

基于粒子群优化法的 Niblack 电力设备红外图像分割

李 鑫, 崔昊杨, 霍思佳, 束 江, 刘晨斐, 李 亚, 李高芳

(上海电力学院 电子与信息工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对电力设备红外图像分割效果受非均匀背景和噪声干扰等因素影响的问题, 提出了一种基于粒子群优化方法的 Niblack 设备红外图像分割算法。采用类间方差作为粒子群算法的适应度函数, 自动搜寻 Niblack 法中图像不重叠矩形邻域的最优分割阈值, 并将其用于图像的二值化分割, 从红外图像中提取出设备的目标区域。实验结果表明: 该分割算法与传统的 Otsu 等算法相比效率更高, 且误分率 (ME) 减少了 14%~78%。鲁棒性分析表明, 本算法对含较大噪声密度的红外图像分割性能优于其他传统算法, 从而有效提高了电力设备红外图像分割精度与效率。

关键词: 红外图像分割; 电力设备; Niblack 法; 粒子群算法; 鲁棒性分析

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2018)08-0780-06

Niblack's Method for Infrared Image Segmentation of Electrical Equipment Improved by Particle Swarm Optimization

LI Xin, CUI Haoyang, HUO Sijia, SU Jiang, LIU Chenfei, LI Ya, LI Gaofang

(School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The infrared (IR) image segmentation effect of power equipment is affected by non-uniform backgrounds, noise interference, among others. To solve this problem, a method of Niblack segmentation algorithm based on particle swarm optimization for infrared images of power equipment is presented. An inter-class variance is adopted as the fitness function of the particle swarm optimization algorithm to automatically search the optimal segmentation threshold value from the non-overlapping rectangular sub-block in Niblack's method. The device is extracted from the IR image target area. The experiment results indicate that the misclassification rate (ME) of the proposed method is reduced by 14%~78% compared with traditional methods such as Otsu's. The robustness analysis based on ME demonstrates that the proposed method is superior to other traditional methods in IR images with high noise density. Therefore, the detection accuracy and efficiency of IR image segmentation are improved.

Key words: infrared image segmentation, power equipment, Niblack method, particle swarm optimization, robustness analysis

0 引言

红外热成像诊断技术目前已成为电力设备诊断领域的常规手段之一^[1-3]。对设备红外图像进行有效分割, 将感兴趣区域 (ROI) 从红外图像中提取出来, 是电力设备故障智能诊断的关键环节^[4]。目前, 图像二值分割是获取电力设备红外图像 ROI 的主流方法。然而, 受红外辐射检测原理及电力设备发热特点的影响, 红外热成像质量往往受背景的非均匀性及噪声等因素的影响, 甚至存在背景亮度过高或噪声过大导致图像过分割或欠分割现象^[5-6], 从而给 ROI 的提取带

来困难。为解决上述问题, 国内外学者做了大量研究, 一般采用全局特征阈值分割法和局部特征阈值分割法两类方法。常见的全局特征阈值分割法包括最大类间方差 (Otsu) 法^[7]、最小误差阈值 (Kittler) 法^[8]、最大熵阈值分割 (Kapur) 法^[9]、粒子群算法 (PSO) 及其优化改进方法^[10-13]等。这类算法虽然在处理低噪声、弱背景辐射的红外图像时具有操作简单、运算速度快等优点, 但难以处理强噪声、弱对比度, 以及非均匀背景的红外图像^[14], 从而难以适用于电力设备红外图像 ROI 的提取与分析。而基于局部特征的阈值分割算法能够较好地分割背景非均匀、对比度低的红外

收稿日期: 2017-03-04; 修订日期: 2017-05-26。

作者简介: 李鑫 (1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备故障红外诊断。

通信作者: 崔昊杨 (1978-), 男, 教授, 博士, 从事电力设备状态检测研究, E-mail: cuihy@shiep.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61107081, 11647023), 上海市科委地方院校能力建设资助课题 (15110500900, 14110500900), 上海市自然科学基金面上项目 (17ZR1411500)。

