

文章编号: 2095-2163(2020)05-0224-05

中图分类号: TP23

文献标志码: A

# 基于地振动信号检测的地下电缆保护研究

闫贻鹏<sup>1</sup>, 傅铭<sup>1</sup>, 胡达<sup>1</sup>, 顾悦<sup>1</sup>, 朱伟剑<sup>1</sup>, 袁靖<sup>2</sup>, 郝柱<sup>2</sup>

(1 上海市电力公司青浦供电公司, 上海 201707; 2 上海置信电气非晶有限公司, 上海 201707)

**摘要:** 随着城市建设的快速发展, 地下电缆线路外损故障也急剧增多。本文在基于振动信号检测的基础上, 提出了一种防止地下电缆压坏的保护方法。通过分析地震波产生原理与传播规律, 研究了行人、车辆、施工机械等运动目标所产生的地振动信号特点, 利用过零数统计分析的方法对行人、车辆、施工机械等运动目标进行识别, 设计了合适的阈值选取原则, 搭建了基于NI的振动信号采集和处理的实验平台, 完成了振动数据采集, 验证了过零数统计分析方法对目标识别的有效性, 集成了地下电缆保护预警系统, 实现了对进入保护范围的施工机械的探测, 达到了保护地下电缆的目的。

**关键词:** 电缆保护; 过零数分析; 阈值选取; 数据采集;

## Research on underground Cable Protection based on ground vibration signal detection

YAN Yipeng<sup>1</sup>, FU Ming<sup>1</sup>, HU Da<sup>1</sup>, GU Yue<sup>1</sup>, ZHU Weijian<sup>1</sup>, YUAN Jing<sup>2</sup>, HAO Zhu<sup>2</sup>

(1 Qingpu Power Supply Company, Shanghai Electric Power Company; Shanghai 201707, China;

2 Shanghai zhixin electric amorphous co., LTD., Shanghai 201707, China)

**[Abstract]** With the rapid development of urban construction, the external damage of underground cable lines has also increased dramatically. This paper proposes a protection method to prevent the crushing of underground cables based on the detection of vibration signals. Analyzed the seismic wave generation principle and propagation law, studied the characteristics of ground vibration signals generated by moving targets such as pedestrians, vehicles, and construction machinery. Using the method of zero-crossing statistical analysis to identify and design moving targets such as pedestrians, vehicles, and construction machinery. The principle of suitable threshold selection was established, an experimental platform for vibration signal collection and processing based on NI was built, vibration data collection was completed, the effectiveness of the zero-crossing statistical analysis method for target identification was verified, and an underground cable protection warning system was integrated. The detection of the construction machinery entering the protection range is realized, and the purpose of protecting the underground cable is achieved.

**[Key words]** cable protection; zero crossing analysis; threshold selection; data collection

## 0 引言

随着城市建设的快速发展, 为了城市美观, 新建输电、配电线路基本采用地下电缆敷设方式。地下电缆线路的供电可靠性较架空线路有了较大提升, 但电缆线路敷设于地下, 有隐蔽性的特点, 同时地下走廊越来越拥挤, 自来水、通信、煤气等施工, 道路拓宽、种树、建筑施工等工程都会开挖路面, 都会对地下电缆造成威胁, 使得电缆外损故障仍无法得到有效遏制。为了更好地保护地下电缆, 在振动信号检测的基础上提出了一种地下电缆保护预警方法。根据人、车辆、打桩机械行走时所产生的振动信号特点<sup>[1]</sup>, 通过labview采集振动信号, 将采集的信号进行预处理, 提取出信号中有效的部分, 在信号的时域部分, 利用过零数分析的方法, 采用基于N次波峰次大值平均值的阈值选取原则, 加入随信号浮动的比例因子, 利用单位周期内波峰频率的次数, 对人、

车辆、施工机械进行识别, 根据不同的目标发出预警信号, 建立电缆保护预警, 达到保护电缆正常工作的目的。

## 1 地震波传播原理及规律

对于非刚体的地球表面介质中, 行人、车辆、施工机械等不同目标在地面上运动时, 相当于震源对地面施加了一定的激励, 激励持续振动造成介质介点在平衡位置上下振动从而形成了振动信号, 振动不断扩散传播形成地震波。地震波依据传播规律的差异, 可分为体波和面波两种<sup>[2]</sup>。体波的质点振动方向随形变不同而改变; 面波属于不同体波相互干涉累计叠加而形成, 传播方向位于介质的分界面, 其特点是随着距离的增加能量呈指数形式减少。体波根据形变方式的不同分为横波(S波)和纵波(P波), 当传播方向与激励振动方向垂直时, 由于剪切形变产生了横波; 当传播方向与激励振动方向一致

