

超—特高压长串瓷绝缘子温度分布 曲线拼接方法

周学明¹, 尹骏刚², 胡丹晖¹, 王森林³, 张睿清⁴, 朱广飞³, 姚建刚²

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 湖大华龙电气与信息技术有限公司, 湖南 长沙 410205; 4. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 红外热像检测法在瓷绝缘子低零值诊断领域拥有独特的优越性。但由于超—特高压瓷绝缘子串长度可达 10 m 以上, 常用工业热像仪—机载镜头难以清晰地拍摄超—特高压瓷绝缘子全串红外图谱, 对基于全串温度特征的劣化智能诊断造成了严重困难。针对此现实难题, 提出一种基于加权数据融合的双段温度曲线拼接方法。本方法避免常规红外图像拼接方法存在的目标缺失问题, 且相比于舍入拼接、中点拼接等曲线拼接方法具有较高的拟合准确性。以 1 000 kV 绝缘子串为例, 阐明所提曲线拼接方法的基本算法和流程; 以 500 kV 绝缘子串为例, 进行多种曲线拼接方法的对比研究, 分析验证所提方法的有效性 with 可行性。

关键词: 超—特高压; 长串瓷绝缘子; 温度分布曲线; 曲线拼接

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.024 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2022)03-0199-07

Temperature distribution curve splicing method for EHV-UHV long string porcelain insulators

ZHOU Xueming¹, YIN Jungang², HU Danhui¹, WANG Senlin³,
ZHANG Ruiqing⁴, ZHU Guangfei³, YAO Jiangang²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. HDHL Electrical and Information Technology, Co., Ltd., Changsha 410205, China; 4. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The infrared thermal imaging detection method has unique advantages in the diagnosis of low/zero-valued porcelain insulators. However, an EHV/UHV porcelain insulator string is generally too long (even 10 meters or above) to be entirely displayed in a single infrared imageshot by an industrial handheld/airborne thermal camera, which causes serious difficulties to the intelligent diagnosis of deterioration based on the whole string temperature characteristics. To solve this problem, this article proposes a double-segment temperature curve splicing method based on weighted data fusion. This method can solve the problems of target missing by applying general infrared image splicing technology, and can obtain higher fitting accuracy compared with curve splicing methods such as rounding and mid-point splicing. The basic algorithm and process of the proposed curve splicing method are illustrated through an example of a 1 000 kV insulator string. A comparative study of various curve splicing methods is carried out by taking a

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-07-26

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(52153219000F)

通信作者: 尹骏刚(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事电力设备状态评价与检测技术研究; E-mail: yinjungang126@126.com

500 kV insulator string into account. Therefore, the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified.

Key words: EHV-UHV; long string porcelain insulator; temperature distribution curve; curve splicing

绝缘子是发、输、变、配电设备中的重要绝缘和支撑元件。与复合绝缘子相比,瓷绝缘子能够耐受紫外线、大气和酸碱污秽的长期作用,具有良好的抗老化性能,被大量使用在超一特高压电网中。超一特高压盘形悬式瓷绝缘子长期运行时受机电负荷、天气环境等因素影响,可能逐渐产生低零值劣化,继而造成闪络、炸裂甚至断串、掉线等事故,对输变电骨干网络安全稳定运行构成严重威胁。因此,如何更加安全有效地对运行中的长串绝缘子进行劣化检测成为电力部门亟待解决的问题。目前,国内外瓷绝缘子零值检测方法包括火花间隙法、绝缘电阻法、分布电压法、工频耐压法、泄漏电流法、紫外电晕检测法、超声波检测法等^[1-4],但上述方法因安全风险、劳动强度、检测适用性、准确度、效率及成本等原因,在实际运维过程中受到了较大的限制。

