



一种基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强算法

张斌, 吴鹏, 袁杰, 孙凌卿, 傅启明, 张永泽, 陆宇
(江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210009)

摘要: 针对紫外图像本身存在的对比度低、成像不清晰、整体成像过暗或过亮且受噪声干扰等特点, 从人眼视觉的掩蔽特性出发, 提出了一种基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强算法。通过 Curvelet 变换将紫外图像信息分解到不同尺度、不同方向子带, 再依据各子带建立 HVS 模型, 利用其遮蔽性对高频分量进行非线性增益来提高图像对比度, 同时非线性灰度拉伸低频分量可以提高图像整体亮度; 最终将处理过的高低频分量通过 Curvelet 逆向重建, 得到增强后的紫外图像。实验结果表明: 增强后的图像符合人眼视觉对图像信息的提取, 突出了边缘和目标的轮廓信息, 在主观视觉和定量指标方面都具有明显的效果。

关键词: 紫外图像; 掩蔽特性; Curvelet 变换; 非线性增益; 增强

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019042

An ultraviolet image enhancement algorithm in Curvelet domain based on human visual characteristics

ZHANG Bin, WU Peng, YUAN Jie, SUN Lingqing, FU Qiming, ZHANG Yongze, LU Yu
Jiangsu Electric Power Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210009, China

Abstract: Aiming at the characteristics such as low contrast, unclear imaging, over-dark or over-bright overall imaging and noise interference in ultraviolet image itself, a Curvelet domain ultraviolet image enhancement algorithm was proposed based on the masking characteristics of human vision. Firstly, the ultraviolet image information was decomposed to different scales and direction sub-bands by Curvelet transform. Secondly, the HVS model was established according to each sub-band, and with its masking characteristics, the nonlinear gain of the high frequency component was used to improve the image contrast. Meanwhile, the low frequency component of nonlinear grayscale stretching could improve the overall brightness of the image. Finally, the processed high and low frequency components were reconstructed by Curvelet backward to obtain enhanced ultraviolet images. The experimental results show that the enhanced image accords with the extraction of image information from human vision and highlights the contour information of edge and target. In addition, it has obvious effect in subjective vision and quantitative index.

Key words: ultraviolet image, masking characteristic, Curvelet transform, nonlinear gain, enhancement



1 引言

21 世纪初, 基于紫外成像技术的放电异常检测逐渐得到我国电力系统和广大研究人员的重视, 大量人力物力资源的投入换来了显著成果: 云南电网利用紫外成像技术检测电线放电状况, 并提出检测的准确率与仪器增益、观测距离和温度等因素有关^[1]; 河南电力公司利用紫外图像处理判断设备是否放电, 提出了放电强度判定方法^[2]; 嘉兴电网利用紫外成像技术对各电力设备放电进行现场测试, 并研究了各影响因素^[3]; 沈阳电力公司利用光子计数判定设备放电状况^[4]。

然而, 紫外图像本身具有对比度低、成像不清晰、整体成像过暗或过亮且受噪声干扰等特点, 通常需要对紫外图像进行增强处理, 以提高检测的准确性。采用常用的直方图均衡化^[5]、Retinex^[6]等增强方法一定程度上可以提高图像的对比度, 但是对于实际含噪的低对比度图像, 这些方法会不同程度地带来噪声的放大, 并且会使图像局部出现增强不足或过增强的现象。小波变换也被广泛地应用到图像增强领域中, 目前已经有许多关于小波变换在图像增强方面的应用研究成果^[7-8]。然而, 研究表明小波^[9-11]在表征二维图像的边缘、纹理等高维奇异性或本质几何结构特征上存在缺陷, 导致图像细节部分的纹理增强效果不理想。

