

基于图像融合的高压隔离开关分合闸状态识别

张 靖, 单长吉, 周 丽, 李 鑫, 朱 豪

(昭通学院 物理与信息工程学院, 云南 昭通 657000)

摘要: 为了解决现有隔离开关分合闸状态识别率较低的问题, 提出了一种基于 NSST-PCNN-IFVSS 的图像融合方法。在对红外和可见光图像的预处理阶段进行图像配准, 再采用像素级融合来实现两图像的融合。在融合阶段采用非下采样剪切波变换将红外和可见光图像分解为高频频子带图和低频频子带图, 在高频频子带图部分采用脉冲耦合神经网络进行融合, 在低频频子带图部分采用基于视觉显著特性分割的图像融合方法进行融合, 通过非下采样剪切波变换的逆变换将两个子带图像结合起来得到融合后的图。建立融合质量指标评价方案来对比本方案与常见的图像融合方案的效果。对融合后的图像进行像素积分投影算法进行处理, 进而实现对高压隔离开关分合闸状态进行识别。通过实验仿真验证了 NSST-PCNN-IFVSS (Non Subsampled Shearlet Transform-Pulse Coupled Neural Network-Image Fusion based on Visual Salience Segmentation) 的图像融合效果优于常见的 6 种融合方法, 且图像融合后的识别结果优于单一的可见光图像和红外图像。

关键词: 高压隔离开关; 图像融合; NSST-PCNN-IFVSS; 图像配准; 像素积分投影

中图分类号: TP89 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)05-0539-09

Recognition of High-Voltage Isolation Switch Opening and Closing State Based on Image Fusion

ZHANG Jing, SHAN Changji, ZHOU Li, LI Xin, ZHU Hao

(School of Physics and Information Engineering, Zhaotong University, Zhaotong 657000, China)

Abstract: To solve the low recognition rate problem of the existing isolation switch state identification, a method of image fusion based on NSST-PCNN-IFVSS is proposed. Image registration is performed in the preprocessing stage of infrared and visible light images; subsequently, pixels and fusion are used to achieve the fusion of the two images. In the fusion stage, the non-subsampled shearlet transform is used to decompose the infrared and visible light images into high- and low-frequency sub-band images. In the high-frequency sub-band image part, a pulse coupled neural network is used for fusion, whereas the image fusion method based on visual saliency segmentation is used for fusion in the low-frequency sub-band image part. The two sub-band images are combined by the inverse transform of the non-subsampled shearlet transform to obtain the fused image. A fusion quality index evaluation scheme is established to compare the effect of this method with common image fusion methods. The fused image is processed by a pixel integration projection algorithm to determine the state of the high-voltage isolation switch. Experimental simulation verifies that the image fusion effect of the non-subsampled shearlet transform-pulse coupled neural network-image fusion based on visual salience segmentation is better than six common fusion methods, and the recognition result after image fusion is better than that of the single visible light image and infrared image.

Key words: high voltage isolation switch, image fusion, NSST-PCNN-IFVSS, image registration, pixel integral projection

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-11-03。

作者简介: 张靖 (1994-), 男, 硕士, 助教, 研究方向: 电气设备故障诊断与检测, E-mail: 3052366988@qq.com。

通信作者: 周丽 (1975-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 理论物理, E-mail: 1780040544@qq.com。

基金项目: 云南省科技计划项目 (202001AP070046)。

0 引言

高压隔离开关在供电系统中起着至关重要的作用, 是一种能够保护检修人员及电力设备安全的重要设备。但由于其长期处于室外工作, 受外界天气和强电场的影响, 导致机械结构发生故障, 容易造成分合闸失灵的情况, 使得电网安全运行受到威胁^[1-2]。针对隔离开关分合闸状态的识别方法主要有基于温度检测、图像识别、应力应变检测、电机电流检测等方法。基于温度检测的原理是通过检测动静触头的温度情况来判断分合闸状态。曾小松^[3]等人根据 500 kV GIS (Gas Insulated Switchgear) 隔离开关的特性建立了三维的温度-流体场仿真模型, 依据仿真模型计算出的温度场分布情况来优化温度传感器的安装位置, 通过传感器检测到的值可以判断出隔离开关的状态。该方法属于接触式测量, 传感器容易受高电压强电流的损坏。陈富国^[4]等人提出了基于红外图像的隔离开关状态识别方法, 采用优化后的 YOLO v3 算法模型做图像提取和精度检测, 通过实验表明了优化后的 YOLO v3 算法比未优化的识别率高出 7.82%。红外图像属于非接触式测量, 具有较强的穿透能力, 且抗干扰能力强。但是其像素较低, 容易丢失图像的细节信息, 对温度较为敏感。基于可见光图像识别的原理是通过采集隔离开关的图像进行处理, 利用智能算法来识别分合闸状态。文献[5]和文献[6]提出了基于可见光图像的隔离开关状态识别的方案, 通过识别动静触头之间的夹角来判断隔离开关的角度, 根据识别的角度来判断隔离开关分合闸是否成功。可见光图像像素高, 能采集到更多的图像细节, 对外界温度不敏感。但是易受遮挡物影响, 受外界干扰影响较大。基于应力应变检测的原理是通过检测操作杆的应变情况来判断分合闸状态。文献[7]提出了一种基于操作力矩和转角检测的识别技术, 通过采集操作杆的应变力和转角数据来绘制应力-转角曲线, 通过分析该曲线的变化情况来判断隔离开关的状态。由于动静触头的相对位置才能真实反映隔离开关分合闸状态, 所以该方法存在识别不准确的缺陷。基于电机电流检测的原理是通过分析不同状态下驱动电机电流的峰值变化情况来判断分合闸状态。于力^[8]等人针对 550 kV GIS 隔离开关的故障特性建立了等效仿真模型, 分别对隔离开关分合闸状态下驱动电机转矩、电流及加速度进行了仿真计算, 通过电流换相时间来判断分合闸状态。刘仕兵^[9]等人通过分析驱动电机定子电流的变频分量和基波有效值来判断隔离开关的状态, 并通过 SVM (Support Vector Machine) 分类器来判断分合闸是否到位。这两种方

