

智能制造背景下机器设备在线监测与检测技术

成广州 畅静静

天辰化工有限公司 新疆 石河子 832000

摘要：本文立足于智能制造的时代背景，系统性地剖析了在线监测与检测技术的内涵、核心构成及其在智能工厂中的战略定位。文章深入探讨了以工业物联网（IIoT）为神经、多源异构传感器为感官、边缘智能为前哨、云端大数据分析为大脑的现代化技术架构，并详细阐述了振动、声学、热成像、电气特征分析等主流在线感知方法的原理与演进。在此基础上，重点论述了数据驱动的智能诊断、预测性维护以及数字孪生闭环优化等高级应用范式。最后，本文展望了该领域在人工智能深度融合、自主感知系统构建及标准化体系完善等方面的未来发展趋势，旨在为推动我国智能制造高质量发展提供理论参考。

关键词：智能制造；在线监测；工业物联网；边缘计算；预测性维护

引言

当前，全球制造业正处于由数字化、网络化向智能化跃迁的关键阶段。要达成这一目标，首要条件是对制造系统内部所有要素，尤其是作为核心资产的机器设备，进行全方位、全时空的状态感知。传统的离线、抽检式检测方法，因其固有的滞后性和片面性，已无法满足智能制造对实时性、连续性和前瞻性的严苛要求。在此背景下，在线监测与检测技术应运而生并迅速成为智能制造体系的“感官”系统。它通过在设备运行过程中，利用各类传感器持续不断地采集其物理、化学、电气等多维度的状态参数，形成海量的实时数据流。这些数据不仅是设备健康状况的直接反映，更是驱动上层智能应用（如故障预警、性能优化、自主决策）的原始燃料。可以说，没有高效、可靠的在线监测与检测，智能制造就失去了感知能力，沦为空中楼阁。因此，深入研究并掌握这一关键技术，对于构建具有国际竞争力的现代产业体系具有重大的战略意义。

1 在线监测与检测的技术内涵与战略定位

在线监测与检测并非简单的数据采集，而是一个集感知、传输、处理、分析与反馈于一体的复杂系统工程。其核心内涵在于“在线”二字，即在不影响设备正常运行的前提下，实现对其状态的连续、动态、非破坏性评估。

1.1 从被动响应到主动预见的范式转变

在传统制造模式下，设备维护主要依赖于事后维修或基于固定时间表的预防性维护。这种模式本质上是被动和滞后的，无法有效规避突发故障带来的巨大损失。在线监测与检测技术的引入，催生了预测性维护（Predictive Maintenance, PdM）这一革命性的新范式。

PdM通过对设备状态数据的实时分析，能够洞察其性能退化的早期征兆，并精准预测潜在的故障模式与发生时间，从而将维护活动从“救火式”的被动响应转变为“未雨绸缪”的主动预见。这不仅大幅降低了非计划停机时间，节约了维护成本，更从根本上提升了生产系统的可靠性和安全性。

1.2 在智能制造体系中的核心地位

在智能制造的“感-联-知-控-决”五层架构中，在线监测与检测技术构成了最底层的“感知”层。它是整个智能系统的数据源头，其感知的广度（覆盖的设备与参数）、深度（数据的精度与粒度）和时效性（数据的延迟），直接决定了上层“连接”、“认知”、“控制”和“决策”各环节的能力上限。高质量的在线监测数据，是构建设备数字孪生体、实现生产过程透明化、优化能源管理、保障产品质量一致性的共同基础。因此，其战略地位不言而喻，是智能制造落地不可或缺的基础设施。

2 现代化在线监测与检测系统架构

为支撑智能制造对海量、高速、高维数据的处理需求，现代在线监测与检测系统普遍采用一种分层、协同的“云-边-端”一体化架构。

2.1 “端-边-云”协同架构

该架构将计算与存储资源进行了合理的空间分布。在设备端（Edge），部署着种类繁多的传感器（如加速度计、温度探头、电流互感器、麦克风阵列等），它们如同设备的“神经末梢”，负责拾取最原始的物理信号。边缘层（Edge Computing）则扮演着“前哨”和“过滤器”的角色。边缘计算节点（如工业网关、嵌入式AI芯片）部署在靠近数据源的车间现场，具备一定的本地

