

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.10.020

用盐雾法研究复合绝缘子污秽闪络特性

高磊¹, 蔡志远¹, 马少华¹, 胡大伟², 冯尧¹, 周思宇¹

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006)

摘要: 针对空气污染导致雾水电导率增大, 复合绝缘子污闪概率也随之增加这一情况, 提出了用盐雾法研究复合绝缘子污秽闪络特性。在人工雾霾模拟实验箱内, 通过控制雾水电导率和雾水含量, 用均匀升压法对蒸汽雾生成到消散两个阶段对绝缘子进行大量试验, 记录闪络电压, 并用高速摄像机观察闪络路径。结果表明: 空气中雾水含量低时, 雾水电导率对绝缘子闪络电压作用不明显; 随着雾水含量增加, 增大雾水电导率对绝缘子闪络电压作用明显。且干净复合绝缘子在其注塑痕迹处发生起弧和闪络的概率较高, 而对于染污绝缘子该痕迹对闪络影响不大。

关键词: 雾水电导率; 复合绝缘子; 盐雾法; 闪络路径

Study on Pollution Flashover Characteristics of Composite Insulators by Salt Fog Method

GAO Lei¹, CAI Zhiyuan¹, MA Shaohua¹, HU Dawei², FENG Yao¹, ZHOU Siyu¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China)

Abstract: In view of the air pollution causes the fog water conductivity to increase, the pollution flashover probability of composite insulators is also increased. Put forward salt fog method to study composite insulator pollution flashover characteristics. In the artificial fog and haze simulation experiment box, through controlling the fog water conductivity and fog water content, and using uniform boosting method, a large number of tests are carried out on the insulator by two steps of vapor mist generation and dissipation, meanwhile flashover voltage are recorded and the flashover path is observed by using high speed video camera. The results show that when the fog water content is low in the air, the fog water conductivity has no obvious effect on the insulator flashover voltage. With the fog water content increased, the effect of fog water conductivity on insulator flashover voltage is obvious and the clean composite insulator has a higher probability of arcing and flashover at its injection marks, and it has little effect on the polluted insulator.

Key words: fog water conductivity; composite insulator; salt fog method; flashover path

0 引言

复合绝缘子因其具有耐污性能好、重量轻等优点, 在国内外输变电路中广泛应用, 相关人员使用复合绝缘子的经验也越来越丰富^[1]。但是当复合绝缘子在污湿环境中, 表面不断积污受潮时, 其发生闪络的概率会大大增加。

文[2]中所述, 海南地区污秽程度不重, 每年都会发生污秽闪络事故且近年来闪络事故呈增多趋势。通过调查发现所有污闪事故均发生在离海 25 km 范围内, 其中超过 70% 发生在离海 10 km 范围内。

故推测绝缘子闪络与海水盐度有关。而海水盐度直接影响了海边周围雾水的电导率。

工业的生产和经济发展等人类活动造成的环境恶化不断加重, 内陆城市大气污染物浓度整体呈上升趋势, 绝缘子表面积污态势也愈加严峻^[3]。同时, 外加东北冬季供暖及秸秆燃烧等作用, 空气污染程度会在短时间内加重^[4]。严重污染的空气遇到大雾等潮湿天气时, 不但会使雾水电导率急剧增加, 同时也会造成输电线路绝缘子快速染污受潮, 从而增加了绝缘子闪络的风险。

文[5]指出, 在雾霾天气条件下, 雾水电导率是

影响绝缘子闪络的主要因素^[5]。雾水电导率一定时,雾霾成分对污闪电压影响并不大^[6]。

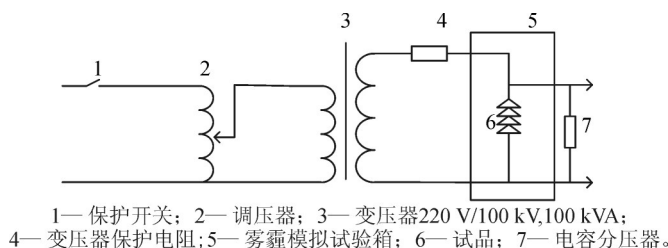
同时,文[7]提出输变电路中的绝缘子发生的“不明闪络”多在夜间7点到次日凌晨6点间。而此时正是有雾水产生,空气湿度增大的阶段。

综上所述,研究雾水及雾水电导率对绝缘子闪络特性的影响是极其有必要且刻不容缓的。文中通过在雾霾模拟试验箱中模拟从雾的生成直至消散的整个过程来研究复合绝缘子的闪络特性。研究结果可为输电线路绝缘子运行及维护提供参考。

