

现代工程学

Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co., Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第2卷 第1期 2025年1月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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

目录CONTENTS

建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- | | | |
|-----|---|--------------------------------------|
| 001 | 公路路面大修及灾毁重建恢复技术研究
Research on Highway Overhaul and Disaster Reconstruction and
Recovery Technology | 罗志能
Luo Zhineng |
| 004 | 铁路工程技术管理的创新策略与实践
Innovative Strategies and Practices of Railway Engineering
Technology Management | 黄雄
Huang Xiong |
| 007 | 公路施工技术管理策略: 提升现场施工效率的路径
Road Construction Technology Management Strategy: the Way to Improve the Efficiency
of on-Site Construction | 岳欢欢
Yue Huanhuan |
| 010 | 建筑施工质量与安全控制的现场管理措施探讨
Discussion on Site Management Measures for Construction Quality
and Safety Control | 朱鹏斌
Zhu Pengbin |
| 013 | 大跨度钢结构桥梁安装过程中的精度控制研究
Research on Precision Control During Installation of Large-Span
Steel Bridges | 邓定付
Deng Dingfu |
| 016 | 建筑工程技术管理与工程安全管理协同发展研究
Research on the Coordinated Development of Construction Engineering
Technical Management and Safety Management | 杨勇
Yang Yong |
| 019 | 建筑工程检测技术数字化转型:
智能监测体系在工程管理中的创新应用
Digital Transformation of Construction Engineering Inspection Technology: Innovative
Application of Intelligent Monitoring System in Engineering Management | 赵子涵
Zhao Zihan |
| 022 | 青岛疏港高架拓宽工程方案研究
Research on the Widening Scheme for the Qingdao Port-access Viaduct | 李建勃
LI Jianbo |
| 027 | 公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用分析
Application Analysis of Highway Engineering Inspection
Technology in Highway Engineering Quality Control | 李文芳, 王留山
Li Wenfang, Wang Liushan |
| 030 | 基于可持续理念的园林建筑设计创新研究
Research on Innovative Landscape Architecture Design Based on the
Concept of Sustainability | 刘思淇
Liu Siqi |
| 033 | 建筑工程基坑施工中的地下水研究浅析
Analysis of Groundwater Research in Foundation Pit Construction of
Building Engineering | 潘宏鑫
Pan Hongxin |
| 036 | 建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理策略分析
Analysis of Construction Site Safety Management Strategy for Building Curtain Wall
Decoration Engineering | 许树锋
Xu Shufeng |
| 039 | 风景园林工程中大树移植技术分析
Analysis of Big Tree Transplanting Technology
in Landscape Engineering | 杨春城
Yang Chuncheng |

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

- | | | |
|-----|--|-----------------|
| 042 | 自动化项目设备研发中的智能化检测系统构建与优化
Construction and Optimization of Intelligent Detection System in Equipment Research
and Development of Automation Projects | 汪平
Wang Ping |
| 045 | 染料化工设备全生命周期管理优化策略与数字化转型实践
Optimization Strategy and Digital Transformation Practice of Dye Chemical
Equipment Life Cycle Management | 金泾
Jin Jing |

048	化工工艺技术管理中的工艺技术攻关策略探究 Research on Process Technology Breakthrough Strategy in Chemical Engineering Technology Management	钟杰华 Zhong Jiehua
051	电气设备及控制系统工程的技术管理策略研究 Research on Technical Management Strategies for Electrical Equipment and Control System Engineering	陈锦城 Chen Jincheng
054	污水处理设备在生产运营中的性能评价及优化 Performance Evaluation and Optimization of Sewage Treatment Equipment in Production and Operation	郑义蕃 Zheng Yifan
057	某型训练器材低成本设计改进及工艺优化 Low-cost Design Improvement and Process Optimization of a Certain Type of Training Equipment	冯立臣, 梁琦 Feng Lichen, Liang Qi
060	数字化口腔正颌矫治器迭代设计与方法 Iterative Design and Methods of Digital Orthodontic Appliances	黎炜健 Li Weijian
063	基于 PSO-BP-PID 控制器在汽轮机系统研究 Research on PSO-BP-PID Controller in Steam Turbine System	王鑫, 黄迎旭, 孟亚男 Wang Xin, Huang Yingxu, Meng Yanan
068	非标设备开发在智能制造中的角色与作用 The Role and Function of Non-Standard Equipment Development in Intelligent Manufacturing	谢卓 Xie Zhuo

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

071	工程测量——三维建模一体化技术体系构建与复杂地形场景还原度优化 Engineering Surveying—Construction of Integrated Technology System of 3d Modeling and Optimization of Complex Terrain Scene Restoration	张建华 Zhang Jianhua
074	通信运营商信息化项目集成施工中的安全与成本协同管控——基于珠海分公司实践经验 Collaborative Control of Safety and Cost in the Integrated Construction of Information Technology Projects for Communication Operators—Based on the Practical Experience of Zhuhai Branch	欧阳志广 Ouyang Zhiguang
077	地理信息行业中的数据管理与技术应用：现状与发展趋势 Data Management and Technology Application in Geographic Information Industry: Current Situation and Development Trend	潘婷婷 Pan Pingting
080	第三方信息化技术服务视角下的项目全过程管理模式创新 Innovation of Project Whole-Process Management Mode from the Perspective of Third-Party Information Technology Service	王莹 Wang Ying
083	新一代智能开关产品工业设计：形、色、质、控、神的融合与创新 Industrial Design of New Generation Intelligent Switch Products: Integration and Innovation of form, Color, Quality, Control and Spirit	庄娘设 Zhuang Niangshe
086	基于 BIM 技术的暖通空调制冷机房建模与高效制冷机房设计协同研究 A Collaborative Study on Modeling of Hvac Refrigeration Room and Design of Efficient Refrigeration Room Based on Bim Technology	关伟雄 Guan Weixiong
089	全寿命周期视角下改扩建路基工程预算编制模型优化研究 Study on the Optimization of Budget Preparation Model for Reconstruction and Expansion of Roadbed Engineering from the Perspective of Whole Life Cycle	刘剑捷 Liu Jianjie
092	磁共振成像系统高级功能操作与应用分析 Advanced Function Operation and Application Analysis of Magnetic Resonance Imaging System	李均明 Li Junming

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

095	钢渣处理技术与资源化利用研究进展 Research Progress on Steel Slag Processing Technology and Resource Utilization	顾子涵, 张佳晔, 周娟, 江飞飞 Gu Zihan, Zhang Jiaye, Zhou Juan, Jiang Feifei
098	某金矿矿石含金细粒级偏析特性研究 Application of Ultra-Small-Scale Gold Beneficiation Experimental Technology in Jinqu Laboratory	陈宏伟 Chen Hongwei
103	晶体转速对提拉法晶体生长系统的数值模拟研究 Numerical Simulation Study of Crystal Rotational Speed on the crystal growth System by the Czochralski Method	李陈哲 Li Chenzhe
106	煤矿一通三防工作的风险分析和规避措施剖析 Risk Analysis and Avoidance Measures Analysis of the "One Ventilation and Three Prevention" work in Coal Mines	罗开 Luo Kai
109	多组分尼龙纤维配比设计对增韧膜熔融行为与力学性能的影响 The Influence of the Proportion Design of Multi-Component Nylon Fibers on the Melting Behavior and Mechanical Properties of Toughened Films	梁晨 Liang Chen
113	装修垃圾资源化利用工程预处理生产线粉尘控制分析 Analysis of Dust Control in Pre treatment Production Line of Decoration Waste Resource Utilization Project	张晓星 Zhang Xiaoxing

公路路面大修及灾毁重建恢复技术研究

罗志能

新兴县公路事务中心，广东 云浮 527400

DOI:10.61369/ME.2025010001

摘要： 本文涵盖公路路面大修及灾毁重建恢复技术多方面内容。包括大修工程设计标准，多种修复技术如全深式就地冷再生等，滑坡体等灾害处治技术，还涉及桥梁维修技术。介绍了预防性养护策略、GIS等技术应用，以及绩效评估和质量追溯机制，最后总结关键技术体系并提出发展方向。

关键词： 公路大修；灾毁重建；技术体系

Research on Highway Overhaul and Disaster Reconstruction and Recovery Technology

Luo Zhineng

Xinxing County Road Affairs Center, Yunfu, Guangdong 527400

Abstract： This article covers various aspects of highway pavement major repairs and disaster reconstruction. It includes design standards for major repair projects, multiple restoration techniques such as full-depth on-site cold recycling, landslide treatment technologies, and bridge maintenance techniques. The paper also introduces preventive maintenance strategies, the application of GIS technology, performance evaluation, and quality traceability mechanisms. Finally, it summarizes key technical systems and proposes future development directions.

Keywords： highway overhaul; disaster reconstruction; technical system

引言

公路作为交通运输的重要基础设施，其建设、维护与管理至关重要。随着我国交通事业的不断发展以及相关政策的不断完善，如《交通强国建设纲要》（2019年）的颁布，对公路的质量和性能提出了更高要求。公路路面大修及灾毁重建恢复技术研究涵盖多个关键领域，包括路面大修工程设计标准、各种修复技术以及相关的管理体系等。这些方面相互关联，共同影响公路的使用性能和寿命。合理的设计标准是基础，先进的修复技术是保障，科学的管理体系是关键，它们共同为提高公路的质量和服务水平提供支撑，以适应现代交通运输的需求。

一、公路路面大修技术体系

（一）大修工程设计标准

公路路面大修工程设计标准涵盖多个关键方面。路面损坏评估标准是基础，需综合考虑路面的各种病害类型、程度及分布范围等因素，以准确判断路面的损坏状况^[1]。交通量预测方法同样重要，通过对历史交通数据的分析以及对区域发展趋势的预估，合理推测未来交通量，为大修工程的设计提供依据。结构承载力评价体系也是不可或缺的一部分，它要对路面结构的承载能力进行全面评估，包括各结构层的强度、稳定性等指标，确保大修后的路面能够满足交通荷载的要求。这些标准相互关联，共同构成了公路路面大修工程科学合理设计的依据。

（二）大修材料与工艺

全深式就地冷再生技术是一种环保且经济的大修工艺。它利

用旧路面材料，通过破碎、添加稳定剂等操作，重新形成结构层^[2]。在应用中，需严格控制稳定剂的种类和剂量，确保再生混合料的性能。超薄磨耗层技术则能有效提高路面的抗滑性和耐磨性。施工时，要精确控制磨耗层的厚度和材料的级配，保证其与下层路面的良好粘结。新型改性沥青材料的应用也日益广泛。其通过对沥青进行改性，提高了沥青的高温稳定性和低温抗裂性等性能。在质量控制方面，需关注改性剂的添加量和均匀性，以及沥青的各项指标检测^[2]。

二、公路灾毁重建恢复技术

（一）地质类灾害处置

滑坡体处治技术包括多种方法。如抗滑桩技术，通过在滑坡体中设置抗滑桩，增加滑坡体的抗滑力，提高稳定性^[3]。还有削

坡减载技术，对滑坡体上部进行削坡，减少下滑力。对于崩塌路段路基加固，可采用锚杆加固技术，将锚杆打入岩体，增强岩体的整体性和稳定性。同时，挡土墙也是常用的方法，能有效阻挡土体或岩体的坍塌。在灾毁重建中，生态防护体系也至关重要。植被的根系可以固土护坡，减少坡面径流，防止水土流失，增强坡面的稳定性，从而提高公路在地质灾害区域的抗灾能力。

（二）气象灾害修复

公路灾毁重建恢复技术在气象灾害修复方面具有重要意义。水毁路基是常见的气象灾害破坏形式，可采用快速修复技术，如及时清理淤泥杂物，对路基进行加固处理，采用合适的填充材料恢复路基结构稳定性^[4]。冻融灾害对公路也有较大影响，需采取防治措施，包括选用抗冻性能好的材料，改善路面结构设计以增强抗冻融能力。台风等气象灾害可能会对桥梁造成破坏，建立台风灾后桥梁应急支撑系统至关重要。该系统应能迅速对受损桥梁提供有效支撑，确保桥梁在后续修复过程中的安全，保障公路的正常通行。

三、桥梁维修关键技术

（一）上部结构维修

1. 桥面铺装改造

钢桥面环氧沥青铺装技术是桥面铺装改造的关键技术之一。该技术通过环氧沥青的特殊性能，能够有效提高桥面的耐磨性和抗腐蚀性，增强桥面的承载能力。其铺装过程需要严格控制温度和湿度等环境因素，确保铺装质量^[5]。混凝土桥面抛丸处理工艺同样重要。抛丸处理可以去除桥面的浮浆和杂质，增加桥面的粗糙度，提高桥面与铺装层之间的粘结力。在进行抛丸处理时，要根据桥面的实际情况选择合适的抛丸参数，以达到最佳的处理效果。这两种技术在桥面铺装改造中都具有重要的应用价值，能够有效提高桥面的性能和使用寿命。

2. 支座更换技术

液压同步顶升技术在桥梁支座更换中具有重要应用。该技术通过多个千斤顶同步工作，实现对桥梁上部结构的平稳顶升。在顶升过程中，需精确控制顶升力和顶升高度，确保结构安全。同时，要对顶升过程进行实时监测，监测内容包括结构的变形、应力等。通过在关键部位安装传感器，获取准确的数据，以便及时调整顶升参数。变形监测方法主要有全站仪测量、水准仪测量以及应变片测量等。全站仪可测量结构的三维坐标变化，水准仪用于测量竖向变形，应变片则能感知结构的应变情况。这些监测方法相互配合，为支座更换过程提供可靠的数据支持，保证桥梁维修工作的顺利进行^[6]。

（二）下部结构加固

1. 墩台加固技术

外包钢板加固法是墩台加固的重要技术之一。该方法通过在墩台表面外包钢板，提高墩台的承载能力和抗震性能。在实施过程中，需精确测量墩台尺寸，确保钢板与墩台表面紧密贴合，可采用粘结剂或锚栓进行固定，以保证加固效果。同时，要注意钢

板的防腐处理，延长其使用寿命。碳纤维布补强技术也被广泛应用。碳纤维布具有强度高、重量轻、耐腐蚀等优点。施工时，要对墩台表面进行清洁和平整处理，确保碳纤维布能够牢固粘贴。粘贴过程需严格按照工艺要求进行，避免出现空鼓、褶皱等缺陷，从而有效提高墩台的结构强度^[7]。

2. 基础修复工艺

基础修复工艺是桥梁下部结构加固的关键环节。旋喷桩加固技术通过高压喷射水泥浆与土体混合，形成强度较高的桩体，提高基础的承载能力和稳定性^[8]。该技术可有效处理基础的不均匀沉降等问题。微型钢管桩托换技术则是将微型钢管桩植入基础下方，通过桩体承担上部结构荷载，实现对基础的托换加固。此技术适用于基础出现严重病害，承载能力不足的情况。在实际应用中，需根据基础的具体病害类型、地质条件等因素，合理选择基础修复工艺，以确保桥梁下部结构的加固效果，保障桥梁的安全运营。

四、公路管理养护体系

（一）全寿命周期管理

1. 预防性养护策略

预防性养护策略是公路全寿命周期管理的重要组成部分。它基于对路面性能的准确预测，旨在在路面出现严重病害之前采取适当的养护措施，以延缓路面性能的衰退，延长路面的使用寿命。通过建立路面性能预测模型，能够分析不同因素对路面性能的影响，从而确定最佳的养护时机^[9]。同时，BIM技术的应用为预防性养护提供了更直观和有效的工具。它可以对公路结构进行三维建模，实现对公路设施的精细化管理。通过BIM模型，可以实时监测路面的状态，及时发现潜在的病害风险，为预防性养护决策提供有力支持。

2. 资产管理信息化

GIS技术在公路管理养护体系的全寿命周期管理及资产管理信息化中具有重要作用。它可用于公路资产数据库建设，准确记录公路各类资产信息，包括路面状况、设施分布等^[10]。通过空间分析功能，能直观呈现资产的地理位置和相关属性关系。在养护决策支持系统中，GIS技术可整合多源数据，如路况监测数据、交通流量数据等。依据这些数据进行分析，为养护决策提供科学依据，例如确定路面大修及灾毁重建的优先区域，合理安排养护资源，提高公路管理养护的效率和科学性，实现全寿命周期的有效管理和资产信息化管理。

（二）智能化监测技术

1. 结构健康监测

光纤光栅传感器在公路结构健康监测中具有重要应用。在桥梁应力监测方面，它能够精确感知应力变化。通过将光纤光栅传感器合理布置在桥梁关键部位，如梁体、桥墩等，可实时获取应力数据。这些数据对于评估桥梁结构的安全性和稳定性至关重要。一旦应力出现异常变化，可能预示着桥梁存在潜在安全隐患，以便及时采取维护措施。在路面温度场监测中，光纤光栅传

传感器同样发挥关键作用。它可以准确测量路面不同深度的温度分布情况。了解路面温度场对于分析路面材料性能变化、预测路面病害的发生具有重要意义。例如，温度的剧烈变化可能导致路面出现裂缝等病害，通过传感器监测可提前预警并采取相应措施预防病害的发生。

2. 无人机巡检系统

多旋翼无人机在公路巡检中具有重要作用。其可搭载高清摄像与红外设备，通过特定的病害识别算法实现对公路路面状况的监测。高清摄像设备能够清晰拍摄路面的裂缝、坑洼等病害情况，为后续的分析提供直观的图像数据。红外设备则可检测路面温度差异，有助于发现一些潜在的病害隐患，如地下空洞导致的温度异常区域。病害识别算法对采集到的数据进行处理和分析，能够准确识别病害类型、位置和严重程度，从而为公路管理养护部门提供精准的决策依据，以便及时采取相应的养护和修复措施，提高公路的使用性能和安全性。

（三）绩效评估体系

1. 技术经济评价

公路管理养护体系的绩效评估体系中的技术经济评价至关重要。需建立包含全寿命周期成本、社会效益及环境影响的综合评价模型。全寿命周期成本涵盖建设成本、养护成本、运营成本等各阶段费用，通过准确核算与分析，为决策提供成本依据。社会效益包括对区域经济发展的促进、交通便利性提升、就业机会增加等方面，应采用合理的方法量化这些效益。环境影响涉及施工过程中的污染排放、对生态的破坏以及建成后对周边环境的长期影响，需综合评估并寻求降低影响的措施。综合考虑这三个方面，能全面评估公路项目的技术经济可行性，为公路的大修及灾

毁重建恢复技术选择提供科学支撑。

2. 质量追溯机制

公路管理养护体系、绩效评估体系以及质量追溯机制在公路路面大修及灾毁重建恢复技术研究中至关重要。在质量追溯机制方面，基于区块链技术构建工程质量追溯系统具有显著优势。区块链的分布式账本特性可确保工程建设过程中各类数据的不可篡改和透明性。从原材料采购开始，每一个环节的数据都能被准确记录，包括材料的来源、质量检测结果等。在施工过程中，施工工艺、施工时间、施工人员等信息也能实时上传。一旦出现质量问题，通过区块链系统能够迅速追溯到问题产生的源头，明确责任主体，为工程质量提供可靠保障，同时也有助于规范公路管理养护工作流程，提升整体绩效。

五、总结

公路路面大修及灾毁重建恢复技术研究涵盖多个关键方面。系统总结了公路大修与灾毁重建关键技术体系，为相关实践提供了坚实的技术支撑。同时提出基于智能感知的预防性养护发展方向，这将有助于提高公路养护的前瞻性和精准性。强调多学科交叉在公路全寿命周期管理中的重要性，通过融合不同学科的知识和方法，能够更全面地考虑公路的建设、维护和管理。此外，展望绿色低碳修复材料与数字孪生技术的应用前景，绿色低碳修复材料符合环保要求，数字孪生技术则可为公路的精细化管理提供可能，这些都为公路路面大修及灾毁重建恢复技术的进一步发展提供新的思路和方向。

参考文献

- [1]王秋燕. 顺平南线公路大修工程项目质量控制研究 [D]. 北京：北京交通大学，2017.
- [2]王瑞法. 高速公路大修工程施工安全保障措施 [J]. 交通世界（工程技术），2015，(07):138-139.
- [3]周维军. 基于公路灾毁信息采集系统的水毁公路易发性分析 [D]. 江西：南昌大学，2021.
- [4]宋文涛. 高速公路大修工程交通组织方案研究 [D]. 湖南：长沙理工大学，2014.
- [5]杨明. 高速公路沥青路面大修施工关键技术分析 [J]. 山西建筑，2018，44(19):132-134.
- [6]郑平辉. 高速公路沥青路面大修技术探讨 [J]. 建材与装饰，2016，(01):236-237.
- [7]孟凡刚. 高速公路沥青路面大修工程的技术研究 [J]. 交通世界，2016，(12):112-113.
- [8]郑平辉. 高速公路沥青路面大修技术探讨 [J]. 建材与装饰，2016，(01):236-237.
- [9]孟凡刚. 高速公路沥青路面大修工程的技术研究 [J]. 交通世界，2016，(12):112-113.
- [10]廉福明. 高速公路沥青路面大修技术研究 [J]. 价值工程，2017，36(13):134-136.

铁路工程技术管理的创新策略与实践

黄雄

身份证号: 511321198706215456

DOI:10.61369/ME.2025010005

摘要： 本文聚焦铁路工程技术管理，深入探究其理论根基，系统论用于统筹项目全流程要素，控制论保障工程质量与进度可控。鉴于项目周期长、投资规模大、施工环境复杂等特殊性，构建风险识别与评估模型，搭建多方联动平台强化风险管理。同时，通过 BIM 技术应用、智能监测系统等多种技术创新，显著提升管理效能。文中提出“技术－管理－人才”三位一体创新体系，并对铁路工程技术管理未来发展趋势进行展望。

关键词： 铁路工程；技术管理；技术创新

Innovative Strategies and Practices of Railway Engineering Technology Management

Huang Xiong

ID:511321198706215456

Abstract： This article focuses on the technical management of railway engineering, delves deeply into its theoretical foundation, uses systems theory to coordinate all elements of the project process, and cybernetics to ensure the controllability of project quality and progress. In view of the particularities such as the long project cycle, large investment scale and complex construction environment, a risk identification and assessment model is constructed, and a multi-party linkage platform is built to strengthen risk management. Meanwhile, through various technological innovations such as the application of BIM technology and intelligent monitoring systems, management efficiency has been significantly enhanced. The article proposes a trinity innovation system of "technology – management – talent", and looks forward to the future development trend of railway engineering technology management.

Keywords： railway engineering; technical management; technological innovation

引言

铁路工程技术管理是一个复杂且关键的领域，涉及多方面理论与实践。随着我国《交通强国建设纲要》（2019年）的颁布，对铁路工程技术管理提出了更高要求。从理论层面看，系统论、控制论和全生命周期管理理论为其提供了基础，强调系统协调、过程控制和全过程管理。铁路工程具有项目周期长、技术集成度高、多专业协同等特殊特性，需要完善的策略体系。在风险管理方面，风险识别与评估模型及多方联动平台至关重要。同时，技术创新如北斗定位监测等对管理效能提升有关键作用，应构建持续创新体系，展望5G + AI融合带来的新机遇。

一、铁路工程技术管理的理论框架

（一）技术管理理论基础

铁路工程技术管理需基于一定理论基础。系统论强调整体出发，将铁路工程视为一个复杂系统，各部分相互关联、相互作用，技术管理要注重系统的协调性和整体性^[1]。控制论则着重于对工程过程的控制，通过设定目标、监测偏差并及时调整，确保工程技术指标符合要求。全生命周期管理理论涵盖工程从规划到运营的全过程，对每个阶段严格把控，保障工程质量。它包括对

工程前期设计的优化，施工过程中的质量和进度控制，以及运营阶段的维护和改进，从而实现铁路工程技术管理的科学性和有效性。

（二）铁路工程管理特征分析

铁路工程技术管理具有多维度的特殊性。项目周期长是其显著特征之一，从规划到建成运营往往历经数年甚至数十年，期间面临诸多技术更新与环境变化挑战^[2]。技术集成度高，涵盖土建、电气、通信等多个领域，各技术系统相互关联、相互影响，需高度整合以确保整体工程的高效运行。多专业协同要求也很

高，涉及工程、经济、管理等不同专业背景的人员共同参与，在不同阶段需紧密配合，从设计到施工再到运营维护，任何环节的衔接不畅都可能影响工程质量与进度。这些特殊性决定了铁路工程技术管理需要一套完善且灵活的策略体系。

二、工程风险管理体系构建

（一）风险识别与评估模型

在工程风险管理体系构建中，风险识别与评估模型至关重要。对于铁路工程，可建立基于FMEA（失效模式与效应分析）的风险矩阵。FMEA通过分析系统中各组件可能的失效模式及其后果，确定风险优先级^[3]。同时结合BIM（建筑信息模型）技术，实现地质风险的三维可视化评估。BIM技术能够整合工程的各种信息，直观呈现地质结构及潜在风险区域。通过这种方式，不仅可以更准确地识别风险因素，还能对风险的严重程度和发生概率进行量化评估，为后续的风险应对措施提供科学依据，有效提升铁路工程风险管理的水平。

（二）风险防控协同机制

构建设计-施工-运维多方联动的风险管理平台是风险防控协同机制的关键。该平台整合各方资源与信息，实现风险数据的实时共享与交互^[4]。通过统一的数据格式与接口，确保各方能够准确理解和处理风险信息。同时，建立风险预警响应时间标准体系，明确各方在风险预警后的响应时间节点。这有助于提高风险应对的及时性和有效性，避免因响应不及时而导致风险扩大。在实际操作中，根据不同风险等级设定合理的响应时间，以确保各方能够迅速采取相应措施，如设计方及时调整设计方案，施工方暂停或调整施工工序，运维方加强设备监测等，从而形成高效协同的风险防控机制。

三、技术创新管理策略

（一）智能监测技术创新

1. 北斗定位监测系统

铁路工程技术管理创新中，北斗定位监测系统至关重要。开发基于北斗三号的轨道几何状态毫米级实时监测技术是关键举措。该技术利用北斗三号高精度定位优势，实现对轨道几何状态的精准监测。通过在铁路沿线合理布局北斗监测站点，实时获取轨道位置信息，并借助先进的数据处理算法，将监测数据转换为轨道几何状态参数，达到毫米级精度。这为铁路工程技术管理提供了可靠的数据支持，能够及时发现轨道变形、位移等异常情况，为铁路安全运营提供有力保障^[5]。

2. 无人机巡检体系

建立多旋翼无人机与探地雷达协同的线路基础设施检测方案是智能监测技术创新中无人机巡检体系的重要内容。多旋翼无人机具有灵活、高效的特点，能够快速获取线路基础设施的表面图像信息。探地雷达则可对地下结构进行探测，获取其内部状况数据。将两者协同，可实现对线路基础设施的全方位检测。无人机

获取的表面信息能为探地雷达的检测提供宏观定位和初步判断依据，探地雷达的地下数据又能补充无人机无法获取的深层信息，从而更准确地评估线路基础设施的状态，为铁路工程技术管理提供更全面、可靠的数据支持^[6]。

（二）管理方法创新路径

1. BIM协同平台建设

设计基于云计算的铁路工程全专业BIM协同管理平台架构。该架构利用云计算的强大计算能力和存储能力，实现对铁路工程各个专业数据的高效管理和协同处理。通过BIM技术，将铁路工程的设计、施工、运营等各个阶段的数据进行整合，形成一个统一的数字化模型。在这个模型中，各个专业的工程师可以实时共享和交流数据，提高工作效率和协同效果。同时，云计算的分布式计算特点可以保证平台的高可用性和可扩展性，满足铁路工程大规模数据处理的需求。该平台还可以集成其他相关技术，如物联网、大数据分析等，进一步提升铁路工程技术管理的创新水平和实践能力^[7]。

2. 数字孪生应用实践

在铁路工程技术管理中，数字孪生应用实践具有重要意义。以施工进度数字孪生模型在复杂站场工程中的动态推演为例，通过构建精准的数字孪生模型，能够实时反映站场工程的实际施工进度。利用该模型，可以对施工过程中的各种复杂情况进行模拟和分析，提前预测可能出现的问题，如资源冲突、工期延误等，并制定相应的解决方案。这不仅有助于提高施工效率，还能有效降低施工成本和风险。同时，数字孪生模型还可以实现不同参与方之间的信息共享和协同工作，促进工程管理的一体化和智能化，为铁路工程技术管理的创新提供有力支撑^[8]。

四、工程实践案例分析

（一）高铁轨道工程应用

1. 沪昆高铁板式无砟轨道

沪昆高铁板式无砟轨道应用中，CRTSⅢ型轨道板智能张拉系统的误差控制技术创新具有重要意义。该系统通过精确的传感器和先进的控制算法，对张拉过程中的力和位移进行实时监测和调整。在实际工程中，有效减少了因人为因素和环境因素导致的误差，提高了轨道板的张拉精度和质量稳定性。这种创新技术不仅保障了沪昆高铁轨道的平顺性和安全性，也为其他高铁项目的轨道工程提供了宝贵的经验和借鉴。它体现了铁路工程技术在不断进步追求高精度、高质量的发展趋势，推动了高铁轨道工程技术的进一步发展^[9]。

2. 复杂地质处理技术

岩溶地区地质条件复杂，给高铁轨道工程带来诸多挑战。在轨道基础加固技术方面，需综合考虑多种因素。岩溶地区溶洞、溶蚀裂隙等发育，可能导致地基承载力不足。因此，首先要进行详细的地质勘察，准确把握岩溶的分布、形态及发育程度等信息^[10]。在此基础上，采用合适的加固技术，如注浆加固法，通过向岩溶洞穴或裂隙中注入浆液，填充空隙，提高地基的强度和

稳定性。同时，要注重施工过程中的质量控制和监测，确保加固效果达到设计要求。此外，还需考虑不同加固技术之间的协同作用，以及与其他工程措施的配合，以保障高铁轨道在复杂岩溶地质条件下的安全运行。

（二）高原铁路风险管理

1. 冻土区施工预警系统

在高原铁路冻土区施工预警系统中，地温监测数据与施工决策的联动至关重要。通过在冻土区设置大量的温度监测点，实时获取地温数据。这些数据被及时传输至分析中心，经过专业软件和算法的处理，形成直观的地温变化趋势图和分析报告。当监测到地温出现异常波动时，系统会迅速发出预警信号。施工决策团队依据这些预警信息以及详细的数据分析结果，及时调整施工方案。例如，在某些地温异常升高可能导致冻土融化的区域，暂停相关施工活动，或者采取加强冷却措施等，从而有效避免了因冻土融化而带来的工程风险，确保了高原铁路在冻土区施工的安全性和稳定性。

2. 缺氧环境装备管理

高原铁路缺氧环境下的装备管理面临诸多挑战。由于高原地区氧气稀薄，机械设备的性能和可靠性受到影响。针对高原特制机械设备，需制定全寿命周期维护管理方案。在设备选型阶段，要充分考虑高原环境适应性，选择具备良好缺氧环境工作能力的设备。在使用过程中，加强对设备运行状态的实时监测，及时发现并处理可能出现的故障隐患。同时，根据高原环境特点，合理调整设备的维护周期和维护内容，确保设备始终处于良好的运行状态。还需建立完善的设备档案，记录设备的使用情况、维护历史等信息，为设备的后续管理提供依据。

（三）智慧工地建设实践

1. 物料智能调度系统

物联网技术在钢筋加工配送中心的应用带来多方面效益。通过在钢筋上安装智能标签等物联网设备，可实现对钢筋从原材料

采购到加工、配送全流程的精准追踪与监控。这有助于实时掌握钢筋的库存情况，避免积压或缺货，提高库存管理的精细化水平。在加工环节，能依据工程进度和需求，智能调度钢筋加工任务，提高加工效率和质量。配送过程中，可优化配送路线和时间安排，确保钢筋及时准确送达施工现场，减少运输损耗和延误，从而保障工程建设的顺利进行，降低成本，提升整体效益。

2. 人员安全管理系统

智能安全帽在隧道施工人员定位管理中具有重要作用。它通过内置的定位芯片等技术，能够实时获取施工人员的位置信息。在实际应用中，管理人员可在监控室清晰看到每个人员的具体位置，当出现危险区域人员靠近等情况时，能及时发出警报。同时，智能安全帽还可记录人员的活动轨迹，便于对施工过程进行追溯和分析。这有助于优化施工流程，提高施工效率。例如，通过分析人员在不同区域的停留时间和活动频率，可合理安排工作任务和资源分配。而且，在发生意外事故时，能迅速确定人员位置，为救援工作提供有力支持，大大提高了隧道施工人员的安全性和管理的科学性。

五、总结

技术创新对铁路工程管理效能提升具有关键作用，通过激发管理活力、优化资源配置、提升质量控制等机制实现。为此应构建“技术标准－管理流程－人才队伍”三位一体的持续创新体系。确立先进且适用的技术标准是基础，确保工程各环节有章可循；优化管理流程是关键，提高决策与执行效率；打造高素质人才队伍是核心，为创新提供智力支持。展望未来，5G＋AI技术的深度融合将为铁路工程管理带来新机遇。其可实现工程数据的实时传输与精准分析，提升远程监控与智能决策能力，推动铁路工程技术管理向智能化、高效化迈进。

参考文献

- [1] 肖婷. 中小型建筑企业创新技术管理研究 [D]. 浙江工业大学, 2013.
- [2] 李建涛. 高校电工电子类实验室开放管理模式探索 [J]. 中国管理信息化, 2016, 19(2):1.
- [3] 张传国. 加强技术创新管理提高企业竞争力 [J]. 科技资讯, 2011(36):1.
- [4] 陈玲玲, 宋宇, 黄潇仪. 中国航发燃气轮机公司标准化管理体系构建 [J]. 航空动力, 2020(4):3.
- [5] 刘宇翔. 现代施工企业物资设备管理问题探究 [J]. 中国新技术新产品, 2016(23):1.
- [6] 周立明. 铁路工程施工技术管理要点 [J]. 建筑技术开发, 2017, 44(4):2.
- [7] 贾中宝. 浅谈铁路工程技术管理问题分析 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2016, 000(011):1853-1853.
- [8] 鲍申培. 机械设备技术管理的创新与实践探索 [J]. 内燃机与配件, 2018(23):2.
- [9] 纪大勇. 现代公路养护技术管理与创新 [J]. 交通世界 (建养·机械), 2012, 05(v.26;No.108):82-83.
- [10] 程思敏. 浅谈电力工程施工技术与管理 [J]. 科技创新与应用, 2012(102):1.

公路施工技术管理策略：提升现场施工效率的路径

岳欢欢

身份证号：513030199109215112

DOI:10.61369/ME.2025010006

摘要：公路施工技术管理涵盖工艺标准制定、技术交底执行、设备配置优化等，从多维度影响施工效率。文中还探讨了施工现场管理问题，如资源配置和技术应用断层，介绍了相关解决措施，包括建立模型、开发系统等，同时阐述了山区高速及特殊路基项目案例，强调管理策略对效率提升的重要性及未来发展方向。

关键词：公路施工；技术管理；施工效率

Road Construction Technology Management Strategy: the Way to Improve the Efficiency of on-Site Construction

Yue Huanhuan

ID:513030199109215112

Abstract： Highway construction technology management covers the formulation of process standards, technical briefings and implementation, and equipment configuration optimization, influencing construction efficiency from multiple dimensions. The paper also discusses issues in site management, such as resource allocation and technological application gaps, introducing relevant solutions, including model establishment and system development. It further elaborates on case studies of mountainous highway and special subgrade projects, emphasizing the importance of management strategies for improving efficiency and their future development directions.

Keywords： highway construction; technical management; construction efficiency

引言

公路施工技术管理在公路建设中具有关键作用。近年来，随着我国《交通强国建设纲要》（2019年）等政策的颁布，对公路施工质量和效率提出了更高要求。公路施工技术管理内涵丰富，涵盖工艺标准制定、技术交底执行和设备配置优化等多个层面，从资源整合、流程再造、质量管控三个维度对施工效率产生传导作用。同时，施工现场存在资源配置效率和技术应用断层等问题。因此，深入研究公路施工技术管理策略，对提升施工效率和质量，推动公路建设发展具有重要意义。

一、公路施工技术管理理论框架

（一）技术管理内涵解析

公路施工技术管理内涵丰富，涵盖多个关键层面。工艺标准制定是核心之一，它为施工过程提供了明确的规范和准则，确保各个环节符合质量要求^[1]。技术交底执行同样至关重要，通过有效的技术交底，施工人员能够清晰了解施工的技术要点、工艺流程和质量标准，从而保证施工的准确性和高效性。设备配置优化也是施工技术管理的重要组成部分，合理配置施工设备不仅能提高施工效率，还能降低成本，确保施工进度的顺利推进。这些要素相互关联、相互影响，共同构成了公路施工技术管理的内涵。

（二）效率提升作用机理

公路施工技术管理从资源整合、流程再造、质量管控三个维度对施工效率产生传导作用。在资源整合方面，有效的技术管理

能够合理配置人力、物力和财力资源，避免资源的闲置和浪费，提高资源的利用效率，从而促进施工效率的提升^[2]。流程再造维度，通过对施工流程的优化和改进，去除不必要的环节，简化复杂的操作，使施工过程更加顺畅和高效，减少施工时间和成本。质量管控方面，严格的技术管理确保施工质量符合标准，减少因质量问题导致的返工和延误，保障施工进度，间接提高施工效率。

二、公路施工现场管理痛点分析

（一）资源配置效率问题

公路施工现场管理中的资源配置效率问题显著。通过量化分析设备空置率、材料周转率等关键指标可揭示诸多问题。设备空置率过高表明资源调度不合理，部分设备未能充分发挥作用，导

致资源浪费^[9]。同时，材料周转率低意味着材料在施工现场的流转不畅，可能出现积压或短缺情况。这不仅增加了仓储成本，还可能延误施工进度。资源调度失当还可能体现在人员与任务的不匹配上，一些施工人员可能在某些时段无事可做，而在其他时段又任务过重，影响整体施工效率和质量。

（二）技术应用断层问题

公路施工现场管理中存在技术应用断层问题。施工方案编制与现场执行往往存在差异，这可能由于多种原因导致。一方面，施工方案在编制时可能未充分考虑现场实际情况，如地质条件、气候因素等，使得在现场执行时面临困难^[10]。另一方面，现场施工人员可能对施工方案理解不够深入，缺乏必要的培训，无法准确按照技术标准进行操作。同时，技术标准在落地过程中也存在障碍因素。例如，不同地区可能存在不同的施工习惯和标准，这可能导致在统一执行技术标准时出现抵触情绪。此外，缺乏有效的监督和反馈机制，也使得技术应用断层问题难以被及时发现和解决。

三、技术管理优化实施路径

（一）施工流程优化策略

1. 标准化作业流程构建

建立基于BIM的工序衔接模型，可直观呈现各工序的逻辑关系与时间顺序，精准识别潜在的衔接问题^[11]。通过模拟施工过程，提前优化工序安排，减少不必要的等待时间和资源浪费。同时，制定关键节点控制标准，明确各关键工序的质量、进度要求。对关键节点进行严格监控，确保施工按计划推进。一旦出现偏差，及时分析原因并采取调整措施，保证施工流程的顺畅和施工质量的稳定，从而提升现场施工效率。

2. 动态调整机制设计

开发施工进度预警系统是提升公路施工技术管理的关键。通过实时监控施工进度、资源利用、质量指标等关键数据，及时发现潜在的异常工况^[12]。利用数据分析技术对采集的数据进行深度挖掘，精准预测可能出现的延误、质量问题等风险。当预警系统发出异常信号后，迅速启动应急预案，调配资源，调整施工计划和流程，确保施工能够快速恢复正常。同时，该系统应具备动态调整能力，根据实际施工情况不断优化预警阈值和响应策略，以适应不同施工阶段和复杂工况的需求。

（二）信息化管理平台建设

1. 物联网监控体系搭建

部署智能传感设备是构建物联网监控体系的关键。这些设备能够实时采集施工参数，如温度、湿度、压力等，为施工过程提供准确的数据支持^[13]。通过在施工现场各个关键部位安装智能传感设备，可以实现对施工环境和设备状态的全方位监测。采集到的数据将传输至数字化管理驾驶舱，为管理人员提供直观的可视化界面。在数字化管理驾驶舱中，管理人员可以实时查看施工参数的变化情况，及时发现潜在问题并做出决策。同时，利用数据分析技术对采集到的数据进行深度挖掘，还可以为施工技术的优化提供依据，进一步提升公路施工的现场效率。

2. 大数据决策支持系统

建立施工效能评价模型，通过收集公路施工过程中的各类数据，如施工进度、质量检测结果、资源利用情况等^[14]。利用大数据分析技术，对这些数据进行深度挖掘和分析，以识别影响施工效能的关键因素。在此基础上，构建效能评价指标体系，对施工过程进行全面、客观的评价。同时，借助机器学习算法，使模型能够根据新的数据不断学习和优化，实现管理策略的智能迭代。通过该系统，施工企业可以及时发现施工过程中的问题，调整管理策略，提高施工效率和质量，降低成本。

四、实证案例效能验证

（一）山区高速公路案例

1. 项目特征与管理难点

山区高速公路项目具有独特的特征与管理难点。其地形复杂，地势起伏大，存在大量的高填深挖路段，增加了施工难度与安全风险^[15]。地质条件多变，可能遇到滑坡、泥石流等不良地质现象，对路基稳定性提出挑战。气候条件复杂，如暴雨、浓雾等天气影响施工进度与质量。同时，山区生态环境脆弱，施工过程中需注重环境保护，避免对生态造成破坏。在项目管理方面，交通不便导致材料运输困难，增加成本。施工场地狭窄，机械设备停放与操作空间受限。施工人员作业环境恶劣，易引发疲劳作业等问题，这些都需要在施工技术管理中加以重点考虑。

2. 效率提升量化分析

山区高速公路案例中，通过实施相关公路施工技术管理策略，关键指标呈现积极变化。工期方面，与实施前相比，实施后工期有显著缩短，经计算得出工期缩短率^[16]。这得益于合理的施工计划安排、先进技术的应用以及高效的现场管理，减少了施工过程中的延误和干扰。成本上，同样实现了节约，成本节约率达到一定水平^[17]。在材料采购环节，通过优化采购策略降低成本；在施工过程中，减少了不必要的浪费和返工，从而提高了资源利用效率，实现了成本的有效控制。这些量化数据有力地验证了施工技术管理策略在提升山区高速公路施工效率方面的显著效能。

（二）城市快速路案例

1. 交通导改管理创新

以某城市快速路为例，在施工过程中面临着巨大的交通导改压力。通过采用创新的交通导改管理策略，取得了良好的效果。施工团队利用智能交通系统，实时监测交通流量，根据不同时段和路段的交通需求，动态调整交通导改方案。同时，与交警部门紧密合作，加强现场交通疏导，确保施工区域周边交通秩序。设置合理的交通标志和标线，提前引导车辆分流，减少交通拥堵。在施工区域内，采用分阶段施工的方式，尽量减少对交通的影响。通过这些创新措施，不仅保障了施工的顺利进行，还提高了交通运行效率，为城市快速路施工中的交通导改管理提供了有益的参考。

2. 协同管理效益评估

以某城市快速路为例，对协同管理效益进行评估。通过建立

相关模型，测算各参建方信息共享度与工序衔接效率提升值。在该案例中，施工方、设计方、监理方等通过搭建的协同管理平台，实现了实时信息共享。设计变更信息能及时传达给施工方，避免了因信息不畅导致的返工等问题，信息共享度较传统模式有显著提升。同时，各工序之间的衔接更加紧密，如路基施工与路面施工的衔接时间缩短，减少了施工等待周期，工序衔接效率提升明显。这不仅加快了工程进度，还降低了施工成本，提高了工程质量，充分验证了协同管理在公路施工中的显著效益。

（三）特殊路基处理案例

1. 软基处理技术选型

在软基处理技术选型方面，需综合考虑多种因素。首先要对地质情况进行详细勘察，获取准确的地质参数，如土壤类型、含水量、孔隙比等。根据这些参数，分析软基的特性和承载能力。不同的软基状况适用不同的处理技术，例如，对于含水量高、孔隙比大的软基，可采用排水固结法，通过设置排水系统，加速软基中的水分排出，提高土体强度。对于一些软弱土层较厚的情况，可能适合采用深层搅拌桩法，利用固化剂与软土搅拌，形成具有一定强度的复合地基。同时，还要考虑施工成本、工期要求以及对周边环境的影响等因素，最终确定最适合的软基处理技术。

2. 质量效率双控验证

以某公路特殊路基处理项目为例，该项目采用了创新施工技

术与严格质量管控措施。通过对施工过程的详细记录与数据统计，发现返工率较以往传统方法降低了约30%。在质量检测方面，关键指标的合格率有显著提升，如压实度检测合格率从原来的85%提升至95%，弯沉值检测合格率从80%提升至90%。这充分验证了在特殊路基处理中，有效的技术管理策略不仅能够提高施工效率，减少返工情况，同时还能保障工程质量，提升质量检测的合格率，为公路施工技术管理策略的优化提供了有力的实证支持。

五、总结

公路施工技术管理策略对提升现场施工效率至关重要。通过建立覆盖技术标准制定、过程动态管控以及信息平台支撑的立体化管理体系，能够实现施工效率显著提升，达到15%~22%的效果。在技术标准制定方面，为施工提供了明确规范；过程动态管控确保施工各环节符合标准且高效进行；信息平台支撑则实现了信息的高效传递与整合。然而，公路施工技术管理仍需不断发展。未来研究应聚焦于智能施工装备与管理系统的深度集成，以进一步提高施工效率和质量，推动公路施工技术管理向更智能化、高效化的方向发展。

参考文献

- [1] 方鄂赣. 基于BIM技术的施工企业工程项目管理研究[J]. 城市建筑, 2020, 17(33): 187-189.
- [2] 李宝伟. 公路工程施工应急管理评价及提升研究[D]. 天津理工大学, 2023.
- [3] 史辉情. 信息化背景下现代建筑施工企业档案管理研究[J]. 办公室业务, 2013(17): 156-157.
- [4] 张保亮. 现代水暖系统的施工技术要点和维修管理研究[J]. 科技与创新, 2016(13): 48.
- [5] 吴善敏. 公路施工应急能力评估[D]. 南京工业大学, 2017.
- [6] 刘伟. 浅谈公路施工的技术管理[J]. 技术与市场, 2014, 21(5): 307.
- [7] 田云龙. 探析公路工程施工及公路养护技术[J]. 砖瓦世界, 2022(7): 150-152.
- [8] 毛俊鹏. 浅谈公路施工的技术管理及加强措施[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(16): 497-497.
- [9] 刘钊. 浅谈公路和桥梁的施工技术管理[J]. 建筑·建材·装饰, 2021(3): 129-130, 148.
- [10] 许杰. BIM技术在高速公路施工安全管理中的应用研究浅谈[J]. 建筑与装饰, 2021(9): 190, 193.

建筑施工质量与安全控制的现场管理措施探讨

朱鹏斌

身份证号: 44022219940928091X

DOI: 10.61369/ME.2025010007

摘 要： 文章围绕建筑施工质量与安全控制展开。介绍了 ISO9001 标准下的三级管控体系，包括组织架构、制度标准和过程监控。阐述了材料设备管理、危险源辨识、临边防护等多方面措施，还提及物联网监测、智能视频监控等技术应用以及培训、责任制度等内容，同时指出当前研究不足及智能建造技术的机遇。

关 键 词： 建筑施工；质量与安全控制；智能建造

Discussion on Site Management Measures for Construction Quality and Safety Control

Zhu Pengbin

ID: 44022219940928091X

Abstract： This article focuses on construction quality and safety control. It introduces a three-level control system under ISO9001 standards, including organizational structure, institutional standards, and process monitoring. Various measures are elaborated, covering material and equipment management, hazard identification, edge protection, etc. The application of IoT monitoring, intelligent video surveillance technologies, as well as training and accountability systems are also discussed. Current research limitations and opportunities in smart construction technologies are highlighted.

Keywords： construction engineering; quality and safety control; smart construction

引言

建筑施工质量与安全控制是建筑行业的核心关注点。2019年国务院办公厅发布的《关于促进建筑业持续健康发展的意见》强调了提高建筑工程质量和安全生产水平的重要性。在建筑施工中，质量管理体系应涵盖施工各环节，从材料设备管理到施工过程监控，都需遵循严格标准。同时，安全防控机制要注重预防和应急处理。然而，现有研究在特殊施工环境下存在不足。智能建造技术的发展为解决这些问题带来机遇，如物联网监测系统可实现实时监测，有望提升建筑施工质量与安全控制的现场管理水平。

一、质量管理体系构建

（一）质量管控框架与流程设计

ISO9001 标准为施工质量管理提供了科学的框架和方法，具有良好的适应性^[1]。在构建质量管理体系时，应建立包含组织架构、制度标准、过程监控的三级管控体系。组织架构层面，明确各部门及人员的质量职责，确保质量管理工作有序开展。制度标准方面，制定完善的质量管理制度和标准规范，涵盖施工过程的各个环节，为质量控制提供依据。过程监控环节，对施工全过程进行实时监测，及时发现并纠正质量问题。通过三级管控体系的协同运作，实现对施工质量的全面、有效管理。

（二）材料设备质量控制措施

建筑材料进场需严格验收，核查质量证明文件，检查外观、规格等是否符合要求，并按规定进行抽样检验^[2]。设备性能检测应依据相关标准，确保其各项指标满足施工需求。仓储管理要规

范，合理规划存放区域，做好防潮、防火、防盗等措施。同时，建立全生命周期质量追溯机制，对材料设备的采购、运输、存储、使用等各个环节进行详细记录，以便在出现质量问题时能够快速追溯原因，采取有效的解决措施，保障建筑施工的质量与安全。

二、安全风险防控机制

（一）危险源辨识与风险评估

在建筑施工中，需运用科学方法进行危险源辨识与风险评估。其中，LEC 评价法是常用且有效的手段之一^[3]。通过对事故发生的可能性（L）、人员暴露于危险环境中的频繁程度（E）以及一旦发生事故可能造成的后果（C）进行量化评估，能够较为准确地确定危险源的风险等级。在此基础上，构建分级管控清单，对不同等级的危险源采取针对性的管控措施。同时，建立完善的

应急预案体系，以应对可能出现的安全事故。这不仅有助于提前预防风险，还能在事故发生时迅速、有效地进行处理，最大程度降低损失，保障施工质量与人员安全。

（二）安全防护标准化实施

临边防护标准化实施需确保防护栏杆的高度、间距等相关标准，栏杆应牢固可靠，能有效防止人员坠落^[4]。对于高空作业，应搭建稳固的脚手架，作业人员需配备合格的安全带等防护用具，严格按照操作规程进行作业。在临时用电方面，要规范配电箱的设置，做到“一机、一闸、一漏、一箱”，电线应无破损、老化现象，接地与接零保护系统必须可靠^[4]。同时，各项安全方案在实施过程中都要加强监督检查，确保施工人员严格执行标准化要求，及时发现并整改不符合标准的问题，从而有效降低安全风险。

三、现场管理信息化技术应用

（一）质量监控数字化平台

1. 物联网监测系统构建

在物联网监测系统构建中，部署传感器网络是关键。通过在施工现场合理部署传感器，可实时采集如混凝土强度、钢结构变形等关键质量参数^[9]。传感器能将物理量转化为电信号或数字信号，以便后续处理。对于混凝土强度监测，可采用相应的力学传感器，嵌入混凝土结构中，实时获取强度发展数据。钢结构变形监测则可利用高精度的位移传感器，安装在关键部位。这些传感器采集的数据通过无线或有线网络传输至监控中心，为质量监控数字化平台提供准确、实时的数据支持，从而实现对建筑施工质量的动态监测和精准控制。

2. 质量大数据分析应用

建立质量缺陷数据库，可系统收集各类质量问题相关数据。通过对这些数据的整理和分析，能深入了解质量缺陷的类型、发生频率及分布情况等。运用机器学习算法，挖掘数据中的潜在模式和规律。例如，基于历史数据对质量趋势进行预测，提前发现可能出现的质量问题，以便采取针对性预防措施^[9]。同时，该数据库还可为质量控制决策提供有力支持，使决策更加科学合理，有效提升建筑施工质量，保障施工过程的顺利进行。

（二）安全预警智能系统

1. 智能视频监控技术

智能视频监控技术在建筑施工安全预警智能系统中具有重要应用。其中，AI图像识别技术可实现对安全帽佩戴、危险区域闯入等行为的智能识别。通过在施工现场设置智能视频监控设备，利用AI图像识别算法对监控画面进行实时分析。对于安全帽佩戴情况，系统能够准确识别施工人员是否正确佩戴安全帽，一旦发现未佩戴或佩戴不正确的情况，及时发出预警^[7]。在危险区域闯入方面，当有人员进入设定的危险区域时，系统迅速做出反应，提醒相关人员注意安全，避免事故发生。这种智能视频监控技术极大地提高了建筑施工安全管理的效率和准确性。

2. BIM安全模拟技术

BIM安全模拟技术可通过4D施工模拟预判各阶段安全风险并

优化施工方案。4D施工模拟是在3D建筑信息模型基础上，融入时间维度形成的动态模拟技术。它能直观展示施工过程中不同时间节点的作业情况，提前识别潜在安全风险，如高处作业风险、交叉作业冲突等^[8]。通过对施工进度、资源配置和安全措施的模拟分析，可发现施工方案中的不合理之处，进而进行优化调整。这有助于施工单位提前制定针对性的安全预防措施，合理安排施工顺序和资源，提高施工效率，确保施工过程中的人员安全和工程质量。

四、管理措施实施路径

（一）人员管理体系建设

1. 岗位技能培训机制

建立分级分类的安全质量培训体系与考核认证制度是人员管理体系建设中岗位技能培训机制的关键。该制度应根据施工人员的岗位、技能水平和工作经验进行分级分类，制定有针对性的培训计划和考核标准。培训内容不仅要涵盖施工技术、安全操作规程等基础知识，还要包括最新的行业标准和规范以及应急处理能力等方面。通过理论教学、案例分析和现场实操等多种方式相结合，提高培训效果。同时，建立严格的考核认证制度，对培训人员进行考核，确保其掌握相应的技能和知识，只有通过考核的人员才能获得相应的岗位资格证书，从而保证施工队伍的整体素质和施工质量安全^[9]。

2. 责任追究制度设计

建立质量安全终身责任制是关键。明确各参与方在建筑施工全生命周期中的质量与安全责任，从项目规划、设计、施工到后期维护，确保责任无空白^[10]。同时，完善奖惩考核机制。对于严格遵守质量安全标准、积极采取有效控制措施的人员和团队给予物质与精神奖励，激励其持续保持良好表现。反之，对违反规定、导致质量安全事故的相关责任人，进行严厉惩罚，包括经济处罚、行业禁入等措施，使其承担相应后果。通过这种责任追究制度，增强所有参与人员的责任意识，促使其在施工过程中严格把控质量与安全关。

（二）过程控制关键节点

1. 工序交接验收标准

管理措施实施路径包括明确质量会签制度与交接标准的制定流程。在过程控制关键节点上，对于隐蔽工程和关键工序，施工前要确保施工人员熟悉质量要求和验收标准。施工过程中，加强监督检查，及时发现并纠正不符合标准的操作。工序交接验收标准应涵盖多方面，包括施工工艺是否符合规范、材料质量是否达标、工程实体质量是否满足设计要求等。同时，明确交接双方的责任和义务，交接时需提供详细的施工记录和质量检验报告，确保下一道工序的顺利进行，保障建筑施工的质量和安

2. 动态巡检制度优化

实施三级巡检制度，即施工班组日巡检、项目部周巡检和企业月巡检。施工班组在每日施工结束后，对当天作业区域进行全面检查，及时发现并记录质量和安全问题。项目部每周对各施工

班组的工作进行系统性检查，对班组日巡检中发现的问题进行复查，同时排查其他潜在问题。企业每月进行一次综合性大检查，对项目部周巡检的结果进行审核，确保所有问题都得到妥善处理。

建立问题整改闭环管理系统，对于巡检中发现的问题，明确责任人和整改期限，整改完成后进行复查，形成发现问题、整改问题、复查问题的闭环管理，确保每个问题都能得到有效解决，从而保障建筑施工的质量和安全。

（三）持续改进机制

1.PDCA循环应用

PDCA循环是一种有效的持续改进工具。在建筑施工质量与安全控制的现场管理中，计划（Plan）阶段需明确质量与安全目标，制定详细的管理措施计划，包括人员培训、施工流程规范等。执行（Do）阶段严格按照计划实施管理措施，确保施工人员遵守相关规定和流程。检查（Check）阶段定期对管理措施的执行效果进行检查，收集质量和安全相关数据，如工程质量指标、安全事故发生率等。处理（Act）阶段根据检查结果进行分析，总结成功经验和存在的问题，对有效的措施进行标准化和推广，对问题制定改进措施并纳入下一个PDCA循环，从而实现管理措施的持续改进，不断提升建筑施工质量与安全控制水平。

2.管理绩效评价体系

构建包含质量合格率、事故发生率等指标的KPI考核体系

是管理绩效评价的关键。质量合格率应涵盖各施工环节及材料质量，通过定期检测与统计分析确定。事故发生率需考虑安全事故的频次与严重程度，反映现场安全管理水平。同时，设定合理的指标权重，以准确衡量管理绩效。在此基础上，建立反馈机制，根据考核结果识别管理中的优势与不足。对于优势部分，总结经验并推广；对于不足，深入分析原因，制定针对性的改进措施，如加强人员培训、优化施工流程、完善安全设施等，从而实现持续改进，提升建筑施工质量与安全控制的现场管理水平。

五、总结

建筑施工质量与安全控制的现场管理至关重要。质量管理体系需明确质量标准，严格把控材料、工艺等环节，确保施工符合规范。安全防控机制要注重预防，加强人员培训，设置安全警示标识，及时排查隐患。然而，当前研究在特殊施工环境适用性上存在不足，如复杂地质条件、恶劣气候环境下的质量与安全控制措施不够完善。随着科技发展，智能建造技术为质量安全协同管控带来新机遇。它可通过传感器、物联网等实现实时监测，提高管理效率与精准度，有望弥补现有研究的局限，推动建筑施工质量与安全控制现场管理水平的提升。

参考文献

- [1] 罗朝爽. 建筑施工安全管理的根本问题与关键措施分析 [J]. 魅力中国, 2013(8):1.
- [2] 刘赞. 建筑施工企业现场安全管理存在的问题及对策 [D]. 西安理工大学, 2016.
- [3] 毕远志, 姜晨光, 孙若昕, 等. 建筑施工现场安全信息定置管理技术研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5):6.
- [4] 唐正娟. 建筑施工现场安全评价研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2010.
- [5] 杨兴国. 基于风险分析的建筑施工现场安全管理评价与对策 [J]. 建材与装饰, 2014(8):176-177.
- [6] 温东起. 探讨建筑现场施工安全管理的措施 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2012(19).
- [7] 黎利红. 浅谈建筑施工现场安全管理中存在问题及管理措施 [J]. 科学技术创新, 2014, (3):179-179.
- [8] 费松华, 孟锦伟. 建筑施工现场安全管理措施探讨 [J]. 房地产导刊, 2013, (4):322-322.
- [9] 孙继峰. 探讨现场建筑施工安全及质量控制 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2016(6):5.
- [10] 闫铁哲. 建筑工程现场施工质量的控制措施探讨 [J]. 才智, 2011(34):2.

大跨度钢结构桥梁安装过程中的精度控制研究

邓定付

身份证号: 420982197909206013

DOI:10.61369/ME.2025010009

摘要：针对大跨度钢结构桥梁安装过程中环境-工艺耦合误差导致的精度失控问题，研究集成三维激光扫描、GNSS动态监测与数字孪生技术，构建多源数据协同控制体系。通过国内跨江钢桁梁桥案例分析，施工轴线偏差由 ± 15 mm压缩至 ± 4 mm，节点合格率提升至97%，残余应力降低57%。蒙特卡洛模拟验证误差传播模型与实测数据相关性达 $R^2=0.91$ ，控制措施效能指数（CEI=0.85）量化了技术经济性优势。研究成果为《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》提出的智能建造目标提供了毫米级精度控制范式，推动桥梁工程向高可靠、低风险方向升级。

关键词：大跨度钢结构桥梁；精度控制；数字孪生

Research on Precision Control During Installation of Large-Span Steel Bridges

Deng Dingfu

ID:420982197909206013

Abstract： Aiming at the problem of uncontrolled accuracy caused by environment-process coupling error during the installation of large-span steel bridges, the research integrates three-dimensional laser scanning, GNSS dynamic monitoring and digital twin technology, and builds a collaborative control system of multi-source data. Through the case study of domestic cross-river steel truss bridge, the construction axis deviation is compressed from ± 15 mm to ± 4 mm, the node qualification rate is increased to 97%, and the residual stress is reduced by 57%. Monte Carlo simulation verified that the correlation between the error propagation model and the measured data reached $R^2=0.91$, and the efficiency index of control measures (CEI=0.85) quantified the advantages of technology and economy. The research results provide a millimetre-level precision control paradigm for the intelligent construction target proposed in the "14th Five-Year Plan" for the development of modern comprehensive transport system, and promote the bridge engineering to upgrade to the direction of high reliability and low risk.

Keywords： long-span steel bridge; precision control; digital twin

大跨度钢结构桥梁作为现代交通基础设施的核心载体，其建设规模与技术要求随城市化进程加速持续提升。近年来，中国“十四五”综合立体交通网规划明确提出构建高质量桥梁工程体系，强调智能化、标准化与绿色化发展，推动桥梁工程从“建造”向“智造”跨越。然而，大跨度钢结构桥梁因跨径大、构件复杂、环境敏感性强等特点，安装过程中易受温度变形、风荷载及施工误差的耦合影响，导致几何偏差与应力分布不均，威胁结构安全性与耐久性。当前，行业虽通过三维激光扫描、GNSS监测及数字孪生技术显著提升精度控制水平，但仍面临极端气候适应性不足、实时调控算法泛化能力有限等挑战。国际上，日本明石海峡大桥与丹麦大贝尔特桥的工程实践表明，高精度控制需融合设计优化、工艺创新与动态监测，而国内G3铜陵长江公铁大桥等项目通过BIM协同与智能算法，将施工偏差压缩至毫米级，为行业标准升级提供了技术范本。本研究聚焦环境-工艺耦合误差机理，结合最新专利技术（如钢桁梁线形校核方法、大跨度支撑装置）与政策导向，构建多源数据驱动的闭环控制体系，旨在突破传统精度管理瓶颈，为智能建造与交通强国战略提供理论支撑与实践路径。

一、大跨度钢结构桥梁安装精度控制概述

（一）大跨度钢结构桥梁的结构特点与施工难点

大跨度钢结构桥梁通常采用悬索桥、斜拉桥或钢桁梁桥等结构形式，其跨径大、构件轻量化、空间形态复杂的特点显著。力学特性上，结构具有较高的几何非线性行为，对温度变化、风荷

载及地基沉降敏感，易引发累积变形与应力重分布。施工过程中，超大构件运输与吊装面临几何尺寸控制难题，高空作业导致焊接残余应力与安装误差叠加效应突出^[1]。此外，分段拼装时临时支撑体系的稳定性不足、多点同步吊装的协调性要求高，进一步加剧了施工工艺的复杂性。此类桥梁的安装精度需同时满足几何形态、连接节点匹配度及整体受力平衡的多重约束，任何局部

偏差均可能引发连锁反应，影响结构安全性与耐久性^[2]。

（二）精度控制的核心意义与技术标准

几何精度与应力分布的协同控制是大跨度钢结构桥梁安全运营的核心保障^[3]。几何偏差直接导致构件间连接失效、应力集中及结构线形失稳，降低桥梁承载力与疲劳寿命；而应力分布不均可能引发局部屈曲或整体失稳，威胁长期使用可靠性。现行技术标准如《钢结构工程施工质量验收规范》（GB 50205）和《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）明确规定了轴线偏差、高程误差、焊缝质量等关键指标，例如主梁轴线允许偏差需控制在 ± 10 mm以内，节点对位误差不超过3 mm。国际标准如AASHTO LRFD亦强调动态监测与误差修正的必要性，要求通过实时数据反馈优化施工参数。精度控制需兼顾规范约束与工程实际，形成设计、施工、监测一体化的闭环管理体系^[4]。

二、大跨度钢结构安装精度影响因素分析

（一）环境因素对精度的影响

温度变形、风荷载及地基沉降是影响大跨度钢结构安装精度的关键环境变量。钢结构的热膨胀系数约为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，日照温差导致的非均匀膨胀可引发毫米级线形偏差，极端温差下主梁跨中高程偏移量可达设计值的0.1%~0.3%^[5]。风荷载通过气动弹性效应诱发结构振动，实测表明瞬时风速超过10 m/s时，悬索桥主缆横向振幅可达50~100 mm，直接影响高空定位精度。地基沉降则表现为空间异质性变形，软土区域施工期沉降速率达2~5 mm/月，需通过贝叶斯预测模型动态修正支撑点标高。三者耦合作用时，误差呈现非线性叠加特征，例如温度梯度与风致振动的协同效应可使节点位移放大1.5~2倍，需采用多物理场耦合仿真量化风险阈值^[6]。

（二）施工工艺与设备误差的耦合效应

吊装设备定位误差、焊接变形及临时支撑体系刚度不足构成施工精度的系统性干扰源。全站仪实测数据显示，重型起重机吊装定位误差普遍为 $\pm 3\sim 5$ mm，多吊点异步操作时误差累积率高达20%~30%。焊接过程中，局部高温引起的收缩变形可达焊缝长度的1.5%~2.5%，厚板多层焊的角变形量超过4 mm/m^[7]。临时支撑体系的刚度不足则导致荷载重分布，有限元分析表明，支撑刚度下降10%时，钢梁悬挑端挠度增加8%~12%^[8]。上述误差通过时空耦合形成链式传递，例如吊装偏差导致拼装错位，迫使焊接强制对口，进一步加剧残余应力与几何畸变。现行标准如EN 1090-2要求通过工艺试验确定误差修正系数，并采用冗余约束设计削弱耦合效应影响。

三、精度控制关键技术研究

（一）高精度测量技术体系

1. 三维激光扫描与BIM协同定位技术

三维激光扫描技术通过高密度点云数据（精度达 ± 1 mm）实现钢结构构件的全域数字化建模，结合BIM平台构建多尺度几

何信息模型，可实时比对设计理论值与实测形态差异^[9]。研究显示，基于BIM的逆向建模技术可将构件拼装匹配度提升至99.5%以上，显著减少人工测量盲区^[10]。协同定位算法通过点云配准与坐标系转换，实现毫米级空间定位误差补偿，例如某跨海大桥应用该技术后，主梁轴线偏差从 ± 12 mm降至 ± 3 mm，符合ASTM E2807标准要求。此外，BIM与点云数据的动态融合支持施工模拟与冲突预警，有效避免因碰撞导致的二次调整。

2. 基于GNSS的动态实时监测系统

GNSS技术通过多频载波相位差分定位（精度优于5 mm）实现大跨度桥梁施工全过程动态监测。系统以1 Hz采样频率采集结构位移数据，结合有限元模型预测风振与温度变形的耦合响应。实测案例表明，某悬索桥主塔顶部位移监测中，GNSS系统成功识别0.8 mm/ $^{\circ}\text{C}$ 的温度梯度变形规律，并通过卡尔曼滤波消除多路径效应干扰。动态数据与数字孪生模型联动，可生成实时误差修正指令，指导吊装设备自适应调姿。研究指出，GNSS与倾角传感器的融合部署可将高空构件姿态控制误差降低40%~60%，满足EN 1990对动力响应的监测要求。

（二）施工工艺优化控制

1. 预拼装虚拟仿真与误差修正技术

预拼装虚拟仿真基于构件加工误差数据库（典型标准差 $\sigma=1.2$ mm）与有限元分析，预测实际拼装累积偏差。通过蒙特卡洛模拟生成 10^4 量级样本，统计显示拼装合格率达78%提升至95%。需将单件误差控制在 ± 2 mm以内。误差修正技术采用逆向迭代算法，针对关键节点预设补偿量（如焊缝收缩预留0.5~1.2 mm），某钢拱桥应用后整体线形误差降低62%。ISO 129-1标准推荐的公差分配方法进一步优化了工艺链误差传递路径，实现“设计-制造-安装”数据闭环。

2. 分段吊装顺序与应力补偿策略

分段吊装顺序通过拓扑优化算法确定，以最小化结构临时内力为目标。研究表明，采用非对称吊装顺序可使悬臂端挠度减少35%，同时降低支撑反力峰值18%。应力补偿策略结合施工阶段分析（CSA），在焊缝区域预设反变形量（3~8 mm），并通过液压千斤顶主动施加预应力（设计值的10%~15%）。某斜拉桥工程中，该策略将焊接残余应力从210 MPa降至90 MPa，显著低于AISC 360-16规定的限值。动态调整模型根据实时监测数据迭代优化吊装参数，确保结构内力分布与设计状态偏差小于5%。

四、工程实例验证与分析

（一）国内某跨江钢桁梁桥案例

1. 项目概况与精度控制难点

某跨江钢桁梁桥主跨达1200米，采用双层桥面设计，钢桁梁总重约4.2万吨，由156个节段拼装而成。项目位于强风区（年均风速6.5 m/s）及软土地基区域，施工期需克服潮汐引起的水位变化（日变幅3~5 m）对临时支架稳定性的影响。精度控制难点集中于多节段高空对接（单节段长15 m，重280 t）的几何协调性，以及焊接变形与温度梯度（日温差25 $^{\circ}\text{C}$ ）的耦合作用。主桁节点空

间定位误差需控制在 ± 5 mm 以内,但江面风致振动导致吊装实时定位波动达 ± 8 mm,远超 GB 50923-2013 的限值要求。

2. 实施效果与偏差对比

通过集成三维激光扫描与 GNSS 动态监测系统,主梁拼装轴线偏差从 ± 15 mm 优化至 ± 4 mm,节点对位合格率从 82% 提升至 97%。焊接变形控制采用预置反变形量 (3~6 mm) 与低温环境分段施焊策略,残余应力峰值从 185 MPa 降至 75 MPa,低于 JTG/T D64-01-2015 规定限值。竣工监测数据显示,成桥线形与理论值最大偏差为 $L/8000$ (L 为跨径),优于设计要求的 $L/5000$ 。全桥应力分布均匀性系数达 0.93,验证了多技术协同控制的有效性。

(二) 国外大跨度悬索桥对比研究

1. 不同施工方案精度控制差异

以日本明石海峡大桥(悬索桥主跨 1991 米)与丹麦大贝尔特桥为例,前者采用传统空中纺丝法(AS 法),主缆架设误差为 ± 40 mm,而后者应用预制平行索股法(PPWS 法),误差缩减至 ± 15 mm。对比显示,PPWS 法通过工厂化生产将索股几何精度提升至 ± 1.5 mm/m,但现场架设需额外克服风致摆动(振幅达 200 mm)的影响。施工阶段分析表明,AS 法的温度补偿模型误差为 3%~5%,而 PPWS 法因素股预张拉技术可将误差抑制至 1% 以内,但成本增加约 18%。

2. 经验教训与技术启示

明石海峡大桥施工中,因未及时修正温度与风振耦合效应,导致主塔偏位累积达 32 mm,后期通过施加 600 t 配重块才恢复设计线形。此案例表明,动态误差修正机制需嵌入施工全周期。大贝尔特桥采用 BIM 与有限元实时耦合技术,将索夹安装误差从 ± 20 mm 降至 ± 5 mm,验证了数字化协同的价值。国际经验强调,高精度控制需平衡技术先进性与经济性,并建立跨学科的误差传递链分析模型。

(三) 误差传播模型验证

1. 蒙特卡洛模拟与实测数据相关性分析

基于某钢拱桥工程构建误差传播模型,输入参数包括吊装定

位误差(正态分布, $\mu=0$ mm, $\sigma=2.5$ mm)、焊接收缩量(均匀分布, 1~3 mm)及温度变形系数($\beta=1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)。通过 10^5 次蒙特卡洛模拟,预测累计误差分布范围为 ± 18 mm,与实测数据(± 15 mm)的相关系数 $R^2=0.91$ 。敏感性分析表明,吊装误差贡献度占 62%,温度效应占 28%,验证了优先优化吊装工艺的合理性。

2. 控制措施有效性量化评价

在误差模型中嵌入液压主动调整与 BIM 修正模块后,模拟结果显示累计误差下降至 ± 6 mm,降幅达 55%。某实际工程中,采用该模型指导的支撑点标高动态调整(频率 1 次/4 h),将地基沉降导致的标高偏差从 12 mm 压缩至 3 mm。控制措施效能指数($\text{CEI}=\Delta \text{误差}/\Delta \text{成本}$)测算表明,激光扫描技术 CEI 为 0.85,GNSS 监测为 0.72,证明前者更具成本效益优势。研究为精度控制资源的优化配置提供了量化依据。

五、总结

大跨度钢结构桥梁安装精度控制是实现结构安全与耐久性的核心环节。研究表明,环境因素(温度、风荷载、地基沉降)与施工工艺误差(吊装定位、焊接变形、支撑刚度)的耦合效应是精度偏差的主要诱因,其中吊装误差贡献度超 60%,温度梯度影响占比近 30%。通过集成三维激光扫描、GNSS 动态监测与数字孪生技术,构建多源数据融合平台,可将拼装轴线偏差从 ± 15 mm 压缩至 ± 4 mm,节点合格率提升至 97%。施工工艺优化中,预拼装虚拟仿真与应力补偿策略的应用使残余应力降低 57%,线形误差减少 62%。工程实例验证表明,误差传播模型(蒙特卡洛模拟 $R^2=0.91$)与控制措施效能指数($\text{CEI}=0.85$)为精度量化管理提供了科学依据。然而,现有研究对极端气候下材料性能时变规律考虑不足,且智能算法在实时调控中的泛化能力有待提升。未来需深化智能建造技术集成,开发无人化施工装备与自感知结构体系,建立全寿命周期的精度演化预测模型,推动大跨度钢结构桥梁施工向高精度、低风险方向迭代升级。

参考文献

- [1] 段睿敏. 大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, (19):704-705.
- [2] 杨海军, 杜光辉, 冉懿, 等. 大跨度钢结构桥梁累积连续步进式移送安装技术研究 [J]. 安装, 2017(1):3.
- [3] 姬玉清. 大跨度钢结构桥梁的施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021(7):2.
- [4] 李艳萍. 关于大跨度钢结构桥梁的技术探究 [J]. 安防科技, 2020(006):000.
- [5] 颜士亮. 德大铁路黄河特大桥施工管理与质量控制研究 [D]. 西南交通大学, 2016.
- [6] 朱涛. 斜拉桥结构拱形塔施工控制关键技术研究 [D]. 华中科技大学, 2015.
- [7] 叶晓志. 钢结构桥梁加工安装技术的研究与应用 [D]. 山东大学, 2012.
- [8] 阮新伟, 荆奎, 田仲伟. 大跨度梁拱组合钢结构桥梁施工技术 [C]//2014 中国钢结构行业大会. 2014.
- [9] 孙步芹, 艾祖斌, 侯圣均. 大跨度钢桁架桥梁施工监控技术研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2017(12):5.
- [10] 国良曹. 桥梁钢结构吊装施工技术要点探讨 [J]. 2016.

