

Study on Differentiation Lightning Protection in Shandong

Ziyang Li¹, Rui Yang², Zhenhai Wang³, Jing Xu⁴, Ranran Wang^{4*}

¹Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co. Ltd., Ji'nan Shandong

²Shandong Institute of Standardization, Ji'nan Shandong

³State Grid Shandong Power Company Zhucheng Power Supply Company, Weifang Shandong

⁴Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong

Email: 272675861@qq.com, 13465680768@163.com, story2018xj@163.com, *wranran@163.com

Received: Nov. 22nd, 2018; accepted: Dec. 7th, 2018; published: Dec. 14th, 2018

Abstract

Based on the influence of factors such as complicated geomorphology and obvious climatic differences on lightning protection design in Shandong, this paper studies the differentiation lightning protection design of overhead-line in Shandong based on the improved electro-geometric model proposed by Eriksson, and summarizes the mathematical model suitable for Lightning Trip Rate calculation in Shandong.

Keywords

Shandong Region, Electro-Geometric Model, Lightning Trip Rate, Differentiation Calculation

山东地区差异化防雷研究

李子扬¹, 杨锐², 王振海³, 徐静⁴, 王冉冉^{4*}

¹山东省电力工程咨询院有限公司, 山东 济南

²山东标准化研究院, 山东 济南

³国网山东省电力公司诸城市供电公司, 山东 潍坊

⁴山东农业大学, 山东 泰安

Email: 272675861@qq.com, 13465680768@163.com, story2018xj@163.com, *wranran@163.com

收稿日期: 2018年11月22日; 录用日期: 2018年12月7日; 发布日期: 2018年12月14日

摘要

基于山东地区地貌复杂、气候差异明显等因素对防雷设计工作的影响, 本文基于Eriksson提出的改进电气几何模型法对山东地区架空线差异化防雷设计进行了研究, 总结了适合山东地区雷击跳闸率计算的数学模型。

*通讯作者。

文章引用: 李子扬, 杨锐, 王振海, 徐静, 王冉冉. 山东地区差异化防雷研究[J]. 智能电网, 2018, 8(6): 586-594.

DOI: 10.12677/sg.2018.86065

关键词

山东地区, 电气几何模型法, 雷击跳闸率, 差异化计算

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷击对于电网安全运行的影响一直备受关注, 统计表明, 包括山东电网在内, 220 kV 及以上交流输电线路, 由于雷击引起的跳闸和重启的概率超过半数[1]。目前输电线路的设计中, 防雷主要采用规程法和电气几何模型法(electro-geometric model, EGM) [2], 国内外也提出了改进的 EGM 和先导模型法(leader progression model, LPM)等[3]。规程法主要基于早期 30 m 以下单回路矮塔设计的经验总结而来, 有很大的局限性, 在如今高杆塔的防雷设计研究中并不适用。先导模型法由于雷电现象的复杂多样性, 诸多学者对雷击物理过程的描述还有很大分歧, 且对雷电和长间隙试验观测的数据过于依赖。EGM 是把雷电的放电特性和杆塔结构尺寸等因素结合起来进行分析, 与实际运行经验相符合, 具有很好的普适性。本文在山东地区差异化防雷研究中, 使用 EGM 法。

山东地理位置处于我国东部沿海地区, 属于我国雷暴频发地区, 且地形地貌复杂多样, 不同地区雷暴日差别明显[4] [5], 各地不同的气候特征, 对于雷电活动也有明显影响[6] [7]。本文以山东电网为例, 基于改进的电气几何模型法, 研究了架空线路的差异化防雷, 对提高输电线路运维水平, 减少雷电活动对电网的破坏, 具有至关重要的作用。

2. 地区不同雷电活动影响

山东省是我国受亚洲夏季风影响最强的地方之一, 山东中部地区年平均雷暴日大于 25 d, 由于地形、纬度等因素的影响, 鲁中山区和鲁南沂蒙山区雷暴日数较多, 其中沂源的雷暴日达到 36 d, 而威海的石岛雷暴日较少, 只有 16 d [8]。各个地区雷暴日差别较大, 雷电分布的差异决定了在防雷计算与设计不能简单地使用单一固定的雷电参数。

