

飞机液压系统故障诊断与智能维护策略研究

夏起炎

北京飞机维修工程有限公司武汉分公司 湖北 武汉 430300

摘要: 飞机液压系统作为飞机关键的动力传输与控制核心,其运行状态直接关系到飞行安全与任务执行效率。随着航空技术的飞速发展,飞机液压系统日益复杂,故障诊断与维护的难度也显著增加。本文深入探讨了飞机液压系统故障诊断技术,包括传统方法与新兴智能诊断方法,分析了各自的优势与局限性。同时,针对飞机液压系统的特点,提出了智能维护策略,旨在提高飞机液压系统的可靠性与维护效率,降低维护成本,保障飞行安全。通过对相关理论与技术的系统研究,为飞机液压系统的故障诊断与智能维护提供了理论支持与实践指导。

关键词: 飞机液压系统;故障诊断;智能维护策略

1 引言

飞机液压系统在起落架、刹车等关键操作中至关重要,但因长期处于高压、高温等恶劣环境,易发生故障,影响飞行安全。传统诊断依赖人工经验和定期检查,效率低、准确性差。随着人工智能、大数据等技术发展,智能故障诊断与维护逐渐成为趋势。智能方法可分析大量数据,实现故障早期预警与精准识别;智能维护则根据系统状态制定维护计划,提升维护效率和可靠性,推动航空安全保障水平不断提升。

2 飞机液压系统概述

2.1 飞机液压系统的组成

飞机液压系统主要由液压泵、液压缸、液压马达、控制阀、油箱、管路等部件组成。液压泵是系统的动力源,它将机械能转化为液压能,为系统提供压力油。液压缸和液压马达则是执行元件,将液压能转化为机械能,驱动各种机械部件运动。控制阀用于控制液压油的流向、压力和流量,实现对系统动作的精确控制。油箱用于储存液压油,并起到散热和沉淀杂质的作用。管路则负责将各个部件连接起来,形成一个完整的液压回路。

2.2 飞机液压系统的工作原理

飞机液压系统的工作原理基于帕斯卡定律,即在密闭液体中,施加于静止液体上的压强可以等值地传递到液体各点。当液压泵工作时,将液压油从油箱吸入并加压,然后通过管路输送到各个控制阀。控制阀根据飞行控制系统的指令,调节液压油的流向、压力和流量,使液压缸或液压马达产生相应的运动,从而实现飞机各种机械部件的动作^[1]。例如,在飞机起落架收放过程中,液压系统通过控制阀将压力油输送到起落架收放液压缸,推动活塞杆运动,完成起落架的收放动作。

2.3 飞机液压系统的特点

一是高压化:为了提高系统的功率密度和减小部件尺寸,现代飞机液压系统的工作压力不断提高,一般可达21MPa以上,部分先进飞机的液压系统压力甚至高达35MPa。高压化使得系统对部件的强度、密封性和可靠性要求更高。二是集成化:为了减轻飞机重量、节省空间,飞机液压系统越来越多地采用集成化设计。将多个液压元件集成在一个模块中,减少了管路连接,提高了系统的可靠性和维护性。三是余度设计:为确保飞行安全,飞机液压系统通常采用余度设计,即设置多套独立的液压系统或部件。当一套系统出现故障时,另一套系统能够迅速接管工作,保证飞机的关键功能不受影响。四是环境恶劣:飞机液压系统在飞行过程中会受到高温、低温、高振动、高湿度等多种恶劣环境因素的影响,这对系统的性能和可靠性提出了严峻挑战。

3 飞机液压系统故障诊断技术

3.1 传统故障诊断方法

感官诊断法:维护人员通过视觉、听觉、触觉等感官对飞机液压系统进行检查。例如,观察液压油的颜色、油位、是否有泄漏;倾听系统运行时是否有异常噪音;触摸液压管路和部件,感受其温度和振动情况。感官诊断法简单易行,但依赖于维护人员的经验,对于一些潜在的、复杂的故障难以准确判断。

参数测量法:使用压力表、流量计、温度计等仪器对飞机液压系统的压力、流量、温度等参数进行测量,并与正常值进行比较^[2]。当参数超出正常范围时,表明系统可能存在故障。参数测量法能够提供较为准确的量化数据,但需要对系统进行停机检测,且测量点的选择和测量精度会影响诊断结果。

