

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.023

面向电力设备红外图像的混合噪声去除方法研究

刘云鹏^{1,2}, 王 权¹, 刘一瑾¹, 杨 宁³, 韩 帅³, 贾鹏飞³, 和家慧¹

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 电力设备的红外图像在采集传输过程中, 易受高斯噪声与脉冲噪声的影响从而破坏图像的真实信息, 为满足图像处理过程对图像质量的要求, 文中提出了一种针对红外图像混合噪声的滤除方法。首先利用三方加权稀疏编码(TWSC)模型有效滤除红外图像中的高斯噪声, 然后利用图像结构纹理分解结合中值滤波算法实现剩余脉冲噪声的分离与去除, 实现在滤除红外图像混合噪声的同时较好地保持图像的边缘结构信息, 结合实例分析表明文中方法能够有效滤除噪声并获得较高的峰值信噪比(*PSNR*)与结构相似度(*SSIM*)。

关键词: 混合噪声; 三方加权稀疏编码; 图像分解; 中值滤波

Research on Mixed Noise Removal Method for Infrared Image of Power Equipment

LIU Yunpeng^{1,2}, WANG Quan¹, LIU Yijin¹, YANG Ning³, HAN Shuai³, JIA Pengfei³, HE Jiahui¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the process of acquisition and transmission, the infrared image of power equipment is easily affected by Gaussian and impulse noise, thus destroying the real information of the image. In order to meet the requirements of image quality to the process of image processing, a kind of filtering method aiming at the mixed noise of the infrared image is proposed in this paper. Firstly, the Gaussian noise in the infrared image is filtered out effectively by using trilateral weighted sparse coding (TWSC) model, and then the separation and removal of residual impulse noise is achieved by the combination of image structure and texture decomposition and median filtering algorithm so that the edge structure information of the image can be well preserved while the mixed noise of the infrared image is filtered. It is shown with combination of example that the method in this paper can effectively filter out noise and obtain higher peak signal to noise ratio (*PSNR*) as well as structural similarity (*SSIM*).

Key words: mixed noise; trilateral weighted sparse coding; image decomposition; median filtering

0 引言

电力设备作为电力系统的重要组成部分, 其运行状态关乎整个电网系统的安全与社会用电稳定, 因此, 针对电力设备的状态检测受到了更为广泛的关注。其中, 红外监测技术作为一种非接触、高灵敏、高准确性的设备状态诊断方法^[1-10], 在维护设备安全稳定运行中起着重要作用, 其主要通过红外辐

射检测设备的温度分布, 及时掌握设备的温度变化, 进而对设备的发热故障情况做出诊断分析。而且随着数字化、信息化在电力设备运维工作中的深入发展, 特征提取、目标检测等与图像处理相关的技术也得到了更为广泛的探索应用^[11-15]。

但电力设备的红外图像在采集、传输过程中, 往往会受到噪声影响造成图像失真, 破坏图像中的有用信息, 进而对目标识别、提取等后续图像处理

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5500-202055096A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Program of SGCC(5500-202055096A-0-0-00).

过程造成影响,因此,图像去噪是图像预处理领域不可或缺的重要步骤^[16]。

受传感器、传输信道以及环境因素影响而产生的高斯噪声和脉冲噪声是图像中的常见噪声污染^[17]。文[18]利用噪声信号的灰度特性和局部统计规律对图像噪声进行检测,在此基础上针对图像的平滑区域和细节区域分别采用ATMF算法和GWMF算法实现图像脉冲噪声的滤除,并且能够较好地保持图像边缘信息。文[19]提出一种基于双加权 L_p 范数的改进鲁棒主成分分析模型,应用于图像脉冲噪声的去除,与已有的近似RPCA模型相比,在去噪效果与时间复杂度方面均表现较优。文[20]采用两个并行的卷积神经网络模块分别实现图像降噪与边缘提取,并将二者融合得到去噪图像,在滤除图像高斯噪声的同时较好地保护图像的边缘细节和纹理特征。文[21]结合转向核回归模型与图像引导滤波,利用核回归的滤波权重来优化图像引导滤波器,实现红外图像中高斯噪声的滤除。文[22]采用改进的自适应NLMF算法与非下采样轮廓波变换相结合实现红外图像中高斯噪声的滤波处理,并结合实验验证了所提方法在不同噪声强度下均具有较好的滤波效果。已有的去噪方法大多仅针对单一噪声的滤除,但红外图像中的噪声往往以混合噪声的形式存在。

