

架空输电线路弧垂及覆冰的在线监测

杨小龙, 袁翰青, 孙辰军, 马超, 李静

(国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 石家庄 050000)

摘要:为实现架空输电线路在线覆冰及舞动监测,提出了一种基于分布式相敏光时域反射计(Φ -OTDR)架空输电线路在线监测方法。文章通过建立了输电线路的数学模型,理论分析得到导线的弧垂、舞动频率等参数计算公式;其次提出了基于 Φ -OTDR分析方法,并对其监测原理进行了分析。通过搭建架空线在线监测模型,分别开展架空线舞动试验及覆冰试验,分析得到了架空输电线路的动态应变特性,验证了基于 Φ -OTDR的输电线路状态在线监测方案。试验结果表明,在厘米尺度上,弧垂估计误差小于5.8%,在亚毫米尺度上,冰厚估计误差不大于10.84%,可准确描述了输电线路状态,为输电线路故障预警提供了有力支持。

关键词:分布式光纤传感器;在线监测;架空输电线路; Φ -OTDR

DOI:10.15938/j.jhust.2023.02.012

中图分类号: TM726.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)02-0099-09

On-line Monitoring of Sag and Icing of Overhead Transmission Lines

YANG Xiaolong, YUAN Hanqing, SUN Chenjun, MA Chao, LI Jing

(Information and Communication Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang, 050000)

Abstract: In order to realize on-line icing and galloping monitoring of overhead transmission lines, an on-line monitoring method for overhead transmission lines based on phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) is proposed. In this paper, by establishing mathematical models of transmission line, the calculation formulas of conductor sag, galloping frequency and other parameters are obtained through theoretical analysis. Secondly, by building the overhead line online monitoring model, the overhead line galloping test and the icing test are proposed respectively, and the leakage principle is analyzed. The dynamic acquisition characteristics of overhead transmission lines are analyzed, and the online status monitoring scheme of transmission lines based on Φ -OTDR is verified. The test results show that the estimation error of sag is less than 5.8% on centimeter scale, and the estimation error of ice thickness is no more than 10.84% on sub-millimeter scale, which gives an accurate description of transmission line status and provides strong support for early warning of transmission line failures.

Keywords: distributed optical fiber sensor; online monitoring; overhead transmission line; phase-sensitive OTDR

0 引言

由于我国东西部资源与消费的严重不均,通过高压远距离传输电能,实现资源在国家内部的优化

配置成为了必然选择。当前,国内多个区域架空输电线路经常受到覆冰和舞动的威胁^[1-3]。输电线路的载荷和迎风面积通常由于结冰而增加,可能导致架空线路舞动,进而导致断线、倒塔、闪络等事故,造成巨大的经济损失^[2,4,5]。因此有必要采用可靠有

收稿日期: 2021-10-14

基金项目: 科技部科技创新重大项目(2020AAA0107500)。

作者简介: 袁翰青(1973—),男,硕士,高级工程师;

孙辰军(1981—),男,硕士,高级工程师。

通信作者: 杨小龙(1989—),男,硕士,高级工程师, E-mail: 277135930@qq.com。

效的检测方法,及时、准确地获取输电线路的覆冰状态。目前,输电线路的在线监测主要通过点传感器或图像监测实现^[6-9]。大多数点传感器是电传感器,通常都存在非线性、零点漂移和强电磁环境耐受差等缺点^[10-11]。此外,这些传感器的安装,包括电源和数据传输网络布设实施步骤复杂且费用较高。

光纤传感器(optical fiber sensors, OFSs)是一种以光波为载体、光纤为传感介质的传感器,随着光纤通信技术的发展,应用已愈来愈广泛。OFSs具有一系列独特的优点,如测量精度高、鲁棒性好和绝缘性能高。基于OFS的传输线监测始于1997年,其中光纤布拉格光栅(fiber bragg gratings, FBG)可用于测量相邻两个城镇之间输电线路的应变^[12]。但由于FBG制造和部件成本较高,通常比同类电子产品贵一到两个数量级。此外,与电子传感器一样,FBG属于单点传感器,只能提供较低的传感器分布密度。此传感器必须采用额外传输线路连接到输电线路,这会降低传输线的稳定性。

与光纤光栅不同,分布式光纤传感器(distributed optical fiber sensors, DOFSs)依靠一整套光学系统与光纤一起实现对物理电气参数进行采集和空间解调,可以取代成千上万的点传感器。因此,DOFSs可以用来监测目标的整体行为,而不是从几个测量点进行外推。电力传输系统中的通信主要基于光缆,同时光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW)得到了广泛的应用。通过DOFSs, OPGW网络可以构成在线监测的传感网络。目前基于DOFSs的输电线路覆冰在线监测主要通过布里渊光时域反射计(BOTDR)监测输电线路的应变变化来实现^[13-16]。虽然研究人员已经证明了该方案的可行性,但仍有一些不足之处。首先,光纤一般有0.6%~0.7%长度的尾纤,其中填充的润滑脂降低了光纤附着力^[7,12],使得架空线的应力很难作用在光纤上。因此,只有当外部张力大于阈值时,才能测量架空线的应变。此外,BOTDR的单个采集周期通常为几十分钟,由于舞动,架空线的应变将会不断变化,这可能导致测量结果不准确。这些缺点共同带来应力测量的不确定性,进而导致测量结果的置信度较低。

