

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.004

雷电发展对高速铁路周围电场分布影响的研究

李瑞芳, 金 亮

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 雷害是影响高速铁路安全稳定运行的关键因素之一,研究雷电先导作用下高速铁路周围电场的变化规律对于高速铁路雷击机理的阐明具有重要意义。文中结合先导法建立了高速铁路三维雷击仿真模型;通过调整导体携带电荷量、高度及侧面距离,来模拟不同雷电流幅值以及先导空间位置对高速铁路周围电场分布的影响;并对比分析了高架区段和路基区段高速铁路周围场强分布情况。研究发现,在雷电流幅值为数千安时,高速铁路周围仍有上行先导产生,因此认为在雷击计算中,雷电流较小情况仍需考虑上行先导;随着雷电流幅值、下行先导空间位置的变化,避雷线总是比其他导线更容易产生上行先导;高架区段接触网场强值约为路基区段的1.4倍,因此高速铁路雷电防护的防雷设计施工要求高架区段应高于路基区段。

关键词: 高速铁路; 高架桥; 下行先导; 电场分布

Effect of Lightning Development on Electric Field Distribution Around High-speed Railway

LI Ruifang, JIN Liang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To understand the change of electric field strength around high-speed railway under the effect of lightning downward leader and further reveal the lightning mechanism of high-speed railway, leader progression model is adapted to build a three-dimensional lightning strike model. By adjusting the charge, height and lateral distance of the conductor, the effects of lightning current amplitude and progression of downward leader nearby the earth on the electric field strength distribution around high-speed railway are simulated, and the electric field strength distribution in viaduct section is compared with that in rail-bed section. Results show that upward leader still occurs around high-speed railway while the amplitude of lightning current is several kiloamperes. It is proposed that upward leader should be considered even under little lightning current in lightning calculation. Research finds that lightning wire generates upward leader easier than the other conductors while adjusting the space location of downward leader and changing amplitude of lightning current. And it finds that electric field strength of viaduct section is 40% higher than that of roadbed section, so lightning protection designation and construction requirement of high-speed railway in viaduct section should be higher than that in roadbed section.

Key words: high-speed railway; viaduct; downward leader; electric field distribution

0 引言

近年来,高速铁路在中国迅猛发展,据统计,截至2015年6月中国高速铁路运营里程已达1.7万公里^[1]。现今,高铁成为拉动国民经济的命脉,也是中国面

向世界的名片,发展高速铁路已经上升为国家战略。高铁的安全可靠运行,关乎国家财产、国民人身安全,也关乎社会稳定和国家形象。影响高速铁路安全运行的因素中,特别是外界原因,气象灾害雷电首当其冲。2011年的“7.23”甬温线特别重大铁路交通事故,据官方报告,雷击是其中一个重要的原因^[2]。

收稿日期:2017-03-09; 修回日期:2017-05-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682014CX022);国家自然科学基金资助(51507145)。

Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2682014CX022), the National Natural Science Foundation of China(51507145).

因此,研究高速铁路雷击特性有重要的现实意义。

中国高速铁路大量采用高架桥结构,文中研究的主要是高架桥区段的高速铁路。对于高速铁路雷电防护的研究,有研究高速铁路接触网落雷特性,文[3]得出结论高速铁路接触网与电力系统 220 kV 架空线路的落雷次数相当;有学者研究防雷设施的架设方式等对防雷保护的影响,文[4-5]指出将架空地线位置抬升兼作避雷线,以及避雷器等安装方式,可以很好提高线路的耐雷水平,文[6]在上述研究的基础上讨论了接地方式的设置。上述文献研究的是雷击发生后,如何对高速铁路进行防护。

文中从电场方面考虑,研究雷击发生以前高速铁路周围电场分布。依据雷电屏蔽理论中先导法,研究的重点在不同因素下,雷电下行先导发展对高速铁路周围电场分布的影响,确定场强最大值的位置,分析高架桥区段与路基区段场强分布的差异。在上述研究的基础上,对结果进行分析,为高速铁路雷电防护技术提供一定依据。