法同样不能够直接检测到隔离开关动静触头的相对位置, 不能够保证分合闸识别的准确性。

综上分析, 红外图像和可见光图像能够实现优势互补, 所以可将两种图像进行融合来实现隔离开关状态的识别。通过 NSST (Non-Subsampled Shearlet Transform) 对两种图像进行分解, 得到高频频子带图和低频频子带图, 采用 PCNN (Pulse Coupled Neural Network) 对两种图像的高频频子带图进行融合, IFVSS (Image Fusion based on Visual Salience Segmentation) 对低频频子带图进行融合, 再通过 NSST 的逆变换将两个子带图像结合起来得到融合后的图。接着对融合图像的效果进行客观评价, 确定本方案的可行性, 再利用像素积分投影法来识别隔离开关的分合闸状态。最后通过实验仿真来判断采取本方案的可行性和合理性。

1 图像预处理

1.1 图像灰度化

采集到的高压隔离开关的红外图像和可见光图像均属于彩色图像, 这些图像中的色彩信息对识别结果影响较小, 为了降低运算量, 提高运算效率, 可将两种图像进行灰度化处理。计算公式为^[10]:

$$\text{Gray}(i,j)=0.299 \times R(i,j)+0.587 \times G(i,j)+0.114 \times B(i,j) \quad (1)$$

式中: $\text{Gray}(i,j)$ 表示图像在坐标 (i,j) 处像素点的灰度值; $R(i,j)$ 表示图像的红色分量; $G(i,j)$ 表示图像的绿色分量; $B(i,j)$ 表示图像的蓝色分量。

1.2 图像滤波

图像在采集的过程中容易受外界环境和自身不稳定的干扰, 导致得到的图像会产生一定的噪声, 这些噪声严重影响着识别的准确率, 所以需要对其进行滤波去噪处理。常用于滤波去噪的方法有: 均值滤波、高斯滤波、双边滤波、二维中值滤波^[11], 相比于均值滤波和高斯滤波, 二维中值滤波能够更好地保护图像的边缘细节, 相比于双边滤波等复杂滤波方法, 二维中值滤波的计算相对简单, 适用于实时处理或者资源有限的情况。所以本文采用二维中值滤波来滤除图像的噪声。

将二维滑动模板中的像素值从大到小进行排列, 得到二维数据序列^[12]。令滤波后的图像为 $g(i,j)$, 则有:

$$g(x,y)=\text{med}\{f(x-k, y-l)\}, (k, l \in A) \quad (2)$$

式中: $f(x-k, y-l)$ 表示隔离开关的原始图像, A 表示二维滑动模板, 模板的区域通常有 3×3 和 5×5 。图 1 所示为图像灰度化和滤波后的图。

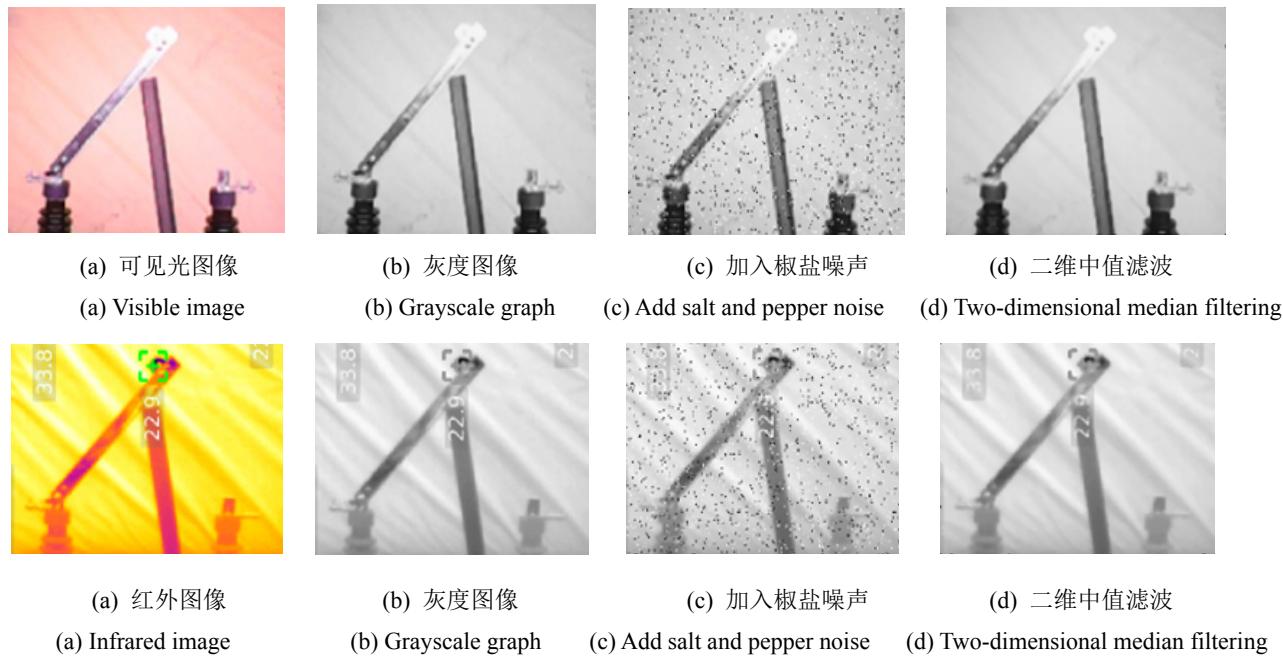


图1 灰度化和滤波后的图像

Fig.1 Grayscale and filtered image

1.3 图像配准

由于在图像采集的过程中会因拍摄角度和物像距离的不同而导致目标图像在空间中无法对齐,使得红外和可见光图像在融合的过程中无法找到相互之间的映射关系,不能在空间中进行较好的融合,因此需要对两种不同的图像进行配准^[13-14]。

