

飞机电缆的智能化检测与维护技术研究

刘 莲 庄世茹

石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050000

摘 要：本研究针对飞机电缆在复杂服役环境下的可靠性保障需求，系统探究了其智能化检测与维护的关键技术。通过分析多元耦合环境载荷对电缆性能的影响机制，揭示了机械振动、热循环与电磁干扰等因素的协同退化作用。在检测方面，构建了基于多模态传感与深度学习的智能诊断模型，实现了对电缆缺陷的精准识别与状态评估。在维护层面，提出了“云-边-端”协同的体系架构，形成了动态优化的预防性维修策略。研究结果表明，所提出的方法显著提升了故障检测准确率与维修效率，为飞机电缆的全寿命周期管理提供了技术支持。

关键词：飞机电缆；智能化检测；状态评估；缺陷探测；预防性维修

飞机电缆作为航空器电力与信号传输的核心载体，其可靠性直接关系到飞行安全与系统效能。随着航空装备向高性能、长航时方向发展，电缆系统所面临的服役环境日趋严苛，复合应力作用下的退化机制更加复杂。传统检测方法依赖人工经验与单物理场测量，难以实现早期故障的精准辨识与预警。当前，智能传感、数据融合与人工智能技术的迅速发展，为电缆健康管理提供了新的解决途径。然而，现有研究多侧重于单一技术环节的改进，缺乏从环境机理、检测方法到维护策略的系统性整合。特别是在多场耦合作用下电缆退化规律的建模、微弱故障特征的提取以及维修决策的动态优化等方面，仍存在诸多技术瓶颈。因此，需开展面向飞机电缆全寿命周期的智能化检测与维护技术研究，突破多源异构数据的协同处理与知识迁移等关键问题，构建覆盖感知、诊断、决策与执行的完整技术体系，为实现电缆状态的可视化监控与精准化维护提供理论方法与实践依据。

一、飞机电缆服役环境特性及其影响机理

（一）多元耦合的环境载荷作用特征

飞机电缆所处的工作环境呈现典型的复合应力场特征。机械振动来源于发动机运转、气流扰动以及起降过程中的冲击载荷，导致导体股线间微动磨损加剧；热循环效应源于高空低温与舱内发热设备的交替作用，加速绝缘材料物理性能退化；电磁干扰则来自雷达系统、通信设备产生的强脉冲磁场，诱发涡流损耗与电晕放电现象。这三种主要环境因素并非独立作用，而是通过能量传递形成复杂的耦合关系。长期观测发现，高频振动会改变材料内部晶格结构，从而降低其耐热阈值；而温度

波动又会放大材料的蠕变速率，间接影响抗振性能。这种非线性相互作用使得单一环境参数下的加速试验无法准确模拟真实服役条件，给可靠性评估带来极大挑战。特别是在潮湿环境下，水汽渗透至绝缘层间隙后，会在电场作用下引发局部放电，形成连锁反应式的损伤积累。

（二）环境因素对电缆性能的影响机制

环境载荷的作用效果体现在微观结构和宏观性能两个层面。在微观尺度上，反复弯曲变形会导致铜导体晶粒细化，表面粗糙度增加，进而增大接触电阻；紫外线照射促使聚氯乙烯绝缘层发生光氧化反应，分子链断裂产生挥发物。宏观表现为导电截面积减小、介质强度下降以及柔韧性丧失。值得注意的是，不同材质组件的环境敏感性存在差异，如镀银触点的硫化速度远高于纯铜导体，而氟塑料绝缘层的耐温性优于普通聚乙烯材料。这种异质性决定了同一电缆束中各元件的失效进程并不同步，增加了状态评估的难度。此外，环境因素还会引发隐蔽性更强的化学腐蚀，盐雾环境中的氯化物离子可通过毛细作用渗入连接器缝隙，与金属材料发生电化学反应，最终导致接触面松脱。

（三）环境适应性设计的技术难点

现有的防护措施多采用双层屏蔽结构，但在应对多重环境威胁时仍显不足。传统的橡胶密封件在超低温下会变脆，失去弹性补偿能力；常规的防波套筒难以兼顾电磁兼容与散热需求。更棘手的是，新增防护层往往意味着重量增加，这与航空器减重目标相矛盾。如何在有限空间内整合多种防护功能，同时保证系统的可维护性，成为工程设计的关键问题。例如，某型客机曾尝试在关

键线路加装陶瓷纤维隔热层，虽提高了防火等级，却因厚度超标影响了相邻管路的检修通道。这表明环境适应性设计需要从材料选型、结构布局到工艺实施进行全面优化，而非简单叠加防护措施^[1]。

