

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211670

基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析

杨芳¹, 唐小亮¹, 尹文阔¹, 王敏学²

(1. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511518; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 输电线路风振可能造成线路闪络、断股和金具疲劳损坏等故障, 严重影响电力系统的安全稳定运行, 准确和实时地监测线路的风振情况对灾害预警、故障排除和状态评估意义重大。为了解决传统风振监测手段维护困难、可靠性低等缺点, 提出了一种基于多参量分布式光纤传感的输电线路风振监测装置。首先介绍了分布式光纤传感的基本原理和设备基本结构, 然后利用数值仿真的方法分析了舞动和微风振动时线路的振动频率、幅值特征, 论证了利用分布式光纤监测风振的可行性。实验证明, 该装置能同时监测输电线路沿线各段的风振及线路内部应力变化情况, 其 60 km 内的定位精度为 ± 50 m, 舞动及微风振动频率监测误差分别为 0.07 Hz 和 0.01 Hz。该装置为架空输电线路的风振在线监测提供了新方法。

关键词: 分布式光纤传感; 舞动; 微风振动; 输电线路; OPGW

Analysis of transmission line wind vibration monitoring based on a multi parameter distributed optical fiber sensor

YANG Fang¹, TANG Xiaoliang¹, YIN Wenkuo¹, WANG Minxue²

(1. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Qingyuan 511518, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Wind vibration of transmission lines may cause line flashovers, broken stocks, and fatigue damage to fittings. This poses a great threat to the safe and stable operation of a power system. Accurate and real-time monitoring of wind vibration of lines is of great significance for disaster warning, troubleshooting and status assessment. To overcome the shortcomings of traditional monitoring methods, such as difficulty in maintenance and low reliability, this paper proposes a multi-parameter distributed optical fiber sensor-based wind vibration monitoring device for transmission lines. The numerical simulation method is used to analyze the vibration frequency of the line during galloping and breeze vibration and amplitude characteristics, demonstrating the feasibility of using distributed optical fiber to monitor wind vibration. Experiments show that the device can simultaneously monitor wind vibration and OPGW damage of various sections along the transmission line. The positioning accuracy within 60 km is ± 50 m, and the monitoring errors of galloping and breeze vibration frequencies are 0.07 Hz and 0.01 Hz respectively. It provides a new method for wind vibration online monitoring of the transmission lines.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20198377).

Key words: distributed optical fiber sensing; galloping; wind vibration; power transmission lines; OPGW

0 引言

舞动、微风振动等线路风振现象可能引起电烧伤、金具损伤等, 甚至还会引起断股断线、杆塔

倒塌等严重事故, 严重影响电力系统的稳定运行^[1]。如果可以实时地监测和评估输电线路的风振情况, 并且在故障时快速定位故障位置, 就可以快速恢复输电线路故障, 并针对性地对灾害出现较多地区的线路进行改造^[2]。目前主要的风振监测技术包括加速度传感法、图像处理法、GPS 传感法^[3-6]和光栅传感法^[7], 然而加速器传感法需要安装一系列的加速

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(GDKJXM20198377); 国家自然科学基金项目资助(52077091)

器传感器,且需要软件拟合舞动轨迹,成本较高,准确度也不足;图像处理法依赖视频拍摄器,易受大雾、雨雪的天气影响,可靠性较差;GPS系统基站的修建及日常维护费用高,经济性不足;光纤光栅的传感距离有限,监测线路风振需要多点布设^[8]以形成准分布式光纤监测,施工难度大且维护困难。所以发展能够长距离监测且经济的输电线路新型传感器对长距离输电线路风振的在线监测意义重大。

分布式光纤传感技术(Distributed Optical Fiber Sensing, DOFS)可以实现空间的连续监测,传输距离可达 100 km 以上,利用光时域反射技术,通过监测后向散射光的相位、振幅等进行监测,目前已广泛应用于桥梁、道路和电缆^[9-11]等区域的监测。

目前光纤复合架空地线(Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire, OPGW)的广泛铺设,分布式光纤可以直接利用 OPGW 内的冗余光纤,主机设置在变电站内,安装维护简单,在输电线路监测领域^[12]发展前景广阔。然而,分布式光纤在应用于风振监测方面研究较少且多基于单一参量光纤传感技术^[13-14],无法估计线缆受损情况或覆冰等情况^[15],抗干扰能力较弱。所以,多参量分布式光纤传感技术^[16-17]是提高输电线路全面性和可靠性监测的关键技术。

鉴于此,本文提出了一种基于多参量的分布式光纤输电线路风振监测方法,首先介绍了多参量分布式光纤的原理与基本构造,然后仿真分析了舞动及微风振动时输电线路的振动特性,论证了该设备监测线路舞动及微风振动的可行性,最后在实验室进行了 OPGW 微风振动、舞动和应变实验,结果证明该设备可以实时监测和评估线路的风振及损伤情况,并对线路风振和故障位置进行精确定位。

1 多参量分布式光纤监测基本原理及结构

1.1 分布式光纤传感基本原理

在光纤中不完全均匀的折射率的影响下,在其中传播的光沿着光纤向前后都发生散射,如图 1 所示,监测后向散射光的返回时间 t 后,代入式(1)即可对发生在光纤上的扰动进行定位。

$$L_r = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

式中: L_r 为光纤扰动位置; t 为光信号往返所需时间; c 为光速; n 为光纤的折射率。该定位技术即光时域反射技术。光纤中的散射光分为瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光,其中瑞利散射光最强,布里渊散射光次之,拉曼散射光最弱,如图 2 所示。

