

变电站低照度场景红外可见光图像融合

赵杰 陈嘉晋

(黑龙江科技大学电气与控制工程学院, 哈尔滨 150022)

摘要 低照度环境会导致变电站采集图像出现视觉质量低、细节损失、对比度低等问题, 影响后续设备检测与监控等工作, 因此本文提出一种基于低照度图像增强和非下采样轮廓波变换(NSCT)与离散余弦变换(DCT)技术的图像融合方法。首先, 基于伽马参数对可见光图像进行自适应图像调节, 增强可视度; 然后, 由NSCT将图像分解为高低频系数, 对高频系数采用Sobel算子进行边缘信息提取, 对低频系数采用改进DCT-离散傅里叶变换(DFT)进行分解整合, 再对分解的振幅频谱与相位频谱分别采用对比度增强加权与基于奇异值分解(SVD)的局部能量最优规则进行融合; 最后, 由NSCT反变换得到融合图像。利用三组变电站常见设备图像, 将所提方法与其他算法进行对比, 结果表明本文所提方法的平均梯度、信息熵、互信息等指标更优。

关键词: 图像融合; 低照度图像; 非下采样轮廓波变换(NSCT); 离散余弦变换(DCT); 奇异值分解(SVD)

Infrared visible light image fusion in low light scenarios of substations

ZHAO Jie CHEN Jiabin

(School of Electrical and Control Engineering,
Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022)

Abstract The image acquisition of substations in low light environments can lead to problems such as low visual quality, loss of details, and low contrast, which in turn affect the subsequent detection and monitoring of equipment. A fusion method based on low light image enhancement and nonsubsampling contourlet transform (NSCT) and discrete cosine transform (DCT) technology is proposed in this paper. Firstly, adaptive image adjustment is performed on visible light images based on gamma parameters to enhance visibility. Then NSCT decomposes the image into high and low frequency coefficients. For high-frequency coefficients, edge information extraction based on Sobel operator is used, and for low-frequency coefficients, improved DCT-DFT is used for decomposition and integration. The decomposed amplitude spectrum and the phase spectrum are fused using contrast enhancement weighting and local energy optimization rule based on singular value decomposition (SVD), respectively. Finally, the fused image is obtained by NSCT inverse transformation. Three sets of images of common equipment in substations are used to compare the proposed method with other algorithms. The results show that this proposed method performs better in indicators such as average gradient, information entropy and mutual information.

Keywords: image fusion; low light image; nonsubsampling contourlet transform (NSCT); discrete cosine transform (DCT); singular value decomposition (SVD)

0 引言

红外图像与可见光图像一直是图像融合领域研究的重点与热点^[1]。针对可见光图像和红外图像的

融合问题, 文献[2]在低照度条件下, 基于离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)提出一种二级小波变换与直方图均衡化(adaptive histogram equalization, AHE)的融合方法, 比传统算法具有更

好的视觉效果,但在边缘细节上有部分缺失并产生伪影;文献[3]将非下采样剪切波变换(nonsampled shearlet transform, NSST)与脉冲耦合神经网络(pulse coupled neural network, PCNN)结合用于图像融合,在对参数进行最优调整后能得到高质量图像,但计算复杂度太高,即使实时修改阈值也无法解决计算量过大而导致计算时间过长的问题;文献[4]指出轮廓波变换(contourlet transform, CT)能有效地捕捉图像的整体信息,使融合图像拥有完整的图像信息,但其运算的过度分解导致重要的细节特征不明显;文献[5]提出一种基于非下采样轮廓波变换(nonsampled contourlet transform, NSCT)和引导滤波器的图像融合算法,解决了红外图像灰度相关性较弱的问题,但整体融合图像的能见度并未达到高标准;文献[6]提出电力系统图像特征融合与筛选方法,针对融合方法计算复杂的问题,指出应将减少冗余信息作为研究方向,以减少运算时间;文献[7]提出针对电力线路图像进行边缘检测的图像处理方案,但只针对线路这种单一对象,存在局限性;文献[8]针对大雾天气提出一种变电站图像去雾算法,但该算法的应用范围存在局限性,在处理低照度图像时存在色彩失真和亮度不足等问题。

因此,得到优质的图像信息并避免计算复杂度过高是首要目标。本文对低照度可见光图像进行增强,再运用NSCT捕捉图像中的重要特征并分解为高频与低频系数,低频系数应用离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)分解出振幅谱^[9],再利用离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)弥补缺乏相位谱的不足,对红外与可见光图像的振幅谱按设定规则进行求取,从而得到更丰富的频域信息,整合所有细节后分解为信息量更高的振幅频谱与相位频谱。针对不同图像与数据特点使用三种针对性的融合策略,最后由NSCT反变换得到最终的融合图像。

