

航空电子系统故障管理研究

邱爱勇

北京飞机维修工程有限公司 北京 100000

摘要：航空电子系统是航空器核心功能保障的关键，其故障管理对飞行安全至关重要。传统故障处理方式受系统复杂度提升影响，在应对故障传播性、诊断精准度等方面存在局限，新型管理体系虽有发展但面临理论与技术融合不足等问题。本文分析故障检测诊断隔离恢复机制及多源信息融合、智能诊断预测等关键技术特性，提出全生命周期管理、性能评估优化、人机协同等策略，为航空电子系统故障管理的高效化与可靠化提供参考。

关键词：航空电子；系统故障管理；关键技术；优化策略

引言：航空电子系统是航空器核心功能实现的关键，其高集成性、实时性与可靠性要求使其故障管理成为保障飞行安全重中之重。随着系统复杂度提升，传统故障处理方式难以应对突发性、传播性故障挑战。当前，故障误报漏报、诊断精度不足、恢复响应滞后等问题凸显，严重威胁航空器运行安全。因此，深入研究故障管理基础理论，构建高效核心机制，突破关键技术瓶颈，优化管理策略，对提升航空电子系统故障处置能力、降低安全风险、保障任务顺利执行具有迫切的现实意义与工程价值。

1 航空电子系统故障管理基础理论

1.1 航空电子系统的组成与特性

航空电子系统是航空器实现飞行控制、导航通信、任务执行等心功能的关键技术体系，其组成具有高度集成性与复杂性。从功能模块划分，主要涵盖飞行控制系统、导航系统、通信系统、任务计算机系统、传感器系统及显示控制系统等。各模块通过数据总线实现信息交互与协同工作，形成一个有机整体。该系统的特性主要体现在三个方面：一是实时性，需在毫秒级时间内完成数据采集、处理与指令下发，以保障航空器对外部环境变化的快速响应；二是高可靠性，作为航空器安全运行的重要保障，系统需在复杂的电磁环境、温度波动及振动条件下持续稳定工作；三是冗余性，为降低单点故障风险，关键模块通常采用多套设备备份设计，通过故障检测与切换机制提升系统容错能力。

1.2 故障的定义、分类与特性

故障是指航空电子系统或其组成部分在运行过程中，偏离预定设计功能或性能指标的异常状态。从不同维度可对故障进行分类：按故障发生的性质，可分为突发性故障与渐进性故障，前者无明显前兆突然发生，后者则随使用时间推移性能逐渐劣化；按故障影响范围，

可分为局部故障与全局故障，局部故障仅影响单个模块功能，全局故障则可能导致整个系统瘫痪；按故障是否可恢复，可分为永久性故障与暂时性故障，永久性故障需通过更换部件修复，暂时性故障可通过重启或调整参数恢复。故障的特性主要包括随机性、层次性与传播性，随机性体现在故障发生的时间与位置难以精确预测，层次性表现为系统故障可能由底层部件故障引发，传播性则指某一模块的故障可能通过数据交互影响其他关联模块的正常工作^[1]。

1.3 故障管理的核心目标与原则

故障管理的核心目标是保障航空电子系统的持续安全运行，最小化故障对航空器任务执行的影响，具体包括三个层面：一是快速检测故障，及时发现系统的异常状态；二是准确诊断故障，定位故障发生的模块与原因；三是有效处理故障，采取合理措施恢复系统功能或隔离故障区域。故障管理需遵循以下原则：一是及时性原则，故障检测与处理需在最短时间内完成，避免故障扩大化；二是准确性原则，精准的故障诊断是后续处理措施有效性的前提；三是容错性原则，在故障处理过程中，需确保系统维持基本的安全功能；四是预防性原则，通过定期维护、性能监测与趋势分析，提前识别潜在故障风险，降低故障发生概率。这些目标与原则共同构成了航空电子系统故障管理的基本框架，为系统的可靠运行提供了理论指导。

2 航空电子系统故障管理核心机制

2.1 故障检测机制

故障检测机制是故障管理的首要环节，通过多维度监测手段实现对系统异常的快速识别。其核心技术路径包括内置测试（BIT）与冗余比对监测：BIT技术通过硬件自检电路与软件诊断程序，实时采集模块工作参数并与预设阈值比对，实现对组件级故障的原位检测；冗

余比对则利用系统的多套备份设备,对关键参数(如传感器数据、控制指令)进行交叉验证,通过偏差分析捕捉微小异常。此外,基于模型的检测方法通过建立系统正常运行的数学模型,将实际输出与模型预测值进行残差分析,可有效识别渐进性故障与隐性异常,三种检测方式协同作用,形成覆盖不同故障类型的立体化检测网络,确保故障发现的及时性与全面性。

