

基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法

吴天宝¹, 马小敏¹, 唐军², 彭旭³, 庄杰⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司营销服务中心, 四川 成都 610041;

3. 电子科技大学航空航天学院, 四川 成都 611731;

4. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:冰灾严重影响输电线路的安全运行,会造成巨大的经济损失。当覆冰产生后,输电线路的弧垂最低点有可能产生位置变化,杆塔拉力传感器所承受的导线长度也会随之变化。文中提出一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法,通过多次迭代计算覆冰与线路等效厚度与密度,以减小弧垂最低点位置变化对覆冰厚度测量的影响。在承受导线长度持续增加、先增加后减少、持续减少、先减少后增加的4种仿真实验情景中,所提出的覆冰厚度估计方法的准确性及科学性均得到了验证。

关键词:覆冰厚度估计; 称重法; 时间序列迭代

中图分类号: TM 752 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)05-0020-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220504

An Estimation Method for Icing Thickness of Transmission Line Based on Time Series Iteration

WU Tianbao¹, MA Xiaomin¹, TANG Jun², PENG Xu³, ZHUANG Jie⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Marketing Service Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. College of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 4. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: Ice disaster seriously affects the safe operation of transmission lines and causes huge economic losses. When the icing occurs, the position of the lowest sag of transmission line may change, and the length of the wire borne by tower tension sensor varies accordingly. An estimation method for icing thickness of transmission lines based on time series iteration method is proposed. The equivalent thickness and density of icing and line are calculated by several iterations to reduce the influence of the changes of the position of the lowest sag on the icing thickness measurement. The accuracy and scientificity of the proposed estimation method are verified in four simulation experiment scenarios, in which the length of the subjected wire continues to increase, firstly increases and then decreases, continuously decreases, and firstly decreases and then increases.

Key words: ice thickness estimation; weighing method; time series iteration

0 引言

在中国许多地区的输电线路都存在覆冰威胁^[1],特别是进入冬季之后,严重时最大覆冰厚度

超过了80 mm^[2]。输电线路覆冰问题如果没得到及时处理,会造成线路过荷载、输电线路断线、大面积闪络、电力设备损坏、杆塔倒塌等严重危害供电安全的问题^[3]。每年由于线路覆冰导致的停电事故约占停电事故的四分之一,造成了巨大的经济损失^[4-6]。

由于电网覆冰故障具有影响范围广、影响时间长、修复难度大等特点,其造成的损失已超过其他种类的自然灾害。有鉴于此,国内对电网冰灾做了大量的研究工作,在输电线路覆冰预测及防治领域取得很多重要成果。文献[7]基于架空输电线路轴向张力、二维倾角和风速风向、温度湿度等信息监测线路稳态覆冰状况,现场安装和运行情况证明了力学模型的有效性。文献[8]以绝缘子串悬挂点拉力和倾斜角为基本参量,考虑风偏因素,将导线力学参量归算到风偏平面,并通过风偏平面内竖直方向上的静力学受力平衡计算覆冰厚度的力学计算模型。文献[9]对直线杆塔两侧导线的覆冰厚度称重法力学模型进行了改进。文献[10]验证了直线塔覆冰厚度计算模型运用到线路地线上的有效性。文献[11]提出了一种等值覆冰厚度计算方法,且效果良好。

目前的大部分覆冰厚度计算模型复杂度高,参数量多,计算麻烦且普遍适用性有待提升。鉴于输电线路覆冰厚度获得方法仍有较大改进空间,下面提出一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法,并运用 Python 设计仿真实验以验证该方法的覆冰厚度计算准确性及其在拉力传感器承受导线长度变化情况下的科学性。

