

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.024

高速气流中沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响研究

曹 桂^{1,2}, 王同来², 曹保江¹, 吴广宁¹, 董海波², 吴立伟²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 国网山东省电力公司检修公司, 济南 250118)

摘要: 运行于高速沙尘环境中的车顶复合绝缘子频繁发生异常及不明闪络现象, 严重威胁列车的安全、稳定运行。风沙环境使得复合绝缘子附近的电场发生了一定的畸变, 会影响复合绝缘子的闪络特性。文中基于风洞试验系统探究高速气流环境中沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响, 测定了高速气流沙尘状况下复合绝缘子的闪络电压, 对比了在有沙尘与无沙尘时复合绝缘子的闪络电压, 揭示了沙尘环境下复合绝缘子闪络电压的变化趋势; 实验结果表明: 高速气流环境下, 复合绝缘子的闪络电压随风速的增加先增大后减小, 有沙尘时复合绝缘子的闪络电压要比无沙尘时低; 在同一气流速度下, 当沙粒粒径为 100 μm 、沙流量较小时, 复合绝缘子的闪络电压要高于沙流量较大时的闪络电压; 随气流速度的不断增大, 沙尘通过畸变电场而影响闪络电压的程度将逐渐低于流场特性的影响, 而使得在气流速度较高时不同沙尘流量的闪络电压差距较小。

关键词: 复合绝缘子; 高速气流; 沙尘环境; 闪络电压

Influence of Sand Dust in High Speed Airflow on the Flashover Characteristics of Composite Insulators

CAO Gui^{1,2}, WANG Tonglai², CAO Baojiang¹, WU Guangning¹, DONG Haibo², WU Liwei²

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250118, China)

Abstract: Based on wind tunnel test system, the impact of the sand dust in high speed airflow on the insulator flashover characteristics is explored and insulator flashover voltage is measured under the condition of sand dust in high speed airflow. The flashover voltage of composite insulators is compared with sand dust and dust free, and the changing trend of flashover voltage of composite insulators under sand dust environment is revealed. The research shows that the flashover voltage of insulator increases first and then decreases with the increase of the wind speed, and the voltage is smaller under sand environment than that of sand-free environment. Under the same wind speed, when the sand particle diameter is 100 μm , the flashover voltage of insulator is higher under less sand flux than that of high flux. With the increase of airflow speed, the degree of flashover voltage affected by the distorted electric field will gradually be lower than that of the flow field, and make the difference between the sand and dust flows at a relatively high airflow speed smaller.

Key words: composite insulator; high speed airflow; the sand dust environment; the flashover voltage

0 引言

中国铁路发展迅速, 截至 2016 年, 全国高速铁路运营里程达到 1.6 万 km, 占世界的 60% 以上, 位

居世界第一^[1]。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。以“兰—新”高铁为代表的铁路线路逐步深入到沙漠风沙地区, 途经塔克拉玛干、古尔班通固特

收稿日期: 2017-08-05; 修回日期: 2017-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(青年科学基金)(51507146)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (National Science Foundation for Young Scientists of China) (51501146).

等沙漠地区^[2-3]。

近年来,由沙尘天气引发的外绝缘闪络跳闸事故时有发生,造成铁路运输晚点或中断,带来负面的社会影响。2010年4月24日,由乌鲁木齐发出的列车因为甘肃某地的沙尘暴天气而晚点;2013年5月24日,乌鲁木齐至济南的1086次列车也因沙尘暴天气而晚点7 h。2015年3月31日,受河西地区强沙尘暴的影响,兰州开往新疆、酒泉、嘉峪关等地的动车,车速由200 km/h降到120 km/h。风沙环境改变了复合绝缘子周围的介质状况,使其由洁净的空气变成混有悬浮沙粒的混合介质^[4-6],与此同时沙粒相互之间的非对称性摩擦改变了沙粒的介电特性影响复合绝缘子表面及空间的电场分布^[7-8]。当局部电场强度到达空气的临界击穿场强时,便会有局部电弧的产生,进一步引发闪络事故,影响列车供电可靠性,威胁列车的安全运行^[9-12]。因此研究沙尘环境下复合绝缘子闪络特性能够为列车安全、稳定运行提供理论依据。