1 基本原理

1.1 图像增强

为了强化低照度可见光图像整体内容的可视度,提出一种基于伽马参数的自适应图像增强算法。首先将可见光图像分解为亮度与色度两个分量,这样可以单独处理亮度而不会影响图像的整体颜色。根据图像局部对比度,采用AHE来自适应调整亮度分量 $I_Y(x, y)$,再对图像进行自适应伽马变换,调整

整体对比度。

$$I_{Y_e}(x, y) = AHE(I_Y(x, y)) \quad (1)$$

$$I_{Y_{enh}}(x, y) = I_{Y_e}(x, y)^{\gamma(x, y)} \quad (2)$$

式中: $I_{Y_e}(x, y)$ 为亮度增强图像; $I_{Y_{enh}}$ 为增强后的图像; $\gamma(x, y)$ 为自适应伽马参数,是由图像亮度的局部统计特性决定的函数,一般取值0.3~2.0。当 $\gamma=1.8$ 和 $\gamma=1.4$ 时,源图像亮度过高;当 $\gamma=0.5$ 和 $\gamma=0.8$ 时,细节信息增强不够。因此,经过测试,取 $\gamma=1.1$ 。不同 γ 值下的可见光图像增强结果如图1所示,可见光图像及 $\gamma=1.1$ 时的增强图像如图2所示。

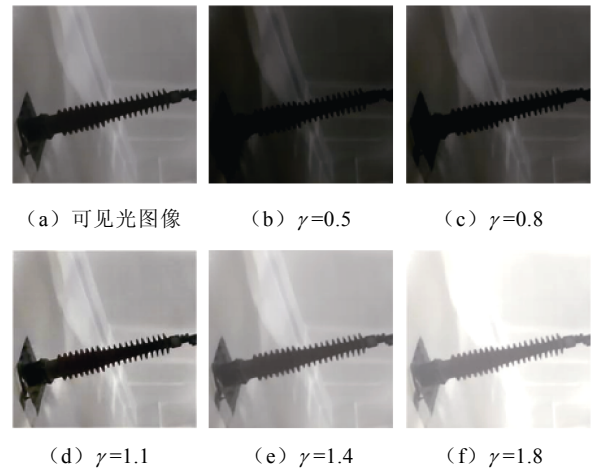


图1 不同 γ 值下的可见光图像增强结果

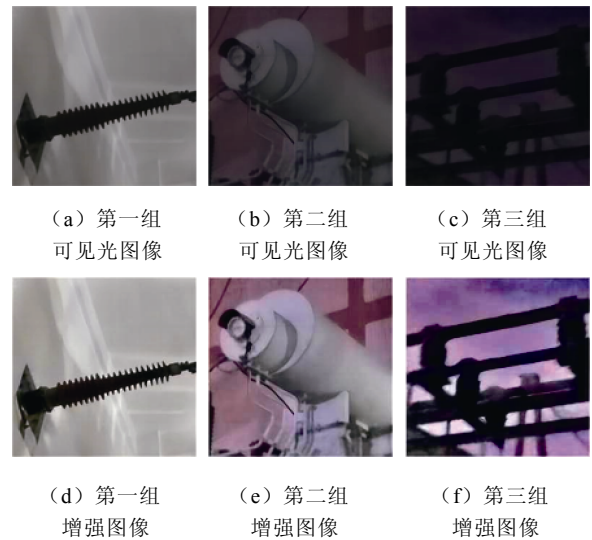


图2 可见光图像及 $\gamma=1.1$ 时的增强图像

对比增强前后图像可知,图像的清晰度与可见度得到了显著提高。本文选取峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)、结构相似度(structural

similarity index, SSIM) 和方均根误差 (root mean square error, RMSE) 进行客观评价^[10]。不同 γ 值下的图像增强效果客观评价指标见表 1。将套管图像归为第一组, 油枕图像设定为第二组, 三相变压器线路图像设定为第三组。图像质量与 PSNR、SSIM 的数值大小正相关, 与 RMSE 数值大小负相关^[8]。

表 1 不同 γ 值下的图像增强效果客观评价指标

类别	γ	PSNR	SSIM	RMSE
第一组	0.5	10.867 1	0.498 3	0.716 6
	0.8	14.260 6	0.529 1	0.484 9
	1.1	16.207 7	0.597 5	0.384 8
	1.4	13.978 5	0.521 6	0.501 2
	1.8	8.110 3	0.515 0	0.885 8
第二组	0.5	9.301 4	0.382 9	0.742 5
	0.8	10.942 6	0.432 1	0.517 3
	1.1	12.514 4	0.482 3	0.454 7
	1.4	10.248 5	0.439 0	0.498 3
	1.8	7.778 4	0.412 7	0.768 3
第三组	0.5	8.556 2	0.452 3	0.783 6
	0.8	9.984 0	0.469 8	0.589 6
	1.1	11.601 6	0.510 7	0.563 0
	1.4	9.882 4	0.481 8	0.640 8
	1.8	8.400 9	0.473 2	0.749 8

