

耐张塔输电线路等值覆冰厚度的简化预测方法

吴天宝¹, 马小敏¹, 刘益岑¹, 刘小江¹, 庄杰²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 输电线路覆冰会引发断线倒塔事故, 严重影响电网的安全运行, 准确监测线路覆冰情况具有重要的工程意义和应用价值。在输电线路综合荷载的静力学模型基础上, 提出了两种简化的等值覆冰厚度预测方法。第一种简化方法不需要水平档距和高度差参数, 减少了输入参数; 第二种简化方法不需要角度传感器, 避免角度传感器误差造成的预测性能下降, 且减小了系统的硬件成本。结果表明: 在大水平档距情况下, 第一种简化方法与现有方法的预测性能基本一致; 在覆冰前后悬垂角变化不大的情况下, 第二种简化方法的预测误差在工程允许范围之内。

关键词: 等值覆冰厚度; 耐张塔; 简化预测方法; 静态力学模型; 悬垂角

中图分类号: TM 752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)01-0010-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240102

Simplified Prediction Method of Equivalent Ice Thickness for Tension Tower of Transmission Line

WU Tianbao¹, MA Xiaomin¹, LIU Yicen¹, LIU Xiaojiang¹, ZHUANG Jie²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: The icing of transmission lines can cause the accident of line broken and tower collapse, which seriously affects the safe operation of power grid. So accurate monitoring of icing conditions on transmission lines has important engineering significance and application value. Based on static mechanical model of comprehensive load of transmission line, two simplified equivalent ice thickness prediction methods are proposed. The first simplification method does not require horizontal span and height difference parameters, and reduces the input parameters, and the second simplification method does not require angle sensors, avoids the degradation of prediction performance caused by angle sensor errors, and reduces the hardware cost of the system. The results show that in the case of large horizontal span, the prediction performance of the first simplified method is basically the same as that of the existing method, and in the case of little changes in overhang angle before and after icing, the prediction error of the second simplified method is within the engineering allowable range.

Key words: equivalent ice thickness; tension tower; simplified prediction method; static mechanical model; overhang angle

0 引言

覆冰灾害会导致输电线路机械和电气性能急剧下降, 引起绝缘子闪络、线路跳闸、断线、倒塔、导线

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目“基于北斗通讯技术的带边缘计算功能的输电线路覆冰监测技术研究及应用”(521997200038)

舞动和通信中断等事故^[1], 威胁电网安全运行。中国幅员辽阔, 地形地貌复杂多变, 尤其是山脉较多的南方地区, 容易发生严重的覆冰事故^[2]。在2008年和2018年, 中国部分地区遭受大面积积雪冰冻天气, 多处输电线路设备被冰雪灾害侵袭, 造成了高达上百亿元的经济损失。有效的覆冰厚度预测方法能提高电网安全运行水平, 减小冰灾造成的经济损失,

已成为国内外重要的研究课题。

目前,输电线路覆冰厚度的预测方法主要有称重法^[1-9]、图像监测^[10-11]及人工智能辅助的导线覆冰预测法^[12-16]、电容法^[17]和光纤传感法^[18-22],其中应用最广泛的是称重法。称重法以拉力传感器代替绝缘子球头挂环,根据覆冰前后拉力变化量,利用覆冰力学模型,计算出等值覆冰厚度^[4]。实际覆冰通常具有不同断面形状与厚度,沿着架空输电线路不均匀分布。为简化模型与方便计算,计算模型通常将实际覆冰折算成具有相同截面、厚度均匀的圆柱形覆冰^[9],即所谓的等值覆冰。针对直线塔的应用情况,文献[2]使用有限元法,研究了过谷模型、翻山模型等特殊地形下的输电线路等值覆冰厚度计算方法;文献[3]重点考虑了导线风偏角因素,分析了垂直平面和风偏平面的静力学综合模型。针对耐张塔的应用情况,文献[1]和文献[5]根据静力学力矩平衡原理,以轴向拉力和倾角作为输入参数,建立了两端均为耐张塔的输电线路力学模型,但该模型忽略了覆冰作用下的综合负荷在导线上的不均匀分布,导致模型计算结果比实测值大;文献[4]采用有限元法,在大高差与否或大档差与否的情况下,分析了等值覆冰厚度计算模型的适用性。

