

交流电磁场检测技术中传感器的设计和信号的小波降噪

任尚坤,林天华,朱志斌,任吉林,宋 凯

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

摘要:传感器的设计和信号降噪分析是交流电磁场测量系统中必须解决的关键问题。通过给激励线圈施加磁芯,缩小传感器的结构尺寸,对交流电磁场传感器的检测信号部分采用差分式串联结构,并采用多级放大、滤波和检波电路,增强对小缺陷信号的检测能力。选取适当的小波,对采集信号进行小波降噪,分析由缺陷引起的扰动磁场与缺陷的关系。试验可得,采用差分式串联结构探头采集的信号峰-峰值较强,噪声较小,能够更好地提取微弱的扰动磁场信号;采用小波降噪后的信号特征能够更明显地定量反映出缺陷特征。

关键词:交流电磁场;传感器优化设计;小波分析

中图分类号: TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2009)11-0876-04

Design for the Alternating Current Field Sensor and the Analysis of Signal Based on Wavelet Denoise

REN Shang-Kun, LIN Tian-Hua, ZHU Zhi-Bin, REN Ji-Lin, SONG Kai

(Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Sensor design and signal de-noising analysis is the key issues of the alternative current field measurement system that must be addressed. Through exerting the coil core, reducing the structure size of the sensor, using differential series structure for the picking-up signal part of the sensor, and adopting the multi-stage amplification, filtering and demodulation circuits, the small defect signals were enhanced. At the same time, the appropriate wavelet mode was selected to denoise the signal acquisition, and the relationship was analyzed about the disturbance magnetic field and the caused defect. Testing results showed that, the stronger peak-peak value and low noise signal could be obtained by the optimized differential series structure sensor, so it was helpful to pick-up the weak disturbance magnetic field signal; the use of wavelet denoising method could help to reflect the signal quantitative characteristics more clearly.

Keywords: Alternating current field; Optimized sensor design; Wavelet analysis

交流电磁场检测是一种新兴的无损检测技术,近年来日益受到检测界的高度关注,在石油、化工、海洋和航空航天的无损检测领域具有广阔的应用前景^[1]。相对于常规的涡流检测和磁粉检测技术,其

在金属材料的表面和近表面缺陷检测方面有着独特的优点^[2-3],如不用标定试块、无需清洗工件、缺陷易于识别以及受提离影响较小。笔者着重研究对传感器的优化设计和对微弱信号的处理。

1 交流电磁场检测的基本原理

交流电磁场检测技术的理论基础是电磁感应原理。当有交变电流通过检测线圈时,在其周围的空间产生交变磁场,此时若靠近被测工件(导体)表面,便产生感应电流,由于集肤效应,感应电流聚集于工

收稿日期:2008-09-21

基金项目:航空科学基金资助项目(06ZF56009);江西省自然科学基金资助项目(2007GZC1587);无损检测技术教育部重点实验室基金资助项目(ZD200629001)

作者简介:任尚坤(1963—),男,博士,教授,从事电磁检测方面的教学与研究工作。

件表面。当工件无缺陷时,感应电流线彼此平行,电流近似匀强,在工件周围空间产生近似匀强的交变磁场;当被测工件表面有缺陷时,由于电阻率的变化,感应电流发生畸变,电流的匀强分布受到破坏,工件表面附近感应的磁场发生变化。依据工件表面感应磁场的变化特征,即可对工件表面裂纹的特征和损伤状况作定量评定^[4-7]。

2 交流电磁场传感器的优化设计

2.1 传感器的整体结构设计

交流电磁场检测探头的整体结构包括激励线圈部分和检测线圈部分。传感器整体结构设计的特点是通过给激励线圈施加磁芯,缩小传感器的结构尺寸。检测信号部分采用差分式和串联结构,对交流电磁场传感器进行优化设计,并采用多级放大、滤波和检波电路,增强对小缺陷信号的检测能力。

2.1.1 激励线圈的绕制特征

激励线圈绕在长方体形状的铁氧体磁芯上,铁氧体磁芯的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,用线径为 0.4 mm 的漆包线绕六层。软磁铁氧体的初始磁导率 μ_i 随激励频率的变化而变化。 μ_i 越大激励频率就越低^[6-7],反之可以使用的激励频率的范围就较宽。所以在不同激励频率下,选择使用不同磁导率的铁氧体。由于所设计探头的激励频率范围 $<1 \text{ MHz}$,故选用锰锌铁氧体。使用铁氧体的目的是增强在工件上的感应电流。影响感应电流大小的根本因素是激励线圈所产生的感应磁场的大小。

