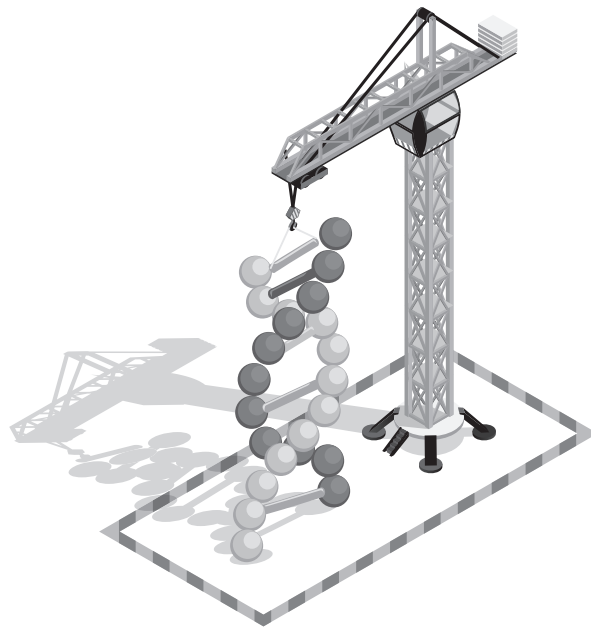


工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第3卷 第8期 2025年8月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

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

网址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

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

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



工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- | | | |
|-----|--|----------------------|
| 001 | 乡村振兴战略下烟台传统村落保护与活化利用的困境及对策
Difficulties and Countermeasures for the Protection and Activation of Traditional Villages in Yantai Under the Rural Revitalization Strategy | 高绪伟
Gao Xuwei |
| 004 | 电梯安装与维保中的工程风险管理: 以科技园项目为例
Engineering Risk Management in Elevator Installation and Maintenance: A Case Study of Science Park Project | 邹健亮
Zou Jianliang |
| 007 | 铁路工程技术管理与施工质量控制策略
Railway Engineering Technology Management and Construction Quality Control Strategies | 鲜永开
Xian Yongkai |
| 010 | 硫铁矿制酸生产过程中的关键技术创新与应用
Key Technological Innovation and Application in Sulfur Iron Ore Acid Production Process | 廖东芳
Liao Dongfang |
| 013 | 建筑工程造价风险因素识别与管控策略研究
Research on Risk Factor Identification and Management Control Strategies in Construction Engineering Cost | 李闻慧
Li Wenhui |
| 016 | 公务机适航维修体系管理难点与解决措施
Difficulties and Solutions in the Management of Airworthiness Maintenance System for Business Jet | 苏毅
Su Yi |
| 019 | 辊压机磨辊表面硬化层厚度对磨损的影响
The Influence of the Thickness of the Hardened Layer on the Surface of the Grinding Roller of the Roller Press on Wear | 严明宏
Yan Minghong |

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

- | | | |
|-----|--|---------------------|
| 022 | 石膏空心条板在公共建筑中的应用分析
Application Analysis of Gypsum Hollow Strip in Public Buildings | 杨榕
Yang Rong |
| 025 | 绿色建筑技术在工程领域的创新研究与应用探索
Innovative Research and Application Exploration of Green Building Technology in Engineering Field | 梁婷丽
Liang Tingli |
| 028 | 再生骨料替代率对绿色混凝土抗冻融性能影响的微观机理分析
Microscopic Mechanism Analysis of the Impact of Recycled Aggregate Replacement Rate on the Freeze-Thaw Resistance of Green Concrete | 李静茹
Li Jingru |
| 031 | 高速公路隧道结构安全性养护研究
Research on Safety Maintenance of Expressway Tunnel Structures | 韩飞
Han Fei |
| 034 | 建筑施工中检验检测技术的应用与质量控制研究
Research on the Application and Quality Control of Testing and Inspection Technology in Building Construction | 张静
Zhang Jing |
| 037 | 修平高速公路路基路面及防护工程设计技术
Design Technology of Subgrade, Pavement and Protection Engineering for Xiuping Expressway | 胡斌
Hu Bin |
| 040 | 公路养护施工安全管理与新材料应用研究
Research on Safety Management and Application of New Materials in Highway Maintenance Construction | 侯森林
Hou Senlin |
| 043 | 日常道路基层材料的粒径分布检测技术
Particle Size Distribution Testing Technology of Daily Road Base Materials | 吕恒
Lv Heng |

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

046	市政给排水管网漏损检测与定位技术研究 Research on Leak Detection and Localization Technology for Municipal Water Supply and Drainage Pipeline Network	刘俊, 张辉 Liu Jun, Zhang Hui
049	YJ27 接装机胶辊压紧装置的改进设计与应用 Improved Design and Application of the Rubber Roller Pressing Device of the YJ27 Filter Rod Joining Machine	张文慧, 张鹏, 闫楷师 Zhang Wenhui, Zhang Peng, Yan Kaishi
053	浅谈剧院给排水设计的若干问题 Several Issues on Water Supply and Drainage Design of Theaters	顾松明 Gu Songming
056	建筑施工与水利工程中的试验检测技术与应用 Experimental Testing Technology and Its Applications in Construction and Water Conservancy Engineering	翟维娟 Zhai Weijuan
059	工业废水处理厂出水水质多指标协同监测与智能预警技术研究 Research on Multi-index Collaborative Monitoring and Intelligent Early Warning Technology of Effluent Quality in Industrial Wastewater Treatment Plants	陈秀芳 Chen Xiufang

电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

062	基于 ITIL 4 的信息服务公司 IT 服务管理 (ITSM) 优化研究 Research on IT Service Management (ITSM) Optimization of Information Service Companies Based on ITIL 4	陈东 Chen Dong
065	液流电池系统装配生产中的研究与应用——以重载多轴桁架机器人自动装配技术为例 Research and Application of Liquid Flow Battery System Assembly Production—Taking Heavy Load Multi-Axis Truss Robot Automatic Assembly Technology as an Example	黄文锋 Huang Wenfeng
068	生物识别技术在自动售检票系统中的应用 Application of Biometric Identification Technology in Automatic Fare Collection System	张岩, 杨秋玲, 张磊 Zhang Yan, Yang Qiuling, Zhang Lei
071	新能源锂电池正极材料生产线设计: 低温蒸发技术与设备腐蚀防护 Design of Cathode Material Production Line for New Energy Lithium Battery: Low Temperature Evaporation Technology and Equipment Corrosion Protection	周海荣 Zhou Hairong
074	化工过程控制系统运维管理: 仪表选型与 PLC/DCS 编程的协同优化 Operation and Maintenance Management of Chemical Process Control Systems: Collaborative Optimization of Instrument Selection and PLC/DCS Programming	刘宇豪 Liu Yuhao
077	基于微纳光学的高分辨率相机成像技术研发与应用 Research and Application of High Resolution Camera Imaging Technology Based on Micro-Nano Optics	郑诚 Zheng Cheng
080	人工智能技术在复杂体系项目管理中的应用与发展趋势 The Application and Development Trends of Artificial Intelligence Technology in Complex System Project Management	杜云飞 Du Yunfei
084	医疗器械售后技术支持: 医院工程师的运维管理策略 Medical Device After-Sales Technical Support: Operation And Maintenance Management Strategy of Hospital Engineers	何汶泽 He Wenze
087	基于暖通空调设计的洁净厂房恒温恒湿系统优化与节能改造实践 Optimization and Energy Saving Transformation of Constant Temperature and Humidity System in Clean Plant Based on Hvac Design	夏卫健 Xia Weijian
090	平板玻璃生产线中机器人技术在自动化装配中的应用与性能评估 Application and Performance Evaluation of Robotics in Automated Assembly of Flat Glass Production Lines	陈太柏 Chen Taibai
093	物联网系统设计与应用: AI 驱动的智能转型路径 IoT System Design and Applications: An AI-Driven Path to Intelligent Transformation	谢铭恩 Xie Ming'en
096	智能网联汽车的智能驾驶感知与决策技术研究 Research on Intelligent Driving Perception and Decision-making Technology of Intelligent Connected Vehicles	张树富 Zhang Shufu
099	固定翼无人机异地起降大范围自动巡检技术设计 Design Of LargeScale Automatic Inspection Technology For Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicles Taking Off And Landing In Different Locations	李宇程, 黄志都, 杨钦 Li Yucheng, Huang Zhidu, Yang Qin
105	垃圾发电厂设备提标改造与技术管理的机械工程路径 Mechanical Engineering Path for Upgrading and Technical Management of Equipment in Waste to Energy Plants	刘毅 Liu Yi

乡村振兴战略下烟台传统村落保护与活化利用的困境及对策

高绪伟

烟台飞龙集团, 山东 烟台 264003

DOI:10.61369/ERA.2025080007

摘 要 : 本研究以烟台传统村落为对象, 探讨乡村振兴战略下其保护与活化利用的困境及对策。研究发现, 烟台传统村落存在资金投入短缺、人才严重匮乏、政策执行不力及自身发展受限等问题, 如资金来源单一、专业人才稀缺、政策体系不完善、产业结构单一等。通过分析中原北街村成功案例, 提出拓宽资金渠道、加强人才培养引进、完善政策体系、挖掘特色资源发展多元产业等对策, 旨在为烟台传统村落保护与活化利用提供理论与实践指导, 推动其可持续发展。

关 键 词 : 乡村振兴; 烟台传统村落保护; 活化利用; 困境对策

Difficulties and Countermeasures for the Protection and Activation of Traditional Villages in Yantai Under the Rural Revitalization Strategy

Gao Xuwei

Yantai Feilong Group, Yantai, Shandong 264003

Abstract : This study focuses on traditional villages in Yantai and explores the difficulties and countermeasures for their protection and activation under the rural revitalization strategy. The research reveals several issues, including a shortage of funding, a severe lack of talent, inadequate policy implementation, and limitations in self-development. Specifically, problems such as a single source of funding, scarcity of professionals, an imperfect policy system, and a homogeneous industrial structure are identified. By analyzing the successful case of Zhongyuan Beijie Village, this study proposes countermeasures such as expanding funding channels, strengthening talent cultivation and introduction, improving the policy system, and tapping into unique resources to develop diversified industries. The aim is to provide theoretical and practical guidance for the protection and activation of traditional villages in Yantai, promoting their sustainable development.

Keywords : rural revitalization; protection of traditional villages in Yantai; activation and utilization; difficulties and countermeasures

引言

在城乡发展失衡的背景下, 乡村振兴战略适时出台。城市快速发展, 而乡村在经济、基建、公共服务等方面落后。该战略围绕产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕五大要点, 旨在全面提升乡村发展水平, 促进城乡融合, 实现共同富裕。乡村振兴战略对传统村落的保护与活化作用重大。传统村落作为乡村文化关键载体, 蕴含丰富历史记忆与地域特色。产业兴旺为其发展特色产业、挖掘经济价值创造条件; 生态宜居推动生态保护与基建升级, 改善人居环境; 乡风文明有利于优秀乡村文化传承; 治理有效提供组织管理保障; 生活富裕明确提升村民生活水平的根本目标。

一、烟台传统村落现状调研

(一) 传统村落保护与活化利用

传统村落是一种多元的文化和自然遗产, 是数千年来遗留下来的珍贵财富, 中华优秀传统文化的根基在于传统村落, 许多重大的历史人物与历史事件都与其息息相关, 中国的优秀传统文化

多数是以乡村为基础的^[1]。传统村落保护, 旨在对村落内具有历史、艺术、科学价值的物质文化遗产, 如传统建筑、历史遗迹等, 以及非物质文化遗产, 如民俗风情、传统技艺等进行系统性维护, 保持其原有风貌与文化内涵, 防止其遭受自然侵蚀或人为破坏。而活化利用则是在保护的基础上, 通过合理的方式对传统村落资源进行开发利用, 赋予其新的生命力与经济价值, 使其能

够适应现代社会发展需求,实现传统村落的可持续发展。活化利用的形式多样,例如发展乡村旅游、开展文化创意产业等,既能促进当地经济发展,又能推动文化的传承与传播。

（二）烟台传统村落分布与保存状况

烟台传统村落的地理分布呈现出一定的特征,多依山傍水,与自然环境相融合。从区域上看,部分村落集中于山区,凭借独特的地形地貌形成了别具一格的风貌;部分则分布于沿海地带,体现出海洋文化与农耕文化的交融。在保存状况方面,不同类型的传统村落存在差异^[2]。一些历史悠久且受到重点保护的傳統村落,其建筑保存相对完好,古建筑群的结构、样式得以较完整地保留,建筑材料也尽可能维持原貌,传统建筑的雕刻、彩绘等细节依然清晰可见,周围环境也较好地保留了自然生态风貌,与村落形成和谐统一的整体。然而,也有部分传统村落,由于自然侵蚀、年久失修以及人为活动的影响,建筑出现了不同程度的损坏,如墙体开裂、屋顶坍塌等,周边环境也因缺乏合理规划,面临着生态破坏的威胁。

（三）人口结构与产业发展

烟台传统村落的人口结构与产业发展现状,深刻影响着村落的保护与活化进程。在人口结构上,老龄化特征明显,青壮年劳动力大量外流,留守群体以老年人和儿童为主。职业分布中,虽仍有村民从事传统农业,但部分已转向旅游业或周边城镇务工。现有产业类型对村落发展利弊并存。传统农业维持着村落基本生活秩序,却因生产效率低,难以满足村民对高品质生活的追求,限制了村落经济增长与保护资金积累。新兴旅游业若合理开发,可带来经济收益,助力传统建筑保护;然而一旦过度商业化,易破坏村落风貌与文化底蕴^[3]。此外,整体产业发展水平滞后,导致村落缺乏吸引力,加剧人才流失,进一步掣肘传统村落的保护与活化利用,亟待探索可持续发展路径。

（四）文化传承情况

烟台传统村落承载着丰富的民俗文化与传统技艺,但当下传承形势严峻。民俗文化以传统节日习俗、民间信仰为代表,多由老年人凭借记忆与生活实践维系,通过口口相传、言传身教在家族邻里间延续。然而,年轻一代因外出求学、务工,对民俗文化兴趣渐失、参与度低,致使传承出现断层。传统木工、石雕、剪纸等技艺同样面临困境。一方面,技艺学习周期长、收益慢,与现代快节奏生活相悖,年轻人不愿投入精力;另一方面,市场需求不足,难以形成规模产业,传承人缺乏经济保障,传承动力匮乏。此外,现代文化的强烈冲击,正不断消解传统村落文化的独特性与原生性,诸多民俗文化与技艺逐渐被淡忘、边缘化,亟待有效保护与传承。

二、乡村振兴战略下烟台传统村落保护与活化利用的困境

（一）资金投入困境

资金是传统村落保护与活化利用工作的基石,然而,当前烟台传统村落在这方面面临严峻挑战。资金短缺严重制约着保护与活化项目的推进,许多传统建筑因缺乏资金得不到及时修缮,传统文化活动也因资金不足难以开展。从资金来源看,较为单一,主要依赖政府财政拨款,社会资本参与度低^[4]。一方面,传统村

落保护与活化项目具有周期长、回报慢的特点,对追求短期利益的社会资本吸引力不足;另一方面,缺乏有效的引导机制与优惠政策,难以激发社会资本投入的积极性。同时,资金分配失衡问题凸显,有限资金多集中于知名村落或重点项目,致使部分具有潜在价值的低知名度传统村落资金匮乏,保护与活化工作推进迟缓,两极分化加剧。

（二）人才短缺困境

专业人才对于传统村落保护与活化利用工作的专业性至关重要。目前,烟台传统村落专业人才匮乏,在保护规划、建筑设计、文化传承创新等方面缺乏专业人才指导,使得相关工作难以达到较高水平。此外,村民作为传统村落主体,其参与积极性不高。一方面,传统村落保护与活化利用工作未充分结合村民实际利益,村民未能从中获得切实经济收益,导致参与动力不足;另一方面,传统村落发展机会有限,难以满足年轻人对职业发展的期望,造成人才流失严重^[5]。年轻人大多选择外出务工或求学,留在村中的多为老年人和儿童,使得传统村落缺乏活力与创新能力,文化传承后继乏人。

（三）政策执行困境

完善的政策体系是传统村落保护与活化利用的重要保障,但当前政策体系不完善对烟台传统村落相关工作形成阻碍。一方面,政策法规不够细化,在一些关键环节缺乏明确操作指南,如传统建筑修缮标准、文化资源开发界限等,导致执行过程中存在模糊地带,难以准确落实政策要求。另一方面,政策执行不到位问题突出,部分地方政府对传统村落保护与活化利用工作重视程度不够,未将相关政策有效传达与执行,存在敷衍塞责现象。同时,监督机制缺失,对政策执行过程与效果缺乏有效监督评估,无法及时发现并纠正执行过程中出现的问题,使得政策难以发挥应有的作用。

（四）村落自身发展局限

烟台部分传统村落地理位置偏远,交通不便,信息流通不畅,增加了保护与活化利用的难度与成本。偏远的区位条件限制了与外界的交流合作,难以吸引游客、投资者等,制约了乡村旅游、特色产业等发展。同时,产业结构单一也是传统村落发展的瓶颈。多数传统村落以农业为主要产业,附加值低,经济增长缓慢,无法为保护与活化利用提供充足经济支持。而且,单一产业结构抗风险能力弱,一旦遭遇自然灾害或市场波动,将对传统村落经济造成沉重打击,进一步削弱其自身发展动力。此外,传统村落自身发展理念滞后,缺乏创新意识与市场敏锐度,未能充分挖掘自身特色资源,难以适应现代市场需求,导致发展动力不足^[6]。

三、传统村落保护与活化利用成功案例分析

（一）中原地区的北街村

中原地区的河南省平顶山市郏县冢头镇北街村,在传统村落保护与活化利用方面成果突出,探索出独特的内生发展模式。该村依托丰富的人口资源,以劳务经济反哺村落建设,形成可持续发展闭环。村内将临街老宅改造为商业街,繁荣的传统服务业既满足居民日常需求,又拓宽就业渠道,带动群众增收。居民投身消费型服务业所获收入,有效填补了村落经济缺口。深厚的农耕文明底蕴,加之旺盛的人力资源,成为北街村持久发展的动力源

泉。自改革开放以来，劳动力积极参与区域经济建设，释放人口红利，务工经济构建起内生造血机制。在基层党组织引领下，北街村提升就业质量、夯实产业基础，走出一条特色鲜明的传统村落振兴之路^[7]。

（二）对烟台传统村落的启示

结合烟台传统村落实际情况，国内外成功案例为其保护与活化利用提供了多方面启示。在资金筹集方面，烟台可学习乌镇吸引社会资本参与的模式，通过打造具有吸引力的旅游项目，吸引企业投资传统村落的开发与运营；同时，借鉴宏村发展村集体经济的方式，整合村落资源，以集体经济的收益反哺传统村落保护与活化项目。在人才培养上，烟台应像宏村一样，加强对本土居民的培训，提高其对本地文化的认知与传承能力，培养一批懂文化、会经营的本土人才；此外，参考丽江古城吸引文化创意人才的做法，制定优惠政策，引进专业的文化创意人才，为传统村落注入新的活力^[8]。在政策制定方面，烟台需完善相关政策法规，明确传统村落保护与活化的方向、标准与责任主体，同时加强政策执行的监督力度，确保政策能够有效落实，为传统村落保护与活化利用营造良好的政策环境，推动烟台传统村落实现可持续发展。

四、乡村振兴战略下烟台传统村落保护与活化利用的对策

（一）拓宽资金渠道

为解决资金投入困境，烟台传统村落可通过多种途径拓宽资金来源。一方面，吸引社会资本参与传统村落保护与活化项目。社会资本具有灵活性和创新性，可通过与地方政府或村集体合作，以 PPP 模式（政府和社会资本合作）等参与传统村落的旅游开发、文化设施建设等项目，实现互利共赢。另一方面，积极争取政府专项基金支持。政府在传统村落保护中应发挥主导作用，设立专项基金用于传统建筑修缮、文化传承保护等关键领域。此外，发展村集体经济也是重要途径。村集体可整合内部资源，如闲置土地、房屋等，通过发展特色产业，如农产品加工、乡村旅游服务等，增加村集体收入，为传统村落保护与活化提供持续资金支持。

（二）加强人才培养与引进

针对人才短缺困境，需从培养本土人才和引进专业人才两方面

着手。培养本土人才方面，可开展针对村民的培训项目，如传统技艺培训、旅游服务技能培训等，提高村民的专业素养和参与能力，使其成为传统村落保护与活化的主力军^[9]。同时，建立激励机制，对积极参与传统村落保护与活化工作的村民给予物质和精神奖励，提高其参与积极性。引进专业人才方面，制定优惠政策，吸引文化、旅游、规划等领域的专业人才投身传统村落建设。

（三）完善政策体系与加强执行监督

完善政策体系是保障传统村落保护与活化利用的关键。制定全面、细致的政策法规，明确保护范围、标准、措施以及活化利用方向与方式，能为各项工作提供清晰指引，实现有法可依、有章可循。在此基础上，加强政策执行监督力度同样重要。通过建立专门监督机构，定期检查评估执行情况，可及时发现并纠正偏差；与此同时，设立举报热线、网络平台等渠道，鼓励村民和社会各界参与监督，能进一步确保政策有效落实，为传统村落保护与活化利用营造良好的政策环境。

（四）挖掘特色资源与发展多元产业

烟台传统村落拥有丰富的特色资源，应深入挖掘并发展多元产业。在乡村旅游方面，依托独特的自然风光、传统建筑和民俗文化，开发特色旅游线路，打造乡村旅游品牌，吸引更多游客。例如，利用烟台的海滨资源，开发渔村风情旅游；结合山区传统村落，开展生态休闲旅游等^[10]。特色农业也是重要方向，根据当地气候和土壤条件，发展特色农产品种植、养殖，并进行深加工，提高农产品附加值。此外，文化创意产业具有广阔前景，可将传统技艺、民俗文化与现代创意相结合，开发具有地方特色的文化创意产品。

五、结束语

烟台传统村落承载着地域文化与历史记忆，在乡村振兴战略下，其保护与活化利用机遇与挑战并存。资金短缺、人才匮乏、政策执行不畅及自身发展受限等问题，严重阻碍可持续发展进程。对此，可借鉴国内外成功经验，通过创新资金筹集、构建人才机制、完善政策体系、发展多元产业等措施，突破发展瓶颈。未来需继续深化研究、优化路径，推动烟台传统村落发展，为乡村振兴提供有力支撑。

参考文献

[1] 任利平. 乡村振兴战略下传统村落保护及发展策略研究——以沙河市为例 [J]. 村委主任, 2024, (03): 130-132.
[2] 王慧. 历史文化名村的保护开发和利用策略探究——以烟台历史文化名村为例 [J]. 炎黄地理, 2023, (06): 89-91.
[3] 王宁, 李奥成, 李阳. 乡村振兴背景下的传统村落的保护与发展——以安河村为例 [J]. 居业, 2024, (01): 191-193.
[4] 袁金鸽. 乡村振兴战略下传统村落活化研究——以小店河村为例 [J]. 中国集体经济, 2021, (10): 1-3.
[5] 逯海勇, 胡海燕, 张成秀. 内生发展视域下传统村落保护发展与路向选择研究 [J]. 安徽农业科学, 2024, 52(13): 163-166.
[6] 方蓉, 何启鸣, 申珈瑞. 乡村振兴战略下传统村落的保护与振兴研究——以湛江市旧县村为例 [J]. 创意设计源, 2023, (03): 27-33.
[7] 许少辉, 董丽萍. 乡村振兴战略下传统村落的保护发展——基于活态传承和活化复兴的视角 [J]. 沈阳大学学报 (社会科学版), 2021, 23(05): 575-579. DOI: 10.16103/j.cnki.21-1582/c.2021.05.013.
[8] 蔡清. 乡村振兴战略下传统村落文化保护与活化研究——以平顶山市为例 [J]. 农村经济与科技, 2022, 33(19): 105-108.
[9] 连华, 宁雷, 张铭驿. 乡村振兴战略背景下传统村落保护策略研究——以甘肃省为例 [J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(09): 57-62.
[10] 刘莉. 乡村振兴战略视野下赣州传统古村落的保护与利用 [J]. 居舍, 2022, (22): 174-177+180.

电梯安装与维保中的工程风险管理：以科技园项目为例

邹健亮

广东孚嘉电梯工程有限公司，广东 佛山 528200

DOI:10.61369/ERA.2025080013

摘 要： 科技园电梯工程风险管理需应对高频负荷、多业态场景及技术集成等特殊风险，通过德尔菲法、故障树分析（FTA）识别安装阶段的导轨偏移与电气故障，结合物联网监测与预防性维保策略实现风险控制。动态监控体系依托 BIM+GIS 技术联动构建多维度指标库，PDCA 循环优化资源分配与审计机制，区块链技术则强化业主、物业、维保企业的责任追溯。研究表明，人工智能与数字孪生技术可突破物理限制，预判长周期风险，为复杂场景电梯工程提供“监测－模拟－决策”一体化解决方案。

关 键 词： 电梯工程风险管理；科技园项目；动态监控体系

Engineering Risk Management in Elevator Installation and Maintenance: A Case Study of Science Park Project

Zou Jianliang

Guangdong Fugia Elevator Engineering Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528200

Abstract： Risk management in science park elevator projects needs to address special risks such as high-frequency load, multi-format business scenarios, and technological integration. The Delphi method and Fault Tree Analysis (FTA) are used to identify track misalignment and electrical faults during the installation phase. Risk control is achieved by combining Internet of Things (IoT) monitoring with preventive maintenance strategies. A dynamic monitoring system is constructed by linking Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS) technologies to build a multi-dimensional indicator database. The PDCA cycle optimizes resource allocation and audit mechanisms, while blockchain technology strengthens the accountability of property owners, property management companies, and maintenance enterprises. The study shows that artificial intelligence and digital twin technologies can break through physical limitations to predict long-term risks and provide an integrated “monitoring-simulation-decision” solution for complex elevator projects.

Keywords： elevator project risk management; science park project; dynamic monitoring system

引言

随着城市化进程和科技园区集约化发展，电梯作为高层建筑的关键设施，其安全性和风险管理对园区运营与人员安全至关重要。科技园项目因高强度使用、多业态场景及智能化需求，面临机械负荷超限、协作壁垒、系统兼容性等特殊风险，传统管理模式难以应对。国内外研究已转向全生命周期风险管理，采用德尔菲法、故障树分析等工具，以及物联网监测和大数据驱动的预防性维保等技术，但系统化治理仍显不足。以某科技园为例，典型风险包括导轨偏移、门系统失调和电气故障等，亟需构建适配性风险管理框架。西安市市场监管局推出的《电梯智慧监管平台》通过数字化手段实现风险预警与闭环处置，推动“技防”替代“人防”，为风险管理提供了政策支持和技术范式。

一、电梯工程风险管理的核心特征与挑战

（一）科技园电梯工程的特殊性

科技园电梯工程的特殊性源于其高强度使用需求与多业态复合场景的叠加效应^[1]。作为集办公、研发、实验等多功能于一体的垂直空间载体，科技园电梯日均运行频次可达普通商业建筑的

1.5–2 倍，设备长期处于高频启停、满载运行状态，加速机械部件磨损并引发导轨偏移、曳引系统过热等负荷型故障。同时，园区内实验室、数据中心等特殊场景对电梯温湿度、电磁屏蔽性能提出差异化需求，而地下设备层潮湿环境与地上高层区域气流扰动进一步加剧电气元件老化风险。多业态场景还导致安全管理标准碎片化，例如生物实验室需规避振动干扰，而物流仓储区需满足

大件设备运输需求，此类矛盾要求电梯系统在设计与运维阶段实现动态适配，显著提升安全管理复杂度。

（二）风险管理的核心挑战

科技园电梯工程风险管理面临技术集成与多主体协作挑战。智能化改造中，电梯系统与楼宇自动化、消防联动等存在协议兼容性问题，物联网数据冲突可能引发误报警或系统宕机。尽管2025年西安市《电梯智慧监管平台》政策强调数据互通，跨平台接口标准化仍在探索。设计方、施工方和维保单位目标冲突导致责任边界模糊，如导轨安装精度不足问题可能源于设计计算偏差或施工缺陷，维保周期设置不合理加剧隐性故障积累^[9]。需通过权责清单与全流程追溯机制解决这些协作盲区，确保系统稳定运行及高效管理。

二、电梯安装阶段的风险识别与评估

（一）风险识别方法

电梯安装阶段的风险识别需结合定性分析与定量工具。德尔菲法通过多轮匿名专家咨询，可系统性识别导轨安装精度不足、门机控制系统参数设置偏差等技术风险，其匿名反馈机制有效规避主观干扰，特别适用于智能化电梯模块兼容性等前沿问题研判^[9]。故障树分析法（FTA）则以门系统失调等终端故障为顶事件，逐层分解机械装配误差、传感器校准失准等底层诱因，量化计算各风险路径发生概率，为安装流程标准化提供数据支撑。例如，某科技园项目通过FTA锁定导轨焊接应力释放不充分为关键风险节点，针对性优化预紧力检测流程，使安装合格率提升12%。

（二）科技园项目案例分析

某科技园超高层电梯安装过程中，导轨垂直度偏差超过0.5mm/m的设计阈值，导致轿厢运行抖动并加速导轨磨损，追溯发现施工方未按规定使用激光校准仪，暴露出工艺执行监管漏洞。另一案例中，地下室电梯控制柜因未配置防潮涂层，在湿度超80%的环境下出现接触器氧化短路，引发困人事故。此类环境风险与《电梯智慧监管平台》政策强调的“环境适应性预判”要求形成鲜明对比，凸显安装阶段需集成物联网传感器实时监测环境参数，并通过BIM模型模拟不同工况下的设备性能衰减曲线，实现风险前置防控^[4]。

三、电梯维保阶段的风险控制措施

（一）技术性风险控制

1. 智能化监测技术应用

物联网传感器通过实时采集曳引机振动频谱（频率范围0-10kHz）、制动器表面温度（阈值 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ）及钢丝绳微应变（ $< 200\mu\epsilon$ ）等参数，构建电梯健康状态数字画像。西安市《电梯智慧监管平台》政策要求2025年前实现监测数据分钟级上传，当振动幅值超过 $5\mu\text{m}$ 或温度梯度异常时，系统自动触发三级预警机制（提示-报警-停机）。某科技园项目部署多物理场耦合

传感器后，轴承磨损预警准确率提升至92%，故障平均响应时间缩短至12分钟。该技术突破传统人工巡检的时空限制，通过边缘计算实现本地化风险研判，减少云端数据传输延迟导致的误判风险^[5]。

2. 预防性维保策略

基于设备运行数据与外部环境参数的关联分析，构建维保周期动态调整模型。利用随机森林算法分析历史故障数据，识别门机控制系统故障与日均启停次数的非线性关系（ $R^2=0.87$ ），将润滑周期从固定30天调整为负载强度自适应模式。某案例显示，该策略使超高层电梯钢丝绳更换间隔从12万次延长至15万次运行，维保成本降低24%。2025年政策推动的“电梯全生命周期数据湖”建设，整合设计、安装、运维数据，通过LSTM神经网络预测部件剩余寿命，实现备件库存的JIT管理模式，库存周转率提升35%。

（二）管理性风险控制

1. 标准化维保流程设计

ISO 18738标准在科技园项目的实施体现为作业流程的颗粒化分解，将维保任务拆解为58项标准化动作，每项动作配备图文指引与误差容限值^[6]。例如，制动器间隙调整需控制在0.15-0.25mm区间，并使用激光测距仪复核数据。AR辅助维保系统通过智能眼镜投射三维拆装指引，某试点项目数据显示，新手技术员操作失误率从18%降至5%。政策要求的“电子工单签核”系统强制记录每项操作的时间戳与执行人，结合区块链技术固化流程证据链，使质量追溯准确率达100%。

2. 应急预案与演练

应急预案体系采用“场景-动作-资源”三维构建模式，针对困人、火灾、水浸等12类场景设计分级响应流程。BIM模型模拟电梯井道烟气扩散路径，结合GIS定位最近救援站点，确保黄金15分钟救援时效。2025年政策规定“年度实战演练覆盖率100%”，某科技园通过混合现实（MR）技术构建电梯坠降模拟场景，训练技术人员在6级震感下的应急操作能力^[7]。演练数据接入监管平台分析响应时效，结果显示困人事件平均处置时间从28分钟压缩至19分钟，较国家标准提升32%。预案更新机制要求每次故障处置后72小时内完成案例库迭代，确保应急策略动态进化。

四、科技园电梯工程风险管理的持续改进机制

（一）动态风险监控体系构建

1. 多维度风险指标库的建立

科技园电梯工程风险指标库需覆盖技术性能、环境适配及人为操作三类核心维度。技术维度量化导轨垂直度偏差（ $\leq 0.3\text{mm/m}$ ）、曳引机振动幅值（ $< 5\mu\text{m}$ ）等关键参数，环境维度设定地下室湿度阈值（ $\text{RH} \leq 75\%$ ）、电磁干扰强度（ $< 10\text{V/m}$ ）等约束条件，人为维度则统计维保人员操作失误率（ ≤ 0.5 次/月）与应急响应时效（ < 15 分钟）。通过西安市《电梯智慧监管平台》政策要求的“风险数据双向推送”机制，指标库实时接入传感器

数据与运维记录，动态修正风险预警基线。例如，某科技园项目通过分析历史数据，将门系统失调风险阈值从 $\pm 5\text{mm}$ 调整为 $\pm 3\text{mm}$ ，故障率降低 22%，体现指标库的动态优化价值^[8]。

2. 信息化管理平台的集成应用

BIM 与 GIS 技术的协同应用构建了电梯风险管理的三维数字孪生体系。BIM 模型集成设备规格、安装参数及维修记录，GIS 系统则映射电梯空间分布与周边地质、水文环境数据，实现风险可视化定位。例如，通过 BIM 模拟地下室渗水场景，结合 GIS 实时监测地下水位变化，可预判电气柜受潮概率并触发自动除湿指令^[9]。西安市 2025 年政策推动的“BIM+GIS 监管驾驶舱”试点项目显示，该技术使故障定位效率提升 40%，维修成本下降 18%。平台还支持跨部门数据共享，物业可通过移动终端调取电梯健康状况，维保企业依据预警工单优化资源调度，形成风险管控闭环。

（二）PDCA 循环在风险管理中的应用

1. 计划阶段：风险优先级排序与资源分配

计划阶段采用风险矩阵法量化风险等级，结合故障树分析（FTA）识别导轨偏移、电气故障等高危节点。基于“后果严重性 \times 发生概率”公式，将资源向高风险项倾斜，例如某科技园项目将 70% 监测预算分配给导轨系统与地下层设备。2025 年政策要求的“年度风险评估覆盖率 100%”推动建立风险数据库，通过蒙特卡洛模拟预测不同资源配置方案下的剩余风险值，优化预算分配逻辑。计划还需与 ISO 18738 标准对接，明确维保周期、检测项目等执行基准，确保风险防控目标可量化、可追溯。

2. 执行与检查阶段：定期审计与第三方评估

执行阶段通过季度审计制度验证措施有效性，采用振动频谱分析、红外热成像等技术手段检测导轨磨损、接触器老化等隐患。检查环节引入第三方评估机构，依据《电梯智慧监管平台》数据接口调用运行日志、故障记录，利用统计过程控制（SPC）分析维保质量稳定性。某案例显示，第三方评估发现 23% 的维保工单未达标准响应时间，倒逼企业重构调度算法。政策强制要求的“区块链存证”技术固化审计痕迹，防止数据篡改，同时通过对比计划与执行偏差率（如导轨校准合格率从 82% 提升至

95%），为改进阶段提供数据支撑。

（三）利益相关方协同机制

1. 业主、物业与维保企业的责任划分

业主需在采购合同中明确电梯安全投入占比（ $\geq 8\%$ 设备总值），物业依托物联网平台监控维保时效与工单完成度，维保企业则对技术故障负直接责任。西安市 2025 年政策推行“区块链责任追溯系统”，将施工日志、巡检记录等数据上链，解决传统纸质记录易丢失导致的权责纠纷。例如，某项目导轨偏移事故中，区块链存证的施工校准数据证明责任归属安装方，索赔效率提升 60%。三方还需签订风险共担协议，约定地下室环境风险由物业主导防控、机械故障由维保企业限时修复，形成责任闭环。

2. 培训与考核体系优化

构建“培训 - 考核 - 授权”一体化管理体系，采用 AR 模拟故障场景进行季度实操考核，未达标者触发在线复训^[10]。技能档案与特种设备作业人员数据库联动，证书到期前三个月启动续期培训，确保能力匹配。西安市政策要求 2025 年前实现 AI 监考全覆盖，通过行为识别算法判定操作规范性，在试点中 AI 识别出违规操作如未使用扭矩扳手，促进技能提升。引入“技能信用积分”制度，积分不足者限制承接高风险项目，推动维保人员从“持证上岗”向“能力上岗”转型，确保持续的专业能力和安全标准。

五、总结

科技园电梯工程风险管理的核心矛盾在于设备高频负荷与长效可靠性、技术迭代与标准滞后、多主体利益博弈与责任真空的失衡。解决路径包括动态风险监控体系、PDCA 循环优化及区块链协同机制，形成“监测 - 决策 - 执行 - 反馈”闭环。实践上推进物联网传感器与 BIM-GIS 联动、ISO 标准与政策衔接及安全考核与 AR 培训。人工智能预测风险传导，数字孪生技术模拟长周期风险，构建“物理 - 数字”双空间协同管控体系，为超高层电梯工程提供前瞻性保障。

参考文献

- [1] 田苏钱. 电梯维保工程项目的风险管理研究 [D]. 江苏：苏州大学，2014.
- [2] 黄文，徐颂. 电梯维保工程多项目管理资源优化问题的研究 [J]. 项目管理技术，2011(4):6.
- [3] 张活安. 电梯安装维保与管理使用中存在的安全问题及对策 [J]. 价值工程，2017，36(11):3.
- [4] 宋文彬，马琳，苏丹，等. 电梯安装维保管理中存在的安全问题及对策 [J]. 设备管理与维修，2021，(02):20-21.
- [5] 张家磊. 基于项目管理的电梯安装业务流程优化研究——以 K 项目为例 [D]. 南京工业大学，2022.
- [6] 宋涛韬. 电梯安装维保与管理使用中存在的安全问题及对策 [J]. 建筑工程技术与设计，2018，000(014):4136.
- [7] 黄昕. 电梯维保改使用住宅专项维修资金的现状及对策分析 [J]. 现代物业（中旬刊），2019，(12):6-7.
- [8] 王宏军. 电梯安装维保管理中存在的安全问题及对策 [J]. 数码设计（上），2019(5).
- [9] 曾承诚. 电梯维保工程项目的风险管理研究 [J]. 大众标准化，2022(2):166-168.
- [10] 刘华龙. 电梯安装维保与管理使用中存在的安全问题及对策分析 [J]. 中华建设，2022(14).

铁路工程技术管理与施工质量控制策略

鲜永开

四川省铁路建设有限公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080018

摘 要 : 本研究系统探讨铁路工程技术管理与施工质量控制策略, 分析技术管理体系优化、施工过程控制等关键环节, 提出基于PDCA循环的全过程质量管理方法。针对路基轨道、桥梁隧道等关键工程部位, 研究质量控制要点与质量事故处理机制, 结合《交通强国建设纲要》等政策要求, 探索智能化技术在质量管控中的应用路径, 为提升铁路工程建设质量提供理论支撑和实践指导。

关 键 词 : 铁路工程; 技术管理; 质量控制

Railway Engineering Technology Management and Construction Quality Control Strategies

Xian Yongkai

Sichuan Railway Construction Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : This study systematically explores the technical management and construction quality control strategies of railway engineering, analyzes key links such as the optimization of the technical management system and the control of the construction process, and proposes a full-process quality management method based on the PDCA cycle. For key engineering parts such as roadbeds, tracks, Bridges and tunnels, the key points of quality control and the mechanism for handling quality accidents are studied. In combination with policy requirements such as the "Outline for the Construction of a Transportation Powerhouse", the application paths of intelligent technologies in quality control are explored to provide theoretical support and practical guidance for improving the quality of railway engineering construction.

Keywords : railway engineering; technical management; quality control

引言

铁路工程作为国家基础设施建设的核心组成部分, 其技术管理与施工质量直接关系到运输安全、工程寿命和社会经济效益。随着《交通强国建设纲要》(2019年)和《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》(2021年)的深入实施, 铁路工程建设面临更高标准的质量要求和技术创新需求。当前铁路工程呈现大规模、高速度、智能化的发展趋势, 复杂地质条件下的长大干线、高速铁路等重点项目对工程技术管理提出了全新挑战。施工质量控制作为工程建设的核心环节, 需要建立更加科学、系统的管理体系。通过分析铁路工程技术管理的关键要素和施工质量的影响因素, 探索有效的质量控制策略, 对提升工程建设品质、保障运营安全具有重要意义。本研究立足于行业最新发展需求, 结合政策导向, 系统探讨铁路工程技术管理与质量控制的优化路径, 为行业高质量发展提供理论参考和实践指导。

一、铁路工程技术管理的基本理论

(一) 技术管理的概念与内涵

技术管理是指在工程项目实施过程中, 通过科学的方法和系统的措施, 对技术活动进行规划、组织、协调与控制, 以确保工程质量和效率的最优化^[1]。其核心要素包括技术标准的制定、技术资源的配置、技术流程的优化以及技术风险的防控^[2]。铁路工程技术管理相较于一般工程项目具有显著的特殊性, 主要体现在工程规模庞大、技术复杂度高、施工环境多变以及安全要求严格等方

面^[3]。铁路工程涉及路基、轨道、桥梁、隧道等多个专业领域, 需统筹协调不同技术环节, 同时需符合国家铁路行业强制性标准, 确保工程的长期稳定性和安全性^[4]。

(二) 技术管理的主要内容

技术标准与规范的制定与执行是铁路工程技术管理的基础, 涵盖设计规范、施工工艺标准、材料验收要求等, 确保工程各环节符合行业规定^[5]。严格执行技术标准可减少施工偏差, 提高工程质量。施工工艺与技术创新管理是提升工程效率和质量的关键, 包括新工艺、新材料、新设备的引入与应用。技术创新需结合工

程实际需求，通过试验验证和优化改进，确保技术可行性与经济性。在铁路工程建设中，技术创新不仅可提高施工效率，还能降低工程成本，推动行业技术进步。

二、铁路工程施工质量的影响因素分析

（一）人为因素

施工人员的技术水平直接影响工程质量的实现程度，专业素质不足易导致施工工艺执行偏差和质量缺陷^[6]。责任意识的强弱决定了施工过程中质量标准的落实程度，缺乏责任心操作可能引发质量隐患^[7]。管理人员的组织能力关系到施工资源的合理配置，协调能力不足将影响各工序的有效衔接。现场管理团队的技术决策水平对处理突发质量问题具有关键作用，不当的应对措施可能扩大质量风险。施工人员的持续培训机制对提升整体技术水平具有重要作用，培训不足将制约质量控制效果。

（二）材料与设备因素

原材料的质量达标是确保工程实体质量的基础条件，不合格材料会直接影响结构强度和耐久性^[8]。材料供应的稳定性关系到施工进度的可控性，供应中断可能导致工艺间断而产生质量缺陷。施工机械的性能状态决定了工艺参数的实现精度，设备老化会降低施工质量稳定性。规范的维护管理能够保持设备最佳工作状态，维护不及时可能引发施工精度偏差。先进设备的合理应用对提升施工质量具有显著促进作用，但需配套相应的操作培训和技术支持。材料进场检验制度的严格执行是控制原材料质量的关键环节，检验疏漏将埋下质量隐患。

三、铁路工程技术管理的关键策略

（一）技术管理体系优化

1. 建立完善的技术管理制度

完善的技术管理制度是确保铁路工程质量和进度的重要保障，需要建立覆盖设计、施工、验收全过程的技术标准体系^[9]。技术管理制度应当明确技术交底的程序要求，确保施工人员准确理解设计意图和技术标准。通过建立分级技术审查机制，可以有效控制施工方案的质量风险。实施动态的技术巡查制度能够及时发现现场技术问题，避免质量缺陷的积累。建立可追溯的技术档案系统，为工程质量终身责任制提供依据。定期开展技术培训考核，持续提升技术人员专业能力。

2. 引入信息化管理手段

BIM 技术的应用实现了铁路工程从二维设计向三维可视化的转变，大幅提升了设计质量和效率。基于 BIM 的碰撞检测功能可以提前发现专业间的设计冲突，减少施工变更^[10]。利用 BIM 平台进行施工模拟，能够优化施工组织 and 资源配置。通过移动终端实现现场质量数据的实时采集和上传，提高了质量管理的时效性。BIM 技术与 GIS 系统的结合，为长大铁路线路工程提供了更精准的空间管理手段。建立基于 BIM 的运维管理系统，延长了技术管理的价值链。

（二）施工过程技术控制

1. 关键施工环节的技术交底与监督

技术交底是确保施工质量的基础环节，针对桥梁架设、隧道开挖、轨道铺设等关键工序，必须实施多层次的技术交底制度。交底内容应当包括设计意图、工艺标准、质量要求和安全措施等核心要素，采用书面交底与现场示范相结合的方式确保施工人员准确理解技术要求。建立专业监理团队对关键工序实施全过程监督，重点监控工艺参数执行情况和质量标准符合度。运用现代检测技术对隐蔽工程和特殊部位进行质量验证，形成完整的监督记录。实施技术人员现场值班制度，确保能够及时解决施工过程中的技术问题，避免因理解偏差导致的质量缺陷。

2. 动态调整施工方案以应对技术难题

铁路工程施工常面临地质条件变化、环境因素影响等不确定因素，需要建立灵活的施工方案调整机制。组建专业技术攻关团队实时监测施工工况变化，运用工程类比法和数值模拟等手段预判技术风险。针对突发技术问题启动快速响应程序，组织设计、施工、监理多方会商确定解决方案。建立方案变更的分级审批制度，在保证工程质量和安全的前提下优化施工工艺。运用信息化手段收集和分析施工数据，为方案调整提供科学依据。通过建立技术预案库和专家咨询机制，提升应对复杂技术问题的能力，确保工程顺利推进。

四、铁路工程施工质量控制的具体措施

（一）质量管理体系的构建

1. 制定科学的质量标准与验收规范

科学的质量标准体系是铁路工程质量控制的基础依据，需要结合工程特点制定分部分项工程的质量指标。质量标准应当涵盖材料性能、工艺参数、结构尺寸等关键控制要素，并明确相应的检测方法和频率。验收规范的制定需要考虑不同工程部位的功能要求，建立差异化的验收标准体系。针对特殊地质条件或复杂结构部位，需制定专项质量控制标准。质量标准体系应当保持动态更新，及时吸收新技术和新工艺的要求，确保标准的先进性和适用性。建立标准执行的监督机制，防止标准流于形式。

2. 实施全过程质量监控

PDCA 循环为铁路工程质量控制提供了系统化的管理方法。计划阶段需要明确质量目标、控制重点和保障措施，形成可操作的质量控制方案。实施阶段重点落实工艺标准执行和过程参数控制，建立完整的质量记录体系。检查阶段通过现场检测、试验验证等手段评估质量状况，及时发现偏差问题。处理阶段针对质量问题分析原因并制定改进措施，形成闭环管理。将 PDCA 循环应用于各施工工序和项目管理层级，实现质量控制的持续改进。运用信息化手段提升 PDCA 循环的执行效率，确保质量管理措施的有效落实。

（二）关键施工环节的质量控制

1. 路基与轨道施工质量控制要点

路基工程质量控制需以地基处理与填筑质量为核心，填料环

节严格限定粒径（如碎石类填料最大粒径不超过层厚 2/3），通过重型击实试验确定最佳含水量，每层填筑厚度控制在 30 厘米以内（机械施工）或 20 厘米以内（人工施工），压实度检测频率每 1000 m² 不少于 2 点，辅以动态变形模量（Evd）检测评估深层承载力。轨道施工中，轨枕间距误差需控制在 ±20 毫米内，轨距水平通过轨道几何状态测量仪实现 ±1 毫米级精度调整，钢轨焊接采用接触焊或闪光焊工艺，焊后进行超声波探伤（探伤率 100%）；道砟铺设前需筛分试验确保级配符合 TB/T 2140 标准，每层铺设厚度误差 ≤ 30 毫米，无缝线路锁定轨温需与设计值偏差 ≤ ±5℃，应力放散通过滚筒法或拉伸器法实施，同时建立沉降观测桩（间距 ≤ 50 米）与轨道几何状态监测网，运营期每季度开展形变数据采集分析，为病害预警与维护提供数据支撑。

2. 桥梁与隧道工程的质量保障措施

桥梁工程需重点控制桩基施工质量、混凝土结构耐久性和预应力张拉精度，实施全过程应力应变监测。大跨度桥梁施工应进行线形控制和应力调整，确保成桥状态符合设计要求。隧道工程需加强超前地质预报和围岩监控量测，动态调整支护参数和开挖方法。防水工程质量控制是隧道施工的关键环节，需严格把控防水材料质量和接缝处理工艺。特殊地质条件下的桥梁基础施工和隧道掘进需制定专项质量保障方案，采取针对性的技术措施。建立桥梁隧道健康监测系统，实现施工期和运营期的质量状态跟踪。

（三）质量问题的预防与处理

1. 常见质量问题的成因分析与预防

铁路工程常见质量问题多源于材料缺陷、工艺偏差和管理疏漏三个维度。混凝土结构开裂通常由配合比不当、养护不足或温度应力引起，需通过优化配合比设计、加强养护措施予以预防。路基沉降问题多与地基处理不彻底或压实度不足相关，实施分层检测和补强处理可有效控制。轨道几何尺寸偏差主要源于测量误差或施工精度不足，采用智能精调技术和复核测量制度能够显著改善。焊接缺陷往往因工艺参数控制不当或操作不规范导致，建

立焊工资质管理和工艺评定制度是关键预防措施。防水工程失效常由材料质量不合格或细部处理不到位造成，加强进场检验和节点验收是必要控制手段。建立质量问题案例库，开展预防性技术培训，从源头上减少质量问题的发生。

2. 质量事故的应急处理与整改机制

质量事故应急处理需建立分级响应机制，重大质量事故应立即启动应急预案，组织专家进行技术评估。现场处置遵循 " 控制事态、查明原因、消除隐患 " 的原则，采取临时加固或局部返工等措施防止事故扩大。质量整改实行 " 四不放过 " 原则，即原因未查清不放过、责任未明确不放过、措施未落实不放过、教育未到位不放过。整改方案需经专业技术论证，实施过程进行全程跟踪验证，确保处理效果达到标准要求。建立质量事故档案管理系统，记录事故详情、处理过程和验收结果，为后续工程提供借鉴。定期开展质量事故案例分析会，总结经验教训，完善预防措施，形成持续改进的质量管理循环。

五、总结

铁路工程技术管理与施工质量控制是确保工程安全、耐久和高效运营的核心要素。通过构建完善的技术管理体系，强化技术标准执行与工艺创新，能够有效提升工程建设的规范化水平。施工质量受人为因素、材料设备及环境条件的综合影响，需通过系统性管理措施加以控制。关键施工环节的技术交底与动态方案调整是保障质量的重要手段，而质量管理体系的科学构建为全过程质量控制提供了制度保障。针对路基轨道、桥梁隧道等关键工程部位实施专项质量控制措施，可显著降低质量风险。质量问题的预防与处理机制形成了闭环管理，通过成因分析、应急响应和整改优化，持续提升工程质量管理效能。未来铁路工程建设应进一步融合智能化技术，推动技术管理与质量控制向数字化、精细化方向发展，为铁路工程的高质量建设提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1] 包睿. 关于铁路施工技术管理相关问题探讨 [J]. 科技创业家, 2014(4):1.
- [2] 张浩. 解析铁路施工技术管理相关问题 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 000(025):5018-5019.
- [3] 赵学辉. 浅谈铁道工程施工技术工作管理的要点 [J]. 环球市场, 2017(5):2.
- [4] 汪铭峰. 铁道工程施工技术工作管理的要点 [J]. 安防科技, 2021, 000(024):P.144-144.
- [5] 杜玉宝. 铁道工程施工技术工作管理的要点 [J]. 农家参谋, 2020, No.648(05):157-157.
- [6] 张恒. 浅析铁路工程施工现场质量控制对成本的影响 [J]. 科技风, 2014(21):2.
- [7] 包双玉. 浅谈铁路工程施工中的质量控制 [J]. 科技创新与应用, 2013(5):1.
- [8] 杨惠新. 铁路通信工程施工项目的质量控制 [J]. 通讯世界, 2015(6):3.
- [9] 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.
- [10] 刘建刚. 铁路建设路基工程技术管理方法 [J]. 科技与企业, 2016(5):1.

硫铁矿制酸生产过程中的关键技术创新与应用

廖东芳

韶关市广宝化工有限公司，广东 韶关 512127

DOI:10.61369/ERA.2025080020

摘 要： 介绍硫铁矿制酸生产工艺，包括原料预处理等工序，指出面临原料适应性等问题。阐述研发的新技术，如流态化动态焙烧装置等，提升了效率。还涉及到节能、设备可靠性、智能控制等创新及应用效果，强调可持续发展方向。

关 键 词： 硫铁矿制酸；技术创新；可持续发展

Key Technological Innovation and Application in Sulfur Iron Ore Acid Production Process

Liao Dongfang

Shaoguan Guangbao Chemical Co., LTD., Shaoguan, Guangdong 512127

Abstract： This paper introduces the sulfur-iron ore acid production process, including raw material pretreatment and other procedures, highlighting issues such as raw material adaptability. It elaborates on new technologies developed, such as fluidized dynamic roasting equipment, which have improved efficiency. The paper also discusses innovations and application effects in energy conservation, equipment reliability, and intelligent control, emphasizing the direction of sustainable development.

Keywords： sulfur and iron ore acid production; technological innovation; sustainable development

引言

随着环保要求的日益严格，如2021年实施的《关于加强高耗能、高排放建设项目生态环境源头防控的指导意见》等政策的出台，对工业生产的节能减排、污染治理等方面提出了更高要求。硫铁矿制酸生产作为重要的化工生产过程，面临着原料适应性差、热能利用率低、尾气治理难等诸多问题。在此背景下，该领域不断探索关键技术创新，包括工艺优化、设备升级与智能控制等方面，旨在提高生产效率和产品质量，降低成本，减少污染排放，实现可持续发展，以适应政策导向和市场需求。

一、硫铁矿制酸生产工艺现状分析

（一）典型工艺流程解析

硫铁矿制酸生产工艺主要包括原料预处理、沸腾焙烧、气体净化、转化吸收等核心工序。原料预处理旨在提高硫铁矿的品位和粒度均匀性，为后续焙烧创造良好条件。沸腾焙烧过程中，通过控制温度、空气流量等参数，确保硫铁矿充分反应，提高焙烧效率^[1]。生成的炉气含有杂质，需经过气体净化，去除其中的灰尘、砷、氟等有害物质。转化吸收工序则是将净化后的二氧化硫气体在催化剂作用下转化为三氧化硫，并被浓硫酸吸收，该过程中转化率的控制至关重要，需精准调控温度、压力和气体流量等因素。这些工序紧密衔接，共同构成了硫铁矿制酸的典型工艺流程。

（二）现有技术瓶颈诊断

硫铁矿制酸生产面临诸多技术瓶颈。在原料适应性方面，硫铁矿成分复杂多变，不同产地的矿石品质差异大，导致生产过程中原料处理难度增加，对后续反应稳定性产生影响^[2]。热能利用率

上，传统工艺存在较大的能效损失。反应产生的大量热能未能得到充分有效的利用，部分热量在传递和转换过程中散失，增加了生产成本，降低了生产效益^[2]。尾气治理也是关键问题，传统工艺的尾气中含有二氧化硫等污染物，排放难以达到日益严格的环保标准，对环境造成污染，同时也面临着环保监管的压力^[2]。

二、关键技术创新体系构建

（一）焙烧工艺优化技术

研发流态化动态焙烧装置，其独特的设计使硫铁矿在焙烧过程中能够更充分地地与空气接触，提高反应效率^[3]。同时，智能温控系统的应用确保了焙烧温度的精确控制，避免因温度过高或过低影响硫铁矿的转化。建立基于矿石粒径分布的氧硫比动态调节模型，能够根据矿石粒径的实际情况，实时调整氧硫比，使反应更加充分和高效。这些技术的综合应用，实现了硫铁矿在焙烧工艺中的高效转化，提高了生产效率和产品质量，降低了能源消耗和生产成本，为硫铁矿制酸生产过程带来了显著的技术创新和经济

效益。

（二）余热梯级利用技术

创新设计高温烟气余热发电与中低温热能回收联用系统，充分利用硫铁矿制酸过程中不同温度段的余热。通过合理配置设备和工艺流程，将高温烟气的热能首先用于发电，实现能量的高效转换^[4]。对于中低温热能，采用专门的回收装置进行收集和再利用，例如用于预热原料或提供生产过程中的其他热需求。同时，构建焙烧工序能源网络优化模型，综合考虑各种能源的输入、输出和利用效率，通过优化算法对能源网络进行调整和优化，使得系统整体热效率能够提升至85%以上，有效提高了能源利用水平，降低了生产成本。

三、技术创新对生产效能的提升机制

（一）工艺参数优化效果

1. 焙烧转化率提升路径

在硫铁矿制酸生产中，通过进料粒度控制与反应动力学优化实现了焙烧转化率的显著提升。合适的进料粒度分布可增大反应物接触面积，促进反应进行。同时，对反应动力学的深入研究使得反应条件更精准地匹配，加速了反应速率。例如，通过调整温度、压力及气体流量等参数，依据反应动力学原理，找到最佳平衡点，使硫铁矿有效硫转化率提升至99.2%以上^[5]。这种优化不仅提高了生产效率，还减少了原料浪费，对整个硫铁矿制酸生产过程的经济性和环保性都具有重要意义。

2. 系统能耗降低方案

通过对硫铁矿制酸生产过程中的工艺参数进行优化，实现了显著的效果。例如，对反应温度、压力等关键参数的精确控制，提高了反应的转化率和选择性，从而提升了产品质量和产量。同时，在系统能耗降低方面，实施了一系列有效的方案。其中，热能系统集成改造是关键举措之一，通过合理配置和优化热能利用环节，减少了能源的浪费。这使得单位产品综合能耗大幅下降，降至8.5GJ/t的行业先进水平^[6]，提高了能源利用效率，降低了生产成本，增强了企业在市场中的竞争力。

（二）设备运行稳定性强化

1. 关键设备可靠性设计

开发耐腐蚀合金材料与防结疤装置是关键设备可靠性设计的重要举措。耐腐蚀合金材料能够抵御生产过程中各类腐蚀介质的侵蚀，确保设备的结构完整性和性能稳定性。例如，在转化器等关键设备中使用，可减少因腐蚀导致的设备损坏和故障。防结疤装置则能有效防止物料在设备表面结疤，保持设备的良好传热和传质性能。这不仅提高了设备的运行效率，还降低了设备的维护成本和停机时间。通过这些技术创新，转化器触媒的使用寿命得以延长至5年以上，显著提升了设备的可靠性和生产效能^[7]。

2. 智能控制系统构建

在硫铁矿制酸生产中，智能控制系统构建对设备运行稳定性强化至关重要。通过应用DCS系统实现工艺参数实时优化，能精准控制生产过程中的各项指标。该系统可对温度、压力、流量

等关键参数进行实时监测和反馈调整，确保设备在最佳工况下运行，有效减少因参数波动导致的设备损耗和故障。例如，它能够根据反应的实时情况自动调节物料的进料速度和反应温度，避免因局部过热或物料配比不当引发的设备问题。同时，借助系统的故障诊断功能，可及时发现潜在故障隐患并提前采取措施，从而使设备故障率显著降低至0.3次/月，极大地提升了设备运行的稳定性和可靠性，为生产效能的提升提供了有力保障^[8]。

四、产业化应用实践与效益评估

（一）典型企业应用案例

1. 技改实施方案

该企业在硫铁矿制酸生产过程中，针对关键技术进行了创新应用与工程实施。在原料预处理环节，采用先进的破碎与筛分设备，提高原料粒度均匀性，确保后续反应稳定^[9]。在焙烧工序，引入高效焙烧炉，优化焙烧温度和通风条件，提高硫铁矿的转化率。同时，对制酸系统的净化、转化和吸收等关键步骤进行技术升级。净化过程中，采用新型的洗涤塔和除雾器，有效去除杂质。转化环节，使用高性能催化剂，提升转化效率。在吸收工序，改进吸收塔结构和喷淋系统，提高硫酸产品质量。通过这些技术集成与工程实施路径，企业实现了生产效率提升和产品质量优化。

2. 运行效果跟踪

某典型企业应用硫铁矿制酸生产过程中的关键技术创新后，取得了显著运行效果。改造后，二氧化硫转化率提升2.8个百分点，这意味着原料的利用更加充分，减少了二氧化硫的排放，符合环保要求的同时提高了生产效率^[10]。蒸汽自给率提高至120%，不仅满足了企业自身生产过程中对蒸汽的需求，还有多余的蒸汽可用于其他环节或对外供应，降低了能源成本，增加了企业的经济效益。这些关键指标的改善，充分证明了该技术创新在产业化应用中的可行性和优势，为硫铁矿制酸行业的发展提供了有力的支撑。

（二）经济效益分析

1. 成本节约测算

硫铁矿制酸生产过程中通过关键技术创新实现了显著的成本节约。在原材料方面，通过优化硫铁矿的选取及预处理技术，提高了硫的利用率，降低了硫铁矿的单耗成本。在能源消耗上，采用先进的余热回收系统，将生产过程中产生的大量余热进行有效回收利用，减少了外部能源的输入，降低了能源成本。同时，在设备维护方面，新的防腐耐磨技术及设备优化设计，延长了设备的使用寿命，减少了设备维修和更换的频率，从而节约了设备维护成本。综合各项成本节约措施，实现了吨酸生产成本降低65元，按年产量计算，年新增经济效益超5000万元。

2. 投资回报周期

该硫铁矿制酸生产的技改项目在经济效益方面表现出色，投资回报周期令人瞩目。静态投资回收期缩短至2.8年，这意味着在相对较短的时间内，企业就能收回投资成本。同时，内部收益率

达28.6%，显示出该项目具有较高的盈利能力。这种良好的经济效益得益于生产过程中的关键技术创新。新技术的应用提高了生产效率，降低了生产成本，使得产品在市场上更具竞争力，从而加速了资金的回笼和利润的增长。较短的投资回报周期和较高的内部收益率为企业进一步扩大生产规模、进行技术升级和市场拓展提供了有力的经济支持，也为行业内类似项目的投资决策提供了重要的参考依据。

（三）环境效益评价

1. 污染物减排效果

尾气 SO₂排放浓度稳定控制在100mg/m³ 以下，这一成果在环境效益方面具有重要意义。首先，与国家标准相比，其排放浓度优于国家标准30%，这意味着在硫铁矿制酸生产过程中，大量减少了SO₂向大气环境的排放。SO₂作为一种主要的大气污染物，其减排有助于降低酸雨形成的风险，减轻对土壤、水体以及植被等生态环境要素的酸性损害。其次，稳定的低排放浓度也体现了该生产工艺在环保方面的可靠性和可持续性，为相关产业在满足环保要求的同时实现可持续发展提供了技术支撑和实践范例。

2. 碳足迹优化

在硫铁矿制酸生产过程中，碳足迹优化取得显著成效。能源

结构调整是关键举措之一，通过采用更清洁的能源替代部分传统能源，减少了生产过程中的碳排放源头。同时，CCUS（碳捕集、利用与封存）技术的应用发挥了重要作用。该技术能够有效捕集生产过程中产生的二氧化碳，降低其排放到大气中的量。通过这些措施的综合实施，单位产品碳排放强度得以大幅下降，达到了18%。这不仅有助于企业自身满足环保要求，提升社会形象，还对整个行业的可持续发展具有积极的示范效应，推动硫铁矿制酸产业朝着绿色、低碳的方向迈进。

五、总结

硫铁矿制酸生产过程中，在工艺优化、设备升级与智能控制方面实现关键技术创新。工艺优化提升反应效率与产品质量，设备升级增强生产稳定性与安全性，智能控制提高生产自动化与精准度。这些创新提升行业竞争力，通过降低成本、提高生产效率实现；同时促进绿色发展，减少污染排放，提高资源利用率。未来应聚焦原料多元化利用，降低对单一原料依赖；推动生产过程智能化，提升生产管理水平；实现固废资源化，解决固废处理难题，促进硫铁矿制酸行业可持续发展。

参考文献

[1] 李旺旺. 硫铁矿制酸过程的废稀酸中砷及重金属元素去除及回用研究 [D]. 武汉工程大学, 2014.
[2] 倪境休. 硫铁矿制酸过程中砷的迁移规律 [D]. 武汉工程大学, 2017.
[3] 曾祥福. 硫铁矿制硫酸过程“三废”治理措施可行性分析 [J]. 广东化工, 2023, 50(20): 91-92+98.
[4] 郭冲远. 技术创新、企业生产率与出口增长 [D]. 郑州大学, 2013.
[5] 向莎. 技术创新生态化的伦理审视 [D]. 湖南科技大学, 2013.
[6] 陈竹青. 硫铁矿制酸装置污酸脱砷生产实践 [J]. 硫酸工业, 2020, (05): 43-45.
[7] 曾锦波, 陈文. 硫铁矿制酸余热锅炉的设计特点 [J]. 硫酸工业, 2014, (03): 54-56.
[8] 文丰兴, 赵洪贵. 硫铁矿制酸装置净化污酸硫化除砷生产实践 [J]. 硫酸工业, 2022, (01): 35-37.
[9] 汪勇平, 熊伟. 新型分酸器在硫铁矿制酸装置的应用 [J]. 硫酸工业, 2022, (02): 42-44.
[10] 潘春迪. 硫铁矿制酸产业的困境与对策探索 [J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(15): 14-15.

