DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0034-06

基于LoRa的低功耗压铸机状态监测系统研究

陆兆基, 缪文南, 陈雪娇, 李丽雅

(广州城市理工学院,广州 510000)

摘　要:为保证压铸过程高效、稳定的进行,超大吨位压铸机监测系统需同时监测多个关键位置,但传统压铸机有线监测方案监测点少且接线繁杂。为实现长期多点远程监测压铸机状态,设计并开发一种基于LoRa模块的低功耗压铸机状态监测系统。系统通过LoRa无线通信技术与E22-400T系列LoRa模块的自动中继、空中唤醒(wake on radio,WOR)工作模式等功能组建低功耗广域网(low power wide area network,LPWAN),实现96个节点同时在线监测,结合温度与加速度传感器实时监测压铸机运行状态,由QT开发的可视化界面完成人机交互。通过低功耗设计分布式采集节点,中继节点扩充通信距离,提高通信抗干扰能力和稳定性,监测主机实现远程监测与数据可视化。将采集节点安装于压铸机测量点进行实时监测,实验表明:系统采集节点连续运行10 d平均工作电流0.863 mA,配置1500 mAh容量电池可支持分布式采集节点连续工作72 d,满足长期不断电多点远程监测超大吨位压铸机状态的需求;在复杂工业环境下的通信距离为500 m,丢包率小于1%、误码率小于1×10^{-6};振动采集量程 $\pm200g$ 且误差在 $\pm0.2g$ 以内,温度测量误差在±0.5 ℃以内;温度、振动、电池电量数据异常上报率100%,能及时准确地发现压铸机的异常数据。

关键词:压铸机;状态监测; LoRa; 低功耗; 中继; 分布式采集; E22-400T

中图分类号: TP274;TP212.1;TG233　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)08-0034-06

Research on LoRa-based low-power die-casting machine condition monitoring system

Lu Zhaoji, Miao Wennan, Chen Xuejiao, Li Liya

(Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: To ensure efficient and stable die casting operations, monitoring systems for ultra-large tonnage die casting machines must simultaneously monitor multiple critical locations. However, traditional wired monitoring solutions for die casting machines offer limited monitoring points and involve complex wiring. To enable long-term, multi-point remote monitoring of die casting machine status, a low-power die casting machine status monitoring system based on LoRa modules has been designed and developed. The system leverages LoRa wireless communication technology and the E22-400T series LoRa module's features—including automatic relaying and wake on radio (WOR) mode to establish a low power wide area network (LPWAN). This enables simultaneous online monitoring of 96 nodes. Integrated temperature and acceleration sensors provide real-time monitoring of the die-casting machine's operational status, while a QT-developed visualization interface facilitates human-machine interaction. Distributed data acquisition nodes employ low-power design, while relay nodes extend communication range, enhance interference resistance, and improve stability. The monitoring host enables remote monitoring and data visualization. Installing collection nodes at die-casting machine measurement points enables real-time monitoring. Experimental results show: the system's collection nodes maintained an average operating current of 0.863 mA during 10 consecutive days of operation. Equipped with a 1500mAh battery, distributed collection nodes can sustain continuous operation for 72 days, meeting the demand for long-term, uninterrupted multi-point remote monitoring of ultra-large-tonnage die-casting machine status. In complex industrial environments, the communication range reaches 500 meters with a packet loss rate below 1% and an error rate below 1×10^{-6}. Vibration measurement spans $\pm200g$ with an error margin within $\pm0.2g$, while temperature measurement maintains an error within ±0.5 ℃. The system achieves 100% reporting rate for abnormal temperature, vibration, and battery level data, enabling timely and accurate detection of abnormal data from die-casting machines.

Keywords: die casting machine; condition monitoring; LoRa; low power consumption; relay; distributed collection; E22-400T

压铸机因生产技术轻量化,精度高等特点被广泛应用于现代汽车制造行业[1-3]。压铸机是通过液压系统驱动压射机构完成对熔融金属进行高压充填模具型腔,最后经过冷凝硬化成形设备[4-5]。因长时间承受高温熔体周期性冲击和锁模力的作用,其关键部件易发生过热及振动不良等问题[6-7]。为确保压铸过程的高效稳定运行,需对压铸机关键位置进行监测。传统的状态监测系统多采用有线传感器网络,存在监测点少、布线繁杂、功耗大、维护成

