

基于场量测量和频率扫描技术的交变漏磁无损检测系统

康中尉

(西南电子电信技术研究所, 成都 610041)

摘要: 交变漏磁检测方法由于兼具涡流检测和传统漏磁检测的特点, 对表面缺陷具有很高的识别率。在对交变漏磁检测理论进行分析的基础上, 提出了基于场量测量和频率扫描技术的快速识别和深度定量检测模型, 并通过试验证明了该模型能实现表面缺陷的快速检测和缺陷深度的定量检测。

关键词: 漏磁检测; 交变漏磁场; 缺陷识别; 磁场测量; 频率扫描

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)08-0402-03

Nondestructive Testing System of Alternative Magnetic Leakage Flux based on the Magnetic Field Measurement and the Frequency Sweeping Method

KANG Zhong-wei

(Institute of South-west Electron & Telecom Technology, Chengdu 610041, China)

Abstract: Alternative magnetic leakage flux method was developed from the eddy current testing and traditional magnetic leakage flux testing, and it was advantageous for surface flaw recognition. The fast flaw-recognition model based on the magnetic field measurement and the depth-detection model based on the frequency sweeping method were built. Experimental results proved their accuracy.

Keywords: Magnetic leakage flux inspection; Alternative magnetic leakage flux; Flaw recognition; Magnetic field detection; Frequency sweeping

场量测量技术由于可以获得与缺陷直接相关的信息, 因此利用该技术实现缺陷的快速识别已成为当前无损检测发展的一个主要方向; 而缺陷深度是一个对工件进行定量检测和寿命评估的很重要的参数, 利用激励频率和感应电磁场的相互作用, 建立基于频率扫描技术的深度定量检测模型也是最近无损检测领域的研究热点^[1], 另外, 交变漏磁检测由于采用交流磁化的方式, 具备了涡流检测和传统漏磁检测的优点, 具有对表面缺陷信号敏感、易于识别等特点, 因此也将越来越受到业内人士的关注^[2]。

笔者在交变漏磁检测理论的基础上, 建立了基于场量测量和频率扫描技术的快速识别和定量检测

模型, 以实现对实际中常见的缺陷类型——表面缺陷的定性识别和深度定量检测。

1 交变漏磁检测理论基础^[3]

交变漏磁检测技术和基于永磁铁和直流磁化的漏磁检测方法具有相同的理论基础, 只是采用的磁化方法不同, 后者可以看成是前者在频率非常小时的情况。传统的漏磁检测方法由于磁力线可以渗透到导体很深的部分, 因此常用来作为内部缺陷的检测, 而由电磁感应定律以及集肤效应可以知道, 交变漏磁检测方法的磁力线分布在导体的表面, 因此适于表面缺陷的检测。

在铁磁材料介质中的磁场标量势满足拉普拉斯方程, 即有

$$\Delta\varphi(r) = 0 \quad (1)$$

式中 φ ——磁势

收稿日期: 2005-06-20

作者简介: 康中尉(1974~), 男, 工程师, 主要从事电子测量技术研究。

r ——空间点矢量

并且由磁场在两个材料的接触面的连续性条件,可以同时满足

$$\mu \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad \varphi_1 = \varphi_2 \quad (2)$$

式中 φ_1 ——在相对磁导率为 μ 的铁磁性材料中的磁势

φ_2 ——外部介质(一般是空气)中的磁势

$\frac{\partial}{\partial n}$ ——表面法向方向的偏导数

由磁势在导体表面的分布可知导体表面的磁荷 σ 可用下式表示

$$\sigma(r) = \frac{\lambda}{\pi} \int_s ds \cdot \sigma(r') \frac{\cos(n_r, r-r')}{|r-r'|} + \frac{\lambda}{\pi} \frac{\partial \varphi_0}{\partial n_r} \quad (3)$$

式中 $\lambda = (\mu - 1) / (\mu + 1)$

φ_0 ——外部磁势

n_r ——垂直于表面的方向矢量

由此,通过磁荷可以计算磁势

$$\varphi(r) = \int_s ds(r') \sigma(r') \ln \frac{1}{|r-r'|} + \varphi_0 \quad (4)$$

如果用 $p(x)$ 表示缺陷的结构函数,式(3)可以表示为

$$\xi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} ds \cdot \xi(s) K(x, s) + \frac{\lambda}{\pi} H_0 p'(x) \quad (5)$$