2.2 故障诊断机制

故障诊断机制聚焦于精准定位故障源,其实现依赖知识驱动与数据驱动的融合架构。知识驱动方法将领域先验知识(如故障树、设备拓扑关系)转化为结构化规则库,通过逻辑推理匹配故障现象与成因;数据驱动方法则利用机器学习算法,从历史运行数据中挖掘故障特征模式,尤其在复杂工况下展现出较强的泛化能力。当前主流趋势是构建混合智能诊断模型,将物理机理(如系统动力学方程)嵌入深度学习框架,通过定制化网络层引导模型学习物理一致性特征,同时结合知识图谱与图神经网络,使模型理解组件间故障传播关系,提升对复合故障与小样本故障的诊断精度,实现从“现象识别”到“原因定位”的深度解析^[2]。

2.3 故障隔离与恢复机制

故障隔离与恢复机制是保障系统连续性的关键,通过分层处理策略实现故障影响的最小化。隔离环节采用硬件与软件协同手段,硬件层面通过总线隔离开关切断故障模块的数据交互通道,软件层面则利用任务调度算法暂停故障模块关联进程;恢复机制则依据故障类型分级实施,对暂时性故障采用热重启、参数重置等快速恢复策略,对永久性故障启动冗余切换,将备份设备无缝接入系统并加载正常配置参数。恢复过程中需遵循优先级原则,优先保障飞行控制、导航等安全关键功能的恢复,同时通过状态同步技术确保系统恢复后的运行一致性,形成“隔离-恢复-校验”的闭环处理流程,最大限度降低故障对航空器任务执行的干扰。

3 航空电子系统故障管理关键技术

3.1 多源信息融合技术

多源信息融合技术是航空电子故障管理的“感知基石”,其核心原理在于通过对来自不同传感器、子系统及外部环境的异构数据进行分层处理,实现信息的互补与优化,从而提升故障感知的准确性与全面性。航空电子系统运行过程中会产生海量数据,包括设备运行参数(如电压、电流、温度)、通信链路信号、操作指令反馈等,这些数据往往存在噪声干扰、维度差异及时空异步等问题,单一数据源难以完整反映系统状态。该技

术通过数据层、特征层与决策层的三级融合架构,逐步实现信息的提炼与升华。在数据层,对原始数据进行降噪、校准与时空对准,消除数据偏差;特征层通过提取数据中的关键特征(如频谱特征、时域特征),实现不同类型数据的标准化表达;决策层则运用概率统计、证据理论等方法对特征信息进行综合推理,输出统一的系统状态评估结果。实践表明,采用多源信息融合技术后,航空电子系统故障检测的误报率可大幅降低,数据整合精度显著提升,能够有效避免单一传感器故障导致的误判,为后续故障诊断提供高质量的数据支撑^[3]。

3.2 智能诊断与预测技术

智能诊断与预测技术是故障管理的“智慧核心”,其突破了传统基于规则的诊断方法局限性,借助人工智能算法实现故障的精准定位与趋势预测。传统诊断方法依赖人工预设的故障模式库,难以应对航空电子系统日益复杂的故障机理,而智能诊断技术通过机器学习、深度学习等算法,让系统具备自主学习与自适应能力,能够从历史故障数据中挖掘潜在规律,实现对未知故障的识别。在诊断环节,深度学习模型(如卷积神经网络、循环神经网络)可对高维非线性的系统数据进行深度分析,精准识别故障特征与故障类型的映射关系,诊断准确率较传统方法明显提升;预测环节则通过寿命预测算法(如剩余寿命回归模型、贝叶斯推理模型),基于实时运行数据与退化规律,提前预测设备剩余使用寿命,将故障管理从“事后维修”转向“事前预测”。相关研究表明,引入智能预测技术后,航空电子系统的计划外维修次数减少50%以上,故障预警提前时间可达数小时至数天,为维护人员争取宝贵的处置时间,大幅降低故障造成的损失。

3.3 冗余与容错设计技术

冗余与容错设计技术是故障管理的“最后防线”,其核心思想是通过在系统中设置冗余资源或设计容错机制,确保单一或多重故障发生时,系统仍能维持基本功能或降级运行,避免故障扩散引发灾难性后果。该技术从硬件、软件与信息三个维度构建容错体系,是保障航空电子系统高可靠性的关键手段。硬件冗余通过部署多套相同或异构的硬件模块(如冗余处理器、冗余传感器),实现故障模块的快速切换。比如采用“三取二”表决机制的处理器模块,当其中一套模块发生故障时,通过比较另外两套模块的输出结果确定正确信号,切换时间可控制在毫秒级;软件冗余则通过设计不同算法或编程路径的软件版本,避免单一软件缺陷导致的系统失效;信息冗余通过数据校验码(如循环冗余校验CRC)