建筑工程造价风险因素识别与管控策略研究

李闻慧

中铁十九局集团第一工程有限公司, 辽宁 辽阳 111000

DOI:10.61369/ERA.2025080021

摘 要 : 本研究以某工业建筑工程为例, 探讨了建筑工程造价风险的识别与管控策略。通过层次分析法 (AHP) 和德尔菲法, 识别出 10 项最重要的造价风险因素, 将这些风险因素划分为技术、经济、政策和环境四个维度, 并提出了相应的风险规避、转移和缓解策略。通过实际案例分析, 项目方通过签订长期供应合同、详细地质勘察、引入先进施工技术等措施, 成功将材料成本节省约 12.3%, 地基施工成本节省约 9.2%, 施工技术成本节省约 8.7%。研究结果表明, 合理的风险管控策略能够显著降低建筑工程的造价风险, 确保项目顺利进行。

关 键 词 : 建筑工程; 造价风险; 因素识别; 管控策略

Research on Risk Factor Identification and Management Control Strategies in Construction Engineering Cost

Li Wenhui

The First Engineering Co., Ltd. of China Railway 19th Bureau Group, Liaoyang, Liaoning 111000

Abstract : This study takes an industrial construction project as an example to explore the identification and management control strategies of construction cost risks. Through the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Delphi method, ten most important cost risk factors are identified and categorized into four dimensions: technical, economic, policy, and environmental. Corresponding risk avoidance, transfer, and mitigation strategies are proposed. Through practical case analysis, the project team successfully saved about 12.3% of material costs, 9.2% of foundation construction costs, and 8.7% of construction technology costs by signing long-term supply contracts, conducting detailed geological surveys, introducing advanced construction techniques, and other measures. The research results indicate that reasonable risk management and control strategies can significantly reduce the cost risks of construction projects and ensure smooth project progress.

Keywords : construction engineering; cost risk; factor identification; management and control strategies

引言

建筑工程作为城市设施建设的重要组成部分, 其造价管理直接关系到项目的经济效益和社会效益。然而, 建筑工程在实施过程中常常面临诸多不确定性因素, 如材料价格波动、地质条件变化、施工技术难度增加等, 这些因素可能导致工程造价超出预算, 甚至影响工程进度和质量^[1]。因此, 如何有效识别和管控建筑工程的造价风险, 成为当前工程管理领域的重要课题。本研究以某工业建筑工程为例, 系统识别了建筑工程造价的主要风险因素, 并提出了相应的管控策略, 旨在为类似工程项目的造价风险管理提供参考和借鉴。

一、工程概述

以某工业建筑工程为例, 其中项目车间 9 个, 建筑面积地上 119718.9m², 建筑高度: 24.9m, 建筑层数: 地上 5 层, 使用性质: 劳动密集型企业生产加工车间; 宿舍建筑面积: 地上 8447m², 建筑高度: 41.4m, 建筑层数: 地上 11 层, 使用性质: 劳动密集型企业的员工集体宿舍; 食堂建筑面积: 地上 13888.01m², 建筑高度: 20.55m, 建筑层数: 地上 4 层, 使用性质: 食堂。地下车库 (含人防口): 建筑面积: 地上 26.51m², 地

下 10045.29m², 层数: 地上 1 层、地下 1 层, 结构类型: 框架结构。耐火等级: 一级, 建筑高度 3.8m, 物业楼: 建筑面积: 地上 3267.37 m², 层数: 地上 1 层, 地下 1 层, 结构类型: 框架耐火等级: 二级建筑高度: 14.4m。总投资约为 30 亿元, 预计工期为 3 年, 涉及多个施工阶段和复杂的工程技术。基于项目前期勘察结果可知, 项目所在地区地质条件比较复杂, 且施工周期较长, 在施工期间容易受到政策法规、施工技术变更以及施工材料价格波动因素的影响, 依据过往类似工程项目经验, 预测工程造价超出预算约 13.4%。基于此, 工程对造价风险因素进行识别分析, 并基

于识别结果制定对应的风险管控措施。

二、造价风险识别

（一）风险识别方法

在建筑工程造价风险管理中，风险识别方法采用层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）和德尔菲法结合的方法实现定性与定量分析。层次分析法是一种系统化、层次化的分析方法，将复杂的风险因素分解为多个层次，通过定量化的方式评估各风险因素的相对重要性^[9]。工程风险识别中构建了建筑工程造价风险的层次结构模型，将风险分为四个主要层次：目标层、准则层、子准则层和方案层。构建层次结构模型后，采用1-9标度法对各风险因素进行两两比较，计算各因素的权重，通过权重大小反映各风险因素在建筑工程造价风险中的相对重要性。

德尔菲法是一种通过多轮专家问卷调查，逐步收敛意见的定性分析方法，工程造价风险识别期间采用德尔菲法对建筑工程造价风险因素进行识别和排序，具体步骤如下：邀请了14位来自不同领域的专家，包括项目经理、造价工程师、设计专家、材料供应商等，发放了开放式问卷开展第一轮调查，要求列出建筑工程造价的主要风险因素^[9]。根据第一轮问卷的结果初步识别出20个潜在的风险因素。在第二轮问卷中将20个风险因素列出，并要求专家对各因素的重要性进行评分（1-10分，10分为最重要）。根据专家的反馈结果计算各风险因素的平均得分和标准差。在第三轮问卷中，将第二轮的结果反馈给专家，并要求他们根据统计结果重新评估各风险因素的重要性。通过多轮反馈和调整，专家的意见逐渐趋于一致。最终确定了10个最重要的造价风险因素，并对其进行了排序。

（二）风险因素识别

工程首先利用德尔菲法确定风险因素，通过第一轮问卷调查初步识别出了20项潜在的建筑工程造价风险因素。在第二轮和第三轮问卷调查中，将这20项风险因素列出，并要求专家对各因素的重要性进行评分（1-10分，10分为最重要），具体情况如下表1所示：

表1 基于德尔菲法的风险因素评价结果

序号	风险因素	专家评价分值	序号	风险因素	专家评价分值
1	材料价格波动	9.3	11	项目管理不善	6.8
2	地质条件不确定性	8.8	12	供应链中断	6.7
3	施工技术难度	8.5	13	合同管理风险	6.5
4	劳动力成本上涨	8.4	14	通货膨胀	6.1
5	设计变更	8.0	15	汇率波动	5.9
6	环保法规变化	7.9	16	施工安全风险	5.6
7	气候条件变化	7.7	17	技术标准变化	5.3
8	机械设备费用增加	7.4	18	政策支持不足	5.2
9	税收政策调整	7.2	19	市场竞争加剧	5.0
10	施工工艺复杂性	7.1	20	不可抗力事件	4.8

通过多轮反馈和调整，专家的意见逐渐趋于一致，最终确定了10项最重要的造价风险因素，并对其进行了排序。材料价格波动、地质条件不确定性、施工技术难度位列前三，其重要性评分分别为9.3、8.8和8.5。

确定10项风险因素后，利用AHP法将其划分为技术、经济、

政策和环境四个维度，对风险因素影响工程造价进行深入分析，具体情况如下表2所示：

表2 层次分析法模型

目标层	准则层	子准则层	权重
建筑工程造价风险识别	技术风险	施工技术难度	0.42
		设计变更	0.37
		施工工艺复杂性	0.21
	经济风险	材料价格波动	0.48
		劳动力成本上涨	0.32
		机械设备费用增加	0.20
	政策风险	环保法规变化	0.58
		税收政策调整	0.42
	环境风险	地质条件不确定性	0.68
		气候条件变化	0.32

（三）风险因素分析

技术风险因素主要包括施工技术难度、设计变更和施工工艺复杂性等。其中，施工技术难度对工程造价的影响最为显著，工程在深水基础施工中需采用先进的钻孔灌注桩技术，且需应对复杂的水流和地质条件，导致施工周期延长，机械设备使用频率增加，进而推高了工程造价。工程中由于设计阶段未能充分考虑地质条件，施工过程中频繁发生设计变更，导致造价超出预算，不仅增加了施工复杂性，还导致材料浪费和工期延误，进一步推高造价。此外，工程采用了复杂的悬臂施工工艺，虽然提高了施工效率，但也增加了施工成本，导致总造价上升。

经济风险因素主要包括材料价格波动、劳动力成本上涨和机械设备费用增加等。其中，材料价格波动受市场供需关系、国际原材料价格波动等因素影响，具有较大的不确定性，导致工程造价增加^[4]。随着劳动力市场的紧张，地区经济发展水平、劳动力供给情况等因素发生变化，且具有较强的地域性，进而推高工程造价。机械设备费用增加与设备租赁市场的供需关系、设备维护成本等因素相关，进一步增加了施工成本。

政策风险因素主要包括环保法规变化和税收政策调整等。随着环保要求的提高，工程在施工过程中增加了多项环保措施，工程项目采用更加环保的材料和技术，且施工过程中需严格控制污染物排放，导致施工成本增加。同时，工程因税收政策调整，导致项目总成本增加。环境风险因素主要包括地质条件不确定性和气候条件变化等，工程在施工过程中遇到复杂的地质条件，导致基础施工难度增加，最终造价超出预算^[5]。同时，工程因施工期间遭遇极端天气，导致工期延长了3个月，导致造价超出预算。

三、造价风险管控策略

（一）风险规避

工程项目方面临材料价格波动和地质条件不确定性等主要风险，提出风险规模方案，并在实际应用中取得良好效果，具体情况如下图1所示：

为规避材料价格波动，项目方与供应商签订了长期供应合同，锁定了钢材和水泥的价格，成功避免了钢材价格和水泥价格上涨导致的造价超支，节省了约12.3%的材料成本。针对地质条件不确定性，项目方在施工前进行了详细的地质勘察，并采用了

先进的地基处理技术，成功将地质条件复杂性带来的造价影响控制在预算范围内，地基施工成本节约了9.2%。此外，项目方通过引入先进的钻孔灌注桩技术和模块化施工方法，降低了施工技术难度和复杂性，进一步减少了约8.7%的施工技术成本。在政策风险方面，项目方及时跟踪环保法规变化，提前增加环保措施，虽然初期增加了约8%的成本，但避免了后期因环保不达标导致的罚款和停工风险，综合分析减少了约7.6%的政策成本。最后，项目方通过制定应急预案，合理安排施工周期，避开了极端天气的影响，确保了工期和造价的控制，并验证了风险规避策略在建筑工程造价管理中的有效性。

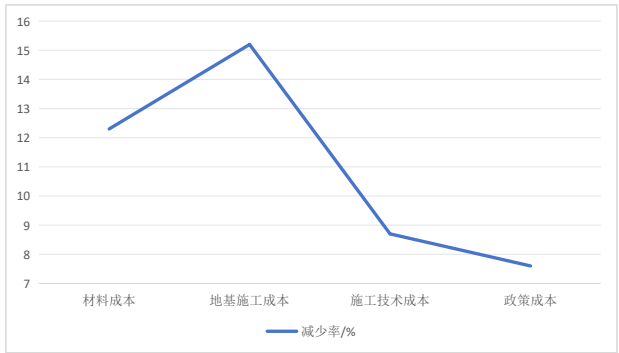


图1 风险规模效果分析

（二）风险转移

在施工过程中，项目方面临了材料价格波动、气候条件变化和施工技术难度等主要风险，在制定风险规避的基础上，项目方还同样采取了以下风险转移策略：在合同管理方面，项目方与承包商签订了固定总价合同，明确规定了材料价格波动的风险由承包商承担，项目方成功避免了因材料价格上涨导致的造价超支。此外，项目方还在合同中加入了设计变更的风险分担条款，规定因设计变更导致的成本增加由设计单位承担，有效降低了设计变更带来的造价风险。

项目方在保险机制方面购买了建筑工程一切险和第三者责任险，涵盖了施工过程中可能发生的自然灾害、意外事故和第三方损失等风险。在施工期间，项目方遭遇了一次极端天气事件，导致部分工程受损，但由于购买了保险，保险公司承担了约78.2%的修复费用，项目方仅需承担剩余的21.8%，有效降低了因气候条件变化导致的造价风险。此外，项目方还购买了施工人员意外伤害保险，确保了施工过程中的人员安全，减少了因安全事故导致的额外成本。

项目方在分包策略方面将深水基础施工分包给了一家具有丰富经验的承包商。由于深水基础施工技术难度较高，项目方通过分包策略，成功将施工技术难度带来的风险转移给了专业承包商，确保了施工的顺利进行，避免了因技术问题导致的成本超

支。此外，项目方还将部分机械设备租赁和维护工作分包给了专业的设备租赁公司，有效降低了机械设备费用增加的风险。

（三）风险缓解

在施工过程中，项目方面临了施工技术难度、材料价格波动、环保法规变化和地质条件不确定性等主要风险。为缓解这些风险，项目方制定了多种风险缓解措施。项目方通过加强施工技术培训 and 引入先进的施工设备，有效降低了技术风险。为了提升施工人员的技术水平，项目方制定了系统的培训体系，涵盖基础技能培训、专项技术培训和现场实操演练三个层次。基础技能培训每季度一次，每次7天，内容涵盖施工安全规范、基础技术和设备操作，使操作失误率降低约15.7%。专项技术培训每月一次，每次5天，针对深水基础施工等高难度技术，邀请专家讲解钻孔灌注桩技术等。现场实操演练在专门区域进行，内容包括设备操作、工艺模拟和应急处理，施工人员操作熟练度提高约22.1%，进一步降低了工艺复杂性风险。

为降低施工工艺复杂性风险，项目方引入了多款先进自动化设备。德国 BAUER 企业生产的 BG 系列旋挖钻机（BG 28 和 BG 36）用于深水基础施工，具有高效、精准的特点；意大利 CIFA 企业生产的 K 系列混凝土泵车（K45H 和 K60H）用于大跨度施工，实现精准混凝土浇筑，；美国 Trimble 企业生产的 SPS 系列智能施工监控系统（SPS 930 和 SPS 986）实时监控设备状态、进度和质量，进一步减少工艺复杂性风险。项目方还通过优化劳动力配置，采用机械化施工，减少对劳动力的依赖。

为应对政策变更等因素的影响，项目方成立了政策研究小组，跟踪国家和地方的环保政策变化趋势，并通过与环保部门的定期沟通，提前掌握未来可能出台的环保法规。在设计阶段，项目方引入了绿色施工标准，确保施工过程中的污染物排放符合最新环保要求。施工过程中，项目方增加了多项环保措施，如设置污水处理系统和采用低噪音设备，减少了施工对环境的负面影响，避免了后期因环保不达标导致的罚款和停工风险。此外，项目方定期组织环保培训，并设立环保监督小组，确保施工人员遵守环保法规，严格执行各项环保措施。

四、结论

本研究通过系统分析建筑工程的造价风险因素，提出了针对性的管控策略，并在实际项目中进行了验证。研究表明，材料价格波动、地质条件不确定性和施工技术难度是影响建筑工程造价的主要风险因素。通过层次分析法和德尔菲法的结合，研究成功识别并量化了这些风险因素的重要性，为后续的风险管控提供了科学依据。在实际应用中，项目方通过风险规避、转移和缓解策略，有效降低了工程造价风险，确保了项目的顺利进行。

参考文献

[1] 宫燕. 全过程视角下住宅建筑工程造价控制的方法研究 [J]. 居舍, 2025, (14): 145-148.
[2] 谭国龙. 层次分析法在码头工程造价风险管控中的应用 [J]. 珠江水运, 2024, (24): 90-92.
[3] 薛茜, 曹鑫, 常燕. 高层建筑施工中绿色技术运用研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, 14127-129.
[4] 熊梓全. 工程造价管理中的合同管理与风险评估研究 [J]. 中国招标, 2024, (11): 153-155.
[5] 罗德桥. 建筑工程造价成本管控现状分析及优化措施 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(17): 73-76

公务机适航维修体系管理难点与解决措施

苏毅

北京航空有限责任公司, 北京 100621

DOI:10.61369/ERA.2025080026

摘 要 : 我国各航空公司的公务机适航维修体系一直存在管理难点多的问题。基于此, 本文对公务机适航维修体系的管理方式进行了详细分析。概述公务机适航维修体系的重要性及难点, 深入分析现有公务机适航维修体系的管理方式, 明确公务机适航维修体系管理优化方向, 找出公务机适航维修体系管理的关键要素。

从建立或完善公务机适航维修体系的管理制度等方面, 提出具体的管理措施及建议, 以“优化管理模式, 把控工作特性差异, 减少人为错误根源”为准则, 对公务机适航维修管理体系进行优化, 旨在有效解决或完善公务机适航维修体系管理的问题。

关 键 词 : 公务机适航维修体系; 管理难点多; 优化管理模式

Difficulties and Solutions in the Management of Airworthiness Maintenance System for Business Jet

Su Yi

Beijing Airlines Co., Ltd., Beijing 100621

Abstract : The airworthiness maintenance system of business jets in various airlines in China has always had many management difficulties. Based on this, this article provides a detailed analysis of the management methods for the airworthiness maintenance system of government aircraft. This article outlines the importance and difficulties of the airworthiness maintenance system for business jets, analyzes in depth the management methods of existing airworthiness maintenance systems for business jets, clarifies the optimization direction of airworthiness maintenance system management for business jets, and identifies the key elements of airworthiness maintenance system management for business jets.

Specific management measures and suggestions have been proposed from the aspects of establishing or improving the management system of the airworthiness maintenance system for business aircraft. Based on the principle of "optimizing management mode, controlling differences in work characteristics, and reducing the root causes of human errors", the airworthiness maintenance management system for business aircraft has been optimized with the aim of effectively solving or improving the management problems of the airworthiness maintenance system for business aircraft.

Keywords : airworthiness maintenance system for business aircraft; there are many management difficulties; optimize management mode

引言

航空器(含公务机)的安全运行一直是民航业的重中之重,而航空器适航维修则是安全运行的基石,但公务机适航维修体系管理一直存在难点多的问题。

长久以来,各公务机航空公司都存在机型种类繁多,涉及民航规章数量及版本多,但公务机配备的适航维修人员普遍精简,致使各公务机航空公司的适航维修体系管理重点多、难点大,各种管理问题逐渐显现。

随着公务机制造厂的设计理念与制造技术不断发展,公务机各系统的冗余度持续提高,故障率不断降低,因公务机系统设计及部件故障引发的适航维修事故概率逐步减少,而由于适航维修体系的管理缺陷,人为原因造成的适航维修事故则越显突出。

因此,深入分析公务机适航维修体系的管理模式具有重要意义,不仅能保证公务机处于持续适航状态,确保航空安全、旅客生命与财产安全,有利于优化工程文件评估编写的适配度,增强维修工作安排的合理性,减少人为原因差错,提高公务机可利用率。

一、公务机持续适航维修的重要性

（一）保障公务机航空安全

国内公务机多属于跨国企业、信托公司或私人自有，由各航空公司作为航空器代管人对公务机进行业务托管，航空公司在满足客户飞行需求同时，负责公务机适航维修工作的实施，确保不发生航空安全事件。

如果疏于适航维修管理，一旦发生因适航维修引发的飞行事故，会造成人员伤亡，对公务机所有权人造成重大经济损失和舆情风险，实施公务机托管的航空公司则会承担严重的适航运营责任和极大的负面社会反响。

（二）促进公务机行业发展

公务机持续适航是航空器飞行安全的根基，夯实适航维修体系管理，可以保证公务机处于适航可用状态，满足客户的飞行任务需求和服务体验，提高公务机航空公司的品牌价值和核心竞争力，推进公务机航空公司经济效应的良性循环，促进整个公务机行业稳定及可持续性发展。

二、公务机适航维修体系的管理依据及方式

（一）公务机适航维修体系的管理依据

国籍登记注册在中国的公务机，该适航维修须遵守中国民航局的规章要求，并按照要求建立及管理公务机适航维修体系。公务机适航维修主要依据民航局规章 CCAR-135、CCAR-136、CCAR-91、CCAR-145，并用规范性文件等对相关工作做出详细工作指导意见和要求。

（二）公务机适航维修体系的管理方式

各航空公司的公务机适航维修部门依据民航规章和规范性文件编写适用本公司或部门的各类维修手册，如《维修工程管理手册》《维修工程手册》《培训大纲》等，用以阐述适航维修部门的框架结构、职能、责任及义务。其后编写《工作程序》《工作规范》等，用以阐述每个各岗位或者部门应采取何种方式和工作流程完成相应的适航维修工作。

（三）公务机适航维修体系管理结构

各公务机航空公司的适航维修通常分为工程、计划、质量安全、航材、定检 / 航线维修五大模块，采用部门职能或业务模块的管理方式划分业务职能，相辅相成地完成各项适航维修工作。

（四）公务机适航维修人员的资质

各航空公司招聘的公务机维修人员大多具有多年维修 CCAR-121 航空器经历的维修人员，并获得 CCAR-66 基础执照及机型培训，且基础执照已签署各类机型资质，有较高专业素养，在某一机型系统章节或专业领域有丰富的维修经验，同时具备高度责任心。

入职公务机航空公司后，维修人员需进行岗位培训和相关机型培训，在基础执照签署机型资质后，航空公司或 CCAR-145 维修单位对该维修人员进行相关维修工作授权，该维修人员才可执行相应的公务机适航维修工作。

三、公务机持续适航维修体系的管理难点

（一）公务机制造厂的适航维修文件类型多

公务机制造厂商多，如当下流行的公务机制造厂有湾流宇航、达索、庞巴迪、波音、空客等，而每个公务机制造厂又推陈出新多种不同型号的机型，以满足不同客户的需求，各公务机制造厂的维修类手册差异、公务机机型繁多、各机型 MOD 选型差异，导致适航维修手册种类繁多、版本多，难以对维修手册数量及版本进行管理。

航空器注册国及制造国颁发的 AD 也存在不同程度的差异，如 AD 实施方式或符合性要求的差异。服务通告或 MPD 颁发类型也存在上述差异，导致编写、评估各机型的 MEL、CAMP、EO、工卡时，难以采用统一的评估模式，工程文件编写的标准难以实行“一刀切”的简易管理方式。

（二）民航规章和规范性文件数量多

通过民航局官网获得相关的民航规章和规范性文件，但规章的数量及版本众多，如疏于管理或更新，会造成编写或修订《维修工程管理手册》《工程管理手册》《培训大纲》《工作程序》《工作规范》等文件的依据不准确。当适航维修人员按照该手册或者工卡执行了错误的流程后，存在违反法规要求的风险，将造成飞机处于非适航状态、航班延误、经济受损，严重情况下造成维修单位停摆，公务机航空公司停运。

通过对各部门的质量内审和供应商、承包商的质量外审发现，不同主体对民航规章的理解存在不一致的情况，在实施民航规章要求时产生歧义。同时部分维修人员的法规理念及工作方式，还停留在某个旧版民航规章，未能及时、动态更新知识库。

（三）公务机适航维修的人员能力欠缺

公务机配备的适航维修人员普遍精简，致使维修人员承担的工作范围极其广泛，例如一个机型的全部工程工作由一或两个维修人员负责，且不分航空器章节与系统、不分 ME 与 AV 专业，且相关的适航维修文件繁多，例如编写一个机型的 MEL，需要参考原公务机制造厂的 MMEL、中国相关民航法规、该航空器的选装系统 / 设备适用性、AD 的特殊要求等，如果该维修人员不能有效地掌握适航维修文件的相关要求，会存在编写、修订 MEL 出现错误的风险，造成实际使用 MEL 放行飞机时使用错误的放行依据，为航空安全带来了隐患。

公务机制造厂的适航性文件和手册均为英文版，对适航维修人员的专业英语水平要求极高，因翻译问题会造成编写 / 评估 MEL、CAMP、工卡、EO 等文件错误，当使用错误的文件作为参考或实施工作步骤，使公务机运行存在安全风险^[1]。

四、公务机持续适航维修体系管理优化建议

（一）优化适航维修文件管理及评估体系

优化持续适航维修文件管理及评估体系，使各类适航维修文件得以有效管控，使各类适航维修文件具有时效性和精准性。

1. 各公务机制造国的适航维修手册虽然有不一样的名称或表

达方式,但整体都是在FAA及EASA管理下的适航维修体系的手册。对于适航维修工程文件评估/编写可采用“清单化”管控方式,在符合民航规章和规范性文件的前提下,采用机型或公务机制造厂的手册归类方式,将其旗下的工程适航手册分别建档管理,建立各机型或原厂适航维修资料清单,并定期对清单内的适航文件进行版本更新。

2. 各公务机制造厂的MMEL格式表述有差异,编写相关机型MEL时,可以采用该机型MMEL模式为基准,可不采用统一的MEL模式,该方式能有效查找、编辑、比对MMEL和MEL的内容,待MEL改版时能更有效的与MMEL进行核对。在编写CAMP时,也可采用与上述MEL编写原则,采用与原厂MPD一致的模式,以便CAMP与MPD进行核对。

3. 涉及EO或工卡编写等,可以统一EO和工卡模板,当各机型AD、SB等表述有差异时,如达索SB版本更新时,版本适用性描述为:“完成前一版的SB内容,则该新版SB为不适用该航空器或组件”,但波音和空客则与其相反,即“完成前一版SB内容,该新版SB依据适用该航空器或组件”,建议在模板中留有该机型的特殊差异的备注,以便能使用统一的EO或工卡模板。

(二) 完善民航规章管理

民航局颁布的民航规章和规范性文件数量及版本众多,通过完善管理制度,落实民航规章和规范性的要求。

1. 对于民航规章和规范性文件数量及版本众多,可由适航维修质量安全部门细化对相关民航规章和规范性文件统计及更新方式,制定民航规章和规范性文件清单。建议由专人或岗位定期查询民航局官网,对民航规章和规范性等文件进行更新,并及时更新清单。重点关注新颁发的民航规章和规范性文件内标注替代某旧版法规的情况,并在清单内标注清晰,及时修订自编手册或工作程序,避免新旧民航规章和规范性文件同时出现/实施的风险。

2. 建立民航规章和规范性文件与公务机适航维修手册的符合性清单,即民航规章和规范性文件条款有具体要求,公务机适航维修部门将要求转化为相关手册内容或工作程序,该清单作为民航规章与自编手册相互符合的索引文件,可明确民航规章和规范性文件条款与维修手册或工作程序的适配度。并在民航规章和规范性文件颁发或更新时,应及时修订该清单的符合性索引,此举能有效的提示规章和规范性文件与自编管理手册或工作程序的差异,及时推进修订相关手册。

3. 完善《培训大纲》,细化各岗位所涉及到的民航局规章和规范性文件,将上述规章定为岗位培训的一部分,定期安排人员

参加局方举办的法规类培训。在局方颁发新版或改版的民航规章和规范性文件时,采用参加局方举办的培训课程,对新颁发或修订的民航规章条款进行学习,统一对民航规章的理解。当管理手册或工作程序依据民航规章更新完毕后,应落实新版管理手册或工作程序的培训,使民航规章的要求落实落地^[2]。

(三) 提高适航维修人员的能力

建立激励机制,提高公务机适航维修人员能力和责任心。

1. 对于专业英语的提升,通过定期送外或内部培训的方式稳步提高适航维修人员的专业英语水平,以提高使用AMM、FIM等原厂家手册实施工作的准确性。

2. 建立有效的激励机制,对优秀的适航维修人员给与奖励,明确激励标准、评分依据,激发适航维修人员工作的热情,发挥榜样与模范作用。对自愿暴露问题的人员从轻处罚,避免故意遮掩问题,造成重大事故。对提出能有效解决问题方案、制定合理措施的人员予以奖励,提高适航维修人解决突发问题、重点难点问题的能力^[3]。

3. 建议民航局能定期举办行业研讨会,打通各公务机适航维修部门的界限,建立适航维修经验成果分享机制,采用相互借鉴、取长补短的方式,完善公务机适航维修管理体系。同时民航局能收集或解答各公务机适航维修单位的疑难问题,促进公务机适航维修行业稳定发展。

4. 对于工程文件评估/编写错误,需找到出现问题根源,如适航维修人员专业英语水平待提高、人员短期工作量剧增、近期人员身心状态、该错误是惯例还是个例笔误等因素。可通过部门自查或质量内审方式,查找问题根源,采用修订工作程序、合理安排工作量、安排人员培训等方式,及时对问题进行纠正并制定纠正措施,减少或避免同类型错误再次发生。

5. 建议各航空公司对照国际适航维修人员收入标准,提高适航维修人员收入待遇,即可稳定适航维修人员的归属感和稳定性,又可提升适航维修人员的社会价值和行业责任感。

五、结束语

综上所述,我国民航局对公务机持续适航管理的要求在不断提升,各公务机航空公司在满足民航局法规要求的同时,要结合自身运营特点,不断提高持续适航维修管理的能力,找到适合本航司的适航维修管理模式,进一步夯实航空安全,实现公务机行业的健康发展。

参考文献

- [1] 许海峰.持续适航文件人为因素浅析[J].民用飞机设计与研修.2011(02):52-55.
- [2] 蔡纯兰.关于提升民航维修人员培训效能的思考[J].运输经理世界,2023(34):40-42.
- [3] 师琬璐.员工激励案例分析[J].合作经济与科技,2025(12):103-105.

辊压机磨辊表面硬化层厚度对磨损的影响

严明宏

四川亚东水泥有限公司，四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080033

摘要： 本文围绕水泥厂辊压机磨辊展开。介绍其粉磨系统及物料破碎原理，分析磨辊失效形式及影响因素，阐述常见表面强化工艺及硬化层梯度结构设计。探讨硬化层厚度与服役性能关系，通过实验确定最佳厚度区间，还介绍了磨辊的在线监测与修复技术，展望了未来的发展方向，为提升水泥粉磨效率和降低生产成本提供了理论支持和技术参考。

关键词： 辊压机磨辊；硬化层厚度；磨损

The Influence of the Thickness of the Hardened Layer on the Surface of the Grinding Roller of the Roller Press on Wear

Yan Minghong

Sichuan Yadong Cement Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： This article focuses on the grinding rollers of the roller press in cement plants. Introduce its grinding system and the principle of material crushing, analyze the failure forms and influencing factors of grinding rollers, and elaborate the common surface strengthening processes and the gradient structure design of the hardened layer. The relationship between the thickness of the hardened layer and the service performance was explored. The optimal thickness range was determined through experiments. The online monitoring and repair technology of the grinding roller was also introduced. The future development direction was prospected, providing theoretical support and technical reference for improving the efficiency of cement grinding and reducing production costs.

Keywords： roller press grinding roller; thickness of the hardened layer; wear and tear

引言

水泥工业在国民经济中占据重要地位，随着我国节能减排政策（2021年）的推进，水泥生产设备的节能降耗与性能提升成为研究热点。辊压机作为水泥熟料破碎的关键设备，其磨辊表面硬化层厚度对磨损及设备性能影响显著。从磨损机制、硬化层工艺到厚度与服役性能关系等多方面研究，有助于深入了解其内在规律。合理的硬化层厚度设计不仅能提高设备耐磨性、降低维修成本，还能提升运行效率，符合节能减排政策要求，对水泥行业可持续发展具有重要意义。

一、辊压机磨辊磨损机理分析

（一）辊压机工作原理与载荷特征

水泥厂辊压机粉磨系统主要用于水泥熟料的破碎。在工作过程中，物料进入辊压机两辊之间的挤压区。动辊和定辊相互挤压物料，使物料受到高压而破碎。从接触应力分布特征来看，在两辊接触区域，应力呈现不均匀分布。靠近辊面中心区域应力较大，向边缘逐渐减小。这是由于物料在挤压过程中，中心部位承受的压力更为集中。在水泥熟料破碎过程中，动态载荷不断变化。当物料刚进入挤压区时，载荷逐渐增加，达到最大值后，随着物料的破碎和通过，载荷又逐渐减小。这种动态载荷的变化规律对辊面的磨损有着重要影响，不同的载荷阶段会导致不同程度

的磨损^[1]。

（二）磨辊表面磨损形式与机理

磨辊表面主要存在磨粒磨损、疲劳剥落和应力腐蚀等失效形式。磨粒磨损是由于物料中的硬质颗粒在压力作用下对磨辊表面进行切削和刮擦，导致材料逐渐损失^[2]。疲劳剥落则是在循环应力作用下，磨辊表面产生微观裂纹，随着时间推移，裂纹扩展并最终导致材料块状脱落。应力腐蚀是在特定环境下，应力与腐蚀介质共同作用，加速磨辊表面材料的损坏。通过EDAX能谱分析水泥物料成分可知，不同成分对磨损机制存在交互影响。例如，某些成分可能会加剧磨粒磨损，而另一些成分可能影响疲劳裂纹的产生和扩展路径，从而影响磨辊的磨损情况。

二、表面硬化层厚度设计理论基础

（一）表面硬化处理技术对比

堆焊、激光熔覆和等离子喷涂是常见的表面强化工艺。堆焊可通过调整焊接参数和工艺来控制硬化层厚度，其优点是能够形成较厚的硬化层，适用于对耐磨性要求较高的场合^[3]。激光熔覆能够实现精确的能量输入，从而精确控制硬化层厚度和微观结构，形成的硬化层与基体结合良好，质量较高。等离子喷涂则可以在不同基体上制备多种材料的硬化层，硬化层厚度相对较薄，但具有较好的均匀性。在硬化层梯度结构设计方面，需要考虑材料的性能、应力分布以及服役环境等因素，以确保硬化层能够有效地提高磨辊的耐磨性和使用寿命。

（二）硬化层厚度与服役性能关系

硬化层厚度与服役性能密切相关。通过建立硬化层厚度与表面残余应力分布、裂纹扩展阻力的数学模型，可深入研究其内在联系。基于 Hertz 接触理论计算不同厚度下的应力场衰减特征，能为确定合理的硬化层厚度提供理论依据。合理的硬化层厚度可有效调节表面残余应力分布，提高裂纹扩展阻力，从而增强服役性能，减少磨损等失效形式的发生。当硬化层厚度过薄时，无法提供足够的保护，易导致表面损伤；而厚度过厚可能会引入新的应力集中问题，影响整体性能。因此，准确把握硬化层厚度与服役性能的关系对于辊压机磨辊的设计和制造至关重要^[4]。

三、硬化层厚度对磨损影响的实验研究

（一）试验方案设计与参数设置

1. 多因素正交试验设计

选取 4 - 12mm 硬化层厚度梯度，将其划分为三个水平。同时考虑水泥物料硬度等级这一因素，也设定为三个水平。通过这种方式设计三水平四因素正交试验矩阵^[5]。这样的设计能够全面考虑硬化层厚度以及水泥物料硬度等多种因素对磨损的综合影响，为后续的实验研究提供科学合理的试验方案，以便更准确地探究辊压机磨辊表面硬化层厚度与磨损之间的关系。

2. 在线监测系统构建

为了实时监测磨辊磨损量，构建了包含多种设备的数据采集系统。集成声发射传感器，其能敏锐捕捉材料内部结构变化产生的弹性波，以此反映磨辊表面的磨损情况^[6]。同时，振动加速度计的加入可测量磨辊在运行过程中的振动特性，不同程度的磨损会导致振动信号的差异。通过合理布置这些传感器，确保采集到的数据全面且准确。利用相关的数据采集设备对传感器获取的信号进行收集和处理，将模拟信号转换为数字信号，以便后续的分析研究和研究，从而为研究硬化层厚度对磨损的影响提供实时、可靠的数据支持。

（二）试验结果与磨损规律分析

1. 磨损速率与厚度相关性

通过对实验数据的回归分析，发现硬化层厚度与单位时间质量损失率呈现出指数函数关系。当硬化层厚度较小时，单位时间

质量损失率较大，随着硬化层厚度的增加，单位时间质量损失率逐渐减小。然而，当硬化层厚度超过一定值后，单位时间质量损失率的下降趋势变缓。综合考虑磨损速率和成本等因素，确定了一个经济性最佳的硬化层厚度区间。在此区间内，既能保证辊压机磨辊的磨损速率较低，延长其使用寿命，又能避免因过度增加硬化层厚度而导致的成本过高问题^[7]。

2. 微观组织演变规律

利用 SEM 观察不同厚度样本的亚表面裂纹萌生与扩展路径。结果显示，随着硬化层厚度的变化，裂纹萌生与扩展呈现出不同的特征。较厚的硬化层在一定程度上能够改变裂纹的扩展方向，这是由于其特殊的梯度结构。这种梯度结构对裂纹偏转具有阻滞机制^[8]，能够有效延缓裂纹的进一步扩展，从而减少因裂纹扩展导致的材料剥落和磨损。通过对微观组织的深入分析，进一步明确了硬化层厚度与磨损之间的内在联系，为优化辊压机磨辊表面硬化层厚度提供了重要的理论依据。

四、工程应用与设备改造策略

（一）现有设备改造案例分析

1. 辊面修复工艺优化

某水泥厂对辊压机磨辊表面进行改造，采用梯度激光熔覆技术，将硬化层厚度从 6mm 提升到 8mm。通过这一改造，设备连续运转周期得以延长，延长比例达到 40%。这一工程实例充分展示了合理优化辊面修复工艺的重要性。合适的硬化层厚度能够显著改善磨辊的耐磨性能，减少磨损，从而提高设备的运行效率和稳定性，降低维修成本和停机时间，为企业带来更好的经济效益^[9]。

2. 在线修复技术应用

自动堆焊机器人可在不停机状态下对辊压机磨辊表面硬化层进行局部修复。其技术方案包括精确的路径规划和焊接参数设置。通过先进的传感器技术，机器人能够准确识别磨损区域，从而实现针对性的修复。在焊接过程中，合理调整焊接电流、电压和速度等参数，确保焊接质量。实施该技术后，取得了良好的效果。不仅有效延长了磨辊的使用寿命，减少了设备停机时间，提高了生产效率，还降低了维修成本。同时，修复后的硬化层与原硬化层能够良好融合，保证了磨辊表面的硬度和耐磨性，进一步提升了设备的运行稳定性和可靠性^[10]。

（二）新型粉磨设备设计指南

1. 球磨机与立磨的差异化设计

球磨机衬板与立磨磨辊在硬化层厚度设计要求上存在显著区别。球磨机衬板主要承受冲击和研磨作用，其硬化层厚度需考虑矿石的硬度、粒度以及球磨机的转速等因素。较厚的硬化层有助于抵抗矿石的冲击磨损，延长衬板使用寿命。而立磨磨辊主要承受挤压和研磨力，其硬化层厚度设计更多地取决于物料的特性和挤压压力。从力学本质差异来看，球磨机衬板的磨损主要是冲击疲劳和磨粒磨损的综合作用，而立磨磨辊的磨损则主要是由于挤压应力导致的表面疲劳磨损和磨粒磨损。因此，在设计新型粉磨设备时，需充分考虑这些差异，以优化设备性能和提高使用寿命。

2. 智能化厚度监测系统

基于涡流检测技术，可设计硬化层厚度在线监测方案。该方案利用涡流检测原理，通过检测探头与磨辊表面的电磁感应，获取硬化层厚度相关信息。同时，为更好地评估硬化层厚度变化对磨损的影响，建立厚度衰减预测模型。此模型需考虑磨辊的工作环境、物料特性、运行时间等多种因素。通过大量实验数据和实际运行数据对模型进行训练和验证，使其能够准确预测硬化层厚度随时间的衰减情况。这不仅有助于及时掌握磨辊的磨损状态，还能为设备的维护和更换提供科学依据，从而提高新型粉磨设备的运行效率和稳定性。

（三）全生命周期成本优化模型

1. 经济厚度计算模型

构建包含初始制造成本、维修费用、停机损失的多目标优化函数来求解不同工况下的最优硬化层厚度。首先明确初始制造成本与硬化层厚度相关，厚度增加可能导致制造成本上升。维修费用方面，考虑硬化层厚度对磨损的抵抗能力，不同厚度在相同工况下磨损程度不同，进而影响维修频率和费用。停机损失则与维修频率和维修时间相关，若因磨损严重导致频繁停机维修，会造成巨大经济损失。综合这三个方面构建多目标优化函数，通过分析不同工况下各因素的变化，找到使总成本最低的硬化层厚度，为辊压机磨辊的设计和使用时提供经济合理的厚度参考。

2. 环境效益评估体系

引入生命周期评估（LCA）方法，旨在全面且系统地量化分析磨辊表面硬化层厚度优化所带来的环境效益。通过详细追踪设备从原材料获取、制造、使用到最终废弃处理的整个生命周期过程，评估不同硬化层厚度设置下的能源消耗情况。例如，在制造阶段，考虑不同厚度硬化层所需的加工工艺及其能耗差异；在使用阶段，分析其对设备运行效率及能耗的影响。同时，关注碳排放指标，包括原材料生产过程中的碳排放以及设备运行期间因能耗产生的碳排放等。通过这些量化分析，为磨辊表面硬化层厚度的优化提供科学依据，以实现环境效益的最大化。

五、总结

辊压机磨辊表面硬化层厚度对磨损有显著影响。研究表明其存在6 – 8mm 的最佳值区间，偏离此区间会出现问题，如过厚脆性增加，过薄耐磨性不足。基于应力场分析的梯度结构设计方法被提出，同时开发了涵盖厚度监测与智能修复的设备改造方案。该方案在3家水泥企业应用后成效显著，平均降低维护成本35%。展望未来，纳米复合强化层与自适应厚度调节技术将成为研究方向，有望进一步提升辊压机磨辊的性能，降低磨损，提高企业经济效益，为相关行业的发展提供更有力的技术支持。

参考文献

- [1] 乔松, 朱光明, 岳博文, 等. 基于不确定性系统铜基镍镀层摩擦磨损规律研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(2): 92–96, 101.
- [2] 潘学福, 武会宾, 巨彪, 等. 耐磨管线钢磨粒磨损机理 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 109–113.
- [3] 石瑞虎, 鲁孟云, 沙静, 等. 基于等离子弧焊的低碳钢耐磨粉末堆焊工艺研究 [J]. 徐州工程学院学报 (自然科学版), 2017, 32(4): 13–17.
- [4] 李海智. 高压辊磨机用 Fe–C–V–Mo–Cr 高强耐磨钢的制备和性能研究 [D]. 辽宁: 东北大学, 2017.
- [5] 何彩云. 正交试验方法在混凝土试验中的应用 [J]. 河南建材, 2020(3): 57–60.
- [6] 张立国, 杜小马, 佟卫勇. 水泥磨系统辊压机辊面的磨损与修复 [J]. 新世纪水泥导报, 2010.
- [7] 王刚, 杨佳巍. 浅谈辊压机辊轴结构改进设计 [J]. 河南建材, 2020(4): 50–51.
- [8] 周太峰, 周鹏. 辊面磨损对辊压机生产效率的影响分析 [J]. 水泥工程, 2019(1): 3.
- [9] 刘蛟. 辊面磨损对辊压机生产效率的影响探讨 [J]. 中国设备工程, 2022(3): 39–40.
- [10] 张玮, 马凌涛, 朱金余, 等. 轧辊磨损及激光表面合金化改性技术应用试验 [J]. 机械研究与应用, 2023, 36(05): 60–63.

石膏空心条板在公共建筑中的应用分析

杨榕

湖北交通职业技术学院，湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025080003

摘 要： 石膏空心条板作为一种轻质、高强、防火、隔声、保温性能良好的新型墙体材料，在公共建筑中的应用日益广泛。本文探讨了石膏空心条板的基本特性、优势、施工工艺以及在公共建筑中的具体应用案例，并对其未来的发展趋势进行了展望。

关 键 词： 石膏空心条板；公共建筑；轻质高强；防火性能；施工工艺

Application Analysis of Gypsum Hollow Strip in Public Buildings

Yang Rong

Hubei Communications Polytechnic, Wuhan, Hubei 430000

Abstract： As a new type of wall material with lightweight, high strength, fire resistance, sound insulation, and good thermal insulation properties, gypsum hollow strip board is increasingly used in public buildings. This paper discusses the basic characteristics, advantages, construction technology, and specific application cases of gypsum hollow strip board in public buildings, and outlooks its future development trends.

Keywords： gypsum hollow strip board; public buildings; lightweight and high strength; fire resistance; construction technology

引言

随着城市化进程的加速和人们环保意识的提高，对建筑材料的要求也日益严格。石膏空心条板作为一种新型墙体材料，因其轻质、高强、防火、隔声、保温等优点，逐渐在公共建筑中得到广泛应用。本文将从石膏空心条板的基本特性出发，探讨其在公共建筑中的具体应用和施工工艺，以为未来公共建筑的设计和施工提供参考。

一、石膏空心条板的基本特性

石膏空心条板是以建筑石膏为主要原料，掺加适量轻质填充料或纤维材料后加工而成的一种空心板材。其主要特性如下：

（一）轻质高强

石膏空心条板的密度小，但抗弯强度高，能够有效减轻建筑物的自重，提高结构安全性^[1]。石膏空心条板作为一种新型墙体材料，具有显著的轻质高强特性，其主要原料为石膏，通过空心结构设计有效降低了材料的体积密度，使其重量远低于传统的砖墙和砌块墙体，这一特性不仅减轻了建筑物整体荷载，降低了对基础和结构的承重要求，还提升了施工便捷性，减少了搬运和安装过程中的人力与机械消耗。尽管自重较轻，但石膏空心条板的力学性能优异，具备较高的抗折强度和抗冲击性能，能够满足公共建筑对内隔墙稳定性和安全性的要求，同时其强度均匀，尺寸精度高，安装完成后整体性好，墙体不易开裂变形，使用寿命长，轻质与高强的结合使石膏空心条板成为实现结构优化、提高施工效率、保障工程质量的理想材料，特别适合对墙体性能和施工效率要求较高的各类现代建筑项目。

（二）防火性能良好

石膏空心条板属于 A 级不燃材料，具有良好的防火性能，遇火不易燃烧，且能释放结晶水，有效降低火场温度。石膏空心条板因其独特的材料属性，具备优良的防火性能，石膏本身是一种天然的防火材料，其化学成分中含有大量结晶水，在遇到高温火灾时会释放水蒸气，吸收大量热量，有效延缓温度上升，阻止火势蔓延，同时石膏空心条板的空腔结构进一步提升了其隔热性能，能够有效减缓火焰和高温向相邻空间的传播速度^[2]。经权威检测，标准厚度的石膏空心条板耐火极限通常可达到 2 小时以上，完全符合公共建筑对防火分隔的严格要求，此外石膏条板燃烧时不会释放有毒有害气体，具有良好的环保和安全特性，保障人员疏散和救援工作的顺利开展，其防火性能稳定可靠，适用于对防火安全要求较高的医院、学校、办公楼、商场等公共建筑，有助于提升整体建筑的防火等级，减少火灾风险，增强建筑物的安全保障能力^[3]。

（三）隔声性能优越

石膏空心条板内部的空腔结构能有效隔绝声音传播，提高建筑物的隔声性能。石膏空心条板凭借其材料密实性和结构设计，展现出优越的隔声性能，广泛适用于对声环境要求较高的公共建

筑，石膏材料本身具有良好的声波阻隔能力，能够有效削弱声音的传播和穿透，而空心结构设计则通过增加空气层，进一步提升了声音的反射和衰减效果，实现更高的隔声性能，经专业检测标准规格的石膏空心条板隔声量可达45分贝以上，能够有效阻挡人声、设备声等日常噪声的干扰，满足学校教室、医院病房、办公区域等对安静环境的需求，石膏空心条板相比传统砌体墙在保证轻质高强的同时兼具良好的隔声效果，避免了墙体加厚、增加施工难度和成本的问题，此外条板接缝少、整体性好，降低了声桥效应，提高了墙体的隔声完整性，提升使用空间的私密性与舒适性，是现代公共建筑室内隔声分区的优选材料。

（四）保温隔热

石膏空心条板的导热系数低，能有效阻挡热量传递，提高建筑物的保温隔热性能。石膏空心条板具有良好的保温隔热性能，能够有效提升建筑节能效果，石膏材料本身导热率低，具备优异的热阻特性，而其独特的空心结构在墙体内部形成空气隔热层，显著减少热量的传导与散失，这一特性使石膏空心条板在冬季能够有效阻隔室内热量向外流失，保持室内温暖；在夏季则能够降低室外高温对室内的侵袭，提升室内舒适度，减少空调和暖气的能源消耗，从而达到节能降耗的目的，石膏空心条板与传统砌筑墙体相比在不增加墙体厚度的前提下实现更优的保温隔热性能，满足现代建筑对绿色节能的要求，同时其保温效果稳定可靠，适用于各类公共建筑，如学校、医院、办公楼等，有助于营造舒适的室内环境，提升建筑整体的节能环保水平，符合国家绿色建筑标准和可持续发展的建设理念^[4]。

（五）施工方便

石膏空心条板安装简便，不需要龙骨，可以缩短施工周期，降低施工成本。

二、石膏空心条板在公共建筑中的优势

石膏空心条板在公共建筑中具有诸多优势，具体表现在以下几个方面：

（一）节能环保

石膏空心条板生产过程中能源消耗低，且不会产生有害物质，符合绿色建筑的理念。同时，其优良的保温隔热性能有助于降低建筑物的能耗。石膏空心条板作为一种轻质高强、绿色环保的新型建筑材料，在公共建筑中的应用优势尤为显著，其主要原材料为石膏，资源丰富、可再生，且生产过程能耗低、污染小，有效减少碳排放，符合绿色建筑发展理念；石膏本身具有良好的保温隔热性能，空心结构进一步增强了其热工性能，有助于提升建筑物的节能效果，降低空调和采暖能耗，此外石膏空心条板具备优良的防火性能和良好的室内湿度调节能力，能够改善公共建筑的室内环境质量，提升使用舒适度，产品可现场装配施工，减少湿作业，降低施工扬尘和噪音污染，体现出较好的环境友好性和资源节约性，因此石膏空心条板在满足建筑功能需求的同时助力公共建筑实现绿色节能与可持续发展的目标，具有广阔的推广应用前景^[5]。

（二）提高建筑质量

石膏空心条板具有轻质高强的特点，能够减轻建筑物的自重，提高结构的稳定性和安全性。同时，其优良的防火性能也为公共安全提供了有力保障。石膏空心条板以其优越的物理性能和施工优

势，有效提升了公共建筑的整体质量，该材料轻质高强，能够显著减轻建筑物自重，减少对结构承载的要求，延长建筑使用寿命，同时石膏空心条板具备良好的尺寸精度和平整度，安装后墙面平整美观，减少后续找平和抹灰工序，提高施工效率与工程质量；其优异的隔声性能、防火性能和防潮性能有助于提升建筑的安全性及舒适性，特别适用于对功能要求较高的医院、学校、办公楼等公共空间，此外该材料施工便捷、接缝少、开裂风险低，能够有效避免传统砌筑材料易开裂、空鼓等质量通病，保证内墙系统的长期稳定性与可靠性，因此石膏空心条板不仅满足公共建筑高质量建设的需求，还提升了建筑的综合性能和使用价值^[6]。

（三）降低施工成本

石膏空心条板安装简便，可以缩短施工周期，降低施工成本。此外，其价格相对较低，有助于降低公共建筑的建造成本。石膏空心条板在公共建筑中的应用，不仅提升了建筑品质，还在多个环节有效降低了施工成本，其材料轻质高强，运输和搬运更加便捷，能够减少人力和机械投入，降低运输及施工的综合费用；石膏空心条板采用装配式干法施工，安装速度快，大大缩短了工期，节省了大量人工成本和管理费用，同时条板成品表面平整，无需批荡找平，减少了对抹灰材料和人工投入，降低了二次施工的费用，此外由于其良好的尺寸精度和稳定性，后期维护成本低，减少因开裂、空鼓等质量问题而产生的返工费用，更重要的是其集保温、隔声、防火于一体，减少了对额外保温、隔音材料的需求，实现一材多用，进一步降低了整体建造成本，因此石膏空心条板为公共建筑提供了经济、高效、品质兼备的墙体解决方案^[7]。

（四）增强使用功能

石膏空心条板具有良好的隔声和保温性能，能够提高公共建筑的使用舒适度。同时，其可锯、可刨、可钻孔的特点也便于后续的装修和改造。石膏空心条板在公共建筑中的应用不仅提升了建筑品质与施工效率，更显著增强了室内空间的使用功能，其良好的隔声性能满足医院、学校、办公楼等公共建筑对安静环境的需求，有效降低空间之间的噪声干扰，提升使用舒适度，同时石膏本身具备优异的防火性能，空心结构设计进一步提升了耐火极限，保障人员生命财产安全，满足公共建筑对消防安全的严格要求^[8]。石膏空心条板还具备良好的呼吸调湿功能，能够根据室内湿度变化自动调节，营造更加健康的室内环境，此外其轻质高强的特性使墙体布局更加灵活，便于实现空间的多样化设计与改造，满足不同功能区域的划分需求，条板表面平整、易于装饰，可直接进行涂料、壁纸、瓷砖等多种饰面处理，提升空间美观性与实用性，因此石膏空心条板在提升建筑使用功能方面表现突出，适应现代公共建筑多元化、专业化的功能需求。

三、石膏空心条板在公共建筑中的施工工艺

石膏空心条板在公共建筑中的施工工艺主要包括以下几个步骤：

（一）基层处理

在施工前，需要对基层进行清理和处理，确保基层平整、干燥、无油污。对于不平整的基层，需要进行找平处理。

（二）排版设计

根据施工图纸和现场实际情况，进行排版设计，确定石膏空

心条板的规格、数量和排列方式。同时，需要预留出门窗洞口等位置^[9]。

（三）安装定位

在基层上弹出安装线，确保石膏空心条板的安装位置准确。同时，需要使用专用的固定件将石膏空心条板固定在基层上。

（四）接缝处理

在石膏空心条板的接缝处，需要使用专用的接缝材料进行处理，确保接缝平整、无裂缝。同时，需要对接缝进行打磨和修补，提高墙面的整体美观度。

（五）抹灰与装饰

在石膏空心条板安装完成后，需要进行抹灰和装饰处理。抹灰层应平整、牢固、无空鼓和裂缝。装饰层应根据设计要求进行选择 and 施工^[10]。

四、石膏空心条板在公共建筑中的具体应用案例

以下是石膏空心条板在国际社区项目的具体应用案例：

（一）某学校项目教学楼

在学校项目教学楼项目中，采用了石膏空心条板作为内隔墙材料。施工过程中，严格按照施工工艺进行操作，确保了施工质量。工程完成后，经过检测验收，石膏空心条板的各项性能指标均符合要求。同时，石膏空心条板的使用也提高了教学楼的隔声和保温性能，为学生提供了一个更加舒适的学习环境。

（二）某项目医疗中心

在某项目医疗中心，采用了石膏空心条板作为病房的隔墙材料。石膏空心条板的防火性能和隔声性能得到了充分发挥，为医院的安全和患者的舒适度提供了有力保障。同时，其施工简便的特点也缩短了施工周期，降低了施工成本。

（三）某项目商业办公楼

在E某项目商业办公楼，采用了石膏空心条板作为商铺区域的隔墙材料。石膏空心条板的轻质高强特点减轻了建筑物的自重，提高了结构的稳定性。同时，石膏空心条板的可锯、可刨、可钻孔的特点也便于后续的装修和改造。

五、石膏空心条板在公共建筑中的未来发展趋势

随着建筑技术的不断进步和人们环保意识的提高，石膏空心条板在公共建筑中的应用前景将更加广阔。未来，石膏空心条板

的发展趋势将表现在以下几个方面：

（一）环保性能提升

未来，石膏空心条板的生产将更加注重环保性能的提升，采用更加环保的原材料和生产工艺，降低能耗和减少污染。

（二）性能优化

随着科技的不断进步，石膏空心条板的性能将得到进一步优化和提升，如提高抗弯强度、防火等级、隔声性能等，以满足更高要求的建筑使用需求。

（三）多功能化

未来，石膏空心条板将更加注重多功能化的发展，如集防火、隔声、保温、装饰等多种功能于一体，提高建筑物的综合性能。

（四）智能化施工

随着智能化技术的不断发展，石膏空心条板的施工将更加注重智能化施工技术的应用，如采用机器人、自动化设备等先进技术进行安装和调试，提高施工效率和质量。

六、结论

石膏空心条板作为一种轻质、高强、防火、隔声、保温性能良好的新型墙体材料，在公共建筑中具有广泛的应用前景。本文探讨了石膏空心条板的基本特性、优势、施工工艺以及在公共建筑中的具体应用案例，并对其未来的发展趋势进行了展望。通过本文的研究和分析，可以得出以下结论：

- 石膏空心条板具有轻质高强、防火性能良好、隔声性能优越、保温隔热等特点，符合绿色建筑的理念和要求。
- 石膏空心条板在公共建筑中具有节能环保、提高建筑质量、降低施工成本、增强使用功能等优势。
- 石膏空心条板在公共建筑中的施工工艺包括基层处理、排版设计、安装定位、接缝处理、抹灰与装饰等步骤，需要严格按照施工工艺进行操作以确保施工质量。
- 石膏空心条板在国际学校、国际医疗中心、商业等公共建筑中具有广泛的应用案例和显著的应用效果。

未来，石膏空心条板将更加注重环保性能的提升、性能的优化、多功能化的发展以及智能化施工技术的应用。

综上所述，石膏空心条板在公共建筑中具有广阔的应用前景和发展空间。随着科技的不断进步和人们环保意识的提高，相信石膏空心条板将在未来公共建筑的设计和施工中发挥更加重要的作用。

参考文献

[1] 游恩. 石膏空心条板隔墙的构造及安装工艺分析 [J]. 基层建设, 2020(25).
[2] 罗挺, 黄明煜. 改性石膏轻质隔墙板施工应用技术要点分析 [J]. 建筑实践, 2021(10).
[3] 吴文杰, 何婉艺, 余恒鹏. 几种常见建筑隔墙用轻质条板的隔声性能研究和分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(4):7.
[4] 邹亮, 宋连根. 石膏隔墙条板耐火性能的分析 [J]. 江西建材, 2023(12):172-174.
[5] 聂晓鹏, 陈尚伟. 石膏基瓷砖胶剂施工质量问题浅析 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50(8):19-21.
[6] 吴文杰, 何婉艺, 余恒鹏. 几种常见建筑隔墙用轻质条板的隔声性能研究和分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2021, 047(004):83-89.
[7] 柏玉婷, 李国忠. 利用脱硫建筑石膏制备空心条板 [J]. 砖瓦, 2008(8):4.
[8] 黄香伟. 磷石膏空心条板施工技术探讨 [J]. 砖瓦, 2024(9):140-142.
[9] 朱惠伟, 朱义铁. 石膏空心条板隔墙的构造及安装工艺 [J]. 建筑技术, 2006, 37(9):2.
[10] 孙磊. 石膏空心条板隔墙的构造及安装工艺 [J]. 科学与财富, 2014(8):1.

绿色建筑技术在工程领域的创新研究与应用探索

梁婷丽

广东双林生物制药有限公司，广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ERA.2025080006

摘 要： 随着可持续发展战略的不断深化，在建筑工程领域进一步加强对绿色建筑技术的研究与开发，并在实践中不断优化与完善。这不仅有利于建筑工程实现更加高效的节能环保，同时也能够让建筑工程更好地与自然生态和谐相处，有效地减轻工程建设对环境带来的破坏，让人们能够在更加舒适、更加自然的空间内工作与生活。本文立足于建筑工程领域，探究绿色建筑技术的创新应用，以期建筑行业带来更多参考。

关 键 词： 绿色建筑技术；建筑工程；创新应用

Innovative Research and Application Exploration of Green Building Technology in Engineering Field

Liang Tingli

Guangdong Shuanglin Biological Pharmaceutical Co. Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： With the continuous deepening of the sustainable development strategy, the research and development of green building technology in the field of construction engineering have been further strengthened and continuously optimized and improved in practice. This not only helps construction projects achieve more efficient energy conservation and environmental protection, but also enables construction projects to better coexist harmoniously with the natural ecosystem, effectively reducing the damage caused by construction projects to the environment, allowing people to work and live in a more comfortable and natural space. This paper focuses on the field of construction engineering and explores the innovative application of green building technology, with the aim of providing more references for the construction industry.

