

飞机机械系统故障预测与健康管理技术研究

邱焕强 刘 莲 王宏岩 马 腾 封亚军
石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050208

摘 要: 飞机机械系统故障预测与健康管理技术是航空工业中一个至关重要的研究领域,它关系到飞行安全、正常运行及飞机维护成本的降低。随着航空科技的发展,通过实时监测、数据分析和预测算法的应用,该领域已取得了显著的进步。在航空工业中,故障预测技术被广泛应用以预见并预防可能导致飞机停飞的机械问题。这些技术包括使用传感器收集的实时数据,通过高级数据分析预测潜在故障,例如,监测发动机的温度、压力和振动等关键性能指标。机器学习和人工智能算法在处理大量数据中发挥了关键作用,能够捕捉到微妙的性能变化,提前识别潜在的故障模式。本文旨在深入探讨飞机机械系统的故障预测方法和健康管理系统,旨在提高飞行安全,减少非计划停机时间和维修成本。

关键词: 飞机;机械系统;故障预测;健康管理

引言

飞机机械系统是飞行安全与效率的关键因素,尤其在航空航天领域,其可靠性与稳定性对整个飞行过程起着至关重要的作用。飞机机械系统包括发动机、液压系统、燃油系统、起落架等关键组件,它们共同确保了飞机的正常运行,提供动力,保证飞行控制,并在必要时确保安全降落。在飞机设计和制造中,机械系统的性能直接影响飞行效率、安全性以及维护成本。对于航空公司而言,机械系统的高效运行可以降低运营成本,减少因故障导致的飞机延误或取消。对于军用航空,机械系统的可靠性更关乎国家安全和军事行动的顺利进行。因此,对飞机机械系统的深入理解和有效维护至关重要。

一、故障预测技术概述

(一) 基于数据驱动的预测方法

基于数据驱动的预测方法是近年来在故障预测领域中发展迅速的一种技术。这种方法依赖于大量的历史数据和先进的数据分析工具,如机器学习和人工智能算法,以识别故障模式并预测设备的健康状态。通过监控和学习设备的运行数据,如传感器读数、维护记录和故障报告,可以训练模型来预测潜在的故障。这些模型包括但不限于决策树、随机森林、支持向量机和神经网络。通过时间序列分析,可以检测设备状态的异常变化,从而提前预警可能的故障。在大数据分析和高级算法的支持下,数据驱动的方法能够提高预测的精度,减少误报和漏报,实现更精确的预防性维护。

(二) 基于模型的预测方法

基于模型的预测方法依赖于对机械设备的物理特性和行为的深入理解。它涉及构建数学模型来模拟设备的工作原理和行为,然后通过比较模型预测与实际运行数据的差异,识别潜在故障的迹象。例如,物理模型可以描述机械部件的热力学行为,材料疲劳,以及应力和应变等参数。在飞机机械系统中,这可能包括气动弹性力学、流体动力学或热力学模型。通过监控模型与实际运行状态的偏差,可以预测设备性能的退化,进而预测故障。

(三) 混合预测方法

混合预测方法结合了数据驱动和模型预测的优势,它将理论模型与实际运行数据相结合,以提高预测的准确性和可靠性。这种方法首先建立基于物理的模型,然后用历史数据来校准和验证模型,使得模型能够更准确地反映出设备的实际运行状况。混合预测方法特别适用于复杂系统,如飞机的机械系统,因为这些系统通常由多个子系统组成,每个子系统可能需要不同的预测技术。通过集成学习,这种混合方法能够综合运用统计分析、机器学习和物理模型,以识别潜在的故障模式,从而提供更全面、更准确的故障预测,降低意外停机的风险,并最大化设备的正常运行时间。

二、健康管理系统的框架

(一) 系统架构与组成

健康管理系统(PHM, Prognostics and Health Management)是飞机机械系统故障预测与健康管理的核心,它涵盖了从数据采集到决策制定的全过程。系统通

常由以下几个主要部分组成：数据采集模块、数据处理模块、特征提取和故障预测模块。数据采集模块负责从飞机的各种传感器中实时获取机械系统的运行数据，这些数据包括但不限于温度、压力、振动、噪音等参数。数据处理模块对采集到的原始数据进行预处理，如滤波、平滑噪声，以提取出关键的故障特征。而故障预测模块则运用各种数据分析和机器学习算法，如监督和无监督学习，来预测可能的故障模式，从而实现早期预警。