目前工程上使用的雷电定位系统都是比较先进的, 理论上可以实时完整的记录覆盖区域内的地闪发生情况。因此使用合适的方法便可以较为准确地统计出线路走廊内实际的地闪发生情况。但是有些地区地闪密度分布数据并不完备, 尤其是新建线路的数据更少。此时可根据地区的雷暴日来近似计算地闪密度从而实现差异化防雷设计。

IEEE 1243-1997 推荐地闪密度可以利用公式(1)来计算。

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (1)$$

式中: T_d 为雷暴日。

计算输电线路雷击跳闸率的时候, 每 100km 线路每年遭受雷击次数, 通常用公式(2)计算。

$$\begin{cases} N = N_g \frac{b+4h_g}{1000} \times 100, (U_n < 1000 \text{ kV}) \\ N = N_g \frac{b+28h_g^{0.6}}{1000} \times 100, (U_n > 1000 \text{ kV}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： N_g 为地闪密度； b 为两根避雷线间距离； h_g 为避雷线平均高度； U_n 为线路电压等级。

现行规程法所使用的雷电流幅值分布函数的计算方法以及相应的雷电流幅值密度函数的计算方法如式(3)所示。

$$\begin{cases} \lg P = -\frac{I}{C} \\ f(I) = \frac{\ln 10}{C} 10^{-\frac{I}{C}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： C 为常数，在我国一般地区 C 通常取 88，在某些特殊地区如西北地区(不包括陕南)和内蒙古自治区部分地区 C 通常取 44。

IEEE 推荐的雷电流幅值分布函数的计算方法以及相应的雷电流幅值密度函数的计算方法如式(4)所示。

$$\begin{cases} P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \\ f(I) = \frac{2.6 I^{1.6}}{31^{2.6} \left[1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}\right]^2} \end{cases} \quad (4)$$

利用规程法和 IEEE 推荐公式分别计算雷电流密度并对比实测值发现，IEEE 公式更接近山东实际雷电流分布情况，如表 1 所示，因此，雷击跳闸率计算中，山东地区的雷电流幅值分布及其概率的计算推荐采用 IEEE 推荐的公式。

Table 1. The discipline method is compared with the IEEE recommended formula

表 1. 规程法与 IEEE 推荐公式比较

I_0/kA	>100	>80	>60	>40	>20
规程法	7.3	12.3	20.8	35.1	59.2
IEEE 推荐	4.5	7.8	15.2	34	75.7
实测值	0.35	1.8	3.89	16.4	67.2

3. 反击跳闸率影响因素及其计算

雷电直击于线路架空地线或者杆塔时，雷电流一部分经架空地线流向线路两侧，大部分经杆塔及接地装置流入大地，引起塔顶电位升高，而造成绝缘子串的闪络放电，这种现象称为反击。雷电反击过电压与雷电参数，杆塔型式、高度和接地电阻等。

3.1. 反击跳闸率的计算

线路绝缘按照塔头绝缘，即绝缘子串或塔头间隙的 50%冲击放电电压计算，则雷击杆塔时的反击跳闸率按照公式(5)计算。

$$n_1 = N(1 - P_a) g P_l \eta \quad (5)$$

式中： N 为年雷击次数； P_a 为绕击率； g 为击杆率； η 为建弧率； P_l 为雷击杆塔超过耐雷水平 I_l 的概率， P_l 按照上述公式(4)计算。

击杆率是指雷击杆塔的次数与线路遭受雷击的总次数的比值，击杆率的大小受地线根数和地形因素的影响。按照表 2 计算。

Table 2. Different terrain Striking Rate
表 2. 不同地形击杆率表

地形	地线根数	
	1	2
平原	1/4	1/6
山丘	1/3	1/4

3.2. 线路耐雷水平的计算

雷击塔顶反击的耐雷水平，按照公式(6)计算。

$$I_1 = \frac{u_{50\%}}{(1-k)\beta R_i + \left(\frac{h_a}{h_i} - k\right)\beta \frac{L_i}{T_1} + \left(1 - \frac{h_g}{h_c} k_0\right) \frac{h_c}{T_1}} \quad (6)$$

式中： $u_{50\%}$ 表示绝缘子串正极性 50%冲击放电电压； h_i 为杆塔高度，m； h_a 表示横担对地高度，单位 m； β 表示杆塔分流系数； h_c 表示导线平均高度，单位 m； k 表示导线和避雷线间的耦合系数； k_0 表示导线和避雷线间的几何耦合系数； h_g 表示避雷线对地平均高度，单位 m； R_i 表示杆塔冲击接地电阻， Ω ； T_1 为雷电波形的波头时间， μs ； L_i 为杆塔等值电感。

