

物联网感知技术赋能工业设备运行监测

孙雅雯

江苏理工学院, 江苏 常州 213001

[摘要] 工业设备运行监测面临测点分散、数据异构、异常发现滞后和系统协同不足等问题。物联网感知技术通过多源传感、边缘处理和网络传输, 建立设备状态连续获取与分层分析链路。文章分析振动、温度、电流、压力等信号的采集机理, 讨论数据融合、状态识别和分级预警方法, 结合公开试验数据归纳其应用成效, 并提出测点规划、边缘部署、平台集成、安全管理和效果评价路径, 为工业设备监测体系建设提供参考。

[关键词] 物联网; 感知技术; 工业设备; 运行监测; 故障预警

DOI: 10.64635/ja.2026.1440

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

IoT Sensing Technology Empowering Operational Monitoring of Industrial Equipment

Sun Yawen

Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China

Abstract: Operational monitoring of industrial equipment faces problems such as scattered measuring points, heterogeneous data, delayed anomaly detection, and insufficient system coordination. Through multi-source sensing, edge processing, and network transmission, IoT sensing technology establishes a continuous acquisition and hierarchical analysis chain for equipment status. This paper analyzes the acquisition mechanisms of signals such as vibration, temperature, current, and pressure, discusses methods for data fusion, condition identification, and graded early warning, summarizes application effects based on publicly available experimental data, and proposes pathways for measuring point planning, edge deployment, platform integration, safety management, and effectiveness evaluation, providing reference for the construction of industrial equipment monitoring systems.

Keywords: Internet of Things; sensing technology; industrial equipment; operational monitoring; fault early warning

引言

工业设备是生产系统保持连续运行的物质基础。电机、泵、风机、压缩机、机床和输送装置长期处于负载变化、环境扰动与部件磨损共同作用之下, 轴承损伤、转子不平衡、润滑劣化、绝缘老化及连接松动等问题会逐步改变设备振动、温度、电流和声学特征。依靠人工巡检和固定周期检修, 难以持续捕捉短时冲击及缓慢退化, 也容易出现检修时点与真实状态不匹配的情况。

物联网感知技术把传感器、标识节点、边缘终端和通信网络连接起来, 为设备状态的连续采集、远程传输和协同分析提供基础。严新平、张月雷较早提出, 物联网环境下的机械系统状态监测需要同时关注可监测性设计、在线传感器和技术标准体系^[1]。设备监测因而不能停留在增加传感器数量, 还要解决测什么、在哪里测、怎样传、如何识别及怎样服务维修等问题。感知层负责获得可信信号, 边缘层负责实时处理, 平台层负责关联分析, 业务层负责预警处置与资产管理, 各层功能共同决定监测效果。

1 物联网感知技术与工业设备运行监测

1.1 监测对象与感知信息

工业设备运行监测是对设备结构、运动、能量转换和环境条件进行连续或周期性测量, 并依据特征变化识别运行状态的技术活动。监测对象可分为动力部件、传动部件、执行部件、控制部件和辅助系统。动力部件重点关注电流、电压、功率和绕组温度, 传动部件重点关注振动、转速、扭矩和润滑状态, 执行部件重点关注位移、压力、流量和动作周期, 控制部件重点关注通信状态、指令反馈和故障代码。

不同信号反映的故障机理存在差异。振动信号对轴承点蚀、齿轮啮合异常及转子不平衡较为敏感, 温度信号适合观察摩擦、散热和电气过载, 电流信号可反映电机负载、转子及绕组状态, 声发射信号有利于捕捉早期裂纹和微弱冲击, 油液颗粒及介电特性可表征磨损和污染程度。单项信号容易受到工况、安装位置和环境噪声影响, 多源感知能够借助信息互补提高状态描述的完整性。

1.2 分层架构与数据链路

物联网监测体系可划分为感知层、边缘层、网络

层、平台层和应用层。感知层由传感器、数据采集器和设备标识组成,承担信号测量、时间标记与初步校验。边缘层靠近设备部署,完成滤波、压缩、特征提取和异常初筛。网络层通过工业以太网、现场总线、无线局域网、低功耗广域网或蜂窝网络传输数据。平台层负责存储、模型计算、设备关联和趋势分析。应用层向运维人员提供状态看板、异常告警、工单和检修建议。

完整数据链路包括“设备状态—传感转换—边缘处理—网络传输—平台分析—业务响应”。时间同步、设备编码和数据质量标记贯穿各环节。采集数据只有关联设备位置、运行负载、维修记录和环境条件,才能解释其工程含义。缺少工况信息时,同一振动幅值可能被分别解释为正常负载变化或部件异常,监测结论的可靠性会明显下降。

2 工业设备运行监测的关键技术

2.1 多源传感器配置

传感器配置需依据设备失效模式、故障传播路径和监测目标确定。关键轴承座可布置三向加速度传感器,电机绕组及轴承附近可设置温度测点,电源回路可配置电流和电压传感器,液压及气动系统可布置压力、流量和泄漏检测节点。高速旋转设备重视采样频率和动态范围,慢速重载设备更关注低频响应、冲击信号及长周期趋势。

