

新型方向性自差分涡流传感器的仿真设计与研究

吕 程¹, 肖迎春¹, 安雨晴², 杨宾峰³

(1. 中国飞机强度研究所结构损伤监测技术研究室,西安,710065;
2. 中航飞机研发中心,西安,710089;3 空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 传统涡流检测技术采用一个圆柱形的激励线圈来产生激励磁场,通过用检测线圈来收集扰动磁场,然而由于激励线圈引起的磁场要比缺陷引起的扰动磁场强很多,这种结构的传感器对缺陷的检测灵敏度低,需采用差分的方法来获取缺陷信息。提出了一种新型涡流传感器,其通过采用矩形激励线圈来改变激励磁场的空间分布,使得无需采用差分方法就可以获得缺陷信息。在对新型传感器进行原理分析的基础上,仿真分析了其与传统传感器探头缺陷检测灵敏度之间的差异。并对传感器尺寸和激励频率进行了优化设计,最后验证了该新型传感器对缺陷长度的定量检测能力。仿真结果表明,该新型传感器具有较高的检测灵敏度和缺陷定量精度,为以后单激励多检测阵列涡流传感器的研究奠定了基础。

关键词 自差分涡流传感器;涡流检测;优化设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.010

中图分类号 TH878 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0054-06

Design and Research onSimulation of a New Directional Self-difference Eddy Current Sensor

LYU Cheng¹, XIAO Yingchun¹, AN Yuqing², YANG Binfeng³

(1. China Aircraft Strength Research Institute ,Damage Monitoring & Detecting Research Department, Xi'an,710065,China;2. AVIC XAC, Xi'an,710089,China;3. Information and Navigation College, Air Force Engineering University ,Xi'an 710077,China)

Abstract: Traditional eddy current testing technology generate a magnetic field excitation by a cylindrical excitation coil, and collect magnetic field perturbations through the detecting coil, however, the magnetic field generated by excitation coil is much stronger than those generated by defect, so the defect detection sensitivity of the sensor with this structure is not high, and it is necessary to adopt difference methods to obtain the information of defect. A new type of eddy current sensor is proposed, which can be used to change the spatial distribution of the excitation magnetic field by using the rectangular excitation coil, so that the defect can be quantified without difference. Based on the analysis of the principle of the new sensor, the sensitivity difference between the traditional sensor and the defect detection is analyzed by simulation. The sensor size and excitation frequency were optimized, and the quantitative detection ability of the new sensor was verified. Simulation results show that the new sensor has high detection sensitivity and defect quantitative accuracy. To lay the foundation for the research of single excitation and multi detector array eddy current sensor.

收稿日期:2016-06-16
基金项目:国家自然科学基金(51377172);航空科学基金(20130996009);陕西省自然科学基金(2015JM5147)
作者简介:吕程(1989—),男,陕西西安人,工程师,主要从事涡流检测技术研究. E-mail:lajourney@163.com

引用格式:吕程,肖迎春,安雨晴,等. 新型方向性自差分涡流传感器的仿真设计与研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):54-59. LYU Cheng,XIAO Yingchun,AN Yuqing,et al. Design and Research onSimulation of a New Directional Self-difference Eddy Current Sensor[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2017,18(2):54-59.

Key words: self-difference eddy current sensor; eddy current testing; optimization design

涡流检测作为一种重要的无损检测方法,在检测管棒、飞机轮毂及发动机叶片、铁轨和发电机端环^[1-10]等多个金属检测领域应用广泛。传统的涡流传感器一般采用圆环柱形线圈作为激励线圈,采用位于激励线圈下方的同轴圆环柱形线圈或磁传感器来收集由于缺陷引起的磁场变化。为了精确获取裂纹信息,得到只受由缺陷引起的那部分磁场的变化,必须对采集得到的信号进行差分处理,从中剔出无缺陷存在时主要由激励线圈产生的磁场引起的参考信号。通常情况下,采用一个自感式的检测线圈和一个自感式的参考线圈形成差分处理探头,要进行差分处理必须保证两个线圈的感应信号同步,以免引起较大的误差,这就使得信号处理的难度加大^[11-12]。