红外热像法是基于温度在绝对零度以上物体的表面热辐射进行成像检测,具有不停电、不受电场干扰等优点。随着红外热成像技术的迅速发展,红外热像法得到了越来越多的关注。文献[5]基于瓷绝缘子交流等效电路,分析了不同工况下绝缘子的发热机理和热像特征;文献[6]针对湿污绝缘子,引入表面电阻率、湿润强度和电弧模型,建立了干燥带及干燥带电弧产生的判断条件和不同运行状态下的绝缘子发热模型;文献[7-10]研究了劣化绝缘子红外检测的多种影响因素,包括环境温湿度、风速、污秽度、劣化绝缘子位置以及测温误差等。在实际运维工作中,目前普遍以电力行业标准 DL/T 664《带电设备红外诊断应用规范》所规定的铁帽处正负 1℃温差分别作为低、零值绝缘子红外诊断依据。为进一步提高劣化检出率,BP 神经网络方法^[11]、卷积神经网络方法^[12]等绝缘子智能诊断算法相继提出,近年来在运维检修工作中逐步得到了应用。

对于 35~220 kV 电压等级的盘形悬式瓷绝缘子串,其红外智能诊断^[12-13]的一般流程为①红外图像预处理;②绝缘子铁帽定位分割;③温度特征数据提取;④生成温度分布曲线;⑤劣化智能诊断。其中,绝缘子红外图像处理及铁帽温度特征数据提取是劣化诊断的前提和基础。当电压等级在 220 kV

及以下时,常用的工业热像仪镜头能够在保持铁帽清晰的条件下拍摄全串红外图谱。但超一特高压瓷绝缘子串身过长,现有工业热像仪的视场角与分辨率有限,通常无法拍摄到清晰的全串红外图谱。为获得绝缘子串温度分布曲线,应对同一绝缘子串分段拍摄 2 张红外图谱(高压侧、接地侧图谱各 1 张),然后利用图像拼接技术将 2 张红外图谱合成为 1 张,继而提取绝缘子全串温度曲线;或者,也可先分别针对高压侧、接地侧图谱生成 2 条部分串温度分布曲线,再利用曲线拼接技术合成绝缘子全串温度分布曲线。

1 超一特高压长串绝缘子红外图像拼

图像拼接是指将含重叠部分的 2 幅或多幅图像,通过图像预处理、图像配准和图像融合,合成一幅包含各图像信息的宽视角图像^[14]。目前最常用的是基于 SIFT(尺度不变特征转换)的图像拼接算法。SIFT 可用来侦测与描述影像局部性特征,在空间尺度中寻找极值点,并提取出其位置、尺度、旋转不变数。绝缘子红外图像为灰度图像,具有分辨率较低、噪声较高的特点,导致特征点检测时,可能出现较多伪特征点,从而增加误匹配率。文献[15]提出了一种高精度红外全景拼接算法,在 ROI(感兴趣区域)窗口中提取 SIFT 特征点,结合 KLT 实时跟踪匹配,利用 RANSAC 算法消误,再采用像素级融合实现无缝拼接,该方法较传统 SIFT 算法,配准率仅提高了约 3.5%;文献[16]针对无人机载红外镜头视场角小的问题,基于 SIFT 算法对场景差异较大的待拼接红外图像无缝拼接,但要求待拼接红外图像重叠视场不小于单幅红外图像视场角的 15%。

本文基于 SIFT 算法进行图像拼接。SIFT 图像拼接方法包括构造高斯尺度空间、局部极值点检测、确定关键点主方向、生成特征描述、特征点匹配。

1)构造高斯尺度空间。

$$L_{(x,y,\sigma)} = G_{(x,y,\sigma)} \otimes I_{(x,y)} \quad (1)$$

$$G_{(x,y,\sigma)} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-m/2)^2+(y-n/2)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 L 为定义的图像尺度空间; I 为原图像; G 为高斯滤波函数; m 、 n 为高斯模板的维度; σ 为尺度空间的尺度大小; \otimes 为卷积运算。

2) 局部极值点检测。

$$D_{(x,y,\sigma)} = (G_{(x,y,k\sigma)} - G_{(x,y,\sigma)}) \otimes I_{(x,y)} \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$D_{(x,y,\sigma)} = L_{(x,y,k\sigma)} - L_{(x,y,\sigma)} \quad (4)$$

