

改进电气几何模型法在 1000 kV 输电线路 雷电绕击跳闸率计算中的应用

彭谦¹, 李军¹, 卞鹏¹, 康东升¹, 单志祥²

(1. 国核电力规划设计研究院, 北京市 西城区 100032;

2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京市 大兴区 100176)

Application of Improved Electrical Geometry Model in Calculation of Lightning Shielding Failure-Caused Trip-out Rate of 1 000 kV Power Transmission Line

PENG Qian¹, LI Jun¹, BIAN Peng¹, KANG Dongsheng¹, SHAN Zhixiang²

(1. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Xicheng District, Beijing 100032, China;

2. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Daxing District, Beijing 100176, China)

ABSTRACT: Advantages and disadvantages of three existing methods to calculate lightning shielding failure are analyzed. The electrical geometry model method is improved to solve the coordinates of intersection point of striking distance curves while the incident direction of is perpendicular to ground; according to the change of incidence angle of lightning current, then the intersection point is mapped to different geometric spaces; and then based on actual striking distance curves the coordinates of intersection point are modified to solve the trip-out rate due to lightning shielding failure. Calculation results show that the improved electrical geometry model method is more accurate than traditional methods. Finally, applying the improved method the influences of ground wire protection angle, tower height, cross arm length of middle phase and layer space on lightning shielding failure-caused trip-out rate of 1 000 kV power transmission line are analyzed.

KEY WORDS: electrical geometry model; 1 000 kV transmission line; lightning shielding failure

摘要: 分析现有 3 种输电线路雷电绕击计算方法的优缺点, 改进了电气几何模型法。求解雷电流垂直地面入射时击距曲线间的交点坐标; 根据雷电流入射角的变化, 将交点映射到不同的几何空间; 根据实际击距曲线修正交点坐标并求解雷电绕击跳闸率。计算结果表明, 改进电气几何模型法较传统方法计算更为准确。最后, 应用该方法分析了地线保护角和杆塔呼高、中相横担长度、层间距对 1 000 kV 输电线路雷电绕击跳闸率的影响。

关键词: 电气几何模型; 1 000 kV 输电线路; 雷电绕击

0 引言

雷击是高压及超、特高压输电线路事故的重要原因, 国内外观测和分析表明, 对于 220 kV 线路,

雷电绕击导线与直击杆塔均是危险的; 对于 330~1 000 kV 线路, 绕击更具危险性。因此准确评价输电线路的绕击耐雷水平对电网安全稳定运行具有重要意义^[1-4]。特高压电网输送容量大, 考虑到其安全稳定运行的重要性, 研究特高压输电线路雷电绕击计算方法, 以减少线路雷击跳闸次数, 对输电线路设计、施工具有重要意义。

目前用于评价线路绕击耐雷水平的常用计算方法^[5-8]有: 规程法、电气几何模型法(electrical geometry model, EGM)和 Dellera-Garbagnati 先导模型法。

规程法^[9-10]是在高压线路模拟试验与运行经验基础上制定的, 经常不能反映线路的具体特性, 该方法在计算线路雷电绕击率时并未考虑雷电流的波过程及地面倾角等对屏蔽效果的影响。我国 1 000 kV 特高压输电工程运行时间较短, 没有充足的运行数据, 不适宜应用规程法计算。

电气几何模型法^[11]将雷电的放电特性与线路的结构联系起来建立几何模型。其基本原理是:

1) 雷电先导的放电通道头部先到达哪个物体的击距之内, 即向该物体放电; 2) 击距仅与雷电流幅值有关, 与其他因素无关, 不受输电网电压等级的影响。因此可以应用电气几何模型法来计算 1 000 kV 输电线路的雷电绕击。

Dellera 和 Garbagnati 基于自然雷电放电过程和长空气间隙放电过程的相似性, 利用长间隙放电来模拟自然雷电放电, 提出了输电线路雷电屏蔽的先

导发展模型^[12-13], 引入了侧面距离和屏蔽失效宽度这 2 个基本参数, 并分段对线路和杆塔处的雷电屏蔽情况分析计算, 使得该模型具有较大的适应性。由于反映雷电发展物理过程的参数不易确定, 如间隙电压、导线上的感应电压、导线表面场强等。先导模型法有其先进性和发展前景, 但目前尚不成熟, 还需进行大量的研究工作才能应用于实际工程中。

