

引用格式: LI Hao, WANG Feng, ZHOU Xiao, et al. Monitoring of Ice Coating Thickness of Tight-buffered OPGW Based on Brillouin Optical Time Domain Reflectometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1106001

李浩,王峰,周霄,等. 基于布里渊光时域反射计的紧套型 OPGW 覆冰厚度监测[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1106001

基于布里渊光时域反射计的紧套型 OPGW 覆冰厚度监测

李浩,王峰,周霄,袁新宇,李时宜,张益昕,张旭革

(南京大学 智能光传感与调控技术教育部重点实验室,南京 210023)

摘 要:为了获取一个档距内更精细的覆冰厚度分布,针对紧套型光纤复合架空地线(OPGW),提出了一种基于布里渊光时域反射计分布式应变传感能力的覆冰监测技术,并通过实验进行了验证。测量得到 OPGW 的应变分布,通过力学分析将应变分布转换为重量分布,进而换算得到具体的覆冰厚度分布。在悬空光缆的模拟实验中,针对均匀负重 5 kg 和 2.5 kg 的实验结果误差分别为 2.27% 和 15.77%,验证了此方法的有效性。误差分析表明在实际中 OPGW 具有更长跨距的情况下,采用较大的空间分辨率可以提高应变测量精度,改善本方法对覆冰分布的测量效果。

关键词:光纤复合架空地线;覆冰监测;分布式光纤传感;布里渊光时域反射计;应变测量

中图分类号:TM726.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215011.1106001

Monitoring of Ice Coating Thickness of Tight-buffered OPGW Based on Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

LI Hao, WANG Feng, ZHOU Xiao, YUAN Xinyu, LI Shiyi, ZHANG Yixin,
ZHANG Xuping

(Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University,
Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to obtain more precise icing thickness distribution within a span, a special icing monitoring technique for tight tube Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire (OPGW) is proposed and preliminary verified by experiments. This method utilizes the distributed strain sensing capability of Brillouin optical time domain reflectometer. The strain distribution of OPGW was obtained by measurement, and then the weight distribution was derived based on mechanical analysis method. the specific icing thickness distribution was obtained via the conversion between weight and icing thickness. In the simulation with a suspended optical cable, the errors of the experimental results are 2.27% and 15.77% for two uniform loadings of 5 kg and 2.5 kg, which preliminarily verifies the effectiveness of the proposed method. The error analysis shows that the effect of the proposed method is better for longer span range in practice, because it allows longer spatial resolution which can improve the strain measurement accuracy.

Key words: Optical fiber composite overhead ground wire; Ice monitoring; Distributed optical fiber sensing; Brillouin optical time domain reflectometer; Strain measurement

OCIS Codes: 060.2370; 120.4825; 230.0040

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61975076, 61627816, U2001601),江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目,江苏省重点研发计划(No. BE2018047),内蒙古重点研发计划(No. 2019GG374),光电信息获取与控制教育部重点实验室开放课题(No. OEIAM202005),智能电网保护和运行控制国家重点实验室项目

第一作者:李浩(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式光纤传感技术。Email: mfl834010@smail.nju.edu.cn

导师(通讯作者):王峰(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为分布式光纤传感技术。Email: wangfeng@nju.edu.cn

收稿日期:2021-04-15; **录用日期:**2021-07-09

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

架设于成冰地带的输电线路十分容易发生电缆覆冰,在架空输电线路产生额外负载,这将会给电网的安全运行带来严重威胁^[1-3]。例如,2005年2月,华中部分地区出现雨淞,致使数十座线塔倒塌,多条输电线路受到破坏,对华中电网的正常运行造成极大影响。为了保证电网安全运行,及时获取电缆的覆冰状况十分重要。传统的对电缆覆冰监测的方法有人工巡视法、模拟导线法、图像识别法、倾角-弧垂法等^[4-7]。其中,前两种方法无法实现在线监测;后两种方法虽然能够实现在线监测,但需要在电缆沿线安装较多的传感器,易受环境条件影响且安装成本较高。

