



文章编号:1671-251X(2020)12-0111-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020040021

基于 LoRa 通信的无线液压支架压力传感器设计

李起伟^{1,2,3}



扫码移动阅读

- (1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;
2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要:针对煤矿顶板压力监测系统中的无线 ZigBee 传感器使用时间达不到设计预期、需频繁更换电池的问题,设计了一种基于 LoRa 通信的无线液压支架压力传感器。内嵌 LoRa 模块的无线液压支架压力传感器安装在液压支架上,采集液压支架前支柱、后支柱及前伸梁的压力值。被测液体介质通过导压孔加压到传感器压阻元件上,压阻元件受压发生形变,产生与压力线性相关的阻值变化;传感器的微控制单元测量加在电阻上的电压,将其换算成实际压力值。该传感器实现了煤矿顶板压力监测信号的远距离、低功耗、高可靠性无线传输;通过高扩频因子的直接序列扩频技术提高接收端灵敏度,获得较高的信号增益,从而增加通信距离;通过前向纠错编码技术提高传输可靠性;采集液压支架压力值并成功发送数据后进入休眠模式,以降低功耗。测试结果表明,该传感器 1 h 的平均功耗为 1.18 mA·h,容量为 5 000 mA·h 的锂电池理论续航时间为 141 d,满足煤矿使用要求;与 ZigBee 技术相比,LoRa 有效通信距离更远,可靠性更高。

关键词:顶板压力监测; 液压支架; 无线压力传感器; LoRa 通信

中图分类号:TD355.4 文献标志码:A

Design of wireless pressure sensor of hydraulic support based on LoRa technology

LI Qiwei^{1,2,3}

- (1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficiency Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China;
3. Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract:In coal mine roof pressure monitoring system, the issues of wireless ZigBee sensors are not being long-lasting as designed and requiring frequent battery replacement. Hence, a wireless pressure sensor of hydraulic support based on LoRa technology is designed to address these problems. The wireless pressure sensor embedded LoRa module is installed on the hydraulic support to collect the pressure values of the front pillar, the rear pillar and the forepole. The measured liquid medium is pressurized to the piezoresistive element of the sensor through the pressure hole. The deformation of the piezoresistive element under pressure produces resistance change which is linearly related to pressure. The micro-control unit of the sensor measures the voltage which applied to the resistance and converts the voltage to the actual pressure value. The sensor achieves wireless long-range, low-power and high-reliability transmission of the coal mine roof pressure monitoring signal by using three methods: the direct sequence

收稿日期:2020-04-07;修回日期:2020-11-23;责任编辑:胡娴。

基金项目:煤炭科学技术研究院技术创新基金资助项目(2019CX-I-08)。

作者简介:李起伟(1983—),男,河北邯郸人,副研究员,硕士,现主要从事煤矿安全装备研究工作,E-mail:liqiwei@ccrise.cn。

引用格式:李起伟.基于 LoRa 通信的无线液压支架压力传感器设计[J].工矿自动化,2020,46(12):111-115.

LI Qiwei. Design of wireless pressure sensor of hydraulic support based on LoRa technology[J]. Industry and Mine Automation, 2020,46(12):111-115.

spread spectrum technology with high spread spectrum improves the sensitivity of the receiving end, achieves high signal gain and increases the communication distance; the forward error correction coding technology improves the transmission reliability; the sensor enters sleep mode to reduce the power consumption after collecting the pressure value of the hydraulic support and sending the data successfully. The test results show that the average power consumption of the sensor is 1.18 mA · h for 1 h and the theoretical endurance of the 5,000 mA · h lithium battery is 141 days. The sensor performance meets the need of coal mining. Comparing with ZigBee technology, LoRa shows better performance for long-range transmission and higher reliability.

Key words: roof pressure monitoring; hydraulic support; wireless pressure sensor; LoRa technology

0 引言

液压支架压力传感器是应用于煤矿井下综采工作面液压支架或普采工作面单体液压支柱压力监测的专用仪表,用来反映工作面的支护情况,分析工作面矿压变化规律,是顶板动态监测系统的重要组成部分。目前液压支架压力传感器主要有有线和无线 2 种传输形式。因支架下空间狭小,随着开采工作面不断推进,有线传输存在电缆易损坏、布线与维护困难的问题。无线传输具有布置灵活、移动方便、扩展性强等优势。