对采集到的红外和可见光图像做归一化处理,使两张图像的分辨率调整为2306×2658。采用最大最小值法进行归一化处理:

$$\text{norm} = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3)$$

式中: norm为归一化后的值; x_i 为图像像素点的值; $\max(x)$ 和 $\min(x)$ 分表表示图像中最大的像素值和最小的像素值。

本文中的图像配准是通过图像特征的变换模型将可见光图像映射到红外图像上。先用Canny算子^[15]对两张图像进行边缘检测,提取出图像的轮廓。通过SURF(Speeded Up Robust Features)算法^[16]来检测并提取图像轮廓的角点,采用Hessian矩阵^[17]提取图像轮廓的特征点:

$$\mathbf{H}(x, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{yx}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $L_{xx}(x, \sigma)$ 表示在尺度 σ 上高斯二阶微分与图像中一点 $I(x, y)$ 的卷积,计算公式为:

$$L_{xx}(x, \sigma) = \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial x^2} \times I(x, y) \quad (5)$$

式中: $G(x, y)$ 表示图像。同理可计算出 $L_{xy}(x, \sigma)$ 和 $L_{yy}(x, \sigma)$ 。

接着利用欧拉距离公式来匹配图像的特征点,最后通过最小二乘法^[18]对这些特征点进行拟合,交换参数估计,进而得到最优的变换模型,最终得到配准后的图像,具体流程图如图2所示。

2 图像融合

图像融合可划分为像素级融合、特征级融合、决策级融合3个层次。其中像素级融合较为简单,且能够保留大量的信息。所以本文采用像素级融合方式进行图像融合。从方法上来说,常见的融合方法有小波变换和加权平均法。而本文采用的是通过NSST将两种图像分解为高频频子带图和低频频子带图,采用PCNN将高频频子带图融合在一起,用IFVSS将低频频子带图融合在一起,再利用NSST的逆变换算法将PCNN和IFVSS融合后的图像进行逆变换,进而得出两种图像的融合图,如图3所示。并通过客观评价方法对融合后的图像质量进行评价。

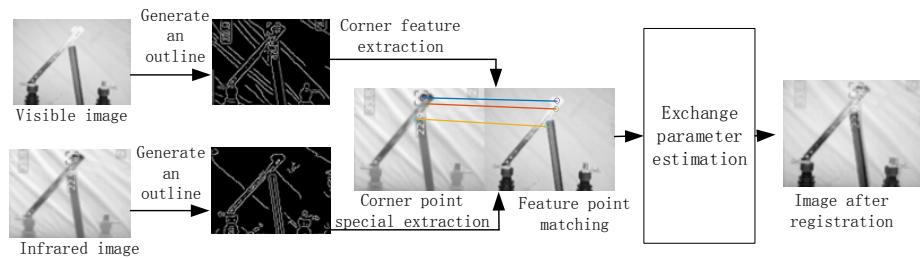


图2 图像配准流程图

Fig.2 Image registration flowchart

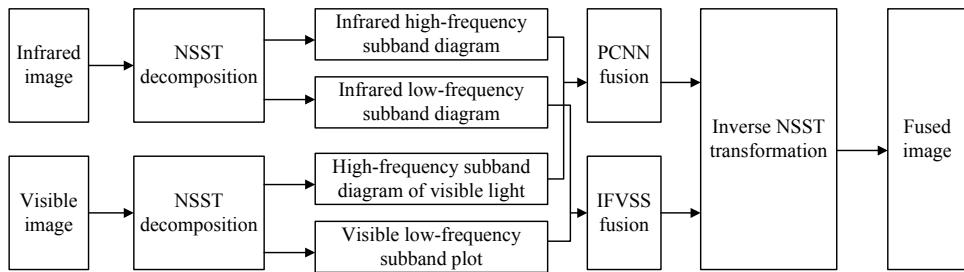


图3 本文的融合方法流程图

Fig.3 Image fusion flow chart

2.1 图像分解

NSST 分解包含了多尺度分解和多方向分解两部分^[19]。在多尺度分解层面，采用非下采样金字塔滤波器将图像分解成 1 个低频子带图和多个高频子带图。接着采用非下采样剪切波滤波器将分解后的高频子带图往多个方向进行分解，构造 Meyer 窗函数，通过卷积算法将高频子带图与窗函数进行卷积计算，得到不同方向的高频子带系数，即可实现图像在不同方向上的分解。

2.2 图像融合设计

2.2.1 基于 PCNN 的高频子带图融合

采用空间频率作为 PCNN^[20]输入，拉普拉斯能量和^[21]作为 PCNN 的连接强度。计算出 PCNN 进行 n 次迭代后的点火频率，根据点火频率来实现高频子带图像的融合。令图像的空间频率为 MSF，有：

$$MSF = \sqrt{RF^2 + CF^2} \quad (6)$$

式中：RF 和 CF 分别表示图像的行频率和列频率。

PCNN 模型中，神经元之间的相关程度用连接强度来表示。连接强度表示为：

$$MSLR(i, j) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \omega(i, j) \cdot [LP(i+m, j+m)]^2 \quad (7)$$

$$LP(i, j) = |2C(i, j) - C(i - step, j) - C(i + step, j)| + |2C(i, j) - C(i, j - step) - C(i, j + step)| \quad (8)$$

