

基于 Φ -OTDR的架空输电线路覆冰在线监测方法*

熊 菲^{1*}, 邢振华¹, 张益昕^{2,4}, 张 道³, 陈亚泽², 方 行², 张旭苹^{2,4}, 王 峰²

(1. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 南京 210023; 3. 南京法艾博光电科技有限公司, 南京 211135; 4. 南京大学 深圳研究院, 广东深圳 518000)

摘 要: 利用 ANSYS 有限元分析软件建立等高架空输电线路有限元模型并进行模态分析, 揭示了架空输电线固有频率与覆冰厚度间的单调递减规律, 因此提出了一种基于相位敏感型光时域反射 (Phase-sensitive optical time-domain reflectometer, Φ -OTDR) 技术的输电线固有频率测定方法, 通过反演覆冰厚度变化, 实现覆冰在线监测。搭建了输电线覆冰模拟装置, Φ -OTDR 设备的测试结果表明悬垂线的小幅度振动频率只与系统属性有关, 而与外部激励无关, 且悬垂线的固有频率随着覆冰层数的增加而降低, 具有很好的单调性, 从而为架空输电线路覆冰在线监测提供了一种潜在的全新解决方案。

关键词: 相位敏感光时域反射计; 输电线路; 覆冰; 固有频率

中图分类号: TN818 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)02-0081-08

Φ -OTDR-based On-line Monitoring Method for Overhead Transmission Line Icing

XIONG Fei¹, XING Zhenhua¹, ZHANG Yixin^{2,4}, ZHANG Dao³, CHEN Yaze², FANG Xing²,
ZHANG Xuping^{2,4}, WANG Feng²

(1. Inner Mongolia Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd, Hohhot Inner Mongolia 010011, CHN; 2. College of Engineering and Applied Sciences Nanjing University, Nanjing 210023, CHN; 3. Nanjing Fiber Photonics Technology Co., Ltd, Nanjing 211135, CHN; 4. Shenzhen Research Institute of Nanjing University, Shenzhen Guangdong 518000, CHN)

Abstract: The finite element model of the overhead conductors was established and the modal analysis was carried out with the ANSYS finite element analysis software. The results showed that the natural frequencies of various vibration modes of the overhead conductors decreased with the icing thickness increasing. A method for measuring the natural frequency of overhead conductors based on the phase-sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) was proposed, with which the on-

收稿日期: 2021-12-21

* **基金项目:** 国家自然科学基金项目 (61975076, 62175100, U2001601); 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目 (2019GG374); 中央高校基本科研业务费 (0213-14380202); 深圳市科技创新基金 (YFJGJS1.0)

作者简介: 熊 菲 (1986—), 女, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为光纤通信及光纤传感; (E-mail: xfei@nmdsy.com)
张益昕 (1984—), 男, 工学博士, 副教授, 研究方向为分布式光纤传感系统的机理研究与仪器化设计; (E-mail: zyxin@nju.edu.cn)

张旭苹 (1962—), 女, 工学博士, 教授, 研究方向为分布式光纤传感技术及其工程化应用。

* **通讯作者**

line monitoring of overhead transmission line icing could be realized. A transmission line icing simulation device was built. The test results of a commercial Φ -OTDR showed that the small-amplitude vibration frequency of the suspended line was only related to system properties, not external excitation. The natural frequency of the suspended line decreased with the increasing number of the coating layers, which showed excellent monotonic relationship. It was testified that this method could provide a reliable solution for on-line monitoring of overhead transmission line icing.

Key words: phase-sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR); transmission line; icing; natural frequency

引 言

架空输电线路是电力传输网络的重要组成部分,由于其途经的地区地形地况复杂、环境恶劣,易遭受灾害而毁坏,其中尤以冻雨、雨淞、雾淞、积雪等凝结在线缆周围形成的覆冰和由其引发的舞动现象最为常见、危害最大。2008年1月10日,我国华中、华东部分地区出现长时间持续的大强度、大范围低温、雨雪冰冻天气,导致湖南、江西、浙江、安徽、湖北等地的电网发生倒塔、断线、舞动、覆冰闪络等多种灾害。湖南电网、浙江电网等多条输电线路停运。雪灾造成国家电网公司直接财产损失高达104.5亿元,灾后电网恢复重建和改造仍需投入资金390亿元^[1]。2021年2月27日,受较强冷空气影响,甘肃定西市出现大风、降雪和冰冻天气,其下辖的通渭县域内的112马吕线等5条10千伏线路覆冰严重,倒杆12基;35千伏渭会线杆塔覆冰严重;2条10千伏线路接地,8条10千伏线路跳闸,灾害共致146个变台,7430户停电,损失巨大^[2]。因此对输电线路进行覆冰监测,及时发现和处理故障隐患,确保电网安全稳定运行的需求极为迫切。传统的基于拉力传感器的称重法、基于摄像头的图像监测法等电子式的覆冰监测技术存在着供电组网困难、抗电磁干扰能力差、环境适应性弱、成本高昂、难以高密度部署等不足。而基于光纤布拉格光栅的光纤传感器则必须额外安装光栅传感头,无法利用电网中既有的OPGW、OPPC、ADSS等缆线的光纤资源,并且只能实现分散的点式测量,组网成阵的数量有限,无法用于监测长距离的输电线路。全分布式光纤传感器利用整条光纤作为外界参量的感知元件和信号传输媒介,具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强^[3-6]、连续测量无盲区、可测量参量多的优点,能很好地与现有输电线路的结构特性融合,克服传统覆冰监测技术的不足。

