

融合彩色模型空间的电力设备红外图像增强

王振, 刘磊

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 电力设备红外图像普遍存在亮度暗、对比度低等问题, 针对此现象, 提出了一种融合彩色模型空间的图像增强算法。该方法将图像的对比度与亮度增强转换至 HSV 与 RGB 空间中分别进行处理: RGB 空间中, 首先预处理图像中的高灰度级, 并采取混合滤波的方式抑制图中噪声, 然后使用增强函数提高图像亮度, 最后将增强图像转换至 HSV 空间中并提取 H 、 S 、 V 三分量图; HSV 空间中, 采用伽马变换和 CLAHE (contrast limited adaptive histogram equalization) 算法实现 V 分量的亮度提升, 并采取非线性饱和度修正函数处理 S 分量提升图像对比度, 最后将处理分量与提取分量进行对应融合得到 HSV 空间中的增强图像, 并将其转回 RGB 空间中得到最终的输出图像。实验结果表明, 本文算法能明显地提升红外图像的亮度与对比度, 增强后的 3 组图像其灰度均值和标准差平均值分别为 115.94 和 78.65, 相对于原图的平均值分别提升了 81.59 和 36.17。

关键词: 电力设备红外图像; 图像增强; 彩色模型空间融合; HSV、RGB 分量增强

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)02-0225-08

Infrared Image Enhancement for Power Equipment Based on Fusion Color Model Space

WANG Zhen, LIU Lei

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China)

Abstract: There are numerous problems with infrared imaging using power equipment, such as dark brightness and low contrast. To solve these problems, an enhancement algorithm using a color-model space was proposed. In this method, the contrast and brightness enhancement of the image are processed in the HSV and RGB spaces, respectively. First, the high gray levels of the image are preprocessed, and the mixed filtering method is adopted to suppress the noise in the image. An enhancement function is used to improve the brightness of the image. Finally, the enhanced image is converted into the HSV space, the H , S and V component images are extracted, the gamma transform and CLAHE algorithms are used to improve the brightness of V component, and a nonlinear saturation correction function is used to process component S to improve the image contrast. Finally, the enhanced image in the HSV space is obtained by the corresponding fusion of each processing and extraction component, and is transferred back to the RGB space to obtain the final output image. Experimental results show that the proposed algorithm can significantly improve the contrast and brightness of infrared images. The average gray mean and standard deviation of the enhanced 6 groups of images were 115.94 and 78.65, respectively, which are improvements of 81.59 and 36.17 compared with the original image.

Key words: infrared image of power equipment, image enhancement, color model space fusion, HSV and RGB component enhancement

收稿日期: 2022-03-31; 修订日期: 2022-05-02.

作者简介: 王振 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为图像处理与模式识别。E-mail:wz0608@petalmail.com.

通信作者: 刘磊 (1981-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为机器视觉、图像处理与模式识别。E-mail:liulei198109@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (61602008)。

0 引言

变电站电力设备由于长期处于运行工作状态，因此易引起各种类型故障，进而对电网的安全稳定运行造成一定威胁^[1]。红外热成像技术可以检测出物体的温度，并且该技术存在非接触、直观化且无需对设备进行断电等优点，使其成为电力设备热故障检测的有力手段^[2-3]。但红外热图像在形成的过程中因设备和环境的共同影响往往会存在一些问题，如对比度低、亮度暗、细节不突出等。这些缺点的存在会影响后续对图像一系列的分析与处理，因此利用增强算法提高图像的质量十分必要^[4]。

常见的图像增强算法大致可划分为空域算法及频域算法两大类^[5]。空域算法是指对图像中的像素灰度值按一定映射规则进行转变来增强图像质量，如直方图均衡化算法、Retinex 理论算法等；频域算法是指通过分析频谱来改变图像特征，进而达到增强图像的效果，如小波变换、傅里叶变换等^[6-7]。这些算法在增强电力设备红外图像时会存在一些问题，如经直方图均衡化算法增强后的图像，其内部噪声会被放大进而导致细节丢失；经 Retinex 理论算法增强后的图像有时会在不同程度上存在“光晕”现象；经频域算法增强后的图像其细节部分模糊^[8]。针对传统方法增强电力设备红外图像时会存在一些问题，许多学者提出了一些改进算法。陈尧等将非下采样轮廓波变换 (nonsampled contourlet, NSCT) 与 Pal-King 模糊增强算法相结合实现了电力设备红外图像的增强^[9]。朱颖等采取非下采样剪切波变换 (nonsampled shearlet transform, NSST) 将图像先分为高、低频两部分，然后对高低频两部分分别进行处理，最后按照 NSST 变换进行合成实现红外图像的增强^[10]。刘陈瑶等采取双边滤波将图像分为基础图像和细节图像，然后对基础图像采用对比度受限自适应直方图均衡法 (contrast limited adaptive histogram equalization,

