

矿用低功耗无线激光移近量传感器设计

路 萍

(中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘要:针对煤矿巷道等恶劣环境下顶底板移近量监测难题,采用激光相位测距技术,设计了一种低功耗无线激光移近量传感器。通过实验研究,该传感器实现了高精度测量,误差控制在 3 mm 以内,有效提升了测量准确性。同时,传感器在低功耗模式下整机功耗降至 5 mW 以内,显著延长了使用寿命。采用 LoRa 无线传输技术和 WaveMesh 网络,实现远距离自组网,方便安装使用。实验结果表明,该传感器具有高精度测量、低能耗工作和无线自组网通信等优势,可广泛适用于矿山巷道顶底板移近量监测中。

关键词:低功耗;移近量;LoRa;无线传感

中图分类号:TP273

文章编号:1000-0682(2025)01-0048-04

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.007

Design of a low-power wireless laser proximity sensor for mining application

LU Ping

(China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: A low-power wireless laser proximity sensor was designed using laser phase ranging technology to address the difficulty of monitoring the displacement of the roof and floor in harsh environments such as coal mine tunnels. Through experimental research, the sensor has achieved high-precision measurement with an error controlled within 3 mm, effectively improving measurement accuracy. At the same time, the overall power consumption of the sensor is reduced to less than 5 mW in low-power mode, significantly extending its service life. Adopting LoRa wireless transmission technology and WaveMesh network, achieving long-distance self-organizing network for easy installation and use. The experimental results show that the sensor has advantages such as high-precision measurement, low energy consumption operation, and wireless self-organizing network communication, and can be widely used for monitoring the movement of the top and bottom of mining tunnels.

Keywords: low-power consumption; proximity; LoRa; wireless sensor

0 引言

煤矿顶板事故是煤矿生产中的一大安全隐患。通过准确测量顶底板距离,可以及时了解顶板的稳定状况,预测顶板可能发生的冒落或垮塌,从而采取相应的预防措施,减少顶板事故的发生。巷道环境复杂多变,对顶底板移近量进行实时监测,需要考虑巷道的实际情况、测量精度要求、设备成本以及操作便捷性等因素。使用测尺或测距仪比较直观,但由

于有线连接、操作误差大等问题,难以满足现代矿山的需求。超声波测距不受光照条件影响,对于存在粉尘或烟雾的巷道环境有一定的适应性,然而它的测量精度不能满足顶底板移近量精度要求^[1]。雷达监测技术成本较高,且数据处理和分析相对复杂^[2]。全站仪提供了高精度的角度和距离测量,适合用于矿山的精细测绘工作,但操作复杂,且设备成本较高^[3]。利用激光测距,具有高精度和非接触式的测量特点,特别适用于需要精确且快速测量距离的场合^[4-5]。在矿山环境中,它能够提供可靠的实时监测数据,并且操作使用方便,价格适宜。因此,该文设计了一种矿用低功耗无线激光移近量传感器,具有高精度测量、低能耗工作和无线自组网通信等优势,为矿山安全和生产提供有力支持。

收稿日期:2024-06-12

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目—环境参数高精度传感技术及装备(2023-TD-ZD005-02)

第一作者:路萍(1978—),女,副研究员,主要从事智能仪器仪表方面的研发工作。

1 激光移近量测量

激光测距是一种先进的测量技术,利用激光来精确、快速地测量距离,且无需与被测物体接触。这种技术主要分为两种类型:红外脉冲式和红光相位式。其中,红外脉冲式激光测距通过计算激光脉冲从发射到被接收的时间差来确定距离,由于激光脉冲的传播速度极快,因此这种方法能够实现高效的测量。同时,该方法还可以测量较远的距离,适用于需要快速、远距离测量的应用场合。红光相位式测量方法是一种通过测定激光束往返目标物体时所产生的相位差异来计算距离的技术。鉴于激光波长极短,这种方法能够实现较高的测量精度。同时,该方法还可以测量非常小的距离变化,适用于需要高精度测量的应用场合^[6]。煤矿顶底板移近量是评估煤矿顶板稳定性的重要指标之一,从而掌握综采工作面围岩的运动规律。因此煤矿顶底板移近量测量的精度要求通常较高,一般要求达到毫米级。该文采用激光相位技术来实现高精度的距离测量,并据此测量煤矿顶底板的移近量。这种高精度测量方法可以更准确地反映顶底板的微小变化,为煤矿安全生产提供预警、监测数据。激光测距相位法不易受到光线、温度等环境因素的影响,因此具有较好的稳定性。在煤矿复杂多变的地质条件下,这种稳定性能够确保测量结果的准确性和一致性。

