

文章编号:1001-5078(2024)12-1954-07

· 光纤传感及光通讯技术 ·

单档不均匀覆冰分布式光纤传感监测技术

李春生¹, 张睿哲¹, 蔡瀛森¹, 周 恺¹, 李鸿达¹, 迟兴江²

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100000)

摘要:为避免自然灾害影响输电线路正常输电,保障输电线路运行安全,设计面向保电的输电线路单档不均匀覆冰分布式光纤传感监测技术。通过种子光源、布里渊激光器等部件构建分布式光纤传感结构,利用该分布式光纤传感结构生成布里渊频移并获取光纤传感长度上的温度与应变的分布,分析布里渊频移产生的机理以及其与温度、应变之间的关系,为后续计算提供可靠依据;通过两档三塔模型,测量输电线路单档运行参数,并应用线路应力方程,计算单档不均匀覆冰的比载,结合单档不均匀覆冰比载与施加给输电线路的温度、应变情况,计算得到输电线路单档不均匀覆冰厚度,保障输电线路安全。经实验验证可知:该技术可精准监测覆冰时线路的应力变化,且监测得到的线路温度误差较低,可实时监测线路每一档距上的覆冰厚度。

关键词:面向保电;输电线路;不均匀覆冰;分布式光纤;种子光源;布里渊激光器

中图分类号:TM764;TP212.4⁺4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.022

Distributed optical fiber sensor monitoring technology for single stage uneven ice covering

LI Chun-sheng¹, Zhang Rui-zhe¹, CAI Ying-miao¹, ZHOU Kai¹, LI Hong-da¹, CHI Xing-jiang²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China;
2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100000, China)

Abstract: To avoid natural disasters affecting the normal transmission of power lines and to ensure the operation safety of transmission lines, a distributed optical fiber sensing monitoring technology for uneven icing on single transmission lines is designed for power conservation. The distributed fiber optic sensing structure is constructed using components such as seed light sources and Brillouin lasers, and the distributed fiber optic sensing structure is used to generate Brillouin frequency shifts and obtain the distribution of temperature and strain over the fiber sensing length. The mechanism of Brillouin frequency shifts and their relationship with temperature and strain are analyzed, providing a reliable basis for subsequent calculations. Through a two-stage, three-tower model, the operating parameters of a transmission line at a single stage are measured, and the line stress equation is applied to calculate the specific load of uneven icing at a single stage. By combining the specific load of uneven icing at a single stage with the temperature and strain conditions applied to the transmission line, the uneven icing thickness of the transmission line at a single stage is calculated to ensure its safety. After experimental verification, it can be concluded that this technology can accurately monitor stress changes in the line during icing, and the temperature error of the monitored line is relatively low, and the thickness of ice-covering can be monitored in real time on each file distance of the line.

基金项目:电力系统气象监测与灾害风险预测能力提升关键技术研究项目(No. 5200-202319382A-2-3-XG)资助。

作者简介:李春生(1978-),男,本科,高级工程师,主要研究方向为输电智能巡检技术。E-mail:fddln11@163.com

收稿日期:2024-03-11; **修订日期:**2024-04-25

Keywords: oriented electricity preservation; transmission line; uneven icing; distributed optical fiber; seed light source; Brillouin laser

1 引言

输电线路覆冰是指在冬季或寒冷地区,由于气温低、湿度高等因素^[1-2],导致输电线路上的导线、杆塔、绝缘子等部件表面覆盖一层冰的现象^[3]。输电线路覆冰不仅会增加导线和杆塔的重量,增加线路受风荷载的风险,而且还会降低导线的电气性能和绝缘性能,对电网的安全稳定运行产生不良影响^[4]。而单档不均匀覆冰是指输电线路上的单个导线表面覆盖了不均匀的冰层。这种现象通常发生在寒冷地区,在气温较低、湿度较高的情况下,雨水或雪水会在导线表面形成一层冰。由于导线表面的形状和材料、气候环境等因素的影响,覆冰的厚度和形状在不同位置可能会产生差异,形成单档不均匀覆冰。随着气候变化和电力需求的增加,输电线路覆冰问题越来越受到关注。

