

· 智能配网与微网 ·

# 马赫-曾德干涉检测地下电缆周界振动的分析与实验

章欣, 朱宁西, 刘刚, 郑文成, 胡传良

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**为提高马赫-曾德干涉光纤传感技术应用于城市中低压地下电缆防外力破坏预警领域的工作效率,需理清干涉电压信号与其振动受力之间关系。首先文中理论分析了干涉电压与振动力之间关系,指出在外界环境一定时,干涉电压变化率只与振动力有关。在此基础上设计实验,研究在刚性水泥地表传播的振动波与干涉电压信号之间的关系,对比分析了振动波与干涉电压信号的传播和衰减规律。结果表明马赫-曾德干涉电压变化率峰值与振动力大小呈正对应关系,可以用电压变化率峰值大小作为特征值来预判入侵外力距离地下电缆的远近或强弱。

**关键词:**光纤传感技术;光生电压;冲击振动;衰减;加速度;马赫-曾德干涉

中图分类号:TM247

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)02-0105-06

## 0 引言

城市中低压地下电缆多接近地表,这导致电缆容易受到盲目施工、偷盗等因素破坏,给用电安全带来严重隐患,因此使用一种实用有效的地下电缆防外力破坏预警系统对地下电缆进行保护是保证电网安全运行的重要手段<sup>[1]</sup>。光纤传感技术具有成本低、抗紫外线、抗老化、可适用于不规则周界等特点,非常适合环境多变的地下电缆防外力预警系统,采用的是马赫-曾德干涉传感技术,其相对于其他光纤传感技术来说,具有结构简单、敏感性高、造价便宜等优点,便于工程实际。光纤传感在地表或地表浅层传播的振动波具有振幅大、衰减慢、易于检测、预警敏感等特点<sup>[2-3]</sup>,且地表环境又有利于施工,所以在实际工程中,传感光纤多埋于地表浅层。城市中低压地下电缆周界多为刚性水泥地,所以研究振动波在刚性水泥地表的传播和衰减特性及其对干涉光纤波的影响,对于提高马赫-曾德干涉光纤传感系统的预警效率上来说具有重要指导意义。

文献[4—9]通过实验分析了振动力在不同介质中的传播及衰减规律,认为负乘幂衰减公式可用于描述振动波在单一介质中的传播和衰减规律。文献[10—14]提出了多种特征提取模式对不同振动力作用下的干涉光纤波进行分类,并根据分类特征,采用模式识别算法对不同振动信息进行识别,从而建立预警机制。以上文献均没有对振动力与干涉光纤波之间的函数关系进行解析分析,目前也少有相关文献做过类似研究。文中以城市中低压

地下电缆防外力入侵预警为应用背景,理论分析了冲击振动力与马赫-曾德干涉波之间的解析关系。在此基础上设计实验,发现马赫-曾德干涉电压变化率峰值与振动力大小呈正对应关系,可用干涉电压变化率峰值大小作为特征值来预判入侵外力距离地下电缆的远近或强弱。最后通过现场工程试验也验证这一观点,为马赫-曾德干涉应用于城市中低压地下电缆防外力破坏预警领域提供了一定理论和实验依据。

## 1 马赫-曾德干涉波与振动力的解析分析

马赫-曾德干涉光纤传感系统输出端光强度的改变是由于光耦合相位的改变引起的<sup>[15]</sup>。如图1所示,由光源发出的光被耦合器分为两束,光束的一部分会从参考臂通过,而另一部分从处于振动测量区的光纤信号臂通过,两束光最后在光纤耦合器汇合,并被光电探测器检测到。设  $E_1$  为从参考臂通过的光束场强,  $E_2$  为从光纤信号臂通过的光束场强,则在光电探测器上输出的光生电压信号强度  $U$  的表达式为:

$$U = \sigma |E_1 + E_2|^2 = \sigma |E_1 \exp(i\theta_1) + E_2 \exp(i\theta_2)|^2 \quad (1)$$

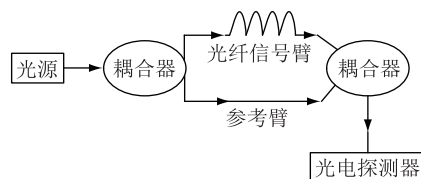


图1 马赫-曾德干涉

Fig.1 Mach-Zehnder interferometer

其中,  $E_1 = E_1 \exp(i\theta_1)$ ,  $E_2 = E_2 \exp(i\theta_2)$  表示随相位  $\theta$  和振幅  $E$  变化的旋转矢量。 $\sigma$  是光生电压与

