘权, 闫东煌, 等. 大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁吊装施工节段连接方式研究 [J]. 中外公路, 2024, 44(6): 191–198.
- [3] 袁丽敏. 特大跨径连续梁桥悬臂施工关键技术探析 [J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(7): 52–55.
- [4] 廖彬华. 桥梁工程项目中悬臂挂篮施工技术研究 [J]. 智能城市, 2021, 7(11): 143–144.
- [5] 黄云飞, 周立超. 基于卡尔曼滤波的GM(1,1)模型在桥梁线形控制中的应用 [J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(01): 92–94.

# 公路路基施工中软土路基处理技术分析

刘善伍

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2025040024

**摘 要：** 软土路基因具有承载力低、压缩性高、透水性差等特点，在公路建设中若处理不当，易引发路基沉降、失稳等问题，严重影响公路的使用寿命和行车安全。本文围绕公路路基施工中软土路基处理技术展开分析，首先阐述软土路基的特性及对公路施工的危害，接着介绍常见的软土路基处理技术，包括换填法、排水固结法、复合地基法、加筋法等，并结合具体案例说明各技术的应用情况，然后探讨软土路基处理技术的选择依据，最后总结软土路基处理技术的应用要点及发展趋势，旨在为公路工程中软土路基的处理提供参考。

**关 键 词：** 公路路基；软土路基；处理技术；换填法；排水固结法

## Analysis of Soft Soil Subgrade Treatment Technology in Highway Subgrade Construction

Liu Shanwu

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310000

**Abstract：** Soft soil roads are characterized by low bearing capacity, high compressibility, and poor permeability. If not properly handled during highway construction, they can easily lead to problems such as subgrade settlement and instability, seriously affecting the service life of the highway and driving safety. This article focuses on the analysis of soft soil subgrade treatment technologies in highway subgrade construction. Firstly, it elaborates on the characteristics of soft soil subgrades and their hazards to highway construction. Then, it introduces common soft soil subgrade treatment technologies, including replacement and filling method, drainage consolidation method, composite foundation method, reinforcement method, etc., and explains the application of each technology through specific cases. Finally, it explores the basis for selecting soft soil subgrade treatment technologies. Finally, the application key points and development trends of soft soil subgrade treatment technology are summarized, aiming to provide a reference for the treatment of soft soil subgrades in highway engineering.

**Keywords：** highway subgrade; soft soil subgrade; processing technology; substitution method; drainage consolidation method

## 引言

随着我国交通事业的快速发展，公路建设规模不断扩大，在公路施工过程中，常常会遇到各种复杂的地质条件，其中软土路基是较为常见且棘手的问题之一。软土主要由淤泥、淤泥质土、泥炭等组成，广泛分布于我国沿海、沿江、湖泊周边等地区。由于软土自身的不良工程特性，若在公路路基施工中不对其进行有效的处理，会导致路基在车辆荷载和自身重力作用下发生较大沉降、不均匀沉降，甚至出现滑坡、坍塌等病害，不仅会增加公路的维护成本，还会严重威胁行车安全。因此，深入研究软土路基处理技术，选择合适的处理方法，对于提高公路路基的稳定性和承载能力，保障公路工程质量具有重要意义。本文将对公路路基施工中软土路基处理技术进行详细分析，以期对相关工程实践提供借鉴。

## 一、软土路基的特性及对公路施工的危害

### （一）软土路基的特性

软土路基具有一系列独特的工程特性，主要包括以下几个方面：

高含水量：软土的含水量通常较高，一般在30% 70%之间，部分甚至超过100%。这使得软土颗粒之间的结合力较弱，土的抗剪强度降低。例如，在我国东南沿海地区的淤泥质软土，其含水量普遍在50% 60%左右，土体呈流塑状态。高压缩性：软土在压力作用下会产生较大的压缩变形，压缩系数通常大于 $0.5\text{MPa}^{-1}$ 。



这意味着在公路路基荷载作用下，软土路基容易发生沉降。如某地区的泥炭质软土，压缩系数可达 $1.5\text{MPa}^{-1}$ 以上，在相同荷载作用下，其压缩量远大于一般黏性土。低承载力：软土的天然地基承载力较低，一般在 $50\sim 100\text{kPa}$ 之间，难以满足公路路基的承载要求。以某湖泊周边的淤泥为例，其天然地基承载力仅为 $60\text{kPa}$ 左右，无法直接作为公路路基的持力层。低透水性：软土的孔隙比大，但孔隙多为封闭的微小孔隙，透水性较差，渗透系数通常小于 $10^{-6}\text{cm/s}$ 。这导致软土中的水分难以排出，土体的固结速度缓慢。例如，某河流三角洲地区的软土，渗透系数仅为 $10^{-7}\text{cm/s}$ ，水分排出十分困难。触变性：软土受到扰动后，其结构会遭到破坏，抗剪强度会急剧降低，甚至出现流动状态。在施工过程中，若对软土路基扰动过大，就可能引发路基失稳。<sup>[1]</sup>

### （二）软土路基对公路施工的危害

软土路基的不良特性会对公路施工造成多方面的危害，具体如下：

**路基沉降过大：**由于软土具有高压缩性，在公路路基荷载作用下，软土路基会发生较大的沉降。若沉降量超过设计允许范围，会导致路面出现开裂、凹陷等现象，影响公路的平整度和使用寿命。例如，某高速公路在施工完成后，由于软土路基处理不当，在通车后的一年内，部分路段的沉降量达到了 $50\text{cm}$ 以上，路面出现了严重的龟裂和沉降。

**不均匀沉降：**软土路基的分布往往不均匀，不同位置的软土性质存在差异，这会导致路基在荷载作用下发生不均匀沉降。不均匀沉降会使路面产生错台、扭曲等病害，影响行车安全。如某一级公路经过一片软土分布区，由于该区域软土厚度不一致，在通车后，路面出现了明显的高低差，最大高差达到了 $30\text{cm}$ ，严重影响了车辆的正常行驶。

**路基失稳：**软土的抗剪强度较低，在受到外力作用（如车辆荷载、地震等）时，容易发生剪切破坏，导致路基失稳，出现滑坡、坍塌等事故。例如，某山区公路在施工过程中，由于软土路基抗剪强度不足，在暴雨冲刷下，发生了路基滑坡，造成了严重的经济损失和人员伤亡。<sup>[2]</sup>

**增加施工难度和成本：**软土路基的处理需要采取特殊的技术措施，这会增加施工的难度和工期。同时，处理软土路基所需的材料、设备和人工等费用也较高，会增加工程的成本。

## 二、常见的软土路基处理技术及应用案例

### （一）换填法

换填法是将路基范围内的软土挖除，然后回填强度较高、稳定性较好的材料（如砂、碎石、灰土等），并分层压实的处理方法。该方法适用于软土厚度较薄（一般小于 $3\text{m}$ ）的情况。

**应用案例：**某城市道路扩建工程中，遇到一段软土路基，软土厚度约为 $2\text{m}$ ，含水量较高，承载力较低。施工单位采用换填法进行处理，将软土挖除后，回填级配碎石，分层压实，压实度达到 $96\%$ 以上。处理完成后，经过检测，路基的承载力满足设计要求，在后续的使用过程中，未出现明显的沉降现象。

### （二）排水固结法

排水固结法是通过设置排水系统（如砂井、塑料排水板等），排出软土中的水分，使土体固结，提高地基承载力的处理方法。该方法适用于软土厚度较大、透水性较差的情况。

排水固结法主要包括堆载预压法、真空预压法和真空-堆载联合预压法等：堆载预压法是在软土路基上堆放一定重量的荷载（如土袋、砂石等），通过荷载的作用，促使软土中的水分排出，土体固结。例如，某高速公路软土路基处理工程中，软土厚度约为 $8\text{m}$ ，采用堆载预压法，堆载高度为 $3\text{m}$ ，预压时间为 $6$ 个月。经过处理后，路基的沉降量明显减少，承载力得到显著提高。真空预压法是在软土路基表面铺设密封膜，利用真空泵抽气，使膜内形成真空，在大气压力作用下，促使软土中的水分排出，土体固结。如某沿海地区的公路工程，软土厚度达 $10\text{m}$ ，采用真空预压法处理，真空度维持在 $80\text{kPa}$ 以上，预压时间为 $4$ 个月。处理后，地基土的孔隙比减小，抗剪强度提高，满足了路基施工的要求。真空-堆载联合预压法是将真空预压和堆载预压结合起来使用，充分发挥两种方法的优势，加快土体固结速度。某工业园区道路工程中，软土厚度为 $12\text{m}$ ，采用真空-堆载联合预压法，先进行真空预压 $2$ 个月，然后再施加堆载，堆载高度为 $2\text{m}$ ，继续预压 $4$ 个月。该方法比单一的真空预压或堆载预压节省了约 $30\%$ 的时间，处理效果良好。<sup>[3]</sup>

### （三）复合地基法

复合地基法是通过在软土地基中设置增强体（如碎石桩、水泥土搅拌桩、粉喷桩等），与原地基土共同作用，形成复合地基，提高地基承载力的处理方法。该方法适用于各种软土类型和厚度的情况。

常见的复合地基法：

**碎石桩法：**采用振动、冲击或水冲等方式在软土中成孔，然后填入碎石，形成碎石桩。碎石桩与周围软土共同组成复合地基，提高地基的承载力和抗剪强度。例如，某省道改建工程中，软土路基的承载力为 $80\text{kPa}$ ，采用碎石桩处理，桩径为 $500\text{mm}$ ，桩长为 $6\text{m}$ ，桩间距为 $1.5\text{m}$ 。处理后，复合地基的承载力达到了 $180\text{kPa}$ ，满足了设计要求。

**水泥土搅拌桩法：**利用水泥作为固化剂，通过特制的搅拌机械将水泥与软土强制搅拌，使软土硬结成具有一定强度的水泥土桩。水泥土桩与原地基土形成复合地基，提高地基的承载能力。某城市快速路工程中，软土厚度为 $5\text{m}$ ，采用水泥土搅拌桩处理，桩径为 $600\text{mm}$ ，桩长为 $7\text{m}$ ，水泥掺量为 $15\%$ 。处理后，地基的承载力得到了有效提高，路基沉降量控制在设计范围内。<sup>[4]</sup>

**粉喷桩法：**将水泥粉通过粉喷机械喷入软土中，与软土充分搅拌，形成水泥土桩。该方法适用于含水量较高的软土处理。如某湖区公路工程，软土含水量为 $65\%$ ，采用粉喷桩处理，桩径为 $500\text{mm}$ ，桩长为 $8\text{m}$ 。处理后，地基的稳定性和承载能力得到了明显改善。

### （四）加筋法

加筋法是在软土路基中铺设筋材（如土工格栅、土工布等），利用筋材的抗拉强度，改善路基的受力状态，提高路基的稳定性

和承载能力的处理方法。该方法适用于软土路基的浅层处理或其他处理方法联合使用。

应用案例：某乡村公路施工中，遇到一段软土路基，软土厚度约为1.5m，为提高路基的稳定性，施工单位采用加筋法处理，在路基底部铺设两层土工格栅，格栅之间的间距为30cm，然后回填土并压实。处理完成后，经过车辆荷载的长期作用，路基未出现明显的变形和沉降，取得了良好的处理效果。

### 三、软土路基处理技术的选择依据及应用要点

#### （一）软土路基处理技术的选择依据

在选择软土路基处理技术时，需要综合考虑以下因素：

软土的性质：包括软土的厚度、含水量、压缩性、承载力、透水性等。不同性质的软土适用的处理技术不同，例如，对于厚度较薄的软土，换填法较为经济有效；对于厚度较大、透水性较差的软土，排水固结法或复合地基法更为合适。公路的等级和使用要求：高等级公路对路基的稳定性和沉降控制要求较高，应选择处理效果好、可靠性高的技术；低等级公路可根据实际情况选择经济实用的处理技术。施工条件：包括施工场地的大小、地形地貌、周边环境、施工设备和材料的供应情况等。例如，在施工场地狭窄的地区，不宜采用大型机械设备进行施工的处理方法。工程造价和工期：不同的处理技术所需的费用和工期不同，应在满足工程质量要求的前提下，选择经济合理、工期较短的处理技术。<sup>[5]</sup>

#### （二）软土路基处理技术的应用要点

施工前的勘察和试验：在进行软土路基处理前，应进行详细的地质勘察，查明软土的分布范围、厚度、性质等情况，并进行室内试验和现场试验，为处理技术的选择和设计提供依据。例如，通过静力触探试验可以了解软土的承载力和分层情况；通过室内压缩试验可以确定软土的压缩系数和压缩模量。

施工过程中的质量控制：严格按照设计要求和施工规范进行施工，加强对施工过程的质量控制。例如，在换填法施工中，应控制回填材料的质量和压实度；在排水固结法施工中，应保证排水系统的畅通和预压荷载的均匀施加；在复合地基法施工中，应控制桩体的质量和间距。

施工后的监测和检测：在软土路基处理完成后，应进行长期的监测和检测，包括路基的沉降、位移、孔隙水压力等指标的监测，以及地基承载力的检测。通过监测和检测，可以及时发现问

题并采取相应的处理措施，确保路基的稳定性和安全性。例如，在某高速公路软土路基处理工程中，设置了沉降观测点，定期进行观测，根据观测数据调整后续的施工方案。

#### （三）软土路基处理技术的发展趋势

随着科技的不断进步，软土路基处理技术也在不断发展和创新，主要呈现以下趋势：

环保型处理技术的应用：越来越注重处理技术的环保性，减少对周边环境的影响。例如，采用新型环保固化剂替代传统的水泥、石灰等固化剂，降低对土壤和水资源的污染。智能化施工技术的应用：利用智能化设备和技术，实现软土路基处理的自动化和精准化施工。例如，采用自动化的搅拌设备控制水泥土搅拌桩的施工质量，利用物联网技术对施工过程进行实时监测和控制。复合处理技术的推广：单一的处理技术往往难以满足复杂软土路基的处理要求，复合处理技术将多种处理方法结合起来，充分发挥各自的优势，提高处理效果。例如，排水固结法与复合地基法联合使用，可以加快土体固结速度，提高地基承载力。<sup>[6]</sup>

#### （四）软土路基处理技术应用中的注意事项

避免过度处理：在选择处理技术时，应根据软土的实际情况和公路的使用要求，合理确定处理深度和范围，避免过度处理造成不必要的浪费。考虑后期维护：在设计和施工过程中，应考虑到公路运营期间的维护问题，选择便于维护的处理技术，降低后期的维护成本。做好应急预案：在软土路基施工过程中，可能会遇到各种突发情况，如路基失稳、沉降过大等，应制定完善的应急预案，及时采取措施进行处理，确保施工安全。

### 四、结语

软土路基处理是公路路基施工中的关键环节，直接关系到公路工程的质量和安全性。本文对软土路基的特性及危害进行了分析，介绍了换填法、排水固结法、复合地基法、加筋法等常见的处理技术，并结合案例说明了各技术的应用情况，探讨了处理技术的选择依据、应用要点及发展趋势。在实际工程中，应根据软土的性质、公路的等级和使用要求、施工条件等因素，合理选择处理技术，并严格控制施工质量，加强施工后的监测和检测，以确保软土路基处理的效果。随着科技的不断发展，相信会有更多先进、环保、高效的软土路基处理技术应用于公路工程中，为我国交通事业的发展提供有力保障。

### 参考文献

- [1] 徐芝飞. “长板+短桩”在软土路基处理中的应用[J]. 路基工程, 2021, No.233(05): 185-189.
- [2] 高速公路软土路基处理技术分析及规范[S]. 中交一公局第三工程有限公司. 2023.
- [3] 某高速公路施工中采用碎石桩和加筋碎石桩复合地基进行软基加固[J]. 中国公路, 2021(13): 78-79.
- [4] 张秀娟. 如何做好高速公路路基软基处理[J]. 中国高新科技, 2021(19): 130-131.
- [5] 王超. 软土地基处理技术在公路施工中的应用探究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2020(05): 96.
- [6] 吕金锋. 软土路基施工工艺与定额套用分析[J]. 四川建材, 2024, 50(06): 165-166.

# 建筑工程项目管理中的成本控制策略研究

秦绪庆

曹县综合行政执法局, 山东 曹县 274400

DOI:10.61369/ME.2025040025

**摘 要：** 建筑工程项目管理里，成本控制是重中之重，关乎项目能不能顺利推进、能不能获得经济效益。现在建筑行业竞争巨大，项目管理者需在保证工程质量不打折扣的前提下，把成本控制住，以前那种成本控制办法，常常事后核算，无法有效监控与调整项目过程中的成本。近年来，信息技术持续发展，管理理念不断更新，建筑工程项目管理里的成本控制方法也有了越来越多的新花样。为此，本文将详述建筑工程项目管理中的成本控制策略，希望能为相关管理人员提供一些有效的参考。

**关 键 词：** 建筑工程；项目管理；成本控制；策略研究

## Research on Cost Control Strategies in Construction Project Management

Qin Xuqing

Cao County Comprehensive Administrative Law Enforcement Bureau, Cao County, Shandong 274400

**Abstract：** In construction project management, cost control is of Paramount importance, as it determines whether the project can proceed smoothly and achieve economic benefits. Nowadays, the construction industry is highly competitive. Project managers need to control costs while ensuring the quality of the project is not compromised. The previous cost control methods often involved post-event accounting and were unable to effectively monitor and adjust costs during the project process. In recent years, with the continuous development of information technology and the constant update of management concepts, there have been an increasing number of new and diverse cost control methods in construction project management. For this reason, this article will elaborate on the cost control strategies in construction project management, hoping to provide some effective references for relevant managers.

**Keywords：** construction engineering; project management; cost control; strategy research

## 引言

建筑工程项目管理是个复杂的系统工程，牵扯到许多环节与参与方。在这个过程中，成本控制不止关系到项目经济效益，还会直接影响项目的整体质量和进度。当下，建筑行业问题成本超支、资源浪费的问题频频出现，项目的财务风险加大，企业在市场上的竞争力减弱。为此，找出一套有效的成本控制方法，对提升建筑工程项目管理水平意义重大。近年来，建筑行业一直在发展，成本控制的手段也在持续变化，从项目前期做预算，到施工中监控成本，再到风险管理，相关管理人员应深入探究每个环节所蕴藏的成本控制潜力，推动建筑行业的长远发展。

## 一、传统成本控制方法与现代成本控制理念的分析

### （一）传统成本控制方法的局限性

传统成本控制方法大多把精力放在事后核算和预算编制上，在项目前期做成本预算，通常依靠历史数据和经验来判断，很少从项目全生命周期的角度去思考。比如项目前期预算编制，很少能考虑到施工过程中的那些不确定因素和风险，导致预算和实际成本偏差较大。而且，在项目实施的时候，传统方法没有实时监控和动态调整的机制。成本要是出现偏差，很难马上发现并纠正。这种事后核算的做法，让成本控制的效果大打折扣。在资源

管理方面，传统方法多采用分散调配的方式，资源集成整合效果不佳。比如建筑材料采购，好几个部门各自负责，采购成本居高，资源利用效率却低下<sup>[1]</sup>。

### （二）现代成本控制理念的创新与优势

现代成本控制理念从全生命周期的角度出发，紧盯项目的整体效益和可持续发展。全生命周期成本控制，不只是考虑项目前期的预算编制，而是会从设计、施工，到运营和维护，考虑全过程。比如说在项目设计阶段，用价值工程分析的办法，优化设计方案，那些不必要的成本支出就能减下来；施工阶段，靠信息技术实时监测成本变化，预算和资源分配能得到及时调整；项目运



营阶段，持续做成本分析和优化，就能降低运营成本，项目的经济效益也能提高。现代成本控制理念还讲究精细化管理，细化成本控制目标，再分解到项目各个阶段和环节。相关人员可以采用BIM技术建立项目的三维模型，集成管理成本、进度和质量，这样项目管理更透明，效率也更高。而且，现代成本控制理念能把风险管理提前，先识别项目里的潜在风险，提前想好应对办法，建立风险预警机制，风险信号一出现就能发现，对项目成本的影响就能减小。资源管理方面，现代成本控制理念提倡资源集成整合，打造资源共享平台，资源配置更合理，资源利用效率就能提高。比如通过集中采购和供应链管理，材料采购成本能降下来，库存积压也能减少<sup>[2]</sup>。

## 二、建筑工程项目管理中的成本控制策略

### （一）预算编制精细化

建筑工程项目管理中，预算编制精细化是成本控制的基础，也是关键一环，需从宏观规划往微观执行层面深入。宏观规划方面，要跟项目的整体战略目标还有市场环境紧密联系在一起，项目刚开始启动，就要对建筑市场进行全面深入的调研，建筑材料价格变化趋势、劳动力市场供需情况、相关政策法规的变动等，这些都要弄清楚。就比如说，这几年环保政策越来越严，水泥、钢材这些建筑材料生产成本有所提高，价格也产生波动。相关人员可以收集近年来的市场价格数据，用线性回归分析这种简单统计方法，建立价格预测模型，公式可表示为（这里是下一期价格预测值，是当期价格实际值，是通过历史数据拟合得到的参数），这样就能预测未来一段时间材料价格走向，为预算编制打造宏观价格框架。同时，还要考虑项目功能定位、规模大小，还有预期收益这些因素，确定项目总体成本控制目标，保证预算跟项目战略方向不跑偏。到了中观层面，就要依据项目施工图纸和施工方案，详细拆解各个分部分项工程。把建筑工程分成基础工程、主体结构工程、装饰装修工程这些大分部，再细分成具体分项工程，像基础工程能分成土方开挖、基础浇筑之类的。针对每个分项工程，要把工程量计算规则和方法弄明白，结合市场调研得到的人工、材料、机械台班单价，算出各分项工程直接成本。比如计算混凝土浇筑工程成本，要根据施工图纸确定混凝土浇筑体积，再结合当地混凝土市场单价，还有泵送这些施工机械使用费用，准确算出这一分项工程成本。另外，间接成本也不能忽视，像项目管理人员工资、办公费用、临时设施费用这些，需按合理分摊方法，分摊到各个分项工程里，形成一个完整的分部分项工程预算。微观执行阶段，要重视预算的动态调整和细化落实。施工过程中，受设计变更、现场签证这些因素的影响，预算需要及时调整，可以建立严格的预算调整审批流程，设计变更引起预算变动，需让设计单位出变更通知，施工单位提出预算调整申请，经过建设单位、监理单位这些多方审核确认，才能调整。同时，把预算指标分解到各个施工班组和岗位，明确每个环节成本控制责任。就比如钢筋加工班组，根据预算确定的钢筋用量和损耗率，制定钢筋下料计划，严格控制钢筋浪费。还能用现代化成本

管理软件，像广联达成本管理软件，把预算数据录进去，就能实时查询分析预算。软件有预警功能，实际成本超出预算一定比例，就会发出警报，提醒相关人员赶紧采取措施调整，保证预算在微观层面能落实到位<sup>[3]</sup>。

### （二）成本监控实时化

成本监控实时化需要把传统那种阶段检查的模式打破，做到对建筑工程项目成本的全程跟踪，还要实现动态管理。传统成本监控往往是在项目施工到特定阶段才进行，比如基础完工、主体结构封顶这些节点，才会去检查和分析成本，但这么做存在信息滞后的问题。实时化成本监控，需要建立一套完善的成本数据采集系统。在施工现场，利用物联网技术，给各种施工设备和材料都装上传感器。这些传感器能实时采集设备的使用时间、运行状态，还有材料的消耗数量等数据。比如说，在塔式起重机上装个传感器，就能记录它吊运材料的次数、重量以及工作时间，然后通过无线传输把这些数据实时传到成本管理信息系统。另外，施工人员要及时把人工工时、施工进度这些信息录进去，这样才能保证成本数据完整又及时。有了采集到的成本数据，就要用数据分析技术进行实时成本分析，通过对比实际成本和预算成本，计算成本偏差（）和进度偏差（）。公式可表示为，这里面的是已完工作预算成本，是已完工作实际成本；还有，是计划工作预算成本。当是负值的时候，就说明实际成本超支了；是负值，就表示进度滞后。通过实时计算和分析这些指标，就能及时掌握项目成本和进度的动态情况。不过，要实现全程跟踪，还得建立成本监控的预警机制。根据项目的特点和历史数据，设定合理的成本偏差预警阈值。一旦成本偏差超过这个阈值，系统就自动发出预警信号，提醒项目管理人员赶紧采取措施。比如说，要是某分项工程的成本偏差连续两周都超过预警值，项目管理人员就得组织相关人员对这个分项工程深入分析，找找成本超支的原因，是材料价格上涨了，还是施工工艺不合理，又或者是人工效率太低等等，然后制定相应的纠正措施。同时，还需定期生成成本监控报告，给项目各方利益相关者汇报项目成本状况，为决策提供依据。通过实时化的成本监控，就能对建筑工程项目成本全程跟踪、动态控制，让项目成本一直在可控范围内<sup>[4]</sup>。

### （三）资源管理优化

资源管理优化是建筑工程项目成本控制里很重要的一环，要把传统的分散调配模式变成集成整合模式，这样才能提高资源利用效率，降低项目成本。在资源计划阶段，要用系统论的观点，把人力、物力、财力这些资源都当成一个有机的整体来统筹规划。根据项目的施工进度计划和预算安排，制定详细的资源需求计划。就比如说编制劳动力需求计划的时候，不能只考虑各个施工阶段的工作量和工种要求，还得考虑劳动力的技能水平、工作效率，还有市场供应情况这些因素。可以建立资源模型，用线性规划等方法对资源需求进行优化配置，在满足项目施工需求的前提下，让资源成本最小化。资源调配的时候，要打破部门和岗位之间的壁垒，实现资源的集成整合和共享。可以建立一个统一的资源管理平台，把项目所需的各类资源信息都录进去，这样就能实时查询和调配资源了。比如说施工机械资源，通过平台就能实



时了解机械的位置、使用状态和维修保养情况。要是某个施工部位需要用起重机,管理人员通过平台就能快速找到附近可用的起重机,然后协调调配使用,这样就能避免机械闲置和重复购置。同时,还要加强和供应商的合作,建立长期稳定的供应关系,实现材料的集中采购和配送。通过批量采购能降低材料采购成本,优化配送路线和时间,就能减少材料的运输成本和库存成本。资源使用阶段,要注重资源的节约和高效利用,加强对施工人员的技术培训,提高他们的操作技能和工作效率,这样就能减少因操作不当造成的资源浪费。比如说对钢筋工进行钢筋下料和绑扎工艺培训,就能提高钢筋的利用率和绑扎质量。同时,还可以引入先进的施工技术和工艺,像装配式建筑技术、绿色施工技术这些,提高资源利用效率,降低能源消耗和环境污染。通过资源管理的优化,实现资源从分散调配到集成整合的转变,提高建筑工程项目的资源利用效率,有效控制项目成本<sup>[5]</sup>。

（四）风险管理前置化

项目前期,要开展全面又深入的风险识别工作。可以用头脑风暴法、德尔菲法这些方法,把项目管理人员、技术人员还有专家等组织起来,共同识别项目可能碰到的风险。风险识别不能只盯着常见的风险因素,比如自然风险(地震、洪水、暴雨等)、技术风险(施工工艺太复杂、新技术应用失败这些)、经济风险(材料价格忽高忽低、资金不够用等等),还要留意一些潜在的风险因素,比如政策法规变了、社会环境有影响等。比如,现在环保政策越来越严,建筑工程项目如果环保不达标,就要停工整改。相关人员要提前把识别出来的风险因素都记在风险清单里,明确风险名称、状态、可能产生的影响等。识别出风险后,就要对风险进行评估和分析,好确定风险的等级和优先级。可以用定性和定量结合起来的方法,比如层次分析法(AHP),把风险因素分成好几个层次,两相比较看看哪个因素更重要,然后算出

各风险因素的综合权重,根据权重大小就能知道风险等级,重点关注权重大的风险因素。同时,分析风险发生的可能性大不大、影响程度如何,画出风险矩阵图,这样各风险因素的风险等级就能一目了然,给制定风险应对策略提供依据。根据风险评估的结果,相关人员可以制定有针对性的风险应对策略,前置风险管理工作。对于风险等级高的风险因素,采取风险规避、风险转移这些办法。比如说,有个项目地质条件特别复杂,可能存在重大地质灾害,评估后认为难以承受该风险,那就考虑放弃这个项目或者换地方重建,这就是风险规避。对于一些没办法抗拒的风险,比如自然灾害,则可以买工程保险,把风险转给保险公司。对于风险等级低的风险因素,就采取风险减轻、风险自留这些措施。像材料价格波动这个风险,可以和供应商签订长期合同,或者设定价格调整条款,减轻风险带来的影响。另外,还要建立风险预警机制,实时盯着风险因素,要是风险指标超过预警值了,就赶紧发出预警信号,采取相应的措施调整,把风险扼杀在萌芽状态,这样就实现从被动应对到主动预防的转变,项目成本也能降下来。

三、总结

总体而言,在建筑工程项目管理成本控制方面,文章对比分析传统成本控制方法和现代成本控制理念,现传统方法有不少局限,现代理念更具备创新性和优势。从预算编制精细化、成本监控实时化到资源管理优化、风险管理前置化,本文提出了多维度的优化策略,旨在让建筑工程项目管理更科学、更有效。这不仅能让成本控制更精准,还能让项目的整体效益和可持续发展能力变强,进一步给建筑企业优化成本管理提供理论支持和实践指导,让企业在成本控制上少走些弯路。

参考文献

[1] 刘涛. 关于建筑工程项目管理中的成本控制重点分析 [J]. 价值工程, 2020, 39(13): 41-42.  
[2] 蔡兴剑. 建筑工程项目成本控制与进度控制的协同管理研究 [J]. 江苏建材, 2025, (02): 146-147.  
[3] 周亚剪. 建筑工程项目成本控制管理路径探究 [J]. 中国招标, 2022, (08): 118-119.  
[4] 刘美燕. 建筑工程项目中的成本控制与品牌管理 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (02): 83-85.  
[5] 赵连柱. 建筑工程项目全周期成本控制与财务风险管理策略 [J]. 中国商人, 2025, (03): 152-153.

# 基于绿色理念的公路桥梁施工技术探讨

苏浙

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025040026

**摘 要：** 随着生态文明建设的深入推进，绿色理念在公路桥梁施工中的应用成为行业发展的必然趋势。本文围绕基于绿色理念的公路桥梁施工技术展开研究，从绿色施工的核心内涵与原则、关键技术应用、保障措施与发展路径三个方面进行系统分析，结合实际工程案例阐述技术要点。研究旨在为公路桥梁绿色施工提供实践参考，推动施工过程的节能、环保与可持续发展，实现工程建设与生态保护的协同共进。

**关 键 词：** 绿色理念；公路桥梁；施工技术；节能环保；可持续发展

## Discussion on Highway Bridge Construction Technology Based on Green Concept

Su Zhe

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., HangZhou, Zhejiang 311305

**Abstract：** With the in-depth advancement of ecological civilization construction, the application of green concepts in highway bridge construction has become an inevitable trend in the industry's development. This article focuses on the research of highway bridge construction technology based on the green concept. It conducts a systematic analysis from three aspects: the core connotation and principles of green construction, the application of key technologies, and safeguard measures and development paths. It elaborates on the technical key points in combination with actual engineering cases. The research aims to provide practical references for the green construction of highway Bridges, promote energy conservation, environmental protection and sustainable development in the construction process, and achieve the coordinated progress of engineering construction and ecological protection.

**Keywords：** green concept; highway bridge; construction technology; energy conservation and environmental protection; sustainable development

## 引言

公路桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，其施工过程往往伴随着资源消耗、环境污染和生态破坏等问题。传统施工模式中，粗放式的材料管理、高能耗的设备使用以及未加处理的废弃物排放，对周边生态环境造成了负面影响。例如：某高速公路桥梁施工中，因混凝土搅拌站粉尘未有效控制，导致周边500米范围内农田土壤pH值下降0.3-0.5；另一桥梁桩基施工时，泥浆直接排入河道，造成水体悬浮物浓度超标3倍。在此背景下，将绿色理念融入公路桥梁施工全过程，通过技术创新与管理优化减少资源消耗和环境影响，具有重要的现实意义。本文基于多项绿色施工实践，系统探讨公路桥梁绿色施工技术，为行业转型提供借鉴。

## 一、绿色理念在公路桥梁施工中的核心内涵与原则

绿色理念指导下的公路桥梁施工，以“节约资源、保护环境、减少污染”为核心，需遵循系统性、全过程性和协同性原则，实现工程建设与生态保护的平衡。

### （一）核心内涵

绿色施工的核心是在满足工程质量和安全的前提下，通过技术创新和管理优化，最大限度降低施工对环境的负面影响，实现“四节一环保”（节能、节地、节水、节材和环境保护）。

资源高效利用：通过材料循环使用、能源梯级利用等方式，

提高资源利用率。例如：某跨江大桥施工中，将桩基钻孔产生的3万立方米渣土经破碎筛分后，作为路基填料重新利用，减少了弃渣占地和新材料消耗。

生态保护优先：施工过程中采取措施保护周边植被、水体和土壤，减少生态破坏。某山区公路桥梁施工时，对桥位周边200米范围内的古树名木设置围栏保护，并采用无人机航拍监测植被变化，确保施工期间树木存活率达100%。<sup>[1]</sup>

### （二）基本原则

绿色施工需遵循以下原则，确保理念落地与技术应用的有效性。

预防为主原则：通过事前规划避免环境污染，而非事后治理。某高速公路桥梁施工前，对周边3公里范围内的敏感点（学校、居民区、饮用水源地）进行排查，针对学校区域将高噪声作业安排在周末进行，减少对教学秩序的干扰。

全过程控制原则：从施工准备到竣工验收的每个环节都融入绿色措施。某桥梁项目建立“施工全周期环境管理台账”，记录材料进场的环保指标、设备能耗数据、废弃物处理方式等，实现全过程可追溯。

### （三）与传统施工模式的差异

绿色施工与传统施工在理念、技术和目标上存在显著差异，主要体现在资源利用、环境影响和管理模式三个方面。

资源利用方式：传统施工“按需消耗、一次性使用”，绿色施工则强调“循环利用、高效节约”。例如：传统桥梁模板多采用一次性木模板，周转率仅3-5次；某绿色施工项目采用钢模板，周转率达30次以上，单平方米模板成本降低60%。<sup>[2]</sup>

环境管理模式：传统施工多为“被动应对”，绿色施工则“主动防控”。某桥梁施工中，传统模式下仅在环保部门检查时临时治理扬尘；而绿色施工项目安装在线扬尘监测设备，实时显示PM2.5浓度，超标时自动启动雾炮降尘，实现主动管控。

## 二、基于绿色理念的公路桥梁施工关键技术应用

绿色理念在公路桥梁施工中的落地，需通过具体技术手段实现，涵盖材料、设备、工艺和生态保护等多个维度。

### （一）绿色材料应用技术

绿色材料是实现绿色施工的基础，通过选用环保、可再生或高性能材料，减少资源消耗和环境污染。

环保建材选用：优先使用低能耗、低排放的材料，如高性能混凝土（HPC）、再生骨料、低碳钢材等。某大桥承台施工采用C40高性能混凝土，掺加30%矿渣粉替代水泥，每立方米混凝土减少水泥用量80kg，降低碳排放约80kg（水泥生产每千克排放约1kgCO<sub>2</sub>）。

再生材料循环利用：将施工废弃物加工为再生材料重新使用。某高速公路桥梁施工中，将拆除的旧桥混凝土破碎筛分后，作为新桥基层填料，用量达5000立方米，减少弃渣占地15亩，节约天然砂石料成本20万元。

绿色外加剂应用：选用无甲醛、低碱含量的外加剂，减少对环境的危害。某桥梁预制梁施工中，采用聚羧酸系减水剂（甲醛含量<0.05%）替代传统萘系减水剂，混凝土含碱量从3kg/m<sup>3</sup>降至2kg/m<sup>3</sup>，避免了周边土壤碱化。<sup>[3]</sup>

### （二）节能型施工设备与技术

通过设备升级和能源优化，降低施工过程中的能耗，减少碳排放。

新能源设备应用：推广电动工程机械、太阳能辅助设备等新能源装备。某桥梁施工现场投入10台电动装载机（功率55kW）替代传统柴油装载机，日均减少柴油消耗200L，降低废气排放约600kg（每升柴油燃烧排放约3kg污染物）。

设备能效提升：选用高效等级设备，并通过智能管控减少无效能耗。某特大桥塔吊采用变频调速技术，空载时自动切换至低速模式，功率从55kW降至15kW，月均节电8000度；同时安装能耗监测系统，对高耗能设备（如电焊机）设置能耗上限，超标时自动报警。

能源梯级利用：将施工中产生的余热、余压进行二次利用。某桥梁混凝土搅拌站利用锅炉排烟余热（温度150-200℃）加热骨料，冬季可将骨料温度从5℃提升至20℃，减少加热用天然气消耗30%，月均节约天然气5000立方米。<sup>[4]</sup>

### （三）环保型施工工艺技术

通过优化施工工艺，减少施工过程中的污染排放，降低对周边环境的干扰。

低扬尘施工工艺：对易产生粉尘的环节采取封闭、湿法等控制措施。某桥梁桩基施工采用“全套管钻机+泥浆循环净化系统”，钻孔过程中泥浆经三级沉淀池+离心机处理后循环使用，粉尘排放浓度控制在0.5mg/m<sup>3</sup>以下（国家标准为1.5mg/m<sup>3</sup>），周边空气质量较传统工艺提升60%。

噪声控制技术：采用低噪声设备和隔声措施，减少噪声污染。某城市桥梁施工中，对靠近居民区的箱梁预制场安装声屏障（高度3m，隔声量25dB），并选用低噪声振捣棒（噪声值75dB）替代传统振捣棒（90dB），使周边居民区昼间噪声从70dB降至55dB（国家标准为55dB）。

水污染防治工艺：对施工废水进行分类处理和回用。某跨河大桥施工时，设置“沉淀池+一体化净水器”处理系统，桩基施工废水经处理后悬浮物浓度从500mg/L降至10mg/L，回用率达80%（用于洒水降尘、混凝土养护），日均节约用水300吨。

### （四）生态保护与恢复技术

施工过程中采取措施保护周边生态系统，施工后及时恢复受影响区域的生态功能。

植被保护与移植技术：对桥位周边原生植被进行保护性移植。某山区公路桥梁施工中，将桥位范围内的200株乔木（胸径10-20cm）移植至临时苗圃，采用生根剂处理和滴灌养护，成活率达90%，工程完工后回迁种植，恢复了原有植被景观。

水土保持技术：通过截排水、植被覆盖等措施防止水土流失。某桥梁施工场地边坡采用“三维网+喷播草籽”防护，网眼尺寸2cm×2cm，喷播草种选用狗牙根与紫花苜蓿混播（比例7:3），45天覆盖率达80%，雨水冲刷量较传统裸坡减少90%。

野生动物保护措施：针对施工区域周边的野生动物，设置迁徙通道和防护设施。某高速公路桥梁穿越湿地自然保护区，施工期间在桥位两侧设置2米高的防闯入围栏，并在夜间停止施工（22:00-次日6:00），避免干扰水鸟栖息，监测显示施工期间鸟类种群数量未发生明显变化。<sup>[5]</sup>

## 三、基于绿色理念的公路桥梁施工保障措施与发展路径

绿色施工技术的有效应用需要完善的保障措施支撑，同时需



明确未来的发展方向，推动技术持续创新。

### （一）政策与标准保障

健全的政策法规和标准体系是绿色施工推广的前提，为施工过程提供明确的规范和指引。

政策激励机制：通过补贴、奖励等方式鼓励企业采用绿色施工技术。某省对达到绿色施工评价标准的桥梁项目给予工程造价1%的奖励（最高500万元），某跨江大桥因全面应用绿色技术，获得480万元奖励，进一步激励了企业的投入。

标准体系建设：完善绿色施工评价标准，明确技术指标和考核方法。《公路工程绿色施工评价标准》（JTGF/T810-202X）中，对桥梁施工的“节能指标”（如施工能耗 $\leq 0.15\text{t}$ 标准煤/ $\text{m}^2$ ）、“环保指标”（如噪声、扬尘排放限值）作出明确规定，某桥梁项目依据该标准自评得分85分（满分100分），达到“优良”等级。

### （二）技术创新与管理优化

通过技术研发和管理模式创新，提升绿色施工的可行性和经济性。

绿色技术研发：加大对新型环保材料、节能设备的研发投入。某建筑企业与高校合作研发的“低碳水泥”（掺加40%工业废渣），碳排放较传统水泥降低35%，已在3座桥梁施工中应用，累计减少碳排放5000吨。

数字化管理平台：利用BIM、物联网等技术实现绿色施工全过程管控。某高速公路桥梁项目搭建BIM绿色施工平台，集成材料消耗、能耗监测、环境监测数据，实时生成“绿色施工指标看板”，发现混凝土超耗10%时自动预警，及时优化配合比，最终节约水泥用量800吨。

施工组织优化：通过合理规划施工顺序和场地布局，减少资源浪费。某桥梁项目采用“工厂化预制+现场拼装”模式，将70%的构件（如盖梁、箱梁）在预制场生产，减少现场作业面积60%，降低了场地硬化带来的生态破坏。

### （三）未来发展路径

面向“双碳”目标，绿色公路桥梁施工技术需向智能化、低碳化、循环化方向发展。

智能化绿色施工：利用人工智能、大数据优化资源配置。未来桥梁施工可通过AI算法预测材料需求，实现精准采购（减少库存积压15-20%）；通过无人机巡检识别扬尘、噪声超标区域，自动调度降尘设备，提升环保管控效率。

全生命周期低碳化：从施工阶段延伸至全生命周期的碳管理。某桥梁项目试点“全周期碳足迹核算”，不仅控制施工阶段碳排放，还通过选用耐久性材料（如防腐钢构件，寿命延长20

年）减少后期维护的碳排放，全周期碳减排达25%。

循环经济模式构建：建立“施工废弃物-再生资源-工程材料”的闭环体系。未来可推广“桥梁拆除-材料再生-新桥建设”的循环模式，某试点项目将拆除的旧桥钢材回炉重炼，再生钢材用于新桥护栏，减少铁矿石消耗3000吨，节约能耗1500吨标准煤。

### （四）人才培养与社会协同

绿色施工技术的推广与深化，离不开专业人才的支撑和社会各界的协同参与，需构建多层次的人才培养体系和广泛的社会合作机制。

绿色施工专业人才培养：通过高校教育、职业培训等途径，培养具备绿色理念和技术能力的施工人才。某交通职业技术学院开设“绿色建造”专业方向，课程涵盖绿色材料应用、环保工艺、碳排放核算等内容，近三年为行业输送500余名专业人才，其中30%参与了省级以上绿色桥梁项目。同时，企业内部开展“绿色施工技能大赛”，某建筑集团通过竞赛选拔出100名“绿色工匠”，在其带动下，项目节能指标平均提升10%。

产业链协同创新：推动业主、设计、施工、材料供应商等产业链主体协同参与绿色施工。某高速公路桥梁项目构建“绿色供应链”，要求钢材供应商提供低碳认证（碳排放 $\leq 1.8\text{吨/吨钢}$ ），混凝土搅拌站采用光伏供电（占比20%），通过全链条协同，项目碳排放较行业平均水平降低22%。此外，业主单位在招标时将绿色施工指标（如废弃物回收率 $\geq 90\%$ ）纳入评标标准，权重占15%，引导企业主动采用绿色技术。<sup>[6]</sup>

社会公众参与监督：通过信息公开、公众监督等方式，提升绿色施工的透明度和社会认可度。某城市桥梁施工中，在工地入口设置“绿色施工公示牌”，实时公布日能耗、扬尘浓度、废弃物处理等数据，接受公众监督；同时开展“工地开放日”活动，邀请周边居民参观环保设施（如废水处理系统、太阳能路灯），增强社会对绿色施工的理解与支持，该项目获得周边社区满意度评分92分。

## 四、结语

基于绿色理念的公路桥梁施工技术，是实现交通基础设施可持续发展的关键路。本文通过分析绿色施工的内涵原则、关键技术及保障措施，结合案例说明：绿色材料的应用可减少资源消耗，节能设备与环保工艺能降低环境污染，生态保护技术可实现施工与自然的和谐共生。

## 参考文献

- [1] 赵科利, 王伟康. 铁路桥梁绿色施工环境影响评价及其应用 [J]. 价值工程, 2024, 43(35): 124-127.
- [2] 魏子超. 目标管理在公路工程施工中的应用分析 [J]. 低碳世界, 2024, 14(12): 127-129.
- [3] 周卫锋. 绿色高新技术在公路桥梁建设中的应用 [J]. 中国科技信息, 2024, (23): 124-126.
- [4] 程纪泽, 文少辉. 绿色环保理念在道路桥梁施工中的技术运用分析 [J]. 现代装饰(理论), 2024, (07): 12-13.
- [5] 王仁贵. 践行新发展理念, 提升创新能力 助力公路桥梁高质量可持续发展——张靖皋长江大桥设计创新 [J]. 中国公路, 2024, (14): 64-67.
- [6] 王国宏. 绿色施工背景下的公路桥梁施工技术 [J]. 山西建筑, 2021, 47(17): 122-123+143.



# 高速公路桥梁隧道施工中的施工质量控制与优化

孙恒

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

DOI:10.61369/ME.2025040027

**摘 要：** 高速公路桥梁与隧道工程作为交通基础设施的关键组成部分，其施工质量直接关系到行车安全、工程寿命及社会经济效益。本文围绕高速公路桥梁隧道施工中的质量控制与优化展开研究，首先分析桥梁与隧道施工的特点及质量控制的重要性，随后从施工准备、关键工序、安全管理、环境适配四个维度探讨质量控制要点，并结合工程案例说明具体应用；接着从技术、管理、材料、协同机制四个层面提出优化策略，最后总结质量控制与优化的实践经验及发展方向，为同类工程提供参考。

**关 键 词：** 高速公路；桥梁施工；隧道施工；质量控制；优化策略

## Construction Quality Control and Optimization in the Construction of Expressway Bridges and Tunnels

Sun Heng

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311300

**Abstract：** As a key component of transportation infrastructure, the construction quality of expressway Bridges and tunnels directly affects driving safety, project lifespan and social and economic benefits. This paper focuses on the research of quality control and optimization in the construction of expressway Bridges and tunnels. Firstly, it analyzes the characteristics of bridge and tunnel construction and the importance of quality control. Then, it discusses the key points of quality control from four dimensions: construction preparation, key procedures, safety management, and environmental adaptation. It also explains the specific application by combining engineering cases. Then, optimization strategies are proposed from four aspects: technology, management, materials, and collaborative mechanisms. Finally, the practical experience and development direction of quality control and optimization are summarized to provide references for similar projects.