光纤复合架空地线(Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire, OPGW)是一种内部含有通信光纤的电缆。它同时具有地线和通信的功能,在许多新建线路上得到了广泛应用。OPGW的光单元可分为松套型和紧套型两种。松套型OPGW中的光纤存在约0.7%的余长,以减少光纤因拉伸而产生的衰减;紧套型OPGW中的光纤经过了筛选,其抗拉强度高,能够随金属线缆一同拉伸。其中,紧套型OPGW更适用于外界负荷条件恶劣的线路^[8],如重冰区、高差大的地区。近些年,借助于OPGW和分布式光纤传感技术的电缆覆冰监测方案已经得到了初步应用^[9-11]。与传统监测方法相比,基于分布式光纤传感技术的电缆覆冰监测方法具有抗电磁干扰、架设简单、实时性强、人工成本低等多种优点^[4,9]。但是,目前基于分布式光纤传感的电缆覆冰监测通常应用于松套型OPGW线路中,由于光纤余长的存在,难以通过OPGW中的光纤进行分布式应变测量,通常仅计算整个档距中平均的覆冰厚度或不进行定量计算^[10-13]。

本文针对紧套型OPGW提出了一种基于分布式布里渊光时域反射计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)的OPGW覆冰厚度监测方法。通过BOTDR对电缆的应变进行分布式测量,利用对悬空电缆的力学分析,将一段电缆的应变分布转换为覆冰厚度,能够得到该段电缆具体的覆冰厚度。与现有技术相比,此方法利用分布式光纤传感分布式测量的特点,可以定量得到非均匀分布的覆冰的质量分布。

1 原理

1.1 BOTDR的基本原理

BOTDR基于光在光纤中传播时的自发布里渊散射现象进行传感。自发布里渊散射是一种非弹性散射,即散射光的频率相对于入射光发生了改变。光频改变的大小称为布里渊频移(Brillouin Frequency Shift, BFS)。BFS的大小受到光纤温度和应变的影响,表示为

$$\Delta\nu_B = C_{\nu,T}\Delta T + C_{\nu,\epsilon}\Delta\epsilon \quad (1)$$

式中, $\Delta\nu_B$ 为BFS, ΔT 为温度变化, $\Delta\epsilon$ 为应变变化, $C_{\nu,T}$ 为BFS与温度变化的关系系数, $C_{\nu,\epsilon}$ 为BFS与应变的关系系数。

脉冲光入射光纤之后,不断地对光纤中背向布里渊散射光进行检测,根据光纤中光速、时间延迟和距离的关系,可以确定不同时刻接收到的散射光在光纤中对应的位置。通过对接收到的不同时刻的散射光的频谱进行分析,得到BFS的大小,根据式(1)可得到不同位置温变和应变的大小。

BOTDR的空间分辨率受光脉冲宽度的影响,由脉宽决定的空间分辨率可以表示为^[14]

$$S = \frac{cW}{2n} \quad (2)$$

式中, S 表示空间分辨率, c 表示光速, W 表示光脉冲宽度, n 表示光纤的折射率。 S 和 W 之间呈正比,当 W 取10 ns时,空间分辨率 S 约为1 m。BOTDR的应变分辨率可以近似的表示为^[14]

$$\delta\epsilon = \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{2} C_{\nu,\epsilon} (\text{SNR})^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中,SNR是散射光信号的信噪比。在不发生非线性效应的情况下,脉宽 W 越宽,散射光能量越强,SNR越高,传感长度越长,但空间分辨率越差。因此BOTDR的空间分辨率与SNR相互制约。当传感距离为数千米时,BOTDR的空间分辨率通常在10 m左右,而OPGW的单跨长度一般为数百米^[15],BOTDR可满足对其分布式应变测量的需求。

1.2 应变和张力的关系

对于紧套型的OPGW,在光缆的弹性限度内,其应变和应力之间是线性关系,因此通过BOTDR测量出的应变分布可等效为张力分布。通常测量电缆覆冰厚度的方法是测算电缆上的等值覆冰厚度,即在得到覆冰的质量后,假设覆冰的形状为圆柱型^[6],根据冰的密度计算出等值覆冰厚度,等值覆冰厚度 h 可以表示为

$$h = \sqrt{\frac{m_{\text{ice}}}{\pi\rho_{\text{ice}}l} + \frac{1}{4}d^2} - \frac{d}{2} \quad (4)$$

式中, m_{ice} 是冰的质量, ρ_{ice} 是冰的密度, l 覆冰段的电缆长度, d 是电缆的计算直径。因此只需要得到覆冰的质量(或重量)即可。以下分析应力分布和重量分布的关系。