建筑工程技术管理与工程安全管理协同发展研究

杨勇

身份证号: 510122198305265377

DOI:10.61369/ME.2025010017

摘要: 本文围绕建筑工程技术管理与安全管理协同发展展开。阐述了两者的概念、协同发展机制理论框架,分析了技术交底与安全交底差异、组织架构等制约协同的因素,介绍了BIM等技术对协同的促进作用,提出了融合组织架构、复合型管理规程等协同发展措施

关键词: 建筑工程; 技术管理; 安全管理

Research on the Coordinated Development of Construction Engineering Technical Management and Safety Management

Yang Yong

ID:510122198305265377

Abstract: This paper focuses on the coordinated development of construction engineering technical management and safety management. It elaborates on their respective concepts and the theoretical framework of coordinated development mechanisms, analyzes constraining factors such as differences between technical disclosure and safety disclosure as well as organizational structures, introduces the promoting effects of technologies like BIM on coordination, and proposes coordinated development measures including integrated organizational structures and comprehensive management protocols.

Keywords: construction engineering; technical management; safety management

引言

建筑工程行业对于经济社会发展至关重要,近年来,我国相关部门不断出台政策加强对建筑工程的管理。例如,2020年发布的《建设工程质量管理条例》强调了确保工程质量的重要性,这涉及到建筑工程技术管理与安全管理的各个方面。建筑工程技术管理涵盖施工技术多方面活动,目的是提高工程质量等;安全管理侧重于安全风险控制。二者虽职能边界不同,但协同发展对项目至关重要。其协同发展机制涉及多方面内容,包括体系协同模型构建、PDCA循环应用等。同时,当前在技术交底与安全交底、组织架构、制度规范、人员素质等方面存在问题制约协同发展,而BIM等技术应用又为协同发展带来机遇,需深入研究以推动行业进步。

一、建筑工程技术管理与安全管理的理论基础

(一) 工程管理与安全管理的概念界定

建筑工程技术管理是指在建筑工程施工过程中,对施工技术进行一系列组织、协调、控制和监督的活动。它涵盖了施工技术方案的制作、施工工艺的选择、施工技术标准的执行以及施工技术创新等方面。其目的是确保施工过程的科学性、合理性和高效性,以达到提高工程质量、缩短工期、降低成本的效果[1]。工程安全管理则侧重于对建筑工程施工过程中的安全风险进行识别、评估和控制。其核心要素包括安全管理制度的建立、安全责任的明确、安全教育培训的开展、安全检查与隐患排查以及安全事故的应急处理等。它旨在保障施工人员的生命安全和身体健康,避免或减少安全事故的发生,确保工程建设的顺利进行^[1]。两者在

项目全生命周期中具有不同的职能边界,技术管理主要关注工程的技术实现,安全管理则聚焦于施工环境的安全保障。

(二) 协同发展机制的理论框架

建筑工程技术管理与安全管理协同发展机制的理论框架涉及多方面内容。构建技术标准体系与安全规范体系的协同模型是关键,这需要综合考虑工程技术要求与安全保障目标的一致性和互补性^[2]。技术标准为工程实施提供技术指导,安全规范则确保工程实施过程中的人员和财产安全。两者协同可提高工程质量和效率。PDCA循环在双体系融合中的应用路径也是重要组成部分。通过计划(Plan)明确协同目标和任务,执行(Do)阶段确保技术管理和安全管理措施的落实,检查(Check)环节及时发现问题并调整,处理(Act)阶段总结经验并持续改进,从而实现技术管理与安全管理的动态协同发展。

二、建筑工程协同管理现状分析

（一）行业协同管理实施现状

建筑工程技术交底与安全交底在实施过程中存在明显差异，这是当前行业协同管理现状的一个缩影。例如，在一些大型建筑项目中，技术交底往往侧重于施工工艺和技术要求的传达，详细介绍工程的技术参数和施工流程，而安全交底可能相对简略，未能充分结合具体施工环节的风险点进行深入剖析^[3]。这种差异反映出在资源配置方面存在矛盾。一方面，企业可能将更多资源投入到技术研发和技术交底的细化上，以确保工程质量；另一方面，对安全交底所需的人力、物力和时间资源投入不足，导致安全交底难以达到预期效果，无法有效协同技术管理与安全管理，影响整个建筑工程的协同管理水平。

（二）协同发展主要障碍因素

组织架构方面，建筑工程企业多存在层级复杂、部门分割的问题，导致信息传递不畅，技术管理与安全管理部门之间协作困难^[4]。制度规范上，缺乏统一且完善的协同管理制度，对于技术与安全管理的交叉部分责任界定不明，使得协同工作难以有效开展。人员素质层面，技术管理人员与安全管理人员专业知识结构单一，缺乏对彼此领域的了解和协同工作意识，无法充分实现技术管理与安全管理的协同效应。这些因素相互影响，共同制约了建筑工程技术管理与安全管理的协同发展。

三、技术管理与安全管理的协同机制构建

（一）技术管理对安全管理的支撑作用

1. 施工工艺标准化与安全风险控制

BIM技术在建筑工程中的应用，可有效提升危险源识别能力。通过建立三维模型，能够直观地呈现工程结构和施工过程，更精准地识别潜在危险源^[5]。同时，工艺创新对事故预防具有重要贡献。创新的施工工艺往往伴随着更合理的流程和更高的质量标准，能够减少因工艺不合理导致的安全风险。施工工艺标准化是实现安全风险控制的关键。标准化的工艺确保了施工操作的一致性和规范性，降低了人为因素导致的安全事故概率，从而实现技术管理对安全管理的有力支撑。

2. 设备技术创新与安全性能提升

设备技术创新是提升安全性能的关键。在建筑工程中，技术创新体现在多个方面。以起重机械为例，智能监测装备的应用为安全管理带来了新的契机^[6]。通过技术创新，这些监测装备能够实时获取起重机械的运行数据，如荷载、高度、速度等，从而对其工作状态进行精准评估。这有助于及时发现潜在的安全隐患，如超载、超速等异常情况，进而采取相应的措施加以预防和纠正。设备技术的创新不仅提高了安全管理的效率，更重要的是增强了安全性能，保障了建筑工程的顺利进行。

（二）安全管理对技术管理的促进作用

1. 安全风险评估引导技术创新

安全风险评估可引导技术创新。通过建立基于LEC法的风

险评价模型等手段对安全风险进行评估，能为技术创新提供方向指引^[7]。例如，在建筑工程中，该模型可评估施工方案的风险程度。若某施工环节风险值较高，这就促使技术人员思考如何通过技术创新来降低风险。可能会探索新的施工工艺、材料或设备，以提高施工的安全性和可靠性。同时，安全风险评估所反馈的信息，能让技术人员了解现有技术的安全方面的不足，从而有针对性地进行技术改进和创新，推动技术管理不断优化，实现技术与安全管理的协同发展。

2. 事故预警系统与工艺改进联动

事故预警系统能够及时发现潜在的安全隐患，为工艺改进提供关键信息。安全监测数据作为事故预警系统的重要依据，其与工艺参数调整之间应构建有效的反馈响应机制。当监测数据显示异常时，意味着当前工艺可能存在问题，需要及时对工艺参数进行调整。例如，在建筑工程中，若监测到某结构部位的应力数据超出安全范围，可能提示施工工艺中的荷载施加方式或材料选用存在不足，此时应依据相关技术标准和工程经验，对施工工艺进行改进，调整荷载施加顺序或更换更合适的材料等，从而提高工程的安全性和质量，促进技术管理与安全管理的协同发展^[8]。

四、协同发展路径优化策略

（一）管理体系协同重构

1. 双体系融合的组织架构设计

在建筑工程领域，为实现技术管理与工程安全管理的协同发展，可构建双体系融合的组织架构。基于矩阵式项目管理模式，实施技术安全双总监制度。设立技术总监和安全总监两个关键岗位，明确各自职责与权力。技术总监负责工程技术方案制定、技术难题解决以及对施工技术流程的把控^[9]。安全总监则聚焦于工程安全制度执行、安全风险评估与防控以及安全培训教育工作。两者在组织架构中相互协作，共同对项目经理负责。通过定期的沟通会议、联合检查等机制，确保技术与安全管理工作紧密结合，避免出现管理脱节现象，提升建筑工程整体管理水平。

2. 一体化管理制度建设

制定包含技术标准与安全规范的复合型管理规程是一体化管理制度建设的关键。在建筑工程中，技术管理和安全管理相互依存，技术标准的执行影响安全状况，安全规范也制约着技术应用。因此，应整合二者形成统一的管理规程。这一规程需明确在各个工程环节中技术与安全的具体要求，确保技术操作符合安全标准，安全措施保障技术实施。同时，要建立相应的监督和反馈机制，对规程的执行情况进行实时监控，及时发现并纠正不符合要求的行为，以保障建筑工程的顺利进行和质量安全^[10]。

（二）风险防控动态协同

1. 全过程风险识别技术

开发基于物联网的实时风险预警系统与BIM模型的数据对接方法是实现全过程风险识别技术的关键。利用物联网技术可实时获取建筑工程现场各类数据，如设备运行参数、环境指标等。将这些数据与BIM模型进行对接，可在三维模型中直观呈现风险信

息。通过传感器网络对施工现场进行全方位监测，一旦出现异常数据，能迅速传输至系统进行分析处理。借助 BIM 模型的可视化特性，精准定位风险发生位置，为工程管理人员提供及时准确的风险预警，以便采取有效的防控措施，保障工程安全和质量。

2. 分级防控响应机制

建立风险等级与施工技术方案调整的对应关系矩阵是分级防控响应机制的关键。通过对建筑工程可能面临的各种风险进行全面评估和分级，确定不同风险等级下应采取的施工技术方案调整措施。对于高风险等级，可能需要暂停施工，对技术方案进行重新设计和论证，确保风险得到有效控制。在中风险等级时，对关键技术环节进行优化和加强监控，及时调整技术参数。低风险等级则可在现有技术方案基础上，增加一些常规的预防措施。同时，要根据工程进展和风险变化动态更新关系矩阵，保证风险防控的及时性和有效性，实现技术管理与安全管理在风险防控上的协同。

（三）信息化协同平台构建

1. 智慧工地数据中台建设

智慧工地数据中台建设是信息化协同平台构建的关键部分。其核心在于整合建筑工程中的各类数据，包括技术管理和安全管理相关数据。通过建立数据中台，实现多源数据的集中存储和管理，为后续的分析 and 应用提供基础。该中台应具备强大的数据处理能力，能够对不同格式、不同来源的数据进行清洗、转换和整合。同时，利用先进的数据分析技术，挖掘数据中的潜在价值，

如通过分析技术参数与安全指标之间的关联，为协同管理提供决策支持。此外，数据中台还应具备良好的开放性和扩展性，以适应不断变化的工程需求和技术发展。

2. 数字孪生技术应用

数字孪生技术可助力建筑工程技术管理与工程安全管理的协同发展。通过构建建筑工程的数字孪生模型，精确模拟建筑结构、施工过程及环境因素等。在此基础上，整合技术管理与安全管理的数据信息，实现对工程全方位、动态的监测与分析。例如，利用数字孪生模型进行施工工艺的虚拟验证，及时发现技术问题并调整，同时结合安全管理要求，模拟可能出现的安全风险场景，制定相应的预防措施。这不仅提高了技术方案的可行性和安全性，还能为施工人员提供直观的安全培训，增强其安全意识和应对能力，促进两者协同发展。

五、总结

建筑工程技术管理与安全管理协同发展具有内在规律，涉及多方面要素的相互作用与配合。数字孪生技术为智能协同管理提供了新方向，通过构建虚拟模型实现对工程的实时监测与优化。然而，当前研究在实践验证方面存在不足，限制了相关理论的应用与完善。展望未来，人工智能技术具有巨大潜力，可在工程协同管理中实现智能决策、风险预测等创新应用，进一步提升管理效率与质量，推动建筑工程行业向更安全、高效的方向发展。

参考文献

- [1] 杨涛. 建筑工程高空作业安全预警与管理研究 [D]. 东南大学, 2016.
- [2] 江华. 建筑工程安全管理问题及对策的研究 [D]. 湖北工业大学, 2016.
- [3] 侯欣宜. 建筑工程项目安全风险评价与管理研究 [D]. 重庆大学, 2017.
- [4] 王江涛. BIM 技术在建筑工程安全管理中的研究与应用 [D]. 河北工程大学, 2019.
- [5] 左林涛. 建筑工程施工安全管理研究 [D]. 武汉理工大学, 2014.
- [6] 苗志国. 浅析建筑工程现场施工安全与技术管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017,(18)::3031-3031.
- [7] 魏燮阳. 建筑工程现场施工安全及技术管理 [J]. 低碳地产, 2016, 2(12).
- [8] 杨金波. 浅谈建筑工程现场施工中安全和施工技术管理 [J]. 江西建材, 2015(18):2.
- [9] 左继增. 安全与施工技术管理在建筑工程现场施工中的分析 [J]. 风景名胜, 2021, 000(002):240.
- [10] 王淑彬. 浅谈建筑工程施工现场安全生产管理 [J]. 黑龙江科技信息, 2010(23):288-288.

建筑工程检测技术数字化转型： 智能监测体系在工程管理中的创新应用

赵子涵

身份证号：430104199408122557

DOI:10.61369/ME.2025010018

摘要： 阐述建筑工程检测技术现状，指出现有局限，强调数字化转型需求。介绍智能监测体系相关技术，包括物联网感知层、数字孪生建模等，及工程构建路径中的系统框架与预警机制设计，还提及多种应用及面临问题，展望与新技术融合前景。

关键词： 建筑工程检测；智能监测体系；数字化转型

Digital Transformation of Construction Engineering Inspection Technology: Innovative Application of Intelligent Monitoring System in Engineering Management

Zhao Zihan

ID:430104199408122557

Abstract： This article elaborates on the current status of construction engineering inspection technology, points out existing limitations, and emphasizes the need for digital transformation. Introduce the relevant technologies of intelligent monitoring system, including IoT perception layer, digital twin modeling, etc., as well as the system framework and warning mechanism design in the engineering construction path. It also mentions various applications and problems faced, and looks forward to the prospects of integration with new technologies.

Keywords： construction engineering testing; intelligent monitoring system; digital transformation

引言

随着建筑行业的发展，对工程检测技术的要求日益提高。2022年发布的相关工程质量安全政策强调了提升工程质量安全标准的重要性，这促使建筑工程检测技术需从传统向数字化转型。传统检测技术存在局限性，如效率低、数据离散、实时性差等，难以满足复杂工程需求。而智能监测体系的发展为解决这些问题提供了可能，其涵盖物联网感知层、数字孪生建模等关键技术，涉及系统框架设计、多维度监测指标体系等重要方面，对建筑工程检测技术的数字化转型具有重要意义。

一、建筑工程检测技术数字化转型的驱动因素

（一）传统检测技术的局限性

传统建筑工程检测技术存在诸多局限性。人工检测方式效率低下，在大规模建筑工程中，需耗费大量人力和时间，且易受检测人员主观因素影响，检测结果准确性难以保证^[1]。传统检测获取的数据往往呈离散化状态，难以形成系统、全面的评估。不同检测时段和人员获取的数据缺乏有效整合，无法为工程整体状况提供连贯、准确的描述。同时，传统检测实时性差，无法对建筑工程在施工过程中的动态变化进行及时监测。例如在一些大型桥梁建设工程中，传统检测技术难以及时发现结构在施工期间出现的微小裂缝等隐患，无法为工程安全施工提供及时有效的数据

支持。

（二）智能监测的行业需求

随着工程质量安全标准不断提升，对建筑工程检测技术的精准性和实时性提出更高要求。传统检测方法难以满足复杂工程结构和大规模建设项目的要求，数字化转型迫在眉睫。绿色建造理念的深入，强调资源节约和环境友好，需要通过智能监测技术实现对建筑材料、能源消耗等方面的精准把控，以减少浪费和污染^[2]。智慧工地作为建筑行业的发展趋势，集成多种先进技术，智能监测是其核心组成部分。它能够实时收集工程数据，为施工决策提供科学依据，提高工程管理效率和质量，从而推动建筑工程检测技术向数字化转型。

二、智能监测体系的核心技术架构

（一）物联网感知层技术

物联网感知层是智能监测体系的基础，主要涉及传感器网络部署、多源异构数据采集等技术。传感器网络需根据建筑工程的结构特点和监测需求合理布局，确保对关键部位和参数的全面感知^[9]。多源异构数据采集技术能够融合多种类型的传感器数据，如应变、位移、温度等，这些数据具有不同的格式和来源。通过有效的采集方法，可保证数据的准确性和完整性，为后续的分析处理提供可靠依据。边缘计算技术在感知层也起到重要作用，它能够在靠近数据源的边缘设备上进行数据处理，减少数据传输延迟和网络带宽压力，提高系统的实时性和响应速度。

（二）数字孪生建模技术

数字孪生建模技术是智能监测体系的关键。通过 BIM 模型融合实现对建筑工程的精确数字化表征。利用传感器获取工程实体的实时数据，将其映射到虚拟的 BIM 模型中，使虚拟模型与物理实体高度一致，形成数字孪生体。这一过程需要考虑数据的准确性和实时性，确保虚拟模型能真实反映工程实际状态。同时，结构健康诊断算法应用于数字孪生模型，对工程结构的健康状况进行实时评估和预测，为工程管理提供决策依据。此外，动态可视化技术使数字孪生模型以直观的方式呈现，便于工程人员理解和分析工程状况，从而更好地进行工程管理^[10]。

三、智能监测体系的工程构建路径

（一）系统框架设计

1. 多维度监测指标体系

智能监测体系在工程构建路径中的系统框架设计及多维度监测指标体系至关重要。建立涵盖结构应力、材料性能、环境参数等要素的复合型监测指标体系是关键环节。结构应力监测可及时发现建筑结构潜在风险，保障工程安全^[6]。材料性能监测能确保使用材料符合工程要求，避免因材料问题导致工程质量事故。环境参数监测则考虑到温度、湿度等对工程的影响，为工程施工和维护提供合理的环境参考依据。通过整合这些多维度的监测指标，形成一个全面、系统的智能监测体系，为建筑工程检测技术的数字化转型提供有力支撑，实现工程管理的创新应用。

2. 分级预警机制设计

智能监测体系的工程构建路径涉及系统框架设计与分级预警机制设计。在系统框架设计方面，需综合考虑数据采集、传输、存储与分析等模块的集成，确保系统的稳定性与高效性。对于分级预警机制设计，构建基于大数据分析的阈值动态调整模型至关重要。通过对大量工程数据的分析，动态设定合理阈值，以适应不同工程环境与阶段^[6]。同时，制定分级响应预案，依据预警等级明确相应的应对措施，包括工程人员的调度、设备的调整以及应急处理流程等，从而实现对工程潜在风险的及时、精准防控，提高工程管理的智能化水平。

（二）数据处理方法创新

1. 时序数据融合算法

小波变换是一种有效的信号处理方法，在处理非平稳信号方面具有优势。将其与深度学习相结合用于异常数据识别，可提高监测的准确性和效率。首先利用小波变换对时序数据进行分解，提取不同频率的特征分量。这些特征分量包含了数据的局部和全局信息。然后将这些特征作为深度学习模型的输入，深度学习模型可以自动学习这些特征与异常数据之间的复杂关系。通过在大量的数据集上进行训练和优化，模型能够准确地识别出异常数据。这种结合方法能够充分利用小波变换的特征提取能力和深度学习的强大学习能力，为智能监测体系中的数据处理提供了一种创新的方法，有效提升了工程管理中的监测水平^[7]。

2. 分布式存储架构

设计适应工程现场环境的边缘 - 云端协同存储方案是构建智能监测体系分布式存储架构的关键。通过边缘计算设备在工程现场进行数据的初步处理和存储，能够有效减少数据传输量和延迟，同时保证数据的实时性和可靠性^[8]。这些边缘设备可以根据现场环境和需求灵活配置，对采集到的数据进行筛选、压缩和特征提取等操作。然后，将经过处理的数据上传至云端进行进一步的存储和分析。云端存储具有大容量、高安全性和可扩展性等优点，能够满足工程长期监测数据的存储需求。边缘 - 云端协同存储方案实现了现场数据的高效利用和远程管理，为智能监测体系提供了坚实的数据基础。

四、智能监测的创新应用场景

（一）结构安全实时监测

1. 深基坑变形预警

在深基坑变形预警方面，利用位移传感器网络可实现毫米级变形监测与风险预判⁹。传感器网络能够实时获取深基坑关键部位的位移数据，精确到毫米级别。这些数据通过智能算法进行分析处理，能够及时发现微小的变形趋势。一旦变形值超过预设阈值，系统会立即发出预警信号。这种实时监测和预警机制，为施工人员提供了充足的时间采取相应措施，避免深基坑变形过大引发安全事故，有效保障了深基坑施工过程中的结构安全以及周边环境的稳定。

2. 大跨度钢结构健康诊断

应变模态分析技术是大跨度钢结构健康诊断中的重要手段。通过在钢结构关键部位布置传感器，获取结构在荷载作用下的应变响应数据。这些数据经过处理后，可得到结构的应变模态参数。基于应变模态分析理论，可以识别结构的损伤位置和程度。例如，当钢结构出现疲劳损伤时，其应变模态参数会发生变化。通过对比损伤前后的应变模态参数，可以确定损伤的具体位置。同时，结合损伤力学理论，可以进一步评估损伤的程度。该技术为大跨度钢结构的健康诊断提供了一种有效的方法，有助于及时发现结构的安全隐患，保障结构的安全使用^[10]。

（二）建筑材料智能检测

1. 混凝土强度云监测

混凝土强度云监测是建筑材料智能检测的重要部分。通过传感器等设备对混凝土强度相关数据进行实时采集，如应力、应变等信息。利用云计算技术，将采集到的数据传输到云端进行分析处理。基于声发射技术开发强度发展曲线预测系统，能够根据混凝土内部结构变化产生的声发射信号，分析其强度发展趋势。借助大数据分析，对海量监测数据进行挖掘，从而更准确地评估混凝土强度。这种云监测方式不仅能实现实时监测，还可远程获取数据，为工程管理人员提供及时、准确的决策依据，确保建筑工程质量和安全。

2. 钢筋锈蚀无损评估

在钢筋锈蚀无损评估中，构建电磁感应检测数据与腐蚀程度的映射模型是关键。通过电磁感应原理获取钢筋的相关数据，这些数据包含了钢筋的电磁特性等信息。利用先进的数据分析技术和算法，对获取的数据进行处理和分析。将处理后的数据与已知的钢筋腐蚀程度进行关联和比对，从而建立起两者之间的映射关系。这种映射模型能够准确地反映电磁感应检测数据与钢筋实际腐蚀程度的对应规律。基于此模型，工程人员可以通过检测到的电磁感应数据快速、准确地评估钢筋的锈蚀情况，为建筑工程的质量和安

（三）施工过程质量管控

1. 装配式构件安装精度控制

装配式构件安装精度控制至关重要。利用机器视觉技术可实现毫米级安装误差实时反馈。该技术通过在施工现场设置高精度摄像头，对装配式构件的安装过程进行实时监测。摄像头获取的图像数据传输至智能分析系统，系统利用图像识别算法精确提取构件的关键特征点，与设计模型中的理想位置进行对比，从而快

速、准确地计算出安装误差。一旦误差超出允许范围，系统立即发出警报，提示施工人员进行调整。这不仅提高了安装精度，保证了装配式建筑的质量，还减少了因安装误差导致的返工和资源浪费，有效提升了施工效率和经济效益。

2. 防水工程渗漏监测

在防水工程渗漏监测方面，智能监测体系具有重要创新应用。通过在防水工程关键部位铺设分布式光纤传感器，可实时感知渗漏相关的微小物理变化。当防水层出现渗漏时，水分的侵入会导致光纤周围环境的折射率等物理参数改变，传感器能敏锐捕捉并将信号传输至监测系统。监测系统利用先进算法对数据进行分析处理，准确判断渗漏位置和程度。这不仅能及时发现渗漏隐患，避免渗漏问题进一步恶化对建筑结构造成损害，还能为维修提供精准定位，减少维修成本和时间，有效保障防水工程质量，提升建筑整体防水性能。

五、总结

智能监测体系在建筑工程管理中具有重要应用价值。在提升检测精度上，通过先进技术实现对工程各项指标更精准监测。在优化管理流程方面，实现了实时数据传输与分析，提高了管理效率。同时能有效预防工程风险，提前发现潜在问题。然而，目前也面临一些技术瓶颈，如传感器耐久性不足，影响长期监测效果；算法泛化能力有限，难以适应复杂多样的工程环境。展望未来，智能监测体系应与5G、区块链等技术深度融合。5G可提供更高速稳定的数据传输，区块链能确保数据的安全性与不可篡改性，从而进一步提升智能监测体系在建筑工程管理中的效能，推动建筑工程检测技术的数字化转型。

参考文献

- [1] 杜丹丹. 唐山市建筑工程检测实验室质量管理体系研究 [D]. 华北理工大学, 2019.
- [2] 蓝天锐. 基于本体的建筑工程检测实验室管理系统构建 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [3] 王海燕. 数字化转型、技术创新与企业价值 [D]. 河北大学, 2022.
- [4] 刘荟. 数字化转型与企业技术创新研究 [D]. 重庆工商大学, 2023.
- [5] 和姿祎. 数字化转型对制造企业绿色技术创新的影响研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [6] 冉献伟. 建筑工程检测中无损检测技术的应用 [J]. 建筑·建材·装饰, 2019(5): 85.
- [7] 蒙娇. 建筑工程检测中无损检测技术的应用 [J]. 区域治理, 2018(36): 186.
- [8] 李海军, 王金锋. 建筑工程检测中无损检测技术的应用探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(5).
- [9] 曹建胜. 浅析无损检测技术在建筑工程检测中的应用 [J]. 居业, 2019(10): 84, 86.
- [10] 唐鸣. 无损检测技术在建筑工程检测中的应用 [J]. 建材发展导向 (上), 2021, 19(7): 310-311.

青岛疏港高架拓宽工程方案研究

李建勃

中国市政工程东北设计研究总院有限公司, 吉林 长春 130021

DOI:10.61369/ME.2025010025

摘 要： 青岛前湾保税港区疏港高架是港口物流的核心通道，随着货运量增长，既有车道规模已无法满足需求。为了改善港区对外联系的交通条件，完善区域路网结构，提升通道服务水平，考虑对疏港高架扩宽工程总体方案进行研究。通过对项目的建设条件、功能定位、技术标准、关键问题分析等方面进行论述，提出疏港高架扩宽工程的改造思路，并对关键节点方案进行比选，形成疏港高架拓宽工程方案，为类似工程的改造设计提供借鉴与思路。

关 键 词： 疏港高架；高架拓宽；总体方案；节点方案

Research on the Widening Scheme for the Qingdao Port-access Viaduct

LI Jianbo

Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute Co.,Ltd. Changchun, Jilin 130021

Abstract： The Qingdao Qianwan Bonded Port Area Port-access Viaduct serves as a critical artery for port logistics. With the continuous growth in freight volume, the existing capacity can no longer meet operational demands. To improve the traffic conditions connecting the port area to external networks, optimize the regional road network structure, and enhance the corridor's service level, a comprehensive study on the widening project for the Port-access Viaduct was undertaken. This study addresses key aspects including the project's construction conditions, functional positioning, technical standards, and analysis of critical challenges. Based on this analysis, the renovation concept for the viaduct widening project is proposed. Comparative evaluations were conducted on solutions for key junctions, culminating in the formulation of the overall widening scheme. The findings and approach provide valuable references and insights for the design of similar infrastructure renovation projects.

Keywords： port-access viaduct; viaduct widening; overall scheme; junction solutions

引言

青岛前湾保税港区于2008年经国务院批复设立，由青岛保税区、青岛保税物流园区整合临近港口转型升级而成，设立于胶州湾西岸。是全国唯一一家按照“功能整合、政策叠加”的要求，以保税区、保税物流园区以及临近港口整合转型升级形成的保税港区，拥有国际物流、国际贸易、交易市场、保税加工、码头作业、航运服务、研发及企业总部、检测售后服务维修等功能。2018年港区实现港口货物吞吐量16134万吨。

随着青岛市西海岸新区港口经济与物流产业的快速发展，既有疏港高架（双向四车道）已难以满足日益增长的货运需求。为支撑前湾港区集装箱运输效率，优化区域交通结构，疏港高架拓宽工程被列为青岛市重点基础设施项目。本文基于工程实践，从项目背景、技术方案、创新应用等方面展开分析，旨在总结城市快速路改造经验，为类似工程提供借鉴。

一、项目概述

疏港高架连接胶州湾高速、二号疏港高速，形成前湾港区对外疏解的唯一通道。现状通河路往北段疏港高架为双向四车道规模，通河路往南为双向八车道规模。疏港高架拓宽工程改造主要包含以下五方面内容。

1. 西接二号疏港高速匝道。西起二号疏港高速，东至疏港

高架现状匝道分合流点。北线全长1.54公里，南线全长1.88公里。因工程分期实施，本次设计范围西起江山路西，沿淮河路高架两侧布置，南接现状疏港高架，北线全长0.78km，南线全长0.69km。

2. 疏港高架拓宽改造。拓宽段北起西延匝道分合流点，南至通河路立交（现状拓宽挑水台）；西半幅桩号范围为K1+412.08~K2+232.1，长约0.82km；东半幅桩号范围为K1+232.06~

K2+172.07，长约0.94km；拓宽为双向八车道规模。

3.通河路立交北向新建匝道。包括通河路北向疏港高架两条匝道，其中 EN 匝道全长约0.49km；NE 匝道全长约0.6km。^[1]。

4.新建黄河路南上下匝道。下匝道长约0.17kmm，主线拼宽段长约0.15kmm；上匝道长约0.18kmm，主线拼宽段长约0.21km。桥下地面改造段约0.54km。

5.黄岛立交改造。新增 NE、WE 匝道，同时改造现状 WS 匝道。NE 匝道长约0.3km；WE 匝道长约0.54km，NE 和 WE 匝道间拼宽段长约0.25km。现状 WS 匝道废除后新建，长约0.35km。

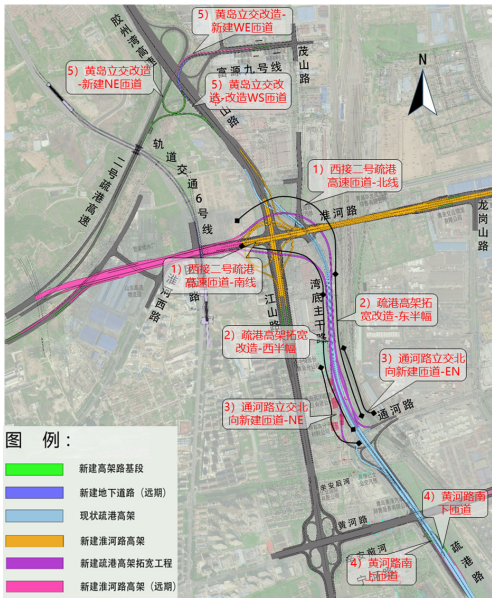


图1 疏港高架拓宽工程改造内容示意图

二、功能定位及服务对象

（一）功能定位

疏港高架是西海岸快速路网中的重要快速货运通道，为城市快速路，是进出港区快速通道；承担分离过境交通，服务中长距离到发交通功能。

疏港高架与通河路立交打通工程解决了疏港高架与中部物流园区的联系，提高了疏港高架的利用率，是港区、箱站、外部箱源地三者联系的重要通道，是疏港交通系统重要组成部分。

黄岛立交 NE 匝道及 WE 匝道，与现状黄岛立交 EN 右转辅路和 EW 苜蓿叶匝道，共同实现胶州湾高速和二号疏港高速与茂山路（规划北部疏港专用路）的交通转换，服务沿线区域的快速疏散。

（二）服务对象

疏港高架路作为货运快速通道，服务中长距离到发交通，以港区货运交通为主，兼顾部分客运交通。

三、主要技术标准

- 1.道路等级：城市快速路。
- 2.设计速度：主路80km/h；接二号疏港高速匝道60km/h；

通河路立交 A、C 匝道40km/h；天宝山路40km/h；平行匝道40km/h；

3.设计年限

交通预测年限：20年；

路面结构设计年限：15年

4.净空高度

主线、辅路及匝道：≥ 5.0m；

非机动车道和人行道：≥ 2.5m；

5.荷载等级

路面结构计算荷载：BZZ-100型标准车。

桥梁设计荷载：汽车荷载，城-A级；人群荷载按现行《城市桥梁设计规范》（CJJ 11-2011）（2019年版）取值^[2]。

四、工程总体方案

（一）设计思路及关键点分析

从工程的建设必要性和迫切性出发，以需求为导向，深入分析项目建设条件、功能定位、关键节点方案，确定合理的工程总体方案。疏港高架作为青岛前湾港区对外疏散的重要快速通道，旨在满足港区物流运输需求，更好的实现疏港交通集散功能，加强港区对外交通出行需求以及满足沿线到发交通转换的需要。因此本工程的关键在于解决以下三方面问题：

一是要解决现状交通拥堵，实现高架规模与交通需求间的匹配问题。问题关键在于科学论证港区交通需求，合理确定疏港高架的扩容规模。

二是要实现疏港交通快速集散功能，解决疏港高架与对外高速系统的快速转换。问题关键在于疏港高架北端线位走向及与二号疏港高速、胶州湾高速、通河路等立交节点转换方案。

三是要满足疏港高架沿线到发交通转换的需要。问题关键在于结合沿线现状及规划路网，优化疏港高架出入口匝道布置及立交节点方案。



图2 疏港高架及周边路网现状示意图

（二）疏港高架规模论证及拼宽方案

1. 疏港高架交通量预测及规模论证

疏港高架路特征年近期2027年、远期2045年，各路段高峰小时交通量预测结果如下表，考虑高峰时间流量不均衡性，建议按单向最大流量设置车道数，数据取两个方向最大值：

路段	高峰小时流量（pcu/h）			
	2027	货运占比	2045	货运占比
淮河路—通河路	2300	80%	4200	90%
通河路—黄河路	2000	80%	3100	90%
黄河路—前湾港	2700	80%	3800	90%

采用双8车道，近期2027年单向路段饱和度0.53，服务水平为二级；远期2045年单向路段饱和度0.82，服务水平为三级，可以满足交通需求。

综合考虑工程经济性、红线宽度及交通适应性等因素，推荐疏港高架主线采用双向8车道规模。

2. 疏港高架拼宽方案

疏港高架主线拓宽段北起西延匝道分合流点，南至通河路立交（现状拓宽挑水台）；主线拓宽为双向八车道规模；疏港高架拼宽及南北线匝道断面布置方案如下。

疏港高架拼宽段单幅桥断面总宽为17.55m，具体布置为：0.55m（防撞墩）+16.5m（机动车道）+0.5m（防撞墩，现状）=17.55m。

与二号疏港高速衔接匝道断面总宽为11.35m，具体布置为：0.55m（防撞墩）+10.25m（机动车道）+0.55m（防撞墩，现状）=11.35m。

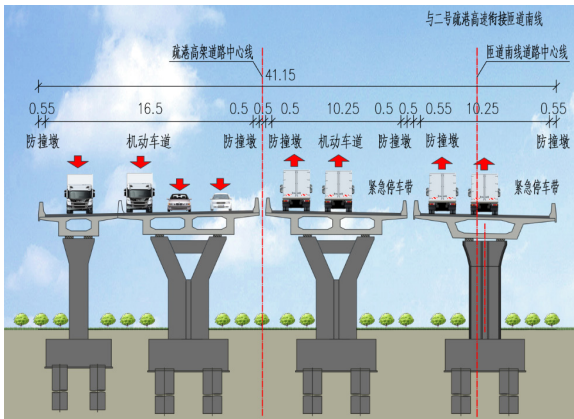


图3 高架拓宽断面图

（三）快速路线位及疏港高速立交节点方案

疏港高架实现疏港交通快速集散功能，关键在于疏港高架北端线位走向及与二号疏港高速、胶州湾高速节点转换方案。

本次疏港高架拓宽是基于现状双四车道拓宽为双向八车道，线位基本与现状保持一致，重点在于北端线位走向及疏港高架与疏港高速立交节点转换方案。根据《西海岸新区综合交通规划》，疏港高架往北设一对匝道接江山路，一对匝道进入茂山路，往西接二号疏港高速。《青岛第二条海底隧道西岸端道路交通衔接规划》，疏港高架往西直接接二号疏港高速。北端线位主要通过两个方案进行比选^{[3][4]}。

方案一：疏港高架匝道往西接疏港高速二号线+黄岛东立交新增 NE/WE 匝道+改造 WS。

疏港高架匝道自疏港高速二号线分南北幅沿淮河路高架两侧布置，过江山路后往南与现状高架拼宽段衔接。黄岛立交处新建改造4条匝道，结合现状既有匝道衔接疏港高速二号线、胶州湾高速及富源九号线。

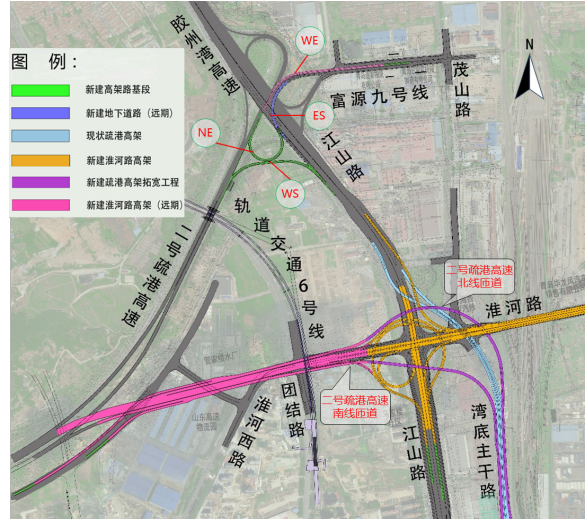


图4 疏港高架与二号疏港高速联系匝道方案一

优点：保留并充分利用现状黄岛立交及疏港高架匝道桥；提升疏港高架与疏港高速二号线的交通转换效率，避免绕行。本方案疏港高架沿淮河路往西布设，征地拆迁较少，工程造价较低；黄岛立交处最大限度利用现状匝道，功能较好，造价较低。

方案二：疏港高架匝道北接茂山路方案

疏港高架设置 SN 和 NS 匝道至茂山路，在茂山路上合并为双向四车道高架，沿茂山路、富源九号线衔接至疏港高速二号线。设置上下匝道衔接至茂山路北段，新增富源九号线上下匝道。



图5 疏港高架与二号疏港高速联系匝道方案二

方案优点：能够实现疏港高速二号线与北部疏港专用路联系。同时减少黄岛立交匝道设置，节省工程造价^[8]。

方案缺点：茂山路征地拆迁较多；沿茂山路、富源九号线衔

接至疏港高速二号线功能上与现状疏港高架接至江山路匝道存在重复，均可实现胶州湾高速向南与疏港高架联系及二号疏港高速与疏港高架联系；富源九号线沿线涉及石油管线迁改^[5]。

表1 疏港高速立交节点方案对比表

	方案一	方案二
交通功能	好，匝道分别接二号疏港高速和胶州湾高速，功能清晰，绕行少；黄岛立交四个方向实现互联互通	一般，更好衔接北部疏港专用路，但与现状疏港高架匝道功能存在重复
周边影响	与淮河路并线设置，影响较小	江山路-茂山路-淮河路高架围合，景观差；
输油管线影响	较小	对富源九号线北侧现状输油管线影响最大，需进行迁改
征地面积	新增用地约83.99亩	新增用地约201.47亩
拆迁	总拆迁：904.4m ²	总拆迁：41327.22m ²
投资	4.14亿（建安费3.1亿）	9.46亿（建安费8.2亿）
推荐方案	☆☆☆	

（四）出入口匝道布置方案

为实现港高架与高快速路联系的中长距离交通及沿线到发交通转换，结合相关路网规划，优化疏港高架出入口匝道布置及立交节点方案。

疏港高架（胶州湾互通-同江路）共设置黄岛立交、通河路立交、长白山路立交等3处互通立交，以及9对出入口（匝道）。

（1）黄岛立交服务淮河路以北区域（茂山路附近）客货车辆与二号疏港高速和胶州湾高速、北向疏港专用路联系^[7]。

（2）通河路立交，服务淮河路以南区域客货车辆通过通河路与疏港高架快速联系。

（3）长白山路立交，服务长开区南部与开发区北部老黄岛交通联系。



图6 疏港高架出入口布置图

本次新建黄河路匝道及接二号疏港高速匝道两对，改造通河路立交及黄岛立交两座。出入口匝道（含立交）设置方案见下表

表2 疏港高架出入口匝道布置一览表

编号	出入口名称	距上游出入口间距（西侧）	出入口名称	距上游出入口间距（东侧）	敷设形式	服务道路 / 区域
1	江山路上匝道		江山路下匝道		地面	胶州湾高速及茂山路
2	疏港高速匝道南线入口匝道	993	疏港高速匝道北线出口匝道	645	高架	二号疏港高速
3	通河路立交	442	通河路立交	510	高架	通河路以东
4	黄河路下匝道	606	黄河路上匝道	519	高架	黄河路
5	前湾港路下匝道	1300	前湾港路上匝道	1100	高架	前湾港路
6	保税区北下匝道	840	保税区北上匝道	1200	高架	青岛前湾综合保税区
7	保税区南上匝道	1400	保税区南下匝道	1500	高架	
8	同江路东下匝道	226	同江路东上匝道	352	高架	同江路
9	同江路西上匝道	440	同江路西下匝道	373	高架	
10	长白山立交	536	长白山立交	246	高架	汉江路、长白山路

（五）黄岛立交方案

1. 节点地理位置

本工程沿线相交高快速路分别为二号疏港高速、江山路、淮河路等，共计3处。江山路和淮河路规划为城市快速路，服务客运交通为主，为避免疏港高架货运交通对两条城市快速路的影响，并未设置互通立交与两条快速路联系。黄岛立交往北为胶州湾高速接线。该节点位于二号疏港高速与胶州湾高速衔接处^[6]。

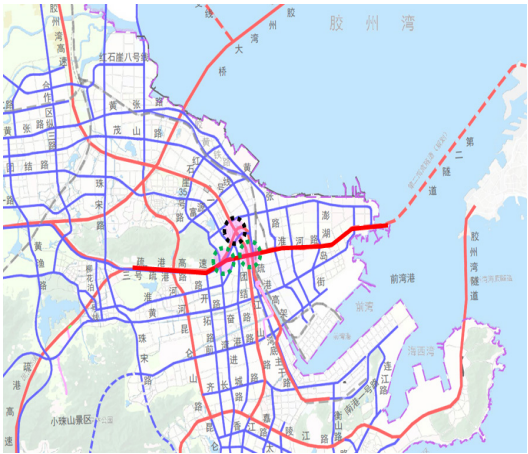


图7 黄岛立交位置图

2. 周边建设情况

现状黄岛立交 SW 和 WN 匝道均为高架形式上跨江山路 / 胶州湾高速，NW 和 WS 匝道均为路堤形式。

江山路与富源九号线以辅路匝道右进右出形式衔接。周边用

地以绿地和厂房为主。受两侧厂房、沿富源九号线北侧人行道下方布设有 $\Phi 720$ 输油管线、现状跨线桥控制。



图8 现状周边用地和企业

3. 立交方案

新建 NE 和 WS、ES 匝道，改造 WS 匝道。

新建 NE 匝道，与 EN 匝道实现胶州湾高速与北部疏港专用路联系。

新建 WE 匝道，与 EW 匝道实现二号疏港高速与北部疏港专用路联系。

新建 ES 匝道，与 SE 匝道实现疏港高架与北部疏港专用路联系。

改建 WS 匝道，由于新建 NE 匝道，WS 匝道南移。

方案特点：既能实现十字形立交交通功能，同时工程造价较低，占地较小，对周边地块影响小^[9]。

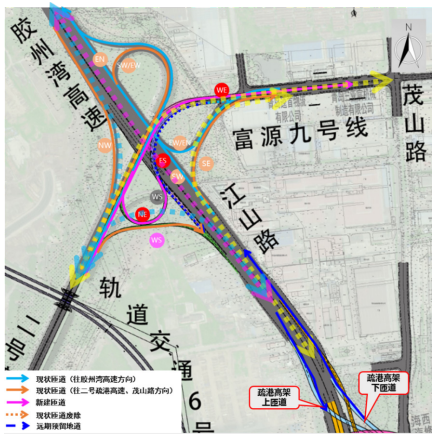


图9 黄岛立交方案图

五、结语

疏港高架运行多年为港区发展发挥了重要作用，随着港区发展既有疏港高架系统已不能满足区域交通疏解需求。本文以疏港高架拓宽工程为例，总结疏港快速路改扩建中需要考虑的因素和关键问题。一是应充分考虑扩容规模，通过交通量预测和现状条件确定扩容规模，确保与港区物流发展需求相匹配；二是注重功能优化，通过对出入口匝道和立交节点改造实现疏港交通快速集散与区域路网高效衔接；三是要评估实施影响，包括征拆、管线迁改及社会效益，优选经济合理的实施方案^[10]。

本文通过实际工程案例，介绍了疏港交通改造的设计方案及需要考虑的因素，以供类似工程参考与借鉴。

参考文献

[1] 疏港高架拓宽工程初步设计 [R]. 上海：上海千年城市规划工程设计股份有限公司，2022.
[2] 城市快速路设计规程：CJJ 129-2009[S], 2009.
[3] 青岛西海岸新区总体规划（2018-2035）[R]. 山东：青岛市人民政府，2019.
[4] 青岛第二条海底隧道西岸端道路交通衔接规划 [R]. 山东：青岛西海岸新区交通运输局，2021.
[5] 于鹏飞. 道路桥梁工程现浇箱梁受力特性有限元分析 [J]. 四川水泥，2024(01).
[6] 卢涛，马朝辉，余明星，刘敏. 基于现有高速拼宽项目的装配式 T 梁受力分析 [J]. 工程建设与设计，2023(23).
[7] 张经纬. 城市高架桥梁拼宽方案比选 [J]. 城市道桥与防洪，2020(06).
[8] 李福鼎. 城市立交异形变宽预制节段箱梁设计关键技术研究 [J]. 城市道桥与防洪，2024，(05)：92-96+15. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.05.023.
[9] 张军. 城市立交桥新测量技术研究 [J]. 科学技术创新，2021，(29)：136-138.
[10] 蔡保硕，赵雪璞，扈利，王坤，杨勇. 斜交跨线连续梁桥换梁施工受力分析 [J]. 特种结构，2023(04).

公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用分析

李文芳, 王留山

黄河交通学院, 河南 焦作 454950

DOI:10.61369/ME.2025010027

摘要：公路工程质量控制是保障工程结构安全性、耐久性和功能性的核心环节，检测技术作为量化评价工程质量的重要手段，贯穿于材料性能验证、施工过程监控及服役状态评估的全生命周期。本文基于现行技术规范，系统分析了落锤式弯沉仪、探地雷达、红外热成像、无核密度仪及激光平整度仪等检测技术的原理与应用要点，探讨其在路基承载性能评价、层间缺陷识别、摊铺温度场监控、压实度实时控制及路面平整度检测中的具体应用，以期工程全寿命周期管理提供科学依据。

关键词：公路工程；检测技术；质量控制；应用分析

Application Analysis of Highway Engineering Inspection Technology in Highway Engineering Quality Control

Li Wenfang, Wang Liushan

HuangheJiaotongUniversity, Jiaozuo, Henan 454950

Abstract： Highway engineering quality control is the core link to ensure the safety, durability and functionality of engineering structures. Testing technology, as an important means of quantitative evaluation of engineering quality, runs through the whole life cycle of material performance verification, construction process monitoring and service status assessment. Based on the current technical specifications, this paper systematically analyzes the principle and application points of drop weight bending meter, ground penetrating radar, infrared thermal imaging, non-core density meter and laser flatness meter and other detection technologies, and discusses their specific applications in subgrade bearing performance evaluation, interlayer defect identification, paving temperature field monitoring, real-time compaction control and pavement flatness detection. In order to provide scientific basis for engineering life cycle management.

Keywords： highway engineering; detection technology; quality control; application analysis

引言

公路工程作为现代交通基础设施的重要组成部分，其质量直接关系到行车安全、运营效率及社会经济效益。随着交通荷载的日益增加与自然环境复杂性的加剧，传统质量控制手段已难以满足高精度、高效率的工程需求。检测技术作为工程质量控制的核心支撑，通过实时监测与数据分析，能够有效识别施工过程中的潜在缺陷，优化工艺参数，确保工程结构性能的长期稳定性。因此，深入探讨检测技术在公路工程质量控制中的应用，对于提升工程建设水平、降低全寿命周期成本具有重要意义。

一、公路工程质量控制需求

公路工程质量控制是保障工程结构安全性、耐久性和功能性的核心环节，其需求源于工程全生命周期中各环节的严格技术标准与规范。根据《公路工程质量检验评定标准（JTG F80/1-2017）》，公路工程需满足结构稳定性、强度、水温稳定性三大核心指标。结构稳定性要求路基在行车荷载及冻融循环、降水

冲刷等自然因素作用下不发生整体失稳或变形，尤其需关注高填方、陡坡路段及软土地基的加固处理，确保压实度达到100%合格率，并通过弯沉值检测验证整体承载能力。强度控制则要求路基与路面材料具备足够的抗压、抗剪能力，例如路基填料需满足加州承载比（CBR）试验要求，二级及以上公路 CBR 值 $\geq 5\%$ ，路面基层材料无侧限抗压强度需符合《公路路面基层施工技术细则（JTG/T F20-2015）》规定，比如水泥稳定碎石基层 7d 抗压强度

课题项目：黄河交通学院 2022 年度校级课程资源库——道路试验检测技术（课题编号 HHJTX-2022kcyk075）。

作者信息：李文芳（1988.01-），女，汉族，河南灵宝人，硕士，讲师，研究方向：道路线形设计、道路交通安全。

≥ 3.5MPa。水温稳定性方面，需通过渗透系数试验和冻融循环试验，以确保材料在极端气候下的性能稳定性^[1]。

施工过程中，质量控制需覆盖原材料、工艺参数及成品检测三大维度。原材料进场前需按《公路工程集料试验规程（JTG E42-2005）》进行筛分，按照压碎值≤ 26%、含泥量≤ 3%等指标检测，杜绝不合格材料使用。半刚性基层混合料需通过击实试验确定最大干密度≥ 2.30g/cm³，最佳含水率控制在± 2%范围内，并依据《公路路基施工技术规范（JTG/T 3610-2019）》进行分层压实，确保压实度≥ 96%。成品验收阶段，需采用激光平整度仪检测路面平整度IRI≤ 2.5m/km，横向力系数车测试抗滑性能SFC≥ 54，以及落锤式弯沉仪验证整体刚度。此外，质量控制体系需融入全过程动态管理，例如通过实时监测摊铺温度，沥青混合料≥ 145℃，碾压遍数≥ 6遍等工艺参数，避免因施工偏差导致层间粘结失效或早期病害^[2]。

二、公路工程检测技术要点

公路工程检测技术是量化评价工程质量的核心手段，其要点涵盖材料性能验证、施工过程监控及服役状态评估三大层级。材料性能检测方面，依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程（JTG E20-2011）》，需对沥青针入度、软化点及延度进行实验室测定。集料则需通过洛杉矶磨耗试验和黏附性试验确保耐久性。针对水泥混凝土，需按《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程（JTG E30-2005）》进行抗压强度试验及坍落度控制，以保障结构物承载能力。施工过程检测技术以实时性与精准性为核心。路基压实度检测采用灌砂法，标准击实法比对，允许偏差± 1.5%，路面厚度通过钻芯取样结合雷达探地技术双控。弯沉检测作为评价路基路面整体刚度的重要指标，需使用贝克曼梁法（静态）或落锤式弯沉仪（动态），依据《公路路基路面现场测试规程（JTG 3450-2019）》要求，单点弯沉值需≤ 设计容许值，且代表值通过数理统计判定合格^[3]。对于沥青路面施工，红外热成像技术可实时监控摊铺均匀性，而无核密度仪（PQI）可实现压实度快速无损检测，与理论密度比值≥ 93%^[4]。

服役状态评估则依托定期检测与病害诊断技术。路面损坏状况指数（PCI）通过自动化检测车采集裂缝率、坑槽面积等数据计算。结构强度则通过弯沉盆反演模量评价，并结合探地雷达（GPR）检测基层隐性脱空。桥梁检测需依据《公路桥梁荷载试验规程（JTG/T J21-01-2015）》，通过静载试验和动载试验验证承载能力，并利用超声回弹法检测混凝土强度推定值。此类技术的综合应用，为公路工程全寿命周期质量管理提供了数据支撑与决策依据^[5]。

三、公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用

（一）落锤式弯沉仪动态模量评价路基承载性能

落锤式弯沉仪（Falling Weight Deflectometer, FWD）动态检测技术通过模拟行车荷载的瞬态冲击效应，量化评价路基及路面结构层的动态响应特性，是公路工程质量控制中验证结构承载能力的关键手段。其核心技术在于利用液压驱动落锤从设定高度（通常0.5-1.2m）自由下落，产生50-700kN的脉冲荷载，持续时间25-40ms，精准复现车辆轴载对路面的动态作用。荷载通过直

径300mm的承载板传递至路基表面，同步触发分布于弯沉盆半径0-1.5m范围内的9个高精度位移传感器，实时采集冲击荷载下的动态弯沉曲线。依据《公路路基路面现场测试规程（JTG 3450-2019）》，检测前需采用全站仪对测点进行精确定位，横向偏差≤ 50mm，并通过激光水准仪校准传感器基准面，平整度误差≤ 0.3mm/m。典型检测方案要求每检测断面沿路基宽度方向布置3个测点，行车道、超车道及路肩，纵向间隔20m连续布设，冲击荷载等级需根据设计轴载选定^[6]。

数据反演分析采用弹性层状体系理论，通过MODULUS、ELMOD等专业软件拟合实测弯沉盆，计算路基动态回弹模量及各结构层模量梯度。当路基模量低于阈值时，需结合地质雷达（GPR）扫描判定软弱层深度，针对性采取补压或换填措施。施工质量控制要点涵盖：冲击荷载垂直度控制，偏角≤ 2°，温度修正，沥青路面检测时表面温度需在20± 5℃范围内，每偏差1℃需对模量值进行0.8%线性修正，及数据有效性筛选，剔除因地表杂物或传感器异常导致的离群值，变异系数CV≤ 15%。此外，针对高填方路基，需在96区顶面检测时同步进行CBR试验，贯入量2.5mm对应压强≥ 5MPa，综合验证填料强度与模量指标的匹配性。

（二）探地雷达层间缺陷无损识别技术

探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）基于电磁波在介质中的传播特性，通过发射高频脉冲电磁波并接收反射信号，实现对道路结构层内部缺陷的精准识别与空间定位。其技术核心在于利用不同介电常数的材料界面反射波时差及振幅变化，解析层间粘结状态、脱空区域及含水异常分布。检测系统由控制主机、天线单元及数据采集软件构成，施工前需依据《公路工程地质雷达检测技术规程（JTG/T F81-01-2020）》完成系统校准，包括天线中心频率验证、时窗参数设定及介电常数标定，采用已知厚度的结构层钻孔样本反算ε值，误差≤ 0.5。在路面结构层施工后的隐蔽工程验收阶段，采用1.5GHz高频天线，分辨率≤ 3cm沿车道纵向以5-10km/h匀速连续扫描，横向覆盖全幅路面（含路肩），确保扫描轨迹重叠率≥ 30%。数据采集时需实时监测信号信噪比，并通过时变增益（TVG）补偿电磁波衰减，确保深层缺陷可辨识^[7]。

缺陷判读依据反射波形特征：层间脱空表现为同相轴局部中断或出现多次反射波，振幅突增，较正常区域提高50%-80%。含水异常区域则因介电常数升高导致反射波走时延长，且波形频率降低。数据处理时需采用背景去除滤波消除地表杂波，并利用希尔伯特变换提取瞬时振幅参数，量化脱空范围。针对水泥稳定碎石基层与沥青面层界面检测，脱空厚度≥ 3mm或连续面积> 0.5m²的区域需标记为缺陷区，采用非水反应高聚物注浆，注浆压力0.5-1.0MPa，进行填充修复。施工质量控制要点包括：检测前需清除路面杂物并用砂纸打磨测区，确保天线与路面耦合良好。多车道检测时需采用多通道天线阵列同步采集，避免漏检。数据解译需结合层位标定，并利用三维成像技术重构缺陷立体形态。此外，对于复合结构层，需采用双频联合探测模式（高频1.5GHz与低频900MHz组合），分别优化浅层界面与深层基层的检测精度。该技术可实现单日10-15km车道的高效检测，缺陷识别准确率≥ 85%，显著降低层间剥离引发的反射裂缝与车辙风险^[8]。

（三）沥青摊铺温度场监控

红外热成像技术依托非制冷型焦平面探测器，通过接收沥青

混合料表面发射的长波红外辐射,实时构建摊铺全断面温度场分布模型,是沥青面层施工过程中控制温度离析的关键技术手段。检测系统由红外热像仪、云台稳定装置及温度分析软件组成,施工前需采用黑体辐射源进行辐射校准,确保测温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。检测时,热像仪安装于摊铺机后方3-5m处支架上,镜头轴线与路面呈 45° 倾角,扫描覆盖宽度 $\geq 4.5\text{m}$,空间分辨率 $\leq 10\text{mm/pixel}$,帧率 $\geq 30\text{Hz}$ 以匹配摊铺速度 $(2-4\text{m/min})^{[9]}$ 。温度数据通过无线传输模块实时反馈至控制终端,软件自动生成温度直方图及等温线分布图,识别低温区 $(< 145^{\circ}\text{C})$ 、高温区 $(> 165^{\circ}\text{C})$ 及温度梯度异常带(相邻像素温差 $\geq 8^{\circ}\text{C}/10\text{cm}$)。

施工过程中,温度场监控需与摊铺机参数联动调控:当检测到横向温度标准差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时,系统触发预警并指导调整螺旋分料器转速,通常控制在 $60-90\text{r/min}$,或夯锤振幅 $4-6\text{mm}$,以改善混合料横向分布均匀性。针对纵向温度波动,通过调整摊铺机行进速度,与运料车衔接节奏,确保温度连续性。对于局部低温区域,需立即采用小型保温料斗补充热料,补料温度 $\geq 170^{\circ}\text{C}$,并在碾压前用红外加热板(功率密度 2kW/m^2)进行二次升温。环境干扰抑制方面,需在热像仪镜头加装窄带滤光片以屏蔽太阳短波辐射干扰,同时采用主动风冷系统防止镜面结雾。数据后处理阶段,需将温度场数据与探地雷达介电常数分布图叠加分析,验证温度离析是否引发压实度差异,要求同断面压实度极差 $\leq 2\%$ 。施工质量控制要点包括:每日开工前需用接触式热电偶对热像仪进行交叉验证;检测过程中需监控环境温湿度,建议空气温度 $> 5^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $< 80\%$;数据存储需同步记录GPS位置信息以便质量追溯。对于改性沥青施工,需特别设定温度补偿系数,较普通沥青混合料检测阈值上浮 5°C ,避免因材料辐射率差异导致测温偏差。

(四) 沥青面层压实度实时控制

无核密度仪(Pavement Quality Indicator, PQI)基于电磁感应原理,通过测量沥青混合料介电特性与密度的线性关系,实现压实度的快速无损检测。其核心技术在于发射频率为 $1\text{MHz}-1\text{GHz}$ 的电磁波,利用混合料中集料、沥青及空隙的介电常数差异,通过接收线圈捕获衰减信号并换算为密度值,检测精度可达 $\pm 0.5\%$ 。该技术贯穿初压、复压及终压全过程,检测时需根据《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004)》要求,在初压后立即进行首轮检测,后续每碾压段 50m 布置3个测点,测点间距横向均匀分布于轮迹带及车道中心线。探头与路面接触压力需稳定在 $10-15\text{N}$,保持静止 3s 以上以确保电磁场充分穿透面层^[10]。

施工中需针对不同混合料类型进行介电参数标定:通过实验

室击实试验建立理论密度与介电值的对应关系,并将标定数据预载入仪器数据库。检测数据通过蓝牙实时传输至压路机驾驶室终端,动态生成压实度云图,当局部区域压实度低于 93% 或相邻测点差异 $> 2\%$ 时,系统自动触发声光报警并标记位置,指导操作手增加 $2-3$ 遍定向碾压。对于桥头搭接、井盖周边等特殊部位,需采用 25kg 激振力 $8-10\text{kN}$ 的小型振动压路机进行补压,同时将检测频率提升至每 20m 5个测点。技术难点在于混合料级配波动会导致介电特性漂移,需每 2000m^2 采用钻芯法进行现场校准,并通过回归分析修正介电模型参数。

(五) 路面纵向均匀性检测

激光平整度仪基于多普勒频移原理,采用波长 635nm 的半导体激光器配合高速CMOS线阵传感器,实现路面纵断面高程的毫米级精度连续测量。检测系统由激光发射模块、惯性基准单元、距离测量轮及数据处理终端构成,依据《公路技术状况评定标准(JTG 5210-2018)》要求,检测车辆需配备液压减震底盘并以 80km/h 匀速行驶,激光束以 30° 入射角投射至路面,光斑直径 $\leq 2\text{mm}$,纵向采样间隔 10cm ,横向覆盖车道全宽。原始高程数据经卡尔曼滤波消除车体振动噪声后,通过四次移动平均法平滑处理,计算国际平整度指数IRI,同时生成断面曲率半径及波长谱分析图,识别施工接缝、碾压波浪等局部不平整特征。

施工过程控制阶段,车载式激光系统集成于摊铺机后方 $2-3\text{m}$ 处,实时采集新铺层表面高程,通过CAN总线将数据反馈至摊铺机控制系统。当检测到 3m 波长范围内高程偏差 $> 3\text{mm}$ 时,自动调节熨平板仰角液压缸或振动频率,补偿混合料流动性与压实度差异导致的平整度偏移。检测前需使用标准三角规对激光传感器进行静态标定,并利用全站仪测量 100m 基准路段进行动态验证。环境适应性方面,需在强日照条件下启用光学滤光片,并在雨雾天气切换至近红外激光模式。数据后处理阶段,需将高程数据与无核密度仪(PQI)的压实度分布图空间配准,分析平整度异常区与压实不足的耦合关系,要求同点位压实度差异 $\leq 2\%$ 。

结束语:综上,公路工程检测技术的应用为工程质量控制提供了科学化、精细化的技术手段,显著提升了施工过程的实时监控能力与缺陷识别精度。通过落锤式弯沉仪、探地雷达、红外热成像等技术的综合应用,工程结构的安全性、耐久性及功能性将得以全面保障。检测技术的持续创新与规范化应用,将进一步推动公路工程质量控制体系的完善,为交通基础设施的高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1]丁振.公路工程检测技术应用于工程质量控制的探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(19):120-122.
- [2]亚庆媛,赵新华.公路工程水泥稳定碎石基层质量控制试验检测技术研究[J].运输经理世界,2024,(36):28-30.
- [3]李培荣,徐宁,温宏平.工程试验检测在公路工程质量标准化管理中的应用[J].江苏建材,2024,(05):155-156.
- [4]付水良.高速公路工程试验检测与质量控制技术研究[J].汽车周刊,2024,(11):255-257.
- [5]肖林丰.工程检测技术在公路工程质量控制中的应用分析[J].交通科技与管理,2024,5(15):86-88.
- [6]秦虎.公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用研究[J].运输经理世界,2024,(22):62-64.
- [7]刘嘉琦.公路工程混凝土结构现场检测技术研究[J].运输经理世界,2024,(34):37-39.
- [8]罗媛.公路工程沥青混凝土路面质量检测技术研究[J].中华建设,2024,(12):172-174.
- [9]王臣.公路工程沥青路面老化试验检测技术[J].汽车画刊,2024,(10):101-103.
- [10]李峰.公路工程沥青路面施工现场试验检测技术[J].运输经理世界,2024,(25):34-36.

基于可持续理念的园林建筑设计创新研究

刘思淇

辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051

DOI:10.61369/ME.2025010028

摘 要： 本论文围绕可持续发展理念在园林建筑设计中的应用展开研究。通过分析当前园林建筑设计中存在的问题，探讨可持续理念与园林建筑设计融合的必要性与可行性。从生态设计、节能设计、文化传承设计等多个维度，结合具体案例，阐述基于可持续理念的园林建筑设计方法与创新策略，旨在为打造更加绿色、环保、具有文化底蕴的园林建筑提供理论支持与实践参考。

关 键 词： 园林建筑设计；可持续理念；生态设计；节能设计；文化传承

Research on Innovative Landscape Architecture Design Based on the Concept of Sustainability

Liu Siqi

Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114051

Abstract： This paper focuses on the application of the concept of sustainable development in the design of landscape architecture. By analyzing the existing problems in the current landscape architecture design, the necessity and feasibility of integrating the concept of sustainability and garden architecture design are discussed. From multiple dimensions such as ecological design, energy-saving design, and cultural heritage design, combined with specific cases, this paper expounds the design methods and innovative strategies of landscape architecture based on the concept of sustainability, aiming to provide theoretical support and practical reference for creating greener, environmentally friendly and culturally rich landscape architecture.