人眼视觉系统 (human visual system, HVS)^[12]能敏捷地识别亮度的相对差异性, 而对绝对亮度判断较差。也就是说, 人眼能自主地优化图像的光强、灰度等, 实现图像的最优显示。同时, Curvelet 变换^[13]具有多尺度特性以及良好的方向特性, 能够将噪声信息和边缘信息很好地分开, 在提高对比度、抑制噪声的同时, 能够突出图像的边缘、纹理等细节信息。因此, 提出了一种基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强算法, 通过 Curvelet 变换将紫外图像信息分解到不同尺度、不同方向子带, 再依据各子带建立 HVS 模型,

利用其遮蔽性对高频分量进行非线性增益来提高图像对比度, 同时非线性灰度拉伸低频分量可以提高图像整体亮度; 最终将处理过的高低频分量通过 Curvelet 逆向重建, 得到增强后的紫外图像。

2 基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强算法

2.1 Curvelet 变换

Curvelet 变换是在小波变换基础上的一种改进, 除了具有小波变换的尺度特性之外, 还具有平移不变性和方向选择性, 计算速度较传统小波变换大幅提高。同时, Curvelet 变换具有较强的线性特性, 图像重建后能很好地保留边缘和细节部分, 图像更清晰。Candes 和 Donoho 在 1999 年提出了第一代 Curvelet 变换, 其主要原理为将曲线分割成一个个非常短的小段, 每段曲线都可用直线段来近似表示, 接着采用脊波 (Ridgelet) 变换算法来进一步处理。整个变换流程包含子带分解、平滑分段、规范化以及 Ridgelet 分析等一系列步骤, 实行起来内容较为繁重, 金字塔的分解使得计算冗余量也较多。另外, Ridgelet 变换的数字实现涉及笛卡尔坐标与极坐标之间转换的差值问题, 不能实现精确重构。为此, Candes 和 Donoho^[13]在 2005 年提出了更为简洁的第二代 Curvelet 变换, 其主要原理为把频域分成许多楔形区域, 然后利用局部傅立叶基变换对楔形区域进行处理。因为无需进行脊波变换, 第二代 Curvelet 变换实现起来更为简单, 计算速度更快。具体的离散型 Curvelet 变换有两种算法: 一种为采用频域特别采样的卷绕规则 Wrapping 算法; 另一种为采用非均匀采样的快速傅里叶变换 USFFT 算法^[14]。

2.2 基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强

2.2.1 人类视觉系统的两种掩蔽特性

人眼视觉系统中存在亮度遮蔽 (LM) 特性, 通常表现为: 人眼视觉的敏感度随所观察环境的亮度呈非线性变化, 就是眼睛观察到环境亮度越高,

眼睛相应地对亮度就越敏感。研究人员发现人眼的这种特性符合心理学的韦伯—费希纳定律, 方程如下所示:

$$\Delta I / I = K \quad (1)$$

其中, I 为人眼受到的激励程度, ΔI 为能察觉到的激励极小值, K 为韦伯常量, 一般为 0.015 左右。由于 K 不变, ΔI 随 I 变大而变大, 但当 I 很小时, 式 (1) 不成立, ΔI 极小, 两者呈非线性关系。研究表明, 式 (1) 只在中等的亮度区才成立。也就是说, 人眼视觉特性函数需分段表达, 一般将它分为 4 部分, 如图 1 所示, x 轴为刺激强度, 用亮度的对数来表示, y 轴为人眼的最小可觉差, 这里也用最小可觉差的对数表示, 第一部分为低对比度区域, 该区域刺激强度过低, 人眼无法感受其变化; 第二部分为低亮度部分, 斜率一般为 0.5 左右, 定义为德弗里斯区^[15]; 第三部分为中等亮度区域, 曲线斜率为 1, 定义为韦伯区域^[16]; 最后一部分为高亮度区域, 该部分刺激强度饱和, 人眼视觉感受失真, 该区域定义为饱和区域^[17]。综上, 只有在第三部分韦伯区域中人眼视觉特性才有效。

