

# 电力金具图像故障状态评估

陆旭<sup>1</sup>, 罗汉武<sup>1</sup>, 李文震<sup>1</sup>, 张海龙<sup>2</sup>, 吴启瑞<sup>2</sup>, 雷丞<sup>3</sup>

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉三江中电科技有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 电力金具是输变电工程的关键部件, 在温度、风沙等环境因素作用下, 因结构缺陷会导致电晕放电, 最终影响输变电线路的安全运行。基于电晕试验工作平台, 采用图像融合和图像处理技术, 对放电光斑进行特征提取和状态评估。研究表明: 光斑面积与放电量呈线性关系; 电力金具放电阶段由电晕阶段, 历经小电弧阶段, 最终发展到强烈火花放电阶段; 当增益为 70%, 观测距离为 10 m 时, 3 个阶段的放电光斑面积分别约为 1000 像素、5000 像素和 10000 像素; 根据紫外图像特征, 电力金具的状态评估分为无缺陷, 一般缺陷, 严重缺陷, 紧急缺陷 4 个状态。该研究成果为电力金具安全评估提供技术支撑。

**关键词:** 电力金具; 紫外成像; 电晕放电; 图像处理; 状态评估

**中图分类号:** TM76      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2020)07-0632-05

## Estate Evaluation of Image Fault of Electric Power Fittings

LU Xu<sup>1</sup>, LUO Hanwu<sup>1</sup>, LI Wenzhen<sup>1</sup>, ZHANG Hailong<sup>2</sup>, WU Qirui<sup>2</sup>, LEI Cheng<sup>3</sup>

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co.Ltd. Hohhot 010020, China;

2. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

3. Wuhan Sanjiang China Electronics Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Electric power fittings are the critical components of power transmission and transformation structures. Under the action of environmental factors, such as temperature and sandstorm, structural defects can lead to corona discharge, which can ultimately affect the safe operation of power transmission and transformation lines. Based on the working platform of a corona test, the feature extraction and evaluation of discharge spots were carried out in this study using image fusion and image processing technology. The results prove that the relationship between the spot area and discharge capacity is linear. The discharge stages of electric power fittings develop from the corona stage to a small electric arc stage, and finally, to a strong spark discharge stage. When the observation distance is 10 m, the gain is 70%, and the discharge spot areas of three stages are approximately 1000, 5000, and 10000 pixels. Based on the characteristics of the ultraviolet image, the state of electric power fittings can be divided into four states: no defect, general defect, serious defect, and emergency defect. The study results provide technical support for the safety evaluation of electric power fittings.

**Key words:** electric power fittings, ultraviolet imaging, corona discharge, image processing, estate evaluation

## 0 引言

电力金具在电、热、力等作用下, 会受到一定的磨损, 在输变电工程强电磁环境的影响下, 表现为磨损部位电场分布不均匀, 最终发生电晕放电的现象,

为线路的安全运行带来隐患。传统放电检测方法分为超声波法、脉冲电流法、红外成像法, 但由于受到电力工程自身强电磁环境的干扰, 以上方法均无法精确定位放电故障位置。

紫外成像技术的出现, 为输变电工程电气设备电

收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2020-06-05.

作者简介: 陆旭 (1970-), 辽宁锦州人, 男, 硕士学位, 高级工程师, 从事电网信息通信以及人工智能电网图像故障检测。E-mail: 1257345953@qq.com.

基金项目: 国家电网公司科技项目 (524625180018)。

晕放电故障定位提供了一种可靠的方案。国内外电力工作机构、高校相继开展了紫外成像图谱诊断研究,取得了一定的成效<sup>[1-3]</sup>。文献[4-5]开展了光斑面积与放电强度内在规律的研究,验证了紫外成像技术用于电晕放电强度的合理性。基于紫外图谱,文献[6-9]进一步研究了环境因素与高压电气设备电晕放电强度之间的关系,为输变电工程前期规划设计提供了一定的参考。刘云鹏<sup>[10]</sup>采用聚类分析的方法,实现了一种优化后的紫外光斑面积提取方法。

