

现代工程学

Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2024 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co., Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第1卷 第7期 2024年9月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



材料工程 | MATERIALS ENGINEERING

- 001 不锈钢材料的性能提升与家电产品耐用性研究 高天元
Research on the Performance Improvement of Stainless Steel Materials and the
Durability of Home Appliances Gao Tianyuan
- 004 国外援潜救生装备主要研制机构发展现状及趋势分析 王瑶, 胡中惠, 姜磊
Analysis of the Development Status and Trend of Foreign Diving Rescue
Equipment Research Institutions Wang Yao, Hu Zhonghui, Jiang Lei
- 007 高分子化工中功能性聚合物的精准合成与调控 吴斌, 王力, 林青儿, 谢芳玉
Precise Synthesis and Regulation of Functional Polymers
in Polymer Chemical Engineering Wu Bin, Wang Li, Lin Qing'er, Xie Fangyu
- 010 橡胶改性沥青对高速公路噪声抑制性能的影响研究 郑世勇
Research on the Influence of Rubber Modified Asphalt on the Noise
Suppression Performance of Expressways Zheng Shiyong
- 013 微发泡聚丙烯的制备及其在汽车门板中的应用 巩丽, 孙文强, 刘光桦
Preparation of Polypropylene with Different Melt Strength and the
Application in Automotive Door Panels Gong Li, Sun Wenqiang, Liu Guangye
- 017 市政工程水泥混凝土道路沥青化改造施工技术 罗锦州
Technical Construction of Asphalt Transformation of Municipal
Engineering Cement Concrete Road Luo Jinzhou

建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 020 房屋建筑工程监理现场安全管理策略探讨 陈蛟
Discussion on On-site Safety Management Strategies for Housing
Construction Project Supervision Chen Jiao
- 023 拟建地块与规划轨道交通的影响分析 储德华
Analysis of the Impact of Proposed Land Parcel and Planned Rail Transit Chu Dehua
- 026 分析水利水电建筑工程中的基础灌浆施工 姜湘丰
Analyze the Foundation Grouting Construction in Water Conservancy
and Hydropower Construction Projects Jiang Xiangfeng
- 029 复杂地质条件下建筑施工排水方案优化与实践 李敏
Optimization and Practice of Construction Drainage Schemes under
Complex Geological Conditions Li Min
- 032 浅议近代文物建筑安全评估与加固——以某近代文物建筑修缮工程为例 刘君
Discussion on Safety Assessment and Reinforcement of Modern Cultural Relics Building
— Taking a Modern Cultural Relic Building Repair Project as an Example Liu Jun
- 036 工程项目可持续发展策略研究 柳莹
Research on Sustainable Development Strategies for Engineering Projects Liu Ying
- 039 BIM技术在建筑工程造价管理中的应用分析 彭玲艳
Analysis of the Application of BIM Technology in Construction Project
Cost Management Peng Lingyan
- 042 建筑施工安全管理中常见问题及应对策略 王磊
Common Problems and Countermeasures in Construction
Safety Management Wang Lei

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

045	压力锅总装中的 LCIM 技术应用与成本优化策略 The Application of LCIM Technology and Cost Optimization Strategy in Pressure Cooker Assembly	刘春贵 Liu Chungui
048	热挤压锻造的工艺的系统集成与优化 Systematic Integration and Optimization of the hot Extrusion Forging Process	冯立臣, 梁琦 Feng Lichen, Liang Qi
052	某型嵌套双互锁结构无人潜航器大口径包装箱密封设计 Sealing Design of large-diameter Packaging box for a Certain type of Nested Double Interlock Structure Unmanned Submersible	皇甫宁, 原瑜点, 梁琦 Huangfu Ning, Yuan Yudian, Liang Qi
056	中国 Chiplet 技术发展路线图与产业政策建议 China's Chiplet Technology Development Roadmap and Industrial Policy Suggestions	李岳龙, 冯明宪, 钟华应, 张志伟 Li Yuelong, Feng Mingxian, Zhong Huaying, Zhang Zhiwei
059	大件运输船运输过程中的风险因素及安全评价 Risk factors and Safety Assessment During the Transportation Process of Large Cargo Ships	赵少林, 孙钰婷, 黄滢宇, 刘峻赫 Zhao Shaolin, Sun Yuting, Huang Yingyu, Liu Junhe
063	基于质量管理工具的军用飞机事故分析 Analysis of Military Aircraft Accidents Based on Quality Management Tools	王知翰, 蒋平 Wang Zhihan , Jiang Ping
068	固定式可燃气体报警器检定方法的研究 Research on the Calibration Method of Fixed Combustible Gas Alarm Devices	所彬 Suo Bin
071	高效真空泵组气冷罗茨泵传动齿轮损坏分析及处理措施 Analysis and Treatment Measures of Transmission Gear Damage of Air Cooled Roots Pump in High Efficiency Vacuum Pump Set	刘旭东 Liu Xudong

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

074	电力自动化系统在现代电力工程中的应用与优化 Application and Optimization of Power Automation System in Modern Power Engineering	胡豪跃 Hu Haoyue
077	电气自动化系统中变频器应用与技术管理研究 Research on the Application and Technical Management of Frequency Converters in Electrical Automation Systems	王刚 Wang Gang
080	内部审计在新能源企业 ESG 治理结构中的嵌入路径研究 Research on the Integration Path of Internal Audit into the ESG Governance Structure of New Energy Enterprises	杜雪芬 Du Xuefen
083	水利水电工程管理中存在的问题及对策 Problems and Countermeasures in the Management of Water Conservancy and Hydropower Projects	罗彦文 Luo Yanwen
086	智能采矿技术在深部资源开采中的应用与挑战 The Application and Challenges of Intelligent Mining Technology in Deep Resource Exploitation	王安豪 Wang Anhao
089	基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成与环境风险控制研究 Research on the Integration of Efficient Disposal Technologies for Municipal Sludge and Environmental Risk Control from the Perspective of Resource Utilization	王付平 Wang Fuping

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

092	低轨道卫星信关站射频分系统的关键技术与创新设计 Key Technologies and Innovative Design of Rf Subsystem of Low Orbit Satellite Gateway Station	李文裕 Li Wenyu
095	AI 赋能信息通信技术服务：技术管理与创新实践 AI Empowering ICT Services: Technology Management and Innovation Practices	许斌 Xu Bin
098	电力公司数字化管理平台建设与应用研究 Research on Construction and Application of Digital Management Platform for Electric Power Companies	王骋宇 Wang Chengyu
101	大疆机场 3 与 Matrice 4 系列无人机电力巡检技术与应用研究 Research on Power Inspection Technology and Application of DJI Airport 3 and Matrice 4 Series Unmanned Aerial Vehicles	吴佳松, 余尚泽, 詹仕钰, 张鑫诚, 唐磊 Wu Jiasong , Yu Shangze , Zhan Shiyu, Zhang Xincheng , Tang Lei
105	浅谈医院三级等保与网络安全设备的协同构建 A Brief Discussion on the Collaborative Construction of the Third-level Information Security Protection for Hospitals and Network Security Devices	张伟强 Zhang Weiqliang

不锈钢材料的性能提升与家电产品耐用性研究

高天元

广东美的暖通设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/ME.2024070002

摘要： 不锈钢材料因其优异的耐腐蚀性和力学性能，在家电制造领域具有重要应用价值。随着家电行业向高端化、智能化、绿色化转型，不锈钢性能的优化技术（如合金化调控、表面改性及智能制造工艺）成为提升家电产品耐用性的关键。本文探讨了不锈钢性能提升的关键技术及其对家电耐用性的影响机制，分析了新型不锈钢材料的研发方向和智能制造技术的应用前景，旨在为家电行业提供高效、可持续的解决方案。

关键词： 不锈钢；家电耐用性；性能提升

Research on the Performance Improvement of Stainless Steel Materials and the Durability of Home Appliances

Gao Tianyuan

Guangdong Midea Warm Air Conditioning Equipment Co., Ltd. Foshan, Guangdong 528000

Abstract： Stainless steel materials are highly valued in the home appliance manufacturing field due to their excellent corrosion resistance and mechanical properties. As the home appliance industry transitions towards high-end, intelligent, and green development, the optimization technologies of stainless steel performance (such as alloying control, surface modification, and intelligent manufacturing processes) have become crucial for enhancing the durability of home appliances. This paper explores the key technologies for improving stainless steel performance and their impact mechanisms on the durability of home appliances, analyzes the development directions of new types of stainless steel materials and the application prospects of intelligent manufacturing technologies, and aims to provide efficient and sustainable solutions for the home appliance industry.

Keywords： stainless steel; appliance durability; performance enhancement

引言

不锈钢材料因其优异的耐腐蚀性、力学性能和美观性，已成为家电制造领域的关键材料，直接影响产品的耐用性和市场竞争力。2024年7月，国家发展改革委、财政部颁布《关于加力支持大规模设备更新和消费品以旧换新的若干措施》，统筹安排3000亿元左右超长期特别国债资金，进一步推动家电行业向高端化、智能化、绿色化转型，刺激不锈钢需求增长。在该政策推动下，预计2025年家电领域不锈钢消费量将提升9.96%至337.92万吨。当前，不锈钢性能优化技术（如合金化调控、表面改性及智能制造工艺）的进步显著提升了家电产品的使用寿命，而高熵合金、环保不锈钢等新型材料的研发则为行业可持续发展提供了新方向。与此同时，消费者对家电耐久性和健康属性的需求升级，促使企业采用更高性能的不锈钢材料，如316L不锈钢在高端厨电中的应用比例持续上升。在此背景下，研究不锈钢性能提升与家电耐用性的关联机制，对推动产业升级、响应政策导向具有重要现实意义。

一、不锈钢材料的基本特性与家电应用现状

（一）不锈钢材料的分类与基本性能

不锈钢根据其微观组织和合金成分可分为奥氏体、铁素体和马氏体三大类。奥氏体不锈钢（如304、316）以高铬镍成分为主，具有优异的耐腐蚀性、良好的塑性和焊接性，适用于高湿、高盐环境；铁素体不锈钢（如430）含铬量高但镍含量低，耐氯化物应力腐蚀性能较好，但韧性较低，多用于低载荷部件；马氏体

不锈钢（如410）通过热处理可调整硬度和强度，但耐蚀性相对较差，适用于耐磨性要求较高的场景^[1]。力学性能方面，奥氏体不锈钢表现出较高的延展性和韧性，而马氏体不锈钢则可通过淬火和回火获得较高硬度和抗拉强度。耐腐蚀性主要取决于铬含量及表面钝化膜的形成能力，其中钼元素的添加可显著提升抗点蚀性能。

（二）不锈钢在家电产品中的应用现状

不锈钢因其耐腐蚀、易清洁和美观等特点，广泛应用于冰

箱、洗衣机、厨具等家电产品^[2]。在冰箱制造中，304不锈钢常用于内胆和门板，其耐酸碱和抗微生物特性可延长食品储存安全性；洗衣机滚筒多采用430不锈钢，兼顾耐水腐蚀和成本效益；高端厨具（如抽油烟机、燃气灶）则倾向于采用316不锈钢，以抵抗高温油烟的氧化和腐蚀。不锈钢的耐用性直接影响家电产品的生命周期，例如，奥氏体不锈钢的耐蚀性可减少冰箱内胆的锈蚀风险，而马氏体不锈钢的高硬度可确保刀具和搅拌机部件的长期耐磨性^[3]。随着消费者对家电品质要求的提升，高性能不锈钢的应用比例正逐步扩大。

二、不锈钢材料性能提升的关键技术

（一）合金化与微观结构优化

不锈钢性能的优化主要依赖合金化与微观结构调控。铬（Cr）作为核心元素，含量提升可增强钝化膜稳定性，显著提高耐腐蚀性；镍（Ni）的加入促进奥氏体相形成，改善低温韧性和加工性能；钼（Mo）的引入则有效抑制点蚀和缝隙腐蚀，尤其适用于高氯环境^[4]。热处理工艺通过调控晶界碳化物析出行为优化材料性能，如固溶处理可消除晶界贫铬区，提高耐晶间腐蚀能力；时效处理则用于马氏体不锈钢，通过析出强化相提升强度与硬度。晶粒细化技术（如控轧控冷）能够同时提高材料的强度和韧性，减少应力腐蚀开裂倾向。

（二）表面处理技术

表面改性技术是提升不锈钢耐磨与耐蚀性能的关键手段。电化学抛光通过选择性溶解表面微观凸起，降低粗糙度并形成均匀钝化膜，减少腐蚀起始点；物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）技术可在表面制备氮化钛、类金刚石碳等硬质涂层，显著提高耐磨性并阻隔腐蚀介质渗透^[5]。钝化处理利用硝酸或柠檬酸溶液去除表面游离铁并富集铬氧化物层，增强钝化膜致密性。激光表面重熔、微弧氧化等新兴技术通过快速凝固形成非晶或纳米晶表层，进一步优化耐蚀与抗疲劳性能，适用于高端家电部件的长寿命需求。

三、不锈钢性能提升对家电耐用性的影响机制

（一）耐腐蚀性能的提升与家电寿命的关系

1. 盐雾腐蚀与家电使用环境分析

家电产品的服役环境显著影响不锈钢的腐蚀行为。厨房环境中的高温高湿、油烟及酸性清洁剂加速不锈钢表面钝化膜的破坏，导致局部点蚀；沿海地区的高盐雾环境促进氯离子吸附，引发应力腐蚀开裂。洗衣机长期接触含氯洗涤剂，内筒焊缝处易发生缝隙腐蚀；冰箱门封处冷凝水积聚则可能诱发电化学腐蚀。不同环境下的腐蚀机制差异要求不锈钢材料具备针对性防护能力，如厨房电器需更高钼含量的奥氏体不锈钢，而沿海地区家电则需优化表面处理工艺以增强耐氯离子渗透性^[6]。

2. 耐蚀性优化策略的实证研究

对比304、316不锈钢及经PVD涂层处理的430不锈钢在盐雾

试验中的表现，316不锈钢因钼元素添加腐蚀速率降低40%；PVD氮化钛涂层使430不锈钢耐蚀性接近304水平。电化学测试表明，经激光重熔处理的马氏体不锈钢点蚀电位提升200mV，显著延长刀具使用寿命。加速老化实验显示，钝化处理后的冰箱内胆在模拟厨房环境下服役寿命延长3-5年。微观分析证实，晶界工程处理可减少50%的晶间腐蚀倾向，验证了微观结构优化对家电长期可靠性的关键作用^[7]。

（二）力学性能优化与家电结构耐久性

1. 疲劳强度与抗冲击性能研究

家电结构件在长期循环载荷作用下易发生疲劳失效，如洗衣机滚筒的周期性转动和冰箱门铰链的反复开合。奥氏体不锈钢虽具良好韧性，但低周疲劳性能需通过晶粒细化和氮合金化提升；马氏体不锈钢经回火处理后疲劳极限提高15%-20%，适用于高应力部件。冲击测试表明，冷作硬化处理的304不锈钢夏比冲击功达100J以上，可满足洗衣机内筒抗变形需求。有限元分析显示，优化后的不锈钢支架在10万次循环载荷后应力集中系数降低30%，显著延长结构寿命^[8]。

2. 轻量化设计与材料性能平衡

高强度铁素体不锈钢（如445J2）屈服强度达450MPa以上，在保持相同承载能力时可减薄冰箱面板厚度20%。双相不锈钢（如2205）通过两相组织协同作用实现强度-韧性最佳匹配，使洗碗机内胆重量减轻15%而不影响抗水压性能。拓扑优化设计结合激光焊接技术，使油烟机不锈钢壳体在减重30%情况下，固有频率仍避开常见振动区间。纳米析出强化型不锈钢的开发为家电轻量化提供了新途径，其比强度较传统材料提升40%以上。

四、家电产品中不锈钢材料的未来发展趋势

（一）新型不锈钢材料的研发方向

1. 高熵合金不锈钢的潜力

高熵合金不锈钢凭借其多主元设计理念展现出卓越的综合性能。由五种以上主元元素构成的CoCrFeNiMn系高熵合金，在800℃高温下仍保持稳定的奥氏体组织，抗氧化性能较传统304不锈钢提升2-3倍。其独特的晶格畸变效应使耐点蚀当量（PREN）值超过40，特别适用于高温高压环境下的烤箱内胆和蒸汽家电部件。高熵合金的加工硬化率显著高于常规不锈钢，制造的榨汁机刀具寿命延长50%以上。虽然目前成本较高，但随着制备工艺优化，其在高端家电领域的应用前景广阔^[9]。

2. 环保型不锈钢的开发

环保型不锈钢研发聚焦资源节约和环境友好特性。无镍奥氏体不锈钢采用锰氮复合替代镍元素，成本降低20%的同时维持相近的耐蚀性，已成功应用于洗衣机平衡环等非接触食品部件。超纯铁素体不锈钢通过将碳氮总量控制在150ppm以下，焊接性能改善30%，适用于整体式热水器内胆制造。氢能炼钢工艺生产的低碳不锈钢（碳足迹减少40%）正逐步应用于欧盟市场的厨电产品，符合ErP指令的生态设计要求。生物基不锈钢表面处理技术的开发进一步推动家电行业向循环经济模式转型^[10]。

（二）智能制造与不锈钢加工技术

1.3D打印技术在不锈钢家电部件中的应用

激光粉末床熔融（LPBF）技术可实现316L不锈钢复杂结构件的一次成型，孔隙率控制在0.5%以下，抗拉强度达传统锻造件的95%。拓扑优化设计的3D打印冰箱铰链，在减重25%前提下，疲劳寿命提升40%。选区激光熔化（SLM）成型的薄壁不锈钢热交换器，其流道表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu m$ ，换热效率提高15–20%。后处理热等静压（HIP）技术可消除内部缺陷，使打印件的耐腐蚀性能达到锻件标准。增材制造为个性化家电的不锈钢部件提供了新的解决方案。

2.智能化表面检测与耐久性预测

基于深度学习的视觉检测系统可实现不锈钢表面缺陷的在线识别，对0.1mm以上划痕的检出率达99.7%。多传感器融合技术结合涡流检测和红外热成像，能实时监测不锈钢焊接接头的微裂纹扩展。机器学习算法通过分析服役环境参数（温度、湿度、应力）与材料性能退化数据，预测家电不锈钢部件的剩余寿命，准确度超过90%。数字孪生技术构建的虚拟样机可模拟不同使用场景下的材料性能演变，为产品设计优化提供数据支持。

（三）家电行业标准与不锈钢选材优化

1.国际标准对比与性能要求

国际标准体系对家电用不锈钢的性能要求存在显著差异。ISO 16143-1规定食品接触用不锈钢的铅、镉迁移量限值较 ASTM A240更为严格，欧盟 EN 10088-2额外要求铬释放量需低于 $0.1 \mu g/cm^2$ 。美国 NSF/ANSI 51标准对洗碗机用不锈钢的耐盐雾腐蚀时间要求达到500小时，高于中国 GB/T 3280的300小时标准。日本 JIS G4303特别强调不锈钢在高温高湿环境下的抗应力腐

蚀性能，规定特定 Cl^- 浓度下的开裂时间阈值。这些差异直接影响出口型家电产品的材料选择，需根据目标市场进行针对性合规设计。

2.成本效益分析与选材建议

家电不锈钢选材应建立全生命周期成本评估模型。经济型方案推荐430不锈钢用于洗衣机外筒等非关键部件，材料成本较304降低30%且满足基本耐蚀需求。中高端产品采用氮合金化节镍型不锈钢（如201Cu），在保持奥氏体特性的同时降低原料价格波动风险。关键承力部件优选双相不锈钢2205，虽然单价高40%，但使用寿命延长3倍以上。表面处理工艺的选择需平衡初始投入与维护成本，PVD涂层相比传统电镀可使抽油烟机面板的维修周期从3年延长至8年。

五、总结

不锈钢性能提升的关键技术，包括合金化优化、微观结构调控及先进表面处理，显著增强了家电产品的耐用性。高铬镍组成分设计结合晶界工程，提高了材料的耐蚀性和力学性能；PVD涂层、激光处理等表面改性技术进一步延长了关键部件的使用寿命。研究表明，通过材料–工艺协同优化，家电不锈钢部件的服役寿命可提升30%–50%。未来研究应聚焦材料–工艺–设计一体化策略，开发智能预测模型以优化选材方案，同时推动高熵合金、环保不锈钢等新型材料的产业化应用。智能制造技术与数字化寿命评估方法的结合，将为家电行业提供更高效、可持续的解决方案。

参考文献

- [1]王晴晴,王涵翰,李涛,等.不锈钢镀铬层结合力提升研究[J].长沙航空职业技术学院学报,2023,23(4):1–3.
- [2]张延娜,王立达,孙文,等.燃料电池不锈钢双极板 Ni/Cr–C 镀层的制备与性能研究[J].材料保护,2021,54(5):6.
- [3]吴洋.不锈钢应用及其表面处理技术分析[J].中国设备工程,2017(13):2.
- [4]王晴晴,王涵翰,李涛,等.不锈钢镀铬层结合力提升研究[J].长沙航空职业技术学院学报,2023,23(4):1–3.
- [5]管海陆.碳纤维/不锈钢极薄带复合材料抗冲击性能研究[D].太原理工大学,2023.
- [6]张肖飞.316LN奥氏体不锈钢耐腐蚀性能研究[D].安徽工业大学,2021.
- [7]刘志远,钱波.316L/碳化钎复合材料 SLM 成形性能强化研究[J].粉末冶金工业,2019,29(6):5.
- [8]马文远.双相不锈钢热变形开裂机制及影响因素研究[D].燕山大学,2021.
- [9]刘晓,王龙妹,陈雷,等.双相不锈钢475℃脆性及其形成特点对性能的影响[J].钢铁研究学报,2010,22(5):46–50.
- [10]黄敏.2012家电用高品质铁素体不锈钢应用研讨会召开[J].电器,2012(11):1.

国外援潜救生装备主要研制机构发展现状及趋势分析

王瑶^{1, 2, 3}, 胡中惠^{1, 2, 3}, 姜磊^{1, 2, 3}

1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082

2. 深海载人装备国家重点实验室, 江苏 无锡 214082

3. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082

DOI: 10.61369/ME.2024070023

摘 要 : 从国外援潜救生装备主要研制机构的角度出发, 通过梳理分析近年来主要研制机构的发展动态, 阐述研制机构的未来发展趋势, 供行业内研发人员和有关机构决策参考。

关 键 词 : 援潜救生装备; 国外主要研制机构; 发展动态; 发展趋势

Analysis of the Development Status and Trend of Foreign Diving Rescue Equipment Research Institutions

Wang Yao^{1,2,3}, Hu Zhonghui^{1,2,3}, Jiang Lei^{1,2,3}

1. China Shipbuilding Science and Technology Research Center, Wuxi, Jiangsu 214082

2. State Key Laboratory of Deep-sea Manned Equipment, Wuxi, Jiangsu 214082

3. Deep Sea Technology Science Taihu Laboratory, Wuxi, Jiangsu 214082

Abstract : From the perspective of the main research and development institutions of foreign submersible rescue equipment, this paper analyzes the development trends of the main research and development institutions in recent years, and expounds the future development trend of the research and development institutions, so as to provide reference for the decision-making of researchers and relevant institutions in the industry.

Keywords : submersible rescue equipment; foreign main research institutions; development trend; development trend

引言

现代潜艇之父 John Philip Holland 曾说过: “就人类现在能够看到的未来可以判定, 潜艇是真正的海洋魔鬼, 能够倚仗它就意味着能够得到胜利。” 潜艇作为海军的一种主战装备, 本身就是一个由执行相应功能的各种部件、设备、分系统组成的武器装备大系统, 亦是现代武器库中威力最大最有效的武器装备之一。^[1] 纵观当今世界, 凡是有领海的国家或地区, 不论大小, 都在竞相发展或相继采购装备潜艇。21 世纪初, 俄罗斯海军的第二代战略核潜艇 “库尔斯克” 号在巴伦支海域参加军事演习时发生爆炸并沉没, 艇上 107 名乘员、11 名舰队级的高级将领和助手共计 118 人全部遇难, 这引起了各国对援潜救生装备及服役性能的普遍重视。

目前已有不少对国外援潜救生装备现状研究的综述类文献。^[2-5] 但从主要研制机构的角度, 着重介绍国外援潜救生装备相关跨国销售机构的发展现状及趋势的文献较少或较久远。本文作者们力求从公开渠道充分收集资料并相互印证分析, 归纳总结出援潜救生装备国外主要研制机构的最新动态, 并对相关研制机构的未来发展趋势开展分析, 供行业内研发人员和有关机构决策参考。

一、主要研制机构动态

在当今国际援潜救生领域, 深潜救生艇、救生钟、单人常压潜水装具 (Atmospheric Diving Systems, 以下简称: ADS)、带压转移装置和甲板减压装置等多种救援装备的生产商仍主要集中在欧美国家, 亚洲临海国家包括中国在内, 多采用引进 JFD 公司 DSAR 系列、Forum Energy Technologies (以下简称:

FET) 公司 LR 系列的深潜救生艇及其配套设备来武装自身海上救援力量。DSAR 系列和 LR 系列的深潜救生艇现已成为国际市场上在役数量最多的援潜救生装备。此外, 隶属于美国海军的潜艇救援潜水和加压系统 (Submarine Rescue Diving & Recompression System, 以下简称: SRDRS 系统), 据悉由 Phoenix International Holdings (以下简称: Phoenix) 公司担任 SRDRS 系统的总承包商, OceanWorks International (以下简称: OceanWorks) 公司负

作者简介: 王瑶, (1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为潜水器总体设计。

责其多个核心装置的设计、建造。Phoenix公司和 OceanWorks公司亦为其它国家的海军提供救援装备或救援技术。现对上述研制机构的近期动态作如下介绍：

（一）JFD

JFD公司成立于2014年，由 James Fisher Defence公司和 Divex公司合并而成。JFD公司总部设在英国苏格兰阿伯丁，在北美洲、亚洲、欧洲及澳洲均设有分部。作为潜艇救援技术前沿，JFD公司近年来业绩尤为突出，研发了 DSAR 系列深潜救生艇、快速响应救生钟，实现为中国、韩国、新加坡、印度、澳大利亚等33国海军，提供潜艇救援设备、技术服务和逃生培训。JFD公司还负责为由英国、挪威和法国三个国家联合研制的北约潜艇救援系统（NATO Submarine Rescue System,以下简称：NSRS系统）提供技术升级及运营服务。^[6]近期公开披露及报道的 JFD 公司参与救援演习的情况如下^[7]：

JFD公司作为澳大利亚海军的 LR5 无缆深潜救生艇的设备维保服务商，每年10-11月份，即在海况普遍恶劣时期，配合皇家澳大利亚海军组织开展名为 'Black Carillon' 的潜艇救援演习，旨在定期确认并提升以 LR5 无缆深潜救生艇为核心的援潜救生装备及操作人员的救援能力。

JFD公司作为 NSRS系统的设备维保服务商，2017年、2019年、2021年及2022年，分别在挪威和英国完成名为 'Northern Sun' 和 'Golden Arrow' 的演习；2024年上半年也和法国海军开展了救援演习，旨在定期确认并提升以 NSRS有缆深潜救生艇为核心的援潜救生装备和跨国操作团队的综合救援能力。

JFD公司作为瑞典海军 URF 型深潜救生艇支持母船“比龙”号的带压转移装置生产商，2021年9-10月，配合北约和瑞典皇家海军在瑞典开展了名为 'Northern Crown' 的演习，完成了“比龙”号母船与北约 NSRS艇的接口适配工作，验证了装备接口通用化技术指标和跨国援潜救生装备的综合兼容能力。

（二）FET

FET公司总部位于美国德克萨斯州休斯顿，于2007年2月收购了英国 Perry PSSL System(以下简称：PSSL公司)。PSSL公司作为 LR 系列深潜救生艇制造商，曾于十余年前就向韩国、北约、中国等国交付自研的深潜救生艇。FET公司在 PSSL公司研制援潜救生装备的技术基础上，进一步健全和优化公司的深海救援技术，该公司新研的 LR 系列深潜救生艇、用于定位搜救及投放应急生命支持储备的观察型 ROV 和布放回收系统等援潜救生装备，于2021年已交付越南海军使用。据悉 FET 公司还为英国、美国、巴西等国家提供作业型 ROV^[8]。

（三）OceanWorks

OceanWorks公司作为一家私营公司，从事深潜和潜水技术、运营和支持业务已超30年。总部设在加拿大不列颠哥伦比亚省伯纳比市。根据该公司官网介绍，自1986年起该公司已研制了40多套 ADS 系统，先后提供给澳大利亚、法国、意大利、日本、俄罗斯、新加坡、土耳其、英国和美国等海军。该公司还为美国海军的 SRDRS 系统研制多个核心装置，例如：ADS、耐压救援模块系统、布放回收系统和脐带缆绞车系统等^[9]。

（四）Phoenix

Phoenix公司于1997年成立，总部位于美国，作为美国海军 SRDRS 系统的总承包商，承担快速响应并执行全球范围内的水下调查、打捞、修复和救援等任务。Phoenix 公司能提供完备的潜艇救援和干预解决方案，包括 ROV 系统、带压转移系统、布放回收系统、母船安装适配系统、ADS 系统、救生钟、应急生命支持储备和潜艇应急通风减压系统。该公司官网披露，2017年参与了搜寻沉没失踪的阿根廷海军圣胡安号 (ARA San Juan) 潜艇的任务；2023年其 Remora 系列 ROV 参与了对泰坦潜水器的残骸进行测绘、定位和回收任务；2024年4月，其已与西班牙海军签订关于潜艇应急通风减压系统的相关供货合同^[10-11]。

二、研制机构未来发展趋势

（一）依赖国际合作、研制与维保共促

由于潜艇的救援技术极为复杂，救援环境艰巨，需要获得大量人力、财力资源的长期稳定支撑，全球海上救援势必依赖国际合作，特别是潜艇救援合作必须加强与深化。在全球范围内现已设立国际潜艇逃生与救援联络办公室 (International Submarine Escape and Rescue Liaison Office, ISMERLO)，目前包含中国在内，已有15个成员国及组织加入，为实际潜艇失事时的国际联合救援行动奠定良好基础^[12]。

近期上述主要研制机构陆续已向美国、瑞典、中国、韩国、新加坡、印度、澳大利亚和越南等国海军出售 / 租借相关援潜救生装备，并作为技术保障机构参与了部分装备交付后的演习活动。未来，受联合救援使命感召和利益驱使的影响，针对已交付的各型装备，相应研制机构将会加强与其装备出口国家的深入合作，进一步提供设备维修升级、技术保障和人员培训等服务。但考虑到目前各国大部分潜艇的工作深度、艇员规模以及人员承压极限，作者们认为目前服役装备的救援能力已满足该领域需求，全球援潜救生装备的整体救援能力在往后一段时间范围内将基本维持现有水平，但或在人工智能识别与判断、虚拟仿真与数字孪生技术等方面取得局部提升^[13]。

（二）实现装备模块化、通用化、跨国兼容发展

众所周知，全球潜艇在四大洋航行，分布零散，在确定失事潜艇的地理位置后，且在72小时最佳救援时间内，潜艇所属国的相关救援装备实现到达失事海域，在有效救援半径内实施援潜救生，几乎是个体小概率事件。因此，实现援潜救生设备的模块化机动搭载、跨国兼容应用具有深远的指导意义。

以美国的 SRDRS 系统、北约的 NSRS 系统及 JFD 公司的第三代深潜救生艇系统为例，现今援潜救生装备的主要研制机构逐步采用并将深化模块化设计概念，要求装备具备快速拆装、转运条件。例如：JFD 公司作为 NSRS 系统的设备维保服务商，为2022年的 NSRS 系统与美国空军 C5“超级银河”运输机完成名为 'Flying Fish' 的飞机装载演习提供技术支持。未来，全球援潜救生装备将能通过海陆空多种运输方式，被快速调度、部署到潜艇失事海域，实施救援任务。同时，将提高援潜救生装备的通

用接口技术,实现装备摆脱对专用救援母船依赖,即能在临时救援船上快速搭载、兼容使用,以进一步提高救援响应能力和响应效率。

三、结语

中国是当今世界潜艇大国,也是潜艇救援强国之一。在人民海军诞生不久,即确定了“海军以发展空、潜、快为主”的建军方针,其中的潜艇力量建设得到飞速发展,潜艇救援技术研究也因此得到重视。实施失事潜艇援救不仅是一个技术问题,还成为

一个政治问题,关系到国家形象、影响到部队士气,日益成为各国海军对外展示军事实力的一个窗口。^[14]同时,党中央领导人把建设海洋强国看成全面建设社会主义现代化强国的重要组成部分。为实现海洋强国战略,国内相关援潜救生研制机构应不辱使命,在引进国外装备的同时,应紧跟国外主要研制机构的未来发展趋势,尽快完成援潜救生装备国产化、体系化的攻坚任务,力争将本国新研设备及技术真正应用到全球潜艇救援工作中,以彰显我国海洋科技力量,并践行我国推动构建人类命运共同体的大国担当。

参考文献

- [1] 马远义,许建.现代潜艇设计原理与技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2012.3:1.
- [2] 崔维成,叶聪,顾继红.国际援潜救生装备体系现状与发展趋势[J].船舶力学,2008,12(5):830-844.
- [3] 薛晶.援潜救生系统装备概况[J].船舶工程,2009,31(1):71-74.
- [4] 马镜,孙鸿博,陈嘉伟,等.援潜救生用作业级遥控无人潜水器的发展现状及趋势[J].中国造船,2023,64(4):258-267.
- [5] 胡中惠,王瑶,马岭,等.国外深潜救生艇发展趋势[J].舰船科学技术,2023,45(5):186-189.
- [6] JFD.Submarine Rescue Systems.[EB/OL].<https://www.jfdglobal.com/products/submarine-rescue/dsar-rescue-vehicles/>.
- [7] Janes. Defence News. [EB/OL].<https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/sea/jfd-tests-new-fibre-optic-communications-in-nrns-exercise>
- [8] Forum Energy Technologies.Submarine Rescue Systems[EB/OL].<https://f-e-t.com/subsea/vehicles/submarine-rescue-systems/#rescue-vehicle-srv>
- [9] OceanWorks International.Submarine Rescue Systems.[EB/OL].<http://www.oceanworks.com/our-business/military/submarine-rescue-systems/>
- [10] Phoenix International. Submarine Rescue Solutions. [EB/OL].<https://www.phnx-international.com/phoenix-and-supsalv-perform-salvage-of-remaining-debris-from-titan-submersible/>
- [11] Phoenix International. Submarine Rescue Solutions. [EB/OL].<https://www.phnx-international.com/what-we-do/submarine-rescue>
- [12] ISMERLO Rescue Systems [EB/OL].<https://ismerlo.org/rescue-systems/>
- [13] 蒋岩.深海救援技术的发展现状与展望[J].前瞻科技,2022,1(2):157-165.
- [14] 侯恕萍,严浙平.深潜救生艇的现状与发展趋势[J].船舶工程,2004,26(4):1-5.

高分子化工中功能性聚合物的精准合成与调控

吴斌, 王力, 林青儿, 谢芳玉

汉基森科技(杭州)有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI: 10.61369/ME.2024070024

摘 要 : 功能性聚合物属于高分子化工产业中的中高端产品系列, 在制备高分子学材料的过程中起着至关重要的作用, 要想提高材料的功能化性能, 就一定要强对其精准的合成和控制, 同时在此基础上将其应用范围不断扩展, 包括先进的成套控速聚合新方法、智能分子设计理念、材料多功能化构筑方式等等。通过分子结构的调控, 调整微纳米结构, 输入功能基团等方式对材料的性能进行控制; 通过多尺度关联探寻分子链—凝聚态结构—宏观性能内在规律, 实现从微观层面对分子设计合成及性能调控的新路径。通过系统的研发现实功能聚合物结构与性能间的精确对应关系, 从根本上使功能聚合物向功能化、绿色化方向发展, 并为其应用于不同的功能化需求打下基础。

关 键 词 : 功能性聚合物; 精准合成; 性能调控; 多尺度结构; 高分子化工

Precise Synthesis and Regulation of Functional Polymers in Polymer Chemical Engineering

Wu Bin, Wang Li, Lin Qing'er, Xie Fangyu

Hanjisen Technology (Hangzhou) Co., LTD. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Functional polymers belong to the medium and high-end product series in the polymer chemical industry and play a crucial role in the preparation of polymer materials. To enhance the functional performance of materials, it is essential to precisely synthesize and control them, and on this basis, continuously expand their application scope. This includes advanced new methods of complete speed-controlled polymerization, intelligent molecular design concepts, and multi-functional construction methods of materials, etc. The performance of the material is controlled by regulating the molecular structure, adjusting the micro-nano structure, and inputting functional groups, etc. Explore the inherent laws of molecular chains – condensed matter structures – macroscopic properties through multi-scale correlations, and achieve a new path for the design, synthesis and performance regulation of molecules at the microscopic level. Through systematic research and development, the precise correspondence between the structure and performance of functional polymers is realized, fundamentally promoting the development of functional polymers towards functionalization and greenization, and laying the foundation for their application in different functional requirements.

Keywords : functional polymers; precise synthesis; performance regulation; multi-scale structure; polymer chemical engineering

引言

功能性聚合物在现代高分子化工领域具有特殊性能, 在电子信息、生物医药、能源存储等高新技术产业发挥着举足轻重的作用。无论是柔性显示屏的光学功能聚合物薄膜还是靶向给药系统的智能响应高分子载体, 聚合物性能的精细调控将直接影响应用效果和产业的高度发展。但是传统的合成方法很难实现功能化的结构和性能的精准可控, 因此需要开发新型的功能化精准合成和调控技术。通过聚合物分子链结构、链节序列以及凝聚态形貌等分子尺度的精确调控赋予功能性的高性能材料, 是打破产业瓶颈的重要方法之一, 也是今后的重点攻关方向, 这就涉及到一系列控制聚合的方法及其机理的理解, 并最终建立由分子设计到宏观性能的调控体系。基于此本文围绕功能化聚合物合成和调控的几个关键步骤展开论述, 综述该领域中现阶段的一些核心技术以及成果。

一、精准合成技术

（一）可控聚合方法创新

可控聚合是实现功能性聚合物精准合成的基础，近年来活性自由基聚合、开环易位聚合、配位聚合等新技术不断发展，并为聚合物的结构调控提供了更多可能；原子转移自由基聚合 (ATRP) 通过引进卤代烃、过渡金属催化，实现抑制链终止和链转移，实现对聚合物分子量、分子量分布以及链段序列精准调控的目的，可以合成嵌段、梳型等不同拓扑结构聚合物；而可逆加成-断裂链转移 (RAFT) 聚合根据独特的链转移试剂的设计，可以在较低的温度下实现窄分布聚合物的合成，并且适合于多种类型的单体；开环易位聚合则是采用金属卡宾配合物作为催化剂，在实现烯烃复分解反应来构建聚合物链的同时也能得到规则的聚合物链，更有利于获得具有特殊的环状结构或功能化侧基的聚合物。总之，这三种可控聚合方法突破了很多方面的限制，在促进功能性聚合物分子设计上起到巨大的推动作用，为实现材料性能的精准调控打下良好的基础。

（二）单体分子设计策略

单体分子设计是赋予功能性聚合物特定性能的基础，合理地设计单体结构可以在分子水平上引入目标功能基团以及对应的响应特性。针对单体的官能团种类、官能团数量和官能团的空间排布开展精准设计，可定向调控聚合物的性质。比如将可聚合的含氟基团引入到单体中，可以得到表面疏水和低介电常数的聚合物材料，适合于电子封装材料的应用；设计含有可反应性环氧基、羧基等官能团的单体，有利于后续通过与功能性的小分子、纳米粒子发生反应的方式获得功能化聚合物；而把如偶氮苯和温敏性聚合物链段等作为刺激响应性基团添加进单体结构，可以形成光响应或温度响应型的智能聚合物。基于目标性能的要求开展单体分子的设计策略，有利于提高聚合物本身的本征性能，也可以赋予材料在特定的应用场合以功能，有助于功能性聚合物的精准合成。

（三）合成路径优化技术

合成路径优化是指综合应用不同的聚合方法及反应条件来改进反应过程，使聚合物可以以更高的产率、更优的质量、更低的成本和更小的环境污染等优点进行高效的、绿色的合成，如可以使用连续流动化学技术以及可控聚合的方法将聚合物的合成进行连续化与自动化的反应，利用进料流速、反应温度和停留时间对反应进行严格把控，使得反应不存在批次差异，产品的质量也更为稳定；使用微波、超声等物理场强化技术来提高聚合反应速度，降低反应活化能，减少催化剂的使用量和反应时间；使用环境友好的溶剂和催化剂体系代替原有的有毒有害的试剂，达到聚合物合成的绿色化目的。合成路径优化技术在保证聚合物精准合成的前提下，提高生产效率和节约成本，并实现功能性聚合物从实验室到工业化生产的转变。

二、性能调控手段

（一）分子结构定向调控

分子结构决定了功能聚合物的性质。可以通过精确的调控分子链上的化学组成、序列分布和拓扑结构使聚合物得到特殊的性

能，在化学组成调控上，可以使用共聚的方法把具有不同特性的单体以一定的比例混合作用得到相应的共聚物，比如使用刚性苯乙烯单体和柔性丁二烯单体进行共聚制备出具有良好的强度和韧性的好丁苯橡胶。序列分布调控能够有效的控制单体单元之间的排列顺序，活性聚合可以获得嵌段共聚物，例如：两亲性的嵌段共聚物由亲水链段与疏水链段组成，能在溶液中自组装形成胶束结构，用作药物输送载体。拓扑结构调控能制备成线形、支化、交联或星形等结构形式，交联聚合物由于分子链间产生化学键的作用，所以能形成良好的尺寸稳定性和较高的机械强度，适用于热固性材料。星形聚合物因具有特殊分子结构而在流变学行为和溶液行为上不同于线形聚合物，并可用于涂料、油墨等领域。通过分子结构定向调控方法能使功能性聚合物达到更优性能。

（二）微观形态精准塑造

微观形态决定了功能性聚合物的一些主要特性，通过对结晶形态、取向结构和相形态等进行调控，以改善微观形貌来提高材料性能。对于结晶形态来说，改变冷却速率或加入成核剂等手段可以使聚合物结晶度、晶粒大小发生变化，对于聚乙烯，在加工时加入成核剂能使晶粒细化，从而提高材料的透明性及力学性能；对于取向结构来说，通过加工过程中的外力作用下使聚合物分子链沿一定的方向排布，可以得到注塑成型中由于剪切产生的分子链取向及经过拉伸法得到的纤维中由于拉伸产生的高取向度分子链；对相形态来说，可通过调节相容剂的选择或者共混工艺来调控不同的聚合物相间的状态，以及它们之间的界面作用情况。例如，对聚丙烯/乙丙橡胶共混体系中加入相容剂，可以使橡胶相在聚丙烯基体中共混更为均匀，有利于提高该体系的抗冲性能，这就要求通过对微观形貌的精准构筑来获取功能性聚合物的优异性能。

（三）功能基团引入技术

引入功能基团是赋予功能性聚合物特殊性能的一种直接途径。在满足一定的功能性能要求下，可以通过化学合成或者后修饰的方法将相应功能基团引入到聚合物的分子链中来实现该功能性能。例如：在通过化学合成的方法制备含有羧基的丙烯酸聚合物，进而用于离子交换树脂上时，由于羧基可以解离产生氢离子，故能利用其进行离子交换，从而达到需要的功能性能。如果从后修饰角度出发，先制得聚合物再在其上接入相应的功能基团，以聚烯烃类材料为例，可先用接枝的方式在该材料表面引入羟基、氨基等极性基团以改善其表面极性及亲水性，提高与其他材料的粘接性。在聚合物材料表面引入光响应基团(如偶氮苯)，可以制得具有光致变色、光驱动取向变化等功能性的光信息存储及光控微纳器件材料；在聚合物材料中引入温敏性基团(如聚 N-异丙基丙烯酸酰胺)，则能得到在一定的温度下会发生体积相变的温敏性聚合物材料，可用于智能药物释放体系等，通过不同功能基团的引入可以使功能性聚合物的种类大大的增加。

三、多尺度结构与功能关联

（一）分子链层次的性能关联

分子链层次的结构特征决定了功能性的聚合物的性质。分子链化学组成决定材料的基本属性，氟原子由于电负性较高使含有含氟基团的聚合物具有较好的耐候性、化学稳定性和低表面能；

主链含有硅氧键的聚硅氧烷，因为具有独特的键角以及较低的内聚能密度，使聚硅氧烷具备良好的柔韧性和宽温度区间使用条件。序列分布对于分子链物理化学性质有很大影响，无规共聚物介于单体均聚物之间，嵌段共聚物由于存在微相分离形成纳米级有序结构如 SBS 嵌段共聚物由硬段聚苯乙烯通过物理交联和软段聚丁二烯的弹性协同作用实现了塑料加工性与橡胶弹性的统一；分子链的支化程度、构象、分子量分布等参数均会直接影响到分子链的缠结和运动行为，从而调控着聚合物的力学、流变以及响应性质，如表一所示。如表一所示：

表1 不同组成 PET 的玻璃化转变温度与结晶速率常数

PET 组成（乙二醇:对苯二甲酸）	玻璃化转变温度（℃）	结晶速率常数（min ⁻¹ ）
1:1	78	0.02
1.1:1	72	0.05
1.2:1	65	0.08

（二）凝聚态结构的功能表达

凝聚态结构作为沟通聚合物微观分子链与宏观材料间的桥梁，决定了功能性聚合物的各种性能。结晶态和非晶态的比例、分布决定了材料的刚柔平衡，不同的 PET 可通过调节结晶度制成透明柔性薄膜或高强工程塑料；取向态赋予了材料的各向异性的属性，纤维和薄膜内的取向定向分子链使沿取向方向具有更优秀的力学和光学性能；相分离结构是共混体系中比较普遍的存在形式，在橡胶增韧塑料中，橡胶相粒子的分散状态、颗粒尺寸以及橡胶相与塑料相界面之间的相互作用决定了材料冲击韧性的高低；而液晶聚合物（LCP）的取向态能够引起其独特的光学响应，用作显示领域的部分基础材料，证明凝聚态结构调控是充分

发挥材料自身功能的作用方式之一。

（三）宏观性能的协同优化

功能性聚合物宏观性能的发挥需要通过不同层次结构和加工过程协同来进行调控，比如功能化的具体体现之一，对于力学性能而言需要通过分子间作用力的提高、结晶结构的改进以及填充增强来实现；比如对于热性能的提升需要从耐热基团的引入、结晶行为的调整以及阻燃手段的加入等方面来进行；再比如对于智能响应材料来说，则需要将刺激响应基团接在分子链上，调节凝聚态结构，改善信号传递，再结合成型工艺实现功能化集成，例如形状记忆聚合物，设计交联网络、相转变温度，并结合加工方法，最终获得形状回复性能。除却单方面对某一类结构的调控之外，多方面结构并重调控打破了单一结构调控的局限性，使得多功能聚合物材料更好的匹配复杂的应用场景中多方面的功能要求。

四、结语

基于可控聚合、分子设计以及多尺度结构调控的精准合成与可控调控得到了一定的研究进展，能够实现针对聚合物材料的性能定向调控，并能突破分子链结构的设计进而拓展其功能。从分子链结构设计至宏观性能调控的系统技术的进步对于促进高分子化工产业的发展起到了关键作用。另外，随着合成技术的发展以及多种学科交叉领域的不断交融，功能性聚合物也将会在将来向着更加广阔的领域出发，例如，在生物医药，新能源，高端装备等，为解决世界性难题提供更多的可能性。

参考文献

[1] 马亿珠,陈蕾,王凯,谢文佳.功能性高分子聚合物在检测领域中的应用 [J].应用化工,2023,52(11):3179-3183+3188.

[2] 张倩.聚合物高分子益胶泥的防水墙体设计分析 [J].粘接,2022,49(7):9-12.

[3] 阳志荣.高分子化工材料的用途和发展现状 [J].化工管理,2022,(09):64-66.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2022.09.020.

[4] 陈鹏翔.高分子化工材料的应用现状及发展趋势探析 [J].当代化工研究,2021,(17):15-16.

[5] 营飞,王木立,顾斌,马智俊,张东阳.功能性含氟聚合物在涂料中的应用 [J].涂料工业,2016,46(1):81-87.

[6] 徐虹,冯小海,徐得磊,邱益彬.聚氨基酸功能高分子的发展状况与应用前景 [J].生物产业技术,2017(6):92-99.

[7] 中石化启动功能性高分子膜材料重大项目 [J].新材料产业,2017(9):91-91.

[8] 云梁,李国峰.我国高分子化工材料的研究进展 [J].合成材料老化与应用,2021,50(3):146-148.

[9] 李鹏飞,王建南,许建梅.功能性高分子柱塞微球的制备与研究进展 [J].现代纺织技术,2022,30(6):242-251.

[10] 李鹏辉,黄丽菁,李家全,任建鹏,吴文娟.功能化木质素在高分子材料中的应用研究进展 [J].高分子材料科学与工程,2022,38(3):159-165+173.

橡胶改性沥青对高速公路噪声抑制性能的影响研究

郑世勇

重庆交通建设（集团）有限公司，重庆 401120

DOI: 10.61369/ME.2024070027

摘要：随着高速公路建设的加速，交通噪声污染问题日益严重。橡胶改性沥青因其优异的弹性、空隙结构及声学特性，在道路降噪方面展现出显著优势。本文从材料微观结构、力学行为、孔隙特性及声波传播机制等方面，系统分析了橡胶改性沥青在噪声抑制中的作用机理。橡胶颗粒的加入有助于构建多孔骨架结构，增强对中高频声波的散射和吸收，显著提升路面降噪性能。通过优化掺量、粒径、空隙率及结构组合，橡胶改性沥青在噪声控制、环境适应性及可持续性方面具备广阔应用前景。

关键词：橡胶改性沥青；高速公路；交通噪声；噪声抑制；声学性能

Research on the Influence of Rubber Modified Asphalt on the Noise Suppression Performance of Expressways

Zheng Shiyong

Chongqing Transportation Construction (Group) Co., LTD. Chongqing 401120

Abstract： With the acceleration of expressway construction, the problem of traffic noise pollution is becoming increasingly serious. Rubber-modified asphalt has shown significant advantages in road noise reduction due to its excellent elasticity, void structure and acoustic properties. This paper systematically analyzes the mechanism of rubber-modified asphalt in noise suppression from the aspects of material microstructure, mechanical behavior, pore characteristics and sound wave propagation mechanism. The addition of rubber particles helps to construct a porous skeleton structure, enhancing the scattering and absorption of medium and high-frequency sound waves, and significantly improving the noise reduction performance of the pavement. By optimizing the dosage, particle size, void ratio and structural combination, rubber-modified asphalt has broad application prospects in noise control, environmental adaptability and sustainability.

Keywords： rubber modified asphalt; expressway; traffic noise; noise suppression; acoustic performance

引言

随着高速公路网络的快速扩展，交通噪声已成为主要的环境污染源之一，尤其在高速、大流量条件下更为突出。传统降噪手段如声屏障和绿化带存在成本高、适用性差等限制，难以满足日益增长的噪声控制需求^[1]。因此，从路面材料出发，通过材料结构优化实现源头降噪，成为当前研究的关键方向。橡胶改性沥青作为将废旧轮胎橡胶粉引入热沥青中的复合材料，兼具良好的弹性、吸能能力与空隙结构特征，在抑制交通噪声方面展现出独特优势。其微观结构有助于声波能量的多路径耗散与频谱调节，材料的粘弹特性亦强化了振动能量的内部转化与衰减效应。本文从微结构特性、力学性能、孔隙参数与声学响应机制等方面，系统探讨橡胶改性沥青的降噪机理，分析其配比设计与结构控制对声学表现的影响，以期绿色道路建设和低噪交通系统提供材料支撑与理论依据。

一、橡胶改性沥青材料的结构与性能基础

（一）材料微结构变化

橡胶改性沥青是一种典型的两相复合体系，橡胶颗粒在沥青基质中形成分散态结构。经高温剪切后，橡胶粒子与基质沥青发生物理混合与部分化学交联，形成具有空间网络特征的复合体。橡胶颗粒的溶胀作用促使其表面与沥青相互渗透，从而在微观尺

度上形成类似多级结构的相互嵌套网络。这一结构特征显著提升材料的整体均质性与内聚性，并在声学负荷作用下提供有效的能量耗散通道。

（二）力学性能改进

橡胶改性沥青的力学行为主要受控于橡胶的弹性回复能力和多尺度相界特征。在反复载荷作用下，改性材料能够保持较低的永久变形速率与裂纹扩展倾向。沥青基体因橡胶的加入而表现出

更高的剪切模量和抗疲劳寿命，同时在剪切变形过程中形成延迟屈服机制，从而降低微裂纹形成速率^[2]。其高温下的流动临界温度上升，抗车辙能力增强，低温下的断裂应变范围扩大，脆裂风险明显降低。

（三）空隙率与材料吸音性

在橡胶改性沥青混合料中，橡胶颗粒间的“骨架-填充”结构促使材料在压实过程中保留部分开放式孔隙结构，形成高孔隙率的非连续相通道。这种孔隙体系不仅影响材料的密实度，还对声波传输路径和衰减机制起决定性作用。声波进入孔隙后发生多次散射与黏滞耗散，降低能量传递效率。材料中空隙的尺度、连通性和分布均匀性是决定其吸音性能的关键因素，开口孔隙率越高，对中高频段噪声的衰减能力越强。与密实型沥青相比，该类材料在1~4 kHz频率范围内具有更优的声能耗散能力。

二、橡胶改性沥青的声学机理分析

（一）多孔结构引导的声波散射与能量耗散

橡胶改性沥青中形成的开口型孔隙结构构成了复杂的非连续声传播介质，声波在穿越孔隙网络时被迫改变传播方向并在多次界面反射中逐渐衰减。孔壁之间的结构不规则性和孔径尺度的多样性增强了散射强度，使声能在多路径折返中快速衰弱。在中高频段，声波波长接近孔隙尺度，更容易被激发共振与模式转换，从而形成有效的吸声带宽^[3]。此外，部分孔隙通道具有局部封闭或颈部约束特征，增强了驻波形成与声能局部滞留的效应，进一步促进能量耗散。

（二）材料内阻尼主导的热转化损耗机制

橡胶分子链具有显著的粘弹性，其对外部激励响应过程中伴随大量分子间摩擦与链段运动失配，表现为高内阻尼特性。当声波以振动形式加载至材料体系中，橡胶相的分子结构对振动能量产生强烈吸收，部分声能在链段内部转化为热能释放，构成典型的粘滞耗散过程。该耗散机制对频率变化不敏感，能够在较宽频带内维持稳定衰减特性。与刚性矿质骨料为主的传统沥青结构相比，橡胶改性系统在应变响应过程中具有更强的振动衰减能力，显著增强了其噪声控制能力。

（三）声阻抗调节对反射衰减的作用机制

声波在传播过程中遇到不同介质界面会发生反射与透射，其反射强度取决于声阻抗差异。橡胶改性沥青通过调节材料的整体密度与弹性模量，有效控制其声阻抗值，使之更接近空气的声阻抗范围，减小声波入射时的反射系数。在声波由空气进入路面结构的界面，其匹配程度越高，越容易将声能导入材料内部进行耗散。通过引入柔性橡胶相，使界面由硬反射边界转化为部分吸收边界，从而降低声波反弹回环境的能量比例，有效缓解近距离噪声扩散。

（四）频谱选择性吸收与“滚动噪声”衰减特性

车辆轮胎与路面之间的相互作用产生以500 Hz至2500 Hz为主频的滚动噪声，此类中高频波动能量集中，传播速度快，传播范围广。橡胶改性沥青在该频率区间表现出优异的频谱选择性吸

收能力。其开口孔隙结构对中频声波具有高散射能力，而弹性橡胶相对对频率波动敏感，易引发材料内部的振动模式响应，形成匹配的阻尼带宽，产生选择性声能捕获效应。通过精细调控粒径分布与孔隙率，可实现对特定频段噪声的精确调控，达到主动控制滚动噪声的目的。

三、橡胶改性沥青混合料的配比与结构优化对噪声性能的影响

（一）橡胶掺量与粒径分布

橡胶掺量是影响改性沥青声学性能的核心变量。橡胶粉末在沥青体系中不仅作为弹性组分参与应力调节，还决定了混合料的孔隙结构和能量耗散能力。掺量在10%至20%范围内，材料表现出良好的粘弹响应特性和孔隙生成能力，既能维持必要的结构稳定性，又能为声波传播提供多级散射通道。掺量不足导致孔隙度偏低，声波路径短，吸音效率下降；掺量过高则引发粘度急剧上升，拌合与摊铺困难，孔隙结构易塌陷。粒径分布控制直接影响声波共振匹配，细颗粒有利于填充微孔，增强高频吸收，而1 mm左右的中粒径橡胶则在中频段形成良好的结构响应，提升滚动噪声的抑制效率^[4]。统一粒径控制范围和形态参数，有助于提高混合料的均匀性和长期性能稳定性。

（二）空隙结构控制

空隙结构作为决定性参数，控制着混合料对声波的传输、衰减与反射路径。橡胶改性沥青中常采用开级配设计，以构建连通性强、结构层次丰富的孔隙网络。整体空隙率应控制在18%至22%，以平衡力学强度与声学性能。开口孔隙的数量、尺度和分布状态决定了声波在材料中的传播效率和吸收能力。非连通性孔隙虽然能提供一定的声能捕获，但其贡献局限于局部驻波区。通透性良好的连续孔隙通道则使得声波在入射后持续发生黏滞摩擦和热损耗，提高整体吸收效率。材料压实过程中的骨架稳定性和橡胶粒子的分布状态直接影响孔隙保持能力，因此需结合沥青黏度调控与压实能量管理，以确保结构完整性不被破坏。

（三）添加剂与共改性方法

橡胶改性体系可通过引入协同组分进一步优化性能，实现多目标功能集成。SBS（苯乙烯-丁二烯-苯乙烯）作为热塑性弹性体，可与橡胶粉共同参与粘结网络构建，提高复合材料的热稳定性与结构柔韧性。纳米硅粉等无机功能材料通过填充微孔、增强界面相互作用，有效提升孔隙结构的稳定性和吸声通带范围。多元共改性能够使材料在低频至高频段形成多个吸收峰，拓宽其声能耗散频谱。不同添加剂之间的协同效应取决于其粒径尺度、界面相容性以及分布均匀性，在配比设计中应充分考虑改性剂的物理耦合特性与化学稳定性，以实现材料力学与声学性能的耦合最优。

（四）路面层厚度与结构组合

面层厚度是影响声波入射响应和吸能深度的重要参数。在3 cm至5 cm厚度区间内，橡胶改性沥青能够有效吸收常见交通噪声频段内的声波能量。较薄面层可能不足以形成完整的声波耗散路

径，而过厚则可能引发结构分层和剪切失稳等问题。与基层结构的耦合组合是提升降噪性能的关键技术路径。当改性沥青与低模量底层形成复合吸声体系时，声波在多层结构中形成多重反射与延迟衰减效应，声能在结构内部驻留时间延长，耗散机制更为充分。结构层的弹性模量梯度设计和各层之间的粘结性能需满足整体动载下的稳定需求，防止因界面脱粘而导致声学性能下降与结构寿命缩短。

四、高速公路应用中的环境适应性与长期性能分析

（一）环境耐久性

橡胶改性沥青在复杂交通与气候环境中需承受长期的温度循环、水分浸泡、紫外老化以及荷载冲击等多重应力作用。其内部橡胶相具有优异的弹性恢复能力，能有效缓解热胀冷缩引发的结构疲劳，抑制因温差引起的微裂纹萌生与扩展。材料的微观交联网络结构提升了其抗氧化性能，降低紫外线诱发的基质老化速度，维持其热稳定性与力学完整性。在高温高湿地区，该类材料对降雨冲刷及水分渗透的抵抗能力明显优于传统沥青层，水稳定性参数表现稳定，有助于保持孔隙结构的完整性与吸声功能的持续性。

（二）噪声性能的持久性

橡胶改性沥青的声学性能主要依赖其空隙率、连通性和橡胶粒子分布状态，这些结构特征随使用年限而发生变化。交通荷载反复作用导致孔隙边界结构逐渐压实，粉尘和颗粒物易在孔隙入口处堆积，造成吸声路径阻塞。声波在结构中传播路径缩短，黏滞损耗机制效率下降，声波反射与远距传播增强，降噪效能逐步减弱。维持良好的吸声性能需通过结构自洁设计与周期性养护干预，控制堵塞速度与频率^[5]。橡胶相对压缩变形具有缓冲功能，可延迟孔隙压塌与连通性丧失，保证材料长期吸声特性不出现突变式退化。

（三）施工与养护适应性

橡胶改性沥青对拌合温度与时间敏感度较高，适宜的热剪切工艺可实现橡胶颗粒充分分散与预溶胀状态，提高混合均匀性与结构稳定性。该材料体系在施工过程中对摊铺速度与碾压工艺要

求严格，需控制压实能量与温度窗口，确保形成目标空隙率与路面平整度。与常规热拌沥青技术体系兼容性较好，可通过现有设备完成高效铺装，具备规模化工程推广能力。其表面层结构具备优良的摩擦系数与轮胎接触性能，满足高速重载环境对抗滑性能与行驶安全性的综合要求。在养护阶段，适用于高压清洗与表层疏水处理，可有效恢复孔隙通透性并延缓老化进程。

（四）环境友好性与可持续利用潜力

橡胶改性沥青采用废旧轮胎粉作为核心组分，在实现道路结构功能提升的同时实现资源再生利用，显著降低道路建材对原生资源的依赖。废橡胶中高聚物组分在热处理过程中参与沥青网络构建，赋予路面新的粘弹行为，增强其使用性能。改性过程中未引入有毒挥发性化学添加剂，热拌过程排放控制在可接受范围内，符合当前低碳建造与绿色交通发展导向。橡胶颗粒的稳定性高，不易迁移或降解，不会对土壤和地下水造成二次污染，具备良好的环境相容性。在生命周期评价中，该类材料表现出更低的碳排放系数与更长的服务周期，支撑高速公路路面从一次性建设向低维护、高性能转型。

五、结语

橡胶改性沥青凭借其独特的微观结构与优异的粘弹特性，在提升高速公路路面噪声抑制性能方面展现出显著优势。橡胶颗粒的引入不仅改善了沥青混合料的空隙结构和力学性能，还有效增强了材料对中高频交通噪声的吸收与散射能力。多孔骨架提供了丰富的声能耗散路径，柔性相的阻尼作用强化了振动能量的热转化，材料的声阻抗特性进一步促进了声波的导入与衰减。合理控制橡胶掺量、粒径分布和空隙率参数，并结合共改性技术与多层结构设计，可实现对滚动噪声的频谱选择性控制，同时兼顾力学稳定性与环境耐久性。在长期服役与复杂工况下仍保持良好声学性能的能力，使其具备实际推广价值与工程应用潜力。未来，橡胶改性沥青将在智能道路、低碳建造与功能材料融合等多维技术路径中持续拓展应用边界，推动高速公路路面向绿色、静音与高性能方向加速演进。

参考文献

- [1] 马辉. 橡胶粉/芳烃油改性沥青对高速路面的降噪与吸声性能试验 [J]. 粘接, 2023, 50(11): 17-21.
- [2] 方淑艳. 橡胶颗粒改性沥青阻尼降噪性能研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(03): 1-3+8.
- [3] 李凯顺. 温度对橡胶颗粒沥青混合料阻尼降噪的影响分析 [D]. 内蒙古农业大学, 2023.
- [4] 黄浩. 橡胶改性沥青路面降噪技术研究进展 [J]. 现代交通技术, 2024, 21(01): 28-33.
- [5] 方淑艳. 橡胶颗粒改性沥青阻尼降噪性能研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(03): 1-3+8.

