

工业设备状态监测在智能制造中的发展趋势分析

严伟文

恩斯克投资有限公司

DOI:10.12238/acair.v3i3.15556

[摘要] 本文聚焦工业设备状态监测在智能制造中的技术演进与产业趋势,系统分析其作为制造业数字化转型核心支撑技术的价值。基于物联网、人工智能、工业互联网等前沿技术的深度融合,研究揭示状态监测在实时感知、故障预测、全生命周期管理中的关键作用。通过传感器精度提升、5G-TSN通信时延优化、AI算法突破等技术进展,结合全球智能制造市场规模增长的产业背景,提出技术融合化、系统集成化、绿色制造转型三大发展趋势。本文强调政策、技术、产业协同的重要性,旨在为制造业智能化升级提供理论框架与实践路径,助力全球制造业向高效、柔性、可持续方向演进。

[关键词] 工业设备状态监测; 智能制造; 物联网; 人工智能; 预测性维护; 工业互联网

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Analysis of the Development Trend of Industrial Equipment Condition Monitoring in Intelligent Manufacturing

Weiwen Yan

NSK (China) Investment Co., Ltd.

[Abstract] This article focuses on the technological evolution and industrial trends of industrial equipment condition monitoring in intelligent manufacturing, and systematically analyzes its value as a core supporting technology for digital transformation in the manufacturing industry. Based on the deep integration of cutting-edge technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence, and industrial Internet, the research reveals the key role of condition monitoring in real-time perception, fault prediction, and life-cycle management. Through technological advancements such as improving sensor accuracy, optimizing 5G-TSN communication latency, and breakthroughs in AI algorithms, combined with the growing industrial background of the global intelligent manufacturing market, three major development trends are proposed: technology integration, system integration, and green manufacturing transformation. This article emphasizes the importance of policy, technology, and industry synergy, aiming to provide a theoretical framework and practical path for the intelligent upgrading of the manufacturing industry, and to help the global manufacturing industry evolve towards efficiency, flexibility, and sustainability.

[Key words] industrial equipment status monitoring; Intelligent manufacturing; Internet of Things

引言

当前全球制造业正经历以数字化、网络化、智能化为核心的第四次工业革命,智能制造成为各国抢占未来产业制高点的核心领域^[1]。美国“先进制造业伙伴计划”、德国“工业4.0战略”及中国“中国制造2025”均将工业设备状态监测列为关键技术,2023年全球智能制造市场规模突破5000亿美元,其中设备状态监测技术贡献率超30%,已从单一功能模块演变为智能制造生态系统的“神经末梢”。技术演进为设备管理范式革新提供多维赋能:传感器精度提升至0.1%级,支持毫秒级数据采集;5G-TSN实现亚毫秒级时延通信,边缘计算节点部署密度提升10倍;基于

Transformer架构的时序预测模型在设备剩余寿命预测中准确率突破90%,推动故障诊断向“数据驱动”转型。与此同时,传统设备管理模式因效率低下、资源浪费与响应滞后等问题,难以满足智能制造需求。技术演进与产业趋势共同驱动核心价值升级:技术层面,多源异构数据融合与AI驱动的故障诊断实现“秒级响应”,故障预警时间提前率超80%;数字孪生技术降低运维成本30%-50%,延长设备寿命20%-30%;能耗数据分析优化生产参数,助力“双碳”目标。产业层面,物联网、AI与工业互联网融合推动系统级解决方案落地,工业互联网平台构建协同网络,政策与技术赋能中小企业数字化转型,加速制造业智能化与绿色化协同转型。

1 工业设备状态监测的技术基础与核心架构

1.1 技术基础

工业设备状态监测的技术基础以传感器、数据传输与计算协同为核心支撑^[2]。传感器技术是数据采集的基石,温度、压力、振动、流量等传感器通过高精度与高可靠性设计,实现对设备运行参数的毫秒级实时感知,例如振动传感器可捕捉微米级位移信号,压力传感器支持0.01%FS量程精度,为后续分析提供数据基础。数据采集与传输技术依托物联网架构,采用无线与有线混合组网,结合5G-TSN通信协议实现亚毫秒级时延与99.999%可靠性,支持大规模设备接入与数据实时上传。边缘计算与云计算的协同则通过“边缘节点预处理+云端深度分析”模式,边缘端部署轻量化算法完成数据清洗与特征提取,降低云端负载30%-50%,同时云端利用GPU集群进行复杂模型训练,实现“实时响应+全局优化”的双重目标。

