

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.024

高速列车车顶绝缘子均压环的优化设计

李从洋¹, 丁晶¹, 田智勇¹, 曹桂^{1,2}, 张血琴²

(1. 国网山东省电力公司检修公司, 济南 250011; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 在大雾等潮湿环境中, 空气中的水分子会附着在绝缘子表面并逐渐凝结成微小水珠, 这些密集的小水珠会对绝缘子内部及周围电场产生畸变, 在电场力等外力作用下这些大量的微小水珠渐渐形成的水带会进一步畸变电场, 形成恶性循环。文中仿真结果表明, 绝缘子表面出现分离水珠时, 高压端金具与第一伞裙之间产生的电场强度足以引起表面水珠发生电晕放电, 这会老化甚至灼蚀绝缘子表面材料, 降低绝缘子安全运行的可靠性。针对这一情况, 文中以CRH-380型电力动车组车顶受电弓支撑环氧树脂复合绝缘子为对象, 运用有限元仿真软件, 采取加装最优均压环的措施来改善绝缘子高压端的电场分布, 当均压环 $R=125\text{ mm}$ 、 $r=21\text{ mm}$ 、 $H=44\text{ mm}$ 时受电弓支撑绝缘子伞裙护套表面最大场强最小, 为绝缘子均压环的最优配置。此时绝缘子伞裙护套表面最大场强为 19.7 kV/cm , 小于分离水珠电晕放电起始场强, 达到预期目标。

关键词: 复合绝缘子; 均压环; 电位分布; 电场分布

Optimization for Grading Rings of High-speed Train Roof Insulator

LI Congyang¹, DING Jing¹, TIAN Zhiyong¹, CAO Gui^{1,2}, ZHANG Xueqin²

(1. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250011, China; 2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In humid conditions, such as heavy fog, water particles in the air will attach to the surface of the insulator and condense gradually. The electric field in and around the insulator will be distorted by these densedroplets. These densedroplets may form several water bands under the influence of an electric field force to further distort the electric field, inducing a vicious cycle. Our simulation results show that on this occasion the electric field intensity between the metal fittings on the high-voltage side and the first umbrella skirt is high enough to trigger corona discharge, resulting in aging or even destruction of the insulator surface and reduction of the safety and reliability of the insulator in operation. In view of this situation, in order to assure operation safety of high-speed train, this paper choose the roof composite insulator of CRH-380 electric high-speed train unit as research object. Optimal grading rings are installed to the insulator to improve the electric field distribution on the high-voltage side. Finite element simulation shows that the maximum field strength is 19.7 kV/cm when the optimal parameters of the grading ring are $R=125\text{ mm}$, $r=21\text{ mm}$, and $H=44\text{ mm}$. This maximum field strength is less than water droplet corona onset field strength, hence the expected goal is achieved.

Key words: roof composite insulator; grading ring; potential distribution; electric field distribution

0 引言

中国的高速铁路发展迅速, 截止到2015年3月, 全国高铁运营里程达1.6万公里, 占世界高铁总里程的60%以上^[1-2]; 同时列车速度也在不断攀升。中国进入了高铁发展的快车道, 目前国内列车运营速

度最高已达 486.1 km/h 。铁路发展在不断推行高速运行的同时其覆盖区域及覆盖面积也在逐年扩展, 高速铁路早已横跨东南西北, 同时, 车顶复合绝缘子将随列车的运行经受不同地区各种极端气候环境的考验^[3]。车顶绝缘子起着支撑受电弓、汇流母线的作用, 同时肩负着隔离接触线与地电位的任

务,是列车上重要的高压设备,其运行故障不仅会造成列车停运,还会带来严重的经济损失和恶劣的社会影响。2012年1月1日至1月18日,隶属于西安铁路局的共13辆动车组中,就有8辆在雾霾及细雨天气下发生了车顶绝缘子闪络故障。2013年初,北京至武汉动车和前来转运的高铁相继在信阳段发生车顶复合绝缘子闪络事故,出现“闪爆”停车^[4]。为保证列车在高速下的安全运行,绝缘子运行的可靠性就变得更为重要。

