

# 基于小波降噪和EMD-AR谱的地下电缆防破坏监测系统

舒俊<sup>1</sup>, 叶帆<sup>1</sup>, 姚峰林<sup>2</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司, 江西 南昌 330000;

2. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030000)

**摘要:** 电力电缆在当今社会发展和城市运作中扮演着非常重要的角色。随着人们用电量增加, 电缆的铺设量也在同步增加。为防止电缆遭到破坏, 对电缆管廊周围环境振动信号进行监测, 及时发现潜在威胁, 保障电缆正常工作, 提出一种基于Matlab小波降噪算法和EMD-AR谱分析的地下电缆防破坏振动监测系统。该系统由太阳能供电模块、六轴陀螺仪姿态感应模块、振动传感器模块、物联网通信模块组成, 主控芯片使用STM32F4单片机。采用小波阈值降噪算法去除复杂高频噪声, 提高信号的可识别度, 随后将去噪后信号进行经验模态分解(EMD), 并对前6个固有模态函数(IMF)分量进行AR谱分析, 最后将前6个IMF分量的AR谱累加得到信号的能量对比图。研究表明, 该方法的应用准确分析出振动类型, 能够给电缆管廊附近振动的监测分析提供更加简单便捷的方法, 有效保护电缆的安全稳定运行。

**关键词:** 小波变换; 阈值降噪; EMD-AR谱; 电缆防破坏; 振动分析

**中图分类号:** TM93    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25037

## Underground Cable Anti Damage Monitoring System Based on Wavelet De-noise and EMD-AR Spectrum

SHU Jun<sup>1</sup>, YE Fan<sup>1</sup>, YAO Fenglin<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Nanchang Power Supply Branch, Nanchang 330000,

Jiangxi, China; 2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

**Abstract:** The power cable plays a very important role in today's social development and urban operation. With the increase of people's electricity consumption, the amount of cable laying is also increasing synchronously. In order to prevent the cable from being damaged, the environmental vibration signals around the cable duct gallery are monitored, and potential threats are found in time to ensure the normal operation of the cable, a vibration monitoring system for underground cable damage prevention based on Matlab wavelet noise reduction algorithm and EMD-AR spectrum analysis was proposed. The system was composed of solar power supply module, six axis gyroscope attitude sensing module, vibration sensor module and internet of things communication module. The main control chip uses STM32F4 microcontroller. The wavelet threshold de-noising algorithm was used to remove the complex high-frequency noise and improve the signal identifiability. Then the de-noised signal was subjected to empirical mode decomposition (EMD) and AR spectrum analysis of the first six intrinsic mode function (IMF) components. Finally, the AR spectrum of the first six IMF components was accumulated to obtain the energy contrast map of the signal. The research shows that the application of this method can accurately analyze the type of vibration, which can provide a more simple and convenient method for the monitoring and analysis of vibration near the cable duct gallery, and effectively protect the safe and stable operation of the cable.

**Key words:** wavelet transform; threshold noise reduction; EMD-AR spectrum; cable protection; vibration analysis

**基金项目:** 国家自然科学基金(52075356); 山西省教学改革项目(J2021411)

**作者简介:** 舒俊(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为输电(电缆)施工及运检, Email: 1157378891@qq.com

在用电量越来越大的情况下,各种各样的电缆因其高稳定性和高传输效率而被广泛应用于配电网中。与此同时,地下电缆的铺设规模也在同步增加。地下电缆多铺设于马路下,电缆管廊挖掘深度浅,城市道路环境复杂,人流量大,路面施工人员误操作导致管廊破坏和电缆盗掘现象时有发生,严重影响了电缆安全性和用电稳定性。传统的电缆防破坏管理方式需要大量人力,效率低下,劳动强度大,上下攀爬电缆井还有一定的危险性。目前电缆防破坏普遍采用的监测手段分别有:设置传统的警示标牌、立柱来提醒人们注意电缆的保护;安排专门巡护人员保护地下电缆;架设基于图像识别的视频监控系统。