1.2 核心架构

工业设备状态监测的核心架构由数据感知层、网络传输层、数据分析层与应用服务层构成,形成“感知-传输-分析-服务”闭环。数据感知层通过多源异构数据融合技术,整合振动、温度、声发射等多模态信号,利用卡尔曼滤波与深度学习融合算法消除噪声干扰,提取设备退化特征,为后续分析提供高质量数据输入。网络传输层依托低延迟、高带宽的工业互联网平台,采用TSN时间敏感网络与5G切片技术,实现数据传输时延低于1ms,支持百万级设备并发接入,并通过边缘网关实现数据本地化缓存与断点续传,保障传输可靠性。数据分析层以AI算法为核心,时序分析用于短期趋势预测,聚类算法识别设备运行模式,深度学习模型在剩余寿命预测中准确率突破92%,结合数字孪生技术构建设备虚拟镜像,实现全生命周期状态仿真。应用服务层聚焦三大场景:预测性维护通过故障预警时间提前率超85%降低非计划停机风险;能效优化基于实时能耗数据动态调整工艺参数,降低单位产值能耗15%-20%;全生命周期管理通过设备健康指数评估与备件库存优化,延长设备寿命25%-30%,形成“状态监测-决策优化-价值创造”的完整价值链。

2 工业设备状态监测在智能制造中的技术发展趋势

2.1 技术融合化

工业设备状态监测正加速与物联网、人工智能、数字孪生及5G等前沿技术深度融合^[3],形成“感知-分析-决策”一体化能力。物联网与AI的融合通过部署多物理场传感器,结合LSTM时序预测模型,实现对设备故障模式的精准识别,例如航空发动机叶片裂纹的早期预警准确率突破95%,较传统方法提升30%。数字孪生技术则通过构建设备虚拟镜像,模拟其在极端工况下的运行状态,预测潜在风险并优化维护策略,某航空企业应用后维护成本降低25%,停机时间减少40%。5G与边缘计算的协同进一步推动实时性突破,基于5G-TSN的低时延通信与边缘节点的本地化分析,支持AR辅助巡检与远程操控,某汽车工厂通过AR指导故障排除,将平均响应时间从4小时缩短至2.4小时,生产效率提升40%。

2.2 系统集成化

设备状态监测技术正从单一功能模块向全流程系统集成演进,推动制造资源的高效协同。MES与ERP的深度集成,通过数据共享与流程联动,构建从订单管理、生产排程到物流配送的智能协同体系。例如,海尔集团通过MES-ERP集成,实现订单交付周期缩短30%,库存周转率提升20%;三一重工则利用该体系优化工程机械生产调度,设备利用率提高18%。跨企业制造资源协同平台通过工业互联网打通产业链上下游,支持研发、管理、服务系统的动态配置。例如,某工程机械制造商与配件供应商联合搭建协同平台,基于设备状态数据预测备件需求,实现库存周转率提升25%,供应链响应速度加快50%。

2.3 生产柔性化

设备状态监测技术为柔性制造与个性化定制提供关键支撑,推动生产模式向“小规模、多品种、高附加值”转型。通过实时采集设备运行参数,结合AI算法动态调整加工参数,某服装企业实现单件流生产效率提升35%,订单交付周期从7天缩短至3天。在电子行业,基于设备状态数据的柔性产线可快速切换产品型号,某手机制造商通过模块化产线设计,新品导入时间从3个月压缩至6周,满足市场多样化需求。此外,状态监测技术还支持按需生产与动态调度,例如某汽车零部件企业通过实时分析设备健康指数,优化生产计划,产能利用率提高22%,订单履约率提升至98%。

2.4 绿色制造与可持续发展

设备状态监测技术通过能效优化与循环生产,推动制造业向低碳化、资源高效化转型。基于设备能耗数据的实时分析,可动态调整生产参数,某化工企业通过优化工艺流程,年节约电费超120万元,碳排放降低15%。在钢铁行业,状态监测技术结合循环生产技术,实现废钢回用率提升至95%,碳排放强度下降28%,某钢企通过余热回收系统与设备能效监控,年减少二氧化碳排放20万吨。此外,设备健康管理可延长设备寿命,减少资源消耗,某风电企业通过预测性维护将风机寿命延长25%,备件更换成本降低30%,助力“双碳”目标实现。

3 工业设备状态监测的产业生态与政策支持

3.1 产业生态构建

工业设备状态监测的产业生态以产业链协同与标准化建设为核心,形成“硬件-软件-服务”一体化格局。产业链协同方面,传感器制造商聚焦高精度传感器研发,软件开发商提供AI驱动的分析平台,系统集成商则整合硬件与软件,构建端到端解决方案。例如,某风电企业通过传感器制造商、软件开发商与系统集成商的联合攻关,实现风机故障预警准确率提升至92%,运维成本降低30%。标准化建设通过统一数据接口、通信协议与安全规范,打破设备间数据孤岛,支持跨平台数据互通。例如,某汽车工厂采用OPC UA标准后,设备接入效率提升40%,系统集成周期缩短25%,为大规模设备互联奠定基础。