图1(a)是两个绝缘子之间的一段悬空电缆处于稳定状态的示意图,其中点 O 是这一段的最低点;点 T 是电缆上 O 点之外的任意一点; G 表示点 O 到点 T 之间的总重量; f_{H} 是点 O 处的一个水平力; f_{T} 是点 T 处的一个张力,其和水平方向夹角大小为 θ 。 f_{H} 和 f_{T} 的方向均与所在位置的光缆相切。由架空线路的电力学可

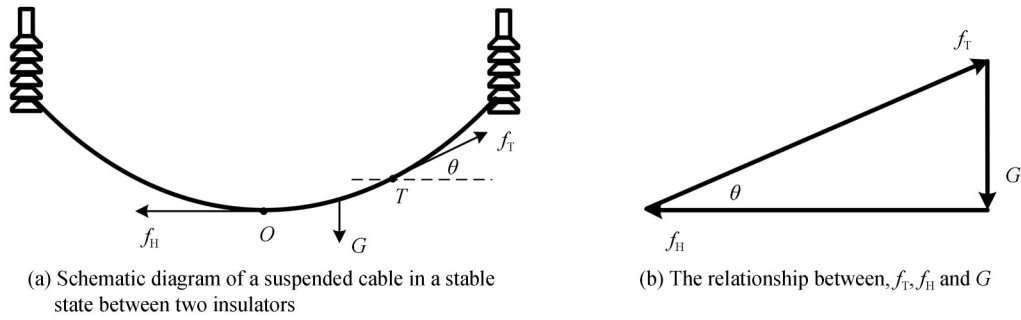


图1 悬空电缆张力分析示意图

Fig. 1 Diagram of tension analysis of suspended cable

知,点 O 处仅受水平力 f_{H} ,且电缆上任意一点处张力的水平分量大小均相等。因为从点 O 至点 T 处于稳定的受力平衡状态,所以 f_{T} 、 G 和 f_{H} 满足图1(b)所示的关系,即

$$\begin{cases} f_{\text{T}}\cos\theta = f_{\text{H}} \\ f_{\text{T}}\sin\theta = G \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中仅考虑了力的大小,不考虑方向。将 θ 消除可得

$$G = f_{\text{T}} \sin \left[\arccos \left(\frac{f_{\text{H}}}{f_{\text{T}}} \right) \right] = \sqrt{f_{\text{T}}^2 - f_{\text{H}}^2} \quad (6)$$

将 G 除以重力加速度 g 即可得到从点 O 到点 T 的总质量。

基于以上方法,通过BOTDR测量获得悬空电缆各个位置的张力分布。其中包含点 O 处的 f_{H} 。将点 O 处的张力 f_{H} 和任意一点处的张力作为 f_{T} 代入式(6),可以获得点 O 到任意一点之间的总质量。然后将每两个相邻位置的总质量做差就能得到电缆上的质量分布。即质量分布 \bar{m} 表示为

$$\bar{m} = \text{diff}(G/g) \quad (7)$$

将 \bar{m} 减去电缆自重,即可到的冰重,进而得到等值覆冰厚度。

1.3 仿真验证

为了验证以上模型的正确性,模拟一个悬空电缆在覆冰情况下的张力分布。为了获取张力分布,首先需要获取已知质量分布的悬空电缆在稳定状态下的形状。可以将这个问题简化为:沿线长方向的悬链线稳定状态求解。文献[16]对这个问题进行了研究及建模求解。

沿着悬链线长 l 方向将其 n 等分,每段长为 $h=l/n$ 。然后将等分点从左到右分别命名为 $(x_0, y_0), \dots, (x_n, y_n)$ 。悬链线水平方向最右侧端点的横坐标为 X ,纵坐标为 y_l ,最左侧坐标为 $(0, y_0)$ 。此问题的离散化最优化方程和限制条件如式(8)^[16]。

$$\min_{Y_i} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i Y_j - \frac{1}{2} Y_i \right) \overline{m}_i \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^n \sqrt{h^2 - Y_i^2} = X \\ \sum_{i=1}^n Y_i = y_l - y_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, \overline{m}_i 是质量分布, $Y_i = y_i - y_{i-1}, y_0 = 0$ 。

然后根据形状数据计算张力分布。

第一步, 计算水平分力的大小。因为悬空电缆在水平方向受到的合力为零, 电缆两端受到的力在水平方向的分力应是大小相等方向相反。对形状数据沿水平方向求导, 得到每个点处的切线角度数据。选取最左侧和最右侧两点处的切线, 其与水平方向所夹锐角分别为 α_1 和 α_2 , 则水平方向分力大小 f_{H0} 满足

$$\begin{cases} f_{H0} = f_{T1} \cos \alpha_1 = f_{T2} \cos \alpha_2 \\ f_{T1} \sin \alpha_1 + f_{T2} \sin \alpha_2 = G_a \end{cases} \quad (9)$$

