不同污秽浓度下10 kV氧化锌避雷器联合加压试验研究

杨 毅，胡 军，梁 振

（长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410004）

摘要：为检验10 kV带串联间隙氧化锌避雷器工频续流遮断能力以及不同污秽浓度下避雷器的污秽性能，通过一种冲击试验与工频续流试验相结合的一体化联合加压试验装置对其进行试验，并采用PSCAD软件进行仿真分析。结果表明：试验所得结果与仿真结果基本相符，验证了避雷器的工频续流遮断能力；污秽对避雷器的工频续流有较大影响，随着避雷器表面污秽浓度的不断增加，工频续流持续时间不断增加，并逐渐达到饱和（6.3 ms），当污秽浓度进一步增加时，工频电弧出现无法熄弧的情况；并且随着污秽浓度的不断增加，工频续流电流幅值不断增加，且上升趋势不断增加。

关键词：联合加压试验装置；工频续流；污秽浓度；电流幅值

Experimental study on combined pressurization of 10 kV zinc oxide surge arrester under different contaminant concentrations

YANG Yi, HU Jun, LIANG Zhen

（School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to test the freewheeling interruption capacity of the 10 kV series gap zinc oxide surge arrester and the pollution performance of the arrester under different pollution concentrations, the test is conducted through an integrated joint pressure test device combined with an impact test and a power frequency freewheeling test, and uses PSCAD software for simulation analysis. The results show that the test results are basically consistent with the simulation results, verifying the power frequency freewheeling interruption capability of the arrester; the pollution has a greater impact on the freewheeling current of the lightning arrester, and the freewheeling current increases with the increase of the pollution concentration on the surface of the arrester. The continuous increase in duration, and gradually reach saturation (6.3ms), when the pollution concentration further increases, the power frequency arc will not be able to extinguish the arc; and as the concentration of pollution increases, the amplitude of the freewheeling current increases continuously. And the rising trend continues to increase.

Key words: joint pressure test device; freewheeling of power frequency; pollution concentration; current amplitude

0 引言

10 kV输配电线路是输配电网的重要组成部分[1]，在雷电、冰雪多发季节，往往因雷电灾害、冰雪事故引起配电线路上设备的损坏，如绝缘子击穿或炸裂、避雷器炸裂损坏等[2]。要使输电线路安全可靠地运行，必须提高线路的防雷、防冰能

力。为降低线路雷害、冰害事故，各种防雷防冰装置得到了飞速发展，如带串联间隙的避雷器、防冰闪型复合绝缘子等已广泛使用[1-8]。

当前国内外对带间隙防雷装置开展的研究主要集中在该类装置与绝缘子的绝缘配合[9-10]、工频大电流下间隙的导弧性能以及利用高速气流吹断间隙电弧等方面[11]，在带间隙防雷装置熄灭工频电弧的能力以及电弧熄灭后在恢复电压作用下重新燃弧的可能性等方面的研究还需深入[12]。国内实验室常常用冲击电压发生器来模拟雷电冲击过电压，但只能提供高电压等级的冲击电压[13-14]；而工频电源通常采用工频振荡回路，该类回路常用于断路器开断试验中大电流开断性能的测试，现有试验设备因受到容量限制而无法作为能同时产生高电压与大电流的工频电源[15]，输出的电压幅值极低，不能满足线路避雷器、绝缘子在雷击动作后工频续流遮断能力测试的要求[16]，且与冲击电源的配合存在一定的问题。

本文对10 kV带串联间隙氧化锌避雷器采用一种冲击与工频相结合的一体化联合加压试验装置进行试验，来检验带外间隙的避雷器在雷电冲击作用下其间隙发生闪络后避雷器熄灭工频续流电弧的能力。同时，针对氧化锌避雷器绝缘外套表面的不同污秽情况对其进行联合加压试验，验证了该新型氧化锌避雷器的污秽性能。

1 试品、试验装置

试品为10 kV带串联间隙氧化锌避雷器，图示避雷器是一种将绝缘子与避雷器相结合，且同时具有防雷、防冰两种功能的新型结构，多用于湖南山区多雷多冰区域。剖面结构如图1所示，图示为板式避雷器，其上半段电极为盘状结构。避雷器分为避雷段和绝缘段两部分，间隙安装于绝缘段两端，避雷段中安装有氧化锌电阻片。

