

便携式多功能涡流仪的研制

任吉林¹, 俞佳¹, 刁海波¹, 黄长江², 余成郭², 陈英姿²

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 温州市特检中心, 温州 325000)

摘要:介绍了集涡流探伤、电导率测量和涂层测厚功能于一体的便携式多功能涡流仪的实现原理。利用 ANSYS 软件进行数值模拟, 得出涡流检测线圈阻抗的变化规律。提出用相位分析法来抑制提离效应, 并在此基础上, 设计研制了基于 AT91RM9200 处理器的多功能涡流仪的测量系统。实验结果表明, 该系统具有很好的推广应用前景。

关键词:涡流检测; 线圈; 电导率; 提离效应; 阻抗

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)01-0013-04

Development of Portable Multifunctional Eddy Current Meter

REN Ji-Lin¹, YU Jia¹, DIAO Hai-Bo¹, HUANG Chang-Jiang², YU Cheng-Guo², CHEN Ying-Zi²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Test(Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Wenzhou Special Equipment Inspect Center, Wenzhou 325000, China)

Abstract: The basic development principle of portable multifunctional eddy current meter was introduced, which included eddy current testing, measurement for the conductivity of metal material and thickness of cladding. Through numerical simulation in ANSYS software, the changing law of the impedance of probe coil was found, a method that using phase analytical method to correct lift-off effect in the impedance plane was put forward. Based on the principle, the meter system using high performance microprocessor AT91RM9200 was designed. It has a great application prospect.

Keywords: Eddy current testing; Probe-coil; Conductivity; Lift-off effect; Impedance

涡流检测是以电磁感应为基础的常规无损检测方法之一。笔者利用 ANSYS 软件, 通过涡流检测线圈阻抗的数值计算, 得到涡流检测线圈的归一化阻抗图。依据提离效应对线圈阻抗的影响在阻抗平面图上近似为直线轨迹的规律, 提出利用相位变换的方法实现提离干扰信号的抑制。设计了以 ARM9 微处理器为核心的、基于幅相鉴别原理的便携式多功能涡流仪的硬件电路, 该电路既可抑制提离效应, 实现涡流探伤和电导率测量, 又可以利用提离效应来进行涡流法测厚。

1 涡流线圈阻抗分析

分析和研究涡流检测理论问题的出发点是麦克斯韦方程组^[1]的求解与实验验证。

应用 ANSYS 来分析电磁场^[2]的基本原理是, 首先将所处理的对象划分成有限个单元(包含若干节点), 然后根据矢量磁势或标量电势求解一定边界条件和初始条件下每一节点处的磁势或电势, 进而求解出其它相关量, 如磁通量密度和电磁场储能等。计算完成后将结果读入, 进行相应的参数分析^[3]。

利用 ANSYS 软件模拟分析可得到线圈阻抗归一化平面图。模拟前, 先定义模型几何尺寸及模拟参数, 规定探头线圈的内径为 4.5 mm, 外径为 6.8 mm, 线圈高度为 5.5 mm, 加载电压为 3 V, 频率为 5 000 Hz。提离间隙从 0.3 mm 逐渐增加至 4 mm。在分析中, 选择模型为一个加载交流电压的线圈放置在一块无缺陷金属平板上, 为简化模型, 设置当前的金属板为圆柱型, 因此只需建立二维 1/2 轴对称模型。当平板直径与线圈直径比例大于 5 且

斯韦方程组^[1]的求解与实验验证。

收稿日期: 2007-12-11

作者简介: 任吉林(1945—), 男, 教授, 硕士生导师, 全国无损检测学会副理事长, 从事电磁无损检测技术研究工作。

金属板厚度与集肤深度比例大于 4 时,可认为金属平板对线圈阻抗的影响与无穷大平板一致。根据已知参数,定义单元以及材料参数,建立对应的模型(图 1),分配单元和材料属性,对模型进行网格划分,再根据定义的参数和模型属性对不同的单元进行参数耦合,设置边界条件、分析类型和加载激励,最后进行求解。然后进入通用后处理器,获取探头线圈电流的实部和虚部,根据公式 $Z = U/I$,便可以计算出探头线圈的阻抗值。

