

基于改进直方图均衡的 SF6 泄漏区域增强算法

卢 泉¹, 黄粒峰¹, 胡梦竹²

(1. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西电网有限责任公司 电力科学研究院, 广西 南宁 530004)

摘要: SF6 气体红外成像易受环境噪声影响, 呈低对比度与低信噪比特性。导致现有算法无法自适应增强 SF6 泄漏区域和抑制高斯噪声。针对上述问题, 提出一种基于改进 HE 的 SF6 泄漏区域增强算法。该算法首先采用单尺度 Retinex 处理原始 SF6 图像获得反射图像, 然后利用引导滤波将反射图像分解为细节层和基本层, 最后采用改进的直方图均衡化来自适应处理基本层, 并将增强后的图像进行融合来获得最终的图像。实验结果表明: 本文算法不仅能够自适应增强泄漏区域的对比度, 而且具有良好边缘保持特性和抑制高斯噪声的性能。其增强效果优于现有的 SF6 红外图像增强算法。有效改善了 SF6 红外图像低对比度和低信噪比特性。

关键词: 单尺度 Retinex; 引导滤波; SF6 红外图像; 直方图均衡化

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)04-0437-06

SF6 Leakage Region Enhancement Algorithm Based on Improved HE

LU Quan¹, HUANG Lifeng¹, HU Mengzhu²

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Electric Power Science Research Institute, Guangxi Power Grid Co. Ltd., Nanning 530004, China)

Abstract: Infrared imaging of SF6 gas is easily affected by environmental noise and exhibits low contrast and signal-to-noise ratio. As a result, existing algorithms cannot adaptively enhance the SF6 leakage area or suppress Gaussian noise. Therefore, this study proposes an improved HE-based SF6 leakage-area enhancement algorithm. The algorithm first uses SSR to process the original SF6 image to obtain the reflection image R, and then uses guided filtering to decompose the reflection image R into detail and base layers. Finally, an improved histogram equalization is used to adaptively process the base layer, and the enhanced images are fused to obtain the final image. The experiment results demonstrate that the proposed algorithm can not only adaptively enhance the contrast of the leaked area but also has good edge preservation and Gaussian noise suppression performance. Its enhancement effect is superior to that of the existing SF6 infrared image enhancement algorithm. This effectively improves the low-contrast and low signal-to-noise ratio characteristics of the SF6 infrared images.

Key words: single-scale-retinex, guide filtering, SF6 infrared image, histogram equalization

0 引言

以六氟化硫 (SF6, sulfur hexafluoride) 作为灭弧和绝缘介质的高压电气设备具有重量轻、体积小、容量大、适应环境能力强和运行可靠性高等优点, 自 20 世纪 80 年代后, SF6 气体被广泛应用于高压和超高压领域的电气设备如六氟化硫全封闭组合电器 (gas insulated switchgear, GIS), SF6 断路器等^[1-2]。但是,

GIS 中的 SF6 气体泄漏的现象时有发生, 泄漏的 SF6 气体会带来严重的不良后果^[3]。因此, 寻求一种安全、高效、及时的 SF6 泄漏检测方案是极其重要且具有十分深远的意义。

由于 SF6 和空气对红外辐射的吸收能力在 10~11 μm 波段的差异较大, 通过红外探测技术可以观察到可见光下看不到的 SF6 泄漏^[4]。美国 FLIR 公司利用 SF6 的红外特性研发了 GF306 气体检漏仪, GF306

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-04-20.