收稿日期:2018-10-28;修回日期:2018-12-05

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2015-AA050201)

光能量之间的转换因子,进一步推导有:

$$U = \sigma \{ E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \operatorname{Re}[\exp(i\theta_1 - i\theta_2)] \} = U_1 + U_2 + 2\sqrt{U_1U_2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

其中,  $U_1 = \sigma E_1^2$ ,  $U_2 = \sigma E_2^2$  分别表示参考臂光束和光纤信号臂光束产生地光生电压,第三项为干涉信号分量产生的光生电压。令  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ , 则上式可简化为:

$$U = U_1 + U_2 + 2\sqrt{U_1U_2} \cos\Delta\theta \quad (3)$$

$\Delta\theta$  是通过测量得到的两束光之间的相位差,该差值可以看作是三部分组成,一是由于制作工艺上不可避免的存在瑕疵,无法使得两根光纤长度绝对等长,这就引入两束光最初始的相位差  $\Delta\theta_s$ , 与干涉仪本身工艺有关;二是光纤折射率改变产生的相位差  $\Delta\theta_x$ ;三是光纤本身长度改变产生的相位差  $\Delta\theta_y$ 。由于  $\Delta\theta_x$  与  $\Delta\theta_y$  均为外力所致,所以就外力产生的相位  $\Delta\theta_t = \Delta\theta_x + \Delta\theta_y$ <sup>[16]</sup>。于此,式(3)可以表式为:

$$U = U_1 + U_2 + 2\sqrt{U_1U_2} \cos(\Delta\theta_s + \Delta\theta_t) \quad (4)$$

由弹性力学原理<sup>[17]</sup>可知相位差  $\Delta\theta_t$  与应力的关系为:

$$\frac{\Delta\theta_t}{FL} = nk_0 \frac{2u}{E} + \frac{2k_0}{2E} n^3 [(1-u)P_{11} + (1-3u)P_{12}] \quad (5)$$

式中: $F$  为外界作用在光纤上的振动力; $L$  为所受振动力的光纤的长度; $P_{11}$ ,  $P_{12}$  为光纤材料的弹光系数; $u$  为泊松系数; $n$  为光纤材料的折射率; $E$  为光纤中的杨氏模量; $k_0$  为光波在真空中的波数。 $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $u$ ,  $n$ ,  $E$ ,  $k_0$  取决于光纤原有物理特性,本次试验中,感应振动力变化光纤长度  $L$  不变,可通过上式可得外界作用力引起光信号的相位变化  $\Delta\theta_t$  与振动力  $F$  成正比,于是有:

$$\Delta\theta_t(t) = kF(t) \quad (6)$$

式中: $k$  为光相位受力转化因子; $F(t)$  为外界振动力随时间变化函数; $\Delta\theta_t(t)$  外界作用力引起光信号的相位随时间变化函数。因此通过对光强度的分析就可以监测外界环境的变化情况,这也是干涉光纤用于测量、安防监控的理论基础<sup>[18]</sup>。

将式(6)代入式(4)可得:

$$U(t) = U_1 + U_2 + 2\sqrt{U_1U_2} \cos[kF(t) + \Delta\theta_s] \quad (7)$$

其中,  $U(t)$  表示输出的光生电压随时间的变化函数,对式(7)进行求导,得到物理量为干涉光生电压变化率  $V(t)$ ,  $\Delta\theta_s$  为初始相位差,  $U_1$ ,  $U_2$  分别为表参考臂光束和光纤信号臂光束产生的光生电压强

度,均不随时间变化,求导后消除。光生电压信号强度变化率  $V(t)$  表达式为:

$$V(t) = U'(t) = -2k\sqrt{U_1U_2} \sin[kF(t) + \Delta\theta_s] F'(t) \quad (8)$$

式中: $F(t) = ma(t)$ ,  $m$  为质点质量,  $a(t)$  为振动加速度随时间变化函数,将  $F(t) = ma(t)$  代入式(8):

$$V(t) = U'(t) = -2km\sqrt{U_1U_2} \sin[kma(t) + \Delta\theta_s] a'(t) \quad (9)$$