伴随着沙尘暴的产生,人们发现了风沙流中的强电场及电火花现象,国内外学者在发生沙尘天气的地区均观测到因为沙风过境而引起的高压打火、线路跳闸等现象^[12-16]。经研究发现,由强风及沙尘造成的不明闪络事故大约是整個线路外绝缘闪络事故的50%^[17-20]。为探究沙尘环境对外绝缘特性影响,国内外学者进行了大量的研究。文[21-22]基于沙尘模拟实验室以对XP-70瓷质绝缘子进行研究,分析了风沙速度、风沙带电量、沙尘沉积量等因素对瓷绝缘子闪络电压的影响规律;研究发现,绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度受悬浮沙粒的数量、粒径、荷质比的大小和极性影响明显。

上述风沙对绝缘子闪络特性的影响的研究对象多为线路绝缘子,最大风速25 m/s,而对工作于100 m/s环境中的高速列车车顶复合绝缘子,并没有相关报导。当气流速度不断增加时,高速气流与沙尘共同影响下复合绝缘子的闪络特性会更为复杂。因此对运行工况特殊的车顶复合绝缘子进行针对性的研究,有助于为运行于沙尘环境中的车顶复合绝缘子提供理论支持。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

为探究高速气流环境下复合绝缘子闪络特性,在实验室搭建风洞系统进行试验研究。该系统由高速离心风机通过引风口引入空气,经过稳定段、收缩段到试验段进行试验,在扩展段进行气流速度

的测定。其中离心风机转速可达1 470 r/min,试验段的最高气流速度大于100 m/s。风速仪采用FC-002/002A型,安装于扩展段,用于测量风洞内的气流速度。由于该系统中各段风量相同,试验段的气流速度可以通过试验段与扩展段所在区域的截面积之比来确定。为探究沙尘环境下复合绝缘子闪络特性,送尘装置安装于风机入风口,风沙经过稳定段与收缩段后均匀通过试验段。高速风洞系统的设计方案见图1。

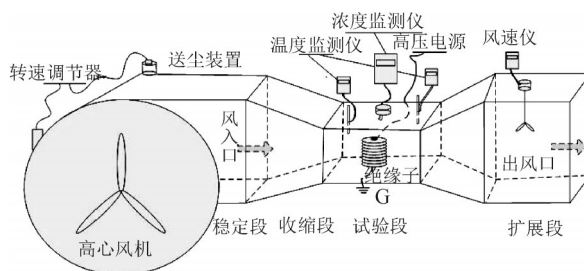


图1 高速风洞系统的设计方案

Fig. 1 The design scheme of high speed wind tunnel system

1.2 实验电路

将工频220 V交流电压通过调压器接入变压器构成试验电源。试验电压通过保护电阻加到试验复合绝缘子高压端,所施加电压通过并联于复合绝缘子高压端的高压探头衰减后接入示波器。通过示波器检测复合绝缘子绝缘状态,同时测定复合绝缘子闪络电压。试验接线原理图见图2。试验中所使用的调压器主要参数:额定容量为10 kVA;输入电压为220 V;输出电压为0~250 V。试验变压器的主要参数:额定容量为5 kVA;变比为250;输入电压的范围是0~250 V;输出电压的范围是0~62.5 kV。试验电路中串联接入保护电阻,以确保试验复合绝缘子闪络对地短路后不会造成电源短路危害试验人员及设备的安全。电阻值为60 kΩ,试验中需要对复合绝缘子所施加的电压值较高。此外,试验所用紫外成像仪主要用于观察复合绝缘子表面电晕的放电过程。