输电线路杆塔的分流系数是指由于避雷线具有分流的作用，使雷电流只有一部分流过杆塔电感和接地电阻。分流系数可以按照表 3 来进行选择。

Table 3. Tower shunt coefficient
表 3. 杆塔分流系数表

线路额定电压(kV)	地线根数	β 值
110	1	0.9
	2	0.86
220	1	0.92
	2	0.88
500	2	0.88

建弧率可用公式(7)计算。

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad (7)$$

式中： E 为工频弧道平均电场强度。

当中性点有效接地，可用公式(8)计算，中性点非有效接地时，可用公式(9)计算。

$$E = \frac{U_n}{\sqrt{3}l_i} \quad (8)$$

$$E = \frac{U_n}{2l_i + l_m} \quad (9)$$

式中： U_n 为系统额定电压，V； l_i 为绝缘子闪络距离，m； l_m 为木横担间距，若为铁或水泥横担，则为 0，m。

雷击塔顶时，地线上的冲击电压超过地线的起始电晕电压，地线上将出现电晕。由于电晕的存在，地线的径向尺寸影响范围将会增大，需要考虑电晕的影响，此时导线的几何耦合系数应当乘以电晕校正系数。

对于 22~500 kV 等特高压以下输电线路，一般需要考虑冲击电晕对线路的影响，表 4 为通常情况下简单修正电晕影响时所需要的校正系数。

Table 4. Corona correction factor for lightning strikes the top of the tower
表 4. 雷击塔顶时的电晕校正系数

额定电压(kV)	20-35	60-110	220	500
双地线	1.1	1.2	1.25	1.28
单地线	1.15	1.25	1.3	
双地线有耦合线	1.1	1.15	1.2	1.25
单地线有耦合线	1.1	1.2	1.25	

3.3. 电磁环境对防雷设计的影响

在特高压交直流输电线路的防雷设计中，还必须考虑电磁环境情况这一重大技术问题。因此，对于线路耦合系数来说，分为特高压以下线路耦合系数计算和特高压考虑冲击电晕的耦合系数计算两种方式。

当不考虑冲击电晕的影响时，输电线路各相导线自波阻抗与互波阻抗用公式(10)和公式(11)表示。

$$Z_{ii} = \frac{\alpha_{ii}}{v} = 60 \ln \frac{2h_i}{r_{eq}} \quad (10)$$

$$Z_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{v} = 60 \ln \frac{2H_{ij}}{D_{ij}} \quad (11)$$

式中： H_{ij} 表示各相导线与其他导线镜像之间的距离，单位 m； h_i 表示各相导线对地高度，单位 m； D_{ij} 表示各项导线之间的距离，单位 m； r_{eq} 表示导线半径，单位 m。

当考虑冲击电晕的影响后，此时输电线路导线的等值波阻抗计算如公式(12)所示。

$$Z_c = \frac{Z_0}{\frac{E_0}{u} \left(1 - \frac{6\sqrt{M}}{7} \right) + \frac{6\sqrt{M}}{7} \sqrt{\frac{E_0}{u}}} \quad (12)$$

式中： Z_0 表示几何波阻抗，单位 Ω ； u 表示导线上的工作电压，单位 V； E_0 表示线路上的起晕电压，单位 V； M 为常数，正极性时， $M=1.36$ ，负极性时， $M=1.13$ 。

分裂导线电晕起始电压的值按照公式(13)所示。

$$E_{d0} = nrE_c \ln \left(\frac{2h}{r_{eq}} \right) \left[1 + \frac{r(n-1)}{A} \right]^{-1} \quad (13)$$