近年来,具有高灵敏度实时测量能力的相敏光时域反射计(Φ -OTDR)引起了众多研究人员的兴趣^[6-10,17-21]。 Φ -OTDR具有响应速度快、机械振动

灵敏度高等优点,适于输电线路的在线监测。2019年,有研究人员使用 Φ -OTDR监测传输线的舞动频率,并将结果与FBG的结果进行比较,但他们并未对这些参数代表的意义以及如何利用它们进行进一步解释或分析^[22]。

本文基于输电线路数学模型,提出了基于 Φ -OTDR的在线监测的分析方法;搭建架空线路弧垂、覆冰监测平台,通过试验证明 Φ -OTDR的测量结果(包括弧垂、舞动、覆冰)的准确性。

1 在线监测原理分析

1.1 输电线路的力学特性分析

在分析输电线路力学特性时,建立一个包含导线、减震器、绝缘子串和杆塔的全套计算模型是非常复杂和困难的。相对于架空线路而言,塔架可视为刚性固定,因此输电线路模型在分析时可简化为无刚度和无阻尼的导线,导线两端的边界可认为是固定。

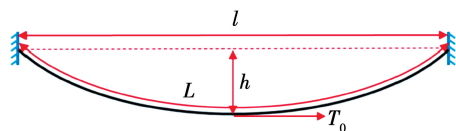


图1 无刚度和阻尼的导线

Fig. 1 A wire with no stiffness and no damping

如图1所示, L 为导线的长度; l 为跨度长度; h 为从导线弧垂的最低点到两固定点连接线的垂直距离; T_0 为导线的初始水平张力。那么导线长度、跨距和弧垂之间的关系可以表示为^[20]

$$L = l + \frac{8h^2}{3l} \quad (1)$$

当覆冰或落冰时, L 将相应地改变 ΔL ,此时弧垂可以表示为

$$h' = \sqrt{\frac{3l}{8} \Delta L + h_0^2} \quad (2)$$

其中: h_0 为初始弧垂; h' 为 L 变化后的弧垂。故只要获得 ΔL ,就可以计算得到 h' 。导线振动的固有频率是其固有特性之一,可表示为^[21]

$$f_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{T_0}{m}} \quad (3)$$

其中: k 为振动阶数; f_k 为 k 阶震动的频率; m 为单位长度导线的质量。用裸导线的振动频率除以覆冰

导线的振动频率:

$$\frac{f_{ice}}{f_0} = \sqrt{\frac{m_0}{m_0 + m_{ice}}} \quad (4)$$

$$m_{ice} = \pi \rho_{ice} d (d - 2r_0) \quad (5)$$

式中: m_0 为导线单位长度的初始质量; m_{ice} 为每单位长度导线的覆冰质量; r_0 为导线的初始半径; d 为冰厚度; ρ_{ice} 为冰的密度 (0.92 g/cm^3), 由于覆冰厚度仅与导线振动频率比的变化有关。将式(5)代入式(4), 振动频率与冰厚度之间的关系可以表示为

$$d = \sqrt{\frac{m_0(f_0^2 - f_{ice}^2)}{\pi \rho_{ice} f_{ice}^2} + r_0^2} - r_0 \quad (6)$$

因此, 通过对输电线路振动频率的检测, 可以得到覆冰厚度。

1.2 Φ -OTDR 监测原理分析

Φ -OTDR 利用窄线宽激光产生高相干光脉冲, 在传感光纤上获得相对稳定的瑞利背向散射 (Rayleigh backscatter, RBS) 相位分布。在没有外界干扰和不考虑激光频率漂移的情况下, 传感光纤任意截面上的 RBS 相位都是稳定的。当振动信号作用于传感光纤时, 传感光纤的形状将会因振动信号而产生受力形变, 光纤的折射率、长度和纤芯直径都会发生变化, 从而导致 RBS 的相位变化。因此, 可通过测量 RBS 相位差的变化来解调该部位光纤的振动信号。

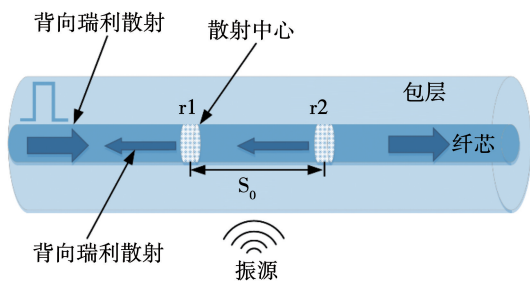


图2 振动引起 RBS 相变

Fig. 2 Vibration causes the phase change of RBS

如图2所示, r_1 和 r_2 分别为传感光纤扰动区前后的散射中心; S_0 是 r_1 和 r_2 之间初始光纤的长度。当相干光脉冲在传感光纤中传播时, 入射光将在每个散射中心激发相干 RBS。在仅考虑传感光纤轴向应变引起的相变时, r_1 和 r_2 处 RBS 的简化表达式可写成^[23]:

$$E_{r_1} = E_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (7)$$

$$E_{r_2} = E_2 \cos\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{4\pi n}{\lambda}(S_0 + \Delta S)\right) \quad (8)$$