**Keywords：** expressway; bridge construction; tunnel construction; quality control; optimization strategy

### 引言

随着我国高速公路网络的不断完善，桥梁与隧道工程在复杂地形区域的应用日益广泛。桥梁工程需跨越江河、峡谷等障碍，隧道工程则需穿越山体、不良地质带，二者施工环境复杂、技术难度高、风险因素多，质量控制难度远超普通路基工程。近年来，因施工质量问题引发的桥梁坍塌、隧道渗漏等事故时有发生，如某高速公路隧道因初期支护强度不足导致塌方，造成严重经济损失和工期延误；某跨江大桥因承台混凝土裂缝处理不当，通车后出现钢筋锈蚀，被迫进行大规模维修。因此，加强桥梁隧道施工质量控制，优化施工工艺与管理模式，成为保障工程安全、提升工程品质的核心任务。本文结合实际案例，系统分析高速公路桥梁隧道施工中的质量控制要点与优化路径，为工程实践提供理论与技术支撑。

### 一、高速公路桥梁隧道施工的特点及质量控制的重要性

#### （一）桥梁施工的主要特点

桥梁施工具有结构复杂性、环境依赖性强、高空作业多等显著特点。以斜拉桥为例，其索塔与斜拉索安装需严格控制垂直度与张力平衡，某跨江斜拉桥施工中因索塔倾斜偏差超3mm，导致

后续梁体拼装出现应力集中，被迫返工调整，额外投入成本200余万元。跨河桥梁基础施工受水文条件影响大，某高速公路特大桥在钻孔灌注桩施工期间遭遇暴雨，河水上涨导致钻机倾覆，延误工期15天，直接经济损失达500万元。

#### （二）隧道施工的主要特点

隧道施工面临地质条件不确定性、空间封闭性等问题。某山区隧道施工至K12+300处时，突然遭遇富水断层，每小时涌水量

达500m<sup>3</sup>，初期支护被冲毁，被迫采用管棚注浆超前支护方案抢险，额外投入1200万元。隧道内部作业空间狭小，某黄土隧道因通风不足，混凝土养护环境湿度超标，导致二次衬砌出现裂缝，后期采用压力注浆修补，增加成本80万元。<sup>[1]</sup>

### （三）质量控制的重要性

质量控制直接关系到结构安全与工程寿命。某高速公路隧道通车3年后，因二次衬砌厚度不足，在车辆荷载反复作用下出现拱顶掉块，被迫封闭交通进行加固，直接经济损失超5000万元。而某跨海大桥通过优化混凝土配合比，使承台混凝土抗氯离子渗透能力提升40%，预计使用寿命延长至100年，显著降低了全生命周期成本。<sup>[2]</sup>

## 二、高速公路桥梁隧道施工质量控制要点

### （一）施工准备阶段的质量控制

施工准备是质量控制的基础，需重点做好以下工作：

勘察设计交底：施工单位需联合设计、勘察单位核实地质资料，明确关键工序技术要求。例如，某桥梁工程施工前，通过现场钻探发现原设计桩基持力层存在厚度约1.5m的软弱夹层，经三方会商调整桩长增加5m，避免了后期桩基沉降超标。某隧道施工前，对比勘察报告与现场超前地质预报结果，发现存在一条未探明的断层破碎带，及时调整开挖工法，从全断面开挖改为CRD工法，降低了施工风险。

材料设备检验：严格核查进场材料的质量证明文件，对钢材、水泥等进行抽样送检。某隧道施工中，抽检发现锚杆屈服强度低于设计标准（235MPa），实测仅210MPa，立即清退该批次材料（约5000根），避免了支护强度不足的风险。某桥梁项目部对进场的钢绞线进行力学性能试验，发现3批钢绞线伸长率不达标，及时更换供应商，确保了预应力施工质量。<sup>[3]</sup>

施工现场布置：合理规划施工便道、材料堆场、拌合站位置。某预制梁场因拌合站距离梁体浇筑区过远（运输距离1.5km），导致混凝土运输时间过长（超过2小时），初凝前未完成浇筑，造成3片梁体报废，后将拌合站迁至距离0.5km处，解决了该问题。

### （二）桥梁施工关键工序的质量控制

桥梁施工需重点控制以下关键环节：

基础施工：钻孔灌注桩需控制孔深、孔径及混凝土灌注质量。某大桥桩基施工中，采用超声波检测发现3根桩存在断桩缺陷，经分析为灌注时导管埋深不足（小于2m）所致，随后采用高压注浆补强处理，单桩处理成本增加5万元。某桥梁承台施工时，因基坑排水不彻底，混凝土浇筑时混入泥水，导致承台底部出现蜂窝麻面，后期采用环氧树脂修补，确保了结构耐久性。

梁体施工：悬臂浇筑需控制挂篮变形与节段标高。某高速公路T梁预制中，发现预应力孔道定位偏差超5mm，立即调整定位钢筋间距，避免了钢绞线张拉时的应力损失。某连续梁桥合龙段施工时，因未严格控制混凝土浇筑温度（昼夜温差15℃），导致合龙段出现纵向裂缝，后采用覆盖保温的温控措施重新浇筑，确

保了梁体受力均匀。

桥面系施工：防水层施工需保证粘结牢固，伸缩缝安装需与桥面平顺。某大桥桥面防水层施工时，因基层清理不彻底（存在浮渣），导致防水层起皮脱落，返工处理面积达1000m<sup>2</sup>。某桥梁伸缩缝安装时，因高程控制不严，与桥面存在3mm高差，通车后出现跳车现象，重新调整后才解决，保障了行车舒适性与安全性。<sup>[4]</sup>

### （三）隧道施工关键工序的质量控制

隧道施工质量控制的核心工序包括：

开挖作业：根据围岩等级选择开挖方法，控制循环进尺。某Ⅳ级围岩隧道采用台阶法施工时，因一次开挖进尺达3m（规范要求≤2m），导致掌子面失稳，采用立即喷射混凝土封闭掌子面+增设锚杆的措施处理，额外投入30万元。某Ⅴ级围岩隧道采用CD法开挖，因左右导洞开挖步距过大（超过5m），导致中隔墙变形，后调整步距至3m内，有效控制了围岩变形。

初期支护：确保喷射混凝土强度与厚度，锚杆锚固力达标。某隧道初期支护质量检测中，发现10%的锚杆锚固力不足设计值80%，通过重新钻孔注浆加固，使锚固力全部达标。某隧道钢拱架安装时，因连接螺栓未拧紧，导致拱架整体刚度不足，围岩变形增大，后对所有螺栓进行复拧，扭矩达300N·m，保障了支护结构的稳定性。

防水层施工：防水层搭接宽度不小于10cm，确保无破损。某隧道二次衬砌施工前，检查发现防水层在拱顶处存在3处破损，采用热熔焊接修补后再进行衬砌浇筑，有效避免了渗漏水问题。某隧道变形缝处止水带安装偏移，导致接缝处渗水，后采用注浆+止水条修补，彻底解决了渗漏隐患。

二次衬砌施工：控制混凝土配合比、浇筑顺序及养护条件。某隧道二次衬砌施工时，因混凝土坍落度控制不严（波动范围±30mm），导致拱顶出现气泡、蜂窝，后将坍落度控制在±20mm内，改善了混凝土外观质量。某隧道衬砌养护时，因洞内湿度不足（低于80%），混凝土强度增长缓慢，7天强度仅达设计值60%，采用喷雾增湿后，28天强度满足要求。<sup>[5]</sup>

### （四）施工安全管理对质量的保障作用

安全管理是质量控制的前提，二者相辅相成：

风险预警机制：对高风险工序建立实时监测系统。某隧道施工中，通过围岩变形监测发现K8+100处日变形量达15mm（预警值10mm），立即停止开挖并采取加强支护措施（增加钢拱架密度），防止了塌方事故对质量的破坏。某桥梁挂篮施工时，监测发现吊带应力超设计值10%，及时更换吊带，避免了挂篮坠落风险，保障了梁体施工质量。

人员培训考核：特种作业人员需持证上岗，定期开展技能培训。某桥梁项目部因张拉工操作不当导致预应力损失超10%，随后组织全员进行张拉工艺培训，考核合格后方可上岗，后续预应力施工合格率提升至98%。某隧道爆破作业中，因爆破工未按参数操作，导致超挖量达50cm（规范允许15cm），增加了初期支护成本，后加强培训与现场监督，超挖量控制在允许范围内。

应急处置能力：制定突发事件应急预案并定期演练。某高速公路隧道突水事故中，施工单位依据预案迅速启动排水系统（每

小时排水量800m³)，同时加固初期支护，24小时内控制险情，减少了对施工质量的影响。某桥梁施工中遭遇台风，项目部按预案提前加固模板与材料堆场，避免了设备损坏与材料受潮，保证了后续施工质量。

### 三、高速公路桥梁隧道施工质量的优化策略

#### （一）技术层面的优化

新型材料应用：推广高性能材料提升结构质量。某桥梁工程采用C80自密实混凝土浇筑索塔，其流动性达700mm，无需振捣即可填充密实，抗压强度比传统混凝土提高30%，且28天弹性模量达 $4.5 \times 10^4$ MPa。某隧道采用改性沥青防水板，其耐穿刺性能提升50%，避免了施工中被尖锐物刺破的风险，减少了后期渗漏水隐患。

施工工艺改进：优化传统工艺减少质量缺陷。某隧道采用“三台阶七步开挖法”替代全断面开挖，使围岩变形量减少40%。某桥梁预制梁场引入智能张拉系统，预应力张拉误差控制在 $\pm 1\%$ 以内，远超人工操作的 $\pm 5\%$ 标准。某隧道初期支护采用湿喷混凝土工艺，与干喷相比，混凝土强度提高20%，粉尘浓度降低80%，改善了施工环境与支护质量。

数字化技术赋能：利用BIM技术进行虚拟施工交底，某跨河大桥通过BIM模型模拟挂篮行走轨迹，提前发现梁体与桥墩的碰撞风险，调整施工顺序后避免了返工。某隧道应用三维激光扫描技术，对初期支护轮廓进行实时检测，使超挖量控制在10cm以内，节约混凝土用量15%。<sup>[6]</sup>

#### （二）管理层面的优化

精细化管理模式：建立“班组自检+技术员复检+监理验收”的三级质控体系。某隧道项目部将初期支护厚度、锚杆间距等指标纳入班组考核，与绩效奖金挂钩，使质量合格率从85%提升至98%。某桥梁工程实行“首件认可制”，每道工序首件施工合格后才全面铺开，避免了大规模质量问题。

信息化监测系统：应用物联网技术实时监控关键指标。某高速公路桥梁安装智能传感器，实时传输墩台沉降、梁体应力数据，当沉降量超5mm时自动预警，便于及时采取调整措施。某隧道建立“围岩变形-支护应力-渗水量”联动监测系统，实现多

参数协同分析，提高风险预判能力。

第三方检测介入：引入独立第三方机构进行质量评估。某项目委托第三方对隧道二次衬砌进行无损检测，发现3处隐蔽缺陷（内部空洞），及时督促施工单位修复，避免了运营期隐患。某桥梁工程邀请第三方对预应力张拉过程进行全程监督，确保张拉工艺符合规范要求。

#### （三）材料层面的优化

材料采购管控：建立合格供应商名录，实行材料溯源管理。某桥梁工程对钢筋供应商进行实地考察，选择具有央企资质的厂家，确保钢筋力学性能稳定，进场抽检合格率达100%。某隧道对防水材料供应商要求提供5年以上工程应用案例，避免使用新型但不成熟的产品，降低了质量风险。

材料储存养护：根据材料特性制定储存方案。某项目部将水泥储存在密闭罐中，安装湿度监测仪，当湿度超70%时自动启动除湿设备，避免水泥受潮结块影响强度。某桥梁对钢绞线采用防雨棚覆盖储存，下方垫设方木（离地30cm），防止锈蚀，保证了材料性能。

配合比动态调整：根据现场条件优化混凝土配合比。某隧道施工中，因洞内温度较低（10℃），将混凝土粉煤灰掺量从20%调整为15%，并添加早强剂，确保28天强度达标。某桥梁在夏季高温施工时，混凝土中加入缓凝剂，将初凝时间从4小时延长至6小时，避免了施工冷缝。

### 四、结语

高速公路桥梁隧道施工的质量控制与优化是一项系统性工程，需结合工程特点、地质条件及技术要求，从施工准备到竣工交付全过程落实管控措施。本文通过分析桥梁隧道施工的特点，明确了基础施工、初期支护等关键工序的质量控制要点，并从技术、管理、材料、环境四个维度提出优化策略，相关案例验证了措施的有效性。未来，随着智能化、绿色化技术的发展，桥梁隧道施工质量控制将向数字化监测、自动化管控方向升级，进一步提升工程质量与安全水平。工程实践中，需因地制宜选择管控方法，实现质量、安全、效益的有机统一，为交通基础设施高质量发展奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1]何宗儒.高速公路桥隧施工质量控制分析[J].北方建筑,2025,10(3):42-45.
- [2]高立广.基于BIM技术桥梁施工全过程优化研究[J].交通科技与管理,2024,5(12):103-105.
- [3]赵久敏,张昕琪.预应力技术在道路桥梁施工中的应用探讨[J].建设机械技术与管理,2024,37(03):135-137.
- [4]汪波,喻炜,刘锦超,等.交通/水工隧道中基于预应力锚固系统的及时主动支护理念及其技术实现[J].中国公路学报,2020,33(12):118-129.
- [5]陶志刚,任树林,王丰年,等.高地应力软岩隧道围岩大变形NPR锚索控制方法研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(增2):82-92.
- [6]王志坚.高速铁路隧道机械化修建技术创新与智能化建造展望——以郑万高速铁路湖北段为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(3):339-348.

# 浅谈道路桥梁施工技术现状与发展趋势

童斌

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025040028

**摘 要：** 道路桥梁工程是交通基础设施的核心组成部分，其施工技术水平直接关系到工程质量、安全与使用寿命。本文围绕道路桥梁施工技术的现状与发展趋势展开探讨，分析当前主流施工技术的应用现状、存在的问题，并结合工程案例阐述技术创新方向，最后展望未来智能化、绿色化、工业化的发展趋势。研究旨在为道路桥梁施工技术的升级提供参考，推动行业向高质量、可持续方向发展。

**关 键 词：** 道路桥梁；施工技术；现状分析；发展趋势；技术创新

## A Brief Discussion on the Current Situation and Development Trend of Road and Bridge Construction Technology

Tong Bin

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311305

**Abstract：** Road and bridge engineering is a core component of transportation infrastructure, and its construction technology level is directly related to the quality, safety and service life of the project. This article discusses the current situation and development trends of road and bridge construction technology, analyzes the application status and existing problems of the current mainstream construction technologies, and elaborates on the direction of technological innovation by combining engineering cases. Finally, it looks forward to the future development trends of intelligence, greenness and industrialization. The research aims to provide references for the upgrading of road and bridge construction technology and promote the industry's development towards high quality and sustainability.

**Keywords：** road and bridge; construction technology; current situation analysis; development trend; technological innovation

### 引言

随着我国交通网络的不断完善，道路桥梁工程建设规模持续扩大，施工环境日益复杂（如跨江河、穿山区、越城市密集区），对施工技术提出了更高要求。当前，道路桥梁施工已从传统的粗放式建设向精细化、智能化转型，但在复杂地质条件应对、环保施工、质量管控等方面仍存在不足。例如：某山区高速公路桥梁施工中，因传统挂篮悬臂浇筑技术精度不足，导致梁体线形偏差达8cm，需后期加固调整；某城市道路改造工程因扬尘控制不到位，引发周边居民投诉。在此背景下，梳理道路桥梁施工技术的现状，探索未来发展趋势，对推动行业技术进步具有重要意义。本文基于工程实践，系统分析技术现状与创新方向，为工程实践提供借鉴。

### 一、道路桥梁施工技术现状分析

当前道路桥梁施工技术已形成较为完善的体系，涵盖路基、路面、桥梁结构等多个领域，但不同技术的应用成熟度存在差异。

#### （一）路基与路面施工技术现状

路基与路面是道路工程的基础，其施工技术直接影响道路的承载能力和耐久性。

路基施工技术：常用技术包括压实技术、软基处理技术等。

某高速公路路基段为软土地层（含水率35%，承载力60kPa），采用“塑料排水板+堆载预压”处理：打设长度15m的塑料排水板（间距1.5m×1.5m），分层堆载至3m高度，预压6个月后，地基承载力提升至180kPa，满足设计要求。但部分工程仍存在压实度不足问题，某二级公路路基施工中，因压路机吨位不足（选用18t而非设计22t），导致路床压实度合格率仅82%，通车1年后出现沉降。<sup>[1]</sup>

路面施工技术：沥青路面和水泥混凝土路面是主流类型。某城市快速路采用改性沥青路面施工，使用SBS改性沥青（针入度



60mm)，摊铺温度控制在165–180℃，碾压采用“初压紧跟、复压高频”工艺，路面平整度标准差控制在1.2mm以内。水泥混凝土路面施工中，某项目采用滑模摊铺机（行进速度1.5m/min），配合激光定位系统，面板厚度偏差控制在±5mm，远超人工浇筑的±10mm精度。

### （二）桥梁结构施工技术现状

桥梁施工技术因结构形式（梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥）不同而各具特点，当前以预制装配、悬臂施工、支架现浇为主流。

预制装配技术：在梁桥中应用广泛，某跨河大桥30m预制T梁采用“工厂化预制+架桥机安装”模式，梁体钢筋绑扎、混凝土浇筑均在预制场完成（蒸汽养护24小时，强度达设计值80%），现场架设效率达每天5片，较支架现浇工期缩短40%。但该技术在曲线梁、变截面梁应用中仍有局限，某城市立交桥因曲线半径小（ $R=50\text{m}$ ），预制梁安装时线形偏差达10cm，需二次调整。

悬臂施工技术：适用于大跨度连续梁桥，某长江大桥主跨180m连续梁采用挂篮悬臂浇筑，每节段施工周期10天，通过BIM技术模拟挂篮行走轨迹，线形控制偏差≤3mm。但传统挂篮自重较大（约80t），对梁体产生附加应力，某项目因此将挂篮优化为轻量化设计（65t），减少梁体应力15%。<sup>[2]</sup>

拱桥施工技术：钢管混凝土拱桥因强度高、自重轻被广泛采用，某山区拱桥主跨150m，采用“缆索吊装+斜拉扣挂”工艺，将每节钢管拱肋（重50t）吊装至设计位置后，通过扣索调整高程（偏差≤5mm），再灌注C80自密实混凝土，经检测钢管与混凝土粘结强度达3.5MPa，满足设计要求。

### （三）施工技术应用中的突出问题

尽管道路桥梁施工技术已取得显著进步，但在复杂环境应对、质量管控、环保性能等方面仍存在短板。

复杂地质适应性不足：在软土、岩溶、高地应力等地质条件下，传统技术易出现隐患。某沿海高速公路路基穿越淤泥质土层（厚度12m），采用普通袋装砂井处理后，工后沉降仍达30cm，远超允许值15cm；某隧道桥梁结合部因岩溶发育，桩基施工时出现突泥，被迫停工20天进行注浆加固。

质量管控精细化不够：部分工序依赖人工操作，质量稳定性差。某高速公路路面施工中，因摊铺机速度波动（2–5m/min），导致沥青面层厚度偏差达±8mm（规范≤±5mm）；某桥梁预制梁张拉时，因人工读数误差，预应力损失达8%（规范≤5%），影响梁体承载能力。

环保与节能水平待提升：施工过程中资源消耗大、污染问题突出。某桥梁施工现场粉尘排放浓度达0.8mg/m<sup>3</sup>（标准≤0.5mg/m<sup>3</sup>），周边农田作物叶片出现粉尘覆盖；某项目施工废水未经处理直接排放，导致附近河道悬浮物超标3倍。<sup>[3]</sup>

## 二、道路桥梁施工技术创新与应用案例

近年来，道路桥梁施工技术在绿色化、智能化、工业化方面

涌现出一批创新成果，有效解决了传统技术的痛点。

### （一）绿色施工技术创新

绿色施工技术通过减少资源消耗、降低污染排放，实现工程建设与生态保护的协同。

节能设备与材料应用：某高速公路项目采用电动摊铺机、太阳能路灯等节能设备，施工期用电量较传统设备减少20%；桥梁支座采用改性橡胶材料（含30%再生橡胶），不仅降低成本15%，还减少固废污染。某跨湖大桥施工中，全部采用LED照明（功率较传统卤素灯降低60%），并利用桥梁桩基施工产生的泥浆（经脱水处理）制作路堤填料，回用率达80%，减少弃渣占地20亩。

污染控制技术升级：某城市道路改造工程采用“雾炮车+围挡喷淋”组合降尘，配合PM2.5在线监测（超标自动启动设备），施工现场粉尘浓度控制在0.3mg/m<sup>3</sup>以下；桥梁钻孔桩施工中，采用“泥浆循环净化系统”（含三级沉淀池+离心机），废水回用率达90%，悬浮物排放浓度≤10mg/L，周边水体未受影响。

### （二）智能化施工技术应用

智能化技术通过自动化、信息化手段提升施工精度与效率，减少人为干预。

BIM技术全流程应用：某特大桥项目建立BIM模型，整合设计图纸、材料参数、施工方案等信息，在预制梁生产中实现钢筋定位、模板安装的数字化指导，钢筋保护层厚度合格率从85%升至98%；施工中通过BIM模拟挂篮悬臂浇筑过程，提前发现3处模板碰撞问题，避免返工损失50万元。某城市道路工程利用BIM进行管线冲突检测，在施工前发现给水管与燃气管交叉冲突点12处，提前调整路由，减少施工扰民。<sup>[4]</sup>

智能监测与控制技术：某高速公路路面施工采用“智能摊铺机”，通过北斗定位（精度10mm）控制摊铺速度（稳定在3m/min）和厚度（偏差≤3mm），配合红外温度传感器监测沥青温度（165–175℃），确保碾压效果；某斜拉桥施工中，安装振弦式应力传感器（每5m一个监测点），实时监测索塔应力变化，当应力达设计值80%时自动预警，避免超载风险。

### （三）工业化建造技术发展

工业化建造通过工厂预制、现场装配，实现施工标准化、高效化，代表了桥梁建设的重要方向。

预制装配桥梁技术：某城市快速路跨线桥采用全预制装配结构，墩柱、盖梁、箱梁均在工厂预制（混凝土强度达C50），现场通过灌浆套筒连接（灌浆料28天强度≥85MPa），安装效率达每天2跨，较现浇施工缩短工期60%，且施工现场噪音降低40dB。某园区道路桥梁采用“模块化预制护栏”，每节长5m，重量2t，通过螺栓快速连接，安装合格率100%，后期维护更换仅需30分钟/节。

3D打印技术试点应用：某景观桥梁栏杆采用混凝土3D打印技术，打印材料为水泥、砂、矿渣粉（比例1:2:0.5），通过机器人喷头逐层打印（速度50mm/s），造型精度达±2mm，较传统预制节省模具成本30%；某道路检查井采用3D打印混凝土井筒，打印高度3m，施工时间从传统砌筑的8小时缩短至2小时，且井筒

垂直度偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。

#### （四）复杂环境施工技术突破

针对特殊地质、地形条件，施工技术不断创新，提升工程适应性。

跨江河施工技术：某跨长江大桥主塔基础采用“双壁钢围堰”施工，围堰直径30m，通过GPS定位控制下沉精度（偏差 $\leq 10\text{mm}$ ），在水深25m、流速3m/s的条件下，成功完成封底混凝土浇筑（厚度3m，强度C30）；主桥钢梁采用“节段吊装+焊接”工艺，每节段重120t，通过激光测距仪控制对接精度（偏差 $\leq 2\text{mm}$ ），焊接质量一次合格率98%。<sup>[5]</sup>

山区道路施工技术：某山区高速公路穿越V型峡谷，采用“悬臂挂篮+隧道锚”组合工艺，桥梁主缆锚固于隧道锚（深度50m），通过三维有限元分析优化锚固结构，确保抗拔力达设计值1.2倍；路基施工中采用“冲击碾压+强夯”处理（每点夯击8次，单击能3000kN·m），使地基承载力从180kPa提升至300kPa，满足重型车辆通行要求。

### 三、道路桥梁施工技术的发展趋势

未来道路桥梁施工技术将向智能化、绿色化、工业化、长寿命方向发展，结合新理论、新材料、新技术实现质的飞跃。

#### （一）智能化与数字化深度融合

智能化技术将贯穿设计、施工、运维全周期，实现“数字孪生”管理。未来道路桥梁施工将广泛应用无人摊铺机、自动驾驶压路机（如某试点项目无人压路机作业精度达 $\pm 3\text{mm}$ ，效率提升20%），通过5G网络实现设备远程控制；BIM与GIS、物联网结合，建立“数字桥梁”模型，实时同步现场施工数据（如混凝土强度、结构变形），某跨海峡大桥规划采用该技术，实现两岸施工数据实时共享，减少沟通误差。此外，人工智能算法将用于施工方案优化，如某AI系统通过分析1000个桥梁案例，能在30分钟内生成最优挂篮施工参数，较人工计算效率提升10倍。

#### （二）绿色低碳技术全面推广

“双碳”目标推动下，绿色施工技术将从“被动环保”转向“主动减碳”。新型低碳材料将成为主流，如低碳水泥（掺加50%工业废渣）在桥梁工程中的应用比例将达80%，某预计2025年投用的高速公路桥梁采用该水泥，可减少碳排放30%；施工设备将

全面电动化，如电动起重机（续航8小时，载重50t）、电动旋挖钻（噪音 $\leq 70\text{dB}$ ），某新区道路工程已实现施工设备100%电动化，年减排二氧化碳5000吨。此外，碳足迹核算将纳入施工管理，某桥梁项目通过核算施工阶段碳排放（材料生产占60%、设备能耗占30%），针对性采用光伏供电（占施工用电20%）、再生材料（占比15%），实现碳减排22%。

#### （三）工业化建造模式普及

工业化建造将实现设计标准化、生产工厂化、施工装配化，大幅提升效率。未来中小跨径桥梁（ $\leq 50\text{m}$ ）将100%采用预制装配，如某省规划的县乡道路桥梁，墩柱、梁体预制率达100%，现场安装工期缩短至7天/座；大跨度桥梁将推广“模块化建造”，如某公铁两用桥将主跨钢梁分为20个模块（每个重500t），工厂预制后通过巨型浮吊整体吊装，对接精度控制在 $\pm 5\text{mm}$ ，较传统散拼缩短工期40%。同时，预制构件连接技术将突破，如采用“超高性能混凝土（UHPC）灌浆接头”，抗压强度 $\geq 120\text{MPa}$ ，耐久性达100年，某跨海大桥采用该技术，接头使用寿命与桥梁主体一致。

#### （四）长寿命与全周期运维技术发展

道路桥梁将从“建设优先”转向“全周期管理”，施工技术与运维技术深度融合。施工中将广泛采用耐久性材料，如桥梁钢筋采用CRB600H高延性冷轧带肋钢筋（corrosion resistance提高50%），路面采用玄武岩纤维改性沥青（抗老化性能提升30%），某高速公路采用该沥青后，预计使用寿命从15年延长至20年。此外，施工阶段将预埋监测传感器（如光纤光栅传感器），实现桥梁全生命周期健康监测，某大桥在施工时预埋100个传感器，运营期间可实时监测梁体应变、温度变化，数据异常时自动预警，为养护提供依据，预计可降低维护成本25%。<sup>[6]</sup>

### 四、结语

道路桥梁施工技术正处于从传统向现代化转型的关键阶段，当前在绿色化、智能化、工业化方面已取得显著进展，但仍面临复杂环境适应性不足、质量管控精细化不够等问题。未来，随着数字技术、低碳理念、工业化模式的深入应用，道路桥梁施工将实现“更智能、更绿色、更高效、更耐久”的目标。

### 参考文献

- [1] 赵久敏, 张昕琪. 预应力技术在道路桥梁施工中的应用探讨 [J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(3): 135-137.
- [2] 高立广. 基于BIM技术桥梁施工全过程优化研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(12): 103-105.
- [3] 周治霖. 基于RBF神经网络的桥梁施工监管方法研究 [J]. 工程建设与设计, 2024, (11): 247-249.
- [4] 张伟蓉. 浅谈道路桥梁施工技术现状和发展趋势 [J]. 四川建材, 2023, 49(4): 191-193.
- [5] 刘记. 浅谈道路桥梁施工技术现状与发展趋势 [J]. 散装水泥, 2024, (2): 95-97.
- [6] 唐浩凌. 公路桥梁施工技术与流程优化研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (12): 100-102.

# 公路桥梁施工中悬臂挂篮施工技术研究

张灵学

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

DOI:10.61369/ME.2025040030

**摘 要：** 悬臂挂篮施工技术是公路桥梁建设中的关键工艺，凭借结构轻盈、施工灵活、不干扰桥下交通等优势，能适应复杂地形与工况。其无需大量临时支撑即可实现桥梁分段悬臂浇筑，显著提升施工效率并降低成本，在大跨度桥梁工程中应用广泛。本文聚焦公路桥梁施工中的悬臂挂篮技术，深入探讨其应用要点与实施路径，为同类工程提供参考。

**关 键 词：** 公路桥梁；施工技术；悬臂挂篮

## Research on Cantilever Basket Construction Technology in Highway Bridge Construction

Zhang Lingxue

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311300

**Abstract：** The cantilever basket construction technology is a key process in highway bridge construction. With advantages such as light structure, flexible construction, and no interference with traffic under the bridge, it can adapt to complex terrains and working conditions. It can achieve the segmented cantilever pouring of Bridges without a large number of temporary supports, significantly improving construction efficiency and reducing costs. It is widely used in long-span bridge projects. This article focuses on the cantilever basket technology in highway bridge construction, deeply explores its application key points and implementation paths, and provides references for similar projects.

**Keywords：** highway bridge; construction technology; cantilever hanging basket

### 前言

悬臂挂篮技术作为大跨度公路桥梁施工的核心手段，以适应性强、安全性高、经济性优的特点，成为复杂环境下桥梁建设的优选方案。其通过分段悬臂浇筑模式，在保障桥下交通通行的同时，可精准应对地形、地质等复杂条件，有效提升施工质量与效率。本文围绕该技术的应用场景、关键工序及控制要点展开深入分析，旨在为公路桥梁施工提供技术借鉴。

### 一、悬臂挂篮施工技术概述

悬臂挂篮施工技术是一种常用于大跨度桥梁施工的先进方法。其原理是利用挂篮作为施工平台，在已完成的梁段上向前逐段浇筑混凝土，形成连续的梁体结构。挂篮就像是一个可移动的小型工厂，它可以沿着梁体轨道移动，为后续梁段的施工提供支撑和作业空间。

### 二、悬臂挂篮技术在桥梁施工中的应用

#### （一）制作与安装

悬臂挂篮的制作与安装是技术应用的前提，其质量直接影响后续施工的安全性与精度。该环节需结合项目实际条件（如跨度、荷载、环境）进行针对性设计与管控。

施工筹备阶段，技术团队需完成三项核心工作：一是地质

勘察，重点探明桥位处土层承载力（要求 $\geq 200\text{kPa}$ ）、地下水位（需低于基坑底1m以上）及周边障碍物分布，为挂篮锚固系统设计提供依据；二是设备参数验算，根据桥梁最大悬臂长度（如50m）、梁段自重（通常每延米30–50t），确定挂篮主桁架截面尺寸（如采用I56b工字钢）、悬吊系统承重能力（钢绞线安全系数 $\geq 3.0$ ）；三是专项方案编制，明确安装流程（如“主桁架拼装→悬吊系统安装→锚固装置固定”）、人员分工（如起重工、焊工持证上岗率100%）及应急预案（如台风天气的设备加固措施）。

安装过程中，精度控制是关键。主桁架拼装需采用全站仪定位（平面偏差 $\leq 3\text{mm}$ ），节点连接螺栓需按“初拧→复拧→终拧”三步施工（终拧扭矩符合设计值，偏差 $\leq \pm 5\%$ ）；焊接部位（如主桁架拼接缝）需采用二氧化碳气体保护焊，焊后24h内进行UT探伤（合格率100%），防止裂纹隐患。安装完成后，必须进行两项测试：静载试验（加载至最大施工荷载的1.2倍，持荷1h，观测挂篮挠度 $\leq L/500$ ，L为跨度）和动态行走试验（连续行走3个梁



段，记录行走阻力、制动响应时间，确保无卡顿现象）。例如，某跨江大桥挂篮安装后，通过静载试验发现主桁架挠度超标2mm，经调整后锚点高程，最终满足规范要求，为后续施工奠定基础。

## （二）混凝土浇筑

悬臂挂篮在悬挂状态下完成混凝土浇筑，需平衡效率与质量，避免因荷载不均导致结构变形。该环节需从浇筑规划、过程管控及质量检测三方面实施精细化管理。

浇筑规划需遵循“对称、分层、均衡”原则。对称方面，左右幅梁段混凝土浇筑进度差控制在1h以内，方量差 $\leq 5\text{m}^3$ ，防止挂篮偏载（如某曲线桥施工中，通过两侧同步泵送实现荷载平衡）；分层方面，按“底板→腹板→顶板”顺序浇筑，每层厚度30cm（对应混凝土初凝时间4-6h），层间间隔时间 $\leq 2\text{h}$ ，避免冷缝产生；浇筑设备选择需匹配工程需求，采用车载泵（输送压力 $\geq 25\text{MPa}$ ）配合布料机（覆盖半径 $\geq 8\text{m}$ ），确保混凝土垂直运输过程中不离析（扩展度损失 $\leq 50\text{mm/h}$ ）。

过程管控需实时监测两项指标：一是挂篮姿态，通过安装在主桁架顶部的倾角传感器（精度 $0.1^\circ$ ），每10min记录一次数据，当水平倾角超 $0.5^\circ$ 时，立即暂停浇筑并调整悬吊系统；二是混凝土性能，入模温度控制在 $5\sim 35^\circ\text{C}$ （夏季采用冰水拌合，冬季用骨料预热），坍落度每车检测（ $180\pm 20\text{mm}$ ），同时通过可视化浇筑平台（如摄像头实时监控）观察腹板倒角处混凝土密实度，避免蜂窝麻面。

质量检测需覆盖三个维度：外观检查（表面平整度 $\leq 5\text{mm}$ ，棱角分明无破损）、强度试验（制作3组同条件养护试块，7天强度 $\geq$ 设计值的85%）、内部缺陷检测（采用超声波检测仪对梁体进行扫描，声速值 $\geq 3.5\text{km/s}$ 为合格）。某高速公路大桥通过上述管控，混凝土外观优良率达98%，28天强度达标率100%，较传统工艺提升15个百分点。

## （三）张拉施工

预应力张拉是确保悬臂梁体受力平衡的核心工序，其质量直接影响桥梁长期承载能力。该环节需实现“参数精准化、监测实时化、应急高效化”。

在进行参数设计时需结合结构受力特点。预张拉力计算需考虑三项损失：锚具变形损失（取6mm）、钢束松弛损失（1000h松弛率 $\leq 2.5\%$ ）、摩擦损失（按孔道类型取值，波纹管 $\mu=0.25$ ），最终张拉力按设计值的1.05倍控制（如设计1000kN，实际张拉1050kN）；张拉顺序需遵循“对称张拉、分批进行”原则，例如连续梁桥需先张拉腹板束（从下到上），再张拉顶板束（从中间到两侧），最后张拉底板束，避免梁体扭转。

监测系统需具备高精度与实时性。采用智能张拉设备（控制精度 $\pm 1\%$ ），同步采集张拉力（精度0.1kN）、钢束伸长量（精度0.1mm）及环境温度（每5min记录一次），数据实时上传至管理平台，当实际伸长值与理论值偏差超 $\pm 6\%$ 时，系统自动报警并锁定设备。某特大桥张拉时，系统监测到一束钢束伸长量偏小（偏差-8%），经查为孔道摩阻过大，通过重新压浆（压力0.6MPa）解决问题，确保预应力传递均匀。

应急保障需做到“设备备用、人员待命”。备用千斤顶（同

型号、已校准）、油泵需放置在张拉现场（距作业点 $\leq 50\text{m}$ ），同时配备2名持证张拉工随时待命；锚具安装前需进行硬度检测（HRC32-36），张拉过程中每5min检查一次夹片状态（回缩量 $\leq 6\text{mm}$ ），防止滑丝事故。通过上述措施，可将张拉合格率提升至99%以上。

## （四）合龙施工

合龙是桥梁结构形成整体的关键工序，需通过“受力平衡、精度控制、时效管理”确保成桥线形达标。其核心流程包括施工准备、临时固定、混凝土浇筑及预应力施加四部分。

施工准备阶段需完成两项工作：一是高程调整，通过全站仪测量悬臂端高程（精度1mm），利用挂篮悬吊系统进行微调（每端调整量 $\leq 10\text{mm}$ ），使合龙段两端高差 $\leq 5\text{mm}$ ；二是压重设置，在悬臂端堆放水箱（重量等同于合龙段混凝土量的1.1倍），浇筑过程中同步放水（每浇筑 $1\text{m}^3$ 混凝土放水1t），维持结构受力平衡。例如，某连续梁桥中跨合龙时，通过精准压重控制，合龙段两端高程差最终稳定在2mm。

临时固定是抗变形的关键。采用“型钢支撑+预应力束”组合体系：在合龙段两侧梁体预埋钢板（厚度20mm），焊接I40b工字钢支撑（间距1.5m），形成刚性约束（抗剪承载力 $\geq 500\text{kN}$ ）；同时张拉临时预应力束（张拉力为设计值的60%），限制梁体纵向位移（ $\leq 2\text{mm}$ ）。某桥梁合龙时遭遇强降雨，因临时固定可靠，梁体未发生偏移，保障了施工质量。

合龙段混凝土浇筑需“限时、控温”。选择在夜间低温时段（气温 $15\sim 20^\circ\text{C}$ ）施工，浇筑时间控制在6h以内（对应混凝土初凝时间）；采用微膨胀混凝土（膨胀率0.02-0.03%），通过掺入聚丙烯纤维（掺量 $0.9\text{kg/m}^3$ ）减少收缩裂缝。浇筑完成后立即覆盖土工布+棉被保湿（养护温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ ），7天抗压强度需达设计值的100%。

预应力施加需紧跟混凝土养护进度。当强度达85%、弹性模量达90%时，及时张拉纵向预应力束（张拉力按设计值的95%控制），采用真空压浆（真空度 $\geq -0.09\text{MPa}$ ）确保孔道密实。某大桥合龙后检测显示，轴线偏差仅8mm，满足规范要求（ $\leq 10\text{mm}$ ）。<sup>[1]</sup>

# 三、悬臂挂篮技术在桥梁施工中的应用的质量控制手段

为确保悬臂挂篮施工质量，需针对挠度、浇筑质量、预应力及内力实施多维度控制，构建全流程管控体系。

## （一）挠度控制

挠度是结构稳定性的核心指标，需通过设计、施工、材料协同控制。设计阶段利用Midas Civil等有限元软件模拟施工全过程，计算各工况挠度值（如挂篮行走阶段L/600、混凝土浇筑阶段L/400），据此优化挂篮刚度（主桁架截面惯性矩 $\geq 5\times 10^8\text{mm}^4$ ）。施工阶段采用“监测-反馈-调整”机制：每浇筑30cm厚混凝土，用全站仪（精度1mm）测量挠度，累计值超计算值10%时，通过调整挂篮后锚点高程（每次 $\leq 5\text{mm}$ ）补偿。某桥梁施工中，实时调整使最大挠度从25mm降至20mm，



符合规范。材料选用 C60 高性能混凝土（28 天强度 $\geq 60\text{MPa}$ ）和 HRB500E 级钢筋，较传统材料降低自重 8%，间接减少挠度。

（二）悬臂浇筑质量优化

从挂篮维护、管道定位及温度控制三方面保障浇筑质量。挂篮维护实行“定期检查+动态监测”：每日检查悬吊钢绞线（断丝数 $\leq 1$ 丝/束）、滑轮组润滑；每月用应变片（精度 $1\mu\text{ε}$ ）检测主桁架应力，确保 $\leq$ 设计值 80%，某项目借此将设备故障率从 5%降至 1%；预应力管道定位采用“双控法”：纵向管道用角钢架固定（间距 50cm，曲线段 30cm），坐标偏差 $\leq 3\text{mm}$ ；竖向管道每 2m 设定位钢筋，防止上浮（偏差 $\leq 5\text{mm}$ ），浇筑前通孔试验通过率 100%；温度控制覆盖全流程：拌合用冷水（ $\leq 10^\circ\text{C}$ ）、冰屑降温（出机温度 $\leq 28^\circ\text{C}$ ）；浇筑时搭遮阳棚（降温 5–8 $^\circ\text{C}$ ）、喷雾控温（环境 $\leq 35^\circ\text{C}$ ）；养护用智能喷淋（每 2h 喷水，湿度 $\geq 95\%$ ），覆盖土工布+塑料膜（保湿 $\geq 14$ 天）。某夏季项目通过此措施，混凝土裂缝率从 8%降至 1.5%。

（三）预应力张拉和压浆的控制

预应力施工需严控张拉精度与压浆密实度。张拉实行“双控+追溯”：以张拉力（精度 $\pm 1\%$ ）为主控，钢束伸长量（偏差 $\pm 6\%$ ）为校核，每束记录操作人员、设备及数据（存档 $\geq 5$ 年）。某桥梁因追溯记录及时发现油泵传感器失准，更换后张拉达标；压浆采用“真空辅助+智能控制”：压浆前真空泵抽至 $-0.09\text{MPa}$ （持续 3min 无回升）；智能压浆机控制压力 0.5–0.7MPa、流量 2–3 $\text{m}^3/\text{h}$ ，通过观察孔溢浆判定饱满度；专用压浆料水胶比

0.27，每批次测流动度（30min 损失 $\leq 20\text{mm}$ ）。某项目借此将孔道密实度合格率从 85%提至 99%。

（四）施工内力控制

通过荷载管理、支撑设计及实时监测防控内力超限。荷载管理细化至工序：挂篮材料堆放均匀（堆载 $\leq 20\text{kPa}$ ），人员集中作业 $\leq 10$ 人/ $\text{m}^2$ ；泵管设橡胶垫减冲击（ $\leq 5\text{kN}$ ），某项目借此将梁体应力控制在设计值 75%内；临时支撑兼顾强度与变形：边跨支架用碗扣架（立杆 $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$ ），地基浇 10cm 厚 C20 垫层，预压（1.2 倍荷载）沉降 $\leq 10\text{mm}$ ；合龙段用 Q355B 型钢支撑（屈服强度 $\geq 355\text{MPa}$ ），焊接达一级标准；实时监测覆盖关键截面：跨中、1/4 跨及悬臂端设应力传感器（精度 1MPa），每 30min 采集数据，超设计值 10%时自动预警。某桥梁监测到悬臂端应力突增（115%设计值），经查为锚固螺栓松动，紧固后恢复正常，避免损伤。<sup>[2]</sup>

四、结语

悬臂挂篮技术的应用水平直接决定大跨度桥梁的施工质量与安全。实践表明，通过设备制作安装的精度管控、混凝土浇筑的均衡施工、张拉合龙的动态调整，以及全流程的质量控制手段，可实现桥梁结构线形偏差 $\leq 10\text{mm}$ 、预应力传递效率 $\geq 95\%$ 、竣工后 10 年无结构性裂缝的高质量目标。

参考文献

[1] 董鹏. 悬臂挂篮技术在桥梁施工中的应用 [J]. 四川建材, 2023(6): 138 – 140.  
[2] 卢静. 桥梁施工中挂篮悬臂浇筑施工技术的应用探讨 [J]. 科学技术创新, 2022 (12): 135–138.

# 概预算编制在建筑工程造价管理中的应用

王书银

中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013

DOI:10.61369/ME.2025040033

**摘 要 :** 概预算编制作为工程造价管理的基础性工作,通过科学、合理的预算编制,能够有效控制工程造价,提高工程建设效率。通过科学准确地编制概预算,可以有效控制项目成本,合理分配资源,确保建筑工程按时按质完成。概预算作为工程造价管理的基础,是提前防范和应对成本风险的有力工具。基于此,本文主要分析概预算编制在建筑工程造价管理中的应用。

**关 键 词 :** 概预算编制; 建筑工程; 造价管理; 应用

## The Application of Budget Estimate Preparation in the Cost Management of Construction Projects

Wang Shuyin

China Academy of Building Research, Beijing 100013

**Abstract :** As a fundamental task in project cost management, the preparation of estimates and budgets can effectively control project costs and enhance the efficiency of engineering construction through scientific and reasonable budget preparation. By scientifically and accurately preparing the budget estimate, project costs can be effectively controlled, resources can be rationally allocated, and the completion of construction projects on time and to a high standard can be ensured. Budget estimates, as the foundation of project cost management, are powerful tools for preventing and responding to cost risks in advance. Based on this, this paper mainly analyzes the application of budget and estimate preparation in the cost management of construction projects.

**Keywords :** budget and estimate preparation; construction engineering; cost management; application

## 引言

建筑工程造价管理贯穿于项目建设的全过程,是确保工程投资合理、经济效益最大化的关键。通过编制高质量的工程概预算,加大工程概预算在工程建设阶段的利用力度,能够合理控制项目投资规模,全程监控工程各项费用支出的合理性,从而发挥出工程概预算对提高工程造价控制水平的功能效用。

## 一、概预算编制概述

### (一) 概预算编制原理

工程概预算是指在工程项目立项初期,根据工程项目的性质、规模、地理位置和其他相关因素,通过对工程项目整体和部分的核算、测算和估算,对工程项目建设成本进行初步的估计和核算。概预算编制在工程项目前期计划和决策中起着重要作用。它既是工程项目投资决策的基础,也是设计、施工、结算等后续阶段的依据。为了确保工程概预算结果的全面性与准确性,并符合我国当前的行业标准和法律法规规定,需要对编制概预算文件进行严格管理。首先需要按照我国行业规定,详细填写项目类别、项目内容和概预算依据基本信息,根据行业标准规范,设定数据和计量单位,计算该项目工程的工程量和预算。其次通过分

析工程项目的设计图纸,确定施工结构和施工工艺。最后,为了提高工程概预算的准确性,应进行详细的现场地质勘察,并按照相关规范明确划分概预算项目,科学计算工程量和造价<sup>[1]</sup>。

### (二) 概预算编制重要性

建筑工程概预算涉及不同的环节,需要有关人员结合具体工作内容以及注意事项去开展工程概预算编制和造价控制工作,从而避免建筑工程造价出现超概预算情况。概预算编制在住宅建筑工程造价管理中扮演着至关重要的角色。作为工程管理的重要组成部分,概预算编制不仅为项目的决策提供了重要依据,其更有效地控制着项目的成本和资源分配。

在施工前,需要做好工程概预算工作,实现工程总成本估算,以达到估算建筑项目建设中各个阶段工程成本合理估算的目的,以免在管理过程中缺乏相应的依据,无法实现成本的有效控

制。然而，工程概预算编制对于控制工程投资规模，缩短施工时间，提高投资效益具有重要意义。合理明确工程造价，严格制定概预算编制依据，全面收集基础资料，做好相关准备工作，正确套用定额，进一步加强对工程造价的管控。概预算编制和造价工作是一项技术性较强的工作，随着工程行业的持续发展，人们对工程造价控制要求越来越高。只有提高概预算编制质量，合理明确工程造价，实现对工程造价的动态管理，加强对风险投资的控制，才能保证工程的整体质量<sup>[2]</sup>。

## 二、概预算编制在建筑工程造价管理中的应用

### （一）完善编制方法和流程

概预算编制对建筑工程造价控制起到关键性的作用。所以，加强对工程造价的控制，以不断提高工程概预算质量。为了实现这一目标，相关工作人员应充分掌握概预算编制方法、流程和相关技巧。概预算编制人员去了解建筑工程各阶段工作内容，并根据该工程的实际情况展开编制工作。在编制过程中，编制人员需搜集该工程的各项资料，了解工程特点、造价特点、相关政策、国家发布的建设标准，明确预算主体。概预算必须完整地反映出造价重点，并为造价管理与控制的工作人员提供依据，以提高造价管理的有效性。根据建筑工程项目的特点，结合实际情况，进行科学、准确的概预算编制。工程概预算编制需要大量的数据支撑，包括劳务、材料、设备和其他费用等方面的数据。因此，数据的质量、来源、真实性直接影响了概预算编制的准确性。在实际工程实践中，需要确保数据的准确性和真实性，以提高概预算编制的质量和精度<sup>[3]</sup>。

### （二）设计阶段的概预算编制

设计阶段的概预算编制在建筑工程造价管理中具有重要的应用价值。设计阶段是整个工程实施周期中成本影响最大的阶段之一，通过概预算编制可以在项目初期就对成本进行有针对性的规划和控制。建筑项目中，工程设计通常都是由设计单位的设计人员依据项目特点，在持续的优化改进中完成。因此，在设计期间要加大对设计人员的监督力度，按照客观的原则，对设计文件进行评价，分析设计内容的可行性。概预算编制人员要多了解设计图，清楚图纸中各个构件的情况，而设计人员要选择适宜的方法开展设计工作，如限额设计等，充分体现出设计的技术性和经济性，在保证建筑使用功能的基础上，达到降低工程造价的目的。同时，设计人员要确保设计内容的合理性，在设计过程中要反复审查，建立评审小组对设计内容进行全面的审核、评价。

### （三）施工前的概预算编制

施工前的概预算编制在建筑工程造价管理中占据非常重要的地位。通过施工前的概预算编制，可以对工程的施工成本进行科学预估，从而为建设单位提供决策依据和资金准备期间的合理规划。施工前的概预算编制也是为了保证工程的质量、进度和安全，通过合理的成本预算，为施工过程提供必要的支持，避免因资金不足导致的延误或变更。在施工前的概预算编制中，需要充分考虑施工所需的人力、材料、机械和施工工艺等方面的具体要

求。同时，还需要参考设计图纸、技术规范、工程量清单等文件，对工程的具体施工内容和范围进行详细地调查和分析，以确保概预算的准确性和全面性<sup>[4]</sup>。

### （四）强化招投标及合同管理工作

在建筑工程造价概预算控制过程中，需要有关单位做好招投标以及合同管理工作。首先，要对合同进行分析和管理的，要确保合同的合法、合规和完整性，结合建筑工程情况和政策法规要求对合同条款进行审核，并做好有关指标的更新；其次，对招投标文件进行把关。施工单位以及业主方要意识建筑工程的招投标文件是进行工程结算的重要依据，要严格控制招投标的变更，并对招投标中涉及的施工方案、材料等进行监督、掌握和管理，然后结合实际情况去对项目的概预算进行调整。在这个过程中可以将信息技术、计算机技术、三维建模技术等应用其中，进行建筑工程项目设计方案的分析，并对可能出现的变动因素进行控制。

### （五）收集价格市场动态信息

建材市场价格浮动大，种类多。在概预算编制工作中，编制人员必须明确所使用的建材种类、建材数量、设备等。不同地区的建材价格存在差异，价格的浮动受当地自然条件、社会环境影响较大，编制工作中，工作人员需依据已有资料计算材料与设备成本。除此之外，编制人员还需统计工程建设中其他费用，保障概预算质量。可以采取调研的方法全面收集价格市场的动态信息，据此对工程机械设备、施工材料的价格做出准确预测。工程项目招投标期间，报价是非常重要的环节，如果报价不准，则会导致风险系数增大，从而造成工程造价超标，所以确保报价的准确性尤为重要，为实现这一目标要采取适宜的管理模式。由于管理的内容中既包含静态方面的固定成本，又包括动态方面的人、机、材料等费用。故此，可以将静态管理联合到一起构成全新的管理模式，在基础上，随时了解并掌握市场的价格波动变化，做出及时响应，以满足工程概预算编制的需要，提高概预算的编制质量<sup>[5]</sup>。

### （六）掌握工程机料信息

工程概预算的编制是一项系统性比较强的工作，概预算编制的是否准确直接关系到编制质量，高质量的概预算对工程造价的影响比较轻微，在可接受的范围内，质量不高的概预算对工程造价的影响较为严重，很容易导致造价失控。所以提高工程概预算编制质量尤为必要。编制人员应把握工程建设所需其他物品价格，把握动态变化，积极制定方案，用最低的价格购买优质的设备。施工组织设计编制应结合实地调查的结果，确定材料运输与储存的方案，选择最合理的施工方法，确保施工全过程按流程有序进行。需要注意的是，实地调查前，编制人员需认真钻研方案。调查过程中，编制人员需详细记录环境、定额标准等，用以统一预算指标。

### （七）严格把好工程量计算

首先，结合计算规则进行计算。在计算时，应确保计算格式统一。图纸的观察遵循从整体到局部的原则，加强对局部信息的关注，先了解建筑整体情况，之后把握建筑结构情况。严格按照相应的规程查看图纸，避免施工图纸中出现一些工程量计算上的

错误。其次，重视工程设计工作，确保设计方案满足相关要求的同时，结合与本工程投资规模相接近的造价指标，对设计方案进行全面评估，以优选施工方案，将其作为概预算编制的重要依据，进一步加强对工程造价的控制。

#### （八）工程进度和成本控制中的概预算编制

工程进度和成本控制中的概预算编制在建筑工程管理中发挥着至关重要的作用。通过概预算编制可以对工程的时间节点和成本支出进行合理规划和控制，帮助项目团队有效地制定工程进度计划和预算计划，确保工程按时按质完成。工程进度和成本控制中的概预算编制是实施全过程造价管理的基础，其能够帮助项目团队对工程的资源使用、费用支出进行有效监控，及时发现和处理潜在的问题和风险，保障工程的顺利进行和成本控制目标的实现。成本预算的编制是成本控制的首要环节。预算的编制需要依据项目的实际情况、市场环境以及技术条件，对项目的各项费用进行合理预测和规划。这一过程不仅需要对项目所需的人工、材料、机械等成本进行细致的分析和计算，还需考虑项目的工期、质量、安全等因素对成本的影响。预算的准确性和合理性直接决定了成本控制的基础和依据<sup>[9]</sup>。

#### （九）加强设计变更标准和现场签证管理

为了有效降低设计变更和现场签证管理的出现概率，要从以下几点入手：第一，设计周期应满足“求真务实”的需求，在保证设计质量的基础上，形成一套科学的设计变更标准要求和变更流程，对现场签证管理不足之处加大改善力度。第二，面对概预算设计变更属于较大情况的必须坚守先报审批、核准，再实施的原则。通常情况下设计变革和签证工作受建设单位、监理单位的直接管理，还能试行与国际工程监督建立联系，对把握不准的情况可开通有偿咨询的服务，从而推广社会化工程服务制度，完成工程造价全流程的监管。

#### （十）构建概预算编制质量评估机制

构建概预算编制质量评估机制，首先应确定评估的指标和评

估方法，概预算主要评估项目指标的准确性、完整性、一致性，并根据实际情况进行权重分配，以反映不同指标的重要性，综合考虑各项指标的得分，形成最终的评估结果。其次设立专门的评估小组或委托第三方机构进行评估工作，对概预算编制文件进行审核、对概预算数据进行抽样核对、对概预算编制全过程进行追踪核验，及时发现概预算编制中存在的问题和不足并进行纠正与改进。

#### （十一）提高预算编制水平

建筑项目中，工程概预算的编制是一项系统性和专业性比较强的工作，要求编制人员具有丰富的经验和过硬的技术水平，能够保证编制的概预算准确、可靠。因此，组建一支专业的编制队伍显得尤为必要。提高预算工作人员的专业水平和职业素养，培养预算人员的综合工作能力，定期开展一些技能培训和实践培训，对预算专员定期进行考核和管理，通过提升其理论基础、技术水平和职业素养，保证概预算编制的准确性和工作质量。要对已完成的概预算进行严格审核，明确不同阶段概预算的校审职责，对各项数据、图纸和各项费用进行分析，避免概预算中存在多算、漏算和重算现象，确保概预算的准确性，提高整体概预算编制水平，保证建筑工程造价控制工作顺利开展。

### 三、结束语

概预算编制在建筑工程造价管理中具有重要作用，通过科学、合理的预算编制，能够有效提高工程造价的快速性和准确性，合理管理施工计划及进程，提高工程建设的效率。在实际应用中，需要注意掌握建筑材料及设备价格要素、加强对设计方案的估价与控制以及严格审批与核对程序等事项。未来，随着建筑行业的不断发展，概预算编制在工程造价管理中的应用将更加广泛和深入。

### 参考文献

- [1] 陈翔. 建筑工程概预算编制对工程造价的影响探析 [J]. 江西建材, 2022(11): 419-420+423.
- [2] 张小强. 概预算编制质量对建筑工程造价的影响解析 [J]. 中小企业管理与科技, 2022(08): 29-31.
- [3] 郭亚慧. 谈谈水利工程概预算的编制重要性及应注意的问题 [J]. 江西建材, 2016(7): 255.
- [4] 陈先兰. 水利工程概预算编制工作的重要性及技巧探讨 [J]. 中外企业家, 2016(19): 151-152.
- [5] 杭晨. 简述水利工程概预算的编制重要性 [J]. 河南水利与南水北调, 2014(2): 59-60.
- [6] 雷平. 水利工程概预算编制重要性及注意事项分析 [J]. 建材与装饰, 2017(30): 288-289.



