

文章编号:1674-2869(2012)04-0064-05

再制造对象磁记忆信号的特征提取方法

曾寿金^{1,2}, 刘志峰², 江吉彬¹, 陈丙三¹

(1. 福建工程学院机电及自动化工程系, 福建 福州 350108;

2. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对在工程实践中对再制造对象进行金属磁记忆检测时容易受环境磁场干扰的情况,给出一种利用小波分析和希尔伯特变换进行磁记忆信号去噪和特征提取的方法。利用金属磁记忆检测仪采集一铁磁性试件的磁记忆信号,对其中受环境磁场干扰的信号进行小波阈值去噪处理,并对去噪后的信号采用希尔伯特变换提取信号包络,最后通过求取梯度获得信号特征。试验结果表明:利用小波阈值方法进行磁记忆信号去噪效果明显,对磁记忆信号利用希尔伯特变换可以获得信号的包络,从而有效地提取信号特征。

关键词:金属磁记忆;小波分析;特征提取;阈值去噪

中图分类号: TG 115.28

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2012.04.015

0 引言

一种新的金属诊断技术——磁记忆检测技术(Metal Magnetic Memory, MMM)由 Doubov 提出^[1]。它可准确可靠地测出被测对象上以应力集中为特征的缺陷部位,为金属构件寿命评估提供依据。MMM 在再制造寿命预测领域也得到了广泛运用^[2],但在对再制造对象进行寿命预测时,常常需要考虑再制造对象的历史健康信息,采集构件在役运行状态的磁记忆信号。因此,采集得到的磁记忆信号往往容易受到现场环境磁场和构件表面状态的影响,附带有大量的噪声,对磁记忆信号真实性造成严重干扰,从而影响信号对缺陷识别的指示作用。由于磁记忆信号具有非平稳性,能量主要集中在低频段,为此,将小波变换用于分析环境磁场干扰下的磁记忆信号,去除高频噪声,提高信噪比,研究磁记忆检测信号的特征提取方法,为准确预测铁磁性材料再制造对象的剩余寿命提供依据。

1 磁记忆检测技术的机理

MMM 能用于判断缺陷或应力集中的位置的根本原因在于铁磁性金属具有的磁记忆效应。受地球磁场激励作用,在铁磁性金属应力集中区域会发生磁畴组织的定向或不可逆的重新取向,形

成类似缺陷的漏磁场分布,外载消除后该状态会继续保留,还与最大作用应力有关,金属构件的这一特性即所谓的磁记忆效应^[3]。正是由于磁记忆效应的存在,实际应用的金属构件在应力集中区域的漏磁场强度切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,法向分量 $H_p(y)$ 改变符号并具有零值,如图 1 所示^[4]。根据此特征进行漏磁信号的采集便可确定作为再制造对象的金属零件上的危险区,继而可以实现再制造对象的强度评估和寿命预测。

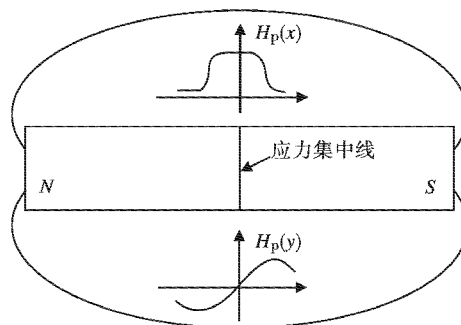


图1 磁记忆检测原理图

Fig. 1 Principle diagram of MMM

表征磁记忆检测信号特征的参数,除了法向分量 $H_p(y)$ 外,还有一个重要的参数是磁场法向分量 $H_p(y)$ 梯度值 K 。 K 可用于度量应力集中线附近的应力集中程度^[5]。可定义为:

$$K = \frac{|\Delta H_p(y)|}{2L_K} \quad (1)$$

收稿日期:2012-04-05

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50735006);“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC46B01);福建省闽港人才合作项目(MG200909);福建省教育厅科技项目(JA11190)

作者简介:曾寿金(1978-),男,福建永定人,讲师,博士研究生。研究方向:机电产品绿色制造与再制造技术。

指导教师:刘志峰,男,教授,博士研究生导师。研究方向:机电产品绿色设计与制造。

式(1)中, K 为应力集中区金属磁场强度变化表征的漏磁场梯度值, $(A/m)/mm$; $\Delta H_p(y)$ 为位于应力集中线两侧同等线段上两检测点之间磁场 $H_p(y)$ 的差, A/m ; L_K 为两测点与应力集中线之间的距离, mm .