式中： r 表示导线半径，单位 m； n 表示分裂导线数； E_c 为起晕场强，单位 V/m； r_{eq} 为分裂导线等效半径，m； A 表示分裂间距，单位 m；起晕场强的计算由 Peek 公式得到，即公式(14)所示。

$$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (14)$$

式中： m 为导线表面粗糙系数； δ 表示相对空气密度系数。

分裂导线间距可用公式(14)表示

$$A = \frac{d}{2 \sin \frac{n}{\pi}} \quad (15)$$

式中: d 为相邻两根分裂导线的距离, m。

计算线路分裂导线的等效半径如公式(16)所示。

$$r_{eq} = \sqrt[n]{nrA^{n-1}} \quad (16)$$

线路双避雷线的起晕电压可用公式(17)计算。

$$E_{b0} = \frac{3000m \left(1 + \frac{0.03}{\sqrt{r_b}}\right) 2r_b}{1 + \frac{2r_b}{D}} \ln \left(\frac{2h_b}{\sqrt{r_b D}} \right) \quad (17)$$

式中: r_b 为避雷线的半径, 单位 m; h_b 表示避雷线的平均高度, 单位 m; D 为避雷线间的距离, 单位 m。

求输电线路的自波阻抗, 将其代入公式(18), 即可得到电晕时的线间耦合系数。

$$k_{m-1,m} = -\frac{Y_{m1} + Y_{m2} + \dots + Y_{mm}}{Y_{mm}} \quad (18)$$

式中: Y_{mm} 表示线路的波阻抗矩阵 $[Z]$ 中第 m 行第 m 列的代数余子式。

在输电线路计算中(特别是防雷计算)通常情况下不考虑杆塔上的波过程, 而是用集中电感来模拟杆塔。我国规程给出了不同结构杆塔单位长度的电感值。该模型较简单、方便, 并且可以根据数学公式直接计算求得线路反击耐雷水平, 我国规程的防雷计算就采用此模型。但此方法是一简化计算方法, 与实际生活中的雷击过程有一定的差距, 因为将杆塔看作一等值电感, 此时杆塔上任意点电位是相同的, 这种情况下不能反映雷击杆塔顶部时雷电流在杆塔上的传播过程及反射波对杆塔各节点电位的影响与绝缘子串上电压随时间变化的过程。

随着电力系统的不断发展, 线路杆塔的高度也在不断增加, 早期根据 30m 以下架空线路杆塔设计的实践经验总结出来的电感模型有很大的局限性, 对高塔的计算有较大误差, 在如今高杆塔的防雷设计研究中并不适用。雷击塔顶导致的雷电流从塔顶流入大地的过程是一个暂态波过程, 单波阻抗模型在这一方面与集中电感模型相比有了质的飞跃。这两种模型分别反映了 2 种完全不同的物理过程, 而波阻抗模型更接近于实际情况, 并且这两种模型塔顶过电压的表示方式是不一样的。经塔底反射回过的电压波和雷电产生的过电压波的同作用产生波阻抗模型中的塔顶过电压; 而在电感模型中, 线路杆塔的接地电阻和塔身的等效电感性抗上的电压降之和表示塔顶的过电压。对比现阶段的各种计算模型, 其中日本的山本修、原武久 2 人给出的计算公式与工程实际更加接近, 受到较多试验数据资料的支持。如公式(19)所示。

$$Z = 60 \left(\ln \frac{\sqrt{2}ct}{r} - 2 \right) \quad (19)$$

式中: c 为光速; t 为杆塔遭受雷击时计时时刻。

关于原武久给出的公式(19), 计算得出的波阻抗随着时间的变化而变化, 在高杆塔防雷设计中, 可以只采用简单的静态波阻抗模型, 即取波阻抗的最大值进行设计。如公式(20)所示。

$$Z = 60 \left(\ln \frac{2\sqrt{2}h}{r} - 2 \right) \quad (20)$$

若双回特高压塔架有导线与避雷线,常采用多层传输塔模型,目的是研究杆塔的雷电冲击响应特性,并且预测线路杆塔在遭受雷击时其绝缘子串反击闪络的情况。目前的杆塔模型很难将其结果推广到结构较为复杂的传输塔上,大多适用于结构简单的传输塔,因为这些模型很少有考虑横担与支架对杆塔 Z 产生的影响。因此在差异化防雷的设计中,建议采用西安交大提出的多波阻抗模型如公式(21)所示。该模型计算相对简单,并与 Hara 提出的无损杆塔模型一致性较高[9]。其多阻抗模型示意图如图 1 所示。