1 实验试品、实验装置及实验方法

1.1 试验设备及实验试品

工频闪络原理图及实验布置见图1。实验平台是由调压器、升压变压器、变压器保护电阻、雾霾模拟试验箱和电容分压器构成。试验电源满足GB/T 4584—2004的规定。



(a) 实验原理图



(b) 试验平台

图1 试验原理及实验平台

Fig. 1 Experimental principle and experimental platform

雾霾模拟试验箱是1.5 m×1.5 m×2 m的玻璃箱体,符合所需的绝缘要求^[8],且自带喷雾系统和喷雾系统。涉及到的绝缘子采用同一生成批号的FXBW4-10/70棒形悬式复合绝缘子。

1.2 试验方法

根据国标GB 10125—1997所述的盐雾法进行试验。可溶盐采用NaCl,利用精度为0.001 g的电子天平和精度为1 mL的量杯依据国标GB 10125—1997中的盐雾法分别配置了盐度为7、14、28、56 kg/cm³的溶液,所对应20℃时的电导率分别为1.15、2.2、4.1、7.7 S/m。加压方式采用文[8]所述的均匀升压法。

蒸汽雾的生成过程和控制湿度的控制方法参见文[9]。文中实验从蒸汽雾生成到消散的两个阶段对绝缘子进行了大量试验。每种盐雾下采用10支绝缘子,每支绝缘子闪络3次,且这3次闪络时间间隔不宜过长,间隔为3~5 min^[10]。

2 试验结果

利用高速摄像机拍摄有雾情况下复合绝缘子的闪络过程见图2。

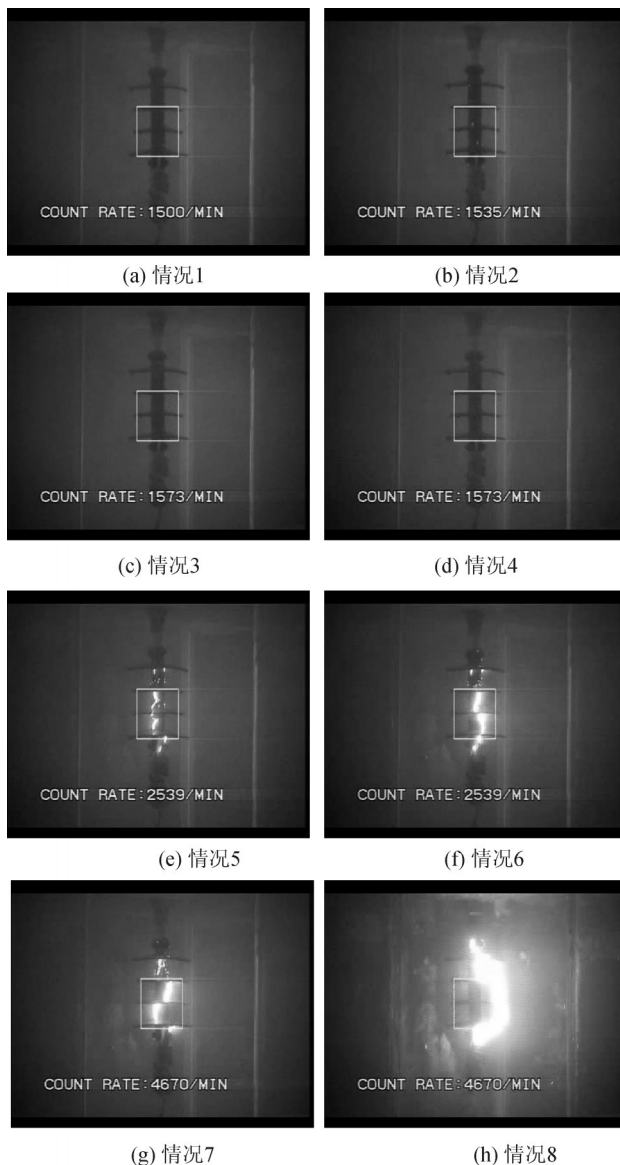


图2 高速摄像成像图

Fig. 2 High speed imaging

在空间有雾的情况下,随着试验电压逐渐增加,会在绝缘子表面的某个部位出现微弱的电晕点,有的电晕点会很快熄灭同时又在另一处产生新的电晕点。此电晕起始电压值要比雾消散后电晕起始电压低很多。当试验电压继续上升,绝缘子表面出现电弧,单条电弧间歇性的出现,当电压达到

