

基于小波变换和HOG特征的变压器 局部放电类型识别方法

李平, 田秋松, 霍明, 陈熙伦, 林雨, 李佳伟

(国网内蒙古东部电力有限公司 建设分公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:不同类型的电力变压器局部放电对变压器绝缘造成的破坏程度不同,正确识别变压器局放类型对于评价变压器的绝缘状况至关重要。提出一种基于小波变换和梯度直方图(HOG)特征的变压器局放模式识别方法,首先根据变压器绝缘缺陷结构特点,设计制作了3种典型的局放缺陷模型,在实验室搭建测试平台并采用脉冲电流法获取变压器局放数据;其次对局放信号进行小波时频变换,获取局放信号的时频谱图并对该时频谱图进行灰度化和归一化处理;最后利用HOG算法提取局放时频谱图上的特征参量并送入分类器,实现变压器不同类型局部放电的模式识别。识别结果表明,该方法的平均识别准确率高达98%,能够有效识别变压器放电类型。

关键词:电力变压器;局部放电;小波变换;梯度方向直方图;模式识别

中图分类号:TM76 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22134

Recognition Method of Partial Discharge Type of Transformer Based on Wavelet Transform and Hog Feature

LI Ping, TIAN Qiusong, HUO Ming, CHEN Xilun, LIN Yu, LI Jiawei

(Construction Branch, State Grid Inner Mongolia East Power Co., Ltd., Hohhot 010010, Nei Monggol, China)

Abstract: The damage degree of transformer insulation caused by partial discharge (PD) will vary from one type to another type, so correctly identifying PD type is very important for evaluating the insulation status of the transformer. A PD pattern recognition method based on wavelet transform and histogram of oriented gradient (HOG) features was proposed. Firstly, three typical PD models were designed according to the structure characteristics of insulation defect in transformer and the PD experiment platform of transformer was built to collect PD signal by pulse current method. On this basis, the time-frequency (T-F) spectrum of PD signal was obtained by wavelet transform and then was grayed and normalized. Finally, the characteristic parameters on the T-F spectrum of PD were extracted by HOG algorithm and putted into classifier to realize PD pattern recognition. The experimental results show that the method has good performance for PD pattern recognition of transformer, and the average recognition accuracy is up to 98%.

Key words: power transformer; partial discharge (PD); wavelet transform; histogram of oriented gradient (HOG); pattern recognition

电力系统能否安全稳定地运行与电力变压器的运行状况密不可分。作为电力系统中的枢纽性设备,电力变压器在电力系统中有能量传输、变换的作用。绝缘劣化是变压器出现故障的主要原因,局部放电可及时反映变压器的绝缘劣化,并且不同的局部放电类型造成绝缘破坏程度不同,因此对局部放电类型进行有效识别对于评

估变压器绝缘状况具有重要意义^[1-3]。

当变压器的内部绝缘介质发生局部放电时常常会伴随着出现电、声、光、温度和气体等各种理化现象,可以通过测量以上的物理量实现局部放电的检测^[4]。不同类型的局部放电信号对应着不同原理的检测方法,其中主要包括脉冲电流法、特高频检测法(ultra high frequency, UHF)、超

声波法(acoustic emission, AE)以及光检测法,这其中脉冲电流法是实验室内局部放电测量和局部放电现场监测最常用的方法,该方法的检测灵敏度高,并且具备相应的国际测量标准。

由于局放信号是典型的非平稳信号,故局放信号的时变信息采用单纯的时域或者频域分析都不能很好地将其表示,但是可以采用时域与频域的联合时频分析去描述局部放电信号在时间和频率方面的特征^[5]。作为一种时频分析方法,小波变换具有多分辨率分析的特点,而且具备在时域、频域两域表征信号局部特征的能力。小波变换可使得窗口大小固定不变,但其形状可以发生改变,时间窗和频率窗都可改变,使得它在时频分析中具有较强的灵活性,能聚集到信号时段和频段的任意细节^[6]。因此我们可以利用小波变换时频域的局部化性质对变压器局部放电信号进行处理。

梯度直方图(histogram of oriented gradient, HOG)是Dalal等人最早提出用于行人检测的图像描述算子^[7]的方法,此方法运用HOG特征描述人体并形成人体丰富的特征集合,该特征集合包含了人体的外形、运动等信息。目前HOG特征已广泛应用于人脸识别、行人检测、目标跟踪等模式识别领域^[8],但其作为表示边缘化的结构特征,在电力设备局部放电模式识别中的运用研究较少。