另外,由于传统涡流传感器的激励线圈在被测物表面产生的不是匀强涡流场,当布置多个检测线圈形成阵列涡流传感器时,各检测线圈背景电平不完全相同,增加了裂纹定量分析的难度。

为了改善以上传统涡流检测中存在的问题,本文对新型方向性自差分涡流传感器^[13]采用 ANSYS 有限元仿真方法,研究了新型涡流传感器检测过程中传感器参数优化设计问题和裂纹长度定量问题^[14]。

1 新型涡流传感器原理分析

传统涡流技术采用圆柱形激励线圈,其在被测试件上感应涡流呈封闭的圆环状流动,当有缺陷存在时,铝板产生的扰动场将沿激励场相反的方向穿过检测线圈。由于激励线圈引起的磁场比缺陷引起的扰动场要强很多,因此,检测线圈难以提取到有效的缺陷信息。

为了克服该问题,采用矩形线圈作为激励线圈,检测线圈位于其正下方,轴向与 Z 向重合,见图 1(a)。

采用有限元软件 ANSYS 仿真建模,新型涡流传感器模型参数见表 1,传统涡流传感器模型除内外半径分别为 18 mm 和 20 mm 外,其他参数与新型涡流传感器模型相同,见图 2(a)。

表 1 新型涡流传感器模型参数	
Tab. 1 Model parameters of the new eddy current sensor	
激励线圈弧半径/mm	3
激励线圈匝数	100
激励线圈长度/mm	40
激励线圈高度/mm	40
激励线圈宽度/mm	40
激励线圈厚度/mm	2
激励线圈与铝板间距/mm	5
激励线圈导线直径/mm	0.35
空气、线圈及铝板相对磁导率	1
检测线圈高度/mm	3
检测线圈内半径/mm	4
检测线圈外半径/mm	6
检测线圈填充系	0.4
检测线圈与铝板间距/mm	1
检测线圈导线直径/mm	0.08
铝板厚度/mm	8
铝板长度/mm	200
铝板宽度/mm	200
线圈电阻率/(S·m)	1.72E-08
铝板电阻率/(S·m)	2.65E-08

新型传感器感应涡流在线圈底部的导体区域内朝同一个方向流动,然后分别在该区域外两侧形成闭合回路,见图 1(c)。

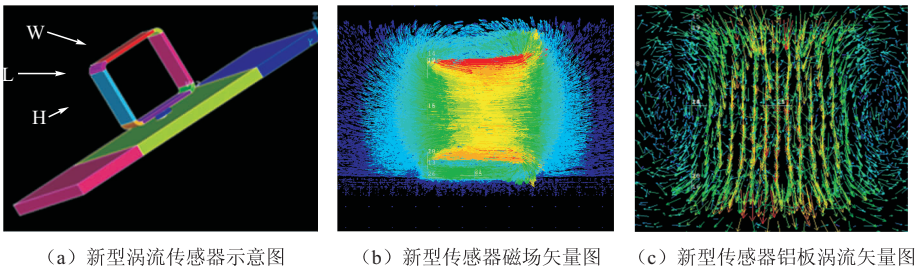


图 1 新型方向性自差分涡流传感器示意图、磁场矢量图与铝板涡流矢量图
Fig. 1 Schematic diagram, magnetic field vector and eddy current vector diagram of the new sensor