诸多学者也对电缆的安全性进行了相关的研究,李靖翔等<sup>[1]</sup>提出一种地下电缆的探地雷达图像特征与识别技术,该技术从电缆结构与磁场分布角度解释了电缆的波形的形成原因和特殊性,证明了该技术在电缆的探测与识别上具有良好的应用效果;王丹等<sup>[2]</sup>开发了基于STM32和Lo-Ra的地下电缆在线监测系统,该系统能实时监测电缆载流量和温度,对于出现过载情况能及时预警;马锋等<sup>[3]</sup>对城市电网地下管线智能运行监控与安全预警系统进行研究,构建了城市电网地下管线智能监测预警方案预警系统模型;项恩新等<sup>[4]</sup>针对电缆防破坏技术提出了一种基于振动特征的智能电缆防破坏监测技术,通过电缆振动实验获得了电缆振动信号的时频域特征,提取可用于识别的特征参量进行识别。

以上方法中,较易受环境等外界复杂因素影响,从而造成保护效率低下,识别精度不高和成本高昂等缺点,对所采集的信号含有的噪声不能有效的去除<sup>[5-7]</sup>。基于此,提出一种在管廊附近安装监测装置的方法,该装置的信号处理采用小波阈值降噪和EMD结合的算法,优势在于小波去噪的多分辨率特性<sup>[8]</sup>,即在信号中存在的非平稳特性,在小波变换之后仍然能够很好地刻画出来,尽可能还原出原始信号的特征,如边缘、尖峰、断点等<sup>[9-11]</sup>。EMD方法的内核是希尔伯特变换,该变换主要目的就是得到单分量信号的瞬时频率,同时注重于信号的局部瞬时特性<sup>[12-14]</sup>,从根本上避免了傅里叶变换过程中所产生的虚假频率谐波的现象。

## 1 相关理论

### 1.1 小波阈值去噪

与傅里叶变换相比,小波变换是时频域内的局部化分析,并且在一定程度上取代了傅里叶分析,在很多领域已经有着较为广泛的应用。小波变换的基本思想与傅里叶变换是一致的,也是将信号用一簇函数来表示,将这一簇函数称为小波函数系。

令  $\Psi(t) \in L^2(\mathbf{R}), L^2(\mathbf{R})$  为一可平方的实数空间,  $\mathbf{R}$  为实数,  $t$  为时间。其傅里叶变换为  $\hat{\Psi}(\omega)$ ,  $\omega$  为角频率。当  $\hat{\Psi}(\omega)$  满足下式:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|^{-1}} d\omega < \infty \quad (1)$$

称  $\Psi(t)$  为小波母函数,也可称为基本小波。将基本小波函数  $\Psi(t)$  进行伸缩和平移,即可产生一组小波基函数  $\Psi_{a,b}(t)$ , 即

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0 \quad (2)$$

式中:  $a$  为尺度参数;  $b$  为位置参数。

设  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ , 小波变换可定义为

$$W_f(a,b) = (f, \phi_{a,b}) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中:  $f(t)$  为时间域信号;  $\bar{\Psi}(t)$  为  $\Psi(t)$  的复共轭;  $(f, \phi_{a,b})$  为两者的内积;  $W_f(a,b)$  为小波系数。

通常情况下,小波降噪会选取合适的阈值  $\lambda$  来控制降噪精度,一般常采用软阈值和硬阈值函数,本文采用软阈值函数来去除信号中高频的噪声,其数学表达式如下:

$$\hat{\omega}_{i,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \lambda) & |\omega_{i,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda' \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\text{sgn}(k) = \begin{cases} 1 & k > 0 \\ -1 & k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\omega_{j,k}$  为经阈值函数处理的小波系数;  $\text{sgn}$  为符号函数。

### 1.2 EMD分解方法

EMD分解的过程实质上是把非平稳信号进行平稳化处理的过程。利用原始信号的极值点信息,将信号中不同尺度的波动和趋势进行分解,产生从高频到低频的特征尺度数据序列,每一个序列称为一个固有模态函数 IMF。

对于信号  $x(t)$ , 分解步骤如下:

