

航空电子系统故障管理研究

刘琳玲

航宇救生装备有限公司 湖北 襄阳 441003

摘要：航空电子系统作为现代飞行器的核心组成部分，其故障管理直接关乎飞行安全与任务成败。故障检测、诊断、隔离及恢复等技术构成了故障管理的核心体系，为系统稳定运行提供保障。然而，随着系统复杂度攀升、实时性与可靠性要求趋严以及网络安全威胁加剧，传统管理方式面临严峻挑战。为此，需发展智能故障管理技术，强化实时性与可靠性设计，并构建网络安全防护体系，以此提升航空电子系统的故障管理水平与整体性能。

关键词：航空电子系统；故障管理；技术

引言

航空电子系统集成通信、导航、监视等多项关键功能，是保障飞行器安全、高效运行的核心。随着航空技术的飞速发展，系统复杂度与集成度不断提升，对故障管理的要求也日益严苛。故障管理涵盖检测、诊断、隔离与恢复等多环节，直接影响系统可靠性与飞行安全。本文聚焦航空电子系统故障管理技术，深入剖析当前面临的挑战，并针对性提出应对策略，旨在为提升航空电子系统故障管理能力提供理论与实践参考。

1 航空电子系统概述

航空电子系统作为现代航空器的核心组成部分，是高度集成化、智能化的电子设备及软件集合，其性能直接决定飞行器任务效能与飞行安全。该系统涵盖通信、导航、监视、显示控制、飞行管理等多个功能领域，通过复杂的网络架构实现各子系统间的数据交互与协同运作，为飞行员提供实时、准确的飞行信息，并保障航空器与地面控制中心及其他飞行器间的有效联络。从硬件层面看，航空电子系统包含传感器、处理器、数据总线、显示终端等关键组件。各类传感器如大气数据传感器、惯性导航传感器、全球卫星导航接收器等，负责采集飞行器的姿态、速度、位置等关键参数；高性能处理器对传感器输入的海量数据进行实时处理与分析，依据预设算法生成控制指令；数据总线作为系统的关键连接通道，采用ARINC429、ARINC664（AFDX）等标准协议，确保数据在各子系统间高速、可靠传输；显示终端则以多功能显示器、平视显示器（HUD）等形式，将处理后的数据转化为直观的图形化信息，辅助飞行员决策。在软件方面，航空电子系统依托嵌入式操作系统及专用应用软件实现功能逻辑。操作系统需满足高实时性、强可靠性及安全性要求，如符合DO-178C标准的机载软件，通过严格的验证与确认流程，确保在极端环境

下稳定运行。应用软件则涵盖飞行控制算法、导航解算程序、故障诊断模块等，通过优化算法提升系统响应速度与精度，同时具备故障隔离与冗余备份机制，以应对突发异常情况。现代航空电子系统呈现综合化、智能化发展趋势。综合化架构打破传统分立系统界限，通过共享硬件资源与数据平台，实现功能的集中管理与协同控制，显著降低系统重量与成本，提高可靠性。智能化技术的引入，使系统具备自主感知、决策与学习能力，例如基于人工智能的故障预测与健康管理（PHM）系统，可提前识别潜在故障并给出维护建议；智能导航系统能够结合实时气象、空域信息，动态规划最优飞行路径。在军用领域，航空电子系统支撑作战飞机的态势感知、目标探测与精确打击，电子战系统通过干扰、欺骗等手段提升战场生存能力；民用航空中，其确保航班安全、高效运行，先进的自动飞行控制系统可实现从起飞到降落的全流程自动化操作。随着航空技术的持续演进，航空电子系统将进一步融合5G、卫星互联网、量子通信等新兴技术，向着更高集成度、更强智能化方向发展，为未来航空运输与国防建设提供关键技术支撑。

2 航空电子系统故障管理技术

2.1 故障检测技术

（1）基于传感器的故障检测依托多样化传感器实时采集系统运行数据，通过对电流、电压、温度、压力等物理量的连续监测实现异常识别。例如，发动机控制系统中温度传感器持续监测涡轮叶片温度，一旦超出正常阈值范围，系统即刻触发预警信号。该技术依赖传感器的高精度与可靠性，且需建立合理的阈值模型，充分考虑不同工况下参数的波动范围，以避免误报与漏报情况的发生。（2）数据处理与分析算法在故障检测中发挥核心作用。通过傅里叶变换、小波分析等信号处理方法，能够提取信号中的特征信息，有效识别故障信号的

独特模式。机器学习算法中的异常检测模型，如孤立森林、单类支持向量机，可基于历史数据训练模型，自主学习正常运行模式，进而精准检测偏离正常模式的异常行为。此类算法不仅能处理复杂的多维数据，还具备对潜在故障的早期检测能力，为故障处理争取宝贵时间。