作者简介: 卢泉 (1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能电力技术。E-mail: luquan@gxu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61863002)。

红外热像仪能够实时捕捉 SF6 泄漏视频图像,该方法通过直接观察 SF6 泄漏视频图像来判别 SF6 设备的泄漏点,其相比于传统检测方法,具有无需停电、危险性小等优点^[5]。因此,手持红外气体检漏仪对 SF6 泄漏进行检测逐渐成为一种主要的电力巡检方式。但 SF6 电气设备在变电站中广泛分布, SF6 泄漏环境复杂多变,因此,手持红外气体检漏仪来判别 SF6 设备的泄漏点不可避免地存在漏检以及误检的问题,造成设备的安全隐患,并且不能及时发现突发性的泄漏。基于此,文献[6]提出一种基于红外视频的 SF6 泄漏在线检测算法,该算法采用直方图均衡化算法(histogram equalization, HE)增强 SF6 图像的对比度,虽有效改善泄漏区域的对比度,但也提高了背景的整体对比度,使得泄漏区域的检测难度成倍增加。针对以上缺陷,文献[7]提出一种基于改进限制对比度的自适应直方图均衡 (contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE) 的 SF6 红外图像局部增强方法,该算法采用双边滤波将 SF6 图像分解为基础图像和细节图像,然后采用 CLAHE 算法处理基础图像,以此

提高泄漏区域的对比度,但需要手动调节加权参数才能获得有效的增强效果,并不适用于 SF6 泄漏在线检测。此外,双边滤波在图像色差较大时容易产生伪影。针对以上算法的不足,本文提出基于改进 HE 的 SF6 泄漏区域增强算法,并采用引导滤波和单尺度 Retinex (single-scale-Retinex, SSR) 增强泄漏区域的边缘并抑制图像的高斯噪声,最后,对室内和室外的 SF6 图像进行实验测试,并对实验结果进行对比和分析。

1 基于改进 HE 的 SF6 泄漏区域增强算法

本文利用 SSR 与引导滤波将 SF6 红外图像进行分解,提升 SF6 图像的视觉效果。本文算法首先利用 SSR 算法对原始 SF6 图像的灰度分布进行调整,突显暗背景中的图像边缘,然后利用引导滤波将反射图像 R 分解为细节层与基本层,最后采用改进的直方图均衡化来自适应处理基本层,调节泄漏区域的对比度,并采用极大值取大算法^[8]将增强后的图像进行融合,获得增强后的图像。算法的工作流程图如图 1 所示。

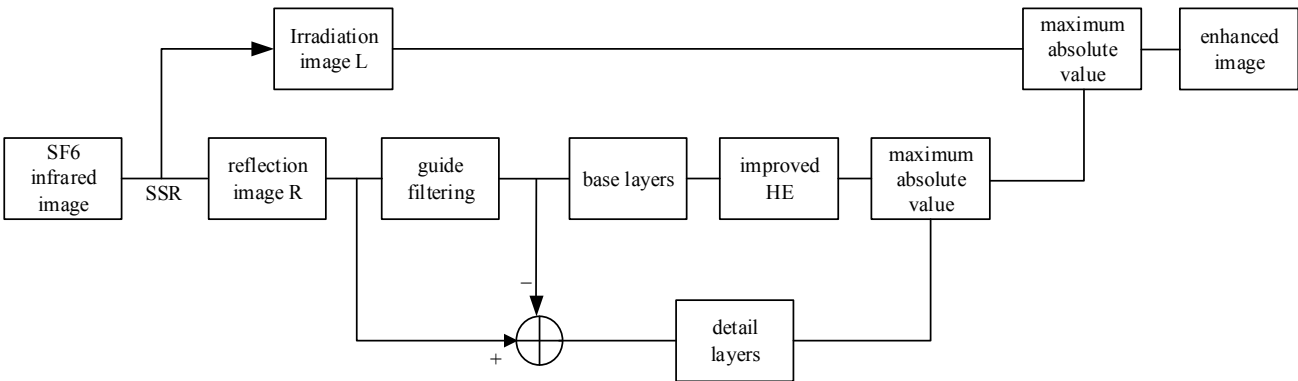


图 1 本文算法流程
Fig.1 Flow chart of the algorithm in this paper

1.1 Retinex 原理

E. H. Land 提出基于人眼视觉特性的 Retinex 理论^[9],该理论认为,一幅图像 $I(x,y)$ 可用式(1)表示:
$$I(x,y) = R(x,y)L(x,y) \tag{1}$$
式中: $R(x,y)$ 为反射分量; $L(x,y)$ 为照射分量。反射分量 $R(x,y)$ 反映景物本身的性质,与环境的亮度无关,含有大量的高频信息。照射分量 $L(x,y)$ 反映景物所在环境的亮度,与景物本身无关,含有缓慢变化的低频信息。Retinex 理论的示意图如图 2 所示。