上述等值覆冰厚度预测方法需要的线路参数较多,且对悬垂角精度要求较高,使得上述方法在工程实践中广泛应用存在较大困难。下面针对输电线路两端都是耐张塔的情况,在覆冰静态力学模型基础上,提出了两种简化的等值覆冰厚度计算方法:第一种方法不需要档距和高度差参数;第二种方法不需要角度传感器。所提方法可提升等值覆冰厚度预测方法在工程实践中的应用性。

1 耐张塔线路覆冰静态力学模型

考虑两端均为耐张塔的情况,架空线受力分析如图 1 所示:A、B 为耐张塔悬挂点,A 与 B 之间的高度差为 h ,m;水平档距为 l ,m;高差角为 β ;AC、DB 为耐张塔绝缘子串,其长度均为 λ ,m;绝缘子串单位长度的自重力和覆冰重力之和为 ω_0 ,N/m;架空线单位长度的自重力和覆冰重力之和为 ω ,N/m;两处悬挂点的拉力分别为 F_a 和 F_b ,N;悬垂角分别为 θ_a 和 θ_b ;V 和 H 分别表示垂直向上方向和水平方向的拉力分量。

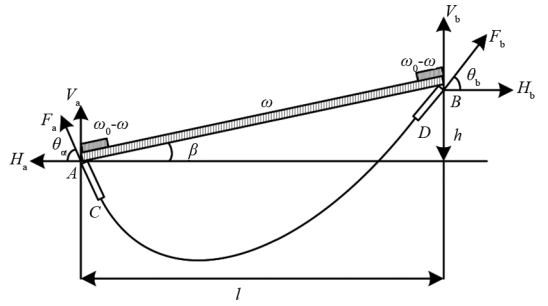


图 1 耐张塔架空线受力分析

根据力学平衡原理,在水平方向和竖直方向的合力均为 0,即:

$$F_a \cos \theta_a = F_b \cos \theta_b \quad (1)$$

$$F_a \sin \theta_a + F_b \sin \theta_b = G_0 + G_1 + G_2 \quad (2)$$

式中, G_0 、 G_1 和 G_2 分别代表绝缘子串、输电线缆和覆冰的重力。在竖直平面内,根据静力平衡条件,对 A 点的总力矩为 0,则^[11]:

$$V_b l - H_b h - \frac{l\omega}{\cos \beta} \frac{l}{2} - \lambda(\omega_0 - \omega) \left(l - \frac{\lambda \cos \beta}{2} \right) - \lambda(\omega_0 - \omega) \frac{\lambda \cos \beta}{2} = 0 \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} V_b &= F_b \sin \theta_b, \\ H_b &= F_b \cos \theta_b, \\ \cos \beta &= \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(3),可得

$$V_b = \frac{l\omega}{2\cos \beta} + \lambda(\omega_0 - \omega) + \frac{h}{l} H_b \quad (5)$$

在文献[1]中,利用 B 点的拉力传感器和角度传感器分别测出 F_b 和 θ_b ,然后根据式(5)可求解出密度变量 ω ,进而获得沿架空线单位长度的覆冰重力 q_{ice} ,N/m。

$$q_{ice} = \omega - \omega_1 \quad (6)$$

式中, ω_1 为架空线单位长度的自重力,N/m。

覆冰等值厚度和 q_{ice} 之间关系为

$$q_{ice} = 9.8\pi b(D + b)\rho \quad (7)$$

式中: b 为覆冰等值厚度,mm; D 为输电导线直径,mm; ρ 为覆冰密度, $\rho = 0.9 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$ 。最后根据式(7)可求出覆冰等值厚度为

$$b = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4q_{ice}}{9.8\pi\rho} + D^2} - D \right) \quad (8)$$

