

文章编号:1671-251X(2021)01-0118-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020070097

用于煤矸识别的振动传感器设计

曹贯强¹, 尉瑞², 孟祥涛¹, 赵文生¹, 刘清¹

(1. 北京天地玛珂电液控制系统有限公司, 北京 100013;
2. 中煤华晋集团有限公司 王家岭矿, 山西 河津 043300)



扫码移动阅读

摘要:目前自动化放顶煤开采煤矸识别技术中,伽马射线成本太高且对人体有害;红外技术受环境温度影响较大;雷达探测在煤层较厚时信号衰减严重;声音技术成本低、难度小,但受外界声音信号干扰严重;图像技术在煤矸颜色差别大时有效,但受粉尘、光线因素影响较大;振动技术具有声音技术的优点,同时又可以避免环境噪声干扰,具有较高的检测精度。顶煤和矸石的性能有所不同,落到液压支架尾梁上时产生的振动信号也表现出不同的特征。针对该特征,设计了一种振动传感器,该传感器安装在液压支架尾梁的腹板处,对顶煤或矸石砸到液压支架上产生的振动信号进行感知,通过信号处理和分析辨识出放煤过程中的煤块和矸石。该传感器利用加速度计采集尾梁振动信号,并对采集数据进行前端滤波处理;利用傅里叶变换对数据进行功率谱分析,得到单位时间内的最大振动频率、幅值及功率谱能量。实验室测试结果表明,该传感器测量误差在 1% 以内。井下测试结果表明,振动传感器采集的信号大部分是煤块落下时的振动信号,其频率范围为 100~200 Hz,而矸石落下时的振动信号频率在 200 Hz 以上,根据振动信号特征能够识别出顶煤和矸石。

关键词:综采放顶煤;煤矸识别;振动传感器;振动频率;加速度计

中图分类号:TD94 文献标志码:A

Design of vibration sensor for coal gangue identification

CAO Guanqiang¹, YU Rui², MENG Xiangtao¹, ZHAO Wensheng¹, LIU Qing¹

(1. Beijing Tianma Electro-hydraulic Control System Company Ltd., Beijing 100013, China;
2. Wangjialing Coal Mine, China Coal Huajin Group Co., Ltd., Hejin 043300, China)

Abstract:At present, there are a variety of coal gangue identification technologies in automatic top coal mining. Gamma ray is too expensive and harmful to human body. Infrared technology is affected by ambient temperature. Radar detection has serious signal attenuation when the coal seam is thick. Sound technology has low cost and small difficulty, but can be severely interfered by external sound signals. Image technology is effective when the color difference of coal gangue is large, but is affected by dust and light factors. However, vibration technology not only has the advantages of sound technology but also can avoid environmental noise interference and obtain a higher detection accuracy. For the properties of top coal and gangue are different, the vibration signal generated when falling onto the hydraulic support tail beam also shows different characteristics. Based on this feature, a vibration sensor is designed, which is installed at the web of the tail beam of the hydraulic support to sense the vibration signal generated by the top coal or gangue hitting the hydraulic support, and identify the coal and gangue in the coal release process through signal processing and analysis. The sensor uses an accelerometer to collect the tail beam

收稿日期:2020-07-30;修回日期:2020-12-26;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804304);北京市科技计划智能制造技术创新与培育资助项目(Z171100000817003);中国煤炭科工集团科技创新资助项目(2016MS014,KJ-2016-TDMK-01)。

作者简介:曹贯强(1990—),男,山东诸城人,硕士,主要研究方向为煤矿自动化传感设备,E-mail:caogq@tdmarco.com。

引用格式:曹贯强,尉瑞,孟祥涛,等.用于煤矸识别的振动传感器设计[J].工矿自动化,2021,47(1):118-122.

CAO Guanqiang, YU Rui, MENG Xiangtao, et al. Design of vibration sensor for coal gangue identification[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(1): 118-122.

vibration signal, and conducts front-end filtering processing of the collected data. Fourier transform is applied to analyze the power spectrum of the data so as to obtain the maximum vibration frequency, amplitude and power spectrum energy per unit time. The laboratory test results show that the sensor measurement error is within 1%. The underground test results show that most of the signals collected by the vibration sensor are the vibration signals of coal falling, and the frequency range is 100-200 Hz. However, the vibration signals of gangue falling is above 200 Hz. Therefore, the differences of the vibration signal characteristics are useful to identify the top coal and gangue.

