

基于小波包特征提取的煤岩硬度振动识别方法

杨健健 姜海 吉晓东 吴淼

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院 北京 100083)

摘要:针对现有煤岩硬度性状识别方法不能满足采煤机滚筒实现自动调高技术的需要,提出摇臂振动信号时频域能量特征识别煤岩硬度的方法。采用自主研发并取得煤安认证的矿用振动加速度传感器开展井下测试,以综采工作面采煤机摇臂处实测振动加速度信号为研究对象,利用小波包信号分析方法,得到第3层4个频率成分的时频域分解信号,根据系数重构后的函数表达式,计算各个频段内的信号能量作为特征向量,确定采煤机截割煤岩时摇臂振动特征。MG180/420-BWD薄煤层采煤机在兖矿集团南屯煤矿测试结果表明,小波包时频域能量特征向量对截割煤岩硬度敏感,该特征向量间接判定截割工况效果良好。

关键词:煤岩硬度;振动信号;小波包;特征向量

中图分类号:TD421.6 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2015)12-0114-04

Vibration identification method of coal and rock hardness based on wavelet packet features

Yang Jianjian, Jiang Hai, Ji Xiaodong, Wu Miao

(School of Electromechanic and Information, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the available character identification method of the coal and rock hardness could not meet the requirements of the automatic height-adjustment technology realized by the cutting drum of the coal shearer, an identification method of the coal and rock hardness was provided with the energy features of the vibration signal time-frequency domain in the ranging boom. A self-developed mine vibration accelerometer with a MA certificate was applied to the tests in the underground mine. With the vibration acceleration signal measured at the ranging boom of the coal shearer in the fully mechanized coal mining face as the study object, the wavelet packet signal analysis method was applied to have the solution signal of the time-frequency domain with four frequency contents from No. 3 strata. According to the function expression after the coefficient restructured, the signal energy at each frequency section was calculated as the eigenvector and was applied to determine the vibration features of the ranging boom during the coal and rock cutting period of the coal shearer. Based on the measured data of MG180/420-BWD thin seam shearer operated in Nantun Mine of Yanzhou Coal Mining Group, the results showed that the energy feature vector of the wavelet packet time-frequency domain would be sensitive to the hard.

Key words: coal and rock hardness; vibration signal; wavelet packet; eigenvector

0 引言

针对煤岩性状识别,国内外提出了雷达、射线、温度、红外等数十种方法和技术^[1-4],也有很多学者从不同角度考虑并分析了现有煤岩性状识别方法中存在的诸多问题^[5-7]。目前,基于振动测试方法用

于煤岩性状识别具有一定的研究基础^[8]。虽然,比煤硬度低的软岩有少量存在,但大部分综采工作面的煤、岩在硬度上有显著差别,体现在表征岩石硬度的普氏系数 f 的大小,表征普通岩石硬度的 $f=5\sim 20$,而表征煤硬度的 $f=2\sim 4$ 。现有研究表明,振动识别煤岩性状的方法虽然已开展研究,并取得一定

收稿日期:2015-05-25;责任编辑:赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.12.023

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB046306)

作者简介:杨健健(1988—),男,山东济宁人,讲师。Tel:010-62339113 E-mail: yangjiannedved@163.com

引用格式:杨健健,姜海,吉晓东,等.基于小波包特征提取的煤岩硬度振动识别方法[J].煤炭科学技术,2015,43(12):114-117,179.

Yang Jianjian, Jiang Hai, Ji Xiaodong, et al. Vibration identification method of coal and rock hardness based on wavelet packet features [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 114-117, 179.