Keywords： green building technology; construction engineering; innovative application

引言

在现代建筑工程中，绿色建筑技术发挥着越来越重要的作用，能够切实贯彻节能环保的基本目标，践行可持续发展理念，有效地减少施工过程中对周边环境造成的影响。目前，建筑工程领域常见的绿色建筑技术主要包括可再生能源利用、节能技术、节水技术、绿色建筑材料应用、绿色建筑规划等等^[1]。这些技术不仅能够给人们创造更加舒适的生活环境，还能减少施工和使用过程中的能耗，为环保事业的发展提供了更多助力，使建筑行业朝着生态友好型的方向不断进步。

一、绿色建筑技术在工程领域的应用价值

（一）节能减排，降低环境负荷

绿色建筑技术能够为建筑工程提供节能环保的设计方案、建筑材料和设施设备，有效地减少工程中对传统能源的依赖，降低建筑物的能源消耗与环境污染，既能保障建筑物各项功能的正常运行，又能避免严重的环境负荷问题破坏生态平衡，实现生态环保的绿色发展。

（二）提升室内环境质量

绿色建筑技术还能够为人们创造更加良好的室内居住环境，

通过环保材料应用、自然光照引入、通风条件改善等多种方式，使室内的空气质量、光照条件得到明显的改善，既能够保障人们的身体健康，又能够减少室内污染现象，保障人们的生活品质。

（三）促进建筑行业可持续发展

绿色建筑技术是建筑行业的新兴技术和前沿科技，能够进一步推动建筑技术的创新发展，引领建筑行业产业升级。在工程实践中，大量的新技术、新材料得到了应用，使工程的技术水平遥遥领先，增强了工程项目的市场竞争力。同时，随着绿色建筑技术的不断完善，还能够在行业内形成高品质的绿色标杆，让整个行业朝着更加高效、更加环保、更加节能的方向发展，从而使建

筑行业焕发出新的生机和活力。

二、绿色建筑技术在工程领域的创新应用

（一）节能技术

节能技术是绿色建筑技术的典型代表，在工程领域中应用的十分广泛，凭借高效环保的节能设备和节能系统有效地降低建筑能耗。比如，太阳能供暖系统就是节能技术的具体应用形式之一。借助太阳能集热器吸收日常太阳光照，转化光照为热能，既能够达到供暖的要求，也能够满足一定的水热供应需要。这样就能够降低冬日等气候寒冷时对传统能源的依赖程度。又如，智能照明系统能够通过传感器识别出当下的光照环境，根据人们活动的需要和室内室外的光线强度，自动调节光照的亮度，这样既能够为人们提供便利的光照环境，又能给人们带来良好的节能效果。

随着技术的不断进步和升级，自控系统成为节能技术在工程领域的创新应用，将智能化控制技术完美地融入到建筑系统中，实现对建筑暖通空调、水电系统和照明系统的精细化管理与实时监控。比如，建筑中安装能源管理软件，配合智能温控器对室内的环境进行有效监测，根据人体的舒适度和环境温度进行自动调节。这不仅能够记录下用户的温度偏好，以便保证室内环境的舒适度；同时还能够通过大数据分析评估出现能源功耗过高的现象，以便通知技术人员进行及时的优化和调整，以达到良好的节能目标^[2]。如表1所示，是建筑热工设计分区及设计要求，可以将其作为建筑智能温控器的基础参数进行优化，以便更好地满足节能与舒适度的要求。这些节能技术的应用，不仅能够有效地降低建筑物的运行成本，同时也能为资源的可持续利用奠定良好的基础，实现建筑行业的绿色发展。

表1 建筑热工设计分区及设计要求

分区名称	分区指标		设计要求
	主要指标	辅助指标	
严寒地区	最冷月平均温度： ≤ -10℃	日平均温度 ≤ -5℃ 天数：145天以上	首先需满足冬季保温要求，一般不考虑夏季防热需要。
寒冷地区	最冷月平均温度： 0℃ -10℃	日平均温度 ≤ -5℃ 天数：90天 -145天	需满足冬季保温要求，视不同地区具体情况考虑夏季防热需要。
夏热冬冷地区	最冷月平均温度： 0℃ -10℃ 最热月平均温度： 25℃ -30℃	日平均温度 ≤ -5℃ 天数：0天 -9天 日平均温度 ≥ 5℃ 天数：40天 -110天	需满足夏季防热需求，并考虑冬季保温需要。
夏热冬暖地区	最冷月平均温度： > 10℃ 最热月平均温度： 25℃ -29℃	日平均温度 ≥ 25℃ 天数：100天 -200天	需充分满足夏季的防热需求，一般不考虑冬季的保温需要。
温和地区	最冷月平均温度： 0℃ -13℃ 最热月平均温度： 18℃ -25℃	日平均温度 ≤ 5℃ 天数：0天 -90天	视不同地区具体情况考虑冬季保暖需要，一般不考虑夏季防热需要。

（二）水资源利用技术

水资源保护一直是绿色环保工程中的重点，因此在工程建设

中高效利用水资源，同样是绿色建筑技术的核心内容。某小区在建筑工程中创新应用了多种水资源利用技术，为实现水资源保护提供了新的思路。在建筑物中增加雨水收集系统，有效地收集并过滤屋面雨水，使其能够成为小区绿化、小区洗车等工作的水资源，从而实现了雨水的零排放工程。同时，在进行地面铺装时，优先选择了透水材料，有效地减少了雨天地表径流，让雨水能够更加快速地渗入地下，实现对地下水的补充^[3]。同时，在建筑内部大力推广节水器具的使用，比如安装低流量的水龙头、具有节水功能的马桶等，能够帮助用户进一步减少不必要的水资源浪费，有效地控制日常的用水量。另外，工程中还将中水处理回用系统引进建筑中，帮助人们更好地实现对生活污水的处理，并将处理后的中水使用在绿植浇灌、冲厕等方面，使得水资源的循环利用效率进一步提高^[4]。这些水资源利用技术的合理使用，不仅能够让建筑的运行成本进一步降低，同时也能给居住者带来更加便利舒适的生活环境，起到了良好的节约效果，也让建筑物的水资源管理能力大幅提升。



图1 雨水收集系统

（三）材料选择与应用技术

在使用绿色建筑技术的过程中，选择绿色环保的建筑材料能够进一步凸显出技术的优势和价值，有效地减少工程中的碳排放问题，不仅能够保障绿色建筑的基本性能，同时还能够有效地延长建筑的寿命，带给人们更加舒适的居住环境，避免环境污染对人们身体健康造成威胁^[5]。比如，某剧场在施工过程中采用了大量绿色环保的建筑材料，像低能耗材料、可再生资源等，充分贯彻落实了绿色环保的建筑理念。这项工程选择高强度低合金钢作为主要的建设材料，能够有效地降低施工过程中的钢材使用量，同时也能够让建筑物的整体结构变得更加稳定，具有良好的抗震效果^[6]。同时，在进行建筑装饰装修时，充分考虑建筑物所处的自然环境，使用了可再生木材和天然石材，既能够为人们营造出一种与自然和谐相处的建筑氛围，提高建筑物的审美情趣，同时又能够有效地减少人工材料对环境造成的污染与破坏，起到良好的绿色环保效用。又如，某金融中心在施工的过程中使用了新型绿色材料，如陶瓷板、高性能混凝土等等。这些材料本身具有良好的隔热保温效果，能够有效的延缓建筑物内部的环境温度变化，减少冬夏季暖通空调的能源消耗。除此之外，陶瓷板本身具有一定的自洁作用，在经过特殊处理后其自洁效果能够更好地凸显出来，既能够减少日常维护过程中的资源消耗，也能够降低维护的成本^[7]。另外，在这次工程中，还大量使用了环保玻璃，将工程中废弃不用的玻璃回收后重新进行制作，使其能够符合工程建设的需求。这些环保玻璃不仅具有较强的透光性，同时还能够有效地

隔绝噪音，能够让建筑内部的舒适度进一步提升，带给人们更加良好的工作体验。

（四）室内环境品质控制技术

室内环境的品质关系到人们的居住体验，因此是建筑工程中的重点。通过室内环境品质控制技术，可以帮助设计人员更加合理的布局内部环境，为后续施工做出有效的指导，使室内的空气质量、光照环境和温湿度都能够得到良好的控制。一项技术如今在许多建筑工程中得到了广泛的应用，比如广州塔就将这项先进的控制技术引入其中，通过室内空气质量控制系统实现对内部环境的动态调控。该系统具备高效的新风系统以及多层次空气过滤系统，能够根据内部环境的空气质量情况自动进行空气过滤，能够保证塔内空气的清新。该设备充分发挥了PM2.5过滤系统的作用，让塔内空气质量实现了显著的提升^[8]。另外，塔内还采用了智能化温湿度控制系统，能够根据塔内温湿度的变化进行自动调节，以便保证塔内工作人员和游客处于相对舒适的环境中。这不仅能够有效地提升室内环境品质，同时动态调整模式也能降低资源的消耗，实现高效的节能减排。又如，杭州某园区将自动通风技术和智能照明系统引入其中，在园区内借助大量自然光的方式来优化工作环境，这不仅能够使工作人员产生强烈的舒适感，同时也能够减少照明的能源消耗。为了更好地发挥自然通风系统的作用，在设计之初就对建筑内部的构造进行了适当的调整，使其布局能够满足空气流通的基本需要，有效地减少了室内闷热的问题，让自然通风效果更佳，切实减少了机械通风的使用频率，达到了绿色环保的节能减排目标。

（五）可再生能源利用

在绿色建筑技术中，可再生能源利用技术也是极为重要的内容之一，能够充分发挥太阳能、地热能、风能等可再生资源的作用，有效地减少能源消耗过程中的碳排放问题，同时切实降低能源消耗，为人们营造更加舒适的生活环境，为建筑行业实现绿色转型奠定良好的基础。国内许多工程都对可再生能源利用技术进行了实践，并取得了良好的实践效果。比如，某能源中心工程充分发挥了太阳能的作用，将大范围的太阳能光伏发电系统投入使用，能够满足建筑物自身的用电需求。该建筑工程将太阳能电池板安置在房顶和建筑外墙上，借助太阳能一年的发电量可以达到数百万度，减少了传统发电方式的使用，对不可再生能源起到了良好的保护作用^[9]。又如，某工程在建设过程中采用了风能发电技术，将智能电网和风力发电机进行衔接，以便满足建筑施工和建筑运行的需要。在大风天气时，风力资源能够满足发电的需求，保证建筑的正常功能；在风力资源不足时，可以借助智能电网进

行电力调节，以满足建筑物的电力使用需要。这不仅能够大幅降低建筑物的电力能源成本，同时也减少了电力使用过程中的碳排放，是绿色环保的有力途径。同时，还有工程将风能和太阳能进行联合使用，使得能源的供给更加稳定，保证了建筑的正常运行。除此之外，地热能也是可再生能源之一，是绿色建筑技术中常用的资源。杭州某科技园区工程项目就是利用地源热泵系统实现了能源的节约，通过该系统充分挖掘地热资源，以此来实现室内环境的有效调控。在冬天时，通过地热进行供暖；在夏天时，通过地冷来降低室内温度。这不仅切实减少了空调使用的频次，降低了空调使用过程中可能带来的环境污染风险，同时也节约了能源成本，真正贯彻落实了绿色环保的发展理念。

（六）绿色建筑规划与设计的应用

绿色建筑的规划与设计同样属于绿色建筑技术之一，是充分调动城市空间布局来实现资源的合理配置，充分考虑建筑周边公共绿地的设置需要，从而打造生态和谐的建筑环境。比如，在进行城区规划时，可以根据绿地面积设置生态廊道和集中绿地，实现整个城市绿化水平的提升，带来良好的生态效益。而在进行建筑设计时，则需要充分考虑当地的四季特点，分析气候环境的变化规律，采取能够提高居民舒适感的设计方案，并达到良好的节能效果。比如，合理的规划建筑物的朝向，避免出现大面积朝西的问题；在设计时贯彻南北通透的理念，实现建筑内部良好的通风效果，增强建筑物的自然采光能力。这些措施都能够减少建筑物使用时的能源消耗，实现节能减排^[10]。同时，可以将被动式设计建筑设计技术融入其中，增强遮阳系统、绿屋顶和太阳能房的应用，充分发挥自然资源的价值，让建筑物能够持续减少对人工能源的依赖，这既能够满足人们的居住需要，同时也能够避免对自然环境带来恶劣影响，实现更加高效的能源利用和环境保护，有效地推动绿色建筑理念的普及，让绿色建筑技术能够发挥出更大的作用和价值。

三、结束语

综上所述，绿色建筑技术是推进可持续发展战略的重要手段之一，能够为建筑行业的转型升级带来良好的助力。虽然目前绿色建筑技术依然存在着标准不完善、技术成本高、推广难度大等诸多问题，但是随着研究的深入和实践的积累，能够在行业内部建立起更加完善的绿色建筑技术使用规范，实现各项技术的创新应用，有效地降低建筑物的能源消耗，为人们带来更加舒适的居住环境，促进生态友好型社会的发展。

参考文献

- [1] 黄新. 建筑工程绿色建筑技术与绿色建筑材料的应用研究[J]. 居舍, 2025, (12): 42-44.
- [2] 张金林, 陈瑜. 绿色技术在建筑设计中的应用与实践研究[C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 西南大学, 重庆工商大学, 重庆建筑编辑部. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 中国建筑科学研究院有限公司, 2025: 863-866.
- [3] 李国保. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用研究[J]. 佳木斯职业学院学报, 2025, 41(02): 219-221.
- [4] 赖行健. “双碳”目标下的绿色建筑技术创新与发展[J]. 资源节约与环保, 2025, (02): 113-117.
- [5] 池年龙. 可持续发展视角下绿色建筑技术创新研究[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(01): 158-160.
- [6] 魏人树, 许斌, 雷鹏. 绿色建筑技术应用研究——以镇江市某住宅小区为例[J]. 城市建筑, 2024, 21(18): 199-202.
- [7] 张斌. 绿色建筑技术在建设工程中的应用与推广[J]. 新城建科技, 2024, 33(07): 70-72.
- [8] 史卫东. 绿色建筑技术在建筑工程中的实践与发展探讨[J]. 陶瓷, 2023, (09): 187-189.
- [9] 刘嘉盛. 工程项目中绿色建筑技术与应用探析[J]. 散装水泥, 2023, (03): 185-187.
- [10] 陈晶晶. 建筑设计中的绿色建筑技术的应用与优化措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (09): 40-42.

再生骨料替代率对绿色混凝土抗冻融性能影响的微观机理分析

李静茹

昌吉职业技术学院，新疆 昌吉 831100

DOI:10.61369/ERA.2025080011

摘 要： 随着建筑行业的可持续发展，再生骨料作为建筑废弃物资源化利用的核心产物，在绿色混凝土制备中发挥着重要作用。本文围绕再生骨料替代率与绿色混凝土抗冻融性能的关系展开研究，运用压汞法、扫描电镜、X射线衍射及能谱分析等技术手段，从微观孔隙结构演变、界面过渡区特征变化以及水化产物稳定性差异三个维度，系统揭示再生骨料替代率影响混凝土抗冻融性能的内在机理。研究发现，随着再生骨料替代率的提高，混凝土内部孔隙结构劣化、界面过渡区缺陷增多、水化产物稳定性降低，三者协同作用导致混凝土抗冻融性能显著下降。本研究成果为优化再生骨料混凝土配合比设计、提升其在寒区工程中的适用性提供了坚实的理论基础。

关 键 词： 再生骨料替代率；绿色混凝土；抗冻融性能；微观机理

Microscopic Mechanism Analysis of the Impact of Recycled Aggregate Replacement Rate on the Freeze-Thaw Resistance of Green Concrete

Li Jingru

Changji Vocational and Technical College, Changji, Xinjiang 831100

Abstract： With the sustainable development of the construction industry, recycled aggregates, as the core product of resource utilization of construction waste, play a significant role in the preparation of green concrete. This paper focuses on the relationship between the replacement rate of recycled aggregates and the freeze-thaw resistance of green concrete. By employing technical methods such as mercury intrusion porosimetry, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and energy dispersive spectroscopy, the study systematically reveals the inherent mechanism of how the recycled aggregate replacement rate affects the freeze-thaw resistance of concrete from three dimensions: the evolution of microscopic pore structure, changes in the characteristics of the interfacial transition zone, and differences in the stability of hydration products. The research finds that with the increase in the replacement rate of recycled aggregates, the internal pore structure of the concrete deteriorates, defects in the interfacial transition zone increase, and the stability of hydration products decreases. The synergistic effect of these three factors leads to a significant decline in the freeze-thaw resistance of concrete. The results of this study provide a solid theoretical foundation for optimizing the mix design of recycled aggregate concrete and enhancing its applicability in cold region engineering.

Keywords： recycled aggregate replacement rate; green concrete; freeze-thaw resistance; microscopic mechanism

引言

随着城市化进程的加速推进，建筑废弃物产生量逐年攀升，传统混凝土生产对天然砂石资源的过度依赖以及大量二氧化碳排放，使得混凝土行业的可持续发展面临严峻挑战。再生骨料作为建筑废弃物经破碎、筛分等处理后的产物，将其应用于混凝土制备，不仅能够实现建筑废弃物的资源化利用，还可有效降低对天然骨料的需求，契合绿色建筑发展理念。冻融破坏本质是混凝土内部孔隙水在冻结过程中体积膨胀产生应力，进而引发微裂纹萌生与扩展的过程。再生骨料的特殊物理化学性质会对混凝土内部孔隙结构、骨料与水泥浆体界面过渡区以及水化产物的形成与稳定性产生重要影响。因此，从微观层面探究再生骨料替代率对混凝土抗冻融性能的影响机理，对于推动再生骨料混凝土在寒区工程中的广泛应用具有重要的现实意义。

作者简介：李静茹（1998.02—），女，新疆昌吉人，本科，助教，研究方向：建筑工程技术，单位：昌吉职业技术学院，邮编：831100。

一、再生骨料特性对混凝土孔隙结构的影响

（一）老旧硬化水泥浆体对孔隙形成的影响

再生骨料表面附着的老旧硬化水泥浆体是影响混凝土孔隙结构的关键因素。老旧浆体中存在大量未完全水化的水泥颗粒，这些颗粒在新拌混凝土的水化过程中，因活性较低，难以与新的水泥水化产物充分融合。从化学反应动力学角度来看，老旧水泥颗粒表面被水化产物包裹，新的水化反应难以突破这层阻碍，导致局部区域水化反应不充分，从而形成更多的孔隙。同时，老旧浆体内部存在丰富的微裂缝与开孔孔隙，其复杂的孔隙网络结构使得再生骨料具有较高的吸水性。相关研究表明，再生骨料的吸水性可达天然骨料的5-10倍，这种高吸水性在混凝土拌合物中会引发一系列连锁反应^[1]。

（二）拌合水吸附与“二次水化”的孔隙效应

在混凝土拌制阶段，再生骨料会大量吸附拌合水，导致实际参与水泥水化反应的自由水减少。水泥水化反应是一个需要充足水分参与的过程，自由水的不足会使得水泥颗粒无法充分水化，大量未水化的水泥颗粒残留于混凝土内部，这些未水化颗粒不仅无法为混凝土提供强度，还会在其周围形成孔隙^[2]。另一方面，在混凝土硬化过程中，前期被再生骨料吸附的水分会缓慢释放，形成“二次水化”现象。虽然“二次水化”在一定程度上能够促进水泥的水化进程，但由于水分释放的不均匀性以及释放时间的滞后性，会在浆体内部形成不规则的毛细孔。这些毛细孔的存在，不仅降低了混凝土的密实度，还为冻融循环过程中孔隙水结冰提供了空间，增大了冻胀应力对混凝土的破坏作用。有研究指出，“二次水化”形成的孔隙尺寸多集中在50-500nm之间，这一孔径范围恰好是冻融破坏中冰晶体生长较为活跃的区域。

（三）孔隙结构劣化与冻融破坏关联

从微观孔隙结构分析，随着再生骨料替代率的增加，混凝土内部孔隙结构呈现明显的劣化趋势。通过压汞法对不同再生骨料替代率下混凝土的孔隙特征进行研究发现，混凝土的总孔隙率随再生骨料替代率的升高而逐渐增大。这是因为再生骨料自身的多孔特性使得混凝土内部孔隙数量增多，同时其对拌合水的吸附作用进一步加剧了孔隙的形成^[3]。此外，在孔隙孔径分布方面，有害孔（孔径>200nm）的占比也随着再生骨料替代率的增加而显著提高。大孔径的有害孔相互连通，形成了孔隙网络，这为冻融过程中冰晶体的生长和膨胀提供了更为有利的条件。当混凝土处于冻融循环环境时，孔隙中的水结冰后体积膨胀，在这些大孔径连通孔隙中，冰晶体能够自由生长，产生的冻胀应力会对孔壁产生巨大的压力，导致孔壁开裂，进而引发混凝土内部微裂纹的萌生与扩展，加速混凝土的冻融破坏^[4]。

二、界面过渡区（ITZ）特征与冻融损伤路径

（一）天然骨料与再生骨料界面过渡区的差异

界面过渡区是骨料与水泥浆体之间的重要连接区域，其结构和性能对混凝土的力学性能和耐久性能起着决定性作用。在天然骨料混凝土中，界面过渡区的形成过程相对较为稳定，水泥水化产物能够在骨料表面有序生长，形成厚度约50-100μm的界面过渡区。在这一区域内，水化产物（如C-S-H凝胶、钙矾石Aft、

氢氧化钙Ca(OH)₂）相互交织，形成较为密实的结构，使得天然骨料与水泥浆体之间具有良好的粘结性能。

然而，再生骨料混凝土的界面过渡区具有更为复杂的结构特征。由于再生骨料表面附着老旧砂浆，其界面过渡区存在两层过渡结构。内侧是新砂浆与老旧砂浆的结合面，外侧是老旧砂浆与天然骨料的原始界面。在混凝土制备过程中，新拌水泥浆体与再生骨料表面的老旧砂浆接触后，水化反应开始进行^[5]。但由于老旧砂浆的存在，其表面的物理化学性质与天然骨料存在较大差异，导致水泥水化产物在老旧砂浆表面的生长受到影响。老旧砂浆的孔隙率高、表面能低，使得水泥水化产物难以在其表面形成紧密的堆积结构，从而影响了界面过渡区的质量。

（二）界面过渡区晶体定向排列的机制

通过扫描电镜对再生骨料混凝土界面过渡区进行观察发现，与天然骨料界面过渡区中Ca(OH)₂晶体呈片状随机分布不同，再生骨料界面过渡区的老旧砂浆表面因预湿处理形成疏松层。在新砂浆水化过程中，Ca²⁺离子会向骨料侧迁移，这种离子迁移现象使得界面区的Ca(OH)₂晶体呈现出定向排列的特征，即出现“晶体择优取向”现象。从晶体生长动力学角度分析，老旧砂浆表面的疏松结构为Ca(OH)₂晶体生长提供了更多的晶核形成位点，同时Ca²⁺离子的定向迁移使得晶体在特定方向上优先生长。这种定向排列的Ca(OH)₂晶体结构较为松散，其层与层之间的结合力较弱，从而降低了界面过渡区的粘结强度。同时，能谱分析结果表明，再生骨料界面过渡区的Ca/Si比高于天然骨料界面过渡区，这反映出再生骨料界面过渡区中C-S-H凝胶的聚合度更低，结构更为疏松，进一步削弱了界面过渡区的性能^[6]。

（三）冻融损伤在界面过渡区的扩展路径

在冻融循环作用下，再生骨料混凝土的冻融损伤路径与界面过渡区的特征密切相关。冻融循环初期，由于再生骨料界面过渡区存在微孔隙、晶体缺陷等薄弱环节，冻胀应力会首先在这些区域集中，导致裂纹在界面过渡区的微孔隙与晶体缺陷处萌生。随着冻融循环次数的增加，裂纹会沿着老旧砂浆内部的裂缝逐渐扩展，并贯通新老界面。当再生骨料替代率较高时，多个再生骨料颗粒相邻分布，会形成连续的薄弱界面网络。在冻应力的作用下，应力能够通过这些连续的薄弱界面快速传递，使得混凝土内部的应力分布更加不均匀，加速了混凝土内部微裂纹的扩展和连通，最终导致混凝土整体性失效^[7]。研究人员通过数字图像相关技术（DIC）对冻融过程中混凝土内部裂纹扩展进行实时监测，发现裂纹在再生骨料界面过渡区的扩展速度明显快于天然骨料界面过渡区，且高替代率下裂纹形成网络的时间大幅缩短。

三、水化产物组成与冻融稳定性关联

（一）再生骨料对Ca(OH)₂晶体生成的影响

再生骨料混凝土的水化产物组成与天然骨料混凝土存在明显差异，这种差异对混凝土在冻融循环环境下的稳定性有着重要影响。通过X射线衍射分析可以发现，随着再生骨料替代率的增加，混凝土中水化产物Ca(OH)₂的衍射峰强度逐渐增强，且在界面过渡区富集现象更为明显。再生骨料表面附着的老旧砂浆中含有大量的惰性成分，如未水化的石英颗粒等，这些惰性成分会抑制水泥的水化反应进程，使得水泥水化反应不完全^[8]。同时，再

生骨料在混凝土中还会释放出 Na^+ 、 K^+ 等离子，这些离子会加速 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的结晶过程，导致 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体在混凝土中大量生成并富集。从化学平衡角度来看， Na^+ 、 K^+ 等离子存在改变了水泥水化体系的离子浓度，促进了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的析出。

（二）膨胀性产物生成与微结构劣化

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体本身硬度较低、韧性较差，其定向排列形成的层状结构在冻胀应力作用下极易产生解理破坏。在冻融循环过程中，孔隙水结冰产生的冻胀应力会作用于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体层，由于层间结合力较弱，晶体层会沿着解理面发生开裂，从而破坏混凝土内部的结构完整性。此外，再生骨料中还可能含有少量杂质，如附着的石膏、碳酸盐等。在长期冻融循环作用下，这些杂质会与水泥水化产物发生二次反应，生成膨胀性产物，如碳硫硅钙石。碳硫硅钙石的生成会导致混凝土内部产生膨胀应力，进一步加剧混凝土微结构的劣化。研究表明，碳硫硅钙石在生成过程中会产生约 1.5–2 倍的体积膨胀，这种膨胀作用会在混凝土内部产生微裂纹，降低混凝土的耐久性^[9]。

（三）AFt 晶体分解与胶凝体系弱化

能谱分析结果显示，在冻融循环后，再生骨料界面过渡区的 Al、S 元素含量升高。这表明在冻融循环过程中，钙矾石 AFt 晶体发生分解，转化为 Friedel 盐。AFt 晶体是混凝土中重要的胶凝物质，其分解会导致胶凝体系的粘结力下降，使得混凝土内部各组成部分之间的连接变得松散，从而降低了混凝土的抗冻融性能。AFt 晶体的分解与冻融循环过程中的离子迁移和化学反应密切相关，在冻融循环过程中，孔隙溶液中的离子浓度发生变化，使得 AFt 晶体的稳定性降低，进而发生分解反应。

四、替代率阈值与微观损伤模型

（一）低替代率下的抗冻融性能特征

通过大量试验研究发现，再生骨料替代率对混凝土抗冻融性能的影响存在一定的阈值。当再生骨料替代率较低，如 $\leq 30\%$ 时，混凝土的抗冻融性能与天然骨料混凝土差异较小，能够承受的冻融循环次数较多（通常 ≥ 300 次）。在这一替代率范围内，虽然再生骨料的加入会使混凝土内部孔隙率有所增加，但增幅相对有限（ $< 15\%$ ），且界面过渡区的缺陷尚未形成连通路径，混凝土内部结构仍具有较好的完整性，能够有效抵抗冻融循环产生的破坏作用。此时，再生骨料的负面影响在混凝土整体结构的稳定性下得到一定程度的缓冲，混凝土中的孔隙结构和界面过渡区仍能

维持较好的性能^[10]。

（二）高替代率下的协同劣化效应

然而，当再生骨料替代率超过 50% 时，混凝土的抗冻融性能显著下降，能够承受的冻融循环次数大幅减少（ < 200 次）。这主要是由于高替代率下，再生骨料的多孔结构与界面缺陷产生协同劣化效应。一方面，大量再生骨料的加入使得混凝土内部孔隙率显著升高，孔隙结构进一步恶化，为冻胀应力的产生和传递提供了条件；另一方面，再生骨料界面过渡区的缺陷增多，形成了连续的薄弱界面网络，使得冻融应力能够迅速在混凝土内部传递，加速了微裂纹的扩展和连通，导致混凝土结构快速破坏。高替代率下，再生骨料的各不利因素相互作用，形成恶性循环，极大地降低了混凝土的抗冻融性能。

（三）“孔隙–界面耦合损伤模型”构建

基于上述研究结果，建立“孔隙–界面耦合损伤模型”。在冻融循环过程中，冻融应力首先作用于具有高孔隙率的再生骨料砂浆基体。由于孔隙率高，孔隙中的水结冰后产生的冻胀应力较大，会在砂浆基体中引发微裂纹。这些微裂纹会通过疏松的再生骨料界面过渡区向相邻骨料传递应力，导致相邻骨料界面区也产生微裂纹。随着冻融循环次数的增加，微裂纹不断扩展并相互连通，形成裂纹网络。最终，裂纹网络贯穿整个混凝土结构，导致水泥石与骨料剥离，混凝土发生破碎，丧失抗冻融性能。该模型从微观层面揭示了再生骨料替代率影响混凝土抗冻融性能的内在机制，为深入理解混凝土冻融破坏过程提供了理论依据。

五、结束语

再生骨料替代率对绿色混凝土抗冻融性能的影响是一个复杂的多因素协同作用过程。从微观层面来看，再生骨料的特殊物理化学性质通过影响混凝土的孔隙结构、界面过渡区特征以及水化产物组成，显著改变了混凝土的抗冻融性能。高再生骨料替代率会导致混凝土内部孔隙率升高、界面过渡区缺陷加剧以及水化产物稳定性降低，这些因素相互作用，使得混凝土在冻融循环环境下更容易发生破坏。为了提高再生骨料混凝土在寒区工程中的适用性，未来研究可从再生骨料表面改性和混凝土配合比优化两方面入手。通过这些研究和技术创新，有望进一步提升再生骨料混凝土的抗冻融性能，推动其在寒区工程中的广泛应用，促进建筑行业的绿色可持续发展。

参考文献

- [1] 丁铸，李秋实，王新友. 再生骨料混凝土冻融损伤机理及性能提升研究进展 [J]. 混凝土, 2023(11): 125–130.
- [2] 刘峰，陈志强，周明. 再生骨料混凝土界面过渡区微观结构与性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(04): 895–902.
- [3] 张立，赵磊，孙宇. 再生骨料对混凝土孔隙结构及耐久性能影响的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(09): 3048–3054.
- [4] 吴昊，徐强，杨波. 再生骨料混凝土水化产物特性及其对耐久性的影响 [J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16148–16153.
- [5] 宋福涛. 再生骨料复合强化对水工混凝土强度和抗冻性的影响 [J]. 东北水利水电, 2023, 41(09): 38–40.
- [6] 刘恩铭，林明强，谢群. 再生粗骨料混凝土抗冻性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(09): 2963–2978.
- [7] 郭丹，郑易，柳蕴，等. 再生混凝土抗冻性能研究现状 [J]. 中小企业管理与科技（上旬刊）, 2021, (07): 181–182.
- [8] 鲍政文，于子浩，张鹏，等. 再生粗骨料混凝土及其构件抗冻性能研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(04): 142–157.
- [9] 王欣，汤玉娟，仝小芳，等. 再生混凝土抗冻性的试验研究 [J]. 绿色环保建材, 2020, (08): 1–4.
- [10] 李雪梅，齐莉莉，江守恒. 再生粗骨料对混凝土抗冻性的影响 [J]. 低温建筑技术, 2018, 40(08): 7–8+20.

高速公路隧道结构安全性养护研究

韩飞

陕西交通控股集团有限公司宝天分公司，陕西 宝鸡 721000

DOI:10.61369/ERA.2025080012

摘 要： 隧道结构作为高速公路的关键节点，指为穿越山体、江河或城市地下空间而修建的带状管状交通构筑物。隧道结构由主体结构、附属结构两大部分构成，承担着重要的功能，也面临着较高的安全风险。安全性养护是防范高速公路隧道结构安全风险的关键，对此，应围绕构建隧道结构安全性评估体系、健全隧道结构安全性养护制度、做好隧道结构病害的处置、推广预防性养护技术、加强数字技术的应用五个方面，采取安全性养护措施，防范高速公路隧道结构安全风险。

关 键 词： 高速公路；隧道结构；安全性养护

Research on Safety Maintenance of Expressway Tunnel Structures

Han Fei

Baofen Branch of Shaanxi Communications Holding Group Co., LTD. Baoji, Shaanxi 721000

Abstract： Tunnel structures, as key nodes of expressways, refer to strip-shaped tubular traffic structures built to pass through mountains, rivers or urban underground Spaces. The tunnel structure is composed of two major parts: the main structure and the auxiliary structure. It undertakes important functions and also faces relatively high safety risks. Safety maintenance is the key to preventing the safety risks of expressway tunnel structures. To this end, safety maintenance measures should be taken from five aspects: establishing a safety assessment system for tunnel structures, improving the safety maintenance system for tunnel structures, properly handling tunnel structure diseases, promoting preventive maintenance technologies, and strengthening the application of digital technologies to prevent the safety risks of expressway tunnel structures.

Keywords： expressway; tunnel structure; safety maintenance

引言

改革开放后，随着社会经济的发展，我国现代化、城市化水平持续提升，城市人口急剧增长的同时，交通出行需求激增。高速公路是现代城市交通体系的重要组成部分，隧道结构则是高速公路中安全风险高发的区域。安全性养护，不仅能够延长隧道结构的使用寿命，也能防范隧道结构的安全风险，对于高速公路的运营有着重要意义^[1]。因此，要做好高速公路隧道结构安全性养护。

一、构建隧道结构安全性评估体系

安全性评估是隧道结构安全性养护的第一步，能够准确反映隧道结构安全现状，为安全性养护的开展提供支持。应深刻认识到安全性评估在隧道结构安全性养护中的价值，围绕评估指标的选择、评估方法的采用、评估流程的优化等多个方面，构建隧道结构安全性评估体系。

1. 科学选择评估指标。评估指标是安全性评估的依据，评估指标是否系统、合理，对评估结果的准确性有着直接的影响。应结合隧道结构常见的安全风险，围绕结构性能、防水系统、环境荷载等多个方面，选择评估指标，构建安全性评估指标体系。

以结构性能为例，结构性能主要反映的是隧道结构的承载能力，涉及到的指标包括但不限于衬砌裂缝、衬砌厚度、衬砌背后脱空率、仰拱隆起量、钢筋锈蚀率等。

2. 合理选用评估方法。将定量评估作为隧道结构安全性评估的主要方法，根据安全性评估的指标体系，通过基于专家打分的层次分析法，明确各指标的权重，再在单一指标评分的基础上，采用加权求和的方式，得出总分。将评分结果由高到低分为 I 级、II 级、III 级、IV 级四个等级，I 级指无显著病害，结构性能达标，IV 级指结构严重劣化，需立即封闭维系。

3. 推进评估流程的标准化。遵循数据采集→状态诊断→等级评定→结果应用的思路，推进评估流程的标准化。数据采集，即

通过传感器、无人机巡检等，多维获取安全性评估所需的数据，为评估工作的开展提供数据支持。状态诊断指通过数据分析，研判隧道结构的安全状况，识别、诊断隧道结构的安全风险。等级评定指从评估指标出发，根据数据分析的结果，应用评估模型计算综合得分，输出安全等级报告。结果应用指将评估结果作为安全性养护的参照，根据评估结果，制定差异化的养护方案，Ⅲ级隧道纳入年度加固计划、Ⅳ级隧道启动应急维修。

二、健全隧道结构安全性养护制度

“没有规矩，不成方圆”，制度建设是高速公路隧道结构安全养护的根本保障。对此，要围绕责任人工、养护要求、监督考核、应急管理四个方面，健全隧道结构安全性养护制度，助力隧道结构安全性养护的高质量开展。

（一）合理划分责任

高速公路隧道结构安全性养护涉及到业主、养护单位以及检测机构等多个主体。合理划分责任，不仅能够有效减少推诿扯皮的问题，也能实现各主体在安全性养护中的协同效应。从业主的角度而言，业主应统筹制定养护规划，审批评估报告与养护方案，并做好养护资金的监督管理。从养护单位的角度而言，作为安全性养护的实际责任人，养护单位应做好日常巡检、定期检测等工作，并将检测结果及时上报。从检测机构的角度而言，检测机构应以独立、公正的态度，做好专项评估，为隧道结构的安全性养护提供智力支持。

（二）明确养护要求

系统、完善、清晰的养护要求，不仅能够为养护工作的规范化开展提供依据，也能提高养护工作质量。应围绕日常巡检、定期检测、专项检测等，出台隧道结构安全性养护操作规程，明确操作要求与阈值。以日常巡检为例，日常巡检是最为基本的养护方式，频率以一周一次为宜，巡检内容包括路面有无隆起、破损现象，衬砌表面有无裂缝、掉块现象，排水系统有渗漏水或盲管堵塞的现象等。巡检人员要实时上传照片、位置，准确描述并及时上报病害。

（三）完善监督考核机制

以内外结合的方式，开展隧道结构安全性养护的考核监督，内部考核监督以业主单位为主体，通过每月抽查养护记录、每季度组织专家现场复核的方式，检查隧道结构安全性养护的情况，外部考核监督以交通主管部门为主体，主要核定隧道结构的安全等级，并根据安全等级，对养护单位评分。同时，出台责任追究机制，对因养护失职导致事故的单位或个人，严格追溯责任。

（四）构建应急管理制度

隧道结构安全问题一旦发生，危害极大。应急预案对于隧道结构安全事件的处理具有重要的作用。应结合近年来隧道结构常见的安全问题，如分门别类制定应急预案。同时，加强应急预案的演练工作，组织养护人员在闲暇时期，开展专项安全事件应急预案演练，提高全体人员的应急管理意识以及应急处置能力。

三、做好隧道结构病害的处置

受设计不当、养护缺位、环境侵蚀等多重因素的影响，高速公路隧道结构易出现各种形式的病害。隧道结构病害严重危害通行安全，因此，做好隧道病害的处置，就成为高速公路隧道结构安全性养护的重点。

（一）衬砌开裂

早期的衬砌开裂以宽度在0.2mm以内的发丝状微裂缝为主，若不及时干预，裂缝会沿着环向、纵向拓展，并伴有混凝土剥落、掉块。导致衬砌开裂的因素有很多，如设计时，衬砌厚度不足或衬砌结构形式与实际地质情况不匹配。针对衬砌开裂的问题，应在应急修补的基础上，做好结构加固，即先采用环氧树脂对微裂缝进行注浆封闭，再根据衬砌开裂的原因，采取针对性的结构加固措施。

（二）渗漏水

渗漏水指隧道结构内存在点漏、线漏或面漏的问题。渗漏水会严重降低隧道结构的安全性。从短期的角度而言，渗漏水会降低路面摩擦力，冬季严寒季节，更会导致挂冰问题，增加通行事故风险，从长期的角度而言，渗漏水会加速钢筋锈蚀、混凝土碳化等问题，影响隧道结构的使用寿命。应在堵水、排水的基础上，通过整体喷涂水泥基渗透结晶型防水涂料或局部更换破损防水板，进行防水修复。

（三）路面隆起

路面隆起指隧道结构路面受围岩膨胀、基底软化、施工缺陷等因素的影响，出现局部隆起、开裂的问题。隧道结构内空间有限，路面隆起会导致行车颠簸，引发车辆失控，造成安全事故。对隆起高度在5cm以内的区域，可采用切割打磨的方式，使路面平整，再根据路面隆起的原因，制定根治修复方案。以围岩膨胀导致的路面隆起为例，可开挖隆起段路面及基层，置换膨胀性围岩。

（四）钢筋锈蚀

钢筋是隧道结构的重要材料，钢筋锈蚀也是隧道结构常见的安全问题。钢筋钝化膜是在氧化条件下通过强阳极极化而形成的一层具有阻碍腐蚀作用的保护膜，然而，受混凝土碳化的影响，钝化膜存在被破坏的风险，同时，地下水或冰盐的渗透，也会加速钢筋电化学反应能够，导致钢筋锈蚀。锈蚀会导致钢筋力学性能的退化，危害隧道结构安全。应通过表层处理、修复加固、长期防护，来防范、处置钢筋锈蚀问题，保障隧道结构的安全性。

四、推广预防性养护技术

预防性养护是高速公路隧道结构安全性养护的重点。所谓预防性养护，指在衬砌开裂、渗漏水等显著病害出现前采用的养护措施。预防性养护具有重要作用，不仅可以有效降低隧道结构的安全风险，保障通行安全，也能延长隧道结构的使用寿命^[3]。对此，应围绕防水系统、衬砌结构、环境三个维度，采取好策略。

（一）防水系统维护

防水系统是隧道结构的重要组成部分，排水盲管堵塞、防水

板破损等问题，也是导致隧道结构渗漏水问题的主要原因。应做好防水系统的周期性检测，综合采用地质雷达、红外热像仪等工具，研判防水系统情况，如以地质雷达探测初期支护与二次衬砌间防水板的完整性，锁定破损点。针对检测中暴露出来的问题，应采取针对性的修复措施。以防水板局部破损为例，可采用粘贴丁基橡胶止水带的方式，来修复破损。对大面积的破损，可采用热风焊枪补焊。对富水段或已出现渗漏水历史的隧道，可增设辅助排水系统，实现排水系统的整体优化。

（二）加固衬砌结构

混凝土微裂缝、脱空、钢筋局部锈蚀等初期劣化，是导致隧道结构整体性风险的主要因素。可通过加固衬砌结构的方式，来遏制病害发展，保障隧道结构安全性。混凝土碳化和多种病害相关，而延缓混凝土的碳化速率，则是预防性养护的重点^[2]。可喷涂硅烷浸渍剂，确保渗透深度在3mm以上，在混凝土表面形成憎水膜。针对衬砌背后脱空的问题，可用水灰比在0.4-0.5的低收缩水泥浆，进行注浆填充，规避衬砌结构脱空导致的开裂问题。

（三）做好环境控制

环境侵蚀是高速公路隧道结构病害由小变大，酿成安全事故的重要因素。应从温度、湿度以及化学腐蚀等方面，做好隧道结构的环境控制。温度控制要根据隧道结构所在的地区环境进行，对高温地区，应在衬砌表面涂刷反射隔热涂料，降低混凝土内外温差，防范温差大导致的温度应力裂缝。对低温地区，可在排水沟内设置保温层，预防冬季渗漏水结冰。湿度控制主要为风机、风管等通风设备的检查、清理与优化，能够降低隧道内的相对湿度，减少混凝土表面冷凝水。

五、加强数字技术的应用

在数字技术不断发展与广泛应用的今天，人类社会已经步入数字时代。高速公路养护也向着数字化转型的方向迈进。数字技术在高速公路隧道结构安全性养护中有着广阔的应用价值，不仅可以提升隧道结构安全性的态势感知能力，也能推动隧道结构安全性养护的智能化发展。因此，要多维加强数字技术在隧道结构安全性养护中的应用。

（一）以无人机巡检提高巡检水平

巡检是隧道结构安全性养护的重要内容，传统的巡检，以人

工巡检为主，面临着盲区多、效率低、安全性差等问题。搭配高清摄像头、红外热像仪以及激光雷达的无人机，在隧道结构巡检中有着突出的优势。应在隧道结构巡检中，大力推广无人机，发挥好专业设备在裂缝、衬砌内部脱空等病害巡检中的作用，同时，将巡检数据，导入分析平台，形成标准化数据库，为后续的数据分析与应用奠定坚实基础。

（二）以BIM模型推进可视化管理

BIM（Building Information Modeling）能够隧道结构数据采集的基础上，生成三维模型，从而助力隧道结构的可视化管理。不同阶段的数据集成，如设计阶段的围岩分级、衬砌厚度、防水板类型，施工阶段的锚杆长度、注浆压，运营阶段的病害历史、修复记录等，是三维模型生成的基础。应在数据采集的基础上，做好数据集成，并结合巡查动态反馈的数据，依托三维模型，生成病害坐标、类型、发展态势等基本信息，为养护工作的开展提供依据。

（三）以人工智能技术推进智能化养护

人工智能以模拟和延展人类智能为主要特点，是养护智能化的关键。机器学习是人工智能的核心，主要研究机器对人类学习行为的模仿与实现，以使机器获取新的知识、技能，促使机器重新组织已有的知识结构使之不断改善。可结合数据，利用LSTM模型，对隧道结构病害进行预测。当前，以DeepSeek、Doubao、文心一言等为代表的生成式人工智能平台，在处于快速发展的阶段。可将相关数据以及安全性养护的需求，输入到生成式人工智能平台，自动获取养护方案，从而提高安全性养护的效率。

六、结束语

安全性养护是通过系统性技术手段，维持或恢复隧道结构性能、预防安全事故的全周期管理过程，对保障高速公路隧道结构的安全性具有重要的意义。要从安全性评估等多个方面出发，做好隧道结构安全性养护，提升隧道结构安全等级。

参考文献

- [1] 施章武. 高速公路桥梁与隧道养护管理现状与解决措施 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(01): 131-134.
- [2] 徐爽. 公路隧道钢筋混凝土二次衬砌施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(03): 118-121.
- [3] 张艺城. 高速公路隧道预防性养护技术的实践应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(01): 177-180.

建筑施工中检验检测技术的应用与质量控制研究

张静

雄铁工程检测有限公司，雄安新区 071600

DOI:10.61369/ERA.2025080016

摘要： 检验检测技术是保障建筑工程质量的核心手段，贯穿材料验收、施工监控及竣工验收全过程。研究系统分析了材料性能检测、结构安全监测等关键技术应用，探讨了标准化操作流程、误差控制等质量管理体系，提出了智能化检测、新型设备研发等技术优化路径。结合《建设工程质量检测管理办法》（2023）等最新政策要求，从技术升级、管理完善、标准建设等维度构建了检验检测技术的优化策略，为提升工程质量管理水平提供理论支撑和实践指导。

关键词： 检验检测技术；质量控制；智能化检测

Research on the Application and Quality Control of Testing and Inspection Technology in Building Construction

Zhang Jing

Xiongtie Engineering Testing Co., Ltd. Xiong'an New Area 071600

Abstract： Testing and inspection technology is the core means to ensure the quality of construction projects, running through the entire process from material acceptance, construction monitoring to final acceptance. The research systematically analyzed the application of key technologies such as material performance testing and structural safety monitoring, discussed the quality management system including standardized operation procedures and error control, and proposed technical optimization paths such as intelligent detection and the research and development of new equipment. In line with the latest policy requirements such as the "Administrative Measures for Quality Inspection of Construction Projects" (2023), an optimization strategy for testing and inspection technology has been constructed from the dimensions of technological upgrading, management improvement, and standard construction, providing theoretical support and practical guidance for enhancing the quality control level of construction projects.

Keywords： test and detection technology; quality control; intelligent detection

引言

建筑工程质量直接关系公共安全和社会效益，检验检测技术作为质量控制的核心手段，在工程建设全过程中发挥着不可替代的作用。2023年住房和城乡建设部颁布的《建设工程质量检测管理办法》（第57号令）进一步强化了检测机构的责任要求，推动检测行业规范化发展。当前，随着新型建筑材料和复杂结构的广泛应用，传统检测方法面临精度不足、效率低下等挑战。智能传感、无损检测等新技术的引入为工程质量管理提供了新的解决方案，而检测标准的持续完善则为技术创新提供了制度保障。研究检验检测技术的应用现状及优化路径，对提升建筑工程质量、促进行业转型升级具有重要的现实意义，也是落实国家质量强国战略的具体实践。

一、建筑施工检验检测技术概述

（一）检验检测技术的定义与分类

检验检测技术是指在建筑施工过程中，通过科学方法对材料、结构及环境参数进行测量、分析与评价的技术手段，其核心职能在于确保工程质量、验证设计合理性并预防潜在风险^[1]。在建筑施工中，检验检测贯穿于项目全生命周期，涵盖原材料进场验收、施工过程监控及竣工验收等关键环节。根据检测对象的

不同，检验检测技术可分为三大类：材料检测主要针对混凝土、钢筋、沥青等建筑材料的物理力学性能（如强度、耐久性）及化学成分进行分析；结构检测侧重于评估建筑构件的承载能力、变形特性及缺陷分布，包括地基检测、桩基完整性测试及钢结构焊缝探伤等；环境检测则涉及施工及使用阶段的环境影响监测，如噪声、振动、空气质量等指标，以确保工程符合环保及职业健康标准^[2]。

（二）检验检测技术的理论基础

检验检测技术的科学性与可靠性依赖于多学科理论的交叉支

撑。力学理论为结构荷载分析、应力应变测量提供计算模型，材料学理论则解释建筑材料在微观与宏观层面的性能演变规律^[3]，统计学方法用于检测数据的误差分析与可靠性验证^[4]。标准化体系是试验检测技术规范化的重要保障，国际标准（如 ISO 17025《检测实验室能力通用要求》）与国家标准（如 GB/T 50344《建筑结构检测技术标准》）对检测流程、仪器精度、人员资质及数据报告格式提出明确要求，确保检测结果的可比性与法律效力。理论基础的深化与标准化体系的完善共同推动了试验检测技术从经验导向向科学化、定量化发展。

二、试验检测技术在建筑施工中的关键应用

（一）材料性能检测

材料性能检测是确保建筑工程质量的基础环节，主要针对混凝土、钢筋、沥青等关键建筑材料进行性能评估。混凝土检测包括抗压强度试验、抗渗性测试及耐久性分析，通过标准试块养护和压力试验确定其力学性能指标。钢筋检测主要涉及拉伸试验、弯曲试验及化学成分分析，以验证其强度、延展性和锈蚀风险。沥青材料则通过针入度、软化点及延展性试验评估其路用性能。随着技术进步，无损检测技术如超声波探伤、红外热成像等逐渐应用于材料缺陷识别，可在不破坏结构的前提下快速定位内部空洞、裂缝及材料不均匀性问题，显著提升检测效率和精度^[5]。

（二）结构安全与耐久性检测

结构安全检测是保障建筑稳定性的核心内容，涵盖地基承载力测试、桩基完整性检测及钢结构焊缝质量评估。地基承载力通常通过静载试验或动力触探法测定，桩基完整性多采用低应变反射波法或声波透射法进行检测^[6]。钢结构焊缝则依赖超声波探伤或磁粉探伤技术确保焊接质量。长期健康监测技术通过分布式传感器网络实时采集结构应力、变形及振动数据，结合 BIM 技术构建数字孪生模型，实现对建筑全生命周期的性能跟踪与预警。桩基检测技术的创新应用为工程质量控制提供了可靠保障^[7]。这种动态监测体系能够及时发现结构损伤，为维护决策提供科学依据，有效延长建筑使用寿命。

三、试验检测技术的质量控制体系

（一）检测过程的质量控制

1. 标准化操作流程

试验检测过程的标准化是确保数据可靠性的基础保障。取样环节需严格遵循代表性原则，按照规范要求的数量、位置和方法进行采集，避免人为因素导致的样本偏差。试验阶段应依据标准操作规程执行，包括仪器校准、环境条件控制和操作步骤规范化，确保不同人员、不同时间获得的检测结果具有可比性。数据分析过程需要采用统一的处理方法和判定标准，建立完整的原始记录和复核机制，实现检测过程的可追溯性^[8]。标准化的操作流程不仅能够提高工作效率，更是保证检测结果准确性和公正性的关键措施。

2. 误差分析与精度控制

试验检测中的误差主要来源于仪器设备、环境条件、操作方法和样品本身四个方面^[9]。仪器误差包括灵敏度不足、零点漂移等问题，需通过定期检定和维护来消除；环境误差由温湿度变化、振动干扰等因素引起，要求实验室具备稳定的测试环境；操作误差源于人员技能差异，需要通过规范化培训和操作考核来降低；样品误差则与取样方法和保存条件密切相关。为控制这些误差，可采用多次测量取平均值的方法提高精度，引入自动化检测设备减少人为干扰，运用统计分析方法识别异常数据，并通过实验室间比对验证检测结果的可靠性^[10]。建立完善的误差控制体系是提升检测质量的重要途径。

（二）检测结果的质量评价

1. 数据可靠性验证

检测结果的可靠性验证是质量控制的关键环节，主要通过重复性试验和第三方复核等方法实现。重复性试验要求在相同条件下对同一样本进行多次测试，通过结果的一致性程度评估检测方法的稳定性。第三方复核则引入独立检测机构对关键数据进行复测，消除单一实验室可能存在的系统误差。数据比对分析需要建立科学的评判标准，采用统计方法计算变异系数和置信区间，确保检测结果在允许误差范围内。实验室能力验证和仪器交叉校准也是验证数据可靠性的重要手段，为检测报告的公信力提供技术支持。

2. 不合格结果的处置机制

对于检测中出现的不合格结果，必须建立规范的处置流程。偏差分析应从检测方法、仪器状态、环境条件和操作过程等多维度查找原因，明确问题性质。整改措施包括重新取样检测、方法优化或设备维修等针对性处理方案，重大质量问题需启动工程整改程序。追溯流程要求完整记录不合格数据的发现、分析和处理全过程，建立从样品接收到报告出具的可追溯链条。同时应完善预警机制，对频发或系统性质量问题及时采取预防措施，避免同类问题重复发生，形成闭环质量管理体系。

四、试验检测技术应用的优化策略

（一）技术层面的优化

1. 智能化检测技术

人工智能与机器学习技术的引入正在推动试验检测数据分析方式的革新。基于深度学习的图像识别算法能够自动分析混凝土裂缝形态和钢筋锈蚀程度，显著提升缺陷识别的准确率和效率。机器学习模型通过对历史检测数据的训练，建立材料性能预测系统，实现强度发展规律的智能研判。大数据分析技术整合多源检测信息，构建工程质量评估模型，为决策提供数据支持。智能算法的应用不仅缩短了数据处理周期，还降低了人为判读的主观性，使检测结果更具客观性和科学性。

2. 新型检测设备研发

检测设备正朝着高精度、自动化方向发展。微型化 MEMS 传感器实现结构应变的分布式实时监测，纳米级位移传感器可捕

捉细微变形特征。自动化检测机器人集成多种传感模块，完成高空、狭小空间等危险区域的自主检测作业。无线传输技术的应用使检测数据能够实时上传至云端平台，实现远程监控与分析。便携式光谱分析仪、三维激光扫描仪等新型设备的普及，大幅提升了现场检测的便捷性和数据采集的完整性。这些技术进步不仅扩展了检测范围，更提高了检测过程的标准化程度。

（二）管理层面的优化

1. 检测人员培训与认证

检测人员的专业素质直接影响试验检测结果的可靠性。建立系统化的培训体系应包含理论教学、实操训练和案例分析等多个维度，重点强化标准规范理解、仪器操作技能和数据分析能力。实施分级认证制度，根据检测项目复杂程度设置不同等级的资质要求，通过理论考核和实操评估确保人员能力达标。定期组织技术交流和继续教育，跟踪最新检测技术发展动态。建立人员技术档案，记录培训经历、考核结果和工作业绩，实现检测队伍的专业化、规范化管理。

2. 检测机构资质与监管

检测机构资质管理是保障行业质量的基础。CNAS（中国合格评定国家认可委员会）认证体系对实验室管理体系、技术能力和质量保证提出严格要求，通过现场评审和能力验证确保检测机构的技术水平。行业监管部门应建立动态监管机制，包括定期检查、飞行检查和能力验证等多种形式，对检测行为实施全过程监督。完善信用评价体系，将检测质量、服务能力纳入评价指标，实施分级分类管理。建立黑名单制度，对出具虚假报告等违规行为实施严厉惩处，维护检测市场的公平有序。

（三）标准化与政策支持

1. 完善技术标准体系

技术标准体系的完善需要实现国际标准与地方标准的有机衔

接。ISO、ASTM 等国际标准为检测方法提供基础框架，地方标准则需结合区域材料特性和工程实际进行针对性补充。建立动态更新机制，及时将新技术、新工艺纳入标准体系，确保标准的先进性和适用性。标准编制过程应加强产学研合作，通过多方论证提高标准的科学性和可操作性。统一不同层级标准的技术要求，避免标准间的冲突与矛盾，形成层次分明、协调配套的标准体系，为工程质量检测提供完整的技术依据。

2. 政策激励与行业推广

政策支持是推动检测技术发展的重要保障。财政补贴和税收优惠可降低企业技术升级成本，激发创新活力。建立技术推广平台，整合高校、科研院所和企业资源，加速科技成果转化。行业协会应组织技术交流活动，编制应用指南，促进先进检测方法的普及。将新型检测技术纳入政府采购目录，通过示范工程验证技术可靠性。完善知识产权保护机制，营造有利于技术创新的政策环境，形成政府引导、市场主导的良性发展格局。

五、总结

试验检测技术在建筑施工中发挥着质量保障与风险防控的核心作用，贯穿材料验收、施工监控及竣工验收全过程。材料性能检测与结构安全监测构成技术应用的关键领域，标准化操作流程与误差控制体系确保检测数据的可靠性。智能化检测技术与新型设备的研发推动检测效率与精度的提升，而人员培训、机构认证及标准化建设则从管理层面强化质量控制。政策支持与技术推广为行业创新提供持续动力。未来，随着数字技术与检测方法的深度融合，试验检测将向智能化、标准化、系统化方向发展，为建筑工程质量提供更加科学、高效的保障。

参考文献

- [1] 薛伟. 浅谈建筑工程材料试验检测技术 [J]. 中小企业管理与科技, 2012(33):1.
- [2] 吴伟. 浅谈建筑工程材料试验检测技术 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015(17).
- [3] 张童, 何卫洲, 胡杨. 建筑工程材料试验检测技术 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 000(023):4276.
- [4] 王凤莲. 建筑工程材料试验检测技术 [J]. 中国周刊: 英文版, 2021(8):3-4.
- [5] 刘恒溢. 建筑工程检测中无损检测技术的应用 [J]. 住宅与房地产, 2016(21):1.
- [6] 王子武. 桩基检测技术在建筑工程中的应用分析 [J]. 科学时代, 2013(15):2.
- [7] 廖培钧. 建筑工程桩基检测技术实践分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(4):4.
- [8] 胡思伟. 浅谈路桥工程的试验检测技术 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 000(016):110-111.
- [9] 高敏斯. 建筑工程材料试验检测技术 [J]. 建材与装饰, 2016(44):2.
- [10] 黄龙. 建筑工程质量控制中的工程检测技术要点 [J]. 大众文摘, 2023(15):0115-0117.

修平高速公路路基路面及防护工程设计技术

胡斌

江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330002

DOI:10.61369/ERA.2025080027

摘 要： 本文以江西修平高速公路为研究对象，该路段穿越江南丘陵过湿区（IV 5 区），面临软土、高边坡等复杂地质条件。研究系统剖析了路基路面及防护工程设计的技术要点与实施路径，创新引入“动态设计 + 生态优先”理念。在技术应用上，针对软土路基采用分级处理策略，通过浅层换填、深层挤密桩等方式提升地基稳定性；排水系统则采用多维耦合设计，保障路基排水顺畅。通过上述技术手段，实现了工程安全与生态保护的协同优化。研究成果为江南丘陵过湿区及同类山区高速公路的设计与建设，提供了可借鉴的技术方案和实践范本。

关 键 词： 山区高速；路基路面设计；特殊路基处理；生态防护；排水系统

Design Technology of Subgrade, Pavement and Protection Engineering for Xiuping Expressway

Hu Bin

Jiangxi Transportation Design Research Institute Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330002

Abstract： This paper takes the Xiuping Expressway (Jiangxi section) as the research object, which passes through the humid hilly area (IV 5 zone) in southern Jiangnan, facing complex geological conditions such as soft soil and high slopes. The study systematically analyzes the technical key points and implementation paths of subgrade, pavement, and protection engineering design, innovatively introducing the concept of "dynamic design + ecological priority." In terms of technical applications, a hierarchical treatment strategy is adopted for soft soil subgrades, enhancing foundation stability through shallow replacement, deep mixing piles, and other methods. The drainage system uses multi-dimensional coupling design to ensure smooth subgrade drainage. Through these technical measures, the collaborative optimization of engineering safety and ecological protection is achieved. The research results provide a referenceable technical scheme and practical model for the design and construction of expressways in humid hilly areas of southern Jiangnan and similar mountainous regions.

Keywords： mountainous expressway; subgrade and pavement design; special subgrade treatment; ecological protection; drainage system

引言

随着我国交通基建推进，山区高速公路建设规模扩大。山区地形地质复杂，尤其江南丘陵过湿区特殊地质多，给高速公路路基路面及防护工程设计带来挑战^[1]，实现工程安全与生态保护协调统一成为关键。江西修平高速公路穿越多种地貌，面临软土路基沉降、高边坡稳定、排水优化等难题。传统设计难以满足安全性、经济性与生态性综合要求。因此，开展该项目路基路面及防护工程关键技术研究，探索山区复杂地质设计方案，对提升山区高速公路建设水平、推动行业进步意义重大。

一、工程概况与设计框架

79.676km，穿越四种典型地貌单元：

（一）项目地理与地质特征

修平高速公路起于修水县庙岭乡，终于赣湘省界，全长

一是冲洪积河谷地貌：分布于修河、大桥河沿岸，软土厚度 0.8~3m，呈透镜体状分布；二是砂页岩剥蚀低丘高岗：占路线总长 45%，地形起伏较大，风化岩层节理发育；三是红层碎屑岩剥

蚀高岗：局部存在高液限土，天然含水率达35%~40%；四是石灰岩溶蚀盆地：岩溶率5%~8%，主要发育溶沟、石芽及小型空洞。

区域水文呈现“季节性流量突出”特点，修河年均径流量达134亿 m³，暴雨期水位涨幅达5~8m。地震动峰值加速度0.05g（地震基本烈度Ⅵ度），历史最大震级5.5级（1573年修水西地震）。

（二）技术标准与规范体系

项目采用双向四车道高速公路标准，核心技术指标如下表：

指标名称	参数值	规范依据
设计速度	80km/h	《公路工程技术标准》（JTG B01-2003）
路基宽度	24.5m（整体式）	《公路工程技术标准》（JTG B01-2003）
路面结构设计年限	沥青混凝土15年	《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2006）
桥涵设计荷载	公路 - I 级	《公路桥涵通用设计规范》（JTG D60-2004）
路基设计洪水频率	1/100	《公路路基设计规范》（JTG D30-2004）

设计严格执行《工程建设标准强制性条文》，如《公路路线设计规范》（JTG D20-2006）中建筑限界规定、《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG D63-2007）中桩基嵌岩深度要求等。

二、路基设计关键技术与实施

（一）横断面布置与边坡优化

1. 标准横断面构成

路基横断面方案按部颁《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)设置，全路段均采用整体式路基断面。路基横断面布置如下：

路基宽24.5m；0.75m（土路肩）+2.5m（硬路肩）+2×3.75m（行车道）+0.5(路缘带)+2.0m(中央分隔带)+0.5m(路缘带)+2×3.75m（行车道）+2.5m（硬路肩）+0.75m（土路肩）^[2]。中间带包含2m中央分隔带与两侧0.5m路缘带，硬路肩含0.5m右侧路缘带，满足应急停车与交通安全需求。

2. 边坡分级设计

— 填方路基：

高度H ≤ 16m 时，采用折线坡率（路面以下8m 内1:1.5，8m 以下1:1.75）；

H > 16m 时， 设1.5m 宽平台（间距8m），平台设20cm×30cm 平台沟，坡脚护坡道宽1m。

— 挖方路基：

土质边坡 ≤ 12m 为单一坡率（1:1.25），> 12m 时分级（每级高8m，平台宽2m）；

岩质边坡 ≤ 12m 为单一坡率（1:0.75~1:1），> 12m 时分级（每级高10m，平台宽2m）。

（二）特殊路基处理技术

1. 软土路基分级处治

根据软土厚度（H）与工程地质条件，采用差异化处理方案：

软土厚度	处理措施	材料参数
H < 2m	清除表土 +50cm 砂垫层 + 土工格栅（TGDG180）	砂垫层压实度 ≥ 93%，格栅抗拉强度 ≥ 180kN/m
2m ≤ H ≤ 3m	50cm 砂砾垫层 +30cm 开山石渣 + 土工格栅包裹（层间距80cm）	砂砾含泥量 < 5%，开山石渣粒径 ≤ 10cm
H > 3m	碎石桩（间距1.5m，深度穿透软土层）+100cm 碎石垫层	碎石桩直径50cm，梅花形布置

案例：K12+300~K12+800段软土厚度2.8m，采用砂砾垫层 + 开山石渣 + 土工格栅方案，工后沉降监测显示年均沉降量 < 15mm，满足规范要求。

2. 岩溶路基工程措施

通过工程地质钻探及物探综合勘察方法，查明岩溶分布范围。本项目 K21+500 ~ K22+200 段丘间谷盆地及 B1 标段东津水河谷盆地岩溶十分发育，且以浅层岩溶为主，洞内多为软~流塑状土充填，局部无充填，灰岩顶板一般0.2 ~ 2.0米不等，路基填高不一。

（1）一般溶洞处治方法

①清除表面耕植土和软土。

②以（200×20）kN·m 单击夯击能夯击，若出现空洞塌陷，则片石回填后夯实，再以（200×6）kN·m 单击夯击能夯击2遍，最后满夯1遍，满夯单击夯击能为（200×4）kN·m^[3]。

③强夯后增设三层双向土工格栅。

④路面基层设置双层配筋连续混凝土板补强。

（2）对于分布于东津水河谷盆地的特殊较大的浅层岩溶，当预先进行强夯存在困难时采用如下方法处治：

①先采用地下爆破将溶洞炸塌、炸开。

②用挖掘机、推土机平整。

③采用夯击能（200×6）kN·m 进行强夯，强夯工艺与石方路基强夯相同。

④利用标段内多余土石方进行正常填筑。

（三）路基压实标准与质量控制

路基压实采用重型击实标准，关键参数如下表：

项目分类	路面底面以下深度（m）	CBR 值（%）	压实度（%）	最大粒径（mm）
上路床	0~0.3	≥ 8	≥ 96	100
下路床	0.3~0.8	≥ 5	≥ 96	100
上路堤	0.8~1.5	≥ 4	≥ 94	150
下路堤	> 1.5	≥ 3	≥ 93	150

高填方路段（H > 16m）采用强夯补强：单击能800kN·m，夯点间距3.5m，梅花形布置，每遍间隔4天，有效控制工后沉降 ≤ 30mm。

三、路面结构设计与材料优化

（一）结构组合与力学性能

山区高速路面需满足承载、耐久及抗变形要求^[4]。修平高速主

线路面采用“沥青混凝土+半刚性基层”复合结构，总厚76cm，分六层：4cm AC-13C 改性沥青表面层（抗滑）、8cm AC-20C 改性沥青下面层（抗疲劳）、10cm ATB-25 沥青碎石上基层（分散荷载）、18cm 水泥碎石中基层、18cm 低剂量水泥碎石下基层（刚柔过渡）、20cm 级配碎石底基层（排水传力）。设计弯沉值23.4（0.01mm），满足2784.86万次累计标准轴次需求，各层协同降低应力集中。

（二）材料技术要求

材料性能决定路面寿命^[5]。表面层用 SBS 改性沥青（PG76-16），软化点≥76℃，5℃延度≥20cm，适应温差。集料表面层粗集料磨光值≥42，粘附性5级；基层集料压碎值≤30%，级配符合规范。土工格栅抗拉强度≥180kN/m、延伸率≤10%，抑制开裂。材料参数精准控制，实现性能梯度优化^[6]。

四、防护与排水系统协同设计

（一）填方路堤边坡防护

按填土高度与地形防护：4米内用贴草皮或喷播；超4米用人字型片石骨架。水库路段以砂砾垫层和浆砌片石防护至水面上0.5米。内涝地段结合排水。旱桥桥头5米内用六边形预制块铺草皮并设踏步，特殊路段用混凝土挡土墙^[7]。

（二）挖方路堑边坡防护

以绿色防护为主，常规用挂网喷播草（灌）、人工植树；破碎岩体用锚杆+挂网植生；顺层坡面局部加混凝土矮墙。不稳定边坡据实际制定特殊方案^[8]。

（三）路基、路面排水系统设计

1. 路基排水：独立体系，与农田灌溉分离。填方设梯形浆砌片石排水沟；挖方用暗盖板边沟，配砂砾盲沟与滤水管。坡顶设截水沟，平台设平台沟，经急流槽排水。关键部位圬工砌筑；水田段排水沟兼具灌溉排洪。2. 路面排水：无超高路段2%路拱横坡散排；超高路段内侧散排，外侧经集水沟等排水。挖方雨水汇入填方边沟；填方借“人字”骨架引流，凹曲线设拦水埂。3. 中央

分隔带排水：集水系统含封水层、碎石盲沟及透水管，双层沥青土工布防渗。排水系统有集水井、纵横向管，横向管埋于底基层下，出口设防冲刷垫板，间距30-50米，遇构造物时调整。

五、环保与节约用地措施

（一）取土、弃土方案

施工标段划分时，注重路基土石方调配等，力求填挖平衡，减少借弃方。弃方优先用主线附近山洼填平，再选弃土场。

（二）环保及节约用地措施

取（弃）土场需协调当地关系，强化水土保持，避免侵害周边^[9]。运土途经街道、村庄时做好防护，减少污染^[10]。取（弃）土场采用草皮、喷播植草（灌）及植树防护，树种选适生品种。弃土分层压实，设排水沟、平台等。取土前清腐殖土、设排水沟，完成后优先复垦，否则整平防护并设排水沟。

六、结论与技术创新

1. 从技术创新维度，构建了“地质勘察-动态设计-生态修复”一体化流程。通过引入先进地质探测技术精准识别软土、岩溶等不良地质，结合动态设计理念优化路基路面及防护方案，创新性地将生态修复融入工程全周期，实现软土路基处理成本降低12%，高边坡稳定系数提升至1.35以上，显著提升工程安全性能与经济效益。

2. 生态效益方面，通过系统的生态防护与排水设计，全线边坡植被覆盖率达92%，水土流失量减少83%，取弃土场生态恢复率100%，有效降低工程建设对生态环境的负面影响，实现工程建设与生态保护的和谐统一。

3. 本项目形成的“安全、经济、环保”综合解决方案，对穿越复杂地质区域的山区高速公路建设具有重要示范价值，相关技术和经验可在同类工程中推广应用，为我国山区交通基础设施建设的高质量发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 陈世刚. 探析公路路基路面设计[J]. 工程建设与设计, 2023, (14): 73-75.
[2] 刘树文. 城市互通立交设计实践[J]. 安徽建筑, 2020, 27(09): 173-174.
[3] 袁腾方. 岩溶区高速公路路基强夯处治技术及其稳定性分析[D]. 湖南大学, 2018.
[4] 杨美汪. 改扩建公路路基路面设计分析[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(05): 85-87.
[5] 陈越阳. 公路沥青路面施工技术与管理控制措施[J]. 工程技术研究, 2021, 6(24): 56-59.
[6] 阎军. 公路工程中路面垫层施工要点分析[J]. 交通世界, 2021, (36): 94-95.
[7] 王方方. 高速公路特殊性岩土的特殊路基设计分析[J]. 企业科技与发展, 2022, (11): 79-81.
[8] 黄宇哲, 农维武, 韦锡望. 绿色公路理念下的高速公路景观绿化建设探讨[J]. 西部交通科技, 2022, (06): 61-63.
[9] 韦庆锋. 广西大瑶山风景名胜生态敏感性分析和保护区划研究[D]. 广西大学, 2022.
[10] 杜兴臣. 公路绿化养护技术[M]. 重庆大学出版社: 202208.234.

