

一种特高压线路超长盘形悬式瓷绝缘子串红外图像拼接方法

邓志阳¹, 李唐兵², 况燕军³, 康琛²

(1. 江西师范大学计算机信息工程学院, 江西 南昌 330200; 2. 南昌科晨电力试验研究有限公司, 江西 南昌 330096; 3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:超长盘形悬式瓷绝缘子串是输变电线路中重要的绝缘部件之一, 因为单帧红外图像分辨率低、视野有限, 所以当前超长盘形悬式瓷绝缘子串红外零值检测面临着难以获取清晰的全串红外图像的问题。文中提出了一种基于变换器的局部特征匹配算法(local feature matching with transformers, LoFTR)的绝缘子串红外图像拼接方法。1) 针对红外图像中背景杂物干扰问题, 利用语义分割“U”形网络(U-network, U-Net)模型对红外图像进行语义分割, 去除背景杂物对绝缘子串特征提取与匹配的影响; 2) 针对现有的图像拼接算法难以正确配准的问题, 通过对重叠区域中心部分进行掩膜操作, 利用LoFTR算法, 提取绝缘子片的特征, 使获取的特征点对匹配正确率更高。江西某线路的实验结果表明, 文中方法的特征点对匹配正确率和图像拼接正确率分别达到了86.1%和95%, 高于其他典型图像拼接方法, 验证了此方法在超长瓷绝缘子串红外图像拼接任务中的有效性。

关键词:超长瓷绝缘子串; 红外图像拼接; LoFTR; U-Net; 特征匹配

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2025)03-0060-05

0 引言

瓷绝缘子串是电力系统中广泛使用的绝缘方式, 如用于输电线路、配电线路及电气设备中。由于长期暴露在恶劣环境中, 瓷绝缘子串可能出现绝缘性能下降甚至故障, 影响电力系统的安全运行^[1]。为了有效监测和评估瓷绝缘子串的状态, 红外热成像技术因其非接触性、实时性、高灵敏度以及无需停电等特点, 被广泛应用于设备维护中, 显著提高了维护效率和安全性^[2-3]。当绝缘子串的电压等级超过220 kV时, 绝缘子串长度增加, 传统的工业热成像仪器难以拍摄到单帧清晰的全串红外图像, 这为超长绝缘子串的红外零值检测带来了困难, 因此利用图像拼接技术是获得全串红外图像的重要手段。

传统的图像拼接方法主要是利用图像中的角点或边缘点等特征点来实现图像的拼接, 特征点提取方式包括尺度不变特征变换(scale-invariant feature trans-

form, SIFT)^[4]、加速鲁棒特征(speeded up robust features, SURF)^[5]、定向快速角点检测和旋转简洁描述子(oriented fast and rotated brief, ORB)^[6]、二进制鲁棒不变可扩展关键点^[7]和加速非线性尺度空间特征检测^[8]等, 但由于这类红外图像中绝缘子片的形状特征呈现出高度的相似性, 导致提取的角点或边缘点相似, 易出现误匹配, 使用传统的图像拼接算法无法完成绝缘子串红外图像的拼接任务。针对瓷支柱型绝缘子串的红外图像, 文献[9]通过去除图像背景, 依据重叠区域的最大结构相似度值来实现图像拼接, 该方法在实际应用场景中计算复杂度较高; 文献[10]提出了一种针对绝缘子串可见光图像的拼接方法, 但由于可见光图像与红外图像在成像原理和特征表现上存在本质差异, 该方法不适用于红外图像的拼接任务; 文献[11]尝试整合多种策略, 设计了全新的匹配策略, 但仍然未能有效解决传统算法在处理重复图案以及弱纹理图像时, 特征提取困难的核心问题。

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 江西省自然科学基金项目(面向电力设备的红外图像超分辨重建与发热缺陷弱小目标检测, 20242BAB25080)。