目前有较多学者对输电线路设计了监测手段,例如黄亚飞等^[5],研究在导线上加装铁磁复合材料制成的涡流自热环,利用导线电流产生的磁场产生电磁热损耗,实现不停电自动除冰。但该方法可能受到环境因素的影响,如极端低温、强风等恶劣天气条件可能会影响其发热功率和除冰效率。卞荣等^[6],研究一种识别输电导线覆冰冰形的视觉方法。该方法利用改进的 Canny 算法识别冰形,结合图像变换理论修正冰形,实现快速识别

与测量。但该方法对于不同类型或更复杂的覆冰情况,其识别效果可能受到限制。李贤初等^[7],研究输电线路导线覆冰 AMPSO-BP 神经网络预测模型,该方法主要通过覆冰情况预测获取线路覆冰状态,可以在覆冰发生前计算出覆冰厚度,但该方法无法在覆冰状态下获取具体的覆冰情况;例如姚景岩等^[8],研究基于航拍的输电线路覆冰厚度监测方法,该方法通过航拍技术实时监控输电线路,拍摄出线路的覆冰状态,但该方法比较耗费人力,且监测过程开销较大,容易出现监测误差。

为最大程度保障输电线路安全,本文利用分布式光纤传感监测技术,设计输电线路单档不均匀覆冰监测方法,保障输电线路电力输送。通过高精度分布式光纤传感结构、深入应用布里渊频移机理、创新结合两档三塔模型与线路应力方程以及实现实时监测与精准预警等多个方面的创新,为输电线路的安全运行提供了强有力的技术支持。

2 输电线路单档不均匀覆冰分布式光纤传感保电监测

由于北京电网输电线路防覆冰工作存在较多困境,现急需构建能够支持保电的覆冰监测方法,目前传统的覆冰监测方法较多,每种方法的具体特点如表 1 所示。

表 1 现有传统覆冰监测方法分析

Tab. 1 Analysis of existing traditional ice cover monitoring methods

监测方法序号	现有监测方法	监测方法性能分析
1	称重法	基于电阻应变片的拉力传感器易受运行环境影响,不利于长期稳定运行
		易受电磁干扰,测量误差较大
2	图像法	智能监测局部导线覆冰情况
		镜头容易被冰雪遮盖
3	导线倾角法	安装难度大
		所计算得到的覆冰厚度为平均值,无法反映不均匀覆冰状态
		要求传感器精度高
4	模拟导线法	拉力传感器的量程较小,实际运行时疑似无法区分风载荷与冰载荷的影响
		模拟导线上并没有电流通过,即忽略了电流、电压对线路覆冰的影响
		模拟导线无法反映覆冰导线的扭转和不均匀覆冰现象
5	人工巡检法	监测面较窄
		耗费人力

根据表1的分析可以看出,现有传统覆冰监测方法存在较多困境,导致监测结果不够全面。因此需要探索一种覆冰预测监测的新技术,保障输电线路运行安全。为此,本文利用分布式光纤传感监测技术,构建能够保电的输电线路单档不均匀覆冰监测。

2.1 基于BOTDR的光纤传感监测技术设计

本文研究的分布式光纤传感监测技术整体结构如图1所示,该结构主要包含种子光源、布里渊激光器等部件,通过这些部件采集输电线路的覆冰数据,并通过计算机计算出输电线路单档不均匀覆冰情况。