式中 $\xi(x) = \sqrt{1 + [p'(x)]^2} \sigma(x)$

H_0 ——缺陷表面的磁场强度

$p(x)$ ——缺陷尺寸的函数

$$p'(x) = \frac{\partial p(x)}{\partial x}$$

并且有

$$K(x, s) = \frac{\lambda}{\pi} \frac{p(x) - p(s) - p'(x)(x-s)}{[p(x) - p(s)]^2 + (x-s)^2} - \frac{\lambda}{\pi} \frac{\partial}{\partial x} \arctg \frac{p(x) - p(s)}{x-s} \quad (6)$$

从式(6)可以得出以下的结论:

(1) 磁荷密度取决于表面结构的微分 $p'(x)$, $\xi(x)$ 的复数形式与 $p(x)$ 的特征点(鞍点)有很大的关系。

(2) 当 $|x| \rightarrow \infty$ 时, $\xi(x) \rightarrow 0$, 对式(5)可使用参数定理进行求解。换句话说,式(5)的渐进性是由 $K(x, s)$ 的鞍点和 $\xi(x)$ 共同决定的。

2 基于场量测量技术的缺陷识别模型

利用笔者设计的 A3515 交变漏磁检测测量传

感器及激励电路、检测电路和数据采集处理软件组成的检测系统^[4]对铝板上 $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的裂纹沿其走向的垂直方向移动,并对磁场感应传感器输出两个方向的感应电压信号进行数据采集(激励频率为 3.5 kHz,激励幅值为 10 V)。具体地说,这是在传感器沿着裂纹垂直方向,磁力线分布也垂直于裂纹走向情况下,空间点磁场的两个分量各自的测量结果,如图 1 所示,可以看出该测量结果和上述的理论结果完全一致,这表明该系统的硬件设计在交变漏磁场检测中对提取有用信息和消除噪声上同样取得了很好的效果,完成了对所需信号的准确测量。

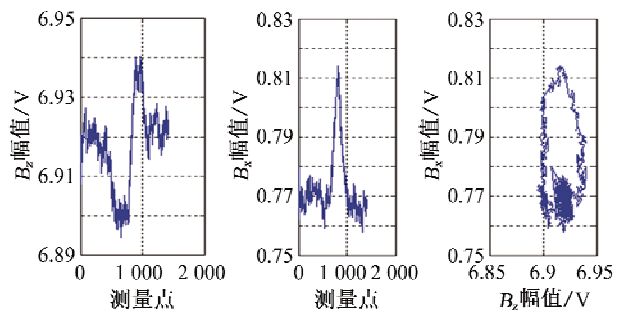


图 1 基于场量测量的交变磁场测量信号

由图 1 可以看出, B_z 在缺陷两侧形成了极大值和极小值,而 B_x 在缺陷中央形成了一个极大值,而在缺陷两侧出现了幅值较小的波谷,这些缺陷信号的特征点在图中有明确的体现。

由交变漏磁检测的特点可以看出,漏磁检测方法具有很高的缺陷识别适应性,因为基于场量测量的涡流检测在涡流方向垂直于裂纹走向时才有高的识别率^[5],对工件大面积的缺陷检测是不适用的(在不明确缺陷的位置和走向的情况下),而漏磁检测不同,只需要裂纹在激励线圈的两极就可以实现缺陷的检出。

图 1 还给出了由 B_x 和 B_z 形成的矢量图,在无缺陷的情况下,由于两者的测量值基本保持不变,所以在图中的一个点附近摆动,而当传感器经过缺陷时,由于测量信号发生了很大的变化,因此形成了一个环。

为了提高缺陷的识别率,根据信号的特点设计了相应的基于斜率比值的缺陷识别模型^[6],该模型的特征式如下

$$ratio = \frac{B_z - B_{z0}}{B_x - B_{x0}} \quad (7)$$

式中 $ratio$ ——斜率比值

B_{x0}, B_{x0} ——完好场的两个磁场分量的测量值

图2表示用式(7)对采集数据进行处理得到的结果,由于在传感器经过缺陷的过程中, B_x 会产生一个极大值,并且在缺陷两端会形成两个极小值,因此在缺陷区域势必会有两次要经过 B_{x0} , $ratio$ 会产生极性的变化并且这时的幅值较大。而因为 B_z 会产生一个极大值和一个极小值,并且和 B_{x0} 特征点之间有很明确的时序性,即先有 B_z 的极小(大)值,再有 B_x 的极小值和极大值,然后再有 B_z 的极大(小)值,最后是 B_x 的另一个极小值,因此利用图2就可以实现缺陷的快速识别。