1 模型介绍

1.1 高速铁路示意图

高速铁路主要采用 AT 供电方式^[7],文中的研究内容按照 AT 供电方式接触网布置,设置接触线、承力索、馈线和避雷线(保护线提升兼作避雷线方式),见图 1。其中,接触线和承力索材质设定为铜合金,馈线和避雷线材质设定为钢^[8]。

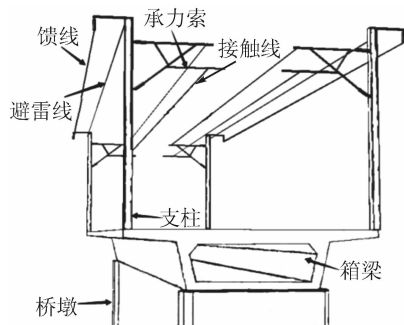


图 1 高速铁路示意图

Fig. 1 Diagram of high-speed railway

参考武广客运专线接触网布置方式,高架桥部分按照常见的简支箱梁结构布置,在有限元电磁场 Ansoft 仿真软件中,建立仿真模型。

1.2 仿真参数设定

在 Ansoft 仿真建模中,求解域设定为模型尺寸的 110%,选定各桥墩底部为零电位。采用主要参数见表 1。

1.3 雷电发展模型

雷电的形成和发展具有随机性和瞬时性,文中

表 1 材料参数

Table 1 Material parameter

材料	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
空气	1.000 6	0.0
铜	1.000 0	5.8×10 ⁷
钢	1.000 0	2.0×10 ⁶
混凝土	2.700 0	7.0×10 ⁻³

在研究中,只考虑雷电下行先导作用下高架桥周围电场分布。雷电发展按照先导发展模型(leader progression model, LPM)^[9-11]分析。仿真分析做一定简化处理,假定高架桥周围空间未产生上行先导以前,雷电下行先导竖直向下发展。雷云层高度 $h_c=2.5$ km,在近地空间分析下行先导发展对高速铁路周围空间电场变化的影响。在下行先导发展到一级定位点高度^[12]时,避雷线、接触线等产生上行先导。见图 2,图 2 中 A 点为一级定位点高度。

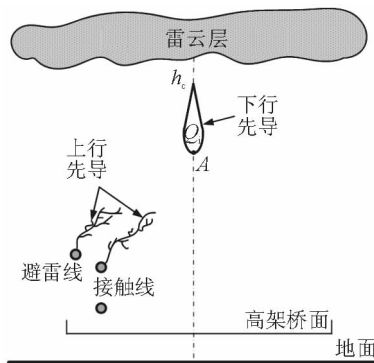


图 2 雷电发展模型

Fig. 2 Model of lightning development

1.3.1 雷电下行先导模型

文中研究中雷电下行先导用电荷量为 Q_i 的导体模拟,通过调整导体高度、侧面距离,模拟下行先导空间位置的动态变化,分析先导在不同位置时高速铁路周围空间电场分布,找出最大场强所在位置。按照式(1)可知,电荷量 Q_i 的大小随雷电流 I 幅值变化^[13-14]。

$$Q_i = (I/25)^{10.7}. \quad (1)$$

如:雷电流幅值 $I=25$ kA 时,由式(1)可知,下行先导电荷量 $Q_i=1$ C 的导体模拟。

1.3.2 雷电上行先导起始判据

雷电先导发展的物理过程中,不同学者采用不同的上行先导起始判据^[15-16],主要包括下列 4 种:间隙电压判据、间隙平均电场强度判据、导线感应电压判据(Rizk 判据)、导线表面场强(Peek 判据)。

文中采用 Peek 判据^[17]作为上行先导的起始判据,当导线表面电场强度达到临界连续先导起始场强时,则认为导线表面产生上行先导,并假设附近

各导线产生的上行先导互不影响,临界先导起始场强与导线临界半径、相对空气密度及导线表面粗糙系数相关,Peek判据式为

$$E_c = 3000 \cdot \delta \cdot m_c (1 + 0.03 / \sqrt{\delta \cdot r_c}) \quad (2)$$