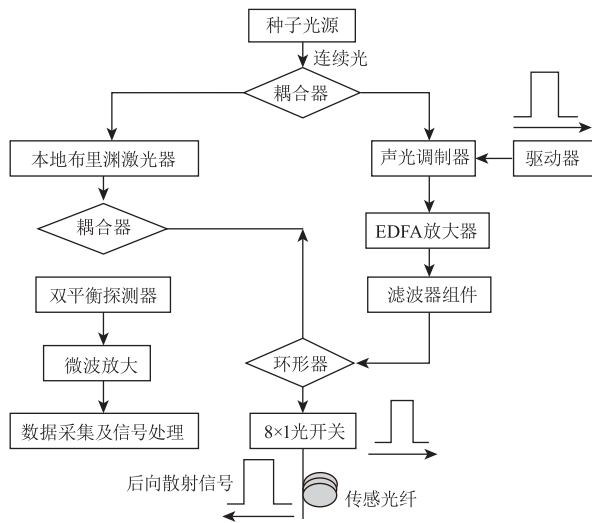


图1 BOTDR 传感监测结构图

Fig.1 BOTDR sensor monitoring structure

该传感监测技术工作原理如下:

(1) 种子光源经耦合器分为两路,一部分到达布里渊激光器,生成布里渊频移,以此作为本地光;另一部分则作为探测光,经EDFA进行一级放大处理,之后经声光调制器将其调制为光脉冲,并再次利用EDFA进行二级三级放大,经调试后输入到传感光纤中。

(2) 在传感光纤中,探测光可产生后向散射光,分别为自发布里渊散射光与瑞利散射光,之后在环形器内与本地布里渊参考光进行相干拍频。而本地光经拍频后,在通过双平衡探测器时,可过滤掉瑞利散射,仅保留布里渊散射,产生布里渊频移。此时,通过微波信号放大器对信号进行放大,使布里渊频移处于数据采集卡范围内,之后通过高速采集卡采集与处理信号,并对其进行存储。

(3) 数据采集完成后,通过计算机读取采集卡内容,在计算机上通过布里渊信号处理,获取光纤传感长度上温度与应变的分布。

2.1.1 基于布里渊散射的分布式传感信号采集

当分布式光纤传感器的脉冲光在传播过程中,背向会生成散射光,通过时钟电路分析发射入射光到接收散射光的时间差,可以获得散射点定位,该运行机理如图2所示。

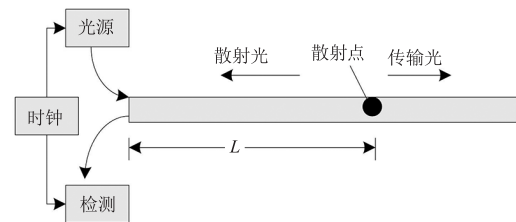


图2 散射点定位原理

Fig.2 Scattering point positioning principle

若在 $t = 0$ 时刻,脉冲光入射至光纤,且经时间 t 接收到散射光,此时,可通过公式(1)计算光传播距离:

$$L = (C/n) \times t \quad (1)$$

式中,光速为 C ; 光纤折射率为 n 。

若散射光按照入射光的线路返回,则可通过公式(2)计算散射点位置:

$$Z = L/2 = Ct/2n \quad (2)$$

根据上述计算方式,可获取光纤上的温度与应变信息。

2.1.2 布里渊频移与温度、应变之间的关系分析

当采集到线路上的应变与温度信息后,为实现输电线路覆冰状态的精准检测,本文深入分析分布式光纤传感采集到的布里渊频移与温度和应变之间的关系。可通过公式(3)计算频移:

$$V_B = 2nV_a/\lambda_p Z \quad (3)$$

式中, V_B 表示布里渊频移; λ_p 为入射光波长; V_a 为声波速度; n 为光纤纤芯折射率。根据公式(3)的计算可以看出,布里渊频移与光纤入射光波长 λ_p 、光纤折射率 n 及声速 V_a 存在关联,此时可得出声速的计算公式:

$$V_a = V_B \sqrt{\frac{E(1-k)}{(1+k)(1-2k)\rho}} \quad (4)$$

式中, ρ 为光纤密度; k 为泊松比; E 为杨氏模量。若光纤沿线温度或应变出现改变,上述每一指标均会出现变化,因此,这些指标均可表示温度 T 与应变

ε 的函数,其中,杨氏模量、光纤密度、泊松比与光纤折射率的函数可设为 $E(T, \varepsilon)$ 、 $\rho(T, \varepsilon)$ 、 $k(T, \varepsilon)$ 、 $n(T, \varepsilon)$, 结合公式(3)与公式(4), 可得出布里渊频移与各参数之间的关系:

$$V_B(T, \varepsilon) = V_a \frac{2v_0 n(T, \varepsilon)}{C} \cdot \sqrt{\frac{E(T, \varepsilon) [1 - k(T, \varepsilon)]}{[1 + k(T, \varepsilon)] [1 - 2k(T, \varepsilon)] \rho(T, \varepsilon)}} \quad (5)$$