CLAHE) 进行增强，对细节图像采用分段线性变换结合拉普拉斯变换的方式进行处理，并将处理后的两图像进行叠加实现图像的增强^[11]。以上 3 种算法虽实现了图像的亮度提升与对比度增强，但是这些算法的输入图像为灰度图像，没有对原始的红外图像直接处理。谭宇璇等提出了一种参数自调整的 Retinex 增强算法^[12]，由该算法增强后的红外图像其亮度与对比度都得到了很大提升。陈基顺等提出的增强算法其最大特点为可以区分出相近的灰度值，进而直观地看出设备温度之间的具体细节变化^[13]。

本文提出了一种融合彩色模型空间的红外图像增强算法，该算法分别在 RGB 与 HSV 两彩色模型空间中对图像做增强处理。RGB 空间中，结合低照度的电力设备红外图像其 R、G、B 三分量图的灰度级普遍分布在中低等级处的特点，提出了一种增强函数来提升图像的整体亮度。HSV 空间中，对 V 分量图采取伽马变换结合 CLAHE 算法的方式来综合增强其亮度，并采取一种非线性色调矫正函数处理 S 分量图。处理完毕后，首先提取由 RGB 空间增强图像转换到 HSV 空间后的三分量图，然后将提取的三分量图与在 HSV 空间中处理后的三分量图分别进行对应的加权融合，最后将融合结果转换至 RGB 空间中得到红外图像的增强图像。实验结果显示，增强后的红外图像其亮度与对比度的提升无论从主观视觉还是客观评价上都取得了较好结果。

1 本文算法

HSV 彩色模型空间中的色彩三分量彼此相互独立，因此对其中任意分量处理时都不会影响到其他两个分量，即在该空间处理后的图像具备色彩失真度小、颜色更加逼真的特点^[14]。根据该空间特性，提出了一种与 HSV 彩色模型空间相融合的图像增强算法，其具体步骤如图 1 所示。

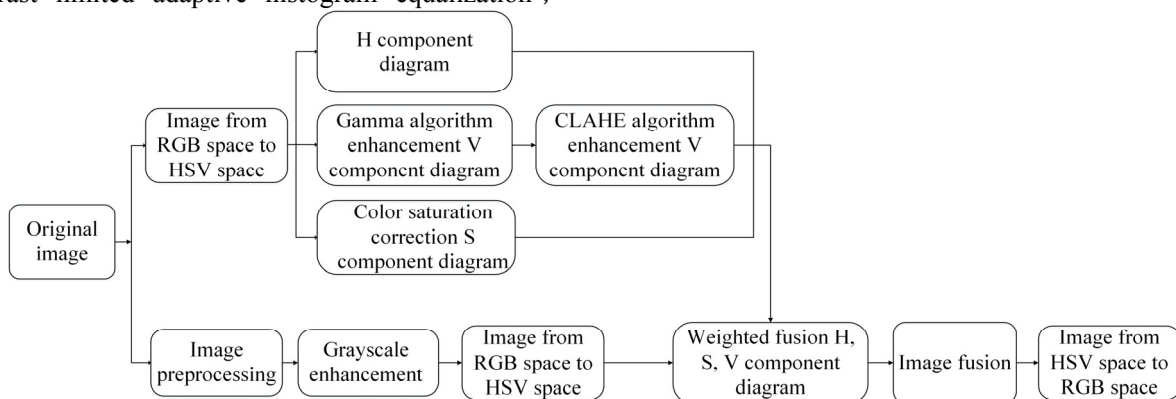


图 1 本文图像增强算法流程
Fig.1 Flow chart of image enhancement algorithm proposed in this paper

1.1 RGB 彩色空间图像增强

RGB 彩色空间也称红、绿、蓝三原色彩色空间，其通过使用红、绿、蓝三原色不同比例的分量组合来显示某种色彩及亮度^[15]。目前电力设备红外图像的采集主要靠摄像头完成，即设备的红外热图像一般表示在 RGB 彩色模型空间中。图 2 为某幅电力设备的红外图像及其 R、G、B 三分量的灰度直方图，当图像整体亮度偏低时，其三分量各自的灰度级均分布于中低等级处。

为进一步突显设备故障区域的亮度，在对图像 R、G、B 三分量进行增强处理之前，采用公式(1)对图像的高灰度级进行预处理。

$$f(i,j)^* = \begin{cases} f(i,j) & f(i,j) < 235 \\ 0.5f(i,j) + 127.5 & f(i,j) \geq 235 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $f(i,j)$ 、 $f(i,j)^*$ 分别为输入图像、输出图像在灰度级 (i,j) 处的灰度值。