目前,紫外图谱用于电气设备放电强度的状态评估较少,一般局限于绝缘子。文献[11-13]针对气体绝缘金属封闭输电线路(Gas Insulated Transmission line, GIL)绝缘子、盘式绝缘子,依据污秽放电不同阶段的特征,划分了不同层级放电的严重程度。文献[14]开展了金具在强风沙尘环境下电晕放电特性的研究,研究了沙粒粒径与放电强度的宏观和微观关系。为此,本文以电力金具为研究对象,搭建了电晕放电观测平台,基于紫外成像技术和图像处理技术,开展了其不同放电阶段的紫外图谱特征研究。

## 1 图像识别

电力金具放电不明显,肉眼难以观测,紫外成像仪可形象直观地捕捉到放电信号。为了实现其精准的图像识别,需要结合图像融合技术和图像处理技术。

### 1.1 图像融合

如图1所示,紫外成像仪镜头由两部分组成,分别可以实现设备反射后的可见光和故障点放电后的辐射光捕捉,然后经过光电耦合器(Charge-coupled Device, CCD)和增强型光电耦合器(Intensified Charge-Coupled Device, ICCD)的光电转换作用<sup>[15]</sup>,最终完整实现电气设备本体上放电光斑的显示。

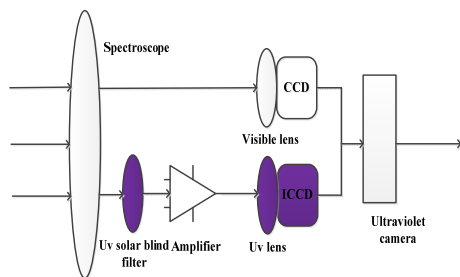


图1 紫外图像融合技术 Fig.1 Image fusion of UV

### 1.2 图像处理

紫外成像仪采集到的图像为视频流,为了定量实现光斑面积的计算,主要包含背景差分、噪声抑制和特征提取3部分。

主成分分析法适用于背景图像提取,电气设备为静止图像,放电光斑为运动图像,利用这一特点,可

基于背景差分原理进行帧差法计算:

$$\Delta B_t(x, y) = |B(x, y, t) - B(x, y, t-1)| \quad (1)$$

式中:  $B(x, y, t)$  表示  $t$  时刻像素点  $(x, y)$  的灰度值;  $\Delta B_t(x, y)$  表示  $t$  时刻灰度差值。

然后进行阈值判断:

$$C_t(x, y) = \begin{cases} 1 & |\Delta B_t(x, y)| \geq \varepsilon \\ 0 & |\Delta B_t(x, y)| < \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$  为背景差分的阈值。

噪声抑制主要基于中值滤波、阈值分割和形态学方法实现放电光斑轮廓提取。形态学处理主要包含开闭运算,即腐蚀与膨胀运算。

$$A \ominus B = \{x | (B + x) \in A\} \quad (3)$$

$$A \oplus B = \{x | (\bar{B} + x) \cap A \neq \emptyset\} \quad (4)$$

最终,统计所有边界区域内的像素数,从而计算其光斑面积。若将放电区域灰度值为255的点定义为1,则光斑面积为  $A$  区域中1的总数  $S$  为:

$$S = \sum_{(x,y) \in A} 1 \quad (5)$$

## 2 试验方案

### 2.1 试验平台搭建

依据 GB/T 2317.2,搭建悬垂式电力金具电晕试验布置图,如图2所示。为完整模拟现场环境,需配置模拟横担和模拟导线。试验电源逐步升高电压,直至达到试验金具的测试电压,待产生稳定的电晕放电,通过紫外成像仪记录放电视频。

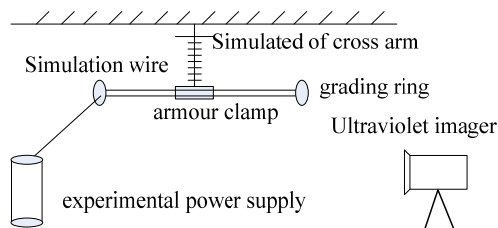


图2 电力金具电晕试验布置图

Fig.2 Corona test layout of electric power fittings

### 2.2 试验方案

均压环常用于330 kV线路中,因为导线的端部效应,两端电场分布不均匀,容易产生电晕现象,均压环起到均压屏蔽的作用,同时也可能造成自身闪络的风险,为此,本文以均压环作为电力金具的典型部件,进行电晕试验。

