

直升机传动系统故障诊断研究

徐赛奎 王晓翔 鲁时寒
61902 部队 四川 宜宾 644000

摘要: 直升机传动系统作为动力传输核心装置,其故障诊断对保障飞行安全意义重大。本文阐述传动系统基础理论,包括结构原理、典型故障模式及演化机理。构建故障诊断技术体系,涵盖信号采集预处理、特征提取选择与智能诊断方法。研究核心诊断方法,开发在线监测与离线分析平台,提出验证方法论。为直升机传动系统故障诊断提供全面理论支撑与技术方案。

关键词: 直升机传动系统;故障诊断;信号采集;智能诊断;系统验证

引言:直升机凭借独特飞行能力,在民用等领域应用广泛。传动系统作为直升机动力传输与转换枢纽,其可靠运行直接影响飞行安全。然而,复杂工作环境与动态负载使传动系统易出现多种故障,传统诊断方法存在局限性。深入研究直升机传动系统故障诊断技术,构建完善诊断体系,实现故障早期精准诊断,对提升直升机运行安全性与可靠性具有至关重要的现实意义。

1 直升机传动系统基础理论

1.1 系统结构与工作原理

直升机传动系统是保障动力稳定传输与转换的核心装置,主要由主减速器、尾减速器及传动轴系构成。主减速器承担将发动机高速动力减速并增大扭矩的重任,适配旋翼低转速大扭矩的工作需求。其内部由齿轮、轴与轴承协同工作,通过特定传动组合实现动力精准变换。尾减速器接收主减速器传递的动力,经减速后驱动尾桨,为直升机提供方向控制与平衡力矩。传动轴系连接主、尾减速器,确保动力稳定高效传输^[1]。动力传输路径清晰有序,发动机动力先输入主减速器,经减速增扭后,一部分通过传动轴系驱动旋翼产生升力,另一部分传递至尾减速器驱动尾桨实现方向操控。在动力传输全程,负载特性复杂多变。旋翼受空气阻力、重力等多力作用,这些力传递至传动系统形成动态负载。直升机在起飞、巡航、悬停等不同状态下载荷差异显著,要求传动系统具备良好的适应性与可靠性,以保证在各种负载条件下稳定运行。

1.2 典型故障模式分类

直升机传动系统长期处于复杂工作环境与动态负载下,易出现多种典型故障。齿轮故障较为常见,齿面磨损是因齿轮啮合时齿面相对滑动摩擦所致,磨损加剧会使传动精度降低、噪声与振动增大。断齿多由过大冲击载荷或疲劳损伤引发,会严重破坏传动系统正常工作。点

蚀则是齿轮表面在交变应力下,局部区域出现疲劳裂纹并扩展形成小坑状损伤。轴承故障也不容忽视,滚动体损伤会使轴承运转不平稳,产生异常振动噪声。保持架断裂会导致滚动体失去约束,引发轴承卡死等严重问题。轴系故障方面,不对中会使轴系运转产生额外弯矩扭矩,加速部件磨损损坏。不平衡会使轴系产生周期性振动,影响系统稳定性。裂纹是轴系长期疲劳载荷作用结果,随裂纹扩展可能引发轴系断裂。润滑系统故障同样影响系统运行,油液污染会降低润滑性能,加剧部件磨损。温度异常可能因润滑不足、散热不良或内部故障引发,过高温度会降低部件强度寿命。

1.3 故障演化机理分析

深入研究直升机传动系统故障演化机理对早期预测与准确诊断故障意义重大。机械振动传播路径建模是理解故障演化过程的关键。通过对传动系统各部件振动特性分析,建立振动传播路径模型,能清晰掌握振动信号在系统中的传播规律,确定故障源位置与传播途径。多物理场耦合作用机制也是故障演化的重要因素。直升机传动系统工作时,同时受机械力、热力等多种物理场作用,这些物理场相互耦合影响。例如高温会降低部件材料强度韧性,增加疲劳裂纹产生风险,而机械振动又会使部件温度升高,加剧热损伤。故障早期微弱信号特征研究对早期诊断故障至关重要。故障初期,故障特征信号往往微弱,易被噪声等干扰信号掩盖。通过提取分析故障早期微弱信号,能发现故障早期迹象,为及时维修提供依据。