式中: $k$  为光相位受力转化因子。 $k$ ,  $m$  与光纤及传播介质物理特性有关; $U_1$ ,  $U_2$ ,  $\Delta\theta_s$  均与系统本身有关,且认为其不变,因而可以得出干涉光生电压变化率  $V(t)$  只与振动加速度  $a(t)$  有关。

## 2 干涉检测实验

式(9)说明马赫-曾德干涉光纤传感系统光电探测器上获得的干涉光生电压变化率  $V(t)$  与振动加速度  $a(t)$  存在明显函数关系,但目前尚未有文献能够用理论公式表达振动加速度随时间变化函数  $a(t)$ ,主要原因是振动在介质中传播受多种环境因素影响,非常复杂,这就使理论推导遇到瓶颈。国内外大量研究表明<sup>[4-9]</sup>,冲击引起的地表振动加速度峰值随距离衰减可以用负乘幂衰减关系表示。

基于此,为了进一步分析干涉电信号与振动加速度之间关系,设计如下实验,同步采集干涉电压信号与振动加速度信号并加以分析,研究其变化规律。

### 2.1 干涉检测系统

一般来说,入侵外力均是作用在地表,振动波传播是由地表向地基深处传播,同时振动波的传播是衰减的,所以浅埋于地表的或悬挂于接近地表的电缆沟壁的传感光纤接受到的振动力远大于实际敷设电缆接受的振动力。沿地表的振动波相比于沿地基垂直传播的振动波来说,具有振幅大、衰减慢的特点,更有利于检测和预警识别。基于上述依据,试验决定在地基表层敷设传感光纤,而不是靠近实际电缆敷设传感光纤。

实验选择某实验室室内地基作为试验地基,该地基为均匀刚性水泥地面,没有断层,材质均匀,并相对广阔,能保证振动波在均一介质中传播,避免由于质地不均导致地波反射、衍射。将固定长度的马赫-曾德干涉光纤信号臂固定在地面并与地面完全接触,其他部分均不与地面接触,可以完全避免光纤参考臂及其他传感光纤受力影响实验结果。

实验原理如图2所示,冲击振动产生采取落锤法,即采用质量 1 kg 的均匀钢棍从距离振动采集点

不等的地表上空 0.3 m 处自由落体冲击地面。冲击产生振动波传递到安放在同一地点的马赫-曾德干涉仪的光纤信号臂和加速度传感器。其中,加速度传感器将采集到振动加速度传递给上位机,同时作用在光纤信号臂上的振动力使传输光纤信号发生改变,从而使马赫-曾德干涉仪输出的干涉光发生变化,光纤信号采集卡将采集到的干涉光传给上位机。本次实验中,加速度传感器与光纤信号采集卡的采样频率均为 5 kHz,满足奈奎斯特采样定理。

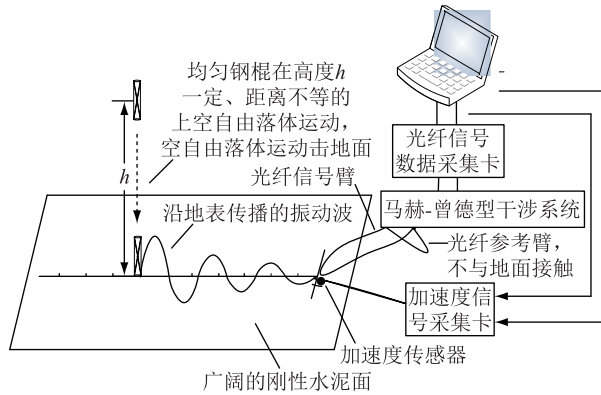


图2 实验原理

Fig.2 Principle of experiment

## 2.2 数据提取过程

基于实验目的是在距离振源不等的地点采集振动加速度与马赫-曾德干涉电压信号,并对比分析两者的传播和衰减规律,所以设计实验步骤如下。

(1) 按图2实验原理所示,分别在距离振源 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm, 200 cm, 240 cm, 280 cm, 320 cm 的各点做实验,每个点均重复 5 次,并用马赫-曾德干涉光纤仪和加速度传感器分别采集干涉电压信号和振动加速度信号。

