

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 9 September 2025 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



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



中文刊名：科技创新与工程
ISSN：3060-8996（纸质）3060-8988（网络）
出版语言：华文
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering
ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《科技创新与工程》征稿函

期刊概况：

中文刊名：科技创新与工程
ISSN：3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)
出版语言：华文刊
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

出版格式要求：

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

版权声明/Copyright

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

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



出刊及存档：

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

作者权益：

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

评审过程：

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

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 9 September 2025
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主 编

康继军

Jijun Kang

编 委

刘 敏 Min Liu

龚勤林 Qinlin Gong

陈 升 Sheng Chen

包 艳 Yan Bao

夏旭东 Xudong Xia

- | | | |
|----|-------------------------------------|---|
| 1 | 无人机多机协同侦察系统技术探究
/ 蔺俊彦 | / 杨海柳 王智永 刘媛 黄建利 舒誉 |
| 4 | 汽车研发试制阶段过线问题多领域协同分析与控制方法研究
/ 王沿钢 | 22 基于无人机的风机叶片自主巡检系统设计与实现
/ 李乐乐 |
| 7 | DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中的应用与精度分析
/ 陈强 | 25 随动线束塑形建模方法
/ 冯靖凯 卢治兵 张广超 代亚新 詹俊 |
| 10 | 船舶柴油机润滑系统智能监测与故障预警技术研究
/ 莫金飞 | 28 计量检定技术在食品安全风险防控中的应用与优化研究
/ 包塔娜 冯平 高雪婧 原海升 云昊雨 |
| 13 | 挤压工艺对 6061 铝合金晶间腐蚀行为的影响机理研究
/ 滕威 | 31 基于带阻尼比正弦波法的高加速冲击技术研究
/ 吴军 吴佳 |
| 16 | 新能源电站配套储能容量优化配置方法研究
/ 石静雯 | 34 军用飞机核生化洗消发展研究
/ 张瑞彩 朱艳艳 王思静 彭靖棠 |
| 19 | 小型移动空调系统结构设计与性能优化研究 | 39 浅谈人工智能医疗设备应用下医学装备管理新挑战
/ 王玲 |
| | | 42 智能化节能管理系统在碳减排中的应用与发展
/ 刘晓英 |

- 1 Technical exploration of multi-drone cooperative reconnaissance system / Junyan Lin
- 4 Research on Multi-Domain Collaborative Analysis and Control Methods for Crossing Line Problems in the Trial Production Stage of Automobile Research and Development / Yangang Wang
- 7 Application and Precision Analysis of Digital Radiography in Weld Defects Identification / Qiang Chen
- 10 Research on Intelligent Monitoring and Fault Early Warning Technology for Marine Diesel Engine Lubrication Systems / Jinfei Mo
- 13 Research on the Mechanism of Extrusion Process Effects on Intergranular Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy / Wei Teng
- 16 Research on Optimal Configuration Methods for Energy Storage Capacity in New Energy Power Stations / Jingwen Shi
- 19 Research on the Structure Design and Performance Optimization of Small Mobile Air Conditioning System / Hailiu Yang Zhiyong Wang Yuan Liu Jianli Huang Yu Shu
- 22 Design and Implementation of an Autonomous Wind Turbine Blade Inspection System Based on Unmanned Aerial Vehicles / Lele Li
- 25 Modeling method for shaping follow-up wire harnesses / Jingkai Feng Zhibing Lu Guangchao Zhang Yixin Dai Jun Zhan
- 28 Application and Optimization of Metrological Verification Technology in Food Safety Risk Prevention and Control / Ta'na Bao Ping Feng Xuejing Gao Haisheng Yuan Haoyu Yun
- 31 Research on High Acceleration Shock Technology Based on Sine Wave Method with Damping Ratio / Jun Wu Jia Wu
- 34 Research on the Development of Nuclear , Biological and Chemical Decontamination Technologies for US Military Aircraft / Ruicai Zhang Yanyan Zhu Sijing Wang Jingtang Peng
- 39 A brief discussion on the new challenges of medical equipment management under the application of artificial intelligence medical equipment / Ling Wang
- 42 Application and Development of Intelligent Energy saving Management System in Carbon Emission Reduction / Xiaoying Liu

Technical exploration of multi-drone cooperative reconnaissance system

Junyan Lin

Shuangqiao District UAV License Examination Center, Chengde City, Hebei Province, Chengde, Hebei, 067000, China

Abstract

With the development of information technology, the application of UAV is expanding, and it plays an important role in both military and civil fields. Especially in the military field, drones have become the core equipment of battlefield reconnaissance due to their high mobility, high concealment and low cost. At present, western countries have developed a number of advanced UAV reconnaissance systems, such as the “Global Hawk” high-altitude long-endurance UAV reconnaissance system and the “Predator” medium-altitude reconnaissance and strike integrated system of the United States, which can realize large-scale battlefield monitoring and target tracking. To enhance the operational effectiveness of UAV reconnaissance systems and better meet battlefield requirements, it is essential to achieve coordinated operations among multiple drones through various technical approaches while designing optimized control methods. This paper synthesizes current research on UAV reconnaissance systems worldwide, focusing on critical technologies such as multi-drone task allocation, perception and decision-making control, and information exchange and distribution. The analysis aims to provide valuable references for future research on multi-drone collaborative reconnaissance systems.

Keywords

UAV; cooperative reconnaissance system; reconnaissance technology; dynamic mission adjustment

无人机多机协同侦察系统技术探究

蔺俊彦

河北省承德市双桥区无人机驾驶证考核中心，中国·河北 承德 067000

摘要

随着信息技术的发展，无人机应用领域不断拓宽，在军事与民用领域均发挥着重要作用。尤其在军事领域，无人机凭借高机动性、高隐蔽性、低成本等特点，已成为战场侦察的核心装备。目前，西方国家已研制出多款先进无人机侦察系统，例如美国的“全球鹰”高空长航时无人机侦察系统、“捕食者”中空侦察打击一体化系统，可实现大范围战场监控与目标跟踪。为进一步提升无人机侦察系统的效能，更好地服务于战场需求，需通过多种技术手段实现多架无人机协同工作，并设计相应控制方法以优化系统运行效率。本文结合国内外无人机侦察系统的研究现状，重点分析多机协同任务分配、感知与决策控制、信息交互与分发等无人机协同侦察系统的关键技术，以期为未来无人机多机协同侦察系统的研究提供参考。

关键词

无人机；协同侦察系统；侦察技术；动态任务调整

1 多机协同任务分配技术

在无人机领域发展进程中，无人机多机协同侦察系统已成为极具潜力的技术方向。尤其在复杂战场环境（如多目标侦察、跨区域协同）或大规模民用场景（如城市安防巡逻、大范围灾害监测）中，单无人机在续航能力、覆盖范围与任务处理效率上均存在明显短板，而多机协同模式恰好能弥补这些不足。通过多架无人机的协同工作，该系统可显著提升侦察任务的执行效率与综合能力，其中多机协同任务分配技术是实现这一目标的核心关键技术之一。其主要目标是将不

同任务合理分配给适配的无人机，推动多机高效协同以达成最优任务效果，在实际应用中需重点考虑以下方面：

首先，任务需求分析是任务分配的核心起点。需对任务的性质、目标与约束条件开展详细拆解，进而明确任务分配的准则与目标。例如在战场侦察任务中，需确定侦察区域的优先级（如敌方指挥部所在区域为高优先级）、侦察时长要求（如需持续监控 4 小时）及传感器精度标准（如需识别地面车辆型号）——这些细化的需求参数是后续任务分配的核心依据；再如部分任务对飞行速度要求较高，另一部分则需更强的传感器性能，此类差异化需求将直接指导任务分配方向^[1]。

其次，无人机性能与能力评估是任务匹配的关键环节。需针对每架无人机的飞行速度、载荷能力、传感器类型及

【作者简介】蔺俊彦（1988—），男，中国山西忻州人，从事无人机维修研究。

分辨率、续航时间等指标开展量化评估，这些指标将直接作为任务分配的依据。例如某型侦察无人机最大续航时间为 6 小时，载荷能力可支持搭载高清光电传感器与合成孔径雷达（SAR）；另一型无人机虽续航仅 3 小时，但飞行速度可达 0.8 马赫，更适配快速穿插侦察任务。唯有通过建立量化指标体系，才能实现任务与无人机的精准匹配，避免“能力错配”问题。

再次，任务分配算法设计是技术落地的核心支撑。需结合任务需求与无人机性能评估结果，设计适配的任务分配算法。这类算法可基于规则、启发式方法或优化算法，以最大化整体任务效率为目标：常见的规则基算法适用于简单场景（如按“距离最近”原则分配任务）；启发式算法（如遗传算法、粒子群优化算法）能在多约束条件下（如多目标、资源有限）找到近似最优解；近年来，随着强化学习技术的发展，基于智能体的自适应分配算法也逐步应用，可通过实时环境反馈动态优化分配策略。设计过程中需重点考虑任务优先级、无人机可用性与适应性等因素，确保算法的实用性和灵活性。

此外，高效的通信与协调机制是多机协同的基础保障。多架无人机需实时交换信息、相互配合以完成任务，因此需设计抗干扰、标准化的通信机制与协调策略：例如采用跳频通信技术提升抗干扰能力，确保在敌方电子干扰环境下仍能保持信息传输稳定；同时制定统一的通信协议（如基于 MIL-STD-1553B 总线协议的无人机协同通信标准），规范信息交互格式，避免数据传输混乱。这一机制可通过构建无线通信网络与标准化协议实现，为多机协同提供稳定的数据交互通道。

最后，动态任务调整能力是应对复杂环境的必要补充。实际应用中，任务需求与外部环境可能发生动态变化（如突发新目标、无人机故障），因此系统需具备基于实时情况的任务重分配与调整能力。这一能力可通过实时感知与反馈机制实现，确保系统能快速适应环境变化并作出响应。例如在森林火灾监测与灭火支援的无人机多机协同系统中：任务需求分析阶段明确“监测火灾状况、追踪火势扩散、提供灭火资源引导”三大核心任务；性能评估阶段筛选出“高速飞行无人机”（适配快速响应）与“红外传感器无人机”（适配火源探测）；任务分配算法结合火势优先级分配任务——若火势突然扩大或发现新火源，系统可通过动态调整机制重新分配无人机，将更多资源调配至关键区域，避免任务中断或效率下降^[2]。

2 感知与决策控制技术

在无人机多机协同侦察系统中，感知技术与决策控制技术是核心支撑技术，二者共同构成系统实现的基础，直接决定了系统对环境的认知能力与任务执行的自主性。

感知技术主要涵盖环境信息获取与处理、目标特性分

析及目标识别三大方向。其中，环境信息获取需全面覆盖地形地貌（如山地、平原、水域）、气象条件（如风速、能见度、降水）及电磁环境（如是否存在电子干扰）——这些信息直接影响无人机的飞行安全与侦察精度，例如在复杂山地环境中，无人机需通过地形匹配技术规避障碍物，防止碰撞事故；无人机的环境感知主要依赖各类传感器，根据感知原理可分为可见光、红外、雷达等类型，不同传感器特性差异显著，需适配不同应用场景：可见光传感器分辨率高、成本低，但受光照条件影响大（如夜间或阴雨天气性能下降）；红外传感器可在无光照环境下工作，能有效识别热源目标（如敌方车辆发动机、人员），但易受复杂背景热辐射干扰；雷达传感器穿透力强（可穿透云层、植被），全天候工作能力突出，但分辨率相对较低。实际应用中，三类传感器常需协同使用以互补短板，提升感知可靠性^[3]。

针对不同传感器的技术特性，需开展差异化研究：针对可见光传感器，需重点研究目标可见性分析、目标分类算法及目标识别模型等方向；针对红外传感器，则需聚焦目标热特性提取与目标识别技术等研究。随着人工智能技术的发展，无人机已可通过视觉感知与图像处理实现高效目标感知——例如通过卷积神经网络（CNN）对图像中的目标进行实时检测，快速识别地面车辆、人员等关键侦察目标，并自动标注目标位置与类型，大幅提升目标识别效率。

决策控制技术是无人机自主执行任务与多机协同的核心，主要包括无人机作战任务执行能力的分析与分配、任务自主规划与决策、协同任务分配与控制等内容。无人机执行任务时，需同时考虑“任务能力指标”与“约束条件”：任务能力指标指完成任务所需的性能与能力（如传感器精度、飞行速度）；约束条件包括执行任务时的限制因素（如禁飞区、剩余电量）与可机动空间。为确保无人机顺利完成任务，需基于上述因素开展控制方案设计。

为支撑无人机完成复杂作战任务，需先对无人机开展性能分析与评估，据此设计适配的控制方案并确定最优控制参数；在任务执行阶段，需对无人机的能力进行合理分配，并建立多机协同控制模型协调各架无人机——常见的协同控制模型包括“leader-follower”（领航 - 跟随）模型与分布式协同模型：前者由 1 架领航机制定航线，其他跟随机保持队形跟随，控制逻辑简单、稳定性高，适配编队侦察场景；后者无明确领航者，多机通过相互通信自主协调运动轨迹，灵活性强，适配复杂动态环境下的多目标侦察。此外，还需实时评估任务执行情况，并根据评估结果优化策略。

任务执行过程中，需综合考虑时间约束、空间约束等硬性条件，同时应对目标不确定性、环境干扰、时间滞后等动态因素的影响。在多机协同系统中，每架无人机可视为独立个体进行管理：首先根据自身特性选择控制方式、方法与策略；其次结合实时情况筛选最优方案；最后根据自身状态、外部环境及其他无人机信息动态调整策略并执行操作。

这一过程中，无人机需同时完成“自我感知”与“协同感知”——例如在战场侦察中，若某架无人机突遇敌方防空火力威胁，自主决策系统需快速判断威胁等级（如是否为防空导弹系统），自动生成规避路径（如爬升高度、改变航向），同时将威胁信息同步至其他协同无人机，避免多机同时暴露于危险区域，保障整体任务安全。

3 信息交互与分发技术

信息交互与分发技术是无人机协同侦察系统的重要组成部分，是实现多机有效交互的前提，其性能直接影响多机协同的实时性与可靠性。在无人机侦察系统中，为确保各架无人机间能顺利、高效地进行信息交互与分发，需设计基于多目标优先级的分布式信息交互与分发机制。

针对多架无人机间的信息交互需求，首先需建立统一坐标系，并对各无人机的位置信息进行坐标系转换——通常采用 WGS-84 世界大地坐标系作为基准，将各无人机的相对坐标（如相对于起飞点的平面坐标）转换为绝对地理坐标（经纬度、海拔高度），确保多机对同一目标的位置描述一致，避免因坐标偏差导致的任务协同失误。例如某无人机发现敌方目标后，其上报的目标坐标需与其他无人机的侦察范围坐标处于同一体系，才能快速判断是否需要其他无人机协同抵近侦察。

其次需对无人机间的相对距离进行测量，为多机协同定位、任务调度及路径规划提供数据支撑，确保多机可按协同需求抵达指定区域。常用的距离测量技术包括全球导航卫星系统（GNSS）定位测距与无线电测距：前者通过多机 GNSS 定位数据计算相对距离，精度可达厘米级至米级；后者包括超短波电台的信号强度测距、脉冲雷达测距等，可在 GNSS 信号受干扰时（如敌方实施卫星信号压制）作为备份，保障距离测量的连续性，避免因单一技术失效导致协同中断。

最后需依托上述统一坐标与距离测量基础，落地基于优先级的分布式信息交互与分发机制——优先级划分通常依据三大维度：任务紧急程度（如发现敌方高价值目标的信息为最高优先级）、信息时效性（如实时威胁信息需优先分发，而历史侦察数据可延后传输）、无人机任务角色（如负责指挥的无人机需优先获取全局信息，负责具体侦察的无人机需优先获取目标位置信息）。通过优先级队列调度算法，可确保高优先级信息优先占用通信带宽，避免因信息拥堵导

致关键信息延迟，同时兼顾低优先级信息的有序传输^[4]。

此外，为确保各无人机能实时获取彼此的任务执行状态，需对无人机任务执行过程中的实时状态进行检测与信息发布——实时状态信息包括无人机的剩余电量、剩余续航时间、传感器工作状态（如是否故障）、当前任务进度（如已完成侦察区域占比）。这些信息需通过高频次（如每秒 1 次）的心跳包机制发送至协同控制中心或其他无人机，确保各节点能实时掌握全局状态。例如当某无人机剩余电量仅够维持 30 分钟飞行时，系统可提前调度其他无人机接替其未完成的侦察任务，避免任务中断，保障整体侦察覆盖的完整性。

4 结语

无人机多机协同侦察系统技术的探究涵盖多方面核心内容，包括多机协同任务分配、感知与决策控制及信息交互与分发。这些技术的综合应用不仅为无人机系统赋予了更高效、精准的侦察能力，也进一步推动了无人机技术的整体发展与场景落地。

随着技术的不断演进，无人机多机协同侦察系统的应用场景将进一步拓展：在军事领域，未来可与有人机、卫星构建“空-天-地”一体化侦察网络，实现对战场的全时域、全空域覆盖；在民用领域，可应用于跨区域生态环境监测（如大范围湿地、森林的生物多样性调查）、重大灾害后的多维度救援侦察（如地震后废墟下的生命探测、洪水区域的被困人员定位）。同时，随着人工智能、5G/6G 通信、新型传感器技术的融合应用，多机协同系统的自主决策能力、抗干扰通信能力、侦察精度与效率将持续提升，但仍需解决多机协同的安全性（如防止恶意入侵控制）、多源信息融合的准确性（如不同传感器数据的时空配准）等关键问题。相信通过技术突破与场景验证，无人机多机协同侦察系统将在未来发挥更重要的作用。

参考文献

- [1] 韩统, 李银通, 唐上钦等。多无人作战飞机协同任务规划技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2021.
- [2] 张晓东, 刘建军。多无人机协同控制与决策 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- [3] 王静, 李明杰。无人机编队协同侦察效能研究 [J]. 火力与指挥控制, 2025, 40 (3): 45-51.
- [4] 王新民, 张安。无人机协同任务分配与航迹规划 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.

Research on Multi-Domain Collaborative Analysis and Control Methods for Crossing Line Problems in the Trial Production Stage of Automobile Research and Development

Yangang Wang

Quality Management Department, Technology Center, Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230031, China

Abstract

The trial production stage of automotive research and development is a crucial link for the transformation of new vehicle models from design to mass production. The quality and efficiency of this stage directly affect the product launch cycle and competitiveness. During the trial production process, problems such as frequent design changes, process mismatch, poor consistency of components and lagging supply chain response often occur, resulting in low assembly efficiency and large quality fluctuations. Based on the multi-domain collaboration theory, this paper constructs a problem analysis framework from five dimensions: design, process, manufacturing, quality, and supply chain. It utilizes multi-source data fusion and digital twin technology to achieve collaborative diagnosis and closed-loop control. The research proposes a collaborative control platform integrating PLM and MES systems to achieve dynamic monitoring and problem traceability from design to production. The results show that this method can significantly improve the first-time pass rate of assembly and the efficiency of line passing.

Keywords

Automobile R&D Trial production has passed the production line. Multi-domain collaboration Digital twin Quality control

汽车研发试制阶段过线问题多领域协同分析与控制方法研究

王沿钢

安徽江淮汽车集团股份有限公司技术中心质量管理部, 中国·安徽 合肥 230031

摘要

汽车研发试制阶段是新车型由设计向量产转化的关键环节, 其质量与效率直接影响产品上市周期与竞争力。试制过线中常出现设计变更频繁、工艺不匹配、零部件一致性差及供应链响应滞后等问题, 造成装配效率低、质量波动大。本文基于多领域协同理论, 从设计、工艺、制造、质量和供应链五个维度构建问题分析框架, 利用多源数据融合与数字孪生技术实现协同诊断与闭环控制。研究提出PLM与MES系统集成的协同控制平台, 实现设计到生产的动态监控与问题溯源。结果表明, 该方法可显著提升装配一次合格率与过线效率。

关键词

汽车研发; 试制过线; 多领域协同; 数字孪生; 质量控制

1 引言

在汽车产品开发周期不断压缩、市场竞争加剧的背景下, 研发试制阶段的质量控制与过程协同成为车企提升竞争力的关键。试制阶段不仅是产品设计验证与制造工艺匹配的重要环节, 更是发现潜在设计缺陷、优化工艺流程、验证供应链体系能力的窗口。然而, 实践中由于设计、制造、工艺、采购及质量管理环节之间信息壁垒突出, 过线阶段常出现装配干涉、零部件错配、工艺工装偏差、供应交付不稳定等问题。这些问题往往导致试制计划延误、物料浪费及返工率上

升, 对项目开发节奏与成本控制造成显著影响。传统的单领域问题处理模式难以应对复杂的系统性问题, 其根因往往跨越设计、制造与供应链多个环节。为此, 本文从系统工程角度出发, 构建多领域协同分析与控制模型, 以实现试制问题的前馈预防、实时监控与闭环改进, 提升研发阶段整体协同效率与产品质量稳定性。

2 汽车研发试制阶段过线问题的特征与成因

2.1 试制过线问题的系统性特征

汽车试制过线问题具有典型的系统性和耦合性特征。不同领域之间的环节相互制约, 任何一处偏差均可能引发连锁反应。例如, 设计公差定义不合理会导致工装装配偏差, 供应商工艺控制不足又会引起零件精度不稳定, 最终在装配

【作者简介】沿钢 (1980-) , 男, 中国安徽宿州人, 高级工程师, 从事试制验证质量管理研究。

现场表现为装配干涉或定位偏差。问题的发生往往呈现“多因一果”特征，即表面缺陷背后隐藏多领域交互影响。因此，过线问题的解决需要在全流程视角下进行系统诊断与综合治理。

2.2 设计环节的问题传导机制

设计阶段是影响试制质量的源头。新车型项目中常出现图纸频繁变更、BOM 版本不一致及数字模型失配等情况，造成试制阶段信息断层。设计参数定义不完整、三维模型未完全约束或装配公差设定偏宽，均会在后续制造环节中放大误差。部分零部件在数字样机中通过虚拟装配验证合格，但实际加工与材料特性未被充分考虑，导致现场装配干涉或强制装配现象，从而影响过线质量。

2.3 供应链与工艺制造环节的协同不足

试制阶段供应链响应滞后、工艺文件更新不及时等问题十分突出。部分供应商因试制批量小、周期短，采用临时工装和简化工艺，造成零部件尺寸偏差大、表面处理不一致。此外，生产线设备调试与物料交付计划不同步，使得零件缺件、错件现象频繁。由于试制件来源复杂、责任界定模糊，导致过线问题难以及时闭环。

3 过线问题的多领域协同分析框架

3.1 问题分层分类与因果分析模型构建

汽车研发试制阶段的问题呈现出高度复杂性与多领域交互特征，单一维度的分析方法难以揭示问题根因。为此，构建“问题—原因—领域”三维矩阵模型，将试制过线问题系统化、层级化。依据问题表现及数据特征，可将其划分为设计失配类、工艺偏差类、装配干涉类、供应异常类和质量不稳定类五大类别。通过鱼骨图（Ishikawa Diagram）与 FTA（Fault Tree Analysis）方法对各类问题的致因进行系统拆解，形成自上而下的逻辑推演链条。结合 Pareto 分析进一步识别关键影响因素，结果显示，约 60% 的过线问题源自设计与工艺信息不一致，25% 来自供应工艺控制差异，15% 源于检测误差与操作偏差。通过分层分类与因果建模，不仅可实现问题的系统归因与优先级排序，还为多部门协同改进提供了定量化决策依据，构建了从问题识别到源头控制的逻辑闭环。

3.2 多源数据融合与知识图谱构建

为解决不同领域信息割裂与数据孤岛问题，建立基于 PLM（产品全生命周期管理）、MES（制造执行系统）与 QMS（质量管理系统）的多源数据融合机制。系统通过 API 接口实现设计参数、工艺路线、检验结果与供应链状态的自动汇聚，形成跨系统互联的数据中枢。基于语义分析与自然语言处理（NLP）技术，对试制问题文本进行关键词提取与语义聚类，进而构建试制问题知识图谱。知识图谱以节点表示问题对象，以边表示因果与依赖关系，可实现多领域问题的智能关联分析。工程师可通过可视化界面查询问题源头、

历史案例及处理方案，快速实现知识复用与协同诊断。此举显著提升了问题闭环效率与信息透明度，使研发、制造与质量团队在同一数据语义层上实现协同决策，为多维度问题解决提供了智能化支撑。

3.3 基于数字孪生的虚拟验证与预测分析

在试制阶段，为实现问题预测性识别与虚拟化验证，构建基于数字孪生（Digital Twin）的虚实融合模型。该模型以 CAD/CAE/BIM 数据为核心，集成装配工艺参数、检测反馈与实时传感器数据，实现虚拟环境与物理车间的动态映射。通过有限元分析（FEA）与多体动力学（MBD）仿真，模拟零部件在装配过程中的形变、应力集中与干涉风险。结合机器学习算法，对仿真结果进行偏差趋势预测与风险分级分析，实现从“被动检测”向“主动预警”的转变。模型预测精度经验证达 92%，能有效识别潜在过线异常区域并提供优化建议。工程师可通过虚拟平台提前验证不同装配方案的可行性，实现设计调整与工艺修正的前置化，显著提升试制阶段的预警响应与决策效率。数字孪生技术的应用，使过线过程实现了从经验驱动到数据驱动、从静态分析到动态预测的智能化跃升。

4 过线问题的协同管控策略研究

4.1 跨部门协同机制的构建

汽车研发试制阶段的过线问题具有典型的跨领域特征，涉及设计、工艺、制造、质量及供应链多个部门，单一职能线条的管理模式难以形成有效响应机制。为此，应建立以“研发—工艺—质量—供应链”协同为核心的项目型组织架构，推动扁平化、矩阵化管理。通过 PLM 系统（产品生命周期管理）实现多角色同步审签、设计变更同步发布与数据版本统一，确保从设计源头到制造端信息一致、传递准确。针对试制现场的突发性问题，可构建跨部门协同工作群，采用 RACI 矩阵（责任划分矩阵）明确责任人、执行人、协助人及审核人，实现问题从发现到验证再到关闭的全过程闭环追踪。该机制不仅提高了跨部门沟通效率，还通过数据共享与实时反馈减少了问题重复发生的概率，形成“问题共识化、决策透明化、执行标准化”的协同管理格局。