Retinex 理论的本质是先估计出一幅图像中的照射分量并去除,最终获得反映景物本质的反射分量。所以,Retinex 算法的核心在于如何有效、准确地估计照射分量。

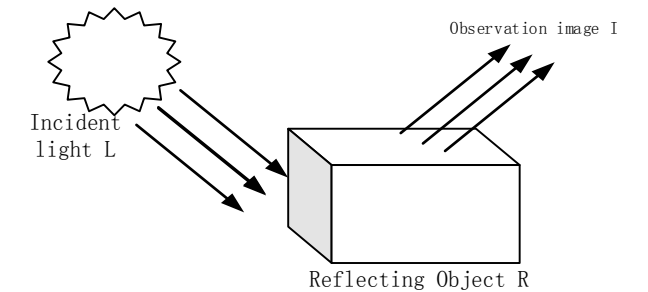


图 2 Retinex 理论示意图
Fig.2 Schematic diagram of the Retinex theory
Jobson 等人基于 Retinex 理论提出单尺度 Retinex (single-scale Retinex, SSR) 图像增强算法^[10]。SSR 算法采用高斯环绕函数与原图像进行卷积,从而获得照射分量。SSR 算法的数学模型如式(2)所示:

$$\begin{aligned}\lg R(x, y) &= \lg I(x, y) - \lg L(x, y) \\ &= \lg I(x, y) - \lg [G(x, y) * I(x, y)]\end{aligned}\quad (2)$$

式中: $G(x, y)$ 为高斯环绕函数, 其表达式如式(3)所示, “*” 为卷积运算。

$$G(x, y) = \lambda e^{-\frac{(x^2+y^2)}{\delta}} \quad (3)$$

式(3)中: λ 为归一化常数, 使得 $\iint G(x, y) dx dy = 1$;

δ 为尺度因子, δ 决定了待增强图像的细节保留程度。由式(3)可知, 原图与高斯低通 $G(x, y)$ 的卷积得到的照射分量为图像的低频部分, 经原图中的低频照射分量去除, 得到的是原图像中的高频部分, 正好是人眼比较敏感的边缘和细节等信息, 决定着图像的本质特征。

综上可知, SSR 算法可以实现边缘和细节的增强。

1.2 引导滤波

为了细化图像去雾算法中的透射图, 何凯明等人提出了一种类似于双边滤波的引导滤波算法^[11]。它不仅具有双边滤波的边缘保持特性, 而且还具有去除高斯噪声的能力。同时, 还克服了双边滤波在图像色差较大时产生伪影的缺点。引导滤波是一个线性模型, 如式(4)所示:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (4)$$

式(4)中: q 是输出图像; I 为引导图像, 当局部窗口为 ω_k 时, a_k 、 b_k 为线性函数的系数。对式(4)求导得到式(5):

$$\nabla q = a \nabla I \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 当 I 的梯度变化时, 输出图像 q 也有相应的梯度变化, 所以引导滤波算法在对红外图像去除高斯噪声的同时, 也可保留图像的边缘信息。式(5)的系数 a 可以通过线性回归求出, 可令拟合函数的真实值与输出值的差值最小, 即求式(6)的最小值。

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2) \quad (6)$$

式(6)中: p 是待处理图像; ε 是用于限制求解的 a 过大的参数, 通过最小二乘法可得:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\delta_k^2 + \varepsilon} \quad (7)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k$$