(3) 冗余设计是故障检测的重要手段。通过设置多个相同或功能等效的组件，对各组件输出数据进行对比分析，当某个组件数据出现显著差异时，即可判断该组件可能发生故障。例如，飞机的惯性导航系统通常配备多个惯性测量单元，通过交叉校验确保导航数据的准确性，同时实现故障的快速检测。这种方式不依赖复杂算法，在硬件层面提供了可靠的故障检测保障，尤其适用于对实时性要求极高的航空电子系统关键部件^[1]。

2.2 故障诊断技术

(1) 基于模型的故障诊断通过建立航空电子系统的数学模型或物理模型，模拟系统在正常及各种故障状态下的行为。当系统实际运行数据与模型预测结果出现偏差时，依据偏差特征进行故障诊断。例如，在飞机电源系统模型中，输入电压、负载等参数，模型输出预期的电流、功率等结果，若实际测量值与模型输出不符，通过分析偏差的类型和程度，可判断是电源转换模块故障还是线路短路等问题。该方法要求模型能够准确反映系统实际特性，并且需不断优化模型以适应系统的动态变化。(2) 专家系统故障诊断借助领域专家的知识 and 经验构建知识库，结合推理机制实现故障诊断。知识库中存储故障现象、原因及处理方法等知识，当系统检测到故障时，将故障现象与知识库中的规则进行匹配，推理出可能的故障原因。例如，针对航空通信系统的故障，专家系统可根据信号中断、误码率升高等现象，快速定位到天线故障、调制解调器异常等具体原因。该技术依赖专家知识的完整性和准确性，同时需要不断更新知识库以应对新出现的故障类型。(3) 基于人工智能的故障诊断利用深度学习、神经网络等人工智能技术处理海量故障数据。卷积神经网络(CNN)可对故障信号图像化处理后的特征进行自动提取与识别，循环神经网络(RNN)及其变体LSTM、GRU等能够有效处理时序数据，学习故障发展的动态规律。例如，在航空发动机振动故障诊断中，通过长期采集的振动数据训练神经网络模型，模型可从复杂的振动信号中识别出不平衡、不对中、轴承磨损等不同故障类型及其严重程度，相比传统方法具有更高的诊断精度和自适应能力。

2.3 故障隔离技术

(1) 物理隔离方法通过设置机械开关、继电器等硬

件装置，在检测到故障时迅速切断故障部件与系统其他部分的物理连接。在航空电子系统的供电网络中，当某条线路出现短路故障时，保护继电器立即动作，隔离故障线路，防止故障蔓延至整个供电系统，保障其他关键设备的正常供电。这种方式操作简单、响应迅速，但需要合理规划系统的物理架构，确保隔离操作不会影响系统核心功能的运行。(2) 软件隔离技术基于操作系统和软件程序实现故障隔离。采用进程隔离、内存隔离等机制，当某个软件模块出现故障时，限制其对其他模块的影响范围。在航空电子综合处理系统中，不同功能的软件模块运行在独立的进程空间内，每个进程拥有独立的内存区域，若某个模块因程序错误崩溃，不会导致整个系统瘫痪，其他模块仍能继续正常工作。通过软件看门狗等机制监测软件运行状态，及时发现并隔离异常进程。(3) 分层隔离策略将航空电子系统划分为多个层次结构，从系统级、子系统级到模块级进行故障隔离。当系统级检测到故障后，首先定位到故障所在的子系统，然后在子系统内部进一步隔离故障模块。例如，在航空电子通信系统中，分为天线子系统、射频子系统、基带处理子系统等，若通信质量下降，先判断是哪个子系统出现问题，再在该子系统中确定具体故障模块，通过分层隔离，缩小故障排查范围，提高故障处理效率，同时减少对正常运行部分的影响^[2]。

2.4 故障恢复技术

(1) 硬件冗余切换恢复利用预先配置的冗余硬件组件，在故障发生后自动切换至备用组件维持系统运行。在航空自动驾驶系统中，通常配备多个飞行控制计算机，当主计算机出现故障时，系统监测到故障信号后，通过快速切换电路将控制权转移到备用计算机，确保自动驾驶功能不受影响。该过程要求切换时间极短，且备用组件需处于热备状态，时刻保持与主组件的同步运行，以保证系统无缝切换，不影响飞行安全。(2) 软件重构恢复通过重新配置软件参数、加载备份程序或调整软件运行逻辑实现故障恢复。在航空电子显示系统中，若显示软件出现图形渲染错误，系统可自动加载备份的显示驱动程序，或调整渲染算法参数，恢复正常显示功能。软件还可通过动态更新技术，在运行过程中修复部分软件缺陷，实现故障的自我修复，提高系统的可靠性和稳定性。(3) 系统重新初始化与恢复当系统出现严重故障导致整体运行紊乱时，采用系统重新初始化的方式恢复。先保存系统关键数据和运行状态，然后按照预定程序对系统进行初始化操作，加载正确的配置文件和程序代码，使系统恢复到正常运行的初始状态。例如，航