式(7)和(8)中：step 为像素与像素之间的距离，取值为 1； $C(i, j)$ 表示高频子带系数； $\omega(i, j)$ 为高频子带系数的权值； $MSLR(i, j)$ 为图像在坐标 (i, j) 处的拉普拉斯能量

和。

点火频率表示为：

$$DM(i, j) = \begin{cases} 1 & T_R(n) \geq T_V(n) \\ 0 & T_R(n) < T_V(n) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $T_R(n)$ 和 $T_V(n)$ 分别为红外和可见光图像经 NSST 分解后的高频子带图的点火频率。

2.2.2 显著特征区域的低频子带图融合

本文通过超复数傅里叶变换算法^[22]来获取低频子带图像中的显著特性（如轮廓和背景信息），将低频子带图像分割成显著性和非显著性两个区域。令超复数矩阵为：

$$f(m, n) = \omega_1 f_1 i + \omega_2 f_2 j + \omega_3 f_3 k \quad (10)$$

式中：i、j、k 满足 $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ ， $\omega_1 \sim \omega_3$ 分别表示图像的亮度、方位、纹理信息的权值，分别取值为 0.5, 0.25, 0.25， $f_1 \sim f_3$ 分别表示这 3 个维度的特征矩阵，由于前文已将图像转换为灰度图，所以不将颜色特征考虑进去。将 $f(m, n)$ 进行超复数傅里叶变换得：

$$F_H[\mu, \nu] = \|F_H[\mu, \nu]\| e^{\mu\phi(\mu, \nu)} \quad (11)$$

式中： $\|F_H[\mu, \nu]\|$ 表示 $f(m, n)$ 的频域的一阶范数。

采用高斯核函数^[23]对 $\|F_H[\mu, \nu]\|$ 进行平滑处理，进而获取 $\|F_H[\mu, \nu]\|$ 的多尺度图，再利用超复数傅里叶逆变换来获取显著图像。以图像的最小熵值为准则在图像空间分割出图像的显著区域和非显著区域。

为了提取这些显著的区域，本文采用了一种基于

视觉显著特性分割的图像融合方法 (Image Fusion based on Visual Salience Segmentation, IFVSS) , 将图像特征划分为显著区域和非显著区域进行融合。针对于显著区域来说, 目标出现的概率和显著值成正比关系, 所以本文通过对比两幅显著图的相似度来判断图像是否相似。

$$\text{SIM}_{A,B}(i,j) = \frac{2 \times \text{SM}_A(i,j) \times \text{SM}_B(i,j)}{\text{SM}_A(i,j)^2 + \text{SM}_B(i,j)^2} \quad (12)$$

式中: $\text{SIM}_{A,B}(i,j)$ 表示显著性相似度; $\text{SM}_A(i,j)$ 和 $\text{SM}_B(i,j)$ 分别表示两图像的显著性值, $\text{SIM}_{A,B}(i,j)$ 越大, 表明两图像越相似。融合输出为:

$$F(i,j) = \begin{cases} \text{IR}(i,j) & (\text{SIM}_{\text{IR},\text{VI}} < T) \& (\text{SM}_{\text{IR}} > \text{SM}_{\text{VI}}) \\ \text{VI}(i,j) & (\text{SIM}_{\text{IR},\text{VI}} < T) \& (\text{SM}_{\text{IR}} \leq \text{SM}_{\text{VI}}) \\ \omega \cdot \text{IR}(i,j) + (1-\omega) \cdot \text{VI}(i,j) & \text{SIM}_{\text{IR},\text{VI}} \geq T \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω 表示融合的加权值; T 表示相似度阈值 (取值范围 0.5~1); IR 表示红外图像; VI 表示可见光图像。

非显著区域一般为背景图, 图像的信息熵越大, 表明图像的信息量越大。所以通过比较信息熵的大小作为图像融合的判断依据, 将信息熵较大的图像进行融合。判断依据如下:

$$F(i,j) = \begin{cases} \text{IR}(i,j) & \text{LR} > 1 \\ \text{VI}(i,j) & \text{LR} \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $F(i,j)$ 表示融合后的图像; LR 为信息熵比, $\text{LR} = \text{LR}_{\text{IR}}/\text{LR}_{\text{VI}}$, IR、VI 分别表示红外图像和可见光图像。当 $\text{LR} > 1$ 时, 该区域中红外图像的信息熵高于可见光图像的, 所以将红外图像作为融合图像, 反之将可见光图像作为融合图像。

2.3 融合图像评价

为了评价本方案与常见的基于颜色模型 (Lab color space, LAB) 算法、空间变换算法 (Intensity Hue Saturation, IHS)、加权平均法、比值变换法 (Brovey)、小波变换法、主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA) 的融合后图像质量的好坏, 分别从融合后图像的边缘信息保持度 ($Q^{\text{AB/F}}$)、信息熵 (Information Entropy, IE)、互信息 (Mutual Information, MI)、视觉显著性 (Visual Saliency Index, VSI)、标准差 (Standard Deviation, STD)、结构相似度 (Structural Similarity, SSIM) [24] 6 个维度对图像进行评价。

1) $Q^{\text{AB/F}}$ 反映的是图像在融合前后细节信息的保

留情况, 该值越大, 表明边缘信息保留越完整。表示为:

$$Q^{\text{AB/F}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Q^{\text{AF}}(i,j) \omega^{\text{A}}(i,j) + Q^{\text{BF}}(i,j) \omega^{\text{B}}(i,j))}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\omega^{\text{A}}(i,j) + \omega^{\text{B}}(i,j))} \quad (15)$$