由表 1 可见, $\gamma=1.1$ 时的各评价指标均优于其他 γ 值下的评价指标, 后文实验图像均采用 $\gamma=1.1$ 时的实验图像。在实际应用中, 可根据可见度与亮度等不同条件进行分析调节。

1.2 NSCT 理论

NSCT 具有对图像多尺度与多方向的分解特性, 使其能获得比小波变换^[2]等传统算法更丰富的方向信息与细节特征, 更适于对复杂纹理图像的融合。NSCT 由两部分组成, 首先是非下采样金字塔对源图像进行多尺度分解得到低频子带与高频子带, 假设输入的图像为 $I(x,y)$, 对于第 k 层的图像分解, 其低频分量 $I_L^k(x,y)$ 和高频分量 $I_H^k(x,y)$ 分别为

$$I_L^k(x,y) = I^{k-1}(x,y) * g_L(x,y) \quad (3)$$

$$I_H^k(x,y) = I^{k-1}(x,y) * g_H(x,y) \quad (4)$$

式中: * 为卷积计算; $g_L(x,y)$ 、 $g_H(x,y)$ 分别为低、高通滤波器。

其次, 使用非下采样方向滤波器组对二维图像的每个高频分量进行多方向分解, 从而获得不同方向的子带图像^[11]。假设在 D 方向上进行分解, 方向滤波器组的输出为

$$D(x,y) = H(x,y) * g_D(x,y) \quad (5)$$

式中: $H(x,y)$ 为高频子带; $g_D(x,y)$ 为方向 D 的方向滤波器。

2 融合规则设计

首先利用 NSCT 将红外图像与增强后的可见光图像分解为高、低频系数, 对低频系数采用改进 DCT-DFT 融合规则优选出振幅谱与相位谱, 振幅谱采用基于对比度增强的加权融合规则, 相位谱采用基于奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 的局部能量最优准则; 高频系数采用 Sobel 算子进行边缘信息提取, 最后经反变换得到最终融合图像。该融合方法流程如图 3 所示。

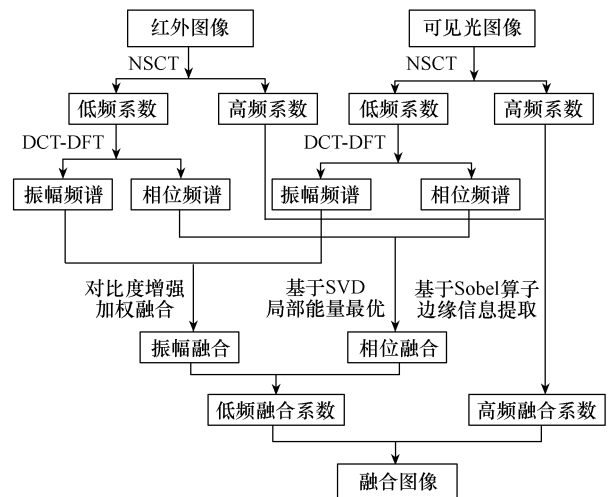


图 3 融合方法流程

2.1 改进 DCT-DFT 图像融合算法

DCT 与 DFT 都有单独处理初始信号的能力, DCT 虽然能量集中但缺少相位信息, DFT 虽然能量分散但包含相位信息, 利用两种方法取长补短, 不仅计算效率优于脉冲耦合神经网络等方法, 评估与处理低频图像重要非冗余信息的能力也优于 DWT 与 CT 等算法^[2-4]。此方法既简化了计算又能得到信息丰富的图像。融合方法的具体数学表达式为

$$X_{DCT}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos \frac{\pi k(2n+1)}{2N} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (6)$$

$$X_{\text{DFT}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (7)$$

$$\theta(k) = \arg(X_{\text{DFT}}(k)) \quad (8)$$

$$|X_{\text{DFT}}(k)| = \sqrt{\Re^2(X_{\text{DFT}}(k)) + \Im^2(X_{\text{DFT}}(k))} \quad (9)$$

$$\theta(k) = \tan^{-1} \frac{\Im(X_{\text{DFT}}(k))}{\Re(X_{\text{DFT}}(k))} \quad (10)$$