目前煤矿的无线传输形式以 ZigBee 为主,但 ZigBee 协议对信道带宽要求较高,通信距离较短。因此,需通过增加发射功率及采用多级级联的形式来提升距离与穿透性,完成远距离传输,但路由节点作为中继却不能休眠^[1],使得系统功耗增大。无线 ZigBee 传感器在实际使用中通过电池供电,使用时间达不到设计预期,存在频繁更换电池的问题。鉴此,本文基于 LoRa 通信技术,设计了一种无线液压支架压力传感器,实现了煤矿顶板监测信号远距离、低功耗无线传输的目的。

1 传感器设计方案

LoRa 是一种物理层调制方式,是将扩频通信技术应用于 1 GHz 以下频谱的一种广域网通信技术,融合了数字扩频、数字信号处理和前向纠错编码技术。在理想环境下,无线通信满足如下关系:

$$P_t - P_r + G_t + G_r = 20\lg \left[4\pi \left(\frac{C}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{-1} \frac{f}{\text{Hz}} \frac{d}{\text{m}} \right] + L_c + L_0 \tag{1}$$

式中: P_t 为发射器发射功率; P_r 为接收器灵敏度; G_t, G_r 分别为发射、接收天线增益; f 为载波频率; d 为收发天线间的距离; C 为光速; L_c 为发射天线的馈线插损; L_0 为空中传输损耗。

将 C 和 π 的值代入式(1),可得

$$P_t - P_r + G_t + G_r = 20\lg \frac{f}{\text{Hz}} + 20\lg \frac{d}{\text{m}} + L_c + L_0 - 148 \text{ dB} \tag{2}$$

对式(2)进行进一步转换可得

$$d = 10^{\left(\frac{P_t - P_r + G_t + G_r - L_c - L_0 - 20\lg \frac{f}{\text{Hz}} + 148 \text{ dB}}{20} \right)} \tag{3}$$

由式(3)可知,通过提升发射功率 P_t 可增加距离 d ,但同时传感器功耗也增大了,从而缩短了电池供电时间。这是目前无线传感器在实际应用中无法兼顾距离和功耗的问题所在。而 LoRa 通过高扩频因子的直接序列扩频技术提高接收端灵敏度(即减小 P_r 值),获得较高的信号增益,从而增加通信距离。这就改变了传输功耗和传输距离之间的平衡,呈现一种远距离、低功耗、长电池寿命、大系统容量、低硬件成本的通信特点,同时 LoRa 通过前向纠错编码技术有效提高了传输可靠性。文献[2]验证了将 LoRa 通信应用在煤矿矿压监测系统可行性,本文设计的 LoRa 通信工作在 433 MHz 频段,相比于主流 ZigBee 的 2.4 GHz 频段,具有更强的穿透和衍射能力,其低功耗、远距离的特点可有效优化顶板压力监测系统的无线网络拓扑结构^[3],解决频繁更换传感器电池的问题。

无线液压支架压力传感器网络拓扑如图 1 所示。

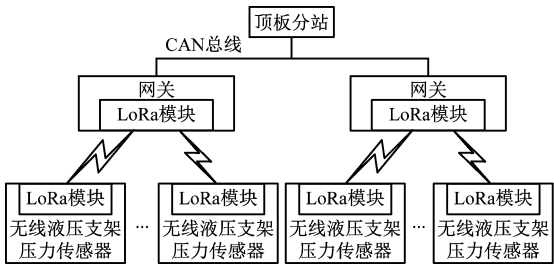


图 1 无线液压支架压力传感器网络拓扑
Fig. 1 Network topology of wireless pressure sensor of hydraulic support

内嵌 LoRa 模块的无线液压支架压力传感器安装在液压支架上,采集液压支架前支柱、后支柱及前伸梁的压力值。被测液体介质通过导压孔加压到传感器压阻元件上,压阻元件受压发生形变,产生与压力线性相关的阻值变化;传感器的微控制单元(Micro Controller Unit, MCU)测量加在电阻上的

电压,将其换算成实际压力值^[4]。传感器通过 LoRa 模块实现与网关的无线通信,网关与各传感器之间采用主从通信方式,网关周期性依次采集各传感器数据,传感器采集压力值并成功发送数据后进入休眠模式,以降低功耗。

2 传感器硬件设计

无线液压支架压力传感器以 ARM 主控芯片 STM8L151C8T6 和 LoRa 射频芯片 SX1268 为设计核心,采用模块化结构,由压阻采集电路、放大电路、声光报警电路、LoRa 通信电路、数码管显示电路、光照检测电路、电源电路、红外接收电路等组成,如图 2 所示。

传感器由锂电池供电,电源电路由低压差(Low Drop Output,LDO)控制外设电路进行功耗管理,核心 ARM 选用超低功耗处理器 STM8L151C8T6,射频芯片使用 SX1268。压阻电路将压力值转换成电压信号,经运算放大器放大及阻抗变换处理后进入 AD 转换器 ADS7822。ARM 对其采样并处理,