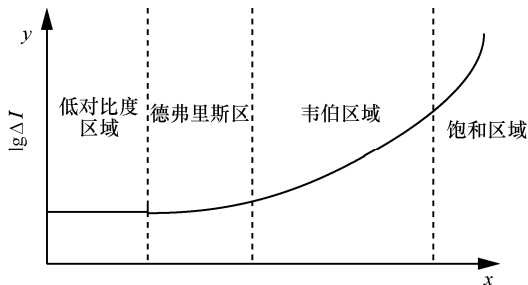


图1 人类视觉的4个区域

人类视觉系统的另一特性为亮度—对比度遮蔽 (LCM), 即人眼的视觉的敏感度与对比度的相对变化有关。该特性与亮度遮蔽性类似, 在低对比度和过高对比度的环境中, 人眼的视觉敏感度

很低, 亮度在中对比度时, 人眼视觉敏感度最高。

2.2.2 Curvelet 域紫外图像增强方法

Curvelet 变换分解过程为: 第一步利用滤波器把待处理的紫外图像分成多个高频分量和一个低频分量, 第二步再依次将每个高频分量分解到各方向。可见, Curvelet 分解具有较好的选择性和方向性。

为提高目标和背景间的对比度, 提出基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强方法, 首先利用 Curvelet 分解待处理的紫外原图, 获得低频与高频分量, 利用这些高低频信息求取 HVS 中的 CM 以及 LCM 值; 接着非线性增大 LCM 值来提升紫外图像亮度对比, 再通过 HVS 逆推算得到图像的高频分量, 同时用非线性拉伸增强原图像低频分量提高图像整体亮度; 最终将处理过的高低频分量通过 Curvelet 逆向变换, 重新构建出紫外增强图像。算法框架如图 2 所示。

LM 的函数定义如下:

$$C_{i,LM}^{(n)} = \frac{y_i^{(n)}}{a_1 + |y_0|^{|\gamma_1|}} \quad (2)$$

为避免分母为 0, 将分母加上一个常数 a_1 , 利用 γ_1 来调节亮度受周围刺激程度, y_0 为低频系数, $y_i^{(n)}$ 为高频系数, i 为分解的方向数, n 为层数。

LCM 可由 LM 得到, 其函数定义如下:

$$C_{i,LCM}^{(n)} = \frac{C_{i,LM}^{(n)}}{a_2 + |C_{i,LM}^{(n+1)}|^{\gamma_2}} \quad (3)$$

同理, 为避免分母为 0, 在分母上加一个常数 a_2 , 利用 γ_2 来调节亮度受周围的刺激程度。

HVS 变换具有逆向性, 已非线性增强的 LCM 参量可反向得到增益后的 LM 参量:

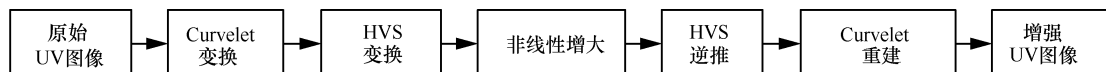


图2 基于 HVS 的 Curvelet 域紫外图像增强算法



$$C_{LM}^{(n)} = C_{LM}^{(n)} \cdot [a_2 + |C_{LM}^{(n+1)}|^{1/2}] \quad (4)$$

然后, 由增益后的 LM 参量反向变换获得 Curvelet 的高频系数:

$$y_i^{(n)} = C_{LM}^{(n)} \cdot [a_1 + |y_0|^{1/2}] \quad (5)$$

2.2.3 低频系数非线性增强

Curvelet 分解得到的低频子带主要为图像的概貌信息, 紫外图像整体对比度较低, 导致低频子带各系数差不大。因此, 若将低频信息代入拉伸函数, 函数处理后能有效增强紫外图像亮度对比。本文采用非完全 Beta 函数, 得到需要的灰度变换拟合曲线。归一化的非完全 Beta 函数如下所示:

$$I_x(x) = B^{-1}(z, w) \int_0^x t^{z-1} (1-t)^{w-1} dt \quad (6)$$

其中, $B(z, w) = \int_0^1 t^{z-1} (1-t)^{w-1} dt$ 为 Beta 函数,

$z > 0$, $w \leq 10$, 通过改变 z 和 w 拟合得到任意灰度变换曲线。如 $z = 0$ 、 $w = 10$ 时, 拟合得到灰度变换曲线, 如图 3 所示。

