

脉冲涡流无损检测提离效应研究

曹海霞¹, 王畅², 杨宾峰¹, 张军潮¹, 张辉³

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 3. 空军工程大学科研部, 陕西 西安 710051)

摘要 在脉冲涡流检测过程中, 由于探头倾斜或被测对象表面不光滑会产生提离效应, 提离效应严重影响着脉冲涡流无损检测的结果。本文在分析脉冲涡流检测技术工作原理的基础上, 采用 ANSYS 有限元仿真软件建立了激励线圈为圆柱形和矩形两种结构的模型, 并分别针对有裂纹缺陷的铁磁性(钢)和非铁磁性(铝)试件进行了仿真研究, 通过分析试件中感应涡流和扰动磁场的变化, 给出了不同情况下检测信号随提离变化的规律, 并从原理上给出了解释。最后, 通过实验的方法对仿真结果进行了验证, 实验结果表明了仿真结果的正确性, 从而为进一步的消除提离效应提供了有价值的参考依据。

关键词 脉冲涡流; 提离效应; 有限元仿真; 检测信号

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.010

中图分类号 TG115 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)03-0045-05

脉冲涡流(Pulsed Eddy Current, PEC)是近年发展起来的一种无损检测新技术, 其具有信号频带宽、对深层缺陷检测能力强、获取信息量丰富等优点^[1-3], 因而在石油化工、航空航天以及机械制造等领域得到了广泛重视。然而, 缺陷的定量精度较低是制约脉冲涡流技术实际应用的主要问题, 其中, 由于被测试件表面粗糙或操作不当而产生的“提离效应”是一个重要影响因素。

Giguere 等采用圆柱型激励线圈对提离效应进行了研究^[4], 结果表明, 不同提离下的检测信号会出现一个“提离交叉点”, 并且此交叉点的出现位置不会随提离而变化。但是, 其只是针对激励线圈为圆柱形且平板试件为非铁磁性的情况进行了研究。

本文采用 ANSYS 仿真软件分别建立了圆柱形和矩形两种结构的激励线圈模型, 研究了其在检测铁磁性(钢)和非铁磁性(铝)试件时, 检测信号随提离的变化规律。并采用实验的方法对仿真结果进行了验证, 得出了各种情况下检测信号的变化规律, 从而为进一步消除“提离效应”奠定了基础。

1 脉冲涡流无损检测原理

脉冲涡流检测技术以被测金属导体感应出的涡流为基础, 通过测量其相应的磁场变化得到检测信息^[5]。当被测金属导体没有缺陷时, 激励线圈在被测导体中感应出涡旋电流, 此涡流又会感应出一个二次场, 因而, 检测线圈得到的信号应该是激励线圈产生的一次场与涡流产生的二次场的叠加。而当导体存在缺陷时, 缺陷就会对涡流产生扰动, 感应涡流会向缺陷的底部和两端偏转, 涡流感应出的磁场也会随之发生变化, 通过测量相应的磁场变化就可以得到相应的缺陷信息。

在检测过程中提离发生变化时^[6-7], 涡流产生的磁场到达检测线圈处的大小会随着提离的改变而不同。提离值越大时, 涡流产生的磁场在空间中的衰减也就越大, 因而检测到的其磁场值就越小, 反之亦然。由此可见, 提离的变化会对脉冲涡流检测结果产生很大的影响。因此, 对提离效应进行研究具有重要的意义。

* 收稿日期: 2010-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50807053)

作者简介: 曹海霞(1980-), 女, 山东鄄城人, 硕士, 主要从事电磁无损检测研究。E-mail: caohaixia111@163.com

2 仿真模型的建立

本文采用 ANSYS 有限元仿真软件建立仿真模型,圆柱形和矩形激励线圈仿真模型见图 1-2。当激励线圈为圆柱形模型时,仿真中激励线圈与检测线圈沿 OZ 向同轴放置,缺陷位于检测线圈中间位置的正下方。当激励线圈为矩形结构模型时,激励线圈和检测线圈的轴线相互平行,且都沿 OY 向放置。缺陷位于检测线圈中央位置的正下方。