收稿日期:2025-09-25;**录用日期**:2025-11-03

基金项目:广州城市理工学院重点科研基金(53/K0224002)

作者简介:陆兆基(1998—),男,助理实验师,研究方向为嵌入式系统设计及LoRa通信技术应用。

通信作者:缪文南(1984—),男,硕士,副教授,研究方向为无线传输技术。

引用本文:陆兆基,缪文南,陈雪娇,等.基于LoRa的低功耗压铸机状态监测系统研究[J].自动化技术与应用,2026,45(8):34-39.(Lu Zhaoji,Miao Wennan,Chen Xuejiao,et al. Research on LoRa-based low-power die-casting machine condition monitoring system[J]. Techniques of Automation and Applications,2026,45(8):34-39.)

本高等问题,运用到超大吨位压铸机多点检测时,存在难以扩展的情况[8-9]。

针对此类问题,Seungcheol 等[10]在压铸机模具内布点测量温度和压力,并采用蓝牙技术对测量数据进行无线传输,实现无线监测的功能,能够安全监测压铸过程,但无法解决传感器布线复杂,传输距离短等问题。赵海贤[11]基于 AM3358 和 RS-485 总线设计 PLC 控制系统,对压铸状态实时监测,优化了有线传感器网络布线复杂的问题,但 485 总线半双工通信易导致关键信息延迟或丢失且扩展性不足,进一步限制了大规模数据采集的实时性,无法满足超大吨位压铸机多维度、高密度的监测需求。Tang 等[12]在数控机床的主轴布点监测振动状态,利用 Wi-Fi 技术实现对数控机床振动状态的无线监测,但其安装在数控机床的主轴附近,Wi-Fi 无线数据传输会受到主轴电机等电气设备的强电磁干扰,通信时延不确定会导致实时性不足。夏明建等[13]采用温度、震动信号及 ZigBee 无线通信技术实现设备故障诊断系统的开发,采集设备重点部位数据并高效传输,系统能耗大且 ZigBee 只能进行短距离传输,在金属密集的环境下衰减严重。薛峰等[14]通过 NB-IoT 实现远程温度检测系统的开发,结合 UDP 协议完成数据的传输工作,数据传输完整,运行稳定。Youchao 等[15]利用 NB-IoT 技术在工业生产中将设备的温度与振动信息上传至云端。但 NB-IoT 技术对移动基站存在较强的依赖性,在工业厂房及地下管网等复杂环境中的应用存在局限性。

本文基于 E22-400T 系列的 LoRa 模块设计并开发低功耗压铸机状态监测系统,通过模块内置的自动中继和高效看门狗功能,能在工业厂房的复杂环境中实现远距离强穿透、抗干扰传输。同时,系统结合 WOR 工作模式完成低功耗设计,实现监测点的长期部署,有助于构建大规模、易于维护的无线监测网络。有效提高压铸机的监测数据故障排查速度与稳定性,有利于促进新型压铸系统智能化发展进程。

1 系统总体设计

低功耗压铸机状态监测系统整体架构如图 1 所示,由一台监测主机、多个中继节点和多个分布式采集节点组成。采集节点安装于压铸机压射杆末端、压射缸体外壁、模具固定板、机身底座及液压站管道外壁等多点。

监测主机将数据采集指令和设置指令发布到中继节点,由中继节点命令各分布式采集节点获取振动幅度、温度和采集节点的电池电量。各采集节点将数据发送到中继节点,再由中继节点将数据打包发送至监测主机对数据进行实时可视化显示、存储查询、导出。

