

# 脉冲涡流检测信号的同步采样方法

高松巍,蒋勇翔

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院,沈阳 110870)

**摘要:**为了有效利用脉冲涡流信号的低频成分检测钢板内部裂纹缺陷,提出了脉冲涡流同步采样方法。介绍了该方法的工作原理;采用在钢板上加工不同规格矩形槽的方法模拟钢板的裂纹缺陷;设计了由激励线圈和检测线圈构成的传感器,实现脉冲涡流信号的提取;采用数据采集卡采集信号,以Labview为平台,实现同步采样方法的软件设计。对钢板缺陷的检测和试验数据的分析,证明了脉冲涡流同步采样方法在钢板内部裂纹缺陷检测中具有较高的灵敏度,可以有效识别钢板内部裂纹缺陷。

**关键词:**脉冲涡流;裂纹缺陷;激励线圈;检测线圈;同步采样

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2010)11-0857-04

## The Synchronous Sampling on Pulsed Eddy Current Signals

GAO Song-Wei, JIANG Yong-Xiang

(School of Information Science and Engineering, Shenyang university of technology, Liaoning Shenyang 110870, China)

**Abstract:** In order to use the low-frequency components of the pulsed eddy current signal to detect the crack defects in the steel plate effectively, a method of pulsed eddy current synchronous sampling was proposed. The working principle of pulsed eddy current synchronous sampling method was described. Different sizes of rectangular slot in the steel plate were processed to simulate the crack defects in steel plate. A transducer consisting of exciting coil and measurement coil was designed to pick up the pulsed eddy current signal. Signal acquisition was realized by the use of Data Acquisition Card. Based on LabVIEW, the synchronous sampling software was designed. Through the steel plate defect detection and the analysis of experimental data, it was indicated that the method of pulsed eddy current synchronous sampling had a high sensitivity in steel plate internal cracks defect detection and could effectively identify defects in steel plate.

**Keywords:** Pulsed eddy current; Crack defect; Exciting coil; Measurement coil; Synchronous sampling

脉冲涡流是涡流检测方法的一个分支。传统涡流检测方法的激励为单一频率正弦波,脉冲涡流采用方波作为激励信号<sup>[1]</sup>。由傅里叶变换可知,一个方波信号可以展开为无限多个谐波分量之和,所以具有较宽的频谱<sup>[2]</sup>。一次扫描,可以实现对不同深度缺陷的快速检测<sup>[3]</sup>。脉冲涡流检测法一般通过测量传感器感应电压峰值的变化来进行缺陷检测,该方法在检测过程中主要利用涡流信号包含的高频成

分;脉冲涡流同步采样方法在检测过程中同时提取了信号的高频成分和低频成分。

笔者以带模拟裂纹缺陷的钢板作为研究对象,提出了脉冲涡流同步采样方法。通过分析不同缺陷处同步采样信号的变化规律,发现脉冲涡流同步采样方法在钢板内部裂纹缺陷检测中具有较高的灵敏度,可以有效识别钢板内部裂纹缺陷。

## 1 脉冲涡流检测原理

脉冲涡流检测方法的工作原理如图1所示。

脉冲涡流检测方法采用方波作为激励信号,激励方波会在激励线圈上产生一个快速衰减的脉冲磁

收稿日期:2009-11-17

基金项目:国家自然基金仪表专项基金资助项目(60927004)

作者简介:高松巍(1956—),女,教授,主要从事无损检测技术和数字信号处理等方面的研究。

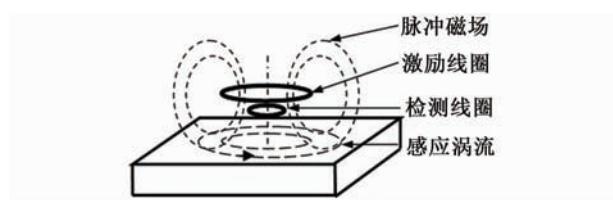


图 1 脉冲涡流检测方法原理图

场,变化的磁场在钢板中感应出瞬时涡流,瞬时涡流在钢板内部传播,又感应出一个与脉冲磁场反向的磁场,从而使检测线圈的阻抗发生变化。由法拉第电磁感应定律可知,脉冲涡流检测线圈上瞬态感应电压  $V_f$  为:

$$V_f = \frac{\iint V_p(r, z, t) dr dz}{\iint dr dz} \quad (1)$$

$$V_p = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} = -\int_c \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

