

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.018

基于Canny算法和图像处理的10 kV电缆中间接头典型施工缺陷识别

陈志¹, 方春华¹, 江全才¹, 于乔², 游海鑫¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 广东中山供电局, 广东 中山 528400)

摘要: 10 kV 电缆中间接头施工缺陷易导致绝缘故障, 为了快速准确的检测识别电缆中间接头施工缺陷, 提出一种Canny算子和图像处理结合的边缘检测方法。Canny算子和图像处理结合的算法能最优定位边缘、不误检, 得到准确的中间接头边缘信息。实验结果表明, Canny边缘算法能检测出缺陷图像中较为完整的污渍和划痕, 对于主绝缘切割不齐、半导电剥离不齐和毛刺缺陷能准确的检测, 缺陷算法准确率均达到90%以上。Canny边缘检测算法提高了缺陷检测的智能化程度, 能有效管控施工质量。

关键词: 10 kV 电缆; 施工缺陷; 缺陷识别; 特征提取; Canny算子; 图像处理

Identification of Typical Construction Defect in 10 kV Cable Intermediate Joints Based on Canny Algorithm and Image Processing

CHEN Zhi¹, FANG Chunhua¹, JIANG Quancai¹, YU Qiao², YOU Haixin¹

(1. School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. China Southern Power Grid, Zhongshan Power Supply Company, Guangdong Zhongshan 528400, China)

Abstract: The construction defects of the 10 kV cable intermediate joint are easy to lead to insulation failure. For quickly and accurately detecting and identifying the construction defects of cable intermediate joints, an edge detection method combining Canny operator and image processing is proposed. The algorithm combining Canny operator and image processing can locate the edge optimally without false detection, and obtain accurate edge information of intermediate joints. The experimental result shows that Canny edge algorithm can detect more complete stains and scratches in the defect image. The main insulation cutting, semi-conductive peeling and burr defects can be accurately detected, and the accuracy rate of the defect algorithm is more than 90%. The Canny edge detection algorithm improves the intelligence of defect detection and can effectively control the construction quality.

Key words: 10 kV cable; construction defects; defect identification; feature extraction; Canny operator; image processing

0 引言

电缆中间接头起着畅通线路、密封电缆等作用, 由于其是电缆的脆弱部分, 加上施工人员的不习惯和时高时低的施工技术, 易造成压接管形成尖角和毛刺、主绝缘存在划痕和杂质以及屏蔽层、半导电层、绝缘层和导体剥切长度不符合规范等缺

陷^[1-5]。这些缺陷会引起中间接头的电场畸变, 导致电缆绝缘逐渐劣化, 最终发生接头击穿引发事故^[6]。

目前对于电缆中间接头施工过程中的缺陷检测, 主要的方式为人工监测, 该方式费时费力, 且可靠性不高^[7]。图像识别方法能在电缆运行前检测出缺陷, 避免二次损伤, 从而无干扰地检测电缆接头^[8-9]。文[10]基于Gabor和纹理抑制对手机配件划痕进行检测;

收稿日期: 2025-08-10; 修回日期: 2025-11-02

基金项目: 南方电网公司科技项目(032000KK52220033)。

Project Supported by Science and Technology Projects of China Southern Power Grid Company(032000KK52220033).

徐志刚通过形状分析和直方图估计检测沥青路面是否龟裂^[11];李哲毓^[12]等基于形态学方法比较分析零件表面划痕的特征参数。然而,上述方法适用于损伤较大或颜色对比明显的检测主体,而文中的电缆主绝缘污渍和划痕存在缺陷细微且颜色对比差异小的特点。基于Canny算子的图像检测,相较于其他算法,对于检测电缆表面不易察觉的缺陷有着识别率高、定位边缘点准确和单—的边缘点响应等优点^[13]。但无法精确地检测隐蔽的缺陷,以及不能有效处理噪声,针对上述特点,图像处理能让缺陷边缘特征更明显,更易检测,且能有效去除干扰。

为此,提出一种Canny算法和图像处理相结合的10 kV电缆中间接头缺陷识别方法。首先计算中间接头图像的梯度与幅值,然后借助局部最优值法,抑制极大值信息,同时去除伪边缘。其次,基于颜色阈值对中间接头进行部件分割,得到不同部件图像。最后,对图像进行膨胀处理,将压接管、外半导电和主绝缘边缘的拟合为二元一次函数,通过函数的极值或均方差判断部件是否存在缺陷;利用像素—长度转换表将像素长度转化为实际长度,判断各部件尺寸是否存在缺陷。通过试验验证了算法的有效性,为施工质量和工艺的管控提供技术手段,有效提高了电力系统的运行可靠性^[14]。