公路养护施工安全管理与新材料应用研究

侯森林

江安县公路养护管理段，四川 宜宾 644000

DOI:10.61369/ERA.2025080032

摘 要： 本文围绕公路养护展开，涵盖传统工艺弊端、施工安全风险、智能自修复材料、固废及生物基材料应用、技术集成与安全管控装备研发、应急预案模拟推演、协同机制构建、综合评价模型、示范工程应用及成本和社会效益评估等多方面内容，指出新技术的优势及未来发展方向。

关 键 词： 公路养护；新材料；安全管理

Research on Safety Management and Application of New Materials in Highway Maintenance Construction

Hou Senlin

Jiang'an County Highway Maintenance Management Section, Jiang'an County, Yibin, Sichuan 644000

Abstract： This article focuses on highway maintenance, covering various aspects such as the drawbacks of traditional techniques, construction safety risks, intelligent self-healing materials, solid waste and biobased material applications, technology integration and safety control equipment research and development, emergency plan simulation and deduction, collaborative mechanism construction, comprehensive evaluation models, demonstration project applications, and cost and social benefit assessments. It points out the advantages and future development directions of new technologies.

Keywords： highway maintenance; new materials; safety management

引言

随着交通运输行业的快速发展，公路养护面临着诸多挑战。2019年发布的《交通强国建设纲要》强调了提升交通基础设施养护水平的重要性。传统公路养护工艺如沥青修补和水泥混凝土养护存在能耗高、效率低、难以精准控制等问题，无法满足日益增长的交通需求。同时，公路养护工程施工安全风险受多种因素影响，呈现复杂性和多样性特征。在此背景下，智能自修复材料研发、工业固废再生骨料和生物基粘结剂应用等新技术的探索以及施工安全管理系统的构建成为研究热点，旨在提高公路养护的质量、效率和安全性，实现可持续发展。

一、公路养护工程现状与挑战

（一）传统养护技术局限性

常规沥青修补和水泥混凝土养护是传统公路养护常用工艺。沥青修补过程中，往往需要对材料进行加热等处理，能耗较高。同时，其施工效率受限于材料特性和施工环境，难以快速完成修补作业，导致交通拥堵等问题^[1]。水泥混凝土养护在时间和资源投入上要求较高，且传统养护方式难以精准控制养护条件，容易出现养护不足或过度的情况，影响公路使用寿命。从交通流量数据来看，随着车辆日益增多，公路使用频率大幅提高，传统养护技术的低效率已无法满足快速恢复交通的需求，技术升级迫在眉睫。

（二）施工安全风险特征分析

公路养护工程施工安全风险受多种因素影响。基于事故统计

报告分析，人-机-环境风险因子关联紧密。在夜间施工场景中，光线不足导致作业人员视线受阻，增加了操作失误的风险，同时机械设备的运行也更易出现故障且难以被及时发现^[2]。临时交通组织方面，交通流的改变易造成道路拥堵，增加车辆与养护作业区发生碰撞的可能性。作业人员在复杂的交通环境下，心理压力增大，也会影响其操作的准确性。这些特殊场景下的安全隐患相互交织，使得公路养护施工安全风险呈现出复杂性和多样性的特征。

二、新型养护材料技术体系

（一）智能自修复材料研发

智能自修复材料研发主要聚焦于微胶囊自修复沥青和形状记忆聚合物。微胶囊自修复沥青中，微胶囊包含修复剂，当沥青出

现裂缝，微胶囊破裂释放修复剂填充裂缝，其作用机理涉及到裂缝产生的应力诱导微胶囊破裂过程^[9]。形状记忆聚合物则是利用其特殊的记忆性能，在受到外界刺激（如温度变化）时，能够恢复到原始形状，从而对裂缝进行修复。通过实验室对比试验，对两者的裂缝自愈效能进行验证。结果表明，在特定条件下，微胶囊自修复沥青和形状记忆聚合物均能在一定程度上实现裂缝自愈合，为公路养护提供了新的材料技术支持。

（二）环保型复合材料的应用

公路养护中，工业固废再生骨料和生物基粘结剂的应用需构建完善的技术参数体系。对于工业固废再生骨料，要明确其颗粒大小、强度等参数，确保其能满足公路养护的基本力学要求^[4]。同时，需考虑其不同环境条件下的稳定性。生物基粘结剂方面，要确定其粘结强度、固化时间等关键技术参数，以保障其在公路养护中的粘结效果。开展全生命周期环境影响评估至关重要，从原材料获取、生产加工到使用后的废弃处理，都要评估其对环境的影响，以便更好地优化材料的应用，实现公路养护的可持续发展。

三、施工安全管理系统构建

（一）风险评估与预警机制

1. BIM-5D 动态风险识别

集成 BIM 模型与物联网传感数据，开发实时风险预警算法。BIM 模型能够整合公路养护施工的多维度信息，包括结构、材料和施工流程等，为风险识别提供全面的数据基础^[9]。物联网传感技术则可实时采集施工现场的环境、设备运行等关键数据。通过将两者集成，利用先进的数据分析技术开发风险预警算法。该算法能够实时监测施工过程中的潜在风险因素，如结构变形、材料老化、环境异常等，并根据设定的阈值及时发出预警信号，以便施工人员进行相应的措施，有效预防安全事故的发生。

2. 安全态势预测模型

在施工安全管理系统构建中，风险评估与预警机制至关重要，其中安全态势预测模型是核心部分。通过应用机器学习技术，综合考虑多种影响施工安全的因素，建立事故概率预测系统。该系统能够对各种复杂的施工环境和作业流程进行分析，识别潜在的安全风险。例如，考虑天气条件、施工人员操作熟练程度、设备运行状况等多方面因素的耦合作用^[6]。通过对大量历史数据的学习和分析，模型可以预测不同情况下事故发生的概率，为提前采取预防措施提供科学依据，从而有效降低施工过程中的安全风险，保障施工安全管理系统的高效运行。

（二）现场安全管控技术

1. 智能安全防护装备

研发具有定位报警功能的可穿戴设备及自动防撞隔离设施是现场安全管控技术中智能安全防护装备的关键部分。可穿戴设备通过定位技术实时掌握施工人员位置，一旦发生危险可迅速报警，保障人员安全^[7]。自动防撞隔离设施能在车辆意外闯入施工区域时自动启动，避免车辆对施工人员和设备造成伤害。这些智能

安全防护装备利用先进技术，提高了公路养护施工的安全性，降低了事故发生的可能性，为施工安全管理系统的构建提供了有力支持。

2. 应急响应决策支持

构建基于数字孪生的应急预案模拟推演系统是应急响应决策支持的关键。该系统利用数字孪生技术，精确复现公路养护施工场景，包括地形、设施、人员分布等要素^[8]。通过设定不同的事故类型和参数，模拟事故发生发展过程，为应急决策提供真实可靠的数据基础。系统能够对应急预案进行全面评估，分析其不同情境下的有效性和可行性，发现潜在问题并及时优化。同时，为应急人员提供虚拟训练环境，使其熟悉应急流程和操作技巧，提高应急响应能力和协同配合水平，从而保障公路养护施工在面对突发情况时能够迅速、有效地做出决策，降低事故损失。

四、技术集成与工程实践

（一）综合管理体系构建

1. 材料 - 工艺 - 安全协同机制

公路养护施工中，需构建材料 - 工艺 - 安全协同机制。新材料应用需与配套施工规程紧密衔接，确保施工安全与质量。在材料选择上，依据公路养护需求和环境特点，筛选合适的新材料，并制定严格的质量标准^[9]。同时，针对新材料的特性，研发与之匹配的施工工艺，明确施工流程、操作要点和质量控制方法。在安全管理方面，分析新材料应用和新工艺实施过程中可能存在的安全风险，制定相应的安全措施和应急预案。通过建立这种协同机制，实现材料、工艺和安全的有机统一，提高公路养护施工的综合效益。

2. 多维绩效评价指标体系

综合考虑公路养护施工的多方面因素，构建包含经济性、安全性、耐久性的综合评价模型至关重要。在经济性方面，需考量养护成本、材料费用、设备使用及人力投入等^[10]。通过精确核算和分析这些成本因素，评估不同养护方案的经济可行性。安全性评价则涉及施工过程中的人员安全、道路使用安全以及对周边环境的安全影响。例如，评估新材料应用对道路防滑性能、结构稳定性的影响，确保施工过程及后期使用的安全。耐久性主要关注公路在长期使用过程中的性能保持，包括路面抗磨损能力、抗老化性能以及抵御自然环境侵蚀的能力。综合这三个维度的评价指标，能够全面、科学地评估公路养护施工的绩效。

（二）示范工程应用验证

1. 试验段参数优化

在示范工程应用验证中，于典型路段进行新材料铺装与智能监测设备联调测试至关重要。通过对试验段各项参数的优化来确保工程效果。在实际操作中，需综合考虑多方面因素，如材料特性、环境条件以及交通流量等对铺装效果的影响。依据现场测试数据，精准调整材料配比、铺装厚度等关键参数，以实现最佳的公路养护效果。同时，对智能监测设备的监测频率、精度等参数进行优化，使其能准确反馈公路使用状况。通过不断调整和优化

试验段参数,为新材料在公路养护施工中的大规模应用提供可靠的技术支撑和实践经验。

2. 全流程监控实施

在示范工程中,通过部署无人机巡检系统与边缘计算终端的数据融合方案实现全流程监控。无人机巡检系统获取公路养护施工区域的实时图像和数据,包括施工进度、人员操作、设备状态以及潜在的安全隐患等。边缘计算终端则对这些海量数据进行快速处理和分析,提取关键信息。通过两者的数据融合,不仅能够实现对施工过程的实时、精准监控,还能及时发现并预警可能出现的安全问题和施工异常情况。同时,这种融合方案有助于优化施工流程,提高施工效率,为公路养护施工安全管理提供了有力的技术支持,确保新材料应用过程中的施工质量和安全性。

(三) 技术经济性分析

1. 全寿命周期成本核算

全寿命周期成本核算对于公路养护施工至关重要。需综合考虑从建设到运营维护的所有成本。对于传统工艺,其材料成本可能相对较低,但由于耐久性较差,后期维护成本较高,且频繁维护可能影响公路正常使用,带来间接经济损失。而新技术体系虽初期投入可能较大,包括新材料研发和应用成本等,但因其具有更好的性能,如更强的耐久性和抗损性,能有效减少后期维护次数和成本,从全寿命周期来看,可能更具经济优势。同时,还需考虑不同工艺和材料对环境的影响,环境成本也是全寿命周期成本的一部分,环保的新技术在长期可能带来更多隐性经济效益。

2. 社会效益量化评估

公路养护施工安全管理与新材料应用研究中,社会效益量化评估至关重要。构建包含交通延误、碳排放等要素的社会成本计算模型是关键。交通延误方面,需考虑车辆在养护施工路段的滞留时间、排队长度等因素,通过实地调研和数据分析,确定不同交通流量下的延误成本。碳排放方面,要综合车辆怠速、缓行等工况下的排放数据,结合养护施工时长和交通流量,计算出因施工导致的额外碳排放成本。该模型还应考虑噪声污染、对周边居民生活的影响等其他社会成本因素,通过量化这些因素,全面评估公路养护施工的社会效益,为决策提供科学依据。

五、总结

公路养护施工安全管理与新材料应用的研究具有重要意义。新型养护材料的技术突破带来了诸多优势,如提高养护质量和效率等。安全管理体系的创新也极具价值,保障了施工过程的安全。多源数据融合及材料智能感知是未来的发展方向,多源数据融合能够整合各方信息,为养护施工提供更全面准确的决策依据;材料智能感知则有助于实时监测材料性能,及时发现问题并调整养护策略。为更好地推动公路养护施工安全管理与新材料应用的发展,建立跨学科协同研发平台至关重要,通过汇聚不同学科的专家和资源,能够实现技术的创新和突破,促进公路养护行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 李利伟. 基于 TQM 的 WJ 公路养护安全管理研究 [D]. 江苏科技大学, 2015.
- [2] 李绍森. 高速公路养护施工安全管理研究与实践 [D]. 华中科技大学, 2015.
- [3] 张静. 高速公路养护施工安全管理研究 [D]. 长安大学, 2014.
- [4] 刘显含. 新疆公路养护管理研究 [D]. 大连海事大学, 2014.
- [5] 徐蕾. 浅谈公路养护工程成本管理体系研究与应用 [J]. 财经界, 2015(17):122.
- [6] 陈嘉臻. 公路养护施工安全管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018.
- [7] 程国琴. 浅谈公路养护工程成本管理体系研究与应用 [J]. 中国经贸, 2017(1):93-93.
- [8] 朱永光, 何培勇, 于会江. 高速公路养护工程全寿命周期成本理论的研究与应用 [J]. 中国高新技术企业, 2013(15):96-97.
- [9] 宿宝明, 张成成. 公路养护机械施工安全管理 [J]. 商品与质量, 2016(10):270-271.
- [10] 沈志鹏. 高速公路养护施工的安全管理 [J]. 内蒙古公路与运输, 2017(5):52-53,62.

日常道路基层材料的粒径分布检测技术

吕恒

广东交科检测有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025080035

摘 要： 阐述了粒径分布对基层材料工程性能的影响，介绍了检测技术如筛分法等，强调智能筛分系统等结构设计的重要性，涉及工地检测流程、机器视觉检测等内容，还提及多源数据融合平台及相关应用，探讨了现有技术的不足与未来趋势。

关 键 词： 基层材料；粒径分布；检测技术

Particle Size Distribution Testing Technology of Daily Road Base Materials

Lv Heng

Guangdong Jiaokexi Testing Co.,LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper expounds the influence of particle size distribution on the engineering performance of base materials, introduces testing techniques such as screening, emphasizes the importance of structural design such as intelligent screening system, involves site testing process, machine vision testing and other contents, also mentions multi-source data fusion platform and related applications, and discusses the shortcomings of existing technologies and future trends.

Keywords： basic materials; particle size distribution; detection technology

引言

道路基层材料的粒径分布对其工程性能影响重大，合理的粒径分布需符合级配要求，影响基层的力学强度、稳定性、孔隙率等多个方面。随着智能化检测技术的发展，如2020年发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》所强调的推动智能化技术在建筑工程领域的应用，道路基层材料粒径分布检测技术不断丰富，包括筛分法、激光粒度法等。同时，智能筛分系统设计、工地检测标准化流程、基于机器视觉的在线检测等方面也不断发展，且在质量预警决策、集料采购验收、成本控制等多方面都有重要应用，未来还将朝着无人化检测方向发展。

一、道路基层材料粒径分布检测技术原理

（一）粒径分布对工程性能的影响机制

粒径分布对基层材料的工程性能具有重要影响。级配曲线反映了不同粒径颗粒的组成比例，合理的粒径分布应符合特定的级配要求，如连续级配或间断级配^[1]。连续级配的材料能使颗粒间相互填充更紧密，提高压实度，从而增强基层的力学强度和稳定性。骨架结构方面，粗集料形成的骨架对基层的承载能力起关键作用，合适的粒径分布可确保骨架结构稳定，避免在荷载作用下变形过大。同时，粒径分布影响材料的孔隙率，进而影响水稳性。合理的粒径搭配可减少孔隙，降低水分侵入的可能性，提高基层在潮湿环境下的耐久性。

（二）检测技术分类及适用场景

道路基层材料粒径分布检测技术主要包括筛分法、激光粒度法和数字图像处理法等。筛分法是通过不同孔径的筛子对材料进行筛分，根据筛余量确定粒径分布，适用于粒径较大的颗粒材

料，操作简单且成本较低^[2]。激光粒度法利用激光散射原理，测量颗粒对激光的散射光强分布来确定粒径，具有测量范围广、精度高的特点，适用于各种粒径的材料，但仪器较昂贵^[2]。数字图像处理法是对材料颗粒的图像进行处理分析来获取粒径信息，适用于不规则形状颗粒的检测，且能直观反映颗粒形态，但对图像质量要求较高^[2]。

二、施工现场常规检测方法优化

（一）改进型振动筛分装置研发

智能筛分系统的结构设计是提高道路基层材料粒径分布检测准确性的关键。该系统应具备合理的振动筛分结构，确保材料能够均匀分散并准确筛分。同时，自动称重功能需精确测量各粒径段材料的重量，其传感器的精度和稳定性至关重要^[3]。数据采集模块要能实时、准确地记录筛分过程中的各项数据，包括筛分时间、各粒径段重量等。在误差控制方面，要考虑系统的机械振

动、环境因素等对筛分结果的影响。通过优化结构设计和采用有效的误差控制方案,可提高智能筛分系统的可靠性和准确性,为道路基层材料粒径分布检测提供有力支持。

(二) 现场快速检测工艺标准化

工地检测标准化作业流程对于道路基层材料粒径分布检测至关重要。在取样方法方面,应确保取样具有代表性,可采用分层取样、多点混合等方式,避免局部偏差影响结果^[4]。环境控制上,要注意温度、湿度对材料的影响,特别是一些对环境敏感的基层材料。合适的环境条件能保证检测结果的准确性和可靠性。对于数据修正,需考虑仪器误差、人为操作误差等因素。建立合理的数据修正模型,对原始数据进行校正,以得到更接近真实值的数据。通过对取样方法、环境控制和数据修正等要素的规范,实现工地检测标准化作业流程,提高道路基层材料粒径分布检测的质量和效率。

三、智能化检测技术创新

(一) 基于机器视觉的在线检测系统

1. 图像采集与预处理技术

在基于机器视觉的在线检测系统中,图像采集与预处理技术至关重要。对于物料输送带动态成像,光照补偿是关键环节之一。由于输送带环境复杂,光照不均匀现象普遍存在,这会影响图像质量,进而干扰后续的检测分析。因此,需要采用有效的光照补偿算法来解决此问题^[5]。同时,颗粒分割算法的优化也不可或缺。准确地分割颗粒是获取其粒径等信息的基础,通过优化算法,可以提高颗粒分割的准确性和效率,更好地适应不同物料和输送带运行状态下的颗粒特征,为道路基层材料粒径分布的精确检测提供有力保障。

2. 三维形态学参数提取

在三维形态学参数提取中,需建立多视角图像融合的颗粒体积计算模型与级配预测算法^[6]。多视角图像融合是关键步骤,通过从不同角度获取颗粒的图像信息,能够更全面地了解颗粒的形态特征。在此基础上,构建颗粒体积计算模型,利用数学算法准确计算颗粒体积。同时,级配预测算法依据颗粒体积以及其他相关参数,对材料的级配情况进行预测。这一过程需要综合考虑多种因素,如颗粒的形状、大小分布等,以确保模型和算法的准确性和可靠性,从而为道路基层材料的粒径分布检测提供有效的技术支持。

(二) 多源数据融合分析平台

1. 检测数据云端管理系统

随着智能化检测技术的发展,设计支持移动终端接入的检测数据实时上传与可视化分析平台至关重要。该平台可实现多源数据融合,移动终端能便捷地将采集到的日常道路基层材料粒径分布等检测数据实时上传至云端。通过云端管理系统,对数据进行整合与分析,利用先进算法挖掘数据价值,为道路基层材料的质量评估提供准确依据。同时,可视化分析功能可将复杂的数据以直观的图表等形式呈现,便于相关人员快速理解和决策,提高检

测效率和准确性,促进道路工程质量的提升^[7]。

2. 质量预警决策模型

随着智能化检测技术的发展,多源数据融合分析平台为质量预警决策模型提供了有力支持。基于该平台,可构建针对日常道路基层材料粒径分布的质量预警决策模型。通过对大量历史数据和实时检测数据的融合分析,挖掘数据中隐藏的规律和特征,确定级配异常的关键指标和阈值^[8]。当检测数据超出阈值范围时,及时触发预警机制,为工程质量控制提供及时准确的反馈。同时,利用数据的可追溯性,建立质量追溯机制,能够快速定位问题产生的源头,为后续的质量改进和责任认定提供依据。

四、检测技术在施工管理中的应用

(一) 全过程质量控制体系

1. 原材料进场验收标准

基于级配检测的集料采购技术指标与验收规程在原材料进场验收标准中至关重要。对于日常道路基层材料,应明确其粒径分布相关的采购技术指标。通过科学的检测技术,确定合适的粒径范围及各级配比例要求,确保集料质量符合道路基层施工需求^[9]。在验收规程方面,要严格按照既定的技术指标进行操作。对进场集料进行抽样检测,采用先进的粒径分析仪器和方法,准确测定其粒径分布情况。只有当检测结果满足采购技术指标时,集料方可验收合格进入施工场地,从而为道路基层施工质量提供有力保障。

2. 拌和站生产监控方案

建立级配在线检测与拌和参数联动控制的实时调控系统,可实现对道路基层材料粒径分布的精准控制。该系统利用先进的检测技术,实时监测材料的粒径情况,并将数据反馈至控制系统。控制系统根据反馈信息,自动调整拌和参数,如搅拌时间、搅拌速度等,确保材料的级配符合设计要求。通过这种联动控制方式,不仅提高了生产效率,减少了人工干预带来的误差,还能有效保证道路基层材料的质量稳定性,为道路施工质量提供了有力保障^[10]。

(二) 施工成本控制策略

1. 级配优化与材料节约

检测技术有助于实现级配优化与材料节约,从而控制施工成本。在施工管理中,对于道路基层材料如水泥稳定碎石,可利用粒径分布检测技术。通过精确检测材料的粒径分布情况,能够更好地确定其级配。合理的级配可使材料在满足工程质量要求的前提下,达到最佳的密实度和强度。这样不仅能提高道路基层的性能,还能避免因材料级配不合理导致的浪费。例如,避免使用过多的细集料,减少水泥用量,从而节约材料成本。同时,优化后的级配可减少施工过程中的压实次数等操作,降低人工和机械成本,提高施工效率,实现施工成本的有效控制。

2. 返工预防经济效益分析

检测技术在施工管理中的应用可有效控制施工成本,预防返工,带来显著经济效益。通过对日常道路基层材料粒径分布等关

键指标的精准检测，能确保施工材料质量符合标准，避免因材料不合格导致的基层病害及后续返工。例如，准确检测可及时发现粒径不符合要求的材料，防止其用于施工，减少因基层强度不足等问题引发的返修。返工不仅增加材料和人工成本，还会延误工期，带来间接经济损失。而检测技术的应用从源头上把控质量，降低返工风险，提高施工效率，综合减少经济支出，提升项目的经济效益。

（三）检测人员能力建设

1. 新型检测设备操作培训

随着科技的发展，智能化检测设备在道路基层材料粒径分布检测中应用日益广泛。为确保检测的准确性和可靠性，需制定标准化操作手册。该手册应详细涵盖设备的启动、校准、样本放置、检测参数设置以及结果读取等各个环节的操作规范。同时，建立考核认证体系至关重要。通过理论考核，检测人员需深入理解设备的工作原理、检测方法的理论基础以及相关标准规范。实践考核则要求操作人员熟练、准确地按照操作手册完成检测任务，并能对常见问题进行及时处理。只有这样，才能提升检测人员对新型检测设备的操作能力，保证检测技术在施工管理中更好地应用。

2. 数据分析能力提升路径

构建检测数据解读与质量诊断的专项培训课程体系是提升检

测人员数据分析能力的关键路径。该课程体系应涵盖多方面内容，包括但不限于对道路基层材料粒径分布检测数据的详细解读方法，如不同粒径范围所代表的材料特性及其对道路基层质量的影响。同时，要教授质量诊断的技巧，使检测人员能够依据数据准确判断施工过程中可能存在的问题，例如粒径分布不均可能导致的基层压实度不足等。通过实际案例分析，让检测人员深入理解数据与质量之间的紧密联系，从而提高他们在施工管理中运用检测数据进行有效决策的能力。

五、总结

智能检测技术为道路基层材料粒径分布检测带来创新价值，通过精确测量和实时反馈，有效提升了施工质量。然而，目前该技术在复杂工况适应性及检测效率方面存在不足。复杂工况下，如恶劣天气或特殊地形，检测结果可能受干扰，准确性降低；同时，检测过程可能较为繁琐，耗时较长，影响工程进度。展望未来，随着5G 传输和边缘计算技术的发展，无人化检测有望成为趋势。5G 的高速传输可实现检测数据的实时上传与分析，边缘计算能在本地快速处理数据，减少延迟。无人化检测不仅能提高检测效率，还可降低人工成本，进一步提升道路基层施工质量。

参考文献

[1] 牛斌. 燃煤粒径分布和流动性检测装置的研发与实验 [D]. 山西：山西大学，2022.

[2] 张思琦. 牛乳脂肪粒径分布影响成分检测的研究 [D]. 黑龙江：哈尔滨理工大学，2016.

[3] 王苗. 微混合技术制备窄粒径分布 CL-20[D]. 山西：中北大学，2021.

[4] 张灏. 土壤粒径分布曲线模型研究 [D]. 甘肃：兰州大学，2023.

[5] 樊东昊. 射流式直接接触蓄热材料的相变特性与粒径分布规律研究 [D]. 内蒙古：内蒙古科技大学，2021.

[6] 王海洋. 改性煤矸石在矿区重载道路中的应用研究 [D]. 江苏：中国矿业大学，2015.

[7] 夏政. 水泥稳定水洗煤矸石材料的基层应用研究 [D]. 江苏省：东南大学，2017.

[8] 赵迪，李进. BIM 技术在施工项目管理中的应用研究 [J]. 项目管理技术，2021，19(7):4.

[9] 刘军，李健超，毛新亚，等. 锌矿渣在道路基层材料中的应用 [J]. 建材世界，2023，44(3):8-11.

[10] 王颖，马红全，陈铁林. 砌灰土应用于道路底基层的力学强度试验分析 [J]. 交通科技与经济，2013，15(04):57-58+70.

市政给排水管网漏损检测与定位技术研究

刘俊¹, 张辉²

1. 山东华德市政工程集团有限公司, 山东 青岛 266000

2. 青岛安博劳务工程有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ERA.2025080001

摘 要 : 本文系统研究市政给排水管网漏损检测与定位技术。早期以直接观察法、听音法为主, 虽操作简便, 但存在效率低、准确性差等局限。随着科技进步, 声学检测、流量监测等基于物理原理的技术及智能融合技术不断涌现, 但在准确性、成本控制与环境适应性方面仍有待提升。主流检测技术如流量监测、压力监测、声波检测和红外热成像各有利弊, 定位技术中的相关分析法、时间差定位法、阻抗定位法也存在应用局限。实际应用中, 管网材质多样、环境干扰等问题突出, 可通过优化设备、改进算法等方式应对。未来, 该技术将朝着多技术融合、智能化、精准化方向发展, 同时兼顾成本效益, 助力市政给排水管网可持续运行。

关 键 词 : 市政给排水管网; 漏损检测; 定位技术

Research on Leak Detection and Localization Technology for Municipal Water Supply and Drainage Pipeline Network

Liu Jun¹, Zhang Hui²

1. Shandong Huade Municipal Engineering Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

2. Qingdao Anbo Labor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

Abstract : This paper systematically studies the leak detection and localization technology for municipal water supply and drainage pipeline networks. Early methods mainly relied on direct observation and auscultation, which were simple to operate but had limitations such as low efficiency and poor accuracy. With technological advancements, physical principle-based techniques such as acoustic detection, flow monitoring, and intelligent fusion technologies have emerged. However, there is still room for improvement in terms of accuracy, cost control, and environmental adaptability. Mainstream detection techniques such as flow monitoring, pressure monitoring, acoustic wave detection, and infrared thermal imaging have their respective advantages and disadvantages. Similarly, correlation analysis, time difference localization, and impedance localization methods used in positioning technology also have application limitations. In practical applications, issues such as diverse pipe network materials and environmental interference are prominent, which can be addressed by optimizing equipment and improving algorithms. In the future, this technology will develop towards multi-technology integration, intelligence, and precision, while balancing cost-effectiveness, supporting the sustainable operation of municipal water supply and drainage pipeline networks.

Keywords : municipal water supply and drainage pipeline network; leak detection; localization technology

引言

市政给排水管网作为城市的“血脉”, 是城市基础设施的关键部分, 其稳定运行关乎城市的方方面面。它不仅为居民生活、工业生产、商业活动提供清洁水源, 保障人们日常用水需求和各类经济活动开展, 还承担着污水收集与处理的重任, 对维护城市生态平衡、实现可持续发展意义重大。然而, 当前市政给排水管网漏损问题严峻, 我国供水管网平均漏损率较高, 造成大量水资源浪费, 加剧了水资源短缺的困境。同时, 漏损增加了水厂制水、管网维护成本, 引发经济损失, 还会破坏管道周围土壤结构, 导致地面塌陷等安全隐患, 威胁居民生命财产安全, 尤其在一些老城区, 因管网老化漏损引发的事故频发, 给城市安全运行带来巨大挑战。

一、文献综述

（一）漏损检测与定位技术的早期发展

早期，市政给排水管网漏损检测与定位主要依赖直接观察法与听音法。直接观察是一种常见的漏损检测方法。通过目视检查排水管道和相关设施，寻找可能存在的破损、渗漏或泄漏迹象。这种方法通常需要人工巡视和检查，可以发现一些明显的问题，如裂缝、破坏或污水外溢等。但是，它在发现隐藏的小型漏损或地下管网中的问题方面存在一定的局限性^[1]。听音法则利用听音棒等简单工具，贴近管道聆听漏损点产生的微弱声音，以此确定漏损位置^[2]。这些传统手段操作相对简单，无需复杂设备，在一些小规模、布局简单的管网中有一定应用。然而，其局限性十分明显。人工巡检效率低下，难以全面覆盖管网，且无法检测到地下隐蔽的漏损点。听音法易受环境噪声干扰，对操作人员的经验要求较高，不同人员判断结果可能存在差异，导致检测与定位准确性较低。

（二）现代检测与定位技术的演进

随着科技发展，漏损检测与定位技术历经了从传统到多样化的变革。从早期单纯依靠人工与简单工具，逐渐发展出声学检测、流量监测、压力监测等基于物理原理的技术。近年来，更是涌现出如智能传感器、大数据分析、人工智能融合等先进技术^[3]。各阶段技术革新背后有着诸多驱动因素。城市规模不断扩大，管网日益复杂，传统技术难以满足需求，促使更精准高效的技术出现。同时，科技进步为新技术研发提供了基础，如传感器技术的提升使得实时监测成为可能，大数据与人工智能的发展则为数据处理与分析带来新契机^[4]。

（三）现有研究的不足

综合现有文献分析，当前漏损检测与定位技术研究存在多方面不足。在技术准确性上，部分技术在复杂管网环境或受干扰情况下，检测与定位精度仍难以保证。例如，声波检测易受环境噪声影响，导致定位偏差^[4]。成本控制也是关键问题，一些先进检测设备与技术的成本较高，限制了其广泛应用，如探地雷达设备价格昂贵。此外，复杂环境适应性有待提升，不同地区的地形地貌、气候条件等差异较大，现有技术并非都能稳定发挥作用，如红外热成像技术受天气因素影响明显。

二、主流漏损检测技术

（一）基于流量监测的算法分析

基于流量监测的算法分析，其原理在于对市政给排水管网的流量数据进行实时、精准监测，并借助特定算法深入剖析异常流量变化，以此实现漏损检测。在规模较小、布局相对简单的管网中，该技术能够通过简洁的流量监测点布置，快速捕捉到因漏损导致的流量异常波动，从而有效检测出漏损情况。而对于规模较大、布局复杂的管网，则需合理增设流量监测点，并运用更为复杂的算法对多维度流量数据进行综合分析，以准确识别漏损信号^[5]。此技术在检测准确性方面表现突出，能够较为精确地判断漏损是否发生，且具备一定的实时性，可及时反馈流量异常情况。然而，该技术易受管网运行状态的影响，如管网的用水量变化、阀门调节等因素，都可能干扰对漏损的准确判断。

（二）压力监测技术

压力监测技术的原理是，当市政给排水管网发生漏损时，漏损

点附近的管道压力会发生变化，通过监测管网压力的变化，能够判断漏损发生的具体位置及程度。在低压等级管网中，由于压力变化相对敏感，该技术能够快速捕捉到微小的压力波动，从而及时发现漏损。在高压等级管网中，虽然压力变化相对较大，但通过合理设置压力监测点和运用先进的压力传感器，同样可以实现有效的漏损检测。该技术的优势在于能快速响应漏损，一旦漏损发生，压力变化能迅速被监测到，且定位相对准确，可根据压力变化的情况初步判断漏损位置。不过，它易受外界因素干扰，如温度变化、相邻管网的运行干扰等，都可能导致压力监测数据出现偏差。

（三）声波检测技术

声波检测技术是利用当管道发生漏损时，漏损点会产生声波信号，这些信号会沿着管壁传播，通过特定的检测设备捕捉并分析这些声波信号来实现检测。对于不同管径的管网，声波传播的特性会有所不同，但声波检测技术能够适应多种管径范围。在材质方面，无论是金属管材还是塑料管材，声波均能在其内部传播，因此该技术适用于不同材质的管网^[6]。该技术操作简便，检测人员经过简单培训即可上手操作，且检测精度高，能够较为准确地定位漏损点。然而，其受环境噪声影响较大，在城市复杂环境中，各种噪声源可能会干扰声波信号的接收和分析，从而影响检测的准确性。

（四）红外热成像技术

红外热成像技术的原理是，当市政给排水管网发生漏损时，漏损点周围土壤的温度会因水流的影响而发生变化，通过检测管网表面温度差异来发现漏损。在埋深较浅且地表温度差异明显的环境下，该技术能够充分发挥其优势。例如，在昼夜温差较大的地区，白天管网周围土壤温度受水流影响较低，与周围地表温度形成差异，利用红外热成像设备可快速捕捉到这种温度异常区域，从而发现漏损。该技术具有能快速大面积检测的优势，可在较短时间内对大片区域进行扫描检测。但它受环境因素影响大，如天气状况，阴雨天气或大雾天气会降低红外热成像的清晰度；地表覆盖物，如植被、建筑物等，也会遮挡红外热成像的视线，影响检测效果。

三、主流漏损定位技术

（一）相关分析法

相关分析法是基于漏损点产生的声波信号在管网中传播时，不同传感器接收到的信号具有相关性这一原理来确定漏损位置。当管网发生漏损，漏损点会发出声波，该声波沿管壁向四周传播，布置在管网不同位置的传感器会接收到这一信号。通过计算不同传感器接收到的声波信号之间的相关性，可以确定漏损点的位置。具体而言，当两个传感器接收到的信号相关性最强时，表明漏损点位于这两个传感器之间的某一位置，通过进一步的计算和分析，能够较为准确地定位漏损点。该技术的定位精度受多种因素影响。其中，管网材质是一个重要因素，不同材质的管网对声波信号的传播特性不同，金属管材对声波传播衰减较小，信号传播距离较远，定位精度相对较高；而塑料管材对声波衰减较大，信号传播距离有限，可能影响定位精度。

（二）时间差定位法

时间差定位法是利用声波在不同位置到达时间差来计算漏损位置的原理进行定位。在管网中，当漏损点产生声波后，声波会以一定的速度向周围传播，布置在管网不同位置的传感器会先后接收到该声波信号。通过精确测量声波到达不同传感器的时间差，结合声波在管网中的传播速度，就可以计算出漏损点相对于传感器的位置，进而确定漏损点的具体位置。

该技术在特定管网条件下具有较好的适用性。例如，在管径较为均匀、材质相对单一的管网中，声波传播速度相对稳定，时间差测量较为准确，能够获得较好的定位效果。然而，该技术也存在一定的局限。信号传播存在不确定性，实际管网环境中存在诸多干扰因素，如管道接口、阀门等部件可能会影响声波传播路径和速度，导致时间差测量出现误差，进而影响定位准确性。

（三）阻抗定位法

阻抗定位法是通过测量管网阻抗变化来确定漏损位置的原理。当管网发生漏损时，漏损点处的流体状态发生变化，会导致管网的阻抗特性发生改变。通过在管网合适位置安装阻抗测量装置，实时监测管网的阻抗变化，当检测到阻抗异常变化时，可以判断该位置附近可能存在漏损点。

四、实际应用中的挑战与应对策略

（一）管网材质多样带来的挑战

市政给排水管网材质多样，常见的有金属管道（如铸铁管、钢管）和塑料管道（如PVC管、PE管）等，不同材质对检测与定位信号传播影响显著。金属管道具有良好的导电性和声波传导性，对于基于电磁感应或声波检测的技术较为有利，然而，金属管道易受腐蚀，腐蚀产生的杂质和坑洞可能会改变信号的传播路径和强度，干扰检测与定位的准确性^[7]。塑料管道由于其绝缘性和较低的声波传导性，在使用电磁类检测技术时信号衰减严重，导致检测难度增大。例如，在采用探地雷达检测塑料管道漏损时，电磁波在塑料中的传播特性与金属不同，反射信号较弱，难以准确判断漏损位置。此外，不同材质的管道热传导性能也不同，这会影响红外热成像技术在检测中的应用效果，金属管道热传导快，温度变化迅速，而塑料管道热传导较慢，可能使漏损点的温度差异不够明显，不利于检测。

（二）环境干扰问题

实际应用中，多种环境因素对检测与定位技术产生干扰。环境噪声是主要干扰源之一，在声波检测技术中，城市中的交通噪声、工业噪声等背景噪声会掩盖漏损点产生的声波信号，使检测设备难以准确捕捉和分析有效信号，降低检测精度。温度变化也会影响检测与定位结果，例如，压力监测技术中，温度的改变会导致管道内流体体积和压力的变化，这种变化可能与漏损引起的压力变化相混淆，干扰对漏损的准确判断^[8]。地形地貌因素同样不可忽视，在山区或地势起伏较大的地区，重力作用会影响管道内流体的流动和压力分布，给基于流量和压力监测的检测技术带来误差。

（三）应对策略

针对上述挑战，需采取一系列应对措施。在检测设备优化方面，可研发适应不同材质管网的专用检测设备，如针对塑料管道开发高灵敏度的电磁检测设备，增强信号接收能力。对于环境噪声干扰，可改进检测设备的降噪算法，采用自适应滤波技术，有效区分背景噪声和漏损信号。在算法改进上，结合大数据和人工智能技术，建立针对不同材质、环境条件的检测与定位模型，提高对复杂情况的适应性^[9]。例如，通过对大量不同材质管道在不同环境下的检测数据进行学习，优化相关分析法和时间差定位法的算法，提高定位精度。此外，选择合适的检测时间也很重要，如在夜间环境噪声较低时进行声波检测，可减少噪声干扰，提高检测准确性。对于温度变化的影响，可在检测过程中实时监测环境温度，并对检测数据进行温度补偿修正，以消除温度因素对检测结果的影响。

五、结束语

市政给排水管网漏损检测与定位技术已实现从传统到现代的跨越。当前，流量监测、声波检测等各类检测技术，以及相关分析法等定位技术虽各有优势，但在准确性、成本及环境适应性方面存在不足，易受管网特性与环境因素制约。未来，该技术将向多技术融合、智能化、精准化发展。通过整合流量、压力等多源检测技术，结合智能传感器、大数据与人工智能，构建高效监测定位体系，突破单一技术局限。同时，需重视成本效益，优化检测流程，强化管网管理，在保障精度的前提下降低资源损耗与经济损失，为城市水资源管理提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 刘芳芳；路甜甜. 城市排水管网漏损检测与修复策略研究 [J]. 建筑与装饰, 2024, (6): 22-24.
- [2] 岳宏宇. 基于群体智能优化算法的供水管网压力监测点优化布置与爆管预警定位研究 [D]. 青岛理工大学, 2021.DOI: 10.27263/d.cnki.gqudc.2021.000324.
- [3] 蒋莉蓉. 市政管网漏损检测技术与策略对管网建设的启示 [J]. 城镇供水, 2023, (6): 39-43.
- [4] 李宁, 王晓东, 惠雨乔, 等. 排水管道阻塞辨识定位和供水管网漏损技术及应用现状分析 [J]. 给水排水, 2022, 58(S1): 1074-1082.DOI: 10.13789/j.cnki.wwwe1964.2021.05.08.0005.
- [5] 苏彦博. 基于供水管网水力模型校验的测压点优化选址与多工况漏损定位研究 [D]. 青岛理工大学, 2023.DOI: 10.27263/d.cnki.gqudc.2023.000514.
- [6] 马志霄. 基于水力模型的住宅小区管网漏损分析与压力管控研究 [D]. 安徽建筑大学, 2024.DOI: 10.27784/d.cnki.gahjz.2024.000685.
- [7] 董文瑾. 基于时空数据分析的深度学习模型在供水管网漏损定位中的研究 [D]. 青岛理工大学, 2020.DOI: 10.27263/d.cnki.gqudc.2020.000198.
- [8] 金俊伟；朱松；元鹏鹏；邓娟. 城镇供排水管网检测技术与管理 [J]. 中国科技信息, 2023, (2): 125-127.
- [9] 孙露. 基于运行工况的排水管网漏损范围评价研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.005688.
- [10] 刘润宇. 市政给排水管网漏损问题研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(11): 72-74.DOI: 10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2024.11.072.03.

YJ27 接装机胶辊压紧装置的改进设计与应用

张文慧, 张鹏, 闫楷师

红云红河烟草(集团)有限责任公司乌兰浩特卷烟厂, 内蒙古 乌兰浩特 137400

DOI:10.61369/ERA.2025080009

摘 要 : 对 YJ27 接装机上胶装置的胶辊压紧机构进行技术改进, 采用气缸替代原碟簧施力方式, 可以通过调压阀精确调整气缸推力, 从而可以方便地根据胶水和水松纸的物理性能, 精确调整和控制涂胶层厚度, 减少设备生产运行中因涂胶问题造成的搓接漏气、泡皱等质量缺陷, 同时可避免压紧力过大造成的胶辊磨损和相关构件的损坏, 保证了产品质量的稳定, 提高了设备运行效率。

关 键 词 : YJ27 接装机胶辊; 压紧机构; 气缸; 碟簧

Improved Design and Application of the Rubber Roller Pressing Device of the YJ27 Filter Rod Joining Machine

Zhang Wenhui, Zhang Peng, Yan Kaishi

Ulanhot Cigarette Factory, Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Ulanhot, Inner Mongolia 137400

Abstract : The rubber roller pressing mechanism of the gluing device on the YJ27 filter rod joining machine is technically improved. An air cylinder is adopted to replace the original disc spring force application method. The thrust of the air cylinder can be precisely adjusted through a pressure regulating valve. Thus, it is convenient to precisely adjust and control the thickness of the glue coating layer according to the physical properties of the glue and tipping paper. This reduces quality defects such as joint air leakage and blistering wrinkles caused by gluing problems during the production and operation of the equipment. At the same time, it can avoid the wear of the rubber roller and the damage of related components caused by excessive pressing force, ensuring the stability of product quality and improving the operation efficiency of the equipment.

Keywords : YJ27 filter rod joining machine rubber roller; pressing mechanism; air cylinder; disc spring

引言

YJ27 接装机是我国卷烟企业广泛装备的一种中速滤嘴接装机, 采用了德国 HAUNI 公司上世纪 70 年代的 MAX70 接装机技术生产制造, 由于设计年代较早, 一些装置的结构采用了传统机械结构方式, 存在控制精度较差、调整繁琐和维修换件频繁等缺陷。水松纸涂胶是接装机上的一个重要功能装置, 涂胶过程中, 胶膜厚度的均匀性和稳定性不但直接关系到水松纸搓接质量, 也关联设备的运行性能。针对水松纸涂胶, 孙开等^[1]关于 PROTOS MAX 接装机接装纸与供胶辊接触的形式改进, 通过增加水松纸以供胶辊的接触包角, 来改善涂胶的均匀性; 陈永贵^[2]降低卷烟机组 MAX 供胶系统的故障频次, 对卷接机组供胶系统进行改造, 并重新对它的控制电路进行设计改造, 有效降低了 MAX 供胶系统的故障频次; 陈岱峰^[3]等水松纸表面特性及接装胶渗透性能研究用于卷烟生产质量控制, 通过对水松纸及胶水渗透过程进行表征结果, 对上胶过程和胶水适应性进行调整, 能够好的更优异的施胶效果, 提高产品生产质量; 但对于胶辊压紧装置本身对上胶辊胶层厚度控制精度对涂胶稳定性的影响则少有研究和报道。为此, 基于对现有胶辊压紧机构缺陷的分析和研究, 并对压紧机构进行改进, 以期解决烟支泡皱、漏气和通风率不稳定等问题, 提高产品质量, 降低调整难度和维修换件频率。

一、问题分析

(一) 工作原理

如图 1 所示的现有涂胶装置, 采用了胶池供胶方式, 一对相对旋转的圆柱胶辊通过挤压形成涂胶层, 其中一个位于左下方的胶辊, 其辊面带一定深度和宽度的凹层, 并浸泡在一个盛满胶水

的胶缸中, 另一个位于右上方的辊则表面是平的, 当两个胶辊接触并旋转, 在外力加压的作用下, 多余的胶水被挤出, 从而在上胶辊表面形成一层一定厚度和宽度的胶水, 然后涂抹在水松纸面上; 所以, 涂胶厚薄、均匀性和胶区分布不但取决于胶辊和胶辊轴本身的精度, 也与胶辊间的压力大小和稳定性有极大的关系。

胶辊的压紧机构如图 1 所示, 胶水缸 1 由两个螺钉顶尖 10 支

撑在弯臂 11 上,转动手柄 5 时,同轴的偏心轮 6 推动杠杆 7 经碟簧 8 推动顶杆,使弯臂 11 绕左边的支撑轴向上转动,将胶水缸的右端顶起,从而使支撑于胶水缸上的控胶辊向上与套在胶辊传动轴上的上胶辊接触,产生压紧力并由偏心轮和杠杆间的摩擦力自锁住,胶辊间的压紧力大小取决于碟簧的变形应力。

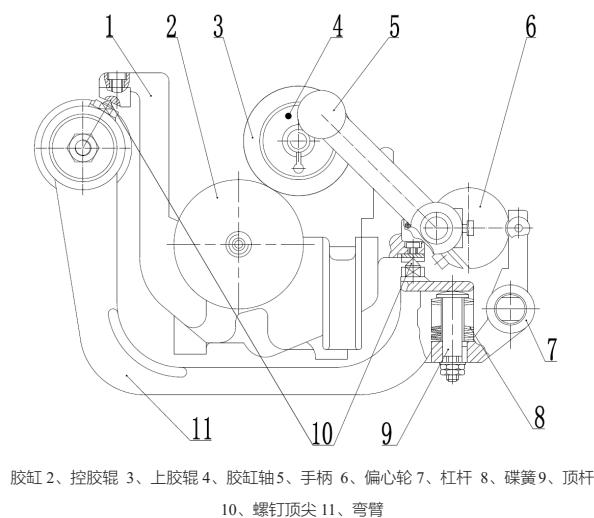


图1：原胶辊加压机构示意图

（二）存在问题

这样的压紧方式主要存在以下问题：不能根据产品的更换，胶水、水松纸的物理性能以及环境温湿度可能的变化，方便和精确地调整和设定涂胶对辊间的压力，达不到精确、稳定且合适的涂胶层，从而造成烟支因涂胶问题造成的搓接泡皱、漏气等质量缺陷，以及过大压紧力造成的胶辊非正常磨损和相关构件的损坏，加大了维修、调整频次和配件更换量。通过胶辊压紧机构的结构分析和长期观察总结，得出以下原因：①采用成对的一组碟簧（标准为 16 片），需成对增加或减少，虽然采用了螺杆螺母机构调整，但很难调整到涂胶工艺要求的最佳压力，过大的压力会造成胶辊磨损快，甚至会造成胶辊驱动轴弯曲变形和胶辊两端轴及轴承损坏，而压紧力过小，则会造成胶层厚度偏厚或不均匀，造成产品质量缺陷；②碟簧为 C 系列，尺寸 28*14.2*1*1.8，内孔直径为 14.2mm，套装在一根直径为 12mm 的顶杆 9 上，当碟簧轴向压缩变形时，内孔会变小，所以顶杆直径小于碟簧内孔直径，并不能起到精确导向的作用，所以，锁紧机构在顶起胶缸过程中，碟簧除轴向压缩变形外，径向也有可能滑动位移，造成轴向变形量的随机变化，偏离调定的预期压力，造成涂胶厚度变异；③碟簧随使用时间会产生疲劳，弹性模量变化，带来应力下降，调整、维修较频繁；④顶杆为模数件，需根据水松纸长度规格（胶辊直径需随之变化），选择不同长度的顶杆，所以，规格变化需重新配置顶杆、碟簧，以及繁琐的调整。

二、改进方法

改进的目的就是要克服碟簧压紧机构存在的各种问题，采用一种更合理的方式和机构来实现压紧力的精确调整设定，并能保

持更恒定的压紧力状态,实现供胶装置的原有调节和控制功能。改进时,尽量只对供胶装置的胶缸压紧功能相关的部位实施改造;采用原装置零件,不但可以保证原装置的工艺参数和运行性能,同时可以降低改造成本、库存零配件的沿用和缩短改造时间;改造件利用原有可利用安装基础件或新兼容设计的件安装,不对基础件进行破坏性加工,以保证改造的安全性和可逆性;采用现场改造方式,改造、调试时间控制在两个生产班时。

（一）改进技术原理

如图 2 所示,改进的胶辊压紧机构,采用一个气缸和杠杆机构来实现,利用气缸 5 的推力,通过杠杆 6,抬起弯臂 9 和胶缸 1,将控胶辊 2 转向上胶辊 4,并与之接触压紧,杠杆前安装一个滚轮 7,可以保证压紧机构始终与弯臂接触,消除机构因制造误差及运动时产生的晃动造成的位置微小变化所造成的压紧力变化。压紧力的大小取决于气缸的推力,气缸推力由通入的压缩空气压力决定。

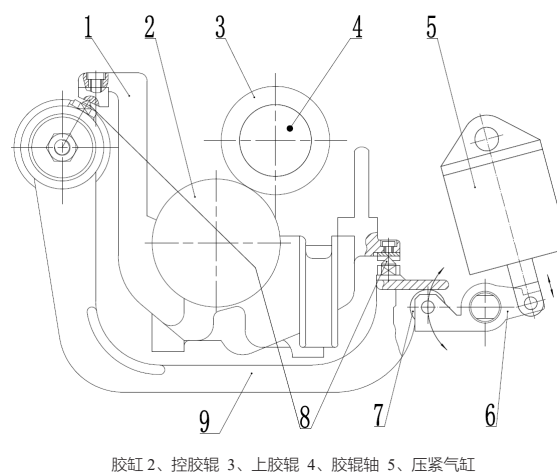


图2：改进后的气缸压紧装置示意图

（二）气缸选型

气缸作为胶辊压紧的施力构件,必须满足胶辊压紧所需推力,以及胶缸(含下胶辊)组件装卸抬起或降下时足够的行程。

1. 气缸推力计算

因为原压紧机构采用了碟簧施力,能够满足胶辊上胶的工艺要求;所以,可以通过计算原碟簧的工作力的大小和范围,就可以得到气缸所需的推力。

原顶杆由碟簧变形产生的力通过压紧弯臂、胶辊将下胶辊压向安装胶辊传动轴上的上胶辊,并产生能够控制涂胶层厚度的压力;如图 4 所示,一组 16 片碟簧按对合组合形式^[4]套在顶杆 1 的轴颈上,一并安装在摆臂 5 的一个孔中,并由螺母 3 轴向限位,顶杆上设置有一个导向限位销 4,可以防止顶杆旋转,同时也限制了顶杆轴向上下移动的范围;如图 4a,当限位销位于上极限位置时,碟簧的变形量最小,弹力也最小,顶杆推力 F_1 最小,胶辊压紧力就最小;如图 4b,当限位销位于下极限位置时,碟簧的变形量最大,弹力也最大,顶杆推力 F_2 最大,胶辊压紧力就最大。所以,只要计算出 F_1 和 F_2 ,就可确定气缸所需推力的范围。

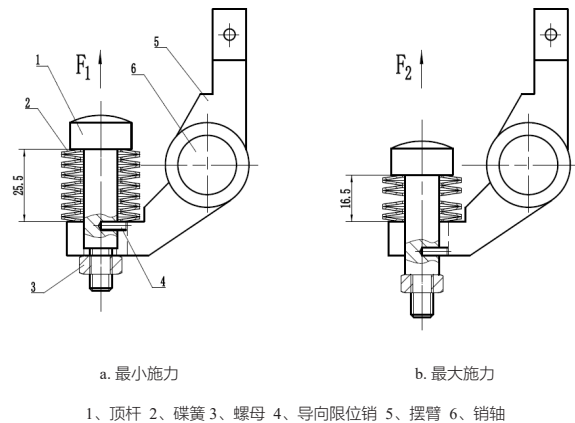


图4: 碟簧施力压紧机构

碟簧采用了 GB/T1972-2005 蝶形弹簧 C 系列 -C28-0.8, 规格和主要参数如表 1 所示:

表 1: 碟簧主要参数表^[4]

	内径 d /mm	厚度 t /mm	压平时变 形量 h ₀ /mm	自由高度 H ₀ /mm	f ≈ 0.75h ₀		
					F/N	f/mm	H ₀ -f/mm
28	14.2	0.8	1	1.8	801	0.75	1.05

①计算碟簧最小载荷 F₁:^[4]

$$\therefore F_1 = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^3}{D^2 K_1} \cdot K_4^2 \cdot \frac{f_1}{t} \cdot \left[K_4^2 \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f_1}{t} \right) \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f_1}{2t} \right) \right]$$

式中: F₁—碟簧负载;

E—弹性模量 (MPa), 弹簧钢取 2.06 × 10⁵MPa;

μ—泊松比, 弹簧钢取 0.3;

C—外径与内径之比, D/d=28/14.2=1.97

计算系数 K₁=0.688; K₄=1 (无减薄量时);

碟簧变形量 f₁=(16H₀-25.5)/16=(16*1.8-25.5)/16=0.206mm;

$$\therefore F_1 = \frac{4 \times 2.06 \times 10^5}{1-0.3^2} \cdot \frac{0.8^3}{28^2 \times 0.688} \cdot 1 \cdot \frac{0.206}{0.8} \cdot \left[1 \times \left(\frac{1}{0.8} - \frac{0.206}{0.8} \right) \left(\frac{1}{0.8} - \frac{0.206}{2 \times 0.8} \right) + 1 \right]$$

$$= 340.4 \text{ (N)}$$

②计算碟簧最大载荷 F₂:^[4]

$$\therefore F_2 = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^3}{D^2 K_1} \cdot K_4^2 \cdot \frac{f_2}{t} \cdot \left[K_4^2 \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f_2}{t} \right) \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f_2}{2t} \right) \right]$$

式中: F₂—碟簧负载;

E—弹性模量 (MPa), 弹簧钢取 2.06 × 10⁵MPa;

μ—泊松比, 弹簧钢取 0.3;

C—外径与内径之比, D/d=28/14.2=1.97

计算系数 K₁=0.688; K₄=1 (无减薄量时);

碟簧变形量 f₂=(16H₀-16.5)/16=(16*1.8-16.5)/16=0.769mm;

$$\therefore F_2 = \frac{4 \times 2.06 \times 10^5}{1-0.3^2} \cdot \frac{0.8^3}{28^2 \times 0.688} \cdot 1 \cdot \frac{0.769}{0.8} \cdot \left[1 \times \left(\frac{1}{0.8} - \frac{0.769}{0.8} \right) \left(\frac{1}{0.8} - \frac{0.769}{2 \times 0.8} \right) + 1 \right]$$

$$= 735 \text{ (N)}$$

③换算到气缸所需的推力

如图 5, 因为气缸 1 是由推力连杆 2 通过转轴再加力到胶辊压臂 3, 它们的扭矩相等, 气缸推杆与推力杠杆在压紧状态时接近成 90° 位置, 由于推力连杆与胶辊压臂的力臂长度不一样, 可以通过换算得出气缸推力:

$$\therefore T_{y1} = T_{t1}$$

式中: T_{y1}—胶辊压臂最小压紧扭矩; T_{y1}=0.04025F₁=0.04025 × 340.4=13.7Nm

$$T_{t1} \text{—气缸推力杠杆最小扭矩, } T_{t1} = T_{y1} = 0.032F_{t1}$$

$$\therefore \text{所需气缸最小推力 } F_{t1} = T_{y1} / 0.032 = 13.7 / 0.032 = 428.1 \text{ N}$$

$$\text{同样: } T_{y2} = T_{t2}$$

式中: T_{y2}—胶辊压臂最大压紧扭矩; T_{y2}=0.04025F₂=0.04025 × 735=29.58Nm

$$T_{t2} \text{—气缸推力杠杆最大扭矩, } T_{t2} = T_{y2} = 0.032F_{t2}$$

$$\therefore \text{所需气缸最大推力 } F_{t2} = T_{y2} / 0.032 = 29.58 / 0.032 = 924.5 \text{ N}$$

计算结果表明, 气缸推力 F_t 应当满足: 428.1 ≤ F_t ≤ 924.5N 条件

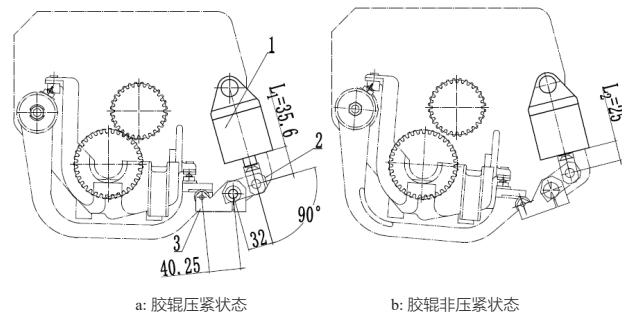


图 5: 气缸行程和推力设计计算图

2. 气缸行程计算

通过设计软件分别画出胶辊压紧和胶辊非压紧状态的位置图 5a, 下胶辊抬起压紧且传动齿轮啮合时如图 5b 状态, 测量气缸活塞杆伸出尺寸为 L₁=35.6mm; 拆装胶辊时, 下胶辊落下且齿轮脱离, 气缸活塞杆伸出尺寸为 L₂=25mm;

$$\therefore L_1 - L_2 = 35.6 - 25 = 10.6 \text{ mm}$$

$$\therefore \text{气缸行程 } S_1 > 10.6 \text{ mm。}$$

3. 气缸选型

根据计算的所需胶辊压紧力在 340.4—735N 之间, 气缸最小位移 10.6mm, 以及工作环境和防护要求, 选用安沃驰 (AVENTICS) 紧凑型单作用气缸, 型号为 0822406362; 具体参数如表 2:

表 2: 选用气缸的主要技术参数

活塞直径 - Ø	[mm]	50
行程 S	[mm]	25
缩回运动的活赛力 f _t	[N]	39
伸出运动的活赛力 F _t (0.63MPa 时)	[N]	1237
工作压力范围 P	[MPa]	0.1 - 1
缸体材料		铝材阳极氧化
活塞、活塞杆材料		不锈钢
环境温度范围		-25° C / +80° C

(1) 气缸推力 F_t=1237N, 这个推力是厂家给出在 0.63MPa 时的数据, 按照单作用气缸 (弹簧回缩) 推力计算公式:

$$F_t = \frac{\pi}{4} D^2 P - f_t$$

$$\text{则 } P = 4 (F_t + f_t) / \pi D^2$$

式中: F_t —气缸推力, N;

f_t —弹簧作用力, 39N;

D —气缸活塞直径, mm

P —气缸工作压力, MPa

当气缸最小推力 $F_{t1}=428.1\text{N}$ 时

$$P_1=4*(428.1+39)/50\pi=0.238\text{MPa} \text{ ①}$$

当气缸最大推力 $F_{t2}=924.5\text{N}$ 时

$$P_2=4*(924.5+39)/50\pi=0.51\text{MPa} \text{ ②}$$

①、②式计算结果表明: 气缸工作压力在0.238MPa—0.51MPa 之间, 平均工作压力 $P_1=0.238+0.51=0.374\text{MPa}$, 满足选型气缸工作压力0.1~1MPa 范围要求^[5]。

(2) 行程 $S=25\text{mm} \geq S_1=10.6\text{mm}$, 满足要求;

(三) 气路控制

如图8所示, 通过一个调压阀2, 可以无级, 精确地调整压缩空气压力, 从而获得胶辊的最佳压紧力, 因为胶辊、胶辊轴等相关构件本身存在制造误差, 胶辊旋转时, 这些综合误差会造成活塞的周期性波动, 所以在气控回路中, 加入一个单向阀4来隔离气源, 利用气体可压缩性来缓冲和吸收波动, 从而保持气缸相对恒定的推力^[6]。

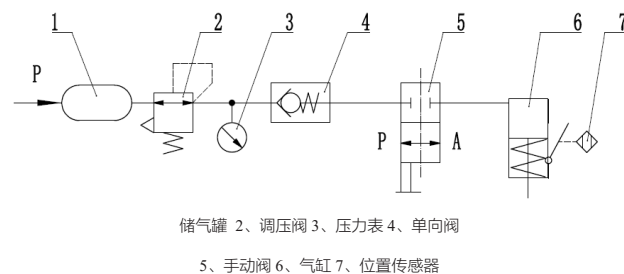


图8: 气路控制原理图

如图8所示的控制气路, 气源经储气罐1、调压阀2, 通过单向阀4接入两位三通手动阀5, 手动阀安装在接装机电控箱操作面板上(上面有备用的开关孔), 胶辊抬起/下降通过手控阀旋钮

操作转换气缸, 胶辊抬起时压缩空气推出活塞, 下降则由气缸内弹簧复位; 根据需要, 调整调压阀来获得最佳压紧力, 压力表3可显示和记录最佳推力的数值, 供操作人员观察、记录和用于不同辅材时的参考; 储气罐可以储存压缩空气, 平衡压力, 避免输入压缩空气压力的波动造成胶辊压紧力的波动变化^[7]。一个安装在气缸体上的磁性位置传感器7用于探测气缸活塞位置, 当胶辊到位并锁紧时, 发送机组控制系统胶缸准备就绪信号。

三、应用效果

通过该项技术的改造, 在实际生产操作维修过程中效果明显, 主要体现在以下几个方面:

1. 改造后涂胶装置安装方便快捷, 压紧机构操作灵活, 胶辊相对压力调整较为精准^[8]。
2. 控胶辊及上胶辊磨损和更换的频次降低, 控胶辊胶窗深度和上胶辊着胶量得到稳定控制。
3. 控胶辊两端滚针轴承和轴承座损坏和更换频次降低, 维修成本进一步降低。
4. 烟支搓接质量得到稳定提高, 接装纸泡皱、翘边、漏气及无胶区施胶等缺陷烟支数量减少, 产品合格率得到进一步提升。

四、结论

对YJ27接装机上胶装置胶辊压紧机构进行技术改进, 采用气缸替代原碟簧施力方式, 通过调压阀精确调整气缸推力, 可以方便地根据胶水和水松纸的物理性能, 精确调整和控制涂胶层厚度, 可以减少设备生产运行中因涂胶问题造成的搓接漏气、泡皱等质量缺陷, 同时可避免压紧力过大造成的胶辊磨损和相关构件的损坏, 有效提高了设备运行效率和烟支质量, 为以后通过对传统结构的改进来提升设备性能和产品质量, 提供了可借鉴的经验 and 思路。

参考文献

- [1] 孙开, 彭晓丽, 王晓燕. PROTOS70 MAX 接装机接装纸与供胶辊接触形式的改进 [J]. 科技创新导报, 2013, (13): 86. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2013.13.039.
- [2] 陈永贵. 降低卷烟机组 MAX 供胶系统的故障频次 [J]. 科学与财富, 2014 (000) 001.
- [3] 陈岱峰, 费婷. 水松纸表面特性及接装胶渗透性能研究用于卷烟生产质量控制 [C]// 中国烟草学会. 中国烟草 2013 年学术年会论文集. 上海卷烟厂工艺质量科; , 2013: 386-396.
- [4] 机械设计手册. 3/ 徐灏主编, -2版, 第2章, 北京: 机械工业出版社, 2006.6 ISBN7-111-01969-5.
- [5] 机械设计手册. 1/ 徐灏主编, -2版, 第2章, 北京: 机械工业出版社, 2006.6 ISBN7-111-01969-5.
- [6] YJ27型滤嘴接装机使用说明书 51ACE0260004, 常德烟草机械有限责任公司, 2009.04.
- [7] ZJ17 卷接机组培训教材, 贾会志, 郑州, 河南人民出版社.
- [8] PROTOS1-8/MAX1-8 操作说明书.