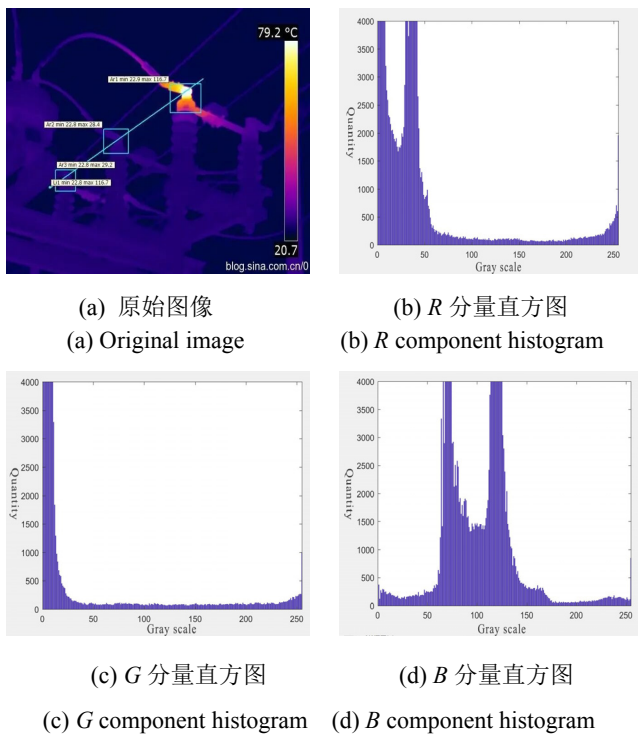


图 2 原始图像及其 RGB 空间分量的灰度直方图
Fig.2 Original image and its RGB space component gray histogram

对图像灰度级预处理后，采取中值滤波结合双边滤波的方法实现图像的保边抑噪。红外图像在成像过程中，因设备性能及环境的共同影响会导致图像中存在一定的椒盐噪声和高斯噪声^[16]。针对椒盐噪声，中值滤波算法对其有较好的抑制作用。该算法采用模板的方式，将模板内像素点的灰度值进行排序，并使用中值代替模板中心处的灰度值。其计算公式如下：

$$Y(i,j) = \text{Med} \sum_M X(i,j) \quad (2)$$

式中： M 为模板大小； $X(i,j)$ 为模板内的灰度值；Med 为求中值函数。

针对高斯噪声，本文选取双边滤波算法对其进行抑制。该算法在抑制噪声的同时，对图像的空间邻近度和灰度相似度进行了综合考虑，使其可以较好地保护图像的边缘信息。其计算公式如下：

$$g(x,y) = \frac{\sum_{i,j} f(i,j) \omega(x,y,i,j)}{\sum_{i,j} \omega(x,y,i,j)} \quad (3)$$

$$\omega(x,y,i,j) = d(x,y,i,j) \cdot r(x,y,i,j) \quad (4)$$

式中： (x,y) 、 (i,j) 分别为当前处理像素点及其邻域内像素点； $\omega(x,y,i,j)$ 为加权系数； $d(x,y,i,j)$ 、 $r(x,y,i,j)$ 分别为空域核函数和灰度核函数。

当红外图像的整体亮度偏低时，其 R、G、B 三分量图的灰度级将普遍分布在中低等级，本文提出了一种灰度级增强函数，如式(5)所示。图 3 为由此函数增强后的红外图像及其三分量的灰度直方图，可以看出各分量的灰度级分布得到拉升，并且图像整体亮度被提高。

$$Y(i,j) = \frac{79[\sqrt{2X(i,j)} - 0.15X(i,j)]}{100} \quad (5)$$

式中： $X(i,j)$ 为像素点 (i,j) 处归一化后的灰度值； $Y(i,j)$ 为输出灰度值。

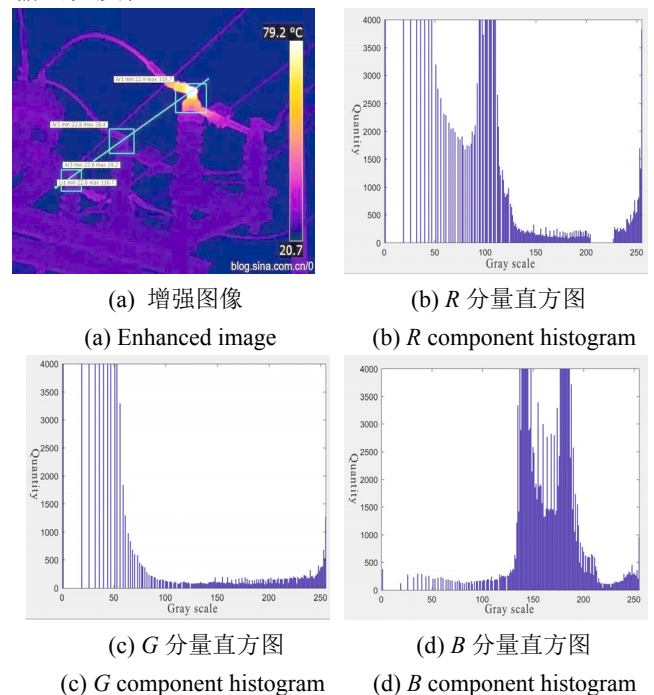


图 3 增强图像及其 RGB 空间分量的灰度直方图
Fig.3 Enhanced image and its RGB space component gray histogram