1 10 kV 电缆缺陷类型及特征

10 kV 电缆多为城市配网电缆,见图1,电缆中间接头处于未压接状态。其中需要检测的部分为主绝缘、半导体层、线芯与主绝缘交界以及压接管^[15]。

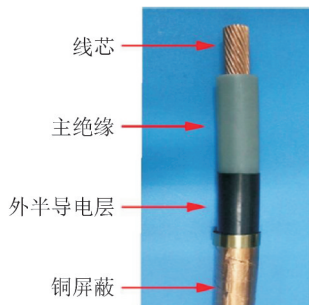


图1 单芯电缆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single core cable

10 kV 电缆中间接头典型缺陷通常在安装过程中产生,具体安装流程见图2,通过安装流程得到下列典型施工缺陷^[16-17]。

剥切电缆外半导电时,施工人员用力过大,会划伤主绝缘表面,若不及时处理,长时间运行后划伤处会发生绝缘击穿,见图3。由于施工人员剥切不规范,造成外半导电和主绝缘剥离不齐,见图4、5。

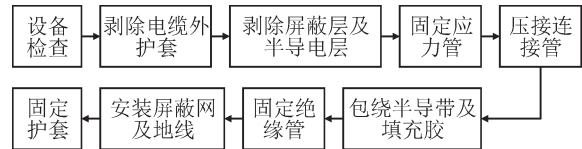


图2 具体安装流程

Fig. 2 Installation process

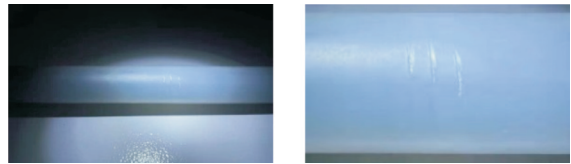


图3 划痕类缺陷

Fig. 3 Scratch defects

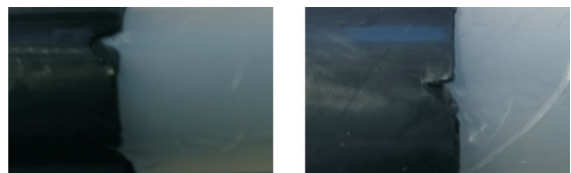


图4 半导体剥离不齐类缺陷

Fig. 4 Semi-conductive layer stripping irregularities

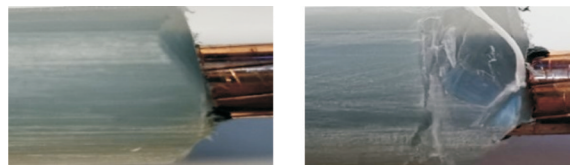


图5 主绝缘切割不齐类缺陷

Fig. 5 Main insulation cutting irregularities

安装人员若未清理干净绝缘体表面的半导体,或在裁剪过程中污染主绝缘表面,则会产生10 kV 电缆中间接头污渍缺陷,见图6。



图6 主绝缘污渍类缺陷

Fig. 6 Stain defect of main insulation

连接管压接完成后,若施工人员未进行全面、细致的打磨,则会在连接管上存留金属尖端毛刺,形成毛刺缺陷,其形状可能为锥状或细长柱状,见图7。



图7 压接管毛刺类缺陷

Fig. 7 Pressure nozzles burr defects

2 基于Canny的边缘检测与部件分割

2.1 算法流程

Canny算子可通过计算每个像素点在不同方向上的灰度偏导数,得到图像的灰度梯度特征。在中间接头缺陷图中,缺陷处灰度值与其相邻地方不同,灰度值梯度发生变化,产生边缘信息。当施工缺陷的位置变化时,图像梯度信息会从一个特定的区域转移到另一个特定的区域,从而产生边缘信息^[18]。

文中基于Canny算子提取图像边缘,识别不同缺陷的纹理特征,并自动准确地定位出主绝缘缺陷位置。主绝缘缺陷检测算法具体流程见图8,该方法可大致分为4个步骤:①图像预处理;②计算梯度的方向和强度;③非极大值检测;④双阈值检测^[19]。

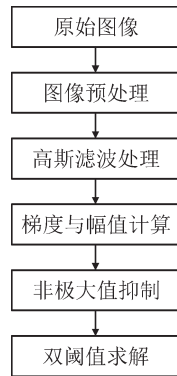


图8 缺陷检测算法流程

Fig. 8 Flowchart of defect detection algorithm

2.2 电缆缺陷图像的高斯滤波

CCD(charge coupled device)相机在采集图像过程中,现场的工作环境、电子元件的发热、传感器的材料和电路的结构都会引入各类噪声,而这些噪声又会在接下来的图像质量增强中被释放,影响图像品质,降低检测准确度。在分析电缆主绝缘表面图像缺陷前,需要增强图像的质量,消除图片中的噪声干扰,从而提升算法的检测精度。待检测电缆原图设为 $f(x, y)$,基于高斯函数组件滤波器 $G(x, y, \sigma)$ 平滑滤波 $f(x, y)$ 进行,文中所用的高斯函数为