本文提出一种基于小波变换和HOG特征的变压器局放模式识别方法。该方法首先在实验室通过脉冲电流法获取变压器发生典型局部放电时的时域信号波形;其次,采用小波变换对时域信号波形进行处理,获取变压器典型的局放时频谱图,并对其进行灰度化与归一化处理;然后利用HOG算法在典型时频谱图上提取局放的特征参量;最后将提取的局放特征参量送入分类器,实现变压器局部放电类型的识别。

1 小波变换理论

小波变换作为一种在时域、频域两域都具有表征信号局部特征能力的局域化分析方法^[9],其定义是将窗函数 $\Psi(t)$ 作位移 τ 之后,在变化的尺度 s 下和要分析处理的信号 $x(t)$ 作内积^[10-11]:

$$WT_x(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{\mathbb{R}} x(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (1)$$

在频域上可将其等效表示为

$$WT_x(s, \tau) = \frac{\sqrt{s}}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} X(\omega) \Psi^*(a\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

式中: $\Psi(t)$ 为基本小波; $X(\omega)$, $\Psi(\omega)$ 分别为 $x(t)$, $\Psi(t)$ 的傅里叶变换; $\frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ 为小波变换的基函数,是窗函数 $\Psi(t)$ 的时间平移 τ 和尺度伸缩 s 的结果。

其中,引入乘因子 $1/\sqrt{s}$ 的目的是为了归一化小波变换的结果。从式(1),式(2)中可以看出,当 $s > 1$ 时,窗函数将被扩张,导致窗口宽度变大;当 $s < 1$ 时,窗函数将被压缩,导致窗口宽度变小。如果需要考虑尺度变换在频域方面的效果,可对时间窗函数 $\Psi(t)$ 进行Fourier变换得到窗函数的频率特性 $\Psi(\omega)$,当 $s > 1$ 时, $\Psi(\omega)$ 就将被压缩,频带变窄;当 $s < 1$ 时, $\Psi(\omega)$ 就被拉伸,频带变宽,此时时间参数 τ 仍具有时移作用。综上所述可知,小波变换作为一种能根据信号自身特征去自适应选择分辨率的时频局域化分析方法,适用于变压器局部放电信号的分析。

2 HOG特征提取

HOG的核心思想是用梯度或者边缘方向密度分布去很好地描述一幅图像中所检测目标的外形^[12],其本质是统计梯度信息,而梯度主要存在于边缘的地方。对图像进行HOG特征提取的算法流程如下^[13-14]:

1) 对时频谱图进行灰度化与归一化处理:

$$\begin{cases} G(x, y) \Rightarrow I(x, y) \\ H(x, y) = I(x, y)^{\text{gamma}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I(x, y)$ 为局放灰度图像 (x, y) 的像素值; G 代表进行灰度化处理; gamma 一般取为0.5。

2) 采用简单的一阶模板梯度算子 $(-1, 0, 1)$ 对原图像做卷积运算,并对图像中每个像素的大小和梯度方向进行计算:

$$\theta(x, y) = \frac{\tan^{-1}[H(x, y+1) - H(x, y-1)]}{H(x, y+1) - H(x, y-1)} \quad (4)$$

$$m(x, y) = \sqrt{\frac{[H(x+1, y) - H(x-1, y)]^2 + [H(x, y+1) - H(x, y-1)]^2}{[H(x, y+1) - H(x, y-1)]^2}} \quad (5)$$

式中: $\theta(x, y)$ 为该点的梯度方向; $m(x, y)$ 为该点的幅度值。

3) 构建梯度直方图。将局放时频灰度图归一化为 $M \times N$ 像素大小,把图像分成大小相等的正方形小块(block),将block块的大小设为 $n \times n$,则局放灰度图中共包含 $(M/n) \times (N/n)$ 个不重叠的

block;再把每一个block分为更小的正方形单元(cell),设cell的像素大小为 $a \times a$,采用梯度方向对cell内的每个像素进行加权投影处理,这其中的梯度幅值就可作为投影的权值。