试验中采用330 kV复合绝缘子,内侧弯曲半径为220 mm、管径为32 mm的均压环,系统额定电压

为 330 kV，紫外成像仪采用南非的 CoroCAM504。由于均压环经过抛光处理，表面光滑，干燥情况下改变电压仅能发生微弱的电晕放电，为此可通过改变均压环表面的湿度，达到强烈放电的目的。

2.3 光斑面积归一化研究

光斑面积可用于设备放电强度的定量分析，较光子数分析更精确<sup>[2]</sup>。由紫外成像仪的内部结构以及光学原理可知，当增益固定不变时，基于三角形相似定理，光斑面积  $S_o$  与内部 ICCD 的成像面积  $S_i$  呈现正比例关系，见式(6)。

$$S_o = kv^2 S_i d^{-2} \tag{6}$$

式中： $v$  为像距； $k$  为比例系数； $d$  为观测距离。当增益和电压等级一定时， $v$  值固定不变，此时，光斑面积与观测距离成幂指数关系。

电压等级分别取 200 kV、250 kV、300 kV、330 kV，增益设置为 70%，为此，开展 5 m、10 m、15 m、20 m 下不同观测距离的研究，对捕捉到的放电图像进行定量计算，并绘制不同电压的光斑面积曲线，如图 3 所示。

按照电压等级进行光斑面积与观测距离的幂指数拟合，汇总如表 1 所示。

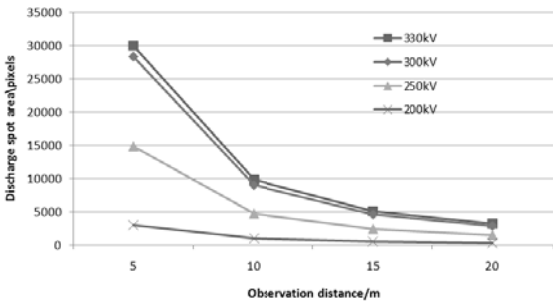


图 3 光斑面积与观测距离关系图

Fig.3 Relation diagram of spot area and observation distance

表 1 不同电压等级下的拟合表达式

Voltage grade /kV	Fitting expression	Degree of fitting
200	$40340d^{-1.621}$	0.99
250	$210785d^{-1.647}$	0.99
300	$409050d^{-1.657}$	0.99
330	$398750d^{-1.607}$	0.99

由表 1 可知，在电压一定时，拟合度接近 1，说明光斑面积与观测距离近似成幂指数关系。由于实际测量过程中，观测距离会有所变化，所以需要对其进行归一化处理，设定 10 m 观测距离为标准值，经过大量数据统计分析，可得出如下结论：

$$S_{10} = S_o \left( \frac{10}{d} \right)^{-1.63} \tag{7}$$

2.4 对比试验

电力金具放电强度一般通过局部放电测试仪进行评估，即检测到的放电量表征电力金具放电状态。为此，需对放电光斑面积和放电量之间的关系进行研究，参照图 2 搭建测试环境，电力金具外接取样电阻，通过局部放电测试仪采集放电信号，对比不同电压等级下的放电量和光斑面积，绘制曲线如图 4 所示。

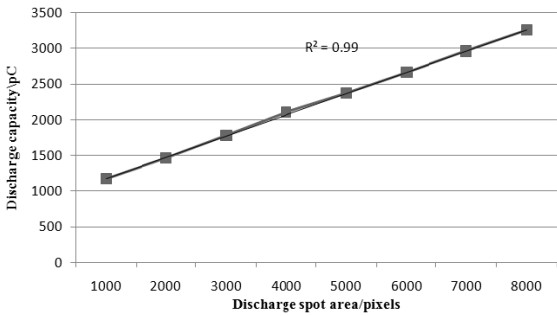


图 4 光斑面积与放电量的关系曲线

Fig.4 Relation curve of spot area and discharge capacity

通过 Matlab 仿真计算工具，对光斑面积和放电量的数值进行线性拟合分析，可得：

$$q = 0.297s + 879.4 \tag{8}$$

式中： $q$  为放电量； $s$  为光斑面积，拟合度为 0.99，所以可以证明光斑面积表征电力金具的放电强度是合理的。

3 数据分析

3.1 紫外图像特征

参考高压电气设备放电发展过程，主要由 3 个阶段组成，如图 5 所示。

图 5(a)为电晕放电阶段，均匀环的电晕起始电压大约为 245 kV，此时电晕声并不明显，紫外成像仪仅能检测到部分零星的光斑，而且放电并不稳定。通过均压环表面湿度的增加，放电强度会逐步加强，光斑路径会逐步扩展，但光斑面积序列的波动较小。