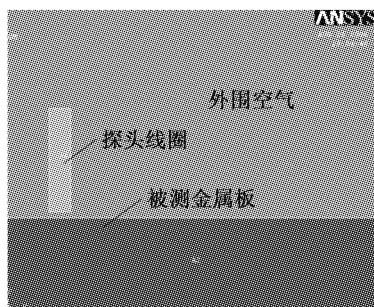


图 1 提离效应模拟模型

设置不同的提离间隙,分别建模进行 ANSYS 模拟,可得到不同提离下的归一化阻抗值。同样,改变被测金属体的电导率的大小,便得到不同检测对象下的涡流传感器的归一化阻抗值。图 2 为线圈在不同电导率非铁磁性金属下的归一化阻抗图。图 2 可得:对于非铁磁性金属板,随着提离间隙的增大,线圈阻抗增大,反映到电阻和电抗上分别为电阻随着提离的增大而减小,电抗随着提离的增大而增大。对于不同电导率的金属,阻抗随提离变化的反映也有所不同,在相同提离变化下,随着金属板电导率的增加,金属板上感生出的涡流变大,涡流产生的反磁场也变大,对阻抗的最终影响是使得阻抗的变化量增大。

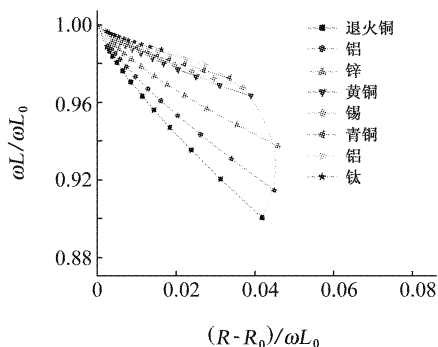


图 2 线圈在不同电导率非铁磁性金属下的归一化阻抗图

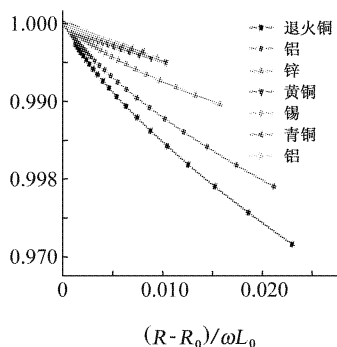


图 3 2 kHz 下的归一化阻抗图

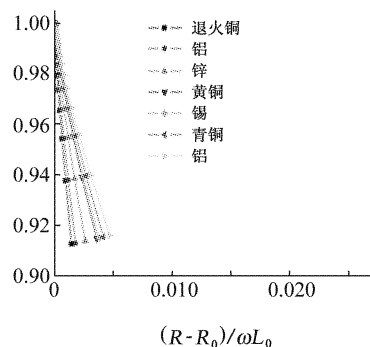


图 4 6 MHz 下的归一化阻抗图

在很多工业应用场合,金属材料的覆盖层厚度^[4]也是一项重要的性能控制指标,因此,覆盖层的厚度以及均匀性的精确测量一直是人们研究的热点问题之一。涡流法是测量非磁性金属基体上非导电覆盖层厚度的有效手段。根据涡流检测的基本原理可知,对于这一类覆盖层厚度的测量,实质上就是提离间隙的测量。为此,利用 ANSYS 分析软件来模拟计算涡流检测线圈的阻抗,得出在不同频率下、不同金属材料上覆盖层厚度发生改变时线圈阻抗的变化规律,并以此作出检测线圈归一化阻抗平面图(图 3 和 4),便可为涡流测厚问题的研究提供有效的理论分析依据。

从归一化阻抗图可以看出,当基体为非磁性金属时,随着覆层厚度(提离间隙)的增加,涡流线圈的电阻部分减小,电抗部分增大,趋近于涡流线圈空载时的阻抗值,反映出基体金属上覆盖层厚度与线圈阻抗间存在一一对应的关系。由此,可以根据线圈阻抗值的测量来间接反映覆层厚度的大小,达到测量覆层厚度的目的。并且在相同的工作频率下,对应于不同电导率的基体金属,其归一化阻抗值随覆盖层厚度变化的曲线不同。故进行基体金属上覆盖层厚度的测量时,基体金属的不同(即电导率的变化)会直接影响覆层厚度的测量精度。但对比不同加载频率的线圈阻抗平面图可知,随着频率的增高,不同基体金属的阻抗曲线不仅趋于陡峭,而且逐渐逼近。因此,为了有效抑制基体金属对覆盖层厚度测量所带来的影响,必须选用较高的工作频率。

2 提离效应的抑制

涡流检测时,线圈与工件之间的距离变化会引起检测线圈阻抗变化,这种距离影响称为提离效应。在涡流探伤和测量金属电导率时,涡流检测线圈的

提离信号是电导率测试的主要干扰信号。目前,国产涡流探伤仪和电导仪采用的抑制提离效应的方法有多种,但都比较复杂。根据不同电导率的非磁性金属归一化阻抗图的结果进行分析,考虑到提离效应对测量结果的影响近似为直线,笔者提出一种简单的利用相位转换来实现提离效应抑制的方法。其原理见图 5。