通过公式(5)的计算,即可获取布里渊频移与温度和应变之间的关系。此外,在光纤传感监测中,温度变化可能导致光纤的折射率、长度或应力状态发生变化,从而影响光信号的相位、强度或频率。这些变化可能会被误解为覆冰引起的变化,从而产生串扰。

2.2 输电线路单档不均匀覆冰监测

2.2.1 输电线路单档不均匀覆冰研究

输电线路单档不均匀覆冰是指在孤立档下,线路上出现的不均匀覆冰情况。通过图3描述输电线路单档不均匀覆冰情况。

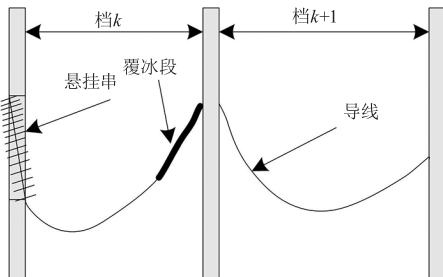


图3 单档不均匀覆冰情况分析

Fig. 3 Analysis of uneven ice cover in single file

在单档的档内不均匀覆冰形态发生时,会在集中一侧出现集中荷载,导致普通方法计算得到的结果无法准确获取输电线路的覆冰厚度。因此,为了避免出现计算结果不精准现象,本文充分考虑主测量塔两侧覆冰前后档距变化,通过两档三塔模型,对如下指标进行测量。

表2 测量指标分析

Tab. 2 Analysis of measurement indicators

序号	指标名称	参数
1	本塔及临塔绝缘子串倾角	$(\phi_{i-1}, \phi_i, \phi_{i+1})$
2	本塔两侧悬挂点导线倾角	(θ_i, θ_{i+1})
3	相邻塔靠近本塔的悬挂点导线倾角	(θ'_i, θ''_i)
4	导线温度	v

针对第 i 档前后两侧塔的悬挂点线路倾角 θ_i 与 θ'_i 可依次与第 i 档线路应力方程联立,应用线路应力方程,即可计算得到第 i 档输电线路的比载 γ_i 与 γ'_i , 通过公式(6)取两者的平均值:

$$\gamma = V_B(T, \varepsilon) \frac{\gamma_i + \gamma'_i}{2} \quad (6)$$

式中,将作为下一步覆冰厚度计算的比载,利用该比载,可以精准完成档内不均匀覆冰厚度的计算,避免出现计算误差问题。

2.2.2 分布式光纤传感覆冰监测

分布式光纤传感测量的信号是后向布里渊散射信号。目前,输电线路上下设的缆线通常为层绞式,当给定缆线相关参数时,可计算光纤应变与光缆应变之间的联系,以此将监测得到的光纤应变变化量转化为光缆应变变化量。结合上述计算得到频移与温度、应变之间的关系,并按照缆线的性能状态,可通过公式(7)表示缆线所受应力大小:

$$\sigma_w = E \Delta \varepsilon \gamma \quad (7)$$

其中, σ_w 为缆线应力大小; E 为缆线杨氏模量; $\Delta \varepsilon$ 为缆线应变变化大小。由于在现实输电线路施工过程中,缆线属于输电线路的一部分,因此按照其架设的参数数据,可获取整条输电线路上的缆线的初始安装应力及温度。

在输电线路架空线运行时,通过公式(8)的架空线状态方程,可获取外部环境改变时,其水平应力、比载的变化情况:

$$\sigma_w - \frac{E \gamma^2 l^2 \cos^3 \beta}{24 \sigma_w^2} = \sigma_{w0} - \frac{E \gamma^2 l^2 \cos^3 \beta}{24 \sigma_w^2} - \alpha E \cos \beta (T_2 - T_1) \quad (8)$$