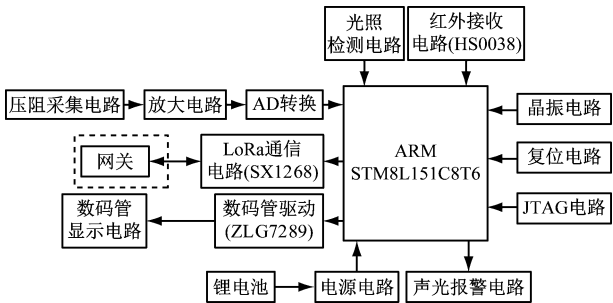


图 2 无线液压支架压力传感器硬件总体结构
Fig. 2 Overall hardware structure of wireless pressure sensor of hydraulic support

通过射频电路将数据发送给网关,同时将采集到的压力值与设定值进行比较,超限时启动声光报警。当有强光照射时,光照检测电路产生电平变化并唤醒 ARM,驱动数码管显示。通过遥控红外电路实现传感器地址、报警值等相关参数配置。

LoRa 模块以 SX1268 为核心,采用 SPI 方式与 ARM 通信,SX1268 是 433 MHz LoRa 半双工收发芯片^[5],是 SX1278 的升级版,改进了发射和接收功耗。LoRa 模块电路如图 3 所示。

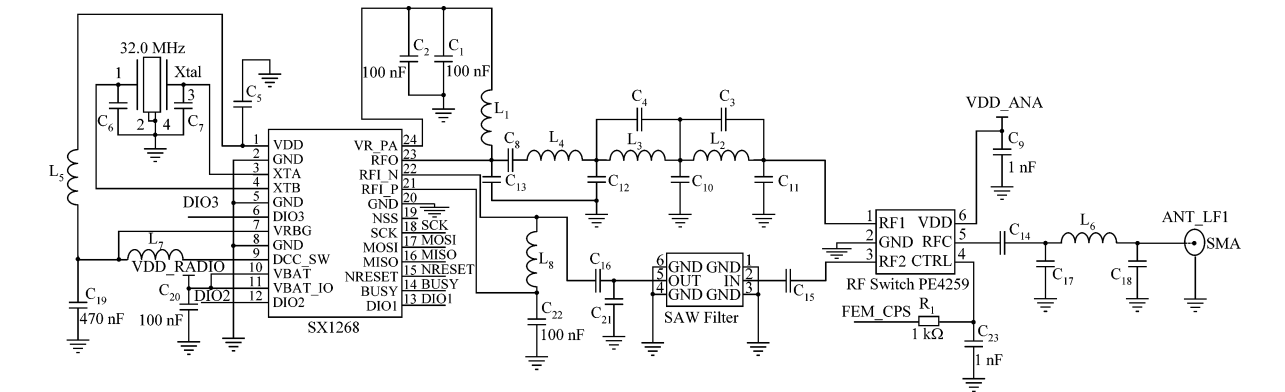


图 3 LoRa 模块电路
Fig. 3 LoRa module circuit

SX1268 的第 10 引脚 VBAT 接射频电源,第 11 引脚 VBAT_IO 接数字 I/O 电源,由 3.3 V 供电,电源入口接电容,以减少电源纹波,保证供电稳定性。采用内部高效率降压 DC-DC 转换器的配电方式^[6],由第 9 引脚引出电源,经 L₇ 接至第 1 引脚,使接收电流更小,可低至 4.2 mA。采用 32 MHz 无源晶振,因为其工作方式为半双工,所以采用射频开关 PE4259 控制收发并进行射频电路切换,将收发支路分开^[7]。发射支路由第 9 引脚射频发射输出,经 LC 椭圆低通滤波器抑制输出杂散后进入射频开关。射频接收差分输入第 21 引脚 RFI_P,第 22 引脚 RFI_N 的前段接声表面滤波器,滤除频带外干扰,提升接收质量。射频开关后端经 π 型滤波器滤除发射的 2 次谐波、3 次谐波和杂散信号,同时滤除接收的干扰信号。根据射频开关 PE4259 的真值

表,由 STM8L151C8T6 的 I/O 口控制其第 4 引脚,实现收发电路切换。

在无线传感器设计中,功耗是极其重要的指标之一,关系到锂电池的续航时间。文献[8]分析得出芯片 I/O 口处于不同状态时,功耗会有明显不同。因此,本设计中,STM8L151C8T6 和 SX1268 都进入休眠状态并关闭未用的外设,只保留实时时钟,用来做定时唤醒和外部中断主动唤醒,其余所有芯片的管脚都配置成模拟状态,不带上拉电阻和下拉电阻,以减少耗电。