式中： $X_{\text{DCT}}(k)$ 、 $X_{\text{DFT}}(k)$ 为DCT与DFT的频谱值； $x(n)$ 为输入信号的样本值； $|X_{\text{DFT}}(k)|$ 为DFT的能量信息； N 为样本总数； $\theta(k)$ 为频域相位； $\Im(\cdot)$ 为频域虚部； $\Re(\cdot)$ 为频域实部。

本文在传统DCT方法^[9]的基础上，融合DCT和DFT两种方法优点，从DFT频谱分解直接得到相位频谱，再运用方均误差（mean square error, MSE）公式判断DFT与DCT分解得到的振幅频谱均值是否优于DFT与DCT单独分解所得的振幅频谱。

$$x_{\text{rec}}(k) = \frac{X_{\text{DCT}}(k) + |X_{\text{DFT}}(k)|}{2} \quad (11)$$

$$e_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - x_{\text{rec}}(n))^2 \quad (12)$$

式中， $x_{\text{rec}}(k)$ 为分解所得振幅频谱的均值。

MSE代表融合后的信号 x_{rec} 与原始信号 x 的误差大小，其值越大代表频谱质量越差。可直接根据MSE大小判断均值振幅和独立分解振幅中的最优频谱。

确定最优振幅频谱与相位频谱后，根据下文设计的高低频融合方法进行融合，再通过DCT与DFT反变换便可得到最终的低频融合系数。

2.2 低频分量融合

低频分量一般视为图像的整体轮廓信息，所以对低频图像有选择性的保留主体信息。

1) 振幅频谱代表了图像中频率成分的强度， $F_1(u,v)$ 与 $F_2(u,v)$ 分别为红外与可见光图像经过频域变换对应的振幅谱，将其转换为对数形式后，采用绝对值平均加权规则融合，经过变换加强了振幅频谱上的重要边缘特征。最终融合所得振幅谱 F_F 如式(16)所示。

$$|F'_1(u,v)| = \log_2(1 + |F_1(u,v)|) \quad (13)$$

$$|F'_2(u,v)| = \log_2(1 + |F_2(u,v)|) \quad (14)$$

$$|F'_F(u,v)| = \frac{|F'_1(u,v)| + |F'_2(u,v)|}{2} \quad (15)$$

$$|F_F(u,v)| = \exp(|F'_F(u,v)|) - 1 \quad (16)$$

式中： $F'_1(u,v)$ 为对数形式的红外图像振幅谱； $F'_2(u,v)$ 为对数形式的可见光图像振幅谱； $F'_F(u,v)$ 为平均加权后的融合图像振幅谱。

2) 相位频谱的融合采用SVD和局部能量加权规则进行处理。不同于传统的均值或最值规则，利用SVD分离信息的特性^[12]，有效提取相位频谱的重要特征并通过对局部能量加权自适应选择源图像高能区域，从而保存更多细节信息，进而提高融合效果。融合规则为

$$\begin{cases} P_{h1} = U_1 \Sigma_1 V_1^T \\ P_{h2} = U_2 \Sigma_2 V_2^T \end{cases} \quad (17)$$

$$E(i,j) = \sum_{m,n \in w_{in}} |I(m,n)|^2 \quad (18)$$

$$W(i,j) = \begin{cases} W_1(i,j) = \frac{E_1(i,j)}{E_1(i,j) + E_2(i,j)} \\ W_2(i,j) = \frac{E_2(i,j)}{E_1(i,j) + E_2(i,j)} \end{cases} \quad (19)$$

$$\Sigma_F = W_1 \Sigma_1 + W_2 \Sigma_2 \quad (20)$$

$$P_{hF} = U_F \Sigma_F V_F^T \quad (21)$$

式中：下标1、2、F分别代表红外图像、可见光图像、融合图像； P_h 为图像的低频相位频谱； U 、 V^T 分别为左奇异矩阵与右奇异矩阵，表示输入频谱的行、列方向相位分布； Σ 为奇异值矩阵； $I(m,n)$ 为待融合的源图像； $E(i,j)$ 为图像局部能量，通过图像窗口 w_{in} 内的能量集中度衡量，窗口根据融合目标自适应选择图像区域； $W(i,j)$ 为图像相位频谱权重值。

2.3 高频分量融合

图像中的高频分量可以视为图像的细节特征，根据这个特点采用Sobel算子计算梯度来提取边缘信息^[13]。以所求得的梯度幅值为参考，选择不同的调节参数改变权重，实现对图像的加权融合。

$$\begin{cases} \mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_x(x, y) = \mathbf{I}(x, y) * \mathbf{G}_x \\ \mathbf{G}_y(x, y) = \mathbf{I}(x, y) * \mathbf{G}_y \end{cases} \quad (23)$$

$$\mathbf{G}(x, y) = \sqrt{\mathbf{G}_x^2(x, y) + \mathbf{G}_y^2(x, y)} \quad (24)$$