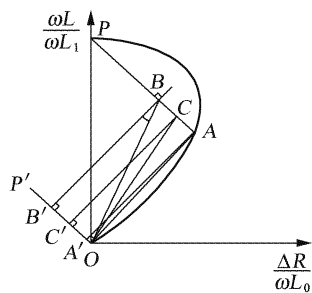


图 5 提离抑制原理图

图 5 表示在某一试件上进行电导率测量时, A 点为没有提离时检测线圈的归一化阻抗点, B 点为有提离影响时检测线圈的归一化阻抗点。而且,不论测量时存在多大的提离,其测得的检测线圈的归一化阻抗点均近似在 AP 的直线上(如 C 点等)。依据相位分析法原理,设从 O 作 AP 的平行线 OP', 分别从 A, B, C 点作 OP' 的垂直线,可见,虽然 $OA \neq OB \neq OC$,但是 $AA' = BB' = CC'$ 。说明由于提离效应的存在,在测量时,虽然实际的检测线圈阻抗值 OA 发生了变化,但通过适当的相位转换,提取信号 AA'(或 BB', CC'),可用以反映 OA 信号的大小,实现了提离的抑制,得到较准确的反映电导率的检测线圈的阻抗值。

3 硬件电路设计

设计了以微处理器为核心的、基于幅相鉴别抑制提离效应的便携式数字显示涡流电导仪,系统硬件框图见图 6。

系统由模拟前端、微处理器和电源管理等部分组成。模拟前端部分包括信号发生、检测探头、前置放大、相敏检波、平衡滤波、可调增益放大器和 A/D 转换器等单元;微处理器部分则由微处理器、人机接口、报警单元和存储单元等组成。系统采用 ATMEL 公司生产的基于 ARM9 核的微处理器 AT91RM9200,是系统的运作平台,它的嵌入大大简化了硬件电路设计,降低了系统的总功耗;模拟前端利用 AT91RM9200 外部可编程时钟输出产生所

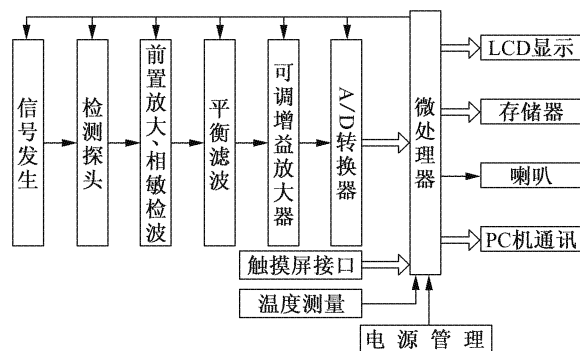


图 6 系统硬件功能框图

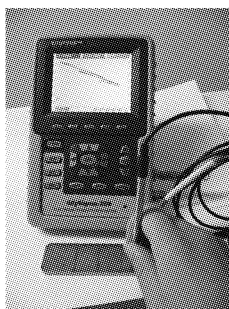
需频率方波,然后转换成正弦波信号,再经一定放大、驱动后施加于涡流传感器上。传感器得到的检测信息经前置放大,并由相敏检波电路拾取含有试件电导率信息的涡流信号(含幅值和相位),通过平衡滤波消除温度变化等因素产生的残余电压,最后经可调增益放大和 A/D 转换器采样后,送入 AT91RM9200 处理。电源管理部分既为系统各个部分提供所需的电源电压,另一方面检测电池电压、电池温度、外电源的接入和管理电池充电^[3]。

4 系统软件结构

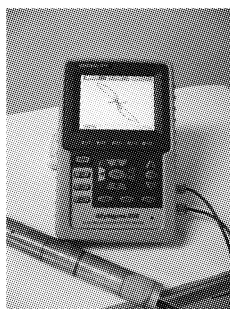
便携式仪器的软件分为四层设计。其最底层为设备驱动程序,包括 A/D 和 D/A 转换,键盘扫描、LCD 驱动和通讯接口驱动等设备程序的编写;其次为操作系统层,该层为整个软件的调度控制中心,为设备驱动和应用程序编写提供相应的软件接口,在此选用 LINUX 操作系统^[5],核为 Linux-2.4.19 版本;在操作系统之上,是系统的应用程序层,它包括对采样数据的滤波程序、对涡流采样值进行提离抑制、涡流特征值与电导率数据的曲线拟合、对电导率测量值的温度补偿和系统工作点的校正;最上层是人机接口层,在此主要表现为仪器的显示界面和按键提示,按键的输入为操作系统调用相应应用程序提供依据,而运行应用程序后,仪器要在显示屏上给出运行结果。操作系统的嵌入,似乎从表面上增加了软件的复杂性,占用了系统的资源;在实质上,它可以提供内存管理、多任务管理和外围资源管理,给应用程序设计带来好多好处。