# 抽水蓄能电站施工投标阶段报价策略

徐慧慧

中国水利水电第十一局工程有限公司, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ME.2025040034

**摘 要：** 抽水蓄能电站作为新型清洁能源储存方式，其施工及投标阶段的报价策略对于工程造价和经济效益有直接影响。本研究基于对抽水蓄能电站工程特点和投标环境的全面分析，运用博弈论和数学模型理论，构建出一套科学、合理的施工投标报价策略。研究结果显示，该策略能够在保证企业收益的同时，辅助投标者更为准确、有效地决策，提高投标成功率并降低投标风险。此外，它还能政府监管部门提供决策参考，促进竞争公平，帮助推动抽水蓄能电站行业健康、快速发展。总体而言，本研究的报价策略可以为本领域内的企业提供有益的参考和策略指导。

**关 键 词：** 抽水蓄能电站；施工投标；报价策略；博弈论；竞争公平

## Quotation Strategies for the Bidding Stage of Pumped Storage Power Station Construction

Xu Huihui

China Water Conservancy and Hydropower 11th Bureau Engineering Co., LTD., Zhengzhou, Henan 450000

**Abstract：** As a new type of clean energy storage method, the quotation strategy during the construction and bidding stages of pumped storage power stations has a direct impact on the project cost and economic benefits. Based on a comprehensive analysis of the characteristics of pumped storage power station projects and the bidding environment, this research uses game theory and mathematical model theory to construct a set of scientific and reasonable construction bidding quotation strategies. The research results show that this strategy can ensure the profits of enterprises while assisting bidders in making more accurate and effective decisions, improving the success rate of bidding and reducing the risks of bidding. In addition, it can also provide decision-making references for government regulatory authorities, promote fair competition, and help drive the healthy and rapid development of the pumped storage power station industry. Overall, the quotation strategy of this study can provide useful references and strategic guidance for enterprises in this field.

**Keywords：** pumped storage power station; construction bidding; quotation strategy; game theory; fair competition

## 引言

随着全球范围内可再生能源使用率的迅速提升，抽水蓄能电站作为清洁能源储存的有效手段正得到广泛应用。然而，在抽水蓄能电站的施工及投标阶段，报价策略的重要性却常被忽视。这不仅直接影响到工程造价，更关乎整个项目的经济效益及企业的长期发展。为解决这一问题，本研究深入剖析了抽水蓄能电站的工程特点和投标环境，利用数学模型和博弈论的理论工具，构建了一套科学、合理的报价策略。我们期望这一策略能在保障企业收益的同时，提高投标成功率，降低投标风险，并为政府监管部门提供决策参考，促进项目竞争的公平性，推动抽水蓄能电站行业的健康、快速发展。

## 一、抽水蓄能电站的基本概念和特性

### （一）抽水蓄能电站的工作原理和工程特点

抽水蓄能电站是一种绿色基础设施，以电力系统的供需差异

为核心，实现能源的储存和调控<sup>[1]</sup>。其工作机制基于水的重力势能转化，在电力需求低谷期利用电能将低位水库的水抽升至高位水库，在电力需求高峰期释放高位水库的水推动水轮发电机组发电，实现电力的时空转换，满足削峰填谷需求，稳定电网运行。

作者简介：徐慧慧（1993-），女，汉族，河南焦作人，本科，中级经济师，现就职单位：中国水利水电第十一局工程有限公司，研究方向：工程经济。

在工程特性方面，抽水蓄能电站融合了水力、电力和建设工程技术的复杂性。设计需满足高效能量转换目标，施工过程需满足高精度工艺需求，并应对复杂地质和水文状况。例如，管道系统及水力机械需具备良好的耐压性能和高疲劳强度，地下厂房等核心工程的开挖与支护对施工技术提出极高要求。设备安装调试需确保精密机械与电气系统的高度匹配，以保障投产后系统运行的安全性与可靠性。这些工程特点决定了抽水蓄能电站施工周期长、技术难度大、资源投入高的特性，为投标报价策略的制定带来诸多影响因素。

### （二）抽水蓄能电站的市场环境分析

抽水蓄能电站在当前市场环境中占据着重要地位。随着可再生能源的迅猛发展，电力系统对调节能力的需求日益增强。作为有效的电网调峰和填谷储能装置，抽水蓄能电站的需求呈现稳步增长态势<sup>[9]</sup>。全球各地政府纷纷出台强有力的支持政策，如提供补助金、税收优惠及推广宣传等，有力推动了抽水蓄能电站行业的蓬勃发展。然而，市场内部仍存在问题，如资源分配不均、技术标准不统一等，这对市场参与者的技术实力和财力决策提出了更高要求。面对瞬息万变的市场环境，企业需灵活调整决策，以适应新形势带来的挑战。

### （三）抽水蓄能电站施工的关键要素

抽水蓄能电站的建设涉及多个重要环节，这些环节直接关系到工程的品质与经济效益。地质环境在施工中扮演着关键角色，影响着电站的选址、挖掘方式及安全因素。施工效率与准确性则依赖于技术设备，如掘进设备、混凝土灌注设备等，这些设备的选择至关重要。工艺流程的合理性与前瞻性同样是工程质量的重要标杆，需考虑水工结构的稳固性与工程的耐久性。此外，经验丰富、技术熟练的专业团队对于复杂工序的推进具有不可替代的作用。从资金筹措到合同管理的全局监控，也是确保项目顺利实施和达到预期目标的重要环节。因此，这些要素共同构成了抽水蓄能电站建设的核心框架，需进行整体评估并优化配置，以确保项目平稳推进。

## 二、投标报价过程中的风险因素和问题

### （一）投标报价过程中存在的主要风险

投标报价过程中的风险因素对企业的投标决策具有深远影响。在抽水蓄能电站施工投标中，主要风险可归类为市场风险、技术风险和管理风险三大方面。市场风险主要包括行业竞争激烈引发的价格战风险，以及材料成本波动和政策调整所带来的报价不确定性。技术风险则体现在工程设计的复杂性和施工方案的不确定性上，这可能导致报价与实际施工成本产生偏差。技术参数不明确或前期勘察不足也会增加报价错误的风险<sup>[9]</sup>。管理风险主要表现为项目管理团队对信息的把控能力不足，以及对招标文件内容的解读存在偏差，这可能导致策略偏离。不良的管理流程和

沟通机制还可能导致报价数据不完整、不准确。投标者在报价过程中，若未能全面识别并量化这些风险，可能会出现报价过高而失去竞争力，或报价过低而削弱利润空间的情况，这将严重影响企业在投标市场中的竞争地位和经济效益。因此，对投标过程中的风险进行系统识别与分析，是实现科学报价的前提保障。

### （二）报价策略中常见的问题点

投标报价策略在制定过程中常见的问题主要体现在以下几个方面。第一，报价信息的不对称性导致投标者难以全面掌握竞争对手的报价策略及项目实施的真实成本，从而增加了决策的不确定性。第二，市场环境波动性对报价的影响较大，特别是在原材料价格和劳动力成本频繁变动的情况下，固定报价可能带来收益风险或降低竞争力。第三，报价策略过于激进或保守可能导致中标率降低或潜在利润流失。第四，未充分结合自身技术能力与资源配置情况进行报价，可能在中标后面临施工阶段资源不足与成本超支的问题。第五，对政策法规的解读不足可能会导致报价策略缺乏合规性，进而增加潜在的法律风险。这些问题的存在严重影响了投标决策的科学性与合理性，需要通过优化方法加以解决。

### （三）投标阶段的竞争策略形成过程

竞争策略的形成需综合考虑市场动态、竞争对手行为、项目规模等因素。通过对项目历史数据及市场趋势的分析，结合博弈论手段，构建策略模型，决策者在此基础上制定具有针对性的报价方案，以提升竞争优势及中标概率。

## 三、博弈论在施工投标阶段的应用

### （一）博弈论基础知识及运用方法介绍

博弈论是一种研究决策主体在特定环境下相互作用与行为选择的科学方法，其主要目的是分析参与者之间的竞争与合作关系，通过数学模型揭示最优决策路径<sup>[10]</sup>。在施工投标阶段，作为一个多主体博弈场景，投标者需要在对手行为不完全确定的情况下制定合理的报价策略。博弈论的核心概念包括参与者（投标企业）、策略集（投标报价方案）、收益函数（经济效益和中标概率）以及信息条件（完全信息或不完全信息）。

在施工投标阶段，博弈论提供了多种分析方法。其中，纳什均衡是一种关键模型，它描述了多方在既定策略下不改变选择的稳定状态；混合策略均衡可用于处理投标报价的不确定性问题；动态博弈模型分析则能评价投标方在多阶段竞争中的行为调整。通过数学建模和均衡分析，博弈论能够优化投标者的决策行为，提高报价的科学性和竞争力。研究表明，合理应用博弈论能够显著降低投标风险，提高中标成功率，促进施工竞争的公平性和效益最大化。

### （二）博弈论在投标报价策略中的实际运用

在投标报价策略中，博弈论通过分析多个竞标者在投标过程

中的互动关系，帮助确定最优策略。博弈论能够为施工企业在复杂多变的投标环境中提供理性决策依据。利用纳什均衡理论，企业可以在预估竞争对手可能行为的基础上，保持自身竞争优势，从而制定适合的报价策略。对称信息博弈模型有助于识别信息不对称情境，促使企业谨慎调整报价策略以应对市场变化。相对竞争模型则通过模拟各参与方的策略调整，优化报价以实现资源的最优配置及收益的最大化。这些应用不仅提升了投标成功率，还降低了因市场波动导致的潜在风险。

### （三）基于博弈论的投标竞争策略

在投标竞争策略的运作中，博弈论提供了实质性的指导。从投标者之间的互动分析出发，博弈论寻找最有利的报价决策。博弈论提供了一个计算框架，让投标企业在信息不完全的情况下理解竞争对手的可能行动，并据此调整自身策略以实现利益最大化。以纳什均衡模型为核心，通过估算其他投标者的出价范围、风险承受力和市场环境，投标者可以确定自身的最佳出价。使用混合策略可以进一步突破单一报价的局限，提高出价的灵活性和竞争力。这种基于博弈论的投标模式不仅提升了报价的精准度，还大幅度降低了恶性竞争的可能性。至关重要的是，它为企业在激烈的投标竞争中提供了理论支撑。

## 四、抽水蓄能电站施工投标阶段的科学报价策略

### （一）宏观经济环境下报价策略

在宏观经济环境下，制定抽水蓄能电站施工投标的报价策略需综合考虑市场动态、政策变动和经济周期等多重因素。市场动态涵盖能源需求波动、原材料价格起伏和劳动力成本调整，这些因素直接影响工程造价的评估<sup>[9]</sup>。政策方面，国家新能源政策、税收优惠措施及环境保护法规等均会对投标策略产生显著影响。经济周期的波动可能导致项目资金筹措难度变化，进而影响报价决策。科学的报价策略需具备灵活性和预见性，能在不确定性中辨识机遇与风险。通过构建与宏观经济环境相契合的报价模型，实现对投标报价的动态调整，提高投标成功率。此策略设计还需兼顾企业的长期发展与经济效益，确保在激烈的市场竞争中保持不败之地。有效的宏观经济环境下的报价策略为增强市场竞争力奠定了坚实基础。

### （二）基于博弈论的报价策略模型设计

基于博弈论的报价策略模型设计旨在构建一种科学合理的投标决策工具，以应对抽水蓄能电站施工投标过程中的复杂竞争环境。通过引入静态博弈和动态博弈模型，对投标者间的相互作用关系进行建模。静态博弈模型假设各投标方同时行动，建立利润最大化和成本约束条件下的纳什均衡，分析不同报价情境下的最优策略选择。动态博弈模型则考虑各方的逐步报价决策过程，结合信息不对称情况下的策略调整规律，评估行动次序和信息透明度对最终投标结果的影响。这些模型通过引入关键参数，如工程

成本、市场竞争强度、预期利润率等，为报价策略提供了量化的依据，为投标方在复杂竞争环境中提供了理论指导，提高了决策的科学性和执行的有效性。

### （三）如何实施科学合理的报价策略

实施科学合理的报价策略需综合考虑宏观经济环境、市场竞争状况和项目具体特点。报价应基于详尽的数据分析和成本测算，准确反映施工难度、资源配置和技术要求。运用博弈论模型确定最佳报价区间，以应对竞争对手的策略行为。建立动态调整机制，根据政策变化和市场反馈灵活优化报价方案。加强内部管理与风险控制，通过精准预估与有效沟通提升报价的谈判优势，实现经济效益与市场拓展的双重目标。

## 五、报价策略对抽水蓄能电站行业发展的影响

### （一）报价策略对投标成功率的影响

投标成功率的进一步提升，在很大程度上取决于报价策略的完善程度和实施效果。在抽水蓄能电站工程投标阶段，企业需坚持制定精确且科学的报价策略，以在竞争中占据优势地位。科学、合理的报价策略依赖于对市场变化和投标环境的深刻理解，包括成本的精确估算和市场价格趋势的准确把握。在竞争激烈的招标环境中，精密的策略将引导企业全面考虑各种影响因素，制定出既具竞争性又经济的报价，从而显著提高中标可能性。设计报价策略时，风险管理的重要性不容忽视，合理的风险分配和成本控制能够降低投标风险，确保项目的经济可行性和实际收益。正确执行科学的报价策略，不仅是提高中标率的关键，也是维护和增强企业在市场中信誉和竞争力的良策，为抽水蓄能电站项目的顺利推进铺平道路。

### （二）报价策略对行业竞争公平性的影响

报价策略在抽水蓄能电站行业竞争公平性中发挥着重要作用。科学合理的报价策略能够有效平衡投标企业的利益诉求与市场竞争生态，使竞争从单纯的价格竞争转向质量、技术和服务的综合比拼。通过引入基于博弈论的模型，不仅可以对企业的合理低价竞标行为形成约束，还能提高投标报价的透明度和规范性。这一过程中，报价策略的优化进一步推动了信息对称的实现，使中小企业能够在公平竞争的环境中与大型企业同台竞技，有助于打破市场垄断，提高行业资源配置效率。合理的报价策略通过保障工程质量与执行效率，减少市场参与者之间的不正当竞争行为，从而促进行业的健康发展。这使得抽水蓄能电站施工领域形成更加规范和可持续的竞争体系，为行业的长期有序发展奠定了基础。

### （三）报价策略对抽水蓄能电站行业健康发展的推动作用

报价策略在抽水蓄能电站行业健康发展中起到关键推动作用。科学合理的报价策略可以有效减少恶性竞争，降低企业在投标过程中的法律和经营风险，确保工程质量和工期的稳定。它能

吸引更多具备技术实力和诚信经营的企业参与市场竞争，形成良性循环，促进行业内技术进步和创新升级。合理的报价策略还为政府监管提供了参考依据，有助于强化市场监管，加强规范化管理，提升行业透明度，最终推动抽水蓄能电站行业实现更高效、更可持续的发展。

六、结束语

此次研究以抽水蓄能电站的施工投标阶段为背景，针对报价策略的制定进行了科学详实的阐述和分析。研究运用博弈论和数

学模型理论，构建出一套全新、科学合理的报价策略，为企业在投标阶段提供了新的决策依据和工具，保障了企业收益，显著提高了投标成功率，降低了投标风险。同时，该策略对政府监管部门的决策也提供了有益参考，使得竞争更加公平，为抽水蓄能电站的行业发展提供了有力推动。然而，该研究仍存在一定的局限性，如针对复杂的投标环境、不确定的政策导向、激烈的市场竞争等因素，需进一步深入研究。尽管如此，此次研究的成果无疑为本领域内的企业提供了有益的参考和策略指导，有助于推动抽水蓄能电站施工投标阶段报价策略研究的发展。

参考文献

[1]李汶航,刘思远,黄梓亮.论抽水蓄能电站工程施工阶段的安全管理[J].中国科技纵横,2020,(02):114-115.  
[2]梁显峰.传统抽水蓄能电站与综合利用的抽水蓄能电站[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022,(12):0071-0073.  
[3]卢星星.抽水蓄能电站工程施工标段划分[J].建筑技术开发,2021,48(16):60-61.  
[4]邱云(文图).世界已建海拔最高的抽水蓄能电站——羊卓雍湖抽水蓄能电站[J].电力勘测设计,2023,(S1):F0002-F0002.  
[5]王富强,王福运,冯吉新.抽水蓄能电站地下施工通道布置分析[J].东北水利水电,2020,38(02):4-7.



# 研究高速公路桥梁预防性养护技术

张建博

河北高速秦沈高速公路有限公司, 河北 秦皇岛 066000

DOI:10.61369/ME.2025040035

**摘 要 :** 为防止高速公路桥梁产生早期病害, 延长桥梁使用寿命, 文章结合某高速公路桥梁实际情况, 在介绍其现有病害问题及其产生原因的基础上, 对其预防性养护施工进行深入分析, 提出针对既有病害问题采取的施工工艺方法和预防性养护技术措施, 包括掌握桥梁状态、完善管理系统、坚持日常保养、建立组织机构和不断完善相关数据库等, 最后经检测检查验证了该桥梁养护效果, 以期为相关人员提供参考。

**关 键 词 :** 高速公路桥梁; 桥梁养护; 预防性养护

## Research on Preventive Maintenance Technology for Expressway Bridges

Zhang Jianbo

Hebei Expressway Qinshen Expressway Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066000

**Abstract :** To prevent early-stage diseases in expressway bridges and prolong their service life, this article conducts an in-depth analysis of preventive maintenance construction based on the actual situation of a specific expressway bridge. After introducing the existing disease problems and their causes, it proposes targeted construction techniques and preventive maintenance measures for these issues. These include understanding the bridge's condition, improving the management system, adhering to routine maintenance, establishing organizational structures, and continuously improving related databases. Finally, the effectiveness of the bridge maintenance is verified through inspection and testing, providing a reference for relevant personnel.

**Keywords :** expressway bridges; bridge maintenance; preventive maintenance

## 引言

高速公路桥梁长期运行过程中受到行车与环境等因素的综合影响难免出现一些病害问题, 要想杜绝这些问题的发生, 并在问题发生后加以解决, 就需要引入预防性养护的方法, 以此及时发现和解决各类病害问题, 始终维持桥梁健康状态, 从而保证桥梁运行安全。

## 一、桥梁概况

### (一) 现有病害问题

某大桥位于某高速K5+184.500处, 是我国西部运营桥梁主干线, 对减轻交通压力意义重大, 起终点桩号为K4+720.390~K5+427.600, 桥全长454m。检测显示, 该桥运行仅4年, 主跨跨中剩余预拱度不足。桥面为水泥混凝土铺设, 现已不平且部分有裂缝, 在通车之前铺设而成的厚度为1cm的防滑层已经剥落。箱梁部分底板产生纵裂, 但还没有贯通, 基本在中心线的两侧对称分布, 间距在16cm~24cm范围内; 顶板也存在纵裂, 同样还没有贯通, 主要产生于中心线的附近, 间距在17cm~32cm范围内, 与中心线距离较近的裂缝宽度相对较大, 向两侧逐渐变窄。处于横隔板附近的横梁有若干宽度不大的竖裂, 均未贯通, 以中心线为对称轴分布在两侧。局部桥墩顶部盖梁所

在位置的主桥侧面分布若干竖裂, 同时盖梁由于直接受到雨水的侵蚀, 内部钢筋外露且锈蚀, 导致部分混凝土剥落损坏。墩身和承台筒距离不大的地方也有宽度较小的竖裂。此外, 护坡处也产生了若干裂缝, 同时其宽度也都发展至较大<sup>[1]</sup>。

### (二) 病害产生原因

#### 1. 主跨跨中下挠过大

(1) 对于跨径较大的预应力钢筋砼连续刚构桥, 主梁跨中下挠是一种比较常见的病害问题, 因影响因素复杂、缺乏精确计算混凝土收缩徐变的方法、徐变终止时间不确定、管道压浆不密实等, 导致预应力效率与计算值有偏差。当前设计通过增加0.8%~1.0%L预拱度应对。

(2) 本桥纵向顶板索为直线索, 抑制下挠效果不佳, 设置下弯索效果更好。如江津长江公路大桥未设顶板下弯索, 运营九年后主跨跨中下挠达31.7cm, 推测特大桥主桥跨中下挠值将持续

作者简介: 张建博(1989.11-), 男, 汉族, 河北邯郸邱县人, 研究生, 研究方向: 高速公路道路与桥梁养护。

增大。

(3) 超声回弹法测得箱梁混凝土强度推定值为40MPa~50MPa, 未达设计标准, 是下挠影响因素。

(4) 施工时部分箱梁胀模、箱内有浮浆杂物, 增加箱梁自重, 加重下挠。

(5) 交通量增多、超重超载汽车多, 动荷载超出设计标准, 是下挠重要原因<sup>[2]</sup>。

#### 2. 箱梁底板开裂

箱梁底板底面有不贯通纵向裂缝, 对称分布, 间距15cm~25cm。计算显示, 底板跨中在多种荷载作用下裂缝宽度为0.15mm, 考虑温差等接近0.20mm, 实际最大裂缝宽度为0.2mm, 推测为受力裂缝。

#### 3. 箱梁内部顶板开裂

箱梁顶板有纵向裂缝, 集中在中心线附近, 间距17cm~32cm。计算表明, 顶板跨中下缘受力受温度梯度影响大, 加上超载等因素会导致裂缝, 判定为结构受力裂缝。

#### 4. 箱梁腹板斜向开裂

箱梁腹板存在斜向开裂问题, 与底板夹角30°~40°, 属主拉应力裂缝。分析显示, 竖向预应力作用失效、主拉应力可能超限制、纵向顶板钢束未设下弯, 判定腹板斜裂缝由主拉应力造成。箱梁腹板开裂部位主拉应力分布情况如表1所示。

表1 箱梁腹板开裂部位主拉应力分布

比例值	100%	50%	30%	0
边跨26号块~边跨合拢段(腹板厚50cm)(MPa)	-1.86~-1.16	-2.65~-1.40	-2.80~-1.63	-3.45~-1.84
中跨18号块~中跨合拢段(腹板厚50cm)(MPa)	-1.32~-0.24	-2.44~-0.68	-2.86~-1.05	-3.38~-1.25

#### 5. 箱梁中横隔板开裂

全桥7道中横隔板, 横隔板与顶板、腹板连接处及倒角处有不同方向裂缝, 最大宽度0.31mm, 判定为行车道板受力超设计承载力所致。

#### 6. 过渡墩盖梁开裂

7号墩盖梁主桥侧立面有竖向裂缝, 防裂钢筋细且间距大, 判定为收缩裂缝。

#### 7. 主墩墩身表面开裂

主墩墩身靠近承台处有竖向裂缝, 因承台先浇筑, 墩身收缩受承台约束, 判定为非结构裂缝。

#### 8. 桥台护坡砌护裂缝较多、较宽

1) 桥台前侧填土不密实致护坡沉降。2) 护坡砌护施工后保温养生不到位。

## 二、桥梁预防性施工工艺

### (一) 裂缝处理

桥梁出现裂缝若不及时处理, 会使钢筋暴露腐蚀, 直接影响到结构的整体性能, 甚至会对运行安全造成很大威胁, 对此必须做好裂缝处理, 这对保证桥梁运行安全十分重要。针对不同宽度

裂缝, 处理方式有注浆和密封两种, 裂缝宽度超0.2mm用注浆法加固, 小于0.2mm则采用封闭加固法<sup>[3]</sup>。

1. 箱梁腹板开裂处理: 结合计算分析成果, 对于腹板处裂缝制定如下处理方案: 从边跨21号段开始直到28号段都采用适当增加厚度的方法处理腹板开裂; 从边跨29号段开始直到37号段则通过粘贴钢板实施加固; 另外, 从中跨19号段开始到36号段, 同样通过粘贴钢板实施加固处理。

2. 箱梁底板、顶板开裂处理: 为有效遏制边、中跨底板开裂快速蔓延, 通过粘贴碳纤维有效修复; 针对顶板产生的纵向裂缝则采取注浆措施处治, 并以实际情况为参考判断是否需要进一步加固, 若需要则也采取粘贴碳纤维的方法。

3. 主桥两侧伸缩缝缺陷处理措施: 主桥墩顶所设伸缩缝有部分底部钢筋锈蚀或胶条丢失及损坏, 对此应及时更换已经损坏的胶条, 并在去除底部锈迹后通过均匀涂刷防锈漆处理。

4. 箱梁隔板裂缝加固: 经检测可知横隔板和顶板之间相连的位置产生裂缝的主要原因为行车道板受力, 虽不影响正常使用功能, 但也有必要采取灌浆的方法封闭现有裂缝。

5. 桥台护坡砌护裂缝加固: 考虑到桥台护坡部分的裂缝宽度都偏大, 且很多地方都已松动, 故需将原护坡部分全部拆除, 同时用合适的土体将所有凹陷处填平并适当夯实, 必要时还需采用其它材料进行补砌。针对宽度不大的地方, 则可通过灌缝处理<sup>[4]</sup>。

### (二) 铺装处理

先将损坏的铺装层结构凿除, 再于箱梁顶增加钢筋配置, 按要求设好钢筋网, 最后再浇筑掺有抗扰动外加剂的混凝土, 要求其强度不低于C50。通过增加钢筋配置, 可以加强新旧部分的连接, 确保铺装层处理完成后与箱梁部分良好协同, 改善铺装层行车舒适性, 此外还能起到提高主梁结构刚度的作用, 进而有效控制跨中下挠。

### (三) 体外预应力的施加

#### 1. 方案一

以主桥中跨为施加位置, 在0号块横隔板边跨锚固钢束。其中, 中跨采用19Φs15.2mm体外预应力钢束, 每块腹板均设置4束, 由A、B两个转向块分别按照8.6°和9.2°的角度分别下弯。其中, 转向块A的具体设置位置为17号段的顶板底部, 而转向块B的具体设置位置为25号段的顶板底部以及底板顶部, 在中间采用窄腹板可靠相连。除此之外, 在30号段的底板顶部以及34号段的底板顶部也设置转向块C、D, 对于锚下控制应力, 严格按照1116MPa严格控制。通过相关计算分析可知, 采用上述方案后桥梁结构受力得到一定程度的改善, 具体表现为以下几点: 1) 中跨主拉应力最大值下降0.46MPa; 2) 跨中下缘应力储备值升高2.38MPa; 3) 预应力施加后主梁跨中的上移量在1.78cm左右<sup>[5]</sup>。

#### 2. 方案二

在主桥中、边跨一同进行体外预应力施加, 将钢束类型确定为束19Φs15.2mm, 与方案一相同每块腹板均设置4束, 但每块腹板均预留2条孔道。在中跨设置T3和T4束, 以0号块横隔板边跨顶板为锚固点, 中跨设置的钢束由C、D两个转向块实现下弯, 角度按7.2°和5.3°严格控制。其中, 转向块C的具体设置

位置为23号段的顶板底部，而转向块D的具体设置位置为29号段的顶板底部以及底板顶部，采用宽度较小的腹板直接相连。除此之外还在34号段的底板顶部额外设置一个转向块E，对于锚下控制引力，同样按照方案一的要求严格控制。T1和T2束则将边跨合拢段的底板作为锚固点，其整个桥梁上通长布置，中跨采用上述C、D转向块进行下弯，其角度分别按照7.2°和5.3°严格控制，而边跨则在转向块B的作用下实现一次下弯，其角度按照5.12°控制。通过相关计算分析可知，实施以上方案后，桥梁整体结构受力改善明显，具体表现为以下几点：1）中跨主拉应力最大值下降0.16MPa；2）边跨主拉应力最大值下降0.31MPa；3）中跨跨中下缘预应力升高1.98MPa；4）闭合段下缘预应力升高2.12MPa；5）待修复加固完成后，跨中产生1.2cm左右的上移，同时合拢处也产生0.8cm左右的上移。

针对该桥梁存在的跨中处下挠相对较大的实际问题，对以上两套处理方法做综合对比。对边跨下挠而言，因其并不严重，加之混凝土徐变给边跨挠度带来的影响也有限，故边跨挠度并不能快速发展。对此，经综合对比，由于方案一操作起来比较简单且成本较低，实际加固效果也能满足要求，所以最终选择方案一进行处理<sup>[6]</sup>。

#### （四）其它预防性养护技术

1.掌握桥梁状态：了解既有桥梁结构工作状态是预防性养护基础。建立检查评定机制，安排人员对桥梁上、下部及附属结构常规检查并评定技术状况，定期全面检测，针对病害专项检查并提出处理措施。

2.完善管理系统：持续优化桥梁养护管理系统，做好信息记录与分析，方便管养单位，使桥梁管理和检测更规范、有针对性，利于养护管理者决策。

3.坚持日常保养：预防性养护注重提前预防或局部小修、中修。小修保养针对日常检查病害，修复轻微破损或进行预防性养护，减缓病害发展，确保桥梁完好、提升耐久性。

4.建立组织机构：预防是桥梁养护根本，有效的预防性养护

是落实养护工作的保障。从养管部门角度讲，需要以桥梁所处地区实行的运营管理体制为依据，并充分考虑自然环境条件，根据现有的人员配置情况以及对各项技术的使用情况，编制可操作性强的养管制度，同时针对该制度提前做好组织机构构建，以确保其能够顺利实施。

5.不断完善相关数据库：数据库的完善是一个长期且复杂的工作，包含从前期方案编制到最后维修养护的全过程。

#### （五）养护效果

1.桥面铺装：铺装层养护过程中采用掺加抗扰动剂的混凝土，不仅可以满足强度要求，而且还能带来良好的抗扰动效果。待桥面养护结束后除了恒载大幅减轻，而且该实现了整体线形的有效改善，无论行车安全还是舒适度，均得到显著提升。

2.体外预应力：施加体外预应力作为常用预防性养护技术措施，体外索施工质量直接影响加固效果。施工采用两端对称分级张拉，每级张拉后检查受力情况，有病害则停止，处理后继续，委托专门部门做好实时监测。实践表明，通过施加体外预应力可以进一步提升跨中刚度、防止主跨下挠，且具有施工方便和布置灵活的特点，可正常工作时调索换索，有良好效益。施工监测数据与标高对比显示，张拉前后主梁上挠、压应力增加，跨中底板部位存在的横裂逐步闭合，没有产生塌落等问题。

3.加固补强：通过有效的加固补强，箱梁结构自身抗剪能力与抗弯能力均得到大幅提升，进而使使用功能得到显著改善。经检测，加固补强后桥梁结构的承载能力满足荷载等级相关要求<sup>[7]</sup>。

### 三、结语

综上所述，预防性养护是当前高速公路桥梁养护工作的主要发展趋势，以上结合某高速公路桥梁实际情况，对其预防性养护技术应用进行了初步分析与总结，明确具体的施工工艺及要点，旨在为其它类似高速公路桥梁的预防性养护施工提供技术参考。

### 参考文献

- [1]陈海兵,曾国良,江祥林.高速公路桥梁伸缩缝预防性养护分析研究[J].湖南交通科技,2015,41(2):123-125+130.
- [2]王海宏.高速公路混凝土桥梁预防性养护加固措施研究[J].智能城市,2021,7(10):99-100.
- [3]张渊波.公路桥梁养护管理中存在问题思考及对策[J].中国新技术新产品,2010(5):61.
- [4]李锋.基于无人机及深度学习的桥梁结构裂缝智能识别[D].湖南大学,2021.
- [5]王正平.高速公路桥梁预防性养护技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2018(6):137-138.
- [6]陶学运.新材料新工艺在桥梁修复补强中的应用探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(32):190-192.
- [7]刘鑫,李潇,邓峰,宋蒙,周文涵.高速公路桥梁预防性养护与绿色环保[J].交通节能与环保,2024,20(3):185-188.

# 高速公路桥梁加宽拼接施工质量控制探讨

陈亮

黑龙江省交投工程监理咨询有限公司，黑龙江 哈尔滨 150001

DOI:10.61369/ME.2025040036

**摘 要：** 在车流量不断增加的大背景下，既有公路桥梁加宽拼接已经成为提高道路通行能力的重要手段。本文以高速公路桥梁加宽拼接施工的质量控制为切入点，从施工前准备、施工关键环节控制、质量检验和验收三个方面对其进行了系统的分析，并在此基础上，对影响拼接质量的主要因素和控制要点进行了系统的分析，并在此基础上，提出了一种有针对性的质量保证方法，为类似的工程提供了借鉴。

**关 键 词：** 高速公路；桥梁加宽；公路桥梁

## Discussion on Quality Control of Widening and Splicing Construction of Expressway Bridges

Chen Liang

Heilongjiang Jiaotou Engineering Supervision Consulting Co., Ltd. Harbin, Heilongjiang 150001

**Abstract：** Against the backdrop of increasing traffic volume, widening and splicing of existing highway bridges has become an important means to improve road capacity. This article takes the quality control of highway bridge widening and splicing construction as the starting point, and systematically analyzes it from three aspects: pre construction preparation, key construction link control, quality inspection and acceptance. Based on this, the main factors and control points that affect splicing quality are systematically analyzed, and a targeted quality assurance method is proposed, providing reference for similar projects.

**Keywords：** expressway; bridge widening; highway bridge

近年来，我国高速公路的交通量以每年8%–10%的速度递增，一些既有桥梁已经不能满足交通需求。桥梁加宽拼接是指在既有桥梁一侧或两侧新建桥梁的情况下，加宽道路，节省投资，减少占地，减少交通影响。然而，在拼接施工过程中，如果质量控制不当，极易引起新老结构沉降差异、节点开裂和行车舒适度降低，严重影响桥梁的服役寿命和运营安全。例如，一座高速公路加宽工程，由于地基处理不当，在通车半年之内，新旧桥台之间的差异沉降达到8毫米，造成了桥面铺装的纵向裂缝，养护费用高达百万元。

### 一、施工前期准备阶段的质量控制

#### （一）设计文件复核与优化

施工前，需对现有桥梁和新建区域进行地质勘察报告进行复核，并通过补充钻进、静力触探等方法，对地基的承载力、土层分布等进行核实。对于地质复杂的地段，辅助钻孔间距应控制在10~15米之间，钻孔深度必须穿透软土层至硬土层2米以上。以软土地区为例，对其地基处理方案的合理性进行验证，采用静载试验确定其承载力，确保新老基础沉降差值小于5 mm。在某工程中，为了避免后期沉降超限，在增加钻探点数30%的情况下，发现了原设计中没有发现的暗沟。

检查新旧桥梁的结构型式、跨距、支座型式等，确保各节点刚度相匹配。利用有限元软件对新老结构在车辆荷载下的应力分

布进行仿真，在节点处应力集中系数大于1.5的情况下对节点构造进行优化。对于梁体拼接，需对新旧梁挠度差异进行检验，当活荷载作用下挠度差异大于2 mm时，需对新增梁体截面尺寸或配筋方案进行调整。在一座连续梁桥的加宽工程中，增加了新梁腹板的厚度，使挠度差值由2.3 mm减小到1.8 mm，达到了设计要求，并取得了良好的效果。

组织专家对施工方案进行论证，重点审查交通导改、支架搭设和吊装技术。交通引导改造方案需要通过模拟仿真，保证车辆通行净宽度不小于3.5米，净高不小于5米。如在跨线桥梁加宽时，既要保证支座承载能力满足施工荷载要求，又要尽量减小对现有交通的影响。支护体系的抗倾覆验算，其安全系数不小于1.5；验算起吊设备的重量和工作半径，保证梁的吊装需要，起吊安全系数不小于1.2。



## （二）原材料与设备质量控制

钢材：按批检验屈服强度、抗拉强度和延伸率，HRB400E 钢筋的屈服强度应 $\geq 400$  MPa，拉伸强度 $\geq 540$  MPa，断裂伸长率 $\geq 16\%$ ；从每批钢筋中随机抽取3根试件，经180°弯折后，无开裂现象<sup>[1]</sup>。

混凝土：检查施工配合比，保证新建结构的混凝土强度不低于既有结构，如既有梁采用C50，拼接段宜采用C50或C55；进场混凝土应按每班2次进行坍落度试验，坍落度控制在 $180 \pm 20$  mm以内。

连接材料：特殊材料如植筋胶、灌浆料等应进场复查，植筋胶的抗剪强度标准值应不低于10 MPa，而灌浆材料28天的抗压强度不低于60 MPa。植筋胶需进行湿热老化实验，5000小时后其性能保留率不小于80%。

对摊铺机、压路机和钢筋加工机械的标定，要求摊铺机熨平板温度传感器的误差不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，振捣棒的振动频率不超过5%。钢筋切断机切割长度误差不超过 $\pm 1\text{mm}$ ，折弯机切割角度误差不超过 $\pm 1^{\circ}$ 。全站仪和水平仪等测量仪器，必须在有效期限内由法定计量机构检验合格，其测距精度要达到 $2\text{mm}+2\text{ppm}$ ，水准仪每公里往返误差不得超过2mm。

## （三）既有桥梁结构检测与评估

对既有桥梁的病害如开裂、剥落，钢筋腐蚀等进行检查，并将裂缝的宽度、长度和分布情况记录下来。采用裂缝宽度检测仪，测量精度达到0.02 mm，用超声波检测仪测量裂缝深度。当腹板纵向裂缝宽度大于0.3 mm时，应采用压力注浆的方法对其进行修补，灌浆压力控制在0.2~0.4 MPa，灌浆半径不小于100 mm。该桥超限裂缝32处，经灌浆处理后，裂缝闭合率大于95%。

采用回弹法和钻芯法对既有混凝土进行强度检测，反弹法每测区测点16个，取芯直径 $\geq 100$  mm、高径比值为1~2的芯样。利用超声波对内部缺陷进行检测，当声速比正常区低10%时，判断为缺陷区。对支座的状况进行检查，发现支座脱空面积大于20%，变形大于10%时，在进行拼接前必须更换支座。某工程更换了12个老化支座，消除了梁的不均匀沉降隐患。

在旧桥墩台、梁体和新增部位分别布置沉降观测点，观测点布置密度为每墩台4个，梁体每跨6个。本项目拟采用连续观测7天，以1次/天的频率进行观测，计算沉降量和日平均沉降率，建立沉降基准数据库，为施工过程中沉降监测提供基础数据。对观测资料进行严格的平差处理，保证其精度符合二等水准的要求<sup>[2]</sup>。

## 二、关键施工环节质量控制

### （一）地基处理与基础施工

对于软土地基，采用水泥土搅拌桩和高压旋喷法进行处理，桩体垂直度偏差不超过1%。桩顶标高误差控制在50mm以内。水泥搅拌桩掺入15%以上，桩身水泥用量误差不得超过 $\pm 5\%$ ，桩身无侧限抗压强度 $\geq 1.5$  MPa；处理后的地基承载力应满足设计要求，如180 kPa的静载荷试验结果需 $\geq 180$  kPa，沉降不大于20 mm/24小时。在软土地基处治工程中，桩数增加20%后，地基承载力由170千帕提高到195千帕。

在新建桩基础施工过程中，对钻孔垂直度进行控制，偏差不超过1%。桩底沉渣厚度不超过50 mm，采用钢丝绳测定。钻孔

灌注桩混凝土坍落度控制在180~220mm，导管埋入2~6米，提升速率 $\leq 2$ 米/分。采用声波透射法对桩身完整性进行检测，每段测点3个，其中I类桩占90%以上，Ⅲ、Ⅳ类桩严禁出现。在某工程中，由于钢筋笼上浮，有2个桩被评定为Ⅲ类桩，经高压灌浆处理后，已达Ⅱ类桩。

承台砼浇筑时，需在与原有墩台的连接处设键槽，键槽深度 $\geq 100$  mm，宽度 $\geq 200$  mm，采用特殊模具成形，棱角分明。新老混凝土结合面必须进行凿毛，露出新骨料的面积 $\geq 70\%$ ，冲洗干净。墩台施工完毕后，用全站仪对其轴线偏差进行测量，允许偏差在10mm以内，高程偏差在5mm以内<sup>[3]</sup>。在承台施工过程中，由于模板移位引起的轴线偏离12mm，通过调整模板重新浇注，达到了设计要求。

### （二）梁体拼接施工质量控制

立杆间距不超过50mm，横撑的步距不超过100mm，立杆的垂直度偏差不超过1/200。施工完成后，采用1.2倍设计荷载的预压方法，分3个阶段（50%,80%,100%）加载，每次加载结束后1小时观察沉降，沉降稳定标准是24小时以内2 mm。预压结束后进行卸载，按沉降量设置预拱度，保证了梁体成型后的高程满足设计要求。通过对某支架的预压试验，发现其最大沉降量为8 mm，据此设置预拱度，梁的标高误差控制在 $\pm 3$  mm以内。

新梁采用吊装设备进行吊装，吊装前要对吊点位置进行合理计算，保证梁的受力均匀，挠度不大于 $L/2000$ （L是梁的长度）。梁轴线偏差不超过10mm，顶面偏差不超过5mm，采用全站仪和水准仪联测。安装完毕后，对梁体与既有梁之间的缝隙进行检查，缝隙宽度控制在20~30mm，以利于后续接缝的施工。某梁在安装过程中，由于吊装偏差，出现了45mm的间隙<sup>[4]</sup>。

植筋施工：钻孔直径大于钢筋直径4~6mm，孔深10~15倍钢筋直径，用专用清孔器清除孔内灰尘，直到看不到明显的灰尘为止。植筋胶是用喷射枪进行的，由孔底开始，缓慢地注入，深度为2/3，插入钢筋后转动30度以保证胶层均匀。植筋后做拉拔试验，抗拔强度不低于标准值的0.9倍。

湿接缝浇筑：采用膨胀剂掺量8%~12%、初凝时间 $\geq 6$ 小时的微膨胀混凝土浇筑接缝。浇注前应清除界面上的浮渣，并洒水润湿，使接触面保持饱和和干燥。用振捣棒振捣10~15秒，使混凝土表面无气泡，在初凝前再次振捣，以保证混凝土的密实度<sup>[5]</sup>。

预应力施工：以6个月以内的张拉设备为周期对张拉应力进行标定，使其应力偏差 $\leq \pm 5\%$ ，并通过应力和伸长双重控制，使伸长值偏差 $\leq \pm 6\%$ 。张拉顺序按照设计要求，分阶段张拉持荷2分钟，对称张拉。张拉完毕后，立即进行压浆，水泥浆的水胶比0.26~0.28，抗压强度 $\geq 30$  MPa。

### （三）桥面系拼接施工

在新老桥面铺装的拼接中，需要在既有桥面上切台阶，台阶宽 $\geq 500$  mm，高 $\geq 50$  mm，采用切割机切割，切边平整无松动。对台阶表面进行凿毛处理，暴露骨料，清扫干净后，涂刷0.3~0.5公斤/平方米的界面剂。采用双钢轮压路机对其进行碾压，初压、复压、终压次数不少于8次，压实度 $\geq 96\%$ 。由于碾压温度不达标，桥面压实只有93%，返工后压实率达97%。

伸缩缝安装标高偏差不超过3mm，用水准尺测量，接缝与桥面平整，高程偏差在2mm以内。缝隙宽度按设计要求进行调整，误差为 $\pm 5\text{mm}$ 。在安装完毕后，用泡沫板将缝隙填满，并在上面

盖上钢板，以防止杂物进入<sup>[6]</sup>。在冬季，由于伸缩缝温度调节不当，出现了过大的裂缝，通过更换胶条来解决。

护栏连接处应设置20mm宽的变形缝，用沥青麻絮填充，深度 $\geq 50$  mm。当护栏筋与既有结构连接时，应焊接长度 $\geq 10$ 天（d为钢筋直径），焊缝厚度 $\geq 6$ mm，采用双面焊接，焊接后清除焊渣，检查无气孔和裂纹。在浇注护栏混凝土的过程中，要注意振捣时不能碰到模板，避免产生蜂窝麻面，表面平整度偏差在3mm以内。

#### （四）沉降与位移监控

在施工过程中，沉降观测频率分别为：基础施工阶段1次/2天，梁施工阶段1次/3天，桥面施工阶段1次/3天。采用自动监测系统时，每30分钟取样一次，当沉降速度大于每天5 mm时，应停止施工，分析原因，采取相应的加固措施<sup>[7]</sup>。某工程监测到3 d内沉降达到12 mm，当即中止荷载，补桩后沉降基本得到控制。

新老结构的差异沉降应在5 mm以内，若与之接近，可采用调整新结构预拱度和增设临时支撑的方法加以控制。临时支护采用千斤顶，其承载能力不低于设计荷载的1.5倍，分阶段进行调节。对于软土地区，可以通过堆载预压预压，使其达到设计荷载1.1倍，并在30天内预压，直到沉降率 $\leq 2$  mm/天。

### 三、质量检测与验收

#### （一）中间验收项目

对桩基进行承载力、桩承载力、桩帽完整性、桩帽尺寸等方面的检测。低应变测试覆盖率达100%，高应变测试占总数的5%以上。承台长宽 $\pm 30$ mm，高 $\pm 20$ mm，表面平整度不超过8mm<sup>[8]</sup>。

采用全站仪对梁轴线和高程进行测量，其轴线偏差在10mm以内，高程不超过 $\pm 5$ mm。采用回弹回弹法检测混凝土强度，每100 m<sup>2</sup> 10个测区，每测点16个，回弹强度与设计值偏差大于15%时，用钻芯法进行验证。采用超声波检测的方法，对预应力孔道压浆充填度进行检测，每孔检测3个断面，合格率达到100%。

对植筋抗拔力和湿缝强度进行检查，每批植筋上拔试验数量为每批钢筋的1%，且不少于3根，试验破坏方式为钢筋屈服，不破坏胶层。湿接缝混凝土试块的抗压强度应 $\geq$ 设计强度，每50 m<sup>3</sup>一组，每组3块。

#### （二）竣工验收标准

接缝表面平整，无裂缝，蜂窝，麻面，用2米直尺检验，偏差在3mm以内。接缝处高差不超过3mm，轴线偏差不得超过10mm。

混凝土表面色泽均匀，修补痕迹不明显。

静载荷试验时，最大跨中挠度不得大于计算值的1.1倍，卸载后的残余挠度不得大于其最大挠度的20%；在试验过程中，控制断面的最大应变值均未超过规范规定的限值<sup>[9]</sup>。

混凝土碳化深度 $\leq 20$  mm，用碳化深度测量仪测量，每件测三点。钢筋保护层的厚度偏差不得超过 $\pm 5$ mm，采用钢筋位置检测仪进行检测，每个构件取10个测点。桥面防水层防水试验合格（0.3 MPa水压30分钟无渗漏），用防水计测定，每1000米<sup>2</sup> 1个。

### 四、质量问题预防与处理

#### （一）常见质量问题及预防措施

预防措施：混凝土浇注温度（ $\leq 30^{\circ}\text{C}$ ），夏季采用冰水拌和，集料遮阳；用0.02%–0.03%的微膨胀混凝土补偿收缩；加强养护（养护时间 $\geq 14$ 天），用土工布覆盖，浇透水，使表层保持湿润。

处理方法：裂缝宽度 $\leq 0.2$  mm时，采用表面封闭法，涂刷1~2毫米厚的环氧树脂胶粘剂；对于宽度大于0.2 mm的裂缝，采用压力注浆法进行修补，注浆压力0.2~0.4 MPa，注浆后养护7天。

防治措施：优化地基处理方案，采用长短桩复合地基处理软弱地基；采用堆载预压的方法来消除部分沉降，并分阶段施加预压荷载；控制新建结构的施工进度，每一层至少7天<sup>[10]</sup>。

处理办法是：当沉降差异大于5 mm时，在墩台处增设顶升装置，用液压千斤顶逐级调整梁高，每一次顶升量不超过5 mm，累计顶升不超过设计限值。

#### （二）质量追溯与改进

建立施工质量可追溯系统，对施工过程中的每一道工序实施“三控制”（自检、互检和专检），并将检查人员、检查时间、检查结果记录下来。定期召开质量分析会议，针对不合格问题制定整改措施，如植筋抗拔力不足时，应加大钻孔深度，更换植筋胶，并进行双倍抽样检查。

### 五、结束语

综上所述，高速公路桥梁加宽拼接施工的质量控制，应从前期准备、施工实施和验收三个阶段进行。通过对原材料的严格检查，对施工参数进行控制，并对其进行实时监控，可以有效地降低质量缺陷，保证拼接后的桥梁的安全和耐久性。

### 参考文献

- [1] 蒋焱. 高速公路桥梁加宽拼接施工质量控制技术研究 [J]. 重庆建筑, 2025, 24(01): 80–83.
- [2] 施汝军. 高速公路桥梁加宽拼接技术要点浅谈 [J]. 科学咨询 (科技·管理), 2021, (19): 64–65.
- [3] 柴智. 公路桥梁拼接施工技术探讨 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(08): 87+89.
- [4] 樊莹, 熊小华. 高速公路桥梁拼接施工技术应用 [J]. 交通世界, 2019, (32): 121–122.
- [5] 温泉, 郭凯斌. 高速公路桥梁拼接加宽设计及施工要点分析 [J]. 交通世界, 2018, (29): 120–121.
- [6] 徐军. 高速公路桥梁拼接化学植筋施工工法及质量控制 [J]. 工程设计与设计, 2018, (10): 190–191.
- [7] 赵彦斌. 分析高速公路桥梁加宽拼接技术 [J]. 山西建筑, 2018, 44(03): 178–180.
- [8] 唐超. 高速公路桥梁加宽拼接技术浅谈 [J]. 四川水泥, 2017, (06): 43.
- [9] 刘坦. 浅谈连霍高速公路 (潼关至西安段) 桥梁双侧加宽拼接施工技术 [J]. 建材与装饰, 2017, (09): 248–249.
- [10] 谢尧, 恩艳峰. 沪宁高速公路桥梁拼接施工与质量控制 [J]. 山西建筑, 2010, 36(11): 341–342.