逻辑分析法:根据飞机液压系统的工作原理和部件之间的逻辑关系,对故障现象进行分析推理,逐步缩小

故障范围,确定故障部位。逻辑分析法需要维护人员具备扎实的专业知识和丰富的实践经验,对于复杂的系统故障,分析过程可能较为繁琐。

3.2 智能故障诊断方法

基于专家系统的故障诊断:专家系统是一种模拟人类专家决策过程的计算机程序,它通过将领域专家的知识 and 经验以规则的形式存储在知识库中,利用推理机根据输入的故障现象进行推理,得出故障诊断结果。在飞机液压系统故障诊断中,专家系统可以整合大量的故障案例和诊断规则,快速准确地诊断常见故障。然而,专家系统的知识获取困难,对于一些新的、复杂的故障可能无法有效处理。

基于神经网络的故障诊断:神经网络是一种模仿人类神经系统结构和功能的计算模型,具有强大的自主学习、自适应和非线性映射能力。在飞机液压系统故障诊断中,可以将液压系统的各种运行参数作为神经网络的输入,故障类型作为输出,通过对大量样本数据的学习训练,使神经网络能够自动识别故障特征,实现故障的准确诊断。神经网络不需要建立精确的数学模型,对噪声和不确定性具有较强的鲁棒性,但训练过程需要大量的数据和计算资源,且网络结构的选择和参数调整对诊断结果影响较大。

基于模糊理论的故障诊断:飞机液压系统的故障现象和原因往往存在一定的模糊性,难以用精确的数学模型进行描述。模糊理论通过引入隶属度函数来处理这种模糊性,将模糊的故障信息转化为计算机能够处理的数值信息。在故障诊断中,模糊理论可以根据模糊规则对故障症状进行模糊推理,得出故障的可能性和严重程度。模糊理论能够较好地处理不确定性和模糊性问题,但模糊规则的确定需要依赖专家经验,且推理过程相对复杂。

基于数据驱动的故障诊断:随着飞机液压系统监测技术的不断发展,能够获取大量的系统运行数据。数据驱动的故障诊断方法直接从这些数据中挖掘故障特征,无需建立系统的物理模型。常见的数据驱动方法包括主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)、支持向量机(SVM)等^[3]。这些方法通过对数据的降维、特征提取和分类,实现对故障的检测和诊断。数据驱动方法能够充分利用数据中的信息,但需要大量的高质量数据进行训练,且对数据的预处理和特征选择要求较高。

3.3 故障诊断方法的比较与选择

传统故障诊断方法简单直观,但在处理复杂故障时存在局限性。智能故障诊断方法具有更高的自动化程度

和诊断精度,能够适应飞机液压系统日益复杂的发展趋势。然而,各种智能诊断方法也各有优缺点,在实际应用中,应根据飞机液压系统的特点、故障类型、数据可用性等因素,选择合适的故障诊断方法或采用多种方法相结合的方式,以提高故障诊断的准确性和可靠性。例如,可以先利用数据驱动方法对系统运行数据进行初步分析,检测出潜在的故障迹象,然后再结合专家系统或神经网络进行进一步的故障诊断和定位。

4 飞机液压系统智能维护策略

4.1 基于状态的维护(CBM)

基于状态的维护是一种根据飞机液压系统的实际运行状态来安排维护计划的维护策略。通过在系统中安装各种传感器,实时监测液压系统的压力、温度、流量、振动等参数,并将这些数据传输到维护管理中心。利用数据分析技术对监测数据进行分析处理,评估系统的健康状态,预测故障的发生时间和部位。当系统的健康状态达到一定的预警阈值时,及时安排维护工作,避免故障的发生或恶化。基于状态的维护能够实现维护的精准化,减少不必要的定期维护,降低维护成本,提高飞机的可用性。

4.2 预测性维护

预测性维护是在基于状态的维护基础上,进一步利用先进的预测算法和模型,对飞机液压系统的剩余使用寿命(RUL)进行预测。通过对历史故障数据、监测数据以及系统运行环境等因素的综合分析,建立系统的寿命预测模型。根据预测结果,提前制定维护计划,准备维护所需的备件和工具,确保在系统出现故障前完成维护工作。预测性维护能够最大限度地减少飞机停机时间,提高维护效率,保障飞行安全。

4.3 智能维护决策支持系统

智能维护决策支持系统是将故障诊断技术、维护策略与信息技术相结合的综合性系统。该系统能够实时收集、存储和分析飞机液压系统的各种数据,包括监测数据、故障记录、维护历史等。利用数据挖掘、机器学习等技术,从海量数据中提取有价值的信息,为维护决策提供科学依据^[4]。同时,系统还可以根据维护人员的经验和知识,提供维护建议和方案,辅助维护人员做出合理的维护决策。智能维护决策支持系统能够提高维护决策的科学性和准确性,优化维护资源配置,提升飞机液压系统的维护管理水平。