图像,在电力设备红外图像分析领域中具备较好的优势,比较典型代表为Niblack法^[15]。但该算法的图像分割效果对修正系数的选取较为敏感,人工干预下修正系数的选择往往给分割结果带来不确定性。此外,该算法需要计算图像中各像素点的分割阈值,在红外热成像像素几何速度增长的趋势下,必然带来计算量的急剧攀升,从而导致算法程序运行效率的低下。

为提高基于局部特征阈值分割法的计算精度和效率,本文提出了一种基于粒子群优化方法的Niblack电力设备红外图像分割算法,以类间方差公式作为粒子群算法的适应度函数搜寻Niblack法处理后的图像分块邻域的最优分割阈值,采用该阈值对当前分块进行二值化处理。与传统的Otsu法、Niblack等方法相比,本算法的图像误分率大幅降低,相比于PSO+Otsu法平均耗时减少了71%,处理后的图像目标轮廓清晰、边缘细节特征明显、视觉效果良好。

1 粒子群优化的Niblack红外图像分割算法

传统Niblack法^[15]通过计算图像中各像素点对应 $r \times r$ 邻域的灰度均值和灰度标准方差得到分割阈值。设电力设备红外图像中的像素点 (x, y) 的像素值为 $g(x, y)$,在以该点为中心的 $r \times r$ 邻域内,分别计算邻域内的像素灰度均值 $m(x, y)$ 和标准方差 $s(x, y)$,采用公式 $T_{xy}(x, y) = m(x, y) + k \times s(x, y)$ 计算每个像素点的分割阈值(k 为修正系数)。为解决由较大红外图像分辨率导致的 $T(x, y)$ 计算量剧增的问题,本文在不影响分割效果的前提下对Niblack法进行了简化处理,即:由各像素点分割阈值计算简化为图像非重叠矩形邻域分割阈值计算。此外,鉴于图像的分割性能对 k 值的选取较为敏感,为获得分割精度较高的红外图像,需要在非人为干预下获取最优 k 值。实验表明:当 k 取值范围为 $[-1, 1]$ 时可以获得较好的图像分割质量,本文算法以0.05等步长在此区间内均匀取值可获取41个 k 值,以此可计算出每个邻域对应的41维阈值寻优区间 $\{T_1, T_2, \dots, T_{41}\}$ 。因此,粒子群在 n 块矩形分块邻域上的阈值寻优区间,即粒子群 n 维解空间表示为:

1维 2维 3维 ... n 维

$$\begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} & T_{1,3} & \dots & T_{1,n} \\ T_{2,1} & T_{2,2} & T_{2,3} & \dots & T_{2,n} \\ T_{3,1} & T_{3,2} & T_{3,3} & \dots & T_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{41,1} & T_{41,2} & T_{41,3} & \dots & T_{41,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于灰度级分为 $0, 1, \dots, L-1$ 的分块邻域,将其像素灰度分为 $D_1 = [0, 1, \dots, T]$ 、 $D_2 = [T+1, \dots, L-1]$ 两类,选择类间方差公式(2)^[7]作为粒子群适应度函数:

$$\sigma^2(T) = \frac{[m \times p_{D1}(T) - m_{D1}(T)]^2}{p_{D1}(T)[1 - p_{D1}(T)]} \quad (2)$$

式中: $p_{D1}(T) = \sum_{j=0}^T p_j$ 、 $m_{D1}(T) = \sum_{j=0}^T j p_j$ 分别表示

D_1 类像素群内像素出现的概率和灰度均值; m 为该邻域的灰度均值。通过PSO法搜寻邻域 n 的最大类间方差 $\sigma^2(T_1^*), \sigma^2(T_2^*), \dots, \sigma^2(T_n^*)$,以及其相对应的最优分割阈值 $T_1^*, T_2^*, \dots, T_n^*$ 。