计算能力。其主要任务包括对原始数据进行预处理（如滤波降噪、数据压缩）、执行轻量级的实时分析（如阈值报警、初级特征提取），并将处理后的高价值信息或关键事件摘要上传至云端^[1]。这种设计有效缓解了网络带宽的压力，降低了数据传输的延迟，并能在网络中断时保障基本的本地监控功能。云端（Cloud Platform）则作为整个系统的“智慧大脑”，拥有近乎无限的存储与强大的弹性计算资源。它负责存储长期的历史数据，训练和部署复杂的机器学习与深度学习模型，进行跨设备、跨产线、跨工厂的大数据分析与关联挖掘，并为上层应用（如可视化大屏、维护工单系统、生产调度系统）提供统一的服务接口。

2.2 工业物联网（IIoT）与标准化通信

上述架构的顺畅运行，高度依赖于一个健壮、安全、高效的工业物联网（IIoT）平台。IIoT通过将物理设备、传感器、控制系统与企业信息系统无缝连接，构建了一个庞大的数据网络。为了确保不同厂商、不同协议的设备能够互联互通，标准化的通信协议至关重要。OPC UA（Open Platform Communications Unified Architecture）因其平台无关性、信息模型丰富性和内建的安全机制，已成为工业数据交换的事实标准。MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）则以其轻量级、低带宽消耗和发布/订阅模式，非常适合于海量传感器数据的高效传输。遵循这些开放标准，是构建一个可扩展、可互操作的在线监测系统的先决条件。

3 核心在线感知与检测方法

3.1 振动与声学监测

对于旋转类机械设备（如电机、泵、风机、齿轮箱），振动分析是最经典、应用最广泛的在线监测手段。设备内部的不平衡、不对中、轴承损伤、齿轮断齿等故障，都会在其振动信号中激发出特定的频率成分。通过在设备关键部位安装加速度传感器，实时采集振动信号，并利用快速傅里叶变换（FFT）将其转换至频域，工程师可以识别出这些故障特征频率，从而实现故障的早期预警。随着技术的发展，声学监测（Acoustic Monitoring）也日益受到重视^[2]。它通过高灵敏度麦克风或声发射（AE）传感器捕捉设备运行中产生的声音或超声波信号。声学信号对某些故障（如气体泄漏、电气局部放电、早期轴承磨损）更为敏感，且具有非接触测量的优势，特别适用于高温、高压或难以安装振动传感器的场合。

3.2 热成像与温度监测

任何能量损耗或异常摩擦最终都会以热的形式表现

出来。红外热成像技术通过非接触式地测量设备表面的温度场分布，能够直观地发现因电气连接松动、过载、绝缘劣化或机械部件润滑不良导致的局部过热点。在线式红外热像仪可以集成到生产线中，对关键设备进行周期性或连续性的扫描，形成热力图谱，为预防电气火灾和机械过热故障提供有力支持。此外，分布式光纤测温（DTS）技术则能沿数十甚至上百米的光纤长度实现连续、精确的温度监测，特别适用于长距离输电电缆、大型变压器绕组等场景。

3.3 电气特征信号分析（ESA/MCSA）

电机作为工业领域的“心脏”，其健康状况直接影响整个生产线的稳定。电机电流特征信号分析（Motor Current Signature Analysis, MCSA）是一种极具成本效益的在线监测方法。它通过在电机供电线上安装高精度的电流和电压传感器，实时监测其三相电流和电压信号。电机内部的转子断条、气隙偏心、轴承故障、负载不平衡等问题，都会在电流频谱中产生独特的边带频率。通过对这些微弱信号的精细分析，可以在不拆卸电机、不影响生产的情况下，对其健康状态进行全面评估。这种方法简单、经济，易于集成，具有广阔的推广应用前景。

3.4 油液与过程参数在线监测

对于依赖润滑系统运行的设备，润滑油的状态是其健康的“晴雨表”。在线油液传感器可以实时监测油品的粘度、水分含量、污染度（颗粒计数）以及关键理化指标（如酸值、碱值）的变化，从而间接反映设备的磨损状况和油品的劣化程度^[3]。同时，对设备运行过程中的关键工艺参数（如压力、流量、液位、功率）进行在线监测，也是判断其是否处于正常工作状态的重要依据。这些过程参数的异常波动往往是设备内部发生故障的早期外部表现。

4 高级应用：从监测到智能决策

在线监测与检测的价值，最终体现在其驱动的高级智能应用上，这些应用构成了智能制造的核心能力。

4.1 数据驱动的智能故障诊断与预测

依托于“云-边-端”架构汇聚的海量数据，数据驱动的智能诊断成为可能。在边缘侧，可以部署轻量级的机器学习模型（如支持向量机、决策树）进行实时的故障分类。在云端，则可以利用深度学习模型（如卷积神经网络CNN处理振动时序或频谱图，长短期记忆网络LSTM处理退化时间序列）进行更复杂的模式识别、故障根因分析和剩余使用寿命（RUL）预测。这些模型能够从历史数据中自动学习故障与状态参数之间的复杂非线性映射关系，其诊断准确率和预测精度远超传统的阈值或规

