



# 科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 Issue 4 April 2026 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 · Issue 4 · April 2026 · ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
Tel.:+65 62233839  
E-mail:contact@nassg.org  
Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：科技创新与工程

ISSN: 3060-8996 (纸质) 3060-8988 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering

ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《科技创新与工程》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



### 期刊概况：

中文刊名：科技创新与工程

ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 科技创新与工程

## Technological Innovation and Engineering

Volume 3 Issue 4 April 2026  
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主 编

康继军

Jijun Kang

编 委

刘 敏 Min Liu

龚勤林 Qinlin Gong

陈 升 Sheng Chen

包 艳 Yan Bao

夏旭东 Xudong Xia

1	市政道路工程施工质量控制技术与科技创新路径探析 / 李臻	55	探讨电子诊断技术在新能源汽车维修中的运用方法 / 王伟东
4	基于 BOPPPS 模型的界面设计课程多模式融合的教学探索 / 张嘉	58	机器人技术在汽车生产中的集成与应用 / 王强
7	绿色施工理念下地铁给排水管道安装工艺优化研究 / 熊浩江 汪洋	61	火电厂锅炉运行节能措施探究 / 吴明
10	高清直播技术在县级融媒体中心节目制播中的实践优化与创新路径 / 罗佳艺	64	考虑随机扰动的作物种植策略研究 / 李强 黄菲菲 郝强 何文林 谭锦华 李卫
13	坍塌防波堤修复施工中的结构稳定性分析及优化—江苏 LNG 防波堤工程实践 / 李赫阳 侯加全	67	面向节假日客流波动的旅游公交 AI 优化策略研究 / 谢燕雯
16	遥控型索道牵引机研制与应用研究 / 应远杰 王涛 王奇志	70	基于数值模拟的冶金反应器内多相流场优化与强化机理分析 / 魏光泽
19	HYDRUS 预测在采选项目土壤环境影响评价中的应用—以西藏高原地区铜矿采选项目为例 / 马春花	73	工贸企业有限空间作业安全管理体系优化研究 / 胡玉凤 赵唐鑫 安子刚
22	物流分拣系统实验设计 / 熊恩卫 安琪	76	仪表工程施工全过程质量管理与精细化控制研究 / 李明杰
25	科研项目分阶段实施的进度控制与资源调配策略 / 王炫文	79	高原低氧环境下睡眠 - 精力健康管理系统研发与展望 / 王曦依
28	老年智能语音交互设计与研究 / 颜心怡 何宇臻	82	综采工作面高产高效生产组织与工艺优化研究 / 王汉斌
31	智能化汽车检测技术的应用与发展思考 / 李金朋	85	深部煤矿采矿工程围岩稳定性分析与支护优化研究 / 刘亚民
34	面向绿色化工的工程技术创新及其在化学工程中的应用 / 王绍武 高旋旋	88	工业自动化仪表的远程故障诊断技术应用探讨 / 钟文篇
37	结合工程技术的化学分离工艺优化及其环境影响评估 / 程毅 曲彦伟	91	沉降式泵站基坑地下水渗涌防治与排水系统优化研究 / 蒋新伟 于兴志 项春正 藏磊
40	随机腐蚀对立式储罐抗震性能的影响研究 / 辛俊城 李想 王柏霖 郭亿丁	94	人工智能在电子信息技术中的应用探究 / 龚雪云
43	胶料挤出智能无人化作业模式研究与应用 / 刘海斌 蒋寒 盛超 尹金云	97	超声空化辅助汽车关键零部件再制造技术研究 / 何顺 曾孟军 何端
46	聚合物水泥防水涂料不透水性试验的有限元分析 / 郭亿丁 王苗苗 李想 王柏霖 辛俊城	100	一种新型电磁盘圆吊具设计与港口应用研究 / 法磊 周桂江 袁国东 张灿 毛泉
49	油气田基层单位计量管理现状及管理措施探讨 / 徐媛媛	104	浅谈动车组客室设备常态化检修效率提升优化方案 / 潘天宇
52	产教融合下 AI+VR 动力电池维修实训课程教学模式探究	107	轨道交通车辆关键结构件智能制造工艺优化研究 / 童昶
		110	基于投资绩效评估的自动驾驶技术路线选择与管理决策研究 / 付娆 王浩玥 朱婧艳 李嘉伟 谭暨元 郭伟伟

- 1 Analysis of Quality Control Technology and Technological Innovation Paths for Municipal Road Construction  
/ Zhen Li
- 4 Exploring Multi-Mode Integration in Interface Design Curriculum Based on BOPPPS Model  
/ Jia Zhang
- 7 Research on Installation Technology Optimization of Subway Water Supply and Drainage Pipeline under the Concept of Green Construction  
/ Haojiang Xiong Yang Wang
- 10 Practice Optimization and Innovation Path of HD Live Streaming Technology in the Program Production and Broadcasting of County-level Converged Media Center  
/ Jiayi Luo
- 13 Structural Stability Analysis and Optimization of the Repairing Construction of Collapsed Breakwater-The Practice of Jiangsu LNG Breakwater  
/ Heyang Li Jiaquan Hou
- 16 Research on Key Technologies for Remote-Controlled Cableway Hoist Systems  
/ Yuanjie Ying Tao Wang Qizhi Wang
- 19 Brief Discussion on Rural Domestic Waste Treatment Technologies in Hunan Province  
/ Chunhua Ma
- 22 Experiment Design of Logistics Sorting System  
/ Enwei Xiong Qi An
- 25 Progress Control and Resource Allocation Strategy of Scientific Research Project Implementation by Stages  
/ Xuanwen Wang
- 28 Design and Research of Intelligent Voice Interaction for the Elderly  
/ Xinyi Yan Yuzhen He
- 31 Application and Development Considerations of Intelligent Automotive Detection Technology  
/ Jinpeng Li
- 34 Engineering Technology Innovation Oriented towards Green Chemical Industry and Its Application in Chemical Engineering  
/ Shaowu Wang Xuanxuan Gao
- 37 Chemical Separation Process Optimization and Environmental Impact Assessment Based on Engineering Technology  
/ Yi Cheng Yanwei Qu
- 40 Study on the Influence of Random Corrosion on the Seismic Performance of Vertical Storage Tanks  
/ Juncheng Xin Xiang Li Bolin Wang Yiding Guo
- 43 Research and Application of Intelligent Unmanned Operation Mode for Rubber Extrusion  
/ Haibin Liu Han Jiang Chao Sheng Jinyun Yin
- 46 Finite Element Analysis of Water Impermeability Test for polymer-Modified Cement cCompounds for Waterproofing Membrane  
/ Yiding Guo Miaomiao Wang Xiang Li Bolin Wang Juncheng Xin
- 49 Current Situation and Management Measures of Measurement Management in Basic Units of Oil and Gas Fields  
/ Yuanyuan Xu
- 52 Exploring the Teaching Model of AI+VR Battery Maintenance Training Course under the Integration of Industry and Education  
/ Xiaoning Yu
- 55 Discussion on the Application Methods of Electronic Diagnostic Technology in New Energy Vehicle Maintenance  
/ Weidong Wang
- 58 Integration and Application of Robotic Technology in Automotive Production  
/ Qiang Wang
- 61 Research on Energy-saving Measures for Boiler Operation in Thermal Power Plants  
/ Ming Wu
- 64 Research on Crop Planting Strategy Considering Random Perturbation  
/ Qiang Li Feifei Huang Qiang Hao Wenlin He Jinhua Tan Wei Li
- 67 Research on AI Optimization Strategy for Tourism Buses Facing Holiday Passenger Flow Fluctuations  
/ Yanwen Xie
- 70 Optimization of Multiphase Flow Field and Analysis of Enhancement Mechanism in Metallurgical Reactor Based on Numerical Simulation  
/ Guangze Wei
- 73 Research on Safety Management System Optimization for Confined Space Operations in Industrial and Trade Enterprises  
/ Yufeng Hu Tangxin Zhao Zigang An
- 76 Research on Quality Management and Fine Control in the Entire Process of Instrument Manufacturing Engineering  
/ Mingjie Li

- 79 Development and Prospects of Sleep-Energy Health Management System in High-altitude Hypoxic Environment  
/ Xinong Wang
- 82 Research on High-yield and High-efficiency Production Organization and Process Optimization for Fully Mechanized Mining Faces  
/ Hanbin Wang
- 85 Research on Surrounding Rock Stability Analysis and Support Optimization for Deep Coal Mine Mining Engineering  
/ Yamin Liu
- 88 Application Discussion on Remote Fault Diagnosis Technology for Industrial Automation Instruments  
/ Wenpian Zhong
- 91 Research on Prevention and Control of Groundwater Seepage and Drainage System Optimization in Foundation Pits of Sedimentation Pump Stations  
/ Xinwei Jiang Xingzhi Yu Chunzheng Xiang Lei Zang
- 94 Exploration of Artificial Intelligence in Electronic Information Technology  
/ Xueyun Gong
- 97 Research on Ultrasonic Cavitation-Assisted Remanufacturing Technology for Key Automotive Components  
/ Shun He Mengjun Zeng Duan He
- 100 Research on the Design and Port Application of a New Type of Electromagnetic Circular Hoist  
/ Lei Fa Guijiang Zhou Guodong Yuan Can Zhang Quan Mao
- 104 A Brief Discussion on the Optimization Plan for Enhancing the Efficiency of Regular Maintenance of Passenger Cab Equipment in EMU Trains  
/ Tianyu Pan
- 107 Research on Optimization of Intelligent Manufacturing Process for Key Structural Components of Rail Transit Vehicles  
/ Chang Tong
- 110 Research on Automatic Driving Technology Route Selection and Management Decision-making Based on Investment Performance Evaluation  
/ Rao Fu Haoyue Wang Jingyan Zhu Jiawei Li Xiyuan Tan Weiwei Guo

# Analysis of Quality Control Technology and Technological Innovation Paths for Municipal Road Construction

Zhen Li

Guilin Municipal Engineering Management Office, Guilin, Guangxi, 541004, China

## Abstract

The construction quality of municipal roads is directly related to urban image and operational safety. The traditional quality control model, which relies on post-construction testing and manual experience, struggles to meet the demands of refined whole-process management. This paper systematically analyzes the current status and key control points of municipal road construction quality, sorts out the core technical systems for subgrade, base course, asphalt pavement, ancillary works, and green construction, and focuses on exploring the paths and supporting mechanisms for empowering quality control through technological innovation. The study shows that digital detection and monitoring, intelligent construction equipment, and the application of new materials and processes are the three major directions for innovation. Technologies such as intelligent compaction, BIM+GIS, and IoT sensing can effectively enhance quality control efficiency. The quality control of municipal road construction is undergoing a transformation from "experience-driven" to "data-driven" approaches, and the integration and complementarity of traditional and innovative technologies constitute an effective path for improving project quality.

## Keywords

municipal road; construction quality; technological innovation and engineering; digital monitoring; intelligent compaction

## 市政道路工程施工质量控制技术与科技创新路径探析

李臻

桂林市市政工程管理处, 中国·广西 桂林 541004

## 摘要

市政道路施工质量直接关系城市形象与运行安全, 传统以事后检测、人工经验为主的质量控制模式难以适应全过程精细化管理需求。本文系统分析市政道路施工质量现状与关键控制环节, 梳理路基基层、沥青面层、附属工程及绿色环保施工的核心技术体系, 重点探讨科技创新赋能质量控制的路径与保障机制。研究表明, 数字化检测监测、智能化施工装备、新材料与新工艺应用是三大创新方向, 智能压实、BIM+GIS、物联网传感等技术可有效提升质量管控效能。市政道路施工质量控制正从“经验驱动”向“数据驱动”转型, 传统技术与创新技术融合互补是提升工程质量的有效路径。

## 关键词

市政道路; 施工质量; 科技创新与工程; 数字化监测; 智能压实

## 1 绪论

当前我国城市发展进入“存量提质”与“城市更新”并重的新阶段, 市政道路施工质量直接关系城市形象与民生体验, 但工程普遍面临工期紧、管线复杂、交叉施工多、环保要求严等挑战, 传统以事后检测、人工经验为主的质量控制模式难以适应全过程精细化管理需求。探索科技创新赋能质量控制的路径, 理论上可丰富施工技术与创新管理交叉研究, 实践上能为施工企业从“经验驱动”向“数据驱动”转型提供参考。本文按照“问题分析—技术基础—创新路径—保障机制—结论”的逻辑展开, 首先分析质量现状与关键控

制环节, 剖析传统技术局限性; 其次梳理核心施工质量控制技术; 再次重点探讨科技创新路径及保障机制; 最后得出结论与展望。研究方法包括文献研究法与实地调研法, 结合企业实践获取一手资料, 增强研究的实践针对性。

## 2 市政道路施工质量现状与关键控制环节

### 2.1 市政道路工程特点与常见质量通病

市政道路工程具有鲜明的特点: 工期紧、任务重, 常面临赶工压力; 露天作业, 受天气、环境影响大; 交叉施工多, 涉及管线、绿化、交通设施等多专业协调; 地下管线复杂, 施工风险高。这些特点决定了其质量控制难度较大<sup>[4]</sup>。

常见质量通病主要表现为: 路基不均匀沉降、压实度不足; 半刚性基层反射裂缝、松散、离析; 沥青面层平整度差、车辙、拥包、温度离析; 检查井沉陷、井周破损、路缘石歪

【作者简介】李臻(1990-), 男, 中国广西阳朔人, 本科, 工程师, 从事市政工程研究。

斜、人行道铺装不平整等。这些通病不仅影响道路使用功能，也增加了后期维护成本。

### 2.2 传统质量控制技术的局限性

传统质量控制手段以事后抽样检测为主，如灌砂法测压实度、钻芯取样检测厚度等，辅以人工巡查和经验判断，质量控制以“合格/不合格”为评价标准。这种模式存在明显局限性：

一是时效性差，检测结果滞后，无法及时指导施工过程调整；二是覆盖不全，抽样检测存在盲区，隐蔽工程质量难以追溯；三是数据离散，缺乏系统化数据积累，难以形成闭环改进；四是预警缺失，缺乏过程动态监控，质量问题暴露时往往已成既成事实，整改成本高。

### 2.3 施工全过程中影响质量的关键环节识别

市政道路施工质量控制需贯穿施工全过程。路基处理环节，清表、压实、含水率控制是影响路基稳定性的核心，直接决定道路使用寿命。基层施工环节，混合料配比、摊铺厚度、压实工艺、养护条件直接影响基层强度与抗裂性能。面层摊铺碾压环节，温度控制、摊铺速度、碾压组合、接缝处理是决定面层平整度和耐久性的关键。管线协调与附属工程环节，管线布设与道路结构层的衔接、井周回填压实、附属设施安装精度，往往是质量通病的多发点<sup>[5]</sup>。

如图 2-1 所示，从施工准备到验收交付，共涉及路基处理、基层施工、面层施工、附属工程四个主要阶段，包含 14 个关键质量控制节点。识别并重点管控这些节点，是保障工程质量的基础。

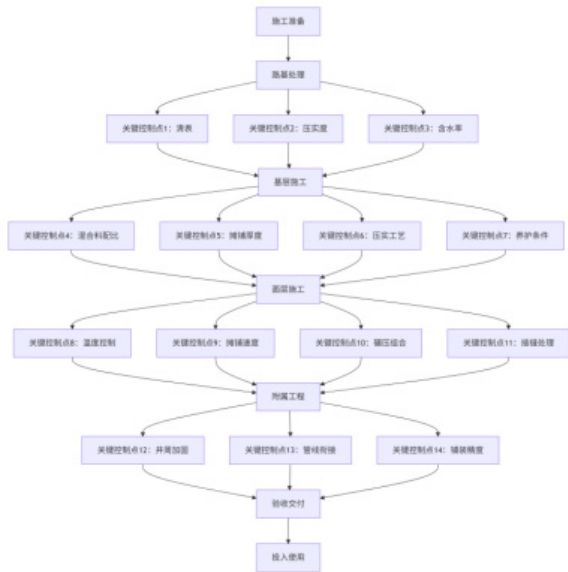


图 2-1 施工全过程质量控制关键节点图

## 3 市政道路施工质量控制关键技术体系

### 3.1 路基与基层精细化施工技术

高填方路基沉降控制方面，可采用强夯补强、冲击碾

压等技术进行补压，减少工后沉降；合理应用土工格栅、土工格室等加筋材料，增强路基整体性，提高抗变形能力<sup>[1]</sup>。

半刚性基层抗裂技术方面，采用大厚度摊铺工艺，减少施工接缝；优化混合料配比，控制水泥剂量、添加抗裂剂，提高抗裂性能；加强保湿养生，避免早期干缩裂缝。这些精细化措施能有效降低基层反射裂缝的发生概率。路基基层施工的关键技术参数如表 3-1 所示：

表 3-1 路基基层施工关键技术参数表

技术环节	关键技术	控制参数	质量要求
高填方路基	强夯补强	夯击能、夯击遍数	工后沉降 < 规定值
路基加筋	土工格栅铺设	搭接宽度、锚固长度	增强整体性，减少差异沉降
基层摊铺	大厚度摊铺	摊铺厚度、速度	减少接缝，避免离析
基层养护	保湿养生	养护时间、湿度	避免早期干缩裂缝

### 3.2 沥青面层高精度施工技术

原材料优选与配比优化是面层质量控制的基础。应严格控制集料级配、沥青性能指标，并根据现场气候、交通条件动态调整配合比。

摊铺与碾压工艺控制方面，采用红外测温仪监测温度离析，及时调整摊铺参数；合理配置碾压设备组合，确定碾压遍数与速度；智能压实技术初步应用，实现压实度实时反馈，确保压实质量均匀可靠。

### 3.3 附属工程与管线协调施工技术

井周加固技术方面，预制装配式井圈因工厂化生产、质量可控、安装便捷，正逐步替代传统现浇工艺；现浇混凝土加固则需注重与路面结构的衔接处理。路缘石、人行道精细化铺装，应严格控制基层平整度，采用定位支架、水平尺等工具，保证线形顺直、平整度达标。管线协调施工方面，管线与道路施工同步规划，避免二次开挖；管沟回填分层压实，控制压实度与路面一致，减少差异沉降。

井周加固是防止检查井沉陷、井周破损的关键措施。目前常用的井周加固技术主要有预制装配式井圈加固和现浇混凝土加固两种，其结构构造如图 3-1 所示。预制装配式井圈采用工厂化生产，质量可控性强、安装效率高，适用于新建道路和工期紧张的项目；现浇混凝土加固则更具灵活性，适用于改造工程或不规则井位。无论采用何种工艺，井周回填的分层压实、井圈与路面的高程协调、过渡层的设置均是质量控制的关键要点。

### 3.4 绿色环保施工技术

温拌沥青技术通过降低施工温度 30-50℃，减少能耗与有害气体排放，但需注意温度控制对压实度的影响，保证压实质量。建筑固废再生材料应用方面，再生骨料可用于路基填筑或水稳层，实现资源循环利用，质量控制要点在于控制含泥量、压碎值、级配稳定性。这些绿色技术在响应“双碳”

目标的同时，也对质量控制提出了新要求。

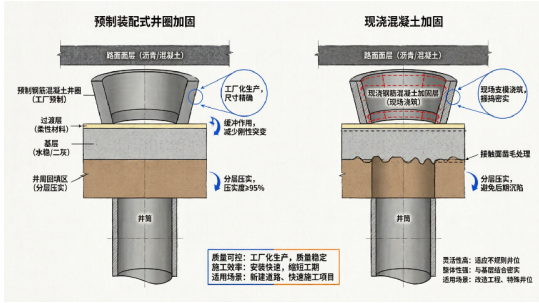


图 3-1 井周加固结构示意图（两种工艺对比）

## 4 科技创新赋能质量控制的路径与保障

### 4.1 数字化检测与监测路径

数字化质量监测系统是实现施工质量全过程管控的技术基础。如图 4-1 所示，系统采用四层架构：感知层通过布设于路基、基层、面层的各类传感器和智能装备，实时采集压实度、温度、沉降等关键质量数据；数据层依托 4G/5G、LoRa 等通信技术将数据上传至平台层；平台层完成数据的存储、治理、分析与可视化渲染；应用层面向管理人员提供质量监控、预警管理、追溯查询、报表生成等功能。这一架构实现了从“事后抽检”向“实时监测、动态预警、全程追溯”的转变，为施工质量控制提供了技术支撑。

BIM+GIS 技术的应用，可建立地下管线三维数字模型，进行碰撞检测和管线综合排布优化，从源头避免因管线冲突导致的返工与质量隐患。物联网传感技术方面，在路基、基层关键部位预埋传感器，实时监测温度、应变、含水率，实现施工过程质量数据自动采集、存储、追溯，形成“数字档案”，为隐蔽工程质量追溯提供支撑。

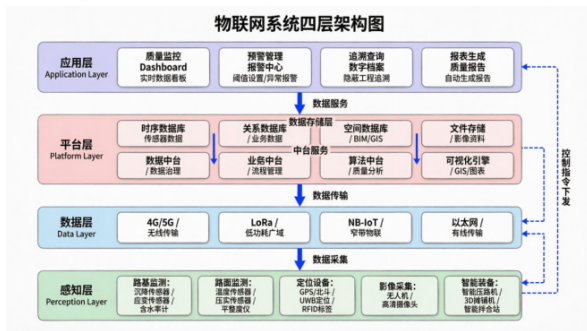


图 4-1 数字化质量监测系统架构图

### 4.2 智能化施工装备应用路径

智能压实系统基于 GPS 定位和连续压实检测技术，实时显示压实度分布图，替代传统“点式”抽检，实现压实质量“面式”全覆盖控制，有效消除压实盲区。与传统压实方式相比，智能压实系统在检测方式、覆盖率、数据反馈等方面具有显著优势，如表 4-1 所示。

3D 数字化摊铺控制利用毫米级 GPS 和激光技术，实现自动化高程控制，提升路面平整度，减少材料浪费。智慧工

地平台集成则将人员定位、设备工况、材料进场、质量检测数据集成于统一平台，构建可视化质量管控中心，实现远程监控与预警，为管理决策提供数据支撑<sup>[3]</sup>。

表 4-1 智能压实与传统压实效果对比

对比维度	传统压实	智能压实
检测方式	事后抽检（灌砂法）	实时连续检测
检测覆盖率	点状抽样（<1%）	面状全覆盖（100%）
数据反馈	滞后 1-2 天	实时反馈
质量控制	经验判断	数据驱动
质量追溯	难以追溯	全断面可追溯
人员依赖	高度依赖操作手经验	系统辅助，降低经验依赖

### 4.3 新材料与新工艺应用路径

高性能路面材料如高模量沥青、抗车辙剂、阻燃改性沥青等新型材料的应用，对提升路面耐久性具有显著效果，但质量控制需建立与之相适应的检测标准和验收指标。装配式市政构件方面，预制检查井、装配式人行道板、预制路缘石等，工厂化生产保障构件质量，现场装配减少湿作业，提升施工效率与质量稳定性，体现了标准化与工业化协同发展的方向。

## 5 结论与展望

本文通过系统分析得出以下主要结论：第一，市政道路施工质量控制正从“经验驱动”向“数据驱动”转型，数字化、智能化是必然趋势，传统事后抽检难以满足精细化管控需求。第二，科技创新路径应聚焦数字化检测监测、智能化施工装备、新材料与新工艺应用三大方向，三者协同构成质量提升的创新动力。第三，传统技术与创新技术应融合互补，发挥各自优势。

展望未来，随着智能建造与数字孪生技术发展，施工质量控制将呈现四方面趋势：智能建造深化，实现全生命周期可视化追溯；人工智能应用拓展，提升缺陷识别与预警能力；绿色低碳融合，研发低碳工艺与可循环材料；标准化建设推进，推动创新成果向行业规范转化，促进规模化应用。

### 参考文献

- [1] 李树兵, 钱梦叮. 路基施工中智能压实技术的应用研究[J]. 工程机械与维修, 2025(12): 104-106.
- [2] 刘志宏. 基于BIM的施工质量动态控制方法研究[J]. 中国科技信息, 2025(4).
- [3] 邵世平, 李艳斌. 建筑工程数字化施工技术的发展与应用现状[J]. 建筑创作, 2025(7).
- [4] 何东亮. 市政道路工程全过程质量管控体系构建[J]. 山西建筑, 2025, 51(24): 85-90. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2025.24.019.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇道路工程施工与质量验收规范: CJJ 1-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] 陈湘生, 张黎明, 刘树亚. 土木工程领域产学研协同创新模式与实践[J]. 高等工程教育研究, 2021(4): 56-62.

# Exploring Multi-Mode Integration in Interface Design Curriculum Based on BOPPPS Model

Jia Zhang

Jincheng College Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, 211156, China

## Abstract

As education transitions from informatization to intelligentization, traditional design course teaching models struggle to meet the demands of personalized learning and innovative capability cultivation. This study constructs a new teaching paradigm for interface design courses through the BOPPPS teaching model framework, integrating six instructional approaches: blended online-offline teaching, modular learning, theory-practice integration, course intelligence, task-driven learning, and teaching-competition fusion. Centered on the four core modules of “interaction, experience, service, and visual” in interface design knowledge system, this model combines intelligent learning platforms with BOPPPS framework to adapt teaching methods, enabling flexible content organization and personalized learning path guidance. The approach enhances students’ learning autonomy, improves design thinking, technical practice, and collaborative innovation capabilities, providing actionable pathways for multi-mode integration in design education.

## Keywords

BOPPPS model; interface design; multimodal; teaching

## 基于 BOPPPS 模型的界面设计课程多模式融合的教学探索

张嘉

南京航空航天大学金城学院, 中国·江苏 南京 211156

## 摘要

随着教育信息化向智能化阶段转型, 传统设计类课程教学模式难以适应学生个性化学习与创新能力培养的需求。本研究以 BOPPPS 教学模型为结构化框架, 深度融合线上线下混合教学、模块化学习、理实一体化、课程智能体、任务驱动与教赛融合六种教学模式, 构建了“以学生为中心、以能力为主线、以智能为支撑”的界面设计课程教学新范式。围绕界面设计知识体系中“交互、体验、服务、视觉”四大模块, 结合智能学习平台, 配合 BOPPPS 模型融合不同的教学模式, 调整并更新教学方法, 实现教学内容的弹性组织与学习路径的个性化引导。该模式激发了学生学习的主体性, 提升了设计思维、技术实践与创新协作能力, 为设计类课程的多模式融合提供了可操作的实践路径。

## 关键词

BOPPPS 模型; 界面设计; 多模式; 教学

## 1 引言

在数字经济与用户体验双重驱动的时代背景下, 界面设计已从单一的视觉美化演变为融合交互设计、用户体验设计、服务设计与视觉设计的系统性创新活动。在教育信息化 2.0 行动计划推动下, “互联网+教育”更是深度渗透设计类专业教学, 界面设计作为数字媒体、视觉传达等专业的核心课程, 面临着教学内容与行业技术更新不同步、实践教学资源不足、个性化指导缺失等痛点。高等院校的界面设计课程需回应这一变化, 培养具备跨学科知识、技术实现能力与用户洞察力的复合型设计人才。

BOPPPS 教学模型源于北美教学理论, 以学生为中心、

以学习成果为导向, 通过导入、目标、前测、参与式学习、后测、总结六个闭环环节, 实现教学过程的精细化设计与高效实施。BOPPPS 教学模型以其目标导向、过程互动、及时反馈的特点, 为多模式结构化教学设计提供了可靠框架。但单一模型难以全面应对界面设计课程的复杂性与多元性。因此, 本研究在 BOPPPS 模型基础上, 构建一种多样性、综合化、开放性, 以学生为主体, 注重融合与实践的课程课程教学新生态。

## 2 界面设计课程的多维知识体系

界面设计并非单一的视觉美化工作, 而是涵盖“交互、体验、服务、视觉”四大核心模块的多维知识体系(如图1), 各模块相互关联、层层递进, 共同构成完整的界面设计能力框架。

交互设计是界面设计的骨骼, 是界面系统的逻辑核心。

【作者简介】张嘉(1990-), 女, 中国江苏徐州人, 硕士, 讲师, 从事智能产品设计, 交互设计研究。

交互设计聚焦用户与产品的互动流程与操作逻辑。课程核心内容包括用户流程图绘制、交互逻辑设计、原型图制作等，要求学生能从全局出发，具备用户视角，设计出流畅、高效的交互原型图。

用户体验设计是以用户为中心，关注用户使用产品过程中的情感感受。课程核心内容涵盖用户调研方法、需求分析、体验优化策略等，要求学生具备同理心与数据分析能力，能够从用户研究中，挖掘问题、提炼需求，并优化方案。

服务设计是界面设计系统性的延伸与深化，聚焦界面背后的服务流程与用户需求满足。课程核心内容包括服务蓝图绘制、场景分析、跨触点整合等，要求学生具备系统思维与全局视野，能够将界面设计与服务流程深度适配，实现“界面、服务、需求”的闭环。

视觉设计模块是界面设计的呈现载体，关注色彩搭配、排版布局、组件样式等视觉元素的设计。核心知识包括色彩理论、栅格系统、视觉层次、设计软件操作，要求学生具备审美能力与技术实现能力，能够设计出美观、规范且符合品牌调性的界面。

维度	理论基础	核心方法	工具技能	实践应用
交互	人机交互原理，尼尔森十大原则，无障碍交互规范	用户流程图、任务场景分析、状态反馈设计逻辑	Figma/Sketch/AxurePrinciple/ProtoPieProcessOn	iOS、安卓交互规范落地，复杂场景交互设计，交互方案评审迭代
体验	用户体验核心概念、用户为中心设计、情感化设计理论	用户调研、可用性测试用户画像、旅程图痛点分析、需求排序	问卷星、热力图工具、同理心地图绘制	全链路体验闭环设计、异常场景体验优化，体验数据监测迭代
服务	服务设计概念、产品与服务关系、需求与业务平衡原则	服务蓝图、触点整合设计、需求转化方法	PRD 解读、业务流程图工具、跨部门协作技巧	界面到服务的链路，设计服务效率优化，商业价值验证
视觉	平面设计基础、品牌、VI 系统、视觉心理学	视觉层级划分、组件化设计、响应式适配原则	Figma/PS/AI/Zeplin / 蓝湖 AE/Lottie	设计系统搭建，多终端视觉适配，潮流风格应用

图 1 界面设计四大模块

四大模块相互支撑、不可分割。视觉设计为交互与体验提供呈现载体，交互设计为体验与服务提供实现路径，用户体验设计为交互与视觉提供优化依据，服务设计为整个界面设计提供系统框架。这种多维联动的知识体系，要求教学模式必须具备综合性与适配性。界面设计课程实践属性强、传统教学互动不足，加上界面设计课程的学生存在基础差异大、学习兴趣多元、创意风格各异等特点，传统“一刀切”教学模式难以满足个性化学习需求与行业实践需求。

### 3 多模式融合的 BOPPPS 教学模型构建

#### 3.1 多模式教学方法解析

线上线下混合教学：打破时空限制，线上提供可重复利用的资源，如微课、案例库、视频库等，线下环节聚焦实践操作、小组协作、创意碰撞等，通过教与学的互动、现场评测深化学习效果。。

模块化学习：把庞大的界面设计知识体系，按照“交互、体验、服务、视觉”四个维度解，拆解为独立且关联的子模

块，每个子模块设置明确的学习目标、教学内容与考核标准。学生可以根据自身基础和兴趣，在教师指导下选择学习路径和深度，实现个性化学习。

理实一体化：理实一体化强调 理论教学与实践操作同步推进，在实践中深化理论理解，在理论指导下优化实践效果。通过“理论讲解 - 案例演示 - 实操训练 - 反馈优化”的闭环流程，以项目或任务为载体，让学生在“做中学”、“学中做”，在实践中遇到问题、学习理论、应用理论、解决问题，形成“实践 - 理论 - 再实践”的认知闭环。

课程智能体：该模式是实现精准教学的核心支撑，能够适配界面设计课程的个性化教学需求。如依靠腾讯元宝创建的智能体“小界灵”，可以依据课程安排和相关的课程学习库，回应学生的疑问和学习难点，定向解决并及时反馈，为教师减负，为学生提供精准支持，实现教学的优化。

任务驱动教学：任务驱动以真实项目或设计任务为核心，让学生在完成任务的过程中主动学习、实践与创新。任务设计遵循“阶梯式”原则，从单一模块的基础任务到跨模块的综合任务，再到行业真实项目任务，逐步提升学生的实践能力与创新能力。该模式能够激发学生的学习积极性与主动性，强化学生的问题解决能力。

竞赛融合：将高水平专业设计竞赛的赛题、流程和评价标准有机融入课程教学。竞赛的真实性、竞争性和综合性，能极大提升学生的投入度、综合应用能力和职业素养，实现“以赛促学、以赛促教、以赛促创”。

#### 3.2 BOPPPS 教学模型的应用

BOPPPS 教学模型以学生为中心，强调教学过程的整体性和结构化，六个环节的层层递进、相互衔接，为界面设计的模式融合提供了清晰的流程框架，保证了教学过程的系统性和有效性。

导入环节 (Bridge-in)：激发学生的学习兴趣，建立“学习内容 - 行业需求 - 个人发展”的关联。通过案例展示、问题引导、场景创设等方式，让学生快速进入学习状态。在界面设计课程中，可结合行业前沿案例、真实设计痛点、竞赛优秀作品等开展导入。

目标环节 (Objective)：让学生明确学习方向与预期成果。需结合界面设计课程的四大模块，设置知识、技能、素养三维目标，并按基础层、提高层、优秀层进行分层设计。

前测环节 (Pre-assessment)：精准诊断学生的学习基础与薄弱点。通过线上测试、小型实操任务等方式，考查学生对模块核心知识点与基础技能的掌握情况，为后续教学策略调整提供依据。

参与式学习环节 (Participatory Learning)：BOPPPS 模型的核心环节，让学生主动参与学习过程，深化知识理解与技能应用。需融入多种教学模式，开展实践操作、小组协作、创意碰撞等活动，让学生在互动中提升能力。

后测环节 (Post-assessment)：检验学习效果，强化知

识与技能的巩固。通过分层任务、作品提交、多维度评价等方式,考查学生对学习目标的达成情况,及时发现未掌握的内容并进行补漏。

总结环节(Summary):梳理知识体系,沉淀学习成果与反思。通过知识图谱梳理、学习心得分享、创新点总结等方式,帮助学生构建结构化的知识框架,明确后续学习的优化方向。

### 3.3 基于界面设计课程的 BOPPPS 教学模型构建

以 BOPPPS 模型为结构化框架,结合界面设计课程的四大模块特性,将六种教学模式深度融入各环节,构建“六环节+六模式+四模块”的多模式融合教学模型,实现教学内容的弹性组织与学习路径的个性化引导。

#### 3.3.1 导入环节:线上线下混合+教赛融合

课前通过智能学习平台,根据学生的学习偏好,讲解每个学习模块的行业前沿热点案例、现实生活中的设计痛点、优秀的获奖或竞赛作品、优秀企业应用案例。能够根据课程进展,安排2~3次企业设计师或竞赛获奖学长线下分享经验,展示真实项目的设计流程与竞赛作品的创作思路,提出模块相关的核心问题,自然引出模块教学内容与目标。

#### 3.3.2 目标环节:模块化学习+课程智能体

根据界面设计的四大模块学习内容及要求,发布三个级别的任务目标,从基本、进阶到高级,学生自主完成认领,三个级别目标都能完成80%以上的,给予奖励机制。学生也可根据自身情况,自主调整目标层级,课程同步更新资源推送与任务设计。

#### 3.3.3 前测环节:线上线下混合

线上通过课程智能平台发布模块相关的理论测试题,与线上实操题,采集数据;线下针对模块特性,开展小型实操任务,例如,视觉设计模块的色彩搭配实操、用户体验设计模块的简易用户调研。教师基于学情画像,针对班级共性薄弱点进行快速补漏讲解,为个性化教学奠定基础。

#### 3.3.4 参与式学习环节:理实一体化+任务驱动+模块化学习

参与式学习是模型实施的关键,让学生主动参与,在互动中深化技能、激发创意、完成创作及学习任务。例如,以“智能家居APP核心功能的用户体验优化方案”为任务,

学生组队通过调研、讨论、设计方案、汇报,完成从“用户访谈、创建用户画像、绘制用户旅程图、发现痛点、构思优化方案、制作可测试原型”的全过程,教师角色转变为教练和引导者,辅助学生完成方案的设计。

#### 3.3.5 后测环节:教赛融合+课程智能体

学生按竞赛标准提交后测作品,例如,视觉设计模块提交符合竞赛规范的界面视觉作品,交互设计模块提交完整的交互原型与设计说明。课程智能体整合评价数据,生成个性化评价报告,标注作品的亮点与改进方向,并为学生推荐适配的竞赛项目与备战资源。

#### 3.3.6 总结环节:模块化学习+闭环优化

师生共同绘制模块知识图谱,串联核心知识点与实践技能,强化四大模块的关联逻辑,例如,“服务流程梳理-交互逻辑设计-视觉呈现-用户体验优化”的全流程关联。学生在线上平台提交学习反思,分享作品的创新点与改进思路,教师点评优秀反思与作品,形成集体学习成果沉淀。课程智能体整合总结环节的所有数据,优化后续的资源推送、任务设计与教学策略,实现闭环迭代。

## 4 总结与展望

本研究以 BOPPPS 教学模型为结构化框架,搭建了六种教学模式,其核心价值在于“结构化”与“弹性化”的统一,通过各环节的精细化设计,实现了教学内容的弹性组织与学习路径的个性化引导,让教学能够适应界面设计知识的复杂性、满足学生个体的差异性、响应行业实践的动态性,为设计类专业课程的信息化教学改革提供实践路径与参考范式。

### 参考文献

- [1] 胡小芳,蒋超宇,胡恒杰.基于OBE理念混合BOPPPS模式的教学改革与探索——以“动车组牵引系统检修”课程为例[J].汽车教育,2024(02):64-66.
- [2] 宋艳江,彭采宇,羊海棠. BOPPPS教学模型和学习通平台在教学中的应用——以我校“高分子成型加工与设备”课程为例[J].科学咨询,2024(21):183-186.
- [3] 周斌彬,蔡建平,林锴杰等.基于多平台融合持续性学习引导的计算机系统原理课程教学探索[J].计算机教育,2025(10):240-244.
- [4] 张俊瑞. OBE理念下“计算机组成原理”课程教学模式探索[J].计算机时代,2020(12):72-75.

# Research on Installation Technology Optimization of Subway Water Supply and Drainage Pipeline under the Concept of Green Construction

Haojiang Xiong Yang Wang

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

## Abstract

Guided by green construction principles, subway water supply and drainage pipeline installation now emphasizes material conservation, energy efficiency, and environmental harmony. This study systematically reevaluates traditional installation procedures by optimizing workflows, improving equipment compatibility, and refining operational models. These enhancements significantly boost pipeline positioning accuracy, connection reliability, and installation efficiency, while effectively controlling construction disturbances, noise pollution, dust emissions, and material waste. The optimized approach achieves a balanced integration of construction organization, operational efficiency, and ecological impact, offering a practical model for implementing sustainable construction practices in subway projects.

## Keywords

green construction; subway engineering; water supply and drainage pipelines; process optimization; resource conservation

# 绿色施工理念下地铁给排水管道安装工艺优化研究

熊浩江 汪洋

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

## 摘要

在绿色施工理念推动下, 地铁工程给排水管道安装方式呈现出节材、降耗与环境协调的趋势。围绕施工现场的资源利用、工序衔接与环境控制, 对传统安装步骤进行系统梳理, 通过工艺流程优化、设备适配改进与作业模式调整, 使管道定位精度、接驳可靠性与安装效率得到提升, 并在施工扰动、噪声扬尘与材料浪费方面形成可控的表现。优化后的工艺在施工组织、作业效率与生态影响之间取得平衡, 为地铁建设中推行绿色化施工方式提供可借鉴路径。

## 关键词

绿色施工; 地铁工程; 给排水管道; 工艺优化; 资源节约

## 1 引言

城市地下空间开发不断加速, 使地铁线路建设呈现规模扩张与技术更新并行的态势。给排水系统作为地铁结构中不可或缺的组成部分, 其安装质量关系到设备运行、安全排水与车站环境稳定。在绿色理念逐步渗透工程建设的背景下, 传统高耗能、高损耗的管道安装方式已难以满足节材、高效与低扰动的目标。施工组织方式、设备选型与工序衔接在新的要求下呈现出更多可改进空间。围绕施工过程的精细化控制, 通过对管道安装流程进行优化, 有助于在资源利用、环境协调与施工效率之间建立更适配的技术路径, 为地铁建设提供更具持续性的实施方式。

## 2 地铁给排水管道安装中的关键矛盾分析

地铁建设进入密集化阶段后, 给排水管道系统的安装矛盾愈加突出。传统工艺在深基坑、狭窄作业面与多专业交叉的条件下暴露出资源投入偏高、作业衔接紊乱与环境扰动不易控制等问题。管沟开挖范围受限, 使管道吊装、对口、固定等环节往往依赖人工精调, 导致耗时延长与误差累积。部分材料在搬运和切割过程中存在浪费, 影响资源利用率<sup>[1]</sup>。施工现场湿作业比例偏大, 排水与泥浆处理压力增加, 使作业环境易受到扰动。地铁车站与区间结构空间层次复杂, 穿越设备区、泵房和附属管井时, 安装路径受到多重结构约束, 进一步放大空间不足、工序冲突和施工组织不协调的矛盾。

在给水管线布局不断精细化的趋势下, 传统定位方式难以满足标高、坡度与中心线精确控制的需求, 管道轴线偏移与局部坡差累积可能引起排水不畅、接口受力异常等风

【作者简介】熊浩江(1993-), 男, 中国四川眉山人, 本科, 工程师, 从事市政及城市轨道交通工程施工管理研究。

险。施工手段仍以分散作业为主，信息传递滞后，使材料进场、支架安装、管段预制与接口焊接之间出现脱节现象。部分作业环节对现场条件敏感度较高，如混凝土结构未达到适宜强度便开展支架预埋或钻孔，会对结构表面稳定性造成影响。现场机具选型不够统一，不同班组使用的测量工具精度差异明显，使管段连接和立管安装过程中的累计误差无法及时修正。管道系统与风、水、电等专业在同一通道或设备层交错布设，安装窗口被压缩，从而使施工过程中的矛盾呈现叠加趋势。

### 3 绿色施工理念下的安装流程重构方向

绿色施工理念融入地铁给排水管道安装后，传统以进度推进为主的流程被迫让位于资源统筹、环境控制与工序协调并重的模式。流程重构的关键在于提升前置策划深度，通过数字化定位、BIM 协同与参数化布置，使管线走向、支吊架布置、接口数量与材料规格在施工前实现可视化推演，减少现场反复调整带来的能源与材料消耗<sup>[2]</sup>。在深基坑与狭窄区间内，绿色理念促使作业顺序更倾向精简与集约，将测量放线、支架安装、预制段拼装与接口成型以模块化方式嵌入流程，使作业面占用时间被压缩，机械操作空间得到释放。随着装配式构件应用比例提高，安装流程从随机作业转向计划化拼接模式，为降低湿作业比例和减少扬尘、噪声提供条件。

在实际施工组织中，绿色理念对资源流转方式具有显著影响。安装流程在材料供应、设备投入和人员调度上呈现更高的系统化要求，通过设置集中加工区、材料周转区以及可重复利用的运输通道，使管道切割、坡口加工、试组装等环节从现场移至可控区域，在源头减少废料、噪声和粉尘。流程重构还强调设备适配，通过引入自动定位仪、数字测量仪、轻型提升机具及管道对口辅助装置，使安装精度与作业效率得到同步提升。地铁车站和区间空间形态多样，流程设计需要将不同作业面之间的干扰降至最低，以减少多专业交叉造成的重复搬运、等待时间与能耗浪费。绿色理念贯穿流程，使材料消耗结构从“现场即时需求”转向“工序集成供应”，为资源优化奠定基础。

在安装流程重新构建过程中，环境控制策略成为不可忽视的组成部分。施工区域内的湿作业面积通过流程调整得以缩减，排水、泥浆与清洗作业被限制在特定区域，使环境扰动更具可控性。通风、照明与噪声管理被纳入流程编排，使不同阶段的环境指标保持在合理区间。对排水管道、消防立管、设备用水系统等不同类型管线设置差异化的安装节奏，使施工人员能够在明确的环境控制条件下完成任务，从而降低资源浪费与返工率。随着绿色理念持续深化，安装流程正在由经验型操作向精细化、数字化与低扰动模式过渡，使地铁给排水管道安装能够与节能环保目标保持一致，并在施工组织层面形成稳定的运行逻辑。

### 4 管道安装关键环节的技术完善策略

管道安装的关键环节在绿色施工理念的影响下呈现出更高的精度要求与更严的环境约束。定位测量作为起点，需要在复杂空间中实现标高、轴线与坡度的精准控制。传统人工测量受现场光线、结构遮挡与空间局限影响较大，易出现累计偏差，导致后续对口难度增加。为提高安装一致性，可通过全站仪、激光测距系统与数字化标识技术形成连续测量链，减少人为调整带来的不稳定因素<sup>[3]</sup>。支吊架布置对管道稳定性影响显著，间距、受力方向与构件材料直接决定整体结构的抗震性能与耐久性，通过模块化支撑构件与可调节装置，可在狭窄工位中实现快速匹配，使支撑体系更为精细与可靠。

在管段拼装与接口处理过程中，工艺缺陷易引发渗漏、变形与失稳等风险，而精确的对口与连接方式是技术完善的核心。受限空间内的人工对位误差频发，加之接口种类多样，各类胶圈、法兰、焊缝或卡箍式连接对施工手法敏感度不同，使得稳定性难以统一。采用对口校准装置、管段导向滑轨与机械化夹持工具，可改善对位精度，使接口形成过程中应力分布更加均匀。焊接作业对环境湿度、光照与通风条件有较高依赖，流程中需构建局部可控作业区，提高焊缝成型质量。对于柔性接口，通过调整插入深度控制、润滑均匀性与密封圈预压状态，可提升抗变形能力，使系统在地铁运营中的动态荷载作用下保持长期稳定。

在安装阶段的资源优化与环境控制中，清洁化作业与低扰动技术显得尤为重要。通过将切割、坡口与预制拼装尽量转移至加工区，使现场湿作业量得到减少，从而降低泥浆、粉尘与废料扩散。提升设备配置，如使用低噪声切割机、环保型清洗设备与可回收材料收集装置，可在不影响施工效率的情况下改善工地环境。狭小区域内的排水管、消防管与设备水系统往往交叉密集，通过优化吊装途径、减轻构件重量与设置临时导向槽，可在高空或侧向作业中提升安全性与可控性。随着绿色理念不断深化，各环节的技术完善逐步促使管道安装从经验依赖向标准化、机械化与精细化方向迈进，使整体施工过程在质量、效率与环境协调性方面呈现协同提升趋势。

### 5 施工资源与环境控制的协同优化措施

在地铁给排水管道安装过程中，施工资源配置与环境控制存在高度关联性，任何一方失衡都会对整体效率与绿色施工目标产生影响。为了在有限空间内实现材料、设备与作业面的协调，需要将资源投放节奏与管线安装流程进行匹配，使供应链与施工链形成一致的运行逻辑。材料储放区经过合理划分，可减少无序堆放造成的二次搬运与损耗；可重复利用的运输通道与周转容器能够提升管道、支架及辅材运输效率，使资源流动保持连续稳定。施工设备方面，通过引入轻量化吊装装置、低噪声机具与节能型照明系统，不仅降

低能耗,还减少环境敏感区的扰动,为管道安装创造更加适宜的作业环境。资源调度方式从粗放式供应向计划化投放转变,使作业进度、材料消耗与设备占用能够保持较高的同步性。

在实际安装区域内,环境控制措施贯穿作业始终,对施工秩序与人员配置具有引导作用。深基坑与隧道空间封闭性强,通风不足会加剧湿作业的影响,使粉尘、噪声与潮湿环境叠加,影响接口成型质量与设备运行状态。通过分区通风、定点降噪与独立排水系统构建,使各区域在不同阶段具备相对稳定的环境条件。湿作业量通过工艺转移方式得以减少,泥浆与废水集中收集后可回流用于清洗与降尘,减轻排放压力。照明系统采用定向布置,使深部空间在安装过程中保持稳定光源,减少测量偏差与设备误操作。针对区间狭窄、净空不足的区域,通过设置临时支撑平台、可移动式操作架与柔性防护设施,使关键工序的环境可控性进一步提高。

随着绿色标准不断提高,施工资源与环境控制之间的协同机制表现得更加突出。为减少现场施工量,预制化与半装配化构件投入比例逐渐提高,使大量扰动性作业转移至受控区域,从根本上降低噪声、粉尘与固废生成强度。管道支架、接口组件与密封材料按批次校核,使材料损耗率得到有效压缩,并减少返工概率。垃圾分类投放、材料余料回收与设备节能管理形成闭环,使资源循环在工地内部得到延续。通过将施工动态、材料消耗与环境监测数据纳入统一平台,管理人员能够实时调整作业节奏,使资源利用与环境控制保持协调,使给排水管道安装在复杂的地铁结构中展现更稳定、有序与绿色化的施工模式。

## 6 优化工艺在地铁建设中的综合成效梳理

优化后的地铁给排水管道安装工艺在现场表现出更高的整体协调性,各环节之间的衔接更加紧密,减少了因空间受限、专业交叉与流程紊乱导致的反复调整。通过数字化定位、模块化支撑构件与机械化辅助装置的应用,管道轴线控制、坡度校核与接口成型趋于稳定,安装误差被有效抑制,流水作业节奏更加清晰。深基坑、车站设备层与区间隧道等多种作业空间因预先规划的流程重构而得到更高层次的适配,使安装进度保持连续性,减少等待时间与重复搬运的资源浪费。

在绿色施工指标的作用下,优化工艺对材料与能耗的影响尤为明显。预制化与集中加工的推广,使现场湿作业明显减少,粉尘、废水与噪声等环境负荷下降。通过系统化的材料周转体系,支架、管段与密封组件的损耗率被压缩,资源流动更加顺畅。节能型机具与高效照明系统的投入,使作业面在深部空间仍能保持良好的工作条件,减少因环境不足造成的工序波动。施工设备的运行负载趋于平稳,使能源消耗结构更为合理。不同专业之间的管线布局因预先协调而更具条理,使安装过程在狭窄空间中保持较高的作业效率。

随着优化措施逐步落地,质量稳定性与环境可控性呈现同步提升趋势。给排水系统的密封性、耐久性与抗振性在标准化工序约束下得到增强,接口渗漏与结构变形的风险显著降低。施工现场的通风、照明与排水系统因流程调整而更具秩序,使安装人员在受限空间中的操作条件得到改善。干扰因素的减少,使作业环境更易维持在适宜区间。绿色施工理念贯穿于各项工艺中,使地铁建设在资源配置、作业组织与环境表现之间形成稳定的技术体系,为地下工程的给排水管道安装展现出更加高效、清洁与可控的施工格局。

## 7 结语

绿色施工理念的引入,使地铁给排水管道安装在流程组织、技术路径与资源配置方面呈现出新的发展方向。随着工艺不断完善,安装过程在精度控制、环境稳定性与作业连续性方面展现出更高水平。管道定位、支吊架布置与接口成型等关键环节在数字化与机械化手段的支撑下更具可控性,减少了空间限制与多专业交叉带来的施工矛盾。资源调配方式的转变,使材料、设备与环保措施形成协同机制,推动施工现场形成整洁、高效的运行格局。绿色理念贯穿各阶段,使地铁建设在安全性、环境协调与施工质量之间实现了较为平衡的技术路径,为地下工程中给排水系统的可靠构建奠定了坚实基础。

### 参考文献

- [1] 林秋敏.绿色施工理念下再生建材对市政工程造价控制的影响研究[J].陶瓷,2025,(12):147-149.
- [2] 高健,张鹏翔,杨鹏,等.绿色施工技术在地铁盾构施工中的应用[J].新疆有色金属,2025,48(06):86-87.
- [3] 魏朝军.绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新路径[J].中国房地产业,2025,(34):46-49.

# Practice Optimization and Innovation Path of HD Live Streaming Technology in the Program Production and Broadcasting of County-level Converged Media Center

Jiayi Luo

Kashgar City Media Convergence Center (Kashgar City Radio and Television Station), Kashi, Xinjiang, 844599, China

## Abstract

In the new era, high-definition live broadcasting technology has become a crucial technical support for county-level media convergence centers to enhance program production quality and dissemination efficiency. Based on the actual development of county-level media convergence, this paper systematically analyzes the application value and practical challenges of high-definition live broadcasting technology in program production, with a focus on equipment upgrades, system coordination, technical maintenance, and talent support. Drawing on practical experience, the study proposes implementation pathways for optimizing and innovating high-definition live broadcasting technology, including comprehensive planning of technical systems, multi-terminal integration, intelligent network transformation, and technical management with talent cultivation. The goal is to establish a standardized, centralized, and sustainable high-definition production and broadcasting system, thereby improving program quality and operational efficiency, strengthening the dissemination power of mainstream public opinion, and providing solid technical support for the high-quality development of media convergence.

## Keywords

high-definition live broadcasting technology; county-level media convergence center; program production and broadcasting; practical optimization; innovative approaches

## 高清直播技术在县级融媒体中心节目制播中的实践优化与创新路径

罗佳艺

喀什市融媒体中心（喀什市广播电视台），中国·新疆喀什 844599

## 摘要

新时代背景下，高清直播技术已成为县级融媒体中心提升节目制播质量与传播效能的重要技术支持。本文立足县级融媒体中心发展实际，系统分析高清直播技术在节目制播中的应用价值与现实困境，重点围绕设备更新、系统协同、技术运维及人才保障等方面展开研究。在此基础上，结合实践经验，提出从技术体系统筹规划、多终端融合应用、智能化网络化改造以及技术管理与人才培养等方面推进高清直播技术优化与创新的实施路径。旨在通过构建规范化、集约化、可持续的高清制播体系，提升节目质量与运行效率，增强主流舆论传播力，为融媒体高质量发展提供坚实技术保障。

## 关键词

高清直播技术；县级融媒体中心；节目制播；实践优化；创新路径

## 1 引言

在融媒体深度融合与广播电视高质量发展的背景下，县级融媒体中心正面临节目形态升级与技术体系重构的双重任务。高清直播技术作为当前广播电视工程领域的重要手段，在提升节目制作质量、拓展传播渠道和优化制播流程等方面发挥着日益突出的作用。深入研究高清直播技术在

县级融媒体中心节目制播中的应用价值与实践路径，对于推动县级媒体技术升级、增强主流舆论传播力与影响力具有重要意义。

## 2 高清直播技术在县级融媒体中心节目制播中的应用价值

### 2.1 提升节目画面质量与传播效果，增强县级融媒体内容吸引力

高清直播是以高清晰度、高亮度以及高稳定性的特点来保障县融媒节目的高质量播出。采用高清摄像机、高清导

【作者简介】罗佳艺（1996-），女，中国陕西汉中，从事广播电视工程技术研究。

播台、高清线路等方式进行拍摄,在图像清晰度、清晰感以及立体感上都有所提高,并解决了以往低清晰度节目画面不清晰、无法展现更多的信息等问题。在新闻直播、大型活动以及专题节目中,高清直播信号能更好地将现场情况展现给观众,让观众更有身临其境的感觉,并对节目产生更大的信赖<sup>[1]</sup>。

## 2.2 拓展直播应用场景边界,提升融媒体内容生产灵活性

高清直播技术的应用,使县级融媒体中心节目制播由传统的演播室制播模式向更多场景、更多形态延伸,在政务活动、文旅宣传、基层治理现场及突发事件报道等场景下,利用高清移动直播设备+网络传输的方式,“随采、随编、随播”的实现成为可能。此外,融媒体中心还可以利用高清摄像机及传输线缆进行节目的外采,在需要的情况下迅速搭建一套临时转播系统,开展现场采访、远程转播、异地联合录制等工作。

## 2.3 优化节目制播流程结构,提高整体生产与播出效率

高清直播系统应用于节目制播过程中,有利于促进传统“采—编—播”分离模式走向集中、集成化。利用高清制播一体系统将采、录、切、播以及多渠道传输有效连接起来,在一定程度上减少了中间转换环节,提高了工作效率。在具体实践中,高清直播系统可以与非编系统、媒资系统进行数据交互,在直播播出同时将节目直接存入素材库中,便于后期编辑、二次传播以及新媒体发布等<sup>[2]</sup>。

# 3 高清直播技术在县级融媒体中心节目制播中的现实困境

## 3.1 制播设备更新滞后,制约高清直播技术整体应用水平

当前,在县级融媒体中心应用高清直播技术的过程中,存在设备更新不及时、设备陈旧的问题,这些问题是影响高清直播技术的应用效果和水平的重要因素。由于缺乏长时间的资金支持,许多县级融媒体中心的广播电视设备还处于低技术水平的状态,不能满足高清制播的要求,其二,在设备方面,无论是硬件还是软件的支持都很欠缺。由于设备老化,致使整个技术系统水平不能与日新月异的广电业务相适应。如传统模拟制播设备及非高清摄像机无法实现高标清图像分辨率,达不到播出节目画面的要求;对高清信号的拍摄、切换、编码、传输、上屏都需要高性能的设备来保证。但因为购置及维护费用高,很多县级融媒体中心设备更新滞后,总体技术应用水平难以提升,制播质量难以满足受众不断提高的视听需求<sup>[3]</sup>。

## 3.2 系统兼容与协同能力不足,影响多平台同步制播效果

随着融媒体的发展,县级融媒体中心节目的制作播出

也逐渐向着多个平台、多种终端同时播出方向发展。但是,技术设备以及系统之间的相容性问题是制约高清直播技术应用的一大难点。因为不同的平台之间运用的技术标准以及协议不尽相同,在进行高清直播技术应用的过程中,各系统的联动性差,不能确保直播内容在不同平台间同时、平稳播出。

在实践层面,县融中心在节目的生产中会采用不同设备、软件以及平台用于不同的制播环节,在设备、平台之间的数据传送、视频编码、音频同步等方面存在不兼容的问题,因此直播内容不能够在各平台上顺畅地转换,降低观看者的感受程度。比如在直播中,有的平台会出现延时、画面质量差或者声音和图像不同步的现象,大大影响了节目的播出效果。所以加强系统的兼容性 & 配合度,保证各平台之间能够完美衔接,是增强高清直播节目播出效果的关键所在<sup>[4]</sup>。

## 3.3 技术运维与保障能力有限,增加直播运行风险

技术运维与保障是保障高清直播技术能够在县级融媒体中心内顺利应用的关键因素之一。但由于县级融媒体中心普遍存在技术人员人力资源较少、资金投入较少等情况,使得其在技术运维方面的保障能力严重缺乏,在进行高清直播的过程中,技术保障环节的工作较为关键,无论是硬件损坏、信号中断还是系统崩溃,都有可能造成直播效果的失败或者中断。

由于技术人员专业化程度高、工作经验少、保障能力弱,在直播中存在设备损坏、网络卡顿、信号中断等情况发生的可能,造成直播运行风险较大;而且大部分县融中心没有完备的应急处理预案和技术支持机制。一旦发生直播过程中的中断、信号中断等突发状况,缺少快速有效的技术人员及应对措施,极易导致直播事件的失败或者拖延,影响到融媒体传播效果,因此加强技术维护人员保障力度和技术支持机制建设也是保证高清直播技术支持的重要手段之一。

## 3.4 专业技术人员储备不足,制约高清直播能力持续提升

高清直播技术的应用不仅需要相应的硬件设施支撑,也需要专业技术人员来进行管理和应用。但大部分县级融媒体中心的专业技术人员都相对匮乏,在县级融媒体中心中,技术人员大多来源于传统的广播电视台,对于新的高清直播技术了解不足。其次,没有对新科技进行专门培训以及技术支持,在实际应用高清直播技术的过程中,相关人员不能够顺利地完器调试、信号收集、数据分析等工作任务,无法实现高清技术优势的有效发挥。

另外,由于县级融媒体中心对技术人员引进、培训等方面的投入不多,加上现有技术人员的能力水平良莠不齐,在一定程度上降低了队伍的整体技术水平。很多员工仅能完成一些常规的工作任务,遇到一些较难处理的问题时无法快速地解决问题,致使技术更新速度缓慢。综上所述,县级融媒体中心应加强对专业技术人员的培训工作,提高工作人员

的专业技术水平及创新能力,保证高清直播技术在实践应用中的稳定性<sup>[5]</sup>。

## 4 高清直播技术在县级融媒体中心节目制播中的优化与创新路径

### 4.1 统筹规划高清直播技术体系,推进制播系统整体升级

面对制播系统升级缓慢、标准不一等问题,县级融媒体中心应在整体设计层面制定出高清直播系统的总体规划,并分期分批实施。在建设高清制作播出能力的过程中,首先结合当前的制作播出系统架构、制作播出流程以及实际工作情况,明确“采、编、播、传、管”的技术提升方向,逐步替换模拟、低清制式设备,采用1080P及以上摄像、切播、编码、播控设备。

同时,在项目推进中坚持“抓大放小”,首先将直播间的电视播出由标清向高清转化;其次将部分新闻现场采访和主要直播间切换为高清信号;最后将部分专题栏目以及重大事件转播也逐步实现高清播出。采用整体招标,分步进行的形式来降低设备投资。根据一段时间的工作实践来看,经过主要切换台和重要直播通道改造之后,高标清直播节目画面分辨率稳定率达到98%以上,画面扭曲、掉线情况大大降低,为后期各平台播出打下了良好的技术基础。

### 4.2 强化多终端制播技术融合,提升节目传播覆盖面与实效性

为解决目前县级融媒体中心各平台同时编辑制作的能力差的问题,需要将制播系统同各新媒体平台进行深度集成,在系统中建立统一的视音频采集、制作、发布系统框架。在实际建设过程中,采用能够同时兼容广电、网络、移动端以及第三方新媒体平台等多种协议编码方式的高清直播编码器,同时向各平台推送直播节目信号,杜绝重制、多级转码的质量损失。

在实际运行过程中将传统播控系统 with 融媒体指挥平台进行融合,“一次采集、多元生成、多端发布”,实现高清直播信号在进主控的同时输出到电视端和网络端,平均延时在3—5秒以内,多终端的画面一致性大大提高。从数据可以看出,综上所述,在多终端融媒播出的情况下,重大活动直播的总覆盖量比单条电视播出提升了近四成,用户参与度也随之上升,增强了县级融媒资讯的覆盖面及辐射力。

### 4.3 引入智能化与网络化技术手段,增强直播系统稳定性与扩展性

针对技术运维力量薄弱、直播运行风险高的问题,应用智能化、网络化技术提高系统的稳定性是重要途径之一。一方面采用IP的高清制播网络将信号传输方式从传统的专线转变为大带宽可冗余的网络传输;另一方面借助于智能监测技术和远程管理技术,实现对重要设备运行情况监测。

实践上,喀什市融媒体中心采用建立网络化直播传输系统的方式,在关键节点实现双路热备并进行自动切换,确保因突发事件导致的直播中断不超过30秒钟;利用智能化报警平台,实现对信号质量、设备运行温度以及带宽使用情况的智能预警,技术人员可以在问题升级之前进行处理。在实际运行中发现,经过此次改进之后,直播事故的发生概率相比以前降低了近一半,对高清直播的稳定性和持续性的保障得到了很大提升,同时也为今后相关工作的开展预留了充足的缓冲空间。

### 4.4 完善技术管理与人才培养机制,保障高清直播长效运行

在专业技术人员缺乏的情况下,县级融媒体中心应加强技术管理制度建设和人才队伍建设两个方面的工作。一方面,在管理制度上建立一套完整的高清直播技术标准和技术职责体系,以确保各项工作的开展有章可循、有规可依;另一方面,坚持“内培外引”,强化技术队伍建设。

在实际工作中,结合每年度的技术培训安排,对原有技术人员进行高清制播、网络传输以及新媒体直播等专题培训,平均每年达到40小时以上的培训时间,并积极参与自治区级技术交流和项目锻炼,促使骨干人员学习掌握新的技术、新的流程。经计算分析发现,经过培训后,技术人员能够独立操作使用高清直播设备的能力从不足60%上升到90%以上,应急处理能力显著增强,为高清直播系统长期稳定工作奠定了人才基础。

## 5 结语

实践表明,高清直播不仅改善了节目画面质量和传播效果,也在推动制播流程重构、技术体系升级和管理机制完善等方面发挥了积极作用。但同时,设备条件、系统协同和人才结构等问题仍对技术效能的充分释放形成制约。面向未来,县级融媒体中心应坚持统筹规划与循序推进相结合,在夯实技术基础的同时注重运行管理与人才培养的协同提升,为地方主流舆论建设和区域文化传播提供更加有力的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 李海涛.全媒体时代下的新媒体直播技术研究[J].电视技术,2024,48(09):172-174+187.
- [2] 王荣谊.5G+8K移动直播技术在广播电视工程中的应用[J].卫星电视与宽带多媒体,2024,21(01):19-22.
- [3] 郑雯,施畅,万旭琪.回归“媒介逻辑”:县级融媒体中心“融合地方”的路径探索[J].现代出版,2023,(05):90-102.
- [4] 卢旭.县级融媒体中心助力基层社会治理的问政模式[J].传媒,2023,(15):33-35.
- [5] 梁岷.县级融媒体中心建设中移动直播技术的应用[J].中国传媒科技,2021,(05):61-63.

# Structural Stability Analysis and Optimization of the Repairing Construction of Collapsed Breakwater-The Practice of Jiangsu LNG Breakwater

Heyang Li Jiaquan Hou

CNOOC Jiangsu Natural Gas Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224500, China

## Abstract

In response to the structural stability repair needs after the collapse of the S2+300-S2+400 section of the Jiangsu LNG project breakwater, this study analyzes the collapse mechanism, conducts stability assessment, and optimizes the repair plan based on on-site investigation and monitoring data. Relying on drone aerial photography and underwater sonar scanning to identify the collapse range and characteristics, using finite element method to build a stability analysis model for the breakwater structure, and identifying the key causes of structural instability; Adjust the block layout plan and construction parameters based on the technique of repairing the twisted crown block protective surface. The practical case of the project shows that the optimized repair plan has increased the overall anti slip safety factor of the breakwater from 1.18 to 1.52, and the anti overturning safety factor from 1.25 to 1.63. The structural settlement does not exceed 5mm, which complies with the provisions of the "Design Code for Breakwaters and Banks" (JTS154-2018). This study can provide scientific basis and technical support for the structural stability control of similar collapsed breakwater repair projects.