微发泡聚丙烯的制备及其在汽车门板中的应用

巩丽^{1,2*}, 孙文强³, 刘光烨^{1,2*}

1. 高分子科学与工程学院 青岛科技大学, 山东 青岛 266042

2. 高性能聚合物研究院 青岛科技大学, 山东 青岛 266042

3. 青岛海泰科模塑科技股份有限公司, 山东 青岛 266042

DOI: 10.61369/ME.2024070029

摘要 : 为了探索熔体强度对聚丙烯发泡效果的影响, 通过不同聚丙烯共混并用的方式制备了不同熔体强度的聚丙烯复合材料, 通过力学性能、熔体强度、扫描电镜等对聚丙烯复合材料的发泡性能进行研究。结果表明, 不同流动性聚丙烯配合, 加上弹性体, 可获得熔体强度适中的聚丙烯复合材料, 发泡后泡孔均匀, 尺寸为20–60um。高熔体强度聚丙烯的加入, 使得聚丙烯复合材料的熔体强度过高, 泡孔尺寸较大, 为100–200um, 而且泡孔数量较少。单一聚丙烯发泡后形成的泡孔多为连泡, 形成大的空洞, 成为缺陷。只有适宜的熔体强度, 才能获得较好的发泡“三明治”结构, 达到较好的发泡效果。

关键词 : 聚丙烯; 微发泡; 熔体强度; “三明治”结构

Preparation of Polypropylene with Different Melt Strength and the Application in Automotive Door Panels

Gong Li^{1,2*}, Sun Wenqiang³, Liu Guangye^{1,2*}

1. Engineering Research Center of High Performance Polymer and Molding Technology, Ministry of Education, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042

2. College of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042

3. Qingdao Hitech Moulds & plastics Co., Ltd, Qingdao, Shandong 266042

Abstract : In order to explore the influence of melt strength on the foaming effect of polypropylene (PP), PP composites with different melt strengths were prepared by blending and using different types of PP. The foaming properties of PP composites were studied through mechanical properties, melt strength, scanning electron microscopy (SEM), and other methods. The results shows that different fluidity PP composites, combined with elastomers, can obtain PP composite materials with moderate melt strength, uniform foam cells after foaming, and a size of 20–60um. The addition of high melt strength PP resulted in excessively high melt strength of PP composites, with larger cell sizes ranging from 100 to 200um and fewer cell numbers. The cells formed by a single type PP were mostly continuous cells, forming large voids and becoming defects. Appropriate melt strength can foam the well "sandwich" structure, achieving a good foaming effect.

Keywords : polypropylene; foaming; melt strength; "sandwich" structure

前言

能源和环境是当今世界面临的两大问题, 因此, 应用新材料、新技术、新设计来实现汽车的轻量化, 使汽车向“低能耗”“低排放”方向转变^[1]。燃油汽车整车重力每减轻 10%, 燃油消耗可降低 6% ~ 8%, 排放可减少 5% ~ 6%^[2]。燃油消耗每减少 1 L, 二氧化碳排放量可减少 2.45 kg。在新能源汽车领域, 车体每减轻 100 kg 质量, 将减少 20% 的电池成本; 车体重力减轻 10%, 续航里程可增加 5.5% 左右^[3]。因此, 汽车零部件的轻量化是汽车行业广泛关注的课题。。

聚丙烯 (PP) 具有质轻、耐化学腐蚀、力学性能优异等特点, 广泛应用于保险杠、门板、仪表板等汽车零部件中。在汽车零部件中采用以塑代钢可以实现减重, 其中, 通过聚丙烯的微发泡可以使零部件再减重 10%~30%。福特汽车利用微发泡技术成功实现小型车减重 100kg 以及大型车减重 300kg 的目标, 这种成型技术在保证零部件耐用性, 且优化燃油性降低排放的同时可降低车身重量近 20%。奔驰

汽车前端模块,通过微发泡设计可减重20%。诺博汽车在VV7车型上应用物理微发泡技术,实现产品减重10%左右,在F7车型上应用化学微发泡技术,实现产品减重25%~28%。因此,微发泡聚丙烯的制备是汽车零部件轻量化的重要一环。

微发泡聚丙烯在汽车中有着良好的应用前景,但PP的线型链结构使其黏度低、熔体强度低,在发泡过程中泡孔易破裂形成连泡^[4]。熔体强度过大,会使发泡困难,影响发泡效果。因此,调节聚丙烯体系的熔体强度是微发泡聚丙烯制备的关键一步。控制发泡的均匀程度的另一关键,选择与聚丙烯基体体系相匹配的发泡剂^[5]。因此,本项目拟通过树脂并用的方法调控聚丙烯材料的熔体强度,并选用合适的发泡剂,实现微发泡聚丙烯的制备。

一、实验部分

(一) 试剂与仪器

PP BX3920 韩国SK; PP WB135HMS (HMS PP) 博禄; PP 300R 巴塞尔; PP 9829H 燕山石化; 滑石粉 辽宁艾海滑石有限公司; 发泡剂 中化集团; 抗氧化剂等助剂 市售。

(二) 实验过程

Table 1 Formula Table of Polypropylene Composite Materials

Formulation number	S1	S2	S3
PP BX3920		58	58
PP 9829H	88	15	
HMS PP			15
POE 7447		15	15
talc	10	10	10
additive	2	2	2

将PP、POE、滑石粉、高熔体强度助剂和抗氧化剂等按照一定的比例(配方如表1)准确称取,混合均匀后,通过料筒加入到双螺杆挤出机中进行熔融挤出造粒,挤出机温度设置为180~210℃,经水冷、风干、切粒得到发泡前的改性PP料粒,烘干待用。

将PP复合材料与发泡剂按一定比例充分混合,通过轴向后退式微发泡注塑机制备汽车门板,并对微发泡后的泡孔结构和厚度尺寸进行测试。注塑温度可在180~230℃的范围内调节,模具温度设定为30~50℃。注塑速度为中高速,注塑压力为中高压,冷却时间为15秒。

(三) 测试与表征

同向双螺杆混炼挤出机,STEER Omega 30; 注塑机,2300T型,克劳斯玛菲; 熔体流动速率仪,GT-7100-MI型,高特威尔科学仪器(青岛)有限公司; 万能试验机,AI-7000

-MU1,高特威尔科学仪器(青岛)有限公司; 冲击试验机,GT-7045-MDL型,高特威尔科学仪器(青岛)有限公司; SEM扫描电镜日立。

力学性能测试采用万能试验机和摆锤冲击试验机测试材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度。拉伸性能按ISO 527-2-1993标准测试,拉伸速率50 mm/min; 弯曲性能按ISO 178-2010标准测试,跨距64 mm,弯曲速率2 mm/min; 悬臂梁缺口冲击按ISO 180-2000测试,缺口深度为2 mm; 熔体强度通过熔融指数测试仪进行测试。

熔体强度(MS)通过经验公式计算而得^[6]:

$$MS = 3.54 \times 10^5 \Delta L^2 \cdot r_0^2 / MFR_{230} \text{ 式中}$$

ΔL ——挤出物直径减少50%时的挤出物长度

r_0 ——最初从模口露出的挤出物直径可分别测量挤出物直径由外推而得

MFR_{230} ——PP在230℃、负荷为2.16kg下的熔体流动速率值

二、结果与讨论

(一) 物理性能

聚丙烯复合材料的基本性能(熔融指数、拉伸强度、弯曲模量和悬臂梁缺口冲击强度)如图1所示。由图1(a)所示,聚丙烯基体树脂的不同引起聚丙烯复合材料熔融指数的变化。复合材料S1的熔融指数为27g/10min。加入高流动性的基体树脂聚丙烯BX3920后,复合材料S2的流动性提高至37g/10min。与S1相比,S2的熔融指数增大了37%,流动性明显改善。为了提高复合材料的熔体强度,在配方体系中引入了HMS PP,HMS PP的加入使得复合材料S3的熔融指数降低至19g/10min,流动性显著下降,粘度增大。

由图1(b)可知,聚丙烯树脂种类变化,复合材料的拉伸强度不同。复合材料S1的拉伸强度为20MPa。当加入高流动聚丙烯和弹性体POE后,复合材料S2的拉伸强度略有下降,这主要由于POE的拉伸强度较低引起的。随着HMS PP的加入,复合材料S3的拉伸强度有增大的趋势。

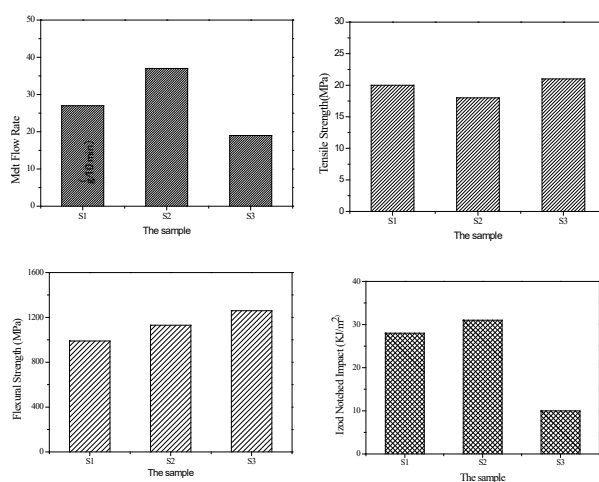


Figure 1 Basic properties of PP composite materials

由图1(c)可以看出,聚丙烯树脂的变化,使得聚丙烯复合材料的弯曲模量不同。复合材料S1的弯曲模量为990MPa。采用vv高流动聚丙烯和弹性体进行组合使用后,复合材料S2的弯曲模量明显升高,这是由于多种分子量的聚丙烯的加入,使得分子链

缠结加大,抵抗变形的能力增强,引起了弯曲模量的增大。复合材料 S3 中由于加入了 HMS PP, 模量增大至 1260MPa, 这是由于 HMS PP 的高分子量引起的。

由图 1 (d) 可以看出,不同的聚丙烯树脂也会引起聚丙烯复合材料冲击强度的变化。复合材料 S1 的冲击强度为 28KJ/m²。在 S1 的基础上,加入高流动聚丙烯和弹性体 POE 后,复合材料 S2 的冲击强度略有增大。这是由于弹性体的韧性弥补了高流动聚丙烯加入引起的韧性损失。复合材料 S3 的冲击强度较低,这是由于 HMS PP 的韧性较差引起的。

(二) 熔体强度

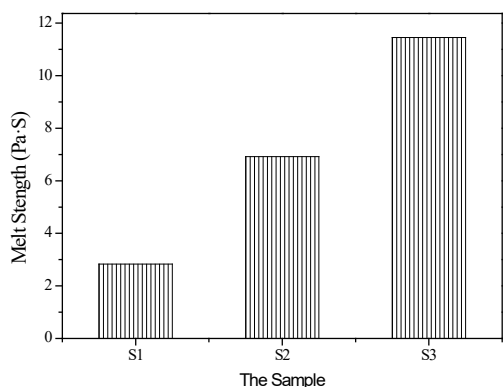


Figure 2 Melt strength of polypropylene composite materials

聚丙烯复合材料的熔体强度如图 2 所示。聚丙烯复合材料 S1 的熔体强度为 2.83Pa · S, 这是由于聚丙烯树脂采用了通用聚丙烯, 只有丙烯、丁烯等少量支链结构, 无法形成较强的链缠结, 导致熔体强度较低。当聚丙烯树脂的种类增加, 多种分子量的聚丙烯并用, 加上乙烯-辛烯共聚物的加入, 分子链的缠结程度增大, 熔体强度增大。复合材料 S3 的熔体强度显著增大, 这主要归功于引入了 HMS PP, HMS PP 本身具有较高的熔体强度, 分子量高, 而且支化程度大, 使得复合材料 S3 中分子链的缠结增大, 熔体强度增大。

(三) 微发泡聚丙烯的形貌

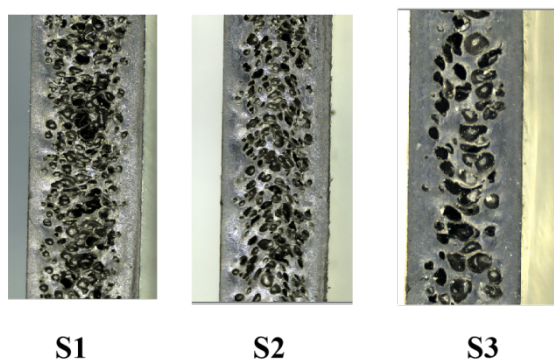


Figure 3 “Sandwich” structure of PP composite material

微发泡注塑成型的制品内部形成蜂窝状的泡孔结构, 刨开制品后截面明显呈现“三明治”结构如图 3 所示, 上下是厚实的皮层, 中间是具有微孔结构的发泡层^[7]。由图 3 可以看出, S1 皮层较薄, 芯层泡孔密集, 泡孔破裂较多, 形成了较多的连孔结构。多个泡孔串联后, 形成了大的空洞, 这对复合材料发泡后的强度影响较大, 成为制品的内部缺陷。形成这种结构的原因主要由于

S1 熔体强度较低, 发泡过程中泡孔壁强度较低, 气体容易穿透泡孔壁, 形成了连泡结构。复合材料 S2 的皮层较薄, 芯层的泡孔密集, 而且泡孔之间相对独立, 并未像 S1 一样形成连泡结构。这主要由于复合材料 S2 样品的熔体强度适中, 这样的熔体强度既有利于发泡剂分解后产生气体的扩散, 又能将均匀分布后的气体束缚住, 使气体不会冲破泡孔壁, 形成泡孔密集且相对独立的发泡三明治结构。复合材料 S3 的泡孔相对稀疏, 而且皮层较厚。这是由于 S3 的熔体强度过大造成的。熔体强度过大, 会使气体扩散困难, 气体聚集后难扩散, 此时形成泡孔尺寸大, 泡孔稀疏, 且皮层较厚的发泡结构。

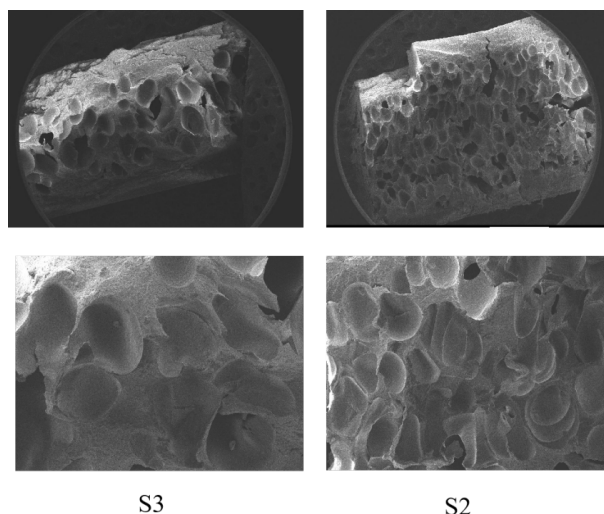


Figure 4 SEM image of foaming structure of polypropylene composite material

为了更好的观察聚丙烯复合材料 S2 和 S3 的微观泡孔结构。将发泡材料在液氮中冷却淬断后得到的 SEM 图如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 熔体强度较大的 S3, 形成的泡孔尺寸较大, 大多分布在 100–200um, 而且泡孔与泡孔间的间隔较大, 进一步说明气体在高熔体强度的材料中难扩散, 易形成大泡孔, 泡孔数量较少。熔体强度适中的 S2, 形成的泡孔尺寸较小, 多为 20–60um。泡孔完整, 泡孔与泡孔间相互独立, 与前面三明治结构的结论一致。

(四) 发泡门板的尺寸偏差

为了验证上述复合材料的应用情况, 将 S2 和 S3 材料应用于汽车门板中, 门板发泡完成后, 对门板各个部位的尺寸进行了统计, 总共统计了 83 个点位。尺寸偏差等于门板发泡后的理论尺寸减去门板发泡后的实际尺寸。偏差上限 = 门板发泡后的理论尺寸 - 门板发泡后的实际尺寸 = 0.2mm; 偏差下限 = 门板发泡后的理论尺寸 - 门板发泡后的实际尺寸 = -0.2mm。

由图可以看出, S3 样件的尺寸偏差, 只有 14% 点位的尺寸偏差位于偏差上限与偏差下限之间, 86% 点位的尺寸偏差高于偏差上限, 这说明 S3 门板的实际尺寸小于理论尺寸, 即发泡倍率较低。这是由于熔体强度过大, 使得发泡困难, 造成发泡尺寸较低。

S2 样件的尺寸偏差, 有 90% 的点位位于偏差上限与偏差下限之间, 只有 10% 的点位位于偏差上限和偏差下限之外。这是由于 S2 样品的熔体强度适中, 发泡均匀。

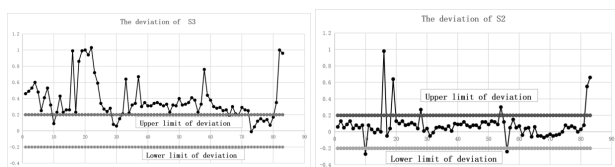


Figure 5 Dimensional deviation of foam door panel

(五) 发泡机理

为了更好的理解不同熔体强度的聚丙烯,对聚丙烯复合材料发泡性能的影响,其发泡机理如图6所示。图6(a)–6(c)为S1的发泡机理,图6(a)为发泡初期气体在S1中的分布状态,气体分子聚集、体积较大、数量较少。在螺杆的剪切作用下,气体逐渐在S1中均匀扩散开,如图6(b)所示,由于S1的熔体强度较低,气体扩散阻力较小^[8],此时气体呈小体积、多数量分散在材料中。气体扩散稳定后的状态如图6(c)所示,由图中可以看出,图6(c)材料中的气体呈现较大的椭圆状,聚丙烯的熔体强度较低,泡孔壁较薄,相邻的气体分子突破泡孔壁限制,融合成较大的气体分子。

图6(d)–6(f)为S2的发泡机理,图6(d)为发泡初期气体在S2中的分布状态,气体分子聚集、体积较大、数量较少。在螺杆的剪切作用下^[9],气体逐渐在S2中均匀扩散开,如图6(e)所示,由于S2的熔体强度适中,气体扩散阻力适中,此时气体呈小体积、多数量分散在材料中。气体扩散稳定后的状态如图6(f)所示,由图中可以看出,图6(f)材料中的气体呈现状态与图6(e)相近,这是由于聚丙烯的熔体强度适中,泡孔壁有强度有韧性,气体分子在稳定过程中始终以相对独立的状态存在,不会发生泡孔壁破裂而融合,而是呈小体积、多数量。

图6(g)–6(i)为S3的发泡机理,图6(g)为发泡初期气体在S3中的分布状态,气体分子聚集、体积较大、数量较少。在螺杆的剪切作用下,气体在S3中均匀扩散开,但由于熔体强度过

大,气体扩散困难^[10],因此,此阶段气体的数量只比如图6(g)略有增加,体积略有下降,如图6(h)所示。气体扩散稳定后的状态如图6(i)所示,由图中可以看出,图6(i)材料中的气体呈现状态与图6(h)相近,这是由于聚丙烯的熔体强度较大,泡孔壁强度大,气体分子在稳定过程中不会发生泡孔壁破裂而融合。

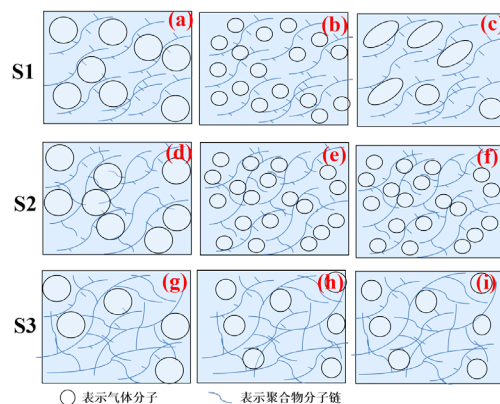


Figure 6 Foaming Mechanism Diagram

三、 结论

我们成功制备了不同熔体强度的聚丙烯复合材料,并将S2和S3应用于汽车门板中,验证其发泡效果。并用不同粘度的聚丙烯,并且借助POE增韧,可以获得熔体强度适中的聚丙烯复合材料。熔体强度过低,会使得泡孔壁强度过低,泡孔多为连泡,成为缺陷。熔体强度过高,不利于气体扩散,形成的泡孔较少,单个泡孔尺寸较大,发泡倍率较低。只有适宜的熔体强度,才能获得较好的发泡“三明治”结构,达到较好的发泡效果。

参考文献

- [1]Sun Wenlong, Chen Xiaokai, Wang Lu. Analysis of Energy Saving and Emission Reduction of Vehicles Using Light Weight Materials[J]. Energy Procedia, 2016, 88: 889–893.
- [2]Frey H C. Trends in onroad transportation energy and emissions[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2018, 68(6): 514–563.
- [3]明星星. 汽车内饰用聚丙烯材料的轻量化研究 [D]. 贵州大学, 2022.
- [4]Li Y, etc. Rheological, crystallization and foaming behaviors of high melt strength polypropylene in the presence of polyvinyl acetate[J]. J Polym Res. 2018; 25(2): 46.
- [5]Rong Deng, Tuanhui Jiang, Chun Zhang, et al. In-Situ Visualization of the Cell Formation Process of Foamed Polypropylene under Different Foaming Environments[J]. Polymers 2021, 13, 1468.
- [6]金阳, 谭小华, 陈贤益, 等. 长链支化制备高熔体强度 PP 的研究 [J]. 2002, 16(10): 24–28.
- [7]SH Yetgin, H Unall and A Mimaroglu. The Effect of Test Parameters on Friction and Wear Performance of PTFE and PTFE Composites[J]. Journal of Cellular Plastics, 2014, 50(6) 563–576
- [8]Jie Ding, Weihua Ma, Qin Zhong. Foaming of homogeneous polypropylene and ethylene–polypropylene block copolymer using supercritical carbon dioxide[J]. Polymer–plastics Technology and Engineering, 2013, 52: 592–598
- [9]Kim DY, etc. Effects of chain extender on properties and foaming behavior of polypropylene foam[J]. RSC Adv. 2019; 9(44): 25496–25507.
- [10]Bujin Liu, Tuanhui Jiang, Xiangbu Zeng, et al. Polypropylene/thermoplastic polyester elastomer blend: Crystallization properties, rheological behavior, and foaming Performance[J]. Polym Adv Technol. 2021; 32: 2102–2117.

市政工程水泥混凝土道路沥青化改造施工技术

罗锦州

礼泉县建筑工程质量安全监督站, 陕西 咸阳 713200

DOI: 10.61369/ME.2024070033

摘要： 伴随城市交通压力的不断增加，水泥混凝土道路长时间使用，不可避免会出现各类病害，对行车安全性和舒适度造成负面影响，这也是当前水泥混凝土道路沥青化改造技术大量投入使用的重要原因。沥青化改造可实现道路耐久度、防滑性能的提升，对交通环境进行改善，因此施工单位需对施工技术充分掌握。本文将从施工准备、施工工艺和施工保障措施等方面入手探讨，希望有所帮助。

关键词： 市政工程；水泥混凝土道路；沥青化改造；施工技术

Technical Construction of Asphalt Transformation of Municipal Engineering Cement Concrete Road

Luo Jinzhou

Liquan County Construction Engineering Quality Safety Supervision Station, Xianyang, Shanxi 713200

Abstract： With the continuous increase of urban traffic pressure and the long-term use of cement concrete roads, all kinds of diseases are inevitable, which will have negative impact on the safety and comfort of driving. This is also an important reason for the large-scale use of asphalt transformation technology for cement concrete roads. The asphalt transformation improve the durability and skid resistance of the road and improve the traffic environment. Therefore, the construction unit needs to fully grasp the construction technology. This paper will start from the aspects of construction preparation, construction technology and construction guarantee measures, and hope to help.

Keywords： municipal engineering; cement concrete road; asphalt transformation; construction technology

一、施工准备

（一）技术准备

技术方面，施工项目技术负责人应牵头，组织技术员开图纸审议会，对施工图进行研究，明确施工图是否符合施工现场实际情况，判断施工图是否符合有关规范。所有技术员均需熟悉设计意图，掌握技术要求，对于发现的设计图纸问题应集中总结，通过建设单位向设计单位反馈。技术员应依照三级交底原则，开展对施工班组的技术交底，交底内容涵盖施工技术、质量标准和安全施工措施等，并解答施工人员的具体疑问^[1]。此外，项目技术负责人应结合实际情况，完成施工方案与施工组织设计的编制，保证施工工序依照进度安排合理进行。最后，人员需要全面调查水泥混凝土道路路况，收集路面结构强度、破损情况等信息，辅助后续施工工序的进行。

（二）设备准备

现场施工的各类机械设备应齐全，包括装载机、沥青洒布机、摊铺机、压路机、破碎机、铣刨机等。所有机械设备都应做好全面维护，符合正常运行标准，避免其带病作业。与此同时，应准备足够的配件，机械设备运行阶段一旦出现异常状况，可以及时替换，避免中断施工^[2]。

（三）材料准备

水泥混凝土道路沥青化改造施工材料，主要包括沥青、集料和填料等。沥青材料以石油沥青为主，材料应与相关标准相符。材料进场之前，应由专人检验沥青材料相关指标，包括软化点、延度、针入度等，相关质量证明文件也应齐全，全部合格才能正常使用。

集料包括粗集料与细集料，粗集料以碎石为主，碎石应干燥、洁净，坚硬程度和针片状颗粒含量应符合标准，颗粒形状与立方体相对结晶。细集料以天然砂为主，不能有杂质，同时应干燥、洁净，颗粒级配应符合规范要求。进场之前，应由专人依照批次检验。

填料以憎水性石料研磨的矿粉为主，应结晶、干燥，不成团，质量也应达到施工标准。

（四）现场准备

施工之前，项目部人员应全面清理施工现场，若现场存在障碍物，影响材料或施工机具的进场，应提前拆除。此外，应在现场设置警示标志、交通导行设施等，落实施工现场交通疏导工作，避免影响行人与车辆的正常通行。原水泥混凝土也需要充分清扫，避免表面沉积杂物或尘土等^[3]。

二、施工技术

（一）原路面处理

针对水泥混凝土路面，项目人员应基于仪器检查为主，人工检查为辅的原则，收集路面病害信息，对病害情况进行总结，统计路面沉陷、错台、断板与裂缝等病害严重程度、类型与位置等，加强综合评估，基于评估结果明确处理方案。基于水泥混凝土路面病害类型的不同，处理方式也有一定差异。针对裂缝病害，若病害不具备扩展性，且宽度不超过3mm，可向裂缝中注入沥青胶结材料。若裂缝属于扩展性，或为贯穿裂缝，且宽度超过3mm，应先统一处理裂缝，后续将改性沥青、橡胶沥青等注入裂缝中，待胶结材料初凝之后，将玻纤格栅铺设在裂缝两端，避免裂缝向沥青面层逐渐反射。针对错台病害，若错台高度在10mm以下，可以用施工机具将错台磨平，若错台高度超过10mm，可将高处错台凿低，并采用细石混凝土找平（混凝土等级应符合施工标准）^[4]。针对断板病害，若水泥混凝土断裂相对严重，可以整体凿除，并在凿除位置浇筑新混凝土。浇筑之前，应充分清理基层，采用补强、压实等方式处理基层。混凝土浇筑之后，应检验其强度，通过检验后才能进行后续施工。

水泥混凝土路面铣刨，同样是处理病害的主要方式。铣刨深度需符合设计要求，若设计图纸并未对铣刨深度做出明确规定，通常达到3cm即可，表面不能有崎岖或磨损现象，实现原路面和沥青材料粘结性的提升。铣刨之后的路面应洁净平整，不能有松散颗粒累积。

（二）透层与粘层施工

透层施工是水泥混凝土路面施工后的工序，透层油以乳化沥青为主，依照设计要求控制乳化沥青用量与规格。喷洒之前，应充分打扫路面，保证路面洁净干燥。透层油应利用洒布车洒布，保证洒布均匀性，油液应向基层中渗透，渗透深度应控制在5mm及以上。洒布之后应将交通封闭，油液干燥之后，才能进行后续施工。

粘层施工需要在摊铺沥青下面层之前进行，施工人员需将粘层油喷在透层油表面。粘层油以改性乳化沥青或中裂乳化沥青为主，用量与规格应符合设计要求。粘层油同样应通过洒布车喷洒，保证喷洒的均匀性，洒布宽度与用量都需要合理控制，不能过量，也不能遗漏。喷洒完成后，应第一时间做好摊铺沥青面层的准备，以保证施工质量^[5]。

（三）沥青混合料摊铺

摊铺之前，应准备施工所用的沥青混合料。沥青混合料应结合设计配合比要求，控制拌和质量，拌和阶段，应对原材料拌和温度及用量等进行精准控制，使沥青混合料质量符合要求。通常情况下，可用150℃-160℃的标准控制混合料出料温度，并结合混合料种类及设备性能等，确定混合料种类。最终拌和的产品不能成团，也不能有花白料。拌和成功的混合料，应通过运输车向施工现场运送。车辆顶部应覆盖篷布，避免混合料淋雨、暴晒，或有杂物混入其中。实践中，一般需要依照车辆运输距离、摊铺速度与生产能力等，保证车辆配置的合理性，避免摊铺工序出现间断现象。摊铺之前，施工人员应对摊铺机参数进行调节，合理

控制仰角、高度与宽度等，使路面平整度与摊铺厚度达到设计标准。通常以每分钟2-6m的标准控制摊铺速度，摊铺机应匀速行进，摊铺不能出现遗漏现象，也不能中途卡顿。摊铺全程应由专人检查，若有异常情况，应第一时间纠偏调整^[6]。

（四）沥青混合料碾压

沥青混合料摊铺完成后，可进行初压操作。初压机具一般为轻型缸筒压路机，或振动压路机（振动装置需关闭），碾压次数控制在2遍即可。以不低于130℃的标准控制初压温度，碾压应以外侧为起始点，逐步碾压至中心线。碾压相邻位置应达到1/3轮迹重叠宽度，并以每小时1.6-1.9km的标准控制碾压速度。初压之后即可进行复压，复压机具可选择振动压路机或重型轮胎压路机，其碾压方式应符合设计要求。实践中，一般以不超过120℃的标准控制碾压温度，压实遍数需为6遍，并以每小时2-3km的标准控制碾压速度。复压完成后可第一时间进行终压，终压机具为双轮钢筒压路机，碾压3遍，目的需将轮迹彻底消除，保证路面光洁平整。一般以每小时2-3km的标准控制碾压速度，以不超过120℃的标准控制碾压温度^[7]。

（五）接缝处理

如果摊铺作业为两台摊铺机并行作业，可选择热接缝作为纵向接缝。摊铺阶段，应提前留出已摊铺混合料部分不碾压，宽度约15cm（上下误差不超过5cm），并将其作为高程基准面，用于后续摊铺。完成后续摊铺后，跨缝碾压，实现缝迹消除。横向接缝一般可选择平接缝，重新摊铺之前，施工人员会将粘层油涂抹在接缝位置，并以接缝处为起始点进行摊铺，选择缸筒压路机完成横向碾压。碾压带外侧应提前设置垫木，辅助压路机行驶。碾压新铺层宽度通常为15cm（最多不超过20cm），新铺层上全部铺完后，即可换成纵向碾压^[8]。

三、质量控制要点

所有施工用的原材料，包括沥青、集料和填料等，都需要在进场之前，由专人进行详细检验，通过检验之后方能进场。原材料进场情况需建立对应台账，方便管理人员通过台账，查阅原材料数量、规格和来源等，便于追溯质量。针对施工过程，包括原路面处理、透层、粘层施工、混合料摊铺、碾压等各道工序，施工人员应奉行按图施工的原则正确施工，并由专人对施工工序异常情况进行检查。以摊铺工序为例，质量监督人员应收集摊铺平整度、厚度等信息，判断摊铺质量是否达到要求。每个施工段完成后，应组织对施工指标的检测，不能放任施工问题，影响后道工序的施工。各项质量检验标准都需要达到要求，平整度可用直尺检测，允许偏差需控制在3mm以内；厚度允许偏差为+10mm；上面层压实度不应低于98%，下面层与中面层同指标不应低于97%；横坡允许偏差不应超过0.3%；宽度应符合设计宽度^[9]。

四、环境保护要点

首先，施工阶段应注重防扬尘，适当在施工现场洒水，起到

防止扬尘的效果。涉及粉状材料运输，应在运输车辆上加盖篷布，避免污染大气。其次，施工中产生的废水应预先沉淀，达到标准之后方能排放，不能直接向现场附近水体中排放。同时应分类收集施工废弃物，充分回收利用废弃物，提高利用率。若废弃物不具备回收价值，应当向垃圾场集中运输，防止污染环境。施工时间应尽量选在白天，避免夜间施工产生巨大噪声，影响附近居民的正常休息。同时应通过隔声屏障和消声器的安装，降低施工机械设备噪声。此外，应注重施工现场生态环境的保护，不能破坏生态景观与植被，完成施工后，应着力恢复施工区域绿化，避免对生态环境造成负面影响^[10]。

五、安全管理要点

现场应建立安全生产管理制度，人员应明确自身岗位职责，以个人为单位落实责任。项目部应开展安全教育培训，建立人员

对安全操作规程、法律条文的清晰认知，所有人员均需持证上岗，并每隔一段时间进行复审。施工现场应设置防护栏、警示灯和围挡等防护装置，对非施工人员起到警示作用。进入现场的人员应保证防护用品佩戴齐全，减少施工事故发生的可能性。此外，项目部还需要完善应急预案，一旦出现施工事故，可以结合应急预案要求，迅速开展救援和风险排除工作。

六、结束语

综上所述，水泥混凝土道路沥青化改造技术，需重视前期施工准备，各道工序施工质量控制，以及环境保护，安全管理等方面。其中，原路面处理，透层与粘层施工，沥青混合料摊铺和碾压，是改造施工的重点环节，施工人员需按图施工，保证施工质量达标，从而真正实现道路实用性的提升。

参考文献

[1] 元瑛. 市政工程施工水泥混凝土道路沥青化改造施工及管理 [J]. 建材发展导向, 2022, 20(16): 133-135.
[2] 马登峰, 孙家乐, 宋娟娟. 市政工程施工水泥混凝土道路沥青化改造施工及设备探讨 [J]. 中国设备工程, 2023(5): 242-244.
[3] 张磊. 市政工程施工水泥混凝土道路沥青化改造施工及管理 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(2): 103-105.
[4] 孙礼学. 市政工程施工水泥混凝土道路沥青化改造施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2024(5): 124-127.
[5] 冯艳. 温拌沥青施工技术在高速公路路面施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024(2): 133-135.
[6] 姚晋昌. 浅谈市政工程施工水泥混凝土道路沥青化改造施工及管理 [J]. 绿色环保建材, 2020(12): 108-109.
[7] 赖日辉, 石磊. 水泥混凝土路面施工工艺及质量控制 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2019(2): 234-234.
[8] 杨家永. 论市政工程施工道路排水管道施工技术要点 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2020(3): 263-263.
[9] 庞新伟. 分析水泥路面共振机械碎石化施工技术与应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2020(4): 105-106.
[10] 陈荣汉. 浅议旧水泥混凝土路面碎石化施工技术应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2020(12): 57-58.

房屋建筑工程监理现场安全管理策略探讨

陈蛟

广东巨正建设项目管理有限公司韶山分公司, 湖南 韶山 411300

DOI: 10.61369/ME.2024070008

摘要： 建筑工程施工现场环境杂乱、工序繁杂，安全事故频发已成为行业发展的棘手挑战，从高空坠落、物体碰击到坍塌故障，每一起安全事件都引起人员伤亡和财产损失，还极大阻碍建筑行业的可持续进步，监理作为管控房屋建筑工程质量与安全的关键一环，其现场安全管理工作成效直接影响到工程建设的安全与可靠属性，处在这样背景里，本文着重研讨房屋建筑工程监理现场安全管理策略，建设科学、系统且高效的安全管理格局，对促进工程建设整体水平具有重要意义。

关键词： 房屋建筑；工程监理；现场安全；管理

Discussion on On-site Safety Management Strategies for Housing Construction Project Supervision

Chen Jiao

Guangdong Juzheng Construction Project Management Co., LTD. Shaoshan Branch, Shaoshan, Hunan 411300

Abstract： The construction site environment of building projects is chaotic and the procedures are complex. Frequent safety accidents have become a thorny challenge for the development of the industry. From falls from heights, object impacts to collapses and malfunctions, every safety incident causes casualties and property losses, and greatly hinders the sustainable progress of the construction industry. As a key link in controlling the quality and safety of housing construction projects, supervision The effectiveness of on-site safety management directly affects the safety and reliability of engineering construction. Against this background, this paper focuses on discussing the on-site safety management strategies for housing construction project supervision and building a scientific, systematic and efficient safety management pattern, which is of great practical significance for promoting the overall level of engineering construction.

Keywords： house construction; engineering supervision; on-site safety; management

引言

在建筑工程项目中，为了确保工程质量和工期的顺利进行，监理现场管理起着至关重要的作用。监理是建设工程中的“第三方”，既要保障业主的权益，又要维护施工单位的合法权益，因此监理现场管理需要具备一定的思路和工作开展方式。

一、房屋建筑工程监理现场安全风险类型审视

（一）人员因素引发的安全风险

人安全是建筑施工的首要任务，监理人员必须对施工现场进行全面的监督与管理。这包括定期巡查施工现场，检查各项安全措施的落实情况，如安全网、安全帽、安全带等是否齐备并正确使用。同时，监理人员还需对施工人员进行安全教育和培训，提高他们的安全意识和操作技能。对于发现的安全隐患，必须及时督促施工单位整改，确保施工过程的安全^[1]。

（二）设备设施因素引发的安全风险

施工设备及设施的安全状况对现场安全有直接影响，大型起重设备，如塔吊与升降机，若长时间运转且维护缺位，较易出现钢丝绳断开、制动失灵等状况，引发物体打击状况或设备翻覆，施工用电环节隐患十分明显，擅自拉接电线、配电箱未设防护措施、电气设备漏电等情况屡见不鲜，容易引发触电方面的事故，安全防护设施的缺失同样危险重重，楼梯口、电梯井口、基坑边等地方倘若未设置稳固的防护栏杆与安全网，施工人员稍有差错便会坠落受伤，某项目塔吊钢丝绳出现磨损却未及时更换，吊运

重物时即刻断裂，引发下方人员伤亡事故^[3]。

（三）环境因素引发的安全风险

自然跟作业环境是不可小觑的风险源头，恶劣天气对施工安全威胁极大，强风可将脚手架掀翻，进而吹倒塔吊，暴雨易导致基坑坍塌以及现场产生积水，雷电或许能引起人员触电及设备损坏，高温会引起工人中暑以及疲劳作业，就作业环境而言，施工现场布置无序、场地逼仄，极易引发材料搬运时的碰撞；照明微弱影响施工人员视野，造成误操作概率增大；通风效果差造成有害气体集聚，影响人员的健康水平，某工地因暴雨未抓紧时间加固围挡，引发围墙轰然倾塌，造成周边人员受围墙砸伤^[4]。

（四）管理因素引发的安全风险

管理漏洞为安全事故埋下潜在隐患，安全管理相关制度存在漏洞，岗位安全职责划分模糊不清，隐患排查、整改及验收流程的规范程度欠缺，造成安全管理无矩可蹈，部分管理人员安全责任观念十分淡薄，在安全工作上敷衍搪塞，未把责任具体分配到个人，安全教育培训只走形式，培训内容未贴合实际，施工人员不易掌握必需的安全知识技能，安全投入数额短缺，为降低费用削减防护设备购买、推迟隐患治理，致安全防线徒有其表^[4]。

二、房屋建筑工程监理现场安全管理机制分析

房屋建筑工程的监理现场安全管理乃系统性工程，其关键是运用科学管理实现施工安全的目的，该管理活动把人员、设备、环境、管理四大风险因子列为管控对象，目的是建立预防为主、防治相佐的安全管理体系，从管理要素协同的角度审视，安全管理制度作根基，厘清各方职责及工作步骤；安全教育培训是增进人员安全意识及技能的关键途径；安全投入为管理措施的执行提供物质后盾^[5]。各要素关联互依、相互搭靠，共同对施工现场发挥效用，在运行机制范畴内，监理单位借助动态巡查、隐患排查、整改跟踪等手段，及时发现并铲除安全隐患，构建“察觉问题—剖析问题—处理问题”的闭环管理体系，采用技术举措，像运用 BIM 技术开展施工模拟、采用智能监测设备实时监管高危作业，增进安全管理的精准程度与时效水平，凭借房屋建筑工程监理安全管理多维度协同模型，构造综合安全评价值计算式：

$$S = \sum_{i=1}^4 (W_i \cdot S_i)$$

其中，S为综合安全评价值（0-10分），Wi为第i类风险要素权重（人员培训 W1=0.3、设备检查 W2=0.25、环境监测 W3=0.25、管理机制 W4=0.2），Si为各要素评分（1-10分）。安全等级划分标准：

- （1）高风险：S<6.0
- （2）中风险：6.0 ≤ S<8.0
- （3）低风险：S ≥ 8.0

表1 房屋建筑工程监理安全要素评估与权重分配表

安全要素	评分（1-10分）	权重
人员培训有效性	8	0.3
设备检查覆盖率	7	0.25
环境监测实时性	6	0.25
管理机制完善度	9	0.2
综合评价值	—	—

模型中人员培训（权重30%）和管理机制（权重20%）对综合安全值影响显著，实际评分8分和9分拉动整体安全等级至中风险（7.45分）。数据表明，设备与环境要素（评分7分、6分）为薄弱环节，需针对性加强监测与检查覆盖率以提升安全等级至低风险（≥8.0分）。

三、房屋建筑工程监理现场安全管理建议

（一）构建完善的安全管理制度体系

安全管理制度是监理现场安全管理的根基，需打造覆盖建设各方的安全责任规章，界定建设单位、监理单位、施工单位在安全管理方面的具体职责，对从项目负责人到一线施工人员的安全责任清单加以细化，以签订责任书的形式保障责任精准到人。构建科学合理的安全检查规章，设定日常巡查、专项检查和综合检查的频次与尺度，对脚手架搭建、施工用电、起重设备运行等关键之处开展重点排查，修缮隐患排查治理制度，搭建隐患分级分类管理架构，明确隐患从上报、整改到验收的流程，保障隐患迅速被发现、有效整治，也得结合工程实际情形，编制针对性显著的安全事故应急预案，按周期组织应急演练，增进各方处置突发状况的水平，采用制度的系统性结构，为安全管理赋予清晰的标准与指引，使安全管理工作有章可守、有据可鉴^[6]。

（二）强化人员安全意识与专业能力

安全管理核心要素当属人员，其安全意识与专业能力对管理成效有着直接影响，监理、施工单位必须严格把好人员准入关，要让监理人员具有相应的专业资质及安全管理能力，尤其是特种作业人员得持证上岗，应定期对人员资质实施复核程序。夯实安全教育培训工作，结合不同岗位人员实际制定差异化培训方案，就新入场的人员而言，推行全面的三级安全宣教活动，让他们掌握施工现场安全规章及基本操作规程；就管理人员而言，按期安排安全管理知识培训及典型案例研讨活动，增强其风险预判与应急处置素养；就一线施工人员而言，采用现场实操展示、短视频授课等办法，夯实安全操作技能培训。形成有效的激励模式，构建安全奖励资金池，对严守安全规定、及时发现且上报安全隐患的人员给予表扬与奖励，对违规操作、多次教育仍我行我素的人员实施严厉处罚，凭借赏罚兼顾的途径，唤起全员投身安全管理的积极性，缔造“人人说安全、人人护安全”的积极氛围^[7]。

（三）推动安全管理运用智能化技术

伴着科技的发展，智能化技术推动安全管理出现新的突破，监理单位宜积极采用建筑工程安全管理信息化平台，把人员、设备管理与隐患排查等业务数字化整合起来，凭借实时采集施工现场的数据操作，诸如人员考勤统计情况、设备运行实时状态、隐

患整改进展详情等，生成以可视化形式呈现的安全管理报告，实现对现场安全局势的动态监控与精准调控。实行智能监测设备推广应用，在塔吊、施工电梯等大型机械装置上设置监测系统，实时掌握设备运行参数，若有异常产生，马上发出预警；在基坑、高支模等危险作业区域投放传感器，对位移、沉降这类数据开展实时监测，提前预防事故降临，充分展现 BIM 技术在安全管理里的作用，利用 BIM 模型对施工进度做模拟剖析，预先找出施工方案里潜藏的安全隐患，进而优化施工工序；进入施工这一阶段，运用 BIM 模型实施安全交底工作，让施工人员更直观地掌握施工工艺与安全风险点，强化安全管理的精准把控与有效性，凭借智能化技术的采用，实现安全管理由被动承接向主动预防转化^[8]。

（四）建立全方位的安全监督体系

有效的监督是保障安全管理措施全面落实的必要条件，监理单位需自身构建完备的内部监督机制，成立专门的安全巡查小组，按期对施工现场安全管理工作实施全面检查和专项检查，比对安全管理的制度与标准，对安全防护设施、人员操作动作、隐患整改状况等展开严格核查，若发现问题，即刻督促有关责任方开展整改工作，并跟进整改落实效果，实现管理的闭环状态^[9]。以积极姿态接纳外部监督，主动呼应政府主管部门的安全执法检查

查工作，切实执行整改要求；招请行业协会等第三方机构对施工现场实施安全评估，借助专业资源揪出管理漏洞，提出改进办法，开辟社会监督渠道，创建举报电话、电子邮箱端口，倡导社会公众加入安全监督行列，对证实举报无误的给予奖赏，构建全社会共同关心、共同督导的良好局面。制订建筑市场安全信用评价体系，把监理与施工单位安全管理表现纳入信用评价体系内，向安全管理成果出众的单位给予信用加分及政策支持，对存在重大安全隐患或发生安全事故的单位实施信用减分，限制其进入市场资格，依靠信用约束引导企业自觉强化安全管理，提升行业总体安全管理层级^[10]。

四、总结

综上所述，房屋建筑工程监理现场安全管理为系统且长期的一项工作，上述对安全风险的解析、管理机制的探讨与针对性意见，为构建安全防线开拓了思路，唯有把各项策略付诸实践，不断精进管理体系，才可切实维护施工安全，带动建筑行业平稳、高质量迈进。

参考文献

-
- [1] 程飞,赵曙红,冯桤帆.建筑工程施工现场安全监督管理分析[J].建筑工程技术与设计,2015,(20):1434.
- [2] 林文剑.房屋建筑工程监理现场质量管理的策略探讨[J].中国科技期刊数据库·工业A,2023.
- [3] 赵杰.房建施工监理现场的质量管理策略探析[J].居舍,2020(13):166-166.
- [4] 刘小波.房屋建筑工程监理现场质量管理探讨[J].住宅与房地产,2018,(19):149.
- [5] 马佳.浅析房屋建筑工程施工现场的安全管理[J].居舍,2023,(22):123-126.
- [6] 赛智.浅析房屋建筑工程施工现场的安全管理[J].大众科技,2023,25(03):194-197.
- [7] 苏新宾.浅析房屋建筑工程现场安全管理水平的提高[J].居舍,2020,(15):120+110.
- [8] 豆兴东.房屋建筑工程施工现场的技术及安全管理研究[J].现代物业(中旬刊),2018,(10):173.
- [9] 赵婧.探析房屋建筑工程施工现场的安全管理及防范[J].山西建筑,2016,42(34):253-254.
- [10] 赖森贞.房屋建筑工程监理现场质量管理[J].建筑技术开发,2021,48(24):183-184.

拟建地块与规划轨道交通的影响分析

储德华

上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235

DOI: 10.61369/ME.2024070009

摘要： 随着城市化进程加速，轨道交通周边地块开发日益密集，由此产生的施工扰动、荷载增加、水文环境变化以及风险传导等问题对轨道交通建设及运营安全构成潜在威胁。随着城市轨道交通工程迅速发展，临近轨道交通的沿线建筑工程随之增加，但轨道交通工程的建设与相关地块建筑工程建设往往并不同步，为解决地块与轨道交通不同步问题，减少地块与轨道交通建设的相互影响，对地块与轨道交通的模型影响分析研究，为地块及轨道交通建设方案的可行性及安全性提供参考，以确保在地块建设的同时后期轨道交通建设依然能顺利进行。

关键词： 地块；规划轨道交通；影响分析

Analysis of the Impact of Proposed Land Parcel and Planned Rail Transit

Chu Dehua

Shanghai Tunnel Engineering and Rail Transit Design Institute, Shanghai 200235

Abstract： With the acceleration of urbanization, the development of plots around rail transit has become increasingly intensive. The resulting construction disturbances, increased loads, changes in hydrological environments, and risk transmission pose potential threats to the safety of rail transit construction and operation. As urban rail transit projects rapidly develop, the number of construction projects along the routes has also increased. However, the construction of rail transit projects often does not align with the construction of related plots. To address the issue of misalignment between plots and rail transit, and to minimize the mutual impact between plot construction and rail transit development, this study focuses on the analysis of model impacts between plots and rail transit. This research aims to provide references for the feasibility and safety of plot and rail transit construction plans, ensuring that rail transit construction can proceed smoothly while the plots are being developed.

Keywords： plot; planning rail transit; impact analysis

引言

由于轨道交通的建设与城市建设的速度不同步，且大多数地块的建设先于轨道交通的建设。为节省轨道交通后期建设的投资，并减小后期轨道交通建设时对地块建筑的影响，在地块建设前期，就对拟建地块与规划轨道交通相对位置关系进行建模，并对模型进行有限元分析，通过影响分析的结果，对拟建地块与规划轨道交通的方案进行分析，研究二者在施工过程中的相互影响，对拟建地块及规划轨道交通的方案可行性提供参考。

本文以规划轨道交通线路与拟建地块的相对位置关系为例，通过建立三维有限元模型对车站及区间施工引起的拟建地块建筑物的变形进行数值模拟分析，对地表沉降、围护变形及拟建地块建筑物结构变形进行了预测。

一、工程概况

拟建地块中有B1#楼、B2#楼及S3#楼在规划轨道交通规划车站的影响区范围内，其中B1#楼、B2#楼及S3#楼与规划车站站附属结构边的最近距离分别约为32.6m、20.3m

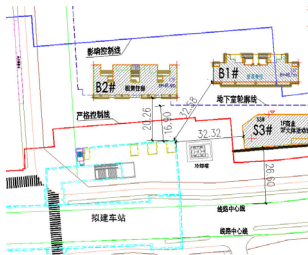


图1: 拟建建筑与规划轨道交通的位置关系图

和32.3m，S3#楼距离规划轨道交通的区间线路中心线最近距离约26.6m。

二、工程地质及水文条件

(一) 地质条件

拟建场地第四纪地貌型态属江淮丘陵岗地微地貌单元。原始地貌已破坏，场地总体较平坦，局部堆土较高，依勘探孔孔口

高程计，一般为24.57~29.51m，最大高差4.96m。为吴淞高程系统。

综合分析钻探、原位测试及室内的土工试验成果，拟建场地的地层层序自上而下可分为：①层杂填土(Qml)、②层粉质粘土(粘土)(Q3al+pl)、③层粘土(Q3al+pl)、④层粉质粘土夹粉土(Q3al+pl)、⑤层残积层(Q3al+pl)、⑥层强风化泥质砂岩(K)。

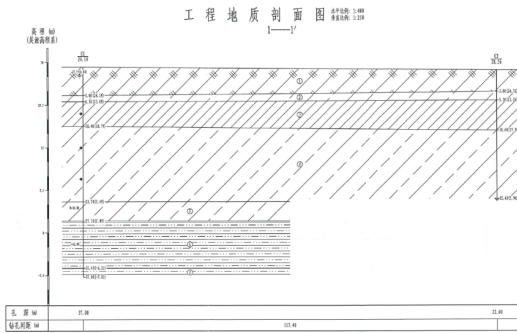


图2：区域典型地质剖面图

表1：土层材料属性

编号	土层	压缩模量 (kN/m ²)	容重 (kN/m ³)	粘聚力 C (kPa)	摩擦角 Φ (°)
①	杂填土	6600	18.5	5	8
②	粉质粘土	8640	18.9	32.2	15
③	粘土	16260	19.2	85.5	12.6
④	粉质粘土夹粉土	8470	18.9	31.4	13.4
⑤	残积层	9500	20.4	32	18
⑥	强风化泥质砂岩	25000	20.9	90	24
⑦	中风化泥质砂岩	30000	21.5	180	28

(二) 水文条件

根据现阶段钻探揭露，拟建场地①层杂填土中埋藏有上层滞水，一般无稳定的自由水面，主要受大气降水和地表水渗入补给；中部土层为粘性土，渗透性相对较小；下部土层中的粉土及风化岩层中埋藏有承压性孔隙及裂隙地下水，其水量较丰富。

现阶段勘察期间进行水位观测，测得钻孔内地下水的混合静止水位埋深1.2~3.0m，其静止水位标高为25.63~28.29m。地下水位年变幅为3~5m。

三、计算软件与计算模型

本次分析采用岩土、隧道结构专用有限元分析软件 MIDAS/GTS 进行计算。该软件是具有强大的后处理功能，能够输出结果等值线、彩色云图、等值面及矢量分布图，能够输出结构单元的内力，能够直接输出实体单元内力，能够输出各阶段孔压变化，能够在输出视图上添加注释，能够绘制监测点变化曲线（曲线管理器），能够自动生成计算结果报告和动画，在计算过程中能够预览计算结果以便于及时检查和修正模型^[1]。

MIDAS/GTS 的施工阶段分析采用的是累加模型，即每个施工阶段都继承了上一个施工阶段的分析结果，并累加了本施工阶段的分析结果。也就是说上一个施工阶段中结构体系与荷载的变化会影响到后续阶段的分析结果^[2]。

为了研究施工过程中各结构构件的荷载效应，以便指导设计，本次分析土体材料本构模型取用德鲁克-普拉格 (Drucker - Prager) 弹塑性模型。车站和房屋结构按线弹性考虑^[3]。

表2：结构材料属性表

主要构件	混凝土等级 / 钢	弹性模量 (kN/m ²)	泊松比	重量密度 (kN/m ³)
车站结构	C35混凝土	31500000	0.2	25
区间管片	C50混凝土	35500000	0.2	25
钢支撑	Q235	200000000	0.2	78

四、地块建筑与轨道交通模型分析

(一) 模型的建立

本次有限元影响分析采用土层结构法进行计算，主要包含以下内容：

地块 B2#、S3# 楼、规划轨道交通线路区间隧道、土层，模型的计算范围长宽根据区间隧道边线外放30m，地块地下室边线外放30m 确定；深度范围根据区间隧道底下放10m 确定。根据以上原则，本次计算模型范围为250m × 133 × 35m。施工场地地基模型按照勘察报告资料选取，根据工程地质资料及地形状况，进行场地有限元模型的建立。由于有限元单元规模限制，单元网格尺寸限制在2~4m，针对复杂地层土分布，尽可能模拟真实的地层土的分布规律和力学特征，当单元尺寸限制将局部小区域土层材料归一化处理时，考虑数值分析的偏于安全的要求，土层选用力学性能低的材料。地基土的非线性本构与屈服力学特性层采用修正摩尔库伦模型描述，土层材料摩擦角、粘聚力等参数按照地质勘察报告推荐的力学参数选取^[4]。整体结构模型如下图所示：

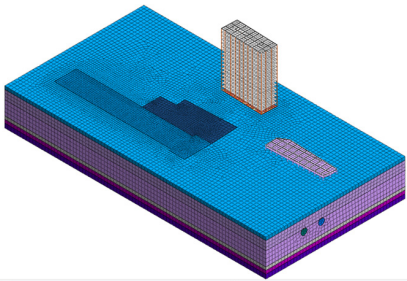


图3：结构模型图

(二) 模型的分析

本次有限元影响分析采用土层结构法进行计算，主要包含以下内容：

根据线路纵断面方案，区间隧道埋深约17.8~24.7m。通过建立三维模型对地铁车站、区间及附属的施工过程进行模拟，车站及区间隧道实施对本工程 S3# 楼、B2# 楼的影响分析结果如下：

a. 车站主体基坑开挖到底

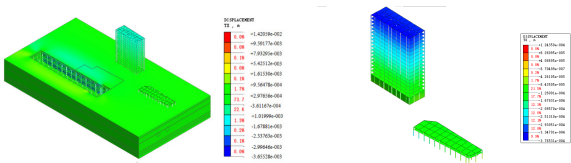


图4：车站主体基坑开挖水平位移结果

如图4，此工况下，基坑最大水平位移约为14.25mm，

S3#楼最大水平位移约为0.2mm、B2#楼的最大水平位移约为0.38mm。

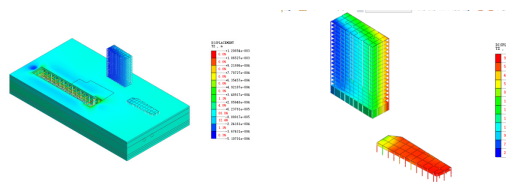


图5: 车站主体基坑开挖竖向位移结果

如图5计算结果, 此工况下, S3#楼的最大竖向位移为0.28mm, B2#楼的最大竖向位移为0.46mm, 变形数值较小, 远小于规范要求。

b. 车站主体结构回填到顶

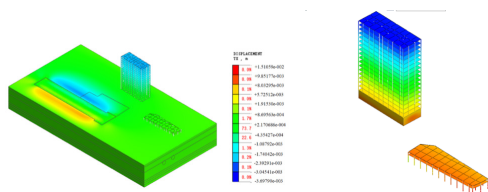


图6: 车站主体结构回填到顶水平位移结果

如图6, 此工况下, 基坑最大水平位移约为15.10mm, S3#楼最大水平位移约为0.25mm, B2#楼的最大水平位移约为0.88mm。

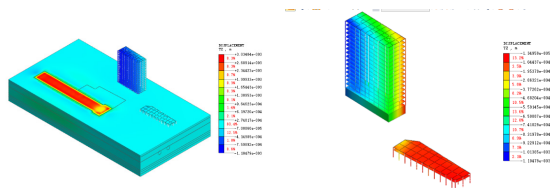


图7: 车站主体结构回填到顶竖向位移结果

如图7计算结果, 此工况下, S3#楼的最大竖向位移为0.29mm, B2#楼的最大竖向位移为1.10mm, 变形数值较小, 远小于规范要求。

c. 区间隧道施工

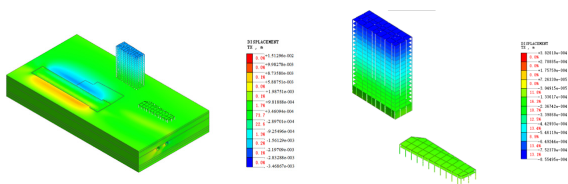


图8: 区间隧道施工水平位移结果

如图8, 此工况下, 区间隧道最大水平位移为4.16mm, S3#楼的最大水平位移为0.34mm、B2#楼及地下室的最大水平位移为0.86mm。

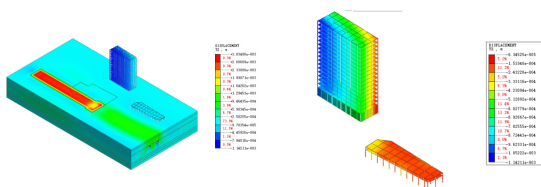


图9: 区间隧道施工竖向位移结果

如图9, 此工况下, 区间隧道的最大竖向位移为3.03mm, S3#楼最大竖向位移约为0.33mm, B2#楼及地下室的最大竖向位

移约为1.14mm。

d. 车站附属基坑开挖到底

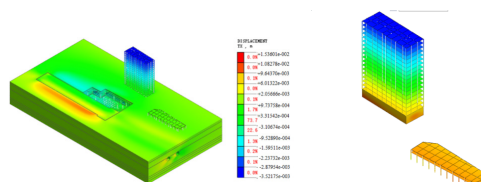


图10: 车站附属基坑开挖水平位移结果

如图10, 此工况下, 附属基坑最大水平位移约为6.12mm, S3#楼最大水平位移约为0.36mm、B2#楼的最大水平位移约为1.37mm。

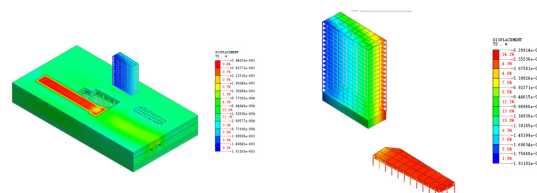


图11: 车站附属结构基坑开挖竖向位移结果

如图11计算结果, 此工况下, S3#楼最大竖向位移约0.38mm, B2#楼的最大竖向位移为1.91mm。

五、结论与建议

(1) 通过对规划车站主体、附属及区间施工进行模拟, 地铁施工引起的拟建 S3#楼最大水平位移约 0.36mm, 最大竖向位移约 0.38mm; 对拟建 B2#楼及地下室最大水平位移约 1.37mm, 最大竖向位移约 1.91mm, 发生在附属结构施工完成后。变形数值较小, 均满足规范要求。

(2) 根据规划轨道交通的施工对拟建地块的影响分析结果, 地铁施工时对地块内建筑物有一定的影响, 建议地块位于轨道交通影响控制区范围内的建筑物尽可能采用桩基、筏板等整体性较好的基础, 如采用天然地基, 应适当加大基础刚度, 以进一步减小建筑物受轨道交通施工的影响。

(3) 轨道施工会引起周边土体位移, 对混凝土结构产生不利变形, 对桩身产生附加弯矩、应力和位移; 因此地块建筑设计中应提高结构强度, 对地下室底板、侧墙及桩基刚度、桩顶竖向和水平承载力等要求进一步提高, 从而提高建筑结构的安全性能。

参考文献

- [1] 廖宇颢; 肖杨; 王晓枫; 靳鹏; 张永超. 既有地铁隧道旁侧基坑开挖影响分析 [J]. 科技通报. 2021, 37(11): 91-97.
- [2] 黄筱淇; 胡盛亮; 李达宏. 基坑开挖对邻近地铁结构影响的数值模拟研究 [J]. 河南科技. 2023, 42 (22): 67-73.
- [3] 黎大鹏; 胡军然; 贾伟. 地铁车站上方分洪箱涵分层开挖施工可行性研究 [J]. 城市住宅. 2019, 26 (04): 125-127.
- [4] 侯俊. 深入探讨地块开发输入对地铁车站建设的影响 [J]. 建筑工程技术与设计. 2022, 10(6): 109-111.