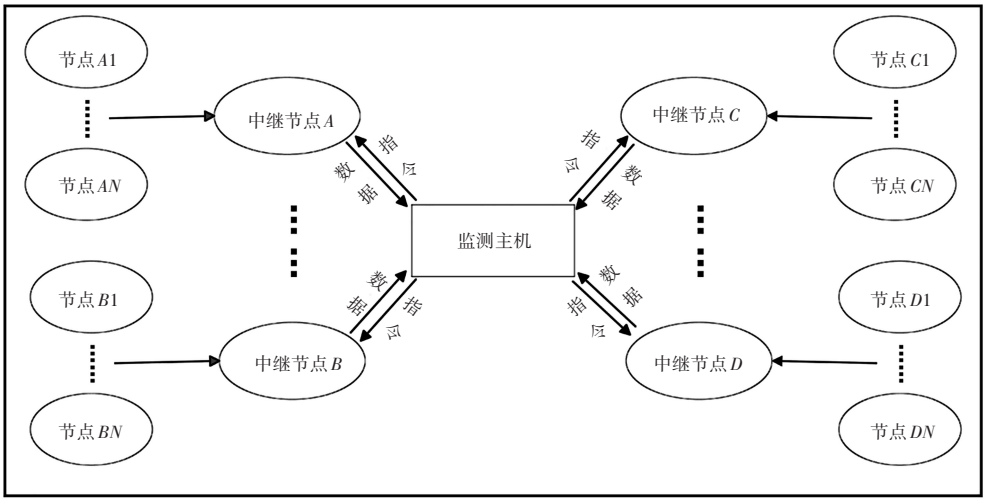


图 1 系统整体架构

Fig. 1 System architecture

2 系统硬件设计

低功耗压铸机状态监测系统的硬件框图如图 2 所示,由 LoRa 采集节点、LoRa 中继节点、LoRa 监测主机这三部分组成。系统内部通过 LoRa 模块 E22-400T22S 和 E22-400T30S 自组网实现远距离、多点多级无线通信。

LoRa(长程低功耗射频)物联网技术具有长距离通信、低功耗、适合大规模部署等特点[16-17]。低功耗压铸机状态监测系统使用 E22-400T 系列 LoRa 无线串口模块,内部集成基于 SEMTECH 公司 SX1268 射频芯片的完整方案,较于传统的 SX1278 方案,有着功耗更低、传输距离更远、速率更快的优势[18-19]。该模块的自动中继、WOR 工作模式、高效看门狗功能实现超长距离、超低功耗、高干扰环境和高性价比的 LPWAN 应用[20]。WOR 通过 AUX 脚位唤醒 MCU[21]。

低功耗压铸机状态监测系统可通过 RF_Setting 软件配置 E22-400T 系列 LoRa 模块组网参数[22]。系统组网关键设置如下:开启中继节点的中继透明转发功能,将采集节点和监测主机分别设为 WOR 接收与发送方。设置完成后,可由监测主机唤醒所有采集节点并检查联网情况。