国网电力科学研究所和中国电力科学研究所计算 1000 kV 特高压输电线路的雷电绕击率时, 主要应用电气几何模型法^[14-18], 通过求解击距曲线交点, 得到雷电垂直入射时的对地投影, 并根据入射角的变化对其修正, 最后根据投影长度计算绕击率。应用该方法计算时, 对于雷电流幅值较小或负保护角情况, 击距曲线交点的投影小于击距曲线对地的实际投影, 计算存在误差。此外, 当输电线路经过山区时, 工程中通常应用经验公式确定导线、地线平均高度, 近似求解输电线路的绕击率, 计算同样存在误差。

本文将改进电气几何模型法, 提出一种更准确的计算方法, 用于分析 1000 kV 输电线路的雷电绕击情况。

1 改进电气几何模型法

1.1 击距公式

雷云向地面发展的先导放电通道头部先到达某个物体的击距时, 即向该物体放电。地线、导线和大地的击距^[1]分别按照下式求解:

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (1)$$

$$r_c = 1.63(5.015I^{0.578} - 0.001U_{ph})^{1.125} \quad (2)$$

$$r_g = \begin{cases} [3.6 + 1.7 \ln(43 - h_{c.av})]I^{0.65}, & h_{c.av} < 40 \text{ m} \\ 5.5I^{0.65}, & h_{c.av} \geq 40 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I 为雷电流; r_s 为雷电对避雷线的击距; r_c 为雷电对导线的击距; r_g 为雷电对大地的击距; U_{ph} 为导线上工作电压瞬时值; $h_{c.av}$ 为相导线平均高度。

1.2 电气几何模型

以 1000 kV 特高压同塔双回路输电工程中使用的鼓型塔模型为例, 研究雷电绕击现象。绘制鼓型塔的电气几何模型如图 1 所示。图中: 点 D 为避雷线挂点, 点 E 为中相导线挂点; 点 A 为杆塔中心对水平面的垂线与避雷线击距圆的交点; 点 B 、点 F 分别为避雷线击距圆与中相导线击距圆的交点; 点 C 、点 G 分别为中相导线击距圆与大地击距直线的交点。

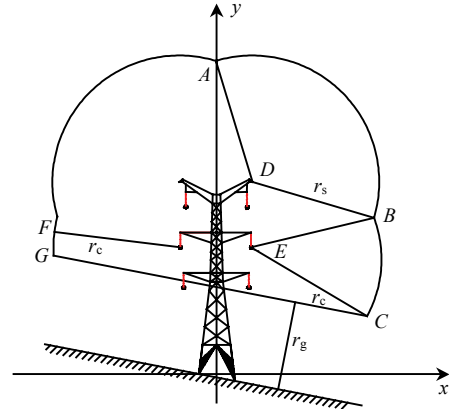


图 1 改进的电气几何模型

Fig. 1 Diagram of improved electrical geometry model

由图 1 可见, 如果雷云先导先到达弧 FA 或弧 AB , 则向避雷线放电; 如果雷云先导先到达弧 BC 或弧 FG , 则向导线放电; 如果雷云先导先到达直线 CG , 则向大地放电。称弧 FA 、弧 AB 为保护弧, 称弧 BC 、弧 FG 为暴露弧。

1.3 雷电垂直地面入射时的绕击率计算

以点 A 对水平面的垂线为中心, 将图 1 中的电气几何模型分为左、右 2 部分。这 2 部分在几何上具有相似性, 同时, 雷电分别击中左、右部分在数学上是相互独立的事件, 没有相关性。因此研究其中的一部分, 即可获得另外部分的结果。本文研究右部分, 即保护弧 AB 与暴露弧 BC 间的关系。

