

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.030

金具结构对动车组受电弓支柱绝缘子附近区域电场分布的影响分析

任丽苗¹, 马建桥¹, 徐金阳¹, 王碧霞¹, 孙 成²

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 北京交通大学, 北京 100091)

摘要: 动车组车顶受电弓支柱绝缘子高压侧金具结构会影响绝缘子表面电场强度的分布均匀度, 电场不均匀会造成绝缘子闪络频次增加。为此, 基于静电场理论, 联合Solidworks软件和有限元软件静电场模块仿真分析了金具结构对绝缘子附近空气域及绝缘子表面电位、电场分布变化的影响, 优化设计金具结构并试验验证其效果。研究表明, 现有连接方式下高压侧金具连接处附近场强分布不均匀, 优化后的连接金具可有效降低局部区域电位梯度, 电位梯度的降低有助于减小闪络故障的发生频次。文中研究结果可为后续动车组受电弓绝缘子结构优化设计及试验验证提供参考。

关键词: 动车组; 受电弓支柱绝缘子; 金具结构; 电场分布

Influence of Fitting Structure on Local Electric Field Intensity Around Pantograph Supporting Insulators of Electric Multiple Units

REN Limiao¹, MA Jianqiao¹, XU Jinyang¹, WANG Bixia¹, SUN Cheng²

(1. College of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China)

Abstract: The metal fitting structure on high voltage side of the EMU (electric multiple units) roof pantograph post insulator affects the distribution uniformity of the electric field intensity on the insulator surface, and the uneven electric field may lead to the increase of the flashover frequency on the insulator. In this study, the software Solidworks and the electrostatic field module of finite element software are employed to simulate and analyze the influences of the metal fitting structure on the air domain near the insulator, as well as the surface potential and electric field distribution on the insulator, on the basis of the electrostatic field theory. The structure of the fitting is optimized and the effect is verified by experiments. The results show that the electric field intensity distribution at the fitting joint on high voltage side is uneven under the existing connection mode, and the optimized connecting fittings can effectively reduce the local potential gradient to decrease the frequency of flashover faults. This study may provide a reference for structural optimization design and experimental verification of pantograph insulators in EMU.

Key words: electric multiple units (EMU); pantograph post insulator; metal fitting structure; electric field intensity distribution

0 引言

到2020年, 中国的高速铁路营业里程数将达3万公里, 铁路复线率达到60%, 电气化率达到70%^[1]。

受电弓、车顶绝缘子、高压隔离开关、电缆、断路器、牵引变压器、变流器等设备是动车组电传动系统的主要组成部分^[2]。车顶高压设备绝缘故障影响动车组可靠运行, 动车组的晚点运行不仅会给动

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-04-28

基金项目: 兰州交通大学百名青年优秀人才培养计划基金资助(152022); 甘肃省教育厅科研基金(2018A-025); 甘肃省自然科学基金(1310RJZA045)。

Project Supported by Program for Hundred Young Talents in Lanzhou Jiaotong University(152022), Research Fund of Gansu Education Department(2018A-025), Natural Science Foundation of Gansu Province(1310RJZA045)。

车组运营单位带来经济损失,更有可能造成较大的社会影响^[3-5]。

高压供电系统中,绝缘子所起的主要作用为高低压侧电位隔离和机械支撑,目前电力系统、电气化铁路中常用的绝缘子材质有瓷、硅橡胶和玻璃等。硅橡胶复合绝缘子伞裙柔软,具有良好的憎水性及憎水性迁移特性,在重污秽地区得到广泛的使用^[6-7]。复合绝缘子伞裙柔软,在风力作用下可能会发生偏折现象,已有西北地区沙尘暴等高速气流造成的复合绝缘子伞裙撕裂故障案例,清华大学深圳研究生院针对此问题开展了相关研究^[8-10]。动车组运营单位发现个别时速 200 km 动车组复合车顶绝缘子亦存在伞裙撕裂问题。针对动车组绝缘子使用问题的调研结果表明,按电力系统绝缘子配方生产的动车组复合绝缘子无法确保动车组可靠运行。复合绝缘子的硬度增加将会导致其憎水性下降,为降低撕裂故障率,可牺牲部分憎水性,提高伞裙硬度^[11]。德国西门子公司在部分动车组车顶采用真空压力浇注的环氧树脂绝缘子,在借鉴此类工程经验的基础之上,国内大连第一互感器公司已制造出结构高度为 400 mm 的环氧树脂绝缘子并成功应用在 380 系列动车组车顶高压供电系统^[12-13]。