在粒子群算法中,由于寻优空间维度较小,群粒子数设为10,最大迭代次数设为25。此外,经实验效果验证,对于本文采用的分辨率为 320×240 红外原图像,当邻域像素取 90×80 ,邻域数量取为4列3行共12块时(对红外原图像纵向边界做左右各20个像素对称延拓,以使原图像成为邻域横向像素整数倍),图像分割效果最好。通过对邻域分割阈值进行寻优,确定了解空间为12维。粒子 i 在解空间的位置标记为 $\{T_{i,1}, T_{i,2}, \dots, T_{i,12}\}$,移动速度标记为 $\{V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,12}\}$,自身找到的最优位置记为 $P_{besti} = \{P_{besti,1}, P_{besti,2}, \dots, P_{besti,12}\}$ 。所有粒子找到的全局最优位置记为 $G_{best} = \{G_{best1}, G_{best2}, \dots, G_{best12}\}$ 。通过跟踪 P_{besti} 和 G_{best} ,每个粒子按公式(3)、(4)来更新自身的速度和位置,粒子以速度 $V_{i,n}(t+1)$ 从当前位置 $T_{i,n}(t)$ 移动到下一位置 $T_{i,n}(t+1)$:

$$V_{i,n}(t+1) = \omega \times V_{i,n}(t) + c_1 \times r_1 [P_{besti,n} - T_{i,n}(t)] + c_2 \times r_2 [G_{bestn} - T_{i,n}(t)] \quad (3)$$

$$T_{i,n}(t+1) = T_{i,n}(t) + V_{i,n}(t+1) \quad (4)$$

式中: $V_{i,n}$ 和 $T_{i,n}$ 分别表示第 i 个粒子在 n 维解空间上的速度和位置; t 表示粒子群搜寻最优阈值过程中的迭代次数; ω 表示粒子的惯性权重,惯性权重的大小决定了对最优分割阈值的搜索速度,较大的惯性权重使粒子具有较大的搜索最优阈值的速度,较小的惯性权重使得对最优分割阈值的搜寻更加精细; c_1 和 c_2 为加速常数,通常 $c_1 = c_2 = 2$,代表群体将每个粒子推向局部最优分割阈值和全局最优分割阈值的统计加速项的权重; r_1 和 r_2 代表 $[0, 1]$ 之间的随机数;其中, ω 用来控制上一代粒子速度对当前粒子速度的影响,目前适应面最广的是线性递减的惯性更新策略^[16],此时惯性权重因子 ω 由式(5)决定,本文实验中算法采用此策略进行惯性权重的更新:

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{t}{G} \quad (5)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别表示惯性权重的最大值和最小值,本文采用文献[16]建议的值 $\omega_{\max} = 0.95$ 、 $\omega_{\min} = 0.4$; t 和 G 分别表示当前迭代次数和最大迭代次数,最大迭代次数用来作为终止搜索最优分割阈值的条件,算

法中 $G=25$ 。根据自适应惯性权重粒子群算法可以获得各邻域的最优分割阈值:

$$\Phi(T_1^*, T_2^*, \dots, T_n^*) = \max_{1 \leq i \leq 41} \{\sigma_1^2(T); \sigma_2^2(T); \dots; \sigma_n^2(T)\} \quad (6)$$

采用分割阈值 $T_1^*, T_2^*, \dots, T_n^*$ 对各邻域进行二值化处理。

2 实验结果与分析

本文算法的仿真试验环境为: Inter(R) Core(TM) i5-4590S CPU@3.00GHz, 4GB 内存, MATLAB R2014a。为验证本文算法的有效性, 选取图1所示5组电力设备红外图像进行分割效果对比试验。可以看出各红外图像中均存在背景不均匀现象, 图像中间部分亮度低于边缘部分亮度, 部分图像中背景亮度已经达到或超过设备局部图像亮度, 这将导致采用全局阈值的方式来分割图像时会产生过分割或者欠分割现象, 从而对设备图像 ROI 准确提取及温度场分析造成较大影响。

2.1 图像分割实验

图2所示为采用最大类间方差(Otsu)法^[7]、Kapur法^[9]、传统Niblack法^[15]、PSO+Otsu法^[17], 以及本文所用分割方法的对比实验分割效果。电力设备红外图像像素均为 320×240 。传统Niblack算法的修正系数 k 值取 0.2, 邻域窗口大小取为 90×80 。PSO+Otsu法中参数根据文献^[17]确定, $c_1=c_2=2$, 微粒群体规模为 10, $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$, 最大迭代次数为 50。本文算法的参数根据实验来确定, 加速常数 $c_1=c_2=2$, 微粒群体规模为 10, 最大迭代次数为 25, $\omega_{\max}=0.95$, $\omega_{\min}=0.4$, 邻域窗口像素取 90×80 。