复合绝缘子具有耐污闪能力强,维护工作量较小,抢修方便,造价低等诸多优异的特性。目前全世界的输电线路绝缘子复合化是大势所趋^[5-6]。但是复合绝缘子在实际运行中会遇到芯棒脆断^[7]、覆冰下电气性能严重降低^[8]、电场分布严重不均匀等一系列严重问题^[9]。由于复合绝缘子结构和伞裙护套材料的低电导率,绝缘子伞裙护套表面电位分布会从高压端开始快速衰减。电场分布严重不均匀是复合绝缘子在运用中所面临的一个紧迫问题^[10]。高速列车车顶绝缘子属于复合绝缘子,干燥洁净状态下运行的车顶绝缘子电位分布极不均匀,高压段金具到第一伞裙之间产生的电场强度很高,高压端金具到第一伞裙之间的局部场强甚至会达到电晕起始场强,并远远超过分离水珠的电晕起始场强^[11-18],从而造成车顶复合绝缘子闪络,在重度污秽地区甚至会引起绝缘子表面形成贯穿性的电弧通道,闪络通道中的火花或电弧使绝缘表面局部过热造成碳化,损坏表面绝缘。长此以往会影响绝缘材料的运行特性。根据电网运行经验,绝缘子均压环可大大改善复合绝缘子的电位分布和控制高电场区域的场强^[19],防止产生电晕放电、漏电起痕及电蚀损、减小可听噪声、降低直流场下离子流的影响,并能消除由电晕引起的非瓷材料的降解作用^[20]。

文中利用建模软件建立高速列车车顶绝缘子三维仿真模型,并利用有限元数值仿真软件研究不同状况下车顶受电弓支撑复合绝缘子伞裙表面的电气状态,并根据以上研究优化高速列车车顶复合绝缘子均压环参数,并对均压环均压效果进行比较分析,最后得出均压环最优结构。

1 绝缘子尺寸参数

为保证仿真结果的准确性,文中对车顶复合绝缘子进行等比例建模,在高速气流环境下,车顶绝缘子与电力绝缘子相比,工作电压并不高,但是在受到车顶空间严格限制的情况下保证较高的电气性能和机械强度,加上机车在严酷的户外环境中

高速运动,绝缘子承受着巨大的风载荷,并且在弓网受流时具有一定的离线冲击等特点^[21],造成了车顶绝缘子伞裙大、高度低、无芯棒以及绝缘子内部中空等特殊构造。CRH-380型电力动车组车顶支撑绝缘子模型,见图1。绝缘子共有7个伞裙,为一大一小伞裙组合。其中包括4片大伞裙和3片小伞裙,第一片大伞裙直径为300 mm,除第一片大伞裙外其他大伞裙直径为280 mm,小伞裙直径为230 mm。相邻伞裙间距为40 mm,伞裙倾角为8°,绝缘子柱体上表面半径为36 mm,柱体外表面面向外倾斜2°,内部中空面向外倾斜3.5°。内部中空底部半径为32 mm。受电弓支撑复合绝缘子总高为400 mm。

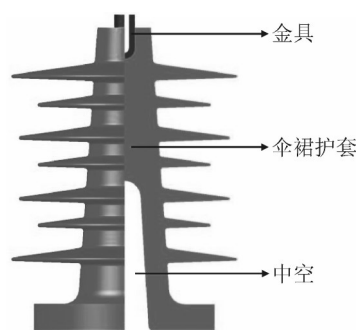


图1 CRH-380车顶支撑绝缘子三维模型

Fig. 1 Two dimensional model of the CRH-380 roof supporting insulator

2 计算模型与仿真结果分析

2.1 模型材料属性

环氧树脂材料憎水性与耐热性良好、机械强度高、质地坚硬不易撕裂^[22-24]。机车在严酷的户外环境中高速运动,在高速气流环境下,为保证绝缘子机械强度,抵抗列车运行的风载荷,生产厂家使用环氧树脂作为复合绝缘子伞裙护套材料。见表1,与电力复合绝缘子不同,受电弓支撑复合绝缘子由金具与伞裙护套两部分组成。复合绝缘子种类很多,其伞裙护套的电导率和介电常数也略有不同,环氧树脂材料的相对介电常数 ϵ_r 一般取3.5~4.5,伞套的电导率都比较小,但远大于空气^[4]。空气的电导率极小,约为 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ S/m}$ ^[25];文中选取的各材料电气参数见表1。

