

# 500 kV 架空线直击和感应雷暂态过电压计算

李天鹭, 陈 谦, 王海林, 李文帆, 冯 肯

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

**摘 要:** 目前中国大多省区已形成以特高压和超高压为骨干的输电网络, 输电线路距离长、跨度大、分布广, 所经过地域气象条件十分复杂, 遭受各种雷电过电压的概率很高。通常将雷击过电压划分为直击和感应过电压, 针对直击和感应过电压进行系统对比研究, 对预防雷击事故、保障电网安全运行具有重要意义。将架空线等效为无限长载流导体, 并在直击雷频域模型下采用 ATP-EMTP 建立 500 kV 架空线雷击瞬态响应模型, 考虑多根导线的耦合关系, 分别得出同塔双回和单回路杆塔上载流导线过电压波形及幅值。另一方面, 利用 Agrawal 方程组建立了雷电电磁辐射模型, 计算得出了雷击点附近线路上感应过电压。通过所计算结果, 表明考虑线路耦合等多因素后, 所得计算结果较经验公式计算结果偏低, 符合实际情况。

**关键词:** 雷击过电压; 直击雷; 感应雷; 电磁耦合; ATP-EMTP

**Abstract:** At present, extra-high voltage and ultra-high voltage transmission grids have formed in most provinces of China. These transmission lines always have long distance, long span and wide distribution, and the weather condition is very complex where the transmission lines pass through. It is a high probability to be influenced by kinds of lightning overvoltage. The comparative study of overvoltage induced by direct lightning flash and lightning induction is carried out, which is of great significance to prevent lightning strike accidents and guarantee the safe operation. The overhead line is equivalent to an infinite conductor, and the transient response model is established under direct lightning flash frequency domain with ATP-EMTP. Considering the coupling between multiple wires, the overvoltage waveform and amplitude of double-circuit and single-circuit transmission lines are calculated. On the other hand, the lightning electromagnetic radiation model is established by using Agrawal equations, and the induced overvoltage on transmission lines near by the lightning strike spot is calculated. By comparing the obtained calculation results with the results of empirical formula, it shows that the obtained calculation results is lower because of lines coupling and other factors, which conforms to the actual condition.

**Key words:** lightning overvoltage; direct lightning flash; lightning induction; electromagnetic coupling; ATP-EMTP

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)05-0058-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.05.013

## 0 引 言

目前中国大多省区已形成以特高压和超高压为骨干的输电网络, 输电线路距离长、跨度大、分布广, 所经过地域气象条件十分复杂, 遭受雷击的概率很高。随着电力技术的发展和绝缘水平的提高, 电力系统内部过电压导致事故减少, 而由雷击引起的设备损坏、系统故障、线路跳闸日益成为主要事故类型, 对电网的安全稳定运行构成重大威胁。一般认为雷电冲击闪络必须形成稳定的电弧才能造成线路跳闸<sup>[1]</sup>, 雷电流无论是直接击中输电杆塔, 还是在输电线路附近形成放电, 均有可能引起绝缘子闪络,

甚至击穿<sup>[2-3]</sup>。文献[4-5]介绍了雷电在线路上传播规律, 文献[6-7]对雷电在输电线路上的电磁耦合作用进行了研究。

下面研究了雷电直接击中输电杆塔, 但未引起绝缘子闪络的情况下, 载流导线上发生雷击瞬态过电压的过程, 采用 ATP-EMTP 建立 500 kV 架空线雷击瞬态响应模型, 并考虑各线路之间耦合因素, 针对不同杆塔类型、雷击点和雷击时刻进行了计算, 得出同塔双回线路雷击过电压较单回线路雷击过电压更小, 不同雷击时刻对线路过电压幅值影响较大, 雷电分别击中避雷线或输电杆塔时, 线路感应过电压差异较小。另一方面, 建立了雷电电磁辐射模型, 根据雷电波辐射理论, 考虑各线路间雷电流耦合作用,