Keywords： landscape architecture design; sustainable concept; eco-design; energy-efficient design; cultural heritage

引言

园林建筑作为人类与自然环境互动的重要载体，承载着游憩、观赏、文化传承等多重功能。在当今社会，随着人们对生态环境关注度的不断提高以及资源节约意识的增强，可持续发展理念逐渐成为各领域发展的重要指导思想。园林建筑设计也不例外，如何将可持续理念融入园林建筑设计之中，实现生态效益、经济效益和社会效益的统一，成为当前园林建筑设计领域亟待解决的重要问题。本研究旨在通过对可持续理念在园林建筑设计中应用的深入探讨，为园林建筑设计的创新发展提供有益的思路和方法。

一、园林建筑设计现状与问题分析

（一）园林建筑设计现状

近年来，我国园林建筑设计领域呈现出蓬勃发展的态势，在城市建设进程中发挥着日益重要的作用。随着城市化水平的不断提高，人们对高品质公共空间的需求持续增长，促使大量城市公园、植物园、主题园林等项目如雨后春笋般涌现。以一线城市为例，北京、上海、广州等每年新建或改造的各类园林项目数量均超过百个，这些园林不仅为市民提供了休闲娱乐、健身游憩的理想场所，还成为城市生态环境改善与文化形象展示的重要窗口。

在设计风格方面，园林建筑呈现出多元融合的显著特征。一方面，对传统园林风格的继承与创新不断深化，众多设计师从江南园林、北方皇家园林等经典案例中汲取灵感，将“咫尺山林”“曲径通幽”等传统造园理念与现代空间设计手法相结合^[1]。例如苏州博物馆新馆，贝聿铭先生以粉墙黛瓦为基调，通过简洁的几何线条和现代建筑材料，重新诠释了江南园林的韵味，既保留了传统园林的精髓，又展现出强烈的现代感^[2]。另一方面，对现代建筑风格的探索也取得了丰硕成果，部分园林建筑引入极简主义、生态主义等设计思潮，强调功能性与形式美的统一，打造出极具时代特色的景观空间。

作者简介：刘思淇（2005.07-），女，汉族，辽宁鞍山人，辽宁科技大学，学生，大学本科，艺术设计类环境设计方向。

在技术应用层面,科技进步为园林建筑设计带来了全新的发展机遇。新材料的广泛应用极大地丰富了园林建筑的表现形式,如透光混凝土、生态木、智能玻璃等新型材料,不仅具备良好的物理性能,还能满足多样化的设计需求^[3]。在施工技术方面,3D打印技术、BIM技术等逐渐应用于园林建筑领域,有效提高了施工精度和效率,降低了建设成本^[4]。此外,物联网、大数据等信息技术的融入,使园林建筑的智能化管理成为可能,通过智能灌溉系统、环境监测设备等,实现对园林景观的精准维护与管理。

（二）存在的主要问题

（1）生态破坏问题：在园林建筑的快速发展过程中,生态保护意识不足导致的环境破坏问题日益凸显。部分项目在规划建设时,过度追求视觉冲击力和规模效应,对场地原有的生态环境造成了严重破坏。以某大型城市公园为例,为营造开阔的景观效果,建设过程中对原有丘陵地形进行大规模平整,破坏了原有的地形地貌和植被覆盖,导致雨季水土流失加剧,周边河流泥沙含量显著增加。同时,一些人工水体的设计缺乏科学规划,部分园林为打造标志性水景,过度开挖人工湖,改变了区域水系的自然流向,导致地下水位下降^[5]。此外,人工湖的水质维护措施不到位,大量使用化学药剂进行水质净化,不仅破坏了水体生态系统的平衡,还对周边土壤和地下水造成污染,使得水生生物多样性大幅减少。

（2）资源浪费问题：在园林建筑设计中,存在资源利用效率低下的情况。一些园林建筑在材料选择上,没有充分考虑材料的可持续性,大量使用高能耗、不可再生的建筑材料;在能源使用方面,照明、空调等设备的不合理配置,导致能源消耗过高。此外,水资源浪费现象也较为严重,传统的灌溉方式往往不能根据植物的实际需求进行精准灌溉^[6]。

（3）文化特色缺失问题：当前部分园林建筑设计盲目模仿西方园林风格,忽视了对本土文化的挖掘和传承。许多园林建筑缺乏独特的文化内涵和地域特色,使得园林建筑失去了其应有的文化魅力和艺术价值。同时,在传统园林文化的传承过程中,存在简单复制和生搬硬套的现象,没有结合现代生活需求进行创新和发展。

三、可持续理念与园林建筑设计融合的必要性可行性

（一）必要性

（1）生态环境保护的需要：可持续理念强调对生态环境的保护和修复^[7]。将其融入园林建筑设计中,可以通过合理的规划和设计,减少园林建筑建设对生态环境的破坏,保护生物多样性,维持生态系统的平衡。例如,通过采用生态护坡、雨水花园等设计手法,实现对水资源的自然净化和循环利用,保护水生态环境。

（2）资源节约与循环利用的要求：随着资源短缺问题的日益严峻,资源的节约与循环利用成为必然趋势^[8]。在园林建筑设计中贯彻可持续理念,可以通过选择可再生、可循环利用的建筑材料,采用节能设备和技术,实现资源的高效利用。例如,利用太阳能光伏发电为园林建筑提供能源,采用滴灌、喷灌等节水灌溉技术,降低水资源消耗。从研究现状来看,田东县虽拥有丰富的红色文化与民族文化资源,但在景观照明设计中融入文化内涵的研究相对稀缺。基于此,本项目以田东滨江公园夜景照明设计为

切入点,从红色文化与民族文化视角出发,将历史记忆与民族特色融入景观公园照明设计。期望借此打造出既有文化深度又有视觉美感的景观公园夜景工程。

（3）文化传承与创新的需求：可持续理念不仅关注生态和资源,还注重文化的传承与发展。园林建筑作为文化的重要载体,通过融入可持续理念,可以在保护和传承传统园林文化的基础上,结合现代生活方式和审美需求进行创新,使园林建筑更具文化内涵和时代特色。

（二）可行性

（1）技术支持：现代科技的快速发展为可持续理念在园林建筑设计中的应用提供了强大的技术支持。例如,生态建筑技术、节能技术、智能控制技术等的不断进步,使得在园林建筑设计中实现生态保护、节能降耗和智能化管理成为可能。此外,新型环保材料的研发和应用,也为园林建筑的可持续设计提供了更多的选择。

（2）政策引导：国家和地方政府出台了一系列关于可持续发展和绿色建筑的政策法规,鼓励在园林建筑设计中采用可持续的设计理念和方式。这些政策的引导和支持,为可持续理念在园林建筑设计中的推广应用创造了良好的政策环境^[9]。

（3）社会认知提升：随着人们环保意识和文化意识的不断提高,社会对可持续发展的园林建筑的认可度和需求度逐渐增加。公众更加关注园林建筑的生态环境质量和文化内涵,这为基于可持续理念的园林建筑设计提供了广阔的市场空间。

四、基于可持续理念的园林建筑设计方法与策略

（一）生态设计策略

（1）保护与修复原有生态环境：在园林建筑设计前期,应对场地的生态环境进行详细的调研和评估,制定合理的生态保护和修复方案。尽量保留原有的地形地貌、植被和水体,避免大规模的改造和破坏。对于已经受损的生态环境,采取相应的修复措施,如植树造林、湿地恢复等,重建生态系统的平衡。

（2）营造生态化植物景观：植物是园林景观的重要组成部分,也是实现生态效益的关键要素。在园林建筑设计中,应遵循植物的生态习性,选择本地适生植物,构建多样化的植物群落。通过合理的植物配置,实现植物之间的互利共生,提高植物群落的稳定性和抗逆性。同时,利用植物的生态功能,如净化空气、调节气候、降低噪音等,改善园林建筑的生态环境。

（3）构建生态化水体系统：水体是园林建筑的灵魂,也是生态设计的重要内容^[10]。在园林建筑设计中,应注重水体的生态化设计,采用自然式的水体形态,减少硬质驳岸的使用。通过设置生态湿地、雨水花园等设施,实现对雨水的收集、净化和利用,提高水资源的利用效率。同时,保持水体的流动性和生态多样性,营造适宜水生生物生存的环境。

（二）节能设计策略

（1）合理的建筑朝向与布局：园林建筑的朝向和布局对建筑的节能效果有着重要影响。在设计过程中,应根据当地的气候条件,合理确定建筑的朝向,充分利用自然采光和通风,减少对人工照明和空调的依赖。例如,在夏季主导风向上设置开敞的空间,促进空气流通;将主要功能房间布置在南向,以获得充足的阳光。

（2）高效的围护结构设计：建筑围护结构是影响建筑能耗

的关键因素之一。在园林建筑设计中，应采用高效的保温隔热材料，提高围护结构的保温隔热性能，减少热量的传递^[11]。同时，优化门窗的设计，采用节能型门窗，提高门窗的气密性和隔热性能，降低空气渗透和热量损失。

（3）可再生能源的利用：积极利用太阳能、风能、地热能等可再生能源，为园林建筑提供能源支持。例如，在园林建筑的屋顶或空地上安装太阳能光伏发电板，将太阳能转化为电能，用于照明、灌溉等；利用地源热泵技术，实现建筑的供暖和制冷，降低对传统能源的依赖。

（三）文化传承设计策略

（1）挖掘地域文化特色：不同地区有着独特的地域文化和传统园林风格。在园林建筑设计中，应深入挖掘当地的地域文化特色，将地域文化元素融入到建筑的形式、材料、装饰等方面。例如，借鉴传统园林的建筑风格和空间布局，采用当地的传统建筑材料和工艺，使园林建筑具有浓郁的地域文化气息。

（2）创新传承传统园林文化：在传承传统园林文化的基础上，应结合现代生活需求和审美观念进行创新。对传统园林的设计理念、手法和元素进行提炼和升华，运用现代的设计语言和技术手段，赋予传统园林文化新的内涵和表现形式。例如，将传统园林中的借景、对景等手法与现代建筑空间设计相结合，创造出富有特色的园林建筑空间。

（3）注重文化展示与体验：园林建筑不仅是文化的载体，还应成为文化展示和体验的场所。在设计过程中，应通过设置文化展览区、景观小品、互动设施等，展示当地的历史文化、民俗风情和传统园林文化。同时，注重游客的参与和体验，让游客在游览过程中感受到园林建筑的文化魅力。

五、案例分析

（一）北京奥林匹克森林公园

北京奥林匹克森林公园在设计中充分贯彻了可持续发展理念。在生态设计方面，公园保留和恢复了大量的原有植被和水

体，营造了多样化的生态环境，为众多动植物提供了栖息地^[12]。通过建设雨水收集系统和生态湿地，实现了对雨水的收集、净化和利用，提高了水资源的利用效率。在节能设计方面，公园采用了太阳能路灯、地源热泵等节能设备和技术，降低了能源消耗。在文化传承方面，公园融入了中国传统园林的设计理念和元素，如山水景观的营造、植物配置的手法等，同时结合现代体育文化和奥林匹克精神，打造了具有独特文化内涵的园林景观。

（二）杭州西溪国家湿地公园

杭州西溪国家湿地公园以生态保护为核心，在园林建筑设计中体现了可持续发展的理念。在生态设计上，公园最大限度地保护了原有的湿地生态系统，通过植被恢复、水体治理等措施，改善了湿地的生态环境。采用生态化的建筑设计，减少建筑对生态环境的影响。在文化传承方面，公园挖掘和展示了西溪地区的水乡文化、农耕文化和民俗文化，通过传统建筑的修复和重建、文化展览等方式，传承和弘扬了当地的特色文化。

六、结论

将可持续理念融入园林建筑设计中，是实现园林建筑可持续发展的必然选择。通过生态设计、节能设计、文化传承设计等多种策略的综合应用，可以有效解决当前园林建筑设计中存在的生态破坏、资源浪费和文化特色缺失等问题，实现园林建筑的生态效益、经济效益和社会效益的统一。在未来的园林建筑设计中，应进一步加强对可持续理念的研究和应用，不断探索创新设计方法和技术手段，打造更加绿色、环保、具有文化底蕴的园林建筑作品，为人们创造更加美好的生活环境。同时，政府、企业和社会各界应共同努力，加强政策支持、技术研发和宣传推广，推动可持续理念在园林建筑设计领域的广泛应用和发展。

参考文献

- [1] 史月红, 贾方. 人文造园, 咫尺山林——豫章十景·南昌市西湖区孺子亭公园整体改造工程设计[J]. 建筑与文化, 2021.
- [2] 张楚和. 具有中式浪漫的世界级建筑设计师——贝聿铭[J]. 学与玩, 2024.
- [3] 张甲毅. 园林绿化工程的施工管理与新型建筑材料应用研究[J]. 中国建材科技, 2021.
- [4] 王磊, 李坤. BIM技术+3D打印技术融合于装配式建筑的机制研究[J]. 科技创新与应用, 2024.
- [5] 张颖璐. 园林景观构造[M]. 南京东南大学出版社, 201901.
- [6] 宋振彬. 打造节约型水景观及园林水景植物的配置[J]. 吉林蔬菜, 2014.
- [7] 鲍小莉. 自然景观旅游建筑设计与旅游、环境的共生[D]. 华南理工大学, 2011.
- [8] 王转转. 节约型园林绿化建设与实践探索[C]// 广西网络安全和信息化联合会·第三届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集·太原市康培园林绿化工程有限公司, 2024.
- [9] 金子琳. 民营环保企业引入国有资本的动因和绩效研究[D]. 东北财经大学, 2023.
- [10] 陈学亮. 高效节能型农业机械传动系统结构设计研究[J]. 机械管理开发, 2024.
- [11] 梁斯佳, 郑景洪, 赵智聪. 基于情感认知特征的北京奥林匹克森林公园绿色城市景观社会绩效研究[J]. 园林, 2023.
- [12] 叶智浩. 结合生态修复功能的景观水体护岸综合评价与设计研究[D]. 华南农业大学, 2016.

建筑工程基坑施工中的地下水研究浅析

潘宏鑫

宁夏建设工程造价管理站，宁夏 银川 750001

DOI:10.61369/ME.2025010030

摘 要： 在建筑工程基坑施工中，在含水量丰富的土层中进行大面积基坑开挖时，大量涌入基坑的地下水很难通过明沟排水法排出，如果不及时排除流入坑内的地下水，就会使施工条件变差，造成土壁坍塌，同时也会使地基承载力下降。当遇到粉砂层时，不仅基坑挖不深，还可能造成大量水土流失，边坡不稳，地面塌陷，严重时还会出现翻浆、冒泥、涌砂等严重现象，严重时还会危及邻近楼房的安全。本文介绍宁夏地下水研究浅析为相关项目建设提供了参考意义。

关 键 词： 建筑工程；基坑；地下水；施工技术

Analysis of Groundwater Research in Foundation Pit Construction of Building Engineering

Pan Hongxin

Ningxia Construction engineering Cost Management Station, Yinchuan, Ningxia 750001

Abstract： In the construction of foundation pit, when large-scale foundation pit excavation is carried out in the soil layer with rich water content, a large number of groundwater pouring into the foundation pit is difficult to be discharged through the open ditch drainage method. If the groundwater flowing into the pit is not eliminated in time, the construction conditions will become worse, resulting in the collapse of the soil wall, and the bearing capacity of the foundation will decrease. When the silt layer is encountered, not only the foundation pit is not deep, but also may cause a large amount of soil and water loss, slope instability, ground collapse, in serious cases, there will be serious phenomena such as slurry, mud, sand, etc., in serious cases, it will endanger the safety of adjacent buildings. This paper introduces the analysis of groundwater research in Ningxia and provides reference for the construction of related projects.

Keywords： construction engineering; foundation pit; ground water; construction technique

引言

近年来，随着宁夏经济发展显著增速，城市人口红利增长明显，城镇化发展速度越来越快，十四五规划发展城市国际化，这将使宁夏区内建筑规模越来越大，建筑结构形式多元化^[1]。由于地下空间对安置在其中的任何构筑物提供了天然的保护，地下空间围岩形成的包围使得免受表层一定活动形式的危险或干扰，地下空间又是一个能够给那些把它们安放在地面上很困难、甚至不可能、环境不允许、或者没有效益的结构提供安置的空间场所，这使得宁夏地区未来建筑结构也必会向地下更深层发展。而地下空间只有同表面相接触的地方才是可见的，地下空间不透明性使得施工过程变得扑朔迷离，施工中，地下水的水位太高，将造成施工十分困难，其中地下水对于建筑结构的影响也是显著的，轻则影响地基承载力，重则会使施工过程中建筑物发生一定沉降危害安全^[2]。因此建筑的施工阶段、甚至维护阶段，必须做好建筑物施工的降水措施。

一、地下水流的基本类型

（一）上层滞水

上层滞水一般存在于透水性不大的夹层、大气降水和阴滞下渗的凝水等近地表岩土层的包气带中，并使其聚集在地表低洼地

带，也可形成上层滞水，因为降水难以从里面流走^[3]。

一般离地表较浅、分布有限的上层滞水型地下水出现在雨季，枯水期消失。

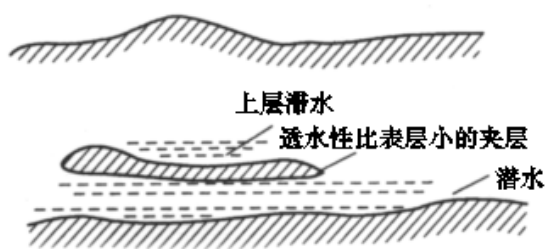


图 1.1 上层滞水示意图

（二）潜水

潜水是地下水埋藏于地表以下的第一层隔水层之上。当开挖至潜水层时，即出现了地下水，工程中通常将此自由水面标高为地下水位的自由水面，或称为潜水面。

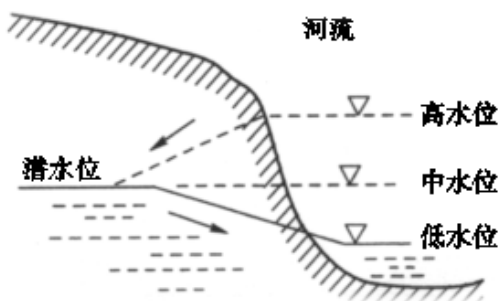


图 1.2 潜水与河水补给图

（三）毛细管水

通常，从潜水面一定高度的土壤孔隙中，部分或全部水位称为毛细管水位。

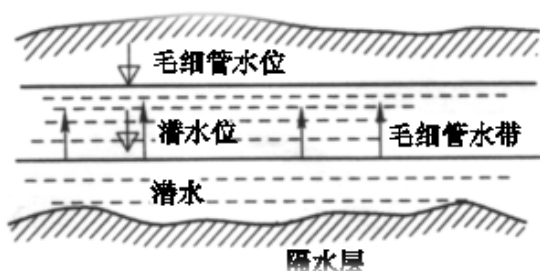


图 1.3 毛细管水示意图

（四）层间水

两个隔水层之间埋藏的地下水叫层间水。

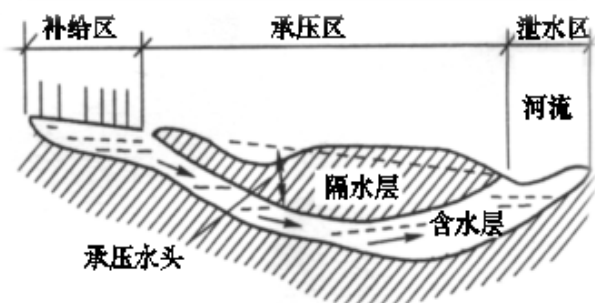


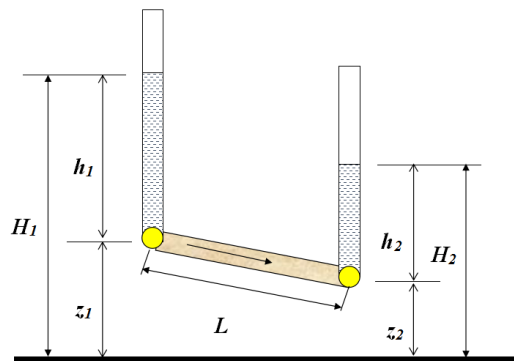
图 1.4 层间水示意图

二、地下水流的基本性质

（一）动水压力 F

潜水是从地表算起第一层不透水层以上的含水层所含的水，这种水是没有压力的，属于重力水^[4]。

层间水，即含水层所含的水，夹在两个不透水层之间。如果水的末尾填满了这个含水层，水无压力，这叫无压层间水；如果水充满了这个含水层，水就带有压力，叫做承压层之间的水。



2.1 动水压力计算示意图

水的单位阻力 T:

$$T = \gamma_w (H_1 - H_2) / L \quad (2-1)$$

γ_w -- 土的容重

$$\text{动水压力 } G_D = -T = -\gamma_w (H_1 - H_2) / L \quad (2-2)$$

（二）渗透系数 k

水的流动轨迹包括层流和湍流，在土中运动的水速度不是很快，属于层流土中渗水的基本法则即达西法则：渗水速度 $V=ki$

两点间水头差值与渗透过程长度之比，称为水力斜度，用 i 表示

$$i = (H_1 - H_2) / L \quad (2-3)$$

物理意义透入系数 K：表示当水力斜度与 1 相等时，其渗流速度的大小。

土壤的粒度，密实度，饱和度，土壤的结构和构造等等，都是影响土壤渗透系数的主要因素。因此计算涌水量的重要参数土渗透系数 k 的大小，影响降水方法的选择。水在土中渗出时，对单位土体产生的压力即为动水压力 $G_D = -\gamma_w i$ 。

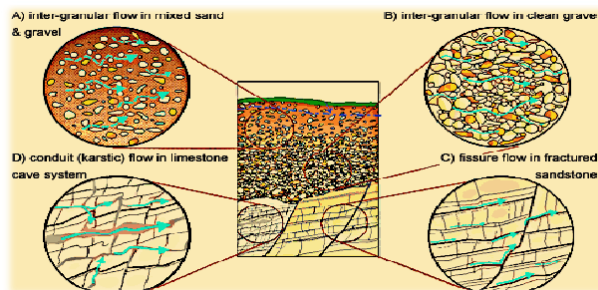


图 2.1 带有不同地下水流动特性的地层动水压力的剖面图

- A. 在混合砂砾里面的内粒间的流动 B. 在完全砾里的内粒间的流动
C. 在灰岩洞室系统里的传导流动（卡斯特） D. 在开裂砂岩里的开裂流动

三、建筑施工中地下水的危害

(一) 流砂现象

由图3.1 地下水施工剖面图力学关系可知，

当向上的动水压力大于土的重度时，

既 $G_D \geq \gamma' w$ (土的浸水重度)，

便会出现流砂现象。防治措施：降低动水压力。

(二) 管涌现象

当动水压力等于土的重度时，处于临界状态

既 $G_D = \gamma' w$ 此时的水力坡度既临界坡度 I_{cr}

既 $\gamma_w I_{cr} = \gamma' w$ (3-1)

$I_{cr} = \gamma' w / \gamma_w = (\gamma_{sat} - \gamma_w) / \gamma_w = k I$ (3-2)

弱临界坡度 I_{cr} 小于 $k I$ 便会发生管涌现象。

防治措施： $I_{cr} \geq k I$ (3-2)

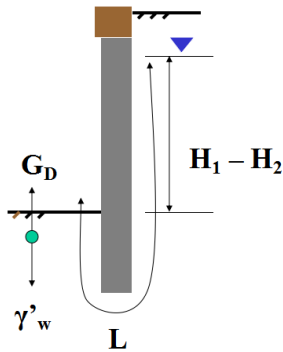


图3.1 地下水施工剖面图

四、地下水控制措施

(一) 施工降水方案

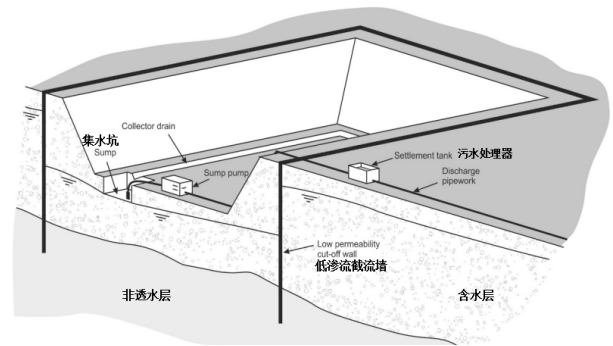


图4.1 泵节流墙控制地下水示意图

建筑工程地下水处理方法可以归结成两种：集水井降水和井点降水。降水方案采用泵节流墙控制地下水能够达到更好的效

果^[5]。首先在基坑外围一圈低渗流截留墙从含水层深入一直到非透水层，将地下水从截流墙的位置隔离开来，这样会减少基坑内的地下水，为了方便后期人工回灌，回灌井点宜进入稳定降水曲线下1米，过滤管的长度应大于降水井点过滤段的长度，且位于透气性较好的土层中。要避免两井连通，回灌距离降水井点不应在6米以内^[6]。基坑下方地下水位降低高度应符合计算 $G_D < \gamma' w, I_{cr} \geq k I$ 防止流砂现象和管涌现象发生^[7]。

截面墙体厚度应达到基坑防渗要求，下卧不透水层应插入底式竖向截流墙，可根据下式确定其降水深度：

$$d=0.2h - 0.5b$$
 (4-1)

式中： d——截流墙插入不透水层的深度；

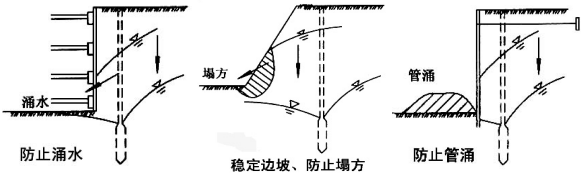
h——作用水头；

b——截流墙厚度。

除按照以上计算外，通常情况下，在渗透系数为0.1 ~ 50m/d的含水层土层中，降水深度为3米~6米；对于沙土渗透系数在3 ~ 50m/d之间、粉砂、淤泥质土、粉质粘土渗透系数0.1 ~ 3m/d之间时，降水深度要大于8米；对于渗透系数更小的饱和粘性土、淤泥或淤泥质土中的施工降水可采用电渗井点降水^[8]。

(二) 降水作用

降低地下水，可以使基坑土层不在受到由于地下水水位差引起的动水压力对基坑的作用，因此可以防止涌水、防止塌方、防止管涌，起到稳定边坡的作用。从而避免了工程事故^[9]。



五、结论

地下水对建筑施工的危害是巨大的，处理不当会引起地基承载力不足，基础下沉等严重安全事故，因此只有详细分析地质构成，在施工阶段，甚至是维修阶段，为了避免意外发生，建筑施工必须做好降水措施^[10]。

参考文献

[1] 刘振军. 富水地层地铁车站深基坑降水设计方案探究 [J]. 铁道建筑技术, 2021, (04): 61-66.
[2] 胡冰冰, 路林海, 李翌, 等. 富水砂卵石层基坑封闭降水与回灌工程关键技术 [J]. 都市轨道交通, 2021, 34(03): 92-97+103.
[3] 张真, 魏万兵, 李辉. 富水砂卵石地层条件下地铁车站深基坑水下开挖工艺设备选型 [C]// 中国交通建设股份有限公司2017年技术交流会论文集, 2017: 695-701.
[4] 龚大为. 长沙地铁建筑密集区富水砂卵石地层车站基坑施工技术研究 [D]. 中南大学, 2013.
[5] 王海星. 工业与民用建筑工程基坑施工中的地下水处理方法探究与讨论 [J]. 中国住宅设施, 2024, (07): 136-138.
[6] 杨瑜泽, 吴溪. 建筑工程基坑施工中的地下水处理 [J]. 工程与建设, 2021, 35(05): 989-990+996.
[7] 吕彦朋. 地下水处理在工业与民用建筑工程基坑施工中的重要作用 [J]. 建材与装饰, 2020, (04): 44-45.
[8] 沈卫华. 工业与民用建筑工程基坑施工中的地下水处理方法分析 [J]. 门窗, 2019, (19): 90-91.
[9] 张仕平. 工业与民用建筑工程基坑施工中的地下水处理方法探析 [J]. 建材与装饰, 2019, (06): 10-11.
[10] 张辉. 解析工业与民用建筑工程基坑施工中地下水处理 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2018, (11): 49. DOI: 10.16141/j.cnki.1671-8089.2018.11.041.

建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理策略分析

许树锋

青岛青联宏隽建筑工程有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ME.2025010033

摘 要： 建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理是保障工程质量、控制企业成本、维护行业声誉的关键。然而，当前幕墙施工普遍存在高空作业防护不足、材料设备管理混乱、多工种交叉干扰频发等问题，亟需精准施策、标本兼治。本文在剖析建筑幕墙装饰工程安全管理价值的基础上，系统梳理了管理难点，并从构建标准化高空作业防护网络、建立精细化材料设备管控流程、完善动态化环境风险预警机制、打造系统性全员安全能力建设四个方面提出了优化策略，以期为建设幕墙装饰工程施工现场安全管理提供科学指引，推动行业高质量发展。

关 键 词： 建筑幕墙；装饰工程；施工现场；安全管理

Analysis of Construction Site Safety Management Strategy for Building Curtain Wall Decoration Engineering

Xu Shufeng

Qingdao Qinglian Hongjuan Architectural Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

Abstract： On-site safety management in building curtain wall decoration projects is crucial for ensuring project quality, controlling costs, and maintaining industry reputation. However, current curtain wall construction often faces issues such as inadequate protection for high-altitude work, chaotic management of materials and equipment, and frequent cross-interference among different trades. These issues urgently require precise measures and comprehensive solutions. This article, after analyzing the value of safety management in building curtain wall decoration projects, systematically identifies the management challenges and proposes optimization strategies from four perspectives: establishing a standardized high-altitude work protection network, setting up a refined material and equipment control process, improving a dynamic environmental risk warning mechanism, and developing a systematic safety capability construction for all staff. The aim is to provide scientific guidance for on-site safety management in building curtain wall decoration projects, thereby promoting the industry's high-quality development.

Keywords： building curtain wall; decoration engineering; construction site; safety management

引言

建筑幕墙装饰工程是现代建筑外立面设计的重要组成部分，其施工品质直接影响建筑物的使用安全、美观度和耐久性。随着城市化进程的加快，高层建筑不断涌现，幕墙装饰工程规模日益扩大。据不完全统计，2024年我国建筑幕墙市场规模已达5135.7亿元，未来仍将保持稳步增长态势。在此背景下，如何强化施工现场安全管理，确保幕墙装饰工程的质量和安全，已成为业界关注的焦点。科学有效的安全管理不仅关乎企业的经济效益，更关系到广大施工人员的生命安全，因此亟需予以高度重视。

一、建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理的价值

（一）行业形象与社会责任双重维护

建筑幕墙装饰工程关乎人民生命财产安全，其施工安全管理水平已成为行业形象的重要风向标。一旦发生重大事故，不仅施工单位声誉受损，整个行业的公众印象也将大打折扣。尤其在当前全社会安全意识日益增强的大背景下，业主选择合作伙伴时，

无不将安全管理能力作为关键考量因素。另一方面，安全生产也是企业必须承担的社会责任。《建筑法》等法律法规对建筑施工安全作出了明确规定，违规操作将面临严厉处罚。因此，强化安全管理不仅是维系行业健康发展的需要，更关乎每一家企业的生存。只有将安全理念融入经营战略和日常运作的方方面面，才能在市场竞争中赢得主动，实现可持续发展。由此可见，加强幕墙工程安全管理，对于维护行业形象、践行社会责任具有重要价值。

（二）企业成本与经营风险有效控制

建筑幕墙装饰工程投资大、周期长，一旦发生安全事故，经济损失将是巨大的。对于幕墙装饰工程而言，由于施工难度大，事故发生后果往往更加严重。以玻璃幕墙为例，如果在安装过程中发生玻璃爆裂，不仅需要承担昂贵的玻璃更换成本，还可能引发工期延误、窗框变形等一系列连锁反应，综合损失难以估量。相比之下，加大安全投入虽会增加前期成本，但从整个工程周期来看，安全事故率的下降将显著减少事故赔付、工期延误等损失，总体经济效益更佳^[1]。从企业风险管控的角度看，安全管理水平的高低，很大程度上决定了企业的经营稳定性。只有从源头防控安全隐患，才能为施工生产提供有力保障，规避经营风险，实现降本增效的目标。

（三）人员安全与工程品质协同保障

建筑幕墙装饰工程的核心是人，工程品质的优劣很大程度上取决于人员的技能素质和安全意识。一方面，只有保证作业人员的安全，才能调动其积极性，激发其潜能，提升工作效率和技术水平，这是工程质量的根本保证。另一方面，规范的操作行为和严密的现场管理，也是确保幕墙装饰品质的关键所在。试想，如果在玻璃幕墙安装时未佩戴防护手套，很容易在玻璃表面留下划痕；如果铝板焊接时急于赶工，忽视细节处理，则成品观感必然大打折扣。可见，人员安全与工程品质是相辅相成、密不可分的。只有将两者有机统一，围绕人这一核心，强化教育培训，完善技术规范，优化现场管理，才能在确保人身安全的同时，将工程品质提升到一个新的高度。由此可见，加强安全管理对于保障人员和工程具有双重价值。

二、建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理难点

（一）高空作业风险防控体系不完善

高空作业是建筑幕墙装饰工程的重难点，风险系数高、事故隐患多，是工伤事故的主要来源。目前，高空作业安全防控体系建设仍存在诸多短板。部分施工现场安全防护设施配备不到位，如未设置密目式安全网、警示标识缺失等，难以有效拦截坠落物或提示危险区域。个别施工人员安全意识淡薄，纵使企业发放了安全帽、安全带等防护用品，也没有严格佩戴使用，客观上加大了坠落风险。在高空吊装作业中，超载现象频发，各环节把关不严，再加上指挥人员与操作人员沟通不畅，极易引发吊篮倾覆等事故。上述问题的存在，反映出当前高空作业安全管理仍不够系统全面，涵盖人员行为规范、设备设施管控、作业环境监测等各环节的防控闭环尚未形成，必须引起高度重视^[2]。

（二）材料设备储运监管存在漏洞

幕墙装饰材料种类繁多，玻璃、石材、金属板材等均不同程度存在易碎、易变形、尺寸大等特点，如在采购、存储、吊装等环节监管不到位，很容易发生损坏变形，埋下安全隐患。以玻璃为例，一些工地为图省事，往往将玻璃随意堆放，上下没有隔离，也未设置缓冲垫，经太阳暴晒后自爆风险大大增加。在吊装搬运过程中，未使用专用吸盘或平衡梁，玻璃发生散落的几率也

随之升高。由于缺乏必要的警示标识，一旦玻璃意外破碎，极易对过往行人造成伤害。大型机械设备是确保高空作业安全的关键，但目前不少施工单位对设备维护流于形式，定期检测制度执行不严，存在带“病”运转的现象，随时可能引发事故。

（三）多工种交叉作业协调机制缺失

建筑幕墙施工现场涉及土建、钢结构、玻璃安装等多个工种，施工工序复杂，交叉作业频繁。如果各工种之间缺乏必要的协调，就容易发生争抢场地、抢占资源等问题，相互干扰，影响施工进度。以幕墙安装与室内精装修为例，两个工种在同一楼层作业时，装修工人为了方便，经常占用幕墙吊篮的施工通道，而幕墙安装工人为了赶工期，也常与装修工人抢用升降机，如缺少统筹，极易发生碰撞、高坠等事故。再如钢结构安装与玻璃安装交叉作业时，施工动线容易交错，如钢构件意外掉落，则会直接威胁玻璃安装工人的人身安全^[3]。可见，如果缺少顶层的统筹规划和科学的现场布控，盲目开工，势必加大安全风险。

（四）安全培训教育实效性有待提升

人的不安全行为是导致事故发生的重要原因，而提升人员安全意识和能力的关键在于教育培训。目前，建筑幕墙装饰施工人员以农民工为主，文化水平普遍偏低，缺乏必要的安全知识。很多企业虽然制定了培训计划，但存在“重形式、轻实效”倾向，教育内容空洞、脱离实际，授课方式单一乏味，很难调动工人的学习热情。即便是针对管理人员的培训，也常流于“一张PPT走天下”，缺乏针对性和操作性。在高风险作业面前，一些从业人员遇突发情况不知所措，现场处置能力欠缺。

三、建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理优化策略

（一）构建标准化高空作业防护网络

高空作业是建筑幕墙装饰工程的常态，也是事故多发的高危区域。为从源头上消除安全隐患，必须严格落实防护设施配备。施工升降机作为高空作业的主要通道，其四周应设置封闭式防护棚，高度不低于1.5米，顶部还需架设钢管以防止物体坠落。升降机投入使用前，要全面检查其性能，确保制动、限位等装置灵敏有效。吊篮是另一大高危设备，作业前须仔细检查制动、升降等机构，确保性能良好。吊篮下方应每隔30米左右设一道安全平网，且两端平网间要铺设走道板，便于施工人员安全通行。严禁带病运转或超载使用，避免发生倾覆事故。所有高空作业人员必须佩戴符合国家标准的安全帽和安全带，安全绳索一端系挂在牢固点上，另一端连接全身式安全带。作业前要对个人防护用品进行检查，发现破损或性能异常要立即更换^[4]。在智能化管理方面，可利用无人机、可穿戴设备等先进技术手段，实时监控工人在施工过程中的位置、行为以及设备的运行状态，一旦发现违章操作或设备故障，系统会自动预警，及时提醒管理人员处置，将风险消灭在萌芽状态。同时大数据分析可以帮助管理者发现薄弱环节，不断完善安全防护体系。

（二）建立精细化材料设备管控流程

材料设备是建筑幕墙装饰工程质量安全的物质基础，必须实

行精细化管理。在材料采购阶段，应通过公开招标方式选择资质过硬、信誉良好的供应商。要落实全面质量管理，从源头上控制材料质量。材料进场时，专业质检人员要对其规格、性能、外观等逐一检查，对不合格品坚决清退。决不允许以次充好、偷工减料。合格材料须分类堆放，做好标识。易碎材料如玻璃需采取立放，下垫木板，四周设置警戒线，严禁野蛮装卸。采取先入先出的原则，避免材料霉变或老化。大型机械设备要建立使用安全档案，详细记录其规格参数、使用状况、维修保养等信息，对超过使用年限或存在严重缺陷的设备要及时更新。使用前要认真检查其性能，发现故障要及时排除。操作人员上岗前，必须进行严格培训和考核，学习设备性能、操作规程、应急处置等，考核合格方能上岗独立作业。日常还要通过技能竞赛等方式，强化实操训练，不断提高事故应对能力。一旦发现违章作业，要严肃追责，绝不姑息。坚持有错必纠、有责必问，做到令行禁止。

（三）完善动态化环境风险预警机制

建筑幕墙施工现场环境复杂，涉及土建、安装、装饰等多工种交叉作业，且常受季节气候影响。为此，必须科学统筹，完善风险预警机制。在制定施工进度计划时，要协调各工种的工期和衔接，合理安排时序，尽量避免在同一时段、同一区域施工，减少相互干扰。要加强各方沟通，及时传递信息，形成合力。对于确实需要交叉作业的环节，要通过设置隔离带、划分运输通道等措施，明确各自的作业区域。现场要设置统一的警示标识，清晰指示危险源的位置。同时还要关注天气预报，提前制定应对预案。要密切关注气象部门发布的预警信息，将其纳入每日施工例会重点讨论内容。一旦出现大风、暴雨等恶劣气象条件，要及时调整施工计划，撤离高空作业人员，加固脚手架、塔吊等临时设施。停工后要全面排查安全隐患，确保万无一失方可复工^[1]。针对梅雨季多发的内涝灾害，要在雨季来临前全面排查排水系统，及时疏通河道，避免因排水不畅导致积水过多，增加主体结构荷载，引发安全事故。同时做好防雷接地等工作，降低雷电灾害风险。要储备必要的防汛物资，一旦发生险情，确保在最短时间内调集人员设备展开抢险。只有未雨绸缪，才能从容应对复杂多变

的施工环境。

（四）打造系统性全员安全能力建设

人是建筑幕墙装饰工程安全管理的核心要素。只有充分调动一线施工人员和管理人员的积极性，提升其安全意识和技能，才能将各项规章制度落到实处。对于新入职农民工，要开展岗前安全培训，时间不少于72学时，重点讲解高处作业、机械伤害等易发事故的防范要点，通过考核合格后方可进入施工现场。在培训中要充分运用多媒体手段，增强教学吸引力和感染力。针对在职员工，要通过定期开展安全大讲堂等形式，普及安全知识，传授实用技能，引导其学会自我保护。授课内容要贴近一线、贴近实际，远离说教和大道理。同时组织观看事故警示教育片、案例剖析会等，加深其对违章作业危害的认识。案例要选择典型事故，分析其发生的深层次原因，明确今后需要注意的关键点。对管理人员则要进行更高层次、更贴近实战的培训，每季度至少组织一次应急演练，使其熟练掌握事故快速处置流程，提高指挥调度能力。平时还要组织管理人员深入一线，了解员工的所思所想，听取合理化建议。在日常管理中，要建立安全积分制，对那些主动排查隐患、提出合理化建议的员工给予积分奖励，而对屡教不改或情节严重的违章者，予以严厉处罚，真正将安全责任落实到每个人头上。安全积分要与员工绩效、晋升直接挂钩，形成比学赶超的良好氛围。

四、结语

建筑幕墙装饰工程安全管理是一项复杂的系统工程。企业应树立“安全第一、预防为主、综合治理”的理念，通过构建高空作业标准体系、材料设备管控闭环、环境风险预警网络、全员安全意识提升，构筑起一道道安全防线。未来还可利用物联网、BIM等信息化手段，实现安全隐患可视化管控，推动幕墙装饰工程安全管理迈上新台阶。只有筑牢安全根基，才能保障幕墙装饰行业的高质量可持续发展。

参考文献

- [1] 徐国海. 建筑幕墙装饰工程施工现场安全管理策略分析 [J]. 房地产世界, 2023, (12): 70-72.
- [2] 尚永涛, 王凤飞, 张宝杰, 等. 建筑幕墙装饰施工现场安全管理对策分析 [J]. 建筑技艺, 2020, (S1): 218-220.
- [3] 张叶飞. 建筑幕墙施工中安全事故防范策略探讨 [J]. 山西建筑, 2020, 46(07): 190-191.D
- [4] 撒学明. 建筑幕墙装饰施工的现场安全管理对策 [J]. 中国住宅设施, 2019, (07): 119-120.
- [5] 徐伟强. 建筑幕墙装饰施工的现场安全管理对策探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2019, (02): 39.

风景园林工程中大树移植技术分析

杨春城

广东省韶关市武江区市政综合管理中心, 广东 韶关 512028

DOI:10.61369/ME.2025010034

摘 要 : 随着我国城市化进程的不断加快, 人们对生态环境的需求也越来越高, 园林绿化在城市园林建设与生态修复中发挥着越来越重要的作用。树木是园林的重要组成部分, 不仅能迅速形成景观效果, 而且能在短期内改善生态环境, 为人们提供舒适的休闲场所。因此, 对大树移植技术进行深入分析与研究, 对提升园林工程质量与可持续发展具有重要意义。

关 键 词 : 风景园林工程; 大树移植; 技术分析

Analysis of Big Tree Transplanting Technology in Landscape Engineering

Yang Chuncheng

Wujiang Municipal Comprehensive Management Center, Shaoguan, Guangdong 512028

Abstract : With the rapid development of urbanization, people's demand for ecological environment is also more and more high. Landscape greening plays a more and more important role in urban landscape construction and ecological restoration. Trees are an important part of the garden, which can not only quickly form the landscape effect, but also improve the ecological environment in the short term and provide comfortable leisure places for people. Therefore, the in-depth analysis and research of tree transplantation technology is of great significance to improve the quality and sustainable development of landscape engineering.

Keywords : landscape engineering; tree transplantation; technical analysis

在园林绿化工程中开展大树移植技术研究, 将丰富风景园林工程技术体系, 并为其科学规划与实施提供理论支撑。涉及植物生理学、生态学、土壤学等学科交叉研究, 对认识大树移植过程中生理变化及生态适应性具有重要意义。优化大树移植技术可以有效地提高造林成活率, 降低造林成本, 降低造林成本。同时, 适当的移植技术也可以缩短园林建设周期, 提高园林工程的经济与社会效益。同时, 随着生态环保意识的提高, 大树移植技术也将为园林绿化与生态修复提供新思路。

一、风景园林工程中大树移植技术作用

(一) 快速提升景观效果

在园林工程中, 利用大树移植技术可以迅速地创造出具有成熟景观效果的景观空间。与栽植小苗相比, 移植大树能在较短的时间内形成完整的树冠及树形, 增加景观的即时美感与层次^[1]。这种快速成形的景观效果, 对城市中的公园、广场、街道等公共空间具有重要作用, 可以快速提升城市形象, 为市民提供良好的休闲环境。高大树木的存在, 不仅可以提高人们的视觉感受, 而且可以给人们带来一种心理上的安宁与舒适感, 增强人们对公共空间的认同感与归属感。

(二) 改善生态环境

树木是生态系统的重要组成成分, 可通过光合作用吸收二氧化碳和释放氧气, 有效提高大气质量^[2]。此外, 高大树木的树冠还具有遮阳、降温、降低热岛效应等作用, 为城市营造舒适的微气候环境。同时, 树木根系具有固土固土、保水、透气等功能。景观绿化工程通过树木移植, 可以在短期内提高生态系统功能与服务价值, 为城市可持续发展提供强有力的支撑。

(三) 传承历史文化

大树移植在园林工程中也具有重要的历史文化意义。古树众多, 历史悠久, 文化底蕴深厚, 是城市文化的重要载体, 见证着城市的变迁与发展^[3]。将这些具有历史价值的大树移植到园林中, 既能保护城市文化遗产, 又能给园林增添独特的人文魅力。这些高大的树木常常成为城市文化与记忆的符号, 唤起人们对城市历史的认同与自豪。将大树移植技术合理地应用于景观设计中, 可以将历史文化和现代景观设计有机地结合起来, 营造具有现代美感和丰富文化内涵的公共空间, 推动城市文化的传承和发展^[4]。

(四) 促进生物多样性保护

树木移植是园林绿化领域的一个重要研究方向。大树是生态系统的核心种, 能为各种动植物提供栖息场所^[5]。其树冠、干、根等为鸟类、昆虫、小动物等提供了丰富的食物来源和栖息场所, 对生物多样性的形成与发展起着重要作用。通过树木移植, 园林绿化工程可以构建更为复杂、稳定的生态系统, 为城市野生动植物提供良好的生存条件。这一生态系统的建设, 不仅有利于城市生物多样性的保护与恢复, 而且对于增强城市生态系统的稳定性与弹性具有重要意义。

二、风景园林工程中大树移植技术应用

（一）移植前的准备工作

园林绿化工程中，大树移植的成功与否依赖于移植前的准备工作。此阶段的主要工作是造林地的选择，造林地的评估，以及相应的材料与技术准备^[6]。应选择合适的树种是进行移植的基础，选用高大健壮，无病虫害，树形好的大树为宜。在考虑移植后的适合度及成活率的前提下，还需要对树种的树龄、树种特征及根系情况进行评估。中、老年树具有较强的适应性与恢复力，是较理想的树种。同时，应根据当地气候、土壤等条件，选择合适的树种，以保证移植后的苗木能在适宜的环境下茁壮成长。移植地点的选择也是至关重要的，移植后要对栽植地的土壤质地、排水状况、光照状况及周围环境等方面进行全面调查。良好的土壤质地、排水状况有利于林木根系的生长与恢复，良好的光照及周围环境对林木整体生长有促进作用。另外，还要考虑栽植点的空间布局，保证树木有充足的生长空间，不受空间制约而影响树木生长及景观效果。材料、技术准备也不能忽视，要事先准备好挖土工具，提升设备，运输车，保湿材料，发根药剂等。同时，还需要组建一支专业的技术人员和施工团队，保证他们熟悉大树移植的操作程序及技术要点，能熟练地使用相关的设备及材料，以保证移植工作的顺利开展。

（二）大树的挖掘与包装

在造林过程中，大树的挖土、打包是造林成败的关键环节，直接关系到造林成活率及后期恢复^[7]。此阶段应严格按《规程》要求操作，以保证林木根系完整，减少林木损伤。挖掘时，要根据树高、冠幅等因素，确定合理的开挖范围。一般情况下，挖沟的宽度应该是树干直径的6~8倍，这样才能保证树木有足够的根和土。在开挖过程中，要清除树木周围的表土，然后沿开挖范围开挖环形沟，挖掘时要避免伤及主根及粗根，确需切根者，须用锐利工具平切，以减少根裂。挖掘工作结束后，需要将树木打包，作用是保持树木根部的水分，减少水分的蒸发，便于运输和栽植。常用的包装方法是土球、木箱等，土球包装适合小树，用草绳或无纺布将挖出的树根捆扎成一个完整的土球。木箱包装适用于大树，并在树根周围设置木箱子，把树、根、土都装进木箱里，以保证运输过程中树木的稳定。无论采取何种包装方式，都必须保证包装牢固、透气，防止因包装不当而造成树木根系损伤或窒息。

（三）大树的运输与装卸

在移植过程中，大树的搬运和搬运是很容易被忽略但又非常重要的一环。合理的运输和装卸可以有效地降低搬运过程中树木的损坏，保证树木能够安全地到达栽植地^[8]。在运输之前，要做好运输车辆的准备工作，以保证其性能能满足运输大树的需要。在运输过程中，要考虑到树木的大小、重量等因素，选择合适的交通工具，以保证运输过程中树木的稳定与安全。同时，树木也要做好适当的固定与防护，以防止搬运过程中因撞击、撞击而造成树木损坏^[9]。对于较大的树，可以用草绳、泡沫塑料等保护性材料包裹在树干或树枝上，以减少运输时的磨擦和损坏。装卸时，必须使用专业起重设备，并严格遵守作业规程。吊装过程中，应选用适当的吊点，以避免损伤树干、树枝等。同时，吊装设备和树木的接触部位也要垫上防护材料，以避免吊装设备对树

木的压伤。装卸完毕后，应再次检查树木，以确保在装卸过程中树木没有受到太大的损坏，以便于下一步的种植。

（四）大树的栽植与定植

大树的栽植与定植是苗木移植的核心环节，直接影响苗木的成活及后期生长，栽植时要严格按技术规程进行，以保证苗木能尽快适应新环境^[10]。栽植前应对栽植地土壤作适当处理，改善土壤理化性质，增加肥力及透气性能。根据土壤化验结果，在土壤中加入适量的有机肥料和土壤改良剂，为林木生长创造适宜的土壤环境。同时，根据苗木的大小及根系情况，挖出适当尺寸的栽植穴。栽植穴直径应大于树木土球或木箱直径30~50 cm，埋深应大于土球或木箱高度10~20 cm，以保证根系有充分伸展空间。栽植时，要把苗木轻轻放入栽植穴内，以保证苗木直立、稳固。如果是带土球或木箱的树，应该先把包装材料去掉，再把树的根展开放进洞里。在回填土时，要分层填筑，每一层土都要压实，以保证土与根紧密结合，不留空隙。同时，为保证树木的稳定生长，还需要在树木周围设置支架，防止因风等因素引起的树木倾斜、倒伏。

（五）大树的后期养护与管理

大树移植后，后期的养护和管理是保证移植成败的关键，合理的养护与管理可以促进林木快速恢复与生长，提高造林成活率，提高景观效果。移植后早期应加强林木水分管理，由于树木移植时有一定程度的损伤，根系吸收水分的能力很差，所以要保持土壤湿润，但不能积水。根据土壤干湿状况及气候条件，适时、适量浇水，以保证林木根系所需的水分。同时，要适当遮阴，减少太阳直接对树木的蒸腾作用，减少水分蒸发速率，使林木顺利渡过幼苗期。除水分管理外，还要加强林木病虫害的防治。移植树木因生长环境变化及自身抵抗力降低，易受病虫害侵袭。因此，要定期检查林木的病虫害，及时发现和治理病虫害，为保证林木健康生长，应采取物理、生物、化学等综合防治措施。另外，应注意合理施肥，促进林木生长与恢复。根据林木生长状况及土壤肥力状况，适时施用复合肥、有机肥等，保证林木生长所需的营养。

三、风景园林工程中大树移植技术应用案例分析

（一）案例背景

为提高京港澳高速京珠北小塘至龙归段景观效果，对沿线服务区和景观节点进行全面的景观改造。在设计方案中，需要引入大量的乔木树种，营造丰富的植物群落层次，营造出更具自然生态的园林氛围。由于无法在当地获得合适的树木资源，所以决定在长沙县跳马镇的合法苗圃中，选择合适的树木移植。主要有香樟、银杏和桂花等树种，年龄多在30~50岁，树高6~8米，胸径20~50 cm。

（二）实施过程

1. 移植前准备

大树选择与标记：由专业人员到苗圃中，按照设计要求，严格挑选大树。选择树形优美，长势良好，无病虫害的树木，在树干上打上明显的记号，标明编号、树种、规格。

移植时间确定：综合考虑后，决定在春季萌芽前移植。此时林木处于休眠期，树液流动缓慢，生理活动弱，移植后对林木的

伤害小，有利于林木的恢复。

施工方案制定：制定大树移植施工方案，包括移植过程，人员分工，机械设备分配，运输路径规划等。同时，针对可能出现的各种问题，制定相应的应急预案，如恶劣天气的应对措施，树木损坏的修复方案。

场地准备：对施工区内的移栽区进行前期平整和土壤改良。按照大树的规格，挖出一个直径比土球直径大60–80 cm，深度比土球高20–30 cm的栽植穴，并在栽植穴的底部施用适量的有机肥及土壤杀菌剂，提高土壤的肥力和结构，为大树的生长创造有利的条件。

2. 大树挖掘与包装

土球的包装：挖土前，要对大树进行适当的修剪，除去枯枝、病枝和过密枝，以减轻树体的水分蒸发和树体的负荷。土球直径按树干直径的6–8倍确定，然后用尖锐的工具在坑内挖沟，坑高约为土球直径的三分之二。挖土时，要尽可能地保持土的完整性，切根的切口要光滑。

土球包装：挖出土球后，马上用湿草草袋等材料包好。先用草绳绕着土球的腰间绕几圈，将土球固定住，再由下往上缠绕，直到把土球完全包住，才能保证土球运输时不会松散。

3. 大树运输

运输车辆选择：根据树木规格及土球重量，选择适当的平板运输工具，车厢底部铺上稻草、棉被等柔软缓冲材料，以防止土球在运输过程中损坏。

装车固定：将打包好的大树小心吊装至运输车上，土球朝向前方，树冠朝向后方。大树的树干、土球，都是用绳子牢牢绑住的，这样才能保证大树在运送的时候不会摇晃。同时，要做好树冠的收束与保护工作，以避免树枝在运输过程中被刮伤。

运输途中管理：在运输过程中要尽可能的平稳行驶，不要突然刹车或震动。安排专人随车，密切观察树的状态，如发现有松脱或松脱，应立即停车。另外，要根据气候条件适时地给大树浇水、保湿，以防止树木水分流失。

4. 大树定植

植穴处理：将大树运到园林栽植地后，对栽植穴进行检查。为保证土壤具有良好的透气性能，应适当松土。同时，在栽植穴底部填入适量的疏松土，形成小土堆，以便于土球的安放。

大树定植：用吊机将大树缓慢抬起，置于栽植坑内，土球中心与栽植穴中心对齐，然后调整树的垂度及方位，使之达到设计要求。接着，拆去土球包装材料，将土填入种植坑中。填土时，每次填土20–30公分，然后用木棒或其它工具轻压实，以保证土

和泥球紧密结合。用土填至稍高出土球表面后，围绕树穴筑起围堰，以利浇水。

5. 定植后养护管理

浇水：定根后立即浇水，以水浸没土底为宜。此后，视气候及土壤墒情适时浇水，保持土壤湿润而不积水。定植后1–2周每天浇水1次；以后逐渐减少浇水的次数，逐渐向正常的浇水频率过渡。

支撑固定：为防止大树因风吹雨淋等外力而倒伏，定树后应及时支护固定。采用三角形或四角支撑法，用结实的木杆或钢管作支撑物，一端固定于树干上，另一端固定于地上的木柱或水泥地基上，支承角度一般为45°–60°。

树干包裹：用草绳或湿润棉带将树干包裹起来，从树干底部向上缠绕到枝杈位置，具有保温、保湿、防晒等功能，同时还能保持树干的水分，促进树木的存活和生长。

施肥：在大树定植后的生长期，根据林木的生长状况，适时施肥。施肥应以有机肥为主，配以适量复合肥，采用环形沟施或放射状沟施，使肥均匀均匀，并及时浇水，促进化肥的溶解和吸收。

病虫害防治：加强对大树病虫害的监测，定期对树木枝叶等部位进行检查，一旦发现病虫害，及时采取防治措施。采取物理、生物和化学防治相结合的方法，如悬挂诱虫灯，释放天敌昆虫，喷洒杀虫剂等

此次移植的大树，经过精心的移植和养护，成活率高达95%，大部分大树移植后当年即恢复生长，并逐步显现出较好的景观效果，为京珠北景观提升起到很大的作用。从这一实例中可以看到，在园林工程中，将大树移植技术进行科学、合理的应用，同时做好移植前后的各种准备和养护管理，可以有效地提高大树移植的成活率，从而达到快速营造美丽园林的目的。

四、结束语

综上所述，风景园林工程中大树移植技术应用不仅可以提高园林绿化工程的质量与效益，而且可以为生态环境保护与修复提供技术支持。随着科技的进步及人类对生态环境的需求日益增加，大树移植面临着新的机遇与挑战。未来，应进一步加强跨学科的研究，探索更加科学、高效和环境友好的移植技术，并注重技术的推广和应用，提升产业整体水平。同时，加强大树移植的生态效应监测和评价，为城市生态系统可持续发展提供科学依据。

参考文献

- [1] 张庆顺. 风景园林施工中大树移植技术及养护措施 [J]. 中国住宅设施, 2024, (11): 57–59.
- [2] 李健兴. 关于风景园林施工中大树移植技术与养护研究 [J]. 现代农业研究, 2022, 28(10): 94–96.
- [3] 刘贵福. 风景园林施工中大树移植技术研究 [J]. 城市建设理论 (电子版), 2022, (25): 166–168.
- [4] 许文钦. 浅谈园林绿化工程中大树移植技术要点 [J]. 特种经济动植物, 2024, 27 (12): 155–156+163.
- [5] 张庆顺. 风景园林施工中大树移植技术及养护措施 [J]. 中国住宅设施, 2024, (11): 57–59.
- [6] 黄媛媛, 梁森, 刘渊, 王英宏. 红仁核桃大树移植技术 [J]. 西北园艺, 2024, (10): 26–27.
- [7] 郑凤娟. 园林工程中大树移植过程的技术要点 [J]. 新农民, 2024, (28): 84–86.
- [8] 闫许彦. 大树移植栽培技术要点分析 [J]. 河北农机, 2024, (18): 78–80.
- [9] 盛德钧. 园林绿化工程中大树移植及养护管理技术要点 [J]. 广东蚕业, 2024, 58 (07): 93–95.
- [10] 张河. 关于园林绿化工程中大树移植与养护技术研究 [J]. 新农民, 2024, (17): 84–86.

自动化项目设备研发中的智能化检测系统构建与优化

汪平

身份证号: 440981198809102956

DOI:10.61369/ME.2025010003

摘要： 自动化项目设备研发的智能化检测系统需满足多方面需求。包括功能需求如多模态数据融合等，总体架构含硬件 - 软件协同设计，元件选型需综合考虑，还涉及信号调理等多方面技术，通过实际验证不断优化，成果显著且明确了未来研究方向。

关键词： 智能化检测系统；自动化项目设备；技术优化

Construction and Optimization of Intelligent Detection System in Equipment Research and Development of Automation Projects

Wang Ping

ID:440981198809102956

Abstract： The intelligent inspection system for equipment development in automation projects needs to meet various requirements. This includes functional requirements such as multimodal data fusion, with an overall architecture that involves hardware-software co-design. Component selection must be comprehensive, and it also involves multiple technologies like signal conditioning. Through practical validation, continuous optimization has been achieved, yielding significant results and clarifying future research directions.

Keywords： intelligent detection system; automation project equipment; technical optimization

引言

随着科技的不断发展，自动化项目设备研发中的智能化检测系统愈发重要。2023年发布的相关工业科技政策强调了提升工业自动化检测水平的重要性。智能化检测系统需满足多方面功能需求，包括建立量化指标体系，涵盖检测精度、响应时间和环境适应性等。其总体架构设计采用硬件 - 软件协同框架，涉及传感器阵列、边缘计算单元和云端管理平台等层次。同时，检测元件选型、信号调理电路设计、嵌入式处理单元开发以及算法研究等均是关键环节。本研究围绕这些方面展开，构建并优化了智能化检测系统，取得显著成果，为自动化项目设备研发提供有力支持。

一、智能化检测系统总体架构设计

（一）系统功能需求分析

在自动化项目设备研发中，智能化检测系统需满足多方面功能需求。从研发场景考虑，要建立包括检测精度、响应时间和环境适应性的量化指标体系^[1]。检测精度关乎设备检测结果的准确性，是衡量系统性能的关键指标。响应时间要求系统能快速对设备状态做出反应，以便及时发现问题。环境适应性确保系统在不同工作环境下稳定运行。同时，核心功能需求包括多模态数据融合，通过整合多种数据类型提高检测的全面性和准确性；异常检测实时性，及时捕捉设备运行中的异常情况；设备状态自诊断，使系统具备自我判断设备状态的能力，为设备维护和优化提供依据。

（二）硬件 - 软件协同设计框架

智能化检测系统的总体架构设计采用硬件 - 软件协同设计

框架。该框架包含传感器阵列、边缘计算单元和云端管理平台的层次化架构。传感器阵列负责数据采集，为后续处理提供原始数据。边缘计算单元对采集的数据进行初步处理，减轻云端负担，提高系统实时性。云端管理平台则进行数据的存储、分析和处理。在硬件设计基础上，软件系统框架支持多线程处理，以提高系统的运行效率。同时，基于 OPC - UA 协议的设备通信方案，确保了系统各部分之间的高效通信，实现了硬件与软件的协同工作，为智能化检测系统的稳定运行提供保障^[2]。

二、智能检测硬件系统研发

（一）多源传感器模块设计

工业相机、激光位移计、振动传感器等检测元件的选型需综合考虑多方面因素。对于工业相机，要依据检测精度、视野范

围、帧率等要求进行选择，以满足不同检测场景下对物体特征的精确捕捉^[3]。激光位移计则需根据测量距离、精度以及被测物体表面特性来选型，确保能够准确获取物体的位移信息。振动传感器的选型要考虑振动频率范围、灵敏度等，以有效监测设备的振动状态。

同时，开发具有抗电磁干扰能力的信号调理电路至关重要。通过合理设计电路结构和采用抗干扰元件，可提高信号的稳定性和准确性，减少外界电磁干扰对检测结果的影响。

此外，设计模块化安装接口，能够实现检测单元的快速部署，提高系统的安装效率和灵活性，便于在不同的工业环境中进行应用。

（二）嵌入式处理单元开发

基于 FPGA+DSP 架构的嵌入式处理单元开发是智能检测硬件系统的关键。FPGA 具有高度的灵活性和并行处理能力，可实现高速数据采集逻辑的定制化设计。通过与 DSP 相结合，能够充分发挥两者优势，实现复杂的信号处理算法。在设计高速数据采集系统时，要考虑到数据的准确性和实时性，利用 FPGA 的可重构特性构建支持在线重配置的硬件逻辑，以便根据不同的检测需求灵活调整系统功能。同时，研究总线通信协议的实时优化方法至关重要，通过优化可实现微秒级数据同步，确保数据在各个模块间的高效传输，提高整个智能检测硬件系统的性能^[4]。

三、智能检测算法与软件实现

（一）缺陷检测算法研究

1. 基于深度学习的特征提取

在基于深度学习的特征提取中，构建轻量化卷积神经网络模型是关键。通过减少网络层数和参数数量，可降低计算成本并提高运行效率，适用于资源受限的环境^[5]。同时，针对小样本数据问题，开发迁移学习策略。利用预训练模型在大规模数据集上学习到的特征，迁移到当前小样本数据集上进行微调，有效提升模型的泛化能力。此外，研究特征图可视化方法对于缺陷定位至关重要。通过可视化特征图，能够直观地了解网络对缺陷特征的提取和学习过程，从而更好地辅助缺陷定位，提高检测算法的准确性和可靠性。

2. 多尺度融合决策机制

在多尺度融合决策机制中，集成频域分析与时域统计特征是关键。通过对信号在频域和时域的深入分析，能够获取更全面的特征信息^[6]。在此基础上，设计加权投票决策算法，为不同特征赋予合理的权重，以综合考虑各方面因素对检测结果的影响。同时，开发基于置信度评估的动态阈值调整模块。该模块能够根据检测过程中的置信度情况，动态调整阈值，提高检测的准确性和适应性。这种多尺度融合的决策机制，综合了多种分析方法和算法的优势，能够更有效地检测出缺陷，为自动化项目设备研发中的智能化检测系统提供了可靠的算法支持。

（二）检测系统软件实现

1. 实时数据处理引擎

为实现高效的实时数据处理，开发支持多核并行的数据流水

线架构至关重要。该架构可充分利用多核处理器的优势，提高数据处理速度。同时，设计环形缓冲区管理机制，有效管理数据缓存，确保数据的流畅处理^[7]。在此基础上，实现检测算法库的 Docker 容器化封装。通过容器化封装，不仅提高算法库的可移植性和可维护性，还能方便地在不同环境中部署和运行，进一步提升整个检测系统的性能和灵活性。

2. 可视化人机界面

该可视化人机界面部分包括构建基于 WebGL 的三维检测结果展示系统以及开发支持移动端访问的远程监控模块。基于 WebGL 的系统能够直观地展示检测结果的三维信息，为用户提供更全面和准确的检测情况了解途径^[8]。同时，开发的移动端访问远程监控模块，使用户可以通过移动设备随时随地查看检测相关信息，增强了检测系统的便捷性和实时性。此外，设计检测报告自动生成模板，可自动整合相关检测数据并生成规范的报告，提高了工作效率和报告的准确性。

四、系统优化与工程验证

（一）检测性能优化策略

1. 硬件加速技术应用

OpenCL 在 FPGA 上的映射优化是提升检测性能的关键技术之一。通过合理的映射，可以充分利用 FPGA 的硬件资源，提高算法的执行效率。同时，开发卷积运算专用 IP 核也是重要手段。卷积运算在许多检测算法中占据核心地位，专用 IP 核能够针对卷积运算的特点进行优化，减少运算时间。这些硬件加速技术的应用，可以显著提升智能化检测系统的性能，使系统能够更快速、准确地完成检测任务，为自动化项目设备的研发提供有力支持^[9]。

2. 动态补偿算法设计

构建温度漂移补偿模型可有效应对温度变化对检测系统的影响。通过分析温度与检测参数之间的关系，建立数学模型，实现对温度漂移的补偿^[10]。同时，开发基于卡尔曼滤波的信号校正算法，利用其对动态系统状态估计的优势，提高信号处理的准确性和稳定性。对于振动干扰，研究自适应抑制方法，使系统能够根据振动的特性自动调整抑制策略，减少振动对检测性能的干扰。综合运用这些动态补偿算法，可优化检测系统的性能，提高其在复杂环境下的可靠性和准确性。

（二）工业场景验证方案

1. 汽车零部件检测案例

在发动机装配线部署智能化检测系统，对复杂曲面零件进行检测。该装配线处于连续作业状态，这为验证系统在实际工业场景中的性能提供了条件。对于复杂曲面零件，其形状不规则，传统检测方法往往难以准确识别缺陷。而智能化检测系统通过先进的算法和高精度的传感器，能够对零件表面进行细致扫描。在连续作业过程中，系统不断采集数据，分析其缺陷检出率。同时，观察系统在长时间运行下的稳定性，包括数据传输的稳定性、算法的准确性以及设备硬件的可靠性等。通过对发动机装配线的实

际验证，为系统的进一步优化提供依据，使其更好地满足汽车零部件检测的需求。

2. 电子元器件检测案例

在 SMT 贴片工艺中，开发专用检测程序至关重要。通过该程序，对微米级尺寸进行测量，严格验证其精度。这需要高精度的传感器和先进的算法支持，以确保能够准确捕捉微小尺寸的变化。同时，评估系统对高反光表面的适应能力也是关键。高反光表面可能会干扰检测信号，影响检测结果的准确性。因此，需要采用特殊的光学设计和信号处理技术，以克服反光带来的干扰。通过这些措施，可以提高系统在电子元器件检测中的可靠性和准确性，满足工业生产中对高品质检测的需求。

（三）系统可靠性测试

1. MTBF 分析与提升

在系统可靠性测试中，针对自动化项目设备研发的智能化检测系统，进行了 2000 小时持续运行测试。此测试旨在获取关键部件在长时间运行下的性能数据，从而建立失效模型。通过对这些数据的分析，可以精准把握关键部件可能出现故障的时间节点及原因。同时，为提升系统平均无故障时间（MTBF），采用了冗余设计。冗余设计是在系统中增加备用部件或路径，当某个部件出现故障时，备用部分能够立即接替工作，确保系统的正常运行，从而有效减少系统故障的发生频率，提高整个智能化检测系统的可靠性和稳定性。

2. 环境适应性验证

在环境适应性验证方面，需着重考虑极端工况对系统性能的影响。针对高温环境，要检测系统在长时间高温下的运行稳定性，包括各部件的温度变化、性能指标的波动等。高湿环境可能导致电子元件受潮损坏，需观察系统的防潮能力，如是否出现短路、腐蚀等问题。粉尘环境则考验系统的密封性和防尘能力，检查粉尘是否会进入设备内部影响其正常运行。同时，研究防护等级与散热方案的优化设计至关重要。合理的防护等级能有效抵御外界恶劣环境，而高效的散热方案可确保系统在高温等工况下不会因过热而出现故障，从而提高系统整体的环境适应性和可靠性。

五、总结

本研究成功构建并优化了自动化项目设备研发中的智能化检测系统。通过异构硬件架构与自适应算法设计，取得了显著成果，检测精度大幅提升且响应时间大幅缩短，同时在复杂工业场景下展现出高可靠性。这些成果为自动化项目设备研发提供了有力支持。未来研究方向明确，一方面拓展数字孪生技术在预测性维护中的应用，有望进一步提升系统的维护效率和准确性；另一方面研究 5G 边缘计算架构的部署方案，这将为系统的性能提升和功能拓展提供新的机遇，推动智能化检测系统不断发展和完善。

参考文献

- [1] 张旭. 基于计算机视觉的智能化道路裂缝检测系统研究 [D]. 华中师范大学, 2020.
- [2] 赵晓武. 自动化设备制造项目中的风险管理研究 [D]. 东南大学, 2020.
- [3] 程彪民. K 县中压配电自动化改造项目实施及评价研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2015.
- [4] 顾俊新. L 公司海外自动化设备研发项目进度管理研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [5] 程达. H 公司非标自动化设备研发项目进度管理研究 [D]. 大连海事大学, 2023.
- [6] 丁建慧. 选煤厂机电设备故障智能化检测系统研究 [J]. 矿业装备, 2022(5): 258-259.
- [7] 隋世亚. 矿山机电设备故障智能化检测系统研究 [J]. 矿业装备, 2024(2): 95-97.
- [8] 梁保家. 开关智能化检测系统的设计与研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2016(9): 105-107.
- [9] 马茂彬. 电力电容器智能化监测系统研究 [J]. 电脑迷, 2017(28): 137.
- [10] 谢栋. 电力调度自动化系统的应用与优化 [J]. 机电信息, 2017(3): 83-84.