该试验研究在湖南省防灾减灾国家重点实验室高压大厅中进行。其接线原理如图2所示，冲击电压由400 kV/40 kJ的冲击电压发生器产生，可以输出波前/波尾时间为2.5/50 μs的雷电压波形；工频电压由10 kV试验变压器产生。图2中，R_1为试验变压器输出端保护电阻；R_{T1}为试验变压器输出端保护避雷器；S_2为试验变压器输出端保护间隙；L与R_2为工频与冲击之间的隔离阻抗；S_1与R_{T2}分别为冲击电压电源与工频电源之间的隔离间隙与隔离避雷器。分压器1用来测量试品两端电压，分压器2可以同时作为调波电容使用。试验现场接线如图3所示。

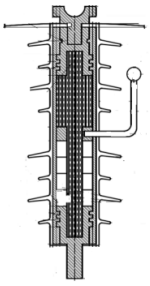


图1 10 kV氧化锌避雷器剖面结构

Fig.1 10 kV zinc oxide arrester profile

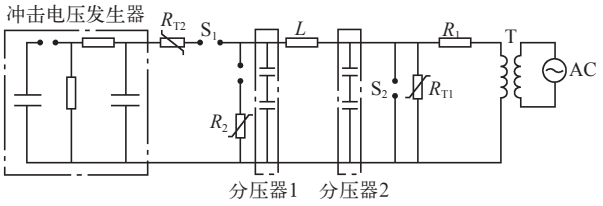


图2 联合加压试验装置接线原理

Fig.2 Wiring schematic diagram of joint pressure test device

图3 联合加压试验装置现场接线

Fig.3 Field wiring diagram of joint pressurization test device

2 仿真分析

根据图2的标准试验电路在PSCAD软件中搭建仿真电路，如图4所示，根据仿真结果确定了试验装置的对应参数。结合电路仿真对工频续流的两个主要过程分析如下。

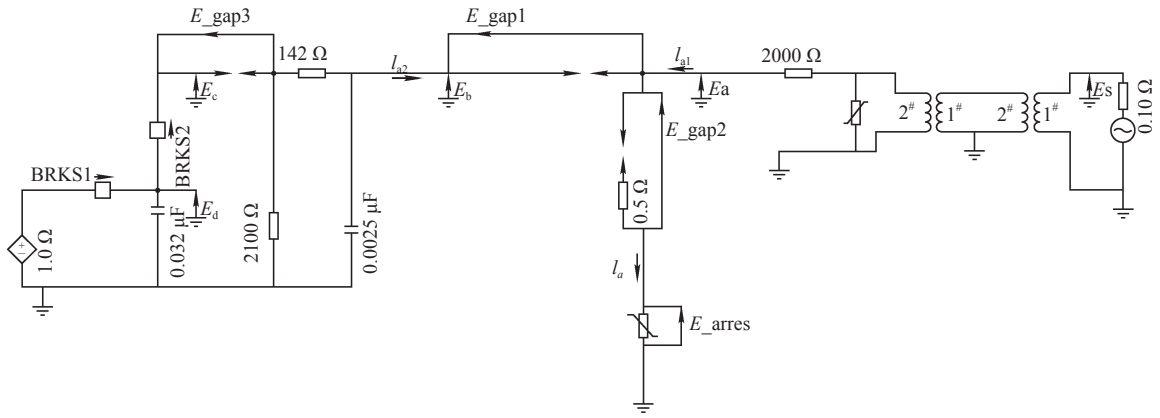


图4 联合加压试验仿真模型

Fig.4 Joint pressurization test simulation model

2.1 冲击放电

冲击放电过程如图5所示。由触发信号控制冲击电压发生器放电，冲击间隙1和试品间隙2击穿；由于冲击电压的幅值很高，因此氧化锌电阻片动作；冲击电流流向试品以及工频端。

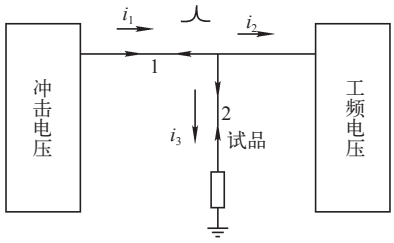
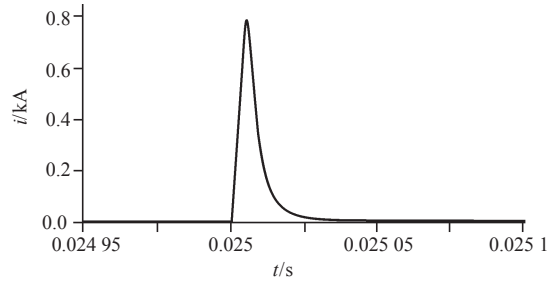