3 传感器软件设计

液压支架的压力值属于缓变数据,因此,可通过程序调度外围电路的使用和工作模式的切换,使传感器间歇性工作^[9],以降低其功耗。传感器软件流

程如图 4 所示。

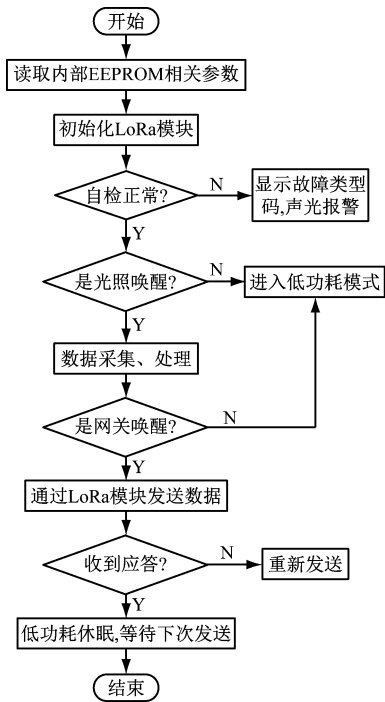


图 4 无线液压支架压力传感器软件流程

Fig. 4 Software flow of wireless pressure sensor of hydraulic support

传感器上电后,STM8L151C8T6 读取 EEPROM 内的传感器地址、载波频率、灵敏度、信号带宽、扩频因子、工作模式等相关参数值并通过数码管显示^[10],通过 SPI 对 SX1268 芯片进行初始化,开启中断,进行传感器自检。当有故障时,声光报警并显示故障类型码,没有故障则进入休眠模式。当检测到光照唤醒时,探头采集压力数据,经数据处理后通过数码管显示。网关根据设定时间定时唤醒传感器,传感器监听到网关唤醒命令时,采集压力数据并进行数据处理,然后通过 LoRa 模块将数据发送给网关。未收到唤醒时,传感器保持休眠状态。在数据处理过程中,若数据超限则发出声光报警。

4 测试分析

通过测量无线传感器电流实现其功耗测试。无线液压支架压力传感器的工作状态包括休眠状态、监听状态、射频接收/发射状态、探头采集显示状态^[11]。用万用表测量无线液压支架压力传感器休眠时的静态电流,用示波器和电流探头捕捉其工作时的动态电流,设发送周期为 5 min,光照唤醒频率为 2 次/h,1 次数码管显示时间为 10 s,测试结果见表 1。

折算到 1 h,无线液压支架压力传感器平均功耗^[12]为 $142 \times 2 \times 12/3\ 600 + 0.03 \times 296.3 \times 12/3\ 600 + 38 \times 10 \times 2/3\ 600 = 1.18\text{ mA} \cdot \text{h}$ 。

表 1 无线液压支架压力传感器功耗测试结果

Table 1 Power consumption test results of wireless pressure sensor of hydraulic support

模式	电流	时间/s
休眠	30 μA	296.3
采集显示	38 mA	1.7(折算)
采集发射	142 mA	2

设锂电池容量为 5 000 mA · h,因电池存在自放电,电池电量按标称容量的 80% 预估,则理论上电池可续航天数为 $5\ 000 \times 0.8 / (1.18 \times 24) = 141$ 。电池续航时间满足煤矿使用要求。

与传统无线通信方式相比,LoRa 能够在发射功率相同的情况下实现更远的通信距离,同时拥有更强的抗干扰能力。在小区环境中测试 LoRa 通信距离与丢包率^[13],地形如图 5 所示。网关放在煤炭科学研究总院 1 号楼楼顶,周围建筑多为小高层。大型煤矿井下工作面宽度为 200~300 m,因此,最大测试距离取 300 m,调整传感器 LoRa 模块扩频因子、带宽等参数,在距离网关 200,220,240,250,280,300 m 处,传感器各发收 1 000 包数据,统计通信丢包率^[14]。



图 5 LoRa 通信测试地形

Fig. 5 LoRa communication test terrain

测试结果显示,在 200~260 m 内,传感器丢包率为 0;在 260~300 m 内,丢包率小于 0.5%。与 ZigBee 的有效通信距离 50~100 m 相比^[15],LoRa 有效通信距离更远,可靠性更高。