2.2 仿真模型

2.2.1 绝缘子电场分析模型

CRH-380车顶支撑绝缘子实物安装图,见图2。受电弓支撑绝缘子、车体和弓网系统组成了高速列车高压受电系统,其三维电场是一个无限场域,有限元法无法直接解决无界场域的计算问题^[12]。基于场域分解的思想,采用耦合边界将三维无界域分解

表1 绝缘子各材料属性

Table 1 Insulator material properties

材料	相对介电常数 ϵ_r	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
空气	1.000 6	5.0×10^{-5}
水珠	20.000 0	1.0×10^{-6}
金具	500 000.000 0	1.5×10^7
伞裙护套	4.000 0	1.0×10^{-12}



图2 CRH-380车顶支撑绝缘子实物安装图

Fig. 2 The physical map of the CRH-380 roof insulator

成耦合面内有界子区域与面外无界子区域^[13]。

环氧树脂材料绝缘子表面具有优异的憎水性,水珠在绝缘子表面分布见图3,可以看出,除伞裙边缘外水珠均成半球形分离状,绝缘子与水珠静态接触角大于 90° ,水珠在绝缘子表面均匀分布,水珠半径基本在3 mm左右。文中将小水珠半径设置为2 mm,见图4,除伞裙根部放置一个小水珠外,其他表面位置(柱体、上下伞裙)小水珠均匀排列,间隔距离为12 mm。

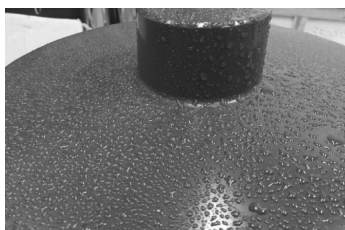


图3 CRH-380车顶支撑绝缘子表面分离水珠

Fig. 3 The discrete water drops of CRH-380 roof insulator

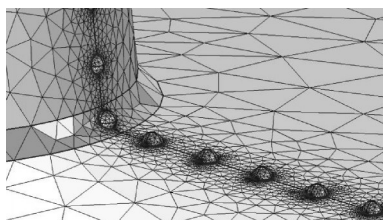


图4 CRH-380车顶支撑绝缘子表面分离水珠模型

Fig. 4 The model of CRH-380 roof insulator with discrete water drops

2.2.2 均压环配置参数

CRH-380 高速列车车顶绝缘子所处的电压等级不高,整体结构高度较低,且只有高压端的电场分布极不均匀,因此设置过程中以保护柱体及第一片伞裙为主。综合上述情况,文中把均压环的位置

限制在第一伞裙上。同时从均压环的半径 R ,截面半径 r ,距离高压端高度 H 3个参数着手,并对其进行最优组合。根据高压端电场分布特性将优化位置分为A、B、C、D4个区域,见图5。