动车组运行时速在 200 km 到 300 km 之间,车顶的任何零件掉落都可造成严重的后果,因此动车组车顶器件以连接牢固、运行可靠为第一设计原则。调研现有车顶受电弓及其支撑装置结构后发现,车顶金具与绝缘子连接处存在尖端或凸起,该区域周围的电场会增强,易引发电晕放电,长时间的电晕放电不仅可加速环氧树脂材料的老化速度,同时在绝缘子表面有湿润污秽物时可促进闪络故障的形成。

针对受电弓弓架同绝缘子连接处存在局部强电场问题,文中选择动车组受电弓绝缘子为研究对象,借鉴电力系统输电线路绝缘子均压环优化设计方法^[14-17],联合三维制图软件与商业有限元仿真软件,分析受电弓弓架同绝缘子连接处的电极结构对电场强度分布的影响规律。基于仿真结果,试验验证改进电极结构前后的闪络电压变化特性,结合仿真及试验结构,提出动车组受电弓弓架同绝缘子连接处的电极结构优化建议。文中研究结果可为动车组车顶绝缘子电极优化策略的实施提供参考。

1 仿真模型

动车组车顶受电弓降弓、升弓状态下的车顶高压设备布置见图 1、2。正常运行过程中通过控制气体压力控制受电弓高度,处于升弓状态的受电弓从接触

网取能,正常状态下处于降弓状态的受电弓不带电。

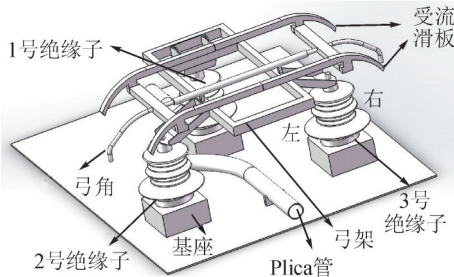


图1 动车组车顶受电弓降弓图

Fig. 1 Schematic diagram of EMU roof pantograph not in current collecting state

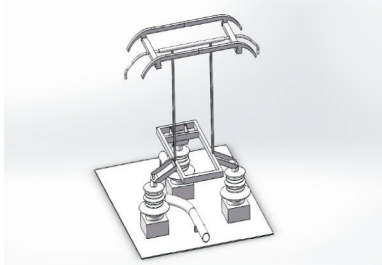


图2 动车组车顶受电弓升弓图

Fig. 2 Schematic diagram of EMU roof pantograph in current collecting state

文中的研究重点为 CRH380A 系列动车组的受电弓绝缘子连接金具对电位或电场分布影响,因此文中建模过程中做如下简化:忽略液压传动装置、气囊等部件;采用金属支杆的高度来模拟升降弓状态;假设绝缘子、金具表面处于洁净、干燥状态。

图 1 中,1、2、3 号绝缘子的型号为 SC_400,其材质为环氧树脂,结构高度为 400 mm,受流滑板材质为合金,Plica 管内布置通往车体高压设备箱内的电缆。基座高度约为 180 mm。

在求解过程中建立一个人工边界,空气域尺寸为图 1 所示模型尺寸的 5 倍。网格剖分类型为四面体,网格最大尺寸为 200 mm,最小为 0.001 mm。计算过程中采用第 1 类边界条件(置电位),仿真中金具为高压侧,施加 27.5 kV 的电压,人工边界处(空气包外表面)和低压端电位设置为零。

模型构建中,除绝缘子外其余部件均设置为金属,各器件相对介电常数见表 1,绝缘子连接金具的材质一般采用高强度铝合金材质,该材料具有良好的导电性能,根据参考文[1, 18-19],高低压侧金具相对介电常数取值为 1×10^8 。

表 1 相对介电常数

Table 1 Relative dielectric constant

空气	环氧树脂	金具
1.0	5.5	1.0×10^8

工程实践中优化电场分布通常采用 3 种方式:

