

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.018

全光纤微风振动监测传感器研制

陈文轩¹, 覃兆宇², 潘哲哲², 沈 杨²

(1. 武汉市第十五中学, 武汉 430070; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 笔者研究了基于光纤传感原理的输电线路微风振动在线监测技术,通过理论计算验证了以植入光纤光栅的悬臂梁为主体结构的新型无源传感器设计的可行性,依据计算结果指导成功试制出首个光纤光栅式微风振动监测传感器,同时根据光纤光栅的应力变化与导线微风振动中振幅及频率的变化情况对传感器进行了标定。标定后的系统经过实验室试验以及实际挂网运行验证可有效检测微风振动,并且文中设计的传感器完全满足频率为0~150 Hz、振幅为0~0.6 mm的输电线路微风振动监测规程。

关键词: 光纤光栅; 无源传感; 微风振动监测; 应力监测

Development of Fiber-grating Breeze Vibration Monitoring Sensor

CHEN Wenxuan¹, QIN Zhaoyu², PAN Zhezhe², SHEN Yang²

(1. No.15 Middle School of Wuhan, Wuhan 430070, China;

2. Wuhan NARI Limited Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper studies the on-line monitoring technology of aeolian vibration in transmission lines based on optical fiber sensing method. A new passive sensor with main structure of embedded FBG cantilever beam is verified feasible and the first fiber grating breeze vibration monitoring sensor is developed successfully according to the calculation results. The sensor can be calibrated through relationship between aeolian vibration frequency, amplitude change and the change of FBG stress. And the designed system is tested to be effective to measure breeze vibration and the sensor can finally meet the monitoring regulation with frequency 0 to 150 Hz and the amplitude 0 to 0.6 mm.

Key words: fiber-grating; passive sensor; breeze vibration monitoring; stress monitoring

0 引言

输电线路微风振动是影响输电线路安全运行的重大隐患之一^[1-2]。导线在微风的作用下会处于一种持续振动状态,这种状态会造成导线、地线疲劳断股、断线以及杆塔构件损坏;因而许多学者研究了输电线路防振措施^[3-4],进一步指导线路的防振设计,以减少因微风振动造成的损失。然而,各种防振设计需要根据现场导线在微风下的振动频率和振幅以调整防振措施参数,这些数据又是实变的。因此,对输电线路的微风振动进行在线实时监测意义重大^[5]。

国内外对微风振动已展开了大量研究,目前国内外对微风振动已展开了大量研究,国外普遍采用能量平衡原理来评价导线振动的情况,国际大电网会议确定了用能量平衡法计算微风振动具有可行性^[6],但微风振动的复杂性导致了数值分析方法无法很好的实际应用^[7]。现有的导线和地线微风振动在线监测装置主要以传统的传感器为敏感元件测量线路的振动^[8]。如采用电磁式振动传感器,利用振动时磁阻大小的变化反应振动振幅,但是由于传感器本身依据电磁感应原理设计,导线上的电压波动和负荷电流的变化都会对传感器测量数据有较大影响。因此,在传感器后端增加了低通滤波器,适当减小了测量误差^[9]。但这些传统传感器存在一些缺

收稿日期:2015-12-12; 修回日期:2016-01-17

基金项目:国家自然科学基金(61572210)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (61572210).

点:如监测装置易受电磁干扰影响。长期运行在恶劣的环境下,线性度和稳定性下降较严重等^[10]。此外,输电线路在线监测系统的问题时有发生。如采用电磁式振动传感器,利用振动时磁阻大小的变化反应振动振幅,但是由于传感器本身依据电磁感应原理设计,导线上的电压波动和负荷电流的变化都会对传感器测量数据有较大影响^[11]。导线监测单元的供电方式受外界环境影响较大,供电、通讯不稳定和维护困难的问题依旧无法得到很好的解决^[12]。

光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高等优点^[13]。文中所述微风振动传感器创新采用光纤光栅传感技术,结合光纤传输技术,成功研制出基于光纤光栅的微风振动监测传感器。随后,设计了微风振动振幅及频率监测采集系统,实现了导线微风振动的实时在线监测;并对光纤光栅式微风振动监控系统进行了标定,通过频率标定试验及振幅标定试验,确定了光纤光栅的应变与频率及振幅的数值关系,从而为之后的挂网运行及导线微风振动状态分析提供了依据。