测点配置不以数量多为目标。传感器位置偏离故障传递路径、安装刚度不足或采样参数不匹配,会形成大量低价值数据。测点设计可先开展故障模式与影响分析,明确关键部件、主要失效形式和可观测信号,再结合现场空间、供电、通信及维护条件确定节点。传感器还需建立编号、量程、精度、校准时间和安装位置档案,保证跨周期数据具备可比性。

2.2 边缘采集与可靠传输

高频振动与声学信号数据量大,全部原始数据持续上传会占用带宽和存储资源。边缘节点可执行去噪、重采样、频谱计算、特征提取与事件截取,仅上传状态特征、异常片段和周期性原始样本。杨琪等构建了设备层、边缘层和云层三层监测系统,在高速机床主轴试验台上的结果显示,该系统较云计算监测架构减少 29.5% 的输出时延,并节省 81.3% 的云层存储空间^[2]。数据表明,边缘处理可改善实时性和资源配置效率。

可靠传输需要兼顾时延、丢包、功耗和抗干扰能力。控制保护类数据具有较高实时要求,宜采用有线网络或确定性通信。移动设备、分散设备和改造受限区域可采用无线接入。网关可完成协议转换、数据缓存和断点续传,网络中断期间保存关键数据,连接恢复后按时间顺序补传。时间戳由统一时钟管理,可降低多传感器融合中的相位偏差。

2.3 状态识别与分级预警

状态识别包括阈值判断、趋势分析、特征匹配和模型诊断。固定阈值适合边界清楚的温度、压力和液位指标,动态阈值可结合负载、转速与环境条件调整。振动信号常提取均方根值、峰值、峭度、频带能量及包络谱特征,再与健康基线、故障样本或诊断模型比较。刘立等采用一维卷积神经网络开展轴承健康监测,说明原始振动数据与联合特征可服务状态识别和故障分类^[3]。

预警宜设置关注、异常和严重三级状态。关注级反映指标轻微偏离,系统增加采样密度并持续观察。异常级表明退化趋势较明确,运维人员开展现场复核。严重级对应安全边界或快速恶化,系统联动工单、停机评估及应急处置。预警信息需同时给出设备、测点、异常指标、持续时间、关联工况和证据片段,避免只提供缺乏解释的颜色标识。

3 物联网感知技术的应用价值

3.1 运行状态可视化与故障发现

物联网感知网络把离散巡检记录转化为连续时间序列,可呈现设备启停、负载波动和性能退化过程。管理人员通过设备看板观察温度、振动、电流、压力及能耗的实时值和趋势,能够较早发现异常组合。例如,轴承振动增大并伴随温度持续上升,可能与润滑不足或磨损有关。电流波动与输出压力下降同时出现时,可进一步检查负载变化、叶轮堵塞或传动效率。

公开试验数据可为监测方案设计和算法验证提供统一条件。凯斯西储大学轴承数据中心记录了正常轴承及内圈、滚动体、外圈单点故障数据,试验条件和感知参数见表 1^[4]。这些数据适合验证振动采集、特征提取和故障分类流程,企业部署时仍需采集本地设备在真实负载、噪声和安装条件下的数据进行校正。

表 1 公开研究与试验中的工业设备监测数据

数据或试验项目	主要条件	公开结果或数据范围	监测启示
高速机床主轴边缘监测试验	设备层、边缘层、云层三层架构	输出时延减少 29.5%，云层存储空间节省 81.3%	高频数据宜在边缘侧完成特征处理 ^[2]
轴承故障公开试验	2 马力电机，负载 0 ~ 3 马力	转速 1797 ~ 1720 r/min	工况参数需与振动数据同步记录 ^[4]
轴承振动数据采集	驱动端、风扇端加速度测点	采样率 12 kHz，驱动端另含 48 kHz	采样率需匹配故障频率范围 ^[4]
轴承单点故障设置	内圈、滚动体和外圈故障	故障直径 0.007 ~ 0.040 英寸	故障类型与损伤程度影响信号特征 ^[4]

3.2 维修决策与设备资产管理

连续监测能够为定期维修向状态维修转变提供证据。系统根据异常趋势、设备重要度、备件周期和生产计划生成检修优先级，运维人员结合现场检查确定检修窗口。对于缓慢退化部件，可在计划停机期间更换。对于快速发展的异常，需要缩短复测间隔或安排停机检查。监测数据还可评价检修效果，比较检修前后的振动、温度和能耗变化。

设备全寿命管理可关联采购、安装、运行、保养、故障和报废信息。相同型号设备在不同生产线上的状态数据能够支持可靠性比较，识别安装质量、负载制度和维护方式带来的差异。故障模式、处理过程和恢复结果沉淀为案例库，可为同类异常提供检索依据。感知技术由单台设备监控扩展到设备群管理后，还能支持备件配置、检修资源调度和更新改造决策。

