

文章编号: 2095-4980(2020)05-0851-06

基于 TEM 系统的回波处理技术应用

杨龙成, 孙睿, 毕晓佳, 孙连海, 李忠玉

(成都师范学院 计算机科学学院, 四川 成都 611130)

摘要: 为了提高瞬变电磁系统回波辨识, 设计一种新型的波形相似度算法, 对接收到的瞬变电磁系统回波数据进行分析处理。针对因各种干扰因素采样到的回波数据变得难以区分、辨识, 传统的回波处理方法效果不理想的情况, 从空间向量的角度出发, 将采样点作为评价指标, 利用熵权法设置指标权重, 综合各个评价指标, 提出一种新型的波形相似度算法。通过大量数据实验分析, 该算法在回波辨识方面取得了不错的效果, 对部分厚度的辨识准确度达到了 90%, 具有较好的实用价值。

关键词: 瞬变电磁系统; 波形相似度算法; 回波数据; 空间向量; 熵权法

中图分类号: TP391; TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019008

Application of echo processing based on TEM system

YANG Longcheng, SUN Rui, BI Xiaojia, SUN Lianhai, LI Zhongyu

(College of Computer Science, Chengdu Normal University, Chengdu Sichuan 611130, China)

Abstract: In order to improve the identification of transient electromagnetic system echo, a new waveform similarity algorithm is designed to analyze and process the received transient electromagnetic system echo data. Aiming at the fact that the sampled echo data is difficult to distinguish and identify due to various interference factors, and the traditional echo processing method is not ideal, this paper takes the sampling point as an evaluation index from the perspective of space vector, sets the index weight by using entropy weight method, synthesizes various evaluation indexes, and proposes a new waveform similarity algorithm. Through a large number of experimental data analysis, the algorithm has achieved good results in the identification of echoes, and the identification accuracy of partial thickness has reached 90%, which has good practical value.

Keywords: transient electromagnetic system; waveform similarity algorithm; echo data; space vector; entropy weight method

基于瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, TEM)的瞬变电磁系统的回波数据来自系统的接收线圈接收的二次场所激发出的感应电压, 感应电压值的准确分析对于获取钢板厚度至关重要, 但由于各种因素的干扰, 例如系统自身产生的白噪声^[1]、线圈的设计^[2-3]、激励信号的类型^[4-5], 以及系统或外部的电磁干扰等^[6], 都给回波数据的分析处理增加了难度, 使得采样到的回波数据变得难以区分、辨识。为了提高瞬变电磁系统回波辨识, 本文先是采用诸如傅里叶变换等常用的信号处理方法进行分析, 说明效果差异, 接着从空间向量的角度出发, 将采样点作为评价指标, 利用熵权法设置指标权重, 综合各个评价指标, 提出了一种新型的波形相似度算法。通过大量的数据实验分析, 证明该算法在回波的辨识方面取得的效果。

1 回波数据预处理

为方便后期回波数据分析处理, 在构建回波处理算法中, 从矩阵的角度抽象处理采集到的所有厚度的回波数

收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51978089); 四川省科技厅科研资助项目(2018JY0202); 成都师范学院校级科研资助项目(CS19ZB03); 国家级、省级大学生创新创业训练计划立项资助项目(201914389024; 202014389063; S202014389063; S202014389112)

作者简介: 杨龙成(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算电磁学、物联网应用等。email:151083@cndu.edu.cn

据。实验中,共有 4 种厚度不同的钢板用于测试,对应的厚度分别为 3 mm,5 mm,7 mm 和 9 mm,在相同的条件下,每种厚度的钢板每个回波采样 100 个点,分析中共采集 540 个回波。因此,可把这些数据抽象成一个三维矩阵 $4 \times 540 \times 100$,该矩阵记为 \mathbf{M} ,表示瞬变电磁系统采集到的回波数据,以此为基础进行后续的分析处理。为了更好地描述回波数据,定义 $M(i,j,k)$ 表示第 i 块钢板的第 j 个回波中的第 k 个采样点。其中,下标 i,j,k 都为正整数, $i=1,2,3,4$; $j=1,2,3,\dots,540$; $k=1,2,3,\dots,100$ 。