一定值后,多条电弧同时出现且伴有“啪啪”的爆破声响。随着电压再次升高到某一值,较粗且亮的电弧贯穿绝缘子两极导致闪络。

雾霾箱内雾水消散后,对绝缘子加压,分别会有以下几种情况出现:①绝缘子闪络过程与有雾情况下基本相同;②绝缘子出现电晕起始点,随之产生电弧,随着电压的继续升高,迅速的在绝缘子上下两极最外侧的两伞叶空气间发生空间放电,放电后所有电弧瞬间消失;③随着电压的逐渐上升,有肉眼观察不到电晕放电和电弧的形成,直到电压达到某一值,会在绝缘子两极间快速的发生空间放电并伴有一声清脆的“啪”声。

不同湿度,不同雾水电导率下的人工污秽闪络电压值见表1、2,闪络电压分布见图3。在雾水消散后和湿度为40%(RH)和70%(RH)两种情况下,雾水电导率从1.15 S/m增加至7.7 S/m时,绝缘子交流击穿电压分别降低了14.91%、17.72%、25.03%。由此可见,在空间湿度较大时,雾水电导率对绝缘子闪络电压作用更明显。从图3可以更好的看出其分布趋势。

表1 不同积污条件下闪络路径分布

Table 1 The distribution of flashover path under different pollution conditions

名称	数值
20℃时的雾水电导率/(S·m ⁻¹)	1.15 2.2 4.1 7.7
空间击穿次	有雾时 9/30 7/30 6/30 3/30
数/实验次数	雾消散后 18/30 15/30 13/30 8/30

表2 不同积污条件下闪络电压平均值

Table 2 Average flashover voltage under different pollution conditions

名称	数值
20℃时的雾水电导率/(S·m ⁻¹)	1.15 2.20 4.10 7.70
闪络电压平	有雾时(70%(RH)) 72.58 62.95 58.41 54.41
均值/kV	有雾时(40%(RH)) 76.79 70.53 67.73 63.18
	雾消散后 81.89 74.79 72.12 69.68

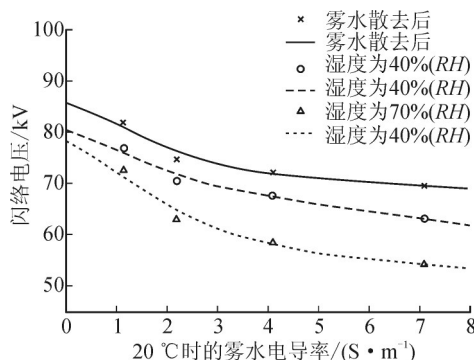


图3 人工试验绝缘子闪络电压分布

Fig. 3 Flashover voltage distribution of artificial test insulator

绝缘子表面注塑痕迹见图4。实验中发现,清洁绝缘子表面积有雾水后,很容易在图4所示的绝

缘子人工注塑时留下的痕迹处起弧,甚至发生闪络。

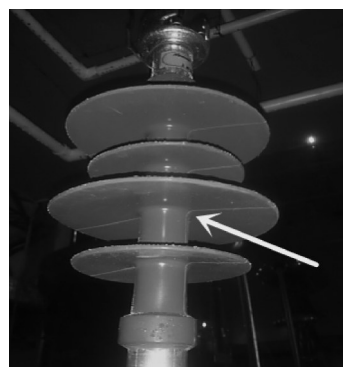


图4 绝缘子表面注塑痕迹

Fig. 4 Injection marks on the surface of insulator

从图4中可见,该痕迹连通绝缘子两极。实验中在此处起弧的概率为46.7%,发生闪络的概率为30%。而拿表面沉积有污秽的绝缘子做实验时,发生这种现象的概率明显降低。

3 试验结果分析

3.1 复合绝缘子表面雾滴对其闪络的影响

3.1.1 雾滴对绝缘子伞叶表面的影响

通过对绝缘子建模,用有限元软件分别对绝缘子上表面有无雾滴的情况进行了仿真,其结果见图5。

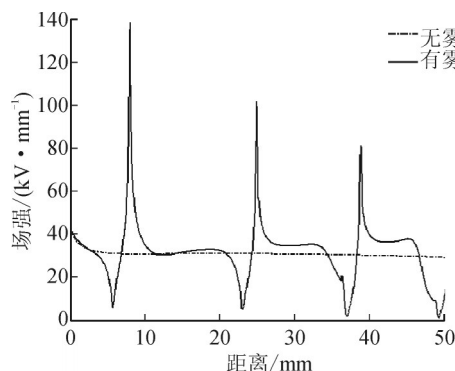


图5 绝缘子表面电场仿真

Fig. 5 Simulation of electric field on insulator surface

在电场的作用下,液滴层可能由极化作用引起电荷的堆积,影响了表面电场的畸变^[11]。水—空气—硅橡胶三重连接点处电场增强最明显。文[12]通过计算也发现了这一特点。表面雾滴在电场作用下积聚成较大液滴,表面液滴严重的畸变了绝缘子表面电场分布,使水滴周围首先发生电晕放电。通过计算可以发现这一现象与液滴相对介电常数远高于空气介电常数有关^[13]。