利用 Agrawal 方程计算得出了雷击点附近线路上感应过电压,分析得出了感应雷和直击雷引起的线路过电压存在的差异。

### 1 输电线路直击雷冲击响应

雷电可通过直击、反击或绕击直接导致输电线路带电,且未引起输电线路绝缘子闪络情况下,可将架空线等效为无限长载流导体;并在雷电流频域模型下计算多根导线的耦合关系。设单位长度线路串联阻抗为  $R + j\omega L$  并联导纳为  $G + j\omega C$   $\mu$  与  $i$  分别表示点电位和点电流,均与频率相关,在频域条件下架空导线电压与电流关系可分别表示为

$$- du/dx = (R + j\omega L) I \tag{1}$$

$$- di/dx = (G + j\omega C) U \tag{2}$$

将导线等分为若干段,每一段假设电压和电流观测点,通过式(1)、式(2)可得到式(3)。

$$\begin{bmatrix} u_{m(w)} \\ i_{m(w)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_w \cdot 1) - Z_w \cdot \sinh(\gamma_w \cdot 1) \\ \sinh(\gamma_w \cdot 1) / Z_w - \cosh(\gamma_w \cdot 1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{n(w)} \\ i_{n(w)} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:  $u_{m(w)}$ 、 $i_{m(w)}$  分别为频域下的始端电压和端电流;  $u_{n(w)}$ 、 $i_{n(w)}$  分别为频域下的末端电压和端电流;  $Z_w$  和  $\gamma_w$  在瞬态电场作用下,采用 J. Marti 模型进行求解,其中  $Z_w$ 、 $\gamma_w$  可分别表示为式(4)、式(5) [8]。

$$Z_w = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{4}$$

$$Y_w = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \tag{5}$$

通用 500 kV 四分裂导线直流电阻大约为 6 ~ 20 mΩ/km;在实际计算中,相比于电感对雷电流的作用,可以忽略串联阻抗中  $R$  不计 [9];同时在针对输电导线进行计算时,由于导线具有高泄漏电阻值,因此在实际计算导线之间和对地耦合关系时,可以同样忽略并联电纳中  $G$  [9]。在不同频域条件下,求得  $Z_w$  和  $\gamma_w$ ,将其带入式(3)即可求得电压和电流相关关系。

### 2 雷电磁感应对输电线路的响应

自然界中的雷击过程是一个不可预测的复杂现象,但是为方便计算,往往将雷云和大地之间产生的

雷电通道认为是垂直扩散型柱形波。该激励源需要用数值积分求取,并分为水平和垂直两个极化分量加载到架空线路上 [10]。

在雷击主放电时刻,雷云到地面的雷电通道附近会伴随很强的电磁场,实际上该电磁场主要是由大地回击电流产生的。雷电通道是由多分支结构组成的,因为在空气中击穿电离呈随机特性,所以分支结构也是不规则的;不过由于主通道是竖直的,为了便于计算,研究中常采用垂直单一放电通道替代雷电的多分支放电通道。设回击电流为  $i(z', t)$ ,起始点位置电流为  $i(0, t)$ ,两者之间的联系可表示为式(6) [11]。

$$i(z', t) = H(t - z'/v) P(z') i(0, t - z'/v) \tag{6}$$

式中:  $H$  是阶跃函数;  $P(z')$  是与地面高度相关的衰减系数;  $v$  是电流波的传播速度,文献 [12] 详细叙述了  $P(z')$  和  $v$  不同取值情况下对应的不同雷电波辐射模型。

将式(6)带入麦克斯韦方程组,将雷电通道视作坐标轴,雷击点视作原点,建立坐标系可以得到观察指定点  $P(r, \Phi, z)$  的通解电场量。高度  $z'$  单位长度雷电通道,电流为  $i(z', t)$  的雷电流径向电场计算式可表示为式(7)。

$$E_{r(t)} = \frac{L}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{3rz}{R^5} \int_0^t i(\tau - R/c) d\tau + \frac{3rz}{cR^4} i(t - R/c) + \frac{rz}{c^2 R^3} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right] \tag{7}$$