1 覆冰厚度计算方法

覆冰发生时拉力传感器会承受左右两侧部分电缆线及覆冰的重量,输电线路覆冰情况如图 1 所示。悬垂绝缘子串左右两侧承受的导线长度分别为 L_{Left} 和 L_{Right} ,总长度为 L 。

$$L=L_{Left}+L_{Right} \quad (1)$$

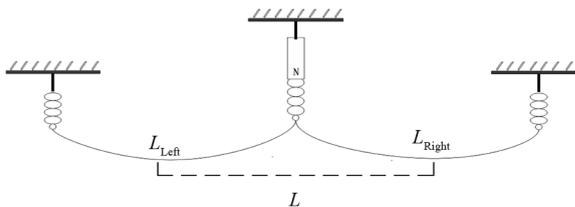


图 1 输电线路覆冰示意

悬垂绝缘子串的拉力分解情况如图 2 所示,拉力传感器垂直方向的分力为 $F \times \cos \theta$ 。

在下面的陈述中,对各参数进行如下定义: F 为拉力传感器的拉力值; θ 为绝缘子串的风偏角; L 为

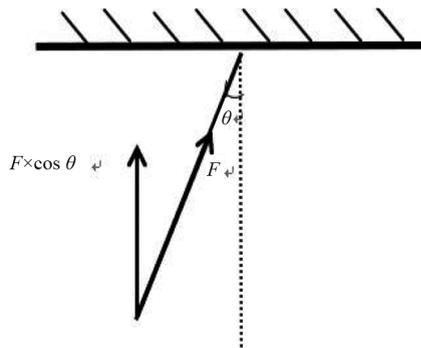


图 2 悬垂绝缘子串的拉力分解

拉力传感器承受的左右两侧导线的总长度; R 为导线及覆冰的总半径; σ 为导线及覆冰的等效线密度(即把覆冰和线路看为一个整体); ρ 为覆冰密度; g 为重力加速度;下标 0 表示没有覆冰的初始时刻,下标 $n, n-1$ 表示覆冰发生之后的第 n 个或 $n-1$ 个时刻,即该物理量为对应参数在该时刻的值。

在覆冰未发生的 t_0 时刻,通过拉力传感器获得输电线路覆冰之前对悬垂绝缘子串的拉力 F_0 以及悬垂绝缘子串的风偏角 θ ,通过台账可知导线初始的 R_0 和 σ 。

在覆冰发生后,依据 $t_1, t_2 \dots t_n$ 时间顺序,多次收集拉力传感器的拉力值,例如间隔 5 min 或 10 min,或根据覆冰增加趋势,动态调整测试间隔周期。随着拉力的增加,每次测量的覆冰厚度会增大。从 $n-1$ 时刻到 n 时刻,覆冰厚度的增大值为 D_n ,如图 3 所示。

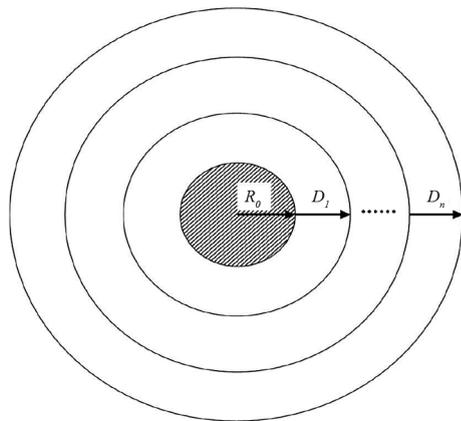


图 3 输电线路覆冰后的横截面时序变化

在覆冰发生的 n 时刻,一方面,覆冰及导线的重力等于拉力传感器在垂直方向的分力;另一方面,覆冰及导线的重力等于 n 时刻新增加的冰重加上 $n-1$ 时刻的导线及覆冰重量。考虑由于各种因素导致的相邻时刻 L 的变化,故覆冰线路的力学模型为

$$F_n \times \cos \theta_n = \pi \times \rho \times g \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2] \times (L_{n-1} + \Delta L_n) + \sigma_{n-1} \times (L_{n-1} + \Delta L_n) \times g \quad (2)$$

在 $n-1$ 时刻,覆冰及导线的重力等于拉力值的垂直分量,同时也等于“覆冰+线路”的等效密度与线路长度和 g 相乘,即

$$F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1} = \sigma_{n-1} \times L_{n-1} \times g \quad (3)$$

