

基于脉冲涡流信号的金属膜厚测量

康学福, 陈立晶, 王 奔, 尹武良*
(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 脉冲涡流检测技术能够快速方便地检测金属导体厚度, 为了研究脉冲涡流检测技术在金属膜厚测量中的应用, 首先设计了测量系统传感器, 并分析了其工作原理; 采用 ANSOFT 软件对不同测试金属厚度下传感器的响应信号进行了仿真计算; 然后搭建了实际的测厚系统, 对不同厚度的铝箔进行了检测, 并对实验数据采用三次样条插值进行了拟合, 得到了金属膜厚与电压信号的关系。研究表明: 采用脉冲涡流技术能够较准确地测量出金属膜的厚度。

关键词: 脉冲激励; 厚度测量; 仿真; 三次样条插值

中图分类号: TM55; TP206.1; TH878

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)01-0004-04

Thickness measurement of metallic coating from pulsed eddy-current signals

KANG Xue-fu, CHEN Li-jing, WANG Ben, YIN Wu-liang

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As a new branch of the eddy current nondestructive testing, the pulsed eddy current testing technology can detect the thickness of the metal conductor quickly and easily. In order to study the technology in the measuring of the thickness of the metal, the sensor was designed firstly and its operating principal was analyzed. The ANSOFT software was used to get the response signal in different metal thickness. Different thickness of aluminum foils were detected and cubic spline interpolation was used to fit experimental data. The relationship between the thickness and voltage signals was obtained. The conclusion shows that the thickness of the metal can be detected precisely on the pulsed eddy current testing technology.

Key words: pulsed eddy-current excitation; thickness measurement; simulation; cubic spline interpolation

0 引 言

金属厚度的检测在机械加工、电气应用等方面的应用十分广泛, 如金属板轧制过程中的厚度检测、精密机械加工, 甚至集成电路生产等^[1-5]。目前, 常用的金属厚度测量方法有: 超声法、射线法和电涡流检测等。超声波测厚在检测薄金属厚度时, 检测精度不高; 射线测厚存在射线源防护问题, 易对操作人员身体造成伤害; 涡流检测方法具有结构简单、数据采集速度快、响应信号便于解释、设备造价低和穿透更深等优点^[6]。

传统的电涡流采用正弦电流作为激励, 而脉冲涡流的激励电流为具有一定占空比的方波。传统涡流检

测对感应磁场进行稳态分析, 即通过测量感应电压的幅值和相角来获得信息, 而脉冲涡流则对感应磁场进行时域的瞬态分析, 以直接测得的感应磁场对传感器的影响来获取信息。在理论上, 脉冲涡流比单频正弦涡流能提供更多信息, 因为脉冲涡流可提供某一范围的连续多频激励^[7]。

基于电磁涡流原理, 本研究采用脉冲涡流激励研制厚度测量系统。

1 工作原理

利用电磁涡流传感器测量金属膜厚度的理论依据在于: 不同厚度的金属膜对电磁场的反射和透射率不

收稿日期: 2011-09-13

作者简介: 康学福(1987-), 男, 河北沧州人, 主要从事电磁层析成像和电磁测量方法方面的研究. E-mail: chuangeer@163.com

通信联系人: 尹武良, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: wuliang.yin@gmail.com

同。从涡流的角度看,在激励线圈两端施加脉冲激励,由法拉利电磁感应定律可知,变化的脉冲电流会在线圈周围产生一个激励磁场,该磁场又会在处于其中的导电金属中感应出涡流磁场,所激发的涡流磁场在检测元件上就会感应出随时间变化的电压信号。

由于涡流磁场的大小与被测试件的本身特性密切相关,如果导电试件的特征发生变化,最终使检测元件上的电压信号发生变化,该变化的信号中就间接包含了与被测导电试件有关的特征信息(如厚度)。

1.1 涡流传感器

该系统中所用的涡流传感器为差动式涡流传感器^[8],如图 1 所示。

该传感器由 1 个 H 形的铁磁块、5 个线圈绕组组成。其中,1 个中心线圈是激励线圈,其余 4 个是感应线圈。这个结构可以看作是由 2 个 U 形的铁磁块背对背构成的,二者具有共同的中间激励绕组,其中一端为主动感应端,另一端为参考端。该设计方案有效地提高了传感器的灵敏度,降低了背景信号及传感器对外界环境变化的敏感性。