二、智能化检测技术的理论基础与发展态势

（一）无损检测技术的演进历程

飞机电缆检测技术经历了从目视检查到仪器辅助，再到自动化扫描的发展阶段。早期依靠工匠经验进行的手工排查，受限于人眼分辨率和主观判断，漏检率高企。随后发展的超声波探伤技术，利用声阻抗差异识别内部缺陷，但对微小裂纹敏感度不足。涡流检测虽能穿透非磁性涂层，却在复杂走向的线缆排列中容易产生伪影。近年来兴起的红外热成像技术，通过捕捉电流致热效应发现异常温升点，但在低负荷运行时效果不佳。这些传统方法的共同局限在于依赖特定物理现象，难以全面覆盖各类缺陷类型。随着机器学习算法的进步，基于图像处理的模式识别开始应用于外观检查，但仍面临光照条件变化带来的鲁棒性问题。

（二）智能检测的核心理论支撑

当代智能化检测建立在多源信息融合的理论基础上。通过部署分布式光纤传感器网络，可实现沿程应变、温度、振动参数的连续采集；结合微波雷达对电缆外形轮廓进行三维重建；运用太赫兹波穿透绝缘层检测内部空洞。这些异构数据的时空配准与特征级联，构成完整的健康画像。深度学习模型在此过程中发挥重要作用，卷积神经网络擅长从海量图像中提取纹理特征，循环神经网络适合处理时序振动信号，图神经网络则能建模电缆拓扑结构的关联关系。特别地，迁移学习技术允许将在地面试验台获取的知识迁移至实际飞行环境中，解决样本稀缺问题。数字孪生理念的引入，使得虚拟仿真能够预判未来一段时间内的退化趋势，为制定检修计划提供决策支持。

（三）技术发展现状与瓶颈分析

目前主流厂商推出的便携式检测仪已实现基本参数测量与简单故障码显示，但在复杂故障诊断方面仍有不足。国内外研究机构正在攻关的难题包括：如何在强电磁噪声背景下提取微弱故障特征；怎样构建轻量化的边缘计算单元以满足机载要求；如何设计通用的数据接口协议以兼容不同机型。值得注意的趋势是，MEMS传感器微型化使得密集布点成为可能，5G通信技术的应用提升了数据传输带宽，边缘人工智能芯片的性能增长则为

本地化决策创造了条件。然而，现有标准体系尚未完全适应智能化转型需求，特别是关于数据主权、隐私保护以及跨平台互操作的规定亟待完善。

三、智能化检测系统的关键技术实现

（一）多模态感知层的构建

感知层的设计遵循“分层分级”原则，针对不同检测需求配置相应传感器阵列。表层布置柔性薄膜压力传感器，实时监测机械形变；中层嵌入光纤布拉格光栅，同步采集温度与应变数据；底层集成巨磁阻效应传感器，捕捉微弱磁场变化。为克服电磁干扰，采用差分测量电路与屏蔽罩相结合的方式，确保信号完整性。无线供电技术的应用消除了电池更换需求，太阳能补能模块则延长了续航时间。自校准机制通过内置参考基准源，自动补偿器件漂移带来的误差。各传感器节点通过时分复用方式共享通信信道，既保证采样频率又节省带宽资源。

（二）数据处理与特征提取算法

原始信号预处理包含去噪、归一化和重采样三个步骤。小波包分解用于分离不同频段的特征成分，希尔伯特变换提取包络谱中的周期冲击成分。针对非线性特征，引入相空间重构技术，将一维时间序列映射到高维状态空间。特征选择采用互信息法与主成分分析相结合的策略，剔除冗余特征的同时保留故障敏感信息。新颖性检测模块基于孤立森林算法，快速识别偏离正常模式的数据点。深度学习模型训练采用迁移学习策略，利用历史故障数据库预训练基础网络，再结合实际工况微调参数。在线学习机制使模型能够适应缓慢变化的工况，增量更新权重系数。

（三）故障诊断与健康评估模型

诊断推理引擎采用模糊综合评判与贝叶斯网络融合的架构。先验概率分布根据专家知识库初始化，现场数据不断修正后验概率。证据理论用于合成多传感器提供的置信度指标，D-S组合规则解决冲突命题分配问题。健康状态评估引入模糊集理论，将定量检测结果转化为定性描述。剩余寿命预测采用巴黎定律外推法，结合加速老化试验数据校正系数。风险矩阵综合考虑故障概率与后果严重度，优先排序待处理事项。决策树模型生成最优检修方案，权衡紧急程度与资源消耗^[2]。