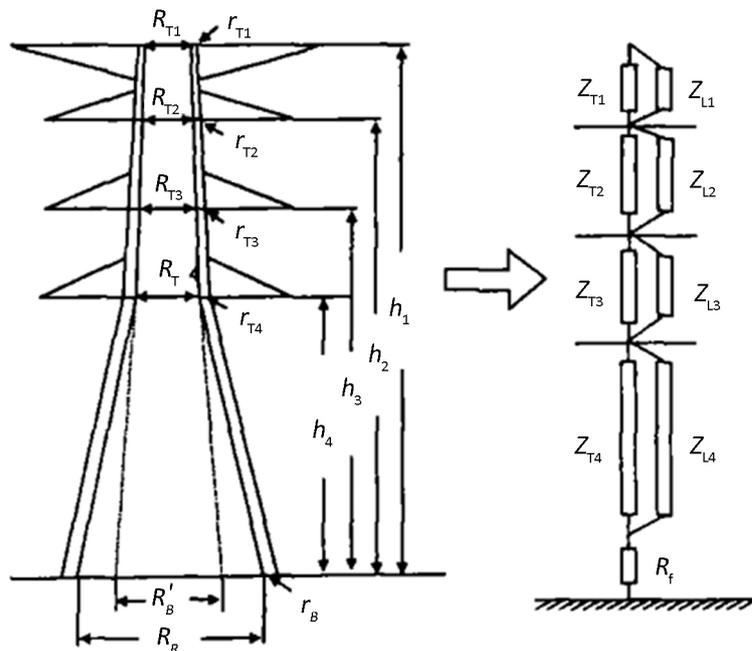


Figure 1. Multi-wave impedance model diagram
图 1. 多波阻抗模型示意图

$$Z_{ik} = 60 \left(\ln \frac{2^{\frac{2}{3}} h_k}{r_{ek}} - 2 \right) \tag{21}$$

$$r_{ek} = 2^{\frac{1}{8}} \left(r_{ik}^{\frac{1}{3}} r_B^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}} \left(R_{ik}^{\frac{1}{3}} R_B^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{4}} \tag{22}$$

$$Z_{Lk} = 9Z_{ik} \tag{23}$$

4. 绕击率影响因素及其差异化计算

由于先导模型法还不是很成熟,而 EGM 具有很好的可操作性,建议架空输电线路绕击雷电性能的计算采用 EGM 法。对于水平导体,针对雷击距这点来讲,不同学者研究所得出的雷击距公式是不同的,并且大多数学者没有考虑线路架设的高度差异对击距产生的影响,得出的公式只是雷电流的一元方程。Eriksson 提出的雷击距公式具有更好的普适性[10]。雷电绕击的电气几何模型如图 2 所示。

Eriksson 提出的计算方法如公式(24)所示。

$$R_c = 0.67h^{0.6} I^{0.74} \tag{24}$$

式中: h 为导线平均高, m; I 为雷电流幅值, kA。

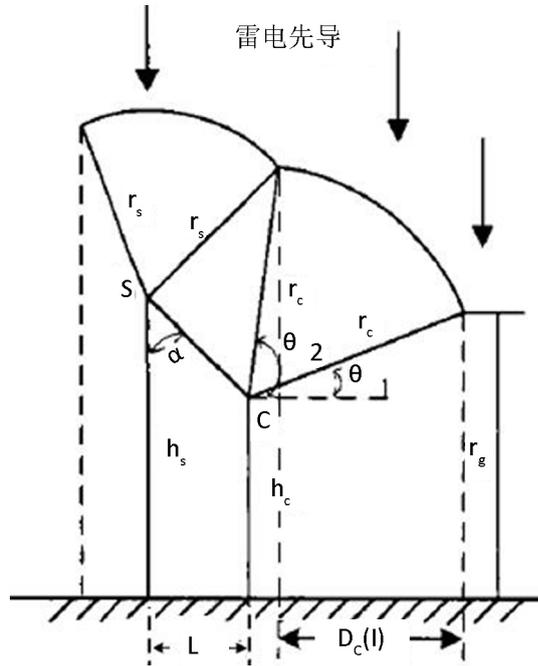


Figure 2. Schematic diagram of conventional lightning strike model

图 2. 常规雷电绕击模型示意图

雷电先导的对地击距与对导线击距的比值(击距系数)是随着导线高度的增加而减小的, IEEE 工作组提出当导线的平均高度小于 40 m 时, 对地击距如公式(25)所示。

$$R_e = (0.36 + 0.168 \ln(43 - h)) R_c \quad (25)$$

对于超特高压线路, 线路杆塔, 先导对大地的击距与其对避雷线和导线的击距是不相等的, 因此当导线的平均高度大于 40m 时, 对地击距如公式(26)所示。

$$R_e = 0.55 R_c \quad (26)$$

雷击导线的区域随着雷电流的增加而减小, 当雷电流达到某一程度时, 击中避雷线或大地, 线路不再发生绕击, 此时称为最大绕击电流, 其大小受到杆塔的尺寸、地形因素的影响。