其中: E_1 和 E_2 为 RBS 的振幅; ω 为入射光角频率; φ_1 为初始相位; n 为光纤芯的折射率; λ 为入射光的波长; ΔS 为振动引起的长度变化。由此, r_1 和 r_2 之间的相位差为^[24]

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n}{\lambda} S_0 + \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta S = \varphi_{s_0} + \Delta\varphi_v \quad (9)$$

式中: φ_{s_0} 为初始光纤长度引入的相位差, 它决定了相位差曲线的初始位置, 在稳定环境下通常为常数; $\Delta\varphi_v$ 为振动引入的相位差, 决定相位差曲线的形状。因此, 可通过 RBS 信号检测和数据处理, 解调相位变化以及光纤长度变化。由于光纤长度的变化与振动幅度呈线性关系, 从而实现振动的精确测量。

1.3 基于 Φ -OTDR 的输电线路在线监测

假设图2中的导线为 OPGW, 两个端点分别为 r_1 和 r_2 , 可通过 Φ -OTDR 获得导线的长度变化。首先, 假设 OPGW 的负载在无振动的情况下发生变化, L 也会相应变化, 其该变量 ΔL 可以表述为^[25]

$$\Delta L = S'_0 - S_0 = \frac{\lambda}{4\pi n} (\varphi'_{s_0} - \varphi_{s_0}) \quad (10)$$

式中: S'_0 为荷载变化后的光纤长度; φ'_{s_0} 为光纤长度变化后相位差曲线的水平位置。需要指出的是, 尽管由于环境不稳定, φ_{s_0} 可能随时间而缓慢变化, 冻雨或冰降引起的输电线路负荷变化通常是快速或突然的, 所以 φ_{s_0} 对计算影响不大。因此, 通过观察相位差曲线的水平位置变化, 弧垂的计算表达式为

$$h' = \sqrt{\frac{3\lambda l}{32\pi n} (\varphi'_{s_0} - \varphi_{s_0}) + h_0^2} \quad (11)$$

然后假设风导致架空线舞动, 导线负载保持不变, L 也会相应变化, ΔL 可以表述为

$$\Delta L = \Delta S = \frac{\lambda}{4\pi n} \Delta\varphi_v \quad (12)$$

平衡状态下最低位置弧垂变化可表示为^[25]

$$G = \sqrt{\frac{3\lambda l}{32\pi n} \Delta\varphi_v + h_0^2} - h_0 \quad (13)$$

这里, 弧垂的变化反映为振幅变化, 也可以相应地获得振动频率。由此, 可以通过将荷载变化前后的固有频率代入式(6)来计算冰厚度。应该注意的是根据式(3), f 与 l 、 T_0 和 m 相关, 因此不同跨度中 f_0 也不一致。于是需要根据不同跨度的实际测量结果校准 f 。此外, 根据式(3)和式(4), 当冰厚度相同时, 振动阶数越高, f_0 和 f_{ice} 之间的差异越大。由此可知, 高阶振动对输电线路的负荷变化更为敏感。

2 试验研究

2.1 试验平台搭建

本文搭建了演示试验系统,其硬件设置示意图如图3所示。所使用的 Φ -OTDR设备为日本光纳株式会社生产,型号为NBX-S300,设备采样率为4 kHz,空间分辨率为0.1 m,测量距离可达100 m。设计的铝合金框架用于悬挂钢绞线,考虑后续覆冰及舞动试验施加的激励方式,本文在实验室内开展模拟试验时以钢丝绳替代导线,分析覆冰和舞动情况。导线在固定滑轮上缠绕数米以此作为固定方式,试验布置时设定两个固定滑轮之间的距离即跨度为30 m,将0.9 mm的光纤紧密固定在导线上。将一根100 g的绳子悬挂在导线的中心(即跨度的中间位置),通过切割绳子释放悬挂在导线上的重量来激发导线振动。利用 H_1 减去 H_2 获得导线的初始弧垂,其中 H_1 是固定点的高度, H_2 是导线最低点的高度,可随冰厚度的变化而变化。本文所使用的导线(即上文提到的钢丝绳)直径和单位长度质量分别为1.5 mm和46.4 g/m。由于很难实现导线覆冰均匀且各处位置厚度一致,所以本文用橡皮泥来替代实际的冰,也可达到导线荷载增加的效果。在开展覆冰试验时,冰的厚度逐渐从0.25 mm增加至1.25 mm,梯度为0.25 mm,冰的质量可以根据式(5)进行计算。

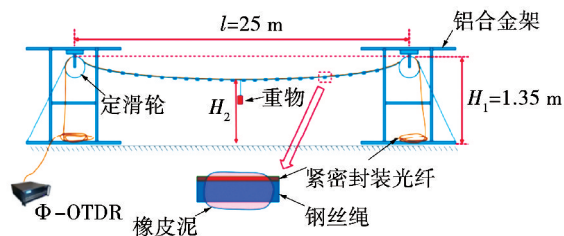


图3 覆冰舞动模拟装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the device for simulating icing and galloping

2.2 试验结果分析

2.2.1 舞动试验

图4(a)为振动的功率谱密度(power spectral density, PSD),可以看出主振动频率约为1.3 Hz,中间振动强度最大,两侧减小。有9个区域受到悬挂重物重量下降的影响,选择中间7个区域分析振动变化,其振动情况一致,如图4(b)所示。然后,沿导