对数据进行预处理过程中,对大量样本求平均,可以在一定程度上降低噪声带来的干扰。求平均时,遵循的处理规则是对同一厚度钢板的所有回波对应点数据做平均,在对数据抽象的基础上,平均处理如式(1)所示。

$$M_avg(i,k) = \frac{\sum_{j=1}^{540} M(i,j,k)}{540} \quad (1)$$

平均后的 M_avg 相对于某一次的测量,可认为是更加“优质”的数据,以此为前提,将平均后的数据作为标准数据,将某一次的测量数据和标准数据对比处理,这是数据处理算法的一个总体思路。

2 传统方法在回波处理中的应用

由于回波曲线在时域上缠绕在一起^[7-8],不易区分,因此从频域着手分析。对不同厚度钢板的回波曲线做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),观察对应的频谱图可否区分。如果频谱图中回波峰值对应的频率区别较大,可以考虑在频域上进行厚度的区分,以 3 mm 和 5 mm 两种不同厚度的回波为例,其对应的频谱图如图 1 所示,3 mm 和 5 mm 厚度的回波对应的频谱图几乎重合在一起,峰值对应的频率点完全相同,通过 FFT 变换进行频谱分析的方法并不适合 TEM 回波数据。

从功率谱角度对回波信号进行频域分析。理论上,理想状态下回波曲线的功率谱能量峰值应出现在不同的频率点上,据此来辨别信号。以 3 mm 和 5 mm 回波信号为例,其功率谱观察结果如图 2 所示,3 mm 和 5 mm 厚度的功率谱峰值对应的频率近乎重合,区分度不明显。因此,不能通过对回波信号进行功率谱分析进行区分。

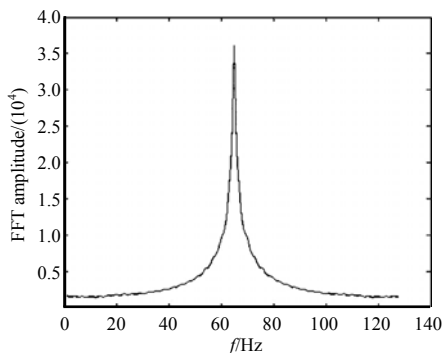


Fig.1 Echo spectrogram
图 1 回波频谱图

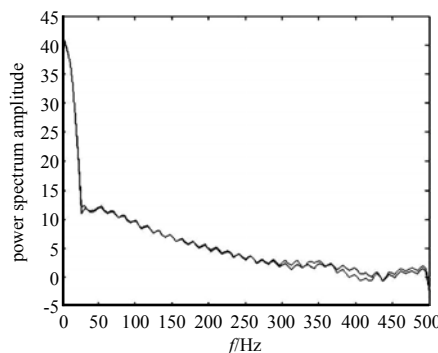


Fig.2 Echo power spectrum
图 2 回波功率谱

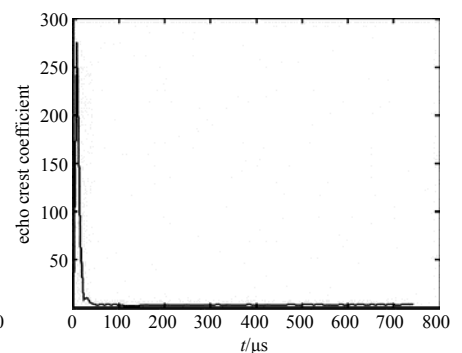


Fig.3 Graph of echo crest coefficient
图 3 回波峰度系数图

峰度系数是经常出现在统计学中的一个特征参数,常用来反应信号波形的峰值情况,如尖锐和陡峭程度。由于 TEM 系统采集到的回波仅仅是一些离散的数值,可通过这些离散的数值去描述波形的陡峭程度。如图 3 所示,通过多次测试发现,不同厚度的峰度系数对应的波形图区分效果不理想,达不到实际需求。