由于在式(3)中,假设的导线自重力荷载沿两

悬挂点连线均匀分布,而实际情况是沿导线曲线均匀分布,因此式(5)中 ω 的系数 $l/(2\cos\beta)$ 比实际值小,从而导致覆冰厚度变大。为了修正该误差,文献[1]建议在无覆冰时,测量拉力 F_b 和悬垂角 θ_b ,利用上述方法计算冰厚 b_0 ;当覆冰发生后,用求解出的 b 减去 b_0 ,即可消除大部分模型误差。

2 简化的等值覆冰厚度估计方法

2.1 简化方法一

在第1种简化方法中,不需要高度差和水平档距作为输入参数。观察式(5),由于高度差 h 相对于水平档距 l 较小(例如 $l=500\text{ m}$, h 位于 $[0,20]\text{ m}$ 区间),且水平分力 H_b 和垂直分力 V_b 是同一数量级的,所以 hH_b/l 相对于 V_b 较小,可以忽略不计。因此,式(5)可简化为

$$V_b \approx \frac{l\omega}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_0 - \omega) \quad (9)$$

当无覆冰时,通过拉力传感器和角度传感器可获取 B 点覆冰发生前拉力 F_{b0} 和悬垂角 θ_{b0} ,代入式(9)可得

$$F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2 \approx \frac{l\omega_1}{2\cos\beta} \quad (10)$$

式中, ω_2 为绝缘子串单位长度的自重力, N/m 。

当覆冰发生时,利用传感器获得 B 点拉力 F_{b1} 和悬垂角 θ_{b1} ,再代入式(9),则有

$$F_{b1}\sin\theta_{b1} - \lambda\omega_2 \approx \frac{l(\omega_1 + q_{\text{ice}})}{2\cos\beta} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)相除并整理,可得

$$q_{\text{ice}} \approx \frac{F_{b1}\sin\theta_{b1} - F_{b0}\sin\theta_{b0}}{F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2} \omega_1 \quad (12)$$

总结所提第1种简化方法的步骤为:1)当无覆冰时,测量拉力 F_{b0} 和悬垂角 θ_{b0} ;2)当覆冰发生时,测量拉力 F_{b1} 和悬垂角 θ_{b1} ;3)利用式(12)计算覆冰密度 q_{ice} ;4)利用式(8)计算覆冰等值厚度 b 。

第1种简化方法所需的输入参数包括绝缘子串的长度 λ 和密度 ω_2 、传输导线的密度 ω_1 、拉力传感器在覆冰发生前后的拉力值 F_{b0} 和 F_{b1} 、角度传感器在覆冰发生前后的悬垂角 θ_{b0} 和 θ_{b1} 。除了拉力和悬垂角,其余参数均为固定值,可通过查找台账获取。与文献[1]采用的式(5)的方法相比较,所提的第1种简化方法不需要高度差 h 和水平档距 l ,因此可避

免高度差和水平档距的测量误差。

2.2 简化方法二

文献[1]和简化方法一都必须通过角度传感器获取悬垂角 θ_b 。但是,在实际情况中,角度传感器时常会提供带有误差的悬垂角;在后续的仿真验证部分,可以看出悬垂角的误差可能会导致覆冰厚度估计值存在较大偏差。为了克服该问题,所提出的第2种简化方法不再需要悬垂角参数。同时,由于无需角度传感器,也可降低覆冰厚度预测系统的硬件成本。具体方法如下。

将无覆冰时的式(4)代入式(5)并移项,可得

$$F_{b0}\sin\theta_{b0} - \frac{h}{l}F_{b0}\cos\theta_{b0} = \frac{l\omega_1}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_2 - \omega_1) \quad (13)$$