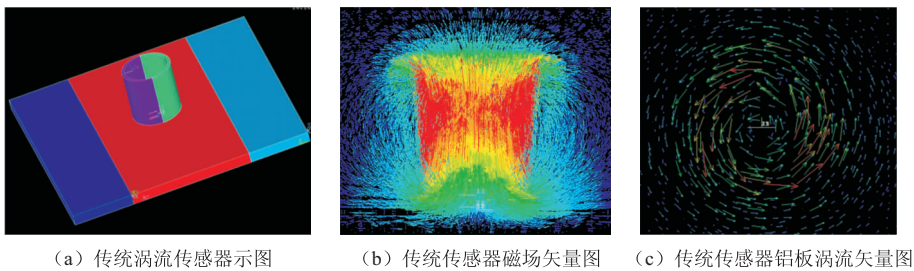


图 2 传统涡流传感器示意图、磁场矢量图与铝板涡流矢量图

Fig. 2 Schematic diagram, magnetic field vector and eddy current vector diagram of traditional eddy current sensor

由图 1(b)和图 2(b)可以看出,传统涡流传感器激励线圈与检测线圈同轴,所以激励线圈主要对检测线圈产生其轴向的磁场,因此,其激励场对检测线圈的检测电压影响大;而新型涡流传感器主要产生垂直于检测线圈轴向的磁场作用于检测线圈,因此不同于传统传感器,新型传感器激励线圈的激励场对检测线圈的检测电压影响很小。

由图 1(c)和图 2(c)可以看出,传统传感器在被

测物表面产生的环形涡流场,而新型传感器可以在被测物表面产生沿激励线圈宽度方向的匀强涡流场,这样可以在激励线圈下方多布置检测线圈,形成阵列涡流传感器。

在检测线圈正下方(铝板中心处)建立长 14 mm、宽 2 mm 的缺陷,缺陷长度方向一端边界处位于铝板中心,深度从 0 到 6 mm 以步长为 1 mm 改变。进行建模分析,测得检测线圈电压幅值见表 2。

表 2 2 种涡流检测方法检测幅值对比

Tab. 2 Comparison of two kinds of eddy current testing methods

缺陷深度/mm	0	1	2	3	4	5	6
新型传感器检测电压幅值/V	0.022 4	0.096 1	0.217 5	0.283	0.354 5	0.394 4	0.419 8
传统传感器检测电压幅值/V	23.007 2	23.207 9	23.384 1	23.530 2	23.840 4	23.916 5	23.979

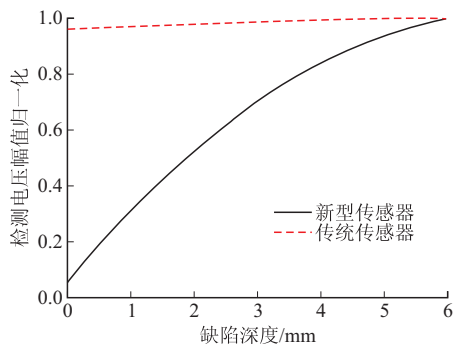


图 3 2 种涡流检测方法归一化幅值曲线

Fig. 3 Normalized amplitude curves of two of kinds of eddy current tes ting methods

由表 2 和图 3 可知,传统涡流检测方法,由于检测线圈与激励线圈同轴,导致激励线圈引起的磁场强度远大于缺陷引起的扰动场强度。所以,虽然测得检测线圈电压幅值偏大,但随着缺陷深度加深,检测线圈幅值变化量很小,灵敏度低。

由图 3 可知,经过归一化处理,新型涡流检测传感器检测线圈幅值变化曲线斜率远高于传统涡流传感器,因此新型方向性自差分涡流传感器灵敏度远好于传统涡流传感器。

2 传感器尺寸及激励频率的优化设计

2.1 检测线圈高度确定

由于检测线圈检测的是一个区域,因此检测线圈外半径越小,检测定量精度越高^[15]。因为检测线圈的感应电动势越大,灵敏度越高。因此由感应电动势公式:

$$E = n \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$
(1)

可以看出通过尽可能的提高线圈匝数 n ,来增大感应电动势 E 提高检测线圈灵敏度。在线圈填充系数 0.4 不变的情况下,提高检测线圈高度可以增加线圈匝数 n ,但由于激励线圈位于检测线圈正上方,因此随着检测线圈高度增加,激励线圈的提离距离也会增加^[16], $\Delta \varphi$ 势必会减小,感应电动势 E 也会减小,会降低传感器的裂纹检测能力,检测电压幅值变小。因此,通过逐渐增加检测线圈高度测量检测电压幅值来求出检测线圈最优高度。

