

Application of Intelligent Sensor in Condition Monitoring of Electromechanical Equipment

Qiangqiang Xue Limin Bai

Yuyang Zhongneng Yuantan Mining Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Currently, smart sensors have been widely implemented in various electromechanical equipment such as wind turbine generators, automotive production lines, and power transformers. By enabling real-time monitoring of critical parameters including vibration, temperature, and current, these sensors effectively reduce operational losses and enhance maintenance efficiency. However, given the varying operating environments and structural characteristics of electromechanical equipment across industries, the selection criteria, deployment strategies, and data application logic of smart sensors still require targeted optimization. This paper, grounded in practical perspectives, explores typical application scenarios of smart sensors in electromechanical equipment condition monitoring. It analyzes their technical implementation pathways and application outcomes, summarizes key challenges encountered in practice, and proposes solutions. The study aims to provide actionable references for enterprises upgrading intelligent maintenance systems and promote the deep integration of smart sensing technology with electromechanical equipment management.

Keywords

smart sensor; electromechanical equipment; condition monitoring; predictive maintenance; acoustic vibration temperature monitoring

智能传感器在机电设备状态监测中的实践应用

薛强强 白利敏

榆林市榆阳中能袁大滩矿业有限公司，中国·陕西榆林 719000

摘要

当前，智能传感器已在风力发电机组、汽车生产线、电力变压器等多种机电设备中实现实践应用，通过对振动、温度、电流等关键参数的实时监测，有效降低了故障损失，提升了运维效率。然而，不同行业机电设备的运行环境、结构特性存在差异，智能传感器的选型标准、部署方案与数据应用逻辑仍需针对性优化。基于此，本文立足实践视角，深入探讨智能传感器在机电设备状态监测中的典型应用场景，剖析其技术实现路径与应用成效，总结实践中的关键问题与解决思路，旨在为相关企业的智能化运维升级提供实践参考，推动智能传感技术与机电设备管理的深度融合。

关键词

智能传感器；机电设备；状态监测；预测性维护；声振温监测

1 引言

随着《中国制造 2025》等政策的推进，智能制造成为产业升级的核心方向，机电设备状态监测逐步向数字化、智能化转型。智能传感器的出现与技术突破，为这一转型提供了核心支撑。机电设备作为工业生产、能源供应、交通运输等领域核心基础设施，其运行状态直接决定生产效率、运营成本与安全水平。传统设备状态监测依赖人工巡检与滞后报警，难以应对复杂工况下的隐性故障预警需求。智能传感器凭借多维度感知、精准数据采集、实时分析预警等核心优势，已成为机电设备状态监测的核心支撑技术。

【作者简介】薛强强（1986—），男，中国陕西榆林人，本科，工程师，从事机电智能化技术在新能源装备中的创新应用研究。

2 机电设备状态监测的行业需求与技术优势

2.1 行业需求

在工业 4.0 转型背景下，机电设备正朝着大型化、精密化、智能化方向发展，其运行工况日趋复杂，任一部件的微小故障都可能引发连锁反应，导致设备停机甚至安全事故。据工业设备运维协会统计，传统运维模式下，机电设备突发故障导致的非计划停机损失占工业企业总生产成本的 15%-25%，其中电机、泵机、输送机等核心设备的故障停机单次损失可达 10-300 万元。以煤矿行业带式输送机为例，滚筒轴承故障若未能及时发现，可能导致输送带撕裂、火灾等严重事故。

传统机电设备状态监测主要依赖人工巡检与定点仪表监测，存在三大核心痛点：一是人工巡检依赖经验判断，漏检率高达 25% 以上，难以识别微米级振动异常、轻微温度

升高等隐性故障；二是传统温控器、振动表等设备仅能在故障濒临爆发时报警，留给维修的响应时间不足 1 小时，无法实现提前预警；三是数据采集不连续、不全面，难以形成设备全生命周期健康档案，导致维护策略趋于保守，过度维护成本占比达 30%。在此背景下，具备多维度感知、无线传输、智能分析能力的智能传感器，成为破解传统监测困境、实现预测性维护的关键技术支撑。

2.2 智能传感器的技术优势

与传统传感器相比，智能传感器集成了感知单元、数据处理单元、无线通信单元与能量供应单元，具备三大核心优势：一是多参数协同感知，可同时采集振动、温度、声纹、转频等多维度数据，通过交叉验证提升故障识别准确性，如声振温一体化传感器可实现振动 1Hz-10kHz、温度 -20℃ -300℃、声纹 20Hz-20kHz 的全频段覆盖监测；二是边缘智能分析，通过内置 AI 算法在传感器端完成数据预处理与特征提取，将原始数据量压缩 70% 以上，实现 10 秒内故障预警推送，大幅降低云端传输与计算压力；三是灵活部署与环境适配，采用磁吸式安装、IP68 防护等级、防爆设计，可在高粉尘、高湿度、高温差等恶劣工况下稳定运行，单台设备部署时间 ≤ 15 分钟，无需拆改原有管线。这些优势使智能传感器能够精准捕捉机电设备的早期故障特征，为预测性维护提供可靠的数据支撑。