由图2中各算法的分割效果可以看出, 采用全局阈值分割方法的Otsu法、Kapur法、PSO+Otsu法对于图像均产生了明显的欠分割现象, 这在一定程度上导致了图像信息的丢失, 例如, 采用PSO+Otsu法时, 设备的一些局部图像信息分割效果不是十分理想, 阻波器和刀闸间引上线接头红外图像中右下角导线部分有明显欠分割现象; 采用局部特征的Niblack法中, 若 k 取 0.2, 尽管电流互感器的分割效果良好, 但其他设备图像分割效果不佳。这也进一步说明修正系数

k 值的选取对于Niblack法的分割性能影响较大。而采用本文的分割算法时, 各设备红外图像的分割效果在降低非均匀背景影响、图像细节信息呈现及目标区域的完整性方面均明显优于上述其他算法。

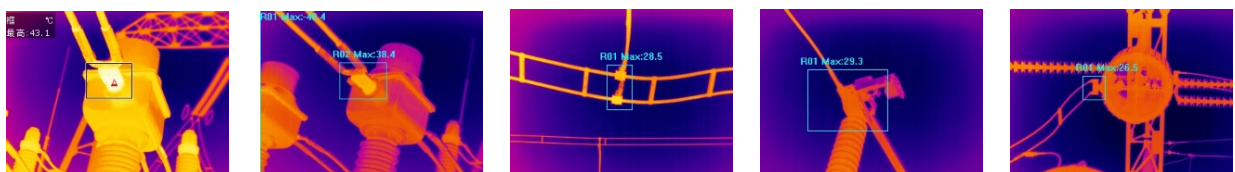
目前, 对图像分割效果的评价主要采用上述主观的方法, 但在部分特殊应用条件下, 主观评价方法并不一定能精确反映出图像的分割效果。为准确客观评价图像分割质量, 本文采用误分率(Misclassification Rate, ME)^[16]作为评价指标对比了各算法实验结果的分割效果。ME值越小表明分割结果越好, 反之则说明效果越差。ME值由公式(7)计算得到:

$$ME = 1 - \frac{|B_0 \cap B_r| + |F_0 \cap F_r|}{|B_0 \cap F_0|} \quad (7)$$

式中: B_0 和 F_0 分别表示图像标准二值掩码(Ground truth, GT)的背景和目标像素集; B_r 和 F_r 表示各算法分割图的背景和目标像素集; $B_0 \cap B_r$ 和 $F_0 \cap F_r$ 表示对应的正确分割像素集。