Key words: fully mechanized top coal caving mining; coal gangue identification; vibration sensor; vibration frequency; accelerometer

0 引言

综采放顶煤是厚煤层开采技术之一,底部煤层按传统方法开采,顶部煤炭在矿压作用下自动落下。该技术开采效率较高,在国内煤矿中得到了广泛应用。但是在顶煤下落过程中,顶部的矸石也会随之掉落,严重影响煤质。因此,如何自动、准确地进行煤矸识别,实现高效、可靠、自动化放顶煤开采,已成为世界各国重点研究的问题。国外主要采煤大国采用了伽马射线、红外技术、视频摄像、雷达探测等技术进行煤矸识别,并取得了一定的实际应用效果,但同时这些方法又具有各自的局限性,导致无法大规模应用,如伽马射线成本太高且对人体有害,红外技术受环境温度影响较大,雷达探测在煤层较厚时信号衰减严重,无法识别。国内煤矸识别技术整体上还处于研究试验状态,没有成套的煤矸识别解决方案,仅在一些文献研究中提到可以利用声音、振动、图像等技术进行煤矸识别^[1-2]。其中,声音技术成本低、难度小,但受外界声音信号干扰严重;图像技术在煤矸颜色差别大时有效,但受粉尘、光线因素影响较大;振动技术具有声音技术的优点,同时又可以避免环境噪声干扰,具有较高的检测精度。

在上述研究的基础上,本文设计了一种用于煤矸识别的振动传感器,通过选用合适的单片机及加速度计,采集顶煤及矸石下落过程中支架尾梁的振动数据,并传输到电液控制系统控制器进行分析处理,达到煤矸识别的目的。

1 煤矸识别原理

顶煤和矸石的性能有所不同,其落到液压支架尾梁上时产生的振动信号也表现出不同的特性^[3-5]。顶煤落下时产生的振动信号频率主要集中在 100~600 Hz,煤矸同时落下时产生的振动信号频率主要集中在 1 kHz 左右^[6];顶煤落下时产生的振动信号最大振幅为 0.036 dB,而矸石落下时产生的振动信号最大振幅为 0.068 dB^[7]。因此,在液压支架尾梁

的腹板处安装振动传感器^[8-9],对顶煤或矸石砸到液压支架上产生的振动信号进行感知,通过信号处理和分析可辨识出放煤过程中的煤块和矸石,达到自动化放顶煤的要求。

由于振动频率信号无法直接检测,本文利用加速度计通过间接方式测量。顶煤与矸石下落时,会对支架的尾梁产生力学作用,造成尾梁振动。将加速度计安装在尾梁上,加速度计会随着尾梁的振动而不断改变其输出值,通过处理器实时采集该加速度数据,便可获取尾梁的振动信号。

2 振动传感器设计

2.1 硬件设计

振动传感器由处理器模块、通信模块、加速度计模块、电源模块和看门狗模块组成,如图 1 所示。加速度计用于采集振动信号,并对采集数据进行前端滤波处理,剔除电信号噪声;处理器对振动信号进行频谱分析,确定信号数据特征^[10-13];最后将该数据传输到电液控制系统控制器,实现煤矸识别。

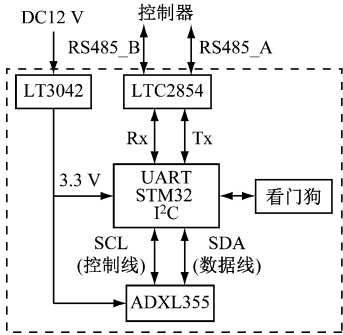


图 1 振动传感器硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of vibration sensor

处理器模块采用低功耗 STM32 芯片,其在运行模式下最低功耗仅为 39 μ A/MHz,同时具有 1 MB Flash 和 128 kB SRAM 的大容量存储,能够满足大容量实时数据存储及双应用程序管理的要求;另外,其内部支持 FPU(浮点运算单元)和 DSP(数字信号处理)库,能够为后续数据处理提供便捷途径。通信模块采用 LTC2854,将处理器的串口数

据转换为 RS485 数据,与外部控制器进行通信,实现传感器参数配置与检测数据上报功能。加速度计采用 ADXL355 芯片,其具有功耗低、精度高、噪声小、零漂低等优点,内置的可编程滤波器可对采集到的数据进行初步滤波,减少噪声干扰。电源模块采用 LT3042 将外部的 12 V 电源转换成 3.3 V,为内部的处理器和加速度计供电。外置看门狗模块用于实时监控内部程序的正常运行,在出现问题时,能够及时对处理器进行复位。