式中: $Q^{\text{AF}}(i,j)$ 为像素点 (i,j) 处的强度; $Q^{\text{BF}}(i,j)$ 像素点 (i,j) 处的方向值; $\omega^{\text{A}}(i,j)$ 、 $\omega^{\text{B}}(i,j)$ 分别表示强度和方向的权值。

2) IE 对应的是图像的信息丰富度, 图像的质量与信息熵值成正比, 表示为:

$$\text{IE} = -\sum_{i=0}^L P_i \log_2 P_i \quad (16)$$

式中: L 为图像的灰度级, 本文中取值 255; P_i 表示相应灰度级出现的概率。

3) MI 反映的是图像融合前后的信息量, 表示为:

$$\text{MI} = \text{MI}_{\text{A},\text{F}} + \text{MI}_{\text{B},\text{F}} \quad (17)$$

式中: $\text{MI}_{\text{A},\text{F}}$ 和 $\text{MI}_{\text{B},\text{F}}$ 分别表示红外图像和可见光图像的信息量的交集。MI 越大, 说明两图像之间的融合性越好。

4) VSI 是用来衡量图像中不同区域的像素级显著性指标, 像素对比度指标越大表示该像素在图像中的显著性越高, 因此越大越好。

$$\text{VSI} = \frac{\sum_{\Omega} S_m(x) \cdot [S_G(x)]^\alpha \cdot [S_C(x)]^\alpha \cdot \text{VS}_m(x)}{\sum_{\Omega} \text{VS}_m(x)} \quad (18)$$

式中: $\text{VS}_m(x) = \max(\text{VS}_1(x), \text{VS}_2(x))$ 作为 $S(x)$ 的权重, Ω 为整张图的像素空间。

5) STD 反映的是图像的反差程度, 标准差越大, 表明图像中的保留的细节信息越多, 融合后的效果与质量就越高。表示为:

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F(i,j) - \bar{F}} \quad (19)$$

6) SSIM 反映的是原始图像在融合前后的相似程度, 该值越大, 表明两者相似度越高, 表示为:

$$\text{SSIM}(A, B, F) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{(2\mu_A \mu_F) \cdot (2\sigma_{\text{AF}})}{(\mu_A^2 + \mu_F^2)(\sigma_A^2 + \sigma_F^2)} + \frac{(2\mu_B \mu_F) \cdot (2\sigma_{\text{BF}})}{(\mu_B^2 + \mu_F^2)(\sigma_B^2 + \sigma_F^2)} \right) \quad (20)$$

式中: μ_A 、 μ_B 、 μ_F 分别表示红外图像、可见光图像、

融合图像的均值; σ_A^2 、 σ_B^2 、 σ_F^2 分别表示这三者各自的方差; σ_{AF} 、 σ_{BF} 分别表示红外图像、可见光图像与融合图像的联合方差。

3 状态识别

隔离开关分合闸状态主要体现在动静触头上, 所以动静触头的相对位置才是感兴趣的区域。对融合后的图像进行边缘提取, 获取感兴趣区域, 再利用像素积分投影算法求出动静触头之间的相对位置, 进而判断隔离开关的分合闸状态。

3.1 特征区域提取

采用 Otsu 阈值分割算法^[25]对融合后的图像进行分割, 先获取灰度图像的最佳阈值, 用这个阈值将图像的灰度值划分为背景和目标两个部分, 并使背景灰度值与目标灰度值之间的方差达到最大, 即可将目标从背景图像中分割出来。

3.2 状态识别

高压隔离开关处于分合闸状态时, 动触头在水平方向上的像素和垂直方向上的像素均存在较大的差异。可以通过这个特征来判断隔离开关的分合闸状态。如图 4 为隔离开关像素积分投影计算模型。

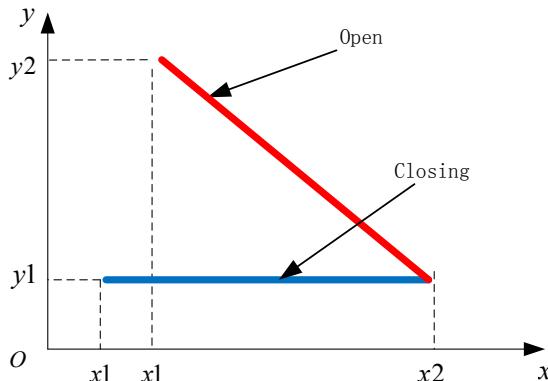


图 4 隔离开关像素积分投影计算模型

Fig.4 Calculation model of isolation switch pixel integral projection

经过分割后的图像已然是二值化后的灰度图, 所以直接将水平方向上的像素进行积分, 同理将垂直方向上的像素进行积分, 再通过计算两者之间的比值来判断隔离开关的分合闸状态。像素积分投影计算为^[6]:

$$L = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} f(x, y) dx \quad (21)$$

$$V = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} f(x, y) dy \quad (22)$$

式中: $f(x, y)$ 表示图像在 (x, y) 处的像素值; L 、 V 分别

表示水平和垂直方向上的积分投影。两者之间的比值 $\alpha = V/L$ 即为判断分合闸状态的依据。

4 实验分析

本文采用型号为 UNI260B 的红外热成像仪进行图像采集, 该设备具备同时采集红外和可见光图像的能力。实验采集了红外图像和可见光图像各 50 份样本, 样本图片显示分辨率均为 320×240 。

4.1 图像融合实验

设置 NSST 的分解层数为 4, 方向数为 [2,3,3,4], 分解后得到高频频子带图和低频频子带图。

在高频频子带图像融合部分, 将 PCNN 的最大迭代次数设置为 100 次, 相关参数设置为 $V_L=1$, $V_\theta=20$,

$$\alpha_L=0.07, \alpha_\theta=0.2, \omega = \begin{bmatrix} 0.6 & 1 & 0.6 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0.6 & 1 & 0.6 \end{bmatrix}.$$
 比较红外和