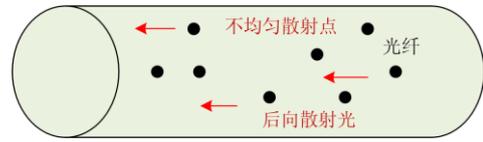


图 1 后向散射光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Rayleigh backscattered light

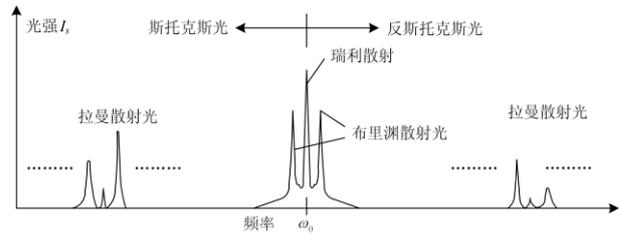


图 2 光纤中的散射光频谱图

Fig. 2 Types of scattered light in optical fibers

布里渊散射光对温度和应力敏感,故布里渊光时域反射仪^[18](Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)可以用于分布式的温度和应力传感,其光频移量与温度和应变的关系如式(2)所示。

$$\Delta f_B = C_\epsilon \Delta \epsilon + C_T \Delta T \quad (2)$$

式中: Δf_B 为布里渊后向散射光的频移量; $\Delta \epsilon$ 和 ΔT 分别为光纤的应变变化量和温度变化量; C_ϵ 和 C_T 分别为布里渊应变和温度系数,在实验室通过实验测试得到 $C_\epsilon = 0.045 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, $C_T = 1.1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 。

在光纤发生振动时,振动区域的光纤折射率会随时间变化,从而改变后向散射光的相位,以实现在线缆振动情况的监测。相位敏感型的瑞利散射光时域反射技术^[19-20](Phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ OTDR)是通过监测光的相位变化来定位振动区域的技术,在光纤某点出现扰动时,该点及其之后的散射点会叠加一个额外的相移,导致电流信号变化,通过两个时刻的后向散射光做差就可以定位振动区域,振动定位原理如图 3 所示。

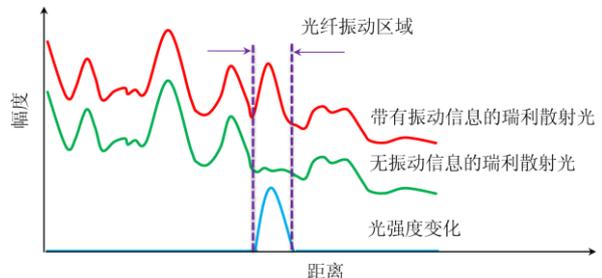


图 3 Φ OTDR 监测与定位振动区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Φ OTDR monitoring and positioning vibration area

1.2 多参量分布式光纤传感主机结构

多参量分布式光纤传感装置结构如图4所示,其中BOTDR、ΦOTDR系统共用一个光源,装置采用窄线宽光源,脉冲调制器采用声光调制器,光调制器将连续光调制为脉冲光,为了增加线路的监测范围,本装置的光放大器采用了拉曼方法与掺铒放大器两级放大模式,增益后光经过带通滤波器进入光环形器中,带通滤波器用于滤除光放大器噪声。

光经过环形器进入OPGW之后其后向散射光再返回环形器进入光耦合器并分为两束光,分别用于BOTDR和ΦOTDR检测。BOTDR采用相干监测的方法,其中布拉格光栅用于滤除瑞利散射光,经过光电转换器后进入信号处理系统,再经过扫频及洛伦兹拟合后得到布里渊频移值。ΦOTDR采用直接检测的方法,因为布里渊散射光强度远低于瑞利散射光强度(大约为3个数量级),可以直接忽略其影响。目前,在理想实验条件下的裸光纤测试得到,该装置的BOTDR部分的传感距离可达80 km,ΦOTDR的传感距离可达120 km,其振动监测范围为0~400 Hz,应变监测范围最大可达5 000 με。

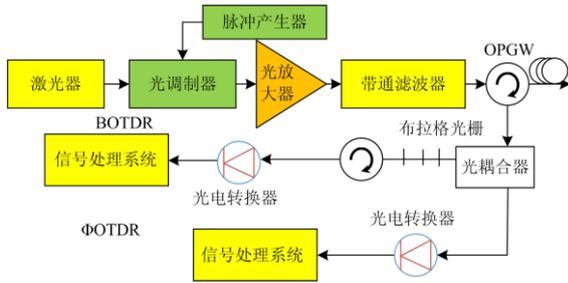


图4 多参量分布式光纤传感光学系统结构

Fig. 4 Structure diagram of multi-parameter distributed optical fiber sensing system