分析水利水电建筑工程中的基础灌浆施工

姜湘丰

宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司湖南分公司，湖南 长沙 410000

DOI: 10.61369/ME.2024070013

摘 要： 水利水电工程中，基础灌浆施工是保证工程质量、提升结构稳定性和延长使用寿命的关键环节。基础灌浆工艺通过填充结构裂缝、孔隙及空隙，有效改善土体和混凝土结构的力学性质。本文分析了基础灌浆施工在水利水电建筑工程中的应用，探讨了施工过程中常见问题及其解决方法，同时评估了灌浆质量的控制措施。通过理论分析与工程实践相结合，提出了优化基础灌浆施工技术的建议，为今后的水利水电工程建设提供参考。

关 键 词： 水利水电工程；基础灌浆；施工技术；质量控制；力学性能

Analyze the Foundation Grouting Construction in Water Conservancy and Hydropower Construction Projects

Jiang Xiangfeng

Ningxia Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., LTD. Hunan Branch,
Changsha, Hunan 410000

Abstract： In water conservancy and hydropower projects, foundation grouting construction is a key link to ensure project quality, improve structural stability and extend service life. The foundation grouting process effectively improves the mechanical properties of soil and concrete structures by filling structural cracks, pores and voids. This paper analyzes the application of foundation grouting construction in water conservancy and hydropower construction projects, discusses common problems during the construction process and their solutions, and simultaneously evaluates the control measures for grouting quality. By combining theoretical analysis with engineering practice, suggestions for optimizing the foundation grouting construction technology were put forward, providing a reference for the future construction of water conservancy and hydropower projects.

Keywords： water conservancy and hydropower engineering; foundation grouting; construction technology; quality control; mechanical properties

引言

在水利水电施工项目中，其中灌浆施工技术的应用较为广泛，它对于建设高质量的水利水电工程项目，具有一定的主导作用。其中灌浆施工技术机构具有一定的复杂性，为此，做好水利水电工程的灌浆和基础施工技术具有极为重要的作用，不仅对环保建设和资源的有效利用方面做出了重要贡献，还对水利水工程的施工质量和安全提供了有力保障。基础灌浆施工不单单涉及传统的混凝土施工技术，还糅合了现代灌浆技术与材料科学的前沿突破，需要对灌浆方法、材料的挑选、施工工艺及质量检测等开展系统分析与优化，以保证灌浆效果契合预期设定。

一、基础灌浆施工技术的应用与原理

（一）基础灌浆的定义与目的

与其他建设项目不同，水利工程是一项繁琐复杂的综合性工程，涉及范围广，施工工序复杂，施工环境复杂多变，受水文地质及资质构造的影响极大。一般情况下，水利工程施工的天然地基都存在一定的缺陷这些缺陷的存在会给水利工程施工埋下安全隐患，具有极大的危害性。为了防止出现水利工程坍塌或者沉陷等情况，在水利工程施工时，就需要采用灌浆技术来处理天然地基缺陷，提供水利工程中灌浆技术的应用性。基础灌浆为一种注入液态或膏状材料的工艺，普遍应用在土建工程领域，尤其在对混凝土结构和土体的修复加固。该工艺将灌浆材料灌入混凝土或土体的孔隙、裂缝等部位，可以切实填充中间的空隙，优化结构的整体特性。基础灌浆的主要目的是强化结构的稳定性，增进其抗

压强度及抗渗能力，防止水流借裂缝渗透，由此提升其持久度和安全性。

基础灌浆还可增进土体或混凝土的抗裂性，降低应力集中或外力作用引起的结构破坏风险。凭借精确调节注浆材料的配比及注入途径，能针对各类工程需求实施定制方案，以此极大地提升灌浆的实际效果。基础灌浆的适应性十分高，可应用于新建工程，也可针对已有结构开展修复加固，特别在地下工程、隧道建造与大坝加固事宜中起到重要功效，属于提升建筑物长期使用性能的关键技术。

（二）常见的基础灌浆材料

基础灌浆材料的选取对灌浆效果及工程质量举足轻重，常见的灌浆材料主要涵盖水泥基、化学及复合型灌浆材料，每种材料皆具备不同性能特色，契合不同的施工需求^[1]。广泛使用的水泥基灌浆材料是传统材料，适用多数种类的土质和结构，呈现出较好的强度及耐久性，尤其适合一般性加固与填充施工。它在土体及混凝土结构中展现出良好的粘结性与抗渗性，多用于基础修复、裂缝填充以及土体的加固处理^[3]。

化学灌浆材料一般用于特殊工况下的工程施工，如高湿度、高温、有腐蚀性的环境或复杂地质状况中，化学灌浆材料体现出较强的渗透及反应特性，可迅速达成固化，填充微末裂缝，强化结构的密封性及抗渗特性，在地下工程、隧道以及防水工程中，化学灌浆材料尤为多见。复合型灌浆材料融合了水泥基材料与化学材料的长处，体现出更强的适应水准，可适配多种环境的条件，提升施工的整体成效。选择材料要结合土壤条件、裂缝大小、施工环境等多重因素综合判断，以保障灌浆施工实现最佳效果及工程质量。

（三）基础灌浆的施工原理

基础灌浆基本原理为把浆液注射到结构中的孔隙、裂缝或空隙地方，借此填充这些空隙，进而提升结构的力学特性与抗渗特性。在施工进行的阶段中，浆液凭借孔隙及裂缝的压力传导效应，能渗透到较深层次的裂缝跟孔隙，实现强化结构与修复受损范围的目的。依靠这种举措，基础灌浆不但可增强混凝土或土体稳定性，还可切实阻止水分渗入，增进结构的抗渗特性，阻挡水害与腐蚀侵害。

在实际开展施工的时候，为达成良好的灌浆效果，要对浆液的流动性、黏度和固化时间进行精准掌控。流动性直接关乎浆液的渗透性和充填效果，黏度决定浆液是否能均匀填充到裂缝的各个角落，而固化时间决定着浆液的硬化效果和最终强度状况^[2]。选择合适的浆液配方并调节施工参数举足轻重，保障灌浆材料可充分充填裂缝且最终固化，得到理想的修复与加固成果。通过精准的把控与技术实施，基础灌浆可显著增强结构的耐久性与安全性，提升其使用时长。

二、基础灌浆施工中的技术难点与解决措施

（一）灌浆压力控制

灌浆压力为基础灌浆施工中一个关键参数，直接牵扯到灌浆

效果和工程质量高低。当灌浆压力达到过低水平时，浆液难以充分渗入结构的孔隙与裂缝，造成灌浆成效未达预期，达不到预期的加固修复预期成效。尤其是针对微小裂纹和深层的空洞，低压灌浆大多无法达成有效填充，可能会让结构的修复不充分，进而影响该结构的强度与抗渗性。

过高的灌浆压力同样会引发风险，过高压力有可能造成混凝土结构遭受破坏。在高强度结构的范畴内，可能会引起裂缝增大，乃至引发结构崩溃，过大压力可能引起浆液外溢，甚至对周围环境产生负面效果，进而干扰施工的顺利开展。在基础灌浆施工过程中，合理把控灌浆压力意义重大，施工人员需要依照具体工程需求、结构状况及材料特质，调控灌浆设备的压力控制环节，保证浆液能在合适压力下渗入裂缝与空隙中，同时杜绝不必要的风险及损失^[3]。采用精准调节灌浆压力，可保障灌浆质量及工程的安全性，提高结构的长期稳固性。

（二）灌浆质量检测与控制

灌浆质量的好坏直接关系着工程整体质量，对结构的稳定性及使用时长有影响。当进行灌浆施工时，应采用多种办法实时监控与评估灌浆质量，保证质量良好，在灌浆过程中，可通过调控灌浆压力、流量与浆液回注等参数检测灌浆效果。这类监控措施可助力施工人员及时发现灌浆过程中可能存在的状况，比如压力不足造成的灌浆分布不均，或面临浆液回流不畅的问题。

在完成灌浆操作后，保障工程质量，质量检测是关键一环。如水密性测试、超声波探伤等是常见的灌浆质量检测方式，水密性测试的主要目的是检测灌浆后结构能否有效阻挡水分渗入，审视裂缝是否全然封堵，保证抗渗功效达到设计预期；超声波探伤借助声波的传播特性，检测浆液是否充入所有裂缝及空隙，判别灌浆是否合格，是否存在漏检的区域。采用这些检测途径，可切实评估灌浆的品质，保障结构修复与加固效果契合预期标准，保证工程在长期内的安全与可靠。

（三）灌浆材料的选择与配比

在基础灌浆施工中，灌浆材料的甄选是关键部分，直接决定灌浆效果及工程质量水平。不同类型的灌浆材料，其固化时间、强度、渗透性与适应性存在区别，选择的时候要根据具体施工的环境与要求来定夺。水泥基灌浆材料固化的速度偏慢，宜用在常规土壤及混凝土结构修复；而化学灌浆材料大多时候固化速度快，适合对快速修复有要求的工程，尤其在潮湿或腐蚀性的环境中有着良好表现。

灌浆材料的配比也是影响灌浆效果的关键要素之一。在施工工作开展阶段，应依据土壤类型、裂缝大小及结构特性调整灌浆材料的配比。针对土质松散或裂缝宽大的基础，要选用渗透性较高的灌浆材料才行，进而保证浆液能深入裂缝深处并充分填满^[4]。针对混凝土结构中的微小裂缝而言，要选用粘结力强的灌浆材料，保证浆液跟基础结构形成良好贴合，进而提升加固效果及耐久性。通过合适筛选及调配灌浆材料，可充分发挥其修复与加固功效，保障工程的质量与长期稳固性。

表格 1：不同灌浆材料的性能对比

材料类型	固化时间	抗压强度 (MPa)	抗渗性	适用环境
水泥基灌浆材料	2-4 小时	30-50	良好	普通土质、轻度裂缝
化学灌浆材料	10-30 分钟	15-40	优秀	极端环境、大裂缝
复合型灌浆材料	1-3 小时	40-60	较好	重度裂缝、高压环境

三、优化基础灌浆施工的措施与建议

（一）优化施工工艺

为增进基础灌浆施工的效率及质量，适宜优化施工工艺意义重大。精准把握灌浆量是保证施工质量的基础要求，过多或过少的灌浆量可能会使施工效果不理想。过多灌浆会让材料被浪费，增加施工成本，而灌浆量过少可能会导致裂缝与空隙不能有效填充，进而影响加固的实际效果与结构的稳定性。施工人员需要依照工程需求与结构情形，精准算出所需灌浆的量，且严格依照要求加以把控。

合理安排灌浆时间与顺序，也是提升施工效率的关键。灌浆时间过短也或过长，皆可能对浆液的渗透效果及固化进程造成影响。合理的灌浆次序可保障浆液均匀渗透、充分填充裂缝，防止因操作不当引起灌浆不均匀现象或出现空洞。在实际施工阶段时，施工人员需依据土质状况、裂缝大小以及结构复杂程度，灵活调适灌浆设备与工艺，及时应对施工环境的多样变化。在遭遇复杂地质条件与特殊结构情形时，可能应采用不同规格的灌浆材料与技术手段，保障施工按计划顺利进行，避免出现灌浆缺乏或分布不均衡等现象，以此实现基础加固和修复效果的极致化。

（二）完善灌浆材料的研发与应用

伴随建筑技术的不断优化，基础灌浆材料的研发及应用一直更新与创新，传统的灌浆材料虽可满足基础修复加固的基本期望，但当工程复杂度上升以及对环保、可持续发展有要求时，探索新型灌浆材料显得极为关键，新型灌浆材料不仅得拥有优异的力学性能与抗渗能力，也要具备自我愈合功能和环保属性，借此进一步强化灌浆效果和结构的长期持久性。

拥有自愈合能力的灌浆材料会在裂缝发生后自我修复，防止

了传统灌浆材料可能遭遇的裂缝扩展难题，增加了结构的使用时长。该材料尤其适用于长期受力以及环境条件复杂的基础构造，有效降低了保养和维修的频次^[5]。环保特点的灌浆材料可降低施工阶段的污染，降低有害物质的排放水平，适配绿色建筑与可持续发展要求。利用持续创新及优化灌浆材料，可更好地适配现代建筑工程对安全、耐久及环保等多方面的要求，提升建筑综合质量^[6]。

（三）加强质量监督与管理

为让基础灌浆施工质量达标，除了借助经验丰富的施工人员以外，还需要强化对施工过程的监督管理举措。伴随科技的不断进步，现代化监测技术的引入，对灌浆施工起到有效保障^[7]。借助传感器和监测设备，实时数据采集技术可实时采集灌浆过程的各种参数，如灌浆压力、流量大小、浆液温度和固化时段等。这些数据能帮施工人员实时知晓灌浆的进展，保障各项操作参数在合理限度内，进而防止灌浆不足与过量的问题出现，实现灌浆质量保障^[8]。

远程控制系统的运用为施工管理赋予了更高效的方法，施工场所的工作人员可借助远程监控手段，及时掌握灌浆设备的工作状态，也可远程对设备进行调度。此项技术能降低人工的干预，增强施工效率，尤其在一些复杂状况中，远程操控可切实降低人为差错的出现^[9]。远程监控系统可马上发出预警，找出灌浆过程中可能存在的异常情形，如设备故障问题、浆液流动不顺等，施工人员可马上采取相应办法，保障灌浆作业顺利开展，提升工程成效。依靠这些现代化监测技术的引入，实现了对灌浆施工精准控制的有效保障，实现了灌浆效果及结构的长期稳定保障^[10]。

四、总结

基础灌浆施工在水利水电建筑工程而言起着极为关键的作用，其质量与工程的安全保障和使用时长紧密相连。利用合理筛选灌浆材料、改进施工工艺以及严格约束施工质量，可切实增强基础灌浆施工的效果。伴随新技术与新材料的持续进步，基础灌浆施工技术将提升至更高的高效精准水平，为水利水电工程的建设打造更可靠的保障体系。

参考文献

[1] 赵佳作. 分析水利水电建筑工程中的基础灌浆施工 [J]. 水电水利, 2021, 5(7): 42-43.
[2] 王鑫. 甘肃省水利水电建筑工程概算定额研究 [D]. 北京林业大学, 2010.
[3] 贺胜斌. 试析水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 中国周刊: 英文版, 2020, 000(006): P.1-1.
[4] 刘晖. 解析在水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 中国科技投资, 2019, 000(024): 47.
[5] 沈养运. 在水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 探索科学, 2020(12): 54-54.
[6] 杨林, 唐成方. 试析水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 珠江水运, 2020, (23): 88-89.
[7] 杨自刚. 水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术研究 [J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2020, (06): 149-150.
[8] 李洋华. 试析水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 建材与装饰, 2020, (10): 29-30.
[9] 伍求凌. 水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 中国高新科技, 2019, (22): 18-20.
[10] 高歌. 解析在水利水电建筑工程中的基础灌浆施工技术 [J]. 建材与装饰, 2019, (24): 310-311.

复杂地质条件下建筑施工排水方案优化与实践

李敏

黑山县住建综合服务中心, 辽宁 锦州 121400

DOI: 10.61369/ME.2024070014

摘要： 随着城市化进程的不断加速，建筑工程开始向地质条件复杂的区域逐渐扩展，而复杂地质条件下施工排水问题又是影响工程进度、质量的重要因素。所以在建筑工程施工中需要从复杂地质条件实际情况出发，明确建筑施工排水方案优化的重要性，结合排水方案设计基本原则与方法，提出有效的优化策略，确保所完善的排水方案能够有效提升排水效率，保障施工安全，实现对工程成本的有效控制。

关键词： 复杂地质条件；建筑施工；排水方案

Optimization and Practice of Construction Drainage Schemes under Complex Geological Conditions

Li Min

Heishan County Housing and Urban-Rural Development Comprehensive Service Center, Jinzhou, Liaoning 121400

Abstract： With the continuous acceleration of urbanization, construction projects have begun to gradually expand to areas with complex geological conditions, and the problem of construction drainage under complex geological conditions is an important factor affecting the progress and quality of the project. Therefore, in the construction of building projects, it is necessary to start from the actual situation of complex geological conditions, clarify the importance of optimizing the drainage plan for building construction, combine the basic principles and methods of drainage plan design, and propose effective optimization strategies to ensure that the improved drainage plan can effectively improve drainage efficiency, guarantee construction safety, and achieve effective control of project costs.

Keywords： complex geological conditions; construction of buildings; drainage plan

前言

建筑施工排水方案优化对保障建筑安全、控制施工进度与成本有着直接影响。从建筑安全层面来讲，完善的排水系统能够控制地下水位，避免因水压力过大而出现地面沉降等问题，可以保障建筑基础稳定性，满足结构安全性、耐久性使用要求。因此在建筑工程中需要从地质条件实际情况出发，明确施工排水方案优化重点，提出可行的排水方案优化策略，保障方案的可行性，为复杂地质条件下建筑施工排水工程开展提供新思路。

一、建筑施工排水方案设计原则与方法

（一）建筑施工排水方案设计原则

1. 安全性

排水方案设计中安全性原则占据首要位置，关系着施工人员生命安全、设备运行安全、建筑物结构安全等。一是高地下水位区域中，受到地下水浮力、水压力等的影响，容易引发基础上浮、墙体开裂等问题。所以在方案设计中需要从降水措施出发，利用深井降水等方法，确保地下水位能够下降到安全范围内，以此来减轻对建筑物基础的影响。二是岩溶区域中，因溶洞、地下暗河等均会对排水系统产生威胁，所以在方案设计中需要开展地质勘察工作，利用钻探等手段明确溶洞、暗河分布情境，确保排

水管道能够避开溶洞与暗河，如果不能避开，则需要采取加固措施，利用混凝土填充等方法，保障管道安全。三是山地区域中，需要从山洪、泥石流等自然灾害入手，增设截洪沟、排水渠等，确保地表水能够远离施工区域，降低洪水对施工现场的影响。或是在设置截洪沟时需要从地形、汇水面积等方面出发，及时拦截上游来水，保障现场人员、设备安全^[1]。

2. 有效性

在施工排水方案设计中需要及时排除现场积水，避免施工活动受到积水等的影响。一是软土地质区域中因土壤渗透性较弱，积水自然下渗难度较大，所以在排水方案设计中可以将明沟排水与井点降水结合，实现对地下水位的有效控制，形成良好施工条件。二是沙土地区虽然土壤渗透性较强，但是容易引发管涌、流

沙等现象。所以在方案设计中需要提出可行的防护措施，如增设反滤层等，避免土壤颗粒进入到排水系统中，引发管道堵塞等问题。三是针对排水流量进行计算，从施工场地面积、当地降雨量等方面出发，使用水文计算方法，确定出排水系统设计流量。

（二）建筑施工排水方案设计方法

1. 地质勘察与数据收集

在方案设计中地质勘察属于工作开展的基础，通过仔细勘察能够获取现场地质信息，为方案设计工作开展提供数据支持，保障排水系统能够适应复杂地质条件，满足安全、有效运行要求。首先，使用工程地质测绘方法，针对现场、周边区域地质现象进行观察、测量，完成信息记录，绘制地质图件，并针对地层结构等信息进行研究，为后续工作开展提供直观地质资料。其次，使用钻探方法获取深部地质信息。借助钻孔采集岩心样本，了解岩石物理力学性质等参数。如在软土地质区域中需要使用钻探方法了解软土层厚度情况，确定出相应的物理力学指标，如抗剪强度等，为系统基础设计提供参考。除地质勘察以外，还需要提升对数据收集的重视度，如地下水位变化情况、降雨强度等。针对地下水位数据进行分析，能够了解地下水位季节性变化规律，确定出系统设计水位、排水能力等，保障深度、间距等的合理性。在土壤数据收集中需要从土壤类型、渗透性等方面出发，明确不同类型土壤的排水特性，在此基础上选择适合的排水方式^[2]。

2. 排水流量计算

提升排水流量计算准确性是排水方案设计中的关键点，对系统规模、排水能力等有着直接影响。一是在排水流量计算中需要重点关注降雨的影响，通过对当地气象资料进行分析，获取相关数据，分析时间分布、强度变化规律等，使用暴雨强度公式完成计算。二是明确地下水对排水流量的影响。在高地下水位区域中，需要从地下水流方向、水力坡度等方面入手，结合地下水动力学原理计算出用水量，为系统设计提供数据支持。

二、复杂地质条件下建筑施工排水方案优化与实践策略

（一）地质条件优化

1. 软土地质

软土地质具有高压缩性、低强度等特点，对系统稳定性、排水效果等有着直接影响。为满足安全、高效运行目标，需要采取针对性优化措施。一是地基加固。利用堆载预压法可以让软土地基在荷载作用下实现排水固结，进而提升地基承载能力。如在某施工项目中使用了堆载预压法，堆放砂石等材料，经过一段时间的持续预压，使得地基沉降量明显降低，承载能力逐渐提高，为后续施工、稳定运行提供了支持^[3]。二是真空预压法。在地基中增设密封膜，使用真空泵抽气形成负压，进而排出地基中的孔隙水，提升固结速度。真空预压具有施工速度快、加固效果好等优势，在大面积软土地基中有着广泛的运用，能够在短时间内实现地基加固，保障排水系统有效施工。三是排水板结和堆载预压方法。通过在地基中增设排水板，构建竖向排水通道，随后进行堆

载预压，提升地基排水顺捷速度，缩短排水距离，提升排水效率，保障地基稳定性。四是管道基础处理，软土地质中可以使用砂石基地，在底部增设一定厚度的砂石垫层，以此来分散管道荷载，减少沉降与变形。五是混凝土基础。混凝土基础具有较强的稳定性特点，可以支撑排水管道。面对管径较大、荷载较重的管道，可以使用混凝土基础，保障管道能够在复杂地质条件下的安全运行^[4]。

2. 岩溶地质

在岩溶地质中溶洞与地下暗河容易影响到排水系统的正常工作，所以为了保障管道安全、系统正常运行，需要做好方案优化工作。一是进行详细的地质勘察。在工程前期阶段，可以使用地质雷达等手段，查明溶洞、地下暗河分布情况，在高频电磁波的使用下，能够快速精准探测地质异常体具体位置、形态等，并绘制出具体的分布图形，为方案设计提供直观资料。二是钻探法是获取深部地质信息的方法，通过采集样本能够了解岩石性质、溶洞大小等参数，确定出溶洞、暗河及预提位置。三是面对排水管道穿越溶洞问题，可以使用跨越方法，如增设桥梁或是架空烟道，在上方设置桥梁，确保管道能够跨越溶洞，避免管道直接与溶洞接触，以此来保障管道的安全性。四是使用架空管道方法，在两侧增设支架，确保管道高度与跨度符合溶洞情况，同时需要针对管道维护、检修等进行研究，保障后续维护管理工作顺利开展^[5]。

（二）排水系统优化

1. 制定监测、预警系统

建设排水系统监测、预警系统是保障施工排水安全性、高效性的基础，通过实时监测系统各项参数，能够及时发现潜在问题，提出可行的应对措施，避免出现排水事故，保障施工顺利进行。一是在排水管道、泵站等关键部位安装传感器，实时监测排水系统。或是在排水管道中增加压力传感器，监测内部水压变化情况。如果内部压力超出安全阈值，可能是管道内部出现堵塞等问题。而对于流量传感器来讲，主要以监测排水流量为主，通过对比实际与设计流量，能够判断出排水系统是否正常运行，如果实际低于设计，则可以证明管道存在被堵塞、漏水等问题，如果高于设计，则可以证明遇到特殊情况，系统压力较大，需要调整策略。二是泵站中液位传感器占据重要位置，能够实时监测水井水位高度，一旦达到预警位置，可以及时发出警报，提醒工作人员进行处理，确保水位能够保持在安全范围内。另外还需要实时监测排水泵运行状态，如针对电机电流等参数进行检测，及时发现是否存在故障，如发现轴承存在磨损问题时，需要及时开展维修工作，保障排水泵的稳定运行。三是水质传感器主要是针对出水水质进行检测，如酸碱度等。在复杂地质条件下，出水水质容易受到多种因素的影响，只有及时做好监测工作，才能发现是否存在异常问题，进而采取有效的处理措施，避免对生态环境产生不良影响^[6]。

2. 制定应急预案

排水应急预案主要是为了应对复杂地质条件下突发性水患的重要举措，为保障施工人员生命安全，确保施工顺利开展，需要确

保排水应急预案的合理性、可行性。如山地地区容易遭遇暴雨引发的泥石流、山洪等。因突发性水患的突发性较强,破坏力较大,如果所制定的应急预案不合理,必然会对施工产生不良影响。所以在建筑施工中需要保障所制定的应急预案能够应对不同水患场景,制定出具体的应对措施。面对因暴雨造成排水系统出现超负荷运行时,需要确保预案中规定启动备用设备的流程、责任人等。或是在预案中需要明确表述人员疏散、安全保障措施等,规定出具体的疏散路线、集合地点等,保障施工人员可以快速撤离。或是在山区施工中,一旦出现泥石流等地质灾害,需要严格按照预先所制定的路线引导施工人员转移,同时在集合地点增设明确标识,由专人负责清点人数,保障人员的安全撤离,并配备安全防护设备^[7]。

(三) 新技术、新材料运用

1. 新型排水管材

新型排水管材具有性能好等优势,对复杂地质条件下的建筑施工排水有着促进作用,同时也可以提升排水系统优化效果。一是高密度聚乙烯管属于运用比较广泛的新型排水管材,因其密度相对较高,具有较好的化学稳定性,可以抵抗不同化学物质的侵蚀。如在酸性、碱性砂质土壤环境中,管材的耐腐蚀性效果较好。二是硬聚氯乙烯管材在也是比较常见的新型管材,具有高强度、抗腐蚀性优势,加之其维卡软化温度为75℃以上,可以运用到一定高温环境中。三是铝合金UPVC复合排水管。通过将两种管材的优势结合在一起,能够有效提升防腐蚀效果,同时也具备较强的耐磨性,即便处于潮湿环境中,也可以实现稳定运行目标。现如今在复杂地质条件中新型排水管材有着广泛的运用,所以需要从不同地质类型出发,选择适合的管材,确保施工排水工作高效开展^[8]。

2. 智能排水设备

智能排水设备属于现代科技与排水技术融合的成果,具有功能先进、应用效果较好等优势,可以有效提升排水系统运行效率。一是智能排水泵。在智能排水设备中智能排水泵属于核心组成部分,其中包含先进传感器技术、自动化控制技术等,具备自动控制功能。加之在液位传感器的使用下,可以实时监测集水井等中的水位变化情况,一旦水位上升到启动水位时,能够立即发

出信号,系统随即做出反应,及时进行排水作业。当水位下降到停止水位时,传感器可以再次发出信号,排水泵随即停止。借助智能排水设备可以实现自动化调整目标,保障基坑内保持干燥施工环境,避免因人工操作不及时而引发积水等问题,可以有效提升施工安全性^[9]。二是压力传感器。使用压力传感器可以实时监测出排水管道内部的压力变化情况,结合具体参数调整水泵转速、流量等,满足节能运行要求。如果管道内部压力相对较低,排水泵可以自动降低转速,进而减少能源消耗。如果压力不断升高,排水泵可以有效提升转速,提升排水顺畅性。在智能化控制方法的支持下,能够从实际排水需求出发,针对排水泵运行参数进行调整,避免因固定模式引发的能源浪费等问题,实现对系统运行成本的有效控制。三是远程监测与控制。在智能排水设备中远程监测与控制属于重点环节,在物联网技术的支持下,设备能够将运行数据,如排水泵运行状态等借助无线传输方式发送到监控中心中,管理人员可以通过终端设备进入到管理平台,及时获取设备运行信息,针对排水系统进行远程监控。一旦排水设备出现故障,或是系统运行存在异常现象时,智能排水设备能够及时发出预警,平台可以获取弹窗、声光报警等不同方式,便于管理人员结合信息做出有效的应对,提升处理及时性。如远程控制排水泵,针对运行参数进行调整等。另外还需要重视智能排水设备在复杂地质条件下的运用效果,如在软土区域中受到地基沉降的影响,使得管道容易发生变形等问题,对排水泵正常运行产生影响。而使用智能排水泵可以通过自动控制、远程监测功能应对管道变形所引发的问题,提升排水系统稳定性^[10]。

三、结语

综上所述,在复杂地质条件下需要提升对完善建筑施工排水方案设计的重视度,从现场环境出发,明确方案设计原则与方法,提出可行设计策略,保障方案的可行性、针对性。所以在施工中需要从地质条件优化、排水系统优化、新技术与新材料使用出发,保障方案细节的完整性,实现对各个环节的有效管理,保障建筑施工顺利开展。

参考文献

- [1] 陈政. 复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降水施工方法研究 [J]. 甘肃科学学报, 2024, (03):100-106.
- [2] 赵世琳. 复杂地质建筑工程深基坑施工技术研究 [J]. 建筑机械化, 2023, 44(10):58-60.
- [3] 宋金晓. 高地下水位渠道工程施工排水方案探讨 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, (06):57-59.
- [4] 苟德明. 吴铭芳. 贵州公路隧道洞内排水系统改进与应用实践 [J]. 公路交通技术, 2024, (04):59-66.
- [5] 易荣. 复杂地质条件下建筑排水工程全钢护筒旋挖桩成孔技术研究 [J]. 中国水能及电气化, 2020, (09):27-31.
- [6] 陈启贵. 高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用研究 [J]. 工程与建设, 2023, 37(06):1688-1690.
- [7] 张建良. 深基坑支护中的防渗与排水技术研究 [J]. 工程与建设, 2023, 37(06):1737-1739.
- [8] 汪志良. 公路隧道排水管路结晶堵塞影响因素及防治对策研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [9] 王晓强. 排水条件和含水率对粉质黏土边坡稳定性影响分析 [D]. 桂林理工大学, 2023.
- [10] 陈列霞. 真空排水管桩排水固结性能及侧摩阻力特性室内模型试验研究 [D]. 华南理工大学, 2023.

浅议近代文物建筑安全评估与加固 ——以某近代文物建筑修缮工程为例

刘君

文化和旅游部机关服务中心, 北京 100020

DOI: 10.61369/ME.2024070016

摘要 : 近代文物建筑承载着历史文化信息, 记录着城市风貌, 但历经风吹日晒, 建筑结构会有不同程度损伤, 存有结构安全隐患, 作为传统文化的物质载体, 保护好这些优秀的建筑遗产具有十分重要的意义。结构安全评估是文物保护工程的基础, 为后续加固方案提供依据, 确保近代文物建筑结构加固科学、有效。本文以某近代文物建筑修缮工程为例, 介绍了建筑结构检测鉴定的基本情况, 按照检测鉴定数据, 对结构进行安全评估并提出工程处理建议及结构加固措施, 为同类文物建筑保护修缮工程提供参考。

关键词 : 近代文物建筑; 结构检测鉴定; 安全评估; 结构加固

Discussion on Safety Assessment and Reinforcement of Modern Cultural Relics Building — Taking a Modern Cultural Relic Building Repair Project as an Example

Liu Jun

Service Center of the Ministry of Culture and Tourism, Beijing 100020

Abstract : The modern cultural relic building carries the historical and cultural information, records the city style, but after the wind and sun, the building structure will have different degrees of damage, there are structural security risks, as the material carrier of traditional culture, protect these excellent architectural heritage has very important significance. Structural safety assessment is the foundation of cultural relic protection project, which provides the basis for the follow-up reinforcement scheme and ensures the scientific and effective reinforcement of modern cultural relic building structures. Taking a modern cultural relic building repair project as an example, this paper introduces the basic situation of building structure detection and identification, according to the detection and identification data, carries on the safety assessment of the structure and puts forward the engineering treatment suggestions and structural reinforcement measures, which provides reference for the protection and repair of similar cultural relic buildings.

Keywords : modern cultural relic building; structural detection and identification; safety assessment; structural reinforcement

引言

近代文物建筑是文化遗产的重要组成部分, 承载着丰富的历史、文化和艺术价值。近年来, 多地发布了优秀近现代历史保护建筑名录, 关于此类文物建筑的保护更多的侧重于挖掘原始建筑的文化信息、文化传承、建筑本体利用等方面, 然而, 许多近代文物建筑历经时间推移, 环境影响, 加之年久失修, 建筑结构出现不同程度的损坏, 存在一定安全隐患, 严重的会危及近代文物建筑的存续。因此, 如何保护近代文物建筑历史风貌, 如何确定其是否安全就显得十分必要了。近代文物建筑的现状检测和评估是保护工作必不可少的关键一步, 是近代文物建筑保护修缮的基础, 其安全性是否满足要求需通过结构检测鉴定进行评估, 准确、全面的近代文物建筑安全评估数据是精准科学制定结构加固及建筑整体保护修缮方案的重要依据。

一、文物建筑安全评估

文物建筑安全评估是分别通过对建筑、结构现场勘察,在深入了解建筑现状前提下,对其结构承载力、变形程度、整体稳定性做出的科学判断。通过对建筑构件、结构等进行仔细检测,及时发现存在的安全隐患,确保文物建筑不发生结构性安全事故。

(一) 文物建筑勘察

文物建筑勘察是指对建筑的历史背景、空间布局、形制、构造特征、材料工艺、装饰艺术、保存状况等进行勘察记录,重点是获得最准确的现状数据,建立完整的建筑档案,为文物建筑保护提供科学修缮依据。

(二) 文物建筑结构勘察

文物建筑结构勘察主要聚焦于结构所处环境、安全性、材料力学性能、损伤程度、基础沉降与倾斜变形、稳定性等,是针对结构而进行的勘察、评估。核心目标是判断建筑是否安全,是否需要加固。其中:对建筑结构所处的周围环境进行调查了解,可初步判定环境对结构的影响及引起结构病害的原因;其次通过对结构主要构件的外观进行详细勘察,特别要对损伤的类型、部位、程度进行记录,便于修缮方案更具有针对性;第三是要对基础沉降、倾斜以及结构构件变形进行勘察,确保数据精准^[1]。

(三) 文物建筑抗震评估

文物建筑抗震评估是指在建筑、结构、岩土地质勘察数据明确基础上,通过科学方法分析评估建筑在地震等极端条件作用下的结构响应、薄弱环节及潜在风险,其目的是评估现有建筑抗震能力、识别结构薄弱点并提出有针对性的加固建议。

目前,对于建筑的历史信息查询、现状调查等都比较全面,但是对结构勘察以及检测往往不够充分,这会影响后续的近代文物建筑保护修缮方案制定。因此,近代文物建筑修缮前要按规范要求做好结构勘察和检测等基础工作,在修缮和加固设计中才可以有针对性的做到最小干预。因此,做好文物建筑保护修缮,首先要高度重视建筑结构勘察检测基础工作,其次依据结构安全评估结果,以数据说话,提出工程处理建议,这样才可以更好的做好文化遗产保护。

二、某近代文物建筑结构检测及安全评估

(一) 某近代文物建筑基本情况

某近代文物建筑群建于上世纪二十年代,为区级重点文物保护单位,现存主要建筑有南楼、东楼和西楼。目前,该近代文物建筑群外观存在部分缺陷及损伤,因建造年代久远,原设计施工资料缺失,为准确了解主体结构性能,对该近代文物建筑群进行结构检测鉴定,进行安全性评估是十分必要的。以下以南楼为例,经现场踏勘,南楼为地上3层,砖混结构,结构平面呈“凸”字形,建筑面积3000m²。楼面及屋面为混凝土现浇板,外围护

结构墙厚度490mm,内部隔墙厚度分别为490mm、360mm、240mm。一到三层层高分别为3.8m、3.3m、3.5m,目前使用用途为办公楼。

(二) 某近代文物建筑结构检测基本情况

近代文物建筑的原始资料大多都不齐全,特别是建造之初的相关设计图纸与施工技术资料缺乏,这就对近代文物建筑结构检测提出更高的要求。因此,在对近代文物建筑实地勘察时,最重要的就是要结合现场实际,对近代文物建筑深入了解,制定与该近代文物建筑相匹配的检测鉴定方案。最终是否需要修缮、是否需要加固以及加固后是否会对现有整体结构体系存在影响,这都需要通过检测数据辅以可靠性验算做出客观准确的结论。

1. 建筑结构外观质量检查

以某近代文物建筑为例,检测前首先对该楼进行结构外观质量检查,发现:该楼檐部有多处混凝土块掉落,外墙风化及砂浆粉化现象明显,混凝土楼板存在钢筋外露并锈蚀,混凝土梁有蜂窝孔洞,顶层楼梯间顶板抹灰层脱落,屋面栏杆多处开裂,部分墙体角部存在开裂。

2. 材料强度检测

(1) 砖强度检测

经踏勘,某近代文物建筑墙体砖为灰砖,为最大限度保护原始结构,通过回弹检测^[2],该结构1至3层砖强度等级推定为MU7.5。

(2) 砂浆强度检测

通过回弹检测,该结构1至3层砌体砂浆强度推定为0.6MPa。

3. 三维扫描建模

三维测绘指的是三维激光扫描,通过扫描,可实现对大型、复杂的实体进行数据采集,可将物件三维模型及线、面、体、空间等各种数据完整的建模重构^[3],通过对该近代文物建筑进行三维扫描,建立数字化模型,便于后续对其承载力进行验算。

(三) 某文物建筑结构安全性评估

结构安全性应根据文物建筑现场勘察、检测、验算等数据资料,按结构构件、分部结构和整体结构三个层次进行安全性综合评定。根据《近现代历史建筑结构安全性评估导则》WW/T 0048-2014,近现代历史建筑的结构安全性评估应分别对地基基础、上部结构(包括围护结构)两个组成部分进行评估,每个组成部分应按规定分一级评估、二级评估两级进行^[4]。其中,一级评估以外观损伤等宏观控制和构造鉴定为主进行综合评定,二级评估以承载力验算为主进行综合评定。

1. 地基基础构件安全性评估

经检查,地基基础不存在影响上部结构安全的不均匀沉降裂缝和明显变形,安全性满足要求,确定为a级。

2. 上部结构安全性评估

(1) 构件的一级评估

砌体结构的勘察检测包括砌体外观质量、材料强度、变形、裂缝、构造等5个项目。经检测,该近代文物建筑砌体墙仅局部

出现酥碱，其承重的有效面积未出现明显削弱，外观质量满足一级评估；材料强度方面，经检测，砖强度等级为 MU7.5；砌筑砂浆抗压强度为 0.6MPa，不满足一级评估；同时，未发现砌体墙柱存在明显变形及明显裂缝。构造措施方面，经现场检测，本结构墙、柱的高厚比符合规范要求；连接及砌筑方式正确，主要构造基本符合规范要求，仅有局部的表面缺陷，工作无异常，满足一级评估。

（2）构件的二级评估

依据现行《近现代历史建筑结构安全性评估导则》WW/T 0048-2014，对结构承载力进行验算。材料强度、结构平面布置、荷载取值、计算参数等依据检测结果及现行规范，采用 PKPM 软件建立结构计算模型，其中，砖强度等级：MU7.5；砂浆强度：0.6MPa。楼面荷载中恒载、活载以及风荷载按实际情况进行取值。经验算，一层有部分砌体墙承载力 $R/\gamma S < 0.90$ ，一层部分外墙窗间墙过小，一层有部分砌体柱承载力 $R/\gamma S < 0.90$ ，不满足安全性要求，经综合评定，上部结构安全性等级评定为 b 级。

（3）建筑整体安全性等级评估

综合地基基础与上部结构的安全性评级，该房屋的安全性等级总体评定为 B 级，整体安全性基本满足要求，有部分构件需要采取措施^[5]。

三、结构抗震鉴定

经检测，该近代文物建筑 1 至 3 层墙体的砌筑砂浆强度等级小于 M1，承重的门窗间墙最小宽度小于 1.0m，不符合标准要求。根据《建筑抗震鉴定标准》（GB50023-2009）^[6]，按楼层综合抗震能力指数计算评定，本结构不满足抗震鉴定要求，应采取加固或其他相应措施。

四、工程处理建议

依据某近代文物建筑结构检测数据及安全评估等级，为确保该近代文物建筑结构安全，提出工程处理建议如下：

1. 对承载力不足的砌体墙、柱，以及局部尺寸超限的墙体采取加固措施；
2. 对开裂的混凝土檐部进行修复加固处理；
3. 对存在风化的墙体表面进行修复处理，并采取相应的化学保护措施；
4. 对存在露筋锈蚀及蜂窝空洞的混凝土构件进行修复加固处理；
5. 对屋面栏杆进行修复加固处理；
6. 对顶层楼梯间顶板抹灰层进行修复处理；
7. 对开裂的砖墙进行修复加固处理。

五、某近代文物建筑结构加固

修缮工程是指为保护文物本体所必需的结构加固处理和维修，包括结合结构加固而进行的局部复原工程^[7]。依据某近代文物建筑结构检测鉴定结果，需进行修缮加固，结构加固范围、加固措施、加固施工注意事项具体如下：

（一）加固范围

1. 对承载力不足的墙体和柱子加固；
2. 对首层东侧一处较短窗间墙内侧增设型钢梁；
3. 对混凝土挑檐用高强灌浆料进行修补；
4. 对墙体裂缝及破损处用高强灌浆料修补。

（二）加固措施

1. 注浆加固，通过剔除原砂浆，用压力注浆法进行加固处理，处理后的砂浆强度须达到 M5.0；
2. 柱增大截面加固，对原承载力不足的柱子，用增大截面法，进行加固；
3. 增设钢梁对提升加固构件承载力方面效果明显，部分短肢窗间墙仅注浆无法满足承压要求，须在内测增设一道钢梁，保证结构安全^[8]；
4. 混凝土挑檐修补，对年久风化严重的混凝土用高强灌浆料进行修补；
5. 墙体风化及裂缝修补，对年久风化严重的混凝土墙体及裂缝用高强灌浆料进行修补，部分采用钢筋网水泥砂浆面层加固^[9]。

（三）加固施工注意事项

1. 加固工程施工中的拆除、植筋、粘钢、粘碳纤维等必须要选用具有专业资质的高水平施工单位进行；
2. 拆除施工应采取科学合理的方式方法以及设备设施，坚决避免损坏需保留的结构构件；
3. 混凝土加固中，旧混凝土表面应剔除 10mm，浇筑新混凝土前，旧混凝土应充分湿润超过 24 小时，同时均匀涂刷界面剂；
4. 原有结构梁板加固部位，应当另加支撑，便于卸掉梁与板的自重；
5. 加固应采取自下而上，即基础地板、柱、墙应先加固；
6. 加固采用的混凝土应具有充分流动性，且应进行收缩试验，浇筑完成后，加强养护，以便减少混凝土收缩与徐变；
7. 混凝土植筋前应先做现场拉拔试验，植筋深度为 15d，待拉拔试验合格后，方可开展植筋，同时植筋前要先明确原混凝土钢筋位置，植筋位置可根据原混凝土内钢筋位置适当调整，植筋孔不得伤及原混凝土内钢筋；
8. 植筋施工的孔径、孔深、清理等各环节需经监理单位检查合格，符合相关要求后方可进行下一道施工^[10]；
9. 粘钢及新增钢梁必须进行防火防腐处理。

通过对该近代文物建筑采取一系列结构加固措施，确保其安

全稳定。

六、结语

文物建筑安全性评估是预防性保护的重要手段，近代文物建筑历经时代变迁，相应的原始资料、修缮记录等历史资料大多缺失，很多无长期使用记录，给其修缮带来诸多不便。因此，通过对结构安全检测鉴定，进而进行安全评估就显得尤为重要，只有

通过精准的检测鉴定评估，才能通过数据反馈出建筑本身的损伤原因、程度，这对后续修缮加固提供直接数据支撑，对于近代文物建筑修缮选择何种加固方式是至关重要的。本文以某近代文物建筑修缮工程为例，介绍了前期的结构安全评估与加固，提出通过检测、鉴定、评估、加固才能及时进行风险预防、控制与维护，以达到消除近代文物建筑存在的隐患，使其处于良好的保存状态，以期为同类工程提供借鉴。

参考文献

-
- [1] 石建光, 易立通. 文物(历史)建筑修缮和加固中结构勘察和检测 [Z/OL]. 2023.
- [2] 《砌体工程现场检测技术标准》(GB/T 50315-2011), 中国建筑工业出版社 [S]. 2011.
- [3] 闫威. 近现代代表性重点近代文物建筑结构检测鉴定方法研究, 昆明理工大学 [D]. 2018.
- [4] 《近现代历史建筑结构安全性评估导则》(WW/T 0048-2014), 文物出版社 [S]. 2014.
- [5] 《房屋结构综合安全性鉴定标准》(DB 11/637-2015), 中国建筑工业出版社 [S]. 2021.
- [6] 《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023-2009), 中国建筑工业出版社 [S]. 2009.
- [7] 《文物保护单位工程管理办法》(文化部令第26号) [S]. 2003.
- [8] 丁博伦, 伍丽娟. 近现代历史保护建筑的结构加固与实践 [J]. 低温建筑技术 [J]. 2023.
- [9] 于虹, 刘思奇. 历史建筑结构加固方法探究与工程实践 [J]. 工程抗震与加固改造 [J]. 2022.
- [10] 徐忠茂, 钢筋混凝土结构检测与加固技术, 江西建材 [J]. 2022.

工程项目可持续发展策略研究

柳莹

成都空港城市建设工程有限公司，四川 成都 610000

DOI: 10.61369/ME.2024070017

摘要： 在全球倡导可持续发展的大背景下，工程项目作为经济发展与社会建设的关键载体，其可持续发展至关重要。本文深入剖析了工程项目可持续发展面临的资源利用、环境保护、社会影响等多方面的挑战，提出了涵盖绿色施工技术应用、全生命周期资源管理、利益相关者协同参与等一系列具有针对性的策略，并结合实际案例验证策略的有效性，旨在为工程行业实现可持续发展提供理论支撑与实践指引。

关键词： 工程项目；可持续发展；绿色施工；全生命周期管理；利益相关者

Research on Sustainable Development Strategies for Engineering Projects

Liu Ying

Chengdu Airport City Construction Engineering Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： Against the backdrop of global advocacy for sustainable development, engineering projects, as key carriers of economic development and social construction, are crucial for their sustainable development. This article deeply analyzes the challenges faced by sustainable development of engineering projects in terms of resource utilization, environmental protection, social impact, and other aspects. It proposes a series of targeted strategies covering the application of green construction technology, full life cycle resource management, and stakeholder collaborative participation. The effectiveness of these strategies is verified through practical cases, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the engineering industry to achieve sustainable development.

Keywords： engineering projects; sustainable development; green construction; full lifecycle management; stakeholder

引言

随着全球经济的快速发展，工程项目的规模和数量不断攀升，在推动社会进步与经济增长的同时，也给资源和环境带来了巨大压力。据相关数据显示，建筑行业消耗了全球约40%的能源和大量的自然资源，同时产生了约30%的温室气体排放。在这样的形势下，工程项目的可持续发展成为了亟待解决的关键问题。实现工程项目的可持续发展，不仅能够降低对环境的负面影响，提高资源利用效率，还能促进社会的和谐稳定发展，完善工程管理的理论与实践体系。这对于推动工程行业的转型升级，实现经济、社会与环境的协调共进具有重要意义。

一、工程项目可持续发展面临的挑战

（一）资源利用效率低

工程项目在建设过程中，资源浪费现象较为普遍。以建筑材料为例，由于施工管理不善、设计变更频繁等原因，我国建筑施工中的材料浪费率平均达到10%–15%。例如，在某大型商业综合体项目中，因施工图纸设计失误，部分区域的墙体反复拆除重建，导致大量的水泥、砖块等材料浪费^[1]。同时，水资源在工程项目中也未得到充分利用，施工现场普遍存在跑冒滴漏现象，且缺乏有效的节水措施。据统计，建筑施工中的水资源浪费量占总用水量的20%–30%。此外，能源利用效率低下也是一个突出问

题，传统施工设备能耗高，施工现场的临时设施如照明、空调等缺乏节能设计，导致能源消耗过大^[2]。

（二）环境保护压力大

工程项目对环境的影响贯穿于整个生命周期。施工阶段，扬尘、噪声、污水等污染问题严重影响周边环境质量^[3]。据监测，在城市建设施工高峰期，施工扬尘可使周边区域的PM10浓度升高50%–100%。例如，某城市地铁施工项目，由于施工场地未采取有效的降尘措施，周边居民小区的空气质量明显下降，居民投诉不断。在运营阶段，一些工程项目如大型工厂、写字楼等，会持续消耗大量能源，产生温室气体排放，对全球气候变化造成影响^[4]。另外，工程项目建设还可能导致生态破坏，如破坏自然植

被、影响生物多样性等。

（三）社会影响复杂

工程项目的建设和运营会对周边社区、居民等利益相关者产生多方面的影响。在建设过程中，可能会因拆迁安置问题引发社会矛盾。例如，某旧城改造项目，由于拆迁补偿标准不合理，与居民未能达成一致意见，导致项目进度受阻，引发了一系列社会问题^[5]。在运营阶段，工程项目可能会带来交通拥堵、就业机会分配不均等问题。一些大型商业中心的运营，吸引了大量人流和车流，导致周边交通拥堵不堪，给居民的出行带来极大不便。同时，工程项目提供的就业机会在不同群体之间的分配可能存在不公平现象，引发社会不满。

二、工程项目可持续发展策略

（一）绿色施工技术的全面应用

绿色施工技术是实现工程项目可持续发展的关键手段之一。在节材方面，推广使用新型节能材料和可回收材料。例如，在某高层住宅项目中，采用新型的轻质隔墙板代替传统的红砖，不仅减轻了建筑物的自重，还减少了红砖生产过程中的能源消耗和环境污染。同时，加强施工过程中的材料管理，利用 BIM 技术进行材料用量的精确计算和动态管理，有效降低材料浪费。通过 BIM 模型，能够提前发现设计中的问题，避免因设计变更导致的材料浪费。在节水方面，施工现场设置雨水收集系统和中水回用系统。某大型市政工程施工现场，通过雨水收集系统收集的雨水用于道路喷洒、混凝土养护等，中水回用系统将处理后的施工废水用于车辆冲洗，使施工现场的水资源重复利用率达到60%以上。在节能方面，推广使用节能型施工设备和照明系统。例如，采用电动施工机械代替燃油机械，降低能源消耗和废气排放；在施工现场安装智能照明系统，根据光线强度自动调节亮度，减少能源浪费。

（二）全生命周期资源管理

全生命周期资源管理要求从工程项目的规划、设计、施工、运营到拆除的整个过程，对资源进行系统的管理和优化^[6]。在规划设计阶段，充分考虑资源的可持续利用，采用合理的建筑布局和结构设计，提高建筑物的自然采光和通风效果，减少对人工照明和空调系统的依赖。例如，某生态办公大楼在设计时，通过优化建筑朝向和开窗面积，使自然采光率达到80%以上，大大降低了照明能耗。在施工阶段，加强资源的统筹调配，合理安排施工进度，避免资源闲置和浪费。同时，对施工过程中产生的废弃物进行分类回收和再利用。某桥梁建设项目，将拆除的废旧钢材进行回收加工，用于项目中的临时设施搭建，既节约了成本，又减少了废弃物的排放。在运营阶段，建立资源监测和管理系统，实时监控能源、水资源等的消耗情况，及时发现并解决资源浪费问题。例如，某大型商场通过安装能源管理系统，对商场内的照明、空调、电梯等设备的能耗进行实时监控和分析，根据实际情况调整设备运行参数，实现了能源消耗降低15%的目标。在拆除阶段，制定合理的拆除方案，最大限度地回收可再利用的材料和

设备，减少拆除过程中的环境污染。

（三）利益相关者协同参与

利益相关者的协同参与是工程项目可持续发展的重要保障。在项目规划阶段，广泛征求周边居民、社区组织、政府部门等利益相关者的意见^[7]。例如，某城市公园建设项目，在规划设计前，通过问卷调查、座谈会等形式，收集了周边居民对公园功能、设施的需求和建议，使公园的设计更符合居民的实际需求，提高了项目的社会满意度。在项目实施过程中，建立利益相关者沟通协调机制，定期召开沟通会议，及时解决项目建设过程中出现的问题。例如，某高速公路建设项目，在施工过程中，因施工噪声对周边居民产生影响，通过与居民代表的沟通协商，调整了施工时间，采取了有效的降噪措施，缓解了与居民的矛盾。同时，鼓励利益相关者参与项目的监督和管理，提高项目的透明度和公正性。在项目运营阶段，与利益相关者共同探讨项目的可持续发展策略，实现项目与周边环境和社会的和谐共生。例如，某工业园区在运营过程中，与当地政府、企业、社区合作，共同开展节能减排、环境保护等活动，推动了园区的可持续发展。

（四）环境影响最小化策略

为减少工程项目对环境的负面影响，需采取一系列针对性措施。在施工阶段，加强扬尘污染控制，施工现场设置围挡、洒水降尘设备，对易产生扬尘的物料进行覆盖^[8]。某城市建筑工地通过安装自动喷淋系统，在施工过程中定时对场地进行洒水降尘，使施工现场的扬尘浓度降低了40%以上。同时，严格控制噪声污染，合理安排施工时间，采用低噪声施工设备，并对噪声源进行隔音处理。例如，某医院建设项目，在靠近居民区的一侧设置了隔音屏障，选用低噪声的打桩机等设备，有效降低了施工噪声对周边居民的影响。对于施工污水，建立污水处理系统，确保达标排放。某市政污水处理厂升级改造项 目，在施工过程中，建设了临时污水处理设施，对施工产生的污水进行处理后达标排放，避免了对周边水体的污染。在运营阶段，加强对工程项目的环境监测，及时发现并处理环境问题。例如，某化工企业建立了完善的环境监测体系，对废气、废水、废渣等进行实时监测，确保各项污染物达标排放。同时，积极推广清洁能源的使用，降低温室气体排放。某新建住宅小区采用太阳能热水系统和地源热泵空调系统，实现了部分能源的自给自足，减少了对传统能源的依赖。

三、案例分析

（一）案例背景

某大型绿色建筑项目，总建筑面积为20万平方米，集办公、商业、居住为一体。该项目旨在打造一个具有高度可持续性的综合性建筑群落，在项目规划初期就将可持续发展理念贯穿始终。

（二）可持续发展策略实施情况

在绿色施工技术应用方面，项目大量采用了预制装配式建筑技术，预制构件的使用率达到70%。通过预制构件在工厂的标准化生产，减少了施工现场的湿作业和材料浪费，同时提高了施工效率，缩短了施工周期。在资源管理上，项目建立了全生命周期

的资源管理系统^[9]。在设计阶段，利用 BIM 技术进行能耗模拟分析，优化建筑设计，使建筑的能源消耗降低了 30%。施工过程中，对水资源进行循环利用，雨水收集系统收集的雨水用于景观灌溉和道路冲洗，中水回用系统将生活污水和施工废水处理后用于冲厕和车辆冲洗，水资源重复利用率达到 75%。在运营阶段，通过智能化的能源管理系统，实时监测和调控建筑内各类设备的能耗，实现了能源的精细化管理。

在利益相关者协同参与方面，项目在规划阶段就组织了多次公众参与活动，邀请周边居民、商业租户、政府部门等利益相关者共同参与项目设计。在施工过程中，建立了与周边社区的沟通协调机制，定期发布施工进度和环境影响信息，及时解决居民关心的问题。运营阶段，成立了由业主、租户、物业等多方组成的可持续发展委员会，共同制定和实施节能减排、环境保护等措施。

在环境影响最小化方面，项目在施工作业区设置了完善的扬尘和噪声污染防治设施，施工过程中扬尘和噪声排放均符合国家标准。建筑外立面采用高效的保温隔热材料，减少了冬季供暖和夏季制冷的能源消耗。同时，项目内建设了大面积的绿化景观，绿化覆盖率达到 40%，有效改善了周边生态环境。

（三）实施效果

通过一系列可持续发展策略的实施，该项目取得了显著的成效。在资源利用方面，与传统建筑项目相比，材料浪费减少了 30%，能源消耗降低了 35%，水资源节约了 40%。在环境影响方

面，施工过程中的扬尘和噪声污染得到有效控制，周边居民投诉率为零。运营阶段，项目的温室气体排放量显著降低，对环境的负面影响明显减小。在社会影响方面，项目的建设和运营为当地创造了大量的就业机会，提高了周边居民的生活质量^[10]。同时，项目的成功实施也为当地的城市发展树立了良好的榜样，推动了区域的可持续发展。

四、结论与展望

本研究发现，工程项目可持续发展面临资源利用、环境保护和社会影响等诸多挑战。全面应用绿色施工技术、实施全生命周期资源管理、促进利益相关者协同参与、采取环境影响最小化策略，能有效推动工程项目可持续发展，实际案例也证实了这些策略的可行性与有效性，有助于实现资源节约、环境友好和社会和谐。未来，随着科技进步和社会对可持续发展关注度的提升，工程项目可持续发展机遇与挑战并存。技术创新上，应加大对绿色施工、可再生能源利用、智能化管理等技术的研发和应用，如研发高效太阳能光伏建筑一体化技术、利用人工智能监测资源消耗和环境影响。政策法规方面，政府需加强引导监管，制定严格环保标准和资源利用规范，出台激励政策。社会意识层面，要加强宣传教育，提高公众对工程项目可持续发展的认识和参与度，营造共同推动可持续发展的良好氛围。

参考文献

- [1] 李乐伟. 项目成本创新管理中的资源利用效率提升方案 [J]. 住宅与房地产, 2024, (26): 86–88.
- [2] 王时方. 工业地产开发建设中的土地资源利用效率研究 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 智慧施工与规划设计学术交流会议论文集. 万泽众创投资集团有限公司; , 2024: 374–376. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.027197.
- [3] 杜萍, 周洪文, 赵志刚, 等. 工程项目建设对生态环境的影响分析 [J]. 能源与节能, 2021, (07): 84–86. DOI: 10.16643/j.cnki.14–1360/td.2021.07.033.
- [4] 陈坤阳, 王家远, 喻博, 等. 地铁工程余泥渣土环境影响研究 [J]. 环境工程, 2022, 40(02): 191–198. DOI: 10.13205/j.hjgc.202202029.
- [5] 冯名泽. 快速城镇化进程中征地拆迁信访问题对策研究 [D]. 华南理工大学, 2020. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.001595.
- [6] 王龙亚. 工程项目设计中的结构方案优化策略研究 [J]. 中国住宅设施, 2017, (10): 27–28.
- [7] 孙大鹏. 协同治理的理论框架及案例考察 [J]. 财经问题研究, 2022, (08): 113–121. DOI: 10.19654/j.cnki.cjwtyj.2022.08.010.
- [8] 杨友麒, 石磊. 环境影响最小化的化工过程综合 [J]. 化工学报, 2001, (02): 95–102.
- [9] 黄小芹. 绿色施工技术在建筑装饰施工中的应用 [J]. 绿色建筑与智能建筑, 2024, (10): 32–34+38.
- [10] 杨玉富. 水利工程管理机制改革策略研究 [J]. 建材与装饰, 2017, (21): 280.

BIM技术在建筑工程造价管理中的应用分析

彭玲艳

天宇中开工程咨询有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI: 10.61369/ME.2024070019

摘 要 : 在信息技术高速发展的背景下, 建筑行业正经历着前所未有的变革, 信息技术在这场变革中发挥着重要作用, 其中BIM技术具有代表性, 该技术以信息模型为核心, 为建筑工程管理提供了强大工具, 特别是在造价管理工作中, BIM技术的应用展现出了巨大的潜力和价值。因此, 本文将深入探讨BIM技术在建筑工程造价管理中的应用, 分析其特点、价值及未来应用实践, 以期对相关领域的实践和研究提供参考。

关 键 词 : BIM技术; 建筑工程; 造价管理; 应用实践

Analysis of the Application of BIM Technology in Construction Project Cost Management

Peng Lingyan

Tianyu Zhongkai Engineering Consulting Co., LTD.Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Against the backdrop of the rapid development of information technology, the construction industry is undergoing unprecedented changes, and information technology plays a significant role in this transformation. Among them, BIM technology is representative. This technology takes the information model as the core and provides a powerful tool for construction project management, especially in cost management. The application of BIM technology has demonstrated great potential and value. Therefore, this paper will deeply explore the application of BIM technology in the cost management of construction projects, analyze its characteristics, value and future application practices, with the expectation of providing references for the practices and research in related fields.