4)对梯度强度进行归一化。为减少局部光照对HOG特征的影响,以block为单位对梯度强度进行L2范数正则化。设 x_n 是对应的block向量,则标准化的向量 s_n 为

$$s_n = \frac{x_n}{\sqrt{\|x_n\|^2 + \xi^2}} \quad (6)$$

式中: ξ 为接近0的正数。

5)形成局放特征向量。把所有block中的直方图向量联结起来即可得到该局放灰度图像的HOG特征向量。

3 算法流程

基于小波变换和HOG特征结合的变压器局放模式识别算法实现主要包含以下步骤:1)采用脉冲电流法采集变压器典型局放缺陷的局放信号,对局放信号进行小波变换处理,最终获取变压器不同类型的局放时频谱图;2)对局放时频谱图进行预处理,将图像进行归一化和灰度化预处理,并依据算法需要划分出训练样本集;3)对不同类型的局部放电灰度图像进行HOG特征算法处理,形成HOG特征向量;4)将提取的HOG特征向量送入分类器,实现变压器局部放电类型的识别。算法的实现流程如图1所示。

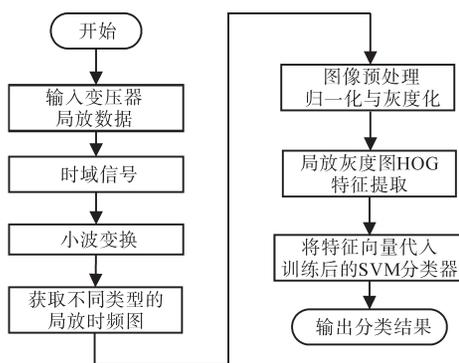


图1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

4 试验结果分析

4.1 缺陷模型及试验平台设计

变压器制作工艺以及其长期运行等因素会造成变压器绝缘结构劣化,进而发生局部放电,其放电的形式主要包括沿面放电、电晕放电和气

隙放电^[15]。为了使放电模型不仅突出变压器设备典型放电发展过程的特征,而且尽量符合变压器现场的实际运行情况,本文结合变压器内部的绝缘结构特点,设计制作了这3种局部放电模型,如图2所示。

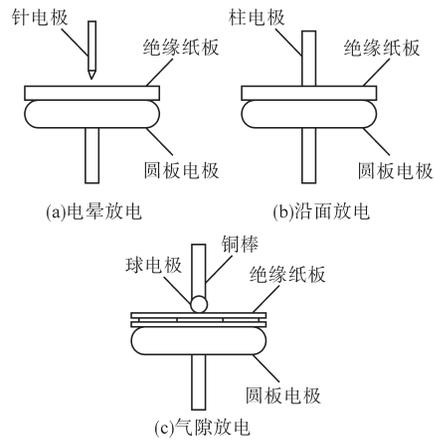


图2 3种局部放电试验模型

Fig.2 Three types of partial discharge experimental models

在高压实验室搭建变压器局部放电试验平台,利用脉冲电流法采集典型局部放电故障模型放电信号。该试验平台如图3所示,主要包括工频高压试验控制系统和局部放电检测系统这两部分。工频高压试验控制系统的保护电阻为10 kΩ,电容式分压器电容为1 000 pF;局部放电检测系统使用HCPD-2622型数字式局放巡检仪采集局部放电信号时域波形图。

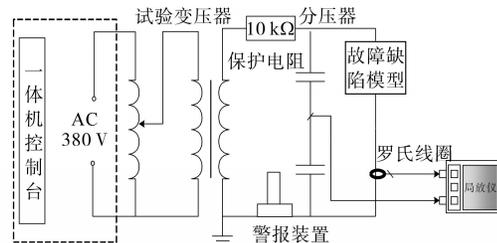


图3 局部放电试验平台

Fig.3 Partial discharge experimental platform

利用上述局放试验平台采集变压器典型的局部放电信号,对局放信号进行小波变换后得到局放信号的时频谱图,将局放时频谱图转换成灰度图(灰度值为0~255),然后将所得图像的分辨率采用双线性插值算法缩放到128×128,最后将图片像素归一化到[0,1]之间。对每种局部放电类型采集205次,共615张归一化灰度化的图像作为样本。为了保证实验结果的客观性,随机选取每种放电类型的图像作为训练样本和测试样本,并建立训练样本和测试样本比为0.7:0.3的样