2 分布式光纤的风振监测可行性分析

2.1 输电线路覆冰舞动的数值模拟

冬季,由于线路不规则覆冰导致其在风作用下所受升力不平衡,容易导致线路舞动。覆冰导线舞动三自由度模型^[21-22]如图5所示。

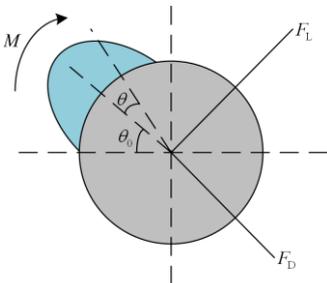


图5 覆冰导线舞动模型

Fig. 5 Model of ice-coated wire galloping

线路舞动的三自由度模型方程求解十分复杂,为了简化计算文中忽略扭转自由度,列出两自由度方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} (m+m_i)\frac{d^2z}{dt^2}+C_z\frac{dz}{dt}+T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2z= \\ (m+m_i)g+F_L\cos\alpha_1-F_D\sin\alpha_1 \\ (m+m_i)\frac{d^2x}{dt^2}+C_x\frac{dx}{dt}+T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2x= \\ F_L\sin\alpha_1+F_D\cos\alpha_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_L=\frac{1}{2}\rho V^2 BC_L$$

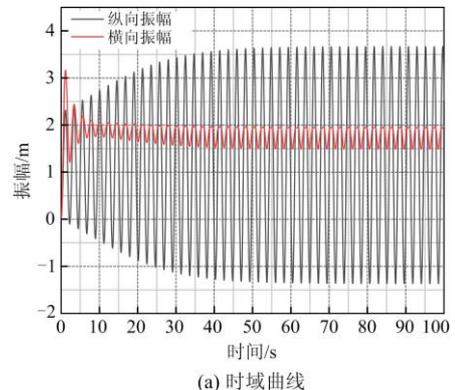
$$F_D=\frac{1}{2}\rho V^2 BC_D$$

式中: m 为线缆的线密度; m_i 为线缆覆冰质量; C_z 和 C_x 分别两垂直方向的阻尼系数; T 为导线张力; L 为线路档距; k 为舞动阶次; C_L 、 C_D 分别为升力系数、阻力系数; ρ 为空气密度; V 为风速; B 为覆冰导线截面特征长度; α_1 为线路的攻角。

此方程是一个二元二次的偏微分方程,难以求得其解析解,工程上想要得到舞动的轨迹一般采用数值解法,本文利用Matlab的ODE45模块进行数值求解,选用具体的线路参数如下: $m=1.5\text{ kg}$, $m_i=0.56\text{ kg}$, $l=300\text{ m}$, $C_z=0.08$, $C_x=0.05$, $T=148\text{ kN}$, $B=0.25\text{ m}$, $V=10\text{ m/s}$ 。

图6(a)为求解得到的线路覆冰舞动轨迹,线路舞动时纵向方向(垂直地面方向)的振幅占主要部分,横向上振幅只有纵向的1/10左右,所以估计出舞动时纵向方向的振动频率就可以估计舞动的情况。舞动纵向分量FFT分解后为频率0.48 Hz,如图6(b)所示,在线路的振动监测范围内。

输电线路只有在不规则覆冰产生不平衡升力时才会发生舞动^[16]。根据抛物线法和弹性变形胡克定律,由舞动引起的水平拉力的变化可由式(4)计算。



(a) 时域曲线

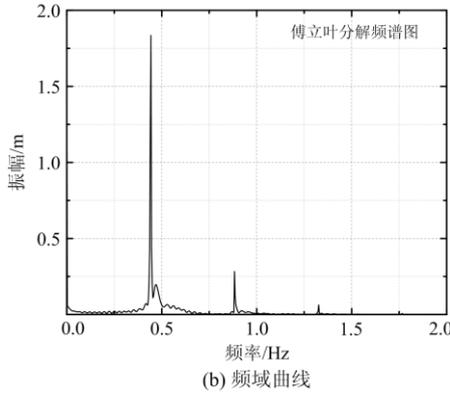


图 6 数值仿真得到的线路时域及频域曲线

Fig. 6 Line time-domain and frequency-domain curves obtained by Matlab simulation

$$\Delta T_0 = \frac{E \times S \times \Delta l}{L_s} = \begin{cases} \frac{n^2 \pi^2 E S a_0^2}{4 L L_s} \sin^2 \omega t, & n = \text{even} \\ \frac{n^2 \pi^2 E S a_0^2}{4 L L_s} \sin^2 \omega t - \frac{2 g_m L E S a_0}{n \pi \sigma_n L_s \cos \beta} \sin \omega t, & n = \text{odd} \end{cases} \quad (4)$$

式中： ΔT_0 为水平张力变化量； E 为线路的杨氏模量； σ_n 为线路的内部应变； Δl 是线路舞动时长度的变化量； N 时舞动时的半波数； ω 为舞动频率； a_0 为舞动振幅； L_s 为线路总长； n 为舞动半波数； g_m 为线缆单位长度、单位面积的重量； S 为线缆截面的面积。常见的半波观察数为 1、2、3、4，超过 5 个半波的振幅太小，在输电线路的监测中可以忽略不计。

表 1 舞动仿真线路参数

Table 1 Parameters of galloping simulation line

参数	S/mm^2	$E/(\text{N}/\text{mm}^2)$	L_s/m	RTS/kN	$G_0/(\text{kg}/\text{m})$
数值	633.6	1.03×10^5	1045	352.8	2.755