式中, f_{T1} 和 f_{T2} 分别代表最左侧和最右侧的张力大小, G_a 表示悬空电缆总重量。

第二步, 计算张力分布。第一步中已经计算出了电缆沿线的切线角度和水平方向分力大小 f_{H0} , 将其代入式(2)就能得到沿线张力分布 $\{f_{Ti}, i = 1, 2, 3, \dots\}$ 。

$$F_{Ti} = \frac{F_{H0}}{\cos \alpha_i} \quad (10)$$

将悬空电缆的参数设定为: 长 401 m, 档距 400 m, 两端高度差为 0, 重量分布如图 2 中橙线所示, 其中 300 m 到 400 m 段未设置覆冰, 是 OPGW 的自身重量。为了更方便地看出设置出的质量以及质量求解结果的效果, 此处设置的重量分布为非均匀分布的情况。

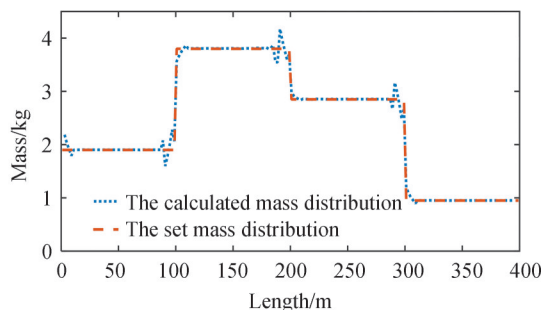


图 2 设定的质量分布和计算出的质量分布
Fig. 2 The set mass distribution and the calculated mass distribution

利用 Matlab 最优化工具箱对式(8)求解, 结果如图 3 所示, 其中蓝线为电缆形状数据, 橙线为计算出的张力分布数据。

在图 3 张力分布数据中添加 10% 的能量噪声, 将其模拟为测量的张力数据。然后利用式(6)和式(7)反推出质量分布, 结果如图 2 中蓝线所示, 可以看出计算结果与设定值十分接近, 符合预期。

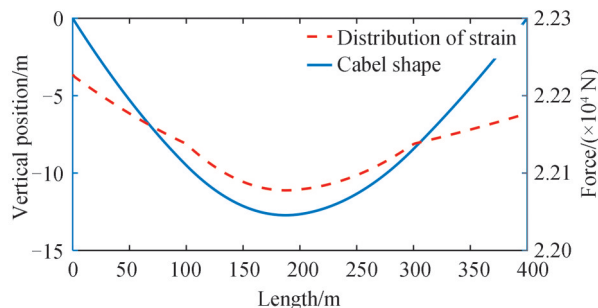


图 3 非均匀悬链线最优化求解结果及其张力分布
Fig. 3 Optimization results of nonuniform catenary and its tension distribution

2 实验与分析

因为OPGW较重且综合弹性模量较大,难以在实验室中测试,所以本文使用皮线光缆代替OPGW进行模拟实验。

2.1 应变张力标定实验

在OPGW中,通过OPGW参数表中综合弹性模量得到应变和张力的关系。在本文实验中由于皮线光缆的弹性模量未知,所以需要通过光缆的应变实验进行标定。实验装置如图4(a)所示,夹子1和夹子2是两个牢牢夹紧光缆的夹子,其中夹子1在空间中的位置固定,夹子2则没有任何位置限制,它们之间光缆长约2 m。光缆在重力作用下自然下垂。借助夹子2,可以在光缆下部添加不同已知质量的重物,重物重量的大小和光缆上的张力相等。通过BOTDR测量放置不同质量的重物时光缆产生的应变可以得到所需关系。