# 数字孪生技术在工程机械运维中的应用研究： 以液压系统故障预测为例

方泽华

广东省机械研究所有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025040004

**摘 要：** 阐述数字孪生技术核心要素，介绍其在环保工程机械领域应用及优势，包括污水处理工程中对设备运维的改善。还涉及液压系统关键部件特性、故障模式，以及相关技术如数据融合算法、特征提取算法等，强调跨专业协同、维护规程重构、多目标优化算法及成本分析等在液压系统改造中的重要性，同时提及风险管理体系升级和未来结合 BIM 技术的展望。

**关 键 词：** 数字孪生；液压系统；工程机械运维

## Research on the Application of Digital Twin Technology in Construction Machinery Operation and Maintenance: An Example of Failure Prediction of Hydraulic System

Fang Zehua

Guangdong Machinery Research Institute Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** This paper outlines the core elements of digital twin technology and its applications and advantages in the field of environmental protection engineering machinery, particularly in improving equipment operation and maintenance in wastewater treatment projects. It also covers the characteristics and failure modes of key components in hydraulic systems, as well as related technologies such as data fusion algorithms and feature extraction algorithms. The paper emphasizes the importance of cross-disciplinary collaboration, the restructuring of maintenance procedures, multi-objective optimization algorithms, and cost analysis in the transformation of hydraulic systems. Additionally, it discusses the upgrade of risk management systems and the prospects for integrating BIM technology in the future.

**Keywords：** digital twin; hydraulic system; construction machinery operation and maintenance

## 引言

随着科技的不断发展，数字孪生技术在各领域的应用日益受到关注。ISO 23247 标准和 EN 12198 标准分别为数字孪生在机电系统及液压系统相关应用提供了规范和指导，前者主要规范机电系统中的数字孪生实现，后者则针对液压系统提出了具体指导原则。在环保工程机械领域，尤其是污水处理工程中，传统运维模式存在诸多不足，而数字孪生技术具有巨大潜在价值。它可通过多物理场建模、实时数据交互及动态映射机制等核心要素，在能效管理、异常检测等方面发挥重要作用。同时，针对污水处理机械特有工况，需构建合适的传感网络，并利用多种算法实现数据融合、故障预测等功能，以提升工程机械液压系统运维的效率和可靠性。

## 一、数字孪生技术基础与工程应用现状

### （一）数字孪生技术理论框架

数字孪生技术包含多物理场建模、实时数据交互及动态映射机制等核心要素。多物理场建模是基础，通过对物理实体的多物理特性进行精确建模，构建虚拟模型。实时数据交互确保虚拟模型与物理实体的数据实时同步，使虚拟模型能准确反映物理实体的状态。动态映射机制则建立起虚拟模型与物理实体之间的动态

对应关系，实现两者的协同演化。数字孪生技术可在机电系统全生命周期管理中进行监控、预警，以 ISO 23247 标准为参考有助于提高其在设计、制造、运维等阶段的适用性，实现对机电系统更高效、精准的管理和优化<sup>[1]</sup>。

### （二）环保工程机械应用现状

在环保工程机械领域，以污水处理工程中的泵站、搅拌设备等为例，传统运维模式存在诸多不足。在能效管理方面，难以精准把控设备的能耗情况，无法实现高效节能。对于异常检测，往



往依赖人工经验和定期检查，及时性和准确性欠佳<sup>[2]</sup>。而数字孪生技术具有巨大潜在价值。它可通过构建设备的虚拟模型，实时映射设备的运行状态，从而实现对能效的精确分析和优化。在异常检测上，能基于实时数据和虚拟模型的对比，快速、准确地发现异常情况，为设备的稳定运行和节能降耗提供有力支持。

## 二、污水处理机械液压系统故障机理分析

### （一）液压系统关键组件工作特性

污水处理机械液压系统中，液压泵站和阀门执行机构等核心部件的工作特性对系统整体运行至关重要。液压泵站作为动力源，其输出的压力、流量等参数需满足系统要求。通过对其运行参数阈值的解析，可更好地了解其工作状态。阀门执行机构则负责控制液压系统中流体的流向和流量，其动作的准确性和及时性直接影响污水处理过程，如液压泵站的输出压力（通常需维持在10–20MPa）和流量（如20–50L/min）直接影响系统动力性能，若压力波动超过 $\pm 5\%$ 或流量下降15%可能预示泵体磨损或密封失效。阀门执行机构（如蝶阀、球阀）的响应时间（要求 $\leq 0.5\text{s}$ ）和位置精度（误差需 $< 2\%$ ）若出现偏差，会导致污泥回流比例失调或曝气量控制失准。参考EN 12198标准，构建包含压力脉动系数（ $> 10\%$ 预示气蚀）、流量突变率（30s内变化 $> 20\%$ 指示泄漏）和温升梯度（ $> 5^\circ\text{C}/\text{h}$ 暗示冷却失效）的多维指标体系，可有效识别如柱塞泵配流盘磨损（表现为压力脉动增大）、液压缸内泄（导致流量异常）等典型故障，为后续的故障诊断和预测提供有力依据<sup>[3]</sup>。

### （二）典型故障模式与失效影响

污水处理场景中存在多种液压系统典型故障模式。密封失效会导致液压油泄漏，一方面降低系统压力，影响污水处理设备的正常运行，如污水输送泵无法达到额定功率，降低污水处理效率；另一方面，泄漏的液压油可能污染环境，影响环境合规性。油液污染会使液压元件磨损加剧，堵塞油路，造成设备运行不稳定，增加设备停机风险，同时也可能影响污水处理的质量和效率。阀门卡滞会阻碍流体正常流动，使污水处理流程中断，导致设备停机，严重影响污水处理的连续性和效率，还可能因污水积压等问题引发环境风险<sup>[4]</sup>。

## 三、数字孪生驱动故障预测技术实现路径

### （一）多维数据融合采集体系构建

#### 1. 物理实体传感网络部署

针对污水处理机械特有工况，需构建合适的物理实体传感网络。考虑到液压系统在运行过程中可能产生油雾和可燃性气体，存在潜在的爆炸风险，因此应评估是否需要采用符合ATEX指令的防爆型传感器。若经评估确认环保工程液压系统存在类似风险，则应设计满足ATEX指令的防爆型传感器布局方案，以确保传感器在特殊环境下的安全与正常运行<sup>[5]</sup>。同时，集成振动、压力、油质在线监测模块，以便全面获取相关数据。通过这些措

施，构建起符合该工况的数据采集规范，为后续多维数据融合以及数字孪生驱动的故障预测提供准确、全面的数据基础。

#### 2. 虚拟模型参数修正机制

基于卡尔曼滤波的数据融合算法在数字孪生体自校正功能实现中具有重要作用。在污水处理复杂工况下，模型易出现漂移问题，该算法通过融合多维数据，有效解决此问题。它能够对采集到的不同维度数据进行合理处理，综合考虑各种因素的影响，提高数据的准确性和可靠性。通过这种方式，数字孪生体能够根据实际工况的变化及时调整自身参数，实现虚拟模型与物理实体的高度匹配，进而为故障预测提供更精准的依据，提升工程机械液压系统运维的效率和可靠性<sup>[6]</sup>。

### （二）故障预测模型开发与验证

#### 1. 数字线索构建与特征提取

在数字线索构建与特征提取方面，针对液压系统非平稳时序数据的特点，应用小波包分解与LSTM网络组合算法。小波包分解能够将原始数据分解到不同的频带，从而更细致地分析数据的特征。通过这种分解，可以有效捕捉到液压系统在不同工况下的细微变化。例如在泵启动、停止或负载突变时压力信号出现的瞬时波动，当液压泵或电机轴承出现磨损时振动信号高频成分的明显增加，以及油液中混入微小颗粒或水分时传感器输出信号在特定频率上的扰动特征。LSTM网络则具有处理时序数据的优势，能够学习到数据中的长期依赖关系。利用该组合算法，从分解后的数据中提取液压系统劣化特征，并建立故障发生概率与这些特征参数的映射关系，为后续的故障预测模型开发与验证提供关键的数据支持<sup>[7]</sup>。

#### 2. 预测模型鲁棒性验证

为验证预测模型的鲁棒性，需设计涵盖不同水质条件、载荷工况的验证实验<sup>[8]</sup>。通过模拟实际应用中可能出现的各种复杂情况，对模型进行全面测试。采用混淆矩阵和ROC曲线来评估模型在不同应用场景下的表现。混淆矩阵能够清晰地展示模型预测的正确与错误情况，包括真正例、假正例、真反例和假反例的数量，从而计算出预测准确率。ROC曲线则以图形化的方式呈现模型在不同阈值下的真阳性率和假阳性率之间的关系，通过计算曲线下面积（AUC）来衡量模型的性能。综合这些评估指标，可以全面了解模型在不同工况下的鲁棒性，为模型的进一步优化和实际应用提供依据。

## 四、工程实践与项目管理融合创新

### （一）污水厂液压系统改造实例

#### 1. 项目需求与技术方案

以某10万吨/日污水处理厂液压系统改造为例，首先需分析项目的技术经济指标。这涉及到对现有液压系统运行成本、维护成本、效率等方面的评估，以确定改造的必要性和预期效益<sup>[9]</sup>。同时，要制定符合ISO 55000资产管理标准的实施路线图。该路线图应涵盖项目规划、设计、实施、运行和维护等各个阶段，明确各阶段的目标、任务和责任人。在技术方案选择上，要综合



考虑污水处理厂的实际工况、液压系统的性能要求以及成本等因素，确保改造后的液压系统能够高效、稳定运行，提高污水处理厂的整体运营效率。

2. 跨专业协同实施要点

在污水厂液压系统改造中，跨专业协同至关重要。机械、电气、自动化专业需建立有效的协同工作机制。不同专业人员要充分沟通，明确各自职责和工作范围，确保改造工作有序进行。针对数字孪生系统与现有 DCS、PLC 系统的数据接口兼容性问题，各专业需共同研究解决方案。机械专业提供液压系统的物理结构和运行参数等信息，电气专业负责处理电力相关问题以及与控制系统的连接，自动化专业则着重于数字孪生系统的构建和数据接口的调试。通过紧密合作，实现各专业知识和技能的融合，提高改造项目的整体效率和质量，确保液压系统改造后的稳定运行<sup>[10]</sup>。

(二) 预测性维护体系构建

1. 维护策略优化设计

基于 RCM 理论，以可靠性为中心对维护规程进行重构。针对液压系统关键部件，详细分析其运行特性、故障模式及影响，确定关键性能指标。通过数据监测与分析技术，结合历史数据和实时运行数据，建立剩余寿命预测模型，从而设定合理的剩余寿命预测阈值。同时，考虑到备件库存管理对维护策略的重要性，制定剩余寿命预测阈值与备件库存的联动规则。当预测部件剩余寿命接近阈值时，及时调整备件库存水平，确保在需要维修更换部件时，备件能够及时供应，减少停机时间，提高液压系统乃至整个工程机械的运维效率和可靠性。

2. 能效-可靠性平衡模型

开发多目标优化算法对于在设备可靠性与能耗指标间建立量化关系模型至关重要。通过对大量设备运行数据的收集与分析，利用先进的算法技术挖掘其中的潜在规律。以液压系统为例，考虑压力、流量、温度等多种因素对可靠性和能耗的影响。将这些因素作为变量纳入模型中，通过算法优化找到不同工况下可靠性和能耗的平衡点。这个平衡点的确定能够为企业在设备运维决策时提供科学依据，使其在保证设备正常运行的前提下，尽可能降低能耗，同时综合考虑环保绩效和运维成本，实现经济效益和环境效益的双赢。

(三) 项目管理效益量化分析

1. 技术经济性评估

采用全生命周期成本分析法对数字孪生技术在工程机械运

维中的应用进行评估。通过对比改造前后的平均无故障时间（MTBF）和平均修复时间（MTTR）指标变化，可直观了解该技术对设备可靠性和维修效率的影响。若 MTBF 显著提高，MTTR 明显降低，意味着设备运行更稳定，维修成本降低。同时，量化节能降耗带来的碳减排效益，这不仅体现了对环境的积极影响，也反映了潜在的经济价值。从成本角度看，综合考虑技术投入、运维成本以及因设备性能提升和节能减排带来的收益，全面评估数字孪生技术应用的技术经济性，为项目管理决策提供有力依据。

2. 风险管理体系升级

在工程实践与项目管理融合创新中，对于风险管理体系升级至关重要。以数字孪生技术在工程机械运维中的应用为例，通过建立基于数字孪生的风险预警矩阵，可实现对风险的精准把控。该矩阵综合考虑机械故障、环境合规、工艺达标等多维度因素。对于机械故障，数字孪生模型可实时监测设备运行数据，提前预测可能出现的故障，为维修保养提供依据。在环境合规方面，能确保工程机械的运行符合相关环保标准，避免因环境问题带来的风险。工艺达标维度则保障了施工过程中各项工艺指标的实现，提高工程质量。这种多维度的风险管控机制完善了项目风险管理体系，提升了项目管理效益，实现了工程实践与项目管理的融合创新。

五、总结

本文系统研究了数字孪生技术在污水处理机械液压系统运维中的应用。通过分析 ISO 23247 和 EN 12198 标准，构建了包含多物理场建模、实时数据交互等要素的技术框架，并针对液压泵站、阀门等关键组件的工作特性及典型故障模式展开研究。研究提出了基于 ATEX 防爆标准的传感网络部署方案，开发了结合小波包分解与 LSTM 网络的故障预测模型，并设计了涵盖多工况的模型验证方法。通过某污水厂改造实例，验证了跨专业协同实施和预测性维护体系的可行性，建立了能效-可靠性平衡模型。研究表明，数字孪生技术可显著提升液压系统运维效率，降低故障率，实现节能降耗，为环保工程机械的智能化升级提供了重要参考。

参考文献

[1] 柳宇翀. 基于数字孪生技术的液压系统故障诊断与预测方法 [D]. 大连理工大学, 2022.  
[2] 鞠佳杉. 采煤机液压系统数字孪生体构建与预测性维护方法研究 [D]. 西安科技大学, 2022.  
[3] 蒋安桐. 基于数字孪生技术的轮辐式索桁架运维安全智能预测方法 [D]. 北京工业大学, 2021.  
[4] 许志华. 数字孪生驱动的冲击桥智能运维方法研究 [D]. 河北科技大学, 2023.  
[5] 张辉辉. 面向智能运维的行车数字孪生系统数据驱动方法研究 [D]. 东华大学, 2023.  
[6] 吕伟. 基于数字孪生的液压运维系统 [J]. 机械制造, 2022, 60(6): 40-44.  
[7] 王乃洲. 数字孪生技术在广电运维管理中的应用研究 [J]. 广播电视网络, 2023, 30(5): 35-37.  
[8] 张越宏, 袁昭成, 米雨阳, 等. 数字孪生技术在电梯智能运维中的应用探索 [J]. 中国电梯, 2023, 34(1): 49-51.  
[9] 高楠, 陈钊, 刘全东, 等. 数字孪生技术在液压设计中的应用探讨 [J]. 现代计算机, 2021, 27(26): 27-31, 37.  
[10] 吴文豪, 陈国兵, 杨自春. 数字孪生技术在船舶装备运维中的应用及挑战 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 139-144.

# 非标自动化机械设计的创新方法与实践

赵添甜

广州隆控机电设备有限公司, 广东 广州 511475

DOI:10.61369/ME.2025040005

**摘 要：** 本文探讨非标自动化机械设计，包括其特性如模块化等。阐述技术创新维度体系中的评价模型要素，介绍半自动化改造路径及相关技术要点。还涉及多源信息融合检测、全自动化系统升级、汽车零部件加工等案例及相关技术，强调模块化设计与智能改造的成效，展望数字孪生与可持续设计的融合前景。

**关 键 词：** 非标自动化机械设计；技术创新；智能改造

## Innovative Methods and Practice of Non-standard Automation Machinery Design

Zhao Tiantian

Guangzhou Longkong Mechanical and Electrical Equipment Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 511475

**Abstract：** This paper explores the design of non-standard automated machinery, including its characteristics such as modularity. It outlines the evaluation model elements within the framework of technological innovation and introduces the semi-automated transformation path and key technical points. The paper also covers case studies and related technologies, including multi-source information fusion detection, full automation system upgrades, and automotive parts processing. It highlights the effectiveness of modular design and intelligent transformation and looks forward to the integration of digital twins and sustainable design.

**Keywords：** non-standard automated machinery design; technological innovation; intelligent transformation

### 引言

非标自动化机械设计是满足特定生产需求的定制化设计过程，涉及多学科知识。在工业4.0（2013年颁布）推动下，其设计指标需具备动态适应性。模块化、可重构性和智能感知能力等特性使非标自动化设备有别于传统专用设备。同时，在技术创新维度体系中，建立涵盖运动控制精度等关键要素的评价模型至关重要。而且，半自动化改造的技术路径、多源信息融合检测、全自动化系统的智能升级以及不同行业案例中的应用都体现了非标自动化机械设计的复杂性和重要性，其发展对于提高生产效率、降低成本具有关键作用，未来数字孪生技术与可持续设计理念的融合应用将有广阔前景。

### 一、非标自动化机械设计的理论框架

#### （一）概念界定与特性分析

非标自动化机械设计是一个涉及多学科知识的复杂领域。它是在传统自动化机械设计基础上，针对特定生产需求进行定制化设计的过程<sup>[1]</sup>。其核心在于满足特定生产任务的高效、精准和灵活要求。与传统专用设备相比，非标自动化设备具有其独特的特性。模块化是其重要特征之一，通过将设备分解为多个独立模块，使其便于组装、维护和升级；可重构性使得设备能够根据生产需求的变化来快速调整相应的结构和功能；智能感知能力则让设备可以实时监测生产过程中的各种参数，以实现智能化控制。在工业4.0背景下，设计指标还需具备动态适应性，以应对不断变

化的生产环境和要求。

#### （二）技术创新维度体系

在非标自动化机械设计的技术创新维度体系中，建立科学的评价模型至关重要。该模型涵盖运动控制精度、多任务兼容性以及状态自诊断能力等关键要素<sup>[2]</sup>。运动控制精度直接影响机械的运行准确性与稳定性，是衡量设计质量的重要指标之一。多任务兼容性则体现了设备在复杂工况下处理多种任务的能力，反映其适应性与灵活性。状态自诊断能力有助于及时发现设备故障、提高维护效率、保障生产的连续性。同时，运用 TRIZ理论分析功能实现与成本控制的矛盾矩阵，能够为推导技术突破路径提供有效方法，促进非标自动化机械设计在技术创新上的不断发展。

## 二、半自动化改造的技术路径

### （一）人机协作界面优化

在半自动化改造的技术路径中，人机协作界面优化至关重要，优化时数安全防护系统最重要、最优先。对于安全防护系统与视觉引导装置的集成，需确保两者在数据传输和协同工作上的高效性、一致性，使操作人员能及时获取准确的视觉引导信息，同时安全防护系统能实时监测并保障操作安全<sup>[3]</sup>。基于力反馈的柔性装夹机构开发，则要注重力反馈的精准性和及时性，让操作人员能通过力的感知来更好地控制装夹过程。多模态交互设计方面，应整合视觉、听觉、触觉等多种交互方式，以让操作员更好地理解设备的意图，例如通过语音提示辅助操作，利用触觉反馈增强操作的真实感，从而降低操作人员技能门槛，提高人机协作的效率和质量。

### （二）工艺参数自整定算法

构建专家系统与深度学习融合的工艺决策模型，实现切削参数、夹持力等工艺参数的动态调整。专家系统可利用已有的工艺知识和经验规则进行初步决策<sup>[4]</sup>。深度学习算法则通过对大量工艺数据的学习，挖掘数据中的潜在规律，以对工艺规律进行深度总结。两者融合，便能够更准确地根据加工状态和工件特性选择更合适的工艺参数。同时，设计边缘计算架构以确保实时控制性能。边缘计算可在靠近数据源的地方进行数据处理和分析，减少数据传输延迟，从而及时根据工艺参数的调整需求对设备进行实时控制，以此保证加工过程的高效和精准。

## 三、全自动化系统的智能升级

### （一）智能感知技术集成

#### 1. 多源信息融合检测

在多源信息融合检测方面，整合机器视觉、振动传感与声发射监测技术是其中的关键。机器视觉可对零件外观进行高精度检测，获取其形状、尺寸、颜色等信息<sup>[5]</sup>。振动传感能够捕捉零件在运行过程中的振动特征，以此反映其内部结构的稳定性。声发射监测技术则可检测零件在受力过程中产生的声发射信号，从而推断其潜在的缺陷。通过将这些不同来源的信息进行整合，可以建立更为全面准确的零件质量在线评估系统。同时，设计模糊神经网络，利用其强大的非线性映射能力和自适应学习能力，对整合后的信息进行处理，实现对零件异常状态的准确识别。

#### 2. 自适应定位算法

在全自动化系统的智能升级中，智能感知技术集成的自适应定位算法至关重要。例如研发基于强化学习的机械臂路径规划算法，能够有效提升机械臂的运动效率和准确性<sup>[6]</sup>。同时，点云匹配技术的应用为解决复杂工件定位难题提供了新的思路，通过对工件的点云数据进行分析 and 匹配，以此实现更精确的定位。此外，在不同干扰条件下对定位重复精度进行验证也是一个关键环节，这有助于确保系统在实际工作环境中的稳定性和可靠性，进一步提升全自动化系统的智能水平和工作性能。

### （二）系统改造实践分析

#### 1. 柔性供料系统重构

在全自动化系统的智能升级中，柔性供料系统重构是其中一个关键部分。对于振动盘和机器人抓取的协同控制机制进行解析，再通过合理的算法和程序设计，两相结合来实现两者之间的高效配合<sup>[7]</sup>。开发可变节拍调节程序，使系统能够根据生产需求灵活调整供料节奏。对比改造前后产线换型时间数据，可以直观地看到这些改进措施的效果。改造后的产线换型时间明显缩短，提高了生产效率，降低了生产成本，同时也提升了系统的智能化程度和柔性生产能力，更好地适应了市场多样化的需求。

#### 2. 能源监控模块嵌入

在全自动化系统的智能升级中，能源监控模块嵌入至关重要。对于非标自动化机械设计，需设计能效评估指标体系<sup>[8]</sup>。通过集成电流检测与热成像装置，能够更全面地获取设备的能耗信息。电流检测可实时监测设备运行时的电流变化，从而了解功率消耗情况。热成像装置则能直观地呈现设备各部分的温度分布，发现潜在的能量损耗热点。在此基础上，进一步构建设备状态-能耗关联模型，该模型可以分析设备不同运行状态下的能耗特征，从而验证节能效果，为系统的优化和节能措施的实施提供强有力的依据。

## 四、创新设计方法的应用实践

### （一）汽车零部件加工案例

#### 1. 多品种共线生产需求

在汽车零部件加工中，以发动机壳体加工工位为例，此工位面临多品种共线生产需求。为满足需求，需分析产品族特征，运用参数化设计构建快速换型系统。通过对发动机壳体的多种特征进行研究，提取其共性与差异，为参数化设计提供良好的基础。利用参数化设计手段，可快速调整生产线设置以适应不同品种的生产。同时，夹具方案对多品种共线生产至关重要。采用正交试验方法，对多种可能的夹具方案进行测试和比较，从成本、生产效率、换型效率等多方面角度去考虑，以期获得最优夹具方案，以最大化提高生产效率和产品质量，满足多品种共线生产的需求<sup>[9]</sup>。

#### 2. 在线检测系统实现

在汽车零部件加工案例的在线检测系统实现中，开发了具有温度补偿功能的激光测量装置<sup>[10]</sup>。该装置能够有效克服温度变化对测量精度的影响，确保在不同温度的条件下都能准确获取零部件的尺寸数据。同时，设计了SPC数据分析模块，通过对大量测量数据的实时分析，能够及时发现生产过程中的异常波动，为质量控制提供了有力支持。经过实际应用验证，系统的CPK值有了显著提升，表明该在线检测系统在保证汽车零部件加工质量方面具有良好的效果，为汽车零部件加工的高效、精准生产提供了可靠保障。

### （二）3C产品装配案例

#### 1. 精密对位关键技术

在3C产品装配案例中，精密对位关键技术至关重要。对于



微米级视觉定位系统开发,需深入研究其相关技术细节。其中,光源波长对识别精度有着显著影响。不同波长的光源在照射物体时,会因物体表面特性及光学原理,产生不同的反射和折射效果,从而影响视觉系统对物体位置和特征的准确识别。同时,运用粒子群算法优化相机标定参数也是关键环节。相机标定参数的准确性直接关系到视觉定位的精度,粒子群算法通过模拟鸟群觅食行为,能够快速搜索到最优的标定参数组合,提高了相机的定位精度,从而实现3C产品装配过程中的精密对位。

## 2. 防静电系统集成

在3C产品装配的防静电系统集成中,开发了离子风与导电材料复合防护方案。通过将离子风技术与导电材料特性相结合,更高效地中和静电。同时设计了实时监测报警装置,能及时察觉静电异常情况并发出警报,确保装配环境的静电安全。在不同湿度条件下对该系统进行静电消除效率测试,结果显示在多种湿度环境中,此复合防护方案都能保持较好的静电消除效果。这一集成方案为3C产品装配过程中的防静电问题提供了可靠保障,有助于提高产品质量和生产效率。

## (三) 包装设备升级案例

### 1. 多规格自适应调整

在包装设备升级案例中,多规格自适应调整是关键。通过设计变螺距螺杆供料机构,以此实现对不同规格物料的精准供料。该机构可根据物料的尺寸和形状,自动调整螺距,确保物料能够稳定、均匀地供给。同时,开发基于二维码识别的参数自动匹配系统,进一步提高了设备的自适应能力。当包装不同规格的产品时,系统通过识别产品上的二维码,自动获取相应的包装参数,并对设备进行快速调整。在实际应用中,对袋长控制精度指标进

行了验证。结果表明,这种多规格自适应调整的设计方法能够有效提高包装设备的灵活性和适应性,满足不同规格产品的包装需求,提升了包装质量和生产效率。

## 2. 故障自诊断实现

构建设备健康状态评估模型,需综合考虑包装设备各部件的运行参数。以振动信号为关键指标,分析其频率、幅值等特征,构建其与设备健康状况的关联。开发基于振动信号的轴承寿命预测算法,通过对历史数据和实时监测数据的深度学习,建立预测模型。该模型能够提前预警轴承可能出现的故障,为维修提供准确时间节点和处理方式。以此实现维修周期优化20%以上,减少设备突发故障带来的生产停滞,提高包装设备整体运行效率和可靠性,降低维修成本和设备更换频率。

## 五、总结

模块化设计方法与智能改造技术在非标自动化机械设计中展现出显著成效。通过这些创新手段,设备柔性得到极大提升。在实际生产中,生产节拍提升率得以量化,故障停机情况也有了明显改善,减少值可明确衡量。这不仅提高了生产效率,还降低了生产成本和维护成本。

展望未来,数字孪生技术与可持续设计理念在非标自动化领域的融合应用具有广阔前景。数字孪生技术可实现虚拟模型与物理实体的精准映射,为设备的优化设计、故障预测和维护提供有力支持。可持续设计理念则促使设计过程更加注重环保、资源利用效率和产品生命周期的整体效益,有助于非标自动化机械设计在满足生产需求的同时,又能更好地适应社会可持续发展的要求。

## 参考文献

- [1] 孙江华. 马克思主义实践观视角下的创新实践探析 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [2] 张碧馨. J公司非标自动化产品营销策略研究 [D]. 苏州大学, 2021.
- [3] 余虹. A公司非标自动化项目流程管理优化研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [4] 程威. R公司的非标自动化业务流程再造研究 [D]. 苏州大学, 2021.
- [5] 宋麒. 大数据驱动的非标自动化设备运维系统设计 [D]. 武汉纺织大学, 2023.
- [6] 陈挺. 非标自动化机械设计标准化路径 [J]. 今日自动化, 2023(10):140-142.
- [7] 冯东生. 机械设计制造及其自动化的发展分析 [J]. 玩具世界, 2023(3):251-253.
- [8] 张利军. 岩土工程技术创新方法与实践 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(20):108-109.
- [9] 吕旭东, 柳玉玲, 高铭. 非标自动化机械设备的创新设计探讨 [J]. 中国设备工程, 2021(16):177-178.
- [10] 袁潮恒. 非标自动化机械设备的创新设计探究 [J]. 今日自动化, 2022(6):54-56.



# 自来水行业设备全生命周期管理： 运行、维护与维修保养

宋子豪

北京市自来水集团有限责任公司长辛店分公司，北京 102412

DOI:10.61369/ME.2025040010

**摘 要：** 自来水行业设备全生命周期管理通过整合物联网监控、预测性维护与智能化维修技术，构建覆盖运行、维护与维修环节的闭环管理体系，显著提升供水系统可靠性与经济性。研究揭示了标准化流程、全生命周期成本（LCC）模型与数据驱动决策的协同作用，同时指出数据孤岛、技术标准缺失及人才短缺等应用瓶颈。未来需以智能化、绿色化与协同化为方向，推动设备管理向智慧水务转型，为行业可持续发展提供理论支撑与实践路径。

**关 键 词：** 全生命周期管理；EAM；物联网；动态调整

## Life Cycle Management of Equipment in the Water Supply Industry: Operation, Maintenance, and Upkeep

Song Zihao

Changxindian Branch of Beijing Municipal Waterworks Group Co., Ltd. Beijing 102412

**Abstract：** The whole life cycle management of equipment in the water supply industry integrates IoT monitoring, predictive maintenance, and intelligent repair technologies to establish a closed-loop management system covering operation, maintenance, and repair, significantly enhancing system reliability and cost-effectiveness. The study highlights the synergy of standardized processes, life cycle cost (LCC) models, and data-driven decision-making, while identifying bottlenecks such as data silos, lack of technical standards, and talent shortages. Future development should focus on intelligence, green transformation, and collaboration to advance smart water management, providing theoretical and practical foundations for sustainable industry evolution.

**Keywords：** life cycle management; EAM; Internet of Things; dynamic adjustment

## 引言

自来水行业作为城市基础设施的核心组成部分，其设备管理效能直接关系到供水安全、资源利用效率及公共服务质量。随着城镇化进程加速与居民用水需求升级，传统分段式管理模式难以应对高可靠性、水质安全及设备复杂化的多重挑战。2023年国家多部委联合发布的《关于严格城镇给排水管网工程建设全生命周期质量管理工作的通知》，明确要求从设计、施工到运维的全链条质量管控，为行业向系统性管理转型提供了政策支撑。当前，物联网、大数据与人工智能技术的深度融合，推动了设备状态实时监控、预测性维护等技术的应用，但数据孤岛、技术标准缺失及复合型人才短缺等问题仍制约着管理效能的提升。在此背景下，探索设备全生命周期管理的创新路径，不仅是保障供水系统韧性的必然要求，更是实现行业智能化、绿色化转型的关键驱动力。

## 一、设备全生命周期管理的概念与框架

### （一）全生命周期管理的定义与内涵

全生命周期管理（Life Cycle Management, LCM）是以设备从设计、采购、运行、维护到退役的完整生命周期为对象，通过系统性规划与动态调控实现资源优化配置的管理模式<sup>[1]</sup>。其核心内涵在于打破传统分段式管理的局限，强调各阶段间的协同性与连续性。在设备设计阶段，需综合考虑功能需求、可维护性及环

境适应性；采购阶段注重成本效益分析与供应商全周期服务能力评估；运行阶段依托实时数据监测与性能分析优化操作效率；维护阶段结合预防性策略与预测性技术降低突发故障风险；退役阶段则通过残值评估与环保处置实现资源循环利用。全生命周期管理通过数据驱动决策，将技术、经济与环境目标整合，形成闭环管理体系，为设备效能最大化提供理论支撑。

### （二）自来水行业设备管理的特殊性

自来水行业设备管理具有显著区别于其他工业领域的特征。

首先，设备运行需满足高可靠性要求，供水系统的连续性与稳定性直接影响民生保障与社会经济运转。其次，设备性能与水质安全高度关联，例如管网腐蚀或泵组效率下降可能导致二次污染风险。此外，设备环境适应性要求严苛，地下管网需应对土壤腐蚀、压力波动，水处理设备则需耐受化学药剂侵蚀与温湿度变化。同时，设备分布广、类型多样（如泵站、加氯系统、智能水表等）导致管理复杂度提升。这些特殊性要求管理策略必须融合技术标准、风险控制与应急响应机制，确保设备在全生命周期内满足水质、效率与安全三重目标<sup>[2]</sup>。

## 二、设备运行阶段的管理策略

### （一）设备运行状态实时监控

设备运行状态实时监控依托物联网（IoT）技术构建多层次传感器网络，通过压力、流量、振动、温度等参数的全方位采集，实现设备健康状态的动态感知。传感器数据经边缘计算节点预处理后，上传至云端平台进行整合分析，结合阈值预警与趋势预测算法，可精准识别设备异常（如水泵轴承磨损、管网泄漏）。数字孪生技术的引入进一步提升了监控可视化水平，通过虚拟模型与物理设备的实时映射，支持故障定位与影响评估<sup>[3]</sup>。这一技术体系不仅降低人工巡检强度，还为后续维护决策提供数据支撑，显著提升供水系统运行的可靠性。

### （二）预防性维护的规划与实施

预防性维护以设备劣化模型为核心，基于历史故障数据与实时运行参数构建退化曲线，量化关键部件（如电机绕组、阀门密封件）的性能衰减规律。维护周期通过蒙特卡洛模拟或贝叶斯网络动态优化，结合环境变量（如水质腐蚀性、负荷波动）调整干预阈值<sup>[4]</sup>。例如，针对高浊度水源地区的离心泵，通过润滑油颗粒度监测数据动态缩短维护间隔。该策略突破传统固定周期维护的局限性，在保障设备可用性的同时减少过度维护成本，形成“监测-分析-决策-反馈”的闭环管理机制，有效平衡运维经济性与安全性。

## 三、设备维护阶段的优化方法

### （一）定期维护与状态维护的融合

#### 1. 定期维护的计划制定与执行流程

定期维护计划以标准化作业程序（SOP）为基础，依据设备类型、运行负荷与历史故障率制定差异化维护周期。SOP明确润滑、紧固、清洁等基础操作的技术规范与验收标准，结合甘特图与关键路径法优化人力、备件与工具的资源调度。例如，利用数字孪生技术模拟维护作业流程，可识别资源冲突节点并提前配置替代方案。执行过程中，通过移动终端记录维护数据并关联至设备档案，形成“计划-执行-反馈”闭环管理，确保维护行为的可追溯性与质量可控性，避免因操作偏差引发的二次故障风险<sup>[5]</sup>。

#### 2. 状态维护的预测性技术应用

状态维护通过振动频谱分析、润滑油金属颗粒检测与红外热

成像等技术捕捉设备劣化特征，结合机器学习算法（如LSTM神经网络、随机森林）建立故障预测模型<sup>[6]</sup>。多源数据（运行参数、环境变量、维修记录）的融合分析可识别潜在故障模式，例如通过轴承振动信号频域特征判断疲劳裂纹发展阶段。预测性维护平台基于实时健康指数（HI）生成维护优先级清单，动态调整巡检频率与备件库存策略。此类技术将故障干预窗口从“事后修复”前移至“早期预警”，减少非计划停机对供水连续性的影响，提升维护资源利用效率。

### （二）维护成本与效益的平衡分析

#### 1. 维护成本模型构建

维护成本模型涵盖直接成本（人工工时、备件消耗、外包服务）与间接成本（停机导致的水量损失、客户投诉、品牌信誉损伤）。直接成本通过作业成本法（ABC）按维护活动细分核算；间接成本则需结合历史数据与行业基准量化，例如采用单位时间产水收益折算停机经济损失<sup>[7]</sup>。模型引入风险权重因子，评估不同故障场景（如泵组突发损坏与阀门缓慢泄漏）对总成本的差异化影响，为维护预算分配提供量化依据，避免单一成本维度导致的决策偏差。

#### 2. 维护策略的经济性评价

基于全生命周期成本（LCC）的维护方案决策框架，综合比较预防性、修复性及预测性维护策略的净现值（NPV）与内部收益率（IRR）<sup>[8]</sup>。LCC模型覆盖设备购置、能源消耗、维护投入及退役处置成本，通过蒙特卡洛模拟量化不确定性因素（如备件价格波动、故障率变化）对经济性的影响。例如，对老旧管网采用高频次定期维护可能短期内降低爆管风险，但长期LCC显著高于局部更换方案。经济性评价通过帕累托最优分析权衡成本、安全与可持续性目标，支持从“经验决策”向“数据驱动决策”的范式转型。

## 四、设备维修保养的关键技术与实践

### （一）机械类设备维修技术

#### 1. 泵阀与管道系统的故障诊断与修复

泵阀与管道系统的故障诊断依托声波检测、光纤传感与压力梯度分析技术定位泄漏点，结合涡流检测与超声壁厚测量评估腐蚀程度。修复工艺采用复合材料修补、冷焊或热熔焊接技术恢复结构完整性，同步实施环氧涂层、阴极保护等防腐措施延长服役周期。例如，针对铸铁管网的硫酸盐腐蚀问题，通过内衬HDPE材料实现非开挖修复。此类技术兼顾修复效率与成本控制，减少因管网破裂导致的水资源浪费与二次污染风险。

#### 2. 大型机电设备拆解与重组规范

大型机电设备（如离心泵机组、水处理反应器）拆解遵循锁定挂牌（LOTO）制度与能量隔离规范，确保作业安全<sup>[9]</sup>。拆解流程采用激光对中仪与三维扫描技术记录原始装配参数，重组阶段通过扭矩分级控制与振动频谱比对验证安装精度。性能恢复标准涵盖空载试运行、负载效率测试与密封性检测，例如泵组重组后需满足流量-扬程曲线偏差小于5%。规范化操作降低人为失误概

率，保障设备重组后的运行稳定性。

（二）电气与自动化设备维护

1. 电机与变频器的保养策略

电机维护以绝缘电阻检测为核心，通过兆欧表定期监测绕组绝缘性能，配合红外热像仪识别局部过热隐患。变频器保养聚焦散热系统清洁与电解电容寿命评估，利用示波器校准输出波形畸变率。参数校准依据设备铭牌数据与负载特性优化载波频率、加速曲线等设定，例如针对恒压供水场景调整 PID 参数以减少压力波动。系统化保养策略可降低电机烧毁与变频器过载故障率，确保电气设备高效稳定运行。

2. 控制系统软硬件升级与兼容性管理

控制系统升级遵循“先仿真后实施”原则，利用虚拟 PLC 验证软件逻辑与硬件驱动的兼容性<sup>[10]</sup>。硬件冗余通过双机热备、模块化插拔设计实现故障无缝切换，软件版本迭代采用灰度发布机制降低升级风险。网络安全防护整合防火墙、入侵检测与数据加密技术，例如 OPC UA 协议替代传统 Modbus 以提升通信安全性。兼容性管理需建立设备型号-驱动版本-通信协议的映射数据库，避免因组件不匹配导致的系统瘫痪。

（三）智能化维修保养技术应用

1. 数字孪生技术在维修仿真中的应用

数字孪生技术通过高保真建模复现设备物理特性与运行环境，支持虚拟调试与维修方案预演。例如，在更换供水泵叶轮前，通过孪生模型模拟不同转速下的应力分布，优化拆卸顺序与工具选型。故障模拟功能可生成轴承断裂、密封失效等场景，验

证应急维修流程的有效性。该技术缩短现场维修时间 30% 以上，同时降低实操训练对物理设备的依赖。

2. 大数据驱动的维修决策支持系统

维修决策系统集成 SCADA、ERP 与 CMMS 数据，通过关联规则挖掘（如 Apriori 算法）识别故障关联模式。故障模式库基于自然语言处理（NLP）结构化历史工单文本，构建故障-症状-解决方案的知识图谱。智能推荐算法（如随机森林、梯度提升树）结合设备实时状态与成本约束生成维修优先级清单，例如优先处理高故障传播风险的管网节点。此类系统推动维修决策从“被动响应”向“主动干预”转型，提升资源配置的科学性。

五、总结

全生命周期管理通过整合物联网监控、预测性维护与智能化维修技术，构建了覆盖设备运行、维护与维修环节的闭环管理体系，显著提升了供水系统可靠性、经济性与可持续性。标准化维护流程、数据驱动的决策框架与 LCC 成本模型的协同应用，为设备效能最大化提供方法论支撑。然而，当前技术应用仍面临数据孤岛阻碍跨系统信息共享、复合型技术人才短缺制约智能化转型、行业标准化不足导致管理碎片化等瓶颈。未来设备管理需聚焦智能化（数字孪生、AI 与区块链深度融合）、绿色化（低碳材料应用与退役设备循环利用）与协同化（跨部门数据平台与供应链协同）三大方向，通过强化数据治理、完善标准体系与产学研合作，推动自来水行业向智慧化、韧性化方向演进。

参考文献

[1] 陈国扬. 供水管网漏损控制管理实践和体会 [J]. 城镇供水, 2017(4): 5.  
[2] 陈圣鹏, 钟煥良, 谢君亮, 等. 基于 GIS 的供水企业管理新模式的研究与实践 [C]// 全国测绘科技信息网中南分网第二十八次学术信息交流会议论文集. 2014: 99-106.  
[3] 田舒茜, 魏昕, 徐琳瑜. 基于生命周期的高校生活用水方案研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014(S2): 4.  
[4] 周家斌. 自来水厂机电设备技术管理的思考及实践 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2016, 000(015): 2767-2767.  
[5] 田振宝. 基于零代码的智慧水务平台设计与应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(5): 320-321.  
[6] 笄跃武, 于少亭, 胡淑圆. 城市自来水厂绿色发展路径探索与思考 [J]. 净水技术, 2022, 41(11): 1-6.  
[7] 陈栩云. 基于 EAM 的设备资产管理信息系统在供水企业的应用 [J]. 设备管理与维修, 2023(16): 18-20.  
[8] 笄跃武, 于少亭, 胡淑圆. 城市自来水厂绿色发展路径探索与思考 [J]. 净水技术, 2022, 41(11): 1-6, 54.  
[9] 石军. 探究城市自来水管道工程施工技术的应用 [J]. 建筑与装饰, 2020(13): 168, 173.  
[10] 齐珊珊, 段梦, 齐欣. 天津市芥园自来水厂的生命周期评价研究 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 4.

# X射线数字成像在压力容器焊缝无损检测中的应用与优化

蔡福磊, 朱涛平

江联重工集团股份有限公司, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/ME.2025040011

**摘 要 :** 随着工业装备向高安全、高可靠性方向发展, 压力容器焊缝质量的无损检测显得尤为重要。X射线数字成像技术作为传统射线检测的升级方案, 凭借高分辨率、实时成像和数字化处理优势, 逐渐成为焊缝无损检测的主流手段。本文系统介绍了X射线数字成像技术的原理及设备构成, 结合压力容器焊缝的缺陷类型和检测需求, 分析了该技术的应用实践和优势。重点探讨了当前应用中存在的技术瓶颈及优化策略, 并展望了未来智能化、标准化的发展趋势。研究表明, X射线数字成像技术的推广应用, 有助于提升压力容器焊缝检测的效率和准确性, 保障设备运行安全。

**关 键 词 :** 压力容器; 焊缝检测; X射线数字成像; 无损检测; 技术优化

## Application and Optimization of X-ray Digital Imaging in Non-destructive Testing of Pressure Vessel Welds

Cai Fulei, Zhu Taoping

Jianglian Heavy Industry Group Co., LTD., Nanchang, Jiangxi 330000

**Abstract :** With the development of industrial equipment towards higher safety and higher reliability, non-destructive testing of weld quality in pressure vessels has become particularly important. X-ray digital imaging technology, as an upgraded solution to traditional radiographic testing, has gradually become the mainstream method for non-destructive testing of welds, thanks to its advantages of high resolution, real-time imaging and digital processing. This paper systematically introduces the principle and equipment composition of X-ray digital imaging technology. Combined with the defect types and detection requirements of pressure vessel welds, it analyzes the application practice and advantages of this technology. The technical bottlenecks and optimization strategies existing in current applications were mainly discussed, and the future development trends of intelligence and standardization were also prospected. Research shows that the promotion and application of X-ray digital imaging technology can help improve the efficiency and accuracy of weld detection in pressure vessels and ensure the safe operation of equipment.

