

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.02.12

交变磁场测量法在表面裂纹无损检测中的应用

李梦雪, 吴志煜, 王春艳

(云南省计量测试技术研究院, 云南 昆明 650228)

摘 要: 为了分析交变磁场测量法在无损检测中的应用及检测金属表面裂纹长度和深度的影响因素, 本文根据交变磁场测量法基本原理, 设计了新型的传感器探头和相关硬件电路, 可以实现全方位检测金属表面缺陷, 抑制噪声并提取缺陷信号的微小变化量。结果表明: 探头型号和激励频率对漏磁场的检测影响很大, 正交矩形激励线圈方法更方便直观; 当霍尔传感器扫过表面裂纹时脉冲漏磁信号急剧降为零后又剧增到最大时, 各个深度的表面裂纹信号到峰时间近似呈线性关系, 这两个特点能用来对表面缺陷进行定位和定量。

关键词: 交变磁场; 矩形线圈; 磁芯; 数字滤波

中图分类号: TB9; TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)02-0042-04

The Application of Alternating Magnetic Field Measurement Method in Surface Crack Nondestructive Testing

LI Mengxue, WU Zhiyu, WANG Chunyan

(Yunnan Institute of Metrology and Testing Technology, Kunming 650228, China)

Abstract: The application of alternating magnetic field measurement method in nondestructive testing and the testing factors affecting the metal surface crack length and depth are analyzed. Based on the basic principle of alternating magnetic field measurement method, a new type of sensor probe and the related hardware circuit were designed, in order to achieve all-round metal surface defect inspection, suppress the noise and extract the small variation of defect signals. The results show that: the great influence on the leakage magnetic field is from the probe type and excitation frequency, and the orthogonal rectangle exciting coil method is more convenient and intuitive; the pulsed magnetic flux leakage signals would sharply reduce to zero and then increase to the maximum when the hall sensor scans through the slit, and the arrived peak time of the slit signals of all the deep surface is approximate linear relationship. These two characteristics can be used to position and quantify surface defects.

Key words: alternating magnetic field; rectangular coil; magnetic core; digital filtering

0 引言

无损检测是工业发展必不可少有效工具, 其在不损害或不影响被检对象使用性能的前提下, 检测被检对象中是否存在缺陷或不均匀性, 给出缺陷的大小、位置、数量等信息, 进而判定被检对象所处技术状态。交变磁场测量(ACFM)技术是在涡流检测和漏磁检测的基础上发展起来的一种新型电磁无损检测技术, 也是近年来无损检测的主要进展之一^[1]。目前已有许多科研工作者研究了交变磁场测量(ACFM)技术在检测金属材料表面及内部缺陷的影响因素。为进一步深化研究交变磁场测量法在无损检测中的应用及检测金属表面裂纹长度和深度的影响因素, 本文设计了一种新

型传感器探头并优化了相关硬件电路, 采用单传感器进行漏磁检测试验数据的采集, 采用手动扫查方式研究检测金属表面裂纹长度和深度的影响因素及方便直观的方法, 提高检测结果可靠性, 以便为食品加工、材料选购、加工过程品质的变化、流通环节的质量变化等过程缺陷检测提供技术依据。

1 漏磁检测原理

漏磁无损检测的原理是依据铁磁性材料有高磁导率这一特性。当被检铁磁性材料中有缺陷时, 磁导率会发生变化, 从而判断缺陷的特性。外加磁场使铁磁性材料被磁化, 当材料中无缺陷时, 磁力线大部分均匀分布地通过铁磁材料, 并不溢出材料表面(图1)。当有缺陷时, 磁场会从一种介质进入另一种, 此时磁导率 μ 会发生突变, 这时磁场矢量会出现相应的不连续性。由于材料中缺陷的磁导率远比铁磁性材料小,