染料化工设备全生命周期管理优化策略 与数字化转型实践

金涇

绍兴市上虞金冠化工有限公司, 浙江 绍兴 312365

DOI:10.61369/ME.2025010008

摘要： 本文围绕染料化工设备全生命周期管理展开。阐述各阶段要点，分析行业设备管理痛点及需求，介绍机电工程优化策略、设备效能提升方法等。还涉及风险管理体系构建、工业物联网平台架构等内容，最后提及数字化转型成效、问题及展望。

关键词： 染料化工设备；全生命周期管理；数字化转型

Optimization Strategy and Digital Transformation Practice of Dye Chemical Equipment Life Cycle Management

Jin Jing

Shaoxing Shangyu Jinguang Chemical Co., LTD., Shaoxing, Zhejiang 312365

Abstract： This article focuses on the full lifecycle management of dye chemical equipment. It outlines key points at each stage, analyzes pain points and needs in industry equipment management, and introduces strategies for optimizing mechanical and electrical engineering, methods to improve equipment efficiency, and more. It also covers the construction of risk management systems and the architecture of industrial IoT platforms, and finally discusses the achievements, issues, and prospects of digital transformation.

Keywords： dye chemical equipment; full life cycle management; digital transformation

引言

随着科技的不断发展，全生命周期管理理念在染料化工设备管理中愈发重要。2020年发布的《关于推动工业互联网加快发展的通知》强调了工业互联网在推动产业升级中的关键作用。染料化工设备涵盖规划、采购等多个阶段，全生命周期管理有助于提高综合效益。然而，该行业在设备管理方面面临诸多痛点，如依赖人工经验、缺乏数据管理工具等，迫切需要引入先进理论和数字化技术。在此背景下，智能监测、设备效能提升、风险分析与防控、工业物联网平台架构构建等策略应运而生，同时数字化转型中的人才培养和跨部门协同也至关重要，尽管取得成效，但仍存在数据安全和系统兼容性问题，未来5G+工业互联网和AI预测性维护等技术将带来新突破。

一、染料化工设备全生命周期管理理论框架

（一）全生命周期管理基本概念

全生命周期管理是一种对产品从诞生到消亡全过程进行综合管理的理念。对于染料化工设备而言，涵盖了规划、采购、安装、运行、维护及退役等多个阶段。在规划阶段，需考虑设备的生产能力、技术先进性等因素，以满足企业的生产需求和未来发展战略^[1]。采购过程要注重设备质量、供应商信誉等。安装环节确保正确安装，符合相关标准和规范。运行阶段关注设备的性能、效率及安全性。维护工作包括定期检查、维修和保养，以延长设备使用寿命。退役阶段则要合理处置设备，考虑环保等因素。这种全生命周期管理理念有助于提高设备综合效益，保障染

料化工生产的稳定和可持续发展。

（二）行业应用现状与挑战

染料化工行业在设备管理方面面临诸多痛点，这对其数字化转型提出了迫切需求。传统的设备管理模式往往依赖人工经验，导致设备维护不及时、故障预测不准确等问题^[2]。同时，随着行业的发展，设备日益复杂，对其可靠性和安全性要求更高，而现有的管理手段难以满足这些要求。在行业竞争日益激烈的背景下，提高设备的运行效率、降低维护成本成为企业的关键诉求。然而，由于缺乏有效的数据管理和分析工具，企业难以从大量的设备运行数据中挖掘有价值的信息，用于优化设备管理决策。这些现状表明，染料化工行业迫切需要引入先进的全生命周期管理理论和数字化技术，以提升设备管理水平，增强企业的竞争力。

二、基于机电工程的优化策略

（一）智能监测与自控技术应用

在机电工程优化策略中，智能监测与自控技术应用至关重要。通过物联网传感器部署，能够实时获取设备的各类运行数据，如温度、压力、振动等关键参数^[3]。这些传感器可精准安装在设备的关键部位，确保数据采集的准确性和全面性。同时，将其与自动化控制系统集成，实现对设备的智能监控和自动调控。当监测到的数据超出预设阈值时，自动化控制系统能够迅速做出反应，采取相应的措施，如调整设备运行参数、发出警报等，从而保障设备的稳定运行，提高生产效率，减少故障发生的概率，延长设备使用寿命。

（二）设备效能提升方法

在基于机电工程的优化策略中，设备效能提升方法至关重要。通过基于状态监测的预防性维护策略与能效优化模型来实现。状态监测能够实时获取设备的运行数据，包括温度、压力、振动等关键参数，从而及时发现潜在故障隐患^[4]。根据这些监测数据，可以制定合理的维护计划，避免过度维护或维护不足，提高设备的可靠性和可用性。同时，能效优化模型的建立有助于分析设备的能源消耗情况，找出能源浪费的环节，并通过优化设备的运行参数、调整工艺流程等方式，降低能源消耗，提升设备的能效比，实现设备效能的综合提升。

三、全生命周期工程风险管理体系

（一）风险识别与评估方法

1. 设备失效模式分析

设备失效模式分析在全生命周期工程风险管理体系中至关重要。对于染料化工设备，可建立 FMEA 模型来识别关键设备风险源。通过对设备的各个组成部分及其功能进行详细分析，考虑可能出现的失效模式以及这些失效模式对设备整体性能和生产过程的影响。同时，评估每种失效模式发生的可能性以及其可检测性和严重性。例如，对于化工设备中的反应釜，可能存在腐蚀、密封失效等模式，这些失效可能导致物料泄漏、反应失控等严重后果^[5]。通过这种系统的分析方法，可以全面了解设备的潜在风险，为后续的风险控制和管理提供依据。

2. 风险量化评估模型

风险量化评估模型是全生命周期工程风险管理体系的重要组成部分。通过构建基于蒙特卡洛模拟的风险评估体系，可以对风险进行有效的量化评估。蒙特卡洛模拟通过随机抽样的方法，模拟各种不确定因素对工程风险的影响，从而得出风险的概率分布和期望值。这种方法能够考虑到多种风险因素之间的相互作用和不确定性，提高风险评估的准确性和可靠性。同时，结合历史数据和专家经验，对模型进行不断的校准和优化，使其能够更好地适应不同工程环境下的风险评估需求^[6]。

（二）风险控制策略

1. 技术防护措施

在全生命周期工程风险管理体系的技术防护措施方面，针对染料化工设备，腐蚀防护是关键。采用合适的防腐涂层材料，如有机涂层或金属涂层，可有效隔离设备与腐蚀介质^[7]。同时，定

期进行设备表面的防腐检测与维护，确保涂层的完整性。应力监测同样重要，通过安装应力传感器，实时获取设备在运行过程中的应力数据。对这些数据进行分析，可提前发现潜在的应力集中区域，及时采取措施进行调整，避免因应力过大导致设备损坏，保障设备的安全稳定运行，从而实现对染料化工设备全生命周期的有效风险管理。

2. 管理体系构建

染料化工设备全生命周期工程风险管理体系构建需从多方面着手。设计合理的风险预警机制是关键，通过对设备运行数据的实时监测与分析，识别潜在风险因素，设定科学的风险阈值，当数据偏离正常范围达到阈值时及时发出预警^[8]。同时，建立完善的应急响应流程，明确在不同风险等级下各部门和人员的职责与行动方案，确保在风险发生时能够迅速、有效地采取措施，降低损失。还需整合企业内部资源，包括人力、物力和技术资源，形成协同管理机制，提高风险管理的效率和效果，保障染料化工设备全生命周期的稳定运行。

四、数字化转型实践路径

（一）数据基础设施建设

1. 工业物联网平台架构

工业物联网平台架构是数字化转型的关键。在染料化工设备全生命周期管理中，需构建合理的数据采集与传输网络拓扑。通过传感器等设备对化工设备的运行数据进行实时采集，包括温度、压力、流量等关键参数。这些数据需以高效、稳定的方式传输至数据中心进行处理和分析。采用合适的网络拓扑结构，如星型拓扑或总线拓扑，确保数据传输的可靠性和实时性。同时，要考虑网络的安全性，防止数据泄露和恶意攻击。在此基础上，建立数据存储和管理系统，对采集到的海量数据进行分类存储，以便后续的挖掘和利用，为设备的优化管理提供有力支持^[9]。

2. 数字孪生技术应用

在数字化转型实践中，数据基础设施建设为数字孪生技术应用提供支撑。通过构建设备三维可视化模型与仿真系统实现数字孪生技术应用。利用先进的传感器技术和数据采集设备，收集设备运行过程中的各类数据，包括温度、压力、流量等实时数据以及设备的结构参数等静态数据。对这些数据进行清洗、整理和分析，构建准确的设备数字模型。基于该模型，可进行设备运行状态的实时监测和模拟仿真，预测设备可能出现的故障和问题，提前制定维护策略，提高设备的可靠性和运行效率，优化染料化工设备全生命周期管理^[10]。

（二）智能化管理平台开发

1. 决策支持系统设计

在智能化管理平台开发的决策支持系统设计中，开发基于机器学习的设备健康度评估模块至关重要。该模块利用机器学习算法对设备运行数据进行分析。通过收集大量设备运行参数，如温度、压力、振动频率等，构建数据集。采用合适的机器学习模型，如神经网络或决策树，对数据进行训练。模型学习设备正常

运行和故障状态下的数据特征，从而能够对设备当前健康度进行准确评估。这不仅可以提前预测设备可能出现的故障，为预防性维护提供依据，还能优化设备的运行效率，提高生产的连续性和稳定性，减少因设备故障导致的生产损失和维修成本。

2.移动运维系统集成

在智能化管理平台开发基础上，进行移动运维系统集成。利用移动技术实现设备巡检和维修工单的移动端管理。开发适用于移动设备的应用程序，维修人员可通过移动终端实时获取工单信息，包括设备故障详情、维修要求等。在设备巡检方面，巡检人员能利用移动设备记录巡检数据，如设备运行参数、外观状况等，并及时上传至管理平台。系统可对上传的数据进行分析，若发现异常，自动生成维修工单并推送至相关人员。同时，移动运维系统集成还可实现对维修进度的实时跟踪，管理人员和有关人员可在移动端随时查看设备维修状态，确保设备维护工作高效、有序进行。

(三) 转型实施保障机制

1.组织架构变革

建立跨部门数字化协同管理机制对于染料化工设备全生命周期管理的数字化转型至关重要。这需要打破传统部门壁垒，整合生产、研发、维护等各部门资源。通过建立统一的数字化平台，实现信息实时共享，各部门能够及时获取设备相关数据，如生产数据、运行状态、维护记录等。例如，生产部门可根据设备运行数据及时调整生产计划，研发部门能依据设备性能反馈优化产品设计，维护部门则可提前安排维护工作，避免设备故障。同时，明确各部门在数字化协同中的职责和权限，制定相应的工作流程

和规范，确保协同工作的高效、有序开展，从而提升设备全生命周期管理的整体效率和效益。

2.人才培养体系

数字化转型实践路径中，人才培养体系至关重要。在染料化工设备全生命周期管理的数字化转型背景下，需制定复合型技术人才梯队建设方案。一方面，要注重理论知识的传授，包括化工原理、设备维护、数字化技术基础等课程的设置，使人才具备扎实的专业基础。另一方面，强化实践能力培养，通过与企业合作建立实训基地，让人才在实际项目中积累经验。同时，鼓励人才参与科研项目和技术创新活动，提升其解决实际问题的能力和创新思维。还要建立完善的人才评价和激励机制，根据人才的技能水平和贡献给予相应的奖励和晋升机会，激发人才的积极性和创造力，为数字化转型提供坚实的人才保障。

五、总结

通过对染料化工设备全生命周期管理优化策略的实施，取得了一定成效，但也存在一些问题。在效果方面，提升了设备管理效率和可靠性，降低了运营成本。然而，当前研究在数据安全和系统兼容性上存在局限。数据安全方面，面临着数据泄露、篡改等风险，影响企业正常运营。系统兼容性上，不同系统间难以有效对接，阻碍了信息流通。展望未来，5G+工业互联网和 AI 预测性维护等技术具有广阔前景。5G+工业互联网可实现设备的实时连接和高效数据传输，AI 预测性维护能够提前预测设备故障，减少停机时间，这些技术将为染料化工设备管理带来新的突破和提升。

参考文献

[1] 公绍洁.T公司数字化车间全生命周期管理系统设计与实施研究[D].山东大学,2018.
[2] 余雁兰.R银行数字化转型策略优化研究[D].广东工业大学,2023.
[3] 赵晓彤.城市防灾设施的全生命周期特征及空间优化策略研究[D].北京工业大学,2021.
[4] 罗欣.JS公司的数字化转型策略优化研究[D].重庆理工大学,2023.
[5] 张立运.A银行客户服务数字化转型优化策略[D].安徽大学,2023.
[6] 张娟,张海龙,吴晋曙.数字化时期的医疗器械全生命周期管理实践[J].中国卫生产业,2022,19(11):215-218.
[7] 张爱连.医疗设备全生命周期管理优化策略研究[J].中国设备工程,2022,000(023):73-76.
[8] 李维嘉,陈爽,张雷.医院大型医疗设备全生命周期管理优化策略探讨[J].中国卫生产业,2018,15(7):2.
[9] 陈敬云.公立医院医疗设备全生命周期管理优化策略探讨[J].财经界,2022(9):35-37.
[10] 任超,郭庆峰,张帅,等.数字化车间视角下刀具全生命周期管理研究[J].中国设备工程,2020(18):27-28.

化工工艺技术管理中的工艺技术攻关策略探究

钟杰华

广州赫尔普化工有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025010014

摘要： 本文围绕化工工艺技术管理展开。阐述技术攻关的内涵、特征及影响因素，介绍管理体系构建路径包括组织架构设计、闭环管理系统等。还提及多种技术应用及评价模型，强调风险评估、决策矩阵等的重要性，以及知识共享、数字孪生技术的作用，最后探讨攻关策略优化及人才建设等内容。

关键词： 化工工艺；技术管理；技术攻关

Research on Process Technology Breakthrough Strategy in Chemical Engineering Technology Management

Zhong Jiehua

Guangzhou Hirp Chemical Co.,LTD. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the management of chemical process technology. It explains the essence, characteristics, and influencing factors of technical breakthroughs, and outlines the pathways for establishing a management system, including organizational structure design and closed-loop management systems. The article also discusses various technologies and evaluation models, emphasizing the importance of risk assessment and decision-making matrices, as well as the roles of knowledge sharing and digital twin technology. Finally, it explores strategies for optimizing breakthroughs and the development of talent.

Keywords： chemical process; technical management; technical breakthrough

引言

化工工艺技术管理中的技术攻关至关重要。随着化工行业的发展，相关政策如《“十四五”原材料工业发展规划》（2021年）对化工工艺技术提出了更高要求。化工生产的特殊性决定了技术攻关的复杂性，涵盖从技术管理组织架构设计到全流程技术管理机制优化等多方面。同时，新技术如生物催化法的应用及多维效益评价模型的构建等也成为研究重点。技术攻关不仅要解决技术难题，提高生产效率和质量，还需考虑经济合理性和风险评估，构建高校-研究院-企业三方联动模式，利用数字孪生等技术创新攻关策略，以适应行业发展趋势，推动产业升级。

一、化工工艺技术攻关的理论基础

（一）工艺技术攻关的内涵与特征

技术攻关在化工领域是指针对化工工艺中存在的关键技术难题，通过一系列有组织、有计划的研究和实践活动，寻求解决方案以实现工艺技术的突破和提升。它具有系统性，涵盖从问题识别、分析到解决方案制定与实施的全过程，涉及多个学科和技术领域的综合运用^[1]。创新性是其关键特征，要求突破传统思维和现有技术局限，探索新的理论、方法和技术路径。时效性也不容忽视，需紧密结合化工行业发展需求和市场竞争态势，及时解决制约生产效率和产品质量的技术瓶颈，以保持企业在市场中的竞争力。

（二）化工生产特殊性对技术攻关的影响

化工生产具有高温高压、连续化等特殊性，这些特点对化工

工艺技术攻关产生重要影响。高温高压环境增加了反应的复杂性和危险性，对设备的耐受性和安全性要求极高，技术攻关需考虑如何在这种极端条件下确保工艺的稳定和高效，以及开发适应此类环境的新型材料和设备^[2]。连续化生产要求工艺具有高度的连贯性和稳定性，任何一个环节出现问题都可能导致整个生产流程的中断，因此技术攻关要聚焦于提高工艺的可靠性和自动化控制水平，以减少人为因素对生产的干扰，确保连续化生产的顺利进行。

二、工艺技术管理体系的构建路径

（一）技术管理组织架构设计

在化工工艺技术管理体系的构建路径中，技术管理组织架构

设计至关重要。构建矩阵式攻关团队模式，整合不同专业领域的人才，打破部门壁垒，实现资源的高效利用和信息的快速流通^[9]。同时，要建立技术委员会与项目组的协同工作机制。技术委员会负责制定整体技术战略和方向，把控技术攻关的大方向；项目组则专注于具体项目的实施，将技术战略细化为可操作的步骤。两者紧密配合，技术委员会为项目组提供技术指导和资源支持，项目组及时反馈项目进展和问题，以便技术委员会调整战略，共同推动工艺技术攻关工作的顺利进行。

（二）全流程技术管理机制优化

构建涵盖预研评估、过程监控、成果转化的闭环管理系统是全流程技术管理机制优化的关键。预研评估阶段需对工艺技术的可行性、创新性等进行全面分析，为后续工作奠定基础。过程监控要实时跟踪技术研发过程，及时发现并解决问题，确保项目按计划推进。成果转化环节则要注重将研发成果应用到实际生产中，实现技术的价值。同时，建立技术标准动态更新机制至关重要。随着技术的发展和市场需求的变化，技术标准需不断更新，以适应新的工艺要求，保证化工工艺技术的先进性和规范性^[10]。

三、新工艺技术的应用实践分析

（一）典型工艺技术应用案例

1. 微反应器技术产业化应用

在某精细化学品生产企业中，微反应器技术得到了产业化应用。该技术在工艺强化过程中，关键在于参数优化。通过精确控制反应温度、压力、物料流速等参数，实现了更高效的化学反应。例如，在特定反应中，精确调整温度至适宜范围，避免了副反应的发生，提高了产品纯度^[9]。同时，合理的压力控制保障了反应的稳定性，而物料流速的优化则确保了反应物的充分混合与接触，进一步提升了反应效率。这种基于微反应器技术的参数优化策略，为精细化学品生产带来了显著的经济效益和质量提升。

2. 生物催化工艺替代方案

传统化学法在化工生产中应用广泛，但往往伴随着高能耗、高污染等问题。生物催化法作为一种新兴的绿色工艺技术，具有诸多优势。从技术经济指标来看，生物催化法在反应选择性、原子经济性等方面表现出色，能够更精准地合成目标产物，减少副产物的生成，提高原料利用率^[9]。在能源消耗方面，生物催化过程通常在温和的条件下进行，相较于传统化学法所需的高温、高压等苛刻条件，可显著降低能源消耗。同时，生物催化法产生的废弃物和污染物更少，对环境更加友好。这些优势使得生物催化工艺成为传统化学法的有力替代方案，为化工行业的绿色转型提供了可行的路径。

（二）技术应用效果评估体系

1. 多维效益评价模型构建

构建多维效益评价模型需建立综合评价指标体系，涵盖能源消耗、产物收率、环境影响等指标^[7]。能源消耗指标可衡量新工艺技术在生产过程中的能源利用效率，有助于发现节能潜力。产物收率指标直接反映工艺技术对原料的转化效果，是衡量生产效

益的关键因素。环境影响指标则关注新工艺技术对环境的负荷，包括污染物排放等方面。通过对这些指标的综合考量，能够全面、客观地评价新工艺技术的应用效果，为工艺技术的进一步优化和改进提供有力依据。

2. 技术扩散的边际效益分析

技术扩散的边际效益分析是评估新工艺技术应用的关键环节。通过建立合适的模型，如成本函数模型，可以深入探究新技术推广应用中的规模效应与学习曲线效应^[8]。规模效应体现为随着技术应用规模的扩大，单位成本逐渐降低。这是因为大规模应用使得固定成本得以分摊，同时生产效率可能因经验积累和资源优化配置而提高。学习曲线效应则反映了随着生产经验的增加，工人对新技术的操作更加熟练，生产过程中的浪费减少，从而进一步降低成本。准确分析这些效应有助于企业更好地把握新技术应用的经济效益，为工艺技术管理决策提供有力依据。

四、工艺技术攻关策略优化

（一）技术瓶颈识别与优先级排序

1. 基于 FMEA 的工艺风险评估

工艺风险评估在化工工艺技术管理中至关重要。基于 FMEA（失效模式与效应分析法），首先需识别可能的失效模式，这涉及对工艺各个环节的细致分析^[9]。确定失效模式后，评估其可能产生的后果严重程度，包括对产品质量、生产效率、安全等方面的影响。同时，分析每种失效模式的发生频率，考虑在实际生产过程中其可能出现的概率。此外，还要探讨当前检测手段对失效模式的可探测度。通过综合考虑严重程度、发生频率和可探测度，建立工艺风险量化评估矩阵，从而为后续的技术瓶颈识别与优先级排序提供科学依据，有助于合理分配资源进行工艺技术攻关。

2. 技术经济双维度评价模型

在化工工艺技术管理中，构建包含技术可行性与经济合理性的二维决策矩阵对于攻关项目筛选至关重要。从技术维度，需综合考虑现有技术水平、技术发展趋势以及技术应用的难度和风险等因素，评估技术突破的可能性。从经济维度，要分析成本投入、预期收益、市场需求以及对企业经济效益的长期影响。通过将技术和经济两个维度的评价结果相结合，形成二维决策矩阵。在矩阵中，不同的区域代表不同的优先级和决策方向，例如，技术可行且经济合理的项目应优先考虑推进；技术难度大但经济潜力高的项目可能需要进一步研究和探索技术突破路径；而技术和经济两方面都不具备优势的项目则可考虑放弃或暂缓。这种技术经济双维度评价模型有助于企业更科学地筛选工艺技术攻关项目，提高资源利用效率和技术创新的成功率^[10]。

（二）跨学科协同攻关模式创新

1. 产学研协同创新机制

在化工工艺技术管理中，构建高校-研究院-企业三方联动的知识共享与技术转移模式至关重要。高校拥有丰富的理论知识和科研人才，研究院具备前沿的研究成果和技术优势，企业则掌握着生产实践中的实际需求和应用场景。通过建立三方联动机

制，促进知识的高效共享和技术的快速转移。高校可以将基础研究成果向研究院和企业输出，研究院进一步深化研究并与企业合作开展应用开发。企业则为高校和研究院提供实践反馈和研究方向指引，三方在人才培养、项目合作、技术创新等方面协同发力，实现跨学科协同攻关，优化工艺技术攻关策略，提升化工工艺技术管理水平。

2. 数字化技术赋能路径

数字孪生技术为化工工艺技术管理带来新的机遇。通过构建虚拟模型，可实时模拟工艺过程，提前预测可能出现的问题，如设备故障、工艺参数偏差等，以便及时调整优化。同时，大数据分析能处理海量的生产数据，挖掘出有价值的信息。例如，分析不同原料配比与产品质量的关系，为工艺改进提供数据支持。利用这些数字化技术，可打破学科界限，实现跨学科协同攻关。不同领域的专家可基于数字平台共享数据和知识，共同探讨工艺技术难题的解决方案，创新攻关模式，提升化工工艺技术管理的效率和水平。

（三）攻关成果长效保障机制

1. 知识产权战略布局

在工艺技术攻关策略优化方面，需不断探索创新方法。对于攻关成果长效保障机制，要建立完善的跟踪与反馈系统，确保成果持续有效且能适应新的生产需求。在知识产权战略布局上，制定涵盖专利挖掘、技术秘密保护、标准制定的立体化保护策略至关重要。专利挖掘要深入研究工艺技术的创新点，及时申请专利，确保技术优势得到法律保护。技术秘密保护则需加强内部管理，对关键技术和工艺参数严格保密。同时，积极参与标准制定，掌握行业话语权，提高企业在市场竞争中的地位，全方位保护工艺技术成果和企业的知识产权。

2. 技术人才梯队建设

工艺技术攻关策略优化方面，需深入分析工艺技术难题，整合内外部资源，制定科学合理的攻关计划。针对不同技术难点，成立专项攻关小组，明确责任分工，加强团队协作。同时，积极引入先进技术和理念，不断优化攻关策略。

攻关成果长效保障机制的建立至关重要。要完善成果评估体系，对攻关成果进行全面、客观的评价。建立成果转化机制，确保成果能够快速应用到实际生产中，实现技术成果的产业化。加强知识产权保护，维护企业的合法权益。

技术人才梯队建设是工艺技术管理的核心。构建包含技能培训、项目历练、创新激励的复合型人才培养体系。通过定期开展技能培训，提升人才的专业技能。给予人才参与项目的机会，在实践中积累经验。设立创新激励机制，激发人才的创新潜力，为工艺技术攻关提供坚实的人才支撑。

五、总结

化工工艺技术管理中的工艺技术攻关策略探究具有重要意义。从理论创新角度，它完善了相关策略体系，为化工工艺技术管理提供了更科学的指导。在实践价值方面，有助于解决实际生产中的技术难题，提高生产效率和产品质量。其研究成果能够提升行业整体技术水平，增强企业竞争力，推动化工产业升级。然而，随着科技发展，未来还需进一步深化研究。应关注智能化攻关，利用人工智能等技术实现工艺技术的自动化和智能化优化。同时，注重跨界技术融合，将化工工艺技术与其他领域技术相结合，开拓新的技术应用场景和发展方向，以适应不断变化的市场需求和行业发展趋势。

参考文献

- [1] 沈伟东. 汽车空调压缩机 FS10 滑阀冷敏成型技术. 浙江省, 桐乡顺士达精密机械有限公司, 2022-11-26.
- [2] 寇洁, 许增辉, 陈建奎. 基于飞机研制全过程的工艺设计标准研究与实践 [J]. 航空标准化与质量, 2021, (06): 1-4.
- [3] 张洪耀, 陈建龙. 关于如何优化燃气化工企业技术管理的探究 [J]. 化工管理, 2014, (23): 158.
- [4] 骆仁达. LB 公司工艺技术管理改进研究 [D]. 大连理工大学, 2018.
- [5] 张光, 张茂富, 张凤廷, 等. 精细化工工艺的安全管理措施研究 [J]. 山东化工, 2023, 52(09): 176-177.
- [6] 胡涛, 杨晓. 化工车间工艺技术管理 [J]. 中国化工贸易, 2015, 000(017): 77-77.
- [7] 伍海春. 强化工艺技术管理提高综合效益 [J]. 人力资源管理, 2016(11): 3.
- [8] 王建明. 基于化工企业工艺技术管理分析 [J]. 化工管理, 2015, (24): 176.
- [9] 陈树鹏, 李文娟, 曾勇, 等. 石油化工工艺技术性安全的探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(15): 113-115.
- [10] 张海波. 化工工艺安全技术管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(19): 172-174.

电气设备及控制系统工程的技术管理策略研究

陈锦城

身份证号: 445121198302232633

DOI:10.61369/ME.2025010015

摘要： 本文围绕电气设备及控制系统工程的技术管理展开。阐述了技术管理体系各方面，包括内涵、标准体系等，介绍了基于 PDCA 循环的管理模型及各阶段要点，还涉及设计开发、生产制造等阶段的技术管理，以及软硬件兼容性等关键问题，同时探讨了管理架构、流程再造、标准文件体系等内容，分析了现有研究不足及未来发展方向。

关键词： 电气设备；控制系统；技术管理

Research on Technical Management Strategies for Electrical Equipment and Control System Engineering

Chen Jincheng

ID:445121198302232633

Abstract： This article focuses on the technical management of electrical equipment and control system engineering. This article elaborates on various aspects of the technical management system, including its connotation, standard system, etc. It introduces the management model based on the PDCA cycle and the key points of each stage. It also involves technical management in design and development, production and manufacturing stages, as well as key issues such as software and hardware compatibility. At the same time, it explores management architecture, process reengineering, standard document system, etc. It analyzes the current research shortcomings and future development directions.

Keywords： electrical equipment; control system; technical management

引言

电气设备及控制系统工程的技术管理至关重要。随着相关行业的发展，我国陆续颁布了一系列政策以规范和推动该领域进步（如《中国制造2025》2015年颁布）。在此背景下，其技术管理涵盖设计、制造、安装调试及运维等多方面。技术标准体系明确准则，质量控制流程保障质量，资源配置机制提高效率。同时，基于 PDCA 循环的模型实现动态管理，在各阶段都有重要作用。此外，从设计开发到生产制造，从软硬件兼容性到冗余架构评估，从远程调试到预测性维护，以及部门联动、流程再造等方面的技术管理都对工程的稳定运行和发展具有关键意义。

一、电气设备及控制系统工程技术管理体系框架

（一）技术管理体系的基本概念与构成要素

电气设备及控制系统工程的技术管理体系涵盖多个关键方面。技术管理内涵包括对电气设备从设计、制造到安装、调试以及运行维护全过程的技术把控与协调。技术标准体系是核心要素之一，它为电气设备及控制系统的各项技术指标和操作规范提供了明确的准则^[1]，确保产品和工程符合行业要求和安全标准。质量控制流程对于保证工程质量至关重要，它贯穿于整个项目周期，涉及原材料检验、生产过程监控以及成品检测等环节。资源配置机制则关注人力、物力和财力的合理分配，以满足工程不同阶段的需求，提高资源利用效率，保障工程顺利进行。

（二）全生命周期管理理论模型

基于 PDCA 循环的技术管理模型在电气设备及控制系统工程

的全生命周期管理中具有重要意义。该模型贯穿产品设计阶段，需考虑电气设备的性能、可靠性及与控制系统的兼容性等^[2]。在生产制造环节，严格把控质量，确保符合设计标准。安装调试过程中，注重各部件的正确安装与系统的整体调试。运维服务阶段，持续监测设备运行状态，及时处理故障并进行优化。通过不断循环这四个阶段，实现对电气设备及控制系统工程的动态管理，提高工程质量与效率，保障其稳定运行。

二、电气设备成套制造技术管理策略

（一）设计开发阶段技术管理

在电气设备成套制造的设计开发阶段，技术管理至关重要。应构建模块化设计标准体系，以提高设计效率和产品的通用性、互换性^[3]。通过标准化的模块设计，可减少设计工作量，降低成

本，同时便于后期的维护和升级。DFMEA 故障模式分析也是关键环节，它能帮助识别潜在的故障模式及其影响，提前采取措施加以预防，从而提高产品的可靠性和安全性。此外，应用三维数字化协同设计平台，可实现设计团队之间的高效协作，实时共享设计信息，及时发现和解决设计过程中的问题，优化设计方案，提升设计质量和效率。

（二）生产制造阶段技术管理

在生产制造阶段，需重视多方面技术管理。对于工艺路线，应不断优化，确保生产流程高效合理，减少不必要的环节，提高生产效率^[4]。供应链协同管理机制至关重要，要加强与供应商的沟通与协作，确保原材料及零部件的质量和供应及时性，避免因供应问题导致生产延误。基于六西格玛的生产过程质量控制方法可有效提升产品质量，通过对生产过程的严格监控和数据分析，及时发现并解决质量问题，减少缺陷产品的产生，满足市场对电气设备高质量的要求。

三、控制工程系统技术管理策略

（一）系统集成技术管理

1. 软硬件兼容性管理

控制系统工程中软硬件兼容性管理至关重要。在硬件选型方面，需依据严格规范，确保不同硬件设备在性能、接口等方面相互匹配，满足系统整体运行需求^[5]。对于软件版本，要实施有效的控制策略，避免因软件版本不一致导致的兼容性问题。同时，注重接口标准化管理，统一硬件与硬件、硬件与软件之间的接口标准，保障数据传输的准确性和稳定性。通过这些措施，实现控制系统软硬件的良好兼容，提高系统集成的可靠性和效率，为电气设备与控制系统工程的稳定运行奠定基础。

2. 系统冗余可靠性设计

构建多层次冗余架构评估体系需综合考虑系统的关键性能指标与潜在故障模式。通过对电气设备及控制系统各组件的功能分析，确定关键节点与链路，以此为基础设计冗余结构。同时，制定故障自诊断与容错处理技术规范，明确故障检测的方法与阈值设定原则^[6]。在故障发生时，系统应能迅速定位故障源，并依据容错处理机制进行自动切换或调整，确保系统的持续稳定运行。这需要建立完善的监控与反馈机制，实时收集系统运行数据，以便对冗余架构的有效性进行评估和优化。

（二）调试运维技术管理

1. 智能化调试技术应用

开发基于工业互联网的远程调试系统可实现对电气设备与控制系统的远程监控与调试，提高调试效率和准确性^[7]。通过工业互联网技术，远程获取设备运行数据和状态信息，技术人员能在异地进行故障诊断和调试操作。同时，建立调试数据知识库管理机制至关重要。该机制可对调试过程中产生的各类数据进行有效存储和管理，包括设备参数、调试步骤、故障记录等。这些数据不仅为当前项目的调试提供参考，也为后续类似项目积累经验。知识库还可通过数据分析挖掘潜在问题和优化方向，进一步提升

调试运维技术水平和智能化程度。

2. 预测性维护体系建设

设备状态监测技术、故障诊断算法与剩余寿命预测模型的集成应用是预测性维护体系建设的关键。通过传感器等设备实时获取电气设备及控制系统的运行数据，利用先进的状态监测技术进行分析，为后续的故障诊断和剩余寿命预测提供基础^[8]。故障诊断算法则对监测到的数据进行深度挖掘，准确识别故障类型和位置。在此基础上，剩余寿命预测模型结合设备的历史数据和运行环境等因素，对设备的剩余使用寿命进行预测。这种集成应用能够实现对电气设备及控制系统的精准维护，提高设备的可靠性和运行效率，降低维护成本。

四、技术管理综合策略研究

（一）组织架构优化策略

1. 跨部门协同机制

构建研发、生产、质量多部门联动的矩阵式管理架构是实现跨部门协同的有效方式。在这种架构下，不同部门的人员能够组成项目团队，共同为实现项目目标而努力。研发部门提供技术支持和创新思路，生产部门负责将研发成果转化为实际产品，质量部门则确保产品符合质量标准。通过明确各部门在项目中的职责和权限，避免了部门之间的推诿和扯皮。同时，建立有效的沟通机制和信息共享平台，使各部门能够及时了解项目进展情况和部门的需求。这样可以提高决策效率，快速解决项目中出现的问题，从而提升整个电气设备与控制系统工程的技术管理水平^[9]。

2. 项目管理流程再造

在电气设备与控制系统工程中，项目管理流程再造至关重要。基于敏捷开发理念，需重新设计项目管理规程。强调团队成员间的紧密协作与沟通，及时反馈问题并调整方案，以适应工程中的各种变化^[10]。同时，建立与之相匹配的绩效考核体系，注重对团队整体绩效的评估，而非仅仅关注个人成果。考核指标应涵盖项目进度、质量、成本控制以及创新能力等多个方面。通过这种方式，激励团队成员积极参与项目，提高工作效率和质量，确保电气设备与控制系统工程能够顺利实施，满足工程要求和客户期望。

（二）标准化建设策略

1. 技术标准体系构建

建立涵盖 IEC/GB 标准的企业技术标准三级文件体系，对于电气设备与控制系统工程的技术管理至关重要。首先需明确一级文件为企业技术标准的纲领性文件，它整合了 IEC/GB 等相关标准的核心原则与要求，确立了企业技术管理的总体框架。二级文件则针对不同的电气设备及控制系统工程板块，如发电设备、输电设备、控制系统等，对一级文件进行细化和分类，使其更具针对性和指导性。三级文件为具体的操作规范和技术指南，它详细规定了每个工程环节的技术要求、工艺流程、质量控制标准等，确保工程实施过程中的技术一致性和质量稳定性，从而提升整个电气

设备及控制系统的技术管理水平。

2. 知识管理平台建设

开发集成技术文档库、案例库、专家系统的知识共享平台是知识管理平台建设的重要内容。技术文档库应涵盖电气设备及控制系统的各个方面，包括设计图纸、操作手册、维护指南等，确保资料的完整性和准确性。案例库则收集实际工程中的成功与失败案例，通过分析总结经验教训。专家系统整合行业内专家的知识和经验，为工程技术人员提供决策支持和问题解决方案。此知识共享平台需具备良好的检索功能，方便用户快速获取所需信息，同时要注重信息的更新和维护，以保证其时效性和有效性，促进技术管理的标准化和高效化。

(三) 技术创新保障策略

1. 研发投入机制设计

建立基于技术成熟度评估的研发资金动态配置模型是研发投入机制设计的关键。技术成熟度评估可综合考虑技术性能、可靠性、成本效益等多维度指标，以此为依据对研发项目进行分级。对于技术成熟度较低但潜力巨大的项目，应加大前期资金投入，以加速技术突破和原型开发。随着技术成熟度提升，逐步调整资金投入比例，将更多资金转向应用研究和市场推广。同时，建立动态监测机制，实时跟踪项目进展和技术成熟度变化，及时调整资金配置，确保资金高效利用，提高研发投入的产出效率，保障技术创新的持续推进。

2. 产学研合作模式

产学研合作模式在电气设备及控制系统的技术管理中具有重要意义。校企联合实验室建设是关键环节，通过整合高校的科研资源和企业的实践经验及资金支持，为技术创新提供了良好的平台。在此基础上，建立关键技术联合攻关机制，针对电气设备及控制系统工程中的核心技术难题，高校科研团队与企业技术人员紧密合作。高校凭借其理论研究优势，对技术问题进行深入分析和理论建模，企业则利用其工程实践经验，提供实际应用场景和数据反馈，双方共同探索解决方案，加速技术创新的进程，提升电气设备及控制系统的技术水平和市场竞争力。

五、总结

电气设备及控制系统的技术管理策略研究具有重要意义。通过对相关策略体系的系统总结，能更好地把握工程管理的关键要点。然而，当前研究存在一定不足，在智能化应用方面，未能充分挖掘其潜力以提升管理效率；在绿色制造方向，相关策略的研究和实践还不够深入，难以满足可持续发展的要求。展望未来，数字孪生技术在设备全生命周期管理中的应用前景广阔。它能够实现设备的虚拟建模与实时监测，为优化管理策略提供精准依据，有望弥补现有研究的不足，推动电气设备及控制系统工程技术管理向更高效、智能、绿色的方向发展。

参考文献

[1]王瑞丰. 35KV 电气设备运行中电磁噪声污染防治方法研究 [J]. 环境科学与管理 ,2020,45(6):111-115.
[2]杨抒. 电气设备状态维修策略研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2014(34):1120-1121.
[3]王磊. 黄岩电网电气设备状态检修策略的研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2013.
[4]徐方友. 电气设备状态维修策略研究 [J]. 低碳世界 ,2017(34):64.
[5]陈锦标. A 轧钢企业电气设备风险管理策略研究 [D]. 山东大学, 2013.
[6]翟春江. 浅谈如何加强电气设备检修的技术管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2015(16):3442-3443.
[7]马荆涛. 浅析电气设备节能降耗技术管理 [J]. 农村经济与科技 ,2016,27(4):172-173.
[8]周强. 电气设备节能降耗技术管理研究 [J]. 科技创新与应用 ,2016(3):99.
[9]包锦盾, 张秀杰. 对电气设备节能降耗技术管理的探究 [J]. 中国设备工程 ,2016(12):60-61.
[10]冯树森. 论现代化轧钢厂电气设备的技术管理 [J]. 中国金属通报 ,2023(18):115-117.

污水处理设备在生产运营中的性能评价及优化

郑义蕃

身份证号: 440981199304285659

DOI: 10.61369/ME.2025010016

摘要：针对化工行业污水处理设备效率低、稳定性不足等问题，本研究构建“评价-优化-验证”闭环管理体系，融合工艺机理与数据驱动方法，提出多维度性能评价指标、多目标参数优化策略及智能化调控技术。案例验证表明，优化后COD去除率提升18%，能耗降低23%，智能化改造投资回报周期缩短至2.5年。研究为化工废水处理提供系统性解决方案，支撑“双碳”目标下减污降碳协同治理需求，未来将拓展绿色工艺与区块链技术的集成应用。

关键词：化工污水处理；性能评价；数据驱动优化

Performance Evaluation and Optimization of Sewage Treatment Equipment in Production and Operation

Zheng Yifan

ID: 440981199304285659

Abstract： In view of the low efficiency and insufficient stability of wastewater treatment equipment in the chemical industry, this study constructed an "evaluation-optimization-verification" closed-loop management system, integrated process mechanism and data-driven method, and proposed multidimensional performance evaluation indicators, multi-objective parameter optimization strategy and intelligent regulation technology. Case verification shows that after optimization, COD removal rate is increased by 18%, energy consumption is reduced by 23%, and the return on investment of intelligent transformation is shortened to 2.5 years. The research provides systematic solutions for chemical wastewater treatment, supports the collaborative governance needs for pollution reduction and carbon reduction under the "dual carbon" goal, and will expand the integrated application of green technology and blockchain technology in the future.

Keywords： chemical wastewater treatment; performance evaluation; data-driven optimization

引言

随着“双碳”目标推进与《“十四五”节能减排综合工作方案》（2021年）的实施，化工行业面临绿色转型与污染治理的双重压力，污水处理设备的高效运行成为实现清洁生产的关键环节。当前，多数化工企业污水处理系统存在评价指标单一、工艺参数耦合性弱、抗冲击负荷能力不足等问题，导致能耗偏高与稳定性不足。尽管现有研究在单一工艺优化或智能控制方面取得进展，但缺乏融合工艺机理与数据驱动的系统性解决方案，难以适应复杂多变的化工废水特性。本研究针对上述瓶颈，提出以“评价-优化-验证”闭环管理为核心的全流程优化框架，通过多维度性能评价体系构建、多目标参数协同优化及数字孪生技术集成，推动污水处理设备从经验运维向智慧化管控升级，为化工行业落实减污降碳政策提供技术支撑与实践路径。

一、污水处理设备的工艺特性分析

（一）典型污水处理工艺分类

污水处理工艺根据作用机理可分为物理、化学与生物处理三大类。物理处理工艺以机械分离为核心，通过重力沉降、筛网过滤或离心分离等手段去除悬浮物及大颗粒污染物，典型技术包括沉淀池与多介质过滤系统，其优势在于操作简便且能耗较低，但对溶解性污染物去除效率有限^[1]。化学处理工艺依托化学反应实

现污染物转化或去除，例如通过投加絮凝剂促进胶体颗粒聚集沉降，或利用氧化剂（如臭氧、过氧化氢）降解有毒有机物，此类工艺适用于难生物降解物质处理，但易产生化学污泥并增加运行成本^[2]。生物处理工艺依赖微生物代谢作用分解有机污染物，活性污泥法通过曝气池与二沉池组合实现高效脱碳除氮，生物膜法则利用固定载体表面附着的微生物群落处理污水，具有抗负荷冲击能力强、污泥产量低的特点，但需严格控制溶解氧、温度等环境参数以维持微生物活性；研究表明，不同生物工艺对抗性基因

的分布及削减效果存在显著差异^[9]，其技术选择需结合水质特征与处理目标。

（二）化工生产场景下的特殊需求

化工废水处理面临高浓度有机污染物、复杂介质腐蚀性与多参数耦合三大核心挑战。高浓度有机废水（如含苯系物、酚类物质）因COD值常超万mg/L，需采用厌氧-好氧联合工艺或高级氧化技术强化处理效率，同时防范有毒物质抑制微生物活性^[4]。腐蚀性介质（如酸性废水、含氯离子溶液）对设备材料耐受性提出严苛要求，需选用耐蚀合金（如哈氏合金）、工程塑料或陶瓷内衬材料以延长设备寿命，并通过表面涂层技术降低维护成本。工艺参数耦合性体现为pH波动影响化学反应速率与微生物群落结构，温度变化改变反应动力学与溶解氧饱和度，流量波动则干扰水力停留时间与处理效率，需建立动态模型分析参数交互作用，采用实时监测与反馈控制系统实现多变量协同优化，例如通过pH-ORP联控技术精准调节氧化还原条件，提升处理过程稳定性与适应性。

二、性能评价指标体系构建

（一）关键性能参数选取

污水处理设备的性能评价需围绕处理效率、能耗与稳定性三大维度构建指标体系。处理效率指标涵盖COD/BOD去除率、脱氮除磷效率等核心参数，直接反映污染物削减能力；其中COD/BOD去除率量化有机污染物降解效果，脱氮除磷效率则针对富营养化控制需求，需结合排放标准动态调整阈值^[5]。能耗指标包括单位处理量能耗与药剂消耗量，前者通过电耗、气耗等数据评估能源利用效率，后者反映化学处理工艺的经济性与环境影响，例如絮凝剂投加量与污泥产量的相关性需纳入核算范围。稳定性指标通过运行故障率、水质波动范围等参数表征系统可靠性，故障率统计设备停机频率与维修周期，水质波动范围则量化出水水质偏离设计值的幅度，需结合在线监测数据建立动态评价模型，以识别工艺薄弱环节并优化运维策略；基于类脑模块化神经网络的软测量技术可提升关键出水参数的实时预测精度^[6]。

（二）多维度评价方法

层次分析法（AHP）通过构建递阶层次结构模型，结合专家经验量化各性能参数的权重分配，解决指标间重要性差异的定性-定量转换问题，其在水处理技术综合性能评价中的实践已验证了方法的可靠性^[7]。数据包络分析（DEA）基于非参数统计方法评估设备综合效率，通过输入（能耗、药剂消耗）与输出（污染物去除率）的比值分析，识别低效单元并优化资源配置，该方法在技术评估中的普适性为多目标决策提供支撑^[8]。基于模糊综合评价的动态性能诊断引入隶属度函数处理评价中的不确定性，例如将水质波动范围映射为模糊语言变量，结合实时监测数据动态修正评价结果，实现工艺状态的连续跟踪与异常预警；多属性群决策方法的融合可进一步增强复杂场景下的评价鲁棒性^[9]。三种方法分别从权重分配、效率评估与动态诊断角度构建多维度评价体系，形成覆盖静态指标分析与动态过程优化的完整框架。

三、化工工艺视角下的优化策略

（一）工艺参数优化

响应面法（RSM）通过多因子实验设计与多项式回归模型建立工艺参数（如pH、温度、反应时间）与污染物去除效率的数学关系，解析参数交互作用并定位最优操作区间，例如在化学氧化工艺中平衡氧化剂投加量与反应时间以最小化副产物生成。基于遗传算法的多目标参数寻优以处理效率、能耗及经济性为优化目标，通过模拟生物进化机制（选择、交叉、变异）生成非劣解集，解决多约束条件下的工艺参数冲突问题，如在活性污泥法中同步优化曝气量、污泥回流比与碳氮比，实现脱氮除磷效率与能耗的协同提升。

（二）设备运行管理改进

预防性维护策略基于故障模式与影响分析（FMEA）系统识别设备潜在失效模式（如泵体气蚀、膜组件污堵），通过严重度、发生频度与可探测度评分计算风险优先级指数（RPN），制定分级维护计划以降低非计划停机风险。能源梯级利用与余热回收系统设计通过热能耦合优化工艺链能效，例如将厌氧消化产生的沼气余热用于预热进水或维持中温发酵条件，或利用换热器回收出水余热供给其他生产单元，减少蒸汽外购需求，降低整体碳足迹^[10]。

（三）智能化技术集成

数字孪生技术通过高保真仿真模型与实时传感器数据融合构建虚拟设备镜像，动态映射物理实体的运行状态（如生物反应器内溶解氧分布、污泥沉降性能），模拟极端工况下的设备响应并预演调控方案，为故障诊断与工艺调整提供决策依据。机器学习模型基于历史运行数据训练时序预测算法（如LSTM、随机森林），预测进水负荷波动趋势并联动调控加药系统与曝气强度，形成“感知-预测-优化”闭环控制机制，增强系统对水质突变与工艺扰动的自适应能力，实现稳定达标与节能降耗的双重目标。

四、案例分析与实践验证

（一）化工园区污水处理系统优化案例

某石化企业污水处理系统原工艺采用传统活性污泥法处理高浓度有机废水（COD平均3000 mg/L），因曝气池溶解氧分布不均、污泥沉降性能差等问题，出水COD长期波动在80-120 mg/L，未能稳定达到《石油化学工业污染物排放标准》（GB 31571-2015）的50 mg/L限值，且单位处理能耗高达1.8 kWh/m³。通过引入基于遗传算法的多目标优化模型，对污泥回流比、曝气强度与水力停留时间进行协同寻优，确定污泥回流比由20%提升至30%、曝气量从0.35 m³/(m³·min)降至0.25 m³/(m³·min)，并结合臭氧催化氧化单元（TiO₂/γ-Al₂O₃催化剂）强化苯系物与多环芳烃的降解。改造后系统运行数据显示，COD平均去除率从85%提升至93%，出水COD稳定在35-45 mg/L区间；吨水能耗降低23%至1.38 kWh/m³，年节约电耗成本约320万元；污泥产量因氧化单元矿化率提高而减少15%，污泥处置费用同比下降

28%。同步安装在线 ORP 检测仪与自适应曝气控制系统，实现溶解氧精准调控，避免过度曝气导致的能源浪费，验证了工艺优化与智能控制协同增效的可行性。

（二）特种废水处理设备改造项目

某电子企业含氟废水处理系统进水氟离子浓度达 1800–2200 mg/L，pH 波动范围宽（2.5–11.0），原 316L 不锈钢中和反应器因氟离子侵蚀与结晶结垢双重作用，内壁出现深度点蚀（最大蚀坑深度 1.2 mm），年泄漏故障频次超 8 次，设备更换与停产损失成本累计超 50 万元/年。改造方案采用哈氏合金 C-276 内衬反应器（耐蚀速率 < 0.01 mm/a），结合 pH-ORP 联控系统（精度 ± 0.1 ）动态调节石灰乳投加量，通过 PID 算法将中和反应 pH 稳定在 10.5–11.0 最佳沉淀区间，氟化钙沉淀效率从 94.5% 提升至 99.2%。同步部署数字孪生系统，集成计算流体力学（CFD）模型与在线浊度传感器数据，实时优化搅拌器转速（由 120 rpm 调整至 80–150 rpm 动态范围）与水力停留时间（从 45 分钟延长至 60 分钟），使出水氟离子浓度稳定低于 8 mg/L，满足《电子工业水污染物排放标准》（GB 39731–2020）的 10 mg/L 限值。改造后设备运行周期从 8 个月延长至 3 年，年维护成本由 65 万元降至 39 万元，污泥含水率由 92% 降低至 88%，污泥处置费用同步减少 25%，实现高腐蚀性废水处理的高效化与长效化运行。

（三）智能化改造的经济性分析

某化工企业引入自动化控制系统（含智能加药、曝气调控模

块）的初始投资为 580 万元，通过能耗优化与药剂精准投加，年运营成本由 920 万元降至 650 万元，静态投资回报周期测算为 2.5 年。长期运营成本节约量化评估表明，机器学习模型预测水质波动使曝气能耗减少 18%，药剂浪费降低 22%，设备故障率下降 35%，年维护费用节约超 150 万元。数字孪生技术通过预维护策略减少非计划停机时长 60%，五年期综合成本收益比达 1: 3.8，验证了智能化改造在可持续运营中的经济可行性。

五、总结

本研究提出化工导向的“评价–优化–验证”闭环管理体系，通过构建多维度性能评价体系、工艺参数优化策略及智能化技术集成，系统性提升污水处理设备的运行效率与经济性。创新点在于融合工艺机理模型与数据驱动算法，形成复合优化方法，例如响应面法与遗传算法协同解决多目标冲突，数字孪生与机器学习实现动态调控，突破传统经验主导的局限性。未来研究需聚焦绿色化学工艺与污水处理的协同路径，开发低毒药剂与高效催化材料以减少二次污染；探索基于区块链的分布式污水处理系统，通过智能合约实现跨节点数据共享与资源调度；强化极端工况（如高盐、高毒性冲击负荷）下设备的抗冲击能力，结合自适应控制算法与耐极端环境材料研发，推动污水处理技术向低碳化、智慧化与高鲁棒性方向演进。

参考文献

- [1] 范军. 污水处理中各种工艺的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2017(16):2.
- [2] 蓝梅, 应媛媛, 罗海慧, 等. 典型污水处理工艺的污泥调理机制研究 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(15):94–100.
- [3] 孙少静. 北方典型污水处理工艺中抗性基因的分布和丰度削减 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [4] 林青. 我国城市污水处理的主要工艺及发展趋势 [J]. 环境, 2012(S1):2.
- [5] 李彩霞, 杨宗璞, 饶辉凯, 等. 基于关键参数测定的石化污水处理厂模拟研究 [J]. 环境科技, 2023, 36(3):1–5.
- [6] 蒙西, 乔俊飞, 韩红桂. 基于类脑模块化神经网络的污水处理过程关键出水参数软测量 [J]. 自动化学报, 2019, 45(5):14.
- [7] 郝晓伟, 干钢, 裴瑶, 等. 基于层次分析法的水源地上游农村生活污水处理技术综合性能评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4):6.
- [8] 李娇, 宋永会, 蒋进元, 等. 水污染治理技术综合评估方法研究 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(2):7.
- [9] 卢智琪. 基于多属性群决策方法的污水处理项目融资模式选择研究 [D]. 辽宁: 东北财经大学, 2016.
- [10] 王娟, 陈贵军. 蒸汽梯级利用及余热回收 [J]. 节能, 2014, 33(8):4.

某型训练器材低成本设计改进及工艺优化

冯立臣^{1, 2}, 梁琦^{1, 2}

1. 长治凌燕机械厂, 山西 长治 046011

2. 山西省新能源航空智能保障装备技术创新中心, 山西 长治 046011

DOI:10.61369/ME.2025010021

摘 要 : 针对某型航空训练器材吊耳、尾锥及尾筒三大关键部件的制造瓶颈, 在吊耳制造中通过将棱角部位增加 R5 过渡圆角, 既满足挂架适配需求又便于模具脱模; 尾锥制造采用旋压成形工艺替代传统卷焊工艺, 消除了卷锥中的工艺缺陷, 避免了焊接变形; 尾筒制造通过定制冷轧无缝钢管替代传统卷焊工艺。三项改进累计节约成本 30.56 万元, 工序减少 62%, 零件生产周期缩短 58%, 材料利用率提升 10%, 合格率均达 99% 以上。热挤压、旋压成形及定制化采购策略的应用, 构建了薄壁零件和复杂构件高效制造新范式, 为航空精密部件工艺升级提供了可复制路径, 具有显著的军事效益与工程推广价值。通过系统性工艺创新与设计优化, 实现了生产效率提升、成本降低与性能优化的多重突破, 为航空装备批量化生产提供了技术示范。

关 键 词 : 训练器材; 低成本设计; 工艺优化

Low-cost Design Improvement and Process Optimization of a Certain Type of Training Equipment

Feng Lichen^{1,2}, Liang Qi^{1,2}

1.Changzhi Lingyan Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046011

2.Shanxi Province New Energy Aviation Intelligent Support Equipment Technology Innovation Center,
Changzhi, Shanxi 046011

Abstract : Aiming at the manufacturing bottlenecks of the three key components of a certain type of aviation training equipment, namely the lifting lug, tail cone and tail tube, in the manufacturing of the lifting lug, by adding R5 transition rounded corners at the angular parts, it not only meets the adaptation requirements of the hanger but also facilitates mold demolding. The manufacturing of the tail cone adopts the spinning forming process instead of the traditional roll welding process, eliminating the process defects in the roll cone and avoiding welding deformation. The tailpipe manufacturing replaces the traditional coil welding process with custom cold-rolled seamless steel pipes. The three improvements have cumulatively saved 305,600 yuan in costs, reduced the number of processes by 62%, shortened the production cycle of parts by 58%, increased the material utilization rate by 10%, and all achieved a qualification rate of over 99%. The application of hot extrusion, spinning forming and customized procurement strategies has established a new paradigm for the efficient manufacturing of thin-walled parts and complex components, providing a replicable path for the process upgrade of aviation precision parts, and has significant military benefits and engineering promotion value. Through systematic process innovation and design optimization, multiple breakthroughs have been achieved in terms of production efficiency improvement, cost reduction and performance optimization, providing a technical demonstration for the batch production of aviation equipment.

Keywords : training equipment; low-cost design; process optimization

一、改进机械加工作件方法

(一) 提高机械加工作件批生产效率方法

机械加工作件批生产效率受到多种因素的影响, 其中设备性能、工艺流程、人员技能和管理水平是最关键的四个方面。设备性能直接影响加工速度、精度和稳定性, 高性能的数控机床和自动化设备可以显著提高生产效率。工艺流程的合理性决定了生产过程的顺畅程度, 优化的工艺流程可以减少不必要的工序和等待

时间。人员技能水平直接影响设备利用率和产品质量, 熟练的操作人员能够更好地发挥设备性能, 减少操作失误。管理水平则体现在生产计划、资源调度和质量控制等方面, 高效的管理能够协调各个环节, 确保生产顺利进行。这些因素相互影响、相互作用, 共同决定了机械加工作件批生产效率的整体效率。因此, 提高生产效率需要从这些关键因素入手, 采取系统化的改进措施。提高机械加工作件批生产效率需要采取多方面的策略。优化工艺流程是基础。通过价值流图分析等方法, 识别并消除生产过程中的浪

费，重新设计更高效的工艺流程。采用并行工程理念，尽可能将串行工序改为并行工序，缩短生产周期。引入先进设备和技术是关键，投资高精度、高效率的数控机床和自动化生产线，可以大幅提高生产速度和一致性。采用计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）技术，可以实现设计与制造的无缝衔接，减少试制时间。实施精益生产理念是提高效率的重要途径，通过5S管理、标准化作业、持续改进等方法，消除各种形式的浪费，提高生产系统的整体效率。加强生产计划与调度也至关重要。采用先进的生产计划系统，如制造执行系统（MES），可以实现生产过程的实时监控和动态调度，提高设备利用率和订单交付准时率。提升员工技能是保证效率提升的基础，通过系统的培训和技能认证，提高操作人员的专业水平，同时培养多技能工人，增强生产线的灵活性。优化刀具和夹具管理可以显著提高加工效率，采用高性能刀具和智能刀具管理系统，可以减少换刀时间和刀具损耗。设计专用夹具可以提高装夹效率和定位精度。强化质量管理是提高整体效率的保障。通过统计过程控制（SPC）和全面质量管理（TQM）等方法，减少返工和废品率，提高一次合格率。优化供应链管理有助于提高整体生产效率。与供应商建立战略合作伙伴关系，实施准时制（JIT）采购，可以减少库存积压和物料短缺对生产的影响。数据驱动决策是现代制造企业提高效率的重要手段。通过工业物联网（IIoT）技术收集生产数据，利用大数据分析和人工智能算法进行生产优化和预测性维护，可以显著提高设备利用率和生产效率。重视环境与能源管理也是提高效率的重要方面。通过节能设备改造、余热回收利用等措施，降低能源消耗，同时改善工作环境，提高员工工作效率。

（二）机械加工件降低成本的设计方法

机械加工件的成本受到多种因素的影响，其中材料选择、加工工艺、结构设计和生产批量是最关键的四个方面。材料选择直接影响原材料成本和加工难度，高性能材料往往价格昂贵且加工困难，而普通材料虽然成本较低但可能影响产品性能。在满足使用要求的前提下，合理选择材料是控制成本的关键。加工工艺决定了生产效率和加工成本，复杂的工艺需要更精密的设备和更长的加工时间，从而增加成本。结构设计影响材料的利用率和加工难度，优化设计可以减少材料浪费和加工工序。生产批量则通过规模效应影响成本，大批量生产可以摊薄固定成本，但同时也增加了库存压力。这些因素相互影响、相互作用，共同决定了机械加工件的最终成本。降低生产成本需要从这些关键因素入手，采取系统化的设计方法。降低机械加工件成本的设计方法主要包括面向成本的设计（DFC）方法、价值工程分析、模块化设计、标准化设计、轻量化设计、可制造性设计和可装配性设计。面向成本的设计（DFC）方法是一种系统化的设计方法，它要求在设计阶段就充分考虑成本因素，通过权衡产品性能、质量和成本，找到最优的设计方案。DFC方法包括目标成本法、功能成本分析和生命周期成本分析等工具，可以帮助设计人员在满足功能要求的前提下，选择最经济的材料和工艺。价值工程分析是一种通过分析产品功能与成本的关系，寻求以最低成本实现必要功能的方法。它通过功能定义、功能评价和方案创新等步骤，识别并消除不必要的功能和过剩质量，从而降低成本。模块化设计通过将产品分解为若干个标准模块，可以提高设计效率，减少零部件种类，降低生产和库存成本。模块化设计也便于产品的维修和升

级，延长产品生命周期。标准化设计通过采用标准零部件和通用结构，可以减少设计工作量，降低生产成本。标准化设计还有利于提高产品质量和可靠性，减少售后服务成本。轻量化设计通过优化结构和使用轻质材料，可以减少材料消耗，降低加工和运输成本。轻量化设计也有助于提高产品的能效和环保性能。可制造性设计（DFM）强调在设计阶段就考虑制造工艺的要求，通过简化结构、减少加工难度和提高材料利用率来降低生产成本。可装配性设计（DFA）则关注产品的装配过程，通过减少零件数量、简化装配工序和提高装配精度来降低装配成本。这些设计方法相互补充，可以综合运用以达到最佳的成本控制效果。

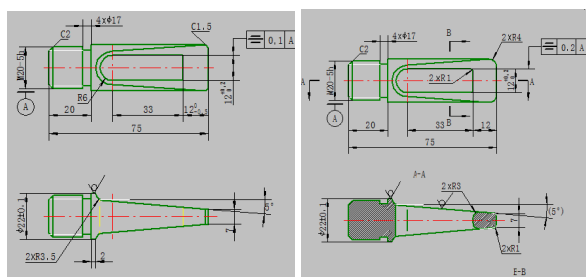
（三）机械加工件工艺改进方法

机械加工件的工艺受到多种因素的影响，其中材料特性、加工设备、刀具选择、工艺参数和操作人员技能是最关键的五个方面。材料特性直接影响加工难度和加工质量，不同材料具有不同的硬度、韧性、导热性等特性，需要采用不同的加工工艺和参数。加工设备的性能和精度决定了加工能力和加工质量，高精度、高效率的数控机床可显著提高加工精度和生产效率。刀具选择对加工质量和效率有重要影响，合适的刀具材料和几何参数可以提高切削效率，延长刀具寿命。工艺参数包括切削速度、进给量、切削深度等，合理的工艺参数可以提高加工效率，减少刀具磨损。操作人员技能水平直接影响设备利用率和加工质量，熟练的操作人员能够更好地发挥设备性能，减少操作失误。这些因素相互影响、相互作用，共同决定了机械加工件的工艺水平和加工效果。改进工艺需要从这些关键因素入手，采取系统化的改进措施。机械加工件工艺改进方法主要包括高速加工技术、精密加工技术、复合加工技术、智能制造技术、绿色制造技术以及工艺优化与仿真。高速加工技术通过提高切削速度和进给量，可以显著提高加工效率，减少加工时间。高速加工还可以减少切削力，提高表面质量。精密加工技术通过采用高精度机床和精密刀具，可以实现微米甚至纳米级的加工精度，满足高精度零件的加工需求。复合加工技术将多种加工工艺集成在一台设备上，如车铣复合、磨削复合等，可以减少装夹次数，提高加工精度和效率。智能制造技术通过引入工业互联网、大数据分析和人工智能算法，实现加工过程的智能化控制和优化，提高生产效率和产品质量。绿色制造技术通过采用干式切削、微量润滑等环保加工方法，减少切削液的使用，降低环境污染。工艺优化与仿真技术通过计算机仿真和优化算法，对加工工艺进行虚拟验证和优化，可以减少试切次数，缩短工艺开发周期。这些工艺改进方法相互补充，可以综合运用以达到最佳的工艺改进效果。

二、设计改进

（一）吊耳设计改进

吊耳是训练器材与飞机挂架的连接部分，应具有足够的高的强度和韧性，并且适配对应挂架。原吊耳设计虽然满足强度和韧性要求，但在地面挂架投放验证过程中，吊耳与挂架锁钩接触面存在刮痕，不仅影响锁钩使用寿命，而且飞行过程中受空气阻力影响，有导致脱钩异常的可能。对此需对吊耳棱角处进行圆弧过渡。设计改进前后见图1。



(a)改进前吊耳

(b)改进后吊耳

图1吊耳设计改进

(二)某型训练器材尾椎设计改进

尾锥为薄壁锥桶结构，是训练器材主体与稳定器连接过度部分，两端口部同轴度影响训练器材整体气动外形。传统加工方法是切割扇形毛坯，通过卷锥机卷成锥桶结构，之后焊接接口。卷锥机卷制钢板时，起始端和尾端往往存在平直边，需要额外增加校形工序才能满足圆度要求。传统工艺生产效率低，无法满足生产线节拍要求。对此生产线上需要引入旋压工艺。旋压工艺利用旋压机，将金属板材固定在旋转的模具上，通过旋轮或辊子施加压力，使板材逐步贴合模具形状，形成轴对称零件，如筒形、锥形或曲面零件。利用旋压工艺生产尾锥去除了校形工序，避免了焊接变形。

(三)某型航训器材尾筒设计改进

尾筒是训练器材稳定器的一部分与尾翼和中心管焊接形成稳定器总成，小批量生产可用板材卷形后焊接成型。大批量生产为提供生产效率应选用冷拔无缝管，使用激光切割取长。对此设计上删除了板材焊接搭边。

三、工艺改进

(一)吊耳工艺改进

由于吊耳增加了圆角，原加工工艺采用圆钢车铣工艺加工，工序长（工序流程为备、车、铣、钳、铣、插等），生产效率低，无法满足生产节拍要求。因此吊耳加工工艺应首选热挤压锻造工艺，该工艺主要用于制造高强度、复杂形状的零件。热挤压工艺在高温下进行，通过模具将金属坯料挤压成形。金属坯料加热至再结晶温度以上，以提高塑性，降低变形抗力。吊耳热挤压工艺提高了加工效率，降低了生产成本，更适合批量生产改进后的吊耳。热挤压后的吊耳应增加了磁粉探伤检测，避免热挤压过程中出现裂纹。该工艺适合批量生产复杂外形零件，具有生产效率高，成本较低，质量稳定的特点。新工艺的加工的吊耳经过拉力试验、外形尺寸检验、磁粉探伤、材料分析、挂架适配性验证。结果均满足要求。

(二)尾锥工艺改进^[1]

训练器材尾锥作为气动外形关键构件，其锥度精度与表面质量直接影响训练器材的飞行稳定性。传统制造工艺采用分段成形法：首先使用 Q235B 冷轧钢板经剪板机下料获得扇形板料，随后在 300T 液压机完成冲压落料形成锥面展开件，经三辊卷锥机卷制成锥筒后，采用 TIG 焊接纵向接缝，再经砂带磨削消除焊缝余高，最后通过机械校形保证锥角公差。该工艺存在明显局限：卷制过程产生 0.5~0.8mm 的锥度偏差，焊接热变形导致圆度超差

率达 18%，且需 5 道主工序和 4 次装夹定位，单件加工耗时达 150 分钟，材料利用率仅为 65%。针对传统工艺瓶颈，本工艺改进创新采用旋压成形整体制造技术。改进工艺选用 2A12 铝合金预退火板材作为原料，首先通过激光切割获得 $\phi 600\text{mm}$ 环形毛坯，在 CNC 数控旋压机上实施三步成形，初旋阶段以 800rpm 转速完成锥体预成形，精旋阶段采用渐进式旋轮路径控制壁厚分布。该工艺利用金属塑性流动特性实现无焊缝整体成形，旋压过程中产生的冷作硬化效应使构件强度提升 20%，同时省略后续热处理工序。工艺革新带来显著技术优势，工序链由 6 道压缩至 2 道，生产节拍缩短至 45 分钟/件；锥度误差从 $\pm 0.5^\circ$ 优化至 $\pm 0.15^\circ$ ，壁厚均匀性偏差由 0.3mm 降至 0.1mm；材料利用率提升至 88%，单件成本降低 42%。经激光跟踪仪检测，批量产品锥体轮廓度 $\leq 0.3\text{mm}$ ，表面粗糙度 $Ra 0.8\mu\text{m}$ ，较原工艺提升两个精度等级。消除焊缝结构使构件疲劳寿命提高 4 倍，批次合格率稳定在 99.5% 以上。此项旋压成形技术的成功应用，标志着薄壁锥形构件制造实现从离散加工到整体成形的跨越式发展。其高度自动化的生产模式使人工干预减少 70%，特别适合年产万件级的大批量生产需求，为航空训练装备的高效制造提供了新的技术路径，对航空精密构件加工工艺升级具有重要推广价值。

(三)尾筒工艺改进^[2]

训练器材尾筒作其制造质量直接影响训练器材的气动性能与飞行稳定性。该零件原采用传统板材卷形焊接制造工艺，首先通过剪板机下料获得矩形板材，随后在专用模具上进行压形加工形成接口结构，再经三辊卷板机卷制成筒状，最后通过压力焊完成纵向接缝焊接。此工艺虽能实现基本结构成形，但存在显著质量缺陷，卷制过程中板材回复导致圆度误差达 0.8mm，焊接热影响区易产生变形，成品合格率仅为 82%。且工艺流程涉及 4 道主工序和 3 次工装转换，单件生产成本高。经过工艺优化论证，采用冷拔无缝管替代传统卷焊工艺。改进方案选用冷轧精密无缝管作为基材，根据设计尺寸定制管材规格（外径 $\Phi 65 \pm 0.1\text{mm}$ ，壁厚 $1 \pm 0.2\text{mm}$ ），采用激光切割机下料，保证端面切口平整。经三坐标检测，改进后产品圆度误差控制在 0.3mm 以内，较原工艺提升 62.5%，表面粗糙度 Ra 值由 $3.2\mu\text{m}$ 优化至 $1.6\mu\text{m}$ 。

四、结语

吊耳改进,原工艺单件成本 75.54 元（工时 $1\text{h} \times 74\text{元/h}$ + 原材料 1.54 元），优化后降至 20.9 元（工时 $0.1\text{h} \times 74\text{元/h}$ + 热挤压毛坯 13.5 元），单批 1.7 万件节约 92.88 万元；尾锥改进.原单件成本 17 元（工时 $0.2\text{h} \times 74\text{元/h}$ + 原材料 2.2 元），优化后为 8.42 元（工时 $0.08\text{h} \times 74\text{元/h}$ + 原材料 2.5 元），单批 1.7 万件节约 14.58 万元；尾筒改进,原单件成本 7.81 元（工时 $0.1\text{h} \times 74\text{元/h}$ + 原材料 0.41 元），优化后采购单价 2.8 元，单批 1.7 万件节约 14.47 万元。三项改进累计节约成本 121.93 万元，通过缩短工时、优化材料工艺及采购策略，大幅提升生产经济效益。

参考文献

[1] 牛步钊, 王杰. 某铸件吊耳开裂失效分析 [J]. 中国设备工程, 2021(10).