诸如BOTDR、POTDR和 Φ -OTDR等分布式光纤传感技术已在输电线覆冰舞动监测领域取得了一定的应用成果^[7-9],然而仍存在诸多不足:单纯依靠监测得到的输电线路温度分布数据无法直接判断输电线是否覆冰以及覆冰程度;利用积温时间、温度日较差和气象数据等综合分析也只能定性评估覆冰概率,判断结果略显牵强,误报率较高;通过应力数据反演线缆弧垂变化,进而推测覆冰程度,但此方法仅适用于重度覆冰状态,由于架空输电线路中复合通信光纤的松套设计,轻度覆冰时,光纤应变状态几乎不受线缆形变的影响,无法及时发出预警;以 Φ -OTDR和POTDR为代表的分布式光纤振动传感器则只能检测舞动现象,不能判断是否覆冰及其程度。针对上述局限性,文中拟从覆冰对输电线振动特性的影响这一角度切入,提出一种全新的覆冰监测方法。利用ANSYS有限元分析软件对等高覆冰架空导线进行模态分析,探讨覆冰厚度对架空导线固有频率的影响,尝试提出一种基于 Φ -OTDR的输电线固有频率测定方法,由其固有频率的变化来反演覆冰厚度变化。搭建具有高度仿真效果的输电线覆冰模拟装置,验证这种覆冰监测方法的可行性,以期为架空输电线覆冰监测提供一种全新的技术方案。

1 基于 Φ -OTDR的振动信号解调原理

与OTDR使用宽谱光源不同, Φ -OTDR将相干长度极长的窄线宽光源作为系统光源^[10]。检测探测脉冲光注入传感光纤后在沿线产生的瑞利背向散射(Rayleigh Back Scattering, RBS),当传感光纤静止稳定时,RBS的相位相对稳定,而在传感光纤受到外界扰动时,相应的RBS的相位受到调制。鉴相型 Φ -OTDR采用IQ解调、Hilbert变换解调^[11]、三端

口相位解调^[12]、相位载波生成^[13]等方法从RBS信号中解调出每个采样点处的幅度与相位,计算振动区域前后两个采样点的相位差随时间的变化,经过解卷绕、快速傅里叶变换、做方差、计算应变等进一步的数据处理得到振动的强度、频率、位置信息,实现振动传感。

鉴相型Φ-OTDR的原理如图1所示。在振动作用区域前选择一段光纤,记为R1;在振动作用区域后也选择一段光纤,记为R2。相同频率,并具有固定相位差的任意列光波叠加一定产生干涉现象,单色探测脉冲光注入传感光纤,在R1处和R2处产生的RBS的电场可以分别表示为:

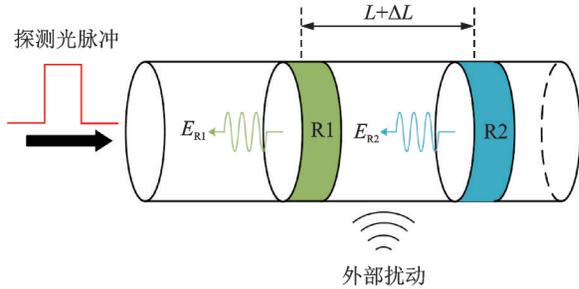


图1 Φ-OTDR鉴相原理

Fig.1 The phase discrimination principle of Φ-OTDR

$$\begin{aligned} E_{R1} &= E_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ E_{R2} &= E_2 \cos\left[\omega t + \varphi_1 + \frac{4\pi n}{\lambda}(L + \Delta L)\right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E_1 和 E_2 分别参考区域R1和R2的RBS电场强度, ω 是探测脉冲光的角频率, φ_1 是参考区域R1的初始相位, λ 是探测脉冲光在真空中的波长, L 是R1和R2的间距, ΔL 是外部扰动引起的光纤长度变化, n 是光纤的纤芯折射率。未发生振动时, ΔL 为0,R2与R1之间的相位差为 $4\pi nL/\lambda$;R2与R1之间的区域发生振动后,R2与R1之间的相位差为 $4\pi n(L + \Delta L)/\lambda$,相位差的变化量为两者之差,可表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n(L + \Delta L)}{\lambda} - \frac{4\pi nL}{\lambda} = \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L \quad (2)$$