2 故障诊断技术体系构建

2.1 信号采集与预处理

在直升机传动系统故障诊断中,精准的信号采集是后续分析的基础。多传感器布局优化策略至关重要,需综合考虑传动系统各部件的结构特点、故障易发位置以

及信号传播特性等因素。通过合理布置振动传感器、声发射传感器和油液传感器等,确保能够全面、准确地捕捉系统运行过程中的各类信息。振动信号能反映部件的机械状态,声发射信号可捕捉到故障初期的微弱动态变化,油液信号则能体现润滑系统的健康状况^[2]。实现振动、声发射、油液信号的同步采集是关键环节。同步采集能够保证不同类型信号在时间上的对应性,为后续的综合分析提供准确的数据基础。通过采用高精度的数据采集设备和同步控制技术,确保各类信号在同一时刻被采集记录。采集到的原始信号往往包含大量噪声干扰,信号降噪与特征增强方法必不可少。常用的降噪方法有滤波法、小波变换法等,能够有效去除信号中的高频噪声和低频干扰。特征增强方法则通过数学变换和信号处理技术,突出信号中的故障特征信息,提高故障诊断的准确性和可靠性。

2.2 特征提取与选择

构建时域特征参数体系是特征提取的重要步骤。时域特征参数包括均值、方差、峰值等,这些参数能够直观地反映信号在时间域内的统计特性,为故障诊断提供基础信息。频域分析方法也是常用的特征提取手段。快速傅里叶变换(FFT)能够将时域信号转换为频域信号,通过分析频谱特征,可以识别出信号中的周期性成分和故障频率。包络分析则适用于对调制信号的分析,能够有效提取故障引起的调制特征。时频域联合分析技术结合了时域和频域分析的优点,能够同时反映信号在时间和频率上的变化特征。短时傅里叶变换(STFT)和维格纳分布(WVD)等时频分析方法,能够更准确地描述非平稳信号的特征,为故障诊断提供更丰富的信息。

2.3 智能诊断方法

基于深度学习的故障识别模型是当前智能诊断领域的研究热点。深度学习模型具有强大的特征学习和分类能力,能够自动从大量数据中提取故障特征,并进行准确分类。通过构建合适的深度学习网络结构,如卷积神经网络、循环神经网络等,对直升机传动系统的故障进行高效识别。多源信息融合诊断框架将不同类型传感器采集到的信息进行融合处理,充分发挥各类信息的优势,提高故障诊断的准确性和鲁棒性。通过融合振动、声发射、油液等多源信息,能够更全面地反映系统的运行状态,降低误诊和漏诊的概率。迁移学习在跨机型诊断中具有重要应用价值。由于不同机型直升机传动系统的结构和运行特性存在差异,直接将一种机型的诊断模型应用于另一种机型可能效果不佳。迁移学习能够利用已有机型的数据和知识,快速适应新机型的诊断任务,提高

诊断模型的泛化能力和应用范围。

3 核心诊断方法研究

3.1 振动信号分析方法

在直升机传动系统故障诊断中,振动信号分析方法发挥着关键作用。阶次分析针对变速工况具有独特优势。直升机在不同飞行阶段,传动系统转速不断变化,传统频域分析在变速时易出现频率模糊问题^[3]。阶次分析通过将时域信号转换为角域信号,以转速为基准进行等角度采样,能有效克服变速影响,准确提取故障特征频率,清晰呈现故障信息。共振解调技术擅长提取高频调制特征。当传动系统部件出现故障时,会产生周期性冲击力,引发系统共振,产生高频共振分量。该技术利用带通滤波器提取高频共振信号,再通过解调处理获取包含故障信息的低频包络信号,从而实现故障的早期精准识别。盲源分离在多源干扰环境下表现出良好适用性。直升机传动系统运行时,振动信号往往受到多种因素干扰,如环境噪声、其他部件振动等。盲源分离能在信号源和传输通道参数未知的情况下,从混合信号中分离出各个源信号,有效去除干扰,提高故障诊断的准确性。

3.2 油液监测技术

油液监测技术是反映传动系统健康状况的重要手段。磨损颗粒形态学特征分析能直观呈现部件磨损状态。不同故障产生的磨损颗粒在形状、尺寸、表面纹理等方面存在差异,正常磨损颗粒尺寸一般小于 $15\mu\text{m}$,而异常磨损颗粒可达 $25\mu\text{m}$ 以上,通过显微镜等设备观察分析这些特征,可判断磨损类型和严重程度。润滑油理化指标劣化规律研究有助于了解润滑油性能变化。随着使用时间增加,润滑油的黏度、酸值、水分等理化指标会发生变化,当酸值增加超过 0.5mgKOH/g 时,表明润滑油已严重劣化,这些变化与部件磨损、系统故障密切相关。掌握劣化规律可提前预测润滑油更换时间,保障系统正常运行。多参数融合的油液健康评估综合多种指标信息。单一参数难以全面准确评估油液健康状态,将磨损颗粒特征、理化指标等多参数融合,通过建立评估模型,能更科学、全面地判断传动系统健康程度。