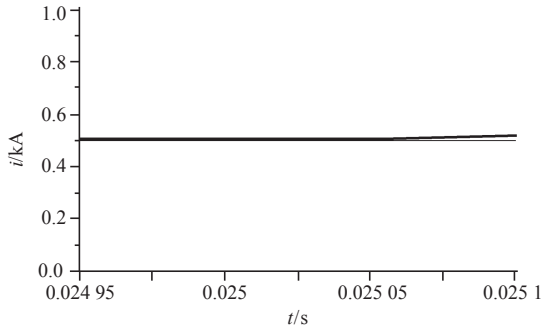
图5 冲击放电过程

Fig.5 Shock discharge process

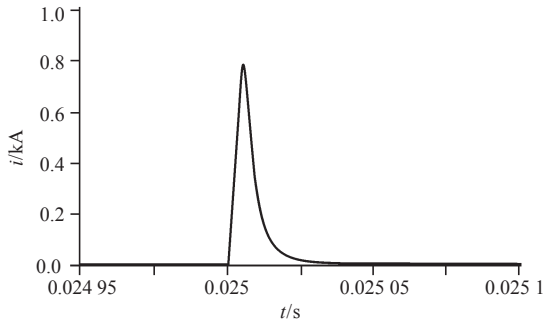
仿真得到的各个方向上的电压电流波形如图6所示。在冲击放电阶段，由冲击电压发生器流向试品与工频电压，其中试品上的冲击电流基本由冲击电压源提供，本文的仿真中，冲击电流幅值为0.8 kA（由试品决定），由于工频电压源中冲击保护元件（电感、避雷器）的存在，冲击放电阶段流向工频电源的冲击电流很小。



（a）冲击端电流



（b）工频端电流



（c）试品上电流

图6 冲击放电过程中各模块电流

Fig.6 Current of each module during the impulse discharge

2.2 工频续流

工频续流阶段放电过程示意图如图7所示。冲击端放电完毕后，冲击间隙1灭弧，间隙2电弧在工频电压的作用下继续燃烧；工频电压作用于试品上，此时氧化锌电阻片不动作；工频电流从工频电源流向试品。

工频续流阶段，冲击端电流为0，电流由工频端流向试品端。其电流波形如图8所示。由图8可

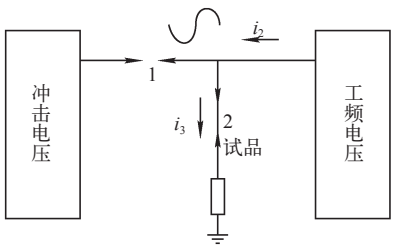
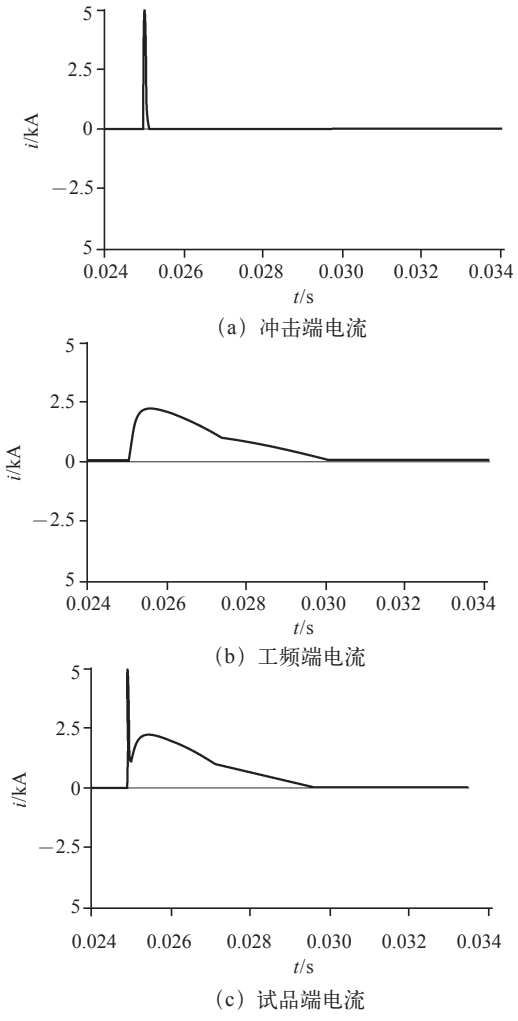