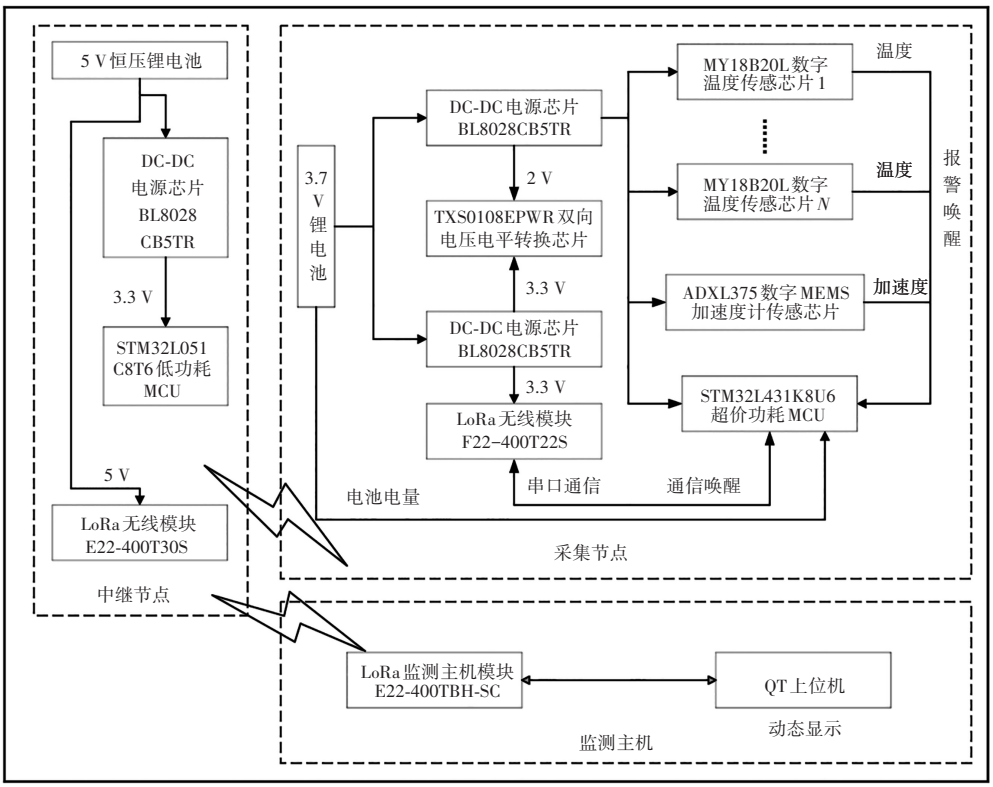


图 2　系统硬件模块框

Fig. 2　System hardware module block

2.1　LoRa 监测主机模块设计

LoRa 监测主机模块 E22-400TBH-SC 集成 LoRa 无线模块 E22-400T30S、USB 通信接口、STM32F103C8T6MCU 实现无线通信数据与计算机 USB 数据的转换[23]。

2.2　采集节点低功耗设计

为满足采集节点长时间不断电工作,对传感器节点的硬件和软件进行低功耗设计。采集节点模块电路如图 3 所示,MCU 采用超低功耗微处理器 STM32L431K8U6,由 BL8028CB5TR 分别将锂电池 3.7 V 转 2 V 给温度、加速度传感器和 MCU 供电;转 3.3 V 给 LoRa 模块供电。为避免电路不同电平之间漏电导致能量损耗,采用 TXS0108EPWR 双向电压电平转换芯片[24]。

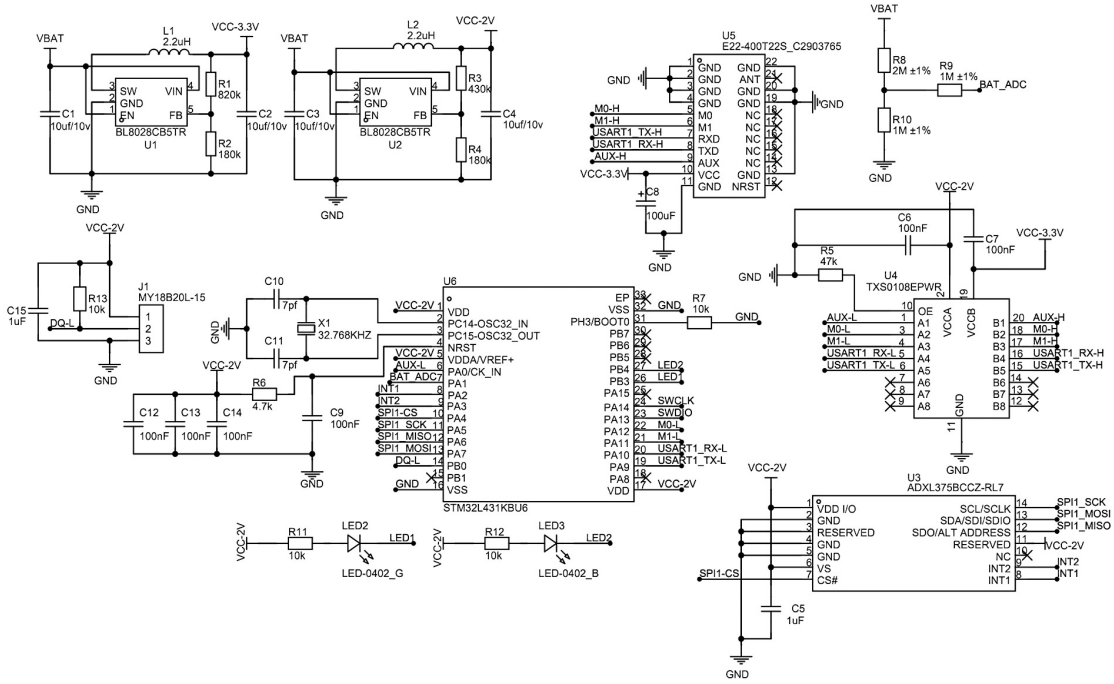


图 3　采集节点电路

Fig. 3　Data acquisition node circuit

MCU 运行功耗受时钟频率影响最大,且外置晶振的功耗相比内部晶振高,本文选择 8 MHz 的内部 RC 振荡器 MSI 作为 MCU 系统时钟(system clock,SYSCLK)和 AHB 时钟,并将锁相环 PLL 和 RC 振荡器 HSI 关闭。RTC 时钟源使用 32.768 kHz 外部晶振,以确保准确记录报警阈值时间并为低功耗定时器和低功耗串口提供时钟源。在 2 V 的工作电压下 MCU 整体运行功耗为 798 μA。