1 基本原理简述

架空输电线路微风振动是导致导线疲劳损伤的主要原因,导线动弯应变是表示疲劳损伤程度的一个主要参数,但在现行条件下无法直接测量这个参数^[14]。1966年IEEE制定的“导线振动测量标准化”明确规定采用弯曲振幅法。主要原因如下:①在现有检测水平下,弯曲振幅比较容易获取;②弯曲振幅和动弯应变间是正比关系,且系数是一个与档距、振动频率等无关的参数^[15]。

1.1 弯曲振幅法定义

下面给出根据弯曲振幅检测动弯应变的方法:首先确定线夹出口3的位置,随后找出与3水平距离为89 mm处电线位置4,进而计算弯曲振幅 Y_b ,见图1,最后根据 Y_b 计算线夹出口3处的动弯应变。此方法采用电线相对于线夹处的振幅来衡量微风造成导线振动时的危害程度,并且实践证明此方法行之有效^[16]。

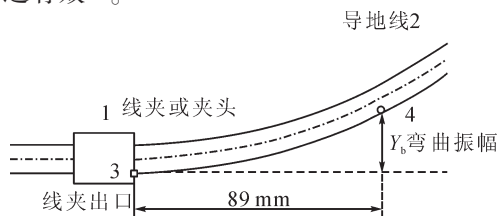


图1 弯曲振幅法原理图

Fig. 1 Diagram of bent amplitude method

下面给出在振幅较小的情形下,动弯应变与弯

曲振幅间的关系,见式(1)

$$\varepsilon_b = \frac{p^2 d Y_b}{2(e^{-pa} - 1 + pa)} \quad (1)$$

式(1)中: ε_b 为夹出口处的动弯应变, $\mu\varepsilon$; d 表示最外层线股股径,mm; Y_b 为距离线夹出口89 mm处的弯曲振幅,mm; $p^2 = T/(EI_{\min})$ 为曲振幅,mm; T 为试验期间导线平均运行张力,N; $EI_{\min}$ 为导线最小刚度, $N \cdot mm^2$ 。

1.2 光纤光栅式振动传感器工作原理

光纤光栅式振动传感器最常见的实现方式为悬臂梁方式,理论上它与上文介绍的弯曲振幅法有着相似的原理^[17]。实质则是将振动方向的位移状态量实时转化为垂直方向的应变变量,这与光纤光栅应变传感器类似。应变传感器是将应力方向的应变变量转化为平行方向的应变变量,然而应变传感器通常不会考虑频率响应特性,只是考虑静态响应,而振动传感器需要考虑频率响应特性^[18]。

在一般情况下,这种应变变量都很微小,随之产生的光纤光栅波长漂移量也很微小,有时难以检测,为了获得较大的应变变量,通过应变增敏技术设法使传感头在相同应力作用的情况下获得较大的应变变量。为此设计了如图2中所示的悬臂梁式传感器结构。

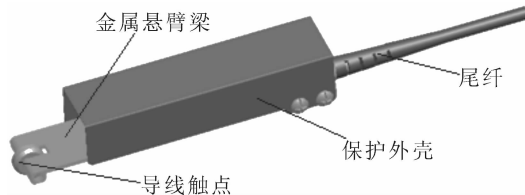


图2 悬臂梁传感器结构示意图

Fig. 2 Diagram of cantilever beam sensor structure

图2中悬梁臂由热双金属材料制成,分为固定端和滑动端。其中固定端与基座相连,滑动端安有滑轮可以移动,光纤光栅安装在固定端附近。其振动检测原理如下所述:固定端振动引发滑动端振动,造成悬臂梁应变,引起固定端光纤光栅拉伸或者挤压,光栅的形变会造成其布拉格波长的改变,通过检测此变化量推算振动频率及振幅。