3.1.2 雾滴对绝缘子注塑痕迹的影响

通过以上分析可知,绝缘子在其注塑痕迹处发生起弧和闪络的概率较高。经过建模仿真得出计

算结果见图6。

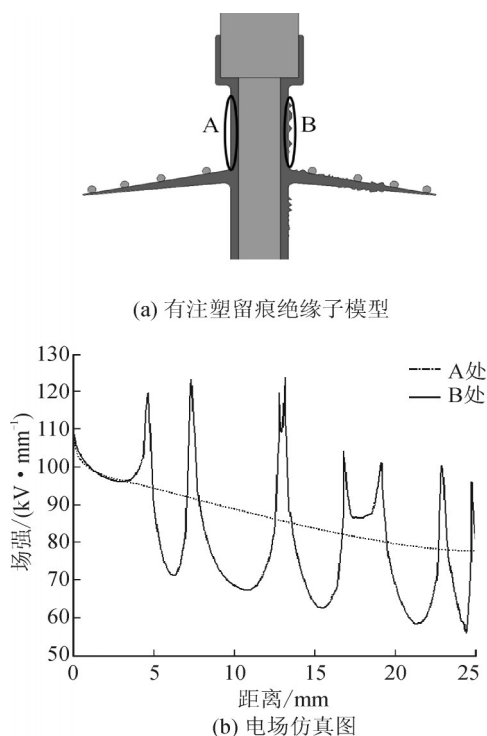


图6 绝缘子表面有注塑痕迹时仿真

Fig. 6 Simulation of the injection marks on the surface of the insulator

注塑痕迹处表面凹凸不平,使其附近的电场有所畸变。外加在有雾水情况下,对电场畸变更加严重,使电晕放电首先在此处发生。而对表面积有污秽成分的绝缘子进行试验,该痕迹对绝缘子闪络影响不大。可能是污秽对该处构成了遮挡或分布不均匀改变了绝缘子表面电场分布。

3.2 空间雾水对绝缘子闪络的影响

通过图3和表2可以得出,雾水含量越大,增大雾水电导率对绝缘子闪络电压作用越明显。主要是因为空气中雾水含量增多,此时不仅是绝缘子表面的闪络,同时也有空间中气雾混合体的放电。空气中的水分子和具有高电导率的雾滴影响了空间的碰撞电离特性。雾滴吸附空间的电子,从而畸变了空间电荷分布^[14]。改变了放电通道复介电常数,使绝缘子周围最大场强得到明显增强^[15],而降低了其两极间隙的击穿电压。

同时要考虑雾滴表面场致发射和光电发射过程^[16-17]。空气湿度越大,空间雾滴相对而言就越大。雾滴表面的场致发射和光电发射所需的能量(即逸出功)仅需6.1 eV^[18],远小于水分子电离能12.59 eV^[11]。相比空气而言,从雾滴表面获得电子更容易。所以有学者认为雾滴可能是流柱发展的重要电子来源^[16-19]。

以上就是跨越伞裙间产生电弧和绝缘子发生

空间击穿的原因。

3.3 雾水消散后对绝缘子闪络的影响

待雾水消散后,对绝缘子进行加压试验。闪络电压显著升高。同时发生空间击穿的概率也明显上升。

长时间处于雾水中的复合绝缘子憎水性会短时间消失。雾散去后其憎水性得以恢复,上表面分离的小水滴会畸变其表面电场,出现间歇性小电弧,使其周围局部憎水性丧失,场强进一步加强从而发生闪络^[20]。分离水珠的存在,使硅橡胶表面放电速度非常快^[21],且可能是发生“不明闪络”的原因^[7]。

观察发生空间击穿的绝缘子,其下表面所积雾水大部分被蒸干。“不明闪络”也可能是在电压升高到某一值时,空气的绝缘强度低于绝缘子,击穿先在空间发生。

4 结论

1)空气中雾水含量低时,雾水电导率对绝缘子闪络电压作用不明显;随着雾水含量增加,增大雾水电导率对绝缘子闪络电压作用明显。

2)干净复合绝缘子在其注塑痕迹处发生起弧和闪络的概率较高。而对表面积有污秽成分的绝缘子进行试验,该痕迹对绝缘子闪络影响不大。可能是污秽对该处构成了遮挡或分布不均匀改变了绝缘子表面电场分布。

