

〈红外应用〉

基于 GWO-SVM 的红外热成像低零值绝缘子识别

张美金, 屈秋帛

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为了准确识别电网中的低零值绝缘子, 提高劣化绝缘子诊断的准确率, 提出了一种使用灰狼算法优化 (grey wolf optimizer, GWO) 与二进制支持向量机 (support vector machine, SVM) 分类器相结合的模式, 对红外图像中的低零值绝缘子进行自动检测。首先对绝缘子红外图像进行增强, 利用 Ostu 算法对红外图像进行分割, 并对得到的二值图像进行倾斜角度矫正和切割, 提取绝缘子串的有效区域, 然后将图像特征用于向量机的分类识别。实验结果表明, 灰狼算法优化支持向量机比常用的网格搜索算法 (grid search, GS)、粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 等得到的分类模型能更准确、有效地对低零值绝缘子进行识别, 且准确率更高。

关键词: 绝缘子; 红外成像; 支持向量机; 灰狼算法

中图分类号: TM216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)04-0397-06

Infrared Thermography Low-zero Insulator Identification Based on GWO-SVM

ZHANG Meijin, QU Qiubo

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning University of Engineering and Technology, Huludao 125105, China)

Abstract: The accuracy of the diagnosis of degraded insulators is improved to accurately identify low-zero-value insulators in the power grid. A pair of insulator infrared images and a gray wolf optimizer (GWO) optimized binary support vector machine (SVM) classifier is proposed. Low-zero insulators are detected automatically. First, the infrared image of the insulator is enhanced; then, the infrared image is segmented using the Ostu algorithm; and the obtained binary image is subjected to tilt angle correction and cutting to extract the effective region of the insulator string. Finally, the image features are applied to the classification and recognition of vector machines. The experimental results show that the GWO-SVM can identify the low-zero insulator more accurately and effectively than the commonly used grid search (GS) and particle swarm optimization (PSO). Its rate is higher.

Key words: insulator, infrared imaging, support vector machine, grey wolf algorithm

0 引言

线路绝缘子主要承担着连接导体和电气绝缘的功能, 是整个电力系统的重要组成部分^[1-3]。由于绝缘子在生产过程中会造成一定的缺陷, 以及受到自然环境的影响, 绝缘子会自然劣化, 绝缘性能不断减弱, 绝缘子串的闪络概率将增大, 最终造成电网运行的不稳定, 而电力事故发生的概率也将增大, 给生产生活带来不利的影响。因此绝缘子的定期检测与及时维修对于维护保障电网的安全至关重要^[4-5]。

目前主流的低零值 (根据 DL/T596-1996《电力设备预防性试验规程》中的要求, 每片悬式绝缘子的绝缘电阻不应低于 300 MΩ, 500 kV 悬式绝缘子不低于 500 MΩ。低于上述水平的, 一般就认为是低值或零值绝缘子。) 绝缘子检测方法有: 光谱法、紫外脉冲法、径向温度法、超声波检测法等。但分析文献, 发现不少方法存在危险性高、算法复杂等问题, 均需进一步深入研究。由于低零值绝缘子在线路中温度变化明显, 目前许多电力公司逐步采用红外成像技术对低零值绝缘子进行检测。然而目前

收稿日期: 2019-08-08; 修订日期: 2019-10-24.

作者简介: 张美金 (1970-), 男, 山西原平人, 博士, 副教授, 主要研究领域为智能检测与信息处理。E-mail: zmj9985@163.com。

图像处理技术对电力设备进行在线检测的研究面临着图像特征提取的困难, 现有算法无法有效解决绝缘子状态检测的多分类问题, 且面临处理海量数据检测耗时, 检测正确率低的问题。因此, 面向大数据的低零值绝缘子检测方法是今后研究的重点。

随着神经网络算法的不断改进, 以深度学习为代表的人工智能理论与应用研究越来越多的被应用到故障检测识别中。目前 BP (back propagation) 神经网络、遗传算法^[6]、Petri 网络及决策树等不少数据挖掘的方法被成功应用到劣化绝缘子的诊断识别中。支持向量机同样被应用在电力系统的故障诊断领域, 然而, 直接采用支持向量机模型对绝缘子样本进行检测效果不尽理想。如何优化原有的支持向量机模型, 解决大数据环境下绝缘子检测问题, 是当下需要着重研究的方向。目前网格搜索法^[7]、布谷鸟搜索算法^[8]、粒子群算法^[9]等等都成功被应用到优化向量机的参数寻优中。灰狼算法与支持向量机相结合应用在诸多领域中, 如医学信号识别、植物种类识别、医学图像识别, 其实验结果都有所改善, 但很少被应用到电气设备故障诊断。本文提出的灰狼优化算法与支持向量机相结合针对低零值绝缘子检测识别的应用尚属空白。

