

# 基于远距离无线电网络技术的电机智能监控系统

张胜<sup>1</sup>, 李诚谦<sup>2</sup>, 朱梓瑞<sup>3</sup>, 杜禹泽<sup>1</sup>, 殷创业<sup>1</sup>

(1. 合肥大学先进制造工程学院, 合肥 230601; 2. 西南大学计算机与信息科学学院, 重庆 400715; 3. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对工业生产领域多电机运行状态远程监控存在的不足, 基于远距离无线电(LoRa)无线网络技术, 设计多电机运行状态远程智能监控系统。通过传感器采集电机的振动速度、加速度、位移及温度等状态信息, 并将采集的电机状态信息通过LoRa无线网络传输至远程计算机, 实现对电机运行状态的远程监控, 当电机工作状态出现异常时发出告警信号, 提示采取有效干预措施。信息传输网络采用主从架构, 由1个接收终端与多个采集终端进行通信, 实现对工业厂区内多台电机工作状态的监测。电机状态监测系统采用独立供电设计, 以便于安装和维护。最后, 搭建实验平台, 对设计的监控系统进行功能测试。结果表明: 设计的监控系统能够实时、稳定地获取电机的状态信息, 验证了系统的稳定性和可靠性, 系统的应用有利于保障电机的安全运行, 维护生产的正常进行。

**关键词:** 无线感知网络; 远距离无线电; 电机监测; 无线传输; 电机联网; 智能监控

**中图分类号:** TP 274 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24148



## Motor Intelligent Monitoring System Based on Long-range Radio Network Technology

ZHANG Sheng<sup>1</sup>, LI Chengqian<sup>2</sup>, ZHU Zirui<sup>3</sup>, DU Yuze<sup>1</sup>, YIN Chuangye<sup>1</sup>

(1. School of Advanced Manufacturing Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China; 2. College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To address the limitations of remote monitoring for multi-motor operational status in industrial production, a long-range radio (LoRa) wireless network-based intelligent remote monitoring system was designed for multi-motor systems. The motor's status information such as vibration speed, acceleration, displacement, temperature and other status information was acquired through sensors. This data was subsequently transmitted to a remote computer using a LoRa wireless network, achieving remote monitoring of the motor's operational status. An alert signal was triggered in case of any anomalies in the motor's operation, indicating the need for taking effective intervention measures. The information transmission network adopted a master-slave architecture, where one receiving terminal communicated with multiple acquisition terminals to monitor the operational status of multiple motors within an industrial plant. The motor status monitoring system was designed with an independent power supply for ease of

收稿日期: 2024-08-14

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U22A20225); 安徽省研究生教育质量工程项目(2022szsfkc130, 2022tsxwd048); 安徽省高等学校省级质量工程项目(2022xqhz071)

作者简介: 张胜(1980—), 男, 安徽涡阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为信号检测控制与电磁兼容设计。

引文格式: 张胜, 李诚谦, 朱梓瑞, 等. 基于远距离无线电网络技术的电机智能监控系统[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(2): 151-158.

installation and maintenance. Ultimately, an experimental platform was established to perform functional tests on the designed monitoring system. The results show that the designed monitoring system is capable of acquiring the motor's status information in real-time and with stability, thus verifying the system's stability and reliability. The application of this system is beneficial for ensuring the safe operation of motors and maintaining the regular progression of production.

**Keywords:** wireless sensor networks (WSN); long range radio (LoRa); engine monitoring; wireless transmission; motor networking; intelligent monitoring

电机作为工业、农业、矿业等领域的关键动力设备,其应用范围涵盖抽水泵机、工业拖动电动机、矿井主要通风机等重要场景。在工业生产现场,电机设备通常呈现两大特征:一是空间分布广泛,在大型工厂或长距离输送系统中,设备间距可达数十米至数公里;二是运行负荷大,长期连续工作易引发绝缘层损坏、老化及过载等典型故障<sup>[1-3]</sup>。这些故障可能进一步导致线圈漏电、短路等严重后果,若不及时处置,不仅影响正常生产秩序,更可能诱发重大安全事故。电机运行状态监测参数主要包括振动、温度、电流和声音等特征量,其中振动信号(如转子旋转等)是最能反映设备机械状态的基础参数<sup>[4]</sup>。现行监测方案通常采用位移和温度传感器就近采集振动与温度数据,并通过有线方式传输至采集终端。然而,在工业园区等大型场景中,电机监测点与中央控制室距离较远,采用有线数据传输方式不仅成本较高、布线复杂,还可能影响生产正常进行。相比之下,无线传输方式更具灵活性和经济性,尤其适用于电机分布分散的工业场景。因此,构建基于无线传感网络的电机远程监控系统,实现对园区内电机的远程监控和网络化管理,对于增强设备安全性、降低维护成本,提高生产效率以及推动设备智能化发展具有重要意义。