4.2 过程监控与动态调整机制

试制阶段的过程波动是过线质量不稳定的主要诱因，需依托数字化系统建立动态监控与实时调控机制。在试制现场引入 MES 系统（制造执行系统）与物联网传感器，实现装配状态、工装姿态、扭矩曲线及零部件合格率的实时采集与上传。通过 SPC（统计过程控制）对关键工艺参数进行趋势监控，借助控制图与 Cp、Cpk 指标分析过程能力变化，系统在检测到异常波动时可自动触发预警并生成问题清单。管理层通过可视化看板可实时掌握装配节拍、异常工位与物料匹配状态，实现基于数据的动态决策。现场工程师可通过移动终端调整工艺参数或调配资源，实现即时修正与持续优

化。该机制将传统的事后分析转变为事中干预与事前预防，显著提高了试制过线阶段的响应速度与过程稳定性。

4.3 经验沉淀与知识复用机制

汽车试制阶段具有高频问题与重复验证的特点，大量的经验数据若无法有效沉淀，将导致知识断层与资源浪费。企业应构建基于知识工程理念的经验数据库，将试制问题、改进措施、工艺优化方案与验证结果进行结构化、标签化管理，形成标准化知识条目。通过 PLM 与 QMS 系统集成，所有问题解决方案自动归档至知识库，并按照零部件类型、问题属性及责任领域分类存储。基于机器学习算法的推荐系统可在新项目中根据问题特征自动匹配相似案例，为工程师提供高相关度解决方案建议，缩短问题定位与验证周期。经验数据库还可支持定期复盘与数据挖掘，提炼共性问题与系统性改进方向，实现知识的传承与创新。该机制使试制阶段由“单次解决”向“体系优化”转变，推动企业形成可持续演进的智能化知识管理体系，为后续量产阶段提供数据化决策支撑。

5 过线控制的数字化与智能化优化路径

5.1 数字化追溯与全链路监控体系

在汽车试制阶段，零部件来源多样、装配路径复杂，若缺乏统一的数据追溯体系，极易出现责任不清、问题定位困难等现象。建立基于条码与 RFID（射频识别）技术的全链路追溯系统，可实现物料、工艺、检测及装配状态的全过程信息采集与监控。系统自动记录零部件供应商、生产批次、检测结果、装配时间与操作人员信息，形成独立且可验证的“数据指纹”。该数据不仅可追溯问题根因，还能通过异常识别算法提前预警质量隐患。通过 PLM（产品全生命周期管理）系统与 MES（制造执行系统）的集成，设计变更信息可实时传递至生产端，实现从设计、工艺到制造的闭环跟踪。此体系的核心价值在于提高问题定位的准确性与响应速度，构建数据驱动的透明化质量管理机制，使试制过程实现全可视、可控与可验证。

5.2 智能诊断与质量预测模型应用

针对试制过线阶段多因素交织、质量波动频繁的特征，可引入机器学习与深度神经网络（DNN）技术，建立智能诊断与预测模型。通过对历史试制数据、工艺参数、检具验证结果及装配偏差信息进行多维特征提取，模型能够识别影响过线成功率的关键因子，并实现实时质量预测。该模型以随机森林（RF）与卷积神经网络（CNN）为核心算法，对样本数据进行训练，形成高精度分类与回归分析机制。经实

车试制验证，模型预测准确率超过 90%，对装配偏差与试制失败风险具有较高敏感度。其结果可为工程师提供基于数据的预警信息与优化建议，在过线前即识别潜在问题，实现资源优先配置与风险规避。智能诊断模型的引入使过线质量管理从“经验判断”转向“数据驱动”，显著提高试制阶段的预判性与决策科学性。

5.3 数字孪生驱动的虚实融合决策支持

数字孪生技术通过构建与物理车间同步运行的虚拟模型，为试制过程提供了实时的仿真与决策支撑。系统基于三维 CAD 模型、传感器数据及生产过程信息，形成虚实交互的动态映射，实现设备运行状态、装配顺序及质量结果的可视化展示。通过虚拟环境中的参数调整与策略仿真，工程师可提前验证不同装配方案的可行性，预测变更对装配精度与过线节拍的影响，避免现场反复试错所造成的时间与成本损耗。该技术还可在早期阶段评估潜在装配干涉与公差叠加风险，为设计优化提供定量依据。数字孪生平台与 PLM、MES 系统互联后，能够实现从虚拟验证到实体反馈的闭环运行，使过线控制从“被动修正”转向“主动优化”。这一虚实融合的决策体系不仅提升了过线的稳定性与柔性响应能力，也为汽车研发全流程的智能化管理奠定了基础。

6 结语

汽车研发试制阶段的过线问题具有多领域耦合、数据复杂与决策实时性高等特征。本文基于系统工程与数字化协同管理理念，构建了从问题识别、协同分析到智能控制的完整研究体系。研究结果表明，建立多领域协同机制与数字孪生技术融合的智能控制平台，能够有效提升问题溯源效率、提高装配一致性与过线稳定性。未来研究可进一步拓展 AI 算法在问题因果推理与自适应优化中的应用，实现试制阶段“虚实共生、数据驱动、智能决策”的全过程质量管理，为汽车研发体系的智能化与高效化提供持续支撑。

参考文献

- [1] 李贝贝,杨阳.纯电动汽车样车试制过程探究[J].汽车与驾驶维修(维修版),2025,(02):42-44.
- [2] 郑国文.整车产品开发项目样车试制的管理方法研究[J].时代汽车,2022,(15):4-6.
- [3] 张浩亮.基于“大数据”的样车试制准备工作评价模型[J].时代汽车,2019,(16):14-18.
- [4] 杨兴,罗益强.汽车研发试制阶段激光技术和设备的应用[J].世界制造技术与装备市场,2019,(05):45-50.
- [5] 李曙光.智能制造背景下汽车试制精益管理研究[D].对外经济贸易大学,2019.

Application and Precision Analysis of Digital Radiography in Weld Defects Identification

Qiang Chen

State Pipeline Network Group West Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

As a core process in manufacturing sectors including petrochemicals, aviation, and shipbuilding, welding quality directly determines the structural safety and operational reliability of products. In the new era of modern industry pursuing high-quality and sustainable development, stricter requirements are imposed on welding quality control. Enhancing welding inspection quality and optimizing Digital Radiography (DR) technology applications to achieve precise identification and quantitative analysis of internal weld defects have become critical for industry advancement. This study focuses on practical applications of DR technology in weld defect detection, systematically explores key process methodologies, and investigates effective strategies for improving inspection accuracy through image processing and intelligent algorithms. The research aims to provide theoretical foundations and technical support for achieving coordinated improvements in welding quality and efficiency, thereby enhancing product competitiveness and driving comprehensive industry optimization.

Keywords

DR Digital Radiography Technology; Weld Defect Recognition; Application; Precision Analysis

DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中的应用与精度分析

陈强

国家管网集团西部管道有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘要

焊接工艺作为石油化工、航空、造船等制造业的核心环节，其质量直接关乎产品的结构安全性与运行可靠性。在现代化工业迈向高质量与可持续发展的新阶段，对焊接质量的控制提出了更为严苛的要求。强化焊接检测质量，优化应用DR（数字射线）检测技术，以实现焊缝内部缺陷的精准识别与定量分析，是行业发展的关键。聚焦于DR技术在焊缝缺陷识别中的应用实践，系统探究其关键工艺方法，从图像处理、智能算法等维度深入探讨提升检测精度的有效策略，旨在为实现焊接质量与效率的协同提升，为增强产品竞争力提供理论依据与技术支撑，推动行业的整体升级优化。

关键词

DR数字射线检测技术；焊缝缺陷识别；应用；精度分析

1 引言

DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中发挥了重要作用，能够利用射线穿透被检测物体，射线与物体相互作用后，部分射线被吸收，剩余射线照射到数字探测器上，探测器将射线信号转换为电信号，再经过计算机处理形成数字化图像。该技术方法能够快速、直接地获取数字图像，具有高分辨率和高对比度的特点，能够清晰地显示焊缝内部的微小缺陷。它所生成的数字图像可以直接存储在计算机中，便于后期的分析、比较和存档。借助先进的图像处理软件，对图像进行增强、滤波等处理，提高缺陷识别的精度。

【作者简介】陈强（1979–），男，中国新疆克拉玛依人，本科，副高级工程师，从事油气储运及长输管道工程与附属工程、油田地面建设研究。

2 DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中的应用

2.1 前期准备工作

样品准备是基础，参数设置是关键，环境控制是保障，在焊缝缺陷识别前，要做好准备工作。备好焊接样品，精准测量和控制焊接样品的尺寸，把尺寸误差控制在合理范围以内，只有这样才能确保样品在 DR 检测设备中准确放置，防止尺寸偏差引起的检测误差；要做好焊接样品表面处理，清除表面油污，打磨表面铁锈，表面粗糙度控制在标准范围内，确保射线能够均匀穿透样品，获得清晰图像。DR 检测前，结合焊接样品的材质、厚度等因素针对性调整检测装置参数，校准和调试成像系统，进而保障图像清晰度和对比度^[1]。还需要评估和优化检测环境，环境湿度、温度控制在合理范围内，避免影响设备性能。

2.2 优化检测技术工艺

选择合适的射线源。选择射线源时，需要保障射线源所发出的射线对被检部位具有较强的穿透力，X 射线机可通过调节管电压和管电流来控制射线强度和能量，适用不同厚度和材质的焊缝检测； γ 射线源具有能量高、穿透能力强、无需电源等优点，存在半衰期限制和辐射防护要求高的问题。还需要确保射线源与成像板保持匹配校准，通过暗场图片校准、中场图片校准、亮场图片校准等方式进行，确保所有像素点的起始点相同，进而保障图像均匀性，最大程度上保证图像质量。如果采集的图像中出现规则状条纹，需要第一时间匹配校准射线源，避免影响检测图像的质量。选择合适的射线能量。射线能量的大小直接影响射线的穿透能力和成像质量。在保证穿透的前提下，应根据工件材质和成像质量要求选择合适的射线能量。对于较薄的焊缝，可以选择较低的射线能量以提高成像质量；而对于较厚的焊缝，则需要选择较高的射线能量以确保足够的穿透能力^[2]。选择合适的成像方式，传统的胶片成像方式通过胶片感光形成潜影，经显影、定影处理得到射线底片。这种方式成像直观，可存档，但操作复杂且成本较高。随着数字成像技术的发展，数字探测器逐渐取代胶片成为主流的成像方式。数字探测器利用平板探测器将射线直接转换为电信号或数字信号，通过计算机处理生成数字图像。这种方式成像速度快、图像可实时处理，大大提高了检测效率。

2.3 DR 图像采集

在射线检测过程中，要确保焊缝表面清洁无油污、铁锈等杂质，以免影响射线的穿透和成像质量；选择合适的透照几何参数，如射线焦点大小、透照距离等，获得清晰的底片或数字图像；根据焊缝的材质、厚度和结构选择合适的像质计来评估射线检测图像的质量。采集过程中，要采用先进的平板探测器，进而提高图像分辨率和灵敏度，如在对大型压力容器焊缝检测时，需要使用 $200\mu\text{m}$ 像素间距的平板探测器（FPD），采集到的图像能够清晰显示焊缝内部 0.1mm 的微小缺陷（如细微气孔、微裂纹）。为了保证图像的完整性和准确性，需要对采集过程进行实时监控和调整，避免过曝光或欠曝光。在采集过程中，要注意避免外界干扰，如电磁干扰、机械振动等，这些因素都可能导致图像出现伪影或模糊，影响后续的缺陷识别^[3]。

2.4 DR 数据处理

在焊缝缺陷检测中，采集的原始 DR 图像存在一些缺陷问题，如噪声、对比度不足等，要进行图像预处理，通过科学方式去除噪声，提升图像质量。1) 常用的图像去噪方式有：中值滤波算法，可以去除图像中的椒盐噪声和散斑噪声，保留图像边缘信息；小波去噪技术，该方法具有低熵、多分辨率、选择灵活等优点，进而提升射线图像质量；还可以利用多幅叠加的方式有效抑制噪声。2) 完成图像去噪处理后，原始图像边缘会变得模糊，影响缺陷特征提取，需要

使用图像增强技术对图像边缘进行锐化，进而强化图像对比度，突出图像中的特定信息，弱化图像中无用成分。常见的图像增强技术有：修整灰度、去模糊、平滑、边缘锐化、伪彩色等方式。如可以通过直方图均衡化算法进行处理，强化图像灰度的均匀分布，提高缺陷区域与背景对比度的明显度，更容易识别缺陷^[4]。在使用图像增强工具时，要尽量减少图像处理步骤，避免图像失真。3) 图像分割，即把焊缝区域（ROI）与背景分离，以便精准识别缺陷区域，通常应用较为广泛的分割算法有阈值分割、边缘检测等。

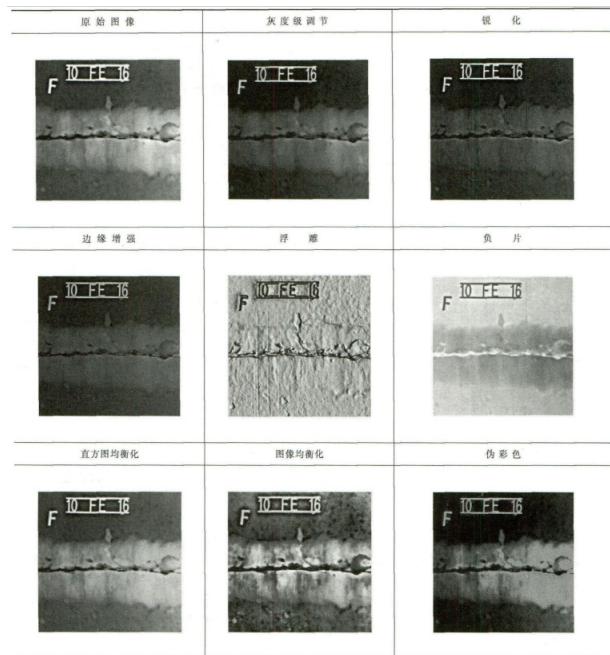


图 1 经过不同数据处理方法处理后的图像

2.5 焊缝缺陷特征提取

完成缺陷分区工作后，需要提取特征，如缺陷大小、形状、灰度等特征，同时通过机器学习算法对其进行分类。其中，常见的焊缝缺陷类型和基本特征体现为：1) 裂纹，在焊接应力、脆化等因素的干扰下，导致焊接区域部分金属原子结合力被破坏，把原本一体的材料分割成两部分，外观体现为焊接裂纹。常用裂缝类型有纵向裂缝、横向裂缝、弧坑裂缝等。通常情况下，裂纹主要出现在焊缝上或者热影响区域，呈现不规则的黑色细线，末端尖锐。2) 未焊透，包含根部未焊透、层间未焊头、边缘未焊头，这种缺陷问题会降低焊缝嵌固端和延伸率，甚至加大开裂概率。其外在表现为规则的黑线，主要处于焊缝中间，逐渐向焊缝方向延伸，边界较为平直规则^[5]。3) 未融合，即焊接材料和母材、焊道材料与焊道材料没有完全熔化结合。未熔合缺陷包含边缘未熔合、根部未熔合、层间未熔合。外在表现为宽窄不一、厚度不均匀、断续分布条带等。4) 气孔，熔池中的气泡残留在凝固中的材料中形成空洞，呈现为椭圆形、圆形黑色图像，边缘光滑、外观规则，边界清晰，分布不均匀，大小不一。5) 夹渣，残留在焊缝中的熔渣，包含条状夹渣、球状夹渣。

X 射线检测捕获的熔渣焊缝图像显示边界处具有不规则棱角的长条状或圆形图像，以及均匀清晰的黑色图像。通常，带渣的延伸方向与焊缝的延伸方向相同。焊缝特征分析是识别缺陷图像的形状、大小、黑度、分布等信息，为缺陷类型的判断提供基础条件。

3 提升 DR 数字射线检测技术识别焊缝缺陷精度的策略

3.1 开发新射线源

核心目标是解决传统射线源能量范围有限、强度不稳定、焦点尺寸大的问题。传统的射线源能量范围有限、辐射强度不稳定，需要探索新型的射线源，其中包含微焦点 X 射线源、同步辐射源和激光驱动射线源等，新型射线源可以提高能量输出，且焦点尺寸更小，稳定性较高，能够保障射线图像的高质量化，强化对缺陷检测的灵敏度和分辨率。其中，同步辐射源主要是通过同步加速器产生的高亮度、高频谱的电磁辐射进行检测，该射线源分辨率、精度较高；激光驱动射线源就是利用激光和物质相互作用，进而产生高能射线，该射线源检测速度较快，对环境适应性好。

3.2 开发高灵敏探测器

核心目标是提高图像分辨率、对比度，加快响应速度，并降低辐射剂量。传统的探测器存在一定的局限性，如动态范围窄、响应速度慢等，需要积极改进探测器，进而提高图像质量，精准识别焊缝缺陷。如开发平板探测器、线阵探测器和半导体探测器等，使其具备更高的灵敏度和响应速度，提高图像分辨率，以便对摄像图像进行实时捕捉和动态处理，保障检测结果的准确性。其中，平板探测器是利用间接转换技术，把射线转化为电信号，在高精度缺陷检测中发挥重要作用，噪声较低，动态范围较宽，且图像分辨率高；半导体探测器是通过半导体材料的电离效应，在高等射线检测中进行使用，该设备响应速度快，且分辨率高。新型高灵敏的探测器能够有效捕捉到射线与物质相互作用产生的信号，从而提高图像的对比度和细节分辨能力。例如，采用先

进的半导体材料和光电转换技术的探测器，如碲化镉(CdTe) 和碲锌镉(CZT) 探测器，具有更高的量子效率和更低的噪声水平，能够在较低的射线剂量下提供高质量的图像^[6]。高灵敏度探测器的应用不仅提高了缺陷的检出率，还降低了辐射对人体和环境的潜在风险。

3.3 优化软件系统

核心目标是实现缺陷的自动、精准、鲁棒识别与分类，减少对人工评片的依赖。在缺陷识别工作中引进深度学习技术，在具体应用中，可以通过卷积神经网络(CNN)，训练大量的缺陷图像数据集，深度学习模型，进而学习到缺陷特征和模式，实现复杂缺陷的自动识别和分类。引进多尺度图像分析技术，即不同空间分辨率上处理和分析图像，进而全面识别和描述缺陷，该方法集合尺度空间表示、多分辨率分解、多尺度特征融合等方法，进而有效处理中的噪声、伪影，增强缺陷可见性，通过深度学习获得强大的特征学习和识别能力，通过多尺度分析保证了对不同大小缺陷的鲁棒性和识别精度。

4 结论

综上所述，为了提升焊缝缺陷识别精度和效率，需要对 DR 数字射线检测技术进行优化应用，进而提升焊缝缺陷识别精度，保障管道安全运行。通过综合应用硬件升级(射线源、探测器)和软件智能化(深度学习等算法)来优化 DR 技术，是提升焊缝缺陷识别精度和效率、保障工业设施安全的关键路径。

参考文献

- [1] 刘浩,曹灿,陈亚楠,等. 数字射线检测技术在压力管道检测中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2025, (14): 157-160.
- [2] 唐飞阳亮,王恒,张立斌,等. 相控阵超声与数字射线检测技术在锅炉水冷壁焊缝检测中的应用对比 [J]. 无损检测, 2019, 41 (08): 58-61+72.
- [3] 赖强. 焊缝缺陷识别的数字化模型构建与图像化表征[C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集 (七). 新疆天维无损检测有限公司; 2024: 92-94.

Research on Intelligent Monitoring and Fault Early Warning Technology for Marine Diesel Engine Lubrication Systems

Jinfei Mo

Shanghai Salvage Bureau, Ministry of Transport, Shanghai, 200090, China

Abstract

This chapter elaborates on the research ideas of intelligent monitoring and fault warning technology for marine diesel engine lubrication systems. In terms of sensors, it introduces the design of online monitoring sensors based on principles such as dielectric constant, viscosity, and wear particles, as well as the installation schemes of wet and dry oil pan systems. It focuses on a grey correlation algorithm that integrates trend similarity and Euclidean distance improvement to improve the accuracy of typical fault diagnosis such as filter blockage and cooler fouling. Through real ship cases, it is verified that this technology system can effectively achieve early identification and precise positioning of abnormal wear, providing technical support for the transformation of marine diesel engines from regular maintenance to on-demand maintenance.

Keywords

marine diesel engine; Lubrication system; Intelligent monitoring; Fault warning

船舶柴油机润滑系统智能监测与故障预警技术研究

莫金飞

交通运输部上海打捞局，中国 · 上海 200090

摘要

本章阐述了船舶柴油机润滑系统智能监测及故障预警技术研究思路，在传感器方面介绍了介电常数、粘度、磨损颗粒等原理的在线监测传感器设计以及湿式和干式油底壳系统的安装方案，重点介绍了一种融合趋势相似性与欧式距离改进的灰色关联算法以提高滤清器堵塞、冷却器积垢等典型故障诊断准确率，并通过实船案例验证该技术体系能够有效实现异常磨损早期识别和精确定位，为船舶柴油机从定期维修向视情维护转变提供了技术支持。

关键词

船舶柴油机；润滑系统；智能监测；故障预警

1 引言

柴油机是船舶的核心部件，它的润滑系统状态直接关系到航行的安全性、可靠性和经济性能，在高温高压且具有强腐蚀性的工况下长时间运行时，润滑系统的失效已经成为引发严重机械事故的主要原因之一^[1]。传统的依靠定期检修以及离线油样检测的方法存在一定的滞后现象，并不能很好地满足现代智慧航运对于实时监测和动态维护的需求。为此，本文选取了船舶柴油机润滑系统的智能监测及故障预警技术这一研究对象，希望通过全面的研究工作来完成智能传感器的设计安装，做到早期发现和精准定位，给船舶动力系统的安全性和可靠性提供理论基础和技术路径。

【作者简介】莫金飞（1972-），男，中国上海人，本科，工程师，从事船舶机电设备研究。

2 船舶柴油机润滑系统智能监测传感器设计与安装方案

2.1 在线监测传感器的设计原理探究

船舶柴油机润滑系统在线监测传感器主要是监测油液的理化性能、污染度和磨损颗粒这三类参数。它依照许多物理与化学原理来开展设计，其中就包含了电容法、粘度测量法、光谱分析法等等。

介电常数法是油品质量检测技术的一种，主要是通过润滑油的电磁特性来评价其综合性能。该方法的基本原理在于：在氧化程度加重、水分含量增多及金属微粒浓度提升等因素的影响下，润滑油所对应的介电常数值会发生明显改变^[2]；当油液老化后生成了酸性物质或者含水量增加时，它的介电常数往往会上升趋势；相反，如果被燃料稀释就会使介电常数降低，在这种情况下利用上述特点就可以对实际状况作出相应的判断并将其应用到现实操作当中去。

作为在线监测设备中的关键部分，粘度传感器在润滑油品质检测领域起着非常重要的作用。它的工作水平直接关系着润滑效果的好坏，而黏度是评判润滑油质量好坏的一个重要指标。目前市场上比较常用的在线测量技术大多为振动式原理，通过驱动装置来促使其中一些特定元件按固有频率进行振荡运动，并把它们放置于待测油液环境中开展运行过程；由于液体介质会对机械震动产生一定的阻尼影响，这种现象与所处环境中的黏度大小存在着正向关联性特征，在浸入目标样品之后因彼此之间的差异而导致了振幅衰减、谐波偏移等情况发生，被捕捉下来后可成为可用于测定流体黏度值的一种有效手段，为了尽可能地减少由温度波动所带来的系统误差干扰，很多现代设计都会采取集成温控方案并实施动态校准处理措施。

磨损颗粒传感器主要用于监测油液中的金属磨损颗粒的含量和分布情况。目前最常用的在线式磨损颗粒传感器是采用电感原理设计的，当金属颗粒流过传感器线圈时，会使线圈的电感发生变化，这种变化程度取决于颗粒的大小以及材质^[3]。先进的磨损颗粒传感器可对铁磁性和非铁磁性颗粒加以辨别，并能对颗粒予以计数和大致分类。另一种是利用光学原理的颗粒传感器，根据油液中的颗粒对光的遮挡或散射来判断颗粒浓度以及尺寸分布。

2.2 传感器系统的安装方案

船舶柴油机润滑系统传感器的安装方案要依照润滑系统的种类（湿式油底壳或者干式油底壳）和船舶的空间安排来制定。合理的安装方案是保证传感器能有效的监测。

对于湿式油底壳润滑系统可采取两种安装方式：一是直接将传感器安装在油底壳上，这种方法的安装比较简单，但是对密封的要求比较高，要防止油液的泄漏；二是从油底壳外面接一根循环管路，在管路上装一个传感器，这种方法是在外接管路上可以接更多的传感器，对柴油机本身的改造是最小的，但需要附加泵等附件，可能会降低系统的可靠性。

对干式油底壳润滑系统，因有独立的滑油箱、传感器，因此安装方案较灵活。一般采用外接循环管路的方法，在回油管或供油管上安装传感器，对于回油管自然落差较大的情况，可以利用落差安装传感器，不需要额外的泵，但是受空间限制大。

在实际的安装设计上要考虑以下几点：首先传感器是可拆卸的方便后期维护；其次要考虑到探头到前置电路盒的距离，不能太近避免信号衰减；然后要考虑到安装的位置是否合适，能否让油液充分流动并且有代表性；最后不能选择气泡积累的地方，避免影响测量结果。

2.3 在线监测系统硬件架构设计

对于完整船舶柴油机润滑系统在线监测系统而言，大多数都是采取分布式结构，在设计时包括了以下几部分，传感器层、数据采集层、数据处理层以及应用层。

传感器层是由多种油液传感器组成，用于采集润滑系

统的状态参数。常用传感器有：介电常数传感器、粘度传感器、温度传感器、水分传感器、磨损颗粒传感器等。这些传感器把油液的物理化学性质转变为电信号，随后进行后处理。

数据采集层负责对传感器的信号进行调理、采集以及转换。由于传感器所接收到的数据都是比较小的信号，并且容易被各种各样的干扰因素影响到，所以要对其进行调理，比如放大、滤波等操作处理之后才能将其作为输入端口接入 A/D 转换器将信号转换成数字信号形式。数据采集层负责多个信号的切换及初步处理。

数据处理层是整个在线监测系统的核心部分，一般用微处理器或者单片机。这一层是对收集到的数据进行分析处理，提取出一些特征参数，判断润滑状态是否正常，如果不正常就报警。处理层先进的还可以存储数据和通信，并能和上层管理系统进行交互。