式中,  $R = \sqrt{(z - z')^2 + r^2}$ ,对径向、轴向电场的进行近似求解,雷电回击所产生的电磁场是由底部雷电通道位置雷电电流和回击速度决定的 [13],回击辐射场的轴向电场分量表达式为式(8) [14]。

$$E_{z(t)} = \frac{L}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{2z^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(\tau - R/c) d\tau + \frac{2z^2 - r^2}{cR^4} i(t - R/c) + \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right] \tag{8}$$

式中:  $\epsilon$  为地面相对介电常数, F/m;  $z$  为纵向坐标, m;  $r$  为径向坐标,  $\mu$ ;  $R$  为电流偶极子到场点的距离, m;  $c$  为真空中光速,  $\mu$ 。

根据 Agrawal 方程可以得到散射电压  $V_{sca}(x)$  和全电压  $V(x)$  [15]、入射电场  $E_{z(j\omega)}$  的关系,表示为式(9);散射电压  $V_{sca}(x)$  和全电流  $I(x)$  关系表示为式(10);分布源  $V_s(x)$  等于传输线上下切向电场的差,

表示为式(11)。

$$V_{sca}(x) = V(x) - \int_0^d E_z(j\omega) dz \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{sca}(x) \\ I(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Z_w \\ Y_w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sca}(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$V_s(x) = E_r(x, d) - E_x(x, 0) \quad (11)$$

式中:  $Z_w$  与  $Y_w$  可参考式(4)、式(5);  $d$  为架空线对地高度。

设  $Z_L$  为负载冲击响应阻抗, 得到式(12)。

$$V(x) = I(x) Z_L \quad (12)$$

联立方程式(9)~式(12)可近似求出相应观测点电位值。

### 3 直击雷冲击响应算例

目前通用电磁暂态仿真计算软件 ATP-EMTP 将架空线用 J. Marti 模型等效, 并按照所述方法进行数值计算。设杆塔周围土壤电阻率为  $1000 \Omega \cdot m$ , 土壤介电常数  $\epsilon = 7.974 \times 10^{-11} F/m$ , 磁导率  $\mu = 1.256 \times 10^{-6} H/m$ , 在雷电流注入点输入幅值为  $100 kA$  的双指数电流波  $I = 1.05 \times 105(e^{-0.016t} - e^{-1.2t})$ , 波头/波尾  $2.6/50 \mu s$ 。

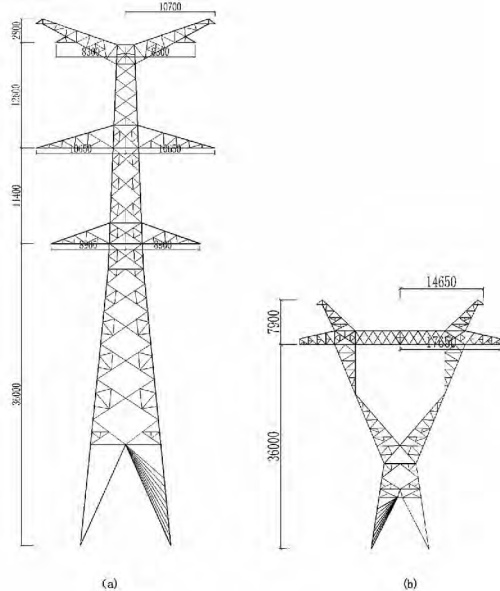


图1 输电线路杆塔示意图

输电线路采用同塔双回架设(间距见图1(a)), 雷击点发生在常规  $500 kV$  直线杆塔附近, 雷电击中杆塔顶端避雷线时, 线路载流运行, 不同观测时刻电压波形如图2、图3所示。根据计算结果可以看出, 雷电击中同塔双回输电杆塔的避雷线后, 在

未发生绝缘子闪络的情况下, 载流导线上的过电压较小。雷击发生在  $0.005 s$  时刻, 引起 A、B、C 三相最大过电压幅值为  $785 kV$ , 雷击发生在  $0.014 s$  时刻, C 相处于波峰, 引起三相最大过电压幅值为  $991 kV$ , 过电压持续时间均较短, 波形未发生畸变。由此可见, 高压载流导线上本身输电电压对过电压有较大影响, 当雷击电压波峰和输电线路电压波峰时刻重叠时引起的过电压最高。

