

DOI: 10.7667/PSPC180363

基于改进 MSER 算法的电力设备红外故障区域提取方法

冯振新^{1,2}, 周东国³, 江翼^{1,2}, 赵坤^{1,2}, 丁国成⁴

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 2. 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211000; 3. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 4. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061)

摘要: 红外图像处理中因目标边界模糊、区域灰度变化等因素, 导致传统的极大稳态区域方法区域提取效果低下。为此, 提出一种基于改进极大稳态区域方法的电力设备红外故障区域提取机制, 提升区域提取效果。首先, 从灰度相似度聚类出发, 采用 Mean shift 算法对分割区域的邻域像素进行聚类。其次, 结合阈值分割机制, 快速将相似像素进行分割, 最终通过迭代得到电力设备故障所呈现的亮度区域信息。实验结果表明该提取区域方法性能优于极大稳态区域算法, 具有较低的误分类错误, 且相比于 Mean shift 算法, 具有高效的处理速度。

关键词: 极大稳态区域; 电力设备故障; 红外图像; 阈值; 聚类

Fault region extraction using improved MSER algorithm with application to the electrical system

FENG Zhenxin^{1,2}, ZHOU Dongguo³, JIANG Yi^{1,2}, ZHAO Kun^{1,2}, DING Guocheng⁴

(1. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China; 3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hefei 230061, China)

Abstract: Aiming at the problem of blur boundary and the intensity variation of regions in the infrared image, the traditional Maximally Stable Extremal Region (MSER) may fail to detect the region, thus leading to the poor performance. Therefore, the improved MSER algorithm is proposed in this paper to find the fault region in infrared electrical equipment image, which is based on the intensity similarity clustering. At first, the mean shift algorithm is used to cluster the pixels with similarity from the point of viewing of intensity homogeneity. Second, the thresholding mechanism is utilized to get the fast binary image, where the thresholding is selected from the low intensity of pixels clustered into the region. It thereby can split the pixels with similarity together faster, and the bright region corresponding to the fault region can be obtained through the iteration. Finally, experiments on the electrical equipment with infrared image show that the proposed method has better performance than the original MSER and owns lower misclassification error. Meanwhile, it decreases the time consumption as comparing to the Mean shift algorithm.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 524625160017).

Key words: MSER; electrical equipment fault; infrared image; thresholding; clustering

0 引言

在电力设备状态监测中, 红外故障检测具有远距离、不接触、准确、快速、直观等诸多优点^[1], 然而在实际应用中, 电力系统故障状态判断仍依赖

于技术人员, 而且判断的准确性大多与技术人员的技术水平差异以及人员细心程度、疲劳程度等密切相关。特别地, 在面对含有众多电力设备的变电站等场合, 技术人员既要诊断电气设备, 同时还需要将潜在的故障信息记录下来, 使得诊断过程变得异常繁琐, 极易出现疏漏, 同时也给设备安全带来了隐患^[2-6]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(524625160017)

随着图像处理技术的发展, 研究人员开始着眼于电力设备故障红外图像智能化诊断^[7-15]。其中, 从红外图像中找出潜在含有故障的区域是其中最为重要的一步, 也是影响后续故障匹配、识别的关键。通常而言, 电力设备故障红外图像存在一些固有特征, 其主要表现在: (1) 故障区域相比于正常区域所呈现的温度要高, 即对应的图像灰度值较大; (2) 故障区域与非故障区域会存在一定的过渡区域。基于这些特性, 研究者早期采用阈值分割机制, 即认为高于某个温度值就判定为故障区域, 而低于某个阈值则认为是非故障区域。然而, 阈值分割方法容易受环境和图像内容的影响。井金剑^[11]采用最大类间方差(Otsu)阈值法将故障区域从背景中分割出来。于加学等^[12]研究了基于元胞机与改进 Otsu 相结合的红外图像分割算法。王如意^[13]则采用分水岭分割算法和模糊聚类方法一起对红外图像进行分割。随着分割方法的多元化, 经典的 Mean shift 聚类方法凭借着概率密度最大的聚类原则, 也被引入到故障区域检测中^[14], 但由于其计算量大导致算法的实时性得不到保障。另外, 基于脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)的分割方法, 尽管其在参数设置合理的情况下具有较高的分割效果, 但是参数的不确定使得 PCNN 模型不具备通用性, 徐雪涛^[15]提出改进 PCNN 模型的图像分割方法提取红外图像中故障区域, 但仍因 PCNN 内部参数设置以及红外图像的差异使得模型的推广受到了限制, 特别是动态阈值的调整、连接系数和迭代次数的选择。