ΔL 与R1、R2两个位置处的RBS的相位差的变化量 $\Delta\varphi$ 呈线性关系。由式(2)可知,从RBS强度信号解调出光纤各个位置处的RBS相位,计算相位差的变化量,就能定量还原光纤沿线各位置处的振动信息。

2 架空输电线模态分析

在自重力作用下处于悬空状态的架空输电线

的线型是一条悬链线^[14],以架空线最低点为原点,水平方向为x轴,竖直方向为y轴建立平面直角坐标系,架空线的轨迹可表示为式(3)。

$$y = \frac{H}{\omega} \left(\cosh \frac{\omega}{H} x - 1 \right) \quad (3)$$

式中: H 为水平张力,单位为N; ω 为输电线单位长度自重力,单位为N/m。

依据式(3)可计算等高架空线的任意一点的弧垂、弧长、张力等参数。在ANSYS有限元分析软件中进行架空输电线模态分析之前,需确定输电线在自重作用下的初始位形。架空导线找形的有限元法有直接迭代法和找形分析法^[15]。不考虑耗时,两种方法的精度都可以达到足够高。文中选择跨度为200 m,水平张力为10 000 N,导线型号为LGJ-240/30的架空导线为分析对象,利用具有双线性刚度矩阵的LINK10杆单元模拟索索。采用直接迭代法进行架空导线的找形,找形结果如图2所示。利用悬链线法计算的理论与有限元模拟值进行对比,部分参数的对比结果如表1所示。

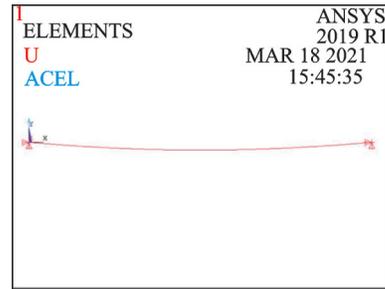


图2 架空导线的初始位形

Fig.2 Initial configuration of overhead power transmission line

表1 悬链线法计算部分参数的理论与有限元法模拟值对比

Tab.1 Comparison of theoretical values of parameters calculated by catenary method with those simulated by finite element method

参数名称	悬链线法	有限元法	误差/(%)
水平张力/N	10 000	10 000.659 5	0.07
最大张力/N	10 040.866	10 041.076 2	0.02
跨中弧垂/m	4.521 9	4.519 3	0.5
索长/m	200.272 4	200.272 1	0.001 5

由于悬链线法计算的水平张力、最大拉力、跨中弧垂、索长这4个参数的理论值和利用ANSYS进行有限元的模拟得出的值均相当接近,误差均小于1%,因此,利用直接迭代法进行找形的结果精确

可靠,为模态分析的正确性提供了保障。调整架空导线的水平张力,确定初始位形后进行模态分析,分别提取架空导线在 9 000 N,10 000 N,11 000 N,12 000 N,13 000 N 的水平张力下的模态。

不同水平张力下,面外振动的固有频率如表 2 所示,面外振动各阶的固有频率保持很好的倍频关系,并且随着架空导线水平张力的增加,架空线的面外振动的第一、第二、第三、第四振型的固有频率均不断增大。

表 2 不同水平张力面外振动的固有频率

Tab. 2 Natural frequencies of out-of-plane vibration under different horizontal tensions

	水平张力/N				
	9 000	10 000	11 000	12 000	13 000 000
第一振型	0.247	0.260	0.273	0.285	0.297
第二振型	0.493	0.520	0.546	0.570	0.594
第三振型	0.740	0.781	0.819	0.855	0.891
第四振型	0.987	1.041	1.09	1.14	1.18

根据悬索线性振动理论,两端铰接于相同高度的水平悬索面内对称振动会产生附加的动张力增量,而文中模拟的架空导线存在几何非线性,要想模拟出实际动张力增量的效果十分困难,当水平张力为 9 000 N、10 000 N 和 11 000 N 时,没有提取出面内第一振型,却提取出两个面内对称的第二振型,说明文中采用的模拟方法在提取面内对称振型时误差较大。面内第二振型和面内第四振型属于面内反对称振型,面内反对称振动不会产生附加的动张力增量。从表 3 可知,不同水平张力下,面内反对称的固有频率之间存在着较好的倍频关系,排除面内对称模态的误差,不失一般性,故认为随着水

