

文章编号: 2095-4980(2018)03-0475-06

激励信号类型及周期对线圈聚焦和检测深度的影响

杨龙成, 胡俊, 孙连海, 刘腊梅

(成都师范学院 计算机科学学院, 四川 成都 611130)

摘要: 激励信号类型与周期选取是影响瞬变电磁法(TEM)系统检测能力的重要因素。利用时域有限元积分方法对不同激励信号进行仿真, 通过发射线圈磁场分布特性与同等深度处磁聚焦效果的对比、分析, 确定激励信号类型; 根据探测深度与灵敏度依赖于激励信号周期的特性, 确定激励信号的最小周期。以此周期为下限, 在不同周期下进行仿真, 得到接收线圈回波信号变化图与同等深度处的磁通量变化曲线图, 对比分析, 最终确定周期为500 ms的矩形脉冲作为激励信号较为合适, 更有利于磁场能量聚焦与传播的深度。最后对不同厚度的钢板进行仿真, 分析回波信号与钢板厚度的关系, 为实际瞬变电磁探测系统设计提供理论依据。

关键词: 聚焦度; 时域有限元积分方法; 激励信号类型; 激励信号周期; 瞬变电磁探测系统中图分类号: TN911.7; TM151 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201803.0475

Influence of excitation signal type and the cycle on the coil focusing and the detection depth

YANG Longcheng, HU Jun, SUN Lianhai, LIU Lamei

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

Abstract: The excitation signal type and cycle selection are important factors affecting Transient Electromagnetic Method(TEM) system detection ability. Using the time-domain finite element integration method to simulate different excitation signals, through the contrast and analysis of the transmitter coil magnetic field distribution characteristics and magnetic focusing effect in the same depth, the excitation signal types can be determined. For the detection depth and sensitivity depending on the excitation signal cycle, the minimum period of the excitation signal is determined. Taking the minimum period as the lower limit, the simulation is carried out in different cycles, and the receiving coil of the echo effect diagram and the magnetic flux change curves of equivalent depth are obtained. Comparison and analysis are conducted to determine the appropriate cycle. The conclusion is that the rectangular pulse with 500 ms is more suitable as excitation signal, and is helpful to magnetic field energy focusing and the depth of propagation. Finally, the steel plates with different thicknesses are simulated, and the relationships between the echo signal and the thickness of steel plate are analyzed. This work can provide a theoretical basis for the practical transient electromagnetic detection system.

Keywords: focus degree; time domain finite element integration method; excitation signal type; excitation signal cycle; transient electromagnetic detection system

瞬变电磁法(TEM)^[1-3]被广泛用在探地雷达中, 已成为石油检测、地下固体废物与污染物探测、考古、土壤评价及城市管线探测、储油管道厚度检测等一种常用的深层地下物质探测方法。而激励信号类型及周期是瞬变电磁检测系统的关键部分^[4], 直接决定检测系统探测埋地金属管道管壁腐蚀情况的能力。若激励信号不能使发射线圈在目标区域形成较好的磁场聚焦, 则埋地金属管道管壁或地下良导体诱发形成的动态感应电流分布会丢失被测体的部分物理参数^[5], 造成接收线圈产生的回波信号失去分析的价值, 整个瞬变电磁检测系统将无法定量评估埋地金属管道管壁的整体腐蚀情况^[6-7], 因此对激励信号类型及周期的研究就显得尤为重要。

收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2017-02-08

基金项目: 四川省教育厅科研基金资助项目(15TD0038); 成都师范学院校级教改资助项目(2018JG43)

本文利用有限元积分仿真软件,创建同心圆线圈模型,用铁板模型模拟金属管壁,选择正弦信号与矩形方波 2 种类型的激励信号,求解不同激励信号下的仿真结果。依据发射线圈的磁场分布特性与同等深度处的磁通量变化图,确定激励信号类型;通过电磁波趋肤效应公式,得到激励信号的下限周期,选择具有代表性的 3 种周期,分别进行仿真,得到回波信号图与同等深度处的磁通量变化图;对比不同周期下相应的仿真结果,确定合适的激励信号类型对应的周期。