1)加装均压环或屏蔽盘。为均匀化特高压输电线路绝缘子及多级串联支柱绝缘子电压分布,可在连接处增设均压环,加装均压环改变电位分布的原理见图3。

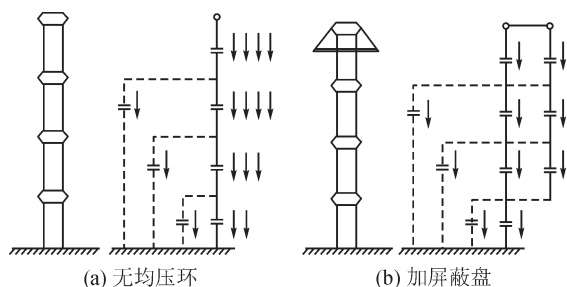


图3 加屏蔽盘改善极间电容分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of capacitance distribution for adding shielding disk

2)改变电极形状。减少电极的曲率来降低设备表面的电场强度,将设备边缘弧形化使电极及电极附近绝缘表面电场强度均匀分布,从而提高沿面闪络电压;

3)采用不同电介质常数的材料。根据电位移矢量不能突变的原理。通常在强电场处,采用电介质常数较大的电介质,来减弱电场强度,减少放电现象的发生。

文中采用方法1即改变电极形状方式来改善电场分布,拟采用的受电弓弓架同绝缘子连接处的附加屏蔽电极见图4。图4中: R 表示屏蔽盘半径; H 为罩入深度; D 为屏蔽盘厚度。为了保证屏蔽盘的结构强度, D 取值为8~12 mm,文中 D 取值10 mm。

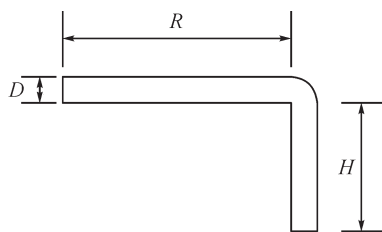


图4 动车组绝缘子高压侧屏蔽盘结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shielding disk for EMU roof post insulator

按如图5所示对动车组车顶的受电弓支柱绝缘子进行编号。由于普利卡管进行接地处理对电势和电场的分布影响较小,2号支撑绝缘子和3号支撑绝缘子、弓角可以看成关于中心线对称。因此,文中只对2号支撑绝缘子附近空气的电位和电场进行分析。