（二）数据采集与处理技术

数据采集是健康管理的基石，它通常涉及安装在飞机关键部位的传感器，如加速度计、温度传感器、压力传感器等，用于实时监测飞机机械系统的运行状态。这些传感器持续不断地将数据发送到中央处理单元，数据包括实时性能参数、振动频率、温度变化等。数据处理阶段涉及数据清洗，去除异常值，处理缺失值，并进行数据转换，以提取出对故障敏感的特征。这些预处理步骤至关重要，因为它们有助于减少噪声，提高后续分析的准确性。

（三）健康状态评估算法

健康状态评估算法是PHM的关键环节，它们可以是基于统计学的模型，如预测性维护模型，也可以是基于规则的系统，如阈值和阈值的设定。常见的算法包括时间序列分析、谱分析、主成分分析（PCA）、特征选择和机器学习方法，如支持向量机（SVM）、随机森林（Random Forest）和神经网络。这些算法通过学习和分析从飞机系统收集的数据，识别出故障的先兆，如异常的振动模式、温度变化或性能下降。通过这些算法，PHM系统可以预测未来可能出现的故障，从而在故障发生前采取预防措施，提高飞机的可用性和可靠性，减少意外停机时间和维修成本。

三、故障诊断技术

（一）故障模式与影响分析

故障模式与影响分析（FMEA）作为一项全面而有条不紊的策略，旨在详尽地探究可能发生的故障场景，评估各种潜在故障对飞机机械系统性能及安全的潜在负面影响，并据此规划对应的缓解策略。在飞机机械系统中，FMEA细致入微地剖析了故障发生的多维度诱因，包括材料的耐久性、设计的适航性以及人为操作的正确性等关键环节。通过深入分析材料疲劳的动态过程，工程师能预判材料性能退化对系统稳定性的影响，同时关注设计缺陷如何潜移默化地埋下安全隐患。此外，FMEA强调了操作失误对系统故障的催化作用，提醒工程师在人为因素导致的问题，如不合规的操作和维护程序，可

能触发的连锁故障。通过这一全面的分析过程，专业人士可预先估计每一种故障模式的几率与后果严重度，为预防性维护策略提供依据。因此，定制的预防措施能够被有效实施，减少了突发停机事件，优化了维护计划，并显著降低了维修成本，以确保飞机机械系统的高效、安全运行。

（二）振动信号分析方法

振动信号分析是飞机机械系统故障诊断中的一种重要技术。通过对飞机系统，如发动机、传动装置或翼面等，进行振动监测，工程师可以捕捉到设备异常的早期迹象。振动分析包括频谱分析、时域分析和模态分析，通过这些技术，可以检测到如不平衡、不对中、松动、共振等故障特征，这些特征通常会体现在设备振动的频率、振幅和相位变化上。这些数据的分析对于及时识别和修复问题至关重要。

（三）神经网络与深度学习在故障诊断中的应用

神经网络和深度学习技术近年来在飞机机械系统的故障诊断中发挥了关键作用。通过训练神经网络模型学习正常与故障状态下的数据，可以构建出强大的分类器，识别出设备的健康状态。深度学习模型，如卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN），能从历史传感器数据中学习故障的特征，并预测未来可能出现的故障模式。这种方法可以实时监控飞机系统，当模型检测到异常数据时，会触发警报，通知维护团队进行检查。通过持续学习和调整，模型能够不断提高其预测准确性，进一步提升故障检测和诊断的精确性。

四、预测与健康应用案例

（一）航空发动机健康管理

航空发动机健康管理（PHM）是一项集成了尖端科技的综合性解决方案，旨在确保航空发动机的高效、安全运行。其核心在于通过实时监控和数据分析来捕捉发动机的异常状况，以实施精确的预防性维护。这一过程涉及多个关键步骤，首先，通过安装在发动机各部位的传感器，如加速度计用于检测振动，热电偶用于测量温度，压力传感器则跟踪压力变化。这些传感器持续不断地捕捉发动机在飞行过程中的实时状态数据。

收集到的大量数据随后通过无线传输技术，如5G或卫星通信，实时传输回地面控制中心。在那里，数据被整合并输入到复杂的机器学习算法中，如支持向量机、决策树或神经网络模型，依据模型的训练和设计，以识别出与正常运行状态的微小但关键的差异。通过训练和优化这些算法，可以提高对异常模式的识别能力，例如振动频率的微小变化可能预示着不平衡或机械磨损，而