2.2 软件设计

振动传感器应用在煤矿井下,因此电路板需要完全密封在产品内部,这就对以后的程序更新造成了麻烦;另外,在井下对产品进行拆卸十分困难,存在损坏设备或造成其他危险事故的可能性。因此,振动传感器软件程序分为下载管理程序(主程序)和应用程序 2 个部分。下载管理程序主要用于管理程序版本号、选择对应的应用程序,并可通过控制器和 RS485 接口进行应用程序烧写;应用程序又分为 2 个存储空间,可同时存储 2 个版本的应用程序,默认情况下执行高版本程序,可通过下载管理程序还原到低版本程序中运行。

振动传感器上电后,首先运行下载管理程序,读取 2 个应用程序的版本号,并跳转到高版本应用程序起始地址处运行程序。当 2 个应用程序都不存在或在应用程序执行过程中进入下载管理功能,则进入主程序。主程序中,首先,对外围串口等资源进行初始化;然后,利用 YModem 协议等待控制器发送可执行的应用程序文件,并将其保存到某一存储空间中(默认写在第 1 存储空间或原有应用程序中版本号小者所对应的存储空间);最后,自动重启,并运行最新的应用程序。下载管理程序流程如图 2 所示。

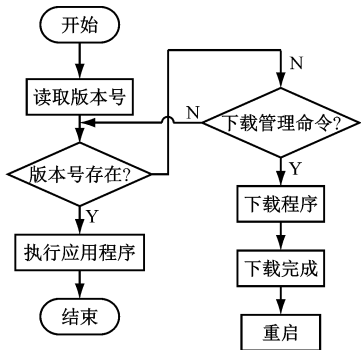


图 2 下载管理程序流程

Fig. 2 Download management program flow

应用程序主要实现振动数据采集与处理,包括硬件资源初始化、数据采集和数据处理等部分。硬件资源初始化包括串口、I²C、定时器及加速度芯片

ADXL355 等的初始化。数据采集利用中断定时器和 DMA(直接存储器访问)方式完成,依据所检测信号的振动频率范围决定采样间隔。数据处理和程序喂狗功能则是在主程序中实现。

煤矸信号频率在 1 kHz 左右便可进行有效识别,因此,将检测频率范围设定为 2 kHz 内,利用定时器每秒采集 4 096 组数据。在程序中采用 DMA 方式读取加速度数据,可有效减小 CPU 的负荷。另外,定义了 2 个缓冲数组,当主程序对一组数据进行处理的同时,定时器将读取的加速度数据放到另一个缓冲数组中,这样使得系统采集与计算可以同时进行,保证了系统采集数据的连续性与可靠性。

主程序信号处理流程如图 3 所示。首先,处理器调用出厂时计算的加速度校准误差对采集的数据进行校准,去除信号中的增益误差及偏移误差等;然后,为提高分析检测的准确性,去除信号中的直流分量,并调用处理器中的 DSP 库进行数据滤波,这样可以有效地衰减尾梁插板动作时产生的振动信号,仅保留煤矸落下时引起的振动信号;最后,利用傅里叶变换对数据进行功率谱分析,得到单位时间内的最大振动频率、幅值及功率谱能量。

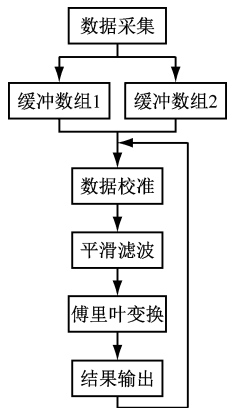


图 3 信号处理流程

Fig. 3 Signal processing flow

2.3 结构设计

结合振动传感器的安装方式和使用环境进行结构设计。传感器用于测量液压支架尾梁的振动信号,要求能够充分感知支架尾梁的振动状态,因此,排除了传统的螺纹安装方式,采用磁座安装方式。在传感器的一端预留安装电磁铁的位置,通过电磁铁将传感器固定在尾梁上。振动传感器结构如图 4 所示。

考虑到煤矿井下安装位置狭窄,走线困难,设计时使传感器尺寸尽可能小,信号传输与电源供电使用同一电缆线,并在内部用绝缘层包裹 2 路线芯,以提高信号稳定性。为保证产品能够安全可靠地应用在煤矿井下,还需对其采取防护措施,以满足矿用本