5 结语

分析了 LoRa 通信技术原理及其低功耗、远距离传输特性。以主控芯片 STM8L151C8T6 和 LoRa 射频芯片 SX1268 为核心,设计了一种基于 LoRa 通信的低功耗无线液压支架压力传感器。测试结果表明,该传感器 1 h 的平均功耗为 1.18 mA · h,容量为 5 000 mA · h 的锂电池理论续航时间为 141 d,满

足煤矿使用要求;与 ZigBee 技术相比,LoRa 有效通信距离更远,可靠性更高。该传感器解决了煤矿顶板压力监测系统中频繁更换传感器电池的问题,实现了压力监测数据的远距离、低功耗、高可靠性传输。LoRa 通信技术在无线液压支架压力传感器上的应用有助于提升顶板压力监测系统运维的高效性与智能性,符合智慧矿山建设的发展趋势。

参考文献 (References):

[1] 胡亮. 无线低功耗液压支架压力监测系统设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(6): 83-86.
HU Liang. Design of wireless pressure monitoring system of hydraulic support with low power consumption [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(6): 83-86. .

[2] 霍振龙. LoRa 技术在矿井无线通信中的应用分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 34-37.
HUO Zhenlong. Application analysis of LoRa technology in mine wireless communication [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 34-37.

[3] 郝瑞泽. 基于 LoRa 技术的煤矿顶板监测系统的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2019.
HAO Ruize. Research and design of coal mine roof monitoring system based on LoRa technology [D]. Taiyuan: North University of China, 2019.

[4] 黄增波, 叶锦娇, 赵华玮. 基于 LoRa 技术的低功耗无线锚杆应力传感器设计[J]. 煤矿现代化, 2017(1): 39-42.
HUANG Zengbo, YE Jinjiao, ZHAO Huawei. Design of low power wireless anchor rod stress sensor based on LoRa technology [J]. Coal Mine Modernization, 2017(1): 39-42.

[5] 李时杰. 远距离低功耗无线传输网络终端节点的设计与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
LI Shijie. Design and implementation of long-distance and low-power wireless sensor network terminal node [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

[6] 赵文举. 低功耗广覆盖 LoRa 系统的研究与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
ZHAO Wenju. Research and application of LoRa system with low power and wide area [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

[7] 赵全, 徐光, 郝龙, 等. 基于 LoRa 的无线多参数环境监测节点设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 119-122.
ZHAO Quan, XU Guang, HAO Long, et al. Design of wireless multi-parameter environment monitoring node based on LoRa [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(5): 119-122.

[8] 蔡文郁, 张鹏鹏, 张美燕. 基于 LoRa 通信的无线传感网低功耗节点设计[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 10-14.
CAI Wenyu, ZHANG Pengpeng, ZHANG Meiyun. Design of low-power WSN node based on LoRa [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2018, 38(2): 10-14.

[9] 薛光辉, 赵贺, 孙宗正. 基于 LoRa 技术的矿用无线复合传感器设计与实现[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 166-170.
XUE Guanghui, ZHAO He, SUN Zongzheng. Design and implementation of mine wireless composite sensor based on LoRa [J]. Coal Engineering, 2020, 52(4): 166-170.

[10] 李继云, 谢俊生. 基于 LoRa 通信的矿用低功耗无线传感器设计[J]. 煤矿机电, 2018(4): 41-43.
LI Jiyun, XIE Junsheng. Design of mine low power consumption wireless sensor based on LoRa communication [J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology, 2018(4): 41-43.

[11] 龚天平. LoRa 技术实现远距离、低功耗无线数据传输[J]. 电子世界, 2016(10): 115-117.
GONG Tianping. LoRa technology achieves long distance, low power wireless data transmission [J]. Electronics World, 2016(10): 115-117.

[12] 楼亮亮, 金彦亮, 周苗, 等. 物联网节点功耗测量及电池寿命分析[J]. 自动化仪表, 2015, 36(12): 52-55.
LOU Liangliang, JIN Yanliang, ZHOU Miao, et al. Measurement of the power consumption for IoT nodes and the analysis of the life cycle of battery [J]. Process Automation Instrumentation, 2015, 36(12): 52-55.

[13] 黄丹群. 井下液压支架压力在线监测系统的设计[J]. 工矿自动化, 2015, 41(12): 9-11.
HUANG Danqun. Design of online pressure monitoring system of underground hydraulic support [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(12): 9-11.

[14] 袁超. 基于 LoRa 的远距离无线通信系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
YUAN Chao. The design and implementation of Long-distance wireless communication system based on LoRa technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[15] 冒志益. 基于 LoRa 的智能监测系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
MAO Zhiyi. Research and implementation of intelligent monitoring system based on LoRa [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.