

# 基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术

杨宾峰<sup>1</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 赵玉丰<sup>1</sup>, 夏明文<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学科研部, 陕西 西安 710051)

**摘要** 传统脉冲涡流检测技术采用反射型传感器,其通过一个圆柱形的激励线圈来产生激励磁场,采用检测线圈或霍尔传感器来检测扰动磁场,然而由于激励磁场要比缺陷引起的扰动磁场强很多,使得这种结构的传感器对缺陷的检测灵敏度不高,需采用差分的方法来增强缺陷信息。提出了一种新型脉冲涡流传感器,其通过采用矩形激励线圈来改变激励场的空间分布,使得无需差分就可以对缺陷进行定量。在分析该新型脉冲涡流传感器检测原理的基础上,采用仿真和实验相结合的方法研究了其对裂纹缺陷长度和深度进行定量的效果,仿真与实验结果相一致,证明了该传感器的有效性。

**关键词** 脉冲涡流;传感器;裂纹缺陷;定量检测

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.01.016

**中图分类号** TG115 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)01-0073-05

脉冲涡流的激励信号为具有一定占空比的方波,施加在探头上的激励方波会感应出脉冲涡流在被测试件中传播,假如有缺陷存在,势必使得磁感应强度发生变化<sup>[1-3]</sup>,导致检测线圈上的感应电压随之改变,由于脉冲包含很宽的频谱,感应的电压信号中就包含有关缺陷的重要信息。传统的脉冲涡流采用圆柱形线圈作为激励线圈,采用同轴的圆柱形线圈或位于激励线圈底部的磁传感器(Hall传感器或GMR传感器)来检测受到缺陷扰动的磁场的变化,为了提取出只受缺陷扰动的那部分磁场的变化,必须对感应信号进行差分处理<sup>[4-7]</sup>,从中减去无缺陷存在时的参考信号,由于差分处理必须首先保证2个差分信号的同步,否则容易引起较大的误差,这就增加了信号处理的难度。

本文提出了一种新型脉冲涡流传感器,其通过采用矩形线圈作为激励线圈,将脉冲涡流激励场从空间上转化为匀强涡流场,从而等效为一种自差分式的涡流检测技术,内径很小的检测线圈位于激励线圈底部的中央,其感应的信号主要来自缺陷产生的扰动场,因此无需进行差分处理,这就消除了硬件设计中对于信号同步的要求,简化了信号处理的过程,同时提高了检测灵敏度。

## 1 新型脉冲涡流传感器检测原理

传统脉冲涡流技术采用圆柱形激励线圈,其在被测试件上感应的涡流呈封闭的圆环状流动,当有缺陷存在时产生的扰动场以和激励场相反的方向穿过检测线圈,由于激励场比缺陷引起的扰动场要强很多,因此,缺陷信息较难提取。

为了克服这个问题,通过采用矩形线圈作为激励线圈,其感应涡流在线圈底部的导体区域内朝同一个方向流动,然后分别在线圈的两侧形成闭合。内径很小的2个正交检测线圈位于激励线圈底部的中央,其轴分别沿Y向和Z向,用来对缺陷引起的扰动场进行检测,其中裂纹缺陷的长度沿Y向,新型脉冲涡流传感器结构见图1。

\* 收稿日期:2010-06-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50807053)