(2) 将实验采集到的干涉电压信号和振动加速度信号导入 Matlab 软件,通过 Matlab 绘图功能,可以还原冲击时的干涉光生电压及振动加速度信号,图3为其中一次冲击振动时的干涉光生电压时域图,图4为其对应的振动加速度时域图。

(3) 用 Matlab 软件将采集到的干涉光生电压离散信号进行一阶差分处理,得到的是干涉电压变化率信号。第  $n$  点的干涉光生电压变化率  $V(n)$  的数学表达式为:

$$V(n) = U'(n) = \frac{\Delta U(n)}{\Delta T} = \frac{U(n+1) - U(n)}{T_s} = F_s [U(n+1) - U(n)] \quad (10)$$

式中: $U(n)$ ,  $U(n+1)$  分别为相邻的采样  $n$  及  $n+1$  点的干涉光生电压; $T_s$  为采样周期; $F_s$  为采样频率。图5为干涉光生电压率时域图(与图3、图4相对应)。

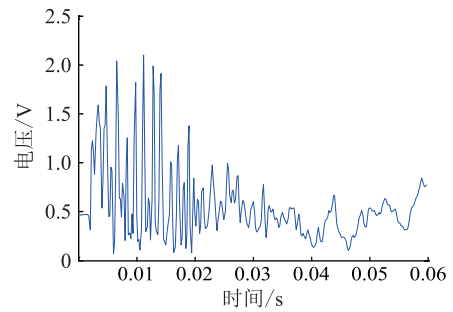


图3 干涉光生电压时域图

Fig.3 Interference voltage time domain diagram

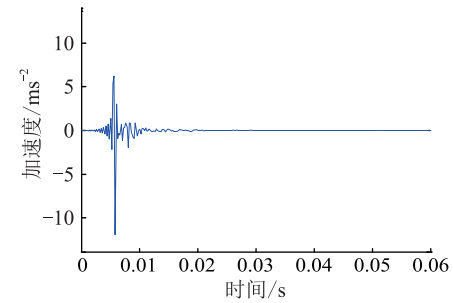


图4 振动加速度时域图

Fig.4 Vibration acceleration time domain diagram

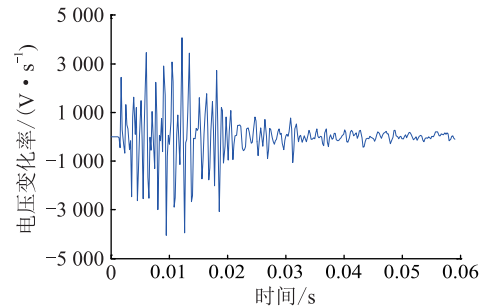


图5 干涉光生电压变化率时域图

Fig.5 Voltage change rate time domain diagram

至此,通过 Matlab 强大的计算功能,即可得到距振源不等的各个测量点的振动加速度峰值  $a_{\max}$  以及对应的电压变化率峰值  $V_{\max}$  数据。

## 2.3 数据处理及分析

根据实验所得数据,描绘出  $a_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 、振源距采集点距离  $r$  相互对应关系,见图6—图8。

从图6可知,振动加速度峰值与振源距采集点距离成负对应关系,且在距离较小时变化较快,距离较大时变化较缓,将振动加速度峰值随距离的变化用负乘幂公式  $a = Yr^{-\gamma}$  进行拟合。拟合后, $Y$  值为 132.174 1, $\gamma$  值为 -0.798 7,相关系数为 0.982 7。相关系数趋近于 1,拟合效果很好,验证了振动波的加速度峰值随传播距离  $r$  的变化规律可用负乘幂公式  $a = Yr^{-\gamma}$  进行拟合。