本文通过对绝缘子红外图像进行处理, 对绝缘子红外图像样本进行多层次深度特征提取用于支持向量机分类识别, 并采用灰狼算法实现对支持向量机参数的优化, 实现对低零值绝缘子检测识别。

1 绝缘子串红外图像预处理

1.1 信号绝缘子串红外图像增强

灰度变换增强可以增强红外图像中的目标与背景的对对比度, 提高图像的质量。灰度变换作为一种应用广泛的图像增强技术可使图像清晰、特征明显^[10-12]。

设原图像为 $f(x,y)$, 其灰度范围为 $[a,b]$; 变换后的图像 $g(x,y)$, 其灰度范围线性的扩展至 $[c,d]$ 。

$$g(x,y) = \frac{d-c}{b-a} [f(x,y) - a] + c \quad (1)$$

图像中大部分灰度级分布在区间 $[a,b]$ 内, 有少部分在此区间之外, 为了改善增强效果, 可以令:

$$g(x,y) = \begin{cases} c \\ \frac{d-c}{b-a} [f(x,y) - a] + c \\ d \end{cases} \quad (2)$$

直方图均衡化作为一种应用广泛的图像增强方法, 可使绝缘子串同背景对比度增大, 方便后期提取绝缘子串。

如图 1 所示, 直方图均衡化增大了绝缘子串与背

景的灰度级, 图像的对对比度也增强了, 这样有利于后期正确分割出绝缘子串和背景。

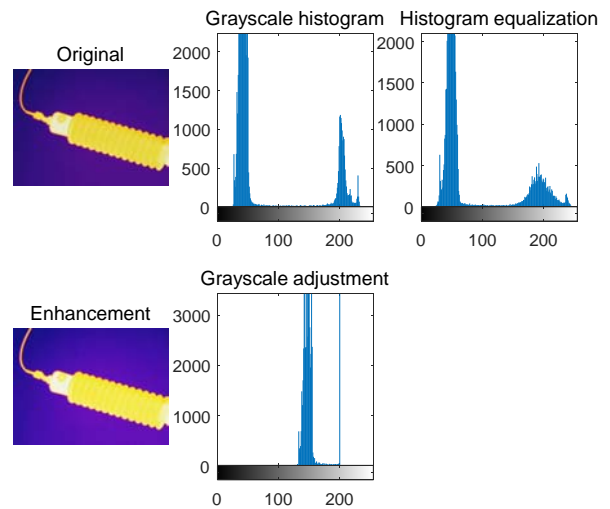


图 1 红外图像增强

Fig.1 Infrared image enhancement

1.2 基于 Ostu 算法的图像自适应阈值分割

首先利用最大类间方差法 (Ostu) 对增强后的绝缘子红外图像进行分割^[13], 如图 2 所示。该方法可自动选取阈值, 分割效果好、速度快。



图 2 分割效果图

Fig.2 The result after segmentation

1.3 绝缘子分割

对 Ostu 分割得到的二值图像进行切割, 提取图像中完整的绝缘子串, 如图 3 所示, 为绝缘子缺陷检测智能认知工作做好准备。



图 3 绝缘子串提取

Fig.3 Insulator string extraction

1.4 基于 Randon 变换的图像倾斜校正

运用 Ostu 算法将绝缘子串的候选区域分割提取后, 用 Randon 变换^[14]的图像倾斜校正算法进行绝缘子角度校正, 如图 4 所示。

2 灰狼算法支持向量机模型

2.1 支持向量机模型

支持向量机(support vector machine, SVM)是 Bell 实验室以 V. Vapnik 教授为首的研究小组针对小样本机器学习方法提出的一种新型模式识别方法^[15]。