可见光图像的点火频率 $T_R(n)$ 和 $T_V(n)$, 当 $T_R(n) > T_V(n)$ 时, 输出为 1, 反之输出 0, 这样即可构成了一幅二值化后的点火频率图。

在低频频子带图像融合部分, 红外和可见光的融合加权值均为 0.5, 相似度阈值 T 取值 0.75。通过 NSST 的逆变换算法将低频频子带图和高频频子带图融合在一起。如图 5 为红外和可见光图像融合的图像。

4.2 图像融合质量评价

如图 6 所示为不同方法下的图像融合识别效果, 从图中可以直观地看出, LAB 算法、IHS 算法、加权平均法得到的融合图像出现了边缘模糊的情况; 基于小波变换法得到的融合图像失真较为严重, 图像比较发散, 导致大量的信息丢失; PCA 算法融合后的图像整体灰度差较小, 目标亮度偏低; 基于 Brovey 算法融合后的图像偏暗。而本文提出的基于 NSST-PCNN-IFVSS 算法得到的融合图像较为清晰, 且目标比较明显。

如表 1 所示, 经过 NSST-PCNN-IFVSS 算法融合后, 图像的 $Q^{AB/F}$ 、IE、MI、MSF、STD、SSIM 六个维度的值均高于其他 6 种方法, 表明本文提出的 NSST-PCNN-IFVSS 算法融合后的图像质量更高。

4.3 状态识别实验

先对融合得到的图像进行分割, 提取出目标图像, 通过像素积分投影法对目标图像进行水平积分投影和垂直积分投影处理, 如图 7 所示, 并计算两者之间的比值来判断隔离开关的状态。

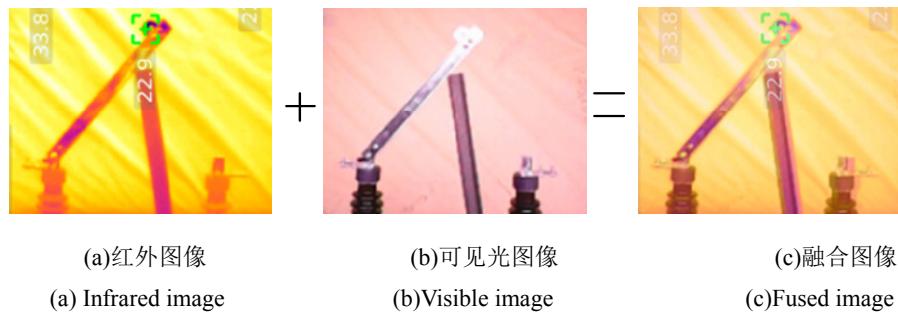


图5 红外和可见光图像融合的图像

Fig.5 Fusion of infrared and visible light images

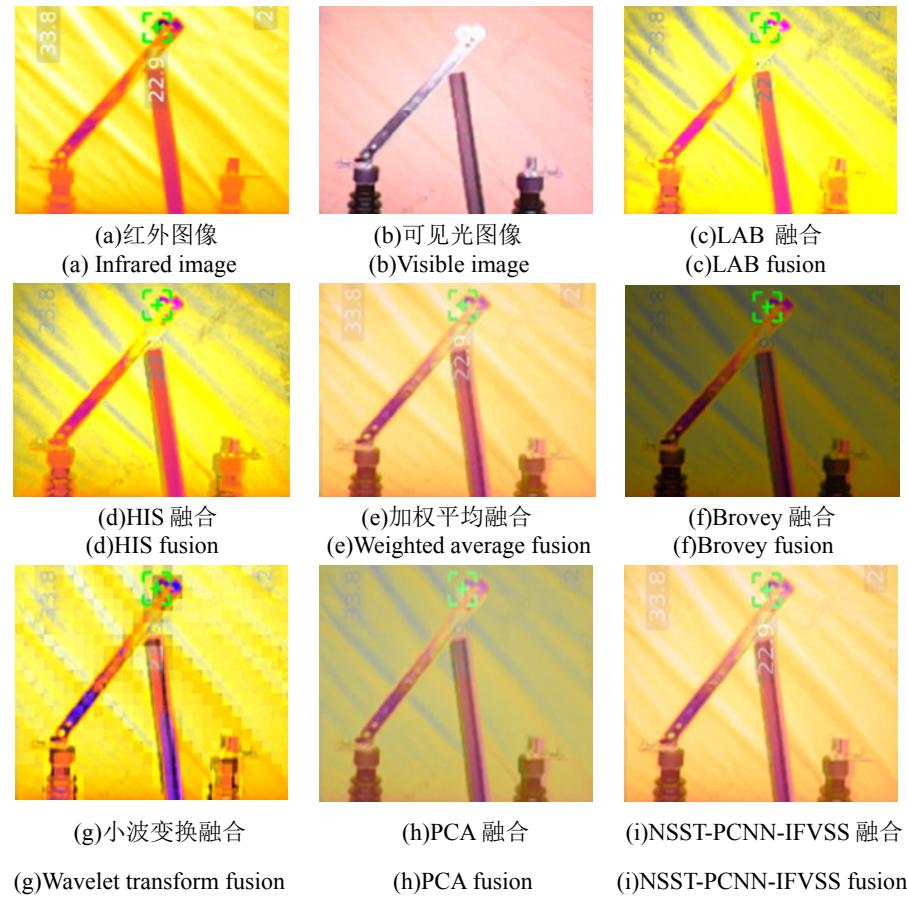


图6 不同方法下的图像融合

Fig.6 Image fusion using different methods

表1 不同融合方法得到的图像质量评价指标

Table 1 Image quality evaluation indicators obtained by different fusion methods

Fusion methods	$Q^{AB/F}$	IE	MI	VSI	STD	SSIM
LAB	9.9351	5.8204	-6.37e-12	9945	27.3467	1
IHS	11.3684	6.1834	-8.00e-12	10030	32.3809	1
Weighted average fusion	9.1370	6.1181	-1.00e-11	9945	33.6583	1
Brovey	12.1616	5.3541	-6.10e-12	9944	38.2942	1
Wavelet transform fusion	8.1644	6.5108	-1.65e-11	9945	33.0885	1
PCA	8.7515	5.3947	-7.02e-12	10030	26.4476	1
NSST-PCNN-IFVSS	14.3917	6.5260	-1.03e-11	10030	38.5471	1