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)可避免有线传输带来的施工、布线等问题。目前常见的无线传感器网络技术<sup>[5-6]</sup>包括 ZigBee、蓝牙低功耗(blueetooth low energy, BLE)、移动热点(wireless fidelity, WiFi)、远距离无线电(long range radio, LoRa)等。其中 ZigBee、BLE 以及 WiFi 通常用于传输距离小于 100 m 的信息传输,虽然可以通过中继或组网扩展覆盖范围,但仍无法完全满足工业园区以及工厂等较大范围内信息无线传输的需求;LoRa 基于扩频技术的电压传输距离在 5 000 m 以内(视环境和功率而定),适合于低功耗、短距离通信。随着物联网技术应用的快速发展,LoRa 凭借超低功耗、组网灵活、覆盖范围广等优势,在智慧农业、智慧工地等领域得到广泛应用。何湘桂等<sup>[7]</sup>设计

1 种具有 LoRa 无线通信功能的集中控制器,采用分时采集的方式采集所有监测节点的电力数据,可实现对照明线路功率与能耗信息的获取;许龙铭<sup>[8]</sup>设计 1 种基于 LoRa 技术的机械冲压机故障检测系统,能够实现对冲压机冲头的温度和振动信号的多节点采集与远程传输;鞠晨<sup>[9]</sup>设计 1 种基于 STM32 的矿用电机轴承振动监测仪,通过控制器域网(controller area network, CAN)实现对轴承振动状态的远程监控。但是,现有研究大多只针对单个电机运行状态的监测,较少关注多个电机运行状态的远程监测及网络化管理。鉴于此,基于 LoRa 无线网络技术,设计一款低成本的多电机状态远程智能监控系统,通过上位机软件对区域内多台电机的实时运行状况进行远程监控,以期实现区域内电机网联以及系统智能化管理。

## 1 电机运行状态智能监控系统的设计原理

设计的电机运行状态智能监控系统由信息采集终端、无线传输单元、信息接收终端以及显示单元等组成。其原理框图如图 1。

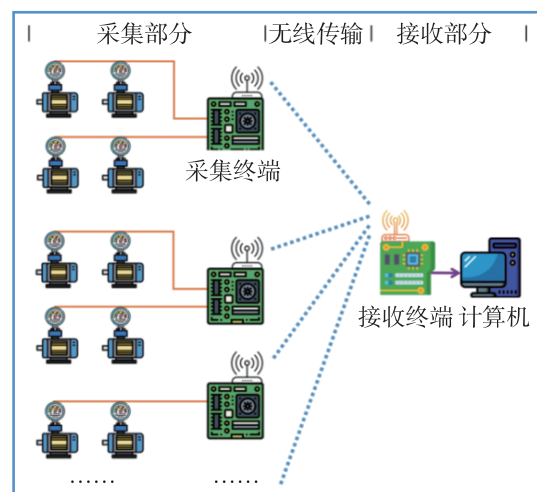


图1 电机监控系统原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of motor monitoring system

通过多个传感器采集电机的振动速度、位移量、加速度及温度等状态信息。设定每台电机的地址固定,由采集终端对地址进行分配,且收集多路传感器传送的电机状态数据并添加相应电机编号与采集终端地址,再按标准通信协议将数据打包后通过无线传输发送至接收终端。采集终端通过智能处理芯片实现自身监测、控制、通信及数据发送等功能。远程接收终端汇总采集终端收集的各电机运行状态数据,并传送至计算机,再通过计算机上位机软件对数据进行处理,实现数值显示、曲线绘制、数据存储、自动告警等功能。无线传输网络采用主从架构,由 1 个接收终端与多个采集终端进行通信。

