

机电一体化设备的状态监测与健康评估研究

赵旭东 130982199005110318

摘要：本文构建了面向机电一体化设备的多维状态监测与健康评估体系，阐述了多源传感与边缘预处理、故障特征提取、数据驱动与混合评估模型及剩余寿命预测方法，分析了关键技术挑战并展望了 AI、数字孪生与标准化驱动的未来发展路径，为设备预测性维护与可靠性管理提供参考。

关键词：状态监测;健康评估;多源传感;边缘计算;故障特征提取;剩余使用寿命;数据融合;数字孪生;预测性维护;标准化

一、引言

机电一体化设备作为工业生产、工程建设与社会服务领域的核心装备，其健康状态直接决定了生产连续性、作业安全性与运营经济性。技术的深入研究与应用，不仅能延长设备使用寿命、降低运维成本，更能为工业数字化转型提供核心技术支撑，对提升制造业核心竞争力、保障关键基础设施稳定运行具有重要理论价值与实践意义。

二、机电一体化设备状态监测体系构建

（一）多维度监测指标体系

状态监测指标体系的构建需覆盖设备机械、电气、液压、气动等核心系统，形成多维度、全生命周期的监测网络。机械系统聚焦振动、温度、位移、噪声等关键参数，其中振动信号包含设备转子不平衡、轴承磨损、齿轮啮合故障等核心故障特征；温度参数涵盖电机绕组、轴承座、液压油等关键部位，直接反映设备发热异常状态。电气系统以电流、电压、功率、绝缘电阻为核心监测对象，通过分析电流谐波、电压波动等参数识别电气元件老化、线路故障等问题。

（二）监测数据采集技术

数据采集系统采用“多源异构传感器+边缘网关”的分布式架构，确保数据采集的精准性、实时性与可靠性。传感器选型遵循工业级标准，振动传感器采用压电式或磁电式传感器，具备宽频响、高灵敏度特性，可捕捉低频到高频的振动信号；温度传感器采用热电偶、红外测温仪等，满足不同工况下的测温需求；电气参数采集依托智能电表、电流互感器等设备，实现高精度数据采集。

三、机电一体化设备健康评估方法

（一）数据预处理技术

数据预处理是提升评估准确性的关键环节，通过一系列算法优化数据质量。首先采用数字滤波技术，运用低通、高通、带通滤波器去除环境干扰、传感器噪声等冗余信息；针对数据采集过程中的缺失值，采用插值法、均值填充法等进行补全；通过异常值检测算法识别传感器故障、传输错误导致的异常数据，避免其影响评估结果。在此基础上，采用时域分析（均值、方差、峰值、峭度等）、频域分析与时频域分析（小波变换、短时傅里叶变换）等方法提取数据特征，将原始数据转化为具有故障辨识度的特征向量，为健康评估提供核心输入。

（二）健康评估模型构建

健康评估模型融合传统信号处理与人工智能算法，形成多层次评估体系。基于规则的评估模型依托设备手册、专家经验与故障特征库，建立监测参数与健康状态的映射关系，通过阈值判断、趋势分析等实现初步评估，适用于简单故障模式识别。基于机器学习的评估模型通过支持向量机、神经网络、随机森林等算法，利用历史数据训练模型，实现健康状态的量化评估与故障类型识别，其中深度学习模型可自动提取高维数据特征，提升复杂故障评估准确性。

四、状态监测与健康评估关键技术

（一）故障特征提取技术

故障特征提取是连接数据采集与健康评估的核心环节，针对不同监测参数采用差异化提取方法。振动信号通过小波包分解、经验模态分解等技术分解为不同频段分量，提取各分量的能量熵、奇异值等特征，识别设备机械故障；电流信号采用谐波分析、Park 矢量变换等方法，提取谐波含量、零序电流等特征，诊断电机绕组故障、转子断条等问题；温度信号通过趋势分析、温差计算等提取异常升温速率、温度梯度等特征，判断设备散热故障、摩擦加剧等问题。多源特征融合技术通过加权融合、特征级融合等方法，整合不同参数的故障特征，提升故障识别的全面性与准确性。