Keywords : BIM technology; construction engineering; cost management application practice

建筑工程造价管理作为项目管理的重要组成部分, 包括工程预算、成本控制、资金分配等多个环节, 对工程项目的经济效益和成功实施具有决定性影响, 但是传统造价管理方式依赖于人工计算和经验判断, 难以应对日益复杂多变的工程项目需求, 所以需要寻求一种更加高效、精准的造价管理方法。BIM技术作为一种集成了三维可视化、数据协同、模拟分析等多种功能的新型工具, 为建筑工程造价管理带来了革命性的变化, 通过构建包含丰富工程信息的虚拟建筑模型, BIM技术能够实现工程数据的实时共享和协同管理, 为造价管理人员提供更加准确、全面的数据支持, 且基于BIM技术的模拟分析功能, 还可以对工程造价进行更加精准的预测和控制, 有效降低工程成本风险。

一、BIM技术特点

BIM技术的核心在于能够通过三维数字化手段, 构建建筑模型, 将建筑信息集成到模型中, 利用信息化平台的方式对建筑模型进行管理, 该模型以建筑实际为基础, 可以充分反映出建筑的具体情况, 从而帮助管理人员完成建筑设计、施工以及管理工作, 是一种新型建筑管理工具, 旨在通过数字化的手段提升建筑项目的整体效能。BIM技术特点主要包括: (1) 三维可视化。BIM技术在构建建筑模型后, 能够以三维可视化的方式将其展现出来, 与建筑实体相一致, 工作人员则可以利用该可视化模型进

行设计、管理等工作, 使得各项工作都能够在可视化的状态下完成^[1]。(2) 信息集成性。BIM技术实现了建筑项目信息的全面集成和统一管理, 模型中所包含的建筑信息较为丰富, 几乎涵盖了建筑的所有数据, 比如属性、时间以及成本等, 信息通过参数化、关联性的方式集成在模型中, 形成了一个完整、一致的信息源。(3) 模拟性。BIM技术具有强大的模拟分析能力, 模型可以根据实际需求进行调整, 比如为了明确建筑节能效果, 则可以在模型中进行演示, 节能最终效果则可以直观地展现出来, 从而为建筑设计提供了科学依据和指导, 帮助项目团队进行更加精准的决策和优化。(4) 优化性。BIM技术通过提供全面的建筑信息数

据库和强大的模拟分析能力，帮助项目团队进行优化决策，在信息、复杂程度和时间等多个因素的制约下，BIM技术能够在保证工程质量和安全的前提下实现成本的最小化和效益的最大化。

二、BIM技术在建筑工程造价管理中应用的价值

（一）提高工程量计算的准确性和效率

工程量计算是工程造价管理的基础性工作，其准确性和效率直接影响工程造价的精确度和项目的整体进度，传统的手工计算方式不仅耗时费力，而且容易出错，难以满足现代工程项目的需要，而通过采用BIM技术，平台可以自动化采集建筑各项信息，将其用于建筑工程量计算中，可以提升计算效率与准确性，比如可以提取包括尺寸、材质、位置等详细参数，为工程量计算提供了可靠的数据基础，通过BIM软件，工程师可以快速生成各种工程量报表，包括材料清单、构件数量、面积体积等，避免了人工统计的繁琐和错误。

（二）优化设计方案，提高设计效率和质量

BIM技术在设计阶段的应用，不仅提高了设计效率，还优化了设计方案，降低了后期变更的风险和成本，通过BIM模型，设计师可以直观地展示设计意图，进行多方案比选和优化，从而选择出最优的设计方案，比如BIM技术支持设计过程中的即时反馈和修改，设计师可以在BIM模型中进行实时调整，查看不同设计方案的效果和影响，及时调整和优化设计方案，即时反馈机制可以缩短设计周期，提高设计效率^[2]。

（三）提升工程造价分析能力，实现多维度成本控制

BIM技术通过构建包含丰富参数信息和业务信息的三维模型，为工程造价分析提供了强大的支持，工程师可以利用BIM模型进行多维度、多层次的造价分析，包括时间维度、空间维度、专业维度等，从而更加全面、准确地掌握工程造价情况。例如，BIM技术可以实现时间维度的造价分析，通过模拟施工进度和资源配置情况，工程师可以预测不同时间点的造价水平，为项目决策提供科学依据，还可以实时更新造价信息，反映项目的实际进展情况，为成本控制提供实时反馈。

（四）实现造价全过程管理，提升项目整体管理水平

BIM技术的应用，使得工程造价管理从单点应用阶段逐渐进入全过程管理阶段，通过构建包含项目全生命周期信息的BIM模型，工程师可以实现造价的全过程管理和控制。比如，BIM技术可以实现造价信息的共享和协同工作，在项目全生命周期内，不同专业、不同部门之间可以通过BIM平台进行信息共享和协同工作，确保造价信息的准确性和一致性，从而提高工作效率，降低沟通成本和管理风险。

三、BIM技术在建筑工程造价管理中的应用实践

（一）设计阶段的应用

在设计阶段，BIM技术通过构建三维数字模型，可以实现工程量的自动计算和成本的初步估算，相较于传统的手工算量方

式，BIM技术在效率与准确性方面具有独特的优势。利用建筑信息模型及其相关数据，造价工程师可以结合历史数据和市场行情，快速编制出详细的造价估算文件，还能够提高估算准确性；限额在建筑造价管理中具有重要的作用，需要在确保建筑设计目标实现的情况相爱，不超过投资预算的总额度，而在限额设计时，就可以采用BIM技术，依据建筑设计方案对限额进行自动化计算，能够确保在不影响建筑质量、工期等前提下，最大程度降低建筑限额，BIM技术的应用使得限额设计更加精准和高效。

在设计阶段，各专业之间的碰撞问题会导致施工阶段的变更和返工，从而增加工程成本，BIM技术通过构建集成各专业信息的三维模型，实现了多专业的协同设计，利用BIM模型的碰撞检测功能，可以及时发现并解决设计中的碰撞问题，避免施工阶段的变更和返工；BIM技术还可以对设计方案进行优化调整，通过模拟分析不同设计方案的成本效益，选择出最优方案实施^[3]。

例如，某高层住宅项目位于城市中心区域，总建筑面积约10万平方米，总投资约5亿元，在设计初期，BIM团队利用Revit软件构建了项目的三维数字模型，并基于模型进行了工程量的自动计算，造价工程师结合历史数据和市场行情，快速编制出了详细的造价估算文件，然后根据估算结果和投资限额要求，对设计方案进行了优化调整，确保总投资额不被突破。

（二）招标阶段的应用

投标人利用BIM技术，可以快速生成符合招标文件要求的投标文件，通过BIM模型，投标人可以精确计算工程量，并结合自身实力和市场价格数据编制出合理的报价，且BIM模型的可视化特点使得投标方案更加直观易懂，有助于招标方和评标专家快速了解投标人的施工能力和技术实力；BIM技术的应用还提高了投标报价的透明度，减少了因信息不对称导致的价格争议和纠纷。在招标阶段，投标人需要提交详细的施工方案，包括施工方法、施工顺序、工期安排等关键内容，BIM技术的应用，使得投标人可以在三维数字模型中进行施工方案的模拟和优化，通过模拟不同施工方案下的施工过程，投标人可以选择出最优方案进行投标。

评标和定标是招标阶段的重要环节，BIM技术的应用使得评标专家可以基于三维数字模型对投标方案进行全面、客观的评审，通过BIM模型的可视化展示和数据分析功能，评标专家可以快速了解投标人的施工能力、技术方案和成本控制措施等方面的信息；BIM模型还可以集成历史数据和市场行情数据，为评标专家提供更为准确的参考依据；在定标过程中，BIM可以帮助招标方快速确定中标人并签订合同文件，提高招标效率并降低交易成本。此外，在招标阶段，BIM模型可以作为招标信息的载体，集成包括工程量、材料设备信息、施工方案等在内的所有关键数据，通过BIM平台各参与方可以实时访问和共享信息，确保招标过程的透明度和公正性，并促进各参与方之间的协同工作^[4]。

（三）施工阶段的应用

施工阶段是建筑工程项目成本投入最为集中的阶段，也是造价管理难度最大的阶段。在该阶段中，工程造价管理人员需要实时掌握施工进度、材料消耗、设备租赁等成本信息，及时调整造

价计划,确保项目成本控制在合理范围内,但是传统造价管理方式依赖于手工记录和二维图纸,存在信息滞后、精度不高等问题,难以满足现代工程项目对造价管理的精细化和实时性要求,而 BIM 技术的应用,则为施工阶段的造价管理提供了全新的解决方案。

施工阶段成本控制的关键在于实时掌握成本信息并进行动态调整,BIM 技术通过集成施工过程中的各项成本数据(如材料消耗、人工费用、设备租赁费用等),构建了工程项目的 5D 模型(三维模型+时间+成本),造价管理人员可以通过 BIM 平台实时查询和分析成本数据,及时发现成本偏差并采取措施进行调整,还可以结合施工进度计划进行成本预测和预警,有效控制施工成本。

材料费用是施工阶段成本的重要组成部分,且计算较为复杂,而采用 BIM 技术时,可以对材料费用进行集中化管理,包括材料费用发生的所有环节,管理人员能够利用信息平台随时查看采用的消耗与库存情况,及时调整采购计划和施工进度计划,避免材料积压和浪费,并对材料的使用过程进行追踪和记录,为后期的成本核算和分析提供准确的数据支持。

施工阶段的造价管理涉及多个参与方(如建设单位、施工单位、监理单位等),各方之间的协同工作对于造价管理的顺利进行具有重要作用,BIM 技术通过构建统一的信息平台,实现了各方之间的信息共享和协同工作,造价管理人员可以通过 BIM 平台实时掌握施工进度、质量、安全等方面的信息,及时与各方沟通协调,确保造价管理工作的顺利进行^[5]。

例如,某高层住宅项目在施工阶段引入了 BIM 技术进行造价管理。该项目总建筑面积约为 10 万平方米,施工周期约为两年。为有效控制施工成本并提高管理效率,项目团队决定采用 BIM 技术进行造价管理的全过程支持,比如在某次进度款支付审核过程中,造价管理人员发现某分项工程的实际成本超出了预算成本,立即通过 BIM 平台查询相关成本数据并进行分析,最终发现是材料浪费和施工效率低下所造成,为此项目团队随即采取措施加强

材料管理和优化施工方案,有效控制了施工成本。

(四) 结算阶段的应用

结算阶段是建筑工程项目造价管理的最后环节,也是检验项目成本控制效果的重要环节,造价管理人员需要全面汇总和分析项目周期内的各项成本数据,与合同约定的造价进行对比分析,确认最终结算金额,结算结果的准确性和公正性,直接关系到建设单位和施工单位的利益分配,也反映了整个项目造价管理的水平。

在结算管理中,BIM 技术通过其强大的信息集成能力,可以自动汇总项目周期内的各项成本数据,包括材料消耗、人工费用、设备租赁费用等,提高结算效率,并根据结算需求灵活生成各类成本报表和分析图表,为造价管理人员提供了直观、全面的成本信息支持。同时,在结算阶段,造价管理人员可以利用 BIM 模型直接提取工程量数据,与合同约定的工程量进行对比分析,确保结算的准确性,还可以根据设计变更和现场签证情况实时更新工程量数据。

BIM 技术通过其全生命周期的信息管理能力,能够实现对项目成本的全过程追溯,造价管理人员可以利用 BIM 平台,查询项目从设计、施工到竣工各阶段的成本数据变化情况,了解各项费用的来源和去向;BIM 技术通过集成合同信息和变更记录,为造价管理人员提供了全面的合同管理支持,结算过程中造价管理人员可以利用 BIM 平台,快速检索合同条款和变更记录,核实结算内容的合规性;对于存在争议的变更事项,BIM 平台还可以提供详细的变更记录和原因分析,为争议解决提供依据。

四、结束语

综上所述,在现代建筑工程造价管理中,BIM 技术能够发挥出良好作用,提升管理效率,确保造价核算准确性,从而保障建筑工程经济效益,对于建筑行业发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 吴娇娇. 建筑工程造价管理中的 BIM 技术应用分析[J]. 北方建筑, 2022, 7(4): 63-68.
- [2] 吴波. 基于 BIM 技术的建筑工程造价控制与管理研究[J]. 建筑与预算, 2022(9): 13-15.
- [3] 陶琪. BIM 技术在 A 建筑工程造价控制中的应用研究[D]. 沈阳大学, 2022.
- [4] 刘科佐, 顾翠娜. BIM 技术在民用建筑工程造价管理中的应用研究[J]. 建筑设计管理, 2022, 39(3): 76-82.
- [5] 董建英. 基于 BIM 技术的建筑与装饰工程造价控制策略研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(13): 63-65.

建筑施工安全管理中常见问题及应对策略

王磊

黑山县住建综合服务中心, 辽宁 锦州 121400

DOI: 10.61369/ME.2024070022

摘要： 在新型城镇化建设加速背景下，建筑施工项目数量逐渐增多。黑山县住建综合服务中心承担区域内建筑施工监管、房屋产权服务等职责，工作成效对建筑建设安全、居民生活质量等有着直接影响。所以在建筑施工中需要加大对安全管理的重视度，针对常见问题进行研究，结合当地实际情况，提出有效的应对策略，保障建筑施工安全管理工作高效开展，促进乡镇建设高质量发展。

关键词： 建筑施工；安全管理；问题；应对策略

Common Problems and Countermeasures in Construction Safety Management

Wang Lei

Heishan County Housing and Urban-Rural Development Comprehensive Service Center, Jinzhou, Liaoning 121400

Abstract： Against the backdrop of the accelerated construction of new urbanization, the number of construction projects has gradually increased. The Comprehensive Service Center for Housing and Urban-Rural Development of Heishan County is responsible for the supervision of construction and property rights services within the region. The effectiveness of its work has a direct impact on the safety of construction and the quality of life of residents. Therefore, in construction, greater emphasis should be placed on safety management. Research should be conducted on common problems, and effective countermeasures should be proposed in combination with local actual conditions to ensure the efficient implementation of construction safety management and promote the high-quality development of township construction.

Keywords： building construction; safety management; problem; coping strategy

前言

近些年建筑施工安全事故发生率不断提高，威胁着施工人员的生命安全，引发了产权纠纷等，限制了乡镇建设与发展。因此需要加大对建筑施工进行安全管理的力度，解决施工中的问题，保障群众生命财产安全，维护建筑市场有序发展，助力乡镇建设可持续发展。

一、建筑施工安全管理的重要性

（一）保障作业规范性

在建筑施工中需要从全过程出发，确保安全管理工作的有效落实，针对细小环节进行研究，保障管理工作的深入性、可行性。在先进管理理念、手段等的支持下，能够及时发现施工中的问题，便于相关部门、工作人员能够及时做出反应，提出可行的改进措施，最大限度降低不安全风险因素。另外开展全过程安全管理工作能够避免出现违规操作行为，约束人员行为，保障技术运用的准确性，提升建筑施工质量，减少伤亡事故发生几率。

（二）提升施工安全性

建筑施工中所涉及到的人员、物资相对较多，如果出现安全事故，必然会造成人员伤亡，引发财产损失等。因此在建筑施工中需要积极开展安全管理工作，针对常见问题进行研究，识别出

施工中的安全风险，制定出可行的安全管理措施，预防、减少安全事故出现，保障人员生命安全，维护群众根本利益。所以在建筑施工中需要积极开展安全教育、培训活动，帮助施工人员形成正确认识，自觉参与安全管理，提升施工团队安全意识，掌握高效的防范方法。如施工中除施工人员外，闲杂人等不得进入到施工现场中，且针对各施工环节需要组织专人进行监督管理，加大人流控制力度，保障施工现场人员生命财产安全，确保建筑工程高效开展^[1]。

二、建筑施工安全管理中常见问题

（一）安全意识、人员素质问题

1. 人员安全意识淡薄

施工人员是建筑工程中的参与者，安全意识高低对施工安全

有着直接影响。但是在实际施工中部分施工人员安全意识淡薄，使得施工过程存在安全隐患。一是对安全风险认识深度不足，施工中存在侥幸心理，认为安全事故不会发生，忽视安全规定、操作规程等。如高空作业时存在不系安全带行为等，认为自身经验丰富，不会出现意外等。二是在施工中存在违规操作行为，如塔吊吊运作业中没有遵守吊运规则，存在超重吊运等，甚至在尚未核吊运货物重量的前提下开展吊运作业，最终因超重引发安全事故。三是部分施工人员对佩戴安全防护用具重视度不高，存在不戴安全帽、佩戴不规范等问题。而造成这一现象的原因就是部分施工人员文化程度不高，对安全知识的掌握深度不足，认知能力有限。且部分施工单位对安全教育培训工作并未给予高度重视，所开展的培训内容针对性不强、形式单一，使得施工人员安全意识不足^[2]。

2. 人员专业素养不高

安全管理人员对建筑施工安全管理工作顺利开展有着重要作用，其专业素养影响着安全管理效果。但是在实际施工项目建设中，部分安全管理人员的专业素质存在许多问题。一是部分安全管理人员并未形成系统化的安全管理知识体系，因安全管理工作中所涉及到的内容较多，而管理人员在工作前并未经过专业化训练，对安全管理理论、方法了解深度不足。如开展安全风险评估时难以精准识别现场风险，使得风险控制措施效果不佳。或是在开展风险评估中主要以常见风险为主，对电气设备老化容易引发火灾风险的关注度不高，且在施工中因电气设备短路引发火灾事故，出现财产损失等。二是部分安全管理人员专业能力不足，缺乏有效的沟通协调能力和问题解决能力等。在施工中安全管理人员需要与各部门之间进行沟通，共同开展安全管理，然而在实际中部分安全管理人员的沟通协调能力和不足，难以及时准确传达安全管理要求，使得各方对安全管理的认识、执行存在差异。如施工现场发现存在违规操作行为时，只采取简单的口头提醒措施，并未采取针对性的处罚措施，且对后期的整改跟踪认识不足，使得违规行为时常发生。

（二）安全管理制度的执行问题

1. 制度问题

安全管理制度是保障安全管理工作顺利开展的基础，但是在建筑施工中却存在安全管理制度不完善问题，使得安全管理工作开展存在许多问题。一是部分项目中的安全管理制度职责划分不合理，因施工中所涉及到的部门较多，各方均负有单独的安全责任。但是在实际中由于安全管理制度并未精准界定各方责任，一旦出现安全问题，容易出现相互推诿责任等行为，难以及时解决问题。二是奖惩机制不足，难以激励施工人员工作积极性。只有形成合理的奖惩机制，才能激励施工人员自觉遵守安全规定，确保安全管理工作高效开展。但是在实际中部分施工单位在制定安全管理制度时没有制定对应的奖惩机制，使得施工人员对安全规定的认识并不合理，经常出现违规操作行为。

2. 执行问题

一是部分施工现场中虽然制定了安全制度，但是却存在执行深度不足问题。如安全检查是发现、消除安全隐患的方法，但是

在实际中部分施工单位所开展的安全检查工作存在形式化问题，对明显的安全隐患关注度不足，在发现现场有配电箱门并未关闭时，没有及时处理等。由于安全检查工作难以真正发现、解决问题，使得安全隐患长期存在，容易引发安全事故。二是部分施工单位存在执行不到位问题，安全培训是强化施工人员安全意识、技能的重要渠道，但是部分施工单位为了节约成本，存在简化安全培训流程行为，甚至存在施工人员代签培训记录等问题，使得施工人员难以真正掌握安全知识与技能，并未形成安全意识，在施工中经常出现违规操作行为^[3]。

（三）施工设备与材料管理问题

1. 设备老化

施工设备是保障建筑施工顺利开展的重要工具，其性能、安全性等均对施工安全有着直接影响。然而在建筑施工中设备老化问题比较明显，对施工带来了安全隐患。一是部分建筑施工项目中设备存在使用年限过长、设备老化严重等问题，使得故障率相对较高。如塔吊属于施工中的关键设备，在长时间工作后结构件容易出现磨损变形等问题，使得塔吊稳定性、承载力不断降低，加之后期没有及时维护与检查，容易引发安全事故。二是设备维护存在问题。部分施工单位对设备维护的重视度不高，并未建立完善的设备维护制度，一旦设备出现故障，没有及时维修，存在带病工作现象，使得安全事故发生几率不断增高。

2. 材料问题

建筑材料是施工顺利开展的基础，所以材料质量的高低对建筑结构安全、防火性能等方面有着直接影响。但是在建筑施工中依然存在使用不合格材料现象，使得建筑工程遗留安全隐患。一是部分施工单位为了节约成本，在材料采购中以价格低廉、质量不合格材料为主。如钢材采购中存在所选择的钢材强度不足、化学成分与标准不符现象，一旦被运用到建筑施工中，容易对建筑结构承载能力、稳定性等产生直接影响，甚至还会引发工程质量问题。二是存在使用不合格防火材料行为。部分施工单位为了节约成本，使用了并未满足标准要求的保温材料、防火土料等，一旦发生火灾，难以阻止火势蔓延，容易造成事故扩大等，甚至还会造成人员伤亡、财产损失^[4]。

三、建筑施工安全管理中应对策略

（一）加大安全教育培训力度

1. 完善培训计划

为提升施工人员安全意识，掌握专业技能，需要从岗位实际情况出发，结合施工各阶段具体情况，设计出针对性培训计划。一是面对新入职施工人员，培训中需要以基础安全知识、操作规范为主，确保其能够快速适应现场环境。在培训内容方面以安全法规、现场安全标识识别等为主，确保施工操作能够满足规范要求。借助系统化的培训，能够帮助施工人员对建筑施工安全形成正确认识，掌握安全技能，避免在参与工作时因认识不足引发安全事故。二是提升对从事特种作业人员的重视，确保培训内容的专业性。通过从特种作业特点、风险等方面出发，提供专门的培

训课程，重点关注安全操作规程等。如电工培训中需要讲解电气设备安装、调试等安全注意事项，确保工作人员能够掌握事故应急处理方法^[5]。

2. 创新培训方式

一是推行线上培训方法，依靠网络平台提供丰富学习资源，或是开发出针对性的安全培训 APP 等，便于施工人员及时学习相关知识。在在线学习平台的支持下，施工人员能够根据现实情况自主选择学习内容，观看安全培训视频，在学习后借助平台完成测试，检验学习成果，发现存在的不足。二是实施线下培训活动，提升对实践操作、现场指导等的重视度，组织施工人员参与实地操作演练活动，通过实践操作掌握安全技能。三是使用案例教学方法，以生动、直观方式进行培训，便于施工人员正确认识到安全事故的影响。所以需要主动收集典型安全事故案例，做好案例分析与视频制作，讲解具体原因，汲取经验与教训，逐渐提升安全意识^[6]。

（二）不断完善安全管理制度

1. 完善制度体系

一是明确安全责任制度，做好各方职责与义务划分工作。如建设单位需要承担安全管理总体责任，提供充足资金、技术等支持，保障项目规划、设计等工作高效开展。施工单位需要做好施工现场安全管理，制定安全计划，保障措施的有效落实，积极开展人员安全教育培训。监理单位应当履行监理职责，从施工全过程出发，及时发现安全隐患与违规行为。二是健全安全检查制度，确定具体的内容、标准等。在安全检查中需要从使用现场安全防护设施等方面出发，保障检查标准的具体化、可行性，便于检查人员执行检查制度。三是建立完善安全奖惩制度，对于能够自觉遵守规定与要求的单位、个人给予奖励，对于存在违规操作的单位与个人进行处罚，激励施工人员自觉遵守安全规定，形成安全管理意识^[7]。

2. 重视制度执行

一是组建专门安全监督小组，承担项目安全管理制度执行的监督。在小组中需要选择经验丰富的管理人员，能够针对安全管理制度执行情况、存在的问题做出正确判断。同时需要制定监督计划、工作流程，确定具体内容与方法，深入到施工现场中，做好细节检查工作，如安全防护设施配备情况、施工人员操作是否满足规范要求等。二是推行定期检查与考核制度，针对制度执行情况进行全面检查，或是可以采取按月、按季度检查等，制定科

学的评价指标，针对制度执行情况进行量化评估^[8]。

（三）重视设备与材料的管理

1. 规范采购维护流程

一是制定设备采购标准时需要明确设备技术参数等关键指标，以施工需求为主，采购符合国家标准要求、行业规范的设备。如对于大型起重设备，需要重点关注其起重量、起升高度等，确保设备能够满足施工要求。在采购中需要针对供应商资质进行审查，以信誉度高、产品质量高供应商为主，做好综合评估工作，保障所采购的设备质量能够满足施工要求。二是建立设备维护计划，确定具体的维护周期、内容等。通过对设备使用情况进行分析，制定出合理的维护周期，适当调整维护频次，确保设备能够处于良好运行状态。三是规范设备采购与维护流程，有效提升施工设备质量，降低设备故障出现几率，最大限度减少因设备问题引发的安全事故，为建筑施工安全管理工作高效开展提供支持。只有形成合理的设备采购计划与维护计划，才能控制好成本支持，提升经济效益^[9]。

2. 重视材料质量把关

一是筛选材料供应商，建立完善的供应商评价体系，针对其资质、信誉等进行全面评估，提供相关证件等。同时需要了解供应商的生产工艺、质量控制体系等情况，针对其生产能力、产品质量的稳定性等进行评估，并检查其信用记录等，最终选择信誉度高、可靠的供应商，形成稳定的合作关系。二是做好材料进场检查工作，严格按照我国现行的标准与规范进行检验。面对各批次材料时，需要采取抽样检查方法，保障材料质量能够满足标准要求。如钢材检验中需要关注钢材强度、化学成分等指标。水泥检验中需要检验水泥凝结时间、安定性等。对于重要建筑材料，如防火材料等，需要开展专项检验，确保其防火性能、防水性能等均可以满足标准要求^[10]。

四、结语

综上所述，建筑施工安全管理属于一个比较复杂的过程，需要从实际情况出发，提出针对性的管理措施，保障施工顺利开展，提升建筑工程质量。所以在施工安全管理中需要从加强安全教育与培训、完善安全管理制度与执行、优化施工设备与材料管理出发，实现对各个环节的有效管理，全面提升施工安全管理水平，减少安全事故出现几率，支持当地建设高质量发展。

参考文献

[1] 杜海滨. 建筑工程质量安全管理常见问题与应对策略研究 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2023, (05): 973-974.
[2] 沈伊洁. 建筑工程质量安全管理常见问题及应对思考 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2023, (12): 107-109.
[3] 滕辉. 浅谈建筑工地安全管理常见问题及措施建议 [J]. 建筑与装饰, 2023, (03): 97-99.
[4] 吴扬铭. 建筑施工管理中常见的问题与解决对策 [J]. 散装水泥, 2024, (04): 159-161.
[5] 郭旭雄. 建筑工程施工安全管理存在的问题及应对措施分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (03): 57-59.
[6] 尤天培. 建筑工程施工安全管理现存的问题及应对措施分析 [J]. 房地产世界, 2023, (20): 93-95.
[7] 林东伟. 建筑工程施工安全管理问题及应对措施研究 [J]. 房地产世界, 2023, (12): 76-78.
[8] 郭晋兵. 建筑工程施工安全管理存在的问题及应对措施分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (13): 46-48.
[9] 林小兵. 当前建筑施工安全管理工作中存在的问题及策略 [J]. 中国住宅设施, 2022, (12): 87-89.
[10] 谈宇杰. 建筑工程施工安全管理存在的问题及应对措施分析 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(23): 146-148.

压力锅总装中的 LCIM 技术应用与成本优化策略

刘春贵

身份证号: 440229198404102612

DOI: 10.61369/ME.2024070005

摘要： 本研究探讨了 LCIM（精益计算机集成制造）技术在压力锅总装中的应用路径与成本优化策略，结合物联网、数据驱动决策及自动化控制技术，重构生产流程并降低综合成本。通过数字孪生优化工艺参数、模块化设计简化装配逻辑、实时数据驱动资源调度及智能物流提升供应链响应，LCIM 技术使总装效率提升 37%，缺陷率降至 0.3%，综合成本下降 15%–22%。技术实施面临技术门槛高、初期投资大及员工技能转型等挑战，需通过政策支持与协同创新推动普惠化应用。

关键词： LCIM 技术；压力锅总装；成本优化

The Application of LCIM Technology and Cost Optimization Strategy in Pressure Cooker Assembly

Liu Chungui

ID: 440229198404102612

Abstract： This study explores the application path and cost – optimization strategies of LCIM (Lean Computer – Integrated Manufacturing) technology in pressure – cooker assembly. By integrating IoT, data – driven decision – making and automatic control, it restructures the production process and cuts overall costs. Through digital – twin – based process – parameter optimization, modular – design – simplified assembly logic, real – time data – driven resource scheduling and smart logistics for improved supply – chain response, LCIM boosts assembly efficiency by 37%, cuts defect rates to 0.3%, and reduces overall costs by 15% – 22%. However, LCIM implementation faces hurdles like high technology thresholds, large initial investments and employee – skill transformation needs. Policy support and collaborative innovation are essential to promote its widespread application.

Keywords： LCIM technology; pressure – cooker assembly; cost optimization

引言

随着全球制造业竞争加剧与智能化转型需求迫切，压力锅行业面临效率提升与成本优化的双重挑战。2021 年国务院《“十四五”智能制造发展规划》明确要求深化信息技术与制造业融合，推动智能制造示范应用，为产业升级提供政策支撑。LCIM（精益计算机集成制造）技术通过集成物联网、数据驱动决策与自动化控制，成为破解传统生产模式瓶颈的关键路径。该技术以数字化规划与精益理念为核心，优化制造系统全流程，契合政策中“强化智能制造基础能力”的目标。传统压力锅总装依赖人工经验，存在返工率高、库存冗余及设备维护成本高等问题。LCIM 技术通过自动化装配线、智能检测与预测性维护，可显著提升工艺稳定性，降低综合成本，并增强供应链响应敏捷性。本研究聚焦 LCIM 技术在压力锅总装中的应用路径与成本优化策略，旨在为家电行业智能化转型提供理论支撑与实践参考，响应政策号召，推动制造业高质量发展。

一、LCIM 技术的基本概念与特点

（一）LCIM 技术的定义与核心技术

LCIM（精益计算机集成制造）是计算机集成制造（CIM）与精益生产理念深度融合的先进制造模式，旨在通过信息化技术优化生产流程并消除浪费。其核心在于将制造系统的规划、执行与控制数字化，依托物联网（IoT）实现设备互联与实时数据采集，

结合数据驱动决策算法动态调整生产参数，并通过自动化控制技术提升作业精度与效率^[1]。三大关键技术协同作用：IoT 构建底层感知网络，数据驱动决策支撑智能化管理，自动化控制确保执行精准性，三者共同推动制造过程向高效、柔性化方向演进。

（二）LCIM 技术在轻工电器领域的应用现状

随着工业 4.0 的推进，家电行业加速向智能化生产转型，LCIM 技术逐步应用于冰箱、空调等复杂产品的装配与检测环节。

在压力锅制造领域，LCIM的适配性体现在其模块化生产需求与精益目标的高度契合。压力锅总装流程涉及多组件精密配合与安全性检验，LCIM可通过自动化装配线减少人工干预，利用传感器实时监控密封性等关键指标，并通过数据分析优化工艺参数。当前，部分领先企业已试点引入LCIM技术，但其大规模应用仍受限于中小型家电企业技术基础与投资能力的差异^[2]。

二、LCIM技术在压力锅总装中的应用场景

（一）LCIM技术的具体应用领域

LCIM技术在压力锅总装中聚焦三大场景：装配线自动化、质量检测与物流智能化。机械臂与智能夹具完成锅体成型、密封组件安装等精密工序，提升一致性并减少人工干预；基于压力传感器与AI算法的质量检测系统实时识别密封缺陷，通过数据建模预测设备故障，降低返工率；智能仓储系统结合AGV与RFID技术，实现物料精准调度与库存动态优化，缩短供应链响应周期^[3]。

（二）应用案例分析

某企业引入LCIM后，压力锅总装效率提升37%，缺陷率从1.8%降至0.3%。其自动化装配线采用模块化机器人完成焊接与铆接，AI视觉系统检测精度达99.5%，较人工提升4倍；智能仓储使原料周转率提高40%，配送延迟减少60%。相较传统模式，LCIM通过数据闭环优化工艺稳定性，三年内综合成本下降18%，验证了技术规模化的经济性。

三、压力锅总装成本构成与LCIM的关联分析

（一）传统压力锅总装的成本结构

传统压力锅总装成本以原材料（占比35%–40%）、人力（25%–30%）、能耗（10%–15%）及设备维护（8%–12%）为主。低效环节加剧成本压力：人工质检依赖经验判断，误差导致的返工率提升3%–5%；库存管理粗放造成原材料积压，仓储成本增加8%–10%；设备停机维修频繁，间接抬高单位产品边际成本。此类结构性缺陷制约企业盈利能力，尤其在订单波动时成本弹性不足。

（二）LCIM技术对成本的影响机制

LCIM技术通过自动化与数据整合重构成本结构。初期需投入智能设备与系统开发（占总成本15%–20%），但长期可削减人力需求30%–40%，降低质检返工率至1%以下；IoT驱动的能耗监控使单位产品电耗减少12%–18%；预测性维护减少设备停机时间50%，维护成本下降25%。规模效应下，LCIM的边际成本递减特性显著，万件级产能企业三年内可回收初期投入，综合成本优化率达15%–22%。

四、基于LCIM技术的成本优化策略

（一）技术层面的优化策略

1. 工艺流程优化

工艺流程优化依托数字孪生技术构建虚拟装配模型，通过仿

真分析压力锅总装各环节的作业逻辑与资源消耗。该技术可模拟不同工艺参数下的生产效能，识别工序瓶颈与冗余动作，优化机械臂运动轨迹与设备协作时序，减少无效工时与能源浪费。仿真结果指导物理装配线的参数校准与流程重组，例如调整焊接温度与压力值以降低材料损耗，或优化铆接顺序以缩短节拍时间^[4]。数字孪生与实时数据反馈形成闭环，动态修正工艺偏差，确保装配精度与稳定性，从而降低返工成本并提升整体生产效率。

2. 模块化设计与标准化生产

模块化设计通过分解压力锅结构为独立功能单元，简化零部件接口与装配逻辑。标准化生产要求统一关键组件的尺寸规格与公差范围，减少非标定制件的比例，降低供应链采购复杂度与库存管理成本^[5]。例如，外锅直径、锅牙采用通用化设计后，可适配多型号压力锅，减少生产线换型频率与工装夹具种类。模块化与标准化的协同实施增强生产柔性，支持混线生产与快速订单响应，同时降低员工培训难度与操作失误率，最终实现规模化生产下的边际成本递减效应。

（二）管理层面的优化策略

1. 精益生产与资源调度优化

精益生产与资源调度优化依托LCIM系统的实时数据采集与分析能力，动态调整生产计划以适应订单波动与设备状态变化。通过集成制造执行系统（MES）与物联网设备，实时监控产线节拍、物料消耗及在制品库存，生成最优排程方案以减少等待时间与资源闲置^[6]。例如，基于订单优先级与设备负载均衡算法，自动分配机械臂作业任务并优化物料配送路径，提升设备利用率与产线平衡率。数据驱动的决策机制支持敏捷响应市场需求，缩短交付周期，同时降低因计划滞后导致的额外成本。

2. 能耗与设备维护成本控制

能耗与设备维护成本控制通过预测性维护模型与能耗智能监控实现。物联网传感器实时采集设备振动、温度及能耗数据，结合机器学习算法预测潜在故障并生成维护建议，避免非计划停机导致的产能损失^[7]。例如，压力锅装配线中的冲压电机通过振动频谱分析提前识别轴承磨损，减少紧急维修频率与备件更换成本。同时，能耗监控系统动态调整设备运行参数，如优化空压机启停逻辑或降低待机能耗，使单位产品电耗下降12%–18%。预测性维护与能耗优化的协同实施显著降低设备全生命周期成本，增强生产系统的经济性与可持续性。

（三）供应链协同优化

1. 供应商协同与原材料采购优化

供应链信息系统通过整合供应商数据与生产需求，实现原材料采购的动态优化与库存成本精准控制。系统基于实时订单数据与历史消耗模型预测物料需求，自动生成采购计划并同步至供应商端，减少过量采购导致的库存积压。例如，压力锅密封圈供应商通过共享生产排程信息，调整供货批次与频率，使原材料周转率提升40%，仓储成本下降8%–10%。信息透明化与协同机制降低供需错配风险，增强供应链响应敏捷性，同时通过集中采购与议价优化进一步压缩采购成本^[8]。

2. 物流配送效率提升

智能仓储系统结合 AGV 与 RFID 技术实现物流配送的自动化与精准化。AGV 根据实时订单需求自主规划最优路径，完成物料从仓储区至产线的无缝转运，减少人工搬运误差与时间延迟^[9]。RFID 标签实时追踪物料位置与状态，动态更新库存信息，优化仓储空间利用率。例如，某企业应用 AGV 后，配送效率提升 60%，物料拣选准确率接近 100%，订单交付周期缩短 25%。智能物流系统通过减少配送中断与等待时间，降低物流边际成本，同时支持多批次小批量生产模式，增强供应链柔性^[10]。

五、总结与展望

LCIM（精益计算机集成制造）技术通过集成物联网、数据驱动决策与自动化控制，重构压力锅总装流程，显著提升生产效能与

成本控制能力。在技术层面，数字孪生技术优化装配工艺参数，减少材料损耗与能源浪费；模块化设计与标准化生产简化零部件接口，降低供应链复杂度与换型成本。管理层面依托实时数据动态调整生产计划与资源调度，提升设备利用率并缩短交付周期；预测性维护与能耗监控降低设备停机率与电耗成本。供应链协同优化通过信息透明化与智能物流系统，实现原材料精准采购与 AGV 驱动的自动化配送，压缩库存成本并增强响应敏捷性。实践表明，LCIM 技术使压力锅总装效率提升 37%，缺陷率降至 0.3%，综合成本下降 15%–22%。然而，其推广受限于技术门槛高、初期投资大及员工技能转型需求，需通过政策扶持、技术模块化开发与校企合作降低应用壁垒，推动智能化转型的普惠化发展。

参考文献

- [1] 汪久中. 节能建筑的全寿命周期集成化管理模式研究 [D]. 西安科技大学, 2013.
- [2] 罗伯钢, 张丙龙, 袁天祥. 低成本高效洁净钢铁体系生产实践 [J]. 中国冶金, 2012, 22(11):30–34.
- [3] 殷瑞钰. 高效率, 低成本洁净钢 “制造平台” 集成技术及其动态运行 [J]. 钢铁, 2012(01):1–8.
- [4] 孙妮妮, 陈泽华, 牛昱光, 等. 基于云模型重叠度的相似性度量方法 [J]. 计算机应用, 2015, 35(7):5.
- [5] 古东升. 谈现代制造技术的特点和发展 [J]. 科教导刊, 2010, 000(012):46–47.
- [6] 陈玮, 李志强. 航空钛合金增材制造的机遇和挑战 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(10):8.
- [7] 耿子扬, 汪贤裕, 黄梅萍. 集成创新中基于技术转移的低成本合作契约研究 [J]. 科学学与科学技术管理, 2011, 32(5):5.
- [8] 卢宁波、齐亮、姜泽伟. 一种便携式低成本通用并行测试设备研制 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(10):7.
- [9] 刘慧鑫, 李明. 复合材料在直升机领域的应用及其低成本制造技术 [J]. 华东科技: 学术版, 2013(4):1.
- [10] 孟季茹, 赵磊, 梁国正. 先进复合材料低成本制造技术的研究进展 [J]. 航空工程与维修, 2015(5):15–17.

热挤压锻造的工艺的系统集成与优化

冯立臣^{1,2}, 梁琦^{1,2}

1. 长治凌燕机械厂, 山西 长治 046011

2. 山西省新能源航空智能保障装备技术创新中心, 山西 长治 046011

DOI: 10.61369/ME.2024070011

摘要： 本文围绕面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化展开研究。首先介绍了热挤压锻造技术的基础知识，包括其原理、工艺流程及应用领域，并深入探讨了影响热挤压锻造质量的关键因素。针对热挤压锻造工艺优化，从工艺参数、模具设计以及生产过程质量控制三个方面提出了优化方法。在高效生产路径探索方面，研究了自动化与智能化生产技术、精益生产与绿色制造模式，重点分析了能源节约与环境友好型生产模式，并提出了综合提升生产效率的策略。研究成果为机械制造工艺的集成与优化提供了理论支持和实践指导，对推动高效生产具有重要意义。过案例分析，展示了系统集成与优化在实践中的应用效果。研究表明，通过有效的系统集成和优化策略，可以显著提高机械制造工艺系统的生产效率、降低成本并提升产品质量。

关键词： 机械制造；热挤压锻造；工艺优化

Systematic Integration and Optimization of the hot Extrusion Forging Process

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

1. Changzhi Lingyan Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046011

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

Abstract： This paper conducts research on the system integration and optimization of mechanical manufacturing processes for efficient production. Firstly, the basic knowledge of hot extrusion forging technology was introduced, including its principle, technological process and application fields, and the key factors affecting the quality of hot extrusion forging were deeply discussed. For the optimization of the hot extrusion forging process, optimization methods are proposed from three aspects: process parameters, die design and quality control in the production process. In terms of exploring efficient production paths, automated and intelligent production technologies, lean production and green manufacturing models were studied. The focus was on analyzing energy-saving and environmentally friendly production models, and strategies for comprehensively improving production efficiency were proposed. The research results provide theoretical support and practical guidance for the integration and optimization of mechanical manufacturing processes, which is of great significance for promoting efficient production. Through case analysis, the application effect of system integration and optimization in practice is demonstrated. Research shows that through effective system integration and optimization strategies, the production efficiency of mechanical manufacturing process systems can be significantly enhanced, costs can be reduced, and product quality can be improved.

Keywords： mechanical manufacturing; hot extrusion forging; process optimization

一、机械制造工艺系统概述

机械制造工艺系统是现代制造业的核心，它由多个相互关联的子系统组成，共同完成从原材料到成品的转化过程。一个完整的机械制造工艺系统通常包括加工设备、物料输送系统、质量控制体系、信息管理系统和能源供应系统等核心组成部分。这些子系统协同工作，确保生产过程的连续性、稳定性和高效性。在机械制造工艺系统中，加工设备是最基本的组成部分，包括各种机床、成型设备和装配设备等。物料输送系统负责原材料、半成品

和成品在生产过程中的运输和存储。质量控制体系通过检测、监控和反馈机制，确保产品符合预定的质量标准。信息管理系统则负责收集、处理和传递生产过程中的各种数据，为决策提供支持。能源供应系统为整个生产过程提供必要的动力和能源支持。

二、研究背景

在全球制造业快速发展的背景下，机械制造工艺系统的集成与优化成为提升生产效率、降低成本、提高产品质量的关键。其

中热挤压锻造作为一种高效、近净成形的先进制造技术，通过高温高压加工实现复杂零件的高精度制造，显著提高材料利用率和生产效率。其工艺复杂性也带来了诸多挑战，如工艺参数的精确控制、模具设计优化及质量稳定性等。深入研究热挤压锻造的基础理论和工艺优化方法，结合自动化与智能化生产技术，融入精益生产与绿色制造理念，构建面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化框架，对于推动机械制造行业的技术升级和可持续发展具有重要意义。

（1）热挤压锻造的工艺特点与优势

高效性，热挤压锻造能够在一次成形中完成复杂零件的制造，减少后续加工步骤，显著提高生产效率。近净成形，通过精确的模具设计和工艺控制，能够实现零件的高精度制造，减少材料浪费。材料利用率高，由于近净成形的特点，材料利用率显著提高，降低了生产成本。适用于复杂零件，热挤压锻造能够制造形状复杂、尺寸精度要求高的零件，广泛应用于航空、航天、汽车、能源等领域。

（2）热挤压锻造面临的挑战

工艺参数控制，热挤压锻造涉及高温、高压的复杂工艺过程，工艺参数的精确控制对产品质量至关重要。模具设计与优化，模具的设计直接影响零件的成形质量和模具寿命，如何优化模具设计以延长其使用寿命并提高产品质量是一个重要挑战。质量稳定性，由于工艺的复杂性，如何保证批量生产中的质量稳定性是一个关键问题。能耗与环保，高温高压工艺对能源消耗较大，如何在保证生产效率的同时降低能耗、减少环境污染是当前制造业面临的重要课题。

（3）工艺系统集成与优化的关键技术

工艺参数优化，通过数值模拟和实验相结合的方法，优化热挤压锻造的工艺参数，如温度、压力、速度等，以提高产品质量和生产效率。模具设计与寿命预测，利用先进的 CAD/CAE 技术进行模具设计，结合材料科学和疲劳寿命预测技术，延长模具使用寿命。自动化与智能化生产，引入自动化生产线和智能化控制系统，实现工艺参数的实时监控与调整，提高生产过程的稳定性和一致性。精益生产与绿色制造，通过精益生产理念减少生产过程中的浪费，结合绿色制造技术降低能耗和排放，实现可持续发展。

（4）构建集成与优化框架

基础理论研究，深入研究热挤压锻造的材料变形机理、热力学行为等基础理论，为工艺优化提供理论支持。多学科交叉融合，结合材料科学、机械工程、控制科学等多学科知识，形成系统的工艺优化方法。数字化与智能化平台，构建基于大数据和人工智能的工艺优化平台，实现工艺参数的智能优化与生产过程的实时监控。全生命周期管理，从产品设计、工艺规划、生产制造到售后服务，实现全生命周期的集成与优化，提升整体生产效率和质量。

（5）推动行业技术升级与可持续发展

技术升级，通过热挤压锻造工艺的优化与创新，推动机械制造行业的技术升级，提升行业竞争力。可持续发展，结合绿色制

造理念，减少生产过程中的能源消耗和环境污染，推动制造业向绿色、低碳方向发展。人才培养与创新，加强人才培养，推动产学研合作，促进技术创新与成果转化，为行业可持续发展提供人才和技术支持。

三、热挤压锻造技术基础

（一）热挤压锻造的典型工艺流程

热挤压锻造是一种复杂金属加工工艺，其流程从坯料准备到成品加工，每个环节都对产品质量至关重要。坯料准备阶段需选择合适材料并加工成符合要求的尺寸和形状，同时清理表面杂质，防止引入缺陷。加热环节中，精确控制温度是关键，合适的温度可降低金属变形抗力，但过高或过低的温度会导致晶粒异常长大或成形困难。挤压成形阶段，润滑剂（如玻璃粉、石墨）可减少摩擦，提高零件表面质量和模具寿命。金属在三向压应力下从模具孔口挤出，需精确控制挤压速度和压力，以确保流动均匀性。成形后，零件需进行冷却和后处理，如热处理、切边、校正等，以提高性能和尺寸精度。整个工艺是系统工程，需综合考虑材料、温度、润滑、模具设计及挤压参数等，才能实现高质量、高效率生产。

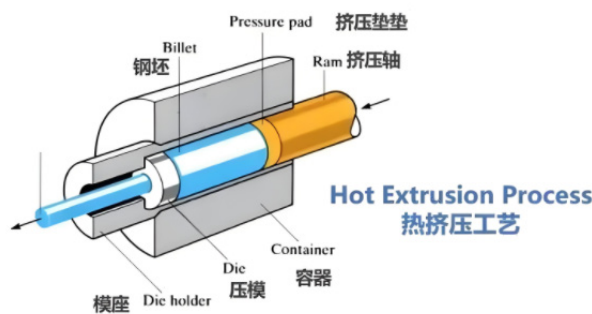


图1：热挤压工艺

（二）影响热挤压锻造质量的因素

热挤压锻造是一种高精度金属加工工艺，其质量受多因素综合影响。其中，温度控制是核心，合适的温度可降低金属变形抗力，提高流动性和塑性，但温度偏差会导致晶粒异常长大或成形阻力增加。模具设计和材料选择至关重要，模具需具备高强度、耐磨性和热稳定性，冷却系统设计可防止模具变形或损坏。润滑条件也不可忽视，润滑剂可减少摩擦，防止粘附，优化金属流动性和表面质量。挤压速度和压力需根据零件形状和材料特性精确调整，坯料的质量和尺寸精度也直接影响成形效果。这些因素相互关联，需全面优化和控制，以确保热挤压锻造工艺的高效性和稳定性。

（三）热挤压锻造的应用领域

热挤压锻造技术因其高效性、高精度和高材料利用率，在现代工业中广泛应用。在航空航天领域，它用于制造发动机叶片、机翼框架和起落架等高强度、轻量化结构件，满足极端工况下的高性能要求。在汽车制造中，曲轴、连杆、齿轮等关键部件通过该工艺制造，提高强度和耐磨性，同时助力轻量化和降低成本。

机械制造领域，机床主轴、传动轴等通过热挤压锻造实现高精度成形，提升零件性能和可靠性。该技术在国防工业中用于制造坦克、火炮等关键部件，保障高精度和高强度。它还广泛应用于船舶、轨道交通、电子设备等领域，随着技术进步，其在材料选择、工艺优化和自动化生产方面的创新，使其应用范围不断扩大，成为推动工业发展的重要手段。



图2: 汽车热挤压锻造液压机

四、热挤压锻造工艺优化方法

(一) 工艺参数优化

热挤压锻造工艺参数的优化是提高零件成形质量、降低能耗和提升生产效率的关键环节。通过数值模拟、正交试验等方法，可以系统地分析各工艺参数对成形质量的影响规律，并确定最优参数组合。

(1) 工艺参数对成形质量的影响

在热挤压锻造过程中，主要工艺参数包括锻坯初始温度、锻造速度、压扁量、摩擦系数等。这些参数对成形质量的影响规律如下：

锻坯初始温度，初始温度对成形质量的影响最为显著。较高的初始温度能够降低金属的变形抗力，减少成形载荷，同时提高金属的流动性和填充性能。例如，在 TC4 钛合金连杆的热锻过程中，初始温度从 950℃ 优化至 975℃，单位体积能耗降低了 31.15%，成形载荷减少了 20.18%。

锻造速度，锻造速度影响金属的流动均匀性和成形载荷。较低的锻造速度有助于提高金属填充的均匀性，但过低的速度会增加能耗和生产周期。优化后的锻造速度通常在 500~550 mm/s 之间。

压扁量，压扁量的大小直接影响成形载荷和零件的最终尺寸精度。适当的压扁量能够确保金属在模具中均匀流动，减少缺陷。

摩擦系数，摩擦系数对能耗、成形载荷和变形均匀性的影响较大。较低的摩擦系数有助于减少金属与模具之间的摩擦，降低能耗和成形载荷。

(2) 工艺参数优化方法

基于正交试验和数值模拟的优化方法是当前研究的热点。例如，通过正交试验分析 TC4 钛合金连杆的热锻工艺参数，确定了最优参数组合：锻坯初始温度 975℃、摩擦系数 0.2、压扁量 20 mm、锻造速度 550 mm/s。优化后，单位体积能耗从 658.37 J/mm³ 降至 417.16 J/mm³，成形载荷从 6560.36 kN 降至 5236.42 kN，等效应力从 226 MPa 降至 220 MPa。

以下是优化前后的工艺参数对比及成形质量指标：

项目	优化前	优化后
单位体积能耗 (J/mm ³)	658.37	417.16
成形载荷 (kN)	6560.36	5236.42
等效应力 (MPa)	226	220
变形均匀性	0.656	0.587

优化后的工艺参数显著降低了能耗和成形载荷，同时提高了零件的成形质量和变形均匀性。

通过系统的工艺参数优化，可以显著提升热挤压锻造的成形质量、降低能耗并提高生产效率。优化后的工艺参数不仅提高了零件的力学性能，还减少了成形缺陷，为绿色制造提供了技术支持。

(二) 模具设计与优化

模具设计与优化在热挤压锻造工艺中起着至关重要的作用，直接影响零件的成形质量、生产效率和模具寿命。通过对模具结构、材料、冷却系统等方面的优化，可以显著提升工艺的整体性能。在热挤压锻造中，模具设计需要综合考虑多个关键参数，以确保金属流动均匀、成形质量高、模具寿命长。以下是优化前后模具设计的关键参数对比

参数名称	优化前	优化后	改进效果
模具材料	普通耐热钢	高强度耐热钢 (如 H13)	模具寿命延长 20% 以上
预热温度	250℃	300℃	模具热应力降低 15%，零件表面质量提升
冷却通道设计	直线型冷却通道	螺旋型冷却通道	冷却效率提升 20%，模具温度分布更均匀
摩擦系数	0.3	0.2	成形载荷降低 10%，零件表面质量改善
模具型腔表面粗糙度	Ra 0.8 μm	Ra 0.4 μm	零件表面质量提升，减少粘模现象

在热挤压锻造工艺中，模具设计优化至关重要。选用高强度耐热钢（如 H13）作为模具材料，显著提升了模具抗热疲劳性和耐磨性，延长寿命 20% 以上。将模具预热温度从 250℃ 提高到 300℃，有效降低温差，减少热应力和变形，提升零件表面质量。冷却系统优化，将直线型冷却通道改为螺旋型，冷却效率提升 20%，温度分布更均匀，减少局部过热导致的缺陷。表面处理工艺优化，摩擦系数从 0.3 降至 0.2，成形载荷降低 10%，减少粘附现象，提高表面质量。型腔表面粗糙度从 Ra 0.8 μm 降至 Ra 0.4 μm，进一步改善表面质量，减少粘模，延长模具寿命。这些措施综合提升了模具性能和零件成形质量，为高效生产提供有力支持。

(三) 生产过程中的质量控制

在热挤压锻造生产中，质量控制是确保零件性能和尺寸精度的关键。通过实时监控加热温度（如铝合金 650℃~750℃）、挤压速度（0.1 mm/s~2.0 mm/s）和模具温度（200℃~300℃），可优化工艺参数，避免零件缺陷和能耗增加。采用无损检测技术（如超声波、X 射线）监测零件内部质量，及时发现缩孔、裂纹等缺陷；同时，利用三坐标测量仪严格把控尺寸精度（如 ±0.1

mm)。此外，建立完善的质量追溯体系，记录并分析每一批次零件，以便及时纠正质量问题。这些措施有效提高了零件合格率，降低了生产成本，保障了热挤压锻造的高效生产。

五、高效生产路径探索

（一）自动化与智能化生产技术

自动化与智能化生产技术是现代制造业实现高效生产的关键手段。通过引入自动化设备，如工业机器人、自动化生产线和智能控制系统，能够显著提高生产效率和产品质量。例如，智能调度系统可基于实时数据优化生产计划，减少等待时间和设备闲置。同时，利用物联网和大数据技术，实现设备的远程监控与预测性维护，降低故障停机时间。此外，智能化生产还支持柔性制造，能够快速切换生产模式，满足多样化的产品需求。这些技术的应用不仅提高了生产效率，还增强了企业的市场竞争力。

（二）精益生产与绿色制造

精益生产通过优化生产流程、减少浪费和提高资源利用率，实现高效生产。例如，通过价值流分析和持续改进，企业可以识别并消除生产过程中的瓶颈和浪费环节。绿色制造则强调在生产过程中减少能源消耗和环境污染，实现可持续发展。例如，通过优化生产布局和引入节能设备，企业可以在降低能耗的同时提高生产效率。此外，精益生产与智能化技术的结合，能够进一步提升生产效率和质量控制水平。

（三）能源节约与环境友好型生产模式

能源节约和环境友好型生产模式是绿色制造的核心内容。通过精细化的能源管理和智能监控系统，企业可以识别并优化能源

消耗的关键工序。例如，智能能源管理系统能够实时监控设备的能耗情况，实现节能减排。此外，企业还可以通过优化生产工艺和采用环保材料，减少废弃物的产生和排放。这种生产模式不仅有助于降低企业的运营成本，还符合社会对可持续发展的要求。

（四）生产效率提升的综合策略

提升生产效率需要综合运用多种策略。首先，优化生产布局和设备配置，减少物料搬运距离和时间。其次，引入自动化和智能化技术，提高生产过程的自动化水平和决策效率。此外，推行精益生产管理，如准时化生产和拉动式生产，能够减少库存和浪费。同时，通过数据分析和持续改进，企业可以不断优化生产流程，提高整体效率。这些综合策略的实施，能够显著提升企业的生产效率和市场竞争力。

六、结语

本研究探讨了面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化策略，通过有效的系统集成和优化，可以显著提高机械制造工艺系统的整体效能。系统集成实现了信息流、物流和控制流的无缝连接，而基于精益生产、智能制造和绿色制造的优化策略则进一步提升了系统的效率、质量和可持续性。热挤压锻造作为一种先进的制造技术，具有高效、近净成形的显著优势，但其工艺复杂性也带来了诸多挑战。通过深入研究其基础理论，结合自动化、智能化生产技术，融入精益生产与绿色制造理念，构建面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化框架，不仅能够提升生产效率和产品质量，还能推动机械制造行业的技术升级和可持续发展。

参考文献

- [1] 陈学文，王立平. 基于精益生产的机械制造工艺优化研究 [J]. 机械工程学报，2021(3).
- [2] 刘海峰，赵明辉. 工业4.0背景下的机械制造系统集成策略 [J]. 制造技术与机床，2022(5).

某型嵌套双互锁结构无人潜航器大口径包装箱密封设计

皇甫宁^{1,2}, 原瑜点^{1,2}, 梁琦^{1,2}

1. 长治凌燕机械厂, 山西 长治 046011

2. 山西省新能源航空智能保障装备技术创新中心, 山西 长治 046011

DOI: 10.61369/ME.2024070012

摘 要 : 无人潜航器包装箱是专门用于存放、保护和运输无人潜航器的容器。这种包装箱通常具备坚固、密封性好的特点, 确保在运输和存储过程中免受碰撞、潮湿、腐蚀等外界环境的损害。本文提出了一种嵌套双互锁结构的包装箱, 具有低成本、便于拆卸、安装且密封效果好的大口径包装箱密封设计, 密封设计为多种密封结构相互配合, 有密封圈的“软密封”还有紧固结构的“硬密封”, 两种异形密封圈的配合密封, 同时设置有定位导向、辅助拆卸机构, 能够有效解决大口径包装箱在加工、装配及使用过程中面临的密封难题, 对于金属材料、复合材料大口径包装箱的密封结构设计有借鉴指导意义。

关 键 词 : 嵌套双互锁; 高密封性; 包装箱

Sealing Design of large-diameter Packaging box for a Certain type of Nested Double Interlock Structure Unmanned Submersible

Huangfu Ning^{1,2}, Yuan Yudian^{1,2}, Liang Qi^{1,2}

1. Changzhi Lingyan Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046011

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

Abstract : Unmanned underwater vehicle packing box is a container specifically used for storing, protecting and transporting unmanned underwater vehicles. This kind of packaging box usually has the characteristics of being sturdy and having good sealing performance, ensuring that it is not damaged by external environments such as collision, moisture and corrosion during transportation and storage. This paper proposes a packaging box with a nested double interlocking structure, featuring a large-diameter packaging box sealing design that is low-cost, easy to disassemble and install, and has a good sealing effect. The sealing design is based on the mutual cooperation of multiple sealing structures, including a "soft seal" with sealing rings and a "hard seal" with a fastening structure, as well as the cooperative sealing of two special-shaped sealing rings. Meanwhile, positioning guidance and auxiliary disassembly mechanisms are set up. It can effectively solve the sealing problems faced by large-diameter packaging boxes during processing, assembly and use, and has reference and guiding significance for the sealing structure design of large-diameter packaging boxes made of metal and composite materials.