图 5(b)为小电弧阶段，当测试电压达到 300 kV 时，均压环表面会交替出现较大光斑和较小光斑，但大光斑持续的时间较短，一般仅持续 1~5 s 左右。随着湿度的增加，大光斑持续时间和发生几率会相应增加，会听到明显的放电声音，在黑暗情况下可以看见细丝状电弧，同时光斑面积序列的波动较大。图 5(c)为强烈火花放电阶段，当测试电压达到 320 kV 时，均压环表面会出现较大光斑，同时持续时间较长，放电现象比较稳定。该阶段放电比较强烈，可以听到明显的嘶嘶声，可观测较多的放电通道。

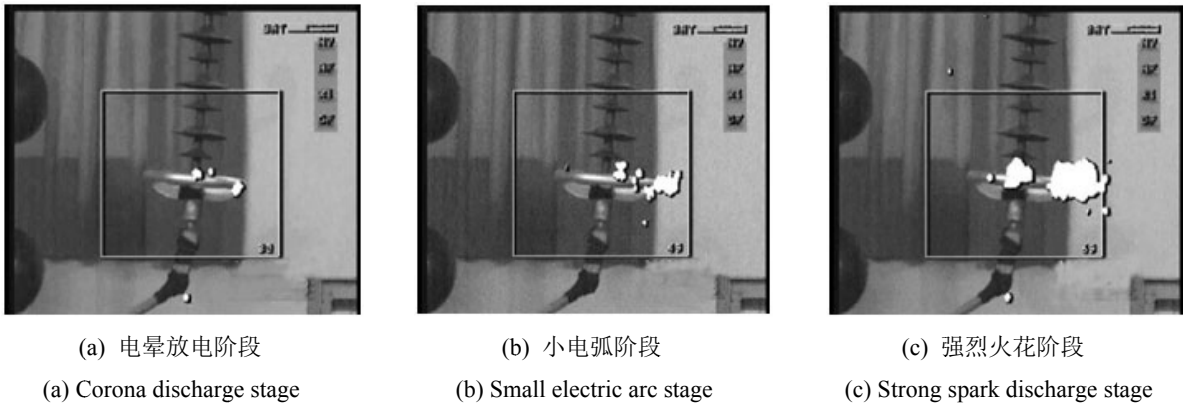


图 5 均压环电晕放电紫外图像

Fig.5 UV image of corona discharge for grading ring

3.2 状态评估

统计不同湿度情况下，放电光斑面积随电压等级变化的曲线如图 6 所示。湿度低一般指均压环湿润，但其下表面未聚成明显的水滴，湿度高一般指均压环内外径表面均有水膜覆盖，同时其下表面可见较大的水滴。

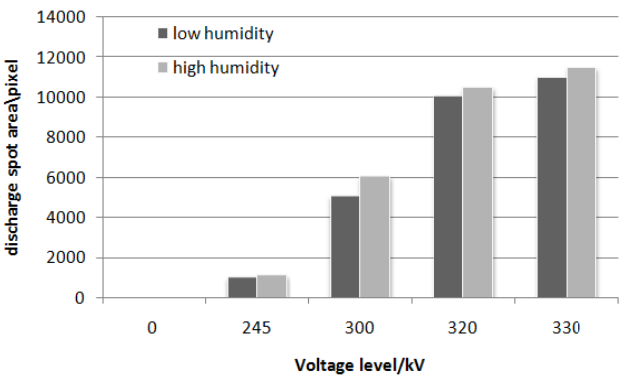


图 6 不同湿度情况下光斑面积变化

Fig.6 Spot area changes under different humidity conditions

在湿度一定的情况下，随着电压增加，光斑面积也相应增加。在电压等级一定的情况下，随着湿度增加，光斑面积也相应增加。经过归一化计算，当增益为 70%，观测距离为 10 m 时，电晕放电阶段，放电光斑面积约为 1000 像素；小电弧阶段，放电光斑面积约为 5000 像素；强烈火花放电阶段，放电光斑面积约为 10000 像素。