1 基于时域有限元积分的仿真软件

利用基于时域有限元积分方法^[8-9]的计算机仿真技术(Computer Simulation Technology, CST),对瞬变电磁进行建模、仿真,其流程如图 1 所示。

2 激励信号的选型

2.1 仿真模型

工业用途的埋地管道是装载石油等液态原料的金属容器,经过长时间使用,管壁、容器壁均由内而外开始腐蚀,要求探测系统能够探测金属的较深部位,要选择能够达到金属深层部位的信号作为激励信号^[10-11]。

一般情况下,选择合适的激励信号必须要考虑两方面的原因:首先是传播深度,由于电磁波中趋肤效应^[12]的存在,电磁波传输到一定距离后,能量值会衰减为零。趋肤效应公式为:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: μ 为介质的磁导率; σ 为介质的电导率; f 为电磁波的固有频率。由式(1)可知,当电磁波的固有频率、介质的磁导率与电导率都较大时,电磁波的传播深度很浅,反之,传播深度很深。

第二个方面是探测的灵敏度^[7],电磁波的固有频率越低^[11-12],在管壁表面与管壁内部形成的动态电流分布越弱,接收线圈两端的感应电压会变小,降低接收电路对回波信号与干扰信号的区分能力。所以在选择激励信号时,必须综合两方面因素。

本文基于创新型的同心圆线圈模型^[13]作为仿真模型,用铁磁材料模型来模拟金属管道,仿真模型如图 2 所示。仿真界面设置的计算空间为 2 m×2 m×2 m,采用四面体划分单元格。

图 2 中铁磁材料模型的长、宽、高分别设为 1 m×1 m×0.005 m,相对磁导率、电导率和介电常数分别设为 1 000,1×10⁶ S/m,14。图中箭头表示漆包线的缠绕方向,线圈的电流方向与缠绕方向相反。内圈是发射线圈,电流幅值设为 2 A,外圈是接收线圈,电流幅值设为 0 A。

2.2 激励信号选取

分别选择半正弦信号与矩形脉冲信号^[14]作为激励信号进行仿真,为使两者的仿真条件一样,只选择正向(或是正值)。将半正弦信号、矩形脉冲信号加载到发射线圈,即线圈模型中的内圈,信号幅值、周期和磁通量变化曲线^[15]如图 3 所示。

图 3(c)为距离铁磁材料表面 3 mm 深处的磁通量变化曲线图。由图可知,若半正弦信号处于上升沿阶段,磁通量的绝对值最大约为 3.5×10⁻⁸ V·s;若处于下降沿,磁通量最大值约为 5×10⁻⁹ V·s。如果在半正弦信号下降时对系统进行研究,当电磁波传播到 3 mm 深处时,磁场能量已相当微弱。说明半正弦激励信号在铁磁材料表面形成的磁感应强度 B 分布梯度不明显,磁感应强度的分布面积较大,即聚焦范围过大,影响探测系统的腐蚀评估。

图 3(c)曲线图中,在 0.1 s 左右,矩形脉冲处于下降沿阶段,该深处的磁通量随着急剧降低,形成瞬变电磁场,在相同深度,最大的磁通量达到 1.4×10⁻⁷ V·s,大约是半正弦信号下降沿处最大磁通量的 100 倍,说明矩形