浅谈剧院给排水设计的若干问题

顾松明

上海申康卫生基建管理有限公司, 上海 200000

DOI:10.61369/ERA.2025080010

摘 要 : 以狮山剧院工程为例, 结合剧院的工程特点, 对剧院室内生活给水系统、排水系统、热水系统等设计方法进行了研究, 并提出了排水设计中控制环境噪声和保持环境卫生的措施, 以为同类型建筑的给排水设计提供参考。

关 键 词 : 剧院建筑; 给排水设计; 给水系统; 排水系统; 雨水系统; 噪音

Several Issues on Water Supply and Drainage Design of Theaters

Gu Songming

Shanghai Shenkang Health Infrastructure Management Co., Ltd., Shanghai 200000

Abstract : Taking the Lion Hill Theater project as a case study and considering the engineering characteristics of theaters, this paper conducts research on design methodologies for indoor domestic water supply systems, drainage systems, and hot water systems in theater buildings. It also proposes measures for controlling environmental noise and maintaining sanitation in drainage system design. The study aims to provide references for water supply and drainage design in similar architectural projects.

Keywords : theater architecture; water supply and drainage design; water supply system; drainage system; stormwater system; noise control

引言

随着我国社会经济持续快速发展, 人们的生活水平得到了显著改善, 在物质生活基本得到满足的情况下, 人们逐渐开始追求精神生活。剧院作为文化教育的场所, 在城市中扮演着重要的角色, 给人们丰富了精神生活, 越来越多的城市拥有自己的大剧院, 如乌镇大剧场, 宁波大剧场等等。而剧院的设计相较于其他建筑, 又有着千差万别, 如剧院造型, 空间表现形式, 舞台机械, 灯光效果等等, 都会对给排水设计形成制约, 但凡任何一个部分出现设计的不合理, 就会影响整个剧院的建设效果, 也使得观众的体验感会很差。此次我就对于我在剧院设计中遇到的问题做一个小结^[1]。

一、工程概况

苏州狮山剧院项目位于狮山公园广场, 从狮山路眺望项目所在位置, 可以通过半透明的建筑屋檐部分, 感受到艺术剧院的独特魅力, 同时当游客到达剧院附近时, 既可以欣赏到剧院整体矗立于眼前的宏大气势, 又可以透过清盈通透的建筑表皮观赏到远处的狮山风景。剧院总建筑面积42404.06平方米, 其中地上建筑面积15794.32平方米(地上计容建筑面积13507.24平方米, 地上不计容建筑面积2287.08平方米)地下建筑面积26609.75平方米。包含一个1382座(固定座位1281座, 乐池升高时座位100座)大剧场, 一个500座多功能厅, 以及市民共享大厅等。剧场体量在波动起伏的大屋盖下统一为一个和谐有机的整体。



二、给排水设计难点分析

（一）剧院造型的独特性对给排水设计的限制

苏州狮山剧院外部结构呈现为带有柔软曲面的半透明形态，屋檐的的低点和高点相互交错，最高处标高与最低处标高差达到20m，倾斜角度极大，当下暴雨时，雨水汇流速度会很快，同时波峰和波谷的面积达到2000平方米，雨水汇水量又会很大，这对雨水排水形成极大挑战。其内部呈现为上大下小的漏斗结构，墙体整体呈现为倾斜状态，管线不能垂直设置，这对排管造成了困难。屋顶呈现为不规则开口，同时因为主舞台区域高度为26m，侧舞台高度为10m，观众厅高度为19m和22m，形成了高低错落的屋面形式，对屋面的整个汇水形式，布管方式都形成挑战。针对屋面高差大，坡度大，汇水收集困难，瞬时排水量大等困难，首先我们与幕墙结合，在每一列幕墙玻璃固定梁处做了个5厘米上翻，当下暴雨时，上翻部分会对雨水汇集有一个阻挡作用，达到延迟雨水汇水时间的目的，减轻了下方的排水压力，而5厘米的上翻对整体效果并无影响，同时考虑到造型的完美性，我们并未在屋檐下摆处设置排水天沟，而是在波谷对应的地面处与景观结合设置较长的雨水口，雨水口上敷有鹅卵石，雨水会在波谷处跌落至地面雨水口上，雨水口的排水量满足了于是排水需求，鹅卵石的敷设既能够减缓水落下来的飞溅，又能够阻挡垃圾落入雨水井造成堵塞，同时不设置外挂雨水沟又避免了对外立面造型的影响。对于主舞台和侧舞台及观众厅屋面高低错落，影响屋面排水的问题，从安全的角度，我们按照百年一遇的重现期考虑雨水量，将部分小屋面雨水引至大屋面排放，在小屋面做排水管时，我们会选择隐蔽的位置，同时将管道颜色涂装成墙体颜色，保证了屋面的整体效果。大屋面我们采用排水沟加汇水坑的排水形式，选择87型雨水斗，这样可以尽可能减少屋面雨水斗的数量，同时排水沟的设置能够避开了舞台，观众厅等不能穿管的位置，从而保证了排水安全的同时又不影响观众的体验^[2]。

（二）剧院用水点分散且需求多样对设计的挑战

狮山剧院用水点多集中于地下，然而在地下又分散在各个部位，化妆间，演员休息，淋浴间，贵宾卫生间主要集中在舞台后场区域，而公共卫生间、空调机房则会散落在剧院各个位置。供水点位的繁多增加了设计的难度。同时，剧院作为高端娱乐场所，各个部位的热水供给是提升剧院品质的一个必要措施，而快速出水则是必然要求，在热水系统的选择上则很关键。在冷水系统选择上，狮山剧院属于单层建筑，根据规范要求，充分利用市政水压的同时，我们在地下室形成环状布置，保证各用水点的安全且稳定。剧院的热水量相对较大，所以我们选择了集中热水系统。因为热水点位相对集中又分布于地下室各个位置，我们选择了整个一个干管的机械大循环，能够保证每个需要热水的点位都能有热水供应，干管距离各个用水点距离保证不超过5m，保证了每个热水点能够快速出水，同时在末端点位，我们选择设置恒温

混水阀，这样大大提升观众的用水的舒适度，且能够防止热水过热烫伤使用者。热水热媒来自市政蒸汽，在末端我们设置了余热回收水箱，用余热加热水箱内的水，这样水箱热水也可以作为日常使用，充分利用了市政热能，狮山剧院选择采用容积式热交换器作为储热设备，能够储存足够的热水量，保证热水的安全、不间断供给，提升观众的整体体验。

（三）排水设计的难点分析

狮山剧院卫生间主要集中在地下一层和地下二层，如何保证在剧院散场时集中使用卫生间导致排水量暴增时，排水的安全顺畅以及未来物业维护检修的便利，都是设计阶段需要考虑的内容。狮山剧院作为狮山广场的一部分，其下方均为满铺地下室，所以室外覆土仅0.7m，对于室外走管覆土不够，管道保护都需要在设计阶段充分考虑。狮山剧院室外存在多个下沉庭院，其中一个庭院下方是观众入口，首先如果出现暴雨，可能会对室内大厅造成危险，其次，雨水落在观众入口处，对观众的感受也是不佳的，这也是设计中需要关注的一点。在针对地下室污水排水设计时，充分模拟考虑了散场时观众集中使用卫生间的流量，且在选择污水提升器时对流量及容量做了合理的放大，同时污水提升器内的提升泵也做到一用一备，保证排水的通畅。针对地下室埋管的卫生间，设计时全部考虑同层降板排水，保证了管道的安全性，同时污水提升泵房单独设置，保证未来运行检修时不会将污染区域扩大，仅仅集中在污水提升泵间内。对于室外覆土不足的问题，大范围的降板势必会造成造价的大幅提升，针对重力雨水管排出长度过长，我们首先选择半有压流系统，其次在设计中充分运用BIM手段，在保证结构安全，排水坡度满足规范的前提下，部分管线穿梁排出，这样既保证了能够安全排水，又提升了下方净高。室外覆土不足处，我们考虑对管道进行混凝土包裹加固，保证管道的安全，从而保证了排水的安全。对于观众入口在下沉庭院的上方问题，首先考虑的是安全，我们在下沉庭院做了缝隙式排水沟，考虑百年一遇的重现期，将下沉庭院集水井容量提高到5分钟泵的排水量，这样就能保证在暴雨时，雨水能够快速排出，从而保证了整个剧院地下部分的安全。其次，我们与幕墙结合，在露天区域做了个透明的观景平台，将雨水直接引至室外，不进入下沉庭院，这样就能形成双重保险^[3,5,6,7,8,9]。

（四）剧院超高静音要求对设计的挑战

众所周知，剧院建筑的静音要求很高，狮山剧院观众席背景噪声 \leq NR25。在建筑结构上会采用墙面和屋顶作隔声减振，设置休息厅（廊）、前厅等作为隔音的措施等等，对给排水专业也同样是个挑战，如观众厅舞台上房屋面排水，观众厅舞台侧面下方卫生间的给水排水管道，机房的震动影响等等都会对观众的体验产生影响。针对剧院的静音要求，我们做了大量工作，首先我们设计给排水管道时避开观众厅和舞台区域，屋顶雨水我们用排水沟引至公共区域设置管线排放。在管材选择上，我们会选择超静音排水管，这样能够降低水流流动时的噪音。按照噪音模拟，

在舞台附近5m 范围内，我们管道均设置弹性吊杆，避免管道震荡传递至观众厅及舞台区域。对于有震动的机房，我们首先会将位置选择在远离舞台和观众厅的区域，其次我们全部设置浮筑基础，做消音隔振措施。将本专业对剧院噪音的影响降到最低，保证观众的观感体验^[4,10]。

三、结束语

剧院给排水设计作为建筑功能实现的重要保障，需兼顾安全性、实用性、艺术性与人性化需求。在复杂空间结构、高密度人

流及特殊舞台工艺的条件下，在设计时需重点关注给排水系统的高效性、观众使用的舒适性、噪声控制的严格性，以及节水技术的创新应用。

未来的设计中，我们需要与剧院运营方需更紧密协作，通过精细化设计和新技术应用，平衡功能需求与艺术表现，最终打造既满足高标准使用要求，又符合可持续发展目标的剧院空间。tt

参考文献

-
- [1] 梁品. 剧院建筑设计的难点和设计管理重点探讨——以武汉琴台大剧院为例[J]. 艺术科技, 2007, (02): 21–24.
 - [2] 翟影, 林锋, 彭友, 等. 重庆施光南大剧院结构设计[J]. 建筑结构, 2017, (06): 39–45.
 - [3] 赏根荣, 赏莹莹. 吉林市人民大剧院钢结构工程施工技术[J]. 施工技术, 2017, (15): 31–33, 41.
 - [4] 章奎生. 上海大剧院观众厅的音质设计与研究[J]. 声学学报, 2000, 25(1): 2–5.
 - [5] 白瑞纳克. 音乐厅与歌剧院[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
 - [6] 张涛, 黄正策, 杨自雄. 浅析全地理式污水提升泵站的优势及其应用[J]. 广西城镇建设, 2012(7): 100.
 - [7] 吴文波. 新型全地理式污水泵站与传统泵站综合比较[J]. 中国给水排水, 2005(69): 70.
 - [8] 赵玺. 一体化污水处理设备在生活区的应用分析[J]. 山西建筑, 2014, 40(17): 146–148.
 - [9] 侯继燕, 罗伟, 贾韬, 等. 一体化污水提升泵站的应用探讨[J]. 西南给排水, 2013(4): 6.
 - [10] 秦佑国, 王炳麟. 建筑声环境[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

建筑施工与水利工程中的试验检测技术与应用

翟维娟

雄铁工程检测有限公司, 雄安 新区 071600

DOI:10.61369/ERA.2025080015

摘 要 : 本文探讨了建筑施工与水利工程中的试验检测技术及其应用。试验检测技术在确保工程质量与安全方面发挥着关键作用。建筑施工中, 地基基础与主体结构的检测技术保障了建筑物的稳固性与质量; 水利工程中, 土石坝、混凝土坝及水闸工程的检测技术有效监测了工程运行状态, 预防潜在风险。随着科技发展, 试验检测技术正朝着智能化、高精度方向迈进, 为工程建设的高质量发展提供有力支撑。

关 键 词 : 试验检测技术; 建筑施工; 水利工程

Experimental Testing Technology and Its Applications in Construction and Water Conservancy Engineering

Zhai Weijuan

Xiongtie Engineering Testing Co., Ltd., Xiong'an New Area 071600

Abstract : This paper explores the experimental testing technology and its applications in construction and water conservancy engineering. Experimental testing technology plays a crucial role in ensuring the quality and safety of engineering projects. In construction, testing technologies for foundations and main structures ensure the stability and quality of buildings. In water conservancy engineering, testing technologies for earth-rock dams, concrete dams, and sluice projects effectively monitor the operational status of engineering projects and prevent potential risks. With the advancement of technology, experimental testing technology is moving towards intelligent and high-precision directions, providing strong support for the high-quality development of construction projects.

Keywords : experimental testing technology; construction; water conservancy engineering

引言

建筑施工与水利工程作为国家基础设施建设的关键领域, 对推动社会经济发展和保障民生具有重要意义^[1]。随着工程建设规模的不断扩大和技术难度的日益提升, 试验检测技术在确保工程质量、保障工程安全方面的作用愈发凸显。近年来, 我国颁布了《建设工程质量检测管理办法》(2022年), 进一步规范了建设工程质量检测行为, 明确了试验检测在工程建设全过程中的重要地位。该政策的实施为建筑施工与水利工程试验检测技术的发展提供了政策支持和方向指引。在此背景下, 深入研究试验检测技术及其在建筑施工与水利工程中的应用, 不仅有助于提升工程质量管理水平, 更能为工程建设的可持续发展提供有力保障^[2]。

一、试验检测技术概述

(一) 建筑施工中的试验检测技术

建筑施工中的试验检测技术是保障工程质量的关键环节^[3], 涵盖了众多项目, 其中建筑材料的强度检测和混凝土配合比试验尤为重要。建筑材料强度检测通过精确的力学试验, 确保钢材、水泥、砖石等材料的力学性能符合设计要求, 从而为结构安全奠定基础。混凝土配合比试验则通过科学的配比设计和试验验证, 优化水泥、砂石、水及外加剂的比例^[4], 以保证混凝土的工作性、强度和耐久性。从发展历程来看, 建筑施工试验检测技术经历了从手工操作到自动化仪器检测的转变, 如今已广泛采用先进的无损检测技术、智能检测设备以及大数据分析等手段, 实现了检测

的高效性与精准性。当前, 该技术正朝着智能化、信息化方向发展, 通过物联网技术实现远程监控与数据实时传输, 进一步提升了工程检测的效率与质量控制水平。

(二) 水利工程中的试验检测技术

水利工程的试验检测技术聚焦于关键环节^[5], 以确保工程的稳定性和安全性。土石坝的压实度检测是其中的重要内容, 通过环刀法、灌砂法等技术手段, 精确测量土石坝填筑材料的压实程度, 确保坝体的密实度满足设计要求, 从而保障坝体的稳定性和抗滑性能。混凝土坝的抗渗性试验同样至关重要, 采用渗透压力试验、渗流量观测等方法, 评估混凝土坝体的抗渗性能, 防止渗漏导致坝体结构破坏。水利工程试验检测技术具有复杂性和高精度要求的特点, 不仅要应对复杂的自然环境, 还需确保检测结果

的准确性与可靠性。随着科技的不断进步，该技术正朝着精细化、自动化和多学科融合的方向发展，借助卫星遥感、无人机监测、智能传感器等先进技术，实现对水利工程的全方位、实时监测与评估，为水利工程的安全运行提供有力的技术支撑。

二、试验检测方向的分类

（一）材料性能检测方向

材料性能检测是建筑施工与水利工程试验检测的重要方向之一，其涵盖内容广泛且至关重要^[6]。在建筑材料方面，钢材检测重点关注其抗拉强度、屈服强度、伸长率等力学性能指标，通过拉伸试验、弯曲试验等方法确保钢材满足结构承载要求；水泥检测则侧重于强度等级、安定性、凝结时间等，采用标准养护条件下的抗压与抗折试验等手段，保障混凝土结构的耐久性与稳定性；砂石检测着重于颗粒级配、含泥量、泥块含量等，以满足混凝土配合比设计的精准需求^[7]。水利材料中，土工材料检测聚焦于抗拉强度、延伸率、渗透系数等，通过直剪试验、拉伸试验等方法，确保其在土石坝等工程中发挥良好的过滤与加固功能；防水材料检测则着重于防水性能、粘结强度等，采用不透水性试验、拉伸试验等，保障水利工程的防渗效果。在实际工程中，材料性能检测的应用实例比比皆是。例如，在某大型建筑工程中，通过对进场钢材进行严格检测，及时发现一批屈服强度不达标的钢材，避免了因材料问题导致的结构安全隐患^[8]；在某水利枢纽工程中，对土工膜进行防水性能检测，确保了其在大坝防渗体系中的可靠应用，有效防止了渗漏事故的发生，保障了工程的正常运行。材料性能检测通过精准把控材料质量，为建筑施工与水利工程的高质量建设筑牢了基础。

（二）结构性能检测方向

结构性能检测是保障建筑施工与水利工程安全性和可靠性不可或缺的关键环节。对于建筑结构，梁、板、柱等构件的性能检测方法多样且技术成熟。以混凝土梁为例，采用静载试验法，通过在梁上施加分级荷载，测量梁的挠度、裂缝宽度等指标，以此评估梁的承载能力和抗裂性能；对于高层建筑的框架柱，利用超声波检测技术^[9]，探测柱内部是否存在缺陷，如蜂窝、空洞等，同时结合回弹法检测混凝土强度，综合判断柱的结构性能是否满足设计要求。在水利结构方面，大坝的性能检测技术更为复杂且要求严格。对于混凝土坝，采用无损检测技术，如超声波检测、雷达检测等，检测坝体内部是否存在裂缝、空洞等缺陷，同时通过变形监测系统，实时监测坝体的位移、沉降等变形情况，分析坝体的稳定性；对于水闸的闸门结构，运用动载试验法，模拟闸门在实际运行中的启闭过程，检测闸门的启闭力、振动特性等，确保闸门在长期运行中能够安全可靠地控制水流。结构性能检测对工程安全性和可靠性的重要性不言而喻^[10]。在建筑领域，通过对结构构件的性能检测，能够及时发现潜在的结构隐患，采取有效的加固措施，避免因结构失效导致的建筑坍塌事故，保障人员生命财产安全；在水利工程中，大坝等水利结构的性能检测是确保工程安全运行的关键，一旦坝体结构出现问题，可能导致洪水泛滥等严重灾害，通过科学的检测手段，提前预警并采取措施，能够有效保障水利枢纽工程的防洪、发电、灌溉等功能的正常发挥，维护社会经济的稳定发展。

三、建筑施工中的试验检测技术应用

（一）地基基础检测

1. 地基承载力检测技术

地基承载力检测是建筑施工中关键环节，常用方法包括静载试验与触探试验。静载试验通过在地基上施加荷载，测量地基变形，精确获取地基承载能力，是工程设计重要依据。触探试验则利用探头贯入土层，根据贯入阻力评估地基承载力，具有快速、经济特点，适用于大面积初步勘察。地基承载力检测结果直接影响建筑设计与施工。合理承载力数据可优化基础设计，避免过度设计浪费资源，或因承载力不足引发工程事故。施工阶段，检测结果指导基础施工，确保施工符合设计要求，保障建筑整体稳定性与安全性，为后续施工奠定坚实基础。

2. 基础检测技术

基础检测涵盖基础尺寸、位置偏差及结构完整性等多项内容。尺寸检测确保基础结构符合设计规格，通过精确测量基础长度、宽度、厚度等参数，保障基础承载能力与稳定性。位置偏差检测则利用测量仪器，检查基础中心位置、轴线偏差是否在允许范围内，防止因位置偏差导致上部结构受力不均。基础检测在施工过程中发挥质量控制关键作用。施工前，检测可发现施工场地潜在问题，提前调整施工方案；施工中，实时检测及时发现偏差，指导施工纠偏，确保施工质量；施工后，全面检测验证基础施工质量，为后续验收提供依据，保障基础施工质量，为建筑整体质量提供有力保障。

（二）主体结构检测

1. 混凝土结构检测技术

混凝土结构检测项目主要包括强度与耐久性检测。强度检测采用回弹法、超声回弹综合法等，通过测定混凝土表面硬度或内部声学特性，推算混凝土抗压强度，确保结构承载能力满足设计要求。耐久性检测则涉及抗渗性、抗冻性、抗碳化性等，通过模拟实际使用环境，评估混凝土结构在长期使用中的耐久性能，预防结构因环境侵蚀导致的早期损坏。混凝土结构检测对建筑质量保障至关重要。准确的强度检测结果可优化结构设计，避免因强度不足引发的结构破坏或过度设计增加成本。耐久性检测则延长建筑使用寿命，降低后期维护成本，保障建筑在设计使用年限内安全可靠，为建筑整体质量提供坚实保障。

2. 钢结构检测技术

钢结构检测涵盖焊缝检测与钢材性能检测。焊缝检测采用超声波检测、射线检测等无损检测技术，检测焊缝内部缺陷，如裂纹、未熔合、气孔等，确保焊缝质量符合设计与规范要求。钢材性能检测则通过拉伸试验、冲击试验等，测定钢材的屈服强度、抗拉强度、延伸率等力学性能指标，验证钢材是否满足工程使用要求。钢结构检测在建筑施工中意义重大。焊缝质量直接影响钢结构连接强度与整体稳定性，合格焊缝可有效传递荷载，保障结构安全。钢材性能检测则从源头把控材料质量，避免因钢材性能不足导致的结构失效，确保钢结构施工质量，为建筑施工提供可靠保障。

四、水利工程中的试验检测技术应用

（一）土石坝工程检测

1. 坝体压实度检测技术

土石坝坝体压实度检测是确保坝体施工质量的关键环节。环

刀法通过在坝体中取样,利用环刀精确测量土体体积与质量,进而计算土体干密度,该方法操作简便且精度较高,适用于黏性土等均匀性较好的土体。灌砂法则利用标准砂的密度与体积关系,通过在坝体表面挖坑,填入标准砂来间接计算土体压实度,适用于各类土体,尤其在粗粒土和砾石土中具有良好的适用性。压实度检测对土石坝质量控制至关重要,压实度不足会导致坝体抗剪强度降低,增加坝体沉降和滑动风险,影响坝体的整体稳定性和防渗性能。通过科学合理的压实度检测,能够及时发现施工过程中的质量问题,指导施工参数调整,确保坝体施工质量满足设计要求,为土石坝的安全运行提供坚实基础。

2. 坝体渗漏检测技术

坝体渗漏检测是保障土石坝安全运行的重要手段。钻孔测压技术通过在坝体中钻孔安装测压管,实时监测孔内水位变化,间接反映坝体内部渗漏情况,能够及时发现坝体内部潜在的渗漏通道和渗漏区域。渗漏观测则主要通过在坝体表面设置观测设施,如渗漏量观测孔、渗漏观测井等,直接测量坝体表面渗漏水量和渗漏路径,直观反映坝体渗漏现状。渗漏检测在土石坝安全运行中发挥着重要作用,渗漏可能导致坝体内部孔隙水压力升高,降低坝体抗滑稳定性,同时渗漏水流携带的土体颗粒流失会逐渐扩大渗漏通道,最终可能引发坝体坍塌等严重安全事故。通过有效的渗漏检测技术,能够及时发现渗漏隐患,采取针对性的处理措施,防止渗漏问题进一步恶化,确保土石坝在各种工况下的安全稳定运行。

(二) 混凝土坝工程检测

1. 混凝土坝强度检测技术

混凝土坝强度检测是评估混凝土坝质量的重要指标,常用方法包括回弹法和超声波法。回弹法通过测量混凝土表面的回弹值,结合碳化深度,推算混凝土的抗压强度;超声波法则利用超声波在混凝土中的传播特性,通过测量声速和波形变化,评估混凝土的内部质量。强度检测对混凝土坝质量评估具有重要意义,它直接关系到坝体的承载能力和抗裂性能。准确的强度检测可以为混凝土坝的设计、施工和运行提供科学依据,确保坝体的安全性和可靠性。

2. 混凝土坝裂缝检测技术

裂缝检测是混凝土坝安全评估的重要内容,常用技术手段包括裂缝宽度和深度检测。裂缝宽度检测通常采用裂缝宽度测量仪,通过光学原理精确测量裂缝的宽度;裂缝深度检测则利用超声波法或钻孔取芯法,通过测量超声波的传播时间和钻孔取芯的深度,确定裂缝的深度。裂缝检测对混凝土坝的安全性保障作用

显著,及时发现和评估裂缝的严重程度,可以采取相应的加固措施,防止裂缝进一步扩展,避免坝体发生结构性破坏,确保混凝土坝的安全运行。

(三) 水闸工程检测

1. 闸门检测技术

闸门检测是水闸工程的重要环节,主要内容包括启闭性能和防腐性能检测。启闭性能检测通过模拟闸门的实际运行工况,测试闸门的启闭力、启闭速度和启闭时间,确保闸门的正常运行;防腐性能检测则通过检测闸门表面的防腐涂层厚度和附着力,评估闸门的耐久性。闸门检测对水闸运行安全至关重要,闸门的启闭性能直接影响水闸的调节功能,而防腐性能则决定了闸门的使用寿命。定期进行闸门检测可以及时发现和处理潜在问题,确保水闸的安全运行。

2. 闸室结构检测技术

闸室结构检测是水闸工程的重要组成部分,主要项目包括结构变形和裂缝检测。结构变形检测通过在闸室结构上安装位移传感器和沉降观测点,实时监测结构的变形情况;裂缝检测则利用裂缝检测仪,测量裂缝的宽度和深度,评估裂缝的严重程度。闸室结构检测在水闸工程中具有重要意义,及时发现和处理结构变形和裂缝问题,可以防止结构进一步损坏,确保水闸的整体稳定性和安全性,保障水闸的正常运行。

五、总结

试验检测技术在建筑施工与水利工程中占据着至关重要的地位,其应用现状已广泛覆盖从材料性能到结构安全的多个关键环节。在建筑施工领域,地基基础检测确保了建筑物的稳固性,而主体结构检测则为建筑的整体质量提供了有力保障;水利工程中,土石坝、混凝土坝以及水闸工程的检测技术,有效监测了工程的运行状态,预防潜在风险。然而,当前试验检测技术仍面临诸多挑战,如检测精度有待进一步提高、检测设备的智能化程度不足以及检测标准的更新滞后于技术发展等。未来,随着科技的不断进步,试验检测技术将朝着智能化、自动化和高精度的方向发展,大数据、物联网以及人工智能等新兴技术的融合应用将为试验检测提供更高效、更精准的解决方案。试验检测技术作为工程质量管理的核心手段,其对保障工程质量和安全的关键作用不容忽视。通过科学、准确的检测手段,能够及时发现工程中的潜在问题,为工程的顺利实施和长期稳定运行提供坚实的技术支撑,从而推动建筑施工与水利工程建设的高质量发展。

参考文献

- [1] 胡国伟. 水利水电工程中地基基础岩土试验检测技术研讨 [J]. 模型世界, 2023: 133-135.
- [2] 李响. 水利水电工程中试验检测的作用 [J]. 工程技术: 全文版, 2021(2017-2): 222-222.
- [3] 潘密成. 水利工程试验监测新技术探讨 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 000(036): 2577.
- [4] 胡林峰. 无损检测技术在水利工程质量检测中的应用研究 [J]. 科技创新导报, 2020, 17(18): 2.
- [5] 李增军. 试验检测在水利工程中的作用 [J]. 珠江水运, 2019(7): 2.
- [6] 陈淑杰, 李志军. 水利建筑工程结构检测综合技术分析 [J]. 华东科技: 综合, 2019(11): 1.
- [7] 帅宗胜. 关于水利建筑工程结构检测技术探析 [J]. 现代物业: 中旬刊, 2018(7): 1.
- [8] 刘彬. 水利水电工程中试验检测的作用 [J]. 四川水泥, 2018, (01): 313.
- [9] 付海峰, 潘亚辉, 刘敏. 无损检测技术在水利工程中的应用分析 [J]. 工程建设与设计, 2022(011): 000.
- [10] 郭箫. 水利水电工程试验检测工作要点浅析 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2021(1): 73-74.

工业废水处理厂出水水质多指标协同监测与智能预警技术研究

陈秀芳

佛山市南海西樵鑫龙水处理有限公司，广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2025080030

摘要： 本文围绕工业废水处理厂出水水质监测展开。阐述了常规监测技术的优缺点，强调多指标协同监测的必要性，介绍了监测指标筛选方法、集成化监测系统构建、预测算法及预警模型，还涉及数据准确性保障、新技术应用，最后提出未来研究方向。

关键词： 工业废水；水质监测；智能预警

Research on Multi-index Collaborative Monitoring and Intelligent Early Warning Technology of Effluent Quality in Industrial Wastewater Treatment Plants

Chen Xiufang

Foshan Nanhai Xiqiao Xinlong Water Treatment Co, LTD. Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper focuses on the monitoring of effluent quality in industrial wastewater treatment plants. It expounds on the advantages and disadvantages of conventional monitoring technologies, emphasizes the necessity of multi-index collaborative monitoring, and introduces the screening method of monitoring indicators, the construction of an integrated monitoring system, prediction algorithms, and early warning models. It also involves ensuring the accuracy of data and the application of new technologies, and finally puts forward the future research directions.

Keywords： industrial wastewater; water quality monitoring; intelligent early warning

引言

随着工业化进程的加速，工业废水污染问题日益严峻。2023年颁布的《水污染防治行动计划》强调了加强工业废水治理的重要性。工业废水水质复杂，包含多种有害物质，传统监测方法在多参数同步监测、实时性和抗干扰能力等方面存在局限。单一指标监测无法全面反映水质状况，因此构建多指标协同监测体系至关重要。同时，为及时应对水质异常，智能预警技术也不可或缺。本研究围绕工业废水处理厂出水水质多指标协同监测与智能预警技术展开探讨，旨在为工业废水处理及环境监测领域的发展提供理论支撑。

一、工业废水水质监测技术原理与现状

（一）常规监测技术分类与局限

工业废水水质监测中，常规监测技术包括化学分析法、光谱技术和生物传感器等。化学分析法是通过化学反应来确定物质的组成和含量，应用广泛，但操作复杂且耗时，难以实现实时监测^[1]。光谱技术基于物质对光的吸收、发射或散射特性进行分析，具有快速、无损等优点，但仪器昂贵且对样品前处理要求高。生物传感器则利用生物活性物质与污染物的特异性反应来检测水质，灵敏度高，但稳定性和重现性较差，且易受环境因素干扰。这些传统监测方法在多参数同步监测方面存在局限，难以同时准确测量多个水质指标。实时性也不足，无法满足对工业废水水质

快速变化的及时监测需求。抗干扰能力弱，复杂的工业废水环境会影响监测结果的准确性。

（二）多指标协同监测需求分析

工业废水污染物组分复杂，包含多种有害物质，如有机物、重金属等。单一指标监测无法全面反映水质状况，可能导致对污染程度的误判。例如，仅监测 COD 无法了解重金属污染情况，而重金属超标可能对生态环境和人体健康造成严重危害^[2]。pH 值作为基本指标，其变化会影响其他污染物的存在形式和毒性。因此，pH 值、COD、重金属等关键参数的协同监测十分必要。通过协同监测这些关键参数，可构建多维度水质评价指标体系，更全面、准确地评估工业废水水质，为废水处理和环境监管提供科学依据。

二、多指标协同监测体系构建

（一）监测指标筛选与优化

工业废水成分复杂，监测指标众多，需筛选并优化。可采用主成分分析法确定核心监测参数，该方法能有效提取关键信息，减少指标数量同时保留主要特征^[3]。建立基于污染源特征和排放标准的动态指标筛选模型，考虑废水来源及处理后应达到的标准，使筛选出的指标更具针对性和实用性。此外，提出指标权重分配算法，根据各指标对水质影响的重要程度合理分配权重，突出关键指标的作用，从而构建科学合理的监测指标体系，为工业废水处理厂出水水质的准确监测和有效管理提供有力支撑。

（二）协同监测系统架构设计

构建包含传感器阵列、数据传输模块、云端处理平台的集成化监测系统。传感器阵列负责采集工业废水处理厂出水水质的多指标数据，应根据监测需求合理选择传感器类型及数量，确保数据的准确性和全面性^[4]。数据传输模块将传感器采集到的数据传输至云端处理平台，需保证传输的稳定性和及时性，可采用合适的通信技术实现。云端处理平台对接收的数据进行存储、分析和处理。在此基础上，运用多源数据融合算法对来自不同传感器的数据进行融合，提高数据的可靠性和有效性。同时，建立异常数据识别机制，及时发现水质异常情况，为后续的智能预警提供支持。

三、智能预警技术开发与应用

（一）机器学习预警模型构建

1. 时序预测算法选择

在出水水质预测中，需对多种时序预测算法进行适用性分析。LSTM 算法具有处理长期依赖关系的能力，适用于水质数据这种具有时间序列特性的预测任务^[5]。它能够学习到数据中的长期模式，对水质变化趋势进行有效捕捉。ARIMA 算法则是一种经典的时间序列分析方法，在平稳时间序列预测方面有良好表现。然而，工业废水处理厂出水水质数据可能存在复杂的非线性关系和季节性波动，单一算法可能存在局限性。因此，有必要建立基于注意力机制的改进预测模型。注意力机制可以使模型更加关注对预测结果有重要影响的特征和时间步，提高预测的准确性和可靠性，更好地适应水质数据的复杂性。

2. 多参数关联预警模型

构建多参数关联预警模型需开发污染物浓度关联网络模型。该模型基于大量的工业废水处理厂监测数据，利用机器学习算法挖掘不同水质参数之间的潜在关联关系^[6]。通过对这些关联关系的深入分析，可以准确识别出在正常运行情况下各参数之间的协同变化模式。一旦出现异常情况，如某个或多个参数偏离正常范围，模型能够依据已建立的关联网络迅速追溯到可能的异常源头。同时，针对复合污染情况，模型可综合考虑多个相关参数的变化，发出准确的预警信号，为及时采取措施保障出水水质提供有力支持。

（二）动态预警阈值设定

1. 自适应阈值算法开发

基于历史数据统计特征和工艺运行状态设计动态调整的预警阈值生成机制。通过分析历史数据，挖掘其中的统计规律，例如均值、标准差、极值等信息，以此为基础构建初始阈值模型^[7]。同时，考虑工艺运行状态对水质的影响，结合实时监测的工艺参数，如流量、温度、处理时间等，对阈值进行动态调整。利用机器学习算法，如神经网络、支持向量机等，学习历史数据和工艺参数与水质指标之间的复杂关系，不断优化阈值模型，使其能够自适应不同工况下的水质变化，提高预警的准确性和及时性。

2. 预警响应策略优化

动态预警阈值设定需综合考虑多方面因素，如工业废水的成分复杂性、处理工艺的稳定性以及环境条件的多变性等。通过对大量历史数据的分析和挖掘，结合先进的数据分析算法，确定合理的阈值范围，并使其能够根据实际情况动态调整^[8]。预警响应策略优化方面，应建立分级预警机制，针对不同等级的预警制定详细且具有针对性的应急处置预案与工艺调控方案。对于低级别预警，可采取一些初步的调整措施，如优化工艺参数等；而对于高级别预警，则需要迅速启动更为严格的应急处置程序，包括暂停部分生产环节、加大处理药剂投放量等，以确保出水水质符合标准，降低对环境的潜在危害。

四、质量控制与技术创新方向

（一）监测数据质量控制体系

1. 传感器校准与维护标准

为确保监测数据的准确性，需制定严格的传感器校准与维护标准。首先应建立在线监测设备定期校准规程，明确校准周期、校准方法及校准参数。例如，对于水质监测中的 pH 传感器，可规定每 [X] 周进行一次校准，采用标准缓冲溶液进行两点校准法，确保测量误差在允许范围内^[9]。同时，要建立基于标准物质的质量控制方法，定期使用标准物质对传感器进行检验，验证其准确性和可靠性。在维护方面，制定详细的维护计划，包括传感器的清洁、更换易损部件等。定期对传感器进行清洁，去除表面的污垢和杂质，防止其对测量结果产生干扰。对于易损部件，如电极等，根据其使用寿命和实际使用情况及时更换，确保传感器始终处于良好的工作状态。

2. 数据验证与修正算法

为确保监测数据的完整性，开发了异常数据识别算法与缺失数据补偿模型。异常数据识别算法通过分析数据的分布特征、变化趋势以及与其他指标的关联性，设定合理的阈值和判别规则，识别出可能存在异常的数据点^[10]。对于这些异常数据，进一步采用统计分析方法和基于物理化学原理的模型进行验证和修正。缺失数据补偿模型则基于历史数据和相关变量之间的关系，建立预测模型。通过分析已有数据的规律和趋势，对缺失的数据进行合理估计和填充，从而提高监测数据的质量和可靠性，为工业废水处理厂的运行管理和决策提供准确的数据支持。

（二）新型监测技术集成应用

1. 光谱联用技术开发

UV - Vis 光谱与荧光光谱联合检测技术是一种有效的有机物污染快速筛查方法。该技术基于两种光谱的互补特性，能够提供更全面的有机物信息。UV - Vis 光谱对具有共轭双键结构的有机物有较好的响应，可检测出一些芳香族化合物和不饱和有机物。荧光光谱则对具有荧光特性的有机物敏感，能检测出多环芳烃等物质。通过联合这两种光谱技术，可以扩大检测范围，提高检测的准确性和灵敏度。在实际应用中，利用先进的仪器设备和数据处理算法，对采集到的光谱数据进行处理和分析，从而实现对工业污水处理厂出水中有机物污染的快速筛查，为水质监测和预警提供有力支持。

2. 微流控芯片传感器研发

微流控芯片传感器研发在工业污水处理厂出水水质监测中具有重要意义。该研发聚焦于设计多参数集成检测微流控芯片，以提升现场快速检测能力。通过将多种检测功能集成于单一芯片，能够同时对多个水质指标进行分析，减少检测时间和成本。芯片的设计基于微流控技术原理，利用微小通道对流体进行精确操控，实现样本的高效处理和分析。在传感器的选择上，结合不同水质指标的特性，选用特异性高、灵敏度强的传感器，确保检测结果的准确性。同时，考虑芯片的稳定性和耐用性，采用合适的材料和制造工艺，使其能够适应复杂的工业废水环境，为水质监测提供可靠的技术支持。

（三）智慧化监测系统发展方向

1. 物联网平台深度整合

5G 通信与边缘计算技术在智慧化监测系统的物联网平台深度整合中具有重要应用前景。5G 的高速率、低延迟特性可实现监测数据的快速传输，确保实时性。边缘计算则能在靠近数据源的网络边缘进行数据处理，减少数据传输至云端的压力，提高系统响

应速度。在工业污水处理厂出水水质监测中，利用 5G 通信将大量水质传感器采集的数据迅速上传至物联网平台，再借助边缘计算技术对数据进行实时分析处理，及时发现水质异常情况并发出智能预警。同时，5G 与边缘计算的结合可优化物联网平台的资源分配，提高整个监测系统的可靠性和稳定性，为出水水质的精准监测和有效控制提供有力技术支撑。

2. 数字孪生技术应用

数字孪生技术在工业污水处理厂监测系统中具有重要应用。通过构建污水处理厂数字孪生系统，可实现对污水处理过程的精确模拟和实时监测。利用传感器等设备采集的数据，在虚拟模型中反映实际处理厂的运行状态。基于此，当水质指标出现异常波动时，能迅速在虚拟模型中体现，进而触发智能预警机制。这不仅有助于及时发现潜在的水质问题，还能为操作人员提供决策支持，使其可根据虚拟模型中的分析结果，提前采取措施调整处理工艺参数，确保出水水质稳定达标，实现虚拟现实联动的高效水质监测与管理。

五、总结

本研究系统探讨了工业污水处理厂出水水质多指标协同监测与智能预警技术。多指标协同监测体系具有多方面优势，能更全面准确地反映水质状况。智能预警模型在实际工程应用中也展现出良好效果，可及时发现水质异常。然而，当前技术仍面临一些挑战。未来需重点突破微型化传感器研发，以实现更便捷高效的监测；加强多源异构数据融合，提升数据利用效率和准确性；提高预警模型可解释性，增强模型的可信度和实用性。通过这些方向的突破，可为构建智慧化环境监测体系提供坚实的理论支撑，推动工业废水处理及环境监测领域的进一步发展。

参考文献

- [1] 钟山. 电站水质智能监测与控制技术研究 [D]. 江苏：南京航空航天大学，2016.
- [2] 王肖颖. 城市供水水质监测与预警系统研究 [D]. 重庆：重庆大学，2015.
- [3] 袁学华. 安徽省某污水处理厂污水主要水质指标的监测与处理效果分析 [D]. 安徽：安徽农业大学，2013.
- [4] 李玥. 水源水质在线监测预警系统的建设及运用研究 [J]. 水土保持应用技术，2017(1):33-34.
- [5] 尚庆国，王琳，李春俊. 城市供水水源地水质监测与预警系统研究 [J]. 治淮，2017(8):44.
- [6] 周丰，魏康林，戴贤明，等. 多参数水质监测与预警仪测控系统设计 [J]. 信息通信，2017(11):54-57,59.
- [7] 周玉娇，熊鹰. 生活污水处理厂协同处置工业废水问题研究 [J]. 四川化工，2022,25(1):51-54.
- [8] 刘琼，刘勇，孙秉成，等. 瓦斯涌出智能分析及预警技术研究与应用 [J]. 采矿技术，2018,18(1):59-62.
- [9] 杨春旺. 岸基柜式水质在线监测预警系统 [J]. 低碳世界，2017(18):1-2.
- [10] 赵彦. 供水水源水质监测和预警研究 [J]. 食品安全导刊，2023(7):166-168.

基于 ITIL 4 的信息服务公司 IT 服务管理（ITSM）优化研究

陈东

湖北工业大学经济与管理学院，湖北 武汉 430068

DOI:10.61369/ERA.2025080002

摘 要： 本文以某信息服务公司的 ITSM 为背景，对 IT 服务管理体系（Information Technology Service Management, ITSMTM）进行了优化，使其更符合实际业务。主要工作包括：首先，根据客户需求和公司发展战略，确定新的 IT 服务管理体系框架，并在此基础上制定了一系列的优化措施；其次，对现有的 IT 服务管理体系中不合理的地方进行分析，将这些问题分类，通过分析得出改善 IT 服务质量、提高响应速度、增强顾客满意度是 IT 服务管理体系需要改进之处；最后，针对以上问题，提出了具体的优化方案，并且付诸实践。结果表明，通过这些优化措施的实施，不仅可以优化信息服务公司的 IT 服务管理体系，还可以使该体系更加贴合实际业务需求，从而帮助信息服务公司提升客户满意度、降低成本、提高竞争力。

关 键 词： ITIL 4；信息服务公司；IT 服务管理；优化策略

Research on IT Service Management (ITSM) Optimization of Information Service Companies Based on ITIL 4

Chen Dong

School of Economics and Management, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068

Abstract： This paper takes the ITSM of an information service company as the background to optimize the Information Technology Service Management (ITSM) system and make it more aligned with actual business needs. The main work includes: Firstly, based on customer needs and the company's development strategy, a new framework for the IT service management system is determined, and a series of optimization measures are developed on this foundation. Secondly, unreasonable aspects of the existing IT service management system are analyzed and categorized. Through analysis, it is concluded that improving IT service quality, increasing response speed, and enhancing customer satisfaction are areas where the IT service management system needs improvement. Finally, specific optimization plans are proposed to address the above issues and are put into practice. The results show that the implementation of these optimization measures can not only enhance the IT service management system of the information service company but also make the system more tailored to actual business needs, thereby helping the information service company improve customer satisfaction, reduce costs, and enhance competitiveness.

Keywords： ITIL 4; information service company; IT service management; optimization strategy

引言

在当今社会，随着企业信息化进程的不断推进，IT 服务已经成为影响企业竞争优势的关键因素之一。然而，由于 IT 系统存在着高复杂性、高度动态性和高度依赖性等特点，使得 IT 服务管理工作面临着严峻挑战^[1]。传统的 IT 服务管理方法已经难以满足日益增长的信息需求，因此，一种新的 IT 服务管理框架——ITIL 应运而生。ITIL（International Institute for IT Service Management）是由国际信息技术服务管理体系协会（ITSS）提出的一整套关于 IT 服务管理的理论和实践指导原则，旨在帮助组织建立标准化、系统化、专业化的服务管理流程^[2]。它包括了对所有与服务相关的活动进行统一管理理念和实践，这些活动可以涵盖从业务需求分析到最终客户服务等各个方面。由于我国信息化建设起步较晚，IT 行业发展不够成熟，所以与国外相比存在着一定的差距^[3]。目前国内很多企业虽然

已经开始重视 IT 服务管理工作，但仍处于初级阶段。在此背景下，相关研究人员也做了大量的研究工作。例如，文献^[4]对中国银行进行了深入调研并提出了一系列改进建议。同时还指出了其存在的问题以及未来的发展方向。文献^[5]对某通信公司进行了研究，认为该公司在实施 ITSM 过程中遇到了诸多困难和挑战。本文通过对某信息服务公司 ITSM 现状进行分析，明确了需要优化的内容，并提出相应的优化方案，以期达到提高服务质量、降低成本、提高客户满意度等目的。

一、信息服务公司 IT 服务管理（ITSM）现状

（一）ITIL 概述

20 世纪 90 年代中期，随着信息技术的广泛应用，IT 对企业经营管理和竞争能力的影响越来越大。然而传统 IT 服务管理模式的不足，使得企业难以应对激烈的市场竞争。为适应这一形势，人们提出了新的理念、方法和实践标准——ITIL 体系，它强调通过一整套流程来确保顾客能够获得高质量的 IT 服务，从而提高组织绩效，增强顾客满意。ITIL 作为一个独立的体系，并不是一种单纯的方法论，而是一整套由流程、工具、培训等组成的综合体系。ITIL 规范的主要内容包括：服务设计、服务交付、服务使用和服务管理四个阶段^[6]。其中，前三个阶段是在前两个阶段的基础上发展而来的，与业务紧密结合。中国电信集团信息服务公司成立于 1985 年，是中国最早的信息技术专业公司之一，经过 30 多年的发展，已成为国内领先的信息服务提供商。

（二）项目概况

某信息服务公司成立于 2010 年，注册资本为 50 万元人民币。公司主要提供信息技术服务，包括软件开发、系统集成和 IT 咨询等业务。公司拥有一支专业的团队，具备丰富的信息技术知识和经验。在过去几年中，公司成功地完成了多个重要项目，并得到了客户的广泛认可和好评。然而，随着市场竞争的加剧以及客户需求的不断变化，公司也面临着诸多挑战和压力。为了应对这些挑战，公司决定加强 IT 服务管理方面的建设。

首先，公司制定了详细的 ITSM 实施计划，包括培训计划、流程优化计划和工具选择计划等。通过这些计划的实施，公司可以有效提升员工的工作效率和质量。其次，公司引入了一系列先进的 ITSM 工具和方法，如 ITIL 框架、故障管理系统、云服务管理平台等。这些工具和方法能够帮助公司更好地管理其 IT 资产和服务，提高服务水平和服务质量。最后，公司在组织结构和人力资源方面进行了调整和优化，建立了专门负责 ITSM 建设的团队，并配备了充足的人力资源。

（三）存在的问题

国外的研究主要是对 ITIL 概念、方法和体系结构等进行研究，并结合行业特点建立适合本企业的 IT 服务管理模式。国内的研究主要集中于如何在我国 IT 服务业中更好地实施 IT 服务管理，但缺少理论指导。由于数据有限且不能进行纵向比较，因此本文将以前述中国电信集团信息服务公司为例，阐述其 ITSM 存在哪些问题。作为一个整体，公司目前正在积极推进 ITIL 4 标准落地工作，但仍有一些方面需要进一步完善：①目前部分员工仍然沿用“重使用，轻管理”的工作理念，重视完成任务而忽视了服务效率和质量；②虽然引入了一些新技术，如知识库、工单系统等，但是未能充分利用这些工具提升服务质量，甚至有的功能还处于开发阶段，尚未投入使用；③管理层对于业务部门和一线人员提供

的服务缺乏有效的评价机制，没有形成良性的互动关系。

二、基于 ITIL 4 的信息服务公司 IT 服务管理（ITSM）优化

（一）信息服务公司 IT 服务管理体系现状分析与优化目标的确定

中国电信集团信息服务公司（以下简称信息服务公司）成立于 2001 年，是中国电信集团公司的全资子公司，在全国拥有 38 家分公司。公司主要业务包括 IDC 和电信级网络资源出租、设备托管及维护、互联网接入服务、电信增值业务运营、系统集成等。信息服务公司自成立以来一直致力于建设以客户为中心的 IT 服务管理体系。由于业务发展迅速，原有的 IT 服务管理体系已不能满足公司的需求^[7]。为了保证 IT 服务质量和效率，公司决定对 IT 服务管理体系进行优化。根据当前企业管理的特点以及业务的实际情况，确定了如下的优化目标：（1）提高员工的工作积极性，实现“能者上，平者让”，确保每一位员工都能参与到整个团队中来，并给他们提供充分的培训机会^[8]；（2）改善服务质量，尽量减少错误发生的频率；（3）加快问题的解决速度，缩短问题处理时间；（4）降低成本，使企业效益最大化；（5）加强内部沟通与协作，避免资源浪费；（6）增加客户满意度，增强客户忠诚度。

（二）优化原则

对于以上优化目标，需要将其细化到各个职能部门和各级别人员，并通过合理设计组织结构来落实这些目标。基于此，在调整组织结构时应遵循如下原则：

（1）集中管理原则：不同类型的 IT 业务应该由不同的职能部门负责，这样可以最大限度地发挥专业人员的作用，并且有助于制定统一的标准；（2）职责明确原则：每个职能部门都要有明确的职责和权限，这样才能确保整个体系的顺畅运作；（3）信息共享原则：信息共享不仅可以节约人力物力，还能提高整体的工作效率，所以必须建立一个合理的信息共享平台；（4）流程化原则：在实际工作中，应该把一些重复性高、规律性强的工作用流程的方式记录下来，这样就可以减少人为的错误，提高工作效率；（5）统一协调原则：职能部门之间、部门与部门之间要相互配合，才能更好地完成各项任务。

（三）影响 ITSM 建设效果的关键因素

为了保证 ITSM 的有效性，在建设过程中需要从多个方面入手。首先，要明确 ITSM 建设的目标和范围；其次，要确定实施过程中的关键环节；最后，要建立相应的绩效评价体系。只有这样才能确保 ITSM 建设的成功。在目前已经有许多研究表明，影响 ITSM 建设效果的关键因素主要包括以下几个方面：

（1）组织文化：良好的组织文化是实现 ITSM 成功的关键。它能够让员工意识到 IT 服务的重要性并积极参与其中^[9]。如果缺

乏这种文化氛围,就会导致员工对 IT 服务管理不够重视或者没有足够的积极性去改进服务质量。

(2) 培训与教育:通过定期组织相关培训课程和教育活动,可以提高员工的专业能力和技术水平,从而提升整体服务水平。此外,还可以通过建立学习平台等方式来加强员工之间的交流和协作。

(3) 管理工具:有效的管理工具是保障 ITSM 建设效果的重要手段之一。例如,ITIL 4 提供了一系列标准流程和工具来帮助企业进行日常管理。另外,一些第三方软件也能够为企业提供个性化的解决方案。

(四) 基于 ITIL 4 的 IT 服务管理体系优化方案设计

由于 ITIL 4 体系是一套很好的理论体系,所以要想进一步优化 IT 服务管理体系,就要充分考虑到企业内部的实际情况和外部环境因素,只有这样才能更好地将这理论体系融入公司的业务流程中去。

(1) 明确战略目标:通过对信息服务公司的业务进行分析,可以发现其业务发展主要受两个方面影响:一是客户的需求;二是公司自身的发展战略。基于以上分析,需要从两方面着手进行优化,即以客户需求为导向优化 IT 支撑系统,同时在管理上采用敏捷模式提升响应能力。

(2) 确定优化方向:为了实现以上优化目标,必须找准优化方向,不能盲目地进行改革。因此,根据公司现有业务情况,选取了以下几个方面作为优化方向:一是加强流程监控与业务监督,以提高整体运营效率^[10];二是建立统一的 IT 服务门户,使客户能够随时了解到公司提供的各项服务;三是加强与客户之间的信息交互;四是通过培训使员工更加了解 ITIL 知识,培养他们成为合格的 IT 服务管理者;五是建立专门负责 ITSM 工作的 IT 服务管理团队,并对人员进行专业培训;六是建立标准化的数据收集和分析平台,以便于管理层掌握全局。

(3) 优化方案实施:针对上述提出的优化方案的实施步骤,主要分为三个阶段:首先,成立由各部门负责人组成的项目组,并召开项目启动会,制定详细的实施计划;其次,按照既定计划开展工作,及时处理出现的问题;最后,根据最终成果进行总结,并在下一次项目启动会上公布项目成果,对下一步工作做出安排。^[11]

(五) 根据关键要素制定优化策略

1. 组织结构优化

组织结构优化是 ITSM 建设的核心内容之一,也是当前信息

服务公司普遍存在的问题。根据 ITIL 4 标准要求,应当将公司内部各部门、分支机构、合作伙伴等进行整合,建立一个高效运转的 IT 治理体系。具体来说,可以通过以下几个方面来实现:一是加强顶层设计,明确组织架构;二是成立专门的 ITSM 团队或委员会,负责对 IT 治理进行规划和指导;三是制定详细的职责分配方案,并落实到各个部门或分支机构中去。

2. 人员能力提升

在信息化时代背景下,人力资源管理已经成为企业生存发展的关键要素之一。因此,要想有效推进 ITSM 建设,必须重视人员培训与发展工作。首先,要建立完善的人才培养机制,定期开展各种形式的培训活动;其次,要加强员工职业生涯规划管理,为他们提供更多学习机会和发展空间;最后,还要充分发挥绩效考核作用,激励员工积极参与到 ITSM 建设中来。

3. 技术支撑平台建设

随着信息技术的不断发展和应用,新技术、新理念层出不穷。为了更好地适应这种变化,信息服务公司需要从技术层面入手,构建一个完整的 ITSM 技术支撑平台。^[12]

三、结论与建议

随着信息技术的发展,用户对于 IT 服务的需求发生了很大变化,除了要求系统运行稳定、性能可靠之外,还要求服务响应及时、处理结果令人满意。对企业而言,只有不断优化和完善 IT 管理体系才能跟上时代的步伐。(1) 本文主要研究了信息服务公司 ITSM 建设过程中存在的问题以及解决方案,并结合实际案例分析,提出了一系列优化策略,如:加强培训、优化管理流程、提高人员素质等。(2) 优化后的 IT 服务管理系统将在很大程度上帮助企业提升内部效率和外部服务质量。同时,也可以为企业提供更加高效、便捷的 IT 服务。(3) 由于目前国内 IT 行业还处于初级阶段,所以对于 ITSM 体系建设仍存在很多不足,需要进一步完善和改进。例如:缺乏统一的标准和规范、没有建立起有效的监督机制、对员工进行专业技能培训不够全面等等。因此,建议相关部门和企业能够积极探索适合自身发展需求的 ITSM 建设模式,并制定出切实可行、行之有效的优化策略。此外,政府及相关部门应加大对 IT 服务管理体系建设的支持力度,不断推进其向标准化、规范化方向发展。

参考文献

- [1] 宋家慧. 基于 ITIL 的医疗运维管理系统的设计与应用 [J]. 数字通信世界, 2025, (03): 109-111.
- [2] 王培法, 付继刚, 魏晓鹏, 等. 基于 ITIL4 的医院信息系统运维管理优化实践 [J]. 中国数字医学, 2024, 19(11): 111-115.
- [3] 索晨升. 沃尔沃电子商务平台服务质量管理优化研究 [D]. 大连海事大学, 2024.
- [4] 郑晓林, 巴刚, 张树云. 信息化项目的运维服务管理体系构建 [J]. 数字通信世界, 2024, (10): 87-89.
- [5] 仇一泓. 面向安全性的 IT 服务管理流程优化探讨 [J]. 网络空间安全, 2024, 15(04): 318-321.
- [6] 宋小军. 基于 ITIL 的 ZH 企业 IT 运维项目管理优化策略研究 [D]. 内蒙古财经大学, 2024.
- [7] 焦荣鹤. 基于 ITIL 和 CMMI 的 IT 服务管理优化研究 [D]. 商务部国际贸易经济合作研究院, 2024.
- [8] 李光恒. CY 公司 IT 服务管理优化研究 [D]. 广西大学, 2024.
- [9] 黄瑜. H 公司 IT 服务管理流程优化设计 [D]. 广西师范大学, 2023.
- [10] 刘铭. 基于 ITSS 的 JH 公司 IT 服务管理优化研究 [D]. 南昌大学, 2023.
- [11] 侯元刚, 孙建山. 基于 ITIL4 构建运维管理服务体系支撑数字化改革 [J]. 中关村, 2022, (10): 96-97.
- [12] 赵海洋, 时延鹏. 基于 ITIL 与物联网的开放型 IT 运维云服务平台的研究 [J]. 现代信息科技, 2022, 6(01): 160-163.

液流电池系统装配生产中的研究与应用

——以重载多轴桁架机器人自动装配技术为例

黄文锋

纬景储能科技有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ERA.2025080004

摘 要： 随着智能制造的快速发展，重载多轴桁架机器人在工业自动化领域中发挥着重要作用。本文围绕重载多轴桁架机器人的自动装配技术展开研究，探讨其在汽车制造、航空航天、重型机械等领域的应用价值。文章首先介绍了重载多轴桁架机器人的基本结构与工作原理，分析了其在自动装配过程中的关键技术，包括高精度定位、柔性夹持、智能控制等。随后，结合具体案例，探讨了该技术在实际生产中的应用效果，总结了其在提高生产效率、降低人工成本、提升装配精度等方面的优势。最后，针对当前技术面临的挑战，提出了未来发展的方向，如智能化升级、轻量化设计、人机协作等，为行业进一步发展提供理论支持和实践参考。

关 键 词： 重载多轴桁架机器人；自动装配技术；工业自动化；智能制造；人机协作

Research and Application of Liquid Flow Battery System Assembly Production—Taking Heavy Load Multi-Axis Truss Robot Automatic Assembly Technology as an Example

Huang Wenfeng

Weijing Energy Storage Technology Co., LTD. Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： With the rapid development of intelligent manufacturing, heavy-duty multi-axis gantry robots play a significant role in industrial automation. This paper focuses on the automatic assembly technology of heavy-duty multi-axis gantry robots and explores their application value in automotive manufacturing, aerospace, and heavy machinery. The article first introduces the basic structure and working principle of heavy-duty multi-axis gantry robots, analyzes key technologies in the automatic assembly process, including high-precision positioning, flexible clamping, and intelligent control. Subsequently, it discusses the practical effects of this technology in actual production through specific cases, summarizing its advantages in improving production efficiency, reducing labor costs, and enhancing assembly accuracy. Finally, addressing the challenges currently faced by the technology, it proposes future directions for development, such as intelligent upgrades, lightweight design, and human-robot collaboration, providing theoretical support and practical references for further industry development.