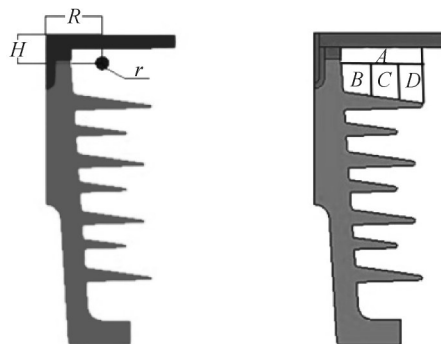


图5 均压环设置示意图

Fig. 5 The setting of the pressure ring

2.3 仿真结果分析

复合绝缘子运行时伞裙护套表面电位分布会从高压端开始快速衰减,电场分布严重不均匀。所以文中爬电距离只研究金具以下,第一伞裙上表面部分。

2.3.1 绝缘子电场分析模型

首先在干燥和出现分离水珠的情况下对车顶绝缘子进行仿真,见图6。图6中黑线为电场线,云图为场强云图。从图6中可以看出在干燥和含分离水珠两种情况下的电位计场强分布。

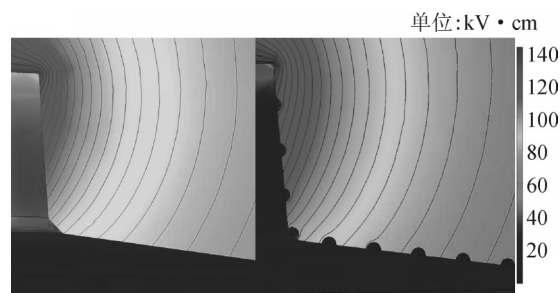


图6 绝缘子高压端电场线场及场强分布云图

Fig. 6 The field-intensity distribution cloud maps and electric field line of the insulator's high voltage terminal

干燥和出现分离水珠时绝缘子高压端电位分布见图7,两种情况相比电位最大相差32.5%。分离水珠的引入不仅对绝缘子表面电位分布影响显著,还会造成局部场强的剧烈畸变。干燥和出现分离水珠时绝缘子高压端电场强度见图8,相对于无水珠情况下,最大场强达到原场强的3.5倍。在伞裙上表面半径方向,随着离柱体的距离越远,电场强度畸变程度越弱。分离水珠对空间电场强度影响最为剧烈,在第一伞裙上表面根部,空气电晕起始场强为2 kV/mm,局部场强已经达到电晕起始场强,远远超过了分离水珠的电晕起始场强。

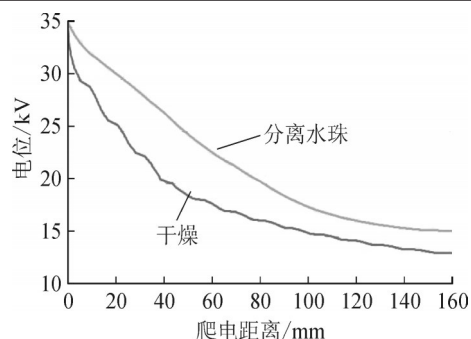


图7 干燥和出现分离水珠时绝缘子高压端电位分布

Fig. 7 The potential distribution of the insulator's high voltage terminal with the two situation

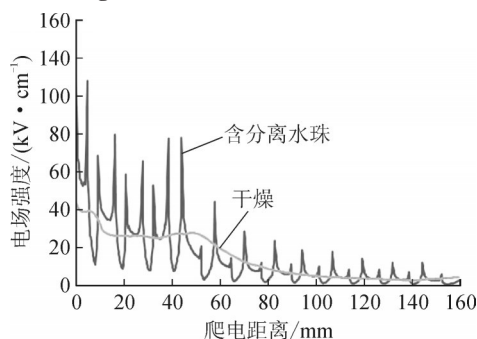


图8 干燥和出现分离水珠时绝缘子高压端电场强度

Fig. 8 The electric field intensity distribution of the insulator's high voltage terminal with the two situations

2.3.2 最优均压环配置方案

在A、B、C、D 4个位置使用截面半径 r 为21 mm的均压环,高压段金具到第一伞裙之间产生的电场强度见图9。

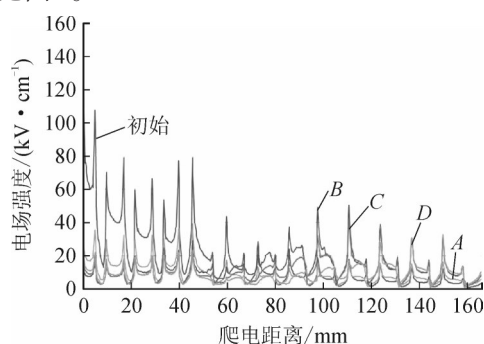


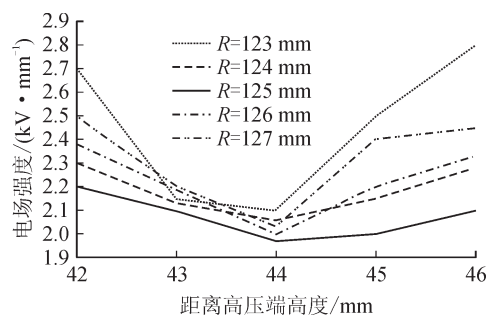
图9 不同区域设置均压环前后高压端沿面电场分布

Fig. 9 The electric field distribution of the high pressure side of the high pressure side in different regions