## Keywords

breakwater repair; structural stability; finite element analysis; twisted king block; optimization plan

## 坍塌防波堤修复施工中的结构稳定性分析及优化—江苏 LNG 防波堤工程实践

李赫阳 侯加全

中海油江苏天然气有限责任公司, 中国·江苏 盐城 224500

## 摘要

针对江苏LNG项目防波堤S2+300-S2+400段坍塌后的结构稳定性修复需求开展处理, 依托现场勘查与监测数据, 分析坍塌机理、做稳定性评估、优化修复方案。依靠无人机航拍、水下声纳扫测查明坍塌范围和特征, 靠有限元法搭建防波堤结构稳定性分析模型, 找出结构失稳关键诱因; 依托扭王字块护面修复工艺, 调整块体布置方案和施工参数。项目实操案例显示, 优化后的修复方案让防波堤整体抗滑移安全系数从1.18升到1.52, 把抗倾覆安全系数从1.25提至1.63, 结构沉降量不超过5mm, 符合《防波堤与护岸设计规范》(JTS154-2018)规定。该研究可为同类坍塌防波堤修复工程的结构稳定性控制提供科学依据与技术支撑。

## 关键词

防波堤修复; 结构稳定性; 有限元分析; 扭王字块; 优化方案

## 1 引言

港口工程的核心防护结构为防波堤, 是抵御风浪、守护港池水域的核心力量, 结构稳定程度直接关联港口运营安全<sup>[1]</sup>。江苏 LNG 项目防波堤采用抛石斜坡堤构造型式, 总长 2510m, 堤顶标高 4.0m, 按允许部分越浪标准设计, 建成后切实保障 LNG 码头及航道通航安全。受复杂海洋环境、

波浪长期冲击及地质条件影响, 防波堤 S2+300 至 S2+400 段出现整体滑移坍塌, 未发现块石和连锁排缺失, 但会严重破坏防波堤整体防护作用, 若未及时修复, 可能让坍塌范围变大, 危及 LNG 船舶靠泊及能源保供安全<sup>[2]</sup>。修复传统防波堤大多采用经验性施工方案, 既无坍塌机理的系统分析, 也无结构稳定性的量化评估, 完成修复的结构易再次失稳<sup>[3]</sup>。以江苏 LNG 防波堤坍塌修复工程为研究对象, 采用现场勘查、数值模拟和工程实践结合的方法, 彻析坍塌机理, 构建结构稳定性分析模型, 优化修正施工方案, 精准修复坍塌防波堤 维持长期稳定, 为北方类海洋环境内的防波堤修复工

【作者简介】李赫阳(1989-), 男, 中国辽宁凌源人, 本科, 工程师, 从事液化天然气储运工程研究。

程提供技术借鉴。

## 2 工程概况与坍塌特征

### 2.1 工程概况

江苏 LNG 项目防波堤坐落盐城市滨海县滨海港区南港池,地理坐标 34° 18' N, 120° 16' E, 用抛石斜坡堤结构,堤身主体的组成部分有 800-1000kg 块石、二片石垫层、土工格栅及 10t 扭王字块护面,堤顶标高 4.0m, 外侧边坡及内侧坡体坍塌段对应防波堤 S2+300-S2+400 区段,长度值 100m, 这片区域紧邻南港池口门,受波浪、潮流作用明显,实测最大有效波高 2.57m,潮流流速 0.5-1.0m/s。工程区地质条件繁杂,表层为淤泥质粉质黏土,厚度 3 至 5m,承载能力偏弱,底部为粉砂层,10-15 米厚,含大量孔隙水,基本地震烈度 VII 度,损害结构稳定性,修复工程核心工作是补装坍塌段的扭王字块,保障防波堤结构稳固及防护功能复原。

### 2.2 坍塌特征与机理分析

用无人机航拍巡查、水下声纳扫测,列出坍塌段特征:坍塌形态为整体滑移,滑移方向为防波堤外侧,滑移距离 1.2m 上下,坍塌段部分堤身边坡坡度为 1:最大堤顶沉降 0.3m;水下声纳扫测结论,坍塌堤脚带局部冲刷坑,最大冲刷深度值 0.8m,部分护面扭王字块移位、缺失,缺额约 350 块。

坍塌机理分析结果显示,3 方面因素共同作用引发失稳,一是海洋环境长期影响,浪涛反复拍打堤身,引发护面块体松动、堤身块石磨损,损坏结构整体连贯性;二是地质条件作用,表层软土承载强度不足,因堤身自重和波浪荷载出现不均匀沉降,造成结构滑移;三是潮流冲刷作用,堤脚周边潮流流速高,长期冲刷形成冲刷坑,损坏堤身基础稳固性,最后引发整体崩塌。

## 3 结构稳定性分析模型

### 3.1 模型建立

用 Midas GTS NX 有限元软件搭建防波堤结构稳定性分析模型,模型覆盖坍塌段及两侧各 50m 正常段,沿堤身轴线延伸 200m,垂直轴线宽 100m,模型单元用实体单元模拟堤身块石、垫层、土工格栅及地基土,用壳单元模拟扭王字块护面,单元总数近 120000 个。材料参数经现场取样试验判定(表 1),堤身块石采用摩尔-库仑本构模型,土工格栅采用线弹性本构模型,地基土借助修正剑桥本构模型模拟软土非线性特性,给定边界条件:模型底部做固定约束,侧面安装水平约束,顶部为自由面,兼顾波浪荷载、潮流力及结构自重作用,以规则波为标准计算波浪荷载,用静压力等效法加在堤身表面<sup>[4]</sup>。

表 1 主要材料物理力学参数

材料名称	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	弹性模量 (MPa)	泊松比
800-1000kg 块石	26.5	0	40	800	0.20
二片石垫层	25.8	0	38	600	0.22
土工格栅	20.0	—	—	500	0.30
淤泥质粉质黏土	18.5	15	8	15	0.42
粉砂	20.8	0	32	80	0.35
10t 扭王字块	26.0	—	—	1000	0.21

### 3.2 稳定性评价指标

依照《防波堤与护岸设计规范》,选抗滑移安全系数、抗倾覆安全系数及结构沉降量作为稳定性评价核心指标:抗滑移安全系数(K<sub>s</sub>):堤身沿滑动面抗滑力和滑动力的比值,K<sub>s</sub>要≥1.3;抗倾覆安全系数(K<sub>t</sub>):堤身抗倾覆力矩与倾覆力矩的比值,K<sub>t</sub>需≥1.4;结构沉降量(s):堤顶及堤身关键断面的最大沉降量,s必须≤10mm。

### 3.3 原结构稳定性分析结果

原坍塌段防波堤稳定性分析数据见(表 2),抗滑移安全系数只有 1.18,抗倾覆安全系数 1.25,全都达不到规范标准,堤顶最大沉降值是 18mm,滑动面核心位置是地基软土层与堤身块石的接触面,倾覆转动中心设为堤脚位置,与现场坍塌特征吻合,确认模型的可靠属性<sup>[5]</sup>。

表 2 原结构稳定性分析结果

评价指标	计算值	规范要求	是否满足
抗滑移安全系数 (K <sub>s</sub> )	1.18	≥1.3	否
抗倾覆安全系数 (K <sub>t</sub> )	1.25	≥1.4	否
堤顶最大沉降量 (s)	18mm	≤10mm	否
滑动面位置	软土层与堤身接触面	—	—

## 4 修复方案优化与稳定性分析

### 4.1 修复方案设计

依据坍塌机理和稳定性分析结论,确定以扭王字块护

面补强、堤脚防护及软基加固为核心的综合修复方案,围绕结构失稳核心问题做针对性设计,兼顾修复效果和工程性价比。扭王字块吊装安放如图 1 所示,采用“坡顶规则排布+

坡脚双层品字形排布”的差异化方案，修复坡顶幅宽 3m，依 1.2m 间距排布 75 块扭王字块，增强堤顶抗浪越功效；坡脚为抗滑移关键区域，设置两道扭王字块防护带，第一道在冲刷坑边缘设双层品字形排布，块体留 0.8m 间距增强护面密实度，第二道加密布置在坍塌滑移边界，合计补充 350 块 10t 扭王字块，使护面与堤身协同受力；堤脚最大冲刷深度 0.8m 的区域抛填大块石，填补冲刷坑，修成宽 5m、厚 1.5m 的护脚平台，同步借助护脚平台分摊堤身自重荷载，减小地基土附加应力。



图 1 扭王字块吊装安放

#### 4.2 优化方案稳定性分析

借助建立的有限元模型开展优化后修复方案稳定性分析，结果详见表 3。把防波堤抗滑移安全系数升到 1.52，把抗倾覆安全系数拉到 1.63，把堤顶最大沉降量控制到 4.8mm，全部指标都达标规范要求，结构稳定性大幅增强。应力分布分析结果表明，优化后堤身应力传递路径更合理，最大主应力汇聚堤脚护面块石区域，最高值 1.8MPa，远低于块石抗压强度，不存在局部压溃风险；扭王字块护面应力分布平稳，应力最大值 0.6MPa，材料维持弹性工作状态，块体齿角彼此钩连，有效分散波浪冲击荷载；地基土附加应力大幅下降，软土层最大附加应力从 0.35MPa 减至 0.22MPa。同时借助模型模拟极端浪作用后的结构变形，堤身最大水平位移只有 2.1mm，不存在倾覆或滑移动向，确认优化方案的抗灾实力。

表 3 优化方案稳定性分析结果

评价指标	计算值	规范要求	提升幅度
抗滑移安全系数 ( $K_s$ )	1.52	$\geq 1.3$	+28.8%
抗倾覆安全系数 ( $K_t$ )	1.63	$\geq 1.4$	+30.4%
堤顶最大沉降量 (s)	4.8mm	$\leq 10$ mm	-73.3%
滑动面位置	无明显滑动面	—	—

#### 4.3 施工参数优化

维持修复施工过程结构稳定，杜绝施工扰动造成二次失稳，结合工程现场水文地质条件及施工设备性能，针对扭王字块安装、堤脚抛石施工两大关键工序，优化施工参数精度，确定专项施工管控标准。扭王字块安装推行“低平潮时段施工+起重船精准定位”方案，选定潮差  $\leq 0.5$ m、流速  $\leq 0.3$ m/s 的低平潮时段开展作业，起重船采用 GPS+北斗双定位系统，严格把控作业半径为 9.6-16.0m，吊臂仰角  $30^\circ - 75^\circ$ ，块体

吊装下放速度  $\leq 0.5$ m/s，安装偏差  $\leq 0.3$ m，相邻块体齿角互锁勾连、错列放置，维持护面整体完整，每完成 10 块安装就做一次平整度检测，不合格马上返工；堤脚抛石运用“分层抛填、分层整平”工艺，分三层投放 1000-1500kg 大块石，每层厚 0.5m，先等下层块石稳定，再开展上层抛填作业，抛填完工后，潜水员借助水下整平仪实施整平，平整度偏差  $\leq 0.2$ m，让护脚平台受力均匀，避免局部应力聚集。

### 5 工程应用效果

#### 5.1 施工过程监测

修复施工作业阶段，安装 6 个沉降监测点、4 个水平位移监测点和 3 个应力监测点，实时监测施工过程的结构稳定性，监测结果表明，施工时段堤顶最大沉降量 3.2mm，最大横向位移 1.5mm，2MPa 为堤身应力最大值，未发现异常变形或失稳现象，证实施工方案合理。

#### 5.2 修复效果评价

修复工程 2026 年 3 月完工，完工后用无人机航拍、水下声纳扫测及荷载试验评估效果。外观质量扭王字块整齐布设，不存在缺失、移位状况，修整堤身边坡，坡度契合设计要求 (1:3)，堤脚冲刷坑彻底填实；稳定性检测用静载试验检测结构稳定性，施加等效波浪荷载后，堤顶下沉 1.2mm，水平方向移位 0.8mm，卸载后变形彻底复原，实测抗滑移安全系数为 1.48，抗倾覆安全系数实际检测值 1.59，与数值模拟结果基本契合；完工 6 个月后长期监测数据表明，结构累计沉降 5.0mm，累计水平位移 2.0mm，全都达到规范标准，结构维持稳定。

### 6 结论

施工期间采用的“低平潮施工、精准定位安装、跳桩施工”等优化参数，切实保障施工阶段结构安全，完工后长期监测，验证修复方案可长期稳定运行且可靠。本次研究提出的坍塌防波堤稳定性分析手段及优化修复方案，为诸如软土地基、复杂海洋环境下的防波堤修复工程提供科学依据和技术参考，推广应用潜力巨大。后续可进一步开展波浪荷载长期作用下的结构稳定性演变规律研究，依托监测数据搭建结构健康预警系统，实现防波堤智能运维和提前防控。

#### 参考文献

- [1] 张海荣, 李冠星, 刘扬勇, 等. 萨摩亚阿皮亚港防波堤结构创新设计[J].水运工程, 2025, (10):48-54+131.
- [2] 刘宏伟, 王琰, 吴哲丰. 长周期波作用下一种宽肩台防波堤的应用[J].中国水运, 2025, (08):95-97.
- [3] 陈日才. 浅谈防波堤监理过程中的质量控制[J].中国住宅设施, 2024, (12):155-157.
- [4] 梁伟. 防波堤护面结构修复加固技术[J].珠江水运, 2024, (17):54-56.
- [5] 黄敏, 李达华, 许建武. 双层扭王字块护面在某防波堤加固工程中的应用[J].水运工程, 2024, (08):198-201+207.

# Research on Key Technologies for Remote-Controlled Cableway Hoist Systems

Yuanjie Ying Tao Wang Qizhi Wang

1. Yangzhou State Grid Electric Power Tools R&D Manufacturing Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China
2. East China Power Transmission & Transformation Engineering Co., Ltd., Shanghai, 201803, China

## Abstract

Remote-controlled cableway hoists serve as crucial platforms for intelligent upgrades in cableway transportation systems. To address persistent challenges including high safety risks and poor adaptability to complex working conditions in traditional manual operations, this study investigates wireless communication stabilization technologies and their application. The research focuses on four key areas: communication stability, precision power transmission control, safety monitoring systems, and multi-scenario adaptability. Breakthroughs were achieved in wireless anti-interference transmission, load adaptive regulation, and real-time monitoring systems integrating multiple sensors. The resulting next-generation hoist features remote operation, intelligent speed control, and safety interlock mechanisms. Engineering tests and field applications demonstrated a response latency of  $\leq 50\text{ms}$ ,  $\pm 3\%$  load adjustment accuracy, and 100% operator evacuation rate from hazardous zones. These advancements significantly enhance cableway transportation safety, efficiency, and cost-effectiveness, with broad applications in mountain logistics, engineering lifting operations, and cultural tourism transportation. The technology provides essential support for intelligent transformation of cableway equipment, demonstrating significant engineering value and promising commercial potential.

## Keywords

remote control cableway; key technology of traction machine; application

# 遥控型索道牵引机研制与应用研究

应远杰 王涛 王奇志

1. 扬州国网电力工具研发制造有限公司, 中国·江苏 扬州 225200
2. 华东送变电工程有限公司, 中国·上海 201803

## 摘要

遥控型索道牵引机是将索道运输装备实现智能化升级的重要载体, 结合传统的索道牵引机人工在现场操作, 安全风险高、复杂工况匹配度差等痛点问题, 展开对无线通信遥控稳定技术及应用关键技术研究。主要从遥控通信稳定性, 动力传动精准控制, 安全监测预警和多场景适配四个方面进行相关研究攻关, 突破了无线抗干扰传输, 负载自适应调节, 多个传感器集成融合的实时监测预警系统等多项新技术, 开发出具有远程操控, 智能调速, 安全联锁功能的新一代牵引机产品装备。经工程试验与应用证实, 该装备操作响应延迟 $\leq 50\text{ms}$ , 负载调节精度 $\pm 3\%$ , 作业人员撤离危险区域率100%, 有效提升索道运输的安全性、效率性和经济性, 可广泛应用于山地物流、工程吊装、文旅运输等领域, 为索道装备智能化转型提供技术支撑, 具有重要的工程价值和推广前景。

## 关键词

遥控型索道; 牵引机关键技术; 应用

## 1 引言

索道运输凭借地形适应性强、运输效率高、对环境破坏小等优点, 是山地物资转运、工程建设吊装、景区游客输送等领域重要的运输方式。但是传统的索道牵引机多为现场人工操作, 在高空、陡坡、复杂地形等作业场景中, 操作人员存在坠落、碰撞等安全风险, 并且还存在着操作精度低、响应速度慢、人力成本高等问题。在此背景下, 开展遥控型

索道牵引机关键技术研制与应用研究, 突破传统装备的技术限制, 创建稳固可靠的遥控操控体系, 改良动力传输及负载适配性能, 完善安全防护机制。此研究采用理论分析, 仿真改进, 原型试制以及现场实验相结合的方法, 形成一套成熟的技术方案和应用形式, 推进索道运输行业技术革新, 符合现代工程建设及民生所需高效, 安全, 智能的运输设备的要求。

【作者简介】应远杰(1972-), 男, 从事机械研究。

## 2 遥控型索道牵引机关键技术研制与应用的核心意义

### 2.1 突破传统设备操作局限，提升作业安全保障水平

传统的索道牵引机要操作人员在危险区近距离控制，高空坠落、机械损伤等事故频繁发生。遥控型索道牵引机能用远距离操控模式让操控行人脱离高危作业环境，从根本上避开直接的安全风险，并且借助智能安全连锁体系，达成对过载、超速、脱轨等异常工况的自动警报和应急制动功能，有效减小了事故发生率，依照行业数据统计来看，遥控化改造之后，索道牵引作业安全事故的发生几率可以削减85%以上，给工作人员的生命安全保障赋予坚强力量，在企业层面也能减轻由事故引发的经济损失与声誉损失影响[1]。

### 2.2 适配复杂场景作业需求，拓展索道应用边界

我国山地、丘陵占地表面积的69%，很多工程建设和物资运送情形遭遇地形复杂，交通不便利的难题。传统牵引机受限于操作方式，在陡坡、峡谷，密林等状况下工作困难重重且效率低下，遥控型索道牵引机凭借精准遥控操作以及负载自适应调节技术，可以灵活应对不同坡度，距离，负载的作业情况，达成在复杂地形中的高效运送，它不但适用于传统的索道作业场景，而且还能拓展到森林防火物资运输，山地光伏电站创建，偏远地区物资配送这些特殊领域当中，从而充分发挥索道运送的独特长处。

### 2.3 推动索道装备智能化升级，引领行业技术革新

当前我国索道装备行业智能化水平总体较低，核心技术及高端装备大多依靠进口。遥控型索道牵引机研制的关键在于融合无线通信、智能控制、传感器监测等先进技术，突破传统装备的机械传动与人工操作方式，关键技术的突破及其应用将促使索道装备由“机械自动化”向“智能遥控化”转型，形成具有自主知识产权的核心技术体系，从而提升我国索道装备核心竞争力并打破国外垄断局面，引领行业发展潮流，推动整个索道装备产业链迭代升级。

### 2.4 降低人力与运营成本，增强产业经济效益

传统索道牵引作业要安排不少操作人员，而且对工作人员的技能要求较高，人力成本占到运营成本的30%多。遥控型索道牵引机可以做到一个人远距离操控多台设备，削减操作人员数量，缩减人力成本投入，这个装备依靠智能调速，负载改良等技术来减小能源耗费和设备磨损，增长使用寿命，削减保养费用，经过实际应用测算以后得出结论，采用遥控型索道牵引机之后，单条索道每年的经营花费会下降20-30%，明显改善了企业的经济效益，高效的运输能力还能缩短工程建设时延，加快物资运送速度，间接产生更大的经济价值。

## 3 遥控型索道牵引机技术发展与应用现状

### 3.1 国内外技术研发进展与成果

国际上，欧美、日本等发达国家较早开展遥控型索道

牵引机研究，形成了不少技术成熟的成果。主要优势集中在遥控通信稳定、动力控制精准以及安全监测系统方面，采用卫星定位+无线通信双模控制方式，适合长距离复杂地形作业[3]。国内研究起步晚些，不过近些年来发展得比较快，高校、科研机构和企业联手攻关，在短距离遥控牵引技术、负载调节技术等方面取得了一些突破，有些产品被用在景区索道、小型工程运输等领域，但是国内的产品在长距离通信抗干扰能力、极端环境适应性这些方面跟国际上的先进水平相比还是差一些的。

### 3.2 现有遥控系统稳定性与精准度不足

目前遥控型索道牵引机的遥控系统存在两个痛点，一个是通信不稳定，在复杂地形和电磁干扰环境下容易出现信号中断、延迟等问题，导致操作不够准确安全；另一个是控制不精确，对牵引速度、负载张力等调节反应较慢，不能满足高精度作业的要求。现在大部分都是用一种无线通讯方式，并且没有冗余设计，而且控制系统算法也没有考虑到负载变化以及不同地形坡度的影响，所以会造成很大的操作误差，从而限制了该装备在高端场景中的使用。

### 3.3 复杂工况下适配性与可靠性短板

在极端环境、复杂工况之下，现有遥控型索道牵引机的适配性和可靠性受到严重考验，高温、低温、高湿等恶劣环境中设备电子元件故障率上升，陡坡或长距离工作时动力传动系统容易出现过载发热现象；多个负载切换的情况下很难迅速调整参数去适应不同的需求条件；某些产品为了节省开支而缩减了安全防护结构和冗余设置，在连续运转过程中频繁出问题并干扰到作业过程中的连贯与安全性[4]。

### 3.4 市场化应用广度与规模化推广局限

当前遥控型索道牵引机的市场化应用还处在初级阶段，它的主要使用场合是景区文旅、小型工程等，在大型工程建设、山地物流、森林防火这样的大规模场景中的渗透率比较低，限制推广的主要因素包含：第一点就是价格比较高昂，和传统的牵引机相比起来，遥控型装备的研发以及制造成本会高出一些，中小企业采购时积极性不高；第二方面则是标准体系存在缺陷，行业缺少统一的技术标准，检测规范及操作流程，所以产品质量参差不齐，第三层原因是使用者的认知度不够充分，而且缺乏专门的操作人员培训，有些企业对于遥控技术是否可靠有所顾虑也会影响设备的应用。

## 4 遥控型索道牵引机关键技术研制与应用实施策略

### 4.1 遥控控制系统精准化研制策略

采用“5G+北斗定位+LoRa”双模冗余通信设计，形成稳定可靠的遥控通讯网络，其中5G保证高速率低延迟传输、LoRa提升复杂环境抗干扰能力、北斗定位实现厘米级位置校准，在根本上解决复杂地形和电磁干扰下的信号中断、延迟问题。改进控制算法，应用模糊PID控制技术，

并结合负载张力、牵引速度及地形坡度的实时反馈数据建立动态调节模型,实现0.1m/s的速度精准控制以及负载张力 $\pm 2\%$ 的调节精度。开发可视化遥控终端,集成作业场景实时监控、设备状态数据可视化显示、故障预警弹窗等,在触控式操作界面中加入国密级通信加密模块,并形成“传输-解析-执行”全链路加密机制,保障控制信号安全[5]。

#### 4.2 动力传动与负载适配技术优化策略

针对不同的作业场景,对负载的需求进行优化动力传动系统的设计,采用液压与电动混合动力模式,在重载工况下液压系统输出大功率,在轻载或精准操作时由电动机保持控制精度,达到动力和能效的平衡。研发负载自适应调节装置,使用高精度张力传感器实时检测负载的变化情况,采样频率为100Hz,并且利用PLC控制系统自动调整动力输出参数,响应时间小于等于100ms,防止出现过载或者欠载运转造成设备损坏的情况发生。优化传动结构,高强度铝合金+碳纤维复合材料制作关键部件,结构强度提高30%,设备自重减轻25%,动力传输效率提升92%以上;设置5档动力模式,包含牵引速度范围在0.5-5m/s的长距离运输、高精度吊装、多负载切换等不同作业需求,并且可以一键切换模式增强通用性。

#### 4.3 安全监测与应急响应系统构建策略

构建“多传感器融合+智能预警+应急制动”三级安全防护体系,在牵引绳关键节点、传动系统及作业区域边界安装张力传感器、速度传感器、位置传感器、红外障碍物探测器等12类传感器,实时采集设备运行参数和作业环境状态数据共20余项,采样间隔50ms。运用大数据分析技术整合设备5年以上历史故障数据和当前运行数据,训练故障预警模型,实现过载、超速、脱轨等15种常见故障预判准确率95%以上,提前3-5秒发出声光预警。设计多重应急制动,传感器数据自动制动(响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ),远程手动制动,机械应急制动,三重制动系统独立运行可联动触发,在信号中断、设备故障等极端情况下快速停机;增加设备状态自诊断功能,自动记录故障代码与运行日志,方便运维人员远程排查故障缩短维修时间减少维护成本[7-8]。

#### 4.4 多场景应用适配与市场化推广策略

开展多场景定制化设计,针对大型工程建设(山地光伏、桥梁吊装)重载需求,牵引重量5-20吨系列;针对山地物流、森林防火场景体积机动性要求,推出轻量化便携款(自重 $\leq 500\text{kg}$ );针对景区文旅场景运行平稳性、降噪要求,满足游客体验。联合中国索道协会、高校及龙头企业成立标

准工作组,编制《遥控型索道牵引机技术条件《安全检测规范》等6项行业标准,明确通信延迟、控制精度等20余项指标。实行差异化定价策略,高端定制款面向大型企业全盘解决,基础款针对中小企业控成本,推出租赁模式降低入门门槛,经由行业展会、现场观摩会、线上直播演示等展开推广,并同地方政府开展森林防火、乡村物流等方面的示范应用项目,创建“线上课程+线下实操”培训体系,培育专业操作及运维团队,给予24小时售后热线并上门维修,加快装备大规模推广应用。

## 5 结语

综上所述,遥控型索道牵引机关键技术的研发现状及应用意义,是针对索道运输装备智能化升级的关键突破口,对提升作业安全性、拓宽适用范围、促进行业技术革新具有重大现实价值,在本研究过程中通过对遥控控制系统,动力传动系统和安全监测系统的优化改进,适应能力弱且可靠度不足等诸多痛点,并通过实际应用证明了所研制出的产品具有较为稳定的可靠性特点,可以实现精准高效操作并能适应多类场景中的使用要求。不过技术研发与应用推广始终处于不断迭代之中,以后还要解决长距离极端环境通讯、AI智能调度之类的技术难题,改善产品性能和标准体系,智能化技术不断发展的时候,遥控型索道牵引机会在更多领域实现大规模运用,给山地运输,工程建设以及民生保障等方面赋予更高效,安全又聪明的方案,从而推动相关产业发展。

## 参考文献

- [1] 于昊,苗峰显,张君,等.电力施工货运索道新型握索器研制[J].电力设备管理,2025,(14):291-293.
- [2] 郭斌,白皓伟,许彬垚,等.一种分体式索道牵引机的研发[J].机械研究与应用,2024,37(04):165-168.
- [3] 刘晨,秦剑,张飞凯,等.货运索道自动化路径选择及结构设计研究[J].机械设计与制造,2024,(02):60-65+70.
- [4] 刘功琦,鲍振川,咸广平.架空索道轮组的检修策略[J].起重运输机械,2023,(11):85-88.
- [5] 曾浩,周成军,周新年,等.林业索道索系标记的研究[J].林业机械与木工设备,2022,50(01):46-50+54.
- [6] 张卫东,秦剑,陈迪,等.工作索耦合作用下多档多载货运索道的分析与计算方法[J].工程设计学报,2020,27(03):293-300.
- [7] 秦剑,乔良,张映晖,等.多档货运索道动力计算方法及结构冲击影响研究[J].动力学与控制学报,2020,18(02):59-68.
- [8] 张宗前,朱俊云.载人索道用牵引钢丝绳生产工艺研究[J].金属制品,2019,45(01):11-15.

# Brief Discussion on Rural Domestic Waste Treatment Technologies in Hunan Province

Chunhua Ma

Chinalco Environmental Protection and Energy Conservation Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410011, China

## Abstract

The ecological environment of the Xizang Plateau region is fragile, and copper mining and beneficiation activities pose a potential threat to the soil environment. Taking a typical copper mining and beneficiation project in Xizang as an example, this study constructs a one-dimensional unsaturated solute transport model using the HYDRUS-1D software in accordance with the Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment - Soil Environment (for Trial Implementation) (HJ964-2018). It simulates and predicts the vertical infiltration and migration process of heavy metals in the vadose zone triggered by the rupture of the wastewater collection tank under abnormal conditions. The prediction results indicate that under the conservative scenario without considering natural attenuation effects such as adsorption and degradation, the concentrations of copper and lead in the soil profile accumulate continuously over time. By the 40th year, the soil concentration between the leakage point and the groundwater level approximates that of the leakage source. This study verifies that the HYDRUS model can effectively simulate the migration pattern of pollutants in the vadose zone of plateau mining areas. The prediction results provide a critical scientific basis for the formulation of the project's zoned anti-seepage design, environmental risk control and management, as well as soil and groundwater tracking monitoring schemes.

## Keywords

Xizang Plateau; copper mining and beneficiation; soil pollution prediction; HYDRUS-1D; vertical infiltration; heavy metal migration

# HYDRUS 预测在采选项目土壤环境影响评价中的应用——以西藏高原地区铜矿采选项目为例

马春花

中铝环保节能科技(湖南)有限公司, 中国·湖南长沙 410011

## 摘要

西藏高原地区生态环境脆弱,铜矿采选活动对土壤环境构成潜在威胁。本文以西藏某典型铜矿采选项目为例,依据《环境影响评价技术导则-土壤环境(试行)》(HJ964-2018),采用HYDRUS-1D软件构建一维非饱和溶质运移模型,对非正常状况下废水收集池破裂导致重金属在包气带中的垂直入渗迁移过程进行模拟预测。预测结果表明:在未考虑吸附、降解等自然衰减作用的保守情景下,随着时间推移,土壤剖面中铜/铅的浓度不断累积,至第40年,从泄漏点到地下水位之间的土壤浓度接近泄漏源浓度。本研究证实,HYDRUS模型能够有效模拟高原矿区污染物在包气带中的迁移规律,预测结果为项目分区防渗设计、环境风险管控及土壤-地下水跟踪监测方案的制定提供了关键的科学依据。

## 关键词

西藏高原;铜矿采选;土壤污染预测;HYDRUS-1D;垂直入渗;重金属迁移

## 1 引言

西藏高原其独特的寒旱化气候、浅薄的土壤层以及活跃的水冻-融冻过程,使得区域生态系统极其敏感且恢复力弱。近年来,随着矿产资源勘查与开发力度加大,高原地区的铜矿采选项目日益增多。此类项目在建设与运行过程中,产生的尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液等均含有高浓度的重

金属(如Cu、Pb等),若因防渗系统失效发生“跑冒滴漏”,污染物将通过垂直入渗途径严重污染土壤及地下水。

传统的土壤环境影响评价多采用定性描述或简单指数法,难以定量刻画污染物在时空维度上的迁移转化过程。因此,引入数值模拟技术进行精准预测至关重要。美国盐土实验室开发的HYDRUS软件,基于Richards方程和对流-弥散方程,是国际上模拟包气带中水分、溶质运移的权威工具。本研究旨在探讨如何应用HYDRUS模型,对西藏高原典型铜矿采选项目可能引发的土壤重金属污染进行量化、动态

【作者简介】马春花(1987-),女,中国河南信阳人,硕士,工程师,从事环境保护研究。

化预测与评估。

## 2 土壤污染途径

高原地区露天铜矿采选项目对土壤的污染途径主要包括粉尘大气沉降、地表径流、垂直入渗以及冻融驱动的二次迁移途径。

大气沉降来源于露天采场爆破 / 挖掘、排土场、尾矿库干滩、矿石破碎筛分、运输道路产生的含重金属粉尘，高原干旱、多大风，粉尘在风力作用下远距离扩散，通过干沉降、湿沉落到周边土壤。下雨时，沿地表径流漫流、扩散，进入周边草地、河滩、沟谷土壤。

垂直入渗主要来源于尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液在防渗层破损 / 老化情况下，高浓度重金属废水向下入渗进而污染包气带土壤。高原地区冻融循环反复胀缩，易造成防渗膜开裂、地基变形，形成渗漏通道，冻土融化层成为优先入渗路径。

本次主要分析尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液在渗漏时对土壤的垂直入渗影响。

## 3 预测模型与方法

### 3.1 模型概化

西藏高原矿区包气带地层岩性相对单一，以砂壤土、砾石为主，污染物在侧向上的弥散作用远小于垂向迁移。因此，根据 HJ964-2018 导则附录 E 的建议，将污染物在包气带中的迁移过程概化为一维垂向运移问题，符合活塞流模式。

### 3.2 控制方程

采用一维非饱和和溶质运移模型，其控制方程可表达为：

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc)$$

式中：

c: 污染物介质中的浓度，mg/L；

D: 弥散系数，m<sup>2</sup>/d；

q: 渗流速率，m/d；

z: 沿 z 轴的距离，m；

t: 时间变量，d；

θ: 土壤含水率，%。

初始条件：

$$c(z, t) = 0 \quad t = 0, L \leq z < 0$$

第一类 Dirichlet 边界条件：

连续点源：

$$c(z, t) = c_0 \quad t > 0, z = 0$$

非连续点源：

$$c(z, t) = \begin{cases} c_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases}$$

第二类 Neumann 零梯度边界：

$$-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad t > 0, z = L$$

### 3.3 软件与情景设定

模拟软件：采用 HYDRUS-1D。该软件专门用于求解一维变饱和和多孔介质中的水流、溶质和热运移，其算法成熟，在国内水土污染模拟研究中应用广泛。

污染源：选取对土壤环境影响最显著且隐蔽性强的尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液收集池作为预测对象。

特征污染物：废石堆场淋滤液泄漏源强铜 (Cu) 浓度为 84.2 mg/L，尾矿库渗滤液泄漏源强铅 (Pb) 浓度为 0.1 mg/L。

泄漏情景：非正常状况，防渗结构破裂，从风险最大化角度考虑，假设在矿山服务年限内持续泄漏，概化为连续点源。

模拟参数：

模拟深度：根据项目区水文地质勘察，地下水位埋深约 5.2m，设定模型深度为 5m。

土壤质地：参考高原地区土壤调查数据，概化为砂壤土。

边界条件：上边界为定水头污染物补给边界（收集池底部）；下边界为自由排泄边界（潜水面）。

模拟时间：36500 天（100 年）。输出时间点包括 1 年、5 年、10 年、20 年、40 年。

关键假设：为获得保守（最不利）预测结果，未考虑土壤对重金属的吸附、化学沉淀、生物降解等自然衰减作用。

## 4 预测结果与分析

通过 HYDRUS-1D 运行模拟，得到不同时间点（1a, 5a, 10a, 20a, 40a）铜 / 铅浓度随土壤剖面深度的变化曲线。

### 4.1 污染物迁移时空特征

根据预测结果图 1- 图 2，非正常状况下，收集池防渗结构破裂后，污染物锋面运移迅速。在连续泄漏条件下，第 1 年，高浓度铜 / 铅的运移深度已达约 4m；第 2 年，污染物锋面抵达地下水水位。

随着泄漏持续，污染物在土壤中不断累积运移路径上的土壤铜 / 铅浓度随时间逐年升高。模拟至第 40 年时，从泄漏源（地表）至地下水位之间的整个包气带土壤剖面中的铜 / 铅浓度均接近泄漏源浓度，表明土壤已遭受全面、严重的污染。

### 4.2 对土壤及地下水的潜在影响

土壤环境：高浓度铜 / 铅在包气带中累积，将直接破坏土壤微生物群落结构，抑制植物根系生长，导致土壤生态功能丧失，且难以自然恢复。

地下水环境：污染物在较短时间内（2 年）进入地下水，将导致地下水水质超标，污染范围随地下水扩散，其治理修复成本极高，在高原地区几乎不可行。

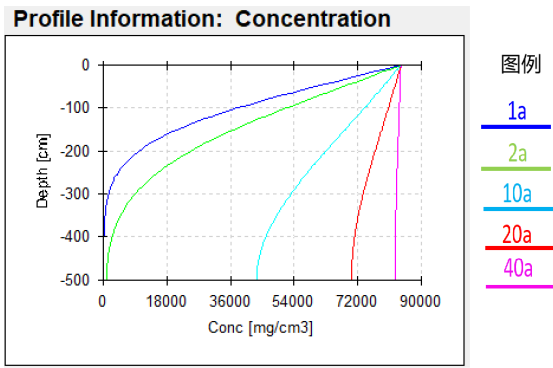


图 1 废石堆场淋滤液收集池泄漏不同时刻铜浓度 - 剖面深度变化曲线图

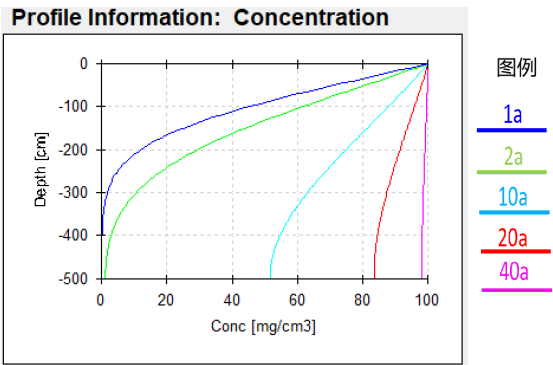


图 2 尾矿库渗滤液收集池泄漏不同时刻铅浓度 - 剖面深度变化曲线图

## 5 基于模拟结果的防控措施建议

预测结果凸显了非正常泄漏的极端环境风险，必须采取最严格的预防和应急措施。

### 5.1 源头控制与分区防渗

垂直入渗预防措施主要为分区防渗，根据《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610-2016)的要求对采场、选矿工业场地按点防渗区、一般防渗区和简单防渗区分别采取不同等级的防渗措施，有效防止地下水及土壤环境污染。

重点防渗区为防渗性能应不低于等效 6m 厚、防渗系数为  $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$  的粘土层。

一般防渗区需要进行地面的硬化、防渗处理，防渗性能应不低于等效 1.5m 厚、防渗系数为  $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  的粘土层，对于长期运行后可能产生的地面破裂、局部渗漏情况要及时检查并处理。简单防渗区需要进行地面硬化。

### 5.2 过程监控与跟踪监测

过程控制措施应根据建设项目所在地的地形特点优化地面布局，必要时设置地面硬化、围堰或围墙，以防止土壤环境污染。

选矿废水含有重金属、悬浮物、各种选矿药剂等污染物，直接外排将对矿区土壤环境造成严重污染。充分利用尾矿浓缩池、回水池、事故应急池，对其进行合理处置。切断污染途径，建设雨污分流工程，在原矿堆场及厂区外围修建截、

排水沟，减少上游汇水、地面径流进入厂区，同时保持厂区内进行硬化、防渗和绿化措施，减少污水漫流，不污染附近的土壤，控制影响范围。

### 5.3 跟踪监测

项目运行过程应加强对防渗结构防渗性能的检查，定期对排土场淋溶水收集池、选厂回水池、尾矿库下游收集池附近的地下水跟踪监测点和土壤跟踪监测点进行例行监测，发现污染时及时找到泄漏点并进行处理，保证防渗措施持续有效，不对底部土壤造成垂直入渗影响。

### 5.4 其他管理控制措施

委托专业的机构完成建立有关规章制度和岗位责任制。制定风险预警方案，设立应急设施减少环境污染影响。建立土壤和地下水污染隐患排查治理制度，定期对重点区域、重点设施开展隐患排查。发现污染隐患的，应当制定整改方案，及时采取技术、管理措施消除隐患。隐患排查、治理情况应当如实记录并建立档案。

## 6 模型应用的深化

本次预测只考虑了一维垂向运移问题。未来可考虑从 HYDRUS-1D 一维到 2D/3D 立体模拟，模拟废水池、尾矿库、渗滤液沟侧向扩散 + 垂向入渗，还原真实污染羽形态，而非只算垂向剖面。针对矿区土壤分层、碎石土、裂隙发育等特点，实现分层参数、优先流、大孔隙流模拟，大幅提升预测精度。也可尝试将 HYDRUS 与地下水模型进行耦合，模拟污染物进入地下水后的三维迁移，实现从“土壤”到“地下水”的全过程风险评价。

## 7 结语

本研究利用 HYDRUS-1D 模型对西藏高原铜矿采选项目非正常状况下的土壤铜 / 铅污染进行了数值模拟。结果表明，在持续泄漏的极端情景下，污染物铜 / 铅迁移迅速，可在短期内污染整个包气带并进入地下水，造成持久性的生态损害。

数值模拟量化地揭示了土壤污染的过程与后果，有力地证明了在西藏高原此类生态敏感区实施极端严格环保措施的必要性和紧迫性。HYDRUS 模型的应用，为高原矿产资源开发项目的土壤环境影响评价、风险管控和精准治污提供了强有力的技术工具和决策支持。项目建设和运营中，必须坚持“预防为主、防控结合”的原则，确保防渗措施可行、可靠，从源头控制垂直入渗对土壤的污染影响。

### 参考文献

- [1] 高震国,钟瑞林,杨帅,等.Hydrus模型在中国的最新研究与应用进展.土壤, 2022,54(2): 219-231.
- [2] 梅雪,刘鸿雁,吴龙华,等.基于HDXRF和ICP-MS的黔西北土壤重金属空间分布及影响因素研究.土壤, 2023, 55(2): 399-408.
- [3] 范平伟,黄宁,马孝义,等.应用HYDRUS-1D模拟砂质夹层土壤入渗特性.土壤.(Soils), 2016,48(1).

# Experiment Design of Logistics Sorting System

Enwei Xiong Qi An\*

Shanghai Shanda College, Shanghai, 210202, China

## Abstract

This paper designs and implements an automated product inspection and sorting system based on the Siemens S7-200 PLC, integrating sensor technology, stepper motor control, and pneumatic actuators. The system achieves a fully automated process from material feeding, transmission, and inspection to precise sorting, serving as a project for a university electromechanical systems course design. The system adopts a modular design, with hardware components including a stepper motor-driven conveyor belt, color sensors, proximity switches, and cylinder groups. On the software side, PLC programming enables multi-sensor signal collaborative processing and motion control logic optimization. In the key technology implementation, the two-point learning method of the color sensor is used to set thresholds for red, green, and blue targets. Combined with the PLC's high-speed pulse train output, issues such as material reflection interference and timing deviations in sorting actions are resolved. The innovative aspects of this system lie in its multi-sensor collaborative control strategy and low-cost modular architecture, providing a reusable experimental pathway for university electromechanical system design courses.

## Keywords

PLC; material sorting; automatic control; color sensor

# 物流分拣系统实验设计

熊恩卫 安琪\*

上海杉达学院, 中国·上海 210202

## 摘要

本文设计并实现了一套基于西门子S7-200PLC的自动化产品检测与分拣系统, 结合传感器技术、步进电机控制及气动执行机构, 完成了从物料上料、传输检测到精准分拣的全流程自动化解决方案, 用于大学机电系统课程设计项目。系统采用模块化设计, 硬件部分由步进电机驱动的传送带、颜色传感器、接近开关及气缸组构成; 软件层面通过PLC编程实现多传感器信号协同处理与运动控制逻辑优化。在关键技术实现中, 通过颜色传感器的两点学习法设定红、绿、蓝目标阈值, 结合PLC的高速脉冲串输出, 解决了物料反光干扰与分拣动作时序偏差问题。本系统设计的创新点在于多传感器协同控制策略与低成本模块化架构, 为大学机电系统设计课程提供了可复用的实验路径。

## 关键词

PLC; 物料分拣; 自动控制; 颜色传感器

## 1 引言

在物流行业的迅猛增长和日益激烈的市场竞争中, 制造企业面临着越来越大的压力, 需要优化生产方法和提高运营效率。特别是对于具有关键任务物料分拣的设施, 传统的手动分拣已被证明不足以满足现代物流和仓储部门不断变化的需求<sup>[1]</sup>。本文围绕工业自动化需求, 设计了一套基于西门子 S7-200 SMART PLC 的产品检测与分拣系统, 可广泛应用于电子元器件、医药包装等领域的标准化产品分选作

业, 为中小型生产线自动化改造提供了高性价比解决方案, 同时也可作为大学机电系统设计课程提供可复用的实验路径。

## 2 总体设计

系统关键部件包括传送带、气缸、步进电机、电磁阀和磁感应开关, 具有用于连接各种气动源的标准化接口。选用颜色识别传感器和光电传感器, 作为检测元件。

系统共有两种工作模式, 第一种模式: 多个物料匀速分拣, 传送带启停人为控制, 当分拣系统通电后, PLC 控制电机的程序首先进行初始化操作, 然后控制电机带动传送带工作, 输送带匀速运行, 与此同时, 颜色传感器检测上料台有无物料, 当上料台上有物料时, 推料气缸 1 将物料推入传送带并记录其颜色类型, 物料被传送带着依次经过红色分拣位 (SA), 绿色分拣位 (SB), 蓝色分拣位 (SC) 和黑色分拣位 (SD)。当物料被对应检测位的接近传感器检测到时,

【作者简介】熊恩卫 (2001-), 男, 中国贵州毕节人, 在读硕士, 从事机械研究。

【通讯作者】安琪 (1993-), 女, 中国湖北襄阳人, 硕士, 助教, 从事机器人技术研发及应用研究。

该检测位的推料气缸将其推入对应的滑槽。第二种工作模式：单个物料精准分拣，传送带的启停由传送带有无物料决定，上料台的颜色传感器判别物料类型，当上料台有物料且类型以被检测出时，PLC 给出该物料到分拣位相应的脉冲，步进电机驱动传送带将其带到该物料对应的分拣位后停止，该分拣位的到接近传感器检测到物料时，对应气缸将其推入的滑槽。不同的工作模式效率效率不同，第一种分拣模式传送带运行速度恒定，可以实现多个物料同时分拣，但物料分拣时容易出现分拣误差；第二种分拣模式，只能分拣单个物料，效率相对较低，但分拣更为精确，能将物料带到指定分拣位置。

### 3 硬件设计

#### 3.1 PLC 选型

作为自动化分拣系统的控制核心，PLC（可编程逻辑控制器）以其卓越的稳定性、出色的耐久性、完备的功能、广泛的适用性以及便捷的操作维护特性，确保了系统的高效可靠运行<sup>[2]</sup>。本系统不仅需要 PLC 实现离散输入信号控制，而且 PLC 必须能够通过发送脉冲信号的方式对步进电机进行控制，PLC 一般有继电器型和晶体管型，继电器型不支持脉冲信号控制，因此必须采用晶体管输出类型。分拣系统总共需要 I/O 点数为 28 个（21 个输入 7 个输出），本文选择具有基于晶体管输出配置的西门子 S7-200-226 PLC，有 24 个输入点，16 个输出点，不仅能够很好的满足本系统分拣任务，而且还留有一定余量，为后续增加元件留出位置。

#### 3.2 电机选型

在选择电机时，需考虑其功率、扭矩、转速等关键性能参数，以及电机的尺寸、重量、冷却方式和防护等级等因素，以确保满足特定应用场景的需求<sup>[3]</sup>。步进电机作为分拣系统的执行机构，用于带动传送带输送物料前行。系统通过控制从 PLC 发送到步进驱动器的脉冲数来实现精确定位，这决定了步进电机的旋转周期。同时，PLC 通过调整脉冲频率来调节步进电机的速度，从而控制物料分拣系统中的输送带速度以完成速度调整，步进电机作为核心驱动元件，承担着精准控制传送带运动的关键任务，本文选取 110 系列三相混合式步进电机。

#### 3.3 传感器选型

选用阿童木 CL2-N3A1 颜色传感器和大森 DS-GD 系列漫反射光电传感器，传感器通常由敏感元件、转换元件、信号调理电路和辅助电源电路组成<sup>[4]</sup>。随着科学技术的发展，传感器技术也迎来了巨大的升级，新兴趋势表明信号调理与转换电路系统地集成在传感器外壳内，或者将它们与传感元件集成在单个芯片上<sup>[5]</sup>。

### 4 分拣控制系统设计

根据分拣系统的生产过程规范，分析单个设备的运行参数和排序逻辑，然后绘制出标准化控制逻辑流程图，如图

1 所示。

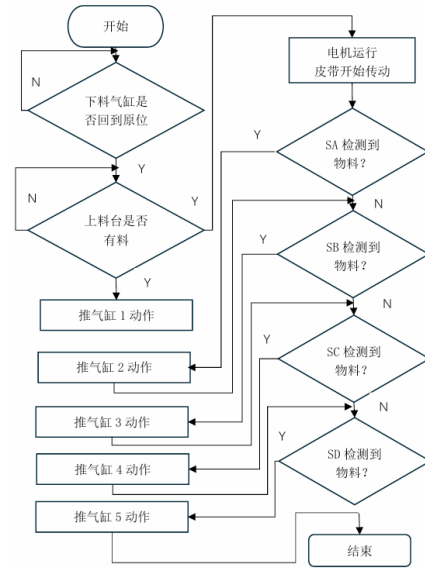


图 1 控制系统流程图

#### 4.1 I/O 模块配置

根据系统控制要求，共需 I/O 点 28 个（21 输入 / 7 输出），选用晶体管输出型西门子 S7-200-226 PLC，可满足脉冲控制及后续扩展需求。I/O 点分配如表 1 所示。

表 1 PLC 输入 / 输出端子分配表

西门子 PLC(I/O)	分拣系统接口(I/O)	备注
I0.0	启动	第一种工作模式
I0.1	停止	第一种工作模式
I0.2	换向	第一种工作模式
I0.4	颜色传感器（红）	
I0.5	颜色传感器（绿）	
I0.6	颜色传感器（蓝）	
I0.7	颜色传感器（黑）	
I1.0	SBW1(推气缸 1 回位限位)	
I1.1	SFW1(推气缸 1 动作限位)	
I1.2	红色到位	
I1.3	SBW2(推气缸 2 回位限位)	
I1.4	SFW2(推气缸 2 动作限位)	
I1.5	绿色到位	
I1.6	SBW3(推气缸 3 回位限位)	
I1.7	SFW3(推气缸 3 动作限位)	
I2.0	蓝色到位	
I2.1	SBW4(推气缸 4 回位限位)	
I2.2	SFW4(推气缸 4 动作限位)	
I2.3	黑色到位	
I2.4	SBW5(推气缸 5 回位限位)	
I2.5	SFW5(推气缸 5 动作限位)	
Q0.0	M(输送带电机驱动器)	
Q0.1	换向	
Q0.3	YV1(电磁阀 1)	
Q0.4	YV2(电磁阀 2)	
Q0.5	YV3(电磁阀 3)	
Q0.6	YV4(电磁阀 4)	
Q0.7	YV5(电磁阀 5)	

#### 4.2 PLC 接线设计

PLC 的输入接线方式主要分为源型和漏型两种，本设计采用漏型输入，根据表 1 可以绘制出 PLC 的外部接线图，如图 2 所示。

### 5 仿真调试

在自动化控制系统的开发中，仿真调试阶段是理论设

计与实际运行衔接的关键环节。仿真可以检验程序是否有漏洞，调试可以验证 PLC 控制的电气元件和复杂的控制逻辑的性能和逻辑的正确性，从而确保整个控制系统的稳定运行<sup>[6-8]</sup>。分拣系统的程序使用西门子 S7-200 V2.0 版本进行仿真，采用缩小版的模型对分拣系统系统进行调试。

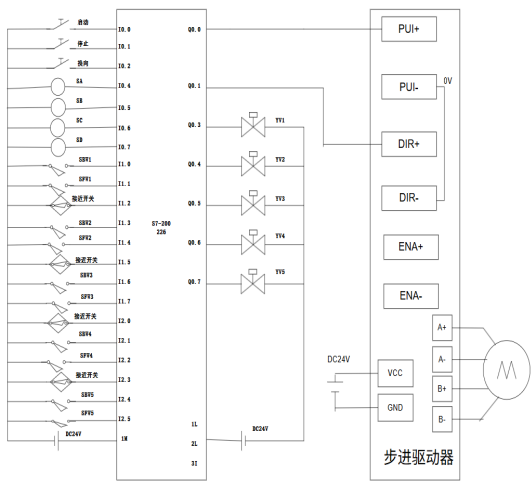


图 2 PLC 外部接线图

调试工作遵循“单机调试→功能联调→系统优化”的递进逻辑。前期需完成以下准备：

(1) 硬件检测：

①确认 PLC、步进电机驱动器、传感器供电电压稳定，如图 3-a 所示。②使用万用表检测传感器输出信号线（NPN 型）与 PLC 输入端的导通性，避免虚接或短路。③检查气缸磁感应开关安装位置，确保活塞杆伸出 / 缩回时开关触发状态正常（如缩回时常闭触点断开）。

(2) 软件配置：

①通过 STEP 7-Micro/WIN 软件导入 PLC 程序，配置 PTO（脉冲串输出）控制步进电机转速。②初始化传感器阈值参数：将颜色传感器的红色通道阈值设为  $R=180 \pm 5$ （RGB 范围 0-255），绿色通道  $G=150 \pm 5$ ，蓝色通道  $B=60 \pm 5$ 。

(3) 单机功能验证

①步进电机与步进驱动器同步调试。确保电机启停平稳，发送的脉冲与传送带位移线性对应。操作步骤：断开气缸负载，单独运行步进电机，使用示波器监测驱动器脉冲信号频率，验证 PTO 输出与设定值（如 1600 脉冲 / 转）的一致性。验证过程如 3-b 所示。

传感器信号采集测试

②确保颜色传感器与接近开关输出信号稳定，PLC 能准确识别触发状态。

操作步骤：

a) 使用标准色卡（红、绿、蓝、黑各 3 种深浅样本）反复通过传感器检测区域，通过 PC 端监控软件记录 PLC 输入点（I0.4-I0.7）的触发状态。

b) 调整传感器安装角度与检测距离，观察光斑是否覆

盖物料表面，过程如图 3-d 所示。

c) 模拟极端光照条件（如强光侧照射），测试传感器抗干扰能力，必要时加装遮光罩或调整阈值回差。

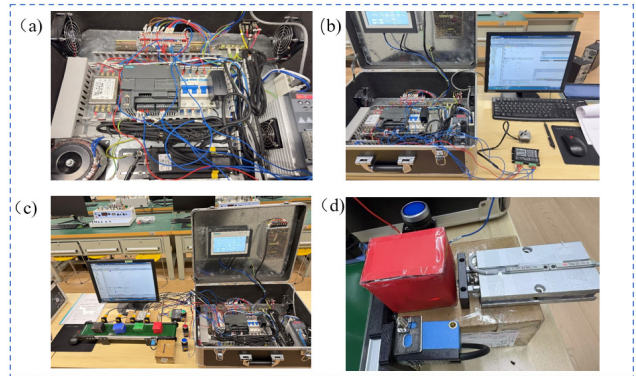


图 3 PLC 电压检测 b 步进电机与步进驱动器同步调试 c 分捡动作调试 d 传感器调试

## 6 总结

在现代工业自动化领域，物料分拣系统的高效性与可靠性直接影响生产线的整体效率。本文以西门子 S7-200-226 PLC 为核心控制器，结合步进电机、颜色传感器、限位开关及气动执行机构，设计了一套完整的自动化产品检测与分拣系统，系统以较低成本实现了高精度分拣功能，特别适合预算有限的中小型生产线改造，也为大学机电系统设计课程提供了可复用的实验路径。其模块化设计便于扩展，例如未来可集成机器视觉模块替代颜色传感器，支持更复杂的图案或二维码识别；增加 RFID 读写器后，可实现物料信息追踪与生产数据管理。其技术方案兼顾实用性与可扩展性，为工业 4.0 背景下的智能化转型提供了切实可行的技术路径。

## 参考文献

- [1] 张莹.基于PLC的工业机器人臂分拣控制系统研究[J].机械管理开发,2024,39(06):237-239.
- [2] 王丽珍,薛小兰.基于PLC的物料分拣控制系统设计[J].机械管理开发,2024,39(06):248-250.
- [3] 蒋祥龙.基于PLC自动分拣控制系统设计[J].农机使用与维修,2024,(11):29-33.
- [4] 吴建平.传感器原理及应用[M].机械工业出版社:202206.719.
- [5] 王涛,袁天梦,刘晓琳,等.基于分布式控制系统的光电传感器智能控制[J].自动化技术与应用,2024,43(12):39-42.
- [6] 刘锦杭.基于NX-MCD的自动装配分拣设备虚拟调试仿真实验[J].机械工程与自动化,2024,(06):86-89.
- [7] 林燕虹,田学锋,梁建玲,等.基于PLC的自动分拣装置设计与研究[J].新技术新工艺,2024,(04):26-32.
- [8] Richter ,Matthias ,Laengle , et al. An approach to color-based sorting of bulk materials with automated estimation of system parameters [J]. Technisches Messen: Sensoren, Gerate, Systeme, 2015, 82 (3): 135-144.

# Progress Control and Resource Allocation Strategy of Scientific Research Project Implementation by Stages

Xuanwen Wang

Beijing Qingyun Aviation Instrument Co., Ltd., Beijing, 100000, China

## Abstract

In the implementation of airborne product research projects, progress control and resource allocation are critical factors for ensuring successful completion. A phased implementation strategy for research projects can effectively coordinate work progress across stages, ensure rational resource allocation, and mitigate potential risks. This paper explores the overall planning and stage division of phased implementation in research projects, analyzes progress control strategies and resource allocation methods for each stage, with particular emphasis on key strategies in project progress monitoring, risk management, and resource allocation. Additionally, based on the implementation characteristics of different stages, phased risk identification and response measures are proposed to ensure smooth project advancement and efficient execution. By optimizing progress control and resource allocation strategies, the implementation effectiveness of research projects can be significantly enhanced, management risks reduced, and all tasks successfully completed.

## Keywords

research project; phased implementation; progress control; resource allocation; risk management

## 科研项目分阶段实施的进度控制与资源调配策略

王炫文

北京青云航空仪表有限公司, 中国·北京 100000

## 摘要

机载产品科研项目的实施过程中, 进度控制和资源调配是确保项目成功完成的重要因素。科研项目分阶段实施策略, 能够有效协调各阶段的工作进展、确保资源合理配置, 并规避潜在的风险。本文探讨了科研项目分阶段实施的总体规划与阶段划分, 分析了各阶段的进度控制策略以及资源调配方法, 尤其是在项目进度监控、风险管理及资源配置中的关键策略。此外, 针对不同阶段的实施特点, 提出了阶段性风险识别与应对措施, 以保障项目的顺利推进和高效实施。通过对进度控制和资源调配策略的优化, 可以有效提升科研项目的实施效果, 降低管理风险, 确保各项任务顺利完成。

## 关键词

科研项目; 分阶段实施; 进度控制; 资源调配; 风险管理

## 1 引言

在机载产品科研项目中, 随着技术不断发展, 项目的规模和复杂性也日益增加。如何有效管理项目的实施过程, 确保项目能够按时、按质完成, 成为了项目管理中的一大挑战。科研项目分阶段实施的策略, 旨在将整个科研过程拆解为多个可控的阶段, 针对每一阶段制定明确的目标和实施策略, 确保各阶段的工作能顺利推进。通过分阶段的实施, 可以及时发现和解决问题, 优化资源配置, 保障项目的整体进度和质量。为此, 本文探讨了科研项目分阶段实施的具体策略, 特别是在进度控制、资源调配和风险管理方面的措施。

分阶段实施的策略不仅有助于提升项目管理的精确度, 还能够有效应对科研项目在实施过程中的不确定性。

## 2 科研项目分阶段实施的总体规划与阶段划分

### 2.1 项目实施总体目标与阶段性目标

科研项目的总体目标是确保项目在规定的时间内完成, 同时达到预期的技术成果和科研效果。在此过程中, 制定阶段性目标对于明确工作重点和方向至关重要。各阶段的目标应细化为具体的任务和可衡量的指标, 确保每个阶段的工作成果为后续阶段的顺利开展奠定基础。总体目标的实现不仅依赖于项目的各项资源, 还需结合项目的实际情况调整和完善。阶段性目标需要与总体目标相匹配, 确保每个阶段的进展可以有效推动项目的整体完成。通过科学合理的目标设定, 可以保证各阶段的任务清晰, 避免出现阶段间的偏差,

【作者简介】王炫文(1993-), 男, 中国江西南昌人, 本科, 工程师, 从事航空机载产品科研项目研究。

进而确保项目的顺利进行。

## 2.2 阶段划分依据与实施策略

科研项目的阶段划分依据项目的复杂程度和技术要求，将工作内容按照任务的先后顺序划分为多个相对独立的阶段。每个阶段有明确的目标、时间和工作内容，能够有效保证项目的组织与协调。阶段划分的核心是对每个阶段的工作进行科学评估，考虑资源的合理配置、技术难度和工作量的均衡分配。实施策略上，项目管理者应结合项目的需求和资源状况，采用灵活的阶段性任务安排。通过适当的阶段目标设定，保证项目任务的可控性和可操作性，确保每个阶段的工作能够有序进行。在实施过程中，每个阶段结束后，应进行效果评估，为下一阶段提供改进意见<sup>[1]</sup>。

## 3 科研项目分阶段实施的进度控制策略

### 3.1 分阶段进度计划编制与优化方法

分阶段的进度计划编制是科研项目中的核心环节，主要目的是为项目的顺利开展制定可行的时间框架。根据项目的复杂性和各阶段的工作内容，管理者需要合理安排每个阶段的任务和时间节点。进度计划的编制要考虑到不同阶段的技术需求、资源可用性以及可能出现的延误风险。在编制过程中，应确保每个阶段的进度计划具备一定的灵活性，以应对突发情况。优化进度计划的方法包括对历史数据的分析、借鉴以往项目的经验，以及使用项目管理软件进行实时进度追踪。

### 3.2 分阶段进度监控与调整机制

为了保证项目在各阶段的进度控制，建立科学的进度监控和调整机制至关重要。通过制定详细的监控指标和进度报告体系，项目管理者可以实时了解各阶段的进展情况。定期进行阶段性检查，确保每一阶段的工作进度都能够按时完成。一旦发现进度延误，管理者应及时采取有效的调整措施，确保项目不因某一阶段的滞后而影响整体进度。调整机制应具备灵活性，通过重新分配资源、优化工作流程等方式，及时解决进度偏差问题。此外，进度监控过程中要注重风险评估，对可能造成进度延误的潜在风险进行预判并采取应对策略，以防止问题扩大。

### 3.3 分阶段进度延误风险管理与应对策略

进度延误是科研项目实施过程中不可避免的风险之一。针对这一问题，项目管理者应在项目初期就进行风险评估，识别可能导致进度延误的因素，例如技术难题、资源不足、人员流动等。在此基础上，制定相应的风险管理策略，通过事前准备、及时调整等方式，降低延误风险对项目的影响。进度延误的应对策略包括增加资源投入、调整工作重心、加强跨部门协作等措施。通过分阶段的延误分析，可以为每个阶段设立缓冲期，在突发状况下能够灵活调整进度安排。此外，还应加强项目团队的沟通与协调，确保各阶段的工作能够迅速响应，并对延误原因进行追踪分析，为后续阶段的实

施提供经验支持，图1为科研项目分段管理流程图。

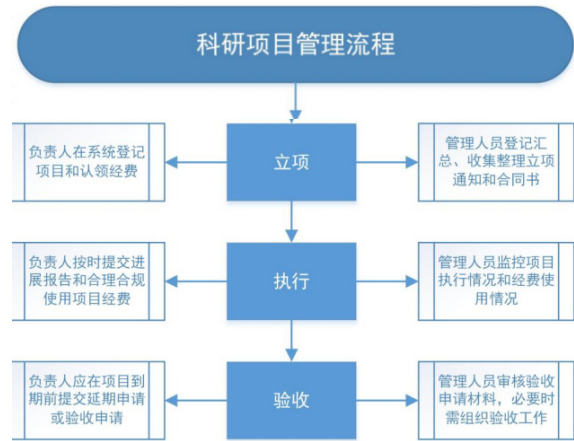


图1 科研项目分段管理流程图

## 4 科研项目分阶段实施的资源调配策略

### 4.1 资源需求预测与分阶段分配方法

在科研项目的实施过程中，准确的资源需求预测是确保项目顺利进行的重要环节。资源需求预测需要基于项目的总体规划、技术要求和每个阶段的具体任务进行详细分析。每个阶段的资源需求不仅包括资金、设备和人力，还要考虑项目实施过程中可能出现的额外需求。在此基础上，通过分阶段分配资源，可以确保每个阶段的工作有足够的支持，避免资源过度集中或浪费。资源分配方法应灵活多样，可以根据每个阶段的实际进展情况进行调整。合理的资源需求预测和分配不仅能提高项目的实施效率，还能帮助项目管理者及时发现潜在的资源瓶颈，避免因资源不足导致的工作停滞或进度延误<sup>[2]</sup>。

### 4.2 人力资源管理与分阶段调配策略

人力资源管理是科研项目中至关重要的一环，合理的人力资源配置能够提高项目的工作效率，确保每个阶段的任务按时完成。人力资源的调配策略应考虑到项目的技术复杂性、各阶段的任务需求以及团队成员的专业背景。在每个阶段的人力资源配置上，需要根据工作量和任务的紧急程度，合理安排人员的工作时间和责任。人力资源的调配不仅要关注人员的技术能力，还要考虑到团队合作的协调性。随着项目的进展，人员的调配也应根据工作需求进行动态调整。通过灵活的人员调度，可以最大限度地利用现有的人力资源，避免出现人力不足或过剩的问题，确保项目各阶段的顺利推进。

### 4.3 物资与设备资源的分阶段调度与管理

科研项目中的物资和设备资源调度管理直接影响项目的进度和质量。在分阶段实施的过程中，每个阶段所需的物资和设备资源各有不同，调度策略必须确保物资和设备能够按时、按需到位。物资的调度需基于每个阶段的具体需求，通过准确的预测和计划，避免因资源不足或过度采购导致的

浪费或短缺。在设备资源管理方面,要特别关注设备的使用频率、保养情况和技术要求,确保设备能够在需要时高效运行。随着项目的推进,物资和设备的使用情况应实时监控,及时发现问题并做出调整。科学合理的物资与设备资源调度,能够有效减少项目停滞时间,提高资源利用效率,确保项目的各项任务顺利完成<sup>[3]</sup>。

## 5 科研项目分阶段实施中的风险管理

### 5.1 阶段性风险识别与评估方法

科研项目实施过程中,风险的出现是不可避免的,尤其是在不同阶段的实施过程中,可能遇到不同的技术、管理、资金等方面的风险。因此,阶段性风险识别与评估是项目管理中不可忽视的重要环节。通过对项目各阶段的任务、资源和技术要求进行详细分析,项目管理者可以识别出潜在的风险点。例如,在项目初期,可能面临技术方案不确定、团队建设不完整等风险;而在实施过程中,则可能遭遇资源短缺、进度延误等问题。阶段性风险评估应通过定期的风险分析会议、专家咨询和数据监控等方式进行。通过科学的评估方法,项目管理者可以预测风险的发生概率及其可能的影响,从而制定针对性的风险管理措施。这一过程的关键在于及时识别问题并评估其对项目的实际影响,确保项目能够在风险发生之前做好预防和应对准备。

### 5.2 关键技术与管理风险控制

科研项目中的关键技术风险与管理风险往往是项目成败的决定因素。技术风险主要体现在项目中的创新性技术和设备的稳定性上,可能会因技术不成熟或未能按时达到预期效果而影响项目进度。为应对技术风险,项目管理者需要加强对关键技术的研究和攻关,确保技术的可行性和可控性。在此基础上,应通过技术审查和试验验证等手段降低技术风险。在管理层面,风险控制的重点是协调与沟通,尤其是在项目团队较大或涉及多个部门时,管理风险尤为突出。项目管理者应设立明确的组织架构和沟通机制,确保信息流通顺畅,避免因管理疏漏导致的决策失误或任务执行不力<sup>[4]</sup>。此外,项目管理者应定期检查项目进展和执行情况,及时发现管理漏洞,采取措施进行修正。

### 5.3 阶段性风险应对策略与应急预案

在科研项目的实施过程中,风险不可避免,但合理的应对策略和完善的应急预案可以将风险带来的影响降到最低。应对策略应根据不同阶段的实际情况进行调整,确保在

出现突发事件时,项目能够迅速响应并采取有效措施。例如,对于技术研发阶段可能出现的技术难题,应通过组织专项攻关小组进行集中解决;而在资源紧张阶段,可以通过优化资源配置或寻找外部支援来应对。此外,项目应提前制定应急预案,涵盖各种可能的风险场景,并明确应对流程、责任分配及资源保障。应急预案的核心在于快速反应和协调,各阶段负责人需定期进行应急演练,以提升团队在紧急情况下的应对能力。通过完善的风险应对策略和应急预案,项目管理者可以确保项目在遭遇突发风险时,能够及时调整策略,继续推进项目,保障项目的顺利完成。为了确保科研成果的质量,必须在每个阶段制定并实施严格的质量管理措施。质量控制从项目启动开始就应进入实施流程,通过明确质量标准、检查流程和评估机制,确保每个阶段的工作都符合预期的质量要求。在每个阶段结束时,进行质量审查和评估,及时发现并解决可能存在的问题,避免低质量的工作影响项目整体进展。通过完善的质量控制与保证体系,可以确保项目按预期目标进行,最终获得高质量的科研成果。

## 6 结语

在科研项目的实施过程中,分阶段的进度控制、资源调配和风险管理是确保项目顺利推进的关键要素。通过科学的阶段划分和合理的资源配置,可以有效提升项目实施的效率和质量。同时,进度控制策略与资源调配策略的精确实施,能够在确保各项任务按时完成的同时,避免资源浪费或短缺。在风险管理方面,及时识别和评估阶段性风险,制定相应的应对策略和应急预案,能够最大限度降低项目实施过程中的不确定性,保障项目的顺利完成。综上所述,科研项目的成功离不开精细化管理,合理的策略规划和应急响应机制是项目高效推进的保障。

### 参考文献

- [1] 张诗亚.航空机载企业科研项目经济性管理探索与研究[J].航空财会,2026,8(01):49-53.
- [2] 王佳妮,刘刚,金天.依托重点实验室的本科生“科研课堂”模式探索与实践——以北京航空航天大学“TOP计划”为例[J].实验技术与管理,2026,43(01):289-294.
- [3] 许刚.目标管理法在航空仪表制造企业科研试制项目管理中的应用[J].质量与市场,2025,(11):156-158.
- [4] 郭玮,程千千.推动党建与科研生产经营双融双促——太原航空仪表有限公司构建四维党建工作矩阵的实践[J].支部建设,2024,(17):27-29.

