

王帅,徐钦云,林胜海.基于分布式光纤传感的输电线路覆冰预警研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):481-487.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240434

WANG Shuai,XU Qinyun,LIN Shenghai.Research on icing warning of transmission lines based on distributed fiber optic sensing[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):481-487.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240434

基于分布式光纤传感的输电线路覆冰预警研究

王 帅, 徐钦云, 林胜海

(青岛科技大学 信息技术学院, 山东 青岛 266000)

摘 要:为实现输电线路覆冰状态的定量监测,采用理论建模和模拟实验的方法,基于布里渊散射原理和悬垂线缆的力学分析,推导布里渊频移和覆冰厚度的关系,并通过模拟实验验证该关系的准确性。研究结果表明,覆冰厚度和布里渊频移呈单调递增关系,在实验条件下,覆冰厚度测量误差为 12.48%,覆冰预警的应变阈值区间为 $1.5 \times 10^{-3} \varepsilon \sim 2.0 \times 10^{-3} \varepsilon$,直接观测输电线路的应变值可简化覆冰预警流程。研究结论可为分布式光纤传感技术在输电线路覆冰监测的工程应用提供参考。

关键词: 输电线路; 分布式光纤传感; 布里渊光时域反射仪; 光纤应变; 覆冰预警; 布里渊频移; 定量监测

中图分类号: TM726.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0481-07

Research on icing warning of transmission lines based on distributed fiber optic sensing

WANG Shuai, XU Qinyun, LIN Shenghai

(College of Information Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: To achieve quantitative monitoring of the icing state on transmission lines, the theoretical relationship between Brillouin frequency shift and icing thickness was derived through theoretical modeling and simulation experiments based on the Brillouin scattering principle and mechanical analysis of suspended cables. The accuracy of this relationship was experimentally verified. The results indicate a monotonic increasing relationship between icing thickness and Brillouin frequency shift. Under experimental conditions, the measurement error for icing thickness was 12.48%, and the strain threshold range for icing warnings was $1.5 \times 10^{-3} \varepsilon \sim 2.0 \times 10^{-3} \varepsilon$. Direct observation of transmission line strain values can simplify the icing warning process. The research conclusions provide an effective reference for applying distributed optical fiber sensing technology to icing monitoring in transmission lines.

Keywords: transmission line; distributed fiber optic sensing; Brillouin optical time-domain reflectometer; optical fiber strain; icing warning; Brillouin frequency shift; quantitative monitoring

0 引言

输电线路是电力传输网络的重要组成部分,覆冰会导致线路机械和电气性能下降,引起线路跳闸、断线、倒塔等事故^[1]。2008 年 1 月 10 日,中国华中、华东部分地区出现低温、雨雪冰冻天气,导致湖南、江西等地的电网发生倒塔、断线等灾害。此次雪灾的直接财产损失高达 250 亿元^[2]。

2020 年 11 月,受较强冷空气影响,吉林地区电网出现严重覆冰现象,全省停电用户数量占比达 11.5%^[3],此次灾害带来了严重的社会影响。因此,迫切需要对输电线路进行覆冰监测,并及时采取除冰措施,以确保电网的安全运行。

传统的覆冰监测方法有人工巡检、视频图像监测、力学监测^[2]。人工巡检耗时长,劳动强度大,且在崎岖地区难以执行;视频图像监测方法

收稿日期: 2024-11-29 修回日期: 2024-12-10 接受日期: 2024-12-17 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家重点实验室开放项目 (SKLCRSM19KF006)

作者简介: 王 帅 (1984-), 男, 山东 青岛人, 博士, 副教授, 主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: wsh0509@126.com

通信作者: 徐钦云 (2000-), 女, 山东 潍坊人, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: 19863713135@163.com

易受恶劣天气干扰,雨雪等会降低图像清晰度,从而影响监测的准确性;力学监测方法使用电子式传感器监测线缆状态,但电子传感器抗电磁干扰能力差、成本高。分布式光纤传感技术具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强,可长距离监测的优点,近年来在输电线路的安全监测上得到了广泛应用。相关学者采用BOTDR技术对OPGW导线进行了监测,验证了温度监测能够有效识别线路的覆冰情况^[4-5]。徐志钮等^[6]进一步研究了线缆在不同环境条件下的温度变化规律,结果表明,在环境风速较大的情况下,依赖温度判断是否覆冰的效果不佳。文献[7]、文献[8]基于BOTDR技术,利用监测应变数据反演覆冰程度,但在实验设置中,线缆各点所受张力均为水平方向,覆冰线缆的受力情况存在差异。文献[9]、文献[10]基于Φ-OTDR技术,利用线缆振动信号检测覆冰情况,但该技术成本较高。