1.2 HSV 彩色空间图像增强

HSV 是在 RGB 彩色模型空间的基础上进行归一化操作演化而来的一种色彩模型空间,其中 H 、 S 、 V 分别代表图像的色调、饱和度和亮度^[17]。与 RGB 空间相比,HSV 空间的 3 个分量都彼此独立,即当对图像亮度调整时只需对 V 分量单独处理,而不影响图像的色调和饱和度;当对图像饱和度处理时只需对 S 分量单独处理,而不影响图像的亮度及色调。

由图 4(a)显示,当红外图像的整体亮度偏低时,其 V 分量图的亮度也较低。针对该特点,对 V 分量图进行两步亮度增强处理,分别为 Gamma 变换增强和 CLAHE 算法增强。首先采取伽马变换实现 V 分量图的全局增强,提升图像背景的整体亮度。伽马变换的一般表达式为:

$$s = cx^\gamma \quad (6)$$

式中: x 为归一化后的像素灰度值; c 、 γ 分别为补偿系数和伽马系数, $\gamma > 1$ 时,增强的为图像中的亮区域; $\gamma < 1$ 时,增强的则为图像中的暗区域。

由于各红外图像本身的亮度不同,所以 γ 值的选取需要根据不同图像而适当改变,本文中选取的 γ 值范围为 0.4~0.6。图 4(c)为伽马变换增强后的 V 分量图。

由于伽马变换是全局增强,所以增强后的图像亮度得到了整体性地提高,但没有突出设备与背景之间的亮度差。因为 CLAHE 算法将图像先分成若干小子块,然后对每一个子块的直方图进行限幅,所以可以有效地抑制局部灰度值过度增强的问题,于是本文进一步采取 CLAHE 算法来改善 V 分量图的增强效果。图 4 中的(e)、(f)分别为增强后的 V 分量图及其灰度直方图,从中可以看出对伽马变换增强后的图像再采取 CLAHE 算法增强,可以有效地抑制背景亮度并提升设备区域的亮度,使亮区域的灰度级分布比较均匀,突出了设备与背景之间的亮度差。

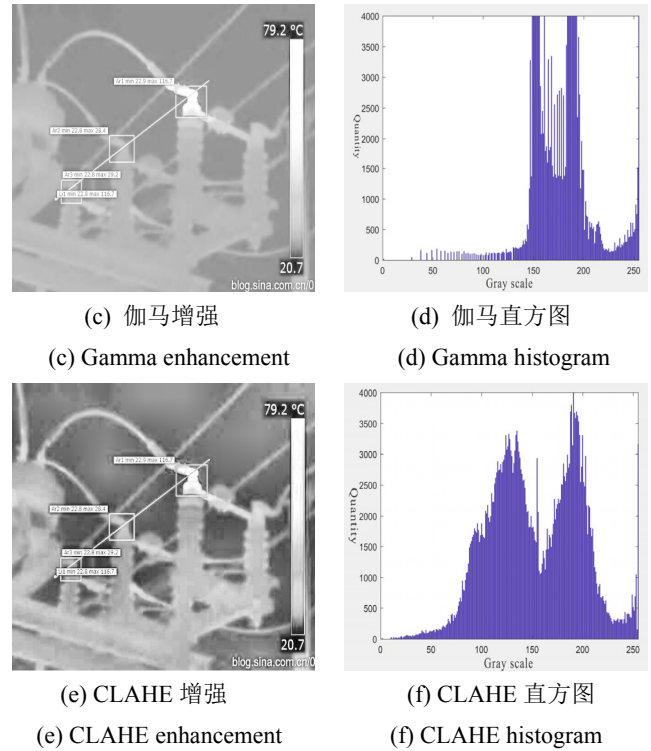
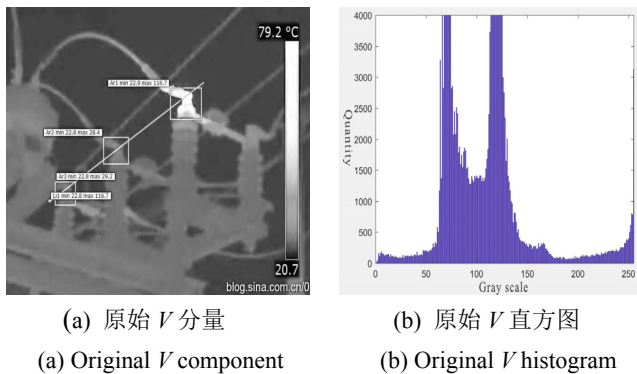