利用三角恒等式,式(13)可改写为

$$R\sin(\theta_{b0} - \varphi) = \frac{l\omega_1}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_2 - \omega_1) \quad (14)$$

其中

$$R = \sqrt{F_{b0}^2 + \left(\frac{h}{l}F_{b0}\right)^2}, \quad (15)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{h}{l}\right) = \beta$$

则可得到覆冰前悬垂角为

$$\theta_{b0} = \arcsin\left\{\left(\frac{l\omega_1}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_2 - \omega_1)\right)/R\right\} + \beta \quad (16)$$

假设覆冰发生后的悬垂角 θ_{b1} 与 θ_{b0} 很接近,可以被 θ_{b0} 近似替代,于是式(12)可另写为

$$q_{\text{ice}} \approx \frac{(F_{b1} - F_{b0})\sin\theta_{b0}}{F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2} \omega_1 \quad (17)$$

此外,根据式(13)并忽略较小项 $\frac{h}{l}F_{b0}\cos\theta_{b0}$,

可得 $F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2 \approx \frac{l\omega_1}{2\cos\beta}$;将该近似值代入式(16),则有

$$q_{\text{ice}} \approx 2(F_{b1} - F_{b0})\sin\theta_{b0}/\sqrt{l^2 + h^2} \quad (18)$$

总结所提的第2种简化方法的具体步骤为:

1)当无覆冰时,测量拉力 F_{b0} ;2)通过式(15)计算出无覆冰时悬垂角 θ_{b0} ;3)当覆冰发生后,测量拉力 F_{b1} ,并利用式(18)计算出覆冰密度 q_{ice} ;4)根据式(8)计算覆冰等值厚度 b 。

第2种简化方法所需的输入参数包括绝缘子串

的长度 λ 和密度 ω_2 、传输导线的密度 ω_1 、高度差 h 、水平档距 l 、拉力传感器在覆冰发生前后的拉力值 F_{b0} 和 F_{b1} 。与文献[1] 和所提的第 1 种简化方法相比较,第 2 种简化方法不依赖于角度传感器,因此可避免角度测量误差带来的覆冰厚度估计偏差。虽然第 2 种简化方法需要高度差和水平档距,在后续的仿真验证部分可以看出,高度差和水平档距的误差对于最终的覆冰厚度估计值影响不大。

3 等值覆冰厚度的仿真验证

为了研究所提覆冰厚度计算方法的准确性,利用 Matlab 进行仿真验证,仿真参数的设置参考了中国国家标准 GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》^[23] 的钢芯铝合金绞线,具体参数值为:水平档距 $l=500$ m,高度差 $h=20$ m,绝缘子串长度 $\lambda=5$ m,绝缘子串单位长度的自重力 $\omega_2=20 \times 9.8$ N/m,架空线单位长度的自重力 $\omega_1=2.078 \times 9.8$ N/m,导线直径 $D=28.33$ mm。无覆冰时的悬垂角 $\theta_{a0}=20^\circ$, $\theta_{b0}=25^\circ$; 当覆冰发生后,悬垂角增加到 $\theta_{a1}=22^\circ$ 和 $\theta_{b1}=28^\circ$ 。当上述参数给定后,可根据式(1)和式(2)计算出拉力的理论值。下面在 5 种场景下,通过仿真对比 3 种等值覆冰厚度预测方法,即文献[1]的方法和所提的两种简化方法。

3.1 输入参数无误差的情况

在第 1 种场景仿真实验中,覆冰厚度从 10 mm 变化到 30 mm,并假设各输入参数值都是准确值。表 1 中“文献[1]”表示文献[1]的覆冰厚度预测方法,“简化 1”和“简化 2”代表所提的两种简化的覆冰厚度预测方法(以下同)。