由式(2)和式(3)作差可以得到 n 时刻的前后时刻拉力变化量 ΔF_n 。

$$\begin{aligned} \Delta F_n &= F_n \times \cos \theta_n - F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1} = \\ &\pi \times \rho \times g \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2] \times \\ &(L_{n-1} + \Delta L_n) + \sigma_{n-1} \times (L_{n-1} + \Delta L_n) \times g - \\ &\sigma_{n-1} \times L_{n-1} \times g \end{aligned} \quad (4)$$

由于相邻时刻时间间隔短,拉力传感器承受的导线长度 L 变化不大,甚至可以忽略,故可假设 $\Delta L_n \approx 0$,前后时刻拉力变化量 ΔF_n 为

$$\Delta F_n \approx \pi \times \rho \times g \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2] \times L_{n-1} \quad (5)$$

在式(5)中只要确定了 L_{n-1} 即可求解出第 n 时刻覆冰厚度的增量 D_n ,但 L 在实际工程应用中很难准确测量。分析发现,可由式(5)和式(3)相比消去 L_{n-1} ,得到

$$\frac{\Delta F_n}{F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1}} = \frac{\pi \times \rho \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2]}{\sigma_{n-1}} \quad (6)$$

通过等式基本运算,即可由式(6)求解出 D_n 的值。

$$D_n = \sqrt{\frac{\Delta F \times \sigma_{n-1}}{F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1} \times \pi \times \rho} + R_{n-1}^2} - R_{n-1} \quad (7)$$

求解得到 D_n 的值后,更新导线的等效半径 $R_n = R_{n-1} + D_n$,以及导线的等效线密度 $\sigma_n = \sigma_{n-1} + \pi \times \rho \times (R_n^2 - R_{n-1}^2)$,为后面时刻的迭代做准备。

当 $n=1,2,3,\dots,N$ (N 为计算终止时刻)时,测量对应时刻的拉力值与风偏角,根据式(7)即可求解到所有时刻的 D_n 。再将所有时刻的 D_n 累加可得覆冰总厚度 D 为

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n \quad (8)$$

基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法具有严谨的数学推导,利用较少且易获得的参数(各时刻悬垂绝缘子串的拉力、悬垂绝缘子串的风偏角以及导线的初始线密度和半径),即可建立一

个效果良好的覆冰厚度模型,具有较好的普遍适用性和准确性。所提出的基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法的算法步骤如图 4 所示。

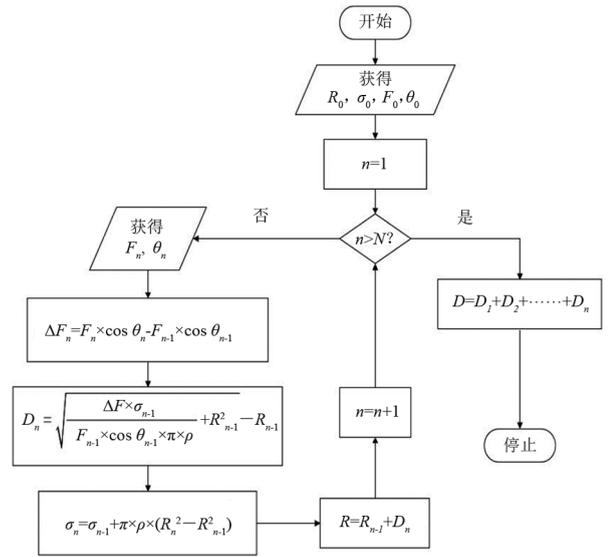


图 4 算法步骤流程

2 覆冰厚度的仿真模型设计

线路覆冰是一个受多因素影响的复杂问题,且很多因素很难去测定,各种因素的变化又对覆冰厚度计算模型的准确度有一定的影响。在现有的力学模型估计覆冰厚度的方法中,一般设定拉力传感器所承受的导线长度 L 不变;但在实际的情况中,受风雪及覆冰情况的影响, L 会有变化,这将导致线路覆冰厚度计算出现偏差。为了研究 L 变化对覆冰厚度计算模型准确度的影响,进行了如下仿真模型的设计。