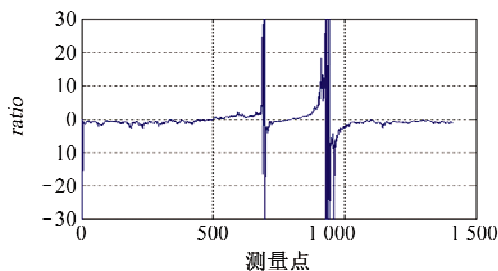


图2 基于斜率比值的缺陷识别模型

由图1和2比较可以看出,由于信号的测量值变化情况较小,利用缺陷环进行识别的可靠性明显低于基于斜率比值的识别模型,因为后者突出了信号变化过程中特征点的测量值变化情况,充分利用了信号在经过缺陷过程中信号的变化特点^[6]。

3 基于频率扫描技术的深度定量检测模型

由电磁感应定律以及集肤效应可知,交变漏磁检测系统激励线圈在工件中产生的交变磁场(磁力线)集中在导体的表面,激励频率的不同势必会造成磁力线渗透深度的不同,进而影响空间磁场的分布,充分利用在激励频率变化过程中磁场信号的变化就可实现对缺陷深度的测量^[6]。利用下式作为特征量提取,在一定的频率范围内 $ratio$ 必然出现拐点,由此确定的拐点频率作为深度判断的特征频率^[6],即

$$ratio = \frac{B_x}{\sqrt{B_x^2 + B_z^2}} \quad (8)$$

3.1 频率扫描特征点位置的选取

从理论上讲,缺陷位置的任何测量点都可以作为基于频率扫描技术的深度定量检测模型的特征点,但选择一个适宜点进行测量可以获得较为理想的结果,因此从上述基于场量测量的缺陷识别模型的几个特征点(B_x 的极小值点和极大值点, B_z 的极大值点和极小值点,即对应缺陷的两侧以及缺陷中

间位置的点)中选择最合适的测量点。

对于铝板上同一个 $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 裂纹进行测量,分别在裂纹的左侧、中间以及右侧进行测量(频率范围为 $5 \sim 9 \text{ kHz}$,步进量为 200 Hz),测量的结果如图3和4所示。

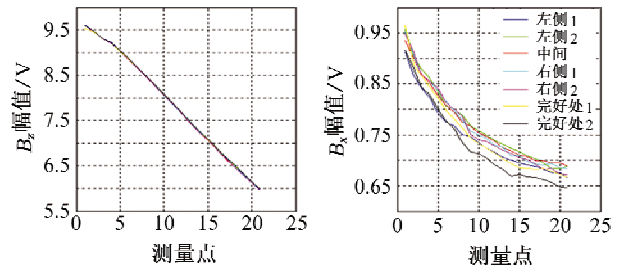


图3 B_x 和 B_z 的原始采集值

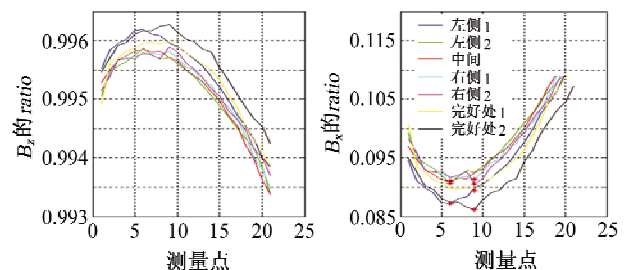


图4 特征量在频率变化过程的曲线

从 B_x 和 B_z 的采集值可以看出,两者的采集值呈现了上面描述的特征,即测量值的变化趋势由剧烈变为缓慢,因此势必出现满足下式的转折点

$$\Delta B_x > \frac{B_{x0}}{B_{x0}} \cdot \left(\frac{B_{x0}^2}{B_{x0}^2} - 1 \right) \cdot \Delta B_z \quad (9)$$