**作者简介:** 闫贻鹏(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电缆运行、电缆检修等。

**收稿日期:** 2020-01-16

时,由于体积形变产生了纵波<sup>[3]</sup>。面波根据传播形状的不同分为乐夫波和瑞利波。只有当介质下面的横波速度大于介质表层的横波速度时,才会产生乐夫波;当介质质点的动态运动轨迹为逆时针椭圆方向时,产生的是瑞利波。从传播的前后顺序来看,检测地震波的传感器接收顺序为:纵波→横波→乐夫波→瑞利波<sup>[4]</sup>,如图1所示。

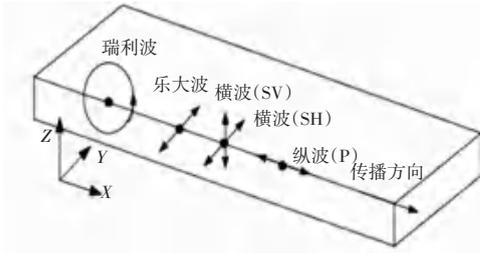


图1 地震波传播顺序

Fig. 1 Sequence of seismic wave propagation

根据地震波的传播特性和产生原理比较,横波速度低、能量弱;纵波频率高、速度快;瑞利波具有较低的频率、较强的能量、较远的传播距离,相比于横波和纵波,瑞利波对于不同目标的检测以及识别更具优势<sup>[5]</sup>。研究得到瑞利波的性质:

(1)同一介质中横波的速度略大于瑞利波的速度,其速度受到介质均匀性的影响,非均匀介质的条件下时,瑞利波会发生频散现象,速度随频率改变而改变;均匀介质的条件下,其速度不会受频率的影响。

(2)当泊松比=0.5时,瑞利波的垂直位移分量为水平位移分量的1.82倍<sup>[6]</sup>。

(3)随着深度的增加,瑞利波的传播速度呈指数形式的衰减,且瑞利波波长与衰减系数成反比。

## 2 过零数分析

### 2.1 过零数分析方法

为了将人员、车辆、打桩机械的地振动信号检测并识别,选择从分析信号的时域特征入手<sup>[7]</sup>,从中提取出具备典型性、稳定性和代表性的特征信息,作为信号判断与识别的依据,最终实现预警的功能。过零数分析是指统计一段时间内信号的振幅超过所设定阈值的次数,将次数作为信号的特征去判断目标特性<sup>[8]</sup>。由于不同目标所产生的信号属于非平稳随机信号,无法进行分析,故将信号截短,选取一段时间视为平稳信号,统计信号过零的次数,作为信号的特征。过零数分析硬件和算法实现简单、计算

量小,抗环境干扰能力强,可作为预警分析的基础<sup>[9]</sup>。

假设过零的次数为 $N$ ,比例常数为 $k$ ,信号的频率为 $f$ ,若信号为频率 $f$ 的正弦信号,则有公式(1):

$$N = k \cdot f. \quad (1)$$

即过零的次数 $N$ 与信号的频率 $f$ 成正比。

假设所选取的随机信号为 $x_1, \dots, x_n$ 的平稳随机时间序列,所设定的阈值为 $a$ ,定义此二进制序列 $H_t$ 为:

$$H_t = \begin{cases} 0, & x_t \geq a; \\ 1, & x_t < a, \end{cases} \quad t = 1, \dots, n. \quad (2)$$

则序列 $H_t$ 的过零数 $M$ 为公式(3)为:

$$M = \sum_{i=2}^n (H_i - H_{i-1})^2. \quad (3)$$

当所选取的平稳随机信号的频率范围从 $f_1$ 变成 $f_2$ 时,功率谱 $G(f)$ 与单位周期时间内的过零总数 $N$ 的关系式如公式(4)所示:

$$N = 2 \sqrt{\frac{\int_{f_1}^{f_2} f^2 G(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} G(f) df}}. \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,过零总数与信号频率密切相关。信号频率范围较低时,单位周期时间内的过零总数较少;信号频率范围较高时,单位周期时间内的过零总数较多。

### 2.2 阈值选取原则

由于电缆的铺设大部分处于城市的地表下面,所采集的振动信号中包含许多无效的偶然强干扰信号<sup>[10]</sup>,在城市环境下,振动信号的振幅受到震源和传感器之间距离的影响,不同硬度、湿度的地面也会影响信号的振幅,故采用更为实用的阈值选取原则显得尤为关键。

通过大量的采集信号实验,提高算法的有效性,将所采集的前 $N$ 次实验数据的次大值 $x_n$ 的平均值作为判断的依据,设定经验系数为 $q$ ,阈值为 $O$ ,则有公式(5)作为阈值的设定依据。

$$O = q \times \frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N x_n. \quad (5)$$