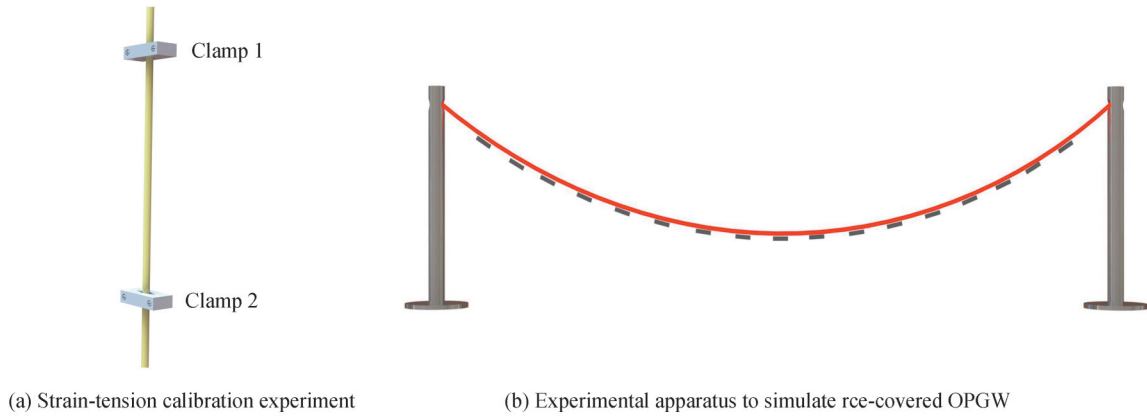


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental equipment

使用图4(a)中的装置,逐步增加光缆一端悬挂重物来增大光缆受到的拉力,并同时测量光缆产生的应变大小。逐步增加的重量和应变测量数据如图5所示。所测量光缆位置位于297 m附近,取此处的应变最大值作为张力对应的应变值,实验数据如图5所示。

将重量作为横轴,应变作为纵轴,把图5中数据画成折线图,如图6中蓝线所示。图6中折线图十分接近线性,对数据做线性拟合,如图6中红线所示,得到的拟合方程为

$$\epsilon = 41.98f + 2.903 \quad (11)$$

式中, ϵ 表示应变大小, f 表示张力大小。相关系数为 $R^2 = 0.9963$,接近于1,可以认为在光缆的弹性限度内,光缆的张力和应变之间为线性关系。

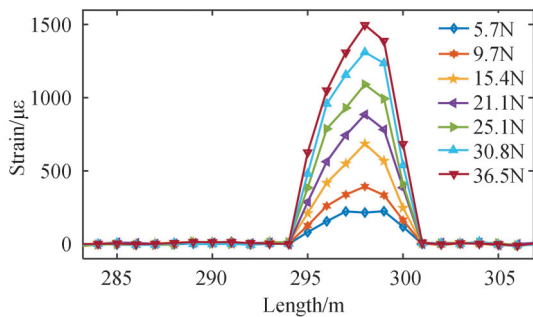


图5 应变张力标定实验的数据

Fig. 5 Data from strain-tension calibration experiments

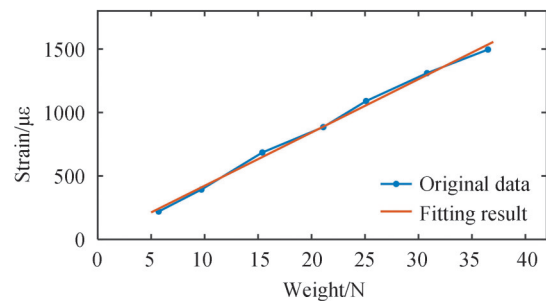


图6 应变张力标定实验数据及拟合结果

Fig. 6 The data and fitting results of the strain-tension calibration experiment

2.2 覆冰监测验证实验

在光缆上均匀的增加额外重量验证本文方法对额外重量的测量效果。图4(b)是覆冰模拟实验装置示意图。红色代表光缆。左右两侧两个柱子高度相同且位置固定。两个柱子顶部各有一个缝隙,可以保证光缆自由地通过并且借助夹子将光缆固定。光缆上的黑色短线代表在光缆上添加的重物,每个重物质量均为50 g并且位置和数量可以自由调整。光缆的一端与BOTDR连接,用于进行应变分布的监测。

首先在光缆上没有施加额外重物的情况下,使用BOTDR测量一次数据作为标定。然后每隔10 cm将一个50 g的重物用扎带绑在光缆上,共50个,同时使用BOTDR测量光缆上的应变分布,重复5次。最后每隔10 cm在光缆上绑2个重物,共100个,同样用BOTDR重复测量5次。测量应变数据如图7所示。悬空部分位于133 m至143 m之间。实际测量时由于左侧柱子存在略微的倾斜,导致重心略微向左倾斜,即最低点位于138 m偏左的136 m附近。