式(7)中: μ_k 是 I 在窗口 ω_k 的平均值; δ_k^2 是 I 在 ω_k 中的方差; $|\omega|$ 是 ω_k 中像素的数量, \bar{p}_k 是待处理图

像 p 在 ω_k 中的均值。当一个像素被多个窗口包含时, 在求取该点的最终输出时, 将该点的函数值做平均, 最终输出如式(8)所示:

$$\begin{aligned}q_i &= \frac{1}{|\omega|} \sum_{k: i \in \omega_k} a_k I_i + b_k \\ &= \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i\end{aligned}\quad (8)$$

式(8)中: q_i 是最终的像素值, 窗口 ω_k 包含所有像素, i, k 是其中中心位置。当引导图像等于输入图像 p 时, 此时有:

$$\begin{aligned}a_k &= \frac{\delta_k^2}{\delta_k^2 + \varepsilon} \\ b_k &= (1 - a_k) \mu_k\end{aligned}\quad (9)$$

式(9)中, 当 $\varepsilon=0$ 时, 有 $a_k=1$, $b_k=0$, $q_i=I_i=p_i$, 即输出图像和输入图像相同。

当 $\varepsilon>0$ 且图像局部方差较大时, 有 $\delta_k^2 \gg \varepsilon \Rightarrow a_k \approx 1$, $b_k \approx 0$, 此时输出图像近似等于输入图像, 保持了与输入图像相同的边缘信息。

当 $\varepsilon>0$ 且图像局部方差较小时, 有 $\delta_k^2 \ll \varepsilon \Rightarrow a_k \approx 0$, $b_k \approx \mu_k$, 此时图像 q 的灰度值可近似为 ω_k 的平均值, 则该区域被平滑了。这就是引导滤波算法的保边平滑特性。

综上可知, 引导滤波算法不仅具有边缘保持特性, 而且还具有去除高斯噪声的能力。

1.3 改进的直方图均衡化

HE 通过非线性映射处理输入图像, 使得图像的像素值在每个灰度级上都是均匀分布的。从而得到动态范围较广和对比度较高的图像。HE 的基本原理是: 假设原始输入图像和输出图像的灰度分别为 r 和 s , $p_r(r)$ 为原始图像的概率密度函数, $T(r)$ 为灰度区间 $[1, L-1]$ 内严格单调递增的映射函数, 则 HE 的数学变换关系如式(10)所示:

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(r) dr, \quad 0 \leq r \leq L-1 \quad (10)$$

式(10)中: $r=L-1$ 为白色, $r=0$ 为黑色。令映射函数 $T(r)$ 为 r 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF), 由于 $T(r)$ 为严格单调递增函数, 则有:

$$\frac{ds}{dr} = \frac{d}{dr} \int_0^r p_r(r) dr = p_r(r) \quad (11)$$

则输出图像的概率密度函数 $p_s(s)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned}p_s(s) &= p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right| = p_r(r) \left| \frac{1}{(L-1)p_r(r)} \right| = \\ &= \frac{1}{L-1}, \quad 0 \leq s \leq L-1\end{aligned}\quad (12)$$

由式(12)可知, $p_s(s)$ 为均匀概率密度函数, 即输

出图像的灰度值是均匀分布的。式(10)适用于连续函数的计算。而实际应用中,离散图像的直方图均衡化过程为:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{MN}, k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (13)$$

式(13)中: MN 是图像中像素的总数; n_k 是灰度为 r_k 的像素个数。则由式(13)可以得到:

$$s_k = (L-1) \sum_{i=0}^k p_r(r_i) = \frac{(L-1)}{MN} \sum_{i=0}^k n_i, k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (14)$$