裂纹尺寸选择长 14 mm、宽 2 mm、高 1 mm。

检测线圈高从 1 mm 以 1 mm 为步长增加到 12 mm,计算出检测线圈电压幅值见图 4。

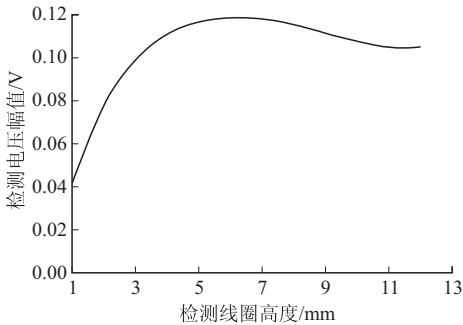


图 4 检测电压幅值随检测线圈高度变化曲线
Fig. 4 The curve of detection voltage amplitude changes with the height of the detecting coil

由图 4 可知检测线圈高度开始增加时,检测电压幅值相应增加,灵敏度提高。检测线圈高度到 6 mm 为检测电压极大值,因此得出检测线圈最佳高度为 6 mm。

2.2 激励线圈高度确定

激励线圈的长度和宽度决定了激励线圈正下方被测物上的匀强涡流场区域大小。由于该传感器可采用多个检测线圈形成单激励多检测阵列涡流传感器,因此可根据实际需要选择适合的长宽。选择长宽高为 $14\times2\times1\text{ mm}^3$ 的裂纹,激励线圈高度从 0 以 10 mm 为步长增加到 50 mm,测得检测电压幅值变化如图 5 所示。根据前文得出的结论,检测线圈高选取为 6 mm。

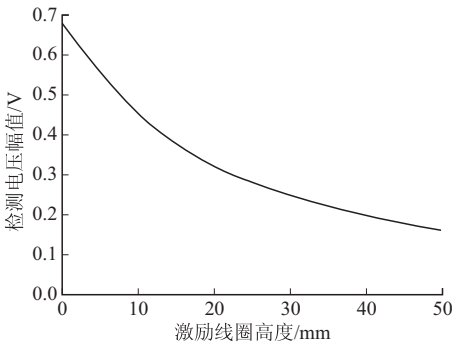


图 5 检测电压幅值随激励线圈高度变化曲线
Fig. 5 The detection voltage amplitude changes with the height of the excitation coil

由图 5 可知,激励线圈高度越小,检测电压幅值越大,因为随着高度的减小,激励线圈产生的磁场更加集中,作用于被测物表面的激励场更强,导致被测物表面的涡流场更强。因此设计传感器时尽可能减小激励线圈高度。

2.3 激励频率的研究

分别选择 4 mm、8 mm 和 12 mm 厚的铝板,选取不同的频率和归一化深度的缺陷,测得检测电压

幅值见图 6~8。

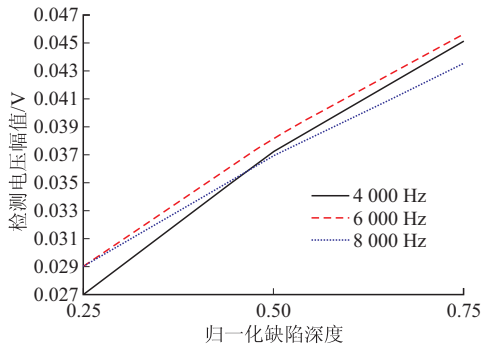


图 6 4 mm 厚度铝板不同缺陷深度变化曲线
Fig. 6 Variation curves of 4 mm thickness of aluminum plate with different defects