应用层为用户提供人机交互界面，显示状态信息、报警提示、历史数据查询等。现代在线监测系统一般都具有远程监控的功能，通过网络把数据传送到岸基管理系统，从而实现对船舶柴油机的远程状态监测和故障诊断。

在实际系统中，多传感器信息融合技术的应用提高了监测的准确性，利用不同的传感器信息融合可以弥补单个传感器的不足之处，提高故障诊断的准确度。测量介电常数和粘度的同时进行，可以区分油品氧化和燃油稀释这两种不同的故障情况。

3 改进灰色关联分析的润滑系统故障诊断方法研究

3.1 优化灰色关联分析算法流程

改进灰色关联分析在传统的灰色关联分析上增加了欧式距离因子，同时考虑特征向量的趋势接近和距离接近，在一定程度上提高了故障诊断的准确率。该方法主要包括 4 个步骤：数据初值化处理、参考特征向量的计算、改进灰色关联度的计算以及故障模式识别。

数据初值化处理是灰色关联分析的基础工作，船舶柴油机润滑系统处于不同状态下的运行数据共有滑油泵后滑油温度、滤清器前滑油温度、滤清器后滑油温度、冷却器冷却水出口温度、滑油泵后滑油压力、滤清器前滑油压力、滤清器后滑油压力、滑油进机压力以及冷却器冷却水出口压力等 9 个监测点。因为各监测点的量纲和数量级不同，需要将原始数据做初值化处理来消除量纲的影响。其公式为：

$$\text{初值化后数据} = \frac{\text{某状态下的监测点原始数据}}{\text{无故障状态下该监测点的初始数据}}$$

其中“某状态下的监测点原始数据”指待分析状态中某个监测点的实际采集数据，“无故障状态下该监测点的初始数据”指系统正常运行时该监测点的初始采集数据，通过该处理可让不同参数具备可比条件。

参考特征向量计算是根据初值化的数据，计算各个运行状态下的典型特征。对每一种不同的运行状态（无故障状态、滤清器堵塞故障状态、旁通阀泄漏故障状态、冷却器积垢故障状态和滤清器泄露故障状态），需先收集该状态下多组（设为 t 组）初值化后的监测数据，再对每个监测点的 t 组数据取平均值，得到对应监测点的参考特征值，公式为：某状态下某监测点的参考特征值 = 该状态下该监测点的 t 组初值化数据之和 ÷ 数据组数 t

其中“数据组数 t”指为某一运行状态采集的有效数据总组数，参考特征向量代表了各个运行状态监测参数的典型特性，是故障诊断的依据。

改进灰色关联度的计算是该方法最大的创新之处，在传统的灰色关联度的基础上，引入了欧式距离因子，对特征向量的趋势相似性和距离接近性进行了综合评价，具体分三步进行：

首先，求传统灰色关联系数：关联系数用于反映待检状态与参考状态单个监测点数据的趋势相似程度，取值范围为 0-1，数值越接近 1，说明两个监测点数据的变化趋势越一致，计算时需结合分辨系数，一般取 0.5 以调节差异灵敏度。

然后，计算传统灰色关联度：对 9 个监测点的传统灰色关联系数取平均值，公式为：

$$\text{传统灰色关联度} = \frac{\text{9 个监测点的关联系数之和}}{\text{监测点总数}} \quad (9)$$

该数值越接近 1，说明待检状态与参考状态整体的趋势相似性越高。

接下来，算出待检的特征向量同参考的特征向量之间的平均欧式距离，并进行归一化处理：欧式距离用于衡量待检与参考特征向量的数值差距，差距越小说明两组数据越接近；为方便结合分析，需将欧式距离转化为 0-1 范围的归一化距离，公式为：

$$\text{归一化距离} = \frac{1 - (\text{待检与参考的欧式距离} - \text{所有欧式距离最小值})}{(\text{所有欧式距离最大值} - \text{所有欧式距离最小值})}$$

最后，结合灰色关联度和欧式距离计算改进的灰色关联度：引入权重系数 α ，一般选择 0.5 以平衡趋势相似性和距离接近性的重要性，公式为：

$$\text{改进灰色关联度} = \alpha \times \text{传统灰色关联度} + (1 - \alpha) \times \text{归一化距离}$$

故障模式识别是指通过改进灰色关联度排序结果来确定需要检测状态的故障类型。改进后的灰色关联度越大则说明待检状态越接近参考状态，将待检状态作为最大改进灰色关联度所对应的运行状态，即可完成故障诊断。

3.2 灰色关联分析应用的改进研究

为验证改进灰色关联分析算法于船舶柴油机润滑系统故障辨识领域的工程适用性，研究团队构建了典型案例研究框架。研究对象为某型船舶发电柴油机，据此确定润滑油样采样时间窗不大于 200 h 的连续监测方案。实验周期内各受

试柴油机的累计运行时间约都是 500h，单台机组取油样 4 份以保证监测数据序列完整性及可比性。

研究首先对每个油样进行原子光谱分析和 PQ 指数分析（PQ 指数是反映铁磁性颗粒含量的参数）。根据实验数据分析可知，1# 柴油机首份油样中铁元素浓度为 27.1 μg/g，铝元素浓度为 19.9 μg/g，PQ 指数为 35。经过长时间的跟踪检测可以得出上述指标的明显上升趋势，在 1786h 的时候，铁元素的浓度是 40 μg/g，铝元素的浓度降到了 11.6 μg/g，PQ 指数同步达到 40 已经超过正常磨损限值。从铁谱表征可知，油液中有大约 20 μm 的金属磨屑，证明异常磨损已经发生。

利用改进灰色关联分析对这些数据进行分析，首先建立了无故障状态、滤清器堵塞、旁通阀泄漏、冷却器积垢、滤清器泄露五种状态的参考特征向量。然后将待检状态特征向量与各参考特征向量进行改进灰色关联度计算，得到待检状态与滤清器堵塞状态的改进灰色关联度最大，诊断为滤清器堵塞故障。

为验证诊断结论的准确性，利用船舶检修窗口对 1# 柴油机实施拆解检验，现场观测表明，气缸套内表面呈现大量呈非规则分布的划痕形貌，活塞本体磨损程度相对较轻，而活塞环与气缸套配合界面存在显著刮擦痕迹。上述宏观失效特征与前期诊断结果高度一致，从而反向验证了诊断方法的有效性。此外，由于润滑油的粘度值变小，这也意味着活塞环与缸套之间的间隙过大，有部分燃油进入到润滑油内，该案例证明了改进灰色关联分析对润滑系统故障诊断的有效性。

4 结语

本文全面探究了船舶柴油机润滑系统智能监测及故障预报警技术的主要环节，经由探究得知，把多种参数的在线检测传感器同改良灰色联系分析等智能算法综合起来使用，可以很好地做到对磨损故障的提前警报以及精确识别，并给船舶柴油机的安全经营给予了切实可行的技术道路。但是现有技术仍存在海洋环境复杂、传感器时间长、多源信息融合等问题，今后该技术将朝着传感器更加集成化、智能化、诊断算法更加强大的自学习、自适应能力以及与数字孪生相结合，实现整个生命历程的健康管理方向发展，对保障船舶航行安全、延长设备寿命、改善维修资源、助力绿色航运发展产生强大的支撑作用。

参考文献

- [1] 赵霄鹏, 江帆, 许之兴, 孟令群, 许福忠. 某非道路用柴油机润滑系统优化仿真[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2025, 54 (03): 35-39.
- [2] 任东平. 船舶柴油机润滑系统故障诊断研究[D]. 大连海事大学, 2020.
- [3] 牛新朋, 张文权, 温金羽, 孟雪锋, 张京辉, 魏铭扬. 某 3 L 柴油机润滑系统优化提升研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2025, 52 (02): 50-53.

Research on the Mechanism of Extrusion Process Effects on Intergranular Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy

Wei Teng

Jiangsu Guly Technology Co., Ltd., Zhangjiagang, Jiangsu, 215600, China

Abstract

6061 aluminum alloy, renowned for its high specific strength, excellent processability, and corrosion resistance, is widely used in transportation equipment profiles, architectural structural components, and electronic heat sinks. However, during extrusion, factors such as temperature field, stress field, and flow velocity collectively alter microstructure morphology and grain boundary precipitation behavior, thereby increasing intergranular corrosion sensitivity. Engineering studies indicate that extrusion speed, extrusion ratio, flow uniformity, and extrusion temperature directly influence the continuity of Mg_2Si phase at grain boundaries and the width of depletion zones, which in turn affects service corrosion resistance. Through analysis of microstructural evolution, precipitation behavior, and residual stress distribution, optimizing temperature ranges, improving metal flow and steady cooling, combined with appropriate aging regimes, can effectively reduce continuous precipitation and enhance intergranular corrosion stability of 6061 aluminum alloy profiles.

Keywords

6061 aluminum alloy; extrusion process; intergranular corrosion; intergranular precipitates; industrial section; microstructure control

挤压工艺对 6061 铝合金晶间腐蚀行为的影响机理研究

滕威

江苏固铝科技有限公司，中国·江苏 张家港 215600

摘要

6061铝合金因比强度高、加工性与耐蚀性优良，被广泛应用于交通装备型材、建筑结构件及电子散热器等领域。但在挤压过程中，温度场、应力场及速度等因素共同作用，使组织形貌和晶界析出行为发生变化，导致晶间腐蚀敏感性提升。工程研究表明，挤压速度、挤压比、流动均匀性和出料温度直接影响晶界 Mg_2Si 相的连续性与贫化区宽度，从而改变服役耐蚀性能。基于对组织演变、析出行为与残余应力分布的分析，可通过优化温度区间、改善金属流动和平稳冷却，并与合理时效制度匹配，有效降低连续析出，提升6061铝合金型材的晶间腐蚀稳定性。

关键词

6061铝合金；挤压工艺；晶间腐蚀；晶界析出相；工业型材；组织控制

1 引言

6061 铝合金 Al-Mg-Si 系可热处理强化材料，依托挤压与时效可获得强化相，因轻量化、耐蚀性和加工性优良而广泛应用于轨道交通型材、建筑幕墙框架及汽车结构件等领域。然而工程实践表明，部分挤压型材在服役中出现沿晶界发展的腐蚀沟槽，其形成并非源于材料本征缺陷，而与挤压过程中的组织演化密切相关。挤压速度、挤压比、模具流道与出料温度等因素共同影响再结晶行为和晶界析出动态，使晶界贫化区宽度与析出连续性呈现区域化差异，进而诱发晶间腐蚀敏感性波动。因此，有必要系统揭示挤压工艺、组织特征与腐蚀行为之间的关联，以支撑型材及交通装备领域的

工艺优化和可靠性提升。

2 挤压加工过程对 6061 铝合金组织与晶界形貌的影响

2.1 挤压温度对再结晶与晶界结构的影响机理

挤压温度是影响 6061 铝合金组织结构的首要因素，其直接关系到金属塑性流动能力及动态再结晶发生程度。温度偏低时，合金流动阻力增大、位错密度升高，可形成沿流动方向延伸的纤维状变形组织，晶界呈明显拉长状态，由此导致晶界应力集中，成为后续腐蚀萌生的敏感区域。若温度过高，动态再结晶将大量发生，使晶粒快速长大，不均匀的再结晶核分布可能形成局部粗晶带。这类粗晶带因晶界短、晶粒大而造成析出动力学差异，晶界 Mg_2Si 相的分布不均，从而加剧晶间电偶差异。在工业应用中，建筑幕墙型材、轨道交通车窗框等产品常因挤压温度不稳定出现组织带状或局

【作者简介】滕威（1985-），男，中国江苏常熟人，本科，助理工程师，从事材料学，铝型材热挤压研究。

部粗晶问题。此类组织在服役过程中表现出晶间腐蚀敏感性的区域性增强，对长期耐候性产生影响。选择适中的挤压温度曲线，使动态回复与局部再结晶平衡，是降低晶间腐蚀的关键路径之一。

2.2 挤压速度与金属流动均匀性的影响机制

挤压速度决定金属在模具内部的流动状态，对组织纤维化程度与析出相分布具有显著调控作用。高速挤压提升产能，但使金属在死区与流动中心区域出现速度梯度，易形成沿挤压方向的带状结构。该结构中晶界分布呈现周期性变化， Mg_2Si 相析出连续性亦表现出差异，导致部分区域形成明显贫化带，构成晶间腐蚀的潜在通道。此外，速度过高使出模温度快速上升，促进晶界连续第二相的析出。在交通装备用长型材生产中，高速挤压带来生产效率优势，但假如流动不平衡，产品在焊合部位或边缘位置常呈现晶间腐蚀优先发展的现象。控制速度梯度、提升模具内金属同步流动性，是减少晶间腐蚀的关键工艺策略。

2.3 挤压比对晶粒取向及第二相分布的调控效应

挤压比反映变形量大小，对材料内部晶粒取向分布及第二相形核行为具有显著影响。较大挤压比使金属获得充分塑性变形，有助于破碎原始粗大析出相，加速第二相在挤压过程中的重新分布，提高晶界间 Mg_2Si 颗粒的离散性，降低连续析出的概率，从而减少晶间腐蚀通道。然而，过大挤压比将增加单位体积应变能，使晶界能量过度提升，加剧晶界敏化风险。对于大型建筑结构型材或汽车底盘连接件，需要控制适中挤压比，以实现组织均匀性与耐蚀性能的综合平衡。

3 晶界析出行为在挤压工艺影响下的演化特征

3.1 晶界 Mg_2Si 相析出连续性的形成机制

6061 铝合金的晶间腐蚀敏感性主要取决于晶界 Mg_2Si 相的析出连续性，而这一特征深受挤压过程中的温度、应变速率与金属流动状态影响。在挤压变形过程中，位错密度增加使原子扩散增强， Mg 、 Si 元素更易向晶界偏聚，形成初始的断续析出相。当挤压温度过高或出模区域温升失控时，偏聚行为进一步加剧，使原本离散的 Mg_2Si 析出颗粒逐渐连成连续链状结构，晶界局部电化学活性差异随之扩大，形成易腐蚀的弱化区。在建筑型材和轨道交通型材中，由于截面复杂、速度梯度明显，金属流动不均常导致局部温升高于平均水平，因此连续析出区域往往集中出现在流速突变带或焊合线附近。这些连续析出带在腐蚀介质作用下极易形成贯穿晶界的腐蚀沟槽，显著降低构件在户外服役环境中的可靠性。

3.2 PFZ 宽度与晶间腐蚀敏感性的关联

贫化区（PFZ）是晶界附近因溶质元素向晶界偏聚而形成的低合金化区域，其宽度可直接反映晶界敏化程度，是判断晶间腐蚀倾向的重要指标。在挤压加工过程中，高温段

停留时间过长或金属在模具出口处冷却不及时，会促进大量 Mg 、 Si 向晶界迁移，使 PFZ 逐渐扩展。较宽的 PFZ 不仅导致晶界与晶内之间形成更显著的电位差，也使晶界强化不足，腐蚀更易沿 PFZ—晶界路径扩展。反之，若出模温度控制合理并辅以快速风冷或雾化冷却，可抑制溶质过度向晶界扩散，使 PFZ 保持在较窄范围内，从而提高晶界电化学均匀性。工程实践中发现，PFZ 较窄的挤压型材在盐雾或湿热环境下表现出更高的耐蚀稳定性，腐蚀范围通常局限于局部点蚀而非贯穿晶界的沟槽型腐蚀。因此，通过优化温度与冷却制度调控 PFZ 宽度，是提升 6061 铝合金抗晶间腐蚀性能的重要工艺路径。

3.3 位错密度与加速析出效应对腐蚀的影响

挤压变形过程中产生的大量位错可作为 Mg_2Si 析出的优先形核位置，使第二相析出的动力学过程显著加快。当位错密度在晶内均匀分布时，有助于形成细小弥散的强化相，提高材料综合性能；但若位错在晶界附近聚集，则会形成连续的扩散通道，促进 Mg_2Si 沿晶界快速生长，使晶界析出相从离散状态向半连续甚至连续状态转变，形成潜在的腐蚀敏化带^[1]。特别是在模具出口附近，由于金属流速突变和应变集中，位错累积更为明显，使这些区域成为晶间腐蚀易发部位。在工业型材生产中，许多腐蚀缺陷被证明与此类“应变集中区”高度相关。位错导致的加速析出不仅改变晶界相形貌，也使局部电化学差异进一步扩大，加速腐蚀介质侵入并沿晶界扩展。因此，控制挤压应变路径和速度梯度、改善模具流道设计，是避免位错聚集与防止晶界连续析出的关键措施。

4 残余应力与宏观形变对应的腐蚀敏感性差异

4.1 挤压残余应力场对晶间腐蚀的促进作用

挤压过程中因快速变形与温度骤降，6061 铝合金表层金属产生高密度塑性应变并形成显著张应力，而内部因冷却迟滞和形变较弱呈现低应力状态，导致应力呈“表层集中—内部缓和”的梯度分布。高张应力使晶界能量升高，促进腐蚀介质优先侵入；当晶界 Mg_2Si 富集带与该应力场叠加时，腐蚀裂纹更易沿晶界扩展并贯穿多个晶粒。此外，张应力可诱发晶界微裂纹萌生，使局部电化学活性提升，加速腐蚀产物积聚，形成典型应力强化型晶间腐蚀特征。工程型材中，外层快速冷却区常最先出现沿晶界扩展的腐蚀沟槽，表明挤压残余应力场在晶间腐蚀启动与加速中具有关键促进作用。

4.2 型材几何形状对应力分布与腐蚀的耦合作用

工业型材的几何复杂性决定金属流动路径与应力分布特征，其影响直接体现在晶间腐蚀的区域化发展上。汽车行李架中空型材、散热器多齿基材及建筑幕墙框架等结构因厚薄差异和转角变化，使金属流动受阻、应力集中方式各异。薄壁区域因流速高、应变大，易形成位错密集带并积累张应力，使晶界析出相趋于连续；多腔型材的隔板部位因金属补

充路径长、局部升温显著，更容易形成敏化区。在散热器基材中，齿根部位因受力不均成为腐蚀优先萌生处；幕墙型材的转角因应力叠加易出现晶界沟槽。由此可见，几何结构强化了应力耦合作用，使晶间腐蚀呈“结构依赖”特征，是工程设计与挤压成形过程中必须重点控制的因素。

4.3 后续时效处理与残余应力释放对应的腐蚀行为变化

挤压后的冷却方式决定残余应力的初始分布，而人工时效可调节应力释放及强化相演化，从而影响晶间腐蚀敏感性。当 T6 或 T5 时效制度与挤压组织匹配良好时，晶内强化相弥散析出，可减轻晶界连续析出趋势，实现晶界强化与晶内强化的协调，提高耐蚀稳定性。若时效温度过高或时间过长，会造成晶界析出相粗化与 PFZ 扩展，导致敏化增强；时效不足则残余应力释放不充分，局部高应力区仍促使腐蚀沿晶界扩展。此外，水冷、雾化冷却或风冷等冷却方式会影响应力消散速率，冷却过强可能引入新的表层应力^[2]。工程实践表明，优化时效温度—时间曲线并辅以适度预拉伸，可改善应力分布，使晶界析出更均匀，从而显著提升 6061 铝合金的抗晶间腐蚀性能。

5 工业应用场景中挤压工艺与晶间腐蚀控制策略

5.1 建筑型材生产中的挤压工艺优化策略

建筑幕墙型材长期暴露于湿热、雨水及盐雾环境，对 6061 铝合金的晶间腐蚀稳定性要求更高。挤压温度的分区调控是改善组织均匀性的关键：适度降低前段加热温度可避免金属过度软化，使应变速率更稳定；中后段温度保持一致能抑制局部再结晶，减少粗晶带形成。同时，通过优化流道结构、采用模具等温设计，提高金属流动同步性，可有效减弱速度梯度引起的带状组织。此外，快速均匀的空气冷却或风冷有助于抑制晶界连续析出并缩小 PFZ 宽度，从而减少贯通式腐蚀路径。实践表明，低温—中速挤压结合在线冷却控制，可显著改善型材晶界析出相分布，提高幕墙产品的耐候可靠性和服役寿命，且在大规模生产中具备良好稳定性。

5.2 交通装备型材中晶间腐蚀的区域化控制

交通装备用 6061 铝合金型材截面复杂、流动路径不均，挤压过程中易形成应变集中与速度差异区域，成为晶间腐蚀优先发生部位。为减弱区域化腐蚀风险，需对模具流道进行优化，如调整厚薄差异较大的部位的流动阻力、改善死区金属补充，从而提升截面各区域流速一致性，避免薄壁区因高

应变形成位错密集带。在挤压比方面，应在组织细化与应力集中之间取得平衡，避免过大挤压比导致敏化加剧。同时，保持出口温度稳定可减少晶界连续析出。部分企业采用分段挤压和在线均匀化技术，有效降低大截面型材温升波动，使晶界析出更离散。多项实践表明，通过金属流动调控、温升控制和组织均匀化，可显著减小不同区域晶间腐蚀差异，提高车体结构的服役可靠性。

5.3 电子散热器基材对挤压工艺的特殊要求

电子散热器基材对导热性和长期耐蚀性具有严格要求，因此其挤压过程需更加注重组织均匀性与晶界析出控制。过高挤压温度或过快挤压速度易导致晶界 Mg₂Si 相沿晶界连续析出，不仅降低耐蚀性，还破坏热传导路径。降低挤压速度可改善金属变形可控性，使纤维化组织更加均匀，同时避免位错在晶界集中。模具深冷预处理技术的应用可降低金属进入模腔时的温度场波动，减少局部升温引起的敏化趋势。针对散热器薄片、多齿结构，挤压出口需采用精准风冷或雾化冷却以限制 PFZ 过度扩展，保持晶界电化学均匀性^[3]。综合来看，通过控制挤压速度、优化温度场以及采用深冷模具与有效冷却方式，可获得更均匀的晶界分布，为散热器在高热载条件下的稳定服役提供可靠保障。

6 结语

挤压工艺对 6061 铝合金晶间腐蚀行为具有多维度影响，其核心机制包括温度与速度调控组织形貌、挤压比影响晶界析出相分布、位错密度驱动析出动力学、残余应力耦合腐蚀扩展路径等。工业实践显示，通过精确控制挤压温度曲线、改善金属流动均匀性、优化挤压比及实施可控冷却制度，可明显降低晶间连续析出的概率，改善 PFZ 宽度与晶界电化学均匀性，显著提升 6061 铝合金在建筑型材、交通装备用型材及散热器基材等领域的耐蚀稳定性。未来，随着智能挤压装备、数据驱动工艺控制和在线组织监测技术的发展，6061 铝合金挤压工艺将实现更加精准的组织调控，进一步降低晶间腐蚀风险，为高性能铝合金型材产业的可靠性提升提供更强技术支撑。

参考文献

- [1] 刘瀚璋. 用于 6061 铝合金切屑固态回收的热挤压工艺及其材料的组织与性能研究[D]. 华南理工大学, 2024.
- [2] 王文辉. 时效处理对 6061 铝合金力学性能及腐蚀行为的影响[D]. 宁夏大学, 2023.
- [3] 何祯, 拜斌, 张小明, 等. 航空用 6061 铝合金恒载荷应力腐蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(02): 64-69.

Research on Optimal Configuration Methods for Energy Storage Capacity in New Energy Power Stations

Jingwen Shi

State Power Investment Corporation Xiong'an Energy Co., Ltd. Beijing Branch, Tianjin, 300131, China

Abstract

Under the promotion of the dual carbon target, the output volatility and uncertainty caused by the large-scale development of new energy power plants have become key factors restricting the safe and stable operation of the power system. As a core means of stabilizing fluctuations and enhancing the capacity of new energy consumption, the capacity optimization configuration of energy storage systems directly affects the system's economy and reliability. The research results indicate that the proposed optimization configuration method can achieve a balance between energy storage investment costs and new energy consumption benefits while meeting the requirements of grid access, providing a scientific basis for the planning of energy storage systems in new energy power plants.