HE 算法对所有像素值都采用相同变换,并未考虑图像的局部特征。这导致经过 HE 算法处理后的图像将丢失有用的边缘的细节信息。因此,直方图均衡化并不适合用于 SF6 红外图像的增强处理。为此,本文提出改进的直方图均衡化对 SF6 图像进行局部增强处理。本文利用图像的局部特征来设计处理算法,不同的局部采用相适的对比度增强方法,即增强图像的每个像素值都通过一个映射函数得到,而映射函数由局部窗口 W 的直方图均衡化获得。则局部对比度增强的表达式为:

$$x'_{ij} = \begin{cases} T^{\text{HE}}(x_{ij}) + k(x_{ij} - m_{ij}) & 0 \leq x_{ij} \leq 255 \\ T^{\text{HE}}(x_{ij}) & \text{others} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: x'_{ij} 、 x_{ij} 分别为变换后和变换前的中心像素, $T^{\text{HE}}(x_{ij}) = 1/mn \sum_{(i,j) \in W} x_{ij}^{\text{HE}}$ 为窗口 W 经 HE 算法

处理后所有像素的灰度均值, $m_{ij} = 1/mn \sum_{(i,j) \in W} x_{ij}$ 为

窗口 W 所有像素的灰度均值。从式(15)可以看出, $T^{\text{HE}}(x_{ij})$ 调节了局部子图像的动态范围, $k(x_{ij} - m_{ij})$ 主要起到增强局部对比度的作用。因此,改进的直方图均衡化算法的关键在于自适应参数 k 的设计上。当窗口 W 的中心像素 x_{ij} 与周围像素无明显差异时, k 应趋向于零;而当窗口 W 的中心像素 x_{ij} 与周围像素具有明显差异时,此时窗口 W 包含较多的图像细节, k 应取一个合适的正值。基于此,本文采用窗口 W 的邻域灰度方差来自适应计算 k 的值,其表达式为:

$$k = \left(\frac{\delta_{ij}^2}{\delta_n^2} - 1 \right) \quad (16)$$

式(16)中: δ_{ij}^2 为窗口 W 的邻域灰度方差; δ_n^2 为整幅图像的噪声方差。

综上所述,改进的直方图均衡化算法具体实现过程如下:

- 1) 计算原始 SF6 图像所有灰度级的像素数 n_i 。
- 2) 求解原始 SF6 图像的累积直方图。
- 3) 采用式(3)~(16)计算 k 值。
- 4) 采用式(3)~(15)计算窗口 W 的对比度,实现直方图均衡化。
- 5) 采用 n_i/n 重新计算直方图。

2 SF6 红外图像局部增强实验分析

为了验证所提算法对泄漏区域的增强效果,采用本文算法对不同场景下的 SF6 红外图像进行实验。所有实验均在酷睿 I5, Windows10 系统、内存为 8 G 的测试平台上进行,编译环境: OpenCV3.3.4 + VS2017,为了验证所提算法的有效性,将本文算法与 HE 算法^[12]和文献[7]的基于改进限制对比度的自适应直方图均衡化(CLAHE)进行比较,并从客观和主观两个方面进行分析。

2.1 主观评价

实验分别对室内和室外的 SF6 红外图像进行测试,实验图像由型号为 FLIR GF306 的红外成像仪在白天对变电站 GIS 设备的 SF6 泄漏进行检测时采集而得。算法对 SF6 泄漏区域的增强结果及其相应的直方图如图 3 和图 4 所示,采用矩形方框对 SF6 泄漏区域进行标注。从图 3(a)及其直方图的分布可知,图 3(a)中 SF6 泄漏区域的对比度低,边缘不清晰。图 3(f)的直方图分布均匀,这说明 HE 算法能够有效增强泄漏区域的对比度并拓展图像的动态范围,但图像整体的对比度被过度放大且泄漏区域的局部细节并不清晰。图 3(g)的直方图主峰位于图像的中右部,这表明文献[7]的增强效果是要优于 HE 算法,图 3(h)直方图的峰值处于图像的右部, SF6 泄漏区域的对比度得到了提高,从图 3(d)也可以看出, SF6 泄漏区域的边缘突出,其轮廓明显。