利用表 1 所示参数对舞动时线路内部应力变化进行仿真， G_0 为单位长度的线缆重量。结果如图 7 所示，在线路发生舞动时，其悬挂点的应力会随着振动的周期性变化，而利用分布式光纤监测舞动的基本原理是监测线缆内部应力变化引起的光纤折射率变化，从而监测舞动的振动频率及振动情况。另外，线路舞动时的应力最大可达 200 kN，达到了仿真所用线缆的最大拉应力的 56%，可能引起线路的断股事故甚至断线事故。

2.2 线路微风振动分析

风激励是引起微风振动的主要原因^[23-24]，而能

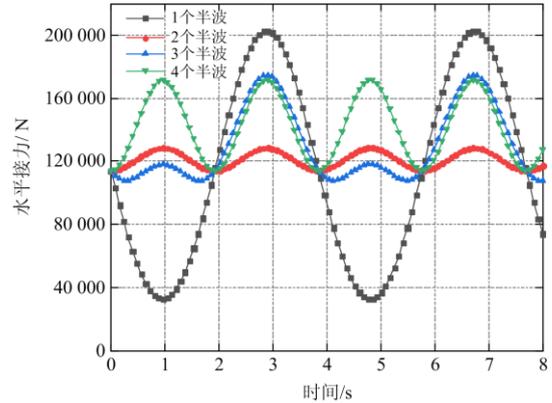


图 7 不同半波作用下水平张力的变化

Fig. 7 Changes in horizontal tension under different half-waves

量平衡法是计算微风振动的主要方法，计算公式如式(5)所示。

$$P_w = P_D \quad (5)$$

式中： P_w 为风载荷的输入功率； P_D 为输电导线的自阻尼功率。

设输电线的 y 方向位移如式(6)所示。

$$y = A_0 \cos(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

式中： A_0 为振动幅值； ω 为升力角频率； φ 为升力与位移间的相位差。

在二分之一的周期内，风输入的功率如式(7)一式(8)所示。

$$P_w = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \left\{ F_y \sin \omega t \frac{d[A_0 \cos(\omega t - \varphi)]}{dt} \right\} dt \quad (7)$$

$$P_w = \pi F_y A_0 f = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 d_1 \pi A_0 f \quad (8)$$

式中： $f = \frac{\omega}{2\pi} = s \frac{v}{d_1}$ 为卡门漩涡频率； $A_0 = \eta d_1$ ；

$\rho = 1.3$ ； η 为常数； d_1 为线缆直径。则

$$P_w = 51.05 C_L \eta f^3 d_1^4 \quad (9)$$

风能输入功率如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_w = (y/d_1)^{2a_1+a_2} e^{a_3} f^3 d_1^4, & (y \leq 0.6d_1) \\ P_w = 27.51 f^3 d_1^4, & (0.6d_1 < y < d_1) \\ P_w = 0, & (y > d_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $a_1 = 0.0526$ ； $a_2 = 1.4074$ ； $a_3 = 4.0324$ 。

线缆自阻尼功率表达式如式(11)所示。

$$P_D = \frac{\pi}{2} l_D h_D y^2 f^4 T^{-1.5} m^{1.5} \quad (11)$$

本文取振幅为小于 $0.6d$ 的风能功率，将式(10)、式(11)代入平衡方程式(5)可得式(12)。

$$(y/d_1)^{2a_1+a_2} e^{a_3} f^3 d_1^4 = \frac{\pi}{2} l_D h_D y^2 f^4 T^{-1.5} m^{1.5} \quad (12)$$

仿真线路参数设置跨距 l 为 220 m, 单位长度重量为 0.974 3 kg/m, 拉力为 72 300 N, 截面积为 277.75 mm², 仿真得到不同风速下的微风振动曲线如图 8 所示。由图 8 可知风速越大, 微风振动的频率越高, 振幅越小, 其振动频率一般为 20~300 Hz, 在此多参量分布式光纤设备的频率监测范围内。另外, 高振幅的舞动很容易引起线路疲劳, 并造成线路的断股和损伤。

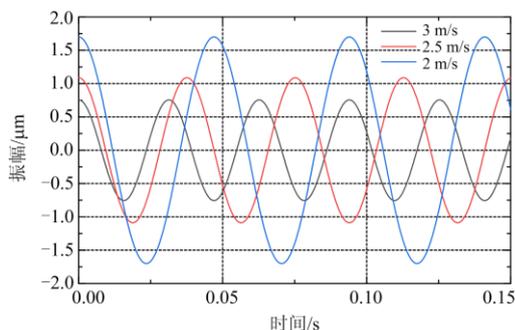


图 8 仿真得到的微风振动时域图

Fig. 8 Time domain diagram of breeze vibration obtained by simulation

3 实验结果与分析

3.1 舞动监测实验及分析

本次实验采用型号为 OPGW-24B1-150 的 OPGW 进行实验, OPGW 结构示意图如图 9 所示, 将实验所用的 OPGW 内部的光纤接出, 在尾端成环处理, 在 OPGW 的首端抽出两根光纤, 将 OPGW 接出的光纤外接 22.4 km 的光纤盘后, 从光纤盘内抽出光纤接入分布式光纤主机中。