针对上述局限性,本文基于布里渊光时域反射计(brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)技术,对悬空线缆进行力学分析,建立布里渊频移与覆冰厚度的理论关系,并进行模拟实验,验证该方法的可行性和有效性。

1 覆冰监测原理

1.1 布里渊散射原理

光信号在光纤中传输时,与光纤相互作用产生散射光,产生的散射光主要有3种:瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。布里渊散射是光纤中的光学光子和声学声子发生非弹性碰撞而产生的一种散射现象,光子和声子发生碰撞后会导致光波的一部分能量转移到声子上,或者从声子转移到光波上,从而改变了光波的频率。散射后的光波频率与入射光波频率之间存在差异,这个差异称为布里渊频移,可表示为

$$\nu_B = 2nV_a/\lambda, \quad (1)$$

式中: n 为光纤折射率,无量纲; λ 为入射光的波长, m; V_a 为光纤的平均声速, m/s。

其中

$$V_a = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1-2k)(1+k)\rho}}, \quad (2)$$

式中: k 为光纤泊松比,无量纲; E 为光纤的弹性模量, Pa; ρ 为光纤的密度, kg/m³。

当光纤的温度或应变发生变化时,受光纤热光效应和弹光效应的影响,光纤折射率、泊松比、杨氏模量和密度均会发生变化,因此布里渊频移

可进一步表示为

$$\nu_B = \frac{2n(T, \varepsilon)}{\lambda} \times \sqrt{\frac{(1-k(T, \varepsilon))E(T, \varepsilon)}{(1-2k(T, \varepsilon))(1+k(T, \varepsilon))\rho(T, \varepsilon)}}, \quad (3)$$

式中: T 为温度, °C; ε 为应变。

由式(3)可知,布里渊频移与温度和应变有关。经推导可得布里渊频移的变化量 $\Delta\nu_B$ 与温度变化量 $\Delta\varepsilon$ 、应变变化量 ΔT 成线性关系,即

$$\Delta\nu_B = C_\varepsilon \Delta\varepsilon + C_T \Delta T, \quad (4)$$

式中: C_T 、 C_ε 分别为温度系数和应变系数,对于单模光纤, C_ε 取 0.05 MHz/(10⁻⁶·ε), C_T 取 1.07 MHz/°C^[10-14]。

1.2 BOTDR 技术

BOTDR(布里渊光时域反射计)利用布里渊散射原理,通过监测布里渊频移获取光纤沿线的温度和应变信息。根据发送探测光和接收散射光的时间延迟可实现定位功能,光纤某点距入射端的距离为

$$x = c\Delta t/2n, \quad (5)$$

式中: c 为光速, m/s; Δt 为发送探测光和接收到散射光的时间差, s; n 为光纤折射率。

BOTDR的基本结构见图1。激光器发出连续光,一路作为参考光输入探测器,一路经调制器形成探测脉冲光,脉冲光通过环形器进入被测光纤,在光纤中产生背向布里渊散射光,再沿光纤返回进入探测器,参考光和散射光进行相干探测,最后经信号数据处理得到温度、应变,以及位置信息^[15-16]。