计算最大绕击电流 I_m 。已知 h_s 、 h_c 、 L 求当 $D_c(I) = 0$ 时的 I 值, 即为最大绕击电流 I_m 。求出最大绕击电流 I_m , 即可进一步求出平原地形的绕击率。 $D_c(I)$ 的计算见公式(27)。

$$D_c(I) = r_c (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (27)$$

式中: h_s, h_c 为避雷线和导线平均高度, 单位 m; L 如图 2, 表示导线与避雷线间的的水平距离, 单位 m。

绕击闪络率及绕击跳闸率的计算见公式(28):

$$\begin{cases} \text{SFFOR} = 2N_g L \int_{I_c}^{I_{\max}} D_c(I) f(I) dI \\ \text{SFTR} = \text{SFFOR} \times \eta \end{cases} \quad (28)$$

式中: $N_g L = N$, 其计算过程见式(2); $f(I)$ 表示雷电流幅值分布, 其计算见式(4)。

根据电气几何模型, 绕击率计算还需要的公式, 如公式(29)、(30)、(31)和(32)所示。

$$I_c = \frac{2 \times U_{50\%}}{Z_c} \quad (29)$$

$$\overline{SC} = \sqrt{L^2 + (h_s - h_c)^2} \quad (30)$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{r_g - h_c}{r_c}\right) \quad (31)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} + \alpha - \arccos\left(\frac{r_c^2 + (\overline{SC})^2 - r_s^2}{2r_c\overline{SC}}\right) \quad (32)$$

式中, α 为避雷线平均保护角。

$$\alpha = \arctan\frac{L}{h_s - h_c} \quad (33)$$

5. 结语

在日常生活中架空输电线路遭受雷击引起的线路跳闸事故,不但会使电力输送单位不能可靠供电,加大线路负担,增加线路以及设备的维护维修成本;而且当输电线路遭受直击雷时,产生的雷电波还会沿着线路传送到变电站中,可能进一步引发重大事故。本文针对雷电跳闸率的计算方法进行研究,结合山东地区地形地貌复杂、雷暴日差别明显以及气候因素,给出了更为符合山东地区防雷计算的改进电气几何模型法,对山东地区的差异化防雷作出贡献,对改进山东地区电网的输电线路设计防雷措施,增强输电线路供电的安全可靠性,保障发电厂、变电站的安全稳定运行具有重要的意义。

基金项目

本项目由山东电力工程咨询院有限公司科技项目资助(项目编号: 37-2016-24-K0016)。

参考文献

- [1] 陈家宏, 赵淳, 谷山强, 等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3361-3375.
- [2] Brown, G.W. and Whitehead, E.R. (1969) Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding: Part II. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **88**, 617-625. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1969.292350>
- [3] 许飞, 王建国, 周文俊, 等. 改进电气几何模型对输电线路绕击率的计算及典型故障分析[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 205-207.
- [4] 唐巧玲, 孙荆茶, 孙迎春. 山东省闪电分布及雷电灾害特征分析[J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 65-68.
- [5] 马红松, 张立波. 山东省雷电灾害分析及雷电防御[J]. 山东气象, 2005, 25(103): 46-47.
- [6] 左迎芝, 朱睦正, 张文煌. 山东地区不同区域闪电与湿度的相关分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009(45): 72-75.
- [7] 于怀征, 张民凯, 陈志超, 等. 山东省闪电活动与降水关系的研究[J]. 现代农业科技, 2009(20): 355, 357.
- [8] 唐巧玲. 山东省雷电活动特征及雷电灾害风险区划研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [9] Hara, T. and Yamamoto, Q. (1996) Modeling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis. *IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, **143**, 283-289.
- [10] 廖民传, 汪晶毅, 李志泰, 等. 混压同塔多回输电线路绕击建模与评估[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2547-2552.