式(2)中: r_c 表示导线临界半径; m_c 表示导线表面粗糙系数; δ 表示相对空气密度; E_c 表示临界先导起始场强, $\text{kV/m}^{[18]}$ 。考虑一般情况, δ 取为1.0, m_c 取为0.9,对于半径小于0.1 m的单根导线, r_c 取为0.1 m。在该模型中,导线半径均于0.1 m,经过计算,对于导线临界场强 E_c 取值为2 956 kV/m 。

2 电场分布影响因素研究

在文中研究中,选取雷电流幅值 I 、雷电下行先导对地高度 H 、侧面距离 D 及有无高架桥4个因素作为雷电发展对高速铁路周围电场分布的影响因素。下面分别对各种因素的影响做详细分析。

2.1 雷电流幅值的影响

研究雷电流幅值不同对于高速铁路周围电场分布的影响时,保证下行先导对地高度 H 一定,侧面距离 D 一定,有高架桥情况下,调整雷电流幅值 I 。按照1.3.1节,调整雷电流幅值 I 的影响转换为调整雷电下行先导所含电荷量 Q_i 产生的影响,见图3。

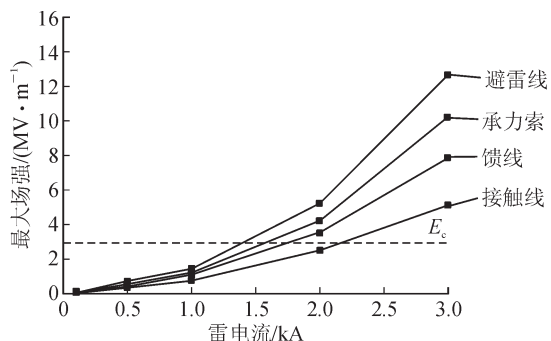


图3 雷电流幅值影响的研究

Fig. 3 Research on effect of lightning current amplitude

如图3,随之雷电流幅值从0.1 kA增大至3 kA,馈线、避雷线、承力索和接触线上观测到的最大场强值均呈上升趋势。在设定条件下,雷电流幅值为1.4 kA时,避雷线场强值先达到临界场强,产生上行先导。随着雷电流增大,幅值达到2.2 kA时,4条观测线上最大值均超过临界场强,产生上行先导。

参考GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护与绝缘配合设计规范》,雷电流幅值的概率式^[19]为

$$P(I_0 \geq i_0) = 10^{-i_0/88} \quad (3)$$

式(3)中: I_0 为雷电流幅值的变量; i_0 为给定的雷电流幅值; P 为雷电流幅值超过 i_0 的概率。

按照式(3),出现雷电流幅值大于1.4 kA的雷电概率达96.4%,幅值大于2.2 kA的雷电概率达94.4%。研究表明,在较小的雷电时,高速铁路附近仍有上行先导产生。由此可见,为保证高速铁路雷电防护的可靠性,在研究高铁线路的绕击耐雷水平时,不能仅仅依靠电气几何模型(electro-geometric model, EGM)^[20-21]和规程法^[22],需要考虑上行先导。

2.2 下行先导高度的影响

研究雷电下行先导对地高度不同对于高速铁路周围电场分布的影响时,保证雷电流幅值 I 一定,侧面距离 D 一定,有高架桥情况下,调整下行先导对地高度 H ,见图4。

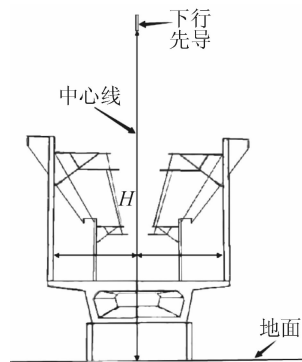


图4 下行先导高度影响的研究

Fig. 4 Research on height effect of downward leader

2.2.1 下行先导固定高度电场分布

有高架情况,取 $H=150$ m, $D=0$ m, $I=1$ kA,对高速铁路周围电场分布进行分析,观察多个位于不同截面的场强分布云图,分别选取支柱顶平面、桥梁中心面和沿桥梁方向剖面,见图5。