式中： \mathbf{G}_x 与 \mathbf{G}_y 为水平和垂直方向的梯度；*为卷积运算； $\mathbf{I}(x, y)$ 为图像信息； $\mathbf{G}_x(x, y)$ 与 $\mathbf{G}_y(x, y)$ 为水平和垂直方向的边缘强度； $\mathbf{G}(x, y)$ 为边缘强度。

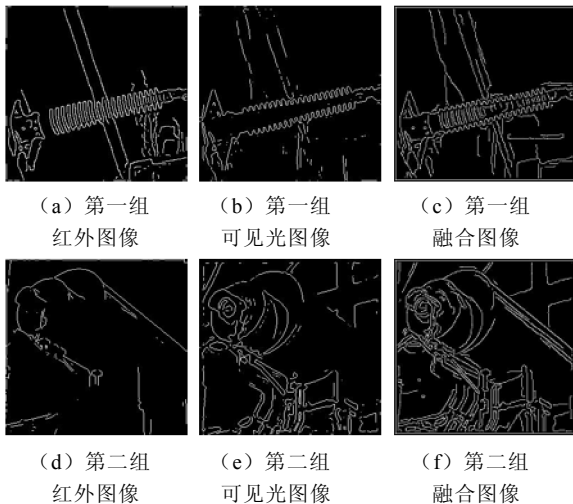
区别于传统的融合规则，自适应融合权重能最大程度地保留图像边缘信息并增强图像整体对比度。最终融合结果如式(26)所示。

$$\mathbf{W}(x, y) = \begin{cases} \mathbf{W}_1(x, y) = \frac{\mathbf{G}_1^\alpha(x, y)}{\mathbf{G}_1^\alpha(x, y) + \mathbf{G}_2^\alpha(x, y)} \\ \mathbf{W}_2(x, y) = \frac{\mathbf{G}_2^\alpha(x, y)}{\mathbf{G}_1^\alpha(x, y) + \mathbf{G}_2^\alpha(x, y)} \end{cases} \quad (25)$$

$$\mathbf{I}_F(x, y) = \mathbf{W}_1(x, y) \cdot \mathbf{I}_1(x, y) + \mathbf{W}_2(x, y) \cdot \mathbf{I}_2(x, y) \quad (26)$$

式中： $\mathbf{W}(x, y)$ 为根据边缘强度与调节参数计算所得权重； α 为调节参数，控制边缘强化对权重的影响程度。当 $\alpha > 1$ 时，边缘强度高的部分占比增大；当 $\alpha < 1$ 时，权重分布较为均衡。根据高频分量特点与本文低照度背景，对细节轮廓的获取是首要任务，经过测试取 $\alpha = 1.8$ 可使融合图像取得最佳效果，后续研究均采用这一数值。

红外与可见光图像经过 Sobel 算子提取的边缘信息与最终融合图像如图 4 所示。



(g) 第三组 红外图像 (h) 第三组 可见光图像 (i) 第三组 融合图像

图 4 不同图像的边缘信息与融合图像

3 实验结果与分析

本文以变电站低照度场景为研究背景，取 3 组常用设备图像为实验对象。第一组为室内穿墙套管，第二组为室外变压器油枕，第三组为室外三相变压器线路。

运用双树复小波变换 (dual-tree complex wavelet transform, DTCWT) 算法^[14]、DWT-AHE 算法^[2]、NSST-PCNN 算法^[3]、CT 算法^[4]、NSCT 算法^[5]与本文算法进行对比，并将增强后的可见光图像加入实验结果进行对比，实验结果分别如图 5~图 7 所示。

