

Analysis of Discharge Characteristics for Contaminated Insulator on Transmission Line

Huarong Zeng, Qi Yang, Xiaohong Ma, Huan Huang, Xianyin Mao, Lusong Zhang, Guoqiang Luo, Liuqing Yang

Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou
Email: yangqi_cqu@163.com

Received: Mar. 18th, 2020; accepted: Apr. 2nd, 2020; published: Apr. 9th, 2020

Abstract

Due to the influence of the type of electric field, the external environment and its structural characteristics on the pollution process of transmission line insulators, the insulation performance of insulator surfaces has been declining and it has caused potential risks for the safe and stable operation of power grid. In order to study the discharge characteristics of polluted insulator in transmission line, the discharge test platform for contaminated insulator in transmission line is set up in this paper, and the simulated polluted insulator under typical polluted conditions is made. On this basis, the discharge process of contaminated insulator is studied through a large number of simulated tests. The typical discharge data of polluted insulator in different stages are obtained by using UV imaging, high-speed camera and high-frequency current monitoring terminal. The results show that the discharge of polluted insulator in different stages is significantly different. The characteristic parameters of different stages of transmission line discharge process are obtained, which provides a reference for the power operation and maintenance personnel to monitor the state of transmission line insulators by joint means and build the contaminated discharge database of transmission line insulator.

Keywords

Insulator, Discharge, Pollution, Simulation Test

输电线路绝缘子污秽放电特性分析

曾华荣, 杨旗, 马晓红, 黄欢, 毛先胤, 张露松, 罗国强, 杨柳青

贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳
Email: yangqi_cqu@163.com

收稿日期：2020年3月18日；录用日期：2020年4月2日；发布日期：2020年4月9日

摘要

输电线路绝缘子积污过程中因受到电场类型、外界环境及其结构特征的影响，绝缘子表面的绝缘性能不断下降并对电网的安全稳定运行造成潜在的风险。为研究输电线路污秽绝缘子放电特征，本文通过搭建输电线路污秽绝缘子放电试验平台，制作了典型污秽条件下的模拟污秽绝缘子试品，并在此基础上通过大量模拟试验研究了污秽绝缘子的放电过程。通过采用紫外成像、高速摄像机、以及高频电流监测终端获得了污秽绝缘子在不同阶段典型放电数据，并通过结果分析得到污秽绝缘子在各个发展阶段的放电呈现显著区别。研究得到不同阶段输电线路放电过程的特征参数，为电力运维人员采用联合手段监测输电线路绝缘子状态及其构建污秽放电数据库提供了参考。

关键词

绝缘子，放电，污秽，模拟试验

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为高压架空线路的重要组成部分，输电线路绝缘子主要承担着绝缘支撑的作用。但在长期的运行过程中，由于受自然环境的不断恶化，绝缘子表面积污严重[1] [2]。尤其在雾霾、冰雪等气象条件下，输电线路绝缘子因积污使得表面电场强度畸变，并发生沿面闪络，从而使得电力系统的运行存在极大的风险[3] [4]。

输电线路高压绝缘子主要受煤烟等工业污秽和鸟粪、飞尘等自然污秽的污染。早在世纪之初，我国的东北地区、华北地区的输电网就曾多次出现因绝缘子污秽引发闪络并致使多条线路跳闸，造成严重的电力损失[5]。在我国南方的广东地区因绝缘子污闪造成多条 220 kV，500 kV 线路跳闸，电网出现解环运行[6]。此外，近年来由于雾霾造成我国多起动车顶部的绝缘子出现闪络故障，致使铁路出现大面积的延误[7]。

针对输电线路绝缘子污秽特性，学者们主要采用试验方法和仿真计算的方法研究绝缘子的积污过程[8] [9] [10]。由于绝缘子在自然环境中积污受多方面影响，学者们开展污秽性质[11] [12]、气象气候[13]、地形地貌[14]、伞裙结构[15] [16]等多种因素的影响。此外，研究人员还对影响绝缘子闪络电压大小的盐密、灰密、污秽成分等因素进行了分析[17] [18]。一方面研究人员的系列研究成果掌握了绝缘子表面积污特性及其分布特征，并提出了改进绝缘子结构、采用复合材料、增加绝缘子片数等多种方案。另一方面，如何及时评估绝缘子表面的污秽程度，从而为及时清扫绝缘子提供判据，很多学者提出了离线和在线等诸多方案[19] [20]。