本文针对电力系统故障红外自动检测, 提出采用极大稳态区域作为区域提取算法, 它所对应的每一个极值区域都是图像中的一个联通分量, 可极大程度上获取完整的故障区域。然而, 由于该方法本质上类似于分水岭算法, 容易将灰度变化缓慢的两个区域合并为一个区域, 引起错误分割。为了解决这个问题, 本文提出采用阈值的方式快速分离各个区域, 并结合 Mean-shift 算法聚类规则, 将具有相似灰度区域的邻域像素进行聚类, 然后按聚类规则更新门限阈值, 从而改进极大稳态区域算法, 得到最佳的区域分割结果, 最后通过真实电力设备故障红外图像验证本文方法的有效性。

1 MSER 算法简介

在计算机视觉领域, 最大稳定极值区域(Maximally Stable Extremal Regions, MSER)起源于对图像中斑点区域的检测。该方法最早由 J. Matas

等^[16]于 2002 年提出, 被用于检测图像中仿射不变区域。经过大量的实践表明, MSER 提取的区域是当使用不同灰度阈值对图像进行二值化时得到的最稳定的区域^[17]。

J. Matas 在提出 MSER 这一算法时, 对 MSER 作出了以下数学定义。

定义(1) 图像 I 是 $I: D \subset Z^2 \rightarrow S$ 的一种映射, 且满足 $S = \{0, 1, \dots, 255\}$ 。

定义(2) 区域 Q : 是 D 的连续子集, 对于任意点 $p, q \in Q$, 都存在连通路径 $p, a_1, a_2, \dots, a_n, q$ 。

定义(3) 区域 Q 的边界 ∂Q : ∂Q 是与 Q 内至少一个像素相邻, 但不属于 Q 的那些像素集合。

定义(4) 极值区域 $Q \subset D$: 对于所有的 $p \in Q, q \in \partial Q$, 满足 $I(p) > I(q)$ (最大灰度区域) 或者 $I(p) < I(q)$ (最小灰度区域) 的区域。

定义(5) 最大稳定极值区域 MSER: 设 $Q_1, \dots, Q_{i-1}, Q_i, \dots$ 为嵌套连通区域 ($Q_i \subset Q_{i+1}$) 的序列。若 $d(i) = \frac{|Q_{i+\Delta} - Q_{i-\Delta}|}{|Q_i|}$ 在 i 处存在局部极值, 使得极值

区域 Q_i 为最大稳定极值区域 MSER, 如图 1 所示, 其中 $|\cdot|$ 为集合的势, $\Delta \in S$ 为参数。

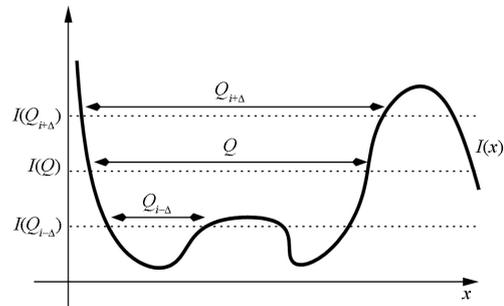


图 1 区域变化示例
Fig. 1 Example of varied region

根据定义(5)可知, MSER 算法的主要思想是: 在给定的阈值下, 其所得到的某个连通区域与阈值衰减 Δ 所对应的区域没有发生变化, 即保持该二值区域稳定, 这样的区域具有稳定不变的特性, 称之为 MSER 区域。相比于单个阈值分割而言, 它避免了硬性分割引起的错误分割, 而采用一系列阈值处理成二值图像, 并将稳定不变的区域作为分割结果, 因此, 是一种潜在的分隔红外图像亮度区域的方法^[18]。