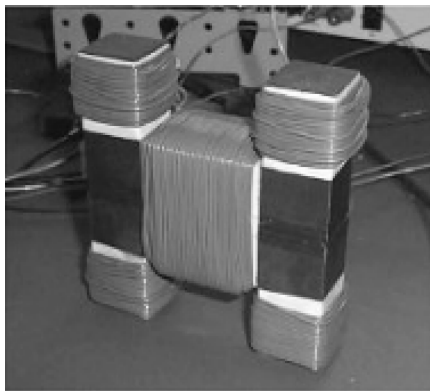


图 1 差动式涡流传感器

差动式涡流传感器测量原理图如图 2 所示。

激励线圈通入激励信号后,产生激励主磁场,为一次磁场;由于电磁感应样品上形成涡流磁场,为二次磁场。测量端接收一次磁场和二次磁场的感应;参考端主要接收一次磁场的感应(二次磁场的影响可以忽略)。测量电路从传感器上测量得到测量端与参考端的差压信号。该信号直接反映了二次磁场对传感器的影响。二次磁场的强度随导电材料厚度的变化而变化,因此检测到的感应差压信号的变化也就反映了导电材料厚度的变化。对差压信号进行放大、滤波后即可得到与导电材料厚度有关的特征信号。

1.2 传感器仿真

传感器的仿真实验使用软件 ANSOFT 来实现。为

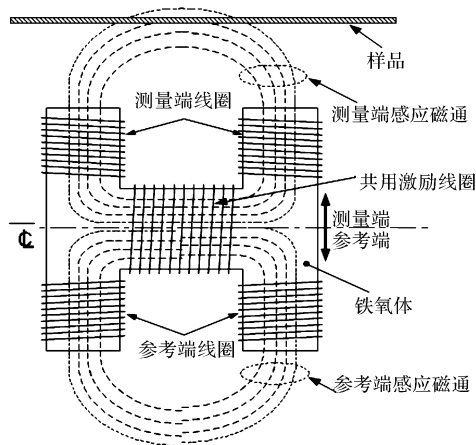


图 2 差动式涡流传感器测量原理图

增大传感器的灵敏度,降低环境温度及外磁场变化对传感器的影响,该系统采用 H 型铁磁芯传感器。H 型传感器的铁磁芯由一个高为 115 mm、宽为 100 mm、切面为 25 mm × 25 mm 的 H 形铁磁块构成,其结构如图 1 所示。

仿真中传感器的模型如图 3 所示。

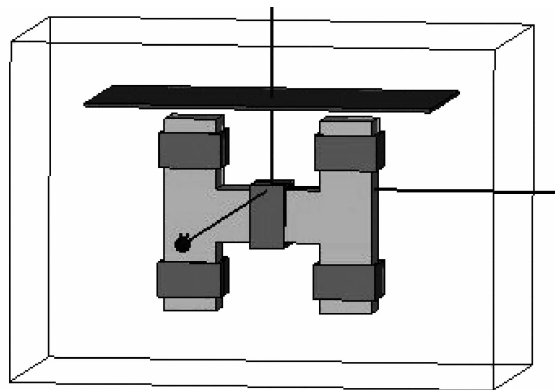
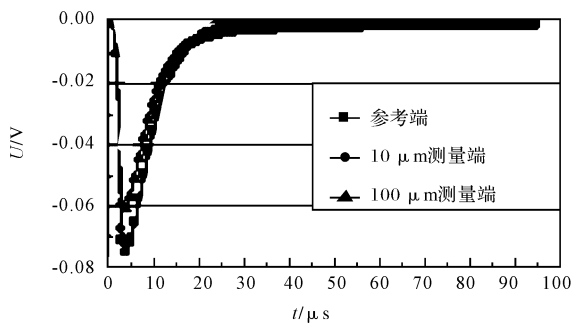


图 3 H 型传感器仿真模型

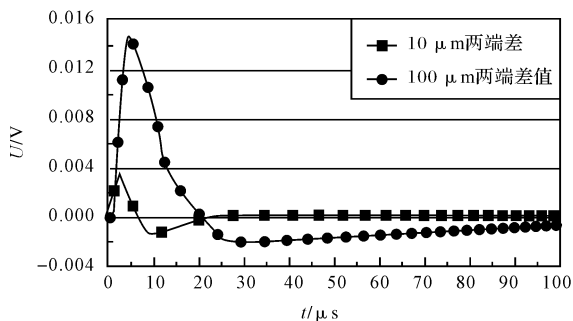
金属板的电导率设为 3.8×10^7 (铝板),提高距离为 5 mm,激励为单位阶跃信号。分别测试参考端、测量端及两端之间的差值信号,仿真结果如图 4 所示。