由于现有对污秽绝缘子研究主要集中于绝缘子本身积污过程模拟以及采用单一检测方法进行测量污秽绝缘子放电。随着电力大数据技术兴起，研究输电线路绝缘子污秽放电特征对于输电线路故障隐患的识别具有重要的意义。鉴于此，本文以输电线路绝缘子污秽放电为研究对象，搭建了污秽绝缘子放电试

验平台并采用紫外摄像机、高速摄像机及高频电流法对放电过程进行了测量，分析得到了不同阶段下放电特征。

2. 输电线路污秽绝缘子放电试验

2.1. 试验平台搭建

为研究输污秽绝缘子放电特征，在南方电网防冰减灾重点实验室——贵州梅花山试验基地搭建得到输电线路污秽绝缘子放电试验平台，其接线原理如图 1 所示。

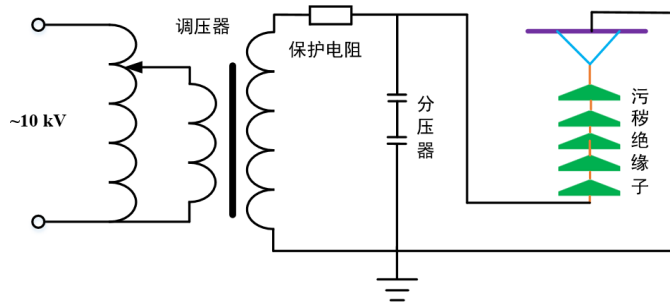


Figure 1. System result of standard experiment
图 1. 污秽绝缘子放电试验原理图

试验电源采工频试验变压器(1200 kVA)进行输出调节，用于模拟输电线路绝缘子高压环境，变压器原边侧输入为 0~10 kV 可调电压，高压输出侧电压最大值为 400 kV，相对本试验均有较大裕度，可以满足试验电源的要求。保护电阻用于限制输出短路发生时电流大小。电容分压器额定电压为 400 kV，分压比为 1000:1，用于测量施加于污秽绝缘子的电压。试品采用 110 kV 输电线路常见 7 片玻璃绝缘子配置。导线上安装的监测终端实现电压与高频电流同步监测。

2.2. 试品涂污准备

对于试验中污秽绝缘子试品，依据标准 IEC-60507 和标准 GB/T 4585 推荐定量涂刷法进行涂污准备 [21] [22]。根据绝缘子表面的污秽的溶解性分为可溶性和不可溶性物质，选取对应的模拟试验物质并将其配置成污秽液。最后将污秽液均匀地完全涂覆于绝缘子表面。具体步骤为：

1) 对于可溶性物质，采用氯化钠模拟，不可溶物质用硅藻土模拟。

2) 选取污秽等级的盐密、灰密以及待涂覆绝缘子的表面积，计算涂刷用盐、灰质量。根据 Q/GDW 152-2006 对污秽等级划定，等值盐密和污秽等级对应关系如表 1 所示 [23]。试验中绝缘子所处地区污秽度选取贵州最常见的 b、c 级污区，并考虑这两级污区中最严重情况，即典型盐密为 0.1 mg/cm^2 进行研究。通过电子天平准确称取盐、灰质量，将盐、灰混合至实验烧杯中。

Table 1. Pollution grade classification method (salt and ash density ratio is 1:5)
表 1. 污秽等级划分方法(盐、灰密比为 1:5)

| 污秽等级 | 等值盐密(mg/cm^2) |
|------|--------------------------|
| a | 0.025 |
| b | 0.025~0.05 |
| c | 0.05~0.1 |
| d | 0.1~0.25 |
| e | >0.25 |

3) 在烧杯中加入试验准备的电导率小于 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的去离子水, 并将其搅拌均匀后配置为试验用的污秽溶液。

