

文章编号: 1001-5078(2025)04-0513-07

· 激光应用技术 ·

基于激光图像处理的输电线路故障定位识别

冯善强, 赵永强, 余膺昊, 谭炜豪

(南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 研究基于激光图像处理技术的特高压输电线路故障定位识别方法, 提升故障定位识别效果。利用单点激光扫描成像仪, 采集特高压输电线路激光图像; 通过维纳滤波算法, 去噪处理特高压输电线路激光图像; 利用改进多显著性集成算法, 结合 K-means 聚类算法, 在去噪后激光图像内, 提取显著性颜色特征与结构特征, 并融合颜色特征与结构特征, 得到特高压输电线路显著性故障区域; 通过多尺度轮廓结构元素形态学, 处理显著性故障区域, 得到故障区域边缘图像; 以统计分析边缘图像颜色分布方式, 构建颜色判决模型, 凸显故障区域, 并提取故障区域的边缘轮廓; 在原始特高压输电线路激光图像内绘制故障区域边缘轮廓, 便可精准定位识别故障位置。实验证明: 该方法可有效采集特高压输电线路激光图像, 并完成去噪处理; 该方法可有效提取颜色与结构特征, 并有效提取故障区域边缘图像, 完成故障定位识别; 在不同过渡电阻时, 该方法均可精准定位识别输电线路故障位置。

关键词: 激光图像处理; 特高压; 输电线路; 故障定位识别; 维纳滤波; 形态学

中图分类号: TN249; TM726.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.005

Fault location and recognition of transmission lines based on laser image processing

FENG Shan-qiang, ZHAO Yong-qiang, YU Ying-hao, TAN Wei-hao

(Southern Power Grid Electric Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The fault location and identification method of UHV transmission lines based on laser image processing technology is studied to enhance the fault location and identification effect. Firstly, a laser image of UHV transmission line is captured by single point laser scanning imager, and the laser image of UHV transmission line is denoised by Wiener filter algorithm. Subsequently, by using the improved multi-significance integration algorithm and K-means clustering algorithm, the significant color features and structural features are extracted from the denoised laser image, and the color features and structural features are fused to obtain the significant fault region of UHV transmission lines. Next, through the morphology of multi-scale contour structure elements, the significant fault region is processed and the edge image of the fault region is obtained. Based on the statistical analysis of edge image color distribution, the color decision model is constructed to highlight the fault region and extract the edge contour of the fault region. Finally, the fault location can be accurately identified by drawing the edge outline of the fault area in the original UHV transmission line laser image. Experimental results show that this method can effectively acquire the laser image of the UHV transmission line and complete the denoising process. It also successfully extracts color and structural

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (No. 2021B0101420002) 资助。

作者简介: 冯善强 (1984 -), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力设备智能运检技术、数字变电站技术等。

E-mail: bbge9544@163.com

收稿日期: 2024-07-17; 修订日期: 2024-09-09

features and generates the edge image of the fault area, thereby completing fault location identification. This method enables accurate identification of the fault location in transmission lines, regardless of the transition resistors involved.

Keywords: laser image processing; extra high pressure; transmission lines; fault location and identification; Wiener filter; morphology

1 引言

特高压输电线路在远距离电力输送中具有重要作用^[1]。特高压输电线路属于电网内最脆弱的一个环节,因其线路比较长,导致其出现故障的概率较高,直接影响电网的运行安全^[2-3]。为此,对特高压输电线路进行故障定位识别非常重要,可及时发现特高压输电线路的故障位置,加快故障维修速度^[4],避免特高压输电线路故障影响区域进一步扩大。

