

基于物联网的压缩机设备预测性维护系统工程实践

黄倩铭

珠海凌达压缩机有限公司 广东 珠海 519110

摘要: 以珠海凌达压缩机物联网项目为工程依托,构建基于物联网的压缩机预测性维护系统,明确系统全链路架构,阐述设备层传感器部署等工程实施细节,采用LSTM-XGBoost特征级融合模型实现故障精准预测。研究验证了系统可行性与应用成效,为压缩机物联网升级、预测性维护技术落地提供可复制工程方案,助力制造业智能化、精细化转型。

关键词: 工业物联网; 压缩机设备; 预测性维护; 边缘计算; 特征级融合模型

引言: 压缩机是制造业核心动力设备,运行稳定性直接影响生产连续性与产品质量。传统运维以定期巡检、事后维修为主,存在数据采集滞后、故障预警不及时、运维成本高等问题。工业物联网为设备运维升级提供技术支撑,可实现状态实时监控、故障精准预测与智能维护调度。本文结合工程实践,阐述压缩机物联网预测性维护系统落地路径,为工业物联网在设备运维领域的工程应用提供实操参考。

1 压缩机设备物联网应用相关理论与技术基础

1.1 物联网核心架构与制造业应用逻辑

物联网技术以“感知-传输-处理-应用”为核心构建四层架构体系,即设备层、网络层、平台层、应用层,各层协同联动实现设备数据采集、传输、处理、应用的全流程闭环。针对压缩机高负荷、多故障点的运行特性,将物联网四层架构与压缩机轴承、电机、气缸等关键部位的监测需求深度绑定,形成设备层对应压缩机关键故障点感知监测、网络层对应车间设备数据工业级传输、平台层对应运维数据边缘-云端协同处理、应用层对应故障预测与智能维护物联网价值转化的映射关系,实现压缩机设备状态的全流程物联网化管控,有效突破传统运维模式的技术局限^[1]。

1.2 系统核心技术支持

1.2.1 设备层感知技术

设备层是物联网应用的底层基础,核心目标是精准、连续采集压缩机核心运行参数。针对压缩机不同部位的故障监测需求,在轴承、电机、气缸等关键部位部署专用感知设备:轴承部位采用高精度振动传感器捕捉振动异常信号;电机部位部署温度与电流传感器,通过参数变化预判电机故障;气缸部位配置压力传感器识别压力异常问题,同时配套油液传感器监测油液状态。

1.2.2 网络层通信技术

网络层是物联网数据传输的核心环节,关键在于选择适配车间工业环境的通信协议与传输方式。结合车间压缩机的分布特点,本系统采用消息队列遥测传输协议(MQTT)、ModbusTCP协议双协议架构,其中MQTT协议用于分散式传感器的数据传输,ModbusTCP协议用于集中式设备的通信交互。传输层面采用LoRaWAN与工业以太网混合模式,车间内部密集部署的压缩机设备通过工业以太网传输数据,车间边缘分散的感知设备采用LoRaWAN无线传输,实现全车间压缩机设备数据的无死角覆盖传输。

1.2.3 平台层边缘计算技术

平台层是物联网数据处理的中枢,通过在车间本地部署边缘计算节点,有效解决云端数据处理延迟高、带宽压力大的痛点。本系统选用华为Atlas500边缘计算节点(以下简称Atlas500)部署于车间本地,其工作流程为:首先接收设备层采集的实时数据并进行预处理,剔除冗余数据、清洗异常数据;再在本地部署轻量化故障预测模型,实现故障实时本地预警;最后将处理后的有效数据同步至云端平台,实现本地数据处理与云端数据备份的协同联动,在降低云端带宽压力的同时,契合压缩机运维的实时性需求。

1.2.4 应用层预测性维护模型技术

应用层是物联网数据价值转化的核心,通过构建LSTM-XGBoost特征级融合模型分析平台层处理后的有效数据,实现压缩机故障精准预测与智能维护调度。LSTM网络用于提取压缩机振动、温度等运行参数的时序关联特征,实现故障趋势预判与剩余寿命估算;XGBoost用于提取故障类型的分类特征,实现故障精准分类与设备健康评分。模型输入为振动、温度、压力、电流等12项核心运行参数,输出为故障类型、健康评分、剩余寿命三大核心指标。模型适配Atlas500边缘计算节点的算力