式中, σ_{w0} 、 T_1 为缆线的初始安装应力与温度; l 为缆线的档距; β 表示档距高差角; γ 为公式(6)获取的缆线不均匀覆冰后的比载; σ_w 为不均匀覆冰后缆线受到的应力。

缆线不均匀覆冰前后的比载与线路单位长度质量之间的关系可通过如下表示:

$$\begin{cases} \gamma_0 = \sigma_w m_0 g / S \\ \gamma = \sigma_w m g / S \end{cases} \quad (9)$$

式中,缆线的自重比载为 γ_0 ; 缆线的截面积为 S ; m_0 、 m 依次表示缆线自身与覆冰后的单位长度质量; g 表示重力加速度。

此时,假设缆线直径为 d ,冰密度为 0.9 g/cm^3 ,覆冰厚度为 b ,此时,不均匀覆冰后的缆线单位长度质量可通过公式(10)表示:

$$m = \gamma_0 m_0 + 0.9\pi b(b+d) \times 10^{-3} \quad (10)$$

将公式(9)引入到公式(10)中,假设覆冰厚度 b 为未知变量,则可通过公式(11)对其进行求解:

$$b = \sqrt{\frac{d^2}{4} + \frac{1000(\gamma - \gamma_0)S}{0.9\pi mg}} - \frac{d}{2} \quad (11)$$

经过公式(11)的求解后,即可获取输电线路单档不均匀覆冰时的覆冰厚度,以此实现输电线路单档不均匀覆冰监测,最大程度保障输电线路安全。

3 实验分析

将本文设计的分布式光纤覆冰监测技术应用至北京电网严重覆冰输电线路,具体线路内容如表3所示。

表3 已应用线路分析

Tab.3 Applied line analysis

电压等级/kV	线路名称	运行单位
220	达坨线	检修公司
220	庆西一线	检修公司
220	庆西二线	检修公司
220	达西一线	检修公司
220	达西二线	检修公司
220	西坨线	检修公司
220	下达一线	检修公司

通过本文技术对庆西一线进行实时监测,分析在传感距离 $300 \sim 400 \text{ m}$ 处发生覆冰情况时,线路产生的应变情况,分析结果如图4所示。

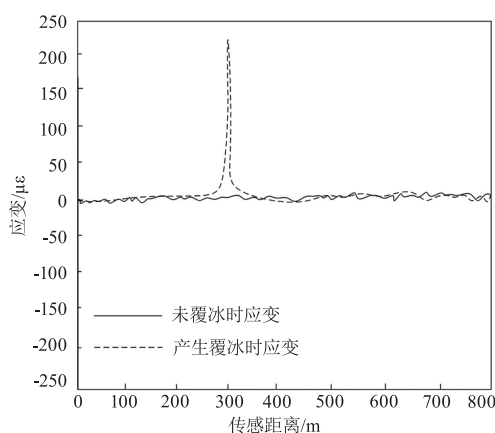


图4 线路应变情况分析

Fig.4 Strain analysis of the line

根据图4可知,在监测过程中的不同传感距离下,当线路未产生覆冰时,输电线路上的应变始终保持在 $0 \mu\epsilon$ 附近波动,而当线路出现覆冰问题时,其应变值会迅速增大,在监测传感距离 $300 \sim 400 \text{ m}$ 之间位置,可以看出线路上的应变值迅速增大,因此可以判断该区域存在覆冰现象,经过本文技术的监测,可直观反应线路应变变化。