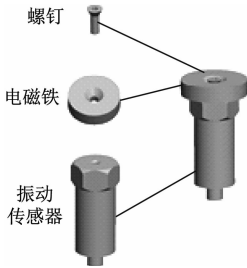


图 4 振动传感器结构

Fig. 4 Structure of vibration sensor

质安全设计要求^[14-15]。在壳体内部预留一定空间，对电路板进行灌胶处理，同时外部配备密封圈，以提高产品的防水性能。

3 测试分析

在实验室振动台上对振动传感器进行测试，取 0,500,1 000,1 500,2 000 Hz 共 5 个振动点，测试结果见表 1,可见，振动传感器测量误差在 1%以内。

表 1 振动传感器实验室测试结果

振动频率/Hz	测试频率/Hz				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
0	0	0	0	0	0
500	498	498	504	502	504
1 000	1 003	994	993	1 007	1 000
1 500	1 490	1 511	1 501	1 509	1 504
2 000	2 012	1 994	1 995	1 999	2 005

在王家岭煤矿对振动传感器进行测试，现场安装如图 5 所示，采集的部分数据见表 2，振动信号频率曲线如图 6 所示。从表 2 和图 6 可看出，采集的信号大部分是煤块落下时的振动信号，其频率范围为 100~200 Hz；而图 6 中用红色标出的部分是矸石落下时的振动频率，频率在 200 Hz 以上，具体的数据与落下的煤矸比例、数量有一定关联性，但顶煤和矸石落下时的振动信号具有一定的可分辨性。



(a) 安装位置 (b) 传感器显示屏

图 5 振动传感器现场安装

Fig. 5 Vibration sensor field installation

表 2 振动传感器采集的部分数据

Table 2 Part of the data collected by the vibration sensor

58 号支架		56 号支架		48 号支架		42 号支架	
采样点	振动频率/Hz	采样点	振动频率/Hz	采样点	振动频率/Hz	采样点	振动频率/Hz
56	194	103	0	98	180	1	235
57	448	104	99	99	0	2	236
58	193	105	0	100	161	3	229
59	187	106	145	101	0	4	2
60	187	107	165	102	171	5	0
61	174	108	160	103	159	6	231
62	190	109	0	104	0	7	225
63	0	110	289	105	159	8	434
64	194	111	0	106	145	9	0
65	0	112	157	107	146	10	442
66	187	113	0	108	144	11	0
67	187	114	163	109	332	12	179
68	197	115	0	110	0	13	0
69	0	116	289	111	169	14	201
70	192	117	0	112	162	15	0
71	193	118	96	113	171	16	12
72	189	119	0	114	1	17	0
73	0	120	157	115	174	18	182
74	180	121	155	116	170	19	0
75	179	122	0	117	169	20	190
76	181	123	162	118	0	21	0

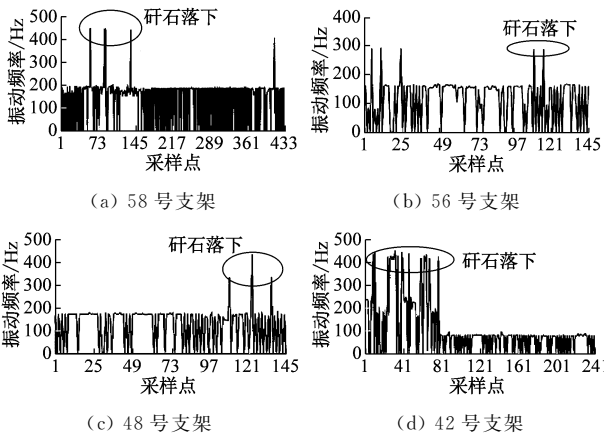


图 6 煤矸落下时的振动信号频率

Fig. 6 Vibration signal frequency of coal-gangue falling

4 结论

(1) 利用低功耗 STM32 单片机和高精度加速度计设计了一种用于煤矸识别的振动传感器，该传感器具有体积小、功耗低、安装使用方便等优点，适用于井下放顶煤工作面。

(2) 硬件设计方面，利用加速度计采集煤矸落下时产生的液压支架尾梁振动信号，通过处理器对振动信号进行频谱分析。软件设计方面，利用中断

定时器和 DMA 方式完成数据采集,有效减小了 CPU 负荷,另外,通过定义 2 个缓冲数组保证了系统采集数据的连续性与可靠性。结构设计方面,排除了传统的螺纹安装方式,采用磁座安装方式,在传感器的一端预留安装电磁铁的位置,通过电磁铁将传感器固定在尾梁上。

(3) 实验室测试结果表明,该传感器测量误差在 1% 以内。井下测试结果表明,传感器采集的信号大部分是煤块下落时的振动信号,其频率范围为 100~200 Hz,而矸石下落时的振动信号频率在 200 Hz 以上,二者具有一定的可分辨性。