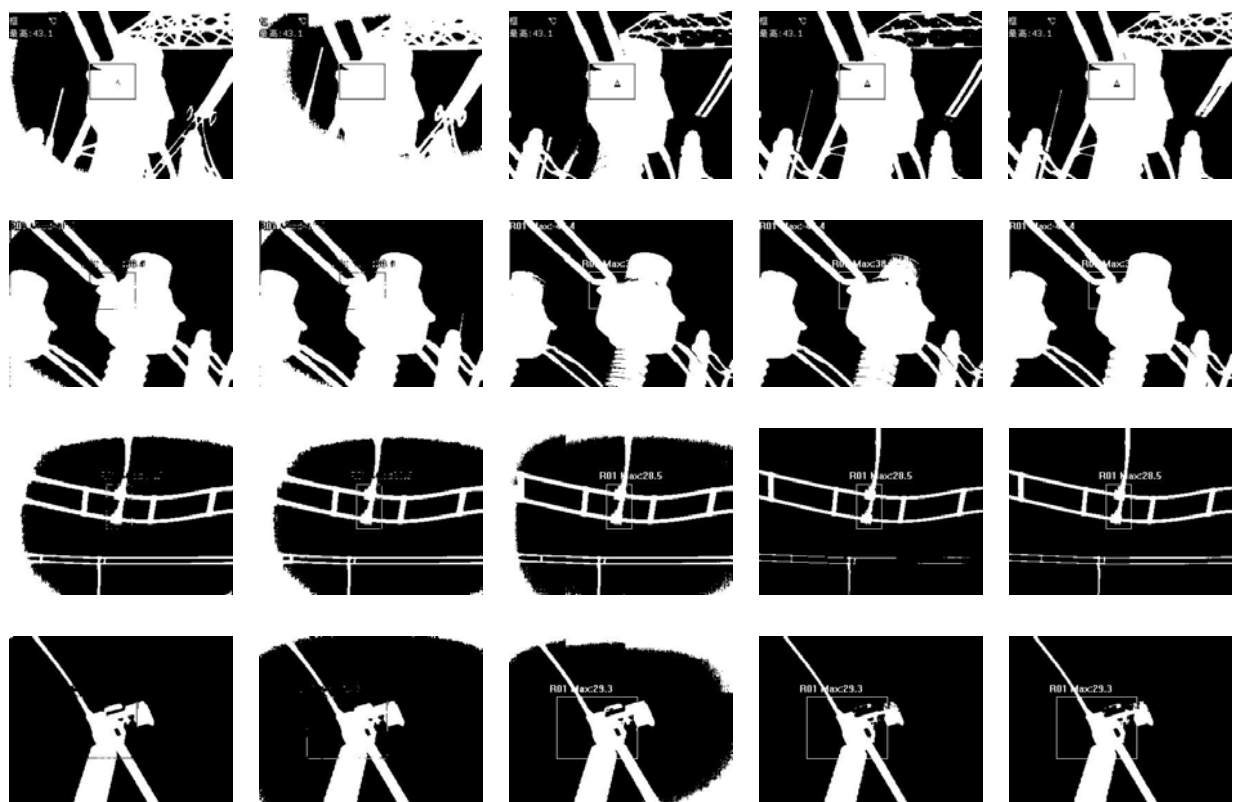
设备标准掩码图由手工方式分割设备温度场区域获得, 如图3所示。

表1给出了Otsu法、传统Niblack法、Kapur法、PSO+Otsu法和本文算法对图1红外原图像进行仿真实验得到的ME值及耗时。从表中可以看出, 本文采用的分割算法与其他几种法分割方法相比, ME值最少分别减少了53%、45%、78%、14%。这表明本文方法的误分率低于其他方法, 这种性能上的提升源于本算法各分块邻域的背景作了近似均匀处理, 并且采用了粒子群算法对每个邻域的分割阈值进行了寻优, 因此, 在对图像进行分割时尽量避免了误分割操作。另一方面, 在图像分割耗时和计算效率方面, 本算法比Otsu法、传统Niblack法的耗时有所增加, 本算法粒子群解空间维度由原来的1维升高至12维, 但是由于利用Niblack理论缩小了各维度解空间阈值搜索范围, 从而提高了各维度解空间粒子群收敛速度, 相比于Kapur法和PSO+Otsu法的耗时大幅降低, 特别是对于比4种传统方法中分割效果最好的PSO+Otsu法, 平均耗时减少了71%。



(a)电流互感器红外图像; (b)电流互感器红外图像; (c)刀闸间引上线接头红外图像; (d)变电站刀闸红外图像; (e)阻波器红外图像
(a)The IR image of current transformer; (b) The IR image of current transformer; (c)The IR image of line connector between knife gate;
(d) The IR image of knife gate; (e) The IR image of wave trap

图1 典型电力设备红外原始图像 Fig.1 The source IR images of classic electrical devices which is used in this paper



(a) 最大类间方差（Otsu）法； (b) Kapur 法； (c) Niblack 算法； (d) PSO+Otsu 法； (e) 本文方法
(a) Otsu's method; (b) Kapur's method; (c) Niblack's method; (d) PSO+Otsu's method; (e) Our method