Keywords： heavy load multi-axis truss robot; automatic assembly technology; industrial automation; intelligent manufacturing; man-machine collaboration

引言

在智能制造的浪潮下，自动化装配技术正成为工业生产的重要支撑。重载多轴桁架机器人因其高负载能力、高精度运动和灵活的控制系统，被广泛应用于汽车制造、航空航天、重型机械等领域。近年来，随着工业4.0的推进，传统的人工装配模式逐渐被自动化装配系统取代，而重载多轴桁架机器人作为其中的关键设备，承担着复杂部件的装配任务。然而，当前重载多轴桁架机器人在自动装配过程中仍面临诸多挑战，如高精度定位误差、柔性夹持适应性不足、多轴协同控制复杂等问题。因此，深入研究其自动装配技术，优化系统性能，对于提升生产效率、降低运营成本具有重要意义。

一、国内外研究现状

国外在重载多轴桁架机器人领域的研究起步较早，德国、日本、美国等国家已形成较为成熟的产业链。以德国库卡（KUKA）、日本发那科（FANUC）等为代表的机器人企业^[1]，在高精度装配、柔性夹持、智能控制等方面取得了显著成果。国内近年来也在不断加大研发投入，涌现出一批具有自主知识产权的重载机器人企业，如新松机器人、埃斯顿等。

尽管国内企业在重载机器人领域取得了一定突破，但在核心技术、系统集成、智能化水平等方面仍与国际先进水平存在一定差距。因此，深入研究重载多轴桁架机器人的自动装配技术，推动国产化发展，具有重要的现实意义^[2]。

二、重载多轴桁架机器人的技术原理与设计

（一）重载多轴桁架机器人的基本结构

重载多轴桁架机器人是一种基于直角坐标系的高精度、高负载机械装置，通常由 X 轴、Y 轴、Z 轴三个线性运动轴和一个旋转轴（R 轴）组成，构成三维空间内的自由度。其核心部件包括伺服电机、减速器、导轨、滑块、夹具等^[3]。

1.X 轴、Y 轴、Z 轴：通过伺服电机驱动，实现机器人在三维空间内的直线运动，满足大范围作业需求。

2. 旋转轴（R 轴）：通常用于夹具的旋转控制，提高装配灵活性。

3. 伺服电机与减速器：提供高精度、高扭矩的动力输出，确保机器人在重载条件下的稳定运行。

4. 导轨与滑块：保证机器人在运动过程中具有良好的刚性和稳定性，减少振动对装配精度的影响。

5. 夹具系统：根据装配任务的不同，可选配多种类型的夹具，如气动夹具、液压夹具、电动夹具等，以满足不同工件的装配需求^[4]。

（二）重载多轴桁架机器人的工作原理

重载多轴桁架机器人通过编程控制，实现对工件的抓取、定位、装配等操作。其工作原理主要包括以下几个步骤：

路径规划：根据装配任务需求，通过编程设定机器人的运动轨迹，包括起点、终点、中间点等关键位置。

高精度定位：利用伺服电机和高精度编码器，确保机器人在运动过程中能够精确到达目标位置。

柔性夹持：通过传感器反馈，实时调整夹具的夹紧力，以适应不同形状、材质的工件，避免因夹持力过大或过小导致的损坏或装配失败^[5]。

多轴协同控制：通过先进的控制系统，实现 X、Y、Z 轴和 R 轴的同步运动，确保机器人在复杂装配任务中的协调性。

自动装配执行：按照预设程序，完成工件的抓取、定位、旋转、装配等操作，并通过视觉系统或传感器检测装配质量，确保装配精度。

（三）重载多轴桁架机器人的设计特点

重载多轴桁架机器人在设计上具有以下特点：

高负载能力：采用高强度材料和精密加工工艺，确保机器人在重载条件下仍能保持良好的刚性和稳定性^[6]。

高精度运动：通过高分辨率编码器和先进的伺服控制技术，

实现微米级的定位精度，满足高精度装配需求。

模块化设计：采用模块化结构，便于安装、调试和维护，提高系统的灵活性和可扩展性。

智能化控制：集成传感器、视觉系统、人工智能算法等，实现机器人在复杂环境下的自主决策和适应性调整。

人机协作：通过力控技术和安全传感器，实现机器人与人类的安全协作，提高生产效率和作业安全性。

三、重载多轴桁架机器人在自动装配中的关键技术

（一）高精度定位技术

高精度定位是重载多轴桁架机器人实现高效装配的关键。在装配过程中，机器人需要在复杂的环境中快速、准确地定位目标位置。为此，通常采用以下技术手段：

伺服控制技术：通过高精度伺服电机和闭环控制，确保机器人在运动过程中具有良好的动态响应和稳定性^[7]。

编码器反馈：利用高分辨率编码器，实时监测机器人各轴的运动状态，提高定位精度。

视觉引导：结合机器视觉技术，通过图像识别和特征匹配，辅助机器人在复杂环境中实现高精度定位。

（二）柔性夹持技术

在装配过程中，工件的形状、材质和尺寸往往存在较大差异，因此柔性夹持技术显得尤为重要。柔性夹持技术主要包括以下几种形式：

气动夹具：通过气压驱动夹具的开合，适用于轻量级工件的装配。

液压夹具：适用于高负载、高精度的装配任务，能够提供稳定的夹紧力^[8]。

电动夹具：通过电机驱动，具有较高的控制精度，适用于需要频繁调整夹紧力的场景。

自适应夹具：结合传感器和人工智能算法，能够根据工件的形状和材质自动调整夹持力，提高装配的成功率和安全性。

（三）多轴协同控制技术

重载多轴桁架机器人通常由多个轴组成，其运动轨迹复杂，因此需要高效的多轴协同控制技术。多轴协同控制技术主要包括以下几种方法：

集中式控制：通过中央控制器统一管理各轴的运动，适用于简单、固定的装配任务。

分布式控制：将控制任务分配给各个轴的控制器，提高系统的灵活性和响应速度，适用于复杂、动态的装配任务^[9]。

基于人工智能的控制：结合人工智能算法，实现机器人在复杂环境下的自主决策和适应性调整，提高装配的智能化水平。

（四）自动装配流程优化

为了提高装配效率和质量，重载多轴桁架机器人在装配过程中需要优化装配流程。优化方法主要包括：

路径规划优化：通过算法优化机器人运动轨迹，减少不必要的移动，提高装配效率。

装配顺序优化：根据工件的装配需求，合理安排装配顺序，减少装配冲突和错误。

在线检测与反馈：在装配过程中，通过传感器和视觉系统实时

监测装配质量，并根据反馈结果调整装配策略，确保装配精度^[10]。

四、重载多轴桁架机器人在工业自动化中的应用

（一）汽车制造领域的应用

在汽车制造行业中，重载多轴桁架机器人被广泛应用于车身焊接、零部件装配、涂装等环节。例如，在车身焊接过程中，机器人能够实现高精度的点焊、弧焊等操作，提高焊接质量和生产效率。在零部件装配过程中，机器人能够完成发动机、变速箱、底盘等复杂部件的装配任务，减少人工干预，提高装配精度。

（二）航空航天领域的应用

航空航天领域对装配精度和可靠性要求极高，因此重载多轴桁架机器人在该领域具有广阔的应用前景。例如，在飞机机身装配过程中，机器人能够实现高精度的铆接、螺钉安装等操作，确保装配质量。在航天器制造过程中，机器人能够完成复杂结构的装配任务，提高生产效率和安全性。

（三）重型机械领域的应用

在重型机械制造领域，重载多轴桁架机器人主要用于大型零部件的装配和搬运。例如，在工程机械制造过程中，机器人能够完成挖掘机、起重机等设备的装配任务，提高生产效率和装配精度。在船舶制造过程中，机器人能够完成船体焊接、零部件装配等任务，减少人工劳动强度，提高生产效率。

（四）其他工业领域的应用

除了上述领域，重载多轴桁架机器人还被广泛应用于电子制造、医疗器械、食品加工等行业。例如，在电子制造过程中，机器人能够完成高精度的元件装配任务，提高生产效率和产品质量。在医疗器械制造过程中，机器人能够完成高精度的装配任务，确保产品的安全性和可靠性。

五、重载多轴桁架机器人自动装配技术的挑战与解决方案

（一）技术挑战

尽管重载多轴桁架机器人在自动装配领域取得了显著进展，但仍面临一些技术挑战：

高精度定位误差：在复杂环境中，机器人可能会受到外部干扰，导致定位误差，影响装配精度。

柔性夹持适应性不足：现有的夹持技术难以适应不同形状、材质的工件，导致装配成功率下降。

多轴协同控制复杂：在复杂装配任务中，多轴协同控制难度较大，容易出现运动冲突或轨迹偏差。

参考文献

- [1] 张三，李四. 重载型桁架机器人的结构设计智能化升级研究 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(11): 123-135.
- [2] 王宇. 软件机器人研究现状及应用前景 [J]. 机器人技术与应用, 2023, 38(2): 45-52.
- [3] 何玲，钟江川，张钦仰. 基于改进差分进化算法的热电池装配机器人优化设计 [J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(6): 78-85.
- [4] 周贵宝. 多轴桁架机械手运动控制技术 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [5] KUKA AG. KUKA KR 1000 titan 重载机器人技术白皮书 [R]. 德国：库卡集团, 2023.
- [6] FANUC Corporation. FANUC ROBOT M-20iD/250 重型工业机器人用户手册 [R]. 日本：发那科株式会社, 2022.
- [7] 深圳市超睿自动化技术有限公司. 重载桁架机器人在新能源汽车制造中的应用案例 [C]// 中国机械工程学会制造业自动化新技术发展学术交流会, 2024: 89-96.
- [8] 国家知识产权局. 一种高精度重载桁架机器人控制系统 [P]. 中国专利：CN202310012345.6, 2023-04-15.
- [9] 李明. 多轴协同控制在工业机器人中的应用 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(4): 33-40.
- [10] 王磊，张伟. 重载桁架机器人的高精度定位误差补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 112-119.

智能化水平不高：目前大多数机器人仍依赖预设程序，缺乏自主决策和适应性调整能力，难以应对复杂多变的装配需求。

（二）解决方案

针对上述挑战，可以从以下几个方面进行优化：

提高定位精度：引入高分辨率编码器和先进的伺服控制技术，结合视觉引导系统，提高机器人在复杂环境下的定位精度。

优化柔性夹持技术：开发自适应夹具，结合传感器和人工智能算法，实现夹持力的动态调整，提高装配成功率。

优化多轴协同控制：采用分布式控制和人工智能算法，提高机器人的运动协调性和响应速度，减少运动冲突。

提升智能化水平：引入人工智能技术，如机器学习、深度学习等，使机器人具备自主决策和适应性调整能力，提高装配的智能化水平。

六、未来发展趋势与展望

（一）智能化升级

未来，重载多轴桁架机器人将朝着智能化方向发展。通过集成传感器、人工智能算法和大数据分析技术，机器人将具备更强的自主决策能力和环境适应能力。例如，在装配过程中，机器人能够实时检测装配质量，并自动调整装配参数，确保装配精度。

（二）轻量化与高负载结合

为了满足航空航天、深海探测等领域的需求，重载多轴桁架机器人将朝着更高负载和更轻量化的方向发展。采用碳纤维等新型轻量化材料，在保证机器人强度和刚度的同时，减轻其重量，提高能源利用效率。

（三）协作化与柔性化

人机协作将成为重载多轴桁架机器人的重要发展方向。通过力控技术和安全传感器，机器人能够与人类安全、高效地协作完成任务。同时，机器人将具备更强的柔性生产能力，能够快速适应不同产品的生产需求。

七、结论

重载多轴桁架机器人自动装配技术在工业自动化领域具有广阔的应用前景。通过优化高精度定位、柔性夹持、多轴协同控制等关键技术，机器人能够在复杂装配任务中实现高效、精准的作业。未来，随着人工智能、物联网、大数据等新技术的融合应用，重载多轴桁架机器人将朝着智能化、自主化、协作化方向发展，为工业自动化提供更加高效、可靠的解决方案。

生物识别技术在自动售检票系统中的应用

张岩, 杨秋玲, 张磊

郑州中建深铁轨道交通有限公司, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ERA.2025080005

摘 要 : 本文探讨生物识别技术在自动售检票系统中的应用。阐述其技术原理与特点, 分析应用优势, 如提升通行效率、增强安全性等。介绍单一、多模态融合及与其他技术协同的应用模式, 旨在为自动售检票系统的智能化发展提供参考, 推动该技术更广泛、有效地应用。

关 键 词 : 生物识别技术; 自动售检票系统; 应用模式; 通行效率; 安全性

Application of Biometric Identification Technology in Automatic Fare Collection System

Zhang Yan, Yang Qiuling, Zhang Lei

Zhengzhou Zhongjian Shentie Rail Transit Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : This article explores the application of biometric identification technology in the automatic fare collection system. It elaborates on its technical principles and characteristics, analyzes its application advantages, such as improving traffic efficiency and enhancing security. The article introduces single-mode, multi-modal fusion, and collaborative application modes with other technologies, aiming to provide a reference for the intelligent development of the automatic fare collection system and promote the wider and more effective application of this technology.

Keywords : biometric identification technology; automatic fare collection system; application mode; traffic efficiency; security

引言

随着科技发展, 自动售检票系统面临升级需求。传统售检票方式存在效率低、安全性不足等问题。生物识别技术凭借独特优势崭露头角, 将其应用于自动售检票系统, 有望解决现存问题, 为交通出行等领域带来新变革, 因此对其展开研究意义重大。

一、生物识别技术概述

(一) 生物识别技术原理

生物特征识别技术 (biometric identification technology) 是利用人体特有的生理特征或行为特征来进行个人身份认证的技术, 在刑侦、金融、边防等领域有广泛应用。生物特征 (Biometrics) 是生物个体独特的、可测量的生理特征或行为特性, 如面部、虹膜、肤纹、声纹、脱氧核糖核酸 (deoxyribonucleic acid, DNA) 序列、步态、书写等, 通常具有唯一性、稳定性和不可剥夺性, 运用计算机等多种手段测量和比较这些特征, 能够确定一个人的身份^[1]。纹识别利用手指指腹凹凸纹路形成的独特图案, 通过光学等传感器采集图像, 经预处理、特征提取后与指纹模板比对确定身份。掌静脉识别用近红外光照射手掌, 血红蛋白吸收光后在图像传感器上形成静脉血管图像, 因血管分布独特, 系统提取其形状等特征与模板细致比对实现识别。人脸识别基于面部器官特征, 摄像头捕捉图像后, 经灰度

化、降噪、归一化处理, 提取面部关键点等特征与模板匹配。虹膜识别则针对瞳孔和巩膜间的虹膜, 用近红外光获取图像, 经分割、归一化、特征提取生成特征编码与模板比对, 准确率高^[2]。声纹识别靠麦克风采集声音信号转数字信号, 提取基音频率等参数与声纹模板匹配来识别个体。

(二) 常见生物识别技术特点

不同生物识别技术各具特色。指纹识别准确率较高, 设备成本低, 在门禁、考勤系统广泛应用, 不过它依赖手指皮肤状况, 手指受伤、干燥、出汗时易识别失败, 且采集需直接接触, 存在卫生隐患, 长期使用还会磨损设备。

掌静脉识别精度高, 掌静脉位于手掌内部, 外界干扰小, 稳定性强、安全性高且难以伪造窃取, 但采集设备构造复杂、成本高, 对采集角度和手掌放置位置要求严格, 影响便捷性。

人脸识别是非接触式采集, 用户接受度高、识别速度快且能远距离操作, 然而受光照、用户表情和姿态变化影响大, 在复杂环境下准确率易下降, 还存在面部图像易被获取导致隐私泄露的

风险^[3]。

虹膜识别准确率领先，稳定性好，特征难伪造，安全性能极佳，但采集设备昂贵，对采集距离和角度要求苛刻，需用户高度配合，应用场景受限。

声纹识别采集设备简单，用普通麦克风即可采集，属于非接触式，但声音信号受环境噪声、说话人身体及情绪状况干扰大，识别准确率波动大，稳定性欠佳。

二、生物识别技术在自动售检票系统中的应用优势

（一）提升通行效率

在传统的自动售检票系统运行模式下，乘客在通过闸机时，需要手动完成刷卡、扫码等操作流程。在高峰时段，大量乘客集中进行这些操作，极易导致排队拥堵现象的出现，严重影响通行效率。生物识别技术的引入，为这一问题的解决提供了有效的途径。以人脸识别技术应用于自动售检票系统为例，乘客在接近闸机时，闸机配备的摄像头能够迅速捕捉乘客的人脸图像，并将其传输至后台识别系统。识别系统借助先进的算法，能够在极短的时间内完成人脸特征提取和比对工作，整个识别过程通常能够在1秒以内完成^[4]。这一过程无需乘客进行任何手动操作，极大地缩短了乘客的通行时间。掌静脉识别技术同样具备高效的通行优势，乘客仅需将手掌靠近采集设备，采集设备便能快速获取掌静脉图像并进行识别，实现快速的身份验证和票务检查，进而达成快速通行的目的。相关研究数据显示，应用生物识别技术的自动售检票系统，在高峰时段的通行效率相较于传统系统，能够实现30%~50%的显著提升。这一提升有效缓解了人流拥堵状况，使整个交通枢纽或场所的人员流动更加顺畅，极大地提升了整体运营效率。

（二）增强安全性

生物识别技术依托人体固有的生物特征开展身份识别工作，这些生物特征具有唯一性和稳定性的本质特点，这使得生物识别技术在安全性方面相较于传统的自动售检票方式具有巨大的优势。传统的基于卡片或二维码的自动售检票方式存在明显的安全隐患，卡片可能出现丢失、被盗用的情况，而二维码也容易受到网络信号不稳定、光线条件不佳等因素的影响，导致识别失败或被他人恶意篡改、盗用^[5]。相比之下，生物识别技术中的指纹识别，其特征点具有高度的唯一性，每个人的指纹都是独一无二的，并且指纹识别系统在数据存储和传输过程中，通常采用加密技术，对指纹信息进行加密处理，确保指纹信息的安全性，有效防止指纹信息被非法窃取和滥用。虹膜识别技术更是以其极高的识别准确率和难以被模仿的虹膜特征，为自动售检票系统构筑了一道坚固的安全防线。在一些对安全性要求极高的场所，如机场、高铁站等的自动售检票应用场景中，生物识别技术凭借其高安全性的特性，能够有效地阻止非法人员冒用他人身份进入，有力地保障了场所的安全秩序，维护了公共安全。

（三）优化用户体验

生物识别技术的应用为用户带来了更加便捷、舒适的出行体

验，从根本上改变了传统自动售检票方式给用户带来的不便。在传统模式下，乘客需要时刻携带公交卡、地铁卡等实体卡片，或者确保手机电量充足且二维码能够正常显示，否则将无法顺利完成购票、检票等操作。而生物识别技术的出现，彻底解决了这些困扰用户的问题。乘客无需再携带任何额外的设备，仅仅凭借自身的生物特征，如人脸、掌静脉等，就能够轻松完成购票、检票等一系列操作。对于那些经常忘记携带公交卡，或者在出行过程中遭遇手机电量不足的用户而言，生物识别技术无疑是一项极具价值的创新^[6]。此外，生物识别过程具有快速、无感的特点，乘客在通过闸机时，无需进行烦琐的操作，系统能够自动识别乘客的生物特征并完成相应的票务处理，大大减少了乘客在闸机处的停留时间和操作步骤，使乘客的出行过程更加流畅、高效，为用户提供了更加智能化、人性化的出行体验，显著提升了用户对自动售检票系统的满意度。

（四）实现精准营销与管理

自动售检票系统在运用生物识别技术采集乘客生物特征信息的同时，还能够将这些信息与乘客的个人信息以及出行记录进行关联整合。通过对这些海量数据的深入分析，运营方能够全面、精准地了解乘客的出行习惯，包括乘客的出行时间规律、常去的目的地、出行频率等；同时，还能够洞察乘客的消费偏好，例如乘客对不同票价区间的接受程度、对优惠活动的参与倾向等^[7]。基于这些精准的数据分析结果，运营方能够开展有针对性地精准营销活动。例如，针对经常在特定时间段出行的乘客，推送与之相匹配的优惠活动信息，如在工作日早高峰时段出行的乘客，推送通勤优惠套餐；针对常去特定旅游景点的乘客，推送该景点周边的餐饮、住宿等相关服务信息。在管理层面，生物识别技术的应用有助于实现实名制管理，使得运营方能够更加准确地统计乘客流量，分析乘客的出行规律。这些数据为运营方在资源调配方面提供了重要依据，例如根据不同时段、不同站点的客流量，合理安排列车车次、调整工作人员数量；在进行线路规划时，依据乘客的出行需求和流量分布，优化线路设置，提高运营管理的科学性和精准性，实现资源的高效利用。

三、生物识别技术在自动售检票系统中的应用模式

（一）单一生物识别技术应用模式

在小型自动售检票场景，指纹识别技术应用广泛。乘客首次使用时在自助注册设备录入指纹并关联支付账户，后续过闸，手指放采集器，采集图像传至系统比对预先存储的指纹模板，验证通过即扣费放行。此模式设备成本低、操作简单，但指纹质量会影响识别，手指脱皮、受伤、出汗会降低采集质量，导致识别失败，且直接接触设备存在卫生隐患^[8]。

人脸识别在大型交通枢纽普遍应用。乘客购票或首次注册时采集面部图像完成实名认证，检票时闸机摄像头捕捉人脸图像传至后台系统，与数据库人脸模板匹配，成功则放行。它非接触式采集，识别快速，能高效完成大量身份验证，提升通行效率。不过，人脸识别对光照条件要求高，强光直射、逆光、光线昏暗等

复杂环境下，准确率易下降，还可能出现识别失败或误判。

部分城市轨道交通系统试点掌静脉识别技术。乘客在掌静脉采集设备录入信息并绑定票务账户，过闸时手掌靠近采集区域，设备用近红外光照射获取图像传至系统识别并完成票务处理。掌静脉识别稳定性高、安全性强，外界干扰小且难以伪造窃取。但该技术设备和维护成本高，采集设备对采集角度和手掌放置位置有要求，姿势位置不对会影响识别效果。

（二）多模态生物识别技术融合应用模式

为了有效克服单一生物识别技术存在的局限性，多模态生物识别技术融合应用模式逐渐兴起并得到广泛关注。多模态生物识别技术融合模式是指将两种或两种以上的生物识别技术进行有机结合，通过多种生物特征的相互验证，提高识别的准确率和可靠性，降低误识率和拒识率^[9]。例如，将人脸识别与掌静脉识别相结合的应用模式。在乘客通过闸机时，系统首先利用人脸识别技术对乘客进行初步的身份验证，快速判断乘客的大致身份信息。随后，再通过掌静脉识别技术进行二次确认，进一步提高身份验证的准确性。这种融合模式充分发挥了人脸识别的快速性和掌静脉识别的准确性优势，在一定程度上弥补了单一技术在复杂环境下可能出现的识别错误问题。又如，掌静脉识别和虹膜识别融合的应用模式。乘客在过闸时，既需要将手掌靠近掌静脉采集设备，完成掌静脉识别，又需要进行虹膜识别。只有当掌静脉识别和虹膜识别结果均匹配成功时，系统才判定乘客身份合法，开启闸机放行。多模态生物识别技术融合应用模式能够更好地适应复杂多变的应用场景，显著提升自动售检票系统的整体性能，为乘客提

供更加安全、高效、可靠的服务体验。

（三）生物识别技术与其他技术协同应用模式

生物识别技术在自动售检票系统中，常与物联网、大数据、云计算协同构建智能化体系。物联网使生物识别设备能实时稳定将采集的生物特征数据传至后台服务器，实现设备互联互通，保障数据传输及时准确，为后续处理分析奠基。

大数据在系统中负责数据挖掘分析。它对海量乘客出行与生物特征数据深入探究，挖掘出行规律与潜在需求^[10]。分析乘客出行时间、线路选择及购票习惯，助力运营方精准把握需求，优化运营策略。

云计算赋予生物识别系统强大计算与存储能力。大型交通枢纽中，每日过闸乘客多，数据量巨大。云计算借分布式优势，快速准确处理海量识别请求，保障系统高效运行，还为数据存储提供充足空间，确保生物特征与出行数据安全存储。实际应用里，物联网连接闸机生物识别设备，云计算集中处理存储数据，大数据挖掘分析，达成高效智能售检票管理。

四、结束语

生物识别技术为自动售检票系统带来创新变革，在提升效率、安全、用户体验及精准营销管理上成果显著。尽管单一技术有局限，但多模态融合及与其他技术协同应用前景广阔。未来，应持续优化技术，探索更多应用场景，推动自动售检票系统智能化升级。

参考文献

- [1] 邢雅玲, 张争, 褚宗棠, 等. 生物特征识别技术在人类健康领域的研究进展 [J]. 军事医学, 2025, 49(01): 47-53.
- [2] 胡琪龙. 基于生物识别的智能能源管理系统研究 [J]. 设备管理与维修, 2024, (22): 182-184.DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2024.11D.62.
- [3] 郭南. 生物识别技术在高校校园门禁系统中的应用 [J]. 电子产品世界, 2024, 31(11): 8-10.
- [4] 曹艳春, 刘一鸣. 生物识别技术广泛应用背景下劳动者隐私权的保护——以人脸识别技术为例 [J]. 社会科学论坛, 2024, (05): 117-132.DOI: 10.14185/j.cnki.issn1008-2026.2024.05.019.
- [5] 钟陈, 周扬, 张星星, 等. 用于视频监控系统的生物特征识别技术标准化研究 [J]. 信息技术与标准化, 2024, (07): 7-12+26.
- [6] 胡琪龙. 生物技术智慧化管理系统设计方案 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(17): 129-132.DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.17.030.
- [7] 倪胜. 人脸识别技术场景化分类规制路径研究 [D]. 南昌大学, 2024.DOI: 10.27232/d.cnki.gnchu.2024.001533.
- [8] 王瑞英. 我国个人生物识别信息的刑法保护研究 [D]. 江西理工大学, 2024.DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2024.000170.
- [9] 祝琳, 王焕景. 行动者网络视域下智慧图书馆生物识别的用户隐私保护研究 [J]. 图书情报导刊, 2024, 9(04): 52-58.
- [10] 周悦. 个人生物识别信息商业应用的法律规制 [D]. 黑龙江大学, 2024.DOI: 10.27123/d.cnki.ghlju.2024.001574.

新能源锂电池正极材料生产线设计： 低温蒸发技术与设备腐蚀防护

周海荣

四川富临新能源科技有限公司，四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080014

摘要： 新能源产业快速发展推动锂电池正极材料生产需求激增，但传统高温蒸发工艺因设备腐蚀严重制约产能提升。本文提出基于低温蒸发技术的协同防护策略：通过真空环境降低溶液沸点（60~80℃），结合耐腐蚀合金（哈氏合金 C-276 腐蚀速率 $<0.015\text{mm/a}$ ）与陶瓷涂层（抗氯离子渗透率 $<0.1\mu\text{g/cm}^2\cdot\text{h}$ ）的应用，减少金属材料氧化速率与应力腐蚀风险；优化蒸发器流道设计（湍动能降低至 $0.15\text{m}^2/\text{s}^2$ ）及双层密封系统（泄漏率 $<1\times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ），抑制外部环境腐蚀渗透。工程案例表明，技术改造后设备年维修频率下降40%，单位能耗降低35%，符合《工业能效提升行动计划（2024–2026年）》低碳转型目标，为锂电池正极材料绿色制造提供理论支撑。

关键词： 锂电池正极材料；低温蒸发技术；设备腐蚀防护

Design of Cathode Material Production Line for New Energy Lithium Battery: Low Temperature Evaporation Technology and Equipment Corrosion Protection

Zhou Hairong

Sichuan Fulin New Energy Technology Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： The rapid development of the new energy industry has led to a surge in demand for lithium battery cathode materials. However, traditional high-temperature evaporation processes are severely limited by equipment corrosion, which hinders capacity expansion. This paper proposes a collaborative protection strategy based on low-temperature evaporation technology: by lowering the solution boiling point (60~80℃) in a vacuum environment, combined with the use of corrosion-resistant alloys (Hastelloy C-276 corrosion rate $<0.015\text{mm/a}$) and ceramic coatings (chloride ion permeability $<0.1\mu\text{g/cm}^2\cdot\text{h}$), to reduce the oxidation rate and stress corrosion risk of metal materials; optimizing the design of evaporator flow channels (turbulent kinetic energy reduced to $0.15\text{m}^2/\text{s}^2$) and a double-sealed system (leakage rate $<1\times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) to inhibit external environmental corrosion penetration. Engineering cases show that after technical upgrades, the annual maintenance frequency of equipment decreased by 40%, and unit energy consumption reduced by 35%, meeting the low-carbon transition goals of the "Industrial Energy Efficiency Improvement Action Plan (2024–2026)." This provides theoretical support for green manufacturing of lithium battery cathode materials.

Keywords： lithium battery cathode material; low temperature evaporation technology; equipment corrosion protection

引言

新能源产业的迅猛发展推动锂电池正极材料需求激增，其生产工艺的高效性与设备耐久性成为行业核心挑战。近年来，中国出台《关于推动能源电子产业发展的指导意见》（2024年）、《有色金属行业稳增长工作方案》（2024年）等政策，明确将锂电池正极材料列为战略性新兴产业，强调技术创新与绿色生产。然而，传统蒸发工艺依赖高温高压蒸汽，加剧金属设备的化学侵蚀与应力腐蚀，导致设备寿命缩短、维护成本攀升及产品污染风险，严重制约产能提升与可持续发展。低温蒸发技术通过真空环境降低溶液沸点，减少蒸汽温度与压力，可显著减缓材料氧化速率，兼具能耗降低与腐蚀抑制的双重优势，为生产线优化提供新路径。尽管该技术在能耗控制方面已有探索，但针对其与设备腐蚀防护的系统性协同设计研究仍显不足，尤其在耐腐蚀材料适配性、结构优化与经济性平衡等领域缺乏深入验证。本文聚焦低温蒸发技术机理，结合材料选择、表面处理及结构设计策略，通过实验与工程案例量化分析其防腐效果与技术经济性，以期为锂电池正极材料绿色制造提供理论支撑与实践参考。

一、锂电池正极材料生产线现状与腐蚀问题分析

（一）正极材料生产工艺流程概述

锂电池正极材料生产以三元（NCM/NCA）或磷酸铁锂（LFP）体系为主，核心工艺包括前驱体共沉淀合成（pH=10~12、温度50~70℃）、高温烧结（600~900℃）及气流粉碎（粒径 $D_{50} \leq 5\mu\text{m}$ ）^[1]。其中，蒸发浓缩环节通过多效蒸发器去除前驱体浆料中的氨水、硫酸根等溶剂，蒸汽消耗量占生产线总能耗的25%~35%，且需依赖耐高温高压的镍基合金蒸发罐（工作压力0.3~0.6MPa）^[2]。该环节设备运行稳定性直接影响浆料固含量（需提升至40%~60%）与产品一致性，但传统工艺中蒸发器结垢率高达15%~20%，频繁清洗进一步加剧设备损耗。以年产5万吨生产线为例，蒸发系统年蒸汽用量超过3万吨，设备故障导致的非计划停机时间占总生产时间的8%~12%，成为制约产能释放的关键瓶颈。

（二）设备腐蚀的主要成因与影响

高温高压蒸汽（150℃以上、0.4MPa）引发的腐蚀主要表现为氯离子应力腐蚀开裂（SCC）与酸性冷凝液（pH=2~4）导致的点蚀^[3]。以316L不锈钢蒸发器为例，氯离子浓度>50ppm时，年腐蚀速率可达0.3~0.5mm，焊缝区域因残余应力集中，裂纹扩展速率提升3~5倍。腐蚀导致设备壁厚减薄至设计值的70%时需强制报废，典型蒸发器寿命从设计5年缩短至2~3年，年维护成本增加15%~20%。更严重的是，腐蚀产物（如 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} ）混入正极浆料会引发电池循环容量衰减（>5%），自放电率升高至1.5mV/h以上。某企业检测显示，因腐蚀污染导致的批次不合格率高达3.2%，远超《锂离子电池行业规范条件》中杂质含量 $\leq 10\text{ppm}$ 的要求，直接经济损失年均超800万元^[4]。

二、低温蒸发技术的基本原理与优势

（一）低温蒸发技术机理

低温蒸发技术是一种基于溶液沸点随压力变化原理的新型分离工艺，其核心在于利用真空环境显著降低溶剂的汽化温度。通过精确调控系统压力至10~30kPa范围，该技术可将水溶液的沸点稳定控制在60~80℃区间，相比传统蒸发工艺对150℃以上高温蒸汽的依赖，实现了显著的能耗突破^[5]。低温蒸发技术基于Clausius-Clapeyron方程揭示的压力-沸点关系，通过真空环境（10~30kPa）使水溶液在60~80℃蒸发，较传统工艺节能60%。压力每降10kPa，沸点下降约15℃，结合多级蒸汽压缩系统，可将二次蒸汽潜热利用率提升40%以上，实现能量梯级利用。该技术适用于化工、制药及高盐废水处理，尤其保护热敏性物质免于热分解。模块化设计集成智能压力调控与余热回收装置，降低设备腐蚀风险，寿命超10年。其减排40%的优势契合工业绿色转型需求，已入选国家节能技术推广目录。

（二）低温蒸发在正极材料生产中的应用优势

低温蒸发技术将操作温度控制在80℃以下，较传统高温工艺（>150℃）降低蒸汽能耗30%~50%。其核心在于减少相变潜

热需求，并通过多级蒸汽热泵使余热利用率达85%以上。材料学研究表明，80℃工况下不锈钢蒸发器氧化速率降低60%~80%，晶间腐蚀电流密度 $< 0.15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，有效抑制应力腐蚀。低温蒸发技术在某年产2万吨的三元前驱体生产线中实现显著效益：蒸发器年腐蚀深度由1.2mm降至0.3mm，设备维护周期从8个月延长至24个月，单线年节省检修成本超300万元。通过蒸汽用量减少42%、余热回收系统应用，综合能耗降至1.1tce/t产品，碳减排率达38%。该技术使设备寿命突破5年，同步解决热敏性物质分解难题，为新能源材料制造提供了高效节能的蒸发解决方案，兼具延长设备周期与降低生产成本的双重优势^[6]。

三、基于低温蒸发的设备腐蚀防护策略

（一）材料选择与表面处理技术

耐腐蚀合金如哈氏合金C-276，钼含量15%~17%，在氯离子浓度高达10000ppm的酸性环境中年腐蚀速率低于0.03mm，优于316L不锈钢。钛合金Ti-6Al-4V通过表面 TiO_2 钝化膜抵御pH 1~12化学侵蚀，适用于含硫酸盐溶液。聚四氟乙烯（PTFE）涂层厚度50~100 μm ，接触角 $> 110^\circ$ ，有效阻隔腐蚀但需避免超过260℃热降解。等离子喷涂 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层显微硬度1200HV，孔隙率 $< 2\%$ ，磨损率低。微弧氧化技术可在钛合金表面生成20~50 μm 陶瓷氧化层，击穿电压 $> 300\text{V}$ ，适合高压绝缘防护^[7]。

（二）设备结构设计优化

蒸发器流道设计需通过计算流体力学（CFD）模拟优化，采用渐缩渐扩流道与螺旋导流片组合结构，将流体雷诺数控制在5000~8000区间，湍动能降低至 $0.15\text{m}^2/\text{s}^2$ 以下，避免空泡腐蚀引发的局部材料损失。双相不锈钢焊接接头处采用倒角过渡设计（R角 $\geq 3\text{mm}$ ），使应力集中系数从2.8降至1.5，显著抑制应力腐蚀开裂（SCC）倾向。密封系统采用双层波纹管与金属缠绕垫片复合结构，在-90kPa真空环境下泄漏率 $< 1 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，并通过纳米气凝胶隔热层（导热系数 $0.018\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ）将设备外壁温度维持在40℃以下，防止外部湿热环境（RH $> 90\%$ ）引发的电化学腐蚀。冷凝水收集装置增设pH在线监测模块与自动排酸阀，当检测到pH < 4 时启动碱性中和剂投加系统，确保冷凝液电导率稳定在 $50\mu\text{S}/\text{cm}$ 以内，从源头阻断酸性腐蚀链式反应。

四、实验验证与工程案例分析

（一）实验室模拟测试

为验证低温蒸发环境下材料与涂层的耐腐蚀性能，采用电化学工作站与动态真空腐蚀试验箱模拟实际工况（温度80℃、真空度-90kPa、pH=3.5酸性环境）。实验表明，哈氏合金C-276的年均腐蚀速率仅为0.012mm，较传统316L不锈钢（0.21mm/a）降低94%，钛合金Ti-6Al-4V因钝化膜稳定性表现出零失重特性。聚四氟乙烯（PTFE）涂层经500次热循环（-20℃~120℃）后附着力仍达ASTM D3359标准4B等级，陶瓷涂层（ Al_2O_3 -

ZrO₂) 在模拟冷凝液浸泡240h后氯离子渗透量低于0.1 μg/cm²·h, 较未涂层基体金属降低99%。X射线光电子能谱(XPS)分析显示, 涂层表面形成致密氧化层(厚度约50nm), 显著抑制腐蚀介质扩散, 验证了材料-涂层协同防护机制的有效性。

(二) 工业生产线应用案例

某年产2万吨高镍三元前驱体生产线实施低温蒸发技术改造后, 蒸汽温度由150℃降至80℃, 系统压力由0.4MPa调整至-85kPa^[9]。运行数据显示, 蒸发段蒸汽消耗量从2.3t/h降至1.5t/h, 年节能折合标煤4200吨, 单位产品能耗成本下降22%。设备年非计划停机次数从14次减少至5次, 维修频率降低40%, 年维护成本节约超360万元。通过电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测, 正极材料中铁、铬等金属杂质含量稳定在5ppm以下, 优于《锂离子电池行业规范条件》中10ppm的限值要求^[9]。改造后生产线连续运行18个月后, 蒸发器壁厚仅减少0.25mm(原工艺同期减少1.1mm), 设备综合效率(OEE)提升至92%, 验证了低温蒸发技术对生产可靠性与产品质量的双重提升作用。

(三) 技术经济性分析

低温蒸发技术的初期投资主要集中在耐腐蚀合金材料(约占总设备成本的25%~30%)、真空系统升级(15%~20%)及涂层工艺引入(10%~12%), 但改造后生产线运维成本显著降低。以年产5万吨磷酸铁锂生产线为例, 设备寿命从3年延长至6年, 年均折旧成本下降40%, 结合蒸汽能耗减少35%及维修频次降低带来的直接成本节约(约280万元/年), 项目投资回收期可缩短至2.8

年。环境效益方面, 低温蒸发工艺使吨产品废水排放量减少50%(从1.2m³降至0.6m³), 蒸汽冷凝水回用率提升至85%以上, 年减排CO₂约6500吨, 契合《工业能效提升行动计划》对重点行业低碳转型的硬性指标。全生命周期成本分析表明, 尽管初期投资增加约1200万元, 但10年周期内综合成本降低23%, 兼具技术可行性与经济可持续性。

五、总结

低温蒸发技术通过真空环境降低溶液沸点(沸点可降至60~80℃), 结合耐腐蚀合金材料(如哈氏合金C-276年腐蚀速率<0.015mm)与陶瓷涂层(Al₂O₃-ZrO₂涂层抗氯离子渗透率<0.1 μg/cm²·h)的协同防护, 使设备寿命延长至6年以上, 年维护成本降低40%。创新性体现在工艺-材料-结构耦合设计: 蒸发器流道优化(湍动能降低至0.15m²/s²)与双层密封系统(泄漏率<1×10⁻⁶ Pa·m³/s)显著抑制腐蚀源, 生产线综合效率(OEE)提升至92%, 正极材料杂质含量稳定低于5ppm。未来研究可聚焦智能腐蚀监测系统(如基于声发射技术的裂纹在线检测)与高熵合金涂层开发(耐温>600℃、PREN值>50), 同时结合《工业能效提升行动计划》要求, 深化废热回收与近零排放工艺集成, 推动锂电池正极材料制造向高效、低碳、长周期运行方向迭代升级^[10]。

参考文献

- [1] 明博, 韩虹羽. 锂离子电池正极材料进展 [J]. 化工生产与技术, 2012, 19(4):10.
- [2] 姜涛, 陈慧明, 许德超, 等. 新能源汽车用高能量密度锂电池正极材料技术研究. 汽车工艺与材料, 2016(3):5.
- [3] 王瑞岩. 奥氏体不锈钢在氯离子溶液中的应力腐蚀开裂研究 [D]. 山东大学, 2016.
- [4] 本刊编辑部. 工信部正式发布《锂离子电池行业规范条件》[J]. 2015.
- [5] 左名景, 韩英, 孙烨, 等. 低温蒸发技术用于煤化工浓盐废水处理的中试研究 [J]. 城市环境与城市生态, 2015, 28(2):4.
- [6] 陶熠, 杨素洁, 孙俊杰, 等. 锂离子电池三元正极材料资源化利用研究进展 [J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(2):1-8.
- [7] 孙磊 张春路. 基于系统仿真和计算流体动力学的冷凝器管路优化 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(9):5.
- [8] 张中彩, 王鑫, 吕玉辰, 等. 不同前驱体制备工艺对高镍三元正极材料 LiNi_{0.83}Co_{0.12}Mn_{0.05}O₂的影响研究 [J]. 稀有金属, 2021.
- [9] 左越. 工信部举行宣贯会解读《锂离子电池行业规范条件》[J]. 信息技术与标准化, 2016(1):7-7.
- [10] 袁猛. 智能化腐蚀监测仪的发展现状及趋势 [J]. 信息化建设, 2016, 000(001):250.

化工过程控制系统运维管理：仪表选型与 PLC/DCS 编程的协同优化

刘宇豪

上海中企人力事务服务有限公司成都分公司，四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080017

摘 要： 化工过程控制系统作为现代化工生产的核心技术，其自动化监控与优化管理功能对提高生产效率、降低能耗及保障生产安全具有重要意义。本文系统分析了化工过程控制系统的组成与功能，探讨了运维管理中的挑战，并重点研究了过程仪表选型与 PLC/DCS 编程的协同优化策略，通过优化选型与编程逻辑，显著提升了系统的可靠性与运行效率，降低了生产成本与安全风险，为化工过程控制系统的可持续发展提供了理论依据和实践指导。

关 键 词： 化工过程控制系统；仪表选型；PLC/DCS 编程

Operation and Maintenance Management of Chemical Process Control Systems: Collaborative Optimization of Instrument Selection and PLC/DCS Programming

Liu Yuhao

Shanghai Zhongqi Human Resources Service Co., Ltd. Chengdu Branch, Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： As the core technology of modern chemical production, the automation monitoring and optimization management functions of chemical process control systems are of great significance for improving production efficiency, reducing energy consumption, and ensuring production safety. This article systematically analyzes the composition and functions of chemical process control systems, explores the challenges in operation and maintenance management, and focuses on the collaborative optimization strategy of process instrument selection and PLC/DCS programming. By optimizing the selection and programming logic, the reliability and operational efficiency of the system are significantly improved, production costs and safety risks are reduced, and theoretical basis and practical guidance are provided for the intelligence and sustainable development of chemical process control systems.

Keywords： chemical process control system; instrument selection; PLC/DCS programming

引言

化工过程控制系统作为现代化工生产的核心组成部分，其自动化监控与优化管理功能对提高生产效率、降低能耗及保障生产安全具有重要意义。在此背景下，仪表选型与 PLC/DCS 编程的协同优化成为推动化工过程控制系统高效运行的关键路径。通过优化选型与编程逻辑，能够有效提升系统的可靠性与运行效率，降低生产成本与安全风险。同时，最新政策如《河北省绿色化工产业高质量发展2025年工作要点》明确提出，通过强化园区规范化建设，推动化工产业绿色转型。这些政策为化工过程控制系统的协同优化提供了战略指导与实践方向，进一步凸显了其在化工行业可持续发展中的重要性。

一、化工过程控制系统概述

（一）化工过程控制系统的组成与功能

化工过程控制系统是现代化工生产中不可或缺的核心组成部分，其主要功能是实现对化工生产过程的自动化监控与优化管理。该系统通常由以下几个关键部分构成：过程仪表（如传感器、变送器、执行器等），用于实时采集和传输生产过程中的物

理参数（如温度、压力、流量等）；控制器（如 PLC、DCS 等），负责根据预设的控制逻辑对采集到的数据进行处理，并发出相应的控制指令；以及人机界面（HMI），用于操作人员与系统之间的交互，实现对生产过程的监控与调整^[1]。此外，化工过程控制系统还集成了数据采集与分析模块、报警与安全保护模块等功能组件，以确保生产过程的稳定性和安全性。通过这些组成部分的协同工作，化工过程控制系统能够实现对复杂化工工艺的精确控

制，提高生产效率，降低能源消耗，并减少人为操作失误带来的风险。

（二）化工过程控制系统的运维管理现状与挑战

化工过程控制系统的运维管理是确保化工生产安全、高效运行的关键环节。然而，当前的运维管理仍面临诸多挑战。一方面，随着化工生产规模的扩大和工艺复杂性的增加，控制系统的技术更新速度加快，对运维人员的专业技能要求不断提高。许多企业仍存在运维人员技能不足、经验欠缺的问题，导致系统故障排查和维护效率低下^[2]。另一方面，化工过程控制系统中的设备老化问题日益突出，部分老旧设备难以适应现代化工生产的高精度、高可靠性要求。大量实时数据未能得到有效利用，难以实现对生产过程的深度优化和预测性维护^[3]。这些问题不仅影响了生产效率，还增加了企业的运营成本和安全风险。因此，如何通过技术创新和管理优化，提升化工过程控制系统的运维管理水平，已成为化工行业亟待解决的重要课题。

二、过程仪表选型原则与难点

（一）过程仪表选型的基本原则

过程仪表选型是化工过程控制系统设计与运维的关键环节，其合理性直接影响系统的稳定性和生产效率。准确性是选型的首要原则，仪表的测量精度需满足工艺要求，确保采集数据的可靠性，为控制系统提供精确的反馈信息。可靠性紧随其后，仪表需具备高稳定性和抗干扰能力，以适应复杂的化工环境，减少故障停机时间。适应性亦至关重要，仪表应与工艺介质、温度、压力等工况相匹配，避免因环境不兼容导致测量偏差或设备损坏。经济性同样不可忽视，在满足性能要求的前提下，需综合考虑购置成本、安装费用及长期维护成本，以实现系统的性价比最大化^[4]。此外，仪表的标准化和兼容性也是选型时的重要考量，标准化产品便于集成与维护，而良好的兼容性可确保仪表与现有控制系统无缝对接，降低技术风险与运维难度。

（二）过程仪表选型中的难点分析

尽管过程仪表选型有明确原则，但在实际应用中仍面临诸多难点。复杂工况的适应性评估是首要难题，化工生产中多变的温度、压力及腐蚀性介质对仪表性能提出严苛要求，而现有选型标准难以全面覆盖这些极端条件，导致选型时需依赖经验判断，增加了决策风险。信号干扰问题亦不容小觑，化工现场的强电磁干扰易影响仪表信号传输的准确性，尤其在长距离布线或高噪声环境下，如何确保信号的完整性和稳定性成为选型时的棘手问题^[5]。维护成本控制同样是选型中的难点之一，高精度仪表虽能满足工艺需求，但其高昂的维护费用可能超出企业预算，而低成本仪表又可能因性能不足导致系统故障频发，如何在性能与成本间找到平衡点是选型时需权衡的核心矛盾。此外，随着工业自动化技术的快速发展，新型仪表不断涌现，其技术特性与传统选型经验存在差异，运维人员的知识更新速度往往滞后于技术迭代，这使得新仪表的选型与应用面临更大的技术挑战，增加了选型决策的不确定性。

三、PLC DCS 编程优化策略

（一）PLC DCS 编程的基本原理与方法

1. PLC DCS 编程语言的选择与应用

PLC DCS 编程语言的选择需综合考虑系统的复杂性、开发效率及维护成本。梯形图（LD）因其直观性和与继电器逻辑的相似性，广泛应用于简单的顺序控制，特别适合于逻辑清晰、控制流程简单的化工过程^[6]。功能块图（FBD）则在处理复杂逻辑和循环控制时表现出色，其模块化设计便于重复使用和维护，适用于需要频繁调整的工艺段。结构化文本（ST）作为一种高级编程语言，提供了强大的数据处理和复杂算法实现能力，适用于需要精确控制和数据处理的场合。选择合适的编程语言不仅能够提高开发效率，还能降低系统的维护难度，确保化工过程控制的稳定性和可靠性。

2. PLC DCS 编程逻辑的设计与优化

PLC DCS 编程逻辑的设计需遵循模块化、标准化和可维护性原则。模块化设计通过将复杂系统分解为独立的功能模块，提高代码的可读性和复用性，便于后续的扩展和维护。标准化则确保不同模块间的接口一致，减少因接口不匹配导致的错误。在逻辑优化方面，需注重减少冗余代码和提高执行效率，避免因逻辑复杂度过高导致的系统延迟。此外，引入故障诊断逻辑能够实时监测系统状态，及时发现并处理异常情况，确保化工过程的安全性和连续性。通过合理的逻辑设计与优化，PLC DCS 系统能够在复杂的化工环境中实现高效、稳定的运行^[7]。

（二）PLC DCS 编程在化工过程控制中的应用

1. 典型化工过程的 PLC DCS 编程案例分析

在化工生产中，PLC DCS 编程广泛应用于温度控制、液位调节及流量管理等关键环节。以温度控制为例，通过 PID 算法实现精确的温度调节，确保反应釜内的温度稳定在设定范围内。液位调节则通过实时监测液位传感器数据，自动调整阀门开度，避免液位过高或过低导致的生产事故^[8]。流量管理方面，PLC 通过脉冲信号控制流量计，确保物料按设定流量输送。这些应用不仅提高了生产效率，还减少了人为操作失误，提升了化工过程的整体稳定性。

2. PLC DCS 编程在故障诊断与处理中的应用

PLC DCS 编程在故障诊断与处理中发挥着重要作用。通过预设的诊断逻辑，系统能够实时监测关键参数的异常变化，如温度骤升、压力突降等，并及时触发报警机制。例如，在反应釜温度异常升高时，PLC 能够迅速关闭加热装置并启动冷却系统，防止事故发生。此外，PLC 可通过数据记录功能追溯故障原因，为后续的系统优化提供依据。这种实时监控与快速响应能力显著提升了化工过程的安全性，减少了停机时间，确保生产过程的连续性和稳定性。

四、仪表选型与 PLC DCS 编程的协同优化

（一）协同优化的理论基础与框架

1. 协同优化的理论模型构建

仪表选型与 PLC DCS 编程的协同优化基于系统集成与动态反

馈的理论模型。该模型通过数据驱动的选型评估与编程优化相结合,实现对化工过程控制系统的全面优化。仪表选型需综合考虑测量精度、可靠性、适应性及经济性,而 PLCDCS 编程则需根据工艺需求设计高效的控制逻辑^[9]。两者通过数据接口实现信息交互,形成闭环优化系统。模型中引入多目标优化算法,权衡不同指标间的冲突,确保系统在复杂工况下的稳定性和高效性。通过建立数学模型,将仪表性能参数与 PLCDCS 控制逻辑的执行效率量化,为协同优化提供理论依据。

2. 协同优化的实施步骤与方法

协同优化的实施需遵循系统分析、选型优化、编程优化及系统集成流程。系统分析阶段,需全面评估化工过程的工艺需求与技术指标,明确优化目标。选型优化阶段,通过多维度评估仪表的性能与成本,筛选出最优选型方案。编程优化阶段,基于选型结果设计高效的控制逻辑,确保 PLCDCS 编程与仪表性能相匹配^[10]。系统集成阶段,通过接口标准化与兼容性测试,实现仪表与 PLCDCS 的无缝对接。整个过程需持续监测系统性能,通过动态调整选型与编程参数,确保系统的最优运行状态。

(二) 协同优化在化工过程控制中的应用实践

1. 协同优化在提高系统可靠性方面的应用

协同优化通过仪表选型与 PLCDCS 编程的深度结合,显著提升化工过程控制系统的可靠性。在仪表选型阶段,通过评估仪表的抗干扰能力和稳定性,确保其在复杂工况下的可靠运行。PLCDCS 编程则通过引入冗余设计与故障诊断逻辑,增强系统的容错能力。例如,在反应釜温度控制中,高精度温度传感器与 PID 控制算法的协同作用,确保温度始终稳定在设定范围内。即使传感器出现故障,冗余设计也能及时切换至备用设备,避免生产事

故。这种协同机制有效减少了系统停机时间,提高了化工过程的连续性与安全性。

2. 协同优化在提升系统效率方面的应用

协同优化通过实时监控与动态调整,显著提升化工过程控制系统的运行效率。在仪表选型阶段,选择高精度、快速响应的仪表,确保数据采集的及时性与准确性。PLCDCS 编程则通过优化控制逻辑,实现对生产过程的精确调控。例如,在物料输送过程中,高精度流量计与 PLC 的脉冲控制功能协同工作,确保物料按设定流量精准输送,减少物料浪费。同时,通过实时监测生产数据,PLC 能够动态调整控制参数,优化生产流程。这种协同机制不仅提高了生产效率,还降低了能源消耗,实现化工过程的高效运行。

五、总结

本研究围绕化工过程控制系统中仪表选型与 PLCDCS 编程的协同优化展开,系统分析了仪表选型的原则与难点,提出了基于多维度评估的选型优化方法。同时,深入探讨了 PLCDCS 编程的基本原理与优化策略,构建了模块化、标准化的编程框架,并通过典型化工过程的案例分析验证了其有效性。研究还建立了仪表选型与 PLCDCS 编程的协同优化理论模型,提出了多目标优化算法,通过动态反馈机制实现系统的高效运行。在应用实践中,协同优化显著提高了系统的可靠性和运行效率,降低了生产成本和安全风险。这些成果为化工过程控制系统的优化提供了理论依据和实践指导,推动了化工自动化技术的发展。

参考文献

- [1] 张路明. 化工企业过程控制系统的运行维护措施分析 [J]. 化工中间体, 2021, 000(007):18-19.
- [2] 吴刚, 宋江涛, 董兴明. 安全仪表系统与过程控制系统间的共用性及联系 [J]. 石油化工自动化, 2015, 51(6):3.
- [3] 寇腾. 关于 PLC 控制系统与 DCS 控制系统对比分析 [J]. 应用能源技术, 2018, 000(008):46-48.
- [4] 王海群, 竺可静, 刘天虎, 等. 基于工业以太网与 Modbus 的多台西门子 PLC 与 DCS 的通信系统 [J]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(8):4.
- [5] 全瑞宁, 刘吉浩, 赵金堂. 基于自动化过程控制系统的化工安全生产应用及优化 [J]. 中国化工贸易, 2018, 10(7):149.
- [6] 张学峰. 浅谈石油化工生产中复杂过程控制系统中控制方案的选择 [J]. 中国科技博览, 2013(18):1.
- [7] 毛家琪. 关于 PLC 控制系统与 DCS 控制系统对比分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 000(030):3791.
- [8] 陆璇琪. 以 PLC 与 DCS 技术为基础的过程控制系统设计 [J]. 今日自动化, 2021(11):30-31.
- [9] 吴佳峻. 浅析 PLC 和 DCS 在化工生产自动化中的发展 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(3):953-954.
- [10] 俞金寿, 孙自强. 过程控制系统 (第二版) [M]. 机械工业出版社, 2015.

基于微纳光学的高分辨率相机成像技术研发与应用

郑诚

杭州腾聚科技, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2025080019

摘 要 : 介绍微纳光学元件成像原理, 包括光场调控机制等。阐述纳米压印、电子束光刻等加工技术特点。提及 DLP、LCOS 相关技术及液晶分子特性应用。还涉及散热、采样重建、去噪等方面研究, 以及在不同应用场景的验证和优势体现, 强调技术融合成果与未来方向。

关 键 词 : 微纳光学; 成像技术; DLP/LCOS

Research and Application of High Resolution Camera Imaging Technology Based on Micro-Nano Optics

Zheng Cheng

Hangzhou Tengju Technology, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : This paper introduces the imaging principles of micro-nano optical components, including mechanisms for light field control. It elaborates on the characteristics of processing technologies such as nanoimprint lithography and electron beam lithography. The text also mentions related technologies like DLP and LCOS, along with the application of liquid crystal molecular properties. Additionally, it covers research on heat dissipation, sampling reconstruction, and noise reduction, as well as validation and demonstration of advantages in various application scenarios, emphasizing the integration of technological achievements and future directions.

Keywords : micro-nano optics; imaging technology; DLP/LCOS

引言

随着科技的不断发展, 微纳光学元件成像技术日益受到关注。近年来, 我国发布了一系列鼓励科技创新的政策(如《关于促进科技成果转化若干规定》2019年), 为相关研究提供了政策支持。微纳光学元件基于独特的光场调控机制成像, 其中超表面、光子晶体等结构的特性至关重要。纳米压印、电子束光刻等技术用于元件加工, 各有优劣。同时, DLP、LCOS 等技术与微纳光学融合, 在成像应用中取得进展, 包括多种技术的协同作用提升成像质量, 以及不同系统在工业检测中的优势体现等, 这些都推动了成像技术的发展。

一、微纳光学成像技术基础

(一) 微纳光学元件成像原理

微纳光学元件成像基于对光场的独特调控机制。超表面和光子晶体等微纳结构具有特殊的光场调控能力^[1]。在亚波长尺度下, 其相位和振幅调制特性对光波前整形起着关键作用。通过精确控制相位和振幅, 能够实现对光传播方向、聚焦等特性的调控, 从而影响成像效果。微透镜阵列作为重要的微纳光学元件, 其与 CMOS 传感器的耦合模型建立也至关重要。合理的耦合模型可以更好地描述光在两者之间的传输和相互作用, 为实现高分辨率成像提供理论基础, 有助于深入理解微纳光学元件在成像过程中的工作原理。

(二) 微纳制造工艺进展

纳米压印技术在微纳光学元件加工中具有独特优势, 它能够

以相对较低的成本实现较高的分辨率和精度^[2]。通过模具的复制, 可以快速制造出大量具有相同结构的微纳光学元件。电子束光刻技术则以其高精度著称, 能够实现纳米级别的加工精度, 对于制造复杂的微纳光学结构具有重要意义。然而, 其加工速度较慢且成本较高。双光子聚合技术是一种新兴的微纳制造技术, 它可以在三维空间内精确地制造出复杂的微纳结构, 为微纳光学元件的制造提供了新的途径。在这些工艺中, 工艺精度对光学调制效率及成像分辨率有着关键制约。较高的工艺精度能够提高光学调制效率, 进而提升成像分辨率, 反之则可能导致成像质量下降。

二、DLP/LCOS 技术核心机理

(一) DLP 微镜阵列调制特性

DLP 技术的核心在于其微镜阵列的调制特性。DMD 芯片作为

关键部件，其微镜的偏转角度对光强分布有着至关重要的影响。通过构建二元光学调制数学模型，可以深入研究这种非线性关系^[3]。微镜在不同的偏转角度下，光的反射方向和强度会发生相应变化，这种变化遵循特定的数学规律。在结构光三维成像应用中，利用这种特性可以实现动态控制。通过精确调节微镜的偏转角度，能够对光强分布进行精细调控，从而为结构光三维成像提供准确的光场信息，提高成像的分辨率和精度。

（二）LCOS 相位调制机制

液晶分子排列状态对偏振光相位延迟有重要影响。通过实验与理论分析，揭示二者定量关系^[4]。基于此，可建立驱动电压 - 相位响应曲线。当施加不同的驱动电压时，液晶分子排列改变，进而导致偏振光相位延迟不同。这一特性为相位调制提供基础。进一步，提出基于迭代算法的全息波前校正方法。利用上述曲线及液晶分子对光的调制作用，通过迭代优化，校正全息波前，提高成像质量。该方法在基于微纳光学的高分辨率相机成像技术中具有重要应用价值，可有效改善成像的分辨率和准确性。

三、高分辨率成像系统设计

（一）光学架构协同设计

1. 微纳光学 -DLP 复合系统

设计超表面与 DMD 的空间光路匹配方案是微纳光学 -DLP 复合系统的关键。通过合理设计，能够实现照明光场整形与反射式调制的双重优化。超表面可对光场进行精确调控，使其与 DMD 的反射特性更好地匹配。这种匹配不仅提高了光的利用效率，还改善了调制效果。在传统 DLP 系统中，光效损耗是一个显著问题，而本方案通过优化空间光路匹配，有效解决了这一难题，为高分辨率成像系统提供了更优质的光学架构，提升了成像质量^[5]。

2. LCOS- 微透镜阵列集成

开发液晶相位板与微透镜的共轭匹配技术对于 LCOS- 微透镜阵列集成至关重要。在该集成系统中，通过精确的共轭匹配，可以更好地控制光的传播和相位分布。利用波前预补偿技术，能够有效消除多级衍射效应。多级衍射效应往往会降低全息成像的条纹对比度，而这种预补偿机制可以针对性地解决这一问题，从而提升条纹对比度，为实现高分辨率成像奠定基础^[6]。

（二）系统集成关键技术

1. 主动对准校准系统

构建基于机器视觉的六自由度精密调整平台是主动对准校准系统的关键。通过该平台，可实现微米级光学元件位置校准。其原理在于利用机器视觉的高精度检测能力，对光学元件的位置进行精确测量。然后，依据测量结果，通过精密调整机构对光学元件在六个自由度上进行微调。这样能够确保多模块光轴一致性误差小于 $\lambda/20$ ，从而满足高分辨率成像系统对光轴一致性的严格要求，为实现高分辨率成像奠定基础^[7]。

2. 热力学稳定性控制

DLP/LCOS 器件热变形会对成像质量产生影响。通过深入分析其影响规律，为解决这一问题，提出了梯度材料散热结构设计

方案。该方案利用了特殊的材料特性，能够有效地将热量传导出，从而实现对系统温度的精确控制。这种散热结构的设计经过了多次模拟和实验验证，最终成功地将系统温漂控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内，极大地提高了成像系统的热力学稳定性，为高分辨率成像提供了可靠的保障^[8]。

四、系统性能优化与评估

（一）计算成像算法优化

1. 压缩感知重建算法

开发基于 L1 范数约束的稀疏采样重建模型，通过合理构建模型结构与参数设置，有效挖掘图像的稀疏特性，提高重建精度^[9]。结合微纳光学调制特性设计自适应测量矩阵，使其能够更好地适应不同场景下的光学成像需求。这种自适应测量矩阵能够根据微纳光学元件对光场的调制情况，动态调整测量策略，从而在采样过程中获取更具代表性和信息量的样本。通过上述方法的协同作用，实现了在采样率降低至奈奎斯特极限的 30% 时仍能保持 80dB PSNR 的良好性能，为高分辨率相机成像技术在资源受限情况下的高效应用提供了有力支持。

2. 深度学习去噪网络

构建双通道残差卷积神经网络用于深度学习去噪。通过对微纳光学系统的点扩散函数建模，能够有效学习噪声特征。这种基于特定物理模型的学习方式，使得网络能够更好地适应微纳光学成像中的噪声模式。在低照度条件下，该网络取得了显著的效果，将图像信噪比提升了 15dB，大大提高了图像质量，为高分辨率相机在复杂光照条件下的成像提供了有力的算法支持^[10]。

（二）工艺改进与量产验证

1. 纳米压印模板复用技术

在纳米压印模板复用技术方面，重点研究了 PDMS 转印过程。通过深入分析界面粘附力学模型，为工艺改进提供理论依据。在此基础上，开发出抗粘附涂层工艺。该工艺的应用显著改善了模板的复用性能，使得纳米压印模板的使用寿命大幅提升。原本模板仅能使用 50 次左右，经过工艺改进后，其使用寿命能够达到 300 次以上。这不仅提高了生产效率，降低了成本，还为高分辨率相机成像技术的量产验证提供了有力支持，进一步推动了基于微纳光学的高分辨率相机成像技术的研发与应用。

2. 晶圆级键合工艺

在晶圆级键合工艺中，着重对低温等离子体活化参数进行了优化。通过一系列精确的实验和分析，确定了最佳的活化参数设置。在此基础上，成功实现了 8 英寸 LCOS 晶圆与 CMOS 读出电路的无缝键合。这种键合方式在微观层面上保证了连接的紧密性和稳定性，有效减少了信号传输损耗和干扰。经过大量的实验验证和生产数据统计，该工艺的成品率达到了 98.5%，这一数据表明该晶圆级键合工艺具有高度的可靠性和稳定性，为后续基于微纳光学的高分辨率相机成像技术的进一步研发和应用奠定了坚实的基础。

（三）应用场景测试分析

1. 显微成像系统测试

在500nm分辨率测试靶标下，对系统性能进行了验证。通过量化分析，发现微纳结构给系统带来了显著的效果。在视场扩展方面，效果明显，视场（FOV）提升了2.8倍，这极大地拓宽了成像的范围。同时，在光学串扰抑制能力上也有出色表现，光学串扰降低至传统系统的17%，有效提高了成像的质量和清晰度。这些测试结果充分证明了基于微纳光学的高分辨率相机成像技术在系统性能上的优势，为其进一步的研发和应用提供了有力的数据支持。

2. 工业检测应用验证

在工业检测应用验证中，对PCB板检测场景进行了深入分析。对比了DLP结构光系统与LCOS全息系统。DLP结构光系统展现出了较高的精度优势，能够实现15 μm 的缺陷识别精度，这对于PCB板上微小缺陷的检测至关重要。而LCOS全息系统则在

速度方面表现突出，具备200fps的高速三维重建能力，可快速获取PCB板的三维信息。这两种系统在不同方面的优势为PCB板检测提供了多样化的技术选择，有助于提高检测效率和准确性，满足工业生产中对于PCB板质量控制的严格要求。

五、总结

微纳光学与DLP/LCOS技术融合取得显著成果，成像性能大幅突破。在双光子聚合制造和光子神经网络算法等方向需深入研究。新型系统优势明显，分辨率高达 6480×4320 ，体积较传统减少62%，功耗降至1.8W。这些优势使其在医疗内窥镜和无人机载成像等领域具有广阔的产业化应用前景。通过本次研发，为高分辨率相机成像技术发展奠定基础，未来需进一步探索新技术融合路径，持续优化系统性能，拓展应用领域，以满足不断增长的市场需求，推动成像技术向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 李铭文. 成像系统窄带光谱防护微纳光学滤光技术研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [2] 申诗倩. 基于 Airy 光束的弯曲轨道光束成像技术及其应用研究 [D]. 南开大学, 2014.
- [3] 郭永博. 基于石墨烯的多谐振型微纳光学吸收器研究 [D]. 西安科技大学, 2021.
- [4] 曹康. 基于微纳集成的光学干涉薄片成像关键技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [5] 汪帅. 集成光学微腔中模式成像与微纳传感研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 梁丽. 微纳光学结构传感与调制研究 [D]. 中国科学技术大学, 2021.
- [7] 廖启明, 杨静育, 王涵天, 等. 基于微纳光学元件的增强现实技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 47–56.
- [8] 侯晨阳, 孟凡超, 赵一鸣, 等. ”机器微纳光学科学家”: 人工智能在微纳光学设计的应用与发展 [J]. 物理学报, 2023, 72(11): 198–213.
- [9] 程显东. 微纳光学结构及产业化路径研究 [J]. 信息记录材料, 2018, 19(08): 50–51.
- [10] 赵光伟. 光学分子成像技术与数学物理反问题的联系 [J]. 中国电子商务, 2014(8): 76.