例如,丁登伟等人通过监测暂态行波第一次抵达输电线路两端的时间、暂态电压特征以及传播速度,计算获取输电线路故障位置,完成输电线路故障定位识别。该方法可有效定位识别输电线路故障,定位识别误差小于 5 m^[5]。李翀等人通过关联输电线路两端位置与故障位置,构造输电线路故障测距模型,结合加权协方差融合系数,确定最终的输电线路故障位置。该方法具备输电线路故障定位识别的可行性与有效性^[6]。但上述方法对于输电线路的参数依赖度较高,导致输电线路故障定位识别存在一定的局限性。利用激光雷达可获取输电线路的全面信息^[7],结合图像处理技术,精准定位识别输电线路故障,且激光图像不受光照与图像采集角度影响,具备较优的故障定位识别效果。

输电线路的故障由多种因素引起,包括线路老化、自然环境影响、外力破坏等。这些因素会导致线路的形变、损坏或故障。为此,研究基于激光图像处理技术的特高压输电线路故障定位识别方法,提升输电线路故障定位识别精度。基于激光图像处理技术,能够对特高压输电线路的故障进行定位识别。可以解决线路的短路故障、接地故障等问题,通过单点激光扫描成像仪采集特高压输电线路的激光图像,然后对图像进行去噪、特征提取和融合等处理,最终能够精准定位识别故障位置,保障电网的安全运行。

本文在特高压输电线路故障定位识别上,通过融合单点激光扫描成像、维纳滤波去噪、改进多显著性集成算法与 K-means 聚类等技术,并创新性地结合多尺度轮廓结构元素形态学处理与颜色判决模型,实现了故障区域的精准定位与识别,展现了显著的技术创新性和实用性。

2 特高压输电线路故障定位识别方法

2.1 特高压输电线路激光成像方法

利用单点激光扫描成像仪,采集特高压输电线路的激光图像,单点激光扫描成像仪的结构如图 1 所示。

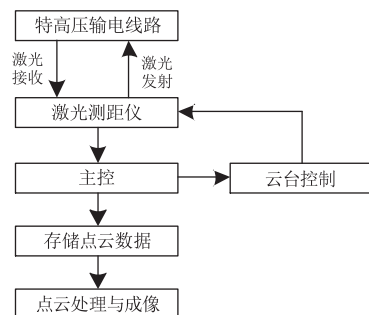


图 1 单点激光扫描成像仪结构图

Fig. 1 Structure diagram of single point laser scanning imaging instrument

利用激光测距仪发射激光至特高压输电线路,并接收作用在特高压输电线路上的激光点云信息;利用串口传输点云信息至主控,主控利用程序初步筛选点云信息,剔除无效点云信息,存储有效点云信息。传输主控指令至云台,云台利用最小角度分辨率变更特高压输电线路定位角度,有序扫描特高压输电线路点云信息,获取整个特高压输电线路的点云信息。云台与激光测距仪的中心处于同一水平线上,利用云台转动激光测距仪,扫描不同视野面中特高压输电线路的全部点云,完成扫描后,通过聚类 Excel 内存储的特高压输电线路点云数据,完成特高压输电线路三维点云图绘制,得到特高压输电线路激光图像。

2.2 特高压输电线路激光图像去噪

利用单点激光扫描成像仪,采集特高压输电线路激光图像时,受环境因素影响,导致特高压输电线路激光图像内存在大量噪声^[8-10],影响特高压输电线路故障定位识别精度。为此,利用维纳滤波方法,去除特高压输电线路激光图像的内部噪声。

令采集的特高压输电线路激光图像是 $z(x, y)$, 无噪声特高压输电线路激光图像是 $z'(x, y)$; 利用维纳滤波方法去除 $z(x, y)$ 的噪声, 就是找到一个 $z'(x, y)$ 的均方估计 $\hat{z}(x, y)$, 令 $z'(x, y)$ 与 $\hat{z}(x, y)$

间的均方差 e^2 最小,其中,特高压输电线路激光图像像素是 (x,y) 。 e^2 的计算公式如下:

$$e^2 = E\{[z'(x,y) - \hat{z}(x,y)]^2\} \quad (1)$$

其中,数学期望是 $E[\cdot]$ 。

特高压输电线路激光图像去噪的具体步骤如下:

步骤 1:估计 $z(x,y)$ 内各像素邻域的均值 μ 与方差 δ^2 , 公式如下:

$$\mu = \frac{\sum_{\alpha=1}^{S(x,y)} \sum_{\beta=1}^{S(x,y)} g'(\alpha,\beta)}{N \times M} \quad (2)$$

$$\delta^2 = \frac{\sum_{\alpha=1}^{S(x,y)} \sum_{\beta=1}^{S(x,y)} [g'(\alpha,\beta) - \mu]^2}{N \times M} \quad (3)$$

其中,以点 p 为中心的邻域窗口是 $S(x,y)$; $S(x,y)$ 的尺寸是 $S(x,y)$; 无噪声特高压输电线路激光图像 $z'(x,y)$ 的灰度值是 $g'(\alpha,\beta)$; 灰度值位置是 (α,β) 。

步骤 2:求解 p 的灰度估计值 $\hat{g}(x,y)$, 公式如下:

$$\hat{g}(x,y) = \mu + \frac{\delta^2 - n^2}{\delta^2} (g'(\alpha,\beta) - \mu) \quad (4)$$

其中,噪声方差是 n^2 。

步骤 3:利用 $\hat{g}(x,y)$ 替代 $z(x,y)$ 内的原始灰度值,得到无噪声特高压输电线路激光图像 $z'(x,y)$ 。

2.3 特高压输电线路故障定位识别的实现

基于激光图像处理技术的特高压输电线路故障定位识别流程如图 2 所示。

特高压输电线路故障定位识别的具体步骤如下:

步骤 1:利用单点激光扫描成像仪,采集特高压输电线路激光图像。

步骤 2:通过维纳滤波算法,去除采集激光图像内部噪声^[11]。

步骤 3:利用改进多显著性集成算法,结合 K-means 聚类算法,在 $z'(x,y)$ 内,提取显著性颜色特征 $V^c(p)$, 以及显著性结构特征 $V^r(p)$, 并融合 $V^c(p)$ 与 $V^r(p)$, 得到特高压输电线路故障区域的显著性识别结果。

步骤 4:通过 CB 形态学,处理输电线路故障元件显著性区域,得到输电线路故障区域边缘图像。

步骤 5:通过统计分析输电线路故障区域边缘图

像的颜色分布,构造颜色判决模型,进行颜色判定,在颜色判决模型成立情况下,则判定该区域为故障区域,并将该区域像素值设置为 255,反之,则判定该区域为非故障区域,并将该区域像素值设置为 0。

步骤 6:经过颜色判定后,可凸显输电线路的故障区域,对故障区域图像的连通域展开边缘轮廓提取,并在原始特高压输电线路激光图像内进行绘制,便可精准定位识别故障位置。

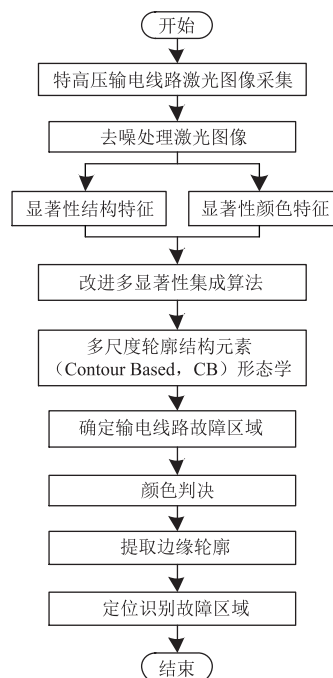


图 2 特高压输电线路故障定位识别流程

Fig. 2 Fault location and identification process for ultra-high voltage transmission lines

2.3.1 特高压输电线路显著性故障区域识别

利用改进多显著性集成算法,融合特高压输电线路的显著性颜色特征与结构特征,得到特高压输电线路显著性故障区域。

利用改进多显著性集成算法,在去噪后特高压输电线路激光图像内^[12],提取显著性故障区域的具体步骤如下:

步骤 1:对 $z'(x,y)$ 展开梯度驱动子采样,通过 4×4 的矩形框采样 $z'(x,y)$, 以各矩形框内的最大梯度值,组建特高压输电线路的稀疏激光图像 $z'_l(x,y)$, 依据 $z'_l(x,y)$ 结合 K-means 聚类算法,提取 $V^c(p)$ 与 $V^r(p)$ 。

步骤 2:集成 $V^c(p)$ 与 $V^r(p)$, 得到特高压输电线路故障区域的初始稀疏显著图 $S_l(p)$, 公式如下:

$$S_l(p) = V^c(p) \cdot W^c(p) + V^r(p) \cdot W^r(p) \quad (5)$$

其中, $V^c(p)$ 与 $V^r(p)$ 的空间先验知识是 $W^c(p)$ 、

$W^r(p)$ 。

步骤 3: 依据得到最终的特高压输电线路显著性故障区域 $S(q)$, 公式如下:

$$S(q) = \frac{\sum_{i=1}^M a_{qp_i} S_i(p)}{M} \quad (6)$$

其中, 去噪后特高压输电线路激光图像内的像素点是 q ; 第 i 个像素点 p_i 的数量是 M ; q 与 p_i 间的距离权重是 a_{qp_i} 。

利用局部观察窗 R_p 得到 $z'_l(x, y)$ 内像素 p 的颜色直方图 $h^c(p)$, 采用 K-means 聚类算法聚类 $h^c(p)$, 得到 K_c 个聚类簇 $\{b_1, b_2, \dots, b_{K_c}\}$, 其中, p 的聚类簇是 b_p ; 则 $V^c(p)$ 的计算公式如下:

$$V^c(p) = \sum_{j=1}^{K_c} \omega_j \|h^c(b_j), h^c(b_p)\|^2 \quad (7)$$

其中, 第 j 个聚类簇 b_j 的权值是 ω_j ; b_j 与 b_p 的颜色直方图是 $h^c(b_j)$ 、 $h^c(b_p)$ 。

利用 R_p 得到 $f'_l(x, y)$ 内 p 的梯度直方图 $h^g(p)$, 采用 K-means 聚类算法聚类 $h^g(p)$, 得到 K_g 个聚类簇 $\{c_1, c_2, \dots, c_{K_g}\}$, 则 $V^r(p)$ 的计算公式如下:

$$V^r(p) = \sum_{j=1}^{K_g} \omega_j \|h^g(c_j), h^g(c_p)\|^2 \quad (8)$$

其中, 聚类簇 c_j 、 c_p 的梯度直方图是 $h^g(c_j)$ 、 $h^g(c_p)$ 。

2.3.2 特高压输电线路显著性故障区域边缘图像提取

利用 CB 形态学提取特高压输电线路显著性故障区域的边缘图像, 凸显特高压输电线路故障区域的轮廓^[13]。

令特高压输电线路显著性故障区域的多尺度结构元素序列是 $Y = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}$, 其中 $y_0 = \{0\}$, η 尺度的 CB 形态学开、闭运算如下:

$$O_{y'_i}(S) = (S \ominus \partial y'_i) \oplus y'_i \quad (9)$$

$$C_{y'_i}(S) = (S \oplus \partial y'_i) \ominus y'_i \quad (10)$$

其中, 开运算处理 S 的结果是 $O_{y'_i}(S)$; 闭运算处理 S 的结果是 $C_{y'_i}(S)$; 特高压输电线路显著性故障区域第 i' 个尺度的结构元素是 $y_{i'}$ 。