图7 工频续流过程

Fig.7 Freewheeling process

知，冲击电压衰减过后，冲击端间隙熄灭，冲击端电流衰减为0，但此时试品上的间隙仍未熄灭，由工频电压源向试品中注入工频电流。当工频电流自然过零时，试品两端的间隙熄灭，试品两端的工频电流为0，工频电源两端的电流也归零。



（a）冲击端电流

（b）工频端电流

（c）试品端电流

图8 工频续流过程中各阶段电流

Fig.8 Current in each stage of the power frequency freewheeling process

3 试验步骤

在进行试验之前，首先将氧化锌避雷器清洗干净，去除表面的污秽，并晾干。在试验前对试品避雷器采用固体涂层法中的定量涂刷法进行人工染污[17]。通过计算得到染污所需氯化钠、高岭土的量，对避雷器进行人工染污，在染污的过程中做到涂刷均匀、严谨，然后晾干等待试验。涂污后的氧化锌避雷器如图9示，将试品连接于试验电路中等待试验。

图9 涂污避雷器

Fig.9 Smear arrester

试验过程中，首先将工频试验变压器两端电压升压至避雷器直流1 mA额定电压。对冲击电压发生器充电，选择预期的触发相位，触发冲击电压发生器放电导通，通过示波器测量试品两端电压与流过试品的电流波形。试验完成后，确认已断开电源，放电，挂接地线；直至将氧化锌避雷器的闪络试验做完，拆除接线，恢复现场。

4 试验结果及分析

4.1 试验结果

在正极性情况下，当避雷器表面污秽浓度为0.2 mg/cm^2，施加工频电压14.2 kV，冲击电压为50 kV，触发相位选择65°时，用示波器记录下流过试品的电流与试品两端电压波形分别如图10、图11所示。图12为避雷器表面污秽浓度为0.2 mg/cm^{2}时进行联合加压试验所拍得的避雷器闪络路径图片。

为定量研究污秽浓度与工频续流时间、电流

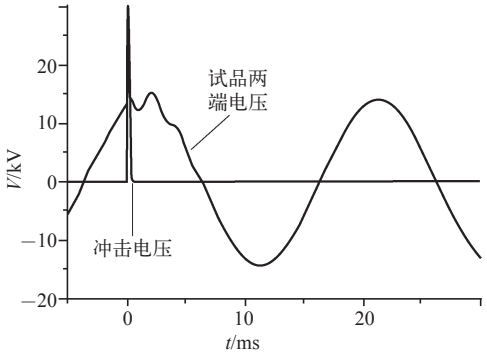


图10 流过试品的电压波形

Fig.10 Voltage waveforms flowing through the sample

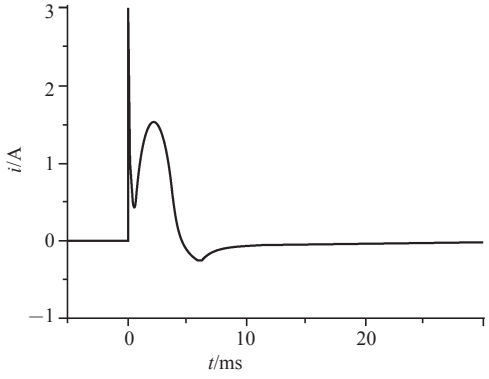


图11 流过试品的电流波形

Fig.11 Current waveform flowing through the sample

图12 避雷器闪络路径图

Fig.12 Arrester flashover path

幅值之间的关系，设定外加工频电压为15 kV，冲击电压为50 kV，在正极性情况下，以避雷器表面的污秽浓度为变量进行试验，根据试验结果得到工频续流电流幅值和工频续流持续时间与避雷器表面污秽浓度的变化关系，如图13、图14所示。

4.2 试验结果分析

1）从图8、图11可以看出，试验所得波形与

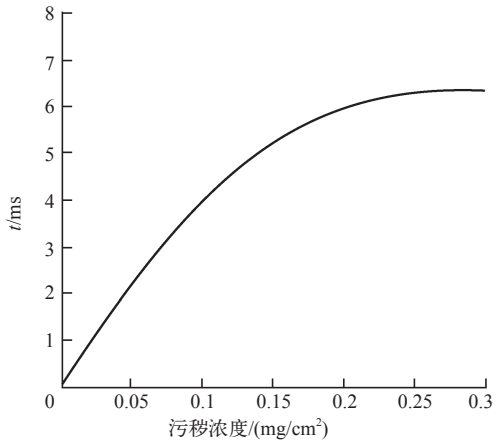


图13 工频续流持续时间与污秽浓度的变化关系

Fig.13 Relationship between duration of freewheeling of power frequency and pollution concentration