图2 不同方法对4种红外图像分割结果 Fig.2 Segmentation results with different algorithms



图3 原图像的标准二值掩码图像

Fig.3 The standard binary mask diagram of the source image

表1 本文算法与其他分割算法的ME值和耗时对比

Table 1 The comparison of ME values and CPU time between different methods

Images	Otsu's method	Kapur's method	Niblack's method	PSO+Otsu's method	Our method				
					ME/(Time /ms)	The percentage of ME value reduction/%			
						Otsu	Kapur	Niblack	PSO+Otsu
ME/(Time/ms)									
Fig.1(a)	0.0820/2.6	0.2569/77.6	0.0686/20.6	0.0633/87.6	0.0264/33.1	68	90	61	58
Fig.1(b)	0.0561/2.1	0.0684/75.5	0.0240/17.8	0.0265/88.9	0.0132/23.3	76	81	45	50
Fig.1(c)	0.1884/0.8	0.2056/80.4	0.1379/17.3	0.0134/80.1	0.0073/23.1	96	96	95	46
Fig.1(d)	0.0177/0.7	0.0373/75.2	0.1357/17.4	0.0097/83.9	0.0083/21.1	53	78	94	14
Fig.1(e)	0.0380/0.7	0.0640/74.2	0.0196/16.8	0.0185/82.4	0.0090/21.8	76	86	54	51

2.2 鲁棒性实验

为了验证本文方法的鲁棒性^[18]，在图1 电力设备

红外图像中加入噪声密度为0.01 的椒盐噪声，采用本文方法和其他4 种经典分割算法进行分割实验，以

ME^[16]作为评价指标比较这几种算法的分割性能。从图4中ME指标统计情况可以看出,Otsu法在分割图1(c)时ME较高、采用恒定 k 值的传统Niblack法在分割图1(c)、(d)时ME较高、Kapur法在分割图1(a)、(c)时ME较高,而本文算法的ME均稳定在0.075以下,对图1(b)~(e)的分割中ME甚至均维持在0.025以下。总体来看,本文算法的ME略低于PSO+Otsu法,说明对含有低噪声密度的电力设备红外图像具有较好的分割性能。

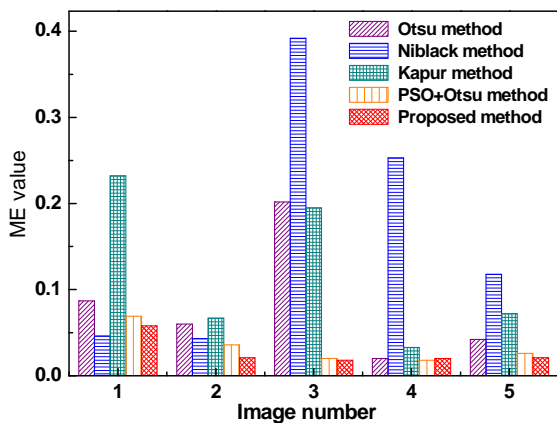


图4 Otsu法、传统Niblack法、Kapur法、PSO+Otsu法和本文算法的鲁棒性实验ME统计图

Fig.4 The ME value of different images by using Otsu's, Kapur's, Niblack's, PSO +Otsu's methods and the proposed method

为了进一步研究本文算法的抗噪性能,选择图1(c)加入噪声密度为0.01的椒盐噪声,随后噪声密度以0.01的步长依次增加,ME指标的评价结果如图5所示,可以看出,尽管本文方法的ME随着噪声密度的增加而增长,但在较高的噪声密度下,仍能展现出很好的分割性能。本文算法的ME值略高于PSO+Otsu法,但ME值均能维持在0.075以下,且明显优于Otsu法、Niblack法和Kapur法。因此从本文给出的设备红外图像角度来看,本文算法展现了较好的鲁棒性,无论是对低噪声干扰还是高噪声干扰,均具有一定的抗噪性能。

3 结论

本文对存在不均匀背景和噪声的电力设备红外图像进行了分析,提出了一种基于粒子群优化方法的Niblack电力设备红外图像分割算法。与Otsu法、传统Niblack法、Kapur法、和PSO+Otsu法的分割效果对比表明,本文的分割算法得到的各设备红外图像的分割效果在降低非均匀背景影响、图像细节信息呈现及目标区域的完整性方面均明显优于上述其他算