为不改变特高压输电线路显著性故障区域的图像边缘细节信息^[14-15], 定义新的开闭运算算子 $MO_y(S)$ 、 $MC_y(S)$, 公式如下:

$$MO_y(S) = \max\{S, O_{y_{i'}}(S)\} \quad (11)$$

$$MC_y(S) = \min\{S, C_{y_{i'}}(S)\} \quad (12)$$

应用 $MO_y(S)$ 与 $MC_y(S)$, 虽然能够较好的保留特高压输电线路显著性故障区域的图像边缘细节信息, 但却影响了去噪效果^[16]。为此, 设计两个改进的形态学算子, 公式如下:

$$\hat{O}_y(S) = O_{y_{i'}}(MC_y(O_{y_{i'}}(S))) \quad (13)$$

$$\hat{C}_y(S) = C_{y_{i'}}(MO_y(C_{y_{i'}}(S))) \quad (14)$$

利用 $\hat{O}_y(S)$ 与 $\hat{C}_y(S)$ 对 S 进行 η 尺度运算得到:

$$\hat{MO}^\eta(S) = \max\{\hat{O}_{y_{i'}}(S)\} \quad (15)$$

$$\hat{MC}^\eta(S) = \max\{\hat{C}_{y_{i'}}(S)\} \quad (16)$$

η 尺度边缘检测算子为:

$$\rho(S) = D_y[\hat{MC}^\eta(\hat{MO}^\eta(S))] - F_y[\hat{MC}^\eta(\hat{MO}^\eta(S))] \quad (17)$$

其中, 膨胀算子是 D_y ; 腐蚀算子是 F_y 。

利用 $\rho(S)$ 提取特高压输电线路显著性故障区域的边缘图像。

2.3.3 特高压输电线路故障区域颜色判决

通过统计分析特高压输电线路显著性故障区域边缘图像的颜色分布, 构造颜色判决模型, 公式如下:

$$\begin{cases} G(i, j) = \text{imgRGB}(i, j) \\ G \geq 200; G = 225 \\ G < 200; G = 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, 特高压输电线路显著性故障区域边缘图像灰度图的像素点坐标是 (i, j) ; 原始的特高压输电线路 RGB 激光图像是 $RGB(i, j)$ 。

利用式(18)的颜色判决模型 $G(i, j)$, 对特高压输电线路显著性故障区域边缘图像展开颜色判定, 当式(18)成立时, 认定 (i, j) 处是故障区域, 则令 (i, j) 的像素值是 255, 反之, 令 (i, j) 的像素值是 0。

3 实验分析

以某 ± 800 kV 特高压输电线路为实验对象, 该线路的输送容量是 8000 MW, 长度是 2000 km, 激光雷达的单次成像距离为 2 km, 滤波器容量为 6400 Mvar, 500 kV 交流出线 9 回, 换流变数量为 28 台, 整流侧、逆变侧无功补偿容量是 3500 Mvar、4500 Mvar。进行故障定位识别的测量步骤如下:

(1) 将激光雷达设备安装在合适的位置, 确保其能够沿输电线路方向进行扫描, 并且单次成像距离能够覆盖足够长的输电线路段。在这个例子中, 由于输电线路长达 2000 km, 需要设置多个激光雷达站点或

使用移动式激光雷达平台来分段进行测量。

(2)启动激光雷达进行扫描,记录输电线路的激光图像数据。在扫描过程中,激光雷达会发射激光束到输电线路,并接收由输电线路反射回来的激光信号,从而生成输电线路的三维点云数据或二维图像数据。

然后,将采集到的激光图像数据导入到计算机中进行处理和分析。利用图像处理技术和算法,对激光图像进行去噪、特征提取、故障区域识别等操作,以定位输电线路上的故障点。

(3)根据处理结果,在原始激光图像中标记出故障区域的边缘轮廓,从而准确识别出故障位置。确定故障点在输电线路上的具体位置,并制定相应的维修和检修计划。

利用本文方法采集该特高压输电线路的激光图像,采集结果如图3所示。

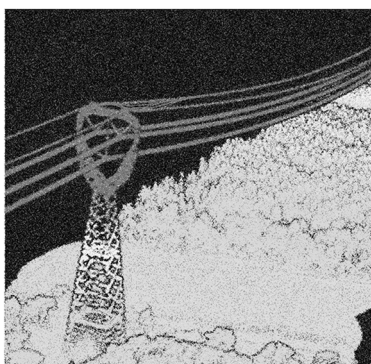


图3 特高压输电线路激光图像采集结果
Fig. 3 Laser image acquisition results of ultra-high voltage transmission lines