ADXL375 是一款低功耗三轴 MEMS 加速度传感器,具有精度高、能耗低、稳定性强的特点[25]。ADXL375 传感器输出数据速率设为 3 200 Hz,超过所需采集的目标信号频带需求(100~1 000 Hz)两倍以上;采集量程为 ±200g(误差补偿分辨率为 98 mg/LSB)能避免饱和失真,满足工厂大型冲压机床、压铸机(50 ~100)g 的大量程、高精度加速度测量需求。开启 FIFO 流模式,防止 MCU 在被唤醒过程中关键事件丢失,并根据需求设定报警阈值向 MCU 发出报警中断信号。

MY18B20L-15 数字温度传感器内置 E^2PROM,保存高低温报警阈值信息。使用单总线通讯,支持多节点串联实现空间分布式组网。通过均值滤波与软件补偿方法提高传感器精度。

2.3 中继节点设计

中继节点采用 E22-400T30S 与监测主机模块和采集节点进行通讯,由 5 V 恒压锂电池供电,透明转发所有数据用于增加测量布点,扩大数据测量范围。

3 系统软件设计

3.1 监测系统运行流程

如图 4 所示,监测系统运行过程由以下几步组成:当监测系统开始运行时,监测主机主线程显示交互界面,次线程处理通信数据、控制采集节点;采集节点设置传感器的报警阈值并读取传感器初始值;中继节点实现监测主机和采集节点间的无线通信。监测系统组网阶段,采集节点上传传感器数据完成节点入网注册,监测主机核查网络拓扑后可直接进入监测模式,也可下发采集节点配置参数后进入监测模式。监测模式运行期间,采集节点以给传感器设置报警阈值的方式监测设备状态,低功耗 MCU 仅在传感器触发报警、时间到上报周期或接收到上报告警命令时才被唤醒,监测主机实时对采集节点收集的数据进行存储及报警显示。

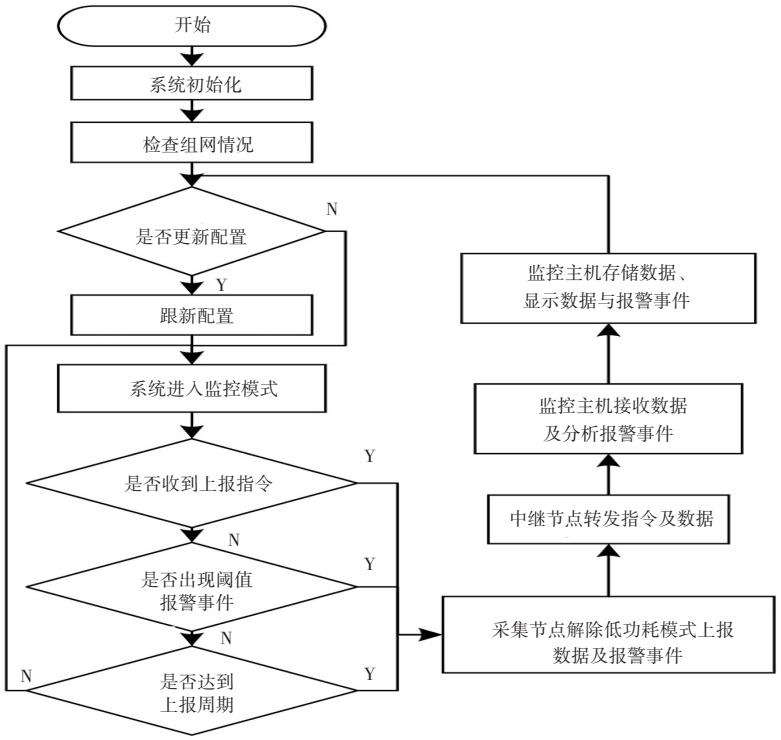


图 4 监测系统运行流程

Fig. 4 Monitoring system operation flowchart

3.2 监测主机软件组成

监测主机的 QT 程序组成如图 5 所示。状态总览模块可查看各采集节点的无线连接状态、采集周期内的温度、振动和电量的最大值,在采集点报警时会弹出提示对话框。数据存储使用 SQLite 数据库,历史数据通过上报时间和采集节点编号筛选,可将数据导出成 Excel 格式。

