

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.051

基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测

彭放¹, 刘甜甜¹, 苏江文², 任俊达¹, 卢伟龙²

(1. 国家电网有限公司大数据中心, 北京 100053; 2. 福建亿榕信息技术有限公司, 福建 福州 350003)

摘要:针对输电线路耐张线夹的缺陷检测存在图像清晰度低、错误检出率低和工作量减少率低的问题, 提出基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法。采用 X 射线无损探伤技术获取输电线路耐张线夹图像, 结合 Retinex 图像增强算法和经验模式分解方法对图像进行增强处理; 为了消除 X 射线强弱对检测结果的影响, 通过自适应通态滤波方法对耐张线夹图像进行处理; 采用 Canny 算子边缘提取方法获取图像边缘, 在形态学运算的基础上获取最大连通域; 将连通域的长宽比和圆形成度作为缺陷特征, 完成输电线路耐张线夹缺陷的检测。实验结果表明: 所提方法的图像清晰度高、错误检出率高、工作量减少率高。

关键词: X 射线无损探伤; 输电线路; 图像增强; 边缘检测; 耐张线夹缺陷检测

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)04-0264-07

Defect Detection of Transmission Line Tensile Clamps Based on X-ray Non-destructive Inspection

PENG Fang¹, LIU Tiantian¹, SU Jiangwen², REN Junda¹, LU Weilong²

(1. Big Data Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;

2. Fujian Yirong Information Technology Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: To improve the poor image clarity, low error detection and workload reduction rates in detecting the defects of strain clamp of transmission line by current method, a new method for detecting the defects of the tension clamp of transmission lines based on X-ray non-destructive testing is proposed. The X-ray non-destructive testing technology is used to obtain the image of the tension clamp of the transmission line, which is enhanced by combining the Retinex image enhancement algorithm with the empirical mode decomposition method. In order to eliminate the effect of X-ray strength on testing results, the image of tension clamp is processed by the adaptive on-state filtering method, the edge of the image is gained with the edge extraction method of Canny operator, the largest connected domain is obtained on the basis of morphological calculation, and the length-to-width ratio of connected domain and circularity are treated as the defect features to complete the detection of the strain clamp defect of the transmission line. The experimental results show that the proposed method has good image clarity, high error detection and workload reduction rates.

Keywords: X-ray non-destructive inspection; transmission line; image enhancement; edge detection; defect detection of tensile clamp

0 引言

开发风能、太阳能等是推动清洁低碳能源转型的关键。随着“碳中和”战略目标的实施, 新能源进入快速发展阶段。在双碳背景下, 铝制或铁制金属附件被广泛地应用在不同电压等级的输电线路中, 在输电线路运行过程中上述金属附件承受的压力较大^[1]。以输电线路的耐张线夹为例, 在生产耐张线夹的过程中, 如果操作不规范, 会导致耐张线夹内部存在缺陷, 这类缺陷不易被检测到, 在昼夜温差和风载等影响下耐张线夹会发生

裂纹, 甚至会导致其失效断裂^[2-3], 进而造成大面积停电和输电中断等故障。因此需要对耐张线夹中存在的缺陷进行检测。

目前国内外学者已对输电线路耐张线夹缺陷检测做出了研究, 并取得了一定的研究成果。彭向阳等^[4]提取输电线路图像的拉普拉斯边缘, 并获取图像的纹理特征, 对角度间特征和角度内特征进行聚类处理, 根据聚类结果完成输电线路耐张线夹缺陷的检测, 该方法没有对图像进行增强处理, 导致图像的清晰度较低。侯春萍等^[5]在 FasterR-CNN (全卷积神经网络) 框架中采用

基金项目: 国家电网有限公司大数据中心科技项目 (SGSJ0000FXJS2100093)

第一作者简介: 彭放 (1987—), 男, 湖北荆门人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力大数据分析、营销计量信息化, zaw0609@126.com。