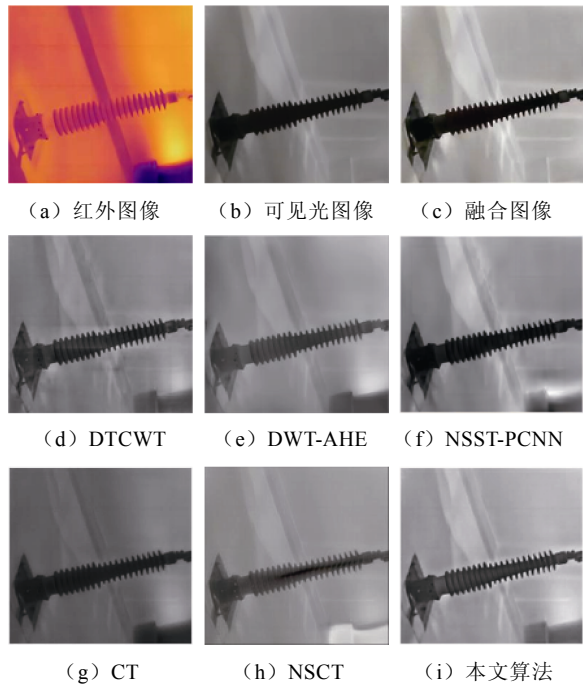


图 5 第一组融合实验结果



(a) 红外图像 (b) 可见光图像 (c) 融合图像

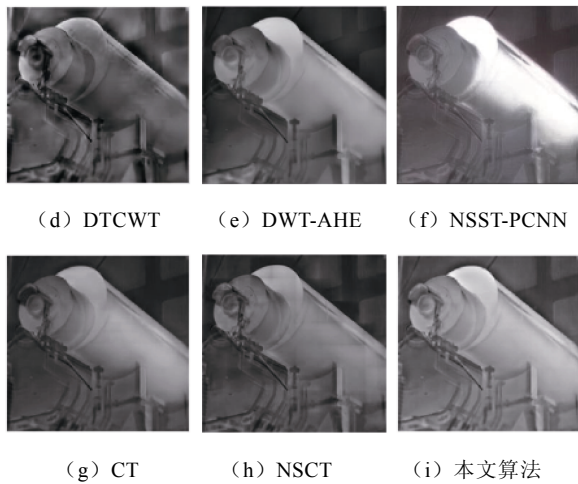


图6 第二组融合实验结果

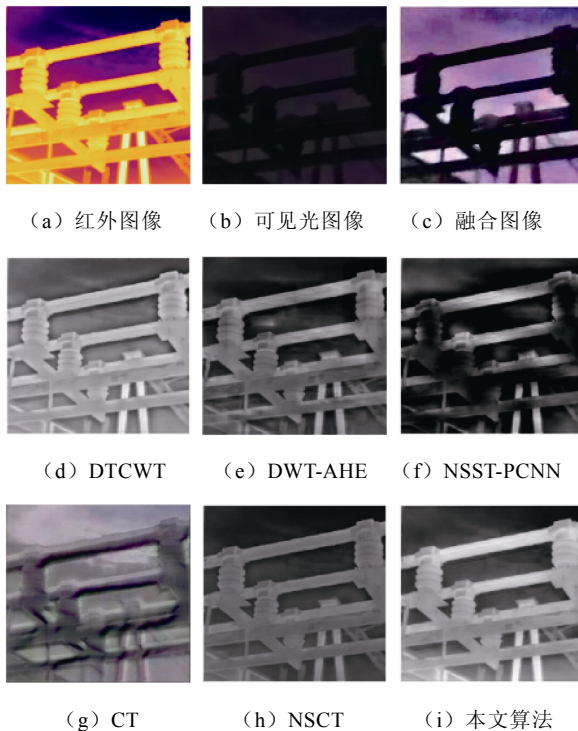


图7 第三组融合实验结果

3.1 主观评价

由图5可见,本文算法在套管图像的细节轮廓、整体可见度和信息丰富度等方面都具有最佳的融合效果。本文算法所得图像明亮适中,图像信息量丰富;DTCWT算法所得图像整体能见度偏低,套管的整体细节呈现较为完整,中间区域出现部分曝光,导致图像信息量非常有限;DWT-AHE算法所得图像具有原始图像的基本轮廓,但整体亮度偏低,导致需要突出的套管细节不清晰;NSST-PCNN算法所得图像整体较为清晰,但对套管细节轮廓的呈现效

果较差,背景墙面色块出现大片模糊重影,十分影响观感;CT算法所得图像较为清晰,但是同样对套管细节的呈现较差;NSCT算法所得图像的整体轮廓呈现效果不错,但在套管中心区域出现残影,影响整体观感。

由图6可见,本文算法所得图像的视觉效果明亮适中,细节信息丰富且对比度强;DTCWT算法呈现的光照度偏低,整体轮廓清晰但受到阴影干扰;DWT-AHE算法所得图像对油枕主体展示清晰,但对其他细节部分如管道等的呈现效果较为一般;NSST-PCNN算法所得图像的对比度偏低,管道等图像细节清晰度差;CT算法所得图像清晰度较好,但在细节方面的能见度与本文算法所得图像仍有差距;NSCT算法所得图像的整体对比度较为协调,但油壁颜色存在失真,细节内容比较清晰,略逊于本文算法所得图像。

由图7可知,本文算法所得图像的视觉效果较为清晰,不仅细节呈现清晰而且整体结构完整;DTCWT算法所得图像整体轮廓清晰完整且亮度适中,无过曝光区域,但清晰度不如本文算法所得图像;DWT-AHE算法所得图像对三相内容呈现完整,但图像亮度偏低;NSST-PCNN算法所得图像出现黑色阴影,严重影响了图片质量,重要细节区域较为模糊;CT算法所得图像较为模糊,只能看出轮廓,无法观察细节;NSCT算法所得图像整体对比度较为协调,信息呈现较为平滑,但图像亮度有待提高,不利于肉眼直接观察图像信息。