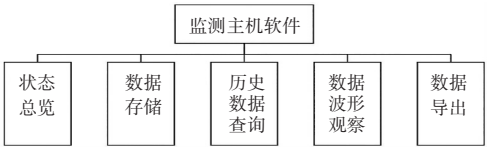


图 5 监测主机程序组成

Fig. 5 Composition of monitoring host program

4 实验与结果分析

4.1 系统测试

该系统支持 6 组每组 16 个采集节点最多 96 个采集节点入网,监测系统实物图如图 6 所示,从左到右分别为 LoRa 监测主机模块、中继节点和采集节点实物图。

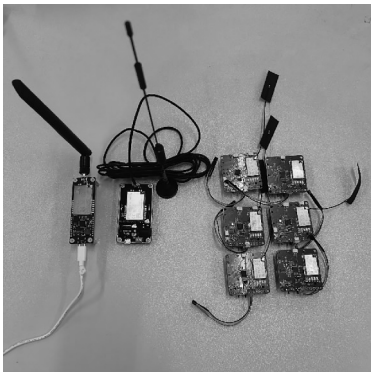


图 6 监测系统实物

Fig. 6 Physical of the monitoring system

监测主机软件主界面如图 7 所示,显示各采集节点当前周期的振动、温度及电量信息;监测主机软件数据波形观察界面如图 8 所示,该界面可配置各节点的设定参数和显示各节点历史振动、温度、电量、报警阈值和时间数据并生成对应波形图。

基于LoRa的低功耗压铸机状态监测系统

	中继编号	采集节点编号	振动/g	温度/℃	电量/%
1	A1	25	0.01	28.3	99
2	A1	30	5.17	28.5	98
3	A1	55	5.21	28.4	97
4	A3	37	5.21	28.2	98
5	A3	59	21.36	39.7	97
6	A3	18	16.82	38.6	98
7	A6	55	43.6	76.5	97
8	A6	73	5.78	29.3	97
9	A6	74	4.21	29.3	97
10	A8	75	16.81	30.1	97
11	A8	85	15.54	50.7	97
12	A8	88	4.32	30.3	97

图 7 监测主机软件主界面

Fig. 7 Monitoring host software main interface

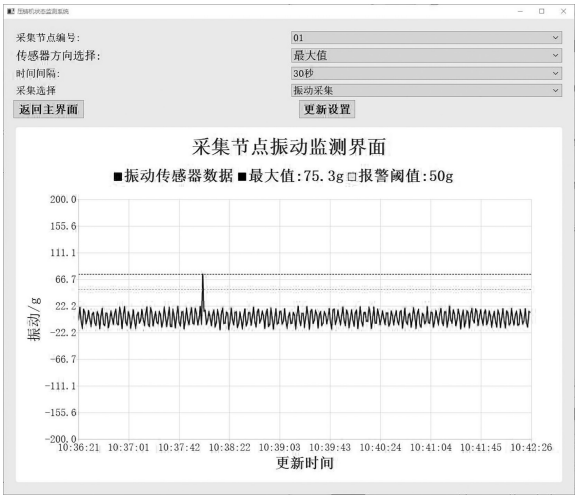


图 8 监测主机软件数据波形观察界面

Fig. 8 Monitoring host software data waveform observation interface

4.2 集节点功耗测试

低功耗分析仪与采集节点测试实验如图 9 所示,采集节点通过低功耗分析仪实时记录其各个运行模式下的平均工作电流,采集节点上报周期 3 min,无线模块 WOR 周期 3 s,连续运行 10 d 后采集节点的平均运行电流为 0.863 mA,按此数据计算,使用 1 500 mAh 的电池可以支持节点连续运行 72 d。