取杆塔塔底中心坐标为 $(0, 0)$, 设点 D 坐标为 (x_D, y_D) , 点 E 坐标为 (x_E, y_E) 。要求点 B 坐标 (x_B, y_B) , 可以点 D 、点 E 为圆心, r_s 、 r_c 为半径, 建立二元二次方程组求解, 难度较大。由图 1 可见, 点 B 为直线 BD 、 BE 交点, 直线 BD 、 BE 的方程较易获得, 可以建立二元一次方程组, 其解容易求得。求直线 BD 、 BE 的方程, 需要计算其斜率。设线段 DE 的长度为 l_{DE} , 其值为

$$l_{DE} = \sqrt{(x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2} \quad (4)$$

可求解 $\angle BDE$ 和 $\angle BED$, 设其分别对应变量 θ_1 、 θ_2 , 计算公式如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos \frac{(l^2 + r_s^2 - r_c^2)}{2lr_s} \\ \theta_2 = \arccos \frac{(l^2 + r_c^2 - r_s^2)}{2lr_c} \end{cases} \quad (5)$$

直线 DE 与 y 轴夹角为

$$\delta_1 = \arctan \left(\frac{x_D - x_E}{y_D - y_E} \right) \quad (6)$$

得到直线 BD 、 BE 的斜率为

$$\begin{cases} k_1 = \tan(\frac{\pi}{2} + \theta_1 - \delta_1) \\ k_2 = \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_2 - \delta_1) \end{cases} \quad (7)$$

建立直线方程为

$$\begin{cases} y = k_1x + y_D - k_1x_D \\ y = k_2x + y_E - k_2x_E \end{cases} \quad (8)$$

求解式(8), 得到点B坐标(x_B, y_B), 表达式分别为

$$\begin{cases} x_B = \frac{y_D - k_1x_D + k_2x_E - y_E}{k_2 - k_1} \\ y_B = k_1x_B + y_D - k_1x_D \end{cases} \quad (9)$$

点A坐标(x_A, y_A)可按式(10)计算, 即

$$\begin{cases} y_A = \sqrt{r_s^2 - x_D^2} + y_D \\ x_A = 0 \end{cases} \quad (10)$$

雷电会以不同的角度入射, 设其下行直线与y轴交角为 ψ , 高杆塔先导入射角的概率分布密度函数为

$$g(\psi) = 0.75 \cos^3 \psi \quad (11)$$

当雷电下行入射角为 0° 时, 雷电流与x轴垂直, 由图1可见, 由于 $y_B < y_D$, 弧AB在x轴上的投影大于 $x_B - x_A$, 弧AB在x轴上的投影 l_{AB} 计算公式为

$$l_{AB} = \begin{cases} x_B - x_A, & y_B \geq y_D \\ x_D + r_s, & y_B < y_D \end{cases} \quad (12)$$

点C坐标(x_C, y_C)可以通过求解圆与直线的方程获得, 直线CG的方程为

$$y = k_3x + b_3 \quad (13)$$

式中: $k_3 = -\tan \theta_g$; $b_3 = r_g / \cos \theta_g$, θ_g 为地面倾角。点E坐标为(x_E, y_E), 以点E为圆心, r_c 为半径的圆方程为

$$(x - x_E)^2 + (y - y_E)^2 = r_c^2 \quad (14)$$

联立式(13)、(14), 求解点C坐标(x_C, y_C), 即

$$\begin{cases} x_C = (-b + \sqrt{b^2 - 4ac}) / (2a) \\ y_C = k_3x_C + b_3 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $a = 1 + k_3^2$; $b = -2x_E + 2k_3(b_3 - y_E)$; $c = x_E^2 + (b_3 - y_E)^2 - r_c^2$ 。

当雷电下行入射角为 0° 时, 由图1可见, 由于 $y_C < y_E$, 弧BC在x轴上的投影大于 $x_C - x_B$, 弧BC在x轴上投影 l_{BC} 的计算公式为

$$l_{BC} = \begin{cases} x_C - x_B, & y_C \geq y_E \\ x_E + r_c - x_B, & y_C < y_E \end{cases} \quad (16)$$