激光经过高频调制,连续发射,通过测量与初始信号的相位差,提高测距精度^[7]。设高频调制光的调制频率为 f_v ,如图 1 所示。

激光往返一周所需的时间 t ,可以通过调制波的完整周期数目以及不足一个完整周期的小数部分来共同表示。

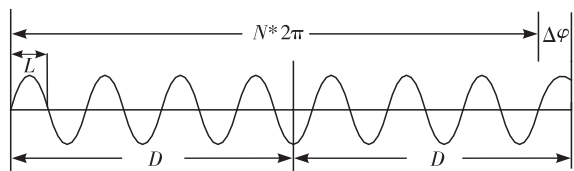


图 1 激光相位式测距示意图

$$t = (N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}) \frac{1}{f_v} \quad (1)$$

式中: f_v 为调制频率; N 为光波往返的整周期数; $\Delta\varphi$ 为非一个周期相位值; C 为光速; D 为单程距离,则:

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{2} C t = \frac{C}{2} (N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}) \frac{1}{f_v} \\ &= \frac{C}{2 f_v} N + \frac{C}{4 \pi f_v} \Delta\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

$$L = \frac{C}{2 f_v} = \frac{C}{2} T_v \quad (3)$$

L 为调制波长的二分之一,即电尺长度。则:

$$D = L * N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} * L = L * N + \Delta N * L \quad (4)$$

$N=0$, 测量距离在一个电尺长度内,则:

$$D = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} * L \quad (5)$$

由式(5)可知,参考信号通过移相器改变相位,与测距信号位相一致,得到相位差值 $\Delta\varphi$,即得到测量距离。激光器通过周期发射进行连续的测量并观察距离的变化,计算两次测量之间的距离差异,反映巷道顶底板在某一方向上的变形情况。

相位式激光测距技术使用激光作为测量媒介,激光具有单色性好、方向性强、亮度高等特点,这使得它在矿井这样的恶劣环境中仍能保持较高的测量精度。相位式激光测距技术采用非接触式测量方式,无需人员直接接触测量对象,从而降低了安全风险。此外,通过采用适当的防护措施,如加装防尘罩、防水壳等,可以进一步增强激光测距传感器在矿井中的适用性。考虑到矿井环境的特殊性,激光探头应避免在粗糙、潮湿、光滑或高光等不合适的表面上进行测量,为此设计目标靶安装于巷道壁,以确保测量结果的准确性。

2 传感器无线传输

煤矿巷道顶底板移近量传感器的工作环境通常是非常恶劣的,巷道内存在大量的煤尘和岩尘,湿度较高。当大量电气设备和电缆同时存在时,电磁干扰环境变得异常复杂,因为这些设备在工作过程中会产生错综复杂的电磁场,对传感器的无线传输和信号处理造成干扰,严重影响传感器的测量精度和稳定性,因此需要考虑抗干扰能力强的低功耗远距离无线传输技术,适应恶劣的巷道环境。

LoRa (Long Range) 是一种近几年广泛应用的低功耗远距离通信技术,在煤矿巷道顶底板移近量监测中,采用 LoRa 技术可以实现长距离的数据传输,同时降低能耗,提高系统整体性能^[8-9]。

在巷道内通常设置多个传感器节点,构成分布式监测网络。每个节点独立采集数据并通过无线方式传输到地面监测中心,实现全局范围内的顶底板移近量监测。基于 Mesh 的无线传感器网络通过无线链路将分布在各个区域的传感器节点连接起来,形成一个自组织的网络系统。网络展现出高度的灵

活性和可扩展性,能够灵活应对各种复杂多变的应用场景。这种多跳传输的方式有助于避免单点故障,进而提升网络的可靠性和稳定性。此外,得益于 Mesh 网络的自组织特性,新加入的节点能够自动快速融入网络,实现网络的动态扩展^[10-11]。