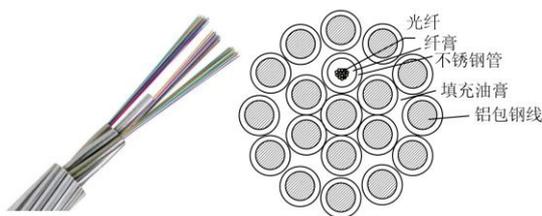


图 9 OPGW 结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of OPGW structure

将 OPGW 以 15% RTS 按图安装在试验档上, 试验过程中实时监测光信号。悬挂装置保证 OPGW 在施振段静态时的弧垂角不超过 $(1.5 \pm 0.5)^\circ$ 。根据第 2.1 节的结论, 舞动的频率在 0~3 Hz 之间, 考虑线缆的结构等因素, 本实验调整舞动振动器的振动频率为 1.41 Hz, 使得线缆进入稳定的舞动状态, OPGW 长度为 60 m, 其实验场地如图 10 所示。

DOFS 系统监测得到的振动曲线是位置-时间的矩阵, 该系统的时间采样频率为 754 Hz, 时间采

样点数为 4 096, 空间采样点数为 4 083 个, 每两个点之间的距离为 16 m, 所得数据为 4096×4083 的矩阵, 三维曲线如图 11 所示。



图 10 舞动实验示意图

Fig. 10 Schematic diagram of dancing experiment

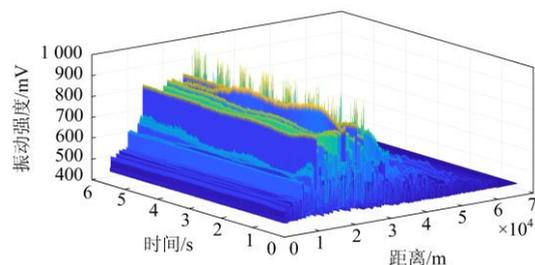


图 11 OPGW 舞动时域—距离—强度三维示意图

Fig. 11 Three-dimensional schematic diagram of OPGW galloping time-distance-intensity

将两个相邻位置的时间—强度曲线进行滑动平均和差分处理后(其中滑动平均窗口取 6), 可以得到如图 12 所示的定位图, 由于只有 OPGW 舞动区域出现振动, 而大部分区域的振动强度是随机的白噪声, 所以对其进行平均后相减可以得到如图 12 所示的位置-振动强度曲线, 其强度最大点即为舞动位置, 如图 12 所示其定位位置为 22 390—22 450 m 段, 此段位置与 OPGW 舞动段位置误差在 20 m 以内。

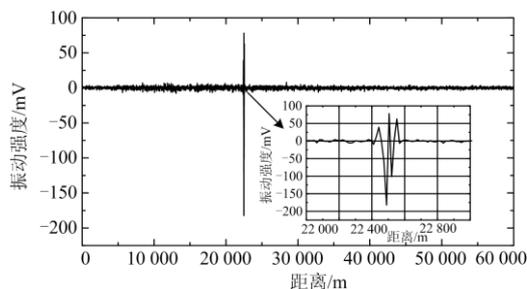
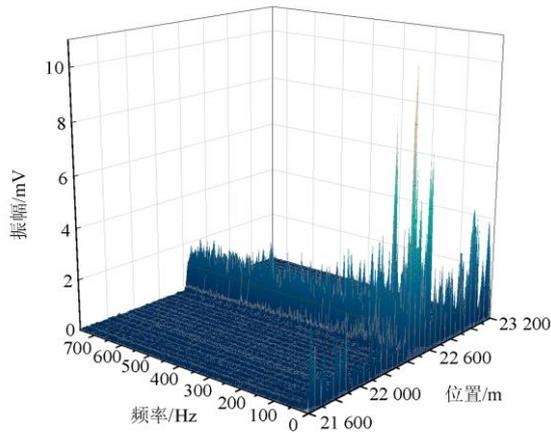
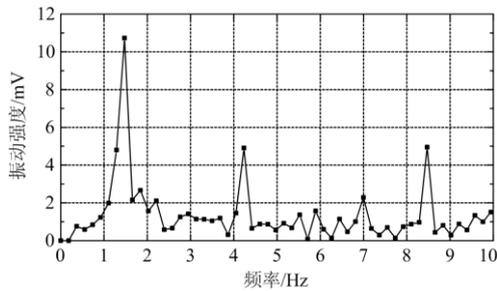


图 12 舞动位置定位图

Fig. 12 Location map of galloping position



(a) OPGW舞动频率-位置-振幅图



(b) 22 400m处频率-振幅图

图 13 舞动实验频谱分析图

Fig. 13 Spectrum analysis diagram of galloping experiment

将舞动定位位置的 22 400 m 处的时间—振动强度曲线提取后进行快速傅立叶变化，得到的频谱图如图 13 所示。在线路发生舞动时，其频谱图在 1.47 Hz 及其倍频(4.2 Hz、8.4 Hz)附近会出现振动强度峰值，与实验设置的振动频率相同，证明该装置可以准确监测线路的舞动频率，其振动频率误差为 0.06 Hz。

3.2 微风振动监测实验及分析

微风振动实验采用与舞动实验相同的 OPGW 型号，其实验场地如图 12 所示。将 OPGW 以 15%~20% RTS 按图安装在试验档上，根据第 2.2 节的结论，在 20~300 Hz 范围内设置线路稳定振动频率，最后设置微风振动频率发生器的频率为 50 Hz，在 OPGW 前分别续接入 22.4 km、44.4 km 和 59.6 km 的光纤盘，微风振动位置定位如图 14 所示。