# Design and Research of Intelligent Voice Interaction for the Elderly

Xinyi Yan<sup>1</sup> Yuzhen He<sup>2</sup>

1. Chang'an University, School of Humanities, Xi'an, Shaanxi, 710064, China

2. Chang'an University, School of Automobile, Xi'an, Shaanxi, 710064, China

## Abstract

The intensifying aging population and the widespread adoption of intelligent technology create a stark contradiction, making the digital divide among the elderly increasingly prominent. Intelligent voice interaction, with its inherent advantages of contactless use and low operational threshold, has become a key breakthrough for improving the use of smart devices among the elderly. This study, based on the physiological and psychological characteristics and cognitive patterns of the elderly, focuses on the core issues of age-appropriate intelligent voice interaction design. It systematically conducts research on elderly users' voice interaction cognitive mechanisms, design framework construction, prototype development, and validation by integrating research methods such as bibliometrics, user interviews, eye-tracking experiments, and fuzzy analytic hierarchy process. The innovative aspect of this study lies in revealing the multidimensional cognitive barriers and needs of elderly users in voice interaction, proposing an age-appropriate voice interaction design framework covering four core dimensions: input, comprehension, output, and process, and establishing a usability evaluation system that combines quantitative and qualitative methods.

## Keywords

elderly users; intelligent voice interaction; age-appropriate design; cognitive characteristics

# 老年智能语音交互设计与研究

颜心怡<sup>1</sup> 何宇臻<sup>2</sup>

1. 长安大学人文学院, 中国·陕西 西安 710064

2. 长安大学汽车学院, 中国·陕西 西安 710064

## 摘要

人口老龄化加剧与智能技术普及形成鲜明矛盾,老年群体数字鸿沟问题日益突出,智能语音交互凭借无接触、低操作门槛的天然优势,成为改变老年群体智能设备使用困境的关键突破口。本研究基于老年群体生理心理特征与认知规律,聚焦适老化智能语音交互设计核心问题,综合运用文献计量法、用户访谈法、眼动实验法、模糊层次分析法等研究方法,系统开展老年用户语音交互认知机制、设计框架构建、原型开发与验证等研究。研究创新点在于,揭示老年用户语音交互的多维度认知障碍与需求特征,提出涵盖输入、理解、输出、流程四大核心维度的适老化语音交互设计框架,建立量化与质性相结合的可用性评价体系。

## 关键词

老年用户; 智能语音交互; 适老化设计; 认知特征

## 1 引言

老龄化程度持续加深且呈加速态势,积极应对人口老龄化已上升为国家战略,智能技术适老化改造是关键举措。

智能设备已深度渗透日常生活,但老年群体因生理机能衰

退、认知能力变化、技术适应不足等,面临严重数字鸿沟。与传统图形交互相比,智能语音交互无需复杂操作记忆与精细动作控制,更契合老年群体使用习惯,成为弥合数字鸿沟的核心路径。

还有就是当前智能语音产品多以年轻用户为核心设计对象,在方言口音识别、语音合成语速、专业术语使用等方面未充分考虑老年用户特殊需求,导致使用体验不佳,甚至引发技术畏惧心理,难以发挥适老化价值。

## 2 相关理论基础

随着年龄增长,老年群体的生理机能会出现自然衰退,对智能语音交互产生直接影响。在感官功能方面,老年用户

**【基金项目】**长安大学大学生创新创业训练计划项目资金支持“颐行无忧——老年助行设备的智能匹配方案项目”(项目编号:202510710091X)。

**【作者简介】**颜心怡(2005-),中国湖南衡阳人,本科,从事语言学研究。

的听觉阈值升高,对高频声音的感知能力下降,容易受到环境噪音的干扰;视觉敏感度降低,对光线变化的适应能力减弱,难以快速识别视觉提示信息;运动能力衰退,手部精细动作协调性下降,难以完成复杂的操作指令。在认知能力方面,老年用户的短期记忆容量缩减,信息存储与提取能力下降,难以记住复杂的语音指令;信息处理速度变慢,对语音信息的理解与反应时间延长;注意力易分散,难以在多任务场景下保持专注。

老年群体的心理特征对智能语音交互体验同样具有重要影响。在学习动机方面,老年用户使用智能语音产品的动机多为实用需求,如信息查询、生活服务、社交沟通等,学习意愿与产品的实用性密切相关;在技术接纳态度方面,部分老年用户对智能技术存在畏惧心理,担心操作复杂或出错,接纳度相对较低;在情感需求方面,老年用户更注重产品的情感支持与安全感,希望交互过程亲切、友好,能第一时间获得反馈与帮助。

## 2.1 智能语音交互技术原理

语音识别是智能语音交互的核心技术之一,其原理是将人类语音信号转换为文本。语音识别系统主要由声学模型、语言模型和解码模块构成,声学模型负责将语音信号转换为音素序列,语言模型负责根据上下文信息对音素序列进行语义解析,解码模块负责输出最终的识别结果。影响语音识别准确率的因素主要包括语音信号质量、用户发音特征、方言与口音、环境噪音等,这些因素对老年用户的语音识别体验影响尤为显著。

语音合成技术是将文本信息转换为自然语音的技术,其质量直接影响老年用户的听觉体验。语音合成的核心指标包括自然度、语速、语调等,自然度越高,用户越容易理解;语速与语调则需要适配老年用户的听觉感知能力与认知节奏,过快的语速或过于平淡的语调会增加老年用户的理解难度。

## 2.2 适老化设计理论

通用设计原则强调产品设计应满足不同用户群体的需求,无需特殊改造即可为包括老年人在内的各类用户使用。其核心原则包括公平使用、灵活使用、简单直观、信息明确、容错性、低物理努力、尺寸与空间适配等。在智能语音交互设计中,通用设计原则的应用主要体现在:设计应兼顾不同年龄、教育背景、技术水平的老年用户,提供灵活的交互方式,简化操作流程,确保信息传递清晰,减少误操作风险。

老年用户中心设计方法强调以老年用户的需求、特征与使用场景为核心,贯穿产品设计的全过程。其核心流程包括用户研究、需求分析、设计开发、测试验证等环节,每个环节都需要充分考虑老年用户的特殊性。在智能语音交互设计中,老年用户中心设计方法要求设计团队深入了解老年用户的生理心理特征、认知规律与使用习惯,通过用户参与式设计、迭代式开发等方式,确保产品能够真正满足老年用户

的需求。

## 3 老年用户智能语音交互认知与需求

### 3.1 老年用户智能语音交互核心需求

老年用户对智能语音交互的功能需求其中之一是基础操作便捷化,希望语音指令简单易懂,操作步骤简化,无需复杂的记忆与学习;第二是信息获取精准化,希望语音识别准确率高,能够快速获取所需信息,如天气、新闻、健康知识等;另外是应急响应及时化,希望在遇到紧急情况时,能够通过简单的语音指令快速发起求助,如拨打急救电话、联系人等。体验需求一是交互流程简化,避免繁琐的语音提示与操作步骤,减少用户的认知负担;二是反馈清晰明确,希望语音合成自然、语速适中、语调亲切,同时提供视觉辅助反馈,如文字显示、图标提示等,确保用户能够准确理解系统响应;三是情感支持适配,希望交互过程具有人情味,系统能够给予用户鼓励与安慰,满足其情感需求。安全需求主要是隐私保护,希望个人信息与语音数据不被泄露;误操作防护,希望系统能够识别并避免误操作,如误拨电话、误下单等;还有就是风险提示易懂,希望系统在涉及资金交易、个人信息修改等敏感操作时,提供清晰、易懂的风险提示,确保用户了解操作后果。

### 3.2 老年用户语音交互认知障碍分析

语音输入的障碍一方面是发音标准度不足,部分老年用户存在方言口音、发音含糊等问题,导致语音识别准确率下降;二是语速控制困难,老年用户的语速普遍偏慢或不稳定,与系统预设的语速范围不匹配,影响识别效果;三是环境噪音干扰,老年用户多在家庭、户外等环境使用语音交互产品,环境噪音容易导致语音信号失真,降低识别准确率。还有语义理解障碍,比如专业术语困惑,系统使用的部分专业术语超出老年用户的认知范围,导致用户难以理解系统指令与响应;以及对话逻辑断层,系统的上下文关联能力不足,无法准确理解用户的连续指令,导致多轮对话中断,老年用户的语言表达较为口语化、随意化,容易出现歧义句,系统难以准确把握用户意图。最后还有反馈接收的障碍,一是语音合成自然度低,部分系统的合成语音机械、生硬,老年用户难以听清或理解;二是语速过快,系统默认的语音语速超出老年用户的信息处理能力,导致用户无法跟上交互节奏;三是提示信息不明确,系统的语音提示过于简洁或抽象,缺乏必要的解释与引导,老年用户难以理解下一步操作。

## 4 老年智能语音交互设计框架构建

### 4.1 设计框架构建原则

适配性原则是适老化智能语音交互设计的核心原则,要求设计充分匹配老年用户的生理心理特征与认知规律。在语音输入设计中,应适配老年用户的发音特点与语速习惯;在语义理解设计中,应适配老年用户的语言表达习惯与认知水平;在语音输出设计中,应适配老年用户的听觉感知能

力；在交互流程设计中，应适配老年用户的认知节奏与操作习惯。

易用性原则要求设计降低老年用户的学习成本与操作难度，具体包括简化语音指令，采用简洁、口语化的表达方式；优化交互流程，减少操作步骤与语音提示；提供个性化的学习引导，帮助老年用户快速掌握使用方法；确保系统具有良好的容错性，允许用户出现一定的操作错误，并提供简单的错误恢复机制。

安全性原则要求设计规避老年用户的使用风险与隐私泄露风险，在功能设计中，应强化敏感操作的风险提示与验证机制，如资金交易、个人信息修改等操作需进行二次确认；在隐私保护方面，应采用数据加密、匿名化处理等技术手段，确保老年用户的语音数据与个人信息安全；在误操作防护方面，应识别并拦截可能导致风险的误操作，如误拨陌生电话、误下单等。

情感化原则要求设计满足老年用户的情感诉求与归属感，在语音输出设计中，应采用亲切、温和的语调与语气，避免机械、生硬的表达；在交互过程中，应给予老年用户鼓励与肯定，如“您说得很清楚”“操作成功啦”等；在功能设计中，可增加陪伴式功能，如语音聊天、情感倾诉等，满足老年用户的情感需求。

## 4.2 设计框架核心维度

1. 语音输入设计是确保交互成功的基础，发音容错率优化，通过训练方言与口音识别模型，扩大发音容错范围，提升不同口音老年用户的语音识别准确率；语速适配，设计语速自适应调节功能，根据老年用户的语速自动调整识别参数，确保在不同语速下的识别效果；方言与口音兼容，支持主流方言的识别，如普通话、粤语、四川话等，满足不同地域老年用户的需求。

2. 语义理解设计的核心是准确把握老年用户的意图，词汇难度适配，构建老年常用词汇库，优先使用简单、通俗的词汇，避免使用专业术语与生僻词；句式简化，支持简洁、口语化的句式表达，能够识别老年用户的口语化、随意化表达；上下文关联能力强化，优化语义理解模型，提升系统对多轮对话的上下文关联能力，确保对话的连贯性。

3. 语音输出设计直接影响老年用户的听觉体验，合成语音自然度提升，采用神经网络语音合成技术，提升合成语音的自然度，还原真实度；语速调节，提供多档语速调节功能，默认语速比普通产品慢 25%-35%，满足老年用户的信息处理需求；语调情感化，根据不同的交互场景与用户情绪，调整语音语调，如问候场景采用亲切的语调，错误提示场景

采用温和的语调。

## 5 老年智能语音交互设计优化策略

语音输入优化，针对老年用户语音输入环节的认知障碍，一是提升方言识别率，扩大方言覆盖范围，针对常用方言进行专项模型训练，提高不同口音的识别准确率；二是扩大发音容错范围，优化语音识别算法，允许一定程度的发音不标准、吐字不清等问题，降低老年用户的发音压力；三是自适应语速调节，通过语音信号分析自动识别老年用户的语速，动态调整识别参数，确保在不同语速下的识别效果。

反馈输出环节的优化策略，采用清晰语调与节奏，优化语音合成模型，提升合成语音的自然度与节奏感，避免机械、生硬的表达；增加视觉辅助反馈，在语音输出的同时，提供大号字体的文字显示、简洁的图标提示等视觉反馈，帮助老年用户准确理解系统响应；关键信息重复提示，对于重要信息，比如紧急求助成功提示、敏感操作风险提示等，采用“语音重复+文字强调”的方式，确保老年用户能够准确接收。

## 6 结论与展望

本文系统梳理了老年用户智能语音交互的生理心理特征与核心需求。老年用户存在感官功能衰退、认知能力下降等生理心理特征，在语音交互过程中面临语音输入、语义理解、反馈接收等多维度认知障碍；其核心需求包括功能需求、体验需求与安全需求。构建多维度适老化智能语音交互设计框架，该框架以适配性、易用性、安全性、情感化为设计原则，涵盖语音输入、语义理解、语音输出、交互流程四大核心维度，明确了各维度的设计要点与实施路径，为适老化智能语音交互产品设计提供了系统性的理论指导。扩大样本规模与地域覆盖范围，涵盖更多特殊老年群体，深入探究其语音交互认知机制与需求特征，进一步完善适老化设计框架。结合人工智能、大数据、物联网等前沿技术，实现个性化自适应设计。

### 参考文献

- [1] 张明, 李静, 王浩. 老年用户智能语音交互产品的适老化设计研究[J]. 机械设计, 2022, 39(5): 152-157.
- [2] 李娟, 刘敏, 张伟. 基于老年用户认知特征的智能语音交互界面设计[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(12): 234-240.
- [3] 陈亮, 张红, 刘静. 智能语音识别技术在适老化产品中的应用研究[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(4): 1123-1128.
- [4] 赵强, 李阳, 王健. 语音合成技术的适老化优化研究[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 256-261.

# Application and Development Considerations of Intelligent Automotive Detection Technology

Jinpeng Li

Inner Mongolia Tiechen Intelligent Equipment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

## Abstract

The intelligent development of the automotive industry is accelerating, with intelligent detection technology becoming a crucial component in enhancing vehicle safety performance and operational efficiency. Researchers employed a combination of theoretical analysis and technical evaluation to elaborate on the core principles and specific application methods of intelligent detection technology. This technology significantly improves fault identification speed and data acquisition effectiveness while promoting the advancement of detection methods toward greater intelligence. The conclusions drawn from the study can effectively enhance automotive safety systems and simultaneously drive continuous technological progress across the industry, yielding highly positive impacts and far-reaching value.

## Keywords

intelligent detection technology; automotive safety system; technological innovation

## 智能化汽车检测技术的应用与发展思考

李金朋

内蒙古铁辰智能装备有限公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017000

## 摘要

汽车产业智能化发展速度加快, 智能检测技术成为提升车辆安全性能以及运行效率的重要部分。研究人员采用理论分析结合技术评估的方式, 详细说明智能化检测技术的核心原理和具体应用方法。这项技术明显提高故障识别速度和数据采集效率, 同时促进检测手段向更加智能的方向发展。研究得出的结论能够有效改善汽车安全保护体系, 同时也推动整个行业技术水平不断向前迈进, 带来非常积极的影响和深远的价值。

## 关键词

智能检测技术; 汽车安全体系; 技术革新

## 1 引言

伴随全球汽车产业加快走向智慧化、融合化的全新时代, 智慧化汽车检测技术正在逐渐转变为保证车辆可靠性和提高运行效率的关键支撑。智能检测技术于实际应用中可以显著提高故障识别的精确度和反应速度, 给车辆保养和事故防范带来了可靠的支撑。本文用理论分析与技术评估作为核心方法, 全面说明了智慧化检测技术的主要原理以及其应用模式。研究目标旨在探究怎样克服当前技术限制, 建立更为完备的智慧检测体系, 期望给促进汽车智能制造与可靠体系发展给予有力支撑。

【作者简介】李金朋(1996-), 男, 中国内蒙古鄂尔多斯人, 助理工程师, 从事装备制造质量、质量管理、汽车检测研究。

## 2 智能检测技术的发展背景与现状

### 2.1 汽车检测传统模式回顾

传统汽车检测方式依靠机械工具、电气工具加上人工操作来完成车辆性能评估和故障诊断工作。这种方式主要采用定时保养加上人工经验分析作为核心手段, 具体涉及发动机检查、刹车系统测试、灯光检查还有安全装置检查等多个项目。传统检测方法技术要求不高, 设备比较简单, 能够满足早期汽车生产规模扩大以及基本维护要求。这种检测方式存在效率低下、准确性不够的问题。

伴随汽车智能化工和电子化程度的提升, 传统检测模式慢慢不能满足新时代的发展需求。于应对迅猛变化革新的行业要求之际, 传统模式的检测方案依然表现滞后, 它的整车运行状态监测与实时保障能力迫切需要借助技术创新达成改进。智能化检测技术变成取代和改进传统模式的必选选择。

## 2.2 智能化技术崛起与产业驱动

智能技术发展很快并且跟汽车行业发展密切相连。传感器技术、人工智能、大数据分析这些领域取得重大突破之后，汽车检测慢慢从过去那种老办法转向更加聪明的路线。智能检测技术把很多新技术整合到一起，可以马上察觉汽车运转情况并且做出准确判断，这样就给提前发现汽车毛病和保证行车安全提供了很好的解决办法。

汽车行业智能化进步的潮流明显加快了检测方法的更新。从过去依靠人工手动操作的检测流程转向利用计算机程序和自动机器来完成的智能检查系统，技术上的突破让检测工作的速度更快也更可靠。消费者越来越看重车辆的安全性能，相关管理部门也不断推出新规定来促进这一领域的发展，因此整个行业都开始关注如何开发和完善智能检测设备，将其广泛用在生产阶段和售后服务中，把智能化技术变成汽车生产和售后市场中不可或缺的关键支持力量。

产业推动力量表现各个行业一起向前发展。抓住电动汽车和自动驾驶技术快速进步机会，公司加大智能检测技术研究和使力度，推动实际使用范围变得更大，建立汽车制造行业跟智能技术紧密融合良好环境。

## 3 智能检测核心原理与关键技术

### 3.1 数据采集机制与传感方案

智能检测技术的核心就是高效率而且准确的数据收集方式和各种传感手段。数据收集是智能检测技术最基础的部分，最主要的目的就是要把车辆运行状态的实时信息抓取并进行深入分析。为了更好地适应各种复杂工作环境下的精确检测要求，普遍使用分布式的传感器网络技术，用来全面覆盖车辆内部和外部的多个重要部位。这样的收集方式里面，传感器组成的阵列负责收集信号和传递信号的关键工作，涵盖了温度传感器、压力传感器、加速度传感器等多种不同种类的传感设备。这些传感设备可以持续监控车辆的各项运行参数状态，清楚表现出车辆面对不同运行环境时产生的各种反应变化。

于数据采集过程中，信号传递的可靠性和精确性极其关键。现在使用较多的技术涵盖依托 CAN 总线和车载以太网的数据传送方案，它们可以达成快速、优良的数据交互，降低信息传递滞后。此类高性能的通信机制给车辆动态数据的即时分析构建了稳固基础。伴随边缘计算技术的应用，传感器的数据处理能力获得了更深入提高，借助局部处理完成数据精简与初始分析，进而缓解中心处理系统的负担。

传感方案的改进在车辆故障的早期检测和精准定位方面特别显著，通过敏感元件与智能算法的融合，增强了系统在复杂运行条件下的辨别精确度。依靠云端数据共享与人工智能技术，收集的信息可以达成智慧化的解析与预估，显著提高了数据使用效能并且拓宽了技术运用范畴。

### 3.2 故障定位与实时响应技术

故障定位和快速响应技术成为智能化汽车检测里面非

常重要的部分。依靠大量传感器网络的广泛使用加上数据处理能力的不断提高，智能检测系统能够马上发现车辆运行中出现的异常情况。这种技术依靠内置的计算算法以及模型预测的方式，来完成对故障位置的准确找到并且立刻给出回应。系统收集到的各种数据经过多方面的深入分析，就能清楚判断出故障发生的具体部位以及可能引起问题的根本原因，最后生成一份完整的诊断报告供参考。

故障定位技术依靠高精度传感器和大数据分析平台，明显提高了检测效率和准确判断能力。在工作过程中，即时响应模块负责传递故障信息和提出解决办法的工作，保证紧急情况下的处理既迅速又稳妥。故障定位和即时响应的配合水平更高地推动了智能检测方式向主动预防方式的转变，为提升车辆运行的稳定性能和安全保障能力提供了技术支持，加速了汽车智能检测领域的整体进步和发展。

## 4 智能检测对车辆安全提升的影响

### 4.1 故障识别与安全保障演进

智能检测技术于故障识别与安全保障领域实现了明显的发展，变成提高车辆安全性的重要推动力量。常规的故障识别方法首要依靠人工经验分析和机械检测设备，具有检测时间较长、精度不足还有问题隐患或许被忽略的限制。伴随智能化技术的嵌入，依托前沿传感器网络、机器学习算法还有即时数据处理的智能检测系统高效填补了常规方法的短板。

智能检测技术使用精度很高的传感器来采集车辆运行时的各种状态数据，可以全面覆盖发动机的工作情况、制动系统的性能表现、转向系统的运作状态等多个方面的指标，确保检测工作做到彻底并且及时。采集到的数据经过智能算法的深入处理之后，能够清楚地发现故障出现的具体位置，进行准确无误的分析，从而大大提升检测工作的速度和效果。故障识别技术的持续进步明显增强了车辆运行时的安全保障水平。基于智能化检测方法设计出的预警系统，在故障刚刚开始出现的时候就能自己发出风险提示，帮助驾驶员和相关管理人员得到快速的维护意见，防止可能出现的严重安全问题。

智能检测技术不断进步明显促进了监测的实时化和联网化发展。依靠车联网跟云计算平台的紧密结合，成功实现了跨越地域界限并且覆盖多辆车的共同监控工作，同时也给故障预测分析带来了非常有力的技术支持。面对动态交通环境下的各种挑战，智能检测系统能够准确识别周围环境变化对于车辆安全性能产生的影响，及时为车辆运行提供高效响应以及优化改进的具体方案。技术方面的持续升级大大提高了汽车检测体系的整体安全保障水平，使得车辆本身以及整个道路交通环境都获得了更加可靠的保护效果。

### 4.2 数据驱动下的维护与预防优化

数据驱动的维护和预防优化是智能化检测技术中非常重要的一部分。借助先进的数据采集系统，车辆可以随时监

测关键部件的工作状态，还能利用大数据分析来提前发现可能出现的故障问题。这样的技术让维护变得更加精准，使得维修工作从过去的被动应对变成了主动的预防措施。这样的方法明显减少了车辆出现故障的可能性，同时让汽车的使用寿命得到了更长的延长。最重要的一点是，安全保障水平得到了很大提升。通过对整体数据趋势的深入研究，制造企业能够不断改进产品的设计和生产过程，从而为用户提供更加稳定可靠的产品使用体验。这种智能化的改变为汽车产业的长期健康发展打下了非常稳固的基础，同时也让车辆的安全性、运行效率以及用户体验都获得了很大的提高。

## 5 未来趋势与技术革新推动路径

### 5.1 技术进步与多方协同创新

技术发展和各方合作创造成为智能汽车检测技术前进最重要推动力量。现在智能检测技术更新速度很快并且实际使用范围很大，完全依靠多个不同领域技术一起研究开发并且深度结合在一起。人工智能领域里面取得的成果一直向前推进，带来检测时候发现故障和提前判断故障能力变得特别准确，数据处理方法加上算法不断改进让整个检测系统能够快速适应各种复杂车辆运行情况。物联网技术已经发展得比较完善，给收集车辆各种数据并且把数据传出去建立起速度快而且效果好的网络结构，实时把数据大家一起共享并且让各个系统之间配合更加紧密，这种变化非常明显。智能传感器体积变得更小同时敏感程度变得更高，检测设备反应速度得到明显提高，检测工作效率得到提高，设备制造花费也明显减少下来。

多方合作成为技术进步的主要支持力量。汽车制造公司、科研单位以及测试服务提供单位正在一起研发探索智能检测技术的产业化道路。不同领域之间的联合攻关加快了关键技术的攻克速度，比如将嵌入式算法设计跟传感器硬件改进紧密结合起来，有效推动了检测系统整体能力的提高。汽车检测技术的进步必须依靠整个产业上下游的相互配合和完善调整，建立生态化的合作方式让设备研发、系统安装以及技术保养都能形成一条完整的协调运行链条。政策引导同样在帮助各种社会资源得到合理分配，制定技术标准并广泛推广使用，成为行业发展的关键推动力量。

技术发展和共同创造有力推动了智能检测技术的推广和进步，给汽车产业的安全提高和技术更新带来了持久的动力。智能化检测会在技术合作中向着更加精确、更加迅速的目标前进，达到与现代交通系统的深入结合。

### 5.2 政策支持与市场导向发展模式

政策扶持和市场导向的发展方式对于加快智能化汽车检测技术的进步起着非常关键的作用。从政策方面来看，通

过制定详细的技术标准、提供一定的财政资金补贴以及推出一系列有利于产业发展的法律法规，可以有效引导企业和相关研究机构增加科研投入，加快技术突破和标准的普遍应用。政府部门还可以建立一些试点示范项目，来帮助智能检测技术得到广泛推广和使用，同时营造一个多方合作的创新氛围，鼓励更多参与方一起努力。从市场角度来看，市场需求会不断推动技术更新换代，尤其是在广大消费者越来越看重汽车安全性能和智能化水平的背景下，市场成为了技术进步最重要的推动力量。产业链上下游的企业可以根据市场需要展开合作，共同研发出更先进的检测设备并实现智能化改造。把政策扶持和市场驱动结合起来，就能为智能化汽车检测技术的进步提供源源不断的动力，最终帮助整个汽车产业实现长期稳定的发展。

## 6 结语

文章针对智能汽车检测技术怎样提高车辆安全性能以及行驶效率这个问题，进行详细研究和分析，依靠理论推导和具体技术评估方式，深入探讨智能检测的关键原理和具体应用方法，取得了一些初步成果。研究结果清楚显示，这种技术能够很好地帮助发现车辆故障、收集相关数据并且不断改进智能算法，这些方面都明显提升了检测工作的效率，为改善汽车安全体系并且让检测方法变得更智能提供了坚实的理论支持和实际操作经验。不过，现在仍然存在一些不足之处，比如系统整合起来的时候标准化问题需要尽快解决，遇到复杂环境时检测数据的稳定性和安全性也存在一些潜在风险。接下来研究工作可以从几个方向继续深入展开，第一，继续加强智能算法的稳定性和适应各种情况的能力。第二，加快完成多传感器数据融合技术和实时监控体系的搭建工作。第三，探索把检测系统跟车联网技术和物联网平台更好地结合起来，从而实现整个检测系统从头到尾的智能化提升目标。这项研究给智能汽车检测技术的实际使用提供了很好的帮助，同时也为未来相关领域的研究和技术创新指明了清晰的方向和具体目标。

### 参考文献

- [1] 刘星.现代汽车检测技术与安全管理[J].河北农机,2021,(03):115-116.
- [2] 蔡先进.汽车检测诊断技术应用与发展[J].汽车测试报告,2022,(07):133-135.
- [3] 杨国亮.汽车检测诊断技术的应用与发展[J].中国科技期刊数据库 工业A,2021,(06).
- [4] 扈文锋.新能源汽车发展背景下的汽车检测与维修技术革新[J].汽车与新动力,2022,5(04):105-107.
- [5] 张继良.新能源汽车发展背景下汽车检测与维修技术革新[J].汽车测试报告,2022,(23):53-55.

# Engineering Technology Innovation Oriented towards Green Chemical Industry and Its Application in Chemical Engineering

Shaowu Wang Xuanxuan Gao

Shandong Hengxin High-Tech Energy Co., Ltd., Tai'an, Shandong, 271411, China

## Abstract

This study places particular emphasis on engineering technological innovation within the context of green chemistry, conducting a comprehensive analysis of how novel engineering technologies are integrated into chemical engineering practices and implemented. Addressing the practical requirements of green chemistry, it thoroughly examines cutting-edge technologies emerging in recent years and their application to core process flows, clearly demonstrating how technological innovation enhances energy efficiency, reduces environmental pollution, and facilitates the achievement of sustainable development goals. Starting from real-world engineering projects, the research systematically analyzes how innovative technologies optimize product quality, improve economic returns, and refine process flows, with experimental validation confirming their detailed effectiveness in energy conservation and emission reduction. The findings highlight the significant application potential of engineering technological innovation in chemical engineering, provide innovative solutions for green process improvements, and promote broader adoption of green chemistry concepts in industrial production.

## Keywords

green chemistry; engineering technology innovation; chemical engineering applications; sustainable development; process flow optimization

## 面向绿色化工的工程技术创新及其在化学工程中的应用

王绍武 高旋旋

山东恒信高科能源有限公司, 中国·山东 泰安 271411

## 摘要

这项研究尤其重视绿色化工背景下工程技术创新, 详尽考察了新型工程技术怎样嵌入化学工程领域并且付诸实施。顾及绿色化工的现实要求, 详尽探讨近些年涌现的前沿技术和这些技术怎样运用于核心工艺流程, 清晰阐明了技术创新可以提高能源利用效率、降低环境污染还有促进实现可持续发展目标的关键作用。研究自真实工程项目起始, 详尽剖析了创新技术怎样优化产品品质、提高经济收益还有完善工艺流程, 借助实际实验验证了这些技术于节省能源和降低排放方面的详细成效。研究结论呈现了工程技术创新在化学工程领域中的强大应用潜力, 亦给常规工艺的绿色改进供给了新颖解决方案, 推动绿色化工思想在工业生产中获得更为普遍的推行。

## 关键词

绿色化工; 工程技术创新; 化学工程应用; 可持续发展; 工艺流程优化

## 1 引言

全球资源短缺问题和生态环境压力变得越来越严重, 导致化学工程领域面临非常严峻的转型升级困难。绿色化工思想已经变成推动产业进步的核心发展方向, 核心目标就是依靠技术方法来降低能源消耗、减少废物排放和污染物释放, 从而让经济收益和生态保护两者都获得良好的结果。国内化工产业在能源消耗降低和污染控制方面取得了显著效

果, 但是老旧生产方式对环境的适应能力和资源利用效率还存在明显不足, 这些问题暴露得越来越清楚。过去的研究工作大多停留在集中在老旧生产方式的改造升级上, 新型技术方法在提高产品品质、改善生产工艺路线以及推进绿色环保转变方面的潜力还没有得到充分挖掘和利用。本次研究关注绿色化工的具体需要, 全面总结并且仔细研究近年来出现的一些领先技术手段, 探索这些方法在化学工程主要生产环节中的实际使用情况和具体运作原理。借助真实案例分析和相关试验验证, 清楚展现技术方法在提升能源利用率、减少环境污染以及实现长期可持续发展的关键作用, 为整个化工行业向绿色环保方向转变提供科学依据和实用操作建议。

【作者简介】王绍武(1974-), 男, 中国河北唐山人, 工程师, 从事高端化工工艺管理研究。

## 2 绿色化工背景与需求

### 2.1 绿色化工的生态意义与发展脉络

绿色化工目的是促进化学工业向生态方向转变,把节约资源、降低污染、推动持续发展作为最核心的目标。生态方面的价值体现在更好地安排资源使用,降低生产过程中有害物质的排放,从一开始就把工业对环境的破坏降到最低,最终让经济利益和生态环境都能得到双赢。绿色化工跟化学工业的发展息息相关,同时也跟全球保护生态的大局联系非常紧密,成为解决气候变化问题、缓解资源不足状况、维护自然生态平衡的关键力量。

绿色化工进步可以回溯到工业早期阶段,那时候传统化学工业主要关注大量生产和减少成本,完全不考虑环境污染问题。到了二十世纪末期,随着人们环保意识的逐步增强,以及资源短缺的压力不断增加,可持续发展的思想开始渗入到化学工业当中,绿色化工这个概念也就慢慢浮现在大家眼前。进入二十一世纪之后,绿色化工的进步速度明显加快,各种新技术跟环保理念结合得越来越紧密,技术创新变成了最重要的推动力量<sup>[1]</sup>。

### 2.2 工程技术革新的起源及动力

工程技术革新来自绿色化工为了实现可持续发展而面对全球生态危机带来的严峻挑战。化学工业的传统生产工艺因为消耗能量太多、污染严重,已经不能达到现在环保和节约资源的严格标准。在这种情况下,绿色化工的理念得到广泛传播,强调消耗能量少、污染少、资源利用效率高的生产方式,成为技术革新的主要推动力量。全球能源结构正在改变、环保法律法规变得更加严格、绿色产品的市场需求也在不断增加,这些因素共同带来外部压力,迫使化工行业必须进行创新和突破。信息技术快速进步为工程技术革新提供了重要帮助,先进的建模和数据分析工具大大加快了新技艺的研究和开发速度。不同领域的研究人员合作越来越紧密,让新兴技术的成果能够很快变成现实生产力,为化学工程向绿色方向转变奠定了坚实的基础<sup>[2]</sup>。

## 3 前沿技术与工艺流程革新

### 3.1 新型工程技术特征及突破

绿色化工环境里面,新型工程技术表现出速度很快、操作很准、消耗很少这样几个重要特点。针对非常恶劣的反应情况,采用改进反应条件的方法,可以大大提高催化效果、让反应更加精确以及把产品得到的比例明显增加。传质和传热两个方面,利用微通道这种精细加工设备,能够把反应所需的时间大大压缩下来,同时把能源消耗也降得非常少。在材料工程这个领域,使用具有特殊功能的纳米材料,作为绿色催化剂的一种全新选择方案,这些纳米材料拥有很好的稳定性以及抵抗环境污染的能力,从而使得催化过程中使用的原子变得更加节约。多种场的耦合技术,加入电化学场和磁场这些辅助手段,帮助推动老式生产工艺朝着低碳和环保

的方向快速转变。智能化控制技术跟大数据分析和机器学习方法结合起来,就能让化学工程的操作过程变得更加合理高效,从而把不必要的资源和能源浪费降到最低。以上各种突破进展为绿色化工提供了理论基础和技术支持,有力推动了老式生产工艺向低碳和环保的目标迈进,真正成为化学工程发展的关键推动力量。

### 3.2 节能降耗与环境效益提升方案

节省能源和降低排放对环境保护发挥关键作用,核心在于应用前沿催化技术来优化能源使用方式并减少资源消耗。依托尖端催化技术来优化工艺流程已经得到普遍运用到化学工程领域,借助加快反应速率和提升准确度来实现降低能源消耗的目标。过程强化技术在热能回收和废热再利用方面起到重要作用,借助改进换热设备的设计并且采用全新热集成系统,把能量消耗降到很低的程度。推行清洁生产技术可以高效降低对污染严重原料的依赖,同时明显降低温室气体和有害物质的排放量,因此给环境质量产生正面影响。以上这些技术方案全部满足绿色化工发展的具体要求,并且有利于提升企业经济收益,为化学工业达成持久稳定发展提供了可靠保障。节省能源和降低排放产生的效果一起形成一个强大技术体系,为绿色化工工艺的广泛普及实施建立了坚实基础。

### 3.3 高效工艺流程构建策略

高性能工艺流程建设策略依靠技术整合和流程优化,重点提升资源利用效率,减少无效消耗,加强化学反应的精准调控,结合智能化技术与绿色设计理念,实现绿色化工领域的工艺经济效益与环境友好性共同发展<sup>[3]</sup>。

## 4 化学工程中的绿色转型实践

### 4.1 产品品质与经济效益的双重提升

化学工程完成生态保护转变之后,在产品质量与经济效益上都获得突出成果。依靠前沿科技,生产流程能够改善,资源使用更加高效,产品性能明显提高,符合市场更加严格的质量标准。环保型催化剂技术的使用,令化学反应更加精确迅速,大量减少副产物产生,提高产品纯度与品质。过程强化方法缩减工艺流程,减少能耗与原料浪费,高效节约生产成本。科技创新促进化工企业盈利增加,而且促进低碳生产方式推广。废弃物与副产物得到循环使用成为原料,达成资源再利用,提高经济收益与可持续发展能力。高价值产品的开发与优化,体现了工程技术突破对于化学工程生态保护转变的关键支持。以上实践给传统化工行业提升指引路径,给绿色化工理念落实奠定牢固基础,推动行业朝更加环境友好的方向前进。

### 4.2 绿色转型中的能源管理措施

绿色转变期间,能源管理特别关注如何提高能源使用效率,尽量降低能源消耗总量,从最开始阶段就有效减少化工生产给环境造成的负面影响。重点关注推广和使用先进的

能源监测设备,依靠实时采集和深入分析数据,准确找到能源浪费的具体地方,然后调整生产过程中的各种参数设置。热能回收技术已经普遍应用,明显提升了能源使用的整体效率,比如利用化学反应产生的余热来发电或者供暖,从而大大减少外部购买能源的需要量。模块化智能能源管理平台可以灵活调整能源的分配方式,保证能源被用到真正有用的地方,避免出现多余浪费的情况。积极采用太阳能和风能这些可再生资源技术,用来满足化工生产的各种实际需求,大幅度降低对化石能源的依赖程度,推动整个生产流程向着环保和可持续的目标不断前进。能源管理方面的改进措施一直得到加强,不仅帮助化学工程行业成功向绿色环保方向发展,同时也为打造低碳并且高效的生产模式提供了非常坚实的基础和可靠的保障力量。

### 4.3 清洁生产与可持续发展路径

清洁生产是绿色化工里面一种很重要的执行方式,通过改善资源的合理使用、改进工艺的具体步骤,还有减少废弃物的产生量,来有效阻止环境污染的发生,让资源得到充分的利用,推动化工行业走向对环境友好的发展方向,同时拥有长期稳定发展的能力,为生态文明的进步提供技术上的支持和实际操作的指导意见<sup>[4]</sup>。

## 5 未来蓝图与产业应用前景

### 5.1 新兴技术趋势及革新动力

绿色化工背景下,新型技术朝着智能化、精准化、集成化方向发展,推动化学工程行业发生重大变革。大数据分析、人工智能、物联网技术的普遍使用,明显增强了工艺过程的智能判断能力,实现了资源的合理配置。先进催化剂和微反应器技术的突破,高效控制了反应路径,提高了反应专一性和效率,助力节能减排工艺的提升。膜分离技术和模块化生产凭借其高性能灵活性的特点,资源回收和废物处理领域展现出很大的发展前景。技术创新的动力来源于全球资源短缺和环境压力带来的产业需求变化,低碳绿色的发展理念推动了行业的转型升级,政策指引和环保标准迫使企业研发环保高效的工艺,达到经济效益和社会责任的平衡。技术的进步和市场需求共同推动化学工程走向绿色环保、高效节能和智慧化发展的道路。

### 5.2 工程技术推广及产业协同

工程技术的普及和产业的协同发展对于绿色化工理念的落实起着十分关键的作用。在普及工程技术的过程中,必须格外注重构建一个多方协作的革新环境,借助政府拟定相

关政策、企业注入资金以及科研机构供应技术支持来达成全面的合作效果。务必注重把工程技术与产业的现实需求密切融合起来,提升技术从研发到应用的转变方式,让技术更为契合现实使用场景并且便捷实施起来。能够建立起来科研单位、企业和学校之间的协作平台,这样就能降低技术研发与现实应用之间具有的差距,加速技术成果从实验室迈向市场的步伐。还需促进产业链上下游之间的协作革新,尽早构建围绕绿色化工主题的技术群落。在现实实施技术的时候,要完善相关标准和法规体系,为新技术进入市场给予强有力的支撑和保证。还需建立监测评价机制,持续优化绿色化工技术的普及方法,为化学工业迈向低碳化转型给予扎实的基础支撑和成功的产业合作模式作为借鉴<sup>[5]</sup>。

### 5.3 生态环保与产业升级新模式

生态保护和产业进步的崭新方式非常重视自始至终的全过程,将多种资源调配得更优,尽可能降低废料生成,因此可以协助化学工业逐步迈向循环利用的路径。依托推进智慧制造体系、构建绿色的物流体系还有普及节能技艺方案,达成守护生态、恰当耗费资源和经济增长的三方均衡前进,为绿色化工持久平稳前进提供全新的飞跃和革新助力。

## 6 结语

这项研究仔细考察了针对绿色化工的工程技术创新和化学工程里面的使用情况,清楚说明了技术创新对提高能源利用效率、降低环境污染程度、推动可持续发展的关键意义。依靠真实案例的研究和实验数据的验证,证明了新型工程技术可以明显改善工艺流程、提升产品质量、增加经济效益。随着新技术不断出现和产业合作水平不断提高,绿色化工会变成化学工业实现转型升级的核心方向,给生态环境保护和经济持续增长带来新的动力和广阔前景。

### 参考文献

- [1] 施可彬.化学工程工艺中绿色化工技术的应用[J].前卫,2022,(10):0236-0238.
- [2] 李怀坤.工程技术化学工程与工艺中绿色化工技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022,(01).
- [3] 刘江涛.化学工程中绿色化工技术的应用[J].休闲,2021,(10):0198-0198.
- [4] 张鹏杨烁.化学工程与工艺中绿色化工技术的应用[J].市场调查信息:综合版,2021,(01):0142-0142.
- [5] 毛娅.绿色化工技术在化学工程工艺中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(15):189-190.

# Chemical Separation Process Optimization and Environmental Impact Assessment Based on Engineering Technology

Yi Cheng Yanwei Qu

Shandong Hengxin High-Tech Energy Co., Ltd., Ningyang County, Tai'an City, Shandong Province, Tai'an City, Shandong, 271400, China

## Abstract

This study focuses on addressing critical challenges in chemical separation processes, including excessive energy consumption, low operational efficiency, and severe environmental pollution impacts. By employing modern scientific methodologies, we have developed innovative and optimized solutions. The research begins with theoretical analysis, conducting comprehensive evaluations of each step in traditional processes—from raw material processing and chemical reactions to final treatment—to identify key operational parameters and existing issues. Through advanced heat transfer control technologies combined with optimized reactor design, we restructured the entire production workflow. This approach accelerates chemical reactions, improves product quality, and significantly reduces emissions of harmful pollutants. Experimental data clearly demonstrate that the enhanced process achieves higher energy efficiency while minimizing ecological damage. Further assessments confirm that the redesigned process fully complies with green manufacturing standards and sustainable development requirements, enabling enterprises to substantially reduce production costs and enhance market competitiveness.

## Keywords

chemical separation; engineering technology; process optimization; environmental impact assessment; green manufacturing

## 结合工程技术的化学分离工艺优化及其环境影响评估

程毅 曲彦伟

山东省泰安市宁阳县山东恒信高科能源有限公司, 中国·山东 泰安 271400

## 摘要

这项研究集中关注化学分离工艺里面能量消耗特别高、工作效率比较低、环境污染负担特别严重这些麻烦,使用现在科学技术办法来设计出全新并且得到改善的具体解决办法。研究工作首先从理论分析开始,认真检查和审查传统工艺的原材料初步加工、化学反应以及最后处理的每个步骤,清楚找到最关键的操作参数和存在问题的地方。依靠使用先进的热量传递控制技术加上反应设备内部结构的优化设计方法,来重新安排整个生产工艺流程,使得化学反应进行得更快一些,分离出来的物质质量变得更好一些,同时把产生污染的有害物质排放量明显减少。实验数据结果清楚显示,经过改善以后的工艺,能源使用效率变得更高一些,对生态环境造成的损害程度明显变小一些。继续深入检查评估以后发现,新设计出来的工艺完全满足绿色制造和可持续发展要求,能够帮助企业把生产成本大幅降低下来,同时让整体市场竞争力得到明显提高。

## 关键词

化学分离; 工程技术; 工艺优化; 环境影响评估; 绿色制造

## 1 引言

全球都开始重视绿色制造和可持续发展的理念,工业生产过程中化学分离工艺的能耗特别高,效率表现很差,造成的环境负担也非常重,这些问题变得非常突出,成了一个迫切需要解决的技术难题。传统的工艺在使用能源和排放污染物这两方面都有很多不足,严重影响了产业的稳定发展以及环境保护目标的顺利达成。虽然科研人员和生产单位针对原料预处理、反应过程还有后续分离精炼等多个环节进行了

大量的研究工作,努力改善反应器的设计结构和优化热能传递的具体方法来提高工艺的整体性能,但现有的各种方案很难同时兼顾反应速度和分离效果,也很难有效减少有害物质的扩散风险。基于当前工程技术的最新发展成果,设计了一套全新的工艺改进方案,通过全面重新规划生产流程并仔细调整关键参数,力求达到能耗更低、产品品质更优的目标,同时大幅度减少对环境造成的污染负担。这个研究成果完全符合国家绿色发展的战略规划和环境保护的标准要求,同时也为整个化学分离行业提供了非常实用且效果明显的技术应用方向。

【作者简介】程毅(1997-),男,中国山东泰安人,从事化工企业安全管理研究。

## 2 背景与意义

### 2.1 工业现状

化学分离方法属于现在工业制造里面非常关键的一个环节,已经被广泛用在化工行业、医药行业、食品行业以及新材料行业这些很多不同领域。现在大部分化学分离技术想要实现大规模生产的时候,仍然会遇到很明显的技术困难和环境方面的很大压力。很多工业分离过程都需要依靠高温高压这样的条件来完成原料的加工、产品的提取还有溶剂的循环使用,这样就会造成能源消耗特别大。由于分离效果不够理想,有些步骤得到的产品纯度和收率很难达到标准要求,这样一来不但会让产品质量变差,还会让市场竞争能力变弱。分离过程当中产生出来的很多副产物和废弃物,通常都含有比较高毒性或者有机污染物,对整个生态环境造成很严重的破坏。随着工业生产规模不断变大,以上这些问题变得越来越突出,一方面严重阻碍整个行业能够长期稳定发展下去,另一方面也给生态环境的安全带来很大隐患。开发出同时具备很高效率和很好环保性能的化学分离技术,已经成为现在工业水平提升和实现绿色发展这两项任务最急迫的要求。

### 2.2 高能耗与低效率难题

化学分离工艺实际工程应用中面临能耗很高和效率很低这两个主要难题。根本原因在于传统工艺设计里面存在能源使用效率非常差、反应条件调整不够精确、分离过程技术停留在不够先进这些问题。原料预处理这个步骤,复杂物质去除和转化通常需要耗费大量热量和化学药品,这样就产生资源浪费现象。反应过程里面设备结构不够完善并且参数调整不合适造成反应速度比较慢,能量投入和产出结果失去平衡状态。分离和提纯这个环节,工艺路线非常繁琐而且设备能量使用效率非常差,因此继续加重整体耗能程度。高耗能工艺另外还产生物质使用效率非常低现象,没有完全反应完的原料和副产品排出造成生态环境额外负担。上面这些困难明显阻碍产业发展经济实力,同时对绿色制造以及可持续发展提出更加严格标准,现在迫切需要依靠技术创新和流程改进来解决这些关键障碍问题<sup>[1]</sup>。

### 2.3 绿色转型需求

绿色转型需求目的就是推动化学分离领域实现生产过程节约能源降低污染提升效率,这样就能达到全世界可持续发展目标还有严格环保要求,节约资源缓解环境压力,加强行业绿色技术使用水平,增强行业竞争实力,给产业高质量发展提供重要支持。

## 3 工艺流程与关键环节

### 3.1 原料预处理与反应过程

原料预处理和反应过程在化学分离工艺里面非常重要,会直接决定整个流程的效率高低和经济成本。传统的原料预处理方式往往能源消耗特别高,还会造成大量环境污染,

所以改进的办法针对各种不同的原料都专门设计了精确的预处理技术,采用物理化学的方法来调整颗粒大小,改善表面特性,增强物质之间的传质和反应的活性,把原料里面的隐藏价值全部挖出来,让反应系统的运行效率变得更高。反应的过程里面,新的工艺不断改进反应的具体条件和具体路线,挑选出性能非常优秀的催化剂,优化反应设备的设计方案,让能量的传递变得更加顺畅,明显加快反应进行的速度<sup>[2]</sup>。利用精细化的控制技术,严格把控温度、压力、反应时间这些关键参数,为后面的分离和提纯环节创造很好的工作环境。另外,及时清理掉不必要的副产物和有害物质,让整个生产过程更加环保,符合绿色发展的要求。改进之后的原料预处理和反应过程,明显提升了分离工艺的整体水平,为材料的高效利用和废弃物的分解提供了强有力的技术支持,给工业生产的持续发展注入了新的活力,帮助企业在环保制造方面取得更大突破。

### 3.2 分离与精炼流程

分离和提纯过程属于化学分离工艺最重要的部分,决定最终产品的纯净程度、生产量以及整个生产环节对环境造成的破坏。传统分离方式因为设备结构老旧、工艺参数不合适,常常造成能量消耗很大、工作效果很差、额外副产物很多这些麻烦。研究人员经过仔细研究,清楚找出分离阶段最困难的地方,并且使用最新技术手段把整个流程进行彻底优化。采取的具体办法有选用性能更好的分离填料、增加精馏塔的加热功率、分层次开展多次分离操作等等。经过这些改进之后,流程运转变得更加顺畅,物质转化率明显提升,生产所需要的时间大大减少,产品纯净度和工作速度都取得更好成绩。特别关注如何高效去除那些易挥发的有机物质以及各种有害杂质,从而大幅降低对周围环境的污染风险。实验结果清楚显示,新型分离和提纯技术让能源使用变得更加科学合理,产品品质得到更好保障,对环境造成的破坏也变得非常轻微,总体效果远远超过传统老办法。这项技术给化工行业带来一种既高效又节约能源的生产方式,有力促进整个行业向更加环保的方向转变和升级,具备很高实用意义以及非常广阔的发展前景。

## 4 工程技术应用与过程优化

### 4.1 热传递控制与反应器革新

热传递控制和反应器更新属于化学分离工艺提升的关键部分,效果会直接决定反应速度以及能源使用效率高低。研究已经发现,传统工艺存在热量分布不均匀、传递效率比较低差、能量浪费非常严重这些问题。针对这些问题,提出了使用高性能导热材料来制造换热设备,并且改善热交换介质的流动方式,这样就能大幅提高整个系统的热利用效率。另外,通过实时监测热状态变化情况,来实现对反应温度的精确调整控制,从而让反应条件变得更加容易掌控和管理<sup>[3]</sup>。

在反应器结构优化领域,应用模块化设计思路和耐高

温材料技术,来改善反应器内部和外部的整体构造。新反应器采用了多相流体分布优化技术,确保原料和催化剂之间的接触更加平衡,这样可以明显加快反应的速度。反应器的表面安装了高性能的绝热层,用来减少热量的散失,从而提升整个系统的热能利用率。

#### 4.2 关键参数调整与协同提升

化学分离工艺要想做得更好,必须把关键参数控制得特别严格,并且把各个步骤之间的配合关系弄得更好。研究人员首先针对反应温度、压力、时间长度以及原料浓度这些参数进行了非常细致的调查和分析,弄清楚了这些参数之间的非线性关系和相互影响的方式。针对反应部分,需要认真调整温度和压力的具体数值,让反应速度变得更快,尽量减少不必要的副反应出现,确保整个反应过程能够更加平稳和可信。到了分离和精炼这两个步骤,可以使用动态压力调节的技术以及多级分离的处理方式,确保关键成分能够被彻底分离出来,同时尽量减少溶剂挥发造成的资源浪费,降低整个操作过程的能源消耗。最后还要改善各个环节中物料流动的特性,确保分离和精炼两个步骤能够在能源消耗和产品品质这两者之间找到一个合适的平衡点,实现更好的效果和更高的效率。

对于工艺瓶颈,采用数学建模和模拟仿真技术,把参数调节跟实际工艺条件融合,让优化方案迅速匹配繁杂工业环境。优化之后的流程达成了反应速率、分离效率、资源利用率的配合提高,明显降低副产物排放与废物产生,给绿色制造给予可信保障。上述参数调节策略不但提升了工艺的稳定性 and 灵活性,并且给有关工艺的普及应用给予了理论支撑和实践经验<sup>[4]</sup>。

### 5 绿色效益与环境成就

#### 5.1 能耗降低与产品提升

优化后的化学分离工艺在节能降耗和产品质量提升方面表现出显著优势。依靠应用先进的热传递调控技术,实现了能量在反应器内部的有效分配和充分使用,减少了热损失和无谓的能源浪费。优化后的反应器设计促进了物料在反应过程中的均匀混合和传质效果,加快了反应速度,从而缩短了生产时间,进一步降低了整体能源消耗量。

在分离和精炼环节,优化工艺采用了高效分离技术和精密集成设备,显著提升了分离效能,减少了材料损耗。新工艺可以在较为的操作环境下实现较高纯度产品的分离,

减弱了对高温或高压条件的依赖,使系统的运行费用逐步降低。结合工艺流程优化,显著减少了化学试剂和溶剂的使用,在提高产品纯度的同时减少了废液和副产物的排出<sup>[5]</sup>。

#### 5.2 生态改善与经济效益

改进之后的化学分离工艺明显减少了环境污染物的排放数量,依靠提高反应效率以及分离精度,有效降低废弃物的产生。新工艺应用先进热传递控制技术和反应器全新设计,在制造过程中降低了有害物质的散失,并且降低了能源消耗,缓解了传统化学分离过程对生态环境的破坏作用。研究结果显示,改进之后的技术路线在制造阶段实现了污染物排放数量的显著降低,有利于改善环境质量。生态效益的提高同样推动了经济效益,依靠降低能源费用和废物处理费用的途径增强了制造效率和产品品质。工艺的高效率和环保特点满足了企业对降低制造费用和增强市场竞争能力的要求,为化学分离行业完成绿色经济转变提供了重要支持,也为循环经济的发展创造了全新的增长机会。

### 6 结语

这项研究利用现在先进的技术方法,针对化学分离工艺进行完整优化,成功解决传统工艺存在能耗太大、效率很低以及环境负担很重这些问题。实验结果清楚显示,经过改进以后工艺在消耗能量减少、产品质量提高、生态环境改善这几个方面都取得显著进步,完全满足绿色制造和可持续发展的具体标准,同时帮助公司降低生产费用,提高市场竞争能力。这项研究给化学分离行业完成绿色转变提供一条科学并且合理的技术路径,拥有很大工程推广潜力和长远经济意义。

#### 参考文献

- [1] 王宇. 化学工程与工艺专业绿色化学教学分析[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(04): 139-141.
- [2] 张钟尹. 环境地质工程技术管理问题探究及优化[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2023, (06): 0171-0174.
- [3] 金传伟, 郑立强, 李静, 王素贞. 化学工程技术的发展现状与优化措施[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2021, (10): 0135-0136.
- [4] 李怀坤. 工程技术化学工程与工艺中绿色化工技术[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 工程技术, 2022, (01).
- [5] 颜君来, 冯闪, 李水沈. 《浙江省海塘工程技术规定》评估[J]. 浙江水利科技, 2021, 49(04): 26-30.

# Study on the Influence of Random Corrosion on the Seismic Performance of Vertical Storage Tanks

Juncheng Xin Xiang Li Bolin Wang Yiding Guo

School of Civil Engineering, Dalian University for Nationalities, Dalian, Liaoning, 116650, China

## Abstract

To mitigate the impact of earthquakes on the risk of tank failure, this study focuses on a 10,000 cubic meter large vertical steel tank and proposes a coupled Monte Carlo simulation and ADINA finite element method to investigate the evolution of the tank's seismic performance under random corrosion. A fluid-structure coupled finite element model of the tank-liquid storage system is established to generate random corrosion morphologies and perform stress and acceleration time-history analysis. The results indicate that corrosion pits weaken local stiffness, induce stress concentration and local acceleration increase, and exacerbate the deterioration of the tank's dynamic performance and resonance risk.

## Keywords

vertical storage tank; corrosion; numerical simulation; fluid-structure coupling

## 随机腐蚀对立式储罐抗震性能的影响研究

辛俊城 李想 王柏霖 郭亿丁

大连民族大学土木工程学院, 中国·辽宁 大连 116650

## 摘要

为了减少地震对于储罐失效风险的影响,本研究以1万方大型立式钢储罐为对象,提出蒙特卡洛模拟与ADINA有限元耦合方法,探究随机腐蚀下储罐抗震性能演化规律。建立储罐-储液流固耦合有限元模型,生成随机腐蚀形貌,开展应力及加速度时程分析。结果表明腐蚀坑造成局部刚度弱化,诱发应力集中与局部加速度升高,加剧储罐动力性能劣化与共振风险。

## 关键词

储罐; 腐蚀; 数值模拟; 流固耦合

## 1 引言

立式储罐是石油化工生产、国家能源战略储备体系中的核心储用装备,主要承担原油、成品油及各类液体化工原料的大规模安全储存任务,其结构完整性与运行可靠性直接关系到石化生产安全、能源供应稳定及生态环境保护。安徽省特种设备检测院和董娇的研究也都证明<sup>[1-2]</sup>,在长期服役过程中,储罐罐壁、底板等关键受力构件长期处于介质侵蚀、土壤腐蚀、大气腐蚀及电化学腐蚀等复杂环境作用下,

极易发生材料非均匀减薄与局部损伤,进而形成结构力学薄弱区域。

在腐蚀损伤不断发展的条件下,储罐结构力学性能劣化将进一步放大地震作用下流固耦合失效风险,显著提升储罐地震破坏概率。目前,国内学者樊海龙等已针对储液罐流固耦合、隔震减震、评测方法及抗震可靠性等方向开展了大量研究<sup>[3-4][5][6]</sup>。针对腐蚀环境下的储罐结构安全问题,张如林等人的研究表明,竖向地震效应、腐蚀减薄会明显改变结构刚度与应力分布,加剧地震作用下的失效可能性<sup>[7]</sup>。为精准揭示随机腐蚀作用对储罐抗震性能的影响规律,本研究采用ADINA有限元分析软件,建立考虑随机腐蚀减薄的储罐流固耦合数值模型,系统研究不同随机腐蚀率下储罐结构的动力响应特征、应力分布规律及抗震性能变化规律,为腐蚀环境下立式储罐的安全评估、维修决策及抗震设计提供理论依据与数值支撑。

【基金项目】大连民族大学创新创业训练计划(项目编号:202512026151)。

【作者简介】辛俊城(2004-),男,布依族,中国湖南常德人,本科,从事ADINA有限元软件的应用模拟研究。

【通讯作者】李想(1989-),男,中国黑龙江双鸭山人,博士,讲师,从事防灾减灾工程及防护工程,民族建筑数字化保护等研究。

## 2 储罐模型建立

为探究不同形式的随机腐蚀对储罐屈曲行为的影响,

我们参照炼油厂常规设计及施工规范，按实际比例对 1 万方容积的平底圆柱形敞口储罐进行了建模。本研究选取的储罐为立式圆柱结构，其中罐体高度  $H=11$  米，罐体直径  $D=17$  米，通过该尺寸组合实现 1 万方的存储容积需求。理想状态下，储罐侧壁自上而下各段厚度分别为 1.0、0.8、0.5 和 0.4 厘米，罐底板作为承载核心，厚度设定为 1.0 厘米，该储罐采用敞口设计，无固定顶板结构，图 1 展示了其几何构造及尺寸参数。

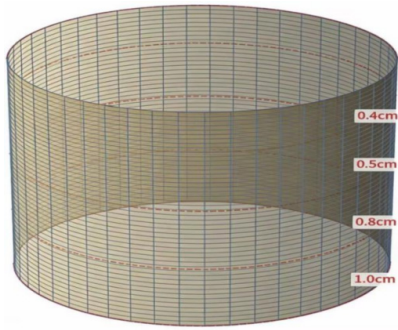


图 1 储罐几何模型示意图

### 2.1 单元选取及有限元模型建立

采用 ADINA 有限元分析软件对石油储罐的有限元模型进行构建与综合分析。液体采用势流体单元，罐壁采用壳单元，如图 2 和图 3 所示。为精准反映服役环境下的结构特性，建模过程中系统考虑随机腐蚀的典型腐蚀模式，并基于工程腐蚀统计规律生成多组具有代表性的随机腐蚀形态。储罐各部位的腐蚀厚度参数通过蒙特卡洛模拟方法进行概率化生成，以客观体现腐蚀分布的随机性与不确定性<sup>[8]</sup>，储罐整体结构有限元模型如图 4 所示。

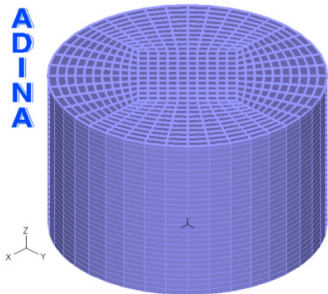


图 2 液体单元

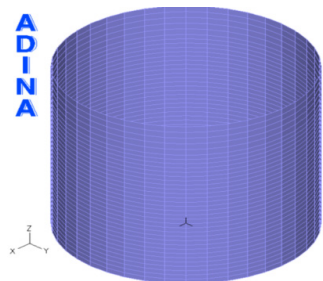


图 3 储罐罐壁单元

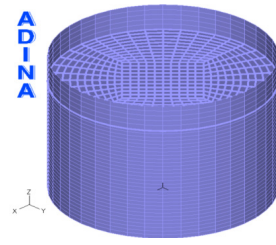


图 4 储罐整体模型

### 2.2 地震波输入与储罐腐蚀模拟

通过蒙特卡洛模拟在 ADINA 中实现腐蚀参数的随机化建模，其中包括了代码的二次开发，基于已有代码，开发适合于此研究的二次开发代码。本文选取第 II 类场地 El-centro 地震波，地震动中主导结构动力响应的剪切波，其传播速度慢于纵波、振动形式以横向剪切为主。该波可激发储罐产生显著动力响应与储液晃动效应，是评估腐蚀储罐抗震性能的核心地震激励，地震波时程曲线如图 5 所示。

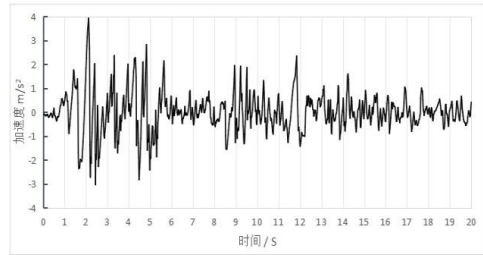


图 5 El-centro 波时程曲线

本研究探究水环境下储罐的随机腐蚀机理在地震荷载下的响应分析。将储罐罐壁的厚度参数设为变量，随机腐蚀结果如下图所示。分别为腐蚀度为 0%、20%、40%。为确保模拟可靠性，每组样本模型均采用与基准模型一致的接触设置、约束条件及荷载方案，仅变更腐蚀率相关的厚度参数，最终提取每组模型的罐壁应力等核心指标，形成统计分析数据集。

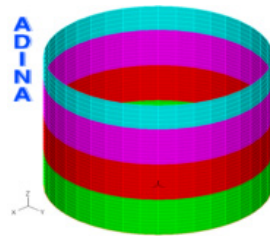


图 6 未腐蚀罐壁

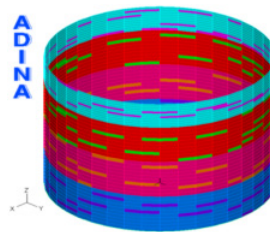


图 7 腐蚀率为 20% 的罐壁

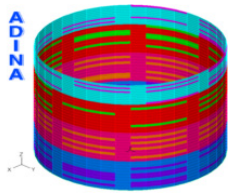


图8 腐蚀率为40%的罐壁

### 2.2.1 各组腐蚀应力随储罐高度结果分析

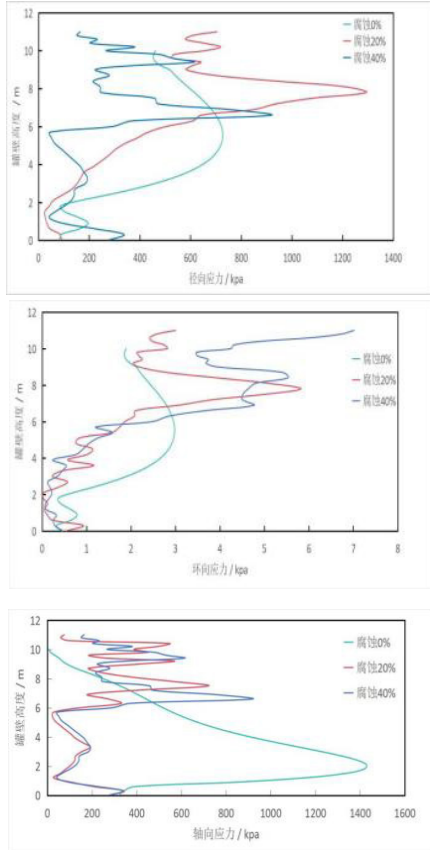


图9 不同腐蚀情况下径向，环向，轴向应力图

从图9中可以看出，不同腐蚀比例对罐壁应力分布的影响显著，随着腐蚀程度从0%提升至40%，罐壁有效厚度减小，刚度与承载能力下降，导致罐底（0~2m，厚度1cm）区域的径向、环向及轴向应力均显著升高，中上部罐壁（2~11m，厚度依次为0.8cm、0.5cm、0.4cm）的应力分布随腐蚀加剧由平滑渐变转为剧烈波动，高应力区域向上扩展，其中径向应力对腐蚀最为敏感，20%腐蚀工况下径向应力峰值突破1200kPa，增大了罐壁局部失效与屈曲破坏的风险。国内有研究通过有限元方法证实结构减薄会引发应力重新分布<sup>[9]</sup>，这与本研究结果一致。重度腐蚀工况进一步加剧此效应，腐蚀坑密度增大使整体应力水平提升15%，底部高应力区扩展至更高高度，且分布离散度增大，验证腐蚀通过削弱材料均匀性加剧应力集中风险。应力分布规律显示，腐蚀程度增加导致罐壁应力梯度陡峭化，峰值向腐蚀区域迁移，威胁结构整体性。

### 2.2.2 加速度时程

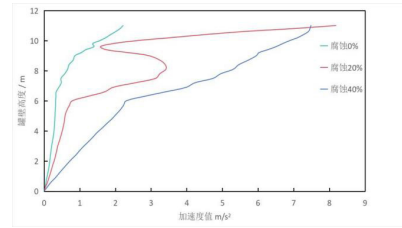


图10 沿罐壁高度加速度变化分析

从图10中可以看出，不同腐蚀状况下，储罐加速度随高度均呈现先减后增的非线性变化规律。无腐蚀时罐体刚性充足，底部加速度初始值最低，随高度快速攀升至罐顶峰值；轻度腐蚀（20%）使底部刚度下降，底部加速度放大，中段形成明显动力薄弱低谷，罐顶仍能保持较高动力响应；重度腐蚀（40%）进一步加剧结构刚度衰减，底部加速度幅值达三者最高，中段能量耗散更为显著，罐顶动力传递能力受限，整体动力风险显著提升。

## 3 结论

无腐蚀储罐应力中间高两端低，20%腐蚀引发局部应力集中，40%重度腐蚀提升整体应力、扩大高应力区，腐蚀程度加剧使应力梯度陡峭、峰值迁移。

腐蚀程度与储罐动力响应正相关，随腐蚀加剧，底部加速度与中段能量耗散均显著放大，罐顶动力传递能力持续减弱，结构刚度衰减引发动力响应非线性突变。

腐蚀坑造成局部刚度弱化，诱发应力集中与局部加速度升高，还改变频谱特性、降低固有频率，加剧储罐动力性能劣化与共振风险。

### 参考文献

- [1] 刘鹏.液化石油气储罐应力腐蚀分析及预防探讨[J].石化技术,2025,32(11):26-28.
- [2] 董娇,李青蕊.储罐底板的腐蚀与防护[J].广东化工,2013,40(21):165-171.
- [3] 樊海龙,李欣业,袁志丹,等.大型立式隔震储液罐的地震响应数值模拟[J].油气储运,2021,40(01):84-89.
- [4] 李钢,郭殿豪,余丁浩.考虑流固耦合的储液结构高效地震反应分析方法[J].工程力学,1-12[2026-03-10]
- [5] 林均岐,李山有,李谊瑞,等.立式储液罐地震破坏快速评估方法[J].地震工程与工程振动,2006,(03):138-141.
- [6] 帅争峰,葛殿辉,雷咸道,等.热力耦合变液位作用下支撑刚度对熔盐储罐力学性能影响研究[J].太阳能学报,2026,47(02):205-212.
- [7] 张如林,程旭东,王淮峰,等.竖向地震作用对储液罐地震响应的分析[J].地震工程学报,2017,39(04):592-599.
- [8] 李昊,张猛强,尹勇,等.流固耦合方法在农业工程中的应用[J].中国农机化学报,2023,44(02):20-28.
- [9] 袁政强.巨型框架箱形节点抗震性能试验及分析.[D].重庆大学,2004.