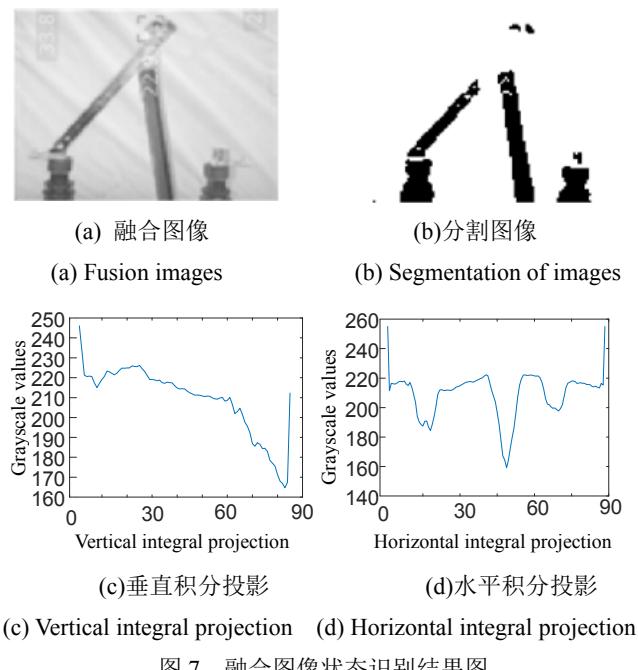


图 7 融合图像状态识别结果图

Fig.7 Fusion image state recognition results graph

从图 7 中可以看出,通过 Otsu 阈值分割算法对融合后的图像进行分割后,能够较好地将隔离开关从背景中提取出来。隔离开关处于分闸状态时,通过计算垂直方向上的积分与水平方向上的积分比值为 0.842; 合闸时,两者的比值为 0.237。根据高压隔离开关分合闸时闸刀角度不低于 65° 的要求^[6],当闸刀角度在 65° 时,融合图像的积分投影比值是 0.826。所以设定像素积分投影比值大于 0.826 的为分闸状态,小于 0.237 的为合闸状态。处于 0.237~0.826 之间的表示分闸或合闸不成功。

分别采集 100 张红外和可见光图像进行识别,判断不同图像识别的准确率。图像采集的过程中设置不同的场景,如隔离开关附近出现障碍物或能见度较低的条件下,红外图像能够采集到隔离开关图,但是摄像机被遮挡无法采集到完整的图,或采集到的图比较模糊;其次就是断开电源,隔离开关上没有电流通过,不产生热量,红外图像就无法采集到清晰的隔离开关图,而摄像机可以。

从表 2 中可以看出,由于高压隔离开关会工作在是否通电、有无遮挡物、能见度较低等情况下,所以仅采用红外设备或只是可见光摄像机是无法满足对隔离开关图像识别的。通过两者之间融合后,准确率有了较为明显的改善。

5 总结

本设计主要解决的是传统图像采集设备较为单一而导致识别率低下的问题。从而得出以下结论:

表 2 不同类型图像识别准确率对比表

Table 2 Different types of image recognition accuracy comparison

Image type	Opening accuracy	Closing accuracy
Infrared image	88%	87%
Visible image	91%	89%
Fused images	95%	94%

1) 先对图像进行预处理,再利用 NSST 算法将高压隔离开关的红外图像和可见光图像分解为高频频子带图和低频频子带图,针对高频频子带图像部分,采用 PCNN 算法进行融合。针对低频频子带图像部分,提出了一种基于视觉显著特性分割的图像融合方法(IFVSS)进行融合,通过实验仿真对比了本文提出的 NSST-PCNN-IFVSS 算法与常见的图像融合算法融合后的图像效果,从视角和($Q^{AB/F}$ 、IE、MI、VSI、STD、SSIM 6 个维度的表现来看,本文提出的融合算法均优于其他算法,确定本方案的可行性。

2) 采用 Otsu 阈值分割算法对融合后的图像进行分割,将目标图像从背景图像中分割出来,再利用像素积分投影法来识别隔离开关的分合闸状态。通过实验仿真验证了本方案融合后的图像识别结果优于单一的红外或可见光图像的效果。

参考文献:

- [1] XU J, LI Q, LUO Y, et al. State measurement of isolating switch using cost fusion and smoothness prior based stereo matching[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, **17**(3): 172988142092529.
- [2] LI Y, DONG X, LIU Z, et al. Design of grinding tool for isolating switch with multiple operating conditions in substation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1601**(4): 042015-042019.
- [3] 曾小松, 罗菁, 姚强, 等. 500 kV GIS 隔离开关触头温度监测及外壳温度传感器优化布置[J]. 高压电器, 2021, **57**(10): 111-119.
ZENG Xiaosong, LUO Jing, YAO Qiang, et al. Temperature monitoring of 500 kv GIS isolation switch contacts and optimal placement of shell temperature sensor[J]. *High Voltage Electrical Apparatus*, 2021, **57**(10): 111-119.
- [4] 陈富国, 蔡杰, 李中旗. 基于机器视觉的高压隔离开关设备状态判别与故障诊断技术[J]. 微型电脑应用, 2022, **38**(2): 191-194.
CHEN Fuguo, CAI Jie, LI Zhongqi. State identification and Fault diagnosis of High voltage isolation Switchgear based on machine vision [J]. *Microcomputer Applications*, 2022, **38**(2): 191-194.
- [5] 腾云, 雷丞, 李洪涛, 等. 基于 HOG 和 SVM 的高压隔离开关分合闸状态自动识别技术研究[J]. 高压电器, 2020, **56**(9): 246-252.
TENG Yun, LEI Cheng, LI Hongtao, et al. Research on automatic state recognition of high voltage isolation switch based on HOG and SVM [J]. *High Voltage Electrical Apparatus*, 2020, **56**(9): 246-252.