空电子数据处理系统在遭遇数据冲突导致崩溃后,通过重新初始化,清除错误数据,重新建立数据处理流程,结合备份数据的恢复,使系统能够继续正常处理各类航空电子数据,保障系统的持续有效运行。

3 航空电子系统故障管理面临的挑战与应对策略

3.1 面临的挑战

3.1.1 系统复杂度与集成度不断增加

现代航空电子系统已从单一功能模块独立运作模式,演变为高度集成化、模块化的综合系统。飞机上的通信、导航、监视、飞控等子系统相互交织,数据交互频繁且复杂。以新一代宽体客机为例,其航空电子系统包含数百个传感器、数十个处理单元以及数千条数据传输链路,不同厂商提供的设备在协议、接口、数据格式上存在差异,这无疑增加了系统的设计、开发与维护难度。当系统中某一组件出现故障时,不仅可能引发连锁反应,导致其他关联组件异常,而且故障的定位与隔离也变得极为困难。因为复杂的信号交互与数据耦合,使得故障现象与根源之间的映射关系不再简单直观,传统的故障诊断方法难以快速准确地识别故障点,给故障管理带来巨大挑战。航空电子系统还需要不断融入新的功能与技术,如先进的航电架构、智能化的人机交互界面等。每一次功能升级与技术融合,都意味着系统复杂度的进一步提升。新加入的模块需要与原有系统无缝集成,确保数据传输的完整性与兼容性,同时还要考虑对系统整体性能的影响。这种持续增长的复杂度和集成度,使得故障管理难以做到全面覆盖和有效控制,任何一个环节的疏漏都可能成为影响系统安全运行的隐患。

3.1.2 实时性与可靠性要求极高

航空飞行过程中,航空电子系统必须时刻保持稳定运行,对实时性和可靠性的要求达到近乎苛刻的程度。在飞行的各个阶段,从起飞、巡航到降落,系统需要实时采集、处理和传输大量数据,为飞行员提供准确及时的决策信息。例如,飞行控制系统需要实时获取飞机的姿态、速度、高度等参数,并在极短时间内进行计算和调整,以确保飞机的飞行安全与稳定。一旦系统出现数据延迟或处理失效,哪怕只是毫秒级的误差,都可能导致飞行姿态失控,引发严重的飞行事故。可靠性方面,航空电子系统的任何故障都可能带来灾难性后果。在高空环境下,系统无法像地面设备那样进行及时维修与更换,因此必须具备极高的容错能力和故障冗余设计。即使部分组件出现故障,系统也需要能够迅速切换到备用模式,保证关键功能的正常运行。然而,要实现这一目标并不容易,因为增加冗余设计不仅会提高系统的成本

和重量,还会进一步增加系统的复杂度,从而对故障管理提出更高要求。随着飞机服役时间的增长,电子元件的老化、环境因素的影响等,都会降低系统的可靠性,如何在复杂多变的条件下维持系统的高可靠性运行,成为故障管理面临的重要难题^[3]。

3.1.3 网络安全威胁日益严峻

随着航空电子系统的网络化和信息化程度不断提高,其面临的网络安全威胁也与日俱增。现代飞机通过各种网络实现内部系统之间以及与地面控制中心的通信,这些网络在带来便捷高效数据传输的同时,也为黑客攻击提供了潜在入口。恶意攻击者可以利用系统漏洞,入侵航空电子网络,篡改飞行数据、干扰通信信号、破坏导航信息,从而对飞行安全造成严重威胁。例如,通过植入恶意软件,攻击者可能控制飞机的自动驾驶系统,改变飞行轨迹;或者干扰通信链路,切断飞机与地面的联系,导致飞机陷入孤立无援的危险境地。航空电子系统的网络安全威胁具有隐蔽性和突发性特点。攻击者可能长时间潜伏在系统中,收集敏感信息,等待合适时机发动攻击,使得故障管理难以提前察觉威胁。一旦攻击发生,由于系统的实时性要求,故障管理需要在极短时间内做出响应,准确识别攻击类型并采取有效防护措施,否则后果不堪设想。航空电子系统的网络安全防护还面临着技术更新迭代快、安全标准难以统一等问题,进一步加剧了故障管理在应对网络安全威胁方面的难度。