1)寻找信号的两个所有局部极值点;  
2)对所有极值点用三次样条函数进行插值运算,得到极大和极小包络线,并求出两包络线的均值 $m_1$ ,然后计算

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (6)$$

3)若 $h_1$ 是IMF,记 $h_1$ 为 $x(t)$ 的第一个IMF分量;否则重复上述步骤 $n$ 次得到:

$$h_{1n} = h_{1(n-1)} - m_{1n} \quad (7)$$

使 $h_{1n}$ 满足IMF条件,即为一阶IMF,记 $c_1$ 。

4)从 $x(t)$ 中减去 $c_1$ ,得残差:

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (8)$$

$r_1$ 作为原始数据重复步骤1)~步骤3),得到第二个IMF分量 $c_2$ ,以此类推得到 $n$ 个IMF分量:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (9)$$

式中: $r_n$ 为循环结束后的残余函数。

## 2 系统原理和模拟实验

### 2.1 系统总体设计方案

电缆管廊附近产生振动信号的因素繁多,有些是无害因素,如行人走过、车辆走过等;有些是有害因素,如周边有大型施工车辆、进行开挖作业的施工队等。为了识别并判断出有害因素,设计使用一种集信号采集、识别、预警的可埋藏标桩系统,该系统主要由太阳能发电装置、振动传感器、六轴陀螺仪、信号解码器、数据处理器等部分构成。由太阳能板作为供电来源,产生的电能输送给蓄电池,再由蓄电池给各个工作部件提供电能,通过安装于电缆线路上方的地表,实时监测周围环境振动信号,当传感器接收到信号后,将信号传递给解码器,经解码器处理后的信号最后到达主CPU,由主CPU进行计算处理,对处理后的信号判断是否可能对电缆造成威胁,如果能,便主动发出警报警示周围人员,并发送预警信息到云服务器,经云服务器实时存储现场信息,并将异常信息传递到终端,提醒人员注意此装置附近的情况,及时制止危险的发生,从而降低事故率,减少电缆线路的损失。系统预警信息通信示意图如图1所示,工作原理如图2所示。

### 2.2 算法分析原理

本文所采用的Matlab小波阈值降噪方法,利用不同的阈值来判断其降噪效果,阈值降噪的原理是使用Matlab小波变换函数,将采集到的信号数据中存在的相关性去除,因信号中含有噪声,正

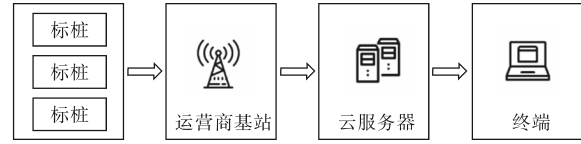


图1 系统预警信息通信示意图

Fig.1 Schematic diagram of system early warning information communication

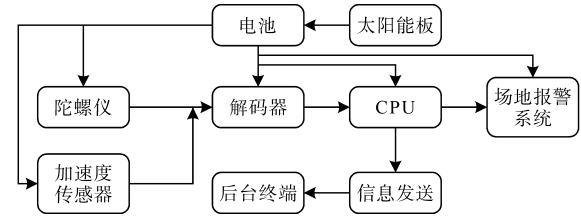


图2 系统工作原理图

Fig.2 Working principle of the system

常信号和噪声信号中同时含有小波系数,且正常信号小波系数与噪声小波系数相比更大,因此可设定一个合适的阈值,由程序判断小波系数是否大于阈值,大于阈值部分认为是正常信号并予以保留,小于该阈值的则被判断为噪声信号,并置为零,依此原理来实现降噪的目的。本质是将信号中无用的成分尽可能抑制而保留有用成分。然后将降噪后的信号进行EMD分解,得到清晰的信号特征,分类判断该特征类型,得出分析结果,并将结果上传至云服务器。信号分析流程图如图3所示。