对仿真结果进行分析^[23-25],在该节给定条件下,电场强度最高点位于下行先导下方钢支柱附近,纵向方向从中心向两边场强 E 逐渐减小,由于吊弦存在使得承力索与接触线之间形成场强 E 相对较小的区域。横向界面上,避雷线附近场强 E 比馈线、承力索和接触线大。观测线上最大数据见表2。

2.2.2 下行先导高度变化的影响

调整雷电下行先导对地高度 H ,观察高速铁路周围电场分布的变化,见图6。

如图,下行先导高度 H 从230 m下降至70 m时,4条观测线上最大场强值逐渐增大,其中在避雷线上观察到的最大场强值增加幅度最大。分析原因为避雷线相对位置较高,在下行先导头部电荷的影响下,场强值最大。 H 达到100 m时,在避雷线附近观测到最大场强值达到临界场强,一级定位点高度为100 m,开始产生上行先导,随后依次为承力索、馈线和接触线。

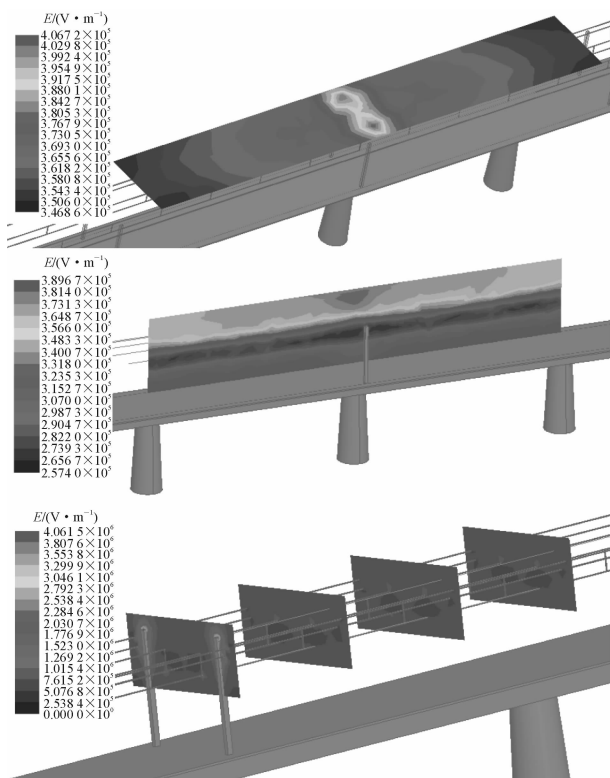


图5 不同截面电场分布云图

Fig. 5 Electric field distribution cloudscape on different sections

表2 观测线上最大场强值

Table 2 Maximum of electric field on survey line

观测线位置	馈线	避雷线	承力索	接触线
最大场强/(MV·m ⁻¹)	1.10	1.45	1.23	0.77

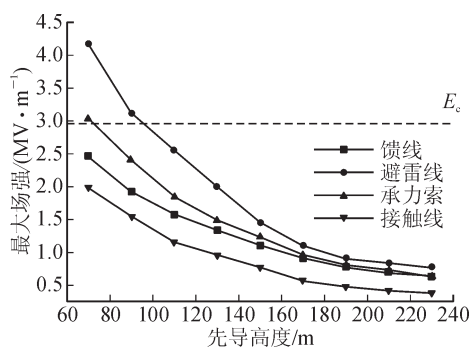


图6 下行先导对地高度影响的研究

Fig. 6 Research on effect of downward leader height

2.3 下行先导侧面距离的影响

研究雷电下行先导侧面距离变化对于高速铁路周围电场分布的影响时,保证下行先导对地高度 H 一定,雷电流幅值 I 一定,有高架桥,调整下行先导侧面距离 D ,见图7。