在实时检测的条件下,为了提高信号处理的速度,采用并行处理的方法,提高信号的处理能力。在阈值的基础上加入随信号浮动的比例因子 $M$ ,所得的阈值为 $O_1$ ,计算公式(6)

$$O_1 = O \times M. \quad (6)$$

### 3 振动信号实验

#### 3.1 实验平台

由于瑞利波的频率比较低,其主要频率成分集中在0~150 Hz范围内,人的脚步频率在50 Hz左右,车辆的主频在150 Hz左右,选取兆峰公司ZF-20DX地震检波器作为地振动信号采集传感器,同时采用该检波器配套的安裝外壳,该传感器广泛应用于石油勘探、采矿、工程和科学研究等领域,其主要参数如表1所示。

表1 传感器参数

Tab. 1 Sensor parameters

参数	值
自然频率/Hz	100±5%
假频/Hz	≥600
失真度/%	<0.2
开路阻尼	0.45
开路灵敏度/(v/m/s)	23
线圈电阻/Ω	570±5%
允许倾斜度	20
悬体质量/g	5
线圈最大移峰-峰值/mm	1.5
使用温度范围/°C	-40~+70

实验数据的采集与分析采用美国NI公司的嵌入式测控系统CompactRIO,其中控制器为cRIO-9030,模拟信号采集为NI9234模块,该模块每通道的传感器输入信号经过缓冲、调理后,由24位Delta-sigma模数转换器对其采样,CompactRIO硬件平台由FPGA和CPU组成,PFGA通过可热插拔的接口与NI9234数据采集模块相连,通过SPI通信方式将数据传输到上位机,从而实现在上位机界面的数据实时采集与存储,针对行人、车辆、打桩机械的振动,从不同距离入手,完成实验数据的采集工作。

#### 3.2 信号采集与处理

为了获得更为准确的实验数据,数据采集时周围无其他干扰条件。采集行人、车辆、打桩机械的振动,贴合电缆预警系统的实际应用场地条件,实验场地选取为平稳的干燥土地,适宜振动传感器信号的传播,天气晴朗,温度条件适宜,如图2所示,在电脑上实时显示波形的曲线。

采样频率取为1000 Hz,经过多次实验,可得到不同目标的信号,经过小波降噪处理,可得到如下的典型信号图,如图3~图5所示。行人信号的波形较为分散、平稳,波动幅度较小,对于电缆无太大影响;车辆信号的波形单位时间内频率较快,振幅无太大

起伏;打桩机械的信号波形变化较大,振幅最大,对电缆的影响最大。



图2 实际采集场景

Fig. 2 Actual collection scene

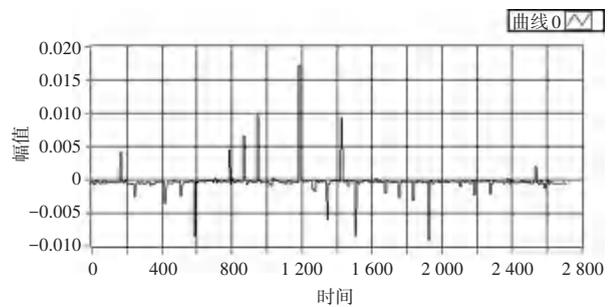


图3 行人信号波形图

Fig. 3 Pedestrian signal waveform

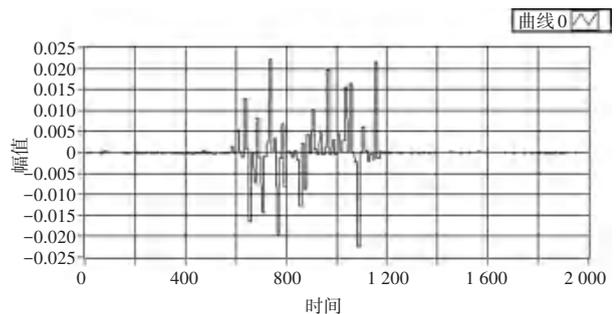


图4 车辆信号波形图

Fig. 4 Vehicle signal waveform

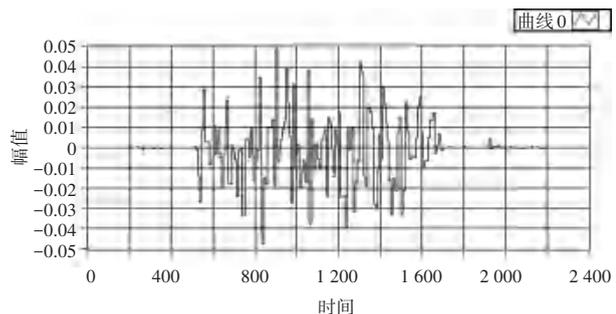


图5 打桩机械信号波形图

Fig. 5 Signal waveform of pile driving machine

分析实验数据的振动结果,综合实际电缆遭受破坏情况,埋在地下电缆大多数受到3 m范围内的

物体影响,故选定传感器与进行测试的不同目标距离为 3 m。为了便于统计不同目标的过零数个数,避免受到偶然因素的干扰,综合分析选取单位时间周期为 60 s,可以得到单位周期内不同目标的过零数统计个数,如表 2 所示。