然而, 由于电力设备红外图像本身容易因覆盖物等外界因素, 使区域内灰度发生变化, 从而使得 MSER 算法获得的故障区域与实际区域不对应, 产生错误分割。

2 改进型 MSER 算法及图像分割

为了提升 MSER 方法红外图像区域分割的性能, 本文从以下两个方面对其进行改进。首先, 从区域一致性或相似性角度出发, 避免因灰度的变化影响 MSER 算法区域提取的完整性; 其次, 在阈值分割机制方面, 解决算法在处理过程中时间复杂度较高的问题。

在区域一致性或相似性上, Mean shift 算法可以将样本点收敛至其概率密度极大值处, 得到具有灰度相似的区域^[19-20]。为了便于描述, 令采样点 $\mathbf{x}_i \in R^d$, $i=1, \dots, n$, 则点 \mathbf{x} 处的概率密度估计为

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{nh^d} \sum_{\mathbf{x}_i \in S_h} K\left(\left\|\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right) \quad (1)$$

式中, S_h 是一个固定带宽为 h 的高维球区域, 可表示为

$$S_h(\mathbf{x}) = \left\{ \mathbf{y} \mid \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|^2 \leq h^2 \right\} \quad (2)$$

d 表示维数, $K(\cdot)$ 为径向对称核函数, 可表示为

$$K(\mathbf{x}) = c_{k,d} k\left(\|\mathbf{x}\|^2\right) \quad (3)$$

式中: $c_{k,d}$ 为归一化常数; $k(\mathbf{x})$ 为核函数 $K(\mathbf{x})$ 的剖面函数, 通常选用高斯核作为 Mean shift 核函数。

为了寻找极大密度值点, 令

$$\nabla \hat{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (4)$$

式(4)左边可根据式(1)得到

$$\nabla \hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \left[\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right) \right] \times m_h(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中, $g(x) = -k'(x)$, $m_h(\mathbf{x})$ 为均值漂移向量, 可表示为

$$m_h(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i g\left(\left\|\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)} - \mathbf{x} \quad (6)$$

由式(6)可知, 均值漂移向量总是指向密度增长最快的方向。因此, 当给定初始点, Mean shift 算法就会根据下面 2 个步骤进行迭代。

Step1: Mean shift 算法向量计算, 改变当前中心位置。

$$\mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^t + m_h(\mathbf{x}) \quad (7)$$

Step2: 平移窗口, 重新计算概率密度。

通过不断的迭代, 当满足 $\|\mathbf{x}^{t+1} - \mathbf{x}^t\| < \varepsilon$, ε 为收敛阈值, 即收敛到概率密度极大值处, 进一步对

具有相似灰度值的像素进行聚类, 进而可避免因灰度变化导致 MSER 算法区域分割的错误。

另外, 为了提升 MSER 算法区域提取效率, 本文将其处理过程进行了改进, 使用一系列自高向低的灰度阈值对图像进行二值化处理, 并结合 Mean shift 均值漂移方法聚类时获得的区域像素特性, 自适应选择以收敛到高亮度区域像素的最低灰度值作为阈值进行二值化, 然后执行下一次迭代, 并将邻域相似灰度值的像素进行聚类。当整个区域不发生变化时, 获得最大稳定区域, 迭代停止。

针对邻域像素的获取, 本文采用数学形态学方法—膨胀算子^[21]。为了方便描述, 用 $B(\mathbf{x})$ 代表结构元素, 对图像空间 I 中的每一点 \mathbf{x} , 膨胀的定义为

$$\text{膨胀: } X = I \oplus B = \{ \mathbf{y} : B(\mathbf{y}) \cap I \neq \Phi \}$$

用 $B(\mathbf{x})$ 对 I 进行腐蚀的结果就是把结构元素 B 平移后使 B 包含于 I 的所有点构成的集合, 然后与当前的二值区域异或操作, 得到的二值区域便是邻域。