AlexNet、VGG16 训练检测器和分类器,组合训练后的检测器与分类器构成级联网络,利用级联网络检测输电线路耐张线夹缺陷,该方法在缺陷检测过程中的错误检出率较低。王伟超等^[6]根据输电线路的特点,对输电线路进行划分,并对耐张线夹的缺陷程度进行量化处理,采用隶属度分析方法根据缺陷历史数据对耐张线夹的缺陷值进行计算,完成耐张线夹缺陷检测,该方法的工作量较大。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于X射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法。首先对输电线路耐张线夹图像进行预处理,利用X射线无损探伤技术采集耐张线夹图像,结合Retinex图像增强算法和经验模式分解方法进行图像增强处理,提升输电线路耐张线夹缺陷检测的精度。基于自适应同态滤波及边缘检测提升图像边缘清晰度,以图像连通域的长宽比和圆弧度作为缺陷特征,实现输电线路耐张线夹缺陷的检测。

1 图像获取与处理

1.1 基于X射线无损探伤技术的图像获取

耐张线夹是一种用于固定导线,以承受导线张力,并把导线挂至耐张串组或杆塔上的一种金属工具。输电线路耐张线夹是由耐张预绞丝和配套的连接金具构成的。耐张线夹是电力系统中重要的连接件,它既起到电线的传导作用,又能承受电线的所有张力。在恶劣的工作条件下,耐张线夹在极限负荷下,经常会出现失效的情况。因此,对电线耐张线夹缺陷进行检测是保证电力系统运行质量的重要手段。本文采用X射线数字成像板进行输电线路耐张线夹图像的X射线无损探伤成像,装置原理图如图1所示。

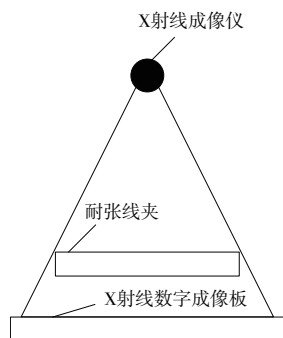


图1 X射线无损检测装置原理图

如图1所示,通过采用X射线无损探伤技术采集耐张线夹图像,X射线波长在0.001~10 nm

之间,波长极短,X射线是由阳极上的电子光束以较快的速度碰撞而产生的,电子光束则是由一个加强的自由电子所构成。从量子理论的角度来看,单个X射线光子的能量为

$$E = h\gamma = hc/\lambda \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常量; γ 为振动频率; c 为光速; λ 为波长。

X射线成像是通过X射线与对象的相互作用而产生的,它具有穿透性。在X光穿过被检对象耐张线夹时,由于其密度和厚度的差异,各对象对X射线吸收的程度不同,所以在穿过对象后,X射线的残留量也会发生变化,从而在屏幕上形成了不同的黑白反差影像。要想获得符合人体肉眼的影像,就需要通过X射线数字成像板进行显影,以确保X光能转化成黑白对比度高、层次分明的输电线路耐张线夹X射线影像。

根据图像质量指标对X射线无损探伤技术的焦距进行选择,利用最优焦距获取输电线路耐张线夹图像。

1) 图像不清晰度

用 U_0 表示输电线路耐张线夹图像的最小不清晰度,其表达式如下。

$$U_0^3 = U_g^3 + U_s^3 \quad (2)$$

式中: U_s 为荧光不清晰度; U_g 为几何不清晰度。 U_g 可通过几何成像关系^[7-9]计算得到:

$$U_g = \frac{dL_2}{L_1} \quad (3)$$

式中: d 为射线源焦点尺寸; L_1 为受检工件与焦点之间的距离; L_2 为成像板与受检工件之间的距离。

设 M 为图像放大倍数,可通过几何原理计算得到:

$$M = \frac{L_1 + L_2}{L_1} \quad (4)$$

U_0 与 M 之间的关系可通过下式进行描述:

$$U = \frac{U_0}{M} \quad (5)$$

式中 U 为输电线路耐张线夹图像的不清晰度。对上式进行分析可知, U_0 随着 M 的增大而减小。

结合上述分析结果,获取最佳放大倍数 M_{opt} ,其表达式如下:

$$M_{opt} = 1 + \left(\frac{U_0}{d} \right)^{3/2} \quad (6)$$

2) 图像对比度

对于细微物体,人类视觉的主观识别程度就是图像分辨率^[10-12]。X射线穿透工件后,会发生

散射或吸收,成像板接收到的射线能量不同。因此,X射线穿透工件后能量变化区域的图像灰度值受材料特性和透照厚度的影响^[13-14]。X射线穿透工件后的图像对比度计算公式为

$$M_f = \frac{L_y}{M_{opt}} \quad (7)$$

式中 L_y 为检测区域的有效长度。

3) 检测焦距

在透照布置原理的基础上对X射线角度 θ 进行计算:

$$\tan\theta = \frac{1}{2L_y} / L_1 \quad (8)$$

设 F 为透照检测焦距,可通过下式计算得到:

$$F = L_1 + L_2 \quad (9)$$

根据确定的透照检测焦距获取输电线路耐张线夹图像。

1.2 图像增强处理

基于X射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法结合 Retinex 图像增强算法和经验模式分解方法对获取的输电线路耐张线夹图像进行增强处理,具体步骤如下。

1) 用 $I(x, y)$ 表示获取的输电线路耐张线夹图像,对其做直方图均衡化处理^[15-16],将RGB空间中存在的图像 $I(x, y)$ 转变到HSV空间中,提取图像中存在的颜色分量,即亮度 V_{org} 、饱和度 S_{org} 和色调 H_{org} 。

2) 设置照射倍数 $n_1, n_2, \dots, n_m$, 对亮度分量 V_{org} 进行提高处理,在不同光照条件下获得 m 幅耐张线夹图像 $V_{org1}(x, y), V_{org2}(x, y), \dots, V_{orgm}(x, y)$;

3) 采用经验模式分解方法^[17-18]对耐张线夹图像 $V_{org1}(x, y), V_{org2}(x, y), \dots, V_{orgm}(x, y)$ 进行分解,获得一个剩余分量 $r_{ik}(x, y)$ 和一个内蕴模式分量 $imf_{ij}(x, y), i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, l; k=0, 1, 2, \dots, l$ 。

4) 取亮度 V_{org} 剩余分量 $r_{0k}(x, y)$ 对应的对数,即

$$r'_{0k}(x, y) = \log[r_{0k}(x, y)] \quad (10)$$

并采用 Retinex 图像增强算法^[19-20]对其进行处理,获得 $r'_{0k}(x, y)$,并通过下式对剩余分量进行增强处理:

$$R_{0k}(x, y) = \exp[r'_{0k}(x, y)] \quad (11)$$

加权处理 $V_{org1}(x, y), V_{org2}(x, y), \dots, V_{orgm}(x, y)$ 的亮度剩余分量对数 $r'_{0k}(x, y)$, 获得增强分量 $R_{0k}(x, y)$ 。

5) 将亮度设置为 $V_{org} = \max[0, \min(1, imf_{ij})]$, 其中 $\max$ 为最大算子。

6) 在HSV(六角锥体模型)空间中利用亮度 V_{org} 、饱和度 S_{org} 和色调 H_{org} 将耐张线夹图像转回到RGB(色彩空间)空间中,完成图像的增强处理。