2.1 输电线路导线参数

为了研究覆冰厚度计算方法的准确性,选择常见的导线型号 LGJX-400/50,参数如表 1 所示,根据此导线参数利用 Python 进行仿真。

表 1 导线 LGJX-400/50 参数

参数	数值
铝—计算截面/mm ²	399.73
钢—计算截面/mm ²	51.82
总—计算截面/mm ²	451.55
外径/mm	27.63
计算拉断力/N	123 400
计算重量/(kg · km ⁻¹)	1511
弹性系数/(N · mm ⁻²)	68 646.55

2.2 考虑 L 变化时的覆冰厚度真值计算模型

在未覆冰时,拉力传感器的值为 F_0 , L 为 L_0 。为控制变量假设悬垂绝缘子串的风偏角 θ 保持不变,根据文献[10]可知风偏角 θ 的变化几乎为 0,可以忽略。在覆冰发生的第 i 时刻,拉力传感器的值为 F_i , L 为 L_i ,覆冰厚度为 D 。因为增加的覆冰重力与拉力传感器的增大值相等,故可得

$$(F_i - F_0 \frac{L_i}{L_0}) \times \cos \theta = \pi \times \rho \times g \times L_i \times [(R_0 + D)^2 - R_{n-1}^2] \quad (9)$$

2.3 考虑 L 变化的基于时间序列迭代的覆冰厚度估计方法

在不忽略 L 变化的情况下,原方法中相邻时刻的覆冰厚度增加量 D_n 的计算公式变为

$$D_n = \sqrt{\frac{F_n \times \sigma_{n-1} \times L_{n-1} - F_{n-1} \times \sigma_{n-1} \times L_n}{F_{n-1} \times L_n \times \pi \times \rho} + R_{n-1}^2} - R_{n-1} \quad (10)$$

2.4 考虑 L 变化的等值覆冰厚度获得方法

在文献[11]中提出了一种输电线路等值覆冰厚度获得方法,通过测量输电线路覆冰前对悬垂绝缘子串的拉力、输电线路覆冰后对悬垂绝缘子串的拉力以及悬垂绝缘子串的风偏角,可以得到输电线路等值覆冰厚度 D_i 为

$$D_i = \sqrt{\frac{(F_i - F_0) \times \cos \theta \times \sigma_0}{F_0 \times \pi \times \rho} + R_0^2} - R_0 \quad (11)$$

考虑 L 变化后等值覆冰厚度 D_i 为

$$D_i = \sqrt{\frac{(F_i - F_0) \times \cos \theta \times \sigma_0 \times L_0}{F_0 \times \pi \times \rho \times L_i} + R_0^2} - R_0 \quad (12)$$

3 覆冰厚度计算方法的仿真分析

根据表 1 中的导线参数,为控制变量设定 θ 为 0,忽略风偏角影响,假定覆冰密度 ρ 为 900 kg/m^3 ,重力加速度 g 为 9.8 N/kg ,相邻杆塔间的输电导线长度为 100 m ,初始状态未覆冰时拉力传感器承受的左右两边导线长度之和 L 为 100 m 。输电线路的覆冰厚度取值一般为 10 mm 或 15 mm ^[12],为了数据更具有识别度,设定仿真覆冰厚度从 0 增加到 50 mm 。为验证基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计

方法的准确性和科学性,在覆冰的过程中设置了 4 种不同的 L 变化场景:1)持续增加;2)先增加后减少;3)持续减少;4)先减少后增加。

3.1 L 持续增加的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 $0, 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 50 \text{ mm}$;设定各时刻 L 的值依次为 $100 \text{ m}, 102 \text{ m}, 104 \text{ m}, 106 \text{ m}, 108 \text{ m}, 110 \text{ m}$ 。根据式(6)可获得各时刻的拉力值 F 如表 2 所示。

表 2 L 持续增加场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	102	2574
20	104	4285
30	106	6648
40	108	9695
50	110	13 460