调整雷电下行先导侧面距离 D ,观察高速铁路周围电场分布的变化,见图8。

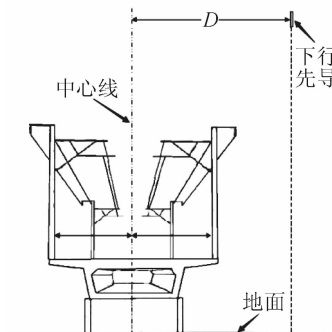


图7 下行先导侧面距离影响的研究

Fig. 7 Research on effect of downward leader lateral distance

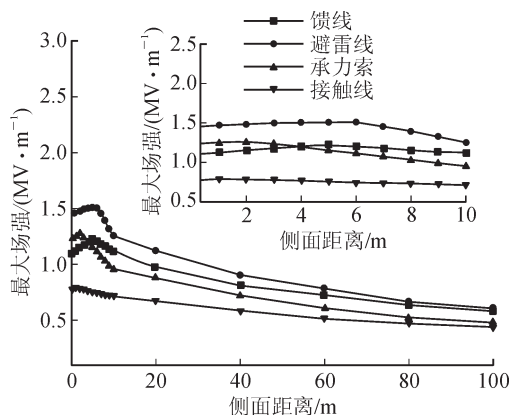


图8 下行先导侧面距离影响的研究

Fig. 8 Research on effect of downward leader lateral distance

如图8,随着下行先导侧面距离从0 m增加到100 m,馈线、避雷线、承力索和接触线附近观测到的最大场强数值先增大后减小,避雷线在6 m、承力索在2 m、馈线在5 m、接触线在2 m附近场强值先后达到各自最大值。分析原因,下行先导在上述位置时位于各导线的正上方。侧面距离达到100 m附近时,场强值变化趋势变缓,当侧面距离较远时空位置的影响可以忽略,避雷线上最大场强值仍然高于其他导线,避雷线和承力索场强值趋于一致,馈线和避雷线场强趋于一致。

2.4 高架桥的影响

高架桥对接触网周围电场的影响主要是由2个原因引起的:一是高架桥高度增加会对接触网周围电场分布产生影响,二是高架桥内部钢筋网状结构可能导致雷电先导作用下感应电荷的变化,可能会对接触网周围的电荷造成影响。为了研究单一因素,即钢筋网状结构对接触网周围电场分布的影响,文中研究假定无论有无高架桥,下行先导对轨面高度是相同的,见图9。

对两种情况分别仿真,对观测线上的场强进行

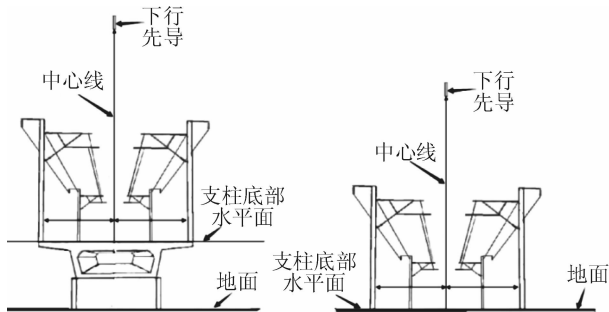


图9 高架桥影响的研究

Fig. 9 Research on effect of viaduct

分析得到结果见表3。

表3 有无高架桥时观测线上最大场强值

Table 3 Maximum of electric field on survey line analyzing effect of viaduct

参数	馈线	避雷线	承力索	接触线
有高架时最大场强/(MV·m ⁻¹)	1.10	1.45	1.23	0.77
无高架时最大场强/(MV·m ⁻¹)	0.75	0.97	0.89	0.54
有高架时场强增大比例/%	46.7	49.5	38.2	42.6

如表3所示,4条观测线上的最大场强值在有高架桥情况下比无高架桥情况下大约1.4倍。这是因为高架桥内部的钢筋网状结构材质,导致在下行先导通道电荷一定的情况下,高架桥的箱梁及接触网周围比无高架情况下的土壤中产生更多的感应电荷。因此,在轨面与下行先导高度一定的情况下,高架桥的存在会导致接触网更容易引雷。

3 结论

文中研究了雷电下行先导发展对于高速铁路周围电场分布的影响,对多种影响因素进行研究,得到以下结论:

1)在雷电流幅值较小的雷电影响下,高速铁路周围仍然有上行先导产生。随着雷电流幅值增加,避雷线首先达到临界场强产生上行先导。在高速铁路雷电防护设计中,为了提高计算精度,应考虑上行先导。