该文采用了基于 LoRa 无线通信技术的 WaveMesh 无线传感器网络组网设计,传感器无线模块能够休眠将功耗降至最低,达到 μA 级。传感器由电池供电,中继级数可以达到上百跳;转换器节点每一次发送集采命令,能够在几秒钟的时间内采集到全网传感器节点的数据,保证实时性的同时,也确保了单次数据采集的成功率基本达到 100%,体现了极高的可靠性。传感器上电入网时间快,具有多种智能重连机制保证了网络的稳定性。WaveMesh 自组织网络易扩容、维护使用简单,适合煤矿井下巷道传感器无线自组网网络的数据传输应用^[12]。

3 低功耗无线激光移近量传感器设计

低功耗无线激光移近量传感器采用主机和探头分离式设计,两者之间通过线缆连接。主机包括主机处理器、电源电路、显示、通讯和报警等部分。探头包括探头处理器、激光器、镜片、调制信号发生器、接收器电路、放大滤波电路、相位差测量电路等部分。传感器设计框图如图 2 所示。

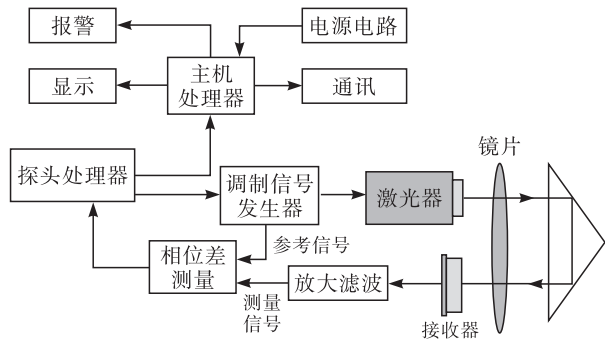


图2 传感器设计框图

激光器发射连续激光束,光束经过镜片反射后,接收器接收反射回来的激光信号。信号经过放大滤波与参考信号进行相位差测量,探头处理器进行传感器到反射面的距离计算并上传数据给主机处理器。主机处理器获取距离数据后,根据设定报警值进行本地报警提示和数据显示,并通过无线通信模块负责将处理后的数据实时传输至上位机。传感器采用锰酸锂锂离子电池供电,两节电池并联使用提高电池容量。传感器工作在巷道环境下,通常处于低功耗休眠模式。通过光控模式,唤醒传感器,进行

传感器校准和地址、频段、网络号、信道号等参数设置。主机处理器进行数据采集和无线数据传输后,关断探头电源、报警和显示等电路,然后进入休眠模式,传感器进入低功耗模式。

激光器采用低输出的可视激光,波段 620 ~ 690 nm,功耗小于 1 mW。激光器采用间歇性工作模式,即传感器在预设的时间间隔内进行测量和传输数据,以降低功耗。探头处理器采用优化的算法,降低功耗。传感器采用基于 LoRa 射频芯片的无线模块,多个传感器节点可组成 WaveMesh 无线自组网络。低功耗无线通信模块采用异步休眠模式,上位机采取无线集采方式实现数据的实时接收。传感器工作流程如图 3。

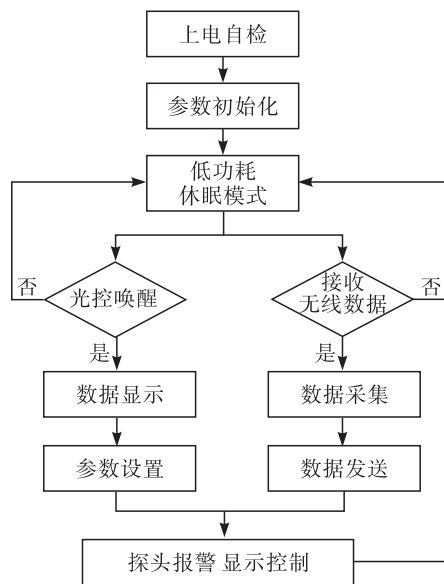


图3 传感器工作流程图

4 实验测试

该文基于激光测距和 LoRa 无线传输 WaveMesh 自组网网络,进行了低功耗无线激光移近量传感器的综合测试。实验中,重点关注了传感器的功耗控制、激光测距精度以及无线传输性能等关键指标。