本集。

4.2 小波变换参数的选择

小波变换的核心思想是将原始信号中各个频率段的信息进行抽取,进而在时间轴上进行显示,因此我们需要选择合适的母小波函数和小波分解重构层数来准确提取局放信号特征。在信号处理效果方面,db, sym, coif, bior这几种小波都取得不错的效果,但根据前人的研究结果,db小波函数在分析局部放电信号时更为有效,故本文选取“db3”小波作为母小波函数;为了对小波分解重构层数进行试验,且考虑到局放信号频率成分的复杂性,本文利用8,9,10,11,12层分解层数进行试验,确定最终小波分解的层数。采用训练样本和测试样本比为0.7:0.3的样本集进行测试,利用HOG描述子提取不同类型的局部灰度图的特征参量,采用SVM分类器完成局放模式的识别。考虑到HOG特征的维数偏大,导致其训练与学习时间较长,本文先采用PCA方法对提取的HOG特征进行线性降维,将降维后的特征向量送入分类器完成局放模式的识别。测试结果如表1所示,从表1中可以看出,当小波分解重构的层数为10层时,变压器不同局放模式的识别率最高,高达91%。因此,本文在对变压器局放信号进行处理时选择db3小波作为母小波函数,并对其进行10层小波分解重构,图4为变压器不同类型局放信号经小波分解重构后的局放时频谱图。

表1 不同小波分解重构层数的识别准确率

Tab.1 Recognition accuracy of different wavelet decomposition reconstruction layers

小波分解层数	8	9	10	11	12
识别准确率/%	87.89	89.25	91.03	89.76	90.17

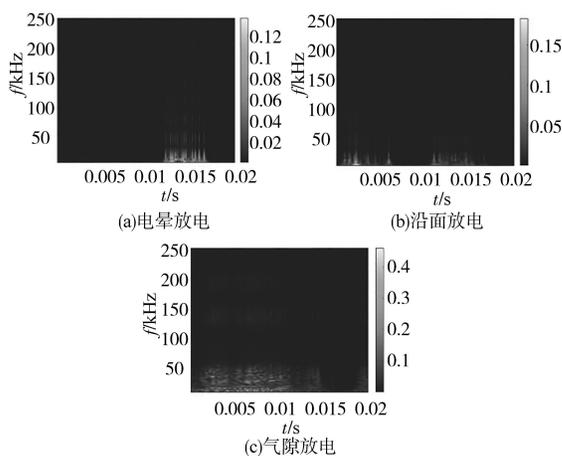


图4 局放时频谱图

Fig.4 Time-frequency spectrums of partial discharge

4.3 HOG参数与图像分辨率的选择

文中选用正方形单元(cell)和正方形小块(block)来表示HOG,由于不同的cell和图像分辨率对HOG特征的提取有影响,本文通过试验确立HOG的cell大小和图像分辨率。采用训练样本和测试样本比为0.7:0.3的样本集进行测试,测试时取block为2×2,方向角度bins为9,通过HOG描述子提取不同图像的特征向量,将提取的特征向量送入随机森林(random forests, RF)分类器,完成变压器局部放电类型的模式识别。识别结果如表2所示,从表2中可以看出,当局放灰度图像的分辨率为128×128,cell为8×8时,其识别效果最佳,平均识别率高达95.07%。因此,本文在对局放时频谱图进行HOG特征提取时选择局放谱图的分辨率为128×128,block为2×2,cell为8×8,方向角度bins为9。

表2 HOG参数与图像分辨率选择

Tab.2 HOG parameters and image resolution selection

图像分辨率	cell大小	识别准确率/%
32×32	4×4	86.12
	8×8	90.03
	16×16	87.47
64×64	4×4	87.26
	8×8	94.56
	16×16	92.23
128×128	4×4	91.13
	8×8	95.07
	16×16	92.22

4.4 分类器识别结果

综上所述,基于0.7:0.3的测试样本集,本文采用db3小波对局放信号进行10层小波变换与重构,对变压器不同局放类型的局放时频谱图进行HOG特征提取,将提取的特征向量送入到支持向量机(support vector machine, SVM)集成分类器、反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)集成分类器和RF集成分类器对局部放电类型进行模式识别,测试不同分类器的使用效果,其测试结果如表3所示。

表3 基于不同分类器的局部放电模式识别准确率

Tab.3 Recognition accuracy of partial discharge pattern based on different classifiers