3.2 客观评价

本文采用平均梯度(average gradient, AG)^[15]、标准差(standard deviation, SD)^[16]、互信息(mutual information, MI)^[17]、信息熵(information entropy, EN)^[18]、边缘强度(edge intensity, EI)作为图像融合效果评价指标^[19]。在实际应用中,变电站实时图像能否及时反馈给工作人员非常重要,因此本文将计算时间也作为评价指标。除了互信息需要与源图像比对共同信息量,其他方法均直接根据对比度、灰度值、信息量等信息对图像质量进行评价。这几个评价指标的大小与图像所具有的信息量、清晰度、质量等都呈正相关,即数值越大融合效果越好。图像融合效果评价结果分别见表2~表4。

从表2~表4可知,本文所提算法的3~4个指标均能显著优于其他五种算法,其他非最优指标也能接近最优值。CT算法^[4]耗时最少,但其图像融合

表2 第一组图像融合效果评价结果

算法	AG	SD	MI	EN	EI	耗时/s
DTCWT	3.616	36.898	0.536	4.485	36.107	23.340
DWT-AHE	3.298	17.304	1.068	5.453	43.571	27.438
NSST-PCNN	2.714	19.166	0.839	5.509	37.914	32.648
CT	3.246	26.085	0.973	5.624	45.901	18.587
NSCT	4.352	35.217	0.880	4.485	41.908	23.945
本文算法	5.372	31.824	1.361	6.839	55.126	21.891

表3 第二组图像融合效果评价结果

算法	AG	SD	MI	EN	EI	耗时/s
DTCWT	5.543	28.397	0.482	4.582	47.174	25.150
DWT-AHE	2.991	16.828	1.650	5.597	31.273	28.892
NSST-PCNN	5.501	38.244	0.847	5.402	35.277	37.317
CT	4.501	35.504	0.961	5.642	35.705	22.006
NSCT	3.578	25.983	0.707	5.239	46.481	30.187
本文算法	4.820	38.602	0.855	6.199	49.634	24.182

表4 第三组图像融合效果评价结果

算法	AG	SD	MI	EN	EI	耗时/s
DTCWT	4.218	37.532	1.218	6.634	49.671	35.199
DWT-AHE	3.681	27.358	1.027	5.623	42.805	36.187
NSST-PCNN	2.893	17.656	0.751	4.231	34.570	41.649
CT	3.168	16.255	0.682	4.624	35.737	30.762
NSCT	4.287	33.846	1.158	5.837	45.834	34.145
本文算法	4.986	34.862	1.563	6.518	52.358	31.817

效果较差,无法达到应用要求。因此,综合各项评价指标结果,本文算法的图像融合效果可视性高且运算快。

4 结论

本文提出了一种基于低照度图像增强和 NSCT 并改进融合规则的变电站红外可见光图像融合方法。以变电站低照度图像为研究对象,根据可见光与红外图像分解所得频谱图像的特点,进行融合规则创新设计,形成一套完整的图像融合方法。实验结果证明,所提方法所得低照度条件下变电站常用设备的融合图像清晰有效。通过融合图像不仅可以获得更加清晰与丰富的信息,还可以配合智能巡检进行远程操作,避免复杂环境因素带来的潜在威胁并提高整体巡检效率。后续可在图像去噪与变电站的故障检测方面进行下一步研究。

参考文献

- [1] KAUR H, KOUNDAL D, KADYAN V. Image fusion techniques: a survey[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(7): 4425-4447.
- [2] 陈昌岩. 基于小波变换的红外与可见光图像融合[J]. 科学技术创新, 2024(15): 42-45.
- [3] 王慧赢, 王春平, 付强, 等. 基于图像特征的红外与低照度图像融合[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(8): 2395-2404.
- [4] VENKATESAN B, RAGUPATHY U S, NATARAJAN I. A review on multimodal medical image fusion towards future research[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82(5): 7361-7382.
- [5] 丁贵鹏, 陶钢, 李英超, 等. 基于非下采样轮廓波变换与引导滤波器的红外及可见光图像融合[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1911-1922.
- [6] 卢宇飞, 林建新. 基于图像特征筛选与融合网络的电力系统动态稳定评估[J]. 电气技术, 2023, 24(12): 1-6.
- [7] 梁新福, 罗日成, 党世轩, 等. 基于数字图像处理的电力线异物识别方法研究[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 73-78.
- [8] 陆世豪, 祝云, 廖华, 等. 基于图像去雾技术的变电站图像清晰化方法[J]. 电气技术, 2023, 24(10): 51-56.
- [9] KAKERDA R K, KUMAR M, MATHUR G, et al. Fuzzy type image fusion using hybrid DCT-FFT based Laplacian pyramid Transform[C]//2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), Melmaruvathur, India, 2015: 1049-1052.
- [10] 万裁, 何为, 沈晟, 等. 超低场磁共振膝关节正交接收线圈设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 1923-1931.
- [11] 代鹏, 许海山. 基于压缩感知的 NSCT 图像融合[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6): 106-109.
- [12] LIU Jiahuan, ZHANG Jian, DU Yunfei. A fusion method of multispectral image and panchromatic image based on NSCT transform and adaptive gamma correction[C]//2018 3rd International Conference on Information Systems Engineering (ICISE), Shanghai, China, 2018: 10-15.
- [13] 赵娅, 成璐璐, 白玉杰, 等. 改进多方向 Sobel 算子的剩余油边缘检测方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(4): 700-709.
- [14] 张贵仓, 苏金凤, 拓明秀. DTCWT 域的红外与可见