图 4(e)灰度级大多分布于直方图的左中部,这与图 4(a)的图像整体较暗相互印证。图 4(f)与图 3(f)的直方图分布类似,从图 4(b)的增强效果也可以看出, HE 算法使得图像的整体亮度过高,泄漏区域增强效果并不明显,图 4(g)的峰值较高,这表明文献[7]的算法有效增强泄漏区域的对比度。采用本文算法增强 SF6 图像,图 4(h)的直方图峰值集中于右部,结合图 4(d)的增强效果可得,本文算法有效增强泄漏区域的对比度,泄漏区域的纹理细节和边缘更加清晰,边缘的保留效果是优于文献[7]的。

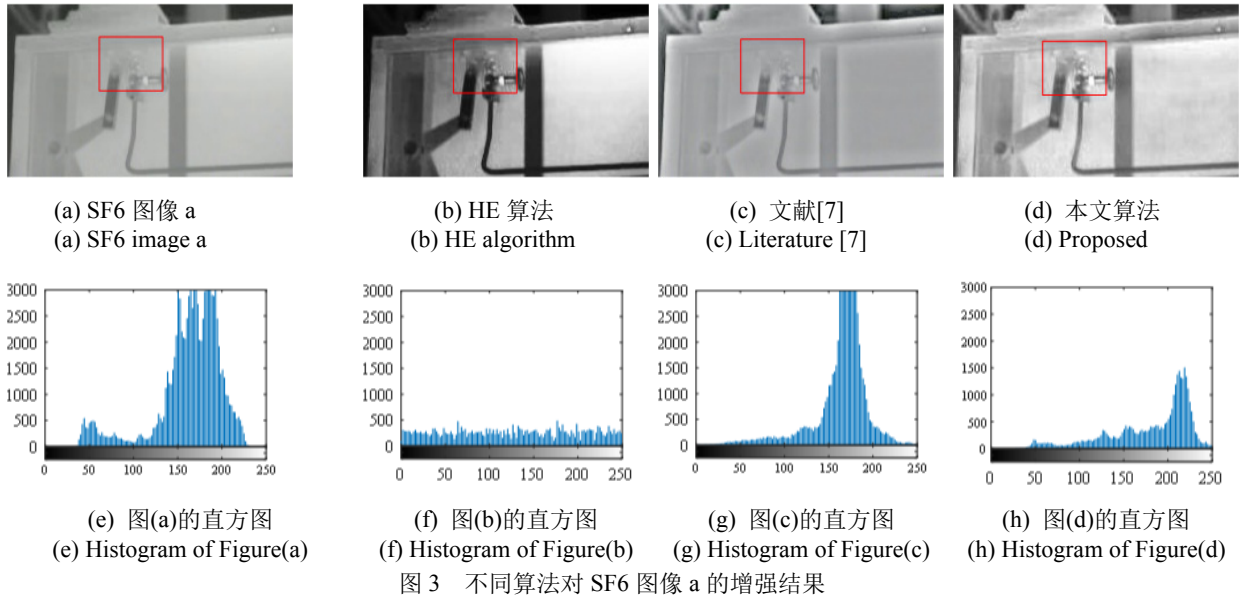


Fig.3 The enhancement results of the SF6 image a by the different algorithms

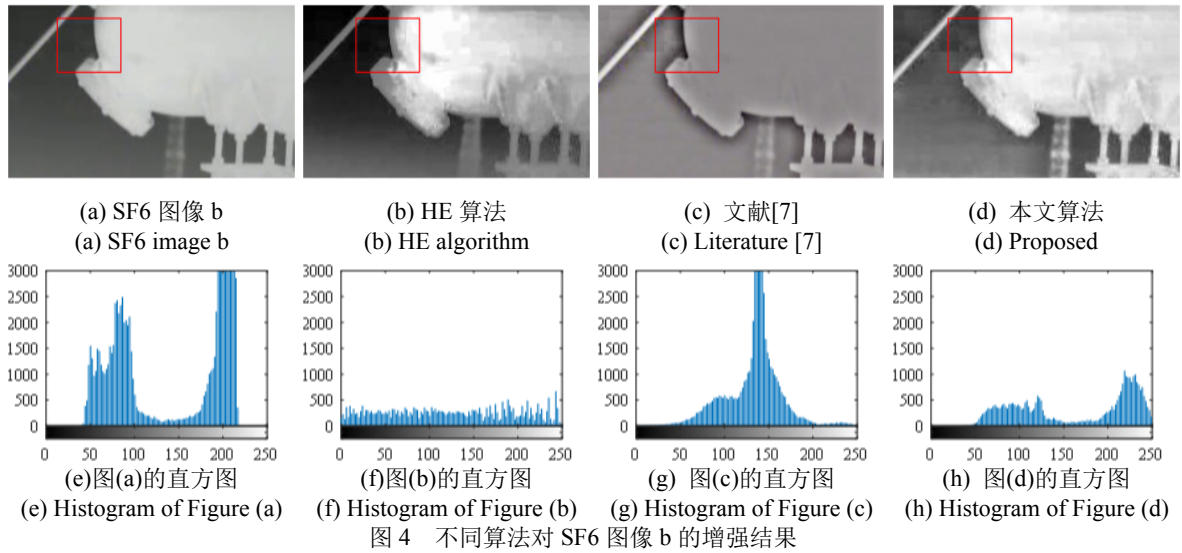


Fig.4 The enhancement results of the SF6 image b by the different algorithms

2.2 客观评价

本文采用标准差 (standard deviation, SD)、信息熵 (information entropy, IE) 和峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 作为客观评价标准, 来验证 SF6 图像的增强效果。

①图像标准差指的是图像均值与其灰度值的差异, 该值越大, 则表示图像的对比度越高, 相反, 标准差越小, 图像对比度越低。标准差的表达式为:

$$\begin{cases} SD = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \mu)^2} \\ \mu = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: μ 表示图像的灰度平均值。

②图像信息熵反映直方图灰度级的分布情况,

能够表征图像的细节信息, 其定义为:

$$IE = -\sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 p_i \quad (18)$$