# Research and Application of Intelligent Unmanned Operation Mode for Rubber Extrusion

Haibin Liu Han Jiang Chao Sheng Jinyun Yin

Zhuzhou Times New Materials Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 412000, China

## Abstract

The rubber preform manufacturing process for primary springs in rail transit vibration damping products has transformed traditional manual workflows through digital and intelligent production systems. Leveraging information technology, smart automation, and AI-driven solutions, the system achieves automated cutting, weighing, material transfer, mechanism integration, and AGV delivery systems. An upper-level extruder control system serves as the central hub, interfacing with Manufacturing Execution System (MES), Automated Guided Vehicle (AGV) Scheduling System (RCS), extruder PLCs, and feeding mechanism PLCs. Industrial Wi-Fi enables real-time data exchange across interconnected systems, allowing MES to initiate rubber material demand commands while the extruder control system coordinates PLCs and RCS to synchronize automated equipment operations. This establishes a fully intelligent unmanned production model for extrusion rubber materials. The smart unmanned extrusion facility exemplifies innovative “digital transformation and intelligent upgrading” strategies, integrating IT/OT/CT technologies to enhance new productivity capabilities, strengthen manufacturing platform competitiveness, and create cutting-edge digital application scenarios.

## Keywords

preform molding of rubber compounds; automatic extrusion; automatic coupling; automatic distribution; intelligent unmanned operation

# 胶料挤出智能无人化作业模式研究与应用

刘海斌 蒋寒 盛超 尹金云

株洲时代新材料科技股份有限公司, 中国·湖南 株洲 412000

## 摘要

轨道交通减振产品一系簧用胶料预成型工序通过推行数智化生产改变传统手工作业模式, 利用信息化、智能化、自动化等技术, 实现自动裁断、自动称量、自动过账、自动接驳机构、自动AGV配送系统等, 建立挤出机上位系统并以此系统为中枢, 对接制造执行系统(MES)、AGV调度系统(RCS)、挤出机PLC, 推料机构PLC, 通过工业WIFI各系统互联, 实时交互信息, 形成MES系统发起胶料需求指令, 挤出机上位系统作为中枢指挥PLC、RCS, 调度各自动化设备及机构协调联动作业, 实现全流程的挤出胶料智能无人化生产模式。该挤出智能无人化工站是深入探索“智改数转”新模式、高度集成IT/OT/CT技术, 聚焦新质生产力、持续提升制造平台核心竞争力, 打造数字化应用场景新高地的典型案例。

## 关键词

胶料预成型; 自动挤出; 自动接驳; 自动配送; 智能无人化

## 1 引言

胶料是橡胶加工领域中的重要材料, 可以通过各种加工方式(如挤出、硫化、注射等)制成各种形状的半成品或成品。这些制品在硫化后具有优异的物理性能和化学性能, 如耐寒性、耐热性、耐老化性、防水性、防潮性等, 广泛应用于汽车、轨道交通、桥梁、建筑、电子、家电、医疗器械等领域。其性能对橡胶制品的加工和最终质量有着至关重要的影响。随着科技的不断进步和工艺的不断改进, 胶料的种

类和性能也在不断丰富和提高。

胶料预成型工艺有回炼和挤出, 胶料先预成型和制品相似形状的料坯半成品, 放在加热的模具的型腔中, 然后闭模加压, 使其成型并固化或硫化, 脱模后得橡胶制品。经过预成型的胶料质量更致密、均匀, 能改善硫化产品的性能和质量, 缩短硫化周期, 是橡胶加工中的重要环节。回炼和挤出各自具有一些优劣势, 在实际应用中, 需要根据具体情况选择合适的工艺和设备, 并加强过程控制和管理, 以确保产品质量和生产效率。

【作者简介】刘海斌(1983-), 女, 中国湖南株洲人, 本科, 工程师, 从事制造工艺研究。

预成型工艺	优点	缺点
回炼	<ul style="list-style-type: none"> <li>●换型快, 适用多胶种生产</li> <li>●料坯可制作成各种形状</li> <li>●设备简单, 投资少</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●人工操作, 质量依赖操作者技术和经验</li> <li>●设备能耗高, 噪音大</li> <li>●设备辊筒旋转, 有操作安全隐患</li> </ul>
挤出	<ul style="list-style-type: none"> <li>●挤出过程自动化, 质量更稳定</li> <li>●生产效率高, 适用大规模连续生产</li> <li>●设备能耗较低, 噪音小, 无操作安全隐患</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●换型慢, 不适用多胶种生产</li> <li>●设备高性能, 价格较高</li> <li>●料坯依据口型, 生产过程中形状单一</li> </ul>

## 2 背景

本文介绍一种轨道交通橡胶减振产品用胶料挤出智能无人化生产方案, 轨道交通橡胶减振产品应用于高铁车辆转向架与车厢之间, 起承载及减振作用。该产品由胶料和铁件经过高温硫化组合而成, 具有优异的物理性能和化学性能, 其制造工艺复杂, 包含铁件前处理、胶料预成型、硫化等主要工序。

现有橡胶减振产品胶料预成型工艺采用挤出逐步代替回炼, 提高生产效率降低制造成本。挤出可将胶料塑化成质量更致密、均匀的卷状, 后人工拿取挤出料配送至硫化机台硫化。现有挤出靠人工传递胶料的挤出信息, 再依胶种人工选择机台挤出, 人工挤出取料及配送料, 效率低, 走动浪费大, 有供料不及时及用错胶料的风险。很有必要应用数智化技术, 对现有挤出作业模式进行升级, 提高制造核心竞争力。

## 3 挤出智能无人化实施方案

该方案利用信息化、智能化、自动化等技术, 建立自动挤出、自动裁断、自动称量、自动过账、自动接驳机构、自动 AGV 配送等代替人工繁杂作业, 建立挤出机上位系统并以此系统为中枢, 对接制造执行系统 (MES)、AGV 调度系统 (RCS)、挤出机 PLC、推料机构 PLC, 通过工业 WIFI 各系统互联, 实时交互信息, 形成 MES 系统发起胶料需求指令, 挤出机上位系统作为中枢指挥 PLC、RCS, 调度各自动化设备及机构协调联动作业, 实现全流程的挤出胶料智能无人化生产模式。并围绕公司数字化建设要求, 建立挤出数字化工位, 实时展示工位六要素 (人/机/料/法/环/测), 实时洞察异常, 敏捷响应。实时呈现停机、缺料、安全隐患、重量、温度、胶料有效期等异常及胶料库存、设备效率等, 自动锁止设备动作及异常工单。

### 3.1 多系统集成互联互通

该工站以制造执行系统 (MES) 为业务端, 依据 MES 排程工单、硫化机台、模腔、物料信息及胶料 BOM, 自动触发胶料需求指令给挤出上位机系统, 指令包含胶料牌号、重量、模具腔数、接料位、配送目的地信息。挤出上位机系统收到胶料需求指令, 分发给 AGV 调度系统 (RCS)、挤出机 PLC, 依据各挤出上位料库存胶料种类指派对应挤出机。RCS 调度 AGV 背负料架至对应挤出机接驳位, 反馈信息给挤出机 PLC 及自动推料机构 PLC, 自动推料机构升降到位, 自动挤出启动, 自动称量、自动裁断料、自动过账配合联动,

完成每模腔重量精度  $\pm 5g$  的胶料挤出, 推料机构自动推送每模腔胶料至 AGV 料架, 依据 MES 需求指令, 挤出上位机系统自动识别模腔数, 多腔胶料需求情况下, 自动推料机构 PLC 与 AGV 调度系统 (RCS) 实时交互信息, 控制推料机构行程、AGV 背负料架步进移动实现多腔胶料在料架上 X、Y 方向的均匀摆布。胶料推送完毕, 自动推料机构 PLC 发送推料完毕信号给 AGV 调度系统 (RCS), AGV 按需求指令配送至目的地, 智能料架安灯亮起提示取料, 硫化操作者取完胶料, 并按下智能料架上安灯键, 物料解除, 安灯键灭, 智能料架反馈信号给 AGV 调度系统 (RCS), AGV 背负料架回等待区, 配送指令执行完毕, 反馈给挤出上位机系统, 挤出上位机系统反馈给 MES, 以此循环往复。系统构架如图 1 所示。

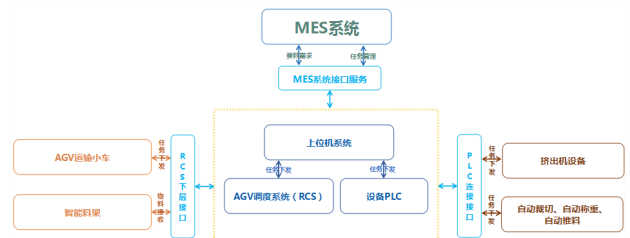


图 1 胶料挤出智能无人化作业系统构架

### 3.2 自动挤出接驳配送

自动推料杆采用伺服电机驱动 + 直线导轨组合, 由于推送距离超过 1m, 采用伺服电机 + 导轨的方式进行物料的推送, 保证推送过程稳定、快速的同时, 伺服电机也可根据现场情况调整推送速度。此机构可调整步进行程, 在 X 轴上对胶料进行设定位置的推进。滚筒平台采用 S45C 材质  $\Phi 50$  滚筒, 针对胶料粘连问题, 在胶料挤出 10 秒内, 自动推料杆可将胶料从滚筒平台顺利推动至智能料架上; 且为防止胶料落入滚筒间缝隙, 将滚筒间间距设置为 2mm, 小于胶料挤出直径 4mm, 消除胶料推送受阻风险。称量装置设立在滚筒平台下, 可对挤出胶料实时称重, 把胶料重量反馈至挤出机 PLC, 在称重重量与需求重量误差小于 5g 时, 方可进行下一步骤, 否则发出异常报警停止挤出作业。自动裁断装置使用气缸驱动剪切装置, 在接收到挤出机单次挤出完毕指令后, 将胶料自动裁断。气缸自动伸缩翻转机构使用气缸、轴承等与滚筒平台相结合, 未使用时收缩于挤出机外壁, 降低占用空间, 在接受到上位机料架到达信号后, 自动翻转伸出, 作为桥梁接驳智能料架与滚筒平台。料架无动力滚筒

S45C 材质 Φ90 滚筒，规格、功能与滚筒平台相同。在 Y 轴上分为多列，可在 Y 轴上承载多道胶料。通过 AGV 的步进与自动推料杆结合可实现 X、Y 轴上的均匀摆布。自动挤出接驳装置结构如图 2 所示。接驳完毕，通过 AGV 自动配送至目的地。

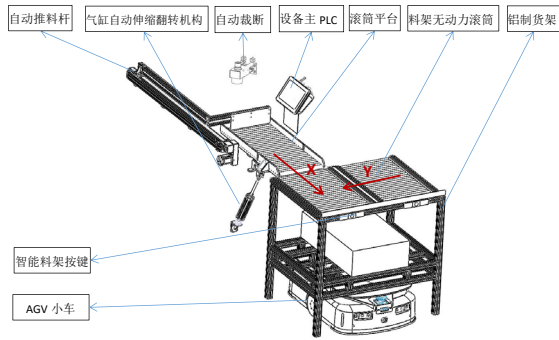


图 2 自动挤出接驳装置

### 3.3 数字化工位建设

围绕公司数字化建设对“工位六要素”的要求，完成标准作业流程、标准作业内容、标准作业动作、标准作业时间等内容制定，实现工位制造全过程数字化管理。内容标准如表 1 所示：

表 1 工位六要素

要素类别	要素编码	属性定义
人	员工编号	工种资质、技能水平、经验、绩效要求、数量要求
机	设备编码	类型、型号、性能、数量要求
料	物料编码	物流编码、定额、配送周期、配送工具
法	动作编码	尺寸、参数、时间 ....
	工序编码	动作组合、资质要求、“工位六要素”配置、作业时间
	岗位编码	动作组合、资质要求、“工位六要素”配置、作业时间
	工位编码	岗位组合、工序组合、“工位六要素”配置、节拍时间
环	危险源编码	危险源类型、危险源状态参数、防护资源型号及数量
	环境要素编码	环境类型编码、环境要素参数
测	检测顶点编码	标准类型、参数

建立挤出数字化工位，用于实时洞察异常、快速处理，实现工位六要素（人 / 机 / 料 / 法 / 环 / 测）实时展示。实时呈现停机、缺料、安全隐患、重量、温度、有效期等异常，及胶料库存、设备效率，并自动锁止。实现胶料挤出智能化

无人化作业工站实时监控。设计内容如图 3 所示：



图 3 挤出数字化工位

## 4 结语

通过运用工业 WIFI，实现挤出上位机系统、挤出机 PLC、自动推料 PLC、AGV 控制系统（RCS）、制造执行系统（MES）多系统互联互通，信息实时交互，实现 MES 作为业务层发起要料需求，挤出上位机系统作为调度层接受和安排任务，指挥执行层 PLC、RCS、PLC、RCS 指挥挤出机、自动称量机构、自动推料机构及 AGV 联动实现自动化作业，高效无人化生产。该工站高度集成了 IT/OT/CT 技术，实现物料的精准取料及配送，杜绝胶料用错的质量隐患。

该工站建立了挤出数字化工位，实现工位六要素（人 / 机 / 料 / 法 / 环 / 测）实时识别异常，图表化呈现指标的 trends 和规律，实时评价管理效果，实时监控和预警，牵引管理者改进。

该工站为聚焦新质生产力，深入摸索“智改数转”新模式，通过集成先进的信息技术、自动化技术和智能技术，实现生产过程的自动化、智能化和数字化，持续提升制造平台核心竞争力，是打造数字化应用场景新高地的典型案例。为橡胶制品行业建设智能无人化作业工站提供实践经验。

### 参考文献

- [1] 薛中华,王伟,肖春峰,等.一种摩擦卷曲恒张力自动调节装置[P].山东省:CN202320343670.8,2023-08-01.
- [2] 史锋,刘飞,刘娟,等.挤出机自动接断条装置[P].湖北省:CN202020637251.1,2020-12-18.
- [3] 闫微.基于改进模糊PID算法的炼胶挤出设备压力-温度协同控制研究[J].制造业自动化,2025,47(11):109-113

# Finite Element Analysis of Water Impermeability Test for polymer-Modified Cement Compounds for Waterproofing Membrane

Yiding Guo Miaomiao Wang Xiang Li\* Bolin Wang Juncheng Xin

School of Civil Engineering, Dalian University for Nationalities, Dalian, Liaoning, 116650, China

## Abstract

To investigate the effects of disc structure and test parameters on the evaluation results in the impermeability detection of polymer-cement waterproof coatings, this study was carried out in accordance with standards including GB/T 23445-2009 and GB/T 16777-2008. The ABAQUS finite element analysis software was used to establish two detection models of a 7-hole disc and a 19-hole disc, so as to simulate the impermeability test processes under a pressure of 0.3 MPa for 30 minutes (for the 7-hole disc) and 60 minutes (for the 19-hole disc) respectively. By analyzing the stress distribution, strain characteristics and mechanical response laws of the coating film samples, the rationality of the two detection methods was compared. The results show that the ABAQUS finite element simulation can accurately reproduce the mechanical behavior of the impermeability test of polymer-cement waterproof coatings, clearly reveal the influence mechanism of test parameters on the test results, and verify that the test scheme of the 19-hole disc combined with a 60-minute load holding time is more reasonable, which provides theoretical and data support for the optimization and improvement of the impermeability test standards for such waterproof coatings.

## Keywords

Polymer-cement waterproof coating; Impermeability; Finite element analysis; ABAQUS; Disc structure

## 聚合物水泥防水涂料不透水性试验的有限元分析

郭亿丁 王苗苗 李想\* 王柏霖 辛俊城

大连民族大学土木工程学院, 中国·辽宁 大连 116650

## 摘要

为探究聚合物水泥防水涂料不透水性检测中圆盘结构与试验参数对评价结果的影响,以GB/T 23445-2009<sup>[1]</sup>、GB/T 6777-2008<sup>[2]</sup>等标准为依据,采用ABAQUS有限元分析软件,建立7孔圆盘与19孔圆盘两种检测模型,分别模拟0.3MPa压力下30min(7孔)与60min(19孔)的不透水试验过程。通过分析涂膜试样的应力分布、应变特征及力学响应规律,对比两种检测方法的合理性。结果表明:借助ABAQUS有限元模拟可精准还原聚合物水泥防水涂料不透水性试验的力学行为,揭示了检测参数对试验结果的影响机制,验证了19孔圆盘搭配60min持荷时间的检测方案更具合理性,为该类型防水涂料不透水性检测标准的优化完善提供了理论与数据支撑。

## 关键词

聚合物水泥防水涂料; 不透水性; 有限元分析; ABAQUS; 圆盘结构

## 1 引言

聚合物水泥防水涂料把丙烯酸酯、乙烯-乙酸乙烯酯这类聚合物乳液以及水泥当作核心原材料<sup>[3]</sup>,它同时具备聚

合物所具有的弹性以及水泥所有的刚性,是无毒、无害、无污染的环保型防水涂料<sup>[4]</sup>,在建筑的屋面、地下室、厨卫间等开展的防水工程当中有着广泛的运用,自2013年起聚合物水泥防水涂料使用量达50万吨,占防水涂料总量50%以上<sup>[5]</sup>。耐水性能作为评估材料耐久性 及服役寿命的核心参数<sup>[6]</sup>,能够直接对工程的防水质量以及使用寿命起到决定性的作用。

现行的GB/T 23445-2009<sup>[7]</sup>标准规定,聚合物水泥防水涂料的不透水性试验要参照GB/T 16777-2008<sup>[8]</sup>第15章来执行,要用7孔圆盘加压装置,试验时的压力是0.3MPa,持续时间为30min。不过在实际检测的时候发现,这种方法因为存在局部应力集中的情况,所以会出现评价偏差的问题。

【基金项目】大连民族大学创新创业训练计划(项目编号:202512026154)。

【作者简介】郭亿丁(2004—),男,中国河北张家口人,在读本科,从事土木工程道路桥梁相关研究。

【通讯作者】李想(1989—),男,中国黑龙江双鸭山人,博士,讲师,从事力学仿真模拟以及新型防水涂料研究。

新的标准打算把检测装置改成 19 孔圆盘，同时把持荷时间延长到 60min，但是缺少理论依据来证明这种变更的合理性。

有限元数值模拟技术能够精准地再现材料在受力过程中所呈现出来的力学行为，这无疑为检测方法的优化给予了极为高效的手段。ABAQUS 软件<sup>[9]</sup>有着颇为强大的非线性分析能力，并且还拥有丰富的材料本构模型，所以在土木工程材料性能模拟方面的应用已经相当成熟了。本文选取聚合物水泥防水涂料当作研究对象，基于 ABAQUS 建立有限元模型，模拟处在不同试验条件之下的力学响应情况，进而揭示出圆盘结构以及持荷时间对于不透水性评价结果所产生的影响机制，从而为检测标准的进一步完善给予数据层面的有力支撑。

## 2 试验基础与数值模型建立

### 2.1 试验参数与材料性能

依据 GB/T 16777-2008 标准规定，试件尺寸是 150mm×150mm，涂膜厚度按照工程常用值来取，也就是

表 1 两种圆盘模型试件结构参数

装置类型	孔径 (mm)	孔数 (个)	圆盘外径 (mm)	加压面半径 (mm)	圆盘厚度 (mm)
7 孔圆盘	φ25	7	φ92	46	5
19 孔圆盘	φ18	19	φ135 (R67.5×2)	67.5	5

### 2.3 数值模型构建

#### 2.3.1 几何建模与装配

在 CAD 中建立起 7 孔 /19 孔圆盘、聚合物水泥防水涂料试件的三维实体模型以及金属网的二维平面模型这三个部分。为了能够让计算得以简化，ABAQUS 中就把金属网和试件之间、圆盘和试件之间的那些微小间隙给忽略了，同时用二维模型赋予不同半径属性的方法代替三维金属网的不同工况，进而采用绑定约束 (Tie) 的方式来对三者之间那种紧密接触的关系加以模拟。在进行模型装配的时候，要让金属网紧紧地贴附在试件的迎水面上，并且把圆盘安置在金属网的上方，以此来保证压力能够均匀地传达到试件的表面。

#### 2.3.2 边界条件与加载方式

边界条件方面，需将固定圆盘外边缘的所有自由度都予以固定，这主要是为了模拟试验装置所实施的夹紧固定操作。要对试件四周的水平位移加以限制，其目的在于防止在试验开展的过程中出现试件滑动的情况。还要求金属网和试件之间、以及金属网和圆盘之间均不能存在相对滑动的现象。

加载方式是静力恒载，把压力施加到 0.3MPa 保持不变，直到规定的持荷时间结束，最后再把压力卸载到 0MPa。这里所说的持荷时间，对于 7 孔模型来说是 30 分钟，而对于 19 孔模型则是 60 分钟。压力是施加在圆盘下表面的，而且是通过均布面荷载的方式施加的，之后再经过金属网传递给

1.5mm。金属网选用的是孔径为 0.2mm、丝径为 0.125mm 的平纹编织网，其力学性能参数是根据 GB/T 5330-2003 标准来确定的。

聚合物水泥防水涂料的力学性能指标是经试验来确定的，其拉伸强度达到了 1.80MPa，断裂伸长率为 30%，弹性模量是依据应力 - 应变曲线经过计算得出的，结果为 5.4MPa，泊松比采用的是 0.3 这个数值。在不透水试验中，所设定的压力为 0.3MPa，对于 7 孔圆盘模型而言，其持荷时间为 30 分钟，而 19 孔圆盘模型的持荷时间则为 60 分钟。

### 2.2 圆盘结构参数

两种圆盘皆是选用钢材来制作的，其厚度达到了 10mm，外径则是 92mm。7 孔圆盘依照 GB/T328.10-2007 这一标准来进行设计。而 19 孔圆盘属于拟变更的结构，它的孔分布是以圆心作为中心点，按照同心圆的方式进行排列，且所有的孔都处在水压加压面的范围之内，各个孔的孔径统一设定为 φ20mm，如此便能确保总加压面积和 7 孔圆盘大致相近。关于圆盘结构的具体尺寸情况，可参照表 1 了解。

试件的迎水面。

## 3 有限元模拟结果与分析

### 3.1 应力分布特征对比

在标准工况下 (金属丝直径为 0.125mm 的金属网) 7 孔圆盘模型以及 19 孔圆盘模型在持荷末期的试件等效应力分布情况分别呈现于图 4 和图 5 当中，详细实验数据见表 3

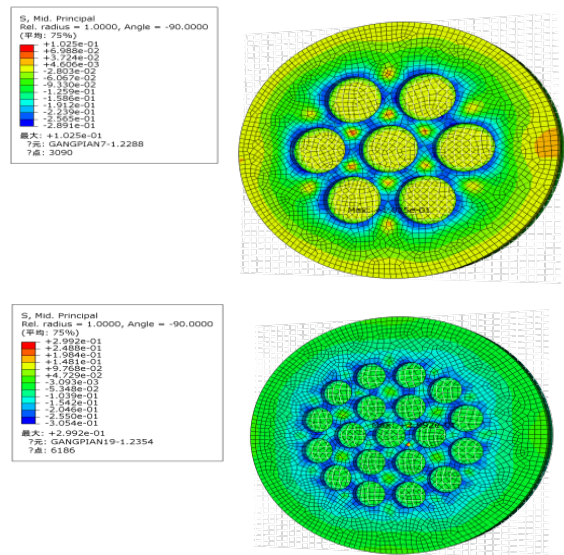


图 4 7 孔与 19 孔圆盘模型试件等效应力分布云图 (单位: MPa)

表 3 两种圆盘模型试件应力统计结果

圆盘类型	最大应力 (kPa)	平均应力 (kPa)	最大主应变
7 孔圆盘	339.84	160	0.036
19 孔圆盘	339.58	164	0.039

### 3.2 应变分布与不透水性评价

7 孔圆盘模型中, 防水涂料试件的应变呈现强局部集中特征, 最大等效应变数值达 7.2%, 该极值点仅出现在 7 个孔的边缘小范围区域, 试件其余绝大部分区域的应变值集中在 0.5%~2.0% 区间, 整体变形程度极低。水压荷载通过 7 孔圆盘传递时, 作用力仅集中在少数孔边缘位置, 易导致试验中仅局部区域产生变形响应, 出现不透水性评价结果偏于保守的偏差。

19 孔圆盘模型下, 防水涂料试件的应变分布均匀性显著提升, 无明显的局部集中现象, 最大等效应变达到 22.5%, 虽仍未超过材料的断裂伸长率, 未造成涂料破坏, 但该极值已接近涂料塑性破坏临界值, 且试件有效加压面内的应变值普遍处于 5.0%~18.0% 区间, 整体变形程度远高于 7 孔圆盘模型。19 孔圆盘凭借孔数更多、孔径更小且呈同心圆均匀分布的结构特点, 使水压通过金属网传递至涂料表面时, 荷载作用点大幅分散, 有效避免了局部应力集中引发的非均匀变形, 让涂料的变形响应更贴合实际工程中防水涂料大面积、整体受水压的变形特征。

### 3.3 不同工况的金属网的应力传递特征分析

在标准 GB/T5330-2003<sup>[10]</sup> 中, 对工业用金属丝编织方孔网进行了网孔基本尺寸、网孔算术平均尺寸偏差、大网孔尺寸偏差范围和金属丝直径的搭配的说明。孔径为 0.2mm 时, 金属丝直径可分为 6 种工况, 我们通过 ABAQUS 模拟不同金属丝直径工况, 得出不同工况对不透水性实验结果的影响见表 4。

表 4 防水涂料在不同工况下应力统计结果 (kPa)

金属铁丝直径 (mm)	7 孔圆盘下总应力	19 孔圆盘下总应力
0.080	344.22	343.95
0.090	343.74	342.20
0.100	342.55	342.13
0.112	341.41	340.92
0.140	338.82	338.43

在 0.3MPa 试验压力下, 无论是 7 孔圆盘还是 19 孔圆盘试验体系, 防水涂料所受总应力均随金属网丝径的增大呈逐步降低趋势。当金属丝直径从 0.080mm 增至 0.140mm 时, 金属网的整体受力面积与约束作用随之减小, 应力传递效

率逐步下降。同时, 相同金属网丝径工况下, 7 孔圆盘与 19 孔圆盘体系中防水涂料所受总应力数值相近, 说明金属网丝径是影响试验应力传递的关键因素, 其影响程度显著高于圆盘结构的差异。

## 4 结语

(1) 在 0.3MPa 试验压力作用下 7 孔圆盘模型的防水涂料试件出现明显的局部应力、应变集中问题, 其最大等效应力高于 19 孔圆盘模型, 而 19 孔圆盘模型的试件应力与应变分布表现出更好的均匀性。

(2) 19 孔圆盘的结构设计能够实现荷载的分散传递, 使试件有效加压面整体产生变形, 更贴合工程实际中防水涂料的受力状态; 7 孔圆盘因局部受力特征易导致对防水涂料防水性能的评价结果偏于保守。

(3) 在不同金属网工况实验中, 随着金属铁丝网丝径从 0.080mm 增大至 0.140mm, 铁丝网整体受力面积和约束作用变小, 防水涂料在 7 孔圆盘、19 孔圆盘试验体系下所受的总应力均呈逐步降低趋势, 丝径越小, 防水涂料传递获得的总应力值越高, 丝径越大则应力传递后的数值越小。

## 参考文献

- [1] GB/T 23445-2009. 聚合物水泥防水涂料[S]. 中国标准出版社, 2009.
- [2] GB/T 16777-2008. 建筑防水涂料试验方法[S]. 中国标准出版社, 2008.
- [3] 熊爽, 刘文凯, 陆建兵. 聚合物水泥防水涂料抗渗性试验方法研究[J]. 中国建筑防水, 2025, (12): 51-53.
- [4] 沈春林编. 聚合物水泥防水涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 15-16.
- [5] 赵守佳, 田翠. 聚合物水泥防水涂料发展现状与展望[J]. 中国建筑防水, 2014, 12: 7-13
- [6] 王雨禾, 邹伟, 等. 聚合物水泥防水涂料的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(09): 29-32+42.
- [7] GB/T 23445-2009. 聚合物水泥防水涂料[S]. 中国标准出版社, 2009.
- [8] GB/T 16777-2008. 建筑防水涂料试验方法[S]. 中国标准出版社, 2008.
- [9] 蔡亚玲, 赵磊, 张颖. 基于 ABAQUS 分析新建部位沉降对拼宽桥梁局部受力的影响[J]. 价值工程, 2026, 45(09): 135-138.
- [10] GB/T 5330-2003. 工业用金属丝编织方孔筛网[S]. 中国标准出版社, 2003.

# Current Situation and Management Measures of Measurement Management in Basic Units of Oil and Gas Fields

Yuanyuan Xu

Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China

## Abstract

Measurement management at the grassroots level of oil and gas fields is of great significance to production operations, but many problems currently exist. In terms of management awareness, it is generally weak, and there is insufficient attention to measurement work; the management of measuring instruments is chaotic, with loopholes in procurement, ledger recording, maintenance, and disposal processes; the professional quality of measurement personnel varies greatly, and the training mechanism is imperfect, making it difficult to meet work requirements; measurement data management is not standardized, with frequent problems in collection, recording, transmission, and analysis, and accuracy cannot be guaranteed. To address these issues, it is necessary to strengthen the measurement management awareness of all personnel, standardize the management of measuring instruments and enhance maintenance, improve the professional quality of measurement personnel and perfect the training mechanism, while standardizing measurement data management, in order to ensure safe and efficient oil and gas field production.

## Keywords

oil and gas field; measurement; management

## 油气田基层单位计量管理现状及管理措施探讨

徐媛媛

新疆油田公司, 中国·新疆 克拉玛依 834000

## 摘要

油气田基层单位计量管理对生产运营意义重大,但目前存在诸多问题。管理意识方面,整体淡薄,对计量工作重视程度不够;计量器具管理混乱,采购、台账记录、维护保养及报废处理等环节均存在漏洞;计量人员专业素质差异大,且培训机制不完善,难以满足工作需求;计量数据管理不规范,采集、记录、传输和分析利用过程问题频出,准确性无法保证。针对这些问题,需强化全员计量管理意识,规范计量器具管理并加强维护,提升计量人员专业素质、完善培训机制,同时规范计量数据管理,以此保障油气田生产安全与高效。

## 关键词

油气田; 计量; 管理

## 1 引言

油气田生产过程中,计量管理是保证安全生产、提高经济效益、保证产品质量的重要环节,在油气田生产一线的基层单位,计量水平高低直接影响到一个油气田的整体发展情况。但是目前油气田基层单位对计量管理工作重视程度不够,从管理意识到仪器设备管理上,再到人员素质及数据管理等,都有很大提升空间。研究分析油气田基层单位计量管理工作现状并且提出合理建议具有非常重要的现实意义。

## 2 油气田基层单位计量管理现状

### 2.1 计量管理意识淡薄,重视程度不足

油气田基层单位计量管理工作往往不够重视。有些领导对于计量工作重要性认识不足,认为它是可有可无的一项辅助性工作,而不是保证安全生产、创造经济效益的重要手段,在实际工作中,计量管理经常处于附属地位,有关工作布置以及人员配备等都处于次要位置。同时,一线工人对计量工作缺乏足够重视,不了解如何正确使用、维护保养计量器具,工作中随意性强,在操作上不按规章制度办事,造成计量结果不正确、不可信。缺乏足够的重视使计量工作难以正常开展,不能给油气田生产决策提供可靠依据。

### 2.2 计量器具管理混乱,维护保养不到位

油气田基层单位计量器具管理工作十分混乱,在计量器具采购上,缺少合理计划以及严格审查程序,造成所购买

【作者简介】徐媛媛(1990—),中国河南驻马店人,本科,助理工程师,从事计量管理。

计量器具不能满足生产需要或质量不合格问题；计量器具台账登记不到位，不清楚、不全面，不能及时了解计量器具数量、种类、使用情况等问题，给计量器具管理及维修工作带来很大麻烦；使用过程中，有效监管缺失，大量计量器具长期超负荷运行，且因维护保养和维修工作大部分依托于生产厂家，而生产厂家分布全国各地，来现场维修保养十分困难，导致器具未能及时修理养护，精度降低、寿命缩短。此外，对于报废计量器具也未按规定妥善处置，有的随意丢弃或者继续使用，造成一定安全隐患。

### 2.3 计量人员专业素质参差不齐，培训机制不完善

计量工作是较为复杂的技术工作，需要计量人员有较高水平的专业技术和工作经验。但是，油气田基层单位计量人员的专业水平参差不齐，基层计量管理人员大多兼职，精力分散且专业管理能力欠缺，部分人员未系统学习过计量专业知识，对计量法规、仪表原理及使用方法的知之甚少。另外，基层单位培训制度不健全，培训内容缺乏针对性及实用性，培训形式单一，只是简单地讲授一些理论知识，没有具体的实操练习和案例剖析，使计量工作人员不能把学到的知识运用到实际工作中去，培训效果不佳。

### 2.4 计量数据管理不规范，准确性难以保证

计量数据是油气田生产决策重要依据，其准确性直接影响生产安全及效益，在实际工作中，计量数据管理存在诸多问题，而在数据获取环节，由于所用计量器具精度不足或者工作人员操作不当等因素造成所获取数据具有偏差，在数据录入以及传输过程中又缺少相应检查与监管措施，导致数据录入不全或错误，同时在传输过程中发生数据损毁或者被篡改现象也较为普遍；另外，对计量数据研究不足，在仅对其进行简单归纳、总结基础上未能进一步分析其中所包含信息并据此提出合理化建议以促进油田开发水平提升以及指导相关工作开展。

## 3 油气田基层单位计量管理措施

### 3.1 强化计量管理意识，提升全员重视程度

油气田基层单位，计量管理意识薄弱是影响计量工作正常进行主要原因。一些管理者没有认识到计量工作对保证安全生产、促进企业增收节支、保证产品质量等方面重要作用，把计量工作当成可有可无辅助性工作，所以在人、财、物以及工作任务分配上给予很少重视。同时，由于基层职工计量意识淡薄，在使用计量器具过程中随意性较大，不按要求操作，造成计量结果准确性较差。

要改变这种状况，就要从多个角度加强计量管理理念。进行广泛而深入的计量管理培训及宣传活动。对管理者来说，可组织专门的计量管理讲座，请相关领域的专业人士向大家介绍计量工作对于油气田生产的重大作用，以实例说明计量管理不到位带来的危害性，比如导致生产安全事故或者造成大量经济损失等，以此提高管理者对计量工作的认识，

在其决策以及资源配置中考虑计量管理工作的重要性。而在一线工人当中，则可以采取多种形式宣传教育活动，例如贴挂图、分发小册子、开展计量知识竞赛等形式，形成良好计量氛围，让每个职工都在工作中都受到计量观念的影响。同时要进行有针对性的计量操作培训，使员工掌握计量器具使用方法以及保养知识，认识到规范操作是保证计量结果准确性的基础，提高员工的责任意识和使命感。把计量管理工作纳入到员工绩效考核当中，在计量方面做出贡献的人员给予一定的奖励，例如发放荣誉证书或者给予一定的奖金以及提拔的机会等，调动员工参与计量管理的积极性。而对于由于计量原因而造成不良影响的人，则进行适当的惩罚，起到警醒的作用。

### 3.2 规范计量器具管理，加强维护保养工作

计量器具是计量工作前提，如果计量器具管理混乱或者缺少对计量器具日常维护，将造成计量结果不准确甚至不可靠。而在油田基层单位中，计量器具采购缺乏计划性、计量器具台账管理不规范、计量器具超负荷运行以及计量器具报废处置不合理等情况比较严重<sup>[1]</sup>。

规范计量器具管理工作应从采购开始。建立健全计量器具采购审查制度，在满足生产和工作需要的基础上合理拟定采购计划，在购买之前了解市场上各种计量器具的情况，选择质优价廉、可靠耐用、符合国家及行业标准要求的产品，同时让供货商提供相关技术资料以及售后服务以保证计量器具能正常运转和保养。加强计量器具台账管理也是十分重要的。做好详细完整的计量器具台账，把每个计量器具的名称、规格型号、生产厂名、出厂编号、购入时间、用途部门、使用状况等都登记清楚，及时做好台账的更新和完善工作，使台账上反映的信息真实有效。利用台账管理可以清楚了解各种计量器具数量、位置以及使用情况，便于对计量器具分配、维修或者报废等提供参考依据。加强对计量器具使用的管理和维护工作。制定计量器具的操作规程及维护保养规定，明确相关工作人员的责任以及操作要求。对相关人员进行针对性培训，让其了解计量器具的功能以及如何正确操作，做到按规章制度操作。定期对计量器具进行检查和维护保养，根据计量器具的不同使用情况，制定相应的维护保养措施，如清洁、润滑、校准等。做好计量器具的维护保养工作并做好记录，记载每次维护保养的时间、内容以及效果等，以方便查看计量器具的工作状态及其维护情况。对于报废计量器具应按要求处置。制定计量器具报废审批程序，对于已到报废期限计量器具，由使用部门提出申请，经技术部门验收后，上报上级主管部门批准。报废计量器具要单独存放，以免被误用。另外还要对报废计量器具进行无害化处理以减少环境污染<sup>[2]</sup>。

### 3.3 提升计量人员专业素质，完善培训机制

计量工作具有很强的专业性，计量人员的专业素质影响到计量工作的质量与效率。而油气田基层单位计量人员的

专业素质参差不齐,缺乏有效的培训制度,使得计量人员不能满足复杂的工作要求。计量岗位属关键岗,长时间任职易滋生廉洁风险。为此,单位采取定期轮岗、换岗举措。但轮岗后员工专业素质出现差异,为保障工作质量,需持续开展针对性培训,提升员工能力,以适应岗位需求。

依据计量人员工作岗位以及技术水平,进行有针对性培训。对刚入行计量人员进行基础培训,如计量法律法规、标准、计量器具工作原理及其使用等,使他们快速掌握计量工作基本要求及流程;而对于有一定工作经验计量人员,则应侧重于提升培训,向其传授现代化计量技术与管理理念,扩大其知识范围与视野,增强其解决问题能力。此外还应支持计量人员参加各类行业会议和专业技术讨论会,了解行业发展现状及未来方向,在此过程中不断吸收新思想、新技术。传统培训主要以讲授理论知识为主,缺少动手实践机会及案例剖析环节,因此很难取得良好效果。应当采用多种形式进行培训,例如现场实操培训、模拟演练、案例分析、网络自学等方式。现场实操培训使计量人员能够亲自动手掌握计量器具使用方法及技术要领,提高其动手能力和准确性。模拟演练可以还原日常工作生活中各类情况及问题,使计量人员通过实践提升处理问题能力以及应变能力。而案例分析是通过具体事例研究讨论,使计量人员明白计量工作中会面临哪些问题及其解决办法,从而吸取教训。在线学习给计量人员提供方便途径,在他们有空闲时间或者需要时,可自行学习相关内容与知识。在培训结束之后,以考试、实操考核、问卷等形式对计量人员培训情况进行测评,根据测评情况及时改进和完善培训计划及内容,做到有的放矢、有的放矢。并且把培训效果纳入到计量人员绩效考核和个人职业生涯规划中去,激发计量人员参与培训积极性,提升计量人员业务水平。

### 3.4 规范计量数据管理,确保数据准确性

计量数据是油气田生产决策重要参考,而其是否准确又直接影响着生产的安全及效益。但是,目前各基层单位对计量数据管理不够重视,在计量数据采集过程中误差较大,在计量数据记录及传递中存在随意性,在计量数据分析与利用上也缺乏主动性。

规范计量数据采集过程。使用精度高、性能稳定计量

设备进行测量并定期对其校准及检定以保证其良好工作状态;制定详细计量数据采集制度以及相应操作流程并严格遵守该制度与流程避免人为影响计量数据采集结果;在计量数据采集过程中需要随时观察并做好相关记录一旦出现任何问题应立即解决以保证所取得计量数据客观、有效;规定统一计量数据记录标准以及格式并且必须做到详细、清楚、准确;利用信息化手段来进行计量数据记录以便更加快速高效地完成此项任务;在计量数据传输时需采取必要的防护措施如使用加密技术以及专用网络等以防计量数据被破坏或者窃取。制定数据传输审查制度,对传输的数据进行严格检查,保证数据的真实性、完整性。充分发挥计量数据的作用。建立计量数据分析方法以及相应的计算公式等,对获得的数据进行详细研究与探索。利用这些研究结果找出生产和管理中存在的问题及规律,从而更有利于生产管理和决策。如通过对油气产量进行研究可掌握油气田生产情况及其发展变化趋势并及时作出相应对策;又如对计量仪表误差的研究可发现计量仪表所存在问题以及改善措施从而提升其精确度与可靠性等。同时,将计量数据分析结果及时反馈给相关部门及有关人员,便于相互之间交流沟通协作,有利于提升整个油田管理水平以及创造更大经济价值<sup>[1]</sup>。

## 4 结语

油气田基层单位计量管理工作是重要且复杂的任务,对油气田的发展具有重要意义,在目前存在的意识、器具、人员及数据管理方面的问题上,加强意识、规范器具管理、提高人员素质以及完善数据管理可以有效地改善基层单位计量管理工作。未来需持续关注计量管理的新需求和新变化,不断完善方法手段,促进油气田基层单位计量管理工作再上一个新高度。

### 参考文献

- [1] 孙凤梅. 油气田计量监督面临的问题分析及优化对策 [J]. 石化技术, 2025, 32 (09): 182-183.
- [2] 迟化昌,王康,吴佳欢,等. 油气田单井计量技术适用性分析 [J]. 石油化工自动化, 2024, 60 (06): 43-48+88.
- [3] 李福敏,明红,李军,等. 油气田压力类计量器具现场检测影响因素探讨 [J]. 石油化工自动化, 2023, 59 (S1): 64-68.

# Exploring the Teaching Model of AI+VR Battery Maintenance Training Course under the Integration of Industry and Education

Xiaoning Yu

Luohe Food Engineering Vocational University, Luohe, Henan, 462300, China

## Abstract

In the context of the rapid development of the new energy vehicle industry, the demand for battery maintenance technical talents continues to increase. Traditional practical training teaching has certain limitations in terms of safety, equipment cost, and the authenticity of the teaching scenario. The integration of industry and education provides a new path for vocational education to achieve resource collaboration and practice-oriented guidance. Introducing artificial intelligence and virtual reality technology into the training course helps to build a highly realistic and interactive learning environment. Focusing on the battery maintenance training course, this paper analyzes the application mechanism of AI and VR technologies in teaching, and explores the reconfiguration of the course system and the optimization of the teaching model under the integration background. By constructing a virtual-real integrated training system and an intelligent evaluation mechanism, students' operational ability and professional quality can be improved, achieving an effective connection between teaching quality and industrial demands.

## Keywords

Integration of Industry and Education; Artificial Intelligence; Virtual Reality; Battery Maintenance; Practical Training Teaching

## 产教融合下 AI+VR 动力电池维修实训课程教学模式探究

于小宁

漯河食品工程职业大学, 中国·河南 漯河 462300

## 摘要

在新能源汽车产业快速发展的背景下, 动力电池维修技术人才需求持续增长, 传统实训教学在安全性、设备成本与教学情境真实性方面存在一定局限。产教融合为职业教育提供了资源协同与实践导向的新路径, 将人工智能与虚拟现实技术引入实训课程, 有助于构建高仿真、可交互的学习环境。围绕动力电池维修实训课程, 分析AI与VR技术在教学中的应用机制, 探讨融合背景下课程体系重构与教学模式优化路径。通过构建虚实结合的实训体系与智能评价机制, 可提升学生操作能力与职业素养, 实现教学质量与产业需求的有效对接。

## 关键词

产教融合; 人工智能; 虚拟现实; 动力电池维修; 实训教学

## 1 引言

新能源汽车产业链持续完善, 动力电池作为核心部件, 其检测与维修技术逐渐成为职业教育的重要培养方向。传统实训课程多依赖实体设备开展, 受限于成本投入与安全风险, 教学过程在操作覆盖范围与情境真实性方面存在不足。随着人工智能与虚拟现实技术的发展, 数字化实训环境逐渐成为教学改革的重要支撑。通过引入AI算法与VR交互系统, 可在虚拟空间中还原复杂维修场景, 为学生提供沉浸式学习体验。产教融合背景下, 企业技术标准与岗位需求能够直接

融入课程设计, 为教学模式优化提供现实依据。在此基础上, 对AI+VR动力电池维修实训课程教学模式进行系统研究, 对于提升职业教育质量具有重要意义。<sup>[1]</sup>

## 2 产教融合视角下课程建设的理论基础与技术支撑

### 2.1 产教融合对实训课程的重构作用

产教融合在动力电池维修领域中具有重要作用, 尤其体现在课程内容的重构和岗位能力标准的转化上。通过与企业的紧密合作, 教育体系能够更加精准地对接产业需求。企业在技术更新与设备应用方面具有前沿优势, 将其引入教学中, 不仅能够让学生接触到最新的技术和设备, 还能缩短人才培养与岗位需求之间的距离。课程重构过程中, 企业参与

【作者简介】于小宁(1991—), 女, 中国河南周口人, 本科, 讲师, 从事新能源汽车技术研究。

对典型工作任务的分析,可以提炼出关键技能模块,并将这些模块转化为具体的教学项目,从而使课程更加具有针对性和实践性。通过这种方式,教学内容更加贴近真实生产情境,能够有效提升学生的职业适应能力和操作水平,帮助学生更好地应对未来的工作挑战。

## 2.2 AI 与 VR 技术在实训教学中的融合机制

AI 与 VR 技术的融合在动力电池维修实训教学中具有强大的应用潜力。AI 技术可以通过数据分析对学生的操作过程进行实时监控,识别出操作中的错误并提供针对性的智能反馈,帮助学生改进操作技巧。而 VR 技术则通过创建沉浸式的三维交互环境,使学生能够在虚拟场景中完成操作训练。两者的结合,不仅能够提供生动的学习体验,还能有效提高学生的技能掌握程度。通过将设备结构、维修流程和故障情境数字化建模,学生可以在虚拟环境中反复进行操作,模拟真实的维修任务,提升技能的熟练度和准确性。此外, AI 与 VR 的协同作用,还能够根据学生的表现提供个性化的指导,使学生能够在实际操作中不断改进,确保技能的高效掌握。<sup>[2]</sup>

## 2.3 动力电池维修实训的安全与技能要求

动力电池维修是一项涉及高电压和化学活性操作的高风险工作,传统教学中对这类高风险操作的模拟和训练往往受到限制,影响学生的技能培养。通过引入 VR 技术,能够在虚拟环境中模拟各种高风险情境,学生可以在无风险的情况下,完成完整的操作训练。这种方式不仅保证了安全,还使学生能够理解规范的操作流程和注意事项,进而增强其实际操作能力。动力电池维修包括多个复杂技能,如结构拆解、电路检测和故障判断等,需要通过系统的训练逐步掌握。AI+VR 技术的结合,使得这些技能的训练具有可重复性和可控性,学生可以反复练习,确保在真实工作中能够正确应对各种维修任务。

# 3 AI+VR 动力电池维修实训课程教学模式设计

## 3.1 基于岗位任务的课程内容构建

课程设计应紧密对接企业岗位需求,确保教学内容与实际工作紧密结合。将动力电池维修流程划分为检测、诊断、维护等模块,每个模块对应特定的教学任务,通过分步实现学生技能的逐步提升。在设计课程内容时,需通过分析典型工作情境,将真实的工作案例转化为教学项目,让学生在完成实际任务的过程中逐渐掌握相关技能。例如,在检测模块中,学生将学习如何诊断电池故障、分析原因,提升其专业能力。在课程进程中,强调从基础认知到综合应用的逐步递进,使学生在各个阶段逐步掌握必要的知识点,最终形成完整的技能体系。此外,课程内容还应融入安全规范和职业素养的培养,使学生在掌握技术的同时,也能理解并遵守行业标准,提升其职业素养。这种基于岗位任务的课程设计模式,有助于提升学生的实践能力,使其能够更好地适应企业的实

际需求。<sup>[3]</sup>

## 3.2 虚实结合的教学实施路径

虚拟仿真与实体操作相结合的教学方式是提升技能训练效果的有效途径。学生首先在 VR 环境中进行初步操作学习,通过虚拟仿真系统熟悉设备结构、工作流程及常见故障处理。这种虚拟环境提供了一个无风险的训练空间,学生可以反复练习操作步骤,掌握技巧,且不受时间和资源的限制。随着虚拟环境中的技能掌握,学生将进入实体训练阶段,通过在真实设备上进行操作训练,进一步加深对操作流程和设备理解,并增强实际操作能力。虚拟与实体训练相互补充,在没有实际操作风险的情况下,

## 3.3 智能化评价与反馈机制

在教学评价中, AI 技术的引入为评估学生学习过程提供了全新的视角。AI 系统能够实时记录并分析学生在操作过程中的每个步骤,包括操作时间、步骤的准确性和出现的错误类型。通过对这些数据的综合评估, AI 能够生成多维度的评价结果,不仅关注学生的最终操作结果,还对学习过程中的每个环节进行深入分析。系统会根据学生的表现提供个性化的反馈,帮助学生及时发现问题并进行改进,例如针对某一操作步骤反复出现错误,系统可以提供具体改进建议或提示,帮助学生提高技能水平。通过这种智能化的评价与反馈机制,学生可以在持续的反馈过程中不断完善自己的操作技巧,逐步提升其技术水平。

# 4 教学实施过程中的关键问题与优化策略

## 4.1 技术应用与教学目标的协调

在引入 AI 与 VR 技术时,确保技术应用与教学目标的协调性至关重要。技术应当是教学过程中的辅助工具,而不是目的本身。为了避免技术与教学目标脱节,必须在课程设计阶段明确教学目标,并确保技术应用能够有效服务于这些目标。技术功能与学习任务的匹配是关键。例如, AI 技术可以为学生提供个性化反馈,而 VR 技术则能模拟复杂的操作环境,使学生能够在安全的虚拟环境中练习和巩固技能。因此,在实施过程中,教师应根据学生的反馈和实际情况,不断调整技术应用方式,确保技术的有效性和针对性。这种动态调整能够确保技术真正发挥其作用,提高教学效果,同时避免技术应用沦为形式化展示,真正实现技术与教育目标的有机结合。<sup>[4]</sup>

## 4.2 教师角色转变与能力提升

新型教学模式下,教师的角色发生了显著转变,从传统的知识传授者转变为学习引导者和资源整合者。教师不仅需要掌握教学内容,还必须具备技术应用与教学设计的综合能力。AI 与 VR 技术的引入要求教师能够熟练运用相关工具,设计出适应学生需求的学习任务,灵活调整教学策略。为了提升教师的技术应用能力,专业培训和实践交流至关重要。通过这些培训,教师能够深入理解 AI 与 VR 技术的功能与

使用方法,提升其在课堂中的运用水平。同时,教师应通过引导学生进行自主探索,给予及时反馈,帮助学生在实践中逐步形成正确的操作习惯和职业意识。教师的这一转变不仅提升了课堂教学的互动性,还能更好地适应未来职业教育发展的需求,培养具备技术素养和创新能力的学生。

### 4.3 教学资源建设与平台优化

高质量的教学资源是确保课程实施效果的基础。在 AI 与 VR 技术的应用背景下,教学资源的开发与优化尤为重要。与企业合作共同开发虚拟仿真资源和案例库,能够提高资源的真实性与实用性,使学生能够在接近实际的环境中进行技能训练。这些资源应当紧密结合行业需求,并保持更新,以确保教学内容始终处于行业发展的前沿。平台的稳定性与交互体验也是影响学生学习效果的关键因素。优化平台系统,确保学生能够顺畅进行虚拟操作,增强其沉浸感和学习动力。此外,平台应具备智能分析功能,能够根据学生的学习进展及时调整资源内容,提供个性化的学习支持。持续更新和扩展资源内容,能够确保课程内容的时效性和针对性,使学生的学习经验始终与行业技术发展保持同步,培养具备实践能力和创新思维的高素质技术人才。<sup>[5]</sup>

## 5 实践效果分析与应用价值

### 5.1 学生技能提升效果

在实际教学中, AI+VR 模式显著提升了学生的操作熟练度与理解深度。通过虚拟现实技术,学生能够在模拟环境中进行多次练习,获得即时反馈,这种反馈机制极大地加速了技能的掌握过程。与传统教学方式相比, AI+VR 模式不仅让学生在没有任何实际风险的情况下进行复杂操作,还能够帮助他们在多种情境下灵活应用所学技能。尤其是在技术性和操作性较强的职业课程中,学生能够通过虚拟环境中的反复练习,迅速提高其实际操作能力,并在实体操作时表现出更高的稳定性。此外,学生的学习参与度也得到显著提升,虚拟环境的互动性增强了学生的学习兴趣,帮助他们建立更加积极主动的学习态度,进而提高了整体的学习效率和成果。

### 5.2 教学质量与效率变化

AI+VR 模式的引入在教学质量和效率方面带来了显著变化。虚拟现实技术的应用减少了设备准备与维护的时间,使得教学过程更加连贯、流畅。教师可以通过实时数据分析了解每个学生的学习进度、掌握情况和薄弱环节,从而有针对性地进行个别指导。与传统的教学模式相比, AI+VR 模式可以根据学生的实时表现调整学习内容,提供更精确的个性化学习方案。这种技术支持的教学方式不仅使得教师能够更高效地管理课堂,还能确保每个学生都在最佳学习状态下

进行练习,提高了教学效率和质量。

### 5.3 对职业教育改革的启示

AI+VR 实训教学模式为职业教育改革提供了新的发展方向。在产教融合的背景下,通过技术手段构建真实学习情境,不仅能够提升学生的技能水平,还能更好地满足行业对技术型人才的需求。虚拟现实技术的应用,使学生能够在没有风险的情况下进行多种实践操作,极大地弥补了传统职业教育中实践环节不足的问题。该模式的推广不仅可以提升个别专业领域的教学质量,还能为职业教育的数字化转型提供有力支持。在未来, AI+VR 模式有望在其他专业领域得到广泛应用,尤其是那些需要高技能和复杂操作的行业,如工程技术、医疗健康等领域。这种教学模式的应用将推动职业教育向更高效、更个性化、更贴近实际需求的方向发展,对促进职业教育体系的完善与人才培养质量的提升具有重要意义。

## 6 结语

在新能源汽车产业快速发展的背景下,动力电池维修实训课程的教学模式亟须优化。通过引入产教融合与 AI、VR 技术,可以构建虚实结合的教学体系,使学生在安全、有效的环境中进行技能训练。AI 与 VR 技术的结合不仅提供了真实的操作体验,还能通过模拟不同故障情境,提高学生的问题解决能力和操作熟练度。研究表明,这种创新的教学模式显著提升了学生的操作能力和职业素养,帮助他们更好地适应快速发展的行业需求。通过虚拟环境的实时反馈,学生可以在没有风险的情况下反复练习,掌握实际操作技能,同时增强职业责任感与安全意识。未来,教学设计与技术应用的进一步协同,将为动力电池维修实训课程提供更智能化、系统化的解决方案,推动职业教育在智能化与实践性方面的更高水平发展,培养出更具竞争力的技术人才。

### 参考文献

- [1] 杨屏,王红霞,岑遗星,等.产教融合背景下动力电池维修技能人才培养[J].汽车知识,2025,25(04):203-205.
- [2] 张宇飞.新质生产力视域下新能源汽车专业育人创新路径[J].汽车电器,2026,(03):196-198.DOI:10.13273/j.cnki.qcdq.2026.03.055.
- [3] 王新旗.新能源动力电池维修技术项目介绍(二)——北汽-中车行动力电池维修校企合作[J].汽车维修与保养,2023,(03):86-89.
- [4] 许巧巧.AI技术在高职新能源汽车技术专业实践教学中的应用研究[J].时代汽车,2026,(05):35-37.
- [5] 段必仲.混动汽车动力电池控制模块故障分析教学设计[J].汽车周刊,2024,(09):199-201.

# Discussion on the Application Methods of Electronic Diagnostic Technology in New Energy Vehicle Maintenance

Weidong Wang

Inner Mongolia Tiechen Intelligent Equipment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

## Abstract

With the rapid popularization of new energy vehicles, brand-new challenges have emerged in their maintenance technology. This paper focuses on the efficient application of electronic diagnostic technology in the maintenance of new energy vehicles. Through an in-depth analysis of the fault characteristics and diagnostic procedures of automotive electronic control systems, a maintenance method based on rapid fault location and module inspection is proposed. This technology can significantly improve fault detection efficiency, shorten maintenance cycles, and reduce maintenance costs, thus exerting a positive effect on ensuring the reliable operation of vehicles. The research results provide theoretical support and practical basis for the improvement of new energy vehicle maintenance technology and the optimization of relevant technical specifications.