作者简介:杨宾峰(1976-),男,陕西卢县人,讲师,博士,主要从事电磁无损检测研究. E-mail:bf\_yang@163.com

采用图 1 所示的模型得到存在缺陷时空间  $Y$  向和  $Z$  向磁场的分布, 见图 2、图 3。从图中可以看出, 由于缺陷的存在, 原本均匀的感应场被破坏, 导致空间磁场分布出现变化。对于  $Y$  向磁场而言, 其在缺陷内部出现凹陷, 如图 2 所示, 这是因为电流总是沿着电阻率小的方向流动, 当金属导体中有缺陷存在时, 沿着  $X$  向均匀流动的涡流就会向缺陷的边缘偏转, 此时只有部分涡流沿着缺陷底部流过, 最终导致  $Y$  向磁场在缺陷内部出现了凹陷, 缺陷越深, 从缺陷底部流过的涡流量越少, 则  $Y$  向磁场凹陷得越厉害<sup>[7-8]</sup>。同时, 部分涡流顺着缺陷边缘发生偏转而形成  $Z$  向磁场, 因为涡流偏转的方向性致使这 2 个信号在缺陷边缘处的方向刚好相反, 如图 3 所示。综合以上分析可以看出,  $Y$  向和  $Z$  向磁场分布与缺陷的长度和深度存在一定的关系, 通过分析空间磁场的分布, 可以实现对缺陷的定量检测。

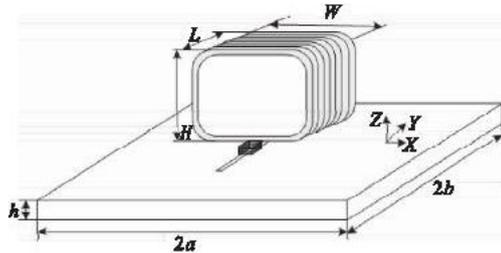


图 1 新型脉冲涡流传感器示意图

Fig. 1 The schematic of the new PEC sensor

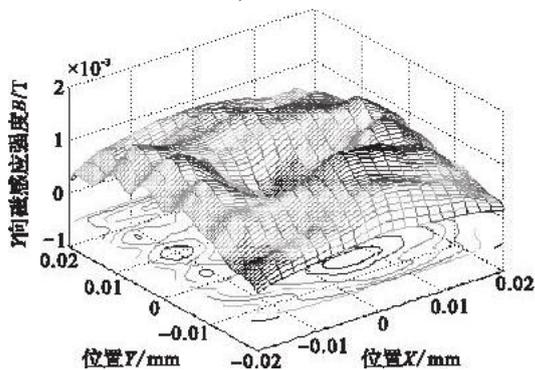


图 2 空间  $Y$  向磁场分布

Fig. 2 The space magnetic field distribution of  $\Delta B_y$

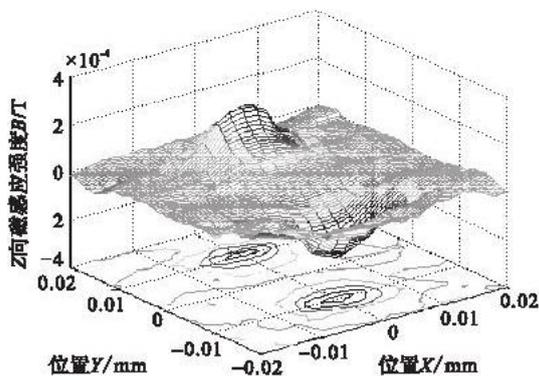


图 3 空间  $Z$  向磁场分布

Fig. 3 The space magnetic field distribution of  $\Delta B_z$

## 2 裂纹缺陷定量的仿真分析

脉冲涡流磁场测量仿真模型的参数为: 铝板尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)为 200 mm $\times$ 200 mm $\times$ 5 mm, 相对磁导率为 1, 电阻率为  $2.65e-8\Omega\cdot m$ 。激励线圈(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 45 mm $\times$ 45 mm $\times$ 25 mm, 线圈厚度为 2 mm, 匝数为 300 匝, 导线直径为 0.35 mm。检测线圈为圆柱形, 内外半径分别为 2 mm、4 mm, 高为 6 mm, 线圈匝数为 800 匝, 导线直径 0.08 mm, 导线电阻率均为  $1.724e-8\Omega\cdot m$ 。激励脉冲电压幅值为 12 V, 频率为 100 Hz, 占空比为 0.5。