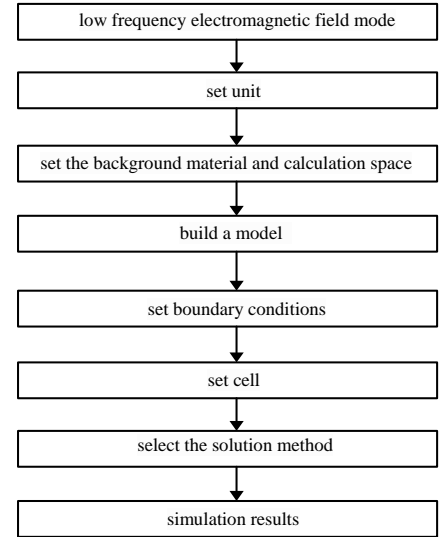


Fig.1 Flow of modeling and simulation
图 1 建模、仿真流程图

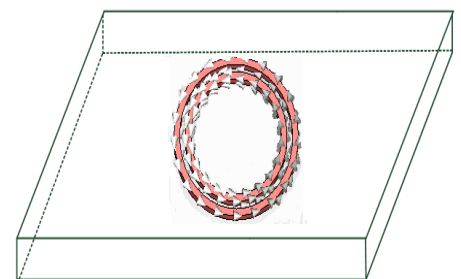


Fig.2 Diagram of simulation modeling
图 2 仿真建模图

脉冲信号在铁磁材料模型表面的磁感应强度梯度分布明显,磁感应强度的分布面积较小,即聚焦范围较小,矩形脉冲比半正弦信号更有助于实现发射线圈的磁场聚焦特性,因此选择矩形方波作为激励信号更合适。

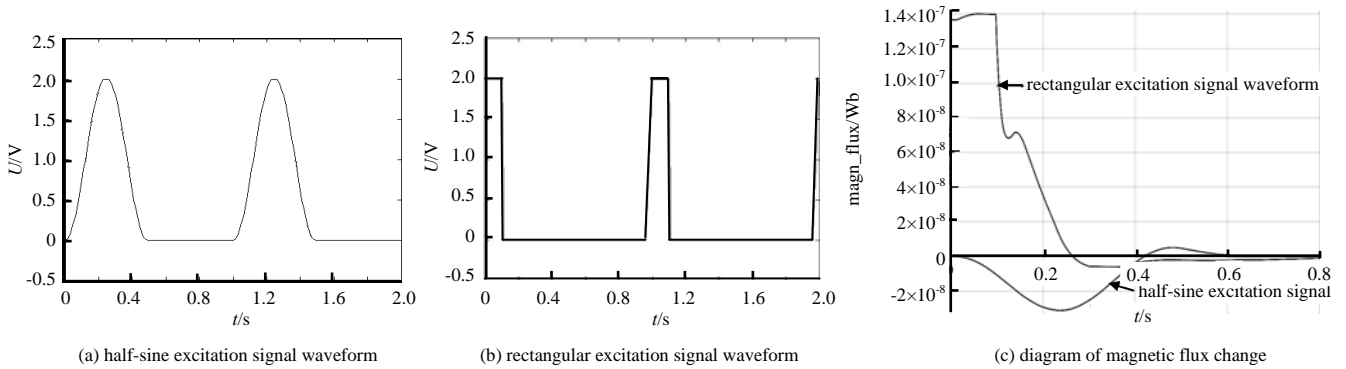


Fig.3 Diagram of excitation signal waveform and magnetic flux change
图 3 激励信号波形和磁通量变化曲线图

3 激励信号的周期

根据泰勒公式,幅值为 A ,周期为 T 的矩形脉冲的傅里叶级数展开式如下:

$$f(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \sin n\Omega t, \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (2)$$

式中 $\Omega = 2\pi / T$ 。矩形脉冲由直流分量和一系列的谐波分量之和构成,与单频正弦信号相比,矩形脉冲信号包含了丰富的频率成分,具有广泛的频谱特性^[7]。一个周期合适的激励信号有利于检测的强度与深度,以此实现更好的检测效果。

仿真实验用 5 mm, 7 mm 和 9 mm 不同厚度的铁磁材料^[16]来模拟被测试件,激励信号的周期不能低于 50 ms,分别选择周期为 50 ms, 500 ms 和 5 000 ms 的矩形脉冲信号进行仿真。3 种周期的上升沿、下降沿均不变,分别为 5 ms, 200 μ s。用厚度 3 mm 的模型进行仿真,并且线圈模型与铁磁材料模型相对距离一致,通过比较仿真结果,确定最合适的激励信号周期。周期为 50 ms, 500 ms 和 5 000 ms 的矩形脉冲仿真如图 4 所示。