四、智能化维护技术的体系架构与实施路径

（一）总体架构设计原则

系统架构遵循“云-边-端”协同设计理念。终端设备负责原始数据采集与初步筛选，边缘计算节点完成

实时分析与本地决策，云端平台承担全局优化与历史追溯。三层架构通过MQTT协议实现无缝对接，消息队列保证数据传输可靠性。容器化部署技术使应用程序能在异构硬件平台上灵活迁移。微服务架构将功能模块解耦，便于独立升级与扩展。安全防护体系贯穿整个架构，区块链技术用于操作日志存证，零信任模型控制访问权限。

（二）预防性维护策略制定

维护策略分为定时制导与状态制导两种模式。前者依据制造商推荐的日历间隔执行标准化程序，后者根据实时监测结果动态调整任务优先级。混合策略综合两者优势，在日常巡检基础上，对高风险区域加强监控。机会维修窗口的选择考虑航班计划与备件库存情况，采用蒙特卡洛模拟预测最佳时机。维修级别判定参照MSG-3逻辑决断图，区分必改项与可选项目。耗材管理系统跟踪备件使用寿命，自动触发采购流程^[3]。

（三）维修作业流程优化

电子工单系统将检测报告转化为具体操作指令，AR眼镜指导技师准确定位故障点。工具管理系统确保所用设备均经过计量校准，防错装设计避免接插件插反。过程记录仪全程录像，供事后质量追溯。维修后的验证测试包括绝缘电阻测量、导通性检查与功能仿真，确保修复有效性。知识管理系统收集典型案例，形成经验反馈闭环。绩效评价指标涵盖故障复发率、平均修复时间与误报率，持续改进工作流程。

五、系统可行性验证与效能评估方法

（一）实验室模拟验证方案

搭建包含典型故障注入装置的综合试验台，模拟振动、温度循环与电磁干扰环境。对比新旧系统在相同工况下的检测准确率与响应时间，验证算法改进效果。疲劳试验加速老化试样，观察系统对渐进式故障的跟踪能力。电磁兼容性测试考核设备在强干扰下的稳定运行情况。人机交互界面进行可用性测试，记录操作人员完成任务所需时间与错误次数。所有测试均按照DO-160标准执行，确保符合航空电子设备规范。

（二）装机试飞验证要点

选取代表性航线开展跟机测试，重点考察系统在真实飞行剖面下的工作表现。数据采集完整性检查确认无丢帧现象，环境适应性测试验证宽温域工作能力。与机载其他系统的兼容性测试包括电磁干扰抑制与电源负载分配。应急情况下的降级模式测试确保基本功能可用。

飞行员反馈意见纳入用户体验评估，地勤人员参与实际操作培训。试飞结束后进行拆解检查，核对系统报警与实际损伤的一致性。

（三）效能评估指标体系

建立涵盖技术性能、经济收益与安全效益的多维评价体系。技术指标包括故障检出率、虚警率、平均诊断时间和系统可用度。经济指标测算维修成本节约额、停机时间缩减带来的收益以及设备全寿命周期成本。安全指标关注重大故障拦截率、人为差错减少量以及规章符合性。采用层次分析法赋予各项指标权重，加权求和得到综合评分。长期跟踪数据用于验证系统稳定性，定期修订评价准则以适应技术进步^[4]。

结语

本研究围绕飞机电缆智能化检测与维护的技术需求，系统阐述了多元环境载荷的作用机制与影响规律，提出了多模态感知与智能诊断相结合的技术路径，构建了“云-边-端”协同的维护架构与动态优化策略。通过理论分析与方法创新，实现了电缆状态的多维度感知、故障的早期识别与维修策略的精准制定，显著提升了系统的可靠性与经济性。然而，面临实际应用中强噪声干扰、多机型适配性以及标准缺失等挑战，仍需进一步深化多物理场耦合建模方法、轻量化边缘智能算法与跨平台数据协议研究。未来应推进产学研用协同攻关，完善技术标准体系，加强实验验证与工程示范，促进智能化技术在实际运维中的规模化应用，为航空装备的安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 闫静, 张忆鑫, 孙大竞, 等. 飞机整机电缆检测智能辅助关键技术研究[J]. 航空计算技术, 2025, 55(03): 93-97.
- [2] 方铭章, 王学峰, 余子彬, 等. 基于人工智能的电缆附件制作关键工艺质量检测技术研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(S2): 68-70.
- [3] 赵金澄, 张松, 王盼. 飞机同轴电缆的故障诊断与维护策略研究[J]. 中国战略新兴产业, 2024, (02): 97-99.
- [4] 李海亮, 蔡景, 康婷玮. 航空电缆故障的可视化智能检测仪设计研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 770-775.