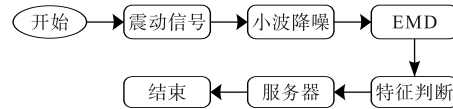


图3 信号分析流程图

Fig.3 Flow chart of signal analysis

### 2.3 实物信号采集实验

本系统最终设计外观为圆形,材质为耐腐蚀易加工的铝合金,双层结构,上层为太阳能面板仓,由透光且韧性足的亚克力板做为盖板,既能保证足够的透光量,又能一定程度保护太阳能板不被破坏,下部埋于地下电缆上方或附近,实时监测周围振动情况,具体外观如图4所示。

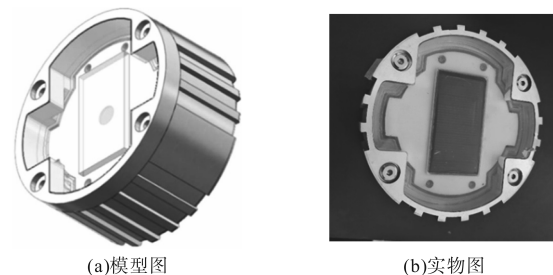


图4 系统结构实物图

Fig.4 Physical diagram of system structure

现场采集信号前,先在实验室对该系统进行了模拟振动采集实验,振动源为人工制造,采集8组振动数据,实验结果表明信号采集精准灵敏度高,采集到的数据如表1所示。

表1 振动数据  
Tab.1 Vibration data

电池电压/mV	振动数据	X轴加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	Y轴加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	Z轴加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	状态	姿态
4 100	53	25	120	100	振动	正常
4 090	468	166	133	959	振动	倾斜
4 100	20	28	22	42	振动	正常
4 080	55	44	18	174	振动	正常
4 090	13	44	73	28	振动	正常
4 110	16	65	29	33	振动	正常
4 090	15	17	80	31	振动	正常
4 090	11	24	66	23	振动	正常

表中X轴、Y轴、Z轴数据由加速度传感器测得,状态、姿态由陀螺仪测得。可以看出,在施加模拟振动信号的情况下,该系统各部件工作正常,陀螺仪和加速度传感器能够灵敏感知周围环境状况,电池耗电量低,符合预期要求。

### 3 振动信号的实验分析

针对当前电缆管廊防破坏监测问题,提出了基于小波降噪和EMD-AR谱分析的方法,应用小波阈值函数消除振动信号中含有的高频噪声,使振动信号的分辨率提升,在此基础上引用EMD-AR谱分析,能够直观展示各信号的分布图,达到振动类型识别的目的,从而判断危险性。

#### 3.1 阈值的选取和降噪

小波阈值降噪的基本思想为通过小波变换将原始信号转换为不同尺度空间,通过设置合理阈值将噪声信号筛选出来并滤除,最后进行小波重构即可得到去噪后信号。

首先采用wavedec小波函数对信号进行小波分层,wavedec函数可将原始信号分解成多个尺度的低频系数和高频系数,小波基为db1,层数设为3,得到分层后的信号后提取其分解系数,然后用阈值函数处理,使用ddencmp函数进行阈值降噪。首先输入需要处理的信号,给定ddencmp函数降噪的设置,ddencmp函数能根据小波系数的统计特征和信噪比的要求自适应地计算出最优阈值,默认选择软阈值对信号去噪,保留信号的低频分量,边界处理模式为默认,每一层均采用同一个阈值,阈值向量的长度设为1。

分别采集冲击锤、切割机、手镐、挖掘机的振动信号进行分析,将采集的信号导入Matlab中,由于样本数据过大,仅采取10 000个样本点进行数据分析,最后计算得到该实验对信号降噪所需要的阈值为0.307 0,降噪后的结果如图5所示。