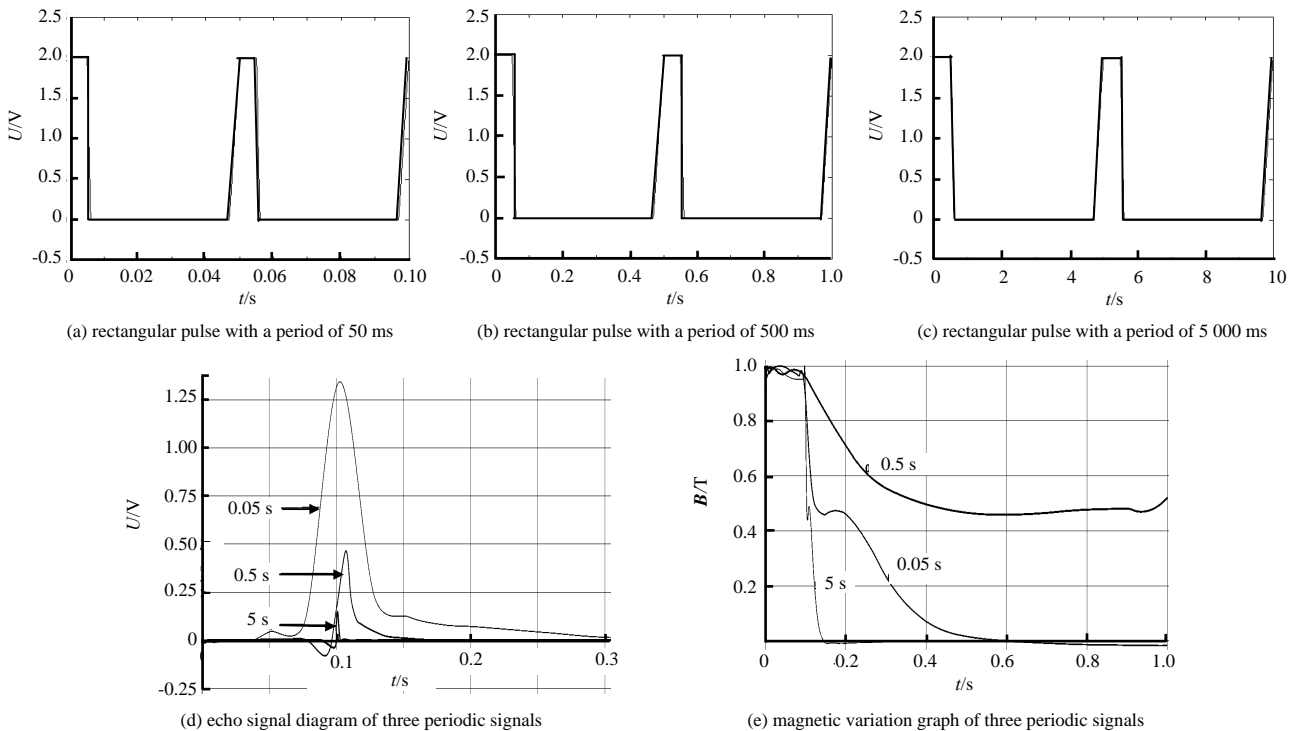


Fig.4 Rectangular pulse and simulation chart
图 4 矩形脉冲与仿真图

为使数据更容易分析,对应的图形变得更简洁、直观,对回波信号的时间分布统一作归一化处理,再对磁感应强度幅值分布统一作归一化处理。

对于周期为 50 ms 的矩形脉冲来说,图 4(d)中的回波信号,接收线圈两端的感应电压从最大值衰减为零大约需 50 ms,激励信号低电平持续时间为 45 ms,回波信号还未衰减完,激励信号已再次到来,导致采集的回波信号不完整,不易评估腐蚀情况,故 50 ms 为周期的下限值。图 4(e)中的曲线表示在 3 mm 深处的磁通量变化曲线,说明电磁波在铁磁材料模型中衰减速度很快。

对于周期为 500 ms 的矩形脉冲来说,在图 4(d)中,比较周期为 500 ms 的矩形脉冲与周期为 50 ms 的矩形脉冲曲线可知,前者的回波信号比后者的回波信号下降得慢,大约在半个周期时衰减为零,整个波形含有被测体相关的信息,系统能采集到完整的波形,而且信号不易丢失,分析价值较高。图 4(e)中周期为 500 ms 的矩形脉冲比周期为 50 ms 的矩形脉冲曲线峰值大,说明周期为 500 ms 的矩形脉冲产生的电磁波衰减的速度比较慢,传播深度更深。