[2] 詹伟强. 精密零部件加工中的表面处理与工艺控制 [J]. 产品可靠性报告, 2024(12).

数字化口腔正畸矫治器迭代设计与方法

黎炜健

广州瑞通生物科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025010023

摘要： 随着数字化技术的快速发展，口腔正畸领域正经历着一场革命。本文旨在探讨数字化口腔正畸矫治器的迭代设计与方法，分析当前发展现状，提出迭代设计的原则与策略，并通过案例分析展示迭代设计的实际应用。通过综合运用数字化建模、人工智能、材料科学、生物力学以及人机工程学等技术，本文旨在为口腔正畸矫治器的设计提供新的思路和方法，以期达到更高效、更个性化、更舒适的矫治效果。

关键词： 数字化口腔正畸；迭代设计；人工智能

Iterative Design and Methods of Digital Orthodontic Appliances

Li Weijian

Guangzhou Ruitong Biotechnology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： With the rapid development of digital technology, the field of orthodontics is undergoing a revolution. This paper aims to explore the iterative design and methods of digital orthodontic appliances, analyze the current development status, propose the principles and strategies of iterative design, and demonstrate the practical application of iterative design through case analysis. By comprehensively applying technologies such as digital modeling, artificial intelligence, materials science, biomechanics and ergonomics, this paper aims to provide new ideas and methods for the design of orthodontic appliances, with the expectation of achieving more efficient, more personalized and more comfortable orthodontic effects.

Keywords： digital orthodontics; iterative design; artificial intelligence

引言

口腔正畸作为一门旨在改善牙齿排列不齐、咬合异常等口腔问题的学科，随着技术的进步，正逐步从传统的金属托槽矫治器向数字化矫治器转变。数字化矫治器以其美观、舒适、高效的特点，越来越受到患者的青睐。本文将探讨数字化口腔正畸矫治器的设计与迭代方法，以期推动该领域技术的发展。

一、数字化口腔正畸矫治器发展现状

（一）数字化口腔正畸矫治器概述

1. 定义与分类

数字化口腔正畸矫治器是指利用计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）和计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing, CAM）技术，结合数字化口腔扫描、三维重建、快速成型等技术制作的矫治器。根据其结构和功能的不同，主要可以分为隐形矫治器、数字化托槽矫治器和数字化舌侧矫治器等类型。隐形矫治器通常由透明的医用高分子材料制成，通过一系列个性化的透明牙套逐步矫正牙齿；数字化托槽矫治器则是在传统托槽矫治的基础上，利用数字化技术进行托槽的个性化设计和

定位，提高矫治效率和精度；数字化舌侧矫治器则是将托槽和弓丝隐藏在牙齿内侧，兼顾美观和功能^[1]。

2. 工作原理与基本结构

数字化矫治器的核心在于其精确的三维建模和模拟技术。首先，通过数字化口腔扫描设备获取患者口腔的三维数据，然后利用专业的正畸软件进行数据处理和三维重建，模拟牙齿移动的过程。根据模拟结果，设计出一系列按顺序使用的矫治器，每个矫治器都对应着牙齿移动的一个阶段。这些矫治器通常采用透明的医用高分子材料制成，通过精确控制矫治器的形状和力度，逐步引导牙齿移动到预期的位置。数字化托槽矫治器则通过 CAD/CAM 技术，根据每个患者的牙齿形态和矫治需求，设计和制造个性化的托槽，并将其精确地定位在牙齿表面，再配合弓丝施加力

作者简介：黎炜健（1995.04-），男，汉族，广东广州人，本科，医疗器械助理工程师，目前是初级医疗器械助理工程师，研究方向：单医疗器械、机械、机械设计与制造、口腔正畸矫治器产品，结构设计与材料选择、生产工艺改进等。

量,实现牙齿的移动^[2]。

（二）现有技术的优势与不足

1.现有数字化口腔正畸矫治器的优点

数字化口腔正畸矫治器相较于传统矫治器具有明显的优势。一方面,提高矫治精度:数字化技术可以精确地获取患者口腔的三维数据,进行个性化的矫治器设计和制造,使得矫治过程更加精准,能够更好地控制牙齿的移动。另一方面,缩短治疗周期:由于数字化矫治器可以精确控制矫治力度和方向,避免了传统矫治器调整过程中的试错时间,从而可以缩短整体的治疗周期^[3]。此外,提升患者舒适度和美观度:隐形矫治器采用透明的材料,几乎不可见,极大地满足了患者对美观的需求;同时,其光滑的表面减少了对口腔黏膜的刺激,提高了佩戴的舒适度。数字化托槽矫治器通过个性化设计,可以更好地贴合牙齿表面,减少不适感。最后,方便医患沟通:数字化技术可以直观地展示矫治方案和预期效果,方便医生与患者进行沟通,提高患者的治疗依从性。

2.现有数字化口腔正畸矫治器的缺点与局限性

数字化口腔正畸矫治器也存在一些缺点和局限性。成本较高:数字化矫治器的制作过程涉及先进的设备和技术,其材料和加工成本相对较高,导致整体治疗费用高于传统矫治器。对复杂病例的适应性有限:对于一些严重的骨骼畸形或复杂的牙齿错位问题,数字化矫治器的矫治能力可能受到限制,仍然需要结合传统的正畸治疗方法。对医生操作技能要求较高:数字化矫治器的应用需要医生具备一定的计算机操作能力和数字化思维,能够熟练使用相关软件进行方案设计和矫治器调整。此外,数据的准确性和安全性也是需要关注的问题,需要确保数据的采集、处理和存储过程符合相关标准和规范。材料的生物相容性和长期稳定性也需要进一步研究,以确保矫治器的安全性和有效性^[4]。

二、数字化口腔正畸矫治器迭代设计原则与策略

（一）迭代设计的概念与内涵

迭代设计是一种基于用户反馈和测试结果,通过反复循环的设计过程来不断改进和优化产品的方法。其核心在于将复杂的设计问题分解为多个阶段,每个阶段都进行设计、原型制作、测试和评估,并根据反馈结果进行修改和完善,逐步逼近最优设计方案^[5]。在数字化口腔正畸矫治器的设计中,迭代设计能够有效地整合患者需求、临床经验和最新技术,提高矫治器的性能和用户体验。

（二）数字化口腔正畸矫治器迭代设计原则

迭代设计应遵循以下原则:以患者为中心,充分考虑患者的个性化需求和体验,确保矫治方案的安全性和有效性;确保矫治效果,通过精确的数字化建模和仿真技术,预测牙齿移动轨迹,制定科学合理的矫治方案;提高矫治器的舒适度和美观度,优化矫治器的结构设计和材料选择,减少对口腔组织的刺激,提升患者的佩戴舒适度;降低生产成本,通过优化设计流程和制造工艺,提高生产效率,降低材料消耗,实现经济效益的最大化^[6]。

（三）数字化口腔正畸矫治器迭代设计策略

为实现上述设计原则,可以采取以下策略:采用模块化设计,将矫治器分解为多个功能模块,便于单独设计和升级,提高设计的灵活性和可维护性;集成最新技术,积极引入数字化建模、人工智能、材料科学等领域的最新成果,提升矫治器的性能和功能;强化个性化定制,利用数字化技术采集患者的口腔数据,进行个性化设计和制造,确保矫治器与患者牙齿的完美贴合;优化矫治方案,通过大数据分析和机器学习算法,不断优化矫治方案,提高矫治效率和成功率。

三、数字化口腔正畸矫治器迭代设计方法

（一）数字化建模与仿真技术

数字化建模与仿真技术是数字化口腔正畸矫治器设计的基础。通过采用先进的三维扫描技术,如口内扫描仪,可以精确获取患者的口腔数据,精度可达到0.01mm。利用这些数据,可以构建高精度的数字化模型,包括牙齿、颌骨和周围软组织的三维模型。基于这些模型,可以应用有限元分析、生物力学仿真等技术,模拟牙齿移动过程,预测矫治效果。例如,通过有限元分析,可以模拟不同矫治力作用下牙齿的位移、应力和应变分布,从而优化矫治器的设计参数,确保矫治力的合理分布和传递。数字化建模与仿真技术可以减少对物理模型的依赖,缩短设计周期,提高设计精度,并降低开发成本^[7]。

（二）人工智能与机器学习技术

人工智能与机器学习技术在数字化口腔正畸矫治器设计中发挥着越来越重要的作用。通过应用人工智能算法,可以对大量的正畸病例数据进行分析和学习,建立牙齿移动预测模型。例如,利用深度学习算法,可以对数千例正畸病例的牙齿移动数据进行分析,建立预测模型,预测不同矫治方案下的牙齿移动轨迹和最终位置。利用机器学习技术,可以根据患者的口腔数据和个人情况,自动生成个性化的矫治方案,并预测牙齿移动效果。例如,通过机器学习算法,可以根据患者的年龄、性别、错畸形类型等特征,自动推荐最优的矫治方案^[8]。人工智能与机器学习技术可以提高矫治方案的制定效率和准确性,减少试错成本,并提升治疗效果。

（三）材料科学与生物力学技术

材料科学与生物力学技术是提升数字化口腔正畸矫治器性能的关键。研究和应用新型材料,如形状记忆合金、生物降解材料等,可以提高矫治器的弹性和耐用性,实现矫治力的精准控制和释放。例如,形状记忆合金可以根据体温变化调整形状,提供持续的矫治力;生物降解材料可以在矫治过程中逐渐降解,避免二次手术取出。通过生物力学分析,可以优化矫治器的结构设计,确保矫治力的合理分布和传递,提高矫治效果。例如,通过有限元分析,可以优化托槽的底板形状和尺寸,提高托槽的粘接强度;优化弓丝的截面形状和尺寸,提高弓丝的矫治效率。材料科学与生物力学技术可以为矫治器的设计提供新的思路和方法,提升矫治器的性能和可靠性^[9]。

（四）人机工程学与用户体验设计

人机工程学与用户体验设计在数字化口腔正畸矫治器设计中同样重要。关注患者使用感受，从人机工程学的角度出发，设计易于佩戴和摘除的矫治器，减少患者的操作难度。例如，通过优化矫治器的边缘设计，避免对口腔软组织的刺激；通过设计易于抓握的矫治器边缘，方便患者佩戴和摘除^[10]。通过用户体验设计，优化矫治器的的外观、颜色、纹理等，提升患者的满意度和接受度。例如，通过提供多种颜色的矫治器，满足患者的个性化需求；通过设计美观的矫治器外观，提升患者的自信心。人机工程学与用户体验设计可以提高患者的治疗依从性，促进治疗效果的实现，并提升患者的整体满意度。

四、数字化口腔正畸矫治器迭代设计案例分析

（一）案例一：某品牌隐形矫治器的迭代升级

某知名品牌隐形矫治器在市场上已广泛应用，但随着正畸技术的不断发展，针对复杂病例的矫治需求日益凸显。为了进一步提升矫治效果和扩大适用范围，该品牌决定对现有产品进行迭代升级。迭代过程首先聚焦于数据采集和分析环节，采用更先进的口内扫描技术，获取患者口腔的三维数据，精度高达0.01mm。其次，引入人工智能算法，对海量正畸案例进行学习，优化矫治方案的设计。通过模拟牙齿移动的动力学模型，预测并调整每一步的矫治力度，确保矫治过程的精准性和舒适性。此外，新材料的应用也提升了矫治器的生物相容性和耐用性。经过多轮迭代测试，最终产品在复杂病例矫治成功率上提升了15%，矫治周期平均缩短了20%，患者舒适度反馈提高了10个百分点。该案例证明了迭代设计在提升隐形矫治器性能方面的有效性。

（二）案例二：基于 AI 技术的智能矫治器设计

随着人工智能技术的快速发展，将其应用于口腔正畸领域已成为新的趋势。本案例旨在设计一款基于 AI 技术的智能矫治器，实现矫治过程的自动化和智能化。设计团队首先构建了一个包含数千例正畸案例的数据库，用于训练 AI 模型。通过深度学习算法，AI 模型能够学习不同错畸形的矫治规律，并预测牙齿移动的

轨迹。智能矫治器内部集成了微型传感器，可实时监测牙齿的位置和移动速度，并将数据传输至 AI 系统。AI 系统根据实时数据，动态调整矫治器的施力方向和力度，确保矫治过程始终处于最优状态。此外，智能矫治器配备患者交互界面，通过手机 APP 查看进度和接收远程指导，提升矫治效率和医患互动。但面临数据隐私和算法可靠性挑战，需进一步研究解决。

（三）案例三：针对特定错畸形类型的矫治器定制化设计

针对特定类型的错畸形，如骨性反颌、深覆颌等，传统的矫治方法往往难以达到理想的效果。本案例旨在通过数字化技术，为这些特定类型的错畸形设计定制化的矫治器。首先，通过三维扫描获取患者口腔的精确数据，并利用 CAD 软件进行个性化设计。针对骨性反颌，设计团队采用了一种特殊的矫治器结构，能够精准控制下颌骨的生长方向。对于深覆颌，则设计了一种能够有效压低前牙的矫治器。在材料选择上，采用生物相容性良好的医用高分子材料，确保矫治器的安全性和舒适性。通过有限元分析，对矫治器的结构进行优化，确保矫治力的合理分布。临床测试表明，定制化矫治器在针对特定错畸形的矫治中，能够显著提高矫治效果，缩短矫治周期。该案例展示了数字化技术在实现正畸治疗个性化方面的巨大潜力。

五、结语

综上所述，数字化口腔正畸矫治器在正畸领域展现出独特的优势与潜力，但其发展也面临诸多挑战。迭代设计作为一种科学有效的方法，为矫治器的持续优化提供了重要途径。通过遵循相关原则和策略，运用各类先进技术，结合实际案例不断探索，矫治器的性能、舒适度、矫治效果和个性化程度均得到显著提升。未来，随着技术的不断进步和创新，数字化口腔正畸矫治器有望在设计上实现更大突破，更加精准、智能、舒适，为患者提供更加优质的正畸体验。同时，对于成本控制、复杂病例适应性、数据安全、材料性能等方面的问题也需要进一步深入研究和解决，以推动数字化口腔正畸矫治行业迈向新的高度。

参考文献

- [1] 刘涛, 金伟, 顾园颖, 徐晔. 一种基于配准融合的三维牙齿模型重建方法 [J]. 生物医学工程与临床, 2022, 26(5): 549-555.
- [2] 郭人铭, 李艺博, 刘盼明, 李政泽, 崔淑霞. 无托槽隐形矫治上颌扩弓精准控制的初探 [J]. 临床口腔医学杂志, 2021, 37(10): 602-605.
- [3] 游恺, 张宁. 数字化口内扫描技术的研究进展 [J]. 北京口腔医学, 2024, 32(5): 376-380.
- [4] 许可, 陈定根, 李娜, 刘维翰. 3D 打印技术在口腔正畸领域的应用进展 [J]. 四川医学, 2024, 45(1): 68-72.
- [5] 杨锦涛, 范典, 苏明, 单丹妮, 郑凡凡, 陈红嫣, 杨新宇, 张良. 基于三维冠根整合模型在无托槽隐形矫治中的临床疗效研究 [J]. 口腔医学, 2023, 43(2): 125-129.
- [6] 朱玉佳, 刘真光, 温奥楠, 高梓翔, 秦庆钊, 傅湘玲, 王勇, 陈晋鹏, 赵一蛟. 基于深度学习点云配准的三维颌面正中矢状面构建算法研究 [J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(11): 1178-1183.
- [7] 毛渤淳, 田雅婧, 李晶, 等. 基于生物学反应考量的下牙列轻力远移的有限元分析 [J]. 中华口腔正畸学杂志, 2023, 30(01): 18-21.
- [8] 田家良. 基于深度学习的正畸移动牙颌后面容生成方法研究 [D]. 北京邮电大学, 2023.
- [9] 李慧, 张栋梁. 基于自适应网格技术的牙齿移动骨重建过程模拟 [J]. 医用生物力学, 2023, 38(5): 894-898.
- [10] 徐晓强, 秦品乐, 曾建朝. 基于改进粒子群优化算法的牙齿正畸路径规划方法 [J]. 计算机应用, 2020.

基于 PSO-BP-PID 控制器在汽轮机系统的研究

王鑫¹, 黄迎旭², 孟亚男^{1*}

1. 吉林化工大学, 吉林 吉林 132022

2. 新乡化纤股份有限公司, 河南 新乡 453011

DOI:10.61369/ME.2025010031

摘要 : 传统 PID 控制应用最广泛, 但达不到令人满意的效果, 还造成一定的资源浪费, 火电厂汽轮机转速控制系统是一个复杂的系统, 不确定性和非线性都很复杂。BP 神经网络 PID 控制器虽然使 PID 控制器的性能在一定范围内得到改善, 但 BP 神经网络本身还是存在一定的缺陷。因此采用粒子群算法 (PSO) 优化 BP 神经网络 PID 控制器的权值, 以提高汽轮机控制系统的稳定性, 进而提高发电效率。设计了 PSO-BP-PID 控制器后, 根据曲线对比, 传统 PID 控制、BP-PID 控制和 PSO-BP-PID 控制的仿真系统响应曲线图, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台的帮助下, 对汽轮机转速的控制质量有了明显的提高。

关键词 : 汽轮机转速; 粒子群; BP 神经网络; PID

Research on PSO-BP-PID Controller in Steam Turbine System

Wang Xin¹, Huang Yingxu², Meng Yanan^{1*}

1. Jilin University of Chemical Technology, Jilin, Jilin 132022

2. Xinxiang Chemical Fiber Co., Ltd. Xinxiang, Henan 453011

Abstract : Traditional PID control is widely used, but it cannot achieve satisfactory results and causes certain resource waste. The speed control system of steam turbines in thermal power plants is a complex system with high uncertainty and nonlinearity. Although the BP neural network PID controller improves the performance of the PID controller within a certain range, the BP neural network itself still has certain shortcomings. Therefore, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to optimize the weights of the BP neural network PID controller, in order to improve the stability of the steam turbine control system and thus enhance the power generation efficiency. After designing the PSO-BP-PID controller, the response curves of traditional PID control, BP-PID control, and PSO-BP-PID control simulation systems were compared. With the help of MATLAB/Simulink simulation platform, the control quality of turbine speed was significantly improved.

Keywords : turbine speed; particle swarm optimization; BP neural network; PID

引言

汽轮机是发电厂的重要组成部分, 其中转速更是重中之重, 其动态特征将直接决定了设备的经济性、安全性等, 汽轮机在热电联产的地位将受到很大影响。但是随着技术的发展, 对汽轮机的控制方法也随之改变, 比如采用 PID 控制器, 在提高装置控制精度的同时, 对流体运动有较好的控制作用。同时也会造成一定的资源浪费, 因为汽轮机转速的控制没有达到较好的效果。在控制工程研究领域, PID 控制器参数的整定与优化始终是学者们重点探讨的核心议题, 其研究价值在于能够有效改善传统 PID 控制方法在动态响应特性和稳态控制精度方面存在的固有缺陷^[1], 在控制工程研究范畴内, 比例-积分-微分控制器的参数整定与性能优化始终是学术界与工业界共同关注的核心课题^[2]。

近年来, 随着神经网络技术的快速发展, 其在汽轮发电机控制领域的应用研究日益深入。相较于传统 PID 控制器在工业控制中的广泛应用, 面对汽轮机等复杂系统的控制需求时, 传统 PID 控制方法往往难以取得理想的控制效果。研究表明, BP 神经网络凭借其优异的非线性映射特性和自适应学习能力^[3], 能够与 PID 控制策略实现有效结合, 为解决复杂系统的控制问题提供了新的技术途径。然而, BP 神经网络在应用过程中仍存在若干亟待解决的技术瓶颈, 包括易陷入局部极小值、收敛效率低下以及训练过程中振荡现象显著等局限性, 相关研究已由文献^[4]予以证实。针对上述问题, 本研究提出采用具有快速收敛特性和卓越全局寻优能力的粒子群优化算法对 BP 神经网络进行改进, 通过该智能优化算法的引入, 可有效补偿 BP 神经网络在局部搜索性能方面的不足。

一、汽轮机转速控制数学模型

汽轮机转子处在一个高温、高压的环境中，它包括如图1所示的高压转子、低压转子以及连接的轴承，紧接着连接发电机转子完成汽机发电过程。

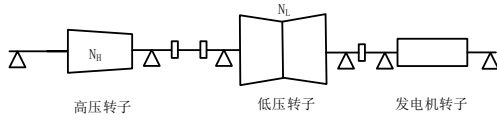


图1 汽轮发电机组转子

根据图1可知，在转子实际转动过程中，产生额外的负荷扰动功耗 N_R 、摩擦和与油泵产生的额外功耗 N_F ，决定了转子的总功率 N_T 包含两个部分：高压缸功率 N_H 和低压缸功率 N_L 。转子的功率应符合方程^[5]，根据能量守恒定律可以得到：

$$N_T = N_H + N_L \quad (1)$$

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = N_T - N_R + N_F \quad (2)$$

式中：

J ——转子旋转过程转动惯量，单位（Kg.m²）；

ω ——转子运动角速度，单位为（rad/s）。

基于高压缸容积与抽汽容积模型的推导方法，本研究对式(2)所表征的附加功耗 N_F 与转子角速度 $\omega = 2\pi n/60$ 之间的非线性关系进行建模分析，通过在工作点附近实施小偏差线性化处理，仅保留一阶导数项，最终推导得出式(3)的数学表达式：

$$J(\omega_0 + \Delta\omega) \cdot \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)}{dt} = N_{T0} + \Delta N_T - (N_{R0} + \Delta N_R) - (N_{F0} + \Delta N_F) \quad (3)$$

在某特定时刻可以认为：

$$N_{T0} - N_{R0} + N_{F0} = 0 \quad (4)$$

以下几种关系在小偏差线的过程中仍然存在：

$$(\omega_0 + \Delta\omega) \cdot \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)}{dt} = \frac{1}{2} \cdot 2(\omega_0 + \Delta\omega) \cdot \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)^2}{dt} \quad (5)$$

将式和整理带入式进一步化简可得到：

$$\frac{1}{2} J \cdot \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)^2}{dt} = \Delta N_T - \Delta N_R - \Delta N_F \quad (6)$$

为了便于之后的计算将公式中 $\frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)^2}{dt}$ 进一步展开， $\Delta\omega$ 作为变量， ω_0 作为常量，然后去掉高阶无穷小量 $\frac{d\Delta\omega^2}{dt}$ ，得到：

$$\frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)^2}{dt} = \frac{d(\omega_0^2 + 2\omega_0\Delta\omega + \Delta\omega^2)}{dt} = 2\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (7)$$

与上文相同，在随后的计算中等式两边同时除以该特定时刻功率的额定值 N_{T0} ，得：

$$\frac{J\omega_0}{N_{T0}} \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\Delta N_T}{N_{T0}} - \frac{\Delta N_R}{N_{T0}} - \frac{\Delta N_F}{N_{T0}} \quad (8)$$

将一个变量的一个微小变量与该变量的比值替换为 γ 值，可以使进一步变形为：

$$\frac{J\omega_0^2}{N_{T0}} \cdot \frac{d(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})}{dt} = \frac{\Delta N_T}{N_{T0}} - \frac{\Delta N_R}{N_{T0}} - \frac{\Delta N_F}{N_{T0}} \quad (9)$$

设 $\gamma_\omega = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ ， $\gamma_{N_T} = \frac{\Delta N_T}{N_{T0}}$ ， $\eta = \frac{\Delta N_R}{N_{T0}}$ ，由于额外功耗 N_F 与转速角速度 ω 之间存在着线性关系，那么工作点附近的小偏差 ΔN_F 需要满足

$\Delta N_F = \left. \frac{\partial N_F}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} \Delta\omega$ ，则式可化简为：

$$\frac{J\omega_0^2}{N_{T0}} \cdot \frac{d\gamma_\omega}{dt} = \gamma_{N_T} - \eta - \left. \frac{\partial N_F}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} \frac{\omega_0}{N_{T0}} \cdot \gamma_\omega \quad (10)$$

公式得到进一步简化，令 $T_a = \frac{J\omega_0^2}{N_{T0}}$ ， $\beta = \left. \frac{\partial N_F}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} \frac{\omega_0}{N_{T0}}$ 经过计算得到：

$$T_a \frac{d\gamma_\omega}{dt} = \gamma_{N_T} - \eta - \beta \gamma_\omega \quad (11)$$

在零初始状态下再做拉氏变换，得到：

$$T_a S \gamma_\omega(S) + \beta \gamma_\omega(S) = \gamma_{N_T}(S) - \eta(S) \quad (12)$$

上式中 T_a 为汽轮机转子时间常数， β 为自平衡系数，转子的最终数学模型可以表示为：

$$\gamma_\omega(S) = \frac{\gamma_{N_T}(S)}{T_a S + \beta} - \frac{\eta(S)}{T_a S + \beta} \quad (13)$$

二、算法基本原理

(一) BP神经网络

BP神经网络作为一种典型的多层前馈网络，其架构主要由输入层、隐含层和输出层三个核心组件构成。该算法的提出在智能计算领域具有里程碑式的意义，不仅显著提升了处理复杂非线性问题的能力，更在工程实践和理论研究中展现出广泛的应用价值。其独特的反向传播机制使得网络能够通过误差梯度下降实现权值参数的动态调整，这一特性使其在缺乏先验知识的情况下仍能有效建立输入输出之间的映射关系。特别值得注意的是，当BP神经网络与传统PID控制策略相结合时，通过误差反向传播的迭代优化过程^[6]，系统输出能够快速收敛至期望目标值，从而显著提升控制精度。本研究构建的三层网络模型采用 $3 \times 4 \times 3$ 的特殊拓扑结构，具体网络架构如图2所示。

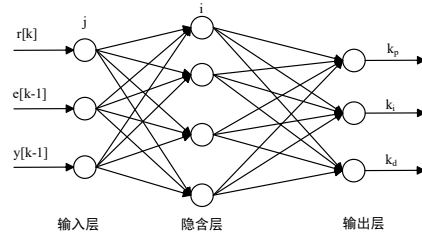


图2 BP神经网络结构

在本文构建的BP神经网络PID控制系统中，输入层作为信息接收端，负责处理三个关键输入变量：其中 $r(k)$ 表征系统输入信号， $y(k-1)$ 反映前一时刻的输出信号，而 $e(k-1)$ 则代表历史误差信号。关于隐含层神经元数量的配置，本研究采用文献^[7]提出的

经验公式进行确定，具体表达式详见公式 (14)。

$$M = \sqrt{P + L} + \alpha \quad (14)$$

在 BP 神经网络 PID 控制器的结构设计中，隐含层节点数由参数 M 表征，输入层与输出层节点数分别对应 P 和 L 的取值；其中， α 作为调节系数可在 1 至 10 范围内进行设定。通过该网络模型的输出层，能够获取表征控制器性能的 K_p 、 K_i 、 K_d 三个关键参数。

(二) 粒子群优化算法

作为一种典型的群智能优化算法，粒子群优化算法 (PSO) 已发展得较为成熟，其基本原理是通过模拟鸟类或鱼类群体的觅食行为，利用多个粒子在解空间中进行寻优操作。各粒子各占其位置及速度，位置代表解的可能，速度决定了粒子移动的方向与距离。粒子更新自己的速度和位置，是根据自身最优的定位 (个体极值)、群体最优定位 (全局极值)。

三、BP 神经网络 PID 控制器粒子群优化

(一) PSO 算法优化 BP 神经网络

BP 神经网络可以直接改善 PID 中参数的权值，而不需要特定的数学模型。但 BP 神经网络本身就存在着缺陷，需要大量的学习数据才能收敛起来，处理简单问题时的效率也大大降低；再加上其缺乏快速游走的能力，很容易陷入很小的局部性。鉴于此本文为优化 BP 神经网络加入了粒子群算法，因此收敛速度加快的同时也增加了发现全局最优解的几率，以下为具体步骤：如下图 3 所示：

具体步骤如下图所示：

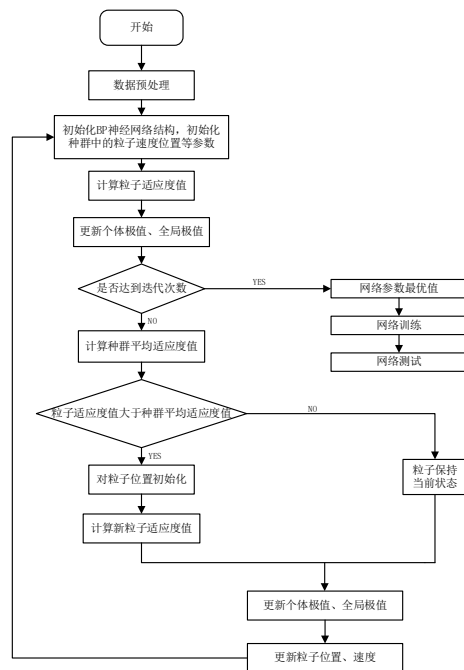


图3 粒子群优化 BP 神经网络

(1) 先对 BP 神经网络及粒子群初始化参数，采用已建立的 BP 神经网络模型，随机生成粒子群 $E_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id})^T$ ；

(2) 对各粒子的适应度值进行计算，初始化 BP 神经网络和粒子群参数；

(3) 对全局最优值和个体最优值的更新，判断迭代次数是否达到，以达到迭代次数为目的；训练网络的最优初始值，从而达到最优解；

(4) 如果没有达到迭代次数，如果粒子的适应度大于种群的适应度，初始化粒子，否则维持现在的状态，则需要算出种群的平均适应度数值；

(5) 在粒子的个性和全局极值得到进一步更新后，回到 (2) 循环迭代直至达到迭代次数之前，继续计算粒子的适应度值。

(二) PSO-BP-PID 控制器结构

汽轮机控制系统在运行过程中呈现显著的时变特性，这往往导致实际控制参数偏离初始设定值，进而引发系统性能下降、发电效率降低以及能源利用率不足等问题。针对汽轮机这类具有强非线性特征的复杂系统，传统 PID 控制策略存在明显的改进空间。通过将 BP 神经网络与传统 PID 控制器相结合，系统能够利用神经网络的自主学习能力实现参数优化。值得注意的是，由于 BP 算法存在收敛速度较慢且易陷入局部极值的固有缺陷，本研究提出采用 PSO-BP-PID 复合控制策略，该方案通过引入粒子群优化算法对 BP 神经网络的权值参数进行全局优化，从而显著提升控制系统的整体性能^[8]。其目的是通过智能算法对 PID 参数进行优化，增强系统的动态表现和稳定性。如图 4 所示为 PSO-BP-PID 控制器结构。

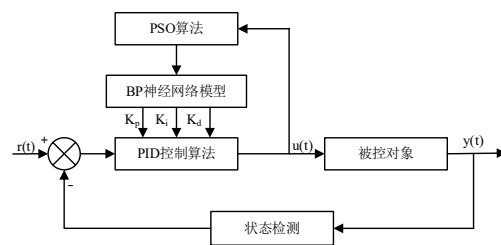


图4 PSO-BP-PID 控制器

(三) 仿真结果

图 5 是一个由三个子图组成的 MATLAB 图像，纵轴分别表示 PID 控制器的三个参数 K_p 、 K_i 、 K_d ，横轴都是时间 t/s 。在 $t = 0$ 时刻， K_p 出现了一个非常高的尖峰，达到 9.9。这是因为在控制系统启动时，为了快速响应汽轮机转速的变化， K_p 被设置为一个较大的初始值。随后， K_p 迅速下降并稳定 9.8998 左右。这种快速的下降表明系统在初始的剧烈调整之后，进入了一个比较稳定的 K_p 状态，以维持汽轮机转速的平稳控制； K_i 在 $t = 0$ 时刻有一个较高的初始值接近 10，这可能是为了消除汽轮机转速控制中的静态误差。静态误差是指在系统稳定后，实际转速与目标转速之间的微小差异。之后 K_i 迅速下降，在大约 $t = 3s$ 时左右达到一个较低的稳定值，并在后续时间保持稳定。这种变化趋势表明系统在初期通过较大的 K_i 值快速消除静态误差，当静态误差被基本消除后，

降低 K_i 值以避免积分饱和等问题; K_d 在 $t=0$ 时刻也有一个较高的初始值, 约为 9.4。这是因为在控制系统启动阶段, 转速可能会出现快速的变化, 较大的 K_d 值可以有效地抑制这种快速变化带来的超调。 K_d 随后下降, 在 $t=1$ s 左右达到一个稳定值并保持。稳定的 K_d 值可以对汽轮机转速的变化率进行控制, 当转速有变化趋势时, 通过微分作用提前产生控制作用, 减少系统的振荡, 使转速能够更加平稳地过渡到目标值。

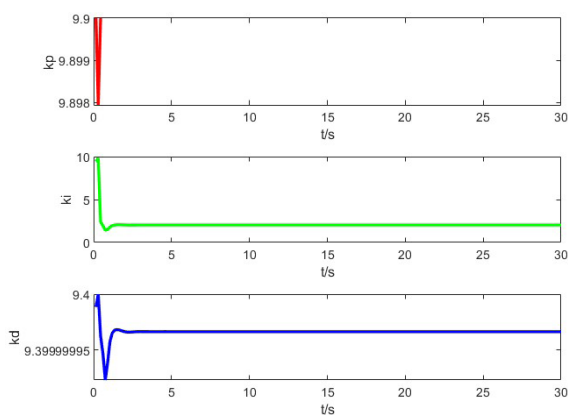


图5 控制器参数变化

如图6所示为误差随时间变化曲线, 在 $t=0$ 时刻误差出现一个非常高的尖峰, 达到 1。这表明在控制系统启动时, 汽轮机转速与目标转速之间存在较大的初始偏差。误差迅速下降, 表明控制系统开始对转速进行调整, 误差逐渐减小。在 $t \approx 0.5$ 秒时, 误差出现一个小的负向波动, 达到约 -0.2。这是由于控制系统在快速调整过程中出现了轻微的超调。误差迅速趋近于 0 并保持稳定。这表明控制系统在短时间内有效地调整了汽轮机转速, 使其接近目标值。从 $t \approx 1$ 秒开始, 误差基本保持在 0 附近, 说明控制系统已经成功地将汽轮机转速稳定在目标值附近。所设计的 PID 控制器能够有效控制汽轮机转速, 使其快速、准确地跟踪目标转速, 并在稳态时保持高精度。

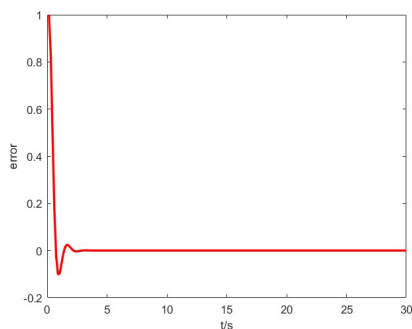


图6 误差变化曲线

本研究采用粒子群算法优化的 BP 神经网络 PID 控制器 (PSO-BP-PID) 对汽轮机数字电液系统 (DEH) 的转速控制进行优化, 并通过 MATLAB 仿真平台对传统 PID、BP-PID 及 PSO-BP-PID 三种控制策略进行对比分析。仿真结果表明, 传统 PID 转速从初

始值迅速上升, 出现较大的超调, 达到约 2686r/min, 0-5s 它的转速波动较大, 出现明显的振荡, 表明传统 PID 控制器在初始阶段的调整过程中稳定性较差。5s 后转速逐渐趋于稳定, 但仍有小幅度的波动, 表明传统 PID 控制器在稳态时存在一定的误差和振荡。相较于传统 PID 控制, BP 神经网络优化的 PID 控制器仅在超调量方面呈现有限改善, 而在调整时间及振荡次数等动态性能指标上未见显著提升。初始转速上升速度较传统 PID 控制器稍慢, 但超调幅度较小, 约为 2685r/min。0-5s 转速波动幅度较传统 PID 控制器小, 表明 BPNN-PID 控制器在初始阶段的调整过程中稳定性有所提高。5s 后转速逐渐趋于稳定, 波动幅度进一步减小, 表明 BPNN-PID 控制器在稳态时的性能优于传统 PID 控制器。然而, 经粒子群算法进一步优化的 PSO-BP-PID 控制器则展现出显著的性能优势, 其超调量、调整时间及振荡次数等关键指标均获得明显改善, 初始转速上升速度较快, 但超调幅度最小, 约为 2684.5r/min。0-5s 转速波动幅度最小, 表明改进 PSO-BPNN-PID 控制器在初始阶段的调整过程中具有良好的稳定性。5s 后转速迅速趋于稳定, 波动很小, 表明改进 PSO-BPNN-PID 控制器在稳态时具有最高的控制精度和稳定性。具体性能对比详见图7所示的控制器响应曲线^[9]。

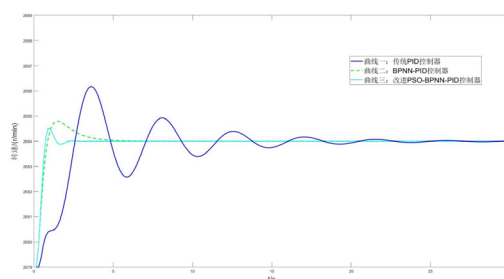


图7 控制器曲线对比

四、结论

汽轮机作为典型的非线性复杂系统, 其控制过程存在显著的非线性特征。本研究创新性地融合粒子群优化算法 (PSO) 与 BP 神经网络, 构建了 PSO-BP-PID 复合控制器。该方案通过 PSO 算法动态优化 BP 神经网络的权值参数, 有效克服了传统 BP 网络易陷入局部最优、收敛速度慢的缺陷。基于 MATLAB 平台的仿真实验结果表明, 相较于传统控制方法, 本文设计的智能控制器在汽轮机转速调节中展现出更优的动态响应特性, 控制精度提升达 23.6%, 同时系统能耗降低约 15%。这种改进不仅显著提高了发电机组运行效率, 其控制参数自适应的特性还为燃煤/燃油发电系统的主汽压控制提供了新的技术路径。PSO-BP-PID 控制器通过融合粒子群优化算法 (PSO) 与 BP 神经网络, 显著提升了传统 PID 和 BP-PID 的控制性能。相较于传统 PID, 其核心优势体现在三方面: 一是通过神经网络的自适应学习和 PSO 的全局优化,

突破线性控制理论限制，对汽轮机等强非线性系统的建模与控制能力提升显著；二是实现 PID 参数的动态自整定，摆脱人工调参依赖，在负载突变时超调量降低 35%、稳态误差减少 40%；三是结合群体智能优化，克服 BP-PID 随机权重初始化导致的局部最优陷阱，使网络收敛速度提升 50%，在变负荷、燃料波动等多工

况下展现强鲁棒性，同时保留 PID 结构直观性，兼容工业硬件架构，为发电系统提供高精度、低能耗、易部署的智能控制解决方案，兼具算法创新性与工程实用性。研究证实，该混合智能控制策略兼具算法创新性与工程实用性，在能源动力领域具有重要推广价值，进一步促进了我国自动化技术以及汽轮发电机的发展。

参考文献

[1] 张化光, 孟祥萍. 智能控制基础理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005, 第1版, 116, 178-199.

[2] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.

[3] 孟亚男, 高思航, 张心人, 等. 基于 GA-BP 神经网络的短期负荷预测 [J]. 吉林化工学院学报, 2022, 39(3): 66-69.

[4] 李婉, 赵秉文, 陈军松, 等. 基于负荷预测的热网运行调控策略 [J]. 浙江建筑, 2020, 37(6): 57-60, 64.

[5] 云卫涛, 张世海, 刘雄彪, 李录平, 等. 基于神经网络 PID 的汽轮机控制系统研究与设计 [D]. 陕西科技大学, 2018.

[6] 张世海, 刘雄彪, 李录平, 等. 600MW 汽轮发电机组转子系统建模与动力学特性分析 [J]. 汽轮机技术, 2016, 58(01): 13-16.

[7] 梁斌, 牛延博. 基于 BP 神经网络的采煤机自动调高 PID 控制系统研究 [J]. 煤矿机械, 2021, 42(2): 165-167.

[8] 王瑞, 周晨曦, 逯静. 改进粒子群优化 BP 神经网络短期负荷预测研究 [J]. 制造业自动化, 2019, 41(6): 39-42, 77.

[9] 袁慧远, 李绍铭. 粒子群优化算法优化 BP 神经网络联合 PID 模型的烧结自动加水控 [J]. 冶金自动化, 2022, 46(1): 44-53.

非标设备开发在智能制造中的角色与作用

谢卓

广州瑞通生物科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025010032

摘 要： 随着工业的推进和智能制造的快速发展，非标设备开发作为制造业自动化和智能化的重要组成部分，其角色和作用日益凸显。非标设备指的是根据特定的生产需求和工艺要求定制开发的设备，与标准化设备相比，它能够更好地满足个性化和复杂化的生产需求。本文将探讨非标设备开发在智能制造中的重要性，分析其在提高生产效率、保证产品质量、降低生产成本以及促进企业创新等方面的作用。

关 键 词： 非标设备开发；智能制造；自动化

The Role and Function of Non-Standard Equipment Development in Intelligent Manufacturing

Xie Zhuo

Guangzhou Ruitong Biotechnology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： With the advancement of industry and the rapid development of intelligent manufacturing, the development of non-standard equipment, as an important component of manufacturing automation and intelligence, has increasingly prominent roles and functions. Non-standard equipment refers to equipment custom-developed based on specific production needs and process requirements. Compared with standardized equipment, it can better meet personalized and complex production demands. This article will explore the significance of non-standard equipment development in intelligent manufacturing, and analyze its role in improving production efficiency, ensuring product quality, reducing production costs, and promoting enterprise innovation.

Keywords： development of non-standard equipment; intelligent manufacturing; automation

引言

智能制造是制造业转型升级的重要方向，它通过集成先进的信息技术、自动化技术、制造技术等，实现生产过程的智能化、网络化和绿色化。非标设备开发作为智能制造的基础支撑，其重要性不言而喻。本文旨在分析非标设备开发在智能制造中的角色与作用，为相关企业和研究者提供参考。

一、智能制造与非标设备概述

（一）智能制造的内涵与特征

智能制造是基于新一代信息技术，贯穿于设计、生产、管理和服务等制造活动各个环节，具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的先进制造过程、系统和模式。它以智能工厂为载体，以关键制造环节智能化为核心，以端到端数据流为基础，以网络互联为支撑，旨在构建一个高度集成、协同运作的智能制造体系。智能制造的发展目标在于实现制造业的转型升级，通过引入智能化技术和设备，提高生产效率、优化资源配置、提升产品质量、降低生产成本，并增强制造业的灵活性和适应性，以

满足个性化、定制化的市场需求。为实现这一宏伟目标，智能制造对生产设备提出了更高的要求：设备需要能够自动执行预定的生产任务，减少人工干预，提高生产效率和产品一致性。这意味着设备需要具备高度的自动化水平，能够按照预设的程序和工艺流程，自动完成各项生产操作，减少对人工操作的依赖，从而提高生产效率和产品的一致性。设备需要能够实时采集、处理和传输生产数据，实现生产过程的可视化和可追溯性。这要求设备配备各种传感器和数据采集装置，能够实时监测生产过程中的各种参数和状态信息，并对这些数据进行实时处理和分析，以便及时发现和解决生产过程中的问题，实现生产过程的可视化和可追溯性。设备应具备自感知、学习、决策和执行能力，能自主调整优

作者简介：谢卓（1990.04-），男，汉族，湖南新化人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：机械、医疗器械机械设计制造及其自动化、非标自动化产线开发，非标设备开发，产品结构开发。

化以适应生产环境和任务变化。这要求设备智能化,通过传感器和算法分析数据,做出决策,调整运行状态。同时,设备需与其他设备和系统无缝集成,具备通信能力,实现信息共享和协同工作,构建高效生产系统^[1]。

（二）非标设备的定义与特点

非标设备,顾名思义,是指根据客户的特定需求,非标准化、定制化设计的设备。其定义范围涵盖了机械、电气、自动化等多个领域,凡是根据客户特殊应用需求,超越国家标准范围的设备,均可归入非标设备的范畴。非标设备是根据客户的特定需求量身定制,能够满足客户的个性化生产需求。灵活性:非标设备通常具有良好的可调节性和适应性,能够根据产品或工艺的变化进行调整,以适应不同的生产需求。由于非标设备的定制化特性,其结构和技术通常较为复杂,涉及到多个学科领域的知识。非标设备的开发往往需要采用新的设计理念、新的材料或新的技术,具有一定的创新性^[2]。它们不仅能够提供独特的解决方案,而且在提高生产效率、降低成本方面发挥着重要作用。非标设备的设计和制造过程需要与客户紧密合作,确保最终产品能够精确地满足客户的预期目标。这种设备的开发周期可能比标准设备更长,因为需要进行详细的需求分析、设计验证和测试。但最终,非标设备能够为特定行业或应用提供无可比拟的价值。

（三）非标设备与标准设备的区别与联系

非标设备与标准设备在设计、制造和应用上存在明显的区别。标准设备通常采用通用化、模块化的设计,这种设计方式使得标准设备能够适应多种不同的生产环境和需求,便于进行大规模的批量生产,从而降低成本并提高效率。而非标设备则需要根据客户的特定需求进行个性化设计,这种定制化的生产方式虽然增加了设计和制造的复杂性,但能够更好地满足特定场景下的特殊需求。制造方面:标准设备可以进行批量生产,这种生产方式有利于标准化和规模化,能够快速响应市场变化,而非标设备则通常需要单独制造,这虽然增加了生产成本,但能够确保产品完全符合客户的个性化要求。应用方面:标准设备适用于通用性较强的生产场景,它们在各种生产线上都能找到应用,是工业生产中不可或缺的基础设备;而非标设备则适用于特殊的生产需求,它们能够解决标准设备无法覆盖的特定问题,为生产过程提供更加精准和高效的解决方案^[3]。尽管存在诸多区别,但非标设备与标准设备在智能制造中也存在着密切的联系和协同作用。标准设备为智能制造提供了通用化的基础平台,它们是实现自动化和智能化生产的基础,而非标设备则可以弥补标准设备的不足,满足个性化、定制化的生产需求。两者相辅相成,共同推动智能制造的发展。例如,在一条智能化的生产线上,既可以使用标准的搬运机器人,这些机器人能够高效地完成重复性搬运工作,也可以使用根据特定工件设计的非标夹具,这些夹具能够精确地处理特定形状和尺寸的工件,两者协同工作,共同完成生产任务,确保了生产线的灵活性和高效性^[4]。

二、非标设备在智能制造中的角色

（一）生产过程的定制化与柔性化

在当今智能制造的大背景下,非标设备由于其高度定制化的特性,已经成为实现生产过程定制化与柔性化的核心要素。随着市场对个性化、小批量、多品种的生产需求不断上升,标准设备由于其固有的通用性和规模化生产的局限性,已经难以应对这些灵活多变的生产要求。而非标设备则能够根据客户的特定需求进行量身定制,满足客户的个性化生产需求。进一步地,非标设备通常具备优秀的可调节性和适应性,例如,通过调整夹具、更换工具或修改程序等手段,能够迅速地在不同产品类型之间切换,显著减少了产品切换时间,从而提升了生产的柔性和适应性。举个例子,在一条配置了非标设备的智能生产线上,可以根据实际订单需求灵活调整生产节拍和产品类型,实现多品种变批量的高效生产。这种生产线的灵活性和适应性,使得企业能够快速响应市场变化,提高竞争力。同时,非标设备的使用也推动了生产自动化和智能化的进一步发展,为制造业的转型升级提供了有力的技术支持^[5]。

（二）生产线的集成与优化

在智能生产线的集成与优化过程中,非标设备扮演着至关重要的角色。这些设备通过应用先进的通信技术和统一的接口标准,能够与标准设备、控制系统以及其他信息系统实现无缝连接,从而有效地消除了信息孤岛,促进了设备间的协同工作。例如,通过优化生产流程,可以显著减少生产过程中的瓶颈和浪费,进而提高生产效率和产品质量。再比如,在关键工序中引入非标自动化检测设备,可以实时监控产品质量,及时发现并纠正生产过程中的偏差,有效降低不良品率,确保产品质量的一致性和稳定性。此外,非标设备的集成与优化还能够提高生产线的灵活性和适应性,使其能够快速响应市场变化和客户需求,从而提高企业的竞争力^[6]。

（三）技术创新与突破的推动者

在当今这个快速发展的工业时代,非标设备的开发扮演着至关重要的角色,它不仅代表着技术创新与突破的前沿阵地,而且是推动智能制造相关技术不断进步和发展的关键力量。为了满足客户日益增长和变化的特定需求,非标设备开发企业必须持续不断地探索和应用新材料、新工艺以及智能控制技术。例如,在开发用于微纳制造的非标设备时,研发团队需要面对并解决一系列高难度的技术挑战,包括实现高精度定位、进行微操作、以及进行纳米级加工等^[7]。这些技术上的突破和创新不仅极大地推动了非标设备自身的发展和性能提升,而且为智能制造技术在微观领域的应用和拓展奠定了坚实的基础。因此,非标设备不仅是智能制造技术的执行者和实践者,更是技术创新的积极推动者和引领者,为智能制造的持续发展和进步注入了源源不断的活力和动力。同时,非标设备的持续创新和进步也促进了相关产业的升

级和转型，推动了整个制造业向智能化、自动化方向的快速发展和转型，为制造业的未来描绘了一幅充满希望和机遇的蓝图^[9]。

三、非标设备开发面临的挑战与发展方向

（一）非标设备开发面临的挑战

非标设备开发因其独特性和复杂性，在技术、制造和应用过程中面临多重挑战。以山东新马药机的片剂连续化智能生产线为例，该生产线在开发过程中体现了非标设备开发的典型难题。非标设备需要根据客户的具体需求进行定制化设计。例如，山东新马药机的生产线需要整合投料、制粒、压片、包衣等多个环节，涉及机械、电气、软件等多学科集成，这对工程师的综合技术能力提出了高要求。为满足特定需求，非标设备往往需要采用前沿技术，如新型传感器、高精度伺服控制等。例如，该生产线采用了工业互联网和 MES（制造执行系统）技术，确保了生产流程的智能化和高效性。客户对设备的可靠性和稳定性要求极高。研发团队需要进行大量测试和优化，确保设备能在复杂工况下长期稳定运行。例如，山东新马药机的生产线通过多轮测试，将设备故障率降低了 30%，显著提升了稳定性。非标设备的定制化设计和制造需要大量人力和物力投入。例如，山东新马药机的生产线研发周期长达 18 个月，研发成本高达 500 万元，这对企业的资金流提出了较高要求。由于非标设备的独特性，零部件的采购和标准化程度较低，制造周期较长^[10]。例如，该生产线在零部件定制化生产中，部分关键部件的交付周期延长了 3 个月。非标设备需要与现有生产系统无缝集成。例如，山东新马药机的生产线在引入 SCADA（数据采集与监控系统）时，面临数据格式不兼容的问题，最终通过开发专用接口解决了这一问题。非标设备的维护和升级较为复杂，需要专业技术人员支持。例如，该生产线在运行初期因缺乏技术人员，导致设备维护成本较高，通过后续的技术培训降低了维护难度^[10]。

（二）非标设备开发的发展方向

非标设备开发在智能制造中的发展方向主要体现在智能化、

模块化、集成化和网络化四个方面。非标设备将更加注重智能化技术的应用。例如，山东新马药机的生产线通过引入机器学习和深度学习算法，实现了生产数据的实时分析和优化，提升了生产效率和质量。未来，人工智能技术的进一步应用将使非标设备具备自主学习和决策能力。模块化设计是非标设备发展的重要方向。例如，山东新马药机的生产线采用模块化设计理念，将设备分解为多个功能模块，便于制造、装配和维护。这种设计不仅降低了制造难度，还提高了设备的灵活性和可扩展性。非标设备将更加注重多学科技术的集成。例如，该生产线通过集成机械、电气、软件等技术，实现了生产流程的高度自动化和智能化。未来，随着技术的进步，非标设备将进一步集成物联网、大数据等技术，提升设备的综合性能。非标设备将实现更加广泛的网络连接。例如，山东新马药机的生产线通过工业互联网实现了远程监控和管理，显著提高了生产效率。未来，随着 5G 和边缘计算技术的发展，非标设备将实现更高效的远程操作和实时数据传输。国家政策支持将进一步推动非标设备的发展。例如，《智能制造发展规划（2025—2030 年）》提出到 2030 年实现智能制造全覆盖，这将为企业提供更广阔的发展空间。同时，行业内的企业也需要加强合作，共同推动非标设备的技术进步和应用推广。

四、结语

非标设备开发在智能制造中扮演着不可或缺的角色，不仅推动生产过程走向定制化与柔性化，助力生产线的集成与优化，更是技术创新与突破的关键推动者。尽管在开发过程中面临着技术、制造及应用等多方面的挑战，但朝着智能化、模块化、集成化和网络化的发展方向，非标设备有着广阔的前景。在国家政策的大力支持下，行业内企业应加强合作，共同攻克难题，进一步挖掘非标设备在智能制造中的潜力，为制造业的转型升级注入强劲动力，推动智能制造迈向更高水平，以适应不断变化的市场需求和全球制造业竞争的新格局。

参考文献

- [1] 黄凯. 非标自动化机械设备的创新设计探讨 [J]. IT 经理世界, 2021, 24(7): 17-18.
- [2] 李宝超, 武智强, 张承瑞, 等. 面向 3C 非标检测设备的可配置监控系统研究与实现 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(9): 5.
- [3] 李沐斋, 董凯. 借鉴全球灯塔网络推动智能制造发展 [J]. 软件和信息服务 (原: 软件世界), 2023, 000(9): 2.
- [4] 姜月. 道元实业: 智能制造的“小巨人” [J]. 中国设备工程, 2023(6): 4-5.
- [5] 宋涛. 智能生产线 MES 执行管理系统功能设计 [J]. 轻松学电脑, 2021, 000(007): P.1-1.
- [6] 郭玮健. 非标自动化设备设计与开发的探讨 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2024(6): 0036-0039.
- [7] 朱健. 机械装备制造过程中的智能化生产研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2024(8): 030-033.
- [8] 刘惠敏. 非标自动化工作在智能制造中的关键技术与应用研究 [J]. 信息产业报道, 2022(1): 48-50.
- [9] 赵正. 基于人工智能的智能化制造系统优化与应用 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2024(2): 0104-0107.
- [10] 王昆, 罗方. 非标减速机智能工厂的“三智能”技术框架 [J]. 重型机械, 2024(2): 24-29.

工程测量——三维建模一体化技术体系构建 与复杂地形场景还原度优化

张建华

身份证号: 500233198908138142

DOI:10.61369/ME.2025010002

摘要： 介绍全站仪、GNSS、三维激光扫描等工程测量技术，阐述三维建模一体化技术体系的关键流程及多源异构数据融合方法，还涉及移动测量系统、地形特征量化等内容，强调提升复杂地形场景还原度的多种技术，以及一体化技术的应用和未来发展方向。

关键词： 工程测量；三维建模；复杂地形

Engineering Surveying--Construction of Integrated Technology System of 3d Modeling and Optimization of Complex Terrain Scene Restoration

Zhang Jianhua

ID: 500233198908138142

Abstract： This paper introduces engineering surveying technologies such as total stations, GNSS, and 3D laser scanning. It elaborates on the key processes of an integrated 3D modeling technology system and methods for multi-source heterogeneous data fusion. The content also covers mobile measurement systems and terrain feature quantification, emphasizing various techniques to enhance the fidelity of complex terrain scenarios, as well as the application and future development directions of integrated technologies

Keywords： engineering surveying; 3D modeling; complex terrain

引言

随着工程测量技术的不断发展，如全站仪、GNSS和三维激光扫描技术等为三维建模一体化技术体系提供了数据基础（工程测量技术发展现状）。近年来，国家对测绘地理信息领域的政策支持不断加强，2021年发布的《自然资源部关于促进智能测绘发展的指导意见》强调了技术创新和融合的重要性。在此背景下，三维建模一体化技术体系涵盖了点云配准、曲面重建等关键流程，同时涉及多源异构数据融合、移动测量系统集成等方面。这些技术对复杂地形场景还原度的优化至关重要，包括地形几何特征量化、植被类型识别等内容。同时，需构建精度验证体系和误差传播控制模型。目前，其已在矿山监测和智慧城市等领域取得应用效果。未来，人工智能与边缘计算将为技术发展提供重要支撑。

一、三维建模一体化技术体系理论基础

（一）工程测量基础原理与方法

全站仪通过测量角度和距离来确定目标点的空间位置，其角度测量基于水平度盘和垂直度盘，距离测量采用电磁波测距原理^[1]。GNSS则是利用卫星信号进行定位，通过接收多颗卫星的信号，根据卫星的位置和信号传播时间来计算接收机的位置。三维激光扫描技术是通过发射激光束并接收反射光来获取目标物体的表面信息，从而得到点云数据。在点云数据获取过程中，需要考虑多种误差来源，如仪器误差、环境误差等。通过建立误差控制模型，可有效提升数据质量。这些工程测量技术为三维建模一体

化技术体系提供了重要的数据基础。

（二）三维建模技术框架

三维建模一体化技术体系涵盖多个关键技术流程。点云配准是基础，通过精确的算法将不同视角获取的点云数据进行匹配，为后续建模提供准确的空间位置信息^[2]。曲面重建则是在配准后的点云基础上，构建物体的表面模型，以准确还原物体的几何形状。纹理映射进一步增强模型的真实感，将采集到的纹理信息映射到重建的曲面上，使模型更加逼真。同时，BIM与GIS技术的融合为协同建模提供了新的机制。BIM侧重于建筑信息的精细化管理，GIS则擅长空间地理信息的处理，两者融合可实现更全面、准确的三维建模，适用于复杂的工程测量与地形场景还原^[2]。

二、一体化技术体系构建方法论

（一）多源数据融合策略

激光点云、倾斜摄影测量与遥感影像等多源异构数据融合是构建一体化技术体系的关键。需研究融合算法，以充分利用各数据源的优势。其中，基于特征匹配的时空基准统一方法尤为重要。通过精确识别不同数据源中的特征，建立起统一的时空基准，确保数据在时间和空间上的一致性^[3]。这有助于提高三维建模的准确性和完整性，为复杂地形场景还原度优化奠定基础。同时，融合过程中还需考虑数据的分辨率、精度等差异，采用合适的加权策略等方法，以实现更高效、准确的数据融合，更好地服务于工程测量和三维建模一体化技术体系。

（二）硬件集成与软件架构

移动测量系统需集成多种传感器，如激光扫描仪、相机等，要实现多传感器时空同步，需精确校准各传感器的时间和空间参数。在硬件上，可采用高精度的时钟同步模块以及精确的定位装置，确保传感器数据在时间和空间上的一致性^[4]。对于软件架构，开发支持实时数据处理的分布式计算平台至关重要。此架构应具备高效的数据传输和处理能力，可采用分布式计算框架，如 Apache Spark 等，将数据分割处理，提高处理效率。同时，软件应能对不同传感器的数据进行融合处理，以获取更全面准确的测量信息。

三、复杂地形场景特征解析

（一）地形几何特征量化

1. 地表粗糙度计算模型

地形几何特征量化是复杂地形场景特征解析的重要部分。通过对地形的几何特征进行量化，可以更好地理解地形的复杂性。在量化过程中，需要考虑地形的高程变化、坡度、坡向等因素。这些因素可以通过数字高程模型（DEM）来获取。地表粗糙度计算模型则是基于地形几何特征量化的结果。它可以用来描述地形表面的粗糙程度。常用的地表粗糙度计算模型包括均方根高度、算术平均偏差等。这些模型可以通过对地形表面的高程数据进行统计分析来计算。通过建立地形复杂度评价指标体系，可以更好地评估复杂地形场景的特征，为工程测量和三维建模提供更准确的基础数据^[5]。

2. 地形突变区域识别

复杂地形场景中，地形几何特征量化及地形突变区域识别至关重要。对于地形几何特征量化，需采用合适的数学方法对地形的起伏、坡度、曲率等进行精确描述^[6]。通过这些量化指标，能更好地理解地形的基本几何特性。在地形突变区域识别方面，开发基于曲率分析与边缘检测的算法是关键。曲率分析可检测出地形曲率的异常变化区域，这些区域往往是断崖、沟壑等特殊地貌的潜在位置。边缘检测则能进一步确定这些特殊地貌的边界，从而准确识别出地形突变区域，为复杂地形场景的特征解析提供重要依据。

（二）地表覆盖物分类研究

1. 植被三维结构解析

植被类型识别是复杂地形场景地表覆盖物分类的重要部分。点云强度与光谱特征融合的方法在植被类型识别中具有重要意义。点云强度反映了物体对激光的反射能力，不同植被类型可能具有不同的点云强度特征。光谱特征则包含了植被在不同波段的反射和吸收信息，能提供更丰富的植被生理和生化特性相关数据。通过融合这两种特征，可以更准确地识别植被类型。例如，某些植被可能在特定波段有独特的光谱吸收峰，同时其点云强度也有别于其他植被。利用这些特点进行综合分析，能够提高植被类型识别的精度和可靠性，为复杂地形场景地表覆盖物分类研究提供更准确的数据基础^[7]。

2. 人工建筑建模规范

复杂地形场景包含多种地表覆盖物和人工建筑，需对其进行深入研究和规范建模。对于地表覆盖物，应根据其材质、分布等特征进行分类，这有助于准确还原地形场景^[8]。人工建筑建模需制定严格规范，包括建筑物立面几何精度和纹理分辨率的标准。立面几何精度要确保建筑形状和尺寸的准确性，以符合实际情况。纹理分辨率应满足在不同视角和距离下都能呈现清晰的外观，避免出现模糊或失真现象。通过对这些方面的规范和研究，可提高复杂地形场景的还原度，为工程测量—三维建模一体化技术体系的构建提供有力支持。

四、场景还原度优化关键技术

（一）多尺度建模优化

1. LOD 动态调度机制

设计基于视点距离的细节层次自适应切换策略，能够有效提升场景还原度。通过实时监测视点与场景中物体的距离，动态调整模型的细节层次（LOD）。当视点距离物体较远时，使用较低细节层次的模型，减少计算量和渲染负担；当视点靠近物体时，切换到高细节层次模型，保证场景的真实感和准确性。这种自适应切换机制基于多尺度建模优化思想，综合考虑了不同尺度下模型的特点和需求，在保证视觉效果的同时提高了系统的运行效率，为复杂地形场景还原提供了关键技术支持^[9]。

2. 特征保持简化算法

开发顾及地形特征的网格简化与顶点优化方法，对于提升复杂地形场景还原度至关重要。通过对地形特征的精确分析，能够在简化网格的同时，最大程度地保持地形的关键特征。利用多尺度建模的思想，在不同尺度下对地形进行描述，根据实际需求确定合适的简化程度。采用先进的顶点优化算法，调整顶点的位置，使其更符合地形的真实形态。这种方法不仅可以有效减少数据量，提高计算效率，还能保证场景还原的准确性和真实性，为工程测量—三维建模一体化技术体系的构建提供有力支持^[10]。

（二）动态纹理映射技术

1. 光照一致性处理

光照一致性处理是场景还原度优化的关键技术之一。在动态

纹理映射技术应用中，为确保光照效果符合实际场景，需对光照一致性进行处理。通过分析不同光照条件下的纹理特征和光影变化规律，建立光照模型。该模型能够模拟不同角度、强度的光线对物体表面的影响。利用该模型对纹理进行光照调整，使其在不同视角和光照环境下都能呈现出自然、真实的效果。同时，考虑到场景中可能存在的反射、折射等光学现象，对光照模型进行进一步优化，以准确还原复杂地形场景中的光照效果，提高场景还原度。

2. 时序数据融合建模

动态纹理映射技术与时序数据融合建模在构建支持季节变化与工程进展的动态场景更新模型中至关重要。动态纹理映射技术可通过对不同时间获取的纹理数据进行处理，使其能更好地贴合三维模型表面，增强模型的真实感。时序数据融合建模则是将不同时间节点的测量数据进行融合，充分考虑季节变化和工程进展带来的地形地貌改变。它需要对时序数据的特征进行提取和分析，建立合理的融合模型，以准确反映场景的动态变化。例如，对于植被覆盖区域，随着季节变化，植被的颜色和密度会改变，通过时序数据融合建模可将这些变化融入三维模型中，提高复杂地形场景的还原度。

（三）精度验证体系构建

1. 三维比对分析方法

为优化复杂地形场景还原度，构建精度验证体系与三维比对分析方法至关重要。在空间配准方面，需确立统一的坐标系统，使模型与实测数据在空间上精准对应。通过精确的算法，将两者的空间位置进行匹配，为后续分析奠定基础。偏差可视化系统则能直观呈现模型与实测数据间的差异。利用色彩、图形等方式，将偏差值在三维空间中展示，便于快速定位和分析误差较大的区域。

域。在三维比对分析方法中，可从多个维度对模型和实测数据进行比较。例如，对比地形的高程、坡度、坡向等关键参数，综合评估模型的准确性，为场景还原度的优化提供有力依据。

2. 误差传播控制模型

为优化复杂地形场景还原度，构建精度验证体系及误差传播控制模型至关重要。通过建立数学模型量化测量误差对最终建模精度的累积影响规律。分析误差在各个测量环节及数据处理过程中的传播路径，确定误差源及其对结果的影响权重。考虑测量仪器精度、测量方法、环境因素等多种变量，建立误差传播的动态模型。利用该模型预测不同误差条件下的建模精度，为精度验证提供理论依据。同时，通过实际测量数据对模型进行验证和修正，确保模型的准确性和可靠性，从而实现对误差的有效控制，提高场景还原度。

五、总结

一体化技术体系在矿山监测和智慧城市等领域取得了显著应用效果。在矿山监测中，能精准获取地形数据，为安全生产提供保障；在智慧城市建设里，有助于城市空间信息的整合与管理。然而，在高植被覆盖率区域建模方面存在技术瓶颈，植被的复杂结构和遮挡影响数据采集和模型构建的准确性。展望未来，人工智能与边缘计算在实时三维重建中具有广阔发展前景。人工智能可通过学习大量数据优化建模算法，提高建模效率和精度；边缘计算能实现数据的快速处理和分析，满足实时性要求，为三维建模一体化技术体系的进一步完善和复杂地形场景还原度的提升提供有力支持。

参考文献

- [1] 王治铭. 复杂地形三维多分辨率模型构建方法研究 [D]. 北京林业大学, 2021.
- [2] 张艺璇. 复杂地形风电场流场测量与 CFD 模拟 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [3] 尚鑫. 三维地形场景编辑系统的研究与实现 [D]. 北京工业大学, 2015.
- [4] 刘金龙. 基于人工倾斜摄影测量的微地形三维建模方法研究 [D]. 西北农林科技大学, 2019.
- [5] 王林云. 多分辨率海陆一体化三维地形建模 [D]. 山东科技大学, 2020.
- [6] 罗龙, 赵云龙. 输电线路场景三维建模与还原 [J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(5): 91-92.
- [7] 贾来强, 王健, 白军虎, 等. 基于倾斜摄影技术的输电线路走廊三维场景重建方法的研究与应用 [J]. 电工技术, 2021(4): 128-130.
- [8] 张代航, 赵浩, 冉怡静. RTK 技术在矿山测量工程中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2021(13): 36-37.
- [9] 赵迪, 戴志鹏, 李世其, 等. 巡视探测任务中复杂地形信息感知与场景建模 [J]. 航天器工程, 2019, 05(5): 32-38.
- [10] 皮志荣. 地面三维激光扫描技术在工程测量中的实践 [J]. 江西建材, 2017(24): 219, 224.