表 1 输入参数无误差时覆冰厚度预测比较

| 真实冰厚/ mm | 预测覆冰厚度/mm | | |
|-------------|-----------|------|------|
| | 文献[1] | 简化 1 | 简化 2 |
| 10 | 10.5 | 10.3 | 8.2 |
| 15 | 15.5 | 15.3 | 13.5 |
| 20 | 20.5 | 20.3 | 18.7 |
| 25 | 25.6 | 25.3 | 23.9 |
| 30 | 30.7 | 30.3 | 29.0 |

从表 1 可知,在理论模型中,文献[1]和所提的第 1 种简化方法的预测误差均小于 1 mm。比较意外的是:第 1 种简化方法忽略了高度差和水平档距参数的相关项,但却能取得更小的估计误差性能。

对该现象的解释是:在利用式(12)计算覆冰等值厚度时,分子项其实是覆冰发生前后做差分,忽略项 hH_b/l 在差分运算中被抵消了。随着真实覆冰厚度的增加,所提的第 2 种简化方法的估计误差从 1.8 mm 下降到 1.0 mm,即覆冰越厚,估计误差越小。这是因为在式(18)的分子中,随着覆冰厚度的增加,悬垂角变化引起的误差相对于覆冰重量越来越小;换言之,在这种情况下,覆冰重量是式(18)分子的主要部分。

3.2 角度传感器有误差的情况

在第 2 种场景中,假设 $b=20$ mm 时角度传感器提供的悬垂角 θ_{b1} 具有误差。由于所提的第 2 种简化方法不需要悬垂角参数,所以表 2 只列举了两种方法悬垂角误差在 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 情况下的覆冰厚度预测值。根据表 1,所提的第 2 种方法的估计值是 18.7 mm,误差为 1.3 mm。从表 2 可知,当悬垂角误差大于 3° 后,文献[1]和所提第 1 种简化方法的估计误差是 2~5 mm,该误差大于所提的第 2 种简化方法。因此,悬垂角误差对于这两种方法的性能影响较大。

表 2 悬垂角有误差时覆冰厚度预测比较

| 悬垂角误差/ ($^\circ$) | 预测覆冰厚度/mm | |
|------------------------|-----------|------|
| | 文献[1] | 简化 1 |
| -5 | 15.1 | 15.5 |
| -3 | 17.4 | 17.5 |
| 0 | 20.5 | 20.3 |
| +3 | 23.3 | 22.8 |
| +5 | 25.1 | 24.4 |

3.3 拉力传感器有误差的情况

在第 3 种场景中,假设 $b=20$ mm 时拉力传感器提供的 F_{b1} 具有误差,其误差与真实值的比例从 -5% 到 $+5\%$,对应的覆冰厚度估计值如表 3 所示。从表 3 可知,文献[1]和所提第 1 种简化方法的性能基本一致,估计误差大致控制在 2 mm 以内。所提第 2 种简化方法在拉力读数偏大时的误差小于偏小的情况,这是因为第 2 种简化方法使用了无覆冰时的悬垂角,导致覆冰发生后计算的向上拉力分量偏小,所以当误报的拉力读数偏大时,正好与模型的误差相抵消。

3.4 水平档距有误差的情况

在第 4 种场景中,假设 $b=20$ mm 时台账提供的水平档距 l 具有误差,其误差与真实值的比例从

-10%到+10%,对应的覆冰厚度估计值如表 4 所示。由于所提第 1 种简化方法不需要水平档距参数,所以第 1 种简化方法的预测值没有出现在表 4 中。根据表 4,水平档距的误差对文献[1]的方法影响较小,预测误差在 0.7 mm 以内;而对所提第 2 种简化方法影响相对较大,误差在 1.5 mm 以内。根据式(17),随着水平档距 l 的增加,覆冰厚度预测值将减小,这也与表 4 的情况相吻合。