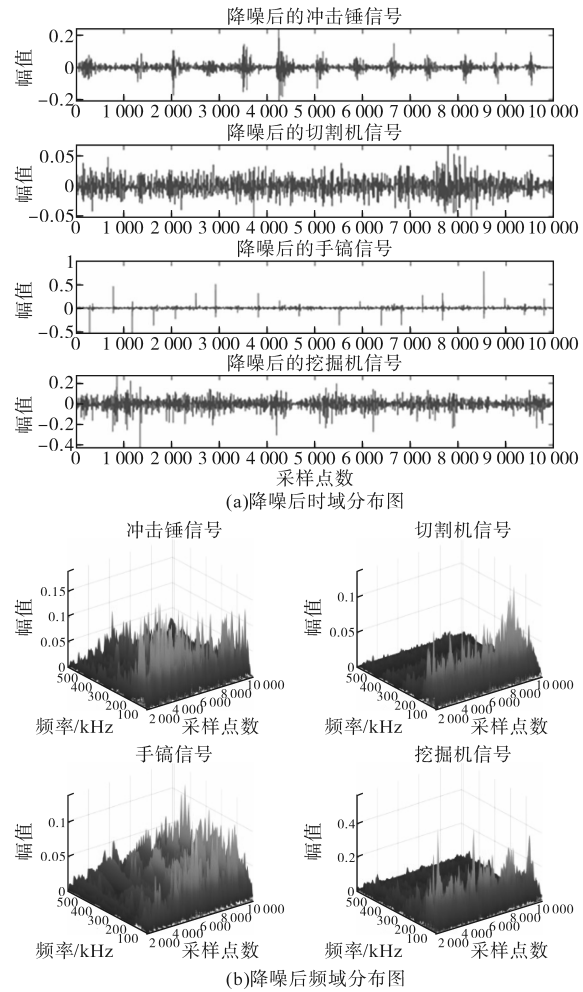


图5 降噪后4种振动信号图

Fig.5 Four vibration signals after noise reduction

由图5a可以看出,手镐和冲击锤消噪后周期性比较明显,而切割机和挖掘机信号没有明显的周期性,图5b可以看出冲击锤信号的振动频率在0~500 kHz均有分布,最大幅值出现在0~200 kHz处,切割机信号频率最大幅值在100~200 kHz处,冲击锤信号在整个频域范围内均有最大幅值出现,挖掘机信号最大频率范围在150 kHz附近。由图5可以看到不同的振动类型的反馈波形均有所差异,但想要清楚分辨出来每种波形所对应的振动源还是有一定难度。

#### 3.2 EMD-AR谱分析

基于3.1节的阈值降噪,可将去除高频噪声后的信号进行EMD分解,然后进行AR谱分析,

EMD能够有序地将模态按照特征的时间尺度,以从大到小的方式分离出来,跟高通滤波器的层层“筛分”类似。分解后得到的分量几乎是正交的,而且满足完备性,因其没有固定的先验基底,还具有自适应的特性。基于AR模型建立的功率谱,能够克服Hilbert分离算法中存在的加窗效应,还能提高功率谱估计的分辨率。首先对4种振动类型降噪后的信号进行EMD分解,提取信号的前6个IMF分量,得到前6个IMF分量的EMD-AR谱对比图,将4种振动类型的EMD-AR谱累加起来得到EMD-AR谱累加能量对比图,如图6所示。