式中 D 为高斯差分尺度空间。将 D 中的每一个极值点与同层相邻点和相邻层的全部相邻点进行比较, 满足大于(小于)26 个像元在 I 和 D 中都是极值点的条件下可确定该点为稳定特征点。

3) 确定关键点主方向。

$$m_{(x,y)} = \sqrt{(L_{(x+1,y)} - L_{(x-1,y)})^2 + (L_{(x,y+1)} - L_{(x,y-1)})^2} \quad (5)$$

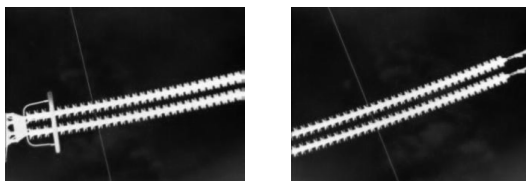
$$\theta_{(x,y)} = \tan^{-1} \left(\frac{L_{(x,y+1)} - L_{(x,y-1)}}{L_{(x+1,y)} - L_{(x-1,y)}} \right) \quad (6)$$

式中 $m_{(x,y)}$ 、 $\theta_{(x,y)}$ 分别为关键点的梯度模与梯度方向; L 为特征点尺度空间值。

4) 生成特征描述符。以特征点为中心, 选取 8×8 的窗口, 再分割为 4×4 的小块; 分别计算 16 个小块上的方向向量, 可得到一个 128 维的特征描述符。

5) 特征点匹配。得到 2 张红外图谱的特征描述符向量后, 对 2 张图特征描述符进行拟合, 可导出相对参考图谱的空间变换矩阵; 对待拼接图谱进行逆变换, 再与参考图谱拼合, 最终得到拼接图谱。

某一特高压瓷绝缘子耐张并联串的双段红外图像如图 1 所示。上、下串瓷绝缘子片数均为 54 片, 高压侧单串包含 30 片, 低压侧单串包含 32 片, 即有 8 片重叠。



(a) 高压侧

(b) 接地侧

图 1 1 000 kV 瓷绝缘子耐张并联串双段红外图像

Figure 1 Infrared images of double-segment

1 000 kV tension porcelain insulator string

利用 SIFT 拼接算法对图 1(a)、(b) 进行图像拼接, 拼接特征如图 2 所示, 拼接后的图像如图 3 所示。由图 2 可知, 由于 2 张图谱中绝缘子串轴向角度存在较大偏差, 且绝缘子形状特征大量周期性地重复出现, 算法无法找到正确的配准位置, 导致特征点连线混乱。经计算, 待拼接图谱的空间变换矩阵近奇异, 无法得到可靠的逆变换图谱, 造成多片绝缘子红外特征目标丢失, 拼接结果见图 3。

由于绝缘子劣化诊断仅需对全串绝缘子铁帽温度分布曲线进行分析, 故可尝试分别提取出包含长串绝缘子局部特征的部分串温度分布曲线, 再对部分串温度分布曲线进行数据拼接, 最终得到全串温度分布曲线。

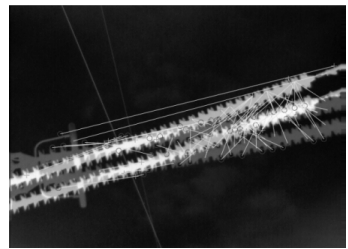


图 2 图像拼接特征点分布与连线

Figure 2 Distribution of feature points and connecting line of image splicing

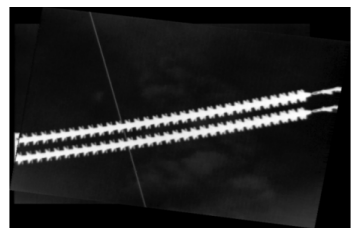


图 3 经图像拼接融合的特高压绝缘子耐张并联串

Figure 3 UHV tension porcelain insulator string spliced by image and fusion

2 特高压长串绝缘子温度分布曲线拼接

2.1 基于加权数据融合的双段温度曲线拼接方法

在红外图谱拍摄过程中, 图像对焦于画面中央。因为热像仪成像透镜面积有限, 靠近图像边缘位置辐射接收率相较于图像中央偏低, 温度采集准确度会因此降低。温度分布曲线重叠区域每片绝缘子铁帽采集 2 次温度, 但而由于拍摄时间、角度、距离、环境