收稿日期: 2015-12-21; 修回日期: 2016-02-19

作者简介: 李梦雪(1987-), 女, 助理工程师, 主要从事声学 and 超声波探伤研究。

使磁力线发生弯曲,有一部分磁力线泄漏溢出材料表面^[2],见图2。这时采用磁敏元件检测该泄漏磁场磁感应强度 B 的信号变化,就能有效地检测出缺陷的存在。图3和图4分别为漏磁检测的原理图和流程图。

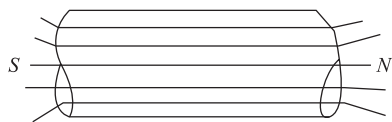


图1 在外加磁场作用下的无缺陷铁磁

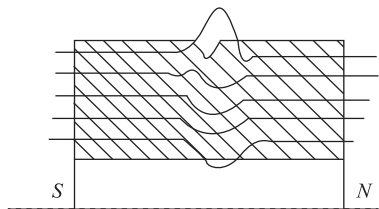


图2 表面缺陷引起的磁力线弯体内部磁力线分布

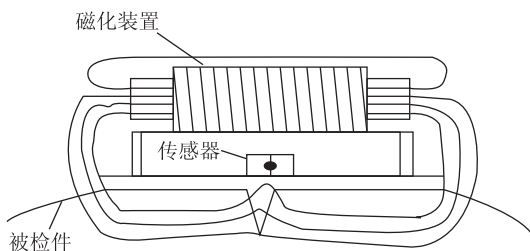


图3 漏磁检测原理图



图4 漏磁场检测的流程图

2 主要研究内容及实验方案

2.1 研究内容

设计正确合适的放大滤波电路,并且制作合适的线圈,在遵循电磁理论的前提下,应用现代信息获取和处理技术,以集成霍尔元件为磁传感器,通过实验对多种所设计的不同几何尺寸缺陷的表面和近表面裂纹产生的漏磁场进行检测,分析它们产生的信号的变化特点。但是通过检测线圈拾取的扰动磁场信号幅值是很小的,只有微伏级或者毫伏级,而对于不同的材料、外观、表面及内部缺陷形状,检测到的信号差别很大,检测信号范围很宽^[3]。噪声信号是从外界工作环境及传感器工作时内部随着有用信息一起被采集出来,从而被测信号干扰源多,噪声大,对信号的分析带来很大的困难。所以要对线圈所提取的信号进行放

大、滤波,并用小波分析技术对信号进行去噪处理,进而分析特征信号与缺陷之间的关系^[4]。

2.2 实验方案

先要制作一批已知缺陷位置、长、宽、深的检测样品,其次,制作一个信号放大滤波电路板和矩形激励铁氧体线圈,然后根据如图5所示的检测原理图检测样品中的缺陷,最后在示波器上观察由霍尔传感器检测到的信号图像,对图像进行采集后去噪分析,总结漏磁检测磁场的一些基本特征^[5]。两块试块及表面缺陷具体尺寸(长×宽×深, m^3)如图6所示。