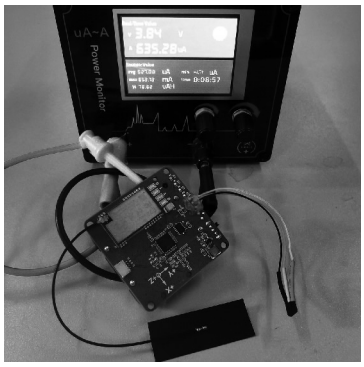


图 9 功耗测试

Fig. 9 Power consumption test

4.3 数据异常报警与数据精度测试

将采集节点与 AA 级 PT100 温度传感器共同安装于恒温加热板上,每次测量重复采集 10 个样本数据以计算误差,并选取最大值进行对比。温度测量精度实验结果如表 1,温度测量精度<0.5 ℃。将采集节点与压电式振动加速度传感器共同安装于模具固定板上,每次测量重复采集 10 个样本数据以计算误差,并选取最大值进行对比。振动测量精度实验结果如表 2 所示,采集节点的振动测量精度 < 0.2g。数据异常报警测试,设定温度与振动异常报警阈值,并通过外部施加超报警阈值温度、冲击振动与使用低于 10%电量电池测试采集节点异常报警响应,实验结果如表 3,异常数据超阈值报警上报率达 100%。

表 1 温度测量精度实验结果

Tab. 1 Temperature measurement accuracy test results ℃

次数	PT100 测量温度	采集节点测量温度误差最大值	温度误差
1	25	25.3	<0.5
2	30	30.1	<0.5
3	35	35.0	<0.5
4	40	39.7	<0.5
5	45	44.3	<0.5
6	50	50.3	<0.5
7	55	55.4	<0.5
8	60	60.3	<0.5
9	65	65.2	<0.5
10	70	70.3	<0.5

表 2 振动测量精度实验结果

Tab. 2 Experimental results on vibration measurement accuracy

压铸机工况	压电式传感器测量加速度 g	采集节点测量加速度误差最大值 g	振动误差 g
设备待机	0	0	<±0.2
电机运行	5.12	5.25	<±0.2
合模、锁模动作	20.21	20.36	<±0.2
射料冲击	47.83	47.78	<±0.2
极端冲击	98.53	98.60	<±0.2

表 3 数据异常报警实验结果

Tab. 3 Data anomaly alarm experiment results

报警类型	异常发生次数	异常响应次数
温度异常报警	20	20
振动异常报警	30	30
电量<10%报警	30	30

表 4 复杂环境通信距离测试实验结果

Tab. 4 Test results for communication range in complex environments

通信距离/m	数据包/个	准确接收/个	采集节点状态	丢包率/%	误码率
250	5 000	4 985	正常在线	0.3	$<1\times10^{-8}$
400	5 000	4 975	正常在线	0.5	$<1\times10^{-7}$
500	5 000	4 960	正常在线	0.8	$<1\times10^{-6}$
600	5 000	4 910	延迟在线	1.8	$<4\times10^{-6}$
1 000	5 000	3 365	延迟在线	32.7	$<3\times10^{-4}$

4.4 复杂环境通信距离测试

进行复杂环境通信距离测试时,配置通信信道为 23,频率为 433.125 MHz,波特率为 9 600 bps,空中速率为 2.4 kbps,采集节点发射功率设置为 22 dBm、中继节点和监测主机发射功率设置为 30 dBm,打开中继节点中继使能。将采集节点安装于压铸机压射杆末端;中继节点置于采集节点与监测主机之间;监测主机则在不同距离处接收数据以验证准确性。采集节点设定为每秒发送 25 字节含校验的固定数据包,每次发送 100 个数据包,监测主机记录每组测试的接收包数与校验结果,共进行 50 组测试以统计分析,累计产生 5 000 个有效数据点。如表 4 所示,实验结果表明在工厂车间存在大量金属设备及电磁干扰的复杂环境中,该监测系统的数据传输距离可达 500 m 且丢包率低于 1%、误码率小于 1×10^{-6}。

5 结论

本文基于 E22-400T 系列的 LoRa 模块设计并开发低功耗压铸机状态监测系统,支持 96 个节点自组网同步监测,有效解决了有线监测方案监测点少、布线繁杂的局限性,振动采集量程为 $\pm200g$,同时可满足目前超大型压铸机加速度普遍在 $(50 \sim 100)g$ 左右的测量需求。该系统通过软硬件的低功耗设计,延长采集节点的续航时长,1 500 mAh 电池可支持节点连续工作 72 d。系统振动测量精度在 $\pm0.2g$ 以内,温度测量精度在±0.5 ℃以内,数据异常报警上报率达 100%,能及时准确地发现压铸机的异常数据。系统在 500 m 通信距离的丢包率小于 1%、误码率小于 1×10^{-6},验证该系统在金属密集、强电磁干扰环境中的抗干扰能力强,数据传输稳定。

参考文献

[1]徐世伟,纪志康,肖培杰,等. 汽车轻量化技术研究现状及展望[J]. 汽车安全与节能学报,2025,16(1):16-31.