程度的研究成果,但因没有适用于矿用环境的振动测试装置,该方法距离实用还有很多问题亟待解决。基于此笔者开展采煤机摇臂振动与煤岩硬度影响关系研究,利用自主研发的矿用本安型振动传感器,提出基于小波包 2 级分解摇臂振动信号研究方法^[9],分析截割煤、顶板、底板振动信号时频域能量特征,实现采煤机摇臂振动信号间接识别截割煤岩性状方法在采煤机自适应截割控制方面的有效应用。

1 采煤机摇臂振动机理

滚筒作为直接受力部件,截齿截割煤岩,因为硬度的差异引起滚筒及摇臂的振动,分析截齿受力,确定力学模型参数分别为采高纵向阻力、采煤机牵引方向阻力和截齿受力侧向阻力^[10]。

1.1 摇臂振动产生原因

摇臂产生振动的原因如下:摇臂振动是由减速机构齿轮、轴传动引起的,为受迫振动或自激振动;采煤机机身是由截割电动机引起、采煤机牵引造成的,为受迫振动或自激振动;滚筒割煤岩振动是由于截齿受力引起的,为受迫振动;机身过煤是由大块煤岩撞击机身引起的,为受迫振动。其中,截齿切割煤岩产生的振动是摇臂振动的主要原因,不同硬度的煤层、顶底板岩层使得截齿的受力产生很大的不同,直接反映在摇臂的振动上,其振幅超过了允许范围会造成设备零故障,采煤工作面停机停产。

1.2 振动测试内容

利用矿用本安振动传感器测取摇臂处振动信号,分析不同硬度煤岩造成摇臂振动的影响关系,测取振动信号来源于摇臂第一级减速机构处和采煤机机身。采煤机滚筒截齿处所载荷为非平稳随机载荷,故拾取的振动信号应采用综合分析时频域特征的频谱分析方法。

2 振动信号特征提取方法及测试方法

根据前文所述,建立摇臂振动信号特征库需解决以下技术问题:①非平稳随机信号时域和频域特征不易明确分割提取,无法确定特征向量;②煤矿综采工作面生产情况恶劣,非实测的模拟数据无法准确验证方法有效性。基于上述原因,笔者提出了利用矿用本安型振动传感器测取煤矿井下综采工作面多种工况下的采煤机摇臂振动数据^[11],分析实测振动信号,提取摇臂振动特征识别煤岩硬度的方法。

测试人员记录滚筒截割煤、页岩顶板、泥岩底板时间,参照对应的典型工况(煤/顶板/底板)确定识别煤岩性状的特征向量。

2.1 振动信号特征提取方法

为了得到摇臂振动信号分析中高频率分辨率,笔者采用小波包信号分析方法,该方法具备一组特定的小波函数族,解决了小波函数分析振动冲击带来的高频信号频域分辨率低的问题^[8-9]。将摇臂振动信号利用小波包分析方法进行两级分解,得到第 3 层 4 个频率成分的时频域分解信号。

小波包两级分解后第 3 层信号重构函数的数学表达式为

$$S_2 = S_{20} + S_{21} + S_{22} + S_{23} \quad (1)$$

其中, S_{2j} 为分解后第 3 层第 j 个频段信号重构函数 $j=0, 1, 2, 3$ 。重构信号的能量 E_{2j} 为

$$E_{2j} = \int |S_{2j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n X_{jk}^2(t) \quad (2)$$

其中: X_{jk} 为第 3 层重构函数的系数; t 为时间; n 为试验次数。根据能量信号确定特征向量 E 为

$$E = [E_{20} \ E_{21} \ E_{22} \ E_{23}] \quad (3)$$

为便于计算,取经验值 K 对特征向量进行归一化处理,定义 E' 为归一化能量向量, E_{jk} 为第 j 层能量代数和。

$$E' = E_{jk}/K \in (0, 1) \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可确定在割煤、割岩状态下的摇臂振动信号特征向量。为完善特征库,需进行多次现场测试,确定割煤和割岩工况下的特征向量平均值 C_j 为

$$C_j = \sum_{k=1}^n E_{jk}/n \quad (5)$$

综上,提出基于小波包分解摇臂振动信号识别煤岩硬度方法,参照确定工况(割煤/顶/底),提取不同频段能量特征值作为间接识别截割介质的依据。

2.2 测试方法

采用 GBC1000 型矿用本安振动加速度传感器获取井下不同工况下 MG180/420-BWD 采煤机的振动数据,准确得到综采工作面采煤机摇臂工作振动数据。

1) 工作面概况。顶板石灰岩的普氏系数 f 为 9,底板铝质泥岩的 f 为 1~2,煤的 f 为 3,石灰岩的 $f=9$,煤层柱状图如图 1 所示。

岩层	柱状	层厚/m	岩性描述
十下灰岩		5.46~5.10 5.28	灰色十灰岩, 岩石坚硬, 裂隙发育, 以石英为主, 方解石充填
16上煤		1.15~0.80 0.92	半亮型煤, 条带状结构, 局部分布有黄铁矿结核, 煤质较硬
铝质泥岩		1.52~1.10 1.28	灰浅灰色铝质泥岩, 致密性脆, 下部含植物化石, 遇水膨胀