根据图3可知,本文方法可有效采集特高压输电线路激光图像,但受外界环境因素影响,导致采集的激光图像内存在噪声,无法为后续特高压输电线路故障定位识别,提供清晰的图像信息支持,影响故障定位识别精度。

利用本文方法对采集的特高压输电线路激光图像进行去噪处理,激光图像去噪结果如图4所示。

根据图示可知,本文方法可有效去除特高压输电线路激光图像内部噪声,经过本文方法去噪处理后,可清晰呈现特高压输电线路的相关信息。实验证明:本文方法具备特高压输电线路激光图像去噪有效性。

利用本文方法在去噪后的特高压输电线路激光图像内,提取显著性颜色特征和显著性结构特征,并融合显著性颜色特征和显著性结构特征,得到特高

压输电线路显著性故障区域,特征提取结果以及显著性故障区域提取结果如图5所示。

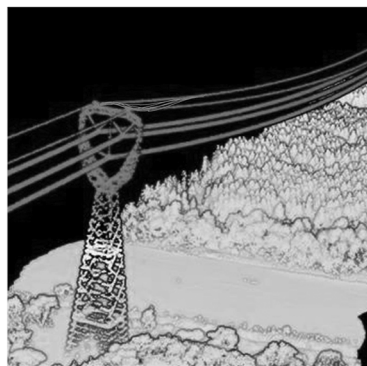
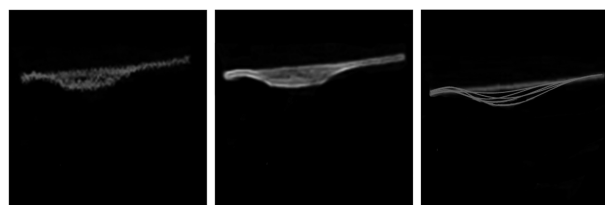


图4 特高压输电线路激光图像去噪结果
Fig. 4 Denoising results of ultra-high voltage transmission line laser images



(a) 显著性颜色特征 (b) 显著性结构特征 (c) 显著性故障区域

图5 特高压输电线路显著性故障区域提取结果
Fig. 5 Extraction results of significant fault areas in ultra-high voltage transmission lines

根据图5(a)与图5(b)可知,本文方法可有效提取特高压输电线路的显著性颜色特征,以及显著性结构特征。利用本文方法将两个特征融合后,可有效得到特高压输电线路显著性故障区域。

利用本文方法提取特高压输电线路显著性故障区域的边缘图像,边缘图像提取结果如图6所示。

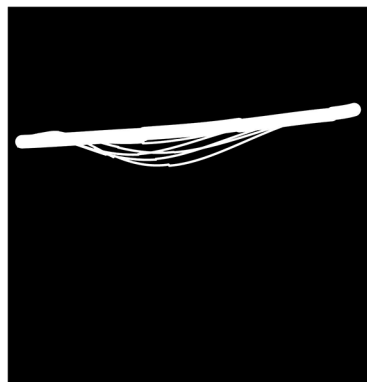


图6 输电线路显著性故障区域边缘图像提取结果
Fig. 6 Edge image extraction results of significant fault areas in transmission lines

根据图6可知,本文方法可有效提取特高压输电线路显著性故障区域的边缘图像,后续故障定位识别提供清晰的边缘图像信息,利于提升特高压输

电线路故障定位识别精度。

利用本文方法对特高压输电线路故障区域边缘图像进行颜色判定,得到特高压输电线路故障定位识别结果,颜色判定及故障定位识别结果如图 7 所示。

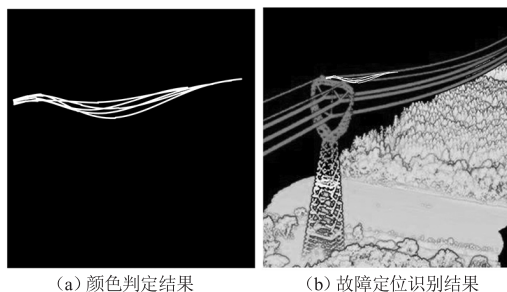


图 7 颜色判定及故障定位识别结果

Fig. 7 Color determination and fault location recognition results

根据图 7(a)可知,本文方法可有效对特高压输电线路故障区域边缘图像进行颜色判定,确定故障区域;并有效在原始特高压输电线路激光图像内绘制故障区域得到故障定位识别结果。