图7显示,电压变化率峰值与振源距采集点距



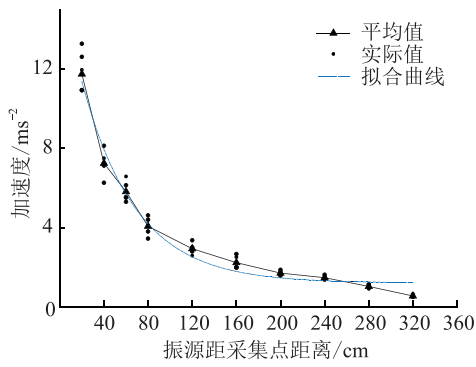


图6 加速度峰值与振源距离变化曲线  
Fig.6 Acceleration peak and vibration source distance

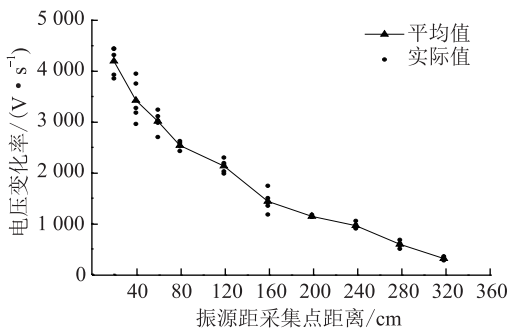


图7 电压变化率峰值与振源距离变化曲线  
Fig.7 Voltage change speed peak and vibration source distance change curve

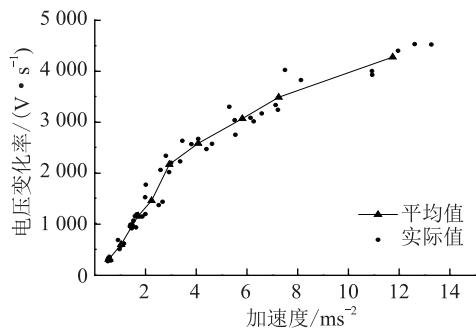


图8 加速度峰值与电压变化率峰值关系  
Fig.8 Relationship between peak acceleration and peak voltage change rate

离关系成负对应关系,在距离较小时变化较快,距离较大时变化较缓;图8显示,电压变化率峰值与振动加速度峰值呈正对应关系,同样也是在距离较小时变化较快,距离较大时变化较缓。综合图7、图8,可以用电压变化率峰值大小作为特征值来判定外力入侵点远近或强弱。