### 2.1 裂纹长度的定量

图 4 表示的是长度分别为 16 mm、20 mm 和 24 mm, 宽度为 1 mm, 深度为 2 mm 的裂纹缺陷的  $Z$  向扫描曲线。传感器从距缺陷中心为  $-20$  mm 位置处向距缺陷中心为  $+20$  mm 处的位置沿着缺陷长度方向扫描。从图中可以看出, 当传感器接近缺陷的边缘时, 扫描曲线的幅值开始逐渐增大, 并在缺陷边缘处扫描曲线的幅值达到最大值。当传感器继续向缺陷中心扫描的过程中, 扫描曲线的幅值开始逐渐减小, 并在缺陷中心处达到最小值。传感器从缺陷中心处向缺陷另一个边缘扫描时, 扫描曲线开始反向对称变化。

从图 4 可以看出, 随着缺陷长度的增大,  $Z$  向扫描曲线两峰值之间的距离也逐渐增大, 并且都分别对应缺陷的 2 个边缘, 因此, 通过计算  $Z$  向扫描曲线两峰值之间的距离可以对缺陷长度进行定量。

图 5 为深度分别为 2 mm、3 mm 和 4 mm, 长度 20 mm, 宽度 1 mm 的矩形缺陷的  $Z$  向磁场扫描曲线, 传感器从距缺陷中心为  $-20$  mm 位置处向距缺陷中心为  $+20$  mm 处沿着缺陷长度方向进行扫描。从图中可以看到,  $Z$  向磁场扫描曲线的峰值随着缺陷深度的增加而增加, 但 3 条扫描曲线峰值对应的位置基本相同, 分别对应缺陷的 2 个边缘, 说明矩形缺陷的深度变化对长度的定量影响不大。

从原理上分析, 这是由于电流受到缺陷阻碍后向缺陷两端偏转造成的。缺陷深度越深, 则缺陷处铝板的阻值就越大, 能从此处穿过的电流也就越少, 从两端流过的电流就越多, 曲线两极大值就越大。同时, 当缺陷

长度不变时,虽然两极大值幅值增大,但两峰值之间距离保持不变。

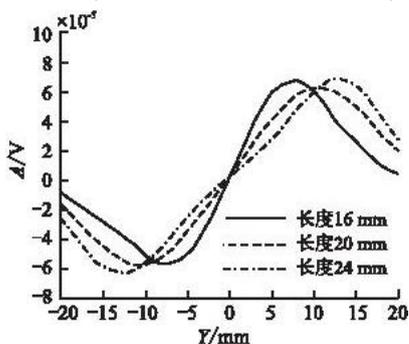


图 4 同深不同长裂纹缺陷 Z 向扫描曲线

ig. 4 The  $B_z$  signals of the different length defects

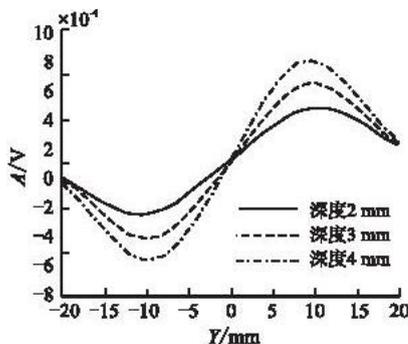


图 5 同长不同深裂纹缺陷 Z 向扫描曲线

Fig. 5 The  $B_z$  signals of the same length defects

### 2.2 裂纹深度的定量

图 6 所示的是长度为 20 mm,宽度为 1 mm,深度分别为 2 mm、3 mm 和 4 mm 的裂纹缺陷的 Y 向磁场扫描曲线,传感器从距缺陷中心为 -20 mm 位置处向距缺陷中心为 +20 mm 处沿着缺陷长度方向进行扫描。从图 6 中可以看出,当传感器位于缺陷外时,检测线圈感应的信号幅值基本不变,当传感器接近缺陷边缘时,其幅值开始逐渐减小,当传感器到达缺陷中心位置时,其值达到最小值,在传感器继续扫描时,扫描曲线开始反向对称变化。对于不同深度的裂纹缺陷,扫描曲线中心处的幅值随着缺陷深度的增加而减小,因而,可以用 Y 向扫描曲线中心处的幅值对缺陷的深度进行定量检测。