总之,从经典常用的信号处理的角度出发,采用 FFT、功率谱、峰度系数等处理方法对回波信号进行处理,效果并不理想,必须寻求新的方法提高回波数据的处理效果。

3 新型回波信号处理方法

理想状态下处于分离的回波,或受到噪声干扰而缠绕不清的回波^[9-10],在一般情况下,特定厚度钢板的回波和其对应的标准厚度的回波最为相似^[11-12],基于这点,本文提出了波形相似度算法。

3.1 算法的构建

3.1.1 获取标准数据

用 $I \times J \times K$ 的三维矩阵表示原始数据 \mathbf{M} ,通过求平均的方法从原始数据 \mathbf{M} 中获得标准数据。对同一厚度钢

板的所有回波(共 J 个)对应采样点求平均。对每种厚度(共 I 种)的所有回波求完平均后,由 M 矩阵可进一步得到一个二维的平均值矩阵 M_avg 。大量的回波数据经过平均后相比单次的数据要“优质”很多,将其作为标准数据,通过将某次的测量回波与该标准数据 M_avg 作对比处理。

3.1.2 回波采样点相似度

测量点和标准点之间的欧氏距离越近,相似程度就越大。假设向量 X 为某次测量过程中的某种厚度的回波样本数据,记作 $X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_K]$,则样本 X 中的某个位置采样点和标准数据中的对应点之间的距离 d_{ik} 可以用式(2)计算。

$$d_{ik} = d(M_avg_{ik}, x_k) = \sqrt{(x_k - M_{ik})^2} \quad (2)$$

式中 i 和 k 都为正整数,取值分别为 $i=1,2,\dots,I$, $k=1,2,\dots,K$ 。

以 4 种厚度钢板为例,取每种厚度的钢板部分采样点,标准回波数据如表 1 所示。某次回波的测量值如表 2 所示。测量值和标准数据对应点之间的距离按照式(2)计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,测量数据中的第 1 个点($k=1$)和标准数据中第 1 块钢板($i=1$)中对应点距离最小($d=0$),即最相似,依次类推,第 2 个点($k=2$)和标准数据中第 2 块钢板($i=2$)中对应点距离最小,最为相似,第 3、第 4 个点同样的道理。

3.1.3 波形相似度

通过对回波的几个采样点加权处理来求得波形相似度。具体做法如下:根据一定的规则为每个采样点赋予权重,然后直接进行加性计算。其中,权重反映回波中不同的采样点在回波相似度的判别中起到的作用大小。在实验中利用熵权法设置采样点权重^[13-14]。每个回波包含 K 个采样点,权重向量表示为 $W=[w_1, w_2, \dots, w_K]$,但必须满足 $\sum_{k=1}^K w_k = 1$ 的约束。为了使点和点之间的相似程度和距离呈正相关,即距离值越大,点和点之间的相似程度越大,对应点之间的距离做线性归一化处理为 r_{ik} ,至此,波形相似度用式(3)表示。

$$P_i = \sum_{k=1}^K w_k r_{ik} \quad (3)$$

式中 i 取正整数, $i=1,2,\dots,I$ 。有了波形相似度之后,就可以进行厚度辨识了。

3.1.4 判定钢板厚度

由波形相似度式(3)可得到一个向量 $P=[p_1, p_2, \dots, p_I]$, P 满足 $\sum_{i=1}^I p_i = 1$,基于向量 P 辨识钢板厚度。该向量中的元素表示某次测量数据和每种标准数据的相似度大小, P 中元素的最大值即为最终的判定结果。以实际测量举例说明,现有标准厚度的钢板厚度分别为 3 mm, 5 mm, 7 mm 和 9 mm,某次的测量数据(如表 2 所示)经过上面构建的波形相似度算法后,获得最终的相似度向量 $P=[0.0821, 0.0751, 0.2151, 0.6277]$,由于 P 中元素 0.6277 最大,可以判定测量数据和 9 mm 标准厚度的钢板最为相似,在现有的分辨力下,可以认为此次测量的厚度近似为 9 mm。

3.2 实验数据分析

算法构建成功后,需通过大量的实验测试来验证该算法的效果。测试中,对现有的钢板进行多次测量,把每次的测量数据输入到波形相似度算法模型中,计算出相似度向量 P ,进而得出钢板厚度的辨识结果,每种厚度的钢板测量 10 次,实验结果如图 4 所示。