由上述分析可知,为计算振动情况需获取悬臂梁的应力和形变,首先要计算梁弯曲时的横截面的内力。此内力一般包括剪力 Q 和弯矩 M ,这两个参量都会改变梁的强度。而研究表明,在梁臂 $L/L/h \geq 5$, h 为梁的厚度)较大时,可以忽略剪力的作用^[19]。典型的悬臂梁弯矩示意图见图3。任意横截面上的弯矩 M 与此截面到固定端距离 x 间的线性关系通过弯矩方程描述,见式(2)。

$$M = P(L - x) \quad (0 \leq x \leq L) \quad (2)$$

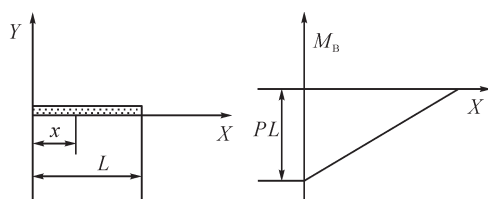


图3 梁的弯矩图

Fig. 3 Bending moment diagram of cantilever beam

如前所述,笔者只考虑弯矩作用,而忽略剪力,这称为纯弯曲,见图4。

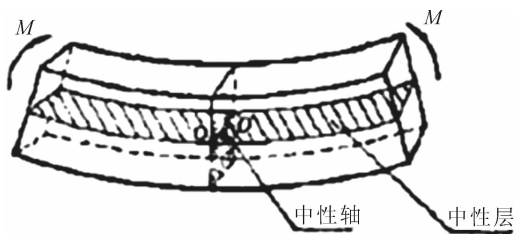


图4 梁的纯弯曲

Fig. 4 Pure bending of cantilever beam

可以计算在纯弯曲时悬臂梁任意一横截面上各点应力大小,计算公式为

$$\sigma = E \frac{y}{\rho} \quad (3)$$

式(3)中: E 为杨氏模量; y 为截面上该点到中性轴的距离; ρ 为此横截面所在处的曲率半径。

从式(3)可以看出,各点应力 σ 是 y 的线性函数;中性轴上所有点的应力为0;与中性轴等距离的各点应力相同;与中性轴距离最远处 $y_{\max}$ 有最大正应力 $\sigma_{\max}$ 。根据正比关系可以将任意一点的正应力 σ 用最大应力 $\sigma_{\max}$ 表示

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \frac{y}{y_{\max}} \quad (4)$$

纯弯曲情形下,横截面弯矩为垂直于截面内力对中性轴 Z 的力矩合,而此时横截面上只有正应力存在。若定义距离中性轴 y 处应力为 σ ,该应力作用面积为 dA ,则此微面上的内力可表示为 σdA ,那么该点作用在轴 Z 的力矩大小为 $dM = y\sigma dA$ 。故截面上的弯矩为

$$M = \int_M dM = \int_A y\sigma dA \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得

$$M = \frac{\sigma_{\max}}{y_{\max}} \int_A y^2 dA \quad (6)$$

定义 $I_Z = \int_A y^2 dA$ 为截面对中性轴 Z 的轴惯性矩,是一个仅与截面相关的量,故式(6)可替代为

$$M = \frac{\sigma_{\max}}{y_{\max}} I_Z \quad (7)$$

通过式(7)可推到最大应力

$$\sigma_{\max} = \frac{M y_{\max}}{I_Z} \quad (8)$$

同理,将式(8)带入式(4)可得截面上任意一点的正应力计算公式

$$\sigma = \frac{M y}{I_Z} \quad (9)$$

由上述推导,悬臂梁上各点的最大弯曲正应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{P(L-x)y_{\max}}{I_Z} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,当 x 最小,即靠近悬臂梁固定端时,能够获取最大的弯曲应力,如果在此处安装光纤光栅能发生最大限度的拉伸或者挤压,有利于提高传感器的灵敏程度。

根据胡克定律可以进一步计算悬臂梁上各点的应变

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} \quad (11)$$

将式(10)代入得

$$\varepsilon_{\max} = \frac{P(L-x)y_{\max}}{EI_{\max}} \quad (12)$$

通过式(12)可以看出,悬臂梁的最大应变发生在悬臂梁的固定端。因此将光纤光栅传感器安装在此处,可克服应变微小而难以监测的问题。

2 光纤光栅微风振动监测传感器的研制

为达到规定的传感精度,光纤光栅微风振动传感器的研制过程需要注意许多影响性能的因素,包括制作材料的选择、尺寸、粘贴剂等^[20],文中将对这些参数的选取进行详细介绍。