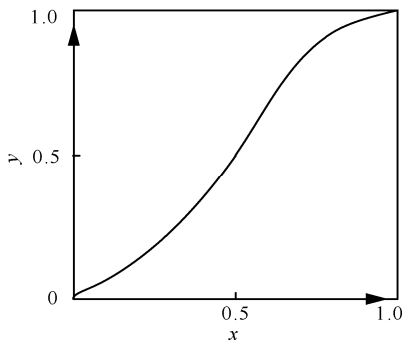


图3 非完全 Beta 函数曲线

2.2.4 LCM 系数对比度非线性增强

Curvelet 分解完成后, 得到的高频子带系数表示紫外图像的细节部分, 一般系数值大的为边缘部分, 系数值较小的为噪声部分, 常用的图像增强方法为去除系数值较小的高频分量而留下系数值较大的部分。但由于紫外图像自身对比度低, 使得高频系数普遍较小, 不易区别边缘和噪声分量, 因此若直接增强高频系数, 则必然同时增大

噪声。利用上文分析的人眼视觉对比度遮蔽特性, 即眼睛面对紫外图像亮度的相对变化比绝对变化更受刺激, 将 Curvelet 分解得的低高频系数用来计算 LCM 参量, 接着将 LCM 参量实现非线性增强, 最后再逆向获取高频分量。这里采用的增益函数如下:

$$f(x) = a \{ \text{sigma}[c(x-b)] - \text{sigma}[-c(x-b)] \} \quad (7)$$

其中, $a = \frac{1}{\text{sigma}[c(x-b)] - \text{sigma}[-c(x-b)]}$,

$\text{sigma}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$, $0 < b < 1$, 利用变量 b 来

调节增强范围, 利用 c 来调节增强强度。非线性增强函数曲线如图 4 所示。

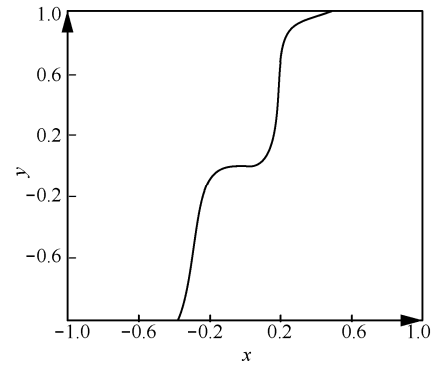


图4 非线性增强函数曲线

HVS 反向得到高频分量后, 为避免在增强边缘的同时也增强噪声, 且鉴于噪声部分大多处于最细子带, 本文对高频分量的最细子带进行阈值化。阈值设定为:

$$T = \begin{cases} 3\delta\sqrt{\delta_{j,k}}, & j=1,2,\dots,J-1 \\ \rho 3\delta\sqrt{\delta_{j,k}}, & j=J \end{cases} \quad (8)$$

其中, ρ 表示高频子带微调系数, $\delta = \text{median}[\text{abs}(c)]/0.6745$, c 表示分解完成后最细子带参量值。

2.2.5 算法实现步骤

提出的基于 HVS 和 Curvelet 的紫外图像增强算法的基本步骤如下。

步骤 1 采用 Curvelet 分解原始紫外图像, 获

取其低频分量系数 C_0 以及各个尺度各个方向高频分量系数 $C_{j,k} (1 \leq j \leq J, 1 \leq k \leq 2^j)$ 。 j 为尺度, k 为方向, 2^j 为各个尺度中分解后的方向个数。