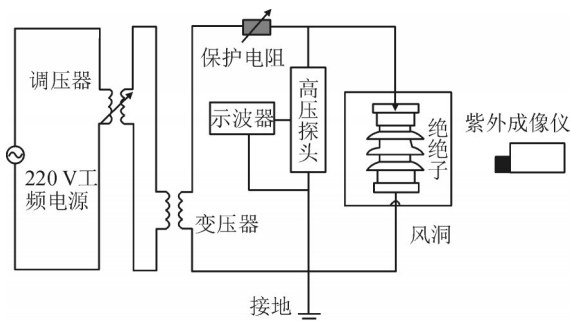


图2 风洞实验接线原理图

Fig. 2 Wind tunnel experimental wiring principle diagram

1.3 实验对象

由于实验风洞较为狭窄,文中采用与车顶支撑复合绝缘子相同材料的小型复合绝缘子进行试验验证,见图3。

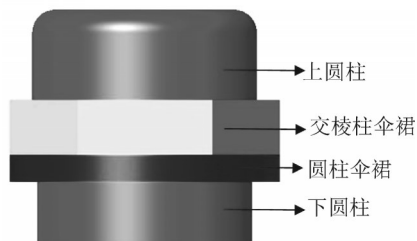


图3 试验所用复合绝缘子

Fig. 3 The composite insulator is used in the experiment

试验中所用复合绝缘子复合材料为环氧树脂。试验所用绝缘子为一体铸造而成,为描述方便,将复合绝缘子分由上圆柱、六棱柱伞裙、圆柱伞裙以及下圆柱4个部分组成,如图3所示。具体参数如下:上圆柱直径2 cm,高1 cm,倒角半径0.25 cm;六棱柱伞裙高0.6 cm,六边形外接圆直径3 cm;圆柱伞裙高0.3 cm,直径3 cm;下圆柱直径2.4 cm,高0.7 cm。

1.4 风沙实验安排

调查表明,兰新线上风沙现象主要出现在戈壁区,风沙主要由石子、粗沙、细沙和微尘组成,线路沙尘情况见表1^[23]。

表1 沙尘分布表

Table 1 Dust distribution

空气高度/m	主要沙粒大小/mm	次要沙粒大小/mm
>3	0.100~0.250	0.250~0.500 和 <0.075
<3	<0.075	0.100~0.250

为体现工程意义试验中所用沙尘均为粒径小于100 μm的研磨细沙。沙尘由风洞入风口送入,其中每小时送尘质量与风速间采用公式为

$$m = 3\,600\lambda_s S v_i \quad (1)$$

式(1)中: m 为每小时需送污秽质量; λ_s 为等效空气含尘量; S 为风洞入风口截面积; v_i 为入风口风速。

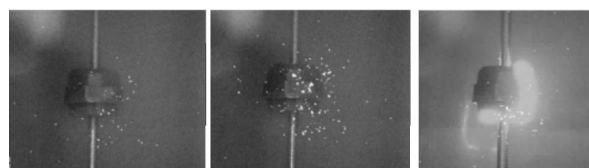
为减少风沙试验过程中沙尘对环境的污染,先测定同风速下无沙尘情况下复合绝缘子的闪络电压。复合绝缘子上施加无沙尘闪络电压的70%时开始由进风口以30 mg/m³送入沙尘,同样按照均压加压法进行试验,测得随气流变化时有沙尘与无沙尘情况下复合绝缘子的闪络电压。同时,为确保试验准确性,每组试验进行20次测试以减小试验误差。

2 沙尘环境下复合绝缘子的闪络特性

2.1 沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响

为了探究沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响,通过风洞系统对试验段的复合绝缘子施加高速气流测定其闪络电压,然后在相同速度下通过通风口处的“送尘器”均匀地向试验区域通入一定量的沙尘,测定在高速气流沙尘状况下复合绝缘子的闪络电压。

当气流速度为27 m/s,沙尘以30 mg/m³由进风口送入时,通过紫外成像仪捕捉加压过程中复合绝缘子周围的光子情况。当复合绝缘子两端电压为22、24 kV及闪络时光子变化情况见图4。