3.2 应对策略

3.2.1 发展智能故障管理技术

为应对航空电子系统日益增长的复杂度,发展智能故障管理技术成为必然趋势。人工智能与机器学习算法在故障诊断和预测领域展现出巨大潜力。通过对海量历史故障数据和系统运行数据的学习分析,智能算法能够挖掘出数据背后的潜在规律,建立精准的故障模型。例如,利用深度学习中的神经网络算法,可以自动识别系统运行状态中的异常模式,即使是复杂隐蔽的故障也能被及时检测出来。这些智能算法还具备自我学习和优化能力,随着新数据的不断积累,其故障诊断和预测的准确性会不断提高。智能故障管理技术还可以实现故障的自主决策与处理。当检测到故障时,智能系统能够基于预先设定的规则和学习到的经验,迅速制定出最优的故障解决方案,自动执行故障隔离、切换备用组件等操作,减少人工干预的时间和误差。借助大数据分析技术,智能故障管理系统可以对整个航空电子系统进行实时健康监测,提前预测潜在故障,在故障发生前采取预

防性维护措施,将故障风险降至最低,有效提高系统的可用性和可靠性。

3.2.2 加强实时性与可靠性设计

为满足航空电子系统对实时性和可靠性的极高要求,在系统设计阶段就需要加强相关设计。在实时性方面,采用高速数据处理架构和优化的数据传输协议至关重要。例如,使用多核处理器和并行计算技术,能够大幅提升系统的数据处理速度,确保在短时间内完成大量数据的采集、分析和处理。优化网络通信协议,减少数据传输延迟和丢包率,保证数据能够准确及时地在各个组件之间传输。可以通过时间触发机制和优先级调度策略,对关键数据和任务进行优先处理,确保飞行关键功能的实时性要求得到满足。在可靠性设计上,采用冗余设计和容错技术是关键手段。通过设置多个功能相同的组件,当主用组件出现故障时,备用组件能够立即无缝切换,接替其工作,保证系统功能不间断。引入容错算法和错误检测与纠正技术,对数据传输和处理过程中出现的错误进行及时检测和修复,提高系统的抗干扰能力和容错能力。需要加强对电子元件的筛选和测试,选择高可靠性的器件,并对系统进行严格的环境适应性测试,确保系统在各种恶劣环境条件下都能稳定可靠运行,从而有效提升航空电子系统的整体可靠性。

3.2.3 构建网络安全防护体系

针对日益严峻的网络安全威胁,构建全面的航空电子系统网络安全防护体系势在必行。从系统架构层面,采用分层隔离的网络设计,将不同功能和安全级别的子系统进行物理或逻辑隔离,限制网络攻击的传播范围。例如,将飞行控制网络与客舱娱乐网络分开,即使客舱网络遭到攻击,也不会影响到飞行关键系统的安全。加

强网络边界防护,部署防火墙、入侵检测与防御系统等安全设备,实时监测和拦截非法访问与恶意攻击。在数据安全方面,采用先进的数据加密技术,对传输和存储的数据进行加密处理,确保数据的机密性和完整性。即使数据被窃取,攻击者也无法获取其真实内容。建立严格的用户认证和访问控制机制,只有经过授权的用户和设备才能访问系统资源,防止非法用户的入侵和越权操作。还需要定期对系统进行安全漏洞扫描和评估,及时发现并修复潜在的安全隐患,同时不断更新和升级安全防护技术,以应对不断变化的网络安全威胁,为航空电子系统的安全运行提供坚实保障^[4]。

结语

综上所述,航空电子系统故障管理是保障飞行器安全运行的关键环节。在系统复杂度持续增加、实时性与可靠性要求极高以及网络安全威胁严峻的背景下,故障检测、诊断、隔离与恢复等技术的研究与应用至关重要。通过发展智能故障管理技术、加强实时性与可靠性设计以及构建网络安全防护体系,能够有效提升系统故障管理水平。未来,需持续深化相关研究,以适应航空技术不断发展的需求。

参考文献

- [1]段海军,张峰.航空电子系统平台故障诊断技术的研究[J].航空计算技术,2022,52(3):100-104.
- [2]王博,张竞凯,颜瑾.基于有向图模型的民机航空电子系统故障诊断[J].航空电子技术,2021,52(3):9-15.
- [3]姜鹏.航空电子设备故障分析及维修[J].中国科技纵横,2024(21):68-70.
- [4]王志强.航空电子系统的安全性诊断技术探讨[J].南方农机,2023,54(7):156-158.