式(18)中: L 为图像的灰度级总数; p_i 表示图像中灰度 i 出现的概率。

③峰值信噪比是衡量图像去噪效果最为常用的指标, 其定义为:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (19)$$

式(20)中: MSE 为均方差, 其定义为:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|f(x, y) - f'(x, y)\|^2 \quad (20)$$

式中: $f'(x, y)$ 为原图像 $f(x, y)$ 经过滤波后得到的图像。

本文通过对上述算法所得的图像求其信息熵、

标准差、峰值信噪比和实时处理时间。比较结果如表1所示。由表1可知, HE算法的标准差最大、峰值信噪比最小, 这说明 HE 算法虽能提高图像的整体对比度, 但存在过增强的现象。文献[7]算法的信息熵和标准差有所增加, 峰值信噪比相比于 HE 算法有所提高, 这说明文献[7]抑制噪声的效果比 HE 算法要好。本文算法的信息熵和峰值信噪比最大, SF6 红外图像的局部对比度得到了提高, 泄漏区域的边缘和纹理细节更加丰富。抑制高斯噪声的效果比文献[7]要好。HE 算法的实时处理速度最快, 本文算法的处理速度适中, 但总体来说, 实时处理速度相差并不大, 完全能够满足实时运行的应用需求。

表1 不同算法的客观评价指标

Table 1 Objective evaluation indicators for the different algorithms

Image	Index	Original	HE	Literature [7]	Proposed
Image a	IE	6.031	7.103	7.066	7.227
	SD	37.046	73.821	44.946	46.465
	PSNR	-	6.615	9.975	16.045
	T/s	-	0.047	0.089	0.082
Image b	IE	6.405	7.118	6.781	7.273
	SD	62.109	74.408	63.094	64.496
	PSNR	-	4.891	5.561	8.951
	T/s	-	0.046	0.086	0.085