在线路某段出现微风振动时，其振动位置距离 DOFS 越长，其定位算法得到的风振位置的信噪比越低，如图 15 所示。这是由分布式光纤的相干衰弱引起的，实验结果定位位置与线路实际位置进行对

比分析如表 2 所示，该设备在 60 km 范围内的定位精度为 ± 50 m。



图 14 微风振动实验示意图

Fig. 14 Schematic diagram of breeze vibration experiment

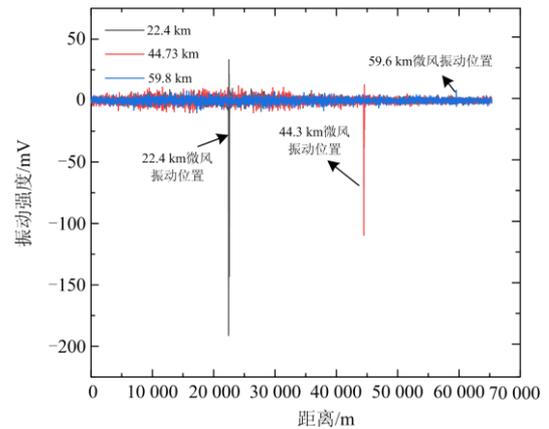


图 15 微风振动定位图

Fig. 15 Location map of breeze vibration

表 2 OPGW 微风振动实际位置与监测定位位置
Table 2 OPGW breeze vibration actual position and monitoring positioning position

光纤盘长度/m	实际位置/m	监测位置/m	最大误差/m
22 400	22400~22460	22448~22476	48
44 400	44400~44540	44442~44581	42
59 600	59600~59660	59584~59696	36

对不同位置处的时域曲线进行快速傅里叶分解得到图 16 所示的频率—位置—振动强度图，振动频谱如图 17 所示。当 OPGW 微风振动时，在 50 Hz 及其多倍频附近有很明显的峰值，且微风振动位置距离分布式光纤主机位置越远其振动强度越弱，其测量的误差在 0.01 Hz 左右，实验证明该装置可以准确定位 60 km 以内的微风振动位置并监测其振动频率。

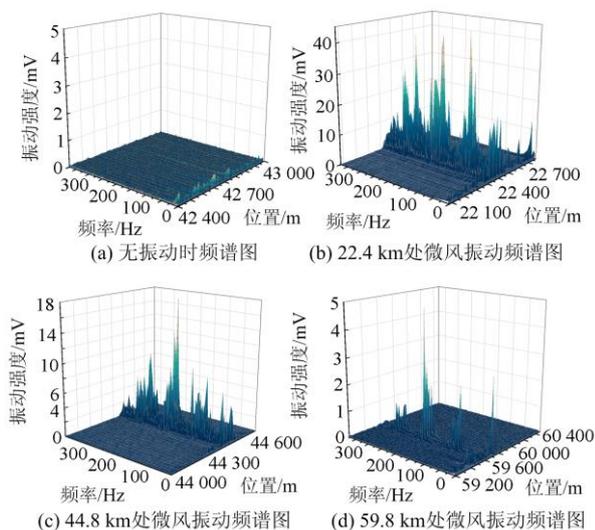


图 16 不同位置处微风振动频谱—位置—振动强度分析图
Fig. 16 Analysis graph of breeze vibration spectrum—location—vibration intensity at different positions

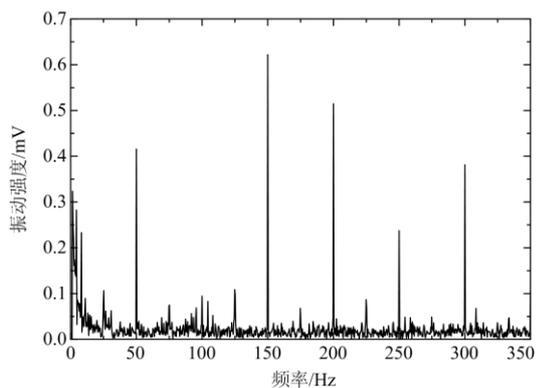


图 17 22 400 m 处微风振动频谱分析图

Fig. 17 Spectrum analysis chart of breeze vibration at 22 400 m

3.3 应变监测试验及分析

在线路出现长期微风振动或舞动时, 可能会导致其疲劳损伤, 并出现断股甚至断线等事故, 在 OPGW 损伤时, 根据文献[25-26]的结论, 在消耗完光纤内部余长的情况下, 其 BOTDR 所测得的频移值会随着断股数的增加而增加, 可以此分析其线路损伤问题。为了测试此设备监测线路应变能力, 进行了 OPGW 的拉力试验, 试验将 100 m 长的 OPGW(型号为 OPGW-96B1.3-150)固定在拉力器上, 其额定拉断力(Rated Tensile Strength, RTS)为 94.8 kN, 依次施加 65% RTS, 85% RTS 和 125% RTS 的拉力, 测试其 BOTDR 的频移情况, 实验设置如图 18 所示。