3)雾水消散后绝缘子发生空间击穿的概率升高,是其表面分离的液滴和上下表面液滴分布不均匀造成的。

参考文献:

- [1] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-7.
LIU Zehong, Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in Cllina[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7.
- [2] 王昱晴, 宋思奇, 罗亚运, 等. 涂污绝缘子在盐雾环境下的交流闪络特性研究[J]. 电磁避雷器, 2015(5): 11-15.
WANG Yuqing, SONG Siqi, LUO Yayun, et al. Experiment research on AC flashover performance of smearing insulator under sea-salt pollution[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(5): 11-15.
- [3] 王彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322-2328.
WANG Bin, LIANG Xidong, ZHANG Yibo, et al. Natural pollution test of composite and porcelain insulators under

- AC and DC stress [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (9):2322-2328.
- [4] 王红磊. 南京市大气气溶胶理化特征观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- WANG Honglei. Observation study of the aerosol's characteristics in the city of Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
- [5] 宿志一. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2284-2290.
- SU Zhiyi. Influences of fog-haze on external insulation of transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2284-2290.
- [6] 王铭民, 周志成, 王凯林, 等. 高电导率雾对染污瓷绝缘子闪络特性的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(1):30-35.
- WANG Mingmin, ZHOU Zhicheng, WANG Kailin, et al. Analysis on flashover performance of polluted porcelain insulators in high conductivity fog environment[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1):30-35.
- [7] 肖 猛, 文 曹, 司马文霞, 等. 硅橡胶表面的分离水珠放电与不明原因闪[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(6):42-46.
- XIAO Meng, WEN Cao, SIMA Wenxia, et al. Discharges between discrete water drops on the silicone rubber surface and reason unknown flashover[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(6):42-46.
- [8] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006:216-219.
- GUAN Zhicheng. Insulators and power transmission equipment insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 216-219.
- [9] 王黎明, 刘 动, 陈凤林, 等. 雾霾模拟方法及其装置研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3297-3304.
- WANG Liming, LIU Dong, CHEN Fenglin, et al. Simulation method and testing apparatus of fog-haze[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3297-3304.
- [10] 蔡 炜, 张 军, 刘毅军, 等. 复合绝缘子人工污秽试验方法比较[J]. 高电压技术, 2003, 29(5):53-54.
- CAI Wei, ZHANG Jun, LIU Yijun, et al. Artificial pollution test methods of composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(5):53-54.
- [11] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983:359-361.
- YANG Jinji. Air discharge[M]. Beijing: Science Press, 1983: 359-361.
- [12] LOPES I J. A study of partial discharges from water droplets on a silicone rubber insulating surface[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 262-268.
- [13] 杨长河, 李 劲, 瞿晶晶, 等. 偶极子模型计算混合电局部场强的误差分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(10):3-5.
- YANG Changhe, LI Jin, QU Jingjing, et al. Error analyses in the calculations of the local electric field strengths in a mixture by the dipole approximation[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10):3-5.
- [14] 董冰冰. 雾对短空气间隙与绝缘子交流放电特性影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014:25-26.
- DONG Bingbing. Study on effect of fog on discharge performance of short air gaps and insulators[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014:25-26.
- [15] 杨长河. 气水混合两相体放电现象及机制的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005:13-15.
- YANG Changhe. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005:13-15.
- [16] BABAEVA N Y, KUSHNER M J. Streamer branching: the role of inhomogeneities and bubbles[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4):892-893.
- [17] BABAEVA N Y, KUSHNER M J. Effect of inhomogeneities on streamer propagation I: Intersection with isolated bubbles and particles[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2009, 18(3):1-15.
- [18] GRIGOR'EV A I, SHIRY'AEVA S O. The mechanism of corona discharge from a water droplet[J]. Journal of Engineering Physics, 1991, 60(4):481-488.
- [19] 邓鹤鸣. 水滴大小对放电开始和发展过程的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28):120-125.
- DENG Heming. Influence of water droplet sizes on the initiation and growth of discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28):481-488.
- [20] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠放电特性的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(2):7-9.
- SIMA Wenxia, LIU Zhenyao, JIANG Xingliang et al. Study of discharge characteristics of discrete water drops on the silicone rubber surface[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2):7-9.
- [21] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006:270-271.
- GUAN Zhicheng. Insulators and power transmission equipment insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 270-271.

高 磊(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压与绝缘技术。