3.3 声发射检测技术

声发射检测技术在故障诊断中具有独特价值。故障源定位算法研究是关键环节。通过在传动系统不同位置布置多个声发射传感器,利用信号到达时间差等参数,采用合适算法可准确确定故障源位置,为及时维修提供依据。声发射信号模式识别能区分不同故障类型。不同故障产生的声发射信号在波形、频率等方面存在差异,裂纹类故障的特征频率主要集中在 $100\text{--}300\text{kHz}$ 区间,运用

机器学习等方法对信号进行分类识别,可快速准确判断故障种类^[4]。与振动信号的互补性验证能充分发挥两种技术优势。振动信号对宏观故障敏感,声发射信号对早期微弱故障响应迅速,二者结合可实现从早期故障到严重故障的全过程监测,提高故障诊断的全面性和可靠性。

4 诊断系统开发与验证

4.1 在线监测系统架构设计

在线监测系统架构设计是保障直升机传动系统实时健康监测的基础。分布式数据采集网络构建是核心环节。通过在传动系统关键部位合理布置多个数据采集节点,利用高速通信协议实现节点间数据高效传输,形成覆盖全面的采集网络。此网络能实时获取振动、温度、转速等多类型数据,确保数据完整性与及时性。边缘计算与云端协同处理可提升系统响应速度与数据处理能力。边缘计算设备靠近数据源,能对采集到的原始数据进行初步处理与分析,快速筛选出关键信息,减少数据传输量。云端则凭借强大计算资源与存储能力,对边缘计算上传的数据进行深度挖掘与综合分析,实现故障趋势预测与全局状态评估。二者协同工作,兼顾实时性与准确性。人机交互界面开发原则注重用户体验与操作便捷性。界面设计应简洁直观,以图形化方式展示系统运行状态与故障信息,方便操作人员快速理解。同时要具备良好交互性,支持操作人员对系统进行参数设置、数据查询等操作,实现人与系统的有效沟通。

4.2 离线分析平台功能模块

离线分析平台为故障深入诊断提供有力支持。信号处理工具包开发涵盖多种先进信号处理方法,如滤波、降噪、时频分析等,能对采集到的复杂信号进行精细处理,提取故障特征信息。平台还提供交互式分析界面,允许用户根据具体需求调整参数,实现个性化分析流程。故障知识库构建方法是通过收集整理大量故障案例、专家经验与理论研究成果,形成结构化知识体系。该知识库为故障诊断提供参考依据,辅助诊断人员快速准确判断故障类型与原因。知识库采用模块化设计,支持动态更新与扩展,确保持续适应新技术发展需求。诊断决策支持系统设计综合信号处理结果与故障知识库信息,运用智能算

法生成诊断决策建议。系统能根据不同故障情况提供针对性维修方案,提高故障处理效率与准确性。系统还具备自学习能力,能够根据新的故障案例不断优化诊断模型,提升智能化水平。平台各模块之间通过标准化接口实现数据共享与功能协同,形成完整的故障分析闭环。

4.3 验证方法论

验证方法论确保诊断系统可靠性与有效性。半实物仿真实验平台搭建将实际传动系统部件与虚拟仿真模型相结合,模拟各种运行工况与故障场景,对诊断系统进行全面测试,验证在不同条件下的性能表现。实验平台采用模块化设计,可灵活配置测试方案,满足多样化验证需求。加速寿命试验设计原则通过强化试验条件,缩短试验周期,快速获取传动系统在极端工况下的故障数据。试验过程需严格控制环境参数,确保数据可比性与再现性。依据这些数据评估诊断系统对早期故障的识别能力与对严重故障的预警效果。诊断结果可靠性评估指标包括准确率、召回率、误报率等。通过对大量实际故障数据与诊断结果进行统计分析,计算这些指标,客观评价诊断系统性能,为系统优化改进提供方向。

结束语

直升机传动系统故障诊断技术已形成多方法融合、多信息协同的智能化发展趋势。通过振动、油液、声发射等多技术联合分析,结合在线监测与离线诊断平台,可实现故障的早期预警与精准定位。未来应进一步强化智能算法应用,突破跨机型迁移诊断难题,推动故障预测与健康管理技术的工程化应用,为航空安全提供坚实保障。

参考文献

- [1]陈鹏,晋野,孟铁睿.直升机传动系统故障诊断与健康健康管理研究现状及发展趋势[J].直升机技术,2025(2):47-54.
- [2]汤勇,吴太欢,唐振寰,等.基于改进广义解调的直升机传动系统速度追踪[J].振动、测试与诊断,2024,44(4):710-717.
- [3]龙舟,黄炎,陈兴明,等.直升机滑油在线屑末监测器研发及应用[J].测控技术,2025,44(1):57-62.
- [4]郭景涛.直升机机械装备维修保障信息化技术分析[J].中国高新科技,2024,(08):81-83.