

基于振动监测的航空发动机机械部件磨损故障预警研究

孙天义

四川西南航空职业学院 四川 成都 610400

摘要: 随着航空工业的快速发展,航空发动机机械部件的安全性和可靠性日益成为关注焦点。本文研究了基于振动监测的航空发动机机械部件磨损故障预警方法。通过对航空发动机机械部件类型、特点及磨损故障类型的分析,结合振动监测技术的基本原理与工作流程,提出了振动信号采集、处理、特征提取及故障诊断模型构建的方法。通过实验验证与案例分析,证明了该方法具有较高的准确性和可靠性,能够有效预警航空发动机机械部件的磨损故障,为航空安全提供了有力保障。

关键词: 基于振动监测;航空发动机机械部件磨损;故障预警

引言:航空发动机机械部件的磨损故障是影响航空器运行安全与可靠性的关键因素。在复杂多变的工作环境中,这些部件不仅需承受高温、高压等极端条件,还时刻面临磨损的威胁。一旦磨损超出阈值,将直接影响航空器的性能,甚至可能导致灾难性事故。因此,对航空发动机机械部件的磨损故障进行预警研究显得尤为迫切。本研究聚焦于基于振动监测的预警方法,通过采集并分析航空发动机机械部件的振动信号,旨在实现对其磨损故障的早期预警,为航空器的安全运行提供有力保障。

1 航空发动机机械部件磨损故障概述

1.1 航空发动机机械部件的类型与特点

(1) 航空发动机机械部件的主要类型包括叶片、涡轮盘、机匣和轴类部件等,这些部件在航空器中发挥着至关重要的作用。叶片负责压缩和推送空气,涡轮盘传递功率并承受高温高压,机匣是发动机的主要承力部件,轴类部件则确保动力传递的连续性和稳定性。它们共同协作,确保航空器发动机的高效、可靠运行。(2) 航空发动机机械部件的工作环境极端恶劣,需承受高温、高压、高转速和强烈振动等复杂载荷。这些部件的磨损特点表现为快速、持续且难以预测,尤其在长时间运行后,磨损问题更为突出。

1.2 磨损故障的类型与成因

(1) 航空发动机机械部件的磨损故障类型多样,主要包括疲劳磨损、磨屑磨损和粘着磨损。疲劳磨损是由于构件表面在反复滑动和滚动过程中产生的疲劳损伤;磨屑磨损则是由于构件表面颗粒或粗糙度导致的损伤;粘着磨损则是构件在滑动过程中因局部塑性变形或材料转移而产生的磨损。此外,还有因转子不平衡导致的失衡磨损和因固定不牢导致的机件松动磨损。(2) 磨损故障的主要成因包括零部件的自然老化、过度负荷以及材

料本身的缺陷。在极端工作环境下,零部件的材质会逐渐退化,导致磨损速度加快。同时,过度负荷会加速部件的磨损过程,甚至引发灾难性故障。此外,材料中的夹杂物、疏松等缺陷也会降低部件的耐磨性。

1.3 磨损故障对航空安全的影响

(1) 磨损故障会严重影响航空器的性能,如降低发动机效率、增加振动和噪声等。这些性能下降不仅影响乘客的舒适度,还可能危及飞行安全。(2) 历史上已发生多起因磨损故障导致的航空安全事故。例如,因齿轮、轴承等部件的异常磨损导致的飞机发动机停车事故,以及因涡轮叶片磨损引发的发动机失效事故等。这些案例警示,磨损故障对航空安全构成严重威胁。

2 振动监测技术及其在故障诊断中的应用

2.1 振动监测技术的基本原理

(1) 基本原理与工作流程:振动监测技术是一种利用传感器将机械振动转换为电信号,再通过分析这些信号来评估机械部件状态的技术。其工作流程通常包括振动信号的采集、信号处理与特征提取、以及故障诊断与预警。在采集阶段,传感器如加速度计、速度传感器等被安装在机械部件上,以捕捉其振动信息。接着,通过信号调理和采集系统,将模拟振动信号转换为数字信号,并进行滤波、去噪等预处理。在特征提取阶段,利用信号处理技术提取振动信号的关键特征,如频率、幅值、相位等。最后,基于这些特征,结合专家系统、机器学习算法等,进行故障诊断与预警^[1]。(2) 振动信号与机械部件状态的关系:振动信号是机械部件状态的直接反映。当机械部件出现磨损、裂纹、松动等故障时,其振动特性会发生变化,如频率成分的偏移、振幅的增大等。这些变化为故障诊断提供了重要线索。通过分析振动信号,可以评估机械部件的健康状况,预测潜在的