分析本文方法对监测线路上的温度变化,分析结果如表4所示。

表4 线路温度变化监测

Tab.4 Monitoring of line temperature change

监测传感距离/m	实际温度/℃	测量温度/℃	误差/℃
50	-62.5	-62.7	0.2
100	-56.7	-56.7	0
150	-43.5	-43.6	0.1
200	-42.3	-42.5	0.2
250	-53.5	-53.5	0
300	-25.6	-26.1	0.5
350	-35.5	-35.2	0.3
400	-46.6	-46.6	0
450	-34.6	-34.7	0.1
500	-24.6	-24.6	0
550	-13.5	-13.5	0
600	-32.4	-32.4	0
650	-35.4	-35.6	0.2
700	-36.7	-36.6	0.1
750	-26.8	-26.8	0
800	-34.5	-34.5	0

根据表4监测结果分析可知,通过本文技术监测到的线路温度与实际线路温度基本接近,仅有部分位置上的监测温度存在微小误差,其中,误差最大不超过 $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$,可以实现较为精准的监测,且不会对后续除冰造成影响,因此,该技术可以实现精准度的线路表面温度监测。在实际监测过程中,应用温度补偿算法,通过实时监测光纤周围的温度,对由温度变化引起的光信号变化进行修正。并采用特殊的光纤材料和结构,以减少温度对光信号传播的影响。

对某一日达坨线线路上不同档距位置的覆冰厚度进行监测,分析本文方法的监测效果,分析结果如图5所示。

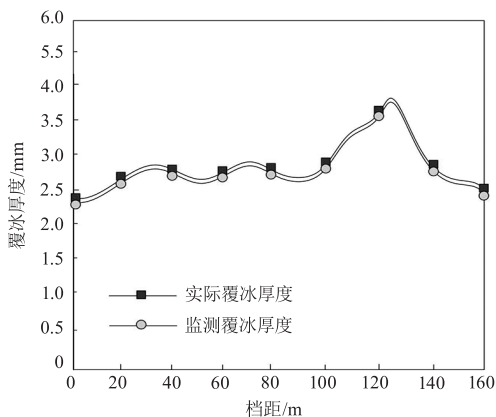


图5 覆冰厚度监测结果分析

Fig. 5 Analysis of monitoring results of ice cover thickness

根据图5可知,当输电线路出现不均匀覆冰时,通过本文技术的监测,可有效监测出档内每一位置的覆冰厚度,在该技术的监测下,档距之间的实际覆冰厚度与监测覆冰厚度并未出现严重偏差,因此,该技术可有效保障覆冰监测能力,获取不均匀覆冰状态下线路每一区域的覆冰厚度情况。

监测不同线路在12月内一天中产生的覆冰情况以及覆冰最大厚度,监测结果如表5所示。

表5 覆冰最大值监测情况分析

Tab. 5 Analysis of monitoring of maximum ice cover

线路名称	覆冰区段	监测覆冰最大厚度/mm
达坨线	23#~25#	0.54
庆西一线	22#~23#	0.53
	27#~28#	1.67
庆西二线	23#~26#	3.09
	22#~24#	3.24
达西一线	25#~26#	0.56
	24#~28#	1.45
达西二线	36#~38#	0.78
西坨线	27#~29#	0.34
下达一线	29#~32#	0.78

根据表5可知,在应用本文技术监测不同线路的覆冰情况时,可有效获取每条线路上的覆冰区段,还能够监测到区段上的覆冰厚度,在单日内,达西一线的24#~28#区段的覆冰厚度最大,达到1 mm以上,由此可见,该技术能够实现覆冰厚度的实时监测。

监测西坨线线路上某日不同覆冰厚度造成的线路变形量情况,监测结果如图6所示。

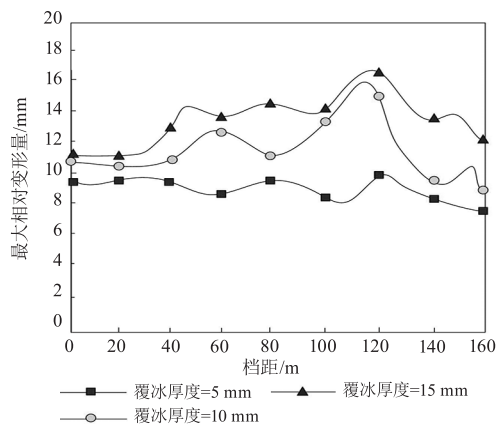


图6 线路最大相对变形量分析

Fig. 6 Analysis of the maximum relative deformation of the line

根据图6可知,在本文技术监测过程中,当覆冰厚度越大,线路的最大相对变形量就越大,导致线路出现变形,其中,当覆冰厚度为15 mm时,线路最大相对变形量达到16 mm以上,而覆冰厚度为5 mm时,线路最大相对变形量均未超过10 mm,而经过本文技术的检测,可以精准获知覆冰厚度对线路变形的影响。