- [6] 刘子英, 张靖, 邓芳明. 基于BP神经网络的高压隔离开关分合闸监测识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 134-140.
- LIU Ziyi, ZHANG Jing, DENG Fangming. On-off monitoring and identification of high voltage isolation switch based on BP neural network [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 134-140.
- [7] 刘春来, 周涛涛, 马宏明, 等. 基于力矩与转角检测的GW4-126型隔离开关典型机械故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 232-239.
- LIU Chunlai, ZHOU Taotao, MA Hongming, et al. Typical mechanical fault diagnosis of GW4-126 isolation switch based on torque and angle detection [J]. *High Voltage Electrical Apparatus*, 2020, 56(2): 232-239.
- [8] 于力, 曹双鹏, 荆澜涛, 等. 550 kV GIS内隔离开关机械故障仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 127-133.
- YU Li, CAO Shuangpeng, JING Lantao, et al. Mechanical fault simulation of isolation switch in 550 kV GIS[J]. *High Voltage Electrical Apparatus*, 2021, 57(10): 127-133.
- [9] 刘仕兵, 宋陵灿, 郭文璟, 等. 基于定子电流特征与SVM高压隔离开关机构故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 289-295.
- LIU Shibing, SONG Lingcan, GUO Wenjing, et al. Fault diagnosis of high voltage isolation switch based on stator current characteristics and SVM[J]. *High Voltage Electrical Apparatus*, 2020, 56(6): 289-295.
- [10] CAO Y, TANG L, JIN R, et al. Grayscale image for broadband linear polarization measurement by an ultracompact metasurface[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1117-1120.
- [11] Ehsan S M, Imran M, Ullah A, et al. A single image dehazing technique using the dual transmission maps strategy and gradient-domain guided image filtering[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 89055-89063.
- [12] 谢文昕, 马伟, 杜雪雪, 等. 起重机械金属结构缺陷的热成像技术研究[J]. 红外技术, 2022, 44(7): 741-749.
- XIE Wenxin, MA Wei, DU Xuexue, et al. Thermal imaging of metal structure defects in lifting machinery[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(7): 741-749.
- [13] Jhan J P, Rau J Y. A generalized tool for accurate and efficient image registration of UAV multi-lens multispectral cameras by n-surf matching[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6353-6362.
- [14] 何凯, 刘坤, 沈成南, 等. 基于相似图像配准的图像修复算法[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(2): 207-213.
- HE Kai, LIU Kun, SHEN Chengnan, et al. Image restoration algorithm based on similar image registration[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2021, 50(2): 207-213.
- [15] Dinesh K P, Jeetha B R. Canny edge detection and contrast stretching for facial expression detection and recognition using machine learning[J]. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2021, 24(1): 35-66.
- [16] Radha R, Pushpa M. A comparative analysis of SIFT, SURF and ORB on sketch and paint based images[J]. *International Journal of Forensic Engineering*, 2021(8): 102-110.
- [17] Amir A, Mokhtar K. A deeper Newton descent direction with generalized Hessian matrix for SVMs: an application to face detection[J]. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimization*, 2021, 11(2): 196-208.
- [18] Levenberg K A. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2018, 2(4): 436-438.
- [19] HU Peng, WANG Chenjun, LI Dequan, et al. An improved hybrid multiscale fusion algorithm based on NSST for infrared-visible images[J]. *The Visual Computer*, 2024, 40: 1245-1259.
- [20] Basar S, Ali M, Ochoa-Ruiz G, et al. A novel defocused image segmentation method based on PCNN and LBP[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 87219-87240.
- [21] 朱亚辉, 高邇. 基于复合分解与直觉模糊集的红外与可见光图像融合方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 930-936.
- ZHU Yahui, GAO Li. Infrared and visible image fusion method based on composite decomposition and intuitive fuzzy set[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(4): 930-936.
- [22] 余映, 吴青龙, 邵凯旋, 等. 超复数域小波变换的显著性检测[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2231-2238.
- YU Ying, WU Qinglong, SHAO Kaixuan, et al. Significance detection of wavelet transform in hypercomplex domain[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, 41(9): 2231-2238.
- [23] ZHANG Y, HAN J. Differential privacy fuzzy C-means clustering algorithm based on Gaussian kernel function[J]. *PLOS ONE*, 2021, 16(3): 1-20.
- [24] 郭全民, 柴改霞, 李翰山. 夜视抗晕光融合图像自适应分区质量评价[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(7): 1750-1757.
- GUO Quanmin, CHAI Gaixia, LI Hanshan. Quality evaluation of adaptive partition of night vision anti-halo fusion image[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2020, 42(7): 1750-1757.
- [25] 杜云, 郑羽纶, 孟凡华. 基于Otsu法和直方图规范化相结合的苹果图像分割研究[J]. 科技创新与应用, 2019(28): 15-17.
- DU Yun, ZHENG Yulun, MENG Fanhua. Research on apple image segmentation based on Otsu method and histogram regularization [J]. *Science and Technology Innovation and Application*, 2019(28): 15-17.