缺陷模型	识别准确率/%		
	SVM	BPNN	RF
电晕放电	95.74	89.36	93.62
沿面放电	100	94.23	98.08
气隙放电	98.15	92.59	90.74
平均	97.96	92.06	94.15

从表3的识别结果可以看出,采用SVM分类器的综合识别准确率要高于采用BPNN分类器和RF分类器的综合识别准确率,基于时频谱图HOG特征的变压器局部放电类型识别方法的准确率能够高达98%。因此,我们推荐使用SVM分类器,同时为了提高算法模型的运行速度与识别准确率,使用网格参数寻优SVM进行分类识别,其中核函数选择径向基核函数, c 取10, γ 取0.1。

为验证小波变换对局放信号的表征能力,本文采用HOG特征提取器分别对局放信号原始波形图像、短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)和小波变换下的时频谱图进行特征提取,并将提取的特征向量统一送入到SVM分类器中进行分类,其分类识别准确率如表4所示。从识别结果中可以看出,经过小波变换后的局放识别准确率要高于原始波形图像和经STFT变换后对应的识别准确率。这说明,小波变换这种联合时频分析的方法比原始波形图像更容易突显放电特征,且相对于STFT,小波变换拥有更强的局部信号表征能力,能够更好地反映局放信号时频特性。另外,为了验证HOG特征提取器对于小波变换时频谱的优越性能,本文将HOG算法与常见的局部二值模式(local binary pattern, LBP)算法和分形理论的特征提取能力进行对比,在其统一使用SVM分类器下的各种算法的识别准确率如表5所示。从表5可以看出,采用HOG算法的准确率基本高达98%,大于采用LBP和分形理论算法的93%,94%,表明HOG算法在处理变压器局放模式识别时明显优于LBP和分形理论。这说明,HOG算法更适用于局放信号的小波时频谱图,所提取的特征参量能够更好区分不同类型的局部放电信号。综上所述,基于小波变换和HOG特征的变压器局放模式识别方法有较高的识别准确率,具备一定工程实用价值。

表4 不同时频变换下的识别性能比较

Tab.4 Comparison of recognition performance under different time-frequency transformations

特征	识别准确率/%			
	电晕	沿面	气隙	总计
原图+HOG特征	93.26	96.51	93.04	94.27
小波变换+HOG特征	95.74	100	98.51	97.96
STFT+HOG特征	95.47	96.58	94.12	95.39

表5 不同特征提取方法的识别性能比较

Tab.5 Comparison of the recognition performance of different feature extraction methods

特征	识别准确率/%			
	电晕	沿面	气隙	总计
小波变换+HOG特征	95.74	100	98.51	97.96
小波变换+LBP特征	92.70	94.22	93.37	93.46
小波变换+分形特征	92.47	95.18	94.08	93.91

5 结论

本文研究得出结论如下:1)对变压器典型的局部放电信号进行小波变换可在最大程度上保留变压器原始局部放电信号的有效信息;对不同类型的局放时频谱图进行HOG特征提取,该特征向量能够反映变压器不同故障类型局放信号之间的差异信息;小波变换能够增强HOG算法对局放时频谱图细节特征和全局特征的表示能力,有效提高了局部放电识别的性能。2)从上述最终的识别结果可以看出,基于时频谱图HOG特征的变压器局部放电类型识别方法能够有效地区分变压器内部3种典型的绝缘缺陷,该方法的综合识别准确率达98%,在变压器设备局部放电类型模式识别领域具备良好的发展前景。

参考文献

- [1] 唐志国,唐铭泽,李金忠,等. 电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术,2017,43(7):2263-2277.
- [2] 刘兵,郑剑. 基于卷积神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 高压电器,2017,53(5):70-74.
- [3] 唐建伟,苏红,严家明,等. 矿用干式变压器局部放电模式识别方法[J]. 工矿自动化,2019,45(1):76-80.
- [4] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006:168-179.
- [5] 郭灿新,勇明,徐敏骅,等. S变换在电力电缆局部放电信号时频分析中的应用[J]. 电工技术学报,2010(11):9-14.
- [6] 韩宝国,马驰,李静鹏,等. 基于DTCWT与LLE算法的变压器局部放电特高频信号特征参数提取方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(20):65-72.
- [7] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//Proc. IEEE Conference on Computer Vision Pattern Recognition, San Diego: IEEE Press, 2005: 886-893.
- [8] 孙玉,刘贵全. 基于HOG与LBP特征的人脸识别方法[J]. 计算机工程,2015,41(9):205-208,214.
- [9] 钟森海,汪烈军,张莉. 小样本条件下的人脸特征提取算法[J]. 计算机工程与应用,2015,51(8):165-169.
- [10] 杨东星. 干式变压器局部放电在线监测及模式识别的研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.

