

工业物联网设备的远程监控与维护策略

孙堂元 陆亚飞

华信咨询设计研究院有限公司 浙江 杭州 310014

摘要: 工业物联网 (IIoT) 设备的远程监控与维护在智能制造和工业自动化领域发挥着关键作用。本研究探讨了IIoT远程监控的特点, 包括实时性、可靠性、安全性和可扩展性, 并分析了关键技术, 如无线传感器网络、数据采集与监控系统 (SCADA) 以及数字孪生技术, 探讨了分层监控架构, 包括感知层、传输层、平台层和应用层, 以提升系统的稳定性与扩展性, 提出了数据驱动的设备状态监测与预测性维护策略, 结合机器学习模型实现设备故障预测与维护优化。研究表明, 基于云-边协同架构的远程监控系统能够有效提升工业设备的运行效率, 降低维护成本, 并增强工业生产的智能化水平。

关键词: 工业物联网; 远程监控; 预测性维护; 云-边协同

引言

工业物联网 (Industrial Internet of Things, IIoT) 技术的发展, 使得远程监控与维护成为智能制造和工业自动化的核心组成部分。传统的设备维护模式依赖定期检查和人工干预, 存在高维护成本和停机时间长等问题, 而IIoT通过实时监测、智能分析和远程控制, 实现了更加高效和精准的设备管理。随着无线传感器网络、云计算、边缘计算、大数据分析和人工智能等技术的进步, IIoT远程监控系统得以构建完整的监测、分析和维护体系, 在工业生产、能源管理、交通运输等领域得到了广泛应用^[1]。然而, 远程监控系统在数据实时性、网络安全、系统可靠性及可扩展性方面仍面临诸多挑战。因此, 研究工业物联网设备远程监控与维护策略, 不仅有助于提升设备管理的智能化水平, 还能够优化工业生产流程, 提高企业运营效率, 并推动工业智能化转型。

1 IIoT 设备远程监控的特点

IIoT设备远程监控技术的发展, 使企业能够更高效地管理工业系统, 实现智能化、自动化运维。远程监控的特点主要包括实时性、可靠性、安全性和可扩展性, 这些特性共同构成了IIoT监控系统的基础, 使其能够适应复杂的工业环境, 满足智能制造的需求。

1.1 实时性

IIoT远程监控系统通过分布式传感器网络和高速数据传输技术, 实现设备状态信息的快速采集与传输, 从而减少数据延迟, 提高决策响应速度。例如, 基于边缘计算 (Edge Computing) 架构的监控系统能够在本地完成

数据处理, 并仅将关键数据上传至云端, 以减少通信延迟, 提高数据处理效率。5G技术进一步提升了数据传输速率, 使得毫秒级的数据同步成为可能, 从而满足高精度生产过程的监测需求。

1.2 可靠性

在IIoT环境下, 可靠性主要体现在网络通信的稳定性、数据完整性以及设备运维的容错性等方面。为了提高通信稳定性, 工业级远程监控系统通常采用多种冗余机制, 如双网络传输 (Wi-Fi+有线网络) 和多通道数据备份, 以防止单点故障导致系统失效。基于区块链和分布式存储技术的日志管理系统可以确保数据的完整性, 即使在网络中断或设备故障的情况下, 也能够保证历史数据的可追溯性和一致性。

1.3 安全性

IIoT设备远程监控系统涉及大量的工业数据, 包括设备运行参数、生产工艺信息、能耗数据等, 一旦发生数据泄露, 会给企业带来严重损失^[2]。为了提高数据传输的安全性, 工业监控系统通常采用端到端加密 (如TLS/SSL协议), 确保数据在传输过程中不会被篡改或窃取。零信任架构可以有效防范内部和外部攻击, 确保只有经过严格认证的用户或设备才能访问监控系统。结合工业防火墙、入侵检测系统 (IDS)、设备身份认证 (DID) 等技术, 能够增强系统的整体安全性, 抵御拒绝服务攻击 (DDoS)、中间人攻击 (MITM) 等网络威胁。

1.4 可扩展性

随着工业自动化水平的提高, IIoT设备数量不断增长, 远程监控系统需要具备良好的可扩展性, 以支持大规模设备的管理和数据处理能力。在硬件层面, 系统支持多种通信协议 (如MQTT、OPC UA、Modbus等), 以