文中针对电力设备红外图像中存在的高斯噪声和脉冲噪声,提出一种混合噪声滤除方法。首先利用三方加权稀疏编码模型对红外图像中的高斯噪声进行有效滤除,然后利用图像结构纹理分解将图像的结构成分和纹理成分分离,并结合中值滤波去除表现在纹理部分的残余脉冲噪声,避免不同去噪方法的运用使图像细节信息模糊,达到在滤除混合噪声的同时较好地保持图像边缘信息与纹理特征的目的。最后利用实际电力设备红外监测图像进行去噪仿真,结合峰值信噪比与结构相似度指标验证了文中去噪方法的有效性,在噪声滤除效果以及结构细节保持方面均优于对比方法。

1 混合噪声滤除算法研究

为有效去除红外图像中的混合噪声,文中利用TWSC模型、图像结构纹理分解以及中值滤波算法对含有混合噪声的红外图像进行分步骤噪声滤除,结合TWSC模型与中值滤波算法分别对高斯噪声和脉冲噪声的良好去噪特性,并引入结构纹理分解算法避免图像的结构信息模糊,在有效滤除混合噪声的同时,使图像的细节信息得到保护。

1.1 TWSC模型

三方加权稀疏编码(trilateral weighted sparse coding, TWSC)^[23]是一种基于传统稀疏编码模型提出的面向真实图像去噪的方法,在高斯噪声滤除方面表现出较优的性能。传统的稀疏编码(sparse coding, SC)模型应用于图像去噪领域,根据稀疏编码框架,通过以下方法可以获得输入噪声矩阵 Y 的稀疏矩阵

$$\hat{C} = \arg \min_C \|Y - DC\|_F^2 + \lambda \|C\|_1 \quad (1)$$

式(1)中: λ 为正则化参数; D 为稀疏编码字典; C 为稀疏矩阵。计算得到 $\hat{C}$ 后,通过 $\hat{X} = D\hat{C}$ 得到去噪后的图像 $\hat{X}$ 。

但在处理含有复杂噪声图像的去噪问题上,传统SC模型的效果并不理想^[24],TWSC算法提出利用图像噪声的局部信号相关特性和通道统计特征,达到更好的去噪性能。具体地,TWSC模型在传统的稀疏编码模型的数据保真度术语 $Y-DC$ 中引入了两个权重矩阵 W_1 、 W_2 ,以自适应地表征不同通道不同图像块中的噪声统计数据;在正则化术语中引入了另一个权重矩阵 W_3 ,以更好地利用图像的稀疏先验。TWSC模型表示为

$$\min_C \|W_1(Y - DC)W_2\|_F^2 + \|W_3^{-1}C\|_1 \quad (2)$$

式(2)的TWSC模型中的权重矩阵 W_1 、 W_2 、 W_3 均设置为对角矩阵, W_1 矩阵具有3个块,块中相同的对角元素用以描述相对应的图像R通道、G通道、B通道所具有的噪声特性; W_2 矩阵中的每一个对角元素用于描述局部图像块的噪声方差,即分别用 W_1 和 W_2 矩阵来规范残差矩阵 $(Y-DC)$ 的行差异和列差异。对于矩阵 W_3 ,基于系数矩阵 C 的稀疏先验来设置每个对角元素,参数 λ 隐含于 W_3 内。