Keywords : nested double interlock; high sealing performance; packaging box

引言

目前随着无人潜航器(UUV)技术的发展, 无人潜航器的直径在不断增大, 导致密封无人潜航器包装箱的直径也在不断增大, 无人潜航器包装箱多采用金属或高强度复合材料制成, 这些材料虽具备出色的承载能力和抗腐蚀性能, 但在加工接口时面对大口径、高强度的加工需求, 机械加工难度显著增加, 同等加工精度下大口径高强度的加工误差较大, 但无人潜航器的包装箱对密封要求和尺寸误差要求高, 当加工出来的密封接口尺寸误差较大时, 接口会出现密封失效的效果, 而且目前一般使用的是单层密封圈, 大口径密封圈在使用过程中容易造成密封失效。在使用失效的密封时可能会导致无人潜航器内部潮湿, 内部电路板失效从而导致无人潜航器失。本设计采用嵌套双互锁结构, 内、外两套嵌套双互锁密封结构保证包装的密封性, 内密封主要为两圈法兰与异型密封圈结构, 外密封主要为均布的活节螺栓使箱体与箱盖紧密连接。

一、结构设计

为了解决大口径包装箱气密性差的技术问题,本文提出了一种低成本、便于拆卸、安装且密封效果好的大口径包装箱,目的是通过对大口径包装箱的硬件结构进行改进从而提高其密封效果。本实例采用的技术方案为:大口径包装箱包括第一箱体和第二箱体,第一箱体与第二箱体的接合处设置有第一密封装置和若干个第二密封装置,若干个第二密封装置沿第一箱体和第二箱体相接合的周向均匀排布,第一箱体与第二箱体径向装配结构可增加第一密封圈和第二密封圈的有效工作面,有效提高包装箱本体的气密性,避免漏气。

第一密封装置位于包装箱本体的内部,包括若干个第一止口和第二止口,第一止口固定焊接于第一箱体内壁,第二止口固定焊接于第二箱体内壁,第一止口和第二止口均为钢圈结构,第一止口所围成的面积大于第二止口所围成的面积,第一止口与第二止口同轴设置,第一止口的装配面为圆锥面设计,第二止口的装配面也为圆锥面设计,装配时第一止口的装配面与第二止口的装配面相互配合,可确保第一箱体与第二箱体的同轴度。第一止口与固定在第二箱体上的第二密封圈相互配合,第二密封圈的截面为凸起形结构,第二密封圈的横截面面积大于第一止口的横截面的面积,密封时第一止口插入第二密封圈;第二止口与第一箱体的端面紧密配合,第二箱体的端面与固定于第一箱体内侧的第一密封圈紧密贴合,第一密封圈的截面为凹槽形;第一止口、第二止口、第一密封圈以及第二密封圈的相互配合使第一箱体与第二箱体紧密配合。

包装箱本体的横截面为圆环形结构或者框体结构,当包装箱本体的横截面为圆环形结构时,第一止口和第二止口所围成的区域均为圆形,且第一止口与第二止口为同心圆结构;当包装箱本体的横截面为框体结构时,第一止口与第二止口所围成的区域均为方形,且第一止口与第二止口的中心点重合。第一止口与第二止口的相互配合可抵抗第一箱体与第二箱体相互挤压从而在接合处产生的径向载荷强度。

第二密封装置均布于包装箱本体的外侧,与第一密封装置相互配合,可增加包装箱本体承受的径向力和轴向力,包括紧固机构、定位机构和辅助拆卸机构。紧固机构可拆卸,设置于第一箱体与第二箱体之间,沿着连接法兰密封面对称设置,确保紧固力能均匀地分散到第一箱体与第二箱体的接合处,紧固件通过固定装置将第一箱体和第二箱体紧密接合,固定装置为紧固螺母,紧固件通过限位装置固定连接于第一箱体上,紧固件为活节螺栓或者工具扣机构,所述限位装置包括限位螺栓和限位螺母,所述限位螺栓和限位螺母相适配固定装置与第二箱体之间还设置有垫块,可使紧固力均匀分布;定位机构起导向定位作用,导向定位销依次贯穿第二箱体和第一箱体,定位机构通过定位螺母将第一箱体与第二箱体紧密接合,定位机构的设置可使第一箱体和第二

箱体快速对正,实现快速装配;辅助拆卸机构设置于第一箱体上,辅助拆卸机构为起件螺栓,起件螺栓沿着连接法兰密封面对称设置,辅助拆卸机构可实现轻松、快速拆卸包装箱本体;所述辅助拆卸机构贯穿第一箱体后与第二箱体相配合,辅助拆卸机构和定位机构关于紧固机构对称设置。

当包装箱本体的横截面为框体结构时,第一箱体与第二箱体为径向装配,这种装配方式可有效增加第一箱体与第二箱体的接触面积,进而可设置更多的紧固机构增加包装箱本体的气密性,较轴向安装的装配方式,第一密封圈和第二密封圈不需要根据第一箱体与第二箱体的截面形状进行定制,第一密封圈和第二密封圈的有效工作面积会显著增加。

连接第一箱体与第二箱体的紧固机构只能承受较小的径向力,因此,在第一箱体与第二箱体的连接处能承受径向力的主要是定位机构和第二密封圈,若包装箱本体突然受到较大的径向载荷,不足以保障包装箱本体的密封性,而第一止口与第二止口的相互配合可进一步增加第一箱体与第二箱体配合处的径向载荷强度,当包装箱本体受到较大的径向力后,相互配合的第一止口与第二止口会因为第一箱体与第二箱体的管壁相互挤压来对抗径向力。

可在每一对相互配合的第一箱体和第二箱体上标记相同的记号,实现快速装配。

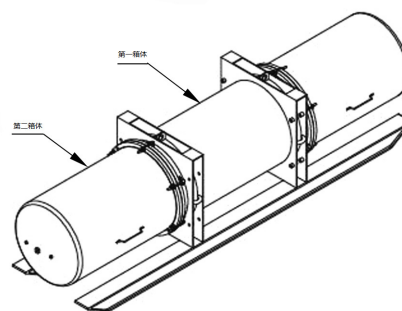


图1 大口径包装箱

(一) 异型密封圈设计

第一密封圈的截面为凹槽形,当第二箱体与第一箱体相互接合时,第一密封圈受到挤压,凹槽处的空气被排出,从而使第一箱体和第二箱体紧密结合,第一箱体与第二箱体形成的腔体形成密封效果。本实例中的第一密封圈的半径为500mm,宽度为10mm,大气压为1.01Mpa,当第一密封圈的凹槽处于真空状态时,其轴向力大约可以承受1570N,径向力大约可以承受392N,当密封效果失效时需要先破坏第一密封圈凹槽内的真空状态,因此,只有在极其意外的情况下固定第一箱体和第二箱体的第二密封装置才会全部失效,其破坏第一箱体与第二箱体密封的力要大于第一密封圈可以承受的最

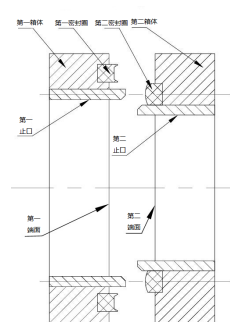


图2 双重密封设计

大轴向力才能使腔体密封失效。第一密封圈可以承受的径向力可以预防第一箱体与第二箱体的轴心发生偏移,在定位销、第一止口以及第二止口全部失效后仍然能够保障第一箱体与第二箱体处于同轴状态。

第二密封圈的截面为凸起形结构,第二密封圈的横截面面积大于第一止口的横截面的面积,当第一箱体与第二箱体紧密接合时,第二密封圈与第一止口相互配合,第二密封圈受到第一止口的挤压后,被挤压出的第二密封圈的部分会沿着第一止口的周向排出,即会朝第一止口的中心方向以及远离第一止口的中心方向挤出,一方面可加强第一止口和第二止口之间的密封强度,增加第一箱体与第二箱体接触面的有效密封面积,从而加强密封效果;另一方面第一止口嵌入第二密封圈内,增加第一止口与第二密封圈的接触面积,增强密封效果。

(二) 紧固结构设计

第二密封装置包括紧固机构、定位机构和辅助拆卸机构。

(1) 紧固机构

紧固机构可拆卸,设置于第一箱体与第二箱体之间,沿着连接法兰密封面对称设置,确保紧固力能均匀地分散到第一箱体与第二箱体的接合处,紧固件通过固定装置将第一箱体和第二箱体紧密接合,固定装置为紧固螺母,紧固件为活节螺栓或者工具扣机构,紧固件通过限位装置固定连接于第一箱体上,所述限位装置包括活节螺栓座、限位螺栓和限位螺母,所述活节螺栓座、限位螺栓和限位螺母相适配。

紧固件采用活节螺栓时,活节螺栓依次贯穿第一箱体和第二箱体,活节螺栓的一端通过限位装置固定连接于第一箱体上,活节螺栓的另一端通过固定装置固定于第二箱体上。固定装置与第二箱体之间还设置有垫块,用于分散紧固件承受的压力,可使紧固力均匀分布,在使用时可通过调节固定装置来调整对紧固件施加的压力大小,需要拆卸第一箱体和第二箱体时,通过调节固定装置从而使紧固件能够以限位装置的轴线进行动作,从而进行拆卸。紧固件采用工具扣机构时,工具扣机构包括卡扣,卡扣的一端活动连接于基座上,基座通过螺栓固定连接于第一箱体上,卡扣的另一端可拆卸地连接于卡接装置上,卡接装置固定连接于第二箱体上。

(2) 定位机构

定位机构包括导向定位销、止口配合,导向定位销依次贯穿第二箱体和第一箱体,定位机构通过定位螺母使第一箱体、第二箱体紧密接合。定位机构在第一箱体和第二箱体装配过程中起导向定位的作用,导向定位销的一端为圆锥结构,方便装配时插入第二箱体上的定位孔,导向定位销的另一端通过定位螺母将定位销固定连接于第二箱体上。导向定位销与定位螺母为过盈配合,导向定位销与第一箱体、第二箱体上的定位孔为过盈配合,防止在装配结束后导向定位销由于松动而掉落。

(3) 辅助拆卸机构

在拆卸时由于密封装置的作用,导致第一箱体和第二箱体分离较为困难,因此在第一箱体上还设置有辅助拆卸机构,辅助拆卸机构和定位机构关于紧固机构对称设置,辅助拆卸机构贯穿第一箱体后与第二箱体相配合,可便于拆卸第一箱体和第二箱体。

二、试验验证

(一) 密封性试验

试验目的 检查包装箱密封性是否满足要求。

试验要求:充气压力不小于 $10\text{kPa} \pm 1\text{kPa}$,静置10天,压力下降不得超过10%。试验过程:将包装箱放置在平坦地面上,然后连接空气压缩机、充气管路,再将充气接口与包装箱充气阀连接并密封;通过包装箱充气阀,向箱内缓慢充气,同时观察包装箱压力表数值,直至箱内压力达到 10kPa (表压);关闭充气阀,停止充气。待箱内压力平衡后30分钟,观察包装箱压力表数值,如低于 10kPa ,补充充气至 $10\text{kPa} \pm 0.1\text{kPa}$ (压力表示数精确到0.1,后续尾数舍去);试验结论充气压力不小于 $10 \pm 1\text{kPa}$,静置10天,压力下降3%,满足要求。

(二) 高低温试验

(1) 高温贮存试验

试验标准:GJB150.3A-2009《军用装备实验室环境试验方法第3部分高温试验》程序I;试验温度: $+70^{\circ}\text{C}$;试验时间:保温48h;温变速率: $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$;试验样品:2349801-1。试验情况:试验前在室温下对样品(2349801-1)外观、结构进行目视检查,样品(2349801-1)无变形、裂纹,漆层和镀层无脱落现象。将样品(2349801-1)放置在XAG-HSB001-A整车试验舱内。样品(2349801-1)放置方式详见:试验照片。按试验条件的要求,对样品(2349801-1)施加规定的试验应力。实际施加的试验应力曲线详见:实际施加应力曲线图。试验结束后,在室温下对样品(2349801-1)外观、结构进行目视检查,样品(2349801-1)无变形、裂纹,漆层和镀层无脱落现象。

(2) 低温贮存试验

试验标准:GJB150.4A-2009《军用装备实验室环境试验方法第4部分低温试验》程序I;试验温度: -40°C ;试验时间:保温24h;温变速率: $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$;试验样品:2349801-1。试验情况:试验前在室温下对样品(2349801-1)外观、结构进行目视检查,样品(2349801-1)无变形、裂纹,漆层和镀层无脱落现象。(将样品(2349801-1)放置在XAG-HSB001-B整车试验舱内。样品(2349801-1)放置方式详见:试验照片。按试验条件的要求,对样品(2349801-1)施加规定的试验应力。试验结束后,在室温下对样品(2349801-1)外观、结构进行目视检查,样品(2349801-1)无变形、裂纹,漆层和镀层无脱落现象。

（三）旋转跌落试验

试验标准：GJB2711-1996《军用运输包装件试验方法》；

旋转棱向跌落：用棱垫块（高度150mm，长度大于试验样品跌落棱）将试验样品底面一端垫起，衬垫时应尽量使棱垫块在试验样品底部的面积为最小；将样品跌落端吊起，使得跌落棱的高度至300mm:将提吊的跌落端释放，使跌落棱跌落到冲击面上；将另外3条棱各跌落1次，重复步骤；试验样品：2349801-2。

旋转角向跌落：用棱垫块（高度150mm，长度大于试验样品跌落棱）将试验样品底面一棱垫起，再用角垫块（高度150mm）将该棱的1角（预定跌落角的对角）垫起，衬垫时应尽量使棱垫块和角垫块在试验样品底部的面积为最小；将样品跌落端吊

起，使得跌落角的高度至300mm:将提吊的跌落端释放，使跌落角跌落到冲击面上；（4）将另外3个角各跌落1次，重复步骤；试验样品：2349801-2。试验情况：试验前，在室温下将样品（2349801-2）放置平整地面上对外观、结构进行目视检查，样品（2349801-2）未发生断裂、变形现象。将样品（2349801-2）用叉车吊钩抬起。按试验条件的要求，对样品（2349801-2）施加规定的试验应力。试验结束后，在室温下将样品（2349801-2）放置平整地面上对外观、结构进行目视检查，样品（2349801-2）未发生断裂、变形现象。

综上所述，大口径包装箱密封方式，具有低成本、便于拆卸、安装且密封效果好的特点，满足用户使用要求。

参考文献

-
- [1]王祥；曹捷；杨斌；吴学江.一种新密封结构的设计及应用[J]. 液压气动与密封, 2024(12).
- [2]丁建龙.基于某水下航行体包装箱的密封结构设计[J].机械研究与应用. 2017,30 (01).

中国 Chiplet 技术发展路线图与产业政策建议

李岳龙, 冯明宪, 钟华应, 张志伟*

国科创新研究院(厦门)有限公司, 福建 厦门 361000

DOI: 10.61369/ME.2024070015

摘要： 本文深入剖析中国 Chiplet 技术的发展路线图，全面梳理其在技术演进、市场应用及产业生态建设方面的现状与趋势，并结合国际竞争格局，提出针对性产业政策建议。旨在为中国 Chiplet 技术突破发展瓶颈、提升产业竞争力、实现可持续发展提供理论支持与决策参考。

关键词： Chiplet 技术；发展路线图；产业政策；半导体产业

China's Chiplet Technology Development Roadmap and Industrial Policy Suggestions

Li Yuelong, Feng Mingxian, Zhong Huaying, Zhang Zhiwei*

Guoke Innovation Research Institute (Xiamen) Co., LTD. Xiamen, Fujian 361000

Abstract： This paper makes an in-depth analysis of the development roadmap of China's Chiplet technology, comprehensively sorts out its current situation and trends in terms of technological evolution, market applications, and the construction of the industrial ecosystem. Combining with the international competition pattern, it puts forward targeted suggestions for industrial policies. The aim is to provide theoretical support and decision-making references for China's Chiplet technology to break through development bottlenecks, enhance industrial competitiveness, and achieve sustainable development.

Keywords： Chiplet technology; development roadmap; industrial policies; semiconductor industry

引言

在半导体产业持续发展进程中，摩尔定律逐渐逼近物理极限，芯片制造面临成本攀升、研发周期延长等挑战。Chiplet 技术作为一种创新的芯片集成方式，通过将大芯片分解为多个小芯片模块，再利用先进封装技术实现互连，有效降低成本、提高良率并缩短研发周期，成为后摩尔时代半导体技术发展的关键方向。我国半导体产业经过多年发展，产销规模已位居世界前列，但由于研发投入少、技术水平低、产业结构不合理，一直处于全球价值链中低端，在高端芯片技术方面仍面临诸多挑战^[1]。深入研究中国 Chiplet 技术发展路线图并提出合理的产业政策建议，对推动中国半导体产业高质量发展、提升国际竞争力意义重大。

一、Chiplet 技术概述

(一) Chiplet 技术原理

Chiplet 技术是将不同功能的小芯片 (Chiplet)，依据各自最适配的制程工艺分别制造，再通过先进的互连技术（如硅通孔 TSV、微凸块等）与封装技术（如 2.5D、3D 封装）进行系统集成。这种模块化设计打破了传统单芯片集成的限制，不同功能模块可独立优化，提升了芯片设计的灵活性与整体性能^[2]。

(二) Chiplet 技术优势

与传统 SoC 芯片相比，Chiplet 技术优势显著。在成本控制

上，部分对制程要求较低的模块可采用成熟工艺制造，降低整体成本；设计灵活性方面，各 Chiplet 能独立开发、测试与升级，加快产品迭代速度；良率提升上，小芯片面积小，缺陷概率降低，即便部分 Chiplet 出现问题，也不影响整体芯片功能^[3]。

二、中国 Chiplet 技术发展现状

(一) 技术研发进展

中国科研机构与企业在 Chiplet 技术研发方面积极投入，在关键技术如 TSV、RDL（重分布层）等取得一定突破。部分企业

作者简介：

李岳龙（1964.04-），男，汉族，中国台湾省新北市人，博士，国科创新研究院（厦门）有限公司，教授，研究方向：科技管理与工程；

冯明宪（1960.03-），男，汉族，中国台湾省台南县人，博士，国科创新研究院（厦门）有限公司，教授，研究方向：半导体/集成电路产品生产/测试封装，半导体封装测试设备；

钟华应（1978.10-），女，汉族，江西省赣州市人，博士研究生，国科创新研究院（厦门）有限公司，研究员，研究方向：创业管理。

通讯作者：张志伟（1979.05-），男，汉族，中国台湾省新竹市人，博士，国科创新研究院（厦门）有限公司，主任工程师，研究方向：半导体产品封装测试及技术研发，邮箱：chgenech@gmail.com。

已具备量产能力，如长电科技的 XDFOI™技术，能实现多种异构芯片的高效集成，在高性能计算、人工智能等领域展现出应用潜力。但在高端 EDA 工具、先进制程设备以及部分关键材料等核心技术环节，仍与国际先进水平存在差距，依赖进口的现状制约着技术的快速发展^{[4][5]}。

（二）市场应用情况

目前，Chiplet 技术在中国市场的应用领域不断拓展，从最初的高性能计算、数据中心，逐步延伸至 5G 通信、物联网、汽车电子等领域，对芯片性能、功能和集成度提出了更高的要求。在高性能计算领域，华为、寒武纪等企业利用 Chiplet 技术提升芯片性能与计算效率；物联网领域，采用 Chiplet 技术的芯片能根据不同应用场景灵活组合功能，满足多样化需求。不过，市场应用仍处于初期阶段，标准化程度低、生态不完善等问题限制了其大规模推广。这就需要中国在发展 Chiplet 技术时，加强对新兴领域技术趋势的研究和跟踪，提前布局技术研发，抢占市场先机^[6]。

（三）产业生态建设

国内已形成相对完整的半导体产业链（如表1所示），但在 Chiplet 技术生态建设方面仍需完善^[7]。一方面，企业间合作有待加强，缺乏统一的标准和接口规范，导致不同企业的 Chiplet 产品兼容性差，增加了系统集成难度与成本。另一方面，产学研协同创新机制尚未充分发挥作用，高校和科研机构的研究成果向产业转化的效率不高。

表 1：中国集成电路产业各环节市场规模占比（2021 年）

产业环节	市场规模（亿元）	占比
集成电路设计业	4519	43.21%
集成电路制造业	3176	30.37%
集成电路封测业	2763	26.42%

为应对这些新的形势，中国 Chiplet 技术发展在坚持自主创新的基础上，还应进一步强化产业链协同发展。产业链上下游企业应加强信息共享和技术交流，共同攻克技术难题，形成完整的产业生态闭环。例如，芯片设计企业应与制造企业紧密合作，根据制造工艺的特点和能力进行芯片架构设计；封装测试企业则需提前介入芯片设计阶段，提供封装技术的可行性建议，确保 Chiplet 产品从设计到生产的高效衔接。

三、中国 Chiplet 技术发展路线图

（一）短期发展目标（1-3 年）

聚焦关键技术突破，加大在高端 EDA 工具、先进封装设备和关键材料研发的投入，提高自主可控能力。推动企业间的合作与交流，参与并主导部分 Chiplet 技术标准的制定，增强在国际标准制定中的话语权。重点发展适用于 5G 通信、物联网等领域的 Chiplet 产品，满足市场对中低端芯片的多样化需求，扩大市场份额。

（二）中期发展目标（3-5 年）

持续提升技术水平，实现 7nm 及以下先进制程 Chiplet 技术的量产，缩小与国际先进水平的差距。完善产业生态建设，加强产学研深度融合，促进科研成果高效转化。拓展应用领域，将

Chiplet 技术广泛应用于人工智能、自动驾驶等新兴战略领域，推动相关产业的技术升级。

（三）长期发展目标（5 年以上）

在 Chiplet 技术领域达到国际领先水平，掌握核心技术与自主知识产权，实现从芯片设计、制造到封装测试的全产业链自主可控。构建成熟、完善的产业生态系统，吸引全球优质资源，提升中国半导体产业在全球的竞争力与影响力，成为全球 Chiplet 技术创新与产业发展的引领者。

四、中国 Chiplet 技术发展面临的挑战

（一）国际形势

在当前复杂的国际形势下，地缘政治因素对半导体产业供应链的稳定产生了深刻影响。以美国为首的部分国家通过出台一系列政策法规，限制高端半导体技术、设备和材料的出口，试图对中国半导体产业进行“卡脖子”。这使得中国 Chiplet 技术的发展面临更为严峻的外部环境，在关键技术引进、国际合作拓展以及市场份额提升等方面遭遇重重阻碍。例如，美国《芯片与科学法案》的实施，加剧了全球半导体产业的竞争格局分化，中国 Chiplet 企业在国际市场上拓展业务时，面临着更为严格的审查和限制^[8]。

（二）技术瓶颈

高端 EDA 工具严重依赖进口，国内 EDA 企业在技术水平、功能完整性和市场份额方面与国际巨头差距明显，制约了 Chiplet 技术的设计创新与优化。先进制程设备技术落后，如极紫外光刻（EUV）设备，限制了先进 Chiplet 产品的制造能力。关键材料国产化率低，如光刻胶、高性能封装基板材料等，影响产品质量与生产稳定性，增加了产业发展的外部风险^[9]。

（三）市场竞争

国际半导体巨头凭借技术、资金和市场优势，在 Chiplet 技术领域占据领先地位，对中国企业形成巨大竞争压力^[10]。全球主要芯片制造商如英特尔、台积电、三星等，在技术研发、专利布局 and 市场份额方面具有先发优势，中国企业在国际市场拓展中面临较高壁垒。国内 Chiplet 市场尚处于发展初期，市场需求有待进一步挖掘与培育。消费者和企业对 Chiplet 技术的认知度和接受度有待提高，市场规模较小，尚未形成规模效应，影响企业的盈利能力和发展动力。

（四）人才短缺

Chiplet 技术涉及多学科交叉领域，需要具备半导体设计、封装、材料等多方面知识的复合型人才。目前，国内相关专业人才培养体系尚不完善，高校和职业院校的课程设置与产业需求存在差距，导致专业人才供应不足，制约了技术创新和产业发展。跨国公司凭借优厚的待遇和良好的发展环境，吸引了大量国内优秀人才，进一步加剧了国内 Chiplet 技术领域的人才短缺问题。人才流失不仅带走了先进技术和经验，还增加了企业的人才培养成本和技术研发风险。

五、促进中国 Chiplet 技术发展的产业政策建议

（一）加大技术研发支持力度

政府应设立专项基金，重点支持 Chiplet 关键技术研发，如高端 EDA 工具、先进制程设备和关键材料等领域。鼓励企业与高校、科研机构联合开展研发项目，建立产学研用协同创新机制，加速科研成果转化为实际生产力。对在 Chiplet 技术研发中取得重大突破的企业和科研机构给予税收优惠、财政补贴等奖励，提高创新积极性。加强国际科技合作，鼓励国内企业与国际先进企业、科研机构开展技术交流与合作，引进国外先进技术和经验。支持国内企业参与国际 Chiplet 技术标准制定，提升中国在国际半导体产业中的话语权。

（二）优化市场环境

制定相关政策，引导和鼓励国内企业在 5G、物联网、人工智能等领域优先采用国产 Chiplet 产品，通过政府采购、产业补贴等方式，培育和扩大国内市场需求，促进国产 Chiplet 技术的应用和推广。加强市场监管，规范 Chiplet 市场秩序，打击侵权行为，保护企业的创新成果和合法权益。建立健全知识产权保护体系，加强对 Chiplet 技术相关专利、商标等知识产权的保护力度，营造公平竞争的市场环境。

（三）加强人才培养与引进

高校和职业院校应优化专业设置，增设 Chiplet 技术相关课程，加强实践教学环节，培养适应产业发展需求的复合型专业人

才。企业应加强与高校的合作，建立实习基地和人才培养联盟，为学生提供实践机会，实现人才的定向培养。制定优惠政策，吸引海外 Chiplet 技术领域的高端人才回国创新创业，为其提供良好的工作环境、科研条件和生活待遇。鼓励企业引进国外先进技术人才，加强人才交流与合作，提升国内人才队伍的整体水平。

（四）发挥行业协会作用

行业协会在推动 Chiplet 技术发展过程中的作用不可忽视。行业协会应充分发挥桥梁纽带作用，组织企业参与国际技术交流互动，及时了解国际最新技术动态和市场信息；协调企业间的利益关系，避免恶性竞争，促进产业健康有序发展；积极开展行业调研，为政府制定产业政策提供数据支持和决策参考，推动产业政策与市场需求的精准对接。

六、结论

Chiplet 技术作为半导体产业的重要发展方向，为中国半导体产业实现跨越式发展提供了机遇。尽管中国在 Chiplet 技术发展过程中面临国际形势、技术瓶颈、市场竞争和人才短缺等挑战，但通过明确发展路线图，实施针对性的产业政策，加大研发投入、优化市场环境、加强人才培养与引进、发挥行业协会作用等措施，有望在复杂的国际环境中突破发展障碍，提升产业竞争力，推动中国半导体产业在全球产业链中迈向中高端水平，实现可持续发展。

参考文献

- [1] 肖勇勇. 中国集成电路产业全要素生产率及影响因素的研究 [D]. 广西大学, 2021. DOI: 10.27034/d.cnki.ggxixu.2021.000327.
- [2] 吉勇, 王成迁, 李杨. 扇外型封装发展、挑战和机遇 [J]. 电子与封装, 2020, 20(08): 3-8.
- [3] Mutschler A. 'More than Moore' reality check [EB/OL]. Semiconductor Engineering. [2020-05-14]. Available from: <http://www.semiengineering.com/more-than-moore-reality-check>.
- [4] 李应选. Chiplet 的现状和需要解决的问题 [J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(05): 1-9.
- [5] Coudrain P, Charbonnier J, Garnier A, et al. Active interposer technology for chiplet-based advanced 3D system architectures[C]//2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference(ECTC). Piscataway: IEEE Press, 2019, doi: 10.1109/ECTC.2019.00092.
- [6] 杨晖. 后摩尔时代 Chiplet 技术的演进与挑战 [J]. 集成电路应用, 2020, 37(05): 52-54.
- [7] 王若达. 先进封装推动半导体产业新发展 [J]. 中国集成电路, 2022, 31(04): 26-29+42.
- [8] 杨忠, 巫强, 宋孟璐, 孙佳怡. 美国《芯片与科学法案》对我国半导体产业发展的影响及对策研究: 基于创新链理论的视角 [J]. 南开管理评论, 2023, 26(01): 146-160.
- [9] "Chinese chip industry has to readjust to deglobalization," Digitimes, 2023. [Online]. Available: <https://www.digitimes.com/news/a20230629VL200.html>. [Accessed: 30-June-2023].
- [10] "Will the US succeed in starving China of semiconductors?," DW, 2023. [Online]. Available: <https://www.dw.com/en/us-china-semiconductor/a-59251512>. [Accessed: 30-June-2023].

大件运输船运输过程中的风险因素及安全评价

赵少林, 孙钰婷, 黄滢宇, 刘峻赫
重庆交通大学, 重庆 400074
DOI: 10.61369/ME.2024070028

摘 要 : 本文以大件运输船运输过程中的风险因素为基础, 从人员因素、船舶因素、环境因素、货物因素及管理因素五个方面进行分析, 选取模糊层次分析法建立了大件运输船舶运输过程中的评价指标体系, 并以某实船为例进行评价分析。得出结论, 大件运输船舶运输过程中的控制难点主要为人员因素的控制, 另外还有船舶因素中的维护保养状态、环境因素中的通航密度和能见度、管理因素中的船员配备及培训等。

关 键 词 : 大件运输船; 风险因素; 安全评价; 模糊层次分析法

Risk factors and Safety Assessment During the Transportation Process of Large Cargo Ships

Zhao Shaolin, Sun Yuting, Huang Yingyu, Liu Junhe
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074

Abstract : Based on the risk factors in the transportation process of large cargo transport ships, this paper analyzes from five aspects: personnel factors, ship factors, environmental factors, cargo factors and management factors. The fuzzy analytic hierarchy process is selected to establish the evaluation index system in the transportation process of large cargo transport ships, and a certain actual ship is taken as an example for evaluation and analysis. It is concluded that the control difficulties in the transportation process of large cargo ships mainly lie in the control of personnel factors. In addition, there are also maintenance and upkeep status among ship factors, navigation density and visibility among environmental factors, and crew allocation and training among management factors.

Keywords : large cargo transport vessel; risk factors; safety assessment; fuzzy analytic hierarchy process

引言

随着“一带一路”战略的实施, 我国基建、装备制造、能源、工程等行业巨头纷纷扬帆出海, 国际工程物流对大件运输的需求日益增长。^[1]然而大件货物海上运输具有超大货值、超级复杂、超高风险等特点, 随着国家和航运企业对安全生产工作的愈加重视, 合理识别影响大件运输船舶装运过程中的安全影响因素, 及安全评价显得尤为重要。

现已有较多学者对船舶及货物装运过程的风险因素、安全评价开展了研究。田佰军等人根据潮汐、货物、车辆、驳船、码头等不同因素, 对驳船滚动装载的方法进行了分析, 提出了相应的计算方法, 并参考有关规范和运输实践的要求, 设计了滚动装货方案, 实践验证了该方案的有效性。^[2]针对目前内河航道危险品运输风险评估指标选取不全面、评估过程复杂、主观因素较多等问题, 王少雄等人建立了一套新的评估指标体系, 并对评估指标进行了优化, 在环境因素中增加船舶流量、桥梁等影响因素基础上, 通过引入熵权法、专家权重因子对评价结果的影响, 从而提高了最后评价的准确性和可靠性。^[3]许玲等人利用云转换的数据驱动方法, 确定了各评估指标所对应的加权云层, 利用云交换规则对各评估指标进行量化评估, 可以对集装箱货轮的危险度进行合理的评估与诊断。^[4]通过文献表明, 已有多理论方法应用到船舶装运过程中的安全评价, 但对于大件运输船的安全评价研究还相对较少, 本文的研究有助于为大件运输船舶装运安全风险提供理论支撑。

一、大件运输船装运过程中风险因素识别

通过文献^[5-9]，整理总结了大件运输船舶的定义、特征等数据资料，结合其装运过程以及水域等特点，对大件运输船装运过程中风险因素进行了分析，主要有以下几个方面。

1. 人员因素。人的行为在一定情况下对系统正确性或成功性的不良影响。主要包含心理素质、业务能力和安全意识三个因素。
2. 船舶因素。作为大件运输船，其结构性能等因素直接影响着装运过程中的安全，主要考虑包含船龄、船体结构、维护保养状态三个因素。
3. 环境因素。主要分为工作环境和自然环境两种。工作环境主要考虑通航密度、航道条件和港口条件；而自然环境主要考虑能见度、波浪和风力。
4. 货物因素。主要包含装卸和系固两个方面。
5. 管理因素。主要包含船员配备及培训、监督与检查、安全管理制度三个方面。

二、大件运输船安全评价模型建立

（一）建立评价指标集

指标集是衡量目标的各种指标的集合，它决定了模糊综合评估的科学性和合理性。它可以表示为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ ，其中， U_i ($i=1, 2, \dots, n$) 是若干影响指标。表 1.1 所示是大件运输船运输过程中的安全评价层次模型指标集。

表 1.1 大件运输船舶运输过程中的安全评价指标

一级指标	二级指标	三级指标	评价指标内容
人员因素 U_1	心理素质 U_{11}		心理状况，不良情绪驾驶水平、船员技术水平、设备操作、装运过程智慧与管理
	业务能力 U_{12}		
	安全意识 U_{13}		
船舶因素 U_2	维护保养状态 U_{21}		电子设备、机械设备、船体磨损与开裂状况、船体结构、机械装置、设备、零部件等的检查、维护和修理
	船体结构 U_{22}		
	船龄 U_{23}		
环境因素 U_3	工作环境 U_{31}	通航密度 U_{311}	船舶或船队通过数量、航道宽窄情况、码头情况
		航道条件 U_{312}	
		港口条件 U_{313}	
	自然环境 U_{32}	能见度 U_{321} 波浪 U_{322} 风力 U_{323}	驾驶员视线情况、波浪的高度、风力的等级均能够影响船舶航行
货物因素 U_4	装卸 U_{41}		船舶稳性和横倾角、焊接情况、系固锁具强度
	系固 U_{42}		
管理因素 U_5	船员配备及培训 U_{51}		职业道德素质和业务技能培训、及时开展监督与检查工作、定期检查制度和设备设施维护制度
	监督与检查 U_{52}		
	安全管理制度 U_{53}		

第一层指标集可表示为 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$ ，即：

$U = \{\text{人员因素 } U_1, \text{船舶因素 } U_2, \text{环境因素 } U_3, \text{货物因素 } U_4, \text{管理因素 } U_5\}$

第二层指标集可表示为 $U_i = \{U_{i1}U_{i1}, \dots, U_{ij}U_{ij}\}$ ，式中的 i 是一级指

数的序数， j 是二级指数的序数。首先把 U 的指数划分为几个子因子，如： $U_1 = \{\text{心理素质 } U_{11}, \text{业务能力 } U_{12}, \text{安全意识 } U_{13}\}$

（二）确定指标权重

评价指标的权重是指量化指标的影响作用，其权重的确定是建立评估系统的一个关键环节。本文采用层次分析法按层级形式表达出来，并通过定性定量相结合的方法进行分析，该方法对样本数据的要求较低，采用定量表示各指标的权重，也是一种有效的多目标决策方法。通过确定各个因子之间的关系，构造一个二二对比来构造判断矩阵 $A = (U_{ij})_{n \times n}$ 。即：

$$A = \begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

其中 a_{ij} 为指标 i 与 j 相对于上层直属目标元素的重要性比较。判断矩阵中的元素 a_{ij} 的赋值含义见表 1.2。

表 1.2 重要性标度

标度	含义
1	u_i 与 u_j 具有相同的重要性
3	u_i 比 u_j 稍重要
5	u_i 比 u_j 重要
7	u_i 比 u_j 强烈重要
9	u_i 比 u_j 极端重要
2, 4, 6, 8	u_i 和 u_j 重要性之比介于以上相邻两者之间

如指标 a_i 的重要性不及 a_j ， a_{ij} 取值为 $1/m$ ， m 为 $1 \sim 9$ ，一般 a_{ij} 为 a_{ji} 的倒数。

针对前述所分析的影响因素，采取在线问卷调查方式对航运院校、船员和从事相关工作人员进行问卷调查，用加权平均法统计并整理后建立了如表 1.3 至 1.10 各因素判断矩阵。

表 1.3 判断矩阵

大件运输船舶风险	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
人员因素 U_1	1	3	3	5	3
船舶因素 U_2	1/3	1	3	4	2
环境因素 U_3	1/3	1/3	1	4	3
货物因素 U_4	1/5	1/4	1/4	1	1/2
管理因素 U_5	1/3	1/2	1/3	2	1

表 1.4 判断矩阵

人员因素 U_1	U_{11}	U_{12}	U_{13}
心理素质 U_{11}	1	2	1/2
业务能力 U_{12}	1/2	1	1/3
安全意识 U_{13}	2	3	1

表 1.5 判断矩阵

船舶因素 U_2	U_{21}	U_{22}	U_{23}
维护保养状态 U_{21}	1	3	2
船体结构 U_{22}	1/3	1	1/3
船龄 U_{23}	1/2	3	1

表 1.6 判断矩阵

环境因素 U_3	U_{31}	U_{32}
工作环境 U_{31}	1	3
自然环境 U_{32}	1/3	1

表1.7 判断矩阵

工作环境 U_{31}	U_{311}	U_{312}	U_{313}
通航密度 U_{311}	1	2	4
航道条件 U_{312}	1/2	1	3
港口条件 U_{313}	1/4	1/3	1

表1.8 判断矩阵

自然环境 U_{32}	U_{321}	U_{322}	U_{323}
能见度 U_{321}	1	3	3
波浪 U_{323}	1/3	1	2
风力 U_{323}	1/3	1/2	1

表1.9 判断矩阵

货物因素 U_4	U_{41}	U_{42}
装卸 U_{41}	1	2
系固 U_{42}	1/2	1

表1.10 判断矩阵

管理因素 U_5	U_{51}	U_{52}	U_{53}
船员配备及培训 U_{51}	1	2	4
监督与检查 U_{52}	1/2	1	5
安全管理制度 U_{53}	1/4	1/5	1

层次分析法在建立判断矩阵后要计算权重向量 ω 和最大特征根, λ_{\max} 再进行检验数据的合理性, 即为一致性检验。具体步骤如下:

计算判断矩阵 R 的最大特征根 λ_{\max} ;

计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中, λ_{\max} 为判断矩阵 R 的最大特征根, n 为 R 的阶数。

查表 1.11 得到 RI 的“随机一致性指标”。

表 1.11 随机一致性指标的取值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

计算“一致性比率” CR:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

在 $CR < 0.1$ 的情况下, 采用一致性检验方法计算结果为通过, 说明层次分析中各个层次要素权重的分布是合理的; 在 $CR > 0.1$ 的情况下, 说明层次分析中各个层级的权重系数分配不合理, 必须对决策矩阵的元素进行调整, 从而对权重因子进行再分配。

表 1.12 各评价指标权重

一级指标 U_i	权重值	二级指标 U_{ij}	权重值	三级指标 U_{ijk}	权重值
人员因素 U_1	0.414	心理素质 U_{11}	0.297		
		业务能力 U_{12}	0.164		
		安全意识 U_{13}	0.539		
船舶因素 U_2	0.241	维护保养状态 U_{21}	0.525		
		船体结构 U_{22}	0.142		
		船龄 U_{23}	0.334		

环境因素 U_3	0.183	工作环境 U_{31}	0.750	通航密度 U_{311}	0.557
				航道条件 U_{312}	0.320
				港口条件 U_{313}	0.123
	0.250	自然环境 U_{32}	0.250	能见度 U_{321}	0.589
				波浪 U_{322}	0.252
				风力 U_{323}	0.159
货物因素 U_4	0.058	装卸 U_{41}	0.667		
		系固 U_{42}	0.333		
管理因素 U_5	0.105	船员配备及培训 U_{51}	0.532		
		监督与检查 U_{52}	0.366		
		安全管理制度 U_{53}	0.102		

(三) 建立评价集

评价集是对被评估对象所给出评估结果的集合, 评估对象既可以是各个评估指标, 也可以是总体评估目标。^[10]评价集包含目标得分、模糊评价语、目标评价等级和目标评价集, 评价集可划分为多个层次, 并依据评分结果迅速确定相应的评价等级。用评价集的方式, 通过评估集合, 可以清晰、直观地反映评估结果。

本文将二级指标评级集分为五个等级, 分别为很好、好、较好、一般和差, 详见表 1.13。评价大件运输船舶安全评价等级分为 5 个等级, 即 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{0 \sim 0.5, 0.5 \sim 2.0, 2.0 \sim 3.5, 3.5 \sim 4.5, 4.5 \sim 5.0\}$ 来表示油船溢油的风险等级。各评价等级相应的量化值可表示为 $V = \{\text{很安全, 安全, 一般安全, 不安全, 很不安全}\}$ 。

表 1.13 二级指标评价集

指标得分	≥ 9	9~8	8~7	7~6	≤ 6
模糊评价语	很好	好	较好	一般	差

(四) 模糊综合评价

模糊综合评价的过程通常可划分为以下 5 个阶段:

第一阶段, 确定评估目标的广义范围, 根据实际评估目标, 判定评价指标的数目, 同时在论域内的数目与评价指数的数目相等, 例如, 评估目标有 P 个指数, 那么论域 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_P\}$ 。

第二阶段, 确定评语等级论域, $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_P\}$, 也是一个层次的集合, 每个层次都有一个模糊的子集。

第三阶段, 在确定评价等级论域之后, 通过建立模糊关系矩阵 R, 需要对被评事物从每个因素 u_i ($i = 1, 2, 3, \dots, P$) 上逐个量化, 确定单因素在被评事物中的等级模糊子集隶属度 $(R|u_i)$, 得到模糊关系矩阵 R:

$$R = \begin{bmatrix} R|u_1 \\ R|u_2 \\ \vdots \\ R|u_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pm} \end{bmatrix}$$

第四阶段, 确定各指标权重向量, 在模糊综合评判中, 权重向量表现为 $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_p)$ 。在模糊关系矩阵 R 中, 包

含了权重向量 R。

第五阶段, 将模糊综合评判的结果矢量进行合成, 并将该方法的权重向量 A 和模糊关系矩阵 R 相结合, 并求出了 B 的模糊综合评判结果。

$$A \cdot R = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_p) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) = B$$

三、实例分析

通过船讯网平台找到一艘大件运输船作为案例分析, 航速 9.5 节, 船长 165 米, 型宽 48 米, 型深 9.28 米, 结构吃水 6.30 米。当日风速等级为 3 级, 浪高 0.2 米, 能见度大于 10 千米。

根据前述所建立的安全评价模型, 组织专家对该轮的安全评价指标进行打分, 根据打分分值参照二级指标评价集得到对应的模糊评价语, 并将专家打分进行统计, 总结出二级指标评价矩阵, 最后进行计算分析。

将上述各评价指标的专家评价表进行归一化处理后得到对应的评价矩阵:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_4 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_6 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据前述所介绍的方式建立模型, 进行模糊综合评价。

第一级评价:

工作环境 $U_{31} = \{\text{通航密度}, U_{311}, \text{航道条件}, U_{312}, \text{港口条件}, U_{313}\}$

$$R_3(U_{31}) = (1.671, 0.961, 0.368) \times \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (2.029, 0.504, 0.300, 0.167, 0)$$

自然环境 $U_{32} = \{\text{能见度}, U_{321}, \text{波浪}, U_{322}, \text{风力}, U_{323}\}$

$$R_3(U_{32}) = (1.767, 0.756, 0.478) \times \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (2.202, 0.376, 0.348, 0.076, 0)$$

第二级评价:

人员因素 $U_1 = \{\text{心理素质}, U_{11}, \text{业务能力}, U_{12}, \text{安全意识}, U_{13}\}$

$$R_2(U_1) = (0.892, 0.491, 1.617) \times \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (2.140, 0.511, 0.300, 0.049, 0)$$

船舶因素 $U_2 = \{\text{维护保养状态}, U_{21}, \text{船体结构}, U_{22}, \text{船龄}, U_{23}\}$

$$R_2(U_2) = (1.574, 0.425, 1.001) \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (1.815, 0.785, 0.400, 0, 0)$$

环境因素 $U_3 = \{\text{工作环境}, U_{31}, \text{自然环境}, U_{32}\}$

$$R_2(U_3) = (1.500, 0.500) \times \begin{bmatrix} 2.0290 & 0.5039 & 0.3000 & 0.1671 & 0 \\ 2.2018 & 0.3757 & 0.3479 & 0.0756 & 0 \end{bmatrix} = (4.144, 0.944, 0.624, 0.288, 0)$$

货物因素 $U_4 = \{\text{装卸}, U_{41}, \text{系固}, U_{42}\}$

$$R_2(U_4) = (1.333, 0.667) \times \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (1.226, 0.400, 0.200, 0.133, 0)$$

管理因素 $U_5 = \{\text{船员配备及培训}, U_{51}, \text{监督与检查}, U_{52}, \text{安全管理}, U_{53}\}$

$$R_2(U_5) = (1.596, 1.098, 0.305) \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (1.849, 0.740, 0.300, 0.110, 0)$$

第三级评价:

大件运输船舶风险 $U = \{\text{人员因素}, U_1, \text{船舶因素}, U_2, \text{环境因素}, U_3, \text{货物因素}, U_4, \text{管理因素}, U_5\}$

$$R_1(U) = (2.069, 1.204, 0.915, 0.288, 0.524)$$

$$\times \begin{bmatrix} 2.140 & 0.511 & 0.300 & 0.049 & 0 \\ 1.815 & 0.785 & 0.400 & 0 & 0 \\ 4.144 & 0.944 & 0.624 & 0.288 & 0 \\ 1.226 & 0.400 & 0.200 & 0.133 & 0 \\ 1.849 & 0.740 & 0.300 & 0.110 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (11.727, 3.369, 1.888, 0.461, 0)$$

得到总评价的结果用线性加权平均法求出最终的评判结果。即:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times V_i}{\sum_{i=1}^n U_i} = 1.49$$

经过计算, 该轮的安全评价值为 1.49, 该轮属于安全等级。

四、结论

本文得出的结论是, 大件运输船舶运输过程中的安全评价分析的控制重点是对人员因素的控制, 加强对船舶维护保养和船员配备及培训, 同时对航行水域的相关环境进行提前预判, 这对于大件运输船舶装运过程中的风险控制具有现实指导意义。

参考文献

- [1] 仲凌. “一带一路”视阈下中小国际货运代理企业的发展战略研究——以连云港 M 公司为例 [D]. 湖北工业大学, 2019.
- [2] 王洪贵, 叶正兵, 田佰军. 平板驳船滚动装卸重大件货物方案设计 [J]. 航海工程, 2018, 47(03): 46-51.
- [3] 王少雄, 张明文. 改进的层次模糊分析法在内河航道危险货物运输风险评估中的应用 [J]. 水运管理, 2022, 44(03): 4-7+33.
- [4] 许玲, 胡基平, 轩少永, 吴建军, 傅俊杰. 集装箱船舶货物运输风险云评价方法 [J]. 中国航海, 2014, 37(04): 69-73+78.
- [5] Jiali Wang, Qingnian Zhang. Model and Algorithm Design for Cargo Shipping Safety Based on Fuzzy- Precise Bayesian Network [J]. Journal of Networks, 2014, 9(8).
- [6] 何静, 王少雄, 昌雪玲, 张明文, 吕植勇. 基于层次-模糊分析法的内河航道危险货物运输风险评估研究 [J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2021, 22(02): 28-33.
- [7] 贾鑫, 吴敏. 超大件货物海上运输的风险识别及应对 [J]. 物流工程与管理, 2019, 41(10): 154-156.
- [8] 张泓怡. 重大件运输船的安全风险管控及经济效益的平衡 [J]. 冶金管理, 2021(07): 141-142.
- [9] 苏晨, 谢新连, 马梦知, 李晓君. 大件运输船舶发展现状与动态 [J]. 船舶工程, 2012, 34(03): 1-5.
- [10] 刘越琪, 肖心远, 李怀俊, 王敏. 基于层次分析和模糊综合评价法的危险品运输安全评价研究 [J]. 广东交通职业技术学院学报, 2011, 10(04): 16-19+49.

基于质量管理工具的军用飞机事故分析

王知翰¹, 蒋平²

1. 国防科技大学军政基础教育学院, 湖南 长沙 410073

2. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073

DOI: 10.61369/ME.2024070030

摘 要 : 军用飞机的安全可靠运行是保持必要战备水平的基本保证。但是, 国内外每年都会发生多起军用飞机事故, 造成人员伤亡、财产损失, 导致任务失败。因此, 有必要通过质量管理的工具去分析目前国内外军用飞机事故, 总结经验教训。本文采用关联图、因果图、系统图等质量管理工具从环境条件、人为操作、设备质量三个方面, 对国内外发生的军用飞机事故开展系统分析, 给出了定量评估的方法, 最后分别提出了系统的改进建议。

关 键 词 : 军用飞机; 事故分析; 质量管理; 关联图; 因果图; 系统图

Analysis of Military Aircraft Accidents Based on Quality Management Tools

Wang Zhihan¹, Jiang Ping²

1. Military and Political Basic Education College, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073

2. School of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073

Abstract : The safe and reliable operations of military aircrafts are basic guarantees for maintaining the necessary combat readiness. However, there are always multiple accidents of military aircrafts over the world, which lead to casualties, losses and mission fails. So it is important to analyze these accidents of military aircrafts, by quality management tools, to summarize the lessons learned from the accidents. Inter-relationship Diagram, Cause & Effect Diagram, Systematic Diagram are applied to systematically analyze the accidents of military aircrafts, from the perspectives of environmental conditions, human operation and equipment quality, and quantitative methods are presented. Finally, improvement suggestions are systematically provided.

Keywords : military aircraft; accidents analysis; quality management; inter-relationship diagram; cause & effect diagram; systematic diagram

“战争胜负的决定因素在于人与武器的结合, 武器质量是关键性基础。”现代战争中, 科技高度密集的武器装备对质量管理形成严峻挑战, 其质量直接决定战斗力生成甚至战争走向。军用飞机的安全可靠运行是保持必要战备水平的基本保证。尽管航空技术不断进步, 但难以避免飞行事故的发生, 而事故发生会造成人员伤亡、装备损毁、任务失败等后果。因此, 系统分析军用飞机事故的成因, 构建科学防范体系, 对保障飞行安全和必要的战备水平具有战略意义。

国内外不同信息渠道针对军用飞机的事故有一些基础数据统计。例如, 1990–1994年间, 质量因素导致美军军用飞机灾难性事故占比27% (空军29%、陆军24%、海军及陆战队20%)^[1]。美《航空周刊》数据显示: 2001–2005财年美国陆军直升机事故共341起, 主要类型为撞地 (87起)、硬着陆 (82起)、撞树 (62起)、灯火管制 (44起)、自标 (35起)、电线 (18起)、雪盲 (7起) 及仪表气象条件 (6起) 引发事故^[2]。我们使用质量管理的工具, 对军用飞机事故和原因开展分析。

图1用关联图来开展事故归因。通过对大量文献的整理, 我们将主要从环境条件、人为操作、设备质量三方面进行, 并结合典型事例进行分析。

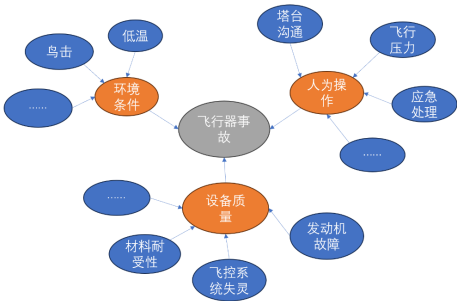


图1 事故归因关联图

一、环境条件

在军用飞机的寿命周期内，环境因素往往是不可控且极具挑战性的变量之一。不同于民用航空，军用飞机在执行任务时往往面临更加复杂的飞行环境，包括高空、高速、极端天气、复杂地形以及战时的敌对环境等。这些因 素使得环境问题在军用飞机事故中占据了不容忽视的地位。近年来，诸如气象变化、气候异常、地形影响等环境因素所导致的军用飞机事故案例不断引发关注。

下面列举几个典型事例：

1.1960年，六架美军 B-52轰炸机在极端寒冷天气中执行任务时，由于温度骤降和寒冷空气的影响，飞机的机械设备出现故障，其中一架因发动机失效坠毁。事故调查显示，低温导致了发动机燃料粘稠度的变化，进而影响了推进系统的正常工作^[3]。

2.2024年4月，美国空军一架 F-16在霍洛曼空军基地附近坠毁。调查显示，发动机风扇叶片在低温下因“维护盲区”发生断裂，导致动力丧失。而长期服役的 F-16机队老化问题突出，低温环境加剧机械故障风险^[4]。

3.2018年8月17日，一架 T-38C在进行低空飞行时飞机右侧引擎起火并失去动力，。据调查，一只鹰撞上了飞机并被卷入发动机，导致气压机损坏、漏油、转轴损坏等一系列问题并使引擎起火。这样的事件较难避免且损失一般较大^[5]。

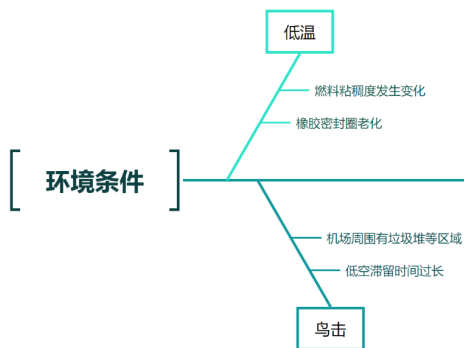


图2 环境问题引发事故的鱼刺图

从事例1、2可看出飞机在很多设计材料上要考虑到高空飞行时可能会遇到的极低温条件。经过不断的总结试错，更要进一步开发耐低温的高性能材料。同时应该建立程序化的模型，应对不同温度下的飞行条件，对飞行操作进行修正^[6]。

事例3的鸟击情况相对复杂，我军也做了相当多的工作。2006年海军在工程大学正式设立海军机场鸟害防治研究室。同时，各场站也积极与驻地科研单位合作，极大地提高了对鸟撞飞机的防治能力。海军还积极筹集经费进行驱鸟措施的建设，配发驱鸟车、猎枪、遥控煤气炮等装备^[7]。

生态综合防治是机场鸟击灾害防治的根本手段，从生态系统的食物链结构中，切断食物链的连接关系，减少各种鸟类的数量，从鸟类的栖息环境方面，尽可能地改变机场吸引各种鸟类的环境，减少机场环境对鸟类的吸引力，降低鸟类对飞行安全的威胁^[8]。

环境条件比较复杂，有关变量较多，故可用逻辑回归模型：

$$P(\text{事故}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 W + \beta_3 B)}}$$

T：温度，W：风速，B：鸟类密度

当 $P > 0.7$ 时触发红色预警。

其中 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为待定系数，应根据历史数据进行求解拟合。

可以从以下几点解决此类问题：

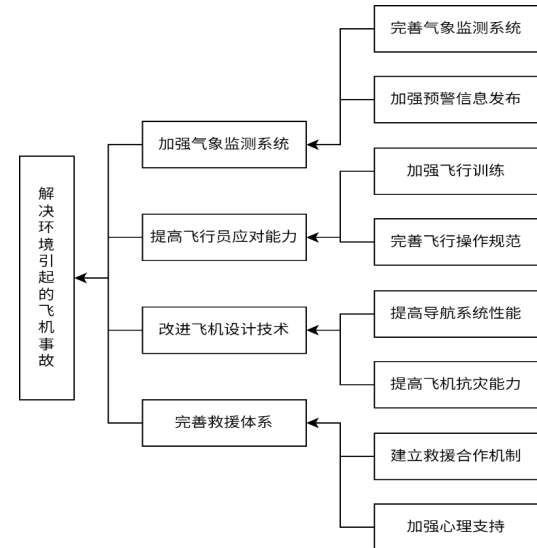


图3 解决环境问题引发事故的流程图

二、人为操作

在军事航空领域，飞机事故的发生通常是多种因素交织作用的结果。其中，由人为操作引起的事故尤为显著。这类事故往往涉及飞行员的操作失误、判断错误、沟通不畅等多方面的因素。与民用航空相比，军用飞机的飞行环境更加复杂，任务更加高风险，飞行员不仅要面对极端的飞行条件，还要执行高难度的战术任务。在这种高压环境下，人为错误往往会放大事故的后果。虽然现代军事航空技术不断进步，飞行员的训练水平逐步提升，但操作失误仍然是导致军用飞机事故的重要原因之一。理解和分析这些人为因素，对于提升飞行安全、减少类似事故的发生，具有重要的现实意义。

下面列举若干典型事例：

1.2020年6月8日，在科威特空军基地执行任务的军用飞机 C-130H着陆时未能停下来，越过跑道并撞上混凝土障碍物。事故飞机受损严重，造成3590万美元损失。调查发现，机组未严格遵循着陆速度规范，且团队协作松散：塔台未及时提醒风险，飞行员过度自信，既未纠正操作偏差，也未有效沟通紧急预案^[9]。

2.2015年10月2日凌晨，一架 C-130J事故飞机在起飞后过早开始旋转变弯，俯仰角过大进而失速。飞机在坠毁时击中了一座瞭望塔，使机上11人及瞭望塔上3人共14人全部死亡。飞行员为方便装卸货物，在驾驶舱违规放置硬质夜视镜外壳，导致控制杆被卡死，飞机起飞后无法调整俯仰角度。失速下坠时，机组因

注意力分散未能及时移除障碍物，最终酿成失控坠机。这一非标准操作未被任何人监督或叫停，暴露出安全流程的严重漏洞^[10]。

3.2018年6月11日，一架 F14-C 事故飞机（MA）在日本空军基地进行一次机动飞行时错误使用右满舵，飞行员在低于安全高度弹射出仓，飞机坠毁，没有人员死亡或平民受伤。在这次事故中，空间定向性障碍（spatial disorientation，SD）是很大一部分原因^[11]。简单来说就是在飞行中，飞行员对飞机状态的感觉与飞机实际状态不一致。事故核心在于飞行员对复杂飞行动作的认知局限，以及训练科目未覆盖极端情况处置方法^[12]。

4.2018年11月13日晚，美军 T-38C 在空军基地的例行训练飞行中飞机撞击地面，飞行学员在弹射时遭到致命伤害。教官在起飞时未选择最大动力，导致飞机右偏失控。事故反映其操作习惯松懈和应急处置能力不足，暴露训练体系的关键缺陷^[13]。

5.2022年1月24日，美国海军 VFA-147 中队的一架 F-35C 战斗机在着舰降落时与航母发生撞击后坠海。新飞行员首次尝试高难度着舰时，因紧张未开启动力辅助系统（APC），导致飞机动力不足、下滑轨迹异常。他强行修正时反而拉高速度和高度，最终以错误角度撞击甲板坠海。事故主因是飞行员经验不足与关键操作程序执行缺失^[14]。

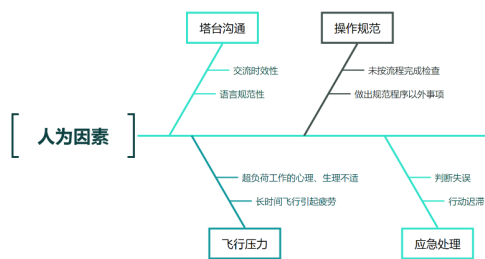


图4 人为因素引发事故的鱼刺图

人为操作失误仍是航空事故主因之一，涉及飞行员技术水平、心理状态及训练质量等综合因素。事故分析表明，机组与地面沟通不畅、指令执行偏差及应急协作失效常导致连锁风险，而超负荷飞行引发的疲劳、压力或生理不适会进一步削弱判断力。改进需多管齐下：通过高强度模拟训练提升复杂场景处置能力（如压力决策/警告响应），优化排班与健康监测以保障飞行员身心状态，并借助智能控制系统（如自动驾驶/实时纠错）降低人为错误概率，形成“人-技协同”的安全闭环。可通过 NASA-TLX 加权公式进行量化：

$$TLI = \sum_{i=1}^6 (w_i \times s_i)$$

W_i ：六维度权重（脑力需求、体力需求、时间压力等），总和为1；

S_i ：飞行员对各维度的主观评分（0-100）。

应用示例（案例5：F-35C 飞行员失误）：

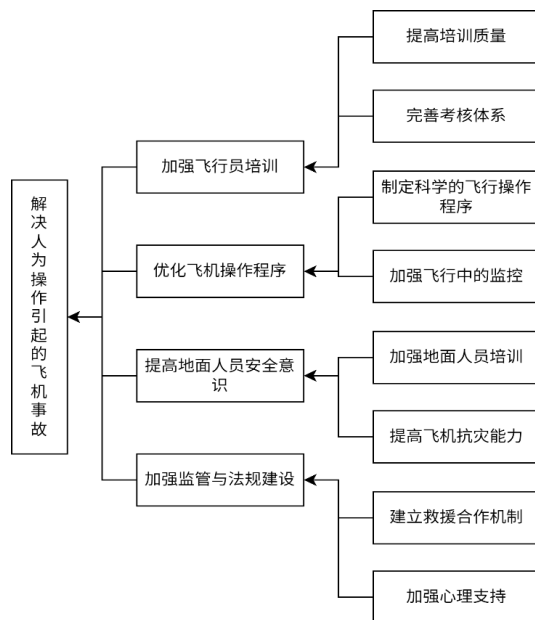
权重分配：时间压力 $w=0.3$ ，任务复杂度 $w=0.25$ ，设备交互 $w=0.2$ ；

主观评分：时间压力 $s=85$ ，任务复杂度 $s=90$ ，设备交互 $s=70$ ；

计算： $TLI = 0.3 \times 85 + 0.25 \times 90 + 0.2 \times 70 = 58.5$ 。

改进意义：TLI > 50 需优化任务设计，通过 VR 训练降低复杂度评分至 $s=60$ 。

可以从图5的措施来解决此类问题：



三、设备质量

军用飞机作为现代军事作战和战略部署的核心装备，其设计、制造和维护的质量直接关系到飞行员的生命安全以及任务的成功执行。随着航空技术的不断进步，现代军用飞机的性能日益提高，但由于其复杂的结构和高强度的使用环境，飞机设备的质量问题依然是导致航空事故的重要因素之一。设备质量问题涉及多个方面，包括发动机、飞行控制系统、航电系统、结构部件等关键系统的故障。任何一项技术故障都可能引发灾难性的后果，甚至导致飞机失事。虽然现代军用飞机采用了先进的技术和严格的质量控制标准，但由于飞机在长期高强度的飞行、复杂的战斗环境下运行，设备故障时有发生，且其引发的事故常常难以预见。

在这里我们将通过具体案例分析，揭示航空领域在设备质量管理中的挑战与应对措施。

1.2011年9月26日，事故飞机：一架 A-10C 在功能性检查飞行中经历了双发动机故障，迫降时撞击地面，飞行员安全弹射，飞机被摧毁，直接损失 14,70 万美元。飞机双发动机因核心锁装置故障同时停机，导致空中失去动力。核心锁异常可能在高空意外触发，使发动机转子锁死无法重启，最终迫降失败坠毁。^[15]

2.F-22 “猛禽” 战斗机是美军以数量取胜战略威慑的典范，但其频繁发生的质量安全事故和高昂的使用维护费用，使得 F-22 的命运成为全球关注的焦点。飞行控制软件存在致命缺陷，导致

飞机在演习和起飞时失控。该问题早在1992年原型机测试时已暴露，但未彻底修复，最终因系统误判飞行姿态引发多起坠机。^[17]

3.2006年6月3日：一架隶属中国人民解放军空军的空警-200预警机在执行任务途中，在安徽省宣城市广德县柏垫镇梨山村上空失事坠毁，机上包括机组人员在内的40人全部罹难。机翼除冰系统失效导致结冰失控，同时飞机搭载40人及测试设备远超限额，加剧操作难度。多重因素叠加使飞机失速后爆炸解体。^[18]

4.2001年1月哈萨克斯坦国防部长在南哈萨克斯坦州乘坐的米-8军用直升机失事原因是该飞机的升力系统的一个组成部分发生故障。飞机失事原因调查会在对事发地进行详细调查、收集直升机残片、译出黑匣子密码后得出了此结论。基洛夫机器制造厂的金相分析也确认了这一点^[19]。

5.2021年8月17日，俄罗斯的一架伊尔-112V试验样机在训练飞行期间，库宾卡机场着陆时失事坠毁。机组成员全部罹难。飞机在着陆时，右侧发动机突然起火，随后飞机向右侧机翼倾斜，速度失控，机身倾覆坠毁。调查组发现右侧发动机故障起火，涡轮叶片断裂引燃油箱，火焰烧毁副翼操控装置。种种因素导致失控的飞机急剧倾斜，飞行员无法修正姿态而坠毁。^[20]

6.7月25日上午，一架米-28直升机在卡卢加州日兹德林斯基区执行预定飞行任务时坠毁。机组人员在坠机中丧生。米-28飞机坠毁的初步原因是技术故障。这款直升机容易坠毁，原因之一可能是落后的设计。原因之二是飞机使用时间零部件寿命。原因之三是维护保养不到位。^[21]

7.驻韩美军F-16战机坠毁：初步证据显示可能是机载电子设备故障导致仪表系统没有正常运行致使战机失控。^[22]

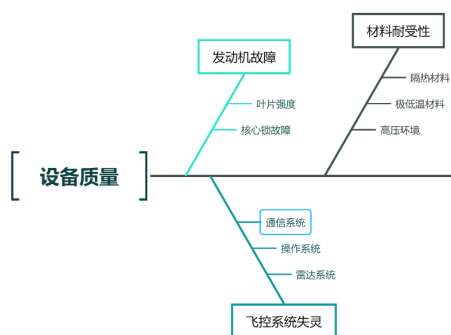


图6 设备质量引发事故的鱼刺图

从案例1可以看出，发动机是飞机的“心脏”，一旦出现故障，飞机将无法继续维持正常飞行。尤其是在复杂的战斗环境下，发动机故障往往难以进行有效的紧急修复。^[23]

从案例6可以看出，航电系统也是影响飞机安全的重要因素之一。航电设备如果出现故障，飞机不仅无法正常获取实时信息，还可能误导飞行员作出错误判断。^[24]

从案例2可以知道，材料的质量和结构部件的老化也是设备质量问题的另一个隐患例如，机翼、尾翼等承受巨大气动力的部件，若发生裂缝或断裂，飞机可能失去稳定性，甚至导致灾难性后果。^[25]

从这些方面来看，设备质量问题不仅仅是飞机设计阶段的技

术问题，还涉及到制造、检验、使用、维护等多个环节的复杂因素。严格遵守设计、生产、测试、维护等标准，持续改进技术和工艺，是确保飞行安全的根本所在。^[26]

总的来说，设备质量问题已经成为现代军用飞机事故的重要原因之一。尽管航空工业界已经取得了显著进展，飞机的安全性和可靠性有了很大提升，但仍需进一步加强设备质量管理，提升故障预防和应急处理能力。只有从根本上提高设备质量，减少潜在故障，才能最大限度地降低飞行事故的发生概率，确保飞行员的生命安全，并提高飞机的作战效能。

可以通过风险优先数（RPN）公式进行评估：

$$RPN=S \times O \times D$$

S(严重度)：故障对系统的影响程度，评分范围1-10（1=轻微，10=灾难）

O(频度)：故障发生的频率，评分范围1-10（1=轻微，10=灾难）

D(探测度)：现有控制措施检测故障的能力，评分范围1-10（1=轻微，10=灾难）

在F-16发动机叶片断裂事故中运用RPN进行评估：

S=9（叶片断裂可能导致坠机）；

O=80=8（低温环境下每千小时发生1次）；

D=1D=1（涡流检测可提前发现裂纹）；

$RPN=9 \times 8 \times 1=72$ $RPN=9 \times 8 \times 1=72$ 。

$RPN > 60$ 需优先改进，建议替换为Sc/Cf复合材料叶片。

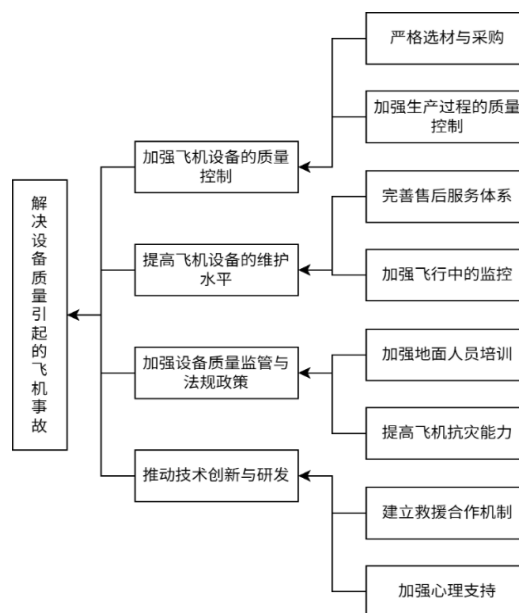


图7 解决设备质量引发事故的流程图

当然，军用飞机事故的原因通常是环境条件、人为操作、设备质量共同作用的结果。如2022年1月，美国一架F-35C战机在与航母甲板撞击后坠海；9个月后，一架F-35A战机又坠毁在跑道上。2023年9月美国沃斯堡海军航空站联合储备基地，一架F-35B战机在垂直降落时失控坠毁。一年多的时间里，美军F-35战机的3种型号都发生了重大坠机事故。^[28]通过鱼刺图可分析如下：

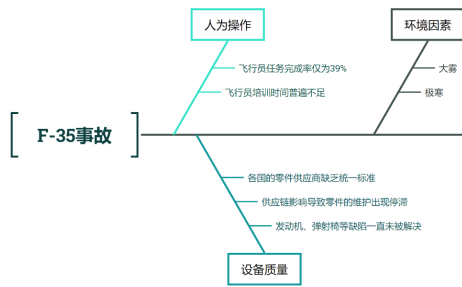


图 8 F-35 事故的鱼刺图

从人为操作方面，可以开发 AI 任务规划平台，实时匹配飞行员能力与任务需求。并通过模仿大雾、雷暴等极端天气对飞行员

进行训练。

从环境因素方面，可以运用全天候的导航矩阵，适配可能的极端环境。并加强发动机叶片的耐受性，使之在低温下也能够正常运作。

从设备质量方面，要建立标准化工程，或者使零件尽量国产化来提高可控性。并且加强飞行中的监控，让整个飞行过程处在实时监控之下。

只有通过全面分析各种潜在风险因素，完善飞机的设计、提高设备质量、加强飞行员训练、强化环境应对能力，才能有效减少飞行事故的发生，确保飞行任务的安全完成，并最大限度地保护飞行员的生命安全。

参考文献

- [1] 外军装备质量事故案例集锦 <https://www.doc88.com/p-60529008172316.html>
- [2] 淡风, 雅楠. 空天消息 [J]. 航空知识, 2006, (4): 4-7
- [3] 50 年前致命坠机成就美轰炸机 B-52 “老兵传奇” - 中新网
- [4] 美媒: 美国空军一架 F-16 战斗机坠毁, 飞行员在飞机坠地前弹射逃生 - 新华网
- [5] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT T-38C, T/N 68-8206
- [6] 翟鹏飞, 马玲, 王航臣, 刘资涵. 民用飞机冬季运行低温修正与评估研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2023, (4): 134-140
- [7] 王朝武, 章汉亭. 海军机场打响驱鸟战 [J]. 当代海军, 2008, (3): 21-24
- [8] 朱云斌. 军用机场鸟击防范对策研究 [D]. null, 2010
- [9] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT C-130H3, T/N 94-6706
- [10] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT C-130J, T/N 08-3174
- [11] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT F-15C, T/N 84-0008
- [12] 造成科比飞机失事的“空间定向障碍”到底是啥? _新闻_央视网 (cctv.com)
- [13] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT T-38C, T/N 68-8152
- [14] 1 · 24 美舰载机坠毁事故 _ 百度百科
- [15] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT A-10C, T/N 80-0282
- [16] 国外武器装备质量事故案例: 美国 [J]. 国防科技工业, 2011, (2): 59-62
- [17] “重建” F-22 [J]. 兵器知识, 2022, (2): 5
- [18] 安徽广德 6 · 3 空难 _ 百度百科
- [19] 淡风, 雅楠. 空天消息 [J]. 航空知识, 2006, (4): 4-7
- [20] 张娜. 伊尔-112V 军用运输机坠毁事件回顾与思考 [J]. 国际航空, 2021, (12): 15-18
- [21] 7 月 25 日一架米 28 武装直升机在俄罗斯失事, 机组人员全部遇难 _ 腾讯新闻 (qq.com)
- [22] 驻韩美军公布去年 5 月 F-16 战机坠毁事故原因 | 韩联社
- [23] 峰峻, 安彦. 军用飞机最大故障速度计算 [J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(2): 7-11
- [24] 张涛, 扈盛超. 航空电气中电缆故障与对策 [J]. 中国航班, 2019, (9): 48-49
- [25] 胡嘉旭; 王海涛; 徐显海; 张学伟; 陈威. 军用飞机火灾特点及救援对策 [J]. 消防界 (电子版), 2022, 8(18): 45-47
- [26] 薛宇敬阳. 我国通用航空飞行事故原因研究 [D]. null, 2019
- [27] 张献逢, 屈轶, 范洪波. 美国空军飞机抢救经验及启示 [J]. 航空维修与工程, 2018, (2): 51-53
- [28] 军工世界 | F-35 为何坠机事故频发 _ 光明网 (gmw.cn)

固定式可燃气体报警器检定方法的研究

所彬

鞍山市检验检测认证中心, 辽宁 鞍山 114001

DOI: 10.61369/ME.2024070031

摘要：可燃气体报警器的作用是检测环境中可燃气体的浓度，分为固定式和便携式。固定式可燃气体报警器被广泛应用在存在可燃气体的行业，如石油行业、化工行业、燃气行业等，能够检测可燃气体的泄漏情况，预防火灾及爆炸事故。固定式可燃气体报警器示值的准确性直接影响着其预警功能的发挥，需要通过定期检定的方式来保障报警器检测的灵敏性以及示值的准确性。文章分析了固定式可燃气体报警器的必要性，阐述了固定式可燃气体报警器检定结果影响因素，并对固定式可燃气体报警器的检定方法进行了研究。

关键词：固定式；可燃气体报警器；检定方法；影响因素

Research on the Calibration Method of Fixed Combustible Gas Alarm Devices

Suo Bin

Anshan Inspection, Testing and Certification Center, Anshan, Liaoning 114001

Abstract： The function of combustible gas alarm is to detect the concentration of combustible gases in the environment, and it is divided into fixed and portable types. Fixed combustible gas detectors are widely used in industries where combustible gases exist, such as the petroleum industry, chemical industry, gas industry, etc. They can detect the leakage of combustible gases and prevent fire and explosion accidents. The accuracy of the indication of a fixed combustible gas alarm directly affects its warning function, and it is necessary to ensure the sensitivity of the alarm detection and the accuracy of the indication through regular calibration. The article analyzes the necessity of fixed combustible gas alarms, elaborates on the factors affecting the calibration results of fixed combustible gas alarms, and studies the calibration methods of fixed combustible gas alarms.