低电压等级下，金具表面仅有微弱的电晕放电时，电离区域较小，属于较安全的状态。随着电压的增加，放电区域逐步扩展，电离区域扩大，发出清晰的放电声，金具处于较危险的状态。待进入强烈火花放电阶段，放电通道增加，放电进入危险区，此时进入高危状态。当增益为 70%时，观测距离为 10m，统计不同类型的电力金具不同放电阶段的光斑面积，电力金具安全状态分为无缺陷，一般缺陷，严重缺陷，

紧急缺陷 4 个状态，对应的 3 个界限值汇总见表 2。

表 2 电力金具放电强度状态评估

Table 2 Estate evaluation for discharge intensity of electric power fittings

Fittings type	Discharge spot area /pixels		
	General defect	Serious defect	Emergency defect
grading ring	1000	5000	10000
gossan	500	1000	2000
iron stand	500	5000	10000
spacer	500	2000	5000

瓷绝缘子铁脚和均压环放电光斑面积比较大，对于紧急缺陷，需要及时更换处理，以免造成线路安全事故。

4 结论

针对电力金具放电强度，基于图像识别技术，进行紫外光斑面积的特征提取，并开展了电晕放电试验研究，结论如下：

- 1) 光斑面积与放电量呈线性关系，光斑面积表征电力金具放电强度是合理的。
- 2) 光斑面积随电力金具放电强度增加而增加。当增益为 70%时，观测距离为 10 m 时，电晕放电阶段，放电光斑面积约为 1000 像素；小电弧阶段，放电光斑面积约为 5000 像素；强烈火花放电阶段，放电光斑面积约为 10000 像素；
- 3) 根据紫外图像特征，电力金具分为无缺陷，一般缺陷，严重缺陷，紧急缺陷 4 个状态。

本结论为电力金具提供了定量化的评估指标，为输变电路运维提供了技术支撑。

参考文献：

[1] 邓久艳, 张宏杰, 李若澜. 基于紫外成像的憎水性表面电晕起始放电研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(4): 50-54.

