

基于改进迁移学习的红外光谱图像自适应分割研究

陈静, 徐伟, 张磊

(国网扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 为了从红外光谱图像中获取有用信息, 设计基于改进迁移学习的红外光谱图像自适应分割方法。采集系统获取红外光谱图像, 采用直方图均衡技术对红外光谱图像进行增强处理, 依据增强后图像各帧像素的高斯正态分布, 重建红外光谱图像, 将红外光谱图像重建结果输入双分支卷积神经网络模型, 利用迁移学习子网提取红外光谱图像全局特征, 结合残差注意力子网提取的图像细小特征; 通过集成学习融合差异红外光谱图像特征, 输出分割后的红外光谱图像。测试结果表明: 该方法可实现红外光谱图像分割, 且分割结果清晰, 具有显著细节特征。

关键词: 改进迁移学习; 红外光谱图像; 自适应分割; 双分支卷积; 残差注意力; 扩散平滑

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0163-05

Research on Adaptive Segmentation of Infrared Spectral Images Based on Improved Transfer Learning

CHEN Jing, XU Wei, ZHANG Lei

(State Grid Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225000 China)

Abstract: In order to obtain useful information from infrared spectral images, an adaptive segmentation method based on improved transfer learning is designed. The acquisition system obtains the infrared spectral image, uses histogram equalization technology to enhance the infrared spectral image, reconstructs the infrared spectral image according to the Gaussian normal distribution of each frame pixel of the enhanced image, inputs the infrared spectral image reconstruction results into the two branch convolution neural network model, uses the migration learning subnet to extract the global characteristics of the infrared spectral image, and combines the small features of the image extracted by the residual attention subnet. Through integrated learning and fusion of different infrared spectral image features, the segmented infrared spectral image is output. The test results show that this method can achieve infrared spectral image segmentation, and the segmentation results are clear, with significant details.

Keywords: improved transfer learning; infrared spectral image; adaptive segmentation; double branched convolution; residual attention; the spread of smooth

0 引言

在一束带有连续波段的红外线穿透物体^[1], 物体分子内某些基团的运动频率, 以及红外线的频率相同的情况下, 分子摄入热能, 并从原始基态运动能级转换为能量更强的运动能级, 同时在分子完成红外线辐射摄入后展开运动能级转移, 此时该位置相同波长的光也被物体所接收^[2-3]。由此可见, 红外光谱的本质是通过物体分子间的运动情况, 来判断其分子结构及物体识别的方法。通过设备记录分子接收红外线的现象获取红外光谱图, 其主要包括透射光谱、反射光谱两种方法。

图像分割是划分图像内意义不同的区域, 区域之间互相独立^[4], 各区域符合图像特征的相似性准则。通过图

像分割可为后续红外光谱图像应用奠定基础。为了从红外光谱图像中提取有效的目标区域信息, 周子杰等人利用神经免疫网络对红外光谱图像进行分割^[5], 任志淼将全卷积神经网络与动态区域生长的方法相结合, 实现红外光谱图像分割^[6], 但是前者分割后的图像存在散斑, 后者分割后的图像边缘较为模糊。

迁移学习是指在相关领域内迁移标注信息、实现或优化目标领域的学习效果^[7], 为此, 本文提出基于改进迁移学习的红外光谱图像自适应分割方法, 通过该方法可有效完成红外光谱图像的准确分割, 并获取清晰的图像边界。

1 红外光谱图像自适应分割方法具体设计

1.1 红外光谱成像原理

用户可通过红外光谱获取温度、光谱信息。温度信息是通过红外传感器测量辐射能量的幅值所得, 光谱信

*基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目 (J2022082)

收稿日期: 2023-09-14

息是通过传感器测量光谱获取^[8]。由此可知,红外光谱传感器成像主要包括红外辐射成像与光谱成像两部分。红外辐射成像是红外辐射能量在大气影响下被采集至传感器的过程,其中,传感器采集的能量表示为:

$$Q(\lambda) = \tau(\lambda)\varepsilon(\lambda) + Q_{\uparrow}(\lambda)(1 - \varepsilon(\lambda))\tau(\lambda)Q_{\downarrow}(\lambda) \quad (1)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 、 $\varepsilon(\lambda)$ 分别表示大气透过率、物体比辐射率, $Q_{\uparrow}(\lambda)$ 、 $Q_{\downarrow}(\lambda)$ 分别为大气上、下行的辐射能量。