2)随着雷电下行先导高度降低,观测到各导线附近的最大场强值逐渐增大,由于空间位置相对较高,避雷线附近观测到的数值相比其他位置变化幅度最大,最先达到临界场强,产生上行先导。避雷线材质的选择和安装位置对于保护效果具有重要意义,现有架空地线抬升兼作避雷线的改造方式,可以有效保护牵引供电系统。

3)随着雷电下行先导侧面距离的增加,观测到

各导线附近最大场强先增加后减小,下行先导位于各导线正上方时达到最大值。

4)高架桥钢筋网状材质导致有高架比无高架时接触网周围电场强度增加40%左右,即接触网比无高架时更容易引雷。这是因为高架桥内部大量的金属材质,使得高架桥的箱梁及接触网周围比无高架情况下的土壤中产生更多的感应电荷。

参考文献:

- [1] 李响. 中西部铁路加快建设我国高铁运营里程超1.7万公里[N]. 人民日报, 2015-07-26.
LI Xiang. The midwest railway construction accelerates, the high-speed railway operation length surpass 17 000 kilometers[N]. People's Daily, 2015-07-26.
- [2] 安全监管总局.“7.23”甬温线特别重大铁路交通事故调查报告[EB/OL]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_21679/2011/1228/244874/content_244874.htm, 2011-07-23.
State Administration of Work Safety. Investigation report of “7.23” Yongwen line special major railway traffic accident [EB/OL]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_21679/2011/1228/244874/content_244874.htm, 2011-07-23.
- [3] 李德胜. 高速铁路接触网落雷特性及防雷技术的探讨[J]. 电气化铁道, 2013(3): 1-4.
LI Desheng. Study on ground flashover characteristics and lightning protection technique of high-speed railway catenary[J]. Electric Railway, 2013(3): 1-4.
- [4] 边凯, 陈维江, 王立天, 等. 高速铁路牵引供电接触网雷电防护[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 191-199.
BIAN Kai, CHEN Weijiang, WANG Litian, et al. Lightning protection of traction power supply catenary of high-speed railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 191-199.
- [5] 邵立, 王国梁, 白裔峰. 高速铁路接触网防雷措施及建议[J]. 铁道工程学报, 2012(10): 80-83.
SHAO Li, WANG Guoliang, BAI Yifeng. Measures for lightning protection for OCS of high-speed railway and proposals[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012 (10): 80-83.
- [6] 张倩. 高速铁路接触网防雷设计研究[J]. 电气化铁路, 2013(6): 9-11.
ZHANG Qian. Research on lightning protection design of high-speed railway catenary[J]. Electric Railway, 2013(6): 9-11.
- [7] 董昭德. 接触网[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 4-6.
DONG Zhaode. Catenary[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 4-6.
- [8] 董昭德. 接触网[M]. 第2版. 北京: 中国铁道出版社, 2012: 33-43.
DONG Zhaode. Catenary[M]. 2nd Ed.. Beijing: China Railway Publishing House, 2012: 33-43.