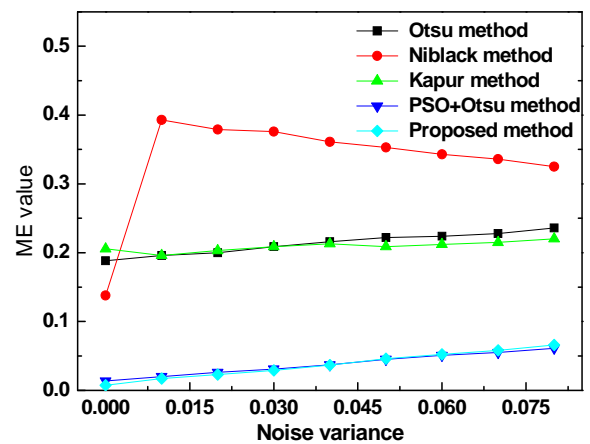


图5 电力设备红外图像含噪声测试结果

Fig.5 Analysis on anti-noise performance of different methods
法,图像分割误分率分别至少减少了53%、45%、78%和14%。比4种传统方法中分割效果最好的PSO+Otsu法平均耗时减少了71%。以误分率为评价指标的鲁棒性分析表明,本文算法对含有噪声的电力设备红外图像分割性能也优于其他传统算法。本文提出的分割算法降低了非均匀背景和噪声对红外图像目标区域提取的影响,进而提高了分割的准确性,在电力设备故障智能诊断应用方面具备较好的优势。

参考文献:

- [1] 崔昊杨, 许永鹏, 孙岳, 等. 基于自适应遗传算法的变电站红外图像模糊增强[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 902-908.
CUI Haoyang, XU Yongpeng, SUN Yue, et al. Substation infrared image fuzzy enhancement algorithms based on improved adaptive genetic theory[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 902-908.
- [2] 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.
- [3] 陈芳, 姚建刚, 李佐胜, 等. 绝缘子串红外图像中单个绝缘子盘面的提取方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 220-224.
CHEN Fang, YAO Jiangang, LI Zuosheng, et al. The method to extract shed surface image of a single insulator from infrared image of a insulator string[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 220-224.
- [4] 邹辉, 黄福珍. 基于FAsT-Match算法的电力设备红外图像分割[J]. 红外技术, 2016, 38(1): 21-27.
ZOU Hui, HUANG Fuzhen. Infrared image segmentation for electrical equipment based on FAsT-match algorithm[J]. Infrared Technology, 2016, 38(1): 21-27.
- [5] 龙建武, 申铨京, 陈海鹏. 自适应最小误差阈值分割算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(7): 1134-1144.
LONG Jianwu, SHEN Xuanjing, CHEN Haipeng. Adaptive minimum error thresholding algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(7): 1134-1144.