图 4 V 分量处理结果对比

Fig.4 Comparison of V component processing results

电力设备红外图像除了整体亮度偏低外,还存在对比度低的问题,这是由于红外热成像仪的成像是依靠物体之间的温度差,当设备与环境之间的温差不大时,此时就会造成红外热图像的对对比度偏低。针对此问题,本文对色彩饱和度 S 分量图进行矫正处理,采用的矫正函数为公式(7),图 5 为该函数处理后的效果图。

$$S^*(x, y) = \frac{[S(x, y)]^3 + 0.6S(x, y)}{3} \quad (7)$$

式中: $S^*(x, y)$ 为处理后的图像色彩饱和度分量; $S(x, y)$ 为原图像的色彩饱和度分量。

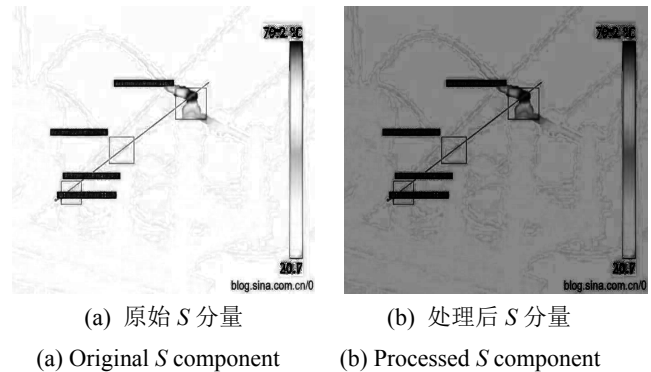


图 5 S 分量处理结果对比

Fig.5 Comparison of S component processing results

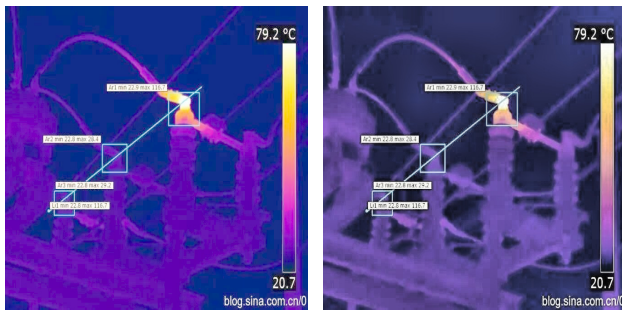
1.3 RGB 与 HSV 空间图像融合

由图 6(a)、(b)显示,在 RGB 空间中增强的图像

其特点为色彩饱和度高及背景亮度大，而在 HSV 空间中增强的图像其特点为设备与背景之间的对比度高。结合两空间增强图像各自的特点，按公式(8)融合两图像的 H 、 S 、 V 三分量图，并将融合结果转回到 RGB 彩色空间中得到最终的输出图像，如图 6(c)所示。

$$\begin{cases} H = \alpha_1 H_{\text{RGB}} + \beta_1 H_{\text{HSV}} \\ S = \alpha_2 S_{\text{RGB}} + \beta_2 S_{\text{HSV}} \\ V = \alpha_3 V_{\text{RGB}} + \beta_3 V_{\text{HSV}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： H 、 S 、 V 分别为融合后的三分量图； H_{RGB} 、 S_{RGB} 、 V_{RGB} 分别为 RGB 空间增强图像转到 HSV 空间后的三分量图； H_{HSV} 、 S_{HSV} 、 V_{HSV} 分别为在 HSV 空间中处理后的三分量图； α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2 、 β_3 为融合系数。本文对 H 、 S 两分量采取等量加权融合的方式，即 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 都取值为 0.5，对 V 分量采取等量融合的方式，即 α_3 、 β_3 取值为 1。



(a) RGB 空间
(a) RGB space
(b) HSV 空间
(b) HSV space



(c) 图像融合
(c) Image fusion

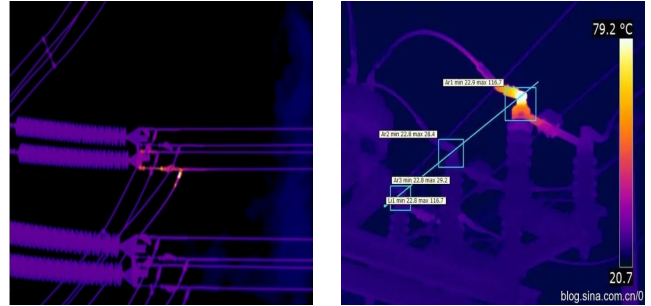
图 6 两空间图像融合结果

Fig.6 Two space image fusion result

2 实验结果与分析

为了验证本文算法可以实现红外图像的亮度增强与对比度提升，选取 3 张对比度较低的电力设备红外图像作图像增强对比实验，测试图像如图 7 所示(红外图像取自网络)。首先对图像采取直方图均衡化 (histogram equalization, HE)、同态滤波、多尺度

Retinex 算法 (multi-scale Retinex, MSR)、CLAHE 算法、加权分布自适应伽马校正算法 (adaptive gamma correction with weighting distribution, AGCWD)、文献 [12]算法及本文算法进行增强处理；接着对各算法增强后的图像进行主观和客观上的评价，来验证本文增强算法的优越性。