需求,推理速度 $\leq 200\text{ms}$,满足车间故障实时预警需求。系统上线6个月,融合模型的故障预测综合准确率提升至92.3%,误报率降至5.8%,有效解决单一模型易出现的模型漂移问题,模型可自动输出故障预警信息与维护建议,并联动生成运维工单。

2 基于物联网的压缩机预测性维护系统工程架构设计

2.1 系统总体架构设计

2.1.1 技术选型决策过程

以算力、功耗、工业稳定性、扩展性、兼容性、部署成本为核心指标,对树莓派、NVIDIA Jetson、Atlas500 三种边缘方案实测试验:树莓派成本低但算力不足;Jetson 算力强但功耗高、工业稳定性差;Atlas500为工业级节点,低功耗(约15W)、高稳定、高扩展,模型推理延迟 $\leq 200\text{ms}$,4台集群可满足20台压缩机并发监控。

2.1.2 架构设计优化决策

系统初始采用“设备直连云端”架构,传输延迟超520ms,难以满足实时预警。优化为“设备层-边缘平台-云端平台”三级架构,新增边缘本地预处理,微服务拆分实现分层解耦。优化后数据传输延迟降至85ms,架构耦合度由85%降至25%,提升系统运维便捷性与可扩展性,适配制造业设备长期动态的运维需求^[2]。

2.2 系统各层工程设计

2.2.1 设备层工程设计

设备层工程设计的核心是精准采集压缩机关键参数,重点完成传感器选型、精准部署与数据采集器配置。振动传感器选用高精度工业级传感器,用于轴承故障监测,采用高温密封胶固定,解决振动导致的传感器松动问题;温度传感器选用耐高温型,适配电机等高温部位监测;压力传感器选用耐腐蚀高压适配型,满足气缸压力监测需求;同时配套油液传感器实现油液状态监测。压缩机各关键部位根据监测需求部署1-2台对应传感器,确保监测无死角。数据采集器选用工业级多接口终端,支持多种信号类型转换,可对传感器采集的原始数据进行封装后传输,保障数据采集的连续性与稳定性。

2.2.2 网络层工程设计

网络层工程设计的重点是解决车间数据高效、稳定传输的问题,结合车间实际布局优化通信协议配置与传输链路设计。通信协议沿用MQTT与ModbusTCP双协议架构,分散式传感器经LoRaWAN无线链路采用MQTT协议传输数据;集中式设备与边缘节点、云端平台经工业以太网采用ModbusTCP协议通信。链路设计采用星型+网状的混合拓扑结构,车间内部铺设工业以太网线路,边缘区域部署LoRaWAN网关构建无线传输网络,同时部

署传输冗余机制,当主传输链路故障时,可自动切换至备用链路,保障数据传输的可靠性。

2.2.3 平台层工程设计

平台层工程设计的核心是实现数据预处理与本地计算,重点完成边缘计算节点部署、存储架构设计与数据处理流程优化。本系统选用4台华为Atlas500边缘计算节点进行集群部署,在节点本地部署轻量化LSTM-XGBoost融合模型,实现压缩机运行异常的实时识别与本地预警。数据存储采用“边缘+云端”的协同存储模式,边缘节点存储近期7天的实时运行数据,满足本地快速调取与分析需求;云端平台采用分布式存储架构,存储设备全生命周期的历史运行数据,为模型迭代优化与设备运维分析提供数据支撑。数据处理流程设计为“边缘先处理,云端再同步”,边缘节点先对采集数据进行异常检测、清洗、特征提取,再将有效数据同步至云端,降低云端数据处理压力。

2.2.4 应用层工程设计

应用层工程设计的核心是实现压缩机故障精准预测与智能维护调度,重点完成融合模型部署、软件模块开发与功能适配。将轻量化后的LSTM-XGBoost特征级融合模型部署于边缘计算节点,实现故障实时预测;开发设备状态监控、故障智能预警、维护工单调度、设备健康管理四大核心软件模块,覆盖压缩机运维全流程。功能适配上优化软件操作界面,采用可视化设计,同时完成移动终端适配开发,支持运维人员通过手机、平板等移动设备实时查看设备状态、接收故障预警,满足车间移动运维的实际需求。