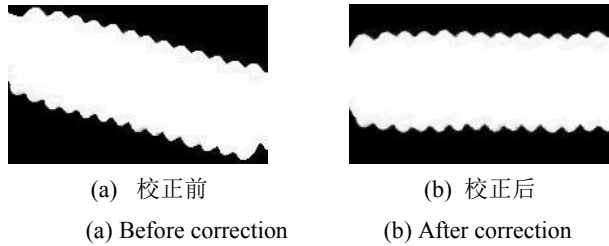


图 4 绝缘子串倾斜矫正

Fig.4 Insulator string tilt correction

对于线性不可分的特征向量, 需采用核函数将向量投放到高维空间中达到可以分类的效果。高斯径向基核函数作为应用最广泛的核函数, 在缺乏样本数据的先验知识时, 可通过调整参数取得较好的学习效果。本文采用高斯径向基核函数:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\delta^2}\right) \quad (3)$$

式中: $\delta > 0$ 为高斯核的带宽。

设 h 维的空间上, 针对线性可分问题, 所有样本均满足约束条件:

$$y_i(\omega^T X_i + \omega_0) - 1 \geq 0, i=1, 2, L \quad (4)$$

求解支持向量机可转化为分类间隔问题:

$$\min_{\omega, b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 \quad (5)$$

在实际机器学习时, 为了允许机器出现一些错分的点, 通常在约束条件中加入松弛变量 $\zeta > 0$, 增加一个常数 C 作为惩罚因子:

$$\min_{\omega, b, \zeta} \left(\frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^h \zeta_i \right) \quad (6)$$

以上问题的求解, 可以得到 SVM 回归表达式:

$$y(x) = \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^h \alpha_j y_j K(x_j, x) - b\right) \quad (7)$$

式中: α_j 为拉格朗日乘积因子。

2.2 灰狼优化算法

灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO), 是一种通过模拟灰狼捕猎过程中的狩猎和搜索行为建立的全局随机搜索算法。由澳大利亚学者 Seyedali Mirjalili 等人在 2014 年提出的新型算法^[16]。GWO 算法与粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 类似, 是一个从随机解出最优解的过程。该方法相较于 PSO、网格搜索算法 (GS) 等算法参数少, 结构简单, 同时又有较强的收敛性, 已成功应用于图

像处理等领域中。

将最优解设为 α , 第二个和第三个最佳解分别命名为 β 和 δ , 而其余的解均设为 ω 。狼群通过 3 只个体狼 α 、 β 和 δ 为初始解带领狼群 ω 在空间中向猎物 (最优解) 逼近, 经过图 5 所示的狼群移动方式, 不断迭代, 引导狼群不断靠近全局最优解。搜索过程狼群捕食位置更新:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (8)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (9)$$

式中: D 为当前灰狼距猎物距离; A 和 C 为系数向量; X_p 是猎物的位置向量。

$$A = 2 \cdot a \cdot r_1 - a \quad (10)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (11)$$

式中: a 随迭代次数从 2~0 递减; r_1, r_2 是 [0,1] 内的随机向量。

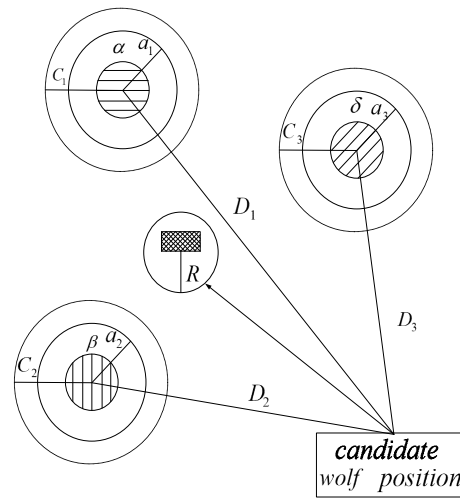


图 5 GWO 中的位置更新

Fig.5 Position updating in GWO

为了模拟狩猎行为, 假设 α , β 和 δ 对猎物的潜在位置有更好的了解, 在每次迭代过程中, 保留当前最优的 α , β 和 δ 解。

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \end{cases} \quad (13)$$

$$X_p(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (14)$$

式中： X_α 、 X_β 和 X_δ 分别代表 α 狼、 β 狼和 δ 狼当前位置； D_α 、 D_β 和 D_δ 分别代表当前狼位置和3只头狼的位置间的距离； A_1 、 A_2 和 A_3 为随机系数向量； t 表示迭代次数。