4) 用排刷将污秽液均匀地涂覆于试验绝缘子表面。

2.3. 试验步骤

1) 清洗。对试验中采用的绝缘子首先用自来水进行粗洗, 再用酒精对绝缘子表面进行擦拭。

2) 预染污。采用定量涂刷法首先将配置的污秽溶液涂抹于绝缘子表面, 再将绝缘子放置于阴凉处自然晾干 6~8 个小时。

3) 试验布置。为避免加压试验过程中, 绝缘子与周围其他物体间因绝缘距离不够产生放电, 试验中对绝缘子采用悬挂试验加压。

4) 设置采集参数。将监测终端触发值调整为回路电晕放电电流幅值的 1.2~1.5 倍左右, 可以避免因电晕放电带来的干扰, 接地端电流传感器采集参数设置方法与此相同。

5) 试品湿润。试品布置好后即通雾湿润。

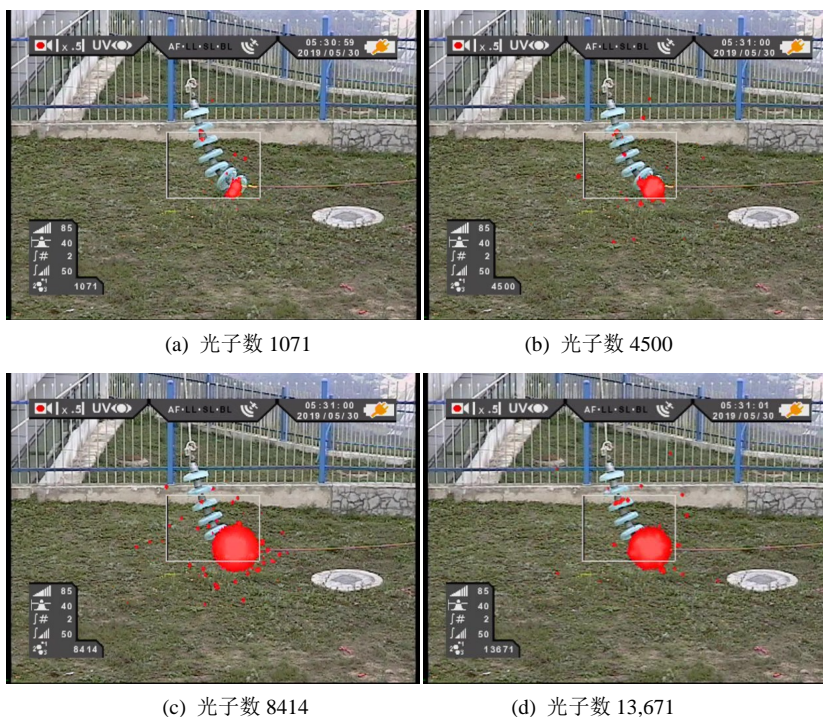
6) 加压。对于污秽绝缘子的加压试验, 在实验中常常采用均匀升压法开展研究。在加压时, 先将被污秽测绝缘子充分受潮后, 立即以一定速度均匀升高电压直至试品出现明显放电, 监测并记录不同施加电压的污秽绝缘子放电过程。

3. 污秽绝缘子放电测量结果

在对污秽绝缘子施加电压过程中, 为观测绝缘子污秽放电特征, 采用紫外成像仪、高速摄像机和高频罗氏线圈构成传感器测量放电特征信息。

3.1. 紫外检测结果

图 2 给出了紫外成像仪拍摄到在加压过程中污秽绝缘子表面放电时中光子数变化过程。



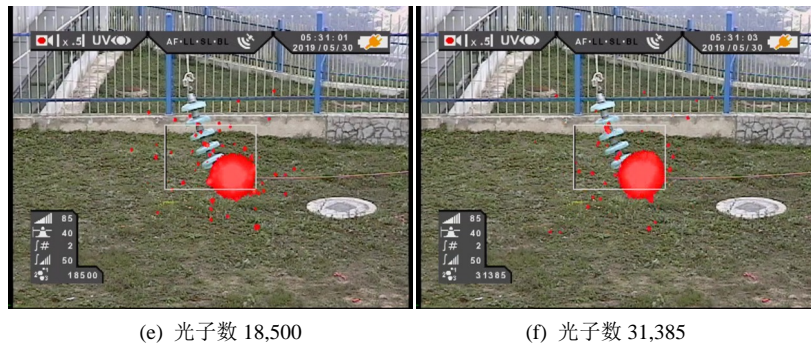


Figure 2. Change of photon number during polluted insulator discharge
图 2. 绝缘子污秽放电过程光子数变化图