表 2 不同目标过零数统计

Tab. 2 Statistics of zero crossings for different targets

目标名称	过零个数(不同目标实验 8 次)			
行人	23	17	27	15
	26	19	18	22
车辆	54	48	53	49
	54	52	56	50
施工机械	103	98	101	105
	99	102	104	110

由于偶然误差的干扰,去掉不同目标过零个数的最大值、最小值,可以看出距离传感器 3 米的范围内,行人信号的过零个数在 17-26 次之间,车辆信号的过零个数在 30-54 之间,施工机械的过零个数在 99-105 之间,各个信号的过零个数呈现倍数式的递增,容易判断其不同目标的特征,实验证明所采用的改进过零数分析方法的有效性,对目标的识别具有普遍适用性。

#### 4 电缆保护预警系统设计

根据上述分析,设计开发一套地下电缆保护预警系统,将振动传感器安装在地下电缆上方的路面,以传感器为中心形成一个圆形的探测区域,当施工机械进入该区域时触发声光报警,提醒施工者进入了电缆保护区,施工要谨慎或停止施工。

电缆保护预警系统由信号采集放大、信号处理和报警等 3 部分组成,系统整体某块图如图 6 所示。信号采集放大部分主要由 ZF-20DX 地震检波器和放大电路组成,检波器输出的毫伏信号,通过放大电路变成 0-5 V 信号;信号处理部分以高性能 STM32 单片机为核心,进行 A/D 采样,采集前端放大电路的输出信号,对信号进行滤波等处理,对处理后的数字信号进行过零数统计,根据设定的阈值,判别当前目标的类型;报警部分主要由声光报警器组成,根据判别的目标类型决定是否触发报警,实际应用中行人和车辆从电缆上方的路面经过时不会损坏电缆,主要是打桩机、钻机等施工机械的打桩头或钻头接触到电缆时才会弄断电缆,因此当打桩机、钻机等施工机械进入保护区时就触发声光报警,提醒施工人员已经进入保护区,地面下有电缆,施工时应该谨

慎或停止施工。

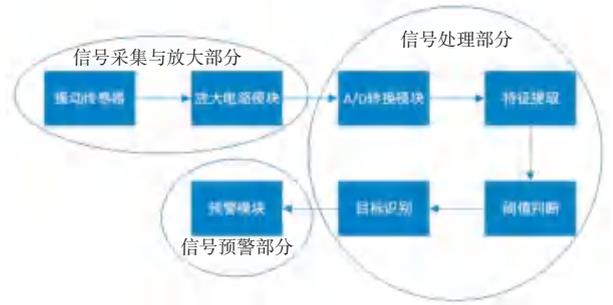


图 6 系统整体模块

Fig. 6 Complete system module

控制系统电路板如图 7 所示,图中 GSM 模块接口外接 GSM 模块,通过短信的方式把报警信息发给电缆管理部门;电量检测模块对供电的可充电锂电池电量进行检测,锂电池由太阳能光伏板供电,当电池电量低于一定阈值时报警;测距模块对施工机械到电缆的距离进行测量,当距离小于设定的安全距离时报警;信号放大器模块对地震检波器输出的信号进行放大等调理,输出信号进入控制器的采样通道;控制器采用 STM32F4 系列高性能微控制器,速度可达 210DMPIPS@ 168 MHz,集成了单周期 DSP 指令和 FPU 浮点单元,具有较高的计算能力,作为电缆保护预警系统的控制核心,对信号放大器模块传输的信号进行采样、处理,运行施工机械检测算法,输出报警控制,同时和测距模块、GSM 模块、电量检测模块通信。经过试验,系统可以检测到进入电缆保护区的施工机械,触发声光报警。



图 7 控制电路板

Fig. 7 Control circuit board

#### 5 结束语

本文在分析地震波产生原理与传播规律的基础上,根据行人、车辆、施工机械运动的自身特点,利用过零数统计分析的方法进行了行人、车辆、施工机械 (下转第 230 页)