## 2 电机运行状态智能监控系统的设计

### 2.1 监控系统硬件

#### 2.1.1 采集终端

采集终端主要由微处理器、RS485 通信电路、电源管理电路和显示电路等部分组成,其原理框图如图 2。采用接触式振动传感器采集电机振动信息,即采集电机在 X, Y, Z 方向的速度、加速度、位移等信息;采用温度传感器采集电机的实时温度信息,根据温度信息预判电机运行时的过流情况。采集终端与振动和温度传感器之间采用 RS485 总线进行通信,通过带有校验的通信模式获取传感器采集的信息。1 个采集终端模块可挂载数十个传感器节点,基本上可满足工厂范围内多台电机状态监控的需要。

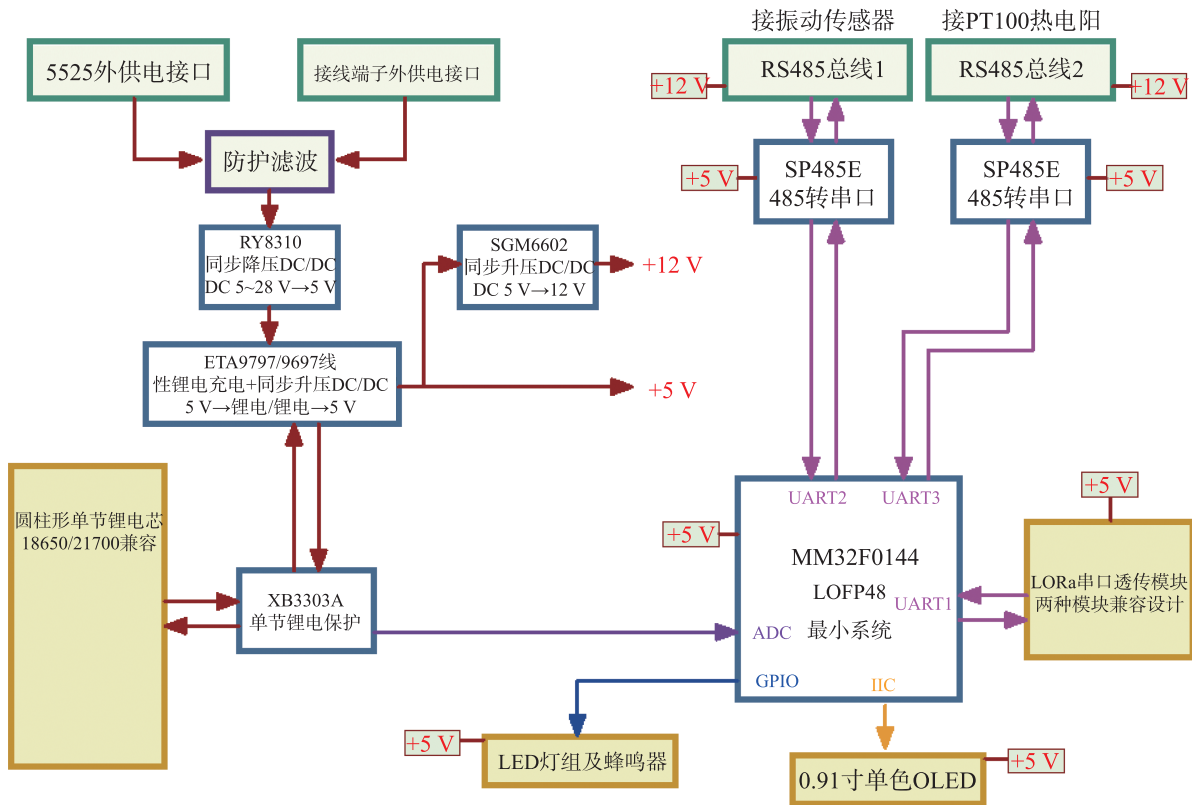


图2 数据采集终端原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of data collection terminal

数据采集终端若采用现场取电方式供电,会限制系统的灵活性。为使监测系统能够更加灵活地应用,并实现独立于电机运行,本系统采用锂电池为采集终端供电。通过电压变换电路,将电池电压转换成系统所需的各种不同等级电压,为芯片、传感器和无线通信模块供电。为满足系统节能需求,由微处理器统一管理采集终端用电,并采用电源管理电路<sup>[10]</sup>为锂电池放电过程提供保护。如图 3,当检测到电池电压低于设定阈值时,系统会提示更换电池。