的变化,使重叠区域的温度曲线并不完全重合。以图 1(a)、(b)中耐张并联串的下串为例,通过红外图像处理 and 特征提取算法,可分别求出左半串(高压侧)、右半串(低压侧)铁帽温度分布曲线,如图 4 所示,可见重叠区域(8片绝缘子)存在 0.4~0.8 °C 的偏差。

为获取整串绝缘子铁帽温度曲线,本文提出一种基于加权数据融合的双段温度曲线拼接方法,其具体流程如图 5 所示。

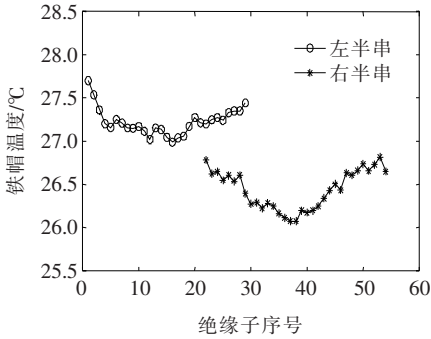


图 4 特高压左半串(高压侧)、右半串(低压侧)铁帽温度分布曲线实例

量,将非重叠区的曲线拼接到融合曲线上,从而实现温度分布曲线的修正。

$$T_{dj} = T_j + d_j \tag{9}$$

式中 d_j 为第 j 条温度曲线的偏移系数,通过重叠区最近点的偏移可以算出,计算方法为

$$\begin{cases} d_1 = T_{c1} - T_{1,n_1-n_p+1} \\ d_2 = T_{c_{n_p}} - T_{2,n_p} \end{cases} \tag{10}$$

得到 T_{d1} 、 T_c 、 T_{d2} 后,将其按照顺序组合为完整的温度分布曲线,如图 6 所示。

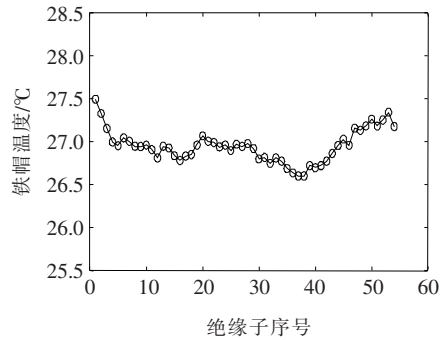


图 6 特高压瓷绝缘子温度曲线加权数据融合拼接实例

Figure 6 Temperature curve example of UHV porcelain insulator string by using weighted curve splicing

由式(7)可知,当衰减因子 η 为 0 或 1 时,可化简加权公式为均值公式,即常用的均值拼接法为融合拼接的特殊情形。除此加权数据融合拼接方法外,特高压长串瓷绝缘子铁帽温度分布曲线还可应用舍入拼接和中点拼接等方法。

2.2 其他拼接方法

舍入拼接即舍弃重叠区的一组数据,直接将剩下的数据拼接到前列数据的尾端。其效果如图 7 所示,可见拼接处出现明显数据间断,不利于绝缘子串劣化诊断,可能产生诊断误报。

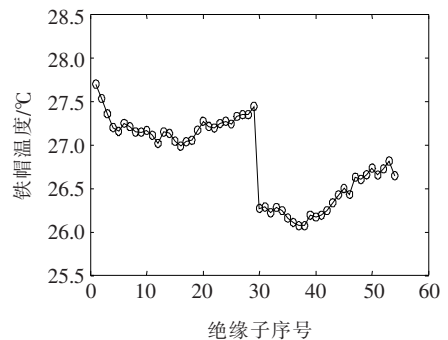


图 7 特高压瓷绝缘子温度曲线舍入拼接实例

Figure 7 Temperature curve example of UHV porcelain insulator string by using rounding curve splicing

Figure 4 Captemperature distribution curve example of left-half (higher voltage end) and right-half (lower voltage end) of UHV tension porcelain insulator string