步骤 2 将步骤 1 得到的各高低频分量系数代入式 (3)、式 (4), 计算 HVS 的 CM 参量和 LCM 参量。

步骤 3 将 LCM 参量代入式 (7) 实现非线性增强, 达到提升紫外图像亮度对比的目的。接着利用式 (4)、式 (5) 进行 HVS 反变换得到增强后高频分量, 并利用式 (8) 进行阈值化, 去除残留的紫外噪声。

步骤 4 利用式 (6) 灰度拉伸来增强原紫外图像的低频分量系数 C_0 , 提升紫外图像的整体亮度, 克服图像过暗的缺陷。

步骤 5 将已增强的各高低频分量系数经过 Curvelet 逆向重建, 得到增强后的紫外图像。

3 实验结果分析

增强效果的评价可以从定性与定量两方面进行, 人眼的主观感受是最直接有效的评价标准。但当图像处理前后的变化不是非常明显时, 人类视觉就很难判断了, 所以还需要定量评价, 采用图像的熵^[18]来定量评价增强后图像所含信息量的大小, 计算得到的熵越大, 则紫外图像里涵盖的有用信息越多, 利用对比度增益来评价图像对比增强程度。

图 5 (a)、图 6 (a)、图 7 (a) 表示紫外图像的对比度较低, 整体偏暗, 这就需要在增强图像目标的同时抑制背景, 突出目标。图 5 (b)、图 6 (b)、

图 7 (b) 为进行直方图均衡化后的增强结果, 可见它的亮度动态区间取得了很大延伸, 提高了亮度对比, 但是会出现局部增强效应过度的现象, 且其增强程度不便于调控, 整幅图像进行全部均衡化后, 图像背景也相应增强了, 目标与背景相融合, 没有突出目标。图 5 (c)、图 6 (c)、图 7 (c) 为使用参考文献[19]的增强方法得到增强的效果, 可以看出, 其图像亮度 and 对比度都得到一定的提升, 但是细节不突出, 边缘不明显。图 5 (d)、图 6 (d)、图 7 (d) 为本文方法得到的效果, 可见增强后的图像不仅提升了放电目标与背景的亮度对比, 而且增强了局部细节, 突出边缘和目标轮廓信息, 同时也有效地抑制了残留噪声。

在定量评价时, 通过计算熵以及对比度增益两项指标来衡量, 其中, 熵表示紫外图像中涵盖的有用信息量, 即所得的熵越大, 表示紫外图像的有用信息就越多, 则经过增强后细节部分被保留下来的就越多; 而对比度增益 G 由计算式 $G = C'_{\text{contrast}} / C_{\text{contrast}}$ 得到, 其中, C'_{contrast} 与 C_{contrast} 分别指增强前后图像的对比度, G 越大表示放电目标与背景对比越明显, 图像对比度越强。从表 1 可以看出, 直方图均衡化整体亮度过强, 对比度增益明显导致目标不突出, 但熵较小表示图像中的细节信息丢失较多; 参考文献[18]中对比度增益降低, 同时熵值不高表示细节信息也有所丢失; 提出算法在对比度增益和熵之间达到平衡, 在对比度增益和图像细节保持方面都有了较好的效果, 增强放电光斑亮度的同时抑制背景, 而前两种对比算法易将背景误增强至放电状态的亮度, 造成放电目标的误判,

表 1 紫外图像增强效果定量评价

图像	原图	熵			对比度增益		
		直方图均衡化	参考文献[19]算法	提出算法	直方图均衡化	参考文献[19]算法	提出算法
图 5	6.855 4	5.943 3	7.345 1	7.783 7	18.69	15.56	8.14
图 6	6.176 2	5.693 5	6.573 6	7.352 4	11.82	9.31	6.87
图 7	6.012 7	5.524 1	6.401 1	7.236 9	8.45	6.78	4.33