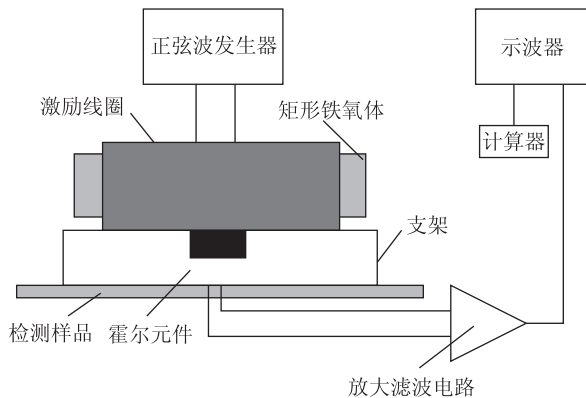


图5 检测原理图

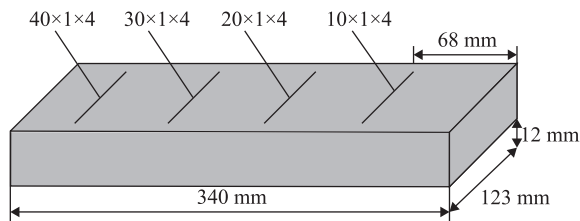


图6 检测样品及尺寸

3 放大滤波电路的设计

AD620 仪表放大电路是由两个放大器共同组成,其中电阻 R 需在放大器的电阻适用范围内(1 ~ 10 k Ω)使用,选择固定电阻 R 的阻值为 3 k Ω 。通过不断地对缺陷进行大量的扫查,我们发现,当放大 100 倍、可变电阻 R_G 的阻值调到 500 Ω 时缺陷图像最清晰,所以选择 500 Ω 作为可变电阻 R_G 的值。放大倍数 100 倍,电路原理框图和电路图如图7、图8所示。



图7 电路原理框图

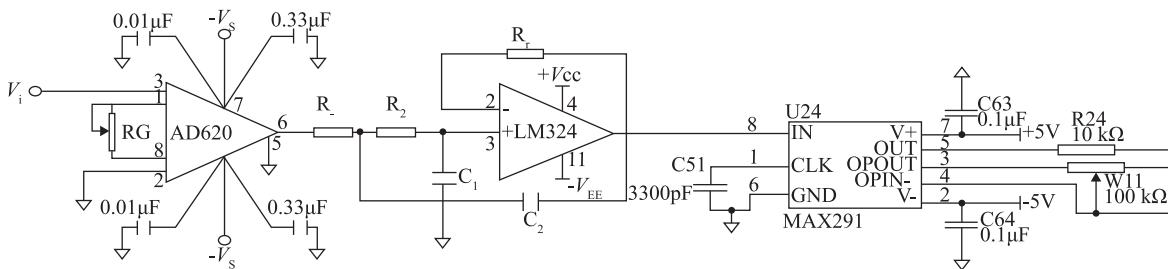


图8 放大滤波电路图

4 具体实验方法

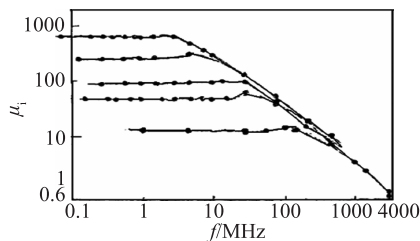
4.1 实验数据采集系统

本文从实验条件及自身能力的角度来考虑,采用单传感器进行漏磁检测实验数据的采集,并采取手动扫查方式。

数据采集装置主要包括探头部分、电源部分、放大电路部分、任意函数发生器和数字示波器。电源部分包括启东计算机厂的WD-5稳压电源和稳压电源输出单元;激励部分使用了任意函数发生器;数据采集部分则采用Tektronix公司的TDS3014B数字滤波器来导出数据。

4.2 铁芯的选择

磁性材料在磁场中会呈现不同的磁性特征,按照材料的磁特性,磁性材料大致可分为强磁材料、顺磁材料及抗磁材料。磁导率 μ_i 是磁性材料的一个指标,如图9所示。由于初始磁导率 μ_i 是随着频率变化而变化的,当 μ_i 越高使用时频率越低,相反使用时的频率就越高,因此在不同的频率段要使用不同磁导率的铁磁性材料^[6]。锰锌铁氧体是一种高稳定性、高功率、高导铁氧体材料,它是以氧化铁、氧化锌为主要成分的复合氧化物,其电阻率低,为 $1 \sim 10 \Omega \cdot m$,其工作频率在 $1 kHz$ 至 $10 MHz$ 之间。该铁芯对应力不敏感,而且磁导率随频率变化特性很稳定,在 $150 Hz$ 以下基本保持不变,是本实验用铁芯最佳选择。由于本实验要求频率 $f \leq 6 kHz$,所以选用锰锌铁氧体作为实验材料。其具体尺寸为 $(40 mm \times 10 mm \times 7 mm)$ 。