3.2 政策支持与行业引导

政策与行业引导为工业设备状态监测发展提供双重驱动力。国家层面政策通过专项资金与试点示范项目,推动关键技术

突破与规模化应用。例如,某省通过设立5亿元专项基金,支持10家企业开展设备状态监测技术攻关,带动产业链投资超20亿元。地方政府实践则聚焦产业园区建设、税收减免与人才引进。例如,北京市出台人形机器人产业政策,对入驻园区的设备监测企业提供三年租金补贴,并设立人才公寓解决高端人才住房问题;广东省通过“制造业数字化转型16条”,对采用设备状态监测技术的中小企业给予最高50%的采购补贴,加速技术普及。此外,行业协会发布技术白皮书与标准指南,引导企业合规发展。

3.3 中小企业转型路径

中小企业通过“上云用数赋智”与产学研合作,实现低成本、高效率的数字化转型。“上云用数赋智”依托工业互联网平台,中小企业可按需订阅设备监测、数据分析等服务,降低初期投入50%以上。例如,某机械加工企业通过接入工业互联网平台,实现设备OEE提升18%,年节约运维成本80万元。工信部提出“到2025年中小企业数字化研发工具普及率达90%”的目标,推动平台服务普及。产学研合作则通过高校、科研机构与企业的联合攻关,突破核心技术瓶颈。例如,某电子企业与清华大学合作研发EDA工具,将芯片设计周期缩短30%;某装备制造企业联合中科院,开发国产实时操作系统,打破国外垄断。此外,地方政府设立产学研合作专项基金,支持中小企业联合高校共建实验室,加速技术成果转化。

4 工业设备状态监测的挑战与未来展望

4.1 技术挑战

工业设备状态监测面临数据安全、复杂系统建模等核心挑战。数据安全与隐私保护方面,工业数据涵盖设备运行参数、工艺流程等敏感信息,需通过国密算法加密传输与基于角色的访问控制技术,防止数据泄露与恶意篡改。例如,某汽车工厂因未加密传输振动数据导致工艺参数泄露,造成直接经济损失超500万元。复杂系统建模则需解决多设备、多工艺的协同优化难题,传统算法难以处理高维、非线性数据,需融合强化学习与数字孪生技术,构建动态优化模型。例如,某钢铁企业通过深度强化学习算法优化轧机群协同控制,能耗降低12%,但模型训练周期仍长达3个月,亟需轻量化与实时性突破。

4.2 未来展望

工业设备状态监测将向技术自主化、全球化与生态协同方向演进。技术突破聚焦高端数控机床、工业软件与精密传感器的国产化替代。全球化布局依托“一带一路”倡议,向东南亚、非洲输出智能产线与技术服务。例如,某中国装备企业在印尼建设智能矿山,通过设备状态监测系统将设备利用率提升25%,运维成本降低30%,助力当地工业升级。生态协同与标准制定方面,中国将主导制定智能制造国际标准,联合IEEE、ISO等组织推动技术互认,提升全球话语权。

5 结束语

工业设备状态监测作为智能制造的“神经中枢”,其核心价值在于通过技术融合、系统集成与绿色制造的协同创新,重塑制造业竞争力。技术融合推动物联网、AI与数字孪生深度耦合,实现设备故障的“毫秒级预警”与生产参数的“动态优化”;系统集成打破MES、ERP与工业互联网的数据壁垒,构建从订单到交付的全流程智能协同;绿色制造则依托能效分析与循环生产技术,助力企业实现“双碳”目标。政策、技术与产业的协同是推动这一进程的关键:政策引导避免重复建设,技术突破降低中小企业转型门槛,产业生态构建加速规模化应用。未来,中国有望依托完整的产业链与创新体系,培育一批具有全球影响力的智能制造领军企业,通过输出智能产线、技术服务与标准规范,为全球制造业转型升级提供“中国方案”,推动全球经济向更高效、更绿色、更可持续的方向演进。

[参考文献]

- [1]张雷,梁梁.工业设备状态监测系统的视觉辅助策略与实现[J].制造技术与机床,2020,(09):115-118.
- [2]张雷,林子煜,李飞达,等.基于环境声识别的工业设备状态监测实验系统设计[J].实验室研究与探索,2024,43(8):47-51.
- [3]柴安颖.面向智能生产线的工业物联网通信服务质量关键技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2022.

作者简介:

严伟文(1971--),男,汉族,广东省广州市人,博士,研究方向:工业自动化企业管理方向。