作者简介: 邓志阳(2000), 男, 硕士研究生, 从事图像拼接研究。

随着深度学习的快速发展,一些基于深度学习的特征提取算法应运而生,为解决传统方法的局限性提供了新的思路。Sarlin等人^[12]提出的SuperGlue算法通过结合图神经网络和注意力机制,提高了特征匹配效率;Sun等人^[13]提出的基于变换器的局部特征匹配算法(local feature matching with transformers, LoFTR)在处理弱纹理和重复图案图像时能够提取大量特征点,为复杂场景下的图像拼接提供了更多的特征点;Wang等人^[14]提出的Efficient LoFTR在LoFTR模型中引入聚合注意力机制,提高了特征提取效率。尽管这些深度学习算法在特征提取方面表现出色,但在处理绝缘子串红外图像时仍存在以下局限:1)在拍摄绝缘子串的红外图像时,除绝缘子串外会有大量背景杂物,影响特征提取和图像拼接之后的效果;2)由于绝缘子串是形状相同的绝缘子片叠合,实际拍摄时的视角差异,绝缘子片边缘部分发生透视变形,提取到的大量特征点对在匹配时存在严重的误匹配现象,导致拼接错误。

文中提出了一种基于LoFTR特征提取与匹配算法的超长瓷绝缘子串红外图像拼接方法。该方法采用语义分割的“U”形网络(U-network, U-Net)^[15]去除绝缘子串背景杂物以降低其干扰,利用Hough^[16]变换,对绝缘子串进行角度矫正,根据绝缘子片数计算待拼接图像的特征提取与匹配区域,对该区域中心部分采用LoFTR算法进行特征点提取与匹配,获取到的匹配特征点对精度更高,减少了绝缘子片相似性导致的误匹配。

1 绝缘子串红外图像拼接方法

1.1 绝缘子串红外图像分割

热红外热像仪拍摄特高压线路的超长盘形悬式瓷绝缘子串时,由于现场环境复杂,获取的红外图像中往往包含大量冗余背景信息,如图1所示。这些背景信息不仅会对特征提取匹配造成干扰,降低特征提取匹配的准确性,还会影响图像拼接的质量。因此,在图像拼接前,需通过图像分割技术,去除绝缘子串之外的背景杂物。

基于深度学习的图像语义分割方法因其高速度和强泛化能力被广泛应用于各类场景,文中选取U-Net模型作为绝缘子串红外图像像素级分割方法。在构建绝缘子串红外图像语义分割数据集(约450张图像)的基

础上,对U-Net模型进行训练和测试。模型分割绝缘子串的性能如表1所示,绝缘子串与背景分割的平均精度达到了94.09%,图2给出了某绝缘子串分割结果图。

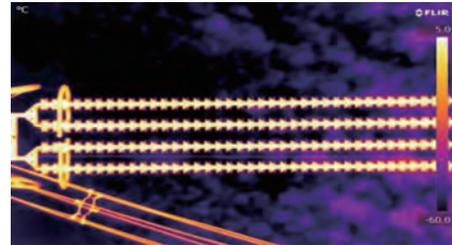


图1 绝缘子串局部红外图像

表1 U-Net分割结

参数	值	%
精度	93.71	
召回率	92.43	
平均精度	94.09	

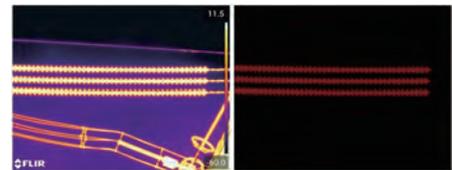


图2 U-Net分割绝缘子串结果图

1.2 绝缘子串角度矫正

在拍摄绝缘子串的红外图像过程中,可能会因人工或外部环境导致红外图像中的绝缘子串呈现角度倾斜的状态。为方便后续重叠部分的计算,利用Hough变换和旋转矩阵,将分割出的绝缘子串区域图像校正至水平位置。其中,Hough变换的原理是将图像中的多个点集转化为直线的参数表示,提取直线的倾斜角度,并利用旋转矩阵对整个图像进行旋转,将红外图像中的绝缘子串调至水平位置。旋转矩阵的公式如式(1)所示,某红外图像绝缘子串角度矫正前后效果图如图3和图4所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ 为绝缘子串中直线的倾斜角度; (x, y) 为角度矫正前像素点的坐标; (x', y') 是经过角度矫正后的像素点的坐标。