图 4 中,每一组回波的数据从左到右依次是每种厚度钢板(从小到大)的测量数据,从测量数据可以得出如下结论:7 mm 和 9 mm 钢板在 10 次测量数据辨识中得到的结果都是正确的,准确率较高,辨识效果令人满意;5 mm 钢板的 10 次测量数据中有 2 次判断错误,总体来看辨识结果基本正确;而 3 mm 钢板的测量错误率达到了 40%,并且在加大测量次数的情况下并没有使错误率降下来,因此可以推断出:a)设计的系统对较薄钢板的探测存在局限性;b)3 mm 钢板在材质本身上存在异常,其数据并不适合本文提出的波形相似度算法模型。

表 1 标准回波数据表

	sample point 1	sample point 2	sample point 3	sample point 4	sample point 5
thickness of No.1 steel plate	495	474	453	434	417
thickness of No.2 steel plate	496	473	452	432	414
thickness of No.3 steel plate	522	496	473	450	430
thickness of No.4 steel plate	589	562	537	513	491

表 2 某次回波测量值

	sample point 1	sample point 2	sample point 3	sample point 4	sample point 5
thickness of a steel plate	591	563	534	511	492

表 3 对应点之间的距离

d_{ik}	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
$i=1$	96	89	81	77	75
$i=2$	95	90	82	79	78
$i=3$	69	67	61	61	62
$i=4$	2	1	3	2	1

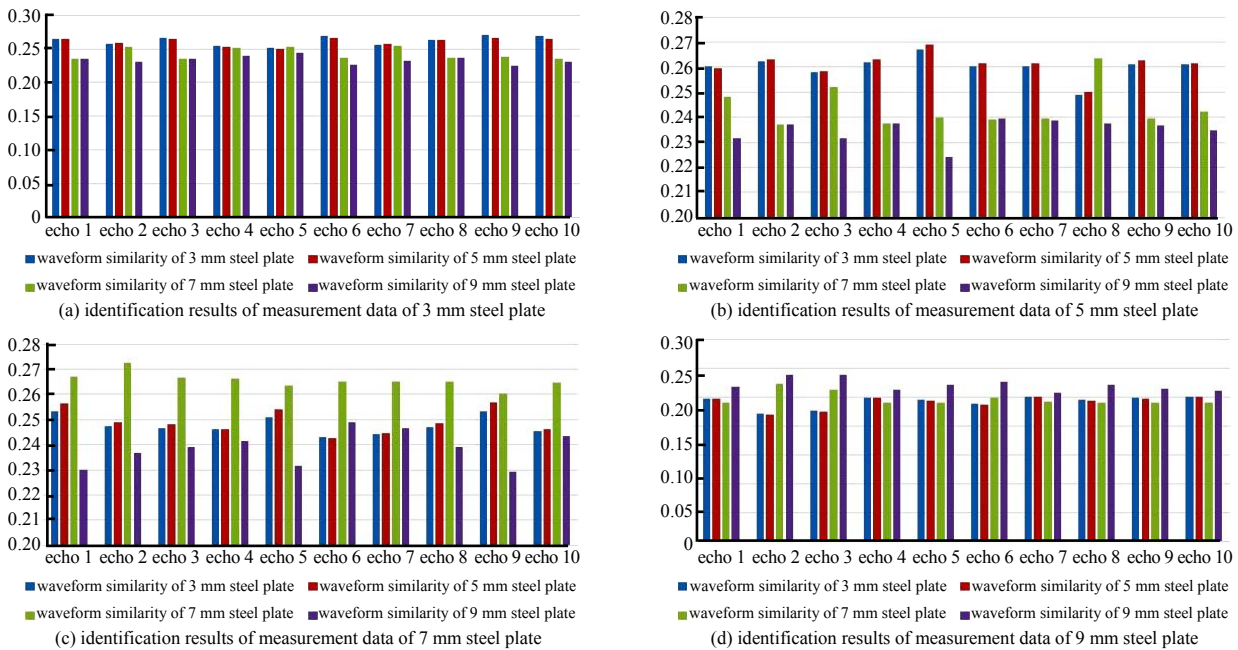


Fig.4 Identification results of steel plates with different thicknesses
图 4 不同厚度钢板的辨识结果