光谱成像是在光谱传感器采集能量时,其能够在不间断的光谱空间内测量并记录能量的辐射值,构成光谱维,最后得到一组光谱连续且区间较窄的数据图像。

1.2 红外光谱图像采集

红外光谱图像采集系统包括图像光谱仪、红外相机、光纤卤素灯、电荷耦合器件等。该系统应用了红外光谱成像原理,通过光纤卤素灯照射变压器并利用红外相机完成拍摄,红外光谱图像被瞬时视场捕捉并在图像光谱仪内实现光谱成像,然后经分光组件处理后在电荷耦合器件内完成红外光谱成像。电荷耦合器件光敏面平行、垂直于图像光谱仪的二维分别称为空间维、光谱维。采集红外光谱图像前,需调试采集系统内装置的所有器件,确保红外光谱图像的分辨率不失真。受红外相机产生磁场影响,光源能量在各波段中的分配并不一致,对红外光谱成像质量产生了极大影响,需对所拍摄红外光谱图像展开标定。通过红外光谱成像测量设备的白色校准片,可以获取全白的标准红外光谱图像 O ,通过关掉相机曝光以获取全黑的标准红外光谱图像 B ,通过变换所收集的绝对红外光谱图像 E 得到相对标准红外光谱图像 R 为:

$$R = \frac{E - B}{O - B} \quad (2)$$

1.3 红外光谱图像增强

红外光谱图像增强是按照某类特定需要,凸显红外光谱图像内存在价值的信息,滤除或减少无效信息,使处理后红外光谱图像更满足人眼的视觉特征,便于后期实施图像分割。通过直方图均衡技术完成所采集红外光谱图像的增强,令红外光谱图像灰度分布匀称,提升红外光谱图像对比度。灰度直方图可分布统计所采集红外光谱图像内所有像素灰度值,将 D 个灰度级的红外光谱图像的直方图函数表示为:

$$P(r_k) = n_k (k = 0, 1, \dots, D-1) \quad (3)$$

式中, n_k 、 r_k 分别描述灰度级为 k 的范围内像素点数、灰度区间值。

红外光谱图像灰度级的概率密度函数为:

$$p(r_k) = \frac{n_k}{N} \quad (4)$$

式中, N 为红外光谱图像内总像素点, $\sum p(r_k) = 1$ 。

红外光谱图像灰度级的累积分布函数是:

$$C(r_k) = \sum_{i=0}^k p(r_i) \quad (5)$$

通过式(5)得出灰度转换函数公式为:

$$Z(I_k) = \frac{(D-1) \times C(r_k) \times I_k}{r_k} \quad (6)$$

式中, I_k 是灰度级为 k 的范围中某像素的初始像素值; $Z(I_k)$ 为完成映射的像素值。

1.4 红外光谱图像重建

为更好地描述红外光谱图像内各帧像素的分布情况,需要应用增强后红外光谱图像各帧像素的高斯正态分布构建重建模型。红外光谱图像前景、背景的占比通过红外光谱图像重建模型内所有高斯正态分布的权重比描述。设 $\{G_1, G_2, \dots, G_R\}$ 为增强后红外光谱图像内各帧像素在时间域 R 内发生的变化, $f(X, Y)$ 为高斯概率密度函数,针对某任意挑选的红外光谱图像各帧像素时间 G_i ,其为重建红外光谱图像背景的占比表示为:

$$M(G_i) = \sum_{\delta} f(X, Y)w \quad (7)$$

式中, w 为权值, δ 表示高斯分布数。

通过修改红外光谱图像像素为高斯正态分布,降低红外光谱图像前景与背景间相对位移存在的重建差异。通过灰度与方差之间的函数关系描述红外光谱图像背景,得到:

$$\Psi(X, Y) = [\mu, \theta^2] = [\mu(X, Y), \theta^2(X, Y)] \quad (8)$$

式中, μ 为红外光谱图像各帧像素灰度完成高斯分布的平均值, θ^2 为红外光谱图像的像素方差。

按照图像灰度理论可知,通过对红外光谱图像各帧像素的灰度计算约束,可实现红外光谱图像前景、背景和原始红外光谱图像的精确匹配,从而实现增强后红外光谱图像重建。

1.5 改进迁移学习的红外光谱图像自适应分割

为获取细节更清晰的红外光谱图像,通过迁移学习子网与残差注意力子网构建双分支卷积神经网络图像分割模型。首先将完成重建的红外光谱图像输入图像分割模型,通过迁移学习子网构建预训练模型,在训练过程中提取所输入的红外光谱图像全局特征,并实现红外光谱图像特征属性的增强,然后采用残差注意力子网帮助迁移学习子网训练模型参数,并完成红外光谱图像的精特征提取,弥补迁移学习子网疏漏的同时防止模型出现梯度消失或爆炸的问题,最后采用尾部集成学习技术融合两个子网络的差异红外光谱图像特征,获取红外光谱

图像模型参数,实现红外光谱图像分割,并输出分割后的清晰红外光谱图像。

迁移学习子网主要包括编码器和解码器两个部分。编码器应用 ResNet101 进行下采样,可有效实现红外光谱图像的特征提取。但在下采样过程中会丢失部分所提取的特征,需在解码器中增加注意力模块。编码器接入解码器所使用的形式为基础跳跃,然后展开上采样,帮助解码器得到更多红外光谱图像的细节特征。在迁移学习子网末端添加特征增强模块,增强双分支模型对红外光谱图像特征的学习能力。注意力机制模块可应用全局平均、最大池化处理通道信息(红外光谱图像特征图),同时注意差异通道的加权信息,获取完成大小压缩的特征图,并过滤冗余信息。将所输入的红外光谱图像特征图表示为 F_c ,第 c 个通道 X_c 在 (i, j) 位置的值表示为 $X_c(i, j)$,则全局平均、最大池化压缩红外光谱图像特征图计算公式为:

$$g_{ac} = H_a(F_c) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W X_c(i, j) \quad (9)$$

$$g_{mc} = H_m(F_c) = \text{Max}(X_c(i, j)) \quad (10)$$

式中, H_a 、 H_m 分别为平均、最大值函数。红外光谱图像特征图的形状表示为 $H \times W$,其在经过全局平均、最大池化后展开 1×1 的卷积操作(Conv),通过元素相加(\oplus)与 Sigmoid 激活函数(σ)获取通道权值,得到:

$$A_c = \sigma(\text{Conv}(g_{ac}) \oplus \text{Conv}(g_{mc})) \quad (11)$$

依据元素顺序令 F_c 与权值 A_c 展开元素相乘(\otimes),获取红外光谱图像特征图输出结果 F_c^* ,即:

$$F_c^* = F_c \otimes A_c \quad (12)$$

迁移学习子网编码器跳跃连接解码器的过程中,会丢失部分对分割红外光谱图像十分重要的细节信息。所以需要通过残差注意力子网对红外光谱图像的精微特征进行提取,改进迁移学习子网的疏漏。残差注意力子网的组成包括编码、残差注意力以及解码模块。为减少双分支卷积神经网络模型的参数量,编码模块对输入的红外光谱图像进行下采样卷积,主干网络的结构主要是残差注意力块,残差注意力块包括卷积层、修正单元层以及注意力块,输入的红外光谱图像特征图与原始特征图在完成卷积后与激活函数展开首次元素相加,相加完毕后经过卷积层与注意力块,然后与输入的红外光谱图像特征图再次展开元素相加,通过局部残差相连令图像特征重复叠加,完成红外光谱图像特征的重复利用。残差注意力块可以有效防止模型出现梯度爆炸或消失的情况,帮助模型提取更加具体的图像特征,同时提升模型的拟合性能,解码模块通过上采样反卷积红外光谱图像特征