表 3 不同水平张力面内振动的固有频率

Tab. 3 Natural frequencies of in-plane vibration under different horizontal tensions

	水平张力/N				
	9 000	10 000	11 000	12 000	13 000
对称 第一振型	/	/	/	0.563	0.541
反对称 第一振型	0.492	0.519	0.545	0.569	0.593
对称 第二振型	0.628	0.612	0.587	0.880	0.909
反对称 第二振型	/0.837	/0.836	/0.854		
对称 第三振型	0.987	1.040	1.092	1.141	1.187
反对称 第三振型	1.245	1.309	1.370	1.430	1.488

平张力的增大,架空导线应力刚化效果增强,架空导线的固有频率均不断增大。

由于 0 °C 冰的弹性模量为 53 MPa,远远小于钢芯铝绞线 LGJ-240/30 的弹性模量 73 Gpa,因此,冰自身应力刚化对固有频率的影响远远小于导线应力刚化对固有频率的影响,覆冰的质量对固有频率的影响占据主导地位^[16]。文中直接采用改变密度法模拟导线覆冰,将由于覆冰造成的质量增加等效为导线密度的增大。LGJ-240/30 的截面积为 275.96 mm²,等效半径为 9.372 3 mm。理论推导,覆冰导线的等效密度可表示为:

$$\rho = \rho_0 + \frac{(2r + d)d}{r^2} \rho_1 \quad (4)$$

式中:钢芯铝绞线 LGJ-240/30 的密度 ρ_0 为 3.341 × 10³ kg/m³,半径 r 为 9.372 3 mm,0 °C 冰的密度 ρ_1 为 0.9 × 10³ kg/m³。

由式(4)计算在覆冰厚度分别为 4 mm、8 mm、12 mm、16 mm、20 mm 时,覆冰导线的等效密度如表 4 所示。

表 4 不同覆冰厚度时覆冰导线的等效密度

Tab. 4 Equivalent densities of conductor with different icing thicknesses

覆冰厚度/mm	等效密度/(10 ³ kg·m ⁻³)
4	4.274 0
8	5.534 0
12	7.121 9
16	9.037 6
20	11.281 3

将架空导线的初始水平张力设为 10 000 N,在最后一次迭代计算前,更改单元密度,完成静力计算后,分别提取模态。表 5 展示了初始水平张力为 10 000 N 时,在不同覆冰厚度下架空导线的固有频率。随着覆冰厚度的增加,架空导线各阶模态的固有频率均不断降低。各阶模态的固有频率关于覆冰厚度的函数单调递减。

3 仿真模拟系统搭建与实验结果分析

文中搭建了具有高度仿真效果的架空输电线路覆冰模拟装置,其结构如图 3 所示。利用铝合金型材搭建两个结构完全相同的支架,平行放置于地面,用于模拟等高的输电杆塔,支架 1、2 的高度均设置为 1.5 m。在两个支架各自的横担上各固定一个

表5 初始水平张力为10 000 N时,不同覆冰厚度下架空导线的固有频率

Tab.5 Natural frequencies of overhead conductors with different icing thicknesses under initial horizontal tension of 10 000 N

	阶数	覆冰厚度/mm				
		4	8	12	16	20
f/Hz	1	0.255 26	0.249 40	0.243 29	0.237 22	0.231 37
	2	0.509 23	0.497 41	0.485 07	0.472 82	0.460 99
	3	0.510 37	0.498 63	0.486 39	0.474 25	0.462 52
	4	0.578 07	0.543 90	0.512 97	0.486 04	0.462 86
	5	0.765 54	0.747 93	0.729 57	0.711 35	0.693 76
	6	0.809 07	0.782 50	0.757 92	0.735 34	0.714 61

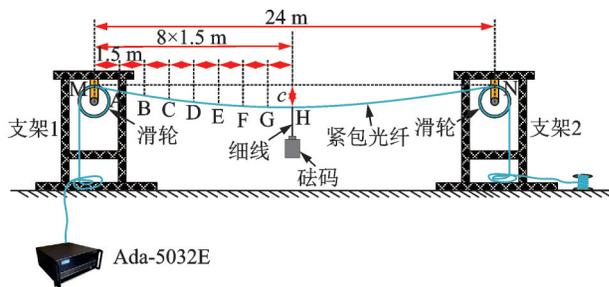


图3 覆冰模拟装置原理图

Fig.3 Schematic of icing simulation device

滑轮,将传感光纤缠绕在两个滑轮上拉紧,传感光纤处于悬垂状态,用于模拟输电线路。采用在悬垂光纤上悬挂砝码、释放砝码的方式对悬垂光纤施振,在光纤上涂敷硅橡胶模拟输电线路覆冰。选用南京法艾博光电科技有限公司研制的Ada-5032E外差探测型Φ-OTDR^[17]对悬垂光纤进行监测。Φ-OTDR性能指标如表6所示。