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} (x^2 + y^2) \quad (1)$$

式(1)中: x, y 为主绝缘二维坐标位置;高斯曲线标准差 σ 取14。通过式(2)得到滤波图像见图9。

$$I(x, y) = G(x, y, \sigma) * f(x, y) \quad (2)$$

2.3 电缆缺陷图像梯度幅值及方向

采用规格为 2×2 的领域,Canny算子计算经过

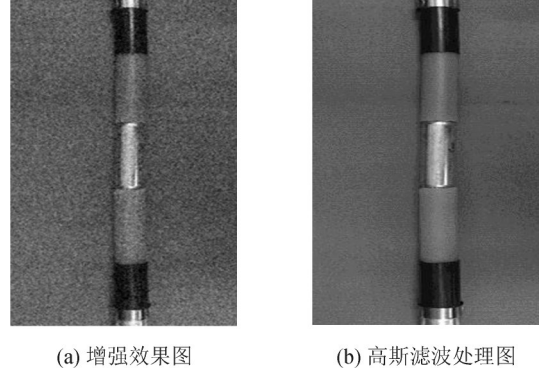


图9 电缆中间接头滤波处理

Fig. 9 Filtering treatment of cable intermediate connector 滤波处理后的图像 $I(x, y)$,得到梯度以及方向。不同阵列的表达式为:

$$P_x[i, j] = \frac{I[i+1, j] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i, j+1]}{2} \quad (3)$$

$$P_y[i, j] = \frac{I[i, j+1] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i+1, j]}{2} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: i 的取值范围为 $[0, N-2]$; j 取值范围为 $[0, M-2]$ 。如果 M, N 取奇数,则不考虑相应 x, y 方向上的最后一个序列。设梯度模 $H(i, j)$,方向 $\theta(i, j)$,计算垂直和水平方向上的差分,即:

$$H(i, j) = \sqrt{P_x[i, j]^2 + P_y[i, j]^2} \quad (5)$$

$$\theta(i, j) = \arctan(P_y[i, j]/P_x[i, j]) \quad (6)$$

2.4 非极大值抑制

$H(i, j)$ 的大小表示主绝缘缺陷点的梯度值大小,同一方向上不同强度的梯度中可能会出现伪边缘。插值法沿着梯度方向进行梯度幅值插值,能筛选出边缘点,并保留缺陷点的梯度幅值。

局部最大判断值见图10,可把一个像素领域划分为4个不同区域,这些区域包含上下两个独立部分。设该像素点 x 方向梯度强度为 $g_x(i, j)$, y 方向梯度强度为 $g_y(i, j)$, 梯度强度为 $g_{xy}(i, j)$, 通过 $g_x(i, j)$ 和 $g_y(i, j)$ 的正负与大小判断其梯度方向,并根据梯度方向以及相邻点的像素梯度线性插值,得到正负梯度方向的两个参与比较的梯度强度 $g_{up}(i, j)$ 和 $g_{down}(i, j)$ 为:

$$g_{up}(i, j) = (1-t) \times g_{xy}(i, j+1) + t \times g_{xy}(i-1, j+1) \quad (7)$$

$$g_{down}(i, j) = (1-t) \times g_{xy}(i, j-1) + t \times g_{xy}(i+1, j-1) \quad (8)$$

其他3个区域的计算方法类似。若 $g_x(i, j) = 0$, 该像素点无梯度,其为非边缘。

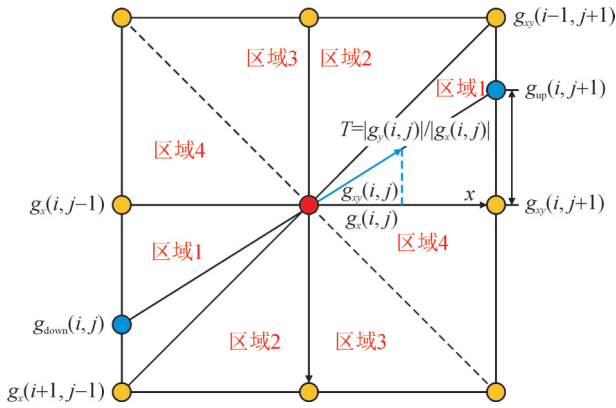


图10 局部最大判断值

Fig. 10 Local maximum judgment value

2.5 双阈值法求解图像边缘

文中算法将图像分为前景和背景两大部分,在灰度直方图上,这两部分都形成了高峰,也就是区间内极大值的所在。那么极小值就是边缘检测预处理中间接头图像的阈值。具体采用灰度化图像得到像素直方图,检测出的波峰,即背景中呈现最多像素值的位置。遍历波峰序列,得到第一个满足下列条件的波峰^[20]:

- 1)检测相邻亮度值的像素数量大小,若存在有变化就产生一个有效的极大极小值。
- 2)波峰的右侧相邻波谷处的像素数量比图像平均像素数量小,否则过滤掉这个波谷和其右侧波峰。
- 3)从左侧波谷到波峰,再到右侧波谷,累计所占的像素总和,比低于整个画面像素的30%。

以上得到的阈值为低阈值 c_1 ,采用相同方法找出像素点最多的直方图,得到双阈值中的高阈值 c_2 ,将在 $[c_1, c_2]$ 之内的像素点集称为像素边缘。为了防止算法误判,孤立判断得到的双阈值,设对应像素边缘集为 $f(z)$,若某边缘像素点 $f(i)$ 周围存在像素边缘集 $f(z)$ 的元素,将其判断为伪边缘,忽略不计;若某边缘像素点 $f(i)$ 周围不存在像素边缘集 $f(z)$ 的元素,则判断为真边缘。当边缘像素灰度大于 k_1 和 k_2 时,规定此时的边缘像素为强边缘像素点。