振动传感器检测的信号通常包含噪声干扰,主

要包含机械噪声、电磁噪声和通风噪声,需通过数字滤波技术来消除或降低这些噪声信号的影响。卡尔曼滤波<sup>[11]</sup>是 1 种面向解决系统状态估计和追踪问题的最优估计算法,特别适用于加速度等信号的滤波。其以最小均方误差作为最优估计准则,利用信号与噪声的状态空间模型,通过前一次的最优估计值和当前测量值来预测当前最优估算值,根据建立的系统方程和观测方程对信号做出满足最小均方误差的估算。该算法递推计算过程如式(1)~(5)。

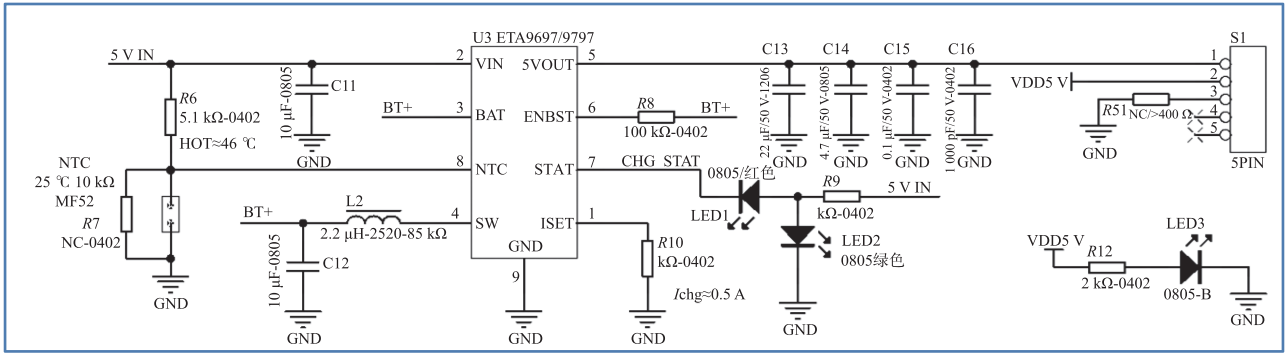


图3 电源管理电路原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of power management circuit

状态量预测:

$$\hat{X}_k^- = A_{(k-1)} \hat{X}_{(k-1)} \quad (1)$$

均方误差预测:

$$P_k^- = A_{(k-1)} P_{(k-1)} A_{(k-1)}^T + Q_{(k-1)} \quad (2)$$

卡尔曼增益计算:

$$K_k = P_k^- B_k^T [B_k P_k^- B_k^T + R_k]^{-1} \quad (3)$$

状态估计:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k [z_k - B_k \hat{X}_k^-] \quad (4)$$

均方根误差估算:

$$P_k = [1 - K_k B_k] P_k^- \quad (5)$$

式中:  $\hat{X}_k^-$  为  $k$  时刻的预测值;  $\hat{X}_k$  为  $k$  时刻的最优估算值;  $A_k$  为  $k$  时刻的状态转移矩阵;  $B_k$  为  $k$  时刻的测量矩阵;  $K_k$  为  $k$  时刻的卡尔曼增益;  $Q_k$  为  $k$  时刻过程噪声的相关矩阵;  $R_k$  为  $k$  时刻测量噪声的相关矩阵;  $z_k$  为  $k$  时刻的观测值;  $P_k$  为  $k$  时刻估算值的均方误差;  $P_k^-$  为  $k$  时刻预测值的均方误差。系统将振动传感器采集的加速度视为一维数据,  $A$  和  $B$  均可简化为单

位 1 处理。经数字滤波后, 振动信号通过 LoRa 无线网络传输至上位机, 进行后续处理与可视化显示。

### 2.1.2 接收终端硬件

接收终端硬件电路主要由通用串行总线 (universal serial bus, USB) 转换芯片、降压电路以及通信接口电路组成, 原理如图 4。通过降压电路将 5.0 V 电源转换为 3.3 V, 为相应芯片提供工作电压。接收终端通过 LoRa 无线网络获取采集终端发送的电机状态信息, 并经由 USB 数据线将数据传输至计算机上位机。为提高系统兼容性并优化计算机 USB 接口资源利用率, 接收终端硬件设计采用双串口芯片方案, 实现单 USB 接口到双串口的转换功能。该终端采用 USB2.0 协议的 16 针 Type-C 接口与计算机建立通信连接。综合考虑系统可靠性、稳定性及成本等因素, 选用 CH342K 作为通信芯片。该芯片支持 1.8~5.0 V 宽串口电平, 显著提升无线通信模块的兼容性; 体积较小, 有利于提高印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 的集成度, 有效减小接收终端模块的整体体积。