图3 绝缘子串角度矫正前图像

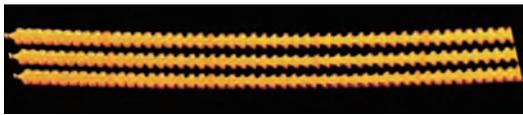


图4 绝缘子串角度矫正后的图像

1.3 特征提取与配准区域选取

由于LoFTR算法在特征提取过程中引入了位置编码,对于包含大量重复图案的绝缘子串红外图像,该算法会在非图像重叠区域生成大量误匹配的特征点对,如图5所示。文献[17]提出通过设置图像重叠区域掩膜,将特征提取与匹配范围限制在重叠区域,从而降低误匹配。

重叠区域的计算过程为,通过形态学处理和连通域标记,计算两张红外图像中的包含的绝缘子片数^[18],利用绝缘子串总片数计算重叠片数,得出重叠区域大小。

但在实际中,拍摄超长盘形悬式瓷绝缘子串的红红外图像时,不同位置的绝缘子片的边缘部分会发生透视变形,如图6所示。导致不同位置的绝缘子在红外图像中呈现不同的形状,对特征提取与匹配仍存在较大影响。如图7所示,在整个重叠区域提取与匹配特征,仍难以找到能让图像正确拼接的匹配点对(为便于观察,特征点对已进行网格化筛选)。

由于镜头与绝缘子串之间的距离保持相对恒定,且绝缘子串在红外图像中尽可能保持水平排列,两张红外图像重叠区域的中心部分因视角变化而产生的透视变形效应较为相似,在重叠区域的中心部分提取的特征点具有更高的相似性和匹配的准确性。文中根据图像大小选取绝缘子串红外图像重叠区域的中心部分(大小为30像素)作为特征提取与匹配区域,并采用掩膜的形式进行标记,与其他区域进行区分。图8展示了在重叠区域的中心部分获取的匹配特征点对,分布更加整齐。

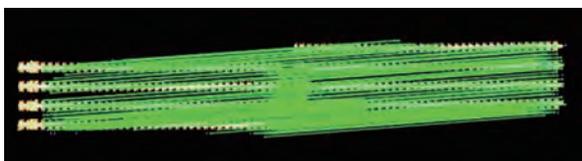


图5 无掩膜特征提取与匹配

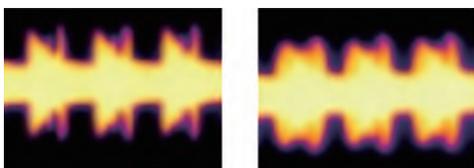


图6 不同位置绝缘子片形状对比

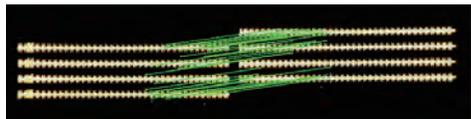


图7 重叠区域掩膜特征提取与匹配

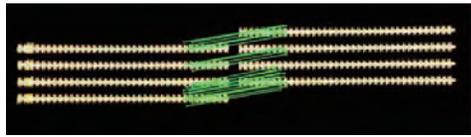


图8 重叠区域中心部分掩膜特征提取与匹配

1.4 LoFTR 特征提取与匹配

LoFTR 是一种基于深度学习的特征提取与匹配算法,通过引入Transformer架构与位置编码,对图像的全局上下文信息进行建模,实现从粗到细的特征匹配,如图9所示,具有鲁棒性强、精度高的特点。在低纹理、重复纹理或光照变化等复杂场景下,能提取到大量的匹配特征点对。因此,文中在选取的特征提取与配准区域使用LoFTR算法。