2.6 基于边缘检测的中间接头部件分割

一张完整的电缆中间接头图像应包含外半导体、主绝缘、线芯以及压接管。电缆外半导体为黑色、主绝缘常为浅蓝色、线芯黄铜色、压接管银白色。这些颜色在色彩空间上存在着很大的差异,本章节通过差异性较大的颜色边缘特征来进行部件分割。基于色彩的边缘信息同样作为基本的图像特征,传统的边缘检测算法一般是对图像的灰度进行分割检测,本章使用的基于彩色图像的分割,通过RGB色彩空间的3个分量分别计算。

通过图像增强,电缆中间接头的各个组成部分有较为明显的分界线,通过各组成部分的颜色特性,由返回的位置在原RGB图像中定位^[21],进行代数运算分离出电力电缆中间接头的各组成部分。取反变换后代数运算的二值图像结果见图11(a)、(b)。根据二值图像,求取该区域在原图像中所对应的部分,主绝缘和外半导体层分割图像见图11(c)、(d)。

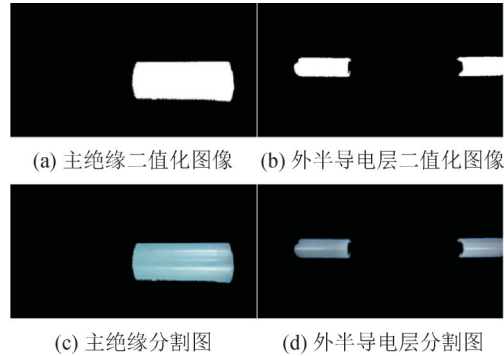


图11 主绝缘与外半导体层分割图像

Fig. 11 Main insulation and outer semiconductive layer separation image

通过图11,去除背景与其他非感兴趣区域,主绝缘与外半导体部分在图像中独立存在,通过电缆独立的部件图像,能够有效提取图像中电缆各部分的特征,针对主绝缘与外半导体进行缺陷识别。

在实际拍摄过程中,拍摄到的电力电缆中间接头图像并非是各个部分单独存在的图像,往往包括了其他部分,通过上述分析,分离包含背景的电力电缆中间接头图像,然后根据每部分的缺陷特征对相应的缺陷进行判断,将复杂的现场图像分割为简单图像^[22],针对性更强,有效提升了识别效率。

3 实验分析

本章节描述了10 kV 电缆中间接头各类缺陷识别检测工作,即基于Canny的中间接头边缘信息检测。这一步能很好地体现待检测的中间接头图像信息,是本章缺陷检测不可缺少的准备工作。

3.1 主绝缘污渍划痕缺陷识别

由于采集装置将接头闭合,并由LED灯带提供光照,那么灯带的颜色对检测结果的影响也是不可忽视的。主绝缘污渍图像见图12。图12(a)为原光光照,图12(b)为蓝光光照,图12(c)为红光光照,图12(d)为绿光光照。在实际操作过程中污渍类型的缺陷往往十分细微,文中通过放大处理更能直观感受算法的效果。

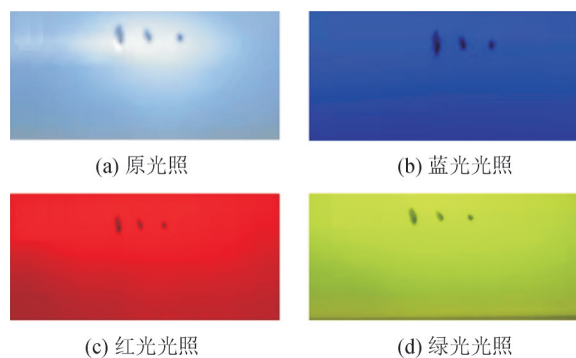


图12 主绝缘污渍图像

Fig. 12 Image of main insulation stain

分别对图12(a)-(d)进行边缘检测实验,算法在不同的阈值下识别电缆中间接头主绝缘上的污渍。实验数据来自真实电缆图像,人为加入污渍生成污渍缺陷,采用Canny边缘检测算子来进行边缘检测,其中Canny检测阈值的大小对实验结果影响非常大。为了能够检测出轻微的污渍,实验分别取不同检测阈值进行多次识别,实验效果见表1、2。其中主绝缘表面由大到小3处污渍点,最小污渍半径0.5 cm。

表1 污渍阈值实验表

Table 1 Test table of stain threshold

序号	阈值	自然光	黄光
1	10		
2	30		
3	50		
4	80		
5	100		
6	200		

从表1、2的图中可看出,当阈值选择较小时,会检测出许多干扰项,当阈值选择较大时,会将明显的污渍过滤掉。由试验可得,选定蓝色光照且Canny检测阈值的大小区间为[30,80]时效果较好,

表2 污渍阈值实验表

Table 2 Test table of stain threshold

序号	阈值	红光	蓝光
1	10		
2	30		
3	50		
4	80		
5	100		
6	200		

并且通过检测后特定像素值的像素点数量是否大于设定的阈值来判定是否有污渍。对污渍大小定量分析,当污渍不小于0.5 mm半径时,文中检测算法均能有效检测,即污渍检测精度为0.5 mm²。