综上所述,耐张线夹图像预处理流程如图2所示。

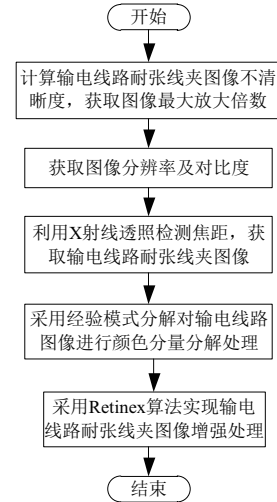


图2 耐张线夹图像预处理流程

2 输电线路耐张线夹缺陷检测

1) 自适应同态滤波

由照射-反射模型可知,可通过反射分量 $r(x, y)$ 和照射分量 $i(x, y)$ 的乘积表示耐张线夹图像 $f(x, y)$, 其中 $0 < i(x, y) < \infty, 0 < r(x, y) < 1$ 。

通过傅里叶变换^[21-22]控制照射分量 $i(x, y)$ 和反射分量 $r(x, y)$ 。取图像 $f(x, y)$ 的对数 $z(x, y)$, 分离照射分量 $i(x, y)$ 和反射分量 $r(x, y)$, 图像 $f(x, y)$ 在区间 $[0, 255]$ 内取值, 采用 $f[(x, y)+1]$ 代替 $f(x, y)$, 以避免 $\ln(0)$ 的出现:

$$z(x, y) = \ln[f(x, y) + 1] = \ln[i(x, y)] + \ln[r(x, y)] \quad (12)$$

通过下式傅里叶变换 $z(x, y)$:

$$Z(u, v) = F[z(x, y)] \quad (13)$$

式中 $F[\cdot]$ 为傅里叶变换函数。

通过傅里叶变换,可以将图像从空间域转换到频域,并在频域中进行处理,得到每个频率分量的幅度 $Z(u, v)$ 。设置滤波器 $H(u, v)$, 通过下式滤波处理 $Z(u, v)$:

$$S(u, v) = H(u, v) Z(u, v) = H(u, v) F[i(u, v)] + H(u, v) F[r(u, v)] \quad (14)$$

傅里叶变换滤波处理后的图像:

$$s(x, y) = \text{IFFT}[S(u, v)] \quad (15)$$

式中 IFFT 为傅里叶逆变换操作。

根据上述过程,获得最终耐张线夹图像:

$$g(x, y) = e^{s(x, y)} - 1 = i_0(x, y)r_0(x, y) \quad (16)$$

式中: $g(x, y)$ 为灰度值; $i_0(x, y)$ 为耐张线夹图像经过处理后的照射分量; $r_0(x, y)$ 为耐张线夹图像经过处理后的反射分量。

对上述过程进行分析可知,为了提高输电线路耐张线夹图像中细节信息的清晰度,需要降低低频信息,增强高频信息,所提方法利用高斯高通滤波器^[23-24]对图像进行处理:

$$H(u, v) = (\gamma_H - \gamma_L) e^{(-aD^2(u, v)/D_0)} + \gamma_L \quad (17)$$

式中: $\gamma_H > 1$, $\gamma_L < 1$ 描述的是滤波器对应的幅度范围; a 为常数; D 为穿越频率; D_0 为截止频率。

通过下式对常数 a 进行计算:

$$a = \frac{P_m^1}{P_m^2} \quad (18)$$

式中: P_m^1 为第 1 个最大幅值; P_m^2 为第 2 个最大幅值。

2) 边缘检测

通过高斯滤波器 Q_{ij} 对耐张线夹图像进行处理,消除图像中存在的噪声,平滑图像:

$$Q_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \eta \left\{ -\frac{[i-(k+1)]^2 + [j-(k+1)]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (19)$$

式中: η 为噪声点像素值; σ 的取值为 1.4。

将高斯滤波器核 Q 中的元素与窗口 A 中的元素相乘,获得滤波处理后耐张线夹图像中心像素点 e 对应的灰度值。

设 G 为中心像素点对应的梯度, θ 为中心像素点对应的方向,其计算公式分别如下:

$$\begin{cases} G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \theta = \arctan \frac{G_y}{G_x} \end{cases} \quad (20)$$