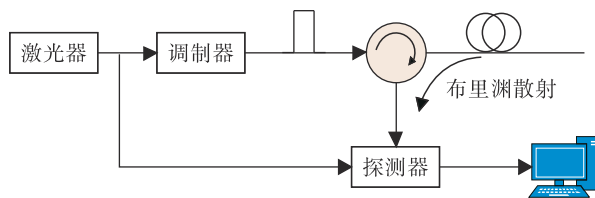


图1 BOTDR系统的基本结构

Fig.1 basic structure of BOTDR

1.3 覆冰厚度理论模型

布里渊频移的变化受温度和应变的共同作用,目前已有较为成熟的温度和应变解耦技术^[17-18]。本文不考虑温度影响,则由应变引起的布里渊频移需满足

$$\nu_B = \nu_0 + C_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (6)$$

式中: ν_0 为布里渊频移初始值; ε_0 为应变初始值。

在光纤的弹性范围内,其应变和应力满足

$$\sigma = E\varepsilon_0 \quad (7)$$

根据应力可得光纤各点的张力为

$$F = \sigma A, \quad (8)$$

式中, A 为光纤的截面积, m^2 。

一段悬空线缆处于稳定状态时受力见图2。

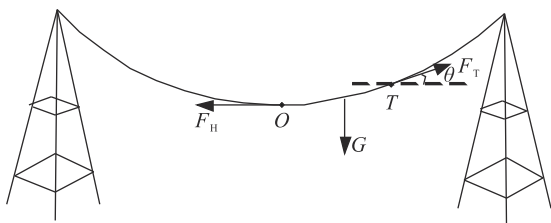


图2 悬空线缆受力

Fig.2 schematic diagram of force on suspended cables

图2中, O 点为线缆的最低点, T 点为线缆除 O 点外的任意一点, G 为 OT 段线缆的总重, F_H 为 O 点处的张力, F_T 为 T 点处的张力, 与水平方向的夹角为 θ 。由于 OT 段处于受力平衡状态, 因此 F_H 、 F_T 、 G 满足

$$F_T \cos \theta = F_H, \quad (9)$$

$$F_T \sin \theta = G. \quad (10)$$

通过消去式 (9)、式 (10) 中的 θ 可得 G , 进一步可得 OT 段线缆的总质量。将每2个相邻位置的线缆质量作差, 可得质量分布。该质量包括覆冰质量和线缆净质量, 去除线缆净质量, 可得覆冰质量为

$$G = F_T \sin \left[\arccos \left(F_H / F_T \right) \right] = \sqrt{F_T^2 - F_H^2}, \quad (11)$$

$$m = G/g, \quad (12)$$

$$\bar{m} = \text{diff}(m), \quad (13)$$

$$m_i = m - m_f, \quad (14)$$

式中: m 、 m_i 、 m_f 分别为 OT 段线缆总质量、覆冰质量、线缆净质量, kg 。

覆冰形状各异, 为建立统一的覆冰厚度评价标准, 通常假设覆冰形状为圆柱形进行理论计算^[19]。由覆冰质量计算等值覆冰厚度为

$$h = \sqrt{\frac{m_i}{\pi \rho_i L} + \frac{d^2}{4}} - \frac{d}{2}, \quad (15)$$

式中: ρ_i 为覆冰密度, kg/m^3 ; L 为覆冰线缆长度, m ; d 为线缆直径, m 。

结合式 (15) 推导得到覆冰厚度和布里渊频移的关系为

$$h = \sqrt{\frac{EA \sqrt{a^2 - b^2} / C_\varepsilon g - m_f}{\pi \rho_i L} + \frac{1}{4} d^2} - \frac{d}{2}, \quad (16)$$

式中: $a = \Delta v_{BT} + C_\varepsilon \varepsilon_{0T}$, $b = \Delta v_{BH} + C_\varepsilon \varepsilon_{0H}$; Δv_{BH} 为最

低点 O 处的布里渊频移变化值; ε_{0H} 为最低点 O 处的初始应变; Δv_{BT} 为除 O 点外任意一点处的布里渊频移变化值; ε_{0T} 为该点对应的初始应变。

2 实验分析

搭建架空线路覆冰模拟实验装置, 见图3。采用钢管搭建2个结构相同的支架, 用于模拟输电杆塔, 支架高度为1.5 m, 档距 (两支架之间的距离) 分别设置为10 m、30 m、100 m。在两支架上各固定一个滑轮, 将传感光纤缠绕在滑轮上, 使传感光纤处于悬垂状态, 用于模拟悬空线缆。实验选用南大705硅橡胶作为覆冰模拟材料, 其密度为 $0.98 \text{ g}/\text{cm}^3$, 与冰密度接近, 通过在光缆上涂敷硅橡胶模拟线路覆冰^[20]。光纤一端连接光纤盘, 另一端接入由中国电子科技集团公司第四十一研究所研制的AV6419光纤应变分布测试仪监测光信号, 其性能指标见表1。

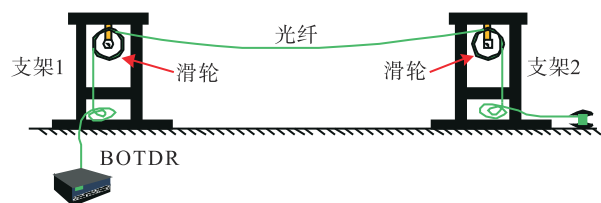


图3 模拟实验装置

Fig.3 simulation experiment setup

表1 AV6419的性能指标

Tab.1 performance indicators of AV6419

性能指标	取值
工作波长/nm	1 550 ± 5
最大监测距离/km	80
应变距离分辨率/m	1
应变测试范围/(10 ⁻⁶ ·ε)	-15 000 ~ 5 000
频率扫描范围/GHz	9.9 ~ 12.0