图9 软磁铁氧体的 μ - f 曲线

4.3 正交型矩形激励线圈的设计

由于单匝矩形线圈探头简单,在实际检测工作中应用的缺点是,只有当矩形线圈的电流方向和被检物体表面的缺陷裂纹垂直时,探伤灵敏度最高,最能发现缺陷位置、大小,然而当线圈电流方向和表面裂纹走向基本平行时,探伤灵敏度非常低,甚至检测不出来。为了能够有效地检测工件的缺陷,弥补单匝矩形线圈探头的缺点,单匝矩形线圈需要以正交 90° 的方式交叉扫描至少两次,才能发现缺陷^[7]。为了避免对缺陷的漏检和大量重复工作,本实验采用自制的正交型激励线圈作为实验铁芯,实验采用 $(40 mm \times 10 mm \times 7 mm)$ 的铁氧体5个,502胶水粘牢后,使用 $0.44 mm$ 的铜线以正交 90° 分别缠绕350匝,其结构如图10所示。在两个正交的矩形线圈两端分别加载两段同频率、相位差为 90° 的正弦波信号,这时在线圈底部中心位置会产生一个与加载信号同频率、强度均匀的正交 90° 的旋转电磁场,如图11所示。此时无论怎样摆放线圈进行探伤,只需扫描一次就可以探测到材料表面缺陷裂纹,大大提高了检测系统的探伤灵敏度和工作效率,可以更快、更有效地发现缺陷。

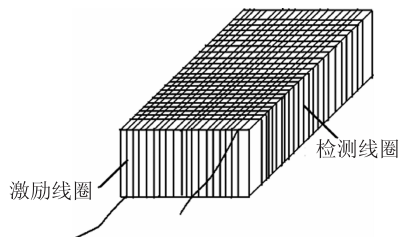


图10 正交矩形线圈图

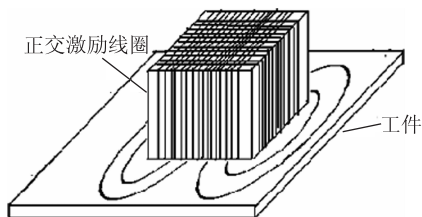


图11 正交激励线圈产生旋转场

4.4 传感器的选择

传感器元件是漏磁测量精确与否的关键。传感器的特征主要包括灵敏度、信噪比、分辨力。灵敏度和信噪比由传感器的空间分辨力决定,这表明传感器分辨相邻缺陷的能力,决定缺陷的可检测性;分辨力则表明传感器定量检测缺陷几何形状的能力,由纵向上布置的独立元件数目及其特性确定,决定着定量检测的精度。分辨力越高,传感器及后续的信号处理装置越复杂。霍尔元件是一种基于霍尔效应的磁传感器,用它可以有效检测磁场及其变化。它结构牢固、体积小、重量轻、安装方便、功耗小、频率高(可达1 MHz),不怕灰尘、油污的污染或腐蚀,因此霍尔元件和霍尔集成传感器是相对理想的实验器件^[8]。本实验选用 Alleger 公司的线性霍尔传感器 UGN3503UA 型芯片,它是一种低噪声输出型霍尔传感器,而且不受检测速度的影响,单5 V供电时灵敏度为15 mV/G,电压输出范围大,在1~4V之间具有很好的线性关系。输出电压值与磁场强度是一条与纵轴交点为2.5 V的斜率为正的直线。

4.4.1 霍尔传感器安装方式

霍尔传感器水平安装对于底面的缺陷灵敏度高于霍

尔片垂直放置,如果是交流磁化方式,则易受工件涡流噪声的影响,所以在探头装置中采用了水平安装方式。

4.4.2 霍尔传感器的安装距离(提离值)的选择

提离值对缺陷漏磁场的影响很大,近似成幂指数衰减,所以在实际工程中必须结合工程实际,尽量减小提离值,但为了不和工件表面摩擦不损坏霍尔片,一般设定提离值为0.5~1.0 mm之间较合适;在此选定为0.5 mm。