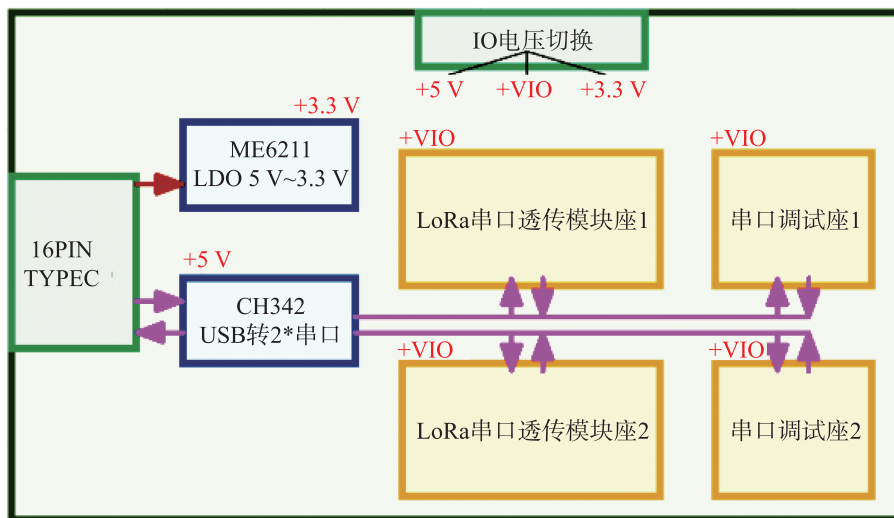


图4 接收终端原理框图

Fig. 4 Block diagram of receiving terminal

### 2.1.3 通信系统

在工业生产现场, 电机状态数据通过采集终端经通信网络传输至接收终端, 最终上传至计算机, 实现管理人员对电机运行状态的远程监控。针对现场电机分布分散、距离较远的特点, 传统有线传输方式存在施工布线复杂、维护困难等弊端。虽然窄带物联网 (narrow band internet of things, NB-IoT)、全球移动通信系统 (global system for mobile communication, GSM) 等通信方式能够满足无线传

输距离上的要求, 但是这些通信系统在后期使用过程中还需要运营商提供服务, 且需持续支付运营商一定的服务费<sup>[12-14]</sup>, 导致系统运行及维护成本较高。相比之下, WSN 采用分布式自组织架构, 各节点具备独立的数据采集、处理和传输能力<sup>[15-18]</sup>, 具有高灵活性、易扩展性和部署方便等优势。通过对各类无线传感器网络技术的综合比较 (如表 1<sup>[19-21]</sup>), 最终选用基于 LoRa 技术的无线传感器网络方案。

表 1 主流无线通信技术特性

Tab. 1 Characteristics of main wireless communication technologies

通信技术	传输距离/m	数据传输速率/(Kbit/s)	布设成本	抗噪性能	工作频段/GHz
LoRa	<5 000	37.5	低	好	0.4
ZigBee	<100	250	低	好	2.4
WiFi	<100	1 000~3 000	高	高	2.4
蓝牙	<15	10 000~55 000	低	中	2.4

在硬件电路设计中, 数据采集终端及接收终端可同时兼容 HC-14 及 E32-433T20D 两款物联网模块。这两款模块均采用 SX1278 芯片, 但具有不同的特性和适用场景。HC-14 模块小巧、成本较低, 支持弹簧天线或 IPEX 接口外接小型天线, 适用于传输距离较短、电磁环境较好的应用场景; 而 E32-433T20D 模块体积较大, 需加装屏蔽罩以提高抗干扰能力, 并采用 SMA 接口连接高增益天线, 适合远距离通信或工业级恶劣环境。在硬件设计上, 通过优化电路布局和接口定义, 可使系统兼容 2 种模块。软件层面则通过协议适配和参数配置, 确保通信功能的一致性。实际工程应用时, 可根据具体需求 (如传输距离、环境条件、成本预算) 灵活选择合适的模块, 从而提高系统的适应性和性价比。

## 2.2 监控系统软件

### 2.2.1 采集终端软件

采集终端软件主程序流程图如图 5。采集终端的处理器采用+12.0 V 的电源管理无线通信模块, 以避免电池能量的损耗。处理器通过通信接口查询是否接收到来自节点的数据采集命令, 若收到指令, 则执行相应操作, 如上传数据、存储至寄存器或执行其他控制任务。若未收到指令, 则检测是否有按键按下, 若有则执行对应功能, 若没有则继续执行其他功能。控制系统定时向 RS485 总线发送指令, 读取振动传感器及温度传感器的数据, 将采集到的电机运行状态数据进行存储和分析, 供后续处理或上传。用户可通过上位机软件调整电机运行状态信息