2 磁记忆信号处理和小波分析

在再制造对象的磁记忆检测中,通过探头采集的信号包含着各种干扰和噪声,对后续的数据分析会产生很大的影响,因而需要采用适当的信号处理技术,将有用信号有效地分离出来.磁记忆信号所含的噪声来源于许多方面,但主要是受检测现场的强磁环境干扰、检测探头抖动造成的脱离干扰以及被检对象的表面缺陷干扰等三方面影响,因而信号频率成分比较复杂,具有极强的不平稳性.由于傅立叶分析方法不具有时-频局部化分析能力,只适用于分析和处理平稳信号,不适合用来分析磁记忆信号,因此,引入小波分析方法对磁记忆信号进行处理.

2.1 小波变换理论

小波变换继承和发展了窗口傅里叶变换的局部化思想,具有良好的时频特性,适用于处理局部或暂态信号,因而能有效地从信号中提取信息.通过小波基函数的伸缩和平移等运算对观测信号进行多尺度细化分析,既可以观察信号的低频概貌,又可以观察信号的高频细节,解决了傅里叶变换不能解决的许多问题,具有“数学显微镜”作用.因此,小波变换在信号滤波、去噪、压缩、传递等领域应用广泛.

设 $\Psi(t)$ 为平方可积函数空间 $L^2(R)$ 中满足下述“容许性条件”的一个函数或者信号:

$$0 < \int_0^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (2)$$

则 $\Psi(t)$ 称为小波函数或小波母函数,其中 $\Psi(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换; ω 为频域自变量.

对于任意的函数或者信号 $f(t)$, 其小波变换定义为^[6]:

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式(3)中 a 为尺度参数; b 为平移参数; Ψ 为小波函数的共轭函数.可见,小波变换是一个二元函数,这是小波变换和傅里叶变换最重要的不同点.

在工程实际中,小波变换的尺度参数实质上描述了观测信号的范围,所以小波变换可以理解为信号的多分辨率分析.多分辨率分析的思想是把信号分解成低频逼近和高频细节两部分,每次用不同的分辨率逼近越来越集中的光滑函数.

多分辨率分析只对低频做进一步分解,而不考虑高频部分.设 a_j 表示分解中低频部分, d_j 表示分解中高频部分, $f_i \in a_j$ 表示分辨率为 2^{-j} 的函数 f 的逼近,而 d_j 代表逼近的误差,则有:

$$f = f_N + \sum_{i=1}^N d_i \quad (4)$$

式(4)表明,某一函数或信号 $f(t) \in L^2(R)$ 可以根据分辨率为 2^{-N} 时 f 的低频部分和分辨率 2^{-j} ($1 \leq j \leq N$) 下的高频部分完全重构.

2.2 小波阈值去噪方法

一个含有噪声的信号模型可以表示成如下形式:

$$s(t_i) = f(t_i) + \sigma n(t_i) \quad (5)$$

式(5)中, $f(t_i)$ 为真实信号; $n(t_i)$ 为噪声; σ 为噪声强度, $i = 0, 1, \dots, N-1$.

小波变换的目的就是通过抑制噪声 $n(t_i)$ 来获取真实信号 $f(t_i)$. 利用小波变换进行去噪的方法主要有3种,即基于小波变换极大值原理去噪,基于小波系数相关性去噪和阈值去噪.由于阈值去噪是一种实现简单,效果较好的小波去噪方法,所以采用阈值法对磁记忆信号进行去噪处理,主要分3步进行:

(1)信号的小波分解. 选择合适的小波基函数,确定合理的分解层次 N ,对含噪信号 $s(t_i)$ 进行 N 层小波分解.