## Keywords

new energy vehicles; electronic diagnostic technology; automotive electronic control system; rapid fault location; module inspection

## 探讨电子诊断技术在新能源汽车维修中的运用方法

王伟东

内蒙古铁辰智能装备有限公司, 中国·内蒙古·鄂尔多斯 017000

## 摘要

伴随新能源汽车的迅猛推广,其维修技术遭遇全新的难题。本文聚焦电子诊断技术怎样于新能源汽车维修内能够高效应用进行探讨。借助全面研究汽车电子控制系统的问题特性以及诊断流程,建议依托问题迅速定位和模块检查的维修方法。该技术能够显著提高问题发现效率,减少维修周期,并且减低维修成本,对于确保车辆可靠运转发挥正面影响。研究成果为新能源汽车维修技术的提升以及技术规范的改进给予了理论支撑和实践基础。

## 关键词

新能源汽车; 电子诊断技术; 汽车电子控制系统; 故障快速定位; 模块检验

## 1 引言

伴随环境保护意识的提高和能源结构的改善,新能源汽车作为绿色交通工具快速推广,其市场份额年年增长。新能源汽车特有的电子控制系统和智能化设计,导致传统维修模式于故障诊断与维修期间遭遇严重挑战。以往已有研究试着采用部分电子诊断手段,然而对于系统性分析及模块检验等关键环节的研究依然不够完善。本文意在全面分析汽车电子控制系统的故障特征与诊断流程,在参考国内外研究成果及实际应用经验的前提下,研究依托故障迅速定位与模块检验的新能源汽车维修方法,从而提升故障寻找效率,减少维修周期,减少维修成本。研究目的是为新能源汽车维修技术

的提高供给理论依据和实践指导,并且促进技术规范的不断改进和可靠运行保障。

## 2 背景与现状概述

### 2.1 新能源汽车发展状况

随着节能减排政策的大力推动以及大家环保意识的明显提高,新能源汽车产业呈现出来非常迅猛的发展势头。各个国家的政府都陆续推出各种补贴和优惠政策,来激励新能源汽车型的研发工作和推广工作,整个全球汽车产业慢慢朝着电动化方向发生转变。从技术角度来看,动力电池、驱动电机、电控系统这些核心部件组成的三电技术取得了非常显著的进步,车辆能够行驶的距离越来越远,充电速度也变得更块,基本可以满足日常出行的各种需要。新能源汽车技术本身比较复杂并且存在一些与众不同的地方,这就给维修服务工作带来了不少新的困难和挑战。

### 2.2 维修技术面临的挑战

新能源汽车技术发展得很快,维修行业出现了很多技

【作者简介】王伟东(1989—),男,中国内蒙古鄂尔多斯人,本科,工程师,从事汽车检测与故障诊断技术、新能源汽车运用技术、整车热管理系统优化、汽车维修工艺与技术研究。

术和实际操作上的困难。过去常用的维修方法主要针对机械部件出现的问题，碰到新能源汽车里面复杂的电子控制系统，效果并不理想。新能源汽车内部装了很多先进的电子模块和控制单元，这些系统把各个功能紧密连接起来，导致找到故障位置变得特别不容易。故障发出的信号种类非常多，异常情况的表现又不够明显，给确定故障来源造成很大麻烦，有些问题甚至跟电子通信协议或者控制算法的深层设计有关系，处理起来非常费劲。缺少这方面专业技术人员和专用维修工具，也严重阻碍了故障诊断工作的速度和准确程度。

### 2.3 电子诊断技术初步成效

电子诊断技术用在新能源汽车维修行业，展现出很明显的初期成果，依靠精确的故障代码读取和详细的数据分析，可以找到车辆电子控制系统出现的问题。这种技术融合了数据链路通信和模块化检测方法，能够快速确定故障发生的部位，减少人工检查带来的错误，让维修工作变得更快更好。使用电子诊断技术后，修理费用明显降低，车辆无法运行的时间也大大缩短，整体维修质量得到改善。电子诊断技术刚开始投入使用时，新能源汽车维修领域就带来了高效的解决方案，同时也推动了维修技术向精确化和标准化的目标迈进，展现出非常重要的价值和意义。

## 3 汽车电子控制系统解析

### 3.1 系统构成与功能分布

汽车电子控制系统是新能源汽车实现高性能运行和智能化管理的重要组成部分。这个系统主要由传感器、电子控制单元 ECU 以及执行器这些关键部件组成。传感器专门用来采集车辆运行过程中各种状态信息，比如温度高低、压力大小、电流强弱、电压高低、车速快慢以及位置远近这些内容，然后把这些物理量转变成为电信号传送到电子控制单元那里。电子控制单元承担整个系统最核心的工作，它会立刻接收来自传感器传来的数据，进行仔细检查和深入研究，然后按照事先设定好的计算规则来决定下一步应该怎么做。执行器接到电子控制单元传来的指令之后，就会马上执行相应的机械操作，比如让电动机运转起来、调整刹车力度大小、改变动力分配比例或者协助转向系统更好地工作。通信总线技术在整个系统里面起到连接各个模块的重要作用，依靠 CAN 和 LIN 这些总线协议，确保数据传递既迅速又准确。所有子系统之间互相配合一起工作，让新能源汽车能够顺利完成那些非常复杂的技术任务，同时保证车辆在动力性能、行车安全以及节约能源这几个方面都表现出很高的水平。

### 3.2 故障信号与异常特征

汽车电子控制系统出现故障时候发出信号以及表现出来的不正常特点表现出多种多样并且非常复杂的样子，主要集中在控制模块之间通信出现问题、传感器提供的数据存在偏差、执行元件工作效果完全消失这几个方面。故障信号通

常通过电压发生波动、数据出现丢失、逻辑出现错误这些方式展现出来，这些信号能够清楚反映出系统内部隐藏起来的问题。传感器输出数据超出正常范围或者出现变形情况，就说明电路连接出现不良状况或者硬件本身已经损坏。不正常特点里面，系统运行过程中出现延迟、输出结果变得异常、性能出现不稳定表现，都可以当作做出判断的根据，这些不正常表现经常伴随着警告灯持续闪烁或者错误代码被完整记录下来。针对上面提到的故障信号和不正常特点进行仔细辨认和深入研究，就能完成准确的诊断工作，有力推动新能源汽车维修工作的顺利开展。

### 3.3 关键指标监测机制

关键指标监测机制专门负责收集新能源汽车电子控制系统的工作状态，依靠传感器网络和控制单元的数据采集功能，仔细检查电压、电流、温度等重要数据的变化情况。一旦发现不正常的的数据，就会进行深入研究，马上做出诊断报告，并且利用数据传输技术和云端存储技术，完成不同系统的合作监控工作。建立一个异常特征库和参数阈值模型之后，就能很快找到故障发生的具体位置，确保系统能够平稳运行。这样的监测机制让提前发现故障变得更加准确，同时也为后面的维修工作提供了非常重要的参考信息，大大提升了新能源汽车使用的安全性和可靠性水平，确保车辆在各种复杂环境下的正常运行。

## 4 故障定位与模块检验策略

### 4.1 快速故障排查技术

快速故障排查技术于新能源汽车维修中拥有关键意义，为改善诊断效率的核心手段。借助研究故障信号源和电子控制系统的数据交互关系，能精确辨别异常部位，降低常规维修方式之中的繁琐流程。采用通用故障代码扫描仪、专用诊断设备还有即时数据流分析，可以针对车辆各模块运作状态开展即时监控，高效发现电子系统的隐性问题。于故障排查期间，使用算法优化和数据库匹配技术，能达成故障代码的自行辨别和关联判断，令故障定位更为智慧化。快速故障排查技术突出模块化的分割诊断方式，把诊断范围限制于特定功能单元，因此规避大面积拆解造成诊断效率降低。此方法不但可以降低误判率，并且能增强排查精度，给后期的模块检验及维修给予准确依据。于确保技术前沿性的恰当应用手持诊断仪和远程数据分析工具，可以高效整合实际操作和创新技术，更深入地加强新能源汽车后期维修的可靠性与效率。

### 4.2 模块检验操作流程

模块检验操作流程主要包括模块启动、数据对比和功能检查三部分。模块启动需要使用电子诊断设备完成模块连接和基础参数重置，确保模块跟整车通信系统能够顺利交流。数据对比环节从故障模块里面采集实时数据，然后跟标准参数库进行比较，这样就能清楚找到偏差出现的地方。

功能检查部分从模拟运行环境出发,针对模块关键功能开展验证工作,确认性能指标达到设计标准。整个流程里面,需要根据车辆真实使用情况挑选合适的诊断工具和应用程序,确保操作准确而且快速,最后提升模块修复可靠程度和稳定程度。

### 4.3 效率提升与周期压缩

故障定位与模块检验策略的实施明显提升了新能源汽车维修效率。电子诊断技术借助自动化检测手段达成了精确辨识故障源,降低人工排查的时间消耗。模块化检验策略根据车辆电子系统的分布特征,把复杂的整体诊断过程拆分成若干具体模块的单独检验环节,有利于迅速确定问题部位。依靠先进的诊断工具与算法,维修流程中的冗余步骤得到高效精简,达到了维修周期的彻底缩短。该方法不但提升了维修操作的精确性,并且明显减少了时间和人力成本,对高效维修建立了基础。经由流程优化,技术人员可以聚焦于解决关键问题,增强整个维修过程的质量和效益。

## 5 运用效果与安全保障

### 5.1 故障排查效率提升表现

电子诊断技术的使用让新能源汽车故障排查的效率有了很大提高。过去是根据经验来判断故障,现在依靠数据分析来找出问题的具体原因,这样明显减少了找到问题和解决问题所需的时间。通过监控车辆电子控制系统并分析异常数据,可以很快确定故障发生的根源,尽量避免对零部件进行不必要的拆卸,也减少了没有必要的操作时间。模块化的设计使得诊断流程更加清晰,配合电子诊断仪器的操作,可以把复杂的故障分成几个小部分逐一检查,这样大大提高了诊断工作的速度。以快速故障排查为核心的技术方法,让操作步骤变得更简单,减少了对技术人员经验的依赖,使得整个诊断过程更加规范和高效率。这样的效率提高对新能源汽车售后服务体系的改善起到了重要作用,同时也让车主维护车辆的成本和时间投入有所减少。实际应用中,加快故障排查速度的技术手段推动了整个行业的维修水平得到提升,促进了整个行业技术水平的进步。

### 5.2 维修成本与周期优化

维修费用和工作时间的缩短成为电子诊断技术应用到新能源汽车维修里面以后提高工作效率的关键部分。依靠电子诊断技术对于故障信号以及各个部件功能进行准确检查,可以明显减少过去那种维修方式里面因为反复测试加上判断错误造成的金钱浪费以及等待时间变长。依靠快速找到问题的方法,维修工作人员能够很快判断出故障具体出现的位置,不会出现多此一举拆开很多东西或者随便换掉零件的情况,因此明显减少需要买的零件数量以及人工花费的时间。各个部件的检查方法变得更加细致,针对每个小单元部分进

行单独检查之后,整个维修步骤变得准确程度更高,同时也让出现额外花销的机会变少。这种技术在缩短修理所需时间上面效果非常好,让修理工作的整体速度明显加快,为新能源汽车整个行业广泛推广使用提供了非常有力的技术帮助。

### 5.3 车辆安全性能强化措施

电子诊断技术于新能源汽车维修领域内之运用可以高效提高车辆运行之安全性能。借助即时监控关键系统的运作状态,准确发现隐性故障信号,可以在问题恶化之前迅速实施精准性维修措施。依靠全面之数据解析和智慧诊断平台,能对系统运作趋势开展预判,给安全风险之初期预警供给技术支持。对于核心零部件之模块化检验可以保障其性能符合设计标准,进而防止由于部件失效导致之安全隐患。上述举措全方位加强了新能源汽车之整体安全保障,给其于繁杂交通场景之可靠运行建立了牢固基础。

## 6 结语

研究关注新能源汽车维修过程里面电子诊断技术使用情况,仔细检查汽车电子控制系统出现故障特点以及诊断步骤,然后提出依靠迅速找到故障位置并且单独检查重要部件这种修理办法。经过实际验证,这种方法明显缩短修理时间、大幅提高查找故障速度并且有效降低修理花费,给新能源汽车修理技术进步以及相关技术标准完善提供可靠理论基础和实用参考。研究显示电子诊断技术在保证车辆正常运转方面发挥关键作用,给进一步推进智能化修理服务打下坚实基础。研究仍然存在一些不足之处,比如某些复杂故障类型和不同系统之间信息交流准确度不够,现在数据整合和互连接方式需要继续完善。接下来工作建议从下面几个方面继续努力,第一扩大诊断方式种类,采用人工智能和大数据技术实现更加精确位置判断。第二完善不同技术平台之间信息规则和连接方法。第三加快智能修理辅助系统建设速度,从而提升全部诊断能力以及修理速度。这项研究给后面新能源汽车修理技术深入推广和多学科交叉研究提供全新想法和实用支撑。

### 参考文献

- [1] 汤广财刘佳慧.电子诊断技术在新能源汽车维修中的运用[J].汽车实用技术,2022,47(13):12-14.
- [2] 刘华.新能源汽车维修中电子诊断技术探讨[J].汽车测试报告,2023,(08):56-58.
- [3] 张每英.在新能源汽车维修中电子诊断技术的运用探讨[J].中国设备工程,2021,(08):8-9.
- [4] 付建伟.新能源汽车维修中电子诊断技术应用[J].汽车测试报告,2021,(19):149-150.
- [5] 付建平.新能源汽车维修中的电子诊断技术[J].时代汽车,2022,(15):181-183.

# Integration and Application of Robotic Technology in Automotive Production

Qiang Wang

Inner Mongolia Tiechen Intelligent Equipment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

## Abstract

With the widespread adoption of Industry 4.0 and smart manufacturing concepts, robotic technology is playing an increasingly critical role in automotive production. This paper focuses on researching the integration and application of robotics in key processes such as assembly, welding, and painting. Through scientifically planned systems and optimized production workflows, efficient collaboration between robots and traditional production equipment is achieved. The research results indicate that this technology can not only significantly improve production efficiency and product quality but also reduce energy consumption and production costs. These findings hold substantial significance for promoting the transformation and upgrading of the automotive manufacturing industry, enhancing overall competitiveness, and achieving green, intelligent production.

## Keywords

robotic technology; automotive production; system integration; smart manufacturing; process optimization

## 机器人技术在汽车生产中的集成与应用

王强

内蒙古铁辰智能装备有限公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017000

## 摘要

随着工业4.0和智能制造理念的普及, 机器人技术在汽车生产中担当着越来越关键的角色。本文聚焦机器人于装配、焊接、涂装等关键环节中的集成与应用进行研究, 借助科学规划系统与改进工艺流程, 达成机器人和传统生产设备的高效协作。研究结果显示, 该技术不但可以明显提高生产效率和产品质量, 并且能减少能耗与生产成本。该成果对于促进汽车制造业转型升级、增强整体竞争力和达成绿色智能化生产拥有重大意义。

## 关键词

机器人技术; 汽车生产; 系统集成; 智能制造; 工艺流程优化

## 1 引言

伴随工业4.0和智能制造理念的广泛普及, 机器人技术已经变成汽车生产智能化升级的关键切入点。汽车制造业身为国民经济关键支柱, 于寻求高效率、高质量生产之过程中, 对于自动化装备和智能化工艺提出了更加严格要求。于机器人技术运用领域, 装配、焊接、涂装等等关键环节始终是研究和实施的核心。国内外众多学者和工程专家借助理论研究与工程实践, 试图构造机器人和传统生产设备高能合作的系统架构, 并且于工艺流程改善、能耗减少、环保与安全等方面获得众多成果。统计数据显示, 机器人集成运用可以明显提高生产效率和产品一致性, 而且于减少生产成本、防控环

境风险等方面表现出显著优势。本文依据现今机器人技术与汽车制造关键工序的集成需求, 目的在于研究更加高能的系统配置方案和工艺改善策略, 为促进汽车制造业绿色智能化升级、增强整体竞争力给予理论支持和实践参考。

## 2 汽车制造环境与智能转型机遇

### 2.1 汽车工业发展历程与面临挑战

汽车工业从十九世纪末期开始出现, 经过了很多不同的发展阶段, 每一个阶段都因为技术方面的突破和市场方面的需求而得到很大的促进。二十世纪初期, 福特公司推出的流水线生产方法让大规模批量生产汽车成为可能, 这种生产方式极大地提高了生产的效率和成本控制的能力。电子技术和信息技术的发展一直在向前迈进, 汽车行业因此慢慢迈向自动化生产和信息化管理的道路, 尤其是在二十世纪末期, 计算机控制系统被引入到生产中, 明显提升了生产的灵活程度和操作的准确程度。

进入二十一世纪, 全球化速度变得非常快, 能源短缺

【作者简介】王强(1990—), 男, 中国内蒙古包头人, 本科, 工程师, 从事电池系统、电驱系统、整车热管理、决策与控制、无人化特种装备、5G+多机编队研究。

和环境污染的问题变得特别严重，汽车制造业因此面对很多全新的困难和挑战。消费者希望购买的产品既有独一无二的个性特点，又有很高的品质水平，同时还要消耗很少的能源，这种需求一天天变得更加迫切，所以企业不得不加快研发和创新的脚步。老式的生产方法因为不够灵活，资源使用效率也很差，完全跟不上市场对多样化产品、更高品质要求以及节能环保产品的迫切需要和环境保护的压力。工人的工资一直在上涨，而且真正熟练的技术工人数量明显不够用，这就给企业的市场竞争能力带来了很大的威胁和挑战。

在当前的大环境下，智能制造的理念和机器人技术的广泛应用给汽车工业带来了全新的发展机会和发展空间。智能制造特别关注生产流程的自动化、灵活调整以及精细化管理，从而确保生产效率得到提升，同时减少资源的浪费和不必要的消耗。机器人技术的发展推动了高精度、高效率的自动化操作方案，能够持续提供高质量的产品和服务，还能根据市场需求的变化迅速做出调整和改进。汽车工业要想完成转型升级的目标，必须尽快采取行动，这是为了适应全球市场竞争带来的各种压力和资源环境方面的严峻考验，同时也是为了增加产业链的整体价值，最终达到可持续发展的长远目标。

## 2.2 智能制造理念推动与机器人技术进步

智能制造理念的推广极大地促进了机器人技术于汽车生产里的应用和进步。伴随全球制造业朝智能化和数字化转变的趋势越发显著，机器人技术的开发和应用获得了空前的关注。智能制造突出信息技术同制造技术的深度融合，借助前沿的自动化解决方案来提高生产灵活性和效率。机器人技术的进步对达成该目标给予了重要支撑。于制造期间，机器人凭借极高的精确度、稳定性和灵活性，可以于繁杂生产环境里进行精巧的任务操作，增强了汽车生产线的自动化水平。借助和物联网、大数据分析技术的融合，机器人不仅能够自主调节操作参数，而且能即时监视设备状态，因此降低故障停机时间。智能制造理念的推动，加速了机器人技术的创新周期，令其在繁杂制造系统里的应用更为完善。智能制造同机器人技术的协同变成汽车行业转型升级的关键驱动力。

## 3 机器人技术集成体系与运行机制

### 3.1 系统集成架构构建

机器人技术的整合在现代汽车生产环境中发挥着非常关键的作用。系统集成架构的搭建显得特别重要，目的是让机器人能够顺利加入到生产线中，与周围的其他设备形成统一协调的工作状态。搭建一套高效率的整合系统架构，必须重视硬件和软件两方面的因素。

硬件方面，机器人技术融合必须把各种设备像机械臂、传感器、输送带等实现顺畅连接。这种融合不但需要生产设备完成物理连接，而且依靠网络通信完成数据互相连接，保证设备之间信息互通以及协调运行。设备采用模块化设计有

利于提升生产线灵活程度和扩展能力。模块化设计让生产线能够依据不同生产需要迅速改变，来适应市场变动和产品升级迭代。

软件部分需要构建一套功能很强大的管理系统，可以随时监控并且合理安排各种机器设备。使用先进的编程语言以及开发工具，制作出拥有自动检查自身状态和解决故障功能的控制程序，这样就能让整条生产线运行得更加稳定可靠。同时，利用人工智能以及大数据相关技术，仔细研究生产过程中产生的所有数据，并且根据实际情况进行改进调整，最终让整体工作效率更高、产品质量也得到明显提升。

这种全面的系统集成架构建立为机器人技术在汽车生产中的应用搭建了基础，保证机器人可以与传统设备配合运作，促进智能制造在汽车行业的广泛推广。借助这种技术进步，汽车制造业会在工艺流程改善、产品质量提高和生产成本减少方面获得明显成果。

### 3.2 协同运作模式与设备联动

合作运作方式跟设备之间的连接对机器人技术的融合使用起到重要作用。想要让生产过程变得高效顺畅，机器人跟传统设备必须做到紧密衔接并且实现智慧化连接。依靠先进的传感器技术、数据交换平台还有实时反馈机制，能够确保设备之间信息交流准确没有误差。这种合作运作方式依靠统一的通信协议加上标准化接口，使各种制造设备在一个整体系统里面保持协调运行状态。智能调度系统在生产期间利用大数据分析结合机器学习来优化资源分配，这样就能提升整体生产效率。在焊接、涂装这些复杂工序里面，机器人能够完成精确操作并且实现自主调节，保证加工质量保持稳定并且一致。建立起来的这种融合体系既提升了各个生产环节的合作水平，也奠定了未来智能制造环境下面向灵活生产的坚实基础。

## 4 机器人在关键生产环节的应用部署

### 4.1 装配环节自动化提升

汽车制造装配过程里面，机器人技术使用明显加快自动化程度提高。采用先进机器人设备，装配线精确程度和稳定程度获得很大提升。机器人依靠传感器技术以及机器视觉，完成零部件精确放置和固定任务，这样人为失误数量明显减少。精确操作不但提高产品装配品质，而且缩短制造时间长度，同时增加全部生产速度。

装机过程里面机器人设备依靠事先设定路线和步骤，可以很快适应各种车型装机要求，这特别适合处理经常变动的生产任务。布置在装机线上机器人设备依靠网络连接方式，跟旁边设备完成流畅配合工作。这种完整结合工作方式让整条生产线能够快速处理不同装机数量以及变化要求，提升生产线面对市场变动时候的反应速度。

机器人在装配环节的应用亦可缓解工人的工作量、减少工人的劳动强度、改善生产环境。借助自动化设备代替人工开展危险或者重复性强的作业，能够降低工伤事故的出

现,提升生产的安全性。因为机器人能够连续不间断地运作,进而缩减了生产停滞时间,提升了设备的利用率与生产的连续性。

机器人技术在装配环节中的应用,不但在提升效率和质量上获得了明显成效,并且给企业提供了更加机动和可靠的生产方式,给汽车制造业的智能化转型筑就了稳固基础。

#### 4.2 焊接与涂装环节的设备协同

焊接与涂装环节,机器人技术的应用不但提高了生产效率,而且保证了工艺的精确执行。焊接过程中,机器人借助精确调控焊接路径和参数,高效降低焊接缺陷,增强接头的质量一致性。机器人可以达成多工位焊接操作,同上下游设备的配合,改进了生产节拍。涂装环节则运用机器人的灵巧挪动和精准喷涂能力,在复杂形状表面上匀称涂覆,削减了涂料浪费和环境污染。机器人于各异涂装作业之间的流畅转换,明显缩减了换色时间,增强了涂装线的稳定性。借助整体系统的融合与改进,焊接与涂装环节的全面无人化、智慧化协作作业是推动汽车制造业智能升级的关键一步。

### 5 创新效益与可持续发展推动

#### 5.1 提升生产效率与产品质量

汽车制造整个流程里面,生产速度跟产品品质一直成为公司想要达到的目的。机器人技术使用带来明显效果。智能机器人加入生产线上每个位置,完成高效率自动运行变成现实。装配部分,精准程度跟反应速度双重长处让零件组合步骤变得更快更准。这种改变缩短制造时间长度,同时减少人工费用支出,提高整体工作效率。

焊接和涂装这两个环节对技术水平的要求特别高,使用工业机器人进行操作时,可以做到非常精准地控制每一个动作,同时让产品质量保持稳定,这样就能大大减少因为人工操作出错而造成的次品数量,最终让产品的合格率得到提升。工业机器人依靠多种传感器收集到的信息进行整合分析,能够随时监控生产过程中产生的各种数据变化,及时给出准确的反馈意见,并且迅速做出必要的调整措施。这样的设计方式让操作过程变得非常灵活顺畅,完全可以满足不同型号和规格产品的生产需要,确保每一款产品都能达到一致的标准和优秀的质量水平。

借助工艺流程的最优化与资源配置的合理化,机器人技术的应用支撑了柔性制造系统的达成。生产的智能化改进增强了企业面对市场变化的能力,缩短了生产线的停工时间,增加了设备的利用率。在全球市场竞争激化的背景下,借助对生产效率和产品质量的提升,企业的市场竞争力能够加强,给予了可靠的技术保障和持久发展的基础。

#### 5.2 降低能耗与生产成本的效应

减少能耗与生产成本于现代汽车制造内的关键性逐渐

显现。借助导入机器人技术和改进生产流程,汽车制造企业可以于多维度上达成资源利用的极致化和成本的最低化。机器人于生产内的融合运用,可以明显降低生产过程中对于能源的耗费。精准调控与迅捷反应能力令机器人于实施任务之际消耗的电能和资源大幅减少,提升能源配置,增强能源使用效能。

在生产成本方面,机器人技术借助降低人为误差及次品率,削减修复和返工的费用,削减对人力资源的需求,明显节省劳动力成本。与传统生产设备的高效协作让生产线运作更加顺畅,大大缩减了生产周期,提高了整体产能。高效掌控生产过程中的物料流动与设备维护,更深入削减多余的支出。

依靠机器人技术构建起来的自动化生产系统,依靠节约能源和减少消耗以及严格控制成本这些具体方法,给整个汽车制造领域实现长期稳定持续发展提供了特别关键的支持力量。成功完成了资源使用方式的全面改善,推动整个行业不断朝着更加环保并且低碳发展的目标稳步前进。

### 6 结语

文章集中关注工业4.0环境下机器人技术跟汽车生产重要步骤结合使用情况,仔细检查机器人停留在在装配、焊接、涂装这些关键环节真实工作方式,通过完整改进生产过程,清楚证明机器人跟传统制造机器一起高效合作非常重要。研究结论表明,这种技术明显提升生产速度和产品品质,同时明显减少能源消耗并且有效降低制造费用,给汽车制造行业转向环保智能带来真正实用的技术帮助。现在研究仍然存在机器人灵活调整能力、环境感应以及动态协作机制这些方面的不足,还没有很好解决生产现场各种复杂变化情况下实时调节和智能判断问题。接下来需要特别重视把机器人技术跟大数据、人工智能、物联网这些前沿技术深度融合,继续完善多个目标一起协调控制方法,提高整个系统智能程度。还需要根据不同车型和具体生产要求进行专门工艺流程开发研究,从而推动达到更高效率和更高准确度的智能制造目标。

#### 参考文献

- [1] 许佑赦,王玉方,许孔联.工业机器人系统集成技术应用教学设计与实践[J].教育教学论坛,2022,(34):141-144.
- [2] 杜鹏.智能制造与机器人焊接技术的集成与应用[J].时代汽车,2021,(15):136-137.
- [3] 焦昂.浅谈工业机器人系统集成[J].中国科技期刊数据库 工业A,2021,(02).
- [4] 程月,孙宝龙,刘亚超.浅析工业机器人系统集成[J].中国科技期刊数据库 工业A,2021,(04).
- [5] 汪守峰.浅谈智能制造与机器人焊接技术的集成与应用[J].电子乐园,2021,(01):0029-0029.

# Research on Energy-saving Measures for Boiler Operation in Thermal Power Plants

Ming Wu

Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd. 803rd Branch, Lanzhou, Gansu, 732850, China

## Abstract

Against the backdrop of China's power structure still relying heavily on large-scale thermal power for supply assurance and regulation, boiler energy efficiency has evolved beyond mere fuel consumption control to become a comprehensive issue involving unit economic performance, environmental stability, peak load adaptability, and long-term operational capacity. Current challenges in boiler energy conservation primarily manifest in deviations from designed coal types, increased deep peak-shaving operations, aggravated heat transfer surface contamination, and intertwined issues of flue gas resistance and air leakage. Relying solely on single-parameter pressure drop often fails to achieve sustained results. To address this, the article examines common boiler operating scenarios in thermal power plants, systematically analyzes the energy-saving value and actionable measures, and conducts in-depth studies on fuel compatibility, pulverizer adjustment, combustion air distribution, ash blowing cleaning, and flue gas loss control, aiming to provide directly applicable technical insights for optimizing similar unit operations.

## Keywords

Thermal power plant; Boiler; Operation; Energy-saving measures; Exploration

## 火电厂锅炉运行节能措施探究

吴明

华能甘肃能源开发有限公司八〇三分公司, 中国·甘肃 兰州 732850

## 摘要

在中国电力结构仍以大规模火电支撑保供和调节的现实背景下, 锅炉运行节能已不再只是单纯的燃料消耗控制问题, 而是关系到机组经济性、环保稳定性、调峰适应性和长周期运行能力的综合课题。当前锅炉节能工作的难点, 更多体现在实际燃煤偏离设计煤种、深度调峰工况增多、受热面污染加重以及尾部烟道阻力与漏风问题交织等方面。若仅依赖单项参数压降, 往往难以形成持续效果。基于此, 文章围绕火电厂常见锅炉运行场景, 对锅炉节能价值与可落地措施进行梳理, 并从燃料适配、制粉调整、燃烧配风、吹灰清洁和尾部损失控制等方面展开分析, 以期为同类型机组运行优化提供可直接参考的技术思路。

## 关键词

火电厂; 锅炉; 运行; 节能措施; 探究

## 1 引言

近年国家持续推进煤电节能降碳改造、灵活性改造、供热改造以及新一代煤电升级的政策趋向可以判断, 在新能源快速增长背景下, 煤电机组仍承担着较强的保供、调节和兜底作用。随着能源需求的不断增加和环保要求的日益严格, 火电厂在能源利用效率和环境保护方面面临着巨大的压力。在这种情况下, 其锅炉运行节能因此必须从“能发电”转向“在复杂工况下尽量少耗煤、少增阻、少失稳”。本文结合公开政策文件与相关文献资料研究, 重点讨论锅炉侧常用且易落地的运行节能措施。

## 2 火电厂锅炉运行节能价值

火电厂锅炉运行节能的现实价值, 首先体现在降煤耗和稳成本两个层面。锅炉是机组热量输入的起点, 入炉煤热值利用是否充分、排烟损失是否偏大、飞灰含碳量是否失控, 都会直接推高供电煤耗。其次, 锅炉节能具有明显的保设备作用。当前不少机组面临变煤种、低负荷、深调峰并行的运行环境, 如果锅炉侧长期存在结渣、积灰、漏风、氧量偏高和制粉不稳等问题, 受热面磨损、空预器堵塞、引风机负担加重等连锁后果会同步出现, 机组经济性与可靠性会一起下降<sup>[1]</sup>。再次, 锅炉节能并非与环保分离, 燃烧组织合理、煤粉燃尽改善、尾部换热恢复正常后, 往往有利于降低无效风量和烟气量, 减轻后端环保系统运行负担。最后, 从国家层面看, 锅炉系统能效提升仍是节能降碳改造的重要潜力来

【作者简介】吴明(1988—), 男, 中国甘肃嘉峪关人, 工程师, 本科, 从事锅炉运行研究。

源, 锅炉运行节能越扎实, 机组越容易靠近基准水平并向标杆水平逼近。

### 3 火电厂锅炉运行节能措施探究

#### 3.1 做好入炉煤质与配煤掺烧控制

锅炉运行节能中做好入炉煤质与配煤掺烧控制, 关键在于把煤质识别、掺配试验、上仓组织和经济核算连成同一条运行链。第一, 值长、燃运和集控岗位应按锅炉设计煤种、实时负荷和磨煤机可用状态共同确定日配煤单, 班中持续跟踪低位发热量、挥发分、全水分、灰分及灰熔点的偏离幅度, 对化验结果与入炉表现不一致的煤仓及时停并核对, 发现热值下探、挥发分走低或水分抬升后, 先修正给煤量、一次风率和制粉组合, 再决定是否换仓。研究表明, 入炉煤低位热值由设计 18.79MJ/kg 降至约 16MJ/kg、挥发分由 39.35% 降至 23%—28%、全水分升至 5.5%—10% 时, 着火和燃尽都会明显变差。第二, 非设计煤种掺烧不能直接按目标比例切换, 宜采用小比例试掺、稳态复核、同负荷再验证的顺序, 每次提比前都要连续核对磨煤机出力、炉膛火焰充满度、再热器减温水变化、飞灰含碳量和排烟氧量, 两轮稳态结果一致后再固化掺配值, 并同步记录一次风压、磨出口温度和炉膛负压的伴随变化, 若出现主再热汽温波动、炉膛出口烟温偏斜或 CO 抬头, 应立即回退上一掺比<sup>[2]</sup>。第三, 煤场和集控应把高水分煤、高灰煤、低挥发分煤分仓堆放、分时分仓、分负荷消纳, 高水分煤优先进入干燥条件较好的磨组, 低负荷时少用难燃煤, 高负荷时避免多仓同时切换, 并把易结渣煤种后移, 减少对同层燃烧器热偏差和受热面结渣趋势的扰动。第四, 配煤评价不能只看到厂单价, 而要把锅炉效率、排烟温度、飞灰含碳量、送引风机电耗、制粉单耗及受热面磨损一并折算, 按采购价、制粉代价、燃尽损失和磨损修复费用合并复算真实成本, 同时把异常结渣清焦、磨辊磨环加速损耗和启停助燃油等附加支出纳入台账, 经复算后仍能稳定燃尽、排烟温度不异常上抬的煤种组合, 方可作为常用配方固化执行。

#### 3.2 优化制粉系统运行与煤粉细度

围绕锅炉运行节能进一步落到制粉侧时, 运行调整不能只看单台磨煤机电流, 而应把磨煤机组合、煤粉细度、一次风参数和炉内燃尽状态联动统筹。第一, 在磨煤机出力安排上, 应根据机组负荷台阶、煤种可磨性和入炉水分及时切换运行组合, 负荷下探或煤质变差时不宜长期让少数磨煤机高加载硬撑出力, 否则容易出现通风裕量变小、分离回粉增多和出口粉量波动, 反而推高制粉单耗; 结合实践来看, 制粉系统本身约消耗发电量的 0.5%—2%, 因此班组应把单台磨维持在稳定经济出力区间, 并结合给煤量、磨差压和石子煤排放变化判断是否需要增投或减投磨煤机。第二, 在煤粉细度控制上, 应坚持按煤种定细度, 不把细度调节简单理解为越细越好; 对挥发分偏低、着火偏迟的煤种, 应适当收

紧细度并结合飞灰含碳、炉膛着火点和排烟温度联查, 避免粗粉比例偏大造成燃尽恶化; 研究显示, R90 由 20% 升至 30% 时, 飞灰含碳可由约 3% 升至 6%, 因此现场宜按试验结果确定细度控制带, 同时关注同层粉管细度偏差。第三, 在参数操作上, 加载力、分离器挡板或转速、一次风量和磨煤机出口温度必须成组微调, 现场不能只追某一个细度值, 因为一次风速、挡板角度和液压加载力会同时影响分级效率与内部流场, 单独压低某项参数, 往往会把干燥能力、回粉量和料层稳定性一并破坏; 较稳妥的做法是每次小幅修正后连续校核出口温度、风煤比、振动和电流变化。第四, 在节能判据上, 应把单位制粉电耗与锅炉侧飞灰含碳、排烟温度、稳燃裕度一起考核, 优先寻找煤粉制备不过磨、锅炉燃烧不欠燃的运行点; 若仅追求低电流运行, 常会把粗粉和燃烧偏差转移到炉内, 最终使综合煤耗上升, 因此制粉侧调整结束后还应回看氧量、减温水量和炉膛出口烟温变化, 再决定是否固化当前运行方式。

#### 3.3 精细调整燃烧配风与过量空气水平

为使锅炉燃烧由“能烧稳”转向“烧得省”, 配风与过量空气控制应当按煤质、负荷和炉内火焰位置同步细调, 而不能长期沿用固定风门与固定氧量的粗放值。第一, 运行人员在不同煤种切换和负荷升降过程中, 应先校正一次风率与一次风速, 再细分二次风及周界风开度, 使主燃区保持足够着火热和后期燃尽空气; 低挥发分煤或低负荷工况下, 一次风不宜过大, 否则煤粉升温慢、着火点后移, 火焰易发散, 上部受热面吸热反而加重, 现场通常要把下层二次风适度托住, 把燃尽风投入节奏放缓, 避免冷风直冲火焰根部, 同时结合磨出口温度和一次风压检查风粉输送是否偏稀<sup>[3]</sup>。第二, 出口氧量不宜单独追求低值, 应以飞灰可燃物、CO 变化和炉膛出口温度分布一并校核, 在中高负荷阶段多通过燃烧优化试验确定经济氧量区间, 煤质变差、制粉偏粗或深调峰运行时再留出必要裕量; 若长期把氧量硬压在过低水平, 往往会出现飞灰含碳上升、局部缺氧和燃尽恶化, 反而把排烟损失以外的不完全燃烧损失放大, 部分机组在优化后仅靠锅炉运行调整即可取得约 0.5—1.5g/kWh 的供电煤耗改善。第三, 燃烧器摆角、上下层给粉量和磨煤机组合必须随负荷同步修正, 深调峰时尤其要避免磨煤机隔层运行和上层给粉偏重, 因为火焰中心一旦上飘, 煤粉在高温区停留时间缩短, 再热汽温、烟温偏差和炉膛结渣倾向都会随之恶化, 此时宜优先稳住下层主燃区热负荷, 再逐步校平各层风粉分配, 并把偏差较大的给粉机转速及时拉回。第四, 配风调整不能只盯单个氧量测点, 应把火检闪烁、炉膛负压摆动、两侧烟温偏差和飞灰变化作为联动判据, 按“小步调整、短时观察、成组修正”的顺序处理; 每次调风后至少跨过一个燃烧响应周期再判断是否继续修正, 避免因连续大幅波动风门引起氧量虚假波动和汽温反复。机组完成针对常用煤种和典型负荷的燃烧优化试验后, 通常可进一步压缩无效风量, 并形成班组可

直接执行的配风基准。

### 3.4 强化受热面清洁维护与吹灰节奏

受热面清洁维护要真正转化为锅炉节能量，关键不在多吹，而在识别灰污性质后把吹灰对象、时机和参数逐项卡准。第一，运行班组应把炉膛水冷壁结渣、屏过和高再的高温黏结灰、对流受热面的干松积灰以及空预器冷端黏附堵灰分开管理，结合实际燃煤的结渣沾污特性、飞灰可熔性和脏污分布重排吹灰流程，先处理换热恶化快、超温风险高的区域，再安排常规受热面，并把同煤种、同负荷条件下的积灰部位和吹后恢复幅度连续记录，避免全炉同频吹扫造成蒸汽空耗和局部过吹。第二，吹灰起点不能只看既定时钟，应把排烟温度、空预器差压、烟道阻力和减温水变化作为现场判据，尤其当排烟温度连续抬升、减温水补偿增多时，要优先核对省煤器后至空预器段积灰，而不是反复依靠加风、压氧量或加大减温水去掩盖传热恶化；当排烟温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ，锅炉效率通常会下降约 $0.5\%$ 至 $0.7\%$ ，空预器差压在相仿负荷下10天内可由 $1.27\text{kPa}$ 升至 $1.48\text{kPa}$ ，重侧可达 $1.94\text{kPa}$ 。第三，蒸汽吹灰必须盯住母管压力、介质温度、疏水和执行机构全行程，开吹前先确认暖管和疏水完成，运行中核查推进、旋转、回退是否到位，并尽量按烟气流程组织炉膛吹灰、长吹受热面吹灰和空预器吹灰，发现压力不足、喷嘴磨损、阀门内漏或吹灰器卡涩时立即退出缺陷设备，并同步核对吹后壁温和烟温响应，防止形成灰未清除、受热面先受冲刷的无效操作。第四，吹灰节奏宜按负荷和污染发展速度滚动修正，深调峰、变煤种和脱硝投运后空预器更易堵灰，此时应缩短重点区域复查间隔，但不机械加密全炉次数，可先处理差压异常侧和温升明显段，再根据吹后温差恢复、阻力回落和汽温偏差变化决定是否补吹，停机窗口还应同步检查长伸缩吹灰器喷嘴、疏水阀和空预器蓄热元件积灰硬化情况<sup>[4]</sup>。

### 3.5 严控漏风并压降排烟热损失

围绕锅炉尾部热损失控制，现场应把漏风治理、空预器整治、排烟温度校核和运行联调作为同一条技术链同步收紧。第一，查漏不能等到炉膛负压异常后再处理，而应按炉膛水冷壁穿墙点、看火孔、人孔门、烟道膨胀节、灰斗与空预器进出口连接段逐点做风压试验和运行听漏，停机时重点复核外护板、保温层下钢板及密封焊缝，发现局部吸风后要同步修补内外两层密封，并复测修后漏风点前后氧

量与烟温，避免只补外表而漏点转移，对长期深调峰机组还要把炉侧负压、尾部烟道差压和引风机电流联在一起判断，形成班组可执行的查漏清单。第二，空预器治理要把径向、轴向和环向密封间隙一起管住，低负荷时尤其要盯紧出口氧量突升、两侧烟温偏差和压差增长，当机组在 $600\text{MW}$ 工况下两侧空预器漏风率达 $7.19\%$ 和 $4.73\%$ ， $300\text{MW}$ 时可升至 $11.68\%$ ，说明深调峰阶段更不能放松冷端密封、蓄热元件清灰、扇形板跟踪及旁路漏风检查。第三，排烟温度偏高时不要先靠加大送引风或压低氧量去掩盖，应先核对省煤器与空预器积灰、换热元件倒伏堵塞、磨煤机冷风门误开及烟道无组织漏风，公开资料显示受热面积灰清除后排烟温度可下降约 $8^{\circ}\text{C}$ ，而漏风量增大又会抬高引风机电流和系统阻力。第四，排烟温度控制应守住防低温腐蚀底线，高硫煤和SCR投运条件下要兼顾酸露点与硫酸氢铵黏附风险，冬季和低负荷运行应结合一次、二次风温、冷端壁温及吹灰效果确定下限，残氨处于 $3$ 至 $5\text{ppm}$ 并持续数月时空预器阻力就可能明显上升，因此不宜单纯追求低烟温，更不能在冷端堵灰未解时长期强压温度，同时要把磨煤机冷风掺入量和空预器前后温差一起纳入日常考核。

## 4 结语

火电厂锅炉运行节能不是依靠单一参数压降就能完成的工作，而是要把煤质适配、制粉状态、燃烧组织、受热面清洁和尾部漏风控制作为一条连续链条统筹处理。结合当前中国煤电机组保供与调节并重的运行环境，越是负荷波动大、煤质变化多的机组，越需要回到锅炉本体与运行工况本身做节能。只要坚持从热损失形成机理出发，逐项压缩排烟损失、不完全燃烧损失和无效风量，锅炉运行节能就能从经验操作转化为稳定、可复制、可考核的现场做法。

### 参考文献

- [1] 彭万勇.火电厂锅炉运行过程中的节能方法探讨[J].中国设备工程,2025(21):223-225.
- [2] 韩波.火力发电厂锅炉运行控制的节能措施研究[J].行车指南,2023(2):0088-0089.
- [3] 周兴平,罗智,张泽群.火电厂锅炉运行中的节能对策研究[J].工程研究与实用,2025(19).
- [4] 黄志武.火电厂锅炉运行优化与节能研究[J].能源新观察,2025(8):106-107.

# Research on Crop Planting Strategy Considering Random Perturbation

Qiang Li<sup>1</sup> Feifei Huang<sup>1</sup> Qiang Hao<sup>1</sup> Wenlin He<sup>2</sup> Jinhua Tan<sup>2</sup> Wei Li<sup>2\*</sup>

1. Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou, Guangdong, 511300, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong, 524048, China

## Abstract

To achieve sustainable development of the rural economy, it is necessary to formulate efficient planting strategies that increase crop yields while minimizing production risks. This paper takes a village in North China as an example. Considering the random perturbation of planting costs and sales prices, the repeated random sampling method is adopted to solve each random fluctuation term. Furthermore, the simulated annealing algorithm is improved using Monte Carlo simulation to enhance its robustness in searching for optimal solutions in a stochastic environment. It is then embedded into the linear programming framework to solve multi-objective optimization models under various constraints. Based on this, an optimal cropping strategy for the village from 2025 to 2030 is formulated to enhance the long-term resilience of the agricultural system.

## Keywords

Random perturbation; Simulated annealing algorithm; Optimal planting strategy for crops

## 考虑随机扰动的作物种植策略研究

李强<sup>1</sup> 黄菲菲<sup>1</sup> 郝强<sup>1</sup> 何文林<sup>2</sup> 谭锦华<sup>2</sup> 李卫<sup>2\*</sup>

1. 广州铁路职业技术学院, 中国·广东广州 511300

2. 岭南师范学院机电工程学院, 中国·广东湛江 524048

## 摘要

为实现乡村经济的绿色、可持续发展, 必须构建高效的种植决策体系, 在稳步提升作物产量的同时, 有效降低自然与市场风险。本文聚焦华北地区某一典型乡村, 综合考虑种植成本及市场销售价格随机性等多重扰动因素, 引入重复随机抽样方法对各不确定性变量进行模拟生成。进一步, 运用蒙特卡洛模拟对模拟退火算法进行改进, 增强其在随机环境下的寻优鲁棒性, 并将其嵌入线性规划框架中, 在产量、成本、收益与资源约束条件下, 求解线性优化模型。基于此, 为该乡村制定2025年至2030年作物的最优种植策略, 以增强农业系统的长期韧性。

## 关键词

随机扰动; 模拟退火算法; 作物的最优种植策略

## 1 引言

为推进乡村经济可持续发展, 一方面应立足本地实际,

科学规划不同农田类型, 精准选种适宜作物<sup>[1]</sup>; 另一方面须制定高效种植方案, 在最大化作物产量的同时, 有效控制生产风险<sup>[2-3]</sup>。华北某山区乡村现有 34 个地块, 总面积达 1201 亩, 涵盖平旱地、梯田、山坡地及水浇地四种类型, 配备 16 个普通大棚与 3 个智慧大棚, 每个大棚面积均为 0.6 亩<sup>[4-5]</sup>。

【基金项目】2026 年广东省科技创新战略专项资金(大学生科技创新培育)(项目编号: 2026KJCX005); “百千万工程”与设计驱动创新双维耦合下湛江智能家电产业集群高质量发展研究(项目编号: ZJ25YB88)。

【作者简介】李强(1989—), 男, 中国江苏徐州人, 博士, 讲师, 从事计算摩擦学研究,

【通讯作者】李卫(1988—), 男, 土家族, 中国湖北巴东人, 博士, 讲师, 从事计算摩擦学、连接结构动力学研究。

本文以该乡村为例, 结合各作物的种植成本和销售价格的随机波动特征, 为该村规划 2025 年至 2030 年的作物种植策略。首先, 基于历史数据构建种植成本与销售价格的随机干扰模型, 并采用重复随机抽样方法求解出各项随机波动参数。在此基础上, 建立以经济收益最大化为目标、兼顾资源约束与风险控制的线性规划模型。进一步利用蒙特卡洛模

拟优化后的算法对模型进行高效求解，最终得到该乡村在不同随机情景下的作物最优种植结构，为乡村农业的稳健可持续发展提供科学决策依据。

## 2 模型假设

在构建乡村作物种植优化模型时，为简化系统复杂性并聚焦于策略层面的分析，需基于现实背景设定若干合理假设。这些假设旨在平衡模型的精确性与可操作性，为后续的随机优化与决策制定提供逻辑起点。具体如下：

- (1) 假设 2023 年各作物的产量等于 2023 年各作物的销量；
- (2) 假设所有作物的种植成本平均每年增长 4% 至 6% 之间；
- (3) 假设蔬菜类作物的销售价格平均每年增长 4% 至 6% 之间；
- (4) 假设所有地块都相连在一起。

## 3 随机波动模型

### 3.1 种植成本随机增长模型的建立

受市场供需波动、气候条件及政策调控等多重因素影响，本文假设各作物种植成本与部分农产品销售价格每年增长率在 5% 左右浮动，具体波动范围设定为 4% 到 6%，以此为基础建立随机增长模型，其数学表达式如下：

$$\begin{cases} pc_i = pc_{i-1} \times (1+r_4), i=2024, 2025, \dots, 2030 \\ r_4 \in [0.04, 0.06] \end{cases} \quad (1)$$

其中的  $pc_i$  表示各作物未来几年的种植成本， $r_4$  表示各作物未来种植成本的随机增长率波动项。

### 3.2 销售价格随机模型的建立

#### 3.2.1 粮食类作物销售价格随机波动模型的建立

基于粮食市场价格的相对稳定性，并参考近年价格波动规律，本文假设粮食类作物销售价格在 2023 年基准价格基础上存在  $\pm 1\%$  的年际随机扰动，建立如下随机波动模型，其数学表达式为：

$$\begin{cases} csp_i = csp_{2023} \times (1+r_5), i=2024, 2025, \dots, 2030 \\ r_5 \in [-0.01, 0.01] \end{cases} \quad (2)$$

其中的  $csp_i$  表示粮食类作物未来几年的销售价格， $r_5$  表示粮食类作物未来销售价格的随机扰动项。

#### 3.2.2 蔬菜类作物销售价格随机增长模型的建立

蔬菜类作物的销售价格受市场供需、季节性波动及政策调控等因素影响，平均每年增长约 5%，以此为基础建立如下随机增长模型：

$$\begin{cases} vsp_i = vsp_{i-1} \times (1+r_6), i=2024, 2025, \dots, 2030 \\ r_6 \in [0.04, 0.06] \end{cases} \quad (3)$$

其中的  $vsp_i$  表示蔬菜类作物未来几年的销售价格， $r_6$  表示蔬菜类作物未来销售价格的随机增长率波动项。

### 3.3 各作物种植成本和销售价格随机模型的求解

为了确定种植成本和销售价格的随机波动项，采用重复随机抽样方法，模拟其不确定性对规划结果的影响。在考虑历史数据与波动分布特征的基础上，进行了 2000 次蒙特

卡洛模拟抽样，随后基于概率密度分析提取出现概率最高的随机取值作为波动项的代表值。最终，为直观展示模拟结果的分布特征与集中趋势，对该过程进行了可视化处理，如图 1 所示，为后续优化建模提供了可靠的随机参数输入。

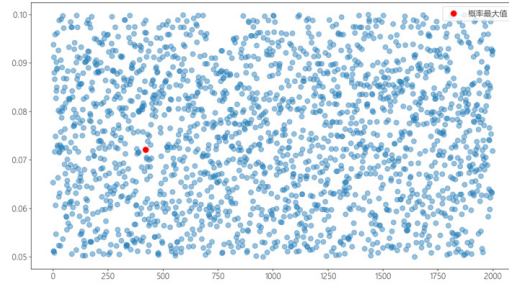


图 1 进行 2000 次模拟的可视化图

## 4 线性规划模型

### 4.1 定义决策变量

$$x_{i,j,k}^t = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中的  $x_{i,j,k}^t$  为 0-1 变量，0 表示第  $j$  种作物在第  $k$  季时不种植在第  $i$  块地块上，1 表示第  $j$  种作物在第  $k$  季时种植在第  $i$  块地块上。

### 4.2 确定目标函数

a) 超过部分滞销，造成浪费

$$\max f_1 = \sum_{i=2024}^{2030} \sum_{j=1}^{34} \sum_{k=1}^{107} \sum_{l=1}^2 x_{i,j,k}^t \times (sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) - pc_j \times area_j) \quad (5)$$

其中的  $sv_j$  表示第  $j$  种作物的预期销量， $ay_j$  表示第  $j$  种作物的亩产量， $sp_j$  表示第  $j$  种作物的销售单价， $pc_j$  表示第  $j$  种作物的每亩种植成本， $area_j$  表示第  $j$  种作物的种植面积。

b) 超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售

$$\max f_2 = \sum_{i=2024}^{2030} \sum_{j=1}^{34} \sum_{k=1}^{107} \sum_{l=1}^2 x_{i,j,k}^t \times area_j \times [(sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) + Q_j \times sp_j^{2023} \times 0.5) - pc_j] \quad (6)$$

其中的  $Q_j$  表示第  $j$  种作物总产量超过相应的预期销售量的部分， $sp_j^{2023}$  表示 2023 年第  $j$  种作物的销售单价。

### 4.3 建立线性规划模型

结合以经济效益最大化为导向的目标函数，以及土地资源、种植结构、市场需求等多重约束条件，本文分别建立两种情况的线性规划模型，数学表达式如下：

a) 超过部分滞销，造成浪费

$$\max f_1 = \sum_{i=2024}^{2030} \sum_{j=1}^{34} \sum_{k=1}^{107} \sum_{l=1}^2 x_{i,j,k}^t \times (sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) - pc_j \times area_j) \quad (7)$$

$$st. \left\{ \begin{array}{l} x_{i,j,1}^t=1, \forall_i \in (\text{平旱地、梯田、山坡地}) \\ x_{i,j,2}^t=0, \forall_i \in (\text{平旱地、梯田、山坡地}) \\ x_{i,j,1}^t=1, \forall_j = (\text{单季的水稻, 两季的蔬菜}), i = \text{水浇地} \\ x_{i,j,2}^t=1, \forall_j = \text{两季的蔬菜}, i = \text{水浇地} \\ x_{i,j,1}^t=1, j = \text{蔬菜}, i = \text{普通大棚} \\ x_{i,j,2}^t=1, j = \text{食用菌}, i = \text{普通大棚} \\ x_{i,j,k}^t=1, j = \text{两季蔬菜}, i = \text{智慧大棚} \\ \sum_{t=T}^{T+2} \sum_{j \in \text{豆类作物}} x_{i,j,k}^t \geq 1, T=2024, \dots, 2027 \\ \sum_{i=1}^{34} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times \text{area}_j \geq \delta_{\min j} \\ \sum_{t=2024}^{2030} x_{i,j,k}^t \times x_{i,j,k}^{t-1} = 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

b) 超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售

$$\max f_2 = \sum_{t=2024}^{2030} \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^{107} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times \text{area}_j \times [(sp_j \times \min(ay_j \times \text{area}_j, sv_j) + Q_j \times sp_j^{2023} \times 0.5) - pc_j] \quad (9)$$

约束条件见式 8 所示。

#### 4.4 模型求解

蒙特卡洛模拟<sup>[6]</sup>作为一种基于概率统计的随机模拟方法，通过大量生成随机数来近似复杂系统的行为，常用于处理不确定性问题。模拟退火算法<sup>[7-8]</sup>则是一种受固体退火过程启发的全局优化算法，通过引入概率性接受劣解的策略，有效避免陷入局部最优，从而更好地搜索全局最优解。本文将蒙特卡洛模拟的思想融入模拟退火算法的框架中，增强算法在随机环境下的鲁棒性与收敛效率。具体而言，利用第三节通过重复随机抽样得到的扰动项，构建随机规划模型，并在 Matlab 平台上进行多次迭代求解，最终得出该乡村 2025 至 2030 年间适应随机波动的最优作物种植策略。因篇幅所限，仅展示各年度在随机优化下的最大预期盈利结果（见表 1），相应求解过程的收敛曲线与迭代路径如图 2 所示。

表 1 各年最大盈利（元）的结果

2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年	2029 年	2030 年
24396850	21723419	17369513	22158953	22251186	22493030	17177200

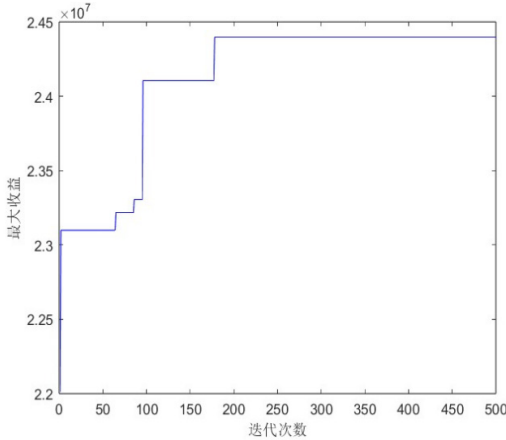


图 2 改进退火模型求解迭代图

## 5 结语

本文采用的改进模拟退火算法，在蒙特卡洛模拟的辅助下增强了全局探索能力，可有效跳出局部最优，从而锁定适应随机波动的最优种植决策。该模型规避了复杂的数学推导与繁琐的解析计算，降低了实际应用的理解门槛。然而，算法依赖大量随机抽样与迭代寻优，收敛速度相对较慢，且结果仍受随机性影响，存在一定的概率误差，在实时性要求

高的场景中需进一步优化效率。

## 参考文献

- [1] 田恬,谷达华,郑财贵等.基于土地资源限制性等级的重庆市建设用地开发适宜性评价[J].中国农业资源与区划,2019,40(11):26-34.
- [2] 毛钧,王靖,黄明霞等.云南蔗区播期与水氮耦合对甘蔗产量和糖分影响[J].农业工程学报,2019,35(16):134-144.
- [3] 郑盛,徐凯,周进等.复垦地地力提升与高效种植模式路径研究——以成都市双流区环城生态区为例[J].浙江农业科学,2025,66(09):2287-2291.
- [4] 王杨,张启.华北地区林粮争地问题概况与对策建议[J].陆地生态系统与保护学报,2022,2(05):49-54.
- [5] 许婷婷,冯再勇,谢小韦.基于线性规划模型的农作物种植策略[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2025,43(06):61-67.
- [6] 朱陆陆.蒙特卡洛方法及应用[D].华中师范大学,2014.
- [7] 谢云.模拟退火算法的原理及实现[J].高等学校计算数学学报,1999,(03):212-218.
- [8] Li Junqing, Liu Zhengmin, Li Chengdong, et al. Improved artificial immune system algorithm for type-2 fuzzy flexible job shop scheduling problem[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021,29(11): 3234-3248.

# Research on AI Optimization Strategy for Tourism Buses Facing Holiday Passenger Flow Fluctuations

Yanwen Xie

Hubei Urban Construction Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

During holiday periods, tourist bus systems face a prominent contradiction between highly uneven spatiotemporal passenger flow distribution and rigid capacity allocation. Traditional scheduling approaches, which rely on historical experience and static timetables, struggle to respond to pulse-like demand fluctuations, resulting in reduced service capacity and lower passenger satisfaction. To enhance the system's adaptability to extreme passenger flows, this study develops an AI-enhanced framework integrating multi-source data perception, deep learning-based forecasting, and reinforcement learning-driven scheduling. On this basis, a multi-agent reinforcement learning mechanism is introduced to optimize departure intervals and vehicle allocation at a minute-level granularity, thereby forming a closed-loop, flexible scheduling decision engine. Meanwhile, a human-machine collaborative interaction architecture is designed to incorporate dispatcher expertise with algorithmic recommendations, improving system robustness and operational feasibility. Experimental results demonstrate that the proposed approach significantly enhances capacity-demand matching and operational stability during peak periods, providing a feasible pathway for the intelligent transformation of smart public transport systems under complex holiday scenarios.

## Keywords

holiday passenger flow forecasting; AI-based scheduling optimization; tourist bus system; graph neural networks; reinforcement learning

## 面向节假日客流波动的旅游公交 AI 优化策略研究

谢燕雯

湖北省城建设计院股份有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

节假日期间旅游公交面对客流时空分布高度不均与运力刚性配置之间的突出矛盾, 传统调度形式因依赖历史经验跟静态排班而不容易响应脉冲式需求波动, 致使服务能力下降与乘客满意度减少。为加强系统解决极端客流的适应能力, 本研究建立融合多源数据感知、深度学习预测跟强化学习调度的AI改良框架, 在此基础上, 引入多智能体强化学习机制, 在分钟级粒度上改良发车间隔跟车辆配置, 形成闭环弹性调度决策引擎; 同时设计人机协同交互架构, 集成调度员经验判断与算法推荐, 增强系统鲁棒性跟可操作性。实验说明, 该方案明显增强了高峰期运力匹配度跟运行稳定性, 为智慧公交在繁复节假日场景下的智能化转型给予了可行途径。

## 关键词

节假日客流预测; 人工智能优化调度; 旅游公交系统; 图神经网络; 强化学习

## 1 引言

节假日旅游客流的剧烈波动使传统公交调度形式暴露出响应滞后与运力错配的深层问题, 面对动辄上亿人次的出行高峰, 刚性排班机制比较难适应脉冲式需求冲击, 致使服务能力下滑跟乘客体验恶化, 广东、江苏等热门区域的线路超载与西北、东北部分线路资源闲置形成鲜明对比, 显示了供需空间错配的结构矛盾, 深度学习驱动的短时客流预测模型凭借挖掘历史运营跟实时交通数据中的非线性关联, 明显

增强了对冗余时空特征的捕捉能力, 为动态调度给出了高精度输入基础, 图神经网络更深一步将路网结构转化为可计算的拓扑关系, 支持站点间客流传播途径的建模与干预, 强化学习算法则在车辆配置与发车间隔改良中展现出自适应决策潜力, 系统借助融合多源感知数据跟弹性调度引擎实现分钟级运力调整, 人机协同界面保留调度员在突发场景下的经验干预通道, 保证智能决策在繁复现实环境中的稳健落地。

## 2 节假日客流波动特征与旅游公交运行挑战

### 2.1 节假日客流时空分布非均衡性

节假日旅游公交客流呈现出明显的时空分布非均衡性。从时间维度看, 以国庆假期为例, 日均客流量在 2023 年约

【作者简介】谢燕雯(1993—), 女, 中国湖北随州人, 硕士, 工程师, 从事道路交通规划与设计相关的研究。

为 5681 万人次，而预测至 2025 年将激增至 30400 万人次，年际波动剧烈。空间上，客流高度集中于广东、江苏等东部经济发达省份，其出游人数合计占比超过全国总量的一半，而西北、东北等边缘地区客流则明显不足。这种不均衡格局主要受节假日类型、区域经济发展差异及突发公共事件等多重因素共同塑造，对公交运力的准确配置构成了重点考验<sup>[1]</sup>。2019-2025 年国庆假期主要省份日均客流量对比如图 2.1 所示。

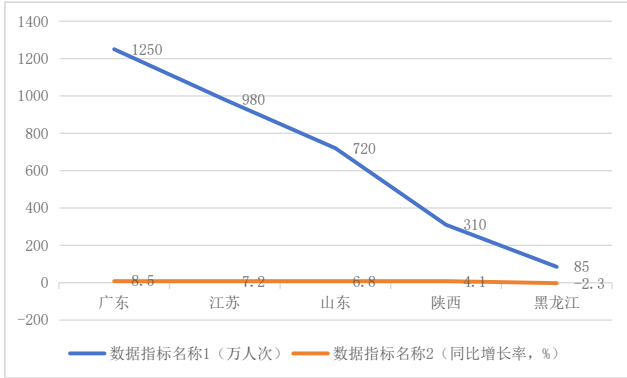


图 2.1 2019-2025 年国庆假期主要省份日均客流量对比

图表数据直观揭示了客流空间分布的极端不均衡。广东、江苏等头部省份日均客流量远超千万级，且保持较高正增长；而如黑龙江等边缘省份，客流量基数小且呈现负增

长态势。这进一步印证了核心客源地与边缘目的地间的客流密度鸿沟，是旅游公交系统面临供需匹配难题的关键数据表征。

## 2.2 旅游公交供需失配典型表现

节假日期间，旅游公交供需失配现象突出，主要表现为运力供给的刚性无法匹配需求的脉冲式激增。以 2019-2023 年数据为例，国庆、中秋等节假日出游人数峰值可达 8 亿人次以上，而同期公路客运量波动剧烈，两者增长趋势常不匹配。这种失配直接致使高峰期车厢过度拥挤、乘客候车时间明显延长，并引发车辆周转率下降、设施故障率上升等连锁反应，服务质量系统性下滑。2019-2023 年典型节假日旅游公交供需关键指标对比如表 2.1 所示。

## 2.3 传统调度机制响应滞后问题

传统调度机制依赖固定排班跟历史经验，这种静态形式面对节假日客流的剧烈波动表现出明显的滞后性，客流数据的采集与处理大多需要较长时间，调度指令的生成与下达无法匹配客流在短时间内的快速聚集跟消散，这种响应延迟直接致使高峰时段运力供给严重不足，乘客等待时间被人为拉长，公交运行能力随之大幅减少，服务质量的下降更深一步引发乘客满意度的滑坡，即便在近年部分城市尝试引入基础数据监测，但决策环节依旧严重依赖人工判断，缺乏对实时客流态势的准确感知与智能预判，使得整个调度系统在解决突发性大客流时显得笨拙而低效。

表 2.1 2019-2023 年典型节假日旅游公交供需关键指标对比

年份	节假日名称	全国出游人次 (亿)	公路客运量 (亿人次)	供需失衡主要表现	典型城市案例
2019	国庆节	7.65	18.46	主干道交通超饱和，公交运力严重不足	北京（道路压力达峰值）
2020	劳动节	1.10	2.82	需求受抑，但线路临时调整频繁	广州、珠海（疫情临时调整）
2021	中秋节	8.26	5.68	客流快速恢复，运力响应滞后	宁德（新开线路应对需求）
2022	劳动节	1.10	2.82	需求波动大，运力调配僵化	泉州（线路频繁优化调整）
2023	中秋节	8.26	5.68	需求反弹强劲，拥挤与服务下降并存	泉州（车辆更换致配车数减少）

## 3 面向客流波动的 AI 优化框架设计

### 3.1 多源数据融合驱动的客流预测模块

多源数据融合驱动的客流预测模块建立了整合公交运营数据、道路通行状况跟历史客流规律的融合分析框架，该框架凭借实时采集的动态信息跟长期积累的时序形式相互校验，可以准确捕捉节假日期间客流分布的时空异质性特征，其重点在于创建统一的多源数据融合数据库，该数据库汇聚了含有手机信令、交通卡刷卡记录、票务系统及道路传感器在内的异构数据流，上述数据经过清洗与对齐后输入到多层融合的预测模型中，模型利用深度学习算法挖掘客流波动跟多重影响因素之间的冗杂非线性关系，然后生成对将来短期还有中长期客流趋势的高精度预测，这种预测结果为后续的运力动态调配给出了核心的数据支撑和决策依据<sup>[2]</sup>。

### 3.2 动态需求感知的线路生成机制

动态需求感知的线路生成机制构成了 AI 改良框架的重点环节，该机制依赖多源异构数据的实时采集与融合，公交

运营数据、道路通行状况与历史客流规律共同输入预测模型，先进的 AI 模型譬如多立场图卷积网络可以捕捉客流在时空维度上的冗杂非线性特征，模型输出的高精度预测结果直接驱动线路生成决策，系统依据预测的客流峰值跟时段分布动态调整运力配置，具体措施表现为增加特定线路的车次或缩短高峰时段的发车间隔，这种基于实时感知的响应式调整保证了运力供给与波动需求之间的动态匹配，继而在节假日等特殊时期有效增进公交系统的整体运营能力与客流疏散能力。

### 3.3 实时弹性调度决策引擎

实时弹性调度决策引擎构成整个 AI 改良框架的重点执行单元，它依赖多源大数据融合跟实时态势感知技术建立动态决策闭环，引擎借助整合客流预测模块输出的高精度需求信号，融合实时 GPS 定位跟车载客流计数数据，对线路运力配置与发车间隔实行分钟级动态改良，这种优化不再遵循固定的时刻表，转而使用一种响应式的资源调配逻辑，系统可以自动识别客流聚集站点跟异常拥堵路段，并触发预设的

弹性调度预案,譬如在返程高峰时段临时增开直达班次或缩短热门线路的发车间隔,决策过程嵌入强化学习算法,使得系统可以从历史调度效果中持续学习并调整方略参数,然后实现运力投放与客流分布的准确匹配,最终达成加强运营能力跟乘客满意度的双重目标<sup>[1]</sup>。

## 4 AI 优化策略的关键技术路径

### 4.1 基于深度学习的短时客流预测模型

建立准确的短时客流预测模型构成旅游公交 AI 改良方针的核心技术基础,深度学习模型凭借其强大的非线性拟合能力可以有效捕捉节假日客流波动的繁复时空特征,精进的 Transformer 模型凭借引入 TPE 改良算法明显增强了预测精度,其架构擅长处理序列数据中的长期依赖关系, LSTM-SVR 混合模型则融合了长短期记忆网络与支持向量回归的优势,该模型在解决高速公路节假日交通流预测任务中展现出良好的适应性,该类模型训练依赖于高频的客流监测数据,譬如以 15 分钟为间隔的景区客流统计,模型输出的高精度预测结果直接服务于后续的动态调度与资源改良模块,为解决突发性客流高峰给予核心的数据洞察跟决策依据。

### 4.2 强化学习驱动的车辆调度算法

强化学习驱动的车辆调度算法建立了智能体与环境持续交互的决策框架,该框架将公交车辆、客流需求跟路网状态整合为马尔可夫决策过程,算法凭借深度 Q 网络或深度确定性方案梯度等模型学习最优调度方略,此类方针可以依据实时客流波动动态调整发车间隔跟车辆配置,继而有效应对节假日期间骤增的运输压力,模型训练依赖高质量的实时 GPS 与客流数据,其泛化能力面对不同城市路网特征的考验,计算资源的消耗也制约着冗杂模型的部署,将来的研究趋向于建立多智能体协同系统以实现车队整体能力的加强,并探析具备自适应能力的算法以增强在不同交通场景下的鲁棒性。

### 4.3 图神经网络支持的路网协同优化

图神经网络支持的路网协同改良构成关键技术途径,该技术途径利用图结构建模交通网络节点跟边的繁复时空依赖关系,节假日客流波动表现高度非线性与突发性特征,传统模型不容易准确捕捉其动态传播机制,图神经网络借助消息传递与聚合机制可以有效学习路网中站点间的潜在关联,进而实现客流分布的准确预测跟运力资源的动态调配,现有研究尚未深度探查该技术在节假日旅游公交这一特定场景的应用,其潜力在于融合多源异构数据并模拟客流在路网中的扩散过程,这为建立具备自适应能力的协同调度系统给予了新的理论工具,将来研究需要设计面向节假日特征的专用图神经网络架构以处理客流数据的极端波动性跟路网拓扑的时变性<sup>[4]</sup>。

## 5 策略实施的运行保障与适应性机制

### 5.1 系统鲁棒性与异常扰动应对

系统鲁棒性设计需要嵌入个体出行模式分析技术,这

种技术借助信息熵模型刻画乘客活动规律, AI 改良方针可以依据此类规律预测节假日客流波动,模块化公交调度模型则给予了解决需求突变的弹性框架,该框架整合电动车辆与需求响应机制,异常扰动解决机制依赖实时数据监测跟混合选择模型,模型评估可靠性等关键因素对出行选择的影响,系统凭借动态调整发车频率与途径来吸收突发客流冲击,保障旅游公交服务在高峰压力下维持稳定运行。

### 5.2 人机协同决策的交互界面设计

人机协同决策的交互界面设计需要建立一个可以融合 AI 智能调度系统预测能力与调度员经验判断的混合智能平台,这个平台借助可视化仪表盘集中展示节假日客流波动预测、实时车辆位置、线路饱和度及潜在拥堵点多维度动态数据,调度员可以直观掌握全局态势并借助双向协同算法生成的改良方案实行辅助决策,界面给出灵活的预案调整与参数干预通道,允许调度员融合自身对现场繁复因素的理解对 AI 推荐的排班计划跟运力投放方针实行微调与确认,这种设计不只发挥了 AI 在处理海量数据与繁复计算方面的能力优势,又保留了人类决策者在解决突发状况和实行价值判断时的关键作用,最终形成一种高效、可靠且具备强适应性的协同工作流<sup>[5]</sup>。

## 6 结语

节假日旅游公交系统面对客流时空分布高度不均衡、脉冲式激增跟区域结构性失衡等现实压力,传统刚性调度形式已比较难维持服务稳定性跟乘客满意度;改进型 Transformer 与 LSTM-SVR 混合模型明显增强短时客流预测精度,图神经网络有效建模站点间动态关联,强化学习驱动的车辆调度算法在分钟级响应中实现发车间隔跟运力配置的自适应调整;多源数据融合框架支撑起从预测到生成再到执行的闭环决策流,模块化弹性调度模型融合信息熵刻画的个体出行规律,使系统具备吸收突发扰动的能力;人机协同界面将车辆实时位置、线路饱和度与拥堵热区等维度集成于可视化仪表盘,双向协同算法赋予调度员对 AI 推荐方案的参数干预权,不光释放人工智能处理高维非线性关系的算力优势,又保留人类在冗杂现场判断中的不可替代性。

### 参考文献

- [1] 何莉,刘健国,陈鹏,贵阳市城市公共交通发展问题及对策研究[J].综合运输,2025,47(12):159-163.
- [2] 钟章建,钱林波,王天宇,等.宁波市主城区地面公交线网优化策略研究[J].交通与运输,2025,41(06):75-78.
- [3] 张馨方,闫芝萍,张哲,等.基于车辆动力学和改进的FFRLS算法在线估算电动公交能耗[J].汽车安全与节能学报,2025,16(05):747-756.
- [4] 王雅,任静梅,王妍文,等.基于统计与机器学习融合模型的水墨丹霞客流量预测优化研究[J].兰州交通大学学报,2025,44(06):63-72.
- [5] Kim, Myung Ja, et al. 'Does using public transport affect tourist subject well-being and behaviour relevant to sustainability? Value-attitude-behaviour theory and artificial intelligence benefits.' Current Issues in Tourism 27.10 (2024): 1666-1682.