作者简介: 孙堂元 (1984.05-), 男, 汉族, 籍贯: 甘肃省武威市, 本科, 工程师, 研究方向: 通信技术、大数据、物联网

适应不同类型的工业设备。在软件层面,云-边协同架构成为主流趋势,即利用边缘计算节点处理本地数据,而云端平台负责大规模数据存储与分析。基于微服务架构的远程监控系统可以实现灵活的模块化扩展,即在需要增加新功能或适配新设备时,无需重构整个系统,从而减少升级成本,提高系统的可维护性。

2 IIoT 设备远程监控关键技术

2.1 无线传感器网络

无线传感器网络主要负责工业设备状态数据的实时采集与传输。传感器节点的部署通常采用分布式架构,每个节点集成数据采集、处理和通信功能,能够感知温度、压力、振动、电流等运行参数,并通过低功耗无线通信协议(如Zigbee、LoRa、BLE或Wi-Fi)传输至边缘计算节点或云端平台^[3]。在工业环境中,传感器的布局需考虑数据精度、信号覆盖范围、环境耐受性及功耗管理,以确保监测的连续性和稳定性。

2.2 数据采集与监控系统

数据采集与监控系统主要用于数据采集、远程控制、设备状态监测及运行参数调整,其核心组成包括远程终端单元(RTU)、可编程逻辑控制器(PLC)、数据采集服务器、HMI(人机界面)以及数据采集与监控系统主站,协同实现工业现场数据的采集、处理和远程管理。RTU和PLC作为数据采集与监控系统的前端设备,负责与传感器、执行机构等进行交互,采集温度、压力、液位、振动等关键参数,并通过工业通信协议(如Modbus、DNP3、OPC UA)将数据传输至数据采集与监控系统主站。

2.3 数字孪生技术

数字孪生技术通过虚拟模型映射物理实体,利用物联网、传感器数据和仿真建模技术构建物理对象的数字化映射,并根据实时数据驱动虚拟模型的动态演化,以实现设备状态监控、数据分析和预测性维护。首先,通过工业传感器和边缘计算节点采集设备的运行数据,并将其输入到数字孪生模型中,实现物理实体与虚拟模型的同步更新。其次,结合AI算法、有限元分析(FEA)、计算机仿真等技术,建立拟真的设备虚拟模型,使其能够模拟设备在不同运行条件下的响应行为,进而实现设备性能优化与故障预测。

3 远程监控系统的分层架构设计

3.1 系统架构的层级划分

IIoT远程监控系统采用分层架构设计,具体如下:

(1) 感知层作为系统的最底层,主要负责设备接入与数据采集,包含各类工业传感器(如温度、压力、振

动传感器)及边缘计算节点的部署。传感器的选型需依据监测目标的物理特性,确保数据的精准度与稳定性,同时,边缘计算节点负责在本地执行数据预处理和异常检测,以减少网络传输负担,提高数据处理效率。

(2) 传输层承担数据的加密传输和网络冗余设计,通过采用TLS/SSL协议确保数据在传输过程中的安全性,防止中间人攻击或数据篡改。为了提升网络的可靠性,采用5G、Wi-Fi 6、LoRaWAN等通信技术,并辅以冗余网络架构,以防止单点通信故障导致的数据丢失^[4]。

(3) 平台层采用云-边协同架构,其中,边缘侧主要负责低延迟的数据处理,如实时设备状态监测、异常识别,云端承担大规模数据的存储与深度分析,支持历史数据挖掘、预测性维护算法训练等功能。

(4) 应用层是用户直接交互的部分,主要包括可视化界面、告警系统及维护决策支持模块。可视化仪表盘能够直观呈现设备运行状态,基于数据驱动的告警系统可实现故障预警,结合AI算法的决策支持模块则能够根据设备健康状况提供智能化维护建议。

3.2 硬件与软件协同设计

远程监控系统硬件选型需要考虑兼容性、扩展性及耐用性,以确保不同类型的工业设备能够稳定接入监控系统。传感器的选型应依据环境因素(如温度、湿度、振动)及监测精度要求,同时,边缘计算设备需具备足够的计算能力,以支持本地数据处理和实时响应。对于无线通信模块,需优先选择低功耗、高稳定性的协议(如LoRa、NB-IoT或Wi-Fi 6),以适应长周期运行的工业需求。

在软件架构设计上,采用微服务架构能够提高系统的模块化和可扩展性,即各功能模块(如数据处理、告警管理、设备控制)独立部署,避免单一故障影响整个系统。通过容器化技术(如Docker、Kubernetes)管理服务,可实现弹性扩展和跨平台部署,提高软件系统的稳定性和灵活性。