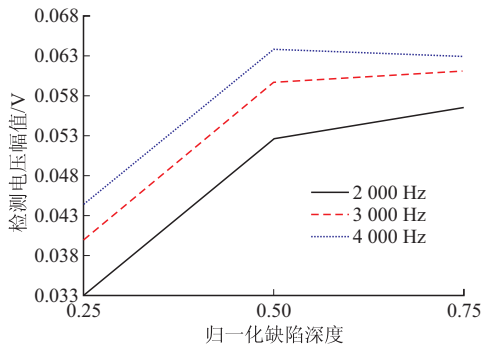


图 7 8 mm 厚度铝板不同缺陷深度变化曲线
Fig. 7 Variation curves of 8 mm thickness of aluminum plate with different defects

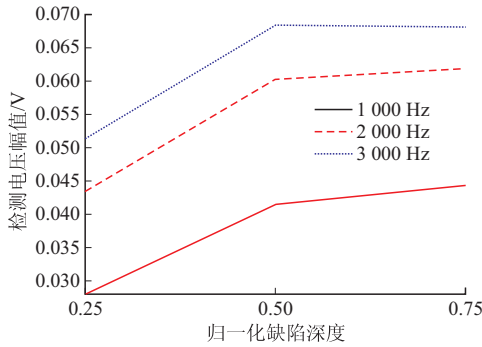


图 8 12 mm 厚度铝板不同缺陷深度变化曲线
Fig. 8 Variation curves of 12 mm thick ness of aluminum plate with differ ent defects

由式(1)可知,感应电动势 E 与 Δt 成反比,而 Δt 反比于频率 f ,因此感应电动势正比于频率 f 。所以随着频率的增加,检测电压幅值增加。由图 6 可以看出,对于 4 mm 厚铝板,激励频率从 6 000 Hz 增加到 8 000 Hz 时,检测电压幅值反而减小。而由图 7~8 可以看出铝板厚度分别为 8 mm 和 12 mm 时,随着激励频率的增加,裂纹归一化深度从 0.5 增加到 0.75(8 mm 厚铝板频率增加到 4 000 Hz, 12 mm 厚铝板频率增加到 3 000 Hz),检测电压幅

值反而减小。

金属表面感应的涡流渗透深度随激励频率而异,激励频率高时金属表面涡流密度大,检测灵敏度高,随着激励频率增加,检测线圈电压幅值增加,但是由于趋肤效应,涡流渗透深度会降低,频率过高不适用于检测较厚被测物的深处裂纹;随着频率的降低,涡流渗透深度增加,但表面涡流密度下降,检测灵敏度降低。所以,涡流传感器的检测深度与表面检测灵敏度是互相矛盾的,难以两全。因此,对一种材料进行涡流检测时,须根据实际需求来选择尽可能高的激励频率。

3 裂纹长度定量的评估

由于实际工作需要测量裂纹长度,因此本文针对检测裂纹长度进行定量分析。沿裂纹长度方向移动传感器,分别选取缺陷尺寸为 $10\times 2\times 2\text{ mm}^3$ 、 $12\times 2\times 2\text{ mm}^3$ 和 $14\times 2\times 2\text{ mm}^3$; $12\times 3\times 2\text{ mm}^3$ 、 $12\times 2\times 2\text{ mm}^3$ 和 $12\times 1\times 2\text{ mm}^3$; $12\times 2\times 6\text{ mm}^3$ 、 $12\times 2\times 4\text{ mm}^3$ 和 $12\times 2\times 2\text{ mm}^3$ 共 3 组情况进行模拟分析,传感器沿裂纹长度方向轴线从距裂纹中心处 -15 mm 移动至 15 mm 处(移动过程中保持传感器的长度方向中心轴线与裂纹的长度方向中心轴线上下重合),仿真结果见图 9~12。

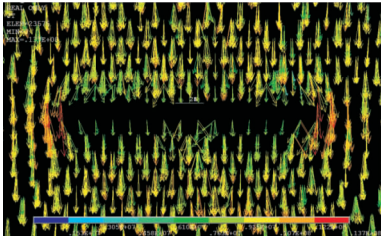


图 9 铝板表面(含裂纹)涡流矢量图
Fig. 9 Eddy current vector of aluminum plate surface (including a crack)