4 算法改进

设计的算法已经较好地处理了回波的辨识问题,但已描述的波形相似度算法是基于空间向量之间的距离展开的,为了进一步提高辨识效果,本文从空间向量的方向改进算法^[15]。

4.1 余弦相似度算法

多维空间中,两个向量的夹角大小反应二者在方向上远近程度;二者的余弦相似度,是衡量向量空间中两个向量之间的夹角余弦值的大小,通过夹角的余弦值可以进一步衡量二者的差异大小。余弦定理反映的是任意的三角形中边角之间的关系,可以通过该定理计算出三角形中任意角的大小,如图 5 所示,将三角形的边看成是向量,有式(4):

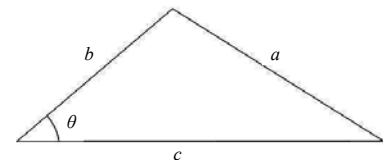


Fig.5 Arbitrary triangle
图 5 任意三角形

$$\cos\theta = \frac{\langle \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle}{\|\mathbf{b}\| \cdot \|\mathbf{c}\|} \quad (4)$$

推广到更一般的情况,对任意的向量 \mathbf{x}, \mathbf{y} , 其夹角为 θ , 有式(5):

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}}{\|\mathbf{x}\| \cdot \|\mathbf{y}\|} \quad (5)$$

由式(5)可以得出余弦相似度的判定方法。两向量夹角余弦值取值范围 $[-1,1]$, 如果余弦值为 1, 则两向量之间夹角为 0° , 方向完全一致,相似度最高;如果为 -1 , 两向量夹角为 180° , 方向完全相反,相似度最低。总之,余弦值越小,相似度越低;余弦值越大,相似度越高。据此有了判定回波相似度的新方法,通过求某次的回波数据向量和现有的几种标准回波数据向量的余弦值,来判断回波的相似度大小,进而辨识钢板厚度。

为了更好地解释,举例说明,设标准数据如表 4 所示。由表 4 可知,标准数据向量可表示成 $\mathbf{x}_1 = [1,1,1,1,1]$, $\mathbf{x}_2 = [1,2,2,3,3]$, $\mathbf{x}_3 = [2,3,1,3,2]$, $\mathbf{x}_4 = [3,2,1,2,1]$; 某一次的回波数据向量假设 $\mathbf{y} = [1,2,3,4,5]$, 计算该向量和标准向量夹角的余弦值,如表 5 所示。从表 5 得知,和此次测量数据最为相似的是 2 号标准厚度的钢板,在现有系统精确度允许的情况下,可认为其厚度相同。

表 4 标准回波数据表

Table4 Standard echo data

	sample point 1	sample point 2	sample point 3	sample point 4	sample point 5
thickness of No.1 steel plate	1	1	1	1	1
thickness of No.2 steel plate	1	2	2	3	3
thickness of No.3 steel plate	2	3	1	3	2
thickness of No.4 steel plate	3	2	1	2	1

表 5 回波余弦相似度

Table5 Echo cosine similarity

	thickness of No.1 steel plate	thickness of No.2 steel plate	thickness of No.3 steel plate	thickness of No.4 steel plate
cosine similarity	0.904 5	0.986 1	0.856 3	0.711 5

4.2 波形相似度算法的改进

基于向量距离的波形相似度算法和余弦相似度算法都可以分析向量的相似度,那么考虑结合二者提出一种改进算法。

通过余弦相似度算法辨识钢板厚度,最后得到一个相似度向量,记为 $C=[c_1, c_2, \dots, c_l]$,而波形相似度最终得到的相似度向量为 $P=[p_1, p_2, \dots, p_l]$,因此利用2个向量做加权处理,具体是将向量 C 中的各元素归一化处理作为权重赋予向量 P ,进一步计算最终的相似度。权重向量为 $W=[w_1, w_2, \dots, w_l]$, $\sum_{i=1}^l w_i=1$,并满足式(6):