线方向进行积分,可以获得整个振动过程的相位变化,如图4(c)所示。分析图4(c),由于悬挂物重量的下降,将使得悬挂中心位置产生46 000 rad的振动,且振动强度呈指数衰减并逐渐趋于稳定。

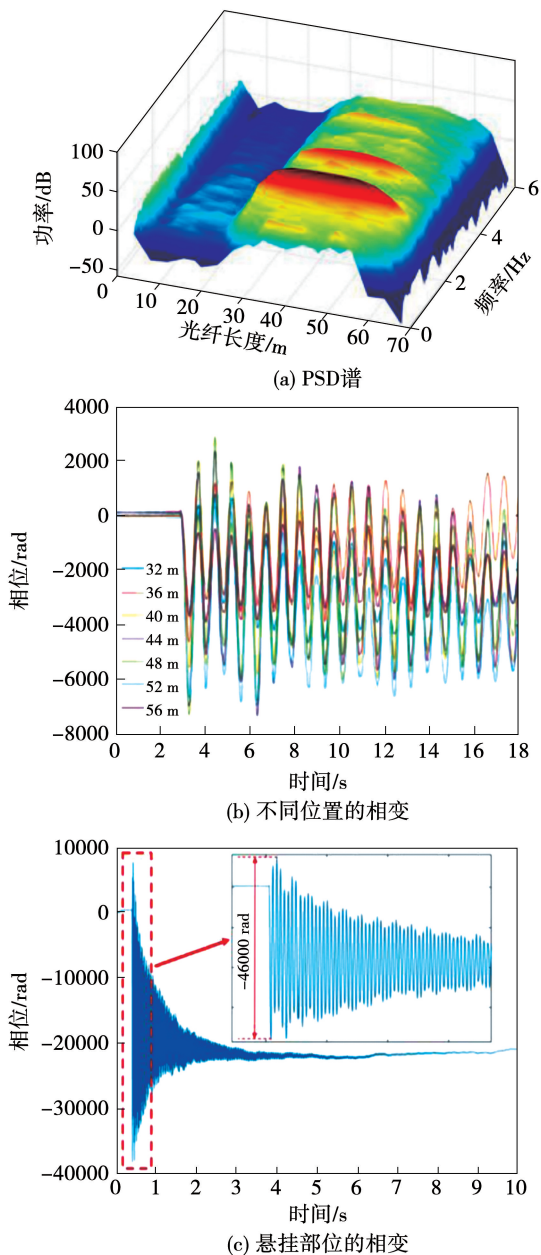


图4 导线舞动试验结果

Fig. 4 Wire galloping test result

首先对弧垂进行评估,依次卸下5个悬挂在线路中间的重量为10 g的橡皮块。图5(a)为导线悬挂部分随橡皮块卸下的相位变化,初始值为0 rad,随着悬挂重物重量的减轻,相位逐渐向y轴负方向移动,这意味着悬挂导线的长度变短,弧垂也应相应减小。图5(b)为用软尺测量的实际弧垂,以及校正

前后的估计弧垂。弧垂测量值和估计值的趋势一致,由于两者绝对误差几乎为常数,故实际值和未经校正的估计值之间的相对误差随着弧垂的减小而增大。可以看出,实际值和估计值之间的误差单调,且估计值均大于实际值,如图 5(c) 所示。根据式(11)和式(9),如果 h' 高于实际值,则 $S_0 - S'_0$ 小于其理论值,误差最有可能是光纤与导线的固定松动而引起的。由图 5(b) 得出,实际值和未经校正的估计值之间的平均差为 0.015 8 m,将该差值和初始弧垂(0.458 m)代入式(1),计算出的额外长度为 0.001 6 m。经校正后,实际值与估计值之间的相对误差减小了一个数量级以上,均小于 5.8%。