式中  $V_p$  为“点”检测线圈感应电压;  $\mathbf{B}$  为感应磁场强度;  $\mathbf{A}$  为感应磁场矢量;  $\mathbf{S}$  为检测线圈的截面积。如果钢板上有缺陷存在,就会使磁感应强度发生变化,导致检测线圈上的感应电压随之变化。分析感应电压的变化,就能得到有关钢板缺陷的重要信息<sup>[4-7]</sup>。

## 2 试验装置

### 2.1 传感器设计

脉冲涡流检测方法的传感器由圆柱形激励线圈和与其同轴的圆柱形检测线圈组成,如图 2 所示。

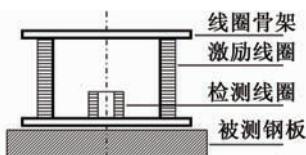


图 2 传感器检测装置

#### 2.1.1 激励线圈设计

激励线圈产生的磁场在试验钢板内形成的脉冲涡流区域有一定的范围,基本分布在内径为  $2r$ ,外径为  $2R$  的圆环内。脉冲涡流区域大小与激励线圈外径  $D$  的关系为:

$$2R = 1.39D \quad (3)$$

$$2r = 0.525D \quad (4)$$

当激励线圈与试验钢板的偏离保持不变时,脉冲涡流区域随着激励线圈外径  $D$  的大小而变化。再考虑到试验钢板上裂纹缺陷的长度为 20 mm,为

了充分利用脉冲涡流效应,使传感器更准确地反映缺陷处磁场的变化,设计激励线圈内径 20 mm,外径 30 mm。

激励线圈的几何形状对脉冲涡流磁场的分布也有影响。长而细的激励线圈形成的脉冲涡流能量比较集中,故灵敏度较高,但线性范围小;扁平的激励线圈形成的脉冲涡流能量比较分散,故灵敏度较低,但线性范围大。综合考虑,激励线圈的高度为 20 mm。在测量时需提高激励场的强度,使试验钢板缺陷处磁场的变化明显,从而方便测量,故激励线圈的匝数不能过低。综上所述,激励线圈的参数为:内径 20 mm,外径 30 mm,高 20 mm,由线径为 0.2 mm 的漆包铜线在直径 20 mm,高 20 mm 的圆柱形塑料骨架上绕制而成,共绕 504 匝。

#### 2.1.2 检测线圈设计

检测线圈的作用是感应试验钢板缺陷处磁场的变化,将变化的磁信号转化为电信号。为了提高灵敏度,准确反映磁场变化,检测线圈的直径要尽可能小,高度要尽可能低,而匝数不能过少。所以检测线圈的参数为:内径 1 mm,外径 1.3 mm,由线径 0.07 mm 的漆包铜线在直径为 1 mm,高为 2 mm 的塑料骨架上绕制而成,共绕 360 匝。

## 2.2 脉冲源

脉冲源由信号发生器及功率放大电路组成。信号发生器产生频率和占空比可调的方波。由 TDA2030A 芯片构成功率放大电路,对信号发生器产生的信号进行功率放大,驱动激励线圈。最终确定激励方波电压为  $\pm 9$  V,频率为 100 Hz,占空比为 0.5。

## 2.3 放大电路及数据采集

由于检测线圈感应到的脉冲涡流信号非常微弱,需要进行放大才能被数据采集卡识别。采用 OP07 集成运放构成放大电路,放大原理为两级反相比例运算电路,每级放大 10 倍,共放大 100 倍。

采用 PCI-1716L 数据采集卡进行数据采集,分辨率 16 位,采样速率 100 K/s。使用 LabVIEW 软件实现数据采集卡与上位机的通信,并进行相关软件的编程。

## 3 脉冲涡流同步采样方法

### 3.1 同步采样方法原理

根据涡流检测原理,涡流的轴向渗透深度  $h$  为:

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (5)$$

式中  $\rho$  为试验钢板电阻率;  $\mu$  为试验钢板电导率;  $f$  为涡流的频率。由式(5)可知,低频涡流更利于检测钢板内部缺陷。脉冲涡流采用方波作为激励信号。根据傅里叶展开公式,一个脉冲信号可以展开为含有基波和许多谐波成分的组合,显然其中的低频谐波具有更大的渗透深度。在激励方波的作用下,对于正半周期的脉冲涡流信号,其峰值点处对应高频成分,渗透深度较浅;峰值点之后的信号对应低频成分,具有较大的渗透深度。