(a) 图像 1
(a) Image 1
(b) 图像 2
(b) Image 2



(c) 图像 3
(c) Image 3

图 7 用于测试的电力设备红外图像

Fig.7 Infrared images of power equipments for test

2.1 主观评价

本文对选择的 3 张红外图像进行不同算法的增强对比实验，实验结果如图 8~图 10 所示。从中可以看出，HE 算法虽提升了红外图像的亮度，但同时放大了图中噪声导致视觉效果较差，并且存在严重的颜色畸变问题。同态滤波、MSR 及 AGCWD 算法总体对红外图像的增强表现不是很明显，且 MSR 算法有时会出现光晕现象。CLAHE 算法突显出了设备区域，但该算法放大了图中噪声，导致增强后的图像普遍存在模糊问题。文献[12]及本文算法都可以大幅度地提升图像亮度和对比度，但文献[12]的增强效果受原始图像的质量影响较大，当图中的背景信息复杂时，则增强后的图像其视觉效果会出现一些偏差，如图 8(g)所示，并且增强图像中有时也会伴随光晕问题，如图 9(g)、图 10(g)所示。总体从主观评价上而言，本文算法可以较好地提升红外图像的亮度与对比度，并

且增强图像中没有出现光晕及模糊等问题。

2.2 客观评价

为进一步确认本文算法在提升图像亮度与对比度方面优于所选取的对比算法，选取灰度均值及标准差两种图像质量评价标准对增强后的图像质量进行客观上的评价。

灰度均值大小可以反映图像整体亮度，其值越大说明图像亮度越高。其计算公式如下：

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(i, j) \quad (9)$$

式中： M 和 N 分别为图像在 x 轴和 y 轴方向上的像素点数目； $f(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值。

标准差值大小可以反映图像灰度值相对于灰度均值的离散程度，值越大说明灰度级分布越分散，则

图像对比度越高。其计算公式如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [f(i, j) - \mu]^2} \quad (10)$$

式中： μ 为图像灰度均值。

图8~图10的客观评价结果如表1所示，对比表中数据可知，由文献[12]及本文算法增强后的红外图像其灰度均值和标准差两种指标值都相对提升较为明显，且相比之下本文算法略胜一筹。计算表中数据可得，本文算法增强后的3张图像其灰度均值和标准差两种指标的平均值分别高达115.94和78.65，相比3张原始图像的两指标平均值分别提升了81.59和36.17。由此说明，本文的增强算法可以实现红外图像的亮度增强与对比度提升。