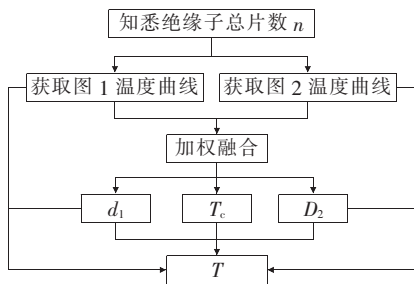


图 5 双段温度曲线拼接方法基本流程

Figure 5 Flow chart of double-segment temperature curve splicing method

根据 2 条曲线特征,对重叠区温度曲线进行加权运算,即

$$T_{ci} = \frac{1}{2} [(1 + \eta_i) T_{1,i} + (1 - \eta_i) T_{2,i}] \tag{7}$$

$$\eta_i = \eta^i - \eta^{n_p - i + 1} \tag{8}$$

式(7)、(8)中 T_{ci} 为融合后的温度值; $T_{1,i}$ 、 $T_{2,i}$ 分别为 2 条温度分布曲线重叠区的温度值; n_p 为重叠片数; η_i 为每片的加权系数; η^i 为衰减因子,当图像质量较好时, η 取值可取 0.98。

重叠区的温度曲线融合后还需计算曲线的偏移

中点拼接即寻找绝缘子铁帽温度分布曲线重叠区的中点为分界位置,分别舍弃越过中点的绝缘子铁帽温度值。中点拼接效果如图 8 所示,可以看出中点拼接形成的数据间断比舍入拼接稍小,但依然十分明显,不利于绝缘子串劣化诊断。

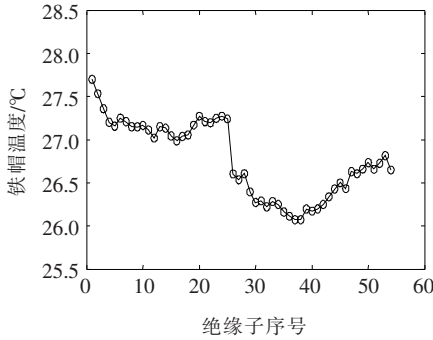


图 8 特高压瓷绝缘子温度曲线中点拼接实例

Figure 8 Temperature curve example of UHV porcelain insulator by using midpoint curve splicing

3 超高压绝缘子串温度曲线拼接对比验证

为验证拼接方法的准确性,本文采用 500 kV 瓷绝缘子串现场采集的全串以及两张分别包含高压侧与接地侧的红外图谱,提取绝缘子铁帽温度曲线并进行拼接。某一 500 kV 瓷绝缘子全串和双段(高压侧、接地侧)红外图谱如图 9 所示,提取 3 张图的铁帽温度分布曲线,如图 10 所示。

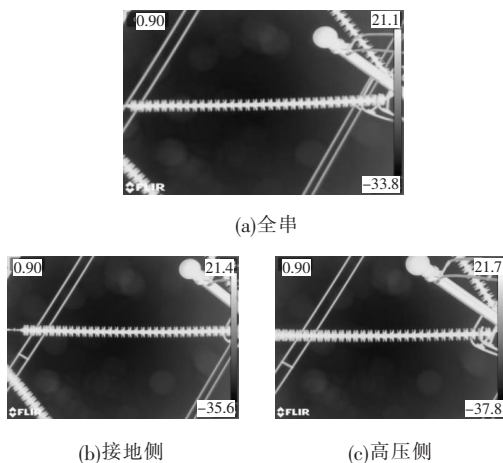


图 9 500 kV 瓷绝缘子耐张串红外图像

Figure 9 Infrared images of 500 kV tension porcelain insulator string

对上述 500 kV 绝缘子左串(接地侧)、右串(高压侧)铁帽温度分布曲线,分别采用上文提及的 3 种曲线拼接方法进行处理,结果如图 11 所示。由图 11 可知,基于上述 3 种拼接方法的合成曲线在趋势上与全串温度分布曲线基本吻合,其中加权数据融合曲线形态特征与全串温度分布曲线最为相近。