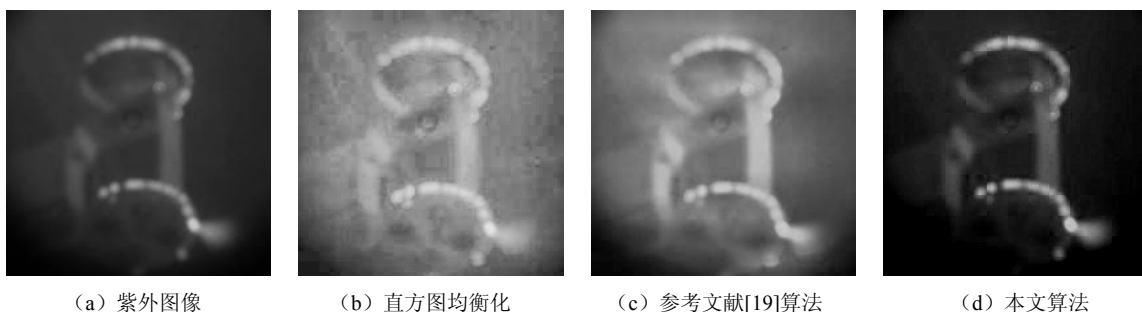


图5 紫外图像1的增强结果

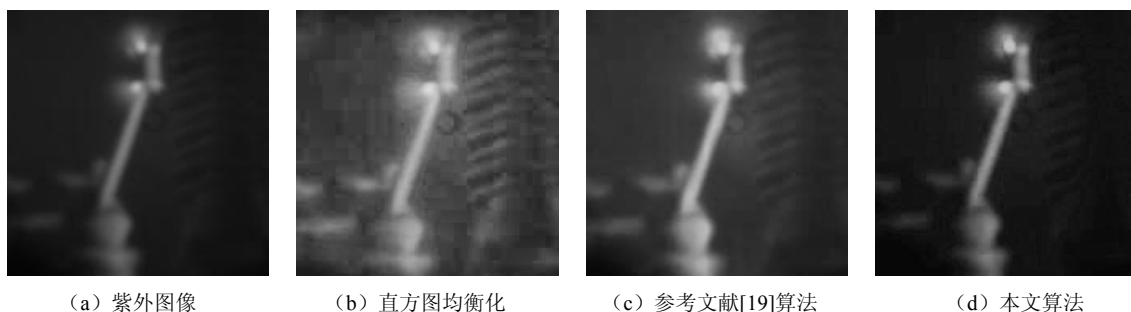


图6 紫外图像2的增强结果

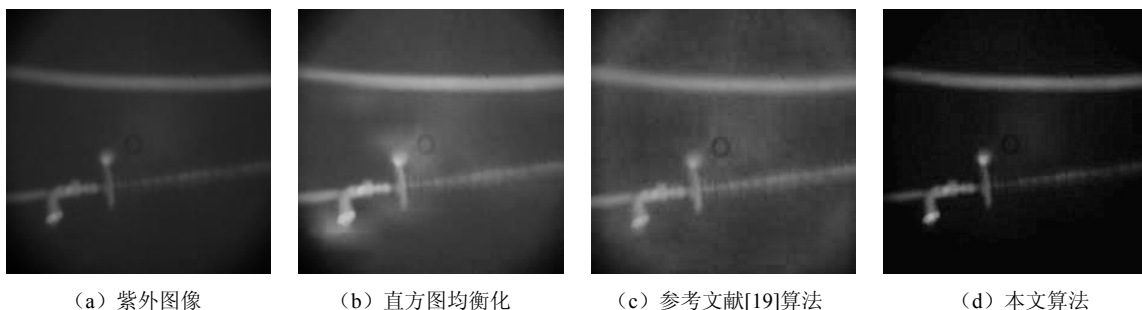


图7 紫外图像3的增强结果

可见提出算法的综合表现优于对比算法。

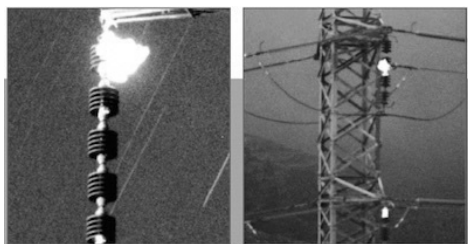
紫外成像技术能广泛应用于高压污秽检查和绝缘子放电检测中。在高压污秽检查中,利用紫外成像技术,可以有效对导线的污染程度及绝缘子上污染物的分布情况等情况进行分析,并且为防止污闪发生和科学制定的检修计划提供依据。在绝缘子放电检测中,利用紫外成像技术可以观察到电晕,从而对放电的绝缘子进行定位并评估其危害性。

4 在电力系统应用分析

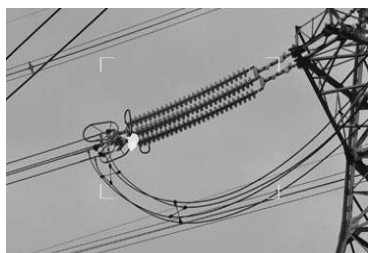
图5(a)、图6(a)、图7(a)中3幅图像分别是绝缘子放电、连接松动放电和导线污秽放电,

在原图中,图像质量较差,比较模糊,放电现象不明显,而在图5(d)、图6(d)、图7(d)中,经过本文算法增强后,放电点较为清晰,更容易帮助工作人员发现线路故障。

紫外成像技术能广泛应用于高压污秽检查和绝缘子放电检测中,如图8所示。在高压污秽检查中,利用紫外成像技术,可以有效地对导线的污染程度及绝缘子上污染物的分布情况等情况进行分析,并且为防止污闪发生和科学制定的检修计划提供依据。在绝缘子放电检测中,利用紫外成像技术可以观察到电晕,从而对放电的绝缘子进行定位并评估其危害性。



(a) 高压污秽检测



(b) 绝缘子放电检测

图8 紫外成像技术应用场景

5 结束语