从图9中可以看出,未加装均压环时,车顶绝缘子高压端柱体上的电场分布极不均匀,其场强足以引起水珠表面电晕放电。加装均压环后,高压端柱体上的场强大大降低,均压环均压效果显著。但均压环在不同位置表现出了不同的均压效果。均压环处于A位置时,对柱体场强有一定的抑制效果,但是柱体上水珠周围的场强依旧大于水珠表面电晕起始放电场强,同时还可以看出,均压环处于A位置

时,对第一片伞裙上表面场强的抑制效果较为明显。与A相比,均压环处于B、C、D位置时,对柱体场强抑制效果较为明显,柱体上水珠周围的场强小于水珠表面电晕起始放电场强,但由于均压环距离上伞裙表面较近,均压环垂直下方所对应的伞裙局部上表面场强大幅增加。均压环处于D时,其对应的伞裙表面场强虽然大于水珠表面电晕起始放电场强,但是要小于B、C位置。初步猜测, H 与伞裙局部上表面场强有关, R 与柱体场强有关。综上所述,均压环应安装在位置C、D上方交接线附近。

为确定均压环具体的 R 、 H 、 r 参数,通常选取金具—伞裙护套—空气交界处的最大场强、伞裙护套沿面—分离水珠与空气最大场强、均压环表面空气最大场强作为选取原则。由于绝缘子表面的最大场强最大,所以文中选取绝缘子表面的最大场强作为参考量。使均压环半径 $R \in [123, 127]$ 、截面半径 $r \in [19, 23]$ 、距离高压端高度 $H \in [42, 46]$,间隔为1 mm。输电线路绝缘子表面最大场强与其均压环的 R 有关,与 r 、 H 关系不大。高速列车受电弓支撑绝缘子结构不同于输电线路绝缘子,所以需要 r 、 R 、 H 的不同组合来确定均压环最优参数。保持 $r=21$ mm不变, R 、 H 组合变化,最大场强变化曲线见图10。保持 $R=125$ mm不变, r 、 H 组合变化,最大场强变化曲线见图11。保持 $H=44$ mm不变, R 、 r 组合变化,最大场强变化曲线见图12。

图10 R 、 H 改变 r 不变时均压环结构参数对伞裙护套表面最大场强的影响Fig. 10 The influence of the structural parameters of the average pressure ring on the maximum field strength as R and H change when r unchanged

观察图10-12可知保持一个参数不变,另外两个参数变化时均会引起最大场强先低后高的变化。当 $R=125$ mm、 $r=21$ mm、 $H=44$ mm时受电弓支撑绝缘子伞裙护套表面最大场强最小,为绝缘子均压环的最优配置。此时绝缘子伞裙护套表面最大场强为19.7 kV/cm。小于微小水珠电晕放电起始场强,达到预期目标。

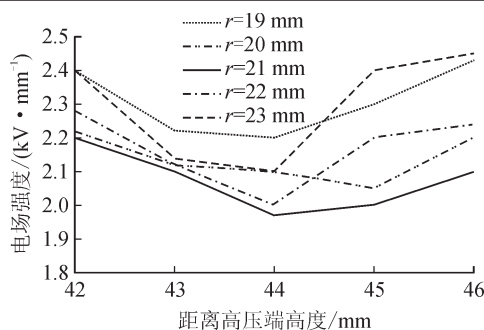


图11 R 不变, r 、 H 改变时均压环结构参数对伞裙护套表面最大场强的影响

Fig. 11 The influence of the structural parameters of the average pressure ring on the maximum field strength as r and H change when R unchanges