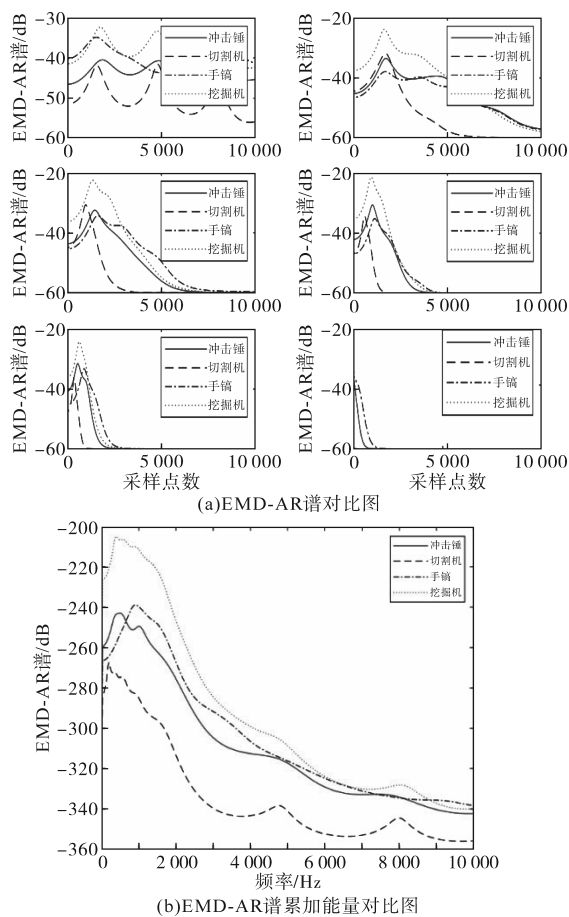


图6 前6个IMF分量EMD-AR谱

Fig.6 EMD-AR chart of the first six IMF components

从图6b可以看出,挖掘机、冲击锤、手镐、切割机4种振动信号依次递增的频带为0~1 000 Hz,由挖掘机、手镐、冲击锤、切割机4种振动信号依次递减的频带为1 000~6 500 Hz。各振动类型频带清晰,依此即可判断出在电缆附近的振动信号类型,从而便可达到风险识别的目的。

## 4 结论

本文基于小波阈值降噪函数和EMD-AR谱

分析,设计一种地下电缆防破坏预警系统,该系统能够适应各种室外露天的环境,太阳能作为电能来源,采用移动网络技术与终端管理员进行无线通信,可做到全线路实时监控。同时对地下电缆周围环境振动信号进行分析实验,以冲击锤、切割机、手镐、挖掘机四种机械作业时产生的振动信号为实验样本,对其进行消噪处理,通过选择合适的阈值函数,得到了去除高频噪声后的振动信号,随后提取4种信号的前6个IMF分量得到其AR谱,最后将6个AR谱累加即可得到其中信号清晰的能量带,以此为依据即可判断出电缆附近是否有危险情况发生,这一方法对电缆周围振动信号监测系统提供了可靠的技术支撑,在实际场景应用下该系统能发挥有效的预警识别作用,既节省人力巡视产生的大量成本,又保障电缆的安全稳定运行。后续可采集更多类型的振动信号来进行实验,让系统对信号的识别判断更加清晰准确。

## 参考文献

- [1] 李靖翔,赵明,赖皓,等. 地下电缆的探地雷达图像特征与识别技术[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1482-1489.  
LI Jingxiang, ZHAO Ming, LAI Hao, et al. Image characteristics and recognition technology of ground penetrating radar for underground cable[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1482-1489.
- [2] 王丹,钱玉良. STM32和LoRa的地下电缆在线监测系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(1): 88-91.  
WANG Dan, QIAN Yuliang. Design of underground cable on-line monitoring system for STM32 and LoRa[J]. Microcontroller and Embedded System Applications, 2021, 21(1): 88-91.
- [3] 马锋,马洁. 城市电网地下管线智能运行监控与安全预警系统研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(8): 50-51.  
MA Feng, MA Jie. Research on intelligent operation monitoring and safety early warning system of urban power grid underground pipeline[J]. Communication Power Technology, 2019, 36(8): 50-51.
- [4] 项恩新,王科,聂鼎,等. 基于振动特征的智能电缆防外破监测技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 35-45.  
XIANG Enxin, WANG Ke, NIE Ding, et al. Research on monitoring technology of intelligent cable against external breakage based on vibration characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 35-45.
- [5] 许金彤,李建斌,俞登科. 介于空气、土壤介质的电力电缆防外破定位方法[J]. 信息通信, 2015(9): 183-184.  
XU Jintong, LI Jianbin, YU Dengke. Detection and location method of power cable against external breakage between air and soil media[J]. Information and Communication, 2015(9): 183-184.

183-184.

[6] 汪友明. 基于声音信号的地下电缆防破坏预警系统平台搭建[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2018.  
WANG Youming. The design of the acoustic signal based underground cables anti-damage early warning system[D]. Hangzhou:Hangzhou Dianzi University,2018.