3 结论

本文基于非锐化掩模图像的基本思想提出基于改进 HE 的 SF6 泄漏区域增强算法。本文算法首先利用 SSR 算法对原始 SF6 图像的灰度分布进行调整, 突显暗背景中的图像边缘, 然后利用引导滤波将反射图像 R 分解为细节层与基本层, 最后采用改进的 HE 来自适应处理基本层, 调节泄漏区域的对比度, 并采用绝大值取大算法将增强后的图像进行融合, 实验结果和分析表明: 本文算法不仅能够提高泄漏区域的对比度, 而且具有良好边缘保持特性。能够有效改善 SF6 红外图像低对比度和低信噪比特性。同时也为后续 SF6 泄漏检测的研究工作提供一个新的思路, 使得后续的研究工作能够顺利进行。

参考文献:

[1] ZHANG X, XIAO H, HU X, et al. Effects of reduced electric field on sulfur hexafluoride removal for a double dielectric barrier discharge reactor[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, **46**(3): 563-570.

[2] 郭瑛, 周会高. 高压开关行业热点分析[J]. *电气时代*, 2019, **1**(6): 442

20-24.

GUO Ying, ZHOU Huigao. Hot spot analysis of high-voltage switch industry[J]. *Electric Age*, 2019, **1**(6): 20-24.

[3] LIU C, GU W, SHI L, et al. A method to construct early-warning and emergency response system for sulfur hexafluoride leakage in substations[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 47082-47091.

[4] 季怡萍, 邓先钦, 徐鹏, 等. SF6 气体泄漏红外成像检测的技术分析和应用探讨[J]. *红外技术*, 2022, **44**(2): 198-204.

Ji Yiping, DENG Xianqin, XU Peng, et al. Analysis of SF6 leakage detection using infrared imaging[J]. *Infrared Technology*, 2022, **44**(2): 198-204.

[5] 王俊波, 徐鑫, 刘志陆, 等. 电气设备 SF6 气体泄漏的红外检测技术[J]. *无损检测*, 2017, **39**(8): 43-46.

WANG Junbo, XU Xin, LIU Zhilu. Infrared detection technology of SF6 gas leakage of electrical equipment [J]. *Nondestructive Testing*, 2017, **39**(8): 43-46.

[6] 李军卫, 张英, 赵乐, 等. 基于红外视频图像处理的瓷柱式 SF6 断路器泄漏区域检测研究[J]. *高压电器*, 2018, **54**(12): 50-55.

LI Junwei, ZHANG Ying, ZHAO Le, et al. Detection of leakage area of porcelain column SF6 circuit breaker based on infrared video image processing [J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, **54**(12): 50-55.

[7] 刘陈瑶, 胡梦竹, 张龙飞. 基于改进 CLAHE 的 SF6 红外图像增强[J]. *光学技术*, 2021, **47**(1): 107-112.

LIU Chenyao, HU Mengzhu, ZHANG Longfei. Infrared image enhancement of SF6 based on improved CLAHE[J]. *Optical Technique*, 2021, **47**(1): 107-112.

[8] 张志恒. 基于图像自适应分解及多方向特征的多聚焦图像融合算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

ZHANG Zhiheng. Research on Multi-focus Images Fusion Algorithm Based on Image Adaptive Decomposition and Multi-directional Features[D]. Xi'an: XIDIAN University, 2021.

[9] Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(1): 1-11.

[10] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 1997, **6**(3): 451-462.

[11] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(6): 1397-1409.

[12] 乔闹生. 一种改进的直方图均衡化[J]. *光学技术*, 2008, **34**(S1): 141-142.

QIAO Naosheng. An improved histogram equalization[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(S1): 141-142.