**Keywords :** pressure vessel; weld seam inspection; X-ray digital imaging; non-destructive testing; technical optimization

## 引言

对于压力容器来说, 作为重要的特种设备之一, 极容易导致爆炸或中毒等事故的发生, 所以开展其安全检测工作是非常有必要的。而针对于无损检测技术, 主要是指维护被检测对象, 由材料内部结构异常或缺陷的存在, 对一系列反应的变化加以利用, 如热、声、光等, 以此来对各种工程的材料、零部件、结构件内部等进行探测, 同时准确判断和评价缺陷的类型、性质、形状等, 以免严重损伤到材料与设备。本文将围绕X射线数字成像技术的基本原理、设备特点及其在压力容器焊缝检测中的应用实践展开, 结合典型案例分析技术效果, 深入剖析存在的问题及优化策略, 最后展望技术未来发展方向, 旨在为压力容器焊缝无损检测的技术进步与应用推广提供参考。



## 一、X射线数字成像技术概述

### （一）数字成像的基本原理

X射线数字成像是利用电子成像技术代替传统胶片拍片的一种先进无损检测手段。其基本原理是：X射线穿透被检测工件后，根据不同材料或结构对X射线的吸收差异，在探测器上形成一幅灰度图像。该图像被采集、数字化，并通过图像处理软件进行增强与分析，从而识别材料内部的缺陷。

数字成像技术主要分为三类：计算机射线成像、直接数字成像和X射线计算机断层扫描成像。其中，CR利用成像板暂存图像后经扫描读取图像，适用于需要便携操作的现场检测；DR直接通过平板探测器实时输出数字图像，具有响应速度快、图像质量高的优点，适合工业在线检测；CT则通过多角度投影重建出三维图像，适用于对复杂结构缺陷的精确分析，但设备成本高、扫描时间长。

### （二）技术设备与关键参数

X射线数字成像系统通常由三部分组成：X射线源、数字探测器以及图像处理系统。X射线源产生一定能量范围内的射线束，用以穿透工件并在探测器上形成图像。常用X射线管电压范围在100~450kV之间，具体根据工件材质与厚度选择。数字探测器包括非晶硅平板探测器、CMOS传感器等，是决定图像分辨率与成像质量的核心组件。图像处理系统负责图像采集、增强、滤波、缺陷识别与数据管理，可与人工智能算法结合实现自动评估。

### （三）与传统射线检测的对比分析

与传统胶片射线检测相比，X射线数字成像技术在多个方面具有明显优势。首先，在成像效率方面，数字成像技术可实现图像实时显示与快速分析，省去了胶片冲洗、干燥等繁琐过程，大幅提高了检测速度，特别适合批量检测与在线监控应用。

在缺陷识别能力方面，数字图像可以通过增强处理、伪彩显示、边缘锐化等手段，明显提升缺陷的可见度与对比度。数字系统还可记录历史图像、进行图像叠加比对与自动缺陷识别分析，提高分析的客观性与准确性。

## 二、压力容器焊缝的检测需求与缺陷类型

### （一）焊缝常见缺陷类型

焊缝是压力容器结构中最易产生应力集中的部位，其质量直接影响设备的密封性与承压能力。在焊接过程中，由于热输入、工艺参数、材料性能或操作不当等因素，容易产生各种形式的缺陷。X射线数字成像技术作为无损检测手段，主要针对以下几类焊接缺陷进行识别和评估：

（1）气孔：在焊接过程中，由于气体未能及时逸出，在焊缝金属中形成球形或椭圆形的空洞。气孔会降低焊缝的强度和致密性，是最常见的表面或近表面缺陷类型。

（2）未焊透：指在焊缝根部未能形成有效熔合，是一种危害性极大的结构性缺陷，容易导致承压过程中发生裂纹扩展或断裂。

（3）夹渣：由于焊渣未能完全排出，留存在焊缝内部形成不连续的夹杂物，通常呈条状或块状分布，影响焊缝的金属连续性。

（4）裂纹：包括冷裂纹、热裂纹和延迟裂纹等，通常与焊

接热循环、应力集中和冶金缺陷有关。裂纹是焊接中最危险的缺陷，往往会迅速扩展，导致压力容器突然失效。

（5）咬边与焊缝不规则成型：这些表面缺陷虽不如内部缺陷危险，但会影响焊缝的力学性能，并可能成为腐蚀源点。

### （二）对检测技术的具体要求

（1）高分辨率成像能力：能够识别1mm以下的微小缺陷，尤其是在高压、厚壁容器中，对探测深度与成像细节的要求更高。X射线数字成像因其灰度分辨率高、图像对比度好，可满足这类高精度需求。

（2）高可靠性与重复性：检测结果应具备高度的一致性，避免因操作人员经验不同而产生差异性判读。数字化系统配合AI辅助识别技术，可有效降低主观干扰。

（3）实时成像与快速评估：为适应工程项目进度，检测系统应具备实时图像显示与快速处理能力，减少等待与重复检测时间。

（4）良好的可追溯性与图像归档功能：数字图像可存储、备份、远程调阅，支持缺陷历史比对和数据溯源，有利于长期安全监测与技术复核。

（5）现场适应能力强：现场检测往往存在环境温差、光线干扰、电磁干扰等问题，设备需具备良好的抗干扰性能与便携性，特别是在空间狭小或焊缝分布复杂的情况下。

## 三、X射线数字成像在焊缝检测中的应用实践

### （一）应用流程与技术方法

在压力容器焊缝无损检测实际操作中，X射线数字成像的应用流程通常包括检测方案制定、设备布置、参数设置、图像采集与处理、缺陷评估与记录等环节。

根据压力容器的结构、壁厚、材质和焊缝类型制定个性化检测方案，包括选择适宜的X射线管电压、电流、曝光时间、射线入射角度等参数。对于焊缝部位复杂或有结构遮挡的情况，还需采用双面曝光、多角度成像等技术手段，以全面覆盖检测区域。

在图像采集过程中，数字探测器（如平板成像系统）实时接收透射X射线形成的图像数据，并通过高速图像处理系统完成自动增强、边缘提取、图像去噪等处理操作。相比传统胶片拍片，数字成像不仅成像时间大幅缩短，而且图像更清晰、对比度更高，利于细微缺陷的识别。

对于成像后的图像数据，检测人员结合国家标准对图像中灰阶分布、结构边界、异常区域等进行定性分析，并可借助AI图像识别系统自动标注可能的缺陷类型与位置，实现快速判断与精准定位。同时，检测图像可自动归档，支持图像历史比对与远程专家会诊。

### （二）典型检测案例分析

某石化企业对一批Φ1600mm、壁厚22mm的中压换热器压力容器进行出厂前焊缝检测。为确保检测覆盖率与图像分辨率，项目选用了320kV X射线机和非晶硅平板探测器进行DR检测。

检测流程如下：

检测方案设定：根据NB/T47013标准，确定以纵缝和环缝为重点区域，采用S形曝光布置，实现无死角覆盖；

曝光参数设置：电压320kV、电流3.2mA，曝光时间3.8秒，

单次成像面积为 400mm × 400mm；

图像分析：使用图像处理软件进行锐化与对比度调整，AI 系统识别出数处低密度气孔和一处疑似夹渣缺陷；

人工复核：由三级检测人员复查并确认缺陷等级，最终判定符合三级评定标准，返修后复检通过。

### （三）应用效果评估

通过实际工程应用与长期追踪，X 射线数字成像在压力容器焊缝检测中的优势表现如下：

#### 1. 检测效率大幅提升

数字成像过程自动化程度高，免去传统拍片、冲洗、干燥等繁杂工序，极大缩短了检测周期。在大批量、多批次容器检测中尤为显著，可节省至少 40% 的时间成本。

#### 2. 缺陷识别率明显提高

数字图像具备更高的对比度和分辨率，特别是对气孔、夹渣、未焊透等中小型缺陷表现敏感。辅以图像处理技术，提升了缺陷识别的精确性与稳定性。

#### 3. 作业环境更安全

在剂量控制和远程操作方面，数字系统大幅减少了人员暴露在辐射环境中的时间和强度，符合职业健康安全管理标准，提升了检测人员的职业安全保障。

#### 4. 数据管理现代化

检测图像可数字化归档、远程传输、信息化管理，有利于形成检测数据库和进行质量追踪分析，为容器全生命周期管理提供依据。

## 四、存在问题与优化策略

### （一）当前应用中存在的技术问题

#### 1. 图像噪声与伪影干扰

在实际成像过程中，受散射射线干扰、设备校准误差或探测器灵敏度不均匀等因素影响，容易在图像中出现伪影、噪点或模糊区域。这些干扰会导致缺陷识别误判、漏判，特别是在高密度材料或结构复杂部位更为明显。

#### 2. 检测死角与盲区问题

在检测大型压力容器环缝或异型结构部位时，受制于空间限制和射线入射角度，部分区域存在覆盖盲区。此类死角若无法有效覆盖，将可能遗漏关键焊缝缺陷，影响整体验收质量。

#### 3. 图像识别依赖人工主观判断

尽管数字图像清晰度高，但当前多数检测单位仍依赖人工阅片。由于检测人员经验差异，容易出现判断标准不一致的问题，影响检测结果的稳定性与权威性。AI 图像识别技术虽然初见成效，但识别准确率、泛化能力和标准匹配度仍待提升。

#### 4. 标准化操作流程缺失

不同检测单位在曝光参数选择、图像处理软件使用、评片标

准执行等方面存在较大差异，缺乏统一标准，导致检测质量和效率存在波动，制约了技术的推广应用。

### （二）检测系统优化方向

#### 1. 提升探测器性能与图像算法质量

应采用高动态范围、高分辨率的非晶硅平板探测器，增强图像灰阶对比能力，减少模糊和伪影。此外，应引入自适应滤波、图像复原与边缘增强等算法，提高缺陷区域的清晰度与轮廓识别能力。

#### 2. 发展 AI 辅助识别系统

基于深度学习的缺陷识别模型可实现自动检测、分类与标注，降低人工负担，提升识别标准一致性。结合大样本焊缝缺陷图像库进行模型训练与优化，逐步实现自动阅片、辅助诊断与智能评估。

#### 3. 引入多角度成像与结构建模技术

对复杂结构容器应采用多角度成像技术或三维结构建模，通过角度叠加、图像合成等手段消除盲区影响，增强对异型部位缺陷的检测能力。

#### 4. 推动标准体系建设与流程规范化

应推动制定数字成像在压力容器检测领域的统一操作标准，明确从拍片参数、图像处理、缺陷评估到数据归档的全流程要求。通过标准化作业流程，提升技术适应性与工程落地性。

### （三）检测系统优化方向

#### 1. 人员培训机制优化

应建立健全的培训认证体系，加强对检测人员在数字成像设备操作、图像分析、标准判读等方面的系统培训，确保其具备专业技术能力与质量判断能力。

#### 2. 构建数字化检测管理平台

通过构建图像数据库、检测日志、设备维护记录与缺陷评估报告一体化管理系统，实现检测过程全程可追溯、结果可回查、质量可量化，推动检测数据的积累与分析应用。

#### 3. 融合多种无损检测技术形成互补优势

将 X 射线数字成像与超声检测（UT）、相控阵（PAUT）、声发射（AE）等技术联合应用，实现缺陷探测的互证互补，提升整体检测精度和可靠性。多手段融合还可在复杂结构、高风险部位提供更立体化的安全保障。

## 五、结束语

X 射线数字成像技术作为压力容器焊缝无损检测的重要手段，凭借其高效、精准和数字化的特点，极大提升了焊缝缺陷识别的准确率和检测效率，推动了传统检测技术的革新。然而，当前技术在图像质量控制、盲区覆盖、智能识别以及标准化操作等方面仍存在不足，亟需通过探测器性能提升、人工智能辅助诊断、多角度成像及流程规范化等多维度优化加以解决。

## 参考文献

- [1] 张立新. 无损检测中焊缝 X 射线底片数字化仪及焊缝图像缺陷检测识别系统 [J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(02): 1.
- [2] 孙福成, 王伟波, 张志强, 等. 窄间隙热丝 TIG 焊在反应堆压力容器上的应用及质量控制研究 [J]. 电焊机, 2019, 49(04): 5.
- [3] 冯云国, 李圣争, 陈聪. 数字射线检测参数对管母线群孔成像质量的影响 [J]. 山东电力技术, 2019, 46(10): 4.
- [4] 王磊, 郑连学, 陈中荣, 等. 球罐对接焊缝中裂纹、夹渣相控阵识谱技术探讨 [J]. 压力容器, 2019, 36(06): 7.
- [5] 刘伟, 闵宇谦, 兰清生, 等. 聚乙烯燃气管道电熔对接接头的数字射线检测 [J]. 工业技术创新, 2019, 6(05): 4.

# 石油化工工程中机械设备密封技术的风险评估与管理策略

关楚廉

身份证号: 440724197212144077

DOI:10.61369/ME.2025040013

**摘 要：** 介绍机械密封技术分类及原理，阐述其在石化设备中的应用及行业规范执行问题。基于 FMEA 构建失效风险模型，用蒙特卡罗模拟等方法评估风险。分析典型案例及多种工况对密封的影响，强调设计改进、监控方案、风险管理及维护体系构建的重要性

**关 键 词：** 机械密封；石油化工；风险管理

## Risk Assessment and Management Strategies for Mechanical Equipment Sealing Technology in Petrochemical Engineering Project

Guan Chulian

ID: 440724197212144077

**Abstract：** This paper introduces the classification and principles of mechanical seal technology, discusses its application in petrochemical equipment, and addresses issues related to industry standards. A failure mode and effects analysis (FMEA) is used to construct a failure risk model, and Monte Carlo simulation and other methods are employed to assess the risks. The paper analyzes typical cases and the impact of various operating conditions on seals, emphasizing the importance of design improvements, monitoring plans, risk management, and the establishment of maintenance systems.

**Keywords：** mechanical seal; petrochemical industry; risk management

### 引言

在石油化工行业的发展中，机械设备密封技术至关重要。2023年相关行业政策强调了化工设备安全运行及环保要求，这对密封技术提出了更高标准。石化设备如反应釜、压缩机、泵体等核心设备的密封技术需满足不同场景需求，防止介质泄漏。机械密封技术分为静密封和动密封等多种类型，其原理和应用各有特点。从失效风险模型构建到蒙特卡罗模拟等方法的应用，都是为了准确评估密封失效风险。同时，在密封材料选型、结构设计改进、多参数实时监控以及全生命周期风险管理等方面都需不断优化，以适应行业发展和政策要求，确保石化工程的安全稳定运行。

### 一、石油化工设备密封技术概述

#### （一）机械密封技术的分类与原理

机械密封技术可分为静密封和动密封。静密封是指相对静止结合面间的密封，而动密封则是相对运动结合面间的密封，二者在技术要求和应用场景上存在差异<sup>[1]</sup>。接触式密封装置通过密封元件与密封面直接接触来实现密封，其工作原理基于密封元件的弹性变形和密封面间的摩擦力。非接触式密封装置则是利用流体动压或静压原理，使密封面间形成一层稳定的流体膜，从而达到密封效果。双端面机械密封在石化设备中应用广泛，它具有良好的密封性能和可靠性。其采用两个密封端面，中间通以密封液，可有效防止介质泄漏，同时还能对密封面进行冷却和润滑，延长

密封装置的使用寿命<sup>[1]</sup>。

#### （二）石化行业密封技术应用现状

在石油化工行业中，反应釜、压缩机、泵体等均为核心设备，其密封技术的应用至关重要。对于反应釜，密封技术需确保在复杂的化学反应环境下防止介质泄漏，保障生产安全和产品质量<sup>[2]</sup>。压缩机的密封则要满足高压、高速运转的要求，不同类型的压缩机如离心式、往复式等，所采用的密封方式也存在差异。泵体的密封同样关键，要适应不同介质的输送，如腐蚀性液体、高温流体等。在行业技术规范方面，API 682标准具有重要指导意义，但在实际执行中仍存在一些問題。部分企业可能由于成本、技术水平等因素，未能完全按照标准执行，导致密封效果不佳，存在泄漏风险，影响设备运行稳定性和生产效率。



## 二、石化密封失效风险识别与评估

### （一）基于 FMEA 的失效风险模型构建

基于 FMEA 的失效风险模型构建，需建立机械密封系统的失效模式与影响分析框架。针对密封面磨损、辅助系统故障、材料老化等关键失效模式，构建定量评估矩阵。首先明确失效模式，如密封面磨损可能因介质中的颗粒、摩擦等因素导致<sup>[3]</sup>。辅助系统故障可能涉及冷却、润滑等环节出现问题。材料老化则受温度、化学物质等影响。对于每种失效模式，确定其可能产生的影响，包括对密封性能、设备运行等方面。然后根据影响的严重程度、发生频率以及可检测性等因素，构建定量评估矩阵，以便更准确地评估失效风险，为后续的风险管理提供依据。

### （二）动态风险概率评估技术应用

蒙特卡罗模拟方法可用于模拟高温高压工况下的密封失效概率。该方法通过对各种不确定因素进行随机抽样，模拟出大量可能的情况，从而得到密封失效概率的分布情况<sup>[4]</sup>。同时，结合 HAZOP 分析建立风险等级划分标准。HAZOP 分析是一种系统性的风险分析方法，它通过对工艺过程的各个环节进行分析，识别出可能存在的危险和可操作性问题。通过将蒙特卡罗模拟得到的密封失效概率与 HAZOP 分析得到的风险等级划分标准相结合，可以更加准确地评估石化密封失效的风险，为制定合理的风险管理策略提供依据。

## 三、典型密封失效案例与机理分析

### （一）炼化装置密封失效案例综述

#### 1. 离心泵密封泄漏事故分析

某炼厂加氢进料泵的波纹管密封失效是一个典型案例。该泵在运行过程中，由于工作环境复杂，多种因素相互作用导致密封失效。其中热应力累积是关键因素之一。在长期运行中，泵体内部温度变化产生的热应力不断作用于波纹管密封部件。这种热应力的反复作用使得金属材料逐渐产生疲劳。随着时间推移，疲劳裂纹逐渐扩展，最终导致金属疲劳断裂。密封结构的完整性被破坏，从而引发密封失效，出现泄漏现象。这一案例凸显了在炼化装置中，对于复杂工况下的离心泵密封，需要充分考虑热应力等因素对密封部件的影响，以预防密封失效事故的发生<sup>[5]</sup>。

#### 2. 反应釜轴封故障溯源研究

催化剂颗粒侵入是导致反应釜轴封故障的一个重要因素。当催化剂颗粒进入机械密封端面时，会引起异常磨损。这些颗粒在端面间充当研磨剂，加剧了密封面的磨损程度，破坏了密封的完整性。这种磨损会导致密封泄漏，影响反应釜内的压力和物料的密封性，进而对整个装置的稳定运行产生不利影响。例如，可能导致反应条件失控，影响产品质量，甚至引发安全事故<sup>[6]</sup>。

### （二）密封系统失效机理研究

#### 1. 材料相容性失效机理

在石油化工工程中，介质腐蚀和温度交变等工况对密封材料性能影响显著。介质腐蚀会使密封材料发生化学反应，导致其结

构和性能改变。例如，某些腐蚀性介质可能会侵蚀密封材料的表面，使其出现孔洞、裂缝等缺陷，进而降低密封效果<sup>[7]</sup>。温度交变会引起密封材料的热胀冷缩，产生内应力。长期作用下，内应力可能导致材料疲劳、开裂，加速密封材料的性能退化。这种性能退化会严重影响密封系统的可靠性，增加泄漏风险，威胁石油化工工程的安全稳定运行。

#### 2. 操作工艺偏差诱发失效

压力波动、转速异常等非正常工况会对密封界面润滑膜稳定性产生破坏作用，进而诱发密封失效。压力波动可能导致密封界面间的压力分布不均匀，使润滑膜无法保持稳定的厚度和压力，从而影响密封效果<sup>[8]</sup>。转速异常则可能改变润滑膜的流体动力学特性，如产生过高的剪切力，破坏润滑膜的结构完整性。这种不稳定的润滑膜无法有效隔离介质，可能导致介质泄漏，加速密封元件的磨损，缩短密封系统的使用寿命，最终引发密封失效。

## 四、全生命周期密封风险管理策略

### （一）密封系统设计优化

#### 1. 基于可靠性的材料选型原则

在石油化工工程的密封系统设计中，基于可靠性的材料选型至关重要。需建立考虑介质特性与工况参数的材料选择标准矩阵<sup>[9]</sup>。不同的介质（如腐蚀性液体、高温高压气体等）和工况（如转速、压力波动等）对密封材料的要求差异很大。通过综合考虑这些因素，形成一个系统的选择标准矩阵，能够更准确地筛选出适合的材料。例如，提出增强型碳化钨/石墨配对方案，碳化钨具有高硬度和耐磨性，石墨则具有良好的自润滑性和化学稳定性，二者配对可在多种复杂工况下实现较好的密封效果，满足石油化工工程中机械设备密封的可靠性要求。

#### 2. 结构设计改进方向

在石油化工工程中，对于密封结构设计的改进至关重要。对于带冲洗系统的平衡型密封结构，可从以下方面优化：优化冲洗系统的流量和压力控制，确保能够有效带走热量和杂质，同时避免对密封面造成过大冲击<sup>[10]</sup>。改进密封面的材料和加工工艺，提高密封面的硬度和光洁度，增强密封性能。在多级密封组合设计方面，根据不同的工况和介质特性，合理选择各级密封的形式和参数。例如，在高压高温且介质含有固体颗粒的环境下，可采用串联的机械密封和干气密封组合，利用机械密封承受高压，干气密封防止介质泄漏和固体颗粒进入密封面，从而提高整个密封系统的可靠性和稳定性<sup>[11]</sup>。

### （二）智能化监测技术应用

#### 1. 在线泄漏检测系统构建

石油化工工程中，需设计集成温度、振动、气体检测的多参数实时监控方案。温度监测可反映密封部件的工作环境，过高或过低可能影响密封效果。振动检测能捕捉设备运行时的异常振动，其可能是密封部件松动或损坏的信号。气体检测则直接针对可能泄漏的介质，及时发现泄漏情况。同时，要建立预警值设定规范。通过对大量实验数据和实际运行经验的分析，确定各参数



的合理预警范围。当监测值超出预警值时，系统能及时发出警报，以便工作人员采取相应措施，确保机械设备密封的可靠性，降低风险。

### 2. 大数据趋势分析方法

随着石油化工工程的发展，机械设备密封技术的风险管理至关重要。智能化监测技术可实时获取设备运行数据，包括温度、压力、振动等参数。通过对这些大量数据的采集与分析，利用大数据趋势分析方法，挖掘数据中的潜在规律。基于设备运行数据开发密封性能退化预测模型，例如采用机器学习算法，对历史数据进行学习和训练，以预测密封性能的变化趋势。进而制定预知性维护决策支持机制，根据预测结果合理安排维护时间和措施，提前预防密封失效带来的风险，提高机械设备的可靠性和运行效率，降低维修成本和生产损失。

### （三）全周期维护管理策略

#### 1. 预防性维护体系构建

在石油化工工程机械设备密封技术中，全生命周期密封风险管理策略下的预防性维护体系构建至关重要。需制定涵盖安装调试、运行监控、定期检修的全流程管理规程。安装调试阶段，严格把控密封件安装精度、密封面贴合度等关键质量控制点，确保初始安装符合标准。运行监控时，利用先进监测技术实时掌握密封状态，如监测温度、压力、泄漏量等参数，及时发现异常。定期检修则要依据设备运行时间、工况等制定合理周期，对密封部件进行全面检查、维护和更换，预防密封失效风险，保障机械设备密封的可靠性和稳定性。

### 2. 应急管理预案设计

建立分级响应的密封失效应急处理机制至关重要。根据密封失效的严重程度、影响范围等因素进行分级。对于轻微失效，可采取在线监测与调整措施，如微调设备运行参数。对于较严重的失效，需及时停机，采用带压封堵等快速维修技术。应制定带压封堵等快速维修技术应用指南，明确其适用范围、操作流程、安全注意事项等。操作人员需严格按照指南进行操作，确保维修过程安全高效。同时，要建立应急物资储备体系，确保在密封失效发生时，所需的维修工具、密封材料等物资能及时供应，最大程度降低因密封失效带来的风险和损失。

## 五、总结

石油化工工程中机械设备密封技术至关重要。其风险受多种因素影响，包括设备自身状况、密封材料性能、操作环境等。通过对这些关键因素的把控，能有效降低风险。在管控方面，需从设计阶段就考虑密封的合理性与可靠性，优化设计方案。同时，要加强对设备密封状态的监测，及时发现潜在问题。维护管理也不可或缺，建立完善的维护制度，确保密封性能的持续稳定。物联网技术的应用为密封管理带来新机遇，可实现对密封设备的实时远程监测与智能管控。构建从设计优化、状态监测到维护管理的全链条风险管理体系，是提升石化工程机械设备密封技术风险管理水平的关键方向。

## 参考文献

- [1] 韦维. H公司融资租赁风险评估与管理策略研究 [D]. 江苏科技大学, 2022.
- [2] 李珍珍. 电厂东路工程造价风险评估与应对策略研究 [D]. 青岛大学, 2021.
- [3] 刘旭洋. 密封端面织构技术在机械密封中的应用研究 [D]. 西安石油大学, 2021.
- [4] 张建荣. G食品检验公司风险评估与管理策略研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2023.
- [5] 左有嘉. 龙卷风作用下列车倾覆风险评估与管理 [D]. 重庆大学, 2021.
- [6] 李岫. 石油化工建设项目的风险管理研究 [J]. 化工管理, 2021(7): 173-174.
- [7] 蔺健宁. 浅谈石油化工压力管道的安全管理与风险评估 [J]. 石化技术, 2023, 30(10): 251-252, 125.
- [8] 吕雪松. 石油化工 EPC 总承包项目施工风险与材料管理的革新方式 [J]. 化工管理, 2023(3): 12-14.
- [9] 刘清学, 滕学金, 甄美静. 石油化工安全技术与环境风险的评价要点及策略 [J]. 化工管理, 2021(14): 114-115.
- [10] 闫威. 石油化工机械设备的管理研究 [J]. 石油化工建设, 2022, 44(11): 66-67, 147.

# 制造业自动化研发：机器人、PLC 与伺服系统的协同应用

邓大方

身份证号：440222198311121035

DOI:10.61369/ME.2025040015

**摘 要：** 介绍工业机器人、PLC 和伺服系统的原理及协同作用，阐述市政工程自动化应用进展，包括轨道交通、管廊运维等。分析市政工程特殊技术要求，强调系统适应性、可靠性等。还涉及制造业自动化研发相关技术及协同系统关键技术路径等内容

**关 键 词：** 市政工程自动化；制造业自动化；系统协同

## Manufacturing Automation R&D: Synergistic Application of Robot, PLC and Servo System

Deng Dafang

ID: 440222198311121035

**Abstract：** Introduces the principles and synergy of industrial robots, PLC and servo systems, and describes the progress of municipal engineering automation applications, including rail transit, pipeline corridor operation and maintenance. It analyses the special technical requirements of municipal engineering and emphasizes system adaptability and reliability. It also covers manufacturing automation research and development related technologies and synergistic system key technology paths

**Keywords：** municipal engineering automation; manufacturing automation; system synergy

### 引言

随着科技的不断进步，自动化技术在市政工程和制造业等领域的应用日益广泛。2020 年发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》强调了自动化、智能化技术在工程建设中的重要性，为相关研究和应用提供了政策支持。市政工程中的轨道交通、管廊运维等场景已取得一定自动化进展，其在复杂工况下对自动化设备的技术要求以及系统集成经验，对制造业自动化研发具有借鉴意义。从工业机器人运动控制原理涉及的机器人、PLC 和伺服系统，到制造业自动化研发中的硬件集成、编程控制平台开发，再到协同系统关键技术实现路径，这些都与市政工程自动化发展相互关联，共同推动相关领域的进步。

### 一、制造业自动化技术基础概述

#### （一）机器人、PLC 与伺服系统技术特性

工业机器人的运动控制原理基于其多关节的协同运动，通过精确的算法实现对末端执行器位置、姿态和轨迹的精确控制<sup>[1]</sup>。PLC 具有强大的逻辑控制功能，能够根据预设的逻辑规则对工业生产过程中的各种输入输出信号进行控制和调节，确保生产流程的有序进行。伺服系统则采用闭环调节机制，通过不断检测实际位置与目标位置的偏差，并进行实时调整，以实现高精度的位置控制。机器人在灵活性和复杂操作方面具有优势，PLC 在逻辑处理上表现出色，伺服系统则提供了高精度的动力控制。三者相互补充，机器人的运动控制可由 PLC 进行逻辑调度，伺服系统为机

器人提供精准动力，共同推动制造业自动化的发展。

#### （二）协同应用发展现状

国内外市政工程领域自动化设备的应用已取得一定进展。在轨道交通方面，自动化技术广泛应用于列车运行控制、车站设备监控系统，提高了运营效率 and 安全性<sup>[2]</sup>。例如，无人驾驶列车技术的发展，减少了人为操作失误。在管廊运维场景中，通过传感器、机器人等设备实现对管廊环境及设施的实时监测和维护。自动化的巡检机器人能够在管廊内自主导航，及时发现并报告潜在问题，如管道泄漏、设备故障等。同时，系统集成技术将各个子系统整合，实现数据共享和协同工作，进一步提升了市政工程的自动化水平和管理效能。

## 二、市政建设工程自动化需求特征

### （一）市政工程特殊工艺要求

地下管廊施工与道路桥梁养护等市政工程场景对自动化设备存在特殊技术要求。地下管廊施工环境复杂，设备需具备良好的耐候性，以适应潮湿、阴暗等恶劣条件，确保长期稳定运行<sup>[3]</sup>。同时，可能存在可燃气体等危险因素，要求设备有相应的防爆等级，保障施工安全。在运动精度方面，无论是地下管廊施工中的管道铺设设备，还是道路桥梁养护中的检测及修复设备，都需要精确的运动控制，以保证施工质量和养护效果。例如，道路桥梁养护中的自动化检测设备，需精确运动以全面检测结构病害位置及程度，为后续修复提供准确依据。

### （二）城市基础设施智能化挑战

市政建设工程面临诸多复杂工况，对自动化系统的适应性提出了高要求。不同地质条件差异明显，从松软地基到坚硬岩层，从富水地层到干燥区域，都会影响设备作业方式；气候环境多样，温度、湿度、降水等变化会改变工程材料性能和设备运行状态，如高温可能加速设备老化，高湿度需考虑防潮防锈<sup>[4]</sup>。施工空间限制也很突出，在老旧城区或地下工程中，狭窄空间要求设备具备紧凑结构和精准操控能力。

市政建设常涉及多点位协同作业，比如道路施工中多个路段同时进行挖掘、铺设等，自动化系统需高效协同，实现各点位设备精准配合，避免工序冲突。系统可靠性至关重要，市政工程启动后，设备故障可能导致严重工期延误和经济损失。因此，自动化系统需高可靠性，能长时间稳定运行，通过优化设计和监测机制减少故障，确保工程按计划推进，在复杂环境中保持稳定性能。

## 三、协同系统关键技术实现路径

### （一）系统架构设计

#### 1. 硬件集成方案

在制造业自动化研发的硬件集成方案中，设计满足 IP65 防护等级的分布式 I/O 系统是核心环节。IP65 防护标准能为系统构建可靠的防护屏障，可在多尘、潮湿等恶劣工业环境中有效阻隔粉尘侵入，防止低压喷水对内部电路元件造成损害，确保各类信号接口与控制模块长期稳定运行，为自动化生产流程提供持续的硬件支撑。

建立 PLC 与伺服驱动器的功率匹配模型同样不可或缺。这一模型需基于生产场景的实际负载特性，精准计算两者在不同工况下的功率需求与输出能力。通过动态适配 PLC 的逻辑控制指令与伺服驱动器的动力输出参数，可避免因功率过剩导致的能源浪费，或因功率不足引发的设备运行卡顿、机械磨损加剧等问题。

这种硬件层面的协同设计，既能保障分布式 I/O 系统在复杂环境中的抗干扰能力，又能通过功率参数的精准匹配提升整个协同系统的响应速度与运行效率，从硬件基础上筑牢制造业自动化生产的稳定性与可靠性根基<sup>[5]</sup>。

### 2. 软件平台构建

开发基于 CODESYS 的编程控制平台，需深度整合机器人、PLC 与伺服系统的核心功能。平台实现机器人路径规划时，要构建精确数学模型，全面纳入工作环境约束条件，像障碍物分布、作业空间边界等因素都需转化为模型参数，通过算法迭代生成最优运动轨迹，确保末端执行器在复杂场景中既能规避障碍，又能保持轨迹精度<sup>[6]</sup>。

针对伺服系统的动态补偿联动，需设计适配的控制算法。算法要实时捕捉负载变化、机械形变等干扰因素，通过参数动态调整抵消误差，比如在高速运动切换时，快速修正因惯性产生的位置偏移，保障系统在不同工况下的高精度与稳定性。

依托 CODESYS 的开放性架构，可将机器人驱动模块、PLC 逻辑控制程序、伺服调节算法无缝集成至统一平台。这种集成模式支持设备间数据实时交互，让机器人运动指令、PLC 逻辑判断与伺服动力输出形成闭环响应，在制造业自动化场景中充分释放三者协同效能，助力生产效率与产品质量提升。

### （二）通信协议优化

#### 1. EtherCAT 实时总线配置

在协同系统关键技术实现路径中，通信协议优化的核心在于 EtherCAT 实时总线配置。EtherCAT 作为高性能实时工业以太网技术，其独特的数据处理机制为多轴伺服系统同步控制时序难题提供了针对性解决方案。通过科学配置该总线，能搭建毫秒级响应的网络架构，确保控制指令与反馈信号在极短时间内完成传输。

配置过程中，需对总线参数进行精细化设定。波特率需匹配系统数据传输量，传输模式选择要契合生产场景对实时性的要求，以此保障数据在高负载状态下仍能保持高速且稳定的传输性能。网络拓扑结构的优化同样关键，通过合理规划节点布局与连接方式，可最大限度降低信号传输延迟，减少电磁干扰对数据完整性的影响。

借助 EtherCAT 的分布式时钟机制，各从站设备能实现微秒级时间同步，使多轴伺服系统的动力输出与位置控制形成精准配合，完美满足复杂运动轨迹对同步控制的严苛标准，为协同系统的高效运行筑牢通信基础<sup>[7]</sup>。

#### 2. 冗余通信机制设计

为确保市政施工现场复杂电磁环境下的数据传输可靠性，需采用双环网拓扑结构并设计冗余通信机制。该机制以通信协议优化为基础，依托特定算法实现高效数据传输与精准错误检测，能在数据传输过程中快速识别并标记异常数据包，保障信息完整性。

冗余通信路径的设置强化了系统容错能力，主通信路径发生故障时，备用路径可即时启动切换流程，整个过程无需人工干预，确保数据传输连续无中断。双环网拓扑结构构建的两条独立通信环路，支持数据在双环路上同步传输，形成双向校验机制，通过对比两路数据一致性进一步降低传输错误率。

这种冗余通信机制的设计，针对性解决了复杂电磁环境下信号干扰导致的数据传输出错与中断问题，为协同系统各设备间的



指令交互与状态反馈提供稳定信道，从通信层面保障市政工程自动化系统在恶劣环境中持续可靠运行<sup>[8]</sup>。

## 四、市政工程实施核心要点

### （一）项目规划阶段

#### 1. 多专业协同设计

在项目规划阶段的多专业协同设计中，建立 BIM 模型至关重要。通过 BIM 模型可进行管线碰撞检测，精确确定自动化设备的安装空间以及供电需求<sup>[9]</sup>。不同专业的设计信息集成在 BIM 模型中，各专业设计师能够实时共享和交互信息，及时发现并解决设计冲突。例如，电气专业可依据模型确定供电线路的走向和布局，避免与其他管线发生碰撞。机械专业则能根据模型中的空间信息，合理规划自动化设备的安装位置，确保设备运行不受空间限制，同时满足其对供电等基础设施的要求，提高市政工程设计合理性和可行性。

#### 2. 环境适应性评估

在市政工程的项目规划阶段，环境适应性评估至关重要。需考虑多方面因素，如地理环境，包括地形、地貌、地质条件等，不同的地理环境可能对工程基础结构产生影响<sup>[10]</sup>。气候条件也是关键，温度、湿度、降水、风速等气候因素会影响工程材料的性能和使用寿命。例如，在高温地区，材料可能出现变形、老化加速等问题；在高湿度地区，需考虑防潮防锈措施。此外，还需评估周边环境的影响，如周边是否存在污染源、噪音源等，以及工程对周边生态环境的潜在影响，确保市政工程能够在其所处环境中稳定、可持续地运行。

### （二）施工调试阶段

#### 1. 机电联调规范

在市政工程施工调试阶段的机电联调规范中，对于 PLC 程序需制定分段调试规程。要明确各段程序的功能及预期效果，通过逐步测试确保程序逻辑的准确性和稳定性。同时，建立伺服系统参数自整定流程至关重要。需确定合理的参数整定方法和标准，使伺服系统能够根据实际工况自动调整参数，以达到最佳运行状态。在机电联调过程中，要注重 PLC 与伺服系统之间的协同性，确保两者之间的信号传输准确无误，实现对机电设备的精确控制，提高市政工程整体运行效率和质量。

#### 2. 安全联锁验证

在市政工程施工调试阶段的安全联锁验证中，设置多重安全回路至关重要。通过逻辑互锁机制，可有效预防施工现场意外事

故。例如，在涉及到电气设备、机械装置等多个系统协同工作的场景下，当一个系统出现异常情况时，逻辑互锁机制能够确保相关联的其他系统及时做出响应，如停止运行或进入安全模式。这种互锁机制是基于对市政工程施工过程中各种潜在危险的深入分析而设计的，它涵盖了从设备启动、运行到停止的各个环节，确保在任何可能出现危险的情况下，都能通过安全联锁装置的作用，保障施工人员的安全以及设备的正常运行，避免因某个局部故障而引发更大的安全事故和工程损失。

### （三）运维管理阶段

#### 1. 预测性维护体系

构建基于振动频谱分析的设备健康监测系统，需利用传感器采集设备运行时的振动信号，通过频谱分析技术提取特征参数，以此判断设备的健康状况。建立设备状态监测模型，实现对设备故障的早期预警。同时，建立备件寿命周期数据库，记录备件的安装时间、使用时长、更换频率等信息。结合设备的运行数据和维护记录，分析备件的磨损规律和更换周期，为备件的采购和库存管理提供依据，确保在设备需要维修时能及时获取合适的备件，提高运维管理的效率和设备的可靠性。

#### 2. 远程诊断机制

开发市政专用云服务平台对实现远程诊断至关重要。通过该平台可进行 PLC 程序远程更新，这能及时修复程序漏洞或升级功能，确保市政工程设备的正常运行。同时，平台具备故障代码实时分析能力，当设备出现故障时，能迅速获取故障代码并进行精准分析。这不仅可以快速定位故障原因，如传感器故障、执行器异常或逻辑错误等，还能为维修人员提供有效的维修建议。借助云服务平台的大数据分析功能，还可对故障发生的频率、类型等进行统计分析，为后续的设备维护和优化提供数据支持。

## 五、总结

市政建设领域自动化系统集成经验为制造业自动化研发提供了借鉴。通过对该领域经验的总结，我们能够更好地理解不同技术在实际应用中的协同方式。在此基础上，提出面向智慧城市发展的数字孪生技术融合方案，这一方案有望进一步提升自动化系统的智能化水平，使其能够更好地适应复杂的城市环境。同时，展望 5G+MEC 边缘计算在设备协同控制中的创新应用前景，5G 的高速通信和 MEC 边缘计算的低延迟特性，将为机器人、PLC 与伺服系统的协同应用带来更高效、更精准的控制能力，推动制造业自动化研发向更高水平发展。

## 参考文献

- [1] 尚玉亮. 机器人关节位置伺服系统的信号与能量协同控制 [D]. 青岛大学, 2022.
- [2] 杨晓宇. 多关节机器人伺服系统的信号与能量协同优化控制 [D]. 青岛大学, 2023.
- [3] 杨新新. 基于 PLC 的袋装螺蛳粉自动化包装设备研发 [D]. 广西科技大学, 2023.
- [4] 王赟晓. PLC 在喷涂机器人系统中的设计与应用 [D]. 东南大学, 2021.
- [5] 刘魁. 基于 STEAM 理念的软体机器人教具研发与应用研究 [D]. 西南科技大学, 2022.
- [6] 刘英会, 岳伟利, 张宗彩. 传感器技术在制造业自动化中的应用 [J]. 机械工程与自动化, 2023(4): 162-164.
- [7] 孙伟. 基于 PLC 并联打磨机器人控制系统设计 [D]. 中国民航大学, 2016.
- [8] 蒙臻, 倪敬, 周晶, 等. 工业机器人伺服系统服役性能综合性实验设计 [J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6): 48-52.
- [9] 吉凤. 基于 PLC 与伺服电机控制的机械手设计方案 [J]. 科技资讯, 2012(24): 115-115, 141.
- [10] 毛宝海, 李志良, 储文璇, 等. 基于系统协同的科研财务服务体系构建研究 [J]. 教育财会研究, 2023, 34(3): 66-71.



# 转炉一次烟气净化技术现状及过滤净化技术的应用

刘晓雄

山西焦化集团有限公司, 山西 临汾 041600

DOI:10.61369/ME.2025040016

**摘 要 :** 针对钢铁行业转炉炼钢过程中一次烟气污染严重、传统净化技术存在能耗高且煤气回收效率低等局限的问题, 本研究基于转炉一次烟气高温、高尘、成分复杂且富含可回收煤气的特性及其对环境和人体健康的危害, 系统分析了当前转炉一次烟气净化技术现状, 并深入探讨了过滤净化技术在转炉一次烟气中的应用。分析发现, 湿法、半干法、干法等传统净化技术在实际应用中各有优劣, 难以完全满足当前严格的环保标准和企业节能减排需求, 而过滤净化技术凭借其高效除尘、适应性强等优势, 在转炉烟气净化领域展现出显著潜力。通过分析, 文章旨在为钢铁企业选择科学合理的烟气净化方案提供参考依据, 助力钢铁行业降低污染物排放、实现绿色低碳发展, 减少转炉一次烟气对生态环境和公众健康的威胁。

**关 键 词 :** 转炉一次烟气; 净化技术; 过滤净化; 布袋除尘; 陶瓷滤管除尘

## Current Situation of Primary Flue Gas Purification Technology for Converter and Application of Filtration Purification Technology

Liu Xiaoxiong

Shanxi Coking Group Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041600

**Abstract :** In view of the serious pollution of primary flue gas in the process of converter steelmaking in the iron and steel industry, and the limitations of traditional purification technology such as high energy consumption and low efficiency of gas recovery, this study is based on the characteristics of the primary flue gas of converter which is high temperature, dusty, complicated in composition, and rich in recoverable gas as well as its hazards to the environment and human health, and it systematically analyses the present situation of the current purification technology of primary flue gas of converter and discusses the application of the filtration and purification technology in the primary flue gas of converter in-depth. The application of filtration purification technology in the primary flue gas of converter is discussed in depth. It is found that the traditional purification technologies, such as wet, semi-dry and dry, have their own advantages and disadvantages in practical application, and it is difficult to fully meet the current stringent environmental protection standards and the demand of energy saving and emission reduction of enterprises, while the filtration purification technology, by virtue of its high efficiency of dedusting, adaptability and other advantages, has shown significant potential in the field of converter flue gas purification. Through the analysis, the article aims to provide a reference basis for steel enterprises to choose scientific and reasonable flue gas purification solutions, help the steel industry to reduce pollutant emissions, achieve green and low-carbon development, and reduce the threat of the primary flue gas of the converter to the ecological environment and public health.

**Keywords :** primary flue gas of converter; purification technology; filtration purification; bag dedusting; ceramic filter tube de-dusting

## 引言

钢铁工业是我国经济发展中主要的产业, 在基础设施建设, 机械制造, 汽车制造等行业中扮演着举足轻重的角色。由于其生产效率高, 成本低廉, 转炉炼钢成为目前我国钢铁工业发展的主流技术之一。但是, 在转炉炼钢生产中, 会产生一次烟气, 在处理烟气时, 普遍存在煤气回收效率低、能耗高等问题, 导致大量可燃气体浪费。根据有关资料, 生产1t钢铁时, 产生的一次烟气体积在80~150m<sup>3</sup>。这

作者简介: 刘晓雄 (1989.03-), 男, 汉族, 山西忻州人, 职称: 助理工程师, 学历: 大专, 主要研究方向: 化工工艺, 身份证号码: 142232198903042190。

些烟气如果没有处理直接排放,将导致空气质量恶化,引发雾霾和酸雨等环境问题,危及周围居民的身体健康,还会导致大量的能量和资源浪费,限制了钢铁工业的可持续发展。随着世界范围内环境保护意识的日益增强和各国越来越严格的环境保护法规的出台,如何通过技术创新提升煤气回收效率、实现节能降耗,已成为钢铁行业绿色转型的关键课题<sup>[1]</sup>。作为一种新型的、高效的烟气净化方法,过滤净化技术在转炉一次性烟气治理中得到了越来越多的重视,深入探究其应用现状与发展趋势,对提升钢铁行业的环保水平、实现绿色转型具有重要意义。

## 一、转炉一次烟气特性及危害

### (一) 转炉一次烟气的产生过程

在转炉炼钢时,将高压力的纯氧注入含铁水的转炉中,使其发生一系列激烈的化学反应。首先,铁水中含有的铁元素与氧进行氧化反应,形成氧化铁,放出大量热能。伴随着反应的持续推进,铁水中的碳元素与氧气反应,形成一氧化碳(CO),而CO又与氧形成二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。在吹氧的初始阶段,还会有大量的硅、锰等元素被氧化,生成了较小的烟尘;在吹氧强度和冶炼强度持续增加的过程中,炉内的碳、氧反应更加激烈,并伴随有较高温度的含尘烟气向外高速喷溅,从转炉炉口排出。整个冶炼过程中,烟气的产生量和成分会受到铁水初始成分、吹氧制度、废钢加入量等多种工艺参数的影响而发生显著变化,这对煤气回收系统的适应性提出极高要求。

### (二) 烟气成分及特性

转炉一次烟气成分复杂多样,主要包含CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、粉尘以及少量的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等有害气体。其中,CO含量通常在60%~80%之间,是烟气中具有回收利用价值的可燃成分;粉尘含量一般在80~150g/m<sup>3</sup>,粉尘粒径主要分布在0.1~10μm之间,这些细小的粉尘颗粒具有较强的悬浮性,容易在大气中长时间扩散,造成大范围的空气污染<sup>[2]</sup>。此外,转炉一次烟气具有高温(800~1400℃)、高湿(水分含量可达10%~20%)、高粉尘浓度且成分波动大的特性<sup>[3]</sup>。高温特性对净化设备的耐高温性能提出了极高要求,普通材质的设备在高温烟气的冲刷下极易损坏;高湿环境不仅会加速设备的腐蚀,还可能导致粉尘结块,堵塞设备管道,影响净化系统的正常运行;而烟气成分和流量的大幅波动,则会影响煤气回收系统的稳定性,需净化技术同步实现除尘与煤气品质优化。

## 二、转炉一次烟气净化技术现状

### (一) 湿法净化技术

以OG工艺为代表的湿法净化技术在转炉一次烟气的处理中得到了较好地应用。该工艺过程包括三个重要步骤:烟气冷却,洗涤,脱水。高温烟气先进入气化冷却通道,与冷却水发生换热,使温度从1400℃降低到800~1000℃,并对其的一些余热进行回收,得到的蒸汽可以直接利用来发电或供暖。在此基础上,烟气进入溢流文氏管中,进行一级洗涤,使高速水流与烟气混合,并通过惯性碰撞、拦截等作用对烟气进行初步的除尘及冷却降温<sup>[4]</sup>。随后,烟气回进入喷淋塔和脱水器,通过喷淋、脱水等方式将残余的灰尘、水分进行分离,该操作可以使净化后的

烟气喊陈亮达到50 mg/m<sup>3</sup>以下。尽管OG工艺除尘效率高<sup>[5]</sup>,但煤气回收时的能耗损失与品质下降,使其难以满足当前节能降耗需求。

### (二) 半干法净化技术

半干法净化技术主要包括喷雾干燥法和循环流化床法两种工艺。喷雾干燥方法就是用一个雾化喷嘴向干燥吸收塔中喷射石灰浆液,使其与高温烟气完全接触,这个过程可以使石灰浆液内部的水分快速挥发,并与二氧化硫等酸性气体进行化学反应,形成固态产物。此方法具有简单、占用空间少、能够去除部分酸性气体等优点,但仍面临着脱硫效率不高(约80%~90%)、吸收剂利用率不高、粉尘排放浓度高等问题。循环流化床技术基于流化床的原理,实现了吸收剂与烟气在流化条件下的充分接触。烟气在进入循环流化床反应器后,会与高速流动的中的吸收剂粒子进行剧烈的传质、传热及化学反应,从而达到同时脱除酸性气体和粉尘的目的。虽然该技术脱硫率高(95%),设备紧凑,运行稳定,但存在着吸收剂循环系统结构复杂、设备损耗大、运行费用高等问题。在煤气回收方面,半干法工艺因无法精准控制烟气温度,易导致煤气中焦油等杂质凝结,堵塞回收管道,降低回收效率(较湿法提升不足10%),且能耗指标(电耗约25~30kWh/t钢)仍处于较高水平。

### (三) 干法净化技术

干法净化技术以静电除尘为主。静电除尘是指采用高压电场对烟尘中的粉尘进行荷电,荷电粉尘在电场力的驱动下,粉尘会向集尘极运动并沉积,从而达到除尘效果<sup>[6]</sup>。本工艺具有较大的处理风量和较高的除尘能力(理论上大于99%),同时还可对干燥的灰尘进行再循环使用。但其会受到烟气温度、湿度、比电阻等烟气工况变化的影响,比如,当烟气温度、湿度、粉尘比电阻等参数超出一定范围时,除尘效率会显著下降,且设备投资和维护成本较高<sup>[7]</sup>。

### (四) 现有技术的局限性

现有的转炉一次烟气净化传统工艺都有各自的缺陷。传统的湿法净化工艺除灰效率高,但存在着能耗大、耗水量大、有二次污染等缺点;半干法净化工艺在一定程度上可以对酸性气体进行治理,但其总体净化效果不能适应日趋苛刻的超低排放标准;在干法净化工艺中,静电除尘工艺对运行工况的要求较高。另外,在环境保护政策下,烟气中粉尘、二氧化硫、氮氧化物等多种污染物的排放标准持续下降,传统工艺难以兼顾多污染物超低排放与高效煤气回收。此外,现有工艺中能源循环效率较低,无法有效地实现烟气中的热能和化学能的有效回收,同时,对系统的协调控制也不够深入,造成了综合运行成本偏高,对我国钢铁工业的可持续发展产生了一定的阻碍。

### 三、过滤净化技术在转炉一次烟气中的应用

#### （一）过滤净化技术的原理

过滤净化技术主要基于深层过滤和表面过滤两种原理实现对烟气中粉尘的有效去除。深层过滤的除尘效能，源于滤料内部复杂的孔隙结构，当含尘烟气通过滤料时，直径大于滤料孔径的粉尘颗粒，会在惯性力驱动下，与滤料纤维发生剧烈碰撞，进而被直接拦截；而对于粒径小于  $0.1\mu\text{m}$  的亚微米级粉尘，由于气体分子的无规则热运动引发的布朗扩散效应，它们会在随机运动中与滤料纤维接触并被捕获；此外，运动轨迹靠近滤料纤维的粉尘颗粒，即便未发生直接碰撞，也会因拦截效应被滤料牢牢截留<sup>[8]</sup>。

在过滤初始阶段，主要依靠滤料自身的孔隙结构进行过滤，此时过滤效率相对较低。随着过滤过程的持续进行，粉尘在滤料内部逐渐积累，形成更为复杂的过滤通道，过滤效率也随之逐步提高。

表面过滤则以滤料表面形成的滤饼层作为核心“滤网”。当含尘烟气与滤料接触时，粒径较大的粉尘颗粒率先被拦截在滤料表面，随着烟气持续通过，这些粉尘逐渐堆积、压实，最终形成致密滤饼层。研究显示，滤饼层的孔隙直径仅为滤料原始孔隙的  $1/10 - 1/5$ ，即便  $0.01\mu\text{m}$  的超细微粉尘也难以穿透，使得表面过滤效率可高达 99% 以上。但随着滤饼增厚，烟气通过阻力会呈指数级增长，当阻力达到  $1200 - 1500\text{Pa}$  时，就需启动清灰程序。

常见的清灰方式各有专长。脉冲喷吹清灰利用  $0.4 - 0.6\text{MPa}$  的高压空气瞬间冲击滤袋，使其剧烈膨胀收缩，以强大的机械振动抖落滤饼，适用于处理高浓度含尘烟气；反吹清灰凭借  $2 - 3\text{m/s}$  的反向气流温和剥离滤饼，对聚酰亚胺等娇贵滤料友好；声波清灰通过  $20 - 200\text{Hz}$  的高频振动，使粉尘因共振脱离滤料，尤其擅长应对黏性粉尘。在实际应用中，需根据转炉烟气的温度、湿度、粉尘浓度等特性，精准匹配清灰方式，确保过滤系统长期稳定运行。

#### （二）具体应用

##### 1. 布袋除尘技术

布袋除尘技术在转炉一次烟气净化领域应用较为广泛。针对转炉烟气高温、高尘、腐蚀性强的特性，通常选用高性能滤料，如聚苯硫醚（PPS）纤维滤料、聚酰亚胺（PI）纤维滤料等。PPS 纤维滤料具有良好的耐高温性能，可在  $180 - 200^\circ\text{C}$  的环境下长期稳定运行，并且具备优异的抗化学腐蚀能力，能够有效抵御烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等酸性气体的侵蚀；PI 纤维滤料的耐高温性能更为突出，可耐受  $260^\circ\text{C}$  的高温，同时其机械强度高，耐磨性能好。在

实际应用中，含尘烟气进入布袋除尘器后，在负压作用下通过滤袋，粉尘被截留在滤袋表面，净化后的烟气从滤袋内侧排出<sup>[9]</sup>。随着过滤过程的进行，滤袋表面的粉尘不断积累，当系统阻力达到设定值时，通过脉冲喷吹系统向滤袋内喷入压缩空气，使滤袋急剧膨胀并产生高频振动，抖落表面的粉尘，实现清灰过程，从而保证除尘器的持续高效运行。

##### 2. 陶瓷滤管除尘技术

陶瓷滤管除尘技术是近年来新兴的高效过滤净化技术，其滤管采用碳化硅、氧化铝等高性能陶瓷材料制成。这些陶瓷材料具有孔隙率高、过滤精度高、机械强度大、化学稳定性好等优点，能够在高温（最高可达  $800^\circ\text{C}$ ）、高尘、强腐蚀性的恶劣工况下长期稳定运行<sup>[10]</sup>。在应用过程中，含尘烟气从陶瓷滤管外侧进入，在压力差的作用下，烟气透过滤管壁，粉尘被拦截在滤管外表面，净化后的烟气从滤管内侧汇集后排出<sup>[11]</sup>。为保证过滤效果和系统稳定运行，陶瓷滤管除尘系统通常配备先进的清灰装置，如声波清灰装置。通过高频声波振动，使滤管表面的粉尘颗粒受到共振作用而脱落，相比传统的脉冲清灰方式，声波清灰对滤管的损伤更小，清灰效果更为均匀彻底，能够有效延长滤管的使用寿命，确保除尘系统长期稳定高效运行。

### 四、结语

转炉一次烟气净化技术的发展是钢铁行业实现绿色转型的关键环节。当前，湿法、半干法、干法等传统净化技术在应对严格要求和企业节能减排目标时，暴露出诸多问题和局限性。而过滤净化技术凭借其高效的除尘能力、对复杂工况的良好适应性以及实现超低排放的潜力，在转炉一次烟气净化领域展现出广阔的应用前景。展望未来，随着环保标准的持续提高和钢铁行业绿色发展需求的不断增强，转炉一次烟气净化技术将朝着高效化、节能化、智能化方向加速发展。一方面，需要进一步加大研发投入，开发新型高性能过滤材料，提高其耐高温、抗腐蚀、长寿命等性能，同时降低材料成本；另一方面，要推动过滤净化设备与转炉煤气回收系统的智能化集成，通过实时监测烟气成分（如  $\text{CO}$  浓度、粉尘粒径）动态调整运行参数，提高回收效率；探索过滤净化与煤气精脱硫、 $\text{CO}$  提纯技术的协同应用，形成“净化 - 提纯 - 资源化”全链条解决方案，最终实现转炉煤气“零排放、全回收、高利用”，为钢铁行业碳达峰、碳中和目标提供技术支撑。

### 参考文献

- [1] 张娟, 刘振, 孙世涛, 等. 转炉一次烟气干法净化回收系统工艺的发展与探讨 [J]. 冶金动力, 2025, (01): 86-89.
- [2] 冯俊小, 温俊云, 刘江, 等. 转炉烟气余热回收利用技术发展现状与展望 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7183-7193.
- [3] 周俊敏, 李永辉, 李新强, 等. 浅谈大型转炉一次烟气低碳高能超净排放技术与装备 [J]. 企业科技与发展, 2022, (06): 124-126.
- [4] 郑运兴. 转炉一次烟气净化技术现状及过滤净化技术的探索与应用 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 64-67.
- [5] 董光宇, 贾东升, 李春生, 等. 转炉一次湿法除尘遗留问题治理 [J]. 鞍钢技术, 2024, (04): 53-56+76.
- [6] 刘国华, 谢建. 转炉一次烟气超低排放技术现状及展望 [J]. 工业加热, 2023, 52(03): 57-60.
- [7] 王进轩. 浅谈转炉炼钢一次除尘超低排放新技术发展趋势 [J]. 低碳世界, 2022, 12(08): 58-60.
- [8] 宋志黎. 烟气冷凝水表层微孔过滤的工业应用实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024, (07): 66-68.
- [9] 付德禄, 姚群. 转炉烟气袋式除尘系统节能降碳途径 [J]. 工业安全与环保, 2024, 50(03): 103-106.
- [10] 钟永生. 高温烟气过滤材料在袋式除尘器中的应用评述 [J]. 中国环保产业, 2020, (08): 57-61.