(4) 后续可融合振动信号幅值、能量分布等参数进行煤矸识别研究,进一步提高识别精度和可靠性。

参考文献 (References):

- [1] 田妍,田丰.放顶煤开采过程煤矸识别技术发展现状及前景[J].煤炭工程,2018,50(10):142-145.
TIAN Yan, TIAN Feng. Development status and prospect of coal gangue recognition technology in top-coal caving[J]. Coal Engineering, 2018, 50(10): 142-145.
- [2] 曹现刚,李莹,王鹏,等.煤矸石识别方法研究现状与展望[J].工矿自动化,2020,46(1):38-43.
CAO Xiangang, LI Ying, WANG Peng, et al. Research status of coal-gangue identification method and its prospect[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(1): 38-43.
- [3] 王水生.基于振动特性分析的采煤机煤岩识别控制系统[J].工矿自动化,2015,41(5):83-87.
WANG Shuisheng. Coal-rock recognition and control system of shearer based on vibration characteristics analysis [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 83-87.
- [4] 魏文艳.综采工作面放顶煤自动控制系统[J].工矿自动化,2015,41(7):10-13.
WEI Wenyan. Automatic control system of top coal caving on fully-mechanized coal mining face [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(7): 10-13.
- [5] 宋庆军.综放工作面放煤自动化技术的研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2015.
SONG Qingjun. Study and application on the caving automation in fully mechanized top coal caving face [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [6] 刘伟,华臻. Hilbert-Huang 变换在煤矸界面探测中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(9): 8-11.
LIU Wei, HUA Zhen. Application of Hilbert-Huang transform to coal gangue interface detection [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(9): 8-11.
- [7] 张良,牛剑峰,代刚,等.综放工作面煤矸自动识别系统设计及应用[J].工矿自动化,2014,40(9):121-124.
ZHANG Liang, NIU Jianfeng, DAI Gang, et al. Design of automatic identification system of coal and gangue for fully-mechanized coal caving working face and its application [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(9): 121-124.
- [8] 马英.基于尾梁振动信号采集的煤矸识别智能放煤方法研究[J].煤矿开采,2016,21(4):40-42.
MA Ying. Intelligent coal caving with gangue identification based on tail beam vibration signal collection[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(4): 40-42.
- [9] 任洁,刘頔.基于采煤机振动时域特性的煤岩识别方法研究[J].煤炭工程,2016,48(3):106-109.
REN Jie, LIU Di. Recognition method of coal-rock interface based on time-domain vibration characteristics of coal cutter[J]. Coal Engineering, 2016, 48(3): 106-109.
- [10] 徐磊,房立清,齐子元,等.基于 MEMS 加速度传感器的振动加速度测量系统设计[J].仪表技术与传感器,2019(2):18-21.
XU Lei, FANG Liqing, QI Ziyuan, et al. Design of vibration acceleration measurement system based on MEMS acceleration sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(2): 18-21.
- [11] 张阳峰,韦仕鸿,邓娜娜,等.基于小波降噪的振动传感器数据分析[J].计算机科学,2019,46(增刊1):537-539.
ZHANG Yangfeng, WEI Shihong, DENG Nana, et al. Vibration sensor data analysis based on wavelet denoising [J]. Computer Science, 2019, 46 (S1): 537-539.
- [12] 刘继承,徐庆华,查建新.用加速度传感器测量振动位移的方法[J].现代雷达,2007,29(5):69-71.
LIU Jicheng, XU Qinghua, ZHA Jianxin. Method of vibration displacement measured with acceleration sensor[J]. Modern Radar, 2007, 29(5): 69-71.
- [13] 王保平.放顶煤过程中煤矸界面自动识别研究[D].济南:山东大学,2012.
WANG Baoping. Research on automatic recognition of the coal-rock interface in top coal caving [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [14] 杨健健,薛光辉,赵国瑞,等.矿用本安型振动传感器的研制[J].煤炭科学技术,2013,41(2):71-74.
YANG Jianjian, XUE Guanghui, ZHAO Guorui, et al. Research and development on mine intrinsic safe mode vibration sensor [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(2): 71-74.
- [15] 吉晓冬,薛光辉,杨健健,等.矿用振动加速度传感器信号调理装置研制[J].工矿自动化,2014,40(5):106-108.
JI Xiaodong, XUE Guanghui, YANG Jianjian, et al. Development of mine-used signal conditioning device of vibration acceleration sensor[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(5): 106-108.