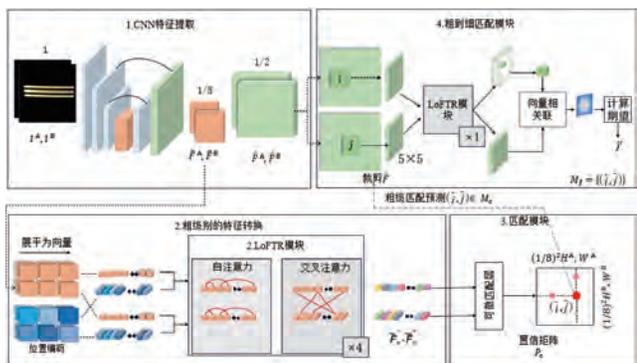


图9 LoFTR算法流程图

由图9可知,LoFTR算法首先使用卷积神经网络(convolution neural network, CNN)对输入图像大小为 H^A 、 W^A 和 H^B 、 W^B 的图像 I^A 、 I^B 提取多尺度特征图,生成低分辨率和高分辨率特征量 \tilde{F}^A 、 \tilde{F}^B 和 \hat{F}^A 、 \hat{F}^B 。将低分辨率特征量展平为特征向量,并添加位置编码,然后通过LoFTR模块进行4次自注意力和交叉注意力迭代优化转换为易于匹配的特征表示向量 \tilde{F}_v^A 、 \tilde{F}_v^B ,使用可微匹配层来匹配变换后的特征,最终得到置信矩阵 P_c ,根据置信度阈值和互近邻条件筛选 P_c 中的匹配项,生成粗略匹配预测点对 M_c 。再将 M_c 的每个粗略级匹配 (\hat{i}, \hat{j}) 在高分辨率特征图 \hat{F}^A 、 \hat{F}^B 上定位其位置 (i, j) ,并在高分辨率特征图上裁剪为两组大小为 5×5 的局部窗口,使用LoFTR模块将每个窗口进行1次特征变换,从而生成两个变换后的局部特征图,

将其中一个特征图的中心向量与另外一个特征图的所有向量相关联,从而生成一个热图,表示 (\hat{i}, \hat{j}) 领域中每个像素的匹配概率,通过计算概率分布的期望值,从而得到 \hat{i} 的匹配特征点在图像 I^b 上的位置 \hat{j}' ,再将所有 (\hat{i}, \hat{j}') 收集到一起,得到最终的匹配特征点对 M_f 。

1.5 图像变换

在得到匹配特征点对之后,通过相互最近邻检查和边缘采样一致(marginalizing sample consensus, MAGSAC++)^[19]过滤这些匹配的特征点,然后计算两幅图像之间的变换矩阵。通常,图像拼接的图像变换都会采用单应性矩阵来对图像进行透视变换,但在实际应用中,单应性变换极易受到错误特征匹配的影响,导致拼接图像出现畸变和不自然效果的情况。由于拍摄过程中,相机和绝缘子串的几乎保持垂直,距离保持相对恒定,所以图像变换选择仿射变换,只对图像做旋转、缩放、平移等操作,减少拼接之后图像的畸变^[20],使图像拼接效果更加自然。仿射变换矩阵如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (x', y') 是变换后的坐标; (x, y) 是原始坐标;

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ 是线性变换矩阵; (t_x, t_y) 是平移向量。

2 实验结果与分析

文中实验过程中,所采用的超长盘形悬式瓷绝缘子串的红外图像是在江西某线路上采集,受限于拍摄设备,绝缘子串被分为两段进行采集,采集了约70组图像,需对绝缘子串进行拼接处理。

实验环境为Intel Core (TM)i5-9300HQ CPU,内存为16 GB,显卡为RTX2060的64位,操作系统为Win10,编程语言为Python3.11,编程环境为Vscode。