可以看到，在绝缘子表面施加工频电压过程中，绝缘子表面的电磁强度不断增加，放电过程呈现出不断增强的趋势：当光子数超过 1500 时，有可见电弧产生，电弧主要集中在靠近高压端的 1~3 片绝缘子表面上。放电时产生嘶嘶放电声音，随着放电强度不断增大，光子数显著上升，放电声音从轻微的嘶嘶声转变为间歇性的炸裂声，随着放电程度不断加剧，稳定的沿面放电发展成为闪络，变压器保护动作并跳闸，放电结束。

3.2. 高速摄像机检测结果

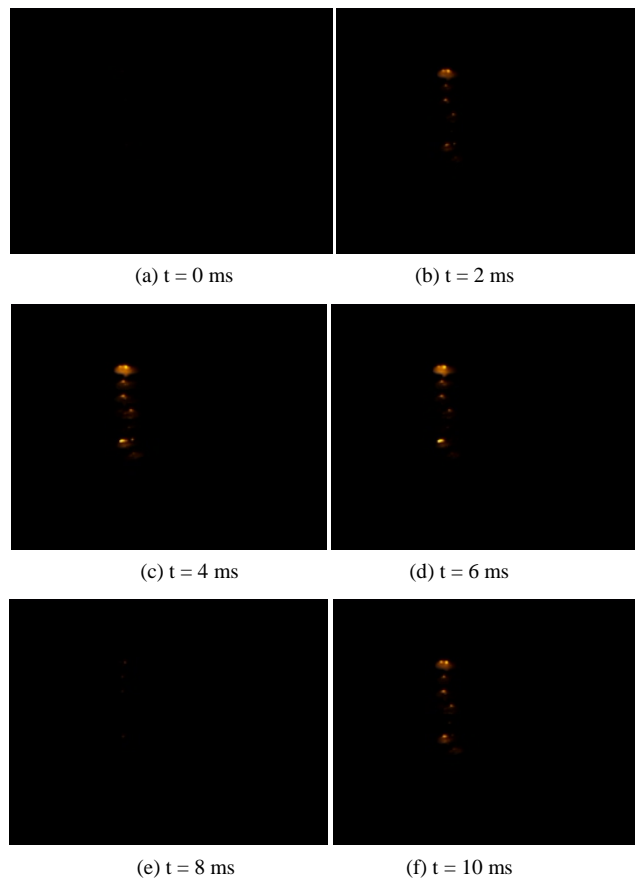


Figure 3. Repeatedly discharge of polluted insulator photographed by high-speed cameras
图 3. 高速摄像机下污秽绝缘子周而复始放电过程

图3给出了输电线路污秽绝缘子在高速摄像机下拍摄半个周期内典型时段下的放电结果。从图3可以看到,绝缘子沿面放电在周期性工频电压作用下,电弧呈现在暗淡和明亮中交替出现:初期施加电压比较低,绝缘子污秽放电尚未形成稳定的沿面放电通道,放电过程此时呈较强的分散性,此时放电过程特征如图3(a)、图3(b)所示。随着电压逐渐升至峰值电压过程,如图3(c)、图3(d)所示形成了显著的放电通道,随着电压逐渐下降,放电也逐渐减弱。此时对于紫外成像仪拍摄的光子数也呈现出波动变化特征,在放电电弧明显时,光子数量迅速攀升至上万级,随着电弧逐渐熄灭,光子数逐渐回落到一千以内波动。污秽绝缘子的整个波动变化的放电过程主要受绝缘子表面的积污状态、气候条件、运行电压等因素有关。