主绝缘划痕缺陷见图3,有较为明显的划痕。对于主绝缘划痕缺陷检测,同样采用边缘检测算法。经过边缘检测后,能够看到明显的划痕区域。随后统计图像中的特定像素值,判定是否存在划痕缺陷。为了能够检测出不同程度的划痕,需要通过实验来选定效果最佳的边缘检测阈值。具体实验过程见表3内的检测图。

与污渍类缺陷相似,在自然光和红光照射下,随着阈值增大会丢失检测信息;而在蓝光与黄光照射下,阈值在[10,100]之间均能较好保留划痕信息。

分析实验结果,阈值设置过小时,检测强度较强,会检测出许多不需要的特征信息。阈值设置太大时,又会将划痕的特征筛选掉。实验表明,选定划痕检测的阈值范围为[30,80]时,能够较为完整地检测出划痕,且不带有其他不需要的特征信息。与污渍类型的缺陷相同,本章检测主绝缘划痕时,划痕的最小检测大小同样是0.5 cm,即长度为0.5 cm或者面积为0.5 cm²的划痕。划痕阈值实验见表4。

表3 划痕阈值实验表

Table 3 Test table of scratch threshold

序号	阈值	自然光	黄光
1	10		
2	30		
3	50		
4	80		
5	100		

表4 划痕阈值实验表

Table 4 Test table of scratch threshold

序号	阈值	红光	蓝光
1	10		
2	30		
3	50		
4	80		
5	100		

3.2 压接管毛刺识别

压接管在压接完后需要打磨毛刺,使表面光滑平整。文中采用边缘检测提取压接管边缘,打磨光滑的压接管边缘大体上是一条直线,当存在毛刺未

打磨或打磨不到位的情况时,压接管的边缘曲线度会增高,即压接管边界线的曲线段存在极值点,且该极值点与打磨光滑的压接管边界相差较大。中间接头膨胀图像见图13。

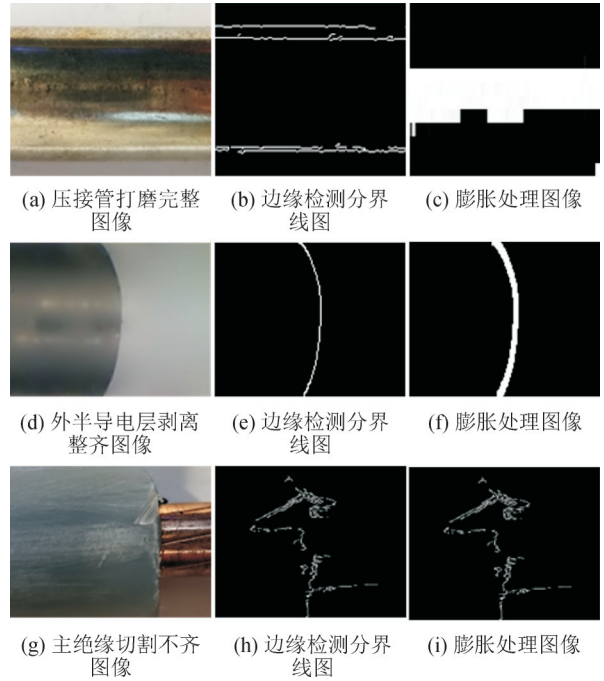


图13 中间接头膨胀图像

Fig. 13 Intermediate joint expansion image

在检测压接管边缘时,边缘分界线可看成函数曲线,本节使用一元二次函数进行拟合^[23]。当存在毛刺缺陷时,压接管表面分界线会层次不齐。采用二次函数进行拟合,计算压接管平整与不齐之间的差值,通过差值大小来判断分界处是否剥离不齐。

图像的膨胀是一种基本的形态学运算,能平滑图像,提高算法识别精度^[24]。选取打磨完整的压接管与未打磨的压接管图像作对比试验,通过边缘检测求出分界线,如13(b)中的分界线图所示;为了更加容易拟合分界线,对分界线图像进行图像膨胀处理。通过图像膨胀之后的图像如13(c)中图像所示。

使用二次函数拟合膨胀后的图像,并计算拟合后的函数峰值见图14。通过图14可知,压接管边缘被拟合成了一元二次方程曲线^[25]。由压接管毛刺与压接管的表面关系可得出,拟合方程的峰值可以理解为压接管毛刺突出最严重的位置,根据峰值对比可以判断压接管是否存在毛刺缺陷。

文中对比有无毛刺缺陷的压接管拟合函数峰值的绝对值大小,通过多次试验分析,当10kV电缆中间接头压接管存在毛刺时,拟合曲线的曲度会更大,拟合方程的极值会过大或过小。当极值在[80,100]的时候,可以视为压接管毛刺打磨完毕,没有毛刺等缺陷。