2.1 覆冰厚度对布里渊频移的影响

覆冰厚度与线路设计的规范要求直接相关, 是架空输电线路覆冰监测的主要指标。在输电线路设计时, 通常考虑预期的最大覆冰厚度。当架空线缆表面出现覆冰时, 单位长度线缆的质量与重力随之增加, 导致线缆在两端支撑点之间的弧垂增大, 线缆内部拉力也相应上升。实验中, 为研究不同覆冰厚度对光纤布里渊频移的影响, 在悬空光纤上涂敷0~8层硅橡胶, 分别观察其布里渊频移的变化。光纤监测系统见图4, 覆冰测试系统见图5, 涂敷硅橡胶的部分光纤见图6。档距分别为10 m、30 m、100 m的布里渊3D曲线见图7。



图 4 光纤监测系统
Fig.4 optical fiber monitoring system



图 5 覆冰测试系统
Fig.5 icing testing system

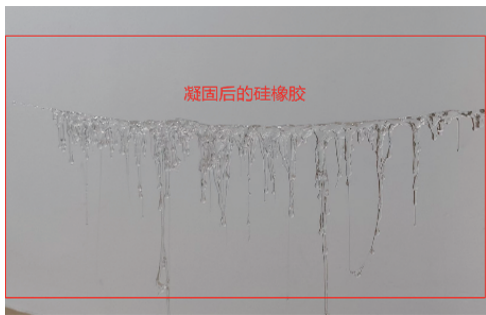


图 6 涂敷硅橡胶的部分光纤
Fig.6 partial optical fiber coated with silica gel

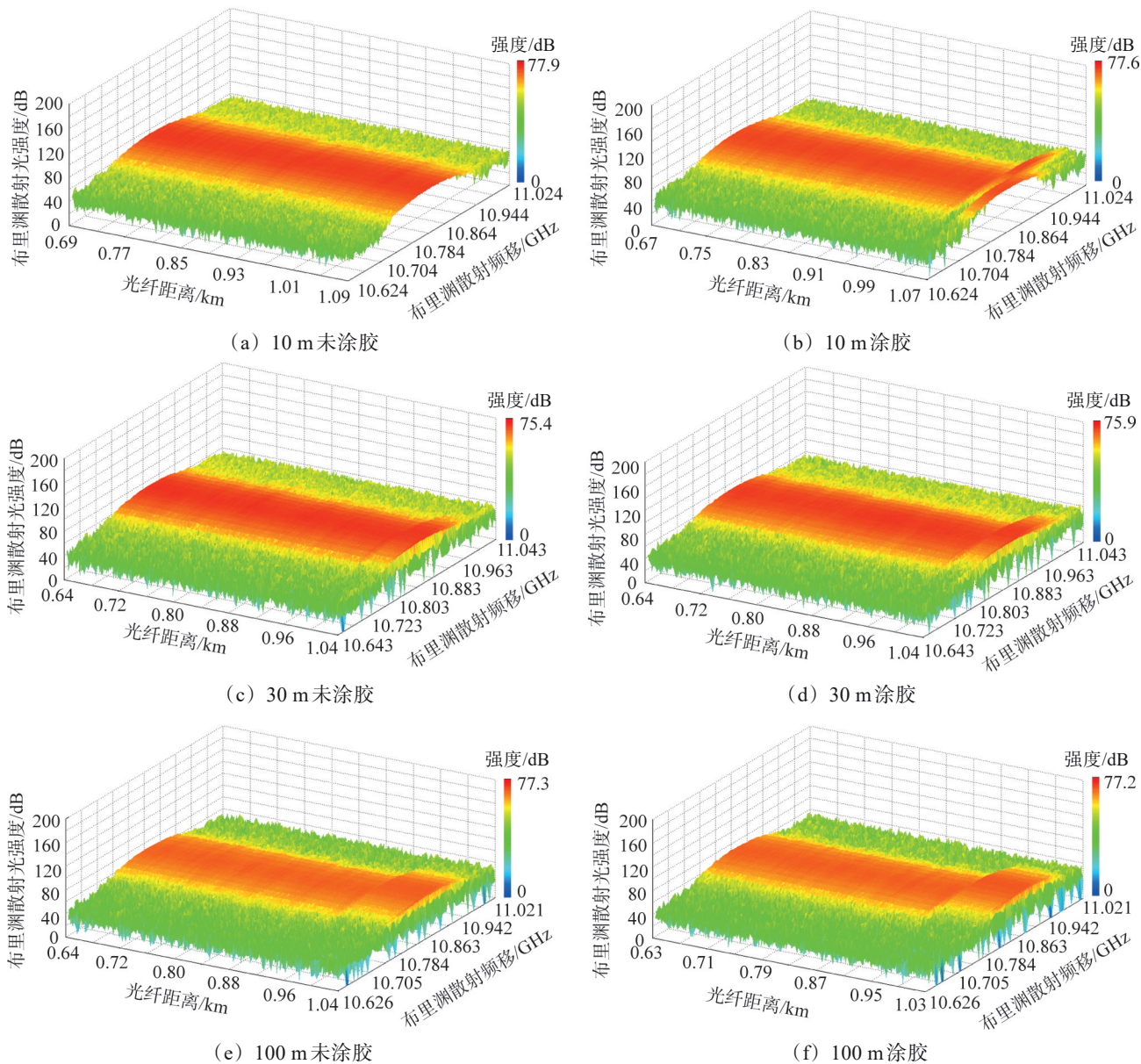


图 7 不同档距下光纤未涂胶和涂胶后的布里渊3D曲线

Fig.7 Brillouin 3D curves of optical fiber before and after silicone coating at different span lengths