4.4 远程维护与协同维护

随着航空运输业的全球化发展,飞机的运营范围越来越广,传统的现场维护方式难以满足快速、高效的维

护需求。远程维护技术通过无线通信网络,将飞机液压系统的监测数据实时传输到远程维护中心,维护专家可以在远程对系统进行故障诊断和维护指导。协同维护则强调航空公司、飞机制造商、维护供应商等各方之间的信息共享与协同合作。通过建立协同维护平台,各方可以实时交流飞机的运行状态、故障信息和维护计划,共同制定最优的维护方案。远程维护与协同维护能够提高维护响应速度,降低维护成本,提升整个航空产业链的维护效率。

5 飞机液压系统故障诊断与智能维护策略的实施挑战与对策

5.1 实施挑战

首先,数据质量与可靠性问题突出,传感器故障、数据传输干扰及环境噪声等因素导致监测数据存在缺失、错误或噪声,影响故障诊断准确性。其次,模型复杂性与可解释性之间的矛盾明显,尽管神经网络等智能模型诊断精度高,但其内部结构复杂难懂,缺乏透明度,这在对维护决策可解释性要求严格的航空领域尤为关键。再者,系统集成与兼容性也是一大障碍,由于接口标准、数据格式和通信协议的差异,故障诊断与智能维护系统难以与现有飞机机载系统和地面维护系统有效集成,从而影响整体性能和可靠性。最后,人员培训与技能提升需求迫切,智能技术的应用要求维护人员具备数据分析、机器学习等方面的专业知识,而当前维护人员技能水平参差不齐,亟需进行系统的培训以适应新技术的发展和应用。这些挑战需要通过改进技术、完善培训体系等多方面努力来克服。

5.2 应对对策

数据预处理与质量保障:在数据采集过程中,加强对传感器的校准和维护,确保数据的准确性。采用数据清洗、滤波、插值等预处理方法,对监测数据进行处理,去除噪声和异常值,提高数据质量。同时,建立数据质量评估体系,对数据的质量进行实时监测和评估,及时发现并解决数据质量问题。

模型优化与可解释性研究:针对智能模型的复杂性和可解释性问题,一方面可以通过模型优化算法,如模型压缩、剪枝等技术,降低模型的复杂度,提高模型的

运行效率。另一方面,加强对模型可解释性的研究,开发可解释的人工智能方法,如基于规则的模型、局部可解释模型无关解释(LIME)等,使维护人员能够理解模型的决策过程和依据。

标准化与接口设计:制定统一的系统集成标准和接口规范,明确不同系统之间的数据格式、通信协议等要求。在系统设计阶段,充分考虑系统的兼容性和可扩展性,采用模块化设计思想,便于系统的集成和升级。同时,加强系统集成测试,确保各个系统之间能够稳定、可靠地运行。

人员培训与知识更新:航空公司应制定系统的人员培训计划,加强对维护人员在智能故障诊断与维护技术方面的培训。培训内容可以包括数据分析工具的使用、机器学习算法原理、智能维护系统的操作与维护等。同时,鼓励维护人员参加行业研讨会、学术交流活动等,不断更新知识,提升技能水平。

结语

飞机液压系统的故障诊断与智能维护对保障飞行安全、提升可靠性至关重要。随着航空技术发展,传统方法已难以满足需求,智能诊断技术(如专家系统、神经网络、数据驱动等)和智能维护策略(如状态监测、预测性维护、远程维护等)提供了更高效、精准的解决方案。尽管在数据质量、模型复杂性、系统集成等方面仍面临挑战,但通过数据预处理、模型优化、标准化设计和人员培训等手段可有效应对。未来,依托人工智能、大数据、物联网等技术,该领域将向智能化、自动化、集成化发展,推动全生命周期健康管理,助力航空安全高效发展,并为其他复杂系统维护提供借鉴。

参考文献

- [1]彭桥,石大仓,步少杰,等.飞机液压系统的常见故障与日常维护分析[J].模具制造,2025,25(04):228-230+233.
- [2]赵新宇,何浪,毋养民.飞机液压系统常见故障分析及维护策略探讨[J].中国设备工程,2024,(22):192-194.
- [3]陆晶文,邱晓慧.飞机液压系统常见故障诊断及预防措施研究[J].机电信息,2024,(21):54-57.
- [4]李朝永,卢浩伟,曾严.浅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.