

面向工业设备预测性维护的传感器接口设计

江 亮

武汉市水务建设工程有限公司 湖北 武汉 430015

【摘 要】：工业设备预测性维护中，多源传感器接入、数据传输可靠及现场适配是核心需求，本文从硬件架构、数据传输与协议优化、系统集成与应用验证三个维度，设计一套高性能传感器接口方案。硬件架构采用异构信号兼容设计，实现多类型传感器即插即用，抗干扰电路保障复杂工况下信号稳定，微型化低功耗设计适配特殊部署场景。数据传输优化主流总线与无线协议，结合边缘预处理，提升传输效率。平台集成、多维度测试及现场适配，验证接口兼容性与稳定性。该方案已应用于汽车零部件生产、高压电机、无人机等多个工业场景，有效提升预测性维护效率与智能化水平，为工业设备故障早期预警提供可靠支撑。

【关键词】：工业设备；预测性维护；传感器接口；数据传输；硬件架构

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.010

引言

工业 4.0 时代，预测性维护是保障设备安全稳定运行、降低运维成本的核心技术。传感器接口作为设备状态数据采集与传输的关键枢纽，性能直接决定预测性维护的精准度与效率。当前工业现场传感器类型多样、工况复杂，接口兼容性差、抗干扰能力弱、数据传输时延高、部署不便等问题突出，难以满足多源数据统一接入与高效传输需求。本文聚焦工业设备预测性维护场景，开展传感器接口设计与优化研究，从硬件架构、传输协议、系统集成三方面突破技术瓶颈，设计适配多场景、高可靠、低功耗的传感器接口，经实际应用验证可行性，为工业预测性维护系统落地提供技术支撑。

1 传感器接口硬件架构设计

(1) 多类型传感器硬件接口适配设计：多源传感器统一接入场景下，接口采用异构信号兼容架构，整合模拟量、数字 IO、IEPE 专用端口及工业总线接口，搭配可编程增益调理、高精度滤波等电路，自动识别信号类型并完成参数配置，实现即插即用^[1]。倍加福 IO-Link 接口模块可适配多种工业传感器，汽车零部件生产线预测性维护中，能快速接入 20 余种设备，实现振动、温度等多信号统一采集传输，提升维护效率。

(2) 抗干扰硬件接口电路设计：工业现场强电磁干扰等工况易致信号畸变，抗干扰电路采用多级 RC 滤波与有源滤波结合方式，搭配光电、磁耦隔离技术阻断地环路干扰，集成浪涌、静电等防护电路。ABB 高压电机预测性维护系统中，该设计可抵御变电站强干扰与电压波动，保障定子温度、轴承振动等信号无畸变传输，确保预测模型捕捉设备异常，保障电机安全运行（见图 1）。

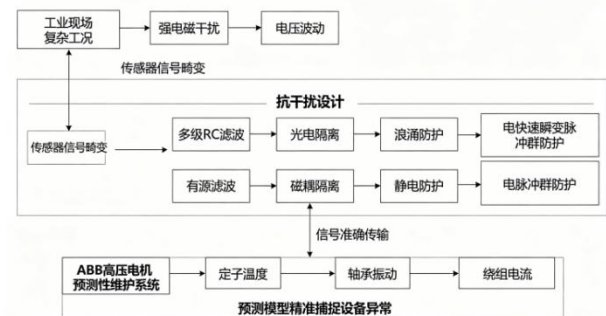


图 1 抗干扰硬件接口电路设计

(3) 低功耗微型化接口硬件结构设计：旋转机械、移动装备等部署空间有限、供电不便场景，接口采用高集成度芯片与紧凑型贴片工艺，优化电源管理电路，支持电池与能量收集两种供电模式。大疆工业无人机电机维护中，微型接口内置电机壳体，体积仅 20mm×15mm×8mm，微瓦级功耗采集数据，采样间隔自适应调整，满足机载设备要求，为故障预警提供可靠支撑。

2 传感器接口数据传输与协议优化

(1) 工业现场总线接口协议适配“工业现场总线是工业设备数据传输核心载体，传感器接口需兼容 Profinet、EtherCAT、Modbus、CANopen 等主流工业现场总线协议，具备协议解析与转换能力。实现与工业 PLC、DCS、SCADA 等控制系统无缝对接，保障设备状态数据稳定、高效传输。接口内置协议解析芯片，可自动识别不同总线协议，完成数据格式转换与标准化处理，确保不同系统间数据互通^[2]。富士康精密加工中心预测性维护中，传感器接口通过 EtherCAT 总线协议实现数据传输。该协议具备低时延、高同步优势，可将主轴振动、切削负载、刀具温度等数据以

