

Research on Fault Diagnosis and Prediction Technology of Flight Control Electronic Equipment

Bingke Qiao Yanrong Jia Peiyi Liu

Shijiazhuang Haishan Aviation Electronic Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050208, China

Abstract

As the information processing and instruction execution core of the aircraft control system, the operational reliability of flight control electronic devices directly determines the level of flight safety and the ability to complete system tasks. With the development of aircraft towards high integration, high autonomy, and complex mission environments, flight control electronic equipment exhibits diverse failure mechanisms, hidden evolution processes, and amplified failure consequences under long-term service and complex operating conditions. The traditional fault handling mode based on post detection is no longer able to meet engineering needs. The results of this study indicate that the prediction method that integrates multi-source monitoring information and intelligent algorithms can effectively improve the foresight and diagnostic accuracy of fault identification, providing technical support for the safe operation and maintenance decision-making of flight control systems.

Keywords

flight control system; electronic devices; fault diagnosis; status monitoring; fault prediction

飞行控制电子设备故障诊断与预测技术研究

乔兵克 贾彦荣 刘培懿

石家庄海山航空电子科技有限公司, 中国·河北 石家庄 050208

摘要

飞行控制电子设备作为飞行器控制系统的信息处理与指令执行核心, 其运行可靠性直接决定飞行安全水平与系统任务完成能力。随着飞行器向高集成度、高自主性和复杂任务环境方向发展, 飞行控制电子设备在长期服役与复杂工况下呈现出故障机理多样化、演化过程隐蔽化和失效后果放大化等特征, 传统以事后检测为主的故障处理模式已难以满足工程需求。本研究结果表明, 融合多源监测信息与智能算法的预测方法可有效提升故障识别的前瞻性与诊断准确性, 为飞行控制系统的安全运行与维护决策提供技术支撑。

关键词

飞行控制系统; 电子设备; 故障诊断; 状态监测; 故障预测

1 引言

飞行控制系统是飞行器实现姿态稳定、轨迹跟踪与任务执行的关键技术体系, 其中飞行控制电子设备承担着信号采集、数据处理、控制律计算与执行指令输出等核心功能, 其运行状态直接关系飞行器的安全性与可靠性。近年来, 随着无人机、先进有人机以及高机动飞行平台的快速发展, 飞行控制系统的结构复杂度和功能集成度持续提升, 电子设备内部集成了大量高密度电路、嵌入式处理单元与复杂接口模块, 使其对环境应力、老化效应与瞬态扰动更加敏感。因此, 如何在故障发生前对设备状态进行有效评估, 实现对失效风险的提前预警, 已成为飞行控制系统安全保障领域的重要研究方向。

【作者简介】乔兵克(1987-), 男, 中国河北巨鹿人, 本科, 工程师, 从事飞机飞行控制系统调试和维修研究。

2 飞行控制电子设备故障诊断方法研究

2.1 基于运行信号特征的故障诊断方法

飞行控制电子设备在正常运行状态下, 其电气参数、计算时序及信号输出均呈现出较为稳定的统计特性, 当设备内部元器件性能退化或局部功能异常时, 相关运行信号往往会首先发生细微变化。因此, 基于运行信号特征的故障诊断方法成为飞行控制电子设备状态评估中应用较为成熟的一类技术路径。该方法以设备在役运行过程中采集的电压、电流、温度及时序响应等信号为分析对象, 通过对其时域、频域及统计特征的变化规律进行分析, 实现对异常状态的识别与判定 [1]。

在工程实践中, 飞行控制电子设备通常工作于强电磁干扰和高动态载荷环境中, 其信号特征不仅受设备自身状态影响, 还与外部工况密切相关。因此, 故障诊断过程中需重点关注信号特征随工况变化的相对偏移趋势, 而非单一时刻

的绝对数值。当电子元器件发生老化、电源模块稳定性下降或信号通道接触不良时,设备运行信号往往表现为幅值波动增大、噪声成分增强或特征频率异常等现象。这类变化虽然在早期不一定引起系统功能失效,但其长期累积将显著增加故障风险。为提高诊断结果的可靠性,实际应用中通常对多类信号特征进行联合分析,通过构建多维特征空间,增强对复杂故障模式的辨识能力。同时,引入统计判别与异常检测方法,可在一定程度上抑制随机噪声和短时扰动对诊断结果的干扰。然而,该类方法在面对多故障耦合或隐性退化场景时,仍然存在诊断边界模糊的问题,其结果更多反映的是“是否异常”,而对故障类型与发展阶段的判定能力有限。