表 3 拉力传感器有误差时覆冰厚度预测比较

| 拉力误差/ % | 预测覆冰厚度/mm | | |
|------------|-----------|------|------|
| | 文献[1] | 简化 1 | 简化 2 |
| -5 | 19.2 | 18.9 | 17.3 |
| -3 | 19.7 | 19.5 | 17.9 |
| 0 | 20.5 | 20.3 | 18.7 |
| +3 | 21.3 | 21.1 | 19.6 |
| +5 | 21.9 | 21.6 | 20.1 |

表 4 水平档距有误差时覆冰厚度预测比较

| 水平档距 误差/% | 预测覆冰厚度/mm | |
|--------------|-----------|------|
| | 文献[1] | 简化 2 |
| -10 | 20.7 | 19.2 |
| -5 | 20.6 | 19.0 |
| 0 | 20.5 | 18.7 |
| +5 | 20.5 | 18.5 |
| +10 | 20.6 | 18.3 |

3.5 高度差有误差的情况

在第 5 种场景中,假设 $b=20$ mm 时台账提供的高度差 h 具有误差,其误差与真实值的比例从-10%到+10%,对应的覆冰厚度估计值如表 5 所示。同样,所提第 1 种简化方法的数据没有出现在表 5 中,是因为第 1 种简化方法不需要高度差参数。根据表 5,高度差误差对文献[1]的方法影响较小,预测误差在 0.6 mm 以内;而对所提第 2 种简化方法影响相对较大,误差在 1.4 mm 以内。根据式(18),随着高度差 h 的增加,覆冰厚度预测值将减小,这也与表 5 的情况相吻合。此外,由于高度差 h 相对于水

表 5 高度差有误差时覆冰厚度预测比较

| 高度差误差/% | 预测覆冰厚度/mm | |
|---------|-----------|------|
| | 文献[1] | 简化 2 |
| -10 | 20.5 | 18.6 |
| -5 | 20.5 | 18.7 |
| 0 | 20.5 | 18.7 |
| +5 | 20.6 | 18.8 |
| +10 | 20.6 | 18.8 |

平档距 l 较小,所以高度差误差对所提第 2 种简化方法造成的误差波动范围不如其他 4 种场景。

4 结 论

上面基于耐张塔覆冰的静力平衡模型,提出了两种简化的等值覆冰厚度预测方法:第 1 种预测方法不需要水平档距和高度差参数,其覆冰厚度估计性能与需要这两个参数的方法基本一致;第 2 种预测方法不需要角度传感器,虽然其估计性能有所下降,但其误差在工程允许范围以内,重要的是该方法可避免角度误差造成的估计性能下降,且减小了系统的硬件成本。这两种方法均可增加基于称重法的覆冰等值厚度预测方法的实际应用性。

参考文献

- [1] 蒋兴良,常恒,胡琴,等.输电线路综合荷载等值覆冰厚度预测与试验研究[J].中国电机工程学报,2013,33(10):177-183.
- [2] 郝艳捧,魏发生,王斌,等.特殊地形下输电线路等值覆冰厚度计算模型有效性分析和改进研究[J].电网技术,2022,46(7):2786-2793.
- [3] 阳林,郝艳捧,黎卫国,等.架空输电线路在线监测覆冰力学计算模型[J].中国电机工程学报,2010,30(19):100-105.
- [4] 曾华荣,毛先胤,黄欢,等.均匀覆冰下在线监测耐张塔输电线路等值覆冰计算模型验证研究[J].电力大数据,2021,24(9):33-39.
- [5] 甘艳,杜志叶,周文峰,等.基于覆冰拉力监测系统的耐张塔线路等值冰厚计算模型[J].电测与仪表,2021,58(5):39-45.
- [6] 吴天宝,马小敏,唐军,等.基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法[J].四川电力技术,2022,45(5):20-25.
- [7] 姚陈果,张磊,李成祥,等.基于力学分析和弧垂测量的导线覆冰厚度测量方法[J].高电压技术,2013,39(5):1204-1209.
- [8] 黄文焘,邵能灵,范春菊.基于杆塔结构力学测量的线路覆冰在线监测系统研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(24):71-75.
- [9] 张松海,施心陵,李鹏,等.基于动态拉力与倾角的输电线路覆冰过程辨识与建模[J].电力系统保护与控制,2016,44(9):57-61.

of "Blockchain Technology + Supply Chain Finance" Based on PEST-SWOT Model[J]. Academic Journal of Business & Management, 2023, 5(8): 27-33.

