

飞机电子电器设备维修中的机电一体化技术实践与探索

闫振雷

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120055

摘 要： 机电一体化技术在飞机电子电器设备维修领域应用广泛，涵盖传感检测、自动控制等模块，有伺服控制等多种类型。在电子组件检测、接触器烧蚀故障维修等方面实践成果显著，同时在嵌入式系统开发、新型传感技术应用等多个方面展开探索，提升了维修效率与质量，未来应向智能诊断、多学科融合及数智化转型发展。

关 键 词： 机电一体化技术；飞机电子电器设备维修；智能诊断

Practice and Exploration of Mechatronics Technology in Aircraft Electronic and Electrical Equipment Maintenance

Yan Zhenlei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Mechatronics technology is widely used in the field of aircraft electronic and electrical equipment maintenance, covering modules such as sensing and detection, automatic control, and various types such as servo control. Significant practical achievements have been made in electronic component detection, contactor ablation fault maintenance, and exploration has been carried out in multiple aspects such as embedded system development and new sensing technology applications, which have improved maintenance efficiency and quality. In the future, there should be a shift towards intelligent diagnosis, interdisciplinary integration, and digital transformation.

Keywords： mechatronics integration technology; aircraft electronic and electrical equipment maintenance; intelligent diagnosis

引言

随着航空事业的不断发展，飞机电子电器设备维修的重要性日益凸显。2022 年颁布的《“十四五”航空工业发展规划》着重强调推动航空技术创新与应用。机电一体化技术融合多学科知识，在飞机电子电器设备维修中发挥关键作用，从传感检测到智能诊断，从嵌入式系统开发到新型传感技术应用等多方面，全面提升维修效率与质量。其应用既顺应政策导向，又符合航空维修智能化、高效化发展趋势，对保障飞行安全、推动航空维修领域技术升级具有重要意义。

一、机电一体化技术概述

（一）技术基本原理

机电一体化技术融合了机械技术、电子技术、信息技术、自动控制技术等多种学科，其核心在于各模块的协同集成。传感检测模块通过各类传感器，如温度传感器、压力传感器等，实时采集飞机电子电器设备的运行状态数据，精准获取设备的工作参数^[1]。信息处理模块接收传感检测模块传来的数据，运用计算机技术与算法，对这些数据进行分析、运算和处理，以判定设备是否处于正常运行状态。自动控制模块依据信息处理模块的分析结果，自动调整设备的运行参数，实现对飞机电子电器设备的精确控制。在航空领域，这种技术延展性体现在能适应飞机复杂、严苛的运行环境，为飞机电子电器设备的稳定、高效运行提供可靠

保障，确保飞行安全。

（二）航空维修技术分类

在飞机电子电器设备维修领域，机电一体化技术涵盖多种类型，有着明确的分类标准。伺服控制系统是其中重要的一类，它通过对机械运动的精准控制，利用电气信号来调节机械部件的运转，如飞机发动机燃油供给的伺服控制，确保燃油供应精准匹配发动机不同工况需求。线传操控系统同样关键，其以电信号取代传统机械连杆传递操控指令，提升飞机操控的灵敏性与稳定性，在现代先进战机和大型客机上广泛应用。此外，还有诸如飞行数据记录与处理系统等，将电子数据处理与机械存储装置结合，实现飞行关键数据的可靠记录与快速提取。这些机电一体化技术类型共同构成飞机电子电器设备维修的技术体系，各有独特功能与应用场景，共同保障飞机的安全可靠运行^[2]。

二、航空维修实践案例研究

（一）电子组件检测应用

在飞机电子电器设备维修中，机电一体化技术在电子组件检测应用方面有着重要实践。以飞行控制系统作动器单元为例，机电一体化在线监测技术能精准对故障进行定位。通过对关键参数的实时监测，其参数监测精度指标可满足飞行安全要求。比如在某次实际诊断中，该技术凭借高精度的参数监测，快速捕捉到作动器单元某部件的异常参数变化，进而准确判断出故障位置，为维修人员及时采取维修措施提供了有力支持。这种基于机电一体化的在线监测技术，改变了传统人工检测可能存在的误差大、效率低等问题，大大提升了电子组件检测的准确性和故障定位效率，为飞机的安全稳定运行保驾护航^[3]。

（二）电器系统维修案例

以飞机电源分配系统为例，在其接触器烧蚀故障维修中，智能诊断装置发挥着关键作用。维修人员利用机电一体化技术对故障进行深入分析。借助多物理场耦合分析过程，该智能诊断装置能够综合考虑电磁、热、机械等多种物理场的相互作用^[4]。比如，在接触器工作时，电磁力使触头闭合，但同时电流通过会产生热量，过高热量可能导致触头烧蚀，机械振动也会对其产生影响。智能诊断装置通过对这些复杂物理场的耦合分析，精准定位接触器烧蚀故障点，判断烧蚀程度及原因，为维修方案制定提供可靠依据，实现对接触器烧蚀故障的高效、准确诊断与维修，确保飞机电源分配系统的稳定运行，保障飞行安全。