1.2 图像的结构纹理分解

结构纹理分解^[25]可以将任意图像分解为结构部分和纹理部分,结构部分包含了图像中较平滑的成分和慢变部分,纹理部分则包含了图像的快变部分,如边缘部分和噪声。TV-L₁模型是常用于图像分解的经典方法^[26],基于TV-L₁模型,文中采用一种分解效果更优的结构梯度和纹理去相关(structure gradient and texture decorrelating, SGT D)算法实现图像分解^[27],SGTD模型包括有数据保真度项、全变分正则化项以及SGTD正则化项3个部分

$$x = \arg \min_x \left\{ \frac{\mu}{2} \|f - x\|_2^2 + \eta \sum_{i=1}^n \|D_i x\|_2 + \sum_{i=1}^{n^2} |f_i - x_i| \cdot \|D_i x\|_2 \right\} \quad (3)$$

式(3)中: f 为目标图像; x 为结构分量。当系数 η 趋于0时,该模型可以看作是加权的TV-L₁方法

$$x = \arg \min_x \left\{ \frac{\mu}{2} \|f - x\|_2^2 + \sum_{i=1}^{n^2} |f_i - x_i| \cdot \|D_i x\|_2 \right\} = \arg \min_x \left\{ \sum_{i=1}^{n^2} |f_i - x_i| \cdot \left(\frac{\mu}{2} |f_i - x_i| + \|D_i x\|_2 \right) \right\} \quad (4)$$

在式(4)的形式下,模型可以看作是权重为 $w_i = |f_i - x_i|$ 的加权TV-L₁模型,SGTD算法继承了TV-L₁模型对比度保持等优势,同时由于SGTD算法采用了非线性公式,与TV-L₁模型相比较,提高了模型的自由度和鲁棒性。在此基础上,引入增广的拉格朗日方法(augmented Lagrangian, AL)处理该非线性问题,提高了算法的解决效率。具体地,对于形如式(5)的模型

$$\begin{cases} \min_{x,y,z} \left\{ \frac{\mu}{2} \|z\|_2^2 + \sum_{i=1}^{n^2} (\eta + |z_i|) \cdot \|y_i\|_2 \right\} \\ \text{s.t. } y_i = D_i x \quad i = 1, \dots, n^2 \\ z = f - x \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $y_i \in R^2$, 利用增广拉格朗日方法求解, 令 $y = [y_1, \dots, y_{n^2}]$, $\lambda_1 = [\lambda_{11}, \dots, \lambda_{1n^2}]$, 表达式为

$$\begin{aligned} (x^{k+1}, z^{k+1}, y^{k+1}) = \\ \arg \min_{x,z,y} \sum_{i=1}^{n^2} (\eta + |z_i|) \cdot \|y_i\|_2 - \lambda_{1i}^T (y_i - D_i x) + \frac{\mu}{2} \|z\|_2^2 + \\ \frac{\beta_1}{2} \sum_{i=1}^{n^2} \|y_i - D_i x\|^2 - \lambda_2^T (z - x + f) + \frac{\beta_2}{2} \|z - x + f\|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

迭代求解过程中利用式(7)–(10)对 y, z, x 和 λ 进行更新:

$$y_i^{k+1} = \max \left\{ \|D_i x^k + \lambda_1^k / \beta_1\|_2 - (\eta + |z_i^k|) / \beta_1, 0 \right\} \cdot \frac{D_i x^k + \lambda_1^k / \beta_1}{\|D_i x^k + \lambda_1^k / \beta_1\|_2} \quad (7)$$

$$z^{k+1} = \text{sgn} \left\{ \frac{\beta_2}{\mu + \beta_2} (x^k - f + \lambda_2^k) / \beta_2 \right\} \odot \max \left\{ \frac{\beta_2}{\mu + \beta_2} (x^k - f + \lambda_2^k) / \beta_2 - \beta_2 \|D x^k\| / (\mu + \beta_2), 0 \right\} \quad (8)$$

$$x^{k+1} = F^{-1} \left\{ \frac{F(\beta_1 D^T (y^{k+1} - \lambda_1^k / \beta_1) + \beta_2 (z + f - \lambda_2^k / \beta_2))}{\beta_1 F^*(D) F(D) + \beta_2} \right\} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_1^{k+1} = \lambda_1^k - \beta_1 (y^{k+1} - D x^{k+1}) \\ \lambda_2^{k+1} = \lambda_2^k - \beta_2 [z^{k+1} - (x^{k+1} - f)] \end{cases} \quad (10)$$