2.1 传感器的材质选择和尺寸设定

悬臂梁作为传感器的主体,其制作材料直接影响着传感器的检测性能。笔者选取了一些常见的弹性材料,并对比了它们的主要性能,见表1。

表1 几种弹性材料的主要性能比较

Table 1 Comparisons of main properties for different elastic materials

名称	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	膨胀系数($\times 10^{-6}$)
45号钢	200	360	11.0
65Si2MnWA	200	1 700	11.0
1Cr18Ni9Ti	200	200	16.6
铍青铜	131	1 250	16.7
Ly12 硬铝	72	280	23.0
30CrMnSiA	210	900	11.0
普通碳钢	206	335~410	12.0

因悬臂梁须用弹性好、刚性好、能耐长期振动

的材料,综合考虑各种金属材料加工性能、腐蚀性、易取性及成本等,文中最终选择 1Cr18Ni9Ti 作为制作悬臂梁的材料。考虑到加工成本和加工难度,外壳采用不锈钢材质。悬臂梁的尺寸为 109.5 mm×21 mm×1.5 mm,所选用的材料为 1Cr18Ni9Ti,参考图 5。

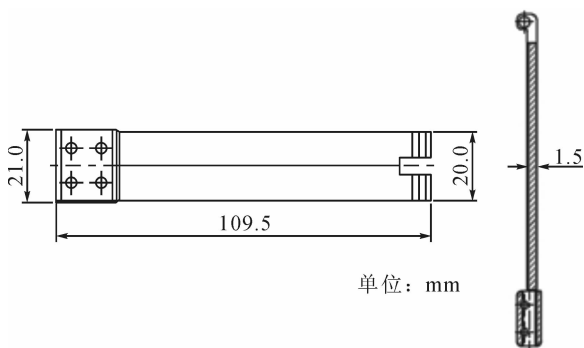


图5 悬臂梁尺寸图

Fig. 5 Size of cantilever beam

2.2 粘贴剂的选择

粘贴剂的优劣直接影响光纤光栅微风振动传感器的性能。一方面,粘贴剂防水、耐腐蚀及粘贴强度等方面的性能决定了光纤光栅能否持久有效地固定在悬臂梁上,直接影响了传感器的稳定性;另一方面,合适的粘贴剂具有抑制迟滞效应、减小传感器的零点漂移、延长传感器寿命等优势。

文中所设计的传感器要粘贴在悬臂梁外表面的中心线处,选择的粘贴剂要硬度适中。如果粘贴剂太稀会造成光纤光栅和悬臂梁因粘贴不牢固而脱离,如果太硬易导致传感器随着测量杆的移动而断裂。为此,文中选自比较了一些常用粘贴的性能,见表 2。

表2 几种常用粘贴剂性能比较

Table 2 Comparisons of main properties for different binding agents

名称	成分	使用温度/℃	特点
硝化纤维	硝化纤维素溶剂	-50~80	适用精度低、防潮差等场合
环氧树脂	家具硫酞酮胺、酚醛环氧、加酚、醛甲苯二酚	-60~50	耐水、耐油、绝缘性能好、但是固化需要时间
有机硅	有机硅树脂、加填料	—	使用温度高
高分子液体密封胶	丁腈酚醛	-40~250	防水,密封性好,耐热

综合考虑成本以及光纤光栅与悬臂梁能够刚性粘合,文中最终选择环氧树脂实现粘贴,因具有以下优势:首先粘贴能力强,环氧树脂内有环氧基、醚基等,这些基团能够在接触面产生电磁力,增强

粘合牢固程度;其次,环氧树脂固化后具有高机械强度、良好的耐老化和绝缘特性等特点;最后,可以根据实际需求通过加热方式改变固化时间,最少可缩短到几分钟。

2.3 光纤光栅的粘贴

由上述分析可知,影响振动测量精度的因素包括将悬臂梁位置偏移量精确转换为光纤光栅布拉格波长的改变量,以及光纤光栅与悬臂梁能够刚性粘合。文中选取环氧树脂胶进行粘贴,粘贴方式介绍如下:

1)粘贴光纤。①使用清洁剂将悬臂梁外表面清洗干净,以免污渍影响粘贴效果;②根据 2:1 比例均匀混合环氧树脂胶及其固化剂;③将②中配好的粘贴剂注射在施加好预应力的光纤光栅上,将其固定在干净的悬梁臂中心线处,外部光纤使用套管保护;④将粘贴好光纤光栅的悬臂梁放置在干燥通风处自然固化。

2)光纤的熔接和保护。由传感器引出的裸光纤与光纤跳线熔接,并且将裸光纤引入套管加以保护,使得光纤不至于因外力作用而折断。最后使用光纤光栅解调仪测试光纤光栅是否完好,熔接点信号是否通顺。

2.4 解调系统的设计

现有光调制解调仪大部分使用 MOI(美国微光)公司开发的产品,波长采样频率在 10 Hz 以下,无法满足 0~150 Hz 的微风振动监测,且要能尽可能精确测量振动的幅度,解调仪的采样频率需大于等于 10 倍的振动频率,因此,需自主开发一款反应速度快、解调范围大、输出线性度好、成本较低、使用方便的光调制解调设备。

解调原理示意图见图 6。

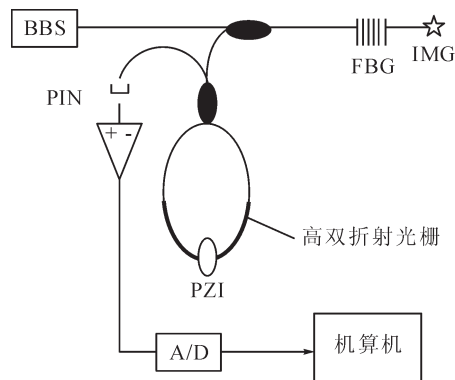


图6 解调原理示意图

Fig. 6 Diagram of demodulation method

由宽带光源 BBS 发出的信号光经 3 dB 耦合器入射到光纤光栅上,信号光经 FBG 反射会产生窄带光,随后窄带光经过高双折射光纤环境,光信号由

光电探测器接收后转换为电信号, PIN 部分输出的电信号经放大、A/D 转换等电路把数据送到计算机处理。系统中一些模块的特点如下所述: BBS 光源产生的光信号平坦度高、功率稳定, 经由 FBG 反射后的光信号功率也比较稳定, 有利于提高系统检测精度和稳定性; 此外, 文中使用高精度 PIN 光电探测器和 16 位的 A/D 转换器, 这样能保证系统有高精度和分辨率。

文中所设计的系统通过光纤探测和传输, 因此影响系统解调速度的因素主要是光电探测器的带宽和 A/D 转换器的转换速度等。文中使用 1 GHz 的 PIN 光电探测器和转换率 200 kHz 的 A/D 转换器, 因此该系统可以检测的最高振动频率能达到 20 kHz。

3 光纤光栅式微风振动监测传感器的标定

3.1 实验平台搭建

在光纤光栅振动传感器制作及系统解调设计好后, 文中对系统性能和算法可行性进行了测试。实验室光纤光栅式微风振动传感器振动测试系统结构见图 7, 整个测试系统包括: 电磁式测振仪、光纤光栅振动传感器、振动台固定底座、光纤光栅解调仪等。

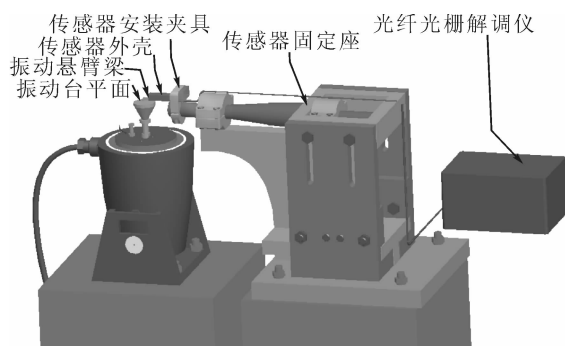


图 7 实验室光纤光栅式微风振动传感器振动测试系统结构

Fig. 7 Test system structure of fiber grating breeze vibration monitoring sensor in laboratory

将光纤光栅微风振动传感器固定端固定在振动台固定底座上, 传感器的另一端压在振动台的振动端子上, 电磁式测振仪设定振动幅值和频率, 实验过程中, 微风振动监测系统实时输出测得的振动幅值和频率的大小, 通过对比设定振动幅值、频率与输出幅值、频率来验证系统的准确性。