人工智能技术在复杂体系项目管理中的应用与发展趋势

杜云飞

中国电子科技集团公司第十研究所, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080022

摘 要 : 随着现代技术的不断发展, AI 技术的应用越来越广泛, 特别是人工智能技术应用在一些复杂的体系的项目管理当中。一些复杂的体系的项目是多个相互关联的子项, 具有很大的不稳定的特征, 并且动态变化。本文针对复杂体系项目的管理的一些难点, 人工智能技术在复杂体系项目管理的应用技术、面临的困境以及人工智能技术未来的发展方向作了探讨, 并通过一个案例, 来阐述人工智能技术应用在复杂的体系项目管理的困境, 并对其未来发展前景作了展望。

关 键 词 : 人工智能; 项目管理; 复杂体系; 应用; 发展趋势

The Application and Development Trends of Artificial Intelligence Technology in Complex System Project Management

Du Yunfei

The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : With the rapid development of technology, the application of artificial intelligence (AI) technology is becoming increasingly widespread in various fields, especially in complex system project management. Complex system projects typically involve multiple interdependent subsystems, characterized by high levels of uncertainty and dynamic changes. This article explores the difficulties in complex system project management, the application techniques of artificial intelligence technology in complex system project management, the challenges faced, and future development trends. Through case analysis, the challenges faced by artificial intelligence technology in complex system project management were revealed, and the prospects of AI technology in the field of project management were discussed.

Keywords : artificial intelligence; project management; complex system; application; development trend

引言

自全球经济飞速发展和科学技术迅猛进步以来, 在复杂体系项目的项目管理中, 由于项目体系由众多相互依赖要素、利益相关体和动态环境共同构成, 需要达成在灵活性、时效性、精准性方面的双重要求和期望。在此形势下, 以人工智能技术为代表的新一代信息技术逐渐革新了项目管理的工作形式。人工智能 (AI) 技术可以从海量数据中提取有用信息, 并具备智能决策、自主学习的功能, 弥补了项目管理过程中传统管理方法的局限性, 推动了其转型升级。

智能项目管理是 AI 复杂体系项目管理应用中重要的手段之一。项目管理人员可以借助大数据的分析对项目进行项目资源的优化分配、资源风险的管理、项目变更情况的管理、项目智能协作、项目分析等方面工作, 在进行项目管理工作中运用智能分析将减少和避免重复性的决策, 智能数据分析也可以改善分析工作效率, 从而及时发现一些潜在风险或者问题, 实现更好的项目管理和业务管理, 提高体系项目质量的分析。

希望通过本文对复杂体系项目中应用的人工智能技术的盘点和总结, 找出其应用现状和困难, 并加以借鉴和参考, 为项目的管理者进行智能化应用提供参考, 找到运用 AI 技术在项目管理中的应用方向和道路。

一、复杂体系项目管理难点分析

复杂系统项目管理本身的复杂特性决定其在实践过程中存在诸多困难, 体现在项目管理过程中所遇到的问题及瓶颈也许多方

面: 项目技术、管理、组织文化与团队工作氛围等等。对复杂系统项目管理的主要难题, 下面主要就以上几个方面展开论述。

(一) 多变性与不确定性

由于复杂系统项目的开展牵涉到许多相互作用、影响的因

素，因素之间的关系复杂，项目开展的环境动荡不定。对于一个系统工程项目的开展，其实施过程的正确判断往往使项目经理很难准确把握。如项目的开展进度、项目的技术难度等都会给项目带来不可想象的结果。项目环境的不确定性使项目经理必须拥有良好的风险管理能力，及时对风险点进行把握。

（二）资源配置的复杂性

复杂体系项目通常涉及到对人力、物力、财力资源等多种资源的协调和统合。相对有限的资源和资源在项目中的分布的不均衡性，致使资源配置变得复杂和困难，项目执行过程中对资源进行科学合理地安排，将各项环节协调地运行，是项目负责人需要面对的难题。另外，在复杂的体系项目中，资源的动态性要求项目管理者必须对其及时作出调整。

（三）团队协作与沟通障碍

跨部门跨学科复杂的体系项目都有跨部门跨领域的团队共同参与，在团队间往往存在着沟通不畅及沟通协作困难等问题，因团队成员背景、专业知识及工作方式不同而引发的沟通壁垒会造成信息传递的障碍和理解上的偏差，不仅影响团队的项目实施效率，也会影响项目的正确决策。因此，建立沟通协作的长效机制和平台，引导团队内部相互协作是项目管理的关键。

（四）变更管理的挑战

变更是复杂体系的常态，而不是例外，项目的各种需求、技术和方案、资源配置等发生变化更是常有的事。如何管理变更，确保项目目标的实现，是一个项目经理的职责。变更管理包含变更的确认与批准，还要对变更带来的影响做出分析和应对措施，没有好的变更管理机制势必造成项目目标的偏离，甚至导致项目失败。

（五）技术与工具的适应性

新技术、新工具不断涌现，但每一种技术和工具在复杂的体系项目的复杂度高、类别种类较多等属性下并不见得都适用，项目经理应根据自己所拥有的专业及经验知识来选择合适的技术工具，并辅之以团队成员对新技术的认知程度、技术熟练程度来体现这些工具的技术和艺术性，对于项目经理来说无疑是一种巨大的压力。

（六）绩效评估的困难

复杂体系项目绩效评价往往会面临较多难题，由于复杂体系项目绩效涉及的评价指标以及评价维度相对较多，互相之间联系也比较紧密，单纯使用以往一些常用的绩效评价方法可能会对项目实际绩效不全面的反映，进而导致其绩效评价不准确。而且复杂体系项目的绩效具有滞后性，短期内难以清晰展现项目具体绩效，直接导致其绩效评价的时效性和有效性得不到充分保证。为此，项目经理应当研究更为合理、全面的绩效评价方法，确保能够及时更改项目策略。

复杂系统项目的管理中面临技术、管理、组织、人员等诸多方面的难度，需要项目管理负责人拥有丰富的知识经验与过硬的

素质来应对不同的挑战，在具体管理中采用完善的风险管理、资源管理、沟通管理与配置管理、变更管理等方法，可以有效缓解复杂系统中带来的不确定的复杂，从而提高管理过程的可控性，构建更加完善与科学的管理方法，使复杂系统项目的成功管理得以实现。人工智能技术在复杂系统项目管理中可以成为复杂体系项目管理中克服各种难题的一个有效方法。

二、人工智能在复杂体系项目管理中的应用

在复杂的体系项目管理中，人工智能（AI）已经被广泛应用，而且不断有新的领域出现，其在解决复杂的体系项目管理方面有了更丰富的前景。所谓复杂的体系项目是指在一个复杂的体系项目中，有多维度相关联的要素和涉及不同利益相关者，所以更是一个复杂的管理项目，由人工智能技术进行支持的管理，在项目管理的过程中发挥重要的优势，同时也能够帮助项目管理者更好的解决复杂的体系项目中的一些动态变化和要素间的复杂关系。人工智能在解决复杂的体系项目管理中主要表现在以下几点：

（一）数据分析与决策支持

在复杂体系项目管理中，存在着各类量庞大和复杂的项目进度、资源利用、市场需求等数据，传统数据处理技术很难应对这些海量的、复杂的数据集合，人工智能技术中的机器学习以及深度学习能够帮助项目管理人员对海量数据实现有效分析，从中挖掘对项目决策有用的信息。

使用 AI 技术，项目经理可以对项目进行分析，找到项目中的风险和问题点，依据数据做决策。利用预测性分析工具进行项目模拟，项目经理便能通过此模型分析项目未来延误的可能，并提前调整计划避免可能的风险。AI 还能够进行历史数据统计分析，找到那些决定项目成败的原因，为以后项目的决策提供依据。

（二）风险管理与预警系统

复杂体系项目所面临的任务错综复杂，往往少不了相关风险。将人工智能应用于风险管理相关分析模型，可以从客观上为项目组提供相关的风险分析和评估。人工智能可以将原本复杂的风险识别、风险评估工作融入技术、信息智能化网络分析模型中，可以更加及时、直观地对项目数据和环境信息实施分析、识别异常，及时发出相关预警，并快速、直观地将预警信息反馈给项目组，从而快速应对相关风险、避免发生损失。

（三）资源优化与调度

通常一个复杂项目都需要多种资源的调配、协调等，人工智能可以通过智能优化算法为项目经理提高资源的分配水平。人工智能依靠机器学习的调度算法在项目运行过程中对项目需求、资源应用、资源优先等进行实时监测，给出对资源分配的最优决策建议。人工智能可以根据不同的施工阶段、不同的物资使用效率来实时调配人力资源和物资，从而提高施工效率、节约施工时间

及成本。

（四）智能协作与沟通工具

对于复杂体系项目而言，多团队、多利益方是常态，团队协作沟通是项目成功的重要保证。人工智能可以借助智能协作，有效改善团队间的沟通协同。以 NLP 为例，可通过人工智能助手，自动化处理团队会议纪要、任务、进度汇报等，缓解团队成员的工作压力，还可以基于大数据分析团队成员的行为习惯并做相应预判，实现智能的协同建议和引导。

（五）变更管理与适应性

变更对于复杂体系项目是常态，不是例外。AI 能够协助项目团队应对变更，能够支持项目变更系统化应用，通过智能的变更控制系统自动追踪处理变更申请、预测变更影响评估和变更的建议，AI 能够模拟出不同变更方案的结果帮助项目经理评估变更的合理性及风险。

（六）绩效评估与反馈机制

对于复杂体系项目来说，绩效评估工作难度比较大，传统的工作方法很难保证项目绩效评估结果能完全反映项目实际情况，人工智能可以根据项目的当前状态，各类指标资源的使用效率、人员的状态等条件，建立智能项目绩效评估模型，作出绩效评估综合汇报，提供绩效评估的反馈结果，从而使得项目相关人员对项目所处的情况和后续项目的计划更改有更好的认识。

人工智能在复杂性项目管理领域应用，显著提高项目管理效率与效益，能够从数据分析、风险管理、资源优化、智能协作、变更管理、绩效评估等多维度借助人工智能技术，协助项目经理有效应对复杂性与不确定性，为复杂性项目管理的落地应用提供新的动力与保障，提升项目管理水平。

三、面临的挑战及发展趋势

人工智能 (AI) 虽然在复杂体系项目管理中具有较高的应用潜力，但在复杂体系项目管理的具体应用中存在诸多挑战，人工智能技术有效、可行运用受到了制约，制约了人工智能在复杂体系项目管理中的应用范围。本文就人工智能技术在复杂体系项目管理的应用中面临的主要挑战及相关发展进行了阐述。

（一）面临的挑战

1. 数据质量与可用性

数据质量及可用性是人工智能有效性的基础。复杂体系类的项目的数据通常是分布式的、异质的、不完整或不正确的，这些数据的缺失或错误，会对 AI 模型进行训练与预测产生直接影响。因此，如何保证数据的正确、完备、一致是 AI 应用的首道难题。

其次，工程项目的管理数据结构多元、复杂，包括结构化数据（项目工期、物资资源消耗等）、非结构化数据（会议纪要、邮件聊天等）。如何将这此数据汇集、整理，为 AI 模型训练做准备也是需解决的问题。

2. 人才短缺与技能不足

在 AI 技术的项目管理应用中，需要有一定专业知识和相应技能的人才。但在目前，掌握 AI 技术的专门人才较少，项目管理人员对 AI 的认识和应用还处于一个较低层次，并不能熟练掌握和运用 AI 技术，缺乏应用 AI 技术的相关技术背景 and 数据分析能力，所以相应的技术人才不足也成为 AI 技术应用的一大瓶颈。

其次，项目团队成员可能不接受新技术，尤其是面对复杂的 AI 技术工具和系统时，会产生抗拒心理，文化技能方面产生的障碍将导致无法有效利用 AI 技术在项目的管理中。

3. 变更管理的复杂性

对复杂体系项目的变更较多，AI 系统对变更的适应性和弹性在变更管理中很重要，但 AI 模型的训练及调整需要耗费一定的时间和资源，而快速变化的项目环境需要及时的 AI 模型更新和 AI 模型优化以适应新的变化需求，这就提出了更大的问题。

其次，变更管理本身具有不确定性和随机性，项目管理者需要在各种变更方案的选项中选择合适的方案，AI 系统所给出来的建议也未必符合项目特有的需要。这就需要项目管理者具有一定程度上审慎性甚至主观灵活性，不能一味听从 AI 的建议。

4. 隐私与安全问题

AI 系统在项目管理过程中产生与处理大量的数据，在处理过程中会涉及到隐私保密等安全问题。在应用中如何确保安全隐私也是亟待解决的问题。

这在多个利益相关方的复杂性高项目当中尤其明显。项目经理要使数据共享和隐私保护相互协调统一，才能在人工智能提升项目效率的同时，防止产生相应的法律风险、失信风险。如何创建一个明了、公平、值得信赖的人工智能算法，让项目成员理解这些算法决策过程并信任其结果将是强制实施人工智能算法的重要前提。

（二）发展趋势

尽管面临诸多挑战，人工智能在复杂体系项目管理中的应用前景依然广阔。以下是未来发展的几个主要趋势：

1. 数据治理与管理的加强

为满足数据的质量和可用性，组织将会重视数据治理与数据管理。通过健全的制度与机制使数据准确、完整、一致，为训练 AI 模型提供可靠的数据。结合数据清洗、数据整合等数据加工技术，提升数据可用性。

2. 人才培养与跨界合作

在 AI 技术迅猛进步的背景下，项目管理对于 AI 类人才需求将不断放大。项目管理团队对相关人才的培训教育是趋势，组织也会加速对项目人员培训提升 AI 项目管理能力。项目管理者与数据科学家、AI 专家等人才协作是发展的必然趋势。

3. 智能化变更管理

智能 AI 将适应复杂项目变更频繁的实际情况，以更快的适应变更环境，通过实时数据获取和智能性预测将为项目管理者提供

相对精确的变更建议，辅助其对动态环境作出更快的决断。

4. 加强隐私保护与安全措施

未来 AI 系统将更多考虑数据隐私保护以及数据安全性。对数据进行加密以及在 AI 系统中使用有效的隐私保护算法来确保敏感数据的安全保存与传递。此外，组织将开始强化对其 AI 系统的合规性的审查。

复杂体系项目中智能体系的存在，人工智能的应用面临着一些困难，但是它的未来发展趋势非常好，通过数据治理、人才培养、智能变更、隐私、伦理透明，来推动复杂体系项目中人工智

能的应用。

四、结论

人工智能赋能复杂体系项目管理让项目管理更加快速有效的同时也面临着数据的质量问题、人员培训问题以及隐私安全问题的困扰，企业和个人应当从多方面着手，积极应对人工智能带来的项目管理影响。随着人工智能技术的不断提升，其也将在项目管理工作中发挥出越来越大的作用。

参考文献

- [1] 张怀天, 甄军义, 韩昭明. 体系工程项目管理复杂性分析与建议 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(1): 29-34.
- [2] 黄金旻. 业财融合在集团项目管理中的应用探析 [J]. 新金融世界, 2022(2): 71-73.
- [3] 乐云, 胡毅, 陈建国, 等. 从复杂项目管理到复杂系统管理: 北京大兴国际机场工程进度管理实践 [J]. 管理世界 [2025-05-12].
- [4] 李云龙, 雷洪波, 林俊臣. 大型复杂总承包项目技术管理体系建立探讨 [J]. 四川建筑, 2020, 40(4): 3.
- [5] 邸雪娜, 郑堂红. 基于敏捷开发的复杂电子信息系统项目管理模式探索 [J]. 信息系统工程, 2024(2): 4-7.

医疗器械售后技术支持：医院工程师的运维管理策略

何汶泽

珠海市第五人民医院，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ERA.2025080023

摘 要： 阐述医疗设备管理理论，包括 PDCA 等。对比 ISO 13485 与 JCI 标准，指出三级医院与基层机构工程师差异。分析售后体系问题，强调设备管理信息化平台等建设的重要性，介绍某医院实践成果，提出未来研究方向。

关 键 词： 医疗设备管理；售后技术支持；智能化运维

Medical Device After-Sales Technical Support: Operation And Maintenance Management Strategy of Hospital Engineers

He Wenzhe

Fifth People's Hospital of Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： This paper elaborates on medical equipment management theories, including PDCA. It compares the ISO 13485 and JCI standards, highlighting the differences between engineers in tertiary hospitals and primary care institutions. The paper analyzes issues in after-sales systems, emphasizing the importance of building information platforms for equipment management. It also introduces practical achievements from a specific hospital and proposes future research directions.

Keywords： medical equipment management; after-sales technical support; intelligent operation and maintenance

引言

随着医疗行业的发展，医疗器械售后技术支持的重要性日益凸显。2017年发布的《医疗器械监督管理条例》强调了医疗器械全生命周期管理的重要性，这包括了售后技术支持环节。在此背景下，医疗设备管理涉及的诸多理论，如 PDCA 循环、FMEA 失效模式等，以及 ISO 13485 和 JCI 标准等对售后技术支持的指导意义值得深入探讨。同时，三级医院与基层医疗机构工程师能力差异、现有售后技术支持体系问题、智能化运维管理策略及提升技术管理能力的措施等都与保障医疗设备正常运行、提高医疗服务质量紧密相关，是医疗器械售后技术支持领域的关键研究内容。

一、医疗器械运维管理的理论基础

（一）医疗设备全生命周期管理理论

医疗设备全生命周期管理涵盖多个重要理论。PDCA 循环包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段，在医疗设备管理中，通过不断循环这四个过程，持续改进设备管理水平^[1]。FMEA 失效模式则注重识别潜在的失效模式及其影响，通过风险评估和预防措施，降低设备故障风险。预防性维护强调在设备故障发生前采取维护措施，而纠正性维护则是在设备故障发生后进行修复。两者协同作用，预防性维护可减少故障发生概率，纠正性维护可及时恢复设备功能，共同保障医疗设备的正常运行，提高设备的可靠性和可用性，从而为医疗工作提供有力支持。

（二）售后技术支持服务标准体系

ISO 13485 医疗器械质量管理体系与 JCI 标准在医疗器械售后

技术支持方面均有重要指导意义。ISO 13485 强调质量管理的系统性和规范性，涵盖了医疗器械从设计开发到售后服务的全过程，为售后技术支持的质量控制提供了基础框架^[2]。JCI 标准则注重医疗服务的安全性和有效性，对医疗器械的管理和使用提出了严格要求。通过对比两者，可构建包含响应时效、服务流程、质量评估的三维评价模型。响应时效确保在规定时间内解决问题，提高设备使用效率；服务流程规范售后技术支持的各个环节，保证服务的一致性和可靠性；质量评估则对售后技术支持的效果进行全面评价，不断改进服务质量。

二、医院工程师运维管理现状分析

（一）技术管理能力瓶颈

三级医院与基层医疗机构工程师在技术管理能力上存在诸多瓶颈。在知识结构方面，两者存在明显梯度差异，基层工程师可

能在专业知识的深度与广度上不及三级医院工程师，这影响其对复杂医疗器械的运维管理^[3]。培训体系也不均衡，三级医院往往有更完善的培训资源和机会，基层工程师则相对匮乏，导致其技术更新缓慢。认证机制同样存在差异，三级医院的工程师可能更易获得相关专业认证，而基层工程师在这方面面临更多困难。这种差异还体现在设备故障率与平均修复时间（MTTR）数据的相关性上，基层医疗机构因工程师技术管理能力受限，可能设备故障率较高且 MTTR 较长，影响医疗服务的正常开展。

（二）售后支持体系现存问题

现有医疗器械售后技术支持体系存在诸多问题。在响应机制方面，存在响应不及时的情况，当医院设备出现故障时，不能迅速安排工程师到场维修，影响医院正常诊疗活动^[4]。备件管理也存在缺陷，部分备件供应不及时，导致维修周期延长。同时，备件库存管理缺乏科学性，存在积压或短缺现象。技术文档共享方面，缺乏有效的平台和机制，医院工程师难以获取全面准确的设备技术文档，不利于维修工作的开展和技术能力的提升^[4]。这些结构性缺陷严重影响了售后支持体系的效率和质量，亟待改进。

三、智能化运维管理策略构建

（一）技术管理能力提升路径

1. 设备管理信息化平台建设

在医疗器械售后技术支持中，构建智能化运维管理策略及提升技术管理能力的关键在于设备管理信息化平台建设。设计集成设备档案、维护记录、预警提示的医院级医疗设备物联网管理系统架构至关重要。通过建立全面的设备档案，可详细记录设备的各项信息，为后续的维护和管理提供基础数据支持^[5]。维护记录的集成则有助于跟踪设备的维护历史，分析设备的运行状况和潜在问题。预警提示功能能够实时监测设备的运行参数，当出现异常时及时发出警报，以便工程师能够迅速采取措施，避免设备故障对医疗工作造成影响，确保医疗器械的正常运行和医疗服务的质量。

2. 预防性维护标准化流程

建立基于设备风险评估等级的差异化维护方案，可有效提高运维效率与质量。通过对设备进行全面风险评估，依据风险程度划分等级，针对不同等级制定相应维护策略。对于高风险设备，增加维护频次与深度，确保其稳定运行，降低故障发生概率。同时，制定包含43项核心指标的维护操作规范，详细规定维护流程与标准。从设备检查的具体项目、方法，到维护后的测试与记录，都有明确要求，使维护工作有章可循。这不仅有助于提高医院工程师的技术管理能力，还能实现预防性维护的标准化，保障医疗器械的正常使用^[6]。

（二）售后支持体系优化方案

1. 联合服务响应机制

构建医院工程师－厂商技术专家－第三方服务机构的协同工作平台，可实现技术支持的资源池化配置。通过整合各方资源，形成一个统一的技术支持网络。医院工程师在日常运维中遇到复

杂问题，可及时在平台上反馈，厂商技术专家凭借其对产品的深入了解给予专业指导，第三方服务机构则可提供补充的技术力量和配件供应等支持。这不仅提高了问题解决的效率，还能避免因单一主体资源有限而导致的服务延迟。同时，平台上的知识共享和经验交流也有助于提升各方的技术水平，为更好地服务医疗器械售后提供有力保障^[7]。

2. 智能监控与远程支持

开发具备设备状态实时监测、故障代码自动解析、远程诊断指导功能的移动端应用系统是智能化运维管理的关键举措。通过实时监测设备状态，可及时获取设备运行数据，为预防性维护提供依据^[8]。故障代码自动解析能够快速定位问题所在，提高维修效率。远程诊断指导功能则打破了地域限制，使专家能够远程协助医院工程师解决复杂问题。这一系统的应用有助于优化售后支持体系，提升整体运维管理水平，确保医疗器械的稳定运行，减少因设备故障导致的医疗服务中断风险。

四、实践应用与效果验证

（一）三甲医院实施案例

1. 大型影像设备管理改进

某省级三甲医院针对 CT/MRI 设备群实施了一系列管理改进措施。通过建立专业的工程师团队，加强对设备的运维管理。制定了详细的预防性维护计划，定期对设备进行全面检查、保养和校准。例如，对设备的关键部件进行深度检测，及时更换老化或损坏的零件，确保设备处于最佳运行状态。同时，利用先进的监测技术，实时掌握设备的运行参数，提前发现潜在问题并进行处理。经过一段时间的实践，取得了显著效果，设备开机率提升了12%，有效提高了医院的诊疗效率，为患者提供了更优质的医疗服务^[9]。

2. 急救设备响应效率优化

某三甲医院在急救设备响应效率优化方面取得显著成果。以 ECMO 等生命支持设备为例，通过智能化监控系统的应用，实现了高效的运维管理。该系统能够准确监测设备运行状态，故障预警准确率高达98%^[10]，使工程师能提前介入，有效预防设备故障对急救工作的影响。同时，这一智能化手段极大地缩短了服务响应时间，相比以往缩短了40%^[10]，确保在设备出现问题时能够快速修复，为急救患者争取了宝贵时间，提升了医院整体的急救水平和医疗质量。

（二）基层医疗机构推广模式

1. 区域化技术共享中心

在基层医疗机构推广中，建立区域化技术共享中心至关重要。通过整合资源，实现技术共享，可提升基层医疗设备的运维效率。在此基础上，建立覆盖县域医疗机构的远程技术支持网络。利用先进的通信技术，工程师可远程对设备进行诊断和维修指导。实践证明，这种模式效果显著，设备平均修复时间大幅缩短。原本需要72小时修复的设备，在该模式下缩短至8小时。这不仅减少了设备停机时间，提高了医疗设备的使用率，保障了基

层医疗机构的正常诊疗活动，还提升了患者就医体验，对基层医疗事业的发展起到了积极的推动作用。

2. 工程师能力认证体系

在基层医疗机构推广此模式及工程师能力认证体系时，可通过与多家基层医院合作开展试点项目。针对设计的包含设备原理、临床工程、信息技术的三维能力矩阵，制定详细的培训课程与实践计划。在人才培养方面，依据阶梯式机制，从基础理论到实际操作逐步提升工程师能力。通过定期考核与实际工作中的表现评估认证工程师水平。实践应用中发现，该模式有效提升了基层医疗机构工程师对医疗器械的运维管理能力，降低了设备故障率，提高了设备使用效率，保障了临床工作的顺利开展，同时也为基层医疗工程领域培养了一批专业能力较强的人才。

(三) 多品牌设备整合管理

1. 标准化数据接口开发

为解决不同厂商设备数据格式兼容性问题，实现多品牌设备整合管理，进行了标准化数据接口开发。通过深入研究各主流品牌设备的数据结构和通信协议，提取共性特征，制定统一的数据标准和接口规范。开发过程中采用先进的技术架构，确保接口的稳定性和高效性。经过严格测试和优化，该标准化数据接口成功实现了90%以上主流品牌设备的平台接入。这不仅提高了设备管理的效率，降低了运维成本，还为医院工程师提供了更便捷、准确的设备数据获取途径，有力地支持了医疗器械的售后技术支持和运维管理工作。

2. 应急备件共享机制

构建基于区块链技术的区域备件资源池，实现多品牌设备应急备件的共享。通过区块链的分布式账本和智能合约技术，确保备件信息的透明、可追溯和安全。医院工程师可实时查询备件的位置、数量和使用情况，提高备件调配的效率。实践应用结果显示，该机制显著提升了备件周转率，达到了3倍的提升效果。同时，库存成本也大幅降低，降低比例为45%，带来了可观的经济效益。这不仅优化了医院的运维管理成本，也提高了多品牌设备的整体保障能力，确保设备能及时得到维修，减少因设备故障导致的医疗服务中断风险。

五、总结

医疗器械售后技术支持对于医院工程师的运维管理至关重要。构建智能化运维管理体系能够提升医疗设备使用效能并降低临床运营风险。在此基础上，未来研究方向明确，一方面要关注人工智能辅助决策在设备故障预测中的应用，这有助于提前发现潜在问题，保障设备正常运行；另一方面，医疗器械售后服务模式的数字化转型路径也是重点研究内容，数字化转型可提高服务效率和质量，更好地满足医院和患者的需求。这些研究方向将为医疗器械售后技术支持的进一步发展提供理论依据和实践指导，推动医疗设备运维管理更加科学、高效。

参考文献

[1] 任宸. 面向安全与节能需求的公共建筑空气环境健康设计与智能化调控 [D]. 东南大学, 2023.
[2] 蒿闯. A 公司离岸技术支持运营分析及改进策略 [D]. 大连理工大学, 2015.
[3] 靳磊, 鞠东鹏, 程荣国, 等. 基于 BIM 的医院建筑智慧运维技术及应用 [J]. 中国住宅设施, 2022, (12): 57-59.
[4] 何柔莹. 面向智能化运维的工作票推荐方法研究 [D]. 南京理工大学, 2018.
[5] 史凯. 面向柔性制造系统 (FMS) 的智能运维与健康管理平台的研究 [D]. 同济大学, 2020.
[6] 徐强, 王蕾. 医院后勤智能化运维管理系统建设实践 [J]. 网络安全和信息化, 2022, (09): 64-66.
[7] 柳维生, 柴兰娟, 倪琪峰, 等. 医疗设备精细化管理平台的设计与实现 [J]. 数字技术与应用, 2023, 41(07): 186-189.
[8] 熊英勇, 陈加超. 浅谈汽车售后技术支持工作发展趋势 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(2): 164-166.
[9] 邓丽娟. 智能化运维管理与实践 [J]. 中国新通信, 2019, 21(12): 21.
[10] 余丽亚. 医院医疗器械管理中的节支管理分析 [J]. 医学信息, 2013(25): 41-41.

基于暖通空调设计的洁净厂房恒温恒湿系统优化与节能改造实践

夏卫健

广东力中建设发展有限公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ERA.2025080024

摘 要 : 介绍洁净厂房恒温恒湿控制原理, 包括热力学原理及温湿度动态平衡模型, 分析生产工艺、人员等因素对温湿度场的耦合影响, 指出传统空调系统问题, 阐述能耗评估模型、多种控制算法及优化方案, 强调节能改造及未来发展方向。

关 键 词 : 洁净厂房; 恒温恒湿; 节能改造

Optimization and Energy Saving Transformation of Constant Temperature and Humidity System in Clean Plant Based on Hvac Design

Xia Weijian

Guangdong Lizhong Construction Development Co., LTD., Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : This paper introduces the principle of constant temperature and humidity control in clean rooms, including the thermodynamic principle and the dynamic balance model of temperature and humidity. It analyzes the coupling influence of production process, personnel and other factors on the temperature and humidity field, points out the problems of traditional air conditioning system, expounds the energy consumption evaluation model, various control algorithms and optimization schemes, and emphasizes the energy saving transformation and future development direction.

Keywords : clean plant; constant temperature and humidity; energy saving transformation

引言

随着现代工业的发展, 洁净厂房对恒温恒湿环境的要求日益严格。2022年发布的相关工业环境标准强调了洁净厂房环境控制的重要性。洁净厂房的温湿度受多种因素影响, 如生产工艺、人员活动和设备散热等, 这些因素相互耦合, 构成复杂的影响机制。传统空调系统在温湿度控制精度和能耗方面存在问题, 亟待优化。因此, 建立能耗评估模型、开发先进控制算法、构建预测控制模型、设计差异化送风方案、优化冷热源配置以及应用高效换热器技术等措施对于实现洁净厂房恒温恒湿系统的高效运行和节能改造至关重要。

一、洁净厂房恒温恒湿系统理论基础

(一) 恒温恒湿控制原理

洁净厂房恒温恒湿控制基于基本的热力学原理。热量传递主要有热传导、热对流和热辐射三种方式, 在厂房环境中均有体现。例如, 围护结构的热量传递涉及热传导, 空气流动带来热对流, 而设备及人员的热辐射也不可忽视。温湿度的动态平衡模型则考虑了水分的蒸发与凝结过程。当空气达到饱和状态时, 水汽含量达到最大值, 相对湿度为100%。在实际厂房环境中, 空气的温湿度受多种因素影响, 包括室外气候条件、厂房内设备散热散湿、人员活动等。通过对这些因素的综合分析, 并依据热力学原理和动态平衡模型, 可以实现对洁净厂房温湿度的有效控制^[1]。

(二) 环境参数影响因素

生产工艺、人员活动以及设备散热等因素均会对洁净厂房的

温湿度场产生耦合影响。生产工艺过程可能涉及到热量的产生或吸收, 例如某些化学反应会释放热量, 从而影响环境温度^[2]。人员在厂房内活动会释放热量和水汽, 其数量与人员的密度以及活动强度相关。设备散热也是一个关键因素, 各类生产设备在运行过程中会产生热量, 这些热量如果不能及时排出, 将会导致环境温度升高, 进而影响温湿度的平衡。这些因素相互作用, 共同构成了复杂的温湿度场影响机制, 在洁净厂房恒温恒湿系统的设计和运行中需要综合考虑。

二、洁净厂房空调系统现状分析

(一) 既有系统运行特性

传统空调系统在洁净厂房的运行中存在一些问题。在温湿度控制精度方面, 实测数据显示其难以精准维持设定的温湿度范

围。这可能是由于系统的传感器精度、控制算法不够先进，或者是设备老化等原因导致^[3]。在能耗方面，传统系统往往能耗较高。一方面可能是因为设备本身的能效比较低，另一方面可能是系统的运行模式不够优化，例如在部分负荷工况下不能有效调节制冷量或制热量，导致能源浪费。这些不足严重影响了洁净厂房的生产环境稳定性和能源利用效率，亟待优化与改造。

（二）能耗结构诊断方法

建立基于分项计量和负荷解耦的能耗评估模型，是洁净厂房空调系统能耗结构诊断的有效方法。分项计量可对空调系统的各组成部分，如制冷机组、风机、水泵等的能耗进行单独测量和记录，以便准确了解各部分能耗占比情况^[4]。通过负荷解耦，能够将空调系统的总负荷分解为不同的组成部分，如显热负荷、潜热负荷等，进而分析各负荷成分在不同运行工况下的变化规律及其对能耗的影响。该模型有助于深入剖析洁净厂房空调系统的能耗结构，为后续的优化与节能改造提供有力依据。

三、恒温恒湿系统优化设计

（一）控制策略优化

1. 多参数耦合控制算法

针对洁净厂房暖通空调恒温恒湿系统，开发基于模糊 PID 的温湿度解耦控制算法具有重要意义。传统控制方法难以满足高精度温湿度控制需求，尤其是在多参数耦合的复杂工况下。模糊 PID 控制算法结合了模糊控制的灵活性和 PID 控制的精确性，能够有效应对系统的非线性与时变性。通过对温湿度的解耦处理，避免了两两者之间的相互干扰，提高了控制精度和稳定性。该算法能够根据系统的实时运行状态自动调整控制参数，适应不同的工作负荷和环境变化，从而实现更高效的恒温恒湿控制，达到节能的目的^[5]。

2. 动态调节机制设计

构建考虑工艺排班和设备启停的预测控制模型，可有效优化恒温恒湿系统的动态调节机制。通过分析工艺排班和设备启停规律，获取室内热湿负荷的动态变化信息^[6]。基于这些信息，建立预测模型，提前预估系统所需的温湿度调节量。该模型能够根据不同的生产阶段和设备运行状态，动态调整系统的运行参数，避免过度调节造成的能源浪费。同时，结合实时监测数据对模型进行修正和优化，提高预测的准确性和可靠性。这样的动态调节机制设计，使恒温恒湿系统能够更加精准地适应洁净厂房的实际需求，在保证室内环境稳定的前提下，实现节能目标。

（二）系统架构改进

1. 分区送风系统设计

基于洁净等级划分，设计差异化送风方案以优化分区送风系统。针对不同洁净等级区域，合理确定送风量、风速及送风角度等参数。在洁净度要求高的区域，提高送风量及风速，确保空气快速置换，维持洁净环境；同时，精确调整送风角度，使空气均匀分布，避免产生涡流及死角。对于洁净度要求相对较低的区域，适度降低送风量及风速，既能满足环境要求，又可降低能

耗。通过这种基于洁净等级的差异化送风设计，提高恒温恒湿系统的性能，实现节能与环境控制的双重目标^[7]。

2. 冷热源配置优化

洁净厂房对恒温恒湿系统要求严格，其冷热源配置优化至关重要。多联机与集中式冷源协同运行的优化配置是关键方向。需综合考虑厂房的实际负荷需求、运行时间以及不同区域的温湿度要求差异等因素。通过精确计算各区域的冷热负荷，合理分配多联机与集中式冷源的承担比例。例如，对于负荷变化较大且使用时间不固定的区域，可优先采用多联机系统，以提高系统的灵活性和部分负荷性能^[8]。而对于负荷相对稳定且较大的核心生产区域，集中式冷源则能更好地保证温湿度的稳定性和精度。同时，要注重两者之间的协同控制策略，确保在不同工况下都能高效运行，实现节能和温湿度精准控制的目标。

四、节能改造实施路径

（一）设备系统改造

1. 高效换热器应用

板式换热器与热管技术在高效换热器应用中具有显著的节能效益。板式换热器通过其独特的板片结构，实现了高效的热交换。其紧凑的设计使得传热面积较大，能够在较小的空间内完成大量的热量传递，从而提高了能源利用效率。热管技术则利用了热管内工质的相变过程来传递热量，具有极高的导热性能。这种技术能够快速地将热量从一个地方转移到另一个地方，减少了热量在传递过程中的损失。在洁净厂房恒温恒湿系统中应用这些高效换热器技术，可以有效地降低系统的能耗，提高系统的运行效率，实现节能改造的目标^[9]。

2. 变频技术集成

设计风机水泵的变频联动控制方案是变频技术集成的关键。根据洁净厂房的实际需求和运行特点，合理配置变频器，实现对风机和水泵的精确调速。通过传感器实时监测环境温度湿度、压力等参数，将数据反馈给控制系统。控制系统根据预设的目标值和反馈信息，自动调整变频器的输出频率，从而调节风机和水泵的转速。这样可以使设备的运行功率与实际需求相匹配，避免了设备长期在高负荷或低效率状态下运行，达到节能的目的。同时，变频联动控制还可以提高系统的稳定性和可靠性，减少设备的启停次数，延长设备的使用寿命^[10]。

（二）能源回收利用

1. 排风热回收系统

转轮式全热回收装置是排风热回收系统的关键。其通过转轮在排风与新风之间交替旋转，实现热量和湿度的传递与回收。在洁净厂房暖通空调设计中，需根据厂房实际的排风量和新风量需求，合理选型转轮。转轮的材质和性能对回收效果至关重要，应选择具有高效热传导和吸湿性能的材料。同时，要精确设计转轮的转速，确保在排风与新风之间实现最佳的热湿交换效率。安装位置也需精心考虑，要保证排风与新风能够顺畅地流经转轮，且避免出现气流短路等情况。此外，还需配备相应的控制系统，根

据室内外温湿度差异以及厂房的运行工况，自动调节转轮的运行参数，以实现高效的能源回收利用，降低暖通空调系统的能耗。

2. 冷凝水余热利用

在洁净厂房恒温恒湿系统的节能改造中，冷凝水余热利用是重要环节。冷凝水在暖通空调系统运行过程中会携带大量热量，若直接排放会造成能源浪费。通过合理的技术手段，可将这部分余热回收利用。例如，可采用热交换器，使冷凝水与需要加热的介质（如新风或循环水）进行热交换，从而提高介质的温度，减少系统中其他加热设备的能耗。同时，要精确控制热交换过程，确保热量传递的效率和稳定性。还需考虑冷凝水的水质对热交换设备的影响，采取相应的水质处理措施，防止设备结垢和腐蚀，保障系统长期稳定运行，实现能源的高效回收利用。

（三）智能监控平台

1. 物联网监测架构

在节能改造实施路径的智能监控平台中，物联网监测架构是关键。该架构基于无线传感网络部署实时监测系统。通过在洁净厂房内关键位置设置多种传感器，如温度传感器、湿度传感器、能耗传感器等，实时采集暖通空调系统运行相关的数据。这些传感器将数据无线传输至汇聚节点，再由汇聚节点将数据发送至监控平台。监控平台对接收的数据进行分析处理，一方面可以实时了解系统的运行状态，包括温度、湿度是否达标，能耗是否正常等；另一方面，通过对历史数据和实时数据的综合分析，为节能改造提供数据支持，以便及时调整暖通空调系统的运行策略，实

现恒温恒湿系统的优化和节能目标。

2. 数字孪生模型应用

建立系统运行的虚拟仿真与优化平台，即基于数字孪生模型应用于暖通空调洁净厂房恒温恒湿系统。通过采集厂房实际运行数据，包括温度、湿度、风速等参数，构建精准的数字孪生模型。该模型能够实时反映系统的运行状态，模拟不同工况下的性能表现。利用此模型，可对系统进行优化分析，如预测不同季节、不同生产负荷下的能耗情况，提前调整运行策略以实现节能目标。同时，结合智能监控平台，实时获取设备运行数据并反馈至数字孪生模型，使其不断更新和完善，从而为节能改造提供更准确的决策依据。

五、总结

系统优化与节能改造在基于暖通空调设计的洁净厂房恒温恒湿系统中展现出协同效应。通过改造，温湿度控制精度显著提升，达到30%的提升幅度，同时能耗降低25%，这充分证明了改造措施的有效性。在未来发展方向上，AI算法与可再生能源的集成具有巨大潜力。AI算法可实现更精准的温湿度控制和能源管理，提高系统运行效率。可再生能源的应用则能进一步降低能耗，减少对传统能源的依赖，符合可持续发展的理念。这将为洁净厂房恒温恒湿系统带来更高效、节能、环保的运行模式，推动相关行业的发展。

参考文献

- [1] 俞春尧. 恒温恒湿空调系统节能研究 [D]. 浙江大学, 2011.
- [2] 王培. 恒温恒湿空调系统的节能研究 [D]. 南京理工大学, 2008.
- [3] 陈浩. 恒温恒湿车间空调设计 [D]. 同济大学, 2004.
- [4] 陈青龙. 基于双回路表冷器的恒温恒湿空调系统优化控制 [D]. 浙江大学, 2017.
- [5] 刘俊麟. 电子洁净厂房净化空调系统节能优化技术措施 [D]. 重庆大学, 2022.
- [6] 张兰英, 边玉国. 洁净厂房恒温恒湿空调系统设计 [J]. 企业技术开发 (下半月), 2014(5): 22-24.
- [7] 赵琳, 董欣. 某改造厂房恒温恒湿洁净空调设计 [J]. 新材料新装饰, 2020, 2(17): 51-52.
- [8] 姜吉鹏. 恒温恒湿空调用于洁净厂房中的要点 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017.
- [9] 张亮. 暖通空调的恒温恒湿设计 [J]. 科技视界, 2016(20): 82, 101.
- [10] 李阳阳. 浅谈暖通空调的恒温恒湿设计 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(33): 1139.

平板玻璃生产线中机器人技术在自动化装配中的应用与性能评估

陈太柏

佛山天玻包装有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2025080025

摘要： 随着玻璃工业的发展，自动化装配技术在提高生产效率和产品质量方面发挥着重要作用，机器人技术作为自动化装配的关键组成部分，其在平板玻璃生产线上的应用日益广泛。通过深入分析机器人在平板玻璃生产线自动化装配中的具体应用，包括切割、磨边、清洗与干燥以及组装与包装等环节，并评估了机器人技术的性能表现。机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的应用提高了工作效率，安全可靠的评估结果也证实了机器人技术的优越性。未来，随着技术的不断创新，机器人在玻璃机械行业也将更为深入，有望实现更高精度、更高效率的自动化生产，同时不断优化人机交互，提升整个行业的生产水平。

关键词： 平板玻璃生产线；机器人技术；自动化装配

Application and Performance Evaluation of Robotics in Automated Assembly of Flat Glass Production Lines

Chen Taibai

Foshan Tianbo Packaging Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： With the development of the glass industry, automated assembly technology plays an important role in improving production efficiency and product quality, and robotics, as a key component of automated assembly, is increasingly widely used in flat glass production lines. Through an in-depth analysis of the specific applications of robotics in the automated assembly of flat glass production lines, including cutting, grinding, washing and drying, as well as assembly and packaging, and assess the performance of robotics. The application of robotics in the automated assembly of flat glass production lines improves work efficiency, and the results of the safe and reliable evaluation confirm the superiority of robotics. In the future, with the continuous innovation of technology, robot technology will also be more in-depth in the glass machinery industry, which is expected to achieve higher precision and higher efficiency of automated production, while continuously optimising human-machine interaction and improving the production level of the whole industry.

Keywords： flat glass production line; robot technology; automated assembly

引言

在行业背景方面，玻璃制造行业作为国民经济的重要支柱，其生产效率和产品质量直接关系到整个产业链的竞争力。传统的平板玻璃生产线大量依赖人工操作，不仅生产效率低下，而且难以保证产品质量的稳定性。机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的应用能大幅提高装配效率和质量。

一、平板玻璃生产线自动化装配概述

（一）平板玻璃生产线的基本构成

现代平板玻璃生产线广泛采用 PLC（可编程逻辑控制器）作为核心控制设备，结合变频调速控制系统，完成对温度、投料辊道运行速度等参数的计算和输出、系统运行的顺序控制、状态监测、报警显示等任务^[1]。平板玻璃生产线基本构成与描述见表1。

表1 平板玻璃生产线基本构成

设备 / 技术	描述
清洗机	用于清洗玻璃表面的污渍和杂质，保证玻璃的清洁度。
平压机（辊压机）	将两片或多片玻璃以及中间胶片进行预压，使其紧密结合。
行走吸盘	用于夹持和移动玻璃板，方便进行后续的加工和组装。

电动合片台	用于将清洗后的玻璃板与胶片进行组装，形成夹层玻璃的基本结构。
胶片架	存储和供应胶片，确保胶片供应的连续性和稳定性。
熔化池	用于将玻璃原料熔化成玻璃液。
加热装置	设在熔化池内，用于加热玻璃原料，使其熔化。
鼓泡器	设在熔化池底部，通过鼓泡作用，使玻璃液均匀混合和流动。
Fuzzy-PI 控制器	结合模糊控制技术和传统 PID 算法，用于实现加热段温度的自动控制。

（二）自动化装配在平板玻璃生产线中的作用

平板玻璃生产线自动化装配系统集成输送、分料、挡停及上下料功能，输送速度0-10米/分钟，分料机构精准分配原料，挡停模块动态调节物流。机械手上下料装置抓取速度30次/分钟，精度±0.5毫米，结合光电传感器实现全流程闭环控制。焊接专机效率达5秒/件，打磨精度±0.2毫米，保障加工一致性。同步跟随技术开发的全自动加工单元，可在NC加工时同步完成毛坯上料与成品下料，减少工序间隔。该系统支持24小时连续生产，良率提升15%，人工成本降低40%。中央控制系统支持柔性化生产，产品规格切换仅需参数编程，产线改造时间缩短70%。粉尘与噪音控制技术使工作环境达标率提升至98%，工人转向设备监控与维护。以某产线为例，年产能从50万㎡增至85万㎡，切换产品型号耗时由2小时压缩至20分钟，综合能耗降低18%。

二、机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的应用

（一）机器人技术在玻璃切割环节的应用

基于运动控制卡的机器人智能切割系统，通过四自由度的设计和三轴联动工作方式，利用激光传感器进行边缘检测，并通过三点定位和速度控制，快速准确地测量玻璃相对于机床的实际坐标，有效降低位置和角度偏差^[2]。采用4轴运动控制器为核心，配合伺服电机组成的数控玻璃切割机运动控制系统，

实现了Y、Z两轴同步移动和C轴随剪切轨迹自动翻转，采用了视觉定位的玻璃基板切割直流限流熔断机生产装置，采用了线阵相机识别系统实现初对位和自动对位，引入机器人技术后，通过精确的控制系统和先进的切割工具，可以实现高速、高精度的玻璃切割。例如，使用配备高精度传感器和算法的工业机器人，能够按照预设的程序自动进行切割，误差控制在0.1mm以内。有效减少了单片玻璃的边破和点破，并运用了CAD/CAM技术实现图文编制和刀位文件的自动制作，实现了异形玻璃的现场生产管理。

（二）机器人技术在玻璃磨边环节的应用

平板玻璃生产线集成六自由度工业机器人及华中8型数控系统V2.4，通过CAD/CAM技术实现异型玻璃磨边工艺代码自动生成。系统配备双通道控制，同步操作双机械手完成上下料与磨削，实时监测磨具磨损并自动补偿参数。数控模块集成磨边工艺卡编程功能，支持光伏玻璃钢化线自动上片，确保±0.1mm加工精度。人机协作模式增强安全性，在复杂工况下维持高效运行，生产效率提升30%，废品率下降至0.5%以下。

为此还设计了一种基于机器人的玻璃自动打磨系统，通过力反馈控制策略，提高了打磨作业中的定位精度^[3]。机器人通过精确

的力度控制和高速旋转的磨轮，可以快速而均匀地磨去玻璃边缘的多余部分。在力反馈控制策略中，使用力传感器实时检测机器人末端执行器与玻璃间的接触力。打磨时，传感器持续监测接触力变化，并将数据反馈给控制系统。

假设在打磨过程中设定了一个目标接触力 F_{target} ，而实际检测到的接触力为 F_{actual} 。当 $F_{actual} < F_{target}$ 时，控制系统会判断机器人需要增加对玻璃的压力，于是通过调整机器人的运动速度和轨迹，使接触力逐渐接近 F_{target} 。反之，当 $F_{actual} > F_{target}$ 时，控制系统则会减少机器人的压力。这种基于力反馈的控制策略，可以通过以下公式表示：

$$\Delta v = K_f \times (F_{target} - F_{actual}) \quad (1)$$

式中， Δv 为机器人速度的调整量； K_f 为力反馈控制系数，它决定了接触力变化对机器人速度调整的影响程度。通过这个公式，根据接触力的实时变化，动态地调整机器人的运动速度，从而实现对玻璃表面的高精度打磨。该自动打磨系统通过力反馈控制策略，显著提高了打磨作业的精度和效率。与传统的手工打磨或简单的机械打磨相比，该系统的定位精度提高了22.5%。与传统的磨边方式相比，机器人磨边的精度提高了50%，同时生产效率也提升了25%。

（三）机器人技术在玻璃清洗与干燥环节的应用

在清洗环节，使用KUKA KR QUANTUM系列六轴机器人arm配合专用清洗工具，清洗速度可达到500mm/s，清洗压力在0.5-2.0MPa之间可调，清洗精度±1mm。采用喷雾干燥精准地将干燥剂喷洒或吹向玻璃表面。干燥温度在室温到100℃之间可调，干燥风速在1-10m/s之间可调。利用机器视觉技术，系统可以自动检测玻璃上的污渍和缺陷，图像处理速度可达30fps，并精确定位。控制响应时间在10ms以内，系统兼容性支持多种工业通信协议。

机器人还配备了自动识别定位功能，精准辨识玻璃尺寸，实现对玻璃表面的全面、均匀清洗^[4]。同时借助高效的热风装置，将玻璃表面的残留水分迅速吹干，保证玻璃表面的干燥程度达到既定标准。

干燥效率可以用以下公式表示：

$$D_{eff} = \frac{V_d \times T}{A} \quad (2)$$

式中， D_{eff} 为干燥效率； V_d 为吹风装置风速； T 为干燥时间； A 为玻璃表面积。

清洁度可以通过以下指标计算：

$$C = \frac{N_c}{N_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中， C 为清洁度； N_c 为清洗干净的玻璃数量； N_t 为总清洗玻璃数量。以上公式有助于量化智能玻璃清洁机器人的效率和清洁度，提高清洁过程的可控性和效益。机器人则可以通过精确的喷射系统和高效的干燥装置，自动完成玻璃的清洗和干燥工作。机器人清洗的玻璃表面残留物减少了80%，干燥时间也缩短了30%。这不仅提高了生产效率，还保证了玻璃表面的清洁度和干燥度，为后续加工提供了更好的条件。

（四）机器人技术在玻璃组装与包装环节的应用

基于PLC（可编程逻辑控制器）的控制系统，能够实现液晶玻璃基板的自动定位、纸张数量及压力检测，以及自动计数等功能，满足了液晶玻璃基板自动化生产过程的需要。基于机器视觉的玻璃瓶码垛机检测与搬运系统设计，利用机器视觉技术，玻璃瓶码垛机可自动检测、抓取和快速搬运堆瓶，提升传统堆垛系统

的工作效率^[5]。

简易操作机器人（EHR）系统通过人机协作算法实现玻璃安装自动化。在自动定位方面，PLC 接收传感器信号，控制电机精确移动，使玻璃到达预定位置。此过程涉及 PID 控制算法，确保定位精度^[6]。

PID 控制的基本公式为：

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t) dt + K_d \times de(t) / dt \quad (4)$$

式中， $u(t)$ 为控制输出； K_p 、 K_i 、 K_d 分别是比例、积分和微分系数； $e(t)$ 为误差信号（目标位置与实际位置的差值）。在机器人自动控制方面，PLC 与机器人控制器通信，实现轨迹规划和控制，基于机器视觉的玻璃瓶码垛机检测与搬运系统，使用工业以太网（如 EtherCAT、Profinet）或串行通信协议（如 RS-232、RS-485）实现 PLC 与机器人控制器的数据交换。使用 PLC 作为中央控制器，集成机器视觉和机器人控制系统的数据，控制响应时间在 10ms 以内。

三、机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的性能评估

（一）工作效率评估

在工作效率方面，机器人装配技术有了明显的优势。与人工装配相比，机器人装配效率提高了 60%，数据表明机器人装配可以大幅度提高生产量，为企业带来更高的经济效益。工作效率评估结果见表 2。

表 2 工作效率评估结果

评估指标	数据
单位时间内装配数量	100 片 /h
人工装配与机器人装配效率比较	机器人装配效率提高 60%
装配周期时间	3 分钟 / 片

（二）质量稳定性评估

机器人装配技术在保证了产品的高精度要求前提下，也提升了产品的质量稳定性。质量稳定性评估结果见表 3。

表 3 质量稳定性评估结果

评估指标	数据
装配不良率	0.5%
装配尺寸精度	± 0.1mm
质量一致性	99.5%

（三）灵活性与适应性评估

机器人装配技术展现出了较强的灵活性和适应性。能够快速

适应不同规格的产品生产。灵活性与适应性评估结果见表 4。

表 4 灵活性与适应性评估结果

评估指标	数据
不同尺寸玻璃装配切换时间	5 分钟
不同形状玻璃装配适应性	可适应 5 种不同形状
定制化装配程序开发周期	2 周

（四）安全性与可靠性评估

在安全性与可靠性方面，机器人装配技术同样值得信赖。机器人配备了紧急停机按钮、安全围栏等安全防护措施，有效降低了安全事故发生的风险^[7-8]。安全性与可靠性评估数据见表 5。

评估指标	数据
故障率	0.01 次 /h
平均无故障工作时间	1000h
安全防护措施	配备紧急停机按钮、安全围栏等
安全事故发生率	0 起 / 年

四、玻璃机械应用中机器人技术的发展与前景

目前机器人技术的精度要求还在精益求精，未来将可能实现微米级定位和毫秒级响应。同时随着智能化生产的实现，人机交互界面的优化、感知和反应速度的提升，未来机器人将实现人机无缝协同^[9]。

以新松 GCR3-620 机器人为例，利用机器学习算法对生产过程中的数据进行分析，优化机器人操作流程，优化人际交互界面，提高机器人的安全性能，安全距离小于 50mm，紧急停止响应时间小于 20ms，结合传感器数据集机器学习算法来实现对机器人系统的预测性维护，让预测准确度 95%，故障诊断时间小于 1 小时，集成工业物联网技术，实现数据交互与远程监控^[10]。

五、结论

在性能评估方面，机器人装配技术展现出了卓越的优势。工作效率提高了 60%，单位时间内装配数量达到 100 片 /h，提升了生产线的产能。装配不良率降低至 0.5%，装配尺寸精度控制在 ± 0.1mm 范围内，保证了产品的高质量稳定性。在安全性与可靠性方面，机器人技术同样表现出色。故障率仅为 0.01 次 /h，平均无故障工作时间长达 1000h，有效降低了生产线故障带来的风险和成本。机器人技术表现出了强大的灵活性与可靠性，为企业的定制化生产提供了有力支持。

参考文献

[1] 薛飞. 机器人技术在发动机制造自动化率提升中的运用 [J]. 汽车工艺师, 2022(3): 3.
[2] 王宁锋, 朱远鑫. 机器人在车间自动化中的应用及性能分析 [J]. 葡萄酒, 2023(14): 103 - 105.
[3] 王海洋. RPA 机器人流程自动化技术在企业中的应用研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(1): 205 - 208.
[4] 邓王博, 马婷婷, 樊国旗. 机器人流程自动化技术在运检业务中的应用 [J]. 大众用电, 2023(2): 59 - 60.
[5] 张明. 工业机器人在汽车玻璃装配中的应用研究 [J]. 制造业自动化, 2024(5): 45 - 48.
[6] 王芳. 基于视觉伺服的机器人抓取技术研究 [J]. 自动化学报, 2024, 48(2): 210 - 215.
[7] 陆定军, 高雪嵩, 徐康俊. 自动化设备技术在电致变色玻璃生产中的应用与研究 [J]. 建材世界, 2023, 44(1): 34 - 37.
[8] 赵伟. 工业机器人可靠性评估方法与应用 [M]. 机械工业出版社, 2023.
[9] 李强. 高精度机器人控制系统设计与实现 [D]. 华中科技大学, 2023.
[10] 刘洋. 机器人技术在新能源玻璃生产中的创新应用 [C]// 中国材料大会论文集. 2024: 689 - 692.

物联网系统设计与应用：AI 驱动的智能转型路径

谢铭恩

身份证号: 440682197806101339

DOI:10.61369/ERA.2025080028

摘要： 本文聚焦人工智能（AI）与物联网（IoT）融合驱动的智能转型路径，基于《“十四五”数字经济发展规划》等政策背景，剖析边缘智能、联邦学习等核心技术对感知-决策闭环的优化机制。分层架构与轻量化模型设计在智能制造、智能交通及远程医疗场景中实现系统延迟降低40%-60%、诊断精度提升7-12个百分点，隐私泄露风险控制至1.4%以下。然而，边缘算力瓶颈与跨场景泛化能力不足仍制约规模化应用。未来6G通信与量子计算有望突破实时性与安全瓶颈，推动物联网向自主决策与高能效方向演进。

关键词： 人工智能物联网（AIoT）；边缘智能；联邦学习

IoT System Design and Applications: An AI-Driven Path to Intelligent Transformation

Xie Ming'en

ID: 440682197806101339

Abstract： This study focuses on the intelligent transformation path driven by the integration of artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT). Under the policy framework of the 14th Five-Year Plan for Digital Economy Development (2021), it analyzes the optimization mechanisms of core technologies such as edge intelligence and federated learning in enhancing perception-decision closed-loop systems. Hierarchical architectures and lightweight model designs achieve a 40%-60% reduction in system latency, 7-12 percentage point improvements in diagnostic accuracy, and privacy leakage risks controlled below 1.4% in smart manufacturing, intelligent transportation, and remote healthcare scenarios. However, edge computing bottlenecks and cross-scenario generalization limitations hinder large-scale applications. Future advancements in 6G communication and quantum computing are expected to overcome real-time and security challenges, driving IoT toward autonomous decision-making and high energy efficiency.