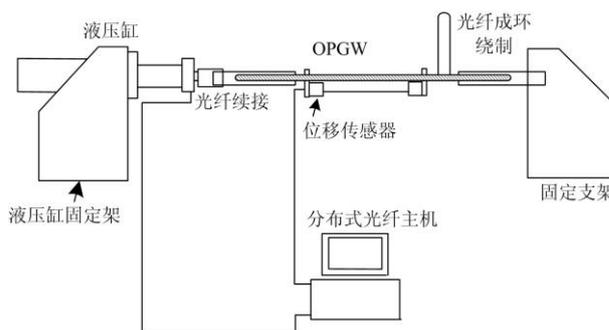


图 18 OPGW 应力—应变性能试验装置

Fig. 18 OPGW stress-strain performance test device

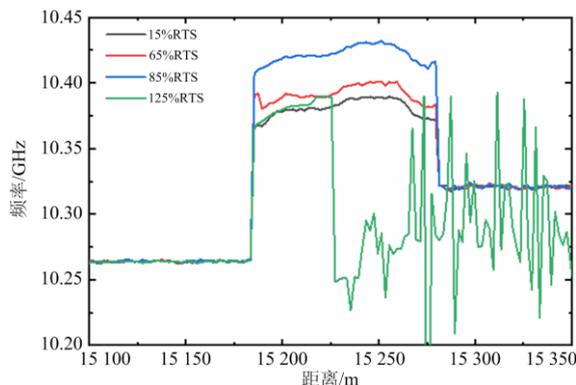


图 19 不同拉力下的频移变化情况

Fig. 19 Frequency shift changes under different tensions

分布式光纤系统得到的频移数据由图 19 所示, OPGW 位于 15 180~15 280 m 段。该设备在实验室测得的微应变与频移的系数为 4.5 MHz/100 $\mu\epsilon$, 随着拉力的增加, BOTDR 监测得到的 OPGW 段的频移值也增加, 此时光纤内剩余长度基本消耗而出现应变值, 65% RTS 和 85% RTS 的 OPGW 应变平均值为 225 $\mu\epsilon$ 和 872 $\mu\epsilon$, 65% RTS 测得应变较小是由于 OPGW 内部光纤存在余长。拉力为 125% RTS 时线路被拉断, 此时频移值出现了很大的变化。从实验结果可得, 该设备可以实时监测线路内部的应变情况, 从而评估 OPGW 风振后的断股及断线情况。

4 结论

本文提出一种基于多参量分布式光纤的输电线路风振监测系统,通过仿真和实验得到如下结论:

1) 输电线路舞动时振动主要集中在垂直于地面方向,其振幅为水平方向的十倍左右,且舞动时线缆内部各点的应力会根据线路振动频率周期性变化,仿真分析其垂直地面方向振动频率为 0.48 Hz;输电线路微风的振动频率在 20~300 Hz 之间,振动幅值小于线路直径。舞动与振动频率在 DOFS 的监测范围内,利用分布式光纤监测舞动和微风振动具有可行性。

2) 在实验室进行了微风振动及舞动实验,结果表明,监测范围在 60 km 内时,设备定位线缆舞动和微风振动的定位精度在 ± 50 m 以内。频谱分析可得,在线缆舞动和微风振动时,分布式光纤监测得到的频谱曲线在其实际振动频率及其多倍频处都会出现峰值。设备的舞动频率监测误差小于 0.06 Hz,微风振动频率监测误差小于 0.01 Hz。

3) 拉力试验显示,当 OPGW 所受拉力为 65% RTS 和 85% RTS 时,对应 OPGW 的应变平均值为 $225 \mu\epsilon$ 和 $872 \mu\epsilon$,而 OPGW 损伤时设备 BOTDR 模块所测得的频移值会随着断股数的增加而增加,即该设备可以实时监测 OPGW 内部的应力情况,从而评估在风振和舞动等情况疲劳后的 OPGW 的断股断线情况。

参考文献

- [1] 褚双伟,熊小伏,刘善峰,等.计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J].电力系统保护与控制,2018,46(9):86-93.
CHU Shuangwei, XIONG Xiaofu, LIU Shanfeng, et al. Short-term risk assessment of power grid considering galloping prediction of transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 86-93.
- [2] LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Pengfei, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.
- [3] 廖峥,熊小伏,李新,等.基于BP神经网络的输电线路舞动预警方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(19):154-161.
LIAO Zheng, XIONG Xiaofu, LI Xin, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.
- [4] 黄官宝,黄新波,赵雪松,等.输电线路导线舞动在线监测系统设计[J].南方电网技术,2009,3(4):85-89.
HUANG Guanbao, HUANG Xinbo, ZHAO Xuesong, et al. On-line monitoring system design on transmission line galloping[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 85-89.
- [5] 李清,杨晓辉,刘振声,等.基于灰色聚类分析的输电线路舞动分级预警方案[J].电测与仪表,2020,57(17):45-51.
LI Qing, YANG Xiaohui, LIU Zhensheng, et al. Graded warning scheme of transmission line galloping based on grey clustering analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 45-51.
- [6] 袁敬中,潘国兵,谢景海,等.基于多模空间距离权重融合的高压架空输电线路舞动监测模块的设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):173-179.
YUAN Jingzhong, PAN Guobing, XIE Jinghai, et al. Design of a galvanic monitoring module for high-voltage overhead transmission lines based on the fusion of multi-mode spatial distance weights[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 173-179.
- [7] 王立恒,林旭君,俞琳,等.基于光纤布拉格光栅的温度应变复合测量系统[J].纳米技术与精密工程,2017,15(5):412-418.
WANG Liheng, LIN Xujun, YU Lin, et al. Temperature and strain measurement system based on fiber Bragg grating[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(5): 412-418.
- [8] 龚戡,赵峰,李冬华,等.基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):97-104.
GONG Yu, ZHAO Feng, LI Donghua, et al. Method for reconstructing galloping waveforms of overhead lines based on compressed sensing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 97-104.
- [9] 杨安琪,龚庆武.基于BOTDR测温技术的架空线路动态增容方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(6):16-21.
YANG Anqi, GONG Qingwu. Dynamic capacity-increase of overhead line based on BOTDR temperature monitoring technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 16-21.
- [10] 黄金朋,张哲,汪伟,等.基于分布式光纤测温技术的超导电缆局部失超检测和保护方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(14):76-84.
HUANG Jinpeng, ZHANG Zhe, WANG Wei, et al. A local quench detection and protection method for a superconducting cable based on distributed optical fiber temperature measurement technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 76-84.
- [11] 陈玉,郝义,姚凯,等.500 kV充油海底电缆运行状态综合在线监测系统研究[J].电测与仪表,2021,58(10):133-139,169.
CHEN Yu, HAO Yi, YAO Kai, et al. Research on integrated on-line monitoring system for operating status of 500 kV