3.2 微风振动算法及实验数据分析

一般高压线路微风振动信号呈现周期性变化, 光纤光栅监测系统以 1.5 kHz 采集频率采集 1 024 个离散的光纤光栅中心波长点。通过快速 Fourier 变换

和峰值算法分析这 1 024 个离散点可以准确地计算出振动频率和幅度。

光纤光栅微风振动传感器在测试过程中, 根据微风振动的实际情况将电磁式测振仪振动信号的频率设置为 1~150 Hz, 振动幅值设置为 0.1~1.3 mm。在电磁式测振仪振动频率为 80 Hz, 振动幅度为 0.3 mm 下得出的数据曲线见图 8。

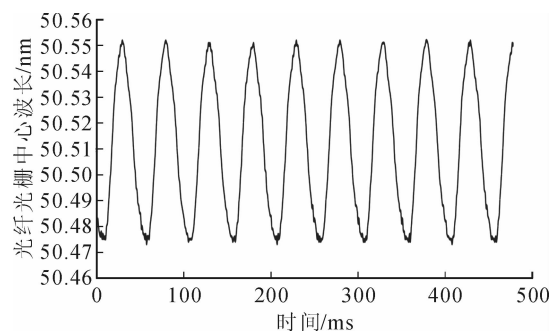


图 8 光纤光栅传感器的振动曲线

Fig. 8 Vibration curve of fiber grating breeze vibration monitoring sensor

在振动振幅为 0.6 mm 时, 在不同频率下光纤光栅微风振动监测系统和电子式微风振动传感器实时输出的振动频率和幅度见图 9。通过对比实验数据及历史电子式微风振动传感器数据, 在振幅为 0.6 mm 时, 两种方法监测到的频率值精度相似 (图 9 中显示为近似重合的曲线), 但是光纤光栅传感器精度较高, 误差小于 0.2%, 而在振幅监测准确性等方面, 光纤光栅传感器精度更高, 误差小于 3.3%, 优于普通电子式微风振动传感器。其主要原因是由于电子式的监测设备在强磁场环境下, 会产生很强电磁干扰, 电路处理单元很容易将噪声信号误认为是波峰值或者波谷值, 导致频率和幅度都产生误差。由图 9 可知, 文中设计的光纤光栅传感器能满足频率 0~150 Hz、振幅 0~0.6 mm 的规程需求。

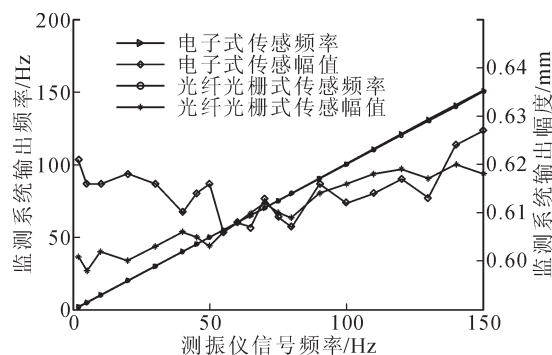


图 9 不同类型传感器测量值对比

Fig. 9 Comparisons of monitoring results in different sensors

4 光纤光栅式微风振动监测传感器的实际挂网运行

光纤光栅式微风振动传感器安装在输电线路高压端的导线上,传感器采用串联方式与并联方式连接。考虑到固定夹具的电场集中对导线的影响,专门设计了圆形的固定夹具,外围进行倒角设计,使电场分布尽量均匀,不会造成尖端放电等现象。在光纤光栅式微风振动传感器出头 5~10 cm 的地方使用扎丝进行固定,线路上各个固定点间隔距离在 0.5~1 m 之间,使用专用夹具在杆塔上固定,杆塔上各个固定点间隔距离在 2~3 m 之间,固定至光缆箱后,丈量光缆到达光交箱的距离,安装完毕后尾部光缆会有一定的余长,将多出的光缆盘附在光缆箱内固定,最后接入光交箱,入口用光纤泥密封保护。