Keywords： fixed type; combustible gas alarm; verification method; influence factor

前言

固定式可燃气体报警器能够对可燃气体浓度进行检测，在检测到超出安全阈值的可燃气体浓度后，会立即发出报警信息，同时联动应急设施，防范火灾和爆炸事故的发生，规避可能出现的人员伤亡、财产损失以及环境污染。考虑到固定式可燃气体报警器运行的可靠性与安全问题直接相关，需要定期做好报警器的检定工作。

一、固定式可燃气体报警器检定的必要性

固定式可燃气体报警器是一种能够对环境中的可燃气体浓度进行实时监测的安全设备，当其检测到环境中可燃气体的浓度超过预设安全阈值时，会发出声光警报，联动其他安全设备如排风设备、切断阀等，预防火灾和爆炸事故的发生^[1]。报警器包含了探测器和控制器，其基本工作原理，是传感器在检测到可燃气体后，会生成与气体浓度成一定比例的电信号，将信号经由线缆或者RS485通讯传输到控制器，控制器会将信号和预设值对比，若电信号超过预设值，控制器会触发报警^[2]。

在固定式可燃气体报警器中，气体传感器是核心部件，其运行的稳定性和可靠性会直接影响报警器的使用效果。实际运行中，气体传感器有着不同的特性，想要将其作用充分发挥出来，使用前需要提前做好标定。报警器在长期使用过程中，因为外部环境因素以及自身材料老化等因素的影响，会出现灵敏度和准确性下降的问题，尤其是在面对高温、粉尘等恶劣环境时，固定式可燃气体报警器的功能会受到更加严重的影响，导致测量误差的增大^[3]。

从保障固定式可燃气体报警器检测结果准确性的角度，需要严格依照国家计量检定规程的相关要求，对报警器实施周期性检

定,确保报警器可以准确检定环境中的可燃气体浓度,发挥出应有的预警作用,将事故发生的概率控制到最低^[4]。固定式可燃气体报警器本身属于强制性检定计量器具,因此需要将其纳入依法强制管理的范畴,做好定点、定周期、强制性检定,检定工作需要由经过授权的专业机构进行,如果报警器没有经过定期检定,或者检定结果不合格,不能安装使用。依照公安部的相关规定,在可燃气体报警器系统安装完成后,需要先全面检测所有的传感器探头,确认其能够正常运转。之后,每2年需要全面检测探头,发现问题应重新标定^[5]。

二、固定式可燃气体报警器检定结果影响因素

定期检定是保障固定式可燃气体报警器计量精准度的关键,也是发挥报警器作用的重要支撑。而在检定过程中,存在一些会对检定结果产生负面影响的因素,需要检定人员的重视:

(一) 物质因素

JJG693—2011《可燃气体报警器检定规程》明确规定,在可燃气体报警器计量检定工作中,使用的气体标准物质必须与报警器在实际工作中检测的气体类型相同,如果报警器本身没有注明检测气体的类型,可以使用丙烷气体或者异丁烷气体标准物质^[6]。若标准气体和被测气体的类型不一致,可能导致检定结果偏差。另外,即便是同一台报警器,在检测相同浓度、不同类型的可燃气体时,可能输出不同的示值,因此,在检定过程中,必须选择合适的气体标准物质。

(二) 环境因素

检定过程中,环境因素同样会对检定结果产生巨大较大影响,部分可燃气体报警器安装在户外,会受到风、粉尘等因素的影响,在检定环节必须将环境因素的影响考虑在内^[7]。如果检定环境中存在有毒有害气体,报警器检定结果会出现偏差,例如,硫化氢、含有机硅的气体会引发传感器异常,阻碍气敏元件与可燃气体的接触,导致传感器灵敏度降低。极端温湿度环境(−20℃以下温度,90%RH以上湿度等)可能会对传感器的热稳定性和电路性能造成影响,强电磁环境也会引发信号传输异常,干扰电桥平衡^[8]。

(三) 操作因素

一是电源稳定性,如果电量不足,传感器无法达到预期加热温度,采样泵流量也会有所下降,会导致报警器响应时间延长以及示值偏低的情况。二是通气流量控制,结合气体传感器的结构分析,气体需要经过3层扩散后,才能接触其内部敏感元件,气体扩散的速度与通气流量存在直接关联。当传感器达到稳态时,气体扩散的速度与催化燃烧反应速度相等,因此,通气流量大小与传感器灵敏度以及反应稳定性密切相关。三是通气气罩尺寸,可燃气体报警器检定中,气罩是常用的辅助工具^[9],其能够保持气体标准物质的浓度,模拟实际情况下气体扩散的效果。在户外环境监测中,气罩的存在可以防止风速带来的负面影响。不过,在相关规范中,没有就通气气罩做出明确规定,气罩的尺寸可能会影响最终检定效果。

(四) 设备因素

现如今,可燃气体报警器的类型变得越发多样化,但是在质量方面存在良莠不齐的情况,一些劣质的气体报警器在运行中欠缺稳定性,即便经过检定也无法实现稳定计量,增大了使用风险。部分报警器长期暴露在户外或者腐蚀性环境中,出现了老化和损坏的情况,降低了传感器的灵敏度^[10]。另外,线路氧化、震动、接触不良等可能造成断路、信号漂移问题,导致报警器示值不稳定,或者出现无法校准的情况。在对报警阈值进行设定时,如果设置不当,可能会掩盖真实泄漏风险。

三、固定式可燃气体报警器检定方法

从保障固定式可燃气体报警器运行效果的角度,需要定期做好报警器的检定工作,这也是确保报警器计量精准度和一致性的关键举措。应依据JJG693—2011《可燃气体报警器检定规程》,选用报警器对应的气体标准物质进行检定^[11]。现阶段,固定式可燃气体报警器检定的方法有两种:

(一) 专业检测机构检定

专业检测机构检定,是将固定式可燃气体报警器中的探测器部分拆下,送到经过授权,具备相关资质的机构进行检定。这种检定方法在实际应用中比较常见,检测机构的专业性保障了检定结果的可靠性,能够很好地处理报警器存在的示值不准确等问题^[12]。不过,专业检测机构检定方法也存在不少问题:

一是固定式可燃气体报警器的运行涉及了一次表、二次表、现场报警、信号传递等内容,有着很强的系统性,单纯拆卸传感器检测,会影响各种功能的实现,又或者无法将报警器的实际运行情况反映出来。因为专业检测机构检定仅针对探测器部分,无法检定控制器、显示部件、电子线路等,并不能很好地保障固定式可燃气体报警器的运行效果^[13]。因此,专业检测机构检定中,应针对报警器整体实施检定,模拟报警器的真实使用情况。二是从现场拆卸报警器探测器,到送至检测机构完成检定工作,通常需要7~14d的时间,而在这个过程中,送检单位可燃气体的监测会中断,安全隐患巨大,如果在检定期间出现了可燃气体泄漏,无法被及时发现,可能引发严重后果。三是在检定规程中明确提出,检定仪器需保持可靠连接,专业机构检定采用的是拆检的方式^[14],无法满足上述要求,检定结果的准确性必然会受到影响。四是固定式可燃气体报警器本身属于精密电控系统,在拆卸和安装的过程中,容易出现密封件破损、线路连接点松动等问题,导致探测器灵敏度的下降。因此对于固定式可燃气体报警器而言,应该尽可能避免频繁拆卸和长距离运输的情况。另外,检测机构在完成探测器检定,认定其检定结果符合相关规范要求后^[15],还需要将探测器运回并安装,这个过程中一旦出现了震动、碰撞等问题,可能导致探测器异常,但是其检定结果又显示正常,会影响可燃气体报警器的检测功能和报警功能。

(二) 现场检定

现场检定即在现场对固定式可燃气体报警器进行检定,其能够很好地满足规程中仪器可靠连接的相关要求。现场检定需要提

前在实验室环境下，配置好用于检定的标准气体，然后与可燃气体报警器以及流量计连接^[16]。现场检定是设备计量检定最为常用的方法，不需要对报警器进行拆装，可以针对报警器整体的运行情况进行检定，检定结果更加客观准确。不过从目前来看，现场检定通常都是采用人工检定操作的形式，检定数据也由人工记录，检定装置相对简单，操作难度大，对检定人员的专业能力有着较高的要求^[17]。这种情况下，现场检定同样存在一些问题：

一是标准气体本身有着一定的吸附性，在放置一段时间后，气体的浓度值会发生变化，与实验室环境下配置出的标准气体浓度存在差异，从而导致现场校准的可信度有所降低。二是可燃气体报警器检定需要针对多个气体浓度进行检定，这也要求检定人员必须携带不同浓度的标准气体以及与之配套的流量控制器进行现场检定，便利性较差^[18]。三是现场检定方法单一，需要人工检定，采用的检定装置也相对简单，检定效率低下，检定结果的准确性也难以提高，很大程度上制约了检定工作的发展。四是单纯依靠现有的检测技术，并不能实现对固定式可燃气体报警器传感器电参数标准输出值的自动采集和处理，而该数据是报警器运行的核心技术参数，也是判断报警器是否合格的关键指标。但是，无论是报警器现场显示的数值，还是远端控制系统显示的数值，都仅能用于仪表的标定工作，无法作为标准值，难以真正实现在线检定^[19]。

（三）注意事项

上述两种检定方法有着各自的优势和不足，在实际应用中需要结合实际情况作出合理选择，以最大限度地保障检定工作的实施效果。第一种检定方法操作简单，自动化水平高，通常只需要一名工作人员就能完成。第二种检定方法受现场条件的限制，至少需要2-3名工作人员，同时报警器使用单位需要提供报警器的分布图和台账，为检定工作的实施提供便利。如果检定场所的危险性较高，在检定前应该准备相应的防护用具，如防护服、口罩、防毒面具等，以保障工作人员的人身安全^[20]。

四、结语

总而言之，固定式可燃气体报警器在石油、化工、燃气等领域应用广泛，有着良好的发展前景。检定工作是保障固定式可燃气体报警器稳定可靠运行的关键，但是常规的检定方法无论是专业机构检定还是现场检定，都存在一定的缺陷。从提升检定效果的角度，应做好现场检定装置的优化创新，提升其便携性和智能化程度，节约人力资源。应该进一步加强对检定技术、检定设备和检定方法的创新，提升检定结果的准确性和可靠性，为固定式可燃气体报警器的稳定运行提供良好支撑。

参考文献

[1] 王晓晖. 固定式可燃气体报警器检定方法探讨 [J]. 商品与质量, 2020(29):178.
[2] 王敏杰, 卓文钦. 四种固定式可燃气体报警器检定中的标定方法 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48(1):75-76, 80.
[3] 邹立斌. 固定式可燃气体报警器检定中的标定方法 [J]. 中国科技信息, 2021(19):50-51.
[4] BILL (BUFF) CROSLY, JON D. MILLER. THE ROLE OF COMBUSTIBLE AND TOXIC GAS DETECTORS IN INDUSTRIAL PLANT SAFETY[J]. International Environmental Technology, 2019, 29(3):6-9.
[5] 张莉丽, 喻旭东, 薛成. 可燃气体检测报警器标定方法和示值误差超差的探讨分析 [J]. 工业计量, 2020, 30(6):99-100.
[6] YUYANG SHANG, ZHENQI YANG, BO HU, et al. The Quality Status Analysis and Development Proposal of Combustible Gas Alarm[J]. E3S Web of Conferences, 2024, 565.
[7] 武晓荣, 冯丽苹, 王笑微, 等. 可燃气体检测报警器检定要点研究 [J]. 机电信息, 2024(5):59-62.
[8] 陈岚, 施马凯, 包亦杰. 可燃气体检测报警器检定装置计量比对结果分析 [J]. 上海计量测试, 2024, 51(6):57-60.
[9] 林俊辉. 可燃气体报警器计量检定和使用的相关问题分析 [J]. 大众标准化, 2023(7):186-188.
[10] 陈勇, 刘慧波. 影响可燃气体检测报警器检定结果的因素分析及建议 [J]. 品牌与标准化, 2023(2):78-80.

高效真空泵组气冷罗茨泵传动齿轮损坏分析及处理措施

刘旭东

浙能阿克苏热电有限公司, 新疆 阿克苏 843000

DOI: 10.61369/ME.2024070032

摘 要 : 1号机高效真空泵组气冷罗茨泵出现异常声音、振动, 检查发现气冷罗茨泵自由端从动齿轮损坏断齿进行原因分析和处理, 经对气冷罗茨泵各部件解体检查、对相关部位安装间隙测量及运行数据进行分析, 查找出齿轮损坏的最终原因, 并给出了有效的处理措施及建议。

关 键 词 : 气冷罗茨泵; 传动齿轮; 润滑不良; 冲击载荷; 高温异音

Analysis and Treatment Measures of Transmission Gear Damage of Air Cooled Roots Pump in High Efficiency Vacuum Pump Set

Liu Xudong

Zhejiang Energy Aksu Thermal Power Co., Ltd. Aksu, Xinjiang 843000

Abstract : The gas-cooled Roots pump of the high-efficiency vacuum pump set in Unit 1 exhibited abnormal sounds and vibrations. Upon inspection, it was found that the free end driven gear of the gas-cooled Roots pump had broken teeth. After disassembling and inspecting the various components of the gas-cooled Roots pump, measuring the installation clearance of relevant parts, and analyzing operational data, the final cause of the gear damage was identified, and effective measures and recommendations were provided.

Keywords : air-cooled roots pump; transmission gear; poor lubrication; impact load; high temperature noise

一、设备概述

某电厂1号机组抽真空系统原有两台水环式真空泵, 2018年在原设备系统基础上升级装备一套高效真空泵组, 每套真空泵组包括一台高效水环泵、一台气冷罗茨泵、两台凝水泵、一台喷淋式凝水装置及配套凝水冷却器、罗茨泵专用冷却器、工作液冷却器等辅助设备。高效真空泵组工作流程: 机组正常运行时抽出的气体首先进入喷淋式冷凝器, 将抽汽中大部分的水蒸汽凝结成水, 剩余的空气和少量水蒸汽进入气冷罗茨泵, 气冷泵将气体压缩进入级间换热器进一步冷却凝结后, 最后进入高效水环泵将气体排出。这样机组将吸入的气体不断的排出, 从而形成系统的抽真空^[1]。

气冷罗茨泵, 是在 ZJ 系列罗茨真空泵的基础上改进而成, 增加了旁路气体冷却系统, 在泵的排气口或回流管路中安装换热器, 排气口排出的气体经过换热器冷却, 冷却后的气体从泵体的两侧进入泵腔并冷却转子及泵体, 使其可以在高压差下不会产生高温^[2]。

二、异常情况

2024年01月20日 15:45, 运行巡检发现1号机高效真空泵组气冷罗茨泵声音异常, 16:30 维护检修人员及设备部点检前往

现场检查确有明显断续“哐当”敲击碰磨声, 同时泵体振动有所增大, 随即联系运行准备停泵检查, 17:18 气冷罗茨泵运行中跳闸(报电气故障, 就地报过流报警) A 水环真空泵联启, 运行退出高效真空泵组运行^[3]。组织检修人员对气冷罗茨泵进行解体检查, 解体后发现传动齿轮的从动齿轮有10个齿断裂(见图1)。



图1 气冷罗茨泵从动齿轮损坏图片

三、原因分析

(一) 负载过大

如果泵的工作负载超过设计范围, 齿轮可能承受过大的应力, 导致疲劳损坏或断裂。查看历史曲线, 气冷罗茨泵电流在1号机组 A 修前平均26A左右, A 修后电流在34A左右且有较大波动, 结合 A 修后高效真空泵水环泵工作液温度高的问题, 分析认为由于在 A 修期间在1号机组抽真空母管至高效真空泵组检修完成后没有对该系统进行打压查漏, 在运行中由于高效真空泵组存在漏点 使外界空气吸入真空系统, 另外 A 修期间在抽真空母管至

高效真空泵入口管加装一根 DN32 的小旁路，母管集聚的冷凝水与漏人的空气混合后形成水汽较大湿空气，增加了气冷罗茨泵负载^[4]。加上2024年5月至9月份在处理水环泵工作液温度高问题期间，对高效真空泵频繁启停，叠加导致齿轮承受冲击载荷，加速齿轮疲劳损伤（见图2）。



图2 齿面磨损、齿跟裂纹情况

（二）润滑油不足或质量差

齿轮润滑不足会导致摩擦增大，进而加速磨损。检查罗茨泵从动齿轮侧的圆柱滚子轴承径向游隙达到0.30mm，查阅相关标准 NJ215E 轴承自由状态下的游隙标准为0.08–0.12mm，已严重超标，观察轴承内外圈滚道有大面积的点蚀坑眼，滚柱表面有较多的环形磨痕^[5]。检查罗茨泵转子轴端密封件唇边有磨损变形。观察润滑油成黑黄色，手指搓动感觉油中有微小颗粒、基本无粘度感。分析原因为含有较大水分的湿空气进入罗茨泵凝结并附着于泵内部件表面，在泵内压出端水汽被压入齿轮及轴承箱，使润滑油质劣化，加上罗茨泵负载增加存在冲击载荷（深调低负荷工况时会出现间断异常振动和异音），进一步加速轴承、传动齿轮磨损及轴端密封的损伤（见图3）。



图3 罗茨泵轴承腐蚀磨损严重

（三）检修工艺不当

检修安装时齿轮对中不准确会导致局部应力集中，加速磨损或断裂。紧固件松动：齿轮或轴承的紧固件松动会导致振动和冲击，进而损坏齿轮^[6]。经检查确认紧固螺栓及齿轮涨紧套等紧固件无松动、预紧力距正常，测量转子各部间隙也在合格范围，在静态无载荷情况下检查齿轮端面瓢偏0.06mm及晃度0.04 mm也基本符合技术要求，测量齿轮轴晃度及平行度0.02mm，检查以上相关安装数据满足要求，故认为检修工艺不良的因素较小。

（四）振动和冲击

不平衡载荷增加、轴承磨损间隙过大及其他机械问题引起罗茨泵的振动过大，进而影响齿轮的正常工作^[7]。突然的冲击载荷

导致齿轮断裂或齿面损坏（见图4）。

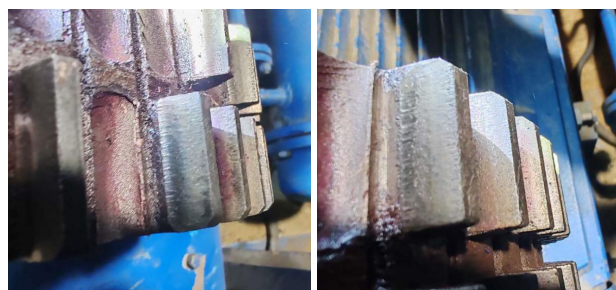


图4 齿面异常磨损及被冲击痕迹

（五）罗茨泵冷却回流系统故障

冷却系统失效可能导致泵体及齿轮箱温度升高，影响齿轮寿命。由于罗茨泵与水环泵因布置标高存在设计问题，罗茨泵冷却器的疏水无法顺利排至水环泵，疏水不断增加淹没冷却器管束失去冷却气体的作用，罗茨泵本身得不到回流冷却加上负载的增大，导致罗茨泵体及齿轮箱温度整体升高（最后造成水环泵工作液温度也过高）^[8]。

（六）异物进入齿轮啮合面内

杂质或颗粒物进入，可能会卡在齿轮啮合处，导致齿轮损坏^[9]。检查油质含有小颗粒单不至于损坏齿轮，主要原因为载荷增大、润滑不良、温度偏高、振动和冲击等综合因素叠加，使最先疲劳脱落的轮齿被带入主、从动齿轮啮合面内，将连续相邻多个齿被打坏（见图5）。

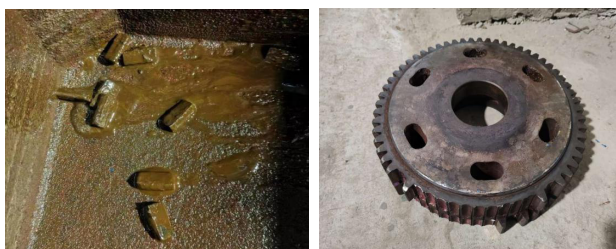


图5 断落的轮齿

四、处理措施

- 1.全面彻底清洗罗茨泵各零部件保证设备内部的清洁度，按照厂家说明书要求调整各部位间隙，严格按照检修工艺进行回装^[10]。
- 2.定期检查润滑油品质，发现油质性能降低及时查找出问题及更换新油，保证良好润滑。
- 3.加强巡检，发现振动和温度异常及时分析并消除。定期对高效真空泵系统进行严密性检查，及时消除系统泄漏，防止罗茨泵、水环泵过负荷。
- 4.在停机检修时，将加装在主机抽真空母管至高效真空泵组入口的小旁通管道加装隔离阀，在高效真空泵组独立运行时能将小旁通管完全隔离，改善高效真空泵运行环境。
- 5.更换损坏的备件：传动齿轮，轴承、隔套密封环、转子轴

端密封圈等。

6.缩短检修周期，做到逢修必检：轴承磨损情况、传动齿轮啮合间隙及啮合面磨损情况、转子各部配合间隙、更换密封件等。

五、结论

此次高效真空泵气冷罗茨泵损坏的根本原因为：增加的小旁

通管增加了泵内的水汽，以及系统严密性不佳造成气冷罗茨泵负荷增加，抽入的空气含有较大水汽进入油室污染润滑油质，冷却器设计缺陷使疏水不畅造成温度过高，加上频繁启停的载荷冲击等因素叠加，加剧传动齿轮异常磨损，最终导致齿面损伤疲劳断裂。

参考文献

[1]张森.基于音频信号的风电叶片损伤检测算法研究[D].北方民族大学,2024.DOI:10.27754/d.cnki.gbfmz.2024.000392.

[2]程志峰.600MW 级超超临界汽轮机盘车装置优化探析[J].中国设备工程,2023,(S2):155-157.

[3]肖时晖.盾构主减速机冷却装置设计及试验验证[D].湘潭大学,2023.DOI:10.27426/d.cnki.gxtdu.2023.002183.

[4]程晓涵,李宗吾,王亚洲,等.振动筛激振器斜齿轮中心距对其动力学特性的影响分析——仿真实验与科研实践联动的案例设计[J].实验技术与管理,2023,40(09):220-228+259. DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2023.09.031.

[5]郭阿童.风电机组齿轮箱常见故障及防护措施[J].仪器仪表用户,2023,30(10):92-94+84.

[6]聂林红.农业机械零件断裂失效主要类型与优化策略研究[J].南方农机,2023,54(17):87-88+126.

[7]黄昌顺.基于深度学习的滚动轴承故障诊断方法研究[D].沈阳化工大学,2023.DOI:10.27905/d.cnki.gsgghy.2023.000068.

[8]张楠楠.基于标志性特征提取和深度学习的轴承故障诊断[D].河南理工大学,2023.DOI:10.27116/d.cnki.gjzgc.2023.000312.

[9]赵东辉.基于深度学习的滚动轴承故障诊断研究[D].大连交通大学,2023.DOI:10.26990/d.cnki.gsltc.2023.000299.

[10]邵雯丽.输出 PDF 预测及其在气化炉烧嘴剩余寿命的研究[D].内蒙古科技大学,2023.DOI:10.27724/d.cnki.gnmngk.2023.000205.

电力自动化系统在现代电力工程中的应用与优化

胡豪跃

新会双水发电厂有限公司，广东 江门 529153

DOI: 10.61369/ME.2024070001

摘要： 电力自动化系统通过集成物联网、人工智能与大数据技术，构建数据驱动的智能控制体系，有效提升电网稳定性与新能源消纳能力。研究聚焦系统核心组成、典型应用场景及优化策略，提出深度学习与分层架构优化方法，破解高维计算与异构兼容性瓶颈；结合区块链与数字孪生技术应对数据安全与可靠性挑战。实践案例验证了动态调度精度提升、故障恢复时间缩短等技术价值，政策导向下需强化标准制定与跨领域协同，推动新型电力系统建设。

关键词： 电力自动化系统；优化策略；数字孪生技术

Application and Optimization of Power Automation System in Modern Power Engineering

Hu Haoyue

Xinhui Shuishuang Power Plant Co., LTD. Jiangmen, Guangdong 529153

Abstract： By integrating Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and big data technologies, power automation systems build a data-driven intelligent control framework, significantly enhancing grid stability and the capability to absorb new energy sources. This study focuses on the core components, typical application scenarios, and optimization strategies of such systems, proposing deep learning and hierarchical architecture optimization methods to address high-dimensional computation and heterogeneous compatibility bottlenecks. Blockchain and digital twin technologies are combined to tackle data security and reliability challenges. Practical case studies verify the technical value in terms of improved dynamic scheduling accuracy and shortened fault recovery times. Under policy guidance, it is essential to strengthen standard setting and cross-domain collaboration to promote the construction of new power systems.

Keywords： power automation system; optimization strategy; digital twin technology

引言

电力系统作为现代社会的能源核心，其智能化转型对实现“双碳”目标与优化能源结构至关重要。随着风电、光伏等可再生能源规模扩大，电力系统面临新能源波动性消纳和实时供需平衡的挑战。电力自动化系统利用数据驱动和智能控制技术，显著提升了电网运行效率与稳定性，成为解决新能源并网问题的关键。2024年7月，《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》发布，该方案强调的配电网高质量发展与电动汽车充电设施网络的拓展，将进一步促进能源消费结构的优化，提升能源利用效率，为经济社会高质量发展奠定坚实基础。然而，技术迭代加速、异构系统兼容性不足及网络安全风险等问题仍制约其发展。本文基于当前技术演进与政策框架，探讨电力自动化系统的应用场景、优化策略及解决方案，旨在为构建安全高效的新型电力系统提供理论支撑与实践参考。

一、电力自动化系统的基础理论与技术框架

(一) 电力自动化系统的核心组成

电力自动化系统的核心组成涵盖数据采集、传输、处理与控制功能模块。数据采集与监控系统(SCADA)作为基础层，通过远程终端单元(RTU)和智能电子设备(IED)实时采集电网运行参数，并基于人机交互界面实现可视化监控。能量管理系统(EMS)在此基础上整合发电、输电和负荷数据，优化电力资源调

度与经济运行；分布式控制系统(DCS)则聚焦于局部电网或工厂站的精细化控制，通过模块化设计提升响应速度与可靠性^[1]。三类系统通过信息交互形成闭环控制架构，支撑电网从感知到决策的全流程自动化。

(二) 关键技术支撑

物联网(IoT)与传感技术为电力自动化系统提供高精度、广覆盖的数据感知能力，通过部署智能传感器与无线通信网络，实现设备状态、环境参数的全天候监测。人工智能(AI)与大数据

分析技术则驱动系统智能化升级，基于机器学习算法构建负荷预测、故障诊断等模型，结合历史数据挖掘潜在规律，优化决策逻辑^[2]。通过整合 AI 推理引擎与实时数据库，系统可动态调整控制策略，降低人工干预需求，提升复杂场景下的自适应能力，形成“感知－分析－优化”的技术闭环。

二、电力自动化系统在现代电力工程中的典型应用

（一）智能电网调度与运行优化

电力自动化系统通过实时负荷预测与动态调度显著提升电网运行效率。基于人工智能的负荷预测模型（如 LSTM 网络）融合气象、用户行为等多源数据，生成高精度短期负荷曲线，为发电计划优化提供依据；动态调度模块依托能量管理系统（EMS）实时调整机组出力与网络拓扑，平衡供需波动并降低运行成本^[3]。在故障诊断与自愈控制领域，SCADA 系统结合广域测量系统（WMS）数据，可快速定位输电线路短路或设备过载故障，触发保护装置动作并启动备用电源投切，典型案例显示新加坡电网通过自适应重构算法将平均停电时间缩短至 2 分钟以内，验证了自动化技术的可靠性提升价值。

（二）配电自动化与用户侧管理

配电自动化系统通过微电网协同控制技术实现分布式能源高效整合。基于多智能体系统的控制架构，协调光伏、储能与柴油机组出力，在浙江某海岛微电网项目中，可再生能源利用率提升至 92%。需求响应与能效优化实践则依托智能电表与用户终端设备，构建双向互动机制：德国 E-Energy 项目通过分时电价策略引导用户主动调整用电行为，结合 AI 算法分析负荷特性，实现区域峰谷差降低 18%。此类技术通过优化配电网络运行效率与用户参与度，推动电力系统向低碳化、柔性化方向演进。

三、电力自动化系统的优化策略与方法

（一）算法优化与模型改进

1. 深度学习在潮流计算中的应用

传统潮流计算依赖牛顿－拉夫逊法等数值方法，面临高维非线性方程求解效率低的问题。深度学习通过构建卷积神经网络（CNN）或图神经网络（GNN），将电网拓扑与电气参数映射为特征向量，实现快速潮流预测。例如，美国 PJM 电网采用 GNN 模型，将计算耗时降低至传统方法的 15%，且电压幅值预测误差小于 0.5%^[4]。此类模型通过端到端训练规避迭代收敛风险，尤其适用于含高比例可再生能源的电网动态分析，为实时调度提供可靠数据支撑。

2. 多目标优化算法（如 NSGA-II）的效能提升

NSGA-II 算法在解决机组组合、网络规划等多目标问题时，易受种群多样性不足与局部最优限制。改进策略包括引入自适应交叉变异算子与混合并行计算框架：巴西电力市场采用改进 NSGA-III 算法优化水火电协同调度，目标函数涵盖经济成本与碳排放量，优化后总成本降低 7.2%，碳排放强度下降 12%。算法通过

非支配排序与精英保留机制平衡收敛性与分布性，为复杂电力系统提供高鲁棒性决策方案。

（二）系统架构优化

1. 分层分布式控制架构设计

分层架构将电力自动化系统划分为主站层、区域控制层与终端执行层，主站层统筹全局优化指令，区域层协调多微电网运行，终端层通过本地控制器实现快速响应。江苏某智能配电网试点采用三层架构后，故障隔离时间由分钟级压缩至 200 毫秒，供电可靠性提升至 99.99%。该架构通过信息纵向交互与决策横向协同，缓解集中式系统的通信压力，增强系统容灾能力^[5]。

2. 边缘计算与云计算协同优化

边缘计算节点部署于变电站或配电终端，处理实时性要求高的本地数据（如故障录波），云计算中心则承担历史数据分析与长期策略生成。芬兰 Fingrid 电网通过“云－边－端”协同框架，将数据处理延迟降低至 10 毫秒以内，同时云端 AI 模型迭代更新边缘节点控制逻辑^[6]。协同机制通过轻量级容器化技术实现资源动态分配，兼顾计算效率与模型泛化能力，支撑海量异构设备的协同管理。

四、电力自动化系统面临的挑战与解决方案

（一）技术挑战

1. 数据安全与隐私保护问题

电力自动化系统依赖海量数据交互，但数据传输与存储环节易受网络攻击（如 DDoS、中间人攻击）威胁，导致敏感信息泄露或恶意篡改。智能电表用户用电行为数据若未脱敏处理，可能暴露用户隐私。2021 年美国科罗拉多州电网因 SCADA 系统漏洞遭受勒索软件攻击，引发局部停电，凸显数据防护机制薄弱。此外，多主体数据共享场景下，权限划分模糊与加密算法滞后进一步加剧风险，亟需构建端到端安全体系^[7]。

2. 异构系统兼容性与标准化缺失

电力自动化系统常集成不同厂商设备与协议（如 Modbus、DNP3），导致数据格式差异与通信延迟。某省级电网改造项目中，旧有 RTU 设备因协议不匹配无法与新型 IED 协同，需额外开发转换接口，成本增加 23%。国际标准 IEC 61850 虽定义了通用数据模型，但实际部署中仍存在协议扩展不一致、互操作性测试覆盖不足等问题，制约系统规模化扩展与运维效率。

（二）解决方案与实践

1. 区块链技术增强数据安全性

区块链通过分布式账本与智能合约实现数据不可篡改与追溯。欧洲 Enerchain 项目利用私有链记录电力交易数据，确保交易透明且防篡改^[8]。智能合约自动执行电费结算，减少人为干预风险。在设备身份认证领域，国网公司采用联盟链技术为每个终端分配唯一数字身份，结合零知识证明验证数据来源合法性，攻击检测准确率提升至 98.6%，有效抵御伪造节点入侵。

2. 开放式通信协议（如 IEC 61850）的推广

IEC 61850 通过面向对象建模与 MMS/GOOSE 通信服务，统

一变电站自动化系统信息交互标准。南非 Eskom 电力公司全面采用 IEC 61850-90-1 架构后，设备配置时间缩短 40%，跨厂商设备互操作成功率从 72% 提升至 95%。为进一步扩展兼容性，中国推出 DL/T 860 扩展协议，支持新能源并网与需求响应功能，在张北柔直工程中实现风光储设备无缝接入，验证标准化对系统集成核心价值。

（三）可靠性优化路径

1. 冗余设计与容错机制

冗余设计通过双通道通信、热备电源等硬件冗余提升系统可用性^[9]。江苏某特高压换流站采用“双总线+双控制器”架构，单点故障下切换时间小于 50 毫秒，年均停电时长减少 82%。软件容错机制结合心跳检测与动态负载均衡，可在边缘节点故障时自动迁移任务，新加坡电网通过该技术将服务中断概率降至 0.001%。

2. 数字孪生技术在系统仿真中的应用

数字孪生通过构建电网高精度虚拟镜像，支持故障预演与策略验证。英国国家电网搭建的数字孪生平台集成 SCADA 与 PMU 数据，模拟雷击导致输电线路断股的物理过程，提前制定保护策

略，将故障恢复时间缩短 35%。在设备健康管理领域，西门子利用数字孪生预测变压器绝缘老化趋势，制定预防性维护计划，德国某风电场运维成本降低 19%，设备寿命延长 12%^[10]。

五、总结

电力自动化系统通过集成数据采集、智能分析与闭环控制技术，成为现代电力工程实现高效稳定运行的核心支撑。其在智能电网调度、配电自动化等场景的应用，显著提升了负荷预测精度、故障响应速度与可再生能源消纳能力，推动电力系统向低碳化与柔性化转型。优化策略涵盖算法创新与架构升级，深度学习与多目标优化算法破解了传统模型的计算瓶颈，分层分布式架构与云边协同机制则增强了系统扩展性与实时性。面对数据安全、异构兼容性等挑战，区块链技术与标准化协议的应用为可信交互与系统集成提供有效路径，冗余设计与数字孪生技术进一步强化了可靠性保障。未来，5G 通信、数字孪生与跨领域 AI 融合将深化电力系统全环节智能化，需通过政策引导加速标准制定与产学研协同，构建安全、开放、可持续的电力自动化生态。

参考文献

[1] 覃丁曼. 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用探究 [J]. 电脑高手, 2020(3): 1459-1460.
[2] 周建新. 电力工程在电力自动化技术方向的应用 [J]. 建材与装饰, 2017(7): 225-226.
[3] 李佳伟. 电力驱动系统电气工程与自动化控制 PLC 的有效应用 [J]. 数码设计, 2021(23): 164-168.
[4] 韩春晶. 电气自动化在电气工程中的应用分析 [J]. 今日自动化, 2021(8): 7-9.
[5] 王姝. 储能技术应用于电力系统时的协调控制研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2015.
[6] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息 - 物理 - 社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 25-40, 后插 4.
[7] 吴兵. DC-DC 变换器模型降阶方法研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2023.
[8] 钟式平. 电力系统中电气自动化技术的应用和发展解析 [C]// 江西中昌工程咨询监理有限公司第十届科技大会论文集. 2016: 342-344.
[9] 何婧. 电力工程中的电力自动化技术的运用 [J]. 江苏科技信息, 2023(35): 78-80.
[10] 陈晓佩. 电力系统运行中电气自动化技术的应用策略分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(18): 555.

电气自动化系统中变频器应用与技术管理研究

王刚

中智广州经济技术合作有限公司，广东 广州 510000

DOI: 10.61369/ME.2024070006

摘要： 随着工业自动化和智能制造的快速发展，变频器作为电气自动化系统中的关键设备，其应用与技术管理的重要性日益凸显。本文深入探讨变频器在电气自动化系统中的应用及其技术管理，研究变频器技术管理对工业自动化发展具有重要意义。

关键词： 变频器；技术管理；工业自动化

Research on the Application and Technical Management of Frequency Converters in Electrical Automation Systems

Wang Gang

Zhongzhi Guangzhou Economic and Technological Cooperation Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： With the rapid development of industrial automation and intelligent manufacturing, frequency converters, as key equipment in electrical automation systems, have become increasingly important in terms of their application and technical management. This article explores in depth the application and technical management of frequency converters in electrical automation systems, and the study of frequency converter technical management is of great significance for the development of industrial automation.

Keywords： frequency converter; technical management; industrial automation

引言

变频器通过调节电机的转速和功率，实现节能与高效控制，在工业生产中发挥着重要作用。近年来，国家出台了一系列政策支持变频器行业的发展。例如，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确提出推动电机系统节能改造，变频器作为电机调速的关键设备，迎来了更大的发展机遇。在这样的背景下，深入研究变频器的应用与技术管理，不仅有助于提高工业生产的效率和稳定性，还能为实现国家的节能减排目标提供有力支持。

一、电气自动化系统概述

（一）电气自动化系统的基本构成

电气自动化系统主要由以下几个关键部分构成：首先是传感器，用于采集现场的各种物理量，如温度、压力、流量等，将这些物理量转换为电信号。其次是控制器，如可编程逻辑控制器（PLC）或分布式控制系统（DCS），它们根据预设的程序对采集到的信号进行分析和处理，发出控制指令^[1]。接着是执行器，如电机、电磁阀等，根据控制器的指令完成具体的动作。此外，还包括通信网络，用于实现系统内各设备之间的数据传输和信息交互，以及人机界面（HMI），用于操作人员对系统的监控与操作。这些部分相互协作，共同实现电气自动化系统的自动化控制功能。

（二）电气自动化系统的发展趋势

随着科技的不断进步，电气自动化系统呈现出多维度的发展

趋势。一方面，智能化成为核心发展方向，借助人工智能技术，系统能够实现自适应控制、故障诊断与预测性维护，提高系统的可靠性和运行效率^[2]。另一方面，网络化趋势愈发明显，工业物联网（IIoT）的兴起使得设备之间的互联互通更加便捷，数据共享与远程监控成为常态。同时，集成化也在不断推进，系统功能更加集中，模块化设计使得系统的扩展与升级更加灵活。此外，对节能环保的要求越来越高，通过优化控制策略和采用高效节能设备，降低能耗，减少对环境的影响，成为电气自动化系统发展的重要考量因素。

二、变频器的基本原理与功能

（一）变频器的工作原理

变频器是一种通过改变电源频率来控制电动机转速的电力电子设备。其工作原理基于交流-直流-交流（AC-DC-AC）的变

流过程。首先，整流电路将输入的交流电转换为直流电，然后通过中间直流环节进行滤波和储能，最后逆变电路将直流电转换为频率和幅值可调的交流电，供给电动机。通过调节逆变电路中开关器件的导通和关断时间，改变输出交流电的频率和电压，从而实现了对电动机的无级调速。这种调速方式不仅能够精确控制电动机的转速，还能有效降低启动电流，减少机械冲击，提高系统的可靠性和使用寿命。

（二）变频器的主要功能与应用场景

变频器的主要功能包括电机调速、软启动、节能控制和保护功能。通过调节输出频率，可实现电机的无级调速，满足不同负载对转速的要求；软启动功能可降低电机启动电流，减少对电网和机械系统的冲击；节能控制功能可根据负载需求自动调节电机功率，降低能耗；保护功能可实现过载、过压、欠压等保护，提高系统安全性。变频器广泛应用于工业领域，如风机、水泵的调速节能，传送带的调速控制，机床的主轴驱动等，还可用于电梯的平稳运行控制和空调系统的变频调速，为各行业提供了高效、节能的解决方案^[3]。

三、变频器在电气自动化系统中的应用

（一）变频器在电机控制中的应用

1. 电机调速与节能

变频器通过调节电机的输入频率和电压，实现对电机转速的精确控制，从而达到节能的目的。在风机、水泵等设备中，变频器可以根据实际负载需求调整电机转速，避免电机在高转速下运行导致的能耗浪费。例如，当风机的风量需求降低时，变频器可以降低电机转速，从而显著减少电机的能耗。此外，变频器的节能效果还体现在其能够根据负载的变化动态调整电机的功率输出，进一步提高系统的能效。

2. 电机软启动与保护

变频器的软启动功能通过逐步升高输出电压和频率，使电机逐渐达到额定转速，从而避免启动时的瞬间大电流冲击。这种启动方式不仅可以减少对电网的冲击，还能降低电机的机械磨损，延长电机的使用寿命。此外，变频器还具备多种保护功能，如过载保护、过热保护等，能够实时监测电机的运行状态，确保电机在安全范围内运行^[4]。通过这些保护功能，变频器可以有效防止电机因过载或过热而损坏，提高系统的可靠性和稳定性。

（二）变频器在PLC控制中的应用

1. PLC与变频器的通信方式

PLC与变频器之间的通信方式多样，主要包括模拟量控制、数字量控制、RS-485通信以及现场总线通信。模拟量控制通过PLC的模拟量输出模块发送0~10V电压信号或4~20mA电流信号至变频器，控制其输出频率，这种方式简单但需注意阻抗匹配。数字量控制则利用PLC的数字输出端口，通过控制变频器的RUN和STOP端子实现电机的启动与停止，还可发送数字信号选择预设频率档位。RS-485通信支持点对点和多点连接，结合Modbus-RTU协议，PLC可集中管理最多30台变频器^[5]。现场总

线通信如CC-Link、Profibus DP等，具有通讯速度快、距离远、可连接更多变频器等优点。

2. 基于PLC的变频器控制策略

基于PLC的变频器控制策略涵盖开环控制、闭环控制、PID控制和多机协同控制。开环控制中，PLC依据预设程序直接向变频器发送指令，调节电机转速和转矩，适用于精度要求不高的场景^[6]。闭环控制结合传感器实时反馈，如在恒压供水系统中，PLC根据压力传感器信号调节变频器输出，确保供水压力恒定。PID控制通过PID算法实现精确控制，如在温度控制系统中，PLC根据温度传感器反馈，调节变频器输出频率，精确控制温度。多机协同控制则通过通信协议，使PLC同时控制多台变频器，实现多台电机的同步运行，如自动化生产线上的输送带同步控制。

四、变频器的技术管理

（一）变频器的选型与配置

1. 选型原则与依据

变频器的选型需要综合考虑多方面因素，以确保其能够满足工艺要求并实现最佳性价比。首先，需明确机械设备的类型、负载转矩特性、调速范围、启动转矩、静态速度精度及使用环境等要求。在技术参数方面，重点关注电机的实际工作电流，变频器的输出电流必须大于电机的实际工作电流^[7]。此外，还需考虑负载类型，如恒转矩负载或风机、泵类负载，并根据负载特性选择合适的变频器型号。环境因素如温度、湿度、防护等级以及电磁兼容性标准也会影响选型。

2. 配置方案与优化

变频器的配置方案应根据具体应用需求进行优化。在配置时，需考虑变频器与电机之间的电缆长度，若电缆过长，可能需要配置输出电抗器以避免杂散电容对变频器工作的影响。对于需要高可靠性的场合，可在变频器与电源之间配置熔断器和隔离开关，以保护变频器免受内部短路的损害。在多台电机并联运行时，要确保变频器到各电机的电缆长度总和在变频器允许范围内。此外，针对特殊应用环境，如高海拔、高温或高湿度等，可能需要对变频器进行降容处理，或选择更高防护等级的型号。通过这些优化措施，可以提高变频器系统的稳定性和运行效率^[8]。

（二）变频器的安装与调试

1. 安装环境要求

变频器的安装环境对其性能和使用寿命有着重要影响。首先，安装位置应选择在通风良好、温度适宜的场所，通常要求环境温度在-10℃至40℃之间，相对湿度不超过90%（无凝露），以确保变频器的散热效果和电气性能。此外，应避免将变频器安装在有腐蚀性气体、粉尘较多或强电磁干扰的环境中，以免影响其正常工作。安装时还需注意变频器的周围空间，为其留出足够的散热空间和维护通道，一般要求变频器与周围墙壁或其他设备之间保持至少100mm的距离。同时，变频器的安装方式应符合其产品说明书的要求，通常采用垂直安装，以保证散热器的散热效果最佳。

2. 调试方法与步骤

变频器的调试是确保其正常运行的关键环节。调试前，需仔细检查变频器的接线是否正确，包括电源线、控制线和电机线的连接是否牢固且符合要求。调试时，首先进行空载调试，通过变频器的操作面板或外部控制设备设置基本参数，如电机额定电压、额定频率、额定电流等，并进行低速运行测试，观察变频器的输出电压、频率和电流是否正常。接着进行负载调试，逐步增加电机的负载，检查电机的启动、运行和停止是否平稳，同时监测变频器的输出参数和电机的运行状态，确保无异常振动、噪音和过热现象。在调试过程中，还需根据实际运行情况进行参数优化，如调整加减速时间、转矩补偿等参数，以达到最佳的运行效果^[9]。

（三）变频器的维护与故障处理

1. 日常维护与保养措施

变频器的日常维护与保养是确保其长期稳定运行的关键。首先，应定期检查变频器的通风状况，清理滤网和散热器上的灰尘，防止散热不良导致过热。检查变频器的外观，包括接线端子是否松动、是否有烧焦或腐蚀迹象。定期检查控制柜内的电气元件，确保其接触良好、无异常发热。同时，检查变频器的运行参数，如输出电压、电流和频率，确保其在正常范围内。建议每季度进行一次全面检查，包括紧固所有螺丝和接线端子，检查接地线是否牢固。此外，应保持变频器周围环境的清洁和干燥，避免灰尘和水分进入设备内部。通过这些日常维护措施，可以有效延长变频器的使用寿命并减少故障发生率。

2. 常见故障分析与处理方法

变频器在运行过程中可能会出现一些常见故障，及时准确地

分析和处理这些故障至关重要。例如，当变频器显示过热故障时，可能是散热器堵塞或冷却风扇故障，应清理散热器并检查风扇是否正常运转^[10]。若出现过流故障，可能是负载过大或电机短路，需检查电机负载是否在额定范围内，并检测电机绕组是否短路。对于欠压故障，应检查电源电压是否过低或电源接触不良。参数设置错误也可能导致变频器无法正常工作，此时需重新核对参数设置是否符合电机和负载的要求。在处理故障时，应先切断电源，确保安全，然后根据变频器的故障代码进行排查和修复。定期记录变频器的运行数据和故障信息，有助于分析故障原因并采取预防措施。

五、总结

本文深入探讨了变频器在电气自动化系统中的应用及其技术管理。变频器作为一种关键的电气设备，通过调节电机转速实现节能与高效控制，广泛应用于电机调速、PLC控制等领域。在技术管理方面，从选型配置到安装调试，再到日常维护与故障处理，每一个环节都至关重要。合理的选型与配置能够确保变频器的性能与系统需求相匹配；良好的安装调试可保障设备的稳定运行；而有效的维护与及时的故障处理则能延长设备寿命，降低运行成本。随着电气自动化技术的不断发展，变频器的应用将更加广泛，其技术管理也将更加精细化和智能化，为工业自动化的发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 张杰. 论变频器在电气自动化控制中的应用——以中央空调系统为例 [J]. 数字化用户, 2017, 23(52): 70.
- [2] 丁菊萍. PLC 与变频器在电气设备自动化控制中的应用 [J]. 电力设备管理, 2023(6): 130–132.
- [3] 韩冰. 变频器在集中供热电气自动化控制中的应用分析 [J]. 建筑·建材·装饰, 2020(15): 127–128.
- [4] 李庆华. PLC 与变频器在自动化控制系统中的应用 [J]. 数字化用户, 2018, 24(17): 73.
- [5] 韩名晓. PLC 与变频器在自动化控制系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2021, 38(7): 184–185.
- [6] 董晓佩. 浅谈电力系统中的电气自动化技术 [J]. 房地产导刊, 2015(22): 232–232.
- [7] 李宏. 探讨电力系统中的电气自动化 [J]. 城市建设理论研究（电子版）, 2015, 5(13): 1129–1130.
- [8] 崔鹏琨. 电力系统中电气自动化技术的探索 [J]. 城市建设理论研究（电子版）, 2013(33).
- [9] 郑维扬. 试论电力系统中运用电气自动化控制技术 [J]. 建材与装饰, 2013(25): 248–249.
- [10] 李鹰. 变频器调速技术在电气自动化控制中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(8): 384–385.

内部审计在新能源企业 ESG 治理结构中的嵌入路径研究

杜雪芬

内蒙古能源集团有限公司，内蒙古 呼和浩特 010000

DOI: 10.61369/ME.2024070010

摘 要： 在“双碳”战略背景下，新能源企业日益成为推动绿色低碳转型的关键力量。ESG（环境、社会与治理）治理结构作为衡量企业可持续发展水平的重要制度安排，对新能源企业的战略落地与风险管理提出更高要求。内部审计因其独立性与专业性，在支撑企业 ESG 治理质量提升方面具有独特优势。本文围绕内部审计嵌入新能源企业 ESG 治理结构的路径展开研究，系统分析当前嵌入过程中的职能割裂、能力错配、规范缺失等现实困境，提出构建 ESG 导向的审计框架、完善组织协同机制、强化审计专业能力、推动数字化赋能与健全审计成果应用体系等路径建议。研究认为，推动内部审计与 ESG 治理的深度融合，有助于提升新能源企业 ESG 信息的可靠性与治理执行力，构建更具透明性与韧性的可持续发展体系。

关 键 词： 内部审计；新能源企业；ESG 治理；可持续发展

Research on the Integration Path of Internal Audit into the ESG Governance Structure of New Energy Enterprises

Du Xuefen

Inner Mongolia Energy Group Co., Ltd. Hohhot, Inner Mongolia 010000

Abstract： In the context of the "dual carbon" strategy, new energy enterprises are increasingly becoming a key force driving green and low-carbon transformation. The ESG (Environmental, Social, and Governance) governance structure, as an important institutional arrangement to measure the level of sustainable development of enterprises, places higher demands on the strategic implementation and risk management of new energy enterprises. Internal audit, due to its independence and professionalism, has unique advantages in supporting the improvement of corporate ESG governance quality. This article focuses on the path of integrating internal audits into the ESG governance structure of new energy enterprises. It systematically analyzes the practical difficulties such as functional fragmentation, capability mismatch, and lack of norms in the current integration process. The article proposes path suggestions such as constructing an ESG-oriented audit framework, improving organizational collaboration mechanisms, strengthening audit professional capabilities, promoting digital empowerment, and improving the application system of audit results. The research believes that promoting the deep integration of internal audit and ESG governance will help improve the reliability and governance execution of ESG information in new energy enterprises, and build a more transparent and resilient sustainable development system.

Keywords： internal audit; new energy enterprises; ESG governance; sustainable development

引言

在“双碳”战略驱动下，新能源企业正逐步成为实现绿色低碳转型的核心力量。与此同时，ESG（环境、社会与治理）治理理念的广泛推广，对企业在战略执行、风险控制和信息披露等方面提出了更高要求^[1]。ESG 治理不仅是政策响应和市场需求的体现，更是企业构建可持续竞争优势的重要制度保障。在此背景下，内部审计作为企业内部控制与风险管理的重要支撑，其作用正由传统财务监督拓展至涵盖 ESG 各维度的全面监督与价值引导。尽管如此，当前新能源企业在推动 ESG 治理体系建设过程中，内部审计普遍存在嵌入机制不清、职能边界模糊、专业能力不足等问题，难以有效发挥其在 ESG 治理中的监督和赋能作用。在企业治理结构日益复杂、ESG 议题高度专业化的趋势下，如何重塑内部审计在 ESG 治理中的制度定位，并构建高效协同、专业融合、技术赋能的嵌入路径，成为提升新能源企业可持续治理能力的关键命题。基于此，本文聚焦内部审计嵌入新能源企业 ESG 治理结构的现实困境与制度路径，旨在提出具备可行性与适配性的策略建议，推动企业内部监督机制与 ESG 治理深度融合，为构建韧性强、透明度高的可持续发展体系提供理论支持与实践指引。

一、相关概念界定与理论基础

（一）内部审计的内涵与职能边界

内部审计是企业内部控制系统中的关键组成部分，其基本职能包括对风险管理、控制与治理流程的独立评估与咨询，旨在提升组织运作效率与价值创造能力。在新能源企业面临高风险与强监管背景下，内部审计逐步由财务导向向战略导向转变，其功能已不再局限于财务合规检查，而扩展至包括环境绩效、社会责任履行、治理结构优化在内的综合监督范围。内部审计具备独立性、专业性与系统性三重特征，使其具备识别 ESG 风险、验证可持续数据、促进战略对齐的能力，成为企业 ESG 治理结构有效运行的保障力量^[2]。

（二）ESG 治理结构的构成与运作逻辑

ESG 治理结构是指将环境保护、社会责任与公司治理三大维度制度化地嵌入企业治理体系的系统安排，其核心在于将可持续发展理念内化为企业战略决策与运营行为的规范标准。该结构包括设立专责治理机构（如 ESG 委员会）、明确战略导向、建立绩效评价机制、推动透明披露等要素，形成目标设定、行为约束与信息反馈的闭环治理机制。在新能源企业中，ESG 治理不仅回应市场对绿色透明运营的要求，更直接关系到政策合规、资本获取与品牌声誉，是企业高质量发展的基础制度平台。

（三）利益相关者理论对 ESG 治理的支撑作用

利益相关者理论强调企业作为多元利益主体互动的平台，必须在价值创造中平衡股东、员工、客户、社区、环境等各方诉求。这一理论为 ESG 治理提供了正当性基础，即企业不应仅以利润最大化为目标，而需全面回应环境保护与社会责任。内部审计在此框架下的职责不仅在于保障公司治理的规范性，更应通过审计程序识别企业在环境与社会绩效方面的偏差与风险，推动多元价值协调，提升企业责任履行的可检验性与透明度^[3]。

（四）三道防线模型中内部审计的制度定位

三道防线模型是现代企业风险管理体系的重要理论依据。该模型将组织防控分为三类职责层级：一线为业务运营控制，二线为风险与合规职能，三线为内部审计。内部审计作为第三道防线，职责在于独立监督和评价前两道防线运行的有效性，确保风险应对措施与治理机制合规运行。ESG 治理作为横跨战略、合规与运营的综合性议题，更需三道防线协同运行。内部审计处于制度末端，能够从整体视角出发审视 ESG 流程设计、信息披露、责任落实等环节，从而为企业提供具有系统性、可操作性和前瞻性的监督反馈。

二、内部审计嵌入新能源企业 ESG 治理的现实困境

（一）审计边界模糊，治理职能碎片化

新能源企业在构建 ESG 治理结构过程中，往往设立了专责机构如 ESG 委员会、碳中和办公室、可持续发展部门等，但这些机构与内部审计部门之间缺乏明确的权责划分与协同机制，导致治理职能存在重复、遗漏或空转现象。内部审计仍以传统财务和合

规为主，对 ESG 风险的识别与干预能力有限，在组织架构中处于相对边缘的地位，缺乏在战略层面发声与监督的制度通道。这种职能割裂造成 ESG 事项审计责任不清，审计边界模糊，制约了内部审计对企业 ESG 目标实现过程的有效介入。

（二）知识体系断层，审计能力难以匹配 ESG 治理需求

ESG 治理涉及环境科学、碳金融、社会伦理与治理监管等多个知识领域，内部审计人员普遍缺乏对这些新兴领域的系统认知与实践经验，无法对专业性强的数据、指标和流程做出有效判断。在碳信息披露、绿色项目评估、社会影响指标审计等环节，传统审计方法难以适用，审计团队难以识别其中潜在的误报、夸大或操纵风险，甚至难以准确解读企业可持续发展目标下的绩效数据。这种专业能力与治理需求之间的错位，使内部审计难以胜任对 ESG 系统性风险的识别与评估职责。

（三）审计规范滞后，ESG 审计缺乏操作指引

当前国内尚未出台专门针对 ESG 领域的系统化内部审计指引或审计准则，审计部门在设计审计范围、评价标准和实施程序时缺乏统一参照。企业各自为政、因企制宜的审计实践，容易导致审计内容随意、结果主观、深度不足，难以满足资本市场和监管机构对 ESG 披露的真实性、可比性和一致性要求。在实践中，ESG 审计往往流于形式，无法提供具有审计价值的治理建议，也无法对高风险领域如碳资产核算、社会事件应对等实现有效监控，降低了审计工作的战略贡献度^[4]。

（四）数据系统封闭，信息支持难以满足审计穿透力

ESG 数据往往分布于企业多个业务部门甚至外包平台，信息系统未实现标准化整合，数据采集缺乏统一格式与接口，审计部门难以及时获取一手资料。部分 ESG 关键数据如排放量、员工多样性、供应链风险等，缺乏可信的数据源和审计轨迹，增加了验证难度。此外，由于数据治理机制不完善，数据冗余、错漏与不可追溯现象较为普遍，内部审计难以从中提炼出可靠的审计证据，制约了其对 ESG 战略执行效果的实证评估与风险诊断能力。

（五）治理反馈机制薄弱，审计成果难以落地转化

在审计成果的应用环节，部分新能源企业缺乏将 ESG 审计结果纳入管理决策与战略修正的制度机制，审计报告常常停留于表层描述，缺乏定量分析与绩效建议。管理层对 ESG 审计建议采纳率不高，整改反馈流于形式，导致审计发现难以形成闭环治理逻辑。此外，审计结果未能有效传导至董事会及 ESG 责任主体，削弱了其在企业治理中的战略影响力，长远来看，将不利于构建以内部监督为支撑的可持续治理文化。

三、内部审计嵌入 ESG 治理的路径构建

（一）构建 ESG 导向的审计框架体系

内部审计有效嵌入 ESG 治理的首要前提在于建立系统化、标准化的审计框架，将 ESG 审计纳入年度审计计划的核心范畴。该框架需以 ESG 关键议题为审计对象，涵盖环境合规性检查、社会责任履约情况审查、治理结构透明度评估等内容。审计目标应聚焦于识别 ESG 战略偏差、揭示潜在风险并提出改进建议，形成

由指标导向、风险导向与战略导向相融合的审计逻辑。制度层面需参照 GRI、SASB、ISSB 等权威披露准则，细化审计流程与技术操作标准，形成明确的审计事项清单、证据获取方法和评价矩阵。框架设计应体现差异化与行业适配，充分考虑新能源企业特有的碳排放核算、绿色项目执行等核心环节，增强审计对 ESG 治理全流程的渗透力与适用性^[9]。

（二）推动组织架构协同，打破职能壁垒

实现内部审计对 ESG 治理的嵌入，必须重塑企业内部的职能协作机制，提升审计职能在治理体系中的地位与联动性。审计部门需与 ESG 委员会、战略规划部、法务与合规部门建立制度化沟通机制，实现信息共享与风险共识。在组织架构设计中，应赋予内部审计对 ESG 治理事务的主动监督权、调查权与建议权，并明确其在重大可持续事项中的审计参与职责。通过设立 ESG 审计联络岗，负责协调部门间的数据接口、资源配置和执行配合，打通治理链条中的“审计介入通道”，形成跨部门审计网络，提高审计介入的时效性和组织穿透力。

（三）强化审计人员能力建设与跨界融合

提升内部审计队伍的综合能力是构建 ESG 审计能力体系的关键基础。人员培养应从单一财务审计能力向复合型 ESG 知识体系转型，涵盖环境管理、能源政策、社会影响评估、公司治理法规等内容。企业应推动审计人员参与 GRI、ISO 14001、SASB 等专业课程与实操训练，构建“具备审计思维的可持续专家”和“掌握 ESG 逻辑的审计人员”双向融合的复合型审计团队。在人员配置上，可通过内外部联合机制引入环境工程师、合规顾问、ESG 数据分析师等专业角色，参与审计项目方案设计与结果解释，构建知识互补、视角多元的审计技术支撑体系。

（四）推进数字化审计，增强 ESG 数据处理能力

数字化能力是提升 ESG 审计效率与深度的核心技术支柱。内部审计部门应基于企业现有信息系统，搭建 ESG 审计数据平台，实现 ESG 数据的统一归集、格式化处理与动态更新。借助 AI 识别技术、大数据挖掘算法与区块链追溯机制，提升对碳排放、绿色

投资、供应链道德风险等非财务指标的实时分析能力。通过嵌入式审计工具，对环境合规情况进行事前监控，对社会绩效指标实现周期性趋势评估，推动从静态报告型审计向实时分析型审计转型^[6]。技术系统还应支持对审计流程全程记录与可视化呈现，增强 ESG 审计的可追溯性、可验证性与内部透明度。

（五）健全审计成果应用机制，构建闭环治理体系

内部审计成果能否对 ESG 治理产生实质性影响，关键在于其报告机制与结果运用是否高效对接治理决策链条。审计报告应以问题导向为核心，聚焦关键绩效偏差、合规漏洞与战略失配，并提供具有操作性的整改建议与实施优先级排序。企业应建立审计成果对接董事会 ESG 决策程序的制度通道，推动审计结果纳入战略修正、资源配置与责任考核体系。整改过程应设定明确期限与负责人，并通过追踪审计机制对执行情况进行动态跟踪。在信息披露层面，审计结论可作为 ESG 报告的重要数据支撑，增强外部投资者与监管机构对企业 ESG 实践的信任基础，进一步提升内部审计对企业可持续发展的价值贡献。

四、结语

内部审计作为新能源企业 ESG 治理的重要监督机制，凭借其独立性、专业性与系统性，能够有效提升企业环境、社会与治理各维度的透明度与执行力。围绕 ESG 治理目标，构建审计导向框架、推动组织协同、加强能力建设与技术支持，有助于打破传统审计职能边界，实现从财务合规向战略可持续转型。同时，健全审计成果应用机制，确保治理建议与整改措施真正融入企业决策链条，是实现 ESG 审计价值转化的关键。通过嵌入式、融合化与数字化路径的协同推进，内部审计将成为引导新能源企业迈向高质量发展与可持续价值创造的重要内在力量。未来，随着 ESG 监管标准与信息技术的不断演进，内部审计将在推动绿色治理体系现代化中展现更为深远的制度价值与实践潜力。

参考文献

- [1] 袁敏. 内部审计在公司可持续发展及 ESG 报告中的角色研究 [J]. 中国内部审计, 2024, (09): 15–20.
- [2] 徐佩佩. 企业内部审计融合 ESG 的优化研究 [J]. 国际商务财会, 2023, (17): 67–70.
- [3] 杨婧, 赵瑞萱. 内部审计助力能源企业高质量发展研究 [J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(08): 122–128.
- [4] 肖宏浩. ESG 视角下新能源发电企业绩效评价优化研究 [D]. 云南师范大学, 2023.002160.
- [5] 杨思祺. 内部审计在我国企业 ESG 中的作用及实现路径研究 [D]. 山东财经大学, 2023.
- [6] 薛先志, 蒋懿, 王圣樱. ESG 视角下的电网新兴产业单位内部审计监管体系研究 [J]. 大众用电, 2024, 39(10): 70–72.