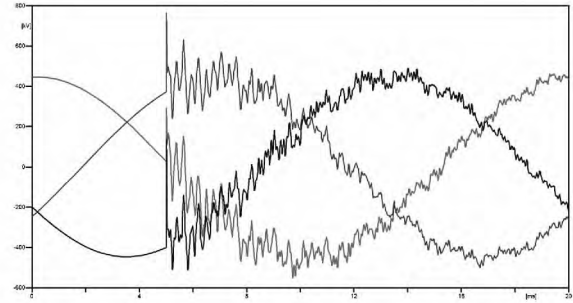


图2 同塔双回杆塔雷击避雷线引起导线过电压波形(0.005 s)

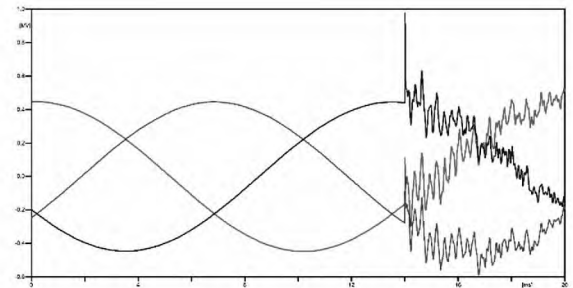


图3 同塔双回杆塔雷击避雷线引起导线过电压波形(0.014 s)

输电线路采用同塔双回架设, 雷电通过绕击或反击, 击中载流导线时, 过电压波形如图4所示。根据计算结果可以看出, 在同塔双回输电杆塔情况下, 雷电击中其中一相输电导线后, 如果未发生绝缘子闪络, 载流导线上的过电压幅值较雷击避雷线大。雷击发生在  $0.014 s$  时刻, 引起雷电直接击中相过电压幅值达到  $5663 kV$ , 虽然过电压持续时间均较短, 但雷电直击相电压波形发生畸变。非雷电直击相电压波形同样发生畸变, 但在绝缘子未击穿情况下, 非雷击相受到感应雷电压影响较小, 过电压幅值仅为  $681 kV$  左右, 且滞后雷击时刻数毫秒。

输电线路采用单回架设(间距见图1(b)), 雷电通过绕击或反击, 击中载流导线时, 过电压波形如图5所示。根据计算结果可以看出, 雷电击中单回

输电杆塔其中一相输电导线后,如果未发生绝缘子闪络,载流导线上的过电压幅值较同塔双回线路更大。雷击发生在0.014 s时刻时引起A、B、C三相最大过电压幅值为6 234 kV,过电压持续时间均较短,但波形发生畸变。绝缘子未击穿情况下,非雷击相过电压幅值与同塔双回杆塔情况相当,由此看出非雷击相感应过电压幅值大小基本不受杆塔回路数影响,而雷击相受杆塔回路数影响较大,回路数越少雷电直接击中相过电压幅值越高。