对于周期为 5 000 ms 的矩形脉冲来说,从图 4(e)的结果可知,周期为 5 000 ms 的矩形脉冲在同等深度的磁通量变化峰值最大,说明磁通量衰减得最慢,磁场能够在介质中传播得更深。但图 4(d)的回波信号幅值最小,很容易被回波接收系统当作干扰信号,经过滤波电路时随纹波干扰一起被消除,导致模数转换模块采集不到信号,严重影响检测性能。

4 仿真结果分析与应用

4.1 仿真结果分析

矩形脉冲产生的磁通量比正弦信号产生的磁通量衰减得慢,磁场在介质中的传播深度更大,在此深度包含的频率信息更丰富,因此,选择矩形方波作为激励信号更合适。周期为 50 ms 的矩形脉冲虽然回波信号幅值最大,但电磁波衰减速度最快,达不到探测深度的指标,周期为 500 ms 的矩形脉冲的回波信号和衰减速度介于两者之间。验证了激励信号频率越低,探测深度更深,灵敏度随之降低,所以只考虑选择低频信号反而会适得其反,必须要综合考虑检测深度和灵敏度两个方面的影响。综上所述,周期为 500 ms 的矩形脉冲作为激励信号较为合适。

4.2 仿真结果应用

在没有铁磁材料模型的情况下,监控接收线圈上的感应电压波形,激励信号选择周期为 500 ms 的矩形脉冲,此时的感应电压全部来自发射线圈产生的变化磁场,感应电压波形如图 5 所示。

根据楞次定律:闭合回路中感应电流产生的磁通量总是阻碍一次场的磁通量变化,由图 5 可得到,在激励信号上升沿阶段一次场产生的磁通量逐渐增大,仿真结果中接收线圈上感应电动势方向与发射线圈上电动势方向恰好相反,符合楞次定律,同理,在激励信号下降沿阶段,接收线圈上感应电动势方向也发生了变化。

通过对比 3 mm,5 mm,7 mm 和 9 mm 四种不同厚度模型的仿真结果来观测接收线圈上感应电压的变化,对应的感应电压波形分别如图 5 所示。对比发现,4 种不同厚度模型接收线圈上的感应电压随着模型厚度的加深,感应电压峰值相应变小,与无铁磁材料模型的仿真结果相比,无铁磁材料模型接收线圈上的感应电压的峰值最大,均以类似于指数形式的变化随时间衰减,正是根据这个物理特性来定量评估埋地金属管道管壁的腐蚀情况。经分析,导致以上结果主要是因为 TEM 系统放置不同厚度的铁磁材料模型,接收线圈上的感应电压不仅受发射线圈的影响,同时还受良导体上感应电流变化产生的磁场的影响,这为瞬变电磁检测系统评估埋地金属管道腐蚀情况提供了理论依据。

5 结论

本文通过时域有限元积分方法建立新型同心圆模型,用于加载不同类型的激励信号,仿真不同类型的激励信

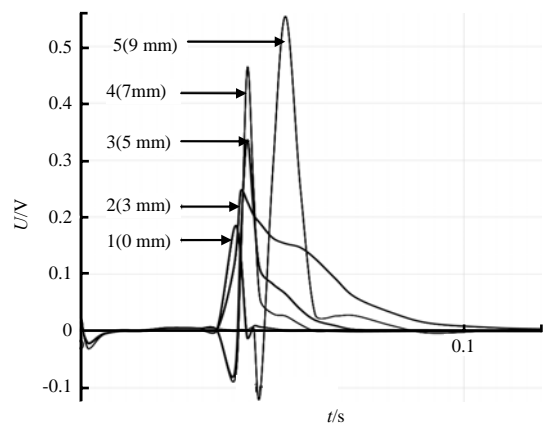


Fig.5 Model of iron-free magnetic material and model echo signal diagram of 3 mm,5 mm,7 mm and 9 mm
图 5 无铁磁材料模型与 3 mm,5 mm,7 mm 和 9 mm 模型回波信号图

号产生的磁场能量分布,用于进一步研究不同周期的激励信号对回波信号变化与磁通量变化的影响,在不同铁磁材料的条件下仿真,并重点关注不同厚度模型接收线圈上的感应电压随着模型厚度的变化,得出如下结论:

1) 在仿真条件一致的情况下,不同的激励信号加载到线圈模型上,通过铁磁材料模型表面的磁感应强度分布面积大小、梯度分布情况对比,加载矩形脉冲信号的发射线圈的磁聚焦更好,磁感应强度分布面积较小,分布梯度更明显,更有助于实现发射线圈的磁场聚焦特性。

2) 监控同等深处的磁通量变化曲线图,当矩形脉冲处于下降沿阶段,在该深处的磁通量随着急剧降低形成瞬变电磁场,在相同深度,最大的磁通量约是半正弦信号下降沿处最大磁通量的100倍,说明矩形脉冲产生的磁通量比半正弦信号产生的磁通量衰减得慢,磁场在介质中的传播深度更大,在此深度包含的频率信息更丰富,因此,矩形方波作为激励信号更合适。

3) 在3种周期的上升沿时间相等,下降沿时间也一致的情况下,根据仿真后的回波曲线和磁通量变化曲线图,综合考虑周期与灵敏度对探测系统的影响,周期为500ms的矩形脉冲更适合作为激励信号。

4) 加载周期为500ms的矩形脉冲信号在不同铁磁材料上进行仿真,得到不同厚度对应的接收线圈上的感应电压不同的结论,铁磁材料越厚,回波信号的峰值越小,并且在没有铁磁材料模型的情况下,接收线圈的感应电压最大。这为瞬变电场检测系统评估埋地金属管道腐蚀情况提供了理论依据。

本文研究激励信号类型及周期对线圈聚焦和检测深度的影响,主要是理论分析与仿真实验,为进一步说明选择的激励信号与周期的正确性,需要对不同厚度的铁磁材料进行实物检测。

致谢: 感谢别敏杰对本文工作的技术支持!

参考文献:

- [1] 彭仲秋. 瞬变电磁场[M]. 北京:高等教育出版社,1989. (PENG Zhongqiu. Transient electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.)
- [2] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990. (PU Huarong. Principle of electromagnetic sounding[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1990.)
- [3] 考夫曼 A A,凯勒 G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 王建谋,译. 北京:地质出版社,1987. (KAUFFMAN A A, KELLER G V. Frequency and transient soundings[M]. Translated by WANG Jianmou. Beijing:Geology Publishing House, 1987.)
- [4] KORJENEVSKY A,CHEREPENIN V,SAPETSKY S. Magnetic induction tomography: experimental realization[J]. Physiological Measurement, 2000,21(1):89-94.
- [5] 刘冀成,黄卡玛,华伟. 基于遗传算法的磁聚焦线圈阵列设计与场分布计算[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004,31(4):412-417. (LIU Jicheng,HUANG Kama,HUA Wei. Design and field calculation of coil array for magnetic focus based on genetic algorithm[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2004, 31(4):412-417.)
- [6] 傅林,黄卡玛,向胜昭. 生物组织磁聚焦电导率成像原理及反演算法[J]. 电波科学学报, 2006,21(2):249-254. (FU Lin, HUANG Kama, XIANG Shengzhao. Focused magnetic fields conductivity tomography of biological tissue and its inverse algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006,21(2):249-254.)
- [7] 杨勇,陈德胜,刘冀成,等. 管道金属蚀失量检测聚焦信号加载理论研究[J]. 油气储运, 2012,31(8):601-603. (YANG Yong, CHEN Desheng, LIU Jicheng, et al. Research on focusing signal loading technique in detection of metal corrosion loss for pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012,31(8):601-603. doi:10.6047/j.issn.1000-8241.2012.08.012.
- [8] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998. (JIN Jianming. Finite element method of electromagnetic field[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 1998.)
- [9] 谢德馨. 三维涡流场的有限元分析[M]. 北京:机械工业出版社,2008. (XIE Dexin. Finite element analysis of 3D eddy current field[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.)
- [10] 蒋大青,付志红,侯兴哲,等. 基于Maxwell 3D瞬变电场法三维正演研究[J]. 电测与仪表, 2012,49(6):29-32. (JIANG Daqing, FU Zhihong, HOU Xingzhe, et al. Research about 3D forward modeling of transient electromagnetic method based on Maxwell 3D[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012,49(6):29-32.)
- [11] 高军哲,潘孟春,罗飞路,等. 谱分析型多频涡流检测的激励信号设计与优化[J]. 无损检测, 2011,33(7):56-59. (GAO Junzhe, PAN Mengchun, LUO Feilu, et al. Design and optimization of excitation signal in multi-frequency eddy current testing based on spectrum analysis method[J]. Non-destructive Testing, 2011,33(7):56-59.)