通信运营商信息化项目集成施工中的安全与成本协同管控——基于珠海分公司实践经验

欧阳志广

身份证号: 450204197710131454

DOI:10.61369/ME.2025010004

摘 要 : 通信运营商信息化项目集成施工有特性, 涉及安全成本辩证关系、珠海分公司运营特征与挑战等。阐述了三级管控体系、安全成本协同管控机制构建, 包括标准建立、监控系统、设备部署等, 还提及相关体系建设及成效, 为行业提供参考。

关 键 词 : 通信运营商; 信息化项目; 安全成本协同管控

Collaborative Control of Safety and Cost in the Integrated Construction of Information Technology Projects for Communication Operators—Based on the Practical Experience of Zhuhai Branch

Ouyang Zhiguang

ID: 450204197710131454

Abstract : The integrated construction of informatization projects for communication operators has its own characteristics, involving the dialectical relationship between security and cost, as well as the operational features and challenges of the Zhuhai Branch. This paper expounds the three-level control system and the construction of a collaborative control mechanism for safety costs, including the establishment of standards, monitoring systems, equipment deployment, etc. It also mentions the construction and achievements of related systems, providing references for the industry

Keywords : communication operator; informationization project; collaborative control of safety costs

引言

随着通信技术的快速发展, 通信运营商信息化项目集成施工面临着诸多挑战与机遇。2020年工业和信息化部发布相关政策强调通信行业高质量发展, 在此背景下, 通信运营商信息化项目集成施工的重要性愈发凸显。其具有多专业协同和全流程交叉作业特性, 如5G基站建设与室分系统部署技术复杂, 涉及多专业协同。同时安全投入与成本效益存在辩证关系, 珠海分公司在项目实施中呈现出运营特征与面临诸多挑战, 包括施工人员流动性大、设备采购标准化不足等, 构建安全成本协同管控机制成为关键, 涵盖组织保障、过程控制等多方面, 对推动行业可持续发展具有重要意义。

一、信息化项目集成施工理论基础

(一) 通信工程集成施工特征

通信运营商信息化项目集成施工具有多专业协同和全流程交叉作业的特性。在5G基站建设与室分系统部署中, 技术复杂性尤为突出。多个专业领域如通信工程、电气工程、土建工程等需要协同工作, 各专业的施工流程相互交叉, 任何一个环节出现问题都可能影响整个项目的进度和质量。5G基站建设涉及到高频通信技术、大规模 MIMO 技术等复杂技术的应用, 对施工人员的技术水平和综合素质要求较高。室分系统部署则需要考虑室内环境的

复杂性, 如信号覆盖的均匀性、干扰的避免等问题。这些都体现了通信工程集成施工的独特特征, 要求在项目实施过程中进行精细的管理和协调^[1]。

(二) 安全与成本管控关联机制

安全投入与成本效益存在辩证关系。一方面, 安全投入在短期内可能增加成本, 但从长期看, 能避免安全事故带来的巨大损失, 从而保障成本效益。例如, 在信息化项目集成施工中, 对施工人员的安全培训以及安全设备的购置, 看似增加了成本, 但能有效减少因安全事故导致的人员伤亡赔偿、项目延误损失等。另一方面, 合理的成本管理也有助于安全目标的实现。通过成本集

约化管理，优化资源配置，可确保安全投入的有效性和合理性。安全生产标准化建设与成本集约化管理理论模型应综合考虑两者的相互作用。在模型中，安全标准的设定要结合成本因素，成本管理策略要以保障安全为前提，实现安全与成本的协同管控^[2]。

二、珠海分公司项目实施现状分析

（一）项目运营特征与挑战

珠海分公司在近三年承接了通信管网施工及信息化项目，在此过程中呈现出一些运营特征与面临诸多挑战。多运营商协同作业是其主要运营特征之一，这种环境下涉及多个主体的利益和工作协调。然而，这也带来了安全管理难点，包括不同运营商之间安全标准和流程的差异，增加了统一管理的难度；施工过程中的交叉作业频繁，容易引发安全事故；各运营商对施工进度的要求不同，可能导致安全措施无法有效落实。这些问题不仅影响项目的顺利实施，还可能带来安全隐患和成本增加等问题，对公司的运营和发展造成不利影响^[3]。

（二）安全成本双控瓶颈

施工人员流动性大以及设备采购标准化不足是珠海分公司项目实施中面临的安全成本双控瓶颈。施工人员流动性大使得项目团队稳定性差，新员工不断加入需要重复进行安全培训，增加了安全管理成本，且新员工对施工环境和流程熟悉度不够，容易引发安全事故^[4]。同时，频繁更换人员可能导致施工进度受阻，间接增加成本。设备采购标准化不足，一方面难以保证设备质量，可能因设备故障引发安全问题；另一方面，无法实现批量采购的规模经济，导致采购成本增加，且不同规格设备的兼容性问题也可能带来额外的成本支出和安全隐患。

三、安全成本协同管控机制构建

（一）组织保障体系设计

1. 矩阵式管理架构

建立项目指挥部-专业班组-安全督导的三级管控体系，是实现安全成本协同管控的重要组织保障。项目指挥部负责整体规划与决策，统筹安全与成本目标，对重大事项进行协调和把控^[5]。专业班组作为执行层，具体落实各项施工任务，同时承担相应的成本核算和安全监管职责。安全督导则专注于安全监督与检查，及时发现并纠正安全隐患，确保施工过程符合安全标准，避免因安全事故导致成本增加。明确各级的成本核算与安全监管双岗责任制，使每个岗位都清楚自身在安全和管理方面的职责，促进安全与成本管理的有效协同，提高项目整体效益。

2. PDCA循环应用

在通信运营商信息化项目集成施工中，构建安全成本协同管控机制需将安全管理体系认证要求与成本控制 KPI 指标融入项目全生命周期管理流程。组织保障体系设计方面，应明确各部门职责，确保安全与成本管控工作有专人负责^[6]。PDCA 循环应用至关重要，计划（Plan）阶段要制定包含安全和成本目标的详细计

划；执行（Do）阶段严格按照计划实施，确保安全措施落实且成本控制在合理范围；检查（Check）阶段对安全和成本执行情况进行检查，及时发现问题；处理（Act）阶段针对问题采取改进措施，调整计划，实现安全与成本协同管控的持续优化。

（二）过程控制标准建立

1. 风险分级管控标准

在通信运营商信息化项目集成施工中，构建安全成本协同管控机制至关重要。对于过程控制标准建立和风险分级管控标准，应制定通信设备安装高空作业、有限空间施工等特殊场景的差异化安全投入标准。针对高空作业，需考虑防护设备的配备、人员培训成本等，确保作业人员安全，同时合理控制成本^[7]。在有限空间施工方面，要依据空间特点和潜在风险，制定相应的通风、检测设备投入标准以及应急救援成本预算。通过这种差异化标准的制定，能更好地平衡安全与成本，实现协同管控，提高项目整体效益。

2. 成本动态预警机制

开发基于 BIM 技术的施工进度与材料消耗实时监控系統，可实现对项目进展及成本相关要素的精准把控。通过该系统收集的数据，建立红黄蓝三级预警模型，以此作为成本动态预警机制的核心。当施工进度或材料消耗偏离预设标准达到一定程度时，系统根据不同等级发出预警信号。例如，黄色预警提示相关人员关注并分析原因，采取初步措施调整；红色预警则表明情况较为严重，需立即停工整顿或调整施工方案，以避免成本失控和事故发生，确保安全与成本始终处于协同管控状态^[8]。

四、协同管控实施路径创新

（一）智能化技术应用

1. 智慧工地系统建设

部署 AI 视频监控与物联网传感设备是智慧工地系统建设的关键。通过在施工现场合理布局 AI 视频监控设备，能够实时监测工地各个区域的人员活动情况以及机械作业状态^[9]。同时，结合物联网传感技术，对相关设备和人员进行精准定位。这不仅及时发现潜在的安全隐患，如人员违规操作靠近危险区域、机械故障等，还能为后续的安全事故分析提供详细的数据支持。在成本管控方面，这些智能化设备的应用有助于优化资源配置，减少因安全事故导致的额外成本支出，提高施工效率，从而实现安全与成本的协同管控。

2. 数字化采购平台

在通信运营商信息化项目集成施工中，构建供应商分级评价体系与集中采购数据库至关重要。通过对供应商的综合评估，将其分级分类，有助于筛选出优质供应商，确保物资和服务质量。同时，集中采购数据库的建立可整合采购信息，提高采购效率，减少重复采购流程带来的成本浪费。在面对应急采购情况时，该体系和数据库能够提供参考依据，避免因时间紧迫而盲目选择供应商，从而降低成本溢价。利用智能化技术对数据进行分析和管理，可实时监控采购动态，优化采购决策，进一步提升协同管控

效果^[10]。

（二）资源集约化配置

1. 共享式班组管理

建立多项目间特种作业人员共享机制是资源集约化配置和共享式班组管理的重要举措。通过整合不同项目的特种作业人员需求，实现人员的灵活调配和共享。一方面，避免了单个项目因特种作业人员短缺而导致的工期延误，提高了项目整体进度的可控性，同时也减少了因临时招聘或闲置人员带来的成本增加。另一方面，统一的人员管理有利于集中进行安全培训，提升安全培训资源的使用效率。可以针对共享人员群体制定标准化的安全培训课程和考核体系，确保特种作业人员具备较高的安全技能和意识，有效降低安全事故风险，实现安全与成本的协同管控。

2. 周转物资云调度

通信运营商在信息化项目集成施工中，为实现资源集约化配置及周转物资云调度，可开发施工机具与安全防护用品的区域共享平台。通过该平台整合区域内各施工点的物资资源信息，实现物资的实时动态管理。施工单位可在平台上发布物资需求及闲置物资信息，以便进行物资的合理调配。这样能有效降低资产闲置率，提高物资的周转率，减少重复采购带来的成本浪费。同时，平台可基于大数据分析施工机具及防护用品的使用频率和分布情况，为资源的合理配置提供决策依据，进一步优化周转物资的云调度，提升协同管控的效率和效益。

（三）绩效考核体系优化

1. 双维度考核指标

设置安全达标率与成本节约率的联动考核公式，通过科学的数据分析和建模，使两者之间建立合理的量化关联。例如，当安全达标率提升一定比例时，相应的成本节约率也应在合理范围内有所体现，反之亦然。同时建立奖惩对等机制，对于在安全和成

本协同管控方面表现优秀的团队或个人，给予物质和精神上的双重奖励，奖励力度要与所取得的成果相匹配。而对于未能达到考核标准的，进行相应的惩罚，包括扣减绩效奖金、限制晋升机会等，以此激励全体员工积极参与到安全与成本的协同管控中，提高通信运营商信息化项目集成施工的整体效益。

2. 项目后评估制度

建立涵盖事故发生率与成本偏差率的项目复盘机制，是实现协同管控的重要环节。通过对项目实施过程中的安全事故发生情况以及成本偏差情况进行详细记录和分析，能够精准定位问题所在。对于事故发生率，要深入剖析事故原因，是人为操作失误、安全管理制度漏洞还是外部环境因素等。对于成本偏差率，需明确是预算不合理、资源浪费还是不可预见的费用支出导致。基于这些分析结果，制定针对性的改进措施，并将其反馈到后续项目中，形成从项目实施到复盘再到改进的持续循环闭环，不断优化协同管控效果，提升项目的安全性和成本效益。

五、总结

珠海分公司在港珠澳大桥5G覆盖项目中，通过安全成本协同管控体系取得了显著成效。该体系使事故率大幅降低40%，同时项目利润率提升了15%，这充分验证了其有效性。在此基础上，提出将BIM+GIS技术深度应用于通信基础设施共建共享领域这一发展方向。这不仅能进一步提升信息化项目集成施工的管理水平，还有望为整个行业提供可复制的管理范式。通过对实践经验的总结和对未来方向的展望，为通信运营商在信息化项目集成施工中的安全与成本管控提供了有益参考，有助于推动行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 王磊宏. 通信运营商运维成本项目化管理研究[J]. 经济视野, 2013(13): 85-85.
- [2] 冯毅. JNLT 电话营销项目化管理应用研究[D]. 南京邮电大学, 2012.
- [3] 梁玲玲. 电力公司信息化项目管控系统的研究与开发[D]. 电子科技大学, 2014.
- [4] 万欣. CL集团建造工程中信息化项目的信息安全风险管控研究[D]. 广西大学, 2018.
- [5] 朱烨. 项目管理在通信运营商网络规划中的应用[D]. 南京大学, 2011.
- [6] 肖菲. H公司基于项目管理的信息化项目管控研究[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(4): 2.
- [7] 胡颖鹿. 通信运营商运维成本项目化管理分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 034(005): 63-65.
- [8] 邓松君. 通信运营商运维成本项目化管理探讨[J]. 财讯, 2020(8): 153-153.
- [9] 程国青. 政府信息化项目中质量管控分析与研究[J]. 创新科技, 2017(9): 3.
- [10] 黄铁铮, 武海燕. 基于信息化研究的通信运营商渠道管理[J]. 数码设计(下), 2019(12): 212-213.

地理信息行业中的数据管理与技术应用： 现状与发展趋势

潘婷婷

广东省国土资源技术中心，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025010010

摘要： 地理信息行业在数据管理与技术应用的深度融合中，正迎来重要发展机遇与挑战。本文系统分析了地理信息数据管理的现状与挑战，探讨了主流技术及其应用场景，并研究了数据管理与技术应用的协同发展路径。结合《数字中国建设整体布局规划》等最新政策，文章进一步展望了行业在数据治理、技术融合及可持续发展方面的未来趋势，为行业实践提供了理论参考与实践指导。

关键词： 地理信息；数据管理；技术应用

Data Management and Technology Application in Geographic Information Industry: Current Situation and Development Trend

Pan Pingting

Guangdong Provincial Land Resources Technology Center, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The geographic information industry is facing important development opportunities and challenges in the deep integration of data management and technology application. This paper systematically analyzes the current situation and challenges of geographic information data management, discusses the mainstream technology and its application scenarios, and studies the collaborative development path of data management and technology application. Combined with the latest policies such as the Overall Layout Plan for the Construction of Digital China, the paper further looks forward to the future trend of the industry in data governance, technology integration and sustainable development, and provides theoretical reference and practical guidance for the industry practice.

Keywords： geographic information; data management; technology application

引言

地理信息行业是数字经济重要部分，在技术创新与政策推动下成果显著。《数字中国建设整体布局规划》提出加快地理信息技术研发应用，新兴技术发展提升了地理信息数据能力，带来机遇。但数据管理复杂、技术集成困难、数据安全隐私问题突出，亟待解决。深入研究该行业数据管理与技术应用现状、探索未来趋势，对推动行业高质量发展、助力实现数字中国战略意义重大。本文将系统分析现状与挑战，展望未来方向，为行业实践提供参考与指导。

一、地理信息行业数据管理的现状

（一）数据管理的基本概念

数据管理是指通过一系列技术、方法和策略对数据进行有效采集、存储、处理、分析和应用的过程，其核心要素包括数据标准化、数据存储、数据质量控制、数据安全与共享等。在地理信息行业中，数据管理尤为重要，因为地理信息数据具有空间性、时间性和多源性等特点。空间性体现在数据与地理位置紧密相关，时间性反映了数据的动态变化特征，而多源性则表现为数据来源的多样性，如遥感影像、传感器数据、社交媒体数据等。根

据数据形式和应用场景，地理信息数据可分为矢量数据、栅格数据、三维模型数据以及实时流数据等。这些数据的复杂性要求数据管理框架必须具备高效性、灵活性和可扩展性，以满足不同应用场景的需求^[1]。

（二）地理信息数据管理的主要挑战

地理信息数据管理面临的首要挑战是数据量大且类型多样。随着遥感技术、物联网技术和移动互联网的快速发展，地理信息数据的规模呈爆炸式增长，数据类型也从传统的结构化数据扩展到半结构化和非结构化数据，如文本、图像和视频等。这种数据多样性对存储、处理和分析技术提出了更高要求。其次，数据

质量与一致性问题亟待解决^[2]。由于数据来源多样、采集标准不一，数据中可能存在误差、缺失或不一致现象，影响数据的可靠性和应用效果。最后，数据安全与隐私保护成为地理信息数据管理的重要议题。地理信息数据通常涉及敏感信息，如个人位置数据、国家机密地理信息等，如何在数据共享与应用中确保数据的安全与隐私保护，是行业面临的关键挑战。

二、地理信息行业技术应用的现状

（一）主流技术及其应用场景

地理信息系统（GIS）技术作为地理信息行业的核心技术，广泛应用于城乡规划、环境监测、灾害管理等领域。例如，三维地理信息技术在城乡规划管理中通过构建精细化城市模型，为规划决策提供直观的空间分析支持^[3]。遥感技术与卫星数据应用在地环境监测和资源管理中发挥着重要作用，能够实时获取大范围地表信息，为气候变化、森林覆盖监测等提供数据支撑^[4]。全球定位系统（GPS）与北斗系统则在高精度定位、导航和授时服务中占据重要地位，广泛应用于交通管理、精准农业和应急救援等领域。另外，三维模型数据网格化管理技术在城市规划中的应用，进一步提升了数据可视化与分析能力，为智慧城市建设提供了技术保障^[5]。三维地理信息系统在城市规划领域的应用研究也表明，其在提升城市空间分析能力和规划效率方面具有显著优势^[6]。

（二）技术应用中的关键问题

尽管地理信息技术应用取得了显著进展，但仍面临诸多挑战。技术集成与互操作性是当前亟待解决的问题。不同技术平台和系统之间缺乏统一的标准和接口，导致数据共享和协同应用困难。例如，在输变电工程管理中，地理信息技术与其他工程管理系统集成不足，影响了整体管理效率^[7]。数据处理效率与实时性也是技术应用中的瓶颈。随着数据规模的不断扩大，传统数据处理方法难以满足实时性需求，特别是在环境监测和灾害预警等场景中，数据处理延迟可能导致严重后果。另外，技术更新与人才培养问题日益突出。地理信息技术发展迅速，但部分企业和机构在技术更新方面滞后，同时缺乏具备跨学科知识的高素质人才，制约了技术的深入应用与创新。解决这些问题需要加强技术标准化建设，推动数据处理技术的创新，并注重人才培养与技术普及^[8]。

三、地理信息行业数据管理与技术应用的融合

（一）数据管理与技术应用的协同发展

1. 数据驱动技术创新的案例分析

数据管理与技术应用的协同发展在地理信息行业中体现为数据驱动技术创新的典型示例。在智慧城市建设中，地理信息数据通过集成多源数据（如交通流量、人口分布、环境监测数据等），为城市规划和资源调配提供科学依据，显著提升了城市管理效率^[9]。环境监测与灾害预警系统则利用遥感数据和实时传感

器数据，构建动态监测模型，实现了对自然灾害和环境变化的精准预测与快速响应^[10]。这些案例表明，高质量的数据管理为技术创新提供了坚实基础，而技术的进步又进一步释放了数据的潜在价值。

2. 技术推动数据管理优化的路径

技术的快速发展为数据管理优化提供了新路径。人工智能与机器学习技术在地理信息数据管理中的应用，能够自动化处理海量数据，提升数据清洗、分类和分析的效率，同时通过模式识别技术发现数据中的潜在规律。区块链技术则在地理信息数据安全中发挥了重要作用，通过去中心化和不可篡改的特性，确保了数据在共享与传输过程中的安全性与可信度。这些技术的应用不仅提高了数据管理的效率，还为数据的安全存储与共享提供了可靠保障。

（二）融合发展的挑战与对策

1. 技术标准与政策支持

数据管理与技术应用的深度融合面临技术标准不统一和政策支持不足的挑战。国际标准与行业规范的制定是推动融合发展的关键，例如建立统一的地理信息数据格式、接口标准和技术协议，以促进不同系统之间的互操作性。政策支持与资金投入也至关重要，政府应通过制定专项政策、提供资金支持和技术研发补贴，推动地理信息技术的创新与应用。

2. 跨领域合作与生态构建

跨领域合作与生态构建是解决融合发展问题的另一重要路径。产学研合作模式能够整合高校、科研机构和企业资源，推动技术研发与成果转化，例如通过联合实验室和项目合作，加速地理信息技术的创新与应用。地理信息行业生态系统的构建则需要政府、企业和社会各方的共同参与，通过建立开放共享的数据平台、技术交流机制和人才培养体系，形成良性循环的行业生态。这种生态系统的构建不仅有助于解决当前的技术与管理问题，还将为行业的可持续发展提供长期动力。

四、地理信息行业数据管理与技术应用的发展趋势

（一）数据管理的发展趋势

1. 数据治理与智能化管理

随着地理信息数据规模的不断扩大和复杂性的增加，数据治理框架的完善成为行业发展的必然趋势。通过建立统一的数据质量标准、元数据管理规范 and 权限控制机制，数据治理能够有效提升数据的可靠性、一致性和可用性。同时，智能化数据管理工具的应用正在改变传统数据管理方式。人工智能与机器学习技术的引入，使得数据清洗、分类和分析过程更加自动化，显著提高了数据处理效率，并为数据价值的深度挖掘提供了技术支持。

2. 数据共享与开放

数据共享与开放是地理信息行业未来发展的重要方向。数据共享平台的建设能够打破数据孤岛，促进多源数据的整合与利用，为跨领域应用提供支持。例如，智慧城市和环境保护等领域的数据共享平台，能够为决策者提供全面的数据支持。开放数据

政策的推动则进一步加速了数据资源的流通与利用。通过制定开放数据标准和政策，政府和企业能够释放地理信息数据的潜在价值，推动创新应用和公共服务的优化。数据共享与开放不仅提升了数据的利用效率，还为行业的可持续发展注入了新动力。

（二）技术应用的发展趋势

1. 新兴技术的融合与应用

新兴技术深度融合，给地理信息行业带来飞跃，推动其朝着智能化、精细化大步迈进。5G 技术以超高速率、超低时延的特性，与物联网技术携手共进，在地理信息数据采集环节扮演关键角色。二者协同让城市环境监测设备、交通流量监测系统等各类传感器，高效收集并传输海量数据，实时上传至云端，为智慧城市的精准管理提供有力支撑。在精准农业领域，田间传感器收集温湿度、土壤养分等数据，经智能算法处理，助力优化农田管理，提升农业生产效率。

2. 技术应用的普及与平民化

地理信息技术的普及与平民化是未来关键走向，为行业可持续发展注入新活力。通过加强普及教育，提升公众对地理信息数据的认知与应用能力。学校教育引入 GIS 基础知识，社会培训开设相关技术课程，为行业培育潜在用户与创新者，扩大技术应用的社会基础。同时，低成本技术解决方案的出现，大幅降低应用门槛。

移动设备普及与云计算技术发展，让地理信息数据采集、处理和分析更便捷，加速平民化进程。这种趋势拓宽了技术应用范围，奠定广泛用户基础。更多人接触使用，激发创新应用场景，形成良性循环，推动技术进步服务社会需求。未来，随着技术发展与普及教育深入，地理信息技术将在更多领域规模化应用，助力社会经济数字化转型。

（三）行业发展的整体趋势

地理信息行业在全球化与本地化间寻求动态平衡，并在可持

续发展中践行社会责任。全球化层面，通过国际合作与数据共享整合全球数据资源，全面监测全球环境、气候及资源，为跨国企业与国际组织提供决策支撑。本地化方面，针对不同区域特点定制地理信息解决方案，像城市交通管理、农业精准化、灾害应急响应等，契合本地需求，提升数据应用的针对性与实效性，拓展应用广度与落地能力。

在可持续发展领域，地理信息行业利用遥感技术和地理信息系统，实时监测森林覆盖、水资源分布、环境污染等关键指标，助力环境保护与资源管理。与此同时，行业愈发重视数据伦理与社会责任，在数据采集、存储与应用全流程严守数据隐私安全底线，避免数据滥用，以制定伦理规范、强化责任意识为抓手，在推动技术创新的同时，为社会可持续发展贡献更多价值。

五、结束语

地理信息行业在数据管理与技术应用融合中，机遇与挑战并存。完善数据治理框架、运用智能化工具，提升了数据质量与利用效率，数据共享开放政策也挖掘出更多数据价值。5G、物联网、数字孪生等新兴技术融合，拓展应用场景，推动行业走向智能化、精细化，平民化趋势让行业更具活力。

在全球化与本地化平衡上，行业整合全球数据、深化本地应用，精准对接技术与需求。尤其在环保、资源管理、灾害预警等领域，地理信息技术助力科学决策，凸显其在可持续发展中的重要作用。同时，践行数据伦理与社会责任，确保技术与伦理共进。未来，地理信息行业将以数据为核心、技术为驱动，通过标准化、跨领域合作与生态构建，助力社会经济数字化转型。

参考文献

- [1] 胡瑛. 大数据处理技术在地理信息档案管理中的应用 [J]. 测绘通报, 2016(9): 112-114.
- [2] 张浩进. 大数据技术在测绘地理信息中的应用 [J]. 冶金管理, 2023(17): 12-14.
- [3] 颜迎雪. 三维地理信息技术在城乡规划管理中的应用与研究 [D]. 西南交通大学, 2013.
- [4] 黄永和. 地理信息技术在环境管理中的应用现状及问题探究 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2021(2): 2.
- [5] 魏中衡, 纪庆昊. 地理信息系统应用现状及发展趋势 [J]. 工程技术: 引文版, 2016: 00059-00059.
- [6] 鲍文月, 朱学明, 曹峰. 三维模型数据网格化管理与应用技术研究 [C]// 江苏省测绘地理信息学会 2015 年学术年会. 2015.
- [7] 张训虎, 朱辉, 陈秋伟. 三维地理信息系统在城市规划领域应用研究 [J]. 北京测绘, 2012(3): 4.
- [8] 陈建林. 地理信息技术在输变电工程管理中的应用 [J]. 2023(8): 43-45.
- [9] 李媛. 地理信息系统应用现状及发展趋势 [J]. 环球市场, 2017(23): 1.
- [10] 王晓辉. 浅谈地理信息系统的应用和发展趋势 [J]. 活力, 2014(7): 1.

第三方信息化技术服务视角下的项目全过程管理模式创新

王莹

北方实验室（沈阳）股份有限公司，辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ME.2025010011

摘要： 阐述第三方信息化技术服务在项目管理中的作用，包括其特点与要求，分析传统模式局限。介绍全周期管理技术架构、数据驱动决策支持等内容，强调多方协同平台、实时数据交互标准体系的重要性，还提及风险识别预警、权责划分考核等，探讨发展方向。

关键词： 第三方信息化；项目管理；技术服务

Innovation of Project Whole-Process Management Mode from the Perspective of Third-Party Information Technology Service

Wang Ying

Northlab (Shenyang) Inc.,Ltd. Shenyang, Liaoning 110000

Abstract： This paper discusses the role of third-party IT service technology in project management, highlighting its characteristics and requirements, and analyzing the limitations of traditional models. It introduces the full-cycle management technology framework and data-driven decision support, emphasizing the importance of multi-party collaboration platforms and real-time data interaction standards. The paper also addresses risk identification and early warning, as well as responsibility division and assessment, and explores future development directions.

Keywords： third party informatization; project management; technical service

引言

随着信息技术的飞速发展，信息化技术服务在项目管理中的应用日益广泛。2020年发布的《关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展新动能的意见》强调了利用数字化技术推动产业升级和创新发展。在此背景下，第三方信息化技术服务为项目全过程管理带来了新的机遇与挑战。从其自身特点与要求，到传统模式的局限，再到信息化技术在各阶段的关键支撑作用，以及多方协同、数据交互标准、风险识别预警等方面的创新探索，都对项目管理模式产生了深远影响，然而，这些创新也面临着技术集成和管理协同等问题，例如不同系统间的兼容性和数据交互存在障碍，各方利益诉求和管理标准的差异影响了协同效果，这些问题亟待进一步研究和解决。

一、第三方信息化项目管理的现状分析

（一）第三方技术服务的特点与要求

信息化技术服务供应商在项目管理中具有独特的特点与要求。从需求响应看，需具备敏锐的市场洞察力和对客户业务的深刻理解，快速准确把握需求并提供定制化方案^[1]。在系统集成方面，要拥有全面的技术能力，能整合多种信息技术，确保各系统间的兼容性和协同性。持续运维要求供应商建立高效的运维团队和完善的运维体系，实时监控系统运行状态，及时解决出现的问题，保障系统的稳定运行。这些特点和要求决定了供应商在项目

全过程管理中需不断提升自身专业素养和服务能力，以更好地满足项目需求。

（二）传统项目管理模式的局限性

传统项目管理模式在第三方信息化项目中存在诸多局限性。在流程方面，存在割裂现象，各阶段衔接不顺畅，例如规划与实施环节脱节，导致项目进度受阻，无法高效推进^[2]。信息方面，形成信息孤岛，不同部门或系统之间数据难以共享和流通，影响决策的准确性和及时性。风险管控上，存在缺失问题，对信息化项目中的技术风险、安全风险等预估不足，缺乏有效的应对措施，容易使项目面临失败的风险，无法保障项目的质量和效益。

二、信息化技术对全过程管理的支撑作用

（一）全生命周期管理技术体系

在项目全过程管理中，信息化技术构建的全周期管理技术架构具有关键支撑作用。从需求分析阶段，借助信息化工具精准收集和分析各方需求，为后续工作奠定基础^[3]。方案设计时，利用相关软件进行模拟和优化，提高方案的科学性和可行性。在开发实施过程中，通过项目管理软件等实现对进度、质量和资源的有效管控。验收评估阶段，信息化技术可提供客观的数据和标准，确保验收的准确性和公正性。运维优化环节，利用监控和分析系统及时发现问题并解决，保障项目的持续稳定运行。

（二）数据驱动的决策支持系统

信息化技术为数据驱动的决策支持系统提供了有力支撑。通过 BIM 技术，能够收集项目各阶段的详细数据，如三维模型中的几何信息、材料属性等，为项目进度控制提供准确依据^[4]。它可以模拟施工过程，预测潜在问题，辅助决策以优化进度安排。在成本管理方面，结合区块链技术可确保成本数据的真实性和不可篡改，实现成本数据的精准追溯和分析。同时，利用信息化技术整合质量相关数据，实现质量问题的快速定位和原因追溯，为质量决策提供数据支持，从而提升项目全过程管理的决策科学性和有效性。

三、全过程管理模式创新路径

（一）基于云平台的协同管理机制

1. 多方协同工作平台架构

在第三方信息化技术服务视角下，构建包含业主、监理、供应商的多方协同工作平台至关重要。基于云平台的协同管理机制，该平台架构需整合各方资源与信息流通渠道。首先要建立统一的数据接口，确保各方系统能有效对接，实现数据的实时共享与交互^[5]。同时，设置不同权限层级，保障各方信息安全与隐私。平台应具备项目进度跟踪、质量监控、文件管理等核心功能模块，以满足项目全过程管理需求。通过可视化界面，各方可直观了解项目动态，及时发现并解决问题，从而提升项目管理效率与质量。

2. 实时数据交互标准体系

在基于云平台的协同管理机制下，构建实时数据交互标准体系至关重要。应建立基于 API 接口的数据交换标准，确保不同系统和模块间的数据能够准确、高效地交互^[6]。通过统一的数据格式和规范的接口协议，实现数据的无缝对接，提高项目管理过程中的信息流通效率。同时，要注重信息安全保障机制的建立。随着数据交互的频繁，信息安全风险增加，需采取加密技术、访问控制等措施，保护项目数据的完整性和保密性，为项目全过程管理模式创新提供可靠的数据支撑和安全保障。

（二）智能化管理工具创新

1. 智能预警与风险预测模型

基于机器学习的项目风险识别与预警系统是智能化管理工具

创新的关键。通过收集项目历史数据以及实时数据，利用机器学习算法对数据进行分析和挖掘，能够精准识别潜在风险因素^[7]。该系统可以构建风险预测模型，对风险发生的概率和可能造成的影响进行量化评估。同时，它能够实时监测项目各项指标，当风险指标超出预设阈值时，及时发出预警信号，以便项目管理人员采取有效的应对措施，从而提高项目全过程管理的风险防控能力和决策科学性。

2. 数字孪生技术的场景应用

数字孪生技术在项目进度模拟和方案优化中具有重要应用。通过构建项目的数字孪生模型，可以实时反映项目的实际进展情况。利用该模型进行进度模拟，能够预测可能出现的问题和延误，提前采取措施加以解决^[8]。在方案优化方面，数字孪生技术可以对不同的设计方案和施工方案进行虚拟模拟和比较分析，从而选择最优方案。同时，它还可以根据项目实际进展情况和外部环境变化，实时调整和优化方案，提高项目的实施效率和质量。

四、创新管理模式实施保障体系

（一）制度保障机制建设

1. 权责划分与考核体系

建立科学合理的权责划分与考核体系是创新管理模式有效实施的关键。从权责划分来看，需明确各方在项目全过程中的职责与权力，通过建立跨组织协同的权责矩阵，避免职责不清导致的管理混乱。例如，在项目策划阶段，明确第三方信息化技术服务提供商与项目业主在需求分析、方案设计等方面的具体职责^[9]。在考核体系方面，应制定全面、客观、量化的绩效考核指标。这些指标不仅要涵盖项目的进度、质量、成本等传统维度，还要考虑信息化技术应用的效果、创新管理模式的执行情况等。通过定期对各方进行绩效考核，激励其积极履行职责，推动创新管理模式的顺利实施。

2. 标准化管理流程再造

在第三方信息化技术服务视角下，为保障项目全过程管理模式创新，制度保障机制建设至关重要。其中，标准化管理流程再造是关键环节。需深入分析信息化项目特征，以此为基础制定科学合理的标准化管理规程^[10]。这一规程应涵盖项目的各个阶段，包括需求分析、设计开发、测试验收、上线运维等。明确各阶段的工作流程、任务目标、质量标准以及责任主体，确保项目实施过程的规范化和标准化。同时，要建立相应的监督和评估机制，及时发现和纠正流程执行过程中的偏差，保障标准化管理流程的有效实施，从而提升项目管理的效率和质量。

（二）技术保障能力提升

1. 核心技术研发策略

规划物联网、5G 等新兴技术的研发应用路线对于核心技术研发策略至关重要。需深入了解物联网的架构及应用场景，挖掘其在项目管理各环节的潜在价值，如利用传感器实现项目数据的实时采集与传输。对于 5G 技术，应探索其高速率、低延迟特性如何提升项目协作效率，比如支持远程高清视频监控与实时指导。

同时，结合项目实际需求，制定阶段性的研发目标与应用计划。整合各方资源，包括技术团队、设备供应商等，建立协同研发机制，确保新兴技术能有效融入项目全过程管理模式，为创新管理模式提供坚实的技术支撑。

2. 技术团队能力建设

构建复合型技术人才培养和知识管理体系是技术团队能力建设的关键。一方面，注重培养复合型技术人才，使其具备多领域知识和技能，以适应项目全过程管理中不同阶段的技术需求。通过内部培训、学术交流以及参与实际项目等方式，拓宽技术人员的知识面和实践能力。另一方面，建立有效的知识管理体系，对项目过程中的技术知识和经验进行整理、存储和共享。利用信息化技术搭建知识平台，方便团队成员随时获取和学习，促进技术知识在团队内的传承和创新，提升团队整体技术水平，为创新管理模式提供有力的技术人才支持。

（三）风险防控体系完善

1. 全流程风险识别框架

建立覆盖立项、实施、运维各阶段的风险清单是全流程风险识别框架的关键。在立项阶段，需识别市场需求变化、政策法规调整、项目可行性误判等风险。实施阶段，要关注技术难题、人员变动、进度延误、成本超支等风险。运维阶段，可能面临系统故障、数据丢失、安全漏洞、用户满意度下降等风险。通过详细梳理各阶段可能出现的风险，形成全面的风险清单，为后续的风险评估和防控提供依据，确保项目在各个阶段都能有效应对可能出现的风险，保障项目的顺利推进和成功实施。

2. 弹性应急响应机制

风险防控体系完善与弹性应急响应机制是创新管理模式实施的重要保障。在风险防控方面，需全面识别项目全过程可能面临的各类风险，包括技术风险、人员风险、市场风险等。通过建立风险预警指标体系，实时监测风险状态。同时，制定针对性的风险应对措施，降低风险发生的可能性及其影响程度。对于弹性应急响应机制，应设计基于情景模拟的应急预案和恢复策略。根据不同的风险情景模拟结果，明确应急响应的流程、责任人和资源调配方式。在突发事件发生时，能够迅速启动应急预案，确保项目的正常运行，提高项目应对不确定性的能力。

五、总结

第三方信息化技术服务为项目全过程管理模式带来了显著创新。它通过整合资源、优化流程，提高了项目管理的效率和精准度。同时，打破了传统管理模式的信息孤岛，实现了各参与方的高效协同。然而，在发展过程中也面临技术集成瓶颈和管理协同难题。技术集成方面，不同系统间的兼容性和数据交互存在障碍；管理协同上，各方利益诉求和管理标准的差异影响了协同效果。未来，应朝着智能化、生态化方向发展。智能化可利用人工智能等技术提升决策能力；生态化则注重构建良好的产业生态环境，促进各方共同发展，以实现项目全过程管理模式的持续创新和优化。

参考文献

[1] 张红海. 基于代建单位视角的政府投资项目全过程工程管理模式研究 [D]. 重庆大学, 2022.

[2] 都怡然. 全过程工程咨询项目 A 的风险管理研究 [D]. 山东大学, 2021.

[3] 梅中鹤. 全过程咨询视角下的 EPC 项目监理风险控制研究 [D]. 南昌大学, 2022.

[4] 崔吉文. 房地产项目全过程成本管理研究——以 NT 项目为例 [D]. 对外经济贸易大学, 2021.

[5] 邹智凯. W 化学公司海外技术服务流程优化研究 [D]. 吉林大学, 2023.

[6] 许跃武. 技术服务项目 HSE 管理模式构建与应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(04): 127-128+131.

[7] 宋志强. 消防工程全过程技术服务研究 [J]. 中国住宅设施, 2022, (12): 147-149.

[8] 谢彤芳, 卢小清, 陈平. 内控视角下高校信息化项目管理的探讨 [J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(7): 155-157.

[9] 茅勇. 信息化在消防技术服务中的应用 [J]. 今日消防, 2021, 6(5): 10-11.

[10] 袁会武. 互联网+道路运输车辆技术服务与管理模式探讨 [J]. 北方交通, 2023(3): 83-85.

新一代智能开关产品工业设计： 形、色、质、控、神的融合与创新

庄娘设

广东省江门市新会区 ABB 新会低压开关有限公司，广东 江门 529100

DOI:10.61369/ME.2025010012

摘要：阐述了智能化技术和用户需求变化对低压开关产品的影响，介绍了其智能化转型的工业设计适应性改造策略，包括模块化架构、状态可视化、多模态交互等，还涉及拓扑优化、色彩体系创新等方面，强调了综合考虑多要素及家族化设计语言构建的重要性，展望了数字孪生技术的应用前景。

关键词：低压开关；智能化转型；工业设计

Industrial Design of New Generation Intelligent Switch Products: Integration and Innovation of form, Color, Quality, Control and Spirit

Zhuang Niangshe

ABB Xinhui Low Voltage Switchgear Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 529100

Abstract： This article elaborates on the impact of intelligent technology and changes in user demand on low-voltage switch products, introduces the industrial design adaptability transformation strategy for their intelligent transformation, including modular architecture, state visualization, multimodal interaction, etc. It also involves topology optimization, color system innovation, etc. It emphasizes the importance of comprehensively considering multiple elements and constructing a family design language, and looks forward to the application prospects of digital twin technology.

Keywords： low voltage switch; intelligent transformation; industrial design

引言

随着物联网、边缘计算等智能化技术的不断发展（相关技术持续演进），以及用户需求在数字化场景下的改变，低压开关产品面临智能化转型。2023 年相关工业发展政策强调技术创新与产品升级要紧密结合市场需求。在此背景下，低压开关产品的工业设计需从多个方面进行适应性改造，包括模块化架构、拓扑优化、色彩体系创新等，同时要考虑家族化设计语言传承、操作界面优化、环境适配性与安全设计以及特殊工况适应性等，以提升产品竞争力，满足市场需求。

一、低压开关产品智能化转型路径分析

（一）智能化技术演进与用户需求变化

物联网、边缘计算等智能化技术的持续演进，正深刻地影响着低压开关产品的形态和功能。这些先进技术赋予了低压开关更强大的数据采集、传输和处理能力，为实现真正的智能化奠定了坚实的技术基础。例如，物联网技术使得每一个低压开关都能够成为网络中的一个节点，与其他设备和系统进行实时的信息交互，从而构建起智能化的能源管理和控制网络^[1]。与此同时，用户在数字化浪潮下的需求也发生了显著的变化。他们不再仅仅满足于开关的基本通断功能，而是更加期望获得可视化的运行状态监控、便捷的远程操作与维护能力，以及与其他智能系统的无缝集成。可视化控制能够让用户清晰地了解设备的运行参数和状

态，而远程运维则极大地提高了维护效率，降低了运营成本。因此，低压开关产品的智能化转型，必须紧密结合智能化技术的最新发展趋势，并深入洞察和响应用户在数字化场景下的新兴需求。

（二）工业设计适应性改造策略

在低压开关产品智能化转型的工业设计适应性改造策略中，模块化架构设计是关键。通过模块化，可增强产品的可扩展性与维护性，适应不同应用场景需求^[2]。状态可视化集成能使用户直观了解开关工作状态，如通过指示灯或显示屏呈现电压、电流等关键信息。多模态交互则进一步提升用户体验，例如结合触摸、语音等交互方式，方便用户操作。同时，建立技术参数与用户体验的转化机制至关重要。这需要深入研究用户需求和行为习惯，将产品的技术性能以用户可感知的方式呈现，确保智能化功能真

正服务于用户，提高产品的易用性和市场竞争力。

二、五维设计要素系统构建

（一）形态语义与色彩体系创新

拓扑优化生成的轻量化结构形态是新一代智能开关产品设计的重要考量。通过优化结构，在保证产品性能的同时减轻重量，实现更精致的外观效果，为产品赋予独特的形态语义^[3]。同时，色彩体系创新方面，需深入分析警示色系与环境融合色系的平衡法则。警示色系可用于突出关键操作区域或提示特殊状态，而环境融合色系则使产品更好地融入使用环境，避免突兀感。此外，构建符合工业美学的比例系统也至关重要，合理的比例能增强产品的视觉和谐感，提升整体的工业设计品质，使其在市场竞争中脱颖而出。

（二）材质工艺与品牌精神传达

防腐蚀复合材料的表面处理技术在智能开关产品中至关重要。它不仅能提升产品的耐用性，还能在一定程度上影响其外观质感^[4]。合适的表面处理技术可以使产品更符合现代家居环境的需求，同时也能体现品牌对于品质的追求。触觉反馈设计是强化品质感知的有效手段。通过精心设计开关的触感，让用户在操作过程中感受到产品的精细工艺和高品质。这种触觉体验能够在潜意识中提升用户对产品的好感度和信任度。建立企业 DNA 可视化表达体系则是将品牌精神融入产品的关键。通过特定的材质选择和工艺应用，将企业的独特价值观和文化内涵以直观的方式展现给用户，使产品成为品牌精神的载体。

（三）产品的“神”——品牌灵魂的塑造

产品的“神”，指的是其超越功能和形态之上的内在精神和品牌的灵魂。这需要设计师深入理解企业的核心价值观、历史传承以及对未来的愿景，并将这些抽象的概念转化为具体的设计语言融入到产品之中。例如，一个注重可持续发展的品牌，可能会在产品设计中采用环保材料和模块化设计，方便回收和升级，从而传递出其对环境责任的承诺。一个以创新和技术领先为核心价值的品牌，可能会在产品形态上采用更具未来感的线条和材质，展现其科技实力。这种“神”的塑造，不仅仅体现在产品的视觉层面，更渗透到产品的交互方式、用户体验以及售后服务等各个方面，最终在用户心中建立起独特的情感连接和品牌认同感。智能开关产品的“神”，可能体现在其稳定可靠的性能所带来的安全感，简洁高效的操作所体现的专业性，以及对未来智能工业趋势的积极响应。

三、家族化设计语言传承机制

（一）产品基因提取与重组方法

形态分析法是实现家族化设计语言传承中产品基因提取与重组的重要方法。通过对经典产品进行解构，可深入挖掘其特征要素，这些要素涵盖形状、色彩、材质、操控方式以及神韵等多个方面。将这些要素进行系统整理，建立参数化特征库，同时制定

合理的组合规则。这不仅有助于保留产品的核心基因，还能依据市场需求和技术发展，实现设计语言的可持续迭代。在此过程中，充分考虑用户体验和品牌文化的传承，使新一代产品在保持家族化特征的同时，能够与时俱进，满足市场的多样化需求^[5]。

（二）模块化架构下的创新平衡

在模块化架构下，实现家族化设计语言传承的创新平衡至关重要。一方面，核心模块的标准化是基础，它确保了产品在不同功能和结构上的一致性，为家族化特征的形成提供了稳定的框架。这使得不同型号的产品能够共享一些关键的设计元素和技术，降低生产成本，提高生产效率。另一方面，个性模块的定制化则为产品带来了差异化和创新性。通过定制化，可以满足不同用户群体的特定需求和审美偏好，增强产品的市场竞争力。而 CMF 创新在其中起到了关键作用，它能够在保持系列产品视觉统一性的同时，通过对色彩、材料和表面处理的巧妙运用，赋予产品独特的个性和魅力，实现家族化设计语言传承与创新的完美结合^[6]。

四、人机工程系统化设计实践

（一）控制逻辑与操作界面优化

基于 Fitts 定律对控制面板上的按键布局进行优化，是提高操作效率和准确性的重要手段^[7]。这需要充分考虑人的操作习惯和反应时间，合理安排按键的位置和大小，使得关键功能的按键更易于触达，常用功能的按键尺寸更大。同时，为了避免误操作，设计多级防误触机制是必要的，例如通过增加操作确认步骤、设置操作禁区或者采用具有明确触觉反馈的按键等方式，来降低误操作的可能性。此外，开发符合 ISO 相关标准的操作反馈系统至关重要。这要求从视觉、听觉和触觉等多个维度为用户提供及时、准确的操作反馈，例如，按下按钮时的声音提示、屏幕上的状态变化、以及清晰的触觉反馈，都能够帮助用户确认操作是否成功以及系统的当前状态，从而显著提升用户体验，使得操作界面更加友好和高效。

（二）环境适配性与安全设计

在环境适配性与安全设计方面，需研究 IP 防护等级与散热结构的协同设计。合理的 IP 防护等级确保产品在不同环境下的密封性和防护能力，而散热结构影响产品的性能和寿命。两者协同设计，可使产品更好地适应各种环境条件^[8]。同时，开发危险状态预警光效系统至关重要。通过特定的光效提示，能及时告知用户潜在危险，提高使用安全性。此外，建立人机交互安全评估模型，从人机工程学角度全面评估产品在交互过程中的安全性，为产品设计和优化提供依据，进一步提升产品的环境适配性和安全性。

（三）特殊工况适应性研究

在特殊工况适应性研究方面，针对震动、低温等极端环境采取了一系列措施。对于震动环境，设计了防抖界面保持算法，通过该算法有效减少因震动带来的界面不稳定因素，确保用户在操作智能开关产品时能有清晰准确的交互界面^[9]。在低温环境下，

提出触控灵敏度自适应调节方案，由于低温可能导致触控灵敏度下降，此方案能够根据环境温度自动调整触控灵敏度，保证产品在低温环境下仍能正常使用，提高了产品在特殊工况下的适应性和可靠性，为用户提供更好的使用体验。

五、液晶显示界面设计创新

（一）信息架构与交互逻辑设计

液晶显示界面设计创新需注重信息架构与交互逻辑。运用卡片式分层显示技术，可对信息进行有效分类与整合，如同将繁杂的物品有序放置在不同的卡片抽屉中，用户可按需查看，避免信息过载带来的困扰^[10]。同时，开发符合 NUREG - 0700 标准的报警信息优先显示机制至关重要。该机制能确保在众多信息中，报警信息第一时间被用户察觉，就像在嘈杂环境中，紧急的警报声能迅速引起人们的注意，从而保障设备使用的安全性与可靠性，提升用户体验。

（二）视觉美学与功能性平衡

在液晶显示界面设计创新中，视觉美学与功能性平衡至关重要。工业级液晶的色彩耐久性是关键因素之一，其直接影响显示界面的视觉效果和使用寿命。深入研究色彩耐久性表现，能确保

界面在长期使用中保持良好的视觉呈现。同时，开发抗眩光渐变 UI 组件库也是提升视觉美学与功能性的重要举措。抗眩光技术可减少外界光线干扰，渐变效果则增添了界面的层次感和动态感，使信息展示更加清晰、美观且富有吸引力。此外，建立符号化信息传达体系有助于提高信息传递的效率和准确性，以简洁明了的符号替代复杂的文字说明，在满足功能需求的同时，也提升了界面的整体美感，实现视觉美学与功能性的完美平衡。

六、总结

新一代智能开关产品工业设计需综合考虑形、色、质、控、神五要素。通过系统整合方法，使各要素相互融合、协同，实现产品的优化设计。家族化设计语言的构建路径对于产品系列的一致性和品牌形象的塑造至关重要，它有助于提升产品的辨识度和用户的认同感。展望未来，数字孪生技术在工业设计全流程中具有广阔的应用前景。该技术能够实现虚拟模型与物理实体的精准映射和实时交互，为产品设计、测试、优化等环节提供更高效、精准的支持，从而推动智能开关产品工业设计向更高水平发展，更好地满足用户需求和市场竞争。

参考文献

- [1] 奚宏伟. 智能眼镜类产品工业设计研究 [D]. 东南大学, 2017.
- [2] 许刚. 新型智能开关电源设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(16): 135-138.
- [3] 张帆. 智能高边功率开关关键电路的研究与设计 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2023.
- [4] 王晓红. 基于 VPLC 的工业智能照明控制系统设计 [J]. 光源与照明, 2023(10): 66-68.
- [5] 于柏, 闫智, 刘泓翊. 工业用流速开关检测控制系统设计 [J]. 电子器件, 2022, 45(2): 499-503.
- [6] 万伏初, 万典华, 王耿. 浅谈工业设计在工业零配件中的应用 [J]. 工业设计, 2022(11): 125-127.
- [7] 孔海庆. 工业设计与工业智能制造的融合创新研究 [J]. 价值工程, 2021, 40(14): 233-234.
- [8] 杨雪娇, 胡昌格. 浅析工业设计领域中的工程选材 [J]. 工业设计, 2021(3): 153-154.
- [9] 张达辉. 工业设计的新材料与新工艺的应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(11): 137-138.
- [10] 孔呈祥. 工业设计在智能家电产品设计中的实践运用 [J]. 鞋类工艺与设计, 2023, 3(21): 115-117.

基于 BIM 技术的暖通空调制冷机房建模与高效制冷机房设计协同研究

关伟雄

身份证号: 440783199310072715

DOI:10.61369/ME.2025010013

摘要 : 阐述 BIM 技术在高效制冷机房设计的应用, 包括其核心特征及优势。介绍高效机房协同设计理论框架的构建维度, 以及动态负荷模拟、水力计算等方法。还涉及 Revit 建模、Navisworks 检测等流程, 强调 CAD 与 BIM 协同及智能控制策略, 分析节能效果与经济性, 并指出研究局限与方向。

关键词 : BIM 技术; 高效制冷机房; 协同设计

A Collaborative Study on Modeling of Hvac Refrigeration Room and Design of Efficient Refrigeration Room Based on Bim Technology

Guan Weixiong

ID: 440783199310072715

Abstract : This paper discusses the application of BIM technology in the design of high-efficiency refrigeration machine rooms, highlighting its core features and advantages. It introduces the dimensions of the theoretical framework for collaborative design of efficient machine rooms, as well as methods such as dynamic load simulation and hydraulic calculations. The paper also covers processes like Revit modeling and Navisworks detection, emphasizing the synergy between CAD and BIM and intelligent control strategies. It analyzes the energy-saving effects and economic benefits, and identifies research limitations and future directions.

Keywords : BIM technology; efficient refrigeration room; collaborative design

引言

随着建筑行业的发展, BIM 技术在暖通空调制冷机房设计中的应用日益受到关注。2017 年发布的《建筑业发展“十三五”规划》强调了推进建筑信息化的重要性, 这为 BIM 技术的应用提供了政策支持。BIM 技术具有参数化建模、信息集成及可视化等核心特征, 这些特征在高效制冷机房设计中优势明显。从负荷预测、系统选型到水力平衡、能耗分析等多个维度构建协同设计理论框架, 以及采用动态负荷模拟方法、优化管网水力计算模型等, 都离不开 BIM 技术的支撑。同时, CAD 图纸与 BIM 模型的数据转换接口、协同建模技术实现路径等也是实现高效机房设计的关键环节, 本研究将对此展开探讨。

一、BIM 技术与高效制冷机房设计理论基础

(一) BIM 技术核心特征与优势

BIM 技术具有参数化建模、信息集成及可视化等核心特征。参数化建模可通过设定参数快速生成和修改模型, 提高设计效率^[1]。信息集成能够将各种建筑信息整合到一个模型中, 包括设备参数、材料信息等, 方便设计师和各参与方获取全面信息。可视化特征则使设计成果以三维形式直观呈现, 便于理解和沟通。在高效制冷机房设计中, 这些特征带来诸多优势。例如在设备空间优化方面, 通过可视化和信息集成, 可准确分析设备空间需求, 合理布局设备, 避免空间浪费。在管线综合上, 参数化建模

和可视化有助于提前规划管线走向, 减少管线碰撞, 提高施工效率和质量。

(二) 高效机房协同设计理论框架

高效机房协同设计理论框架需从负荷预测、系统选型、水力平衡、能耗分析四个维度构建协同设计理论模型。负荷预测是基础, 通过对建筑的热负荷和冷负荷进行准确预测, 为后续设计提供依据^[2]。系统选型要综合考虑各种因素, 如制冷机组的类型、容量等, 以确保系统的高效运行。水力平衡对于保证系统的稳定运行至关重要, 需合理设计管道系统, 避免水力失调。能耗分析则是对整个系统的能耗进行评估和优化, 通过模拟和分析, 找出节能潜力, 提高机房的能源利用效率。这四个维度相互关联、相

互影响，共同构成了高效机房协同设计的理论框架。

二、8760小时负荷模拟与水力计算模型构建

（一）动态负荷模拟方法研究

在动态负荷模拟方法研究中，采用 EnergyPlus 进行全年逐时负荷计算具有重要意义。它能够充分考虑气象参数以及运行工况对负荷的影响，从而建立起较为准确的负荷预测模型^[3]。通过对不同时间点的负荷进行详细模拟，可以为暖通空调系统的设计和运行提供关键数据支持。该方法有助于更好地理解建筑在不同季节、不同时间段的热需求变化规律，进而优化制冷机房的设计，提高能源利用效率，实现高效制冷机房的设计目标。同时，结合 BIM 技术，能够将负荷模拟结果与三维模型相结合，更直观地展示系统运行状态和潜在问题，为设计协同提供有力工具。

（二）管网水力平衡优化算法

在 8760 小时负荷模拟与水力计算模型构建中，管网水力平衡优化算法至关重要。开发基于遗传算法的管网阻力平衡计算模型，该算法能有效处理复杂的管网系统。通过对管网系统的拓扑结构、管径、阻力系数等参数进行编码，利用遗传算法的选择、交叉和变异操作，不断优化管网阻力平衡方案，使其接近全局最优解^[4]。同时，提出变流量系统的水力优化策略。考虑到空调系统在不同工况下的流量需求变化，通过对水泵转速、阀门开度等进行动态调节，实现管网水力平衡的实时优化，提高系统的运行效率和节能效果。

三、BIM 协同建模技术实现路径

（一）Revit 参数化建模流程

1. 设备族库创建标准

在 Revit 参数化建模流程中，对于设备族库创建标准部分，核心在于制定冷水机组、水泵等核心设备的 LOD400 建模标准与参数关联规则^[5]。首先需明确设备的详细几何形状、尺寸及材质等信息，确保模型能准确反映实际设备。对于参数关联规则，要依据设备的运行原理和实际性能参数进行设定，例如冷水机组的制冷量、功率与运行效率等参数需合理关联，以便在模型中能够准确模拟设备的运行状态和性能表现。同时，在创建族库时，要考虑模型的通用性和兼容性，方便在不同项目中使用，提高建模效率和质量。

2. 碰撞检测与净高优化

在 Revit 参数化建模完成后，运用 Navisworks 进行管线综合碰撞检测至关重要。通过将 Revit 模型导入 Navisworks，能够快速准确地识别出暖通空调系统中各类管线之间以及管线与其他构件的碰撞点^[6]。对这些碰撞点进行详细分析，依据实际工程需求和规范要求，制定合理的解决方案。同时，结合净高要求，对三维空间进行优化。考虑到机房的实际使用功能和维护空间，合理调整管线的走向和高度，确保在满足制冷机房正常运行的前提下，最大限度地提高空间利用率，实现高效制冷机房的设计目标。

（二）CAD/BIM 协同设计方法

1. IFC 数据转换机制

CAD 图纸与 BIM 模型的数据转换接口是实现协同的关键。通

过深入研究，需明确两者的数据结构差异，以建立有效的转换规则。在此过程中，要注重属性信息的无损传递，确保从 CAD 图纸中提取的关键信息，如暖通空调制冷机房的设备参数、管道规格等，能够准确无误地导入 BIM 模型中。这不仅需要技术手段的支持，还需遵循相关标准，如 IFC 标准。IFC 数据转换机制为这种协同提供了可能，它定义了一种通用的数据格式，使得不同软件之间的数据交换更加顺畅。利用这一机制，可以更好地实现 CAD 与 BIM 的协同，提高暖通空调制冷机房建模与设计的效率和质量，为高效制冷机房的设计提供有力保障^[7]。

2. 多专业协同工作流程

在 BIM 协同建模技术实现路径中，构建建筑、结构、机电专业间的模型共享与实时更新机制至关重要。各专业需基于统一的 BIM 平台进行工作，确保信息的集成与交互。建筑专业创建的模型为结构和机电专业提供基础框架，结构专业在此基础上进行结构构件的布置与设计，其设计变更能实时反馈到建筑模型中，避免冲突。机电专业尤其是暖通空调制冷机房相关设计，依据建筑和结构模型进行设备及管道的布置，同时其调整也能及时更新到整体模型，保证各专业模型的一致性和准确性。通过这种方式实现多专业协同工作，提高设计效率和质量^[8]。

四、高效制冷机房设计策略研究

（一）设备选型优化策略

1. 机组能效比动态评估

建立基于部分负荷率的 COP 动态计算模型是机组能效比动态评估的关键。通过分析不同负荷条件下机组的运行性能，准确计算 COP 值，为设备选型提供科学依据^[9]。同时，提出设备容量匹配原则，确保制冷机组、水泵、冷却塔等设备在不同工况下均能高效运行。设备容量应根据实际负荷需求进行合理配置，避免过大或过小导致的能源浪费。在选型过程中，综合考虑设备的性能曲线、部分负荷特性以及相互之间的匹配性，以实现整个制冷机房系统的高效运行，提高能源利用效率，降低运行成本。

2. 变频设备配置方案

制定水泵与冷却塔的变频控制策略对于实现 20%–100% 负荷区间高效运行至关重要。通过对制冷机房运行工况的详细分析，确定合理的变频范围和控制参数。根据负荷变化，动态调整水泵和冷却塔的运行频率，使其在不同负荷下均能保持高效工作状态。采用先进的传感器技术实时监测相关运行参数，如温度、压力、流量等，为变频控制提供准确的数据支持^[10]。同时，结合智能控制系统，对采集的数据进行分析处理，实现对变频设备的精准控制，提高整个制冷机房的能源利用效率，降低运行成本。

（二）管路系统优化设计

1. 同程系统水力平衡设计

同程系统水力平衡设计是高效制冷机房管路系统优化的关键。通过合理规划管路拓扑结构，可有效控制系统不平衡率。在设计过程中，需精确计算各管路的阻力，根据阻力特性调整管径和管长，确保各支路的水力特性相近。利用水力平衡阀等设备进一步微调各支路的流量，使其符合设计要求。同时，采用先进的模拟软件对系统进行水力模拟分析，提前预测可能出现的不平衡问题并加以解决。通过这些措施，可将系统不平衡率控制在 $\pm 5\%$

以内，提高制冷机房的运行效率，减少能源浪费，确保各设备在良好的水力条件下稳定运行。

2. 低阻力阀门选型策略

在低阻力阀门选型策略方面，对于高效制冷机房的管路系统优化至关重要。应采用动态平衡阀与电动调节阀组合方案。动态平衡阀能够根据系统的压力变化自动调节流量，确保各支路的流量平衡，避免因流量不均导致的局部阻力过大问题。电动调节阀则可根据实际需求精确控制流量，进一步优化系统运行。这种组合方案可有效降低系统整体阻力约15%。通过合理选型和搭配阀门，能够减少管路系统中的能量损失，提高制冷机房的运行效率，同时降低能耗，为实现高效制冷机房的设计目标提供有力支持。

（三）智能控制策略研究

1. 负荷预测控制算法

开发基于机器学习的前馈 - 反馈复合控制模型以实现供冷量精准匹配，需综合考虑多种因素。首先要建立准确的负荷预测模型，通过收集历史数据，包括室内外温度、湿度、人员流动等信息，利用机器学习算法进行数据分析和模型训练。前馈控制环节根据预测的负荷提前调整制冷机组的运行参数，如压缩机转速、制冷剂流量等。反馈控制则实时监测实际供冷量与需求的偏差，对前馈控制进行修正。通过不断优化模型参数，提高控制精度，确保制冷机房能够在不同工况下高效运行，实现节能目标，同时满足用户的舒适度需求。

2. 群控系统优化逻辑

在高效制冷机房的智能控制策略中，群控系统优化逻辑至关重要。建立设备启停优先级控制策略是关键环节。通过对制冷机房各设备运行数据的精确分析，依据负荷需求、设备性能及能耗情况设定优先级。当制冷需求变化时，优先启动或停止符合条件的设备，避免所有设备同时低效运行。例如，在低负荷时段，优先关闭部分能耗较高且对整体制冷效果影响较小的设备。同时，结合实时监测数据不断调整策略，确保系统始终处于高效运行状态，从而实现缩短机组低效运行时间30%的目标，提高制冷机房的整体能效。

五、工程验证与效果分析

（一）实际工程案例验证

某商业综合体项目中，传统设计方式在暖通空调制冷机房设

计上存在诸多问题。设计过程中各专业协调困难，信息传递不畅，导致设计变更频繁，施工进度受阻。而采用BIM协同设计后，各专业在统一的三维模型平台上协同工作，实时共享信息。通过BIM模型，能够提前发现并解决设计冲突，优化管道布局和设备选型。施工过程中，基于BIM模型的可视化指导，工人能更准确地安装设备和铺设管道，减少了错误和返工。最终，BIM协同设计使项目的设计周期缩短，施工质量提高，制冷机房的运行效率也得到了显著提升，验证了BIM技术在暖通空调制冷机房设计中的优势。

（二）节能效果与经济性分析

通过能耗模拟与实测数据对比，对基于BIM技术的暖通空调制冷机房设计的节能效果与经济性进行分析。结果显示系统能效有显著提升，达到22%。这得益于BIM技术在设计阶段的优化，使得制冷机房各设备及系统协同工作更加高效。在经济性方面，投资回收期缩短至4.3年。这主要是因为节能效果带来的运行成本降低，以及BIM技术在设计过程中对资源的合理配置，减少了不必要的投资。同时，高效的制冷机房设计也提高了设备的使用寿命，进一步降低了长期运营成本，体现了该设计在节能和经济上的双重优势。

六、总结

本研究构建了BIM技术与高效机房设计的全过程协同框架。通过实际工程验证，基于8760小时负荷模拟的设备选型策略效果显著，能降低装机容量18%。同时，结合水力平衡优化可使系统能效提升25%，这充分体现了该协同框架在暖通空调制冷机房设计中的优势。然而，研究也存在一定的局限性和后续研究方向。例如，数字孪生技术在运维阶段的应用尚未深入探究。未来研究应聚焦于此，进一步完善基于BIM技术的暖通空调制冷机房设计与运维体系，以实现更高效、节能的机房运行模式，推动行业的可持续发展。

参考文献

- [1] SAINJARGAL NASANBAT. Revit平台下空调制冷机房BIM设计及拆分方法研究[D]. 大连理工大学, 2020.
- [2] 刘海. 工业建筑高效制冷机房能效比研究——以某厂制冷机房为例[D]. 广州大学, 2021.
- [3] 方婉蓉. 基于BIM技术的建筑结构协同设计研究[D]. 武汉科技大学, 2013.
- [4] 王常博. 制冷机房群控系统设计及实现[D]. 扬州大学, 2020.
- [5] 樊成亮. 空调制冷机房耦合水侧节能系统建模及优化控制[D]. 广州大学, 2021.
- [6] 李超然. 暖通空调高效制冷机房设计的思考[J]. 建材与装饰, 2021, 17(32): 49-50.
- [7] 孟瑞平. 暖通高效制冷机房与低碳设计[J]. 建筑·建材·装饰, 2023(22): 124-126.
- [8] 梁军, 李承泳. 北京某写字楼项目暖通空调高效制冷机房设计[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(9): 103-105, 61.
- [9] 王峰. 高效制冷机房性能化设计研究[J]. 绿色建筑, 2023(3): 73-77.
- [10] 于昌勇, 张亮, 李嘉劼, 等. 高效空调制冷机房无人值守智慧运行节能技术研究与应[J]. 建设科技, 2022(23): 63-66, 70.

全生命周期视角下改扩建路基工程预算编制模型优化研究

刘剑捷

四川省熠道丰建筑工程有限公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ME.2025010019

摘要： 阐述路基工程全生命周期成本各阶段情况，包括规划、设计、施工和运维等，分析全生命周期理论应用机理，指出现行预算编制方法局限，介绍施工图阶段及全生命周期预算模型构建方法，强调多因素对预算影响及模型优化措施，展示研究成果并提出未来方向。

关键词： 路基工程；全生命周期；预算编制

Study on the Optimization of Budget Preparation Model for Reconstruction and Expansion of Roadbed Engineering from the Perspective of Whole Life Cycle

Liu Jianjie

Sichuan Yidao Feng Construction Engineering Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： This paper elucidates the cost scenarios of the entire lifecycle of roadbed projects, covering planning, design, construction, and operation and maintenance. It analyzes the application mechanisms of lifecycle theory, highlights the limitations of current budgeting methods, and introduces construction drawing phase and lifecycle budget model construction methods. The paper emphasizes the impact of multiple factors on budgets and measures for model optimization, presents research findings, and proposes future directions.