仿真模型的参数如下:铝板的相对磁导率为 1,电阻率为 $2.65E-8 \Omega \cdot m$ 。钢板的相对磁导率为 100,电阻率为 $2.0E-7 \Omega \cdot m$ 。圆柱形激励线圈的高度为 45 mm,内、外半径分别为 22.5 mm 和 24.5 mm,厚度为 2 mm,匝数为 300 匝。矩形激励线圈的长度为 45 mm,宽度为 45 mm,高度为 25 mm,厚度为 2 mm,匝数为 300 匝。检测线圈均为圆柱形,其内、外半径分别为 2 mm 和 4 mm,高度为 6 mm,匝数为 800 匝。激励线圈和检测线圈绕线的电阻率为 $1.724E-8 \Omega \cdot m$ 。脉冲方波的电压为 12 V。裂纹缺陷的尺寸(长 \times 宽 \times 深)为 20 mm \times 2 mm \times 2 mm。

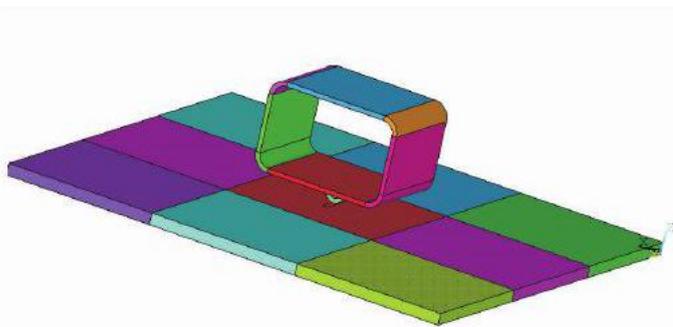


图 1 矩形激励线圈有限元仿真模型

Fig. 1 The rectangle excitation coil model

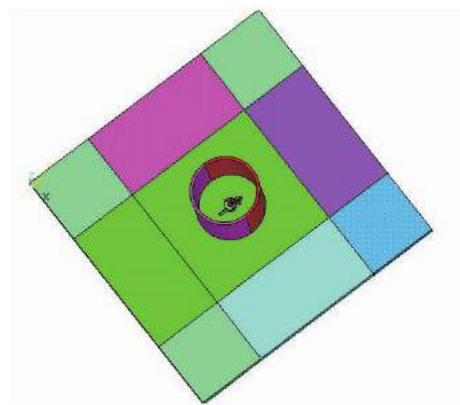


图 2 圆柱形激励线圈有限元仿真模型

Fig. 2 The columniform excitation coil model

3 仿真结果及分析

研究发现^[8-9],当激励线圈和检测线圈轴向相互平行放置,检测线圈到达缺陷的中间位置时,提取此值可以实现对缺陷深度的定量,但此值会受提离变化的影响较大。因此,本文只研究检测线圈与激励线圈轴向相互平行放置时提离对检测信号的影响。

3.1 激励线圈为圆柱形时的仿真结果

试件为有裂纹缺陷的铝板金属时,仿真结果见图 3。其中,参考信号是在没有平板试件的情况下获得的,此时,由于不存在金属导体试件,也就不会有涡流信号产生,所以,参考信号可以被看作是只有激励磁场作用时的检测信号。

从图 3 可以看出,检测信号的幅值随着提离距离的增大而增大。这是由于铝板上感应的涡流的流向与激励电流的流向相反,因而,两者在检测线圈处感应的磁场方向也相反。当提离距离变大时,涡流产生的二次场到达检测线圈处的衰减就越大,因而其在检测线圈上感应的信号就会减弱。此时,激励磁场与涡流场在相互叠加后就会越大。

当平板试件为有裂纹缺陷的钢板时,垂直的激励磁场作用于铁磁性试件时,它自身会产生一个与激励磁场同向的磁场,此场对激励磁场起到加强的作用。从图 4 中可以看出,对于铁磁性试件的检测,检测信号的幅值随提离增大而减小。

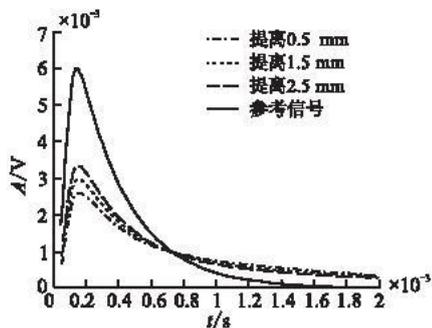


图3 有缺陷铝板检测线圈的感应信号

Fig. 3 The influence signals of the aluminium sample

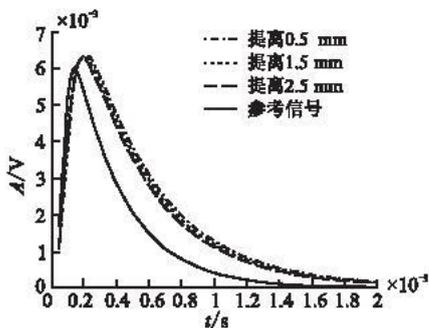


图4 有缺陷钢板检测线圈的感应信号

Fig. 4 The influence signals of the steel sample

3.2 激励线圈为矩形时的仿真结果

图5给出了试件为铝板时检测信号幅值随提高的变化结果。在矩形激励线圈的底部,涡流产生的磁场与激励产生的磁场以相同的方向穿过检测线圈。当提高减小时,涡流磁场会逐渐增大,激励磁场和涡流磁场同向叠加后的值就会增大,同时检测信号幅值也会增大。