$$w_i = c_i / \sum_{i=1}^l c_i \quad (6)$$

最终的相似度向量记为 S ,计算公式如式(7):

$$s_i = \sum_{i=1}^l w_i p_i \quad (7)$$

改进后的算法基于空间向量的距离和方向,比波形相似度算法考虑更全面,通过实验数据分析说明改进后算法的处理效果,以5 mm钢板作为测量对象(前面的结论说明5 mm厚度钢板相比其他厚度钢板具有较好的对比分析价值)。将相同的10次测量数据,分别经过波形相似度算法、改进后的相似度算法模型进行处理,对比分析二者处理后的效果,如图6所示。

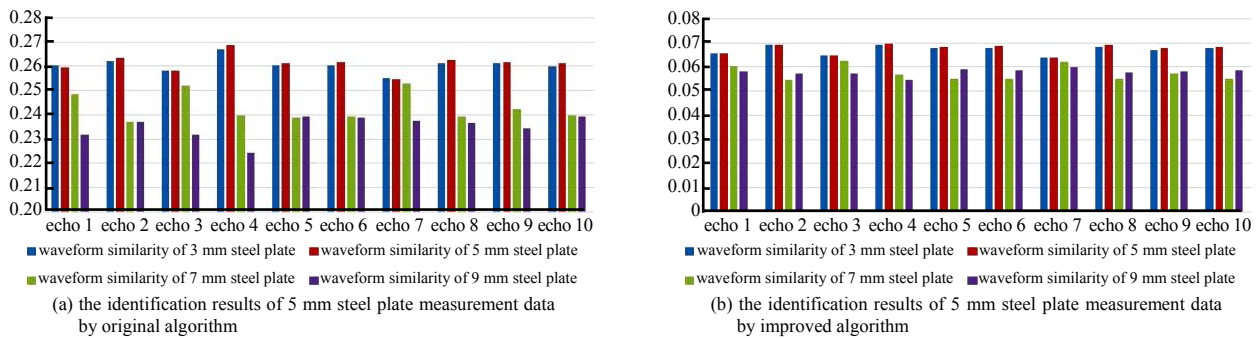


Fig.6 Processing results of two algorithms

图6 两种算法处理结果

图6中,每一组回波的数据从左到右依次是每种厚度钢板(从小到大)的测量数据。对比分析发现,原有算法出现了2次错误,而改进算法出现了1次错误,说明改进后算法比原有算法更优越。数据量越大,优越的表现效果越明显。不过改进算法在3 mm和5 mm的相似度值差别较小,算法仍有改进空间。

5 结论

本文从传统的数据处理算法进行分析,指出了FFT频谱分析、功率谱分析、峰度系数等分析方法在TEM系统回波数据上处理效果欠佳现状,提出了一种新型的基于空间向量距离的波形相似度算法,详细介绍了算法的构建过程,最后通过大量的数据试验,取得了较好的处理效果,而后又对该算法做了进一步改进,提高了算法的实用价值。

参考文献:

- [1] 武欣,薛国强,肖攀,等.瞬变电磁采样函数优化法降噪技术[J].地球物理学报,2017,60(9):3677-3684. (WU Xin, XUE Guoqiang, XIAO Pan, et al. Noise reduction technology of TEM using optimization of instrument sampling function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(9):3677-3684.) DOI: 10.6038/cjg20170931.
- [2] 杨龙成,孙连海,张娇,等.基于改进遗传算法的磁聚焦线圈阵列优化设计[J].成都师范学院学报,2018,34(1):97-105. (YANG Longcheng, SUN Lianhai, ZHANG Jiao, et al. Optimization design of coil array for magnetic focusing based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Chengdu Normal University, 2018,34(1):97-105.) DOI:10.3969/j.issn.2095-5642.2018.01.097.