- 1134-1144.
- [6] 刘火平, 孟维平, 宋立维, 等. 红外图像序列中不均匀背景消除新方法[J]. *液晶与显示*, 2012, **27**(4): 539-544.
- LIU Huoping, MENG Weiping, SONG Liwei, et al. New method for eliminating non-uniformity background of IR images[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, **27**(4): 539-544.
- [7] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on System Man and Cybernetic*, 1979, **9**(1):62-66.
- [8] KITTLER J, ILLINGWORTH J. Minimum error thresholding[J]. *Pattern Recognition*, 1986, **19**(1): 41-47.
- [9] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. New method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision, Graphics and Image processing*, 1985, **29**(3): 273-285.
- [10] 黄浩, 李俊, 潘金贵. 基于粒子群优化算法的2维 Otsu 快速图像分割算法[J]. *中国图象图形学报*, 2011, **16**(3): 377-381.
- HUANG Gang, LI Jun, PAN Jingui. A fast 2D Otsu image segmentation algorithm based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, **16**(3): 377-381.
- [11] 吴一全, 张晓杰, 吴诗嫒, 等. 基于混沌 PSO 或分解的二维最小误差阈值分割[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2011, **45**(7): 1198-1205.
- WU Yiquan, ZHANG Xiaojie, WU Shihua, et al. Two-dimensional minimum error thresholding based on chaotic particle swarm optimization or decomposition[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2011, **45**(7): 1198-1205.
- [12] 章慧, 龚声蓉, 严云洋. 基于改进粒子群算法的图像阈值分割方法[J]. *计算机科学*, 2012, **39**(9): 289-291, 301.
- ZHANG Hui, GONG Shengrong, YAN Yunyang. Image threshold segment method based on improved particle swarm optimization[J]. *Computer Science*, 2012, **39**(9): 289-291, 301.
- [13] 张伟, 隋青美. 基于改进粒子群优化的模糊熵煤尘图像分割[J]. *控制与决策*, 2011, **26**(2): 276-279, 284.
- ZHANG Wei, SUI Qingmei. Coal dust image segmentation based on improved particle swarm optimization and fuzzy entropy[J]. *Control and Decision*, 2011, **26**(2): 276-279, 284.
- [14] 吴一全, 占必超, 吴加明. 基于类内绝对差和混沌粒子群的红外图像分割[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 79-85.
- WU Yiquan, ZHAN Bichao, WU Jiaming. An infrared image segmentation method based on within-class absolute difference and chaotic particle swarm optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 79-85.
- [15] Niblack W. *An Introduction to Digital Image Processing*[M]. Denmark: Strand berg Publishing Company Birkeroed, 1986: 115-116.
- [16] 唐英干, 刘冬, 关新平. 基于粒子群和二维 Otsu 方法的快速图像分割[J]. *控制与决策*, 2007, **22**(2): 202-205.
- TANG Yinggan, LIU Dong, GUAN Xinping. Fast image segmentation based on particle swarm optimization and two-dimension Otsu method[J]. *Control and Decision*, 2007, **22**(2): 202-205.
- [17] 刘申晓, 王学春, 常朝稳. 基于改进粒子群优化算法的 Otsu 图像分割方法[J]. *计算机科学*, 2013, **40**(8): 293-295.
- LIU Shenxiao, WANG Xuechun, CHANG Chaowen. Otsu image segmentation method based on improved PSO algorithm[J]. *Computer Science*, 2013, **40**(8): 293-295.
- [18] 姚婷婷, 谢昭. 多层次 MRF 重标记及映射法则下的图像分割[J]. *自动化学报*, 2013, **39**(10): 1581-1593.
- YAO Tingting, XIE Zhao. Top-down inference with relabeling and mapping rules in hierarchical MRF for image segmentation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(10): 1581-1593.

(上接第 779 页)

- [15] 姚娜, 林招荣, 任超锋, 等. 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2014: 022204-1-022204-8.
- YAO N, LIN Z R, REN C F, et al. A distortion model suitable for nonlinear distortion correction of digital video camera[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2014: 022204-1-022204-8.
- [16] Brown D C. Close-range camera calibration[J]. *Photogrammetric Engineering*, 2002, **37**(8): 855-866.
- [17] Faig I W. Calibration of close-range photogrammetric systems: mathematical formulation[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1975, **41**(12): 1479-1486.
- [18] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. of Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323-344.
- [19] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 110-114.
- ZHANG G J. *Vision Measurement*[M]. Beijing: Science Press, 2007: 110-114.
- [20] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for MATLAB[EB/OL]. [2008] www.vision.caltech.edu/bouguetj.
- [21] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]// *Proceeding of the Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester: 1988: 147-151.
- [22] 刘阳, 王福利, 常玉清, 等. 黑白棋盘格角点检测算法[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2007, **28**(8): 1090-1093.
- LIU Y, WANG F L, CHANG Y Q, et al. Black and white X-corner detection algorithm[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2007, **28**(8): 1090-1093.
- [23] 胡海峰, 熊银根. 一种基于两次 Radon 变换检测棋盘方格点的新算法[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2003, **42**(2): 23-26.
- HU H F, XIONG Y G. A new algorithm for chessboard corners detection based on two successive Radon transform[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, **42**(2): 23-26.