分析不同过渡电阻以及不同故障类型下,本文方法故障定位识别的误差,误差阈值是 1 m,故障定位识别误差分析结果如图 8 所示。

根据图 8 可知,随着过渡电阻的增长,三种不同故障类型的故障定位识别误差均呈上升趋势,当过渡电阻为 50 Ω 时,三种故障类型的故障定位识别误差均达到峰值,其中接地故障的故障定位识别误差最大,在 0.9 m 左右,并未超过误差阈值,说明本文方法的故障定位识别误差较低。实验证明:在不同过渡电阻以及不同故障类型时,本文方法的超高压输电线路相定位识别误差均较低,即本文方法的故障定位识别精度较高。

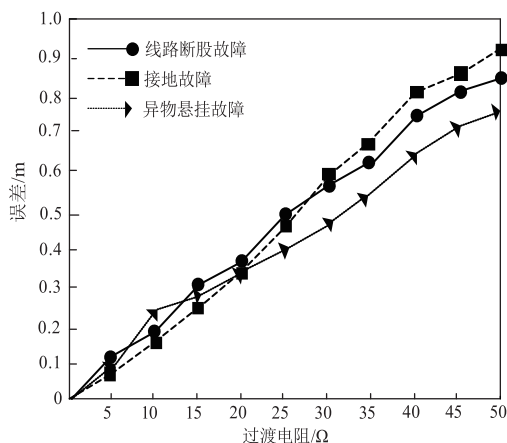


图 8 故障定位识别误差分析结果

Fig. 8 Analysis results of fault localization and identification error

4 结 论

特高压输电线路属于电网中必不可少的一个环节,其运行状态与电网安全运行息息相关。若不及时处理特高压输电线路故障,则会影响电网运行的安全性。为加快特高压输电线路故障维修效率,研究基于激光图像处理技术的特高压输电线路故障定位识别方法,精准定位特高压输电线路故障,为维修人员提供精准的故障位置信息,加快故障维修速度,避免影响供电质量。

参考文献:

- [1] Tian Pengfei, Yu You, Dong Ming, et al. A CNN-SVM-based fault identification method for high-voltage transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 119 – 125. (in Chinese)
田鹏飞, 于游, 董明, 等. 基于 CNN-SVM 的高压输电线路故障识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 119 – 125.
- [2] Cai Xinlei, Cui Yanlin, Dong Kai, et al. Intelligent identification method of transmission line fault based on long short term memory network and random matrix [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(2): 388 – 395. (in Chinese)
蔡新雷, 崔艳林, 董楷, 等. 基于长短期记忆网络和随机矩阵的输电线路故障智能识别方法 [J]. 电子器件, 2022, 45(2): 388 – 395.
- [3] Xiao Zhiyun, Wang Haiqiang. Typical small target fault identification of high-voltage transmission lines based on image double segmentation and fusion of multi-features in wavelet domain [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4461 – 4470. (in Chinese)
肖志云, 王海强. 图像双分割与小波域多特征融合的高压输电线路典型小目标故障识别 [J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4461 – 4470.
- [4] Wang Qiaomei, Wu Hao, Hu Xiaotao, et al. Fault recognition method for HVDC transmission line based on VMD multi-scale fuzzy entropy [J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2021, 33(5): 134 – 144. (in Chinese)
王桥梅, 吴浩, 胡潇涛, 等. 基于 VMD 多尺度模糊熵的 HVDC 输电线路故障识别方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 134 – 144.
- [5] Ding Dengwei, Han Xiancai, Zhang Pengfei, et al. Fault location method and engineering application in UHV GIL based on transient voltage monitoring [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1092 – 1099. (in Chinese)
丁登伟, 韩先才, 张鹏飞等. 基于暂态电压监测的特高压 GIL 故障定位方法及工程应用 [J]. 高电压技术,