雷电先导垂直击中线路的绕击率 $P_\alpha(I)$ 可按式(17)计算, 即

$$P_\alpha(I) = l_{AB} / (l_{AB} + l_{BC}) \quad (17)$$

当雷电以入射角 ψ 下行, 其绕击率可应用式(17)求解, 但式(12)和式(16)不再适用, 需要针对入射角 ψ 研究新的击距圆投影计算方法。

1.4 雷电不垂直地面入射时的绕击率计算

由式(12)和式(16)可见, l_{AB} 、 l_{BC} 仅由点B、C、D、E的坐标决定。雷电流以入射角 ψ 下行, 等价于将坐标轴y轴逆时针旋转 ψ , 相应地将坐标轴x轴逆时针旋转 ψ 度, 得到新的 $x'-y'$ 坐标系, 在新坐标系下, 同样可以应用式(12)和式(16)求解 l_{AB} 、 l_{BC} 。因此, 需要求解点B、C、D、E在 $x'-y'$ 坐标系下的坐标。 $x-y$ 、 $x'-y'$ 坐标系如图2所示。

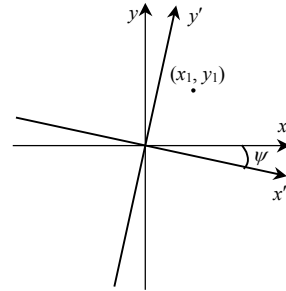


图2 $x-y$ 和 $x'-y'$ 坐标系

Fig. 2 Coordinate systems of $x-y$ 、 $x'-y'$

设图2中有一点, 其在坐标系 $x-y$ 上的坐标为(x_1, y_1), 则其在坐标系 $x'-y'$ 上的坐标(x'_1, y'_1)的计算公式为

$$\begin{cases} x'_1 = x_1 \cos \psi + y_1 \sin \psi \\ y'_1 = -x_1 \sin \psi + y_1 \cos \psi \end{cases} \quad (18)$$

将点B、C、D、E的坐标依次代入式(18), 即可得到各点在坐标系 $x'-y'$ 上的坐标。将新坐标值代入式(12)、(16)、(17), 即可获得入射角 ψ 的绕击概率。

1.5 雷电流幅值概率

除西北地区(不包括陕南)和内蒙古自治区的部分地区以外, 我国一般地区雷击输电线路杆塔的雷电流幅值概率为

$$P(I_0 \geq i_0) = 10^{-i_0/88} \quad (19)$$

式中 $P(I_0 \geq i_0)$ 为雷电流幅值超过 i_0 的概率。

陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区雷电流幅值较小, 雷击输电线路杆塔的雷电流幅值概率为

$$P(I_0 \geq i_0) = 10^{-i_0/44} \quad (20)$$

1.6 雷击跳闸率计算

得到的雷击导线闪络概率的计算方程为

$$P_{st} = \int_0^{\pi/2} \int_{I_{min}}^{I_{max}} P_\alpha(I) \frac{d[1 - P(I_0 \geq i_0)]}{dI} dI d\psi \quad (21)$$

式中 I_{max} 、 I_{min} 分别对应造成输电线路绕击跳闸的最大、最小电流, 其计算方法参见文献[14-19]。

雷击跳闸率可按式(22)计算, 即

$$N = N_L \eta P_{sf} \quad (22)$$

式中: N_L 为每 100 km 线路每年遭受雷击的次数;

η 为建弧率, 其计算方法参见文献[14-18]。

2 算例分析

以 1000 kV 特高压同塔双回路输电工程中使用

的鼓型塔为例, 其电气参数和杆塔参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 1000 kV 输电线路电气参数