水利水电工程管理中存在的问题及对策

罗彦文

湖南华凌工程建设有限公司, 湖南 长沙 410000

DOI: 10.61369/ME.2024070018

摘要： 水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，在推动经济发展和改善生态环境方面具有举足轻重的作用。它不仅为社会提供了稳定的电力资源，促进了工业和农业的发展，而且在防洪、灌溉、供水等方面发挥着不可替代的作用，对维护生态平衡和促进区域可持续发展具有深远影响。本文通过深入分析水利水电工程管理中存在的主要问题，提出了相应的对策和建议，旨在提高项目管理的效率和质量，确保工程的顺利实施与可持续发展。

关键词： 水利水电工程；项目管理；问题分析；对策建议；管理效率

Problems and Countermeasures in the Management of Water Conservancy and Hydropower Projects

Luo Yanwen

Hunan Hualing Engineering Construction Co., LTD. Changsha, Hunan 410000

Abstract： Water conservancy and hydropower projects, as an important part of national infrastructure construction, play a crucial role in promoting economic development and improving the ecological environment. It not only provides stable power resources for society, promotes the development of industry and agriculture, but also plays an irreplaceable role in flood control, irrigation, water supply and other aspects, and has a profound impact on maintaining ecological balance and promoting regional sustainable development. This article, through in-depth analysis of the main problems existing in the management of water conservancy and hydropower projects, puts forward corresponding countermeasures and suggestions, aiming to improve the efficiency and quality of project management and ensure the smooth implementation and sustainable development of the projects.

Keywords： water conservancy and hydropower engineering; project management; problem analysis; countermeasures and suggestions; management efficiency

引言

水利水电工程是现代社会发展中必不可少的一环，尤其于能源应用、灌溉管理、防洪抢险等方面，发挥着关键效用。随着这类项目规模扩大以及技术复杂特性增强，工程管理面临大量挑战，现有的管理模式及执行进程当中，存在不少棘手问题，急切要求相关部门和单位高度留意并加以革新。本文将水利水电工程管理中的主要问题为开端，结合真实案例，给出切实管用的对策建议，增进水利水电工程管理水平。

一、项目管理中存在的主要问题

（一）项目规划与设计不完善

在部分水利水电类的项目中，前期的规划设计往往存有显著缺陷，未开展充分的可行性探究，欠缺对项目的全面评估考量。项目可行性研究报告存在内容短板，未对环境影响、社会效益以及地方经济做全面剖析，导致后期项目执行阶段需时常调整方案，这既提升了项目实施的难度，也加大了开支。在设计起始阶

段，因为未充分考量实际施工的情形，设计方案的灵活性欠佳，实施进程中频繁出现与实际情况不一致的状况，引发了无谓的返工操作与资源浪费。

（二）资金管理不规范

水利水电工程项目中，资金管理问题极为突显，尤其是在项目周期较长、投资规模大、资金消耗巨量的时候，合理地调度和管理资金尤为关键。部分项目由于资金使用审批流程不透明，引发资金分配的不合理性，影响了工程的推进进程^[1]。部分项目在

资金管理上未建立有效监督机制,无法实时跟进资金使用情形,甚至冒出资本金断裂的风险,造成工程停滞或推进缓慢。某些工程项目未进行科学合理的资金预算与调度,引发资金呈现较大缺口,从而影响施工的质量与整体工期。

（三）工程质量控制不到位

工程质量堪称水利水电项目的命脉,若质量控制不过关,可能会引发安全事故,进而影响工程的使用时长。部分项目由于质量管理体系不完备,未达成全程监测与严格约束,导致施工进度中的质量方面隐患。施工单位材料采购时未严格做好把关,选用的材料不达标;在施工操作开展的阶段,部分环节实施不到位,甚至出现了疏漏情形;施工现场监管工作落实不到位,未能及时发现并处理问题,这些因素造成工程质量不稳定的局面,甚至埋下安全隐患,情况严重时可能对项目整体安全构成威胁。

（四）人力资源管理不足

水利水电工程管理是一个系统性的工作,在大型工程中涉及到政府部门、设计单位、施工单位、监理单位以及相关行业协会等多方面的合作。如果管理体系不健全,各方的职责不清晰,容易产生管理混乱和责任推诿的问题。水利水电工程建设关联大量专业技术人员与工人。某些项目在人力资源配置上有明显的不足,部分项目的技术人员流动较为剧烈,导致施工阶段专业人才出现短缺,无法保障项目的技术质量水平。工人团体的素质参差不齐,部分员工缺少必需的培训及专业能力,难以适应复杂施工的实际环境。这些问题直接左右了项目的进度和质量,甚至存在引发安全事故的潜在可能。

二、存在问题的原因分析

（一）项目管理体系不完善

管理人员对水利行业的法律法规理解不深、执行力不够既没接受过专业知识教育,缺少水利工程建设经验和应有的理论技能,缺乏从业资格基本素质;在项目多的情况下,部门人员兼多个项目职务,苦于分身乏力,要求其认真细致的对某一项目实施全过程监督显得心力不足。众多水利水电项目的管理体系仍滞留在传统模式,没有现代化的管理理念及技术手段。在项目管理的工作阶段,项目管理人员多依靠经验作出决策,欠缺科学、成体系的管理工具及方法^[2]。该管理方式让项目执行进程中频繁有协调不足、效率低下的问题出现,项目任务分派不精准、进度管理不得力、资源调度不恰当等,此类问题皆会致使项目进展滞缓,甚至引起工期耽搁。

（二）技术型人才短缺

技术密集特征显著的项目有水利水电工程,需大量专业技术人员提供支持并进行管理。某些企业在技术人员的筛选、培训和储备方面存在明显不足,造成项目执行阶段出现技术力量匮乏的状况。部分企业在技术人员引进及培养的投入不足,造成工程实施过程中缺乏足量的技术帮助,难以应对复杂的设计、施工及调试工作。伴随项目的持续拓展与技术的迅猛进步,不少项目管理工作者未能及时掌握新技术与工艺,引起技术更新相对滞后,对

项目进度及质量造成影响。

（三）政策与监管执行不到位

在部分地域,水利水电项目在政策执行及监管方面存在明显破绽,造成项目推进受阻。因当地监管机制存在缺陷,某些项目实施过程中未得到充分的监督稽查,引发资金流通、进度掌控、质量把控等关键环节缺少有效监督。项目建设当中可能存在资金滥用、资源浪费、质量有隐患等情形,进一步对工程的完工质量和后期运行效果形成影响^[3]。部分项目的资金运用与资源分配缺少透明性,引起工程进度滞后,甚至停工。

三、改进水利水电工程管理的对策与建议

针对上述问题,必须采取一系列有效的措施,以提升水利水电工程管理的水平,确保项目的顺利进行。

（一）加强前期规划与设计

为助力水利水电项目顺利实施完成,前期的可行性研究意义重大。可行性研究既需要分析项目的经济性和技术性,还需全面考量自然环境、社会效应以及项目的长远可持续性。凭借细致入微的可行性研究,可保障项目规划与设计与实际需求相符,防止资源的无谓浪费和非必要的调整。在研究进行阶段,规划人员跟工程师要与各相关部门开展密切沟通,采集全面的环境、地质、水文方面数据,进而为设计提供可靠的佐证。

当进行设计阶段,必须充分斟酌环保、社会影响等多方面事宜。水利水电项目一般涉及大规模资源开发,可能会对当地生态环境、居民生活和社会结构形成一定的影响。设计方案不只要考量技术与经济方面的可行性,还应对项目给周围环境及社会造成的潜在影响加以评估,采取有效的消解办法,减少负面后果。设计方案应兼具可操作性与灵活性,以便在工程实施时出现变更可迅速进行调整,保证项目得以顺利开展,突发的自然灾害、政策改变或资金调整等情形,可能都会要求设计方案做相应的优化或调整^[4]。灵活性与可调整性为设计阶段必须具备之特性,依托科学合理的设计及精心谋划,可保证水利水电项目实施达成预期功效,助力项目实现预期成功。

（二）规范资金管理

资金管理是实现项目顺利实施的关键步骤之一。为保障项目可按时、高质量达成,必须搭建一个科学又高效的资金管理体系。明晰项目资金使用的审批程序,保证每一笔资金支出都历经严格审批与审核,审批流程当清澈透明,阻止一切潜在的滥用事例,需保证资金使用跟项目实际需求及进度相协调。

在资金管理实施期间,资金流动的实时监管与跟踪必不可少,项目方须设立专门的资金监管群组。采用定期的审计与监控手段,保障资金运用契合预算规定,并马上发现可能会有资金浪费或滥用行径。资金流动应实现透明化,各项支出跟收支记录都应公开透明,利于各方实施监督。运用现代化的资金管理工具及软件,增加资金流动的效率,保障资金实现高效运用,降低非必要的成本花费。

（三）加强质量控制与技术支持

增强工程质量把控，完善质量管理体系必不可少。厘清质量控制的各项责任及标准，保证各环节均契合规定的质量标准。在项目落实的期间中，成立专项的质量检查群组，实施全程监督是必须的步骤。此团队应定时对施工期间的各项工作开展检查，马上发觉并纠正可能出现的质量问题，防止质量隐患逐步堆积，保证项目得以顺利实施。

项目团队应推进技术培训工作，增进管理人员的技术水准与应对突发问题的能力。凭借定期组织的技术培训跟讲座，项目管理人员可掌握最新的施工技术 with 行业标准，从而更灵活地应对现场技术困境。技术人员理应拥有快速反应及解决问题的能力，及时应对施工期间可能出现的突发事件。为进一步提高质量把控的水平，可以引入高级的科技手段，如智能监控设施、大数据剖析手段等。这些技术手段可实时对施工现场各项数据开展监测，如温度、湿度、材料的使用情况之类，借助数据分析迅速察觉潜在隐患，让工程质量始终维持高要求。运用多维度的质量把控举措，可较好地守护工程的质量，实现项目按期、合质量交付。

（四）完善人力资源管理

为达成项目顺畅推进及高质量落实，必须进一步加强技术人员的招聘培训，提高项目管理团队的综合素养。招聘时应着重挑选具备相关经验与技术背景的专业人才，确认他们可胜任项目的各项技术需求。面对现有的项目经理及技术人员，应当阶段性安排培训与技术交流，进而提升其专业能力与管理能力。依托技术交流活动，团队成员可交流最新行业技术、施工经验及应对问题的办法，增强团队的整体协同水平。

培养项目经理和技术人员需聚焦长期发展，不只是聚焦于当前项目需求，还应提前为未来工作挑战做好准备^[5]。按期开展培训、模拟实操和案例研讨，助力其更有效地应对复杂的项目管理 with 技术挑战。为保障项目稳定开展，还应构建一个稳定的人员流动机制，降低人员更换对项目推进进度的干扰。借助提供诱人的薪酬福利、职业成长契机和优质的工作条件，留住关键技术骨干，合理的人力规划与岗位替补机制，同样能让项目管理团队在人员流动时，仍旧实现高效运作，助力项目按时按质达成预期^[6]。

（五）加强政策与监管力度

为实现水利水电工程项目顺利实施效果，政府及相关监管部门需强化监管力度，保障项目建设契合国家与地方的法律法规。政府需依据工程特性制定科学且合理的政策，明确项目建设过程中牵涉的各项规格，保障各个环节均依照法律法规开展，杜绝出现违法违规的情形。在资金管理维度，监管部门应提升对资金流动的监控水平，防止资金挪用、滥用等违规举动，确保资金可投入工程实际所需，保障项目顺畅地推进下去^[7]。

从环保视角出发，水利水电项目对生态环境产生较为明显的影响，应当采取严密的环保办法，保证项目在施工和运营阶段不造成重大的环境破坏^[8]。监管部门将制定周全的环保监测计划，实时关注施工阶段的排放状况与环境作用，尽快采取矫正行动^[9]。监管部门还应拓展对施工安全的监管范围，保障施工单位严格落实安全生产规范，预防安全事故出现。凭借加大对各个环节的监管管控，保障项目高效规范地推进落实，且为项目的可持续发展搭建坚实基础^[10]。

表1 水利水电工程项目管理中的主要问题及频发原因分析

问题类型	主要原因	影响因素
项目规划与设计不足	前期可行性研究不充分	导致项目设计不合理，施工难度大
资金管理不规范	审批程序不透明，资金分配不合理	项目进展缓慢，甚至出现资金链断裂风险
工程质量控制不到位	质量管理体系不完善，施工监督不足	工程质量不稳定，可能影响工程使用安全
人力资源管理不足	人员流动频繁，技术人员不足	项目执行效率低，技术支持不足

四、总结

水利水电工程项目管理涉及领域宽、环节繁多，面临大量挑战，经深入剖析项目管理中的问题及成因，本文就加强前期规划、规范资金收支管理、强化质量标准控制、优化人力资源布局及完善政策法规监管等给出对策建议，只有持续增进管理水平、完善各套管理体系，方能让水利水电工程项目高效平稳地开展实施，最终实现社会与经济两方面效益最大化。

参考文献

[1]尹苗.水利水电工程管理中存在的问题及对策[J].户外装备,2023(1):219.
[2]侯国辉.水利水电工程管理中存在的问题及对策[J].农业科技与信息,2019,(14):116-117.
[3]唐海华.水利水电工程建设管理中存在的问题及其对策探究[J].南方农业,2019,13(18):179-180.
[4]曾宇静.水利水电工程造价管理中存在的问题及其解决对策研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2023(5):3.
[5]黄哲.现代化水利水电工程管理现状分析及其改进对策[J].水电水利,2023,7(8):31-33.
[6]邓百高.水利水电工程管理中存在的问题及对策[J].水上安全,2023,(04):167-169.
[7]张辉.水利水电工程建设管理中存在问题及对策研究[J].地下水,2021,43(03):281-282.
[8]赵玉玲.农田灌溉管理中存在的问题及对策[J].农业科技与信息,2021,(01):86-87.
[9]关功政,高静.浅谈水利水电工程管理中存在的问题及对策[J].建材与装饰,2020,(15):173-175.
[10]周魁,朱云川.水利水电工程管理中存在的问题及对策[J].河南科技,2020,(02):83-85.

智能采矿技术在深部资源开采中的应用与挑战

王安豪

江西乐矿能源集团, 江西省 景德镇 333000

DOI: 10.61369/ME.2024070020

摘要： 随着矿产资源的不断开采，浅层资源逐渐减少，深部资源的开采变得越来越重要。智能采矿技术作为现代矿业发展的重要方向，为深部资源的高效、安全、可持续开采提供了可能。本文首先介绍了智能采矿技术的定义和特点，然后分析了智能采矿技术在深部资源开采中的应用，包括自动化设备、远程监控系统、大数据分析和人工智能等。接着，本文探讨了智能采矿技术在深部资源开采中面临的挑战，如技术难题、成本投入、人员培训和环境影响等。最后，提出了相应的对策和建议，以期智能采矿技术在深部资源开采中的应用提供参考。

关键词： 智能采矿技术；深部资源；自动化；大数据

The Application and Challenges of Intelligent Mining Technology in Deep Resource Exploitation

Wang Anhao

Jiangxi Lekuang Energy Group, Jingdezhen, Jiangxi 333000

Abstract： With the continuous exploitation of mineral resources, shallow resources are gradually decreasing, and the exploitation of deep resources is becoming increasingly important. Intelligent mining technology, as an important direction of modern mining development, provides the possibility for the efficient, safe and sustainable mining of deep resources. This paper first introduces the definition and characteristics of intelligent mining technology, and then analyzes the application of intelligent mining technology in deep resource exploitation, including automated equipment, remote monitoring systems, big data analysis and artificial intelligence, etc. Then, this paper discusses the challenges faced by intelligent mining technology in deep resource exploitation, such as technical difficulties, cost input, personnel training and environmental impact, etc. Finally, corresponding countermeasures and suggestions were put forward, with the expectation of providing a reference for the application of intelligent mining technology in the exploitation of deep resources.

Keywords： intelligent mining technology; deep resources; automation; big data

引言

随着全球工业化进程的加快，矿产资源的需求日益增长，而浅层资源的开采难度和成本逐渐增加，深部资源的开采成为矿业发展的必然趋势。深部资源开采面临诸多挑战，如复杂的地质条件、高风险作业环境、资源回收率低等问题。智能采矿技术的应用，能够有效提升深部资源开采的效率和安全性，降低环境影响，实现资源的可持续利用。

一、深部资源开采的环境与挑战

（一）深部资源开采的地质环境特征

深部资源开采面临着极端的地质环境，其中最显著的特征是高温、高湿和高地应力。随着开采深度的不断增加，地温会逐渐升高，通常每向下深入100米，温度就会上升约3摄氏度。在数千米深的地下，温度甚至可能高达50-60摄氏度，甚至更高，这对于设备和人员都是巨大的考验。深部环境湿度高，加速设备腐蚀和故障。地应力随深度增加而增长，导致岩石变形、破裂，引

发岩爆等灾害，威胁开采安全。岩爆、突水、瓦斯等灾害风险增加，难以预测，带来安全风险。深部地质结构和矿体赋存条件复杂，岩石结构破碎、裂隙发育，矿体形态变化多端，增加了开采难度。深部矿产共生或伴生情况多，进一步增加开采和选冶的复杂性^[1]。

（二）深部资源开采的技术挑战

传统的采矿方法，如空场法、崩落法等，大多是针对浅部或中深部矿体开发的，其设计理念和工艺流程难以适应深部开采的极端环境。例如，传统的支护方法在高地应力环境下可能失效，

导致巷道变形、垮塌；传统的通风系统在高温、高湿环境下效率低下，难以有效降低工作面的温度和湿度。针对深部开采，需开发新采矿方法、工艺和设备，以提升效率和安全。设备必须在恶劣条件下稳定运行，这对材质、结构和密封性能提出挑战。深部开采设备维护难度大，成本高，因此需研发高可靠性、易维护的专用设备，并建立维护管理体系。深部开采还面临通风、降温、排水等技术难题，需综合运用多学科知识和技术解决。安全监测与预警技术要求更高，需建立完善监测系统和预警模型，融合多种先进技术，建立智能化安全管理平台^[2]。

（三）深部资源开采的经济挑战

深部资源开采的成本显著高于浅部开采。首先，深部开采需要投入更多的资金用于购买先进的设备、建设完善的配套设施，如通风系统、降温系统、排水系统等。其次，深部开采的运输成本、提升成本、通风成本、降温成本等运营成本也远高于浅部开采^[3]。此外，深部开采的设备损耗更快，维护成本也更高。深部资源开采成本上升，经济效益受压。投资风险高于浅部开采，勘探难度大，地质资料不确定性高，投资决策风险增加。开采周期长，资金时间成本和风险增加。安全风险高，事故经济损失和社会影响大。需谨慎评估和决策。深部开采需高素质专业人才，如采矿、地质、安全、机械工程师等，但人才培养体系不完善，人才储备不足。恶劣工作环境和高安全风险导致人才不愿从事相关工作。企业需投入资金培养和引进人才，进一步增加成本。

（四）深部资源开采的安全挑战

深部资源开采的作业环境极其恶劣，高温、高湿、高地应力、高噪音、高粉尘等恶劣条件对作业人员的身心健康构成了严重威胁。长时间在如此恶劣的环境下工作，作业人员容易疲劳、中暑、患职业病，甚至引发安全事故。深部开采的安全风险高于浅部，面临多种灾害如岩爆、突水和瓦斯爆炸，这些灾害复杂且难以预测，对作业人员生命安全构成威胁。深部开采事故的应急救援难度大，因为作业地点远离地表，通信条件差，救援设备难以展开，且救援通道易堵塞。恶劣环境如高温、高湿、缺氧也威胁救援人员安全。因此，深部资源开采需建立完善的应急救援体系和配备先进装备，以提升救援效率和成功率^[4]。

二、智能采矿技术在深部资源开采中的应用

（一）采矿设备自动化技术在深部开采中的应用

在深部资源开采中，无人化采矿设备的应用日益广泛，极大地提高了开采效率 and 安全性。无人驾驶矿车能够自主导航、自动避障，并在无人干预的情况下完成矿石的运输任务，有效降低了人员在高危环境中的暴露时间。凿岩机器人则能够替代人工进行钻孔作业，精确控制钻孔参数，提高钻孔效率和质量，同时避免了人工凿岩带来的安全风险和劳动强度。无人化采矿设备体系，包括无人化铲运机和装卸设备，预示着深部资源开采的未来。远程操控技术允许操作人员在地面控制中心远程操作深井下的设备，如挖掘机和装载机，减少人员风险，提升设备效率和维护。设备状态监测与故障诊断技术通过实时监控关键部件，利用传感器、信号处理和人工智能算法，实现故障预警和精确诊断，避免停产事故，降低维修成本，延长设备寿命，增强开采的经济性和安全性^[5]。

（二）采矿过程信息化技术在深部开采中的应用

矿山信息化管理系统是深部资源开采实现现代化管理的重要工具。该系统涵盖了生产调度、设备管理、人员定位等多个方面。生产调度模块可以根据实时生产数据，优化生产计划，协调各生产环节，提高生产效率。设备管理模块可以记录设备的基本信息、运行状态、维护记录等，实现设备的全生命周期管理。人员定位模块实时监测井下人员位置，确保安全，并助于紧急疏散。集成应用提升了矿山管理的数字化和智能化水平。监测和数据采集技术是获取关键信息的手段，通过传感器监测多种参数预防灾害。这些数据支撑安全管理。通信与网络技术是信息化、智能化的基础，确保信息可靠传输。有线通信提供稳定高速通道，无线通信用于定位和通话，工业以太网实现设备互联，构建网络平台。这些技术为信息化建设提供坚实基础^[6]。

（三）采矿决策智能化技术在深部开采中的应用

基于大数据的矿山安全生产预测预警技术是利用大数据分析技术，对海量的监测数据进行深入挖掘和分析，从而实现对矿山安全状况的预测和预警。通过对历史数据、实时数据、环境数据等多源数据的融合分析，可以识别出潜在的安全隐患和风险因素。机器学习和深度学习等人工智能技术可用于构建安全预测模型，预测未来安全状况并预警。这种技术有助于提前识别安全隐患，为预防措施争取时间，减少事故发生。人工智能优化的采矿方案通过综合分析矿体条件、地质构造等因素，利用智能算法寻找最佳采矿方案，提高开采效率、降低成本、确保安全。专家系统和智能决策支持系统是矿山管理决策的辅助工具，专家系统基于专家知识解决生产问题，智能决策支持系统通过数据处理和分析提供决策支持。两者结合可提供更全面、准确的决策信息，提升决策科学性和有效性^[7]。

（四）智能采矿技术在深部开采中的集成应用

构建智能化开采平台是实现深部资源开采智能化的关键。该平台需要集成采矿设备自动化技术、采矿过程信息化技术、采矿决策智能化技术等多个方面的技术成果。建立统一数据中心以集中存储和管理数据。开发应用软件集成多种功能并实现协同作业。构建可视化界面以实时监控和远程操控开采过程。智能化开采平台通过数据共享和协同控制技术支持深部资源开采。统一的数据标准和接口促进不同系统和设备间的数据交流。开发的协同控制算法使设备如无人驾驶矿车能根据凿岩机器人进度自动调整运输，从而提高开采效率，降低能耗，并优化开采过程。智能采矿技术的集成应用提升了开采的自动化、信息化和智能化水平，减少了人工干预，优化了资源配置，提高了资源利用率和决策的科学性。这些技术将推动矿业行业的革命性变革和转型升级^[8]。

三、智能采矿技术在深部资源开采中面临的挑战与对策

（一）技术层面的挑战与对策

深部开采面临着高温、高压、高湿、强腐蚀等极端恶劣的环境，这些环境因素对智能采矿设备的性能和可靠性提出了极高的要求。例如，高温会导致设备元器件性能下降甚至失效，高压会影响设备的密封性能和结构强度，高湿和腐蚀性气体会加速设备的老化和损坏。针对这些挑战，需要重点研发能够适应深部复

杂环境的智能采矿设备。深部开采设备应使用耐高温、高压、防腐材料，优化结构以提高可靠性和寿命。需加强散热设计，确保高温下正常工作。通信技术需应对信号衰减和电磁干扰，研究新技术如低频电磁波和光纤通信，优化网络架构，提升信号覆盖和稳定性。智能采矿技术产生的大数据需利用大数据和云计算技术进行挖掘和分析，建立高效数据管理系统，开发数据处理算法和挖掘模型，自动提取信息，优化开采过程和决策支持。智能采矿技术还需与现有工艺融合，优化和改造工艺，重新设计开采流程，升级设备，加强技术人员培训^[9]。

（二）经济层面的挑战与对策

智能采矿技术的研发和应用需要投入大量的资金，包括设备采购、系统开发、维护升级等方面的成本。这些成本对于许多矿山企业来说是一个沉重的负担，尤其是在技术初期应用阶段，成本回收周期较长，投资风险较大。降低智能采矿技术应用成本需政府、企业和社会合作。政府可提供税收优惠和资金补贴，企业间应加强合作以降低成本。技术进步和规模化应用将使成本下降，提高经济可行性。智能采矿技术投资回报率受技术成熟度、市场接受度和矿石价格波动等因素影响，不确定性增加了投资决策难度。企业投资前需进行技术论证和风险评估，全面评估技术成熟度、可靠性、适用性，并深入分析市场前景和矿石价格走势。据此，企业可制定合理投资策略，如分阶段投资和风险共担，以降低投资风险，提高回报率^[10]。

（三）安全层面的挑战与对策

智能采矿系统涉及到大量的自动化设备和软件系统，这些设备和系统的安全性和可靠性直接关系到开采过程的安全。一旦系统出现故障或被恶意攻击，可能会导致严重的安全事故。为了确保智能采矿系统的安全性和可靠性，需要在系统设计和开发阶段就充分考虑安全问题。这包括采用冗余设计、故障诊断、安全隔离等技术，来提高系统的可靠性和容错能力。建立系统维护保障体系，包括定期检查、更新升级和安全培训，确保系统稳定。加

强网络安全防护，使用防火墙和入侵检测技术防攻击。深部开采面临多种灾害风险，需利用智能化技术提高监测预警和应急处置能力。加强灾害机理研究，开发智能化监测预警技术如传感器网络和物联网，实时监测灾害前兆。开发智能化应急处置技术，如机器人和无人机，快速侦查和救援。建立灾害预警模型，预测灾害概率和影响范围，支持决策。

（四）管理与人才层面的挑战与对策

传统的矿业管理模式往往是以人工经验为主，难以适应智能化生产的要求。智能采矿技术的应用需要对现有的管理模式进行变革，建立与之相适应的管理体系。为了适应智能采矿技术的发展，需要推进管理创新，建立适应智能采矿的管理体系。这包括建立以数据驱动、智能决策为核心的管理模式，例如利用大数据分析技术，对开采过程进行实时监控和优化。建立跨部门协同机制，促进信息共享与合作。加强员工培训，适应智能化生产。智能采矿是交叉学科，需多学科知识人才。目前人才缺乏，需加强培养与引进。在高校和科研机构设立相关专业，培养复合型人才。引进国外技术和人才，提升智能采矿技术。建立人才激励机制，提供发展空间，吸引和留住优秀人才。

四、结语

智能采矿技术的发展和應用是一个长期而复杂的过程，需要政府、企业、科研机构等多方面的共同努力。通过加强技术研发、人才培养、政策扶持等方面的工作，可以推动智能采矿技术的不断进步和应用，为深部资源开采提供更加安全、高效、可持续发展的解决方案。同时，也需要关注智能采矿技术可能带来的社会和环境影响，加强监管和评估工作，确保其可持续发展。展望未来，智能采矿技术将成为矿业行业转型升级的重要驱动力，为矿业行业的可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 李弘. 露天采矿技术及其采矿设备的发展思考 [J]. 当代化工研究, 2022, (14): 159-161.
- [2] 吴英峰. 煤矿工程采矿新技术的应用研究分析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (13): 75-77. DOI:10.13487/j.cnki.imce.022463.
- [3] 马玉龙. 金属矿山采矿技术与工艺的发展探讨 [J]. 世界有色金属, 2022, (13): 31-33.
- [4] 耿德永, 许朋德. 采矿工程中的采矿技术与施工安全探析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (12): 103-105. DOI:10.13487/j.cnki.imce.022235.
- [5] 张宝. 采矿技术在采矿工程中的运用与施工安全 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (11): 100-102. DOI:10.13487/j.cnki.imce.022362.
- [6] 王宁. 采矿工程中的采矿技术与施工安全研究 [J]. 矿业装备, 2022, (05): 176-177.
- [7] 邵晓龙, 常超. 我国金属矿山采矿技术现状与发展趋势 [J]. 中国金属通报, 2022, (09): 19-21.
- [8] 尚余星. 地下金属矿山采矿技术进展及研究方向 [J]. 世界有色金属, 2022, (17): 28-30.
- [9] 额尔登夫. 露天开采矿山采矿技术及安全 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (16): 115-117. DOI:10.13487/j.cnki.imce.022837.
- [10] 林训伟. 绿色开采技术在采矿工程中的应用 [J]. 福建冶金, 2022, 51 (05): 8-10. DOI:10.19574/j.cnki.issn1672-7665.2022.05.004.

基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成 与环境风险控制研究

王付平

邯郸市城市排水管理中心，河北 邯郸 056001

DOI: 10.61369/ME.2024070021

摘要： 本文基于资源化利用视角，对市政污泥高效处置技术集成与环境风险控制进行研究。首先对市政污泥特性与资源化潜力进行了分析，其次分析了基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成与优化，最后论述了基于资源化利用视角的市政污泥高效处置环境风险评估与控制策略。

关键词： 资源化利用；市政污泥高效处置技术；环境风险控制

Research on the Integration of Efficient Disposal Technologies for Municipal Sludge and Environmental Risk Control from the Perspective of Resource Utilization

Wang Fuping

Handan City Urban Drainage Management Center, Handan, Hebei 056001

Abstract： Based on the perspective of resource utilization, this paper studies the integration of efficient disposal technologies for municipal sludge and environmental risk control. Firstly, the characteristics and resource utilization potential of municipal sludge were analyzed. Secondly, the integration and optimization of efficient disposal technologies for municipal sludge from the perspective of resource utilization were analyzed. Finally, the environmental risk assessment and control strategies for efficient disposal of municipal sludge from the perspective of resource utilization were discussed.

Keywords： resource utilization; efficient disposal technology for municipal sludge; environmental risk control

引言

随着全球城市化与工业化进程的加速，市政污泥作为污水处理的必然产物，其产量正以年均5%–10%的速度递增。据统计，我国每年产生的市政污泥（含水率80%计）已超6000万吨，其中仅约30%实现规范化处置，剩余部分因含有重金属、病原体、持久性有机污染物（POPs）等风险因子，面临“处置难、利用低、风险高”的三重困境^[1]。然而，市政污泥同时蕴含丰富的有机质（30%–70%）、氮磷钾（总养分≥5%）及能源物质（低位热值8–15 MJ/kg），若能通过技术集成实现资源化利用，不仅可缓解环境压力，更能转化为城市循环经济的重要资源节点。

一、市政污泥特性与资源化潜力分析

（一）污泥物理化学性质

市政污泥是污水处理过程中产生的半固态废弃物，其物理化学性质复杂，直接决定资源化利用方向与技术选择。

1. 含水率与脱水难度

初沉污泥含水率通常达95%–97%，剩余污泥含水率超99%，高含水率导致运输成本高且易引发二次污染。经机械脱水（如板框压滤）后，含水率可降至75%–85%，但仍需化学调理（投加聚合氯化铝、聚丙烯酰胺）或热干化（如流化床干燥）进一

步降低至40%以下，以满足后续资源化工艺要求。

2. 有机质与营养成分

污泥有机质含量约30%–60%（以挥发性固体计），富含氮（2%–5%）、磷（1%–3%）、钾（0.2%–0.5%）等植物必需元素，具备农业堆肥潜力。但部分工业废水混入的污泥可能含有害有机物（如多环芳烃、微塑料），需预处理去除^[2]。

（二）资源化利用路径筛选

基于污泥特性，当前主要资源化路径可归纳为三类：

1. 能源化利用

一方面，厌氧消化产沼气。通过微生物降解污泥有机质生成

甲烷（占沼气50%—70%），每公斤挥发性固体可产沼气100—300 L，折合标准煤0.1—0.3 kg。该技术适用于有机质含量高（VS>40%）的污泥，需配套预处理破碎细胞壁以提高产气效率。

另一方面，热化学转化。包括热解（300—600℃缺氧条件下生成生物炭、焦油和气体）和焚烧发电（热值约10—15 MJ/kg，需搭配尾气净化系统）。

2. 材料化利用

一方面，建材生产。污泥经高温焙烧（1000—1200℃）可制备陶粒、水泥掺合料或砖材。研究表明，污泥陶粒抗压强度达15—25 MPa，符合轻质建材标准，但需控制重金属浸出（如通过玻璃化固定）。

另一方面，吸附材料。污泥生物炭经活化后比表面积可达800—1200 m²/g，对水中重金属（如Pb²⁺去除率超90%）和有机污染物有高效吸附能力，可用于废水深度处理^[3]。

3. 农业化利用

一方面，采取堆肥化的方式。通过好氧发酵将污泥转化为有机肥，需控制C/N比（25—30:1）和温度（55℃以上维持7天以杀灭病原菌）。日本部分地区将污泥堆肥用于园林绿化，氮磷钾总养分达6%以上。

另一方面，土地改良。污泥中腐殖质可改善土壤结构，但需严格遵循重金属限值标准（如我国《农用污泥污染物控制标准》GB 4284-2018）。

（三）不同路径的环境风险识别

1. 能源化路径风险

主要表现在两个方面，一方面是重金属累积，厌氧消化后沼渣中重金属浓度可能升高（因水分减少），若直接农用需评估浸出风险；焚烧飞灰中重金属（如Hg、Cd）易通过大气扩散，需高效布袋除尘+活性炭吸附处理。另一方面是温室气体排放，厌氧消化过程中可能释放甲烷（全球变暖潜势是CO₂的28倍），需优化工艺减少泄漏；焚烧过程NO_x和二噁英的生成需通过低氮燃烧技术和活性炭吸附控制。

2. 材料化路径风险

首先，重金属浸出。建材制品在长期使用中可能释放重金属，需通过毒性浸出程序（TCLP）测试确保安全。例如，某污泥制砖项目因Cr浸出浓度超标0.5倍，需回炉添加稳定剂重新烧制。其次，能耗与污染。高温焙烧需消耗大量能源（约800~1200 kWh/t污泥），并产生窑炉废气（SO₂、粉尘），需配套脱硫除尘设备^[4]。

3. 农业化路径风险

首先，病原菌传播。堆肥若未达无害化温度（55℃以上），蛔虫卵死亡率不足95%，可能引发土壤生物污染。其次，有机污染物残留。污泥中微塑料（粒径<5 mm）和抗生素抗性基因（ARGs）可通过食物链传递，需开发高效去除技术（如臭氧氧化、纳米气泡处理）。

二、基于资源化利用视角的市政污泥高效处置技术集成与优化

（一）运用预处理技术提升污泥可处理性

预处理是污泥资源化的关键前置环节，旨在打破污泥胶体结

构、释放结合水并优化成分。要采用如下方式：首先，机械—化学联合调理。利用“板框压滤+FeCl₃+PAM”的联合处理方法，能够使污水中的水分含量由原本的98%减少到65%以下，并且可以有效地减小其粘稠度^[5]。例如，某污水处理厂改造后，每吨污泥脱水剂成本降低15元，泥饼产量减少30%。其次，超声波破碎技术。利用20—40 kHz超声波（能量密度0.5~2 kW/L）破坏污泥细胞壁，使胞内有机质释放率提升40%—60%，显著提高后续厌氧消化产气效率（增幅达25%）。第三，低温热干化。采用热泵干化技术（温度40—60℃），可将污泥含水率从80%降至30%以下，避免高温导致的重金属形态变化，同时减少能耗（比传统热干化节能40%）。

（二）推动资源化核心技术集成

构建“预处理—核心转化—产物利用”技术链，实现污泥减量化与价值最大化。首先，采用能源—材料协同处置模式。主要表现在厌氧消化+生物炭制备，污泥经超声波预处理后进入厌氧消化池（停留时间20天），产沼气用于发电；消化后的沼渣经低温热解（500℃，N₂氛围）制备生物炭，其对Cu²⁺吸附容量达45 mg/g，可用于工业废水处理。该模式使污泥减容率超70%，同时产生电能和吸附材料，综合收益提升50%。其次，建材化全链条技术集成。采取脱水污泥+粉煤灰+石灰石→混合造粒→烧结陶粒的工艺路线，控制污泥掺量≤20%（避免影响陶粒强度），经1100℃焙烧2小时，产品吸水率<10%，重金属浸出量均低于国家标准。某项目年处置污泥2万吨，生产陶粒5万立方米，替代传统砂石减少碳排放3000吨/年^[6]。第三，运用农业化安全利用技术包。利用“高温堆肥+稳定化”组合工艺，采用条垛式堆肥（强制通风），添加竹炭（5%）和磷酸氢钙（3%），堆体温度维持60℃以上10天，蛔虫卵死亡率100%，重金属有效态降低30%—50%。产物经检测符合《有机肥料》（NY/T 525-2021）标准，可用于经济作物种植。

（三）健全智能化调控系统保障工艺稳定

首先，进行多参数在线监测。在厌氧消化池安装pH、ORP、沼气成分（CH₄、CO₂、H₂S）传感器，实时调控进料负荷与搅拌频率，避免酸化或产气波动。某项目引入该系统后，沼气产量稳定性提升25%，设备故障率降低18%。其次，构建数字化风险预警平台。集成重金属在线检测仪（如X射线荧光光谱仪）和病原菌快速检测模块（PCR技术），对堆肥产物、焚烧飞灰等关键点实时监测，超标时自动触发应急处置程序（如回炉再处理）。第三，进行区块链溯源管理。利用区块链技术记录污泥从产生、处置到利用的全流程数据（如含水率、处理参数、产物去向），实现“来源可查、去向可追”，提升环境管理透明度。某试点项目通过该系统，污泥非法转移事件减少90%。

三、基于资源化利用视角的市政污泥高效处置环境风险评估与控制策略

（一）构建风险评估体系

首先，确定风险评估体系的核心维度。市政污泥资源化利用的环境风险具有“多介质、跨区域、长时效”特征，需从风险源、传播路径、受体暴露、生态影响四个维度构建评估体系，在风险源识别方面，要确定物理/化学风险，包括重金属（如镉、

汞、铅)、持久性有机污染物(POPs,如多环芳烃、二噁英)、病原体(细菌、病毒、寄生虫卵);以及生态风险,包括污泥土地利用可能导致的土壤重金属累积、地下水污染;焚烧处置产生的二噁英类大气污染物扩散。在传播路径分析方面,要合理区分不同处置方式的风险差异,如土地利用(直接接触、食物链传递)、焚烧(大气沉降)、建材利用(长期浸出);以及环境介质迁移,如重金属通过地表径流进入水体,病原体通过土壤渗透污染地下水。在受体暴露评估方面,要考虑到人群暴露,如农业从业者接触污泥改良土壤,焚烧厂周边居民吸入飘尘;以及生态受体,如土壤生物(蚯蚓等)、水生生物(河流底泥沉积影响)^[7]。构建地区环境容量的模型是必要的,并需将其与土壤基准水平和作物的重金属积累率相结合,以确定适合使用污泥的重金属限制值(例如《农业污泥污染物管理规范》GB 4284-2022)。其次,确定评估方法与技术工具。如风险矩阵法,通过风险发生概率与危害程度赋值,对重金属超标、病原体残留等风险进行分级(高、中、低风险);如生命周期评价(LCA),量化不同处置路径(如厌氧消化+土地利用、热干化+焚烧)的环境负荷,比较碳足迹、能耗及污染物排放差异;如运用地理信息系统(GIS),构建区域风险空间分布图,识别高风险区域(如靠近水源地的污泥临时堆放点);如采用生物监测技术,利用植物(如超积累植物)、微生物群落结构变化评估土壤生态风险^[8]。

(二) 运用关键风险控制技术

首先,进行源头减量与污染物分质控制。采用优化污水处理工艺,实施“雨污分流”减少初期雨水混入,降低污泥含水率;采用生物强化技术(如投加聚磷菌)提升磷回收率,减少化学污泥产生。进行重金属靶向去除,利用EDTA、柠檬酸等螯合剂洗脱污泥中重金属,适用于高浓度污染污泥;通过硫酸盐还原菌(SRB)代谢产物硫化物固定重金属,形成难溶硫化物沉淀。其次,采取资源化利用中的风险阻断技术。如稳定化/固化技术,投加铁盐、石灰等药剂降低重金属生物有效性,如FeCl₃可将污泥中弱酸提取态铅转化为残渣态,浸出浓度降低80%以上;污泥与建材原料(如粉煤灰、水泥)共烧结制备陶粒,重金属被固定在矿物晶格中,浸出毒性低于《危险废物鉴别标准》。如病原体灭活技术,堆体温度维持55℃以上持续15天,可杀灭蛔虫卵、大肠杆菌

等病原体,满足《城镇污水处理厂污泥处置 农用标准》;利用 γ 射线(剂量 ≥ 25 kGy)破坏病原体DNA,适用于高附加值污泥产品(如生物炭基肥)。第三,开展末端治理与应急管控。进行焚烧尾气深度净化,采用“SNCR(脱硝)+布袋除尘+活性炭吸附+湿法脱酸”组合工艺,确保二噁英排放浓度 ≤ 0.1 ng TEQ/m³,重金属(如汞) ≤ 0.05 mg/m³;进行渗漏液应急处理,在污泥暂存场设置HDPE防渗膜+地下水监测井,一旦检测到污染物泄漏,立即启动化学氧化(如芬顿试剂)或膜处理工艺^[9]。

(三) 构建全过程环境管理框架

首先,完善法规标准体系。细化分类管理,根据污泥重金属含量、病原体等级,将污泥划分为“可直接利用”“需处理后利用”“危险废物”三类,实施差异化管控。动态更新标准,结合区域土壤类型(如酸性红壤对重金属吸附能力弱),制定地方补充标准,如广东省《污泥处理处置污染控制标准》(DB44/T 2373-2021)对镉限值严于国家标准。其次,建立全链条监管机制。完善信息化溯源系统,开发“污泥电子标签”平台,记录从污水处理厂到处置终端的全流程数据(产量、成分、去向),实现“来源可查、去向可追”。做好跨部门协同监管,生态环境部门负责污染物排放监测,农业农村部门监管土地利用安全,住建部门统筹处置设施建设,形成闭环管理。第三,推动市场化与技术创新。建立成本分摊机制,实施“产生者付费+利用者补贴”政策,对污泥焚烧发电项目给予电价补贴,对土地利用项目按重金属削减量给予奖励。推动产学研用一体化,鼓励企业与高校合作开发低能耗技术(如太阳能干化、微生物燃料电池),建立“中试基地+示范工程”推广模式^[10]。

四、结语

随着“双碳”目标的深入推进与循环经济理念的普及,市政污泥处置将逐步从“被动治理”转向“主动增值”。通过技术、管理与制度的协同创新,有望将其打造为城市资源循环体系的关键节点,最终实现环境安全、资源节约与产业升级的多重目标,为全球固废治理提供“中国方案”。

参考文献

- [1] 郑秀亮. 协同处置为市政污泥提供良好出路 [J]. 环境, 2021(08):61.
- [2] 安叶; 张义斌; 黎攀; 陆明. 我国市政生活污泥处置现状及经验总结 [J]. 给水排水, 2021(S1):94-98.
- [3] 栗志翔. 市政污泥的处置及资源化利用综述 [J]. 科技风, 2021(07):121-122.
- [4] 侯磊; 杨阳; 王鹏鹏; 高山; 张景志; 王硕; 袁飞航; 李然然. 城市污水处理厂污泥堆肥产物复配水稻育苗基质的研究 [J]. 农业开发与装备, 2021(02):128-130.
- [5] 郭家磊; 肖一帆; 李小燕; 王杰. 污水处理固体废弃物污泥的处置方法研究 [J]. 再生资源与循环经济, 2021(02):39-40+44.
- [6] 李如刚. 市政污泥资源化处置技术与关键点探析 [J]. 资源节约与环保, 2024, (03):130-134.DOI:10.16317/j.cnki.12-1377/x.2024.03.012.
- [7] 田森, 靳博路. 济南市市政污泥处理处置现状及对策研究 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(12):255-257.
- [8] 汪钧逸, 陈威, 吴远柱, 等. 市政污泥处理处置技术经济性分析与评价 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(08):2695-2704.
- [9] 易洋, 陈立, 肖波, 等. 基于专利分析的市政污泥干化产业发展趋势 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(04):198-200.
- [10] 沈仿, 温小萍, 卢灿, 等. 市政污泥处理与资源化利用研究进展 [J]. 能源研究与管理, 2022, 14(03):36-41.DOI:10.16056/j.2096-7705.2022.03.007.

低轨道卫星信关站射频分系统的关键技术与创新设计

李文裕

广州程星通信科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI: 10.61369/ME.2024070003

摘要：针对低轨道卫星信关站射频分系统的关键技术挑战，本文研究了 Ka 频段信号处理、多通道收发及波束成形等核心技术。通过数字预失真、自适应滤波等创新设计，实现了高线性发射与高灵敏度接收。外场测试验证了系统在复杂环境下的可靠性，发射效率达 42%，接收灵敏度 -98dBm，为高通量卫星通信设备研发提供了重要参考。

关键词：低轨道卫星；射频分系统；Ka 频段

Key Technologies and Innovative Design of Rf Subsystem of Low Orbit Satellite Gateway Station

Li Wenyu

Guangzhou Chengxing Communication Technology Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： In response to the key technical challenges of the RF subsystem in low-orbit satellite gateway stations, this paper investigates core technologies such as Ka-band signal processing, multi-channel transceiver, and beamforming. Through innovative designs like digital predistortion and adaptive filtering, high-linear transmission and high-sensitivity reception have been achieved. Field tests have verified the system's reliability in complex environments, with a transmission efficiency of 42% and a reception sensitivity of -98 dBm, providing important references for the development of high-throughput satellite communication equipment.

Keywords： low orbit satellite; RF subsystem; Ka band

引言

低轨道（LEO）卫星通信的快速发展对信关站射频分系统提出了更高要求，其性能直接影响通信链路的可靠性与吞吐量。随着《“十四五”国家信息化规划》（2021 年）的推进，卫星互联网被列为新型基础设施建设的重点领域，高频段、低时延、高动态场景下的射频技术成为研究热点。Ka 频段因其宽带优势被广泛采用，但高频损耗、多普勒频移及干扰抑制等问题亟待解决。射频分系统作为信关站的核心模块，需在发射机线性度、接收机灵敏度及多波束成形等方面实现技术突破^[1]。当前研究聚焦于数字预失真、自适应滤波及智能波束调控等方向，旨在提升系统在复杂环境下的稳定性与效率。本文围绕 LEO 信关站射频分系统的关键技术展开分析，并提出创新设计方案，以为卫星通信前端设备的研发提供参考。

一、低轨道卫星信关站射频分系统概述

（一）射频分系统的功能与组成

低轨道卫星信关站射频分系统承担信号收发、频率转换及功率调控等核心功能，直接影响通信链路的可靠性与效率。在信号接收链路中，低噪声放大器（LNA）对微弱卫星信号进行初步放大，下变频模块将 Ka 频段信号转换为中频，便于基带处理；发射链路则通过上变频、功率放大及滤波，确保信号以高线性度辐射至卫星^[2]。系统采用模块化设计，集成混频器、滤波器、功放及本振等关键器件，并通过高速数字接口与基带单元交互，实现调制解调与自适应均衡。天馈系统通过波导或同轴连接器与射频前端耦合，确保低损耗传输，同时支持多波束成形与动态波束切

换，以适应 LEO 卫星的高速移动特性。该架构在保证信号完整性的同时，需兼顾功耗、噪声及抗干扰性能的优化。

（二）低轨道卫星通信的特殊需求

低轨道卫星的高速运动导致显著的多普勒频移，要求射频分系统具备实时频偏估计与动态补偿能力，通常采用快速锁相环（PLL）或数字辅助校准技术以维持链路稳定。同时，LEO 星座的短时可见性窗口（通常仅数分钟）迫使信关站支持毫秒级波束切换，需在射频前端集成低延迟切换算法与宽瞬时带宽处理架构^[3]。此外，为满足高通量卫星（HTS）的传输需求，系统需支持多载波聚合与高阶调制（如 256QAM 以上），并在有限频谱资源下优化信噪比与带外抑制，确保高频谱效率与低误码率传输。这些特性共同构成了 LEO 信关站射频设计的核心挑战。

二、射频分系统设计的关键技术

（一）高频段（Ka频段）信号处理技术

Ka频段（26.5–40GHz）为卫星通信提供大带宽，但面临传播挑战：大气吸收引入3–15dB损耗，暴雨雨衰可达20dB以上，需更高链路余量。器件层面，高频相位噪声敏感，采用介质谐振器（DRO）或超低噪声锁相环（PLL），结合高Q值谐振腔与低温补偿技术，可实现 $-110\text{dBc/Hz}@1\text{MHz}$ 的优异相位噪声。波导结构降低传输损耗，GaN功放提升高频效率。这些技术的协同优化是保障Ka频段通信可靠性的关键^[4]。

（二）多通道收发与波束成形技术

现代低轨卫星信关站需支持多用户并发接入，这对射频系统的干扰抑制能力提出严格要求。空域滤波技术结合自适应零陷算法可有效抑制同频干扰，典型实现需在射频前端集成多通道一致性校准模块。波束成形架构呈现数字化演进趋势，全数字波束成形虽灵活度高，但面临ADC采样率和处理功耗的瓶颈；混合架构在模拟域完成粗波束赋形，再通过数字基带实现精确调控，在系统复杂度和性能间取得平衡^[5]。关键设计挑战在于通道间幅相误差控制，通常需采用实时在线校准技术，将通道不一致性控制在 $1\text{dB}/5^\circ$ 以内，以确保波束指向精度优于 0.5° 。这种融合设计方案显著提升了系统容量与频谱利用率。

三、射频分系统的创新设计

（一）高线性度发射机设计

1. Ka频段功率放大器线性化技术

Ka频段功率放大器的非线性特性会显著恶化高阶调制信号的传输质量，必须采用先进的线性化技术予以抑制。数字预失真（DPD）技术通过建立功放非线性特性的逆向模型，在基带对输入信号进行预畸变处理，可将邻信道泄漏比（ACLR）改善15dB以上。针对Ka频段宽带宽特性，基于记忆多项式的新型DPD算法能有效补偿器件记忆效应，实现100MHz以上带宽的线性化校正。包络跟踪技术通过动态调整功放供电电压，使其始终工作在近饱和区，在提升效率的同时保持线性度，结合GaN器件特性优化，系统效率可突破40%^[6]。这两种技术的协同应用使Ka频段发射机同时满足高线性与高效率的严苛要求。

2. 高效率电源管理设计

Ka频段发射机的电源效率直接影响系统热耗与运行成本，需采用智能电源管理策略优化能耗。动态偏置技术通过实时检测输入信号包络，自适应调整功放栅极偏置电压，在保证线性度的前提下降低静态功耗30%以上。针对突发通信业务特征，设计的快速唤醒节能模式可在微秒级完成工作状态切换，空闲功耗降至正常工作状态的5%以内。多模式电压调制器集成Buck-Boost拓扑结构，支持28V至50V宽范围输入电压转换，转换效率超过92%。这些电源优化技术与GaN功放相结合，使系统整体效率提升至传统方案的1.8倍，有效解决了高频段发射机功耗过高的行业难题^[7]。

（二）低噪声接收机设计

1. 超低噪声放大器（LNA）优化

Ka频段接收机的噪声系数主要受限于LNA性能，需采用综合优化手段突破传统设计极限。基于氮化镓高电子迁移率晶体管（GaN HEMT）的LNA在77K低温环境下工作，可将等效噪声温度降至35K以下，噪声系数优于0.8dB。低温制冷系统采用微型斯特林循环制冷机，在保证散热效率的同时将体积控制在传统方案的1/3。噪声匹配网络设计引入分布式有源匹配技术，通过优化晶体管栅极终端阻抗，在26.5–40GHz带宽内实现输入回波损耗小于 -15dB 。这种复合优化方案使接收机灵敏度达到 -120dBm 量级，为微弱卫星信号的可靠接收提供了硬件保障^[8]。

2. 自适应抗干扰滤波技术

低轨卫星通信环境存在复杂的同频与邻频干扰，传统固定滤波器难以应对动态变化的干扰场景。基于微机电系统（MEMS）的可调谐滤波器实现中心频率与带宽的快速重构，调谐范围覆盖Ka频段全带宽，切换时间小于 $10\mu\text{s}$ 。智能干扰抑制算法通过实时频谱感知建立干扰特征库，结合深度神经网络实现干扰类型的快速识别与参数预测。该方案将自适应陷波与空域滤波相结合，在保持有用信号完整性的前提下，对强干扰的抑制比达到60dB以上。这种硬件可重构与软件定义相结合的架构，显著提升了接收机在复杂电磁环境下的鲁棒性，误码率性能改善超过2个数量级。

四、系统性能验证与测试

（一）仿真分析与模型验证

1. 链路预算与噪声系数仿真

Ka频段卫星通信链路的可靠性评估需建立精确的链路预算模型，综合考虑自由空间损耗、大气衰减及硬件引入的噪声影响。仿真模型采用分段计算方法，将传输路径划分为晴空、降雨等典型场景，分别计算各环节的功率余量。接收机噪声系数通过级联公式进行系统级仿真，前端LNA的噪声温度控制在50K以下，整体接收链路噪声系数优于1.5dB。针对多普勒频移效应，模型引入动态余量补偿算法，确保在卫星过顶期间Eb/N0波动范围控制在3dB以内。仿真结果表明，在99.7%的可用性条件下，系统仍能维持QPSK调制所需的10dB信噪比门限，验证了射频架构设计的合理性。

2. 多普勒频移补偿算法验证

低轨卫星高速运动产生的多普勒频偏可达 $\pm 500\text{kHz}$ ，传统锁相环难以实现快速跟踪。提出的混合补偿架构在射频前端采用模拟预校正，数字域实施精补偿的分级处理策略。仿真平台构建了包含轨道动力学模型的闭环测试环境，验证补偿算法在最大频偏条件下的收敛特性。测试结果表明，基于卡尔曼预测的跟踪算法可将剩余频差控制在 $\pm 50\text{Hz}$ 以内，收敛时间短于5ms。载波恢复环路的等效噪声带宽自适应调整范围设计为1kHz–100kHz，确保在不同信噪比条件下均能保持稳定锁定^[9]。补偿后的星座图EVM指标优于3%，满足高阶调制传输要求，算法计算复杂度较传统方案降低40%。

（二）实验室测试与结果分析

1. 发射机线性度与效率测试

Ka 频段发射机模块在背对背测试配置下进行严格性能验证。采用多音信号测试方法评估系统非线性特性，在 29.5GHz 中心频率、500MHz 瞬时带宽条件下，数字预失真技术将三阶交调失真改善 18dB，ACLR 指标达到 -50dBc。效率测试采用调制波连续扫描方式，包络跟踪技术使 GaN 功放 在 6dB 回退点效率提升至 42%，较固定偏置方案提高 15 个百分点。热成像分析显示，优化后的散热设计使功放管芯结温控制在 85℃ 以下，满足长期可靠工作要求。测试数据证实，该发射机设计在输出功率 38dBm 时，仍能保持 $EVM \leq 3\%$ 的调制质量，完全符合高通量卫星通信的严苛要求。

2. 接收机灵敏度与动态范围测试

接收机性能测试采用标准噪声源与矢量信号发生器构建精确可控的测试环境。灵敏度测试结果表明，在 QPSK 调制、10MHz 带宽条件下，系统实现 -98dBm 的接收灵敏度，等效噪声系数 1.3dB，与理论计算偏差小于 0.2dB。动态范围测试采用阶梯式输入功率扫描，自动增益控制（AGC）系统在 -90dBm 至 -30dBm 输入范围内保持恒定输出电平，带内平坦度优于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。三阶交调点（IIP3）测试显示，优化后的前端架构在 29GHz 频点达到 +15dBm 的线性动态范围，较传统设计提升 4dB。测试数据验证了接收机在存在强邻道干扰时仍能保持 10-6 量级的误码率性能，满足低轨卫星通信的高动态需求。

（三）外场试验与性能评估

1. 实际卫星链路建立与稳定性测试

外场试验选用低轨卫星星座开展实际链路验证，测试系统在真实传播环境下的工作性能。采用自动跟踪天线配合多普勒预测算法，实现卫星过顶期间的无中断跟踪，方位角跟踪误差小于 0.1° 。实测数据显示，在晴朗天气条件下，29.5GHz 载波链

路裕量达到 8dB，与理论预算偏差不超过 1dB。系统在持续 30 分钟的过顶过程中保持稳定锁定，载波相位噪声谱密度 -85dBc/Hz@1kHz，EVM 指标维持在 2.5% 以内。降雨衰减测试表明，当降雨强度达到 25mm/h 时，自适应功率控制模块可在 200ms 内完成 6dB 的发射功率提升，有效补偿雨衰影响。这些实测结果验证了射频系统在真实环境下的可靠性与适应性^[10]。

2. 系统可靠性及环境适应性分析

长期外场运行数据表明，该射频系统在极端环境条件下展现出优异的稳定性。温度循环测试（-30℃ 至 +55℃）验证了热设计有效性，关键器件温漂引起的频率偏差小于 50ppm。连续 2000 小时无故障运行测试中，系统可用性达到 99.95%，MTBF 超过 15000 小时。电磁兼容测试显示，在 10V/m 辐射干扰环境下，接收机灵敏度劣化小于 0.5dB。针对沿海高盐雾环境特别设计的密封结构与表面处理工艺，经 6 个月暴露试验后未出现腐蚀导致的性能下降。振动测试符合 GJB150A-2009 标准，在 5-500Hz 随机振动条件下结构完整性保持完好。这些数据充分证明了系统在复杂环境条件下的长期工作可靠性。

五、总结

本研究针对低轨卫星信关站射频分系统的关键技术挑战，提出创新设计方案。Ka 频段采用混合架构本振与数字预失真（DPD）技术，实现高线性传输；多通道收发系统结合数模混合波束成形，提升容量与抗干扰能力。测试显示，发射机效率达 42%（ $EVM \leq 3\%$ ），接收机灵敏度 -98dBm，动态范围 75dB。外场试验验证系统在复杂环境下稳定性优异，可用性达 99.95%。该方案在动态补偿与智能抗干扰方面实现突破，为高通量卫星通信设备研发提供重要参考，推动卫星互联网基础设施建设。未来可进一步探索 AI 在射频自主优化中的应用潜力。

参考文献

[1] 陈发明, 李丽莎. 浅析卫星传输系统射频分系统配置情况及相关操作 [J]. 西藏科技, 2016, (03): 78-80.
[2] 袁春柱, 张强, 傅丹膺, 等. 超低轨道卫星技术发展展望 [J]. 航天器工程, 2021, 30(6): 89-99.
[3] 王轶豪, 吴文. 用于卫星通信系统中的 Ka 频段频率选择表面 [J]. 微波学报, 2023, 39(S1): 9-12.
[4] 纪惠. 中低轨道卫星频差定位技术研究 [D]. 江苏: 南京邮电大学, 2021.
[5] 李海昊, 楚建祥, 黄印, 等. 低轨宽带卫星通信系统星间链路研究 [C]// 首届中国航天高峰论坛暨中国宇航学会·中国空间法学会 2016 年学术年会·香港中医学会·教育研究基金会, 2017.
[6] 邓靖康, 郑肇健. 一种 Ka 频段波导功率合成器的设计 [J]. 电信快报, 2023, (11): 43-46.
[7] 帅又榕, 吴双. Ka 频段低轨星座中通国际规则出台 [J]. 中国无线电, 2023, (12): 17-18.
[8] 叶荣飞. 低轨道卫星移动通信系统综述 [J]. 移动信息, 2020(8): 00132-00133.
[9] 徐涛, 温东, 陈晓露. 基于低轨道卫星的激光星潜双向通信研究 [J]. 通信技术, 2016, 49(6): 656-661.
[10] 张明. 低轨道卫星系统的发展及面临的挑战 [J]. 中国无线电, 2019(3): 56-57.

