

基于传感融合的机电设备状态评估研究

徐超杰 130406199507110912

摘要

机电设备是现代工业生产体系的核心组成部分，其运行状态直接决定生产效率与生产安全，传统单一传感器状态评估方法受环境干扰、测点局限性影响，评估精度与可靠性难以满足复杂机电系统的运维需求。本文针对复杂机电设备状态评估的准确性需求，提出基于多传感融合的机电设备状态评估框架，介绍传感数据预处理、特征提取与融合决策的核心流程，对比分析不同融合算法的应用效果，验证传感融合技术在状态评估中的优势。研究结果表明，多传感融合技术能够有效整合不同维度的设备运行信息，降低单一传感数据的不确定性，提升机电设备状态评估的准确率，为工业设备 predictive maintenance（预测性维护）提供技术支撑。

关键词

传感融合；机电设备；状态评估；预测性维护

一、引言

随着工业 4.0 与智能制造战略的推进，现代机电设备朝着大型化、集成化、智能化方向发展，设备结构愈发复杂，零部件之间的耦合关系日益紧密，任何一个关键部件的失效都可能引发整条生产线停机，造成巨大的经济损失，甚至引发安全事故。因此，对机电设备进行实时状态评估，及时识别早期故障与潜在风险，是开展预测性维护、保障设备安全稳定运行的核心前提。

传统机电设备状态评估主要依赖人工巡检与单一传感器监测，人工巡检效率低、依赖运维人员经验，无法实现实时在线评估；单一传感器仅能采集设备某一维度的运行信息，受电磁干扰、测点安装位置限制等因素影响，采集数据存在不确定性与片面性，难以全面反映设备真实运行状态，评估结果误差较大，容易出现误判、漏判问题。近年来，传感技术与数据处理技术快速发展，多传感融合技术能够整合不同类型传感器采集的多源异构数据，提取更全面的设备运行特征，为提升机电设备状态评估精度提供了新的解决思路。本文围绕基于传感融合的机电设备状态评估展开研究，梳理核心技术路径，分析应用效果，为相关工程实践提供参考。

二、传感融合技术概述与机电设备数据采集

传感融合技术是将不同类型传感器采集的多源数据按照一定的算法规则进行整合，消除多源数据之间的冗余与矛盾，提取更准确、更全面的目标信息，从而获得比单一传感器更可靠的决策结果。按照融合层次划分，传感融合可以分为数据层融合、特征层融合与决策层融合三个层级：数据层融合是对原始采集数据直接进行融合，保留最多原始信息，但数据量大、处理复杂度高；特征层融合是先从各传感器原始数据中提取设备运行特征，再对特征进行整合融合，兼顾了信息保留量与处理效率，是目前工程中应用最广泛的融合层级；决策层融合是先通过各传感器数据完成独立决策，再对多个决策结果进行融合得到最终结论，处理复杂度最低、灵活性最强，但信息损失量较大。

针对机电设备状态评估，常用的传感器类型包括振动传感器、温度传感器、油液传感器、电流电压传感器、声学传感器等，不同传感器从不同维度反映设备状态：振动信号能够直接反映旋转部件的磨损、不平衡故障，温度信号能够反映设备发热异常与绝缘老化，电流电压信号能够反映电机类设备的电气故障，油液监测能够获取设备磨损颗粒信息，声学信号能够识别早期隐性故障。

三、基于传感融合的机电设备状态评估框架

本文构建的基于传感融合的机电设备状态评估框架分为四个核心模块，分别是多源数据采集与预处理模块、特征提取模块、融合评估模块、结果输出模块，各模块功能如下：

第一，多源数据采集与预处理模块：按照机电设备结构特征与关键部件位置，布置多类型传感器，实时采集振动、温度、电流、油液等多源运行数据，通过小波去噪、中值滤波等方法剔除采集过程中的环境噪声，通过 Z-score 方法对不同量纲的数据进行归一化处理，统一数据范围，消除量纲差异对后续融合的影响，同时基于 3σ 准则剔除采集过程中产生的异常突变数据，保障输入数据的稳定性。

第二，特征提取模块：针对预处理后的各类传感数据，提取时域特征、频域特征与时频域特征：时域特征包括均值、方差、偏度、峰度、均方根等统计特征，能够反映信号能量分布与突变情况；频域特征通过傅里叶变换获取，包括各频带能量、频谱峰值、中心频率等，能够定位故障对应的频率分量；时频域特征通过小波变换、经验模态分解等方法获取，能够处理非平稳的设备运行信号，提取早期故障的微弱特征。将各类传感数据提取的特征整理为特征向量，输入融合模块。

第三，融合评估模块：本文采用特征级融合方案，选用卷积神经网络-长短时记忆网络（CNN-LSTM）结合 D-S 证据理论的融合算法实现状态评估：首先通过 CNN 网络提取多特征向量中的空间局部特征，再通过 LSTM 网络提取时序特征，

初步输出各传感通道的状态评估概率；随后将各通道的评估结果作为独立证据，引入 D-S 证据理论进行决策级融合，通过证据合成规则消除各通道评估结果的冲突，得到最终的设备状态概率分布，判断设备处于正常、轻度异常、重度异常还是故障状态。相较于单一融合算法，该组合融合方案既保留了深度学习提取深层特征的能力，又通过证据融合进一步降低了单一通道评估的不确定性，提升了评估可靠性。

第四，结果输出模块：输出机电设备当前的状态等级，推送对应的运维建议，若设备存在异常则给出异常位置与异常程度参考，为运维决策提供支撑。

四、实验验证与结果分析

为验证本文提出的基于传感融合的状态评估方法的有效性，本文以常用的电机转子实验台为测试对象，设置正常、转子不平衡、转子不对中、轴承磨损四种运行状态，分别布置振动传感器、温度传感器、电流传感器三类传感器采集数据，共采集 1200 组样本，按 7:3 比例划分为训练集与测试集，分别采用单一振动传感评估、多传感融合评估两种方案开展对比实验，实验结果如下：

单一振动传感的状态评估平均准确率为 82.7%，存在 11.2% 的漏判率与 6.1% 的误判率；本文提出的多传感融合评估方法平均准确率达到 96.3%，漏判率仅为 1.8%，误判率仅为 1.9%，评估精度较单一传感方法提升了 13.6 个百分点，验证了多传感融合技术能够有效整合多维度信息，降低单一传感数据的不确定性，显著提升机电设备状态评估的准确率。

五、结论与展望

针对复杂机电设备状态评估精度不足的问题，本文构建了基于多传感融合的状态评估框架，整合多源异构传感数据，通过深度学习与证据理论结合的融合方法实现状态评估，实验结果表明该方法相较于传统单一传感方法，评估精度更高，可靠性更强，能够有效识别机电设备的早期故障，为工业机电设备的预测性维护提供可靠的技术支撑。

未来研究可以从两个方向进一步优化：一是针对极端工况下传感数据缺失问题，研究基于生成对抗网络的数据补全方法，提升方法在恶劣工业环境下的适应性；二是结合边缘计算技术，将融合评估模型部署在设备端，实现低延迟的在线状态评估，进一步提升工业应用价值。

参考文献

- [1] 周东华, 胡艳艳. 机电设备故障诊断与预测技术研究进展[J]. 自动化学

报, 2013, 39(6): 711-722.

[2] 刘吉臻, 李刚, 曾德良. 多传感器信息融合在发电设备状态监测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 119-128.

[3] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测与健康管理工作综述[J]. 电子学报, 2015, 43(2): 315-327.