[7] 耿焯,李永辉. 低压电力线通信的信道特性分析及模型研究[J]. 电力系统通信,2004(4):19-21,24.  
GENG Xuan, LI Yonghui. Channel characteristics analysis and model research of low-voltage power line communication[J]. Electric Power System Communications,2004(4):19-21,24.

[8] 杨慧,顾菊平,华亮,等. 基于小波的声发射信号去噪研究[J]. 现代电子技术,2017,40(13):70-72,76.  
YANG Hui, GU Juping, HUA Liang, et al. Research on acoustic emission signal denoising based on wavelet[J]. Modern Electronics Technique,2017,40(13):70-72,76.

[9] 陈建勇,王道阔,邓文锋,等. 重构小波阈值函数在信号去噪中的应用与研究[J]. CT理论与应用研究,2017,26(1):63-68.  
CHEN Jianyong, WANG Daokuo, DENG Wenfeng, et al. Application and research of reconstructed wavelet threshold function in signal denoising[J]. CT Theoretical and Applied Research,2017,26(1):63-68.

[10] 李庆华. 基于小波阈值算法的信号去噪研究[D]. 乌鲁木齐:

新疆大学,2013.  
LI Qinghua. The study on signal de-noising algorithm based on wavelet threshold[D]. Urumqi:Xinjiang University,2013.

[11] 陆建华,沈科宇. 基于动态小波阈值的齿轮箱振动信号降噪方法[J]. 起重运输机械,2022(2):56-60.  
LU Jianhua, SHEN Keyu. Gearbox vibration signal denoising method based on dynamic wavelet threshold[J]. Hoisting and Conveying Machinery,2022(2):56-60.

[12] 白哈,张劲松,邹明贺,等. 电力电缆隧道振动监测技术研究与应用[J]. 电气应用,2015,34(24):157-160.  
BAI Han, ZHANG Jinsong, ZOU Minghe, et al. Research and application of vibration monitoring technology for power cable tunnel[J]. Electrical Application,2015,34(24):157-160.

[13] NILISH S W, SINGH R P, MILIND U. Detection classification and localization of faults of transmission lines using wavelet transform and neural network[J]. International Journal of Applied Engineering Research,2018,13(1):98-106.

[14] 方明. 城区电缆管廊防破坏监测系统研究[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(12):38-41.  
FANG Ming. Research on anti-damage monitoring system of urban cable pipe corridor[J]. Machinery Design & Manufacturing Engineering,2020,49(12):38-41.

收稿日期:2023-03-18

修改稿日期:2023-05-24

(上接第90页)

动”影响,因此更适合使用长距离工业光纤通信的现场,通信抗干扰能力强、误码率极低,实验结果表明应用效果良好。

参考文献

[1] 周根成,韩斌,林永才. 高效8倍过采样异步串行数据恢复[J]. 计算机应用与软件,2014,31(10):254-257.  
ZHOU Gencheng, HAN Bin, LIN Yongcai. Recovering efficient 8-times oversampling asynchronous serial data[J]. Computer Applications and Software,2014,31(10):254-257.

[2] 曲伟,孙志安. 基于FPGA实现高速串行链路数据恢复的方法[J]. 计算机测量与控制,2011,19(1):219-221.  
QU Wei, SUN Zhian. Data recovery method of high-speed seri-

al link based on FPGA[J]. Computer Measurement and Control,2011,19(1):219-221.

[3] 李湘琼,黄启俊,常胜. 基于FPGA的高速时钟数据恢复电路的实现[J]. 电子技术,2009,36(8):48-50.  
LI Xiangqiong, HUANG Qijun, CHANG Sheng. Design of high-speed clock and data recovery circuit based on FPGA[J]. Technology Research,2009,36(8):48-50.

[4] 谢明璞,武杰,张杰. 利用FPGA延时链实现鉴相器时钟数据恢复[J]. 核技术,2009,32(6):477-480.  
XIE Mingpu, WU Jie, ZHANG Jie. Clock and data recovery of phase detector realized by FPGA delay chain[J]. Nuclear Technology,2009,32(6):477-480.

收稿日期:2023-04-13

修改稿日期:2023-06-27