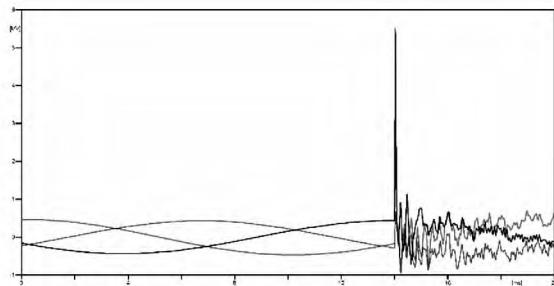


图4 同塔双回杆塔雷击导线引起过电压波形

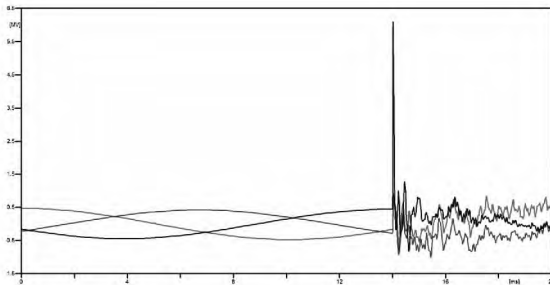


图5 单回路杆塔雷击导线引起过电压波形

#### 4 感应雷冲击响应算例

根据所述方法,利用 Matlab 建立模型进行数值计算,相应参数按照第3节所述,计算雷电通道在不同距离下对输电导线的感应电场。

设定雷电通道和输电导线处在不同水平距离,分别计算幅值为100 kA 雷电通道附近10 m、50 m 和100 m 3个观察点的径向电场,其中雷电回击速度为  $v = 1.3 \times 10^8$ ,计算结果如图6所示。可见距离雷电通道10 m 处,径向电场最大值为2 343 V/m; 50 m 处,径向电场最大值为492 V/m; 100 m 处,径向电场最大值为240 V/m。

由于当雷电通道距离输电导线较近时,可以认为与雷击避雷线情况类似,因此仅通过式(8)计算与雷电通道水平距离为100 m 观测点的轴向电场,

轴向电场垂直地面平均高度设为40 m 时,轴向电场最大值可达到18 kV/m 左右。

实例计算以图1(b)单回路输电杆塔为基础,假设入射电场距离导线末端结点为1 km,径向电场可忽略,仅考虑轴向电场的影响<sup>[16]</sup>。根据第2节所述方法,对矩阵方程式(10)进行离散化处理后,求得线路匹配负载  $Z_L$  为100  $\Omega$  的电压响应,并得到如图7所示三相导线上的感应电压,其中距离地面最高位置导线感应电压最大,峰值可达到743 kV。

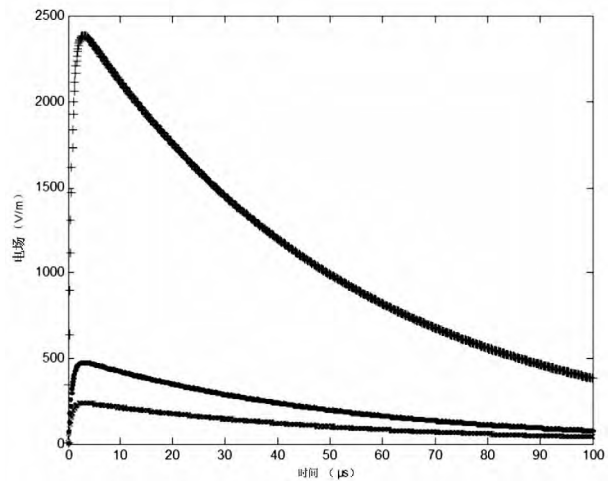


图6 雷击导线引发绝缘子闪络过电压波形

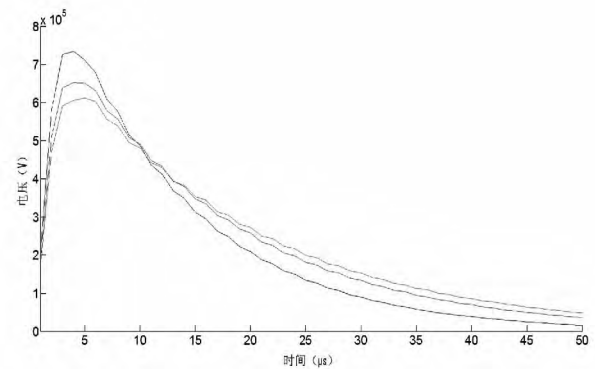


图7 雷电通道附近架空线上感应电压

#### 5 计算结果对比分析

目前工程上关于计算雷电直接击中杆塔、避雷线或者导线引起输电线路过电压,一般通过经验公式求得。针对雷电击中导线后,通过公式  $U = 100 \times I$ <sup>[17]</sup> 可估算线路过电压幅值,其中  $I$  为雷电流幅值。

该公式不考虑杆塔冲击接地电阻、杆塔类型和线路耦合情况,计算结果为10 000 kV。第3节对100 kA 直击雷冲击响应计算结果是:同塔双回杆塔

雷击过电压幅值为 5 663 kV ,单回路杆塔过电压幅值为 6 234 kV ,均小于规程中公式计算结果。

关于感应雷过电压有经验公式  $U = 25 \times I h_d / s$  [17] ,其中:  $h_d$  为导线悬挂高度;  $s$  为雷击点和导线距离。