式中 G_x 、 G_y 分别为 Sobel 算子 S_x 、 S_y 对应的梯度。

通过比较像素的梯度,判断像素是否为边缘点,当像素为边缘点时,予以保留,当像素为非边缘点时,抑制该像素点,完成耐张线夹图像边缘检测^[25-27]。

3) 形态学运算

针对图像 I ,通过结构元素 B 完成灰度膨胀操作,并用 $I \oplus B$ 表示:

$$(I \oplus B)(s, t) = \max \{ I(s-x, t-y) + B(x, y) \} \\ (s, t) \in I, (s-x, t-y) \in I, (x, y) \in B \quad (21)$$

基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法,通过圆盘结构元素 S_E 进行灰度膨

胀操作,其表达式如下:

$$S_E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

4) 最大连通域

消除耐张线夹图像中存在的噪声点,并通过连通域方法标记所有连通域,保留最大连通域^[28-29]。

5) 缺陷检测

设 C 为连通域对应的周长, S_2 为连通域对应的面积,通过连通域的长宽比 D_2 和圆形度 R 对缺陷进行判断,完成输电线路耐张线夹的缺陷检测:

$$\begin{cases} R = \frac{4\pi S_2}{C^2} \\ D_2 = \frac{L^2}{S_2} \end{cases} \quad (23)$$

式中 L 为最小矩形长边对应的长度。

输电线路耐张线夹缺陷检测流程如图 3 所示。

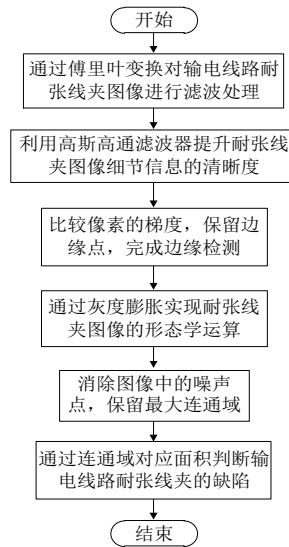


图 3 输电线路耐张线夹缺陷检测流程

3 实验与结果

为了验证基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法的整体有效性,需要对基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法进行测试。

3.1 实验对象

实验对象选取 100 个 NLD-1 型号耐张线夹为待检测对象。其结构特点为线夹强度高、对绞线应力分布均匀,能够提升线路抗振能力,同时耐腐蚀性较好。NLD-1 型号耐张线夹的缺陷情况

如表1所示。

表1 NLD-1型号耐张线夹的缺陷分类

缺陷类别	描述
功能性缺陷	A类 钢锚凹槽处铝管严重欠压
	B类 钢锚凹槽处铝管未压
工艺性缺陷	C类 钢芯鼓肚
	D类 钢锚管变形
	E类 钢锚管存在毛刺
	F类 钢锚管处铝管空压

本文研究的耐张线夹的缺陷统计结果如表2所示。

表2 耐张线夹缺陷统计结果

缺陷类别	缺陷数量
功能性缺陷	A类 23
	B类 9
工艺性缺陷	C类 21
	D类 22
	E类 17
	F类 8

根据透照厚度与X射线管相关的电压特性,获取X射线认可的管道电压上限值。输电线路

耐张线夹的透照参数如表3所示。

表3 X射线透照参数

参数项	数值
透照厚度/mm	20
管电压/kV	85
管电流/mA	0.33
输电线路耐张线夹透照投影长度/mm	440
焦点尺寸	1
X射线器垂直辐射角度/(°)	84
透照长度/mm	630
曝光时间/s	4

3.2 实验指标及实验环境

检测的模拟平台为MATLAB2019,采用Java编程语言进行算法的试验模拟。本文选用的耐张线夹缺陷图像包括耐张线夹钢芯鼓肚、钢锚凹槽处铝管严重欠压、钢锚管变形和钢锚管存在毛刺的缺陷。实验指标如下:

1) 图像清晰度:图像清晰度 D 的计算公式如式(24)所示,图像清晰度 D 值越接近于1,表示清晰度越好。

$$D = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{[x_{\text{out}}(m, n) - x_{\text{out}}(m-1, n)]^2 + [x_{\text{out}}(m, n) - x_{\text{out}}(m, n-1)]^2} \quad (24)$$

2) 错误检出率:错误检出率的计算公式如式(25)所示。

$$L_c = \frac{c_1 - c_0}{c_1} \times 100\% \quad (25)$$

式中 c_0 、 c_1 分别为采用输电线路耐张线夹缺陷检测方法前后的缺陷检出量。

3) 工作量减少率:工作量减少率的计算公式如式(26)所示。

$$L_g = \frac{t_1 - t_0}{t_1} \times 100\% \quad (26)$$

式中 t_0 、 t_1 分别为采用输电线路耐张线夹缺陷检测方法前后的检测耗时。

3.3 实验结果分析

在100个待检测的耐张线夹测试图像中随机挑选4幅,采用基于X射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法、文献[4]方法和文献[5]方法对每幅图中耐张线夹存在的缺陷进行识别,识别结果如图4所示。

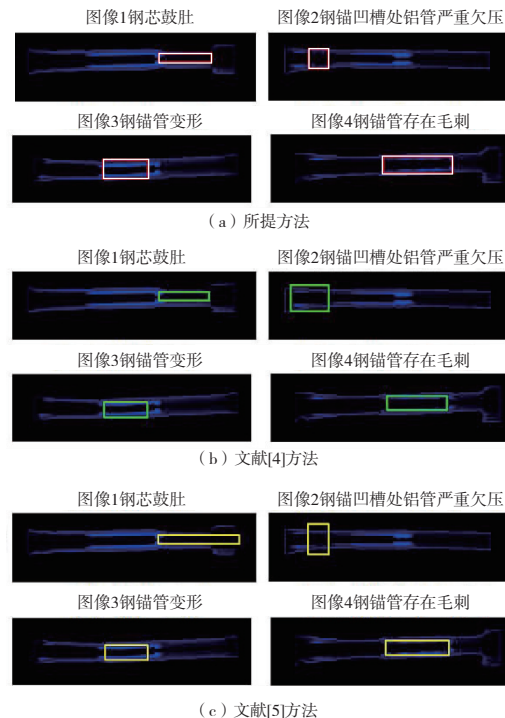


图4 耐张线夹缺陷识别结果

分析图4可知,所提方法可以准确识别出耐张线夹钢芯鼓肚、钢锚凹槽处铝管严重欠压、钢锚管变形和钢锚管存在毛刺的缺陷;而文献[4]可以识别出钢芯鼓肚、钢锚管变形和钢锚管存在毛刺缺陷,识别钢锚凹槽处铝管严重欠压缺陷有限;文献[5]能够识别钢锚凹槽处铝管严重欠压、钢锚管变形和钢锚管存在毛刺缺陷,钢芯鼓肚缺陷识别效果较差。这是因为所提方法结合了Retinex图像增强算法和经验模式分解方法对图像进行增强处理,提高了图像质量,以此提升了缺陷识别能力。

在上述测试结果的基础上,选取清晰度作为指标,采用所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法对输电线路耐张线夹图像质量进行评价,结果如图5所示。

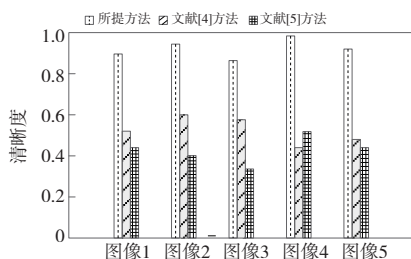


图5 不同方法的清晰度测试结果

对图5进行分析可知,所提方法获取的图像清晰度均在0.9以上,远高于文献[4]方法和文献[5]方法。清晰度越高,表明该方法获取的图像质量越高,所提方法应用X射线无损探伤技术采集耐张线夹图像,选取最优焦距,提升了图像分辨率,因此可获取高质量的输电线路耐张线夹图像。