故障，从而采取相应的维护措施。

2.2 振动监测技术在故障诊断中的应用现状

(1) 应用案例：振动监测技术在各种机械故障诊断中得到了广泛应用。在旋转机械中，如风力发电机、水泵和压缩机，振动监测被用来检测轴承、齿轮和转子等关键部件的磨损和裂纹。在往复机械中，如内燃机和压缩机，振动监测有助于识别连杆、曲轴和活塞等部件的松动和不平衡。此外，在航空航天领域，振动监测技术被用于监测飞机发动机叶片、涡轮盘和轴系等部件的磨损状态。(2) 在航空发动机机械部件磨损故障预警中的适用性：振动监测技术在航空发动机机械部件磨损故障预警方面具有显著优势。航空发动机机械部件运行条件恶劣，磨损故障频发，且一旦发生往往后果严重。振动监测技术能够实时监测部件的振动特征，及时发现异常振动信号，从而提前预警磨损故障。此外，振动监测技术具有非接触式测量的特点，不会对航空发动机机械部件造成额外损伤，适用于对高精度和高可靠性要求极高的航空领域。

2.3 振动监测技术的优势与局限性

(1) 优势：振动监测技术在磨损故障预警中的优势主要体现在实时监测、非侵入性和高灵敏度等方面。实时监测能力使得振动监测技术能够及时发现和处理潜在故障，避免故障恶化导致的严重后果。非侵入性测量方式确保了监测过程对机械部件运行状态的无干扰。高灵敏度则意味着振动监测技术能够捕捉到微小的振动变化，从而实现对磨损故障的精确预警。(2) 局限性：尽管振动监测技术具有诸多优势，但在实际应用中仍面临一些局限性。例如，振动信号可能受到环境噪声的干扰，导致信号质量下降，影响故障诊断的准确性。此外，对于某些复杂机械部件，其振动特征可能与多种故障模式相关，增加了故障诊断的难度。因此，在实际应用中，需要结合其他监测手段和技术，如声发射监测、温度监测等，以提高故障诊断的准确性和可靠性。

3 基于振动监测的航空发动机机械部件磨损故障预警方法

3.1 振动信号采集与处理

(1) 振动信号的采集方法与设备：振动信号的采集通常依赖于高精度、高灵敏度的传感器，如加速度传感器、位移传感器或速度传感器。这些传感器被安装在航空发动机机械部件的关键位置，能够实时监测部件在运行过程中的振动情况。传感器的选择需根据监测对象的特性、工作环境以及监测需求来决定。例如，对于高频振动，加速度传感器更为适用；而对于大位移或低频振动，位移传感器可能更为合适。采集到的振动信号经过

模数转换后，被存储或传输到数据处理中心进行进一步分析。(2) 振动信号的处理流程与技术：振动信号的处理主要包括滤波、降噪和信号调理等步骤。滤波是为了去除信号中的高频噪声和干扰，提高信号的信噪比。降噪技术则进一步去除信号中的随机噪声和背景噪声，以确保后续特征提取的准确性。信号调理是对原始信号进行平滑、去趋势等处理，以便更好地提取信号特征。此外，还可能利用信号增强技术，如自适应滤波、盲源分离等，来提高信号的质量和可用性^[2]。

3.2 特征提取与故障诊断模型

(1) 振动信号特征提取的关键技术：常用的振动信号特征提取技术包括小波包分析、时频分析、包络分析等。小波包分析能够同时提取信号的时域和频域特征，对于非平稳信号的分析尤为有效。时频分析则能够揭示信号在不同频率上的能量分布和变化趋势，有助于识别故障的早期迹象。包络分析则通过提取信号的包络线，去除噪声干扰，提取出与故障直接相关的特征信息^[3]。

(2) 构建基于机器学习或深度学习的故障诊断模型：在特征提取的基础上，可以构建基于机器学习或深度学习的故障诊断模型。支持向量机(SVM)、决策树、随机森林等传统机器学习方法在故障诊断中得到了广泛应用。这些模型通过训练数据学习特征与故障类型之间的映射关系，能够实现对未知数据的故障分类和预测。随着深度学习技术的发展，卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)等深度学习模型也在故障诊断领域展现出强大的潜力。这些模型能够自动学习数据的高层次特征表示，提高故障诊断的准确性和鲁棒性。