表6 Ada-5032E的性能指标

Tab.6 Performance parameters of Ada-5032E

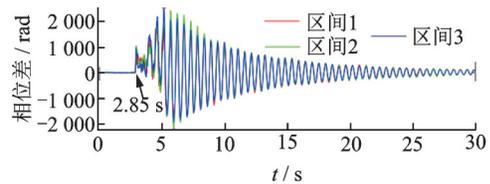
性能指标	最小值	典型值	最大值
监测距离/km	0.1	60	80
测频范围/Hz	0.1	10	10 000
空间分辨率/m	4	10	50
空间定位精度/m		±3.5	

3.1 架空线弧垂对固有频率的影响

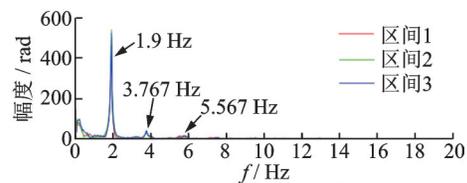
在实际振动过程中,悬垂光纤的内部张力不断变化,相应的应力刚度并不恒定,模态也因此不断改变,固有频率时刻都在变化,但在小幅度的振动中,应力变化的程度较小,仍可表现出固有的特性。由固有频率的变化反演覆冰厚度变化的方法中,必须保证系统属性不变时,悬垂光纤振动频率也不

变。为验证架空悬垂光纤小幅度振动的振动频率只与系统属性有关,而与施振方式无关,用细线在光纤不同位置悬挂不同质量的砝码,剪断细线释放砝码对悬垂光纤进行外部激励,并同时利用Φ-OTDR进行监测。

图4展示了在悬垂光纤中点处剪断释放20 g砝码后,30秒内处于振动中心的3个临近鉴相区间(悬垂光纤多个鉴相区间中相邻且相位差信号强度最大的3个区间)的相位差信号随时间的变化及其频谱。3个鉴相区间的相位差信号频谱的特征峰均为1.9 Hz,3.767 Hz,5.567 Hz。换用5 g,10 g,30 g,40 g的砝码,相位差信号的频谱如图5所示。第一阶频率均为1.9 Hz,第二阶、第三阶特征频率均相差较小。在不同位置悬挂砝码对悬垂光纤施振,相位差信号的第一阶特征频率也均为1.9 Hz,第二阶、第三阶特征频率同样均在3.767 Hz与5.567 Hz左右。因此,可以认为悬垂光纤的振动特征频率只与自身特性有关,而与外界激励无关。相位差信号的特征频率即是固有频率。



(a) 相位差时域图



(b) 相位差频谱图

图4 3个鉴相区间相位差的时域图与频谱图

Fig.4 Time domain and frequency spectra of phase difference in three phase discrimination intervals

调整悬垂光纤的跨中弧垂(图3中的c值已红线标出)分别为5 cm、9 cm、13 cm、17 cm、21 cm、29 cm,选用50 g的砝码系在悬垂光纤中点进行激励。相位差信号的频谱如图6所示。由跨中弧垂c与水平张力H的约束关系可知,在两端支架间距不变时,悬垂光纤内部的水平张力H随着弧垂c的增加而减小,H造成光纤材料应力刚化程度变小,在跨中弧垂分别为5 cm、9 cm、13 cm、17 cm、21 cm、29 cm时,第一阶频率分别为1.9 Hz、1.733 Hz、1.567 Hz、1.333 Hz、1.267 Hz、1.2 Hz。

图7展示了悬垂光纤的振动频率与跨中弧垂的

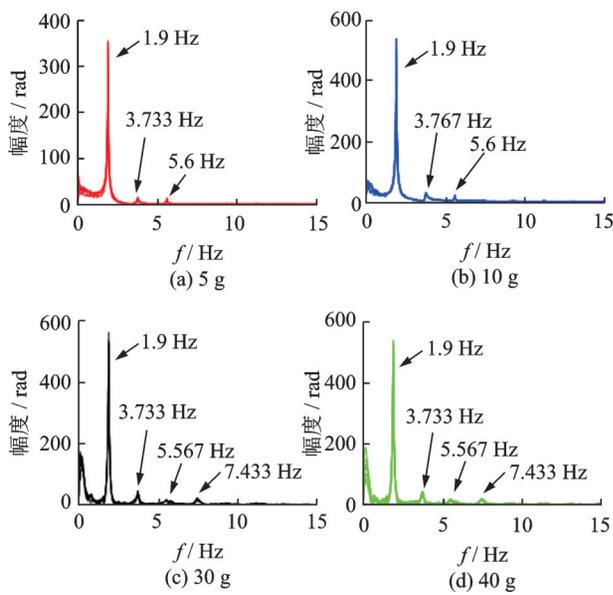


图 5 中点处不同质量砝码坠落相位差的频谱

Fig.5 Frequency spectra of phase difference after falling of weights with different masses at the midpoint