3 实验结果及分析

为了验证本文方法的有效性, 本文模型在 Intel(R) Core(TM) i5 CPU 4 GB 内存 PC 机 Matlab (2010b) 上编程实现。图 2 给出了 5 幅具有代表性的电力设备故障红外图像。从图中可以看出, 电力故障区域呈现出较高亮度, 而在故障区域之外灰度逐步衰减, 例如图像 2—图像 4。当采用文献[16]所提出的 MSER 方法时(代码来自 <http://vision.ucla.edu/~vedaldi/assets/mser/mser-0.5.tar.gz>), 得到的结果如图 3 所示。该方法将图像划分为多个稳态区域, 然而对于故障区域, 由于故障区域与非故障区域之间灰度变化缓慢等因素, 使得整个故障区域被其他非故障区域合并, 例如图像 2、图像 4 和图像 5 的分割结果。

图 4—图 6 给出了现有一些方法的分割结果, 例如分水岭算法、PCNN 方法。实验结果可以看出, 分水岭算法容易将一个物体分割成多个区域, 或者将多个区域合并成为一个区域^[22], 特别是当分水岭在图像中不能形成时, 便产生了错误的划分。PCNN 模型作为一种带参的分割模型^[23-24], 其分割的效果主要受到其参数设置以及迭代规则的影响, 如文献[15]给出的参数 $V_L = 0.01$, $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.1$, $T_0 = 255$, 最大迭代次数为 25。尽管迭代次数的限制以及阈值衰减的控制, 能够使模型提取较亮部分的故障区域, 但对于邻域次亮部分, 模型参数还需要进一步改善。Mean shift 作为一种经典的聚类方法, 在带宽尺度约束情况下将空间邻近、灰度相似的像素聚类, 然

而由于图像中类别数的不确定，导致将整幅图像分割成多个部分，并降低了处理速度，例如表 1 所示，其中代码是经 Matlab 和 C 混合编程^[26]，仍需要大概 5 s/幅的处理。本文方法融合了快速阈值机制，同时将 MSER 方法融入到图像分割中，获得了较高的分割性能，如图 7 所示。同时，结合 Mean shift 方法的优势，将邻域灰度相似的像素进行聚类，获得了较为完整的故障区域，便于后续进一步处理。此外，在处理速度上也优于 MSER 方法和 Mean shift

方法，如表 1 所示。

表 1 运行时间对比

Table 1 Running time comparison

方法	s				
	图像 1	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
MSER	0.417	1.194	1.149	1.858	0.902
Mean shift	3.543	4.275	6.642	5.246	6.363 8
本文方法	0.154	0.435	0.573	1.322	0.754