3.3 磨损故障预警算法与实现

(1) 设计磨损故障预警算法：磨损故障预警算法的设计需要综合考虑多个因素，包括阈值设定、趋势分析、故障模式识别等。阈值设定是根据历史数据和专家经验，设定一个合理的振动特征阈值，当实际监测数据超过这个阈值时，触发预警。趋势分析则是通过监测振动特征的变化趋势，识别故障的早期迹象。故障模式识别则是利用故障诊断模型，对实际监测数据进行分类和预测，确定是否存在特定的故障模式。(2) 实现预警算法的流程与步骤：实现预警算法的流程通常包括数据预处理、模型训练、预警决策等步骤。数据预处理是对采集到的振动数据进行清洗、去噪、归一化等处理，以符合模型训练的要求。模型训练则是利用预处理后的数据，对故障诊断模型进行训练和优化，以提高模型的预测性能。预警决策则是基于训练好的模型，对实际监测数据进行故障预测和预警决策，判断是否需要采取维护

措施或进行进一步检查^[4]。

4 实验验证与案例分析

4.1 实验设计与实施

4.1.1 实验设计

(1) 实验对象：选取CFM56-7B航空发动机的3组高压压气机叶片、2组传动轴（材料为Inconel718）及4套角接触球轴承（型号SKF7205BEP）作为测试样本。

(2) 加速寿命测试参数：负载范围：阶梯式递增，从额定负载的80%逐步提升至150%（每阶段增加10%，持续2小时）；振动频率：20Hz至2000Hz，模拟起飞、巡航、降落等工况；总测试时长：累计240小时，覆盖500次启停循环。

(3) 数据采集系统：传感器：采用PCB352C33型高频振动传感器（采样率51.2kHz，灵敏度100mV/g）；安装位置：叶片根部（3个测点）、轴承外圈（2个测点）、传动轴轴向/径向（各1个测点）。

4.1.2 实验实施

(1) 重复实验3次，共获得振动信号数据量1.2TB（原始波形数据）及特征数据集（含12维时域/频域特征，如RMS、峭度、包络谱幅值等）。

(2) 关键控制：传感器采样频率设置为信号最高频率的2.56倍（满足香农定理），并通过激光校准确保安装角度误差 < 0.5°。

4.2 案例分析

4.2.1 案例分析过程

(1) 数据预处理：采用小波变换（DB4基函数）降噪，信噪比提升至35dB以上；提取故障特征：如叶片裂纹的1×/2×转频谱波能量比（阈值 > 1.8时为异常）、轴承剥落的BPFO（BallPassFrequencyOuterRace）特征频率（峰值 > 0.5m/s²报警）。

(2) 模型构建：算法：基于XGBoost的多分类模型（输入特征12维，输出5类故障标签）；训练集/测试集：按7:3划分，模型准确率92.3%（F1-score0.89）。

4.2.2 预警结果验证

(1) 对比数据：

故障类型	预警准确率	误报率	平均提前预警时间
叶片疲劳裂纹	94.1%	3.2%	8.5小时

续表：

故障类型	预警准确率	误报率	平均提前预警时间
轴承内圈剥落	88.7%	5.1%	12.3小时
传动轴不对中	90.2%	4.3%	6.8小时

(2) 典型误判案例：2例轴承早期磨损被误判为润滑不足（因振动频谱相似性 > 85%）。

4.3 实验结果与讨论

4.3.1 核心结论

(1) 有效性验证：叶片裂纹预警准确率显著高于传统阈值法（对比提升21%）；轴承故障预警时间较行业平均（6小时）缩短48%。

(2) 局限性：复合故障（如裂纹+磨损）识别率仅76.5%，因特征耦合导致模型混淆。

4.3.2 改进方向

(1) 多源数据融合：补充红外热像仪数据（如叶片局部温升 > 70℃时联动触发预警）；声发射监测（频段50-400kHz）可提升复合故障识别率（初步试验显示+15%）。

(2) 算法优化：引入Transformer时序模型处理非平稳信号，试验阶段准确率已达95.8%。

结束语

综上所述，基于振动监测的航空发动机机械部件磨损故障预警研究已取得了初步成果。通过振动信号的处理与分析，我们成功建立了有效的预警模型，为航空安全提供了新的保障手段。尽管当前研究已取得一定进展，但仍需不断优化与完善，以应对航空发动机机械部件磨损故障的多样性与复杂性。未来，我们将继续致力于预警技术的创新与突破，为航空领域的安全发展贡献更多力量。

参考文献

- [1]张成玉.航空发动机机械磨损故障的诊断研究[J].设备管理与维修,2020,(14):147-148.
- [2]李永伟,董川.航空发动机机械磨损故障的诊断分析[J].文化科学,2023,(07):71-72.
- [3]毕鹏飞.航空发动机机械磨损故障的诊断分析[J].建筑技术科学,2024,(04):49-50.
- [4]王凤翔.航空发动机机械磨损故障原因与诊断分析[J].建筑技术科学,2024,(11):113-114.