4 数据驱动的设备状态监测与维护策略

4.1 设备状态监测方法

通过实时监测技术和异常检测模型,能够实现对设备运行状态的精准感知和早期预警。振动频谱分析通过采集设备振动信号,并利用傅里叶变换(FFT)将其转换为频谱形式,以识别潜在故障模式,如轴承磨损、齿轮断裂等。热成像监测主要依赖红外热像仪采集设备表面温度分布,通过分析热异常点,检测电气设备过载、机械摩擦异常等问题。声发射检测利用高灵敏度传感器捕捉机械设备运行时产生的超声波信号,从而识别微裂纹

扩展、泄漏和材料疲劳等隐患。基于数据驱动的异常检测模型, 阈值法通过设定设备运行参数的正常范围, 一旦超出预设阈值即触发告警。孤立森林算法是一种无监督异常检测模型, 能够基于设备历史运行数据自动学习正常运行模式, 并在新数据偏离正常模式时快速识别异常^[5]。

4.2 预测性维护策略

故障预测模型的构建依赖于剩余使用寿命 (Remaining Useful Life, RUL) 预测与故障模式识别。RUL预测基于设备运行数据, 估算其距发生故障前的剩余工作时长, 常用的方法包括基于物理模型的预测、统计回归分析以及深度学习方法。传统的回归模型 (如ARIMA、卡尔曼滤波) 在短期预测方面表现良好, 而支持向量机 (SVM) 和深度神经网络 (DNN) 等数据驱动方法在复杂故障模式识别上更具优势。动态维护决策的核心在于设备健康指数 (Health Index, HI) 的计算与维护资源的优化调度。HI基于多维度传感器数据, 利用数据融合技术 (如主成分分析PCA、贝叶斯网络) 计算设备健康状态, 并依据HI的变化趋势对设备进行健康评分, 确定优先维护的设备列表。

4.3 维护流程优化

工业设备的维护模式正经历从“计划维护” (Scheduled Maintenance) 向“按需维护” (Condition-Based Maintenance, CBM) 的转型, 通过结合历史数据和实时状态信息, 优化维护策略, 提高设备的可靠性和可用性。传统的计划维护模式依赖于固定的时间间隔执行维护任务, 而忽略了设备的实际运行状态, 可能导致维护成本过高或设备潜在故障未能及时发现。相比之下, 按需维护基于实时监测数据和预测性分析, 能够根据设备健康状态动态调整维护计划, 从而减少不必要的维护干预, 降低维护成本。数据驱动的维护优化流程需依赖高精度的状态监测算法, 并结合历史数据趋势分

析, 制定最优的维护策略。远程维护技术的应用使得维护流程进一步优化, 典型方法包括远程固件升级 (Over-the-Air, OTA) 和远程参数配置。OTA升级可实现设备固件或软件的在线更新, 减少现场维护的人力成本, 并提高设备安全性和功能扩展能力。

结语

综上, 工业物联网设备远程监控与维护策略的研究, 为工业自动化和智能制造提供了技术支撑。本文分析了IIoT远程监控的特点, 并围绕无线传感器网络、SCADA系统和数字孪生等关键技术展开探讨。基于分层架构设计, 提出了感知层、传输层、平台层及应用层的系统构建方法, 以提高监控系统的稳定性和可扩展性。同时, 通过数据驱动的状态监测与预测性维护策略, 实现了设备健康管理的智能优化。研究表明, 云-边协同架构和AI技术的结合, 能够有效提升工业设备的运行效率, 降低维护成本, 并增强系统的可靠性与安全性。随着5G、区块链及数字孪生等技术的进一步发展, IIoT远程监控系统将更加智能化和自主化, 为工业领域的数字化转型提供更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 范永全. 基于物联网的机电设备远程监控与维护系统研究[J]. 工程技术研究, 2024, 6(14): 67-69.
- [2] 董东. 利用物联网技术实现矿山设备监控与维护的远程管理研究[J]. 互动软件, 2022(8): 1137-1138.
- [3] 张文举. 电气设备远程监控与维护技术的发展及应用前景[J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2022(6): 853-854.
- [4] 班传波, 刘航, 吕轩志. 基于物联网技术的设备远程监控和管理系统分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 362-363.
- [5] 程功荣, 佟冰, 邓杰, 等. 基于物联网的RH真空系统远程智能监控与诊断[J]. 重型机械, 2021(3): 17-21.