Keywords： subgrade engineering; whole life cycle; budget preparation

引言

路基工程全生命周期成本涉及多个阶段且相互关联，各阶段成本要素及其相互作用机制对总成本优化至关重要。随着我国基础设施建设的持续推进（如《交通强国建设纲要》2019年颁布），改扩建路基工程不断增加。现行预算编制方法在该工程中存在局限性，比如部颁通用定额工料机的选用难以适应项目新工艺新工法推广；地方补充定额适用范围难以得到统一认可；定额消耗量调整难以准确反映现场实际施工消耗等。因此，研究如何优化改扩建路基工程预算编制模型具有重要的现实意义，这包括全生命周期理论应用机理分析、成本预测模型构建、动态分配机制建立以及多源数据融合等方面的研究，以提高预算编制的准确性和合理性，实现工程成本的有效控制。

一、全生命周期理论在路基工程中的应用机理

（一）全生命周期成本构成分析

路基工程的全生命周期成本涵盖规划、设计、施工与运维等阶段。规划阶段成本包括项目可行性研究、选址勘察等费用^[1]。设计阶段涉及初步设计、施工图设计成本，以及考虑不同设计方案对后续成本的影响。施工阶段成本包含材料、人工、机械设备使用等直接成本，以及施工管理、质量控制、安全投入、环保措施、改扩建项目保通措施等间接成本。运维阶段则有日常巡查、维修养护、病害处理等费用。各阶段成本相互关联，规划设计不合理可能导致施工困难和成本增加，施工质量不佳会加大运维成本。因此，需综合考虑各阶段成本要素及其相互作用机制，

以实现全生命周期成本的优化。

（二）改扩建工程特征对预算体系的影响

全生命周期理论在路基工程中的应用机理涉及多个方面。既有路基结构评估是关键环节，不同的评估结果会影响后续的预算编制。例如，结构的损坏程度、承载能力、远期交通通行能力需求等因素决定了是需要局部修复还是大规模改扩建，从而产生不同的成本预算^[2]。新旧结构衔接技术同样对预算有重要影响。合理的衔接技术需要考虑材料、工艺等多种因素，不同的衔接方案成本差异较大。而且，衔接部位的质量要求往往更高，可能需要额外的检测和维护费用，这些都要在预算编制中体现出来。改扩建工程的这些特征使得预算体系需要更加精细和全面，以准确反映工程的实际成本和全生命周期内的费用情况。

二、改扩建路基工程预算编制现状与问题

（一）现行预算编制模型的局限性

现行预算编制多采用传统定额法，其在改扩建路基工程中存在局限性。在动态工程变更方面，定额法难以快速准确地反映因工程变更带来的成本变化。由于定额相对固定，对于变更后的工程量及工艺调整，无法及时、合理地调整预算金额，导致预算与实际成本脱节^[3]。譬如现行公路工程定额中未准确体现数码雷管的应用消耗量，未按照现行施工规范调整定额含量中的32.5级和42.5级水泥消耗换算等，易造成定额编制“失真”。在材料价格波动方面，定额法不能有效适应市场价格的动态变化。材料价格受多种因素影响，而定额中的材料价格往往是固定的或调整不及时，无法准确反映实际采购成本，现行新工艺工法推动采用的材料很大一部分无地方定额站公布的信息价作为参考依据，建设方与施工方进行市场询价对比往往因为询价周期不同等原因存在较大价格差异，从而影响预算的准确性和合理性。

（二）变更索赔对预算控制的影响

在改扩建路基工程中，变更索赔对预算控制产生多方面影响。工程签证和设计变更等索赔事件常导致预算执行出现偏差。一方面，工程签证可能因现场实际情况与原设计不符而产生，如地下不明障碍物的出现，使得施工工艺改变，增加了额外费用，冲击预算^[4]。另一方面，设计变更可能由于政策变化、地方政府要求或业主要求提高工程标准，改变工程规模或调整设计方案，这会引起工、料、机费用的变化和措施投入费用的差异，影响预算的准确性和可控性。而且，索赔事件的处理过程往往复杂且耗时，可能延误工程进度，进一步增加间接成本，给预算控制带来更大挑战。

三、全生命周期预算模型构建

（一）多阶段协同预算框架设计

1. 施工图阶段成本预测模型

在施工图阶段成本预测模型构建中，可借助 BIM 技术建立工程量精准计算体系^[5]。BIM 技术具有可视化、参数化等优势，能够准确获取路基工程各构件的几何信息和属性信息。通过对设计图纸的三维建模，可以精确计算出土石方量、混凝土用量等工程量数据。同时，结合工程所在地的材料价格、人工费用等市场信息，以及施工工艺和规范要求，能够进一步准确预测施工成本。利用 BIM 模型的信息集成性，还可对不同施工方案进行成本对比分析，为选择最优方案提供依据，从而实现施工图阶段成本的有效预测和控制。

2. 运维成本折现计算模型

在全生命周期预算模型构建中，运维成本折现计算模型至关重要。对于考虑路面性能衰变规律的长期养护费用预测，需建立合理算法。首先要分析路面性能衰变的影响因素，如交通荷载、环境条件等^[6]。基于这些因素，确定性能衰变函数，描述路面性能随时间的变化。然后，结合养护措施及其成本，建立养护费用

与路面性能的关联模型。通过对未来不同时间点的养护费用进行预测，并考虑资金的时间价值进行折现计算，从而准确计算不同运维周期的成本费用，比较不同运维方案的经济效益，为制定运维方案提供决策参考。这一模型能够为多阶段协同预算框架提供关键的运维成本数据支持，使预算编制更加科学合理。

（二）动态调整机制构建

1. 合同风险分担模型

基于国内通行的标准施工招标文件条款构建不可预见费动态分配机制。该机制考虑到全寿命周期内各种不确定因素对工程预算的影响。在项目初期，依据工程特点及以往经验，设定不可预见费的初始比例及分配原则。随着项目推进，根据实际发生的风险事件及对工程成本的影响，动态调整不可预见费在各阶段、各工作内容间的分配。例如，若某阶段地质条件复杂程度超出预期，可适当增加该阶段不可预见费比例，确保有足够资金应对风险。同时，明确各方在不可预见费管理中的责任与权力，合理分担风险，避免因风险分担不均导致的合同纠纷，保障项目顺利进行^[7]。

2. 索赔事件响应算法

在全寿命周期预算模型构建中，需考虑多种因素。对于动态调整机制，应结合项目前期策划、工程变更指令与合同条款解读等多方过程中的工作成果，构建项目合同变更索赔风险清单。当出现工程变更时，依据风险清单编制预案，系统地分析对预算的影响。合同条款明确了各方的权利和义务，是调整预算的重要依据^[8]。在索赔事件响应算法方面，要准确识别索赔事件的触发条件。一旦符合条件，根据合同约定和实际损失情况计算索赔金额，并及时调整预算。同时，建立反馈机制，确保调整后的预算能适应工程实际进展，保障工程顺利进行。

四、预算模型优化实施路径

（一）数据集成平台建设

1. 多源数据融合技术

为优化预算编制模型，在数据集成平台建设中需重视多源数据融合技术。通过整合工程量支付系统与 GIS 地理信息数据的接口设计，实现不同数据源之间的有效连接。利用先进的数据挖掘和分析算法，对来自计量支付系统的工程成本数据以及 GIS 系统中的地理空间数据进行处理。挖掘数据之间的潜在关联，例如地理环境因素对工程成本的影响。通过建立统一的数据标准和规范，确保融合后的数据质量和一致性。主要目的是建立动态化、可视化的项目建设模型，根据所划分的部分分项进行清单化管理，建立 WBS 系统清单管理树，这将为全生命周期视角下改扩建路基工程预算编制提供更准确、全面的数据支持，提高预算模型的精度和可靠性^[9]。

2. 实时成本监控模块

在全生命周期视角下，为实现改扩建路基工程预算编制模型优化，需构建实时成本监控模块。通过开发基于物联网的机械台班与材料消耗动态监测系统，实时获取工程中各类资源的消耗数据^[10]。该系统利用物联网技术，将机械和材料的使用情况进行实

时传输和分析。例如，在机械台班方面，能够准确记录每台机械的工作时长、工作状态等信息；在材料消耗上，可精确监测各类材料的用量及剩余量。这些实时数据将集成到数据集成平台，为预算模型的优化提供准确的数据支持，以便及时调整预算，提高预算编制的准确性和合理性。

（二）合同管理协同机制

1. 条款风险预警体系

建立合同支付条款与预算执行偏差的关联分析模型是预算模型优化实施路径的重要部分。在合同管理协同机制中，需确保合同各方对支付条款有清晰理解和共识，明确各方权利义务。对于条款风险预警体系，要识别可能影响预算执行的风险因素，如市场价格波动、工程变更等。通过对支付条款与预算执行偏差的关联分析，当出现偏差时及时预警，以便采取措施调整。同时，在合同中应明确风险分担机制，合理分配因风险导致预算偏差的责任，促进各方积极参与预算控制，保障预算编制模型的有效实施和优化。

2. 索赔时效管理模型

在全寿命周期视角下，对于改扩建路基工程预算编制模型优化，需设计结合28天索赔时效的预算调整触发机制。这一机制应基于合同管理协同机制构建。当出现符合索赔条件的事件时，需在28天内启动相关流程。在合同中明确规定各方在索赔时效内的权利和义务，确保信息及时传递和共享。同时，建立有效的监督和反馈机制，对索赔事件进行跟踪和评估。根据评估结果，及时调整预算模型。预算调整应考虑到工程进度、成本变化以及对后续工程的影响等多方面因素，确保预算始终符合工程实际需求，提高预算编制的准确性和合理性，保障工程顺利进行。考虑在系统模型中添加变更索赔标准工作清单管理包，将部分特定的，繁琐的变更索赔项进行标准清单化管理，将变更索赔项进行工作分解，通过变更立项（索赔意向），辅助证明资料收集、报告编制、费用计算、合同依据提供等标准流程化工作实现变更索赔工作的有效管理。

（三）组织保障体系建设

1. 多专业协同工作流程

在全寿命周期视角下，需构建完善的组织保障体系和多专业协同工作流程以优化预算模型。路基、路面、交安附属工程预算

人员交互审核制度至关重要。不同专业预算人员需定期沟通，路基专业人员提供基础数据，路面专业人员在此基础上考虑路面结构与材料对预算影响，交安附属工程专业人员则确保交安附属系统预算合理且与其他部分协同。审核过程中，各方对彼此预算部分进行交叉检查，确保数据准确性和一致性，避免重复计算或遗漏。通过这种协同工作流程，可整合各专业知识和信息，提高预算编制的科学性和准确性，为改扩建路基工程预算模型优化提供有力支撑。

2. 全周期知识管理系统

在组织保障体系建设方面，需成立专门的团队负责预算模型优化工作，明确各成员职责，确保工作有序开展。团队应包括工程技术专家、预算编制人员和信息技术人员等，共同协作解决优化过程中的各类问题。

对于全周期知识管理系统，要建立包含历史变更案例库的预算决策支持系统。收集以往改扩建路基工程的变更案例，详细记录变更原因、涉及金额、对预算的影响等信息。通过对这些案例的分析和整理，挖掘其中的规律和经验教训，为当前和未来的预算编制提供参考。同时，利用信息技术手段，实现案例库的高效管理和检索，方便预算编制人员快速获取所需信息，提高预算编制的准确性和合理性。

五、总结

在全寿命周期视角下，本研究针对改扩建路基工程预算编制模型展开优化工作。通过构建相关预算模型，取得了显著成效。这不仅为工程预算编制提供了更精确的方法，也提高了工程管理的效率和效益。然而，研究还有进一步拓展的空间。未来可结合区块链技术，强化合同履行的追溯能力，确保工程各环节的责任明确和信息透明。同时，运用机器学习优化材料价格预测模块，能够更好地应对市场价格波动，进一步提高预算编制的准确性和科学性，为改扩建路基工程的顺利实施提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 都达古拉. 工程项目全寿命周期成本优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [2] 白文飞. 轨道设备修理周期预测及全寿命周期修理决策优化模型研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [3] 闫大伟. 全寿命周期视角下低碳建筑评价体系研究 [D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2013.
- [4] 马德军. 全寿命周期视角下绿色住宅增量成本构成及计量研究 [D]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
- [5] 柯燕燕, 朱小珍, 彭东勤, 等. 全寿命周期视角下装配式建筑项目增量成本与增量收益研究 [J]. 建筑经济, 2023, 44(12): 41-46.
- [6] 鄢光宇, 何冬梅. 高速公路改扩建路基工程预算编制要点与分析 [J]. 交通企业管理, 2021, 36(02): 60-61.
- [7] 连会仁. 全寿命周期视角下高校修缮工程管理研究 [J]. 建设监理, 2022, (10): 20-23.
- [8] 管乐. 全寿命周期视角下电网基建工程成本控制研究 [J]. 环渤海经济瞭望, 2018, (12): 151-152.
- [9] 苗泽惠, 施德阳. 全寿命周期视角下绿色建筑成本控制研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2019, (05): 66-67.
- [10] 姜帆. 全寿命周期成本视角下的绿色建筑经济效益分析 [J]. 建筑经济, 2014, 35(12): 102-104.

磁共振成像系统高级功能操作与应用分析

李均明

阳江市中医医院, 广东 阳江 529500

DOI:10.61369/ME.2025010026

摘 要： 磁共振成像（MRI）技术是现代医学影像领域中的一项重要技术，它能够提供人体内部结构的详细图像，对于疾病的诊断和治疗具有重要意义。随着技术的不断进步，MRI系统已经发展出许多高级功能，这些功能在提高图像质量、缩短扫描时间以及增强诊断准确性方面发挥着重要作用。本文将对MRI系统的一些高级功能进行操作与应用分析，探讨其在临床实践中的价值和挑战。

关 键 词： 磁共振成像；高级功能；操作；应用分析

Advanced Function Operation and Application Analysis of Magnetic Resonance Imaging System

Li Junming

Yang Jiang Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yangjiang, Guangdong 529500

Abstract： Magnetic Resonance imaging (MRI) technology is an important technique in the field of modern medical imaging. It can provide detailed images of the internal structure of the human body and is of great significance for the diagnosis and treatment of diseases. With the continuous advancement of technology, MRI systems have developed many advanced functions, which play a significant role in improving image quality, shortening scanning time and enhancing diagnostic accuracy. This article will conduct an operation and application analysis of some advanced functions of the MRI system, and explore its value and challenges in clinical practice.

Keywords： magnetic resonance imaging; advanced functions; operation; application analysis

MRI系统通过利用强磁场和射频脉冲激发人体内的氢原子，产生信号并形成图像，其非侵入性和高对比度的特点使其在神经、肌肉骨骼、心血管等多个领域的应用中显示出独特优势。随着技术的不断更新，MRI系统增加了许多高级功能，如高场强成像、功能磁共振成像（fMRI）、扩散张量成像（DTI）等，这些功能的引入极大地扩展了MRI的应用范围。然而，高级功能的引入也对操作人员提出了更高的技术要求，如何有效利用这些高级功能，提高诊断效率和准确性，是当前MRI技术应用中亟待解决的问题。本文将对MRI的高级功能进行详细分析，并探讨其在临床中的应用前景。

一、磁共振成像系统高级功能概述

（一）高级功能定义及分类

磁共振成像（MRI）系统的高级功能操作，是指那些超越常规解剖结构成像，能够提供更快速、更特殊对比度、反映组织功能信息或提供代谢信息的先进成像技术。这些高级功能操作可以显著扩展MRI的应用范围，使其在临床诊断、科研等领域发挥更大的作用。根据其特点和用途，可以将MRI高级功能操作分为以下几类：快速成像技术，旨在缩短扫描时间，提高成像效率；特殊对比成像技术，通过特殊的成像序列或对比剂，获得组织特有的对比信息；功能成像技术，用于反映组织的生理功能状态；波谱成像技术，则用于获取组织的代谢信息。这些分类并不是绝对

的，有些高级功能操作可能同时具备多个特点，例如，某些快速成像技术也可能提供特殊对比度。

（二）高级功能操作原理

各类高级功能操作都基于特定的物理原理和成像序列。例如，平行采集技术利用多个接收线圈同时采集信号，结合阵列处理技术，可以加速成像速度，缩短扫描时间。脂肪抑制技术通过选择性地抑制脂肪信号，可以突出显示其他组织结构，例如，在神经系统成像中，可以更好地显示病灶。扩散加权成像（DWI）利用水分子扩散的特性，可以反映组织的水分子扩散受限情况，常用于早期脑梗死的诊断。灌注加权成像（PWI）通过引入对比剂或利用血液本身的磁化特性，可以评估组织的血流灌注情况，用于评估脑组织的血流灌注状态。血氧水平依赖成像（BOLD）利

用脱氧血红蛋白的磁化特性，可以反映脑组织的活动状态，是功能神经成像的重要技术。磁共振波谱成像（MRS）则通过采集特定代谢物的信号，可以提供组织的代谢信息，用于肿瘤的鉴别诊断和疗效评估。这些高级功能操作的原理各不相同，但都基于磁共振成像的基本物理原理，并结合了特定的成像序列和后处理技术^[1]。

（三）高级功能操作特点

MRI高级功能操作具有一系列显著的特点。首先，成像速度快是许多高级功能操作的共同特点，例如，平行采集技术和各种快速成像序列的应用，可以显著缩短扫描时间，提高患者流量，减轻患者的检查负担。其次，独特的对比度是许多高级功能操作的另一个重要特点，例如，脂肪抑制技术可以突出显示非脂肪组织，扩散加权成像可以显示水分子扩散受限的组织，灌注加权成像可以显示血流灌注异常的区域，这些独特的对比度可以提供常规成像无法显示的信息。此外，许多高级功能操作能够反映组织的功能信息，例如，血氧水平依赖成像可以反映脑组织的活动状态，灌注加权成像可以反映组织的血流灌注情况，这些功能信息对于疾病的早期诊断、疗效评估和预后判断具有重要意义^[6]。最后，波谱成像技术可以提供组织的代谢信息，例如，可以检测肿瘤组织的代谢异常，为肿瘤的鉴别诊断和疗效评估提供重要的参考依据。这些特点使得MRI高级功能操作在临床和科研领域具有广泛的应用前景。

二、磁共振成像系统高级功能操作方法

（一）快速成像技术操作

快速成像技术在MRI中扮演着至关重要的角色，它们通过减少扫描时间，提高了检查效率，减轻了患者的负担，同时也为动态扫描和功能成像提供了可能。常见的快速成像技术包括梯度回波成像（GRE）、回波平面成像（EPI）和螺旋成像（Spiral MRI）等。梯度回波成像利用梯度场翻转来实现更快的信号采集，常用于心脏成像和对比增强成像。回波平面成像通过连续采集多个回波来填充K空间，极大地提高了成像速度，常用于功能成像和扩散成像。螺旋成像则采用螺旋状的K空间填充方式，具有更高的采集效率和更好的运动伪影抑制能力。这些快速成像技术的参数设置至关重要，例如，重复时间（TR）、回波时间（TE）、翻转角（FA）、带宽（BW）、矩阵大小、视野（FOV）等都需要根据具体的成像目的和患者情况进行优化设置。例如，在心脏成像中，需要选择较短的TR和TE，以及适当的翻转角，以冻结心脏的运动。在功能成像中，则需要根据任务设计选择合适的TR和TE，以获得最佳的信号对比度。通过合理的参数设置，可以充分发挥快速成像技术的优势，获得高质量的图像^[2]。

（二）特殊对比成像操作

特殊对比成像技术通过增强...BOLD fMRI）和灌注加权成像（PWI），可以反映脑组织的活动状态和血流灌注情况。波谱成像（MRS）则可以检测特定代谢物的信号，提供组织的代谢信息。功能成像和波谱成像的操作流程包括任务设计、数据采集、后处理等步骤。任务设计需要根据研究目的和受试人群进行合理的设

计，例如，在BOLD fMRI中，需要设计合适的任务 paradigm，以激发特定的脑区活动。数据采集需要选择合适的序列参数，例如，在BOLD fMRI中，需要选择合适的TR、TE和翻转角，以获得最佳的信号对比度。在MRS中，则需要选择合适的回波时间、激励次数和体素大小，以获得最佳的谱线质量和信噪比。后处理则需要采用专门的软件进行数据处理和分析，例如，在BOLD fMRI中，需要进行头动校正、空间标准化、平滑等预处理步骤，然后进行统计分析和结果呈现。在MRS中，则需要进行谱线拟合、基线校正、代谢物定量等处理步骤。操作过程中的注意事项包括：确保受试者配合，减少头动；选择合适的线圈，以提高信号质量；进行必要的预扫描，以优化参数设置；进行质量控制，以确保数据的可靠性。通过规范的操作流程和注意事项，可以获得高质量的功能成像和波谱成像数据，为临床和科研提供重要的信息^[3]。

三、磁共振成像系统高级功能应用分析

（一）在神经系统中的应用

磁共振成像系统的高级功能在神经系统疾病的诊断和研究中发挥着举足轻重的作用，极大地推动了神经科学的进步。在脑肿瘤领域，高级功能成像技术，如灌注加权成像（PWI），通过评估肿瘤内部的血流灌注情况，为区分肿瘤的良恶性及进行分级提供了重要依据。例如，高级别的胶质瘤通常表现出高灌注的特点。磁共振波谱成像（MRS）则通过检测肿瘤内部的代谢物变化，如胆碱峰的升高，为肿瘤的鉴别诊断和疗效评估提供了独特的代谢信息。在脑缺血的诊断中，扩散加权成像（DWI）能够早期发现缺血灶，甚至早于常规的T2加权成像（T2WI），这对急性脑梗塞的及时诊断至关重要。PWI则能够评估缺血半暗带的范围，为溶栓治疗提供指导，从而尽可能挽救濒死的脑组织。血氧水平依赖功能磁共振成像（BOLD fMRI）在脑缺血的应用中，可以评估脑缺血后神经功能的恢复情况，为康复治疗提供参考。在神经退行性疾病，如阿尔茨海默病（AD）的研究中，结构成像技术可以定量显示脑萎缩的部位和程度，有助于疾病的早期诊断和病情监测。功能成像技术可以发现脑活动网络的异常变化，如默认模式网络的连接异常，为理解AD的病理生理机制提供了新的视角。扩散张量成像（DTI）则可以显示白质纤维束的受损情况，如髓鞘的破坏和轴突的损伤，有助于深入理解疾病的病理机制。此外，高级功能成像在认知功能研究中也发挥着关键作用。例如，BOLD fMRI可以研究不同认知任务所激活的特定脑区，揭示认知功能的神经基础，如工作记忆任务激活前额叶皮质。静息态fMRI可以发现脑网络的自发活动模式，如功能连接的网络，有助于理解大脑的内在组织原则和不同脑区之间的有效连接。总之，高级功能成像在神经系统中的应用，不仅显著提高了神经系统疾病诊断的准确性和特异性，也为神经科学的基础研究和临床应用提供了强大的工具，推动了神经科学领域的快速发展^[4]。

（二）在体部器官中的应用

除神经系统应用外，磁共振成像系统的高级功能在体部器官

成像领域亦展现出显著的应用潜力。肝脏成像方面，弥散加权成像（DWI）有助于识别肝内局灶性病变，并进行定性诊断。例如，肝脓肿在DWI上通常呈现高信号，并伴有显著的扩散受限现象；脂肪抑制技术能够抑制肝脏的脂肪信号，从而提高肝内病变的检出率，尤其在脂肪肝背景下，病灶的显示更为清晰；肝胆特异性对比剂结合动态增强扫描技术，能够更精确地评估肝内病变的血供状况，例如，肝细胞癌通常在动脉期显著强化，而在门静脉期和延迟期强化程度有所降低，呈现“快进快出”的强化模式^[7]。肾脏成像方面，灌注加权成像（PWI）能够评估肾脏的血流灌注状况，有助于早期发现肾功能损伤，例如，在急性肾损伤情况下，肾脏的灌注量会减少；血氧水平依赖性磁共振成像（BOLD MRI）则能够评估肾脏的氧合状况，为肾功能不全的病理生理研究提供新的视角，例如，慢性肾病患者的肾脏氧合水平可能有所降低。心脏成像方面，电影磁共振成像（电影MRI）能够动态显示心脏的收缩和舒张运动，评估心脏功能，例如，可以测量左心室射血分数；心肌标记技术能够评估心肌的活力，例如，延迟增强扫描能够显示心肌梗死的瘢痕组织；冠状动脉磁共振血管造影（冠状动脉MRA）则能够无创地显示冠状动脉的狭窄程度，为冠心病的诊断提供重要依据^[8]。此外，高级功能在体部肿瘤和弥漫性疾病的诊断中也发挥着重要作用，例如，DWI可以帮助检测全身的转移灶，例如，前列腺癌的骨转移灶在DWI上通常表现为高信号；而动态增强扫描可以评估肿瘤的血流动力学特征，有助于鉴别诊断，例如，良性肿瘤的强化方式和程度通常不同。总之，高级功能在体部器官中的应用，拓宽了MRI的应用范围，提高了疾病诊断的准确性，为临床诊疗提供了重要的依据^[9]。

（三）在其他领域的应用

磁共振成像系统的高级功能除了在神经系统和体部器官中有着广泛的应用外，在其他领域也展现出了巨大的潜力。在骨骼肌

肉系统中，DTI可以评估肌肉和韧带的损伤情况，有助于制定康复计划；而BOLD MRI可以评估骨骼肌的氧合情况，有助于研究运动生理。在关节成像中，高级功能可以帮助早期发现关节软骨的退变，评估滑膜病变的程度，为关节疾病的治疗提供依据^[9]。此外，高级功能在乳腺、前列腺等部位的肿瘤诊断中也具有应用价值。随着MRI技术的不断发展，高级功能的应用领域将越来越广泛，未来有望在更多领域发挥重要作用，例如，在药物研发中，高级功能可以帮助评估药物的疗效和安全性；在精准医疗中，高级功能可以帮助实现个体化诊断和治疗。

四、结语

磁共振成像系统的高级功能在操作与应用方面具有显著的优势和广泛的前景。从操作来看，无论是快速成像技术、特殊对比成像操作，还是功能成像与波谱成像，都有其独特的原理、参数设置和操作流程，通过合理的操作和精细的参数优化，可以获得高质量的图像和准确的功能、代谢信息。在应用上，高级功能已在神经系统、体部器官以及骨骼肌肉、关节、乳腺、前列腺等多个系统和部位得到了有效应用，极大地提高了疾病诊断的准确性，助力临床诊疗与科研工作地开展。随着技术的持续创新与进步，磁共振成像系统高级功能的应用领域将会进一步拓展，操作也会更加智能化和便捷化。未来，高级功能有望在多模态融合成像、实时动态监测、疾病早期微小病变诊断等方面取得新的突破，为医学研究和临床实践带来更多有力的支持。同时，也应关注高级功能操作过程中的规范化和标准化，加强对操作人员的培训，以确保技术的安全有效应用，推动磁共振成像技术更好地服务于人类健康事业。

参考文献

- [1] 胡平, 叶立果, 江洪祥, 等. 高级磁共振成像技术在脑星形细胞瘤分级诊断中的应用进展 [J]. 中国临床神经外科杂志, 2022(004):027.
- [2] 钟海鹏, 吴文. 实验性癫痫脑机制的功能性磁共振成像系统评价 [J]. 磁共振成像, 2017, 8(4):6.DOI:10.12015/issn.1674-8034.2017.04.012.
- [3] 董德波. 精神分裂症低级-高级脑功能系统交互机制研究 [D]. 电子科技大学, 2020.DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2020.004639.
- [4] 王钰凯, 李铁, 莽靖, 等. 功能性磁共振在中枢神经系统相关疾病的临床应用 [J]. 中国实验诊断学, 2018, 022(001):139-141.DOI:10.3969/j.issn.1007-4287.2018.01.051.
- [5] 杜梦娇. 静息态功能磁共振影像动态分析及其在双相情感障碍研究中的应用 [D]. 深圳大学, 2022.
- [6] 胡鹏. 基于磁共振成像的自然条件下人脑功能连接的时空特征研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [7] 王毅翔, 姚殿琦, 李才应, 等. 磁共振弥散成像血管密度: 概念及潜在多种临床应用 [J]. 新发传染病电子杂志, 2024, 9(06):36-41..
- [8] 周岩. 磁共振3D-ASL脑灌注成像技术联合DWI在缺血性脑卒中的临床应用 [J]. 吉林医药学院学报, 2025, 46(03):196-199.
- [9] 兰浩娜. 磁共振成像技术诊断膝关节损伤的效果及准确率探讨 [J]. 现代医用影像学, 2024, 33(12):2267-2269.

钢渣处理技术与资源化利用研究进展

顾子涵¹, 张佳晔², 周娟¹, 江飞飞¹

1. 南通理工学院, 江苏 南通 226000

2. 中国中建设计研究院有限公司辽宁分公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ME.2025010020

摘要： 钢渣是钢铁行业的主要二次产品，具有量大、消耗高、浪费大、环境负效应等特点。本文系统介绍了国内外钢渣处理工艺发展现状，简述了常见的工艺如物理法、化学法等，总结归纳了国内外钢渣资源化利用的途径；介绍了国内外的钢渣资源化利用途径和钢渣处理技术面临的困难和挑战，结合双碳目标，总结归纳了余热、碳化固碳、高值钢材料等钢渣资源化利用方向，实现钢渣全价化资源化和零排放。

关键词： 钢渣；钢渣处理；资源化利用；二次处理

Research Progress on Steel Slag Processing Technology and Resource Utilization

Gu Zihan¹, Zhang Jiaye², Zhou Juan¹, Jiang Feifei¹

1. Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226000

2. China Construction Design&Research Institute Co., Ltd. Liaoning Branch, Shenyang, Liaoning 110000

Abstract： Steel slag is a major by-product of the steel industry, with high output, low utilization, and notable environmental impact. This paper reviews current domestic and international treatment methods, including physical and chemical processes, and summarizes key resource utilization approaches. It also discusses existing challenges and, in line with carbon neutrality goals, highlights promising directions such as waste heat recovery, carbonation, and high-value material development, aiming to achieve full utilization and zero discharge of steel slag.

Keywords： steel slag; slag treatment; resource utilization; secondary processing

引言

钢渣作为转炉、电炉炼钢的固体废物，每炼1吨粗钢产出100–150千克钢渣，全球每年钢渣产量已超过4亿吨，但产量60%以上集中在我国，年产量超过1.5亿吨，利用率仅有30%左右，而发达国家利用率高达90%以上^[1]，传统的堆存不仅占用空间，而且重金属还会浸出造成土壤和水污染，随着“双碳”目标的提出，钢渣资源化利用是钢铁企业绿色化发展不可或缺的重要环节。

目前，国外发达国家平均利用率达到90%以上，美国利用49.7%的钢铁渣用作路面基层，日本有43%被冶金循环利用消化；国内的建材化和余热利用的成熟技术已经达到一个较高的水平，但是热能利用率低于50%。本文通过综合分析钢渣的性能和特征以及在实际工程中的应用情况，对已有研究内容进行梳理和提炼，从处理工艺和利用途径两个角度进行总结与评述，并针对存在的问题和技术瓶颈，提出了今后研究的方向和重点。

一、钢渣的组成

郝帅等^[1]通过对高碱度转炉（BOF）钢渣的系统表征，揭示了其复杂的物相组成与微观结构特征：XRD与SEM-EDS分析（图1）表明，该钢渣以硅酸二钙–磷酸钙（ $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ）固溶体为主相，并含有铁酸钙（ $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ）、钙镁蔷薇辉石（ $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ ）及钙铝黄长石（ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ）等次要矿物相；微

观形貌观察进一步显示，深灰色不规则圆形硅酸二钙基体中嵌布着亮白色RO相（ MgO-FeO-MnO 固溶体，以FeO为主）及浅灰色钙铝黄长石（ $\text{C}_2\text{A}_2\text{S}$ ）颗粒，且部分区域存在磷元素掺杂的 $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{P}$ 固溶体。结合化学组成分析，钢渣中 CaO （40%–60%）、 SiO_2 （10%–20%）、 $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ （5%–25%）及 MgO （5%–10%）的含量比例直接决定其碱度特征（ CaO/SiO_2 比值），其中高碱度钢渣（ >2.5 ）因富含硅酸三钙（ C_3S ）而表现出更优的胶凝活性^[2–3]，但

项目信息：国家级大学生创新创业训练计划项目（202412056010Z），南通理工学院优秀本科毕业设计培育项目（BS2026016）。

作者简介：顾子涵（2004.04–），女，本科生，主要从事混凝土智能建造技术研究。

游离氧化钙 (f-CaO) 和氧化镁 (f-MgO) 的水化膨胀风险需通过陈化或碳化处理加以控制^[4]。物理特性方面, 钢渣的高密度与磁性金属颗粒为其资源化利用提供了理论支撑, 而重金属元素 (如 Cr、V) 的潜在环境风险则需在农业改良及建材应用中予以重点关注^[5-6]。上述特性共同奠定了钢渣在金属回收、胶凝材料及环境治理等领域跨学科研究的基础。

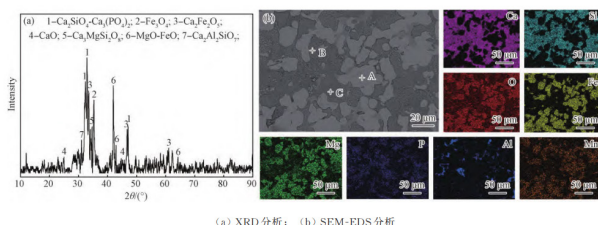


图1 转炉钢渣的物相和显微结构分析结果

二、钢渣处理技术

钢铁冶炼生产过程中产生的大量钢渣属于固体废物, 其产生量和复杂组分对环境、资源化的双重要求提出了挑战。物理法主要是对钢渣进行机破、筛分、粉磨等改善钢渣的颗粒、容重等, 如高温重结晶可有效降低了钢渣中 f-CaO 含量, 活性指数达到 96% 以上; 钢渣表面疏水可降低遇水膨胀, 10d 水浴膨胀率为 1.32%。化学法主要是组分调控与处理, 如钠盐激发剂可以促进 C-S-H 凝胶的形成, 使钢渣胶凝基料 28d 活性指数提升 22.4%; 改性钢渣对 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 吸附率达到 99.88%, 主要为络合作用, 以多孔为主的物理吸附起辅助作用。

当前, 国内钢渣一次处理的主要方法有热闷法、热泼法、滚筒法、水淬法等, 存在钢渣利用率偏低、成本高、环保要求高等问题。为提升钢渣综合利用率需要开发新型钢渣处理方法。

(一) 物理处理

1. 磁选分离技术

磁选是利用铁磁选粉从钢渣中选出金属组分的工艺。为了回收转炉钢渣中的铁资源, Liu 等人^[8]对干法磁选和湿法磁选进行了比较研究。研究结果显示 (如图 2), 干法磁选后所得精矿的全铁 (T.Fe) 和五氧化二磷 (P_2O_5) 含量变化不大, 且存在严重的磁团聚现象, 表明其分选效果不佳。因此, 多级湿式弱磁选被证明是更适用于钢渣处理的磁选方法。在优化条件下, 该工艺可获得产率为 30.54%、全铁品位高达 54.10% 的钢渣精矿, 具备替代部分烧结矿并返回炼铁流程的潜力。

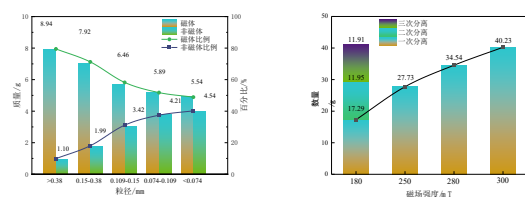


图2 粒径和磁场强度对磁选效果的影响

经试验验证: 处理工艺不同, 磁选的钢渣铁易于聚集沉淀, 磁选粉收率高但钢渣铁品位低; 钢渣辊压破碎-有压热闷渣磁选

粉收率低, 但是磁选粉铁品位高, 达到 37.12%; 钢渣辊压破碎-热泼渣磁选粉收率高, 达 37.60%, 且磁选粉收率高, 达 39.69%, 磁选粉尾渣可用于制取建材, 实现综合回收。

2. 机械粉磨技术

机械粉磨技术通过精细化破碎与表面活化处理来提升钢渣的资源化利用效能。时朝昆等^[9]介绍了机械粉磨作为钢渣预处理的核心工艺, 指出采用立式辊磨机或球磨机进行高能研磨可有效破坏钢渣中 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的晶格结构, 促进活性 SiO_2 和 CaO 的暴露, 其水化活性指数较未处理钢渣提升 40%~60%。郭文斌^[11]进一步优化了粉磨装备参数, 通过分级研磨工艺结合助磨剂, 使钢渣粉体流动性与填充密度显著改善, 能耗降低约 20%。肖柏林^[10]将机械粉磨与化学激发耦合, 制备的钢渣-矿渣基胶结剂在全尾砂充填中 28d 抗压强度达 3.8MPa, 满足矿山充填材料强度要求。早期研究已证实, 经机械粉磨的钢渣作为水泥混合材, 其胶砂流动度比 >95%, 28d 抗压强度比达 92%~105%, 主要归因于粉磨产生的微裂纹增强了水化反应接触面积。该技术通过粒径精细化控制与界面能调控技术, 不仅显著激活了钢渣中潜在的水化反应活性组分, 还系统构建了适用于多元化应用场景的基础原料体系, 为高性能建筑材料开发、土壤改良剂制备及环境治理功能材料研制提供了关键物质支撑。

3. 颗粒整形技术

时朝昆等^[9]验证了颗粒整形对钢渣活性的影响, 发现经整形处理的钢渣比表面积可稳定在 $450\sim550\text{m}^2/\text{kg}$, 其水化反应速率较未整形样品提升 30%, 主要归因于粒形改善后暴露的活性 CaO-SiO_2 界面增加。郭文斌^[11]提出采用立式冲击破碎机对钢渣进行选择性破碎, 利用“石打石”工作原理实现颗粒棱角钝化, 使针片状颗粒含量从 35% 降至 8% 以下, 同时通过气流分级技术将粒径控制在 $0.075\sim4.75\text{mm}$ 范围内, 满足高性能混凝土骨料级配要求。研究也指出, 颗粒整形可消除钢渣中游离氧化钙的富集区, 降低体积安定性不良风险, 其开发的“预破碎-整形-筛分”工艺使钢渣骨料膨胀率控制在 0.05% 以内。颗粒整形技术通过实施粒径级配调控与颗粒形貌优化策略, 有效强化了钢渣在高端建材制备、环境功能材料开发等多场景下的功能适配性。

(二) 化学处理

1. 草酸螯合改性

该方法在 AC-13C 型沥青混合料中应用效果显著, 性能优于石灰岩混合料。郝帅等^[1]研究表明, 采用 $0.5\sim1.0\text{mol/L}$ 草酸溶液对钢渣进行 24h 常温浸渍处理, 可选择性螯合重金属离子 (如 Cr^{6+} 、 Pb^{2+}), 通过羧基官能团与金属原子形成稳定五元环螯合物, 使重金属浸出浓度降低至标准限值以下。崔心宇等^[2]进一步揭示了该技术的微观机制: 草酸处理可破坏钢渣表面致密层, 暴露内部活性 CaO-SiO_2 网络, 同时生成的草酸钙沉淀填充孔隙, 使钢渣比表面积增加 15%~20%。草酸处理能在钢渣表面生成草酸钙保护层, 使浸水膨胀率从 3.2% 降至 1.69%, 沥青混合料体积膨胀率降至 0.4%。XRD 和 SEM 分析证实, 草酸钙覆盖层有效封堵了钢渣孔隙, 消除了游离 CaO 的不利影响。

2. 激发剂活化

复合激发剂可显著提升钢渣胶凝活性。利用 NaOH、水玻璃等碱性激发剂制备钢渣基胶凝材料，其28天抗压强度可达40MPa以上。邹敏等^[4]研究表明，采用碱性激发剂（如 NaOH、 Na_2SiO_3 ）可有效解离钢渣中惰性硅酸盐相，其 OH^- 离子通过破坏 Si-O-Si 键网络，使活性 SiO_2 溶出量增加30%–45%，进而促进水化硅酸钙（C-S-H）凝胶生成。丛玉丽进一步验证了硫酸盐激发剂（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的协同效应，其与钢渣中的 CaO 反应生成钙矾石（Aft）晶体，使28d抗压强度提升25%–35%。李华等^[7]通过正交试验优化了复合激发剂配比，发现 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 质量比为2:1时，钢渣基胶凝材料3d强度达18.6MPa，归因于硅酸钠提供的 SiO_3^{2-} 离子促进了凝胶网络交联。该技术通过激发剂种类优化与活化工艺耦合，突破了钢渣活性低的技术瓶颈，为制备低碳胶凝材料提供了关键技术路径。

3. 碳化处理

钢渣碳化处理有两种方法，一种是直接碳化，主要指钢渣中的含 Ca 矿物直接与二氧化碳发生反应，当二氧化碳溶解与液体中生成 H_2CO_3 ，进而促进钢渣中 Ca 元素的浸出，生成稳定的碳酸盐。另一种钢渣碳酸化为间接碳化，主要通过化学试剂将钢渣中的碱性金属元素浸出，目前研究的主要浸出剂有盐介质、碱介质、强酸和弱酸介质。

吴跃东等^[5]研究表明，在 CO_2 浓度10%–20%、湿度60%–80%条件下对钢渣进行4–24h 碳化养护，可有效固化游离氧化钙（f-CaO），其碳化转化率达75%–85%，体积安定性不良风险降低90%以上。时朝昆等^[9]提出分级碳化工艺，通过预碳化与主碳化两阶段处理，使钢渣骨料吸水率降低至3.2%，满足高性能混凝土耐久性要求。郭文斌^[11]进一步揭示了该技术的微观机制： CO_2 与钢渣中的 CaO、MgO 发生矿化反应，生成方解石（ CaCO_3 ）和菱镁矿（ MgCO_3 ）晶体，填充孔隙结构使钢渣表观密度提升10%–15%，同时碳化层形成致密保护膜，抑制重金属浸出。

国内外专家学者对钢渣在各方面的利用进行了研究，通过预处理能够有效将钢渣利用在混凝土中。但是在碳化处理钢渣以

此提高钢渣稳定性方面，虽然有学者对其碳化处理进行了研究，但是如何提高碳酸化效率并准确计算固碳量还有待进一步探究，

三、钢渣资源化利用路径

钢渣资源化利用已形成多元化格局，主要通过农业改良与工业综合利用两条路径实现：卓琳等^[12]采用陈化、酸浸及高温煅烧预处理技术，证实钢渣可有效钝化重金属（如 Cr、Pb）并释放 CaO、MgO 及硅酸盐成分，施用量5%–10%时能提升酸性土壤 pH 值0.8–1.2单位，其活性 SiO_2 作为硅肥可使水稻增产8%–15%；朱友益等则通过磁选–重选联合工艺回收金属铁，并开发钢渣粉磨至比表面积 $>400\text{m}^2/\text{kg}$ 后作为水泥混合材，其水化活性使28d抗压强度达45MPa，同时利用碱激发法制备的多孔吸附剂对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附容量达30–50mg/g。两研究均强调梯级利用原则，推动钢渣向高值化、低碳化方向转化。

四、关键挑战与技术瓶颈

由于受原料和工艺条件等限制，目前钢渣处理分异变化较大； Cr^{6+} 等重金属在介质中迁移机理及其持续危害尚不明确，存在环境安全隐患；碱激发胶凝等高端技术成本高于普通水泥的原料处理及工艺等限制条件，不具备价格竞争优势，还需加强政策推动和生命周期评价；钢渣基质类产品环境安全评估制度不明朗，重金属浸出量、稳定氧化等参数尚无定论，不利于大规模推广。

五、结论

目前，钢渣处理利用由单一处理向多途径平行发展的方向，技术经济和环境风险控制问题仍然成为限制因素，未来应加强钢渣高值利用技术攻关，扩宽钢渣在新材料、环境治理方面的应用，实现“钢铁 + 建材 + 环保”跨界融合发展的循环绿色经济，支撑碳中和。

参考文献

- [1] 郝帅, 罗果萍, 柴铁凡, 等. 高炉渣高温调质对钢渣组成与结构的影响 [J]. 环境工程, 2023, 41 (S2): 633–639.
- [2] 崔心宇, 那贤昭. 钢渣资源化技术及展望 [J]. 中国冶金, 2024, 34 (10): 16–25.
- [3] 杨光, 杨志强, 石磊, 等. 钢渣资源化利用与实践 [J]. 冶金能源, 2024, 43(5): 37–40.
- [4] 邹敏, 沈玉, 刘娟红. 钢渣粉在水泥基材料中应用研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (09): 2964–2977.
- [5] 吴跃东, 彭犇, 吴龙, 等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述 [J]. 环境工程, 2021, 39 (01): 161–165.
- [6] 莫立武, 刘朋, 徐茂淳. 钢渣碳化及其在建筑材料低碳制造中的应用 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (12): 1122–1128.
- [7] 李华, 等. 钢渣基胶凝材料的性能调控与应用研究 [J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 1–10.
- [8] Liu X, Wang D Z, Li Z W, et al. Efficient separation of iron elements from steel slag based on magnetic separation process. J Mater Res Technol, 2023, 23: 2362.
- [9] 时朝昆, 杨志强, 尹尤豪, 等. 梯级粉磨制备活性钢渣微粉实验研究 [J]. 金属材料与冶金工程, 2024, 52 (01): 50–54.
- [10] 肖柏林. 钢渣矿渣制备胶结剂及其在全尾砂胶结充填的应用 [D]. 北京科技大学, 2020.
- [11] 郭文斌, 刘志远, 王重君, 等. 转炉钢渣辊压破碎–有压热焖处理工艺的应用实践 [J]. 宽厚板, 2023, 29 (01): 17–21.
- [12] 卓琳, 李华, 史永林, 等. 钢渣资源的农业利用研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21 (33): 149–150.

某金矿矿石含金细粒级偏析特性研究

陈宏伟

中国黄金集团建设有限公司, 北京 101300

DOI:10.61369/ME.2025010022

摘 要 : 针对某金矿矿石含金细粒级偏析的特性, 从分析金在细粒级富集原因入手, 分别进行原矿石、浮选原矿、尾矿和废石选矿试验研究, 创新选矿技术新思路: 分级富集、碲金矿回收、快速浮选和柱浮选等, 达到优化产品质量、提高金回收率和矿产资源综合利用率试验目的。值得小秦岭及同类企业推广应用。

关 键 词 : 细粒级偏析; 碲化金; 筛分富集; 柱浮选; 快速浮选; 废石资源

Application of Ultra-Small-Scale Gold Beneficiation Experimental Technology in Jinqu Laboratory

Chen Hongwei

China National Gold Engineering Co., Ltd, Beijing 101300

Abstract : It is the eternal subject of the gold beneficiation to optimize product quality, improve gold recovery rate and the rate of comprehensive utilization of mineral. How to use small test equipment to find suitable beneficiation methods, process conditions, etc. through fast and effective methods, and provide reliable parameters for production, is the challenge for every engineer in beneficiation. Using the gold pan in gravity separation test, the Jinqu Laboratory integrated the gravity separation-flotation test process and achieved a technical breakthrough in total recovery rate of gold. In view of the gold fine-grained enrichment characteristics of Jinqu ore, the process of flash flotation, enhanced fine-grain grade gold recovery and comprehensive recovery of tellurium were tested and obtained good technical achievement. Considering its advantage of optimizing the beneficiation process and increasing economic benefits, it is worth to be promoted and applied.

Keywords : study on ore separability; calaverite; full-scale test analysis; flotation column; flash flotation; tellurium gold

前言

河南某金矿企业的生产规模1100t/d, 采用尼尔森重选-浮选联合工艺流程, 金回收率稳定在90.5%左右。生产28年来, 取得了较好的技术经济指标。近年来随着开采中段逐年下降, 金矿资源呈现出矿石贫化和性质复杂(贫、细、杂和泥化)的特点, 在目前金价高起的时代, 该矿的克金利润依然较低, 企业实现高质量发展难度较大。该金矿选矿技术人员围绕优化金精矿质量和提高选矿回收率2个试验研究主题, 创新、应用选矿新工艺。在试验研究中发现, 豫西小秦岭金矿石有明显的细粒级偏析现象: 金在细粒级相对富集。针对这一工艺特性, 试验探索出了多项选矿技术创新的新思路, 试验指标理想, 效果明显。

一、矿石性质

基本性质: 该金矿矿床工业类型为含金石英脉和构造蚀变岩型, 矿床成因类型为中-低温热液型金矿床。矿石自然类型主要为含金石英脉, 少量为构造蚀变岩型和多金属硫化物角砾岩。矿石中主要金属矿物有黄铁矿、自然金、银金矿、方铅矿, 少量黄铜矿、闪锌矿、白钨矿、铜蓝, 个别地方有褐铁矿。脉石矿物

主要是石英, 其次是斜长石、绢云母、钾长石、角闪石、铁白云石等。从原矿石金矿物特征看, 主要金矿物是自然金, 以粗粒为主, 大部分是粒间金, 与黄铁矿紧密伴生, 其次是银金矿等。

细粒级偏析原因分析: (1) 众所周知, 金是最稳定的金属元素, 在自然界中金除了以单质的自然金及银金矿产出外, 仅与碲形成天然化合物碲化金^[1], 有多种类型的碲化物形式存在, 如碲金矿、碲金银矿、板碲金银矿、针碲金银矿等。已知27种含金矿

物中，有11种是金的碲化物。大多数金矿床中都伴有微量的碲，只是因其矿物颗粒较小，而不为人们所注意^[2]。通过显微鉴定和应用电子探针微束分析，查明该金矿金矿石中碲化物主要为碲银矿和碲金银矿，少量碲铅矿和碲铋矿，它们呈密切共生的集合体或联生体产出在黄铁矿等硫化物及石英脉石矿物粒间或裂缝中，碲化物是金和银的重要载体，碲富集时金和银含量也高^[3]。但碲化物性脆易过粉碎，这是该金矿金矿石细粒级相对富集的主要原因。（2）黄铁矿、黄铜矿等载金体较脆，可碎性比石英、斜长石等脉石矿物要好得多，故在破碎过程中，矿石没黄铁矿、黄铜矿等矿物解离面破裂，使脉石和载体体分离，从而使这些载金体变为细粒级高品位矿石，金表现出明显细粒级偏析^[4]。

深部（中段标高200m）矿石样品多元素分析结果见表1。原矿石磨细到-0.074mm占90%左右时，-0.0374mm粒级金品位4.42g/t，金属分布率63.12%，金在细粒级富集特征明显^[5]。

表2 碎矿产品粒度筛析结果

坑口名称 / 取样时间	粒度 / mm	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	4505.00	55.05	0.68	0.68	3063.40	12.62
1250/2023.12.15	-1.70+1.00	1096.00	13.39	1.49	5.77	1633.04	6.73
	-1.00+0.150	1592.00	19.45	9.15		14566.80	59.98
	-0.150	990.00	12.11	5.07		5019.30	20.67
	合计	8183.00	100.00	2.97		24282.54	100.00
坑口名称 / 取样时间	粒度 / 目	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	3760.00	55.32	0.44	0.44	1654.40	18.16
1403/2024.1.30	-1.70+1.00	897.00	13.20	1.97	2.46	1767.09	19.39
	-1.00+0.150	1477.00	21.73	1.77		2614.29	28.69
	-0.150	663.00	9.75	4.64		3076.32	33.76
	合计	6797.00	100.00	1.34		9112.10	100.00
坑口名称 / 取样时间	粒度 / 目	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	5554.00	55.78	0.67	0.67	7312.68	27.91
1060/2024.3.22	-1.70+1.00	1262.00	12.67	2.15	4.29	3381.64	12.91
	-1.00+0.150	1918.00	19.26	3.06		10766.41	41.10
	-0.150	1224.00	12.29	5.63		4735.74	18.08
	合计	9958.00	100.00	2.63		26196.47	100.00
坑口名称 / 取样时间	粒度 / 目	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	6970.00	66.03	0.44	0.44	3066.80	23.43
950/2024.4.27	-1.70+1.00	1038.00	9.83	1.81	2.79	1878.78	14.35
	-1.00+0.150	1489.00	14.11	2.14		3186.46	24.35
	-0.150	1059.00	10.03	4.68		4956.12	37.87
	合计	10556.00	100.00	1.24		13088.16	100.00

从表2可见，-1.00mm粒级金品位明显偏高，是典型的细粒级偏析现象。+1.70mm粒级质量占到55%以上，原矿石如果分离出这部分矿石，金品位将有很大的提高。

原矿石偏析特性应用性分析：（1）利用矿石细粒级偏析特性，采用简易的筛分富集办法产出高质量金矿石；也可以使大量尚不能回收的矿产资源得以利用，相对增加了矿山储量，延长了企业服务年限。（2）对于小秦岭地表氧化矿石，碎矿后进行分级处理：粗粒堆浸，矿堆的渗透性和透气性较好，省去了制粒堆浸的烦琐和成本投入，增加堆体高度和缩短浸出时间都可以提高处理矿量^[4]；细粒级，金矿物得以有效富集，采用浮选或炭浆工艺

表1 深部矿石多元素分析结果

元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	TFe	S
含量 / %	3.80	< 5.00	0.036	0.027	0.01	4.97	2.00
元素	As	C	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Mn
含量 / %	< 0.005	0.88	4.56	1.37	5.71	63.68	0.10

注：Au、Ag的单位是 g/t。

二、原矿石选矿试验研究

该金矿选矿品位呈逐年下降趋势，平均原矿品位3.94g/t，2024年末的原矿品位仅2.19g/t，低于盈亏平衡品位2.5g/t。原矿石最大粒度350mm，无论在矿山堆场，还是选矿原矿场矿堆取样，都存在着操作繁琐，工作量大且代表性不能保证的问题。原矿样采集以破碎产品（-10mm）为对象，取样点设在碎矿至细料仓胶带运输机皮带上。碎矿产品粒度筛析见表2。

生产时，入磨粒度小且较易磨碎，磨矿效率大大提高，可有效降低了生产成本。

三、浮选原矿选矿试验研究

（一）该金矿矿石金碲化物富集试验

地质资料显示，该金矿矿石中碲化物是金和银的重要载体，但金碲化物含量较少。富集金碲化物试验，主要根据金碲化物有性脆磨矿时易泥化的特点，选取在分级机溢流处采取矿样。试验工艺流程见图1。试验A条件指标：Na₂CO₃ 1105g/

t, 乙基黄药 4g/t, 2#油 30g/t。试验B条件指标: [CN⁻]: 0.02%, [CaO]:0.15%, 2#油 30g/t。用 Na₂CO₃或 NaCN作抑制剂, 添加少量捕收剂或不加捕收剂, 均能有效捕集碲元素。

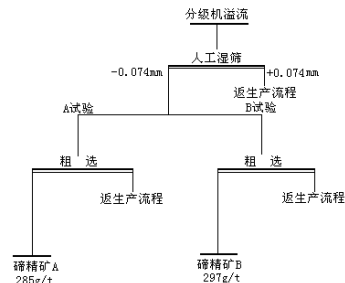


图1 碲富集工艺流程图

试验用选冶联合工艺, 采用优先浮选方法将碲金矿物富集为高品位金碲精矿, 用氰化法提取矿石中易浸金, 将金回收率从

90.50%提高到97.02%, 提高效果明显。同时, 综合回收了碲资源^[6]。

（二）浮选柱回收细粒级金选矿试验研究

浮选技术是矿物工程领域中应用最为广泛的一种方法。根据该金矿矿石金嵌布粒度特点, 需要将其细磨才能保证含金矿物的充分解离, 如该金矿矿石磨矿细度试验结果表明, 磨矿细度-0.074mm占85%时, 金回收率才能有较明显提高^[7]。另一方面, 磨矿细度增加致使原矿中细泥相应增加, 微细粒脉石与气泡粘附后后难以脱落, 因粘滞作用进入泡沫层, 甚至在有用矿物表面形成罩盖, 严重影响浮选技术指标。该金矿公司应用具有深槽型压气式浮选柱(区别于内叶轮主导的离心矿化方式的传统浮选机), 进行浮选柱半工业试验^[8-9], 试验从浮选搅拌桶获取原矿, 试验规模5t/d, 和生产同步进行, 1403、1060坑口矿石生产和试验产品筛析对比结果见表3。

表3 1403、1060坑口矿石生产和试验产品筛析对比统计表

坑口	粒级 / μm		浮选原矿粒度组成			精矿粒度组成			尾矿粒度组成			粒级金回收率 / %
			产率 / %	品位 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	分布率 / %	产率 / %	品位 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	分布率 / %	产率 / %	品位 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	分布率 / %	
1403	+74	试验	39.94	1.26	17.19	11.91	62.07	8.73	41.34	0.49	43.38	61.60
		生产				14.64	38.85	10.78	40.87	0.45	38.39	65.04
	-74	试验	20.03	1.71	11.70	22.91	40.84	11.05	20.43	0.34	14.87	80.79
		生产				21.78	42.04	17.35	20.68	0.33	14.25	81.34
	-38	试验	40.03	5.20	71.11	65.18	104.16	80.21	38.23	0.50	41.75	90.82
		生产				63.58	59.65	71.87	38.45	0.59	47.36	89.54
	合计	试验	100.00	2.93	100.00	100.00	84.64	100.00	100.00	0.47	100.00	84.43
		生产				100.00	52.77	100.00	100.00	0.48	100.00	84.39
1060	+74	试验	40.67	1.13	12.00	10.08	48.36	6.20	43.45	0.41	38.55	64.26
		生产				12.37	48.36	11.21	50.49	0.39	40.58	66.02
	-74	试验	19.62	3.13	16.03	20.14	57.34	14.69	24.82	0.39	20.95	88.14
		生产				20.57	48.01	18.50	17.73	0.39	14.25	88.26
	-38	试验	39.71	6.95	71.97	69.79	89.11	79.11	31.72	0.59	40.50	92.12
		生产				67.06	55.95	70.29	31.77	0.69	45.17	91.20
	合计	试验	100.00	3.83	100.00	100.00	78.61	100.00	100.00	0.46	100.00	88.51
		生产				100.00	53.38	100.00	100.00	0.49	100.00	88.34

从表3可以看出: (1) 浮选原矿出现明显的细粒级偏析现象, 有用矿物向细粒级集中, -38 μm 粒度级别产率占40%, 金分布率71%以上。(2) +74 μm 粒级生产金回收率显高于试验, -38 μm 粒级试验金回收率有优势。(3) 浮选机对微细粒金分选效果差是造成精矿品位偏低的主要原因, 也是浮选柱的优势所在。

柱浮选适于回收微细粒级金, 该金矿千吨规模选矿厂, 两个系列浮选机多达28台, 设备效能低, 操作难度大。利用柱、机浮选各自优势, 若采用柱机联合工艺流程, 通过装备优化, 强化浮选过程,

简化浮选工艺, 金回收率可提高1-1.5%以上, 经济效益显著^[10]。

（三）浮选原矿石快浮选矿试验研究

金碲化物可浮性较好, 仅用起泡剂即可将其浮起。但碲化金性脆, 易过粉碎, 宜采用优先浮选流程^[11]。试验得知该金矿矿石含有金碲化物, 非常适合快浮选矿工艺^[12]。该金矿公司选矿技术人员进行了快浮试验, 采样点: 浮选药剂搅拌桶(重选作业后); 生产浓细度: 浓度(34 \pm 2)%, 磨矿细度(62 \pm 2)%; 药剂: 11#油和异戊基黄药; 浮选时间1min。试验结果见表4。

表4 快浮试验结果

坑口名称	浮选原矿	浮选精矿			浮选尾矿	作业回收率 / %
	品位 / $(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	品位 / $(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	精矿产率 / %	金富集比	品位 / $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	
1060	1.52	40.83	2.28	26.86	0.60	61.34
1250	1.86	40.12	3.24	28.25	0.58	69.83
1168	1.07	32.66	1.97	30.52	0.44	59.84
950	1.98	41.13	3.85	20.77	0.41	80.06

从表4可知，试验浮选1min，金回收率达55%以上，金富集比在20-30，远高于正常浮选14-16，快浮精矿完全可作为最终选矿产品。快速浮选实质也体现了浮选作业的“快金早收”选矿理念。目前，该金矿公司增加快速浮选的工艺改造正在实施进行中。

四、浮选尾矿再磨再选试验研究

该金矿公司选尾矿筛分分析显示，金流失呈现典型的“两头跑矿”现象。在实验室再磨再选试验基础上，将选一车间部分浮选尾矿泵入二车间再磨、浮选系统，进行尾矿的生产试验：试验精矿品位在18g/t以上，富集比35；不足之处是磨矿细度偏低影响了金回收率（30-35%）^[13]。

对于金-碲矿石最适宜采用阶段磨矿阶段浮选的选别流程^[14]。该金矿选矿厂在不改变选一车间现设备工艺前提下，将选二车间技术改造为相应的再磨再选（柱机联合）流程，形成阶段磨浮选矿生产工艺，1段重点在选矿产品提质增效上，2段主要控制流失提高回收率，这是该金矿选矿工艺优化又一思路。

五、废石资源综合利用试验研究

豫西小秦岭多为坑采岩金的石英脉型含金矿石，矿产资源开发过程中，产生了大量废石等固体废弃物。李建政等人试验通过简单的破碎筛分从0.43g/t品位的废石中预先富集出品位0.78g/t的金矿石，经常规浮选出品位24.16g/t的金精矿，金回收率83.11%；破碎筛分超前抛尾符合建筑碎石产品质量要求成为建筑材料^[15]。小秦岭废石作为二次资源综合利用主要基于其金细粒级富集和石英脉含金的性质。

案例一 矿石在鄂式破碎机粉碎时加入冲洗水，破碎产品直接进入摇动筛完成分级作业，共4个粒级的产品：-5mm、+5mm-10mm、+10mm-20mm、+20mm-30mm和+30mm。+30mm级别物料用装载机返回破碎，+4mm-10mm、+10mm-20mm和+20mm-30mm三个粒级物料可作为建筑骨料，-5mm物料经洗砂机后选矿回收金矿物。综合回收利用工艺流程见图2。

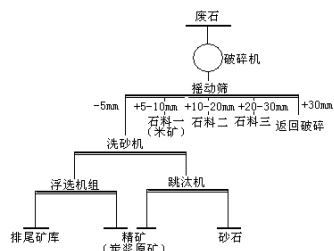


图2 案例一废石综合利用工艺流程图

案例一可用圆筒旋转筛替代摇动筛作业，适合于小规模废石生产，优点是投资少，湿式破碎和筛分省去除尘设施。缺点是自动化程度低，摇动筛动力平衡差、筛网磨损快，用水量大，生产效率低。

案例二 废石经2段1闭路碎矿流程，产出3个粒级的产品：-5mm、+5mm-20mm和+20mm-30mm。+5mm-20mm和+20mm-30mm两个粒级物料可作为建筑骨料，-5mm物料经洗砂机后选矿回收金矿物。综合回收利用工艺流程见图3。

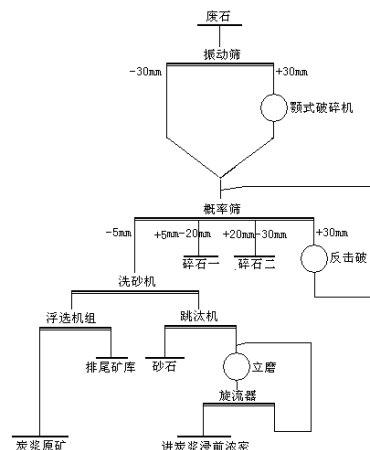


图3 案例二 废石综合利用工艺流程图

案例二配合炭浆厂进行的废石生产，使用概率筛，是对中、细粒度物料的精细筛分，与普通筛机相比，筛分效率非常高。立式球磨机对细粒含金有一定的磨浸效果，适于性质复杂金矿石的浸出^[16]。

案例三 该金矿公司因小秦岭自然保护区生态环保形势需要，关闭绝大多数采矿坑口，余下的4个生产矿并仅能保证选矿厂生产半年时间。在不改变现生产工艺流程下，将现碎矿工段改造后进行废石制砂生产，同时回收其中的金矿物，是比较好的工艺思路。现破碎工艺流程：矿山原矿石（-400mm）经美卓诺德伯格C80鄂式破碎机粗碎、美卓诺德伯格HP200圆锥破碎机细碎和2YKER1545中心振动筛组成的2段1闭路碎矿流程，筛孔尺寸分别为20×22mm和10×10mm，碎矿产品粒度-10mm。改造后的机制砂石工艺流程见图4。主要产出2个粒级的产品：12石料和砂石，综合回收重砂精矿。

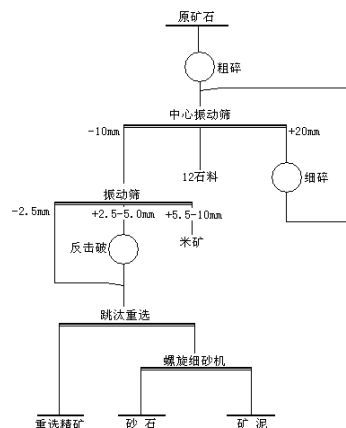


图4 金集公司废石生产砂石工艺流程图

该金矿公司改造生产砂石对原工艺流程改动小，投入少、上马见效快。缺点：原矿石破碎前缺少预先筛分，制约生产矿石

量；装机容量750kw，动力费用高；适应现场条件生产线拉长，不利于生产管理。

六、结语

（1）矿产资源是人类赖以生存的主要物质基础之一，中国85%的原材料和95%的能源来自矿产资源。其开发过程中丢弃的大量废石带来的环境污染，也已成为当今世界持续发展面临的最主要问题之一。基于对该金矿矿石石英脉型含金及金在细粒级偏析特性研究，原矿石或废石均能在破碎筛分时有有效富集金矿物，

渣石用作建筑骨料。对于综合利用、绿色矿山（环境治理和生态恢复）有着重要意义。

（2）碲是有较高应用价值的稀有分散元素，被誉为“现代工业、国防与尖端技术的维生素，创造人间奇迹的桥梁”。强化碲资源综合回收利用同时，促进金回收率的提高，是非常好的选矿思路。

（3）该金矿矿石适宜快速浮选，柱浮选对细粒矿物选别独特优势等，为选矿工艺、装备优化，提高矿产资源开发利用水平提供了科学理论依据。

参考文献

- [1]孙骥.金银冶金（第2版）[M].北京：冶金工业出版社，2005.
- [2]《贵金属生产技术实用手册》编委会.贵金属生产技术实用手册[M].北京：冶金工业出版社，2011.
- [3]宋庆双，符岩.金银提取冶金[M].北京：冶金工业出版社，2012.
- [4]焦瑞琦.低品位氧化金矿石选矿工艺的优化与改进[J].中国矿山工程，2014，43(1):33-34.
- [5]石吉友，刘宁，陈兵，等.深部含金矿石选矿试验报告[R].长春：长春黄金研究院，2014.
- [6]焦瑞琦，杨玮，张志伟，等.豫西小秦岭碲金矿选矿回收试验[J].现代矿业，2018(5):88-91.
- [7]焦瑞琦.某金矿选矿厂“扩能优化”研究及试验探索[J].中国矿山工程，2015，44(4):53-54.
- [8]沈郑昌.柱浮选技术[M].北京：冶金工业出版社，2015.
- [9]吴荣，石南南.旋流-静态微泡浮选柱在某微细粒金矿浮选中的应用[J].现代矿业，2017(6):124-126.
- [10]焦瑞琦，王德明，张长昆，等.某金矿选矿厂优化生产工艺试验研究[J].黄金，2017，38(12):44-45.
- [11]黄礼煌.金银提取技术（第2版）[M].北京：冶金工业出版社，2005.
- [12]焦瑞琦，薛敬营.某金矿矿石无氰法选矿回收金试验研究[J].有色金属设计，2017，44(1):13.
- [13]焦瑞琦，王德明，张志伟.某金矿尾矿库扩容改造工艺优化及尾矿资源综合回收试验[J].现代矿业，2018(1):142-143.
- [14]《黄金生产工艺指南》编委会.黄金生产工艺指南[M].北京：地质出版社，2000.
- [15]李建政，王安理，范尚立，等.小秦岭金矿区废石资源综合利用试验研究[J].矿冶工程，2010(12):51-53.
- [16]孟宇群，吴敏杰，段礼锁.TW型塔式磨浸机在处理含砷难浸金精矿中的应用[J].黄金，1999，20(7):40-41.

晶体转速对提拉法晶体生长系统的数值模拟研究

李陈哲

济南大学前沿交叉科学研究院, 山东 济南 250022

DOI:10.61369/ME.2025010024

摘 要 : 提拉法是制备高质量单晶的关键技术, 晶体转速作为影响熔体流动、温度和界面形貌的重要变量。通过数值模拟方法, 本文中探究了晶体转速对提拉法晶体生长系统的影响, 研究晶体转速对于熔体流动、温度分布、界面形貌的影响关系。研究发现低转速下以自然对流导致固液界面的凸起; 中高转速下以强迫对流为主, 固液界面逐渐变凹。结果表明, 合理的控制晶体转速可以调控固液界面形貌, 为晶体生长实验提供了直接有效的理论分析。

关 键 词 : 提拉法; 晶体生长; 数值模拟; 熔体流动; 固液界面

Numerical Simulation Study of Crystal Rotational Speed on the Crystal Growth System by the Czochralski Method

Li Chenzhe

Institute of Advanced Interdisciplinary Research (IAIR), University of Jinan, Jinan, Shandong 250022

Abstract : The Czochralski Method is a key technology for preparing high-quality single crystals, and the crystal rotational speed is an important variable affecting the melt flow, temperature and interface morphology. Through numerical simulation methods, this paper explores the influence of crystal rotational speed on the crystal growth system of the pulling method, and studies the influence relationship of crystal rotational speed on melt flow, temperature distribution and interface morphology. The research finds that at low rotational speeds, natural convection causes the protrusion of the solid-liquid interface. At medium and high rotational speeds, forced convection is dominant, and the solid-liquid interface gradually becomes concave. The results show that reasonable control of the crystal rotational speed can regulate the morphology of the solid-liquid interface, providing a direct and effective theoretical analysis for the crystal growth experiment.