Tab. 1 Electrical parameters of 1000 kV transmission line

绝缘子闪络 电压/kV	导线瞬时 电压/kV	年平均 雷电日/d	系统标称 电压 U_n /kV
4400	816.4	40	1100

表 2 1000 kV 输电线路杆塔参数

Tab. 2 Tower's parameters of 1000 kV transmission line

杆塔 呼高/m	塔头 高度/m	上相与中相横担 的垂直距离/m	中相与下相横担 的垂直距离/m	中相与下相横担 的水平距离/m	中相横担 长度/m	绝缘子 的串长/m	避雷线距塔 中心距离/m	避雷线 弧垂/m	导线 弧垂/m
54.00	6.00	19.80	19.70	2.00	17.50	12.45	18.00	12.55	14.40

应用传统方法和改进方法分别计算平原、丘陵、山地条件下的输电线路雷电绕击跳闸率, 计算结果如表 3 所示。由表 3 可见, 对于平原地区、丘陵地区和山地地区, 改进方法较传统电气几何模型法的计算结果分别增大 1.2%、3.2%和 5.3%。

表 3 不同地形条件下 1000 kV 输电线路的雷电绕击跳闸率

Tab. 3 Lightning shielding failure rate of 1000 kV transmission line covering different terrain

计算方法	地形条件	雷电绕击跳闸率/(次/(100 km·a))
传统电气 几何模型法	平原	0.083
	丘陵	0.157
	山地	0.400
改进方法	平原	0.084
	丘陵	0.162
	山地	0.421

针对平原地区, 分析保护角对雷电绕击跳闸率的影响, 计算结果如表 4 所示。由表 4 可见, 保护角对线路雷电屏蔽性能影响明显, 当保护角从 -5° 增大到 0° 时, 绕击跳闸率增加了 100%, 当保护角从 0° 增大到 5° 时, 绕击跳闸率增加了 73%。这主要是因为保护角增大, 减小了保护弧的长度, 同时增大了暴露弧长度, 造成绕击跳闸率增大。

表 4 保护角对雷电绕击跳闸率的影响

Tab. 4 Influence of lightning protection angle on shielding failure-caused trip-out rate

保护角/ $^\circ$	-10	-5	0	5	10
绕击跳闸率/(次/(100 km·a))	0.018	0.048	0.096	0.166	0.280

调整杆塔呼高, 分析其对绕击跳闸率的影响, 计算结果如表 5 所示。由表 5 可见, 杆塔呼高对线路雷电屏蔽性能影响较大, 随着呼高增大, 绕击跳闸率增大。这主要是因为塔高增大, 虽然不影响保

表 5 塔高对雷电绕击跳闸率的影响

Tab. 5 Influence of tower height on shielding failure-caused trip-out rate

杆塔呼高/m	51	54	57	60
绕击跳闸率/(次/(100 km·a))	0.069	0.084	0.099	0.116

护弧长度, 但增大了暴露弧长度, 绕击跳闸率造成绕击跳闸率增大。

调整中相横担长度, 绕击跳闸率计算结果如表 6 所示。由表 6 可见, 随着中相横担长度增加, 线路绕击跳闸率变化很小, 中相横担长度对线路绕击跳闸影响很小。

表 6 中相横担长度对绕击跳闸率的影响

Tab. 6 Influence of length of middle-phase cross arm on lightning shielding failure-caused trip-out rate

中相横担长度/m	15	20	25	30	35
绕击跳闸率/(次/(100 km·a))	0.083 9	0.083 8	0.083 8	0.083 8	0.083 8

调整上相与中相横担、中相与下相横担的垂直距离, 计算结果如表 7 所示。由表 7 可见, 增大导线的层间距, 绕击跳闸率也会增大。

表 7 上相与中相、中相与下相横担垂直距离对绕击跳闸率的影响

Tab. 7 Influence of distance between up-phase, middle-phase and lower phase cross arm on lightning shielding failure-caused trip-out rate

上相与中相横担 距离/m	中相与下相横担 距离/m	绕击跳闸率/ (次/(100 km·a))
15	15	0.104
20	20	0.155
25	25	0.214
30	30	0.278
35	35	0.347

3 结论

针对传统电气几何模型法计算误差大的问题, 改进了电气几何模型法。计算结果表明, 改进的方法计算更为准确。应用该方法分析保护角、杆塔呼高、横担长度及其间距对绕击跳闸率的影响, 得到如下结论:

- 1) 输电线路的绕击跳闸率随保护角、杆塔呼高及横担层间距的增大而增大, 受横担长度影响很小。
- 2) 减小地线保护角对降低绕击跳闸率有明显的效果。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 电力工业出版社, 2005: 1-204.
- [2] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 13-17.
Mo Fujiang, Chen Yunping, Ruan Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 13-17(in Chinese).
- [3] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-7.
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-7(in Chinese).
- [4] 李培国. 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 63-65.
Li Peiguo. A new viewpoint about lightning trip-out of UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 63-65(in Chinese).
- [5] 王钢, 李海锋. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
Wang Gang, Li Haifeng. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144(in Chinese).
- [6] 钱冠军, 王晓瑜. 输电线路雷击仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 39-44.
Qian Guanjun, Wang Xiaoyu. Lightning simulation model of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 39-44(in Chinese).
- [7] 陈国庆, 孙才新, 张志劲. 计及风速影响的500kV同杆双回线路绕击耐雷性能计算模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 108-111, 115.
Chen Guoqing, Sun Caixin, Zhang Zhijin. Study on the calculation model of lightning protection performance of shielding failure for 500kV double circuit transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 108-111, 115(in Chinese).
- [8] 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良, 等. 超/特高压输电线路雷绕击防护性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1-6.
Zhang Zhijin, Sima Wenxia, Jiang Xingliang, et al. Study on the lightning protection performance of shielding failure for UHV&EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-6(in Chinese).
- [9] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 5.
- [10] 电力工业部绝缘配合标准化技术委员会. DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [11] Eriksson A J. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(3): 859-870.
- [12] Deller L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model, part I: description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 2009-2017.
- [13] Deller L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model, part II: exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 2023-2029.
- [14] 谢耀恒, 谢伟, 谷山强, 等. 应用雷电参数统计分析 220 kV 同塔双回输电线路绕击性能[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2657-2662.
Xie Yaoheng, Xie Wei, Gu Shanqiang, et al. Lightning performance analysis of shielding failure for 220 kV transmission lines with double circuit on the same tower using lightning parameters statistics [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2657-2662(in Chinese).
- [15] 张志劲, 司马文霞, 廖瑞金. 风速对 500 kV 同杆双回线路绕击耐雷的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 19-20.
Zhang Zhijin, Sima Wenxia, Liao Ruijin. Study on the effect of wind speed to the lightning protection performance of shielding failure for 500kV double-circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 19-20(in Chinese).
- [16] 徒有锋, 李晓岚, 余仁山, 等. 输电线路防雷软件开发和应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 183-186.
Tu Youfeng, Li Xiaolan, Yu Renshan, et al. Development and application of calculation software HVC for lightning protection of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 183-186(in Chinese).
- [17] 周远翔, 鲁斌, 燕福龙. 山区复杂地形输电线路绕击跳闸率的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 45-49.
Zhou Yuanxiang, Lu Bin, Yan Fulong. Shielding failure flash-over rate under conditions of complex landscape in a mountainous area[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 45-49(in Chinese).
- [18] 李晓岚, 尹小根, 余仁山, 等. 基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 42-44.
Li Xiaolan, Yin Xiaogen, Yu Renshan, et al. Calculation of shielding failure flashover rate for transmission line based on revised EGM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 42-44(in Chinese).
- [19] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 考虑雷电入射角后电气几何模型的改进[J]. 电磁避雷器, 2009(4): 23-26.
Li Ruifang, Wu Guangning, Cao Xiaobin, et al. Improvement of electro-geometric model with considering lightning strike angle [J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(4): 23-26(in Chinese).



彭谦

收稿日期: 2010-05-30。

作者简介:

彭谦(1980), 男, 博士, 工程师, 从事输电网设计工作, E-mail: PQ.ncepu@163.com;

李军(1965), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网设计、运行、管理方面工作;

卞鹏(1979), 男, 硕士, 工程师, 从事输电网设计工作;

康东升(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输电网设计工作。

(责任编辑 马晓华)