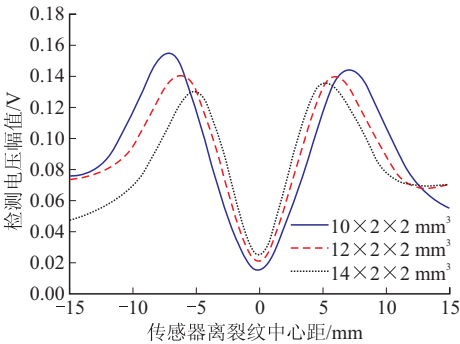


图 10 不同长度的裂纹幅值扫描曲线
Fig. 10 Scanning curves of different length cracks

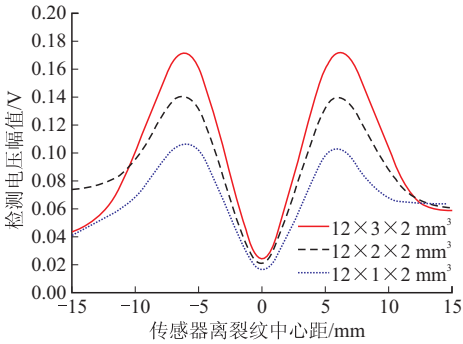


图 11 不同宽度的裂纹幅值扫描曲线
Fig. 11 Scanning curves of different width cracks

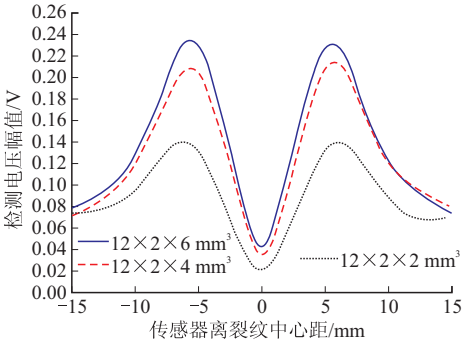


图 12 不同高度的裂纹幅值扫描曲线
Fig. 12 Scanning curves of different high crack amplitude

由图 9~10 可知,涡流通过裂纹时,主要从裂纹两端绕过,因此裂纹端点处涡流强度最大,当传感器中心即检测线圈中心位于裂纹长度方向两端时,其检测电压幅值也就为极大值;而裂纹中心处通过的涡流最少,因此检测线圈位于裂纹中心正上方时,检测电压幅值为极小值。如图 11~12 所示,裂纹的宽度和深度只影响该极大值的电压幅值,并不影响其横坐标即传感器离裂纹中心距。因为检测线圈外半径越小,检测的区域越小,定位精确度越高;但随着检测线圈尺寸减小,匝数跟着减小,由式(1)可以看出,匝数将会导致检测幅值降低。因此,根据实际情况选择合适的检测线圈尺寸,通过求 2 个极大值的距离可以算出裂纹长度。

4 结语

基于传统涡流传感器检测线圈易受激励线圈干扰,和无法在被测物产生匀强涡流场这些缺点,提出一种新型方向性自差分涡流传感器,与传统涡流传感器进行比较,发现新型传感器有效的克服了这些缺点。并且通过新型涡流传感器激励线圈下方的被测物表面产生匀强涡流场这一优点,可以在激励线圈下方布置多个检测线圈,形成阵列涡流传感器。

通过 ANSYS 有限元模拟,对新型传感器进行

优化设计,计算出最佳参数,对该传感器测量裂纹长度进行验证。为以后研究单激励多检测阵列涡流传感器提供了奠定了基础。

参考文献(References):