若激励方波的频率为 100 Hz,方波占空比为 0.5,脉冲涡流的同步采样点确定方法如图 3 所示。

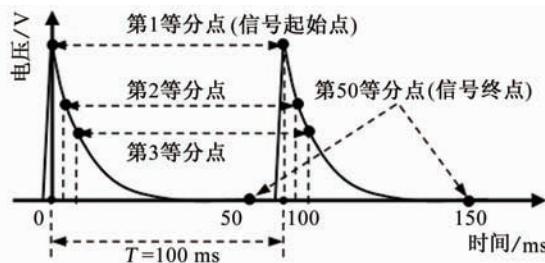


图 3 同步采样点的确定方法

在周期性激励方波的作用下,脉冲涡流信号周期性变化。图 3 中相邻的同一等分点的时间间隔  $T = 100$  ms,等于激励脉冲的周期。定义各个脉冲涡流信号正半周期的峰值点为起始点,正半周期结束时对应的点为终点,作为同步采样的一个周期。将此周期信号 49 等分,可得 50 个等分点。提取每个同步采样周期的第一个等分点(峰值点)相连作第一条曲线;提取第二个等分点相连作第二条曲线……可以得到 50 条同步采样曲线。综上所述,即为脉冲涡流的同步采样方法。

### 3.2 基于 LabVIEW 的同步采样方法软件编程

同步采样方法软件编程的关键是找到脉冲涡流峰值点所对应的时刻,以此时刻作为同步采样的起始点。同步采样方法软件流程图如图 4 所示。

## 4 试验结果与分析

采用在钢板上加工不同规格矩形槽的方法来模拟钢板上的裂纹缺陷。试验钢板长度为 200 mm,宽度为 160 mm,厚度为 10 mm。传感器通过对钢板下表面的检测来完成其内部裂纹缺陷的检测。裂纹缺陷长度均为 20 mm,宽度均为 1 mm,深度分别为 1,3 和 5 mm。试验钢板裂纹缺陷尺寸如图 5 所示。

采用同步采样方法检测试验钢板内部裂纹缺陷,激励方波的电压为  $\pm 9$  V,激励方波的频率为

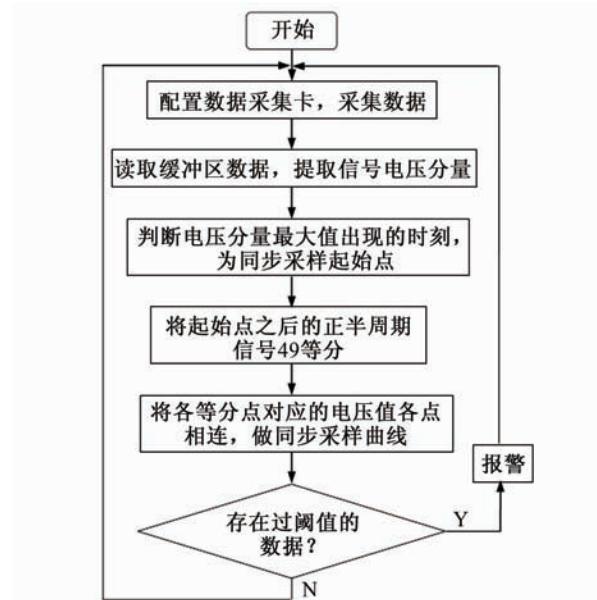


图 4 同步采样软件流程图

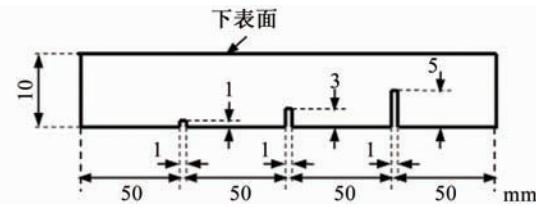


图 5 钢板不同规格缺陷尺寸

100 Hz,方波占空比为 0.5。采用手动方式缓慢移动传感器。传感器由无裂纹缺陷区域向有裂纹缺陷区域直线移动,各同步采样曲线电压值也随之发生变化。第一条同步采样曲线如图 6 所示。

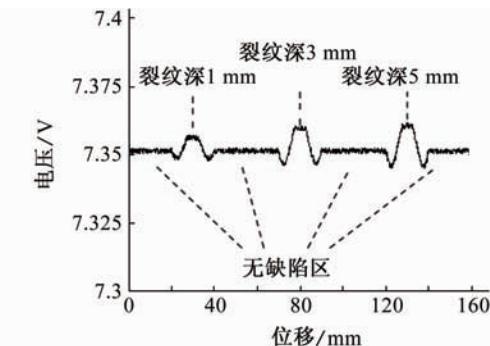


图 6 第一条同步采样曲线

由图 6 可知,传感器在无缺陷区域移动时,第一条同步采样曲线电压保持不变,为 7.350 8 V。当传感器逐渐接近内部裂纹缺陷时,各同步采样点的电压先减小,再增大;当传感器移动至裂纹缺陷上方时,同步采样点的电压达到最大;当传感器逐渐远离裂纹缺陷位置时,各同步采样点的电压先减小,再增