2 电极结构对电场分布的影响

2.1 仿真结果

静电场中,电场强度等于电位的负梯度,文中

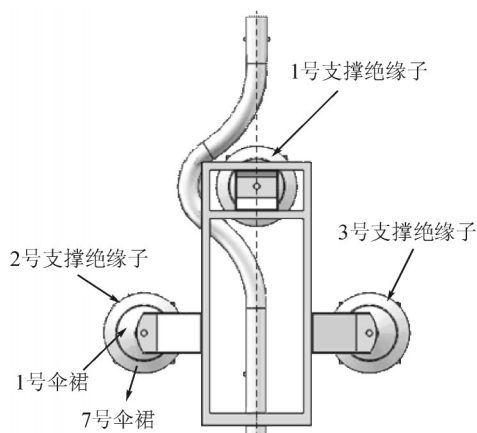


图5 动车组高压系统俯视图

Fig. 5 Topview of EMU roof high voltage system

选择电场强度进行相关数据分析。

绝缘子高压侧加装屏蔽盘前后的电场分布云图见图6,2号支撑绝缘子1号伞裙表面电场分布云图见图7。

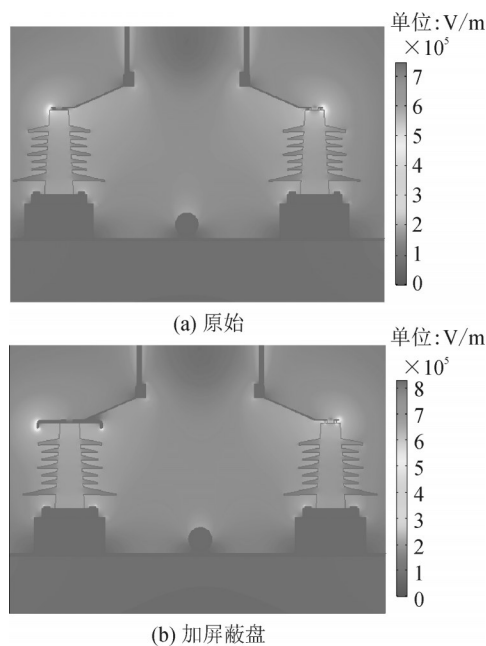


图6 支撑绝缘子截面电场云图

Fig. 6 XY-plane electric field cloud diagram of post insulator

由图6可知,金具边缘同空气交界面处电场强度数值较大,加装屏蔽盘后,2号支柱绝缘子1号伞裙表面电场分布不均匀程度下降明显。

由图7可知,加装屏蔽盘后,位于绝缘子高压侧的第一片绝缘子电场强度分布更为均匀,局部场强区的区域面积明显减小。

提取如图8所示的2号绝缘子中轴线及沿边电位、电场数据,分析加装屏蔽盘前后及屏蔽盘尺寸对电场分布的影响。加装屏蔽盘前后的绝缘子左侧沿边电场强度值比较见图9,图9(a)中屏蔽盘 R 为

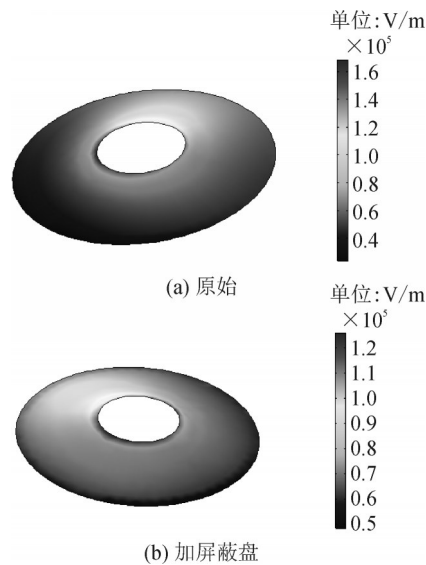


图7 2号支撑绝缘子1号伞裙电场云图
Fig. 7 Electric field cloud diagram of 1st sheath of No.2 post insulator

130 mm, H 为 40 mm, 图 9 中原始代表加装屏蔽盘之前的工况。

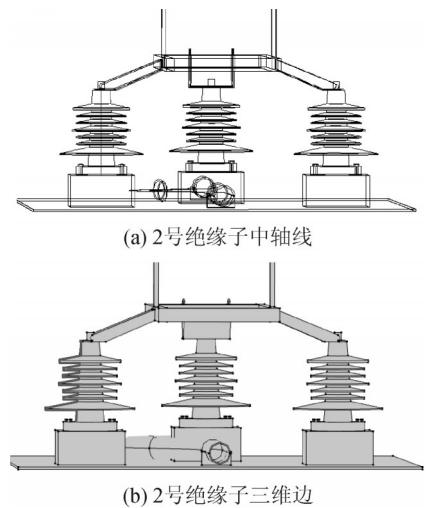


图8 2号支撑绝缘子轴线及沿面路径示意图
Fig. 8 Schematic diagram of axis and surface path of No.2 post insulator

由图 9 可知, 加装屏蔽盘($R=130\text{ mm}$, $H=40\text{ mm}$)后, 靠近高压侧的轴线及沿面电场强度最大值具有明显的下降, 图 8(b) 所示的深色路径中的最高场强值由 $429\,876\text{ V/m}$ 下降为 $102\,226\text{ V/m}$ 。

由图 9(b)、(c) 可知, 屏蔽盘参数 R 对电场强度无明显影响, 参数 H 影响高压侧电场强度, 高压侧场强值随 H 的增加而下降。

2.2 试验验证

干闪试验接线图见图 10, 工频试验变压器的型号为 YDTW - 1200 kVA/300kV, 试验电源参数满足 IEC 60507—2013 和 GB/T 4585—2004 要求^[20-21]。高压分压器变比为 1 000:1, 干闪试验期间环境温度为