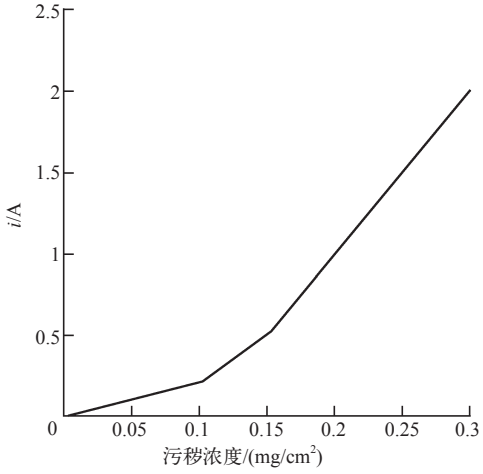


图14 工频续流电流幅值与污秽浓度的变化关系

Fig.14 Relationship between the amplitude of the freewheeling current and the the pollution concentration

仿真所得波形基本相符，验证了联合加压试验装置的合理性。

2）从仿真结果图8c、试验结果图11可以看出，此氧化锌避雷器具有良好的工频续流遮断能力。

3）从图12可以看出，氧化锌避雷器间隙段首先击穿，间隙段的击穿电压小于避雷器表面的击穿电压，为保证不发生沿面闪络的情况，避雷器防雷段的爬电距离应不小于相同电压等级的避雷器爬电距离。

4）从图13中可以看出，在清洁状态下不存在工频续流，持续时间为0。随着污秽浓度的不断增

加，工频续流持续时间不断增加，并逐渐达到饱和（6.3 ms）。当污秽等级进一步增加时，工频电弧出现无法熄弧的情况。

5）从图14中可以看出，随着避雷器表面污秽浓度的不断增加，工频续流电流的幅值不断增加，并且上升趋势不断增加。

5 结束语

1）以10 kV带串联间隙氧化锌避雷器为例，通过一种冲击与工频相结合的一体化联合加压试验装置进行了试验分析，并具体提出了试验方法。

2）氧化锌避雷器具有良好的工频续流遮断能力以及良好的污秽性能，避雷器间隙段可以不考虑爬电距离，而防雷段爬电距离应不小于相同电压等级的避雷器爬电距离。

3）在不同的污秽浓度情况下，由于氧化锌避雷器间隙段沿面发生闪络与间隙之间闪络效果基本相同，因此，可以适当缩短间隙段伞裙的爬电距离。随着表面污秽浓度的不断增加，工频续流持续时间不断增加，并逐渐达到饱和。

参考文献

[1] 陈发强．10 kV配电线路防雷技术分析与应用[J]．科技创新与应用，2017(21)：159-160．
CHEN Faqiang．Analysis and application of lightning protection technology for 10 kV distribution lines[J]．Science & Technology Innovation and Applications，2017(21)：159-160．

[2] 陈甫康．京广高铁广东段接触网防雷现状及改进措施[D]．北京：中国铁道科学研究院，2014．
CHEN Fukang．The current situation and some improvement measures of lightning protection for Guangdong section of the Beijing-Guangzhou high-speed rail way's contact system[D]．Beijing：China Academy of Railway Sciences，2014．

[3] 黄中华．杭州电网220 kV输电线路防雷性能研究[D]．北京：华北电力大学，2012．
HUANG Zhonghua．Research on lightning protection performance of 220 kV transmission lines in Hangzhou grid[D]．Beijing：North China Electric Power University，2012．

[4] 何计谋，洪波，李亚东，等．输电线路保护用有串联间隙避雷器间隙特性的研究[J]．电瓷避雷器，2006(4)：25-29．
HE Jimou，HONG Bo，LI Yadong，et al．Study on gap performance of line surge arrester with series gap[J]．Insutation and Surge Arrester，2006 (4)：25-29．