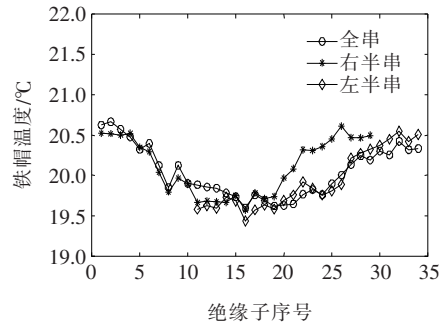


图 10 500 kV 瓷绝缘子耐张串红外图像

Figure 10 Temperature distribution curve example of left-half (lower voltage end) and right-half (higher voltage end) of 500 kV tension porcelain insulator string

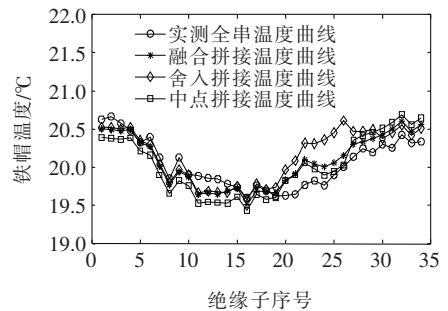


图 11 超高压瓷绝缘子温度曲线拼接结果对比

Figure 11 Comparison of temperature curves of 500 kV porcelain insulator string by 3 splicing methods

为了对拼接效果进行量化对比,可使用相关系数法来检验各拼接方法合成曲线与全串温度曲线的相似性,即

$$C_{ORREL} = \frac{C_{ov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \quad (11)$$

式中 $C_{ov}(x, y)$ 为 2 组数据的协方差; $D(x)$ 、 $D(y)$ 分别为 2 组数据的方差。根据式(11)可求得各拼接方法合成曲线与全串温度曲线的相关系数。

除相关系数法外,亦可使用残差平方和衡量各方法的拼接效果,即

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2 \quad (12)$$

式中 J 为图 11 中融合拼接温度曲线与实测全串温度曲线残差的平方和; Y_i 为验证曲线第 i 片绝缘子钢帽温度; X_i 为拼接曲线第 i 片绝缘子钢帽温度。

如表 1 所示,舍入拼接的相关系数最低,而加权数据融合拼接与中点拼接的相关系数基本达到或超过 0.8。其中,加权数据融合拼接的相关系数最高(0.881),具有强相关性。另外,在 3 种方法计算所得的残差平方和中,融合拼接产生的误差最小,与相关系数评价结果一致。

表 1 3 种温度分布曲线拼接方法效果对比

Table 1 Comparison of 3 temperature curve splicing method

拼接方法	相关系数	残差平方和
加权数据融合	0.881	0.909
中点	0.798	1.672
舍入	0.730	2.452

4 结语

针对超—特高压长串瓷绝缘子难以在单张红外图谱中清晰完整成像的现实问题,本文提出了一种基于加权数据融合的双段温度曲线拼接方法,并进行了实验验证。本方法基于高压侧、接地侧分段串温度分布曲线,自动拼接合成完整的全串温度曲线;相较于常规的红外图像拼接方法和针对曲线的舍入、中点拼接方法具有显著优势。

1) 仅需获取长串瓷绝缘子双段温度分布曲线,便可快速地拼接合成全串温度曲线,有效地避免了图像拼接中因角度偏差、周期性重复特征引起的目标缺失问题;

2) 采用加权数据融合能够有效地抑制双段曲线重叠拼接处的数据间断问题;相关系数以及残差平方和评价结果表明,本文提出的融合拼接方法所合成的温度曲线与实测全串温度曲线具有较高的吻合度。

综上所述,本文提出的基于加权数据融合的双段温度曲线拼接方法,有效地解决长串绝缘子全串温度特征提取的难题,为超—特高压瓷绝缘子红外

智能诊断技术体系提供了重要前提。

参考文献:

- [1] 邱志斌,阮江军,黄道春,等. 输电线路悬式瓷绝缘子老化形式分析与试验研究[J]. 高电压技术,2016,42(4):1259-1267.
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on aging modes and test of transmission line porcelain suspension insulators[J]. High Voltage Engineering, 2016, 4(4):1259-1267.
- [2] 郭磊,张晓鹏,全松利,等. 低(零)值盘形悬式瓷绝缘子带电检测及实验研究[J]. 电瓷避雷器,2015(4):14-18.
GUO Lei, ZHANG Xiaopeng, TONG Songli, et al. Energized test and experimental study of low(zero) resistance cap and pin ceramic insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(4):14-18.
- [3] 王平,李抗,耿江海,等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14):93-98.
WANG Ping, LI Kang, GENG Jianghai, et al. Study on space electric field of 110 kV faulty porcelain suspension insulator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14):93-98.
- [4] 闫丽梅,刘永强,徐建军等. 基于 Grabcut 分割和填充物面积判别的复合绝缘子断串诊断[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(22):114-119.
YAN Limei, LIU Yongqiang, XU Jianjun, et al. Broken string diagnosis of composite insulator based on Grabcut segmentation and filler area discrimination [J] Power System Protection and Control, 2021, 49 (22):114-119.
- [5] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热像特征[J]. 电网技术,1997,21(10):44-46.
HU Shizheng. Heating mechanism and thermograph of degraded insulators[J]. Power System Technology, 1997, 21(10):44-46.
- [6] 李佐胜,姚建刚,杨迎建,等. 湿污绝缘子发热模型[J]. 电工技术学报,2009,24(7):21-27.
LI Zuosheng, YAO Jiangan, YANG Yingjian, et al. Heating model of polluted and wetted insulators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (7):21-27.
- [7] 居一峰,蒋卿,杨鹤猛,等. 异常发热复合绝缘子温升的影响因素研究[J]. 智慧电力,2020,48(11):86-91.
JU Yifeng, JIANG Qing, YANG Hemeng, et al. Study

- on influence factors of temperature rise on composite insulator with abnormal heating[J]. *Smart Power*, 2020, 48(11):86-91.
- [8] 王思华,王军军,赵磊等. 污秽成分对复合绝缘子表面电场的影响[J]. *中国电力*, 2021, 54(7):149-157.
WANG Sihua, WANG Junjun, ZHAOLei, etc Influence of pollution components on surface electric field of composite insulators[J]. *Electric Power*, 2021, 54 (7): 149-157.
- [9] 方春华,方雨,李景,等. 脉冲激光清洗瓷式绝缘子表面污秽温度场和应力场分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(04): 62-67.
FANG Chunhua, FANG Yu, LI Jing, et al. Analysis of temperature field and stress field of pollution on the surface of porcelain insulator cleaned by pulse laser[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(4):62-67.
- [10] 夏德分. 红外热像检测零值绝缘子影响因素研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
- [11] 关石磊. 基于红外热像的零值绝缘子识别方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
- [12] 彭子健. 基于红外热像的瓷绝缘子劣化识别技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
- [13] 唐睿,张铭予,徐宏,等. 基于深度学习的输电线路巡检图像绝缘子识别[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(4): 41-46.
TANG Rui, ZHANG Mingyu, XU Hong, et al. Insulator recognition in transmission line inspection image based on deep learning[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(4): 41-46.
- [14] 杨蕊,李雪. 基于显著特征的红外全景图像拼接[J]. *激光杂志*, 2020, 41(6):98-101.
YANG Rui, LI Xue. Infrared panoramic image mosaic based on salient features[J]. *Laser Journal*, 2020, 41 (6):98-101.
- [15] 代少升,姚俐. 基于 ROI 的高精度红外全景拼接算法研究[J]. *半导体光电*, 2020, 41(4):572-577.
DAI Shaosheng, YAO Li. Research on the method of infrared panoramic image mosaic based on ROI[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(4):572-577.
- [16] 顾晓东,唐丹宏,黄晓华. 基于深度学习的电网巡检图像缺陷检测与识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49 (5):91-97.
GU Xiaodong, TANG Danhong, HUANG Xiaohua. Deep learning-based defect detection and recognition of a power grid inspection image[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49 (5):91-97.