- [3] 杨龙成,陆继庆,刘冀成,等. 基于遗传算法的瞬变电磁法线圈阵列优化设计[J]. 成都信息工程学院学报, 2014,29(1): 28-32. (YANG Longcheng,LU Jiqing,LIU Jicheng,et al. Optimization design of coil array for Transient Electromagnetic Method based on genetic algorithm[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2014,29(1):28-32.) DOI:10.16836/j.cnki.jcuit.2014.01.005.
- [4] 杨龙成,陆继庆,张帅,等. 基于混合优化算法的磁聚焦线圈阵列设计与优化[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2014,37(6):942-946. (YANG Longcheng,LU Jiqing,ZHANG Shuai,et al. Coil array design and optimization in magnetic focusing based on hybrid optimization algorithm[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science), 2014,37(6): 942-946.) DOI:10.3969/j.issn.1001-8395.2014.06.029.
- [5] 杨龙成,胡俊,孙连海,等. 激励信号类型及周期对线圈聚焦和检测深度的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):475-480. (YANG Longcheng,HU Jun,SUN Lianhai,et al. Influence of excitation signal type and the cycle on the coil focusing and the detection depth[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):475-480.) DOI:10.11805/TKYDA201803.0475.
- [6] 胡祥超. 集成涡流无损检测系统设计与关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012. (HU Xiangchao. Design of integrated eddy current nondestructive testing system and research on key technologies[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2012.)
- [7] 吴秀君. 改进提升小波阈值算法在信号去噪中的应用[J]. 激光杂志, 2014,35(8):15-18. (WU Xiujun. Improved wavelet threshold based on lifting wavelet in application of signal de-noising[J]. Laser Journal, 2014,35(8):15-18.) DOI: 10.3969/j.issn.0253-2743.2014.08.015.
- [8] 杨龙成. 基于混合优化算法的 TEM 线圈阵列设计与仿真[D]. 成都:成都信息工程大学, 2015. (YANG Longcheng. Design and simulation of TEM coil array based on hybrid optimization algorithm[D]. Chengdu,China:Chengdu University of Information Technology, 2015.)
- [9] 左蓉丽. 野外作业中瞬变电磁法的影响因素及其相关问题研究[J]. 山东工业技术, 2013(10):85-88. (ZUO Rongli. Research on influencing factors and related problems of Transient Electromagnetic Method in field operation[J]. Shandong Industrial Technology, 2013(10):85-88.) DOI:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2013.10.009.
- [10] 郝延松. 埋地管道腐蚀瞬变电磁法检测试验方法及数据处理研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2013. (HAO Yansong. Research on test methods and data processing of buried pipeline corrosion Transient Electromagnetic Method[D]. Nanchang,China:Nanchang Hangkong University, 2013.)
- [11] 童玉娟,罗党. 一种改进的属性识别理论模型及应用[J]. 华北水利水电大学学报, 2008,29(2):106-108. (TONG Yujuan,LUO Dang. An improvement model of attribute recognition and its applications[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2008,29(2):106-108.) DOI:10.19760/j.ncwu.zk.2008.02.032.
- [12] 董德威,颜云辉,宋克臣,等. 带钢质量属性识别理论评价模型及应用[J]. 中国机械工程, 2012,23(15):1844-1847,1854. (DONG Dewei,YAN Yunhui,SONG Kechen,et al. Attribute recognition theoretical evaluation model of strip steel quality and its application[J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(15):1844-1847,1854.) DOI:10.3969/j.issn. 1004-132 X.2012.15.017.
- [13] 王洪彬,徐亨,童晓阳,等. 基于结构熵权法与故障树的智能变电站保护系统扰动度在线评估方法[J]. 电网技术, 2019,44(5):1-9. (WANG Hongbin,XU Heng,TONG Xiaoyang,et al. The online disturbance degree assessment method of protection systems in intelligent substation based on the structure entropy weight method and fault trees[J]. Power System Technology, 2019,44(5):1-9.) DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0493.
- [14] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010,30(7):1225-1228. (CHENG Qiyue. Structural entropy weight method to confirm the weight of evaluation index[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010,30(7):1225-1228.)
- [15] 冯高磊,高嵩峰. 基于向量空间模型结合语义的文本相似度算法[J]. 现代电子技术, 2018,41(11):157-161. (FENG Gaolei,GAO Songfeng. Text similarity algorithm combining semantics based on vector space model[J]. Modern Electronics Technique, 2018,41(11):157-161.) DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2018.11.035.