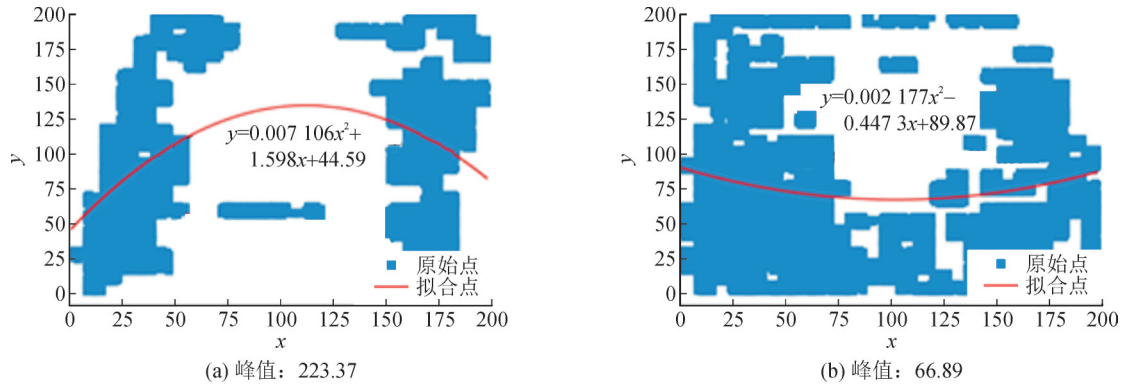


图14 中间接头拟合图像及曲线方程

Fig. 14 Fitting image and curve equation of intermediate joint

3.3 外半导体缺陷识别

在电缆中间接头的施工过程中,易发生外半导体剥离不齐的现象,能明显看出黑色的半导体突出到白色的主绝缘层部分中,缺陷检测算法需要检测出这种较为明显的缺陷。

为了判断外半导体与主绝缘层是否剥离不齐,需要截取分界处的图像,基于边缘检测,提取图像的分界线,随后拟合分界线。通过图13(f)看出,图中的黑白分界线能够看成函数曲线,能够使用二次函数来进行拟合。对剥离不齐的分界线同样使用二次函数来进行拟合,计算剥离整齐与剥离不齐拟

合函数的误差,通过误差大小来判断分界处是否剥离不齐。

与压接管不同的是,边缘裁剪整齐的半导体图像存在一定的弧度,宜采用均方差的方式,比较待检测图像的拟合方程与不存在缺陷的半导体的拟合方程, e_{MSE} 均方差计算得

$$e_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

式(9)中: n 为边缘点的总数; y_i 为待检测拟合边缘点大小; \hat{y}_i 为无缺陷边缘点大小,拟合二元方程式,设自变量区间在 $[0, 200]$, 得均方差见图15。

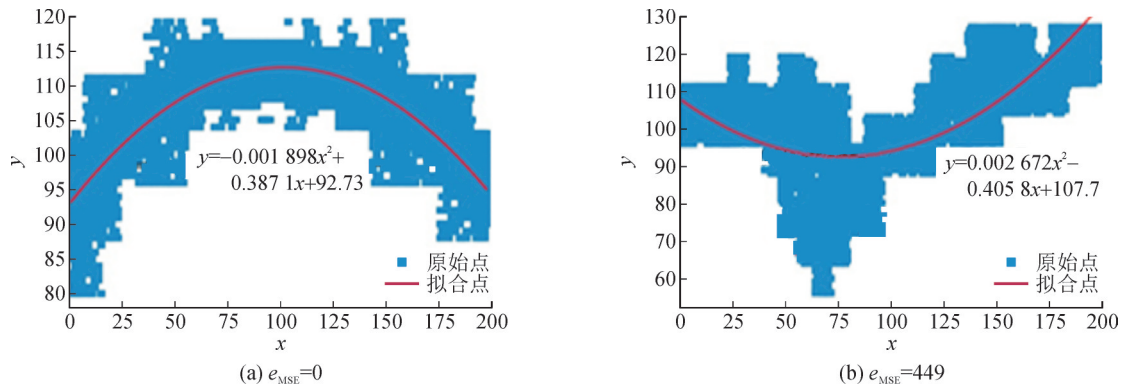


图15 外半导体拟合图像及曲线方程

Fig. 15 Fitting image and curve equation of external semiconductive layer

通过拟合图像,求出拟合函数上所有点的均方差,通过均方差,判断是否剥离不齐。通过实验,能够明显看到,剥离不齐图像的均方差明显大于剥离整齐图像的均方差,并且当均方差属于 $[0, 200]$ 时认为没有缺陷,若大于这一区间判定为外半导体剥离不齐。遵循这一标准判断,具有一定的实用性与合理性。

3.4 主绝缘切割不齐识别

为了判断主绝缘边界是否切割整齐,需截取分界处的图像。基于边缘提取,提取图像边界线,随后拟合分界线,使用同样的方法将10 kV 电缆中间

接头半导体缺陷图像进行二值化及膨胀算法处理,如图13(g)-(i)中膨胀图像所示。

同样通过拟合图像,求出拟合函数上所有点的均方误差,通过均方误差判断是否存在主绝缘边界切割不整齐。其中由于主绝缘半径和存在外半导体的电缆主绝缘半径相差不大,那么可以认为判断是否存在切割不齐缺陷的均方差与剥离不齐缺陷的相同,即不大于200的均方差值。