5 图像采集

首先对实验系统进行调节,调好后开始进行实验,用正交矩形激励线圈检测 Bx 方向和 By 方向的缺陷,实验主要采用手动扫查方法^[9]。

图12(a), (b), (c), (d)分别为试块在4个位置的缺陷扫查检测图,4个缺陷尺寸分别为:位置1, 10 mm×1 mm×4 mm;位置2, 20 mm×1 mm×4 mm;位置3, 30 mm×1 mm×4 mm;位置4, 40 mm×1 mm×4 mm。由此可知,4个缺陷宽深不变,长度依次增加,因此检测时扫查出的缺陷大小会呈线性逐渐增大。此特点在图12中清晰可见,缺陷大小得到了直观的反应和体现。

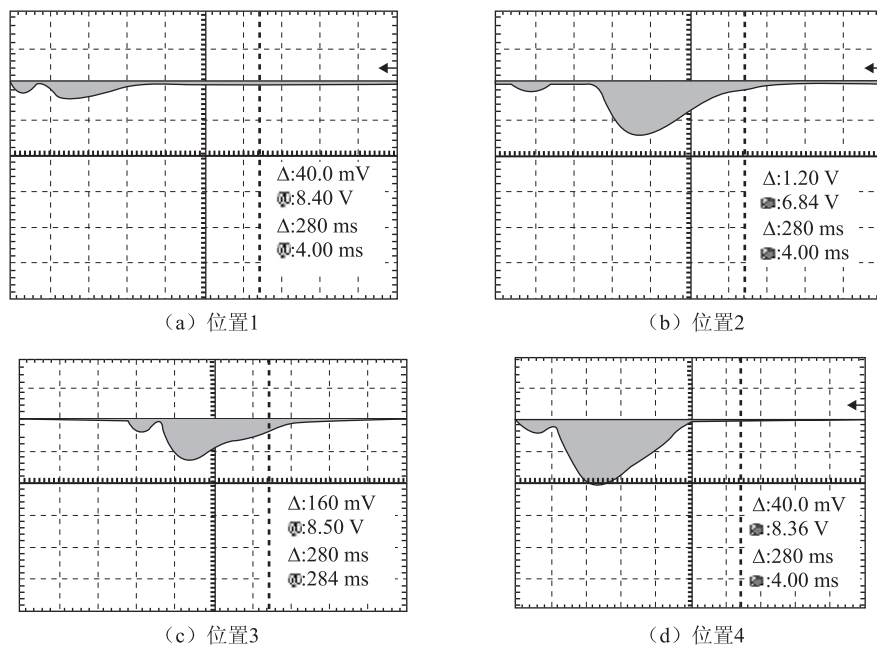


图12 缺陷采集图

6 结论

通过对多种已知几何尺寸的表面和近表面裂纹产生的漏磁场进行实测,实验检测结果表明:本文制作

的探头和放大滤波电路可以检测出表面和近表面的狭缝,效果明显,达到了预期的实验目的。可以得出以下结论:① 探头型号和激励频率对漏磁场的检测影响很大,正交矩形激励线圈方法更方便直观;② 当霍尔

(下转第57页)

路有关的电缆和接头,由于锁相信号一定是环路信号,因此若电缆或接头接触不良,信号中断未形成环路即引起此类报故。如连接正常,则进一步检查信号源部分,信号源部分中包含信号较多,有参考信号 R、基准信号发生器和时钟参考信号等,检查各部件均有正常信号输出,则排除其相关部件的故障。最后用信号寻迹法检查故障,将锁相环路打开,外加一模拟输入信号至鉴相器的输入端,测试其输出端信号,同样未发现故障,而将锁相环路中 R 信号接收机断开则出现锁相错误, A、B、R 三个信号接收机的参数及性能完全一样,可互换使用,所以用替换法查出 R 信号接收机故障,更换后功能正常。