2.1.2 绕制线圈的激励电流和激励频率的感应磁场特性

通过试验,对绕制线圈的激励电流和激励频率的感应磁场特性进行研究。检测位置在绕制线圈端面中心紧靠磁芯位置,周围没有其它金属。用高斯计的交流磁场测定功能,测量磁芯表面磁场的垂直分量,分析在相同激励电流条件下不同频率对感应磁场的影响以及在相同激励频率条件下不同电流对感应磁场的影响,研究绕制线圈的激励电流和激励频率的感应磁性特征,检验励磁线圈的性能。图 1 为在 1 A 激励电流条件下,感应磁场垂直分量 B 随激励频率的变化关系。可以看出,感应磁场随激励频率的增加略有增加,并表现出线性变化的规律。这主要是由于频率的增加,磁通量的变化率增加,引起磁感应强度的增加。在 $4 \sim 6 \text{ kHz}$ 范围内,感应磁场的变化比较有规律,确定的激励电流和激励频

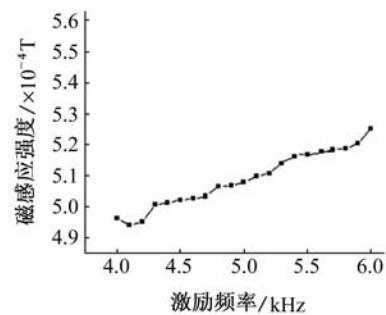


图 1 不同激励频率对应的磁感应强度

率在同一金属表面产生的磁场是平稳的,为交流电磁场检测提供一个稳定的环境。

图 2 表示在不同激励频率条件下,不同激励电流对感应磁场的影响。可以看出,在相同激励频率下,磁感应强度随电流的增大而增大;但随着电流的增加,磁感应强度呈现出饱和的趋势。这主要是由于随着电流的增加,激励线圈中的磁芯磁化渐近饱和,磁感应强度随电流的增加呈现线性关系。由图 2 可见,激励线圈电流适宜取在 $1.5 \sim 2.0 \text{ A}$ 区域内,充分发挥铁氧体磁芯的功能,由较小的激励电流产生较大的磁场。

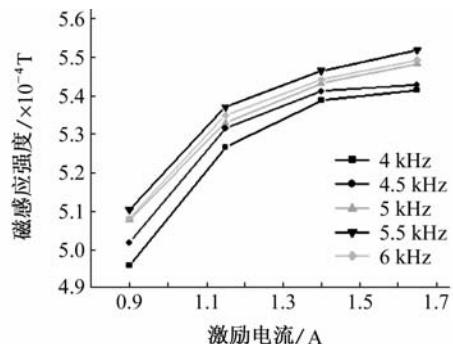


图 2 不同激励电流对应的磁感应强度

2.1.3 检测线圈的绕制

为了实现尽量大的提高,同时保证检测到微弱的扰动磁场信号,采用长为 3 mm ,直径为 1.5 mm 的圆柱形骨架,用 $\phi 0.03 \text{ mm}$ 的漆包线在两个骨架上正反两个方向各绕制 300 匝,制作两个检测探头。每个探头都采用差分式结构,两个探头之间的间距尽可能小。两个探头的输出信号串联接入加法器电路中,同时保证探头在激励线圈的正下方,保证两个检测线圈的中心在同一条水平线上。不采用差分串联结构和采用差分串联结构的检测探头,分别在带有缺陷的铝板上作检测试验,铝板上两个槽状缺陷的长分别为 15 和 10 mm ,宽均为 1 mm ,深均为 4 mm 。信号采集传感器正对着缺陷上方,提高距离

1 mm, 沿缺陷方向移动测量, 移动速度均匀。在缺陷尺寸为 $15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 和 $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 试样上采集的 B_z 信号如图 3 所示。可见, 采用差分式串联结构采集到的信号峰-峰值大于不采用差分式结构, 而且采用差分式串联结构采集的信号峰-峰值明显噪声较小。