通过增广的拉格朗日方法,将原非线性问题转化为一组易于求解的子问题,提高了模型的处理效率,使SGTD算法可以有效处理各种复杂图像的分解问题。

1.3 中值滤波

中值滤波是一种可以有效滤除脉冲噪声的非线性滤波算法^[28],并且在抑制噪声的同时可以较好地保护图像边缘特征^[29–30]。该方法的基本思想是用某像素点邻域窗口内所有像素点灰度值的中值来代替该像素点的灰度值,中值滤波的主要工作步骤为^[31]:

- 1) 选定窗口大小后,在图像中遍历模板,使模板中心和图中某个像素位置重合;
- 2) 选择模板对应的像素点的灰度值并将其按照升序排列;
- 3) 以中值替代模板中心对应的像素点,作为新的灰度值。

2 实验分析

为验证文中所提方法的有效性,选取实际电力设备的红外监测图像进行方法验证,通过在图像中添加高斯噪声和脉冲噪声构成含有混合噪声的红外图像,然后运行文中算法进行噪声滤除,并与三维块匹配滤波(block-matching and 3D filtering, BM3D)^[32]、非局部均值(non-local means, NLM)^[33]算法和小波阈值收缩去噪算法^[34]对混合噪声的滤除结果进行比较。

2.1 算法流程

文中采用算法的具体流程见图1:

- 1) 利用TWSC算法对含有混合噪声的红外图像进行初步去噪,实现高斯噪声的有效滤除;
- 2) 进行图像结构纹理分解,并结合中值滤波对纹理部分的剩余脉冲噪声进行滤除,在保护图像结构信息的同时实现混合噪声的去除;
- 3) 对去噪后的纹理分量与结构分量重构,得到去噪后的红外图像。

2.2 评价指标

除人为主观的视觉效果外,为客观评价比较文中所提方法的噪声滤除效果,为去噪结果采用峰值信噪比PSNR(peak signal to noise ratio)和结构相似度SSIM(structural similarity)作为评价指标来定量分析各去噪方法的性能^[35],PSNR通过比较对应图像像素点之间像素值的误差对图像质量进行评估,SSIM利用图像的亮度、对比度和结构信息3个方面的度量值来评估图像相似性,PSNR和SSIM的值越大,表明滤波效果越好,二者的计算见式(11)、(12)。

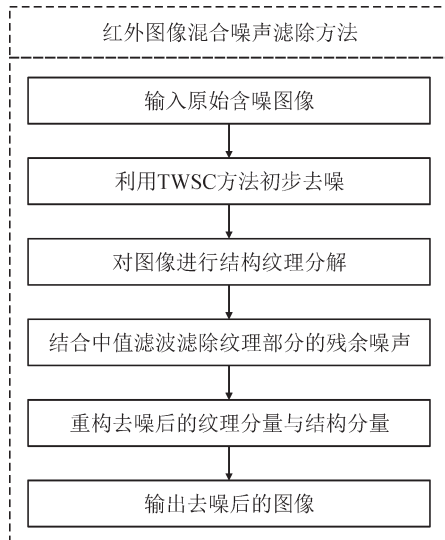


图1 去噪算法流程

Fig. 1 Process of denoising algorithm

$$\begin{cases} PSNR = 10 \lg \frac{(f_{\max} - f_{\min})^2}{MSE} \\ MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u(i) - \hat{u}(i)]^2 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 表示图像最大和最小像素; $u(i)$ 和 $\hat{u}(i)$ 分别表示原始图像 u 和去噪图像 $\hat{u}$ 在像素点 i 处的灰度值; N 表示图像中像素点的数量。

$$\begin{cases} SSIM(x, y) = l(x, y) \cdot c(x, y) \cdot s(x, y) \\ l(x, y) = \frac{2\mu_x \mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \\ c(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \\ s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 、 $s(x, y)$ 分别表示对图像亮度、图像对比度以及结构特性的比较度量; μ_x 和 μ_y 分别表示两个图像块的均值; σ_x 和 σ_y 表示它们的标准差; σ_{xy} 则表示它们之间的协方差; C_1 、 C_2 、 C_3 均为常量。