# Optimization of Multiphase Flow Field and Analysis of Enhancement Mechanism in Metallurgical Reactor Based on Numerical Simulation

Guangze Wei

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

## Abstract

Metallurgical reactors serve as core equipment in metallurgical production processes. The coupled behaviors of multiphase flow, heat and mass transfer, and chemical reactions within them directly impact product quality, energy consumption, and pollutant emissions. Traditional experimental research methods struggle to comprehensively capture the complex physicochemical phenomena occurring inside reactors. Numerical simulation technology, with its advantages of low cost, high efficiency, and strong reproducibility, has become a crucial tool for revealing multiphase flow field characteristics, optimizing process parameters, and elucidating enhancement mechanisms. This paper systematically expounds the fundamental theories and methodologies of metallurgical reactor numerical simulation, analyzes the distribution characteristics of multiphase flow fields in typical metallurgical reactors such as blast furnaces, converters, electric furnaces, and continuous casting tundishes, explores key strategies for flow field optimization and process enhancement, and demonstrates the practical value of numerical simulation in optimizing metallurgical reactor design.

## Keywords

numerical simulation; metallurgical reactor; multiphase flow field; flow field optimization; process intensification

# 基于数值模拟的冶金反应器内多相流场优化与强化机理分析

魏光泽

辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

## 摘要

冶金反应器是冶金生产过程的核心装备,其内部多相流动、传热传质及化学反应等过程的耦合行为直接影响着产品质量、能源消耗和污染物排放。传统的实验研究方法难以全面捕捉反应器内部复杂的物理化学现象,而数值模拟技术凭借其低成本、高效率、可重复性强等优势,已成为揭示反应器内多相流场特征、优化工艺参数、阐明强化机理的重要工具。本文系统阐述了冶金反应器数值模拟的基本理论与方法,分析了高炉、转炉、电炉、连铸中间包等典型冶金反应器内多相流场的分布特征,探讨了流场优化与过程强化的主要策略,揭示了数值模拟在冶金反应器优化设计中的应用价值。

## 关键词

数值模拟; 冶金反应器; 多相流场; 流场优化; 过程强化

## 1 引言

随着计算机技术和数值计算方法的飞速发展,基于计算流体动力学的数值模拟技术为冶金反应器的研究开辟了新的途径。数值模拟能够以较低的成本获取反应器内部速度场、温度场、浓度场和相分布的详细信息,揭示流动与反应之间的内在联系,为工艺参数优化和反应器结构改进提供科学依据。近年来,多相流模型、湍流模型、辐射传热模型以及化学反应动力学模型的不断发展和完善,使数值模拟的准确性和适用性显著提升,在冶金反应器的设计、诊断和优化

中发挥着日益重要的作用。

## 2 冶金反应器数值模拟的基本理论与方法

### 2.1 多相流数学模型

冶金反应器内的流动通常涉及多个相态,准确描述多相流动行为是数值模拟的核心。根据研究对象的特征和模拟需求,常用的多相流模型包括欧拉-欧拉双流体模型、欧拉-拉格朗日模型和混合模型等。

欧拉-欧拉双流体模型将各相均视为连续介质,通过求解各相的质量、动量和能量守恒方程来描述流动行为。该模型适用于颗粒相或气泡相体积分数较高的体系,如高炉风口回旋区、流化床反应器等。模型需要引入相间动量交换项和湍流相互作用项,通过相间曳力系数、升力系数等本构关

【作者简介】魏光泽(2005—),男,中国山东潍坊人,本科在读,从事冶金工程研究。

系实现相间耦合。该模型的优点在于计算效率较高，适用于大规模工程问题，但相间本构关系的准确性对模拟结果影响较大。

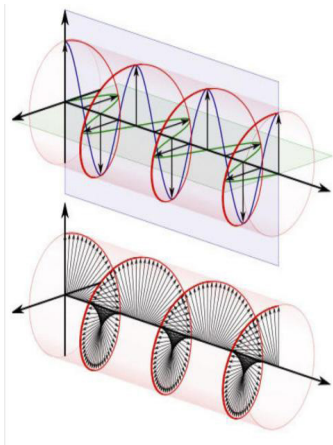


图1 欧拉 - 欧拉双流体模型示例

欧拉 - 拉格朗日模型将连续相（通常为气相或液相）作为连续介质处理，采用欧拉方法求解，而将离散相（颗粒或气泡）视为离散单元，采用拉格朗日方法追踪其运动轨迹。该模型能够详细描述离散相的运动行为、粒径分布以及相间相互作用，适用于颗粒浓度较低、颗粒尺寸分布较广的体系，如喷雾干燥器、气力输送等。该模型的计算精度较高，但计算量较大，对计算资源要求较高。

混合模型是一种简化的多相流模型，适用于各相之间相对速度较小、相间耦合较强的体系，如离心分离器、沉降池等。该模型通过求解混合物的连续性方程、动量方程以及各相的体积分数方程来描述流动，计算效率高，但无法准确描述相间的相对运动。

## 2.2 湍流模型与传热传质模型

冶金反应器内的流动大多处于湍流状态，湍流模型的选取对模拟结果的准确性至关重要。常用的湍流模型包括标准  $k-\epsilon$  模型、雷诺应力模型和大涡模拟等。

标准  $k-\epsilon$  模型是最广泛应用的湍流模型，通过求解湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\epsilon$  的输运方程来描述湍流黏性。该模型计算稳定性好，收敛速度快，适用于高雷诺数下的充分发展湍流，但无法准确捕捉各向异性和强旋流动。雷诺应力模型通过直接求解雷诺应力的输运方程，能够更准确地描述各向异性湍流，适用于旋流、分离流等复杂流动，但计算量较大，收敛性较差。

在冶金反应器中，流动往往伴随着传热和传质过程，因此需要耦合求解能量方程和组分输运方程。传热模型包括导热、对流和辐射传热，其中辐射传热对于高温冶金反应器尤为重要，常用离散坐标法或离散传播法求解辐射传递方程。传质模型则涉及组分扩散、化学反应以及相间传质过程，需根据具体反应体系确定组分输运方程中的源项和边界条件。

## 2.3 化学反应与多场耦合

冶金反应器内的化学反应对流场和温度场具有重要影响，因此需要在数值模拟中合理描述化学反应动力学。根据反应体系的特点，可选用总包反应模型、详细反应机理或火焰面模型等。对于高炉炼铁、转炉炼钢等复杂反应体系，通常采用简化的总包反应模型结合经验动力学参数来描述；对于某些特定反应，如燃烧过程、脱硫反应等，可引入详细的反应机理以提高模拟精度。

多场耦合是冶金反应器数值模拟的显著特征。流动场、温度场、浓度场和电磁场等物理场之间存在复杂的相互作用，需要建立耦合求解方法。例如，电炉炼钢过程中，电磁场驱动钢液流动，而流动又影响温度分布和传质过程，因此需要采用磁流体动力学模型实现电磁场与流场的耦合<sup>[1]</sup>。

## 2.4 计算网格与数值求解

数值模拟的前处理工作主要包括几何建模、网格划分和边界条件设定。网格质量直接影响计算的精度和收敛性，对于复杂的冶金反应器几何结构，通常采用非结构化网格或多面体网格以适应复杂的边界形状。对于边界层区域，需进行网格加密以准确捕捉近壁面流动特征。网格独立性验证是保证计算结果可靠性的重要环节，需通过加密网格验证计算结果不再随网格数量显著变化。

数值求解过程涉及控制方程的离散化和迭代求解。有限体积法因其守恒性好、适应性强，是冶金反应器数值模拟中最常用的离散方法。求解过程中需合理设置松弛因子、收敛准则等参数，以保证计算稳定收敛。对于瞬态问题，需选择合适的时间步长以捕捉流动的动态特征<sup>[2]</sup>。

## 3 典型冶金反应器内多相流场特征

### 3.1 高炉内气 - 固 - 液流动

高炉是钢铁生产中最核心的反应器，其内部同时存在气相（煤气）、固相（炉料）和液相（渣铁）的相互作用，流动行为极为复杂。数值模拟研究表明，高炉上部块状带以气 - 固逆流流动为主，炉料在重力作用下向下运动，煤气在压力驱动下向上运动，气 - 固两相的相对速度决定了传热和还原反应的效率。模拟结果揭示了炉料分布的不均匀性对气流分布的影响，中心气流与边缘气流的合理匹配是保证高炉顺行的关键。

高炉下部软熔带和滴落带是气 - 液 - 固三相共存的复杂区域。软熔带的形状和位置直接影响高炉内的压力损失和煤气分布。数值模拟能够预测不同原燃料条件下软熔带的变化规律，为优化炉料结构和操作参数提供依据。滴落带内，铁水和熔渣穿过焦炭层向下滴落，煤气向上流动，相间相互作用强烈。采用欧拉 - 欧拉双流体模型结合颗粒动力学理论，可以模拟焦炭层的空隙率分布和液相的渗透行为，揭示影响滴落带透气性的关键因素。

高炉风口回旋区是高炉内温度最高、反应最剧烈的区

域,煤粉和热风在此发生燃烧反应,产生高温还原性煤气。数值模拟能够刻画回旋区的形状、大小以及温度分布,揭示喷煤量、富氧率等参数对回旋区流动和燃烧的影响。研究表明,增大富氧率可提高回旋区温度,增强煤粉的燃烧效率,但过高的富氧率可能导致回旋区扩大,影响气流分布的均匀性。

### 3.2 转炉内射流 - 熔池相互作用

转炉炼钢过程中,氧枪喷出的超音速射流冲击熔池,产生强烈的搅拌和混合作用,促进脱碳、脱磷等反应的进行。数值模拟是研究射流 - 熔池相互作用的重要工具。通过建立多相流模型,可以模拟氧枪射流冲击熔池的过程,揭示射流穿透深度、冲击坑形状以及熔池内部流场结构。

模拟结果表明,氧枪喷头结构对射流行为有显著影响。拉瓦尔喷管可产生超音速射流,其马赫数和流量密度分布取决于喷管几何尺寸。采用多喷嘴氧枪可改善射流的空间分布,减少对炉衬的冲刷,同时增强熔池的搅拌效果。通过数值模拟优化喷头参数,可以在保证脱碳效率的同时降低喷溅损失,提高金属收得率。

### 3.3 电炉内电磁 - 流动耦合

电炉炼钢以电能为热源,电磁场对熔池流动具有决定性影响。数值模拟需要耦合求解电磁场方程和流动方程,以准确描述电炉内的多物理场行为。交流电炉和直流电炉的电磁特性存在显著差异,交流电炉的电磁力呈现周期性变化,导致熔池流动的脉动特征;直流电炉的电磁场相对稳定,熔池流动较为平稳。数值模拟揭示了电炉内电磁力的分布特征及其对熔池流动的驱动作用。

### 3.4 连铸中间包内钢液流动

连铸中间包是连铸工艺中的重要设备,其内部钢液流动状态直接影响铸坯质量和生产效率。数值模拟是研究中间包流场的主要手段,通过建立三维流动模型,可以模拟钢液在中间包内的停留时间分布、速度场和温度场。

模拟结果表明,中间包的流动结构主要由入口射流、出流抽吸以及挡墙、挡坝等控流装置共同决定。未经优化的中间包容易出现短路流和死区,导致夹杂物无法充分上浮去除,影响铸坯洁净度。通过设置合适的挡墙和挡坝,可以改善钢液的流动路径,延长停留时间,促进夹杂物上浮<sup>[1]</sup>。

## 4 流场优化与过程强化策略

### 4.1 反应器结构优化

反应器结构是决定流场分布的根本因素,通过数值模拟优化反应器结构是改善流动状态、强化反应过程的重要途径。对于高炉而言,炉喉布料器的设计、炉身角度的选取、风口布置方式等均影响炉内气 - 固流动的均匀性。数值模拟能够定量评估不同结构参数对气流分布、炉料下降和压差损失的影响,为高炉设计提供理论依据。

对于转炉而言,氧枪喷头的几何形状、喷孔数量和角度、

底吹喷嘴的布置方式等对流场影响显著。通过数值模拟优化氧枪参数,可在保证脱碳效率的前提下降低喷溅损失和炉衬侵蚀。对于中间包而言,挡墙和挡坝的位置、湍流控制器的尺寸、浸入式水口的形状等均影响钢液流动模式,数值模拟能够筛选最优的控流装置组合。

### 4.2 操作参数优化

操作参数的调整是实现流场优化和过程强化的另一重要手段。数值模拟能够揭示关键操作参数对流场的影响规律,为工艺优化提供定量指导。对于高炉,风量、风温、富氧率、喷煤量等参数直接影响风口回旋区的状态和气流分布,通过模拟可以确定不同条件下的最优操作区间。

对于转炉,氧枪枪位、供氧强度、底吹流量等参数决定了熔池搅拌强度和反应速率。数值模拟能够建立操作参数与熔池混合时间、喷溅损失之间的定量关系,为转炉吹炼过程控制提供依据。对于电炉,供电曲线、电极调节方式、泡沫渣控制等参数影响熔池流动和热效率,通过模拟可优化供电制度和加料工艺。

### 4.3 外加物理场强化

在传统冶金反应器基础上引入外加物理场,是实现过程强化的新途径。数值模拟为外加物理场的设计和 optimization 提供了有力工具。例如,在中间包内施加电磁搅拌,可改变钢液的流动模式,促进夹杂物碰撞和上浮。电磁场作用下,钢液中产生洛伦兹力,驱动钢液形成强制对流,改变原有的流动结构。通过数值模拟可以优化电磁搅拌器的布置位置、电流频率和强度,获得最佳的流场调控效果。

在钢包精炼过程中,底吹氩气搅拌是强化传质的主要手段。数值模拟能够研究气泡尺寸分布、气体流量、喷嘴布置等因素对熔池搅拌效果的影响,优化精炼工艺参数<sup>[4]</sup>。

## 5 结语

基于计算流体动力学的数值模拟技术已成为研究冶金反应器内多相流场、优化工艺参数和揭示强化机理的重要工具。通过建立合理的多相流模型、湍流模型和传热传质模型,并结合化学反应动力学和电磁场等物理场,可以准确捕捉高炉、转炉、电炉、连铸中间包等典型冶金反应器内部的速度场、温度场和浓度场分布特征,揭示流动与反应之间的内在联系。随着计算能力的提升和物理模型的完善,数值模拟将在冶金过程绿色化、智能化发展中发挥更加重要的作用。

### 参考文献

- [1] 陶鑫.典型冶金反应器钢渣界面下速度分布及夹杂物去除原理[D].太原理工大学,2025.
- [2] 米涛.基于机器学习的冶金反应器内气泡行为检测与预测[D].辽宁科技大学,2024.
- [3] 尚小标,李广超,白永珍,等.微波冶金反应器加热效率与均匀性优化[J].微波学报,2023,39(03):89-96.
- [4] 沈蔡龙,贾炎,陈彦臻,等.化工技术在生物冶金过程强化中的研究进展[J].过程工程学报,2022,22(10):1349-1359.

# Research on Safety Management System Optimization for Confined Space Operations in Industrial and Trade Enterprises

Yufeng Hu Tangxin Zhao Zigang An

COFCO Heilongjiang Brewing Co., Ltd., Zhaodong, Heilongjiang, 151100, China

## Abstract

Safety management in confined space operations within industrial and commercial enterprises has become a critical yet challenging domain due to enclosed working environments, compounded hazards, and complex operational processes that exhibit sudden occurrence and high injury potential. This study systematically examines systemic weaknesses in confined space safety management systems regarding regulatory compliance, risk identification, and on-site control measures, while proposing optimization pathways for framework development. Through analysis of hazardous factors and accident causation mechanisms in confined spaces, the research integrates key elements including risk classification control, operational approval procedures, and safety technology support to establish a comprehensive management system covering pre-event prevention, in-process control, and post-event evaluation. By incorporating standardized operational protocols, real-time monitoring systems, and multi-department coordination mechanisms, the study facilitates a shift from reactive response to proactive prevention in safety management, providing systematic support for enhancing safety standards and operational efficiency in confined space operations across industrial and commercial enterprises.

## Keywords

confined space operation; safety management system; risk control; operation approval; emergency management

## 工贸企业有限空间作业安全管理体系优化研究

胡玉风 赵唐鑫 安子刚

中粮黑龙江酿酒有限公司, 中国·黑龙江肇东 151100

## 摘要

工贸企业有限空间作业因作业环境封闭、危险因素叠加及作业过程复杂,安全风险具有突发性与高致害性特征,已成为安全生产管理中的重点与难点领域。围绕有限空间作业安全管理体系在制度执行、风险辨识及现场管控等方面存在的薄弱环节,对体系构建与优化路径进行系统梳理。在分析有限空间危险因素与事故致因机制的基础上,整合风险分级管控、作业审批流程及安全技术支撑等关键要素,构建覆盖事前预防、事中控制与事后评估的全过程管理体系。同时,结合标准化作业流程、信息化动态监管及多部门协同机制,推动安全管理由被动应对向主动防控转变,为提升工贸企业有限空间作业安全水平与管理效能提供系统支撑。

## 关键词

有限空间作业;安全管理体系;风险管控;作业审批;应急管理

## 1 引言

工贸企业在生产运行过程中涉及储罐、管道、地下空间及设备内部等多类型有限空间作业场景,受通风条件受限、有毒有害气体聚集及作业环境不确定性等因素影响,安全风险呈现出高度集中与动态变化特征。近年来相关事故频发,暴露出安全管理制度落实不到位、风险辨识不充分及现场监控手段滞后等现实问题。随着安全生产监管要求不断提高,传统依赖经验的管理方式已难以适应复杂作业环境下的

风险控制需求。构建系统化、标准化与动态化相结合的安全管理体系,强化全过程管控与多要素协同,成为提升有限空间作业安全水平的重要方向。通过对管理体系结构、运行机制及优化路径的深入分析,有助于推动安全管理模式转型,增强风险预防与应急处置能力,实现作业安全的持续稳定。

## 2 工贸企业有限空间作业安全管理体系的内涵界定与风险特征分析

### 2.1 有限空间作业的类型划分与作业场景界定

工贸企业有限空间作业涵盖储罐、反应釜、地下管廊、污水处理池及设备内部检修空间等多种类型,依据空间结构与通风条件可划分为密闭型、半密闭型与开放受限型三类。

【作者简介】安子刚,男,中国黑龙江肇东人,本科,中级职称,从事工贸企业有限空间作业安全管理体系优化研究。

密闭空间氧含量常低于 19.5%，有毒气体浓度波动范围在 10ppm 至 200ppm 之间，半密闭空间受外界环境影响较大，气体扩散速度约为 0.3m/s 至 0.8m/s，开放受限空间则存在局部气体滞留与通风盲区。作业场景涉及清罐、检修、动火、涂装及清淤等多工序叠加状态，作业时间通常集中在 2h 至 8h，人员进入频次可达每日 3 次以上。不同空间类型在结构封闭性、气体交换效率及人员作业强度方面存在显著差异，决定了风险暴露程度与管控重点呈现出明显分层特征。

## 2.2 有限空间典型危险因素与事故致因机理分析

有限空间危险因素以缺氧、有毒有害气体及爆炸性气体为主，其中氧含量低于 18% 时作业人员易出现意识障碍，低于 16% 将产生严重生命危险。硫化氢浓度达到 10ppm 可引发嗅觉疲劳，超过 100ppm 存在急性中毒风险，一氧化碳浓度在 50ppm 以上持续暴露 30min 即可造成中毒反应。可燃气体浓度达到爆炸下限的 10% 即进入危险区间，当达到 LEL 的 50% 时爆炸概率显著提升。事故致因机理表现为多因素耦合作用，包括通风失效、检测滞后及违规操作等因素叠加，约 70% 以上事故发生于未执行气体检测或检测频次不足的情形，作业人员盲目进入与救援过程中的二次伤害比例接近 40%，呈现出链式反应特征<sup>[1]</sup>。

## 2.3 工贸企业有限空间作业安全管理的现状问题与薄弱环节

当前工贸企业在有限空间作业管理中存在制度执行与现场控制脱节现象，约 60% 企业虽建立管理制度但执行偏差明显。风险辨识多停留在静态识别层面，动态评估频率低于每班 1 次的情况较为普遍，导致风险变化未能及时掌握。作业审批流程流于形式，约 45% 作业未严格落实审批签字与现场确认，存在代签及简化程序现象。气体检测设备配置不足或精度偏低，部分企业检测误差达到  $\pm 5%$  以上，影响判断准确性。培训覆盖率虽达到 85%，但实操能力达标比例不足 70%，现场应急处置反应时间普遍超过 5min，暴露出应急联动机制薄弱与响应效率不足的问题。

## 3 工贸企业有限空间作业安全管理体系的构建要素与结构框架

### 3.1 安全管理制度体系与责任分工机制构建

安全管理制度体系需覆盖作业许可、风险评估、监测检测及应急处置等核心环节，制度条款细化至岗位职责与操作标准，责任划分精度达到岗位级与工序级。企业应设置专职安全管理人员比例不低于从业人员总数的 3%，关键岗位如监护人员与检测人员持证率需达到 100%。责任分工采用“管理层—执行层—监督层”三级结构，形成闭环责任链条，确保每项作业均明确责任主体与监督节点。制度执行考核频次控制在每月 2 次以上，违规行为处罚与整改完成率需达到 95% 以上，通过量化考核指标强化制度刚性约束，使安全

管理由经验依赖向制度驱动转变<sup>[2]</sup>。

### 3.2 风险辨识评估与分级管控体系设计

风险辨识采用作业前评估与动态监测相结合方式，气体检测频次控制在每 30min 一次，特殊作业阶段缩短至 15min 一次。风险分级依据气体浓度、作业时间及作业类型等因素进行量化评定，将风险划分为 I 级至 IV 级，其中 III 级及以上风险需实施重点监控与审批升级。评估模型可采用风险值  $R = \text{可能性 } P \times \text{后果 } C$  的计算方式，当 R 值超过 20 时需暂停作业并实施整改措施。现场监测设备精度控制在  $\pm 2%$  以内，报警阈值设置为氧含量 19.5%、硫化氢 10ppm 及可燃气体 LEL 的 10%。通过动态数据采集与实时分析，实现风险由静态识别向动态控制转变，提高风险预警的及时性与准确性。

### 3.3 作业审批流程与作业全过程管控机制优化

作业审批流程设置申请、审核、批准与现场确认四个关键节点，审批时间控制在 30min 以内，确保流程高效运行。作业前需完成气体检测、通风置换及安全交底，通风时间不少于 20min，换气次数达到 5 次以上，确保环境达标。全过程管控涵盖进入前、作业中与撤离后三个阶段，作业中监护人员与作业人员比例不低于 1:3，实时监测数据上传频率达到每 5min 一次。作业时长超过 2h 需进行轮换作业，单人连续作业时间控制在 60min 以内。通过流程标准化与过程节点量化控制，使审批与现场执行形成有效衔接，降低人为操作偏差与管理漏洞风险。

## 4 工贸企业有限空间作业安全管理体系的关键运行机制

### 4.1 安全培训教育与作业人员能力保障机制

安全培训教育需覆盖作业认知、风险识别、设备操作及应急处置等核心内容，培训周期以季度为单位，年度培训总时长控制在 40h 以上，关键岗位人员专项培训不少于 24h。培训对象分为作业人员、监护人员及管理人员三类，考核通过率需达到 90% 以上，实操考核比例不低于 60%。培训内容中气体检测仪操作误差需控制在  $\pm 2%$  范围内，防护设备穿戴规范合格率达到 100%。模拟演练频次控制在每季度 2 次以上，应急响应时间需压缩至 3min 以内。通过建立培训档案与能力评估体系，对人员能力进行分级管理，I 级人员可独立作业比例控制在 70% 以上，II 级人员需在监护下作业。能力保障机制与绩效考核挂钩，违章操作发生率需控制在 2% 以下，通过持续培训与能力评估提升作业人员风险识别与应急处置能力<sup>[3]</sup>。

### 4.2 现场监测预警与应急处置联动机制

现场监测系统以多参数气体检测为核心，检测指标包括氧含量、硫化氢、一氧化碳及可燃气体浓度，数据采集频率设定为每 10s 一次，实时传输延迟控制在 2s 以内。报警

阈值设定为氧含量 19.5%、硫化氢 10ppm、一氧化碳 50ppm 及 LEL 的 10%，当监测值达到阈值的 80% 即触发预警提示。监测设备布点密度控制在每 20 m<sup>2</sup> 至少 1 个监测点，关键区域布点密度提升至每 10 m<sup>2</sup> 1 个。应急处置联动机制涵盖报警响应、人员撤离及救援实施等环节，报警触发后 30s 内完成现场广播提示，1min 内完成作业人员撤离确认。应急救援队伍配置比例不低于在岗人员的 5%，救援装备到位时间控制在 2min 以内。多部门联动机制通过通信系统实现信息同步，指挥决策响应时间控制在 60s 以内，确保监测预警与应急处置形成高效联动体系。

#### 4.3 设备设施配置与安全技术支撑体系

设备设施配置以气体检测、通风换气及个人防护为核心，气体检测仪配置比例达到每 3 人 1 台，检测精度控制在 ±2% 以内。通风设备换气能力需满足每小时换气次数不少于 6 次，局部强制通风风速控制在 0.5m/s 至 1.2m/s 之间。个人防护装备包括空气呼吸器、防毒面具及安全绳索等，空气呼吸器使用时间不少于 30min，防护装备完好率需达到 98% 以上。智能检测设备与数据分析系统联动，形成风险预警与设备管理一体化模式，设备使用率稳定在 85% 以上，通过完善配置与技术支撑提升有限空间作业安全保障能力。

### 5 工贸企业有限空间作业安全管理体的优化路径与实施策略

#### 5.1 标准化作业流程优化与执行强化路径

标准化作业流程需覆盖作业申请、风险评估、审批确认、现场执行及作业结束等全过程环节，流程节点不少于 6 个，关键控制节点设置比例达到 80% 以上。作业前准备时间控制在 30min 至 60min 之间，气体检测合格率需达到 100%，通风换气次数不少于 5 次。作业中监护与巡检频次控制在每 15min 一次，数据记录完整率达到 98% 以上。执行强化通过现场检查与视频抽查相结合，抽查覆盖率不低于 90%，违规操作纠正率需达到 95% 以上。流程执行偏差控制在 5% 以内，通过细化流程节点与强化执行监督，实现作业全过程规范化与标准化运行<sup>[4]</sup>。

#### 5.2 信息化支撑下的动态监管与数据驱动机制

信息化监管平台集成作业审批、气体监测、人员定位及设备管理等功能模块，数据更新频率达到实时级，平台处理能力支持每秒 1000 条数据以上。人员定位精度控制在 1m 以内，实时监测覆盖率达到 100%。数据分析结果用于优化作业流程与风险控制策略，使风险发生概率降低 20% 以上，通过信息化手段实现安全管理的精细化与智能化运行。

#### 5.3 多部门协同与安全文化建设推进策略

多部门协同机制涵盖安全管理、生产运行及设备维护等部门，协同响应时间控制在 2min 以内，信息共享准确率达到 98% 以上。联合检查频次控制在每月 2 次以上，隐患整改完成率达到 95% 以上。安全文化建设通过培训、宣传及激励机制相结合，员工安全参与率达到 90% 以上，安全建议采纳率达到 60% 以上。安全绩效与薪酬挂钩比例控制在 20% 至 30%，激励员工主动参与安全管理。通过协同机制与文化建设的融合推进，使安全管理由被动执行向主动参与转变，形成稳定高效的安全管理运行环境。

#### 5.4 基于风险分级的动态优化与闭环改进机制

基于风险分级的动态优化机制以全过程数据采集与持续评估为核心，构建覆盖识别、评估、控制及反馈的闭环运行模式。闭环改进依托隐患排查与整改跟踪系统，隐患整改完成时限控制在 24h 至 72h 之间，整改复核通过率达到 95% 以上。数据反馈机制通过月度分析与季度评估相结合，对事故隐患发生频率、整改效率及风险变化趋势进行量化分析，使重复隐患发生率下降 20% 以上。动态优化过程与绩效考核联动，风险控制达标率需稳定在 90% 以上，通过持续改进实现安全管理体的自我完善与运行效率提升<sup>[5]</sup>。

### 6 结语

工贸企业有限空间作业安全管理体的优化是实现安全生产由被动防控向主动治理转变的重要路径。围绕制度建设、风险管控、技术支撑与运行机制等关键环节，通过标准化流程与数据化手段的协同应用，可有效降低作业风险水平并提升管理精度。实践表明，强化全过程控制与多要素联动，有助于缩短风险响应时间，提升隐患治理效率。在持续完善评价与改进机制的基础上，推动安全管理体动态优化与迭代升级，为工贸企业安全稳定运行提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1] 罗航.工贸企业有限空间作业安全多维度保障体系构建与优化[J].现代职业安全,2025,(06):62-65.
- [2] 李季硕,许开立,姚锡文,李梦佳.工贸企业有限空间作业事故风险分级研究[J].中国安全科学学报,2025,35(06):98-104.
- [3] 杨娟,王彦,王良旺.工贸企业有限空间作业典型问题分析[J].电气防爆,2025,(02):43-46.
- [4] 王建龙,任爱斌,江卫华,李龙斌,陈永鑫,左明芳.探索工贸企业有限空间作业安全培训课程体系构建[J].劳动保护,2025,(02):81-83.
- [5] 杨娟,王彦,王良旺.工贸企业有限空间作业典型问题分析[J].电气防爆,2024,(06):30-33.

# Research on Quality Management and Fine Control in the Entire Process of Instrument Manufacturing Engineering

Mingjie Li

Zibo Beiyue Equipment Protection Engineering Co., Ltd., Hainan Branch, Danzhou, Hainan, 578101, China

## Abstract

The comprehensive quality management and refined control throughout the instrument engineering construction process are crucial for ensuring the smooth implementation of engineering projects. With the advancement of engineering technology, the requirements for construction quality management have become increasingly higher, and traditional management models can no longer meet the demands for refined control. This paper aims to explore the current status and issues of instrument engineering construction quality management, analyze the theoretical foundation of comprehensive quality control, and propose optimization plans by integrating the application of refined control. Through the construction and implementation of the quality management system and the analysis of refined control strategies, the paper seeks to enhance the quality control level during the construction process, reduce potential quality risks, and ensure the high-quality delivery of the project. Additionally, this paper discusses the application of information technology in quality management and suggests optimizing management processes through technical means to achieve refined control throughout the entire process.

## Keywords

Instrumentation Engineering; Construction Quality Management; Precision Control

# 仪表工程施工全过程质量管理与精细化控制研究

李明杰

淄博北岳设备防护工程有限公司海南分公司, 中国·海南 儋州 578101

## 摘要

仪表工程施工全过程质量管理与精细化控制是确保工程项目顺利实施的重要保障。随着工程技术的发展, 施工质量管理的要求越来越高, 传统的管理模式已不能满足精细化控制的需求。本文旨在探讨仪表工程施工质量管理的现状与问题, 分析全过程质量控制的理论基础, 并结合精细化控制的应用, 提出优化方案。通过对质量管理体系的构建、实施及精细化控制策略的分析, 旨在提高施工过程中的质量控制水平, 减少施工过程中的质量隐患, 确保工程项目的高质量交付。此外, 本文还探讨了信息化技术在质量管理中的应用, 提出通过技术手段优化管理流程, 实现全过程的精细化控制。

## 关键词

仪表工程; 施工质量管理; 精细化控制

## 1 引言

随着现代化工程建设的不断发展, 仪表工程作为一项技术性较强的施工项目, 其质量管理显得尤为重要。在仪表工程的施工过程中, 传统的质量管理方法往往偏重于单一环节的控制, 而忽视了整个施工过程中的协同效应和系统性要求。随着行业需求的提升, 施工质量管理必须从注重局部的监控转向全过程的系统管理, 精细化控制成为提升工程质量的重要途径。全过程质量管理强调在设计、采购、施工、调试等每个环节中实现对质量的全程管控, 确保每一项工作都能够在控制范围内进行。精细化控制则是通过细化各项管

理任务, 优化施工过程中的每个操作, 降低人为因素带来的质量风险。此外, 信息化技术的应用为质量管理提供了更为精准的数据支持, 通过数字化手段提高管理的透明度和精确性。

## 2 仪表工程施工质量管理现状分析

### 2.1 仪表工程施工质量管理的现状

近年来, 仪表工程施工的质量管理逐渐得到重视, 许多企业开始引入现代化管理方法, 尤其是通过标准化和规范化管理来确保施工质量。然而, 部分企业的质量管理体系仍存在一定缺陷, 许多项目仍依赖传统的管理方式, 导致质量控制效果不理想。在实际施工中, 质量管理的执行力度不均, 部分施工环节仍存在监督不到位的情况, 导致项目出现质量问题。此外, 尽管工程质量管理逐步规范, 但在一些复杂的

【作者简介】李明杰(1992—), 男, 中国海南人, 本科, 助理工程师, 从事仪表工程研究。

项目中，缺乏系统性和全过程的质量保障措施，施工中的质量控制仍停留在局部阶段。随着市场对施工质量要求的提升，仪表工程施工质量管理面临着更高的挑战。

## 2.2 仪表工程施工中存在的质量管理问题

目前，仪表工程施工中存在的质量管理问题较为突出。首先，施工人员的质量意识普遍不足，部分操作人员对质量管理的认识不深刻，导致施工过程中的管理松散。其次，质量控制的环节不够全面，许多项目仅在施工后期进行质量检查，忽视了施工前期和过程中的质量管理。同时，项目管理的管理能力和技术水平参差不齐，一些项目缺乏专业的质量管理人员，影响了质量管理的效果。另外，质量检测手段仍较为传统，缺乏先进的检测设备和技术支持，难以有效发现潜在的质量问题，导致一些隐患未能及时消除。这些问题使得仪表工程施工过程中难以实现有效的质量保障，亟待解决。

## 3 仪表工程施工全过程质量控制理论

### 3.1 全过程质量管理理论概述

全过程质量管理理论强调质量控制应贯穿项目的整个生命周期，从项目启动到竣工交付的每一个环节都应进行有效的质量管控。该理论认为，质量不仅仅是最终结果的体现，更是过程的反映。在仪表工程施工中，通过对施工前、施工中及施工后的全面监控，能够及时发现并纠正质量问题，确保工程质量稳定达标。全过程质量管理要求各部门和环节之间保持信息畅通、协同合作，并在每个阶段设立质量管理目标和标准。通过引入精细化管理理念，将质量控制的重点从单一环节的检查转向整个项目的系统管理，最大化降低潜在的质量风险，确保工程的顺利进行<sup>[1]</sup>。

### 3.2 仪表工程施工质量控制的基本原则

仪表工程施工质量控制的基本原则主要包括预防为主、全过程控制和持续改进等方面。预防为主原则强调在施工过程中，通过提前识别潜在问题并采取相应的预防措施，避免质量问题的发生。全过程控制原则要求在项目的各个阶段都进行质量控制，确保从设计、采购、施工到竣工交付的每个环节都能够达到质量标准。此外，持续改进原则要求在质量管理的过程中，及时总结经验，发现不足并进行改进。通过建立有效的反馈机制，不断优化施工质量管理体系，使质量控制能够不断适应新的施工要求和技术进步，确保项目始终处于最佳质量状态。

### 3.3 仪表工程质量控制的核心要素

仪表工程施工质量控制的核心要素包括人员、设备、材料和管理四个方面。首先，人员素质的高低直接影响施工质量，施工人员需经过严格的培训，具备相关专业知识和技能。其次，设备的选择和维护也是影响质量的关键因素，先进、稳定的施工设备能够提高施工效率和质量。此外，材料的质量对仪表工程施工的质量也有重要影响，材料的采购与

检验需要严格把关，确保所有材料符合标准要求。

## 4 仪表工程施工质量管理体系的构建

### 4.1 质量管理体系的设计与框架

仪表工程施工质量管理体系的设计与框架应包括质量目标、质量标准、质量保证措施和质量控制手段等方面。在设计体系时，应根据项目的具体情况，结合工程的规模、复杂度和技术要求，确定适合的质量控制模式。质量目标的设定应明确具体的施工质量要求，确保各项工作有明确的标准和目标。质量标准则应依据国家法规、行业标准和企业规范，确保施工过程中的每一个环节都能达到相应的质量要求<sup>[2]</sup>。质量保证措施包括对人员、设备、材料、工艺等方面的保障，以确保施工质量始终处于可控状态。

### 4.2 质量管理体系的实施与监督

质量管理体系的实施应确保各项质量管理措施能够在施工过程中得到严格执行。施工单位应明确各部门和人员的职责，确保质量控制的工作不被遗漏。在实施过程中，需要制定详细的施工质量控制计划，确保每一个环节都能按照质量标准进行操作。同时，质量管理体系的监督机制至关重要。项目管理人员应定期检查施工质量，对发现的质量问题进行及时处理，并采取相应的纠正措施。此外，质量监督员的独立性和权威性应得到保障，确保其能够客观公正地对施工过程进行全面监督。

### 4.3 质量管理体系的优化路径

质量管理体系的优化应从提升管理人员的素质、优化管理流程、引入先进的技术手段等多个方面进行改进。首先，企业应加强对质量管理人员的培训，提升其专业素养和管理能力。其次，优化管理流程，减少冗余环节，提高工作效率，确保每一项质量控制措施能够精准到位。再次，信息化技术的应用是优化质量管理体系的重要手段，通过引入数字化管理平台，实时监控工程进度和质量情况，确保施工过程中的各项工作得到有效控制。最后，企业应鼓励创新，不断总结施工过程中遇到的质量管理问题，不断完善质量管理体系，提升施工质量。

## 5 精细化控制在仪表工程施工中的应用

### 5.1 精细化管理的概念与作用

精细化管理是一种追求精确、高效和系统化管理模式，它注重对施工过程中的每一个环节进行细致、深入的分析与控制。通过对每个细节的优化和调整，实现资源的最大化利用，降低工程成本，提高施工质量。在仪表工程施工中，精细化管理能够确保各个环节的质量可控、过程可追溯，并且能够及时发现和解决施工中的潜在问题。精细化管理不仅提高了施工效率，还增强了团队的协调性和执行力。通过精确的计划和控制，能够实现高质量、低成本的施工目标，有效提升整体项目的质量水平。因此，精细化管理在仪表工程施工中的作用至关重要，它能够提升企业的竞争力和市场声

誉,确保项目的顺利完成<sup>[3]</sup>。

## 5.2 精细化控制的具体措施

精细化控制在仪表工程施工中主要体现在对施工过程的每个细节的精细化管理。具体措施包括制定详细的施工计划,确保每个环节都按时、高质量完成;建立严格的质量检查和验收机制,确保施工质量不打折扣;加强施工人员的培训,提高他们的技能水平,确保他们具备执行精细化管理的能力;引入先进的施工设备和技术,提高施工的精准度和效率;此外,实施项目全过程的监督和跟踪,及时发现问题并采取相应的改进措施。这些措施能够提高施工效率,还能确保工程质量达到预期目标,减少质量问题的发生,保证项目能够按时交付并符合客户的要求。

## 5.3 精细化控制的实践案例分析

在某大型仪表工程项目中,精细化控制的应用取得了显著成效。项目团队在施工前期进行了详细的规划,并细化了每个施工环节的任务与标准,确保每一项工作都有明确的时间节点和质量要求。在施工过程中,项目管理人员实施了全过程的质量监控,并对施工质量进行严格的检查和验收,确保了每个环节都能按照标准要求完成。此外,项目还引入了先进的质量检测设备,实时监控施工质量,及时发现问题并进行整改。通过这些精细化控制措施,该项目顺利按时交付,且施工质量远超预期,得到了客户的高度评价。该案例证明了精细化控制在仪表工程施工中的有效性和重要性。

# 6 仪表工程施工质量管理与精细化控制的提升策略

## 6.1 加强质量控制意识与责任

提升质量控制意识与责任是提高施工质量管理水平的重要策略。企业应加强对全体施工人员质量意识的培养,确保每个成员都深刻认识到质量管理的重要性,并主动承担起自己在质量管理中的责任。通过定期组织质量培训和开展质量讲座,提高员工的质量管理技能和意识,培养团队的责任感。同时,项目经理和质量负责人要起到表率作用,对施工质量进行严格把关,并制定明确的质量目标和考核标准,确保每个环节都能落实质量控制要求。加强质量控制意识能够增强团队凝聚力,提升施工质量,从而保证项目顺利完成并满足客户需求。

## 6.2 提升施工人员的技能与素质

提升施工人员的技能和素质对于精细化控制的实施至

关重要。企业应根据不同岗位的需求,制定个性化的培训计划,定期对施工人员进行专业技能和操作规程的培训,提高其实际操作能力和应变能力。通过引进新技术和新设备,增强员工的技术适应能力,使他们能够熟练操作现代化设备和技术,提高施工的精确度和效率。此外,企业还应注重施工人员的综合素质培养,提升他们的团队协作能力和沟通能力,确保在施工过程中能够高效配合和协作。

## 6.3 运用信息化手段提升质量管理水平

信息化手段在现代工程施工中的应用已成为提高质量管理水平的重要途径。通过信息化平台,施工过程中的每个环节都能够实时监控,确保各项工作按照既定计划进行。利用大数据分析和云计算技术,可以对施工过程中的质量数据进行统计分析,及时发现潜在的质量问题,并进行针对性改进。此外,通过信息化手段,可以实现施工进度、材料采购、人员调配等方面的实时跟踪和动态管理,提升项目管理的透明度和精确性。运用信息化技术,不仅能够提高质量管理的效率和精度,还能优化资源配置,减少人力和时间的浪费,提高整体项目的质量水平。

# 7 结语

通过对仪表工程施工全过程质量管理与精细化控制的研究,本文阐明了精细化管理在提升施工质量、控制成本和提高效率方面的重要性。精细化控制能够确保施工每个环节的高效与精确,从而保障项目的整体质量与安全。结合全过程质量管理理论和具体措施的应用,工程项目可以更好地应对施工中的复杂性与不确定性,确保项目按时交付并满足预期目标。提升质量管理意识、加强施工人员技能培训、引入信息化技术等策略,是实现精细化管理的重要途径。未来,随着技术的不断发展,精细化控制将在仪表工程施工中发挥更加关键的作用,推动行业向更高标准迈进。

## 参考文献

- [1] 赵玉龙.工业自动化仪表工程施工管理研究[J].工程技术研究,2025,10(13):149-151.
- [2] 赵安堂,谢方元.仪表自动化工程施工质量管理与控制策略研究[A].工程技术与新能源经济学术研讨会论文集[C].江西省工程师联合会:2025:928-932.
- [3] 李项磊.电力工程施工技术关键点和强化措施研究[A].全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(七)[C].中国电力设备管理协会:2024:247-249.

# Development and Prospects of Sleep-Energy Health Management System in High-altitude Hypoxic Environment

Xinong Wang

Yunnan Medical and Health Vocational College, Kunming, Yunnan, 650300, China

## Abstract

In high-altitude hypoxic environments, sleep disorders and energy deficiency remain major challenges constraining health standards and development capabilities among plateau residents. Existing health products suffer from poor adaptability, high costs, and lack of integration with local resources. This study utilizes a vocational college student innovation and entrepreneurship project as a platform to develop a precision health management system for sleep and energy regulation tailored for grassroots plateau communities. By leveraging the unique environmental characteristics of high-altitude regions, the solution incorporates a dual hardware linkage system comprising portable monitoring terminals and home-based intervention devices. Concurrently, the project plans to develop complementary health consumables using indigenous medicinal and edible ingredients from Yunnan's plateau areas, exploring industrialization pathways involving enterprises, cooperatives, and farmers. Based on an industry-education integration model, the initiative highlights vocational students' practical skills and promotes project updates through innovation competitions. Its objective is to provide cost-effective, inclusive health management solutions for plateau regions while supporting rural revitalization through collaboration with local specialty industries. The research only outlines project design concepts and development plans without including real-world implementation data, offering practical references for innovative development in plateau health industries.

## Keywords

Plateau Health Management; Intelligent Health Devices; Local Raw Materials; Innovation and Entrepreneurship Practice; Rural Revitalization

## 高原低氧环境下睡眠－精力健康管理系统的研发与展望

王曦依

云南医药健康职业学院，中国·云南昆明 650300

## 摘要

在高原低氧的环境当中，睡眠障碍以及精力不足属于制约高原地区民众健康水准与发展能力的主要痛点之一。目前同类健康产品存在适配性欠佳、成本较高、未和本土资源相结合的缺陷。本研究将专科生双创项目当作载体，规划设计出一套针对高原基层的睡眠、精力精确健康管理系统，围绕高原环境的适配特性，搭建便携监测终端、家用干预终端的双硬件联动方案，同时规划依靠云南高原本土药食同源原料来开发配套健康耗材，探寻企业、合作社、农户的产业化途径。该项目基于产教融合的模式，突显专科学子实操技能方面的长处，基于双创竞赛推动项目更新，其目的在于为高原区域提供低成本、普惠性质的健康管理办法，并且联合本土特色产业来帮助乡村振兴。研究仅说明了项目设计的思路以及研发规划，未包含实测落地的相关数据，能够为高原健康产业的创新性发展提供实践方面的参考。

## 关键词

高原健康管理；智能健康设备；本土原料；双创实践；乡村振兴

## 1 引言

高原区域特有的低氧、低温状况，对人体的生理功能造成明显影响，其中睡眠方面的障碍是高原人群较为普遍的健康难题之一。已有的研究显示，急性或者慢性的低氧暴露会干扰人体的睡眠方案，造成深度睡眠所占比例下降、睡眠显示碎片化，同时导致 5-羟色胺等助眠物质的信号传导受阻，进一步引发入睡困难、白天精力欠佳等状况 [1,7]。

该问题不但影响长期居住此地群众的生活品质，还对进入高原的务工者、建设人员的工作效能与健康安全形成威胁 [3]。

当下面向高原健康管理的智能设备日益增多，不过大部分产品存在明显的适配性欠佳问题。一方面常见的智能可穿戴装置大多是为平原人群所设计，在低氧环境中传感器的数据偏差较为明显，并且续航能力难以符合高原基层地区的电力配套要求 [2]；另一方面现有的干预类产品大多依靠化学助眠成分或者大型氧疗设备，成本相对较高，难以在基层民众中广泛推广，而且没有充分发掘高原本土的特色健康资源，无法实现产业的联动式发展。

【作者简介】王曦依（2005—），男，从事高原健康管理、智能设备研发研究。

在这样的背景之下，身为专科生项目的负责人，笔者主导开展该双创项目的研发计划，目的是凭借在校所学的实践技能，结合高原地区的实际情况，研制一套低成本、高适配度的睡眠、精力精准健康管理系统。该项目将普惠性健康服务作为核心定位，并且与本土特色原料产业开展联动，探寻健康管理和乡村振兴的融合途径，为高原地区的产业创新和健康普惠提供全新的实践导向。

## 2 系统整体研发设计思路

本体系以需求导向、闭环管理、本土适配为主要设计准则，意在搭建一套包括生理监测、主动干预、健康管理的完备闭环，化解当下产品功能单一、适配性欠佳的难题。

在设计准则方面，项目着重确保产品具备低成本和高适配特性，不同于高端商用健康器械，该系统的主要目标是使高原基层的普通民众能够承受其费用。所以在硬件挑选、耗材研发时，均优先采用成熟且低成本的策略，同时针对高原低氧、温差大等环境特征开展专项的适配性改良。

从整体方案角度来看，项目规划建立双硬件终端+配套健康耗材+轻量化管理平台的总体方案。其中两个硬件终端分别担负生理监测和主动干预的作用，基于蓝牙模块实现数据的相互联通，构成从监测到干预的自动衔接；配套的健康耗材依靠本土原料进行开发，为干预终端提供天然、适配的助眠干预办法；轻量化管理平台以微信小程序的方式实现，不用用户下载安装，就能实现健康数据的查看以及个性化的健康建议推送，降低用户的使用难度。

基于这一方案规划，系统可实现从对用户睡眠状况的实时监控，到根据监控成果自动开启助眠干预，再到为用户提供长期的健康管理指引的全流程服务，为高原群体的睡眠、精力管控提供完备的解决办法。

## 3 高原适配型睡眠监测干预终端设计

本部分规划的高原适用型睡眠监测干预终端，为系统双硬件方案的主要联动单元，意在基于成熟量产模块的适配性整合，处理高原环境中的监测误差与干预欠缺问题，所有设计都根据专科生能够掌握的实操技能实施，不存在复杂的前沿技术研发。

在传感器模块的设计中，项目采用四模态集成传感器的策略，分别是 MAX30102 光电血氧传感器、三轴加速度传感器、微型气压传感器以及温湿度传感器，这四类传感器都是市场上已成熟的量产模块，采购费用不高，并且不需要复杂的定制化开发步骤，只需基于标准化的电路焊接就能实现集成，完全符合专科生在校所学的硬件组装调试能力。

针对高原低氧环境监测存在的偏差状况，项目拟定预校准的设计理念：基于气压传感器所获取的实时海拔信息，在终端控制程序中预先设定不同海拔梯度对应的血氧监测校准参数，通过软件方面的参数动态调节，来弥补低氧分压时的监测误差，不必对传感器硬件加以改造，实现简易化的

环境适配。

在干预模块的设计方面，项目规划纯物理动态的干预策略，基于微型静音风机和柔性温感组件，根据所监测到的用户睡眠状况，动态调控助眠枕的草本耗材气流缓释速率以及枕体表面温度，实现无化学添加的动态干预，确保干预的安全性和长期适用性。

整个终端设计都以低成本、轻量化作为核心，各个模块的组装调试都属于高职电子实训的常见内容，可有效保证项目的可落地性，符合基层群众的使用需求。两个终端基于低功耗蓝牙模块实现数据的相互连通，无需繁杂的网络设定，便能够实现数据的即时传输与功能的协同，确保系统在基层网络状况欠佳的区域也可正常运用。

## 4 高原本土健康耗材的研发与产业化思路

为了替换传统的化学助眠成分，同时发掘本土资源的产业价值，项目计划基于云南高原本土的药食同源材料，研制配套的健康耗材，并且探寻产业化发展途径。

### 4.1 本土药食同源原料的筛选与配伍设计

在原材料的挑选方面，项目策划选取云南高原本地的红景天、高原艾草、天麻这三种药食同源的材料，已有研究显示，红景天拥有天然的抗缺氧、抗疲劳效果，能够有效减轻低氧环境给人体带来的影响；高原艾草和天麻则具有镇静、助眠的功能，能够提高用户的睡眠质量 [6]。这三类原料都为云南高原地带的特色物产，拥有充裕的原料供应根基，并且其功效和高原人群的健康需求非常符合。

在配伍的研发进程中，项目规划把三种原料根据特定比例开展复方配伍，运用低温萃取的技术，提取原料里的有效成分，接着制成标准化的助眠香薰片和药枕芯，当作干预终端的配套耗材。不同于传统助眠用品，该耗材完全依靠天然草本成分，没有化学添加，可满足长期使用的要求，并且其成分更符合高原人群的健康需要。

### 4.2 耗材标准化加工与产业化路径规划

在产业化的进程中，项目策划把农户所种植的初级农产品，基于标准化的清洗、低温萃取、压制成型等工艺，转变为具备高附加值的健康耗材，让本土农产品的附加值提高 3-5 倍，化解传统农产品附加值低这一难题。

同时该项目规划打造企业、合作社、农户的订单式种植模式，经由和本地的农业合作社开展合作，跟农户签订长期性的原料采购订单，给农户提供稳定的销售途径，并且为农户提供种植技术方面的指导，引领农户种植标准化的特色药材。基于此模式，可把项目的耗材原料需求，转变为农户的增收途径，带动当地农户依靠特色种植实现增收目标，推动乡村产业的进步。

## 5 专科生双创实践的项目推进路径

作为专科层次学生的双创项目，此项目充分施展技能型人才的实践长处，凭借产教融合的方式，谋划项目的推进

与迭代轨迹。

### 5.1 技能型人才的双创实践优势发挥

专科教育的主要优势是专注于实操技能的培育，本项目的团队成员都为不同专业的专科学生，凭借在校所学的电子装配、硬件调试、药材加工等实操能力，能够有力地弥补纯理论研发在落地性方面的欠缺。在硬件的初始开发进程中，团队人员凭借电子专业的实际操作能力，能够自主完成硬件的焊接、调试以及原型的打造；在耗材的研究开发中，药学专业的人员则能够依靠所学的药材加工理论，完成原料的处置与小试的研发，确保项目的可实施性。

在团队的任务划分上，该项目根据硬件研制、耗材研究、市场宣传的方向来开展分工，充分施展不同专业成员的技能长处，建立起跨专业的合作模式，确保项目各个板块的推进效能。

### 5.2 产教融合下的项目孵化与迭代规划

该项目基于学校的产教融合平台，规划出项目的孵化途径。首先基于学校的电子实训基地以及双创孵化中心，团队可免费运用实训设备和孵化场地，进行硬件原型的研制与耗材的小试，解决初创项目场地和设备短缺的问题[4]。

其次项目规划基于双创赛事推动项目的迭代完善，通过参与互联网+、挑战杯等双创赛事，得到专家的指导建议，持续优化项目的设计规划，同时凭借赛事获取项目的孵化资金与资源，为项目的后续研发提供支持。此模式亦是当下高职双创教育的主要实践途径，可有力促进学生项目的落实与成长。

## 6 应用展望与政策适配性分析

该项目的设计规划，可与当下的健康普惠和乡村振兴政策实现良好符合，拥有较大的应用前景和社会价值。

### 6.1 健康普惠视角下的基层推广前景

在成本设计方面，项目规划把整套系统的总体成本把控制在千元以下，配套耗材的价格同样控制在普通民众可承受的区间，不同于动辄数千元的高端健康器械，本系统能够使高原偏远区域的普通民众也有能力承担，实现健康资源的普惠性覆盖。

同时该项目可解决高原基层医疗资源匮乏的状况，为基层民众提供居家类型的健康管理服务，使民众不用去县城的医院，就能实现睡眠状态的监测和干预，切实提高基层的健康服务水平，推动健康中国战略在高原区域的实施。

### 6.2 乡村振兴战略下的产业联动价值

在产业方面，项目可带动当地建立特色药材种植、加工、

销售的完备产业链，把高原的特色资源转变为产业优势，打造具备区域特色的健康产业。凭借这一产业体系，能够促进当地的就业并增加收入，给乡村振兴提供产业保障。

与此同时该项目可与云南高原特色农业、乡村健康服务等有关政策实现对接，积极争取政策扶持，以此推动项目落地并发展。当下云南正积极推动高原特色农业和大健康产业的融合式发展，此项目的设计理念和政策导向高度相符，可凭借政策的利好实现迅速的发展。

## 7 结语

本研究设计一套针对高原低氧环境的睡眠、精力精准健康管理体系，基于高原适配性终端的打造、本地耗材的研制，为身处高原的人群提供低费用、高适配度的健康管理策略。该项目把专科生双创实践当作载体，全力发挥技能型人才的实操长处，凭借产教融合的方式推动项目的研发，同时探寻健康管理和乡村振兴的融合途径，具有较大的社会价值与产业价值。

此后该项目会持续推动硬件原型的研制以及耗材的配伍改良，基于双创赛事持续更新项目方案，促进项目落地实施与发展，为高原区域的健康普及和产业振兴增添帮助。

## 参考文献

- [1] 刘佳, 王航宇, 李多. 高海拔区域睡眠呼吸障碍特性与治疗的研究进展[J]. 四川大学学报(医学版), 2023年, 54卷(2期): 412-418.
- [2] 张宇, 李明, 王芳. 智能穿戴式设备在高原心脑血管疾病中的应用研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2022, 39(2): 426-432.
- [3] 赵晓娟, 陈军. 高原睡眠障碍的发生机理及其防治药物[J]. 医药导报, 2022, 41(12): 1816-1822.
- [4] 伍贤洪. 产教融合+社会服务双螺旋带动的高职院校专业群专创融合实践模式研究[J]. 职业技术教育, 2025年, 第46卷第11期: 45-50.
- [5] 封彩. 产教结合背景下专科学生创新创业教育研究[J]. 产业创新探索, 2025(14): 112-114.
- [6] 段金廛, 吴启南, 严辉. 药食同源类中药资源产业的现状、开发利用策略及研究实践[J]. 南京中医药大学学报, 2023年, 39卷(8期): 721-728.
- [7] Guo C, Lan L, Yan Y, et al. Influence of short-term exposure to low-oxygen environment on sleep architecture in healthy adults: A systematic review [J]. Sleep Medicine Reviews, 2024, 62: 101928.

# Research on High-yield and High-efficiency Production Organization and Process Optimization for Fully Mechanized Mining Faces

Hanbin Wang

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 036700, China

## Abstract

This study addresses the challenges of low production efficiency, lax organizational management, and process incompatibility in fully mechanized mining faces (FMMF) by integrating modern mining practices. It analyzes deficiencies in current production organization models and coal mining techniques, proposing optimization strategies across three dimensions: workforce allocation, equipment control, and process coordination. By refining operational parameters for critical operations including coal cutting, support systems, and transportation, field validation demonstrates that these improvements enhance face productivity while reducing costs. The findings provide actionable insights for achieving high-efficiency production in FMMF operations.

## Keywords

fully mechanized mining face; high production and efficiency; production organization

## 综采工作面高产高效生产组织与工艺优化研究

王汉斌

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西 忻州 036700

## 摘要

本文根据煤矿综采工作面生产效率低、组织管理松散、工艺不匹配等实际情况,结合现代化矿井生产实际,分析当前生产组织模式和采煤工艺存在的不足,从人员配置、设备管控、工序衔接三个方面优化生产组织,针对割煤、支护、运输核心环节优化工艺参数,通过现场实践验证优化方案可以提高工作面单产水平、降低生产成本,为煤矿综采工作面高产高效生产提供可行的参考。

## 关键词

综采工作面; 高产高效; 生产组织

## 1 引言

随着煤炭行业绿色高效发展的要求不断提高,在能源结构转型的背景下,煤炭开采越来越重视安全、高效、低耗的协同发展,高产高效成为现代化综采工作面的主要建设目标。目前一些矿井的综采工作面还存在着生产衔接不协调、设备利用率不高、工艺参数不合理、管理粗放等问题,从而影响到煤炭产能的释放和开采效益的提高。为解决生产瓶颈,适应矿井集约化生产的要求,本文根据现场实际生产数据,对生产组织优化路径和工艺改进措施进行研究,使综采工作面达到安全、高效、低耗的发展趋势。

【作者简介】王汉斌(1984—),男,中国河南鲁山人,本科,工程师,从事矿井采掘工程、技术管理及现场实施研究。

## 2 综采工作面生产现状与存在问题

### 2.1 工作面基本概况

本次研究以某矿主采煤层综采工作面为研究对象,该工作面煤层厚度稳定在3.2-3.8m,平均倾角6°,地质条件相对简单,无大型断层和破碎带,配备大功率采煤机、液压支架、刮板输送机等成套综采设备,设计日产能1.2万吨,但是实际生产中经常不能达到设计产能,生产波动较大,设备故障停机时间较长,工序衔接效率低,是影响高产高效的主要原因。工作面采用走向长壁后退式采煤法,全部垮落法管理顶板,原有生产组织采用传统的三班制模式,人员分工不清,岗位衔接有空挡,工艺执行没有标准化的控制。

### 2.2 现有生产组织存在的问题

一是生产组织模式僵化滞后,传统的三班制生产存在着交接班流程繁杂、耗时过长,岗位责任不清、现场管理权责不明等现象,生产调度依靠人工线下沟通,没有实现实

时性和统筹性,突发设备故障、工序卡顿等问题处理滞后,造成有效生产时间大大缩减;二是人员配置结构失衡,熟练操作工和专职设备检修人员比例严重失调,一线生产人员过多、核心检修力量不足,设备日常维保流于形式,隐性故障频发,小故障拖成大问题;三是跨岗位协同管控能力欠缺,采煤、支护、运输、通风各个工序的班组之间互相独立,没有统一的生产调度指挥,工序衔接断层不断出现,整体生产节奏混乱,不能形成连续高效的作业闭环。

### 2.3 现有采煤工艺存在的短板

原有采煤工艺参数适配性较差,采煤机割煤速度、截深采用固定设置,未结合现场煤层硬度变化、设备实际性能动态调整,割煤效率偏低且易造成截齿、滚筒过度损耗,增加设备维修成本;液压支架移架严重滞后割煤工序,端面距长期超标,顶板维护安全风险增加的同时,拖慢整体生产循环节奏;刮板输送机与转载机、皮带机运输能力匹配度不足,煤流输送不均衡,易出现堵煤、空载运行问题,运输环节能耗高、效率低;此外,工艺操作缺乏统一标准化流程,工人现场操作随意性大,不仅影响原煤开采质量,还大幅增加了安全隐患与生产材料损耗<sup>[1]</sup>。

## 3 综采工作面高产高效生产组织优化

### 3.1 生产组织模式重构

抛弃传统三班制生产模式的交接班繁杂、有效作业时间短、检修和生产冲突等弊端,全面采用“两班生产、一班检修”的集约化生产组织方式,把全天24小时科学划分成两个班次,每个班次的工作时间均衡分配,两个生产班次专门从事割煤、支护、运输等主要开采工作,集中精力提高进尺和产能,专职检修班在非生产时段内,集中进行全部设备的深度维护保养、隐患排查、易损件更换和线路整改,从根本上杜绝生产过程中出现非计划停机的情况。同时建立扁平化现场指挥体系,取消多级管理环节,成立专职生产调度小组,派驻专职调度员全程跟班作业,实时统筹采煤、支护、运输、通风各班组的进度,建立突发问题快速响应机制,压缩故障处置和工序衔接的空档,全力保证综采工作面连续不间断生产,最大限度地提高有效生产时长。

### 3.2 人员配置与岗位管控优化

严格按照精简高效、权责分明、定岗定责的原则,全面优化工作面人员配置结构,根据生产实际核定各岗位定员标准,坚决精简冗余后勤辅助人员和非必要岗位人员,把富余人力充实到一线生产班组和专职检修队伍中,补齐检修力量薄弱短板。明确采煤机司机、支架工、输送机司机、检修工等关键岗位的岗位职责、操作标准和安全责任,实行岗位责任制和生产绩效、安全考核直接挂钩的机制,打破平均分配的模式,调动人员的工作积极性。同时开展常态化全员技能培训,重点加强操作工标准化作业能力、检修工故障快速排查处置能力的培养,努力造就一专多能的复合型技术人

才,形成岗位间的快速补位,建立班组协同考核制度,把整体生产效率、产能完成率、安全指标作为主要的考核标准,提高班组团队协作意识,消除各自为战的现象。

### 3.3 设备全生命周期管控优化

创建起涵盖全流程的综采设备全生命周期管理架构,实行“日常巡检、定时保养、专项修理”的三级联动设备监管办法,对各个层次的检修标准和频率展开细化,防止出现设备失修、漏修的情况。专职检修班严格按照管控要求,对采煤机、液压支架、刮板输送机等主要设备进行全面拆解检查、精准润滑保养、老化易损件批量更换,同时建立完善的设备运行电子台账,记录设备运行参数、故障频次、维修内容和配件更换记录,依靠运行数据提前预判设备可能出现的故障风险,把事后维修变成预防性维修。针对设备配套联动参数实施有目的性的改进,调整采煤机、液压支架、运输设备的运转节奏与契合程度,防止设备性能闲置损耗,提升设备利用率,缩减设备故障率和维修开支,改善设备耐用时间,给高产高效生产赋予设备支撑。

## 4 综采工作面核心生产工艺优化

### 4.1 采煤机割煤工艺优化

根据工作面煤层硬度、厚度现场实测数据,对采煤机截深和牵引速度两个主要工艺参数进行针对性的优化,抛弃了原来固定的参数、一刀切的落后方式,把原来的600mm截深改为800mm,很好地适应了大功率电牵引采煤机的额定截割性能和工作面循环进尺要求,防止了小截深造成的循环进尺不够、作业效率低、往返次数多等问题。同时根据现场实测煤层硬度分级,对牵引速度进行差异化设置,硬煤区控制在3~4m/min,防止截割阻力过大损坏截齿、滚筒,减少设备损耗;软煤区提高到5~6m/min,充分发挥设备割煤能力,全程采用双向割煤工艺,彻底取消单向割煤的空机往返环节,大大缩短无效作业时间,加快生产循环频次。另外严格规范割煤操作规程,统一采高控制标准,全过程杜绝割顶割底,保证煤壁平直规整,大大减少煤矸混入量,提高原煤质量,降低洗选成本,防止大粒径矸石堵塞后续运输设备,从源头上降低运输环节故障率,全面提升割煤环节的连续性和高效性<sup>[2]</sup>。

### 4.2 液压支架支护工艺优化

为了解决原有的移架滞后、顶板控制不好、支护和割煤脱节等问题,全面推行了“追机移架”同步作业工艺,打破了割煤和支护工序各自独立、衔接滞后的情况,严格控制移架滞后距离,硬性规定移架滞后采煤机后滚筒不超过3架,将端面距控制在300mm以内,使割煤后及时支护暴露顶板,最大限度地缩短顶板空顶时间,从根本上防止顶板冒落、煤壁片帮等安全隐患的发生。根据工作面顶板压力在线监测数据,对支架移架速度、初撑力核心参数进行优化,根据顶板下沉变形情况动态调节支架供液时间、压力值,保证支架初

撑力达到设计要求，防止顶板下沉变形，保证工作面顶板安全。

### 4.3 运输系统工艺优化

围绕煤流均衡运输、连续畅通的核心目标，对刮板输送机、转载机、皮带运输机三个运输设备的联动参数进行全方位的优化，建立与采煤机割煤速度实时匹配的动态调速机制，根据现场实时割煤速率、出煤量来调节输送机运行频率，防止煤流过于集中造成过载堵煤、堆煤问题，防止设备空载空转、低负荷运行造成的电能和机械损耗浪费，实现煤流平稳连续运输。创建运输设备常态化的点检及预防性维修制度，安排专人每隔一小时就对溜槽磨损状况，链条松紧度，托辊运转情况，减速机油温等重要部分实施检查，及时更换掉已经变质或者磨损比较严重的东西，这样就能避免出现断链，卡溜，跑偏这些运输故障。根据工作面现场巷道实际情况，对运输线路坡度、转弯半径进行优化，减小煤流运输阻力，缩短运输距离，配备专职巡查人员全程跟班监控运输系统运行状态，采用现场视频监控和人工巡检相结合的方式，及时发现堵煤、掉矸、设备异响等突发情况，第一时间到达现场处理故障，保证整个运输环节畅通无阻，给综采工作面连续高效生产提供有力的运输保障<sup>[3]</sup>。

## 5 优化方案实施效果分析

### 5.1 生产指标对比分析

本次优化方案在研究工作面现场连续执行了三个月，对生产数据、设备运行参数以及成本消耗等各方面进行了详细的记录，并且对优化前后各项核心生产指标进行了对比，从而有效地证明了方案的实施效果，具体的数据见下表。从实际运行数据可以看出，生产组织模式的重构和核心工艺参数的优化两方面并行推进，有效地解决了原来存在的生产瓶颈，工作面日产水平、月总产量均得到明显提升，设备故障率、故障停机时间大幅降低，有效生产时间占比大幅上升，综合生产成本得到控制，高产高效建设目标基本实现，具有在同类工作面推广应用的價值。

### 5.2 综合效益分析

经济效益上工作面产量大幅度提高，吨煤生产成本明

显降低，设备维修费、电能耗能费、配件损耗费等均有所减少，经计算单月直接经济效益增加超过400万元，矿井整体开采效益和市场竞争能力明显改善，安全效益上工艺优化后顶板支护可靠度、煤壁控制强度、设备运行安全系数得到全面提高，生产过程中各类安全隐患减少70%以上，现场作业环境更加规范，无轻伤及以上安全事故，安全生产形势持续稳定向好，管理效益上集约化生产组织模式和标准化工艺流程使矿井生产管理由粗放型向精细化转变，人员综合素质、岗位操作水平、班组协同能力明显提高，形成了一套标准化、可复制的生产管理模式，为矿井长期稳定高生产打下了坚实的基础。

表1 优化前后对比表

检测指标	优化前	优化后	提升/下降幅度
平均日产量(吨)	9200	12600	提升 36.96%
月总产量(万吨)	27.6	37.8	提升 36.96%
设备综合故障率(%)	12.3	4.7	下降 61.79%
日均故障停机时间(min)	185	62	下降 66.49%
有效生产时间占比(%)	68.2	89.5	提升 21.3%
吨煤生产成本(元)	186	152	下降 18.28%

## 6 结语

综采工作面高产高效生产要依靠科学的生产组织体系和匹配的工艺改进措施，本次研究重新构建组织模式、优化人员设备管理、改善核心工艺参数，解决了原来存在的生产瓶颈问题，实现了产能和效益双提高。未来可以将智能化开采技术同自动化控制、在线监测、远程操控等技术相结合，使综采工作向着智能化、少人化、无人化方向发展，不断挖掘出生产潜力，促进煤炭行业的高质量绿色发展。

### 参考文献

- [1] 冯梓彤. 综采工作面液压支架与采煤机智能协同控制研究[J].能源与节能,2026,(03):153-155.
- [2] 武瑾. 复杂地质条件下薄煤层综采工作面巷道布置与支护技术[J].能源与节能,2026,(03):187-190.
- [3] 苏琪. 综采工作面液压支架与采煤机智能协同控制技术研究[J].能源与节能,2026,(03):227-229.