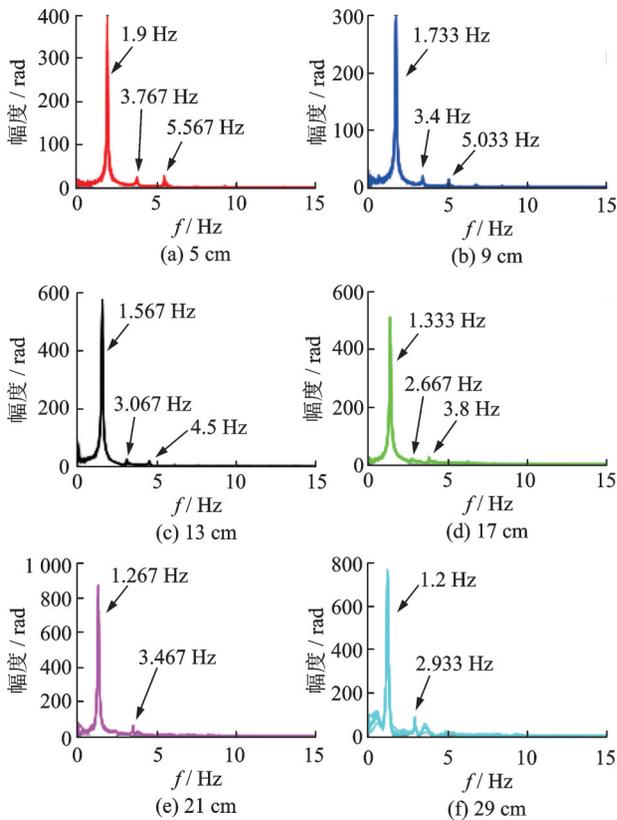


图 6 不同跨中弧垂时悬垂光纤振动的频谱

Fig.6 The vibration spectra of suspended optical fiber with different mid-span sags

关系。跨中弧垂为 21 cm、29 cm 时,第二阶固有频率幅度过小,接近消失。随着弧垂增大,第三阶固有频率由 5.567 Hz 降低至 2.933 Hz,第二阶固有频率也不断降低。说明弧垂越大,悬垂光纤的各阶固

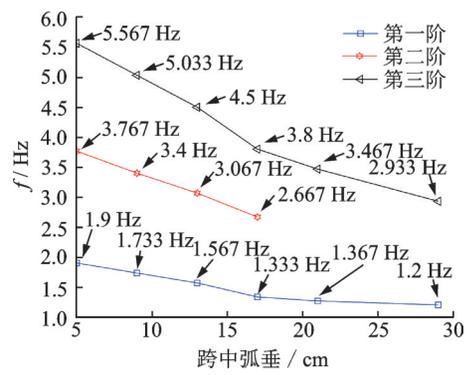


图 7 悬垂光纤固有频率与跨中弧垂的关系

Fig.7 The relationship between the natural frequency of suspended fiber and the mid-span sag

有频率越小,即架空线的固有频率随着跨中弧垂增大单调递减,由固有频率即可反推架空线弧垂,进而结合冰的密度及架空线弹性模量反推覆冰厚度。

3.2 基于固有频率的架空线覆冰厚度评估

在悬垂光纤沿线涂敷硅橡胶模拟覆冰,大致保持每增加一层时附着物增加的厚度一致。不断增加涂敷层数,选用 20 g 的砝码在悬垂光纤中点处进行激励。涂敷硅橡胶的悬垂光纤如图 8 所示。从无胶、一层、两层直到七层,附着在悬垂光纤上的硅橡胶不断增多。

