

基于 Zernike 矩特征的电力设备红外图像目标识别

郭文诚, 崔昊杨, 马宏伟, 秦伦明
(上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090)

摘要: 基于红外图像处理的电力设备及其关键构件识别是红外诊断技术的关键步骤, 其难点之一在于设备图像的倾斜、缩放以及外形相似性导致的设备特征参量难以提取。本文以电流互感器、电压互感器、避雷器、隔离开关以及断路器五种外形相对接近的设备状态红外图像为研究对象, 采用具有旋转与缩放不变性的 Zernike 矩作为待识别设备的特征, 并基于相关向量机(Relevance Vector Machine, RVM)进行设备分类与识别。实验结果表明, 该方法不受目标在图像中所处位置与倾斜角度影响, 能够自定义生成大量高质量样本且有效分辨不同设备, 设备识别准确率达到 94.7%, 验证了该方案的有效性与实用性。

关键词: 电力设备识别; 红外图像; Zernike 矩; RVM

中图分类号: TM507; TP391.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.04.020

Infrared image target recognition of power equipment based on Zernike moment

GUO Wen-cheng, CUI Hao-yang, MA Hong-wei, QIN Lun-ming

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

Abstract: The identification of power equipment and its key components based on infrared image processing is significant to infrared diagnostic technology, of which the characteristic parameters are difficult to extract as the result of image tilt, image zoom and shape similarity of the device. To solve this problem, the infrared images of five devices with similar shape are studied in this paper, including current transformer, voltage transformer, lightning arrester, isolating switch and circuit breaker. For the device classification and identification, Zernike moments, with the advantage of rotation and scaling invariance, are used as the characteristic features, which are later identified by Relevant Vector Machine (RVM). The experimental results show that the method proposed will not be affected by the target position and tilt angle in the image. Meanwhile, it can customize a large number of high-quality samples and effectively distinguish different devices, whose recognition accuracy reaches 94.7%, verifying the effectiveness and practicability of this method.

Key words: power equipment identification; infrared thermal imaging; Zernike moment; RVM

1 引言

随着红外热像诊断技术的快速发展, 各级电力公司加强了设备状态图像的建库工作, 以便开展电力设备的精细化诊断和故障演化分析^[1-3]。与此同时, 电

力设备红外图像的数据量大幅增长, 在海量设备图像拍摄库中, 如何实现电力设备的红外热像图像批量化、自动化的诊断, 成为行业领域亟待解决的问题^[4], 其中极为关键的技术步骤是如何实现设备图像的自

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61107081); 上海市地方能力建设项目 (No. 15110500900) 资助。

作者简介: 郭文诚 (1994 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力设备故障红外诊断研究工作。E-mail: gwench@163.com

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

收稿日期: 2018-09-05; **修订日期:** 2018-10-11

动化识别,并依据相关的导则或标准开展针对性的评估。然而,受拍摄角度、拍摄距离和方法的影响,不同时期、不同平台获取到的设备红外热像与标准库相比,往往存在图像倾斜或目标设备大小不等的情况,干扰了设备图像特征量的提取,并进一步降低了设备识别的准确率。而针对此类问题的研究相对较少,其中吕俊^[5]等人基于变电站设备的全景温度场,提取图像中各设备的 SIFT 特征,并与标准库中设备进行对比实现目标识别,此方法虽然可有效识别图像中电力设备,但需要事先对图像中设备进行标注,难以实现批量化的图像处理;陈俊佑^[6]等人以设备红外图像的 Hu 不变矩特征作为 BP 神经网络分类器的输入,对电力设备进行了分类识别,该方法取得了较高的识别率,但是其所处理的设备外形差别较大,对于外形相似设备的识别准确率仍有待提高。

本文提出了一种利用 Zernike 矩旋转与缩放不变性提取设备红外图像几何特征,并以此训练量子粒子群算法优化后的相关向量机 (Relevance Vector Machine, RVM) 的方法,用以开展电力设备的识别。该方法可自动批量处理图像,高效解决跨平台设备拍摄库中图像倾斜和尺寸不同带来的设备特征提取难题,对电流互感器、电压互感器、避雷器、隔离开关以及断路器五种设备的 150 组样本进行测试的结果表明:Zernike 矩在处理设备图像时,特征样本质量较高,并可以保证外形相近设备较高的区分度, RVM 识别的准确率高达 94.7%,证实了本文所用方法的实用性。

2 红外热像 Zernike 矩

Zernike 矩是由一组单位圆内的正交基函数构成的,对于一幅电力设备图像 $f(x, y)$, 其 m 阶 n 次 Zernike 矩极坐标形式可写表示为^[7-9]:

$$\begin{aligned} Z_{mn} &= \frac{m+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 V_{mn}^*(\rho, \theta) f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \\ &= \frac{m+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{mn}(\rho) e^{jm\theta} f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \end{aligned} \quad (1)$$