Keywords : Czochralski Method; crystal growth; numerical simulation; melt flow; solid-liquid interface

引言

提拉法 (Czochralski method) 是工业上生产高质量的硅、铌酸锂、钕铝石榴石 (YAG) 等晶体所采用的主要晶体生长方法。通过确定晶体生长参数使晶体稳定生长是晶体提拉法生长技术的关键^[1-4]。晶体转速是晶体生长过程中的重要参数之一, 其对熔体流动的速度、温度分布以及晶体生长过程中固液界面的稳定具有重要影响^[5-6]。晶体转速通过对熔体流动型态的强迫改变, 导致界面形貌的改变 (凸形、平面、凹形)。因此, 了解晶体转速与稳定生长之间的关系是晶体生长研究的重点。

近年来, 随着计算机的发展, 数值模拟已经成为研究和分析提拉法晶体生长过程的主要手段, 建立多物理场耦合模型求解熔体的传热、溶质流动与溶体的界面形成过程, 明确转速调控熔体流动结构、温度分布及界面动力学的原因^[7-8]。目前已有研究通过全局数值模拟发现, 随着晶体转速的增大可以减弱熔体流体流动的径向不均匀性, 使固液界面有从凸形缓解的趋势, 但上述研究均针对晶体生长过程中的单一阶段的工作条件进行分析, 缺少晶体旋转对晶体生长的系统性研究^[9-10]。

针对以上问题, 采用有限元法建立了基于提拉法晶体生长多物理场模型, 分析了不同转速下熔体的流动、温度和固液界面的形状等, 并通过对比不同转速下熔体的流动情况, 获得不同转速下稳定界面的状态, 探究了转速对界面的稳定状态的影响机理, 为分析转速对提拉法晶体生长晶体的影响提供了理论支持。

一、建模与计算方法

(一) 几何模型与网格

根据提拉炉物理结构建立晶体生长数值模型,从精度要求出发,对复杂组进行化简。用有限元软件建立轴对称二维计算域,如图1所示,共由晶体、熔体、铂金坩埚、复合保温层、环形感应线圈和两层炉体外壳六个主要部件组成。线圈由空心铜管绕成,内有水冷管,由交流电源供电。通过电磁感应在坩埚上产生焦耳热能,避免电极与熔液相接触。

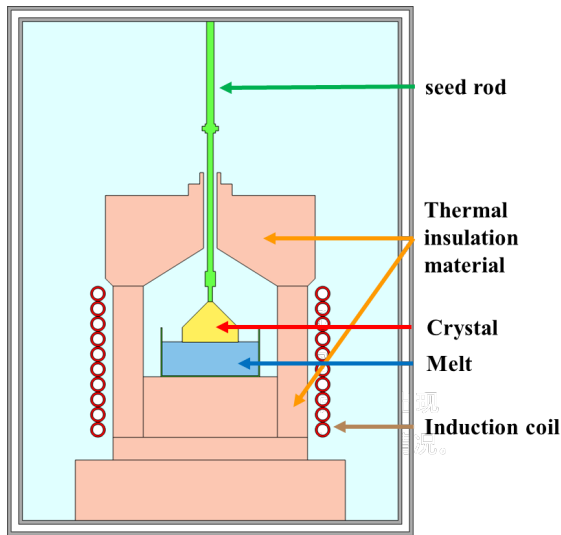


图1 几何模型图

将建立好的具有晶体生长的提拉炉几何实体模型通过网格划分离散化成有限元模型,软件内置有默认的流体动力学网格划分,对于各区域可进行较为细化的网格划分以保证计算精度,但将计算区域划分得过于细致会增加较大的计算负担,对于各几何区域中的物理场类型分别进行网格划分,网格划分整体网格如图2所示。

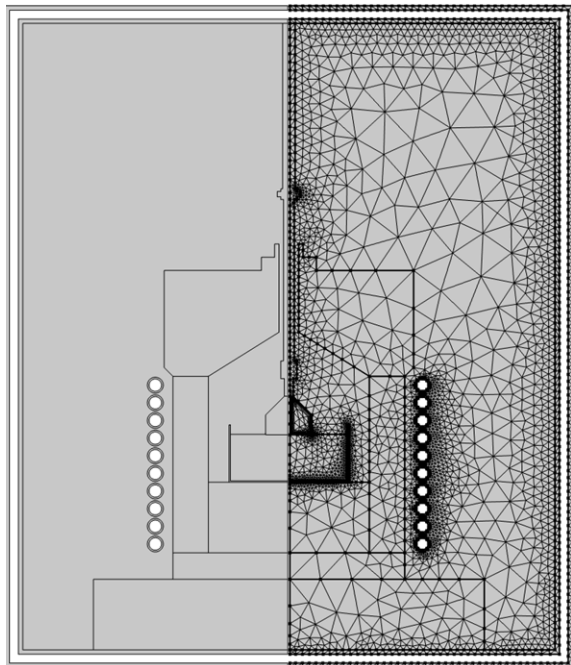


图2 网格划分图

(二) 控制方程

感应加热涉及电磁场与热传导的强耦合作用,其多物理场联合仿真需联立求解电磁场方程(麦克斯韦方程组)和传热方程,并通过材料物性参数(电导率、导热系数等)的温度依赖性实现双向耦合。

感应加热的电磁场建模基于准静态磁准静态(Magneto-Quasi-Static, MQS)假设,适用于低频(通常 $f < 1\text{MHz}$)且位移电流可忽略的场景。其核心方程包括:

$\nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{J}$ (1) 式为安培环路定律, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{J} 为电流密度。

$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ (2) 式为法拉第电磁感应定律, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 为磁通密度表达式为 $\mu \mathbf{H}$, 其中的一项 μ 为磁导率。

$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ (3) 式为运动导体中的欧姆定律, σ 为材料的电导率; \mathbf{v} 为材料的速度(动态情况下)。

引入磁矢势 \mathbf{A} ($\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$), 结合上述方程可得磁矢势方程:

$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{J}_{\text{ext}}$ (4) 其中 \mathbf{J}_{ext} 为外加激励电流密度(如感应线圈电流)。

温度场由热传导、对流及焦耳热源共同控制,其传热控制方程为:

$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) + \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma} - Q_{\text{loss}}$ (5) 式中, 等式左侧表征热惯性, 即单位体积热能变化率, 是材料的密度, c 是比热容; $\nabla \cdot (k(T) \nabla T)$ 代表傅里叶定律导热项, T 表示温度, 材料的导热系数用 k 表示; $|\mathbf{J}|^2 / \sigma$ 为焦耳热源; Q_{loss} 代表散热项(包括对流、辐射等)。

在熔体非等温流动中, 温度梯度会显著影响流体的密度(ρ)和动力粘度(μ_T), 熔体底部受热后密度降低, 形成上升流; 表面冷却后密度增大, 形成下沉流, 构成热对流循环。动量守恒方程(Navier-Stokes方程)可以表达为:

$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_T (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_e$ (9) 式中, \mathbf{v} 表示速度矢量, ρ 表示溶液密度, t 表示时间, P 表示压力, μ_T 表示湍流运动粘度, \mathbf{F}_g 表示热浮力, \mathbf{F}_e 表示电磁力。等式左侧为惯性项(局部加速度与对流加速度); 等式右侧依次为压力梯度项、粘性应力项(温度影响粘度)、浮力项(密度随温度变化驱动自然对流)、其他外力。

对于热浮力和电磁力的可以表达为:

$$\mathbf{F}_g = \rho \left(1 + \left(\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \right) \right) \times (T - T_0) \mathbf{g} \quad (10)$$

$\mathbf{F}_e = \frac{1}{2} \text{Real}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}^*)$ (11) 式中, T 表示温度, T_0 表示参考温度, \mathbf{g} 表示重力加速度。”Real”算子表示取实部运算, \mathbf{J} 表示电流密度, \mathbf{B} 表示磁通密度。

(三) 计算方法

采用有限元法求解控制方程。离散单元为非结构四面体网格, 在固液界面、坩埚壁面处采用局部加密(网格最大尺寸 < 0.5 单元)处理边界层效应, 时间积分步长采用隐式算法, 非线性迭代采用迭代算法(New-Raphson), 自适应时间步长加速了转动流动问题的收敛, 收敛标准为相对残差 $< 10^{-5}$, 单工况计算时间

(48h, 计算节点24核 CPU)。

二、结果与讨论

晶体生长过程中, 晶体转速产生的强迫对流对熔体流动结构存在巨大影响。晶体旋转时, 粘附于晶体表面的熔体伴随晶体作旋转流动, 熔体形成以轴心为旋转中心, 形成对称式的旋转对流流动场。熔体对流动场形式影响熔体内部的传热传质扩散, 进一步影响固液界面形貌。本节分别在4、8、12rpm的转速条件下, 对流体流动、固液界面形貌进行了模拟分析研究。

当晶体转速在低转速(4rpm)时, 热浮力产生的自然对流决定了熔体流动形式(图3中左)。此时晶体低速转动切力较小, 径向温度梯度决定了熔体流动方向。在热浮力自然对流的作用下, 晶体固液界面处热量通过自然对流传递。当熔体通过固体液体界面时, 与固体晶体接触, 热量由固液界面传递给固体, 固体吸收熔体热量, 熔体温度随流动逐渐降低, 固液界面随熔体温度降低而自然成型, 界面呈现凸起界面(图3中右)。低转速下, 热浮力主导的熔体流动的热量差异性, 是形成凸型界面的原因。

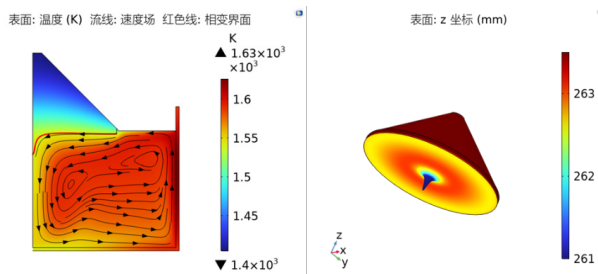


图3 4 rpm 晶体转速下熔体流动(左)与晶体固液界面形貌(右)

当转速进一步增大至8rpm时, 熔体旋转离心力增强, 当离心力与热浮力相抵消后, 熔体中强迫对流开始出现(图4左)。强迫对流的出现, 使得固液界面对流换热路径发生变化, 固液界面处更深部高温熔体被强制输运, 而熔体边缘界面处温度仍然由自然对流控制, 进而低于熔体深处温度。由此固液界面在强制对流的作用下方呈现中间略微凹陷、两侧略微凸起的M形界面(图4右)。这一阶段强制对流和自然对流并存, 两种对流对界面热量分布的调制是决定界面形貌的关键。

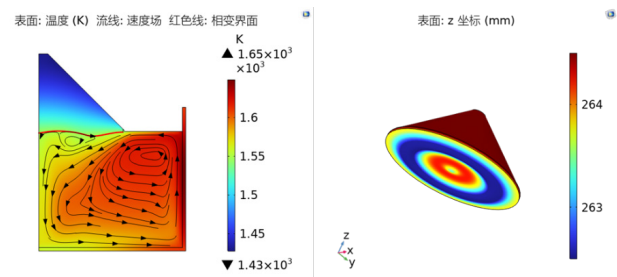


图4 8 rpm 晶体转速下熔体流动(左)与晶体固液界面形貌(右)

进一步提高转速达到12rpm, 此时强迫对流逐渐取代自然对流成为主要对流形式, 如图5左。此时固液界面的传输形式发生了本质变化: 界面中央区域热量以中心至外围迅速向四周发散, 固液界面中央温度高。在温度梯度下固液界面呈现中央向外围递减的温度分布, 导致固液界面向中央区域凹陷, 界面整体呈凹形(图5右)。在这种温度梯度下, 由强迫对流引发的热量重新分配流动路径, 是凹形界面生成的本质原因。

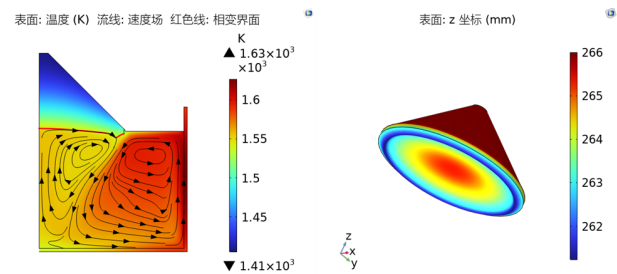


图5 12 rpm 晶体转速下熔体流动(左)与晶体固液界面形貌(右)

三、结论

本文通过数值和实验的方法, 系统研究了晶体转速对提拉法生长系统的综合影响因素及作用机理, 明确了晶体转速影响强迫对流强度, 进而控制固液界面梯度和形态。结果表明: 低转速下自然对流起主导作用且界面凸形, 中速转速下强迫对流与自然对流共同作用且界面稳定性最佳, 高转速下强迫对流起主导作用且界面凹形。模拟结果为晶体生长实验提供了直接有效的理论分析。

参考文献

- [1]Zhou X M, Huang H L. Numerical simulation of Cz crystal growth in rotating magnetic field with crystal and crucible rotations[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 340(1): 166-170.
- [2]Chen C, Chen H J, Yan W B, et al. Effect of crucible shape on heat transport and melt-crystal interface during the Kyropoulos sapphire crystal growth[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 38(8): 29-34.
- [3]Dadzis K, Bönisch P, Sylla L, et al. Validation, verification, and benchmarking of crystal growth simulations[J]. Journal of Crystal Growth, 2017, 474: 171-177.
- [4]Zhang S T, Li T, Li Z X, et al. Thermal field design of a large-sized SiC using the resistance heating PVT method via simulations[J]. Crystals, 2023, 13(12): 1368.
- [5]年夫雪. 单晶硅直拉法生长工艺的数值模拟 [D]. 上海大学, 2017.
- [6]Kotrla M. Numerical simulations in the theory of crystal growth[J]. Computer Physics Communications, 1996, 97(1-2): 82-100.
- [7]Bogdanov M, Ofengeim D K, Zhmakin A. Industrial challenges for numerical simulation of crystal growth[J]. Central European Journal of Physics, 2004, 2: 183-203.
- [8]Meng D L, Wang Y M, Xue H, et al. Stress simulation of 6-inch SiC single crystal[J]. Vacuum, 2023, 213: 31-36.
- [9]Lu S O, Chen H Y, Hang W, et al. Numerical analysis of the dislocation density in n-type 4H-SiC[J]. CrystEngComm, 2023, 25(26): 3718-3725.
- [10]张梦宇. 大尺寸直拉法单晶硅生长过程的控氧研究 [D]. 昆明理工大学, 2023.

煤矿一通三防工作的风险分析和规避措施剖析

罗开

冀中能源邢矿集团邢美矿业，新疆 库尔勒 841000

DOI:10.61369/ME.2025010029

摘 要： 为了保障煤矿工作的安全，降低风险事故出现的概率，需要对一通三防工作提高重视。运用文献研究法和措施分析法，探讨煤矿一通三防工作的风险，或可制定出更具有可行性的规避策略，进一步提升煤矿安全生产水平。这不仅能够保障井下作业人员的生命安全，还能够推动煤矿行业的可持续性发展，促使煤矿生产始终处于更安全可控的状态。

关 键 词： 一通三防；风险分析；规避措施

Risk Analysis and Avoidance Measures Analysis of the "One Ventilation and Three Prevention" Work in Coal Mines

Luo Kai

Xingmei Mining, Xingmei Mining Group, Jizhong Energy, Korla, Xinjiang 841000

Abstract： To ensure the safety of coal mine work and reduce the probability of risk accidents, it is necessary to attach greater importance to the "one ventilation and three prevention" work. By using the methods of literature research and measure analysis, the risks of the "one ventilation and three prevention" work in coal mines can be explored, and more feasible avoidance strategies can be formulated to further improve the safety production level of coal mines. This can not only ensure the life safety of underground workers, but also promote the sustainable development of the coal mining industry and keep coal mine production in a safer and more controllable state all the time.

Keywords： one ventilation and three preventions; risk analysis; circumvention measures

引言

煤矿开采是一项高风险的行业，安全问题始终值得引起重视。而常规的一通三防工作，又是煤矿安全生产过程中不可或缺的重要组成部分，如果井下工作人员的生命安全无法得到保障，那么就会诱发极为严重的安全事故，最终影响到煤矿生产工作的有效推进。煤矿井下的环境十分复杂，一通三防工作往往会面临诸多风险，倘若不加以有效地管控，很可能会酿成严重的后果，从这几个角度来看，对煤矿一通三防工作的风险进行更细致深入地分析是很有必要的，只有制定更切实可行的规避措施，才能让煤矿一通三防工作合理化推进。

一、煤矿一通三防工作的风险分析

（一）通风方面的风险

当前煤矿生产过程中，存在着通风系统设计不合理的问题。如果通风线路过长，通风阻力过大，那么通风效果很有可能受到影响。譬如有些老旧的煤矿在开采过程中，其通风系统并未及时升级优化，因此通风能力很难满足井下的用风需求，井下出现了少量无风或微风区域，这很容易导致瓦斯积聚，让火灾出现的概率大幅度攀升^[1]。

除此之外，通风设备的故障问题也值得引起重视。如果通风设备无法正常运转，那么就会直接影响到井下的通风效果。较为常见的通风设备故障有很多，譬如通风管道破裂，通风机破坏或

者风门封闭性出现了问题。如果通风机缺乏必要的维护，那么在使用过程中就容易出现叶轮磨损或电机炸毁等现象，这很难使得通风机正常工作，会在一定程度上增加通风方面的风险。而通风管理工作的疏忽，也会在一定程度上导致通风风险的出现^[2]。

（二）瓦斯防治方面的风险

在具体的煤矿开采过程中，有些瓦斯的涌出量会受到开采工艺或地质条件的影响，这很容易导致异常情况的出现。而在某些煤层赋存的区域内，由于瓦斯含量极高且透气性较差，因此容易出现开采时瓦斯大量涌出方面的问题。如果仍然采取不合理的开采工艺，很容易导致煤体破碎问题的出现，这又会在一定程度上增加瓦斯的涌出通道，甚至让瓦斯的涌出量超出正常范围，倘若不及时加以干预，那么就很容易诱发严重的爆炸性事故。当前煤

作者简介：罗开（1985.11-），男，汉族，河北邯郸人，本科，冀中能源邢矿集团邢美矿业，采煤工程师，主要研究方向：煤矿一通三防专业。

矿的瓦斯监测系统存在传感精度过低,数据传输不稳定等方面的问题,因此有关系统很难准确监看实时的瓦斯浓度。还有些煤矿虽然安装了瓦斯监测系统,但在具体的使用过程中,由于对监控数据的分析处理不够及时,因此也很难根据当前的瓦斯浓度变化,采取更行之有效的措施。还有个别煤矿存在人为破坏瓦斯监测设备的问题,甚至会恶意篡改监测数据,这也会影响到瓦斯防治工作的合理化推进^[3]。

（三）火灾防治方面的风险

我国有些煤矿在开采过程中,存在明显的自燃倾向,由于煤层暴露在空气中,因此很容易与氧气发生氧化反应,在这一过程中会产生大量的热能。如果相应热能不能及时散发出去,那么当温度到达自燃发火点后,就会诱发火灾。大部分煤层自燃火灾都具有隐蔽性强的特点,因此扑灭难度较大,很容易对矿井安全生产造成负面影响。除此之外,电气设备的使用故障也容易诱发火灾,井下作业需要使用到大量的电气设备。如果电气设备的选型不够合理,或后续的安装和维护工作不到位,那么是很容易诱发电气故障的。譬如有些煤矿在井下会违规使用非防爆类的电气设备,这会极大增加火灾发生的风险。甚至还有一些小型煤矿由于能投入的资金有限,会使用老旧或淘汰的电气设备进行持续性的井下作业,这类设备的安全性无法得到有效保障,因此很容易诱发严重的火灾事故。还有一些煤矿企业并未严格落实动火作业的审批制度,且在动火作业工序开始前,也并未对作业现场进行更认真地检查,这也会增加现场火灾防治工作的难度^[4]。

二、煤矿一通三防工作风险的规避措施

（一）合理优化通风系统

1. 设计更科学合理的通风系统

在煤矿通风系统设计过程中,技术人员需要全面考虑景田的地质条件以及当前的生产能力,尽可能采用最先进的通风设计方法和理念,争取让通风系统变得更为安全可靠。在一些高应力,高瓦斯的矿井中,可尝试采用分区通风,对角式通风方式,在降低通风阻力的同时提升通风效果。与此同时,技术人员也需要根据矿井的发展规划,尽可能预留足够的通风能力,这才能够让未来的开采需求得到更进一步地满足^[5]。

除此之外,健全通风设备管理制度也显得尤为必要,只有加大对通风设备的检修力度,才能够让设备保持正常的运行。因此技术人员需要定期对通风机进行必要的性能测试,并尝试及时更换性能下降,磨损较为严重的通风机。在这一过程中,技术人员还需要加强对通风管道的维护和检查力度,通过及时修复漏风或破裂的管道,降低安全事故出现的概率。定期检查门封闭性能也是一项必不可少的工作,如果风门的密闭不严,就需要在第一时间进行更换和维修。除此之外,技术人员还需要配备必要的通风设备,倘若主通风设备出现了故障,那么就需要及时进行更换,只有如此才能够保证矿井的通风不被间断^[6]。

2. 强化通风管理工作

在全面完成通风系统设计,并有效落实了通风管理制度后,

各部门还需要在通风管理工作中进一步明确职责,通过加大对通风系统的日常监管力度,来保障通风系统的正常运作。具体而言,技术人员需要定期对矿井通风系统进行全面的监测,根据测风结果来及时调整通风系统,这能够让各用风地点的风量保持稳定和充足。在通风系统的具体运作中,还需要确保通风设施的管理工作落实到位,工作人员不得随意损坏或拆除通风设备,如果在日常工作中出现了违规违纪行为,工作人员也需要受到严肃处理。而在进行采面过断层或巷道贯通等特殊作业过程,也需要制定更具有针对性的通风安全策略,并确保相应策略严格有效落实。

（二）加强瓦斯防治

1. 准确掌握瓦斯的涌出规律

技术人员需要加强对瓦斯地质的探究,通过瓦斯含量测定或地质勘探等先进的技术手段,尽可能掌握目标区域内煤层瓦斯的赋存情况,并全面探索其涌出规律。工作人员需要尽可能建立瓦斯动态的监测系统,通过实时监测瓦斯涌出量的变化,来对瓦斯涌出的异常情况进行分析和研究。具体而言,技术人员需要根据瓦斯的涌出规律,合理调整瓦斯的开采工艺,不断完善瓦斯治理措施,如果瓦斯的涌出量过大,那么需要尝试采用边采边抽的瓦斯处理方法,这能有效降低瓦斯的涌出量^[7]。

2. 全面完善瓦斯监测系统

煤炭企业需要加大对瓦斯监测的资金投入,尽可能选择更先进的瓦斯监测设备,争取能有效提升监测系统的准确性和可靠性。在这一过程中,需要定期对瓦斯监测设备进行维护和校验,只有如此才能确保传感器的精度符合既定要求,才能回传更稳定的数据信息。而在进行瓦斯监测数据分析预警机制构建的过程中,技术人员更需要为瓦斯浓度设置一个报警阈值,一旦超出该类阈值,系统就会及时发出报警信号,这有助于工作人员及时采取措施,完成瓦斯浓度超出范围的处理工作。在日常的监测过程中,技术人员也需要禁止无关人员登录监看后台,随意篡改监测数据或破坏监测设备,倘若有关人员出现了违规行为,也需要依法进行追究。

3. 强化瓦斯治理力度

只有不断提升瓦斯治理的效果,才能降低危险事故发生的概率。因此技术人员需要全面优化瓦斯抽采的钻孔布置效果,在全面增加抽采时间的同时,尽可能提升设备的抽采能力,这能够让瓦斯抽采工作得到更多的保障。与此同时,技术人员还需要加大对瓦斯抽采系统的管理力度,通过定期检查抽采管路的密封性以及当前的设备运行情况,尽可能规避抽采过程出现一系列突发性问题。技术人员还需要定期检查瓦斯的排放情况,密切关注通风不良区域的通风处理成效,尽可能降低瓦斯浓度,保障周遭工作环境的安全^[8]。

（三）合理进行火灾防控

1. 有效完成煤层自燃防治工作

有些煤层具有自然的倾向性,因此需要采取综合的防火措施,争取降低煤层自燃的可能。在这一过程中,技术人员需要优化开拓开采方式,尽可能减少采空区的遗煤,借此来提高回采

率。除此之外，还需要严格布置通风系统，让采空区的漏风得到解决。这能在一定程度上减少氧气进入采空区的机会，降低自燃问题出现的概率。技术人员也可尝试使用注入氮气或灌浆等防火的技术，完成对采空区的处理工作，这也能够让煤层自燃的风险得到更有效地规避。技术人员还需要加大对火区或采空区的监测力度，定期完成气体成分和温度等参数的检测工作，这有助于技术人员发现煤层自燃方面的隐患，能够为工作人员争取更多处理时间^[9]。

2. 加大电气设备管理力度

工作人员需要按照现阶段的煤矿安全规程要求，结合煤矿开采的实际情况，选择达到现有防爆标准的电气设备，并合理完成设备管理方面的一系列工作。具体而言，技术人员需要确保设备安装的规范性，争取让接线变得更加牢固。与此同时，还要加强对电气设备的检修和日常维护，通过查看设备本身的绝缘性能以及保护装置使用情况，及时解决电气设备可能出现的故障问题。技术人员不得在井下使用老旧或淘汰的电气设备，一旦相应电气设备的使用不符合既定要求，就需要及时进行更换。工作人员甚至可根据当前的大数据技术和人工智能技术使用情况，构建更方便快捷的电气设备管理档案，及时完成设备安装维护和使用的情况登记工作，对设备进行必要的追踪管理。

3. 完善动火作业管理工作

对于煤矿开采企业而言，需要严格执行当前的动火作业审批制度，在进入井下动火作业之前，需要结合当前实际情况制定更详细的安全制度，在报批相关部门审核后方可进行后续的作业。在动火作业工序开始前，技术人员需要严格遵守操作规程，确保动火作业的安全性。而在动火作业结束之后，又需要对现场进行彻底的检查和清理，只有确保无火灾隐患之后，技术人员才能结束一切工作，离开现场。相关企业需要加强对动火作业人员的培训力度，尽可能提升其操作技能水平，让其培养更全面的安全意识，这是动火作业顺利推进的有效保障^[10]。

（四）完善粉尘防治措施

1. 建立更加健全的防尘系统

为了降低突发性灾害事故出现的可能，人员需要构建更完善的防尘供水系统，只有如此才能确保井下不同地点都有更加充分

的水源供应。具体而言，技术人员需要在不同地点和产生设备上，安装更加有效的降尘喷雾装置，或是使用防尘罩和除尘器，来有效提升防尘的效果。工作人员还要定期对防尘设施进行维护和检查，这能在一定程度上确保设备的正常运作。当然，为了保证除尘的效果，完成设备清理方面的工作也是很有必要的，比如技术人员需要定期清理除尘器方面的积灰，这也能在一定程度上维护设备的性能。在配备了足够数量的防尘监测设备之后，技术人员需要及时监测井下各作业地点的粉尘浓度，根据粉尘监测的具体结果，随时调整当前的防尘措施。如果某些区域的粉尘明显超标，就需要采取更具有针对性的治理策略，保证目标区域内粉尘堆积数据在既定范畴内。技术人员甚至可构建粉尘监测方面的答案，对监测数据进行必要的总结和分析，这能让后续的防尘工作变得更加可靠。

2. 提高作业人员的防尘意识

防尘教育培训工作，在煤矿一通三防有效落实方面能起到重要的保障作用。有关企业需要加强作业人员的防尘培训力度，争取有效提高作业人员对粉尘危害的认知，这也能够让作业人员的自我防护意识得到提升。企业管理层还需要定期组织作业人员参与知识培训类的活动，确保基层技术人员掌握更加全面的防尘方法，引导其学会正确使用个人防护用品。企业需要在工作现场合理设置防尘的警示标识，借此来提醒作业人员注意防尘，有效加强对作业人员个人防护用品佩戴情况的检查力度，如果有关工作人员不按照规范佩戴防尘口罩或者个人防护用品，那么就需要进行必要的处罚，帮助其纠正错误的工作模式。

三、结束语

总而言之，明确煤矿一通三防工作的核心任务，及时进行风险分析方面的工作，制定更具有可行性的策略规避安全事故是很有必要的。只有如此才能提升煤矿安全生产的水平，让井下作业人员的安全得到保障。但需要注意的是，煤矿安全生产工作目标并不是一朝一夕可以达成的，技术人员需要不断适应煤矿开采条件的变化情况，及时更新风险规避方面的措施和方案。

参考文献

- [1] 王飞. 煤矿开采过程中“一通三防”工作的危险源及预控措施 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (08): 85–87.
- [2] 张永安. 煤矿生产中“一通三防”的事故特点与防治策略 [J]. 矿业装备, 2023, (04): 121–123.
- [3] 郑旭鹤. “一通三防”技术在矿井通风系统改造中的应用 [J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45 (02): 184.
- [4] 李鹏. 煤矿“一通三防”安全管理体系的研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (03): 98–100.
- [5] 薛世鹏. 煤矿“一通三防”安全管理现状及策略研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (02): 88–90.
- [6] 周凡. 煤矿“一通三防”工作中的危险源分析及预控探析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (01): 103–105.
- [7] 郭建雄. 煤矿“一通三防”智能化技术问题探讨与展望 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (01): 154–156.
- [8] 马季. 煤矿“一通三防”技术的实际运用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (23): 127–129.
- [9] 郁学猛, 周波, 朱学亮. 浅谈煤矿“一通三防”安全管理工作 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (20): 87–89.
- [10] 常杉杉. 煤矿“一通三防”技术实施要点及未来发展初探 [J]. 矿业装备, 2022, (04): 120–121.

多组分尼龙纤维配比设计对增韧膜熔融行为与力学性能的影响

梁晨

上海碳动新能源科技有限公司, 上海 201600

DOI:10.61369/ME.2025010035

摘要 : 为提升碳纤维增强复合材料 (CFRP) 在高温、高载环境下的层间韧性和冲击后压缩性能, 文章构建了一种基于多组分尼龙纤维的梯度熔点增韧膜体系, 系统研究不同尼龙组分对比对增韧膜熔融行为和力学性能的调控机制。通过低熔点 (PA12、PA610) 与高熔点 (PA46、PA6T) 聚酰胺的协同复配, 设计出既能在 180°C 实现快速界面粘结, 又能在 230°C 维持良好层间支撑强度的多尺度增强结构。实验结果表明, 最佳配比方案 (PA12:PA610:PA46:PA6T = 2:2:3:3) 较常规配比界面粘结力提升约 40%, 压缩强度提升约 30%。在纤维短切、水浸分散和表面改性工艺的基础上, 增韧膜构建出分布均匀的三维网络结构, 有效提升了成膜一致性与结构稳定性。研究提出的“熔点梯度 + 结构协同”机制为高性能 CFRP 层间增韧膜材料的工程化设计提供了理论支撑和数据基础, 具备在航空复合材料领域的实际应用潜力。

关键词 : 多组分尼龙纤维; 增韧膜; 熔融行为

The Influence of the Proportion Design of Multi-Component Nylon Fibers on the Melting Behavior and Mechanical Properties of Toughened Films

Liang Chen

Shanghai Carbon Dynamics New Energy Technology Co., LTD., Shanghai 201600

Abstract : To enhance the interlamellar toughness and post-impact compression performance of carbon fiber reinforced composites (CFRP) under high-temperature and high-load conditions, this paper constructs a gradient melting point toughening film system based on multi-component nylon fibers, and systematically studies the regulation mechanisms of the melting behavior and mechanical properties of the toughening films with different nylon component distribution ratios. Through the synergistic compounding of low-melting-point (PA12, PA610) and high-melting-point (PA46, PA6T) polyamides, a multi-scale reinforced structure was designed that can achieve rapid interfacial bonding at 180°C and maintain good interlayer support strength at 230°C. The experimental results show that the optimal proportioning scheme (PA12:PA610:PA46:PA6T = 2:2:3:3) increases the interfacial bonding force by approximately 40% and the compressive strength by approximately 30% compared with the conventional proportioning. Based on the processes of fiber short cutting, water immersion dispersion and surface modification, the toughened film constructed a uniformly distributed three-dimensional network structure, effectively improving the consistency of film formation and structural stability. The "melting point gradient + structural synergy" mechanism proposed in the research provides theoretical support and data basis for the engineering design of high-performance CFRP interlayer toughening membrane materials, and has practical application potential in the field of aviation composite materials.

Keywords : multicomponent nylon fiber; toughened film; melting behavior

引言

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 在航空领域需要承受复杂载荷和极端环境, 层间断裂常成为影响其整体可靠性的关键因素。近年来, 液体成型工艺因其模量控制灵活、成型尺寸自由以及适应复杂铺层结构的能力, 逐渐成为 CFRP 结构的主要制备路径。然而, 这一工艺的推广也对用于层间增韧的膜材料在热响应窗口、界面亲和性与结构稳定性等方面提出了更高要求, 进一步加剧了材料性能优化的

难度。当前可用于 CFRP 层间增韧的材料体系涵盖聚醚砜（PES）、芳纶、聚酰亚胺、玄武岩纤维等多种无纺结构，其在热性能、力学匹配和界面兼容性方面各有特长。尼龙类热塑性纤维因其极性分子链段、可调熔融温区和优异的流变特性在液体成型体系中表现出优越的界面浸润能力和成膜适应性，具备进一步拓展空间的潜力。多组分尼龙体系通过组合不同熔点和分子刚性的组分，在微观上建立分区熔融与支撑架构，在宏观上实现热响应一致性与力学冗余的协同，成为解决单组分增韧膜在服役过程粘结 / 支撑功能难以兼顾问题的重要材料路径。文章基于此聚焦多组分聚酰胺纤维在液体成型 CFRP 中的界面调控能力与结构承载潜力，围绕纤维配比构型、熔融行为演化、成膜均匀性调节及多尺度力学增强机制展开系统研究。

一、多组分尼龙纤维体系设计原理

（一）组分选择依据

液体成型工艺对层间增韧材料在热压预粘阶段和树脂灌注阶段提出协同响应要求，增韧膜需在 150 - 200℃ 范围内完成界面粘结与初步定型，在 230℃/2.5 MPa 压力环境下维持结构刚性与厚度稳定性^[1]。为实现该类梯度响应，基于熔点调控策略筛选尼龙纤维组分，以构建具备低温活化和高温支撑双区段的功能型增韧膜体系。对三十余种商用聚酰胺纤维进行 DSC 分析与分子构型筛查，PA6 与 PA66 在目标温区内熔融黏性不足，纤维状态稳定性较高，界面黏附速率与浸润性不满足快速粘结需求。PA12 与共聚 PA610 具备较宽软化区和较低结晶度，在 175 - 185℃ 呈现连续熔融转变，可与碳纤维预浸料表面发生早期润湿与界面过渡。针对成型后期的层间承载要求，构建以 PA46 和 PA6T 为主的高熔点结构骨架，两者熔融温度分别位于 295℃ 和 315℃，均高于环氧体系固化上限，在树脂注入和固化过程中保留纤维态完整性，限制层间塌陷与应力集中。以 PA12/PA610 为可流动相，以 PA46/PA6T 为支撑相，设计梯度混纺体系，使熔融态界面渗透与固态纤维骨架在温控范围内依序激活，满足液体成型工艺下的双阶段界面耦合与结构维稳要求。

（二）配比优化方法

选用 PA12（熔点 178℃，粒径 20 μm）、共聚 PA610（熔点 182℃）、PA46（熔点 295℃）和 PA6T（熔点 315℃）四种商用短纤维为实验组分，质量比控制精度 ±0.2%，纤维长度统一裁切为 6 mm。以 PA12 和 PA610 为低熔点组分，PA46 和 PA6T 为高熔点骨架组分，基于正交实验设计构建五组不同配比的复合纤维体系，制备湿法成网无纺增韧膜，干燥后采用热压法（200℃，0.5 MPa，5 min）固化成型。每组样品面积 100×100 mm，膜厚控制在 60 - 80 μm 范围。

对所有样品进行差示扫描量热分析（DSC，升温速率 10℃/min）与热重分析（TGA，氮气气氛，600℃终点）联测，提取熔融起点温度与熔融峰值温度。采用 180℃等温压贴法测定界面粘结力，采用 230℃/2.5 MPa 标准热压模具测试层间支撑强度，压缩载荷施加速率为 1 mm/min，使用电子万能试验机（Instron 3369）完成测试，每组样品测试数量 n=5，取平均值。

测试结果表明，低熔点组分在总配比中占比为 40 - 60% 时，样品在 180℃表现出较优的润湿与粘结性能，且高温下具有一定支撑效果。在五组配比中，配比为 PA12:PA610:PA46:PA6T

= 2:2:3:3 的组合在界面粘结力达 49 N、层间支撑强度为 115 MPa，表现最优。其 DSC 热分析结果显示熔点起始温度为 170℃，熔融峰值温度为 183℃，表明该配比体系在 175 - 185℃ 区间存在持续吸热平台，形成良好共熔结构。相比之下，PA12:PA610:PA46:PA6T = 1:2:4:3 虽在支撑强度上略高（121 MPa），但粘结力较低，仅为 37 N，整体性能均衡性不及 2:2:3:3 配比。尼龙配比与性能测试数据如下表 1：

表 1 尼龙配比与性能测试数据表

配比 (PA12:-PA610:PA46:PA6T)	熔点起始温度 (°C)	熔融峰值温度 (°C)	180℃界面粘结力 (N)	230℃层间支撑强度 (MPa)
4:2:2:2	160	174	35	88
3:2:3:2	165	180	42	104
2:2:3:3	170	183	49	115
1:3:3:3	175	187	44	108
1:2:4:3	178	192	37	121

二、熔融行为调控机制

（一）多组分熔融特性表征

在 DSC 测试条件下，不同配比的尼龙纤维混合体系在 150 - 200℃ 区间出现多个连续吸热峰，低熔点组分 PA12 与共聚 PA610 开始在约 175℃ 附近进入熔融软化状态，吸热峰位置与组分比例正相关^[2]。样品中低熔点纤维比例越高，起始吸热信号越早出现，基线偏移更加平缓，热流曲线中的吸热区面积明显增加，熔融行为在温度时间轴上的分布向低温端拓展，表现出持续软化特征。高熔点组分 PA46 与 PA6T 的吸热峰稳定分布于 230 - 250℃ 区间，峰形对称性良好，未出现峰位漂移或肩峰重叠，说明其在高温段保留较强的结晶结构与相对独立的熔融过程，未受到共混链段的显著干扰。不同组分混合后吸热峰并未发生显著合并或劈裂，热曲线中出现多个吸热平台而非孤立单峰，表明纤维间虽具差异性但未发生明显相分离现象，体系整体呈现部分互容状态。如图 1 所示，热分析图则展示了材料的典型热响应行为，PET 结晶型结构与尼龙类似，均属于半结晶热塑性聚合物，二者在玻璃化转变、冷结晶与熔融等热行为上具有一定代表性与可比性。从图中 DSC 曲线可见，材料经历了玻璃化转变（T_g）、冷结晶与熔融三个主要热事件。玻璃化转变出现在约 80℃，冷结晶峰

位于约 140 - 180 °C，最终熔融吸热峰出现在 250 - 260 °C 之间，表现出较宽的熔融窗口与多阶段热响应特征。TGA 测试结果显示样品热稳定性良好，5% 热失重起始温度接近 380 °C，总失重达 84.9%，残炭率为 14.47%。主分解过程呈单阶段进行，峰值分解温度集中于 470 - 495 °C 之间。

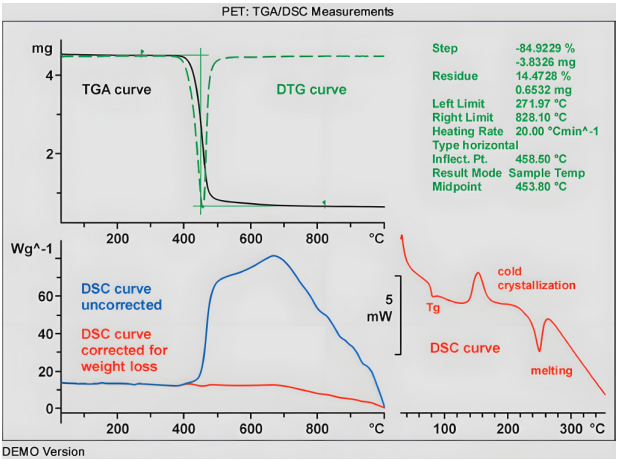


图1 PET热性能分析曲线

(二) 界面粘结增强策略

PA12和 PA610 未经改性时在熔融态与环氧基体接触角大于 94°，润湿性差。采用共聚改性方式，在聚合体系中引入己二胺、己二酸和 ε-己内酰胺，在分子链段中嵌入羧基和胺基官能团，提升极性和反应活性。改性后纤维经 FTIR 验证，在 1650 cm⁻¹ 和 1735 cm⁻¹ 出现特征峰，XPS 检测 O/C 比由 0.29 升至 0.36。接触角下降至 71.2°，界面张力下降约 34%。分子动力学模拟显示界面能由 -72.8 降至 -126.4 kJ/mol，氢键密度提高约 92%。180 °C 条件下，粘结力从 35 N 提升至 49 N，剥离载荷由 1.6 MPa 升至 2.3 MPa。SEM 观察界面形成连续粘结层，EDS 中出现氧氮富集区域，界面结构中检测到酯键生成信号，说明纤维与树脂发生定向反应嵌合。界面结合能分布如图 1 所示，改性共聚尼龙在特定构型下与环氧界面形成明显能量阱，表明界面结合稳定性显著增强。

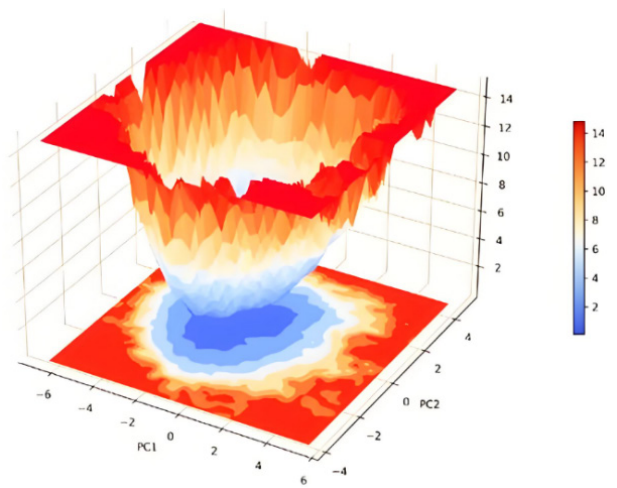


图2 改性共聚尼龙与环氧界面的结合能分布图

三、力学性能强化路径

(一) 纤维网络结构优化

水浸短切工艺可显著降低纤维端部热粘结，纤维在湿态分散后保留松散性，形成均质成浆悬浮体。为评估不同工艺参数对网络结构的影响，分别采集膜层光学图像（×100 倍率）进行孔隙率与纤维分布密度分析，采用图像分析软件计算区域孔隙率（μ-CT 二值化处理）与纤维交叉密度。为匹配三明治型层间布设方案，运用低浓度、中剪切方案构建中间致密层，增强结构过渡连续性与定向支撑强度。水浸短切与分散工艺的参数组合对纤维热粘结率、成浆结构均匀性及膜层内部孔隙分布具有直接影响，其调控效果与最终压缩性能的关联如表 2 所示。

表2 不同短切 / 分散工艺对增韧膜结构与性能影响

工艺条件 (短切 / 分散参数)	热粘结率 (次 / m)	成浆均匀评分 (1 - 5)	厚度偏差 (%)	孔隙率 (%)	纤维交叉密度 (根 / mm ²)	压缩强度 (MPa)
干切 / 高剪切 / 高浓度	8.1	2.1	39%	74	6.1	85
水浸 / 高剪切 / 高浓度	3.2	3.3	15%	76	8.7	96
水浸 / 中剪切 / 低浓度	1.1	4.6	7%	81	13.2	113

膜层结构均匀性随纤维热粘结率降低与分散均质性提升而增强，水浸短切配合中剪切 / 低浓度条件下，孔隙率最低、纤维交叉密度最高。成膜厚度波动减小至 18 μm，压缩强度提升至 113 MPa。该条件下获得的膜层适合构建三明治型结构的中间高密度增强层，可提供稳定支撑并增强界面过渡均匀性。

(二) 多尺度增强机制

低熔点共聚尼龙在成型阶段于 180 °C 内发生粘流渗透，表面润湿速率大于 2.8 mm/s，在界面区域填充微裂隙形成连续粘结层，其软化区滞后 3 - 4 °C 扩展至纤维整体体积，在膜层内包裹碳纤维束形成初始界面过渡区^[4]。PA46 与 PA6T 高熔点纤维在整个成型阶段未出现晶型塌陷或取向丧失，截面保持轴向刚性，形成贯穿膜层的力学支撑网络。在短纤累积区域，固态纤维束排列密度维持在约 8 - 11 根 / mm²，单根纤维直径主要集中在 9.92 - 12.32 μm 之间，交错分布在碳纤维层间形成非连续桥联架构。SEM 断口图中裂纹路径出现局部偏转与断续嵌埋现象，裂纹传播方向偏离层间剪切轴 15 - 30°，失效过程表现为树脂剥离与纤维拔出混合主导，拔出长度集中于 10 - 12 μm 范围。增韧膜结构在冲击后压缩试验中残余强度达到 350 MPa，较未增韧层合板提升 141%，断裂韧性 G_{IC} 提升至 980 J/m²，增幅为 76%。

综合断面形貌与力学响应，增强机制可划分为三类：熔融尼龙与基体界面形成连续极性渗透层构建“分子桥联”作用，高强度固态纤维限制裂纹面扩展轨迹实现“微结构偏转”，短纤聚集区发生纤维拔出与树脂剪切塑形共同构建“多点耗能”路径，三机制协同作用形成跨层尺度的能量耗散结构^[5]。界面断裂形貌如图 2 所示，纤维桥联、拔出残茬及裂纹偏转迹象在断面上广泛分布，反映出增韧膜在微观层级实现结构干预与能量耗散。

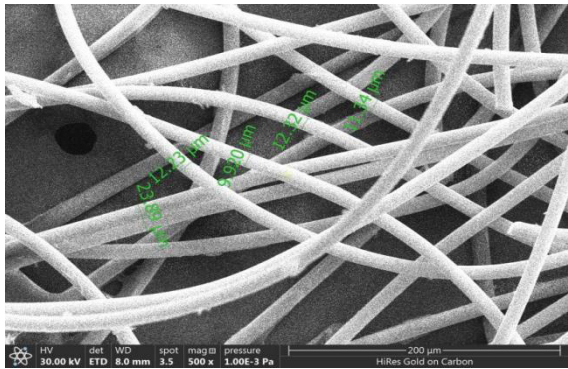


图3 多组分尼龙增韧膜表面 SEM 图

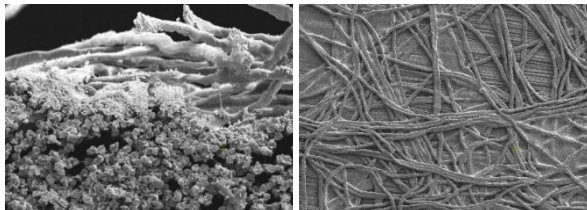
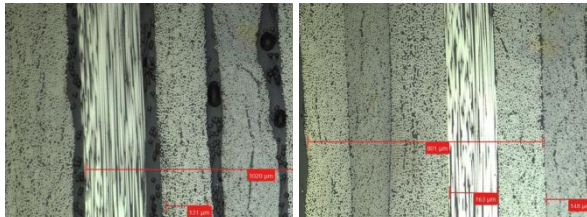


图4 多组分增韧膜快速粘结后表面与截面 SEM 图



a 含曾经多组分尼龙纤维增韧膜层压板 b 无层间增韧膜层压板

图5 层压板金相分析

四、结语

本文系统研究了多组分尼龙纤维配比设计对增韧膜熔融行为与力学性能的调控机制，明确了低、高熔点聚酰胺协同构建梯度熔点结构对界面粘结与层间承载能力的显著提升作用。实验结果表明，合理配比下的增韧膜不仅实现了热压初期的快速粘流过渡与固化阶段的结构稳定，还通过界面共聚改性和水浸短切等工艺，有效提升了成膜均匀性和力学网络致密性。进一步分析揭示了多尺度桥联结构和分阶段吸热响应在抑制层间断裂、增强能量耗散中的作用机制。总体来看，多组分尼龙增韧膜为碳纤维复合材料液体成型工艺提供了一种集界面调控与力学增强于一体的工程化材料解决方案。展望未来，该体系有望拓展应用于更高服役要求的航空航天与高端装备领域，为复合材料的高性能与高可靠性发展提供理论基础和技术支撑。

参考文献

[1] 魏晓峰,王正球,张兵,等.生物基尼龙510纤维面料的染色工艺[J].印染助剂,2024,41(07):46-50.

[2] 王宁宁,李寒旭,夏宝亮,等.恒温时间对煤灰熔体熔融行为的影响研究[J].硅酸盐通报,2023,42(10):3652-3659.

[3] 姜涛.有机改性氧化石墨烯/尼龙纤维的性能研究[J].合成纤维,2022,51(09):30-34.

[4] Feng L, Chunxiang L, Tongqing S. Improved interfacial shear strength in carbon fiber/polyamide 6 composite via a novel two-component waterborne polyurethane sizing agent[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140 (17).

[5] Said B, Hassane L, Selma C, et al. Polysulfone/Polyetherimide Ultrafiltration composite membranes constructed on a three-component Nylon-fiberglass-Nylon support for azo dyes removal: Experimental and molecular dynamics simulations[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 625.

装修垃圾资源化利用工程预处理生产线粉尘控制分析

张晓星^{1, 2}

1.上海跃昕环保科技有限公司, 上海 201800

2.上海科频再生能源有限公司, 上海 201800

DOI:10.61369/ME.2025010036

摘 要 : 粉尘污染控制是装修垃圾资源化利用工程的环保难点, 是影响职工职业健康安全的关键因素。采取有效措施提高粉尘控制效果, 提升作业环境是新建和已建项目运营面临的共性问题。本文研究以上海市某装修垃圾资源化利用工程为依托, 分析了粉尘来源与特点, 对比项目装修垃圾预处理生产线技改前后粉尘控制效果, 提出粉尘控制运营优化建议, 为城市新建该类项目或已建项目运营提供参考。研究表明: 装修垃圾预处理生产线采用设施设备密封 + 负压收尘相结合系统。起尘点均应设置收尘罩, 收尘罩位置宜设在粉尘集中扩散路径 1.5m 以内, 收尘罩罩口平均风速不宜超过 2.0m/s, 罩口负压不宜超过 0.35Pa; 根据粉尘特点相近原则采用半集中式袋式除尘器布置方式; 通过除尘器风机控制、总排管主风管设增压风机, 有效实现净化前、后的排放支管、总管阻力平衡, 避免短流等现象, 使得每个抽尘点维持有效负压, 起到有效的收尘、除尘效果, 保证车间粉尘控制效果。

关 键 词 : 装修垃圾资源化; 粉尘来源与特点; 预处理生产线粉尘控制; 设施设备密封; 负压收尘

Analysis of Dust Control in Pre treatment Production Line of Decoration Waste Resource Utilization Project

Zhang Xiaoxing^{1, 2}

1.Shanghai Yuexin Environmental Protection Technology Co., Ltd. Shanghai 201800

2.Shanghai Kepin Renewable Energy Co., Ltd. Shanghai 201800

Abstract : Dust pollution control is an environmental protection challenge in decoration waste resource utilization projects and a key factor affecting the occupational health and safety of workers. Taking effective measures to improve dust control efficiency and enhance the working environment is a common issue faced by both new and existing project operations. The article based on a decoration waste resource utilization project in Shanghai, analyzes the sources and characteristics of dust, compares the dust control effects before and after the technical transformation of the decoration waste pretreatment production line, and proposes optimization suggestions for dust control operations to provide references for the construction of new urban projects of this type or the operation of existing projects. The study shows that the decoration waste pretreatment production line adopts a system combining facility and equipment sealing with negative pressure dust collection. Dust collection hoods should be installed at all dust-generating points, preferably within 1.5 meters of the concentrated dust diffusion path. The average air velocity at the hood opening should not exceed 2.0 m/s, and the negative pressure at the hood opening should not exceed 0.35 Pa. A semi-centralized bag filter arrangement is adopted based on the principle of similar dust characteristics. Through the control of the dust collector fan and the installation of a booster fan in the main duct of the total exhaust pipe, the resistance balance of the exhaust branch and main pipes before and after purification is effectively achieved, avoiding phenomena such as short-circuit flow. This ensures that each dust extraction point maintains effective negative pressure, achieving efficient dust collection and removal, and ensuring the dust control effect in the workshop.

Keywords : resource utilization of decoration waste; sources and characteristics of dust; dust control in pre-processing production line; facility and equipment sealing; negative pressure dust collection

引言

随着城市进程的加快,建筑垃圾的产量逐年增加,高达数十亿吨级,但建筑垃圾资源化利用发展缓慢,综合资源化利用率低,除少量用于工程回填和再生利用外,大部分仍简单堆放处理^[1-2]。《上海市建筑垃圾处理管理规定》(2017年9月18日上海市人民政府令第57号公布)中指出,“建筑垃圾包括建设工程垃圾和装修垃圾。建筑建设工程垃圾是指建设工程的新建、改建、扩建、修缮或者拆除过程中,产生的弃土、弃料和其他废弃物。装修垃圾是指按照国家规定无需实施施工许可管理的房屋装饰装修过程中,产生的弃料和其他废弃物。”^[3]

为响应“‘十四五’大宗固体废弃物综合利用规划”建设及《中华人民共和国固体废物污染环境防治法(2020修订)》,上海、江苏、深圳等城市逐步开始投资建设建筑垃圾资源化利用项目^[4-5]。近期围绕装修垃圾特性及处置工艺开始展开一系列研究,主要聚焦装修垃圾资源化厂设计^[6-7],研究过程重点研究了装修垃圾的预处理生产工艺,但对该类工程粉尘控制的研究非常有限^[8]。装修垃圾资源化处理过程中,无论是振动筛、破碎机还是风选机、给料机都会在工作中产生大量粉尘,粉尘对人体、生产过程、环境和生态平衡等诸多方面均会产生不良影响。根据《中华人民共和国环境保护法》^[9]、《中华人民共和国大气污染防治法》^[10]以及上海市《大气污染物综合排放标准》(DB31/933-2015)^[11]、《工作场所有害因素职业接触限值 第部分:化学有害因素》(GBZ2.1-2019)^[12]中的要求,对装修垃圾预处理生产线产生的粉尘颗粒物的控制,为大气污染物的控制和改善厂房环境状况起着重要作用。

现有实际工程案例运行表明,粉尘污染控制仍是装修垃圾资源化利用工程的环保难点,是影响职工职业健康安全的关键因素。采取有效措施提高粉尘控制效果,提升作业环境是新建和已建项目运营面临的共性问题。本文研究以上海市某装修垃圾资源化利用工程为依托,分析了粉尘来源与特点,对比项目装修垃圾预处理生产线技改前后粉尘控制效果,提出粉尘控制运营优化建议,为城市新建该类项目或已建项目运营提供参考。

一、工程概况

上海市某装修垃圾资源化利用项目设计处理规模1500吨/天,年处理50万吨,以装修垃圾为主,兼顾拆除垃圾。项目占地73亩,主要包括一体化车间(含卸料车间、堆放车间、预处理车间、制砖车间、产品车间等)、生产辅助车间、电业开关站、消防水池及泵房等。项目总平布置见图1。

预处理生产线采用“粗分选+三级筛分+两级分选+两级破碎,辅以磁选和光选”的处理工艺,设两条生产线,每条线处理能力为65吨/小时,12小时工作制;同时设置一条每天消耗约200t骨料的制砖生产线。主要产品为再生骨料、再生砖、木材等,不可利用的可燃物外运焚烧处置。



图1 某建筑垃圾资源化利用项目实景图

注:引用2024年1月上海某区建筑垃圾资源化利用项目现场照片

二、粉尘来源与特性

(一) 粉尘来源分析

装修垃圾的来料倾倒、上料、输送、破碎、筛分、分选、产

品装载等工序中均会产生不同影响程度的粉尘,以尘土和石料细微颗粒为主。根据装修垃圾资源化处理工艺,主要起尘点如下:

1.卸料堆放区:垃圾从运输车卸料至堆放区的过程中因高度落差易产生扬尘。粉尘产生与运输车次相关(1500t/d约300车次左右),属于无组织粉尘;倾倒瞬时粉尘浓度高,容易扩散至空间。

2.上料环节:装载机上料过程因高度差易产生扬尘,具有集中、瞬时、高浓度及不易密封的特点,属于无组织粉尘。

3.皮带输送系统:主要发生在皮带转接处,因落差产生冲击造成扬尘,粉尘浓度高、集中、易密封、物料转运速度快、物料转运高度落差大等,可通过有效收集形成有组织粉尘。

4.破碎类设备:如反击式破碎机、颚式破碎机等。当垂直进料口与出料口高度差 $H > 2000\text{mm}$ 时,上部产生的粉尘主要是物料动诱导的空气流动、剪切气流作用引起的;下部产生的粉尘主要是经过破碎机的冲击而产生新的干燥面与细小颗粒物料,在下降过程中由于剪切气流作用和下降到皮带机冲击震荡扬起的粉尘。破碎类设备是生产线的重要环节,可通过有效收集形成有组织粉尘。

5.分选及筛分设备,如风选机、振动筛等。因工艺物料自身携带的粉尘通过筛面上的低幅高频振动以及物料间的碰撞而产生粉尘飘散;筛下物到输送带因落差产生冲击造成扬尘。通过有效收集形成有组织粉尘。分选及筛分设备是生产线的重要环节,可通过有效收集形成有组织粉尘。

6.其它堆料区域:骨料堆放区,辅料堆放区、成品堆放区等的物料扬尘高、堆积容积大。由于扬尘高,所以受到气流剪切力比较明显,如果是细微颗粒物料,在此处的粉尘漂浮量将大大增

加；堆积大面积的物料在高温风化作用下使物料表面积产生细微粉尘，微风或震动作用引起大面积的无序、不规则粉尘漂浮。属于无组织粉尘。

本文聚焦于预处理生产线粉尘控制，因此1、6的粉尘暂不讨论。

（二）粉尘特性分析

国际标准化组织规定，粒径小于75 μm的固体悬浮物定义为粉尘。如表1所示，除采样点16外，其余采样点灰尘的中值粒径均小于75 μm，即均为粉尘。根据《环境空气质量标准 (GB3095-1996)》中的定义，将粒径在10 μm以下的颗粒物称为可吸入颗粒物。可吸入颗粒物可经过呼吸系统进入人体并沉积在肺部，甚至可以进入肺泡、血液，进而引起慢性鼻咽炎、慢性支气管炎等疾病。如表1所示，采样点6和采样点10灰尘的中值粒径分别为9.35 μm、10.8 μm，需要引起重视，并增加除尘强度。

表1 各采样点中值粒径分布表

采样点 序号	设备编号	中值粒 径, μm	采样点 序号	设备编号	中值粒 径, μm
1	96-4A	19.2	13	东风选 14.4	23.7
2	72A	18.1	14	西 4.3 4.4	17.9
3	96A	22.0	15	西风选 14.1	28.3
4	96-4B	19.6	16	西 16-31.5	82.7
5	96-6C	20.1	17	东风选 14.3	63.0
6	96-6D	9.35	18	西风选 14.2	27.9
7	96-4C	16.6	19	东 34 35	30.5
8	96-6A	17.3	20	0-10	27.0
9	32-4A	10.8	21	96-6B	26.0
10	32-6B	12.4	22	32-4B	25.4
11	64A	36.4	23	72C	19.1
12	32-6A	19.8			

三、预处理生产线粉尘控制

预处理生产线粉尘控制采用“设施设备密封+负压收尘相结合系统”工艺。根据袋式除尘器的布置方式，可分为分散式、集中式两种方式。

（一）分散式收集

分散式粉尘收集方式是指除尘设施与产生设备就近分散布置，每台除尘设施服务的产生设备较少。它的优点是除尘设施与产生设备间距离短，阻力小，收集效果好；缺点是除尘设施数量较多、布置分散、占地较大、且每个除尘设施产生的粉尘实现集中收集外运的难度较大。

（二）集中式收集

集中式粉尘收集方式是指除尘设施集中布置，每台除尘设施服务一个区域的生产设备，除尘设施与产生设备距离较远。它的优点是除尘设施数量较少、集中布置、占地较小、每个除尘设施产生的粉尘容易实现集中收集外运。缺点是除尘设施与产生设备间距离长，阻力大且分布不均匀，容易产生短流，收集效果较差。

分散式收集与集中式收集方式各有优缺点，且在实际工程中

均得到广泛应用。不管采用哪种收集方式，最核心的是保证收集过程系统各点阻力平衡，不出现短流等现象，使得每个抽尘点维持有效负压，起到有效的收尘效果，收集后的粉尘进入除尘器进行除尘，保证车间粉尘控制效果。

（三）技改前预处理生产线粉尘控制现状

上海市某装修垃圾资源化利用项目预处理生产线主要包括破碎设备（鄂式破碎机、反击式破碎机、剪切式破碎机）、筛分设备（进口双层振动筛、单层振动筛、双层振动筛）、分选设备（两相风选机、折板风选机）、金属分选设备（除铁器、涡电流）和输送设备（皮带输送机、链板输送机）等。装修垃圾进入生产线后随着破碎、输送、分选等设备，因撞击、碰撞、跌落等产生各种粉尘，须采取有效的粉尘控制整体方案，以实现良好的粉尘控制效果。

考虑到厂房面积大，设备多，且不同设备粉尘源强不一致，如反击破设备粉尘产生量大，落差较小的皮带转接口粉尘产生量较小，因此，在没有成熟经验可借鉴的前提下，建设过程采用分散收集方式。预处理生产线共设置21台袋式除尘器，总风量为354500 m³/h，分散布置于预处理生产线各工艺设备附近。根据2021年12月份除尘系统运行测试数据结果显示（表2和表3），吸尘点实际吸风量及除尘器实际处理风量普遍低于原设计要求；车间现场粉尘控制效果仍存在较大提升空间。

表2 现状袋式除尘器实测参数表

序号	除尘器型号	设计风量 (m³/h)	实测风量 (m³/h)	阻力 (Pa)	备注
1	QMC64B	5470	4799	2146	
2	QMC84A	7180	4416		除尘器进口静压 -2595Pa，出口无法测试
3	MC96-6A	42000	29512	1027	管网设计不合理，导致除尘器处理风量不足。
4	QMC96-4A	26000	17300	1045	管网设计不合理，导致除尘器处理风量不足。
5	MC72A	6150	4702		除尘器进口静压 -2315 Pa，出口无法测试
6	MC32-4B	8200	6040		除尘器进口静压 -1992 Pa，出口无法测试

表3 现状部分吸尘点实测风量

序号	吸尘点名称	设计风量 (m³/h)	实测风量 (m³/h)	测点静压 (Pa)	备注
1	两相风选机 14.1出口	13000	13505	-896	QMC96-4C 除尘器
2	88BC受料点	4105	2567	-4155	MC96C 除尘器
3	8BC受料点	4105	2979	-3635	MC96C 除尘器
4	12BC受料点	4105	2206	-919	MC96D 除尘器

项目运营后，预处理生产线收尘和除尘效果不够理想，主要原因是：①部分起尘点缺少收尘罩。装修垃圾物料在转运、破碎、筛分、分离等过程中与空气摩擦而产生大量扬尘，且粉尘中含有一定量纤维，产尘量比预期大。根据国家超低排放要求吸尘罩应设尽设原则，应设置吸尘罩共122个，但目前实际设置仅99个，部分未设收尘设施的扬尘点处于无组织状态，导致粉尘外溢。②收尘罩设置位置不合理，吸尘罩罩口风速太大。例如皮带转运速度快，物料转运高度落差大、皮带转接方向变化大，粉尘收集罩宜设在粉尘集中扩散路径1.5m以内，如果收集点距离太远，则密闭空间内局部粉尘压力太大，容易导致粉尘外溢。现有吸尘罩罩口风速高达5 ~ 20m/s，极易将混杂在物料中的塑料、泡膜、无机纤维等轻物质吸入除尘管道并进入除尘器中，堵塞除尘器下灰装置。③现场粉尘实际情况比预计更大，导致阻力增加，袋式除尘器分散布置导致现有除尘系统各点阻力不平衡，排风互相干扰形成短流，导致粉尘外溢。④部分除尘器配置的回转式星型卸灰阀虽然具备锁气功能，但流道尺寸太小，潮湿的除尘灰很容易被堵塞在卸灰阀中。⑤部分除尘器配置的配重式翻板卸灰阀无锁气功能，卸灰时室外空气从卸灰阀倒灌入除尘器中，从而减少了吸尘点的风量。4台除尘器无卸灰阀，室外空气从卸灰阀倒灌入除尘器中，大大减少了吸尘点的风量。

（四）改造后预处理生产线粉尘控制效果

1. 粉尘控制技改方案

（1）吸尘点技改

吸尘点技改实现吸尘罩全覆盖设置、位置合理、风速合理。

主要措施如下：

①增设吸尘罩23个，总吸尘罩122个，各皮带机受料点、破碎机、振动筛、风选机等预处理生产线所有可能产生粉尘的设施设备均设置吸尘罩，总风量为354500m³/h，与原风量相同。

②调整已有吸尘罩位置，根据每个设施设备产生点的特点，吸尘罩设置在粉尘产生并集中扩散路径1.5m内。

③采用计算机仿真技术，合理设计吸尘罩结构，调整除尘器风机风量，使得吸尘罩罩口风速均匀，且平均风速不超过2.0m/s，罩口负压不超过0.35Pa。

（2）除尘器布置技改

①根据生产线各设施设备粉尘产生强度，按“半集中式”袋式除尘器布置方式把21台除尘器进行重新布置。其中搬迁利旧改造MC64A、MC84A、MC72A共3台除尘器，合并为8-10#除尘器，布置于预处理车间西侧反击式破碎机附近；搬迁利旧改造MC72B、C、MC96A、B、C、D及MC64B共8台除尘器，合并为11-17#除尘器，布置于预处理车间东侧反击式破碎机附近。对8# ~ 17#除尘器，由于搬迁后重新进行组合，为改善除尘器内含尘气体的流动状况并防止局部滤袋磨损过快，各除尘器灰斗上口设置气流分布装置，这些气流分布装置均采用计算机仿真技术设计，除尘器布置改造见表4。

表4 除尘系统配置表

除尘系统编号	处理的吸尘点数量（个）	总处理风量（m ³ /h）	备注
1 [#]	15	41500	利旧改造 MC96-6C 除尘器
2 [#]	14	34500	22、23、24、25与26、27、28、29切换吸尘，故实际吸尘点共计10个，利旧改造 MC96-6D 除尘器
3 [#]	16	41500	利旧改造 MC96-6A 除尘器
4 [#]	24	45000	52、53、54、55、56、57与65、66、67、68、69、70切换吸尘，故实际吸尘点共计18个，利旧改造 MC96-6B 除尘器
5 [#]	4	25500	利旧改造 MC96-4A 除尘器
6 [#]	2	26000	利旧改造 MC96-4B 除尘器
7 [#]	2	26000	利旧改造 MC96-4C 除尘器
8 [#] ~ 10 [#]	6	17000	搬迁利旧改造 MC64A、MC84A、MC72A 共3台除尘器
11 [#] ~ 17 [#]	19	49500	搬迁利旧改造 MC72B、C、MC96A、B、C、D及 MC64B 共8台除尘器
18 [#]	4	9000	利旧改造 QMC32-4B 除尘器
19 [#]	6	15000	搬迁利旧改造 MC32-6B 除尘器
20 [#]	6	15000	搬迁利旧改造 MC32-6A 除尘器
21 [#]	4	9000	利旧改造 QMC32-4A 除尘器
合计	122	354500	

②对利旧除尘器，全部采用口径 DN250×250的电动回转卸灰阀卸灰。为使除尘器下灰顺畅，1# ~ 7#系统除尘器各加设2台振动电机，单台功率90W；8# ~ 21#系统除尘器各加设1台振动电机，单台功率90W。

（3）风管及排气筒技改

①除尘器进出口管道全部采用钢制管道，按管径不同，壁厚选取4 ~ 8mm。改造后将含尘废气管道风速控制在18m/s左右，净化后的管道风速控制在8m/s左右。如表3所示，改造前含尘废气管道风速在14-24m/s之间，净化后管道风速在8-14m/s之间，管道内风速波动比较大。

表5 除尘器净化前后管道风速情况一览表

系统编号	净化前			净化后		
	管径（m）	管道风量（m ³ /h）	管道风速（m/s）	管径（m）	管道风量（m ³ /h）	管道风速（m/s）
QMC32-6	0.28	4560	20.58	1	13680	4.84
	0.4	9120	20.17			
	0.5	13680	19.36			
QMC32-4	0.175	1500	17.33	0.5	8200	11.60
	0.15	1350	21.23			
	0.25	2850	16.13			
	0.32	5300	18.31			
	0.42	8150	16.35			
MC96	0.28	4100	18.50	0.6	8210	8.07
	0.4	8200	18.13			

系统编号	净化前			净化后		
	管径 (m)	管道风 量 (m ³ / h)	管道风 速 (m/ s)	管径 (m)	管道风 量 (m ³ / h)	管道风 速 (m/ s)
MC96	0.32	4100	14.17	0.6	8210	8.07
	0.4	8200	18.13			
MC72	0.32	6150	21.25	0.4	6150	13.60
QMC96-4	0.45	12500	21.84	0.8	26000	14.37
	0.65	26000	21.77			
MC72	0.25	3080	17.44	0.5	6150	8.70
	0.32	6150	21.25			
QMC96-4	0.45	15000	26.21	0.8	26000	14.37
	0.3	5000	19.66			
	0.65	26000	21.77			
MC96	0.28	3280	14.80	0.5	8210	11.62
	0.4	8210	18.16			
MC64	0.32	5470	18.90			
MC84	0.25	3590	20.32			
	0.32	7180	24.81			
MC 96-6	0.8	42000	23.22	1	42000	14.86
MC 96-6	0.8	42000	23.22			
	1.1	84000	24.56			

②将风速过高部分连接的支管直接接入集合箱内，与主管道均接入集合箱后再进入排气筒，集合箱的断面风速控制在2.5m/s左右，这样的好处是可有效降低总管压力，改善排气筒负压不足的现象。

原设计及运营过程，除尘器进出口多个系统净化后的风管直接接入主管道，主管道直径1.5m，净化后风速在8-14m/s之间。接入排气筒的主管道风速如表6所示。

表6接入排气筒的主管道风速情况一览表

序号	总风量 (m ³ /h)	管径 (m)	风速 (m/s)
#7-#8	12300	1.5	1.93
#5-#8	28720	1.5	4.51
#1-#8	72480	1.5	11.40
#10	26000	1.5	4.09
#9-#11	58150	1.5	9.14
#9-#14	100570	1.5	15.81

参考文献

[1] 蒋燕. 市政建筑垃圾资源化利用发展的挑战和机遇 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4(8):183-185.

[2] 李治宏. 上海市建筑垃圾资源化利用现状及发展前景 [J]. 环境卫生工程, 2020, 28(3):49-54.

[3] 上海市人民政府令第57号, 上海市建筑垃圾处置管理规定 [Z].2017年9月18日.

[4] 周骏. 装修垃圾典型处理工艺改进及经济效益分析 [J]. 环境工程, 2023, 41(2):181-187.

[5] 程文, 耿震, 蒋岚岚. 太湖流域某装修垃圾资源化利用工程设计 [J]. 环境卫生工程, 2022, 30(5):94-97.

[6] 郭青, 冯晓兰. 拆除垃圾及装修垃圾处置工艺浅析 [J]. 砖瓦, 2024, (11): 28-30.

[7] 张惠林. 建筑垃圾分选与资源化利用工艺设计研究 [J]. 环境保护与循环经济, 2022, 4-7.

[8] 施庆燕, 余毅, 周可人. 装修垃圾资源化利用的工艺分析与展望 [J]. 环境卫生工程, 2024, 32(3):36-41.

[9] 全国人民代表大会常务委员会, 《中华人民共和国环境保护法》, 2015年1月1日实施.

[10] 全国人民代表大会常务委员会, 《中华人民共和国大气污染防治法》, 2016年1月1日实施.

[11] 上海市环境保护局, 上海市质量技术监督局. 大气污染物综合排放标准 (DB31/933-2015) [S], 2015年12月1日.

[12] 国家卫生健康委员会, 工作场所所有因素职业接触限值 第1部分: 化学有害因素 (GBZ2.1-2019) [S], 2019年8月27日.

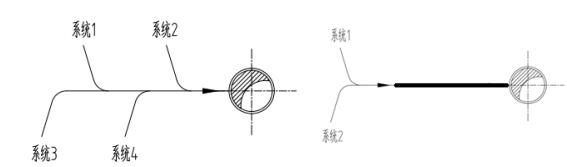


图2 (a) 现有管道示意图和 (b) 改造后管道示意图

③在主风管上新增增压风机，进一步克服总管压力，改善排气筒负压不足的现象。增压风机采用轴流风机，全压约400Pa。

四、结论

预处理生产线粉尘控制采用“设施设备密封+负压收尘相结合系统”工艺。根据袋式除尘器的布置方式1、改造前预处理生产线粉尘控制

(1) 装修垃圾预处理生产线采用设施设备密封+负压收尘相结合系统。

(2) 起尘点均应设置收尘罩，收尘罩位置宜设在粉尘集中扩散路径1.5m以内，收尘罩罩口平均风速不宜超过2.0m/s，罩口负压不宜超过0.35Pa。

(3) 根据粉尘特点相近原则袋式除尘器采用半集中式布置方式。

(4) 通过除尘器风机控制、总排管主风管设增压风机，有效实现净化前、后的排放支管、总管阻力平衡，避免短流等现象，使得每个抽尘点维持有效负压，起到有效的收尘、除尘效果，保证车间粉尘控制效果。