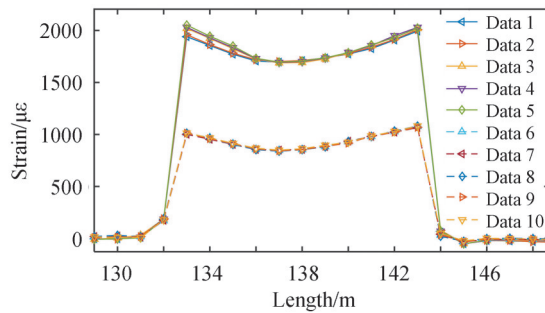


图7 覆冰模拟实验数据

Fig. 7 Experimental data of icing simulation

使用式(6)和式(7)对图7中的数据进行处理,结果如图8所示。图8中红色的水平虚线是实际在光缆上施加重物的质量。对比图8(a)和(b),可以看出两次实验的结果在纵向上有着明显的区别,能够分辨出它们具有不同的质量,两图中的平均值分别为5.11 kg和2.89 kg,与设定值相比,误差分别为2.27%和15.77%。从对该段的整体平均值的估测来看,本方法的结果具有一定的参考性。但也能够发现,在136~137 m处,结果的波动比较大。与图7对比,近似位于光缆的最低处。

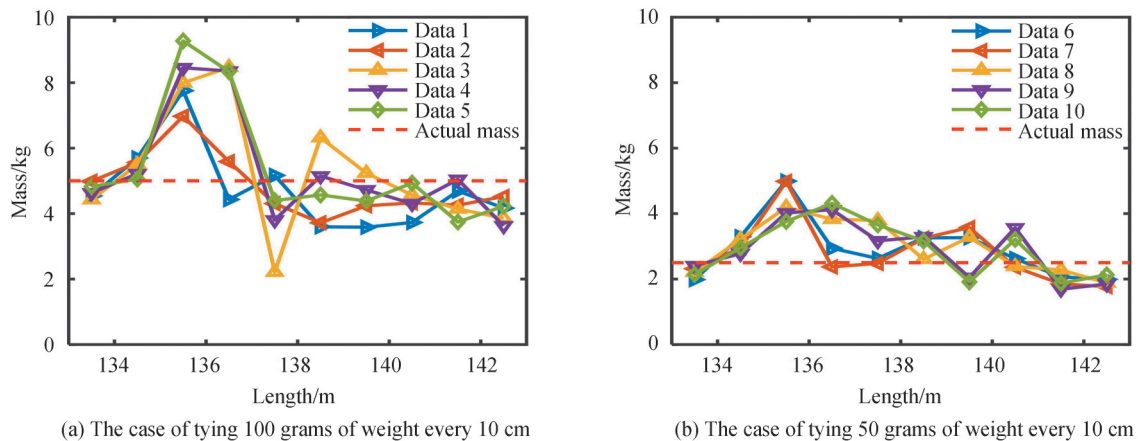


图8 重量分布的反演结果

Fig. 8 Inversion results of weight distribution

以上实验数据虽然能区分出施加的不同负重,但数据也存在着明显的波动,与设定值最大相差分别达到了85.54%和99.40%。经过分析,此误差来源于BOTDR的应变测量精度。

根据最低点和任意点之间重力的计算公式

$$G(f) = \sqrt{f^2 - f_H^2} \quad (12)$$

设光缆上任意一点处的张力为 f_T ,将 $G(f)$ 在 f_T 处泰勒展开至2阶

$$G(f) = \sqrt{f_T^2 - f_H^2} + \left(1 - \frac{f_H^2}{f_T^2}\right)^{-\frac{1}{2}} (f - f_T) + \frac{f_H}{4f_T^2} \left(1 - \frac{f_H^2}{f_T^2}\right)^{-\frac{3}{2}} (f - f_T)^2 + R_2(f) \quad (13)$$

而在 f_T 处的实际测量结果设为 $f_T + \delta$,其中 δ 为测量产生的误差,将 $f_T + \delta$ 代入 $G(f)$

$$G(f_T + \delta) = \sqrt{f_T^2 - f_H^2} + \left(1 - \frac{f_H^2}{f_T^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \delta + \frac{f_H}{4f_T^2} \left(1 - \frac{f_H^2}{f_T^2}\right)^{-\frac{3}{2}} \delta^2 + R_2(f_T + \delta) \quad (14)$$