从原理上分析,这是由于电流受到缺陷阻碍后向缺陷两端偏转,导致中部电流密度的下降造成的。缺陷深度越深,则缺陷处铝板的阻值就越大,能从此处穿过的电流也就越少,因而感应的 Y 向磁场也就越弱,最终使得裂纹深度越深,扫描曲线波谷处的幅值就越小,因此,通过分析波谷处感应电压信号的最小值,就可以确定出裂纹缺陷的深度。

图 7 为长度分别为 16 mm、20 mm 和 24 mm,宽度为 1 mm,深度为 2 mm 的矩形缺陷的 Y 向磁场扫描曲线,传感器是从距缺陷中心 -20 mm 位置处向距缺陷中心 +20 mm 处的位置沿着缺陷走向移动的。从图中可以看到,对于不同长度的裂纹缺陷,Y 向扫描曲线在缺陷中心处基本重合,说明缺陷长度变化对矩形缺陷深度定量影响不大。

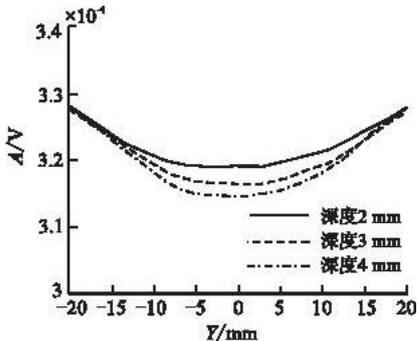


图 6 同长不同深裂纹缺陷 Y 向扫描曲线

Fig. 6 The  $B_y$  signals of the different depth defect

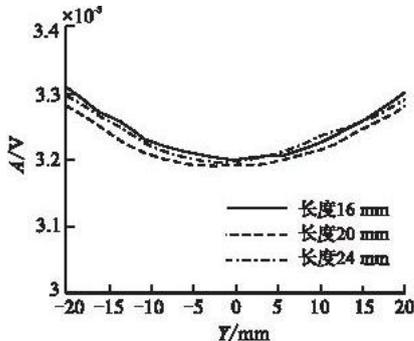


图 7 同深不同长裂纹缺陷 Y 向扫描曲线

Fig. 7 The  $B_y$  signals of the same depth defects

## 3 实验结果

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、数据采集模块和新型脉冲传感器等部分组成,图 8 为实验系统照片。

信号发生模块采用 DDS 芯片 AD7008 产生正弦信号,经整形后变成方波,信号的幅值、频率等参数可以通过键盘、RS232 串口等不同方式输入,并可以根据实际检测需要进行调整设置。

功率放大模块采用功率放大芯片 TDA2030 进行设计,主要作用是将信号发生模块产生的激励信号进行功率放大,放大后的信号加载到传感器激励线圈。

信号调理模块主要包含信号的前置放大和滤波 2 大功能。其中,前置放大电路采用 AD620 仪表放大器进行设计,主要作用是对探头输出信号进行前置低噪声隔离放大,将检测信号放大到与采集电路量程相当的程度;滤波电路采用了 6 阶巴特沃兹低通滤波器,截止频率为 2 000 Hz,用来对信号进行滤波处理,以有效地抑制干扰信号,从而得到清晰、稳定的检测信号。

数据采集模块采用 NI 公司生产的 12 位 PCI 数据采集卡 PCI-6010,采样频率设置为 100 kHz。

传感器激励线圈尺寸为 45 mm × 40 mm × 40 mm(长 × 宽 × 高),用 0.24 mm 的漆包线共绕了 450 匝;检测线圈采用外径为 4 mm、内径 2 mm、高为 4 mm 的“工”字形尼龙骨架,用 0.08 mm 的漆包线共绕了 600 匝。