异常的温度变化可能指向潜在的热效率问题。这种高级分析技术的运用，使得预测和诊断故障的能力大大增强，有助于在故障实际发生前就定位和解决潜在问题。

预测性维护策略的益处在于其显著降低了非计划停机事件，这些事件不仅影响飞行计划，还可能导致严重的安全风险。通过PHM，维护成本得以有效控制，因为维护工作可以更准确地计划和执行，避免了因紧急停机维修导致的高额费用。同时，由于能提前预测和预防发动机故障，整体飞行安全得到显著提升，为飞行人员提供了更安心的飞行环境。

（二）起落架系统预测与维护

起落架系统作为飞机安全降落和起飞的关键，其预测性维护同样至关重要。通过对起落架的磨损、润滑、液压和电气系统的实时监测，可以提前发现并预防潜在的故障。例如，利用状态监测技术分析磨损数据，结合温度、压力和位移传感器，可以预测起落架组件的疲劳状况，及时进行更换或维修。这种精细化的管理策略可以避免突发故障，减少飞机的意外停机时间，同时保证飞行人员的安全。

（三）燃油系统健康管理策略

燃油系统的健康管理主要关注油泵、油箱和管道的健康状态。通过集成传感器数据，分析燃油流动、油压和油温，可以预测和防止燃油泄漏、阻塞或其他可能导致发动机性能下降的问题。例如，异常的燃油流动模式可能预示着潜在的阻塞或泄漏，而异常的油压和温度变化可能表明燃油泵或燃油管道的问题。这种预测性维护可以提前发现并解决这些问题，确保燃油系统的可靠性和飞行安全，同时降低运营成本，避免因燃油系统故障导致的飞行中止。

五、面临的挑战与解决方案

（一）数据质量与可靠性问题

在飞机机械系统故障预测与健康管理技术的研究中，数据质量与可靠性问题是一个至关重要的环节。数据是预测模型的基础，低质量或不准确的数据可能导致预测结果的失准，甚至产生误导性的故障预测。噪声数据、缺失值和异常值的普遍存在，使得模型训练和预测效能受到影响。为提高数据质量，需要实施严格的数据预处理步骤，包括数据清洗、缺失值处理和异常值检测。确保数据的可靠性和一致性，如采用多源数据验证、实施严格的数据采集标准以及实时的数据质量监控，也是提升数据质量的关键。

（二）复杂系统建模难度

飞机机械系统的故障预测往往涉及到多变量、非线性

性以及动态的系统行为。复杂系统的建模工作需要考虑众多的交互变量和潜在的故障模式，这对研究者提出了高阶的数学建模挑战。研究人员需要发展更加先进的算法和方法，如深度学习和多变量统计分析，来捕捉这些复杂关系。物理机理的融入也是解决复杂系统建模问题的有效手段，它能够提供对系统行为的直观理解，进一步提升故障预测的准确性和可信度。

（三）实时性与准确性平衡

在飞机机械系统的故障预测中，实时性与准确性之间往往存在天然的矛盾。实时监测和快速响应是保障飞行安全的必要条件，但这也可能以牺牲准确性为代价。因此，需要寻找在保持实时反馈与预测精度之间的最佳平衡点。例如，通过使用边缘计算和云计算的协同方案，可以在确保快速响应的利用云端的计算资源提高预测的精确性。优化的算法选择和调整也至关重要，如使用轻量级的机器学习模型，能够在减少计算需求的维持较高的预测准确率。

结论

通过对大量飞机运行和维护数据的深度分析，能够实现更精准的故障预测，提前识别可能的机械故障，从而减少非计划的停机时间和维护成本。通过回顾上述的预测技术，包括基于数据驱动的预测方法，如时间序列分析和机器学习算法，以及基于模型的预测方法，如故障模式和效应分析（FMEA）和物理效应模型，研究揭示了这些技术在飞机机械系统健康管理中的应用价值。混合预测方法，结合了数据和模型两者的优点，能够在复杂系统中提供更全面的故障预警。

参考文献

- [1]王继凯.基于飞机机械故障检查液压系统常见故障研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(2): 4.
- [2]巫梦.飞机航空机械维修检查存在的问题分析[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2023.
- [3]赵达明.基于专家系统的飞机机械智能故障诊断研究[J].科技创新导报, 2022, 19(14): 3.
- [4]赵东标, 申珂楠, 赵世超, 等.飞机起落架液压收放系统的故障程度诊断[J].机械制造与自动化, 2022(051-001).
- [5]李朝永, 卢浩伟, 曾严.探析飞机液压系统的常见故障与维护策略[J].机械工业标准化与质量, 2023(11): 43-46.