图完成红外光谱图像分割。但是模型过度拟合也会影响其性能,迁移学习分支的存在可有效改善这一情况。

红外光谱图像分割通过双分支卷积神经网络模型训练红外光谱图像数据集实现,模型的输入结果即为红外光谱图像的自适应分割结果,红外光谱图像的具体分割可描述为:

$$V = \omega \cdot U(F_c^*) + J(F_c^*) \quad (13)$$

式中, U 、 J 分别为目标项和背景项, ω 为二者在损失函数中的占比情况, F_c^* 表示残差注意力子网输出的红外光谱图像特征图。

通过平滑损失函数规范模型训练时的参数学习方向,该函数对图像的异常点、离群点敏感,可有效减小红外光谱图像间的像素差异,令模型鲁棒性更好。平滑损失函数的公式为:

$$L_s = \frac{1}{N} \sum_i S_{L1}(y_i - F(x_i)) \quad (14)$$

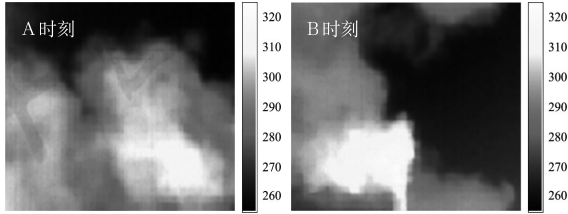
式中,损失函数表示为 $S_{L1}()$, x_i 为重建后的红外光谱图像, y_i 是真实值, $F()$ 代表网络模型。

2 实验结果与分析

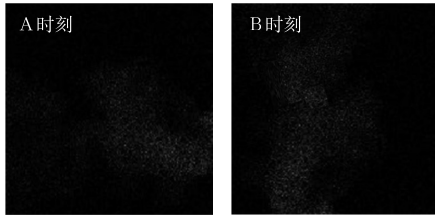
将本文方法应用至某变压器的油中气体检测中,利用红外光谱图像采集系统采集变压器油中气体红外光谱图像,共计采集 200 幅。将该系统所采集 200 幅的红外光谱图像为实验样本数据,验证本文方法的变压器油中气体红外光谱图像分割效果。选用 MATLAB 软件为实验平台,硬件配置为 3.20 GHz CPU、4.00 GB 内存,软件配置为 Windows 7 SP1 的 PC 机,运行环境为 Visual Studio 2010 在 MATLAB 平台搭建实验环境,红外光谱图像采集系统的光谱区域是 80–1 400 nm,空间分辨率是 0.4 mm,光谱分辨率是 2 cm^{-1} ,帧率是 90 Hz,曝光时间为 $0.8 \mu\text{s}$ –500 s,功率低于 5 W,像素尺寸为 $8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,孔径为 $F/2.0$,在 800–1 400 nm 范围内光通量超过 50%。

利用本文方法处理两个不同时刻的变压器油中气体红外光谱图像,相关处理结果见图 1。从图 1 可知,本文方法可以有效采集不同时刻的变压器油中气体红外光谱图像,颜色从深至浅代表变压器油中气体的区域浓度从高变低。通过黑白标定有效简化了红外光谱图像色彩,有助于后续操作的展开。本文方法重建后的红外光谱图像较为清晰,细节特征与信息清晰,具有较好的重建效果。通过图 1(d)中不同时刻的红外光谱图像分割结果可以看出,两个红外光谱图像的目标区域与背景的边界都较为明显,表示本文方法可以清晰地呈现出变压器油中气体

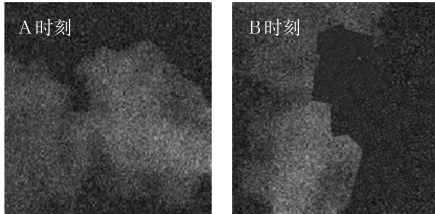
的扩散区域,将气体与背景区域分开,说明本文方法的分割效果较优,实际应用效果较好。



(a) 红外光谱图像采集结果



(b) 红外光谱图像标定结果



(c) 红外光谱图像重建结果



(d) 红外光谱图像分割结果

图1 不同时刻红外光谱图像处理结果

为分析红外光谱图像重建效果,在实验红外光谱图像样本中随机抽取 10 幅,以峰值信噪比(PSNR)、相关系数(CORR)、结构相似度以及遍历覆盖度为指标,判断抽取的红外光谱图像重建质量,其中峰值信噪比计算公式为:

$$PSNR = \frac{\max |u_0|^2}{\sum [u_0 - u]^2} \quad (15)$$

式中, u_0 、 u 分别表示原始红外光谱图像与完成重建的红外光谱图像。

峰值信噪比越大则图像质量越高,相关系数计算公式为:

$$CORR(u, u_0) = \frac{\text{cov}(u, u_0)}{\sqrt{\text{var}(u) \text{var}(u_0)}} \quad (16)$$