大,最终电压增大至无裂纹缺陷处的电压值。因此可通过同步采样曲线电压的变化判断内部裂纹缺陷的位置。裂纹深度1,3和5mm处第一条同步采样曲线的峰值电压分别为7.3557,7.3590和7.3596V。显然深度为1mm的裂纹缺陷容易识别。而深度为3和5mm的裂纹缺陷电压值较为接近,只有0.6mV的差别,不易相互区分。

其余的同步采样曲线在检测试验钢板内部裂纹缺陷的过程中,变化规律非常接近。选取最有代表性的第五条同步采样曲线,如图7所示。

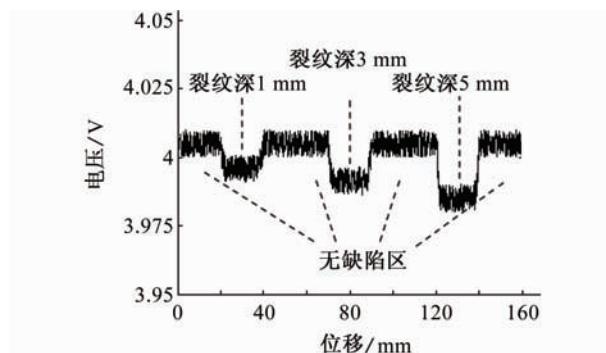


图7 第五条同步采样曲线

由图7可知,传感器在无缺陷区域移动时,第五条同步采样曲线电压基本不变,为4.0002V。当传感器逐渐接近缺陷时,各同步采样点的电压逐渐减小;当传感器移动至裂纹缺陷上方时,同步采样点的电压达到最小;当传感器逐渐远离裂纹缺陷时,各同步采样点的电压逐渐增大,最终电压增大至无缺陷处的电压值。因此可通过同步采样曲线电压的变化判断内部裂纹缺陷的位置。裂纹深度1,3和5mm处电压分别为3.9914,3.9868和3.9804V。图中,各裂纹缺陷的电压值差别较大,相互容易区分。将同步采样曲线在裂纹缺陷处的电压值与无裂纹缺陷处的电压值作差再取绝对值,差值为电压变化量。第一条同步采样曲线至第十二条同步采样曲线在检测过程中具有代表性,将它们的电压变化量列出,如表1所示。

由表1可知,裂纹缺陷越深,各同步采样曲线的电压变化量越大,因此可以通过裂纹缺陷处的电压变化量来判断裂纹深度。

第4~12条同步采样曲线的电压变化量要大于第1条同步采样曲线,其中第5条同步采样曲线在各缺陷的电压变化量最大。

第1条同步采样曲线在3和5mm处的电压变化量比较接近,只有0.7mV的差别,不易区分。而

表1 不同同步采样曲线的电压变化量

mV

同步采样 曲线	裂纹深度/mm		
	1	3	5
1	4.9	8.2	8.9
2	1.5	3.4	7.3
3	5.2	7.0	13.4
4	7.3	10.4	18.3
5	8.9	13.4	19.8
6	7.0	12.5	17.7
7	8.2	12.8	17.7
8	8.5	11.3	18.6
9	7.9	13.4	17.1
10	7.3	10.1	14.6
11	7.9	11.3	17.1
12	7.3	11.9	14.3

第5条同步采样曲线在各缺陷处的电压变化量差别较大,至少有3.7mV的差别,容易区分。

第1条同步采样曲线检测钢板内部裂纹缺陷时的检测灵敏度平均值为:

$$\frac{(4.9+8.2+8.9)mV}{(1+3+5)mm} = 2.44 \text{ mV/mm} \quad (6)$$

第5条同步采样曲线检测钢板内部裂纹缺陷时的检测灵敏度平均值为:

$$\frac{(8.9+13.4+19.8)mV}{(1+3+5)mm} = 4.68 \text{ mV/mm} \quad (7)$$

由式(6)和(7)可知,第5条同步采样曲线的检测灵敏度平均值要比第一条同步采样曲线高91.4%。

## 5 结论

采用脉冲涡流同步采样方法检测钢板内部裂纹缺陷时,可以通过分析同步采样曲线电压的变化来判断内部裂纹缺陷的位置。当激励方波的电压为±9V,频率为100Hz,占空比为0.5时,第五条同步采样曲线对应的脉冲涡流信号对试验钢板内部裂纹缺陷更敏感。综上所述,脉冲涡流同步采样方法在钢板内部缺陷检测中具有较高的灵敏度,可以有效识别钢板内部缺陷。

## 参考文献:

- [1] 赵亮,陈登峰,卢英,等.脉冲涡流在金属厚度检测中的应用研究[J].测控技术,2007,26(12):22~24.