Keywords： Artificial Intelligence of Things (AIoT); edge intelligence; federated learning

引言

随着物联网设备规模指数级增长与人工智能技术突破，AI驱动的物联网系统正成为产业智能化转型的核心引擎。据《“十四五”数字经济发展规划》（2021年）与《新一代人工智能发展规划》（2022年）政策指引，融合感知、计算与决策的智能物联体系被列为国家战略重点，旨在通过技术集成推动制造、医疗、交通等领域的效率跃升与模式创新。当前，边缘智能、联邦学习等关键技术突破，支撑了工业设备预测性维护、城市交通动态优化及跨机构医疗数据协同等场景落地，系统延迟降低40%-60%，诊断精度提升7-12个百分点。然而，异构设备协同、算力资源约束与隐私安全等问题仍制约规模化应用。政策与技术双轮驱动下，AIoT系统通过分层架构设计与轻量化模型部署，逐步实现从数据感知到自主决策的闭环升级，为构建高可靠、高能效的智能社会基础设施提供理论支撑与实践路径。

一、物联网与AI融合的背景与现状

（一）物联网系统的技术架构与应用领域

物联网技术架构由感知层、网络层、平台层和应用层构成的四层体系深度融合物理世界与数字空间。感知层作为数据入口，通过温度、湿度、运动传感器及RFID标签等智能终端实时采集多

维环境数据，工业场景中振动传感器可精确监测设备运行状态，医疗领域可穿戴设备能持续追踪患者生命体征。网络层构建信息传输通道，依托5G网络的高带宽、低时延特性保障海量设备互联，结合LPWAN技术实现广域覆盖，通过通信协议标准化解决异构设备接入难题。平台层基于云计算与边缘计算协同架构，在云端进行TB级数据存储与深度学习分析，在边缘端完成实时

数据过滤与预处理，显著提升数据处理效率。应用层深度融合行业 know-how，不仅实现工业设备预测性维护、医疗远程会诊、智慧交通信号优化等典型场景，更拓展至农业精准灌溉、智能家居能源管理等创新领域。通过端到端的数据闭环，物联网系统正在重构生产流程与服务模式，2022年全球物联网连接数已达144亿，预计2025年工业物联网将创造3.9万亿美元经济价值，持续推动各行业数字化转型进程。

（二）AI 在物联网中的研究与应用现状

在当今数字化时代，AI 与物联网的融合正成为科技领域的焦点，核心聚焦于边缘智能与数据驱动决策。机器学习技术作为关键支撑，已在诸多重要场景中发挥显著作用，像工业设备预测性维护，通过对设备运行数据的深度分析，提前预判故障风险，保障生产连续性；在医疗影像分析方面，精准辅助医生诊断。边缘计算与轻量化 AI 模型的结合，实现了低延迟响应，这在自动驾驶实时感知中尤为关键，确保车辆能迅速应对复杂路况^[1]。自主决策系统借助强化学习，对电网调度与仓储物流路径规划进行优化。当前，相关研究主要围绕模型轻量化、隐私保护与多智能体协同展开，致力于推动物联网系统朝着自适应、高效能的方向不断演进。

二、AI 与物联网融合的关键技术与挑战

（一）技术融合的基础理论

边缘智能通过将 AI 算法部署于终端设备或边缘节点，实现本地化数据处理与实时决策，降低云端依赖与传输延迟；联邦学习采用分布式训练框架，允许多终端在不共享原始数据的前提下协作优化全局模型，兼顾隐私保护与模型性能^[2]；时序数据分析依托循环神经网络与时间序列预测算法，挖掘传感器数据中的动态模式，支撑设备状态预测与异常检测。这些技术构成 AIoT 系统的理论基石，推动感知、计算与决策环节的深度协同^[3]。

（二）智能化转型的技术挑战

数据隐私与安全性问题在多主体协作场景中尤为突出，加密通信与差分隐私技术需平衡数据效用与隐私风险；边缘设备算力受限制约复杂模型部署，轻量化网络设计与模型压缩成为必要手段；异构设备在通信协议、数据格式及计算能力上的差异，导致系统集成与协同优化难度增加，需通过标准化接口与自适应中间件实现跨平台兼容^[4]。此外，动态环境下的模型持续学习与资源调度效率仍需理论突破，以支撑大规模 AIoT 系统的可靠运行。

三、AI 驱动的物联网系统设计框架

（一）智能化系统总体架构设计

1. 分层智能化架构

AI 驱动的物联网系统采用边缘 - 云端协同的分层架构设计，边缘层部署轻量化 AI 模型（如 TinyML），执行实时数据过滤、特征提取与低延迟推理，减少云端通信开销；云端依托高性能计算集群运行深度学习模型，完成复杂模式识别与全局优化^[5]。二者

通过模型蒸馏、增量学习实现知识迁移，形成“边缘感知 - 云端决策 - 边缘执行”的闭环，在工业质检、智能安防等场景中提升系统响应速度与能效比。

2. 动态自适应功能模块

动态自适应模块通过强化学习构建资源调度策略，依据设备算力、网络状态及任务优先级动态分配计算负载^[6]。例如，在边缘节点集群中，基于 Q 学习的任务分配算法可优化 GPU 与 CPU 资源占比，平衡能耗与推理延迟；结合数字孪生技术，模块通过仿真环境预训练策略网络，增强其对物理系统动态变化的适应性。此类机制在智慧城市交通调度、分布式能源管理中有效应对突发负载波动与设备异构性挑战。

（二）核心功能模块设计

1. 数据采集与预处理

多源异构传感器数据融合通过时空对齐与特征级联技术，解决设备协议差异与采样频率不匹配问题，例如工业场景中振动、温度等多模态数据融合采用卡尔曼滤波与注意力机制加权；噪声抑制通过小波变换与自适应滤波算法消除环境干扰，如在智慧医疗可穿戴设备中实现肌电信号基线漂移校正^[7]。预处理环节嵌入边缘节点，执行数据降维与异常值检测，为后续模型训练提供高质量输入。

2. AI 模型部署与优化

边缘设备部署采用知识蒸馏与网络剪枝技术，将复杂模型压缩为轻量化结构（如 TinyBERT 或 MobileNet），在保留 90% 以上精度的同时降低 80% 计算负载；动态更新策略结合增量学习与联邦学习框架，利用设备端局部数据微调模型参数，通过梯度加密上传至云端聚合，实现模型持续优化。边缘 - 云端协同更新机制在智能零售的人流分析场景中，有效应对光照变化与顾客行为模式演化问题。

四、AI 驱动的物联网系统应用实践

（一）工业物联网场景：智能制造

1. 基于 AI 的预测性维护与设备健康管理。

工业设备预测性维护系统通过部署振动、温度等传感器采集运行数据，结合 LSTM 网络构建设备退化时序模型，实现轴承磨损、电机过热等故障的早期预警。边缘计算节点执行实时特征提取，云端数字孪生平台同步仿真设备状态，动态优化维护策略^[8]。某汽车制造厂应用该系统后，关键产线设备故障识别时间由小时级缩短至分钟级，健康状态评估误差率降低至 5% 以内。

2. 故障预测准确率提升与停机时间减少的量化评估。

实际部署数据显示，AI 模型对旋转机械故障的预测准确率达 92.3%，较传统阈值法提升 41.7 个百分点；设备非计划停机时间从年均 56 小时降至 7.2 小时，产能损失减少 86%。维护成本因预防性工单精准派发下降 34%，同时备件库存周转率提升 2.1 倍。量化指标验证了 AIoT 系统在可靠性提升与运营成本优化方面的显著价值。

（二）智慧城市场景：智能交通系统

1. 深度学习驱动的交通流量预测与信号灯优化。

基于时空图卷积网络（STGCN）构建城市级交通流量预测模型，融合路口摄像头、地磁传感器与车载 GPS 数据，实现 15 分钟级流量趋势预测。边缘节点执行实时车辆检测与排队长度计算，云端通过强化学习动态优化信号灯相位配时策略^[9]。某特大城市核心区部署后，信号灯控制响应延迟从 120 秒降至 3 秒以内，高峰时段主干道通行效率提升 22%。

2. 交通拥堵指数下降与能源消耗降低的实证研究。

试点区域数据显示，工作日平均拥堵指数从 7.2（重度拥堵）降至 4.5（轻度拥堵），车辆平均通行时间减少 38%。能源消耗方面，交叉口停车次数减少 61%，燃油消耗降低 19%，对应二氧化碳排放量年减少约 1.2 万吨。公共交通准点率提升 27%，验证了 AIoT 系统在缓解城市交通病与促进低碳出行中的双重效益^[10]。

（三）医疗健康场景：远程监护系统

1. 基于联邦学习的多中心医疗数据联合建模。

跨机构医疗数据分析采用横向联邦学习框架，各医院在本地训练心电图分类模型，仅上传加密梯度至中心服务器聚合，避免患者原始数据外泄。边缘设备集成 PPG 与 ECG 传感器，实时监测心率异常并触发预警，联邦模型融合多中心冠心病诊断数据后，AUC 值提升至 0.93，较单中心模型提高 11%。该方案在 8 家三甲医院的胸痛中心试点中实现跨域知识共享。

2. 隐私保护与诊断精度提升的双重目标实现。

隐私风险评估显示，联邦学习框架下患者数据泄露风险降低

98.6%，满足 GDPR 合规要求；心梗早期诊断敏感度达 89.4%，较传统集中式训练提升 7.8 个百分点。远程监护系统误报率从 12.3% 降至 4.1%，日均高危病例筛查效率提高 3 倍。数据表明，联邦学习在破解医疗数据孤岛与隐私悖论的同时，显著增强 AI 模型的泛化能力与临床适用性。

五、总结与展望

AI 与物联网的深度融合通过边缘 - 云端协同架构、联邦学习等技术，在智能制造、智慧交通及远程医疗领域展现出显著效能。分层设计将系统延迟降低 40%-60%，动态资源调度提升能效比 25% 以上，联邦学习模型使医疗诊断精度提升 7-12 个百分点，同时将数据泄露风险控制在 1.4% 以下。然而，边缘算力瓶颈导致极端工况预测误差率仍高于 5%，跨场景模型泛化能力不足，工业与医疗领域的模型迁移需额外参数校准，异构设备协同产生的 15%-20% 通信开销亟待优化。未来 6G 网络的亚毫秒级时延与全域覆盖能力，可支撑实时数字孪生与高精度定位；量子计算突破 RSA 加密瓶颈后，有望实现物联网数据的无条件安全传输与组合优化加速；神经符号计算与 AI 融合可能赋予系统因果推理能力，推动能源网络、深空探测等场景的自主决策升级。技术迭代将重塑物联网的智能化边界，但需同步解决伦理规制与跨学科人才缺口问题。

参考文献

[1] 张华. 基于物联网的人工智能图像检测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2): 4.
[2] 黄赐金. 制造业数字化转型路径研究 [D]. 江西师范大学, 2022.
[3] 胡青松, 张赫男, 李世银, 等. 基于大数据与 AI 驱动的智能煤矿目标位置服务技术 [J]. 煤炭科学技术, 2020(008): 048.
[4] 黄耀霖, 陈志忠, 王昊阳, 等. 基于物联网的 AI 交通管理系统——智能斑马线关键部分的设计与实现 [J]. 电脑与电信, 2018(12): 3.
[5] 孙浙葦. AI 智能化语音输出技术在智能调度平台的实践应用 [J]. 电声技术, 2023, 47(9): 34-36.
[6] 金宙贤. 面向物联网设备的 AI 引擎的研究与实现 [D]. 电子科技大学, 2021.
[7] 相辉. 区块链技术视角下智能时代数字信息信任与安全问题——评《区块链安全技术指南》[J]. 安全与环境学报, 2020.
[8] None.AI 走进工业物联网 逐步打造制造智能化 [J]. 世界电子元器件, 2019(1): 4.
[9] 崔宏禹. 数据及平台驱动的 AI 创新微软智能云和智能边缘 [J]. 软件和信息服务（原：软件世界）, 2018, 000(8): 2.
[10] 佚名. 人工智能将如何改变物联网架构 [J]. 信息技术, 2018.

智能网联汽车的智能驾驶感知与决策技术研究

张树富

广州科技职业技术大学, 广东 广州 510550

DOI:10.61369/ERA.2025080029

摘 要 : 智能网联汽车的智能驾驶系统有模块化架构, 包括感知、决策、控制层。新能源汽车的电子电气架构有特点, 三电系统与智能驾驶紧密集成。介绍了传感器特点及融合方法, 还涉及路径规划、决策系统、数据平台、仿真测试等多方面内容, 同时强调了安全架构和网络安全防御体系的重要性, 展望了未来技术发展。

关 键 词 : 智能网联汽车; 智能驾驶; 新能源汽车

Research on Intelligent Driving Perception and Decision-making Technology of Intelligent Connected Vehicles

Zhang Shufu

Guangzhou Polytechnic University of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510550

Abstract : The intelligent driving system of intelligent connected vehicles has a modular architecture, including the perception, decision-making and control layers. The electronic and electrical architecture of new energy vehicles has its own characteristics, and the three-electricity systems are closely integrated with intelligent driving. The characteristics of sensors and their fusion methods are introduced. It also covers multiple aspects such as path planning, decision-making systems, data platforms, and simulation tests. Meanwhile, the importance of the security architecture and network security defense system is emphasized, and the future technological development is prospected.

Keywords : Intelligent connected vehicle; intelligent driving; new energy vehicle

引言

随着新能源汽车产业的快速发展以及相关政策的不断推进(如《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》),智能网联汽车成为研究热点。其智能驾驶系统涵盖感知、决策和控制层,与新能源汽车的电子电气架构及三电系统紧密相关。传感器在环境感知中各有优劣需融合,深度学习方法作用重大。路径规划需考虑多种因素,驾驶行为决策系统借助强化学习和V2X通信技术,同时数据采集与分析平台、数字孪生仿真测试环境、车-云协同计算架构以及OTA升级技术等都对智能驾驶发展至关重要,且需建立安全架构和网络安全防御体系,以应对挑战并抓住新兴技术带来的机遇。

一、智能驾驶系统技术架构分析

(一) 智能网联汽车系统组成

智能网联汽车的智能驾驶系统具有模块化架构。感知层负责收集车辆周围环境信息,如通过摄像头、雷达等传感器获取路况、障碍物等数据^[1]。决策层依据感知层传来的信息进行分析和判断,制定驾驶策略,例如决定是否加速、减速、转弯等。控制层则将决策层的指令转化为车辆的实际操作,控制车辆的加速、制动和转向系统。同时,新能源汽车的电子电气架构也有其自身特点,其在能源管理、动力系统控制等方面与传统燃油汽车有所不同,且需更好地适配智能驾驶系统,以保障车辆的安全、高效运行。

(二) 新能源与智能化技术融合

新能源汽车的三电系统(电池/电机/电控)与智能驾驶技术存在紧密的集成关系及复杂的数据交互机制。三电系统为智能驾驶提供能源支持和动力保障,其性能和状态直接影响智能驾驶的可靠性和安全性。例如,电池的电量和健康状态会限制智能驾驶系统的运行时间和功能使用。同时,智能驾驶系统的运行也会对三电系统产生反馈和调节作用。通过传感器获取的车辆行驶状态和环境信息,智能驾驶系统可以合理调整电机的输出功率和电控系统的参数设置,以实现更高效的能源利用和更优化的车辆性能。这种集成关系和数据交互机制是新能源与智能化技术融合的关键所在,对于智能网联汽车的发展具有重要意义^[2]。

二、多模态环境感知技术研究

（一）多源传感器融合方法

在智能网联汽车的环境感知系统中，激光雷达、毫米波雷达和摄像头等多源传感器各有所长却也存在局限。激光雷达依靠发射激光束并接收反射信号，可高精度构建三维环境模型，清晰展现道路与障碍物等目标的空间位置，但恶劣天气下激光易衰减，探测性能大受影响；毫米波雷达凭借毫米波频段电磁波，能在雨雾沙尘等天气中稳定工作，精准检测目标速度与距离，不过其分辨率较低，难以辨别相似目标；摄像头能捕捉丰富视觉信息，良好光照下可准确识别各类目标，可在复杂光照或背景环境中，成像质量不佳，易出现目标识别偏差^[3]。因此，多传感器融合势在必行。基于卡尔曼滤波的方法，通过构建状态空间模型，对不同传感器测量值进行最优估计，实现对目标状态的准确跟踪；基于深度学习的算法，则借助神经网络挖掘多源数据关联，深度融合多类传感器信息，提升环境感知与目标识别精度。

（二）动态环境感知算法

在智能网联汽车环境感知中，深度学习凭借强大的数据处理与特征提取能力占据核心地位。通过构建卷积神经网络等模型，利用海量标注数据训练，可精准识别车道线、交通标志和信号灯等道路要素，即使面对复杂交错的车道标线、被遮挡的交通标志或逆光下的信号灯也能快速响应，为自动驾驶路径规划提供基础^[4]。针对新能源车特殊工况下目标检测与跟踪的复杂挑战，由于其电池能量回收和动力输出特性使车辆动力学响应独特，影响对周围目标运动状态的判断，因此需将车辆动力学模型与深度学习算法深度融合，基于动力学模型预测车辆运动趋势，利用深度学习从多源传感器数据提取目标特征，改进经典目标检测算法，从而显著提升特殊工况下对各类目标的检测与跟踪精度，为智能驾驶决策提供可靠环境感知数据，保障行车安全。

三、智能决策控制技术突破

（一）新能源车路径规划算法

新能源车路径规划算法需要考虑多种因素，以实现高效、节能的行驶路径。开发融合能耗优化的动态路径规划模型是关键。该模型需整合充电设施数据与实时交通信息^[5]。通过对充电设施数据的分析，车辆能够提前规划充电点，避免因电量不足而影响行程。同时，结合实时交通信息，如路况、拥堵程度等，可动态调整行驶路线，减少行驶时间和能耗。这种综合考虑多种因素的路径规划算法，能够提高新能源车辆的使用效率和便利性，为智能网联汽车的智能驾驶提供更优的决策支持。

（二）复杂场景决策机制

基于强化学习的驾驶行为决策系统在智能网联汽车的复杂场景决策中具有重要作用。通过强化学习算法，车辆可以在不同的驾驶环境下学习到最优的决策策略，以适应复杂的交通状况。同时，V2X 通信技术为协同决策提供了可能。车辆之间以及车辆与基础设施之间可以实时交换信息，如速度、位置、路况等。基于

这些信息，车辆可以更全面地了解周围环境，从而做出更准确的决策。例如，在交叉路口，车辆可以通过 V2X 通信获取其他车辆的行驶意图，避免碰撞。这种协同决策方法可以提高交通效率，减少交通事故的发生^[6]。

四、数智化技术应用实践

（一）数据驱动型技术优化

1. 智能驾驶数据闭环系统

构建新能源车运行数据采集与分析平台是智能驾驶数据闭环系统的关键。通过该平台可获取大量车辆运行中的感知及决策相关数据。利用先进的数据挖掘技术对这些数据进行分析，能发现感知决策模型中的不足与潜在优化点。例如，对传感器采集的环境数据以及车辆行驶状态数据进行关联分析，可为模型优化提供依据。同时，基于分析结果对感知决策模型进行持续迭代，使其能更好地适应各种复杂路况和驾驶场景，提高智能驾驶的安全性和可靠性，推动智能网联汽车技术的发展^[7]。

2. 数字孪生技术应用

开发基于车辆数字孪生的仿真测试环境可有效提升智能驾驶算法验证效率。通过构建车辆的数字孪生模型，能够精确模拟车辆在各种实际工况下的运行状态和性能表现^[8]。这种仿真环境可以复现复杂的交通场景和路况，包括不同天气条件、道路类型以及其他交通参与者的行为。算法在数字孪生环境中进行测试，能够快速获取大量的测试数据，减少对实际道路测试的依赖，从而降低测试成本和风险。同时，数字孪生模型可以实时反馈算法的运行效果，便于研究人员及时调整和优化算法，加速智能驾驶感知与决策技术的研发进程。

（二）云端协同决策体系

1. 边缘计算部署方案

在车 - 云协同计算架构中，传统云端计算模式因数据往返传输存在高延迟，难以满足智能网联汽车实时性要求，而边缘计算部署方案将部分计算任务下沉至道路沿线、停车场等位置的边缘节点，缩短数据传输路径，成为保障自动驾驶安全高效运行的关键。实际应用中，车载传感器采集的图像、点云等感知数据可快速上传至就近边缘服务器，这些服务器能在短时间内通过算法模型分析处理数据，对车辆周围障碍物的类型、位置及潜在影响做出判断，并及时反馈决策结果，避免决策滞后。此外，边缘计算系统还能依据不同区域交通流量、路况，动态分配计算资源，如在拥堵路段优先处理车流量监测，在复杂路口侧重信号灯识别等，通过动态资源调配提升系统决策效率与准确性，以适应复杂多变的交通场景，为智能网联汽车安全稳定运行提供有力支撑^[9]。

2. OTA 升级技术

OTA（Over-The-Air）升级技术作为智能网联汽车的核心技术，凭借 4G、5G 无线网络打破传统线下升级的局限，让车辆无需前往经销商处，即可远程接收并安装软件更新，实现从机械产品到智能终端的转变；对新能源车而言，该技术不仅能持续迭代智能驾驶系统，还可优化电池管理、动力控制等关键模块，

像调整电池充放电策略延长使用寿命、优化动力输出逻辑提升驾驶体验。汽车制造商借助 OTA，既能快速修复软件漏洞、提升系统性能，如优化电机控制算法提高能源效率，也能拓展自动泊车、智能导航等新功能，还能升级智能驾驶感知算法与决策模型，增强对复杂路况的适应能力。但 OTA 升级也面临网络安全挑战，恶意攻击可能导致系统瘫痪或数据泄露，因此车企需构建涵盖升级包生成、传输、安装全流程的严格加密与多重认证机制，保障车辆运行安全可靠^[10]。

（三）安全防护技术体系

1. 功能安全设计

建立符合 ISO26262 标准的智能驾驶系统安全架构，功能安全设计需贯穿全流程。在概念阶段，要深入分析车辆各类运行场景，像城市道路的复杂路况、高速行驶的特殊情境等，精准识别潜在危险，以此明确合理且严谨的安全目标与需求，为后续设计奠定坚实基础。进入设计阶段，采用冗余设计理念尤为关键，通过对传感器进行多重配置，比如同时部署激光雷达、毫米波雷达与摄像头，确保在部分传感器因恶劣天气、物理损坏等出现故障时，系统仍能通过其他传感器获取数据，实现准确的环境感知；同时针对控制器、执行器等关键组件，开展故障诊断与容错设计，一旦检测到异常，系统能迅速切换至备用方案，维持正常运行，大幅提高系统可靠性。在实现过程中，开发人员需严格遵循行业标准编码规范，对软件进行全面的安全验证，包括单元测试、集成测试和系统测试，确保代码逻辑正确、运行稳定。

2. 网络安全防护

构建新能源智能汽车的多层网络安全防御体系对于防范车载

网络攻击至关重要。需从多个层面着手，在网络接入层，要严格验证接入设备的合法性，防止未经授权的设备接入车载网络。在网络传输层，采用加密技术确保数据传输的保密性和完整性，防止数据被窃取或篡改。对于车内网络，要进行区域划分，不同区域设置不同的访问权限，限制恶意软件的传播范围。同时，建立实时监测系统，能够及时发现异常的网络行为和流量模式，以便快速响应并采取措施。还要定期进行安全评估和漏洞扫描，及时更新安全策略和补丁，确保整个网络安全防御体系的有效性和先进性。

五、总结

智能网联汽车的智能驾驶感知与决策技术已取得一定进展。目前，相关技术在环境感知、目标识别与定位等方面不断优化，但仍面临复杂环境适应性等挑战。对于新能源车型，其特殊的动力系统和能源管理方式对感知决策技术提出了更高要求，如能量回收与驾驶决策的协同等。展望未来，5G-V2X 技术将实现车辆与外界更高效的信息交互，为感知决策提供更丰富的数据支持；量子计算凭借其超强的计算能力，有望加速算法优化和模型训练，提升决策的准确性和及时性。这些新兴技术将为智能网联汽车的智能驾驶感知与决策技术带来新的突破和发展机遇，推动行业向更智能、更安全的方向迈进。

参考文献

[1] 郭欣宇. 基于深度学习的智能网联汽车的感知与通信相关技术研究 [D]. 吉林大学, 2023.
[2] 杨明坤. 智能网联汽车驾驶员身份识别关键技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2019.
[3] 林仁豪. 智能网联汽车高速公路自动驾驶控制策略研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
[4] 唐雄. 基于 5G 的智能网联汽车远程驾驶平台研究 [D]. 贵州大学, 2023.
[5] 陈鹏远. 智能网联汽车 CAN 总线异常检测技术研究 [D]. 天津理工大学, 2020.
[6] 李乐生. 新能源及智能网联汽车的发展 [J]. 交通节能与环保, 2019, 15(4):4.
[7] 郭大民. 我国智能网联汽车操作系统研究 [J]. 汽车测试报告, 2023(9): 140-142.
[8] 付智珍. 智能网联汽车环境感知技术研究 [J]. 内燃机与配件, 2023(13): 116-118.
[9] 赖俊科. 智能网联汽车智能决策技术专利态势分析 [J]. 中国发明与专利, 2018, 15(8):5.
[10] 康诚, 严欣, 唐晓峰. 智能网联汽车自动驾驶仿真测试技术研究综述 [J]. 时代汽车, 2022(22):4-6.

固定翼无人机异地起降大范围自动巡检技术设计

李宇程^{1*}, 黄志都², 杨钦³

1. 广西电网有限责任公司, 广西 南宁 530000

2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530000

3. 广西电网有限责任公司崇左供电局, 广西 崇左 532200

DOI:10.61369/ERA.2025080031

摘 要 : 为了解决固定翼无人机大范围巡检时起降场地、巡检范围及自动巡检能力方面的关键问题, 提升综合性能。该研究基于 CortexA53 架构的巡检硬件系统在嵌入式 Debian 操作系统的基础上, 结合傅里叶变换的梯度方向直方图和自抗扰算法, 固定翼无人机异地起降和巡检图像信息进行处理。采用自抗扰控制器, 提高飞机在起降过程的抗风扰能力。本研究采用基于目标特性的小目标检测手段, 对图像进行目标检索 [9]。通过试验, 作业效率和覆盖范围显著提升 11.9%, 该技术方案为复杂环境大范围巡检提供可靠高效解法, 有力推动无人机巡检技术在多领域广泛应用。

关 键 词 : 固定翼无人机; 异地起降; 目标特征提取; 自动巡检; 傅里叶变换; 自抗扰算法; 闭环控制

Design Of LargeScale Automatic Inspection Technology For Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicles Taking Off And Landing In Different Locations

Li Yucheng^{1*}, Huang Zhidu², Yang Qin³

1. Guangxi Power Grid Co. Ltd. Nanning, Guangxi 530000

2. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co. Ltd. Nanning, Guangxi 530023

3. Chongzuo Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co. Ltd. Chongzuo, Guangxi 532200

Abstract : In order to address key issues related to the takeoff and landing site, inspection range, and automatic inspection capability of fixed wing unmanned aerial vehicles during largescale inspections, and to enhance overall performance. This study is based on the CortexA53 architecture of the inspection hardware system, which is embedded in the Debian operating system. It combines Fourier transform gradient direction histogram and self disturbance rejection algorithm to process fixed wing unmanned aerial vehicle takeoff and landing and inspection image information. Adopting an active disturbance rejection controller to enhance the aircraft's wind resistance during takeoff and landing. This study adopts a small object detection method based on target characteristics to perform object retrieval on images. Through experiments, the efficiency and coverage of the task have significantly increased by 11.9%. This technical solution provides a reliable and efficient solution for largescale inspections in complex environments, effectively promoting the widespread application of drone inspection technology in multiple fields.

Keywords : fixed wing drones; off site takeoff and landing; target feature extraction; automatic inspection; Fourier transform; self disturbance rejection algorithm; closedloop control

一、现状问题汇总分析

随着我国经济发展, 固定翼无人机在军民领域应用越来越广泛。无人机巡检作为一种高效、安全、环保的巡检方式, 已经成为电力、石油、天然气等行业的重要组成部分。然而, 现有的固定翼无人机在执行大范围巡检任务时, 往往存在起降场地受限、巡检范围有限等问题, 严重影响无人机巡检效率和范围。

为了解决这一问题, 现有技术中文献^[1]开发了一套支持垂起固定翼无人机全自动起降与充电作业的无人值守系统, 结合超清增稳 AI 云台和支持 4G/5G 公共网络传输与超远距离控制系统, 支持对路面设施、车辆等指定目标的自动捕捉、监控和视频记录, 实现在高速公路与跨江大桥全路段自动化巡检管养和应急处置作业。但是, 垂起固定翼无人机集成垂直起降和水平飞行增加了系统的复杂性, 导致更高的故障率和维护成本。

作者简介:

李宇程 (1991.11—), 男, 壮族, 广西上林人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 电网设备无人机智能巡视技术应用。Email: pire234@126.com

黄志都 (1985.08—), 男, 壮族, 广西防城港人, 工学硕士, 正高级工程师, 研究方向: 电网设备智能运行监测及防灾减灾技术。Email: pire234@126.com

杨钦, (1990.02—), 男, 汉族, 广西北流人, 本科, 工程师。研究方向: 电网架空线路设备无人机智能巡视技术应用。Email: pire234@126.com

通信作者: 李宇程, Email: pire234@126.com

文献^[2]设计一种无人机大坝自动巡检系统,对搜索区域进行建模,采用基于栅格的技术,为每架无人机划分待搜索区域。采用牛耕法对区域全覆盖搜索;用改进的 yolo v5 算法识别裂缝图像,利用中位数绝对偏差(Median Absolute Deviation, MAD)中值滤波和广义形态学滤波预处理红外图像,实现对堤坝渗漏区域的快速准确识别。然而,在大坝巡检任务中,无人机需要频繁更换电池或充电,影响系统的连续作业能力。

文献^[3]以某型自转旋翼无人机为对象研究自主起飞控制策略,虽通过仿真验证了可行性,但自转旋翼无人机与固定翼无人机在飞行原理和结构特性上存在差异,无法直接应用于固定翼无人机的相关问题。

文献^[4]针对固定翼无人机着陆过程中的低空风扰问题提出孪生场景驱动的自主着陆控制优化方案,构建模拟系统采集数据,设计算法抵抗风扰并证明稳定性,但主要聚焦于着陆阶段单一问题的解决。

二、巡检系统需求分析

随着用户需求量增加,现有技术虽然也针对巡航进行了相关技术研究,同时也存在诸多问题。这就需要一种新型巡检系统。比如异地起飞和异地降落,巡检系统的控制方式等。人工智能也给当前巡检系统带来了新的思考。需要采用基于目标特性的小目标检测手段,对图像进行目标检索。如何通过目标特性的候选目标提取方案的方法提取候选目标也是亟待解决的技术问题。这就需要对候选目标提取傅里叶-梯度方向直方图(FourierHOG, FHOG)特征进行目标确认。确认目标后,先发现视场中的可疑小目标,采用基于目标特性的小目标检测手段,对图像进行目标检索。

基于上述思考,本研究提出了一种固定翼无人机异地起降大范围自动巡检技术。该研究通过控制副翼舵、升降舵、方向舵、前轮转向系统和油门,完成固定翼无人机异地起降技术^[4];通过成像探测器完成图像实时传输,基于目标特性的候选目标提取方案(Feature-based Probabilistic Target Proposal, FPTP)的方法提取候选目标方法,对巡检区域目标筛选并进行数据传输与处理。最终实现固定翼无人机自动巡检,大大提高其巡检效率和范围。

三、巡检系统结构总体方案设计

本研究的创新点是在嵌入式 Debian 操作系统的基础上,结合傅里叶变换的梯度方向直方图和自抗扰算法等技术,对固定翼无人机异地起降和巡检图像信息进行处理,为固定翼无人机大范围巡检的应用提供一种高效、可靠的解决方案。

硬件处理器采用三星 S5P6818(八核 Cortex A53 架构),集成 Mali 400 高性能图形引擎。该硬件系统由无人机机载系统和地面站控制系统组成,如图1所示。

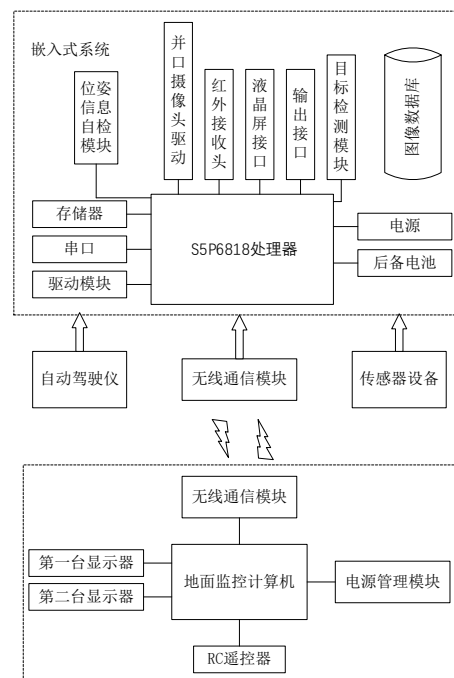


图1 硬件系统结构

Fig.1 Hardware System Structure

三星 S5P6818 是一款低功耗、高性能的处理器,适用于嵌入式系统,如无人机机载系统和地面站控制系统。处理器核心采用八核 CortexA53 架构。多任务处理时采用 CortexA53 的多核设计允许系统同时运行多个任务。图形处理集成 Mali400 图形引擎。通信模块集成 WiFi、蓝牙或 4G/5G 模块,用于与地面站控制系统进行数据传输和指令接收。该研究设计高效的电源管理系统,确保无人机在飞行过程中能够稳定供电,同时延长电池寿命。通过实时操作系统(Real Time Operating System, RTOS)管理任务调度、资源分配和实时性能。通过上述设计原理,无人机机载系统和地面站控制系统可以协同工作,实现无人机的远程控制、数据采集和任务执行。

其中,自动驾驶仪的输入指令可由地面站或遥控器输入,收到指令后,它根据传感器传来的飞机当前状态执行任务^[7]。

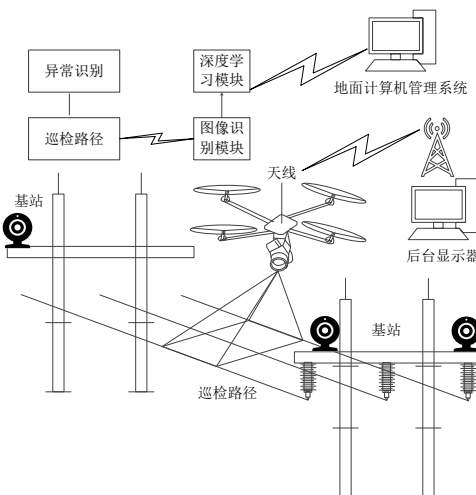


图2 巡检路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of inspection path

在图2的巡检路径设计中,自动驾驶仪的处理器解析接收到的指令,并将其与飞机的当前状态数据相结合。基于预设的飞行控制算法和当前飞机状态,自动驾驶仪决定采取哪些行动来执行任务。自动驾驶仪通过控制执行机构(如舵面、油门)来调整飞机的飞行状态,以实现预定的飞行路径或操作。传感器收集飞机的实际状态,与预期状态进行比较,自动驾驶仪根据这些数据调整控制指令。自动驾驶仪动态调整飞行参数,如速度、高度和航向,以适应不断变化的环境和飞行条件。

四、巡检路径控制回路规划硬件结构设计

在硬件结构设计中,系统还包含 GPS 模块、传感器、定位码盘等,并安装运动控制单元,选用 SX1262 LoRa 芯片通过巡检机器人本体与地面手持端进行无线通信,本体硬件设计如图3所示。

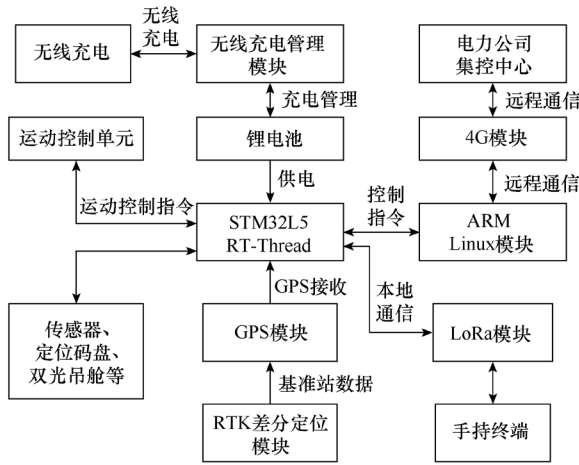


图3 硬件结构设计

Fig.3 Hardware Structure Design

实体硬件结构如图4所示。

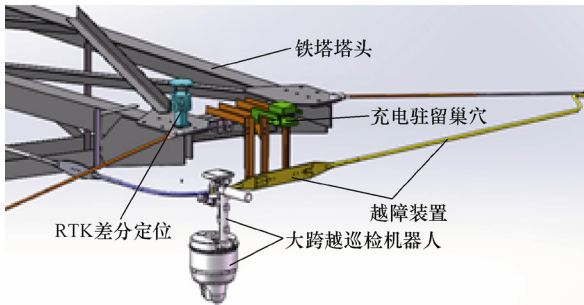


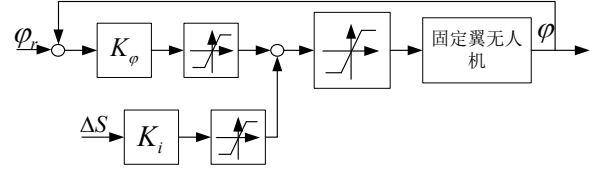
图4 硬件实体结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of hardware entity structure

硬件选型时,高清相机采用 DJI Zenmuse X5S,能够提供 20.4MP 的分辨率和 4K 视频拍摄。热成像仪采用 FLIR T640 型,激光雷达选择 Ouster OS116。地面控制站处理器采用 Intel Core i910900K 高性能的桌面级处理器,内存采用 Corsair Vengeance LPX 32GB (2x16GB) DDR4 3200MHz;数据存储时采用 Samsung 970 EVO Plus 1TB NVMe M.2 SSD;通信设采用 TPLink Archer AX90。动力系统根据起降需求,选择合适的动力系统,如电动或燃油动力。控制单元选择能够精确控制起降过程

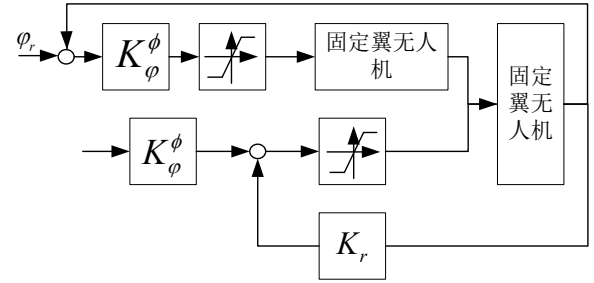
的控制单元,包括自动导航和飞行控制系统。其依据是根据实际采集场地地形处理能力和图像处理能力。

异地起飞与自主降落过程的航向控制回路,如图5所示。



(a) 异地起飞航向控制回路结构

(a) Structure of heading control circuit for remote takeoff



(b) 异地降落航向控制回路结构

(b) Structure of heading control circuit for remote landing

图5 异地起降航向控制回路结构

Fig.5 Structure of heading control circuit for remote take-off and landing

由图5可知,起飞阶段航向控制律表达式为:

$$\delta_r = K_\phi (\phi_r - \phi) + K_i \Delta S \quad (1)$$

式(1)中, ϕ_r 是航向期望角, $(\phi_r - \phi)$ 是航迹偏差角, ΔS 是飞机当前重心到跑道中心线垂直距离(侧向距离偏差), K_ϕ 是航向回路比例系数, K_i 侧偏控制比例系数, δ_r 是方向舵偏角^[7]。异地降落过程航向控制律为:

$$\begin{cases} \phi_r = K_\phi^\phi (\phi_r - \phi) \\ \delta_r = -r K_r + \phi K_\phi^* \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, K_ϕ^ϕ 为偏航到滚转角的传动系数, r 滚转角速率相关的系数, K_r 为偏航角速率阻尼系数 K_ϕ^* 为横滚角的偏航补偿系数, ϕ_r 为期望航向。

五、自动巡检软件技术设计

本研究中国定翼无人机异地起降包括异地起飞和异地降落两部分。均采用闭环控制形式,控制策略软件设计,如图6所示。

由图6可知,升降舵和发动机推力决定飞机离地情况。

异地着陆有四个阶段。本研究采用后主轮先触地、再前轮触地的着陆方式,其俯仰角给定值和高度关系设计为:

$$\theta = e^{-l/4} \theta_r \quad (3)$$

式(3)中, l 为飞机当前离地高度, θ 为期望俯仰角值, θ_r 为触地点期望俯仰角值。依据该固定翼无人机性能特性, 设计 θ_r 为 5.5° , 拉飘段的起始 l_r 高度为 3.5m 。根据进场飞行高度 l_r 确定下滑飞行段长度为 $(L-l_r)/\sin\theta$, 下滑飞行段速度采用油门闭环控制。无人机触地后, 随即断开动力, 开始滑跑。滑跑中, 纵向俯仰角用姿态控制, 给定值 0° , 同时设计安装刹车装置以减小着陆滑跑距离^[8]。

同时为了解决固定翼无人机在起降过程中容易受到风的扰动问题, 该研究采用自抗扰控制器, 提高飞机在起降过程的抗风扰能力。跟踪微分器输入 v 为系统给定信号, 输出 V_1 为跟随信号, V_2 为近似微分信号, 对于二阶积分串联型系统, 其最速反馈闭环系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = r \cdot \sin\left(x_1 + v(t) - \frac{x_2^2}{r}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $x_1(t)$ 将在加速度 r 的限制下最快的跟踪输入信号 $v(t)$, $x_1(t)$ 充分接近 $v(t)$ 时, 可认为 $x_1(t)$ 为 $v(t)$ 的近似微分^[7]。对此系统建立状态观测器为:

$$\begin{cases} \dot{e} = a_1 \\ \dot{a}_1 = a_2 - \alpha_1 f(e, z_1, l) \\ \dot{a}_2 = a_3 - \alpha_2 f(e, z_2, l) \\ \dot{a}_3 = a_3 - \alpha_3 f(e, z_3, l) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $f(e, z, l)$ 为内部扰动, a_1 、 a_2 、 a_3 扩张状态观测器的输出, a_1 、 a_2 、 a_3 为扩张状态观测器的可调增益参数。自抗扰控制器的非线性误差反馈有两种组合方式, 本研究采用的如式(6):

$$u = f(e_1, c * e_2, r, l) \quad (6)$$

自抗扰控制器输出的控制量 u 为:

$$u = (u - a_3) / b \quad (7)$$

通过系统模型可直接确定补偿因子 b , 只需对阻尼系数 c 和精度因子 l 进行细调。调节过程中 a_2 和 c 都有微分作用, 二者可协调取值。

六、巡检路径实时数据传输与处理

固定翼无人机在自动巡检前期, 需先发现视场中的可疑小目标, 本研究采用基于目标特性的小目标检测手段, 对图像进行目标检索^[9]。基于目标特性的小目标检测算法如图7所示。

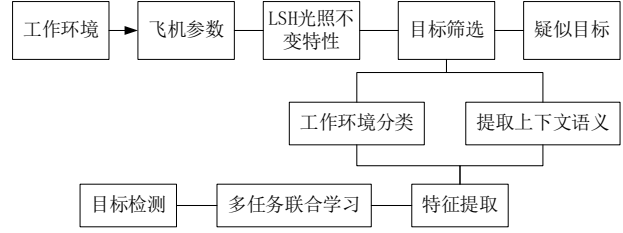


图7 基于目标特性的小目标检测算法流程图

Fig.7 Flow chart of small object detection algorithm based on target characteristics

本研究用极坐标进行梯度方向直方图 (Histogram of Oriented Gradients, HOG) 旋转不变特征提取目标。HOG 通过对图像像素点进行微分运算得到目标边缘大小和方向, 并统计相应 block 块内的梯度方向直方图^[11]。假设像素梯度为 d , 梯度方向为 $\nabla f(d)$, 则该像素点的分布函数 h 可用冲击响应函数表示:

$$h(\theta) = \|l\| \delta(\theta - \nabla f(d)) \quad (8)$$

令 P_1 为空间聚集的卷积核函数, P_2 为局部归一化的卷积核函数。 L 为梯度场, \hat{f} 为函数 h 的傅里叶系数, \tilde{F}_m 为傅里叶变换的系数, 则有:

$$\tilde{F}_m = \frac{\hat{f} P_1}{\|L\|^2 P_2} \quad (9)$$

傅里叶基的角度部分完全正交^[12], 构建一个描述 FHOG 的 2D 基。令 $W_{k,m}$ 为原始的 FHOG 特征, $W'_{k,m}$ 为旋转 θ 角后的 FHOG 特征, 则有:

$$W'_{k,m} = e^{-i\theta(m-k)} W_{k,m} \quad (10)$$

基于目标特性的候选目标提取方案的方法提取候选目标, 对候选目标提取 FHOG 特征进行目标确认^[13]。确认目标后, 流程如图8所示。

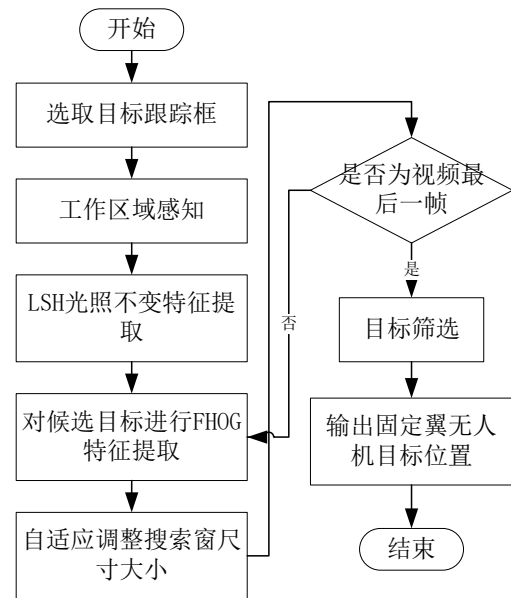


图8 固定翼无人机目标跟踪系统软件流程图

Fig.8 Software flowchart of fixed wing unmanned aerial vehicle target tracking system

成像探测器生成现场图像传输给目标检测模块，实时处理图像并检测现场目标，检测结果以图像的形式发送到小型移动地面站，地面控制通过遥控器对检测结果进行选择跟踪^[14]。

七、系统实现与部署

为了验证该研究是否可以顺利异地起降并大范围巡检，搭建异地起降大范围自动巡检实验的软硬件平台：包括基于嵌入式 Debian 操作系统的控制系统硬件和自动飞控巡检的软件算法设计^[15]。选择偏僻且人少的郊区作为试飞区域，通过多点布设机巢，无人机在机巢网内异地起降和持续工作。利用多机巢组网、异地起降和视觉定位等技术，初步建成无飞行示意图如图9所示。



图9 试验场地示意图

Fig.9 Schematic diagram of the experimental site

该区域设有专门跑道，使用样机在上述平台开展 X plane 半物理仿真实验，在巡检过程中设置了7个航迹点和3个目标点，该实验航迹规划如图10所示。



图10 Xplane 半物理仿真航迹规划图

Fig.10 Xplane semi physical simulation trajectory planning diagram

样机物理参数见表1。

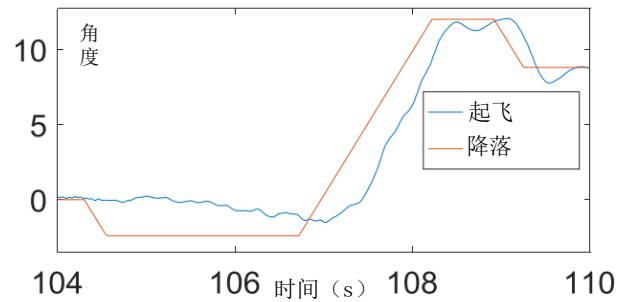
表1 样机主要参数

Tab.1 Main Parameters of Prototype

类型	参数
起飞重量	6000g
飞机长度	1500mm
副翼翼展	2200mm
展弦比	5.8
机翼面积	0.82
垂尾翼展	340mm
水平尾翼展	820mm
螺旋桨直径	480mm

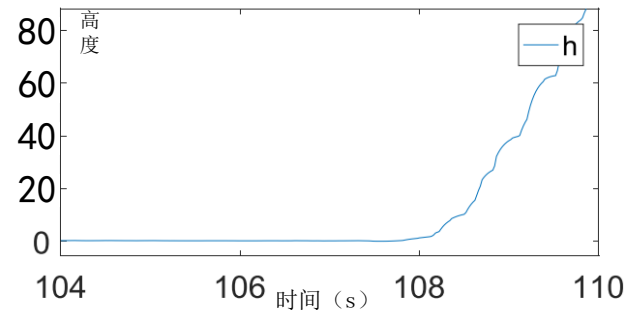
八、系统成效分析

下面验证异地起降自动巡检效果，飞行试验起降过程主要数据如图11所示。



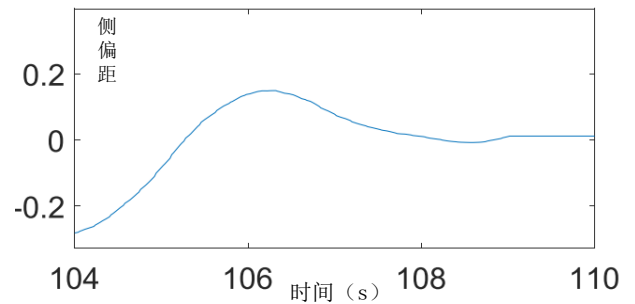
(a) 起降俯仰角曲线图

(a) Elevation angle curve diagram for takeoff and landing



(b) 高度曲线图

(b) Height Curve Chart



(c) 侧偏距曲线图

(c) Lateral offset curve graph

图11 起降过程的主要数据

Fig.11 Main data of takeoff and landing process

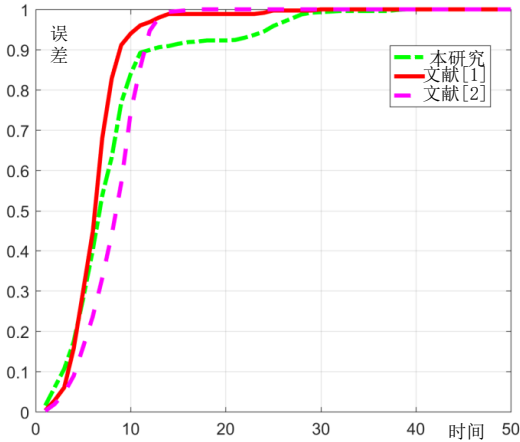
滑跑至一定速度后，无人机俯仰角给定增大至 14° ，图11 a 显示无人机约 108s 离地。说明该研究起降过程具有非常有效的稳定性。

为了验证该研究在巡检效率和范围上更具优势，基于 Python 进行仿真实验，选择位置记录（Location Record，LR）类数据库对本研究、文献 [1] 和文献 [2] 使用算法进行横向比较巡检，效率越高巡检的范围越大，实验数据如表2所示。

表2 不同研究方法在不同测点的误差数据对比表
Tab.2 Comparison of Error Data of Different Research Methods at
Different Measurement Points

测点	测绘类型	X 误差	Y 误差	Z 误差
1	文献 [1]	0.35	0.34	0.41
	文献 [2]	0.29	0.32	0.40
	本研究	0.15	0.11	0.12
2	文献 [1]	0.29	0.31	0.61
	文献 [2]	0.23	0.24	0.24
	本研究	0.11	0.24	0.24
3	文献 [1]	0.32	0.72	0.74
	文献 [2]	0.26	0.25	0.65
	本研究	0.11	0.14	0.11

由表 2 可知, 本研究方法在 X、Y、Z 三个方向的平均误差均小于文献 [1]、文献 [2] 的方法, 表明本研究方法在整体上具有更高的精准度, 提高整体巡检过程的效率。不同研究方法巡检效率对比图如图 12 所示。



九、经验总结

本研究基于嵌入式 Debian 操作系统, 利用自抗扰控制器使固定翼无人机完成异地起降, 采用 HOG 通过对图像的像素点进行微分运算得到目标的边缘大小和方向, 并统计得到相应 block 块内的梯度方向直方图进行巡检区域目标的检测, 并能通过图传模块传回地面显示完成巡检工作。该研究为固定翼无人机在大范围巡检任务中的应用提供一种高效、可靠的解决方案, 进一步提高无人机巡检的自动化水平, 降低巡检成本, 推动无人机巡检技术在更多领域的广泛应用。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突关系。

参考文献

- [1] 王珂, 李晓甜. 垂起固定翼无人机高速公路无人值守巡检系统应用研究 [J]. 江苏科技信息, 2021, 38(25): 5658.
- [2] 方卫华, 杨浩东, 谢双双, 等. 面向堤坝监测的无人机自动巡检系统设计 [J]. 江苏水利, 2024, (02): 14. DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2024.02.002.
- [3] 孙本良, 曹东, 薛鹏翔. 自旋旋翼无人机的起飞控制研究 [J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(01): 266270. DOI: 10.19344/j.cnki.issn16715276.2024.01.053.
- [4] 马国庆, 田秋扬, 朱波, 等. 孪生场景驱动的固定翼无人机进场自主着陆控制 [J/OL]. 控制理论与应用, 112[20240416]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240201.1506.002.html>.
- [5] 鲁亚飞, 陈清阳, 郭正. Aerosonde 全地形固定翼无人机发展与技术特点 [J]. 国防科技, 2023, 44(06): 5158. DOI: 10.13943/j.issn16714547.2023.06.07.
- [6] 程登峰, 林世忠, 尚文迪. 输电线路固定翼无人机多目标巡检线路优化 [J]. 自动化仪表, 2023, 44(12): 2125. DOI: 10.16086/j.cnki.issn10000380.2022120051.
- [7] 夏知胜, 陈诚, 杨爱斌. 基于遗传算法优化 PID 的固定翼无人机俯仰控制设计 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(34): 4144. DOI: 10.19981/j.CN231581/G3.2023.34.010.
- [8] 肖锦涛, 谭先琳, 苏良, 等. 固定翼无人机的结构优化设计 [J]. 装备制造技术, 2023, (09): 227228+232.
- [9] Watanabe K, Shibata T, Ueba M. Derivation and Flight Test Validation of Maximum Rate of Climb during Takeoff for FixedWing UAV Driven by Propeller Engine[J]. Aero-space, 2024, 11(3): 233.
- [10] Wang Z, Wang T, Li T, et al. Distributed observerbased close formation control for UAV swarm under outside disturbances and wake interferences[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(5): 106651.
- [11] 方卫华, 杨浩东, 谢双双, 等. 面向堤坝监测的无人机自动巡检系统设计 [J]. 江苏水利, 2024, (02): 14. DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2024.02.002.
- [12] 金涛, 黄俊波, 蔡澍雨, 等. 基于机器视觉的无人机自动巡检定位控制技术 [J]. 电子设计工程, 2023, 31(21): 104108. DOI: 10.14022/j.issn16746236.2023.21.021.
- [13] 蒙华伟, 刘高, 王丛, 等. 基于无人机影像的输电线路自动巡检系统 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39(08): 193196+200.
- [14] 张霞, 陈玉洁, 唐炉亮, 等. 基于无人机自动巡检技术的大坝病害观测站设计策略研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 134138.
- [15] 王哲峰, 张金营, 曹亚南, 等. 基于工业无线网的输电线路无人机自动巡检系统 [J]. 自动化应用, 2023, 64(07): 46.

垃圾发电厂设备提标改造与技术管理的机械工程路径

刘毅

身份证号: 410883198302286559

DOI:10.61369/ERA.2025080034

摘 要 : 本文聚焦垃圾发电厂设备提标改造与技术管理的机械工程路径, 深入分析设备现状, 探讨安装、现场管理及技术管理中的机械工程应用。研究指出, 通过优化安装工艺、强化现场环境与维护管理、提升技术管理水平并加强人员培训, 可显著提高设备性能与运行效率, 满足环保政策要求, 为垃圾发电厂可持续发展提供理论与实践支持。

关 键 词 : 垃圾发电厂; 设备提标改造; 机械工程

Mechanical Engineering Path for Upgrading and Technical Management of Equipment in Waste to Energy Plants

Liu Yi

ID: 410883198302286559

Abstract : This article focuses on the mechanical engineering path of upgrading and technical management of garbage power plant equipment, deeply analyzes the current status of equipment, and explores the application of mechanical engineering in installation, on-site management, and technical management. Research has shown that optimizing installation processes, strengthening on-site environment and maintenance management, improving technical management levels, and enhancing personnel training can significantly improve equipment performance and operational efficiency, meet environmental policy requirements, and provide theoretical and practical support for the sustainable development of waste to energy plants.

Keywords : garbage power plant; equipment upgrading and renovation; mechanical engineering

引言

垃圾发电作为一种有效的城市垃圾处理方式, 近年来在能源回收与环境保护领域的重要性日益凸显。随着我国对环境保护要求的不断提高, 特别是《生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据标记规则》(2020年颁布) 的实施, 垃圾发电厂面临着更为严格的排放标准和运行效率要求。在此背景下, 垃圾发电厂的设备提标改造与技术管理成为保障其可持续发展的关键环节。这一研究不仅有助于解决垃圾发电厂当前面临的实际问题, 还为行业的技术升级和管理优化提供了理论支持与实践指导, 具有重要的学术价值和现实意义。

一、垃圾发电厂设备现状分析

(一) 垃圾发电厂设备组成与功能

垃圾发电厂主要由垃圾焚烧炉、烟气处理设备和汽轮发电机组等构成。垃圾焚烧炉是核心设备, 其通过高温焚烧将垃圾转化为热能, 焚烧炉通常由炉排、燃烧室和余热锅炉组成, 炉排负责垃圾的均匀铺展与焚烧, 燃烧室提供高温环境, 余热锅炉则回收热能转化为蒸汽。烟气净化设备用于净化焚烧产生的烟气, 防止污染物排放, 包括除尘器、脱硫塔、脱硝装置等, 通过物理、化学方法去除颗粒物、酸性气体和氮氧化物等污染物, 确保烟气达标排放。汽轮发电机组将蒸汽的热能转化为机械能, 进而驱动发电机发电, 其主要由汽轮机和发电机组成, 汽轮机通过蒸汽膨胀做功, 发电机将机械能转化为电能^[1]。这些设备协同工作, 实现垃圾

的高效处理与能源回收。

(二) 设备运行现状与问题

当前垃圾发电厂设备运行中存在诸多问题。垃圾焚烧炉常因垃圾成份复杂、热值不稳定导致燃烧不充分, 出现密相区结焦、水冷壁腐蚀等现象, 影响焚烧效率与锅炉使用寿命。烟气处净化设备在高负荷运行下, 易出现堵塞、漏气等问题, 导致烟气净化效果下降, 难以满足环保要求。汽轮发电机组易受蒸汽品质、润滑系统故障影响, 出现汽轮机叶片腐蚀、发电机绝缘老化等问题, 降低发电效率与设备可靠性。这些问题的根源在于设备设计与垃圾特性不匹配、运行维护不到位、技术更新滞后等, 导致设备运行效率低下, 制约了垃圾发电厂的稳定运行与可持续发展^[2]。

二、垃圾发电厂设备提标改造的机械工程路径

（一）提标改造的目标与原则

垃圾发电厂设备提标改造旨在提升设备的性能指标，以满足更高的环保标准和运行效率要求。具体目标包括提高垃圾焚烧炉的燃烧效率，降低污染物排放，提升汽轮发电机组的发电效率和可靠性，以及增强烟气处理设备的净化效果，确保烟气达标排放。在改造过程中，应遵循以下原则：经济性原则，即在保证改造效果的前提下，合理控制成本，实现经济效益与环境效益的统一；可靠性原则，确保改造后的设备能够长期稳定运行，减少故障停机时间；先进性原则，采用先进的技术和设备，提升设备的自动化和智能化水平；安全性原则，确保改造过程和设备运行符合安全标准，保障人员和设备的安全。这些原则有助于确保提标改造工作的顺利进行和长期效益的实现^[3]。

（二）机械工程在设备提标改造中的应用

机械工程新技术在垃圾发电厂设备提标改造中发挥着重要作用。以垃圾焚烧炉为例，采用先进的机械传动技术可以优化炉排的运行性能，提高垃圾的焚烧效率。通过引入先进的密封技术，可以有效减少炉排轴端漏风现象，降低能耗并提高燃烧稳定性。在汽轮发电机组的改造中，应用先进的润滑系统可以减少设备磨损，延长设备使用寿命，同时提高发电效率。此外，利用机械工程中的自动化控制技术，可以实现对设备运行参数的实时监测和精准调控，进一步提升设备的运行效率和可靠性。

三、垃圾发电厂设备安装的机械工程路径

（一）设备安装前的准备工作

1. 技术准备

设备安装前的技术准备是确保安装工作顺利进行的关键环节。首先，需要制定详细的设备安装方案，包括安装流程、技术标准、质量控制点等。安装方案应由专业的机械工程师团队根据设备的技术要求和现场条件进行编制，并经过严格的审核流程，确保方案的科学性和可行性^[4]。同时，对安装人员进行技术培训也是必不可少的。培训内容应涵盖设备的结构原理、安装工艺、操作规范以及安全注意事项等，通过理论学习和实际操作相结合的方式，使安装人员熟练掌握安装技能，提高其技术水平和操作熟练度，为高质量完成设备安装任务奠定坚实基础。

2. 物资准备

物资准备是设备安装顺利实施的重要保障。安装所需材料与工具的采购应严格按照设备安装方案的要求进行，选择符合质量标准的材料和先进的工具设备。采购完成后，需对材料和工具进行严格的检验，确保其质量和性能符合安装要求，避免因材料或工具问题导致安装过程中出现延误或质量问题。设备到货后，要进行详细的验收工作，检查设备的外观、数量、型号是否与合同一致，核对设备的技术参数和随机文件是否齐全，对设备的关键部件进行必要的检测，确保设备在运输过程中未受到损坏^[5]。验收合格后，应将设备妥善存储于符合要求的仓库中，做好防潮、防

尘、防腐等措施，确保设备在安装前保持良好的状态，为后续的安装工作提供可靠的物资保障。

（二）设备安装过程中的机械程控制

1. 安装工艺的优化

在垃圾发电厂设备安装过程中，采用先进的机械安装工艺是提高安装质量的关键。例如，在大型设备如垃圾焚烧炉和汽轮发电机组的安装中，应用模块化安装工艺可以显著提高安装效率和质量。通过将设备分解为多个模块进行预制和组装，不仅减少了现场安装的工作量，还提高了安装的精度和可靠性^[6]。此外，采用先进的起重和搬运设备，如液压提升装置和自动化搬运机器人，可以有效减少设备安装过程中的损伤和变形，确保设备的安装精度。工艺优化对设备性能有着重要影响，它能够减少设备运行中的故障率，延长设备的使用寿命，同时提高设备的运行效率和稳定性，为垃圾发电厂的高效运行提供有力保障。

2. 安装质量的控制

安装质量的控制是确保设备安装符合标准的重要环节。机械工程检测技术在安装质量控制中发挥着关键作用。例如，利用激光测量技术可以对设备的安装精度进行高精度检测，确保设备的水平度、垂直度和同轴度等参数符合设计要求。超声波检测和无损探伤技术可用于检测设备焊缝和关键部件的内部缺陷，及时发现并处理潜在的质量问题^[7]。同时，建立完善的质量控制体系是确保安装质量的重要保障。该体系应包括质量检查标准、检验流程、质量记录和质量改进机制等。通过定期的自检、互检和第三方检验，确保安装过程中的每个环节都符合质量标准。

四、垃圾发电厂设备现场管理与技术管理的机械工程路径

（一）现场管理的机械工程策略

1. 设备运行环境的机械工程优化

垃圾发电厂设备的运行环境对其性能和寿命有着重要影响。通过机械工程手段，可以有效改善设备运行的温度、湿度等环境条件。例如，采用高效的通风系统和空调设备，可以调节设备运行区域的温度和湿度，确保设备在适宜的环境中运行。对于高温设备如垃圾焚烧炉，通过优化冷却系统的设计，采用先进的冷却技术和材料，可以有效降低设备表面温度，减少热应力对设备的损害^[8]。此外，通过安装防尘、防水设施，可以防止灰尘和水分对设备的腐蚀和损坏。

2. 现场设备维护的机械工程支持

机械工程工具与设备在垃圾发电厂现场设备的日常维护中发挥着重要作用。例如，利用先进的检测设备如红外热成像仪、振动分析仪等，可以实时监测设备的运行状态，及时发现潜在的故障隐患。这些工具能够提供精确的数据支持，帮助维护人员快速定位问题并采取有效的维修措施。同时，建立基于机械工程的维护标准与流程是确保设备维护质量的关键。维护标准应明确设备的维护周期、维护内容和质量要求，确保每次维护都能达到预期效果。维护流程则应规范维护操作的步骤和方法，确保维护工作

的标准化和规范化。

（二）技术管理的机械工程方法

1. 设备技术档案的机械工程化管理

在垃圾发电厂的技术管理中，设备技术档案的机械工程化管理至关重要。通过采用机械工程信息管理系统（MEIMS），可以实现设备技术档案的数字化、标准化和动态化管理。MEIMS能够整合设备的设计参数、安装记录、运行数据、维护历史等信息，形成全面的设备技术档案。这种管理方式不仅提高了档案的准确性和完整性，还便于快速查询和分析设备的运行状态和历史数据。技术档案管理对设备全生命周期管理具有重要意义，它为设备的运行维护、故障诊断、技术升级和报废决策提供了科学依据，有助于优化设备管理流程，降低管理成本，提高设备的可靠性和运行效率，从而延长设备的使用寿命，提升垃圾发电厂的整体运营效益。

2. 技术创新与升级的机械工程路径

机械工程在垃圾发电厂设备的技术创新与升级中扮演着关键角色。例如，在垃圾焚烧炉的技术升级中，采用先进的燃烧控制系统和热解技术，可以显著提高垃圾的燃烧效率，减少污染物排放^[9]。通过引入机械工程的自动化控制技术，实现对焚烧炉燃烧过程的精确调控，优化燃烧条件，提高能源利用效率。技术创新对提升设备性能和竞争力具有重要作用。例如，采用高效的烟气净化技术，结合机械工程的优化设计，可以有效去除烟气中的有害物质，确保排放达标，同时降低运行成本。技术创新不仅提升了设备的性能和可靠性，还增强了垃圾发电厂在市场中的竞争力，推动行业的可持续发展。

（三）人员管理与机械工程培训

1. 现场人员的机械工程技能培训

针对垃圾发电厂现场操作人员的机械工程技能培训是提升其

操作水平和设备运行效率的重要手段。培训课程应结合实际工作需求，设计包括设备操作规程、机械原理、故障排除、安全规范等内容的模块化课程。通过理论讲解、实际操作演示和现场模拟练习相结合的方式，使操作人员深入理解设备运行机制，掌握常见故障的快速诊断与处理方法。

2. 技术管理人员的机械工程知识更新

随着机械工程领域的不断发展，新材料、新技术不断涌现，对垃圾发电厂技术管理人员进行知识更新培训至关重要。培训内容应涵盖最新的机械设计理论、智能监控技术、节能减排技术等前沿知识。通过参加专业研讨会、在线课程和实地考察先进企业等方式，技术管理人员能够及时了解行业最新动态，掌握先进的管理理念和技术应用方法^[10]。知识更新有助于提升技术管理人员的决策能力和创新能力，使其能够更好地规划设备技术升级路径，优化设备管理流程，提高垃圾发电厂的技术管理水平和整体运营效益，推动企业可持续发展。

五、总结

本文系统探讨了垃圾发电厂设备提标改造与技术管理的机械工程路径，从设备现状分析到安装、现场管理与技术管理的全过程进行了详细阐述。通过优化安装工艺、强化现场管理、提升技术管理水平以及加强人员培训，垃圾发电厂设备的性能和运行效率得到了显著提升。机械工程新技术的应用不仅优化了设备运行环境，还提高了设备的可靠性和使用寿命。同时，人员的专业技能提升为设备的高效运行提供了有力保障。这些措施的实施，为垃圾发电厂的可持续发展奠定了坚实基础，也为行业内的技术管理提供了有益的参考和借鉴。

参考文献

- [1] 龙伟. 入厂煤样智能化管理系统设备设计得失浅析 [C]//2017年《运煤技术》编委会年会论文集. 2017:1-21.
- [2] 罗鸿涛. 浅谈水力发电厂技术管理 [J]. 通讯世界, 2018(3):294-295.
- [3] 赵强, 彭柯嘉. 水利发电厂技术管理应用及加强措施分析 [J]. 信息化建设, 2015(12):265.
- [4] 郭静静. 火力发电厂能耗管理以及节能技术的运用分析 [J]. 应用能源技术, 2022(11):38-40.
- [5] 董传彬. 数字化技术在燃煤发电厂燃料管理中的应用 [J]. 电力系统装备, 2022(9):208-210.
- [6] 魏利辉. 浅析加强火力发电厂生产技术管理的控制措施 [C]//2015清洁高效燃煤发电技术交流研讨会论文集. 2015:179-193.
- [7] 吴心飞, 许卫新. 火力发电厂中的集控系统运行技术及管理 [J]. 工业设计, 2016(1):182,184.
- [8] 高再超. 关于火力发电厂运行中的集控系统运行技术及管理分析 [J]. 数码设计 (上), 2020,9(1):128.
- [9] 王启东. 电气工程自动化背景下的发电厂改造初探 [J]. 中小企业管理与科技, 2020(28):134-135.
- [10] 杨劲, 朱光涛. 火力发电厂改造项目的设计管理研究 [J]. 南方能源建设, 2017,4(z1):205-208,215.