[2]郑敬明,潘帅,王玉,等. 免热处理铝合金大型结构件一体压铸研究进展[J]. 中国有色金属学报,2025,35(6):1869-1894.

[3]Li T,Song J,Zhang A,et al. Progress and prospects in Mg-alloy super-sized high pressure die casting for automotive structural components [J]. Journal of Magnesium and Alloys,2023,11(11):4166-4180.

[4]谭高山,刘志强,别大勇. 一体化压铸成形技术应用研究[J]. 锻造与冲压,2025(8):24-28.

[5]黄军,潘武兵,唐晓亮,等. 汽车行业一体化压铸的研究现状与进展[J]. 大型铸锻件,2025(2):29-35.

[6]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.

[7]Godreau V,Ritou M,Castelbajac C D,et al. Diagnosis of spindle failure by unsupervised machine learning from in-process monitoring data in machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2024,131(2):749-759.

[8]聂俊毅,黄志垣,万里,等. 一体化压铸模温控制系统设计与应用[J]. 特种铸造及有色合金,2024,44(8):1041-1044.

[9]张尚星. 物联网技术在煤矿机电设备状态监测系统中的应用[J]. 科技与创新,2025(19):226-229.

[10]Seungcheol L,Dosuck H,Naksoo K. Design and implementation of a remote monitoring system of mold cavity using eject pin in high-pressure die casting[J]. International Journal of Cast Metals Research,2023,36(4-6):112-120.

[11]赵海贤. 基于嵌入式软 PLC 的压铸机实时控制系统设计[J]. 煤炭技术,2022,41(3):216-218.

[12]Tang J,Hu Y,Shang Y,et al. Frequency adaptive and frequency domain adjustable frictional electric vibration sensor and its application in CNC machine tools[J]. Nano Energy,2025,140:111002.

[13]夏明建,阎志超. 基于温度和震动信号的机电设备故障诊断系统研究[J]. 矿业装备,2024(2):158-160.

[14]薛峰,李娟,王如龙. 基于 NB-IoT 的供热温度监测系统设计[J]. 物联网技术,2023,13(11):5-7,12.

[15]Youchao Q,Junqing Z,Jianhua Z,et al. Self-powered wireless temperature and vibration monitoring system by weak vibrational energy for industrial internet of things[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2023,15(34):40569-40578.

[16]周丽丽,杜寅甫,王艳新,等. 基于 5G 与 LoRa 的厌氧干发酵系统研究[J]. 自动化技术与应用,2024,43(12):159-162.

[17]叶光伟,刘海哲,李长武. 光伏发电智能清洁机器人设计与实现[J]. 自动化技术与应用,2025,44(9):95-99.

[18]胡圣洋,陈泽鸿,刘伟康,等. 基于 LoRa 的果园管道自动顺序喷雾系统研究[J]. 农机化研究,2025,47(2):171-175.

[19]刘洋. 基于 5G 技术的电缆接地电流在线监测系统设计[J]. 电子技术,2024,53(12):28-29.

[20]张群,刘凡,杨文栋,等. 基于 LoRa 的水环境监控系统设计[J]. 现代信息科技,2025,9(10):186-192.

[21]刘骏威,马梓涵,黄双根,等. 基于 STM32 的稻田土壤有机质在线监测传感器的设计[J]. 江西农业大学学报,2025,47(3):778-790.

[22]张情清. 基于 LoRa 技术的灾害环境下定位算法优化研究与应用[D]. 廊坊:华北科技学院,2024.

[23]石杰,王帅,朱恩照,等. 基于树莓派的水下航行器通用遥控器设计[J]. 自动化技术与应用,2026,45(4):69-72,96.

[24]刘婷婷,郭佩佩,高翔,等. 基于北斗-RTK 的农用无人车设计与实现[J]. 现代农业装备,2022,43(1):30-37.

[25]刘子亮. 基于 STM32 的采煤机振动信号采集系统终端设计[J]. 工矿自动化,2025,51(增刊 1):94-97.