由表 2 可知,随着覆冰厚度 D 和拉力传感器承受导线长度 L 的增加,拉力值 F 在不断增大。根据获取的 F 值,按照提出的基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法(以下简称“迭代法”)计算覆冰厚度值 D_x ,并得到相对误差 $e_x = (D_x - D)/D$,结果如表 3 所示。

表 3 L 持续增加场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	10.377	3.77
20	20.864	4.32
30	31.521	5.07
40	42.353	5.88
50	53.367	6.73

考虑 L 的变化时,根据式(7)和式(9)可以得到该迭代法和文献[11]提出的输电线路等值覆冰厚度获得方法(以下简称“等值法”)的覆冰厚度计算结果 D_x 与 D_y 以及误差 e_x 与 e_y ,结果如表 4 所示。

表 4 L 持续增加场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	102	9.998	10.219	-0.02	2.19
20	104	19.996	20.302	-0.02	1.51
30	106	29.998	30.345	-0.01	1.15
40	108	39.996	40.367	-0.01	0.92
50	110	49.996	50.381	-0.01	0.76

从以上仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 持续增加的情况下,该迭代法的绝对误差和相对

误差均有所增加,这主要是因为未考虑 L 变化的情况下,由 L 的持续增加引起的误差变大。考虑 L 变化的情况下,迭代法和等值法的误差都明显减小,迭代法的相对误差接近于 0。计算过程中取整或保留小数是造成误差的原因,等值法的绝对误差在持续增大但变化不大,其相对误差在持续减小。

3.2 L 先增后减的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 0、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm;设定各时刻 L 的值依次为 100 m、102 m、104 m、102 m、100 m、98 m。覆冰开始后, L 先增后减场景下的拉力真值仿真结果如表 5 所示; L 先增后减场景下的迭代法估计值仿真结果如表 6 所示; L 先增后减场景下考虑 L 变化的仿真结果如表 7 所示。

表 5 L 先增后减场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	102	2574
20	104	4285
30	102	6397
40	100	8977
50	98	11 991

表 6 L 先增后减场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	10.377	3.77
20	20.864	4.32
30	31.511	1.70
40	39.997	-0.01
50	49.298	-1.40

表 7 L 先增后减场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	102	9.998	10.219	-0.02	2.19
20	104	19.996	20.302	-0.02	1.51
30	102	29.997	30.120	-0.01	0.40
40	100	39.997	40.001	-0.01	0.00
50	98	49.994	49.914	-0.01	-0.17

从仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 先增后减的情况下,当 L 减少时, F 的增加量没有在 L 持续增加时大;该迭代法的绝对误差和相对误差均是先增大再变小;相对误差在 L 变化最大时达到最大为 4.32%,在 L 变化最小即 L 变回 L_0 时相对误差仅为 -0.01%。考虑 L 变化的情况下,迭代法和等值法的误差都较小,迭代法的绝对误差接近 0,等值法的绝对误差从 2.19%减少至 -0.17%。

3.3 L 持续减少的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 0、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm;设定各时刻 L 的值依次为 100 m、98 m、96 m、94 m、92 m、90 m。覆冰开始后, L 持续减少场景下的拉力真值仿真结果如表 8 所示; L 持续减少场景下的迭代法估计值仿真结果如表 9 所示; L 持续减少场景下考虑 L 变化的仿真结果如表 10 所示。

表 8 L 持续减少场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	98	2473
20	96	3956
30	94	5895
40	92	8258
50	90	11 012

表 9 L 持续减少场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	9.612	-3.88
20	19.108	-4.46
30	28.418	-5.27
40	37.530	-6.18
50	46.435	-7.13

表 10 L 持续减少场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	98	9.997	9.770	-0.03	-2.30
20	96	19.999	19.672	-0.01	-1.64
30	94	29.996	29.609	-0.01	-1.30
40	92	39.994	39.565	-0.02	-1.09
50	90	49.994	49.532	-0.01	-0.94

从仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 持续减少的情况下,该迭代法的绝对误差和相对误差的绝对值均在增加,且其变化幅度比 L 持续增加时大。这主要是因为未考虑 L 变化的情况下, L 的持续减小引起该误差变大。考虑 L 变化的情况下,迭代法的绝对误差和相对误差仍接近于 0,等值法的绝对误差为负数且在持续减小,其相对误差的绝对值也在变小。

