

基于物联网的矿山机电设备远程监控系统设计

赵明月

凉山西昌永盛爆破工程有限责任公司 四川省凉山彝族自治州 615000

【摘要】：针对金属矿山井下环境复杂、机电设备连续运行监测难度较大的问题，设计一种矿山机电设备远程监控系统。系统以凿岩机、提升机、通风机、排水泵及带式输送机等设备为对象，构建感知层、传输层、平台层和应用层协同架构，采用 STM32F103 采集温度、振动、电流、电压等工况参数，并通过 LoRa 自组网、5G 网络和 MQTT 协议实现数据上传、状态判别与远程告警。测试结果表明，系统数据传输延迟为 420 ms，采集误差控制在 $\pm 0.3\%$ 以内，报警响应时间为 2 s，数据完整率达到 99.6%。在某金属矿山实际应用中，提升机月度故障率降低 25%，维护成本降低 30%，故障排查时间由 2 h 缩短至 30 min。结果说明，该系统能够提升矿山机电设备运行状态感知能力，为预防性维护和安全生产提供技术支撑。

【关键词】：矿山机电设备；远程监控；LoRa 通信；5G 网络；故障预警

0 引言

矿山机电设备承担采掘、运输、通风、排水等关键任务，其运行稳定性直接关系到矿山生产效率与安全水平。受井下高湿、高粉尘、强电磁干扰及空间受限等因素影响，传统人工巡检方式存在实时性不足、故障发现滞后和维护依据分散等问题。随着传感器、工业通信和云平台技术的发展，构建远程监控系统已成为提升设备管理水平的重要方向。本文围绕矿山机电设备运行状态监测需求，开展系统架构、核心模块及应用效果研究，以期对金属非金属矿山设备智能化运维提供参考。

1 矿山机电设备远程监控系统需求分析与总体架构设计

矿山机电设备远程监控系统的设计需立足井下生产环境的高湿、高粉尘、强电磁干扰以及设备连续运行特性，把凿岩机、提升机、通风机、排水泵以及带式输送机等关键装备当作监测对象来开展需求划分。系统在功能层面应覆盖运行参数采集、异常状态识别、远程告警推送、历史数据追溯以及设备维护辅助决策等内容，其中运行参数主要囊括电流、电压、温度、振动、压力以及转速等可反映设备工况的指标。从架构角度来看，可把系统划分为感知层、传输层、平台层以及应用层，感知层依靠传感器以及可编程控制器完成现场数据接入，传输层选用工业以太网、5G 专网以及井下环网进行数据传递，平台层承担数据清洗、状态判别以及存储管理工作，应用层面向调度中心和值班人员提供可视化监控界面。该架构把现场设备状态、网络通信链路以及远程管理需求进行统一衔接，有助于降低人工巡

检依赖，并且为后续核心模块设计提供较为清晰的技术边界。

2 矿山机电设备远程监控系统核心模块设计

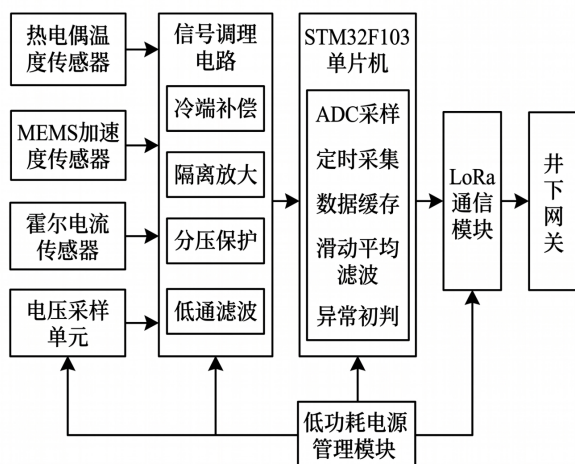
2.1 设备数据采集模块设计

井下提升机、通风机以及压风机在连续运行过程中容易受到载荷波动、轴承磨损以及供电扰动影响，数据采集模块需把温度、振动加速度、工作电流以及电压当作基础工况量来接入。采集节点选用 STM32F103 单片机作为控制核心，该芯片具备多路 ADC 接口、定时采样能力以及较低功耗，适宜布设在设备机旁控制箱内。考虑到本系统应用于金属非金属矿山，无防爆等级要求，因此无需对采集节点进行额外防爆壳体封装，降低了硬件成本与部署难度。温度检测选用热电偶温度传感器，经冷端补偿以及信号调理后接入模拟采样通道；振动检测选用 MEMS 加速度传感器，重点采集电机端盖以及轴承座的径向振动变化；电流检测选用霍尔电流传感器，把主回路电流转化为隔离低压信号；电压采集则经分压、隔离以及滤波电路后进入采集端。节点硬件连接逻辑见图 1，传感器信号经调理电路进入 STM32F103，单片机完成采样、缓存以及初步判别后，经 LoRa 通信单元上传至井下网关。鉴于矿山现场强电磁干扰较为突出，节点软件在采样端加入滑动平均滤波，以削弱瞬时尖峰噪声对状态判断的影响。其计算形式如下：