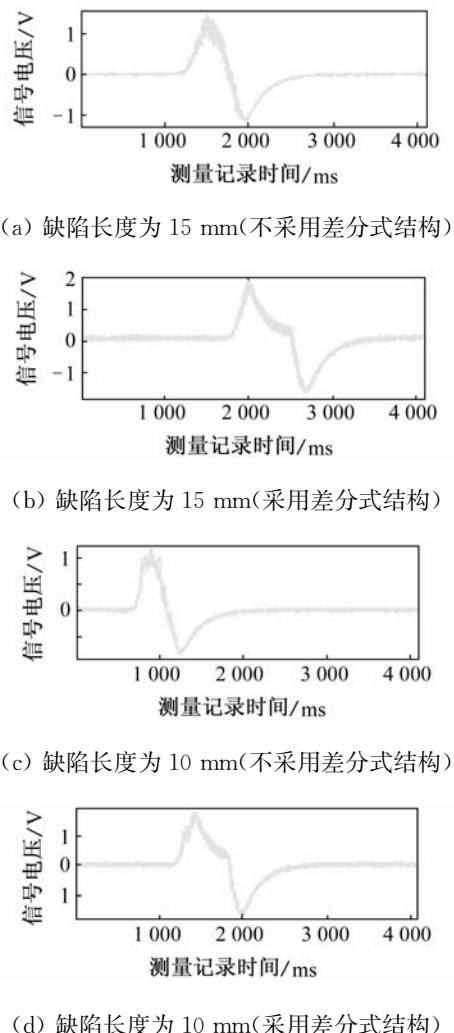


图 3 不采用差分式结构和采用差分式结构的信号

2.2 检测信号调理电路

两路差分信号采用加法器串联方式进行增强。因为缺陷引起的扰动磁场信号比较微弱, 先进入一级预放大电路, 然后通过检波电路把调制波从载波中解调出来, 再进行信号的二级放大。图 4 是调理电路流程图。

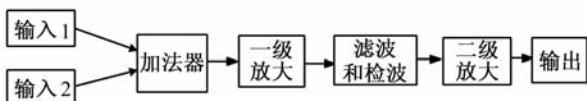


图 4 信号调理电路设计

3 信号的小波降噪处理

3.1 小波降噪的方法

对扰动磁场信号的降噪处理是交流场检测技术中的重要环节, 这里运用小波分析方法进行一维信号的降噪处理。小波降噪时, 设含噪声的一维信号的模型 $s(i)$ 为^[8]:

$$s(i) = f(i) + \sigma \cdot e(i) \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中: $f(i)$ 为真实信号; $e(i)$ 为噪声。试验发现, 使用 Haar 小波对检波后的特征信号进行去噪效果良好。Haar 小波是一个具有紧支撑的正交小波函数, 也是一种最简单的小波函数, 其数学表达式为^[8]:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 0.5 \\ -1 & 0.5 < t \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

Haar 小波的物理意义非常明确, 尺度空间是其均匀值, 是较为低频的分量; 小波空间的系数则是差值, 是高频分量, 主要是由噪声信号引起。由于系数简单, 在实时处理中, 计算方便, 具有实用性。小波降噪的基本步骤为:

(1) 一维信号的小波分解 选择一个小波并确定小波分解的层次 N , 对信号进行 N 层小波分解。

(2) 小波分解高频系数的阈值量化处理 选择适当的阈值, 对从 $1 \sim N$ 的每一层高频系数进行量化处理。

(3) 一维小波的重构 根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的从 $1 \sim N$ 层的高频系数, 进行一维小波的重构。

3.2 小波降噪的实例分析

在铝合金平板试件上, 刻上长度分别为 15, 10, 5 和 3 mm, 宽为 1 mm, 深为 4 mm 的矩形槽。试验中提离距离为 1 mm, 交流信号频率为 1 MHz。表面扰动磁场信号 B_z 的峰-峰值间距即可反映缺陷的长度信息。 B_z 的扰动磁场信号会受到其它因素的干扰, 对评定缺陷的长度有一定的影响。图 5~8 是降噪前与降噪后的波形对比图。可见, 降噪前的噪声明显大于降噪后的噪声, 说明运用小波分析进行一维扰动磁场信号的降噪处理是行之有效的。另外, 由图 5~8 可见, 随着缺陷长度的减小, 幅值下降, 说明由缺陷引起的 B_z 的扰动磁场信号受到缺陷长深比的影响, 而且, 长深比越大, B_z 的扰动磁场信号在相同激励条件下, 幅值就越大; 当长深比 > 2 时, 幅值趋于稳定。