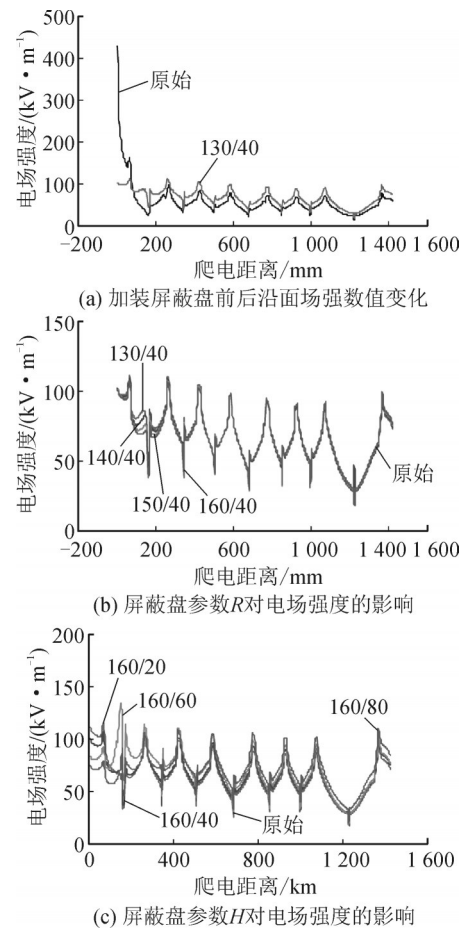


图9 屏蔽盘对轴线及沿面电场分布的影响
Fig. 9 Influence of shielding disk on the electric field distribution along the axis and the surface of No.2 post insulator

$21\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $42\%\sim 47\%\text{RH}$, 绝缘子的型号为 SC-400。比较加装屏蔽盘前后及不同尺寸屏蔽盘对干闪电压的影响, 试验结果见表 2。表 2 中数据为多次试验(12~20 次)后, 取 10 个有效值的平均值, 标准偏差均小于 3%。

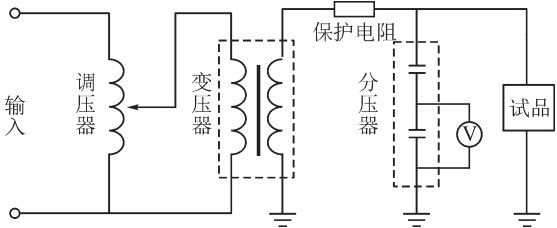


图10 干闪试验接线图
Fig. 10 Wiring diagram of dry flashover test

表 2 2号绝缘子闪络电压

Table 2 Flashover voltage of insulator No.2					
项目	原始	130/20	130/40	130/60	160/60
闪络电压	172.3	167.2	159.4	147.2	145.8

由表 2 可知, 屏蔽盘参数 R 对干闪络电压无明显影响, 随着参数 H 值的增加, 高压电极向低压侧延

伸,缩短了干闪距离。以未加装屏蔽盘时的闪络电压为基准,当参数 H 增加到60 mm时,干闪络电压下降了25~27 kV,且屏蔽盘的下部已靠近绝缘子1号伞裙表面(边缘),由于绝缘子本身的结构高度比较低,因此对文中涉及的绝缘子而言,60 mm的罩入深度过大。

综合考虑屏蔽盘参数对电场分布及闪络电压的影响,建议屏蔽盘的参数 R 范围为130~150 mm, H 范围为20~30 mm。

3 结论

文中基于仿真计算和试验验证方法,分析了受电弓支柱绝缘子高压侧屏蔽盘对电位及电场强度分布的影响,研究结论如下:

1)高压侧加装屏蔽盘可有效屏蔽尖角,改善绝缘轴线及沿面电场强度分布。

2)屏蔽盘盘径 R 参数选择范围为130~150 mm,罩入深度 H 参数选择范围为20~30 mm。

3)屏蔽盘的引入,降低了绝缘子干闪电压值,但降低后的干闪电压值仍满足入网考核指标。

参考文献:

- [1] 马建桥,律方成,汪佛池,等.螺栓安装方式对动车组高压隔离开关电场分布与闪络特性的影响[J].高电压技术,2017,43(10):3351-3360.
MA Jianqiao, LYU Fangcheng, WANG Fochi, et al. Influence of bolt installation method on electric field distribution and flashover characteristics for isolating switch in electric multiple units[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10):3351-3360.
- [2] 罗蜀彩,彭刚,李军,等.车顶绝缘子湿润条件下表面电场分布研究[J].高压电器,2016,52(1):36-41.
LUO Shucui, PENG Gang, LI Jun, et al. Study of surface electric field distribution of railway coach roof insulator under wet condition[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1):36-41.
- [3] 孙继星,吴广宁,高国强,等.水滴降落对列车车顶电场的影响及应对策略[J].高电压技术,2014,40(6):1748-1755.
SUN Jixing, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. Influence of dropping water droplets on electric field above train roof and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1748-1755.
- [4] 吴广宁,邵梦春,彭松,等.车顶绝缘子表面水珠及降落水滴电场分布及其对闪络特性的影响[J].高电压技术,2017,43(2):557-566.
WU Guangning, SHAO Mengchun, PENG Song, et al. Distribution of surface electric field of water and water droplets landing and its influence on the insulator flashover characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):557-566.
- [5] 孙继星,罗蜀彩,吴广宁,等.高速列车车顶绝缘子积污分布特性及优化策略[J].西南交通大学学报,2014,49(2):343-350.
SUN Jixing, LUO Shucui, WU Guangning, et al. Pollution distribution characteristic of high-speed train roof insulator and its optimization strategy[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2):343-350.
- [6] 董平平,高丽娟,梁英.硅橡胶复合套管用PRTV修复后表面放电对其憎水性及电性能的影响研究[J].高压电器,2018,54(10):125-131.
DONG Pingping, GAO Lijuan, LIANG Ying. Effect of surface discharge on hydrophobicity and electrical properties of silicone rubber composite bushing after PRTV remediation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10):125-131.
- [7] 许竞,高波,宋臻杰,等.不同环境因素对复合绝缘子憎水性影响的研究[J].高压电器,2018,54(2):103-109.
XU Jing, GAO Bo, SONG Zhenjie, et al. Study on the effect of environmental factors on hydrophobicity of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2):103-109.
- [8] 王希林,朱正一,马国祥,等.强风区复合绝缘子伞裙撕裂研究[J].电网技术,2013,37(10):2845-2849.
WANG Xilin, ZHU Zhengyi, MA Guoxiang, et al. Research on shed crack of composite insulators used in strong wind area[J]. Power System Technology, 2013, 37(10):2845-2849.
- [9] 贾志东,马国祥,朱正一,等.复合绝缘子在强风下的形变及应力集中程度[J].高电压技术,2015,41(2):602-607.
JIA Zhidong, MA Guoxiang, ZHU Zhengyi, et al. Deformation and stress concentration of composite insulator in strong wind[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2):602-607.
- [10] 李庆峰,魏杰,殷禹,等.复合绝缘子耐张串微风振动疲劳特性研究[J].电网技术,2012,36(12):269-275.
LI Qingfeng, WEI Jie, YIN Yu, et al. Research on aeolian vibration caused fatigue properties of strain composite insulator string[J]. Power System Technology, 2012, 36(12):269-275.
- [11] 宿志一,陈刚,李庆峰,等.硅橡胶复合绝缘子伞裙护套的老化及其判据研究[J].电网技术,2006,30(12):53-57.
SU Zhiyi, CHEN Gang, LI Qingfeng, et al. Study on aging and criterion of sheds and housing of silicon rubber composite insulator[J]. Power System Technology, 2006, 30(12):53-57.
- [12] 律方成,张兆华,汪佛池,等.动车组高压隔离开关用绝缘子电场分布特性及其影响因素仿真分析[J].高压电器,2017,53(1):1-7.
LYU Fangcheng, ZHANG Zhaohua, WANG Fochi, et al. Simulation on electric field distribution of electric multiple unit high voltage disconnecter insulators and the influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1):1-7.