3.4 L 先减后增的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 0、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm;设定各时刻 L 的值依次为 100 m、98 m、96 m、98 m、100 m、102 m。覆冰开始后, L 先减后增场景下的拉力真值仿真结果如表 11 所示; L 先减后增场景下的迭代法估计值仿真结

果如表 12 所示; L 先减后增场景下考虑 L 变化的仿真结果如表 13 所示。

表 11 L 先减后增场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	98	2473
20	96	3956
30	98	6146
40	100	8977
50	102	12 481

表 12 L 先减后增场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	9.612	-3.88
20	19.108	-4.46
30	29.477	-1.74
40	39.997	-0.01
50	50.684	1.37

表 13 L 先减后增场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	98	9.997	9.77	-0.03	-2.3
20	96	19.999	19.672	-0.01	-1.64
30	98	29.996	29.876	-0.01	-0.41
40	100	39.997	40.001	-0.01	0
50	102	49.996	50.083	-0.01	0.17

从以上仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 先减后增的情况下,与 L 先增后减的情况相反,该迭代法的绝对误差和相对误差先减小后增大, L 越接近 L_0 时相对误差的绝对值越小。考虑 L 变化的情况下,和前面场景类似,迭代法的效果优于等值法。

4 结 论

上面提出了一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法,并模拟在覆冰厚度逐渐增加的情况下,从拉力传感器承受的导线长度 L 持续增加、先增后减、持续减少和先减后增 4 种场景,验证了所提方法的有效性和科学性。结论如下:

1)在覆冰厚度小于 20 mm 时,在 4 种场景下该迭代法的相对误差的绝对值最大为 4.46%,最大的绝对误差为 0.892 mm;该误差在实际工程应用中影响不大,且能在 L 变化的影响下有效地估计覆冰厚度。在覆冰厚度超过 20 mm 时,该迭代法的最大相对误差绝对值为 7.13%,优于现有的大多数力学方法,且在实际情况中覆冰超过 20 mm 的情况罕见。

2)在考虑 L 变化的情况下,该迭代法的表现优于目前先进的等值厚度计算方法,其未来应用空间将会更大。

参考文献

[1] 王青峰. 输电线路覆冰的防治方法探究[J]. 通讯世界,2018(11):188-189.

[2] 田学农,杨永. 架空输电线路覆冰的危害及应对措施[J]. 电世界,2009(11):4-5.

[3] 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.

[4] 夏辉军. 输电线路防冰减灾技术研究及覆冰在线监测系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2011.

[5] 张文亮,于永清,宿志一,等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术,2008,32(8):1-5.

[6] 童军心,陈智. 冰雪天气对江西电网造成的灾害分析及防治对策[J]. 江西电力,2008,32(S1):18-20.

[7] 邢毅,曾奕,盛戈皞,等. 基于力学测量的架空输电线路覆冰监测系统[J]. 电力系统自动化,2008,32(23):81-85.

[8] 张子翀,王健. 基于拉力和倾角的输电线路覆冰厚度预测模型[J]. 广东电力,2015,28(6):82-86.

[9] 董德杰. 直线杆塔两侧导线覆冰厚度的改进称重法[J]. 电气技术,2015(4):52-55,60.

[10] 牛唯,王斌,马晓红,等. 均匀覆冰下的直线塔架空地线覆冰厚度计算模型误差分析[J]. 广东电力,2021,34(10):76-82.

[11] 国网四川省电力公司电力科学研究院,国家电网公司. 输电线路等值覆冰厚度获得方法:CN201510765526. 3[P]. 2016-01-20.

[12] 林凤羽. 高压输电线路设计冰厚的取值[J]. 山东电力技术,1996(6):10-13.

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;

唐 军(1964),男,硕士,高级工程师,研究方向为电能计量装置智能化技术;

彭 旭(2000),男,硕士研究生,研究方向为输电线路覆冰;

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:2022-06-01)