Keywords

new energy power station; Energy storage capacity; Optimize configuration; solving algorithm

新能源电站配套储能容量优化配置方法研究

石静雯

国家电投集团雄安能源有限公司北京分公司，中国·天津 300131

摘要

双碳目标推动下，新能源电站规模化发展引发的出力波动性与不确定性问题，已成为制约电力系统安全稳定运行的关键因素。储能系统作为平抑波动、提升新能源消纳能力的核心手段，其容量优化配置直接影响系统经济性与可靠性。研究结果表明，所提优化配置方法能够在满足电网接入要求的前提下，实现储能投资成本与新能源消纳效益的平衡，为新能源电站储能系统规划提供科学依据。

关键词

新能源电站；储能容量；优化配置；求解算法

1 引言

双碳目标推动下，我国新能源电站装机规模持续扩张，风能、太阳能等清洁能源在电力结构中占比显著提升。然而，受自然条件制约，新能源出力呈现强波动性、随机性与间歇性，大量并网后不仅加剧电力系统供需失衡，增加传统火电调峰压力，还导致新能源弃电风险上升，成为制约能源转型进程的关键瓶颈。储能系统作为平抑新能源波动、提升消纳能力的核心手段，其容量配置直接关系系统经济性与可靠性，但现有研究多聚焦单一目标优化，对源荷不确定性和系统灵活性的协同考量不足，配置方案实用性与经济性难以兼顾。基于此，本文围绕新能源电站配套储能容量优化展开研究，先阐述新能源电站与储能系统基础理论、梳理容量配置核心影响因素，再构建多目标优化模型并选取粒子群算法求

解，最后通过实际算例验证模型有效性，旨在为储能系统科学规划提供技术支撑，助力新型电力系统安全高效运行。

2 新能源电站与储能系统相关基础理论

2.1 新能源电站出力特性分析

新能源电站出力由资源禀赋与发电技术决定，风能、太阳能为代表的新能源出力呈显著波动性、随机性与间歇性。风电受风速、风向影响，日内功率起伏大，冬春季出力高、夏秋季低；光伏依赖太阳辐射与日照，日内呈单峰特性，云层、阴雨会引发随机波动，季节变化也导致出力差异。此外，新能源出力存在地域差异，如我国西北地区资源丰富但出力波动更明显，难以提供稳定电力，给电力系统供需平衡与安全运行带来挑战^[1]。

2.2 储能系统工作原理与技术类型

储能系统核心是实现电能时空转移，工作原理为充电时将电能转化为化学能、机械能等存储，用电高峰或新能源出力不足时反向转化为电能并网。按存储形式可分多类：电

【作者简介】石静雯（1996—），女，中国山西阳泉人，硕士，助理工程师，从事风电场管理研究。

化学储能响应快、配置灵活，其中锂电充放电效率高、寿命长，适用于分布式与集中式场景，液流电池容量与功率可独立调节，适合大规模长时储能；抽水蓄能技术成熟但依赖地理条件、建设周期长；压缩空气储能适用于长时大规模场景，飞轮储能响应极快，多用于短时调频。不同类型储能能在效率、成本等方面有差异，为优化配置提供选择。

2.3 储能容量优化配置核心目标

核心目标是平衡系统经济性、可靠性与环保性。经济性目标为最小化全生命周期成本，含储能投资、运维及新能源弃电损失成本，以提升项目效益；可靠性目标是通过储能调节平抑波动，保障电网电压、频率稳定，降低供电中断风险；环保性目标契合双碳要求，通过提高新能源消纳率减少化石能源发电与碳排放^[2]。三者相互约束，需寻求最优平衡以制定科学配置方案。

3 新能源电站配套储能容量影响因素分析

3.1 新能源出力波动性与不确定性影响

新能源出力的波动性与不确定性是储能容量配置的核心影响因素，直接决定储能调节需求。波动性表现为出力在不同时间尺度的持续变化：日内短时快速波动需储能具备快速响应能力，季节性波动则要求长时存储能力，波动幅度越大，所需储能容量越高。不确定性源于出力预测误差，气象条件的复杂性使预测值与实际值存在偏差，可能引发供需失衡，需储能预留备用容量应对；预测误差随预测时长增加而扩大，配置时需充分考虑以规避系统风险。此外，新能源电站装机规模会放大上述影响，大规模集群的出力波动叠加后，对储能调节能力需求更迫切，需配置更大容量保障系统稳定^[3]。

3.2 负荷需求特性与电网接入要求

负荷需求特性与电网接入要求从外部约束影响储能配置。负荷时序分布决定供需平衡状态：若新能源出力高峰与负荷高峰重叠，储能需求较小；若负荷高峰与新能源出力低谷并存，则需更大容量实现电能转移。负荷波动幅度也会增加需求，波动剧烈区域需储能同时应对新能源与负荷波动。电网接入要求提出明确约束：部分地区规定电源侧储能按配套新能源装机 15%、2 小时配置，负荷侧按用电负荷 5%、2 小时配置；电网接纳能力有限时，需储能转移富余电量，接纳能力越弱，所需容量越大；同时，储能需具备足够容量与功率参与调频、调压，保障电网运行安全^[4]。

3.3 储能系统技术参数与经济性约束

储能系统的技术参数与经济性指标从可行性与经济性角度制约配置。技术参数方面：充放电效率越低，能量损耗越大，需更大容量达预期调节效果；循环寿命越短，更换成本越高，配置时需兼顾短期需求与长期寿命；充放电功率上限越高，应对突发波动能力越强，可适度降低容量需求。经济性约束聚焦成本与收益平衡：单位容量、功率投资成本直

接影响总投资，成本越高，相同预算下可配置容量越小；运维成本含设备检修、电池更换及能耗等，长期过高会降低经济性。此外，新能源上网电价、峰谷价差影响收益，价差越大，储能削峰填谷收益越高，可支撑更大容量配置；项目全生命周期越长，越能分摊初始投资，利于配置较大容量。

4 储能容量优化配置方法构建

4.1 优化目标函数建立

储能容量优化需综合经济性、可靠性与环保性构建多目标模型。经济性目标以全生命周期总成本最小为核心，成本涵盖储能投资成本（单位容量 / 功率成本、固定投资）、运行维护成本（检修、能耗）及新能源弃电损失成本（与弃电率、上网电价相关）；可靠性目标以系统供电缺电率最低为指标，降低负荷需求无法满足的风险；环保性目标以碳排放量最小为导向，通过提升新能源消纳率减少化石能源使用。采用加权求和法将多目标转化为单目标函数，结合项目需求与政策导向赋予目标权重，最终目标函数表现为经济性成本、可靠性惩罚成本（与缺电率正相关）、环保成本（与碳排放量正相关）的加权和最小^[5]。

4.2 约束条件设定

储能配置需满足技术、电网与经济性三类约束。技术约束包括：储能系统充放电功率不超额定值，荷电状态维持在允许范围且每日循环后恢复初始值，同一时刻不兼具充放电状态；新能源电站出力与储能充放电功率叠加值不超额定装机容量。电网约束包括：功率平衡（新能源出力 + 储能放电 = 负荷需求 + 储能充电），接入节点电压维持在额定电压允许波动范围。经济性约束包括：储能全生命周期成本不超预算上限，新能源弃电率不超政策规定上限。

4.3 求解算法选择与实现

选取粒子群算法求解，该算法收敛快、鲁棒性强，适用于多目标优化，核心是模拟鸟群觅食，通过粒子位置与速度调整寻找最优解。实现步骤为：确定算法参数（粒子数量、迭代次数等）与解空间范围（结合储能参数、预算、电网约束）；初始化粒子群位置与速度，每个粒子代表一组储能配置方案；计算粒子适应度（基于目标函数，值越小方案越优）；更新个体与群体最优位置，调整粒子速度与位置；引入交叉变异机制增加种群多样性，避免局部最优；采用罚函数法处理约束违反情况，若达到迭代次数或收敛精度，输出最优储能容量与功率方案，否则继续迭代。

5 算例分析与验证

5.1 算例数据选取与参数设置

选取我国西北地区某风电场作为算例，该风电场装机容量为 100 兆瓦，全年风能资源丰富但波动明显，年平均风速为 6.5 米 / 秒，年有效发电小时数约 2200 小时。选取该风电场连续一年的实测出力数据，时间分辨率为 1 小时，数据显示日内最大出力波动幅度达 30 兆瓦，冬季出力明显高

于夏季。负荷数据采用该风电场接入区域的电网负荷数据，同样为 1 小时分辨率，年最大负荷为 90 兆瓦，负荷高峰主要集中在上午 10-12 时与晚上 19-21 时，与风电出力高峰存在一定错位。储能系统选用锂离子电池储能，技术参数设置如下：充放电效率为 90%，循环寿命为 6000 次，最小荷电状态为 20%，最大荷电状态为 80%，单位容量投资成本为 1500 元 / 千瓦时，单位功率投资成本为 300 元 / 千瓦，年运行维护成本为投资成本的 2%。电网接入要求新能源弃电率不超过 5%，节点电压波动范围为额定电压的 $\pm 5\%$ 。算法参数设置：粒子数量为 50，最大迭代次数为 100，学习因子 c_1 与 c_2 均为 2.0，惯性权重初始值为 0.9，迭代过程中线性递减至 0.4。目标函数权重设置：经济性权重为 0.5，可靠性权重为 0.3，环保性权重为 0.2。

5.2 优化配置结果计算

基于上述数据与参数，采用粒子群算法对储能容量进行优化求解。算法迭代过程中，适应度值逐步下降并趋于稳定，在迭代至 80 次时达到收敛，此时得到最优配置方案：储能容量为 15 兆瓦时，储能功率为 7.5 兆瓦。该配置方案对应的全生命周期总成本为 2860 万元，其中投资成本 2400 万元，运行维护成本 320 万元，弃电损失成本 140 万元。系统供电缺电率为 1.2%，新能源弃电率降至 3.8%，满足电网接入要求的弃电率上限。碳排放量较无储能配置时减少 8600 吨，实现了环保目标。为验证算法有效性，对比不同迭代次数的优化结果，发现迭代次数增加至 80 次后，适应度值不再明显下降，表明算法已找到全局最优解，避免了局部最优问题。同时，对比不同粒子数量的求解结果，粒子数量为 50 时既能保证求解精度，又能控制计算时间，兼顾效率与效果。

5.3 结果分析与有效性验证

最优配置方案的有效性可从经济性、可靠性与环保性三个维度验证。经济性方面，配置 15 兆瓦时 /7.5 兆瓦的储能系统后，新能源弃电率从无储能时的 12.3% 降至 3.8%，年减少弃电量约 1020 万千瓦时，增加新能源消纳收益约 408 万元，同时储能系统通过削峰填谷获得峰谷电价差收益约 180 万元，项目投资回收期为 8.5 年，具备良好的经济效益。可靠性方面，供电缺电率从无储能时的 4.8% 降至 1.2%，显

著提升了系统供电稳定性，储能系统能够快速响应新能源出力波动与负荷变化，有效抑制电压波动，电压波动范围控制在 $\pm 3\%$ 以内，满足电网运行要求。环保性方面，年碳排放量减少 8600 吨，相当于节约标准煤 3.44 万吨，减少二氧化硫排放 258 吨，环境效益显著。为进一步验证优化方法的优越性，对比传统经验配置方法与所提优化方法的结果，传统经验方法按照新能源装机 15%、2 小时配置储能，即 30 兆瓦时 /15 兆瓦，投资成本高达 4800 万元，投资回收期长达 12.6 年，且弃电率仍达 4.2%，供电缺电率为 1.5%。对比结果表明，所提优化配置方法在降低投资成本、缩短投资回收期的同时，提升了新能源消纳率与系统可靠性，验证了方法的科学性与有效性。

6 结论

本文针对新能源电站配套储能容量优化配置问题，通过理论分析、模型构建与算例验证，形成系统研究成果。研究表明，新能源出力特性、负荷需求、电网要求及储能技术经济参数共同决定容量配置方案，构建的多目标优化模型，结合粒子群算法求解，可实现多维度需求平衡。西北风电场算例显示，最优配置使弃电率从 12.3% 降至 3.8%、供电缺电率从 4.8% 降至 1.2%，年减碳 8600 吨，较传统经验配置降低投资成本 44.6%，缩短回收期 4.1 年，验证了方法的科学性。但研究未充分考虑储能技术进步带来的参数动态变化，权重确定依赖主观赋权，存在一定局限。后续可引入动态参数预测模型，采用客观赋权法优化权重，探索多类型储能混合配置，进一步提升方案前瞻性与灵活性。

参考文献

- [1] 张郝宁.新能源接入下配电网储能容量优化配置方法[J].中国新技术新产品, 2025(2):57-59.
- [2] 王睿思.考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法[J].电气时代, 2025(2):137-139.
- [3] 罗晓乐,宋洋,徐翔,等.计及新能源消纳的储能容量优化配置研究[J].电气开关, 2022(002):060.
- [4] 王萍.基于储能技术的新能源电力优化设计研究[J].中国高新技术, 2025(9).
- [5] 电气工程.高渗透率新能源下的储能调频容量优化配置方法研究[D]. 2024.

Research on the Structure Design and Performance Optimization of Small Mobile Air Conditioning System

Hailiu Yang Zhiyong Wang Yuan Liu Jianli Huang Yu Shu

China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China

Abstract

With the increasing demand for comfort and convenience, small portable air conditioning systems have gradually become important household appliances. This paper primarily explores the structural design and performance optimization of small portable air conditioning systems. First, the basic design requirements, considerations for functional module design, and energy efficiency requirements are analyzed. Next, the selection and arrangement of compressors and condensers, the design and optimization of evaporators and fans, as well as the design of system piping and control systems are discussed. Then, performance evaluation methods for portable air conditioning systems are proposed, including heat exchange efficiency, energy consumption, environmental performance, and noise and comfort evaluations. Finally, based on existing technologies, the paper explores strategies for optimizing system performance, focusing on improvements in the refrigeration cycle, energy utilization, and intelligent management. By combining theoretical analysis with practical case studies, this paper provides theoretical support and practical guidance for the design and optimization of small portable air conditioning systems.

Keywords

Small portable air conditioning; Structural design; Performance optimization; Energy efficiency; Intelligent management

小型移动空调系统结构设计与性能优化研究

杨海柳 王智永 刘媛 黄建利 舒誉

中国空间技术研究院，中国·北京 100094

摘要

随着人们对舒适性与便捷性的需求不断增加，小型移动空调系统逐渐成为重要的家电设备。本文主要探讨了小型移动空调系统的结构设计与性能优化问题。首先，分析了系统设计的基本需求、功能模块的设计考虑以及能源效率要求。接着，介绍了压缩机与冷凝器的选择与布置、蒸发器与风机的设计与优化、系统管路与控制系统的工作原理等结构设计要素。然后，提出了移动空调系统性能的评估方法，包括热交换效率、能源消耗、环保性能及噪音与舒适度评估。最后，基于现有技术，探讨了系统性能的优化策略，重点在制冷循环、能源利用率和智能化管理的提升。通过理论分析与实际案例的结合，本文为小型移动空调系统的设计与优化提供了理论支持和实践指导。

关键词

小型移动空调；结构设计；性能优化；能源效率；智能化管理

1 引言

小型移动空调系统因其便捷性、灵活性和较低的初期投资，已经成为市场上广泛应用的空调设备。随着生活质量的提高，人们对空调系统的需求日益多样化，尤其是在能效、环保和舒适性方面的要求不断提升。因此，对小型移动空调系统进行有效的结构设计与性能优化，不仅能够提高其制冷效率，还能在节能降耗方面取得显著效果。本文将围绕小型移动空调系统的设计要求、结构设计与性能优化展开研究，旨在分析现有技术的优缺点，并提出可行的改进方案。通过

对系统结构、性能评估方法以及优化策略的深入探讨，本文力求为相关产品的设计与改进提供理论依据，推动其在市场中的应用和发展。

2 小型移动空调系统的设计要求

2.1 系统设计的基本需求

小型移动空调系统的设计必须满足一定的制冷效果，同时确保便捷性与移动性。设计过程中应考虑空调设备的体积、重量和便于搬运的特性。其外形尺寸应适合家庭、办公室或车内等场景使用，最大限度地减少空间占用。空调系统的设计还应保证操作的简便性，用户能够轻松进行温度调节、模式切换以及过滤器清洁等日常操作。此外，噪音控制也是设计的关键因素，系统在运行时需保持低噪音，保证使

【作者简介】 杨海柳（1986—），男，中国河北三河人，本科，工程师，从事暖通空调研究。

用环境的舒适性。通过合理设计各项功能，确保空调在各种工作条件下都能达到良好的性能表现。

2.2 设计的能源效率要求

小型移动空调的设计必须优先考虑能源效率，以减少用户的能耗支出并推动绿色环保。系统应采用高能效比（EER）技术，在保证制冷效果的同时，降低功率消耗。压缩机的选择应优先考虑变频技术，这能根据负载自动调节功率输出，避免不必要的能耗浪费。制冷剂的使用也是设计中的重要因素，应选择低 GWP（全球变暖潜力）且环保型制冷剂，以减少对环境的负面影响。此外，空调系统还应配备智能控制系统，根据环境温度和湿度自动调整工作状态，从而最大限度地提高能源使用效率。系统的设计还要保证长时间使用中的稳定性，避免因过度消耗能源而导致设备寿命降低^[1]。

3 小型移动空调系统的结构设计

3.1 压缩机与冷凝器的选择与布置

小型移动空调的压缩机和冷凝器是系统制冷效果的关键部件。压缩机通常采用直流变频压缩机，以提高系统的能效比（EER）和调节精度。直流变频压缩机根据负荷变化自动调整转速，避免了传统定频压缩机的高能耗和噪音问题。冷凝器的选择一般以翅片式为主，翅片设计可以增加热交换的表面积，从而提高热交换效率。为了确保高效散热，冷凝器需采用良好的散热材料，如铝合金或铜材，并且表面经防腐处理以增强耐久性。布置方面，压缩机和冷凝器应合理分布在空调外部或底部，避免过度紧凑的布局影响散热性能。压缩机与冷凝器之间的管道连接应尽量简短，减少热交换过程中的热损失。

3.2 蒸发器与风机的设计与优化

蒸发器与风机的设计对小型移动空调的制冷性能与空气流动效果起着至关重要的作用。蒸发器通常采用铝翅片管式结构，以确保较大的热交换面积，从而提高热交换效率。翅片的设计要合理，过于密集的翅片可能增加空气流动的阻力，影响空气的流通速度。蒸发器的管道系统采用耐腐蚀材料，如铜或不锈钢，并采取抗氧化表面处理技术，延长使用寿命并确保长期高效运行。风机设计则需要考虑噪音、风量和空气分布的平衡。常见的风机类型为离心风机或轴流风机，其中离心风机具有较高的风量输出能力，能够提供稳定的空气循环。风机叶片的设计应减少空气流动的阻力，优化空气流速，确保空气能够均匀地流过蒸发器表面，提高热交换效率。此外，风机应具备多档风速调节功能，用户可以根据实际需求选择合适的风速，提升空调的适用性和舒适性。

3.3 系统管路与控制系统的应用

小型移动空调的管路系统和控制系统的应用直接影响制冷剂的流动效率和空调系统的智能化水平。管路系统需要合理设计，以确保制冷剂能够顺畅流动并快速实现热交换。

管道一般采用钢管或铝管，因其优良的导热性和抗腐蚀性，能够有效保证系统的长期运行稳定性。管道布局应尽量减少弯曲和长度，减少制冷剂流动中的阻力，避免热损失。在管道连接处，应选择密封性能良好的接头，防止制冷剂泄漏，确保系统的高效运行。控制系统是小型移动空调智能化的核心，通常采用微处理器控制技术，通过传感器实时监测室内温度、湿度等环境参数，并调节空调运行模式。控制系统不仅需要能够实现温度设定和自动调节风速等基本功能，还应具备故障自诊断功能，能够在发生故障时及时通知用户，并通过控制系统进行保护，避免系统损坏。

4 移动空调系统的性能评估方法

4.1 热交换效率与制冷能力

热交换效率和制冷能力是评估移动空调性能的核心指标。热交换效率直接影响到空调的制冷效果，其主要由蒸发器和冷凝器的设计决定。对于典型的家用小型空调，制冷量通常为 3000-5000W。热交换效率较高的系统通常能够在短时间内达到较低的室内温度，提升舒适度。现代空调系统采用了高效的铝翅片设计和优质热交换材料，这些优化能够有效提高热交换效率。比如，某型号小型空调的蒸发器和冷凝器设计能使热交换效率达到 85% 以上，从而有效提升制冷能力。制冷能力也受到环境温度、湿度和制冷剂种类的影响。常见的制冷剂如 R32 和 R410A 具有较高的热交换能力，能在较低的能耗下实现较强的制冷效果。实验数据表明，使用 R32 制冷剂的空调系统在相同条件下较 R410A 系统的制冷能力提高了 10%。因此，优化热交换过程和选择合适的制冷剂是提升制冷能力的关键因素^[2]。

4.2 能源消耗与环保性能

小型移动空调的能源消耗直接决定了其使用成本和环境影响。为了评估能源消耗，首先需要查看空调的能效比（EER）和制冷量。典型的小型空调设备的 EER 值一般在 3.0-4.0 之间。根据不同制冷剂和压缩机技术，EER 的值会有所不同。比如，使用直流变频压缩机的小型空调在低负荷情况下能有效调节功率，能效比能达到 4.2 以上，相较于传统定频压缩机空调，其能源消耗减少约 25%。此外，环保性能也尤为重要。制冷剂的选择对空调的环保性能有显著影响。R32 作为一种新型环保制冷剂，其全球变暖潜力（GWP）为 675，明显低于传统的 R410A（GWP 为 2088）。因此，使用 R32 制冷剂的小型空调不仅能减少能源消耗，同时也能降低对环境的负面影响。在能效优化方面，进一步提升系统的热交换效率、压缩机的能效和系统控制的精细化调节可以大幅度减少能源的浪费。通过优化这些技术，系统的能源消耗降低了约 20%-30%。

4.3 噪音与舒适度评估

噪音和舒适度是影响用户体验的关键因素。移动空调的噪音主要来自于压缩机、风机和气流的扰动。根据测试

数据，普通小型空调在标准工作模式下的噪音水平一般在 50-60 分贝之间。采用直流变频压缩机的小型空调相比传统压缩机，噪音通常降低 5-10 分贝。这一降噪效果主要得益于变频压缩机在低负荷情况下的低速运行和风机的优化设计。此外，风机叶片的设计和风道的布局对噪音有直接影响，优化的风道设计能有效减少空气流动中的涡流，从而降低噪音。通过优化气流路径和增加吸音材料，空调的噪音水平能进一步降低至 45 分贝以下，接近图书馆的安静环境。舒适度的评估则涉及温度均匀性、风速调节和湿度控制。现代移动空调系统配备了智能温控和湿度感应器，能够根据环境条件自动调节风速和温度设置，从而达到最佳的舒适性。测试结果表明，在温度变化较大的环境中，智能控制系统可以保持室内温度波动在 2°C 以内，提升了用户的舒适感^[3]。

5 小型移动空调系统的性能优化策略

5.1 优化制冷循环与热交换效率

为了提升制冷效率，优化制冷循环是提升空调性能的关键措施之一。优化制冷循环可以通过多种方式实现，主要包括提高压缩机效率、优化冷凝器和蒸发器设计以及改进制冷剂流动路径。压缩机作为制冷循环中的核心部件，其效率直接影响整体能效。采用变频直流压缩机可以根据负荷变化调节转速，从而避免不必要的能量消耗。冷凝器的翅片设计也是影响热交换效率的重要因素，通过增加翅片的数量和优化翅片形状，可以提升热交换效果。蒸发器的表面也应采用抗污染涂层，减少灰尘积聚，确保热交换效率。此外，系统管路应优化设计，减少弯曲与阻力，确保制冷剂流动的顺畅。通过这些优化，空调的制冷循环效率可以提高约 15%-20%，提升了整体系统的性能。

5.2 提高系统的能源利用率

提高能源利用率的策略包括优化压缩机和冷凝器的配合、采用高效的变频控制技术以及选择低 GWP 的环保制冷剂。直流变频压缩机能根据负荷调节运行功率，相较于传统的定频压缩机，变频压缩机在低负荷时能大幅度降低能耗，整体能效提升约 25%。冷凝器的优化设计，如采用高效翅片材料和提升散热面积，也能有效提高系统的能源利用率。为了进一步提升能效，现代小型移动空调普遍采用智能控制系统，该系统能够实时监控室内温度、湿度和外部环境变化，并自动调整空调的运行模式。根据测试，采用智能控制系统

的小型空调，其能源消耗比传统空调低 15%-20%。此外，制冷剂的选择对能效也有影响，采用 R32 等低 GWP 制冷剂的空调，其能效比传统 R410A 系统提高了 10%-15%^[4]。

5.3 改善系统控制与智能化管理

智能化控制系统是提升小型移动空调系统性能的一个重要方面。现代空调系统配备了温湿度传感器、红外传感器和智能调节系统，能够根据环境条件自动调节工作状态。例如，当室内温度过高时，空调系统能自动开启强制制冷模式；当温度接近设定值时，系统则自动调节至节能模式。通过微处理器控制技术，空调能够实时监控温度变化，避免过度制冷或制热，减少能源浪费。数据表明，采用智能控制系统的空调，其能源消耗较传统控制方式降低了 15%-20%。此外，智能化管理还可实现远程操作与监控，用户可通过智能手机进行远程开关机、温度调节等操作，提升了使用便捷性。通过智能控制系统，空调的整体性能得到了大幅提升，且能在不同环境条件下保持最佳的运行效果。

6 结语

通过对小型移动空调系统结构设计与性能优化的深入研究，本文探讨了该系统在设计要求、结构设计、性能评估及优化策略等方面的关键技术与方法。在系统设计中，注重提高能源效率、优化功能模块以及确保舒适性和低噪音，是实现高效制冷和用户满意度的基础。通过合理选择压缩机、冷凝器、蒸发器以及风机的设计与布置，能够有效提升热交换效率和制冷能力。与此同时，能源消耗与环保性能的优化以及智能化控制系统的引入，进一步推动了系统的能效和智能化水平。通过这些优化策略，能够显著提高小型移动空调的综合性能，满足现代用户对于高效、环保和舒适生活环境的需求。

参考文献

- [1] 肖喜平.移动空调系统降噪优化设计措施[A].2023年中国家用电器技术大会论文集[C].中国家用电器协会:2023:1038-1042.
- [2] 刘娟.基于人性化设计的移动空调造型设计研究[J].科技风,2022,(05):4-6+77.
- [3] 秦艺萌,吴其洲.基于单片机的移动空调系统设计[J].测试技术学报,2021,35(04):364-368.
- [4] 刘娟.智能化及低噪声节能的移动空调造型设计[J].机械设计,2020,37(05):145.

Design and Implementation of an Autonomous Wind Turbine Blade Inspection System Based on Unmanned Aerial Vehicles

Lele Li

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

Abstract

Aiming at the problems of low efficiency and high risks in traditional wind turbine blade inspection, this paper introduces an autonomous inspection system based on unmanned aerial vehicles (UAVs). It primarily analyzes the system architecture composed of the flight platform, payload system, route planning module, and data analysis platform. The paper elaborates on the complete workflow, which encompasses 3D route planning, autonomous data acquisition, AI-based image analysis, 3D reconstruction, and report generation. The research demonstrates that this integrated system can significantly enhance inspection safety and efficiency, enable precise assessment and preventive maintenance of blade conditions, thus providing effective technical support for the intelligent operation and maintenance of wind farms.