(2)高频系数的阈值处理. 对经分解的第1至第 N 层的每层高频系数,选择一个合适的阈值和阈值方法进行量化处理.

(3)信号的小波重构. 根据第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第1至第 N 层高频系数,完成信号的重构.

2.3 磁记忆信号的 Hilbert 变换

利用磁记忆检测仪和软件直接获得采集信号的梯度,有时会因为噪声的干扰使得梯度极大值所对应的位置变得难以判断.需要将小波消噪后的信号先进行 Hilbert 变换再求取梯度,才能进一步提取应力集中处的梯度极值.

信号的突变信息往往体现在信号的包络里,最常用的信号包络提取方法是 Hilbert 变换法.一个时域信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换定义为^[7]:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{\pi t} x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

得到 $x(t)$ 的解析信号为:

$$W(t) = x(t) + j\bar{x}(t) \quad (7)$$

对磁记忆信号而言,应力集中区的漏磁信号是奇异的,故其振幅为:

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + [\bar{x}(t)]^2} \quad (8)$$

$A(t)$ 是原始信号的包络,包含着信号的低频

成分,反映了信号的整体变化趋势.通过小波去噪的信号经过 Hilbert 变换后再求梯度值,更易于判断信号梯度极大值所对应的位置.

3 数据的采集与处理

3.1 数据采集系统及实验方法

采用某一废旧套类零件作为检测试件,材料为 Q235 钢,试件表面未作任何处理,形状及尺寸如图 2 所示.磁记忆检测设备选用厦门爱德森公司生产的 EMS-2003 金属磁记忆检测仪,磁记忆检测原理及试验系统如图 3 和图 4 所示.从图 3 可以看出,磁记忆检测仪主要由探头、信号处理电路以及计算机处理系统三个部分组成.其中,探头由磁敏传感器、温度传感器、距离传感器等传感器组成,信号处理电路由滤波器、放大器和 A/D 转换器

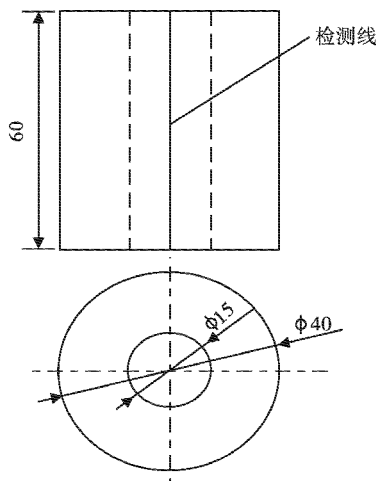


图 2 试件形状及尺寸

Fig. 2 Shape and size of specimen

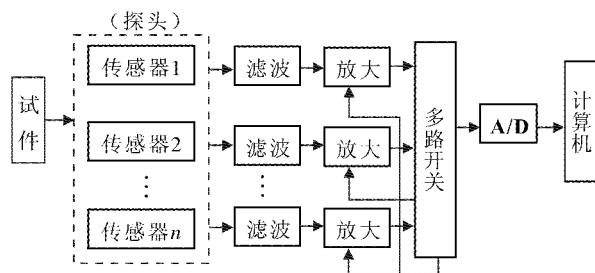


图 3 磁记忆检测仪原理框图

Fig. 3 Principle diagram of MMM instrument

在检测时,EMS-2003 金属磁记忆检测仪既可以采用点测的方式,也可以采用扫描检测的方式.笔者在试件表面选取一检测线,采用沿线扫描检测的方式进行检测.为了避免探头与试件表面距离发生改变造成提离干扰而影响检测结果,在测量的过程中要求试件不能挪动.实验分成两种不同的状态进行检测,一种是周边没有环境干扰的原始检测状态,一种是周边存在电机、铁磁性材料及其他强磁干扰环境的状态,两种状态检测的

参数完全相同.由于试验的目的是探讨环境磁场干扰下磁记忆检测信号的去噪方法与特征提取方法,为消除探头抖动带来的提离干扰,利用扫描架夹持探头进行定向运动.