可以看出,在式(14)右侧除第一项外均为测量误差 δ 造成的误差项。在 f_T 和 f_H 相近的情况下, $\frac{f_H}{f_T}$ 接近于1,误差项的系数将会很大;而随着 f_T 的增大,误差项的系数减小,误差造成的影响也逐渐减小。由式 $f_T = \frac{f_H}{\cos\theta}$ 可知, θ 越大, f_T 与 f_H 的差值越大,即离最低点越远,测量误差的影响越小。因此,在最低点(136 m)附近偏离设定值最大,从最低点向两侧呈现下降趋势。

设误差产生的影响小于一个特定比例 x ,则需要满足 $\left| \frac{G(f)}{G(f_T + \delta)} - 1 \right| < x$ 。以 $x = 10\%$ 为例,取 $G(f)$

的泰勒展开式的前两项进行计算

$$\left| \frac{\sqrt{f_T^2 - f_H^2}}{\sqrt{f_T^2 - f_H^2} + \left(1 - \frac{f_H^2}{f_T^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \delta} - 1 \right| < 10\% \quad -\frac{f_T^2 - f_H^2}{11f_T} < \delta < \frac{f_T^2 - f_H^2}{9f_T} \quad (15)$$

以文中的实验数据为例,最低点的张力 $f_T \approx 19.05\text{N}$,两端最大张力 $f_T \approx 27.38\text{N}$,此时测量误差需要满足 $-1.28\text{N} < \delta < 1.57\text{N}$,转换为光缆应变为 $-53.76\mu\epsilon < \delta_\epsilon < 65.94\mu\epsilon$ 。需要注意的是测量误差在 $-53.76\mu\epsilon \sim 65.94\mu\epsilon$ 之内,仅能够实现两端点的测量结果受误差影响小于10%,而对于更靠近中间的部分,则要求 $|\delta_\epsilon|$ 更小。更高的测量精度将改善测量结果。本文中测量距离仅为10 m,需要较高的空间分辨率,这导致应变测量精度降低。在实际的数百米长的档距情况下,10米量级的空间分辨率将能够满足需求,这会使应变测量精度大幅提高,测量结果更好。

另外,从 $f_T = f_H/\cos\theta$ 分析可分辨区间和测量误差的关系。同样设测量得到的拉力结果为 $f_T + \delta_T$,则计算出的测量点所在位置的切线角度为 $\theta' = \arccos\left(\frac{f_H}{f_T + \delta_T}\right) = \arccos\left(\frac{f_H}{f_H/\cos\theta + \delta_T}\right)$,其中 θ' 为根据测量数据计算出的切线角度, θ 为实际的角度。可以看出, θ' 和 δ_T 呈负相关。以文中实验设备为例,应变测量误差为 $\pm 50\mu\epsilon$,对应光纤上拉力为 $\pm 1.19\text{N}$,在 θ 为 0° ,最低点应变为 $800\mu\epsilon$ 的情况下,可以计算出 $\theta' = 19.7499^\circ$,即从 $0^\circ \sim 19.7499^\circ$ 为一个由测量误差决定的可分辨区间;在 θ 为 19.7499° 时,可以计算出 $\theta' = 27.2671^\circ$,即从 $19.7499^\circ \sim 27.2671^\circ$ 为一个可分辨区间。因此,应变的测量精度还将影响到一个档距内的覆冰测量的可分辨区间:测量精度越高,可分辨区间越小,结果越精细。

3 结论

本文通过对悬空电缆的力学分析,针对紧套型OPGW提出了一种利用BOTDR测量OPGW应变分布并转换为覆冰厚度分布的方法。通过悬链线稳定状态方程模拟了覆冰的悬空电缆的形状,据此计算出其张力分布,然后用此模拟数据验证了本文方法的有效性。实验中在150 m长的光缆中构建了10 m长的悬空光缆进行覆冰模拟实验,在均匀负重5 kg和2.5 kg的情况下,分别得到了5.11 kg和2.89 kg的结果,误差分别为2.27%和15.77%,体现出了本文方法的有效性。最后在误差分析中发现,误差的大小受限于应变测量的精度,在实际的数百米长的档距情况下测量结果会更好,并且应变的测量精度越高,可分辨区间越小,结果越精细。本文在分析和实验时,由于实验条件的限制,没有考虑风力的影响。通常在有风力影响下,风压载荷引起的应变比覆冰引起的载荷大3倍以上,会显著影响基于应变对输电线覆冰状态的测量。但考虑到风