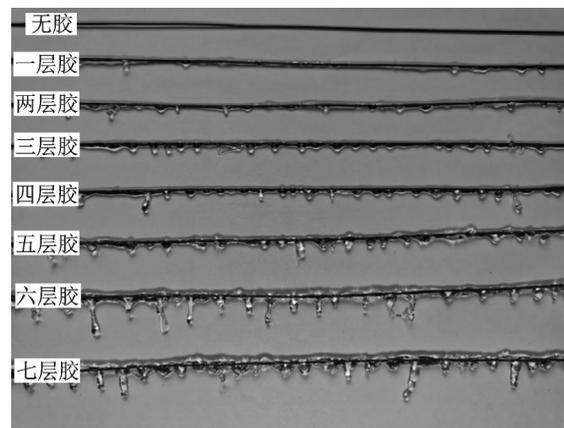


图 8 涂敷不同层数的硅橡胶的紧包光纤

Fig.8 Compact fiber coated with different layers of silicone rubber

图 9 展示了悬垂光纤上无胶、覆着一层胶、两层胶、三层胶时 30 s 时间的相位差信号的频谱。随着涂覆层数的增加,悬垂光纤的固有频率不断降低。

图 10 展示了悬垂光纤的固有频率与涂胶层数的关系。一方面,涂敷在光纤表面的硅橡胶会导致光纤单位长度质量增加,这会使固有频率降低;另

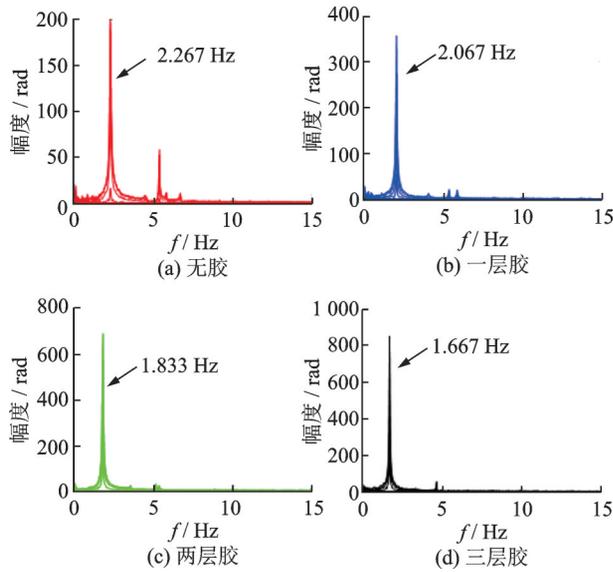


图9 垂悬光纤覆盖不同层涂胶时相位差信号的频谱

Fig.9 Spectra of phase difference signal under no coating and different layers of coating with silicone rubber

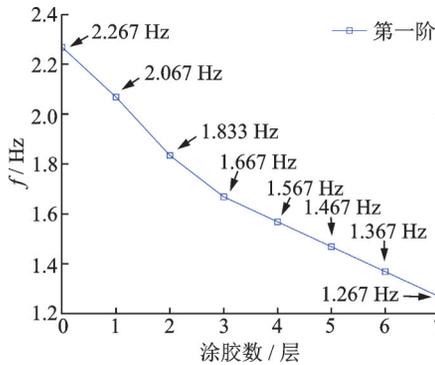


图10 悬垂光纤固有频率与涂胶层数的关系

Fig.10 The relationship between the natural frequency of suspended optical fiber and the number of coating layers

一方面,质量的增加会导致悬垂光纤各个位置处的弧垂增大,光纤内部张力增大,应力刚化效果增强,这会使固有频率增大。实验结果显示,硅胶涂覆层数从0~7变化时,悬垂光纤的第一阶固有频率分别为 2.267 Hz、2.067 Hz、1.833 Hz、1.667 Hz、1.567 Hz、1.467 Hz、1.367 Hz、1.267 Hz,呈现单调递减变化。随着涂胶层数的增加,悬垂光纤的固有频率不断降低,说明单位长度质量增大时降低固有频率的效果大于由张力增大引起应力刚化效果增强时进而增大固有频率的效果。增加的附着物的质量对悬垂光纤的固有频率变化起主导作用。

两端固定并拉紧的弦的弧垂远远小于其跨度,自重力远远小于弦的内部张力,对弦线的几何形状几乎没有影响,可以不考虑几何非线性,固有频率

可表示为^[18]:

$$f_n = \frac{m}{2l} \sqrt{\frac{H}{\omega}} \quad (5)$$

式中: H 为弦的内部张力, ω 为弦的单位长度质量, l 为弦长, m 为模态阶数, $m=1,2,3\cdots$

与弦相比,架空输电线路是悬索结构,弧垂不可忽略,具有很强的几何非线性,但单位长度质量也是影响悬索固有频率的重要因素。如图8所示,悬垂光纤的轴向、周向的硅橡胶分布不均匀,附着在光纤上的硅橡胶的质量、厚度与层数成正相关,但不是线性变化。考虑到未涂敷硅胶的光纤直径与硅橡胶的厚度处在同一数量级,定义涂敷硅橡胶的层数+1为该工况的悬垂光纤的覆冰厚度指数,用 n 表示。