### 3 工程应用

为检验电压变化率峰值大小作为特征值来判定外力入侵点远近、强弱在实际工程上的可行性。文中分别在距离敷设电缆2 m和6 m的地表某处采

集了冲击钻冲击、打桩机打桩、挖掘机运行3种典型外界入侵工况下的马赫-曾德干涉光纤信号。

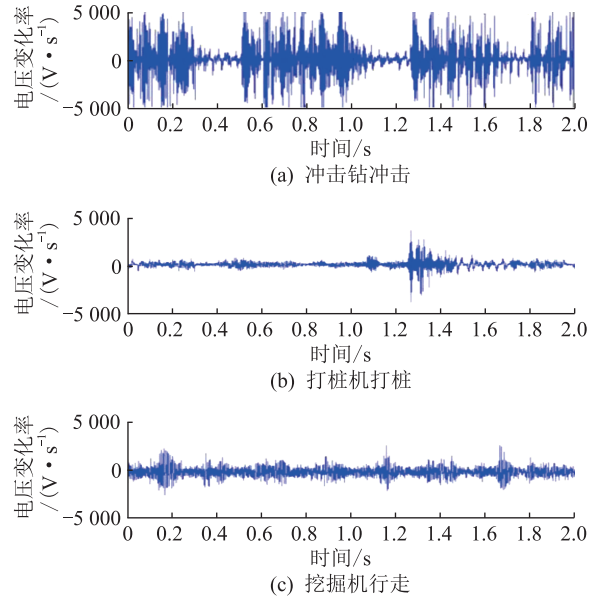


图9 2 m 处的光生电压变化率信号  
Fig.9 Voltage change speed signal at 2 meters

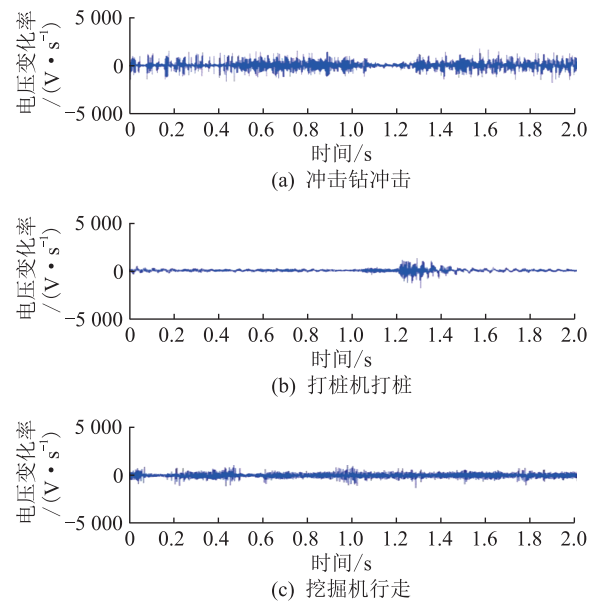


图10 6 m 处的光生电压变化率信号  
Fig.10 Voltage change speed signal at 6 meters

由图9可知,冲击钻冲击时入侵力最大,干涉电压变化率幅值最大;挖掘机行走时入侵力最小,干涉电压变化率幅值最小。所以,当入侵作用点一致时,入侵外力越大,干涉电压变化率幅值就越大。

对比图9、图10发现,同样的入侵外力,距离传感光纤2 m处采集的光生电压变化率幅值明显大于距离传感光纤6 m处采集的光生电压变化率幅值。所以,当入侵外力一致时,距离传感光纤越近,干涉电压变化率幅值越大。

基于此,即可说明电压变化率峰值大小作为特征值来预判入侵外力距离地下电缆的远近或强弱在实际工程应用中可行的。

#### 4 结论

文中在理论分析的基础上,结合实验,对比分析了马赫-曾德干涉波与振动波传播和衰减规律以及二者之间的关系,得到以下结论:

(1) 在刚性水泥地表,振动波在近处衰减快,远处衰减慢,在刚性水泥地表传播的振动波的加速度峰值随传播距离  $r$  的变化规律可用负乘幂公式  $a = Yr^{-\gamma}$  进行拟合。

(2) 马赫-曾德干涉电压变化率峰值与振动力大小呈正对应关系,可以用电压变化率峰值大小作为特征值来预判入侵外力距离地下电缆的远近或强弱。

上述结论可适用于采用马赫-曾德干涉光纤传感技术的中低压电缆配电网防外力预警系统。对于敷设较深的高压电缆配电网是否适用仍需试验验证,下步可研究沿地基垂直向下传播的振动波与马赫-曾德干涉波之间规律。

#### 参考文献:

- [1] 牛文楠, 张金平, 唐会东, 等. 配电网电缆沟综合布防系统开发[J]. 广东电力, 2015(6):107-112.  
NIU Wennan, ZHAO Jinping, TANG Huidong, et al. Development of integrated deployment system for powerdistribution cable trench[J]. Guangdong Electric Power, 2015(6):107-112.
- [2] 唐海. 地形地貌对爆破振动波影响的实验和理论研究[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007.  
TANG Hai. Experimental and theoretical study on the influence of topography on blasting vibration waves [D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics), 2007.
- [3] 夏红光, 陆丹丹. 长距离海缆线路复役引起的主变无功倒送现象分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(6):25-29.  
XIA Hongguang, LU Dandan. Reversed reactive power analysis of main transformer caused by recommission of long submarine cable lines[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(6):25-29.
- [4] 金尚儿, 刘刚. 110 kV 电缆击穿振动波在电缆支架间的传播特性研究[J]. 电线电缆, 2015(2):6-9.  
JIN Shang'er, LIU Gang. 110 kV cable breakdown vibration wave propagation characteristics of research between the cable-bracket[J]. Electric Wire and Cable, 2015(2):6-9.
- [5] 陶连金, 张波, 王文沛, 等. 冲击作用下地层振动衰减规律的现场试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4):33-39.  
TAO Lianjin, ZHANG Bo, WANG Wenpei, et al. Field-test research of vibration attenuation rules in complex formation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(4):33-39.
- [6] 陈向阳, 郭冰鑫, 谢玲霞, 等. 砂土地基强夯影响因素及振动规律的现场试验研究[J]. 石油工程建设, 2016, 42(3):64-68.  
CHEN Xiangyang, GUOBingxin, XIE Lingxia, et al. Field teston influencing factors and vibration law of dynamic compaction for sand foundation[J]. Petroleum Engineering Construction, 2016, 42(3):64-68.
- [7] FUYUKI M, NAKANO M. Finite difference analysis of rayleigh wave transmission past an upward step change [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, 74(3):893-911.
- [8] 向国威, 叶冠林, 王建华. 冲击振动在砂土中传播的模型试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1):136-141.  
XIANG Guowei, YE Guanlin, WANG Jianhua. Experimental investigation on propagation of impact load induced vibration in sandy soil[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(1):136-141.
- [9] 刘刚, 金尚儿, 黄嘉盛. 10 kV XLPE 电缆击穿振动在砂土中的传播规律 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(8):34-38.  
LIU Gang, JIN Shang'er, HUANG Jiasheng. Propagation law of 10 kV XLPE breakdown vibration in sand[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(8):34-38.
- [10] 朱琳. 分布式光纤管道安全预警信号处理方法的研究[D]. 天津:天津大学, 2009.  
ZHU Lin. Research on the processing method of distributed optical fiber pipeline security early warning signal [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [11] 王思远, 娄淑琴, 梁生, 等. M-Z 干涉仪型光纤分布式扰动传感系统模式识别方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8):2613-2618.  
WANG Siyuan, LOU Shuqin, LIANG Sheng, et al. Pattern recognition method of fiber distributed disturbance sensing system based on M-Z interferometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8):2613-2618.
- [12] 安阳, 靳世久, 冯欣, 等. 基于相干瑞利散射的管道安全光纤预警系统[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015(1):70-75.  
AN Yang, JINShijiu, FENG Xin, et al. Pipeline security optical fiber security pre-warningsystem based on coherent rayleighscattering[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology), 2015(1):70-75.
- [13] 王越冬. 基于混合特征提取的光纤周界安防系统入侵识别方法研究[D]. 天津:天津大学, 2017.  
WANG Yuedong. Research on intrusion identification method of fiber perimeter security system based on hybrid feature extraction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [14] 刘嵘, 沈庆河, 刘辉, 等. 基于 Mach-Zehnder 原理的分布式光纤振动监测系统[J]. 电气应用, 2015(13):162-165.  
LIU Wei, SHEN Qinghe, LIU Hui, et al. Distributed optical fiber vibration monitoring system based on Mach-Zehnder prin-