由图 7 (a) 可见, 未涂胶时的初始布里渊频移为 10.82 GHz。由图 7 (b) 可见, 涂胶后在 1.029~1.039 km 位置布里渊频移明显向右偏移。由图 7 (c) 可见, 档距为 30 m 时, 悬垂光纤在自

身重力的作用下各点张力增大,在0.99~1.02 km位置,布里渊频移相较于未悬挂状态已发生偏移。由图7(d)可见,涂胶后光纤总质量增加,布里渊频移继续向右偏移。由图7(e)、图7(f)可见,档距100 m时,在硅橡胶的作用下,布里渊频移的偏移程度增大。综上,在不同档距下,覆冰均导致布里渊频移增大。

为更直观显示布里渊频移变化,分析档距为10 m时,1.033 km位置的布里渊谱,见图8。未涂胶的中心频率为10.829 GHz,涂8层胶的中心频率为10.904 GHz。

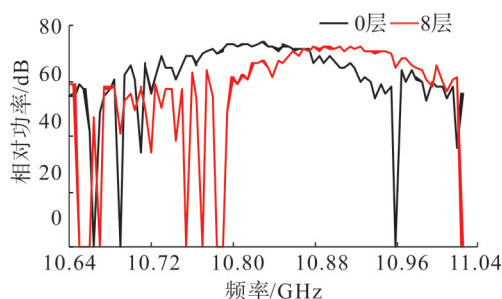
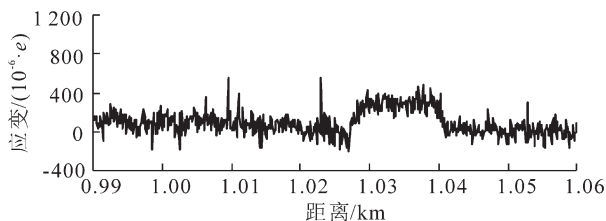
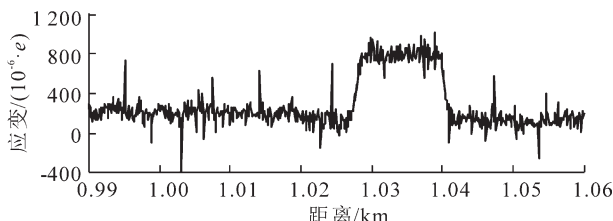


图8 悬垂光纤上涂敷0层和8层胶的布里渊谱

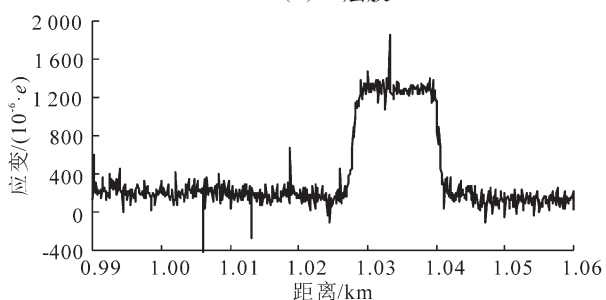
Fig.8 brillouin spectra of coated fibers with 0 and 8 layer