3 基于物联网的压缩机预测性维护系统工程实施与优化

3.1 设备层实施控制

设备层实施的核心控制点为传感器安装精度与数据采集稳定性,笔者制定了标准化的传感器安装与调试流程。安装前,对压缩机轴承、电机等关键安装部位进行清洁、打磨处理,去除表面锈迹与油污,确保传感器与设备表面紧密贴合,减少振动干扰;安装时,严格把控传感器的安装角度与固定力度,使振动传感器的感应方向与设备实际振动方向保持一致,保证振动数据采集的精准性;安装后,采用标准信号源对所有传感器进行逐一校准,将传感器采集误差控制在工业级允许范围内。同时对数据采集器进行全功能调试,测试采集器与各传感器的兼容性、数据采集频率、信号转换精度等指标,确保设备层数据采集的连续、稳定、精准。

3.2 网络层实施控制

网络层实施的核心控制点为通信稳定性与数据传输实时性,重点把控通信协议配置与传输链路质量。协议配置阶段,根据车间设备分布与传输需求,设定合理的协议传输频率与超时时间,优化 MQTT 协议的 QoS 等级,提升无线数据传输的可靠性;链路调试阶段,对 LoRaWAN 网关与工业以太网交换机进行全功能调试,测试无线与有线传输的速率、延迟、丢包率等核心指标。传输链路部署完成后,进行全车间覆盖检测,排查线路接触不良、信号屏蔽等问题,在强电磁干扰区域对以太网线路进行屏蔽处理。同时对传输冗余机制进行模拟测试,人为模拟主传输链路故障场景,验证备用链路的自动切换功能,确保数据传输无中断。

4 系统工程实践案例分析

4.1 案例工程概况

该生产车间专注制冷空调压缩机零部件生产,有20台螺杆式压缩机为核心动力设备,长期高负荷运转。传统运维采用每月1次定期巡检与事后维修,存在故障预警滞后、运维成本高、停机率高等问题,常见故障有轴承

磨损、气阀泄漏,严重影响生产。此次工程将基于物联网的预测性维护系统应用于车间压缩机,全面部署各层设备,实现物联网化预测性维护。方案还扩展至公司3台离心式压缩机试点,故障预测准确率稳定,验证了架构的设备兼容性。

4.2 系统工程部署与应用

按车间实际场景与设计流程完成系统部署。设备层在压缩机关键部位部署多种传感器和数据采集器,全面采集关键参数。网络层采用混合传输模式,部署网关、铺设线路、配置协议,确保数据稳定传输^[1]。平台层部署边缘计算节点构建集群,搭建云端平台。应用层部署融合预测模型,开发适配软件并打通数据接口。系统运行时各层协同,实现“事前预警、精准维护”。

4.3 工程实践效果分析

系统运行6个月,核心运维指标显著提升:故障停机率由12.5%降至3.1%,故障预测准确率92.3%,运维人员效率提升35%。经济效益如下表所示,项目落地形成企业内部运维规范。

指标	传统模式	本系统	备注
月均运维成本	8.0万元	4.8万元	人工3万+备件2.5万+停机损失2.5万,降幅40%
系统实施总成本	-	28.0万元	传感器15万+边缘节点8万+软件5万
投资回收期	-	3.5个月	计算依据:28万÷(8万-4.8万)

实践表明,该方案适配多种压缩机类型,降本增效显著,为制造业压缩机物联网化升级提供可复制方案。

结束语

本文系统阐述基于物联网的压缩机预测性维护系统工程实践,覆盖技术基础、架构设计、实施优化与案例验证。项目形成“边缘计算+融合算法”技术体系,已在多类型压缩机试点验证,为设备智能化运维提供经验。随着物联网技术发展,其在制造业的应用将持续深化,推动更多设备实现精细化、智能化运维。

参考文献

- [1]王伟.工业设备预测性维护的物联网架构设计[J].传感器与微系统,2024,43(5):45-48. DOI:10.13873/J.1000-9787(2024)05-0045-04.
- [2]周卫,李家兵,李庭建,等.离心压缩机故障分析及处理[J].化工生产与技术,2023,29(5):33-35. DOI:10.3969/j.issn.1006-6829.2023.05.008.
- [3]王龙鹤,宋炳亮,任思澄.基于人工智能算法的压缩机厂房综合安全监测系统[J].今日自动化,2024(8):163-164,193.