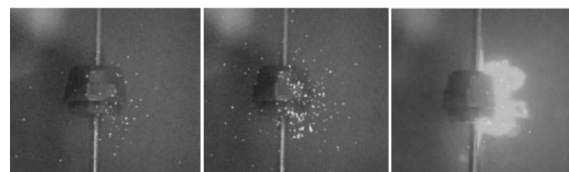
(a) 22 kV情况 (b) 24 kV情况 (c) 26.5 kV情况

图4 气流速度为27 m/s时复合绝缘子闪络过程

Fig. 4 The process of insulator flashover under wind speed 27 m/s

随着施加于复合绝缘子两端的电压逐渐升高,复合绝缘子周围空气被电离出现的光子数随之增多。电压越高电离程度越强,直至出现电弧贯穿复合绝缘子两端。从上述紫外图像可看到,在气流速度为27 m/s时,加压的各个阶段中光子大多数分布于复合绝缘子后侧并逐渐增多,直至当电压为26.5 kV时,复合绝缘子被击穿,发生贯穿性闪络。经20次试验统计,7次闪络点发生在背风区,由图4可清楚的看出,闪络点发生在复合绝缘子的背风区。

当对试验段的复合绝缘子施加55 m/s的高速气流时,通过紫外成像仪捕捉到在对复合绝缘子加压至闪络过程中的典型图像见图5。



(a) 22 kV情况 (b) 24 kV情况 (c) 26.5 kV情况

图5 气流速度为55 m/s时复合绝缘子闪络过程

Fig. 5 The process of insulator flashover in 55 m/s

较上述无风沙情况下,此时在相同电压下复合绝缘子周围的光子数明显增多;但在相同电压下、55 m/s与27 m/s时,复合绝缘子周围出现的光子数相差不大,复合绝缘子闪络电压为26.5 kV,且闪络

点也都大多发生与侧后区域。

经过试验得到在不同气流速度下有沙尘及无沙尘环境时复合绝缘子的闪络电压值见图6。并求得在有沙尘时相对于无沙尘时的闪络电压变化率。

$$\alpha = (U_0 - U_f)/U_0 \quad (2)$$

式(2)中: α 为闪络电压变化率; U_0 为无沙尘时复合绝缘子的闪络电压; U_f 为有沙尘时复合绝缘子的闪络电压。

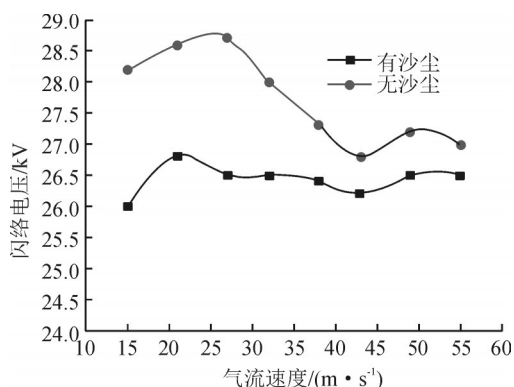


图6 风沙环境下复合绝缘子闪络电压变化

Fig. 6 The flashover voltage of insulator under sand environment

沙尘的引入使得复合绝缘子的闪络电压较无沙尘时降低,且随气流速度的增加沙尘对闪络电压的影响程度逐渐降低。气流速度为15 m/s时,沙尘使得复合绝缘子闪络电压较无沙尘时下降7.8%;气流速度为55 m/s时,闪络电压下降1.9%。有沙尘与无沙尘环境下复合绝缘子闪络电压随气流速度变化的曲线如图6所示。

对比图6有风无沙和有风有沙情况下复合绝缘子闪络电压的变化曲线可知,沙尘环境下,复合绝缘子的闪络电压仍随风速的增加先增大后减小,与无沙尘环境下复合绝缘子闪络电压的变化呈现相同的走势,但沙尘环境下复合绝缘子的闪络电压要比无沙尘时低。有沙尘时,由于气流速度的变化复合绝缘子闪络电压呈现出先增大后减小的趋势,其原因与上述气流速度对复合绝缘子闪络电压的影响相同。但是,风沙的引入使得复合绝缘子附近的电场发生了一定的畸变,使得复合绝缘子闪络电压较无沙尘时低。