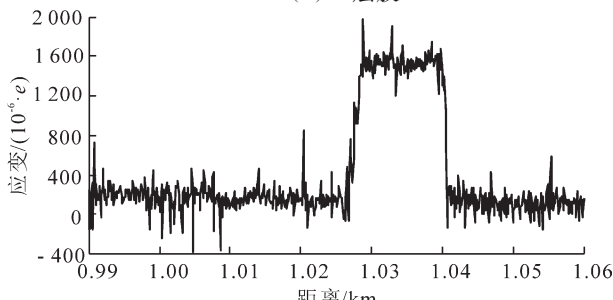
(a) 2层胶



(b) 4层胶



(c) 6层胶



(d) 8层胶

图10 应变实测曲线

Fig.10 measured strain results

由图10可知,涂胶段光纤在硅橡胶重量作用下产生应变,并随着涂胶层数增多,应变增大,与布里渊频移变化趋势一致。

为探究悬空线缆上的应变分布规律,对实测应变进行异常值去除和平滑处理,结果见图11。由图11可见,档距为10 m时,1.034 km左右是悬

垂光纤布里渊频移和涂胶层数的关系的实验结果见图9。涂胶层数在0~8变化时,布里渊频移呈现单调递增变化。因此通过BOTDR监测可区分不同程度的覆冰状态,并实现了定位功能。

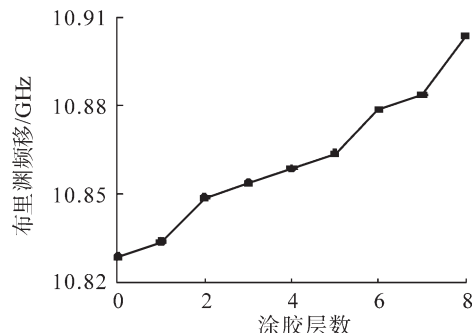


图9 涂胶层数和布里渊频移的关系

Fig.9 relationship between the number of coating layers and brillouin frequency shift

2.2 覆冰质量评估

设置测试仪关键参数,脉冲光信号的脉宽为10 ns,每个频率点的平均采样次数为 2^{14} 次,采样分辨率为0.1 m,光纤折射率标定为1.467。依据布里渊频移和应变的关系,得到如图10所示的涂胶为2、4、6、8层的实测应变曲线。

垂光纤的中间位置,为最低点。在覆冰厚度一定时,距O点越远,OT段的质量越大。根据式(11)可知,T点距O点越远,所受的张力越大,即应变越大。因此悬垂光纤应变呈悬链线式分布,即中间应变小,两端应变大,实测应变与理论分布相符。

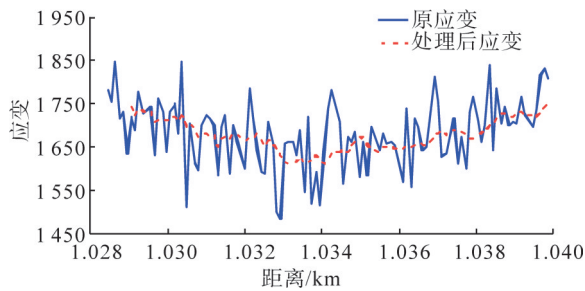


图11 应变曲线

Fig.11 strain curve

利用应变分布特性,根据理论模型推导覆冰质量,应变空间分辨率为1 m。以1 m为单位求解光纤段覆冰质量,重复3次测量。硅橡胶具有凝固后剥离,称取剥离凝固后的硅橡胶,结果见图12。图12中,黑色线为实际质量分布,红线、蓝线、绿线为3次测量的质量。与实际质量对比可知,误差分别为11.70%、14.98%、10.78%,平均误差为12.48%。