（二）剩余使用寿命预测技术

剩余使用寿命预测技术基于设备健康状态趋势与故障演化规律，实现定量预测。基于物理模型的预测方法通过建立设备故障演化的数学模型，结合材料特性、运行工况等参数，推导剩余使用寿命，适用于结构明确的简单设备；基于数据驱动的预测方法利用历史监测数据与故障记录，通过时间序列分析、机器学习等算法构建预测模型，适用于复杂机电一体化设备；混合预测方法融合物理模型与数据驱动模型的优势，既考虑设备物理特性，又利用数据反映实际运行状态，提升预测精度。预测过程中需动态修正模型参数，结合实时监测数据更新预测结果，确保预测准确性。

五、当前面临的主要挑战

（一）技术层面挑战

复杂工况下的干扰抑制难度较大，工业环境中的电磁干扰、振动干扰、温度波动等易导致监测数据失真，影响评估准确性。多源异构数据的融合分析面临挑战，不同类型、不同维度的数据格式差异大，难以有效整合挖掘；部分设备老旧，缺乏标准监测接口，增加了数据采集难度。核心算法的泛化能力不足，现有评估模型多针对特定设备或故障类型，面对不同品牌、不同型号设备的适应性较差，复杂多故障耦合场景下的诊断精度有待提升。

（二）成本与标准化挑战

系统建设与运维成本较高，高精度传感器、边缘网关、云端服务器等硬件设备投入较大，软件开发与模型训练需要专业技术人员，中小企业难以承担全面升级改造费用。行业标准化体系不完善，缺乏统一的监测指标、数据格式、通信协议与评估标准，导致不同厂商的设备与系统难以互联互通，数据共享困难。技术更新迭代速度快，已建成系统的升级与兼容成本较高，部分企业面临“建设即落后”的困境，制约了技术的广泛应用。

六、未来发展趋势

（一）技术融合深度升级

未来将朝着多技术深度融合方向发展，人工智能大模型与健康评估的结合将实现故障特征自动提取、评估模型自适应优化与诊断决策智能化，大幅提升复杂故障处理能力；数字孪生技术的全面应用将构建设备全生命周期虚拟映射，实现运行状态模拟、故障仿真分析与维护方案优化的一体化；5G-A、6G 技术的普及将实现毫秒级低时延数据传输与千亿级设备接入，支撑大规模、跨地域设备协同监测。

（二）标准化与模块化发展

行业标准化进程将加速推进，统一的监测指标体系、数据传输协议、评估标准与接口规范将逐步建立，打破不同厂商、不同系统之间的兼容壁垒，提升系统的通用性与扩展性。模块化设计将成为主流，通过构建标准化的感知模块、数据处理模块、评估模块与应用模块，实现系统的快速搭建、灵活扩展与按需配置，降低建设与维护成本。开源平台与标准化解决方案的推广应用，将推动技术普及，助力中小企业快速实现设备健康管理升级。

七、结论

机电一体化设备的状态监测与健康评估技术通过构建多维度监测体系、融合先进数据处理与评估算法，实现了设备健康状态的精准感知、量化评估与智能决策，为预测性维护提供了核心技术支撑，在提升设备运行可靠性、降低运维成本、推动工业数字化转型等方面展现出显著

价值。未来，需通过技术创新突破核心瓶颈，完善行业标准化体系，加强复合型人才培养，推动该技术在各行业的广泛应用，为制造业高质量发展、关键基础设施稳定运行提供坚实保障。

参考文献

[1]吴恩来.机电一体化在工程机械设备中的运用[J].电子技术与软件工程,2019,(04):106.DOI:10.20109/j.cnki.ets.2019.04.071.

[2]周柳奇,施力仁.机电一体化设备的故障诊断技术探析[J].电子世界,2013,(22):195.

[3]王树璞.煤矿综采设备机电一体化的现状和发展[J].能源基地建设,1995,(04):22-24.