Keywords

UAV; blade inspection; wind power operation and maintenance

基于无人机的风机叶片自主巡检系统设计与实现

李乐乐

山东电力工程咨询院有限公司，中国·山东 济南 250013

摘要

针对传统风机叶片巡检效率低、风险高的问题，介绍了一套基于无人机的自主巡检系统，主要分析了由飞行平台、载荷系统、航线规划与数据分析平台组成的系统架构，重点阐述了从三维航线规划、自主数据采集、AI图像分析到三维重建与报告生成的完整工作流程。研究表明，该集成系统能显著提升巡检安全性与效率，实现叶片状态的精准评估与预防性维护，为风电机场智能化运维提供了有效技术支撑。

关键词

无人机；叶片巡检；风电运维

1 引言

风电机组叶片是风力发电系统的核心组件之一，其状态和完整性对运行安全至关重要^[1-2]。如果叶片存在潜在的损伤，可能会导致叶片断裂、碎片飞散或整个机组故障，对人员和设备造成严重危害。传统的人工风机叶片巡检方式安全性差、效率低下，无法满足风电日益增长运维需求^[3-4]。基于无人机的叶片自主巡检技术具有非破坏性、速度快、测量精度高、自动化程度高、安全性高等特点，通过定期进行叶片巡检，可以及早发现潜在的问题，采取维护和修复措施，延长叶片的使用寿命，提高系统的可靠性和持续运行时间^[5-6]。

2 整体设计

无人机叶片巡检系统是基于无人机、高清相机、机载电脑、激光测距、人工智能、图像识别等技术，实现对风机叶片自主巡航检测。通过无人机航线规划，实时对风机叶片进行全方位的扫描监测，将影像数据回传后端数据处理服务器，通过AI图像智能系统分析影像中的异常情况（结构损坏、叶片雷击、叶片开裂等），确定叶片隐患位置及损伤类型。整体的架构设计如图1所示

架构包含如下几个层次：

- (1) 无人机、无人机载荷及其他相关硬件负责完成航迹智能控制和数据采集，通过文件传输接口上传平台。
- (2) 前端应用即交互层负责承载呈现给最终用户的交互信息，主要通过数据化大屏等可视化的方式来完成。
- (3) 管理后台及业务层包含各种具体的业务逻辑，可根据业务需求进行扩充。

【作者简介】李乐乐（1990-），男，中国山东济南人，硕士，从事电力行业智慧运维及在线监测等研究。

(4) 数据中心构建在硬件系统之上，对各类数据进行存储管理，送到算法中心进行分析和使用。

(5) 算法引擎实现缺陷的自动分析和自动定位。

(6) 基础组件和基础设施实现软件和硬件上的基础支撑。

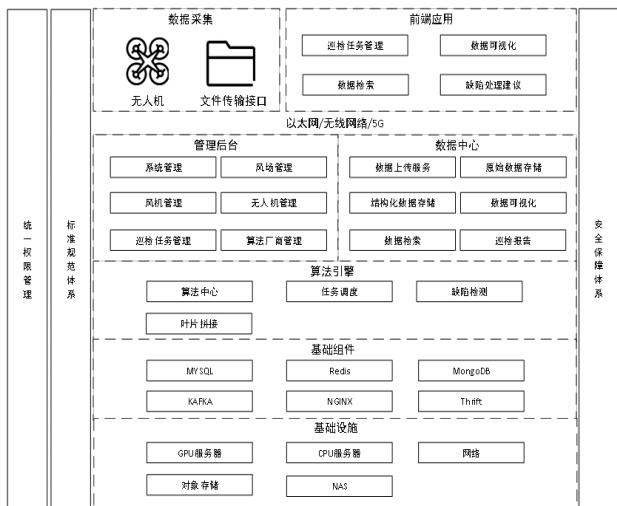


图 1 整体架构设计

3 硬件和软件系统的设计

无人机叶片巡检系统的硬件主要包括无人机飞行器、荷载系统、数据处理服务器等，当风电场站需要进行无人值守时，还需要进行无人值守起降平台的建设，值守平台需要充足的空间进行自动起降、充电、维护等操作。



图 2 无人机飞行器

无人机飞行器主要实现自主或遥控的稳定飞行，包括起飞、空中悬停、航线飞行、避障和精准降落，是执行任务的移动平台；荷载系统是无人机搭载的任务设备，包括高清相机、红外相机、激光雷达等传感器，其功能是直接执行叶片检测的任务；数据服务器主要是对后续的数据进行处理和分析。

无人机巡检系统的软件主要包括飞任务规划与飞行控制、数据采集与实时回传、数据分析与缺陷识别、数据管理与报告生成等基本的功能模块，四个模块共同构成一个高效的闭环系统。飞任务规划与飞行控制模块主要负责巡检前的航线自动规划和飞行过程中的自主控制；数据采集与实时回

传模块主要控制无人机搭载的载荷（如相机）进行数据采集，并通过网络将数据实时发送回后台；数据分析与缺陷识别模块是核心，利用 AI 算法对采集的图像和视频进行自动分析，识别缺陷；数据管理与报告生成模块主要负责存储和管理所有的巡检数据，并自动生成结构化的巡检报告。

4 无人机静态巡检的基本流程

4.1 入场手续的办理

人员抵达现场，完成飞行作业前的安全培训、资质审查以及技术交底的准备工作。针对叶片检查项目的各个合作环节可能涉及的安全事项，技术人员需要进行安全培训，同时进行飞行人员专业资格证的资格审查，最后进行技术交底。

4.2 风机基础数据的准备

无人机抵近风机绕叶片飞行，采集高清图像，对叶片表面细微缺陷进行辨识，因此需准备风机的基础数据，用于进行后续计算，包括：风机中心经纬度坐标、风机轮毂中心高程、叶片尺寸、机舱尺寸、塔筒直径等。

4.3 三维建模

通过建模航线规划、建模数据采集、模型自动生成、姿态智能分析过程获得风机姿态及叶片关键点，用于后续巡检航线规划，确保叶片数据采集过程安全、完整。

图像三维重建是一个计算密集型过程，其耗时较长的特性显著制约了风机叶片巡检的整体效率。因此，在实现重建功能的同时，应着力于算法优化，旨在保证模型精度的前提下，显著提升建模速度，以平衡模型精度与生成效率，满足现场应用的实时性需求。

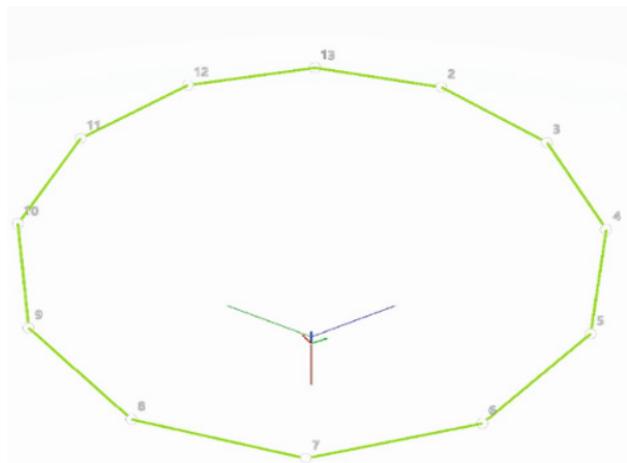


图 3 三维建模示意图

三维重建是从二维图像序列中恢复物体三维几何结构的技术过程，其标准工作流程通常包含以下几个核心环节：

4.3.1 图像采集

重建过程始于图像数据的获取。需使用数码相机、无人机载荷等设备，围绕目标物体从多视角、多方位采集一系

列具有足够重叠度的影像。全面、高质量的影像数据是保证重建精度的基础，旨在尽可能覆盖物体的全部表面几何信息。

4.3.2 数据预处理

在正式重建前，采集的原始影像需进行预处理。此阶段主要包括辐射校正(如亮度与对比度调整)与几何校正(如裁剪、旋转)，旨在提升图像质量的一致性，并消除部分噪声，为后续计算步骤奠定基础。

4.3.3 特征提取与匹配

预处理后的影像被用于提取显著的局部特征点(如角点、边缘等)及其特征描述符。通过比对不同图像中特征描述符的相似性，建立跨图像的对应关系，即特征匹配。该步骤是关联多视角图像、恢复三维空间关系的关键。

4.3.4 稀疏重建与稠密重建

基于匹配的特征点，结合相机参数(内参与外参)，利用运动恢复结构和多视几何算法，可计算出特征点在三维空间中的坐标，形成初步的稀疏点云。为进一步丰富模型细节，常通过多视立体视觉等算法进行稠密重建，生成蕴含表面连续几何信息的稠密点云。

4.3.5 模型生成与后处理

三维点云需转换为更具实用价值的网格模型。通常通过曲面重建算法实现，并对生成的网格进行一系列后处理操作，包括但不限于噪声滤波、孔洞修补、网格简化与平滑，最终得到一个完整、光滑且结构准确的三维模型。

4.4 飞行规划

风机叶片的高耸立体结构对其巡检航线的设计提出了特殊要求，主要表现在以下两方面：

首先，在航线构型上，必须摒弃适用于平坦地形的常规平面航线，转而采用能够全方位包裹风机主体的三维立体航线。该构型需依据叶片的长度、弯曲弧度及其空间分布进行定制化设计，以确保飞行轨迹能实现对叶片上下表面、前缘与后缘等所有关键部位的无遗漏覆盖。

此外，在影像采集策略上，为保证后续三维重建与缺陷识别的精度，无人机必须在每个预设航点上调整其空间姿态与云台角度，确保相机光轴尽可能垂直于叶片表面，以获取无透视畸变的正视影像。这一精确指向性是获取高质量分析数据的关键。

巡检航线的技术要点：

- ① 无人机起飞，爬升至中间位置处
- ② 远离塔筒方向飞行，飞出风轮半径
- ③ 爬升至安全高度，飞向待巡检风机
- ④ 反航逆向执行

云台角度的规划主要依赖于航点与风机轮毂中心的相对位置。通过计算航点到轮毂中心的方向向量，确定云台需

要指向的方向，将该方向分解为水平和垂直两个角度，得到云台的偏航角和俯仰角。

4.5 数据采集

航线规划完成后，系统进入数据采集阶段。规划好的航线指令被注入无人机飞控系统，无人机即可依托卫星导航与遥测系统，沿预定三维航线进行自主飞行。飞行全程，无人机严格按预设航点、高度与云台角度自动采集数据。同时，系统保留了人工介入的权限，支持操作人员在飞行过程中根据实时状况进行监控与干预。

4.6 叶片缺陷识别

数据处理软件是无人机巡检的核心，主要是对叶片的原始影像进行图片处理，分析缺陷类型和缺陷所在位置，生成缺陷结构化数据，并生成巡检报告。

图像分析模块集成了目标检测与变化检测两种核心方法。目标检测方法通过提取航空影像中的颜色、纹理与形状等多维特征，初步识别出潜在异常区域，进而将候选区域输入经大规模样本集训练的卷积神经网络模型，实现裂缝、掉漆等典型目标的精确分类。而变化检测法则侧重于对同一区域、不同时相的序列影像进行配准与比对，通过分析在空间位置上高度重合的影像对象所发生的变化，来侦测那些形态不固定、分布范围广的弥散性异常。二者结合，构成了从点识别到区域变化发现的多维度分析能力。

缺陷报告包括每个叶片的缺陷概况统计、缺陷的类别、缺陷的定位、缺陷的图像，为管理人员提供检修的依据。

5 结语

本文对无人机自主叶片巡检系统的组成进行了分析，论述了各部分的功能，重点介绍了巡检的基本流程，无人机叶片巡检彻底改变了传统人工高空攀爬的巡检模式，保障了人员安全，通过自动化巡检与智能分析，大幅提升了巡检作业的效率和覆盖度，实现了运维管理的可追溯与数据驱动，保障了发电量并降低全生命周期运维成本。

参考文献

- [1] 李哲.风电场风机叶片无人机自主巡检系统分析设计与研究[J].机电信息, 2024(19):7-12.
- [2] 曾勇刚,陈丽城,申毅莉,等.海上风电场风机叶片巡检方法研究[J].装备维修技术,2024,(03):91-93+97.
- [3] 朱锐答,王凤颖,李建刚,等.基于图像处理技术的风力发电机组叶片智能巡检系统设计[J].电气技术与经济,2025,(11):95-99.
- [4] 朱锐答,王凤颖,李建刚,等.基于图像处理技术的风力发电机组叶片智能巡检系统设计[J].电气技术与经济,2025,(11):95-99.
- [5] 谭兴国,张高明.基于无人机巡检的风机叶片表面缺陷检测技术[J].电测与仪表,2025,62(03):183-189.
- [6] 马敏敏,刘昊,高毓欣,等.基于无人机与人工智能的风机叶片全自动巡检[J].电气时代,2023,(S2):44-48.

Modeling method for shaping follow-up wire harnesses

Jingkai Feng Zhibing Lu Guangchao Zhang Yixin Dai Jun Zhan

Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing, 100854, China

Abstract

Aiming at the problems such as the difficulty in characterizing the physical properties of wire harnesses composed of multiple cables, low spatial shaping efficiency, and poor consistency, this paper combines measurement with theory and proposes a modeling method for the shaping of follow-up wire harnesses. Firstly, a tracking 3D scanner was used to map the alignment of the wire harness. Considering the influence of the deviation of the contour collection points from the centerline comprehensively, the spatial discrete data points of the centerline of the actual continuous wire harness alignment were obtained. Secondly, adjust the physical properties of the cable. Based on the finite particle method, solve the theoretical wiring harness alignment and compare it with the actual wiring harness alignment. The physical properties when the two are close are the parameters for inversion. Finally, the extracted particle position data is fitted into curves to obtain the theoretical midline of the wire harness shape. A negative mold is generated using 3D software and then 3D printed into a wire harness shaping fixture. Actual production shows that this method has greatly improved the shaping efficiency and consistency of cables.

Keywords

Wire harness shaping Linear mapping Finite particle method Physical property inversion

随动线束塑形建模方法

冯靖凯 卢治兵 张广超 代亚新 詹俊

北京遥感设备研究所, 中国·北京 100854

摘要

针对多根线缆组成的线束物性难以表征、空间塑形效率低、一致性不高等问题, 本文将测量与理论相结合, 提出一种随动线束塑形建模方法。首先, 采用跟踪式三维扫描仪对线束线形进行测绘, 综合考虑轮廓采集点偏离中线的影响, 得到实际连续线束线形中线的空间离散数据点。其次, 调整线缆物性, 基于有限质点法对理论线束线形进行求解, 并与实际线束线形比对, 二者接近时的物性即为反演的参数。最后, 对提取到的质点位置数据拟合为曲线, 得到理论线束线形中线, 使用三维软件生成阴模, 再3D打印成线束塑形工装。实际生产表明, 该方法极大地提高了线缆塑形效率和一致性。

关键词

线束塑形; 线形测绘; 有限质点法; 物性反演

1 引言

线缆作为电气连接件, 广泛存在于各类产品中, 单根线缆两端固定时受安装空间和最小半径约束, 线形容易确定。而由多根线缆组成线束且随动时, 虽然在某一位置可认为是两端边界固定, 但线束物性难以描述, 线缆找形不易。生产前期操作人员需经过很多次试装后, 确定出较理想的线形, 后续生产中操作人员根据布线经验, 以之前的状态为参考进行线形比对和调整。即便是同一人作业, 也难以保证线形状态的一致性, 不同作业人员技能的差异性, 更是造成线束塑形效率低、一致性不高等问题。

柔性线缆塑形对保证产品装配质量至关重要, 相关研

究较多。马世纪^[1]基于改进 A* 算法研究了 2D 路径仿真和 3D 虚拟布线的最优路径, 以指导工程布线。陈杨^[2]基于 Cosserat 弹性杆模型, 结合牛顿法、二次规划法, 对线缆物性建模与求解。吴保胜^[3, 4]借助 CREO 三维线缆布线模块, 基于改进蚁群算法对线缆路径进行空间规划。罗权^[5]建立了基于物理特性的离散弹性线缆模型, 采用半隐式欧拉法与位置动力学方法相结合进行求解, 研究了工程约束下的线缆布局。但现有成果对线缆形态求解与建模依赖于线缆物性, 尤其对于由多根线缆组成线束, 其表征参数难以获取, 求解算法适用性和效率受到局限, 采用力学试验方法成本高, 研究内容较少。

因此, 本文将测量与理论相结合, 提出一种随动线束塑形建模方法, 具体组织结构如下。第二节对实际线束线形进行测绘, 去除轮廓采集点偏离中线的影响, 得到实际线束线形中线离散点数据。第三节基于有限质点法, 并与第二节

【作者简介】冯靖凯 (1992-), 男, 中国北京人, 博士, 工程师, 从事智能制造研究。

中线数据对比, 反演出线缆物性和求解出理论线束线形。第四节对第三节的理论线束线形进行三维建模, 并 3D 打印制造出用于辅助成形的塑形工装。最后, 第五节对本文的研究内容进行总结。

2 实际线束线形测绘

为准确获取线束在三维空间内的实际线形, 本文使用 TrackScan-Sharp 49 跟踪式三维扫描仪对线束线形进行测绘, 主要包括跟踪仪 i-Tracker、扫描仪 i-Scanner 等硬件。设备最高分辨率 0.02mm , 体积精度 0.049mm (距离跟踪仪 3.5m), 研究对象长度为 $200 \pm 2\text{mm}$ 、直径为 $7 \pm 0.2\text{mm}$, 满足场景使用需求。其工作原理含两步, 一是相机采集随扫描对象形状变形的激光, 计算得到线状三维信息; 二是 i-Tracker 实时跟踪 i-Scanner 上的反光标记点, 经过空间坐标变换得到空间位置。采集过程如图 1 所示, 将 i-Scanner 的针头与线束轮廓接触, 识别状态显示在 $90\% \sim 100\%$ 时进行数据采集。



图 1 线形测绘

而实际线束线形测绘是寻找中线, 而非简单的由与中线偏移线束半径的轮廓数据点组成。线束由 6 根线缆组成, 其中锦纶丝套线 1 根, 金属编织线 5 根, 用屏蔽胶带缠绕成圆柱状。在对线缆上任意一点采集前, 先用空芯棉丝线在该位置截面方向绑扎线扣(见图 2(a)), 再沿两根绑线槽采集三点(见图 2(b)), 该三点的圆心 O 即位于该线束线形采集点的中线上。手持 i-Scanner 沿线束轮廓从起始端到终止端进行数据采集, 在曲率半径变化较大的位置, 可以适当增加采集点, 最后计算得到的所有空间圆心即为连续空间线束线形中线的离散点数据。沿线束共采集生成中线离散点数据 113 个, 使用样条曲线进行拟合, 得到线形中线, 完成线束线形测绘。

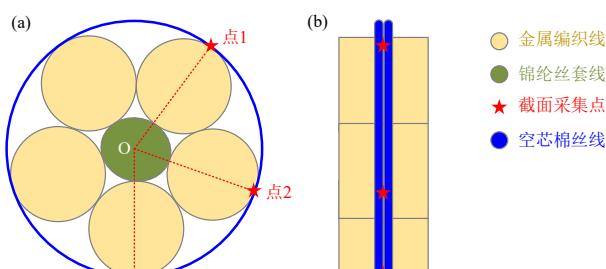


图 2 中线确定

3 理论线束线形求解

线缆在使用过程中, 通常关注线缆强度, 在出厂时产品合格证中只会提供弯曲半径、抗拉强度指标。由于线缆由多层不同材料制成, 具有较强非线性特性, 其弹性模量等物理属性不便于直接测量。且多根线缆组成线束后, 线束形态更不容易预测, 布线只能依赖于反复试验, 生产成本高、效率低, 且难以获取理论线束线形。在对实际线束线形测绘后, 可以使用有限元方法对线束物理属性反演。但经典结构力学采用偏微分方程描述结构行为, 而向量式结构力学控制方程是质点运动公式, 求解效率高。故本节采用有限质点法来研究, 任一线束单元质点 i 上的总力和总力矩遵循牛顿第二定律:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{F}_i^{\text{ext}} + \mathbf{F}_i^{\text{int}} \\ \mathbf{I}_i \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i &= \mathbf{M}_i^{\text{ext}} + \mathbf{M}_i^{\text{int}} \end{aligned}$$

其中, m_i 、 $\dot{\mathbf{x}}_i$ 分别为质点 i 的质量、线加速度; \mathbf{I}_i 、 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_i$ 分别为质点 i 的质量惯性矩阵、角加速度; \mathbf{F}^{ext} 、 \mathbf{M}^{ext} 分别为质点所受外力和外力矩; \mathbf{F}^{int} 、 \mathbf{M}^{int} 分别为质点所受内力和内力矩。

线束起始端固定在产品结构件, 终止端用金属卡箍固定, 为提高程序的收敛性和求解稳定性, 采用位姿边界加载方式, 而非外力加载方式, 即 $\mathbf{F}^{\text{ext}}=[0\text{N}, 0\text{N}, 0\text{N}]$, $\mathbf{M}^{\text{ext}}=[0\text{N} \cdot \text{m}, 0\text{N} \cdot \text{m}, 0\text{N} \cdot \text{m}]$ 。线束初始化建模为直线, 起始端的位姿对应三维扫描仪测绘的点 1, 位置分量为 $\mathbf{UP}_1=[39.6\text{mm}, 95.5\text{mm}, -556\text{mm}]$, 姿态分量为 $\mathbf{URP}_1=[0\text{rad}, 0.35\text{rad}, 0.35\text{rad}]$, 设起始端为完全固定约束, 则质点 1 运动方程中位姿保持。线束初始状态沿 $-X$ 向, 则终止端初始位置分量为 $\mathbf{UP}_{113q}=[-180.4\text{mm}, 95.5\text{mm}, -556\text{mm}]$, 姿态分量为 $\mathbf{URP}_{113q}=[0\text{rad}, 0.35\text{rad}, 0.35\text{rad}]$ 。三维扫描仪测绘的点 113 对应线束成形后终止端的位置分量为 $\mathbf{UP}_{113h}=[-42.0208\text{mm}, 84.9497\text{mm}, -454\text{mm}]$ 、姿态分量为 $\mathbf{URP}_{113h}=[-1.57\text{rad}, 1.92\text{rad}, -0.44\text{rad}]$, 则终止端成形后的位置增量为 $\Delta \mathbf{UP}_{113}=\mathbf{UP}_{113h}-\mathbf{UP}_{113q}=[138.4\text{mm}, -10.5\text{mm}, 102\text{mm}]$, 姿态增量为 $\Delta \mathbf{URP}_{113}=\mathbf{URP}_{113h}-\mathbf{URP}_{113q}=[-1.57\text{rad}, 1.57\text{rad}, -0.79\text{rad}]$ 。成形后的位姿增量随时刻的变换迭代更新质点 2~113 的状态。

给定线缆不同的材料属性, 可求解出成形后线束形态, 并将其与实际线束线形测绘曲线比对, 选最接近的作为理论线束线形, 图 3(a)、(b) 分别对应实际线束线形测绘曲线、理论线束线形求解曲线。该理论曲线设定的材料属性, 为反演出的成形线束等效材料属性, 在此基础上, 改变线束边界条件, 可求解出任一工作空间内的理论线束线形。

4 线束塑形工装建模

基于有限质点法完成理论线束线形求解后, 提取最后一个时刻更新的质点位置矩阵 $\mathbf{x}=[\mathbf{UP}_1; \mathbf{UP}_2; \dots; \mathbf{UP}_i; \dots; \mathbf{UP}_{113}]$, 维度为 3×113 , \mathbf{UP}_i 表示质点 i 的空间位置坐标,

$UP_i(1)$ 、 $UP_i(2)$ 、 $UP_i(3)$ 分别为 x 、 y 、 z 方向分量。以质点 50 为例, 数值显示精度保留小数点后两位, 最后一个时刻更新的质点位移为 $UP_{50}=[UP_{50}(1), UP_{50}(2), UP_{50}(3)]=[25.47, -45.79, 25.85]$ 。

后处理中, 将提取到的各质点位置数据按矩阵格式写入文本中, 再将其导入三维建模软件中, 使用曲线指令生成通过离散点的连续线束中线; 再使用扫描命令, 沿中线生成

线形, 去除线缆半径空间, 保留一半截面, 形成用于线束塑形的阴模, 如图 4(a) 所示。将生成的模型导出为 .STL 格式, 在 3D 打印机软件中进行模型切片, 未避免工装出现大变形, 将填充密度设置为 100%, 打印速度降低至 5mm/s, 完成打印后的工装如图 4(b) 所示。在线束塑形时, 将线束沿阴模槽内铺设, 得到接近于理论线束线形的走线方式, 极大地提高了线束塑形效率和线形的一致性。

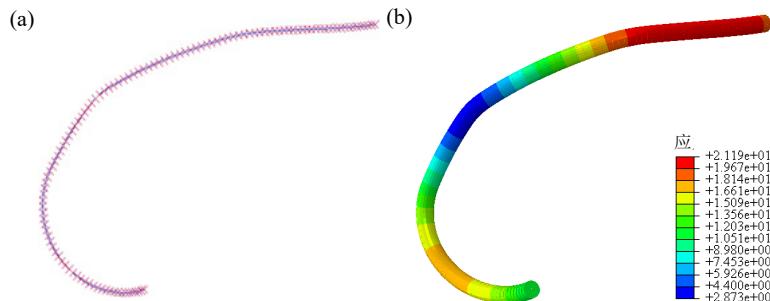


图 3 线束形态

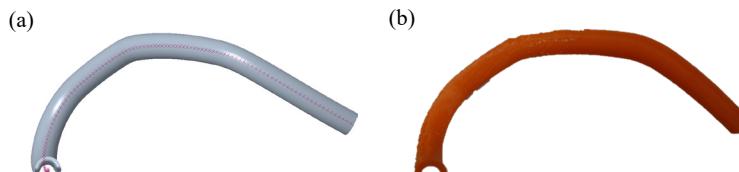


图 4 线束塑形工装

5 结论

本文针对多根线缆组成的线束人工塑形形态难以表征的问题, 采用跟踪式三维扫描仪设备对线缆轮廓进行采集, 提出基于截面三点确定中线圆心的方法, 对线束线形进行准确测绘。提出基于有限质点法的线束找形方法, 对线束等效物性进行反演, 进而求解出固定边界约束条件下的理论线束线形。在此基础上, 设计并 3D 打印制造了用于生产中的线束塑形工装, 解决了依赖人工经验存在的线束空间塑形效率低、一致性不高等问题。

参考文献

1. 姜康, 马世纪. 基于改进 A* 算法的线缆路径规划方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(06):699-708.
2. 陈杨. 线缆布局路径规划与安装过程仿真技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学. 2023.
3. 吴保胜, 郭宇, 王发麟, 宋倩. 基于改进蚁群算法的线缆路径规划技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(10):236-241.
4. 吴保胜, 郭宇, 王发麟, 黄潇, 宋倩. 基于 CREO 的复杂机电产品辅助布线系统设计与开发[J]. 制造业自动化, 2017, 5:145-149.

Application and Optimization of Metrological Verification Technology in Food Safety Risk Prevention and Control

Ta'na Bao Ping Feng Xuejing Gao Haisheng Yuan Haoyu Yun

Ordos City Inspection and Testing Center, Ordos, Inner Mongolia, 017010, China

Abstract

Food safety constitutes a critical public health issue impacting national welfare and people's livelihoods. As the cornerstone of ensuring accurate and reliable testing data, metrological verification technology plays a fundamental role in identifying, assessing, and controlling food safety risks. This paper systematically analyzes the application scenarios of metrological verification technology across key aspects of food safety risk prevention, including pesticide and veterinary drug residue testing, food additive limit verification, and microbial contamination monitoring. It highlights existing challenges such as inadequate grassroots verification capabilities, lagging technological innovation, and imperfect collaborative mechanisms. The paper proposes targeted optimization strategies, including strengthening infrastructure development, promoting technological integration and innovation, and establishing a multi-stakeholder collaborative system, to enhance the scientific rigor and precision of food safety risk management.