- 2021,47(3):1092-1099.
- [6] Li Chong, Liu Linqing, Tao Peng, et al. Fault location method of transmission line based on multi-source data fusion technology[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1):168-170, 210. (in Chinese)
李翀, 刘林青, 陶鹏, 等. 基于多源数据融合技术的输电线路故障定位方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1):168-170, 210.
- [7] He Qiaoying, Huang Linhai. Imaging technology based on single-point laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6):355-362. (in Chinese)
何巧莹, 黄林海. 基于单点激光测距的扫描成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6):355-362.
- [8] Li Fuzhi, Zheng Weibin, Zhang Wenhai, et al. Fault path direct-current resistance based off-line single-phase-to-ground fault location[J]. Electric Power, 2021, 54(2):140-146. (in Chinese)
李福志, 郑卫宾, 张文海, 等. 基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J]. 中国电力, 2021, 54(2):140-146.
- [9] Miao Xiren, Lin Zhicheng, Jiang Hao, et al. Fault detection of power tower anti-bird spurs based on deep convolutional neural network[J]. Power System Technology, 2021, 45(1):126-133. (in Chinese)
缪希仁, 林志成, 江灏, 等. 基于深度卷积神经网络的输电线路防鸟刺部件识别与故障检测[J]. 电网技术, 2021, 45(1):126-133.
- [10] Wang Chuning, Li Jie, Xu Zhengqing, et al. Research on single-ended fault location of transmission line based on transient information fusion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2):62-71. (in Chinese)
王春明, 李杰, 徐正清, 等. 基于暂态信息融合的输电线路单端故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2):62-71.
- [11] Dai Feng, Liu Zhenao, Chen Xuan, et al. Accurate fault location considering the influence of transmission line span and sag[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):97-104. (in Chinese)
戴锋, 刘贞瑶, 陈轩, 等. 考虑输电线路档距及弧垂影响的故障精准定位[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4):97-104.
- [12] Zhang Zhiwei, Fan Xinqiao, Zhang Li, et al. Novel fault location method for three-terminal multi-segment overhead-cable hybrid transmission line based on dynamic mode decomposition[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(10):129-137. (in Chinese)
张智伟, 范新桥, 张利, 等. 基于动态模式分解的三端多段式架空线-电缆混合输电线路故障定位新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10):129-137.
- [13] Wang Wei, Wang Quanjin, Yi Li, et al. Two-terminal fault location method for high-voltage transmission line based on zero-mode traveling wave velocity quantization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12):165-170. (in Chinese)
王伟, 王全金, 尹力, 等. 基于零模行波波速量化的高压输电线路双端故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12):165-170.
- [14] Huang Yuehua, Chen Zhaoyuan, Chen Qing, et al. Real-time detection method for transmission line faults applying edge computing and improved YOLOv5s algorithm[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1):91-99. (in Chinese)
黄悦华, 陈照源, 陈庆, 等. 基于边缘计算和改进 YOLOv5s 算法的输电线路故障实时检测方法[J]. 电力建设, 2023, 44(1):91-99.
- [15] Li Xiaopei, Zhang Yinbao, Li Yanpei, et al. An improved method of infrared image target detection based on YOLOv5s[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(7):1043-1051. (in Chinese)
李晓佩, 张寅宝, 李严培, 等. 一种基于 YOLOv5s 的红外图像目标检测改进算法[J]. 激光与红外, 2023, 53(7):1043-1051.
- [16] Tao Caixia, Du Xue, Gao Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10):105-112. (in Chinese)
陶彩霞, 杜雪, 高峰阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10):105-112.