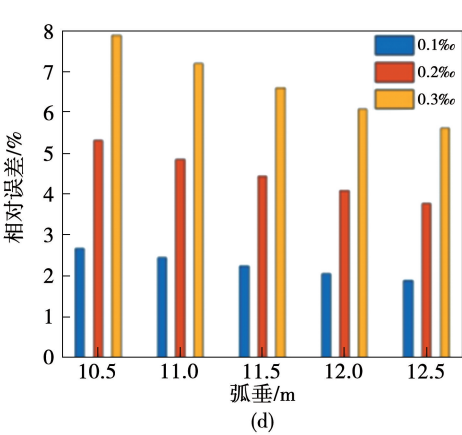
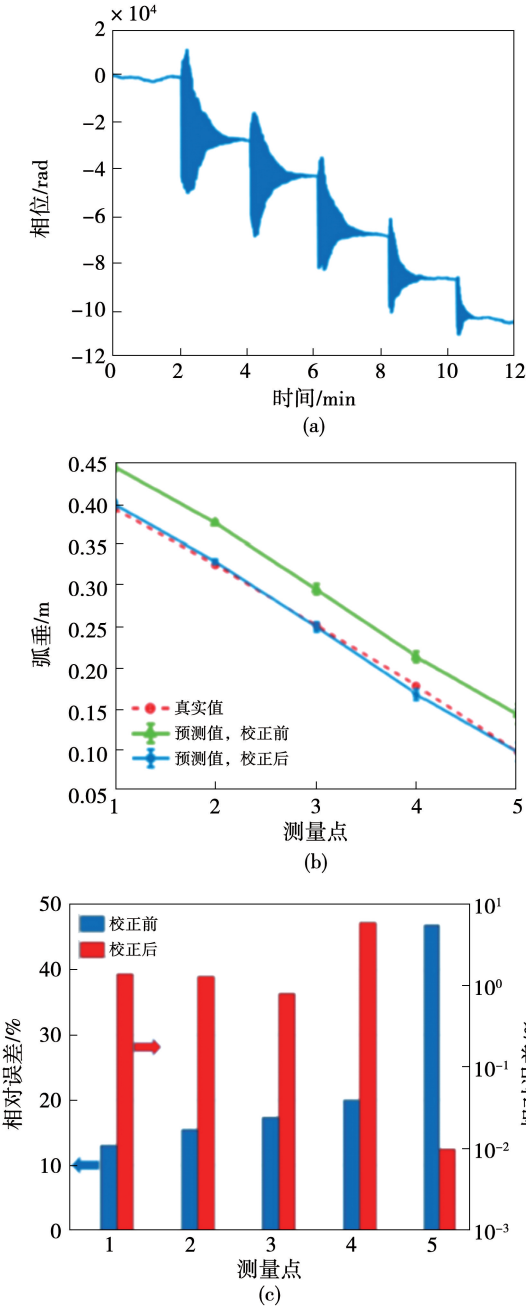


图 5 弧垂测量结果分析

Fig. 5 Analysis of sag measurement results

进一步分析光纤固定松动引起的额外长度变化,在式(2)中引入了误差项 ΔL ,有无额外长度的弧垂估计表示如下:

$$h_1 = \sqrt{\frac{3l}{8} \Delta L + h_0^2} \tag{14}$$

$$h'_1 = \sqrt{\frac{3l}{8} (\Delta L + \Delta L') + h_0^2} \tag{15}$$

相对误差可以表示为

$$\frac{h'_1 - h_1}{h_1} = \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{\Delta L + \frac{8}{3l} h_0^2}} - 1 \tag{15}$$

220 kV 输电网络的跨度通常为 100 m,假设 $l = 400$ m, $h_0 = 10$ m, h_1 从 10.5 m 增加到 12.5 m,间隔为 0.5 m, ΔL 的取值范围为 0.1‰ ~ 0.3‰,接着计算相对误差,如图 5(d) 所示。可以看出,在引入实际刻度参数后,虽然额外长度的比例增加,但相对误差小于 10%,并且随着弧垂的增加而减小。显然,由于模拟设备与实际情况之间存在一定差异,引起误差放大。

对相变曲线上进行高通滤波,截止频率设定为 0.5 Hz,以获得 $\Delta\varphi_v$,可根据式(13)计算最低点的位移。为了评估计算结果的准确性,在导线的最低点布置了 MEMS 加速度计作为对比,其分辨率为 6.1×10^{-5} g,传感范围为 ± 16 g。将加速度器的结果进行两次积分,可以得到最低点的位移信息。如图 6(a) 所示,加速度器和 Φ -OTDR 获得的位移信息基本一致,这证明等式(13)给出的转换关系是有效的。图 6(b) 给出了振动的 PSD 图,可得导线固有振动频率的值,证明了加速度器和 Φ -OTDR 结果的一致性。

因此,在已知初始垂度的情况下, Φ -OTDR 可以检测导线的位移。

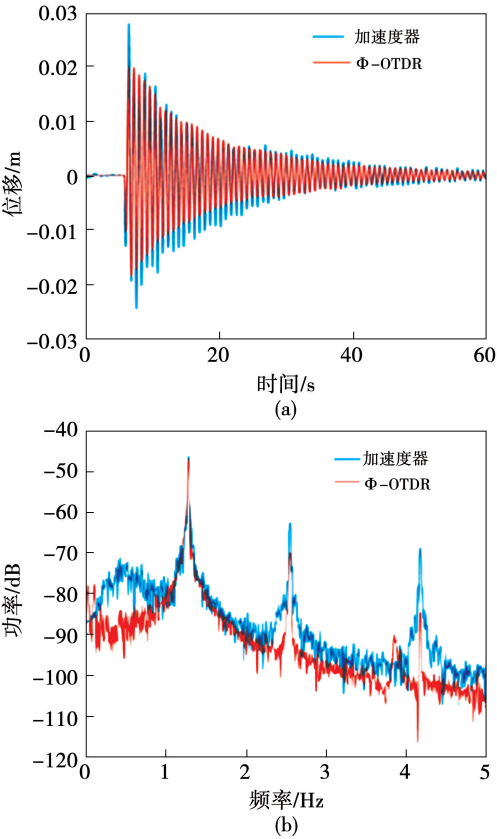


图 6 振动频谱分析
Fig. 6 Vibration spectrum analysis

2.2.2 覆冰试验

图 7 为覆冰厚度变化后悬挂部分导线的相位变化,它不仅体现了振动激励的一致性,还描述了导线振动固有频率的变化。随着振动的不断变化,由于共振,振动能量逐渐集中在导线的固有频率上。