采用所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法对输电线路耐张线夹进行缺陷检测,对比不同方法的错误检出率,测试结果如图6所示。错误检出率越高,表明缺陷检测性能越好。

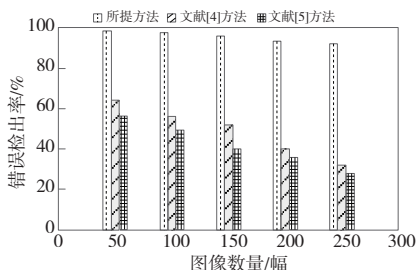


图6 错误检出率测试结果

采用所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法

对输电线路耐张线夹的缺陷进行检测时,随着图像数量的增加,3种方法的错误检出率均有所降低,从减小幅度的出发,所提方法的错误检出率减小幅度最低,且在相同图像数量下,所提方法的错误检出率均高于文献[4]方法和文献[5]方法。所提方法应用自适应同态滤波及边缘检测技术提取图像边缘特征,通过高斯高通滤波器实现边缘保留,能够有效提升输电线路耐张线夹故障检测准确性。因此所提方法具有良好的检测性能。

为了进一步验证方法的有效性,选取工作量减少率作为指标进行测试,所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法的测试结果如表4所示。

表4 工作量减少率测试结果

测试 次数/次	工作量减少率/%		
	所提方法	文献[4]方法	文献[5]方法
1	59.4	21.3	29.6
2	60.1	25.0	28.4
3	58.8	22.5	26.7
4	57.9	23.8	28.8
5	61.4	21.1	27.4
6	62.2	24.7	26.6
7	63.4	23.3	25.8
8	61.9	24.6	24.7
9	62.8	21.7	27.9
10	63.5	25.6	28.2

根据表4中的数据可知,在10次测试试验中,所提方法的工作量减少率平均值为61.14%,与文献[4]方法和文献[5]方法的测试结果相比,所提方法的工作量减少率最高,表明所提方法可有效提高输电线路耐张线夹缺陷检测的效率。

4 结语

输电线路耐张线夹长期受振荡、舞动和覆冰等因素的影响,容易出现缺陷,导致输电线路断线事故的发生。目前输电线路耐张线夹缺陷检测方法存在图像清晰度低、错误检出率低和工作量减少率低的问题,本文提出基于X射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测方法,通过X射线无损探伤技术获取输电线路耐张线夹图像,利用连通域的长宽比和圆弧度完成缺陷检测,提高了耐张线夹在输电线路中的安全性和稳定性。

参考文献:

- [1] 童晓阳,杨明杰,张广骁. 基于改进 DTW 的行波波形相似性的高压直流输电线路保护方案[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3878-3887.
- [2] 陈杰,曹少华,任永琼,等. 取代可锻铸铁的高寒低温环境用新型铝合金耐张线夹的研究[J]. 铸造技术,2020,41(9):826-830.
- [3] 徐望圣,孙志林,谢亿,等. 500 kV 输电线路耐张线夹钢锚断裂分析[J]. 矿冶工程,2020,40(2):144-146,153.
- [4] 彭向阳,梁福逊,钱金菊,等. 基于机载红外影像纹理特征的输电线路绝缘子自动定位[J]. 高电压技术,2019,45(3):922-928.
- [5] 侯春萍,章衡光,张巍,等. 输电线路绝缘子自爆缺陷识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(6):1-6.
- [6] 王伟超,司文涛,袁光福,等. 几何成像区域红外小目标像素数测量方法[J]. 光学学报,2020,40(13):87-94.
- [7] 曾勇斌,王星华,彭显刚,等. 输电线路缺陷风险建模及其预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(10):91-98.
- [8] 孟庆鹏,刘世界,李春来,等. 成像狭缝对热红外高光光谱成像仪接收能量的影响[J]. 半导体光电,2019,40(5):714-718,725.
- [9] 王亚堃,朱荣刚,刘波,等. 最小体积约束的高光谱图像分辨率增强算法[J]. 电光与控制,2019,26(1):38-42.
- [10] 刘秀,刘咏,张翠,等. 遥感图像分辨率提升与数据处理[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(8):98-108.
- [11] 刘志博,朱志鹏,何超,等. 微纳级示踪粒子图像灰度与粒径量化关系研究[J]. 光学学报,2020,40(8):80-86.
- [12] 赵战民,朱占龙,王军芬. 改进的基于灰度级的模糊 C 均值图像分割算法[J]. 液晶与显示,2020,35(5):499-507.
- [13] 赵春丽,董静薇,徐博,等. 融合直方图均衡化与同态滤波的雾天图像增强算法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(6):93-97.
- [14] 虎晓红,陈宝钢. 基于受限分位直方图的小麦苗情图像增强方法[J]. 河南农业大学学报,2019,53(1):128-134.
- [15] 黄传金,雷文平,李凌均,等. 旋转机械故障特征提取的全矢二元经验模态分解方法研究[J]. 振动与冲击,2019,38(9):94-99,132.
- [16] 陈岳坪,谌炎辉,汤慧,等. 基于经验模态分解方法的曲面加工误差补偿[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(10):2616-2622.
- [17] 张驰,谭南林,李响,等. 基于改进型 Retinex 算法的雾天图像增强技术[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(2):309-316.
- [18] 许凤麟,苗玉彬,张铭. 基于彩色加权引导滤波-Retinex 算法的导航图像增强[J]. 上海交通大学学报,2019,53(8):921-927.
- [19] 杨卫梅,刘刚,刘雨,等. 农作物锈病叶傅里叶变换红外光谱检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(2):435-442.
- [20] 白旭,胡辉. 基于快速傅里叶变换和互相关的多频微弱信号重构法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(3):168-175.
- [21] 方洁,庄智强,戴永胜. 基于 LTCC 的小型化超宽带高通滤波器[J]. 固体电子学研究进展,2019,39(4):269-272,296.
- [22] 胡鑫楠. 基于改进型混沌粒子群优化算法的 FIR 高通数字滤波器设计[J]. 计算机科学,2019,46(增刊1):601-604.
- [23] 陈雨,方滨,王普. 一种 Beamlet 变换下的图像边缘检测算法[J]. 中国图象图形学报 A,2010,15(8):1214-1219.
- [24] 黄巍,黄辉先,徐建闽,等. 基于 Canny 边缘检测思想的改进遥感影像道路提取方法[J]. 国土资源遥感,2019,31(1):65-70.
- [25] 阙禄松,王明泉,张俊生,等. 基于多尺度局部边缘保持滤波的 X 射线图像色调映射算法[J]. 科学技术与工程,2019,19(28):217-221.
- [26] 蔡彪,沈宽,付金磊,等. 基于 Mask R-CNN 的铸件 X 射线 DR 图像缺陷检测研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(3):61-69.
- [27] 庞锴,吕中宾,都元祥,等. 输电线路耐张线夹压接长度对其抗拉承载力及失效模式的影响分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(23):9384-9392.
- [28] 张永翔,吴功平,刘中云,等. 基于 YOLOv3 网络的输电线路防震锤和线夹检测迁移学习[J]. 计算机应用,2020,40(增刊2):188-194.
- [29] 董选昌,曲烽瑞,李艳飞,等. 架空线路耐张线夹三维温度场仿真分析及验证[J]. 西南交通大学学报,2019,54(5):997-1004.

收稿日期:2022-10-12