2.3 实例验证

具体地, 文中选取3幅实际红外监测图像进行去噪仿真, 将3幅原图分别命名为红外图像1、红外图像2、红外图像3。向原图中添加均值为0, 不同方差值的高斯噪声和不同噪声密度的脉冲噪声形成含有混合噪声的图像, 运行前述方法实现噪声滤除, 并利用BM3D、NLM以及小波阈值算法对添加的混合噪声进行去噪后与文中方法进行比较。

3幅红外图像在添加混合噪声为(0.03, 3)、(0.05, 5)、(0.07, 7)、(0.09, 9)下运行文中去噪方法及对比算法的 $PSNR$ (dB)和 $SSIM$ 值见表1~3。其中添加方差为0.07的高斯噪声和噪声密度为7%的脉冲噪声时, 3幅图像运行不同去噪算法后的去噪结果分

别见图2~4。从去噪后图像的视觉效果可以看出对比方法去噪后会有噪声残留或者细节信息模糊, 相比之下文中方法在噪声的消减滤除方面以及图像边缘细节的保持能力方面整体优于对比算法, 并且根据3幅图像的 $PSNR$ 和 $SSIM$ 的定量评价指标, 文中方法在不同噪声水平下的平均计算结果要大于对比算法, 相较于3种对比算法, 文中方法的 $PSNR$ 值平均提升2.14、1.96、2.44 dB, $SSIM$ 值平均提升0.02、0.06、0.09。

表1 红外图像1去噪结果定量评价($PSNR/SSIM$)Table 1 Infrared image 1 quantitative evaluation of denoising results($PSNR/SSIM$)

混合噪声(方差, 密度/%)	BM3D	NLM	小波阈值	文中方法
(0.03, 3)	23.89/ 0.55	22.97/ 0.48	21.73/ 0.45	25.53/ 0.57
(0.05, 5)	21.72/ 0.52	21.23/ 0.46	20.48/ 0.44	23.54/ 0.55
(0.07, 7)	20.06/ 0.50	19.79/ 0.44	19.19/ 0.43	21.87/ 0.53
(0.09, 9)	18.55/ 0.48	18.40/ 0.43	17.90/ 0.41	20.25/ 0.51

表2 红外图像2去噪结果定量评价($PSNR/SSIM$)Table 2 Infrared image 2 quantitative evaluation of denoising results($PSNR/SSIM$)

混合噪声(方差, 密度/%)	BM3D	NLM	小波阈值	文中方法
(0.03, 3)	22.40/ 0.15	22.44/ 0.13	22.07/ 0.13	24.16/ 0.16
(0.05, 5)	20.22/ 0.14	20.42/ 0.12	19.97/ 0.11	22.27/ 0.15
(0.07, 7)	18.51/ 0.13	18.78/ 0.12	18.37/ 0.10	20.61/ 0.14
(0.09, 9)	17.16/ 0.12	17.44/ 0.11	17.17/ 0.10	19.19/ 0.13

表3 红外图像3去噪结果定量评价($PSNR/SSIM$)Table 3 Infrared image 3 quantitative evaluation of denoising results($PSNR/SSIM$)

混合噪声(方差, 密度/%)	BM3D	NLM	小波阈值	文中方法
(0.03, 3)	24.40/ 0.83	23.83/ 0.77	23.58/ 0.74	25.95/ 0.84
(0.05, 5)	21.96/ 0.79	21.76/ 0.74	21.49/ 0.69	23.67/ 0.81
(0.07, 7)	20.12/ 0.76	20.05/ 0.71	19.74/ 0.66	21.84/ 0.78
(0.09, 9)	18.49/ 0.71	18.49/ 0.68	18.22/ 0.62	20.25/ 0.75