2.2 沙尘流量对复合绝缘子闪络特性的影响

由上述风沙环境下复合绝缘子的闪络试验可知:沙尘的引入使得复合绝缘子的闪络特性发生了变化。为进一步探究沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响,试验中改变沙尘的流量,对复合绝缘子的

闪络电压进行测试。

为探究沙尘流量对复合绝缘子闪络电压的影响,对沙粒粒径为100 μm ,沙流量分别为50 mg/m^3 和100 mg/m^3 的2种情况下的复合绝缘子进行试验,测定在不同气流速度时复合绝缘子的闪络电压。当气流速度为27 m/s时试验复合绝缘子在22、24 kV、及闪络时的光子图像见图7。

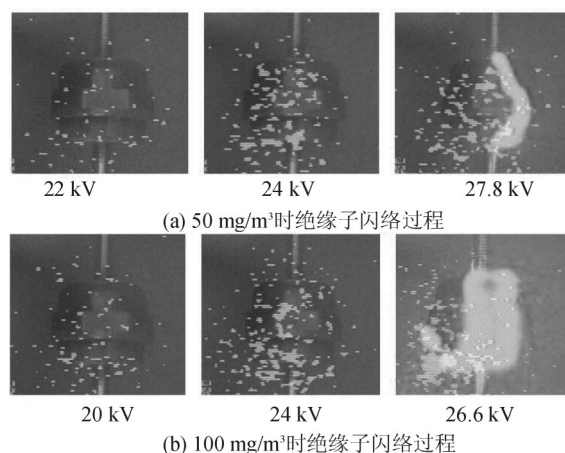


图7 不同沙流量时复合绝缘子闪络过程

Fig. 7 The process of insulator flashover under different sand flow

比较不同沙流量在气流速度27 m/s时复合绝缘子的闪络过程可看到,在相同电压时观测到100 mg/m^3 时,复合绝缘子周围空间的光子较50 mg/m^3 时多,且闪络电压下降了4.3%。当沙尘环境中,空气中的沙粒含量增大,导致空气的介电常数和电导率增大,使空气放电更容易发生,放电过程产生的大量电荷漂移到复合绝缘子表面后,使复合绝缘子表面电荷积聚,引发复合绝缘子闪络。同时,输沙量增加后,同一体积下沙粒与沙粒间,沙粒与复合绝缘子间接触碰撞的几率增大,发生电荷转移的几率也增大,使得复合绝缘子表面更容易积聚电荷,从而降低了复合绝缘子的闪络电压。

随气流速度的增加,50 mg/m^3 和100 mg/m^3 2种沙尘流量下复合绝缘子的闪络电压变化曲线见图8。在同一气流速度下,当沙粒粒径为100 μm 时,沙流量较小时复合绝缘子的闪络电压要高于沙流量较大时的闪络电压。沙尘流量的不同使得复合绝缘子空间电场畸变程度不同,沙尘流量较大时对电场影响更大,因此闪络电压较小。随气流速度的不断增大,沙尘通过畸变电场而影响闪络电压的程度将逐渐低于流场特性的影响,而使得在气流速度较高时不同沙尘流量的闪络电压差距较小。