Keywords

metrological verification; food safety; risk prevention and control; detection technology; quality assurance

计量检定技术在食品安全风险防控中的应用与优化研究

包塔娜 冯平 高雪婧 原海升 云昊雨

鄂尔多斯市检验检测中心，中国·内蒙古鄂尔多斯 017010

摘要

食品安全是关系国计民生的重大公共卫生问题，而计量检定技术作为保障检测数据准确可靠的核心手段，在食品安全风险识别、评估与控制中发挥着基础性作用。本文从计量检定技术的核心内涵出发，系统分析其在食品安全风险防控各环节的应用场景，包括农兽药残留检测、食品添加剂限量核查、微生物污染监测等关键领域，揭示当前技术应用中存在的基层检定能力薄弱、技术创新滞后、协同机制不完善等问题，并针对性地提出强化基础设施建设、推动技术融合创新、构建多元协同体系等优化路径，为提升食品安全风险防控的科学性和精准性提供参考。

关键词

计量检定；食品安全；风险防控；检测技术；质量保障

1 引言

计量检定技术是通过法定或约定的方法，对计量器具的计量性能进行全面评定，确保其量值准确一致的技术性活动，是计量工作的核心环节。在食品安全检测中，无论是色谱仪、质谱仪等精密检测仪器，还是温度计、天平、压力计等基础计量器具，其计量性能的稳定性和准确性直接决定了检测数据的可信度，进而影响风险研判的科学性和防控措施的有效性。因此，系统研究计量检定技术在食品安全风险防控中的应用现状与优化策略，对于完善食品安全监管体系、保障公众饮食安全具有重要的现实意义。

2 计量检定技术在食品安全风险防控中的核心应用场景

2.1 农兽药残留检测中的计量检定应用

农产品种植和畜禽养殖环节的农兽药残留超标是食品安全的主要风险源头之一，其检测依赖于气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）、液相色谱-质谱联用仪（LC-MS/MS）等精密分析仪器，而这些仪器的计量性能直接影响检测结果的准确性。

计量检定技术在该场景中的应用主要体现在三个方面：一是仪器核心部件的性能检定，针对色谱仪的柱温箱温度稳定性、进样口压力精度，质谱仪的质量准确度、灵敏度等关键指标进行检定，确保仪器处于最佳工作状态；二是检测方法的计量验证，通过标准物质对检测方法的回收率、重复性进行验证，确保方法的可靠性，例如使用农兽药残留标准品对检测流程进行校准，避免因方法误差导致的检测结果偏

【作者简介】包塔娜（1986-），女，蒙古族，中国内蒙古人，硕士，工程师，从事检验检测、质量监督研究。

差；三是样品前处理设备的检定，对于固相萃取仪、氮吹仪等前处理设备，其萃取效率、浓缩精度等指标需通过计量检定进行保障，防止因样品处理不当导致的检测数据失真。

以蔬菜中有机磷农药残留检测为例，通过对 GC-MS 进行计量检定，将柱温箱温度波动控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内，进样口压力误差控制在 0.01MPa 以下，能够有效提升农药残留峰的分离度和检测灵敏度，确保准确检出低至 0.01mg/kg 的农药残留量，为种植环节的风险防控提供精准数据支撑^[1]。

2.2 食品添加剂限量核查中的计量检定应用

食品添加剂在改善食品风味、延长保质期等方面发挥着重要作用，但过量使用或滥用会对人体健康造成危害，因此需要严格核查其含量是否符合《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》（GB 2760）的限量要求。食品添加剂检测常用的紫外分光光度计、原子吸收分光光度计等仪器，其计量性能的稳定性是保障检测结果可靠的关键。

计量检定技术在该场景中的应用重点包括：一是分光光度计的波长准确度和吸光度精度检定，通过标准滤光片对仪器的波长进行校准，确保其波长误差不超过 $\pm 1\text{nm}$ ，吸光度误差控制在 ± 0.002 以内，避免因波长偏移导致的检测结果偏差；二是原子吸收分光光度计的特征浓度和检出限检定，确保仪器能够准确检测出食品中痕量的金属类食品添加剂，如防腐剂中的亚硝酸盐、甜味剂中的甜蜜素等；三是容量器具的计量检定，对于移液管、容量瓶等样品稀释和配制过程中使用的容量器具，其容积误差需通过检定控制在允许范围内，防止因稀释倍数不准确导致的检测结果失真。

在碳酸饮料中苯甲酸含量检测中，通过对紫外分光光度计进行计量检定，校准其波长至 225nm 的特征吸收峰，确保吸光度测量的准确性，能够精准测定苯甲酸含量是否符合 $\leq 0.2\text{g/kg}$ 的限量要求，有效避免企业为延长保质期而过量添加苯甲酸的风险。

2.3 微生物污染监测中的计量检定应用

微生物污染是导致食物中毒的主要原因之一，其检测依赖于微生物培养箱、菌落计数器、生物安全柜等专用设备，这些设备的计量性能直接影响微生物检测结果的可靠性。

计量检定技术在微生物污染监测中的应用主要包括：一是培养环境参数的精准控制，对微生物培养箱的温度、湿度、二氧化碳浓度等参数进行检定，确保培养环境符合微生物生长要求，例如将致病菌培养箱的温度控制在 $37 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，避免因温度波动导致的菌落计数误差；二是菌落计数设备的精度检定，对菌落计数器的放大倍数、计数准确率进行校准，确保能够准确计数平板上的菌落数量，避免因计数误差导致的微生物污染程度误判；三是生物安全柜的性能检定，对其气流速度、过滤效率等指标进行检定，确保在微生物检测过程中避免样品交叉污染，保障检测数据的准确性。

以熟食制品中沙门氏菌检测为例，通过对微生物培养

箱进行计量检定，将温度波动控制在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内，确保沙门氏菌能够稳定生长，同时对菌落计数器进行校准，使计数准确率达到 99% 以上，能够精准判断熟食制品是否存在沙门氏菌污染，为食品加工环节的风险防控提供技术支撑^[2]。

2.4 重金属及有害元素检测中的计量检定应用

食品中的重金属及有害元素（如铅、镉、汞、砷等）具有蓄积性和毒性，会对人体神经系统、消化系统等造成严重危害，其检测依赖于电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）、原子荧光光度计等精密仪器。

计量检定技术在该场景中的应用重点的是仪器的计量性能校准，包括：一是 ICP-MS 的质量分辨率和同位素丰度准确度检定，确保能够准确区分不同重金属元素的同位素，避免光谱干扰导致的检测结果偏差；二是原子荧光光度计的荧光强度稳定性和检出限检定，确保能够准确检测出食品中痕量的砷、汞等元素，其检出限需控制在 0.001mg/kg 以下；三是标准溶液的溯源校准，通过使用有证标准物质配制系列浓度的标准溶液，对检测仪器进行校准，建立准确的浓度 - 响应值曲线，确保检测数据的溯源性和准确性。

在大米中镉含量检测中，通过对 ICP-MS 进行计量检定，将质量分辨率控制在 0.5amu 以内，同位素丰度准确度误差控制在 $\pm 2\%$ 以内，能够有效避免镉与其他元素的光谱干扰，准确检出大米中低至 0.002mg/kg 的镉含量，为粮食安全风险防控提供精准数据。

3 计量检定技术在食品安全风险防控中应用的现存问题

3.1 基层计量检定能力薄弱，覆盖范围有限

我国食品安全检测体系中，基层检测机构（如县级食品药品检验检测中心）承担着大量的日常检测任务，但这些机构的计量检定能力普遍薄弱。一方面，基层机构的计量检定设备投入不足，缺乏先进的标准器具和检定设备，无法对 GC-MS、LC-MS/MS 等精密分析仪器进行自主检定，需依赖上级计量技术机构，导致检定周期过长，影响检测工作的效率；另一方面，基层计量检定专业人才匮乏，现有人员多为兼职，缺乏系统的计量专业培训，对新型检测仪器的检定技术掌握不足，无法满足复杂的检定需求。

3.2 技术创新滞后，难以适应新型风险检测需求

随着食品工业的快速发展，新型食品加工技术、新型食品添加剂和污染物不断涌现，对食品安全检测提出了更高要求，但计量检定技术的创新速度相对滞后，难以适应新型风险的检测需求。

一是针对新型检测仪器的检定技术不完善，例如在生物传感器、量子点检测仪器等新型快速检测设备的检定方面，缺乏统一的检定规程和标准物质，导致这些设备的计量性能无法得到有效保障；二是复杂基质食品的检定技术不足，对于含有多种成分的复合食品，其检测过程中存在严重

的基质干扰，现有计量检定技术难以精准校准仪器，导致检测数据偏差较大^[3]。

3.3 协同机制不完善，数据共享与联动不足

计量检定技术在食品安全风险防控中的应用需要计量技术机构、食品安全监管部门、食品生产企业等多方主体的协同配合，但目前各方之间的协同机制不完善，存在数据共享与联动不足的问题。

一是计量检定数据与食品安全检测数据割裂，计量技术机构的检定结果未及时同步至食品安全监管平台，监管部门无法根据仪器计量状态判断检测数据的可靠性，影响风险研判的科学性；二是企业与计量技术机构的联动不足，部分食品生产企业对计量检定的重要性认识不足，未建立定期检定制度，计量技术机构也缺乏对企业的精准技术指导，导致企业检测仪器的计量性能无法得到持续保障。

3.4 法规标准不健全，监管与检定衔接不畅

计量检定技术的应用需要完善的法规标准体系作为支撑，但目前我国食品安全领域的计量法规标准仍存在不健全的问题，导致监管与检定衔接不畅。

一是部分食品检测仪器的检定规程更新不及时，现有规程无法覆盖新型仪器的计量特性，例如针对 ICP-MS 的检定规程未充分考虑其多元素同时检测的性能指标，导致检定结果无法全面反映仪器状态；二是计量标准与食品安全标准衔接不足，部分食品安全标准中规定的检测指标缺乏对应的计量标准物质，导致检测结果无法溯源至国家基准，影响数据的权威性。

4 计量检定技术在食品安全风险防控中的优化路径

4.1 强化基层能力建设，扩大检定覆盖范围

针对基层计量检定能力薄弱的问题，需从设备投入、人才培养和服务延伸三个方面进行优化。一是加大基层计量检定设备投入，通过财政专项补贴、设备共享等方式，为县级检测机构配备必要的标准器具和检定设备，支持基层机构开展常规检测仪器的自主检定，缩短检定周期；二是加强计量检定专业人才培养，建立“校企合作”“师徒传承”的人才培养模式，定期组织基层人员参加计量专业培训和技能竞赛，提升其对精密仪器的检定能力，同时引进高素质计量专业人才，优化人才队伍结构。

4.2 推动技术融合创新，适应新型风险需求

为应对新型食品安全风险的检测需求，需推动计量检定技术与新兴技术的融合创新，提升技术支撑能力。一是加强新型检测仪器的检定技术研发，针对生物传感器、量子点检测仪器等新型设备，制定统一的检定规程，研发配套的标

准物质，建立完善的计量溯源体系；二是突破复杂基质食品的检定技术瓶颈，结合色谱-质谱联用、核磁共振等先进技术，开发基质干扰校准方法，提高复杂食品检测中仪器的计量精度^[4]。

4.3 构建多元协同体系，促进数据共享联动

建立计量技术机构、监管部门、企业等多方协同的工作体系，实现数据共享与联动。一是搭建统一的计量检定与食品安全监管数据平台，将计量检定结果、仪器使用状态、食品安全检测数据等信息整合至平台，实现数据实时共享，监管部门可通过平台精准掌握检测仪器的计量状态，提升风险研判的科学性；二是建立企业与计量技术机构的常态化联动机制，计量技术机构为企业提供定制化的检定服务和技术指导，帮助企业建立完善的仪器定期检定制度，同时企业及时反馈仪器使用中的问题，为计量检定技术创新提供需求导向。

4.4 健全法规标准体系，强化监管与检定衔接

完善计量法规标准体系，加强监管与检定的衔接，为计量检定技术的应用提供制度保障。一是加快计量检定规程的更新完善，针对新型检测仪器和检测需求，及时修订和制定检定规程，确保规程的科学性和适用性，例如修订 ICP-MS、LC-MS/MS 等仪器的检定规程，增加多元素检测、高灵敏度等性能指标；二是加强计量标准与食品安全标准的衔接，围绕食品安全标准中的检测指标，研发配套的标准物质，建立从国家基准到检测仪器的完整量值溯源链条，保障检测数据的权威性。

5 结论

为提升食品安全风险防控的科学性和精准性，需通过强化基层能力建设、推动技术融合创新、构建多元协同体系、健全法规标准体系等优化路径，全面提升计量检定技术的应用水平。未来，随着计量检定技术与新兴技术的深度融合，以及多方协同机制的不断完善，计量检定技术将在食品安全风险防控中发挥更加重要的作用，为保障公众饮食安全、促进食品产业高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 黄汀汀. 计量检定在食品质量控制中的应用与挑战[J]. 食品安全导刊, 2024, (32): 41-43.
- [2] 杨涛. 计量检定在食品检验中的应用研究[J]. 中外食品工业, 2024, (21): 99-101.
- [3] 唐小花. 食品检验中计量检定存在的问题及对策[J]. 食品安全导刊, 2024, (31): 176-178.
- [4] 李可皓. 浅析提高食品检测实验室计量器具检定校准工作质量的有效措施[J]. 中外食品工业, 2024, (10): 90-92.

Research on High Acceleration Shock Technology Based on Sine Wave Method with Damping Ratio

Jun Wu Jia Wu

Shanghai Hanhai Testing Technology Co., Ltd., Shanghai, 200433, China

Abstract

High acceleration shock technology holds a core position in reliability testing in fields such as aerospace and weapons equipment, where the accurate reproduction of shock loads directly determines the validity of test results. To address the shortcomings of traditional shock test methods in terms of controllability of load waveforms and matching degree of damping characteristics, this paper proposes applying the damped sine wave method to the research of high acceleration shock technology. Firstly, the mechanical characteristics of the damped sine wave and its adaptability to high acceleration shock loads are analyzed, and an impact load mathematical model incorporating damping parameters is constructed. Secondly, an impact load generation strategy based on this method is designed, and through dynamic simulation analysis, the influence rules of key parameters such as damping ratio and frequency on shock response are studied. Finally, an experimental system is built to verify the feasibility of the method. The research shows that the damped sine wave method can effectively regulate the peak value, pulse width, and attenuation characteristics of shock loads, improve the accuracy of high acceleration shock testing, and provide a new path for shock reliability testing under complex conditions.

Keywords

Damped Sine Wave; High Acceleration Shock; Load Regulation; Reliability Testing; Dynamic Simulation

基于带阻尼比正弦波法的高加速冲击技术研究

吴军 吴佳

上海瀚海检测技术股份有限公司，中国·上海 200433

摘要

高加速冲击技术在航空航天、兵器装备等领域的可靠性测试中占据核心地位，其冲击载荷的精准复现直接决定测试结果的有效性。针对传统冲击试验方法在载荷波形可控性、阻尼特性匹配度等方面不足，本文提出将带阻尼比正弦波法应用于高加速冲击技术研究。首先剖析带阻尼比正弦波的力学特性及与高加速冲击载荷的适配性，构建包含阻尼参数的冲击载荷数学模型；其次设计基于该方法的冲击载荷生成策略，通过动力学仿真分析阻尼比、频率等关键参数对冲击响应的影响规律；最后搭建试验系统验证方法的可行性。研究表明，带阻尼比正弦波法可有效调控冲击载荷的峰值、脉宽及衰减特性，提升高加速冲击测试的精准度，为复杂工况下的冲击可靠性测试提供新路径。

关键词

带阻尼比正弦波；高加速冲击；载荷调控；可靠性测试；动力学仿真

1 引言

高加速冲击作为产品在运输、作战及应急工况下常见的力学激励形式，其对产品结构强度、元器件稳定性的影响直接关系到装备整体可靠性。当前高加速冲击测试主要采用半正弦、梯形等标准波形，但实际工况中的冲击载荷往往伴随明显阻尼衰减特性，标准波形与实际载荷的适配偏差导致测试结果存在失真风险。

带阻尼比正弦波因能精准描述阻尼作用下的振动衰减

过程，在振动控制领域已得到广泛应用，但其在高加速冲击载荷复现中的应用研究仍处于起步阶段。传统冲击试验技术存在载荷峰值调控精度低、阻尼特性难以匹配等问题，无法满足航空航天等高端装备对冲击测试的精细化需求。基于此，本文聚焦带阻尼比正弦波法与高加速冲击技术的融合，深入研究载荷模型构建、参数调控及试验实现等关键问题，旨在提升高加速冲击测试的真实性与精准度，为装备可靠性设计提供理论与技术支撑。

2 带阻尼比正弦波的力学特性及适配性分析

2.1 带阻尼比正弦波的数学表征与力学本质

带阻尼比正弦波是阻尼振动系统的典型响应形式，其数学模型可通过二阶线性微分方程推导得出。在无外力作

【作者简介】吴军（1988—），男，中国安徽黄山人，本科，从事基于带阻尼比正弦波法的高加速冲击技术研究。

用的自由阻尼振动系统中，其运动方程为 $m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=0$ ，其中 m 为质量， c 为阻尼系数， k 为刚度系数。通过求解该方程可得系统响应为带阻尼比正弦函数，其表达式为： $x(t)=A_0e^{(-\zeta\omega_n t)}\sin(\omega_d t+\phi)$ ，其中 $\zeta=c/(2\sqrt{(mk)})$ 为阻尼比， $\omega_n=\sqrt{(k/m)}$ 为固有角频率， $\omega_d=\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}$ 为阻尼振动角频率， A_0 为初始振幅， ϕ 为初相位。从力学本质来看，带阻尼比正弦波体现了振动能量的衰减过程，阻尼比 ζ 作为核心参数，直接决定能量衰减速率：当 $\zeta \in (0, 1)$ 时，系统处于欠阻尼状态，振动呈现周期性衰减，这与高加速冲击过程中载荷的衰减特性高度契合；当 $\zeta=1$ 时为临界阻尼， $\zeta>1$ 时为过阻尼，二者均无明显周期性，不适用于冲击载荷复现。高加速冲击的核心特征是短时间内出现载荷峰值并伴随快速衰减，欠阻尼状态下的带阻尼比正弦波可通过调控 ζ 和 ω_n ，精准匹配冲击载荷的峰值出现时间与衰减速率，这是其区别于标准正弦波的关键优势。

2.2 与高加速冲击载荷的适配性分析

实际高加速冲击工况（如炮弹发射、航天器着陆）中，载荷波形受介质阻尼、结构变形等因素影响，呈现“峰值骤升—快速衰减”的典型特征，其本质是一种非稳态阻尼振动过程。通过对典型实际冲击载荷的波形分解发现，其主振动成分可近似为带阻尼比正弦波，且阻尼比通常处于 0.05-0.3 的欠阻尼区间，这为带阻尼比正弦波法的应用提供了理论依据。对比传统半正弦波与带阻尼比正弦波的适配性可知：半正弦波无阻尼特性，载荷衰减阶段为线性下降，与实际冲击载荷的指数衰减规律偏差较大，尤其在冲击后期的载荷幅值误差可达 20% 以上；而带阻尼比正弦波可通过调整阻尼比匹配实际载荷的衰减特性，通过调整固有角频率匹配载荷的峰值出现时间。以航天器着陆冲击为例，实际载荷峰值出现时间约 5ms，衰减阶段持续约 20ms，采用阻尼比 0.15、固有角频率 1200rad/s 的带阻尼比正弦波，其波形与实际载荷的相似度可达 92%，远高于半正弦波的 75%。这种高适配性使得带阻尼比正弦波法在高加速冲击测试中具备显著应用潜力。

3 基于带阻尼比正弦波的高加速冲击载荷建模与调控

3.1 冲击载荷数学模型构建

高加速冲击测试的核心需求是通过试验台生成与实际工况一致的冲击载荷，因此需要构建带阻尼比正弦波冲击载荷的数学模型。考虑到试验台为受迫振动系统，需引入激励函数修正自由振动模型，构建受迫阻尼振动载荷模型。试验台通过液压伺服系统提供正弦激励，其载荷模型为： $F(t)=F_0e^{(-\zeta\omega_n t)}\sin(\omega_d t+\phi)+F_1\sin(\omega_1 t)$ ，其中 F_0 为冲击载荷峰值， $F_1\sin(\omega_1 t)$ 为伺服系统激励项， ω_1 为激励角频率。模型参数确定需结合实际测试需求：载荷峰值 F_0 根据测试标准确定，如航空装备通常要求 1000-5000g；阻尼

比 ζ 通过实际载荷波形反演得到，采用最小二乘法拟合实际载荷与带阻尼比正弦波的偏差，当偏差最小时确定 ζ 值；固有角频率 ω_n 由试验台刚度和试件质量决定，根据 $\omega_n=\sqrt{(k/m)}$ 计算，其中 k 为试验台刚度，可通过静态加载试验测量；激励角频率 ω_1 需与 ω_n 匹配，通常取 $\omega_1 \approx \omega_n$ 以实现共振放大，降低伺服系统功率需求。该模型既保留了带阻尼比正弦波的衰减特性，又考虑了试验台的激励特性，为载荷生成提供精准的理论依据。

3.2 关键参数对冲击响应的影响规律

为实现冲击载荷的精准调控，需明确阻尼比、固有角频率等关键参数对冲击响应的影响规律。采用动力学仿真软件建立试验台—试件系统模型，试件选取典型航空铝合金构件，质量 5kg，刚度 $2 \times 10^6 N/m$ ，试验台采用液压伺服冲击试验台，刚度 $5 \times 10^7 N/m$ 。参数取值，分析试件加速度响应特性。阻尼比 ζ 对响应的影响：当 ζ 由 0.05 升到 0.3 时，试件峰值加速度由 5200g 降至 4800g，下降幅度约 7.7%，但是响应衰减速度明显加快，峰值后 10ms 的加速度幅值由 2000g 降至 800g，下降幅度 60%。这说明阻尼比对冲击响应的衰减特性起主要作用，对峰值影响不大，所以可以通过调整 ζ 来对实际载荷的衰减过程进行精确的匹配。2 固有角频率 ω_n 的影响：当 ω_n 从 1000rad/s 增大到 1400rad/s 时，峰值加速度出现时间从 6.2ms 提前到 4.5ms，峰值加速度从 4700g 增大到 5300g，增幅 12.8%。这是因为 ω_n 增大，使系统固有频率增大，振动周期变短，峰值出现时间提前，同时共振效应增大，峰值变大。因此可按 ω_n 调整实际载荷的峰值出现时间和峰值幅值。激励角频率 ω_1 对响应的影响存在一个最优区间：当 ω_1 在 $0.9\omega_n-1.1\omega_n$ 的区间时，系统产生共振，在较低的激励功率下可以达到目标载荷峰值；当 ω_1 偏离这个区间时，就需要增大激励功率才能达到目标峰值，而且响应波形畸变率增大。因此实际应用中需将 ω_1 控制在最优区间内，以达到节能与波形准确的平衡。

3.3 载荷调控策略设计

基于参数影响规律，设计“峰值—衰减—时序”三段式调控策略，实现冲击载荷的精准生成。第一段为峰值调控：根据测试目标确定载荷峰值 F_0 ，通过调整激励幅值 F_1 和固有角频率 ω_n ，使系统响应达到目标峰值，若峰值不足则增大 F_1 ，若峰值超标则降低 ω_n ；第二段为衰减调控：通过反演实际载荷的衰减曲线确定目标阻尼比 ζ ，采用 PID 控制算法调整试验台的阻尼器参数，实时监测响应波形的衰减速率，通过修正 ζ 使衰减过程与目标一致；第三段为时序调控：根据实际载荷的峰值出现时间调整激励角频率 ω_1 ，使响应峰值出现时间与目标时间的偏差控制在 $\pm 0.2 ms$ 内。调控策略的实施需结合闭环控制逻辑：通过加速度传感器实时采集试件的响应信号，与目标带阻尼比正弦波信号进行对比，计算幅值偏差、衰减偏差和时序偏差，采用模糊控制算法对试验台的伺服阀开度和阻尼器参数进行实时修正，确保响应

波形与目标波形的相似度达到 90% 以上。该调控策略解决了传统开环控制精度低的问题，实现了冲击载荷的动态精准调控。

4 试验验证与分析

4.1 试验系统搭建

搭建液压伺服高加速冲击试验系统验证所提方法的可行性，系统由试验台主体、液压伺服系统、控制系统和测量系统组成。试验台主体采用刚性框架结构，最大承载质量 50kg，刚度 $5 \times 10^7 \text{ N/m}$ ；液压伺服系统采用电液比例阀控制，最大输出力 100kN，响应频率 0-2000Hz；控制系统采用 PLC+ 工业计算机架构，实现载荷模型参数设置、实时调控和数据采集；测量系统由压电式加速度传感器（量程 0-10000g，精度 $\pm 0.5\%$ ）、高速数据采集卡（采样频率 1MHz）和波形分析软件组成，用于采集和分析冲击响应波形。试件选取航空发动机叶片模拟件，材质为 TC4 钛合金，质量 3.2kg，尺寸为 300mm × 50mm × 5mm，根据航空标准要求，目标冲击载荷为峰值 3000g、峰值出现时间 5ms、阻尼比 0.2 的带阻尼比正弦波。试验前对系统进行校准，通过静态加载试验测量试验台刚度为 $5.2 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，通过空载振动试验确定系统固有角频率为 1250rad/s。

4.2 试验结果分析

采用所提方法进行 3 组平行试验，采集试件的加速度响应波形，与目标波形对比分析。试验结果显示，3 组试验的峰值加速度分别为 2980g、3020g、3010g，平均值 3003g，与目标值 3000g 的偏差均小于 1%，峰值出现时间分别为 4.9ms、5.1ms、5.0ms，偏差均小于 $\pm 0.1\text{ms}$ ，满足时序精度要求。在衰减特性上，3 组试验峰值后 10ms 的加速度幅值分别为 620g、590g、600g，与目标值 600g 的偏差均小于 5%，衰减曲线与目标曲线的相似度分别为 93%、92%、94%，平均相似度 93%。传统半正弦波法试验结果比较：采用相同试验系统和试件，半正弦波法的峰值偏差为 $\pm 5\%$ ，峰值出现时间偏差为 $\pm 0.5\text{ms}$ ，与实际载荷相似度仅为 78%。说明带阻尼比正弦波法载荷的精确性远高于传统方法。进一步分析试件的损伤情况，通过超声检测，带阻尼比正弦波法试验后试件的微裂纹数量与实际工况下的损伤程度一致，半正弦波法试验后微裂纹数量偏多，存在过度测试问题。这证明了带阻尼比正弦波法在冲击测试真实性上优越性。

4.3 方法局限性分析

试验过程中发现，带阻尼比正弦波法有一定的局限性：当阻尼比大于 0.3 时，载荷波形的周期性消失，与实际冲击

载荷的适配性下降；当试件质量小于 1kg 时，系统固有频率受试件质量的影响很大， ω_n 很难稳定控制，波形畸变率增大。针对这些局限性，在今后的研究中，采用自适应滤波技术来修正高阻尼比下的波形，同时通过增加试件质量补偿装置来稳定小质量试件的固有频率，可以增加方法的适用性。针对以上局限性，后续研究可以从两方面重点进行技术优化。首先，针对高阻尼比导致的周期性丧失问题，引入 LMS 算法等自适应滤波技术对驱动信号进行在线识别与实时修正，动态补偿系统的能量耗散，在强阻尼条件下重建与维持载荷波形的周期性特征。其次，为了解决由于小质量试件引起的固有频率漂移与波形畸变，可在试验装置中采用质量补偿机构来解决这方面的问题，如通过预载弹簧或附加配重结构，使系统等效质量控制在可控范围内，从而抑制 ω_n 的波动。此外，结合系统辨识与闭环控制算法，实时调整激振参数，有望在宽泛的阻尼比与试件质量条件下，均能精确复现目标冲击载荷，显著提升该方法的工程适用性与测试精度。

5 结论

本文详细分析了带阻尼比正弦波法在高加速冲击技术中的应用，得出以下结论：带阻尼比正弦波的欠阻尼特性与高加速冲击载荷的“峰值骤升—快速衰减”特征十分吻合，其波形与实际载荷的接近程度远远高于传统的半正弦波；所建立的受迫阻尼振动载荷模型在很大程度上考虑了试验台的激励特性，其模型参数的确定可以通过最小二乘法和静态试验来实现；阻尼比是影响冲击响应三段式调控策略结合闭环控制，可使冲击载荷峰值偏差小于 1%，时序偏差小于 $\pm 0.1\text{ms}$ ，波形相似度达到 93%；试验验证表明，该方法在测试精准度和真实性上均优于传统方法，可有效复现实际冲击工况。

参考文献

- [1] 李玉,刘海波,孙丹,杨泽敏,苏国征,徐梅鹏.阻尼环对箝齿封严气弹稳定性的影响[J].航空动力学报,2025,40(06):266-276.
- [2] 陈林,谭平,徐亚飞,赵啸峰,周福霖.考虑楼层刚度的新型消能伸臂结构动力特性研究[J].振动与冲击,2023,42(15):55-64.
- [3] 颜晓霞,刘桂源,董春光,张卓杰,李明阳.索网-阻尼器系统自振特性研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(07):61-71.
- [4] 张蓝方,张乐乐,谢壮宁,江毅.内部带阻尼格栅的 TLD 减振性能试验研究[J].振动工程学报,2022,35(03):674-680.
- [5] 杨兴国,魏显坤,王茂辉,石英.基于多自由度阻尼振动系统的动力吸振器的理论研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020,(01):89-92.