2.3 GWO-SVM

采用GWO优化算法对绝缘子红外图谱识别的SVM网络核参数惩罚因子 C 与核宽度 δ 进行参数优化，以达到图谱分类识别的准确性和泛化能力。

①输入绝缘子图谱的特征量，选取部分作为SVM的训练集，并将剩余的特征向量集作为测试集，以验证SVM识别的准确率。

②初始化狼群数量、迭代次数，设置惩罚因子 C 与核宽度 δ 的范围。

③SVM根据初始参数 C 与 δ 进行训练和测试，并以错误率最小化为目标。

④GWO以 C 与 δ 为猎物进行优化，达到最大迭代次数时输出GWO全局最优值。

⑤将处理后的绝缘子图谱样本分别作为SVM的训练集与测试集。采用最佳参数 C 与 δ 建立识别模型，并对测试样本进行预测、分析。

3 实验结果与分析

3.1 数据描述

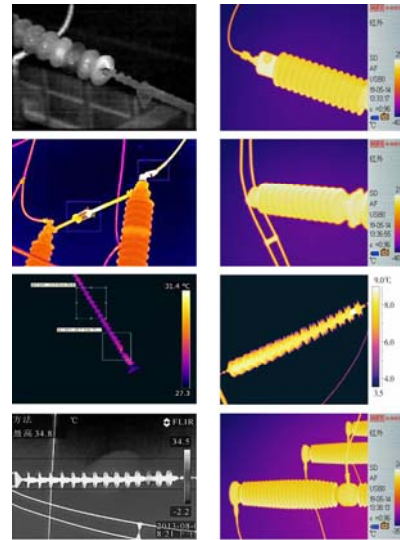
为了验证所提出的基于GWO-SVM劣化绝缘子状态检测的可行性，由于目前未建立绝缘子红外图像数据库，我们选取200幅绝缘子图像作为绝缘子样本库。采取随机抽样的方法选取两类样本，其中训练样本120幅，测试样本80幅。所有样本由多位人工分拣专家投票分为完好和低零值两类（如图6所示）。

3.2 绝缘子检测结果

本文利用灰狼优化算法、粒子群优化算法（random-search）和网格搜索算法（grid-search）对支持向量机参数进行优化。我们对比了3种算法的寻优时间、寻参效率和训练准确率。如表1所示，灰狼优化算法的各项性能都要比另外两种算法好，其准确率及寻参效率都高于其余两种优化算法。

从3种算法优化支持向量机的结果看，网格搜索耗时且识别准确率低，且寻优时存在复杂度高，运算量大等不足。粒子群优化算法收敛速度快，算法简单，但也存在很明显的缺点，它对于有多个局部极值点的函数，容易陷入到局部极值点中，得不到正确的结果，因此其优化向量机识别的正确率不高。而灰狼优化算法识别准确率可达到95.246%，寻优时间最少

且寻参效率高。灰狼算法充分利用先验知识，避免由于惩罚参数过大而导致算法陷入局部最优的风险。因此灰狼优化相比于粒子群搜索算法和网格搜索算法能高效的对低零值绝缘子进行识别。图7为SVM参数寻优过程。



(a) 低零值 (b) 正常
(a) Low zero (b) Normal

图6 部分绝缘子红外图像样本

Fig.6 Partial insulator infrared image samples

表1 参数寻优方法对比

Table 1 Comparison of parameter optimization methods

Parameter optimization method	Accuracy/%	Optimization time/s	Seeking efficiency/(s/time)
Grid-search	91.523	12.693	0.2487
Random-search	92.267	8.159	0.3156
Grey wolf optimizer	95.246	6.251	0.1145