- inciple [J]. *Electrical Application*, 2015(13): 162-165.
- [15] KERSEY A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology [J]. *Optical Fiber Technology: Materials, Devices and Systems*, 1996, 2(3):291-317.
- [16] 柴天娇. 全光纤防区型智能周界监控技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.  
CHAI Tianjiao. Research on all-fiber zone-type intelligent perimeter monitoring technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [17] COLE J H, DANVER B, BUCARO J A. Synthetic-heterodyne interferometric demodulation [J]. *Microwave Theory & Techniques IEEE Transactions on*, 1982, 30(4):540-543.
- [18] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 国防工业出版社, 2001.

WANG Huiwen. Optical fiber sensing technology and application [M]. National Defense Industry Press, 2001.

作者简介:



覃欣

覃欣(1988),男,硕士在读,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断(E-mail: 254645162@qq.com);

朱宁西(1964),女,硕士,副教授,研究方向为电工理论与新技术(E-mail: nxzhu@scut.edu.cn);

刘刚(1969),男,博士,副教授,研究方向为智能高压电网,过电压及其防护,电力设备外绝缘。

## Analysis and experiment of surface vibration characteristics of underground cables by Mach-Zehnder interference detection

QIN Xin, ZHU Ningxi, LIU Gang, ZHENG Wencheng, HU Chuanliang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to improve the working efficiency of Mach-Zehnder interference fiber optic sensing technology applied to the field of underground urban medium and low voltage cable anti-external force damage warning, it is necessary to clarify the relationship between the interference voltage signal and its vibration force. Firstly, the paper theoretically analyzes the relationship between the interference voltage and the vibration force, and points out that when the external environment is certain, the rate of change of the interference voltage is only related to the vibration force. On this basis, the design experiment is carried out to study the relationship between the vibration wave propagated on the rigid cement surface and the interference voltage signal, and the propagation and attenuation laws of the vibration wave and the interference voltage signal are compared and analyzed. The results show that the peak value of Mach-Zehnder's interferometric voltage change has a positive correlation with the magnitude of the vibration force. The peak value of the voltage change speed can be used as the feature quantity to predict the distance or strength of the intrusive external force from the underground cable.

**Keywords:** optical fiber sensing technology; photovoltaic voltage; shock vibration; attenuation; acceleration; Mach-Zehnder interferometer

(编辑 钱悦)