# Research on Surrounding Rock Stability Analysis and Support Optimization for Deep Coal Mine Mining Engineering

Yamin Liu

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Ningwu, Shanxi, 036700, China

## Abstract

In deep coal mining engineering, the stability of surrounding rock is a key factor in ensuring mine safety and improving production efficiency. As the depth of mining continues to increase, the stability of surrounding rock faces greater challenges. The destruction and deformation of surrounding rock directly impact the safety of the mining process and the design of the support system. This paper analyzes the factors influencing surrounding rock stability in deep coal mines, including geological conditions, mining methods, and the physical and mechanical properties of surrounding rock, and explores the mechanisms of surrounding rock deformation and failure. By applying various stability evaluation methods and combining actual mine data, the paper assesses the impact of different support technologies on surrounding rock stability and proposes an optimized support design plan. The research provides theoretical basis and technical support for the support design of deep coal mining projects, contributing to the sustainable development of coal mining.

## Keywords

deep coal mine; surrounding rock stability; support optimization; mining engineering

## 深部煤矿采矿工程围岩稳定性分析与支护优化研究

刘亚民

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西 宁武 036700

## 摘要

深部煤矿采矿工程中, 围岩稳定性是确保矿山安全和提高生产效率的关键因素。随着矿山深度的不断增加, 围岩稳定性面临更大的挑战。围岩的破坏和变形直接影响到采矿过程的安全性及支护系统的设计。本文通过分析深部煤矿围岩稳定性影响因素, 包括地质条件、开采方式及围岩的物理力学性质等, 探讨了围岩变形与破坏机制。通过应用多种稳定性评价方法, 结合实际矿山数据, 评估了不同支护技术对围岩稳定性的影响, 并提出了支护优化设计方案。研究为深部煤矿采矿工程的支护设计提供了理论依据和技术支持, 有助于实现煤矿采矿的可持续发展。

## 关键词

深部煤矿; 围岩稳定性; 支护优化; 采矿工程

## 1 引言

随着煤矿资源的不断开采, 采矿深度逐渐增加, 深部煤矿采矿工程的围岩稳定性问题愈加突出。围岩的稳定性直接影响着矿井的安全生产以及矿山经济效益。传统的支护技术在深部采矿过程中往往无法有效应对复杂的围岩条件, 因此对围岩稳定性的分析与支护优化设计显得尤为重要。深部煤矿开采不仅需要考虑地质结构的复杂性, 还要关注开采过程中围岩的变形与破坏机制。围岩的不稳定性可能导致矿井塌方、支护失效等严重事故, 甚至对矿工的生命安全构成威胁。为了提高煤矿的安全性和生产效率, 研究围岩的稳定性及支护优化设计成为亟待解决的技术难题。本文将通过分析

影响围岩稳定性的主要因素, 探讨围岩稳定性评价方法, 并结合现代支护技术, 提出支护优化方案, 为深部煤矿采矿工程的安全生产提供理论依据和技术支持。

## 2 深部煤矿采矿工程概述

深部煤矿开采面临诸多独特的挑战, 主要体现在矿体深度的增加、开采环境的复杂性以及地质条件的不确定性。随着煤矿深度的不断加大, 地下水、压力、温度等因素对矿井安全的影响逐渐显现。矿体的深度使得围岩的稳定性变得更加复杂, 增加了支护系统设计和施工的难度。矿井深部的开采环境比浅层矿井更加复杂, 地下应力变化较大, 开采过程中容易发生地表沉降、围岩破坏等现象, 严重影响矿山的生产安全。此外, 深部煤矿的开采受到复杂地质条件的制约, 围岩类型多样、断层和裂隙分布不均, 这使得围岩的稳定性难以预测, 给矿井安全管理带来了更高的风险。因此, 深部

【作者简介】刘亚民(1990—), 男, 中国山西忻州, 本科, 工程师, 从事煤矿采矿工程研究。

煤矿开采不仅需要更高效的开采技术，还必须应对围岩稳定性等多方面的挑战。

### 3 深部煤矿围岩稳定性分析

#### 3.1 围岩稳定性的影响因素

深部煤矿围岩的稳定性受到多种因素的影响，首先是地质条件，尤其是岩层的硬度、层理、断层和裂隙的分布情况。不同的岩性层对围岩稳定性的影响差异较大，硬岩和软岩的稳定性差异明显。其次，开采深度是影响围岩稳定性的关键因素。随着矿井深度的增加，地表压力和地下水的影响逐渐增强，围岩变形和破坏的风险也随之增加。矿井通风、排水系统的设计和运营状态也直接影响围岩的稳定性。若排水系统不畅，地下水渗透到矿体内，可能引发围岩的滑移或坍塌。此外，开采方法和矿体形态对围岩的稳定性有重要作用<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 围岩变形与破坏机制

围岩在开采过程中可能发生多种类型的变形与破坏，主要包括塑性变形、弹性变形和破裂等。塑性变形主要发生在围岩受力较大的区域，岩体内的裂隙会随着应力的增大逐渐扩展，导致围岩发生形变。弹性变形通常在围岩应力较小的情况下发生，岩体表现为弹性恢复，但随着外力的持续作用，可能导致应力积聚，进而引发更为严重的破坏。破裂是围岩失稳的主要表现形式，通常发生在矿体开采后的应力重新分配过程中。当围岩的内力超过其抗力时，岩体会出现裂缝，最终导致围岩的破坏。此外，围岩的破坏往往是多因素共同作用的结果，包括地质结构、开采方式、地下水的影响等。

#### 3.3 围岩稳定性评价方法

围岩稳定性评价方法主要包括地质调查法、数值模拟法、监测法以及理论分析法等。地质调查法通过对矿山周围的地质构造、岩层分布、裂隙情况进行详细勘探，评估围岩的稳定性。数值模拟法则通过建立围岩的力学模型，模拟开采过程中的应力分布、变形和破坏情况，从而评估围岩的稳定性。这种方法能够在实际开采前预测围岩可能发生的变形及破坏过程，为支护设计提供依据。监测法通过在矿井内安装各种监测设备，如应变计、位移传感器等，实时监控围岩的变形情况，及时发现潜在的安全隐患。理论分析法则通过对围岩力学特性、开采影响因素等进行数学建模，采用理论公式进行分析，评估围岩稳定性。

### 4 深部煤矿采矿过程中围岩稳定性的动态变化

#### 4.1 开采过程中的围岩变形

在深部煤矿开采过程中，围岩的变形是动态变化的，随着采掘作业的进行，围岩不断受到新的应力作用，产生不同程度的变形。开采初期，围岩受到的应力较小，变形较为缓慢，但随着开采深度的增加，围岩的变形速度逐渐加快。开采作业不仅改变了围岩的应力分布，还引起了围岩的塑性

流动和破裂，尤其是在采空区附近，围岩的变形尤为显著。为了避免开采过程中围岩发生大规模的破坏，需要实时监测围岩的变形情况，并根据变形规律及时调整开采方案和支护措施。围岩的动态变形过程不仅与开采深度和地质条件密切相关，还受到矿井通风、排水等外部环境因素的影响，因此，在实际开采中必须综合考虑各种因素，确保围岩的稳定性<sup>[2]</sup>。

#### 4.2 采矿方法与围岩稳定性的关系

采矿方法对围岩稳定性的影响至关重要，不同的采矿方法会引发不同的围岩变形模式和破坏方式。传统的采矿方法，如垂直开采和水平开采，在深部煤矿中面临较大的围岩稳定性挑战。随着开采深度的增加，围岩的应力集中和变形风险也逐渐增大。近年来，采用了诸如分层开采、回采技术等先进采矿方法，这些方法可以在一定程度上减缓围岩的应力集中，降低围岩失稳的风险。同时，合理的采矿顺序、开采间隔和支护设计，也能在一定程度上改善围岩的稳定性。采矿方法的选择不仅影响围岩的变形，还直接关系到支护系统的设计和施工效果。因此，在深部煤矿开采中，合理选择采矿方法对于确保围岩稳定性至关重要。

#### 4.3 围岩稳定性对矿山安全的影响

围岩稳定性直接关系到矿山的安全生产，围岩失稳可能导致矿井内事故频发，严重时甚至造成矿井的塌方和设备损坏。围岩不稳定的区域往往是矿井生产的安全隐患区，若未及时发现并采取有效的支护措施，矿井内的生产设施和矿工的生命安全都会受到威胁。围岩稳定性差不仅会导致矿井的结构破坏，还会影响矿井的通风、排水等系统的正常运行，进而影响到整体矿山的生产效率和安全性。为了保障矿山的安全，必须建立有效的围岩监测与评估机制，实时掌握围岩的变化情况，并根据实际情况采取相应的支护和加固措施。围岩稳定性的有效控制是矿山安全管理中的核心内容，只有确保围岩稳定，才能有效保障矿山的长效运营和矿工的安全。

### 5 支护优化设计与技术方案

#### 5.1 支护类型与选择原则

支护类型的选择在深部煤矿采矿工程中具有重要作用，直接决定着围岩稳定性的保障效果。支护类型通常包括钢架支护、锚杆支护、混凝土支护以及复合支护等多种形式。选择合适的支护类型需考虑围岩的力学性质、开采深度、矿井环境等因素。对于软弱围岩，锚杆支护和喷锚支护常被优先选择，而在硬岩地区则更多采用钢架支护。支护类型的选择还需综合考虑施工成本、安装难度以及支护后的稳定性效果。支护类型的决策不仅关系到围岩的稳定性，还直接影响矿山的生产效率和安全性。因此，支护设计需进行科学的力学分析，评估不同支护类型的适用性和效果，确保在保证安全的前提下，能够有效控制支护成本，避免不必要的资源浪费。

## 5.2 支护材料的性能分析

支护材料的性能直接影响支护系统的稳定性和长期使用效果。常用的支护材料包括钢材、混凝土、复合材料以及高分子材料等。钢材具有较强的抗拉强度和延展性，适用于承受较大压力的深部矿井支护，但其抗腐蚀性能较弱，需进行防腐处理。混凝土材料则广泛用于大规模支护工程，具备良好的抗压性能，但在复杂围岩条件下可能出现裂缝。复合材料和高分子材料在现代支护中逐渐获得应用，它们结合了传统材料的优点，具有较高的抗压、抗拉和抗腐蚀性能，且重量轻，施工便捷。材料性能的优化选用能够提高支护的安全性和经济性，延长使用寿命并减少维护成本。因此，在支护设计中，必须根据围岩特性和矿井开采环境，选择最适宜的支护材料，以提高支护效果和矿井的安全性。

## 5.3 支护系统的优化设计方法

支护系统的优化设计涉及多个方面，包括支护结构的合理性、支护材料的选择以及施工工艺的改进等。在优化设计中，需要考虑围岩的实际情况，如岩层的强度、裂隙的分布、地下水的影响等因素，制定最为合理的支护方案。数值模拟技术是支护优化设计中常用的工具，它通过建立力学模型，模拟支护系统在开采过程中受到的力学作用和围岩的变形情况，从而指导支护方案的设计。此外，支护系统的优化还需关注施工工艺的改进，如采用先进的支护施工技术，提高支护的精度和效率。支护系统的优化设计不仅能够提升围岩的稳定性，还能够在保障安全的基础上，降低开采成本，提高矿井的生产效率和经济效益。

## 6 支护优化对围岩稳定性的影响

### 6.1 支护优化设计的作用与效果

支护优化设计对围岩稳定性有着直接而深远的影响。通过对围岩的力学性质和应力状态进行细致分析，优化支护系统可以有效减少围岩变形，避免发生塌方、滑坡等破坏现象。在支护设计中，通过合理选择支护材料和支护方式，结合矿井的地质条件，可以最大限度地提高支护效果，降低支护成本。优化设计还能够延长支护的使用寿命，减少维护频次和维护成本。在深部煤矿开采中，支护优化设计尤其重要，它能够在开采过程中减少对围岩的破坏，确保围岩的稳定性和矿井的安全运行，从而保障矿山的长期生产效益和安全。

### 6.2 支护优化实施的关键技术

支护优化实施的关键技术包括先进的支护材料技术、

施工技术以及实时监测技术。采用新型支护材料，如高强度钢材、复合材料等，能够有效提高支护系统的承载能力和抗腐蚀性能。施工技术的改进，如喷射混凝土技术、机械化支护技术等，提高了支护施工的效率和质量。此外，实时监测技术也是支护优化中的关键技术之一，通过在矿井中安装位移传感器、应变计等设备，能够实时监控围岩的变形和支护的状态，及时调整支护方案，避免因围岩变化而导致的支护失效。综上所述，支护优化实施的成功离不开先进技术的支持，这些技术的应用能够确保支护系统的稳定性和安全性<sup>[1]</sup>。

### 6.3 支护优化对矿山安全及经济效益的影响

支护优化设计和实施对矿山的安全性和经济效益具有显著影响。通过优化支护设计，能够显著提高围岩的稳定性，减少矿井发生事故的风险，保障矿工的生命安全。支护系统的优化不仅提升了矿山的安全性，还能降低矿井的维修成本，提高矿山的生产效率。在经济效益方面，优化支护设计能够减少不必要的资源浪费和支护成本，同时提高矿山的生产能力和矿石回收率。支护优化不仅能在短期内提升矿山的经济效益，还能为矿山的长期发展奠定基础。因此，支护优化是提高矿山综合效益的重要手段，对矿山的持续稳定运营具有重要意义。

## 7 结语

通过对深部煤矿采矿工程围岩稳定性与支护优化设计的分析，可以看出，围岩的稳定性是确保矿山安全和提高生产效率的关键因素。在深部采矿中，支护优化设计不仅能够有效提高围岩稳定性，减少事故风险，还能降低施工成本和提高矿山的经济效益。通过采用先进的支护材料、科学的支护设计以及精确的施工技术，能够实现围岩稳定性和矿山安全的最佳平衡。未来，随着采矿深度的不断增加，支护技术和优化设计将持续发展和完善，为矿山的安全运营和可持续发展提供更加坚实的保障。

## 参考文献

- [1] 穆利明.采矿工程中煤矿深部岩巷围岩稳定与支护策略[J].能源与节能,2024,(08):231-233.
- [2] 张喜成.采矿工程中煤矿深部岩巷围岩稳定与支护策略[J].矿业装备,2023,(12):7-9.
- [3] 张明光.探讨采矿工程中煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J].门窗,2019,(07):145.

# Application Discussion on Remote Fault Diagnosis Technology for Industrial Automation Instruments

Wenpian Zhong

Zibo Beiyue Equipment Protection Engineering Co., Ltd., Hainan Branch, Danzhou, Hainan, 578101, China

## Abstract

Focusing on the operational reliability of industrial automation instruments in complex industrial systems and the demand for remote operation and maintenance, this study systematically analyzes the application pathways and implementation mechanisms of remote fault diagnosis technology in engineering practice. Considering the multi-type and multi-condition operating characteristics of automation instruments, common fault types and diagnostic requirements are summarized. A remote diagnosis technical system is constructed from key aspects such as data acquisition, communication transmission, and multi-source information fusion. On this basis, the architecture and engineering application modes of the diagnostic system are examined, and the mechanisms of platform-based integration and coordinated remote operation and maintenance are discussed. Meanwhile, safeguard systems and optimization strategies are proposed from the perspectives of system security, data reliability, and standardized operation and maintenance. Through the coordinated advancement of technology and management, the efficiency of fault identification and the operational stability of industrial automation instruments are improved, providing support for the safe and efficient operation of industrial systems.

## Keywords

industrial automation instruments; remote fault diagnosis; data acquisition; communication transmission; operation and maintenance management

## 工业自动化仪表的远程故障诊断技术应用探讨

钟文篇

淄博北岳设备防护工程有限公司海南分公司, 中国·海南 儋州 578101

## 摘要

围绕工业自动化仪表在复杂工业系统中的运行可靠性与远程运维需求, 系统分析远程故障诊断技术在实际工程中的应用路径与实现机制。结合自动化仪表多类型、多工况运行特征, 对其常见故障类型与诊断需求进行归纳, 并从数据采集、通信传输及多源信息融合等关键环节出发, 构建远程诊断技术体系。在此基础上, 分析诊断系统的架构组成与工程应用模式, 探讨平台化集成与远程运维协同机制。同时, 围绕系统安全性、数据可靠性及运维标准化建设等方面, 提出保障体系与优化策略。通过技术与管理协同推进, 提升工业自动化仪表故障识别效率与运行稳定性, 为工业系统安全高效运行提供支撑。

## 关键词

工业自动化仪表; 远程故障诊断; 数据采集; 通信传输; 运维管理

## 1 引言

工业自动化水平的持续提升使仪表系统在生产过程中的作用不断强化, 其运行状态直接关系到装置稳定性与生产安全。在石油化工、电力及冶金等行业中, 自动化仪表种类繁多、分布广泛, 运行环境复杂且干扰因素较多, 传统依赖现场巡检与经验判断的维护方式已难以满足高效运维需求。随着工业通信网络与信息化技术的发展, 远程监测与故障诊断逐渐成为提升设备管理水平的重要手段, 通过对运行数据的实时采集与分析, 实现对仪表状态的动态掌握与异常预

警。在复杂工况下, 仪表故障呈现隐蔽性与多源耦合特征, 单一诊断方法难以实现准确识别, 亟需构建集数据采集、信息传输与综合分析于一体的远程诊断体系。通过强化系统集成与运维协同机制, 可有效降低设备故障率, 提升工业系统运行的安全性与连续性。

## 2 工业自动化仪表远程故障诊断技术的理论基础与系统构成

### 2.1 工业自动化仪表运行特性与故障类型划分

工业自动化仪表在生产过程中承担着测量、控制与反馈等核心功能, 其运行状态受到工艺条件、环境因素及设备老化等多重影响。仪表设备长期处于高温、高压及强干扰环境中, 信号稳定性与测量精度易发生波动, 运行表现呈现出

【作者简介】钟文篇(1991—), 男, 中国海南昌江人, 本科, 助理工程师, 从事化仪表工程研究。

动态变化特征。不同类型仪表在结构组成与工作原理方面存在差异,使其故障表现具有多样性和复杂性。常见故障可划分为传感元件失效、信号漂移、线路异常及执行机构失灵等类型,各类故障在表现形式与发展路径上具有明显差别。部分故障呈现渐进式变化,伴随性能衰减过程逐步显现,另一些则表现为突发性中断,直接影响系统稳定运行。通过对运行特性与故障类型进行系统划分,有助于明确诊断对象与分析重点,为远程故障诊断技术的应用奠定基础<sup>[1]</sup>。

## 2.2 远程故障诊断技术的基本原理与实现机制

远程故障诊断技术依托数据采集与信息传输手段,对仪表运行状态进行持续监测与分析,其核心在于通过对关键参数变化趋势的识别,实现对设备异常状态的判别。系统在运行过程中,通过采集电压、电流、压力及温度等多维数据,形成反映设备状态的特征信息,并通过算法模型对数据进行处理与分析。诊断过程围绕特征提取、状态识别与结果反馈展开,通过对历史数据与实时数据进行对比分析,识别异常偏差与潜在风险。在实际应用中,远程诊断机制通过建立设备运行模型,将正常状态作为基准,对偏离范围进行评估与判定,从而实现故障预警与定位。该机制能够减少对现场人工经验的依赖,提高故障识别的准确性与响应速度,使设备维护由事后处理向过程监测转变。

## 3 工业自动化仪表远程故障诊断的数据获取与传输技术

### 3.1 现场数据采集方式与传感信号处理技术

现场数据采集是远程故障诊断系统运行的基础环节,其质量直接影响后续分析结果的准确性。工业自动化仪表通过多类型传感器获取压力、流量、温度及位移等关键参数,采集方式包括模拟量采集与数字量采集两类。模拟信号在采集过程中易受到电磁干扰与环境波动影响,需要通过滤波与放大等手段提升信号质量。数字信号则具有抗干扰能力较强的特点,在复杂工况下表现出较高稳定性。信号处理环节通过去噪、归一化及特征提取等方法,将原始数据转化为可用于分析的有效信息。采集系统通常配置高精度模数转换模块,使信号在转换过程中保持较高分辨率。通过合理设计采集频率与采样策略,可以在保证数据完整性的同时降低系统负荷,为远程诊断提供可靠的数据基础。

### 3.2 工业通信网络与数据远程传输技术路径

工业通信网络在远程故障诊断体系中承担着连接现场设备与分析平台的重要功能,其性能直接影响系统运行效率与数据可靠性。常用通信方式包括有线网络与无线网络两种类型,有线网络在稳定性与传输速率方面表现突出,适用于固定设备与关键控制系统。无线网络则具备部署灵活与覆盖范围广的特点,在分散式设备管理中具有较高应用价值。数据在传输过程中依赖标准化通信协议进行封装与解析,保障信息传递的完整性与一致性。网络架构通过冗余设计与链路

优化,提高系统抗干扰能力与故障恢复能力。传输路径在设计过程中需综合考虑带宽、延时及安全性等因素,通过合理配置网络资源,实现数据的高效流转与稳定传输,为远程诊断系统提供可靠支撑<sup>[2]</sup>。

## 3.3 多源数据融合与实时数据处理机制

多源数据融合技术通过整合来自不同传感器与系统的数据,实现对设备运行状态的全面描述。不同数据源在时间尺度与数据格式上存在差异,通过时间同步与格式转换可实现数据的一致性处理。融合过程通过特征匹配与关联分析,将分散信息整合为统一的数据结构,从而提升故障识别的准确性。实时数据处理机制在系统运行过程中发挥关键作用,通过对连续数据流进行动态分析,实现对异常状态的快速响应。处理过程结合数据压缩与边缘计算技术,在减少传输压力的同时提高处理效率。系统通过构建动态更新模型,对数据变化趋势进行持续跟踪,使诊断结果能够反映设备实际运行状态。多源数据融合与实时处理机制的协同应用,有助于提升远程故障诊断系统的整体性能与应用价值。

## 4 工业自动化仪表远程故障诊断技术的工程应用模式

### 4.1 典型工业场景中的远程诊断应用路径

在石油化工、电力与冶金等连续生产系统中,自动化仪表分布密度达到每套装置120台至300台,运行状态直接影响装置稳定性与生产安全。远程故障诊断技术通过在关键节点布设采集终端,对压力、温度及流量等参数进行实时监测,采集频率设置为1s至5s区间,使数据连续性得到保障。系统运行过程中,设备异常信号在30s内完成初步识别,在120s内形成诊断结果并推送至运维平台,使响应效率提升约60%。在典型炼化装置中,远程诊断应用后,仪表故障停机时间由每月18h降低至7h,故障定位准确率由78%提升至92%。在发电机组监控系统中,通过对振动与温度数据进行动态分析,异常趋势识别提前量可达到15min至30min,使设备维护由被动处理转向预防控制。该应用路径通过数据驱动与远程协同,实现设备运行状态的持续监控与精准诊断,有效提升工业系统运行稳定性<sup>[3]</sup>。

### 4.2 系统集成与平台化应用模式构建

系统集成与平台化应用模式以数据集中管理与功能模块协同为核心,通过构建统一的远程诊断平台,实现多设备、多系统的集成运行。平台接入设备规模可达500台至1500台,数据接入点数量超过3000个,系统处理能力达到每秒2000条数据以上,使数据处理效率明显提升。通过接口标准化设计,实现不同类型仪表与控制系统的无缝接入,数据共享比例提升至85%以上。平台在运行过程中,将数据存储、分析与展示功能进行集成,响应时间控制在2s以内,保证实时性与可视化效果。系统集成后,维护人员数量由原有12人减少至7人,人工巡检频次由每日4次降低至1次,

运维成本降低约35%。通过平台化模式构建,远程诊断系统形成集中管理与分布执行相结合的运行机制,使设备管理效率与数据利用价值显著提升。

#### 4.3 远程运维与智能化管理协同机制

远程运维与智能化管理通过构建数据驱动的协同体系,实现设备状态监测与运维决策的联动运行。系统通过对历史运行数据进行分析,形成设备运行特征库,数据样本规模达到10万条以上,为故障识别提供支撑。在运行过程中,异常事件识别时间控制在20s以内,告警信息推送至运维终端的延迟低于5s,使处理效率明显提升。远程运维模式实施后,现场维护响应时间由平均90min缩短至35min,设备平均修复时间由6h降低至3h。智能化管理机制通过对设备状态进行分级评估,将风险等级划分为4级,对应不同运维策略,使资源配置更加合理。系统通过对运维数据进行持续优化,使故障复发率由12%降低至5%,设备可用率提升至97%以上<sup>[4]</sup>。该协同机制实现了远程监测、智能分析与运维决策的闭环运行,推动设备管理向精细化方向发展。

### 5 工业自动化仪表远程故障诊断技术的保障体系与优化策略

#### 5.1 系统安全性与数据可靠性保障机制

远程故障诊断系统在运行过程中涉及大量关键生产数据,其安全性与可靠性直接关系到系统稳定性。系统通过构建多层次安全防护结构,对数据采集、传输及存储环节进行全面保护,防止数据泄露与非法访问。通信过程采用加密传输机制,对数据进行编码处理,提升信息传输安全性。数据存储环节通过冗余备份与容灾机制,确保数据在异常情况下仍能保持完整性与可恢复性。系统在运行过程中通过校验机制对数据进行一致性验证,减少误差与异常数据对诊断结果的影响。通过完善权限管理与访问控制机制,对不同用户进行分级授权,使系统运行更加规范。该保障机制能够有效提升远程诊断系统的稳定性与安全水平,为工业自动化仪表运行提供可靠支撑。

#### 5.2 运维管理体系与标准化建设路径

运维管理体系在远程故障诊断技术应用中发挥着基础性作用,通过制度建设与流程优化,实现设备管理的规范化运行。体系构建围绕设备生命周期管理展开,对设备安装、运行及维护等环节进行全过程管理。通过建立标准化操作流程,对数据采集、故障诊断及处理流程进行规范,使运维工作具备可操作性与可追溯性。管理体系在运行过程中,通过

绩效评价与过程监督,对运维质量进行持续改进,提升管理效率。标准化建设通过统一技术规范与数据格式,实现不同系统之间的兼容与协同,减少系统集成难度。通过培训与能力提升机制,强化运维人员专业水平,使其能够适应远程诊断技术的发展需求。该路径推动运维管理由经验依赖向制度驱动转变,提升整体管理水平。

#### 5.3 技术升级与应用效能提升策略

技术升级是推动远程故障诊断系统持续优化的重要手段,通过引入先进技术与优化系统结构,实现应用效能的提升。系统在升级过程中,通过优化数据处理算法与模型结构,提高故障识别精度与响应速度,使诊断准确性得到增强。通过引入边缘计算技术,在数据采集端实现部分处理功能,减少数据传输压力,提升系统响应效率。平台在运行过程中,通过对历史数据进行分析与模型迭代,使诊断能力不断优化。通过优化系统架构与资源配置,提升系统处理能力与稳定性,使其能够适应大规模设备接入需求。应用策略通过强化技术与管理协同,实现系统运行效率与经济效益的提升,使远程故障诊断技术在工业自动化领域发挥更大价值。

### 6 结语

工业自动化仪表远程故障诊断技术在工业系统运行中的作用不断强化,其应用已由单一设备监测向系统化、平台化与协同化方向演进。通过构建以数据采集、通信传输与综合分析为核心的技术体系,设备运行状态能够实现持续感知与精准识别,运维模式由依赖经验向数据驱动转变。工程实践表明,远程诊断技术在提升故障响应效率、降低停机时间及优化资源配置方面具有显著成效。随着工业系统复杂程度不断提升,对诊断精度与系统稳定性的要求持续提高,技术体系需在安全保障、标准化建设与能力提升等方面不断完善。通过技术优化与管理协同的持续推进,远程故障诊断技术将在工业自动化领域形成更加高效、可靠的运行支撑体系。

#### 参考文献

- [1] 张恒,刘竹琴.基于人工智能的工业仪表故障自动化识别系统设计[J].电子设计工程,2025,33(24):58-64.
- [2] 曾茂林.自动化仪表常见故障分析及处理措施[J].云南冶金,2025,54(S1):140-145.
- [3] 钱泽伶.智能气田生产模式中自动化仪表的日常维护与故障处理研究[J].仪器仪表用户,2025,32(08):43-45.
- [4] 王永兴.自动化仪表故障DCS诊断与远程维护技术[J].中国仪器仪表,2025,(07):89-92.

# Research on Prevention and Control of Groundwater Seepage and Drainage System Optimization in Foundation Pits of Sedimentation Pump Stations

Xinwei Jiang Xingzhi Yu Chunzheng Xiang Lei Zang

Gansu Jingmei Energy Co., Ltd. Hydropower Management Branch, Baiyin, Gansu, 730900, China

## Abstract

Submerged pump stations are widely used due to their compact structure, stable operation, and good water suction conditions for pumps. Most of these pump stations are located in low-lying areas or near rivers and ditches, where the bottom plate of the pump room is constantly below the groundwater level, and water pressure persists around the foundation pit. When the strata fractures are developed, the permeability of the gravel layer is strong, and the waterproof joints are aged, groundwater will seep and gush into the interior of the pump room. The seepage water will damage the operating environment, reduce the durability of the structure, and pose risks such as equipment corrosion, foundation hollowing, and local subsidence. To address this issue, relying solely on sump pumping and drainage cannot achieve long-term stable control effects. Instead, seepage control, anti-seepage repair, drainage organization, and operation monitoring should be integrated into a system to improve the safe operation level of the pump station.

## Keywords

subsiding pump station; foundation pit seepage and inrush; groundwater control; drainage system; anti-seepage treatment

# 沉降式泵站基坑地下水渗涌防治与排水系统优化研究

蒋新伟 于兴志 项春正 藏磊

甘肃靖煤能源有限公司水电管理分公司, 中国·甘肃 白银 730900

## 摘要

沉降式泵站应用较多, 结构紧凑、运行稳定、水泵吸水条件较好。此类泵站大多处在低洼或者近河沟的地方, 机房底板长时间处于地下水位之下, 基坑周围水压力一直存在。当地层裂隙发育、砂砾层透水性强、防水节点老化时, 地下水就会向机房内部集中渗涌。渗涌水会破坏运行环境, 也会使结构耐久性下降, 产生设备腐蚀、基础空鼓、局部沉陷等危险。针对此问题, 单纯依靠集水坑抽排不能达到长期稳定的治理效果, 应该把渗流控制、防渗修复、排水组织、运行监测纳入一个系统, 提高泵站的安全运行水平。

## 关键词

沉降式泵站; 基坑渗涌; 地下水控制; 排水系统; 防渗治理

## 1 引言

沉降式泵站机房高程低于周边地面, 地下水易沿底板接缝、墙体交接部位及设备基础薄弱区渗入, 造成混凝土侵蚀、金属构件锈蚀、电气设备绝缘性能下降等问题。本文以沉降式泵站基坑地下水渗涌治理为研究对象, 分析渗涌成因、危害机理及排水系统缺陷, 提出“截、导、排、监”协同治理思路, 形成适用于富水地层泵站的防治与优化方案。

## 2 沉降式泵站基坑地下水渗涌特征

沉降式泵站基坑渗涌是隐蔽的、持续的、有季节性的。

泵站机房处在地下水活动带之内, 雨季或者河道补给加强的时候, 地下水位上升, 基坑外侧水头压力变大, 渗涌量随之增大; 枯水期水位下降, 渗涌强度减小, 但是结构缝隙里仍然会保持潮湿的状态。渗涌位置多在底板施工缝、墙体根部、穿墙管周围、电缆沟、设备基础边缘等薄弱处。这些部位的材料界面比较复杂, 受温度变形、振动荷载、长时间浸泡的影响, 很容易产生细微裂纹, 成为地下水进入机房的主要通道。

从渗流机理来看, 基坑外侧地下水在水头差的作用下向低位机房迁移, 如果底板下部有透水夹层或者岩面裂隙, 水流就会沿着阻力小的通道集中进入室内。渗涌初期墙脚潮湿、地面积水、局部返碱; 发展到一定程度后就会出现连续明流, 使排水沟长时间带水。泥沙随水流进入泵房, 会造成

【作者简介】蒋新伟(1976-), 男, 中国甘肃礼县人, 本科, 工程师, 从事水处理研究。

地基颗粒流失,形成内部侵蚀,给泵站基础稳定带来危险。

### 3 地下水渗涌对泵站安全运行的影响

地下水渗涌对泵站的危害主要是结构、设备、运维三个方面。结构上,长期渗水会使混凝土处在饱水状态,氯盐、硫酸盐等腐蚀性介质很容易进入孔隙,钢筋保护层的耐久性降低。底板、墙体接缝处受水压反复作用时,裂缝会继续扩大,局部空鼓、剥蚀、渗漏加重。如果基底细颗粒被水流带走,泵站底板受力状态就会发生变化,严重时会造成不均匀沉降。

设备方面,潮湿环境会使水泵、电机、阀门、控制柜和电缆桥架老化速度加快。金属表面锈蚀会使构件的强度、密封性降低,电气元件受潮后绝缘电阻下降,容易造成短路、误动作、停机故障。泵站担负着供水提升的任务,一旦关键设备因为渗水而损坏,就会造成生产和生活用水的保障问题。

运维方面,长期积水会增大清淤、抽排、防腐、维修、巡检的工作量。值班人员经常要应对地面积水、设备受潮等问题,运行管理由正常的维护转变为被动的抢修,管理成本也随之上升。渗涌问题如果不从源头上加以控制,后期的维修工作就会出现反复的情况,治理费用和停机风险都会随之增大。地下水渗涌对泵站运维影响较大,它直接影响泵站运营管理安全性,导致运营压力瞬间增大。设备运维人员需要动态监测渗涌节点状况,排查安全隐患,确保排水系统与止水设施都完好,这需要大量的监测成本。如果渗涌节点得不到快速有效控制,则能进一步引发地基沉降、结构变形等不同程度问题,甚至迫使泵站停止生产,为企业带来生产经济效益负面影响。

综合来讲,地下水渗涌会威胁沉降式泵站安全运行,它的危害贯穿于施工全过程,破坏泵站的安全稳定运行状态。纵观国内外,此类事故发生频繁,甚至成为沉降式泵站常态。如国内某泵站发生管涌,底板分缝位置出现隔水橡胶被冲破情况,大量粉砂被带出,直接威胁周边居民安全。究其原因,主要是泵站地下20m位置的流沙地质影响,再加之当时正处于汛期,地下水水压明显升高,最终导致水渗涌险情发生。在国外,同类事故也在美国某泵站发生,由于该泵站施工技术人员未能及时封堵钻孔,导致施工开挖过程中遭遇高压承压水,泵站内严重渗水。这一事故所造成的结果是泵站周围大量水土流失,地基土承载力也被一次性破坏,当地施工技术人员采用钻孔桩方案才弥补损失。

### 4 地下水渗涌防治技术方案

沉降式泵站基坑渗涌治理要实行外部减压、内部导排、节点封堵、动态监测相融合。外部减压的主要目的就是减小基坑周边地下水对泵房结构的直接作用。可在来水侧或者渗流集中侧设置渗漏管、盲沟或者集水廊道,将地下水提前收

集到检查井内,再由排水泵排到安全区域。渗漏管应采用耐腐蚀、抗压性能好的管材,外包反滤材料,防止泥沙进入管道造成淤堵。管底高程应比机房底板低一些,使地下水先进入导排系统,减少对底板和墙脚的顶托压力。

内部导排的重点就是使已经进入机房的水有条理地流动,防止无组织漫流。机房地面应设环形排水沟、支沟、集水坑,沟底应有适当的坡度,沟槽表面应采用耐磨、防渗材料处理。集水坑容量应满足短时最大涌水量的要求,排水泵应采用一用一备或者两用一备的方式配置,并且要配备液位自动控制和故障报警装置。对运行可靠性要求高的泵站,设置双电源或者应急电源接口,防止停电时地下水倒灌。

节点封堵的重点就是修复结构薄弱区。对底板裂缝、墙根渗水点、穿墙管周边空隙等处,可以采用压力注浆、柔性密封、刚柔结合防水层等方法。注浆材料的选择要根据渗水量和裂缝宽度来定,细小裂缝用化学浆液,较大空隙或集中涌水点用水泥基浆液和速凝材料联合封堵。封堵施工不能只看表面止水,要重视水流转移的风险,防止原渗点被封堵后在相邻处产生新的渗点。节点封堵可采用截渗阻流系统,具体做法就是对系统中止水帷幕进行选型优化。截渗阻流系统主要围绕三大维度统筹设计,分别是阻断渗透通道、降低水力梯度以及减少降水总量。首先对止水帷幕进行选型,参考地质条件选择适宜工艺,如采用TRD工法分析高承压水条件,保证系统周边地下连续墙整体性表现良好,体现优质挡土止水效果。如果是渗透性较强的地层,则在施工中采用深层水泥土搅拌连续墙,采用地层颗粒与喷射水泥浆制作止水墙体,有效截断高水头作用下的渗透通道。为较好降低水力梯度,可以对帷幕插入深度进行优化处理,对不同截渗深度与降水井布置数量进行分析,形成组合工况。在组合工况中,就能确定最优截渗深度以及降水井数量。当水力梯度达到较大量级时,渗涌量可能至少增大2倍,因此降低水力梯度的具体做法就是分区形成封闭截水帷幕,采用多种截水技术进行相互协同。如采用外围地下连续墙配合内侧高压旋喷桩,形成两道止水帷幕,满足节点封堵技术条件;最后是减少降水总量,可以设计风险控制与动态监测系统,对节点封堵的止水帷幕实施可视化、可预警、可追溯全过程监测,如监测基坑内外水位动态变化情况,并将所监测到水位数据上传到后台监管系统。当截水帷幕内外水位差逐渐增大时,可判断截水帷幕应用可靠性,并观察地下连续墙位置是否完整,如果存在缺陷,则需要密切监测注浆处理情况。

动态监测属于长期治理效果的保证。泵站应建立地下水位、集水坑水量、排水泵启停频次、室内湿度、结构裂缝和设备绝缘状态监测台账。雨季、融雪期和河道水位变化期要增加巡检次数。数据积累之后可以分析渗涌量与降雨、水位、季节之间的关系,为排水泵选型、管道清淤周期、防水维修计划提供依据。

## 5 排水系统优化措施

排水系统优化要以“收得住、排得出、控得稳、管得久”为原则。收水环节要将地下水、地表水、设备排污水分别组织，减少不同水源混入同一个通道造成负荷不清。基坑外侧渗漏管主要起到截排地下水的作用，机房内部排水沟主要负责地面积水的收集工作，设备排污水应独立接入指定管线。分区收集可以确定异常水源，提高检修效率。

排水能力设计应以最大涌水量为基础，留有安全余量。泵站处于近河沟或者富水地层时，排水设施不能只满足日常少量渗水工况，还要考虑暴雨后地下水位迅速抬升的不利情况。集水坑有效容积、排水泵流量、扬程、管径、阀门阻力、出口高程等要统一校核，防止出现泵能抽、管难排、出口倒灌的现象。

管道系统要重视防堵、检修。渗漏管外侧反滤层的配制要合理，检查井间距不宜过大，关键转弯和汇水节点处应设清淤口。室内排水沟盖板应便于开启，沟底坡度连续，防止局部沉积。排水泵前端设拦污设施，减少砂粒、杂物进入叶轮。对于含泥沙量大的渗水，应定期清掏集水坑，防止有效容积减少。

自动化控制可以提高排水系统的稳定性。液位控制器应设置启泵、停泵、高水位报警三个区间，防止水泵频繁启停。备用泵要定期轮换运行，防止长时间闲置造成锈蚀卡滞。控制柜应做防潮、防凝露处理，电缆进出口处应密封良好。值班系统可以加入声光报警或者远程提示的功能，使异常水位、泵故障、电源故障可以及时处理。

排水系统优化的外围部分主要采用“联合降水”组合方案，新方案注重集水明排、管井降水组合方案优化，这也是当前沉降式泵站基坑地下水排水系统优化的主流实践技术优化方向。组合方案可以采用联合布置要求，在基坑周边坡平台中间位置设置多个降水井，并在降水井内侧部位再设置集水井和排水沟，形成群井效应。群井效应可以快速疏干基坑表层积水部分，满足降排水结构相互配合要求，建立高效联动的系统“联合排水”机制。系统排水过程中要将降水深度控制在基坑开挖地下水位 $\geq 0.5\text{m}$ 位置，同时对基坑基底层部位的承压水部分进行调整，避免发生坑底突涌水情况，始终保持地下水位安全，满足干地施工要求。

目前，排水系统已经实现了智慧赋能优化，即智能化

降排水系统。新系统引入“智能化监测与动态调度”技术，可以为降排水系统优化指明技术发展与应用方向。例如，新系统的水位自动联动控制能力较强，可以在降水井内设置水位监测机构，满足水位报警要求。同时，监测数据也能实施反馈到后台终端，确保与降水泵建立稳定的电信号联动关系，实现对降水设备的自动启停。系统也提供智慧化、多目标降水方案，且各种方案能够根据实际生产需求实现滚动调度。例如在施工过程中，对水文数据、渗流边界条件数据的实测范围广、精度高，可以调整降水方案，确保滚动优化调度机制有效实施。如在优化排水系统过程中，实时调整降水井的综合抽水强度以及运行数量，满足施工干地开挖环境要求，避免出现过分抽排，导致大量地下水资源被浪费。

## 6 结论

沉降式泵站基坑地下水渗涌的根本原因就是机房低位布置、外侧水头压力长期存在、地层透水通道发育、结构防水节点薄弱共同作用。治理工作要从渗流路径、水压来源入手，单靠室内抽排不能取得持久的效果。

“外部截排减压+内部有序导排+薄弱节点封堵”的组合方案适合富水地层泵站。外部渗漏管、盲沟可以减小底板及墙脚水压力，内部排水沟、集水坑可以保证机房积水迅速排出，注浆封堵可以提高结构防水的完整性。

排水系统优化要重视最大涌水量校核、备用泵配置、防堵清淤、倒灌防控、自动报警。排水设施只有具备足够的冗余和可维护性，雨季高水位工况下才能保证稳定运行。

泵站地下水治理不是一次性维修工程，而是长期运行管理工程。应建立水位、水量、湿度、裂缝、设备绝缘和排水泵运行数据台账，依靠持续监测来判断治理效果，及时调整清淤、防腐、封堵和设备维护计划。

## 参考文献

- [1] 瞿成松. 基坑地下水控制质量管理[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 291-293.
- [2] 周念清, 等. 徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1950-1956.
- [3] 王硕, 曾超峰, 薛秀丽, 李明广, 蔡钢. 复杂越流含水层基坑抽水引发围挡变形发展规律[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2)
- [4] 迟民良, 等. 降水开挖共同作用下地连墙受力变形机制模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(2): 365.

# Exploration of Artificial Intelligence in Electronic Information Technology

Xueyun Gong

Zhongtian Technology Marine Systems Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226000, China

## Abstract

The continuous advancement of artificial intelligence (AI) technology has revolutionized the operational paradigms of electronic information systems. By harnessing AI's capabilities, these systems can perform large-scale data processing, analysis, and decision-making, enabling adaptive responses to diverse scenarios and thereby enhancing overall operational efficiency. Supported by AI, the deep integration of machine learning, deep learning, and reinforcement learning algorithms with electronic hardware and software systems offers innovative solutions to address critical bottlenecks in electronic information technology, including increased complexity, inefficient data processing, and limited dynamic optimization. This study provides a concise overview of the advantages and challenges of AI applications in electronic information technology, while exploring its practical implementations to serve as a reference for relevant professionals.

## Keywords

artificial intelligence; electronic information technology; application

# 人工智能在电子信息技术中的应用探究

龚雪云

中天海洋系统有限公司, 中国·江苏 南通 226400

## 摘要

人工智能技术持续发展改变了电子信息系统的运行模式。发挥人工智能技术的优势, 系统大量处理分析判断信息, 根据不同情况做出相应的反应, 从而提升整体的运行效率。在人工智能技术的支持下, 机器学习、深度学习、强化学习等算法与电子信息硬件、软件系统的深度融合, 可以为电子信息技术突破复杂度提升、数据处理效率不足、动态优化能力薄弱等瓶颈提供全新路径。在本文的研究工作中, 简单概述人工智能在电子信息技术中的应用优势和挑战, 探究其应用场景, 以供相关人员参考。

## 关键词

人工智能; 电子信息技术; 应用

## 1 引言

电子信息技术涵盖了电子元器件、通信网络、测量检测等多个细分领域, 是支持 5G、物联网、智能制造、智能终端等新兴产业发展的底层技术。电子信息技术与人工智能的融合正催生新一代计算架构与交互范式。计算架构从集中式到边缘与云端协同的转变, 人工智能则推动着数据处理和模型训练的变革。人工智能技术凭借强大的自主学习、模式识别、动态决策能力, 成为破解电子信息技术发展瓶颈的关键手段。通过两者的有效结合, 从而推动电子信息技术的高效应用, 实现产业从自动化向智能化跨越, 满足人们日常生活的需求。

## 2 人工智能在电子信息技术的应用优势和挑战

### 2.1 应用优势

人工智能与电子信息技术深度融合, 可以充分发挥智能技术的高效率、准确性和多元化的各类优势。人工智能技术的合理应用, 可以很好地对一些模糊信息进行筛选处理, 提升信息数据的处理水平和效率, 提高数据获取的准确性。人工智能应用于电子信息技术中, 利用一些非线性的思维方法分析数据, 有效提升学习能力。

电子信息产业是全球制造业的核心支柱, 人工智能的融入, 可推动产业从自动化向智能化跨越。例如在半导体产业中, 将人工智能应用于设计、制造、封测等各个环节, 实现全流程的智能化改造, 可以有效提升制造良率, 创新封装测试的方法, 拓展半导体产业的高端应用市场。应用于工业电子产业, 推动制造业向柔性生产和绿色生产转型, 普及预测性维护, 推动柔性生产线落地<sup>[1]</sup>。而且人工智能的应用还

【作者简介】龚雪云(1986-), 女, 中国江苏如东人, 本科, 助理工程师, 从事机械电子研究。

能有效控制成本，实现降本增效。人工智能的技术，在电子信息技术中的应用通过优化生产流程，降低运维成本和拓展增值服务，为企业和社会带来显著的经济效益。人工智能技术融入于全产业链中，有效降低研发成本和运维成本，控制全产业链的成本。同时提升产品和服务质量，确保各行业更加精准服务。应用 AI 分析用户行为推出个性化服务，可创造新的收入增长点。

### 2.2 应用的挑战

数据隐私和安全是电子信息系统中应用人工智能时不可忽视的重要问题。随着大量数据的收集和分析，保护个人隐私和数据安全变得至关重要。伦理和法律问题也是人工智能应用时需要重点考虑的方面。随着人工智能在电子信息技术中的应用，许多伦理和法律问题涉及了数据隐私、权责问题，以及人工智能的决策过程。伦理方面，包含了使用 AI 时如何处理个人隐私、数据伦理，以及人工智能决策是否公平公正<sup>[2]</sup>。法律问题包括了如何确保合规性、遵守数据隐私法和知识产权法。

## 3 人工智能在电子信息技术中的应用场景

### 3.1 通信与人工智能

通信技术是电子信息技术的核心分支，人工智能技术的引入，打破了传统通信系统依赖预设规则的局限，实现了从被动适配到主动优化的转变。频谱是无线通信的核心稀缺资源。基于强化学习的智能频谱管理系统，通过与环境的实时交互，动态调整频谱分配策略。例如，华为提出的智能频谱调度算法，采用深度强化学习模型，将频谱资源、用户需求、干扰强度作为状态输入，以频谱利用率和用户体验作为奖励函数，实现频谱资源的动态分配<sup>[3]</sup>。调制编码是通信系统提升传输效率的关键技术。基于机器学习的自适应调制编码技术，能够实时分析信道状态信息，动态调整调制阶段与编码率。例如，高通公司在 5G 基带芯片中集成的 AI-AMC 模块，采用卷积神经网络模型对信息衰落、噪声干扰等数据进行特征提取，预测最优调制编码方案。

### 3.2 控制系统与人工智能

自动化控制是电子信息技术中人工智能应用的关键领域之一，涵盖了从制造业到基础设施管理，以及生活中各种自动化系统的所有方面。PID 控制是工业领域应用最广泛的控制算法，但其参数整体依赖工程师经验。基于人工智能的 PID 参数自整定技术，可以实现参数的实时优化和动态调整。构建模糊推理规则库，将系统的偏差与偏差变化率输入，其中利用模糊逻辑推理，输出 PID 参数的调整量<sup>[4]</sup>。

工业生产中的多数被控对象具有强非线性时变特性。深度学习和强化学习为非线性系统控制提供了全新解决方案。在工业机器人轨迹跟踪控制中，基于深度强化学习的控制模型，无需建立精确的机器人动力学模型。通过对关节角度、角速度、力矩等数据的实时采集与学习，能够自主生成

最优控制策略。例如在冶金高炉炉温控制中，基于长短期记忆网络的预测控制模型，能够融合铁矿石成分，鼓风温度等多维度数据，预测炉温变化趋势，进行炉温的超前控制。

分布式控制系统是流程工业的核心控制架构，人工智能技术的引入，可以实现分布式控制系统的全局智能优化。在火电厂的分布式控制系统中，基于多智能体强化学习的优化模型，将锅炉、汽轮机、发电机等设备作为独立智能体，通过智能体间的协同决策，优化煤耗、气压、发电量等关键参数。



图 1 DCS 智能化自动化控制系统

### 3.3 半导体与集成电路领域中的应用

半导体与集成电路是电子信息技术的核心基石，其设计和制造过程具有复杂度高、精度要求严、流程长的特点。人工智能技术应用可以解决这一特点带来的难题，大幅度提升设计效率和制造良率。在集成电路方面，发挥人工智能的优势，实现设计的自动化。基于机器学习的智能设计自动化工具，实现设计流程的自动化与优化。在半导体制造工艺优化与缺陷检测中，也可以应用智能检测与工艺优化技术。基于深度学习模型，构建检测系统，开展对芯片的检测工作识别微观缺陷<sup>[5]</sup>。在存算一体芯片的智能架构设计中，可以应用人工智能技术，实现在存算中计算，大幅度提升算力密度与能效比。

### 3.4 信号处理与人工智能

语音信号处理是人工智能在电子信息技术中的一个重要领域，应用广泛，对人们的生活和工作产生重要影响。通过语音信号处理，计算机可以识别、分析和生成语音，使得许多自然语言处理和人机交互技术成为可能。语音识别技术是其重要分支，使计算机将口头语言转化为文本形式，可应用于语音助手，自动字幕生成、语音搜索等多个方面<sup>[6]</sup>。深

深度学习技术,尤其是循环神经网络和卷积神经网络在语音识别中取得巨大的成功。使人们更加自然地使用计算机进行交流。生成自然流畅的人工语音,在无障通信、虚拟助手和有声书等方面发挥重要的作用。图像信号处理是另一关键领域。人工智能在其中发挥重要作用,卷积神经网络已经成为图像处理的核心技术,使计算机可以自动识别和分类图像中的对象和模式,在人脸识别、物体识别、交通监测、医学影像分析等方面得到了广泛应用。

复杂信号智能特征提取是信号处理的核心环节。深度学习模型凭借强大的自主特征学习能力,成为复杂信号特征提取的最优解决方案。在雷达目标识别场景中,基于卷积神经网络融合的特征提取模型,对雷达回波信号的视频图像进行多层特征映射,自动提取目标的散射点分布,运动轨迹等身份特征。智能降噪与干扰也是十分重要的信号处理技术,基于人工智能的自适应降噪算法,能够根据噪声特征动态调整滤波策略,实现噪声与有用信号的有效分离。在工业振动信号处理中,基于生成对抗网络的降噪模型能够模拟设备正常运行的振动信号特征,从混杂机械噪声的采集信号中,还原故障特征波形,可以提早识别设备故障。调制方式识别是通信侦察、频谱监测、信号解调的前提,基于机器学习的调制识别模型,可以实现调制方式的自动分类与识别。在卫星通信领域,该模型可以实时识别敌方干扰信号的调制方式,为抗干扰通信策略的动态调整提供依据。

### 3.5 电子设备维护与维修

在电子设备维护与维修方面,人工智能技术的应用,为其提供了技术支撑和显著便利,推动事后维修向预测性维护转型。预测性维护,旨在提高设备和系统的可靠性,同时降低维护成本。这种方法依赖于AI技术来监测设备的性能数据以预测潜在故障和问题,从而采取预防性维护措施。分析大规模数据,训练机器学习算法,可以提供一定帮助。应用设备传感器和监测系统收集实时数据,通过机器学习模型分析这些数据,以识别其中的异常模式和趋势,发现潜在问题,系统触发警报或者自动化维护程序,以防止设备故障和停机<sup>[7]</sup>。

故障诊断与定位是电子设备维修的关键前提,传统方法依赖于人工拆机检测或者专用仪器测试。人工智能技术通过多源数据融合诊断和视觉识别诊断,两种路径,实现故障的快速精准定位。在复杂电子系统诊断领域,例如航空航天电子设备,采用多源数据融合诊断模型,整合设备的电压信号、电流信号、振动信号等,通过深度置信网络提取多维度特征的关联关系,实现故障的分层定位,从系统级定位到板

卡级,再到芯片级,可以有效提升故障诊断的准确率。

人工智能可以应用于维修过程中,实现维修的智能化与AI辅助决策。通过增强现实和AI融合的方案,为维修人员提供实时决策支持,降低对高技能人才的依赖。在航空航天电子设备维修领域,中国商飞研发了AR智能维修辅助系统,该系统通过AI算法识别待维修设备的型号与故障部位,将维修步骤、元器件安装规范的信息以虚拟标注的形式叠加在真实设备上,同时维修人员可通过语音指令调取设备的3D模型、历史维修记录等数据。

数字孪生的应用,可以为电子设备提供全生命周期的虚拟运维载体,通过构建与物理设备1:1映射的数字孪生模型,实时同步物理设备的运行状态数据,结合AI算法实现虚拟仿真与优化,进一步指导物理设备的维护、维修。例如在风电电子设备中,通过数字孪生模型模拟台风天气对逆变器的影响,提前调整逆变器的保护参数,避免设备因过载而损坏。

## 4 结语

综上所述,人工智能技术应用于电子信息技术领域中,可以实现自动化控制,有效控制成本,做好数据的深度分析,为各项工作提供支持。然而在实际应用中还存在一定的挑战,因此各行各业需要提高重视。人工智能技术在信号处理、通信控制系统、电子设备维护两个方面得到了广泛的应用,在未来的发展中,通过不断优化技术深度结合,可以促进电子信息技术领域的创新发展,为数字经济和智能制造的发展提供坚实的技术基础。

### 参考文献

- [1] 石坚,李文爱. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 消费电子,2025(16):155-157.
- [2] 王丽雅,刘传浩,吴修安,等. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 信息记录材料,2025,26(2):96-98,107.
- [3] 樊金凤. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 电子元器件与信息技术,2020,4(5):76-77.
- [4] 孟慧. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 数字通信世界,2023(8):111-113.
- [5] 张华英. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 电脑知识与技术,2021,17(12):181-182.
- [6] 张卒. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 今日自动化,2021(7):25-26.
- [7] 李圣洁,马龙敏. 人工智能在电子信息技术中的应用[J]. 科技创新与应用,2021,11(16):166-168.

# Research on Ultrasonic Cavitation-Assisted Remanufacturing Technology for Key Automotive Components

Shun He Mengjun Zeng Duan He

Zunyi Vocational and Technical College, Zunyi, Guizhou, 563006, China

## Abstract

This study conducts an in-depth exploration of the fundamental theories and practical operational principles of micro-jets and instantaneous high pressure generated by ultrasonic cavitation effects in the field of automotive core component remanufacturing. A comprehensive remanufacturing process scheme has been developed for typical components such as engine blocks and transmission gears. The research not only establishes a solid theoretical foundation for advancing the industrial application of this technology but also provides crucial technical support for achieving green and sustainable development in related industries.

## Keywords

ultrasonic cavitation; micro-jet; automotive components; remanufacturing

## 超声空化辅助汽车关键零部件再制造技术研究

何顺 曾孟军 何端

遵义职业技术学院, 中国·贵州 遵义 563006

## 摘要

本研究深入探讨超声空化效应产生的微射流和瞬间高压在汽车核心部件再制造领域的基础理论与实际操作要点, 针对发动机缸体与变速箱齿轮等典型件制定了完整的再制造工艺方案。不仅为推动该技术向工业实践转化奠定了坚实的理论基础, 还为相关行业实现绿色可持续发展提供了重要的技术支持。

## 关键词

超声空化; 微射流; 汽车零部件; 再制造

## 1 引言

再制造通过修复废旧产品使其性能接近甚至超越新品标准, 已成为实现资源节约与减排目标的关键技术路径之一。与传统制造相比, 再制造可大幅减少原材料消耗并降低能源需求, 展现出显著的经济与生态优势<sup>[1]</sup>。汽车关键零部件因长期运行而遭受严重的表面污染与磨损、疲劳损伤等问题, 传统修复工艺往往难以满足深层次清洁及高效改性的需求<sup>[2]</sup>。虽然能够改善部分性能指标但工序繁琐且能耗较高。

超声空化技术作为一种新兴的物理处理方式, 利用超声波在液体介质中的传播特性, 在声场强弱交替变化的作用下形成微米级气泡, 并在正压条件下迅速破裂释放能量。这一过程不仅能够微观层面有效清除顽固附着物, 还能通过对基材施加瞬时高温高压环境促进晶格重构及位错运动, 从而大幅提升材料表面的硬度与抗磨损能力。

本研究聚焦于该技术在汽车核心组件修复中的基础理

论探究, 致力于优化超声波参数配置, 并设计具有代表性的零部件再生制造工艺方案, 以推动其实现工程技术转化与实际应用价值提升<sup>[3]</sup>。

## 2 超声空化作用机理分析

### 2.1 空化泡动力学模型

液体介质中的一个气核, 假设里面充满不可压缩气体, 在此理想情况下 Rayleigh<sup>[4]</sup> 最早在 1917 年推导出了不考虑表面张力和粘性的理想化气泡的运动方程:

$$R\ddot{R} + 3/2\dot{R}^2 = (P_B - P_0)/\rho$$

式中:  $R$  为空化气泡半径长度;  $\dot{R}$  为气泡半径长度对时间的一阶导数, 即气泡半径变化速率;  $\ddot{R}$  为气泡半径对时间的二阶导数, 即气泡半径变化加速度;  $P_B$  为空化气泡外液体压强;  $P_0$  为液体的静压强, 即空气压强。

在超声场的影响下, 空化气泡破裂引发的微射流冲击压力可高达 GPa 量级; 同时伴随瞬时高温现象, 局部温度可能突破 5000 K 大关。上述极端物理化学条件为污染物去除及表面改性提供了有力驱动力。

【作者简介】何顺 (1996-), 男, 中国贵州遵义人, 硕士, 助教, 从事机械制造及其自动化研究。

## 2.2 清洗作用机制

超声空化对汽车零部件的清洗作用主要体现在三个层面：

1. 机械剥离：当传入液体中的超声波声压幅值达到空化阈值时，液体中就会产生空化效应，当气泡壁在固体壁面附近径向脉动时，由于壁的强约束，形成压力梯度。壁面附近的气泡容易变形，并在压缩阶段发生不对称溃灭而产生指向壁面的微射流。速度可达200-300m/s<sup>[5]</sup>，如同微型高压水枪，直接冲刷缝隙、盲孔内的油污、积碳和金属碎屑。

2. 冲击波作用：一个初始气核在施加超声振动液体中的膨胀相中半径变大，当来到液体中的压缩相时，空化气泡会在数微秒的时间内被压缩至崩溃，积聚在空化气泡内的能量瞬间释放产生瞬间高压。能够破坏污染物与基体之间的分子间作用力，使污染物整体脱落。

3. 化学活化：局部高温使水分子分解产生·OH自由基，加速有机污染物的氧化分解；同时高温促进化学清洗剂的活性，提升乳化、皂化反应效率。

4. 针对汽车零部件中难以清除的顽固性积碳，超声空化技术借助高频振荡实现对材料表面的微细化剥离，从而有效突破传统机械清洗方法可能引发的表层损伤难题。

## 2.3 表面强化机制

除清洗功能外，超声空化还能对材料表面产生显著的强化效应：

1. 塑性变形：微射流和冲击波反复冲击表面，使表层数十微米范围内发生剧烈塑性变形，晶粒细化；

2. 位错增殖：塑性变形引入大量位错，位错密度提升3-5个数量级，形成位错缠结和胞状结构；

3. 残余压应力：表面塑性变形受阻于基体，形成残余压应力层，抑制裂纹萌生和扩展；

4. 纳米结构形成：对于铝合金等材料，剧烈塑性变形可使表层晶粒细化至纳米级，显著提升硬度和耐磨性能。

5. 该“净化与增强”的协同作用使超声空化技术能够在再制造过程中实现污染物清除及表面功能优化双重目标，从而精简工艺环节并显著提升整体效能。

## 3 典型零部件再制造工艺流程

基于优化参数，针对发动机缸体和变速箱齿轮两类典型零部件，构建了超声空化辅助再制造工艺流程。

### 3.1 发动机缸体再制造流程

步骤 1: 拆解与初步清理。将发动机缸体从整机中拆解，去除附件，使用压缩空气吹扫表面大颗粒碎屑，对油道进行通检查，记录损伤情况。

步骤 2: 超声空化预清洗(除油)。参数:28kHz、功率密度 0.5W/cm<sup>2</sup>、温度 60℃、连续模式、时间 15min

目的: 去除表面油污、软化积碳，为精洗做准备。

步骤 3: 超声空化精洗(除积碳)。参数:40kHz、功率

密度 0.4W/cm<sup>2</sup>、温度 55℃、脉冲比 2:1、时间 25min

目的: 彻底去除缸体内壁积碳、油道内金属碎屑，清洗液采用碱性水基清洗剂(pH10)

关键点: 配备抛动装置，使缸体在清洗液中往复运动，确保油道、盲孔等隐蔽部位无清洗盲区。

步骤 4: 高压漂洗。使用 5MPa 纯水对油道进行脉冲冲洗，去除残留清洗剂和松动污染物，流量偏差 ≤5% 为合格。

步骤 5: 中和处理。采用弱碱性溶液(pH8.5)清洗 10min，中和表面酸性残留，预防锈蚀。

步骤 6: 干燥与防锈。60℃热风循环干燥 30min，表面喷涂水性防锈剂(浓度 3%)，短期防护。

步骤 7: 尺寸修复与表面强化。采用激光熔覆技术修复磨损部位，随后进行超声冲击强化(UIF)，参数: 20kHz、冲击能量 3J、覆盖率 150%，在表面形成残余压应力层，深度约 200 μm，表面硬度提升 15-20%。

步骤 8: 精加工与装配

按照新品公差要求进行精加工，完成装配后进行台架试验，性能恢复率 ≥95% 为合格。流程如图 1 所示。



图 1 发动机缸体再制造工艺流程图

### 3.2 变速箱齿轮再制造流程

步骤 1: 拆解与检测。将齿轮从变速箱中拆解，清洗检测齿面磨损情况、齿面硬度、尺寸公差，评估再制造值。

步骤 2: 超声空化除油。参数: 68kHz、功率密度 0.3W/cm<sup>2</sup>、温度 50℃、脉冲比 3:1、时间 15min。

目的: 去除齿面残留切削液、齿轮油，高频低功率模式避免损伤齿面精度。

步骤 3: 超声空化除锈。参数: 40kHz、功率密度 0.4W/cm<sup>2</sup>、温度 60℃、脉冲比 2:1、时间 20min。

目的: 去除齿面轻微锈蚀、氧化层，清洗液添加缓蚀剂(50ppm 苯并三氮唑)。

关键点: 齿轮单层悬挂于专用挂篮，禁止叠放，避免

相互碰撞。

步骤4: 漂洗与干燥。去离子水漂洗去除残留清洗剂, 电导率  $<10\mu\text{s/cm}$ ,  $60^\circ\text{C}$  热风干燥 20min。

步骤5: 接触角测试。水滴接触角  $<25^\circ$  为合格, 确保无油膜残留, 否则重复步骤2-4。

步骤6: 表面修复。采用堆焊或激光熔覆修复齿面磨损部位, 确保齿形精度。

步骤7: 超声滚压强化。参数:  $28\text{kHz}$ 、滚压力  $500\text{N}$ 、进给速度  $10\text{mm/min}$ 、覆盖率 200%。

目的: 齿面产生塑性变形, 形成残余压应力层, 表面硬度提升 20-30%, 耐磨性能提升 50% 以上。

步骤8: 渗碳淬火。根据齿轮材质和性能要求, 进行渗碳淬火热处理, 渗碳层深度  $0.8\text{-}1.2\text{mm}$ , 表面硬度提升。

步骤9: 精磨与装配。精密磨削保证齿面精度 ( $Ra\leq 0.4\mu\text{m}$ ), 装配后进行啮合试验, 噪音  $\leq 70\text{dB}$ 、温升  $\leq 40^\circ\text{C}$  为合格。流程如图2所示。



图2 变速箱齿轮在制造流程图

### 3.3 工艺流程特点

与传统再制造工艺相比, 超声空化辅助工艺具有以下显著特点:

- 清洗效率提升 60% 以上: 单批次可处理 50-80 件零件, 清洗时间缩短至传统工艺的 1/3;
- 清洁精度达到 0.1mm 级: 能彻底清除 0.2mm 以下的微孔积碳, 清洁合格率  $\geq 99\%$ ;
- 零件损伤率降至 0.5% 以下: 通过柔性清洗避免机械磨损, 保护精密表面;
- 工艺流程简化: 清洗与强化环节可部分合并, 减少工序数量;
- 环保效益显著: 水基清洗剂可循环使用 3-5 次, 废液

处理成本降低 60%。

## 4 结语

### 4.1 研究结论

本文系统研究了超声空化辅助汽车关键零部件再制造的基础理论与关键技术, 主要结论如下:

1. 超声空化作用下, 空化泡溃灭所引发的微射流、冲击波及局部极端温压环境, 可高效清除汽车零部件表面的油渍、积碳与金属残留物, 并通过塑性变形和位错增殖机制, 达成兼具去污与强化功能的协同效果;

2. 构建了以发动机缸体再制造工艺流程, 涵盖拆解清理、超声空化清洗、尺寸修复、表面强化、精加工装配等环节, 再制造零件性能恢复率增高;

3. 与传统方法相比, 该超声空化辅助再制造工艺显著提升了清洗效率, 其增幅超过六成, 并实现了亚毫米级别的高精度清洁效果, 同时将零件损伤概率控制在千分之五以内; 相较于常规技术, 废液处理费用大幅减少了约六成。该工艺展现出卓越的经济价值及环保性能。

### 4.2 展望

尽管超声空化辅助再制造技术展现出巨大潜力, 但仍存在以下有待深入研究的问题:

1. 多物理场耦合仿真: 建立超声场、流场、结构变形场的多物理场耦合模型, 预测空化泡分布和清洗效果, 指导工艺参数优化;
2. 智能监控系统: 开发基于声阻抗、声致发光信号的实时监测系统, 实现清洗效果的在线评估和参数自适应调整;
3. 新型换能器设计: 针对不同零部件的几何结构, 设计聚焦式、阵列式换能器, 提升超声场的均匀性和穿透性;
4. 复合工艺集成: 研究超声空化与激光熔覆、喷丸、滚压等技术的复合工艺, 进一步提升再制造零件的性能;
5. 标准体系建立: 制定超声空化辅助再制造的工艺规范、质量评价标准和验收准则, 推动技术产业化应用。

### 参考文献

- [1] 张明远, 李建国, 王立强. 汽车零部件再制造技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 1-15.
- [2] 刘晓东, 陈志华, 马宏伟. 超声波清洗技术在汽车发动机维修中的应用[J]. 汽车工程, 2023, 45(6): 789-796.
- [3] 王建国, 刘志强. 汽车再制造工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [4] RAYLEIGH L. VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2009, 34(200): 94-8.
- [5] 王艳, 何顺, 陈奕璋, 等. 超声空化辅助金刚石线锯切割单晶硅物理分析与试验验证 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (09): 114-126.