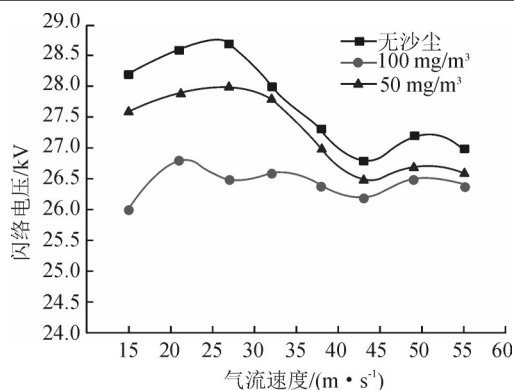


图8 沙流量对复合绝缘子闪络的影响

Fig. 8 The influence of sand flow on insulator flashover

3 结论

文中基于风洞试验系统探究高速气流环境中沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响,测定了高速气流沙尘状况下复合绝缘子的闪络电压,对比了在有沙尘与无沙尘时复合绝缘子的闪络电压,揭示了沙尘环境下复合绝缘子闪络电压的变化趋势,并得出如下结论:

1)在有沙尘的环境下,复合绝缘子的闪络电压仍随风速的增加先增大后减小,与无沙尘环境下复合绝缘子闪络电压的变化呈现相同的走势,但有沙尘时复合绝缘子的闪络电压要比无沙尘时低。

2)在同一气流速度下,当沙粒粒径为 100 μm 时,沙流量较小时复合绝缘子的闪络电压要高于沙流量较大时的闪络电压。随气流速度的不断增大,沙尘通过畸变电场而影响闪络电压的程度将逐渐低于流场特性的影响,从而使得在气流速度较高时不同沙尘流量的闪络电压差距较小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 潘新民,祝学范,黄智强,等. 新疆百里风区地形与大风的关系[J]. 气象, 2012, 38(2): 234-237.
PAN Xinmin, ZHU Xuefan, HUANG Zhiqiang, et al. The relation between the strong wind region along one hundred kilometer of railway and the topography in xinjiang[J]. Meteorological Monthly. 2012, 38(2): 234-237.
- [3] 赵兴有,胡汝骥. 哈密盆地风蚀地貌及其旅游价值[J]. 干

旱区地理, 2002, 25(3): 252-255.

ZHAO Xingyou, HU Ruji. Tourism value of wind-erosion landform in Hami basin[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(3): 252-255.

- [4] 赵珊鹏. 沙尘环境下接触网绝缘子电场分布的仿真研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
ZHAO Shanpeng. Research on electric field distribution along catenary insulator in sand - dust environment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [5] 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.
- [6] 司马文霞,程浩,杨庆,等. 沙尘环境下绝缘子交流闪络特性及机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 834-840.
SIMA Wenxia, CHENG Hao, YANG Qing, et al. AC flash-over performance and mechanism of insulator in wind sand environment[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 834-840.
- [7] 张友朋,赵珊鹏,陈志东,等. 悬浮沙粒对棒形绝缘子电位和电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2706-2723.
ZHANG Youpeng, ZHAO Shanpeng, CHEN Zhidong, et al. Influence of suspended sand particles on potential and electric field distribution along long rod insulator[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2706-2723.
- [8] 袁婕. 西北电网 750 kV 输变电工程通过论证并立项[J]. 电工技术杂志, 2001(8): 64.
YUAN Jie. The northwest power grid 750 kV power transmission and transformation project through the demonstration project[J]. Electro-technical Journal, 2001(8): 64.
- [9] SIMA W X, YANG Q, MA G Q. Experiments and analysis of sand dust flashover of the flat plate model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 571-580.
- [10] 司马文霞,吴亮,杨庆. 沙尘对电力系统外绝缘电气特性影响分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 16-20.
SIMA Wenxia, WU Liang, YANG Qing. Effect of sand dust environment on external insulation of electrical power system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 16-20.
- [11] 司马文霞,杨庆,吴亮,等. 平板模型沿面工频沙尘闪络特性的试验研究及放电机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 6-13.
SIMA Wenxia, YANG Qing, WU Liang, et al. Experiment research and mechanism analysis on the sand dust flashover of flat plate model under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 6-13.
- [12] HAMZA A S, BDELGAWAD N M, ARAFA B A. Effect of

- desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(17):2437-2442.
- [13] KARADY G. The effect of fog parameters on the testing of artificially contaminated insulators in a fog chamber[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, PAS-94(2):378-387.
- [14] NAITO K, KAWAGUCHI T, ITO M, et al. Influence of fog parameters on withstand voltage of contaminated insulators[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, PAS-102(3):729-736.
- [15] ISHII M, AKBAR M, KAWAMURA T. Effect of ambient temperature on the performance of contamination DC insulators[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1984, EI-19(2):129-134.
- [16] 郑晓静, 黄宁, 周又和. 风沙运动的沙粒带电机制及其影响的研究进展[J]. *力学进展*, 2004, 34(1):77-86.
ZHENG Xiaojing, HUANG Ning, ZOU Youhe. The effects on the sand charged mechanism of sand movement[J]. *Mechanical Progress*, 2001, 34(1):77-86.
- [17] 屈建军, 言穆弘, 董光荣. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. *中国科学*, 2003, 33(6):593-601.
QU Jianjun, YAN Muhong, DONG Guangrong. Research on the wind tunnel experiment of sandstorm electrification[J]. *Chinese Science*, 2003, 33(6):593-601.
- [18] 李芳, 屈建军. 风沙电研究的现状及展望[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(4):572-575.
LI Fang, QU Jianjun. The status quo and the prospect of the electrification of wind-blown sands[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 17(4):572-575.
- [19] 屈建军, 俎瑞平. 扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5):534-538.
QU Jianjun, ZU Ruiping. The tunnel simulation experiment of blowing sand and sandstorms' impact on wire potential[J]. *Chinese Desert*, 2004, 24(5):534-538.
- [20] 吴亮. 沙尘环境下空气间隙和平板模型沿面放电特性的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
WU Liang. Study on model discharge characteristics of flat and air gap under sand dust environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [21] 胡文文. 风沙流中沙粒带电机理及荷质比研究[D]. 兰州:兰州大学, 2012.
HU Wenwen. A study on charging mechanism of sand grains and charge-to-mass ratio in wind-blown saltation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [22] 贺博, 张刚, 陈邦发, 等. 沙尘环境对板—板电极气隙放电特性影响的模拟试验研究[J]. *中国科学*, 2010, 40(3):296-302.
HE Bo, ZHANG Gang, CHEN Bangfa, et al. Research on the influence of airgap discharge characteristics on plane-plane electrode[J]. *Chinese Science*, 2010, 40(3):296-302.
- [23] 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.

曹桂(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事过电压与绝缘配合方面的研究。

曹保江(1970—), 男, 硕士, 副教授, 硕导, 主要从事高电压与绝缘技术及电气化铁路方面的教学和研究。

吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高电压与绝缘技术及电气化铁路方面的教学和研究。

(上接第163页)

- ratus, 2010, 46(7):100-104.
- [20] 牛海清, 周鑫, 王晓兵, 等. 外皮温度监测的单芯电缆暂态温度计算与试验[J]. *高电压技术*, 2009, 35(9):2138-2143.
NIU Haiqing, ZHOU Xin, WANG Xiaobing, et al. Calculation and experiment of transient temperatures of single-core cables on jacket temperature monitoring[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(9):2138-2143.
- [21] 刘刚, 雷成华. 提高单芯电缆短时负荷电流的试验分析[J]. *高电压技术*, 2011, 37(5):1288-1293.
LIU Gang, LEI Chenghua. Experimental analysis on increasing temporary ampacity of single-core cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(5):1288-1293.
- [22] DIAZ A M, DE L F, JAZEBI S, et al. Ladder-type soil model for dynamic thermal rating of underground power cables[J]. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2014, 1(12):21-30.
- [23] MALMEDAL K, BATES C, CAIN D. On the use of the law of times in calculating soil thermal stability and underground cable ampacity[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(2):1215-1220.
- [24] MAXIMOV S, VENEGAS V, GUARDADO J L, et al. Analysis of underground cable ampacity considering non-uniform soil temperature distributions[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 132(11):22-29.

傅晨钊(1975—), 男, 工学博士, 高工, 主要从事电力设备运行技术研究。