已知拟合二元方程式,同样设自变量区间在 $[0, 2]$, 得均方差见图16。

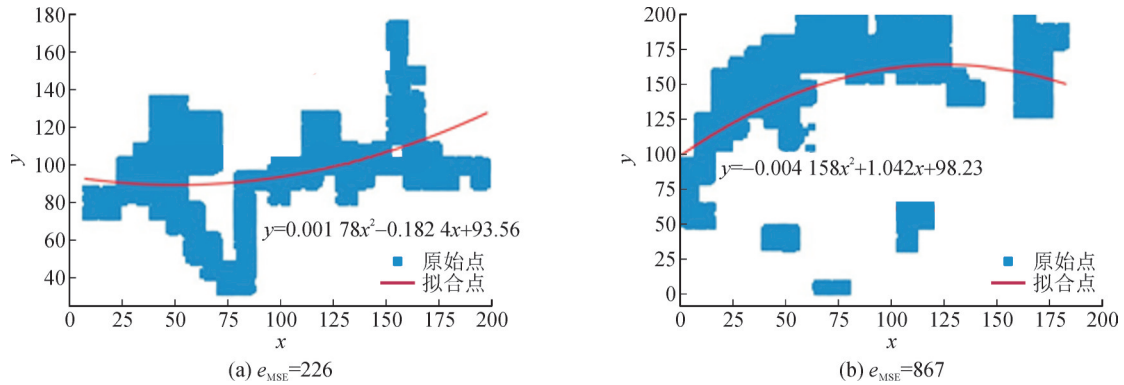


图 16 主绝缘边缘拟合图像及曲线方程

Fig. 16 Main insulation edge fitting image and curve equation

3.5 缺陷定量化识别准确率

文中样本 10 kV 中间接头,模仿制作施工人员施工过程中的缺陷,得到最接近实际施工情况下的缺陷状态。各类缺陷均与现场操作产生缺陷有着极高的相似度,具有普遍性。

统计对于不同类型的缺陷的识别次数实验结果,其数据见表 5。

表 5 各类缺陷识别率统计

Table 5 Statistics of all kinds of defect recognition rate

缺陷类型	检测次数	识别成功次数	识别率/%
主绝缘划痕污渍	400	377	94.23
半导电切口不齐	300	288	96.00
压接管毛刺	400	363	90.75
主绝缘边缘切割不齐	300	286	95.33

4 结语

文中为了解决 10 kV 电缆中间接头由于施工质量不达标、管控难导致的产生各类缺陷的问题,采用 Canny 算法和图像膨胀识别典型施工缺陷。图像膨胀算法能使目标图像向外界扩张,增大了边缘信息点,使目标图像更容易拟合,增强算法识别效果。

Canny 缺陷检测算法对于 10 kV 电缆中间接头各类缺陷的识别率都在 90%以上,能识别主绝缘划痕污渍、压接管毛刺、半导电切口不齐、主绝缘边缘切割不齐等缺陷,具有较高实用价值。

参考文献:

[1] 桂俊峰,刘岳楠,逯华,等. 10 kV 电缆接头典型缺陷局部放电类型模式识别[J]. 北京交通大学学报,2023,47(3):140-148.
 GUI Junfeng, LIU Yuenan, LU Hua, et al. Pattern recognition of partial discharge types for typical defects in 10 kV cable joints[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(3): 140-148.

[2] 蒋晓娟,梁惟钢,夏俊峰,等. 35 kV 电力电缆冷缩式中间接头典型缺陷电场计算及故障分析[J]. 绝缘材料,2015,48(11):59-63.

JIANG Xiaojuan, LIANG Weigang, XIA Junfeng, et al. Electric field calculation of typical defects in 35 kV power cable joints and fault analysis[J]. Insulating Materials, 2015, 48(11):59-63.

[3] 陶玉宁,陈皇熹,赵国伟,等. 10 kV 电缆中间接头典型施工缺陷的电场及局放特性研究[J]. 电力工程技术,2021,40(5):114-120.
 TAO Yuning, CHEN Huangxi, ZHAO Guowei, et al. Electric field and local discharge characteristics of typical construction defects of 10 kV cable intermediate joint[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5):114-120.

[4] 余世文,石钟锋,程宏波. 基于多能量 X 射线图像融合的电缆接头状态判断方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(3):13-19.
 YU Shiwen, SHI Zhongfeng, CHENG Hongbo. Condition Judgement method of cable joints based on multi energy X-ray image fusion[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3):13-19.

[5] 何亚文,李友才,李奇艳,等. 防爆型高压电缆接头的泄能孔形状设计[J]. 电力科学与技术学报,2025,40(4):313-322.
 HE Yawen, LI Youcai, LI Qiyang, et al. Shape design of energy leakage hole of explosion-proof high voltage cable joint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(4):313-322.

[6] 刘亚南,丁然,喻建,等. 10 kV 电缆熔融接头运行状态下的电-热-力耦合仿真分析[J]. 绝缘材料,2023,56(3):93-99.
 LIU Yanan, DING Ran, YU Jian, et al. Electrical-thermal-mechanical coupling simulation analysis of 10 kV cable fusion joint under operation[J]. Insulating Materials, 2023, 56(3):93-99.

[7] 袁建强. 电力电缆中间接头故障原因分析及制作工艺改进[J]. 科技与创新,2016(13):141-142.
 YUAN Jianqiang. Cause analysis and production process improvement of power cable intermediate joint failure[J]. Science and Technology & Innovation, 2016(13):141-142.