(下转第864页)



图 6 超声信号检测的总体思路

通过对采集的超声信号进行处理,从图 6 可以看出,尽管噪声很大,但泄漏信号在频域内能够较好显示,且分辨率较经典功率谱法有较大改进。充分证明了基于 AR 模型的功率谱估计在处理此类信号问题中所具有的优势。说明经过本系统的确能够实现对微小孔径的泄漏检测,检测精度实现了很大的提高。

#### 4 结语

数字带通滤波器可以实现大量的高频和低频噪声的去除,混沌理论能够将微弱的泄漏信号检测出来,现代功率谱估计能够有效地对泄漏信号在频谱上的特性表现出来,将它们结合使用,进行飞机气体系统泄漏超声信号的处理,较好地解决机场环境下强背景噪声的干扰以及经典谱估计频率分辨率低的问题,提高了泄漏检测的精度,为故障的提前发现,尽早预防提供了技术手段。笔者在进行信号采集与滤波器设计时,进行了大量的工作,超声泄漏信号对系统的灵敏度要求很高,电路自身的干扰,及超声换能器的精度都会影响到泄漏的检测精度。而为了有良好的性能指标,数字滤波器设计阶数高达 1 400 多阶,尽管取得了较好的试验结果,但势必造成计算量的增大。在实际设计系统时,为了保证实时检测,需要在满足性能要求与快速运算上找到合适的平衡点,才能保证算法硬件实现的可行性和经济性。而混沌系统的灵敏度极高,对于高频信号,频率稍有变化,都将导致混沌系统无法检测,所以需要进一步对

其进行优化。将该算法通过 DSP 实现并应用于飞机气体系统的泄漏检测,将极大地提高飞机维修保障效率。

#### 参考文献:

- [1] 马大猷. 现代声学理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 296—306.
- [2] 江洋, 龚其春, 叶骞, 等. 气体泄漏量超声检测理论分析与实验 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 224—226.
- [3] 王秀, 程建政, 倪园. 高速超声信号采集系统的设 [J]. 无损检测, 2009, 31(2): 144—146.
- [4] 李伟, 郭福平. 气体管道泄漏声源产生机理仿真研究 [J]. 压力容器, 2008, 25(4): 12—15.
- [5] Moon C, Brown W C, Mellen S, et al. Ultrasound techniques for leak detection in vehicle and pressure vessel production lines [C]. Noise-Con, Dearborn Michigan: 2008.
- [6] Moon C, Brown W C, Mellen S, et al. Pickering ultrasound techniques for leak detection [C]. SAE N & V Conference. USA: SAE 2009-01-2159: 2009.
- [7] 聂春燕, 徐振忠. 混沌系统在弱信号检测中的应用 [J]. 传感器技术, 2003, 22(1): 55—57.
- [8] Chunyan Nie, Yao Wu Shi, Wensuo Yi. Analysis of chaotic system characters based on time frequency distribution [C]. Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006: 4842—4845.
- [9] 姜礼平. 有噪声场合自回归模型的参数估计及定价 [J]. 应用数学, 2001, 14(2): 64—68.
- [10] Bos R, Waele S de, Broersen P M T. AR spectral estimation by application of the burg algorithm to Irregularly sampled data [C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference May 21—23, 2001.

(上接第 860 页)

- [2] 叶子郁, 朱目成. 应用脉冲涡流检测金属表面裂纹的研究 [J]. 传感器技术, 2005, 24(11): 16—18.
- [3] 杨宾峰, 罗飞路. 脉冲涡流检测系统影响因素分析 [J]. 无损检测, 2008, 30(2): 104—106.
- [4] Sophian A, Tian G Y, Taylor D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT [J]. NDT&E International, 2003, 36(1): 36—41.
- [5] Tian G Y, Sophian A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors [J].

NDT&E International, 2005, 38(38): 77—82.

- [6] Sophian A, Tian G Y, Taylor D, et al. Design of a pulsed eddy current sensor for detection of defects in air-craft lap-joints [J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2002(101): 92—98.
- [7] Lebrun B, Jayet Y, Baboux J C. Pulsed eddy current signal analysis: application to the experimental detection and characterization of deep flaws in highly conductive materials [J]. NDT&E International, 1997, 30(3): 163—170.