的采样频率, 以适应不同应用场景的需求。

### 2.2.2 监控界面

QT Creator 作为集成化开发平台, 提供代码编辑、调试及可视化界面设计工具, 可显著提升电机状态监控系统的开发效率<sup>[22]</sup>。为对电机运行状态进行远程实时监控, 并对采集的电机状态信息进行分析, 本系统基于 QT Creator 软件开发平台设计上位机监控界面, 如图 6。通过上位机界面中“设置与查询”按钮, 查找并配置接收终端对应的通信接口以及电机状态参数阈值。通过“通信测试”按钮设置接收终端参数、电脑与接收器之间数据传输的波特率、传感器采样频率等。通过上位机软件主界面实时监测联网电机状态信息、显示振动和温度信息。上位机软件对接收的电机温度以及电机 X, Y, Z 三轴方向的振动速度、加速度、位移等信息进行分析、存储并显示于计算机界面, 同时将相关参数绘制成变化曲线展示在上位机界面, 直观展示电机运行状态变化趋势。

## 3 实验与结果分析

为验证电机远程监控系统设计的合理性, 本研究构建完整的电机状态监测实验平台, 包括信息采集终端模块、远程接收终端和上位机监控软件, 并通过 LoRa 无线传感网络实现数据远程传输测试。实验过程中, 以永磁同步电动机的工作状态为检测对象, 传感器固定在电机上, 采集终端通过 RS485 总线与传感器进行通信, 如图 7。