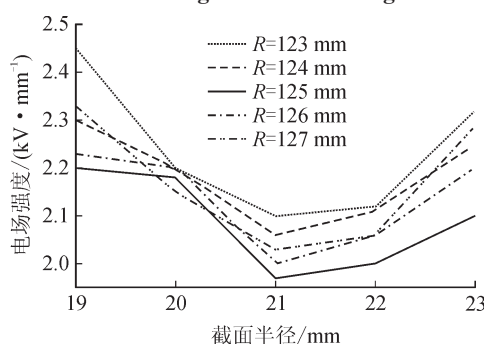


图12 H 不变, R 、 r 改变时均压环结构参数对伞裙护套表面最大场强的影响

Fig. 12 The influence of the structural parameters of the average pressure ring on the maximum field strength as R and r change when H unchanges

3 结论

文中建立了高速列车25 kV车顶复合绝缘子三维模型;采用有限元软件对车顶绝缘子进行了电场分析;分析了加装均压环前后的复合绝缘子表面的电位、电场分布情况,对均压环的结构参数(均压环的半径 R ,截面半径 r ,距离高压端高度 H)进行了组合并计算,得到了均压环参数的最优选择。得到如下结论:

1)在干燥和含分离水珠两种情况下,电位最大相差32.5%。分离水珠的引入不仅对绝缘子表面电位分布影响显著,还会造成局部场强的剧烈畸变。

4)均压环3个参数,其中一个参数保持不变,另外两个参数变化时均会引起最大场强先低后高的变化。当 $R=125$ mm、 $r=21$ mm、 $H=44$ mm时受电弓支撑绝缘子伞裙护套表面最大场强最小,为绝缘子均压环的最优配置。此时绝缘子伞裙护套表面最大场强为19.7 kV/cm,小于分离水珠电晕放电起始场强,达到预期目标。

参考文献:

- [1] 佚名.中国电气化铁路里程跃居世界第一[J]. 市政技术,2015,33(1): 127.
Nameless. Electrified railway mileage of China ranked first [J]. Municipal Technology, 2015, 33(1): 127.
- [2] 孙继星,徐跃,胡学永,等. 高速气流环境中电气化铁路绝缘子表面积污分布特性[J]. 高电压技术,2014,40(1):95-102.
SUN Jixing, XU Yue, HU Xueyong, et al. Characteristics of pollution distribution on insulators nearby electrified railroad in high-speed aerosol[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 95-102.
- [3] 吴广宁,杨坤松,高国强,等. 电动车组车顶复合绝缘子内部间隙电场分析[J]. 高电压技术 2014, 10(40):3252-3259.
WU Guangning, YANG Kunsong, GAO Guoqiang, et al. Analysis of the electric field through internal gap of electric multiple unit roof composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2014, 10(40): 3252-3259.
- [4] 杨坤松. 动车组车顶绝缘子湿污和内部缺陷条件下电场分布研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
YANG Kunsong. Research on electric field distribution of roof insulator on EMU under wetting contamination and international defects conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [5] 关志成,彭功茂,王黎明,等. 复合绝缘子的应用及关键技术研究[J]. 高电压技术,2011,37(3):513-519.
GUAN Zhicheng, PENG Gongmao, WANG Liming, et al. Application and key technical study of composite insulators [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 513-519.
- [6] 米晋秋. 合成绝缘子的选择应用分析[J]. 电力学报, 2004, 19(2):130-132.
MI Jinqiu. Compound insulator and the analysis of the selection and application[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(2): 130-132.
- [7] 张鸣,陈勉. 500 kV罗北甲线合成绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电网技术,2003,27(12):51-53.
ZHANG Ming, CHEN Mian. Analysis on core brittle fracture of composite insulators in a certain 500 kV transmission line[J]. Power System Technology, 2003, 27(12):51-53.
- [8] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11): 115-120.
SUN Caixin, SHU Lichun, JIANG Xingliang et al. AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in highaltitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120.
- [9] 司马文霞,杨庆,孙才新,等. 基于有限元和神经网络