将传感器探头固定在移动桌面上,目标靶固定于对面作为参考目标物。LoRa 网关配置后,连接电脑,用于收发数据。根据传感器的设计规格,配置激光测距模块的参数和 LoRa 模块的通信参数。传感器采用 4 节 18650 锰酸锂锂离子电池并联供电,单节电池 3.7 V、2.0 Ah,电池组总容量为 8.0 Ah。串联 1 只 0.82 Ω /1 W 限流电阻和 1 只额定值为 375 mA 的保险丝,用阻燃导热液体灌封胶局部浇封后置于电池盒内构成本安电池组件,为传感器提供电源,对工作电流和电压实时监测。

实验结果显示,激光器工作过程中,电流消耗比较大,约为 162 mA,然后进入低功耗模式,传感器的功耗显著降低,整机功耗约为 1.3 mA。如图 4 所示。因此采用间歇测距工作模式,周期性地切换工作和休眠状态,激光器采集数据传输过后,然后进入休眠状态,实现了在满足长时间工作需求的同时显著降低功耗的目标。



图 4 传感器功耗测试

首先传感器进行零点和线性校准,之后对准目标靶,进行多次测距实验。记录每次测距的结果,传感器进行多次测量并显示平均测量值,得出测量误差。测量数据如下表 1。

表 1 传感器测量数据

序号	标准值/mm	平均测量值/mm	测量误差/mm
1	100	102	2
2	300	301	1
3	500	498	-2
4	1000	1003	3
5	2000	2002	2
6	3000	3003	3
7	5000	4999	-1
8	10 000	10 002	2

测距实验表明,10 米范围内,传感器测量误差在 ± 3 mm,能够非常准确地捕捉巷道顶底板之间的微小变化,满足实时监测要求。

在不同的距离和发射功率下,测试多台传感器与 LoRa 网关之间的无线通信性能。LoRa 网关每隔 10 秒发送一次集采命令,所有传感器回复数据。数据传输性能测试如图 5 所示。



图 5 传感器传输性能测试

实验表明数据成功接收达到 99.9%,网络中部分节点的增加和减少对网络剩余部分没有影响,传感器上电即可入网,不需等待额外组网时间,网络更健壮。传感器节点可以休眠降低功耗,全网可进行休眠网络的集采,在几秒钟之内即可获得所有传感器数据,网络在长期的运行过程中无需人工维护。

5 小结

该文设计了一种矿用低功耗无线激光移近量传感器,非接触式的激光测距有效避免了因接触式测量可能引发的安全隐患,智能供电管理、休眠低功耗模式和无线自组网,显著降低了功耗,提高了系统的灵活性和可扩展性。实验结果表明,该传感器具有高精度、无线传输、低功耗和良好稳定性等优点,为矿山安全 and 生产提供了有力支持。

参考文献:

- [1] 段庆,张红娟,高妍,等. 矿用本质安全型超声测距系统[J]. 煤炭技术,2022,41(03):181-183.
- [2] 王飞. 雷达测距技术在智能化综采工作面中的应用[J]. 煤炭科学技术,2021,49(S1):138-141.
- [3] 李海棠. 提升全站仪在矿山测绘中测量精度的研究[J]. 中国金属通报,2023(10):195-197.
- [4] 潘映伶,纪荣祎,祁勤,等. 高速高精度实时相位式激光测距系统[J]. 光学精密工程,2023,31(16):2343-2351.
- [5] 喜嘉辉. 相位式激光测距仪设计及性能影响因素分析[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [6] 凌亮. 中短程高精度激光相位测距系统的设计与实现[D]. 南昌:南昌大学,2022.
- [7] 鲁猛. 激光测距传感器关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
- [8] 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.
- [9] 王文振. 复杂环境下电力监测网无线多跳传输协议研究与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [10] 孙宏彬,曹琪,刘明,等. 一种基于无线 Mesh 的高压输电线路远程通信方法研究[J]. 信息系统工程,2019(09):129-130.
- [11] 张明明. 基于 LoRa 无线 Mesh 网络路由协议及节点定位算法研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [12] 路萍. 基于 WaveMesh 的煤矿无线传感器自组网设计[J]. 自动化与仪表,2023,38(01):95-98.