- [16] 张传远, 赵久勇, 王光磊, 等. 新型电力系统的新能源挑战和数字化技术研究[J]. 科技与创新, 2023(10): 7-10.

作者简介:

栗奕博(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源、电力市场;

(上接第 14 页)

- [10] YANG Lin, JIANG Xiaolan, HAO Yanpeng, et al. Recognition of natural ice types on in-service glass insulators based on texture feature descriptor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 535-542.
- [11] 张焯, 冯玲, 穆靖宇, 等. 输电线路绝缘子覆冰厚度图像识别算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 195-202.
- [12] 林刚, 王波, 彭辉, 等. 基于强泛化卷积神经网络的输电线路图像覆冰厚度辨识[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3393-3401.
- [13] WANG Bo, MA Fuqi, GE Leijiao, et al. Icing-EdgeNet: a pruning lightweight edge intelligent method of discriminative driving channel for ice thickness of transmission lines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12
- [14] HE Lifu, LUO Jing, ZHOU Xiudong, A novel deep learning model for transmission line icing thickness prediction[C]. 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), IEEE, 2021: 733-738.
- [15] DAN Handong, HU Bo, SHEN Xiang, et al, Prediction model for transmission line icing thickness based on ISSA-WNN[C]. 2022 5th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), IEEE, 2022: 338-342.
- [16] SUN Wei, WANG Caifei. Staged icing forecasting of power transmission lines based on icing cycle and improved extreme learning machine [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 1384-1392.
- [17] 张思建, 林志赞, 颜钢锋. 基于电容传感器的架空输电线覆冰厚度检测方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 99-102.
- [18] 马国明, 李成榕, 蒋建, 等. 架空输电线路覆冰监测用光纤光栅风速传感器的研制[J]. 中国电机工程学报,

代清钊(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源金融;
杨富麟(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能;
孙冬(1973), 女, 研究生导师, 副教授, 研究方向为能源金融;

张晓春(1972), 女, 研究生导师, 副教授, 研究方向为能源经济及可持续发展、电力市场理论与应用;

曾博(1987), 男, 博士生导师, 副教授, 研究方向为综合能源系统优化规划、能源互联网等。

(收稿日期: 2023-06-09)

2011, 31(13): 128-134.

- [19] BARAT Adil, GUO Qingrui, FAN Fangjun, et. al. Analysis and design of transmission line icing monitoring system based on optical fiber sensing[C]. 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), IEEE, 2022: 1846-1849.
- [20] WEI Jie, HAO Yanpeng, FU Yuan, et al. Experimental study on glaze icing detection of 110 kV composite insulators using fiber Bragg gratings[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1834.
- [21] HE Ling, YI Jizhao, WANG Yanming, et al. Application research of transmission line icing monitoring based on optical fiber sensing technology[C]. 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), IEEE, 2022: 1838-1842.
- [22] SIEGL A, NEUMAYER M, BRETTERKLIEBER T. Fibre optical ice sensing: sensor model and icing experiments for different ice types[C] // 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2020. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128617.
- [23] 全国裸电线标准化技术委员会. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

作者简介:

吴天宝(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输变电运检技术;

马小敏(1988), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网智能运检技术;

刘益岑(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘;

刘小江(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘;

庄杰(1976), 男, 博士, 副教授, 研究方向为嵌入式 AI 系统、通信与信号处理。

(收稿日期: 2023-06-02)