式中, $CORR()$ 、 $\text{var}()$ 分别代表协方差、方差。

结构相似度从亮度、对比度以及结构三方面度量了红外光谱图像重建效果,结果如表1所示。从表1可知,利用本文方法重建后红外光谱图像的峰值信噪比与相关系数的值较大,表明本文方法可以保持更多的红外光谱图像有用信息,重建后的红外光谱图像平滑性好,红外光谱图像清晰度高,视觉表达力强。结构相似度值较高表示本文方法可以有效地在很大程度上恢复红外光谱图像的纹理结构,较好地保持红外光谱图像结构的一致性。10幅重建后的红外光谱图像平均遍历覆盖度高达97.76%,说明应用本文方法的红外光谱图像重建遍历覆盖度较宽泛,重建性能较好。

表1 红外光谱图像重建效果评价

红外光谱图像编号	PSNR/dB	CORR	结构相似度/%	遍历覆盖度/%
1	25.89	0.984 1	98.90	98.21
2	27.64	0.977 5	83.45	98.46
3	25.83	0.992 1	89.57	97.78
4	27.79	0.995 7	90.13	97.46
5	27.25	0.987 2	96.12	96.97
6	25.72	0.988 4	90.88	97.31
7	25.47	0.989 8	94.07	98.52
8	26.39	0.993 5	85.63	96.88
9	25.65	0.992 4	87.86	97.32
10	25.84	0.999 7	85.35	98.65

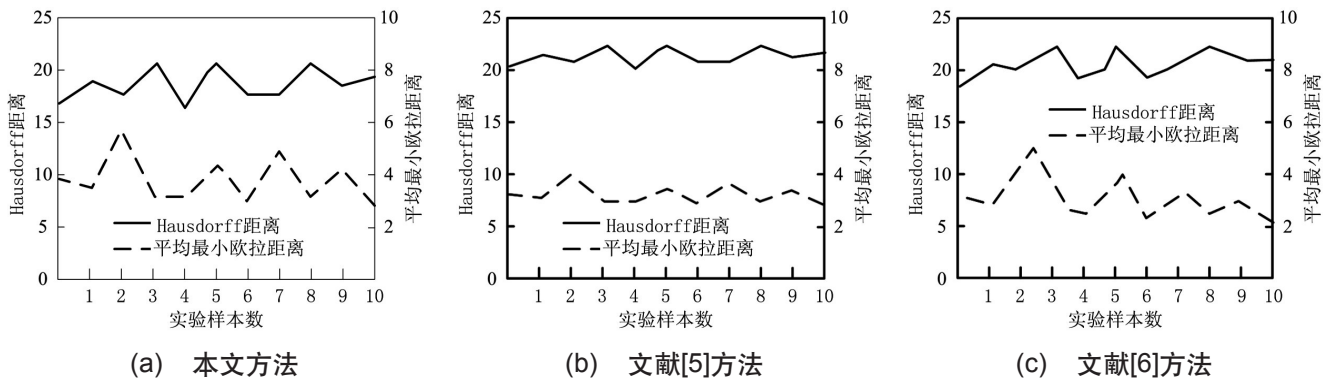


图2 红外光谱图像分割的Hausdorff距离、平均最小欧拉距离

以Hausdorff距离和平均最小欧拉距离为指标衡量红外光谱图像的分割效果,两个指标的值越小,则红外光谱图像的分割越准确有效、效果越好。两个指标的公式分别为:

$$Hausdorff = \max \left\{ \max_{x_i} \min_{y_j} \|x_i - y_j\|, \max_{y_j} \min_{x_i} \|x_i - y_j\| \right\} \quad (17)$$

$$pjzsol = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \min_{y_j} \|x_i - y_j\| + \sum_{j=1}^m \min_{x_i} \|y_j - x_i\| \right\}}{2} \quad (18)$$

式中, $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ 、 $\{y_1, y_2, \dots, y_j\}$ 分别为原始、分割后红外光谱图像轮廓点集, $\|x_i - y_j\|$ 为 x_i 、 y_j 间的欧拉距离。