$$\bar{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{k-i}$$

其中， $\bar{x}_k$ 表示第 k 次采样后的滤波输出值， N 表示滑动窗口内的采样点数量， x_{k-i} 表示当前时刻及其前序时刻的原始采样值。

图1：矿硐电机设备数据集集节点硬件连接流程图

图1：矿硐的电机设备数据采集节点硬件连接流程图
图1 矿山机电设备数据采集节点硬件连接流程图

2.2 数据传输与处理模块设计

金属矿山井下巷道空间狭长，金属支护结构以及大型电气设备会削弱无线信号覆盖质量，单一通信方式难以稳定承载多设备监测数据。数据传输模块把LoRa自组网以及5G网络组合起来开展分层传输，井下采集节点借助LoRa低功耗广域通信把数据送至就近网关，网关完成协议转换以及数据汇聚后上传至地面基站，地面侧再依靠5G网络把设备状态数据发送至云端服务器。LoRa链路承担短报文、低速率以及远距离传输任务，较适宜温度、振动、电流以及电压等周期性采样数据；5G链路承担高带宽以及低时延上传任务，能够支撑调度中心对关键设备状态的集中查看。通信协议选用MQTT，设备节点作为客户端发布采样主题，云端服务器订阅设备数据主题，同时把控制指令下发至指定节点，形成设备端与云端之间的双向通信机制。云端数据处理模块把MySQL数据库当作结构化存储载体，按照设备编号、采样时间、参数类型、参数值以及告警状态建立数据表。异常检测逻辑选用阈值判断方式，系统把设备额定工况、厂家维护参数以及矿山运行规程转化为温度上限、振动加速度上限、电流波动范围以及电压偏差范围，当实时数据越过对应阈值时，平台生成异常记录并推送至终端界面。

2.3 远程监控终端模块设计

远程监控终端面向调度中心值班人员以及设备运维人员的日常使用场景进行设计，系统把Web端以及移动端整合为统一访问入口。Web端侧重连续监测以及数据追溯，界面把提升机、

通风机、压风机等设备按照区域以及设备类型进行组织，实时数据以折线图、仪表盘以及状态标识进行呈现，便于值班人员观察温度缓慢升高、振动异常增强以及电流突变等运行迹象。历史数据查询功能按照设备编号、时间区间以及参数类别检索记录，报表导出功能把巡检记录、告警记录以及维护建议整理为Excel文件，服务于设备台账更新以及检修计划编制。移动端强调异常响应，系统在云端判定异常后，可借助短信以及APP通知把告警内容推送给对应责任人，告警信息囊括设备名称、异常参数、发生时间以及建议处置方式。对于紧急停机等远程控制操作，终端需设置二次确认以及操作留痕机制，避免误触发影响生产。权限管理采用管理员、运维人员以及普通用户3级结构，管理员开展账户、设备以及阈值配置工作，运维人员进行告警确认、报表导出以及远程控制，普通用户仅查看授权范围内的实时状态以及历史趋势，由此把监控便利性以及操作安全性进行协调。

3 系统效果评估与应用验证

3.1 系统功能测试与性能指标分析

系统功能测试在金属矿山设备模拟平台内开展，测试环境把高湿度、粉尘扰动以及电磁干扰当作井下典型工况来复现，测试对象涵盖提升机电机、通风机轴承座以及排水泵供电回路等监测点位。测试过程围绕数据采集、链路传输、云端处理以及终端告警进行连续运行核查，采集节点按1s周期读取温度、振动加速度、电流以及电压数据，网关把LoRa报文转换为MQTT主题消息后上传至云端服务器，Web端以及移动端同步刷新设备状态。为评价采集端测量误差，测试中把标准校验仪输出值当作参考值，把采集节点上传值当作测量值，采集精度按相对误差进行计算。公式如下：

$$\delta = \frac{|X_m - X_r|}{X_r} \times 100\%$$

其中， δ 表示采集相对误差， X_m 表示系统采集节点上传的测量值， X_r 表示标准校验仪给出的参考值。

从测试数据来看，系统在多参数并行采集条件下保持了较稳定的数据完整性，温度以及电流采集误差控制在 $\pm 0.3\%$ 以内，能够契合矿山机电设备状态监测对趋势识别以及阈值判别的精度需求。传输链路平均延迟为420ms，低于井下工业监测场景通常要求的1s级响应范围，说明LoRa网关汇聚以及5G回传的组