该公式同样考虑因素较少 ,通过带入相同的计算条件 ,计算结果为 1 000 kV。而第 4 节对单回路杆塔雷电感应过电压幅值计算结果为 743 kV ,小于规程中公式计算结果。

由于工程上对计算结果均要求留有一定裕度 ,可以认为经验公式计算结果偏保守 [18] ,而通过所推荐的计算方法得到的计算值更接近于实际情况。

## 6 结 论

1) 雷电击中输电杆塔避雷线 ,将通过电磁感应引起输电杆塔导线上产生过电压。如果输电导线绝缘子未发生持续闪络或击穿 ,导线上过电压幅值相对较小 ,持续时间均较短 ,波形不会发生畸变。

2) 直击雷引起单回路架设杆塔上的过电压幅值较同塔双回杆塔水平高 ,主要原因是同塔双回线路导线数目更多 ,距离更近 ,通过静电耦合作用降低了雷电直击线路过电压幅值。非雷击相感应过电压幅值大小基本不受杆塔回路数影响 ,而主要受导线间距影响。

3) 离地面高度越高的导线 ,所产生的感应雷过电压幅值越高 ,输电导线距离 100 m 范围内 ,可产生最大幅值在 700 kV 以上的过电压。

4) 通过经验公式计算所得直击雷和感应雷过电压幅值 ,均较所提方法计算结果偏高 ,但差异不大。

### 参考文献

[1] 文远芳. 高电压技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2001.

[2] 谷定燮. 500 kV 输变电工程设计中雷电过电压问题 [J]. 高电压技术 2000 26(6): 60 - 62.

[3] 张纬钹 ,何金良 ,高玉明. 过电压防护及绝缘配合 [M]. 北京: 清华大学出版社 2002.

[4] F Rizk. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1990 5(4): 1983 - 1997.

[5] Diendorfer G. Induced Voltage on an Overhead Line due

to Nearby Lightning [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility ,1990 32(4): 292 - 299.

[6] F Rachidi. Formulation of Field to Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field [J]. IEEE Transactions on EMC ,1993 35(3): 404 - 407.

[7] Frederick M ,Tesché Michel. EMC Analysis Methods and Computational Models [M]. New York: John Wiley & Sons Press ,1994: 268 - 282.

[8] 黄家裕 ,陈礼义 ,孙德昌. 电力系统数字仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社 ,1995.

[9] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 李永壮等译. 北京: 水利电力出版社 ,1991.

[10] 杨静 ,郗秀书 ,王建国. 雷电在水平导体中产生感应电压的观测及数值模拟研究 [J]. 物理学报 2008 57(3): 1968 - 1975.

[11] C A Nucci ,C Mazzetti ,F Rachidi ,M Ianoz. On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations [C]. International Conference on Lightning Protection ,Graz , 1988: 463 - 470.

[12] M Rubinstein ,M A Uman. Methods for Calculating the Electromagnetic Fields from a Known Source Distribution: Application to Lightning [J]. IEEE Transactions on EMC ,1989 1(31): 183 - 189.

[13] 邹相国. 雷电电磁场空间分布的研究与计算 [D]. 武汉: 华中科技大学 2006.

[14] M J Master ,M A Uman. Transient Electric and Magnetic Fields associated with Establishing a Finite Electrostatic Dipole [J]. IEEE Transactions on EMC ,1991 33(4): 118 - 126.

[15] Agrawal A K ,Price H J ,Gurbaxani S H et al. Transient Response of Multi Conductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field [J]. IEEE Transactions on EMC ,1980 22(2): 119 - 129.

[16] 郭辉萍 ,刘学观. 电磁场与电磁波 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社 2003.

[17] GB/T 50064 - 2014 ,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范 [S].

[18] 刘强 ,谷定燮 ,张元芳. 雷击杆塔塔顶时导线上感应电压敏感性分析 [J]. 高电压技术 2005 31(3): 31 - 33.

作者简介:

李天鹭 (1986) ,硕士 ,从事电力系统输变电领域的设计研究工作。

(收稿日期: 2016 - 06 - 14)