图 1 煤层柱状图

Fig. 1 Coal seam histogram

2) 确定 MG180/420 - BWD 采煤机的摇臂及机身处的振动测点, 传感器测点布置如图 2 所示。



图 2 采煤机机身传感器测点布置

Fig. 2 Layout of measurement point for shear sensor

小波包振动信号特征提取的方法和矿用本安型振动加速度传感器的使用为研究煤矿井下摇臂振动与截割煤岩硬度关系奠定了基础。

3 测试数据分析

为研究摇臂振动与滚筒截割煤岩的定量影响关系, 选取井下综采工作面现场测试数据, 其中样本数据 1 对应割煤工况, 样本数据 2 对应割岩(顶板)工况, 振动信号采样频率为 10 kHz。采用 Mallat 快速算法, 以 Daubechies 小波为基函数的二阶小波包变换分析采煤机摇臂振动加速度信号的局部时频域特征。

3.1 割煤工况测试

样本 1 数据对应截割工况是采煤机滚筒空载下牵引一段时间, 然后滚筒开始截割煤, 测点 1 采高方向振动加速度全程信号如图 3 所示, g 为重力加速度。

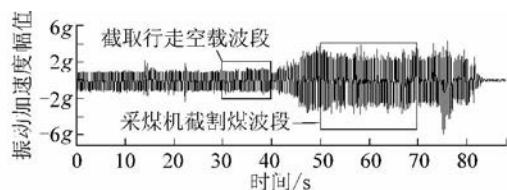


图 3 割煤工况测点 1 采高方向振动加速度全程信号

Fig. 3 Vibration acceleration signal process along mining height direction at point 1 under coal cutting condition

图 4 所示为截取割煤工况(普氏系数 $f=3$) 摇臂振动信号的小波包分解重构信号, 经二阶小波包

分解为 4 个频段(A1—A4), 结果表明割煤振动信号低频分量较集中, 能量较大。

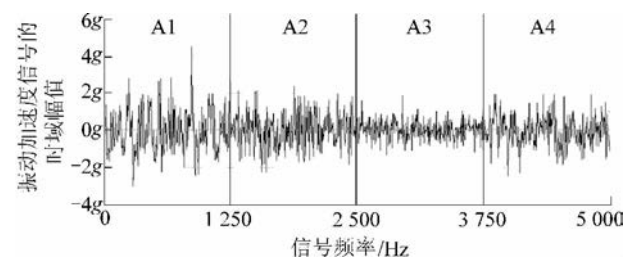


图 4 割煤振动信号小波包分解时频域图

Fig. 4 Frequency domain of wavelet packet decomposition on coal cutting vibration signal

求取 A1、A2、A3、A4 相应频段的能量分别为 344.506 88、221.570 56、67.381 76、173.027 84, 对重构信号的系数进行计算, 其值为无量纲值。采煤机截割煤层摇臂振动加速度小波包分解特征向量 $E = [344.51 \ 221.57 \ 67.38 \ 173.03]$ 。得到该样本下的采煤机滚筒截割煤层时的摇臂处振动加速度信号的两级小波包分解的归一化特征向量 E' 为

$$E' = T/K \quad (5)$$

根据多次测量, 取经验值 $K = 1\ 000$ 。由式(5)可得:

$$E' = [0.345 \ 0.222 \ 0.067 \ 0.173]$$

3.2 割岩工况测试

选取样本 2 数据, 对应截割工况为滚筒截割顶板岩层。割岩测点 1 采高方向振动加速度全程信号如图 5 所示。

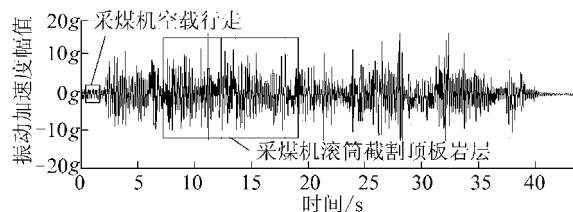


图 5 割岩工况测点 1 采高方向振动加速度全程信号

Fig. 5 Vibration acceleration signal process at point 1 along mining height direction under rock cutting condition