力具有间歇性,借助于分布式光纤传感系统可以持续不断的对线路进行监测的优势,通过选择测量过程中同一位置处应变最小时的数据,作为受风压影响较小时的覆冰应变数据,可在一定程度上排除风压的影响。

参考文献

- [1] JI Jinchuan, GAO Yibin, DONG Yongjun, et al. Reason analysis of OPGW breakage caused by ice cover[J]. North China Electric Power, 2008, (7): 15-17.
冀晋川, 高义斌, 董勇军, 等. OPGW覆冰断线原因分析[J]. 华北电力技术, 2008, (7): 15-17.
- [2] YANG Lin, SHI Zunwei, HUANG Jichao, et al. Field test research on temperature detection of overhead transmission line based on botdr distributed fiber sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 925-930.
阳林, 史尊伟, 黄吉超, 等. 基于BOTDR分布式光纤传感技术的架空线路温度检测现场试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 925-930.
- [3] LI Qingfeng, FAN Zheng, WU Qiong, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36.
李庆峰, 范峥, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 33-36.
- [4] CAO Yongxing, ZHANG Changhua, HUANG Qi, et al. Research status of on-line ice coating monitoring & forewarning technology of overhead transmission lines in China and abroad[J]. East China Electric Power, 2011, (1): 96-99.
曹永兴, 张昌华, 黄琦, 等. 输电线路覆冰在线监测及预警技术的国内外研究现状[J]. 华东电力, 2011, (1): 96-99.
- [5] HUANG Xinbo, ZHANG Fei, LI Husheng, et al. An online technology for measuring icing shape on conductor based on vision and force sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3180-3189.
- [6] HUANG Xinbo, WEI Xu. A new on-line monitoring technology of transmission line conductor icing [C]. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, IEEE, 2012: 581-585.
- [7] SONG Wei, LI Dongjian, XIE Wei, et al. Measurement system for transmission lines icing based on image processing on site[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(S1): 3-7.
宋伟, 李东坚, 谢伟, 等. 基于现场图像处理的输电线路覆冰测量系统[J]. 光子学报, 2017, 46(S1): 3-7.
- [8] SHANG Wei, CHEN Qingmei. Discussion about the application problems of OPGW[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2003, (5): 16-21.
商威, 陈清美. OPGW应用问题的探讨[J]. 电力系统通信, 2003, (5): 16-21.
- [9] CAI Yingmiao, ZHANG Ruizhe, ZHOU Kai, et al. Application of distributed optical fiber-based ice coating monitoring technology in Beijing[C]. 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), IEEE, 2019: 652-656.
- [10] YANG Di, LIU Yan, WANG Shirong, et al. Research on icing monitoring of OPGW transmission line [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(4): 7-11.
杨滴, 刘燕, 王世蓉, 等. 输电线路覆冰监测的OPGW传感应用研究[J]. 电力大数据, 2018, 21(4): 7-11.
- [11] CHEN Fang, LI Zifan, LI Bozhong, et al. Analysis on icing and stress monitoring for OPGW [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, (10): 48-52.
陈芳, 李子凡, 李伯中, 等. OPGW光缆覆冰监测与纤芯应变分析[J]. 电力信息与通信技术, 2020, (10): 48-52.
- [12] LI Zhiguo, ZHANG Zhiguo, LI Luming. A novel FBG-based sensor system for the transmission line icing on-line monitor [C]. 2016 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), IEEE, 2016: 1-3.
- [13] LUO Jianbin, HAO Yanpeng, YE Qing, 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): 1559-1565.
- [14] WANG Lina. The research of the distributed sensing technique based on Brillouin scattering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 38-43.
王立娜. 基于布里渊散射的分布传感技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 38-43.
- [15] LI Yongshuang, ZHANG Guoliang. UHVAC transmission line pole and tower planning and economical span analysis[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(4): 7-10.
李永双, 张国良. 交流特高压线路杆塔规划及经济档距分析[J]. 电力建设, 2007, 28(4): 7-10.
- [16] LIN Hongxiang. Direct and inverse catenary problems with inhomogeneously distributed mass: mathematical modelling and numerical simulation[D]. Shanghai: Fudan University, 2014: 6-17.
林宏翔. 非均匀悬链线问题及其反问题: 建模和数值模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2014: 6-17.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.61627816, 61975076, U2001601), Qing Lan Project of Jiangsu Province, Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No.BE2018047), Key Technology Research and Development Program of Inner Mongolia Autonomous Region (No.2019GG374), Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education (No.OEIAM202005), State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control