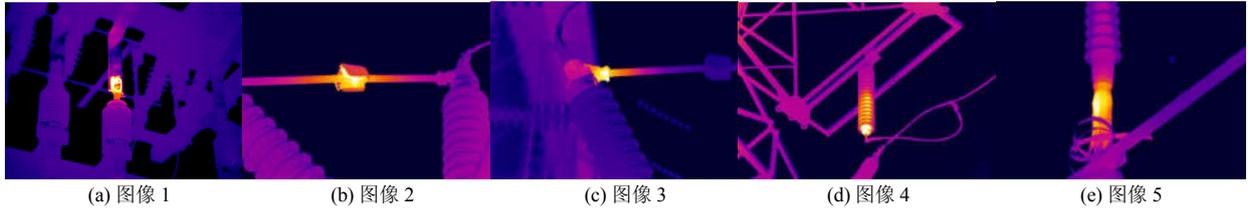


图 2 红外检测图像
Fig. 2 Infrared images

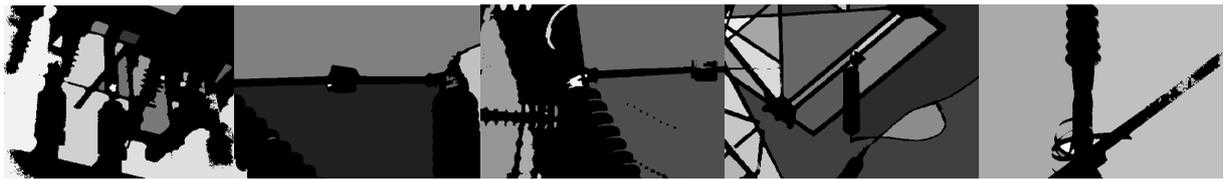


图 3 MSER 方法的区域分割结果
Fig. 3 Segmentation results of MSER method



图 4 分水岭方法的区域分割结果
Fig. 4 Segmentation results of Watershed method

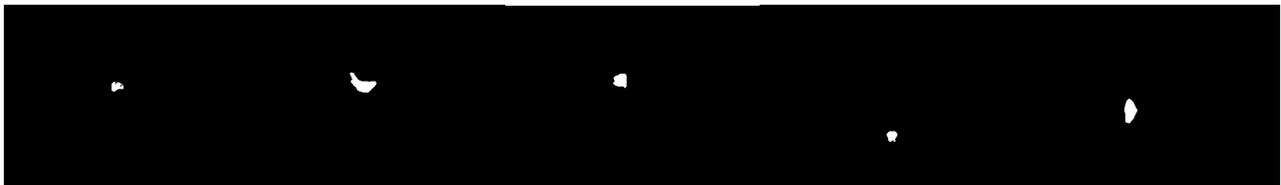


图 5 PCNN 方法的区域分割结果
Fig. 5 Segmentation results of PCNN method

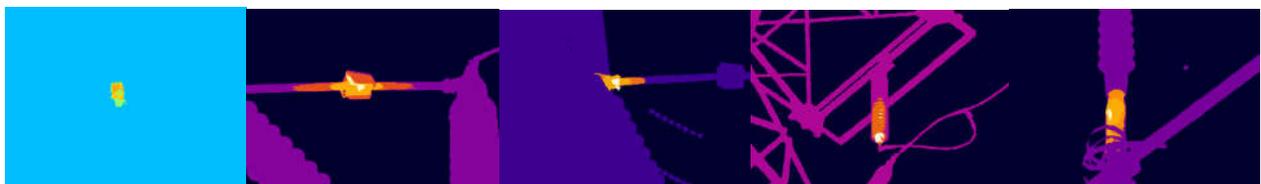


图 6 Mean shift 方法的区域分割结果
Fig. 6 Segmentation results of Mean shift method



图 7 本文方法的区域分割结果

Fig. 7 Segmentation results of the method proposed

此外, 从这些典型的电力设备红外图像中可以发现, 本文方法能够有效提取红外图像故障区域的最大稳态区域, 例如图像 4、图像 5 的分割结果。特别是图像 4 中的绝缘柱, 其故障区域伴有纹理特性, 本文方法仅将其邻域非故障区域聚类成一个整体, 形成最大稳态区域, 得到分割结果, 如图 7 所示。而 MSER 算法直接将整个绝缘柱区域划分为一个区域, 形成最大稳态区域, 显然包含了绝缘柱中非故障区域。因此, 本文方法在自高向低的阈值分割机制下结合 Mean shift 方法聚类特性, 能够确保故障区域达到稳态, 实现故障区域的有效提取。

4 结语

本文给出了一种基于改进 MSER 算法的电力设备故障区域提取方法, 该方法结合了均值漂移算法, 避免传统 MSER 算法将灰度变化缓慢的两个区域合并为一个区域。同时, 提出以自适应收敛到高亮度区域的像素的最低灰度值作为阈值分割策略, 使得相似灰度值的像素快速聚类, 最终得到红外图像故障区域的最大稳态区域。实验结果表明所提出的算法有效可行, 且与传统 MSER、分水岭、PCNN 分割方法以及 Mean shift 算法相比, 本文算法能够得到较优的结果, 并具有较快的处理速度。为此, 在今后的工作中, 可将其作为电力故障区域自动化检测重要的一部分, 同时为运维人员在线巡检、数据分析等操作提供方便, 也为后续的快速定位奠定基础。