# 电力终端智能制造模式下的生产管理创新

纪清

深圳市国电科技通信有限公司，广东 深圳 518100

DOI:10.61369/ME.2025040022

**摘 要：** 在科技飞速发展的当今时代，电力终端智能制造模式渐成电力行业发展重要趋势。本研究聚焦该模式下的生产管理创新，旨在探讨创新生产管理方式以提升电力终端生产效率、质量与竞争力。先分析其特点与优势，如高度自动化、智能化、数据驱动等；接着研究此模式下生产管理面临的挑战，如生产流程优化、人员技能升级、设备维护管理等问题。通过结合实际案例分析与理论研究，提出一系列创新策略，包括生产计划与调度智能化、质量管理数字化、强化供应链协同及创新人才培养模式等。研究表明，实施这些策略可提高电力终端生产整体效益、降低成本、增强企业市场应变能力。本文为电力终端制造企业在智能制造模式下实现生产管理转型升级提供了有价值参考。

**关 键 词：** 电力终端；智能制造模式；生产管理创新

## Innovation in Production Management under the Smart Manufacturing Model of Power Terminals

Ji Qing

Shenzhen Guodian Technology and Communication Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518100

**Abstract：** In the current era of rapid technological development, the smart manufacturing model of power terminals has gradually become an important trend in the development of the power industry. This study focuses on production management innovation under this model, aiming to explore innovative production management methods to improve the efficiency, quality, and competitiveness of power terminal production. Firstly, it analyzes its characteristics and advantages, such as high automation, intelligence, and data-driven capabilities. Then, it examines the challenges faced by production management under this model, including issues such as production process optimization, personnel skill upgrading, and equipment maintenance management. Through a combination of practical case studies and theoretical research, a series of innovative strategies are proposed, including intelligent production planning and scheduling, digital quality management, strengthening supply chain collaboration, and innovative talent training models. The research shows that implementing these strategies can improve the overall efficiency of power terminal production, reduce costs, and enhance the enterprise's ability to respond to market changes. This article provides valuable references for power terminal manufacturing enterprises to achieve production management transformation and upgrading under the smart manufacturing model.

**Keywords：** power terminal; smart manufacturing model; production management innovation

### 引言

随着全球科技革命和产业变革加速，智能制造成制造业趋势。电力终端制造智能化升级对电力系统意义重大。电力终端智能制造模式借助先进技术实现生产自动化、智能化和数字化，能提升效率、降低成本、提高质量。但该模式应用给生产管理带来新挑战，传统管理方式应对乏力，如生产计划调度精准化、大数据和人工智能用于质量管理、加强供应链协同等问题待企业探索。在此背景下，研究电力终端智能制造模式下生产管理创新意义重大，创新管理方式可发挥模式优势，提升企业竞争力，推动行业升级和电力行业可持续发展。因此，本文将深入研究其生产管理创新，为企业提供可行策略和方法。



# 一、电力终端制造传统生产管理模式及其挑战

## （一）传统生产管理模式特征

在智能制造理念尚未大规模引入电力终端制造行业的时期，该领域普遍沿袭着一套相对固化的生产管理体系。这种传统模式在生产计划制定环节，主要依靠生产主管基于长期工作经验的主观判断，或者仅能借助功能较为单一、算法基础的信息系统进行简单的生产排程，既缺乏对市场需求波动的实时感知能力，也难以建立科学的需求预测模型。整个生产流程通常采用刚性设计，各工序之间的衔接方式和资源配置方案一旦确定，在短期内很难根据实际情况进行灵活调整。在质量管控方面，则主要采取定期抽检的方式评估产品合格率，这种事后检验的模式使得生产过程中的质量异常难以及时发现和纠正，往往造成批量性质量问题。深入分析这种传统生产管理模式，可以归纳出以下几个显著特征：首先，各类信息系统（如 ERP、MES 等）之间缺乏有效的接口对接和数据集成，形成了多个相互割裂的“信息孤岛”，导致生产数据无法在企业内部实现顺畅流通和共享，管理层难以获取全面、准确、实时的生产运营状态信息。其次，由于计划调整机制僵化和流程变更周期较长，整个生产系统对市场需求变化或突发性事件的响应速度明显滞后，常常错失最佳应对时机。再次，在资源配置方面缺乏精细化管理手段，设备、人力、物料等生产要素的利用效率普遍偏低，经常出现部分设备长期闲置而另一些设备超负荷运转的不均衡现象，这种资源配置的不合理直接导致了整体运营成本的居高不下<sup>[1]</sup>。

## （二）面临的主要挑战

随着电力终端产品市场的快速发展和转型升级，产品特性呈现出日益复杂化的趋势：客户定制化需求持续增长且个性化程度不断提高，产品质量标准日趋严苛并逐步向零缺陷目标靠拢，生产环境本身也变得更加复杂多变（可能涉及多种工艺路线并行、多种物料协同配送、多品种产品混线生产等复杂场景）。这些新特点使得传统生产管理模式在效率、成本、质量和柔性等多个关键维度上都遭遇了前所未有的发展瓶颈和运营挑战。在生产效率方面，僵化的固定流程和经验主导的计划模式难以适应多品种、小批量、高频次切换的定制化生产需求，导致单个订单的生产周期不断延长，订单交付延迟现象频发。在成本控制方面，信息系统的割裂状态和资源利用的低效性直接推高了单位产品的制造成本，而大量的事后抽样检验和频繁的返工返修更是显著增加了质量管控成本。在质量保证方面，由于缺乏对生产过程的实时监控和质量异常的预警机制，难以确保每一件出厂产品都能稳定达到客户要求的严苛质量标准，存在较高的偶发性质量事故风险。在生产柔性方面，面对市场需求快速变化和客户个性化要求日益增多的新形势，传统模式下的生产线布局固化、设备功能单一、工艺路线固定等问题凸显，导致企业难以快速实现不同规格产品或定制化需求的柔性切换。这些日益凸显的运营挑战，不仅制约了电力终端制造企业的市场竞争力提升，更构成了推动该行业生产管理模式向智能化、数字化、柔性化方向转型升级的内在驱动力，迫使企业必须积极探索更高效、更灵活、更可靠的新型生产

管理方法和智能制造解决方案。

# 二、智能制造模式对生产管理要素的重塑

## （一）生产计划的智能化与柔性化发展

在智能制造模式的深度推进下，生产计划的制定与执行方式正经历着前所未有的智能化转型。现代制造企业通过在生产线各个环节广泛部署高精度传感器、智能终端设备以及自动化数据采集系统，构建起全方位的数据感知网络。这一网络能够实时捕获包括销售订单动态、库存实时状态、设备运行参数、供应商交付进度以及能源消耗等多维度的运营数据。依托强大的云计算平台和分布式计算能力，企业可以对这些海量数据进行深度挖掘和智能分析，运用机器学习算法建立精准的需求预测模型，从而显著提升物料需求计划（MRP）的准确性。这种数据驱动的计划模式不仅能够有效规避传统计划中常见的库存积压或物料短缺问题，更能实现库存周转率的最优化。更为关键的是，智能制造系统整合先进工具，可在虚拟环境中模拟和评估多种生产排程方案，全面考量关键绩效指标表现。这种智能化计划系统打破传统生产计划刚性特征，具备动态响应能力：面临异常情况时，系统能基于实时数据分析和预设规则，短时间内生成并执行最优调整方案。这种高度柔性的生产计划模式，为企业在 VUCA 商业环境中保持竞争优势提供支撑，也为满足个性化定制需求创造技术条件<sup>[2]</sup>。

## （二）生产过程的实时监控与动态优化机制

智能制造体系在生产过程管理方面实现了从被动应对到主动调控的质的飞跃。通过构建覆盖全厂的工业物联网（IIoT）平台，将生产现场的贴片机、镭雕机、工业机器人、AGV 小车、检测设备等各类智能装备，以及工位终端、物料储位和在制品等生产要素全面互联互通。配合部署的温度传感器、振动传感器、视觉检测系统、RFID 读写设备等感知层设备，系统能够毫秒级采集设备的电流、电压、温度、振动等运行参数，工艺执行过程中的压力、速度、精度等关键质量数据，以及在制品的流转路径、停留时间等状态信息。实时数据经工业以太网或 5G 网络传输至边缘计算节点和中央控制系统，经清洗、特征提取和关联分析后，以可视化看板呈现给各级管理者，实现生产现场透明化管理与精准掌控。基于这些数据构建的闭环反馈系统是智能制造动态优化核心机制，系统建立数字模型，设定参数正常波动范围和预警阈值。当检测到异常信号，如车间温湿度异常、分板刀具磨损超标、关键尺寸偏离公差带等质量风险时，不仅触发声光报警，还能按预设规则自动调控，如调整设备参数、切换备用刀具等。这种数据驱动的即时干预机制，降低生产中断风险，压缩非计划停机时间。

## （三）质量管理的预防性控制与全流程追溯体系

智能制造为质量管理领域带来了革命性的模式创新。通过大数据分析、机器学习、知识图谱等人工智能技术与质量管理深度融合，企业的质量管理体系正从传统的“事后检验”向“事前预防-过程控制-持续改进”的全新范式转变。在预防性质量控制方面，系统对海量历史质量数据、实时工艺参数、设备状态数据进

行多维度关联分析与特征提取,运用随机森林、神经网络等算法构建质量预测模型。这些模型能识别影响产品关键特性的过程参数及相互作用关系,建立精确质量控制限。当实时监测数据异常或接近控制限时,系统提前 12 - 24 小时发出质量风险预警,并基于知识库推荐最优调整方案,有效预防质量问题。在追溯性管理方面,智能制造采用数字化标识技术为产品赋予唯一身份标识 SN 码,配合 MES 系统记录的全要素生产履历,构建贯穿产品全生命周期的数字孪生<sup>[3]</sup>。

### 三、电力终端智能制造生产管理创新的关键实践

#### (一) 跨部门协同的深化

智能制造平台通过搭建统一的数据交互架构,打破了设计、采购、生产、物流、售后等部门间的信息壁垒。设计部门在完成电力终端产品的三维模型设计后,模型数据可实时同步至采购部门,采购部门依据模型中的物料清单自动匹配供应商库存与报价信息;生产部门则能提前获取设计参数,制定对应的生产工序与设备调试方案。物流部门通过平台接入生产进度数据,精准规划原材料入库与成品出库的时间节点,避免库存积压或短缺。售后部门在接收到客户反馈的产品运行问题时,可直接调取该产品的设计参数、生产检测记录及物流信息,快速定位问题根源。

这种协同模式优化了资源配置,缩短了交付周期。以国家电网有限公司位于深圳的电力设备智能制造基地为例,该基地 2021 年引入智能制造协同平台后,设计部门与生产部门的图纸传递效率提升 60%,采购部门的物料匹配准确率从 82% 提高至 97%,产品从设计完成到批量交付的周期平均缩短 25 天。同时,各部门基于实时数据调整资源投入,生产设备的有效利用率提升 18%,整体运营成本降低 12%,充分体现了跨部门协同对生产管理效率提升的实际价值<sup>[4]</sup>。

#### (二) 人力资源角色的转变与技能提升

在高度自动化的生产环境中,操作人员的工作内容从传统的重复性组装、搬运等劳动,转向对自动化生产线的实时监控、设备维护及异常处理。例如,以往需要多名工人手动装配的智能电表机芯,如今由机器人完成,操作人员只需通过监控屏幕观察机器人的运行状态,当系统发出零件抓取偏差警报时,及时排查机械臂校准参数或零件定位装置的问题。管理人员的角色则从现场调度转向数据分析与流程优化,通过查看生产数据看板,分析设备停机原因、生产瓶颈环节,制定针对性的改进方案。

企业需调整人力资源策略以适应这种转变。广东某电力终端制造企业 2020 年启动技能提升计划,针对操作人员开设自动化设备维护、传感器数据解读等课程,对管理人员开展数据分析工具应用培训。培训后,该企业操作人员处理设备异常的响应时间从平均 40 分钟缩短至 15 分钟,管理人员制定的生产优化方案实施后,生产线的单位能耗降低 9%。据《中国电力企业管理》2022 年发布的数据,该企业通过人力资源角色调整与技能提升,生产效率较转型前提升 30%,产品不良率下降 22%。

#### (三) 数据驱动的决策文化

生产管理各环节已形成依赖实时、准确数据进行决策的机制,而非仅凭经验。在生产计划制定阶段,系统会依据历史生产数据、订单需求、设备产能等信息,自动生成多套排产方案,并计算各方案的成本与交付周期,供管理者选择。在质量控制环节,每台电力终端在生产过程中会经过 12 个检测节点,每个节点的检测数据实时上传至系统,当某批次产品的某个参数出现微小波动时,系统会自动预警,管理者可立即调取该批次的原材料数据、设备运行参数进行分析,及时调整生产工艺。

数据可视化、分析工具的应用提升了管理者的洞察力。浙江某电力终端企业 2021 年引入生产数据可视化平台后,管理者通过电脑或移动端即可查看各生产线的实时产量、设备利用率、能耗等指标的动态图表。当某条生产线的能耗突然上升时,平台会自动关联该时段的设备运行日志与原材料配方数据,辅助管理者快速定位原因。据该企业公开数据显示,应用数据工具后,管理者做出生产调整决策的时间从平均 8 小时缩短至 2 小时,因决策失误导致的生产浪费减少 35%,生产计划的达成率从 85% 提升至 96%,实现了更科学、更敏捷的管理决策<sup>[5]</sup>。

### 四、结语

电力终端智能制造模式下的生产管理创新,是电力行业发展至特定阶段的必然抉择,亦是企业增强自身竞争力、顺应市场变化的关键举措。尽管目前已取得一定成效,但仍存在较大发展空间,且有诸多问题亟待解决。未来,企业需持续深入推进创新策略的实施。电力终端制造企业应坚定不移地走智能制造与生产管理创新之路,不断探索实践,以创新驱动发展,为电力行业的转型升级与可持续发展贡献更多力量。相信在各方共同努力下,电力终端智能制造模式将迎来更为辉煌的发展前景,为社会经济发展提供更为稳定、高效的电力支撑。

### 参考文献

- [1] 杨成玮. A 公司智能制造生产管理体系构建研究 [D]. 吉林大学, 2019.
- [2] 罗卫强, 唐斌, 陈勇军. 智能终端精密外观结构件离散型智能工厂规划 [J]. 机电工程技术, 2022(009): 051.
- [3] 薛源, 臧冀原, 孔德婧, 等. 面向智能制造的产业模式演变与创新应用 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 16.
- [4] 盛敏. 中小型制造企业“智慧车间”的设计构思 [J]. 电脑知识与技术, 2020.
- [5] 谢静. 低压配电柜的创新与发展研究 [J]. 轻松学电脑, 2021, 000(011): P.1-2.

# 基于人工智能的智能电视硬件开发研究

余彦飞

深圳创维 -RGB电子有限公司, 广东 深圳 518057

DOI:10.61369/ME.2025040029

**摘 要 :** 随着人工智能技术发展,其在消费电子领域应用渐广,智能电视正朝智能化、个性化、交互友好化演进。本文聚焦基于人工智能的智能电视硬件开发研究,先阐述人工智能赋能智能电视硬件发展的意义与前景;接着分析当前智能电视硬件在 AI 集成方面的关键技术挑战,如 AI 芯片选型定制、多模态交互硬件模块优化、硬件架构对 AI 算法适应性设计等;随后针对挑战提出硬件开发策略与方案,包括专用硬件加速方案、智能交互硬件系统构建、AI 硬件资源调度机制;最后展望关键技术,探讨未来人工智能智能电视硬件发展趋势,为相关研究与产业实践提供参考。

**关 键 词 :** 人工智能;智能电视;硬件开发

## Research on the Hardware Development of Smart TVs Based on Artificial Intelligence

Yu Yanfei

Shenzhen Skyworth-RGB Electronic Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057

**Abstract :** With the development of artificial intelligence technology, its application in the consumer electronics field is gradually expanding, and smart TVs are evolving towards intelligence, personalization, and friendly interaction. This article focuses on the research of smart TV hardware development based on artificial intelligence. Firstly, it expounds on the significance and prospects of artificial intelligence enabling the development of smart TV hardware. Then, it analyzes the key technical challenges of current smart TV hardware in AI integration, such as AI chip selection and customization, multimodal interactive hardware module optimization, and adaptive design of hardware architecture for AI algorithms. Subsequently, hardware development strategies and solutions are proposed for these challenges, including dedicated hardware acceleration solutions, intelligent interactive hardware system construction, and AI hardware resource scheduling mechanisms. Finally, key technologies are prospected, and the future development trend of artificial intelligence smart TV hardware is discussed, providing references for related research and industrial practice.

**Keywords :** artificial intelligence; smart TV; hardware development

## 引言

近年来,人工智能(AI)技术突破性进展改变了各行业格局。在家庭场景中,智能电视从传统视频播放设备演变为集多种功能于一体的智能信息中心。用户对智能电视智能化体验提出更高要求,如精准语音控制、自然人机交互、个性化内容推荐和智能场景感知等。这需强大硬件支撑,而传统智能电视硬件在 AI 处理、感知和交互能力上有局限,难以满足复杂 AI 应用场景。所以,开展基于人工智能的智能电视硬件开发研究,优化硬件架构、提升 AI 算力、集成先进感知与交互模块,是推动智能电视产业升级的关键。

## 一、人工智能对智能电视硬件的需求分析

### (一) AI 功能对硬件算力的需求

人工智能功能实现对智能电视硬件计算能力有明确要求。如语音识别需 CPU 有较强多任务与浮点运算能力;图像识别要求 GPU 或 VPU 加速复杂算法;内容推荐需 CPU 算力与特定 AI 加速器;场景感知对硬件实时处理能力有要求。不同 AI 任务对算力特

性侧重不同,智能电视硬件需根据 AI 功能组合配置计算单元,优化算力特性以满足需求。

### (二) AI 应用对硬件功耗与散热的要求

AI 功能持续运行增加智能电视功耗与发热量,高功耗运行产生的热量若不能有效散发,会影响硬件稳定性、寿命及 AI 应用性能。因此,AI 应用在硬件选材上要选低功耗组件,电源管理需精细化策略,散热设计要采用高效材料与合理风道,甚至用主动散



热方式保证硬件温度安全和系统稳定<sup>[1]</sup>。

### （三）AI交互对硬件接口与传感器的需求

AI交互方式多样化对智能电视硬件接口和传感器配置提出新要求。语音交互需配置性能好的麦克风阵列，涉及相关技术，对硬件接口性能有要求；手势识别和眼动追踪需特定摄像头及图像处理能力。硬件接口要稳定高速传输数据，传感器需有精度和灵敏度，且要优化集成方式，硬件设计需统一规划和集成。

### （四）AI系统对硬件存储与数据通路的要求

AI系统运行对智能电视硬件存储器和数据通路要求更高。AI模型体积大，ROM需有足够容量存储；运行中频繁交换大量数据，RAM容量要大、访问速度要快；内部数据总线带宽要大，以避免成为AI计算性能瓶颈。硬件需配备大容量、高速度存储器，确保数据总线带宽满足需求。

## 二、面向AI的智能电视硬件设计理念与架构

### （一）硬件设计理念的转变

面向人工智能的智能电视硬件设计，其核心理念正在发生显著转变。过去，硬件设计主要围绕如何稳定实现电视的基本显示、播放和连接功能展开，关注点在于性能指标的达成和成本的控制。而现在，设计重心转向了如何更好地支撑AI功能的运行，并以此为基础优化用户的整体交互体验。这意味着硬件设计不再仅仅是独立于软件的物理构建，而是必须与AI算法、操作系统以及上层应用紧密配合，进行协同设计。软硬件界限模糊，硬件要为软件提供最优运行环境，软件需充分利用硬件能力。协同设计很重要，只有在设计之初软硬件就充分考虑彼此需求和限制，才能发挥AI电视性能潜力，避免硬件闲置或软件需求无法满足，实现以AI支撑和体验优化为核心的设计目标<sup>[2]</sup>。

### （二）系统架构优化策略

为了支撑复杂的AI应用，智能电视的硬件系统架构需要进行针对性的优化。一个关键的策略是采用异构计算平台，将不同类型的处理单元，如通用的中央处理器（CPU）、擅长图形和并行计算的处理单元（GPU），以及专门用于加速神经网络计算的单元（NPU）集成在一起。这种架构可以根据不同的AI任务，动态分配计算资源，例如使用CPU处理系统任务和复杂逻辑，使用GPU进行图像相关的AI运算，使用NPU高效运行深度学习模型，从而在整体上提升计算效率。此外，可设计专用AI加速单元，针对特定AI算法进行硬件优化，提升算法运行速度。在内存层次结构上，优化策略有增加缓存容量、提高缓存命中率、采用高速内存接口技术，确保数据在存储器和处理器间快速流动，减少AI运算的数据等待时间。这些架构优化策略旨在平衡性能、功耗和成本，保证AI功能流畅运行，控制电视能耗与制造成本，提升市场竞争力。

### （三）关键硬件模块的AI适应性设计

智能电视中的关键硬件模块，在设计时都需要充分考虑AI应用的具体需求。主控芯片（SoC）的选择尤为关键，现在越来越多地选用集成了神经网络处理单元（NPU）或其他AI加速模块

的SoC，以提供必要的算力基础。存储模块的设计也需要适应AI需求，例如采用读写速度更快、容量更大的内存（RAM）和存储（ROM），以支持AI模型的高效加载和运行时大量数据的快速交换。音视频处理单元需适应性设计，要处理传统音视频编解码，配合AI算法进行音视频内容分析、增强或生成，如支持AI降噪、智能画质提升等，这要求其有更强处理能力和更灵活接口。传感器接口设计要满足AI交互需求，如配高灵敏度麦克风阵列支持远场语音识别，设高帧率、高分辨率摄像头接口支持手势或人脸识别，集成多种环境传感器接口实现场景感知。这些关键硬件模块的AI适应性设计，能确保各硬件直接支持AI功能实现，共同构建高效运行AI应用的硬件基础<sup>[3]</sup>。

## 三、AI驱动下的智能电视硬件开发实践要点

### （一）硬件选型与评估

在AI需求明确的前提下，芯片的选型需以AI处理能力为核心指标。需关注芯片的神经网络计算单元数量、算力水平（以TOPS为单位）以及对主流AI框架的支持程度。例如，针对具备语音识别、图像分割等多任务的中高端智能电视，应选择算力不低于2TOPS的芯片，以确保多任务并行处理时的流畅性。某品牌2022年推出的智能电视采用的A73架构芯片，其NPU算力达到3TOPS，在实际测试中，语音指令响应速度较上一代提升40%，图像识别准确率稳定在92%以上。

传感器的选型需匹配具体AI功能场景。用于手势控制的红外传感器，需满足采样频率不低于30帧/秒，识别距离覆盖1-5米范围；用于环境光适应的光线传感器，应具备1-10000lux的检测量程，且测量误差控制在±5%以内。存储器的选型则需平衡容量与读写速度，运行内存（RAM）需支持AI模型的实时加载，对于搭载深度学习模型的电视，RAM容量不应低于4GB，存储空间（ROM）需预留至少16GB用于AI算法模型存储及数据缓存，以避免因存储不足导致的模型加载失败或运行卡顿。

评估过程中，需建立量化对比体系。通过搭建测试平台，模拟多任务并发场景，测试不同硬件组合的AI处理延迟、功耗峰值及连续运行稳定性。例如，在同时运行语音助手、画面场景优化、用户行为分析三个AI任务时，记录芯片的温度变化、响应时间及系统崩溃次数，以此筛选出性能与稳定性最优的硬件组合<sup>[4]</sup>。

### （二）硬件与AI软件的协同开发

硬件开发与AI软件的协同需贯穿开发全周期。在项目启动阶段，硬件工程师需与算法工程师共同明确AI功能的硬件需求，例如图像识别算法对芯片算力的最低要求、语音处理对麦克风阵列接口的参数定义。某家电企业2021年的智能电视开发项目中，通过在概念设计阶段成立跨部门协同小组，硬件团队提前获取AI算法的计算复杂度数据，将芯片选型周期缩短了20%，避免了后期因硬件性能不足导致的算法适配问题。

接口定义需形成标准化文档。明确硬件与软件之间的数据传输格式、通信协议及交互时序，例如规定摄像头采集的图像数据以YUV420格式通过MIPI接口传输，传输速率不低于



1.5Gbps，确保 AI 算法能实时获取完整的图像信息。在开发过程中，需建立两周一次的协同评审机制，硬件团队展示原型机的接口测试结果，软件团队反馈算法在硬件平台上的运行瓶颈，通过及时调整硬件设计参数或优化算法代码，实现两者的动态适配。

并行开发阶段需设置关键节点同步。当硬件完成原理图设计时，软件团队应同步完成 AI 算法的模型压缩，使其适配硬件的存储容量；当硬件进入 PCB 打样阶段，软件团队需完成操作系统与硬件驱动的适配，确保 AI 中间件能正常调用硬件资源。这种同步机制可减少后期集成测试的问题数量，某调研机构 2020 年发布的数据显示，采用协同开发模式的智能设备项目，软硬件集成问题发生率较传统串行开发降低 65%<sup>[5]</sup>。

### （三）硬件调试与性能优化

硬件调试需聚焦 AI 应用的实际场景。针对语音控制功能，需测试不同噪音环境下的硬件响应，在 50 分贝的家庭背景噪音中，麦克风阵列的语音信号采集信噪比应保持在 30dB 以上，确保 AI 语音算法的识别准确率不低于 90%；针对画面场景优化功能，需检测芯片在 4K 分辨率下的实时图像处理能力，要求每帧画面的 AI 场景分析时间不超过 10 毫秒，避免出现画面卡顿或延迟。

性能优化需采用分层调整策略。在硬件层面，通过调整芯片的电压频率曲线（DVFS），在 AI 任务负载较低时降低核心频率以减少功耗，例如当仅运行语音识别时，将芯片大核频率从 2.0GHz 降至 1.5GHz，可使待机功耗降低 15%；在接口层面，优化存储器的读写时序，将 AI 模型加载时间从 2 秒缩短至 0.8 秒，提升用户操作的即时性。

持续监测与迭代优化是关键。通过搭建长期运行测试环境，连续 72 小时模拟用户高频使用的 AI 功能，记录硬件的温度变化、功耗波动及错误日志。例如，在循环执行“语音搜片 - 场景模式切换 - 内容推荐”操作时，若发现芯片温度超过 85℃导致系统降频，需通过增加散热片面积或优化 PCB 布局改善散热，确保在极端使用场景下 AI 功能的稳定运行。

### （四）硬件可靠性、安全性与成本控制

可靠性保障需通过环境测试验证。硬件需通过 -20℃至 60℃的高低温循环测试（不少于 500 次循环），在湿度 95% 的环境中连续运行 30 天无故障，以应对不同地区的气候条件。针对 AI 功能依赖的传感器，需进行机械可靠性测试，例如对摄像头模组进行 10000 次的振动测试（频率 10-2000Hz），确保在运输或日常使用中的振动环境下，传感器数据采集精度不受影响。

安全性设计需覆盖数据全生命周期。硬件层面需集成加密模块，对摄像头采集的图像数据、麦克风录制的语音信息进行实时加密，加密算法需符合 AES-256 标准；设置硬件级安全区域（TEE），用于存储 AI 模型的密钥及用户身份信息，防止恶意软件的非法访问。某品牌 2022 年推出的智能电视，因采用硬件加密技术，在第三方安全测评中，用户隐私数据泄露风险评估得分较行业平均水平降低 40%。

成本控制需在性能与预算间平衡。通过简化非必要硬件功能降低成本，例如对于入门级 AI 电视，可采用集成 NPU 的中端芯片替代独立 AI 处理器，在确保基础语音控制、画质优化功能的同时，将硬件成本降低 15%；通过批量采购降低元器件单价，当某型号传感器的采购量达到 10 万颗时，单颗采购成本可降低 8-12%。同时，需建立成本动态监测机制，定期对比实际采购价格与预算，及时调整供应商或替换性价比更高的替代元器件，确保项目成本控制在预算范围内。

## 四、结语

基于人工智能的智能电视硬件开发潜力大且具挑战。随着人工智能进步和用户需求增长，智能电视硬件升级优化势在必行。需求分析显示，人工智能对智能电视硬件在算力、功耗与散热等多方面有明确要求，开发者需考虑不同 AI 功能的硬件需求，合理配置资源，保障 AI 应用高效稳定运行。面向 AI 的智能电视硬件设计理念与架构转变，为开发提供新思路，从设计理念协同转变到系统架构优化，再到关键模块 AI 适应性设计，都围绕支撑 AI 功能和提升体验，有望实现性能、功耗和成本的最佳平衡。AI 驱动下的开发实践中，硬件选型评估、软硬件协同开发、调试优化以及可靠性、安全性和成本控制等要点，是开发成功的关键，开发者要严格把控各环节，确保硬件满足需求、保证质量。展望未来，人工智能智能电视硬件的发展前景广阔。随着 AI 技术的不断创新，如更先进的机器学习算法、更强大的 AI 芯片技术等，智能电视将具备更强大的智能处理能力和更丰富的交互功能。同时，硬件开发者也将面临更多的挑战，如如何进一步降低硬件功耗、提高硬件的集成度和安全性等。相信在未来，通过科研人员和产业界的共同努力，基于人工智能的智能电视硬件将不断取得突破，为用户带来更加智能化、个性化的视听体验，推动智能电视产业迈向新的高度。

## 参考文献

- [1]侯玉娟.人工智能在广播电视行业中的应用研究[J].广播电视网络,2020.
- [2]李亚铭,李阳.智媒体时代人工智能在电视行业的应用研究[J].出版广角,2019(3):3.
- [3]张乐,王晨,李良,等.基于人工智能的视频节目生产数字模型设计[C]//第31届中国数字广播电视与网络发展年会暨第26届国际广播电视技术讨论会论文集(CCN&ISBT 2023).2023.
- [4]赵艺涵.小米智能家居产品营销策略研究[D].云南财经大学,2023.
- [5]黎政,杨广辉,白伟,等.基于人工智能的TVOS 4K超高清智能电视终端研究及应用[J].广播与电视技术,2021,48(8):4.

# 设备制造企业精益生产与智能创新融合

周昌玮

广州番禺电缆集团有限公司, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ME.2025040031

**摘 要：** 在当今制造业竞争日益激烈的背景下，设备制造企业面临着提高生产效率、降低成本、提升产品质量等多方面的挑战。精益生产作为一种以最大限度地减少企业生产所占用的资源和降低企业管理和运营成本为主要目标的生产方式，在设备制造企业中得到了广泛应用。同时，智能创新凭借其先进的信息技术和智能化手段，为企业的发展带来了新的机遇和活力。本文旨在探讨设备制造企业精益生产与智能创新融合的相关问题，分析两者融合的必要性和可行性，阐述融合的具体路径和策略，并通过实际案例验证融合的效果，以期设备制造企业实现可持续发展提供有益的参考和借鉴。

**关 键 词：** 设备制造企业；精益生产；智能创新

## Integration of Lean Production and Intelligent Innovation in Equipment Manufacturing Enterprises

Zhou Changwei

Guangzhou Panyu Cable Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400

**Abstract：** In the increasingly competitive manufacturing industry today, equipment manufacturing enterprises face multiple challenges such as improving production efficiency, reducing costs, and enhancing product quality. Lean production, as a production method that aims to minimize the resources occupied by enterprise production and reduce enterprise management and operating costs, has been widely used in equipment manufacturing enterprises. At the same time, intelligent innovation, with its advanced information technology and intelligent means, has brought new opportunities and vitality to the development of enterprises. This article explores the integration of lean production and intelligent innovation in equipment manufacturing enterprises, analyzes the necessity and feasibility of their integration, elaborates on specific paths and strategies for integration, and verifies the effectiveness of the integration through practical cases. It aims to provide useful references for equipment manufacturing enterprises to achieve sustainable development.

**Keywords：** equipment manufacturing enterprise; lean production; intelligent innovation

## 引言

随着全球经济一体化加速和科技飞速发展，设备制造企业市场环境变化深刻，消费者对产品个性化、高品质和快速交付需求增加，市场竞争激烈。在此背景下，企业需提升核心竞争力。精益生产源于日本丰田，强调消除浪费、优化流程、持续改进，引入我国后，在众多设备制造企业成效显著，助其降本提质增效。同时，智能创新推动制造业转型升级，物联网等先进技术带来变革，可实现设备自动化、智能化生产，增强企业创新与响应能力。但目前很多企业实施精益生产和智能创新时将两者孤立，未发挥协同效应。

## 一、精益生产与智能创新融合的理论基础与内在逻辑

### （一）精益生产核心理念在智能时代的延续与拓展

精益生产核心理念，如“消除浪费”“持续改进”“准时化生产”“自动化（含自働化）”，在智能化背景下获得新途径与内涵。智能传感与数据分析技术让生产全流程监控更精细，能精准识别并量化浪费，为消除浪费提供目标与数据支持。智能算法为“持

续改进”注入活力，使改进成为数据驱动的持续过程，提升了效率与深度。

### （二）智能创新对精益生产关键环节的支撑作用

智能创新的物联网、大数据分析、人工智能、数字孪生等技术，为精益生产提供支撑。智能传感器与物联网技术实现生产过程透明化，为“可视化”管理提供基础，便于快速发现和响应异常。大数据分析技术处理生产数据，支撑“准时化生产”。人工智

能技术辅助质量检测和工艺参数优化。数字孪生技术为精益改善提供低成本、高效率试验平台。

### （三）两者融合的内在契合点与协同效应

精益生产“简化、高效、精准”的目标与智能制造“自动化、智能化、数据驱动”的特性内在一致，都旨在提升整体运营效率，这是两者融合的基础。融合产生协同效应，智能手段能更彻底快速消除浪费，精益生产理念为智能技术应用提供方向和优先级排序，确保技术投入产生最大效益，实现管理哲学与先进技术有机结合<sup>[1]</sup>。

## 二、智能技术赋能精益生产实践的关键领域

### （一）智能化设备与产线对精益生产效率的提升

智能化设备与柔性化生产线的应用，是提升精益生产效率的关键物理基础。自动化程度高的设备能够替代大量重复性、体力消耗大的操作，显著减少人工干预带来的不稳定因素和误差。通过精确控制加工参数和动作节拍，智能产线能够稳定并提高单位时间内的产出量，即生产节拍。同时，许多智能设备具备快速调整参数和工装的能力，使得生产从一种产品切换到另一种产品所需的时间，即换型时间，大幅缩短。这些因素共同作用，直接提升了衡量生产效率的综合指标——整体设备效率（OEE）。此外，先进的智能设备通常集成自诊断和预测性维护功能。设备能够实时监测自身运行状态，一旦检测到潜在故障或性能下降的早期迹象，系统可以自动报警甚至提示维护建议，甚至在某些情况下实现自我调整或基础维护。这种能力有效减少了非计划停机时间，保障了生产能够按照预定计划连续、稳定运行，从而更好地满足准时化生产的要求。

### （二）数据驱动的精益过程监控与优化

物联网技术、遍布生产现场的传感器以及连接它们的网络，构成了数据采集的基础设施，能够实时、准确地捕获生产线上各个环节的数据，包括设备运行参数、加工过程中的物理量、产品质量检测数据等。这些海量数据被传输到大数据分析平台进行分析和处理。通过对这些数据的挖掘和建模，管理者可以实现对生产过程状态、产品质量稳定性以及设备健康状态的全面、实时监控，打破了传统管理中信息滞后或不透明的局面。数据分析结果能够帮助精准定位生产瓶颈所在的工序，识别导致生产效率波动的异常因素，以及找出影响产品质量的具体环节和原因。这些基于数据的洞察为精益改善活动提供了客观、具体的依据，使得改进措施能够有的放矢，避免盲目性。决策者可以依据数据分析结果做出更精准的判断，快速调整生产计划、工艺参数或资源配置，实现对生产异常的快速响应和处理，从而持续优化生产流程<sup>[2]</sup>。

### （三）智能供应链与精益库存管理

智能仓储系统以及自动化物流设备，例如自动导引车（AGV）、智能分拣机器人等，显著提升了物料于仓库内部以及车间之间的流转效能。AGV 可依据指令自动且精准地将物料从仓库运送至指定工位，或者把成品运送至下一环节或出库区域，削减了人工搬运的距离、时间以及出错率，切实降低了搬运过程中产

生的资源浪费。基于大数据的需求预测模型以及由智能算法支撑的供应链协同平台，能够更为精准地预测市场需求的波动情况，并及时将预测信息共享给供应商以及企业内部各相关部门。这使得供应链上的各个节点能够实现更优的协同运作，供应商可更精确地安排生产与交付事宜，企业内部则能够更合理地规划采购并投入生产。通过此项优化，企业能够将原材料、在制品以及成品的库存水平控制在更为理想的区间，达成更趋近于按需供应的模式，大幅减少积压库存，进而降低所占用的流动资金以及仓储管理成本。

## 三、融合过程中面临的挑战与精益管理角色的演进

### （一）技术集成与数据壁垒的挑战

不同智能系统、新旧设备之间的集成存在显著难度。在设备制造企业中，智能系统往往来自不同供应商，其接口协议、数据格式存在差异，导致系统间难以实现无缝对接。例如，某汽车零部件制造企业引入了新的智能仓储系统与原有 ERP 系统，由于两者数据交互协议不兼容，使得原材料入库信息无法实时同步至生产计划模块，影响了生产排程的准确性。新旧设备的集成同样棘手，老设备缺乏数据采集功能，需额外加装传感器才能接入智能管理平台，而加装过程可能对设备原有结构造成影响，甚至导致生产中断。

数据标准不统一和数据孤岛问题严重阻碍融合进程。企业内部不同部门、不同生产环节的数据往往由各自的系统管理，数据标准不统一，如生产部门的产品编码规则与采购部门存在差异，导致数据汇总分析时需进行大量转换工作。数据孤岛则使得信息无法流通，某重型机械制造企业的焊接车间与装配车间分别使用独立的管理系统，焊接工序的质量数据无法及时传递至装配车间，导致装配过程中多次出现因焊接缺陷引发的返工。据 2022 年中国机械工业联合会发布的《设备制造业智能化发展报告》显示，国内 80% 以上的设备制造企业存在不同程度的数据孤岛问题，其中 30% 的企业因数据无法有效共享，导致生产效率损失超过 10%<sup>[3]</sup>。

技术复杂性给员工操作和维护带来诸多挑战。智能设备和系统的操作需要员工具备一定的数字化技能，而部分老员工难以快速掌握新设备的操作方法。某机床制造企业引进智能加工中心后，有 20% 的操作工因不熟悉触摸屏操作和程序设置，导致设备初期利用率不足 60%。在维护方面，智能系统的故障排查涉及软件、硬件、网络等多个层面，传统维修工缺乏相关知识储备，某自动化生产线的智能控制系统出现故障后，企业花了 3 天时间才找到问题根源，造成生产停滞。

### （二）组织文化与人才能力的挑战

传统精益文化向数字化、智能化文化转变存在困难。传统精益文化强调现场改善、消除浪费，而智能化文化更注重数据驱动决策和跨部门协同，两者在理念上存在差异。部分员工对智能化改造持抵触态度，认为智能系统会取代人工，某轴承制造企业推进智能车间建设时，有 15% 的员工担心失业，工作积极性明显下



降。企业需要通过培训、沟通等方式转变员工观念，但这一过程耗时较长，某工程机械企业花了 2 年时间才让员工普遍接受智能化生产模式。

员工对新技术的接受度和应用能力不足制约融合发展。新技术的应用改变了传统的工作方式，需要员工主动学习和适应，但部分员工因年龄、知识结构等原因，接受度较低。某齿轮制造企业引入智能检测设备后，有 30% 的质检人员仍习惯采用传统抽检方式，对智能设备的全检数据持怀疑态度，导致设备的检测效率未得到充分发挥。员工应用能力的不足还体现在对数据的分析利用上，多数企业的员工仅能完成数据的收集和简单统计，无法通过数据分析发现生产中的问题，某泵阀制造企业的生产数据平台建成后，因员工不会使用数据分析工具，平台的使用率不足 40%<sup>[4]</sup>。

复合型人才短缺是融合过程中的突出瓶颈。既懂精益生产又掌握智能技术的人才能够有效推动两者融合，但目前这类人才供给严重不足。据 2021 年人社部发布的《制造业人才发展规划指南》显示，我国设备制造业中复合型人才缺口超过 200 万，其中具备精益管理经验和智能化技能的人才供需比达到 1:5。企业在招聘时难以找到合适的人才，某汽车底盘制造企业的智能工厂项目因缺乏既懂精益生产又能规划智能产线的人才，导致项目延期 6 个月。内部培养则需要较长周期，某农机制造企业通过与高校合作开展定向培养，花了 3 年时间才为企业输送了 50 名符合要求的复合型人才。

### （三）精益管理角色在融合中的新定位

精益管理者不再仅仅是流程优化者，还需要具备数据解读能力和技术理解能力，以引导智能技术的有效应用。在数据解读方面，精益管理者要能从海量数据中提取有价值的信息，指导生产改善。某压缩机制造企业的精益经理通过分析智能系统采集的设备运行数据，发现某型号压缩机的装配工序存在瓶颈，通过调整作业顺序，使生产效率提升 15%。在技术理解方面，精益管理者需了解智能技术的功能和局限性，确保技术应用符合精益目标。某电机制造企业计划引入自动化搬运机器人时，精益经理发现机器人的运行路径会增加物料搬运距离，不符合精益中的“短距离

搬运”原则，建议优化机器人路径后再投入使用，避免了资源浪费。

精益思想在引导智能系统设计和评估智能项目价值方面具有重要作用。在智能系统设计阶段，精益思想能确保系统功能符合生产实际需求，避免过度智能化。某仪表制造企业在设计智能管理系统时，精益团队提出要以消除生产瓶颈为核心，否决了研发部门提出的增加不必要功能的方案，使系统开发成本降低 20%。在评估智能项目价值时，精益思想强调从投入产出比、对生产效率和质量的提升效果等方面进行考量，某压力容器制造企业的智能焊接项目通过精益评估，剔除了华而不实的功能模块，使项目投资回收期缩短至 2 年。

精益管理角色的演进确保了技术投入不偏离管理本质。在融合过程中，部分企业盲目追求技术先进，忽视了管理的核心目标。精益管理者通过把控技术应用方向，使智能创新服务于提高生产效率、降低成本、提升质量等管理目标。某管件制造企业引入智能调度系统后，精益团队定期评估系统运行效果，发现系统在某些情况下会优先考虑设备利用率而忽视订单交付期，及时对系统算法进行调整，保证了订单的按时交付。这种以管理本质为导向的技术应用，使精益生产与智能创新的融合更加高效、务实<sup>[5]</sup>。

## 四、结语

设备制造企业实现精益生产与智能创新融合，是顺应时代、提升竞争力的必然选择。此融合理论基础坚实、实践能提效益，但面临技术集成与数据壁垒、组织文化与人才能力等挑战。企业需积极应对，技术上加大研发投入，加强系统与设备集成研究，统一数据标准，降低技术复杂性影响；组织文化上推动传统精益文化向数字化、智能化转变，加强员工培训，培养复合型人才。同时，精益管理者要明确新定位，提升数据与技术能力，以精益思想引导智能技术应用。未来，随着科技进步和智能技术成熟，该融合将不断深化，有望推动企业高质量、高效率、可持续发展，为我国制造业转型升级贡献力量。企业应抓住机遇，积极探索实践，实现自身长远发展。

## 参考文献

- [1] 张志芳. 工业 4.0 时代的精益化生产与智能发展探讨 [C]// 第十届中国金属学会青年学术年会暨第四届辽宁青年科学家论坛. 中冶京诚工程技术有限公司轧钢与金属加工工程技术所, 2020.
- [2] 刘德龙. 基于精益生产的制造业企业管理创新模式 [J]. 电子乐园, 2022(002):000.
- [3] 李红艳. 基于 MFCA 理论的 S 企业乳胶手套生产线精益生产研究与应用 [D]. 天津大学, 2020.
- [4] 王军奎, 王凯, 张叶同, 等. 电力装备制造业智能工厂规划与实践 [J]. 智能制造, 2022(4):52-57.
- [5] 王盼, 苏醒, 冯景浦. 井工刮板输送机智能制造的现状与未来 [J]. 装备制造技术, 2023(10):247-250.



# 政府采购与工程招标的合规性及优化路径

林蓓蕊

身份证号: 445202199405022488

DOI:10.61369/ME.2025040003

**摘 要：** 本文围绕政府采购与工程招标展开。介绍了相关法律法规，分析采购流程规范性，指出存在问题。阐述住建局、财政局等部门监管职责，介绍信用管理平台等应用成效。还提及跨区域评标合作等创新举措及提升合规性的多种方法，最后强调进一步发展的方向。

**关 键 词：** 政府采购；工程招标；工程招标监管

## Compliance and Optimization Path of Government Procurement and Project Bidding

Lin Beirui

ID: 445202199405022488

**Abstract：** This article focuses on the government procurement and engineering bidding. It introduces relevant laws and regulations, analyzes the standardization of procurement procedures, and highlights existing issues. The article also outlines the regulatory responsibilities of departments such as the Housing and Urban-Rural Development Bureau and the Finance Bureau, and discusses the effectiveness of applications like the credit management platform. Additionally, it mentions innovative measures, such as cross-regional bid evaluation cooperation, and various methods to enhance compliance. Finally, it emphasizes the direction for further development.