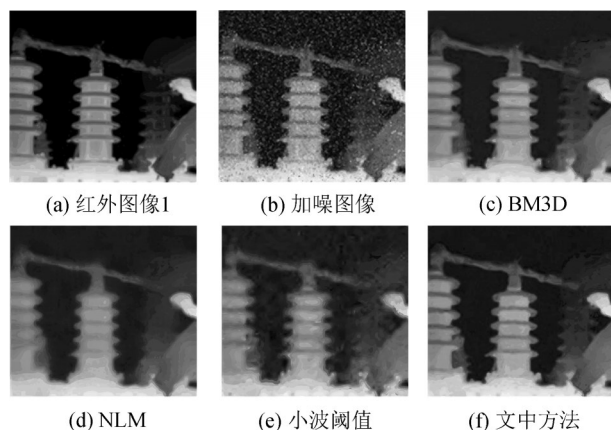


图2 红外图像1去噪结果对比

Fig. 2 Infrared image 1 denoising result comparison

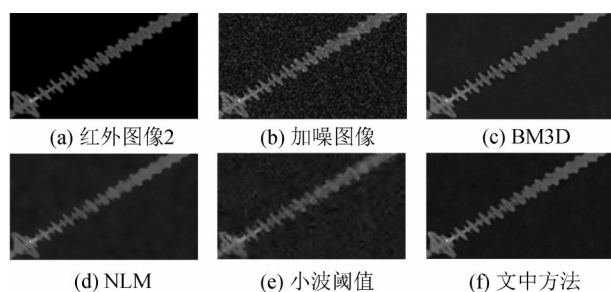


图3 红外图像2去噪结果对比

Fig. 3 Infrared image 2 denoising result comparison

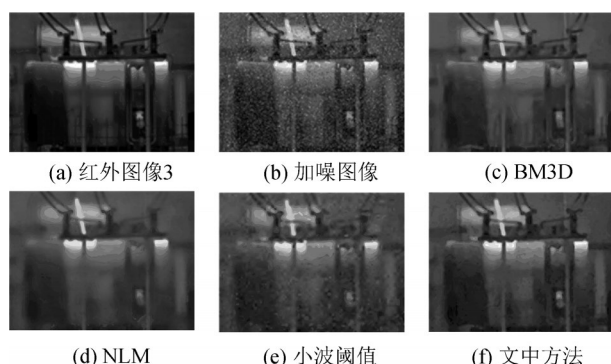


图4 红外图像3去噪结果对比

Fig. 4 Infrared image 3 denoising result comparison

3 结语

文中针对电力设备红外图像提出了一种混合噪声滤除的方法,首先利用三方加权稀疏编码模型对红外图像中的高斯噪声进行初步滤除,然后结合图像结构纹理分解和中值滤波算法对含有剩余脉冲噪声的纹理部分进行针对性的去噪处理,结构部分得到有效的保持,最后将去噪后的纹理分量与结构分量重构。结合实验分析表明,相较于传统算法,文中方法在去噪效果及细节保持方面均具有较优的效果。

参考文献:

- [1] 王旭红,李浩,樊绍胜,等.基于改进SSD的电力设备红外图像异常自动检测方法[J].电工技术学报,2020,35(z1):302-310.
WANG Xuhong, LI Hao, FAN Shaosheng, et al. Infrared image anomaly automatic detection method for power equipment based on improved single shot multi box detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(z1): 302-310.
- [2] 王业,崔玉,陆兆沿,等.基于CNN图像识别算法的保护装置智能巡视技术研究[J].电力工程技术,2022,41(6):252-257.
WANG Ye, CUI Yu, LU Zhaoyan, et al. Intelligent inspection technology of protection device based on convolution neural network image recognition algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 252-257.
- [3] 韩谷静,何敏,雷宇航,等.基于改进U-Net的输电线路绝缘子图像分割方法研究[J].智慧电力,2022,50(3):93-99.
HAN Gujing, HE Min, LEI Yuhang, et al. Image segmentation method of transmission line insulator based on improved U-Net[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 93-99.
- [4] 郑宾,杨海钢.一种用于红外焦平面阵列的读出电路设计[J].电子设计工程,2022,30(15):104-108.
ZHENG Bin, YANG Haigang. A design of readout circuit for infrared focal plane array[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(15): 104-108.
- [5] 邹辉,黄福珍.基于改进FAsT-Match算法的电力设备红外图像多目标定位[J].中国电机工程学报,2017,37(2):591-598.
ZOU Hui, HUANG Fuzhen. Multi-target localization for infrared images of electrical equipment based on improved FAsT-Match algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 591-598.
- [6] 姚源,刘齐悦.大口径中波红外辐射特性测量系统标定[J].电子设计工程,2022,30(2):115-119.
YAO Yuan, LIU Qiyue. Calibration for mid-IR radiometric measurement system with big aperture[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(2): 115-119.
- [7] 李腾飞.红外精确测温技术在电力设备状态检修中的应用[J].高压电器,2020,56(4):246-251.
LI Tengfei. Application of accurate infrared temperature measurement in condition maintenance of power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 246-251.
- [8] 郑宾,杨海钢.一种用于红外焦平面阵列的读出电路设计[J].电子设计工程,2022,30(15):104-108.
ZHENG Bin, YANG Haigang. A design of readout circuit