Research on the Development of Nuclear , Biological and Chemical Decontamination Technologies for US Military Aircraft

Ruicai Zhang Yanyan Zhu Sijing Wang Jingtang Peng

The People's Liberation Army of China 95899 Brigade, Beijing, 100085, China

Abstract

The research and application of decontamination technology for military aircraft is of great significance to ensure the smooth progress of military operations and safeguard national security. This paper systematically reviews the development history of US military aircraft decontamination technology, and reveals its equipment and technical path. It studies the US military aircraft current development status of nuclear, biological and chemical decontamination technologies and equipment, analyzes the key technologies including positive pressure thermal airflow technology, ultrasonic degradation technology and adsorption technology, and outlines the related aircraft decontamination equipment, including fixed and mobile decontamination equipment. It also predicts the three core directions of future technological development, providing reference for the relevant fields in China.

Keywords

Military aircraft, decontamination of nuclear; biological and chemical agents; decontamination equipment and technology; scientific and technological innovation; military engineering

军用飞机核生化洗消发展研究

张瑞彩 朱艳艳 王思静 彭靖棠

中国人民解放军 95899 部队, 中国 · 北京 100085

摘要

军用飞机核生化洗消技术的研究与应用对保障军事行动的顺利进行与维护国家安全有至关重要的意义。本文系统梳理了美国军用飞机核生化洗消技术的发展脉络，揭示其装备与技术路径。研究了有关飞机核生化洗消的技术与装备发展现状，分析其关键洗消技术包括热气流正压技术、超声波降解技术与吸附剂吸附技术，概述了相关飞机洗消装备，涉及固定式洗消装备与机动式洗消装备，并预测未来技术发展的三大核心方向，为中国相关领域提供参考。

关键词

军用飞机；核生化洗消；洗消装备与技术；科技创新；军事工程

1 引言

化学、生物、放射和核 (CBRN) 威胁是现代战争与非传统安全领域的“隐形杀手”，而洗消装备则是空军应对此类威胁的战斗力“修复器”，能在核云下快速“重启”的空军，才是真正战略力量。全球空军洗消装备技术，从二战时期的人工化学擦拭，发展到如今融合 AI、无人化平台的智能系统，本质上是一场围绕“效率、安全、适应性”的技术革命。在核生化防护体系中，空军飞机洗消装备具有至关重要的战略地位，是应对核生化威胁、确保空军战斗力持续发挥的关键环节。

1.1 核生化武器特性与危害

核武器通过核裂变或聚变反应释放巨大能量^[1]，其爆炸效应主要包括冲击波、光辐射、早期核辐射、放射性沾染及电磁脉冲。冲击波可造成飞机机体结构物理性损毁，超压与负压变化可能引发燃油系统破裂或舱体密封失效；光辐射导致表面材料碳化或电子设备过载；早期核辐射与放射性沾染则可能损伤人员 DNA 并污染设备；电子脉冲效应则会干扰或永久损坏机载电子系统，破坏通信、导航及火控装置的功能连续性。生物武器以病毒、细菌等战剂为核心^[2]，通过空气、水体或食物传播，其隐蔽性与强传染性使感染防控极具挑战性。一些病毒、细菌可通过气溶胶形式附着于飞机表面或通风系统，对人员健康构成持续威胁，且生物战剂的潜伏期特性易导致危害的延迟性显现，加剧应急处置难度。化学武器则通过神经性毒剂（如 VX、沙林）与糜烂性毒剂（如芥子气）等有毒化学物质作用于人体神经系统或皮肤黏膜，

【作者简介】张瑞彩（1995-），女，中国山西朔州人，硕士，工程师，从事化学研究。

极低剂量即可引发中毒甚至死亡。这些毒剂多为液体形态，易挥发或附着于飞机材料表面，导致设备腐蚀与长期环境残留。

1.2 研究背景与意义

在当代军事冲突中，核生化威胁已成为影响作战行动安全与成效的关键因素。核武器、生物武器、化学武器的潜在使用不仅对人员构成致命威胁，还可能对军事装备尤其是军用飞机造成严重损害。美国作为全球军事力量的重要一级，在飞机核生化洗消装备与技术领域具备成熟的经验。首先是装备体系完备，拥有多种固定式洗消站、机动洗消单元，可快速洗消各类军民用飞机；其次是技术先进，广泛应用高效、低腐蚀性洗消剂，集成了高压冲洗、蒸汽、吸附等先进技术，并注重环保与人员安全；第三是重视研发机器人、无人辅助洗消及实时监测技术，走向自动化与智能化，减少人员暴露危险；第四是聚焦应对新型威胁，增强装备适应性与部署能力，趋向于建设更快速、更智能、更安全的应对未来复杂化生放核威胁能力。

本文系统研究梳理了航孔装备的核生化洗消技术发展脉络，分析研究了当前飞机洗消技术与装备，并预测了未来趋势。通过深入分析其装备技术演进与特点，为中国相关领域建设提供理论参考与实践借鉴，助力提升核生化威胁应对能力。

2 美国航空设备核生化洗消技术发展历程

航空设备洗消装备的发展与核生化武器的迭代、战场需求的升级紧密相关，主要分为三个阶段：早期萌芽阶段、机械化阶段、现代化发展阶段。其发展脉络主要表现为，从“被动应对”到“主动防护”的代际跃迁。

2.1 早期萌芽阶段

早期萌芽阶段（20世纪初-1950年代）：人工为主，功能单一。一战期间，化学武器（如氯气、芥子气）的大规模使用，催生了最早的洗消需求。但受限于技术，早期空军洗消以“人工+简单工具”为主。士兵穿戴简易防护装备，用刷子、抹布蘸取石灰水、次氯酸钠等化学溶剂，手动擦拭飞机表面污染物。此时装备无标准化设计，洗消效率低（单架战机需数小时），且对人员防护不足，易造成二次伤害。

2.2 机械化阶段

机械化阶段（1960年代-2000年代）：车载化、系统化，覆盖核生化全场景。冷战时期核威慑与生化武器扩散，推动洗消装备向“机械化、集成化”转型。典型代表是美国M12A1洗消系统（1980年代列装）。这类装备以军用卡车为平台，集成高压水泵、加热装置、储液罐（可装载化学洗消剂或热水），支持“喷洒-冲洗-中和”一体化作业，单架战机洗消时间缩短至30分钟内。同时，洗消剂从单一化学溶剂升级为“复合配方”（如DS2洗消剂，可同时应对核辐射尘埃、生物战剂和化学毒剂）。

2.3 智能化阶段

智能化阶段（2010年代至今）：无人化、精准化，融入战场信息链。进入21世纪，非对称战争与反恐作战成为主流，空军任务场景从传统战场延伸至城市、丛林等复杂环境，洗消需求进一步细化：既要快速响应（如无人机蜂群作战后需即时洗消），又要避免人员暴露（如高辐射区域）。技术突破集中在三方面：一是发展无人化平台。如美国“洗消机器人”可自主识别污染区域，通过多自由度机械臂喷洒洗消。二是聚焦精准检测-洗消联动。洗消装备集成光谱仪、生物传感器，实时分析污染物类型，自动匹配洗消剂配方，如遇VX毒剂使用酶解洗消剂，遇放射性尘埃使用纳米吸附材料。三是进行轻量化与模块化设计。便携式洗消背包可拆解为喷雾器、中和剂包等模块。

3 航空设备的核生化洗消技术与装备体系

3.1 关键洗消技术

航空设备核生化洗消技术是保障航空装备快速恢复作战能力的核心支撑，在物理洗消技术领域，目前以热气流正压技术、超声波降解技术与吸附剂吸附技术为主要代表。

热气流正压技术是将空气、稀有气体或低反应性蒸汽以正压形式高速喷向受染对象，实现沾染表面污染物的去除。被去除的污染物通过过滤单元进行富集。通过不同高温（温度>75°C）和高湿（湿度>70%）环境条件组合以实现典型飞机材料表面化学毒剂降解和病原体有效灭活。根据从军用飞机上清除化学污染物和模拟剂的研究显示，在3.0 h、4.0 h 和 20.0 h 内分别能够去除 99% 的芥子气、浓芥子气和 VX^[3-4]。

超声波清洗技术能够产生高频振动，使污染物从设备表面分离，目前已用于医疗器械、电子产品、光学设备、印刷电路板和金属上的污垢、油脂和锈迹的清洁处理。美国Master Sonics 制造了一系列超声波清洗机，可用于清洗飞机上的单元件（刹车部件、发电机组件、执行器、梭阀、过滤器、车轮和发动机叶片等）。

吸附剂吸附技术主要是通过物理或化学吸附材料捕获、固定并降解有毒有害物质（如化学战剂、生物毒素、放射性污染物等）的应急处置方法。其核心是借助高比表面积材料的强吸附能力，实现对污染物的高效清除。纳米粒子为典型代表，纳米粒子（1-100nm）的尺寸效应赋予其极大的比表面积，能提供大量吸附位点，通过物理吸附（范德华力）和化学键合（表面羟基、官能团）高效捕获污染物，使其成为洗消、降解、过滤等消毒应用的理想材料。为了提升吸附技术洗消效果，纳米粒子必须能够与污染物实现固-固或固-液接触，并在处理后从受影响表面移除。纳米粒子已用于敏感设备的除污，例如美国 NanoMaterials 公司研发的 FAST-ACT。溶胶-凝胶合成的 Al₂O₃ 纳米颗粒，无论是带有还是不带反应性浸渍剂，都已研究证实了其连续物理吸附和原位

中和芥子气的能力。

在化学洗消领域，美国广泛应用表面活性剂技术，通过其独特的浸润、乳化、分散及增溶等特性，高效清除污染物，同时兼顾飞机机体安全性与环境兼容性。美国国防部联合科学技术办公室和化学与生物防御联合项目执行办公室，研发了一种用于去除表面化学和生物战剂的表面活性剂技术，专门用于乳化和去除军用涂漆表面的化学战剂。使用过程中将表面活性剂溶液喷洒在飞机上形成稳定的乳化液，去除沾染在飞机上的化学战剂，然后通过传统方法进行消毒处理。该表面活性剂不含挥发性有机化合物，并符合多项飞机使用规格要求。

针对生物战剂（如炭疽孢子）污染后的战机表面处理，美国研究采用细菌孢子萌发灭火新技术，通过精准激活孢子休眠-萌发转换机制，诱导休眠孢子主动萌发为营养细胞，推动军用洗消从“化学中和”向“生物智能”跃迁。美国研发团队使用一架废弃的 C-130 飞机和炭疽杆菌模拟芽孢，测试了细菌孢子萌发灭活技术：该团队在 C-130 的外表面上每平方米均匀喷洒了超过 1 亿个细菌孢子，孢子干燥后，使用背负式静电喷雾器在表面均匀地喷洒无腐蚀性萌发溶液，以最大限度地降低人员风险并保持与飞机材料的兼容性。由于萌发需要湿润的表面，团队继续每隔 2 小时定期向飞机内表面喷洒萌发溶液，以保持表面湿润。研究人员发现，孢子萌

发过程可将生物孢子和病毒污染减少 99.9% 以上。孢子萌发灭活技术不仅减少了飞机净化所需的时间和温度还减轻后勤负担以及对飞机部件的影响^[5]。

3.2 关键洗消装备

美国在航空设备核生化洗消装备与技术领域处于全球领先地位，拥有多种固定式洗消装备、机动式飞机洗消装备，具备成熟且先进的应对能力。

3.2.1 固定式飞机洗消装备

1. 改性过氧化氢飞机洗消掩体系统

在大规模核生化沾染环境中，洗消掩体具有显著的部署优势。洗消掩体搭建迅速，能快速形成较大的洗消空间；洗消性能强，可对大量受染战机进行高效洗消。洗消掩体可同时对飞机进行外部和内部洗消作业。掩体帐篷内的温度可加热至 77℃~82℃，具备化学洗消与生物洗消能力。飞机受染后，置于洗消掩体内部，用改性过氧化氢蒸汽进行洗消（见图 1）。通过在掩体内部可施加负压，可防止生物、化学毒剂飘逸到掩体外部。在美国埃奇伍德化学和生物司令部的支持下，采用过氧化氢(VHP)蒸气和改性过氧化氢(mVHP)蒸气对 C-141 航空飞机内部进行了消毒试验，并验证了对多种化学毒剂、生物战剂消毒效果。过氧化氢蒸气消毒具有速度快、对电子设备没有损害、降解产物为水和氧气无二次污染的优点^[3]。

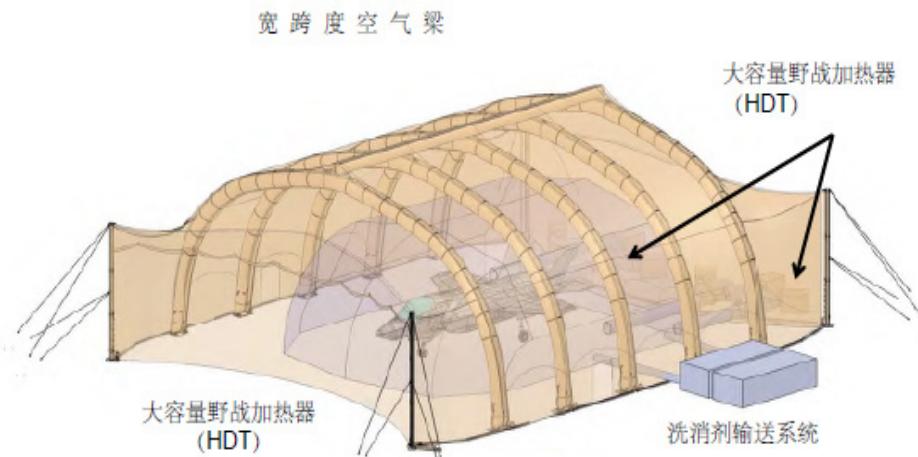


图 1 改性过氧化氢飞机洗消掩体系统模型图

2. 联合生物战剂飞机洗消系统

联合生物战剂飞机洗消系统利用生物热净化工艺，对飞机内部和外部进行生物消杀，以保障飞机重新投入战斗。该系统包括洗消剂输送系统、掩体系统、环境控制与监测系统和辅助组件。通过调节掩体内温度和湿度辅助洗消剂消除飞机内外部生物战剂，掩体内温度需低于飞机设备的安全极限温度，防止飞机系统受损。改进的联合生物战剂洗消系统可在不到 4.0 h 内将传染性包膜 RNA 病毒（如新型冠状病毒）的存活率降低 99.99% 以上^[6]。

3.2.2 机动式飞机洗消装备

机动式洗消系统能够快速洗消飞机上沾染的化学和生物战剂，还可用于船只、车辆等的洗消作业，包含大型及小型配置，具备快速、机动的飞机洗消能力，可实现“尽早执行”洗消作业，防止毒剂渗透至材料表面。在作战、撤离和后勤保障阶段，可根据不同需求灵活配置不同型号的机动式洗消系。该系统在保障战术灵活性的同时，可最大限度减轻后勤负担。美国 CBRN 特种作战部队联合项目组计划 2029 年在美国特种作战司令部全面部署该系列洗消系统。

1. 联合军种大型移动式洗消系统 (JSTDs-LS)

联合军种大型移动式洗消系统 (JSTDs-LS) 为航空装备处于研发和试用阶段的产品, 可对大型装备实施洗消, 包括飞机、设施、地面、海港和机场。该系统可将沾染的化学战剂浓度降低到探测器探测水平以下; 可在移动过程中对受染对象进行洗消; 能够使用环保型洗消剂和热肥皂水, 对环境无污染。

2. 联合军种小型移动式洗消系统 (JSTDs-ss)

联合军种小型移动式洗消系统 (JSTDs-ss) 可安装于高机动性多用途轮式车辆或大型车辆上, 具备良好的平台兼容性。每小时可洗消一架 FA-18E/CH-53 飞机或八台中型车辆, 能快速完成洗消任务。该系统操作便捷、简单, 3 名操作人员在 30 min 内即可完成系统安装、调试和运行。



图 2 联合军种小型移动式洗消系统实物图

3.3 装备研发与更新

科学技术的进步正在改变 CBRN 威胁格局, 美国提出先进的洗消计划项目, 涉及飞机等大型敏感装备洗消项目包括联合军种敏感设备洗消系统 (JSSED) 和吸附剂洗消系统 (SDS) 等。

联合军种敏感设备洗消系统 (JSSED) 专为敏感设备的洗消而设计。其设计逻辑基于超声波降解和循环溶剂清洗技术。超声波降解能够产生高频振动, 使污染物从设备表面分离; 循环溶剂清洗则通过不断循环的溶剂, 将分离后的污染物带走。这种洗消方式能够在不损坏设备的前提下, 对电子设备、飞机内部等敏感部位进行彻底洗消。

吸附剂洗消系统 (SDS) 则具有快速擦除功能。它利用特殊的吸附剂, 能够迅速吸附和清除设备表面的污染物。SDS 系统操作简单, 可在短时间内完成对敏感设备的初步洗消, 为后续的深度洗消提供基础。在处理一些紧急情况时, SDS 系统能够快速响应, 有效减少污染物对设备的损害。

美国新型自主洗消设备研发方面取得了显著进展, 其中机器人自主洗消系统备受关注。该系统具备热点识别功

能, 能够通过摄像头等设备精准定位污染热点区域, 然后利用清洁泥浆进行冲洗, 有效清除污染物。美国研发团队对机器人自主洗消系统进行了实际测试, 结果表明该系统能够快速准确地完成洗消任务, 大大提高了洗消效率, 同时降低了士兵的暴露风险, 实现了技术上的重大突破。

4 航空装备飞机核生化洗消技术的未来发展研判

未来, 美国航空装备核生化技术的创新发展将聚焦于提升技术效能、适应复杂战场环境以及增强智能化水平三大核心方向。

在飞机清洁和洗消领域, 目前采用较多的是肥皂水、表面活性剂类去除污渍的洗消剂^[7-8], 由于传统的洗消剂存在腐蚀性、环境污染等缺陷和不足, 在新型洗消剂技术发展方面, 低腐蚀性、高效性的平衡将成为关键技术突破点。例如, 生物酶制剂降解技术 (磷酸三酯酶 -PTE^[9-10] 等) 的开发应用。原则上, 酶处理可能对敏感设备材料的腐蚀性比传统化学洗消剂更为“温和”, 且能高效降解有机磷化合物, 包括化学战剂 (GB、GD、VX), 基于酶制剂生化飞机洗消应用处于早期阶段, 设计开发成本低、活性高且可降解多类生化战剂的酶制剂飞机洗消系统仍具有挑战性。

在无人检测方面, 传统方法无法跟上快速变化的技术格局和动态演变的威胁。为应对复杂战场环境, 现在正在探索新一代可部署的化学、生物、放射和核 (CBRN) 微传感器, 这些微型传感器具备五个模块化组件, 可实现部署、战场感知与通信功能, 外形小到可以用手抛掷或从无人机上投掷, 同时可搭载于飞机上, 以实时检测预警可能出现的核生化威胁。这些微传感器的开发, 代表着美国向低成本、低功耗、一次性使用的检测系统战略转变, 同时能够增强遥感能力并减轻前线部队负担。在大面积区域快速部署微型传感器, 并根据任务切换不同的传感器, 实现化学毒剂探测分析、辐射地图绘制与生物威胁监测, 同时可与其他战场系统通信互联, 从而构建更广泛的传感器网络, 为指挥官提供实时态势感知。

在机器人自主洗消方面, 智能洗消机器人将搭载多光谱成像等先进检测技术, 能够自主规划洗消路径并动态调整作业参数, 显著降低人员暴露风险。未来, 将可能引入机器学习与 5G 通信, 实现实时分析污染物类型并自动匹配洗消剂配方, 同时形成多台机器人协同作业网络, 通过分布式决策机制提升整体作业效能。

未来战争是体系化对抗, 技术整合与系统化建设是未来发展的核心方向, 洗消体系将构建“感知-决策-执行-评估”的一体化闭环架构, 当战场监测到核生化袭击时, 洗消装备自动规划最优洗消路线 (避开高污染区), 与指挥系统共享数据, 实时上传洗消进度、污染物类型等信息, 人工智能平台将深度介入洗消任务决策环节, 通过历史案例分析

与战场模拟生成最优方案，辅助指挥官调整作战计划。

5 结论

本研究通过系统梳理航空装备核生化洗消技术的发展脉络，结合技术与装备分析，对现有相关成果进行了总结，并对未来发展趋势进行了研判分析。可为中国相关领域的装备研发、战术制定及体系化建设提供重要参照。

参考文献

- [1] 木易.核生化武器的威力有多大[J].生命与灾害,2023, No.292(09):38-41.
- [2] 高东广,辛松.生物之战——离我们并不遥远[J].祖国, 2020,No.287(03):35-38.
- [3] Mundis, Chris; Judd, Adam et al. Edgewood Chemical Biological Center. Hot Air Decontamination of the C-141 Aircraft Technology Development Program. [R]. 2004.0
- [4] Myers, Joseph P., Morrissey, Kevin M.et al. Edgewood Chemical Biological Center. Decontamination of Personal Effects Using Humidified Chemical Hot Air Decontamination. [R]. 2018.10
- [5] Army to Study Biological Decontamination of Aircraft Interiors. [2013-05-31]. <https://www.army.mil/article/104266/>
- [6] Military Aircraft SARS-cov-2 Sanitizing with Hot Air System. <https://globalbiodefense.com/2020/11/05/>.
- [7] 夏治强, 习海玲, 朱安娜, 廖阳等.美军化生放核后果管理手册. [M]. 2017.05
- [8] 程振兴, 王连鸳, 朱海燕.核生化洗消剂及应用.[M].2018.09
- [9] 周蕾,钟近艺,郭旋,郑禾.磷酸三酯酶对VX的洗消研究进展 [J].环境科学与技术,2020,43(06):190-196.DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.06.025.
- [10] 周蕾. 分子进化提高PTE对神经性毒剂VX的降解活性研究[D]. 军事科学院,2021.

A brief discussion on the new challenges of medical equipment management under the application of artificial intelligence medical equipment

Ling Wang

Xiangyun County People's Hospital, Xiangyun County, Dali, Yunnan, 672100, China

Abstract

This paper examines emerging challenges in medical equipment management within the context of AI-powered healthcare devices, conducting an in-depth analysis of key issues. In terms of data management, critical challenges include inconsistent quality standards, fragmented data integration difficulties, and prominent risks in data security and privacy protection. Regarding technological updates, the rapid iteration of AI technologies necessitates lengthy and costly processes for rigorous testing, validation, and approval of equipment upgrades. System compatibility issues and integration complexities also require substantial human and material resources for system modifications. Personnel challenges involve both a shortage of interdisciplinary professionals with expertise in both medicine and AI, as well as difficulties such as operational discomfort, insufficient trust, or over-reliance among medical staff. To address these challenges, the paper proposes strategies including establishing data quality control and security systems, optimizing technology update mechanisms, and enhancing staff training programs. These measures aim to improve the management level of AI-powered medical devices and facilitate better adaptation of the healthcare industry to intelligent development trends.