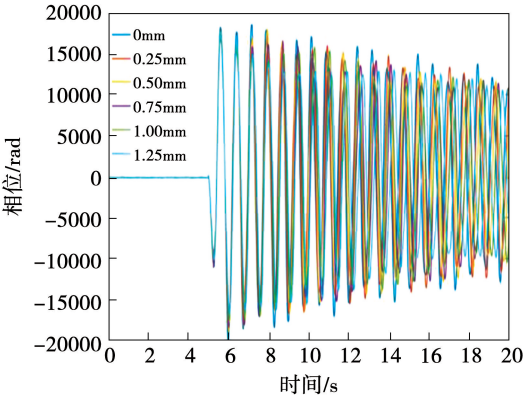
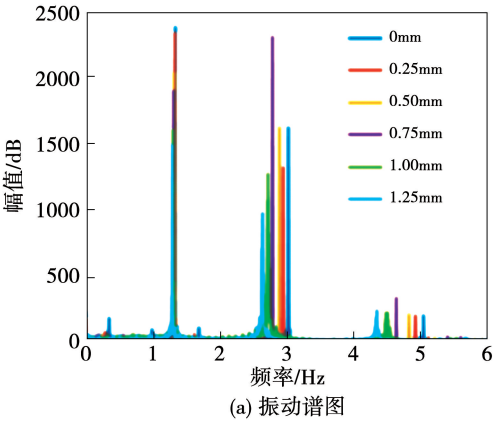


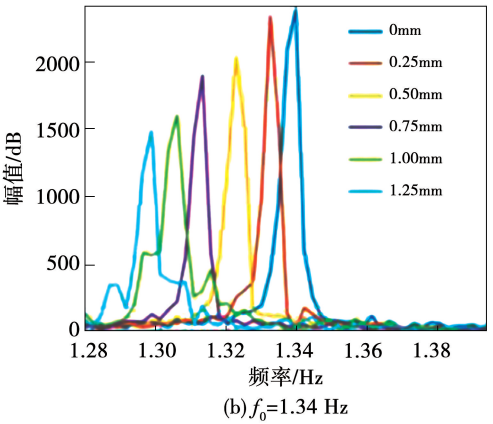
图 7 不同冰厚下的相变

Fig. 7 Phase change under different ice thickness

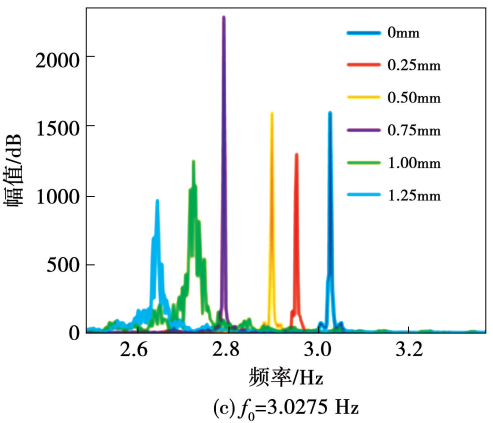
通过比较振动 PSD,可以进一步分析振动频率与冰厚之间的关系。图 8(a) 为不同冰厚下的振动 PSD,可以看出振动具有多个频率分量。根据式 (3),一次谐波和二次谐波之间的频率间隔应与二次谐波和三次谐波之间的间隔相同,但观察图 8(a) 明显与理论不符,将图 8(a) 局部放大为图 8(b)、(c)和(d)。很明显,随着冰厚度的增加,振动频率向低频漂移,其关系如图 8(e)所示。高次谐波的频移对冰厚的变化更为敏感,冰厚度与 f/f_0 之间的关系如图 8(f)所示。