实验随机选取了40组超长盘形悬式瓷绝缘子串红外图像进行拼接,为验证文中方法选取区域的特征提取与匹配的有效性,使用SIFT、ORB、Efficient LoFTR、SuperGlue和LoFTR(重叠区域)等五种特征提取算法与文中提出的方法进行了对比。LoFTR(重叠区域)表示LoFTR算法的特征提取与匹配是在整

个图像的重叠区域进行的,对比结果如表2和图10所示。表2中,特征匹配正确对数表示平均一组图中的匹配正确的特征点对的数量。

2.1 图像拼接结果与分析

实验结果表明,传统特征提取算法在处理绝缘子串红外图像时存在显著局限性。如表2和图10(a)(b)所示,由于这些算法主要依赖图像角点或边界信息进行特征点提取,而绝缘子串红外图像具有高度重复的纹理特征,导致提取的特征点误配率较高,匹配正确的特征点对数量不足,难以完成绝缘子串红外图像拼接任务。

表2 特征匹配结果对比

特征提取方法	特征匹配正确对数/对	匹配正确率/%
SIFT	2.00	3.00
ORB	18.35	5.06
SuperGlue	18.85	56.91
Efficient LoFTR	44.00	48.79
LoFTR(重叠区域)	107.05	84.71
文中方法	41.15	86.11

SuperGlue算法在特征匹配正确对数和匹配正确率方面均优于传统算法,但其提取的特征点对数量相对较少,且匹配正确率仍有待提升。如图10(c)所示,在处理包含多条绝缘子串的红外图像时,该算法会出现绝缘子串错位拼接的问题;Efficient LoFTR虽在粗特征图转换时引入了聚合注意力机制来提升特征提取效率和提取能力,但没有关注全局信息,所以在拼接含有多条绝缘子串的红外图像时,出现了错拼情况,如图10(d)所示;采用LoFTR算法并在重叠区域设置掩膜进行特征提取与匹配虽然获得了较多匹配正确的特征点对,但拼接结果存在绝缘子片数不准确的问题,如图10(e)所示,拼接后的红外图像中绝缘子片数为55片,与实际的57片存在偏差。文中提出的方法在特征点对匹配正确率方面表现优异,特征点对匹配正确率高达86.1%,如图10(f)所示,不仅实现了高质量的图像拼接,且拼接之后的红外图像中绝缘子片数量也无误。

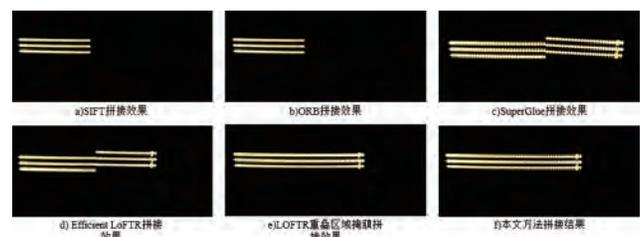


图10 不同方法拼接效果对比图

2.2 图像拼接质量对比

为进一步客观的对比不同方法拼接红外图像中绝缘子串的效果,通过绝缘子串的总片数计算了不同方法的拼接正确率,并计算拼接后图像重叠区域的均方根误差(root mean square error, RMSE)值,如表3所示。RMSE是衡量两幅图像在重叠区域像素差异的指标,该值越低表示拼接之后的图像质量越高,其计算公式如式(3)所示:

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H (I_1(x,y) - I_2(x,y))^2} \quad (3)$$

式中: R 为RMSE值; W 和 H 分别是重叠区域的宽度和高度; $N=W \times H$ 是重叠区域的像素总数; $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 分别是两幅图像在坐标 (x,y) 的像素。

表3 图像拼接质量对比

特征提取方法	拼接正确率/%	RMSE值
SIFT	0	5.184
ORB	0	4.927
SuperGlue	70	3.756
Efficient LoFTR	60	3.765
LoFTR(重叠区域)	35	3.712
文中方法	95	3.721