三、关键技术优化策略

（一）维护技术升级路径

1. 嵌入式系统开发

在飞机电子电器设备维修里，嵌入式系统开发对机电一体化技术的有效实践意义重大。研究 FPGA 芯片于机电控制单元的集成应用时，为确保系统在航空复杂环境下稳定运行，需构建适应航空环境的系统冗余架构。具体而言，借助 FPGA 芯片灵活的可编程特性，优化硬件逻辑设计，实现对机电设备精准高效控制。同时，在嵌入式系统开发中，依据航空环境的振动、温度、电磁干扰等特殊要求，对系统进行冗余架构设计^[5]。这不仅要考虑硬件层面的冗余备份，如关键模块的双备份设计，还需在软件方面构建容错机制，以便在某一模块出现故障时，系统能快速切换至备份模块，持续稳定运行，从而提升飞机电子电器设备维修中机电一体化技术的可靠性与稳定性。

2. 新型传感技术应用

在飞机电子电器设备维修中，新型传感技术应用至关重要。探索光纤传感器在发动机线束检测中的实施路径意义重大。光纤传感器凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀等特性，能有效检测发动机线束的微小变形与温度变化。通过合理布置光纤传感器于发动机线束关键部位，实时采集数据。同时，建立振动信号与电气参数的关联分析模型^[6]，借助先进的数据处理算法，深入挖掘振动信号

与电气参数间隐藏的关系。当发动机振动异常时，该模型可依据关联关系迅速判断是否对电气参数产生影响，进而精准定位故障隐患，提升飞机电子电器设备维修的准确性与效率，为飞机安全稳定运行提供有力保障。

（二）维护流程再造

1. 智能诊断系统构建

在飞机电子电器设备维修的智能诊断系统构建中，设计基于设备树模型的故障定位算法，此算法以设备树模型为基础，将飞机电子电器设备的结构层次化呈现，能精准定位故障所在位置，大大提高故障排查效率。同时，开发具备自学习能力的专家系统模块^[7]。该模块借助机器学习等技术，可对过往维修案例和实时监测数据进行深度分析，不断丰富自身知识库，以适应复杂多变的飞机电子电器设备故障情况。通过这两个关键部分的构建，实现智能诊断系统对飞机电子电器设备故障的高效、精准诊断，优化维修流程，提升维修工作的整体质量和效率，为飞机电子电器设备的稳定运行提供有力保障。

2. 预防性维护体系

在飞机电子电器设备维修的预防性维护体系中，构建基于 PHM 理论的剩余寿命预测模型与制定关键部件的状态维修决策阈值是关键。通过 PHM 理论收集设备运行的各类数据，如温度、振动、电流等^[8]，借助数据分析与建模技术，精确预测关键部件的剩余寿命，为提前维护提供依据。同时，基于对部件性能、运行环境及历史故障数据的深入分析，制定科学合理的状态维修决策阈值。当监测数据接近或达到该阈值时，及时安排维护工作，既能避免过度维护造成的资源浪费，又能防止因维护不及时导致故障发生，有效提升飞机电子电器设备的可靠性与安全性，确保飞行任务的顺利进行。

四、技术融合创新探索

（一）数字化技术融合

1. 数字孪生技术应用

在飞机电子电器设备维修中，数字孪生技术的应用具有重要意义。通过构建飞机配电系统的数字孪生模型，能够对其运行状态进行精确模拟与实时监测。此模型可复现配电系统的各种工况，将实际物理系统的信息映射到虚拟空间，维修人员借助该虚拟调试平台，可对维修方案开展事前验证。例如，模拟不同故障场景下维修方案的实施过程，依据虚拟环境中的反馈数据，精准分析维修方案的可行性与潜在问题。从而提前优化维修方案，有效减少实际维修过程中的失误与时间消耗，提高维修效率与质量^[9]。同时，数字孪生技术也为维修人员提供了一个沉浸式学习与培训的环境，使其能更好地熟悉配电系统结构与维修流程。

2. 增强现实辅助系统

在飞机电子电器设备维修中，增强现实辅助系统通过构建基于 SLAM 技术的 AR 维修指引系统，为维修工作带来革新。SLAM 技术能够实时定位与地图构建，让维修人员精准掌握设备位置与空间信息。在此基础上，研究环境感知算法在复杂工况下

的适应能力至关重要。飞机维修环境复杂，光线、噪声等因素多变，这要求环境感知算法能准确识别设备部件、故障标识等。借助该算法，增强现实辅助系统可将虚拟维修信息精准叠加在真实设备上，如故障位置标注、维修步骤演示等，帮助维修人员快速理解维修流程，提升维修效率与准确性^[10]。