4 结论

本文研究面向保电的输电线路单档不均匀覆冰分布式光纤传感监测技术,为保护输电线路不被覆冰问题影响,设计有效的监测方法,保障输电线路运行安全。未来阶段可对该监测技术进行扩展,使该监测技术能够实现大范围实时性的输电线路覆冰监测,并引入预警技术,当线路发生覆冰时,能够快速发出预警信号。

参考文献:

[1] Zhou Wenwu, Zhang Xiaoli, Jiang Yue, et al. Characteristics of unbalanced tension and relative displacement in overhead power lines under non-uniform accreted ice[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 45 - 50. (in Chinese)

周文武, 张小力, 江岳, 等. 单档不均匀覆冰下架空线路不平衡张力及形变特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 45 - 50.

[2] Li Tianliang, Guo Jinxiu, Wu Dongjian, et al. Current status and development of equipment manufacturing and operation condition monitoring technology based on optical fiber sensing in extreme environments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 27 - 53. (in Chinese)

- 李天梁,郭金秀,吴冬健,等. 基于光纤传感的极端环境下装备制造与运行状态监测技术现状与发展[J]. 机械工程学报,2022,58(8):27-53.
- [3] Zhang Chuqian, Li Longyun, Liu Chuntang, et al. Seismic signal analysis of transmission lines based on distributed optical sensing[J]. Optical Communication Technology, 2021,45(3):32-36. (in Chinese)
张楚谦,李龙云,刘春堂,等. 基于分布式光传感的输电线路地震信号分析[J]. 光通信技术,2021,45(3):32-36.
- [4] Li Zefeng, Li Meng, Zhang Qian, et al. Assessment of natural sponge water storage monitoring system based on optical fiber sensing technology[J]. Environmental Engineering, 2022,40(1):155-160. (in Chinese)
李泽丰,李孟,张倩,等. 基于光纤传感技术的天然海绵体监测系统评估[J]. 环境工程, 2022, 40(1):155-160.
- [5] Huang Yafei, Jiang Xingliang, Ren Xiaodong, et al. Study on preventing icing disasters of transmission lines by use of eddy self-heating ring[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(10):2169-2177. (in Chinese)
黄亚飞,蒋兴良,任晓东,等. 采用涡流自热环防止输电线路冰雪灾害的方法研究[J]. 电工技术学报, 2021,36(10):2169-2177.
- [6] Bian Rong, Chen Keji, Zhang Baiyan, et al. Ice coating shape vision identification on transmission lines based on improved Canny algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(11):131-138. (in Chinese)
卞荣,陈科技,张柏岩,等. 基于改进 Canny 算法的输电导线覆冰冰形视觉识别[J]. 高压电器,2021,57(11):131-138.
- [7] Li Xianchu, Zhang Xi, Liu Jie, et al. Prediction of transmission line icing thickness applying AMPSO-BP neural network model[J]. Electric Power Construction, 2021,42(9):140-146. (in Chinese)
李贤初,张翕,刘杰,等. 输电线路导线覆冰 AMPSO-BP 神经网络预测模型[J]. 电力建设, 2021, 42(9):140-146.
- [8] Zhou Yihuan, Feng Simeng, Cai Yong, et al. Design and experimental study of CW laser cleaning system for high voltage transmission lines ice-covered[J]. Laser & Infrared, 2021,51(1):41-45. (in Chinese)
周艺环,冯思朦,蔡勇,等. 高压输电线覆冰连续激光清除系统设计与实验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(1):41-45.