对传输与存储的信息进行错误检测与纠正,确保数据完整性^[4]。目前,先进航空电子系统的硬件冗余度可达2-3重,软件容错覆盖率超过99%,系统平均无故障工作时间(MTBF)提升至10万小时以上,为航空器的持续安全飞行提供了坚实保障。

4 航空电子系统故障管理优化策略

4.1 基于全生命周期的故障管理体系构建

基于全生命周期的故障管理体系将系统从设计到退役的各阶段纳入统一管理框架,实现故障风险的全程可控。设计阶段通过故障模式与影响分析(FMEA)提前识别潜在失效点,优化冗余配置与测试性设计,为后续管理奠定硬件基础;制造阶段引入过程质量监测,通过关键参数追溯建立组件健康档案,避免先天缺陷进入服役环节;服役阶段融合故障预测与健康(PHM)技术,利用实时监测数据与退化模型实现剩余寿命预测,推动维护模式从定期维修向视情维修转变;退役阶段则通过故障数据复盘与部件拆解分析,提炼失效规律反哺设计迭代。各阶段通过数据共享平台形成闭环管理,设计参数、制造数据、运行状态与维护记录相互关联,使故障管理从被动响应升级为主动预防,显著提升系统全生命周期可靠性与经济性。

4.2 故障管理系统的性能评估与优化

故障管理系统的性能评估需建立多维度指标体系,涵盖检测及时性、诊断准确性、恢复有效性与资源消耗合理性四大核心维度。其中,检测延迟时间、故障漏检率与误检率量化检测环节效能;诊断定位精度与原因识别准确率衡量诊断能力;恢复时间目标(RTO)与恢复点目标(RPO)评估系统连续性保障水平;硬件冗余成本、软件算力开销则反映资源优化程度。优化过程采用“评估-分析-迭代”的闭环模式:通过故障注入测试与仿真工况验证,定位系统性能瓶颈;针对检测盲区优化传感器布局与算法阈值,结合多源信息融合技术提升异常识别能力;对诊断模型采用迁移学习与在线学习机制,持续更新故障特征库;基于可靠性分配理论均衡冗余资源,在满足安全要求的前提下降低系统复杂度,实现性能与成本的动态平衡^[5]。

4.3 人机协同故障管理模式优化

人机协同故障管理模式通过合理划分人与智能系统的权责边界,实现优势互补。智能系统承担数据密集型任务,如海量运行参数实时监测、复杂故障树自动推理及恢复方案快速生成,提升处理效率与一致性;人类操作员则聚焦决策密集型任务,基于领域经验对智能诊断结果进行验证,在模糊故障场景下制定柔性处理策略,并对系统异常行为进行最终裁决。优化策略包括三方面:一是界面交互优化,采用可视化仪表盘与分级告警机制,将故障信息转化为直观的状态图表与操作指引,降低认知负荷;二是协同决策机制构建,通过专家系统与人类决策的双向反馈,实现智能模型与操作员经验的动态融合;三是培训体系完善,基于故障模拟系统提升操作员与智能系统的协同熟练度,确保在紧急故障场景下形成高效响应闭环,最大化系统故障处理能力。

结束语:航空电子系统故障管理是保障航空器安全的核心环节,需从理论、机制、技术与策略多维度协同发力。本文系统梳理了故障管理的基础框架、核心机制与关键技术,提出的全生命周期管理等优化策略为实践提供了可行路径。未来,随着人工智能与物联网技术的深度融合,故障管理将向智能化、预测性方向持续演进。需进一步加强多模态数据融合、边缘智能诊断等技术研究,不断完善人机协同模式,为航空电子系统构建更高效、可靠的故障安全屏障。

参考文献

- [1]刘琳玲.航空电子系统故障管理研究[J].电子通信与计算机科学,2025,7(8).
- [2]任彬.航空电子系统故障预测及健康管理探究[J].中国航务周刊,2022,(08):65-67.
- [3]游蕊,白雪琪.航空电子通信系统关键技术问题的浅析[J].科技风,2024,(22):65-67.
- [4]金建刚,蔡忠义,连可,等.航空电子系统外场测试性迭代评估方法[J].航空兵器,2024,31(03):137-141.
- [5]邝安玄,马超,王佳明.综合模块化航空电子系统安全分析的模型检测方法[J].电光与控制,2023,30(03):112-115+121.