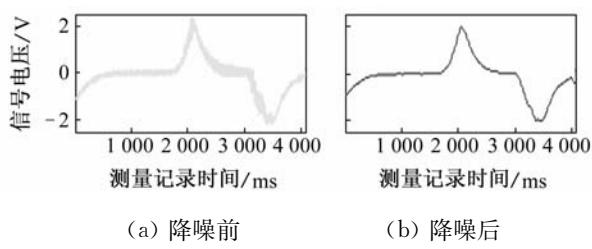


图 5 长度为 15 mm 缺陷信号降噪前后波形图

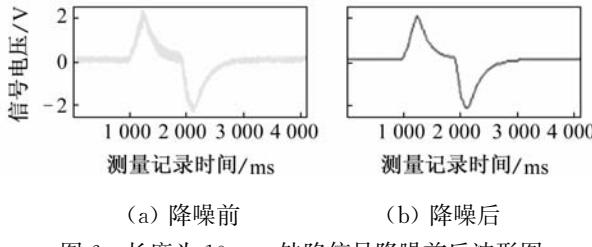


图 6 长度为 10 mm 缺陷信号降噪前后波形图

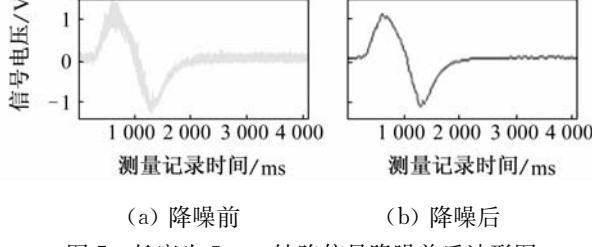


图 7 长度为 5 mm 缺陷信号降噪前后波形图

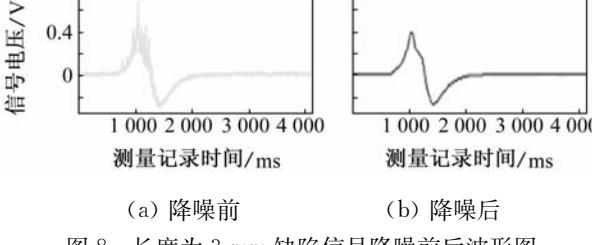


图 8 长度为 3 mm 缺陷信号降噪前后波形图

4 结论

通过给激励线圈施加磁芯、缩小传感器的结构尺寸、检测信号部分采用差分式串联结构,对交流电

(上接第 875 页)

系,结合信号相关性分析方法,建立多传感器间重叠声发射信息的识别及去除方法,为周期性故障声信号重构提供技术支持;通过对实验数据的分析,验证该方法的正确性和可行性,获取滚动轴承在 1 个周期中故障信号的较为完整的信息,为进一步的故障识别做准备。

参考文献:

- [1] 刘瑞阳.货车滚动轴承早期故障轨边声学诊断系统的

磁传感器进行了优化设计;通过采用多级放大、滤波和检波电路,增强对小缺陷信号的检测能力。采用差分式串联结构采集的信号峰-峰值较强,噪声较小,能够更好地提取微弱的扰动磁场信号;对采集信号进行小波降噪后的信号特征能够更明显地定量反映出缺陷的特征。分析了缺陷与扰动磁场的关系,说明运用小波分析进行一维信号降噪处理是可行的;同时发现,由缺陷引起的 B_z 的扰动磁场信号受到缺陷长深比的影响,长深比越大, B_z 的扰动磁场信号在相同激励条件下,幅值就越大;但是当长深比 >2 时,幅值趋于稳定。

参考文献:

- [1] 徐小杰,罗飞路,刘春艳,等.远场涡流传感器与信号调理电路优化设计及其应用[J].仪表技术与传感器,2006,(6):3-5.
- [2] 孙瑜.圆柱体表面缺陷检测的 ANSYS 仿真[J].兵工自动化,2006,25(2):38-39.
- [3] 祖先锋,康中尉,韩玉芹.场量测量在交变漏磁检测中的应用[J].测试技术学报,2006,20(2):128-132.
- [4] 康中尉,罗飞路,胡缓缓,等.交变磁场测量法数学模型及“类匀强场”的建立[J].无损检测,2004,26(11):545-551.
- [5] 陈建忠,史耀武.无损检测交变磁场测量法[J].无损检测,2001,23(3):96-99.
- [6] 齐玉良,陈国明,张彦廷.交流电磁场检测数值仿真及其信号敏感性分析[J].石油大学学报,2004,28(3):65-68.
- [7] 任晓鹏,李征,张红瑞,等.运用小波变换捕捉信号的奇异点[J].计算机工程与设计,2007,28(11):2762-2764.
- [8] Jaideva C Goswami, Andrew k Chan.小波分析理论、算法、及其应用[M].许天周,黄春光,译.北京:国防工业出版社,2007.

应用与展望[J].中国铁路,2004(8):31-35.

- [2] 李光海,刘正义.声发射源多传感器数据重构识别技术[J].计算机测量与控制,2002,10(5):345-348.
- [3] Jamaludin N, Mba D, Bannister R H. Condition monitoring of slow-speed rolling element bearing using stress waves[J]. Proc Instn Mech Engrs, 2001, 215 (part E):246-271.
- [4] 沈功田,耿荣生,刘时风.声发射信号的参数分析方法[J].无损检测,2002,24(2):72-77.