[5] 王兰义，赵冬一，胡淑慧，等．从INMR全球会议看避雷器的发展趋势[J]．电瓷避雷器，2011(5)：37-45．
WANG Lanyi，ZHAO Dongyi，HU Shuhui，et al．Development trend of arrester from INMR world congress[J]．Insulators and Surge Arrester，2011(5)：37-45．

[6] 李学林．配电网避雷器在线监测设备的研究[D]．济南：山东大学，2010．
LI Xuelin．Study on MOA on-line monitoring equipment used in distribution network [D]．Jinan：Shandong University，2010．

[7] 孔繁钦，徐鹏．雷电侵入波对变电站设备的影响及防范措施[J]．华中电力，2011，24(6)：64-68．
KONG Fanqin，XU Peng．Impact of lightning invasion wave on substation equipment and counter measures[J]．Huazhong Electric Power，2011，24(6)：64-68．

[8] 徐鹏，梁少华．可调间隙防雷装置在35 kV变电站防雷中的应用研究[J]．高压电器，2012，48(9)：7-15．
XU Peng，LIANG Shaohua．Research on application of gap adjustable lightning protection device to lightning protection of 35 kV substation[J]．High Voltage Apparatus，2012，48(9)：7-15．

[9] 司马文霞，张智，杨庆，等．110 kV复合绝缘子棒形并联间隙工频电弧疏导过程的试验研究[J]．中国电机工程学报，2012，32(31)：114-121，226．
SIMA Wenxia，ZHANG Zhi，YANG Qing，et al．Experimental research on power frequency arc process

of 110 kV composite insulator in rod shaped parallel gap lightning protection devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (31): 114-121, 226.

[10] 王巨丰，李世民，闫仁宝，等．可主动快速熄灭工频续流电弧的灭弧防雷间隙装置设计[J]．高电压技术，2014，40(1)：40-45.
WANG Jufeng, LI Shimin, YAN Renbao, et al. Arc quenching lightning protection gap for fast extinction of power frequency arcs[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 40-45.

[11] 王巨丰，梁雪，郭伟，等．基于Navier-Stokes方程的新型喷射气流灭弧防雷间隙有效性论证[J]．高电压技术，2015，41(1)：28-34.
WANG Jufeng, LIANG Xue, GUO Wei, et al. Effectiveness verification of novel air-blast arc-quenching device based on Navier-Stokes equation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41 (1): 28-34.

[12] 李恒真，陈斯翔，刘根才，等．10 kV带串联间隙防雷装置一体化联合试验装置的研制与试验[J]．高电压技术，2016，42(11)：3464-3472.
LI Hengzhen, CHEN Sixiang, LIU Gencai, et al. Development and test of integrated test device for the 10 kV lightning protection device with series gap[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42 (11): 3464-3472.

[13] 柴健，孙京．雷电流作用下铁件剩磁量的规律分析[J]．国外电子测量技术，2016，35(8)：71-75.
CHAI Jian, SUN Jing. Regularities analysis of the recidual magnetic of the iron custing under the lightning current[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(8): 71-75.

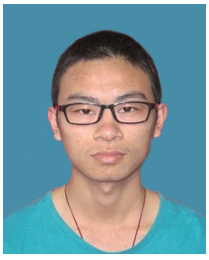
[14] 李孛．10 kV配电线路防雷措施研究[D]．长沙：长沙理工大学，2009.
LI Bei. The research on lightning protection of 10 kV transmisson lines[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2009.

[15] 沈海滨，陈维江，王颂虞，等．10 kV架空线路雷击断线故障的模拟试验研究[J]．电网技术，2011，35(1)：117-121.
SHEN Haibin. CHEN Weijiang, WANG Songyu, et al. Simulation test on lightning stroke-caused wire-breakage of 10 kV overhead transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 117-121.

[16] 李恒真，陈道品，王俊丰，等．多重短间隙灭弧装置设计及其工频续流遮断能力测试[J]．南方电网技术，2015，9(7)：57-62.
LI Hengzhen, CHEN Daopin, WANG Junfeng, et al. Design of arc quenching device multi-short-gaps and test of its ability to cut off power frequency residual current[J]. Southern Power System technology, 2015, 9 (7): 57-62.

[17] 刘健．低气压下不同伞形结构复合绝缘子直流污闪特性研究[D]．重庆：重庆大学，2015.
LIU Jian. Study on DC pollution flashover performance of composite insulators with different shed configuration under low air pressure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

作者简介



杨毅

杨毅（1993－），男，长沙理工大学在校硕士研究生，主要研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期：2018－05－23)EA