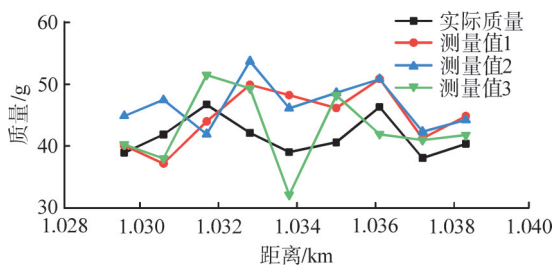


图12 质量测试结果

Fig.12 quality test results

求得覆冰质量后,根据式(15)可得等值覆冰厚度。实验中忽略了温度影响,所以由布里渊频移求解的应变值存在偏差,另外,测试仪的精度也对测试结果造成一定影响。

由图12可知,不同位置的质量测试误差存在较大差异,为进行误差分析,将式(11)在 f_T 点进行泰勒展开,即

$$G(f) = \sqrt{f_T^2 - f_H^2} + \frac{f_T(f - f_T)}{\sqrt{f_T^2 - f_H^2}} - \frac{f_H^2(f - f_T)^2}{2(f_T^2 - f_H^2)^{3/2}} + \frac{G^{(3)}(\xi)(f - f_T)^3}{6} \quad (17)$$

考虑在 f_T 处的测量误差,即实际测量值为 $f_T + \Delta f$,代入式(17)可得

$$G(f_T + \Delta f) = \sqrt{f_T^2 - f_H^2} + \frac{f_T \Delta f}{\sqrt{f_T^2 - f_H^2}} - \frac{f_H^2 \Delta f^2}{2(f_T^2 - f_H^2)^{3/2}} + R_2(f_T + \Delta f) \quad (18)$$

式(18)可另写为

$$G(f_T + \Delta f) = \sqrt{f_T^2 - f_H^2} + \left(1 - f_T^2/f_T^2\right)^{-1/2} \Delta f + \frac{f_H}{4f_T^2} \left(1 - f_T^2/f_T^2\right)^{-2/3} \Delta f^2 + R_2(f_T + \Delta f) \quad (19)$$

由式(19)可见,除第一项外,其余项均为误差项,影响误差的系数主要为 f_H/f_T 。当覆冰厚度一定时, f_H 为常量, f_T 越大,误差越小。由于 $f_T = f_H/\cos \theta$,越接近两端位置,与水平方向的夹角 θ 越大, f_T 就越大。因此质量测量误差在接近最低点位置较大,在两端位置较小,实际测量误差基本符合此趋势。

通过实验可知线缆应变为 $1.5 \times 10^{-3} \varepsilon \sim 2.0 \times 10^{-3} \varepsilon$ 时,覆冰质量为30~60 g。根据《高耸结构设计规范》(GB 50135—2019)的规定,对于重覆冰区,如大凉山、川东北、川滇、秦岭、湘黔、闽赣等地区,基本覆冰厚度取10~30 mm;对于轻覆冰区,如东北及华北的部分地区、淮河流域等地区,基本覆冰厚度取5~10 mm^[21]。为增强输电线路的安全防护并减少资源损耗,取覆冰厚度10 mm为预警阈值。当覆冰质量为30~60 g,覆冰厚度为10 mm左右时,取应变阈值为 $1.5 \times 10^{-3} \varepsilon$ 。当线缆光纤应变达到此阈值时,启动覆冰预警。

3 结论

(1) 建立了布里渊频移与覆冰厚度的理论模型,并进行了覆冰模拟实验。误差分析发现,距离线缆最低点越远,测量误差越小,因此在实际应用中可选择距离最低点较远的位置进行覆冰评估。

(2) 温度对布里渊频移的测量有一定影响,后续研究将进一步关注温度的精确控制。通过实时测量温度并进行温度补偿,或在恒温室内开展实验,校正温度变化对布里渊频移测量结果的干扰,进一步研究该方法的可靠性。

(3) 本研究提出的基于应变阈值的覆冰预警方法,通过直接监测输电线路的应变变化,简化了覆冰监测的复杂流程。然而,应变阈值的普适性仍需在不同导线类型及气候条件下进一步验证,以建立更为精确的覆冰预警标准体系,推动分布式光纤传感技术在实际工程中的应用。

参考文献(References):

- [1] 閃光云,趙鑫,劉小會. 架空覆冰輸電線路舞動研究進展[J]. 南方能源建設,2023,10(5):116-128.
- MIN Guangyun, ZHAO Xin, LIU Xiaohui. Research progress of galloping of overhead iced transmission lines[J]. Southern Energy