文中设计的光纤光栅式微风振动传感器已于 2013 年 5 月 12 日在内蒙古自治区通辽市科河线 12 号杆塔上进行挂网试运行。光纤光栅式微风振动传感器安装于导线线夹出口 89 mm 处,信号通过植入在复合绝缘子芯棒内的光纤通道传至解调系统进行波长解调,实时监测导线振动状态。安装在输电线路上的光纤光栅传感器见图 10。

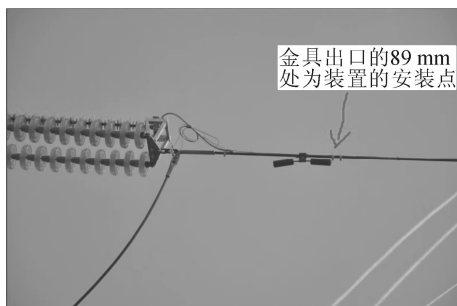


图 10 安装在输电线路上的光纤光栅传感器

Fig. 10 Fiber grating breeze vibration monitoring sensor installed on transmission line

光纤光栅式微风振动传感器挂网运行后,在 2013 年 12 月 12 日数据中心连续 10 次监测到传感器的振动频率和幅值绘制成的曲线见图 11,通过图 11 可以看出,振动频率曲线和幅值曲线有强线性关系,其皮尔森相关系数为 0.999 9。通过挂网运行,光纤光栅式微风振动传感器能够真实反映出导线微风振动的情况,可实现导线微风振动的实时监测。

5 结语

通过输电线路微风振动的室内模拟试验及挂网运行的实验结果分析,采用光纤光栅式微风振动

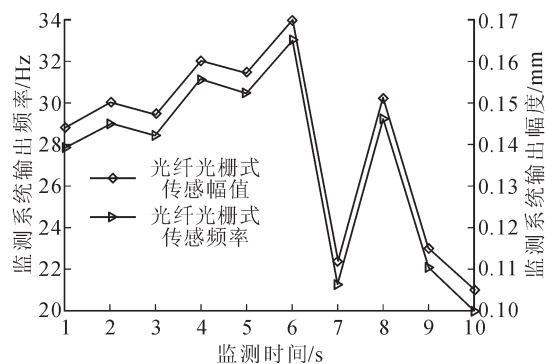


图 11 监测系统所监测的数据

Fig. 11 Data of monitoring system

监测传感器结构设计正确,可以准确测量振动频率为 0~150 Hz,振幅为 0~0.6 mm 的振动信号,频率误差 <1%,振幅误差 <3%。符合《输电线路状态监测装置通用技术规范》,能够有效地监测输电线路微风振动,完全能够满足电力系统对于输电线路微风振动的监测需要。

参考文献:

- [1] 张会韬. 架空输电线路微风振动危害的实例及现场测振的重要性[J]. 电力建设, 1997, 25(9): 40-42.
ZHANG Huitao. Examples of aeolian vibration harmfulness on overhead transmission lines and importance of its field measurement[J]. Electric Power Construction, 1997, 25(9): 40-42.
- [2] 杨立秋, 李海花, 高玉竹. 架空输电线路微风振动危害分析[J]. 中国科技信息, 2008(12): 54-55.
YANG Liqiu, LI Haihua, GAO Yuzhu. The analysis of harmfulness about aeolian vibration on transmission line[J]. China Science and Technology Information, 2008(12): 54-55.
- [3] 张兴旺. 架空线路的振动分析及防振措施综述[J]. 南昌水专学报, 1994, 13(1): 51-55.
ZHANG Xingwang. Review of vibration analysis and anti-vibration measures for overhead transmission lines[J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1994, 13(1): 51-55.
- [4] 潘龙斌, 陈汝英. 架空输电线路导、地线微风振动成因和防控措施探讨[J]. 广西电力, 2013, 36(4): 75-78.
PAN Longbin, CHEN Ruying. Discussion on aeolian vibration of conductor and ground line of overhead transmission line and countermeasures[J]. Guangxi Electric Power, 2013, 36(4): 75-78.
- [5] 黄新波, 赵隆, 舒佳, 等. 输电线路导线微风振动在线监测技术[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1863-1870.
HUANG Xinbo, ZHAO Long, SHU Jia, et al. Online monitoring conductor aeolian vibration of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1863-1870.
- [6] 潘忠华, 徐乃管, 陈露娟. 悬垂线夹出口处动弯应变与弯