由图4可以看出,完好场以及在缺陷右侧(B_z 最小值)所测的信号值的拐点频率基本上在同一个点上(这是因为扫描频率步进较大的缘故);在裂纹中间以及缺陷左侧(B_z 最大值)所测的信号值的拐点频率与完好场的拐点频率有一定的距离,因此应选用 B_z 最大值点的位置作为判断深度的标准。

3.2 拐点频率和裂纹深度的定量关系分析

为了进一步确定交变漏磁测量中基于频率扫描技术的深度测量模型中裂纹深度是否与特征频率有定量关系,对不同深度的裂纹进行了测试,结果如图5所示(四条裂纹尺寸分别为 $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$, $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$, $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 以及 $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$)。

其测量结果可以用表1进行描述。

由表1可以看出,利用式(8)确定的特征值的拐点频率和裂纹深度之间呈现了很好的线性关系,但在测量深度为 0.5 mm 的裂纹时不满足线性关系,



第 17 届世界无损检测大会展览会招展通知

由国际无损检测委员会主办,中国无损检测学会承办的第 17 届世界无损检测大会暨展览会定于 2008 年 8 月 27—31 日在中国上海展览中心举办。

第 17 届世界无损检测大会展览会诚邀世界各国、各地区的无损检测仪器设备制造商、无损检测相关专业的设备制造商和科研人员踊跃参加世界无损检测界的盛会。本届展览会将为世界上最新无损检测设备、最新无损检测技术的交流搭建平台。在中国举办世界无损检测大会和展览会是有史无前例的大事,是世界无损检测界的骄傲,也是中国无损检测人员的骄傲。我们相信届时一定会有众多无损检测人员从世界各地赶来,一睹这一盛况。

展览时间

报到和布展为 2008 年 8 月 25—27 日上午;展出日期为 2008 年 8 月 27 日下午 1:00~8 月 30 日下午 3:00;展出时间为上午 9:00~下午 4:30;撤展为 2008 年 8 月 30 日下午 3:00。

展览地址

上海市延安中路 1000 号上海展览中心(与第 17 届世界无损检测大会地址相同)。展览会共有两

处场馆,即中央大厅(国际馆)和西二馆(国内馆)。中央大厅面积 5 240 m²,西二馆面积 2 545 m²。

参展程序

欲报名参展的单位,请按要求填写参展协议,加盖公章后寄第 17 届世界无损检测大会展览部秘书处(请复印存盘备查)。参展费用、组织方提供物品以及展品和新技术发布会等详细信息请参见大会网站。

展台安排原则

先付款,先安排。除非参展协议不获主办单位接纳,否则已交展费概不退还,主办单位收到参展协议书和展台费后即寄参展手册,以便参展单位做好各项准备工作。

联系信息

联系地址:上海市邯郸路 99 号 17 届世界无损检测展览部秘书处;邮编:200437;联系人:朱亚青,王为纲;电话:021-65550277,65556775-483,366,65555687;传真:021-65550277;电子邮箱:chsndt2008@163.com 或 chsndt@public2.sta.net.cn;网站:www.17wcndt.com 或 www.wcndt2008.com。

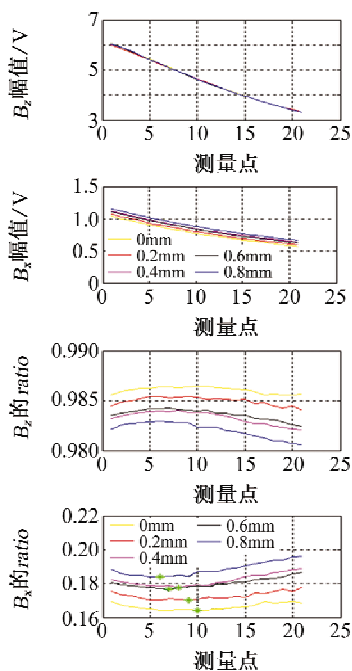


图 5 不同深度裂纹在同一频率范围的测量值及特征值变化

表 1

裂纹深度 mm	拐点频率 KHz	频率差 KHz	裂纹深度 mm	拐点频率 KHz	频率差 KHz
0	4.8	0	0.8	4.0	0.8
0.2	4.6	0.2	0	5	0
0.4	4.4	0.4	0.5	4.4	0.6
0.6	4.2	0.6	1.0	4	1