- Construction, 2023,10 (5):116-128.
- [2] 李先锋,徐志钊,郭一帆,等.基于光纤传感的输电线路覆冰监测技术应用评述[J].华北电力大学学报(自然科学版),2023,50(2):22-34,43.
- LI Xianfeng, XU Zhiniu, GUO Yifan, et al. Review of application of icing monitoring technology for transmission lines based on optical fiber sensing[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(2): 22-34, 43.
- [3] 中国电力网. 国网吉林电力全力抗冰雪保供电[EB/OL]. <http://www.chinapower.com.cn/dww/zhxw/20201126/35613.html>, 2020-11-26.
- [4] 覃兆宇,刘卫新,潘哲哲,等.光纤布里渊分布式输电线路覆冰识别技术[J].光电工程,2016,43(10):6-11.
- QIN Zhaoyu, LIU Weixin, PAN Zhezhe, et al. Optical Brillouin distributed ice-coating identification technology on transmission line[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(10): 6-11.
- [5] SUN J X, ZHANG Z G, LI Y M, et al. Distributed transmission line ice-coating recognition system based on BOTDR temperature monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3967-3973.
- [6] 徐志钊,李先锋,郭一帆,等.风速对基于BOTDA架空导线覆冰监测有效性的影响[J].电力工程技术,2022,41(3):152-162.
- XU Zhiniu, LI Xianfeng, GUO Yifan, et al. Influence of wind speed on the effectiveness of monitoring of ice-covered overhead transmission line based on BOTDA[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 152-162.
- [7] 王帅,贡彬,孙晓伟,等.采用分布式光纤传感技术的煤矿顶板变形实验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(1):32-40.
- WANG Shuai, GONG Bin, SUN Xiaowei, et al. Experimental study on deformation of coal mine roof using distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(1): 32-40.
- [8] 张炜,邬蓉蓉,覃炜.基于应变分析的光纤复合架空地线覆冰荷载监测[J].南方电网技术,2016,10(11):52-58.
- ZHANG Wei, WU Rongrong, QIN Wei. Icing load monitoring of OPGW based on strain analysis[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 52-58.
- [9] 熊菲,邢振华,张益昕,等.基于 Φ -OTDR的架空输电线路覆冰在线监测方法[J].光电子技术,2022,42(2):81-88.
- XIONG Fei, XING Zhenhua, ZHANG Yixin, et al. Φ -OTDR-based on-line monitoring method for overhead transmission line icing[J]. Optoelectronic Technology, 2022, 42(2): 81-88.
- [10] DING Z W, ZHANG X P, ZOU N M, et al. Φ -OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5163-5169.
- [11] LI Y Q, WANG J J. Optimized neural network for temperature extraction from Brillouin scattering spectra[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 58: 102314.
- [12] MEI Y, XU X M, LUO L Q, et al. Reconstruction of distributed strain profile using a weighted spectrum decomposition algorithm for Brillouin scattering based fiber optic sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(22): 6385-6392.
- [13] HAO Y Q, LIU N N, KUN Y, et al. Online ice-coating monitoring research on overhead transmission lines with Brillouin optical time domain reflectometry[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102339.
- [14] 张旭苹,张益昕,王亮,等.分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J].光学学报,2024,44(1):11-73.
- ZHANG Xuping, ZHANG Yixin, WANG Liang, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 11-73.
- [15] 柴敬,郝鸿儒,杨健锋,等.基于BOTDR的区段煤柱水平变形监测[J].煤田地质与勘探,2024,52(5):46-55.
- CHAI Jing, HAO Hongru, YANG Jianfeng, et al. BOTDR-based horizontal deformation monitoring of section coal pillars[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 46-55.
- [16] WU H T, GUO W C, ZHONG Z X, et al. BGS distribution deformation in BOTDR induced by self-phase modulation[J]. Photonic Sensors, 2024, 15(1): 250118.
- [17] 蒋心雄,白清,闫剑锋,等.融合拉曼散射的BOTDR温度应变解耦传感系统研究[J].传感技术学报,2024,37(8):1335-1341.
- JIANG Xinxiong, BAI Qing, YAN Jianfeng, et al. Temperature-strain decoupling sensing system based on BOTDR combined with Raman scattering[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(8): 1335-1341.
- [18] XU Z N, ZHAO L J. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.
- [19] 吴天宝,马小敏,刘益岑,等.耐张塔输电线路等值覆冰厚度的简化预测方法[J].四川电力技术,2024,47(1):10-14,42.
- WU Tianbao, MA Xiaomin, LIU Yicen, et al. Simplified prediction method of equivalent ice thickness for tension tower of transmission line[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2024, 47(1): 10-14, 42.
- [20] 方行.基于 Φ -OTDR的架空输电线路覆冰在线监测方法研究[D].南京:南京大学,2021:46-48.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.高耸结构设计规范:GB 50135—2019[S].北京:中国计划出版社,2019:36.