为了模拟不同类型的裂纹缺陷,在 3 mm 厚的铝板上分别加工了尺寸为:16 mm × 1 mm × 2 mm、20 mm × 1 mm × 2 mm、24 mm × 1 mm × 2 mm 的深度相同长度不同和 20 mm × 1 mm × 1 mm、20 mm × 1 mm × 1.5 mm、20 mm × 1 mm × 2 mm 的长度相同深度不同的裂纹缺陷。

### 3.1 裂纹长度的定量结果

图 9 和图 10 表示的是同深不同长以及同长不同深裂纹缺陷的实验结果,从图中可以看出,对于 Z 向检测线圈,其峰值扫描波形的 2 个极值间的距离对应着裂纹缺陷的长度,当裂纹缺陷的长度保持不变时,峰值扫描波形的 2 个极值出现在相同的位置,当裂纹缺陷的长度变化时,峰值扫描波形的 2 个极值点之间的距离随着裂纹长度的增加而增加,实验与仿真结论相一致,表明了仿真的正确性。在实际的检测过程中,只要得到 2 个峰值点出现时刻之间的时间差值,其与传感器扫描速度的乘积就是裂纹缺陷的长度。

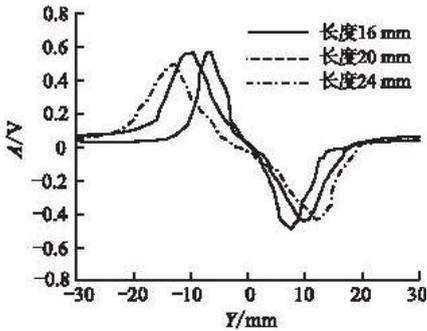


图 9 同深不同长裂纹缺陷 Z 向扫描曲线

Fig. 9 The  $B_z$  signals of the different length defects

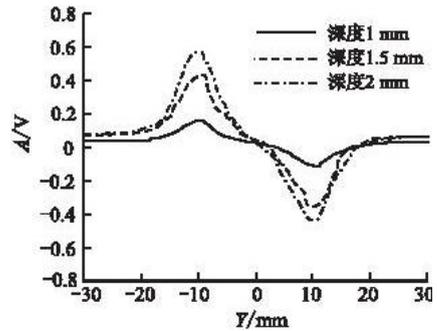


图 10 同长不同深裂纹缺陷 Z 向扫描曲线

Fig. 10 The  $B_z$  signals of the same length defects

### 3.2 裂纹深度的定量结果

图 11 和图 12 表示的是同深不同长以及同长不同深裂纹缺陷的实验结果,从图中可以看出,对于 Y 向检测线圈,其峰值扫描波形波谷值对应着裂纹缺陷的深度,缺陷越深,波谷值越小。实验与仿真结论相一致,表明了仿真的正确性。