- [12] 胡小伟. 经颅磁刺激系统聚焦性的研究[D]. 天津:天津工业大学, 2016. (HU Xiaowei. Study on the focus of transcranial magnetic stimulation system[D]. Tianjin,China:Tianjin Polytechnic University, 2016.)
- [13] 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. TEM coil array design and simulation based on hybrid optimization algorithm[D]. Chengdu,China:Chengdu University of Information Technology, 2015.)
- [14] 任海燕,丁克勤. 低频涡流检测激励频率选取的仿真研究[J]. 无损探伤, 2009,33(3):18-20. (REN Haiyan,DING Kekan. Simulation research on excitation frequency selection of low frequency eddy current detection[J]. Non-destructive Test, 2009,33(3):18-20.)
- [15] 游凤荷,蒋韬,孙砚飞. 脉冲涡流磁场特征分析[J]. 仪表技术与传感器, 2003(5):38-40. (YOU Fenghe,JIANG Tao,SUN Yanfei. Analysis of the characteristics of pulsed eddy current fields[J]. Instrument Technique and Sensor, 2003(5):38-40.)
- [16] 刘波,罗飞路,侯良洁. 平板表层缺陷检测涡流阵列传感器的设计[J]. 传感技术学报, 2011,24(5):679-683. (LIU Bo, LUO Feilu,HOU Liangjie. Design of an eddy current array sensor for surface flaw detection in a conductive plate[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011,24(5):679-683.) doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.05.011.

作者简介:



杨龙成(1988-),男,成都市人,硕士,助教,主要研究方向为计算电磁学、物联网应用等,email:151083@cdnu.edu.cn.

胡俊(1982-),男,四川省达州市人,博士,副教授,主要研究方向为智能交通、计算机网络等.

孙连海(1974-),男,山西省临县人,硕士,高级实验师,主要研究方向为计算机应用等.

刘腊梅(1992-),女,四川省自贡市人,本科,主要从事英语教育.

2018 年高级混合智能信息处理国际会议 (ADHIP)

人工智能和大数据为现代计算机技术应用的重要分支,近年来这两个领域的研究相互交叉促进,产生了很多新的方法和应用。紧跟时代步伐,将主办“2018 年高级混合智能信息处理国际会议(ADHIP)”。旨在为业界建立一个广泛、有效的交流合作平台,让我们及时了解行业发展动态、掌握最新技术,拓宽研究视野,推动学术进步以及技术成果的高效应用。会议将于 2018 年 10 月 5~8 日在中国湖南益阳召开。

会议的征稿范围涵盖人工智能、智能数据库,大数据模型和算法、大数据架构、大数据管理,大数据搜索和挖掘,无线传感器网络技术及其相关领域。热忱欢迎从事相关技术研究的专家、学者和专业技术人员踊跃投稿并参加大会。聆听国内外知名专家精彩报告,并且可以亲自参与其中与来自世界各地的专家学者进行面对面的交流与探讨。

欢迎学会各单位专家学者积极投稿,凭此通知投送且录用的稿件。本次会议采取同行评议的审稿方式遴选收录文章,收录的文章将推荐由 SPRINGER 出版到会议论文集,送检 Ei Compendex、Scopus 等著名数据库。本次会议将选择优秀的论文扩展后推荐发表在 JCR2 区 SCI 期刊和部分 EI 期刊上。

征稿范围包括但不限于以下主题:大数据、机器学习、信息检索、无线通信、传感器网络、生物信息技术、信号与信息处理、信息与通信技术。

2018 高级混合智能信息处理国际会议(ADHIP)投稿说明:

1. 征稿主题详情请参考: <http://adhip.org/>;
2. 投稿截止日期: 2018 年 7 月 31 日
3. 会议官方语言为英语,只接受英语论文,请务必用英语撰写文章。