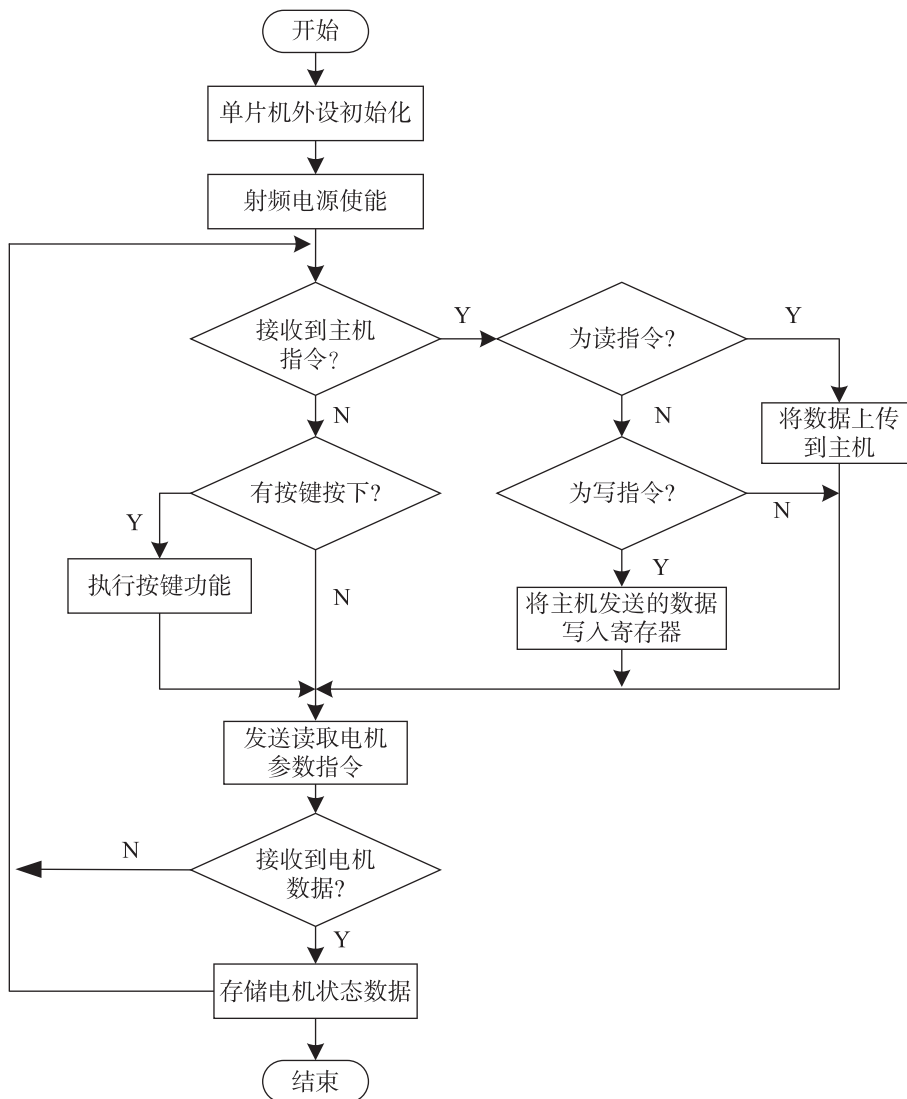


图5 采集终端软件流程图

Fig. 5 Flowchart of collection terminal main program

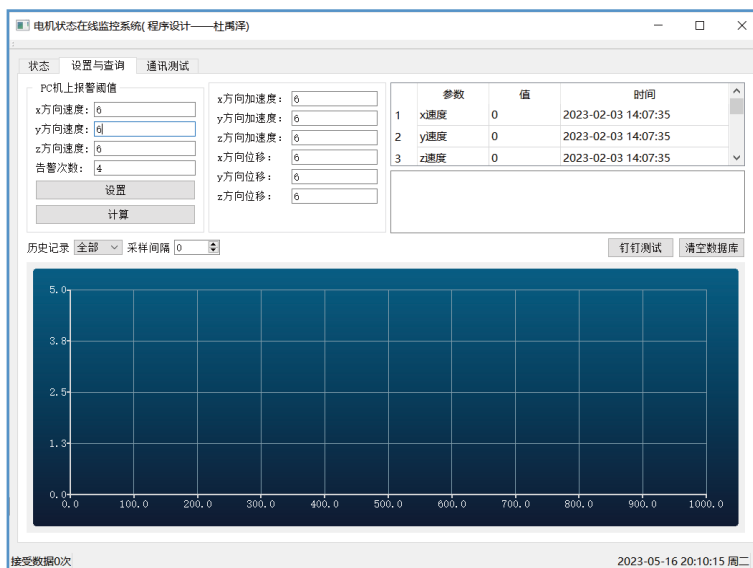


图6 上位机软件界面

Fig. 6 Interface of upper computer software

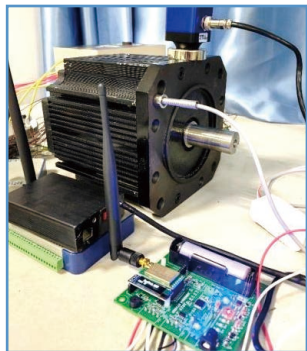


图7 采集终端

Fig. 7 Collection terminal

为提升现场操作便捷性,采集终端设计了 OLED 显示屏,通过显示屏直接获取电机状态、电池续航时间及电机故障等信息。接收终端模块通过

LoRa 构建的无线网接收采集终端发送的电机状态信息,通过 USB 数据线传输至计算机,结果如图 8。系统运行时上位机界面显示如图 9,上位机软件实时接收电机状态信息,并进行显示。



图8 接收终端

Fig. 8 Receiving terminal



图9 上位机软件监测界面

Fig. 9 Monitoring interface of upper computer software

由图 9 可看出:上位机界面可显示远程电机的温度信息以及电机在 X, Y, Z 三维度的实时加速度与位移信息,当电机在 3 个维度的位移量超过阈值时,系统会自动记录,并在上位机界面显示;上位机界面还可显示电机 X, Y, Z 方向的位移量在一段时间内的变化趋势,其中白色线条为 X 方向的位移、红色线条为 Y 方向的位移、黄色线条为 Z 方向的位移。每个电机的信息采集终端除自身地址信息外,采集的信息类型均相同,因此文中仅搭建一路检测系统进行系统验证。

#### 4 结论

采用 LoRa 无线网络传输技术设计电机运行状态远程智能监控系统,通过主从模式的网络架构使

多个传感器测量的数据通过无线传感器网络汇总至同一采集终端,并通过采集终端将信息汇总至接收终端,再由接收终端上传至计算机,实现对数据的收集;通过上位机软件设置电机参数阈值,处理传输数据并绘制成曲线,实现对电机运行状态的信息化管理。最后搭建实验平台对设计的系统进行功能测试,通过对监控数据的分析可实现对电机的故障预警,验证了系统功能的可靠性和稳定性。