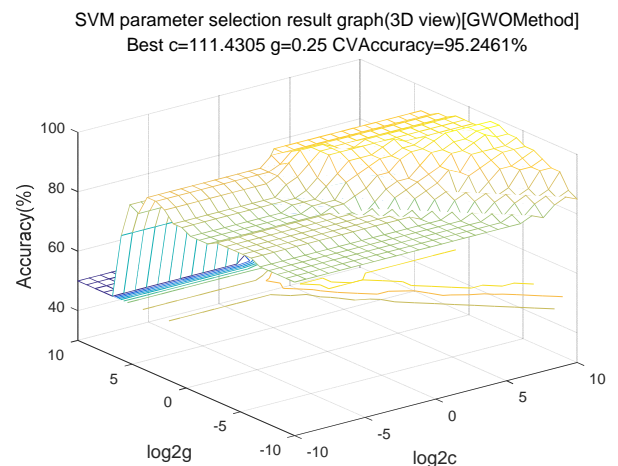


图7 SVM参数寻优过程

Fig.7 SVM parameter optimization process

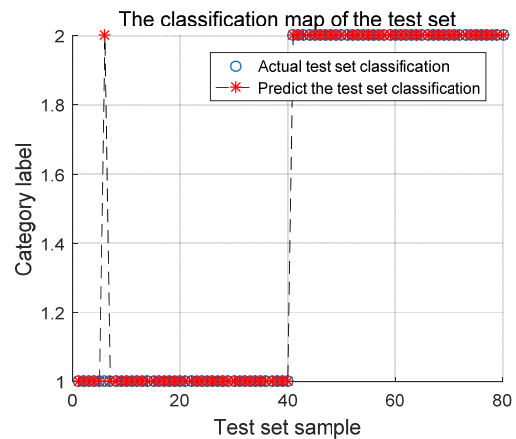
本文通过网格优化、粒子群优化和灰狼优化这 3 种优化算法对支持向量机的参数 C 和 δ 进行优化。图 8 为不同优化算法的故障识别对比。

通过图 8 不同优化算法的识别对比, 可以看出 GWO-SVM 诊断方式相比于 GS-SVM 和 PSO-SVM 识别正确率更高。对于图 8 分类的结果, 结合表 1, GWO-SVM 错误识别的绝缘子仅有一个, 且 GWO 寻优时间及寻参效率明显优于 GS 与 PSO, 满足预设要求。整个绝缘子串检测系统可以实现有效地对低零值绝缘子进行故障诊断, 具有工程实际意义。

4 结束语

1) 本文绝缘子红外图像样本进行了多层次深度特征提取, 相比于现有的深度模型提取的特征具有更强的鉴别能力。

2) 本文提出红外图像和灰狼算法优化支持向量机相结合的方法实现对低零值绝缘子的检测识别, 能够在大数据层面准确地识别低零值绝缘子, 减少人力, 物力以及财力。



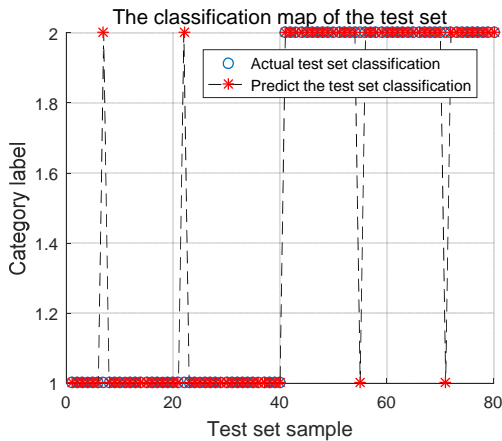
(c) 灰狼优化算法预测图

(c) GWO algorithm prediction map

图 8 不同优化算法故障识别对比

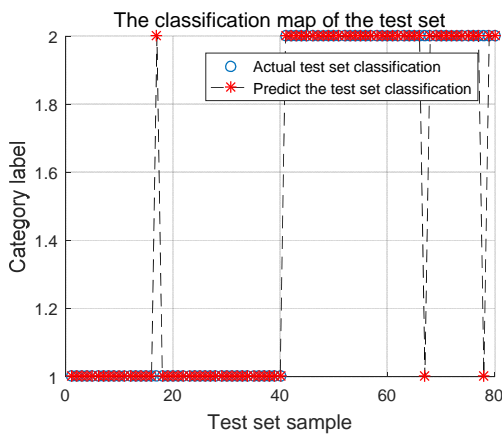
Fig.8 Comparison of fault identification of different optimization algorithms

3) 本文采用灰狼算法优化支持向量机参数, 并采用高斯径向基核函数, 得到的识别模型识别效果好。



(a) 网格搜索优化算法预测图

(a) GS algorithm prediction map



(b) 粒子群优化算法预测图

(b) PSO algorithm prediction graph

参考文献:

- [1] Lopes F V, Dantas K M, Silva K M, et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, **33**(2): 873-880.
- [2] Costa F B, Monti A, Lopes F V, et al. Two-terminal traveling wave-based transmission line protection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, **32**(3): 1382-1393.
- [3] CHENG Li, ZHANG Zhonghao, ZHANG Fuzeng, et al. Study on electrical properties and field solutions of water related heating of composite insulators on 500 kV AC transmission lines[C]//*Electrical Insulation and Dielectric Phenomena IEEE*, 2015: DOI: 10.1109/CEIDP.2015.7352019.
- [4] 吕玉坤, 赵伟萍, 庞广陆, 等. 典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J]. *电工技术学报*, 2018, **33**(1): 209-216.
LYU Yukun, ZHAO Weiping, PANG Guanglu, et al. Simulation of contamination deposition on typical shed porcelain and composite insulators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, **33**(1): 209-216.
- [5] 律方成, 刘宏宇, 汪佛池, 等. 高速气流条件下污秽颗粒在复合绝缘子表面的沉积判据[J]. *电工技术学报*, 2017, **32**(1): 206-213.
LYU Fangcheng, LIU Hongyu, WANG Fochi, et al. Deposit criterion of pollution particles on composite insulators surface under high speed aerosol[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, **32**(1): 206-213.
- [6] 司马文霞, 施健, 袁涛, 等. 特高压复合绝缘子电场计算及基于神

- 经网络遗传算法的均压环结构优化设计[J]. *高电压技术*, 2012, **38**(2): 257-265.
- SIMA Wenxia, SHI Jian, YUAN Tao, et al. Electric field calculation of ultra high voltage composite insulator and optimization design of corona ring structure based on neural network and genetic algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, **38**(2): 257-265.
- [7] 吴晓辉, 刘炯, 梁永春, 等. 支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用[J]. *西安交通大学学报*, 2007, **41**(6): 457-457.
- WU Xiaohui, LIU Jiong, LIANG Yongchun, et al. Application of support vector machine in transformer fault diagnosis[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, **41**(6): 457-457.
- [8] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, **43**(8): 8-13.
- XUE Haoran, ZHANG Kehang, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, **43**(8): 8-13
- [9] 张青, 赵黎明, 焦尚彬. 基于 PSO-SVM 的高压绝缘子污秽等级评定[J]. *高压电器*, 2008, **44**(6): 562-565.
- ZHANG Qing, ZHAO Liming, JIAO Shangbin. Assessment of contamination grades for high voltage insulator based on PSO-SVM[J]. *High Voltage Apparatus*, 2008, **44**(6): 562-565.
- [10] 刘颖, 陈谨女. 自适应中值滤波算法在图像处理中的应用[J]. *物联网技术*, 2013, **3**(3): 51-52.
- LIU Ying, CHEN Jinnv. Application of adaptive median filtering algorithm in image processing[J]. *Internet of Things Technologies*, 2013, **3**(3): 51-52.
- [11] 肖蕾, 何坤, 周激流, 等. 改进自适应中值滤波的图像去噪[J]. *激光杂志*, 2009(2): 44-46.
- XIAO Lei, HE Kun, ZHOU Jiliu, et al. Image noise removal on improvement adaptive median filter[J]. *Laser Journal*, 2009(2): 44-46.
- [12] 宁春玉, 赵春华. 自适应中值滤波算法滤除医学图像脉冲噪声[J]. *计算机工程与应用*, 2012, **48**(24): 153-156.
- NING Chunyu, ZHAO Chunhua. Removing impulse noise in medical images using adaptive median filtering algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, **48**(24): 153-156.
- [13] 杨新华, 吕意飞. 差分算子和改进 Otsu 算法结合的灰度图像阈值分割研究与实现[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(3): 32.
- YANG Xinhua, LV Yifei. Research and implementation of grayscale image threshold segmentation based on difference operators combined with instrument technique and sensor improved Otsu algorithm[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(3): 32.
- [14] 方梓涵, 张焕明, 朱家明. 基于 RADON 逆变换对 CT 系统参数标定及成像分析[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2018(2): 32.
- FANG Zihan, ZHANG Huanming, ZHU Jiaming. Parameter calibration and imaging analysis of CT system based on RADON inverse transform[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2018(2): 32.
- [15] 杨凯, 张认成, 杨建红, 等. 基于分形维数和支持向量机的串联电弧故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2016, **31**(2): 70-77.
- YANG Kai, ZHANG Rencheng, YANG Jianhong, et al. Series arc fault diagnostic method based on fractal dimension and support vector machine[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, **31**(2): 70-77.
- [16] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey Wolf Optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, **69**(3): 46-61.