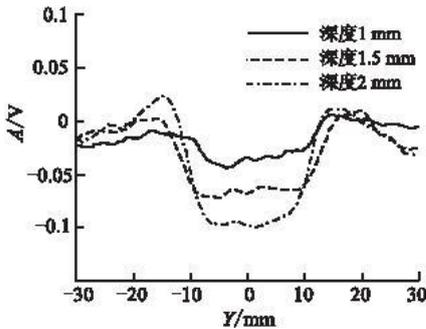


图 11 同长不同深裂纹缺陷 Y 向扫描曲线

Fig. 11 The  $B_y$  signals of the different depth defects

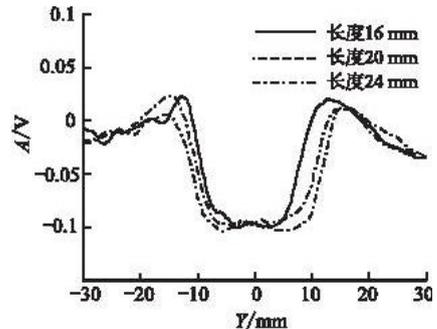


图 12 同深不同长裂纹缺陷 Y 向扫描曲线

Fig. 12 The  $B_y$  signals of the same depth defects



图 8 实验系统照片

Fig. 8 The picture of experiment system

## 4 结束语

传统的脉冲涡流传感器由于其结构的局限性,使得激励场对检测结果的影响很大,因而检测灵敏度不高,本文提出了一种新型的脉冲涡流传感器,由于其激励线圈的轴线与检测线圈的轴线相互正交,因而,激励场对检测结果的影响很小,使得该传感器具有较高的检测灵敏度。仿真结果表明,Z向检测线圈的峰值扫描波形的2个极值点与裂纹的2个边缘存在对应关系,Y向检测线圈的峰值扫描波形的波谷值与裂纹的深度存在对应关系同时,提取这2个特征量可以实现对裂纹长度和深度的定量检测。最后的实验结果与仿真结论相一致,证明了该新型传感器的有效性。

### 参考文献:

- [1] Chen T L, Tian G Y, Sophin A, et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT[J]. NDT&E international, 2008, 41:46 - 476.
- [2] Tian G Y, Sophin A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors[J]. NDT&E international, 2005, 38:77 - 82.
- [3] Li S, Huang S L, Zhao W. Development of differential probes in pulsed eddy current testing for noise suppression[J]. Sensors and actuators A, 2007, 135:675 - 679.
- [4] Clauzon T, Thollon F, Nicolas A. Flaws characterization with pulsed eddy currents N D T[J]. IEEE transactions on magnetics, 1999, 35(3):1873 - 1876.
- [5] Smith R A, Hugo G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft - capabilities and limitations[J]. Insight, 2001, 43(1):14 - 25.
- [6] Safizadeh M S, Lepine B A, Forsyth D S, et al. Time - frequency analysis of pulsed eddy current signals[J]. Journal of nondestructive evaluation, 2001, 20(2):73 - 86.
- [7] 杨宾峰,张辉,余付平,等. 新型脉冲漏磁传感器的仿真设计与实验研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(4):57 - 61.  
YANG Bin-feng, ZHANG Hui, YU Fuping, et al. Simulation design and experimentation research on a new type of pulsed magnetic flux leakage sensor[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(4):57 - 61. (in Chinese)
- [8] Chen G M, Li W, Wang Z X. Structural optimization of 2 - D array probe for alternating current field measurement[J]. NDT&E international, 2007, 40:455 - 461.
- [9] Knight M J, Brennan F P, Dover W D. Effect of residual stress on ACFM crack measurements in drill collar threaded connections[J]. NDT&E international, 2004, 37:337 - 343.

(编辑:徐楠楠)

## Quantification of Crack Defect Using a New Pulsed Eddy Current Sensor

YANG Bin - feng<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, ZHAO Yu - feng<sup>1</sup>, XIA Ming - wen<sup>1</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In traditional pulsed eddy current (PEC) nondestructive testing (NDT) technique usually a reflection - type probe is used, which consists of a pancake exciting coil for generation of incident magnetic field and a pick - up coil or a solid - state magnetic field sensor for detecting the perturbed magnetic field. However, due to the restriction of the traditional structure of PEC probes, the incident magnetic field generated by the excitation coil is much stronger than the eddy current induced magnetic field, thus reducing the detection sensitivity, and a reference signal must be subtracted from total transient response signal to get the flaw information, the process of difference may bring errors. A new PEC sensor is proposed, which, in crack defect quantification, does not need the difference processing by changing the distribution of exciting magnetic field with a rectangular exciting coil. The principle of the new sensor is analyzed first, and then, the performance of the sensor is verified by the method of combining simulation with experiment together, the agreement in experiment with theory shows that the present sensor is effective.

**Key words:** pulsed eddy current; sensor; crack defect; quantification