#### 参考文献:

[1] 马寅兴. 发电机励磁变压器状态监测系统研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.  
 MA Y X. Research on the Condition Monitoring System for Generator Excitation Transformers[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

- [2] HE L J, HAO L W, QIAO W. Remote monitoring and diagnostics of pitch-bearing defects in an MW-scale wind turbine using pitch symmetrical-component analysis[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(4): 3252–3261.
- [3] 张俊仁. 煤矿井下电机车远程监控及定位系统设计与研究[J]. *机械管理开发*, 2022, 37(4):246–248.  
ZHANG J R. Design and research of remote monitoring and positioning system of underground motor vehicles in a coal mine[J]. *Mechanical Management and Development*, 2022, 37(4):246–248.
- [4] 钟益民. 基于LoRa的电机振动信号无线采集与分析系统[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.  
ZHONG Y M. Wireless Acquisition and Analysis System for Motor Vibration Signals Based on LoRa[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2020.
- [5] ÜNAL I. Integration of ZigBee based GPS receiver to CAN network for precision farming applications[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2020, 13(5):1394–1405.
- [6] JAGANNATH A, KANE Z, JAGANNATH J. Bluetooth and WiFi dataset for real world RF fingerprinting of commercial devices[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(5):50–56.
- [7] 何湘桂, 孟志强, 周华安. 基于LoRa物联网的城市道路照明能耗与窃电监测系统[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(10):11–19.  
HE X G, MENG Z Q, ZHOU H A. System of urban road lighting energy consumption and power theft monitoring based on LoRa internet of things[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(10):11–19.
- [8] 许龙铭. 基于LoRa的机械冲压机故障检测系统设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2023, 23(7):88–91.  
XU L M. Design of mechanical stamping machine fault detection system based on LoRa[J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2023, 23(7):88–91.
- [9] 鞠晨. 基于STM32的矿用电机轴承振动监测仪[J]. *机电工程*, 2023, 40(8):1299–1306.  
JU C. Mining motor bearing vibration monitor based on STM32[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(8):1299–1306.
- [10] XU H H, QU Z Y, TANG H Y, et al. An energy-efficient scheduling algorithm with SIC and power control in WSNs[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(20):20027–20041.
- [11] JIA X Y, WANG S L, QIAO J L, et al. An adaptive spherical square-root double unscented Kalman filtering algorithm for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(10):14256–14267.
- [12] SHILPA B, JHA R K, NAWARE V, et al. Design and implementation of hybrid low power wide area network architecture for IoT applications[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 2024, 16(2):201–213.
- [13] XU Z F, YANG J J, ZHOU H, et al. A wireless remote monitoring sensor for agricultural environment based on NB-IoT[J]. *INMATEH Agricultural Engineering*, 2023, 69(1): 285–294.
- [14] MOUNIKA K, PURNA CHANDAR RAO E N V, SUDH A. IoT-based wastebin-monitoring and-tracking system using GSM and GPS[M]//*Modern Approaches in IoT and Machine Learning for Cyber Security*. Cham: Springer International Publishing, 2023:311–324.
- [15] ZHANG H J, LIU G H, XU Y, et al. LoRaAid: underground joint communication and localization system based on LoRa technology[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(5):5248–5260.
- [16] LIU J J, YAN Y M, YU H, et al. Approximate BER performance of LoRa modulation with heavy multipath interference[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(5):853–857.
- [17] CHENG J H, LU C L, ZHANG G, et al. Design of motor intelligent monitoring and fault diagnosis system based on LoRa[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(8):3091094.
- [18] CHANDER B, KUMARAVELAN G. Outlier detection strategies for WSNs: a survey[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34(8):5684–5707.
- [19] ABDERRAHMANE T, NOURREDINE A, MOHAMMED T. Experimental analysis for comparison of wireless transmission technologies: WiFi, Bluetooth, ZigBee and LoRa for mobile multi-robot in hostile sites[J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2024, 14(3):2753.
- [20] FU X, SHEN W Z, YIN Y L, et al. Remote monitoring system for livestock environmental information based on LoRa wireless ad hoc network technology[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(4):79–89.
- [21] PURWONO P, BURHAN A, LUTVIANA L. Implementation of LoRa wireless communication in smart diabetic shoes design[J]. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2023, 3(4):899–910.
- [22] DE LA TORRE L, CHACON J, CHAOS D, et al. Using IoT-type metadata and smart web design to create user interfaces automatically[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(3):3109–3118.