2.2 基于模型与数据融合的故障诊断方法

针对单纯信号特征分析在复杂系统中的局限性,近年来逐渐发展出基于模型与数据融合的故障诊断方法。该方法通过引入飞行控制电子设备的功能模型或行为模型,将设备的理论运行状态与实际观测数据进行对比分析,以残差信息或偏差特征作为故障判据,从而提升诊断的针对性与解释能力[2]。

在模型驱动诊断过程中,设备模型用于描述正常工况下各功能模块之间的输入输出关系,当设备内部出现异常时,模型预测结果与实际测量值之间将产生偏差。通过对该偏差随时间演化特征的分析,可有效区分暂态扰动与持续性故障。对于飞行控制电子设备而言,模型可重点围绕信号处理延迟、计算负载变化及电源响应特性等关键行为进行构建,从而降低整体建模复杂度。在融合诊断框架下,模型输出结果可作为数据驱动算法的先验约束或特征输入,而数据分析结果则可用于修正模型参数或优化诊断阈值,从而构建具有自适应能力的故障诊断体系。工程应用表明,该类融合方法在复杂工况与长期运行条件下,能够显著提升飞行控制电子设备故障诊断的稳定性与准确性,为后续故障预测与维护决策奠定可靠基础。

3 飞行控制电子设备故障预测技术研究

3.1 状态监测与健康指标构建

飞行控制电子设备的故障预测技术基于设备的状态监测,目的是通过持续跟踪设备的工作状态,提取与故障演化相关的关键特征,构建设备的健康监测模型,并将这些特征转化为健康指标。健康指标是反映设备工作状态的重要量,它能够揭示设备从正常状态到失效状态的演变趋势,为故障预测提供量化依据[3]。

在飞行控制电子设备中,多个关键参数(如温度、电流、电压、计算延迟等)直接影响设备的健康状态。例如,过高的工作温度可能导致半导体元器件的退化,电流波动过大则可能指示着电源模块的不稳定。通过传感器对这些关键参数的实时监测,可以获得设备的动态状态信息。通过对这些信号的分析,能够有效识别设备是否存在潜在的风险。在设备

运行的不同阶段,其健康状态会表现为不同的动态变化,通常早期阶段的退化过程比较缓慢,信号特征较为微弱,但随着故障的逐步加剧,故障的痕迹变得更加明显。因此,健康监测的精度和预测的准确性在于及时发现这些微弱变化,并能够提前预警。

为了有效评估飞行控制电子设备的健康状态,常见的做法是通过多维度监测数据的融合与综合分析,构建一个能够实时反映设备状态的健康指数。例如,通过对设备温度、功率消耗及工作频率等参数的加权平均或综合计算,得到一个综合健康指标,该指标可以反映设备整体的健康水平。随着设备运行时间的推移,健康指标将显示出逐步退化的趋势,一旦该健康指数超过设定阈值,就可以预警设备即将发生故障。

3.2 基于智能算法的故障预测方法

随着飞行控制电子设备技术的不断进步,越来越多的智能算法被应用于设备故障预测领域。与传统的基于规则或模型的预测方法不同,基于智能算法的故障预测方法具有强大的自学习能力,可以处理复杂的非线性关系,尤其适合于飞行控制电子设备中多元数据和复杂故障模式的识别。

常见的智能算法包括机器学习方法、深度学习方法、支持向量机(SVM)、决策树(DT)、随机森林(RF)等。这些方法能够从大量的历史运行数据中学习潜在的故障特征,自动识别不同工况下设备的健康状态。在这些方法中,深度学习尤为重要,因为它可以从原始信号中自动提取特征,避免了人工特征提取的复杂性。具体来说,深度神经网络(DNN)和卷积神经网络(CNN)在设备故障预测中具有广泛应用。这些模型通过多层非线性变换,能够识别设备运行中微小的、难以察觉的故障前兆。通过对飞行控制电子设备的历史数据进行训练,深度学习模型能够有效捕捉到设备故障前的退化模式,为预测模型提供精确的判断依据。相比传统的诊断方法,智能算法通过自适应的学习过程,能够在数据模式发生变化时及时调整,从而提供更加精确和稳定的预测结果。基于智能算法的故障预测不仅可以应用于设备的单一故障类型预测,还能通过多任务学习对多种故障模式进行联合预测。例如,在飞行控制系统中,电源模块的故障、计算单元的故障以及信号通道的故障往往同时发生。通过智能算法,系统能够根据不同故障模式之间的关联性,进行更为准确的预测。

4 工程应用与技术实现分析

4.1 飞行控制电子设备故障预测在实际工程中的应用

随着飞行控制系统复杂度的不断增加,特别是高性能飞行器的研发与应用,飞行控制电子设备故障预测技术的工程应用显得尤为重要。在实际工程中,飞行控制电子设备故障预测系统通常作为飞行器整体健康管理体系的一部分,与飞行器的其他系统进行深度集成。