- 方法对超高压合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报 2005, 25(17):115-120.
- SIMA Wenxia, YANG Qing, SUN Caixin, et al. Optimization of corona ring design for EHV composite insulator using finite element and neural network method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 115-120.
- [10] 毛凤麟, 王雪松. 复合绝缘子均压环对电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 39-42.
- MAO Fenglin, WANG Xuesong. Effects of grading ring of polymer insulator on the field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 39-42.
- [11] SIMA W, ESPINOCORTES F P, CHEMEY E A, et al. Optimization of corona ring design for long rod insulators using FEM based computational analysis[C]//Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Indianapolis. USA: IEEE, 2004:19-22.
- [12] 王文兴, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2):4-10.
- WANG Wenxing, DING Guo'an. The geographical distribution of ion concentration in precipitation over China[J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(2):4-10.
- [13] 刘正响, 陆宠惠. 海拔高度对导线起晕电压影响的研究[J]. 高电压技术, 1988, 14(3):38-41.
- LIU Zhengxiang, LU Chonghui. The influence of altitude on corona-starting voltages[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(3):38-41.
- [14] 姚 刚, 文习山, 蓝 磊. 湿润污秽绝缘表面电场及针板电极下的沿面放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1407-1414.
- YAO Gang, WEN Xishan, LAN Lei. Electric field of wet contamination on dielectric surface and creeping discharge in needle-board electrodes[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1407-1414.
- [15] 律方成, 尤少华, 刘云鹏, 等. 雨雪天气下特高压交流单回试验线段电晕损失实测分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(9):2089-2095.
- LYU Fangcheng, YOU Shaohua, LIU Yunpeng, et al. Analysis on corona loss measurement of ultra high voltage AC single circuit test line in rain and snow weather conditions [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9):2089-2095.
- [16] 王清亮, 张 璐, 李 舟, 等. 直流负极性下雨滴对导线电晕特性的影响[J]. 高压电器, 2011, 47(8):9-13.
- WANG Qingliang, ZHANG Lu, LI Zhou, et al. Influence of corona characteristics of water drops on smooth conductor under negative DC voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8):9-13.
- [17] 陈 澜, 陈方东, 赵雪松, 等. 大雨环境下雨滴对线路电晕特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(11):2863-2868.
- CHEN Lan, CHEN Fangdong, ZHAO Xuesong, et al. Influence of rain drops on corona discharge in AC transmission lines under high rainy condition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):2863-2868.
- [18] 司马文霞, 武 坤, 李立涅, 等. ± 800 kV 线路直流复合绝缘子均压环结构研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11):33-36.
- SIMA Wenxia, WU Kun, LI Licheng, et al. Optimization of corona ring design for ± 800 kV UHV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11):33-36.
- [19] 陈昌龙, 王黎明. 电力机车车顶绝缘子电场计算[J]. 高压电器, 2011, 47(1):53-57.
- CHEN Changlong, WANG Liming. Electric field calculation for electric locomotive roof insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1):53-57.
- [20] 何恩广, 周 升. 新型有机复合材料车顶支持绝缘子的研制[J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(3):13-16.
- HE Enguang, ZHOU Sheng. Development of new car roof composite insulator[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2003, 26(3):13-16.
- [21] 朱 滨. 弹性力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2008:1-4.
- ZHU Bin. Elastic mechanics[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2008:1-4.
- [22] 范钦珊, 殷亚俊, 唐靖林. 材料力学[M]. 3版. 北京:清华大学出版社, 2014:7-10.
- FAN Qinshan, YIN Yajun, TANG Jinglin. Modern signal processing[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 7-10.
- [23] WENG Gengsheng, HUANG Guangsu, LEI Hangxin. Crack initiation of natural rubber under high temperature fatigue loading[J]. Journal of Applied Polymer, 2012, 124(5): 4274-4280.
- [24] 卞星明, 张福增, 王黎明, 等. 1 000 kV 交流复合绝缘子均压环参数设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(5):980-986.
- BIAN Xingming, ZHANG Fuzeng, WANG Liming, et al. Design of grading rings for 1 000 kV AC composite insulator [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5):980-986.
- [25] 钟 山. 合成绝缘子电场计算与分析[D]. 北京:清华大学, 2000.
- ZHONG Shan. Composite insulator electric field calculation and analysis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- 李从洋(1984—), 男, 硕士, 主要从事 1 000 kV 变电站设备运行维护工作。
- 曹 桂(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作。
- 张血琴(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高电压试验技术、绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作, “四川省千人计划”获得者。