其中, m 为任意自然数,且需满足 $(m - |n|)$ 为偶数、 $m \geq |n|$ 的条件;基函数的复共轭 $V_{mn}^*(\rho, \theta)$ 为设备图像像素坐标映射到单位圆极坐标后用于 Zernike 矩计算的变换核,可由径向多项式 $R_{mn}(\rho)$ 表示, (ρ, θ) 定义在单位圆上, ρ 表示图像中设备某一点 (x, y) 到原点的矢量长度, θ 表示该矢量的倾斜角度。在计算设备红外图像的 Zernike 矩时,单位圆原点与图像的中心重合,将图像像素点向圆内进行映射。根据公式(1)可以得到,当设备图像旋转角度 α 后,其

Zernike 矩 Z'_{mn} 与原图像 Z_{mn} 之间存在 $Z'_{mn} = Z_{mn} e^{jm\alpha}$ 的关系,从而推导出 Zernike 矩的幅值在理论上不发生变化,即 Zernike 矩具有旋转不变性。目标设备的整体形状将由低阶矩进行描述,而高阶矩往往用于描述目标设备的具体细节^[10]。

3 QPSO-RVM 模型

相关向量机是一种建立在贝叶斯框架基础上的概率预测模型,对于给定训练样本集 $\{x_n, t_n\}_{n=1}^N$, RVM 模型定义的输出为^[11-12]:

$$t_n = y(x_n, \omega) + \varepsilon_n = \sum_{n=1}^N \omega_n K(x, x_n) + \omega_0 + \varepsilon_n \quad (2)$$

其中, N 为电力设备样本数; x_n, y 为设备 Zernike 矩的特征数据与拟合值; t_n 为具体设备标签; ω_n 为模型的权值; ε_n 为噪声; $K(x, x_i)$ 为用于进行不同设备分类的核函数。一般而言, RVM 受限于核函数的选择,常用核函数主要存在两种形式^[13]。本文所用的核函数形式为:

$$\begin{aligned} K(x, x_1) &= \lambda \exp\left(-\frac{\|x - x_1\|^2}{\sigma_1^2}\right) + \\ &(1 - \lambda) \left[x\left(\frac{x_1}{\sigma_2}\right)' + 1\right]^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, σ_1, σ_2 和 λ 分别组合核函数的参数, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。以往的研究中, σ_1, σ_2 和 λ 的数值往往根据研究人员的经验获取,主观性较强。而直接使用 PSO 进行参数寻优可能出现局部极值的问题^[14],本文采用 Quantum 优化 PSO 算法,其进化方程可写为^[15]:

$$X_{k+1}^i = X_k^p \pm |C_k - X_k^i| \ln \frac{1}{u} \quad (4)$$

其中, $X_k^p = \varphi P_k^i + (1 - \varphi) G_k$ 。 X_k^p 是位于 P_k^i 与 G_k 间的某一随机位置, P_k^i 指进行第 k 次迭代时编号为 i 的粒子所处的最优位置, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为粒子群大小; G_k 表示进行第 k 次迭代时整个种群的全局最优位置; C_k 为全部粒子在第 k 次迭代时各粒子最优位置均值; u 为 $(0, 1)$ 间的一个随机数值。

4 实验结果与分析

本文对山东省某 220 kV 变电站拍摄的电流互感器、电压互感器、避雷器、隔离开关以及断路器五种设备红外图像进行 Zernike 矩特征提取,结果表明 Zernike 矩对于红外图像边缘特征的提取效果很好。图 1 所示为电流互感器的处理结果,可明显看出处理后的设备图像与背景区分度极高,轮廓清晰,这有助于进行图像二值化分割,有利于后续处理中的设备几何特征提取与分类识别。

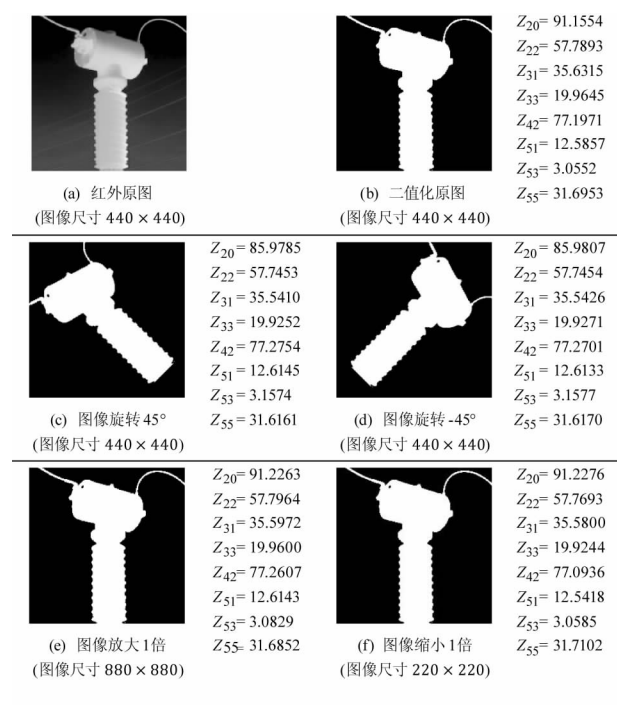


图 1 经处理的电流互感器图像的部分 Zernike 矩特征

Fig. 1 Partial Zernike moment characteristics of processed current transformer images