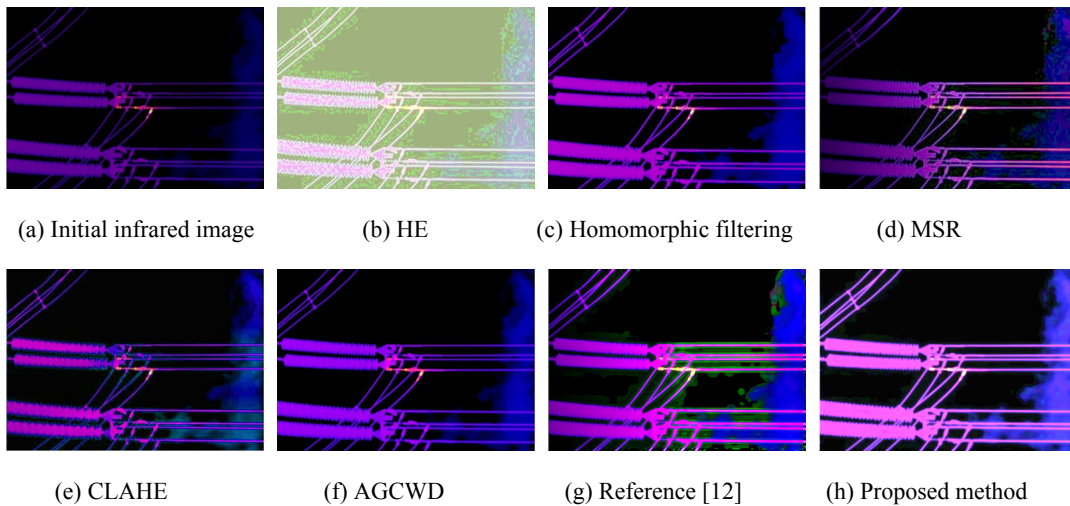


图8 红外图像1的增强对比图

Fig.8 Enhanced contrast images of infrared image 1

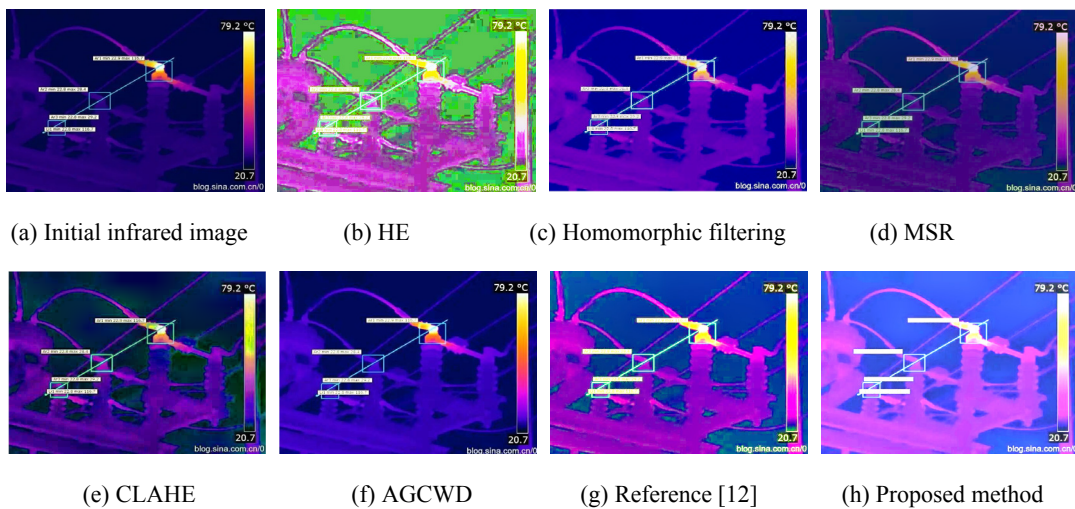


图9 红外图像2的增强对比图

Fig.9 Enhanced contrast images of infrared image 2

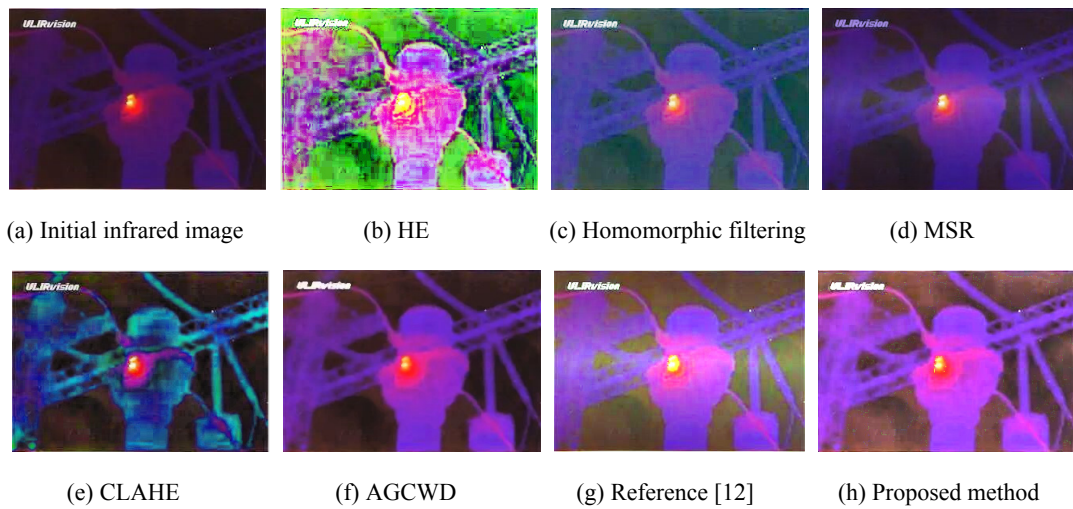


图 10 红外图像 3 的增强对比图

Fig.10 Enhanced contrast images of infrared image 3

表 1 客观评价结果

Table 1 Objective evaluation results

Evaluation criterion	Comparison algorithm	Image 1	Image 2	Image 3
μ	Original	15.42	29.26	58.35
	HE	178.21	136.75	129.58
	Homomorphic	31.82	55.50	69.67
	MSR	27.05	46.70	70.25
	CLAHE	26.88	44.61	48.08
	AGCWD	25.57	40.73	92.89
	Reference [12]	45.70	86.46	140.67
	Proposed	68.89	132.59	146.33
δ	Original	38.84	55.38	33.21
	HE	35.11	69.55	71.79
	Homomorphic	65.54	72.37	44.11
	MSR	51.60	56.61	46.43
	CLAHE	56.31	62.23	49.29
	AGCWD	64.34	74.70	55.29
	Reference [12]	81.23	84.28	59.44
	Proposed	89.39	81.35	65.21

3 结论

针对电力设备红外图像普遍存在亮度暗、对比度低等问题,提出了一种基于颜色空间的图像增强算法。该方法首先分别在 RGB 与 HSV 两彩色模型空间中对图像做不同方式的增强处理,然后将 RGB 空间中的增强图像转换至 HSV 空间中,最后将两种空间各自增强图像的 H、S、V 分量进行不同比例的对应融合,并将融合图像由 HSV 空间转回 RGB 空间中得

到最终的输出红外图像。为了验证该算法可以有效地提升红外图像的亮度与对比度,与 6 种不同的增强算法进行了对比实验。据实验结果显示,从主观上看,由本文算法增强后的红外图像其亮度和对比度得到了很大提升,并且没有出现图像模糊及光晕现象等问题;从图像质量评价标准的数据上看,由本文算法增强后的红外图像其灰度均值和标准差值较高,即也客观说明了与其他算法相比,本文算法在提升红外图像亮度与对比度方面具备一定优势。

参考文献:

- [1] 张丽娜. 红外测温技术在变电站运维中的应用探讨[J]. 电子测试, 2021(21): 119-120.
ZHANG Lina. Application of infrared temperature measurement technology in substation operation and maintenance[J]. *Electronic Test*, 2021(21): 119-120.
- [2] 赵天成, 罗吕, 杨代勇, 等. 多属性融合的电力设备红外热特征数字化方法[J]. 红外技术, 2021, 43(11): 1097-1103.
ZHAO Tiancheng, LUO Lyu, YANG Daiyong, et al. A multi-attribute fusion method for digitizing infrared thermal characteristics of power equipment[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(11): 1097-1103.
- [3] 曾军, 王东杰, 范伟, 等. 基于红外热成像的电气设备组件识别研究[J]. 红外技术, 2021, 43(7): 679-687.
ZENG Jun, WANG Dongjie, FAN Wei, et al. Research on component identification for electrical equipment based on infrared thermography[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(7): 679-687.
- [4] 魏然然, 詹伟达, 朱德鹏, 等. 改进多尺度的 Retinex 红外图像增强[J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 465-474.
WEI Ranran, ZHAN Weida, ZHU Depeng, et al. Improved multi-scale Retinex infrared image enhancement[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 465-474.
- [5] 程铁栋, 卢晓亮, 易其文, 等. 一种结合单尺度 Retinex 与引导滤波的红外图像增强方法[J]. 红外技术, 2021, 43(11): 1081-1088.
CHENG Tiedong, LU Xiaoliang, YI Qiwen, et al. Research on infrared image enhancement method combined with single-scale Retinex and guided image filter[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(11): 1081-1088.
- [6] 翟海祥, 何嘉奇, 王正家, 等. 改进 Retinex 与多图像融合算法用于低照度图像增强[J]. 红外技术, 2021, 43(10): 987-993.
ZHAI Haixiang, HE Jiaqi, WANG Zhengjia, et al. Improved Retinex and multi-image fusion algorithm for low illumination image enhancement[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(10): 987-993.
- [7] 徐武, 杨昊东, 汤弘毅, 等. 基于改进加权引导滤波的红外图像增强算法[J]. 激光杂志, 2022, 43(1): 101-106.
XU Wu, YANG Haodong, TANG Hongyi, et al. Infrared image enhancement algorithm based on improved weighted guided filtering[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(1): 101-106.
- [8] 李牧, 周瑞杰, 田哲嘉. 基于直方图的热红外图像增强方法[J]. 红外技术, 2020, 42(9): 880-885.
LI MU, ZHOU Ruijie, TIAN Zhejia. A thermal infrared image enhancement method based on histogram[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(9): 880-885.
- [9] 陈尧, 尹丽菊, 咸日常, 等. 基于 NSCT 和改进 Pal_King 算法的电力设备红外图像增强方法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(11): 236-241, 287.
CHEN Yao, YIN Liju, XIAN Richang, et al. Infrared image enhancement method for power equipment based on NSCT and improved Pal_King algorithm[J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38(11): 236-241, 287.
- [10] 朱颖, 王昕, 王爱平, 等. 基于 MVOtsu 和对数型模糊隶属度函数的电力设备 NSST 域红外图像增强[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 179-185.
ZHU Ying, WANG Xin, WANG Aiping, et al. Electrical equipment infrared image enhancement of NSST domain based on MVOtsu and log-type fuzzy membership function[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(9): 179-185.
- [11] 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.
- [12] 谭宇璇, 樊绍胜. 基于图像增强与深度学习的变电设备红外热像识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7990-7998.
TAN Yuxuan, FAN Shaosheng. Infrared thermal image recognition of substation equipment based on image enhancement and deep learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(23): 7990-7998.
- [13] 陈基顺, 肖立军, 万新宇, 等. 复杂环境下电力设备红外热图增强与分割研究[J]. 红外技术, 2018, 40(11): 1112-1118.
CHEN Jishun, XIAO Lijun, WAN Xinyu, et al. Research on enhancement and segmentation of power equipment infrared heat map in complex environment[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(11): 1112-1118.
- [14] 刘寿鑫, 龙伟, 李炎炎, 等. 基于 HSV 色彩空间的低照度图像增强[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(9): 2552-2560.
LIU Shouxin, LONG Wei, LI Yanyan, et al. Low-light image enhancement based on HSV color space[J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(9): 2552-2560.
- [15] 王利娟, 常霞, 任旺. 基于加权直方图均衡化彩色图像增强仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12): 126-131.
WANG Lijuan, CHANG Xia, RENG Wang. Color image enhancement simulation based on weighted histogram equalization[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(12): 126-131.
- [16] 刘智嘉, 夏寅辉, 杨德振, 等. 基于中值滤波器的红外图像噪声处理的改进方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(3): 376-380.
LIU Zhijia, XIA Yinhui, YANG Dezhen, et al. An improved method for infrared image noise processing based on median filter[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(3): 376-380.
- [17] 刘寿鑫, 龙伟, 李炎炎, 等. 融合彩色模型空间的非线性低照度图像增强[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58(1): 57-64.
LIU Shouxin, LONG Wei, LI Yanyan, et al. Non-linear low-light image enhancement based on fusion color model space[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2021, 58(1): 57-64.