[1] 万本例,张路根,宋凯,等. 钢管饱和磁化下涡流检测有限元仿真研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(8): 116-119.
WAN B L,ZHANG L G, SONG K,et al,The Simulation Study of Eddy Current Testing of Pipeline under Magnetic Saturation Condition[J]. Manufacturing Automation,2011,33(8):116-119. (in Chinese)

[2] 李桂元. 阵列涡流在棒材检测中的应用[J]. 南钢科技与管理,2012(2):52-54.
LI G Y. Application of Array Eddy Current in Steel Bar Detection[J]. NISCD Technology and Management, 2012,2:52-54. (in Chinese)

[3] 张玉华,吕登龙,孙慧贤. 飞机轮毂裂纹检测涡流探头的设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(5): 131-134.
ZHANG Y H,LYU D L,SUN H X. Design and Implementation of Eddy-Current Probe for Aircraft Wheel Hub Cracks Detection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(5): 131-134. (in Chinese)

[4] 宋凯,刘堂先,李来平,等. 航空发动机涡轮叶片裂纹的阵列涡流检测仿真,航空学报,2014,35(8):2355-2363.
SONG K,LIU T X,LI L P,et al. Simulation on Aero-engine Turbine Blade Cracks Detection Based on Eddy Current Array[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2014,35(8):2355-2363. (in Chinese)

[5] SONG Z,YAMADA T,SHITARA H,et al. Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications,2011,3:546-550.

[6] GÄRTNER S,KRAUSE H J,WOLTERS N,et al. Multiplexed HTS rf SQUID Magnetometer Array for Eddy Current Testing of Aircraft rivet Joints[J]. AIP Conference Proceedings, 2002,615(1):520.

[7] RUDTSOV V,TARASOV S,KOLUBEAV E,et al. Ultrasonic Phase Array and Eddy Current Methods for Diagnostics of Flaws in Friction Stir Welds[J]. AIP Conference Proceedings,2014,1623(1):539-542.

[8] WARD C,The Use of Eddy Current Arrays as A Replacement for Dye-penetrant Inspection of Generator and Exciter End-rings[J]. Or Insight, 2005, 47(9): 543-547.

[9] ANGANI C S, RAMOS H G, RIBEIRO A L, et al, Evaluation of Transient Eddy Current Oscillations Response for Thickness Measurement of Stainless Steel Plate[J], Measurement, 2016, 90(1): 59-63.

[10] LIANG T, REN W, TIAN G Y, et al. Low Energy Impact Damage Detection in CFRP Using Eddy Current Pulsed Thermography[J]. Composite Structures, 2016, 143: 352-361.

[11] JUN J, LEE J, KIM J, et al. Eddy Current Imager Based on Bobbin-type Hall Sensor Arrays for Nondestructive Evaluation in Small-Bore Piping System[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1511(1), 502-509.

[12] 郭肖鹏. 基于 GMR 的电涡流检测仿真分析[D]. 天津:天津大学, 2013.
GUO X P. Simulation Analysis Eddy Current Testing Based on GMR[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)

[13] 张辉,杨宾峰,王晓锋,等. 脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(1): 52-57.
ZHANG H,YANG B F,WANG X F,et al. Simulation Analysis and Experimental Research on Parameter Influence in Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technique[J]. Journal of Air Force EngineeringI University (Natural Science Edition), 2012, 13(1): 52-57. (in Chinese)

[14] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等. 基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(1): 73-77.
YANG B F, ZHANG H, ZHAO Y F, et al, Quantification of Crack Defect Using a New Pulsed Eddy Current Sensor[J], Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2011, 12(1): 73-77. (in Chinese)

[15] YANG B F, LI X C. Pulsed Remote Eddy Current Field Array Technique for Nondestructive Inspection of Ferromagnetic Tube[J]. Nondestructive Testing & Evaluation, 2010, 25(1): 3-12.

[16] 曹海霞,王畅,杨宾峰,等. 脉冲涡流无损检测提离效应研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(3): 45-49.
CAO H X,WANG C,YANG B F,et al. Study of Lift-off Effects for Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technique[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2011, 12(3): 45-49. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)