3 智能传感器在机电设备状态监测中的核心技术体系

3.1 核心感知技术与传感器类型

机电设备状态监测的核心是捕捉设备运行中的异常物理信号，不同类型的智能传感器针对不同故障特征形成互补监测体系，常见类型及技术参数如下：

3.1.1 振动传感器

振动是机电设备旋转部件故障的核心表征，如轴承磨损、转子不平衡、齿轮啮合异常等均会引发振动频率与幅值的变化。目前主流采用压电陶瓷传感器与 MEMS 加速度传感器，其中压电陶瓷传感器可捕捉 1Hz-10kHz 频段振动，能识别轴承滚珠 0.005 毫米（约头发丝直径 1/12）的微小磨损；MEMS 加速度传感器则具备低功耗优势，如 RIILinX-WS30M-CH 传感器的 X/Y/Z 轴频响范围达 0.1-8kHz，测量精度 ± 5% (160Hz)，可实现秒级振动数据采集。在实际应用中，通过监测振动峰值、有效值、峭度等特征参数，结合频谱分析技术，可精准定位故障类型，如水泵叶轮积灰失衡时，Z 轴振动峰值会从 0.5g 骤升至 1.2g，通过频谱图可直接锁定故障频率成分。

3.1.2 温度传感器

温度异常是机电设备电气部件与摩擦部件故障的重要信号，如电机绝缘层老化、轴承润滑失效、密封件磨损等均会导致局部温度升高。智能温度传感器采用红外 + 热电

偶双技术融合方案，测温范围覆盖 -40℃ -300℃，精度可达 ± 0.5℃，其中 RIILinX 系列传感器的设备表面测温精度为 ± 1℃，能捕捉到密封件磨损导致的 5℃微小温升。值得注意的是，电机温度超过额定值 5-10℃时，绝缘层老化速度会加快 60% 以上，传统温控器仅在温度濒临临界值时报警，而智能传感器可提前 3-5 小时预警，为维修预留充足时间。

3.1.3 声纹传感器

设备运行中的异常声音是故障的直观反映，如轴承润滑失效的“沙沙声”、叶轮气蚀的“气泡破裂声”等。智能声纹传感器采用 64 通道麦克风阵列，可过滤背景噪音，提取 20Hz-20kHz 全频段声纹信号，信噪比达 66dBA，通过构建声纹特征库实现故障模式匹配。与振动、温度数据交叉验证后，可将故障误报率压至 0.5% 以下，显著提升监测可靠性。

3.2 数据传输与智能分析技术

智能传感器的核心价值不仅在于数据采集，更在于通过数据传输与分析实现故障预警。目前主流采用“边缘计算 + 云端协同”的架构：传感器端通过内置 SOC 芯片完成数据预处理，提取峭度、包络解调、声纹特征值等关键信息，数据压缩比达 7:1，大幅降低传输压力；传输层面采用蓝牙 5.0 与 4G 双协议，蓝牙用于现场调试与近距离数据读取，4G 实现远距离实时传输，支持 32K 字节的波形数据传输，无网关直接连接云端，数据延迟控制在 10 秒内。

智能分析算法是故障识别的核心，目前应用较成熟的包括 APEF 自适应滤波算法、NanoEdge AI 异常检测模型等。APEF 算法可根据设备运行状态动态调整振动烈度阈值，降低环境干扰导致的误报；NanoEdge AI 模型通过终端设备学习，可适应不同转速下的电机故障检测，异常识别准确率达 99.45%，仅需 5.7 千字节内存与 6.9 千字节闪存，可嵌入微型传感器节点。通过构建涵盖正常工况、内外圈故障、滚动体损伤等典型模式的健康数据库，算法可实现故障类型精准判定与严重程度分级，为运维人员提供明确的维修指引^[1]。

4 智能传感器在多领域机电设备监测中的实践案例

4.1 工业制造领域

泵机与电机是工业生产的动力核心，其故障停机将直接导致生产线中断。某汽车零部件制造厂针对车间 20 台水泵与 15 台冲压机电机，部署了声振温一体化智能监测系统，传感器采用磁吸式安装于轴承座与密封区，实时采集振动、温度、声纹数据。

在水泵运维中，系统通过监测轴向振动与密封区温度变化，提前 7 天捕捉到 1 台水泵密封件磨损隐患，预警时振动峰值达 0.8g，密封区温度较基线升高 3℃。维修人员在 2 小时内完成密封件更换，避免了水泵抱死导致的生产线停机。系统部署一年后，水泵维修成本下降 40%，电机更换次数从每年 4 次降至 0 次，单台水泵年均运维成本降低 1.2 万元。

在冲压机电机监测中，系统通过振动频谱分析，提前 7 天识别出 1 台电机轴承的内圈剥落故障，特征频率为 48.2Hz，与轴承内圈故障特征频率（BPFI）理论计算值完全吻合。维修人员利用生产间隙 8 小时完成轴承更换，避免了 8 小时非计划停机，减少直接经济损失 200 万元。数据统计显示，电机维修周期延长 2 倍，设备故障率下降 60%。