样本 1 和样本 2 测试数据全程时域波形显示结果表明, 采煤机割煤与割岩振动信号时域幅值差距较大。同样采用二阶小波包分解样本 2 数据为 4 个频段, 较之采煤机割煤($f=3$) 时振动加速度信号, 冲击效应明显, 如图 6 所示。

被测对象为 MG180/420 - BWD 薄煤层采煤机, 整机体积小、质量小, 滚筒截割硬度较高的顶板页岩($f=9$), 截齿所受瞬时激振力较大, 能量集中, 引起

摇臂强烈的冲击振动。

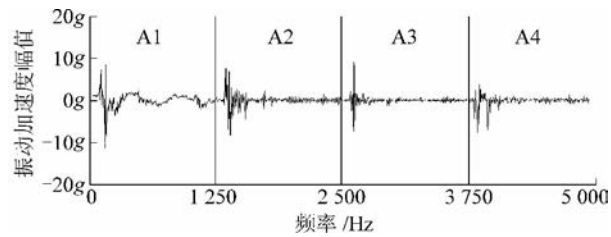


图 6 割岩振动信号小波包分解时频域图

Fig. 6 Function wavelet packet decomposition on rock cutting condition

如上所述,利用已有样本建立了不同硬度截割介质下的采煤机摇臂振动加速度信号时频域小波包

分解的能量特征归一化向量,以及对比时域指标中的典型差异指标,见表 1。

由表 1 可知,割岩工况下的摇臂振动信号小波包分解能量特征向量的各频段数值 2 倍,甚至 3 倍于割煤工况下的数值,时域指标中的有效值、均方差也有较大的增幅比,体现信号冲击特性的时域峭度和脉冲指标增幅比最大。

因此,通过监测摇臂振动信号小波包分解能量特征值以及时域指标峭度等特征值,实现对滚筒截割煤岩性状的准确识别,为实现采煤机滚筒自动调高技术提供参考。

表 1 割煤/岩工况摇臂振动信号特征值

Table 1 Ranging boom vibration signal characteristic value under cutting coal/rock condition

工况	频域指标	时域指标			
	能量特征归一化向量	有效值	均方差	峭度	脉冲
割煤($f=3$)	[0.345 0.222 0.067 0.173]	0.716 1	0.512 4	0.906 0	7.499 7
割岩($f=9$)	[0.756 0.761 0.3251 0.379]	0.985 3	0.970 2	24.602 0	23.828 0
增幅比(割岩/割煤)/%	[119.3 243.5 383.0 119.0]	37.60	89.34	2632.7	217.7

4 结 语

频域中考虑截割介质的随机性,利用小波包提取的频域特征值,量化该特征值,获得特征库。通过测取摇臂处振动信号,可提取分辨不同截割工况的频域指标,从而间接判定截割介质硬度。该方法适用于顶板岩层硬度明显大于煤层硬度的综采环境,对于岩层软于煤层的环境还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 孙继平,余杰.基于支持向量机的煤岩图像特征抽取与分类识别[J].煤炭学报,2013,38(S1):105-109.
Sun Jiping,She Jie. Coal-rock image feature extraction and recognition based on support vector machine[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(S1):105-109.

[2] 汪玉凤,夏元涛,王晓晨.含噪超完备独立分量分析在综放煤岩识别中的应用[J].煤炭学报,2011,36(S1):212-216.
Wang Yufeng,Xia Yuantao,Wang Xiaochen. Application on over-complete ICA with noise in coal and rock identification of fully-mechanized mining[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(S1):212-216.