- (1):1-7.
- [13] 律方成, 马建桥, 汪佛池, 等. 雾霾天气下动车组支柱绝缘子表面污秽分布规律[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3305-3310.
- LYU Fangcheng, MA Jianqiao, WANG Fochi, et al. Pollution distribution rule of insulator surface of locomotives under fog - haze condition[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3305-3310.
- [14] 邓 桃, 李庆峰, 张学军, 等. ± 800 kV 特高压直流线路均压环优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 100-105.
- DENG Tao, LI Qingfeng, ZHANG Xuejun, et al. The optimization of grading ring design of ± 800 kV UHVDC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 100-105.
- [15] 李庆峰, 邓 桃, 毛 艳, 等. 1 000 kV 特高压交流复合绝缘子耐张串均压特性研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2541-2546.
- LI Qingfeng, DENG Tao, MAO Yan, et al. Study on optimization characteristic of composite tension insulators for 1 000 kV UHVAC lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2541-2546.
- [16] 关志成, 刘 敏, 王黎明, 等. ± 800 kV 直流复合绝缘子正方形耐张串均压环设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1423-1428.
- GUAN Zhicheng, LIU Min, WANG Liming, et al. Design of grading rings for ± 800 kV DC tension string with four composite insulators in rectangle form[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1423-1428.
- [17] ZHAO T, COMBER M G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 313-318.
- [18] 阚仲元. 电动力学教程[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- KAN Zhongyuan. Electrodynamics course[M]. Beijing: The People's Education Press, 1979.
- [19] 邝向军. 关于金属介电常数的讨论[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2006, 19(2): 75-78.
- KUANG Xiangjun. Discussion on dielectric constant of metal[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2006, 19(2): 75-78.
- [20] 高电压试验技术, 第一部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927. 1—2011[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2012.
- High-voltage test techniques, Part 1: General test requirements: GB/T 16927. 1—2011[S]. Beijing: Standardization Administration of The People's Republic of China, 2012.
- [21] 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验: GB/T 4585—2004[S]. 2004.
- Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems: GB/T 4585—2004[S]. 2004.

任丽苗(1982—), 女, 讲师, 研究方向为高电压绝缘、继电保护等。

马建桥(1982—), 男, 副教授, 研究方向为高压电气设备外绝缘特性等(通讯作者)。

(上接第 211 页)

- tion molding technology of composite insulator shed housing [J]. Engineering and Materials Science, 2013(5): 71-73.
- [17] 范金娟, 刘高远, 章 菊, 等. 加载速率对硅橡胶拉伸断裂行为的影响[J]. 机械工程材料, 2007, 31(12): 69-71.
- FAN Jinjuan, LIU Gaoyuan, ZHANG Ju, et al. Effect of loading rate on tensile fracture behavior of silicon rubber[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(12): 69-71.
- [18] 方钦志, 李慧敏, 欧阳小东. 加载速率对 PC/ABS 拉伸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(1): 131-134.
- FANG Qinzhi, LI Huimin, OUYANG Xiaodong. Effect of loading rate on the tensile properties of PC/ABS[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22(1): 131-134.
- [19] 黄艳华, 任玉柱, 赖亮庆, 等. SE6450 硅橡胶的低温拉伸性能研究[J]. 特种橡胶制品, 2011, 32(4): 38-40.
- HUANG Yanhua, REN Yuzhu, LAI Liangqing, et al. Study on tensile properties of silicone rubber SE6450 at low temperature[J]. Special Purpose Rubber Products, 2011, 32(4): 38-40.
- [20] 陈 原, 张章奎, 岳 乔. 以 RTV 涂料作为永久性反污措施的可行性研究[J]. 华北电力技术, 2001(12): 3-8.
- CHEN Yuan, ZHANG Zhangkui, YUE Qiao. Feasibility study on using RTV coating as permanent anti-contamination-flashover measure[J]. North China Electric Power, 2001(12): 3-8.
- [21] 何 强, 贾奇博, 卢咏来, 等. 硫化硅橡胶交联结构与物理性能关系研究[J]. 橡胶工业, 2010, 57(5): 268-274.
- HE Qiang, JIA Qibo, LU Yonglai, et al. The relationship between crosslinked structure and physical properties of silicone rubber vulcanizates[J]. China Rubber Industry, 2010, 57(5): 268-274.
- 李秋鹏(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划、电能质量。
- 吴兴全(1970—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。
- 高 婷(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术等。
- 董平平(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术等。