**Keywords：** government procurement; project bidding; project bidding supervision

### 引言

我国政府采购活动依据一系列法律法规进行规范，其中《中华人民共和国政府采购法》（2002年颁布）和《中华人民共和国招标投标法》等是重要基石。在地方层面，各地也结合实际情况出台相关法规，如广东省实施条例等。这些法律法规对采购范围、方式、程序等作出规定。建设工程项目招标有其特殊性，在资质审查、技术标准、履约担保等方面有严格要求。揭阳市在政府采购和工程招标活动中，需遵循这些法律法规及特殊要求，同时其在采购流程规范性审查、多部门协同监管、信用管理平台应用、电子招标系统建设等方面都有相关实践，但也存在一些合规性问题，需进一步探索优化路径以推动政府采购与工程招标的合规性发展<sup>[1]</sup>。

### 一、政府采购与工程招标制度概述

#### （一）政府采购的法律框架

我国招标采购的法律体系以《中华人民共和国政府采购法》和《中华人民共和国招标投标法》两部核心法律为基础，这两部法律明确规定了政府采购的范围、方式以及程序等内容。在此基础上，地方政府根据国家法律和本地实际情况，制定了一系列地方性法规和政策，以完善政府采购制度。

在广东省汕头市，地方政府根据国家法律和本地实际情况，制定了《汕头市政府采购管理办法》（汕府〔2000〕16号），该办法对政府采购的范围、方式、程序等内容进行了详细规定。为了进一步深化政府采购制度改革，汕头市还配套出台了《深化政

府采购制度改革实施方案》（汕府办〔2021〕10号），该方案对财政部门 and 公共资源交易中心在政府采购中的监管职责进行了细化，并推行了全流程电子化和信用管理等一系列措施。

而在揭阳市，地方政府依据《广东省实施〈招标投标法〉办法》出台了《揭阳市招标投标管理办法》（揭府令29号），该办法建立了多部门协同监督机制，由发改局统筹，住建、财政等部门分工执法，强化了招标方案的核准和信息公开要求。这些措施有助于提高政府采购的透明度和公正性，确保政府采购活动的顺利进行。

汕头市和揭阳市的政策都注重了国家法律与本地实操需求的衔接，形成了“国家法—省条例—市细则”的三级合规框架。这一框架既保证了政府采购活动的合法性，又充分考虑了地方实际

情况，为政府采购活动的顺利进行提供了有力保障。

### （二）工程招标的特殊性要求

建设工程招标需严格资质审查、技术标准及履约担保。施工类项目公开招标门槛为合同估算价400万元以上；货物采购中，财政资金批量采购超200万元需招标，且履约保证金对中小企业限至5%以下<sup>[4]</sup>。进一步明确特殊性要求：资格后审：评标阶段需对中标候选人进行企业专业技术人员资质、工程业绩的核实，并确保其具备相关规划许可审批条件。技术标准：市政工程须符合省级质量安全规范，并在招标文件中载明环保、节能等指标；履约担保：政府投资项目原则上不设标底，但可以要求中标人提供银行保函或投标保证金（上限2%），履约保证金不得超过中标合同金额的10%。两地均通过地方性法规强化工程招标的合规性。其中，仅揭阳市针对特许经营项目（如供水、交通）设定了年经营权出让额超1000万元必须招标的专项标准。

## 二、揭阳市政府采购合规性分析

### （一）采购流程规范性审查

采购流程规范性审查是揭阳市政府采购合规性分析的重要部分。需结合揭阳市政府集中采购目录，对各环节法定程序执行情况进行深入剖析。在采购需求编制环节，应确保需求明确、合理且符合相关法规与政策要求，避免模糊不清或不合理的需求设定<sup>[5]</sup>。信息公告环节，要严格按照规定的时间、渠道和内容要求进行发布，确保潜在供应商能够及时获取准确信息。评标定标环节更是关键，需遵循公正、公平、公开的原则，评标标准应科学合理且事先明确公布，定标结果应符合法定程序和评审结果，杜绝人为干预和违规操作，以保障政府采购的合法性和公正性。

### （二）典型案例实证研究

近年来，在推进信息化建设项目、医疗设备采购等重大采购项目过程中，确实暴露出一些不容忽视的合规性问题<sup>[6]</sup>。具体而言，在信息化建设项目的评审环节，对于参与评审的人员所持有的证书是否符合政府采购相关法律法规的标准，缺乏严格的审核机制，这一疏漏直接影响了潜在供应商之间的公平竞争环境，使得部分符合条件的供应商可能因评审标准的不明确而失去参与机会。此外，在医疗设备采购领域，采购需求的制定过程显得不够精细和准确，导致某些设备的技术参数设置存在明显不合理之处，这不仅可能无法充分满足实际医疗工作的需求，还可能造成资源的浪费和资金的使用效率低下。

在项目评标阶段，也出现了一些令人担忧的情况。个别评委的专业素养和公正性受到了外界质疑，评标过程中存在评分标准模糊不清、主观随意性较大的问题，这使得评标的公正性和透明度大打折扣。更为严重的是，在合同签订环节，同样暴露出一些明显的漏洞，例如合同条款的制定不够严谨，对合同双方的权利和义务界定不够明确，这种模糊性为后续可能出现的合同纠纷埋下了隐患<sup>[6]</sup>。这些程序上的瑕疵和不足，充分反映出政府采购的规范管理方面还存在明显的短板，亟需通过加强制度建设、提升监管力度等措施，切实提升政府采购的规范性和透明度。

## 三、工程招标监管机制研究

### （一）监管体系架构

#### 1. 多部门协同监管模式

住建局在工程招标监管中主要负责对工程建设相关活动的监督管理，包括对工程建设主体资质的审核、工程建设过程中的质量与安全监督等，从工程实体建设角度保障招标活动的合规性<sup>[7]</sup>。财政局侧重于对招标项目资金的监管，确保资金使用合理、合规，符合财政预算和相关财务制度，避免资金浪费和挪用情况发生<sup>[8]</sup>。审计局则对招标项目进行审计监督，审查招标程序的合法性、公正性以及合同执行情况等，对发现的问题及时提出整改意见，保证招标活动的规范透明<sup>[9]</sup>。三个部门通过明确各自职能分工，建立信息共享与沟通协调机制，协同开展监管工作，形成有效的多部门协同监管模式。

#### 2. 信用评价体系建设

揭阳市建筑企业信用管理平台在招标资格审查过程中展现出了显著的应用成效。该平台通过系统性地收集和整合建筑企业的各类信用信息，涵盖企业的基础信息、历史业绩记录、违规违约行为等多个维度，构建起了一个全面且详尽的信用数据库。在招标资格审查阶段，审查机构能够依托这些多维度的信用数据，对企业进行全方位的综合评估。对于信用记录良好、信誉度高的企业，平台会给予优先考虑或简化审查流程的优惠政策，以此激励企业持续保持良好的信用行为<sup>[10]</sup>。与此同时，对于那些存在不良信用记录、信誉受损的企业，平台则会采取相应的惩戒措施，如限制其投标资格、提高保证金比例等，从而增加其违规行为的成本，形成有效的震慑作用。这种信用管理机制不仅有助于筛选出真正优质的建筑企业参与招标，确保工程质量和安全，还能有效规范建筑市场的秩序，遏制不正当竞争行为，进而促进揭阳市建筑行业的健康、有序和可持续发展。

### （二）电子招标实践创新

#### 1. 全流程电子化平台建设

公共资源交易中心电子招标系统在全流程电子化平台建设方面具有极其重要的意义。该系统不仅全面覆盖了招标项目的各个环节，还深入细化了各项功能模块，包括但不限于招标公告的及时发布、招标文件的便捷下载、投标文件的安全上传、开标过程的透明展示以及评标环节的公正执行，从而实现了招标流程的高度标准化和自动化。系统通过严格的身份认证机制和精细化的权限管理策略，确保只有经过合法认证的用户才能访问和操作相关功能，有效防止了非法入侵和操作风险。

在数据安全保障方面，该系统采用了国际先进的加密技术，对传输和存储的数据进行多重加密，确保数据的安全性。同时，系统还实施了全面的数据备份策略，定期对关键数据进行备份，以防止因意外情况导致的数据泄露和丢失。此外，系统还建立了完善的监控和审计机制，对系统的各项操作和数据访问进行实时监控和详细记录，能够及时发现和处理异常情况，确保系统的稳定运行。

这些综合性的措施不仅为电子招标的顺利进行提供了强有力

的保障，还显著提高了招标工作的效率和透明度，有效促进了市场主体的公平竞争，进一步优化了公共资源交易环境，为推动地方经济高质量发展奠定了坚实基础。<sup>[7]</sup>

## 2. 远程异地评标实施

揭阳与其他地市之间的跨区域评标合作项目，在一定程度上显著推动了远程异地评标的实践创新与发展。该项目通过有效整合两地优质资源，不仅大幅提升了评标工作的整体效率，还显著增强了评标的公正性<sup>[8]</sup>和透明度。借助先进的远程异地评标系统，评标专家们可以在各自不同的地理位置同时参与评标活动，这一举措有效减少了传统评标过程中可能出现的人为干扰和地域限制因素。

然而，在项目实际运行过程中，也逐步暴露出一些亟待解决的问题和挑战。例如，网络稳定性的波动可能会直接影响到评标工作的顺利进行和进度控制；不同地区在评标标准的具体细节上可能存在一定的差异，这需要在实际操作中进行进一步的协调和统一。此外，信息安全保障问题同样不容忽视，必须确保评标过程中涉及的所有数据在传输和存储环节的安全性和可靠性。

针对上述问题和挑战，相关部门应当采取一系列切实有效的措施加以应对。首先，应加大技术投入力度，全面提升网络基础设施的建设水平，确保网络稳定性和高效率。其次，亟需建立一套科学、统一、规范的评标标准体系，以消除地区间的标准差异，确保评标过程的公平公正。最后，必须强化信息安全管理措施，通过采用先进的安全技术和严格的管理制度，确保评标数据的绝对安全。通过这些综合措施的实施，将进一步优化和完善远程异地评标机制，使其在未来的实践中发挥更大的作用。

# 四、合规性优化路径探索

## （一）流程再造方案

### 1. 采购需求标准化建设

采购需求标准化建设可从多个方面入手。首先，建立采购文件模板库，为采购活动提供标准化的文件框架，明确各项采购要求的规范表述和格式，确保采购文件的一致性和严谨性。其次，设定评审因素量化指标，对评审因素进行量化处理，避免主观随意性，使评审过程更加科学、公正。通过这些规范化措施，能够有效提升采购需求的标准化水平，减少因需求不明确或不规范引发的合规性问题，进而提高政府采购与工程招标活动的质量和效率。

### 2. 异议投诉处理机制

揭阳特色的质疑响应时限压缩方案，应当从当地的实际情况出发，充分考虑揭阳市在采购与招标项目中的独特特点和以往处理类似问题的丰富经验，进行科学合理的设计。通过合理缩短质疑响应的时限，不仅能够显著提升工作效率，减少不必要的等待时间，还能有效避免问题的拖延和积压，确保各项工作的顺利进行。与此同时，争议调解程序的构建在这一方案中显得尤为关键。可以考虑设立专门的调解机构或工作小组，其成员应包括具备丰富经验的法律专家、行业内的资深人士等<sup>[10]</sup>。在具体操作

中，需要明确调解的启动条件、详细流程以及参与各方的权利和义务，确保每一步都透明、规范。在调解过程中，务必充分听取各方的意见和建议，依据国家相关法律法规和政策，进行公正、客观的裁决。通过这样细致周到的方案设计和程序安排，能够更加高效、公正地处理各类异议和投诉，进一步提升政府采购与工程招标的合规性和公正性，为揭阳市的经济社会发展营造良好的环境。

## （二）智慧监管升级

### 1. 区块链存证技术应用

构建招标文件数据唯一标识码存证、评标过程追溯的区块链平台，能够显著提升政府采购与工程招标的合规性和智慧监管水平。通过运用先进的区块链技术，为每一份招标文件生成并存储其独一无二的唯一标识码，从而确保文件的完整性和不可篡改性，从根本上杜绝文件被恶意篡改的风险。在评标过程中，每一个环节的操作和产生的数据都能实时、准确地记录在区块链上，形成不可篡改的链上记录，实现评标过程的全程追溯。这不仅能够有效防止评标过程中的违规操作和暗箱操作，还能为监管部门提供透明、可靠、详实的监管依据，极大提升监管效率和效果。

同时，利用区块链的分布式账本特性，各个参与方，包括招标方、投标方、评标专家以及监管部门等，都能实时获取和验证相关信息，确保信息的对称性和可信度。这种去中心化的信息共享机制，不仅提高了信息的透明度和可信度，还有助于消除信息不对称带来的不公平现象，促进招标采购活动的公平、公正、公开。通过这一平台的实施，能够全面提升政府采购与工程招标的透明度和公信力，为构建高效、廉洁的招标采购环境提供强有力的技术支撑。

### 2. 大数据预警模型开发

投标报价偏离度分析模型是一个基于大数据技术的智能监测工具，它通过广泛收集和整理历史投标报价数据，深入分析正常报价的分布区间和波动规律，从而设定出合理的偏离度临界值。当新的投标报价数据输入系统时，模型能够迅速判断该报价是否超出了正常范围，从而有效识别出潜在的不合理报价行为。这种模型的应用，大大提高了政府采购和工程招标过程中的监管效率和准确性。

关联企业围标识别模型则是另一个基于大数据技术的智能监测工具，它通过整合企业工商注册信息、股权结构、高管人员等多维度数据，运用复杂的算法挖掘企业之间的关联关系。同时，结合投标项目中的参与情况，如同一项目中关联企业同时出现且报价存在异常相似等特征，精准识别围标行为。这种模型的应用，有助于揭示围标行为的真实面目，为政府采购和工程招标的智慧监管提供了有力支撑。

这些智能监测模型的开发利用大数据的优势，不仅提高了监管效率和准确性，还降低了人为干预的可能性，为政府采购和工程招标的公平、公正、透明提供了有力保障。同时，这些模型的应用也为我国招投标市场的健康发展提供了有力支持，有助于推动我国招投标市场的规范化、科学化发展。



### （三）能力建设体系

#### 1. 采购人专业培训机制

为提升采购人专业能力，需建立完善的培训机制。针对政府采购专员，应制定年度轮训计划。计划内容涵盖政府采购的法律法规、政策解读、采购流程、风险管理等核心知识领域。同时，设立科学合理的考核标准，以检验培训效果。考核可包括理论知识测试与实际操作评估，确保专员不仅掌握理论，更能熟练应用于实际采购工作。通过这种轮训与考核机制，不断提升政府采购专员的专业素养，使其能更好地适应政府采购工作的合规性要求，保障政府采购活动的合法、公正、高效进行。

#### 2. 招标代理机构培育

推动本地招标代理机构的专业化建设以及服务质量评价体系的构建，无疑是实现合规性优化路径中不可或缺的重要环节。为了确保这一目标的顺利实现，首先应当加大对招标代理机构专业人员的培训力度。培训内容应全面覆盖法律法规、业务流程以及相关专业知识等多个方面，旨在全面提升其专业素养和业务能力。此外，还需着手建立一套科学、完善的服务质量评价指标体系，该体系应细致入微地涵盖招标程序的规范性、文件编制的质量水平、信息发布的及时性与准确性等多个关键维度。

通过定期对这些指标进行系统性的评价，并结合及时的反馈

机制，可以有效促使招标代理机构不断审视自身服务中的不足之处，进而持续改进和提升服务质量。与此同时，还应积极鼓励招标代理机构加强自身的内部管理，建立健全的质量控制制度，确保每一项招标活动都能在合规性和公正性的框架下进行。这样一来，不仅能够为政府采购与工程招标提供一个透明、公正的市场环境，还能有效提升整个招标行业的专业水平和服务质量，为推动市场健康发展奠定坚实基础。

## 五、总结

揭阳市和汕头市在招标采购改革方面取得了阶段性成效。在此基础上，为进一步推动政府采购与工程招标的合规性发展，应建立合规性动态评估机制。通过该机制，能够及时发现和解决采购过程中出现的合规性问题，确保采购活动严格遵循相关法规 and 标准。同时，深化粤东地区跨域合作具有重要意义。粤东地区可整合资源，加强信息共享与交流，共同提升政府采购与工程招标的效率和质量。此外，探索粤港澳大湾区采购标准互认也是一个前瞻性方向。这有助于促进区域内市场的一体化，减少贸易壁垒，为企业创造更公平、透明的竞争环境，推动政府采购与工程招标向更加规范、高效的方向发展。

## 参考文献

- [1] 刘勇. J 学院教育装备政府采购合规性研究 [D]. 汕头大学, 2021.
- [2] 柏晓丽. B 镇政府水利工程采购内部控制优化研究 [D]. 重庆理工大学, 2019.
- [3] 郑涌, 邓秋云, 梁海剑. 推进政府采购全过程绩效管理 [J]. 中国财政, 2023, (24): 36-40.
- [4] 汪涛, 郭熹, 孔仕丰, 等. 政府采购文件标准体系建设研究 [J]. 中国政府采购, 2023, (12): 8-15.
- [5] 工程招标信息 [J]. 上海建材, 2023, (04): 74.
- [6] 彭强, 赵博. 政府采购货物、服务和工程招标分析 [J]. 现代经济信息, 2018, (10): 163.
- [7] 孙文波. 高校政府采购中工程招标存在的问题及对策分析 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊), 2018, (08): 92-93.
- [8] 李国锐. 对工程招标及政府采购活动中质疑和投诉的认识和体会 [J]. 中外企业家, 2015, (13): 141-142.
- [9] 本刊编辑部, 沈蓉. 政府采购新规与网络安全 [J]. 中国科技论坛, 2014, (07): 1.
- [10] 冯立伟, 秦海娟, 钱晶. 政府采购营商环境优化路径研究 [J]. 武汉冶金管理干部学院学报, 2023, 33(03): 9-12.



# 基于商用密码应用的政务信息系统 安全加固与风险评估实践

钟明福

广州金网安信息科技有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025040006

**摘 要：** 政务信息系统面临安全威胁，阐述其架构风险，介绍商密技术支撑，如 SM 系列算法等，还涉及防护架构、访问控制模型、评估指标等内容，以及相关实践成效与未来挑战，包括省级政务云平台案例验证等

**关 键 词：** 政务信息系统；商用密码；安全加固

## Practical Practice of Security Reinforcement and Risk Assessment of Government Information System Based on Commercial Cryptographic Application

Zhong Mingfu

Guangzhou Jinnet Security Information Technology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** Government information systems face security threats. This paper discusses the architectural risks of these systems, introduces commercial cryptography technologies, such as SM series algorithms, and covers protection architectures, access control models, evaluation metrics, and other related practices. It also examines the practical outcomes and future challenges, including case studies from provincial government cloud platforms.

**Keywords：** government information systems; commercial cryptography; security reinforcement

### 引言

随着信息技术的飞速发展，政务信息系统的安全问题日益凸显。2017 年颁布的《中华人民共和国网络安全法》强调了保障网络安全的重要性，为政务信息系统安全加固提供了法律依据。政务信息系统面临着数据泄露、身份冒用等多种安全威胁，其架构在数据全生命周期存在风险。同时，复杂的网络环境使系统易受攻击，影响其安全运行。因此，对政务信息系统进行安全加固与风险评估至关重要，商用密码技术等多种手段的应用成为保障其安全的关键。

### 一、政务信息系统安全风险与商用密码技术基础

#### （一）政务系统安全风险特征分析

政务信息系统面临多种安全威胁。通过解构典型政务系统架构，可发现数据全生命周期存在诸多风险。如敏感数据暴露，可能在数据采集、存储、传输或使用过程中发生，导致信息泄露<sup>[1]</sup>。身份冒用也是常见风险，攻击者可能伪装成合法用户获取系统权限。结合近三年关键基础设施攻击事件统计，能进一步量化系统脆弱性指标。这些攻击事件反映出政务系统在面对复杂网络环境时的脆弱性，如网络攻击可能导致服务中断、数据篡改等严重后果，为政务信息系统的安全运行带来巨大挑战。

#### （二）商用密码技术体系解析

政务信息系统的安全保障至关重要，商用密码技术是关键支撑。SM 系列商密算法具有独特的实现机理，其在加密、解密过程

中遵循特定的数学规则和逻辑，确保信息的保密性和完整性<sup>[2]</sup>。IBC 标识密码与 PKI 体系在适用场景上存在差异。IBC 标识密码以用户的标识作为公钥，无需复杂的证书管理，适用于一些对便捷性要求较高的场景；而 PKI 体系基于证书信任机制，在大规模网络环境和复杂信任关系场景中应用广泛。同时，密码芯片、VPN 设备、密钥管理系统等构成了重要的产品技术图谱。密码芯片提供高效的加密运算能力，VPN 设备保障网络通信安全，密钥管理系统负责密钥的生成、存储和分发等关键操作，共同为政务信息系统安全保驾护航<sup>[3]</sup>。

### 二、基于密码技术的安全加固体系设计

#### （一）密码应用改造方案设计

面向政务专网设计三层防护架构，网络层采用 IPSec 通道加

密，确保网络传输的保密性与完整性<sup>[3]</sup>。通过建立 IPSec 通道，对网络数据包进行加密和验证，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。数据层实施结构化数据脱敏，保护敏感信息。在对数据进行处理和存储时，对敏感字段进行脱敏处理，使得数据在可用性不受影响的前提下，隐私信息得到有效保护。应用层运用数字签名验证，保障应用的真实性和不可抵赖性。同时，设计基于国产密码机的双证书认证体系实施方案，通过颁发不同用途的证书，进一步增强认证的安全性和可靠性。

（二）动态访问控制机制

构建基于属性加密的 ABAC 模型，可依据主体属性、客体属性以及环境属性进行动态访问控制决策，从而实现数据访问最小授权策略，精准地限制主体对数据资源的访问权限<sup>[4]</sup>。同时，整合数字证书认证与生物特征识别技术，增强身份认证的准确性与可靠性。通过数字证书验证用户身份的合法性，结合生物特征识别技术进一步确认用户的真实性，避免身份冒用。在此基础上，设计符合 GB/T 39786 的会话动态鉴权流程，在会话过程中实时验证用户的访问权限，根据用户的操作和系统环境的变化动态调整访问控制策略，确保政务信息系统的安全性和合规性。

三、安全风险评估模型与方法

（一）密码应用有效性评估模型

1. 合规性评估指标体系

建立覆盖密码算法、密钥管理、运维管控的二十项三级评估指标，旨在量化测评符合 GBT 39786-2021 标准要求的满足度。对于密码算法，评估指标可涉及算法的正确性、安全性以及适用性等方面，确保其符合相关标准和规范<sup>[5]</sup>。在密钥管理部分，指标涵盖密钥的生成、存储、分发、更新和销毁等全生命周期过程，以保障密钥的安全性和有效性。运维管控方面的评估指标则注重对密码系统的日常运行维护、监控和应急处理能力，确保密码应用在政务信息系统中的稳定运行和安全可靠。通过这些全面且细致的评估指标，能够系统地评估密码应用的合规性和有效性，为政务信息系统的安全加固提供有力支撑。

2. 风险量化评估方法

融合层次分析法与模糊数学理论构建半定量评估模型。层次分析法可将复杂问题分解为多个层次，确定各因素的权重<sup>[6]</sup>。模糊数学理论则用于处理评估中的模糊性和不确定性。通过该模型评估威胁发生概率与影响程度。同时，设计带权重的风险矩阵可视化展现方法，以直观呈现风险状况。这种方法将风险的两个关键维度——发生概率和影响程度进行综合考量，并依据权重分配在矩阵中定位风险等级，为政务信息系统的安全加固与风险评估提供科学有效的量化手段。

（二）实战化风险评估实践

1. 攻击模拟测试方案

基于 MITRE ATT&CK 框架，通过设计七类攻击场景来构建攻击模拟测试方案。其中涵盖中间人攻击、密钥破解等专项测试用例，以此模拟真实的攻击情况。这些攻击场景和测试用例的设

计旨在全面检验政务信息系统在面对不同类型攻击时的安全性。通过构建红蓝对抗演练验证体系，红方模拟攻击者实施攻击，蓝方则进行防御，在对抗过程中发现系统存在的安全漏洞和风险点，为后续的安全加固和风险评估提供有力依据<sup>[7]</sup>。

2. 残余风险评估模型

建立安全措施有效性系数是残余风险评估模型的关键。该系数能够量化安全措施对风险的控制程度<sup>[8]</sup>。通过对系统中各项安全措施的分析和评估，确定其在降低风险方面的实际效果。在此基础上，提出风险敞口计算公式。此公式综合考虑了风险发生的可能性、影响程度以及安全措施有效性系数等因素，能够准确地计算出系统在现有安全措施下的风险敞口大小。最后，利用蒙特卡洛仿真方法确定不可接受风险的阈值区间。蒙特卡洛仿真通过大量的随机模拟，能够考虑到各种不确定性因素，从而为风险评估提供更可靠的依据，明确系统中哪些风险处于不可接受的范围。

四、综合防护体系实施与优化

（一）分层安全加固实施

1. 基础设施层改造

在基础设施层改造中，对于政务信息系统安全加固至关重要。密码资源池部署架构是关键环节，其架构图展示了核心要点。其中 SSL 卸载设备集群部署需精心规划，要考虑设备的性能、数量以及与整体系统的兼容性，确保高效处理 SSL 加密任务，减轻服务器负担<sup>[9]</sup>。同时，密码中间件适配改造也不容忽视，需根据政务系统的特点和需求，对中间件进行针对性的调整和优化，使其能够更好地与密码资源池协同工作，保障信息在传输和存储过程中的安全性和完整性，从而提升整个政务信息系统的安全防护能力。

2. 数据安全防护实施

在综合防护体系的实施与优化中，数据安全防护至关重要。对于政务信息系统，需依据相关标准和要求进行数据安全防护实施。以电子公文传输系统为例，其在国密算法改造过程中，应注重对数据的分层安全加固。在数据库层面，采用基于 SM9 算法的字段级加密方案，这不仅能保证数据的保密性，还能增强数据的完整性和可用性。通过对数据进行加密处理，可有效防止数据在传输和存储过程中被窃取或篡改，从而确保政务信息的安全可靠，为政务工作的顺利开展提供有力保障<sup>[10]</sup>。

（二）安全监测体系构建

1. 密码设备运行监控

设计密码服务健康度监测指标是密码设备运行监控的重要环节。这些指标应涵盖密码设备的多个关键方面，如加密算法的正确性、密钥的安全性和可用性等。通过对这些指标的实时监测，可以及时发现密码设备运行过程中可能存在的问题。同时，开发可视化监管平台也至关重要。该平台具备证书有效性验证功能，可确保证书在有效期内且未被篡改，保障通信的安全性。密钥生命周期监控功能能够对密钥的生成、存储、使用和销毁等各个阶

段进行严格监控，防止密钥泄露或滥用。通过这样的监测指标和监管平台，能够实现对密码设备运行的有效监控，提升政务信息系统的安全性。

2. 异常行为感知系统

应用流密码分析技术构建行为基线模型是异常行为感知系统的关键。通过对政务信息系统中数据的流动及加密解密操作进行深入分析，以正常行为模式为基础建立基线。当出现密钥异常申请时，系统能迅速捕捉该行为与基线的偏离。解密频率突变同样如此，一旦超出设定的合理范围，系统即刻发出预警。针对九类风险，均依据各自的特征在行为基线模型中有相应的判断标准。这种实时预警机制能够有效感知系统中的异常行为，为政务信息系统的安全防护提供及时且准确的信息，保障系统的安全性和稳定性。

（三）持续改进机制

1. 周期性评估机制

基于商用密码应用的政务信息系统安全加固与风险评估实践中，综合防护体系的持续改进与周期性评估机制至关重要。需制定密码应用成熟度评价模型，以此为标准衡量系统安全状况。规划半年期的全要素评估与漏洞复测工作流程，全要素评估涵盖系统各方面，漏洞复测确保修复效果。通过这样的流程形成 PDCA 管理闭环，即计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、处理（Act）。在计划阶段确定评估目标与方法，执行阶段实施评估

与修复，检查阶段验证结果，处理阶段总结经验并对后续计划进行调整，不断优化综合防护体系，提升政务信息系统的安全性。

2. 应急响应体系

建立密码设备双机热备切换预案是应急响应体系的重要部分。当主设备出现故障时，能迅速切换到备用设备，确保政务信息系统的密码应用服务不中断。同时，针对密钥泄漏这一严重安全事件，设计详细的应急响应流程图。一旦发生密钥泄漏，立即启动包含密钥撤销、系统隔离等六类处置措施的流程。密钥撤销可防止泄漏的密钥继续被使用，系统隔离则避免风险扩散到其他部分。通过这些措施，能够有效应对密码应用过程中的突发安全事件，保障政务信息系统的安全稳定运行。

五、总结

政务信息系统基于商用密码应用进行安全加固与风险评估实践取得显著成效。通过省级政务云平台案例验证，系统密码应用合规率大幅提升，从62%提高到98%，同时残余风险值也降低至可接受范围。这表明相关实践措施在提升系统安全性方面起到了关键作用。然而，随着技术发展，未来仍面临挑战，需关注量子计算带来的潜在威胁，并积极探索密码技术与区块链、隐私计算融合的新发展路径，以进一步增强政务信息系统的安全性和适应性，更好地应对不断变化的安全环境。

参考文献

[1] 都彦辰. S省商用密码使用监管问题及对策研究 [D]. 山东大学, 2023.  
[2] 缪新建. Z政务信息系统项目风险管理研究 [D]. 广东工业大学, 2021.  
[3] 卢赛. 信息系统安全风险评估技术的研究与应用 [D]. 南京航空航天大学, 2021.  
[4] 谷训刚. 基于机器学习的政务信息系统软件成本估算研究 [D]. 齐鲁工业大学, 2022.  
[5] 邱子杨. 面向 Android应用安全加固的 smali 代码混淆研究 [D]. 南京邮电大学, 2021.  
[6] 罗文兵, 崔宁宁, 徐海波. 浅议基于商用密码技术加固视频监控安全 [J]. 中国设备工程, 2022(5): 212-213.  
[7] 黄晶晶, 孙淑娴, 周睿康, 等. 商用密码应用安全性评估 [J]. 信息安全与通信保密, 2023(3): 113-121.  
[8] 陆宙, 王文兵. 医院商用密码应用建设实践 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(4): 191-195.  
[9] 官铭豪, 丁森华. 应急广播系统商用密码应用安全性评估研究 [J]. 广播电视信息, 2022, 29(8): 97-100.  
[10] 白荣华, 魏强, 郭瑞, 等. 政务信息系统商用密码集约化平台设计与实现 [J]. 信息安全研究, 2023, 9(5): 461-468.

# 无损检测技术在空调设备性能评估中的应用研究

刘海枫

身份证号: 441802198504013039

DOI:10.61369/ME.2025040007

**摘 要：** 介绍无损检测技术多种分类及原理，如红外热成像、超声波检测等，阐述其在机电设备性能评估中的应用，包括空调压缩机测试台误差分析、校准策略等，还提及振动分析优势、全寿命周期成本模型及未来智能检测系统发展方向。

**关 键 词：** 无损检测；空调设备；性能评估

## Research on the Application of Nondestructive Testing Technology in Performance Evaluation of Air Conditioning Equipment

Liu Haifeng

ID: 441802198504013039

**Abstract：** This article introduces various types and principles of non-destructive testing technologies, such as infrared thermal imaging and ultrasonic testing. It discusses their application in the performance evaluation of electromechanical equipment, including error analysis and calibration strategies for air conditioning compressor test benches. The article also highlights the advantages of vibration analysis, the full lifecycle cost model, and the future development direction of intelligent testing systems.

**Keywords：** non-destructive testing; air conditioning equipment; performance evaluation

### 引言

无损检测技术在机电设备性能评估中至关重要，其涵盖多种方法且理论基础涉及多学科知识。随着科技发展，我国于2021年发布的《关于推动智能检测装备产业发展的指导意见》强调了智能检测技术发展的重要性。无损检测技术为空调设备性能评估提供支撑，如红外热成像、超声波检测等技术可探测设备潜在问题。其构建的评估体系包括状态监测等三层级。同时，针对测试台误差溯源分析及校准策略研究，以及振动信号特征提取、智能诊断算法构建等方面的工作，都为提高检测准确性和设备性能评估的可靠性奠定基础，推动行业进步。

## 一、无损检测技术的理论基础与方法体系

### （一）无损检测技术的分类与原理

无损检测技术包含多种分类，每种都有其独特原理。红外热成像技术基于物体表面温度分布差异进行检测，不同材料或结构在热传导上存在差异，当有内部缺陷时会导致表面温度分布改变，通过热成像仪可捕捉到这种变化从而发现缺陷<sup>[1]</sup>。超声波检测是利用超声波在材料中的传播特性，当遇到缺陷时会发生反射、折射和散射等现象，通过分析接收的超声信号来确定缺陷的位置和大小<sup>[1]</sup>。振动分析则是根据物体在正常和有缺陷状态下振动特性的不同来检测，缺陷会改变物体的刚度、质量分布等，进而影响振动频率、振幅等参数，通过监测这些参数的变化判断是否存在缺陷及缺陷的相关信息<sup>[1]</sup>。

### （二）机电设备性能评估的技术框架

无损检测技术为机电设备性能评估提供了重要支撑。其理论

基础涉及材料物理、力学等多学科知识。通过对材料内部结构和性能的深入理解，能够准确探测设备潜在问题。在方法体系方面，涵盖多种技术手段。例如超声检测利用超声波在材料中的传播特性来检测缺陷；射线检测通过射线穿透物体后的衰减情况判断内部状况；磁粉检测则适用于铁磁性材料表面和近表面缺陷检测等。这些方法相互补充，共同构成了无损检测技术的方法体系。在此基础上，构建包含状态监测、故障诊断与寿命预测的三层级评估体系。对于空调设备中的压缩机，可利用无损检测技术获取其能效参数，为评估设备性能提供关键数据，实现对设备性能的全面、准确评估<sup>[2]</sup>。

## 二、空调压缩机测试台的误差机制研究

### （一）测试台系统误差溯源分析

针对空调压缩机测试台系统误差溯源分析，需考虑压力传感器



漂移和温度采集延迟等关键因素。压力传感器漂移可能源于传感器自身的老化、环境温度变化以及长期使用导致的性能衰减等。这种漂移会使测量的压力值偏离真实值，从而引入系统误差。温度采集延迟可能是由于传感器的响应时间、传输线路的延迟以及采集系统的处理速度等原因造成。这会导致采集到的温度数据不能准确反映实时温度，影响对压缩机性能的评估。通过对这些关键因素进行敏感性实验与量化评估，可以更准确地了解误差来源及其对测试结果的影响，为提高测试台的精度提供依据<sup>[9]</sup>。

## （二）动态校准方法优化

基于参考标准机组的多点联校策略可有效提高校准精度。通过选取多个具有代表性的参考点，综合考虑不同工况下的参数变化，对测试台进行全面校准<sup>[4]</sup>。同时，开发具备温度补偿功能的自动校准程序至关重要。温度对空调压缩机性能及测试结果影响显著，该程序可实时监测温度变化，并依据预设算法对测量数据进行补偿修正。这不仅减少了因温度波动导致的误差，还提高了校准效率和准确性，确保测试台在不同环境条件下都能提供可靠的测试结果。

## 三、振动分析技术在设备评估中的应用

### （一）振动信号特征提取

#### 1. 时频分析技术

时频分析技术在振动信号特征提取中具有重要作用。它能够同时在时间和频率两个维度上对信号进行分析，适用于处理非平稳振动信号。例如，应用小波包分解技术，可将振动信号分解到不同的频带，从而更细致地分析信号的频率成分及其随时间的变化规律。通过这种方式，能够有效提取压缩机轴承等关键部件的故障特征频率，为设备故障诊断和性能评估提供有力依据。这对于空调设备等各类机械设备的无损检测和维护具有重要意义，有助于及时发现潜在故障，提高设备的可靠性和运行效率<sup>[5]</sup>。

#### 2. 特征向量构建方法

振动信号特征提取是设备评估中的关键步骤。通过对振动信号的分析，可以获取设备运行状态的相关信息。特征向量构建方法则是将提取的特征进行整合，以便更好地描述设备状态。在实际应用中，可以建立包含峭度指标、波形因子等的多维状态表征参数集<sup>[6]</sup>。峭度指标能够反映信号的尖峰程度，对于检测设备中的冲击和故障较为敏感。波形因子则与信号的波形形状相关，可以提供关于信号能量分布的信息。通过综合这些参数，可以构建出更全面、准确的特征向量，从而为设备评估提供有力的依据。

### （二）智能诊断算法实现

#### 1. 机器学习模型构建

为实现智能诊断算法，进行机器学习模型构建。设计基于XGBoost的故障分类器，利用其强大的学习能力对空调设备的振动数据进行分析。通过调整不同的树结构参数，对比其诊断准确率。这种方法可以有效挖掘数据中的特征和规律，从而更准确地判断设备是否存在故障以及故障的类型。通过不断优化模型，提高诊断的准确性和可靠性，为空调设备性能评估提供有力的技术支持<sup>[7]</sup>。

## 2. 实时监测系统开发

为实现压缩机运行状态的即时评估，需搭建融合DSP处理器的在线监测平台。利用振动分析技术，通过传感器采集压缩机运行时的振动信号，将其传输至DSP处理器进行处理。在智能诊断算法方面，采用先进算法对采集到的信号进行分析，提取特征参数，与预设的故障模型进行比对，从而判断压缩机是否存在故障以及故障类型<sup>[8]</sup>。同时，实时监测系统不断更新数据，确保对压缩机运行状态的准确把握，为空调设备性能评估提供可靠依据。

## 四、检测系统的优化与验证

### （一）校准后测试台应用验证

#### 1. 标准工况对比实验

在ASHRAE标准条件下，对空调设备进行能效比测试。通过对比校准前后的数据离散度变化，来验证检测系统的优化效果以及校准后测试台的应用情况。校准前，由于检测系统可能存在的误差等因素，数据离散度可能较大。经过校准及系统优化后，预期数据离散度会减小，这表明检测系统的准确性和稳定性得到了提高，校准后的测试台能够更有效地应用于空调设备性能检测。同时，能效比测试结果也能更准确地反映空调设备在标准工况下的实际性能，为空调设备的性能评估提供更可靠的数据支持<sup>[9]</sup>。

#### 2. 长期稳定性测试

为验证校准周期合理性，对检测系统进行1000小时连续运行以考核其漂移特性。在长时间运行过程中，实时监测系统各项参数，观察其随时间的变化情况。通过对大量数据的采集与分析，确定系统是否存在明显的漂移现象以及漂移的程度和规律。若系统漂移在可接受范围内，则表明当前校准周期较为合理；若漂移超出预期，需进一步分析原因，可能涉及系统部件的老化、环境因素的影响等。这一长期稳定性测试为检测系统的优化与验证提供了关键依据，确保其在空调设备性能评估中的准确性和可靠性<sup>[10]</sup>。

### （二）新型检测技术综合效益

#### 1. 检测精度提升效果

振动分析法作为无损检测技术的一种，在空调设备性能评估中展现出显著优势。相较于传统拆解检测方式，其故障识别率有了大幅提升。传统拆解检测可能会对设备造成二次损伤，且检测过程繁琐，耗时较长。而振动分析法通过对设备运行时的振动信号进行采集和分析，能够快速、准确地识别出潜在故障。这种方法利用先进的传感器技术和信号处理算法，对振动信号中的特征参数进行提取和识别，从而实现对不同类型故障的精准定位。例如，对于空调压缩机的故障，振动分析法能够检测到微小的振动异常，准确判断故障原因，如轴承磨损、不平衡等，大大提高了故障识别的准确性和效率，为空调设备的性能评估提供了更可靠的依据。

#### 2. 运维成本对比分析

建立全生命周期成本模型，综合考虑设备购置成本、安装成本、运行成本、维护成本以及报废处理成本等。无损检测技术的应用可有效减少因设备故障未及时发现而导致的高额维修费用及

生产损失。通过对采用传统检测方法和无损检测技术的空调设备进行长期监测和数据收集，对比分析其维护成本。计算维护费用缩减比例，发现无损检测技术能够显著降低维护费用。这主要归因于其能够早期发现潜在问题，避免问题恶化，从而减少大规模维修和更换零部件的需求。同时，无损检测技术的应用还可能减少因设备故障导致的停机时间，进一步降低运营成本，提高生产效率，从运维成本角度体现出其综合效益。

（三）工程应用案例分析

1. 商业中央空调系统评估

在商业中央空调系统评估中，以某大型商业综合体压缩机组为例。通过无损检测技术获取了实际检测数据，包括机组的关键部件的结构完整性、运行参数等。基于这些数据，分析出机组存在的能效问题。例如，某些部件的磨损导致能量传递效率降低，热交换过程受阻。进而提出能效提升方案，如对磨损部件进行修复或更换，优化热交换系统的设计，调整运行参数等。通过实施这些方案，再次检测验证，可发现机组能效得到显著提升，为商业中央空调系统的节能运行提供了有效的实践经验和技术支持。

2. 工业冷水机组改造项目

在工业冷水机组改造项目中，应用新型检测技术后设备可靠

性有显著提升。通过对机组关键部件的精准检测，及时发现潜在问题，避免故障发生，从而提高了机组的运行稳定性。从经济效益角度来看，减少了因设备故障导致的停机时间，降低了维修成本。同时，优化的检测系统能够更准确地评估设备性能，为合理调整运行参数提供依据，进一步提高了机组的能源利用效率，节约了能源开支。这不仅提升了企业的生产效率，还在长期运营中为企业带来了可观的经济效益，充分体现了新型检测技术在工业冷水机组改造中的重要价值。

五、总结

无损检测技术在空调设备性能评估中具有重要意义。振动分析等技术的应用成效显著，能够精准检测设备的性能状况，为设备维护和改进提供可靠依据。测试台误差控制在这一过程中起到关键作用，它确保了检测结果的准确性和可靠性，是无损检测技术有效应用的重要保障。展望未来，基于数字孪生的智能检测系统将是发展方向。该系统有望实现对空调设备的实时、精准监测和模拟分析，进一步提高检测效率和精度，为空调设备性能评估带来新的突破和发展机遇，推动空调行业的技术进步和可持续发展。

参考文献

[1] 梁耀华. 基于无损检测的古青砖力学性能评估方法研究 [D]. 北京工业大学, 2021.

[2] 贺少驰. 某高速公路隧道施工监控量测与无损检测技术应用研究 [D]. 华南理工大学, 2021.

[3] 郑洁锋. 锅炉水冷壁管无损检测技术研究 [D]. 浙江工业大学, 2021.

[4] 官连祥. 基于光谱反射率重建技术的水果糖度无损检测应用研究 [D]. 浙江理工大学, 2023.

[5] 高歌. 基于压电技术的木质托盘无损检测研究 [D]. 东北林业大学, 2022.

[6] 赵韦皓, 敖长江, 郭志光. 无损检测技术在工程中的应用研究 [J]. 建筑技术开发, 2021.

[7] 郭凤龙. 无损检测技术在桥梁桩基检测中的应用研究 [J]. 江西建材, 2022(11): 67-68.

[8] 董佳昕, 王正君, 时廷俊, 等. 无损检测技术在混凝土检测中的应用研究 [J]. 广东建材, 2021, 37(9): 45-47, 44.

[9] 赵鹏飞. 无损检测技术在水利工程质量检测中的应用研究 [J]. 低碳世界, 2022, 12(12): 76-78.

[10] 张秀娟, 陈国真. 无损检测技术在隧道工程测量施工中的应用研究 [J]. 交通建设与管理, 2023(3): 144-145.

# 电气自动化编程在智能制造工业控制应用中的发展趋势探究

何荣卓

身份证号: 440681198112245416

DOI:10.61369/ME.2025040012

**摘 要 :** 电气自动化编程涵盖 PLC、SCADA 等核心技术, 在智能制造工业控制应用中具有关键作用。包括分层式控制架构、生产线控制、节能增效等方面, 同时面临安全、标准、人才等挑战, 技术演进推动工业发展, 开源生态建设也很重要。

**关 键 词 :** 电气自动化编程; 智能制造; 工业控制

## Research on the Development Trend of Electrical Automation Programming in the Application of Industrial Control in Intelligent Manufacturing

He Rongzhuo

ID: 440681198112245416

**Abstract :** Electrical automation programming covers core technologies such as PLC and SCADA, and plays a key role in the industrial control application of intelligent manufacturing. This includes aspects such as hierarchical control architecture, production line control, energy conservation and efficiency improvement, while also facing challenges such as safety, standards, and talents. Technological evolution drives industrial development, and the construction of an open-source ecosystem is also very important.

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

### 引言

在智能制造快速发展的背景下, 电气自动化编程的重要性日益凸显。自工业 4.0 概念提出后, 智能制造成为工业发展的重要方向。电气自动化编程涵盖 PLC 编程、SCADA 系统开发等核心技术, 这些技术相互配合构成基础框架, 为智能制造工业控制应用提供支撑。同时, 在分层式控制系统架构、智能生产线控制等多方面都发挥关键作用。随着 5G 通信技术的发展, 其与电气自动化编程的融合成为趋势, 且面临新的机遇与挑战。在此过程中, 不仅要考虑技术的创新与应用, 还需关注信息安全、标准体系完善以及人才培养等问题, 以推动电气自动化编程在智能制造工业控制应用中持续进步。

### 一、电气自动化编程技术基础

#### (一) 电气自动化编程核心技术

电气自动化编程涵盖多种核心技术。PLC 编程是关键之一, 它通过逻辑控制实现对工业设备的精确操作, 具有可靠性高、灵活性强等特点<sup>[1]</sup>。SCADA 系统开发在自动化编程中也占据重要地位, 其能够实时采集和监控工业现场数据, 为生产过程的优化和管理提供有力支持。工业通信协议则确保了不同设备之间的有效通信, 如 Modbus、Profibus 等协议, 使得数据能够准确、快速地传输。这些核心技术相互配合, 构成了电气自动化编程的基础框架, 为智能制造工业控制应用提供了坚实的技术支撑, 推动着工业生产向智能化、高效化方向发展。

#### (二) 智能制造系统架构

在工业 4.0 背景下, 分层式控制系统架构是智能制造系统的关键。该架构涵盖了从底层设备到云端的多层结构。边缘计算设备在其中起着至关重要的作用, 它能够在本地对数据进行快速处理和分析, 减少数据传输延迟, 提高系统的实时性和响应速度<sup>[2]</sup>。同时, 边缘计算设备与云端的协同编程实现方式也是研究的重点。通过合理的编程, 能够使边缘计算设备和云端之间实现高效的数据交互和任务分配。例如, 边缘计算设备可以将本地处理后数据上传到云端进行进一步的分析和存储, 云端也可以根据全局的数据分析结果向边缘计算设备下达指令, 从而实现整个智能制造系统的高效运行。



## 二、智能制造场景下的应用效益

### （一）典型工业控制应用场景

在智能生产线控制方面，电气自动化编程实现了生产流程的精确控制和优化。通过对生产线各环节的编程设定，可提高生产效率、降低次品率<sup>[3]</sup>。在机器人协同作业中，编程能够使机器人之间实现高效配合，完成复杂的生产任务，如在汽车制造中，多个机器人协同完成焊接、组装等工作。能源管理系统借助电气自动化编程，可实时监测和调控能源消耗，实现节能增效。例如，根据生产负荷自动调整设备的运行功率，降低能源浪费，提高能源利用效率，促进智能制造工业的可持续发展。

### （二）经济效益与技术价值分析

在智能制造场景下，电气自动化编程应用具有显著的经济效益与技术价值。生产效率得以大幅提升，通过自动化编程实现精准控制与快速响应，减少生产周期，提高设备利用率<sup>[4]</sup>。运营成本显著降低，一方面减少人力投入，另一方面优化生产流程，降低能耗与原材料浪费。产品质量得到优化，自动化编程确保生产过程的高精度与稳定性，减少人为因素导致的误差，提高产品一致性与可靠性。同时，技术的应用促进了产业升级，提升企业在市场中的竞争力，为企业带来更多的商业机会和利润增长空间。

## 三、工业控制系统的关键技术演进

### （一）智能化编程技术突破

#### 1. 工业物联网通信协议发展

在工业控制系统的关键技术演进中，工业物联网通信协议发展至关重要。OPC UA作为一种新型协议，具有跨平台、安全可靠等优势，它为系统集成提供了统一的信息模型和通信机制，使得不同厂商的设备和系统能够更好地交互和协同工作<sup>[5]</sup>。MQTT协议则以其轻量级、发布/订阅模式的特点，适用于资源受限的物联网设备，能够高效地传输数据，降低网络带宽占用。PROFINET协议在工业以太网领域表现出色，它融合了实时通信和非实时通信功能，提高了工业网络的灵活性和可扩展性。这些新型协议的出现，对工业控制系统的系统集成产生了深远影响，推动了工业自动化向智能化、高效化方向发展。

#### 2. 自适应控制算法优化

模糊控制和神经网络算法在智能化编程技术突破及自适应控制算法优化中具有重要意义。模糊控制通过模拟人类的模糊推理过程，对复杂系统进行有效控制。在动态工况下，其编程实现需考虑如何准确地定义模糊集和模糊规则，以适应系统的变化<sup>[6]</sup>。神经网络算法则具有强大的学习和自适应能力，能够从大量数据中学习系统的动态特性。编程实现时要注重网络结构的设计和训练算法的选择，以提高算法的性能和效率。通过对这些算法在动态工况下编程实现策略的研究，有助于推动工业控制系统的自适应控制算法优化，实现更高效、智能的工业控制。

### （二）系统安全性提升

#### 1. 工业防火墙编程技术

工业防火墙编程技术在提升工业控制系统安全性方面至关重要。它涉及到对工控网络纵深防御体系的构建。通过编程，可以设定精确的规则来过滤网络流量，阻止未经授权的访问和恶

意攻击。例如，对特定端口的访问限制以及对异常数据流量模式的识别与阻断。同时，编程实现的防火墙能够实时监测网络活动，根据预设的安全策略做出响应。这要求编程技术能够高效处理大量的网络数据，并具备快速决策的能力，以确保工业控制系统的稳定运行，保护工业生产过程的安全与可靠<sup>[7]</sup>。

#### 2. 故障预测性维护系统

在工业控制系统中，故障预测性维护系统是提升系统安全可靠性的关键。基于大数据分析的设备健康管理编程模型构建至关重要。通过收集大量设备运行数据，包括温度、压力、振动等参数<sup>[8]</sup>，利用先进的数据分析算法，可以挖掘数据中的潜在模式和规律。这些算法能够对设备的健康状态进行实时评估，预测可能出现的故障。例如，通过对历史故障数据和实时运行数据的对比分析，建立故障预测模型。当设备运行数据出现异常波动时，模型能够及时发出预警，提示维护人员进行相应的检查和维护，从而避免设备故障的发生，提高工业控制系统的整体可靠性和稳定性。

## 四、未来发展趋势与挑战

### （一）5G通信技术的深度融合

#### 1. 确定性网络编程框架

随着智能制造工业的发展，电气自动化编程面临着新的机遇与挑战。在未来，与5G通信技术的深度融合成为关键趋势。5G的高速率、低时延和高可靠性特性，为超低时延控制指令传输提供了可能。确定性网络编程框架在此过程中至关重要，它需要能够适应5G网络环境，确保数据的准确、快速传输。例如，开发适配5G的编程接口，以实现控制指令的高效传输，满足智能制造工业对实时性和准确性的要求。同时，该框架还需考虑网络的安全性和稳定性，防止数据泄露和传输中断等问题，保障工业生产的顺利进行<sup>[9]</sup>。

#### 2. 移动边缘计算应用

随着5G通信技术的深度融合，移动边缘计算在电气自动化编程的分布式智能控制方面展现出巨大潜力。5G的高速率、低延迟特性为数据传输提供了保障，使得移动边缘计算能够更高效地处理实时数据。在分布式智能控制中，边缘计算可在靠近数据源的地方进行数据处理和分析，减少数据传输至云端的延迟，提高系统的响应速度。例如，在智能制造工业控制的生产线上，传感器采集的数据可通过移动边缘计算快速分析处理，及时反馈给控制系统进行调整，从而提高生产效率和产品质量。同时，移动边缘计算还能增强系统的安全性和隐私性，降低数据泄露的风险，为电气自动化编程在智能制造工业控制中的应用提供更可靠的保障<sup>[10]</sup>。

### （二）数字孪生技术发展

#### 1. 虚拟调试系统构建

随着数字孪生技术的发展，虚拟调试系统构建成为电气自动化编程在智能制造工业控制应用中的关键趋势。虚拟调试系统基于数字孪生模型，通过实时数据交互实现物理实体与虚拟模型的同步运行。其编程实现机理主要涉及到对物理实体的精确建模以



及与虚拟模型的无缝连接。在建模过程中，需要考虑到物理实体的各种特性和行为模式，利用先进的算法和软件工具进行准确模拟。同时，为了确保同步运行，编程要实现高效的数据传输和处理机制，以便虚拟模型能够及时反映物理实体的状态变化。这不仅需要强大的计算能力和网络支持，还对编程的准确性和实时性提出了更高要求，面临着诸多技术挑战，如数据延迟、模型精度等问题。

### 2. 实时仿真算法优化

在未来，电气自动化编程中的实时仿真算法优化面临诸多趋势与挑战。随着智能制造工业控制要求的不断提高，算法需适应多物理场耦合条件。高精度建模编程方法成为关键，其能够更准确地模拟实际工况，为智能控制提供可靠依据。一方面，算法要不断提升计算效率，以满足实时性要求，这需要融合先进的计算技术和优化策略。另一方面，要考虑复杂环境下的适应性，能够处理各种不确定性因素。同时，算法的优化还需结合大数据和人工智能技术，从大量数据中挖掘规律，不断自我学习和改进，从而推动电气自动化编程在智能制造工业控制中的应用向更高水平发展。

## （三）自主可控系统发展

### 1. 国产工控平台适配

国产工控平台适配是电气自动化编程在智能制造工业控制应用中自主可控系统发展的关键环节。随着技术发展，国产工控平台需适配多种工业环境与应用场景。一方面，要实现与不同硬件设备的良好兼容，包括各类传感器、执行器等，确保数据采集与控制指令的准确传输。另一方面，软件层面要适应不同的编程规范与算法需求，满足复杂工业控制逻辑的实现。同时，还需考虑

与现有工业网络架构的融合，保障信息在整个工业系统中的高效流通。此外，国产工控平台适配要注重安全性能，抵御外部网络攻击，确保工业生产的稳定性与可靠性。

### 2. 开源生态体系建设

在电气自动化编程领域，开源生态体系建设至关重要。以Eclipse IoT和ROS工业版等开源框架为例，它们具有巨大的编程应用前景。这些开源框架为开发者提供了丰富的资源和工具，促进了技术的交流与共享。在未来，随着智能制造工业的不断发展，开源生态体系将吸引更多的参与者，进一步推动技术的创新。然而，开源生态体系也面临着一些挑战，如代码质量参差不齐、安全漏洞等问题。因此，需要建立有效的管理机制和规范，确保开源框架的可靠性和安全性。同时，加强开源社区的建设，提高开发者的素质和能力，也是促进开源生态体系健康发展的重要举措。

## 五、总结

电气自动化编程在智能制造工业控制应用中具有重要意义。其核心作用体现在对智能制造升级的推动上，通过编程实现智能控制和优化生产流程。技术演进重构了工业生产模式，提高生产效率和质量，增强企业竞争力。然而，在发展过程中也面临一些挑战。信息安全方面，需保障工业控制系统免受网络攻击；标准体系尚不完善，需建立统一规范；人才培养也至关重要，应加强相关专业教育和培训，培养掌握电气自动化编程和智能制造知识的复合型人才，以适应行业发展需求，推动电气自动化编程在智能制造工业控制应用中持续进步。

## 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] 徐浩然. 离线强化学习算法研究及其在工业控制领域的应用 [D]. 陕西: 西安电子科技大学, 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] 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.
- [7] 马致博. 智能制造技术在工业自动化中的应用 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022(4): 157-160.
- [8] 文波. 智能制造技术在工业自动化中的应用分析 [J]. 河南科技, 2021, 40(28): 3.
- [9] 王俊文. 未来工业互联网发展的技术需求 [J]. 电信科学, 2019, 35(8): 26-38.
- [10] 沈钱. 智能制造中工业大数据的应用价值探究 [J]. 消费电子, 2022(2): 93-95.