# Research on the Design and Port Application of a New Type of Electromagnetic Circular Hoist

Lei Fa<sup>1</sup> Guijiang Zhou<sup>1\*</sup> Guodong Yuan<sup>2</sup> Can Zhang<sup>1</sup> Quan Mao<sup>1</sup>

1. Dongjiakou Branch of Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266021, China  
2. Huludao Tianli Industrial Co., Ltd., Huludao, Liaoning, 125099, China

## Abstract

To address the deficiencies in port handling operations represented by coiled steel hoisting, a novel electromagnetic spreader for coiled steel is developed and designed based on conventional port portal cranes. Based on the principle of electromagnetic adsorption, the spreader is integrated with electrical control systems, safety protection devices and an intelligent management platform, enabling remote, high-precision and low-latency operation control. The proposed system reduces or eliminates on-site operators and realizes the safety concept of man-machine separation, man-cargo separation and unmanned operation under the warehouse, thus ensuring the intrinsic safety of operations. Meanwhile, it significantly improves hoisting efficiency, shortens ship turnaround time, reduces overall operating costs and enhances economic benefits, providing a solid foundation for the digital transformation of port enterprises.

## Keywords

round steel lifting equipment; automated control; inherent safety

## 一种新型电磁盘圆吊具设计与港口应用研究

法磊<sup>1</sup> 周桂江<sup>1\*</sup> 袁国东<sup>2</sup> 张灿<sup>1</sup> 毛泉<sup>1</sup>

1. 青岛港国际股份有限公司董家口分公司, 中国·山东 青岛 266021  
2. 葫芦岛天力工业有限公司, 中国·辽宁 葫芦岛 125099

## 摘要

针对当前以盘圆钢材吊装为典型代表的港口装卸中存在的弊端问题,以传统港口门机为主要作业载体,自主研发设计一种新型电磁盘圆吊具,利用电磁吸附基本原理,加装一系列电气控制设备、安全防护设施和智能管理系统,可实现远距离、高精度、低延迟的操作控制,减少甚至取消现场作业人员,实现“人机分离、人货分离、仓下无人”的安全理念,确保作业“本质安全”,同时能够大幅提升吊装作业效率,节省船舶装卸时间,有效降低港口企业综合运营成本、提升经济效益,为稳步推动港口企业数字化转型奠定坚实基础。

## 关键词

盘圆钢材吊具; 自动化控制; 本质安全

## 1 背景描述

《中国制造 2025》指出,全球制造业格局面临重大调整,国内经济发展环境发生重大变化,我国制造业发展必须紧紧抓住历史机遇,积极稳妥应对内外部挑战。“建设数字中国”为大型企业集团的产业升级指明了数字化建设的方向,各大企业集团均在发展规划中明确指出,坚持以数字产业化、产业数字化为主线,积极推动传统工业应用现场的数字化升级、转型的步伐。

【作者简介】法磊(1981-),男,中国山东青岛人,本科,高级技师,从事设备安全管理研究。

【通讯作者】周桂江(1989-),男,中国山东日照人,本科,工程师,从事设备安全管理研究。

## 2 问题分析

放眼全国,虽然门机制造技术突飞猛进,但是门机使用技术却发展缓慢,以盘圆钢材吊装为代表的码头船边作业仍是沿用传统的“门机+人”式作业,存在以下三点弊端[1]。

### 2.1 安全隐患大

船边作业现在全部由门机来配合人工操作属具,手动装卸。人、货、吊具、门机密切接触,人机需要大量的配合作业,作业中人-机-货之间频繁交叉,没有实现人机分离,作业安全在客观上得不到有效保证,大量人员参与现场作业,人的操作失误或者违章作业都容易造成安全事故,这样就加大了事故发生的概率,安全隐患极大[2]。

### 2.2 运营成本高

当前,各大港口现场作业工人老龄化严重,据港口行业内部调研数据显示,其中45~55岁人员占比约75%,

而且招工越来越难。随着工人工资的不断提高,用工成本也越来越高。按照“机械化换人,自动化减人”的理念,迫切需要改进工艺、减少人工占比[3]。

### 2.3 作业效率低

现有工艺需要多名人员在作业现场对起重工具属具进行装卸和操作,每钩作业都需要工人频繁上下车、频繁摘挂钩。同时,现有的吊运方式,易对盘圆钢材等货物造成摩擦刮伤,在当前的运作模式下,只能采取又慢又稳、绑牢勤查的方式减少损坏。这些都直接导致了作业效率无法提升。

## 3 设计方案

针对这一普遍问题,成立了技术攻关课题组,经过深入学习、调研、讨论和分析,根据门机起重机的自有特点,在不改变门机现有结构的前提下,充分结合运用先进电气技术,设计制造出新型盘圆吊具,推动装卸作业向电控化、智能化方向发展[4][5]。

具体方案:此电磁盘圆吊具配套港口门机通过专用钩头带电连接,电磁盘圆吊具通过6块电磁铁进行盘圆螺纹钢的吊运工作,在吊运过程中由两侧护翼保护钩加持勾住盘圆螺纹钢,起到防止因电磁铁断电致使盘圆螺纹钢掉落的作用。电磁钢板吊具通过智能控制系统实现远程控制,操作人员通过远程控制在驾驶室完成盘圆吊具的吊运工作,通过主、副定位针来实现物理精准定位[6]。定位时,操作人员通过操作港口门机以及钩头进行移动、旋转等动作,将电磁盘圆吊具下放至盘圆螺纹钢上方一定距离,利用主、副定位针靠在盘圆螺纹钢一侧后,使吊具的6块电磁铁对准盘圆螺纹钢,从而实现精准定位[7](见图1)。

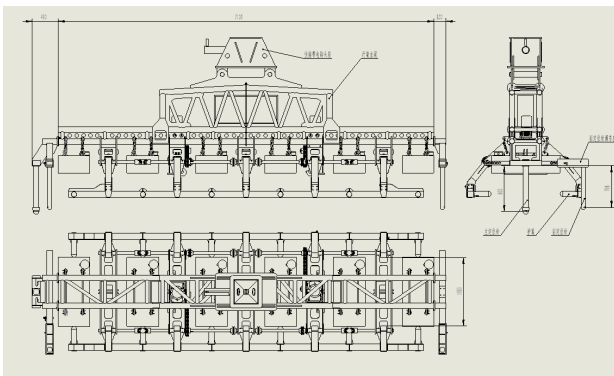


图1 吊具结构图

### 3.1 钩头带电改造(钩头带电配套使用)

盘圆吊具与钩头带电配套使用,钩头端加装电缆卷筒,预留取电和通讯端口,再与电动自动吊具连接,加装电力、通讯信号传输系统及缆线收放系统。

取电的技术要求如下

在不改变门机现有结构的前提下,从门机电气房取电,电压为380V、50HZ。在不改变臂架结构的前提下,在门机大臂铺设电缆通过快速插头引至钩头吊具,为钩头及电动吊

具提供功率不大于100KW。其中,吊具电磁部分供电总功率不大于60KW。

电缆采用高强度抗拉耐磨弯曲的专用缆线,电缆有抗紫外线、耐油等特点,适用电缆频繁弯曲和卷绕场所及干燥或潮湿场地使用。电压等级不低于600/1000V,电缆内部设有多种抗拉件结构,缆线整体抗拉强度不低于1000kg。

电缆大臂远端连接取电,旋转带电钩头自带集成智能PLC伺服电缆卷筒,满足旋转带电钩头缆线在任意升降速度下,电缆随动收放,适应在上下任意速度,不影响电力输送。

3.1.4 旋转带电钩头与盘圆电磁吊具设有远程无线遥控装置,可实现钩头下部吊具的旋转控制及电磁铁供电等。钩头遥控旋转速度不大于6rap/min,旋转角度不小于350度,方便操作人员控制放置。

配有电缆检测及预警提示装置,通过装置能够提前发现电缆问题并更换电缆。

### 3.2 钩头受控旋转吊钩(盘圆吊具工作原理)

工作原理如下:

电磁铁部分:为通电带磁、断电消磁通过磁力来吊运盘圆螺纹钢。

保护钩部分:分为两侧护翼,通过链条传动,电机减速机带动两侧护翼沿着两侧旋转轴旋转,当两侧保护钩穿过盘圆螺纹钢后停止。

### 3.3 吊具结构设计

回转范围不大于10m,具备远程遥控、异常报警等功能。满足吊装货物重量不小于15吨,吊具重量不大于25吨,总重量不大于40吨。

吊具框架结构采用钢结构箱型梁强度满足要求,通过梁架下侧吊耳,用链条方式与各电磁铁连接,梁架下端共挂有6块电磁铁,每块上设有磁铁异常断电保护钩和指示标志。

尺寸范围要满足,总长度不超过7.5米(边缘不超过6件盘圆总长),吊具梁架两端端部高度含电磁铁和被吊物盘圆(盘圆直径1.2米)不超过2米,宽度(含机械保护装置,在开起状态下)不超过1.5米。采用Q345以上规格优质钢材进行制造。

吊具吊梁下方设置6组电磁铁吊耳用于悬挂6台电磁铁悬挂方式采用软硬相结合的方式兼顾电磁铁位置支撑和相对移动冗余,6台电磁铁采用联吊方式排布,尺寸在长1.4米宽0.8米以内。

为确保电磁铁吊运安全,需装配物料机械安全锁紧装置,避免因电器线路故障导致失磁,物料落下造成安全事故(见图2)

### 3.4 可视化管理实现(远程控制和监视技术)

加装视频监控系統,为门机司机提供远程实时影像并对作业全过程进行记录,实现“全覆盖、可追溯、可倒查”,安全管理形成闭环。

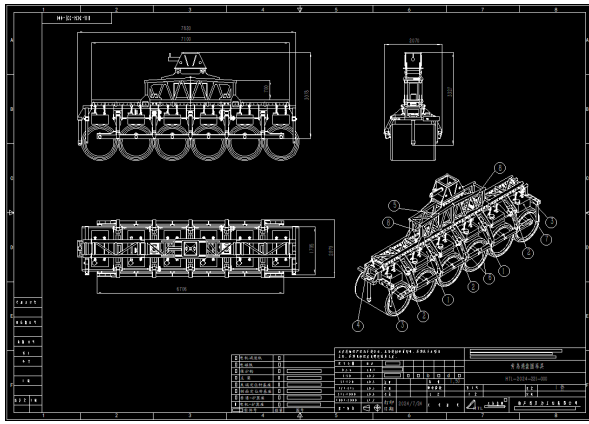


图2 吊具总装图

通过高度灵活的通信技术，操作人员可以在远控中心，远程控制门机以及智能化盘圆吊具和配套钩头带电，并实时监视门机和吊具的状态、位置和性能，这为实时干预和决策提供了有力支持 [8]。从技术角度来看，远程控制和监控涉及复杂的数据传输和处理过程 [9]。通信系统必须能够实时传输大量数据，包括门机的位置、速度、负载情况等 [8][9]。在远控中心，需要建立高效的数据处理和分析系统，用于处理来自门机的大规模数据流 [10]。为了实现远程控制，需要设计安全可靠的通信协议和机制，以确保操作指令的准确传达和门机的安全操作 [9][10]。

远程控制系统具体配置如下：远程操作台内设置独立的远控 PLC 系统，该系统可与门机实现稳定通信，进而完成远程控制操作 [10][11]。操作台远控 PLC 与机上自动化 PLC 之间的通信，采用西门子特有 S7 通信协议，保障通信的稳定性与兼容性 [11][12]。机上自动化系统 PLC 则与定位系统、激光扫描建模系统、安全防护、视频 / 语音系统和主机电控 PLC 等多个系统相连，采用工业总线或以太网通信方式，实现各系统间的数据高效交互与协同工作 [9][11]。

### 3.5 其他辅助系统（数字化应用系统）。

加装风稳系统、坐标控制系统、电力通讯信号输送及 PLC 程序控制系统、数据通讯电缆等。

## 4 典型应用

以盘圆线材或螺纹钢装卸为例，吊具（见图 3）直接用吸盘吸取线材，无工人参与作业，期间机械安全锁钩关闭，进行二次安全保护。门机运行过程中，吊具始终保持顺着车船长度方向吊运（坐标控制系统、PLC 系统），确保安全进入船舱（PLC 安全防撞控制系统）。无需稳钩，直接落钩（风稳系统无需辅助等待）。全过程门机司机和数字化系统相互配合，无需工人参与作业，通过数字化手段，实现自动化装卸。

## 5 前景优势

### 5.1 提升安全性

应用这种新型吊具的门机能做到“人机分离、人货分离、

仓下无人”，作业过程中无需工人在吊装区域内现场配合，将人从作业环节中隔离出来，现有作业当中由于人的参与而产生的安全隐患就彻底消除了，这就从根源上防止了安全事故的发生，从而实现“本质安全”的目标。

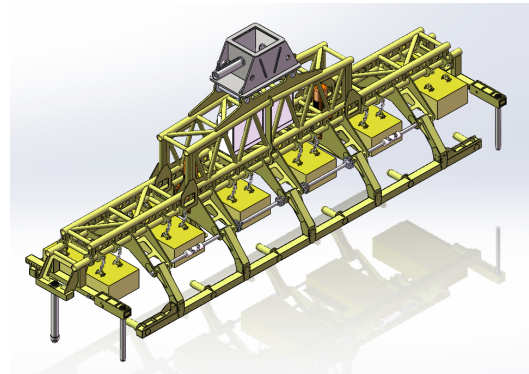


图3 吊具效果图

### 5.2 节约运营成本

应用这种新型吊具的门机实施远程操控，现场无需人员参与，与改造前相比可有效降低综合成本，减少装卸造成的货物损坏。以人工费为例，应用新型吊具后，多个岗位实现无人化操作，可大幅缩减现场作业工人员额，降低港口作业人工成本。

### 5.3 提高作业效率

全程自动化作业，无需工人上下车进行辅助作业，节省了单位作业时间，提高了作业效率。经测算，作业效率预计可以提高 15% 以上。同时，相应提高了码头泊位利用率，压缩了船舶在港停时。

### 5.4 推动数字化转型

这种新型吊具应用 PLC、坐标系统、防撞系统等一系列数字化手段，来配合门机装卸作业，将实现除了门机司机控制门机之外，其他控制基本由数字化手段来完成，并可为门机司机的控制提供技术帮助。项目的设备和系统，全部兼容目前主流的 WMS 类无人化控制系统，并预留了数字化管理系统接口。将来，依托 5G、互联网+、大数据等技术的加持，可进行门机的完全无人化升级，从而实现港口钢杂货物无人化装船，成为全国同行业标杆。

## 参考文献

- [1] 王健. 基于多维感知和智能控制的全自动门机开发和应用 [J]. 港口科技, 2025 (7):1-6.
- [2] 李磊. 自动化控制技术在门座式起重机上的应用研究 [J]. 工程机械与维修, 2026 (2):89-91.
- [3] 交通部运输研究所. 商港码头作业劳动力选用改善策略之研究 [R]. 2025.
- [4] 荣建生. 一种新型门座起重机[J]. 起重运输机械, 2025(24):74-82.
- [5] 王日华. 门座起重机电气系统故障诊断与解决方案[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2025(12):175-177.

- [6] 李庆凯. 门座式起重机回转机构一键锚定技术的应用研究[J]. 中国高新科技, 2023(12):147-149.
- [7] 许力. 全功能小车自动化轨道吊吊具精确定位研究[J]. 港口装卸, 2019(05):2-4.
- [8] 张磊. 港口门机远程控制系统的设计与实现[J]. 港口科技, 2024(8):32-36.
- [9] 刘军. 工业物联网在港口起重机远程监控中的应用研究[J]. 起重运输机械, 2025(18):98-102.
- [10] 陈峰. 港口设备远程控制通信协议的安全性设计[J]. 中国航海, 2024(3):112-116.
- [11] 赵伟. 西门子S7通信协议在港口起重机远程控制中的应用[J]. 电工技术, 2025(10):134-136.
- [12] 孙浩. 港口门机PLC控制系统的设计与优化[J]. 机械工程与自动化, 2024(6):189-191.

# A Brief Discussion on the Optimization Plan for Enhancing the Efficiency of Regular Maintenance of Passenger Cab Equipment in EMU Trains

Tianyu Pan

Wuhan CRRC Sifang Maintenance Center Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430200, China

## Abstract

In response to the problems such as lengthy processes, uneven resource allocation, and delayed status perception in the regular maintenance of passenger car equipment for EMU trains, this paper, based on the concepts of lean management, digital monitoring, and dynamic scheduling, has developed an optimization plan for improving the efficiency of passenger car equipment maintenance. By reconfiguring the maintenance processes for seats, air conditioning, lighting, door control, and passenger information display devices, the original 12 steps were reduced to 8 steps, and a state-triggered digital maintenance management system and a dynamic resource allocation mechanism were established. Case analysis shows that the single maintenance duration decreased from 120 minutes to 90 minutes, the timely rate of fault handling increased from 85% to 98%, the completion rate of maintenance tasks increased from 90% to 99%; the labor cost decreased by 15%, the spare part loss reduced by 10%, and the single comprehensive cost decreased by 12%. The research indicates that this plan can effectively enhance the efficiency, economy, and continuous optimization capability of the regular maintenance of passenger car equipment for EMU trains.

## Keywords

passenger compartment equipment of EMU; regular maintenance; lean management; digital monitoring; dynamic resource allocation

## 浅谈动车组客室设备常态化检修效率提升优化方案

潘天宇

武汉中车四方维保中心有限公司, 中国·湖北 武汉 430200

## 摘要

针对动车组客室设备常态化检修中存在的流程冗长、资源配置不均和状态感知滞后等问题, 本文基于精益管理、数字化监测与动态调度思路, 构建了客室设备检修效率提升优化方案。通过对座椅、空调、照明、门控及旅客信息显示装置的检修流程进行重构, 将原有12个步骤压缩为8个步骤, 并建立状态触发式数字化检修管理体系与资源动态配置机制。案例分析表明, 优化后单次检修时长由120 min降至90 min, 故障处理及时率由85%提升至98%, 检修任务完成率由90%提高至99%; 人工成本下降15%, 备件损耗减少10%, 单次综合成本下降12%。研究表明, 该方案能够有效提升动车组客室设备常态化检修的效率、经济性与持续优化能力。

## 关键词

动车组客室设备; 常态化检修; 精益管理; 数字化监测; 资源动态配置

## 1 引言

随着动车组运用密度持续提高, 客室设备检修已由传统周期性维护逐步转向高频次、短周转的常态化作业模式。座椅、空调、照明、门控及旅客信息显示装置等设备涉及多专业协同, 检修过程中容易出现工序重复、信息传递滞后、工具与人员配置不均等问题, 进而影响车组周转效率和运维成本<sup>[1]</sup>。尤其在到段检修与高级修场景下, 有限时间内完成多类设备的状态确认、异常排查和结果闭环, 对检修组织方

式提出了更高要求。

## 2 动车组客室设备常态化检修现状及问题分析

动车组客室设备常态化检修通常围绕座椅、空调、照明、门控与旅客信息显示装置展开, 现有作业模式仍以计划性巡检和到段复核为主, 检修人员依照标准化作业指导书对设备外观、紧固状态、功能响应以及接口状态进行逐项确认。这种模式在保障基础安全方面具有现实基础, 但在高密度运营和短时周转场景下, 流程链条偏长的问题逐渐显现, 尤其是同类项目在不同工位间被反复核验, 重复检查步骤占比已接近25%, 由此带来的作业停留时间延长较为明显。结合某动车组高级修案例观察, 单次客室设备检修时长平均超出标

【作者简介】潘天宇(1998-), 男, 中国湖北潜江人, 硕士, 助理工程师, 从事动车组高级修研究。

准15%，时间消耗主要集中在信息传递、状态复核以及异常追踪环节，反映出现行模式对多专业协同的适配程度仍显不足。

从资源组织方式来看，当前检修现场的人力与工具配置更多依赖经验预判，尚未形成与车组状态、检修节拍相匹配的动态调配机制。高峰时段内，关键工位的人员和专用工具往往呈现阶段性紧张，而低负荷时段又存在闲置现象，资源利用率仅约60%。这种不均衡并非单纯的数量不足，而是资源投放节奏与实际需求波动之间存在错位，导致部分检修任务在等待人员到位、工具转运和工序交接中被动延后。进一步来看，客室设备种类多、接口差异大，座椅调节机构、空调风道组件以及照明回路的检修需求并不一致，若仍沿用静态配置方式，难以兼顾设备复杂性与作业连续性，进而把局部拥堵扩展为整体效率损耗<sup>[2]</sup>。

### 3 动车组客室设备常态化检修效率提升优化策略

#### 3.1 检修流程精益化重构

基于精益管理理念对动车组客室设备常态化检修流程进行重构时，关键不在于简单压缩工序数量，而在于围绕价值流辨识把非增值活动从作业链条中剥离出来。现有检修组织通常将座椅、空调、照明、门控以及旅客信息显示装置分散安排在不同检查节点，信息传递、记录复核和状态回填占用了较多作业时段，容易使检修人员把时间消耗在重复确认上。由此，价值流分析被用于重新梳理作业路径，即从工单接收、设备分区、并行核查、异常确认到结果闭环进行连续观察，识别出冗余签认、跨工位重复记录以及不必要的返工确认环节，并将其从主流程中移出，使检修活动更贴近设备状态变化的真实节拍。

在流程组织层面，重构思路强调把原本按设备类别线性展开的检修方式，调整为按区域与专业耦合的并行作业模式。座椅结构检查、照明回路确认以及局部附件紧固可在同一车厢内同步推进，空调风道与温控组件的功能核查则可与门控状态确认交叉开展，从而减少工位间往返移动和等待时间。对于需要跨专业协同的项目，则把接口确认、功能联调以及异常标记放入同一作业窗口内处理，避免因前序环节未闭合而反复回退。这样一来，流程不再以单一设备为中心进行割裂式排布，而是依托客室空间组织方式把相邻任务进行合并，既保留了标准化检修所要求的可追溯性，也降低了低价值动作对节拍的干扰。

#### 3.2 数字化检修管理体系构建

在动车组客室设备常态化检修语境下，数字化检修管理体系的构建并非单纯叠加信息技术，而是把设备状态感知、检修指令流转以及工单闭环控制重新纳入同一数据链路之中。围绕空调、座椅、照明、门控以及旅客信息显示装置，可运用物联网客室设备状态监测系统把分散在客室各区域

的运行信息连续汇集起来，形成可追溯的状态底座。系统采集内容宜覆盖空调滤网压差、座椅调节次数、照明回路通断状态、门控动作次数以及显示屏通信延迟等指标，其中压差变化能够反映风道阻力累积情况，调节次数则可作为机械磨损强度的表征变量。借助传感节点、边缘网关以及车载通信链路，设备运行信息得以在检修到段前完成初步归集，检修人员不再依赖到场后逐项翻查，工单生成方式也由经验触发逐步转向状态触发。

#### 3.3 检修资源动态配置优化

在动车组客室设备常态化检修场景中，资源动态配置的优化并不只是对人员数量作机械增补，而是要把历史检修数据沉淀为可供调度决策调用的需求画像。围绕座椅、空调、照明、门控以及旅客信息显示装置的检修记录，可构建资源需求预测模型，将故障类型、作业时长、工位占用、工具调用频次以及返工概率纳入同一分析框架，从而识别不同周转时段的资源波动规律。鉴于动车组到段时间相对集中，检修负荷常在交接班、首末班次衔接以及高级修窗口内出现峰值，若仍沿用固定编组方式，便容易把人员等待和工具闲置叠加为隐性损耗。基于这一现实情境，资源投放方式宜由静态配备转向弹性匹配，即依托模型对未来若干小时内的工单密度进行预判，把基础检修组、机电联动组以及异常处置组进行动态重组，使人力、工器具以及备件周转能够贴合实际作业节拍。

从现场组织角度来看，弹性排班制度为资源配置的精细化运行提供了更具适配性的支撑。高峰时段将原有2组检修小组调整为3组，不仅能够缓解座椅锁止件、照明回路以及门控执行机构同时检修时的工位拥堵，还可把等待协调、跨岗支援以及工具转运时间压缩到较低水平。与传统固定班次相比，这种排班方式并未改变检修标准本身，而是把资源响应前移到工单生成之前，使班组编成随任务强度发生弹性变化。

### 4 优化方案实施效果评估

#### 4.1 效率指标对比分析

在动车组客室设备常态化检修优化方案落地后，效率指标的变化能够较直接地反映流程重构、数字化管理以及资源动态配置之间的耦合效果。结合某动车组客室设备检修案例的实施记录，单次检修时长由优化前的120 min下降至90 min，故障处理及时率由85%提升至98%，检修任务完成率由90%提高至99%。这些指标并非孤立波动，而是共同指向检修链条中等待、复核以及跨工位协同环节的同步收缩，表明优化方案对常态化检修的节拍控制已产生较为稳定的改善作用。

任务完成率由90%提高至99%，则从侧面说明资源动态配置对任务闭环能力的支撑开始增强。高峰时段内，弹性排班与工具周转配置把原先容易出现的人员短缺和

设备闲置状态进行了重新平衡,使座椅、空调以及门控相关任务能够在同一检修窗口内连续推进,减少了因等待支援而形成的未完工项。结合该案例的实施过程,完成率接近满额并不意味着任务复杂度下降,而是说明检修组织方式已更适宜高密度周转场景下的实际需求,能够把有限资源更多投向关键缺陷处置与复核签认环节。综合观察上述指标变化,优化方案对动车组客室设备常态化检修效率的改善具有较明确的指向性,单次时长缩短、及时率提升以及完成率提高之间形成了相互支撑的关系。尤其是在客室设备多专业并行、周转时间紧张的运行语境中,这类变化对于压缩检修占线时间、提升车组周转连贯性以及增强异常处置能力具有较强的现实意义。

#### 4.2 成本效益评估

在动车组客室设备常态化检修的优化实施过程中,成本结构的变化较能反映流程精益化、数字化管理以及资源动态配置之间的协同效应。结合某动车段客室设备检修组织案例,优化后人工成本较优化前降低15%,主要缘由在于重复核验工序被压缩以后,检修人员在信息传递、状态复核以及结果回填环节上的无效停留明显减少,班组间的交接等待也随之收窄。与此同时,备件损耗减少10%,这一变化并非来自备件使用强度的简单下降,而是源于状态前移识别机制把部分潜在缺陷提前纳入处置范围,避免了故障扩展后带来的整件更换和附属部件连带拆装。对客室设备这类多专业耦合对象而言,座椅锁止件、门控执行机构以及照明接插件的损耗控制,往往与检修节拍是否贴合设备真实状态直接相关,优化后的组织方式使部件拆装次数得到抑制,材料消耗因而呈现出更平稳的下降趋势。

从总体支出角度来看,优化方案落地后,单次常态化检修的综合成本下降12%,其构成并不局限于人工和备件两项,而是同时涵盖工时占用、工具周转、异常追踪以及重复进场所形成的隐性支出。鉴于动车组客室设备检修具有到段时间集中、任务类型分散以及工位衔接紧密的特性,若仍维持传统静态配置方式,成本往往会在等待协调和返工确认中被动放大。优化后,工单流转路径更为紧凑,数字化监测又把异常定位前移到设备状态变化阶段,使检修人员能够把资源集中投向关键缺陷处置,进而减少了不必要的开盖、复测和跨工位返工。结合该案例的投入产出测算,方案实施后每投入1元可节省2.5元,说明前期在监测终端、数据接口以及管理流程重构方面形成的投入,能够在后续持续运维中转化为更高比例的成本回收<sup>[3]</sup>。

#### 4.3 可持续性与推广价值分析

从常态化检修体系的演进路径来看,该优化方案的复制性主要体现在流程组织逻辑、状态监测口径以及资源调

度方式三方面具有较强的通用特征。动车组不同车型在客室设备布置、接口形式以及检修节拍上存在差异,但座椅、空调、照明、门控以及旅客信息显示装置所对应的基础检修逻辑并未发生根本变化,因此,前述以价值流梳理为基础的流程精益化重构,可以在同类车型的客室设备检修场景中平移应用。结合CRH系列、复兴号不同编组的维护现实,只需围绕设备编码规则、监测点位密度以及工位衔接顺序作适配调整,便可把原有分散式核验转化为区域化并行处置,从而减少重复记录以及跨工位返工对节拍造成的干扰。

从长期运行效果来看,常态化检修体系一旦与数字化监测、动态调度机制形成稳定耦合,设备故障率的下降便不再体现为短周期波动,而会逐步沉淀为持续性的风险收敛过程<sup>[4]</sup>。基于检修数据台账不断积累的背景,滤网堵塞、门控迟滞、照明回路接触不良以及座椅锁止件磨损等问题能够更早进入维护窗口,潜伏性缺陷被提前处置后,故障链条扩展的概率随之减弱。按照该类设备磨损规律的演化趋势,后续年度故障率有望维持约5%/年的下降幅度,这种下降并不依赖额外增加检修强度,而是来自状态识别更前置、维修决策更贴近真实劣化过程以及资源投放更契合检修负荷的共同作用。

## 5 结语

本文围绕动车组客室设备常态化检修效率提升问题,提出了以流程精益化重构、数字化检修管理和资源动态配置为核心的优化路径。实践结果表明,该方案在缩短检修时长、提高故障处置及时性、增强任务闭环能力以及降低综合成本方面均具有较明显成效。从应用前景看,该模式具备较强的通用性和推广价值,可为同类动车组客室设备检修组织优化提供参考。后续可进一步结合AI故障预测技术,完善多源数据融合分析与趋势预警机制,推动常态化检修由状态响应向智能预测持续演进。

#### 参考文献

- [1] 户佐安,张文豪,周甲明,黄鑫磊,张玉召.考虑可变编组和均衡检修的动车组运用计划编制优化研究[J].北京交通大学学报,2025,49(02):14-24.
- [2] 华鼎,王鹏,于伟,肖会超,蔡田,章阳.动车组制动系统软件自动化测试方法研究与实现[J].铁道机车车辆,2025,45(03):81-87.
- [3] 范立,李丹勇,刘冰,尤嘉,贾潞.基于改进SOLOv2网络的动车组TEDS图像辅助识别关键技术研究[J].铁道机车车辆,2025,45(02):1-11.
- [4] 赵日鑫,何世伟,张杰,刘杰,丛铭,吴艺迪.高铁枢纽环线公交化列车新增运行线优化方法[J].北京交通大学学报,2025,49(01):28-37.

# Research on Optimization of Intelligent Manufacturing Process for Key Structural Components of Rail Transit Vehicles

Chang Tong

Wuhan CRRC Sifang Maintenance Center Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430200, China

## Abstract

In response to the problems such as large cycle time fluctuations, high defect rate, and insufficient equipment utilization in the production of key components for rail transit vehicles, this paper focuses on the manufacturing process of the bogie frame and constructs a process optimization method based on digital twin, intelligent detection, and flexible scheduling. By establishing a mapping model between welding parameters and deformation amounts, combining machine vision and multi-source sensing to achieve pre-recognition of process quality, and using genetic algorithms to dynamically configure resources at multiple workstations, a comprehensive optimization path for quality, efficiency, and cost is formed. The application results show that the production cycle time has been shortened from 12.0 hours per piece to 7.5 hours per piece, the defect rate has decreased from 3.5% to 1.2%, the equipment utilization rate has increased from 65% to 88%, and the first-time inspection pass rate has increased from 93.1% to 98.4%. The study indicates that this method can effectively enhance the stability and flexibility of the production of key components, providing a reference for the intelligent manufacturing of rail transit equipment.

## Keywords

rail transit vehicles; key structural components; digital twin; intelligent detection; flexible scheduling

## 轨道交通车辆关键结构件智能制造工艺优化研究

童昶

武汉中车四方维保中心有限公司, 中国·湖北 武汉 430200

## 摘要

针对轨道交通车辆关键结构件生产中存在的节拍波动大、不良率偏高、设备利用率不足等问题, 本文围绕转向架构架制造过程, 构建了基于数字孪生、智能检测与柔性调度协同的工艺优化方法。通过建立焊接参数与变形量的映射模型, 结合机器视觉与多源传感实现过程质量前移识别, 并采用遗传算法对多工位资源进行动态配置, 形成面向质量、效率与成本的综合优化路径。应用结果表明, 优化后生产节拍由12.0 h/件缩短至7.5 h/件, 不良率由3.5%降至1.2%, 设备稼动率由65%提升至88%, 一次交检合格率由93.1%提升至98.4%。研究表明, 该方法能够有效提升关键结构件生产的稳定性与柔性化水平, 为轨道交通装备智能制造提供参考。

## 关键词

轨道交通车辆; 关键结构件; 数字孪生; 智能检测; 柔性调度

## 1 引言

随着轨道交通装备制造向高质量、高一致性与高柔性方向发展, 关键结构件生产正面临多品种、小批量、强耦合工艺条件下的组织挑战<sup>[1]</sup>。以转向架构架为代表的结构件, 其制造过程涉及下料、组对、焊接、去应力处理、机加工与复检等多个环节, 任一工序参数波动都可能引发质量偏差并向后续环节传递。传统生产模式主要依赖人工经验进行工艺调整, 检测环节偏后置, 调度方式也缺乏对设备状态、

订单结构与物流约束的统一响应机制, 导致节拍不稳定、返修频繁以及资源利用效率不高。

## 2 工程概况

### 2.1 某轨道交通车辆关键结构件生产现状

某轨道交通车辆关键结构件以转向架构架为代表, 其生产组织通常覆盖下料切割、坡口加工、组对定位、焊接成形、去应力处理、机加工修整以及尺寸复检等环节, 工序之间存在较强的前后依赖关系, 任一节点的偏差都可能向后续装配精度传递。结合车体承载安全与运行可靠性要求, 现有生产线仍以人工经验调参与离线流转为主, 工艺参数、设备状态以及质量信息之间缺少连续关联, 造成节拍控制不够稳

【作者简介】童昶(1991-), 男, 中国湖南常德人, 硕士, 助理工程师, 从事高速动车组检修研究。

定,批次间一致性也难以保持。图1所示流程能够反映出当前生产组织的基本形态,即以单件流转为主、工位切换频繁、信息反馈链条较长。

在具体运行层面,切割环节对板材余量控制和热影响区管理依赖人工判定,焊接环节则对坡口间隙、焊丝送进速度以及热输入窗口保持高度敏感,机加工环节又对前道焊后变形补偿提出更高要求。由于这些参数尚未形成在线闭环控制,生产过程往往表现出明显的波动性,现有节拍约为12 h/件,不良率约3.5%,设备稼动率约65%。从工艺链条的衔接状态来看,等待、返修以及重复找正占用了较多有效时间,资源配置也呈现出局部拥堵与阶段闲置并存的状态,难以适配小批量、多品种的订单组织模式<sup>[2]</sup>。

## 2.2 智能制造工艺优化需求分析

结合转向架构架生产链条的实际运行状态可以发现,当前工艺优化需求并不局限于单一环节的局部修补,而是同时指向质量、效率以及成本三个维度的协同改进。就质量控制而言,焊接热输入、坡口装配间隙以及机加工余量之间存在较强耦合关系,若仍依赖经验判定,容易把前序误差放大到后续精加工阶段,进而增加返修与报废风险。基于轨道交通车辆关键结构件对服役安全性的高要求,工艺体系需要把不良率由当前约3.5%压缩至1.5%以下,并将过程偏差控制从事后修正转向前置识别,这就对数字孪生建模提出了更明确的应用需求。数字孪生并非单纯的三维可视化,而是把现场设备状态、工艺参数以及质量数据映射到虚拟空间中开展同步推演,用以支撑参数寻优与异常预判。

从效率提升的现实语境来看,现有生产组织仍然存在工位切换频繁、等待时间偏长以及返修占比偏高等问题,生产节拍约12 h/件已难以适配小批量、多品种订单的连续交付要求。若要把节拍缩短至8 h/件,必须把下料、焊接、去应力处理以及机加工等环节纳入同一套协同控制逻辑之中,借助智能调度对设备占用、工序衔接以及物流流向进行动态重构。柔性生产调度的核心并不在于简单压缩时间,而在于根据订单结构、设备负载以及在制品状态实时调整资源分配,使关键工位维持更稳定的运行节奏。与此同时,设备稼动率提升至85%以上,也要求把停机等待、换型准备以及重复找正纳入统一的约束优化框架,以减少隐性时间损失。

从成本降低的角度观察,传统模式下的材料消耗、返修返工以及人工复检共同抬高了单位制造成本,且工艺波动越大,成本外溢越明显。为适应高一致性制造要求,工艺优化不仅需要降低直接加工损耗,还需要减少因缺陷流转而带来的附加处置成本。智能检测体系在此环节具有承上启下的作用,其本质是借助机器视觉、激光测量以及多源传感数据融合,把尺寸偏差、焊缝缺陷以及装配错位尽可能前移识别,从而压缩质量损失的传递链条。结合当前产线的技术基础,只有把数字孪生、智能检测以及柔性调度联动起来,才能为关键结构件生产建立更具响应能力的优化路径,并使工艺调

整从被动纠偏逐步转向主动适配。

## 3 轨道交通车辆关键结构件智能制造工艺优化方法

### 3.1 基于数字孪生的工艺参数优化模型构建

面向轨道交通车辆关键结构件焊接成形过程,数字孪生工艺参数优化模型的构建并不止于对现场设备进行三维复刻,而是把材料属性、工装约束、焊接参数以及成形质量统一纳入同一数据语义空间之中。结合转向架构架焊接场景,模型层面需要把母材牌号、板厚、坡口形式、装配间隙以及焊丝规格等静态信息,与电流、电压、焊接速度和层间温度等动态变量建立持续关联,并借助传感采集与工艺数据库形成同步更新机制。

### 3.2 智能检测与质量控制体系设计

围绕转向架构架焊接成形后的过程管控需求,智能检测体系被设计为面向焊缝缺陷、尺寸偏差以及装配错位的连续感知单元,其运行逻辑并不止于终检环节的结果判读,而是把检测节点前移至组对、焊接以及机加工衔接界面。结合现场工艺节拍,系统以机器视觉为核心采集手段,联动激光位移传感器、工业相机以及编码同步触发装置,对坡口边缘形貌、焊缝余高、咬边、气孔和错边量进行同步识别;同时,对关键尺寸如对角线长度、孔位中心距以及基准面平面度实施在线测量。基于这种多源感知方式,检测数据能够在同一时间轴上完成配准,进而把外观缺陷、几何偏差以及工艺参数波动关联起来,为质量判定提供连续依据。

### 3.3 柔性生产调度与资源配置优化

鉴于转向架构架多工位、多品种小批量场景下存在工位切换频繁、物流阻滞与返修插单交织的现实情境,本研究把柔性调度建模为多约束组合优化问题,选用遗传算法作为求解器,并把设备能力边界、订单优先级、工序前后依赖、换型准备时长、夹具占用、AGV路径冲突与去应力工序时间窗一并纳入约束集合。编码层把工序序列与资源指派组合为双层染色体,针对切割、焊接、热处理和机加工等关键节点构建可重入工艺路线表达,以支撑不同车型切换时的快速重排与装夹再利用策略的自动衔接<sup>[3]</sup>。

适配性评估采用多目标适应度函数,综合节拍偏差、在制品水平、关键设备负载均衡性与换型损失,并以数字孪生的状态预测和检测系统的缺陷预警作为动态权重来源,把排程偏好随设备健康与质量风险实时调整。运行机制采用事件驱动滚动时域,订单到达、设备停机与质量预警触发时启动快速重排;变异与交叉算子在资源日历与物流约束下进行受限搜索,避免不可行解占用计算窗口。资源配置层通过对焊接单元中机器人与人工协同比例、班次结构与工装池分配进行联动优化,把高频换型工位与共享夹具池绑定为优先级更高的可重构单元,并对AGV与起重工位的时隙进行统筹,以降低在制品跨区等待。

## 4 工艺优化效果评估与应用验证

### 4.1 工艺优化前后关键指标对比分析

结合转向架构架生产链条的工艺重构过程可以发现,优化效果并不体现在单一设备或单道工序的局部变化,而是集中反映在节拍、质量以及设备利用水平的协同改善上。原有生产组织以经验调参和离线处置为主,切割、焊接、热处理以及机加工之间的信息传递链条较长,工位等待和重复找正占用了较多有效时间,生产节拍长期维持在12 h/件。随着数字孪生参数优化、在线检测前移以及柔性调度联动实施,关键工序之间的耦合关系得到重新梳理,节拍被压缩至7.5 h/件,工序衔接的稳定性也随之增强。

从质量控制视角观察,不良率变化最能体现工艺链条的内在改进。优化前,焊接热输入波动、坡口装配间隙偏差以及机加工余量控制不稳,容易把前序误差持续放大,导致返修与报废占比偏高,不良率约3.5%。在数字孪生模型对工艺窗口进行重构之后,焊接参数设定逐步摆脱了经验依赖,智能检测体系又把尺寸偏差和焊缝缺陷前移到过程阶段识别,缺陷流转链条被明显压缩,不良率下降至1.2%。这一变化说明,质量改善并非来自单次修正,而是来自参数寻优、过程预警以及工艺回写的连续作用。

### 4.2 智能制造系统运行稳定性验证

智能制造系统的稳定性验证建立在连续30天的生产运行记录之上,观察重点并不放在单次开机或短时波动,而是放在焊接参数回写、在线检测联动以及调度重排三类功能在真实生产节奏中的持续响应能力。结合转向架构架多工位协同的运行语境,系统在日排产、工位切换以及质量预警触发时均保持了较稳定的数据交互链路,工艺参数与设备状态能够按既定频率完成同步刷新,未出现因数据不同步而导致的排程中断现象。需特别指出的是,稳定性验证的核心并不在于追求某一时刻的峰值表现,而在于考察系统在长周期负载下是否仍可维持一致的控制逻辑和处置节奏。

从故障运行特征来看,30天内系统共出现4次可记录故障,主要集中于工业相机通讯短时中断、AGV路径冲突提示以及局部传感器信号漂移等环节,单次故障持续时间均较短,且均可在现场维护和程序重连后恢复正常运行。进一步观察发现,故障并未对主生产链条形成持续性干扰,焊接单元、检测单元以及调度单元之间的联动关系仍可维持闭环状态,说明该系统在软硬件接口设计以及异常隔离机制方面具备较好的适配性。与此同时,平均故障间隔时间延长至168 h,反映出系统在连续运行过程中并未因多源数据叠加而快速积累不稳定因素,运行秩序保持相对平稳。

### 4.3 经济效益与社会效益评估

从工艺重构后的资源消耗结构来看,经济效益主要体现在制造成本压降、产能释放以及返修损失收敛三个方面。数字孪生参数优化把焊接热输入和装配偏差控制在更稳定的窗口内,智能检测则把过程缺陷识别前移到组对与焊接阶段,柔性调度又把设备空转、换型等待以及物流阻滞纳入统一排程约束,由此形成的协同效应使单位产品综合制造成本呈现持续下降趋势。结合转向架构架的批量生产组织测算,优化方案实施后,年降低生产成本约200万元,同时由于工位衔接效率改善以及设备利用水平抬升,年产能提升约15%,为订单连续交付提供了更充足的产能余量。

进一步观察发现,成本节约并不仅来自直接加工环节的压缩,还来自质量损失链条的缩短。焊接缺陷、尺寸偏差以及返修插单在原有模式下容易相互叠加,形成材料重复占用、人工复核增加以及设备重新找正等隐性支出;优化后,过程预警与参数回写机制把多数波动控制在前道工序内,使返修返工占比明显收敛,进而减少了辅助工时和附加能耗。对于轨道交通车辆关键结构件这种高一一致性要求较强的产品而言,这种成本改善方式更具可持续性,也更契合小批量、多品种生产组织下的精益化管理需求。节拍压缩、稼动率提升以及返修率下降共同构成了经济收益的主要来源,且各项收益之间具有较强的联动关系。

## 5 结语

本文面向轨道交通车辆关键结构件生产过程,提出了数字孪生参数优化、智能检测闭环控制与柔性调度协同联动的工艺优化思路,并通过应用验证证明了其有效性。结果表明,该方法能够在缩短生产节拍的同时兼顾质量提升与资源优化,推动制造过程由经验驱动向数据驱动转变。研究进一步说明,工艺优化不应局限于单一环节改进,而应从设计、制造、检测与调度多个层面建立统一协同机制。后续可结合更高精度的过程数据采集与更复杂的多目标优化策略,进一步提升系统的自适应能力与跨车型复用能力。

### 参考文献

- [1] 向远琴,万宏伟,孙敏.基于构型的轨道交通车辆试验管理研究[J].黑龙江科学,2025,16(22):150-152.
- [2] 秦兆伯,杨晨,穆禹丞,李炳萱,陈广泰,于健.基于工艺参数库的铁路货车车钩铸造件等离子切割作业方法[J].科学技术与工程,2025,25(16):6698-6706.
- [3] 李森.焊装车间手动线自动化改造的关键技术研究与实践[J].汽车维修与保养,2025,(12):60-61.

# Research on Automatic Driving Technology Route Selection and Management Decision-making Based on Investment Performance Evaluation

Rao Fu Haoyue Wang Jingyan Zhu Jiawei Li Xiyuan Tan Weiwei Guo

Central University of Finance And Economics , BeiJing, China, 100098

## Abstract

From the perspective of management science and engineering, this paper constructs an investment performance evaluation framework for autonomous driving technology, and comprehensively uses the analytic hierarchy process ( AHP ) and system dynamics to compare the advantages and disadvantages of the two technical routes of bicycle intelligence and vehicle infrastructure coordination. It is found that in the short term, bicycle intelligence should be given priority to develop, taking advantage of its high technology maturity and fast commercialization ; in the long run, we should focus on the development of vehicle infrastructure coordination, which is better in system efficiency, safety and environmental benefits. The research fills the gap between technology application and investment performance evaluation in the existing research, and provides scientific basis and management enlightenment for the selection of automatic driving technology route, investment decision-making and project management.

## Keywords

investment performance evaluation; management science and engineering; technology route selection; vehicle intelligence; vehicle-road coordination; Analytic Hierarchy Process (AHP)

# 基于投资绩效评估的自动驾驶技术路线选择与管理决策研究

付晓 王浩玥 朱婧艳 李嘉伟 谭璽元 郭伟伟

中央财经大学, 中国 · 北京 100098

## 摘要

本文从管理科学与工程视角出发, 构建自动驾驶技术投资绩效评估框架, 综合运用层次分析法 (AHP) 与系统动力学, 比较单车智能与车路协同两种技术路线的优劣势。研究发现: 短期应优先发展单车智能, 利用其技术成熟度高、商业化快的优势; 长期应重点发展车路协同, 其在系统效率、安全与环境效益上综合更优。研究填补了现有研究中技术应用与投资绩效评估脱节的空白, 为自动驾驶技术路线选择、投资决策与项目管理提供了科学依据与管理启示。

## 关键词

投资绩效评估; 管理科学与工程; 技术路线选择; 单车智能; 车路协同; 层次分析法

## 1 引言

在新一轮科技所带来的革命中, 自动驾驶技术成为全球所关注的焦点, AI 和大数据带动其向高级别发展, 该技术能够增加安全性和效率、削减能源消耗、促进智慧交通往前发展, 现有的研究多着重于技术应用, 缺少以投资绩效评估和项目管理视角所做的系统分析, 本研究自管理工程学切入, 形成投资决策绩效评估框架, 填补技术经济分析跟项目可行性评价的空白, 给资源配置提供材料。

## 2 国内外研究现状

基于德温特与 CiteSpace 分析, 近 10 年自动驾驶快速发展, 路径规划与定位专利占比高<sup>[1]</sup>。华为<sup>[2]</sup>、特斯拉<sup>[3]</sup>等专利持续突破; Waymo 验证可靠性<sup>[4]</sup>, 宝马、奔驰引入部分功能。首钢基金投资理想与毫末, 强调技术与商业结合: 理想实现正现金流, 毫末“风车战略”推动落地<sup>[5]</sup>。

## 3 自动驾驶技术概述与技术路线分析

### 3.1 单车智能技术路线

1) 架构演进: 从模块化进入到端到端, 模块化架构对任务分解, 得到感知、定位等子模块, 但模块间较易出现信息损失以及误差累积, 端到端架构依靠深度学习把传感器数据直接变成行车的决策, 所有的模块都采用神经网络, 去掉中间的环节, 让效率与鲁棒性提高<sup>[6]</sup>, 有感知 - 控制和感

【作者简介】付晓 (2005–), 女, 中国河北石家庄人, 在读本科生, 从事项目投资决策研究。

知 - 规划这两种分类。

2) 感知技术演进: 从单个传感器进化到多传感器融合, 逐渐结合激光雷达等, 增进准确性及鲁棒性, 未来会进一步达成车路云一体化的融合, 利用路侧感知同云端进行数据的交互, 做到更广泛范围的环境感知。

### 3.2 车路协同技术路线

1) 多传感器综合技术, 合并激光雷达、视觉等数据, 弥补单一数据所存在的缺陷, 就像激光雷达和视觉融合可降低恶劣天气造成的干扰程度, 路侧要布置上更多高精度传感器, 使车辆硬件的要求降低。

2) 车、路、云集成化, 着重车端、路端、云端的协同, 赶紧共享数据并一道决策, 2025年, 产业产值增量总规模有望达到7295亿元, 通过“车路云一体化”操作系统对硬件予以整合, 且使用AI算法模型保障数据的质量<sup>[7]</sup>。

### 3.3 技术路线的比较与选择

表1 技术路线的比较与选择

	单车智能	车路协同
技术依赖	车载传感器与计算平台	车载设备 + 路侧基础设施 + 通信网络
应用场景	高速自动驾驶、城市复杂路况	智能交通管理、城市NOA、特定区域自动驾驶
成本	车端硬件成本高, 但不依赖基础设施	初期建设成本高, 长期效益显著
优势	独立性强、灵活性高	系统协同性高、交通效率提升
劣势	硬件成本高、技术复杂	基础设施建设周期长、依赖外部环境

## 4 投资绩效评估体系构建

### 4.1 输入特征选择

#### 4.1.1 技术可行性评估

##### (1) 技术成熟度

根据华泰研究预测的数据, L2级自动驾驶的渗透率在逐年增长——2020年时, 其渗透率相对较低, 但从2021年开始显著上升, 并在未来预测中继续保持这一趋势, L2级自动驾驶技术预计将成为市场的主流, 占据绝大多数市场份额<sup>[8]</sup>。

##### 应用数据

· 北京亦庄: 截至2023年末, 已完成329个智能网联标准化路口的建设部署。部署4400余个摄像头、1200余个雷达感知设备, 350余个RSU通信单元及480余个边缘计算节点, 并建设超高速无线通信技术专网, 覆盖750公里城市道路和10公里高速公路。<sup>[9]</sup>

· 广州黄埔: 在示范区一期建设中, 已完成133公里开放道路和102个路口的智能化升级改造, 共部署1318套AI感知设备和89个V2X路侧通信单元。二期新增437公里高精地图覆盖道路和230个智慧路口。<sup>[10]</sup>

#### 4.1.2 经济回报分析

单车智能技术通过车辆个体层面创造经济效益。前期

研发与传感器、软件、改装成本高昂, 初期盈利挑战较大。随着技术成熟与规模化生产, 边际成本递减、边际利润提升, 还可通过保险动态定价等数据服务拓展盈利空间。车路协同技术的经济价值主要体现在系统层面, 前期依赖政府大规模基础设施投入; 后期投入使用后, 可优化交通流量、减少拥堵与排放、降低事故率、提升应急效能, 从而减少经济损失与社会成本。其投资回报周期较长, 但长期系统经济效益潜力巨大。

#### 4.1.3 社会效益评价

单车智能技术通过增强车辆自主性能, 有效降低人为失误引发的事故风险, 显著提升行车安全。车路协同技术则依托车际通信和智能路侧设备的信息交互, 实现精细化交通管控, 大幅提升路网通行效率。其社会效益体现在更广泛的交通网络优化和环境保护上。相比而言车路协同在实现全面交通系统优化方面具有更深远的影响。

#### 4.1.4 风险与挑战

复杂环境里感知和决策所出现的局限: 自动驾驶技术处于复杂气象条件和特殊工作情况当中仍面临关键技术挑战, 水雾干扰造成激光雷达感知精度大幅下降, 对于动态目标轨迹预测误差还是比人类驾驶员水平高; 算法伦理与系统安全平衡要解决的难题: 自动驾驶在突发危险状况当中, 决策机制还没确立统一标准, 紧急避让策略有造成二次事故的可能性, 海量数据采集造成隐私泄露的隐患。

#### 4.1.5 战略价值

自动驾驶技术所产生的溢出效应正重塑多产业技术生态, 依靠搭建自动驾驶国际标准的话语权体系, 中国正将技术研发所具备的优势转化为产业链主导力, 主导核心标准的编排, 拉动中国技术框架成为全球市场准入的基本标准, 这种标准输出让跨国企业调整技术方向适配中国方案, 变换全球智能汽车产业链的价值分配形式, 达成从技术跟随到规则规定的范式发展。

### 4.2 输入特征分析

在自动驾驶技术投资决策当中, 技术成熟度、战略价值、经济回报、风险挑战和社会效益等关键变量彼此间有复杂的动态关系, 正负反馈机制的彼此作用, 造就了动态稳定的系统稳态, 投资者在争取技术发展和市场扩大的同时, 要留意市场的长期良好走向, 以避开市场饱和或技术瓶颈带来的投资方面的风险。

### 4.3 仿真和情景分析: 构建如下示例性实施例

1. 目的: 评价分析出两种技术路线当中更优的投资选择项。

2. 输入: 决策的目的、决策的标准、可供选择的方案、判断矩阵内容、一致性查验输出: 各准则层和方案层的相对权重大小、一致性比率(CR)、备选方案进行比较、做出决策

3. 处理过程: 借助系统动力学的办法, 造就一个包含自动驾驶技术发展、投资回报和市场接受境况等因素的动

态模型，该模型可对各类投资方案对长期效益的作用加以评估。

**Step1. 建立层次结构模型**

- (1) 目标层：选取出最佳的自动驾驶技术投资途径。
- (2) 准则层：技术成熟所达到的程度
- (3) 方案层：单车智能（方案 1）、车路协同（方案 2）。

**Step2. 构建判断矩阵并赋值**

- 1：同等重要
- 3：稍微重要
- 5：明显重要
- 7：强烈重要
- 9：绝对重要

2、4、6、8：上述相邻判断的中值

倒数：如果准则 i 比 j 重要。则取正值，反之取倒数。

(1) 准则层判断矩阵（A-B）

**表 2 准则层判断矩阵**

	经济回报	风险与挑战	社会效益	战略价值	技术可行性
经济回报	1	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
风险与挑战	$a_{21}$	1	$a_{23}$	$a_{24}$	$a_{25}$
社会效益	$a_{31}$	$a_{32}$	1	$a_{34}$	$a_{35}$
战略价值	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$	1	$a_{45}$
技术可行性	$a_{51}$	$a_{52}$	$a_{53}$	$a_{54}$	1

得出准则层判断的矩阵如下：

$$\begin{matrix}
 1 & 1/3 & 2 & 1 & 3 \\
 3 & 1 & 3 & 3 & 3 \\
 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\
 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1
 \end{matrix}$$

(2) 方案层判断矩阵（B-C）

对单车智能和车路协同分别进行成对比较，为了与准则层相区分，将方案层矩阵赋值为，同样表示在某一准则下，两种方案层比较时方案 i 相对于方案 j 的现有发展水平，取值同样使用 1-9 标度法：

**表 3. 方案层判断矩阵**

	单车智能	车路协同
单车智能	1	$b_{ij}$
车路协同	$b_{ji}$	1

得出方案层判断的矩阵如下：

**Step3. 计算权重和一致性检验**

准则层权重：因为有五个准则层，则将准则层判断矩阵每行乘积开五次方求和，对每行乘积做归一化处理，得到各准则层权重向量。

经济回报 ( $a_1$ ) =0.20、风险与挑战 ( $a_2$ ) =0.42、战略价值 ( $a_3$ ) =0.12、社会效益 ( $a_4$ ) =0.14、技术可行性 ( $a_5$ ) =0.11。

方案层权重：因为有两个方案层，则将准则层判断矩阵每行乘积开两次方求和，对每行乘积做归一化处理，得到各方案层权重向量。

**表 4. 方案层判断矩阵结果**

方案层	判断矩阵
经济回报	$  \begin{matrix}  1 & 1/3 \\  3 & 1  \end{matrix}  $
风险与挑战	$  \begin{matrix}  1 & 1/3 \\  3 & 1  \end{matrix}  $
战略价值	$  \begin{matrix}  1 & 1 \\  1 & 1  \end{matrix}  $
社会效益	$  \begin{matrix}  1 & 1/3 \\  3 & 1  \end{matrix}  $
技术可行性	$  \begin{matrix}  1 & 3 \\  1/3 & 1  \end{matrix}  $

经济回报：单车智能 ( $b_1, a_1$ ) =0.25、车路协同 ( $b_2, a_1$ ) =0.75

风险与挑战：单车智能 ( $b_1, a_2$ ) =0.25、车路协同 ( $b_2, a_2$ ) =0.75

战略价值：单车智能 ( $b_1, a_3$ ) =0.50、车路协同 ( $b_2, a_3$ ) =0.50

社会效益：单车智能 ( $b_1, a_4$ ) =0.25、车路协同 ( $b_2, a_4$ ) =0.75

技术可行性：单车智能 ( $b_1, a_5$ ) =0.75、车路协同 ( $b_2, a_5$ ) =0.25

一致性检验得出 CR 均 <0.1，可以接受判断矩阵的一致性。

**step4. 综合得分**

单车智能的综合得分：

$$\sum_{n=1}^5 (a_n * b_1, a_n) = 0.20 * 0.25 + 0.42 * 0.25 + 0.12 * 0.50 + 0.14 * 0.25 + 0.11 * 0.75 = 0.3325 \quad (1)$$

车路协同的综合得分：

$$\sum_{n=1}^5 (a_n * b_2, a_n) = 0.20 * 0.75 + 0.42 * 0.75 + 0.12 * 0.50 + 0.14 * 0.75 + 0.11 * 0.25 = 0.6575 \quad (2)$$

**step5. 分析结果**

比较两个方案的综合得分，车路协同技术被认为是更优的投资选择。

**5 结语**

**5.1 技术路线选择与推广策略**

**5.1.1 短期策略（0-3 年）**

根据技术成熟度所得到的分数，车路协同 0.25 分比不上单车智能 0.75 分，实施“单车智能先行，车路协同渐进”的发展路径，单车智能技术成熟度是比较高的，市场渗透的速度比较快，消费者接受的程度比较高，能够更迅速使商业化应用实现。

### 5.1.2 长期策略（3-10年）

根据综合得分分析：车路协同的 0.6575 在数值上大于单车智能 0.3325，长期要着重去发展车路协同技术，并且需完善有关的基础设施，带动自动驾驶技术大规模推广应用，车路协同技术对于提高交通系统的效率、安全性与环境效益效果良好，是未来智慧城市交通系统的主要构件。

### 5.2 面向管理科学与工程与实践

自动驾驶技术路线的抉择，从根本上说是多目标、多阶段、不确定条件下的投资决策问题，本文所构建的投资绩效评估框架把技术成熟度、经济回报、风险与挑战、社会效益、战略价值五个评估准则结合起来，当中风险与挑战的权重是最大的，反映出在自动驾驶领域投资决策当中，风险管理要在短期收益之前处理，这使管理者在项目组合管理当中明白，要加大对技术不确定性、法规滞后性和市场接受度波动的动态监控与对冲的人力投入。

短期（0-3年）把单车智能作为主要方面、长期（3-10年）往车路协同发展的分阶段策略，体现了实物期权思维与柔性决策所具有的价值，一开始投资单车智能，可较快拿到现金流与市场反馈，留存未来向车路协同发展领域转型的扩张权益，防止过早把大规模路侧基础设施的沉没成本锁定住，这种分阶段的资源配置做法有助于降低政策跟技术突变造成的下行风险。

系统动力学分析显示出情况是，技术进步跟市场推广建立正反馈的回路，但也会造成市场饱和、成本失控等负反

馈情况，管理者该构建系统动力学模型作为决策支持办法，动态模拟不同投资力度、补贴政策、标准发展下长期效益的发展路线，以此来使投资时机和资源分配更优。

### 参考文献

- [1] 陈雪瑶. 自动驾驶技术创新态势研究[J]. 海峡科技与产业, 2024, 37(12): 41-46.
- [2] 华为技术有限公司. 一种导航指引方法及相关装置: 中国, CN 119687943 AP. 2025-03-28
- [3] 特斯拉公司. 一种用于自动驾驶车辆的高精度定位系统: 中国, CN 123456789 AP. 2024-07-01.
- [4] Waymo. (2024). On the road to fully self-driving: Waymo safety report.
- [5] 首钢基金. 从智能汽车到自动驾驶：首钢基金构建出行产业差异化投资方略[J]. 中国汽车, 2024(2): 108-111.
- [6] 李升波, 刘畅, 殷玉明, 等. 汽车端到端自动驾驶系统的关键技术与发展趋势[J]. 人工智能, 2023, (05): 1-16.
- [7] 何积丰. 推进“车路云一体化”助力智能交通发展[J]. 中国科技产业, 2024, (12): 4-5.
- [8] 华泰. 汽车深度研究. 车身域控空间广阔，国产替代正当时[N] (2024-01-04).
- [9] 新浪财经. “路”将成“车路云”增长最快板块？这些公司领跑路侧通信[N] (2024-06-20).
- [10] 亦城时报. 北京入选首批智能网联汽车“车路云一体化”应用试点城市“亦庄经验”助力打造“北京样本”[N] (2024-07-08)