(下转第62页)

的条件下,设置两种WPT系统的磁场为相同的上、下限值,即 $B \in [6.678 \times 10^{-5}, 6.5364 \times 10^{-4}]$ T,可知相较于柱形螺旋发射线圈,锥形螺旋发射的聚磁效果更好,系统的磁场更加集中在发射和接收线圈上,使得周围环境中的漏磁量大幅度减少。

4 结论

本文基于磁耦合式无线电能传输技术的原理,通过对盘式线圈无线电能传输系统的建模和磁场分析,提出了盘式发射线圈最优半径的理论,探究并量化了最优发射半径与系统传输距离之间的关系,以用于指导优化的锥形螺旋发射线圈的设计。经有限元仿真验证,优化后的锥形螺旋发射线圈WPT系统相较于传统的柱形螺旋发射线圈WPT系统,耗材降低了34.3%,互感值提升了140.16%,系统周围环境中的漏磁量更少,整体达到了较好的传输性能。

参考文献

[1] Lee W, Yoon Y K. Wireless power transfer systems using metamaterials: a review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147930-147947.
 [2] 高世萍,冯玉明. 感应式和电场式结合的无线电能传输系统研究[J]. 电气传动, 2020, 50(12): 88-92.
 [3] 徐晨洋,张强,李岳,等. 体内植入装置的磁耦合谐振无线电能传输分析[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(10): 49-51, 55.
 [4] 吴丽君,李冠西,张朱浩伯,等. 一种具有恒流恒压输出自切换特性的电动汽车无线电能传输系统拓扑[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3781-3790.
 [5] 王帅,薛寒寒. 小功率磁耦合谐振式无线供电系统的研究[J].

电子技术应用, 2020, 46(2): 109-113, 120.
 [6] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
 [7] 董纪清,杨上苹,黄天祥,等. 用于磁耦合谐振式无线电能传输系统的新型恒流补偿网络[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4468-4476.
 [8] 张焱强,金楠,唐厚君,等. 无线电能传输基于负载阻抗匹配的最大效率追踪[J]. 电力电子技术, 2018, 52(5): 25-27.
 [9] Rosu G, Marinescu A, Samoilescu G, et al. The efficiency of an underwater inductive charging system for AUVs based on truncated coils[C]//2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2019.
 [10] Song B, Wang Y, Zhang K, et al. Research on wireless power transfer system for torpedo autonomous underwater vehicles[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(9): 1-8.
 [11] Sun G, Muneer B, Li Y, et al. Ultracompact implantable design with integrated wireless power transfer and RF transmission capabilities[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2018, 12(2): 281-291.
 [12] Gulzar H, Ain N U, Zahid T, et al. A comprehensive electromagnetic design, simulation and analysis of wireless charging coils for large power applications[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 2018.
 [13] 汪泉弟,康健炜,王赢聪,等. 磁谐振无线电能传输系统空间磁场的时空特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4486-4495.
 [14] 沈栋,杜贵平,丘东元,等. 无线电能传输系统电磁兼容研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2855-2869.

收稿日期:2021-01-17

修改稿日期:2021-02-09

~~~~~  
 (上接第56页)

[11] 李跃先. 基于小波变换与神经网络的GIS局部放电故障诊断研究[D]. 沈阳:东北大学, 2011.  
 [12] 薛茹,常岐海,吴宗胜. 基于Gabor小波与HOG特征的目标检测方法[J]. 电视技术, 2014, 38(7): 182-185.  
 [13] 包晓敏,任文静,吕文涛. Gabor小波与HOG特征融合的行人识别算法[J]. 无线电工程, 2017, 47(10): 25-29.  
 [14] 范国娟,范国卿,柳絮青. HOGG: 基于Gabor变换与HOG特

征的人体检测[J]. 微型机与应用, 2016, 35(21): 14-15, 19.  
 [15] 李正明,钱露先,李加彬. 基于统计特征与概率神经网络的变压器局部放电类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 55-60.

收稿日期:2020-07-05

修改稿日期:2020-07-24