参考文献

- [1] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [2] 马洲俊, 樊飞龙, 王勇, 等. 基于多源异构数据的配电网故障信息挖掘与诊断[J]. 供用电, 2018, 35(8): 31-39. MA Zhoujun, FAN Feilong, WANG Yong, et al. Distribution network fault information minning and diagnosis based on multi-source heterogeneous data[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 31-39.
- [3] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述[J]. 供用电, 2018, 35(6): 3-11. LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 3-11.
- [4] 王然, 张志刚, 孙保民, 等. 红外测温技术在炉膛温度场检测中的应用[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 136-140. WANG Ran, ZHANG Zhigang, SUN Baomin, et al. Application of infrared temperature detection technology in furnace temperature field measurement[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 136-140.
- [5] 黄葆华, 仇晓智, 周卫庆, 等. 基于相似性建模和模糊概率有向图的热力设备故障诊断[J]. 热力发电, 2018, 47(4): 104-109. HUANG Baohua, QIU Xiaozhi, ZHOU Weiqing, et al. Thermodynamic equipment fault diagnosis based on similarity modeling and fuzzy probabilistic signed directed graph[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(4): 104-109.
- [6] 黄新波, 张杰, 田毅, 等. 风电母线槽热故障状态在线监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 131-157. HUANG Xinbo, ZHANG Jie, TIAN Yi, et al. On-line monitoring system for wind power busbar trunk heat fault status[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 131-157.
- [7] 陈欢, 彭辉, 舒乃秋, 等. 基于鲁棒能量模型 LS-TSVM 和 DGA 的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 134-139. CHEN Huan, PENG Hui, SHU Naiqu, et al. Fault diagnosis of power transformer based on RELS-TSVM and DGA[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 134-139.
- [8] JAFFERY Z A, DUBEY A K. Design of early fault detection technique for electrical assets using infrared thermograms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 753-759.
- [9] 甘锡淞, 李云, 傅成华, 等. 基于信息融合和 CS-SVM 的变压器绕组变形故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 43(4): 156-161. GAN Xisong, LI Yun, FU Chenghua, et al. Information

- fusion and CS-SVM based research on diagnosis method for transformer winding deformation fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 156-161.
- [10] 孙怡, 吴邦树, 刘仪卜, 等. 基于红外图像处理的电气设备故障诊断方法[J]. 机电工程技术, 2016, 46(1): 58-61.
SUN Yi, WU Bangshu, LIU Yibu, et al. Method of default diagnosing of electric equipments based on infrared image processing[J]. Mechanical & Electrical, 2016, 45(6): 58-61.
- [11] 井金剑, 翟春艳, 李书臣, 等. 基于红外图像识别的电气设备故障诊断[J]. 电子设计工程, 2014, 22(12): 171-173.
JING Jinjian, ZHAI Chunyan, LI Shuchen, et al. Fault diagnosis of electrical equipment based on infrared image recognition[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(12): 171-173.
- [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): 93-95.
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): 93-95.
- [13] 王如意. 变电站电力设备红外图像分割技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
WANG Ruyi. Research of infrared segmentation for power equipment[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [14] 熊芬芳. 基于图像处理技术的电气设备故障诊断方法[D]. 上海: 东华大学, 2015.
XIONG Fenfang. Research on electrical equipments diagnosis methods based on image processing technology[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [15] 徐雪涛. 基于红外成像技术的电气设备故障诊断[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
XU Xuetao. Electrical equipment fault diagnosis based on infrared imaging technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [16] MATAS J, CHUM O, URBAN M, et al. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions[J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(10): 761-767.
- [17] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [18] OH II-S, LEE J, MAJUMDER A. Multi-scale image segmentation using MSER[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 8048(2): 201-208.
- [19] CHENG Yizong. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790-799.
- [20] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24: 603-619.
- [21] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[J]. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
- [22] GONZALEZ A, PEREZ J C, MUNOZ J, et al. Watershed image segmentation and cloud classification from multispectral MSG-SEVIRI imagery[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(1): 135-142.
- [23] ZHAN Kun, SHI Jinhui, WANG Haibo, et al. Computational mechanisms of pulse-coupled neural networks: a comprehensive review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017, 24(3): 573-588.
- [24] SUBASHINI M M, SAHOO S K. Pulse coupled neural networks and its applications[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41: 3965-3974.

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-06-25

作者简介:

冯振新(1982—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为变电设备试验和现场故障检测及诊断; E-mail: 329101854@qq.com

周东国(1985—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为红外图像处理、模式识别及电力信息处理等。E-mail: dgzhou1985@whu.edu.cn

(编辑 许威)