由于钢为铁磁性金属,试件自身产生的磁场与激励磁场以相反的方向穿过检测线圈。提高距离越小,检测信号的峰值就会越小,仿真结果见图6。

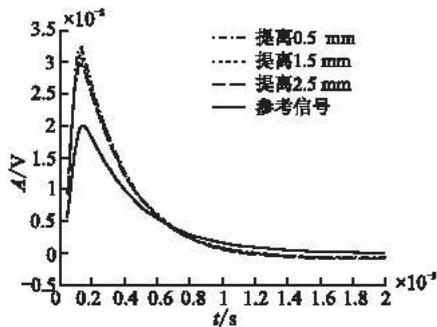


图5 有缺陷铝板检测线圈的感应信号

Fig. 5 The influence signals of the aluminium sample

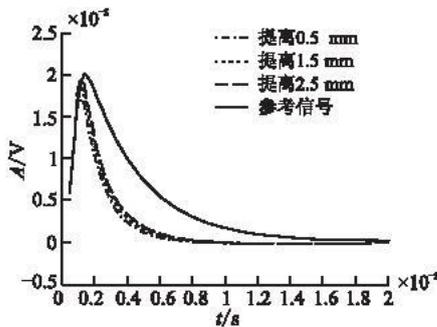


图6 有缺陷钢板检测线圈的感应信号

Fig. 6 The influence signals of the steel sample

4 实验结果

本文实验系统主要由信号发生模块、功率放大模块、信号调理模块、数据采集模块和脉冲涡流传感器等部分组成,图7为实验系统照片。

图8为圆柱形激励线圈的实验结果,参考信号线以上为钢板时的实验结果,而以下为铝板时的实验结果。可见,当被测试件为有裂纹缺陷的铝板时,提高的距离越大,检测信号的幅值越大;而对于钢板的检测,提高的距离越大,检测信号的幅值越小。

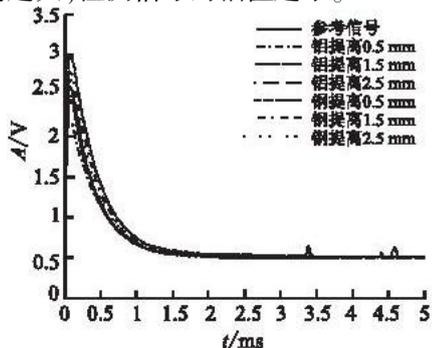


图8 圆柱形激励线圈实验结果

Fig. 8 The experiment results of the columniform excitation coil

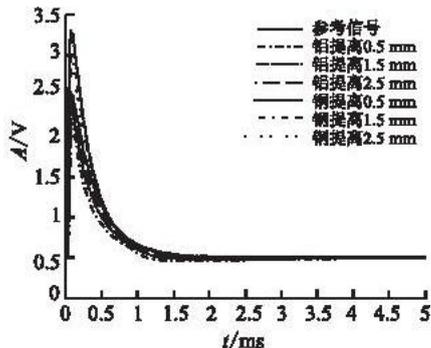


图9 矩形激励线圈实验结果

Fig. 9 The experiment results of the rectangle excitation coil

采用矩形的脉冲涡流传感器,同样对有裂纹缺陷的金属铝板和钢板进行实验研究,结果如图9所示。相反,参考信号线以上为铝板时的实验结果,而以下为钢板时的实验结果。从图中可看,当被测试件为有缺陷的铝板时,提离的距离越大,检测信号的幅值越小;被测试件为有缺陷的钢板时,提离的距离越大,检测信号的幅值越大。