[3] 刘春生,杨秋,李春华.采煤机滚筒记忆程控截割的模糊控制系统仿真[J].煤炭学报,2008,33(7):822-825.
Liu Chunsheng,Yang Qiu,Li chunhua. Simulation of shearer drum cutting with memory program controlling by fuzzy control [J].

Journal of China Coal Society,2008,33(7):822-825.

[4] 刘春生,荆凯,万丰.采煤机滚筒记忆程控液压调高系统的仿真[J].中国机械工程学报,2007(2):142-146.
Liu Chunsheng,Jing Kai,Wan Feng. Simulation of memory program med hydraulic control system for height adjustment of shearer's drum [J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2007(2):142-146.

[5] 王增才,富强.自然 γ 射线穿透煤层及支架顶梁衰减规律[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2006,25(6):804-807.
Wang Zengcai,Fu Qiang. Attenuation of natural γ ray passing through coal seam and hydraulic support [J]. Journal of Liaoning Technical University: Nature Science Edition,2006,25(6):804-807.

[6] 王增才,孟惠荣.支架顶梁对 γ 射线方法测量顶煤厚度影响研究[J].中国矿业大学学报,2002,31(3):323-326.
Wang Zengcai,Meng Huirong. Influence of canopy of hydraulic support upon measurting thickness of coal seam by natural gamma ray [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2002,31(3):323-326.

[7] 梁义维,熊诗波.基于神经网络和 Dempster-Shafer 信息融合的煤岩界面预测[J].煤炭学报,2003,28(1):86-90.
Liang Yiwei,Xiong Shibo. Forecast of coal-rock interface based on neural network and dempster-shafter theory [J]. Journal of China Coal Society,2003,28(1):86-90.

[8] 刘俊利,赵豪杰,李长有.基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法[J].煤炭科学技术,2013,41(10):93-95.

(下转第 179 页)