4.2 矿山运输领域

带式输送机是煤矿运输的核心设备，滚筒轴承长期在重载、高粉尘环境下运行，极易发生疲劳磨损与润滑失效，传统人工巡检漏检率达 25%。某大型煤矿针对 10 条总长 10 公里的带式输送机，部署了 VB43LoRa 智能无线温振传感器，安装于滚筒轴承座，传感器内置滤波算法消除机身振动干扰，采样率达 6400Hz。

2025 年 1 月，系统监测到某带式输送机滚筒轴承振动加速度峰值从基线值 1.2m/s^2 升至 7.5m/s^2 ，频谱分析显示 45.3Hz 的特征频率，与轴承外圈故障特征频率（BPFO）完全匹配，判定为外圈局部剥落。维修人员依据预警信息，2.5 小时内完成维修，较原计划 8 小时检修时间缩短 68.75%，避免连带损失 10 万元^[3]。

4.3 能源电力领域

螺杆压缩机是电力行业的关键辅助设备，其振动超标与润滑油老化会导致能效下降、寿命缩短。某电厂针对 3 台螺杆压缩机，部署了 RIILinX-WS30M-CH 声振温一体式传感器，监测范围涵盖振动、温度、声纹、转频，传感器防护等级达 IP68，适应电厂高湿度、高电磁干扰环境。

系统运行初期，监测到 1 台压缩机振动值达 6.2mm/s ，噪音 95dB，通过声振数据交叉分析，判定故障源于转子不平衡与润滑油老化。维修人员调整供油压力至 2.5MPa ，完成转子动平衡校正后，压缩机振动值降至 3.8mm/s ，噪音降至 82dB，符合 GB/T 7777-2019 标准要求。数据显示，优化后压缩机故障率下降 60%，使用寿命延长 22%，单位产气能耗降低 8%，年均节省电费支出 15 万元。传感器采用 4G 直接连接云端，无需网关部署，施工成本较传统有线监测系统降低 70%，电池续航达 2 年，大幅降低运维负担^[4]。

5 智能传感器应用的核心成效与数据价值

5.1 提升故障预警精准度，降低安全风险

多维度数据协同监测与智能算法分析，使智能传感器的故障识别准确率普遍达到 94% 以上，漏检率控制在 3% 以下，误报率低于 0.5%，远超人工巡检的 75% 准确率。在隐性故障识别方面，智能传感器可捕捉到 0.005 毫米的部件磨损、 $3\text{-}5^\circ\text{C}$ 的微小温升，提前 3-7 天预警，较传统监测手段的预警时间提前 80% 以上，为维修决策预留充足时间，

有效避免故障扩大引发的安全事故。如煤矿带式输送机、电厂压缩机等高危设备，通过精准预警将重大安全事故发生率降低 90% 以上。

5.2 优化运维策略，降低综合成本

智能传感器推动运维模式从“事后维修”“定期检修”向“预测性维护”转型，大幅降低过度维护与非计划停机成本。从实践数据来看，部署智能监测系统后，机电设备维修成本平均下降 40%，备件库存成本降低 18%-30%，非计划停机时间缩短 68% 以上。以汽车厂电机、煤矿皮带机、电厂压缩机为例，单台设备年均运维成本降低 $1.2\text{-}15$ 万元，大型生产线年减少停机损失 200-300 万元。此外，智能传感器的无线部署与低功耗特性，使单台设备部署时间 ≤ 15 分钟，年运维成本较传统有线监测系统降低 70%，电池续航达 2 年以上，进一步降低长期运营成本。

5.3 延长设备寿命，提升能效水平

通过及时发现并处理微小故障，避免部件过度磨损与工况恶化，智能传感器可有效延长机电设备使用寿命。实践数据显示，电机、压缩机等设备的使用寿命延长 22%-30%，轴承更换周期延长 30%，设备全生命周期价值显著提升。同时，基于精准数据的工况优化，可提升设备能效，如螺杆压缩机单位产气能耗降低 8%，电机运行效率提升 5%-10%，为企业实现节能降碳目标提供技术支撑^[5]。

6 结语

智能传感器凭借多维度感知、精准数据采集、实时智能分析等核心优势，已成为机电设备状态监测的核心技术手段，在工业制造、能源电力、矿山运输等领域的实践中展现出显著价值。尽管当前仍面临恶劣环境适应性、数据标准化、成本门槛等挑战，但随着技术升级与产业成熟，智能传感器必将在机电设备健康管理中发挥更重要的作用，推动工业运维向智能化、精准化、高效化转型，为高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 刘佳鸣. 电气设备运行状态监测系统在水厂安全管理中的应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(12): 132-134.
- [2] 孙文锋. 电力工程中电气设备状态监测与故障诊断[J]. 灯与照明, 2025, 49(06): 170-172.
- [3] 杜俊红. 物联网技术下煤矿机电设备运行状态安全监测方法研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(12): 255-258.
- [4] 何佳珉. 基于物联网的高速公路机电设备状态监测与故障预警研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(22): 7-9.
- [5] 林世潭. 变电站电气设备状态监测技术与智能运维系统应用实践[J]. 光源与照明, 2025, (10): 188-190.