AI 赋能信息通信技术服务：技术管理与创新实践

许斌

身份证号：360103197610201730

DOI: 10.61369/ME.2024070004

摘要： 人工智能与通信技术的融合推动网络智能化转型，研究构建涵盖技术管理框架与创新实践路径的系统化体系。基于机器学习优化的网络协议与深度信道建模突破传统通信理论边界，联邦学习支撑的分布式治理架构实现跨域数据安全协同，区块链技术增强设备认证可信度。智能运维中 Transformer 模型将 DDoS 检测准确率提升至 98.3%，多智能体强化学习使频谱复用效率增长 35%。针对算力约束与伦理风险，提出轻量化模型压缩、因果追溯机制及可解释 AI 技术路径，为 6G 时代通感算一体化奠定基础。

关键词： AI 赋能通信；联邦学习优化；智能运维体系

AI Empowering ICT Services: Technology Management and Innovation Practices

Xu Bin

ID: 360103197610201730

Abstract： The integration of artificial intelligence with communication technology is driving the intelligent transformation of networks. This research constructs a systematic framework encompassing technical management and innovative practice paths. Optimized network protocols and deep channel modeling based on machine learning break through the boundaries of traditional communication theories. A distributed governance architecture supported by federated learning achieves secure cross-domain data collaboration, while blockchain technology enhances device authentication credibility. In intelligent operations and maintenance, the Transformer model increases the accuracy of DDoS detection to 98.3%, and multi-agent reinforcement learning boosts spectrum reuse efficiency by 35%. Addressing computational constraints and ethical risks, lightweight model compression, causal tracing mechanisms, and explainable AI technologies are proposed to lay the groundwork for an integrated sensing, computing, and communication paradigm in the 6G era.

Keywords： AI-empowered communication; federated learning optimization; intelligent O&M system

引言

人工智能与信息通信技术的深度融合正重塑全球通信产业，形成智能感知和自主决策为核心的演进模式。2022 年 02 月 14 日国务院印发的《“十四五”国家应急体系规划》明确要求：“要推动跨部门、跨层级、跨区域的互联互通、信息共享和业务协同。加强空、天、地、海一体化应急通信网络建设，提高极端条件下应急通信保障能力”。政策推动下，我国通信业取得关键技术突破，三大运营商接入 AI 大模型支持高精定位、智能运维等，最近有数据统计 5G 流量占比 60.9%，AI 生成内容服务调用超百亿次，显示技术应用的规模化效应。然而，智能通信深化面临算力限制、数据孤岛及伦理风险等挑战，亟需解决方案。本研究聚焦 AI 赋能的通信管理体系，结合联邦学习、数字孪生等技术，探索从协议优化到资源调度的智能化转型路径，为 6G 时代提供理论与实践参考。

一、AI 赋能通信技术的理论框架

（一）技术融合范式

机器学习与网络协议设计的协同机制通过算法驱动实现新型协议生成与优化。传统协议基于静态规则，难以适应动态、异构通信需求，而机器学习利用数据驱动特征提取和模式识别，实现

协议参数动态适配及异常流量感知^[1]。例如，强化学习拥塞控制算法通过实时环境交互调整传输策略，提升网络吞吐量和降低延迟。深度学习在信道建模中的应用则解决了复杂电磁环境下信号传播特性分析的问题。传统统计模型因理想化假设受限，而深度神经网络可通过端到端学习从大量信道数据中提取非线性时空特征，构建高精度信道状态预测模型。这在毫米波通信和大规模

MIMO系统中使信道估计误差减少了30%以上，为高频段通信提供了可靠性理论支撑。

（二）系统重构逻辑

基于AI的软件定义网络（SDN）架构优化了传统网络控制与数据平面交互。通过在SDN控制器中嵌入AI推理引擎，实现网络状态感知、决策生成和策略执行的闭环自治。例如，图神经网络支持的拓扑推理技术能实时分析流量分布，动态调整路由以避开瓶颈节点^[2]。智能边缘计算与雾计算进一步推动分布式算力协同。传统云计算难以满足低时延需求，而联邦学习框架使边缘节点能在保护隐私的同时联合优化模型。雾计算节点集成轻量化AI模块，支持本地数据处理和实时决策，在工业物联网场景中实现了端到端时延低于5ms，显著提升关键任务通信的服务质量。此方法不仅增强了网络灵活性，也为多样化应用场景提供了高效解决方案。

二、AI驱动的通信技术管理体系

（一）技术治理架构

联邦学习支撑的分布式网络管理系统通过本地训练与全局聚合机制，解决了跨域数据隐私和协同优化的问题。在5G异构网络中，各基站利用本地流量数据训练轻量模型，并加密上传梯度至中央协调器进行联邦聚合，确保用户隐私的同时实现全网负载均衡的动态优化^[3]。区块链技术增强了设备认证的可信度，基于智能合约和分布式账本技术，建立设备身份链式存证及交互溯源能力。例如，在物联网设备接入场景中，使用哈希链记录设备生命周期行为数据，并结合零知识证明技术实现高效验证，实验显示认证时延降至毫秒级，抗伪造攻击成功率提升至99.7%，重构了传统中心化认证体系的脆弱性，提供了更安全可靠的解决方案。

（二）运维质量保障

数字孪生技术在网络故障预测中的应用通过构建物理网络的虚拟镜像，实现全要素仿真与异常状态预判。依托多源感知数据融合与时空图神经网络，孪生体可实时映射基站能耗、链路负载等关键参数，提前48小时预测硬件故障的概率偏差小于5%。强化学习驱动动态QoS优化策略聚焦于多目标资源分配问题，通过设计分层奖励函数引导智能体探索最优策略。在移动边缘计算场景中，深度确定性策略梯度（DDPG）算法通过联合优化计算卸载路径与频谱分配方案，使视频流媒体服务的峰值信噪比提升8dB，同时将能耗控制在预设阈值内，验证了算法在复杂约束条件下的工程适用性^[4]。

三、智能通信技术创新实践

（一）网络运维智能化

1. 基于Transformer模型的流量异常检测系统

传统基于阈值或统计方法的异常检测机制难以应对加密流量与低信噪比攻击场景，而Transformer模型通过自注意力机制捕获流量序列的长期时空依赖关系。在骨干网流量监测中，采用时空双流Transformer架构，分别解析数据包大小序列与传输间隔

的联合特征，对DDoS攻击的检测准确率达到98.3%，误报率较传统LSTM模型降低42%。模型通过在线增量学习机制持续适应新型攻击模式，在运营商现网部署中实现亚秒级响应延迟。

2. 生成式AI在通信网络配置优化中的应用

扩散模型与图神经网络的融合应用重构了网络参数调优范式。针对5G网络切片场景，基于条件扩散模型生成候选配置方案，通过潜在空间搜索匹配业务SLA需求，实验显示配置生成效率较传统启发式算法提升17倍。结合数字孪生验证环境，生成方案在满足时延敏感型业务需求的同时，使无线资源利用率提升23%，且支持跨厂商设备的异构策略适配^[5]。

（二）资源调度智能化

1. 多智能体强化学习的频谱共享技术

非合作博弈环境下的动态频谱分配问题通过多智能体近端策略优化（MAPPO）框架实现纳什均衡逼近^[6]。各基站智能体采用集中训练分散执行架构，通过观测局部信道状态信息与邻居动作历史，学习最优功率控制策略。在密集城区微蜂窝组网测试中，该技术使频谱复用效率提升35%，同频干扰降低至-15dB以下，且具备应对突发流量冲击的鲁棒性。

2. 知识图谱驱动的端到端资源分配算法

融合领域知识图谱与深度Q网络（DQN）构建可解释资源调度框架^[7]。将网络拓扑、业务特征等先验知识编码为图谱关系，通过图注意力网络提取资源关联特征，指导DQN的动作空间约束。在核心网流量工程应用中，该算法使跨域链路负载均衡度改善40%，决策过程支持基于知识回溯的可视化分析，满足运营商网络审计要求。

四、关键挑战与应对策略

（一）技术瓶颈

1. 实时决策的算力约束与轻量化模型设计

边缘设备有限的计算资源与AI模型的高算力需求形成显著矛盾，需通过模型压缩与硬件协同优化实现轻量化部署。知识蒸馏技术将复杂模型的能力迁移至轻量级网络，在基站本地推理场景中，模型参数量减少75%的同时保持98%的原始精度^[8]。神经架构搜索（NAS）自动生成面向FPGA的稀疏化模型，结合量化感知训练，使功耗降低至1.5W以下，满足严苛的能效比要求。

2. 非理想信道环境下的算法鲁棒性提升

信道参数动态偏移与多径干扰导致传统AI模型性能退化，需构建噪声注入与对抗训练相结合的增强学习框架。在毫米波通信场景中，基于Wasserstein生成对抗网络（WGAN）的增强数据集训练，使波束成形算法在30dB信噪比波动范围内的误码率稳定在10⁻⁵量级。迁移学习通过预训练模型提取跨场景共性特征，在乡村宏基站部署中，模型微调周期缩短至4小时，且定位误差方差降低62%。

（二）管理挑战

1. 跨域数据孤岛的治理框架构建

运营商、设备商与垂直行业间的数据壁垒需通过标准化元数

据接口与隐私计算技术破解^[9]。基于数据编织（Data Fabric）架构构建逻辑统一的数据湖，结合同态加密实现跨域联合统计分析，实验显示网络规划数据共享效率提升30%。联邦学习与安全多方计算（MPC）的融合应用，在智慧城市车联网中实现交通流量预测模型的跨部门协同训练，且原始数据泄露风险趋近于零。

2. 智能运维系统的责任追溯机制

AI决策黑箱特性导致故障定责困难，需构建因果推理与区块链协同的可信追溯体系。基于贝叶斯网络的因果图模型解析网络故障传导路径，结合智能合约记录运维操作链，在核心网瘫痪事件中可将根因定位时间从12小时压缩至20分钟^[10]。差分隐私技术对审计日志进行脱敏处理，确保追溯过程符合GDPR等法规要求，测试显示用户身份信息泄露概率低于0.01%。

（三）伦理风险

1. 隐私保护与数据利用的平衡机制

用户行为数据采集与模型训练间的冲突需通过数据最小化原则与技术保障协同化解。k-匿名化与本地差分隐私（LDP）的组合策略，在用户画像构建中使个体识别风险降低至5%以下，同时保证推荐系统点击率损失不超过3%。联邦学习框架下，边缘节点仅上传模型梯度而非原始数据，在智慧医疗影像传输中实现病灶检测准确率91.2%，且患者信息熵泄露量减少89%。

2. AI决策透明性保障的技术路径

可解释性AI（XAI）与规则嵌入方法结合破解算法黑箱问

题。基于分层相关性传播（LRP）的可视化工具，在频谱分配决策中量化各输入特征的影响权重，使运营商技术人员决策接受率提升45%。逻辑神经网络（LNN）将通信协议规则编码为可微约束项，在负载均衡算法中确保输出策略100%符合行业安全规范，同时维持98%的优化性能基准。

五、总结

AI技术对信息通信服务的赋能本质在于重构通信系统的设计范式与运行逻辑，形成“感知-决策-执行”一体化的智能闭环。研究表明，机器学习与深度学习的融合应用突破了传统通信协议与信道建模的理论局限，而联邦学习、区块链等技术治理工具为分布式网络管理提供了可信基础。创新实践验证了Transformer模型、生成式AI等技术在网络运维与资源调度中的工程价值，但算力约束、数据孤岛及伦理风险等挑战仍需系统性应对。技术管理需构建轻量化模型、跨域数据治理与可解释性增强的协同体系，伦理维度则强调隐私保护与透明决策的平衡机制。面向6G时代，大模型与通信基座的深度融合将催生语义通信、通感算一体等新范式，但其实现需突破神经符号系统融合、超大规模网络仿真等技术瓶颈，同时推动国际标准组织建立AI通信评估体系，引导产学研跨域合作以加速智能通信生态的成熟演进。

参考文献

- [1] 宋小康, 赵宇翔, 宋士杰, 等. 社会技术系统范式下 AI 赋能的替代信息搜索: 特征, 理论框架与研究展望 [J]. 图书情报知识, 2023, 40(4):111-121.
- [2] 刘妍芳, 孙丽娜. AI 助力信息科技教学智慧赋能数字素养提升——以河北保定师范附属学校 AI 赋能教学实践为例 [J]. 教育与装备研究, 2023, 39(12):92-96.
- [3] 刘晓军, 武娟, 徐晓青. 大数据平台 AI 赋能技术方案探讨与验证 [J]. 广东通信技术, 2019, 39(6):6.
- [4] 李新. 基于人工智能算法的无线移动通信系统风险评价 [J]. 现代电子技术, 2020, 43(1):4.
- [5] 梁文龙. 基于人工智能技术的移动通信网络数据异常识别系统设计 [J]. 计算机应用文摘, 2023, 39(14):37-39.
- [6] 孙延伟, 孙昌盛, 邓连涛. 基于人工智能的移动通信网络优化与管理 [J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2023(16):61-63.
- [7] 洪曜庄. 移动通信技术助力人工智能的愿景成真 [C]//2019 世界人工智能大会. 国家发展和改革委员会; 科技部; 中国工程院; 中科院, 2019.
- [8] 兰国帅, 郭倩, 魏家财, 等. 5G+ 智能技术: 构筑“智能+”时代的智能教育新生态系统 [J]. 远程教育杂志, 2019, 37(3):14.
- [9] 王巍, 车翼飞. 移动通信技术专业“2+1”工学模式下创新实验基地建设的实践与思考 [J]. 科技视界, 2013, (30):20.
- [10] 董良. 信息通讯技术的创新实践控制 [J]. 数字化用户, 2019, 25(22):33.

电力公司数字化管理平台建设与应用研究

王骋宇

国网河南省电力公司郑州航空港经济综合实验区供电公司，河南 郑州 451100

DOI: 10.61369/ME.2024070007

摘 要： 随着智能电网、分布式能源等新型电力系统的不断发展，电网的复杂性和不确定性显著增加。传统管理模式难以实现对电网的实时监测和精准调控，容易导致电网运行的不稳定和安全隐患的增加。在用户需求方面，用户对供电可靠性、电能质量、服务响应速度等方面的要求越来越高，传统的供电服务模式难以满足用户的个性化需求。在市场竞争方面，随着电力体制改革的不断深入，电力市场逐步开放，供电公司面临着来自其他能源供应商和新兴电力服务企业的竞争压力。在这种情况下，供电公司迫切需要借助数字化技术，构建数字化管理平台，实现管理模式的创新和升级，以提高供电效率、优化服务质量、增强市场竞争力。

关 键 词： 数字化管理平台建设；供电服务；物联网

Research on Construction and Application of Digital Management Platform for Electric Power Companies

Wang Chengyu

State Grid Henan Electric Power Company Zhengzhou Aviation Port Economic Comprehensive Experimental Zone
Power Supply Company, Zhengzhou, Henan 451100

Abstract： With the continuous development of new power systems such as smart grids and distributed energy, the complexity and uncertainty of power grids have significantly increased. Traditional management models struggle to achieve real-time monitoring and precise regulation of power grids, which can easily lead to instability in grid operations and an increase in safety hazards. In terms of user needs, users are increasingly demanding higher reliability of power supply, better power quality, and faster service response times, making it difficult for traditional power supply service models to meet these personalized demands. In the context of market competition, with the deepening of power system reforms, the power market is gradually opening up, putting pressure on power companies from other energy suppliers and emerging power service enterprises. In this situation, power companies urgently need to leverage digital technology to build a digital management platform, innovate and upgrade their management models, thereby improving power supply efficiency, optimizing service quality, and enhancing market competitiveness.

Keywords： digital management platform construction; power supply service; Internet of Things

一、供电公司数字化管理平台建设概述

（一）数字化管理平台建设的内涵与目标

供电公司数字化管理平台是一个融合了先进信息技术，以数据为核心驱动，对供电公司运营管理各环节进行全面数字化升级与整合的综合性系统。该平台利用云计算、大数据、物联网、人工智能等前沿技术，实现对电网设备运行状态、电力营销业务、客户服务信息、企业资源配置等各类数据的实时采集、高效传输、深度分析与智能应用，旨在打破传统管理模式下的信息壁垒，提升管理效率与决策科学性，为供电公司的可持续发展提供强大支撑。

建设的主要目标：提升管理效率，通过数字化管理平台，实现业务流程的自动化与智能化，减少人工干预，缩短业务处理周

期；优化资源配置，借助大数据分析 with 人工智能技术，对电网设备运行状态、电力负荷分布、客户用电需求等数据进行深度分析，为资源配置提供科学依据；增强服务能力，以客户为中心，通过数字化管理平台整合客户信息，深入了解客户需求，为客户提供个性化、多元化的供电服务。

（二）数字化管理平台建设的关键技术

关键技术在于大数据，云计算，物联网和人工智能。其中大数据技术主要包括电网运行数据、用户用电数据、设备状态数据等。大数据技术能够对这些大规模、高维度的数据进行高效采集、存储、管理和分析。通过大数据分析，可以挖掘数据背后的潜在价值^[1]，实现对电网负荷的精准预测；云计算具有强大的计算能力和灵活的资源调配能力，能够为供电公司数字化管理平台提供高效的计算和存储支持。数字化管理平台需要处理大量的实

时数据和复杂的业务逻辑，云计算平台可以根据业务需求动态分配计算资源和存储资源，确保平台的稳定运行和高效响应；物联网技术实现了物理设备与互联网的连接，使设备之间能够进行数据交换和通信^[2]。在供电公司数字化管理平台中，物联网技术广泛应用于电网设备的监测和管理。通过在电网设备上安装传感器和智能终端，实现对设备运行状态的实时感知和数据采集，如变压器的油温、绕组温度、负荷电流，输电线路的弧垂、温度、覆冰情况等。同时，物联网技术还可以应用于电力营销领域^[3]，实现智能电表的远程抄表、电费实时结算等功能，提高电力营销的效率和准确性；人工智能技术在供电公司数字化管理平台中发挥着重要作用，能够实现智能化的决策和控制。在电网调度方面，人工智能算法可以根据电网实时运行数据和负荷预测结果，自动生成优化的调度方案，实现电网的经济、安全运行。

二、供电公司数字化管理平台建设现状与面临挑战

（一）现状分析

近年来，中国众多供电公司积极投身数字化管理平台建设，取得了一系列显著成果。国家电网作为中国电力行业的领军企业，大力推进数字化转型战略，构建了一体化“国网云”平台。该平台整合了电网生产、营销、调度、客服等核心业务系统，实现了海量数据的集中存储与高效共享。通过大数据分析技术，对电网运行数据进行深度挖掘，精准预测电力负荷，为电网的科学调度和优化运行提供了有力支持。在负荷预测方面，国家电网利用机器学习算法，结合历史用电数据、气象信息、节假日等因素，建立了高精度的负荷预测模型。通过对这些数据的实时分析，能够提前准确预测未来一段时间内的电力需求，为电网调度部门合理安排发电计划和电网运行方式提供了科学依据，有效避免了电力短缺或过剩的情况发生，提高了电力系统的稳定性和可靠性。

（二）面临的挑战与问题

1. 技术层面的挑战

首先数据安全方面，供电公司数字化管理平台集中了海量的电力数据，包括电网运行数据、用户用电数据、设备信息等，这些数据涉及国家能源安全和用户隐私，一旦发生数据泄露、篡改或丢失，将带来严重的后果^[4]。随着网络攻击手段的不断升级，如黑客入侵、恶意软件攻击、网络钓鱼等，数字化管理平台面临着严峻的数据安全威胁。其次是系统兼容性问题，供电公司在长期的发展过程中，积累了大量的业务系统和信息系统，这些系统在建设时采用了不同的技术架构、数据标准和接口规范。在数字化管理平台建设过程中，需要将这些分散的系统进行整合，实现数据的共享和业务的协同。一些老旧系统采用的是传统的数据库技术和通信协议，与数字化管理平台所采用的新技术不兼容，导致数据传输和共享困难；不同系统的数据格式和编码方式不一致，需要进行大量的数据转换和清洗工作，增加了数据处理的复杂性和成本^[5]；系统接口不统一，使得系统之间的互联互通难以实现，影响了业务流程的顺畅运行。这些兼容性问题不仅增加

了数字化管理平台建设的难度和成本，还可能导致系统运行不稳定，影响供电公司的正常运营。再者就是技术更新换代压力，数字化技术发展日新月异，新的技术和理念不断涌现，技术更新换代也带来了一系列的压力。一方面，新技术的引入需要投入大量的资金和人力资源，包括技术研发、设备采购、人员培训等，这对于供电公司来说是一笔不小的开支。另一方面，新技术的应用可能会带来新的风险和挑战，如技术不成熟、兼容性问题、安全隐患等，需要供电公司在应用过程中进行充分的测试和评估，确保新技术的稳定可靠运行。此外，技术更新换代还可能导致现有系统的重构和升级，这将对供电公司的业务连续性和稳定性产生一定的影响，需要合理安排系统升级计划，尽量减少对业务的干扰。

2. 管理与组织层面的问题

管理理念转变困难，长期以来，供电公司采用的是传统的管理模式，这种模式注重层级管理和流程控制，决策过程相对缓慢，对市场变化和客户需求的响应不够敏捷^[6]。一些管理人员可能认为数字化管理只是技术层面的变革，对管理理念和管理方式的影响不大，仍然沿用传统的管理思维和方法来指导工作；部分管理人员可能担心数字化管理会削弱自己的权力和地位，对数字化转型持抵触态度；还有一些管理人员可能缺乏数字化管理的相关知识和技能，不知道如何运用数字化技术来优化管理流程和提升管理效率。这些因素都导致了管理理念转变困难，制约了数字化管理平台的建设和应用。

组织架构调整复杂，数字化管理平台的建设和应用需要对供电公司的组织架构进行相应的调整，以适应数字化时代的业务需求。传统的组织架构通常按照职能进行划分，部门之间存在明显的边界，信息流通不畅，协同效率低下。为了实现数字化管理，需要打破部门壁垒，建立跨部门的协同工作机制，实现业务流程的一体化和数据的共享。

人员素质提升需求迫切，数字化管理平台的建设和应用对供电公司员工的素质提出了更高的要求，员工不仅需要具备扎实的专业知识和技能^[7]，还需要掌握数字化技术和数据分析能力。供电公司在新老员工培训方面存在不足，培训内容和方式不能满足员工素质提升的需求，培训体系不够完善，缺乏系统性和针对性。因此，迫切需要加强员工培训，提升员工的数字化素养和业务能力，以适应数字化管理平台建设和应用的需要。

3. 数据质量与应用难题

数据的准确性是数字化管理平台有效运行的基础，然而，在实际数据采集和录入过程中，由于各种原因，数据可能存在错误、缺失或不一致的情况，数据不准确会影响到数据分析的结果和决策的科学性，如基于错误的负荷数据进行电网调度，可能会导致电力供应不足或过剩，影响电网的稳定运行；根据错误的用户信息提供服务，可能会导致客户满意度下降。因此，确保数据的准确性是数字化管理平台建设和应用中需要解决的重要问题。

数据深度分析与应用不足，虽然供电公司积累了大量的电力数据，但目前对这些数据的分析和应用还主要停留在表面层次，缺乏对数据的深度挖掘和分析。许多供电公司只是利用数据进行

简单的统计和报表生成，没有充分发挥数据的潜在价值。此外，数据的深度分析和应用还需要具备专业的数据分析师和先进的分析工具，目前供电公司在这方面还存在一定的不足，制约了数据价值的挖掘和应用。

三、供电公司数字化管理平台的应用实践

在电网运营管理方面，供电公司数字化管理平台在电网运维管理中发挥着关键作用，通过多种技术手段实现了电网设备的实时监测、故障预警与智能运维^[8]，有效提升了电网的可靠性和稳定性。借助物联网技术，在电网设备上广泛部署各类传感器，实现对设备运行状态的全方位实时监测。变压器作为电网中的关键设备，通过在其内部和外部安装温度传感器、湿度传感器、油位传感器、振动传感器等，能够实时采集变压器的油温、绕组温度、油位、振动等运行参数，并将这些数据通过无线网络实时传输到数字化管理平台。平台对这些数据进行实时分析，一旦发现数据超出正常范围，立即发出预警信号，通知运维人员进行处理。其次，数字化管理平台还实现了电网设备的智能运维。通过与地理信息系统（GIS）的结合，平台能够直观地展示电网设备的地理位置分布和运行状态，为运维人员提供便捷的设备定位和巡检路径规划功能。

在电力营销管理方面，供电公司数字化管理平台整合了客户信息^[9]，利用大数据分析技术，实现了客户信息的精准管理、市场需求的准确预测以及营销策略的科学制定，为供电公司提升市场竞争力和客户满意度提供了有力支持。数字化管理平台全面整合了客户的基本信息、用电历史数据、缴费记录、用电习惯等多维度信息，建立了完善的客户信息数据库。通过对这些信息的深度分析，供电公司能够深入了解客户的用电需求和行为特征，为客户提供个性化的服务。

在安全风险管控方面，数字化管理平台利用物联网、大数据、人工智能等技术，对供电生产过程中的各类安全风险进行全面监测和分析。通过在生产现场部署各类传感器和智能监测设

备，实时采集设备运行状态、作业环境参数、人员位置等信息，并将这些信息传输到数字化管理平台。平台利用大数据分析技术，对这些数据进行实时分析，识别潜在的安全风险，并及时发出预警。

四、数字化管理平台建设与应用的优化策略

平台的持续优化与日常维护是确保系统稳定运行、提升用户体验的关键^[10]。在系统优化方面，应定期对平台的性能进行评估和分析，根据评估结果对系统进行针对性的优化。通过优化系统架构，提高系统的可扩展性和灵活性，以适应不断变化的业务需求。采用微服务架构，将平台的各个功能模块拆分成独立的微服务，每个微服务可以独立部署和升级，这样在业务需求发生变化时，可以方便地对相关微服务进行调整和扩展，而不会影响到整个系统的运行。同时，优化数据库设计，提高数据存储和查询效率。采用分布式数据库技术，将数据分散存储在多个节点上，提高数据的读写性能和可用性。对数据库索引进行优化，合理设计索引结构，减少数据查询的时间复杂度，提高数据查询的速度。

五、结论

本研究深入探讨了供电公司数字化管理平台的建设与应用，取得了一系列具有重要价值的研究成果。通过对数字化管理平台建设内涵与目标的解析，明确了其在提升供电公司管理效率、优化资源配置、增强服务能力等方面的关键作用。数字化管理平台以数据为核心，融合大数据、云计算、物联网、人工智能等先进技术，实现了供电公司运营管理各环节的数字化升级与整合，打破了传统管理模式下的信息壁垒，为公司的可持续发展提供了强大支撑。数字化技术将持续快速发展，为供电公司数字化管理平台带来更广阔的发展空间和更多的创新机遇。人工智能技术还将在电力负荷预测、电网调度优化、客户服务智能交互等方面发挥更大的作用，进一步提升供电公司的运营管理水平和服务质量。

参考文献

- [1] 刘祥振, 马超. 电网电气自动化中的智能感知与大数据分析技术研究 [J]. 电器工业, 2024, (06): 71-74.
- [2] 陈骢, 丁徐楠, 韦良森, 等. 计量箱创新管理策略: 从传统到数字化的转变 [J]. 电气技术与经济, 2023, (06): 234-236.
- [3] 张慧. 电力系统自动化中基于物联网的设备状态监测与运维管理研究 [J]. 家电维修, 2024, (08): 74-76.
- [4] 邓梦沁. 智能配电网在电力营销中的应用与思考 [J]. 智慧中国, 2024, (08): 62-63.
- [5] 刘婷. 财务共享模式下企业业财一体化融合路径探究 [J]. 中国管理信息化, 2024, 27(15): 61-64.
- [6] 张东风. 大数据背景下事业单位人力资源管理改革创新路径探索 [J]. 大众标准化, 2024, (14): 161-163.
- [7] 闫琰, 陈微尘, 王宇威, 等. 人力资源管理新视角: 组织行为学如何助力企业创新发展 [J]. 现代班组, 2024, (12): 40-42.
- [8] 沈赣华, 闫虎, 刘熹. “双碳”战略下能碳数字化运营管理服务平台建设 [J]. 价值工程, 2024, 43(22): 114-116.
- [9] 段志田, 张皓, 邹禹平, 等. 基于电力营销大数据的数字化管控平台研究与应用 [C]// 中国电力科学研究院. 2017智能电网发展研讨会论文集. 国网天津市电力公司客户服务中心, 2017: 488-493.
- [10] 孙高济. 数字化平台管理控制理论与决策优化方法. 浙江省, 台州学院, 2019-03-10.

大疆机场3与Matrice 4系列无人机电力巡检技术与应用研究

吴佳松, 余尚泽, 詹仕钰, 张鑫诚, 唐磊
武汉学院信息工程学院, 湖北 武汉 430212
DOI: 10.61369/ME.2024070025

摘要 : 随着电网智能化与无人机技术的不断融合, 大疆创新推出了新一代电力巡检解决方案首款可车载部署的无人值守机场平台“机场3”(DJI Dock 3)以及Matrice 4系列多传感智能无人机。本文首先介绍机场3与Matrice 4D/4TD无人机的硬件构成及关键性能, 包括全新的图传与定位系统; 然后分析其多种部署模式, 如固定站点与车载机库的组合; 接着阐述数据通信与图传架构(包括OcuSync 4+ 远距离传输与D-RTK 3中继站); 并重点论述Matrice 4T在AI目标识别和红外热成像测温方面的能力; 结合典型电力巡检场景, 探讨系统在缺陷检测、设备监测等方面的应用; 最后分析该系统的优势与现存挑战, 例如高效自动化巡检能力与传输距离、车载作业范围等限制。研究表明, Airport 3+Matrice 4组合通过无人值守平台、自动化航线与智能感知, 实现了电网巡检的高效便捷, 但仍需解决通信覆盖、法规规范等问题。

关键词 : 大疆机场3; Matrice4系列; 电力巡检; 无人值守平台; AI识别; 热成像; 图传系统

Research on Power Inspection Technology and Application of DJI Airport 3 and Matrice 4 Series Unmanned Aerial Vehicles

Wu Jiasong, Yu Shangze, Zhan Shiyu, Zhang Xincheng, Tang Lei
Wuhan College School of Information Engineering, Wuhan, Hubei 430212

Abstract : With the continuous integration of power grid intelligence and unmanned aerial vehicle (UAV) technology, DJI Innovation has launched the first vehicle-deployable unmanned airport platform "Airport 3" (DJI Dock 3) for the new generation of power inspection solutions, as well as the Matrice 4 series multi-sensor intelligent UAVs. This paper first introduces the hardware composition and key performances of Airport-3 and Matrice 4D/4TD unmanned aerial vehicles, including the brand-new image transmission and positioning system; Then analyze its various deployment modes, such as the combination of fixed sites and vehicle-mounted hangars; Then elaborate on the data communication and image transmission architecture (including OcuSync 4+ long-distance transmission and D-RTK 3 relay station); And focus on discussing the capabilities of Matrice 4T in AI target recognition and infrared thermal imaging temperature measurement; Combined with typical power inspection scenarios, this paper discusses the application of the system in defect detection, equipment monitoring, etc. Finally, analyze the advantages and existing challenges of the system, such as the limitations of efficient automated inspection capabilities and transmission distances, as well as the range of on-board operations. Studies show that the Airport 3+Matrice 4 combination has achieved efficient and convenient power grid inspection through unmanned platforms, automated routes and intelligent perception. However, problems such as communication coverage and regulatory norms still need to be solved.

Keywords : DJI Airport 3; Matrice4 series; power inspection ; unattended platform ; AI recognition ; thermal imaging ; image transmission system

引言

近年来, 随着电力系统规模扩张与智能化升级, 对输电线路和变电设备的巡检提出了更高的效率和精度要求。传统人工巡检周期

依托大学生科研创新团队: 批准号: XST202404 智空安防团队, XST202406 三维机器视觉与逆向工程检测创新团队, XST202310 人工智能研究团队, 202413634001 智影空探——轻量型共轴无人机, 202413634008S 无人机起飞空域管理系统——自动生成姿态通行令牌, 202413634009 基于5G--北斗的智能温湿度监测装置, XCDC202404 蓝航守望者--北斗集成水质监测技术系统, XCDC202436 基于北斗卫星的近海水质智能监测养殖系统

长、存在风险,推动无人机智能化巡检方案成为行业热点。大疆新一代电力巡检系统以全无人值守机场和多传感无人机为核心,首次实现了车载部署,适应了复杂场景下的连续长距巡检^[2]。本文在分析《大疆无人机遥感测绘技术在工程测绘中的应用探究》写作风格的基础上,对机场3+Matrice 4技术架构与应用案例进行系统梳理,期望为电力行业无人化巡检提供参考^[1]。

一、产品技术构成



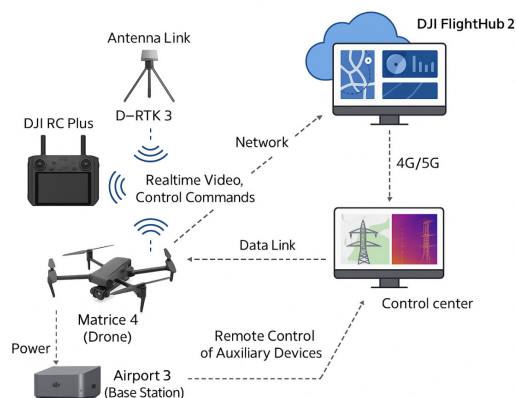
图1所示为大疆机场3基地与Matrice 4D无人机的搭载场景。

Airport 3(DJI Dock 3)作为无人值守作业站,具备IP56防护等级及-30℃至50℃宽温工作范围,可全天候连续作业³⁴。站体内置自动起降、充电模块,并采用业界版OcuSync4+图传,无遮挡条件下图传距离可达25公里。机场3支持与D-RTK3多功能站配合使用,后者可作为RTK基准站或空中中继部署于高处,大幅提高RTK定位和图传信号的抗遮挡能力,解决复杂环境下的通信与定位问题⁵⁶。Matrice 4D和4TD无人机为高性能四旋翼系统,配备与Matrice 4系列同级的光电载荷:包括24mm广角摄像头(4/3 CMOS, 20MP,机械快门)用于全景巡视;70mm(1/1.3 CMOS,48MP)与168mm(1/1.5 CMOS, 48MP)长中焦镜头,可在10米处识别输电线缆螺栓细节、250米外捕捉工器具信息⁷;全向线激光测距仪测距范围达1800米,可实时标注目标距离。Matrice4T另加装了640x512像素(超分辨率模式可达1280x1024)的非制冷氧化钒热成像相机⁸⁹,并配备前视近红外补光灯(有效照射距离100米)⁹和IR-Cut滤光片,实现昼夜连续成像。热成像模块支持点测温 and 区域测温,高增益模式下测温精度达±2℃(或±2%)¹⁰,可检测-20℃~150℃范围内的热点。Matrice4系列内置6颗低照度鱼镜头与红外三维测距传感器,用于构建全向避障体系¹¹¹²。上述无人机配备DJI RC Plus 2工业遥控器,可独立操控并具备空中信号中继功能¹。总体来看,大疆新一代机场3+Matrice4D/4TD系统通过高防护全自动基地与多源传感无人机的组合,实现了电力巡检作业的自动化与精细化需求^[2]。

二、部署模式

感无人机的组合,实现了电力巡检作业的自动化与精细化需求。等高处实现24小时无人值守;车载部署模式是其最大创新点

之一,可将机场3机箱固定于巡检车辆上随车移动¹³³。车载部署配合专用云台固定装置,可在行驶中保护基座设备、加快应急调度响应,同时覆盖长距离线路巡检需求¹³。此外,系统支持一机多库灵活切换:一架Matrice4无人机可挂靠多个机场并互为备用,多机场协同飞行任务;机场之间可通过多机场任务配置实现分散式区域管理¹⁴。机场3支持“开盖即飞”快速起飞,进一步提高调度效率³。在部署过程中,借助大疆司空2(FlightHub2)无人机任务管理云平台,可对所有机场、无人机和飞行任务进行集中规划与实时监控¹⁵¹⁶。例如,运营人员可在FlightHub 2上预设巡检航线并下发至指定机场,一线人员则通过Pilot 2 App监视航路覆盖情况和AI识别结果,实现远程协同。借助这种灵活部署模式,大疆机场3与Matrice4系统能够覆盖包括城乡电网、远郊线路、岛屿输电等多种场景^[3]。



三、数据通信与图传系统

为保障大疆无人机系统在长距离电力巡检中的稳定通信与厘米级定位能力,系统配备了三层次的通信架构:遥控图传链路、地面中继与云端调度平台。

(一) 第一层: 遥控与图传链路 (OcuSync 4+)

Matrice 4系列无人机与DJI RC Plus 2遥控器之间采用了OcuSync 4+ (行业版)图传协议,理论最大有效图传距离为25 km,具备低延迟与高带宽(最大1080p@60fps)传输能力。其链路预算可由以下公式近似描述:

$$Pr = Pt + Gt + Gr - Lfs - Lm$$

其中:

- Pr: 接收端功率 (dBm)
- Pt: 发射功率 (dBm)
- Gt, Gr: 发射/接收天线增益 (dBi)
- Lfs: 自由空间路径损耗 (dB), 按公式: $Lfs = 20\log_{10}(d)$

$$+ 20\log_{10}(f) + 32.45$$

d为距离（km），f为频率（MHz）

– Lm：多径损耗及其他边缘效应（dB）

该系统在2.4 GHz / 5.8 GHz双频模式下，可在无遮挡环境维持稳定链路，对复杂地形环境具有一定穿透力。

（二）第二层：D-RTK 3多功能站（基准站与中继模式）

当D-RTK 3作为固定基准站使用时，配合GNSS（全球导航卫星系统）可实现厘米级定位精度。其精度估算模型如下：

$$\sigma_{\text{RTK}} = \sqrt{\sigma_{\text{base}}^2 + \sigma_{\text{rover}}^2 + \sigma_{\text{link}}^2}$$

其中：

– σ_{RTK} ：RTK总体误差

– σ_{base} ：基准站观测误差

– σ_{rover} ：移动站观测误差

– σ_{link} ：基站与移动站数据链误差

在复杂环境下，如城市高楼密集区或山区遮挡区，D-RTK 3可切换为中继模式，部署于高空平台（楼顶或铁塔顶部），用于增强无人机与地面站的信号穿透能力^[4]。

（三）第三层：调度与云端管理（FlightHub 2平台）

系统部署FlightHub 2云平台作为全局调度与数据汇集中心，支持图传与定位数据上云存储、AI检测结果远程查看、航线、任务、状态图层可视化以及附件设备远程控制。

该平台与RC Plus 2遥控器配合，可建立空中中继网络，即一架Matrice 4可临时悬停并转发其他作业无人机信号，构建局部Mesh中继拓扑。

（四）综合通信保障模型

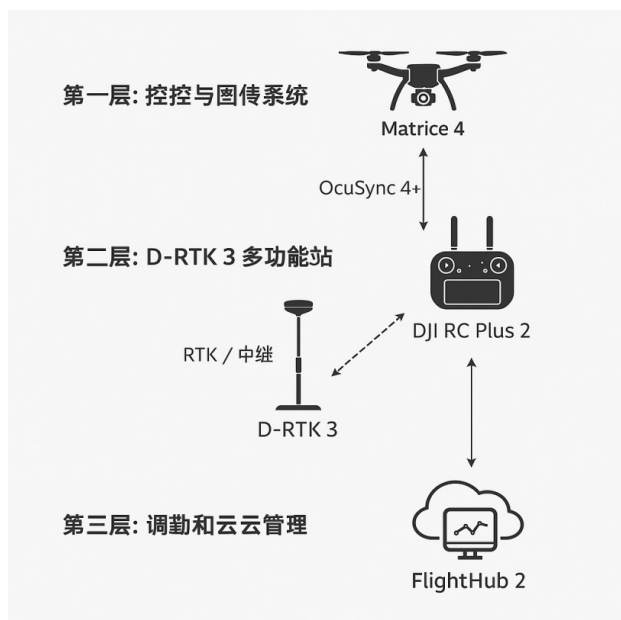
整个系统通信可靠性的理论信噪比（SNR）模型为：

$$\text{SNR} = P_r / (N_0 * B)$$

其中：– N_0 ：噪声功率谱密度（W/Hz）

– B：通信带宽（Hz）

系统中通过链路冗余（多频切换、中继补强、RTK缓存机制）确保复杂地形环境下的通信稳定性与图像实时传输质量。



四、AI识别与热成像测温能力

Matrice4系列在智能识别和温度检测方面具备显著升级。其基于高性能机载计算平台的“智能检测”功能，可实时识别并定位关键目标。内置的AI模型能够检测并标注人、车、船等目标，同时支持用户自行训练和上传第三方算法模型12。固件升级后，智能检测模块可调整识别置信度阈值，识别目标数量和精度均有提升12。结合飞行器的高清可见光传感器群，巡检时可自动锁定并跟踪电网设备缺陷。例如，Matrice 4T配备三个4800万像素相机，拍摄分辨率大幅提升17。实测表明，相同拍摄距离下，其可见光镜头捕捉的细节优于上一代机型，配合缺陷智能算法，可精准识别绝缘子破损、导线松脱等隐患17。同时，Matrice 4T的红外热成像相机默认开启超分辨率模式，分辨率提升至1280x102418；每台设备出厂前完成了测温精度标定，并内置温度传感器实时校正测量结果18，测温误差可控制在±2° C以内10。这使得系统能够实时监测设备温度，快速发现如变压器热点、断路器过热等问题，并生成高精度热图和温度报告。上述AI识别与热成像能力，为长距离巡线中的目标检测与状态评估提供了强大支撑，显著提高了巡检的自动化与准确度1211^[9]。

五、电力巡检具体应用案例

实际应用表明，Airport 3+Matrice 4系统可显著提升巡检效率并降低风险。在典型的输电线路巡检中，无人机可沿预定航路执行夜间巡检，利用热成像探测高压设备局部过热。由于四旋翼机身折叠便携，可在偏远林区快速被车载运输至线路附近，通过Airport 3自动起降完成长距离“点对点”巡检，减少人员进入高压区次数。以铁塔线路为例，Matrice 4T可在50米高塔下方释放无人机，70mm和168mm长焦相机从10米至250米范围内精细拍摄铁塔结构与输电导线，能够识别细小螺栓裂纹和垂线上绑定的塑料绳索等细节7。同时，热成像模式可捕捉绝缘子表面裂痕旁的温度异常，实现高精度缺陷定位。在变电站巡检场景，航线规划功能保证全景覆盖，Matrice 4E的0.5秒连拍和Smart 3D Capture可以快速生成站区精细化三维模型19。无人机搭载的AI算法可对巡检画面中的设备仪表、标识等目标自动识别并标记，大幅减轻人工判图负担。例如，在潮湿环境或夜间拍摄时，夜视能力强的鱼镜头头可辅助完成自动避障，确保飞行安全11。多次实测证明，Matrice 4T在“画质、效率、安全”三方面相较上一代机型有显著提升，使其成为电网巡检的“全能之眼”，推动智能化巡检新模式的建立2011^[6-8]。

六、系统架构

系统总体架构如图示所示，通过硬件融合和软件平台将各单元紧密连接。Airport 3(基地站)与Matrice 4无人机构成前端工作单元，无人机完成图像采集、AI识别与温度测量。无人机与遥控器之间通过OcuSync 4+图传链路交换实时视频与控制指令；地面

可配置 D-RTK 3 中继站 (天线链路) 增强此链路。后端部署有 DJI 司空 2 (FlightHub 2) 云平台与控制中心, 用于任务规划、数据融合和远程监控 [15][16]。具体架构特点包括: 无人机内部集成高算力飞控, 可在边控 / 云端算法指令下执行智能任务; 基站侧 D-RTK 3 既做 RTK 基准站也做信号中继; 飞行和作业数据经 4G/5G 网络传回地面指挥中心, 运营人员可通过司空 2 界面监视所有机场和无人机的态势^[9]。



七、优势与挑战

大疆机场 3+Matrice 4 系统在电力巡检中展现了显著优势: 自动化与高效率。无人值守机场支持 24 小时不间断巡航, 有效减轻

人工参与压力; 多机场编队和任务预案极大提高巡检覆盖率 [15]。信息化与智能化水平高: AI 目标检测、实时热成像与激光测距为巡检数据提供了精细化分析能力, 促进了问题自动报警和数据可视化管理 [12][17]。性能提升与可靠性。Matrice 4 系列在图像清晰度、低光态势感知与抗风性能方面均比上一代有大幅升级 (最高风速下稳定起降, 续航相对增加 37% [21])。可扩展性好: 系统模块化设计允许后续功能迭代, 如机载算法的更新、云服务的集成等。正如业内报道所言, 新一代系统的问世, 为电网巡检带来了“智能化革命” [22]。然而, 现实应用中仍面临挑战。首先, 作业范围限制: 尽管 OcuSync 4+ 和中继站扩展了图传距离至 25 公里 [3], 在复杂地形 (山谷、峡谷等) 或法规限制区域, 实际有效半径可能受限。其次, 车载部署局限: 车载机场需依赖道路网络, 不适用于无路可至的偏远线路, 且车辆振动和供电也需额外考虑; 同时, 车载模式下探测范围依然受限于机库布置和航程。再次, 环境适应性与安全性: 尽管设备在 -30°C ~ 50°C 的温度下均可运行 [4], 极端风雨和复杂电磁环境仍可能影响传感器^[10]。

参考文献

- [1] 苏盛; 李银红; 段献忠. 电网故障自组织临界性及其在应对极端天气中的应用 [J]. 科学通报, 2009(03).
- [2] 宋立业; 姜钧. 电力巡检无人机无线充电线圈场效应分析及优化 [J]. 制造业自动化, 2023(03).
- [3] 彭湛博. 无人机实时高清图传系统的设计与实现 [D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [4] 缪希仁; 刘志颖; 鄢齐晨. 无人机输电线路智能巡检技术综述 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2020(02).
- [5] 刘传洋; 吴一全; 刘景景. 无人机航拍图像中电力线检测方法研究进展 [J]. 中国图象图形学报, 2023(10).
- [6] 常安; 陈振辉; 付明, 等. 无人机电力巡检航线智能规划及自主巡检研究 [J]. 电网与清洁能源, 2023(07).
- [7] 李海龙; 刘金慧; 张志国, 等. 基于无人机的输电线路工程图像采集研究 [J]. 电子设计工程, 2022(08).
- [8] 裴扬. 飞机易损性建模方法研究及 DMECA 软件开发 [D]. 西北工业大学, 2003.
- [9] 陈杰; 唐占元; 安之焕, 等. 基于无人机采集图像的输电线路异常检测方法研究 [J]. 电测与仪表, 2023(07).
- [10] 陈嘉琛; 俞曜辰; 陈中, 等. 基于改进 YOLOv3 的输电线路缺陷识别方法 [J]. 南方电网技术, 2021(01).

浅谈医院三级等保与网络安全设备的协同构建

张伟强

中国中元国际工程有限公司，北京 100089

DOI: 10.61369/ME.2024070026

摘 要： 随着医疗行业与信息技术的深度融合，医院信息化程度不断提高。从电子病历系统、医院信息系统（HIS）到远程医疗、智慧医疗等应用的普及，大量医疗数据产生、存储和传输，如患者的个人信息、诊疗记录、药品信息等。但医院网络环境日趋复杂，面临诸多安全威胁，像黑客攻击、恶意软件入侵、数据泄露等。本文以某三甲医院信息机房及网络安全设备建设为例，探讨如何保障医院网络安全。

关 键 词： 信息机房建设；三级等保；网络安全

A Brief Discussion on the Collaborative Construction of the Third-level Information Security Protection for Hospitals and Network Security Devices

Zhang Weiqiang

China IPPR International Engineering Co., Ltd. Beijing 100089

Abstract： With the deep integration of the medical industry and information technology, the informatization level of hospitals has been continuously increasing. From the popularization of applications such as the electronic medical record system, the Hospital Information System (HIS), telemedicine, and smart healthcare, a large amount of medical data is generated, stored, and transmitted, including patients' personal information, diagnosis and treatment records, drug information, and so on. However, the network environment in hospitals is becoming increasingly complex, and it faces numerous security threats, such as hacker attacks, malicious software intrusions, and data breaches. Taking the construction of the information computer room and network security equipment of a certain Class-A tertiary hospital as an example, this paper explores how to ensure the network security of hospitals.

Keywords： construction of information computer room; third-level information security protection; network security

引言

随着“健康中国 2030”战略的推进与人工智能、物联网技术的深度应用，医疗行业正经历从传统诊疗模式向“智慧医疗”的跨越式变革。电子病历系统、医院信息系统（HIS）、医学影像信息系统（PACS）等核心业务系统的普及，以及远程手术、互联网医院等创新场景的落地，使医疗数据呈现爆发式增长。医院之间的信息共享和业务协同也日益紧密，通过区域医疗信息平台，实现了患者信息的互联互通，促进了医疗资源的合理配置。然而，医疗行业信息化程度的提高也带来了网络安全挑战^[1]。医院网络系统中存储着大量患者的个人信息、诊疗记录、健康档案等敏感数据，这些数据不仅关乎患者的隐私和权益，还涉及医疗服务的安全和质量。因此，加强医院网络安全建设，保障医疗信息系统的安全稳定运行，已成为医疗行业信息化发展的重要任务。网络安全等级保护制度作为我国网络安全领域的基本制度，为医院网络安全建设提供了重要的指导和规范。其中，三级等保是针对重要信息系统的安全保护标准，要求医院在技术和管理层面采取严格的安全措施，以确保信息系统的安全性和可靠性。本文从项目概况、等保概念、信息机房建设、网络系统设计及安全管理等方面来阐述。

一、项目概况

本项目为三级甲等综合医院，包括医疗综合楼、科研教学楼、感染楼、发热门诊等，规划总建筑面积约22万平方米，住院床位数1200床。信息机房位于科研教学楼，面积为320平方

米，灾备机房位于医疗综合楼，面积为100平方米。本项目内、外网采用双核心双汇聚单接入的三层结构网络体系，网络传输采用万兆主干、千兆桌面的网络传输方式。医院的信息管理系统（HIS）、医学影像系统（PACS）、临床信息系统（CIS）、放射信息系统（RIS）等医院信息系统、各类资产管理系统、智慧医

疗、候诊呼叫信号系统、护理响应信号系统等接入内网。

二、等保概述

达到三级保护级别的信息系统，需构建系统化的安全防护体系。该体系应依据统一的安全策略进行规划与部署，从而抵御来自外部专业攻击团队的恶意侵袭。这些攻击者往往具备充足的资源与技术能力，攻击手段更为复杂和隐蔽。同时，系统还须具备应对严重自然灾害等不可抗力因素的能力，以及防范其他同等级别危害的威胁。在安全监测与响应方面，三级保护对象需建立有效的安全监测机制，能够实时感知并识别各类攻击行为。一旦发生安全事件，系统应迅速启动应急响应流程，采取有效措施进行处置。此外，系统应具备完善的灾备与恢复机制，在遭受安全威胁导致系统受损后，能够快速恢复核心功能和大部分业务，将损失控制在最小范围内，保障信息系统的持续稳定运行。

三、机房建设要求

1. 本项目机房设置在科研教学楼三层，避开强电场及强磁场（如变配电室）、强震动源（如空调机房）、强噪声源（如柴发机房）、易发生火灾、水灾等区域。

2. 机房出入口设置人脸识别门禁系统，可以控制、鉴别和记录进出信息机房的人员。

3. 机房门口处设置入侵报警系统。

4. 机房内设置视频监控系统，视频监控主机及存储设备设置在信息机房值班室内。

5. 机房设置火灾自动报警消防系统，对机房划分区域进行管理，区域和区域之间设置隔离防火措施；设置漏水检测仪器，对机房进行漏水检测和报警。

6. 机房设置温湿度传感器及空调自控系统，使机房温湿度变化在设备运行的范围内。

7. 本项目设置2套 UPS，提供30的备用电力供应，满足设备在市电断电情况下的正常运行要求。

四、网络安全设备设计

网络安全是医院三级等保的关键环节。应有详细网络拓扑图，清晰展示网络架构和设备连接关系，便于网络管理和故障排查。核心交换机、防火墙、路由器等网络设备的配置必须符合要求，进行Vlan划分，有效防止网络风暴和非法访问；配置QoS流量控制方案，根据业务需求合理分配网络带宽，确保关键业务的网络性能；配备访问控制策略，对网络访问进行精细控制，只允许合法的访问流量通过，防止非法访问和攻击。重要网络设备和服务器应进行IP/MAC绑定，确保设备身份的唯一性和网络访问的安全性。配备网络审计设备，对网络活动进行全面记录和审计，以便及时发现和追溯安全事件；部署入侵检测或防御设备，实时监测网络流量，及时发现并阻止入侵行为。交换机与防火墙

需建立严格的身份鉴别体系^[3]。设备应采用强身份认证机制，设置具有唯一性的用户名，并要求配置复杂度高的密码，通过设置密码长度、大小写字母、数字与特殊字符组合等要求，提升密码破解难度。同时，为强化账户安全，需制定完善的登录访问失败处理策略，当出现多次无效登录尝试时，系统将自动触发账户锁定机制，暂停该账户的登录权限，并在锁定期间采取审计记录等措施，有效抵御暴力破解攻击，切实保障网络设备的访问安全。网络链路、核心网络设备和安全设备需要提供冗余性设计，当主链路或设备出现故障时，备用链路或设备能够自动切换，确保网络的连通性和可用性^[4]。

服务器主机安全直接关系到医院信息系统的稳定运行。服务器的自身配置应符合严格要求，强化身份鉴别机制，采用多种身份验证方式；完善访问控制机制，根据用户角色和业务需求，对服务器资源进行细粒度的访问控制；建立安全审计机制，对服务器的操作进行全面审计，记录操作行为和事件，便于事后追溯和分析；安装防病毒软件，实时监控和查杀病毒，防止病毒感染服务器，确保系统安全。应用服务器和数据库服务器应配置多台使其具有冗余性，采用双机热备或集群部署等方式，提高服务器的可用性和可靠性，当一台服务器出现故障时，保证另一台服务器能够立即接管业务，确保系统不间断运行。在服务器与关键网络设备部署上线前，必须开展系统性的安全检测工作^[5]。借助专业的漏洞扫描工具，对设备进行全维度的安全评估，重点排查Windows操作系统、数据库管理系统、各类系统软件及其开放端口存在的安全隐患。针对检测发现的中高级别漏洞，需建立严格的修复机制，确保在设备上线前完成漏洞修补，从而有效提升系统的安全防护水平，降低遭受外部攻击的可能性。此外，为强化安全事件的溯源与分析能力，应配置独立的日志管理服务器，对主机系统与数据库产生的审计日志进行集中存储与管理。通过规范化的日志收集与存储策略，确保日志数据的完整性与准确性，为后续的安全审计与事件分析提供可靠依据，便于统一管理和分析^[6]。

应用安全关乎医院信息系统的业务功能正常实现和数据安全。应用自身的功能应符合等保要求，加强身份鉴别机制，确保用户身份的真实性和合法性；完善审计日志功能，记录应用操作的详细信息，便于审计和追溯；采用通信和存储加密技术，对重要的数据在传输和存储过程中进行加密，以防止数据被窃取和篡改。应用处应考虑部署网页防篡改设备，实时监控网页内容，防止网页被非法篡改，确保医院对外发布信息的真实性和完整性^[7]。

在医院三级等保体系架构中，数据安全保障处于核心地位。为防范数据丢失风险，需构建完善的数据备份体系。一方面，建立本地数据备份机制，每日定时将关键业务数据同步至院内信息机房，确保数据在本地存储环境中的冗余性和可用性；另一方面，针对医疗核心数据，需进一步实施异地备份策略。通过加密传输通道与安全通信协议，将核心数据实时或定期传输至异地备份站点，形成跨地域的数据存储副本。这种双备份架构能够有效抵御自然灾害、硬件故障等极端情况对数据的毁灭性破坏，确保

在本地数据中心遭遇重大事故时，仍可凭借异地备份数据快速恢复业务系统运行，保障医疗服务的连续性与数据完整性^[9]。

五、安全管理

在管理层面，安全管理制度是保障医院信息系统安全的重要环节。应制定全面、详细的安全管理制度，涵盖网络安全、数据安全、人员安全等各个方面。明确安全管理目标、职责分工、操作流程和应急处理机制等，确保安全管理工作有章可循。例如，制定数据访问权限管理制度，规定不同人员对患者数据的访问级别和权限，防止数据泄露；建立安全事件报告和处理制度，明确安全事件的报告流程和处理方法，确保安全事件能够得到及时有效地处理^[10]。

医院应设立专门的安全管理机构，负责统筹协调医院信息系统的的市场管理工作。明确机构内各岗位的职责和权限，确保安全管理工作的有效实施。例如，设置安全管理员岗位，负责日常的安全管理工作，如安全设备的配置和维护、安全事件的监测和处理等；设立安全审计员岗位，负责对安全管理工作进行审计和监督，确保安全管理制度的执行。

人员安全管理是防止内部安全风险的关键。加强对医院员工的安全意识培训，提高员工对网络安全的认识和重视程度，使其了解网络安全的重要性和相关法律法规。培训内容包括网络安全基础知识、安全操作规程、数据保护意识等，通过案例分析、模拟演练等方式，增强员工的安全意识和应急处理能力。建立人员访问权限管理制度，根据员工的工作职能和需求，分配最小化的访问权限，定期对员工的访问权限进行审查和更新，防止权限滥用和数据泄露。对涉及敏感信息的人员进行背景审查和定期考核，确保人员的可靠性和安全性^[10]。

系统建设管理贯穿于医院信息系统建设的全过程。在系统规

划阶段，应充分考虑网络安全因素，将安全需求纳入系统设计方案，确保系统在建设之初就具备良好的安全性能。在系统开发阶段，遵循安全开发规范，采用安全的开发技术和工具，对代码进行安全审查和漏洞检测，防止因开发过程中的安全漏洞导致系统安全风险。在系统验收阶段，严格按照等保标准进行验收，对系统的安全功能和性能进行全面测试，确保系统符合三级等保要求。

系统运维管理是保障医院信息系统长期安全稳定运行的重要环节。建立系统运维管理制度，明确系统运维的流程和要求，包括系统的日常维护、故障处理、升级更新等。定期对系统进行安全检查和评估，及时发现并修复安全漏洞。建立系统应急响应机制，制定应急预案，定期进行应急演练，确保在发生安全事件时，能够迅速、有效地进行应急处理，降低安全事件的影响。对系统运维过程中的操作进行详细记录，便于追溯和审计。

六、总结

随着医疗信息化的加速推进与网络安全形势的深刻变革，医院网络安全呈现多维度发展趋势，同时也面临诸多挑战。云计算、大数据、人工智能、物联网等新兴技术在医疗领域的深度融合，使得医院网络安全环境日益复杂：云计算在实现系统弹性扩展的同时，带来数据云端存储安全与服务提供商信任风险；大数据应用丰富了医疗决策依据，但也加剧了患者数据泄露风险；人工智能虽提升了诊疗效率，但其算法漏洞可能导致诊断失误；物联网实现医疗设备互联互通，却带来设备身份认证与数据传输安全隐患。为此，医院需强化新兴技术安全风险研究，创新安全防护技术与管理模式，需要持续关注网络安全态势，及时调整网络安全防护策略，以应对不断变化的安全威胁。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会 . GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求 [S]. 2019.
- [2] 中华人民共和国国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会 . GB/T 25070-2019 信息安全技术 网络安全等级保护安全技术要求 [S]. 2019.
- [3] 刘建伟，王育民. 网络安全：技术与实践（第2版）[M]. 北京：清华大学出版社，2011.
- [4] 纪爱民. 计算机安全的思想与方法（第3版）[M]. 北京：电子工业出版社，2015.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 智能建筑设计标准：GB 50314-2015 [S]. 北京：中国计划出版社，2015.
- [6] 住房和城乡建设部 . 火灾自动报警系统设计规范：GB 50116-2013 [S]. 北京：中国计划出版社，2013.
- [7] 住房和城乡建设部 . 消防设施通用规范：GB 55036-2022 [S]. 北京：中国建筑出版传媒有限公司，2022.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局 . 综合医院建筑设计标准：GB 51039-2014 [S]. 北京：中国计划出版社，2014.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 安全防范工程技术标准：GB 50348-2018 [S]. 北京：中国计划出版社，2018.
- [10] 住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局 . 建筑电气与智能化通用规范：GB 55024-2022 [S]. 北京：中国建筑出版传媒有限公司，2022.