根据仿真的结果图 4(a)可以看出,随着测试金属板厚度的增加,测量端的信号会明显减小。这是由于测试金属板产生的涡流场方向与主磁场正好相反,在测试端的感应与主磁场产生一个反向的叠加,金属板越厚产生的涡流场越强。

图 4(b)为测量端与参考端做差后的差值信号,即实际电路中测得的值,由图可以明显看出差压信号相对于厚度变化的 3 个特征信号^[9]:正峰值,过零时间和峰值时间。随着测试金属板厚度的增加,正峰值变大,



(a) 参考端及测量端仿真结果



(b) 两端差值信号

图 4 仿真结果

过零时间及峰值时间均延长。这一变化规律与实验所得规律完全一致。

2 实验系统及测量

2.1 实验系统

该实验系统是基于 DAQ-2205 采集卡进行设计的。系统结构图如图 5 所示,系统主要包括:电涡流传感器、激励通道、采集通道、采集卡、PC 机。

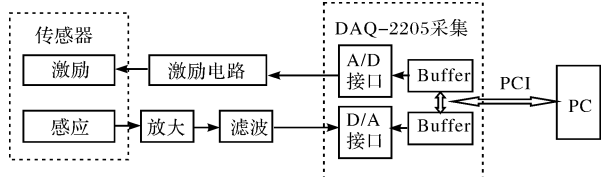


图 5 系统结构图

其中,DAQ-2205 为凌华 64 通道高性能多功能数据采集卡^[10],它具有 32 位 PCI 总线、64 个单端以及 32 个差分模拟量输入通道、2 路带波形发生功能的 D/A 输出通道;它的 A/D 分辨率为 16 位,最高采样频率可达 500 kHz,完全满足系统需要。

系统的控制主要是通过 PC 机中编程控制采集卡来实现的。首先编程使采集卡内部实现一个数字形式的脉冲电压信号,再经过 A/D 转换变为模拟信号;然后输出的电压信号经过激励板变为相应的激励信号,用于驱动激励线圈;最后通过采集板检测感应差压信号,经过放大和滤波后由采集卡的第 0 通道采集,再

通过 D/A 变换为数字信号,经 PCI 总线存入 PC 机中。

2.2 实验测量

本实验采用铝箔作为测试样品,铝箔胶带单层厚度为 30 μm,分别测量 2、5、9、14、16、18 层铝箔。由于在样品中产生的主要是在水平面内的涡流,层与层之间的界面对电磁场分布的影响可以忽略。实验中采集卡输出幅值为 2.5 V 的阶跃信号,采集通道放大倍数为 20,低通滤波的截止频率是 10 kHz,采集卡的采样率为 100 kS/s。对不同厚度的样品分别记录 100 个点。6 种厚度下测得感应差压信号如图 6 所示。

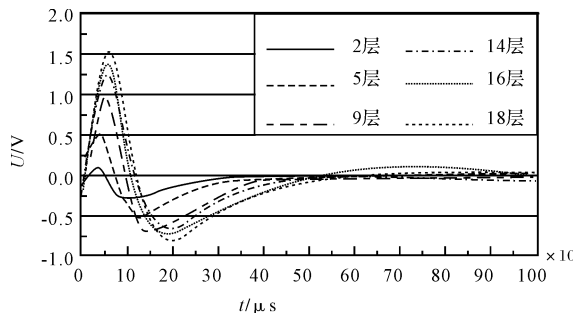


图 6 6 种厚度下测得感应差压信号

3 结果和分析

本节将分析上述得到的感应差压信号数据,找出特征信号与样品厚度之间的对应关系。特征信号主要受样品厚度和激励信号的影响,实验时保证激励信号不变,只改变样品的厚度。由图 6 中实际测得的数据波形可以清晰的看出与厚度相对的 3 个特征信号:正峰值、过零点和峰值时间。

本研究应用正峰值这一特征信号来确定金属膜厚。由于测量的差压信号点为离散的,很难精确地从测得的变化曲线区分各厚度铝箔所对应的正峰值。应用具有光滑性的三次样条插值法可得到逼近原曲线,并通过全部给定离散点的连续曲线^[11-12],拟合后的曲线如图 7 所示。