3.3. 放电脉冲电流检测

在模拟污秽绝缘子放电过程中,在模拟导线上安装的高频电流测量装置(带宽 10 Hz~10 MHz)用于测量放电过程中的脉冲电流波形。利用检测监测终端采集到了污秽绝缘子放电过程中的脉冲放电波形,并选取了不同阶段采集到的脉冲电流波形,如图4所示。

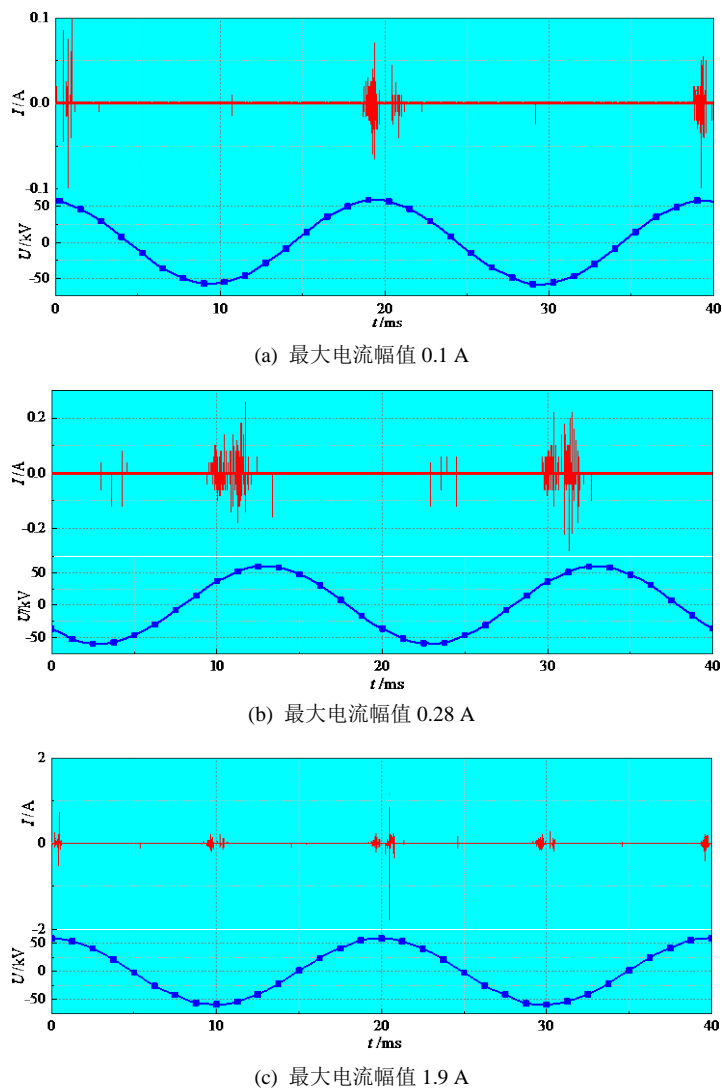


Figure 4. Discharge pulse current waveforms at different stages

图4. 不同阶段下的放电脉冲电流波形

试验过程中,对升压过程中污秽绝缘子放电电流进行了采集和记录,并对各个阶段的放电电流(各1400次)进行了统计分析得到表2。

Table 2. System resulting data of standard experiment
表 2. 不同阶段下的放电电流波形特征

| 电流幅值/mA | 频率/次 | 相位分布/° |
|---------|------|-------------------|
| 10~100 | 252 | (82~97, 254~286) |
| 100~250 | 344 | (79~118, 256~297) |
| 250 ↑ | 376 | (45~127, 251~288) |

从表2可知:

- 1) 在污秽绝缘子放电初始阶段,电流大小在100 mA范围内。单个工频周期内放电频次为252次,放电脉冲电流相位区间范围为(82°~97°, 254°~286°)。
- 2) 随着放电电流进一步增大至100~250 mA范围,污秽绝缘子放电进入发展阶段。此时单个工频周期内放电频次达到344次,放电脉冲电流相位宽度进一步拓展至(79°~118°, 256°~297°),放电进一步增强。
- 3) 当污秽绝缘子放电脉冲电流达到250 mA。放电进入预击穿阶段,放电脉冲数进一步增加至376次。放电脉冲起始相位和宽度进一步增加(45°~127°, 251°~288°)。