为进一步验证本文方法的有效性,将本文方法与文献[5]提出的基于神经免疫生长可免域网络的红外光谱图像分割算法和文献[6]提出的基于全卷积神经网络和动态自适应区域生长法的红外图像目标分割方法进行对比,利用不同方法对10幅红外光谱图像分割结果进行评价,结果见图2。通过分析图2可知,利用两种文献方法完成红外光谱图像分割后,10幅图像的两个距离指标的值都较大,利用本文方法完成红外光谱图像分割后,10幅图像的两个距离指标的值都较小,该结果表示采用本文方法进行红外光谱图像分割的结果较为准确、效果较好。

3 结束语

本文研究基于改进迁移学习的红外光谱图像自适应分割方法,利用红外光谱图像采集系统采集待研究的红外光谱图像,经图像处理通过改进迁移学习实现红外光谱图像分割。通过实验验证了该方法具有较好的图像分割效果,分割后图像清晰度高、细节特征明显。该方法

在一定程度上为红外光谱图像的重建与分割等工作提供了理论指导,实际应用效果较好。

参考文献:

- [1] 孙禧亭,袁洪福,宋春风.“动态”近红外光谱结合深度学习图像识别和迁移学习的模式识别方法研究[J].分析测试学报,2020,39(10):1247-1253.
- [2] 丁永前,邢智雄,姜懿倬,等.光谱指数测量中窄带图像的光强自适应分割方法[J].南京农业大学学报,2020,43(3):574-581.
- [3] 罗钧,杨永松,侍宝玉.基于改进的自适应差分演化算法的二维Otsu多阈值图像分割[J].电子与信息学报,2019,41(8):2017-2024.
- [4] 张昊.融合噪声信息函数的改进FCM图像分割方法研究[J].能源与环保,2021,43(6):213-218.
- [5] 周子杰,张宝峰,于晓.基于神经免疫生长可免域网络的红外光谱图像分割算法(英文)[J].光谱学与光谱分析,2021,41(5):1652-1660.
- [6] 任志森.基于全卷积神经网络和动态自适应区域生长法的红外图像目标分割方法[J].半导体光电,2019,40(4):564-570.
- [7] 刘子全,付慧,李玉杰,等.基于Mask-RCNN迁移学习的红外图像电力设备检测[J].数据采集与处理,2021,36(1):176-183.
- [8] 洪向共,周世芬.基于灰度共生矩阵和区域生长算法的红外光伏面板图像分割[J].科学技术与工程,2018,18(34):92-97.

作者简介:陈静(1978-),女,硕士,副高,研究方向:变电设备运检。

(上接第126页)

CT接线校验方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(6):173-179.

[4] 王磊,陈长征.变压器的故障预测研究[J].机械设计与制造,2023(1):65-68,73.

[5] 李晓华,张冬怡,陈忠,等.换流高频变压器第1次空载合闸励磁涌流抑制的研究[J].广东电力,2019,32(1):13-19.

[6] 马钢军.大型油浸式高频变压器箱沿放电分析与处理[J].电工技术,2019(3):69-70,73.

[7] 吕莹,弓满锋,唐高登.TRIZ理论在高频变压器绕线生产优化中的应用[J].机械设计与制造,2020(3):301-304.

[8] 张勇,咎虎,伍柏霖,等.基于波形识别法判别励磁涌流和内部故障电流[J].电子世界,2019(3):159,161.

[9] 卞楠,田行军,刘洋,等.V/x型牵引高频变压器匝间短路识别方法研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2019,32(1):83-92.

[10] 肖湃,张海龙,杜志叶等.特高压换流变压器励磁涌流选相合闸抑制方法研究[J].高压电器,2023,59(5):146-153,162.

[11] 栗磊,赫嘉楠,熊军辉,等.基于波形分区重构的变压器励磁涌流与故障电流识别方法[J].电网与清洁能源,2023,39(2):16-23,32.

[12] 李海涛,刘北阳,滕文涛,等.基于可变合闸角的变压器励磁涌流抑制方法[J].中国电力,2022,55(9):70-78.

[13] 刘鹏辉,焦兵豪,郭向伟.考虑CT饱和干扰的电力变压器励磁涌流识别方法[J].电网技术,2022,46(9):3633-3641.

[14] 陈映芳,姚琳.一种基于小波的相关系数判别变压器励磁涌流的方法[J].电子器件,2021,44(6):1479-1483.

作者简介:李凤海(1973-),男,本科,高级工程师,研究方向:输变电设备。