对 9 阶以内各 Zernike 矩特征进行分类验证可得到,采用 Z_{20} 、 Z_{22} 、 Z_{31} 、 Z_{33} 、 Z_{42} 、 Z_{51} 、 Z_{53} 与 Z_{55} 矩作为 RVM 分类器的特征输入得到的设备识别准确率最高。其中,对电流互感器图像分别采用二值化、顺时针旋转 45°、逆时针旋转 45°以及放大 1 倍与缩小 1/2 处理后的 Zernike 矩特征数据如图 1 所示。特征数据表明:同阶次 Zernike 矩特征的结果相对偏差较小。但是, Z_{20} 矩特征在进行图像旋转后存在较大的偏差,这主要源于电流互感器两侧进出线对应的 ρ 与 θ 两个参数计算误差所致。但从整体特征提取情况来看,Zernike 矩可在原始拍摄图像存在角度偏差时仍然可以高效提取特征。

图 2 给出了电压互感器、避雷器、隔离开关以及断路器四种设备二值化原图的 Zernike 特征。图 1 与图 2 中的五类设备二值化原图下同阶的相对差异极大,即使是在各设备均表现为圆柱体时特征仍然如此。以此类特征作为 RVM 的输入,不仅质量较高,同时能通过旋转得到较多数据,从而保证了用于训练的样本大小与质量。

对上述五种设备各 16 组样本进行旋转与缩放,得到共计 400 组样本数据。针对生成的不同设备样本,分别随机选取 50 组数据作为训练数据对基于 QPSO 进行参数寻优的 RVM 进行训练,并使用剩余样本作为测试数据进行效果分析,其结果如表 1 所

示,整体识别率可以达到 94.7%,这表明本文所用方法可以有效避免图像倾斜及与标准图库中设备尺寸不等带来的误识别问题。同时,经分析发现,误判率样本多出现于二值化处理难以区分目标设备与背景的图像,以及环境反射过强的环境,这要求在进行红外图像拍摄时尽可能采用简单背景以减少特征提取难度。

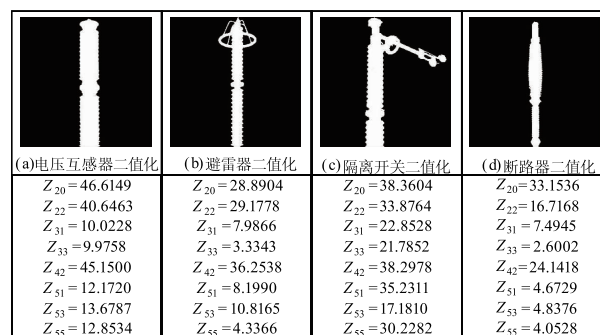


图 2 电压互感器、避雷器、隔离开关与断路器二值化图像的部分 Zernike 矩

Fig. 2 Partial Zernike moments for binary images of voltage transformer, lightning arrester, isolating switch and circuit breaker

表 1 QPSO-RVM 分类器设备识别准确率

Tab. 1 QPSO-RVM classifier device recognition accuracy

电力设备	输入样本数	正确识别数	识别率
电流互感器	30	29	96.7%
电压互感器	30	30	100.0%
避雷器	30	29	96.7%
隔离开关	30	28	93.3%
断路器	30	26	86.7%

5 结 论

本文开展了非标准化电力设备红外图像目标识别的研究,重点在于解决跨平台设备拍摄库中图像倾斜和尺寸不同带来的设备特征提取和设备识别难题。利用 Zernike 不变矩有效提取出各类设备红外图像几何形状特征量,对于同种电气设备,Zernike 矩特征具有极高相似度,而对于不同类型,其差异较为明显。以量子粒子群算法优化后的相关向量机可实现不同种类电力设备的分类识别,其识别精度可高达 94.7%,较传统方法具有更好的效果。本文方法可进一步应用于电力设备图像自动化识别和智能诊断,因此具有较高的实用性。

参考文献:

- [1] LI Xin, CUI Haoyang, XU Yongpeng, et al. Research on

- infrared image feature extraction and fault diagnosis of power equipment [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48 (5): 659–664. (in Chinese)
- 李鑫, 崔昊杨, 许永鹏, 等. 电力设备 IR 图像特征提取及故障诊断方法研究 [J]. *激光与红外*, 2018, 48 (5): 659–664.
- [2] LI Mengxing, WANG Haiyan, YANG Yidong, et al. Research and Implementation of a Power Equipment Infrared Diagnosis Algorithm [J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(8): 224–229. (in Chinese)
- 李孟兴, 王海燕, 杨屹东, 等. 一种电力设备红外诊断算法的研究与实现 [J]. *高压电器*, 2017, 53 (8): 224–229.
- [3] LIU Jian, XIE Chen, LIN Lihua. Automatic detection of oil level of electric power transformers using infrared image [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(4): 964–970. (in Chinese)
- 刘健, 解辰, 蒯丽华. 基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法 [J]. *高电压技术*, 2010, 36 (4): 964–970.
- [4] YU Ping, CUI Shaofei, GE Yongxin, et al. A new method for electrical equipment visual and infrared image registration based on alignment metric [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 737–740. (in Chinese)
- 余萍, 崔少飞, 葛永新, 等. 基于对齐度的电力设备红外与可见光的图像配准 [J]. *激光与红外*, 2008, 38 (7): 737–740.
- [5] LV Jun, WANG Futian, TANG Jin, et al. Online automatic recognition and diagnosis of electrical devices via thermal panorama [J]. *Computer and Modernization*, 2015, (8): 19–23. (in Chinese)
- 吕俊, 王福田, 汤进, 等. 基于全景温度场的电力设备在线自动识别与诊断 [J]. *计算机与现代化*, 2015, (8): 19–23.
- [6] CHEN Junyou, JIN Linjun, DUAN Shaohui, et al. Power equipment identification in infrared image based on Hu invariant moments [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(1): 5–8. (in Chinese)
- 陈俊佑, 金立军, 段绍辉, 等. 基于 Hu 不变矩的红外图像电力设备识别 [J]. *机电工程*, 2013, 30(1): 5–8.
- [7] RJ Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J Opt Soc Am*, 1976, 66(3): 207–211.
- [8] TONG Weihong, DU Tianjun. Target Detection Method for Low-SNR Infrared Images Based on Zernike Moments [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(7): 691–694. (in Chinese)
- 童卫红, 杜天军. 基于 Zernike 矩的低信噪比红外目标检测方法 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(7): 691–694.
- [9] WANG Yan, MU Chunyang, MA Xing. Traffic sign recognition based on zernike invariant moment and SVM [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(12): 128–132. (in Chinese)
- 王雁, 穆春阳, 马行. 基于 Zernike 不变矩与 SVM 的交通标志的识别 [J]. *公路交通科技*, 2015, 32 (12): 128–132.
- [10] WU Zhe, ZENG Jiexian, GAO Qiqi. Aircraft target recognition in remote sensing images based on saliency images and multi-feature combination [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(4): 532–541. (in Chinese)
- 吴喆, 曾接贤, 高琪琪. 显著图和多特征结合的遥感图像飞机目标识别 [J]. *中国图象图形学报*, 2017, 22 (4): 532–541.
- [11] YI Hui, MEI Lei, LI Lijuan, et al. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating units using the multi-class relevance vector machine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(17): 2843–2850. (in Chinese)
- 易辉, 梅磊, 李丽娟, 等. 基于多分类相关向量机的水电机组振动故障诊断 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(17): 2843–2850.
- [12] LUO Yiyong, ZHANG Hao, ZHANG Liting. Prediction model for cultivated land area based on self-adaptive differential evolution and relevance vector machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 257–264. (in Chinese)
- 罗亦泳, 张豪, 张立亭. 基于自适应进化相关向量机的耕地面积预测模型 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 257–264.
- [13] HU Yanyan, LI Dongsheng, ZHANG Shigui. Classification of hyperspectral image by convex combination kernels function SVM [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(5): 627–633. (in Chinese)
- 胡燕燕, 李东生, 张诗桂. 凸组合核函数的支持向量机高光谱图像分类 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (5): 627–633.
- [14] LIU Zhengyu, YANG Junbin, ZHANG Qing, et al. Estimation for SOC of lithium battery based on QPSO-BP neural network [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2013, 27(3): 224–228. (in Chinese)
- 刘征宇, 杨俊斌, 张庆, 等. 基于 QPSO-BP 神经网络的锂电池 SOC 预测 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27 (3): 224–228.
- [15] LI Yibo, ZHANG Bolin, LIU Zixin, et al. Adaptive stochastic resonance method based on quantum particle swarm optimization [J]. *Acta Physica Sinica* 2014, 63 (16): 40–47. (in Chinese)
- 李一博, 张博林, 刘自鑫, 等. 基于量子粒子群算法的自适应随机共振方法研究 [J]. *物理学报*, 2014, 63 (16): 40–47.