由式(5)可知,弦的各阶固有频率与 l 成反比,与 $H^{1/2}$ 成正比,与 $\omega^{1/2}$ 成反比。而覆冰厚度指数 n 与光纤的单位长度质量高度相关,采用最小二乘法对悬垂光纤频率 f 与覆冰厚度指数开方后的倒数 $n^{-1/2}$ 进行一次拟合。 $n^{-1/2}$ 的计算结果如表7所示。 f 与 $n^{-1/2}$ 的拟合结果可表示为:

$$f = \frac{1.5396}{\sqrt{n}} + 0.8465 \quad (6)$$

式中: f 为该工况下的悬垂光纤的第一阶固有频率,单位Hz; n 为覆冰厚度指数。

表7 覆冰指数及其开方的倒数

Tab.7 Icing index and reciprocal of its square root

涂胶层数	覆冰指数 n	$n^{-1/2}$	f/Hz
0	1	1	2.267
1	2	0.707	2.067
2	3	0.577	1.833
3	4	0.5	1.667
4	5	0.447	1.567
5	6	0.408	1.467
6	7	0.378	1.367
7	8	0.3536	1.267

一次拟合相关系数达到了0.9614,即 f 与 $n^{-1/2}$ 高度相关。由式(6)求得该工况的覆冰厚度指数 n , n 表示为:

$$n = \frac{2.3704}{(f - 0.8465)^2} \quad (7)$$

利用Φ-OTDR测定悬垂光纤面内振动的第一阶固有频率,即可计算 n 值。 n 衡量了覆冰程度, n 值越大,覆冰越厚。实际的架空输电线路,在架设完成后,跨度、高差、各个位置的初始弧垂,电缆单

位长度自重力均已确定,不会发生变化,其固有频率恒定不变。覆冰会使输电线的固有频率降低,采用 Φ -OTDR测定输电线的固有频率,由固有频率的变化定性判断输电线有无覆冰及其厚度。

4 结 论

通过对架空导线进行模拟仿真,得到了架空导线的模态特性,为由架空线固有频率的变化反演覆冰厚度变化提供了理论依据。进行了输电线路覆冰模拟实验,验证了架空悬垂光纤小幅度振动条件下特征频率只与系统属性有关,与外界激励无关;证实了悬垂光纤的固有频率随覆冰厚度的增加不断降低;实验结果与有限元模态分析结论吻合。实验结果证明文中提出的基于 Φ -OTDR的输电线路固有频率测定方法,并由其固有频率的变化反演覆冰厚度变化的方法可靠性高、可行性强。这使得 Φ -OTDR技术能够同时实现覆冰监测和舞动监测,拓宽了 Φ -OTDR的应用范围,对于推动基于 Φ -OTDR实现输电线路覆冰监测工程化应用具有一定的指导意义。

鸣谢:本项目得到了国家自然科学基金项目(61627816, U2001601);内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2019GG374);中央高校基本科研业务费(0213-14380202)、深圳市科技创新基金(YFJGJS1.0)资助,感谢南京大学的丁哲文博士在本工作中对建模的帮助。

参 考 文 献

- [1] 杨靖波,李正,杨风利,等. 2008年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 4: 10-4.
- [2] 国网定西供电公司全力抢修恢复冰冻雨雪覆冰灾害受损电网[EB/OL]. <https://power.in-en.com/html/power-2384277.shtml>, 2020.
- [3] Ding Z W, Zhang X P, Zou N M, et al. Phi-OTDR based online monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5163-5169.
- [4] Chen X, Zou N, Liang L, et al. Submarine cable monitoring system based on enhanced COTDR with simultaneous loss measurement and vibration monitoring ability[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13115-13128.
- [5] 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.
- [6] 张旭萃,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): 15.
- [7] 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.
- [8] 张旭萃,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.
- [9] Wu H J, Tang B, Xiao Y, et al. Monitoring of the transmission line galloping with a novel distributed optical fibre sensor and its statistical data analysis[J]. IET Gener. Transm. Distrib., 2020, 14(1): 166-171.
- [10] Healey P, Booth R C, Daymond-John B E, et al. OTDR in single-mode fibre at 1.5 μm using homodyne detection[J]. Electronics Letters, 1984, 20(9): 360-362.
- [11] Yang G, Fan X, Wang S, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1-12.
- [12] Sun Q, Liu D, Wang J, et al. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Communications, 2008, 281(6): 1538-1544.
- [13] Fang G, Xu T, Feng S, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [14] 张旺海. 覆冰架空导线振动数值仿真分析及实验研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- [15] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [16] 范孜. 覆冰分裂导线的动力学特性研究[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [17] 出版者. Ada-5032E 分布式光纤微扰动监测仪[EB/OL]. <http://fib-tech.com/content/?3.html>, 2019.
- [18] 鲍文博,白泉,陆海燕. 振动力学基础与MATLAB应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.