[8] 曾俊. 图像边缘检测技术及其应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
 ZENG Jun. Research on image edge detection and its application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[9] GONZALEZ R, WOODS R, et al. Digital image processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007: 152-158.

[10] 宋迪,张东波,刘霞. 基于 Gabor 和纹理抑制的手机配件划痕检测[J]. 计算机工程,2014(9):1-5.

- SONG Di, ZHANG Dongbo, LIU Xia. Scratch detection for mobile phone accessories based on Gabor and texture suppression[J]. Computer Engineering, 2014(9): 1-5.
- [11] 徐志刚,赵祥模,宋焕生,等.基于直方图估计和形状分析的沥青路面裂缝识别算法[J].仪器仪表学报,2010,31(10):2260-2266.
- XU Zhigang, ZHAO Xiangmo, SONG Huansheng, et al. Asphalt pavement crack recognition algorithm based on histogram estimation and shape analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2260-2266.
- [12] 李哲毓,高明,马卫红.基于计算机视觉的管壳表面划痕检测技术研究[J].应用光学,2007,28(6):802-805.
- LI Zheyu, GAO Ming, MA Weihong. Detecting technology of scratches on pipe surface based on computer vision[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(6): 802-805.
- [13] 鲁友存.基于红外图像特征的建筑热工缺陷检测方法[D].大连:大连理工大学,2022.
- LU Youcun. Detection method of building thermal defects based on infrared image features[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [14] 黄奇.10 kV电缆接头典型缺陷局部放电研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- HUANG Qi. Study on partial discharge of typical defects in 10 kV cable joint [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [15] 刘钦伟,王元韶,王志康.交联电缆常见施工缺陷与对策[J].自动化应用,2014(6):109-110.
- LIU Qinwei, WANG Yuanshao, WANG Zhikang. Common construction defects and countermeasures of cross-linked cable[J]. Automation Application, 2014(6): 109-110.
- [16] 吴刚,单旭凯,张福祯.10 kV高压电缆安装及电缆头制作工艺的研究[J].科技与创新,2018(11):60-61.
- WU Gang, SHAN Xukai, ZHANG Fuzhen. Study on installation of 10 kV high voltage cable and manufacturing technology of cable head[J]. Science and Technology & Innovation, 2018(11): 60-61.
- [17] 乔丕凡,张玉,曹华明,等.10 kV电力电缆中间接头施工工艺缺陷的研究[J].山东电力技术,2019,46(7):33-37.
- QIAO Pifan, ZHANG Yu, CAO Huaming, et al. Research on the installation defects of 10 kV cable joint[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(7): 33-37.
- [18] 王军,林宇航,贾玉彤,等.一种改进Canny算子的图像边缘检测算法[J].小型微型计算机系统,2024,45(6):1413-1417.
- WANG Jun, LIN Yuhang, JIA Yutong, et al. Image edge detection algorithm based on improved canny operator[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2024, 45(6): 1413-1417.
- [19] HARINI S, ABHIRAM V, HEGDE R, et al. A smart driver alert system for vehicle traffic using image detection and recognition technique[C]//2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). [S. l.]: IEEE, 2017: 1540-1543.
- [20] KIM S W, KIM N S. Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing[J]. NDT & E International, 2013, 59(7): 25-33.
- [21] PARRA L, MOSTAZA COLADO D, MARIN J F, et al. Methodology to differentiate legume species in intercropping agroecosystems based on UAV with RGB camera[J]. Electronics, 2022, 11(4): 609.
- [22] MAHFURDZ A, SAHER R, PI W G W. Electronic circuit failure detection using thermal image[J]. Open Access Library Journal, 2020, 7(8): 1-7.
- [23] 明菊兰,钱洲亥,牛莉,等.基于最小二乘原理的电力变压器绝缘油色谱在线监测系统校准方法[J].武汉大学学报(理学版),2021,67(3):281-291.
- MING Julan, QIAN Zhouhai, NIU Li, et al. A calibration method of power transformer insulating oil chromatography online monitoring system based on least square principle[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), 2021, 67(3): 281-291.
- [24] 贺杰,王桂梅,刘杰辉,等.基于图像处理的皮带上煤量体积计量[J].计量学报,2020,41(12):1516-1520.
- HE Jie, WANG Guimei, LIU Jiehui, et al. Volume measurement of coal volume on belt conveyor based on image processing[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(12): 1516-1520.
- [25] 芦穗豪,韩勇,齐永阳,等.基于改进麻雀搜索算法的B样条曲线拟合方法[J].计算机工程,2023,49(1):100-112.
- LU Suihao, HAN Yong, QI Yongyang, et al. Method of B-spline curve fitting based on improved sparrow search algorithm[J]. Computer Engineering, 2023, 49(1): 100-112.
- 陈志(2000—),男,硕士研究生,从事电气工程输电线路方向研究(E-mail:572451367@qq.com)。
- 方春华(1980—),男,副教授,硕士生导师,从事电力系统在线监测技术、电力设备故障诊断、高电压绝缘与测试技术研究(通信作者)(E-mail:fang107531@163.com)。