5 结束语

本文在分析了脉冲涡流检测原理的基础上,利用 ANSYS 有限元仿真软件建立了圆柱形和矩形激励线圈模型,首先仿真分析了被测试件为非磁性和磁性材料,激励线圈为圆柱形和矩形结构时,检测线圈感应信号随提离的变化规律。仿真结果表明,对于圆柱形的激励线圈而言,当被测试件为铝板时,提离越大感应信号的峰值也就越大;当被测试件为钢板时,提离越大检测信号的峰值越小。而当激励线圈为矩形的情况下,检测信号随提离的变化规律与圆柱形激励线圈刚好相反。最后对仿真结果进行了实验验证,表明了仿真结果的正确性,从而为消除脉冲涡流无损检测中的提离效应提供了理论参考。

参考文献:

- [1] Espina - Hernandez J H, Grssinger R, Hallen J M. Local eddy current measurements in pulsed fields[J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2008, 320(4): 300 - 303.
- [2] LI Shu, HUANG Songling, ZHAO Wei. Development of differential probes in pulsed edd current testing for noise suppression [J]. Sensors and actuators A, 2007, 135: 675 - 679.
- [3] Lefebvrea J H V, Mandacheb C. Pulsed eddy current thickness measurement of conductive layers over ferromagnetic substrates [J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2008, 27: 1 - 8.
- [4] Giguere S, Lepine B A, Dubois J M S. Pulsed eddy current technology characterizing material loss with gap and lift off variations[J]. Res nondestr eval, 2001, 13: 119 - 129.
- [5] 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 Binfeng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, et al. Quantification of crack defect using a new pulsed eddy current sensor[J]. Air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1): 73 - 77. (in Chinese)
- [6] Safizadeh M S, Lepine B A, Forsyth D S, et al. Time frequency analysis of pulsed eddy current signal[J]. Journal of Nondestructive evaluation, 2001, 20(2): 73 - 79.
- [7] LI Shu, HUANG Songling, ZHAO Wei. Improved immunity to lift off effect in pulsed eddy current testing with two - stage differential probes[J]. Russian journal of nondestructive testing, 2008, 44(2): 138 - 144.
- [8] 杨宾峰,罗飞路,张玉华,等. 飞机多层结构中裂纹的定量检测及分类识别[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 63 - 67.
YANG Binfeng, LUO Feilu, ZHANG Yuhua, et al. Quantification and classification of cracks in aircraft multi - layered structure[J]. Chinse journal of mechanical engineering, 2006, 42(2): 63 - 67. (in Chinese)
- [9] 杨宾峰,罗飞路,潘孟春. 脉冲涡流无损检测中腐蚀缺陷边缘的识别[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 75 - 79.
YANG Binfeng, LUO Feilu, PAN Mengchun. Identification of corrosion fringe in pulse eddy current nondestructive testing[J]. Chinse journal of mechanical engineering, 2008, 44(12): 75 - 79. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Study of Lift - Off Effects for Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technique

CAO Hai - xia¹, WANG Chang², YANG Bin - feng¹, ZHANG Jun - chao¹, ZHANG Hui³

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. Department of Scientific-

ic Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In the course of pulsed eddy current testing, the incline of the probe or the roughness of the surface of the tested object will lead to the lift-off effects, which have a bad influence on the result of pulsed eddy current (PEC) nondestructive testing. Based on the analysis of the operating principle of PEC, two different simulation models with the excitation coils of columniform and rectangle structures are established by ANSYS finite element simulation software and the simulations on the specimen of ferromagnetic and non-ferromagnetic materials are done respectively. Through the analysis of the eddy current and rotated magnetic field, the influence effect of response signal with the variation of the lift-off distance and the reason is given. Finally, the results of simulation are verified by experiment methods. The results of the experimental work confirm the correctness of simulation, which will lay the foundation for the elimination of lift-off effects.

Key words: pulsed eddy current; lift-off effect; finite element simulation; detecting signal

(上接第44页)

The Research on Coordination Firepower Deployment of Multi-layered BMD system

ZHOU Xiao-guang, LI Wei-min, XIE Xin

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: This paper researches the problems of coordination firepower deployment of multi-layered BMD system. Firstly, the concept of multi-layered BMD system is defined, and anti-missile platforms of multi-layered BMD system are introduced. Secondly, the basic requirements of the firepower deployment of multi-layered BMD system are analyzed. Thirdly, since the anti-missile operation is an offence and defense process, this paper establishes a min-max model of coordination firepower deployment of multi-layered BMD system based on Game Theory, and again presents an algorithm to solve the model. Finally, by a calculation example and simulation, the optimal coordination deployment plan is gained. The model and the results can provide a reference for the improvement of the operation efficiency.

Key words: multi-layered BMD system; firepower deployment; min-max model