从人眼视觉的掩蔽特性出发,提出了一种基于人眼视觉特性的 Curvelet 域紫外图像增强算法。在 Curvelet 域,根据人眼视觉特性分别对高低频进行非线性增益,与其他增强算法相比,提出的方法能够有效增强紫外图像对比度,同时抑制残留噪声,增强后的图像符合人眼视觉对图像信息的提取,突出了边缘和目标的轮廓信息,在主观视觉和定量指标方面都可以看到显著的效果。

参考文献:

- [1] 陈磊. 紫外检测技术在云南电网的应用[J]. 云南电力技术, 2009, 37(3): 29-30.
CHEN L. Application of ultraviolet detecting technology in Yunnan Power Grid[J]. Yunnan Electric Power, 2009, 37(3): 29-30.
- [2] 寇晓适, 卢明, 夏中原, 等. 紫外放电检测在电力系统设备状态检修的应用[J]. 河南电力, 2008(1): 1-5.
KOU X S, LU M, XIA Z Y, et al. Application of ultraviolet discharge detection in state maintenance of power system equipment[J]. Henan Electric Power, 2008(1): 1-5.
- [3] 李传才, 魏泽民. 紫外成像检测变电设备电晕放电的实际应用[J]. 浙江电力, 2012(4): 54-56.
LI C C, WEI Z M. Practical application of ultraviolet imaging to detection of substation equipment corona discharge[J].

Zhejiang Electric Power, 2012(4): 54-56.