- 曲振幅关系的探讨[J]. 电力技术, 1982(12): 14-19.
- PAN Zhonghua, XU Naiguan, CHEN Loujuan. The research about move bending stress and bending amplitude near to the export of trailer wire clip[J]. Electric Power, 1982(12): 14-19.
- [7] 黄新波, 张国威. 输电线路在线监测技术现状分析[J]. 广东电力, 2009, 22(1): 13-20.
- HUANG Xinbo, ZHANG Guowei. Status quo analysis of online monitoring techniques of transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(1): 13-20.
- [8] 林钧岫, 王文华, 王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(6): 931-936.
- LIN Junxiu, WANG Wenhua, WANG Xiaoxu. Study of application and evolution of fiber grating sensors technique[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(6): 931-936.
- [9] 周雪芳. 光纤布拉格光栅振动传感技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- ZHOU Xuefang. Study of fiber Bragg gratings vibration sensing technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [10] 单耀祖. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 10-135.
- SHAN Yaozu. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 10-135.
- [11] 吴蓉, 杨军, 李晓东, 等. 输电线路在线监测系统的电源解决方案[J]. 电源技术, 2012, 36(5): 709-710.
- WU Rong, YANG Jun, LI Xiaodong, et al. Power solutions of high-voltage on-line monitoring equipment[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(5): 709-710.
- [12] 蒋建, 李成榕, 马国明, 等. 架空输电线路覆冰监测用FBG拉力传感器的研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3028-3034.
- JIANG Jian, LI Chengrong, MA Guoming, et al. Development of FBG tension sensor applied to ice monitoring of overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3028-3034.
- [13] 马国明, 全江涛, 李成榕, 等. 输电线路覆冰荷载监测用光纤光栅称重传感器的设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2225-2230.
- MA Guoming, QUAN Jiangtao, LI Chengrong, et al. Design of the fiber bragg grating load cell applied to icing monitoring of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2225-2230.
- [14] 丁嘉文, 唐俊, 胡保民. 无源光网络技术用于输电线路监测的研究[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 91-95.
- DING Jiawen, TANG Jun, HU Baomin. Application of PON technology to overhead transmission line monitoring[J]. Electric Power, 2012, 45(12): 91-95.
- [15] 黄新波, 赵隆, 舒佳, 等. 输电线路导线微风振动在线监测技术[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1863-1870.
- HUANG Xinbo, ZHAO Long, SHU Jia, et al. Online monitoring conductor aeolian vibration of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1863-1870.
- [16] 薛泽利, 吕国辉. 光纤光栅应变传感器表面粘贴工艺研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2011, 27(1): 29-32.
- XUE Zeli, LYU Guohui. Study on the surface paste technology of the fiber Bragg grating strain sensor[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2011, 27(1): 29-32.
- [17] 鲍吉龙, 陈莹, 赵洪霞. 嵌入式光纤光栅传感器应力传递规律研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 871-875.
- BAO Jilong, CHEN Ying, ZHAO Hongxia. Research on stress transferring rules for embedded FBG sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(4): 871-875.
- [18] 赵启林, 杨洪, 陈浩森. 光纤光栅应变传感器的温度补偿[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 310-314.
- ZHAO Qilin, YANG Hong, CHEN Haosen. Temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2007, 37(2): 310-314.
- [19] 万里冰, 王殿富. 基于参考光栅的光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. 光电子·激光, 2006, 17(1): 50-53.
- WAN Libing, WANG Dianfu. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor based on reference grating[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(1): 50-53.
- [20] 梁磊, 王艳妮, 刘德力. 粘贴式光纤光栅应变传感器的应变传递分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(10): 144-146.
- LIANG Lei, WANG Yanni, LIU Deli. Strain transferring analysis of pasted strain fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(10): 144-146.

陈文轩(1998—), 男, 目前在武汉市第十五中学就读, 2015年加入国家自然科学基金项目“大数据环境下多传感器网络的信息混合处理方法及在智能电网中的应用”, 在相关老师的指导下从事全光纤微风振动监测传感器的部分研制等工作。

覃兆宇(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高电压试验技术、一次设备在线监测技术、绝缘子检测和外绝缘等方面的研究工作。