（二）智能化设备研发

1. 多功能检测装备

在飞机电子电器设备维修领域，多功能检测装备的智能化研发至关重要。研制具备航电总线解析功能的便携式测试装置，整合 1553B 和 ARINC429 协议栈，这一创新极大提升了检测的效率与精准度。1553B 协议广泛应用于航空电子系统，数据传输稳定可靠；ARINC429 协议则以其灵活性在飞机通信等方面发挥重要作用。将两者协议栈整合于便携式测试装置，该装置能快速准确解析不同类型航电总线数据，维修人员可借此迅速定位飞机电子电器设备故障点，为维修工作提供有力数据支持，大大缩短维修时间，提高飞机整体维护水平，有效保障飞机电子电器设备稳定运行。

2. 自主维护机器人

在飞机电子电器设备维修中，自主维护机器人的研发意义重大。开发适用于电子舱环境的蛇形机械臂系统，是实现自主维护的关键一步。这种蛇形机械臂系统需能灵活穿梭于电子舱复杂的结构之中，以抵达各个待维修设备处。同时，研究受限空间内的路径规划算法也必不可少。该算法要充分考虑电子舱内空间狭窄、设备布局紧凑等特点，使机械臂能精准避开障碍物，快速且安全地到达目标位置进行维修操作。通过蛇形机械臂系统与路径规划算法的有机结合，可有效提高飞机电子电器设备维修的自动化与智能化水平，降低人工维修的难度与风险，为飞机的安全稳定运行提供有力保障。

（三）大数据技术应用

1. 维修知识库建设

在飞机电子电器设备维修中，维修知识库建设对提升维修效率与质量至关重要。基于 Ontology 构建维修案例推理系统，能

有效建立失效模式与处理方案的映射关系。通过对大量飞机电子电器设备维修数据的收集、整理与分析，将各类失效模式详细分类，利用大数据技术挖掘其中潜在联系，精准匹配相应处理方案。以 Ontology 为基础，对知识进行语义描述和结构化表示，使知识更具逻辑性和关联性，便于维修人员快速检索与利用。维修知识库就像一个强大的“智囊库”，当遇到新的维修问题时，可依据相似失效模式从库中迅速获取处理思路，为维修决策提供有力支持，促进维修工作的高效开展。

2. 预测分析模型优化

在飞机电子电器设备维修中，预测分析模型的优化至关重要。应用 LSTM 神经网络算法处理时序维修数据，能够有效提升设备状态预测准确率。LSTM 神经网络具有长短期记忆特性，可处理维修数据中的时间序列信息，捕捉设备运行状态随时间变化的规律。通过该算法，深入挖掘数据间的潜在联系，准确判断设备可能出现故障的时间与类型。在训练过程中，对参数进行精细调整，使模型更好地拟合维修数据特征。相较于传统预测模型，LSTM 神经网络算法大大提高了预测的准确性，为维修人员提前规划维修策略、准备维修资源提供有力支持，有效降低设备故障带来的风险，提升飞机电子电器设备维修的整体效率与质量。

五、总结

机电一体化技术在飞机电子电器设备维修中的应用成效显著，不仅提高了维修效率与质量，还降低了人力成本与维修误差。从发展方向来看，提升智能诊断精度是关键，通过引入更先进的算法与传感器技术，让诊断结果更精准可靠。多学科交叉融合也是重要趋势，融合机械、电子、计算机等多学科知识，为维修工作提供更全面、创新的解决方案。数智化转型对于航空维修体系意义重大，它将带来全新的管理模式与维修流程，革新传统维修理念。未来，应不断深化机电一体化技术在飞机电子电器设备维修中的实践，推动航空维修领域持续向智能化、高效化迈进，以适应日益发展的航空事业需求。

参考文献

- [1] 韦佑武.《飞机电气基础维修手册》英汉翻译实践报告[D].东北电力大学,2023.
- [2] 李奕霖.机理与数据协同的机电设备智能诊断方法研究[D].中国石油大学(北京),2022.
- [3] 潘加爽.飞机电子设备舱通风冷却系统研究与优化[D].江苏科技大学,2023.
- [4] 李征鸿.飞机机电系统综合控制管理技术研究[D].南京理工大学,2021.
- [5] 张兴昊.飞机空调系统故障诊断与维修管理[D].中国民航大学,2023.
- [6] 刘娟桂.机电一体化技术在智能制造中的实践探索[J].信息记录材料,2021,22(6):98-99.
- [7] 张谊.机电一体化技术在智能制造中的实践运用[J].中国设备工程,2023(20):26-28.
- [8] 霍英杰,方周泉.机电一体化技术在智能制造中的实践运用[J].佳木斯职业学院学报,2021,37(9):35-36.
- [9] 高露.机电一体化技术在智能制造中的实践运用[J].电子测试,2022(8):134-135,17.
- [10] 李军.机电一体化技术在煤矿生产中的实践探析[J].内蒙古煤炭经济,2021(8):55-56.