

机电一体化设备的振动监测与诊断研究

游亚涛 130429199204061038

摘要

机电一体化设备是现代工业生产体系的核心组成，其运行稳定性直接影响生产效率与生产安全，设备故障引发的非计划停机不仅会造成巨大的经济损失，还可能引发安全事故。振动信号蕴含丰富的设备运行状态信息，是反映机电设备故障特征最直观的载体，基于振动信号的监测与故障诊断也成为机电一体化设备状态维护领域的研究热点。本文围绕机电一体化设备振动监测与诊断的核心流程展开分析，介绍振动监测系统的组成框架与常见信号处理方法，探讨当前主流的故障诊断技术应用路径，总结当前研究存在的不足与未来发展方向，为机电一体化设备的状态监测与 predictive 维护提供参考。

关键词：机电一体化；振动监测；故障诊断；信号处理

一、机电一体化设备振动监测的研究背景与意义

机电一体化技术融合了机械工程、电子信息技术、自动控制技术与计算机技术，是现代装备制造领域的核心技术方向，广泛应用于数控加工设备、工业机器人、风力发电装备、轨道交通牵引设备等高价值工业设备中。这类设备结构复杂度高，长期处于连续运行、变负载的工况下，机械部件的磨损、疲劳、松动等故障是影响设备寿命与运行安全的主要诱因。数据显示，工业领域超过 70% 的旋转机械故障都可以通过振动信号的异常变化反映出来，因此建立科学完善的振动监测与故障诊断体系，能够及时识别设备早期故障隐患，避免突发性故障发生，对实现设备从计划维修向状态维修的转型、降低企业运维成本具有重要的现实意义。

二、机电一体化设备振动监测系统的结构组成

完整的机电一体化设备振动监测系统主要由信号采集模块、信号传输模块、数据处理与分析模块三个核心部分组成，各模块协同运行实现对设备振动状态的实时感知与故障识别。

第一，信号采集模块是振动监测系统的基础，核心部件是振动传感器，需要根据机电设备的结构特点、监测位置与故障类型选择适配的传感器类型。当前工业领域常用的振动传感器包括压电式加速度传感器、电容式加速度传感器、电涡流位移传感器、速度传感器等，其中压电式加速度传感器灵敏度高、频率范围宽，

适合采集机电设备高频振动信号，多用于滚动轴承、齿轮箱等核心部件的故障监测；电涡流位移传感器则适合测量轴类部件的径向振动与轴向位移，多用于转子系统的状态监测。信号采集模块还包含信号调理电路与数据采集卡，负责对传感器输出的模拟信号进行放大、滤波、模数转换，将其转化为计算机可以处理的数字信号。

第二，信号传输模块负责将采集到的振动数据传输至后端处理平台，当前有线传输方式主要采用工业以太网、PROFIBUS 等现场总线方式，稳定性高、抗干扰能力强，适合固定安装的大型机电一体化设备；无线传输方式则采用蓝牙、Wi-Fi、NB-IoT、5G 等技术，无需布线，适合布线难度大、可移动的机电设备，比如工业机器人、移动式工程机械等，近年来随着低功耗广域网技术的发展，无线传输的稳定性与传输距离已经能够满足多数工业场景的需求。

第三，数据处理与分析模块是振动监测系统的核心，负责对传输过来的振动数据进行存储、处理、分析与诊断，最终输出设备的健康状态评估结果与故障预警信息。当前该模块已经从传统的本地计算机处理，逐步向云端平台转型，依托云计算的强大算力，可以支撑大规模多设备的同时监测与复杂诊断算法的运行，降低企业的本地硬件投入成本。

三、振动信号处理与故障诊断的常用方法

机电一体化设备的振动信号往往包含多种噪声干扰，且早期故障的特征信号较弱，容易被噪声淹没，因此需要通过合适的信号处理方法提取故障特征，再通过诊断方法识别故障类型与故障程度。

（一）常用的振动信号处理方法

传统的信号处理方法以时域分析与频域分析为主，时域分析直接对振动信号的时间序列进行统计分析，通过计算均方根、峰值、偏度、峭度等时域指标判断设备状态，其中峭度指标对脉冲类故障比较敏感，适合检测轴承、齿轮的早期剥落故障，计算方法简单，适合在线监测。频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，从频谱中识别出对应故障的特征频率，比如滚动轴承的内圈故障、外圈故障、滚动体故障都有对应的特征频率，通过频谱分析可以快速定位故障部件。但傅里叶变换适合处理平稳信号，而机电一体化设备很多情况下处于变转速、变负载的工况，振动信号属于非平稳信号，傅里叶变换无法体现信号的时频局部化特征，因此后续发展出了多种时频分析方法。

常用的时频分析方法包括小波变换、经验模态分解（EMD）、变分模态分解（VMD）等，这类方法可以将非平稳信号分解为不同频率分量的组合，能够提取

出淹没在强噪声中的弱故障特征，解决了非平稳工况下的故障特征提取问题。其中变分模态分解能够克服经验模态分解存在的模态混叠问题，在机电设备故障特征提取中得到了广泛应用。

（二）常用的故障诊断方法

当前机电一体化设备的故障诊断方法主要可以分为基于模型的方法、基于信号特征的方法与基于数据驱动的方法三类。基于模型的方法需要建立设备的精确物理模型，通过对比实际观测数据与模型输出的残差判断故障，这类方法在设备结构明确、模型精度较高的情况下诊断准确率较高，但机电一体化设备结构复杂，很多故障的机理尚未完全明确，建立精确物理模型的难度较大，因此应用范围受到限制。

基于信号特征的方法通过提取振动信号的时域、频域、时频特征，结合专家系统或者模式匹配的方式识别故障，这类方法依赖于诊断专家的经验知识，对已经明确特征的故障诊断效果较好，但对未知故障的适应性较差，知识获取与更新的难度较大。

四、当前研究存在的问题与未来发展方向

虽然当前机电一体化设备振动监测与诊断技术已经取得了很多研究成果，但在实际工业应用中仍然存在一些需要解决的问题：一是早期弱故障特征提取难度大，机电设备早期故障的特征信号非常弱，很容易被强背景噪声掩盖，现有方法的提取精度仍然有待提升；二是变工况下的故障诊断准确率偏低，实际工业生产中机电设备大多处于变转速、变负载的工况，不同工况下振动信号的分布差异较大，影响诊断模型的泛化能力；三是端边云协同的监测体系还不够完善，大量边缘端设备的计算能力有限，如何将复杂诊断模型轻量化部署在边缘端，实现监测数据的边缘预处理，降低数据传输带宽与云端算力压力，仍然是需要研究的问题。

五、结论

振动监测与诊断是保障机电一体化设备安全稳定运行的核心技术，随着传感器技术、人工智能技术与物联网技术的不断发展，该技术已经从传统的人工分析发展到智能化诊断阶段，在工业领域的应用范围不断扩大。本文梳理了振动监测系统的组成结构，总结了常用的信号处理与故障诊断方法，分析了当前研究与应用中存在的问题，指出了未来的发展方向。未来随着相关技术的不断成熟，智能化振动监测与诊断技术将进一步推动机电设备维护模式的转型升级，为工业生产的安全高效运行提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 屈梁生, 何正嘉. 机械故障诊断学[M]. 上海科学技术出版社, 1986.
- [2] 钟秉林, 黄仁. 机械故障诊断学[M]. 机械工业出版社, 2006.
- [3] 雷亚国, 贾旭, 孔德政. 大数据驱动下机械设备智能故障诊断研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 71-81.