4. 结论

针对输电线路绝缘子污秽放电对系统安全稳定的影响,本文搭建了污秽绝缘子放电试验平台,并根据地区常见的绝缘子污秽等级,制作了相应的污秽绝缘子试品。在此基础上通过大量模拟试验研究了污秽绝缘子的放电过程,并得到以下结论:

- 1) 当污秽绝缘子表面刚出现放电时,紫外成像仪上记录到的光子数较在数千以内,此时高速摄像机拍摄的表面电弧较为暗淡,放电脉冲电流幅值在100 mA范围。
- 2) 随着施加电压的不断上升,放电过程明显加强,污秽绝缘子表面的光子数瞬间攀升至数万以上,绝缘子表面电弧在明亮和暗淡中交替转化,此时放电电流幅值迅速攀升,放电脉冲相位迅速拓宽。
- 3) 当施加电压进一步加大,污秽绝缘子表面发生放电,并最终出现系统保护动作至放电结束。期间光子数、和电弧由于形成稳定性放电而波动较小,电流幅值显著增加,脉冲放电频率进一步提高,放电起始相位向下延伸,整个脉冲电流相位区间进一步拓宽。

参考文献

- [1] 王黎明,刘霆,梅红伟,等.基于计算流体力学的支柱绝缘子积污特性研究[J].高电压技术,2015,41(8):2741-2749.
- [2] 卢明,刘泽辉,向玲,等.不同电压等级下绝缘子积污特性研究[J].电磁避雷器,2020(1):186-191.
- [3] 梁伟,高嵩,周志成,等.污秽分布对陶瓷XP-70与玻璃LXP-70绝缘子放电影响的实验研究[J].电瓷避雷器,2019(1):218-225.
- [4] 陈杭,张志劲,冉军德,等.XHP-160绝缘子积污特性仿真分析及试验验证[J].电网技术,2017,41(11):311-317.
- [5] 崔江流,宿志一,车文俊,等.2001年初东北、华北和河南电网大面积污闪事故分析[J].电力设备,2001,2(4):9-23.
- [6] 樊灵孟,刘平原,郑晓光,等.广东电网污闪原因分析和防污对策[J].电瓷避雷器,2006(2):4-9.
- [7] 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]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2014.
- [8] 张锐,黄道春,吴光亚,等.交流特高压支柱瓷绝缘子的自然积污特性研究[J].电网技术,2014,38(11):

3217-3223.

- [9] 梅冰笑, 叶自强. 不同盐密、灰密下 XP-160 绝缘子串交流闪络特性研究[J]. 浙江电力, 2008, 27(6): 13-16+32.
- [10] 袁伟. 污秽条件下复合绝缘子表面电荷积聚动态仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [11] 王淑兰, 柴发合, 张远航, 等. 成都市大气颗粒物污染特征及其来源分析[J]. 地理科学, 2004, 24(4): 488-492.
- [12] 张成君, 胡轶鑫, 钱韵砚. 兰州市冬季大气沉降尘粒度特征及来源解析[J]. 兰州大学学报, 2006, 42(6): 39-44.
- [13] 蒋兴良, 谢述教, 舒立春, 等. 低气压下三种直流绝缘子覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 162-166.
- [14] 张本皇, 李恒真, 刘刚, 等. 珠三角地区不同地形条件下绝缘子污秽积累规律的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 1-6.
- [15] 吴光亚, 蔡炜, 王钢, 等. 输电线路不同型式绝缘子的特性分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 72-74.
- [16] 罗利云, 蒋兴良, 张志劲, 等. 不同型式绝缘子长串的直流污闪特性比较[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(7): 42-45.
- [17] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [18] 庞广陆. 钟罩型绝缘子积污仿真模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [19] 李佐胜. 红外热像检测绝缘子污秽等级的关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [20] 朱虹宇. 接触网绝缘子泄漏电流特性与污秽检测研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [21] International Electrotechnical Commission (1991) IEC 60507 Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on AC Systems. IEC, Geneva.
- [22] 中国电器工业协会. GB/T4585-2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [23] 国家电网公司. Q/GDW152-2006 电力系统污区分级与外绝缘选择标准[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.