在飞行器中，飞行控制系统的健康状态监测和故障预测通常依赖于两大类数据：一类是飞行过程中实时采集的状态监测数据，包括设备运行参数、传感器数据、电源信息等；另一类则是历史数据，包括设备的过往故障记录、维修日志、工况变化记录等。通过实时数据与历史数据的融合，故障预测系统可以对飞行控制电子设备的未来状态进行科学估算，预测设备可能的故障及其发生时间，从而为系统维护提供精准的决策依据。以无人机为例，飞行控制电子设备在无人机飞行中的应用要求极高的可靠性和实时性。通过将健康监测与故障预测技术集成到无人机的控制系统中，可以在飞行过程中持续监测各关键部件的健康状态。当预测到某个组件的性能出现退化并接近故障阈值时，系统会自动发出预警信号，并根据预测结果调整飞行计划，减少飞行器损失。同时，故障预测系统还可与无人机的自动返航系统协同工作，一旦出现设备失效迹象，飞行器可自动选择最安全的路径进行返航或着陆，从而提高飞行安全性。

对于有人驾驶飞行器，飞行控制电子设备故障预测技术同样具有至关重要的作用。通过实时监测飞行控制系统的状态，飞行器能够实现对各关键系统组件的健康评估，并通过故障预测分析，及时调整飞行任务和航路，避免因设备故障造成飞行事故。例如，飞行控制系统中的电源模块可能在长时间高负荷运行后逐渐退化，智能故障预测系统可以通过电压波动、温度变化等信号进行早期预警，并指导维修团队提前进行检修或更换。

4.2 持续优化与未来发展方向

尽管飞行控制电子设备故障预测技术在多个领域取得了显著进展，但在实际应用中仍面临许多挑战，尤其是在预测精度、实时性以及系统集成等方面。目前，飞行控制电子设备故障预测的精度仍受限于数据质量和算法性能。在实际应用中，设备的故障模式和退化过程复杂多变，单一的预测模型难以覆盖所有的故障类型。为此，未来的研究应集中在如何通过多源数据的融合，提升故障预测的精准度。除了传统的电压、电流、温度等数据，未来可以考虑集成更多种类的传感器数据，如振动信号、噪声信号等，以及飞行器操作环境数据，如气象、飞行姿态等。基于数据融合的技术可以将来自不同传感器、设备及飞行环境的数据进行联合分析，形成更为全面的设备健康状态评估。通过多模态数据的互补性，可以有效减少单一数据源可能带来的误差，提升故

障预测的准确性和可靠性。

飞行器的实时性要求对故障预测系统提出了极高的要求。尤其在高速飞行器或无人机的控制系统中，预测模型需要能够实时运行，并根据飞行器的实时状态变化调整预测结果。为此，未来的故障预测系统需要结合边缘计算与云计算技术，在飞行器上实现对数据的快速处理与实时预测，同时结合云端数据中心进行更为复杂的分析与建模。智能化故障预测技术的进一步发展，将依赖于更加先进的人工智能算法。通过增强学习、生成对抗网络（GAN）等前沿技术，故障预测系统将能够在复杂、多变的飞行环境中更加智能化地进行学习与优化。例如，增强学习能够使系统通过与环境的互动自动调整预测策略，从而实现更高效、更精确的故障预警。

故障预测系统不仅仅是单独的预测工具，它需要与飞行控制系统、维护系统及其他子系统进行深度集成。在未来的飞行器设计中，飞行控制电子设备故障预测系统将被嵌入到飞机的整体健康管理系统中，确保数据流、决策流与反馈流的顺畅传递。这种集成不仅能够提高飞行器的故障诊断与维护效率，还能通过系统的协同工作最大化飞行安全和运营效率。

5 结语

飞行控制电子设备故障预测技术作为飞行器整体健康管理的重要组成部分，已在多个领域取得显著进展。通过融合多源数据与智能算法，飞行控制系统能够实现对设备健康状态的实时监测与故障预测，大幅提升飞行安全性和设备维护的效率。尽管目前仍存在一定的挑战，但随着技术的不断进步，尤其是在多源数据融合、实时计算能力与智能算法应用等方面，未来故障预测技术有望得到更广泛的应用，推动飞行器安全保障水平的进一步提升。

参考文献

- [1] 张晨,崔利军,李飞晟,等.机载任务设备控制模块自适应BIT检测电路设计[J].计算机测量与控制,2021,29(7):7-10.D
- [2] 曹悦,王红敏,张健雨.航空电子系统中的人工智能应用研究[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(12)[2024-12-01].
- [3] 徐楠.探讨空客A320系列飞机航空电子设备故障及维修措施[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2)[2025-03-07].