(a) 振动谱图



(b) $f_0=1.34$ Hz



(c) $f_0=3.0275$ Hz

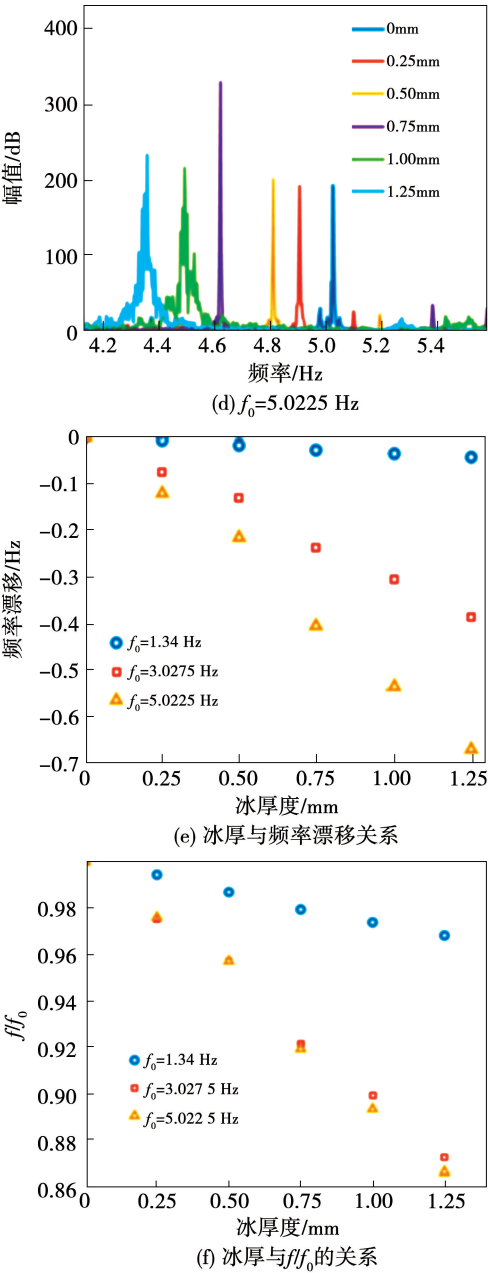


图 8 覆冰试验结果分析

Fig. 8 Analysis of icing test results

根据式(4), f/f_0 的值仅受导线质量的影响, 因此对于不同的 f_0 , 比率的变化趋势应该是相同的。在图 8(f) 中, 当 f_0 为 3.027 5 Hz 和 5.022 5 Hz 时, 比率变化一致, 而当 f_0 为 1.34 Hz 时, 斜率显著不同, 这表明这组频率不符合等式(3)。分析原因, 认为这组频率的出现是由铝合金框架的振动引起的。一方面, 在由导线和铝合金框架组成的振动系统中, 铝合金框架在外力作用下可能发生低频弹性变形, 振动频率低于由绳索和固定点组成的振动系统。另一方面, 由于铝合金架质量较大, 导线质量变化引起的

整体振动频率变化相对较小。结果表明, 1.34 Hz 左右的频率簇出现在低频段, 对冰厚的变化不太敏感。

分析二阶和三阶谐波的变化, 根据式(6)可计算预估的覆冰厚度, 结果如图 9 所示。估计值与实际值吻合良好, 在亚毫米尺度上绝对偏差小于 10.84%, 这意味着可以线路结冰初始阶段即产生预警信息。

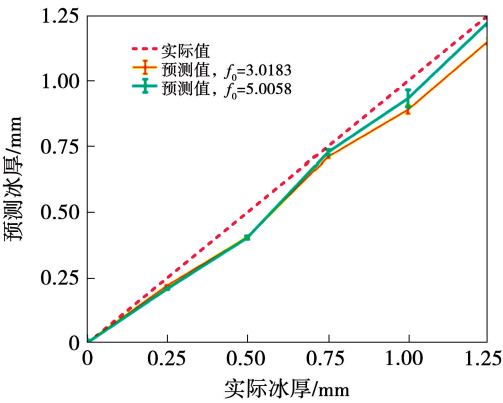


图 9 实际与预测的冰厚度

Fig. 9 Actual and estimated ice thickness

3 结 论

综上所述, 本文建立了输电线路状态的数学模型, 通过分析黏附在导线上光纤的相变特性, 提出了基于 Φ -OTDR 的在线监测方案的分析方法, 并搭建了演示装置对分析结果进行验证。试验结果表明, 在厘米尺度上, 弧垂的预测误差小于 5.8%, 在亚毫米尺度上, 覆冰厚度的预测误差不大于 10.84%。因此, 本文的研究结果可为输电线路的日常检查和维护提供了有效途径, 且具有更低的成本、更高的可信度和更早的警告。

虽然本文已做了较多的工作, 然而在工程应用中仍存在问题需要解决。首先, OPGW 中光纤的额外长度将影响弧垂和振动测量, 尾纤的存在可能导致弧垂预测偏大和振动位移预测偏小。其次, 固有频率的选择决定了覆冰厚度预测的准确性。对于实际输电线路, 振动的激励源通常是强风, 除固有频率外, 强风还可能引起更多频率分量。因此, 还需对此方法开展深度研究, 从而实现工程应用。另外, 本文试验研究时考虑的是均匀覆冰, 与实际存在一定差别, 后续将在覆冰实验室开展试验, 验证本文方法工程应用的可行性。

参 考 文 献:

- [1] 李海荣. 500 kV 架空输电线路次档距振荡原因与防范策略的分析[J]. 电工技术, 2018(17): 120.
LI Hairong. Causes Analysis and Prevention Strategies of Subspan Oscillation of 500 kV Overhead Transmission Lines[J]. Electric Engineering, 2018(17): 120.
- [2] 刘亮, 郝震, 崔赞, 等. 架空线路无覆冰导线舞动的参数共振机理[J]. 振动工程学报, 2018, 31(2): 308.
LIU Liang, HAO Zhen, CUI Yun, et al. Parametric Resonance Mechanism of Conductor Galloping Without Icing on Overhead Lines[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(2): 308.
- [3] 刘文峰, 袁翔, 傅建宇. 架空线路覆冰在线监测模型的研究现状[J]. 电子测试, 2019(14): 44.
LIU Wenfeng, YUAN Xiang, FU Jianyu. Research Status of Iced Calculation Models for Overhead Lines [J]. Electronic Test, 2019(14): 44.
- [4] 李党学, 李锐. 架空输电线路弧垂检测方法综述[J]. 电力与能源, 2019, 40(6): 664.
LI Dangxue, LI Rui. Overview of Sag Detection Methods for Overhead Transmission Lines[J]. Power & Energy, 2019, 40(6): 664.
- [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.
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.
- [6] 彭波, 赵彬, 刘彬, 等. 一种基于超长弹性细杆模型的大截面导线弧垂计算方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 70.
PENG Bo, ZHAO Bin, LIU Bin, et al. A Method for Sag Calculation of Conductor with Large Section Based on Super Long Thin Elastic Rod Model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 70.
- [7] 林金树, 吴润发. 基于声表面波技术的配电网架空线温度无源无线监测系统[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13): 167.
LIN Jinshu, WU Runfa. Passive-wireless Temperature Monitoring System Based on SAW Technology for Overhead Transmission in Distribution Network[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(13): 167.
- [8] 刘云鹏, 田源, 步雅楠, 等. 光纤检测变压器绕组变形的特征提取与聚类分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 93.
LIU Yunpeng, TIAN Yuan, BU Yanan, et al. Feature Extraction and Cluster Analysis of Transformer Winding Deformation by Optical Fiber Detection [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21): 93.
- [9] LUO J, HAO Y, YE Q, et al. Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-line Monitoring in Overhead Transmission Lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1559.
- [10] CHAOXIANG L, HUAJIAN W, WENBO L, et al. Image Processing and Recognition Technology for Transmission Line Icing[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 132.
- [11] ZENG X, LUO X, LU J, et al. A Novel Thickness Detection Method of Ice Covering on Overhead Transmission Line[J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1349.
- [12] OGAWA Y, IWASAKI J, NAKAMURA K. A Multiplexing Load Monitoring System of Power Transmission Lines using Fiber Bragg Grating [C]//Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 1997: OThC16.
- [13] 司召鹏, 卜泽华, 毛邦宁, 等. 基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 109.
SI Zhaopeng, BU Zehua, MAO Bangning, et al. Review of Research on Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer Based on Phase Demodulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 109.
- [14] 钟翔, 赵世松, 邓华夏, 等. 基于脉冲调制的 Φ -OTDR 研究综述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 193.
ZHONG Xiang, ZHAO Shisong, DENG Huaxia, et al. Review of Research on Φ -OTDR System Based on Pulse Modulation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 193.
- [15] 王敏学, 李黎, 周达明, 等. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测的应用研究综述[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3591.
WANG Minxue, LI Li, ZHOU Daming, et al. Overview of Research on Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Online Monitoring of Transmission Lines [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3591.
- [16] 马皓钰, 王夏霄, 马福, 等. Φ -OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 66.
MA Haoyu, WANG Xiaoxiao, MA Fu, et al. Research Progress of Φ -OTDR Distributed Optical Fiber Acoustic Wave Sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 66.
- [17] 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.
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.
- [18] 郑高铭,焦新泉,贾兴中. 基于基线偏移的加速度积分速度与位移的方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9):142.
- ZHENG Gaoming, JIAO Xinquan, JIA Xingzhong. Method for Calculating Velocity and Displacement Based on Acceleration of Baseline Offset [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9):142.
- [19] 吴超,王峥,庞振江,等基于 φ -OTDR 的架空输电线路风振检测系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(9):46.
- WU Chao, WANG Zheng, PANG Zhenjiang, et al. Design of the Wind-vibration Detection System for Overhead Power Line Based on φ -OTDR [J]. Automation & Instrumentation, 2019(9):46.
- [20] 葛雄,雷雨,侯新文,等. 输电线路导线覆冰舞动时力学特性分析[J]. 江西电力, 2019, 43(12):33.
- GE Xiong, LEI Yu, HOU Xinwen, et al. Analysis of Mechanical Characteristics of Transmission Line Conductors under Ice Coating and Galloping [J]. Jiangxi Electric Power, 2019, 43(12):33.
- [21] 谢占山,李忠芳,王少夫. 架空线张力与频率关系理论与试验的研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2014, 30(3):62.
- XIE Zhanshan, LI Zhongfang, WANG Shaofu. Research on the Theory and Test of the Relationship Between Overhead Wire Tension and Frequency [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2014, 30(3):62.
- [22] CHAI Q, LUO Y, REN J, et al. Review on Fiber-optic Sensing in Health Monitoring of Power Grids [J]. Optical Engineering, 2019, 58(7):072007.
- [23] MA G, SHI C, QIN W, et al. A Non-intrusive Electrical Discharge Localization Method for Gas Insulated Line Based on Phase-sensitive OTDR and Michelson Interferometer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4):1324.
- [24] 董向华. 基于 φ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2016(3):32.
- DONG Xianghua. Research on the Submarine Optical Cable Disturbance Monitoring System Based on φ -OTDR Technology [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2016(3):32.
- [25] 杨斌,皋魏,席刚. Φ -OTDR 分布式光纤传感系统的关键技术研究[J]. 光通信研究, 2012(4):19.
- YANG Bin, GAO Wei, XI Gang. Key Technology of Φ -OTDR-based Distributed Fiber-optical Sensing Systems [J]. Study on Optical Communications, 2012(4):19.
- [26] 孙毅,赵泰,侯思祖. 基于 OTDR 的光纤在线监测系统实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2004(5):78.
- SUN Yi, ZHAO Tai, HOU Sizhu. Experimental of Optical Fiber Monitoring System Based on OTDR [J]. Journal of North China Electric Power University, 2004(5):78.

(编辑:温泽宇)