合方式可以支撑周期性状态数据上传。告警响应时间为2s,囊括云端阈值判别、异常记录生成以及终端消息推送过程,满足值班人员对温升越限、振动异常以及电流突变的及时处置需求。

系统性能测试结果见表1,表中把实测值以及行业参考要求进行对应呈现,可进一步说明该系统在采集精度、通信时延以及告警响应方面具备工程应用可行性。

表1 系统性能测试结果表

测试项目	测试条件	行业参考要求	实测结果	达成情况
数据传输延迟	20个采集节点并发上传,采样周期1 s	≤ 1000 ms	420 ms	满足要求
采集精度	温度、电流、电压标准信号校验	误差 $\leq \pm 1.0\%$	$\pm 0.3\%$	满足要求
报警响应时间	阈值越限后云端推送至移动端	≤ 5 s	2 s	满足要求
数据完整率	连续运行72 h,累计上传259200条数据	$\geq 99.0\%$	99.6%	满足要求
终端刷新周期	Web端实时监控界面连续刷新	≤ 3 s	1 s	满足要求

3.2 实际应用案例与效益评估

山西某金属矿山把该远程监控系统部署于主井提升机运行管理环节,监测点位集中布设在提升电机、减速器轴承座、制动液压站以及主供电回路位置。系统运行期间,采集节点持续上传电机温度、轴承振动、电流波动以及制动压力数据,云端平台依据设备额定参数以及矿山检修规程设置告警阈值,调度中心值班人员依靠Web端查看运行曲线,运维人员则借助移动端接收异常提醒并开展现场排查。该应用场景中,提升机属于连续运输关键装备,停机故障会直接影响矿石流组织以及井下人员物料提升,因此系统更强调异常征兆的提前识别以及维修资源的快速调配。

系统连续运行6个月后,该金属矿山提升机月度故障率由部署前的15%降至11.25%,降幅为25%,故障类型主要集中在轴承温升异常、制动压力波动以及电流短时冲击等方面。维护成本由每月12万元降至8.4万元,减少30%,主要缘由在于计划性检修比例提高,临时抢修以及备件应急采购次数有所下降。

运维效率方面,故障排查时间由平均2 h缩短至30 min,值班人员能够依据历史趋势曲线以及告警记录快速锁定异常部位,现场检修人员不再完全依赖经验性逐项排查。结合实际运行过程观察,远程监控系统把分散设备状态转化为可追溯的数据链条,使提升机维护工作由事后处置逐步转向状态跟踪以及预防性维护,对降低金属矿山机电设备运行风险以及提高生产连续性具有较明确的支撑作用。

4 结语

本文完成了矿山机电设备远程监控系统的需求分析、架构设计、核心模块构建及应用验证。系统通过多参数采集、分层通信、云端处理和终端告警,实现了设备运行状态的连续感知与异常信息的快速传递。测试与现场应用结果表明,该系统在采集精度、传输时效、告警响应和运行可靠性方面均能满足金属非金属矿山设备监测需求,并能有效降低故障率和维护成本。后续可进一步引入智能诊断算法和寿命预测模型,提升系统对复杂故障演化过程的识别能力。

参考文献

- [1]甄明哲.基于物联网的煤矿机电系统远程监控与智能运维[J].中国机械,2025,(18):80-83.
- [2]周永光,熊理想.基于物联网的临时电源设备远程监控系统设计[J].电工技术,2023,(09):188-190.
- [3]张豪.基于物联网的燃气设备远程监控系统设计与实现[J].化工设计通讯,2024,50(12):110-112.
- [4]侯强.选煤厂机电设备远程监控系统架构与功能实现[J].电站辅机,2024,45(04):71-74.
- [5]程利利,张治中,刘利兰.基于虚幻引擎的矿山智能监控数字孪生系统设计与实现[J].现代电子技术,2025,48(21):157-164.

作者简介:赵明月(1992—),男,汉族,本科,研究方向为矿山机电。