这是因为频率扫描间隔过大造成的,为了提高测量精度仍然可以采用缩小激励频率步进量的方法予以实现。

4 总结

笔者设计了包括传感器、信号调理电路和数据采集的交变漏磁检测系统,建立了基于场量测量的斜率比值的缺陷快速识别模型,以及利用拐点频率的基于频率扫描技术的深度定量检测模型,完成了表面缺陷的识别和深度的定量测量。

(下转第 418 页)

化设计,操作者只需进行简单的培训即可应用自如。软件系统易于扩展、升级和维护。

3 试验情况简介

为了验证该方法与装置的有效性,笔者专门采集了36%~70%不同含铁量的矿粉样品,分别采用理化方法和涡流法对其含铁量进行标定及检测,然后对检测结果进行比较(表1)。试验情况表明,利用改制的SMART-2097便携式智能多频涡流检测仪对矿粉样品进行测试,尽管比较的数值尚存在量化误差,但取得了较好的结果。

表1 检测结果比较

理化检验 含铁量/%	涡流检测 含铁量/%	涡流检测的 测量误差/%	备 注
36.88	37	0.12	量化误差
57.68	58	0.32	量化误差
66.68	67	0.32	量化误差
67.88	68	0.12	量化误差
69.96	70	0.04	量化误差
70.10	70	0.10	量化误差

此外,现场中可能出现的潮湿铁矿粉对检测结果的影响,笔者也作了模拟试验。由于湿矿粉的密度略高于干矿粉,用该装置对湿粉的测量值略高于干粉,其误差值 $<1\%$ 。

4 总结和展望

该装置适用于钢铁企业对进料铁矿中含铁量的

快速检测,操作简便,不需要采、送样品,检测过程简单直观,可多点检测、综合评定,使检测结果更具公正性,设备成本低、携带方便,可有效减轻理化检验人员的劳动强度,缩短进料周期,提高投入产出比,且有利于降低生产过程中的能耗。该装置也适于对其它金属矿粉中金属含量的快速测定,在工业生产中具有较高的实用价值。

为了让检测结果更直观地反映出来,该装置还可作一些改进,如在受检矿粉表层选择若干点,传感器从所选择的各点插入,在传感器拔出时,采集此过程所产生的连续信号,每个检测点的检测过程形成一条检测曲线,将此若干个点和每个点对应形成的检测曲线通过计算机软件处理并建立三维立体图形,得出矿粉不同层深的金属含量剖面图及给定位位置平均值,就可使最终结果显示更为直观。

参考文献:

- [1] 杨世维. 钢铁企业中的理化检验与无损检测[A]. 2004年全国电磁(涡流)检测技术研讨会论文集[C]. 鞍山: 2004.
- [2] 任吉林,林俊明,高春法. 电磁检测[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [4] 林俊明. 无损检测仪器的智能化[A]. 21世纪华人无损检测论坛论文集[C]. 北京:知识产权出版社,2001.
- [5] 林俊明. 多频涡流检测原理与应用[J]. 无损检测, 1996,18(1):23—26.

flux leakage data[J]. IEEE Trans on Magnetics,2002, 38(3):1481—1488.

- [4] 康中尉,罗飞路,潘孟春,等. 钢管表面缺陷检测用交变漏磁检测系统[J]. 无损检测,2006,28(4):189—191.
- [5] Zhou Jiannong, Wong Brain Stephen, Seet Gerald GL. An ACFM automated crack detection system deployed by an underwater roving vehicle[EB/OL]. Http://www.ndt.net, 2003.
- [6] Kang Zhongwei, Pan Mengchun, Luo Feilu, et al. Application of the frequency sweeping method in alternative current field measurement (ACFM) [A]. ISIST'2004[C]. Xi'an, China: 2004.

参考文献:

- [1] Burke SK. Crack depth measurement using dddy-current NDE[A]. The 10th APCNDT [C]. Austrilia: 2001.
- [2] Gotoh Yuji, Takahashi Norio. Proposal of detecting method of plural cracks and their depth by alternating flux leakage testing; 3-D nonlinear eddy current analysis and experiment[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2004,40(2):655—658.
- [3] Hauelsen Jens, Unger Ralf, Beuker Thomas. Evaluation of inverse algorithms in the analysis of magnetic

(上接第405页)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告