- [5] 赵春霞, 顾平, 张光辉. 反渗透浓水处理现状与研究进展[J]. 中国给水排水 2009 25(18): 1-5.
Zhao Chunxia, Gu Ping, Zhang Guanghui. Current status and re-research development of reverse osmosis concentrate treatment[J]. China Water & Waste Water 2009 25(18): 1-5.
- [6] 苏艳敏, 郑化安, 付东升, 等. 煤化工反渗透浓水浓缩的研究现状[J]. 洁净煤技术 2014 20(1): 104-109.
Su Yanmin, Zheng Huanan, Fu Dongsheng. Research progress of desalination-concentration of reverse osmosis drained waste water from coal chemical industry[J]. Clean Coal Technology 2014 20(1): 104-109.
- [7] 孙项城, 王军, 侯得印, 等. 膜蒸馏法浓缩反渗透浓水的试验研究[J]. 中国给水排水 2011 27(17): 22-25, 30.
Sun Xiangcheng, Wang Jun, Hou Deyin. Study on concentration of reverse osmosis concentrate by membrane distillation[J]. China Water & Wastewater 2011 27(17): 22-25, 30.
- [8] 张妍青. 反渗透浓水回用技术及运行探讨[J]. 石油化工安全环保技术 2010(3): 49-51, 69.
Zhang Yanqing. Exploration of reusing technology and running of condensed water form RO system[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology 2010(3): 49-51, 69.
- [9] 姜兴涛, 姜成旭. 利用蒸发塘处置煤化工浓盐水技术[J]. 化工进展 2012(S1): 276-278.
Jiang Xingtao, Jiang Chengxu. Technology of disposal of condensed coal chemical saltwater by evaporation-pool[J]. Chemical Industry and Engineering Progress 2012(S1): 276-278.
- [10] 王庚平, 索超, 张明霞, 等. 反渗透浓水处理与利用技术研究概况[J]. 甘肃科技 2011(22): 93-95.
Wang Gengping, Suo Chao, Zhang Mingxia et al. The concentrated overview of reverse osmosis water treatment and utilization technology[J]. Gansu Science and Technology 2011(22): 93-95.
- [11] 谢欣馨, 朱玉琴. 工业废水和煤液化残渣制取水煤浆的研究[J]. 应用化工 2013 42(8): 1448-1450.
Xie Xinxin, Zhu Yuqin. Study of preparing coal water slurry with industrial wastewater and coal liquefaction residue[J]. Applied Chemical Industry 2013 42(8): 1448-1450.
- [12] 王睿坤, 刘建忠, 胡亚轩, 等. 水煤浆掺混湿污泥对浆体成浆特性的影响[J]. 煤炭学报 2010 35(S1): 199-204.
Wang Ruikun, Liu Jianzhong, Hu Yaxuan et al. Influence of wet sludge on the slurrying properties of coal-water slurries[J]. Journal of China Coal Society 2010 35(S1): 199-204.
- [13] 高志芳, 李辽沙, 吴照金, 等. 高炉瓦斯泥掺制水煤浆成浆性及燃烧特性的研究[J]. 环境科学学报 2013 33(12): 33-37.
Gao Zhifang, Li Liaosha, Wu Zhaojin et al. Combustion characteristics and slurry ability of coal water slurry prepared with blast furnace sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2013 33(12): 33-37.
- [14] 李安. 水煤浆技术发展现状及其新进展[J]. 煤炭科学技术 2007 35(5): 97-100.
Li An. Development status and new development of coal water mixture technology[J]. Coal Science and Technology 2007 35(5): 97-100.
- [15] 邱学青, 周明松, 杨东杰, 等. 麦草碱木素高效水煤浆分散剂的应用性能[J]. 中国造纸 2007(2): 31-34.
Qiu Xueqing, Zhou Mingsong, Yang Dongjie et al. Evaluation of utilization performance of modified wheat straw alkali lignin as a dispersant of coal-water slurry[J]. China Pulp & Paper 2007(2): 31-34.
- [16] 郑福尔, 刘以凡, 刘明华. 利用高浓度印染废水制备水煤浆的研究[J]. 煤炭工程 2012(2): 85-87, 91.
Zheng Fuer, Liu Yifan, Liu Minghua. Study on high density dyeing and printing waste water applied to preparation of coal water slurry[J]. Coal Engineering 2012(2): 85-87, 91.
- [17] 徐志强, 涂亚楠, 孙南翔, 等. 利用焦化废水制备水煤浆的试验研究[J]. 中国煤炭 2013 39(6): 105-109, 121.
Xu Zhiqiang, Tu Yanan, Sun Nanxiang et al. Experimental study on the coal water slime preparation by using coking wastewater[J]. China Coal 2013 39(6): 105-109, 121.
- [18] 尉迟唯, 李保庆, 李文, 等. 煤质因素对水煤浆性质的影响[J]. 燃料化学学报 2007 35(2): 146-154.
Yuchi Wei, Li Baoqing, Li Wen et al. Analysis of coal characteristics on the properties of coal water slurry preparation with different coal ranks[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007 35(2): 146-154.
- [19] 谢华, 曾凡, 许泽胜. 电解质对水煤浆流变快的影响[J]. 煤炭加工与综合利用 1994(4): 12-13.
Xie Hua, Zeng Fan, Xu Zesheng. The influence of electrolyte of coal-water slurry rheological fast[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization 1994(4): 12-13.
- [20] 姚彬, 张玉荣, 杨鸿鹰. 水煤浆稳定剂研究现状[J]. 煤炭科学技术 2013 41(11): 124-128.
Yao Bin, Zhang Yurong, Yang Hongying. Study status on stabilizer of coal water slurry[J]. Coal Science and Technology 2013 41(11): 124-128.

(上接第 117 页)

- Liu Junli, Zhao Haojie, Li Changyou. Coal-rock recognition method based on cutting vibration features of coal shearers drums[J]. Coal Science and Technology 2013 41(10): 93-95.
- [9] 任芳. 基于多传感器数据融合技术的煤岩界面识别的理论与方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003.
Reng Fang. Study on the theory and method of coal-rock interface recognition based on multi-sensor data fusion technique[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.
- [10] 刘送永. 采煤机滚筒截割性能及截割系统动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
Liu Songyong. Research on cutting performance of shearers drum and cutting system dynamics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology 2009.
- [11] 杨健健, 薛光辉, 吴森, 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, Wu Miao. Research and development on mine intrinsic safe mode vibration sensor[J]. Coal Science and Technology 2013 41(2): 71-74.