4 工业设备运行监测的现实问题

4.1 感知数据质量与工况差异

传感器漂移、安装松动、线路老化、电磁干扰和时间不同步都会改变数据质量。生产现场的转速、负载、温度及原料特性不断变化，正常工况切换可能与故障信号相似。若模型训练只采用稳定实验数据，投入现场后容易出现误报和漏报。凯斯西储大学数据具有明确故障类型和试验条件，适合基础验证，但与复杂生产环境仍存在差异。

数据治理需记录缺失、突变、漂移和噪声情况，并保存设备工况、传感器状态及维修事件。健康基线

可按设备、负载和季节分别建立，避免采用统一阈值解释全部工况。模型评价除准确率外，还需统计误报率、漏报率、预警提前量和跨工况稳定性。

4.2 网络接入与系统兼容

工业现场常同时存在不同年代、不同厂商和不同协议的设备。部分老旧设备缺少数字接口，只能外加传感器和采集终端。设备编码、测点命名、采样格式和时间标准不统一，会阻碍数据汇聚。无线网络还可能受到金属结构遮挡、电磁噪声和节点供电影响。

系统建设可通过工业网关完成协议适配，以统一数据模型描述设备、测点、指标和事件。实时监测网络与办公网络保持边界控制，关键数据设置本地缓存和冗余链路。平台接口需保留扩展能力，减少新增设备时的大量定制开发。

4.3 数据安全与建设成本

设备数据包含产量、工艺、能耗和运行节拍，泄露后可能暴露企业生产能力。感知节点数量多、分布广，弱口令、固件漏洞和非法接入会扩大攻击面。安全控制需覆盖节点身份认证、通信加密、访问权限、日志审计和补丁管理。远程控制功能与监测功能宜划分权限，预警系统不能未经授权直接改变关键设备运行状态。

建设成本包括传感器、网关、网络、平台、模型开发和长期维护。低价值设备全面布点容易造成投入分散。企业可依据设备关键度、故障损失、可监测性和数据基础选择对象，优先覆盖停机影响大、故障征兆清楚且维修价值高的设备。项目收益可通过非计划停机时间、故障发现时长、检修工时、备件占用和误报数量综合评价。

5 物联网感知技术的应用路径

5.1 分阶段监测体系建设

第一阶段开展设备分级和故障模式分析，确定关键设备、主要失效形式、监测信号和测点位置。第二阶段选择一类设备开展小范围试点，建立传感器安装、采样、传输、存储和告警流程。第三阶段引入边缘处理与多源融合，形成工况识别、动态阈值和异常证据保存能力。第四阶段连接设备管理、维修工单和备件系统，建立监测、复核、检修与效果评价闭环。

每个阶段设置可量化验收指标。感知层关注数据完整率、时间同步误差和传感器在线率，网络层关注传输时延、丢包和断点恢复，分析层关注误报率、漏报率和预警提前量，业务层关注停机时间、维修周期和检修成本。试点达到稳定运行条件后再扩展设备范

围,可降低一次性建设带来的技术和管理风险。

5.2 运行管理与评价机制

监测体系需要设备、自动化、信息、安全和生产人员共同参与。设备人员负责故障机理、测点和检修验证,自动化人员负责采集与控制接口,信息人员负责平台、网络和数据服务,安全人员负责权限和审计,生产人员提供工况与停机窗口。异常处置流程明确告警确认、现场复核、工单生成、维修实施和结果回填的责任主体。

传感器定期校准,边缘程序保留版本记录,诊断模型接受周期性复评。设备改造、负载调整和工艺变化可能改变数据分布,健康基线与阈值需同步更新。评价机制采用技术指标和业务指标结合的方式,既检查系统稳定性,也检验异常发现、维修决策和设备可靠性改善情况。对无实际价值的测点及时调整或撤除,把有限资源集中到关键风险。

6 结语

物联网感知技术通过多源传感、边缘计算、可靠通信和平台分析,构建设备状态连续获取与业务响应链路,为工业设备故障发现、状态维修和资产管理提

供数据基础。其应用质量取决于测点设计、数据可信度、工况关联和处置流程,单纯扩大采集规模难以形成稳定成效。企业可按设备分级、试点验证、边缘处理、系统集成和持续评价逐步建设监测体系,同时加强接口统一、安全控制和责任管理。感知数据与故障机理、维修记录及生产计划形成有效关联后,设备运行监测才能转化为可执行的维护决策。

【参考文献】

- [1] 严新平,张月雷.物联网环境下的机械系统状态监测技术展望[J].中国机械工程,2011,22(24):3011-3015.
- [2] 杨琪,刘畅,杨建维,等.面向边缘计算的机械装备状态监测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(9):226-234.
- [3] 刘立,朱健成,韩光洁,等.基于1D-CNN联合特征提取的轴承健康监测与故障诊断[J].软件学报,2021,32(8):2379-2390.
- [4] 凯斯西储大学工程学院.轴承数据中心及试验装置说明[DB/OL].[2026-07-30].