- oil-filled submarine cable[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(10): 133-139, 169.
- [12] 王健健, 李永倩. 分布式光纤传感技术在 OPGW 监测中的应用现状[J]. *光通信研究*, 2018(3): 25-27.
WANG Jianjian, LI Yongqian. Progress on distributed optical fiber sensing technology in OPGW[J]. *Study on Optical Communications*, 2018(3): 25-27.
- [13] 张旭苹, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. *光电子技术*, 2017, 37(4): 221-229.
ZHANG Xuping, WU Jianling, SHAN Yuanyuan, et al. On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology[J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37(4): 221-229.
- [14] 谭磊, 赵永强, 赵留学, 等. 基于分布式光纤的电网台风灾害预警方法研究[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(15): 20-24.
TAN Lei, ZHAO Yongqiang, ZHAO Liuxue, et al. Research on warning method of typhoon disaster based on distributed fiber[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(15): 20-24.
- [15] 郝伟博, 赵衍双, 李卓枢, 等. 基于相位敏感光时域反射技术的导线舞动状态监测[J]. *应用科学学报*, 2019, 37(4): 437-446.
HAO Weibo, ZHAO Yanshuang, LI Zhuoshu, et al. Transmission-line galloping monitoring based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2019, 37(4): 437-446.
- [16] 熊菲, 丁文红, 张益昕, 等. 基于布里渊光时域反射技术的多参数输电线路覆冰预警[J]. *电力科学与工程*, 2019, 35(1): 36-44.
XIONG Fei, DING Wenhong, ZHANG Yixin, et al. Detection of transmission line icing based on multiple parameters measured by Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2019, 35(1): 36-44.
- [17] 张凯, 药炜, 原军, 等. 相位敏感 OTDR 和布里渊 OTDR 结合的双参量分布式光纤传感的研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(1): 74-79.
ZHANG Kai, YAO Wei, YUAN Jun, et al. Research on dual-parameter distributed optical fiber sensing combined with phase sensitive OTDR and Brillouin OTDR[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(1): 74-79.
- [18] LIN R, ZHU Y F, TIAN L, et al. On-situ monitoring of sleet-thawing for OPGW based on long distance BOTDR[J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(4): 226-230.
- [19] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 100-114.
ZHANG Xuping, DING Zhewen, HONG Rui, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometer distributed optical[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 100-114.
- [20] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 158-176.
RAO Yunjiang. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 158-176.
- [21] 闵光云, 刘小会, 严波, 等. 覆冰四分裂导线的气动特性与舞动特性[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(21): 8607-8615.
MIN Guangyun, LIU Xiaohui, YAN Bo, et al. Aerodynamic characteristics and galloping characteristics of iced quad bundle conductor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(21): 8607-8615.
- [22] 周驰. 特高压输电线路分裂导线表面电场特性分析[J]. *浙江电力*, 2020, 39(1): 73-82.
ZHOU Chi. Analysis of surface electric field characteristic of bundled conductor for UHV transmission lines[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2020, 39(1): 73-82.
- [23] WEI Y, SHAO Y, LÜ Z, et al. Study on monitoring for power transmission line galloping based on monocular vision method[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China.
- [24] 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.
- [25] 杨坤, 郝蕴琦, 叶青, 等. 基于 BOTDR 传感技术的架空光缆覆冰监测研究[J]. *激光杂志*, 2018, 39(8): 43-45.
YANG Kun, HAO Yunqi, YE Qing, et al. Ice-coating monitoring research on aerial cables with BOTDR sensing system[J]. *Laser Journal*, 2012, 38(8): 1863-1870.
- [26] 邱平, 范江波, 付玉峰, 等. OPGW 断股状态的光学监测技术研究[J]. *光通信研究*, 2015(2): 47-48.
QIU Ping, FAN Jiangbo, FU Yubo, et al. Research on optical monitoring technique for strand breakage in OPGW[J]. *Study on Optical Communications*, 2015(2): 47-48.

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-01-23

作者简介:

杨芳(1986-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路运行技术、智能技术应用; E-mail: 1902099210@qq.com

唐小亮(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输配电技术管理; E-mail: 785045586@qq.com

尹文阔(1993-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为输电线路运维。E-mail: 13297958072@163.com

(编辑 张爱琴)