- for infrared focal plane array[J]. *Electronic Design Engineering*, 2022, 30(15): 104-108.
- [9] 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.
- [10] 代晓丰, 陈泽涛, 刘秦铭, 等. 基于红外传感的配电房变压器高温过热故障识别研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(9): 73-79.
- DAI Xiaofeng, CHEN Zetao, LIU Qinming, et al. Research on identification of transformer overheating faults in the distribution room based on infrared Temperature measurement technology[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(9): 73-79.
- [11] 姚景岩, 杨世勇, 舒征宇, 等. 基于航拍的输电线路覆冰厚度监测研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(8): 105-114.
- YAO Jingyan, YANG Shiyong, SHU Zhengyu, et al. Research on monitoring of ice - coating thickness of transmission line based on aerial image[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(8): 105-114.
- [12] 门 洪, 于加学, 秦 蕾. 基于CA和OTSU的电气设备红外图像分割方法[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(9): 92-95.
- MEN Hong, YU Jiaxue, QIN Lei. Segmentation of electric equipment infrared image based on CA and OTSU[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(9): 92-95.
- [13] 徐 凯, 梁志坚, 张懿议, 等. 基于GoogLeNet Inception-V3模型的电力设备图像识别[J]. *高压电器*, 2020, 56(9): 129-135.
- XU Kai, LIANG Zhijian, ZHANG Yiyi, et al. Image recognition of electric equipment based on GoogLeNet Inception-V3 model[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(9): 129-135.
- [14] 夏湛然, 杨 斌, 郭浩然, 等. 电缆终端红外图像过热区域提取方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(2): 12-21.
- XIA Zhanran, YANG Bin, GUO Haoran, et al. Extraction method of overheating regions in infrared images of cable terminations[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(2): 12-21.
- [15] 王晶晶, 杨俊杰. 改进Canny算法在绝缘子串红外图像边缘检测中的应用[J]. *电瓷避雷器*, 2022(3): 179-185.
- WANG Jingjing, YANG Junjie. Application of improved Canny algorithm in edge detection of high voltage insulator string[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(3): 179-185.
- [16] 王满利, 田子建, 桂伟峰, 等. 基于高斯曲率优化和非下采样剪切波变换的高密度混合噪声去除算法[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 205-220.
- WANG Manli, TIAN Zijian, GUI Weifeng, et al. High density mixed noise removal algorithm based on gaussian curvature optimization and non - subsampled shearlet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 205-220.
- [17] 袁 健, 姜振宇, 石凌峰. 基于非局部自相似性的混合噪声滤波算法[J]. *光学技术*, 2020, 46(3): 361-367.
- YUAN Jian, JIANG Zhenyu, SHI Lingfeng. The filtering algorithm for mixed noise based on nonlocal self similarity [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(3): 361-367.
- [18] 唐 超, 左文涛, 李小飞. 结合修剪均值与高斯加权中值的图像去噪算法[J]. *计算机工程*, 2021, 47(9): 210-216.
- TANG Chao, ZUO Wentao, LI Xiaofei. Image denoising algorithm based on trimmed mean and Gaussian weighted median[J]. *Computer Engineering*, 2021, 47(9): 210-216.
- [19] 董惠雯, 禹 晶, 郭乐宁, 等. 双加权Lp范数RPCA模型及其在椒盐去噪中的应用[J]. *数据采集与处理*, 2021, 36(1): 133-146.
- DONG Huiwen, YU Jing, GUO Lening, et al. Dual - Weighted Lp-norm RPCA model and its application in salt-and-pepper noise removal[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2021, 36(1): 133-146.
- [20] LIU Yichang, MA Wei. Fusing edge-information in image denoising based on CNN[C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). Dalian, China: IEEE, 2020: 544-548.
- [21] KAI Kang, TINGTING Liu, XIANCHUN Xu, et al. Study of infrared image denoising algorithm based on steering kernel regression image guided filter[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Huangshan, China: IEEE, 2019: 1-3.
- [22] 韩红光. NSCT域红外图像改进非局部均值滤波算法[J]. *红外技术*, 2015, 37(1): 34-38.
- HAN Hongguang. Improved non - local means infrared image filtering algorithm based on NSCT[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(1): 34-38.
- [23] XU J, ZHANG L, ZHANG D. A trilateral weighted sparse coding scheme for real - world image denoising[J]. *The European Conference on Computer Vision*, 2018(11212): 20-36.
- [24] 张永胜, 田华伟, 肖延辉, 等. 基于三方加权稀疏编码模型的PRNU提取算法[J]. *应用科学学报*, 2019, 37(5): 704-710.
- ZHANG Yongsheng, TIAN Huawei, XIAO Yanhui, et al. PRNU extraction algorithm based on trilateral weighted sparse coding model[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2019, 37(5): 704-710.
- [25] MEYER Y. Oscillating patterns in image processing and non - linear evolution equations[M]. Boston: University Lecture Series, 2001.
- [26] 徐 静, 刘俊皓. 一种改进的原始对偶法求解TV-L1图像去噪模型[J]. *应用数学学报*, 2020, 43(4): 684-699.