- [4] 尹立敏, 张东建, 陶玉忠. 基于数学形态学的电晕日盲紫外图像处理方法研究[J]. 东北电力大学学报, 2013(1): 148-151.
YIN L M, ZHANG D J, TAO Y Z. Corona solar blind ultraviolet image detecting method[J]. Journal of Northeast Dianli University(Natural Science Edition), 2013(1): 148-151.
- [5] HUMMEL R. Image enhancement by histogram transformation[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1977(6): 184-195.
- [6] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [7] 崔克彬, 李宝树, 徐雪涛, 等. 基于图像增强技术的电气设备热故障自动诊断与定位[J]. 红外技术, 2014, 36(2): 162-167.
CUI K B, LI B S, XU X T, et al. Automatic diagnosis and positioning of electrical equipment thermal faults based on image enhancement technology[J]. Infrared Technology, 2014, 36(2): 162-167.
- [8] 吴颖谦, 施鹏飞. 基于小波变换的低对比度图像增强[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 3-7.
WU Y Q, SHI P F. Approach on image contrast enhancement based on wavelet transform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 3-7.
- [9] 赵季红, 雷佩, 王伟华, 等. 基于小波变换的 RLS 波束成形算法研究[J]. 电信科学, 2015, 31(2): 108-112.
ZHAO J H, LEI P, WANG W H, et al. RLS beamforming algorithm based on wavelet transform[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 108-112.
- [10] 李丹, 王慧倩, 柏桐, 等. 基于双数复小波变换和形态学的脉搏信号去噪[J]. 电信科学, 2016, 32(12): 93-98.
LI D, WANG H Q, BAI T, et al. De-noising method of pulse signal based on double-tree complex wavelet transform and morphological filtering[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(12): 93-98.
- [11] 徐妮妮, 张明明, 汪剑鸣. 纯二维 5/3 小波变换及其在 CT 图像无损压缩中的应用[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 73-82.
XU N N, ZHANG M M, WANG J M. True 2-D 5/3 wavelet transform and its application for CT image lossless compression[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 73-82.
- [12] SHAHAN C N, KAREN A P, SOS S A. Non-linear direct multi-scale image enhancement based on the luminance and contrast masking characteristics of the human visual system[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 3549-3561.
- [13] CANDLES E, DEMANET L, DONOHO D, et al. Fast discrete curvelet transforms[J]. Multiscale Modeling & Simulation, 2006, 5(3): 861-899.
- [14] 杨家红, 何明志, 余利忠, 等. 结合 USFFT Curvelet 变换的各向异性扩散图像去噪模型[J]. 通信学报, 2009, 30(1): 82-87.
YANG J H, HE M Z, SHE L Z, et al. Image de-noising model integrating anisotropic diffusion with USFFT Curvelet trans-



- form[J]. Journal on Communications, 2009, 30(1): 82-87.
- [15] PANETTA K A, WHARTON E J, AGAIAN S S. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(1): 174-188.
- [16] BUCHSBAUM G. An analytical derivation of visual nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1980(5): 237-242.
- [17] PANETTA K, ZHOU Y, AGAIAN S, et al. Nonlinear unsharp masking for mammogram enhancement[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2011, 15(6): 918-928.
- [18] PANETTA K A, WHARTON E J, AGAIAN S S. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(1): 174-188.
- [19] 石丹, 李庆武, 倪雪. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 342-346.
- SHI D, LI Q W, NI X. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on Contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 342-346.

[作者简介]



张斌(1973-), 男, 江苏电力信息技术有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为模式识别。



吴鹏(1979-), 男, 江苏电力信息技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为知识发现、模式识别。



袁杰(1981-), 男, 江苏电力信息技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为机器学习、模式识别。

孙凌卿(1982-), 男, 现就职于江苏电力信息技术有限公司, 主要研究方向为图像处理。

傅启明(1980-), 男, 江苏电力信息技术有限公司助理工程师, 主要研究方向为图像处理。

张永泽(1991-), 男, 现就职于江苏电力信息技术有限公司, 主要研究方向为图像处理。

陆宇(1990-), 男, 现就职于江苏电力信息技术有限公司, 主要研究方向为图像处理。