- [9] 贺恒鑫.超特高压输电线路雷电屏蔽性能三维先导仿真模型研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011:7-11.
HE Hengxin.A three-dimensional leader progression model for the lightning shielding performance simulation of EHV/UHV transmission lines[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2011:7-11.
- [10] DELLERA 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 Transactions on Power Delivery,1990,5(4):2009-2017.
- [11] 王志勇,余占清,李雨,等.基于先导发展法的特高压直流输电线路绕击特性分析[J]. 高电压技术,2011,37(9):2178-2184.
WANG Zhiyong,YU Zhanqing,LI Yu,et al.Lightning shielding failure characteristics of UHV DC transmission line using leader progression method[J]. High Voltage Engineering,2011,37(9):2178-2184.
- [12] 钱冠军,王晓瑜,汪雁,等.输电线路雷击仿真模型[J]. 中国电机工程学报,1999,19(8):39-44.
QIAN Guanjun,WANG Xiaoyu,WANG Yan,et al. Lightning simulation model of transmission line[J]. Proceeding of the CSEE,1999,19(8):39-44.
- [13] HE Jinliang,TU Youping,ZENG Rong,et al.Numerical analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke[J]. IEEE Transaction on Power Delivery,2005,20(2):815-822.
- [14] 冯杰,雷霆,吴廷祥,等.基于先导发展的特高压线路雷电屏蔽模型研究[J]. 广东电力,2012,25(2):24-29.
FENG Jie,LEI Ting,WU Tingxiang,et al.Modeling of lightning shielding in UHV transmission lines based on leader progression model[J]. Guangdong Electric Power,2012,25(2):24-29.
- [15] 曾嵘,耿屹楠,李雨,等.高压输电线路先导发展绕击分析模型研究[J]. 高电压技术,2008,34(10):2041-2046.
ZENG Rong,GENG Yinan,LI Yu,et al.Lightning shielding failure model of transmission line based on leader progress model[J]. High Voltage Engineering,2008,34(10):2041-2046.
- [16] 魏本刚,傅正财,袁海燕.改进先导模型法交流特高压线路雷电屏蔽性能分析[J]. 高电压技术,2008,34(9):1880-1884.
WEI Bengang,FU Zhengcai,YUAN Haiyan.Analysis of lightning shielding performance of 1 000 kV UHV AC transmission lines based on improved leader progression model[J]. High Voltage Engineering,2008,34(9):1880-1884.
- [17] 许高峰,顾乐观,司马文霞.输电线路雷电屏蔽仿真模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2001(2):76-80.
XU Gaofeng,GU Leguan,SIMA Wenxia.Lightning shielding simulation model of transmission line[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition),2001(2):76-80.
- [18] 李志钊,曾嵘,庄池杰,等.雷云下空间电荷对直流输电线路上行先导起始特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(5):1358-1364.
LI Zhizhao,ZENG Rong,ZHUANG Chijie,et al.Influence of space charge on the upward leader characteristics emerging from the DC transmission lines under lightning[J]. High Voltage Engineering,2014,40(5):1358-1364.
- [19] GB/T 50064—2014 交流电气装置过电压保护与绝缘配合设计技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
GB/T 50064—2014 Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S]. Beijing:China Planning Press,2014.
- [20] 谷定燮,周沛洪,戴敏,等.特高压线路雷电绕击跳闸率计算比较分析[J]. 中国电力,2008,41(8):85-89.
GU Dingxie,ZHOU Peihong,DAI Min,et al.Comparison and analysis of the UHV transmission line lightning shielding failure trip ratio calculated by LPM and EGM[J]. Electric Power,2008,41(8):85-89.
- [21] ERIKSSON A J.An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1987,2(3):859-870.
- [22] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等.雷电流幅值概率计算公式[J]. 电工技术学报,2011,26(4):161-167.
LI Ruifang,WU Guangning,CAO Xiaobin,et al.Formula for probability of lightning current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(4):161-167.
- [23] 吴东,王巨丰,李国栋,等.防雷间隙大电流快速灭弧试验研究及应用[J]. 电瓷避雷器,2015(6):117-121.
WU Dong,WANG Jufeng,LI Guodong,et al. Experimental research and application of high current fast arc-quenching of lightning protection gap[J]. Insulators and Surge Arresters,2015(6):117-121.
- [24] 冯万兴,严碧武,赵淳,等.雷击暂态全响应监测系统在直流输电线路故障诊断中的应用[J]. 电瓷避雷器,2015(6):142-147.
FENG Wanxing,YAN Biwu,ZHAO Chun,et al. Application of lightning transient full response monitoring system in fault diagnosis of DC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters,2015(6):142-147.
- [25] 扈海泽,容展鹏,赵军,等.基于10/0.4型变压器低压侧雷电过电压防护[J]. 电瓷避雷器,2015(6):80-83.
HU Haize,RONG Zhanpeng,ZHAO Jun,et al. Lightning overvoltage protection based on 10/0.4 type transformer low voltage side[J]. Insulators and Surge Arresters,2015(6):80-83.

李瑞芳(1980—),女,博士,硕士生导师,从事超/特高压输电线路防雷接地、铁路防雷接地技术的应用与研究。

金亮(1988—),男,硕士研究生,从事铁路防雷接地技术的应用与研究。