5 实验结果

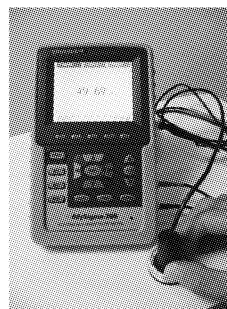
根据上述涡流检测的基本原理以及对测试仪器的软硬件分析,设计研制了集涡流探伤、电导率测量和涂层厚度测量的便携式多功能涡流仪。



(a) 平板探伤



(b) 铜管探伤



(c) 电导率测量



(d) 涂层测厚

图7 便携式多功能涡流仪应用示意图

在涡流探伤功能中,仪器可以选择探头形式,调节频率大小,使检测到的缺陷信号幅度最大,然后调节增益大小,使信号幅度达到检测要求,还可调节相位大小,使缺陷信号与晃动信号形成一定的夹角,便于观察检测(图 7a 和 b)。

在电导率测量中,用户校准完毕后即可进入电导率检测状态。将探头放置于被检工件上即可在屏幕中显示电导率大小。还可以根据需求选择不同的电导率单位 %IACS 或 MS/m(图 7c)。

在涂层测厚中,根据不同的基体材料,先选择合适的频率、增益和探头驱动强度,然后进行标定操作。标定完毕后,即可进入涂层检测状态。将探头放置于被检工件上即可在屏幕中显示涂层厚度大小(图 7d)。

6 结语

首先对涡流检测的机理进行了分析,然后利用 ANSYS 软件计算出不同电导率的非磁性金属归一化阻抗图,得出提离效应引起线圈阻抗的变化近似呈直线的规律,以及在高频率下不同电导率的阻抗曲线近似重合。从而在涡流探伤和测量电导率时,

应用涡流检测阻抗分析法,提出利用相位转换来抑制提离效应干扰的新方法。根据上述原理分析,设计了以微处理器为核心的、基于幅相鉴别抑制提离效应的便携式多功能涡流仪,组装了电路、编制了系统软件,研制了一台可分别进行涡流法探伤、测量电导率和测厚的便携式、多功能涡流检测仪。该仪器可以有效地进行表面裂纹的探伤、电导率测量和覆盖层厚度测量(测量误差 $<1\%$),为研制智能化多功能涡流电导仪提供了良好的基础,有良好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 任吉林. 电磁无损检测[M]. 北京:航空工业出版社, 1988.
- [2] 龚曙光,谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 机械工业出版社, 2004.
- [3] 李龙奎,苏俊宏. 基于 ANSYS 的二维谐性磁场分析[J]. 应用光学, 2005, 26(6): 38-40.
- [4] 田 泽. 嵌入式系统开发与应用教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.
- [5] 玉 波,朱自强,郭 军. Linux C 编程[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

2008 远东无损检测新技术论坛将在南京举办

2008 远东无损检测新技术论坛将于 2008 年 6 月 7—9 日(6 日报到)在江苏省南京市举办,有关筹备工作正在进行。本次论坛的主题为“研发、应用、教育”。主办单位为江苏省特种设备安全监督检验研究院、江苏省机械工程学会无损检测学会、南京大学、南京航空航天大学 and 南京工业大学。

欲在本次论坛上作学术报告、投递学术论文、进行仪器设备推介展示活动,请登陆江苏省特种设备安全监督检验研究院网站 <http://www.jstzsb.com>,或与论坛筹备工作委员会联系。

论坛策划人:强天鹏;电话:025-84513355;手机:13776663939;E-mail:jsbpvqtp@vip.163.com。

筹备工作委员会秘书(文件管理):陈雁康;电话:025-84404024;手机:13813893470;E-mail:chen-yankang@gmail.com。

筹备工作委员会秘书(会务管理):俞燕萍;电话:025-84408576;手机:13951630079;E-mail:kjfbz2007@163.com。

(2008 远东无损检测新技术论坛筹备工作委员会)