从表3的数据可以看出,绝缘子串红外图像由于其图案的高度重复性,导致传统特征匹配算法(如SIFT、ORB)难以提取有效的特征点,从而无法完成绝缘子串红外图像的拼接任务;相比之下,SuperGlue和Efficient LoFTR算法在拼接正确率上表现优于传统算法,但其RMSE值仍然高于文中提出的方法;LoFTR算法在重叠区域掩膜的情况下,虽然拼接图像的RMSE值最低,但其拼接正确率仅为35%,拼接结果中大部分绝缘子片数不准确。文中方法在保证高拼接正确率(达到95%)的同时, RMSE值仅略高于LoFTR算法在重叠区域掩膜情况下的结果,差值仅为0.009。

3 结语

针对超长盘形悬式瓷绝缘子串红外图像绝缘子形状重复导致使用传统方法无法拼接的难题,提出了一种基于LoFTR特征提取与匹配算法的超长瓷绝缘子串红外图像拼接方法。文中利用U-Net语义分割网络去除背景杂物的干扰,通过Hough变换对绝缘子串进行角度矫正,根据绝缘子片数计算出特征提取和匹配区域,对该区域进行特征掩膜,利用LoFTR算法在该区域进行特征提取与匹配,使用仿射变换来对绝缘子串的

红外图像进行拼接。实验结果表明,文中提出的方法能准确完成超长盘形悬式瓷绝缘子串红外图像的拼接任务,特征点对匹配正确率达到86.11%,拼接的红外图像绝缘子片数准确,拼接正确率达95%,有效地解决了超长盘形悬式瓷绝缘子串红外图像难以拼接的问题。

参考文献:

- [1] 周阳洋,胡俊华,徐华,等.一种瓷支柱绝缘子红外图像目标检测算法[J].浙江电力,2023,42(11):78-85.
- [2] 徐奇伟,黄宏,张雪峰,等.基于改进区域全卷积网络的高压引线接头红外图像特征分析的在线故障诊断方法[J].电工技术学报,2021,36(7):1380-1388.
- [3] 董懿飞,王晓杰,王仁书,等.基于一维残差网络的复合绝缘子发热缺陷检测[J].红外技术,2023,45(6):663-670.
- [4] 卢泉,杨振华,黄粒峰.改进最佳缝合线的红外图像拼接方法[J].红外技术,2022,44(6):580-586.
- [5] 江智,江德港,黄子杰,等.基于IB-SURF算法的无人机图像拼接技术研究[J].计算机工程与应用,2024,60(3):263-269.
- [6] 彭畅,李广泽,张晓阳,等.基于改进的ORB算法的红外遥感图像拼接研究[J].控制工程,2020,27(8):1332-1336.
- [7] 卢文祥,何小海,员旭拓,等.基于PC-BRISK的岩石显微图像拼接[J].电子测量技术,2024,47(10):191-198.
- [8] 崔晨阳,方宇,高玮玮,等.基于AKAZE和PROSAC的风机叶片裂纹图像拼接方法[J].电子测量技术,2024,47(7):177-183.
- [9] Hua Xu, Yangyang Zhou, Junhua Hu, et al. A segmentation and stitching method on infrared images of porcelain post insulator[C]//IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing: IEEE, 2023:52-56.
- [10] Lin Nie, Yuqing Wang, Xiang Zhu, et al. Research on creepage distance measurement method of rod insulator based on image stitching[C]//Proceedings of the 16th Annual Conference of the China Electrotechnical Society, Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE). Beijing: Springer, 2022:1085-1096.
- [11] Bellavia F. SIFT matching by context exposed[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023,45(2):2445-2457
- [12] SarlinP-E, DeTone D, MalisiewiczT, et al. SuperGlue: Learning feature matching with graph neural networks[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020:4938-4947. (下转第72页)

件表面异物清理标准化工艺、绝缘件表面清擦材料及工艺要求；三是开展支撑绝缘子附近金属异物引发绝缘击穿的模拟试验；四是优化产品设计，研究微粒捕捉器等提升异物容错能力，解决异物引发放电问题。