本研究设定差值步长为 0.1,找出每条曲线在该步长下的正峰值,则获得了具有插值步长精度的正峰值。

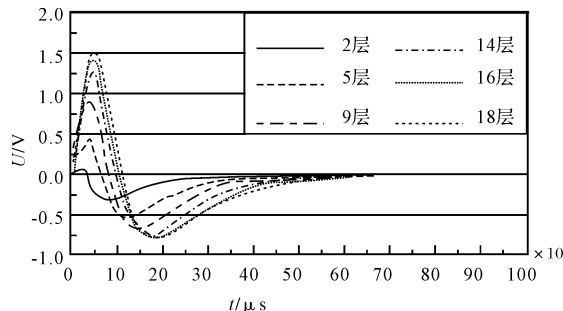


图 7 差值后的差压信号

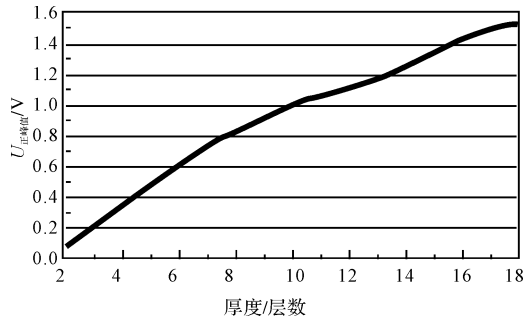


图8 铝箔厚度与正峰值关系曲线

本研究利用插值之后获得的对应于不同厚度铝箔的正峰值与厚度值再运用3次样条插值进行标定,可以得到拟合出铝箔厚度与正峰值的一条光滑关系曲线,如图8所示^[13-14]。

本研究将此标定后的关系曲线对应的数据存入到上位机程序中,测量时只要测出厚度对应的正峰值即可得出厚度值。当标定用的数据点多时,测量时产生的相对误差就会越小,准确性越高。

6组数据标定关系曲线后记录的测量结果和相应的误差如表1所示,产生的相对误差不超过5%。

表1 测量数据及误差

层数 /层	厚度 / μm	测量值 / μm	相对误差 /(%)
2	60	60	0
3	90	92.45	2.72
4	120	121.76	1.46
5	150	150	0
6	180	178.38	-0.9
7	210	213.45	1.64
8	240	242.11	0.87
9	270	270	0
10	300	302.50	0.83
11	330	326.27	-1.13
12	360	352.48	-2.09
13	390	397.51	1.92
14	420	420	0
15	450	451.14	0.25
16	480	480	0
17	510	515.47	1.07
18	540	540	0

4 结束语

本研究采用脉冲涡流测量技术实现了金属膜厚度

的测量。对不同厚度铝箔进行测量,将采集的数据进行分析得到了比较满意的结果。同时,本研究对涡流传感器采用ANSOFT进行仿真计算。实验测量所得数据与仿真的结果具有很好的一致性,这说明该方法用于金属膜厚度测量是比较可靠的,具有一定的应用前景。

参考文献(References):

- [1] TAI Cheng-chi, ROSE J H, MOULDER J C. Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy-current measurements [J]. **Review of Scientific Instruments**, 1996(67):3965-3972.
- [2] YANG H C, TA C C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate[J]. **Measurement Science and Technology**, 2002(13):1259-1265.
- [3] 郑岗,赵亮. 金属厚度的脉冲涡流无损检测研究[J]. **传感器与微系统**, 2006, 25(4):35-40.
- [4] 李玉军,刘军. 电涡流传感器在铝箔厚度测量中的应用[J]. **传感器技术**, 2005, 24(6):77-84.
- [5] YIN W, PEYTON A J. Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors [J]. **NTD&E International**, 2007(40):43-48.
- [6] SMITH R A, HUGO G R. Transient eddy-current NDE foraging aircraft-capabilities and limitations [J]. **Insight**, 2001, 43(1):14-25.
- [7] 杨宾峰,罗飞路. 脉冲涡流无损检测技术应用研究[J]. **仪表技术与传感器**, 2004(8):45-46.
- [8] 尹武良. 低频电磁传感检测技术[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [9] 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.
- [10] ADLINK TECHNOLOGY INC.. DAQ High Performance Multi-Function Data Acquisition Card User's Manual [M]. ADLINK TECHNOLOGY INC., 2010.
- [11] DYER S A, DYER J S. Cubic-spline interpolation: part 1 [J]. **Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE**, 2001, 4(1):44-46.
- [12] 张丽娟. 三种插值方法的应用与比较[J]. **赤峰学院学报:自然科学版**, 2010, 26(3):1-3.
- [13] 李登峰. 无刷直流电动机无位置传感器检测技术[J]. **机电技术**, 2010(3):68-70.
- [14] 王伟. 自检式紫外线火焰检测器的应用与故障处理[J]. **现代制造技术与装备**, 2010(4):73-74.

[编辑:罗向阳]