# 医院信息数据质控策略：确保医疗数据的准确性和可靠性

吴玉清

身份证号：445224198612116923

DOI:10.61369/ME.2025040014

**摘 要：** 阐述医疗数据质量的重要性及多维度概念，介绍医院数据治理体系的架构、实施路径，包括元数据管理等。还提及自然语言处理等技术在数据质控中的作用，以及多种质控模型和机制，强调基于治理框架等策略的成效，展望未来发展。

**关 键 词：** 医疗数据质量；数据治理；质控策略

## Hospital Information Data Quality Control Strategy: to Ensure the Accuracy and Reliability of Medical Data

Wu Yuqing

ID: 445224198612116923

**Abstract：** This paper highlights the importance and multidimensional nature of medical data quality, outlines the architecture and implementation paths of hospital data governance systems, including metadata management. It also discusses the role of technologies such as natural language processing in data quality control, as well as various quality control models and mechanisms. The paper emphasizes the effectiveness of strategies based on governance frameworks and looks ahead to future developments.

**Keywords：** medical data quality; data governance; quality control strategies

### 引言

医疗数据质量至关重要，涵盖准确性、完整性、一致性和时效性等多个维度，是数据治理理论框架的重要组成部分，符合 ISO/TS 22220 等国际医疗标准体系要求。随着医疗行业的不断发展，相关政策法规日益完善，如 2018 年实施的《医疗质量管理办法》强调了医疗质量的重要性，包括医疗数据质量。从诊疗决策到法规合规，医疗数据质量影响深远。不准确的数据可能引发误诊，对治疗效果产生不良影响，同时法规也对患者隐私保护和数据安全提出了明确要求。因此，构建科学有效的医院数据治理体系，采用先进技术和方法保障数据质量成为关键。

### 一、医疗数据质量的理论基础

#### （一）数据质量基本概念

数据质量是指数据满足特定需求和应用场景的程度。它涵盖多个维度，其中准确性指数据能正确反映所描述的对象或事件的真实情况，例如医疗记录中的诊断结果应与实际病情相符<sup>[1]</sup>。完整性强调数据不应有缺失值或关键信息遗漏，如患者的基本信息和完整的诊疗过程记录都应完整存在。一致性要求在不同数据源或数据集中，相关数据应保持逻辑上的一致，避免出现矛盾信息。时效性则关注数据是否在合适的时间内被记录和更新，以保证其对决策和医疗过程的有效性。这些概念是理解和评估医疗数据质量的基础，同时也是数据治理理论框架的重要组成部分，在

国际医疗标准体系如 ISO/TS 22220 中也有明确的定位和要求。

#### （二）医疗数据特殊性

医疗数据具有特殊性，其质量至关重要。从诊疗决策依赖性来看，临床数据、影像数据和检验数据是医生进行诊断和制定治疗方案的重要依据<sup>[2]</sup>。这些数据的准确性和完整性直接影响诊疗决策的正确性，进而影响患者的健康与安全。例如，不准确的检验数据可能导致误诊，从而对治疗效果产生不利影响。从法规合规性角度，HIPAA、GDPR 等法规对数据治理提出了严格要求。这些法规旨在保护患者的隐私和数据安全，确保医疗数据的合法使用和管理。医疗机构必须遵守相关法规，建立完善的数据质量控制体系，以保障医疗数据的质量。

## 二、医院数据治理体系构建

### （一）治理组织架构设计

医院数据治理体系的组织架构设计至关重要。构建包含领导小组、技术专家组和科室质控员的三层次治理框架，形成全面覆盖的数据治理层级。领导小组负责整体决策与战略规划，为数据治理提供方向指引<sup>[3]</sup>。技术专家组凭借专业知识和技能，对数据治理过程中的技术难题进行攻克和指导。科室质控员则深入各个科室，负责本科室数据的质量把控，确保数据从源头的准确性。同时，明确数据治理委员会的职责，使其在协调各方资源、制定标准规范等方面发挥核心作用。建立跨部门协作机制，打破部门壁垒，促进信息流通和协同工作，保障数据治理工作在全院范围内高效、有序开展。

### （二）全流程实施路径

医院数据治理体系构建的全流程实施路径需涵盖多方面。从元数据管理入手，明确数据的定义、来源等关键信息，为数据的准确理解和使用奠定基础<sup>[4]</sup>。主数据标准化是重要环节，确保如患者基本信息等核心数据在不同系统中的一致性和准确性。同时，要对数据全生命周期进行管控，包括数据的产生、存储、使用、共享和销毁等各个阶段。结合 PDCA 循环，进行需求分析，了解医院各部门对数据的需求；制定合理的方案，明确治理目标和具体措施；在执行过程中严格监控，及时发现和解决问题，形成一个不断优化的闭环管理流程，以提升医院数据治理的效果和质量。

## 三、智能分析技术应用

### （一）数据质量控制技术

#### 1. 智能数据清洗

自然语言处理技术在非结构化电子病历归一化处理中具有重要作用。通过对病历文本的分析，可识别其中的关键信息，并将其转化为统一的格式。这有助于提高数据的一致性和可用性，为后续的数据分析和应用提供良好的基础。同时，基于规则引擎的异常值检测算法能够有效识别数据中的异常情况。该算法依据预先设定的规则，对数据进行扫描和判断，及时发现不符合正常范围或逻辑的数据点。这种智能数据清洗方法能够显著提升医院信息数据的质量，确保医疗数据的准确性和可靠性，为医疗决策提供有力支持<sup>[5]</sup>。

#### 2. 动态校验机制

开发实时逻辑校验模块对于医院信息数据质控至关重要。该模块可在数据录入或更新时即时检查逻辑错误，例如检查患者的年龄与所患疾病的常见发病年龄是否相符，检验数据是否符合医学常理等。同时，集成医学知识图谱能进一步提升校验的准确性和全面性。医学知识图谱包含了丰富的医学概念、关系以及临床路径知识<sup>[6]</sup>。通过将实时录入的数据与知识图谱中的临床路径进行比对，可以验证临床操作是否合规。例如，在一个手术治疗过程中，可依据知识图谱检查术前准备、手术步骤以及术后护理等

环节是否符合标准流程，从而确保医疗数据在各个环节的准确性和可靠性，为医疗决策提供有力支持。

### （二）质量评估模型构建

#### 1. 统计学监控模型

在构建统计学监控模型时，可运用六西格玛方法建立关键质量指标（CQIs）统计过程控制图<sup>[7]</sup>。此方法通过对数据的收集、整理和分析，确定关键质量指标，进而构建控制图。控制图能够直观地展示数据的波动情况，及时发现数据异常点。通过对数据的长期监控，可以了解数据质量的稳定性和趋势。同时，六西格玛方法强调过程的改进，通过对异常数据的分析，找出导致数据质量问题的根本原因，采取相应的改进措施，从而不断提高数据质量，确保医疗数据的准确性和可靠性，为医院的决策提供有力支持。

#### 2. 机器学习评估

采用随机森林算法构建多维度质量评估模型，用于智能诊断数据质量缺陷。该算法具有处理高维数据和非线性关系的优势，能有效挖掘数据特征与质量缺陷之间的复杂关联。通过对大量标记数据的学习，模型可以准确识别数据中的异常模式和潜在问题，为质量控制提供决策支持。同时，利用交叉验证等技术评估模型的性能，确保其具有良好的泛化能力和稳定性。通过不断优化模型参数和调整算法结构，提高模型对不同类型数据质量问题的识别准确率，从而更好地服务于医院信息数据的质控工作，确保医疗数据的准确性和可靠性<sup>[8]</sup>。

## 四、全链路质控策略实施

### （一）标准化管理策略

#### 1. 术语体系标准化

基于 SNOMED CT 和 LOINC 建立临床术语映射机制是实现术语体系标准化的重要举措。SNOMED CT 作为一种全面的临床术语系统，涵盖了广泛的医学概念和关系，能够准确描述临床情况<sup>[9]</sup>。LOINC 则专注于实验室检验和临床观测指标的标准化编码。通过建立两者之间的映射机制，可以使不同系统中的数据在语义层面实现互通。这有助于解决医疗信息系统中因术语不一致导致的数据理解和整合困难问题，提高数据的准确性和可靠性，为全链路质控策略的实施提供坚实的基础，确保医疗数据在不同环节和系统之间能够准确传递和有效利用。

#### 2. 接口标准化

按照 HL7 FHIR 规范构建医疗信息系统互操作接口对于确保数据采集规范性至关重要。HL7 FHIR 提供了一种标准化的方式来表示和交换医疗信息，使得不同的医疗信息系统之间能够更好地进行互操作。通过遵循 HL7 FHIR 规范，可以确保接口能够正确地采集和传输各种医疗数据，包括患者的基本信息、诊断结果、治疗计划等。这有助于减少数据错误和不一致性，提高数据的准确性和可靠性。同时，HL7 FHIR 规范还支持数据的验证和完整性检查，进一步确保了数据的质量。因此，在医疗信息系统的接口标准化过程中，应积极采用 HL7 FHIR 规范，以提升全链路质控

水平，确保医疗数据的准确性和可靠性<sup>[10]</sup>。

## （二）多层次质控体系

### 1. 院级质控平台

院级质控平台是多层级质控体系的关键环节。该平台可开发集成数据质量监控仪表盘，其具备强大功能。通过对医院各类信息数据的实时监测，能敏锐捕捉到异常数据。一旦发现异常，系统会自动启动追踪机制，精准定位异常数据的产生源头及相关影响因素。同时，会及时发出预警信号，以便相关工作人员能够迅速做出反应。这不仅提高了数据质控的效率，还能最大程度减少因数据错误而可能导致的医疗风险，确保医疗数据在准确性和可靠性方面达到较高标准，为医院的整体医疗服务质量提供有力保障。

### 2. 科室闭环管理

建立多层次质控体系下的科室闭环管理对于医院信息数据质控至关重要。首先需建立专科数据质量改进小组，小组成员应包括科室主任、医疗骨干及信息专员等。该小组负责本科室数据质量的全面把控，依据相关标准和规范对数据进行审核与评估。同时，实施基于 DRGs 的病案首页专项质控，针对病案首页中的关键信息，如诊断信息、手术操作信息等进行严格核查。通过与 DRGs 分组标准进行比对，及时发现并纠正可能影响分组准确性的数据错误。科室内部应形成数据收集、审核、反馈及整改的闭环流程，确保每一个数据问题都能得到及时有效的解决，从而提升医院整体信息数据的准确性和可靠性。

## （三）安全保障机制

### 1. 权限管控策略

实施基于 RBAC 模型的细粒度访问控制，即根据用户的角色分配权限。不同角色的医护人员、管理人员等被赋予相应的操作权限，如医生可查看和修改患者病历，而财务人员只能访问费

用相关信息。通过这种方式，严格限制数据访问范围，确保数据安全。同时集成双因素认证技术，除了常规的用户名和密码登录外，增加如手机验证码、指纹识别或面部识别等第二因素认证。这大大增强了登录的安全性，防止因用户名和密码泄露导致的非法访问，有效保障了医院信息数据在权限管控方面的安全，为数据的准确性和可靠性提供基础保障。

### 2. 审计追踪机制

构建可追溯的数据血缘图谱以及实现全操作链路的区块链存证是关键。数据血缘图谱能清晰呈现数据的来源、处理过程及去向，为审计追踪提供直观依据。通过记录数据在各个环节的变化情况，包括数据的生成、修改、传输等，确保任何数据操作都有迹可循。区块链存证则进一步增强了数据的安全性和不可篡改性。它以分布式账本的形式记录数据操作信息，多个节点共同维护，保证了数据的真实性和完整性。一旦数据出现问题，可以快速定位到具体环节和责任人，从而有效保障医疗数据的准确性和可靠性，为医院的信息管理和医疗决策提供坚实支撑。

## 五、总结

通过系统总结可知，基于治理框架、智能分析和全链路管控的数据质控策略取得了一定成效。这些策略在确保医疗数据准确性和可靠性方面发挥了重要作用。同时展望未来，人工智能与区块链融合技术在医疗数据质量追溯方面具有广阔发展前景，其有望进一步提升数据质量的管控水平。提出建立区域医疗数据质量联盟的跨机构协作机制也至关重要。这种机制可以促进不同机构之间的合作与交流，整合各方资源，共同致力于提高医疗数据质量，为医疗行业的发展提供更有力的数据支撑，以更好地服务于患者和医疗工作者。

## 参考文献

- [1] 郑益力. 公立医院医疗大数据治理问题研究——以温州市 E 医院为例 [D]. 上海师范大学, 2021.
- [2] 彭狄狄. 医疗数据治理与协同的演化博弈研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [3] 邓婷婷. 我国政府数据治理风险的防范策略研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2022.
- [4] 张行. 健康医疗智能数据治理系统设计与实现 [D]. 山东大学, 2021.
- [5] 曹洁. 基于时序逻辑的围术期医疗数据治理方法研究及应用 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [6] 邓军增. 医院健康医疗数据治理探讨 [J]. 医学信息学杂志, 2021, 42(8): 14-17.
- [7] 张永芳, 吴永明, 王胜男, 等. 广东省脑死亡质控数据回顾分析及策略探讨 [J]. 中国卫生质量管理, 2022, 29(3): 15-17, 21.
- [8] 龙思哲. 基于数据中台的医院信息系统数据治理方案的探讨 [J]. 当代医学, 2021, 27(29): 193-194.
- [9] 吴龙, 严晓明, 陈秀娟, 等. 医疗数据湖建设及医疗数据治理探索 [J]. 医学信息学杂志, 2022, 43(6): 8-13.
- [10] 刘鸿. 谈对试油数据质控管理的认识 [J]. 信息系统工程, 2021(6): 71-73.



# 矿区水环境修复与污水治理一体化技术研究

郑丽辉

中国市政工程西北设计研究院有限公司福州分公司, 福建 福州 350001

DOI:10.61369/ME.2025040017

**摘 要 :** 矿区水环境受到矿产资源开采, 存在重金属超标、酸性化等复合型污染问题, 特别是锰污染因其降解难、高毒性, 成为了矿区水环境治理难点。本文以华南地区某铁矿矿区为研究对象, 针对该矿山存在的生态环境问题及矿洞涌水锰超标问题, 提出综合性生态修复措施和废水“石灰中和+除锰反应+除锰过滤+特种树脂吸附”一体化技术方案。实践表明, 该一体化技术可将锰浓度降至0.1mg/L以内, 实现稳定达标排放。本文研究旨在为矿区生态环境修复和高浓度含锰废水深度处理提供技术参考。

**关 键 词 :** 矿区水环境; 锰污染治理; 一体化技术; 重金属去除; 铁矿废水

## Research on Integrated Technology of Water Environment Restoration and Sewage Treatment in Mining Areas

Zheng Lihui

China Municipal Engineering Northwest Design and Research Institute Co., Ltd. Fuzhou Branch, Fuzhou, Fujian 350001

**Abstract :** The water environment in mining areas is affected by the exploitation of mineral resources, and there are complex pollution problems such as excessive heavy metals and acidification. In particular, manganese pollution has become a difficult point in the treatment of water environment in mining areas due to its difficult degradation and high toxicity. This article takes a certain iron ore mining area in southern China as the research object, and proposes comprehensive ecological restoration measures and an integrated technical solution for wastewater "lime neutralization+manganese removal reaction+manganese removal filtration+special resin adsorption" to address the ecological environment problems and excessive manganese content in the mine. Practice has shown that this integrated technology can reduce manganese concentration to within 0.1mg/L and achieve stable and compliant emissions. The purpose of this study is to provide technical references for ecological environment restoration in mining areas and deep treatment of high concentration manganese containing wastewater.

**Keywords :** mining area water environment; manganese pollution control; integrated technology; heavy metal removal; iron ore wastewater

### 引言

矿产资源开发作为推动我国市场经济发展的支柱型产业, 但在矿区开发期间对自然环境会造成一定程度的生态破坏和水环境污染。矿区水体因矿石风化、氧化、水温地质等条件影响, 会产生重金属超标、pH值异常等问题, 特别是锰污染因其降解难、具有生物累积性等特点, 成为制约矿区生态修复的一大瓶颈<sup>[1]</sup>。华南地区某铁矿矿区开采历史已超过50年, 历史遗留的露采区存在较为严重的生态破坏和淋溶水锰浓度超标问题, 硐采区产生的矿洞涌水中锰浓度达到60mg/L, 且酸性条件加剧了金属元素的溶出与迁移, 对周边土壤、水体、生物链构成严重威胁。传统处理工艺主要针对单一污染或某个环节, 存在成本高、效率低、二次污染风险大等情况。对此, 本文提出“修复-减量-治理”的一体化技术, 实现矿区生态治理与废水处理同步提升的目标, 实现矿区的可持续发展。

## 一、矿区环境污染的特点与危害

### （一）矿区环境污染的特点

1. 水土流失。矿区上部进行露天数十年，已形成露天采场，多个堆矿区、选矿场、排土场，地形地貌改变较大，露天开采的北矿和南矿附近发生滑坡；排土场冲沟裸露，易形成水土流失。

2. 水量波动大。矿区主要产生地表淋溶水、矿洞涌水，受气候影响较大，雨季水量大，旱季水量小，水量变化系数超过5.0。

3. 重金属超标。铁矿企业停产矿洞涌水持续排放，水体中重金属铁、锰含量较高，高浓度矿洞涌水中锰含量高达115mg/L，远超2.0mg/L的排放标准，并且水中锰以溶解态  $Mn^{2+}$  为主，自然沉淀难度大。

4. 协同污染突出。水体中的除了有锰，还有铜、铁、锌等重金属，在酸性条件下多种污染物的协同作用下，加大了治理难度。

### （二）矿区存在的环境危害

1. 生态破坏。开采活动破坏原有植被和土壤结构，加剧水土流失。矿区的土壤因重金属污染和肥力丧失，难以自然恢复植被。

2. 水环境污染。含硫铁矿氧化产生酸性废水，pH值可低至2-4，溶解大量重金属（如铁、锰、锌），严重威胁周边水体安全。

3. 健康威胁。含重金属废水下渗污染地下水，存在通过食物链进入人体的隐患，对周边居民健康存在较大威胁。

## 二、矿区常用的生态修复及废水处理工艺

### （一）常用的生态修复工艺

#### 1. 物理修复

物理修复是通过改变地表形态、土地利用方式、重建地质景观等方式，恢复矿山区域的自然形态和地貌，减轻环境影响。常用的物理修复手段有：

填平法：通过填充矿渣、煤矸石等废弃物来改变地表形态和地貌，提高土地利用效率。

土壤覆盖法：在地表上覆盖一层肥沃的土壤，利用其改善植被生长条件和土地生态功能。

贴岩法：在大风、干旱、缺土等困难立地的矿山治理区域铺设矸（块）石或岩石，重建地质景观和生态环境，利于区域扬尘控制以及地被物种入驻自然修复。

地形削减法：通过削减矿山区域的地形高度，减轻矿区对环境的影响，同时增加土地利用面积。

#### 2. 化学修复

化学修复是通过添加化学物质，改善土壤结构和提高土壤质量，使其具有生态功能的修复方法。主要包括土壤改良、污染物吸附和中和等手段。

常用的化学修复方法有：

营养元素添加法：在矿山治理区域内添加有机肥料（腐殖

质）或土壤改良与调理材料，改善土壤质量和提高植物生长量。

中和法：利用酸碱反应原理，将酸性土壤中的酸性物质中和掉，减少对环境的危害。

吸附法：利用化学物质吸附污染物，减少其对环境的危害，如添加粘土、石灰、人工合成材料等吸附性物质。

#### 3. 生物修复

生物修复是利用植物、微生物等生物体，改善矿山区域的生态环境和土壤质量的修复方法。生物修复可以提高矿山区域的生态系统稳定性和土壤肥力，促进植被恢复和生物多样性的增加。

植物修复是指利用具有抗逆性、快速生长和适应性强的植物，修复受损的生态系统。植物修复的主要目标是恢复植被，增强土壤稳定性，防止土壤沙化与水土流失，提高生态系统的自我调节能力。

微生物修复是利用微生物对有害物质进行降解、转化和吸附，以达到修复矿山环境的目的。

#### 4. 综合修复

综合修复是指采用多种修复手段，结合具体情况，全面、系统地修复矿山采矿迹地生态环境和土地资源。常用的综合修复方法有：

生态工程法：结合物理、化学和生物修复手段，进行综合修复。

生态农业法：通过发展生态农业，恢复农业生产和生态环境。

生态旅游法：通过发展生态旅游，促进经济发展和生态修复共同进步。

空间利用法：因地制宜的生态修复 +（4.0），促进产业提升和空间综合利用。

### （二）常用的含锰废水处理工艺

#### 1. 化学法除重金属

化学法作为高浓度重金属废水的重要处理手段，技术较为成熟。是通过向水体中投入化学药剂，使重金属离子形成沉淀或络合物分离。在中和沉淀法中，通过投加石灰、氢氧化钠等碱剂，将水体pH值调节到8-9，使  $Mn^{2+}$  转化为  $Mn(OH)_2$  沉淀（溶度积  $K_{sp}=1.9 \times 10^{-13}$ ），并去除  $Fe^{3+}$ 、 $Zn^{2+}$  等金属离子。该方法操作简单、成本低，但对低浓度锰（10mg/L以内）去除效果有限，容易产生大量污泥。在硫化物沉淀法中，通过向水体中加入  $Na_2S$  等硫化剂，生成  $MnS$  沉淀（ $K_{sp}=2.5 \times 10^{-13}$ ），该方法适用于高浓度锰废水，但硫化剂过量易生成  $H_2S$  有毒气体，需严控反应条件<sup>[4]</sup>。

#### 2. 生物法除锰

该方法是利用锰氧化细菌等微生物的代谢作用，将  $Mn^{2+}$  氧化成  $MnO_2$  沉淀，具有环保、成本低等优势。在生物滤池法中，通过在滤料表面上培养锰氧化细菌，一旦废水流经，会通过胞外酶将  $Mn^{2+}$  氧化成不溶性  $MnO_2$ ，附着在滤料表面上。该方法适用于低浓度锰废水（5mg/L以内），且会受到pH值、温度等因素影响，启动周期约为1-3个月。在生物膜法中，通过载体固定微生物，形成生物膜，强化对  $Mn^{2+}$  氧化效率。但对高浓度锰耐受性较差，需配合预处理降低其负荷。

### 3. 化学氧化法除锰

使用氧化剂将  $Mn^{2+}$  氧化为  $MnO_2$ ，常见氧化剂为高锰酸钾、氯气等。其中，在高锰酸钾氧化法中，中性条件下， $MnO_4^-$  和  $Mn^{2+}$  反应生成  $MnO_2$  沉淀。（化学反应式为： $2MnO_4^- + 3Mn^{2+} + 2H_2O = 5MnO_2 \downarrow + 4H^+$ ），反应迅速且高效，但投入的药剂成本高，用量过多会升高水色度。在氯氧化法中， $Cl_2$  在碱性条件下生成  $ClO^-$ ，氧化  $Mn^{2+}$  为  $MnO_2$ ，全程应保持 pH 值不低于 9.5，且可能产生氯代消毒副产物<sup>[6]</sup>。

### 4. 解除氧化法除锰

使用天然锰砂等滤料，其表面  $MnO_2$  为催化剂，在曝气条件下将  $Mn^{2+}$  氧化成  $MnO_2$  并附着到滤料表面上，形成“自催化”循环。该工艺适用于浓度不超过 10mg/L 的中低浓度锰废水，具有运行稳定、工艺简单等优势。但对于浓度超过 50mg/L 的高浓度锰废水处理效果不佳，需频繁反冲洗避免滤料堵塞。

### 5. 深度除锰工艺

浓度低于 5mg/L 的低浓度残留锰处理难度较大，需采用深度处理工艺确保水质达标。在电化学法中，以电解的方式产生羟基自由基（ $\cdot OH$ ）或高价金属离子，将  $Mn^{2+}$  氧化成  $MnO_2$ ，去除效率高，但要消耗大量电能，适用于小水量处理。在膜分离法中，采用纳滤 NF、反渗透 RO 膜等截流  $Mn^{2+}$ ，可截留绝大部分重金属离子，出水水质好，但会造成膜污染，需定期再生和更换，还要设置预处理系统，运行成本高。在吸附法中，使用沸石、活性炭、特种树脂等吸附  $Mn^{2+}$ ，特种纳米吸附树脂对锰的选择性高、饱和容量大，可重复再生利用，适合深度净化<sup>[6]</sup>。

## 三、矿区水环境修复与污水治理一体化措施

本项目矿区一体化治理的核心逻辑为“源头修复—过程控制—末端治理”的闭环路径，实现矿区生态修复与污水处理系统深度耦合。依据矿区所在区域的生态系统功能重要性、人居环境与经济社会发展状况，综合考虑自然条件、地形地貌条件、矿山生态环境问题及其危害程度等，系统性开展矿区生态修复及废水处理。生态修复措施遵循生态系统演替规律和内在机理，利用科学的复垦修复技术和模式，使可修复区域地质环境达到稳定、损毁土地得到复垦利用、生态系统功能得到恢复和提升，恢复矿区生物多样性，协同推进绿色矿山建设，实现人与自然和谐共生。废水处理遵循应收尽收、源头治理的思路，选用工艺稳定可靠、投资成本较低、符合用地规划的模式，将矿区超标废水处理达到《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅲ类标准（其中铁 < 0.3mg/L、锰 < 0.1mg/L），以削减排入下游流域污染负荷，进而改善流域水质。

### （一）生态修复配套措施

#### 1. 坡面治理与修复

针对露天采区坡度较陡、岩土疏松的区域，通过物理手段固定岩土体，防止坍塌和水土流失。主要措施有：对凹凸不平的坡面进行削坡（去除危岩、突出岩体），将陡坡修整为台阶状（如每 10-20 米设一个平台，宽度 1-3 米），降低坡度至安全范围（一

般  $\leq 45^\circ$ ）；用混凝土、浆砌石修建网格状梁体（如菱形、矩形）或挡土墙，包裹坡面并拦截滑落体，网格内可预留生态修复空间；在坡顶设截水沟（拦截坡外汇水）、坡面设急流槽（引导雨水沿固定路径流下，避免冲刷坡面）、坡脚设排水沟（收集并排出坡面水），沟体材质可采用混凝土或浆砌石。

### 2. 土壤改良与植被恢复

针对矿区遗留的酸性污染土壤，使用生石灰均匀施撒中和 pH 值至 6.0-7.5。之后施加有机肥改善土壤结构，强化土壤的保水保肥能力。在植被恢复中，优选蜈蚣草、东南景天等超富集植物，利用其根系吸收作用，吸附锰、锌等重金属，定期收割植物地上部分，采取无公害处理手段，逐步降低土壤中重金属含量。并搭配黑麦草、紫花苜蓿等先锋植物，打造乔灌木相结合的植被群落，使土壤生态功能得到修复，预防水土流失。

### 3. 地表水及地下水导排措施

地表排水：在坡顶设截水沟（拦截坡外汇水）、坡面设急流槽（引导雨水沿固定路径流下，避免冲刷坡面）、坡脚设排水沟（收集并排出坡面水），沟体材质可采用混凝土或浆砌石。

地下排水：对地下水丰富区域，钻孔设置排水管（如透水管），降低岩土体含水率（避免因渗水导致的边坡失稳）。

### （二）工艺设计原理与技术路线

本项目需处理的主要污染因子为铁、锰，工艺采用“石灰中和+除锰反应+除锰过滤+特种树脂吸附”对废水中的锰进行深度去除。

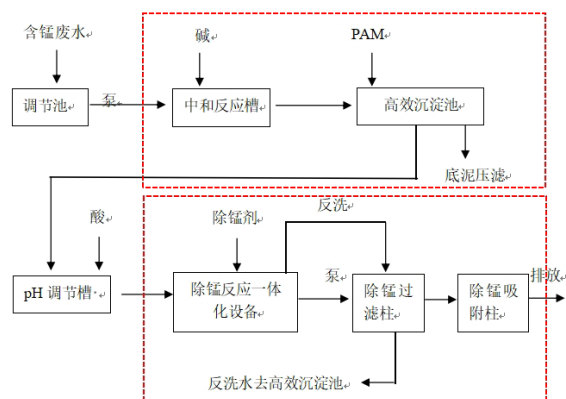


图1 工艺流程图

### 工艺流程说明：

含锰废水首先进入调节池均质均量，经泵提升至中和反应槽，投加碱液提高 pH 值，使锰、铁生成氢氧化沉淀物，再经絮凝及高效沉淀去除；沉淀出水加酸回调 pH 值，自流进入除锰反应一体化设备，投加除锰剂进行搅拌反应，将锰离子氧化成二氧化锰，反应出水经泵提升进入后段的除锰过滤柱，过滤柱中装填专有的除锰滤料，对废水中的锰进行过滤、附着、截留深度去除；过滤出水串联进入除锰吸附柱，通过特种纳米吸附树脂进一步对锰进行深度去除，达标排放。

高效沉淀池底泥由污泥泵定期抽至板框压滤机压滤，干渣外运处置。除锰过滤柱定期进行自动反冲洗，反冲洗水去往前端石

灰中和沉淀段的沉淀池。

本工艺设计流程简洁，技术成熟，还可实现全流程的自动化控制。整套系统除药剂配制以及板框压滤需人工操作外，其他全部自动化运行。

1. 预处理阶段：均质均量与酸碱调节

针对矿区矿硐涌水特点，为了避免对后续工艺产生冲击，该技术体系下降所有废水引入到调节池内（800m<sup>3</sup>），通过机械搅拌实现水质、水量的均质化，停留时间控制在10–12h之间。之后经提升泵将废水送到中和反应槽内，加入石灰乳将水体pH值调节至8.0–8.5，让废水中Fe<sup>3+</sup>快速生成Fe(OH)<sub>3</sub>沉淀（K<sub>sp</sub>=2.8×10<sup>-39</sup>），Mn<sup>2+</sup>则转化为Mn(OH)<sub>2</sub>胶体（K<sub>sp</sub>=1.9×10<sup>-13</sup>），中和酸性水体，以免对后续设备造成酸性腐蚀<sup>[8]</sup>。

2. 一级净化：絮凝沉淀去除大部分重金属

完成中和后的废水进入到絮凝反应槽内，投入混凝剂（聚合氯化铝）20–30mg/L，通过压缩双电层作用让Mn(OH)<sub>2</sub>胶体凝结成大絮体；再加入助凝剂（聚丙烯酰胺）0.5–1mg/L，加强絮体的沉降性能。反应后混合液进入到高效沉淀池内，表面负荷为1.5m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)，借助斜管沉淀作用使固液快速分离，该阶段可去除80%以上的锰和90%以上的铁，出水后锰浓度下降至5–10mg/L，为后续深度处理奠定基础。

3. 沉淀池出水依然保留一定量的Mn<sup>2+</sup>，且由于石灰中和导致水体pH值偏高，加入稀硫酸将水体pH值回调至6.5–7.0，为氧化反应创造良好条件。之后废水进入到除锰反应一体化设备中，加入氧化剂（高锰酸钾），用量为锰浓度的1/3，通过机械搅拌下发生反应：2MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>+3Mn<sup>2+</sup>+2H<sub>2</sub>O=5MnO<sub>2</sub>↓+4H<sup>+</sup>，将可溶Mn<sup>2+</sup>氧化成不溶于水的MnO<sub>2</sub>颗粒。完成反应后的水通过水泵传输至除锰过滤柱中，柱内装填0.8–1.2mm的改性锰砂滤料，滤料上的MnO<sub>2</sub>涂层通过吸附和截流作用去除MnO<sub>2</sub>颗粒，利用“自催化”效应强化Mn<sup>2+</sup>

的氧化性能。处理之后可将锰浓度降低至1–3mg/L<sup>[9]</sup>。

4. 深度净化：特种树脂吸附确保达标

过滤出水进入到串联的除锰吸附柱中，柱内填充D401、0.3–1.2mm特种纳米螯合树脂，对残留锰离子有较强的吸附性，饱和吸附容量达50–60mg/g。吸附之后出水锰浓度可降低至0.1mg/L以内，满足排放标准。

5. 副产物处理与资源循环

高效沉淀池内的污泥经污泥泵输送至板框压滤机中脱水，形成含水率不超过60%的干泥饼，其中富含锰、铁等金属，统一运输至回收厂提取有价金属，也可以用作建筑材料辅料，实现污泥资源化。除锰过滤柱每隔24h进行一次反冲洗，反冲洗水中含有微量的MnO<sub>2</sub>颗粒，回流至中和沉淀池内二次处理，以免出现二次污染问题。达标水用于矿区绿化灌溉、道路降尘，或者排入人工湿地进行深度净化后补充周边水体。

四、结束语

综上所述，矿区生态修复与污水治理是一项系统性工程，应综合考虑污染治理的高效性、生态修复的长效性、技术应用的适应性。对于高浓度锰污染及酸性水体特征，本文提出了“石灰中和+多段净化+深度吸附”的一体化技术体系，打破了单一处理工艺的局限性，不仅能高效去除水中污染物高，还能实现水资源循环利用。通过分级处理适配水质波动，借助自动化系统提升运行稳定性，并搭配污泥资源化与生态修复措施，有效解决了矿硐涌水中锰超标问题，同时使矿区生态系统的逐步得到恢复。未来，矿区水环境治理需进一步强化技术创新，建立长效监测机制，确保污染控制与生态恢复的持续性。

参考文献

- [1] 郭志耀, 杨冬. 矿区地下水环境重金属污染时空变化特征及风险评估研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(03): 189–194.
- [2] 毛格, 周君蕊. 某金属矿区尾矿库水环境治理方案 [J]. 能源研究与管理, 2024, 16(02): 86–91+102.
- [4] 苏志强. 煤矿区水环境特征研究——以柳林泉域西部某矿区为例 [J]. 经纬天地, 2024, (01): 93–96.
- [5] 平措朗加, 其米多吉, 旦增罗布. 矿区水文地质勘查与环境地质评价现状及发展形势 [J]. 世界有色金属, 2024, (01): 157–159.
- [6] 谢腾蛟, 张娇, 廖禄云, 等. 废弃煤矿区水污染特征及成因分析研究 [J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 224–229.
- [7] 张宇. 库拜和哈密矿区水环境质量评价及环境容量预测 [D]. 中国矿业大学, 2023.
- [8] 王秋月. 铁矿区环境地质生态调查与评价研究——以高岭铁矿区为例 [J]. 环境科学与管理, 2023, 48(04): 156–161.
- [9] 牟祥国. 传统水文地质调查方法在矿区地下水环境污染调查中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2023, (03): 186–188.
- [10] 倪高倩, 林元惠, 张帆洋. 水文地质工作在矿区环境污染调查中的应用 [J]. 中国金属通报, 2022, (12): 195–197.



# 中铁特货物流股份有限公司空车调配相关问题探索

关伟

中铁特货物流股份有限公司, 北京 100000

DOI:10.61369/ME.2025040020

**摘 要 :** 伴随国家“公转铁”行动计划和“双碳”目标的提出,采用铁路运输方式进行商品车运输和冷链物流已经成为未来发展的重要趋势之一。铁路商品车运输和冷链物流是我国特种货物运输的重要方式之一。为进一步降低铁路特种货物运输成本,优化铁路商品汽车运输专用车(JSQ型车)和冷藏货物运输车(B型车)的空车调配方案,基于我国商品车运输和冷链物流现状以及铁路商品汽车运输专用车(JSQ型车)与冷藏货物运输车(B型车)空车调配现状,分别从运输需求、运输时间、车辆设备、运输路径、空车等级、淡旺季、编组辆数、车辆检修作业、冷藏车加油等方面,分析了铁路商品汽车运输专用车(JSQ型车)与冷藏货物运输车(B型车)空车调配的影响因素,为科学编制空车调配方案提供必要的理论支撑。

**关 键 词 :** 铁路商品车运输; 铁路冷链物流; 空车调配; 运输需求; 运输路径

## Exploration of Issues Related to Empty Vehicle Allocation in China Railway Special Cargo Logistics Co., Ltd.

Guan Wei

China Railway Special Cargo Logistics Co., Ltd., Beijing 100000

**Abstract :** With the introduction of the national "Highway to Railway" action plan and the "Dual Carbon" goals, the use of railway transportation for commercial vehicle transportation and cold chain logistics has become one of the important trends for future development. Railway commercial vehicle transportation and cold chain logistics are among the significant modes of special cargo transportation in China. To further reduce the transportation cost of special cargo by railway and optimize the empty car allocation plan for dedicated railway commercial vehicle transport cars (JSQ cars) and refrigerated cargo transport cars (B-type cars), this paper analyzes the influencing factors of empty car allocation for these two types of cars. The analysis is based on the current situation of commercial vehicle transportation and cold chain logistics in China, as well as the status of empty car allocation for JSQ and B-type cars. The influencing factors are examined from various aspects, including transportation demand, transportation time, vehicle equipment, transportation route, empty car grade, peak and off-peak seasons, number of marshaled cars, vehicle maintenance operations, and refueling of refrigerated cars. This paper provides necessary theoretical support for scientifically developing empty car allocation plans.

**Keywords :** railway commercial vehicle transportation; railway cold chain logistics; empty car allocation; transportation demand; transportation route

## 引言

中铁特货物流股份有限公司(以下简称特货公司)是中国国家铁路集团有限公司货运板块直属运输企业。特货公司的主营业务为商品汽车物流、冷藏物流和大件物流,公司总部设在北京,下设16个分公司、3个机械保温车辆段、2个全资子公司,形成覆盖全国的铁路特货运输网。

公司配属、使用的商品汽车运输专用车(JSQ型车)2万余辆、冷藏货物运输车(B型车)4300余辆及长大货车(D型车)等铁路专业车辆。

因特货公司配备的运输车辆均为铁路专用货车,运力调配方法较为特殊,与国铁集团的通用货车调配有较大不同,本文就特货公司商品汽车运输专用车(JSQ型车)及冷藏货物运输车(B型车)的运力调配相关问题做简单的研究。

## 一、运力调配管理流程

### （一）管理架构

特货运输调度中心工作实行分级管理，集中统一指挥。特货公司设运输调度中心，分公司设运输调度部及负责调度工作的相关部门，机保段设调度科。特货公司、分公司、机保段调度部门分别负责特货公司、分公司、机保段的日常运输组织协调工作，完成特货公司的运输生产经营任务。<sup>[1]</sup>

### （二）两级管理

特货公司调度中心负责跨局调配、分公司调度负责局管内调配。

特货公司调度中心根据分公司提供的次日装、卸车计划编制和下达特货公司日计划。根据运输需求负责向国铁集团调度申请特货车辆调动的命令建议，由国铁集团调度发布车辆调动命令。

分公司调度在特货公司调度中心的集中统一指挥下，负责所在铁路局集团公司管内运输组织协调工作。负责编制本单位运输日计划，包括日/次日装车计划、日/次日卸车计划。组织调整分公司管内的货流、车流，按阶段均衡地完成特货公司调度中心下达的车流调整方案和去向别装车方案。编制局管内空车调配方案。<sup>[2]</sup>

### （三）运力调配流程步骤

第一步：分公司提报需求：区域内空车供需不平衡时，分公司上报装车、排空计划。

第二步：特货公司调度预排空车：提前向缺车区域排送空车，分公司制定管内方案并上报排空情况。

第三步：特货公司调度跨局调配：结合车流推演（空重车动态），编制调度命令拟稿，报国铁集团审核。

第四步：国铁集团执行：下达终稿命令，各铁路局执行调配任务。

特货公司调度中心会根据各分公司周计划和次日的装车需求，以及各分公司的在站空车、在途空车、在站重车、在途重车等实际情况，经过与分公司沟通后，一方面提前安排空车向需空区域排送；一方面分公司调度制定管辖区域内的空车调配方案，并根据其管辖区域内空车的供需情况后上报排空情况。之后，特货公司调度根据各个分公司调度上报的装车、排空情况和对车流空重推演情况，制定跨区域的空车调配方案，编写调度命令拟稿并上报给国铁集团调度。最后，国铁集团对调度命令拟稿进行审核，下达调度命令终稿，由各铁路局执行空车调配任务。<sup>[3]</sup>

## 二、运力调配考虑要素

### （一）运力调配原则

空 JSQ 型车和 B 型车调整是为了合理地运用空车，保证特货装车需要的调整措施。分公司必须从全局出发，按照国铁集团调度命令的要求，做好相关协调工作，协调局间分界站的空车有序交接。空车调整方法有：正常调整、特殊调整。

正常调整：按照国铁集团《铁路运输调度规则》和列车编组计划及运输径路的有关规定，空车调整必须做到缩短空车行程，

消除同车种对流，坚持就近调整原则。

特殊调整：为保证各装车区域临时运输任务需要采取的非常措施。要及时采取各种可能的调整手段，以最快的速度将空车调整到位，保障紧急运输任务的用车需求。<sup>[4]</sup>

### （二）特货公司空车调配现状

#### 1. 商品汽车运输专用车（JSQ 型车）空车调配现状

我国商品车的生产地主要集中在长春、沈阳、北京、长三角、广州、天津、重庆等地，销售地则遍布全国，铁路运输的优势方向集中在长距离和大批量的商品车库区方向，如乌鲁木齐三坪、上海闵行、西安国际港、郑州圃田、沈阳蒲河、南宁雒容等地，卸车后不易产生返程货源。把商品汽车运输专用车（JSQ 型车）从卸车点调配到下一装车点是铁路运输的一项基础性工作。调配空车是保证装车的基础，空车的流动不产生效益，只产生成本，如何在淡季时合理调配空车，优化走行径路和配空方向，尽量降低运输付费，对铁路运输成本控制具有重要意义。同时，空车是保证装车的基础，如何在运输旺季的时候高效的调配空车，使空车流动速度尽可能快，为旺盛的发运需求提供空车保障，是抢占市场和增加收入的关键。

#### 2. 冷藏货物运输车（B 型车）空车调配现状

特货公司冷链物流发运、到达区域分布不均衡。当前，特货公司冷链物流发运地主要集中在东北、西北地区，东北、西北地区合计发运量占比 70% 左右，导致发运量分布极不均衡。到达地主要在西南地区，主要为成、渝、昆方向，合计到达量占比 60% 左右。如此情况下，势必造成从成、渝、昆地区向东北、西北地区长距离排空，以满足运力配置的需要。这样不仅增加运输成本，还会降低运输效率。同时发运、到达区域分布不均衡还会降低抗风险能力，在冷链物流货物市场波动较大的情况下，可能难以准确预测未来的运输需求，从而影响运营的稳定性和风险控制。<sup>[5]</sup>

### （三）特货运力调配影响因素

运力（空车）调配是铁路特货物流运输中的关键环节，在整个运输过程中起着至关重要的作用，其主要目的是确保车辆的有效利用，提高运输效率，并降低运输成本。在进行特货空车调配时，需要综合考虑多方面因素以确保调配的合理性和有效性。

#### 1. 空车时效因素

特货空车调配的目的就是使特货空车从富余空车的区域运输至缺少空车的区域，以及及时满足该区域的装车需求并进行运输，在此情形下，空车能否及时运到需求区域将影响到后续物流环节的运作时间和运输收益，甚至是运输委托方的运输信任度。

#### 2. 分界口与线路通过能力因素

在一般情况下，分界口图定能力与通道通行能力是特货调度人员在制定空车调配方案中需要考虑的重要因素，如果制定的特货空车调度方案超过了当日的分界口与线路通过能力，则该方案可能不被国铁集团审批通过。同时，铁路局现车车数量要求亦需要纳入考量，如某路局现在车比较大，编组站比较拥堵，会根据现在车情况给出特货公司空 JSQ、B 型车保有车数量要求。因此将充分考虑各分界口的能力、关键通道流向、车站存车数量等制约因素，保障调度命令能够科学合理执行。

### 3. 特货车辆构造特性因素

因特货车辆的构造特性导致其具有特殊的走行特性。在经过编组站时由于特货车辆换长普遍较长（JSQ型车换长2.4、BH1型隔热保温车换长为2.0），在部分编组站无法过驼峰、禁止溜放，需要经迂回线顶送至编组场内，给车组的解体、编组作业带来了较大影响，作业时间增加。

### 4. 淡季影响因素

商品汽车销售淡季时，空车大量闲置时（特别是一季度春运期间），以2023年为例，目前投入使用的JSQ型车保有量JSQ6型车18450辆、JSQ5改型车1313辆，再加上其他J型车合计将近2万辆，11月份装车7.1万车，推算出周时为8.4天方能在现有车辆情况下满足各分公司装车。同时按照8.4天的周时，完成全年最淡季的二月份装车5.06万台，只需要运用车1.5万辆JSQ型车即能完成。淡旺季存在5000辆JSQ型车的差值。

### 5. 检修影响因素

因特货车辆的检修工作大部分由特货公司所属的三个机保段（郑州机保段、广州机保段、柳州机保段）完成，检修地点相对固定，如何科学合理的调整检修车对特货空车调配有较大影响。

### 6. 加油影响因素

由于冷藏运输的车组有加油的需求，受铁路站点安全因素影响，可设置为加油站点的铁路车站有限，如何合理地安排冷藏运输车组的加油工作，也是在B型空车调配的过程中起到决定性的影响因素。<sup>[6]</sup>

## 三、特货运力调配的几点建议

### （一）加强对流运输组织，最大限度减少空车走行

以运输结构反哺营销布局，重点强化返空车货源营销，完成常态化对流运输组织，经营循环班列，完成高效运输组织；同时合理利用价格策略，充分调动各方积极性、主动性，整合各方资源，争取公水等其他运输方式的对流货源，把对流线路上的适合特货运输的货源营销到铁路上，特别是鼓励各装车分公司向缺车分公司装车，对长期需要补空的区域加强到达营销力度，实现在铁路上对JSQ试装货源的对流线路运输、阶梯线路运输、多角线路运输等，鼓励以重抵空，减少空车走行距离。

### （二）精细化调度指挥

精细化J型车、B型车的差异化运输调度，统筹设计各车型空

车走行径路，坚持全局安排，按照就近区域排空原则，协调相关路局，避免路局、分公司各自为政，最大限度减少空车合计走行距离，提高车辆各指标运用效率。特别是加强空车回送组织，因为特货车辆的重空方向较为固定，如何科学回送是提高运用效率的重要方面。

### （三）淡季空车管理

针对淡季可用空车较多，铁路局存放较难的问题，特货各分公司应根据各铁路局运用车及现在车保有量情况，并结合各分公司全年商品汽车、冷链发运量任务，积极协调国铁调度指挥中心及各所在地铁路局，共同寻找新场地或开发可利用的专用线或偏远货运站，在运输淡季将闲置J型车、B型车辆转为备用状态，消除对各局中时、停时等指标的影响，打消各铁路局存放特货各型空车的顾虑；同时建立淡旺季空车存放与装车量匹配的机制，根据旺季各局装车需用车的比例进行合理存放，按照“旺季装车多用车淡季保有多存车”的原则进行空车合理存放，争取各铁路局对空车存放的支持，避免各型特货空车无序流动，占用技术站到发线、专用线、货物线，影响正常秩序。按照国铁集团调度指挥中心的相关要求，本着在装车局集团公司、偏远局集团公司、有能力的铁路局集团公司多存车，在枢纽铁路局集团公司、能力紧张的铁路局集团公司少存车的原则，确定在各铁路局集团公司的空车保有量，并每年根据全路实际运输情况进行动态调整，做好与属地铁路局集团公司的协调工作，保障特货公司的运输需求及空车的有序存放。<sup>[7]</sup>

### （四）精心组织检修车工作，全力保证运输需求

一是督促机保段与所在铁路局做好精准对接，科学合理组织车辆出入段，有效避免车辆积压情况发生，充分利用台位设备，全力开展检修作业；二是要求各分公司组织到期车、预警车向三个机保段方向顺路装车，提升车辆回送效率；三是针对机保段检修车阶段性分布不均，督促机保段与所在铁路局做好对接，组织好车辆出入段。同时根据机保段存车数量及检修能力进行实时调整，做好检修车分流工作。<sup>[8]</sup>

### （五）合理安排冷藏车组加油，减少空排距离和空排付费

合理布局冷藏车组加油站，避免为加油绕远，安排冷藏车组加油在装车站进行或在车组走行路径上进行。尽量压缩空排距离，减少空排付费，缩短走行时间，提高车组效率和效益。

## 参考文献

- [1]王丹竹,田宏业,周姗姗.铁路商品车运输专用车辆空车调配影响因素分析,中国铁道科学研究院集团有限公司科技研究开发计划课题,2021.
- [2]于佳.铁路商品车运输的机遇与挑战[J].中国物流与采购,2021,(04):74-75.DOI:10.16079/j.cnki.issn1671-6663.2021.04.036.
- [3]张涛.铁路商品车运输发展问题与对策的研究[J].中国物流与采购,2020,(21):47-48.
- [4]张翔,贺金龙.铁路商品车运输发展探讨[J].铁路技术创新,2020,(02):22-25.DOI:10.19550/j.issn.1672-061x.2020.02.022.
- [5]关键.铁路商品车物流时效性影响因素分析[J].铁道货运,2018,36(01):1-4+23.DOI:10.16669/j.cnki.issn.1004-2024.2018.01.01.
- [6]姚天宇.中铁特货公司铁路冷链物流发展战略研究[D].西南交通大学,2018.DOI:10.27414/d.cnki.gxnu.2018.000210.
- [7]纪若婷.我国铁路冷链物流发展战略与应用研究[D].中国铁道科学研究院,2017.
- [8]郭帅,郭彦,张建平.铁路冷链物流发展战略研究[J].铁道货运,2021,39(07):26-30.