微秒级同步精度传输至 PLC 与预测性维护平台,传输时延控制在 $10\mu\text{s}$ 以内,同步误差不超过 $5\mu\text{s}$,满足高精度加工设备预测性维护的低时延、高同步要求,支撑精密加工设备故障早期预警与精准维护。

(2) 无线传感器接口通信协议设计:工业现场无布线、移动设备、远距离监测等场景下,无线传感器接口采用轻量化、高可靠通信协议。优化 LoRa、Wi-Fi 6、5G URTC 等协议栈参数,降低传输功耗与时延,提升无线链路抗干扰性与穿墙能力,确保数据传输稳定。LoRa 协议适配远距离、低功耗场景,Wi-Fi 6 协议适配高带宽、近距离场景,5G URTC 协议适配低时延、高可靠场景,接口可根据现场环境自动切换通信协议。国家电网变压器远程预测性维护中,山区变电站地理位置偏远、布线困难,无线传感器接口基于 LoRa 自定义优化协议。优化通信频段与功率参数,实现变压器温度、局部放电、绝缘性能等数据远距离稳定传输,传输距离可达 3km 以上,丢包率控制在 0.5% 以下,满足无人值守变电站远程监测与预测性维护需求。

(3) 数据预处理与接口传输优化:工业传感器原始数据含噪声、缺失值及异常值,海量数据直传易致带宽拥堵、传输低效。传感器接口内置边缘预处理单元,传输前通过小波去噪、均值滤波滤除噪声,线性插值与多传感器互补补齐缺失数据,阈值判定与异常检测剔除异常数据,再经特征提取与压缩算法提取核心故障特征、削减冗余。徐工挖掘机预测性维护中,传感器对振动数据去噪提特征后仅传关键内容,数据量缩减超八成,缓解带宽压力,加快传输与推理速度,实现核心部件故障快速识别,助力工程机械运维智能化落地。

3 传感器接口系统集成与应用验证

(1) 接口与预测性维护平台集成设计:传感器接口依托标准化 API、MQTT 等协议与维护平台无缝集

成,支持数据上传、模型下发双向交互,形成闭环管控。阿里云工业大脑平台内,接口将设备数据标准化后上送,平台借助深度学习完成故障预测与寿命评估,下发参数调整接口策略,实现“采集—传输—分析—决策—优化”闭环,提升智能化水平。

(2) 接口兼容性与稳定性测试:为保障接口长期稳定运行,开展多品牌传感器接入、多协议适配、长时间满载等多维度测试。中车集团轨道交通齿轮箱维护测试中,接口完成 15 类传感器兼容测试,通过 72 小时连续满载运行,零丢包无异常,在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 及 EMC 三级干扰环境下稳定运行,数据传输准确率超 99.9%,满足车载极端环境需求。

(3) 接口部署与现场适配方案:工业现场环境复杂,粉尘、油污、高温、高湿等因素影响接口部署与运行^[1]。传感器接口采用现场快速安装、免布线、即插即用方案,降低部署难度与成本,搭配定制安装支架与防护外壳,防护等级达 IP67 以上,可抵御粉尘、油污、水汽侵蚀。采用无线与有线传输结合方式,规避布线困难,支持远程参数配置与在线调试,无需运维人员现场操作。海螺水泥窑炉预测性维护中,接口采用防爆防护与防尘密封设计,借 LoRa 无线传输解决布线难题,单台安装调试仅需 10 分钟,实现高温窑体温度、振动数据快速采集传输,适配复杂现场环境。

4 结语

本文完成传感器接口全面设计与应用验证,异构兼容、抗干扰、微型化低功耗的硬件架构设计,解决多类型传感器接入与复杂工况适配难题。总线与无线协议优化及数据预处理,提升数据传输效率与可靠性。平台集成、专项测试与现场适配,保障接口在各类工业场景稳定运行。该接口方案已应用于多个行业预测性维护场景,解决传统接口痛点,提升维护智能化水平。

参考文献:

- [1] 李先品,段海燕.预测性维护技术在农业机械中的应用研究[J].农业开发与装备,2025,(09):80-82.
- [2] 许启发,基于云平台和大数据技术的工业设备预测性维护系统研发及产业化.安徽省,安徽容知日新科技股份有限公司,2023-07-05.
- [3] 汪海.工业设备维护管理系统研究与设计[J].河南科技,2023,42(08):22-26.