6 结语

文中详细分析了某特高压变电站 1000 kV 断路器的放电故障，通过现场检查和解体分析，确定了故障原因为内部残留异物导致的放电，并根据此次故障所暴露出的工艺管控不到位的问题，除要求运维人员加强对设备的管控和检测外，还针对该型断路器提出了增加出厂机械操作磨合次数、开展金属异物绝缘击穿模拟试验和开发微粒捕捉器等要求，为特高压设备的运行维护提供了参考，有助于提升特高压输电技术的可靠性和稳定性，保障电力系统安全运行。

参考文献：

- [1] 张丕沛, 郭晨瑞, 李杰, 等. GIS 内部异物放电故障的特征机理研究[J]. 山东电力技术, 2023, 50(5): 41-47.
- [2] 和晓辉, 周磊, 邱鹏锋, 等. 220 kV GIS 隔离开关对地放电故障案例分析[J]. 云南电力技术, 2023, 51(2): 69-74.
- [3] 朱建武, 周保红. GIS 隔离开关触头烧损故障分析[J]. 江西电力, 2010, 34(3): 20-21.
- [4] 吴星, 刘志刚, 饶鸿猷, 等. GIS 组合电器内部放电诊断试验及原因分析[J]. 江西电力, 2022, 46(9): 38-42, 62.
- [5] 张语桐, 吴泽华, 徐家忠, 等. 特高压 GIS 用单支撑绝缘子绝缘结构优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 258-269.
- [6] 徐志钊, 郭一帆, 李先锋, 等. 机械缺陷对 GIS 外壳振动影响[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 156-164, 185.
- [7] 杨勇, 史方颖, 潘巧梅. 海上风电用气体绝缘金属封闭开关设备抗振可靠性研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 31-35, 40.
- [8] 李星, 刘卫东, 许渊, 等. 冲击振动下 GIS 内金属颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2838-2848.
- [9] 韩帅, 高飞, 廖思卓, 等. GIS 盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 12-22.
- [10] 李杰, 李晓昂, 吕玉芳, 等. 正弦振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4580-4589, 4597.
- [11] 刘衍, 周友武, 徐鹏, 等. X 射线数字成像技术在 GIS 检测中的应用研究[J]. 江西电力, 2014, 38(6): 72-74.
- [12] 李杰, 李晓昂, 吕玉芳, 等. 正弦振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4580-4589, 4597.
- [13] Jiaming Sun, Zehong Shen, Yuang Wang, et al. LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers[C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Virtual Event: IEEE, 2021: 8922-8931.
- [14] Wang Yifan, He Xingyi, Peng Sida, et al. Efficient LoFTR: Semi-dense local feature matching with sparse-like speed [C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2024: 21666-21675.
- [15] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). Munich: Springer, 2015: 234-241.
- [16] 李博, 刘会斌, 王胜辉, 等. 基于 GANR-UNet 的绝缘子红外图像分割及低零值故障诊断研究 [J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024: 1-11[2025-03-15]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.tm.20240115.1750.002>.
- [17] 李炳超, 王军, 李海丰, 等. 弱纹理飞机蒙皮曲面图像特征匹配及拼接[J]. 电子测量技术, 2024, 47(5): 124-132.
- [18] 李唐兵, 付鹏, 朱向前, 等. 绝缘子串红外图像中绝缘子盘面和钢帽区域的自动提取方法[J]. 红外技术, 2014, 36(8): 644-648.
- [19] Barath D, Noskova J, Ivashchkin M, et al. MAGSAC++, a fast, reliable and accurate robust estimator [C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020: 1304-1312.
- [20] Perera C J, Premachandra C, Kawanaka H. Low pixel resolution hyperspectral image mosaics generation using learning-based feature matching[J]. IEEE Access, 2023, 11: 104084-104093.

(上接第 64 页)