5)实例 5: 开机后仪器自检通过,进入测试界面后不连电缆自测,发现测试反射 S11 及 S22 的功率电平均在 -70 dBm 以下,再连接电缆进行自测,发现测试传输 S21 及 S12 也均在 -70 dBm 以下。由此两个故障现象可判断仪器的信号源未产生信号输出,可将故障定位于仪器的源模块。图 4 为信号源输出部分的原理图,使用 AV4032 型频谱仪开始测试三片 A06 放大器的输入及输出信号,我们从信号输入部分向后面输出部分逐级测量,信号放大前后的幅度大约相差 13 dB 左右,测量至第二级 A06 放大器时,发现有输入信号却没有输出信号,更换第二级的 A06 放大器后,功能恢复正常。

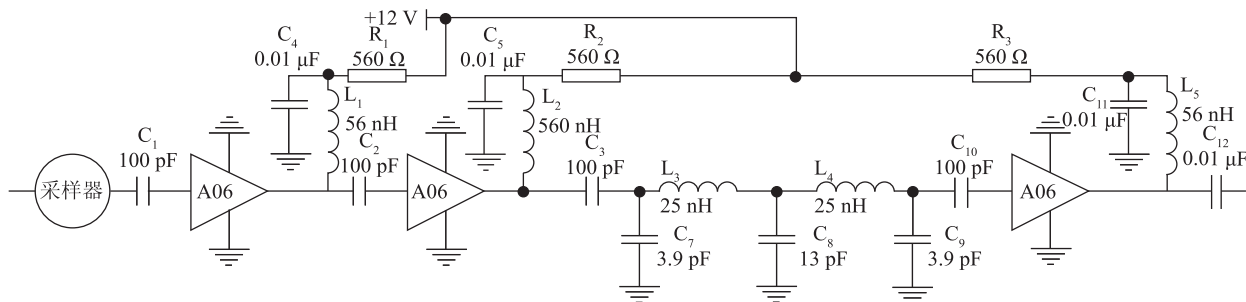


图 4 信号源输出部分原理图

3 结束语

AV3620 型矢量网络分析仪作为国产仪器中技术领先的网络测试仪器,拥有较高的性价比。维修人员对仪器的工作原理应当有足够的了解,根据故障现象结合仪器的原理框图和信号流程图,对各主要部件的前后节点进行信号测试判断,灵活地应用各种电路检修方法,达到快速准确的故障定位,最终完

成修复。

参考文献

- [1] 李长海, 吴申贤. 现代通讯测量仪器[M]. 北京: 军事科学出版社, 1999.
- [2] AV3620 系列射频微波矢量网络分析仪用户手册[Z]. 中电集团公司第四十一研究所, 2002.
- [3] 林占江, 林放. 电子测量仪器原理与使用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [4] 解源, 康宜华. 漏磁探伤及其信号处理[J]. 工业仪表与自动化装置, 1999(4): 52-53.
- [5] 汪友生, 潘孟贤, 何辅云. 缺陷参数与漏磁信号相互关系的实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998(5): 28-31.
- [6] 任吉林, 高春法, 林俊明. 电磁检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 徐章遂, 徐英, 王建斌, 等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [8] 金建华, 康宜华, 武新军, 等. 用集成霍尔元件定量检测缺陷漏磁场的特点[J]. 无损检测, 1998, 20(2): 34-38.
- [9] 康宜华, 杨叔子, 卢文祥, 等. 空间域信号的采样方法[J]. 华中理工大学学报, 1992, 20(S1): 183-188.

参考文献

- [1] 林俊明. 漏磁检测技术及发展现状研究[J]. 无损探伤, 2006, 30(1): 1-5.
- [2] 李家伟, 陈积懋, 李路明. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 解源, 康宜华. 漏磁探伤信号的提取[J]. 武汉冶金科技大学学报, 1997(4): 441-444.

(上接第 45 页)

传感器扫过狭缝时脉冲漏磁信号急剧降为零然后又剧增到最大时, 各个深度的表面狭缝信号的到峰时间近似呈线性关系, 这两个特点能用来对表面缺陷进行定位和定量。