- XU Jing, LIU Junhao. An improved TV-L1 image denoising model solved by primal-dual method[J]. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 2020, 43(4): 684-699.
- [27] LIU Qiegen, LIU Jianbo, DONG Pei, et al. SGT-D: Structure gradient and texture decorrelating regularization for image decomposition[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision. Sydney, Australia: IEEE, 2013: 1081-1088.
- [28] 李健, 刘孔宇, 任宪盛, 等. 基于自适应阈值的Canny算法在MRI边缘检测中的应用[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(2): 712-719.
- LI Jian, LIU Kongyu, REN Xiansheng, et al. Application of Canny algorithm based on adaptive threshold in MR Image edge detection[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(2): 712-719.
- [29] 李凯勇. 基于数据挖掘的图像特征分割技术[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(15): 60-64.
- LI Kaiyong. Image feature segmentation technology based on data mining[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(15): 60-64.
- [30] 饶成成, 罗李毅, 徐健儿. 一种适用输电线路智能巡检的人工智能图像识别方法[J]. *电器与能效管理技术*, 2022(10): 38-43.
- RAO Chengcheng, LUO Liyi, XU Jian'er. An artificial intelligence image recognition method suitable for intelligent inspection of transmission line[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2022(10): 38-43.
- [31] 张家铭, 丁迎迎. 基于深度学习的声呐图像目标识别[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(12): 133-136.
- ZHANG Jiaming, DING Yingying. Sonar image target recognition based on deep learning[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(12): 133-136.
- [32] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [33] BUADES A, COLL B, MOREL J, et al. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, 4(2): 490-530.
- [34] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, 81(3): 425-455.
- [35] 秦毅, 赵二刚. 结合Curvelet变换与加权双边滤波的图像去噪方法[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(1): 7-12.
- QIN Yi, ZHAO Ergang. On image denoising method combined with Curvelet transform and weighted bilateral filtering[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 46(1): 7-12.
- 刘云鹏(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电气设备在线监测及故障诊断的研究工作(E-mail: liuyunpeng@ncepu.edu.cn)。
- 王权(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器状态检测与故障诊断(E-mail: 1825191266@qq.com)。