- DENG Jiu, ZHANG Hongjie, LI Ruolan. Study on initial discharge of hydrophobic surface corona based on UV imaging[J]. *Insulating Materials*, 2016, **49**(4): 50-54.
- [2] 陈磊, 周仿荣, 马仪, 等. 悬式复合绝缘子电晕放电紫外图像光斑面积[J]. *高压电器*, 2013, **49**(8): 60-67.
- CHEN Lei, ZHOU Fangrong, MA Yi, et al. Ultraviolet image facular area vary characteristic and apparent discharge estimation of suspension composite insulator corona[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, **49**(8): 60-67.
- [3] 徐长福, 周广洋, 胡成博, 等. 紫外成像图谱参数量化提取改进算法的研究[J]. *智慧电力*, 2017, **45**(11): 52-56.
- XU Changfu, ZHOU Guangyang, HU Chengbo, et al. Study on improved extraction algorithm for parameter quantization of ultraviolet imaging spectra[J]. *Grid Analysis & Study*, 2017, **45**(11): 52-56.
- [4] 李炼炼, 孟刚, 邓慰, 等. 输变电设备电晕放电紫外图谱量化参数提取[J]. *高压电器*, 2017, **53**(12): 229-235.
- LI Lianlian, MENG Gang, DENG Wei, et al. Quantification parameters extraction from ultraviolet image of corona discharge of power transmission and transformation equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, **53**(12): 229-235.
- [5] 贺振华, 王玮, 黄文武, 等. 两种紫外成像仪检测电晕放电的对比研究[J]. *高压电器*, 2014, **50**(8): 80-86.
- HE Zhenhua, WANG Wei, HUANG Wenwu, et al. Comparative Study on Corona Discharge Detection with Two Ultraviolet Imagers[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, **50**(8): 80-86.
- [6] 黄文武, 贺振华, 蔡炜, 等. 基于紫外成像技术的棒-板间隙放电环境因素研究[J]. *高电压技术*, 2015, **41**(8): 2788-2794.
- HUANG Wenwu, HE Zhenhua, CAI Wei, et al. Study on the environmental factors of rod-plane gap discharge based on UV imaging[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(8): 2788-2794.
- [7] 齐磊, 符瑜科, 李小萌, 等. 气压和湿度对复合电压下换流阀高压电极起晕电压影响试验[J]. *高电压技术*, 2019, **45**(1): 82-90.
- QI Lei, FU Yuke, LI Xiaomeng, et al. Effects of air pressure and humidity on corona onset voltage of high voltage electrode of converter valve under combined ac and dc voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, **45**(1): 82-90.
- [8] 黄荣辉, 张宏钊, 李勋, 等. 基于紫外成像法的绝缘子电晕放电影响因素试验研究[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(11): 180-182, 170.
- HUANG Ronghui, ZHANG Hongzhao, LI Xun, et al. Test study on factors influencing insulator corona discharge with ultraviolet imagery method[J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(11): 180-182, 170.
- [9] 李林发, 穆卡, 黄荣辉, 等. 基于紫外成像的电晕放电参数变化特性及距离修正方法研究[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(11): 183-187.
- LI Linfa, MU Ka, HUANG Ronghui, et al. Study on parameter vitiation characteristics and distance correction of corona discharge based on ultraviolet imagery[J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(11): 183-187.
- [10] 刘云鹏, 周广洋, 黄世龙, 等. 基于紫外成像的高海拔分裂导线电晕起始特性研究[J]. *电测与仪表*, 2017, **54**(19): 54-58, 101.
- LIU Yunpeng, ZHOU Guangyang, HUANG Shilong, et al. Study on corona onset characteristics of bundle conductors in high altitude area based on equivalent spot area[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, **54**(19): 54-58, 101.
- [11] 刘云鹏, 纪欣欣, 裴少通, 等. 基于稀疏表示的绝缘子紫外图谱闪络状态分类评估方法[J]. *高电压技术*, 2018, **44**(10): 3352-3358.
- LIU Yunpeng, JI Xinxin, PEI Shaotong, et al. Method for Evaluating Flashover State of Insulator Ultraviolet Image Based on Sparse Representation[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, **44**(10): 3352-3358.
- [12] 李建波, 高文胜, 刘卫东. 直流 GIL 绝缘子表面附着金属颗粒局部放电发展过程及严重程度评估[J]. *高压电器*, 2018, **54**(5): 9-16.
- LI Jianbo, GAO Wensheng, LIU Weidong. Evolution Process and Severity Assessment of the Partial Discharge Caused by Immobilized Metal Particles on DC GIL Insulator Surface[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, **54**(5): 9-16.
- [13] 王胜辉, 牛雷雷, 李浩, 等. 基于放电紫外成像特征的污秽线路盘形绝缘子绝缘状态评估[J]. *高压电器*, 2019, **55**(2): 201-207.
- WANG Shenghui, NIU Leilei, LI Hao, et al. Insulation Condition Evaluation of Contaminated Disc Insulator for Transmission Lines Based on the Characteristic of Discharge UV Imaging Characteristics[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, **55**(2): 201-207.
- [14] 赵建平, 邓鹤鸣, 张伟, 等. 线路金具沙粒磨损模拟试验: 试验设置与电晕分析[J]. *高电压技术*, 2018, **44**(9): 2904-2910.
- ZHAO Jianping, DENG Heming, ZHANG Wei, et al. Sand Erosion Simulation Experiments on Link Hardware of Transmission Lines: Test Setting and Corona Analysis[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, **44**(9): 2904-2910.
- [15] 陈磊, 邓慰, 周仿荣, 等. 基于紫外成像的电晕放电海拔因素的研究[J]. *电瓷避雷器*, 2013(6): 124-129.
- CHEN Lei, DENG Wei, ZHOU Fangrong, et al. Study on the Altitude Factors of Corona Discharge Based on UV Imaging[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2013(6): 124-129.