- 光图像融合算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(7): 1226-1233.
- [15] CUI Guangmang, FENG Huajun, XU Zhihai, et al. Detail preserved fusion of visible and infrared images using regional saliency extraction and multi-scale image decomposition[J]. Optics Communications, 2015, 341: 199-209.
- [16] 李敏, 苑贤杰, 骆志丹, 等. 基于改进引导滤波与DCPCNN的图像融合方法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(19): 207-213.
- [17] QU Guihong, ZHANG Dali, YAN Pingfan. Information measure for performance of image fusion[J]. Electronics Letters, 2002, 38(7): 313.
- [18] VAN AARDT J. Assessment of image fusion procedures using entropy, image quality, and multispectral classification[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2008, 2(1): 023522.
- [19] RAJALINGAM B, PRIYA R. Hybrid multimodality medical image fusion technique for feature enhancement in medical diagnosis[J]. International Journal of Engineering Science Invention, 2018, 2(special issue): 52-60.
-
- 收稿日期: 2024-09-18
修回日期: 2024-11-07
- 作者简介
赵杰(1977—), 女, 黑龙江省哈尔滨市人, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为机器人控制、矿山机械控制。
-
- (上接第21页)
- [2] CHEN Liangwei, ZHANG Jingwen, ZHANG Xinyue, et al. A new low-carbon project scheduling problem with renewable and traditional energy: a comprehensive analysis and its solution[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 468: 143089.
- [3] 李长云, 徐敏灵, 蔡淑媛. 计及电动汽车违约不确定性的微电网两段式优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1838-1851.
- [4] 马瑞真, 张新燕, 章攀钊, 等. 计及需求响应与主从博弈的微电网低碳优化调度[J]. 现代电子技术, 2023, 46(7): 121-127.
- [5] 夏鑫, 钟浩, 张磊, 等. 计及动态电价的电动汽车参与微电网调度双层优化策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 140-150.
- [6] 黄冬梅, 吕嘉欣, 时帅, 等. 计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 88-98.
- [7] 王强杰, 沈达, 郭晶, 等. 基于天牛须-粒子群算法的微电网日经济调度优化[J]. 上海电机学院学报, 2021, 24(1): 39-46.
- [8] 蔡胜, 谢云云, 张玉坪, 等. 考虑孤岛微电网建立过程功率冲击的弹性配电网主动预防调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6419-6432.
- [9] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [10] 彭铎, 陈江旭, 张倩, 等. 多策略改进的螻蛄搜索算法优化3DDV-Hop节点定位[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2024, 36(3): 438-449.
- [11] 赵鑫, 王东丽, 彭泓, 等. 基于多策略改进螻蛄算法优化的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 120-130.
- [12] 万怡华, 张雪梅. 混合多策略改进螻蛄算法的避障路径规划[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2): 69-78.
- [13] 牛耕, 季宇, 陈培坤, 等. 含海洋能发电的海岛微网能量优化调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 96-104.
- [14] 孙川, 汪隆君, 许海林. 用户互动负荷模型及其微电网日前经济调度的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2009-2015.
- [15] 许雨玲, 王磊, 江伟建, 等. 考虑源荷互动的微电网容量配置双层优化模型[J]. 浙江电力, 2024, 43(4): 29-39.
- [16] 胡春安, 熊显然. 多策略改进的混沌哈里斯鹰优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(9): 1648-1660.
- [17] 吴成明, 邢博洋, 李世春. 基于麻雀搜索算法的微电网分层优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 115-123.
-
- 收稿日期: 2024-09-05
修回日期: 2024-10-08
- 作者简介
匡洪海(1972—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行与优化。