Keywords

artificial intelligence; medical equipment; medical equipment management; hospital management; medical technology

浅谈人工智能医疗设备应用下医学装备管理新挑战

王玲

祥云县人民医院，中国·云南大理 672100

摘要

本文针对AI医疗设备应用场景，系统分析医学装备管理的核心挑战：在设备全生命周期管理中，存在采购选型与临床需求脱节、运维故障定位难且响应周期长的问题；技术更新方面，因AI技术迭代迅速，设备升级需经复杂测试审批流程，且与医院现有信息系统兼容性不足；人员能力层面，缺乏兼具医学、工程与AI知识的复合型人才，医护人员对设备的操作适应度与信任度也有待提升。为应对上述挑战，提出优化设备全生命周期管理、建立敏捷技术更新机制、加强人员培训与能力建设等策略，以期为医院提升AI医疗设备管理水平提供实践参考，助力医疗行业平稳推进智能化转型。

关键词

人工智能；医疗设备；医学装备管理；医院管理；医疗技术

1 引言

近年来，人工智能技术在医疗领域的渗透日益加深，AI辅助影像诊断设备、智能手术机器人、临床决策支持系统等各类人工智能医疗设备不断涌现并投入临床应用，为疾病诊断、治疗及患者监护等带来了革命性变化，显著提升了医疗服务的效率与精准度[5]。然而，这些先进设备在为医疗行业注入活力的同时，也对传统的医学装备管理模式提出了严峻考验。医学装备管理作为保障医疗设备有效运行、支

撑医疗服务质量的关键环节，在人工智能医疗设备广泛应用的当下，其管理内容、方式和要求都发生了深刻变化，一系列新的挑战逐渐凸显。深入探究这些挑战并寻求有效的应对之策，对于确保人工智能医疗设备的安全高效运行、充分发挥其在医疗服务中的价值具有重要的现实意义。基于此，本文将浅谈人工智能医疗设备应用下医学装备管理新挑战，并提出相应的解决对策。

2 人工智能医疗设备应用下医学装备管理新挑战

2.1 设备全生命周期管理挑战

2.1.1 采购与选型精准性不足

人工智能医疗设备技术复杂度高、功能迭代快且采购

【作者简介】王玲（1989—），中国云南大理人，本科，助理工程师，从事医疗设备工程研究。

成本高昂，其采购与选型需紧密匹配医院临床需求、科室技术承接能力及长期发展规划^[1]。当前部分医院采购时易存“重技术参数、轻临床适配”问题：一方面，采购决策多依赖行政或采购部门，缺乏临床科室、医学工程部门与 AI 技术专家的协同评估，致设备与诊疗场景脱节，如某医院 AI 辅助病理诊断设备因未适配现有标本处理流程，利用率不足 30%；另一方面，对供应商技术支持考察不足，部分供应商仅提供基础安装服务，缺乏后续算法升级、故障应急响应，设备后期易陷“停滞状态”；部分医院盲目追“新技术”，如基层医院采购高端 AI 手术机器人，因手术量少、操作团队不足，设备长期闲置，浪费医疗资源。

2.1.2 运维与故障处置效率低下

AI 医疗设备融合 AI 算法、精密机械、软件系统等多技术模块，运维难度远超传统医疗设备，传统“事后维修”模式已无法满足需求。一方面故障诊断难：故障可能源于硬件（如传感器损坏）、软件（如算法程序异常）或数据交互（如与医院系统接口故障），传统医学工程人员多擅长硬件维修，对 AI 算法逻辑、软件架构了解有限，难快速定位根源，如某医院 AI 影像诊断设备“漏诊率升高”，工程师初查硬件未发现算法参数因数据格式变化偏移，延误处置近 3 天；另一方面运维响应周期长：多数医院无 AI 设备专属运维团队，故障后依赖供应商支持，不及时易致设备停机，某三甲医院 AI 心电分析设备故障，等工程师到场耗时 5 天，期间近千份心电报告需人工复核，大幅增加医护负担且影响诊疗效率。

2.2 技术更新挑战

2.2.1 应对设备快速迭代不足

人工智能技术发展日新月异，新的算法、模型和应用不断涌现。这就要求人工智能医疗设备能够及时更新技术，以保持其性能和竞争力。但医疗设备的更新换代不像消费电子产品那样简单快速，医疗设备的技术更新需要经过严格的测试、验证和审批流程，确保其安全性和有效性。某 AI 医疗影像诊断设备的研发公司推出了新的算法，可提高影像诊断的准确性，但医院要将该新算法应用到现有的设备上，需要花费大量时间和精力进行测试，验证其在实际临床环境中的可靠性，还需向相关监管部门申请审批，整个过程耗时较长，可能导致医院无法及时跟上技术更新的步伐。频繁的技术更新也增加了医院的成本投入，包括设备升级费用、技术培训费用等。

2.2.2 系统兼容性与集成难题

人工智能医疗设备往往需要与医院现有的信息系统和其他医疗设备进行集成，以实现数据的共享和协同工作。然而，不同设备和系统之间可能存在兼容性问题。医院现有的电子病历系统可能与新引入的 AI 辅助诊断系统在数据接口、数据格式等方面不兼容，导致数据无法顺畅传输和共享^[2]。一些老旧的医疗设备可能无法与新的 AI 智能设备进行有效

的集成，影响了整体医疗流程的连贯性和效率。解决这些兼容性和集成问题，需要投入大量的人力、物力进行系统改造和调试，增加了医学装备管理的复杂性和难度。

2.3 人员能力挑战

2.3.1 专业技术人才短缺

管理和维护人工智能医疗设备需要具备跨学科知识的专业技术人才，他们既要熟悉医学知识，了解医疗设备的临床应用需求，又要掌握人工智能技术、计算机技术等相关知识。目前，这类复合型专业技术人才十分短缺。医院的医学工程部门人员大多具备传统医疗设备维修和管理的知识，但对人工智能技术了解有限，难以对 AI 医疗设备进行深入的技术支持和维护。在遇到 AI 医疗设备的算法故障或数据处理问题时，往往无法及时解决。高校相关专业的人才培养体系也尚未完全适应这种跨学科人才培养的需求，导致人才供给无法满足市场需求，限制了人工智能医疗设备的有效管理和应用推广。

2.3.2 医护人员难以适应设备

对于医护人员来说，使用人工智能医疗设备也需要一定的适应过程。AI 医疗设备的操作方式和决策模式与传统医疗设备有所不同，医护人员需要学习新的操作技能和理解 AI 的诊断建议。一些医生可能对 AI 辅助诊断结果存在疑虑，习惯于依靠自己的临床经验进行诊断，不太愿意接受 AI 的建议。这可能导致 AI 医疗设备在实际临床应用中无法充分发挥其作用。医护人员对 AI 医疗设备的过度依赖也可能带来问题，若他们缺乏对设备原理和局限性的了解，在设备出现异常时可能无法正确判断和处理，影响医疗服务质量和患者安全。因此，如何帮助医护人员正确认识和使用人工智能医疗设备，提高他们的接受度和应用能力，是医学装备管理面临的重要挑战之一。

3 应对策略探讨

3.1 优化设备全生命周期管理体系

3.1.1 构建精准化采购与选型机制

医院需建立“跨部门协同 + 临床导向”的 AI 医疗设备采购决策体系，确保采购设备与实际需求高度匹配^[3]。首先，成立采购评估小组：成员涵盖临床科室负责人、医学工程技术人员、AI 技术顾问及财务人员，形成“需求调研 - 技术评审 - 成本评估 - 试用验证”的全流程采购机制。其次，强化供应商考察维度：除评估设备核心参数外，重点考察供应商的技术服务能力，包括是否提供至少 3 年的算法升级服务、故障响应时间、是否具备本地化技术服务团队等，并将服务承诺纳入采购合同。最后，推行试用验证制度：对拟采购的 AI 设备，在临床科室开展 1-3 个月的试用，通过统计设备利用率、诊疗符合率、医护人员满意度等指标，验证设备实用性，避免盲目采购。

3.1.2 建立智能化运维与故障响应体系

针对 AI 医疗设备运维复杂度高的问题，需从“技术赋

能 + 团队建设”双维度提升效率。技术赋能上，引入物联网与预测性维护技术，在 AI 设备关键部件（如传感器、处理器）装智能监测模块，实时采集温度、运行速率等参数，经运维平台分析预测故障、提前预警，将“事后维修”转“事前预防”，例如监测 AI 手术机器人机械臂关节摩擦力与精度，提前识别磨损风险以避术中故障。团队建设上，打造“院内团队 + 外部专家”模式：加强院内医学工程人员培训，开设含 AI 算法基础、软件排查等内容的专项课程；与供应商共建“远程运维中心”，远程诊断修复简单故障、协调专家处理复杂故障；建立运维知识库记录故障案例，助力提升处理效率。

3.2 优化技术更新管理

3.2.1 建立敏捷技术更新机制

医院与人工智能医疗设备供应商应建立紧密的合作关系，共同制定敏捷的技术更新机制。供应商及时向医院提供技术更新信息和升级方案，医院在评估技术更新的必要性和可行性后，按照规范的流程快速进行设备升级。在升级过程中，充分利用模拟测试环境，对新的技术和算法进行全面测试，确保其在医院实际应用场景中的稳定性和可靠性。简化技术更新的审批流程，相关监管部门可针对人工智能医疗设备的特点，制定专门的快速审批通道，在保障安全有效的前提下，缩短审批时间，使医院能够及时享受到技术更新带来的优势。医院也应合理安排技术更新的预算，确保有足够的资金支持设备的升级和维护。

3.2.2 提升系统兼容性与集成能力

在引入人工智能医疗设备之前，医院应对现有的信息系统和医疗设备进行全面评估，了解其兼容性情况。对于可能存在兼容性问题的系统和设备，提前进行改造和优化。在设备采购环节，明确要求供应商提供设备与医院现有系统集成的解决方案，并进行严格的兼容性测试。鼓励设备供应商和软件开发商遵循统一的技术标准和接口规范，提高设备和系统之间的互操作性。建立专门的技术团队，负责解决设备集成过程中出现的技术问题，确保人工智能医疗设备能够与医院的其他系统无缝集成，实现数据的顺畅流通和共享，提高医疗服务的整体效率。

3.3 加强人员培训与能力提升

3.3.1 培养专业技术人才

高校应加强跨学科专业建设，整合医学、计算机科学、人工智能等相关学科资源，开设人工智能医疗相关专业课程，培养适应行业需求的复合型专业技术人才。课程设置应注重理论与实践相结合，让学生在学习过程中参与实际项目，提高解决实际问题的能力 [4]。医院与高校、科研机构合作，开展在职人员培训和继续教育项目，为医院的医学工

程技术人员提供人工智能技术培训课程，提升他们的专业技能水平。鼓励医院技术人员参加国内外相关学术交流活动，了解行业最新技术动态，拓宽技术视野。通过内部培训和外部引进相结合的方式，打造一支高素质的人工智能医疗设备专业技术人才队伍，为设备的有效管理和维护提供人才保障。

3.3.2 提高医护人员应用能力

医院应组织针对医护人员的人工智能医疗设备应用培训，培训内容包括设备的操作方法、功能特点、AI 诊断建议的解读等。采用理论讲解、案例分析、实际操作演练等多种培训方式，让医护人员深入了解设备的性能和优势，提高他们对设备的操作熟练程度和应用能力。开展宣传教育活动，消除医护人员对人工智能医疗设备的疑虑和误解，通过实际案例展示 AI 设备在提高诊断准确性、改善治疗效果等方面的作用，增强医护人员对 AI 技术的信任。建立医护人员与技术人员的沟通协作机制，当医护人员在使用设备过程中遇到问题时，能够及时得到技术人员的支持和帮助，促进人工智能医疗设备在临床实践中的顺利应用。

4 结语

人工智能医疗设备的普及已成为医疗行业发展的必然趋势，其在重构诊疗流程、提升服务质量上的价值毋庸置疑，但也让医学装备管理从“传统硬件运维”向“技术、设备、人员协同管理”的复杂模式转变。本文通过深入分析发现，设备全生命周期的管理短板、技术迭代与系统集成的现实阻碍、人员能力与设备需求的适配差距，是当前 AI 医疗设备管理面临的主要难题，这些问题相互交织，考验着医院的综合管理能力。文中所提的跨部门采购评估机制、物联网赋能的运维体系、校院企联动的人才培养路径等策略，既聚焦解决当下设备管理中的实操痛点，也为构建长效管理机制奠定基础。未来，随着医院管理理念的更新、监管政策的完善以及技术与人才资源的深度融合，医学装备管理将实现从“被动解决问题”到“主动预判保障”的升级。

参考文献

- [1] 屈国辉,闫广宇.浅谈人工智能医疗设备应用下医学装备管理新挑战[J].中国设备工程,2025(2):33-35.
- [2] 巩高,黄文华,曹石,陈超敏,郑东宏.人工智能在医学的应用研究进展[J].中国医学物理学杂志,2021,38(8):1044-1047.
- [3] 庞磊,赵忻蕊,沈婉婉,何直益,王正刚,杜杏利.人工智能在骨科医疗中心管理中的应用研究[J].骨科,2025,16(3):285-288.
- [4] 魏合阳.医学装备与医疗设备的智能化发展趋势及应用前景[J].科学与信息化,2025(2):157-159.
- [5] 沙腾,徐占磊.人工智能在医学装备故障诊断与管理中的应用前景分析[J].办公自动化,2025,30(10):108-110.

Application and Development of Intelligent Energy saving Management System in Carbon Emission Reduction

Xiaoying Liu

Xinjiang Wuyun Songhuan Energy Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

The intelligent energy-saving management system achieves refined, full-process control of energy use through real-time data acquisition, analytical processing, and operational adjustment, providing an efficient and controllable pathway for carbon reduction. By relying on monitoring devices, data platforms, and automated control modules, the system establishes a dynamic profile of energy operation, enabling minute-level detection of consumption trends for timely decision optimization. Through comprehensive calculations of load curves, equipment operating parameters, and energy structure data, the system can adjust energy-supply modes, optimize equipment start-stop strategies, and reduce ineffective consumption, thereby lowering carbon emissions.

Keywords

Intelligent energy-saving management system; Energy monitoring; Optimization scheduling; Carbon reduction; Equipment control

智能化节能管理系统在碳减排中的应用与发展

刘晓英

新疆五韵松环能科技有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

智能化节能管理系统通过对能源数据的实时采集、分析与调控，实现对能源使用全过程的精细化管理，为碳减排提供了高效可控的技术路径。系统依托监测设备、数据平台与自动控制模块构建能源运行状态的动态画像，使能耗变化趋势能够在分钟级范围内被捕捉并被用于决策优化。通过对负荷曲线、设备运行参数和能源结构构成等数据的综合运算，系统能够调整能源供给模式、优化设备启停策略、降低无效损耗，从而减少碳排放量。

关键词

智能化节能管理系统；能源监测；优化调度；碳减排；设备控制

1 引言

在能源资源约束不断增强、低碳发展要求持续提升的背景下，能源利用效率已成为衡量行业竞争力与区域发展质量的重要指标。当前各行业普遍存在能源消耗结构复杂、运行负荷波动较大、设备管理粗放等问题，使能源浪费与碳排放量长期维持在偏高水平。通过构建覆盖监测、分析和控制的联合体系，系统能够对能源使用情况进行全过程数字化管理，提高能源利用效率，降低单位产出能耗，并在不同场景中形成可复制的碳减排路径。智能化节能管理系统已成为推进节能降碳工作的关键技术基础，在产业转型和绿色发展中具有重要的现实意义。

2 智能化节能管理系统的内涵

2.1 智能化节能管理系统的概念界定

智能化节能管理系统是在能源使用全过程中应用数据采集、动态分析与自动化控制技术，实现能耗精细化管理的综合平台。系统以实时监测为基础，以数据模型为核心，以自动控制为支撑，通过构建能源运行状态的数字化画像，提升能源利用效率并降低碳排放量。系统能够对电、气、热、水等多种能源进行同步管理，形成跨设备、跨区域、跨流程的能源管理闭环。通过对负荷变化、设备效率、环境参数和运行模式的综合运算，系统能够识别能耗异常、判断节能潜力、提供调控策略，使能源管理从经验驱动过渡为数据驱动。在制造业、建筑业和公共机构运行中，该系统作为节能管理的重要基础设施，为能源成本控制、碳排放削减和运行安全保障提供技术支撑，体现出广泛的适用性与技术价值。

2.2 智能化节能管理系统的组成模块

智能化节能管理系统由能源监测模块、数据分析模块、

【作者简介】刘晓英（1988-），女，中国陕西榆林人，本科，工程师，从事工业生产过程中的节能减排技术等研究。

控制执行模块和系统管理平台等部分构成。能源监测模块通过电表、流量计、压力传感器、温度采集端子等设备完成对关键能耗点的实时数据采集，采集精度可达到毫秒级或秒级，为后端分析提供数据基础。数据分析模块利用算法模型对能耗趋势、设备效率和负荷变化进行计算，生成能耗评估结果、节能潜力报告和运行优化建议。控制执行模块负责对设备启停、工况调整、供能比例等策略进行自动化实施，实现能源调控的即时响应。系统管理平台为用户提供可视化界面、权限管理、告警推送、报表输出等功能，形成监测、分析与控制的闭环体系，使能源管理具备可持续运行能力^[1]。

3 智能化节能管理系统在碳减排中的作用机制

3.1 系统在能源监测与数据采集中的作用机制

智能化节能管理系统通过精细化监测手段实现对能源使用全过程的动态捕捉，为碳减排提供可靠的数据基础。系统利用覆盖生产线、建筑区域和设备节点的高精度传感器实时采集电、气、热、水等能源消耗数据，并同步记录设备开机率、环境温度、负荷波动等运行参数，使能源使用状态在秒级时间尺度内呈现。数据采集通过边缘节点进行预处理，减少冗余信息，并将关键数据上传至中心平台进行集中存储，从而构建能耗数据库。通过连续监测，系统能够识别能耗异常、查找高耗能环节、评估设备效率，为后续碳排放核算和减排策略提供依据。高质量的数据采集机制使系统能够准确呈现能源结构与碳排放水平的变化趋势，提高碳减排路径的科学性与准确性。

3.2 系统在设备节能控制中的作用机制

智能化节能管理系统通过对设备运行状态的精确控制，实现能源消耗的结构性压降，为碳减排提供直接支撑。系统能够对空压机、泵站、风机、暖通设备等高能耗设备进行实时工况监测，通过分析运行效率、负荷变化和温湿度条件，生成最优控制策略。控制终端根据策略调整设备启停模式、频率输出、阀门开度和运行时间，从而降低设备在非效率区间的运行时长。系统能够对“待机空耗”“超负荷运行”“低负载持续运行”等问题实施自动干预，使设备在能源效率最高的区间运行。通过优化控制逻辑，系统可实现 5% 至 15% 的电耗下降，进一步降低碳排放量。设备节能控制机制强化了用能管理的主动性，使节能减排不再依赖人工经验，实现高水平、持续性的碳减排效果。

4 智能化节能管理系统的关键技术路径

4.1 智能化能源监测技术的发展路径

智能化能源监测技术的发展经历从单点计量到多维监测、从人工抄录到自动化采集再到边缘计算支撑的全过程感知阶段。早期监测依赖独立电表、热量表与流量计实现基础计量，难以满足实时性与多能源联动管理需求。随着传感器技术提升，电流、电压、温度、压力、湿度等多参数传感器精度提升至 $\pm 0.2\%$ 至 $\pm 0.5\%$ ，采样频率达到 1 秒级，形成

分布式监测网络。基于总线与物联网通信协议的能源监测架构使电、气、热、水数据能够通过 4G、NB-IoT、LoRa 等方式实现稳定传输，数据覆盖范围可扩展至生产线、车间、建筑区域和市政设施。发展路径进入新阶段后，边缘计算节点承担数据清洗、特征提取和异常识别任务，使原始数据量减少 40% 至 60%，提升平台响应速度^[2]。现代监测体系通过构建能源全景可视化界面，形成能源流向图、负荷趋势图和设备效率图，实现从点状监测走向系统化监测的转变，为节能管理与碳排放核算提供坚实基础。

4.2 智能化负荷预测与优化算法的发展路径

智能化负荷预测与优化算法的发展路径从规则化方法逐步迈向基于数据驱动的多模型协同预测机制。早期负荷预测主要采用线性回归法、时间序列法和经验模型，依赖人工设参，难以处理设备负荷的高速波动与多变量关联。随着负荷数据规模扩大，预测算法开始引入多变量耦合模型，通过同时考虑温度、湿度、设备启停、生产计划和历史负荷，实现误差在 5% 至 8% 区间内的预测能力。优化算法的发展使负荷预测脱离静态计算，进入动态迭代阶段，通过滚动预测、滑动窗口分析与实时数据校准，使预测偏差持续缩减。在工业场景中，负荷预测模型能够根据生产节拍判断未来 30 分钟至 2 小时的能源需求，优化调度策略。多模型联合预测结构引入残差校正与参数更新机制，使模型在负荷突变情况下仍能保持较高准确度。优化算法通过能源成本函数、碳排放因子与设备效率矩阵实现最优调度策略生成，使能源供需匹配更加合理，推动节能与减排的协同实现。

4.3 智能化控制技术的发展路径

智能化控制技术的发展经历从定值控制向自适应调节、从单设备控制向系统级协同控制的演进。早期控制方式基于固定阈值、周期调整和人工设定参数，系统响应速度慢、精确度低。现代智能化控制技术通过实时数据输入、模型驱动策略和多变量调节机制，实现对空压机、冷冻机、泵站、风机、锅炉等高耗能设备的精细控制。系统在接收监测数据后，通过计算设备效率曲线、负载比、温湿度变化和供需差异，自动生成控制指令。变频调速技术使设备能够根据负载变化在 30% 至 100% 区间内连续调节，避免高能耗区间运行。集中控制系统可对多个设备实施联动管理，使运行效率提升 8% 至 15%。先进控制策略通过实时优化算法、设备启停模型、供能比例矩阵和负荷平衡机制，提高对设备运行状态的匹配度。控制技术的发展方向呈现自动化程度不断提升、系统协调能力不断增强的趋势，为节能管理与碳减排提供稳定支撑。

5 智能化节能管理系统的重点行业中的应用

5.1 系统在工业生产领域的应用

工业生产领域的能源消耗量高、设备运行负荷大、工况变化频繁，智能化节能管理系统通过监测、分析与控制实

现高能效运行管理。在监测层面，系统在关键设备点布设电流、电压、压力与流量传感器，能够追踪生产线能源使用情况，使能耗数据采集频率稳定在 1 秒至 5 秒区间。数据分析模块通过对生产节拍、电机负载率、冷却需求与空压机输出压力等参数进行计算，生成设备效率评估报告。控制系统对空压机组采用联动调节策略，通过变频方式使设备维持在最佳负载区间，使电耗降低 8% 至 12%。在冶金、化工、装备制造等行业中，智能化节能管理系统可使车间级能源消耗下降 5% 至 18%，碳排放量减少幅度达到 10% 至 20%。工业生产过程中产生的废热与余能可通过系统进行回收利用调度，提高能源综合利用效率，大幅提升生产过程的绿色运行水平^[3]。

5.2 系统在建筑能源管理中的应用

建筑运行涉及暖通空调、照明、电梯、水泵等设备，能源负荷具有显著的时间波动特征，智能化节能管理系统能够对建筑能源系统进行分区化、分时段和多参数协同管理。在监测方面，楼宇内部署温度、湿度、光照、用电与空气质量传感器，实现对办公区、公共区与设备区的能源使用状态监测。系统通过热负荷计算、冷负荷预测与照明需求分析，对暖通空调机组的送风量、冷冻水流量和末端温度进行实时调节，使机组能效比提升 5% 至 10%。照明系统通过调光算法与人体存在检测实现按需供电，使照明能耗降低 15% 至 30%。建筑整体能耗经系统管理后可下降 8% 至 20%。系统对能耗高峰期进行负荷转移，通过冷蓄能技术与时间分段控制策略减少电网碳排放因子较高时段的用电量，使建筑在运行稳定性、舒适性与碳减排水平之间形成平衡。

5.3 系统在公共机构能源管理中的应用

公共机构包括医院、学校、政府办公机构与交通枢纽等场景，能源消耗结构复杂、运行周期长，对节能管理的精细化要求较高。智能化节能管理系统在此类机构中构建多源能源监测网络，对空调系统、给排水系统、照明系统和特殊用途设备进行数据采集，形成跨区域能源管理架构。系统能

够分析不同区域的能耗密度、运行时长与季节性需求，实现差异化控制。例如医院的手术室与病房对环境温湿度要求严格，系统通过温湿度控制模型使环境偏差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 3\%\text{RH}$ 区间内，同时降低空调能耗 6% 至 12%。学校教学楼的照明与空调在课间波动明显，系统通过时间调控与占用识别技术使能耗下降 10% 至 18%。政府办公机构通过对设备运行时长、峰谷用电比例与公共区域能源配置进行优化，使整体能耗降低 8% 至 15%。系统在公共机构中的应用推动了精细化能源管理体系建设，为公共部门碳排放减少提供可持续技术路径^[4]。

6 结语

智能化节能管理系统以能源监测、负荷预测和自动控制为核心，通过构建覆盖生产、建筑与公共机构等多场景的节能管理体系，实现能源使用全过程的数字化、精细化与协同化管理，为碳减排提供了可量化、可执行、可持续的技术路径。系统在实际运行中能够显著降低能源损耗，提高设备运行效率，使能源结构更为合理，使碳排放呈现持续下降趋势。随着监测精度提升、算法模型完善与控制策略深化，智能化节能管理系统在能源管理中的应用价值将进一步增强。其在工业生产优化、建筑能源管理升级以及公共机构用能治理中的深化应用，将持续推动节能与减排协同并进，为推进绿色低碳发展奠定重要基础。

参考文献

- [1] 李柏桐. 公共建筑碳减排多主体决策机制研究[D]. 导师：李健. 天津理工大学, 2025.
- [2] 黄超. 节能服务公司参与的供应链减排策略与协同治理研究[D]. 导师：付剑茹. 江西师范大学, 2024.
- [3] 周子勋, 孙兆. 碳减排支持工具落地绿色发展再添新引擎[N]. 中国经济时报, 2021-11-11(001).
- [4] 陈建军. 煤气化耦合煤焦化制甲醇工艺碳减排性能分析及低温单元节能技术研究[D]. 导师：钱宇. 华南理工大学, 2021.