则-based方法。

4.2 预测性维护 (PdM) 的闭环实现

在线监测数据是PdM得以实施的基础。通过持续跟踪设备的健康指标 (HI)，系统可以动态评估其健康状态，并在预测到即将发生故障时，自动生成包含故障类型、位置、严重程度和建议措施的维护工单，并推送给相应的维护人员或集成到企业的CMMS (计算机化维护管理系统) 中。这实现了从“状态感知”到“维护执行”的闭环，极大地提升了维护工作的计划性和效率。

4.3 数字孪生驱动的性能优化

在线监测数据是构建和驱动设备数字孪生体 (Digital Twin) 的生命线。数字孪生体是物理设备在虚拟空间中的高保真动态镜像，它不仅包含了设备的几何、材料、工艺等静态信息，更重要的是，通过实时接入在线监测数据，能够精确映射其当前的运行状态^[4]。在此基础上，可以在虚拟模型中进行各种“假设分析” (What-if Analysis)，例如模拟不同的运行参数 (如转速、负载) 对设备性能、能耗和寿命的影响，从而找到最优的运行工况。这种虚实互动、闭环优化的模式，是实现智能制造自优化目标的关键路径。

5 未来发展趋势与挑战

5.1 人工智能与自主感知系统的深度融合

未来的在线监测系统将不再是被动的数据采集者，而是具备自主感知、自主学习和自主决策能力的智能体。人工智能，特别是强化学习和联邦学习，将在其中扮演关键角色。强化学习可用于让系统自主探索最优的监测策略 (如动态调整采样频率、切换传感器组合)。联邦学习则允许多个工厂在保护各自数据隐私的前提下，协同训练一个更鲁棒、泛化能力更强的全局诊断模型。此外，将AI算法直接部署在传感器或边缘芯片上 (AI at the Edge)，实现“感知即智能”，将是提升系统实时性和降低通信开销的重要方向。

5.2 多模态信息融合与知识图谱构建

单一的监测维度往往存在盲区。未来的趋势是将振动、声学、热、电、油液等多模态数据进行深度融合，利用先进的融合算法 (如深度多模态学习) 构建一个更全面、更可靠的设备健康画像。同时，将监测数据与设备的设计图纸、维修手册、专家经验等非结构化知识相结合，

构建领域知识图谱，可以赋予系统更强的因果推理能力和可解释性，使其不仅能告诉用户“设备有故障”，还能解释“为什么有故障”以及“该如何处理”。

5.3 标准化、安全与互操作性挑战

随着监测系统的规模不断扩大，如何确保不同厂商设备、不同协议数据之间的无缝互操作，成为一个严峻挑战。需要进一步完善和推广统一的数据模型 (如Asset Administration Shell, AAS) 和通信标准。同时，海量设备的联网也带来了巨大的网络安全风险，必须构建端到端的安全防护体系，确保数据的机密性、完整性和可用性。此外，如何量化在线监测系统带来的投资回报率 (ROI)，并建立一套科学的评估体系，也是推动其大规模商业落地的关键。

6 结语

在智能制造的宏大叙事中，机器设备在线监测与检测技术扮演着无可替代的“感官”角色。它通过构建“端-边-云”协同的现代化架构，利用多维度、多物理场的感知手段，实现了对设备状态前所未有的实时、全面、精准的把握。这不仅为预测性维护、智能诊断等高级应用奠定了坚实的数据基础，更通过与数字孪生等技术的深度融合，开启了从状态感知到性能优化的闭环智能新篇章。展望未来，随着人工智能、自主系统、多模态融合等前沿技术的持续赋能，以及标准化与安全体系的不断完善，在线监测与检测技术必将向着更高水平的自主化、智能化和系统化方向演进，成为驱动制造业迈向高质量、高效率、高韧性发展的核心引擎。深入研究并广泛应用这一技术，对于抢占全球制造业竞争制高点具有深远的战略意义。

参考文献

- [1]李宝明.数字化转型背景下电气设备智能制造企业面临的挑战与机遇[J].现代工业经济和信息化,2026,16(03):218-220.
- [2]黄艳.基于物联网的智能制造设备状态监测技术研究[J].中国新技术新产品,2025,(24):23-25.
- [3]刘奇.基于深度学习的智能制造设备故障预测方法研究[J].中国新技术新产品,2025,(23):13-15.
- [4]徐长城.智能制造下设备维护优化提升生产效率[J].投资北京,2025,(12):87-88.