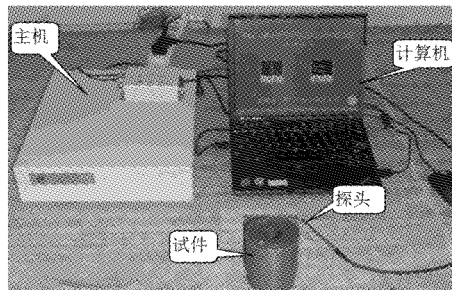


图 4 试验系统示意图

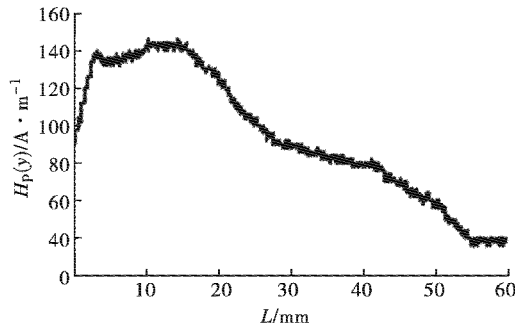
Fig. 4 Schematic diagram of test system

3.2 数据分析处理

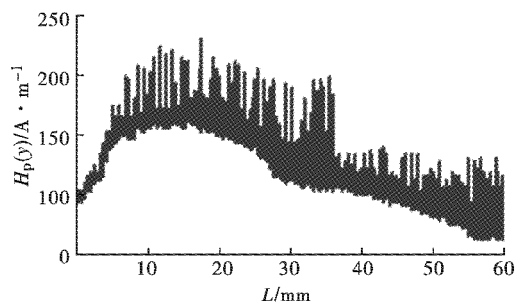
图 5 所示为由所建试验系统采集到的两种不同状态下的试件磁记忆信号.图 5(a)为无干扰状态 $H_p(\gamma)$ 曲线,图 5(b)为存在环境干扰下的 $H_p(\gamma)$ 曲线.可以看出,在没有干扰状态下,磁记忆信号曲线光滑,能清晰看出信号的变化,但在存在环境干扰的状态下,信号信噪比不高,很难辨认出应力集中部位,失去了对应力集中区的指示作用.因此,需要对环境干扰信号下的检测数据做进一步处理来反映构件的应力集中状况.首先对环境干扰状态下采集的磁记忆信号直接求取梯度值,结果如图 6 所示.梯度值是磁记忆信号的另外一个重要特征参数,如本文式(1)所示,在数值上等于两点的磁感应强度模数差与两点距离的比值.由图 6 可见,由于噪声干扰,直接求取的梯度值依然含有很强的噪声,还是无法反映真正的低频磁记忆信号的梯度变化.

为进一步提取信号特征,对采集的环境干扰状态磁记忆信号进行小波去噪.主要步骤如下:①选择合适小波基函数.小波基函数在选择的时候一般需要考虑正交性、正则性、对称性、紧支性和消失矩等五个方面因素,但任何一个小波函数都无法同时满足上述所有特性,对于磁记忆信号去噪而言,主要考虑正则性和紧支性.通过去噪效果对比数字实验,最终选择 Db4 函数.②确定分解层数.噪声一般具有一定的频带宽度,存在于一定范围的尺度参数的分解结果中.因此需要确定合理的分解层数,使得既能保证完全去除噪声,又能减少处理工作量.经过实验发现,磁记忆信号从 4 次分解开始信号波形就基本没有变化,故分解层数选为 4 层.③选择阈值.阈值的处理方法主要包括硬阈值和软阈值两类,由于硬阈值容易产生不连续性,丢失信号的有用成分,因此采用软阈值方法对采集的磁记忆信号进行处理.通过对小波分解

的第1层到第4层的每层高频系数采用 Heursure 软阈值处理,得到新的小波分解系数,最后重构信号。



(a) 无干扰状态 $H_p(y)$ 曲线



(b) 环境干扰状态 $H_p(y)$ 曲线

图5 不同状态磁记忆检测数据

Fig.5 Test data of MMM in different states

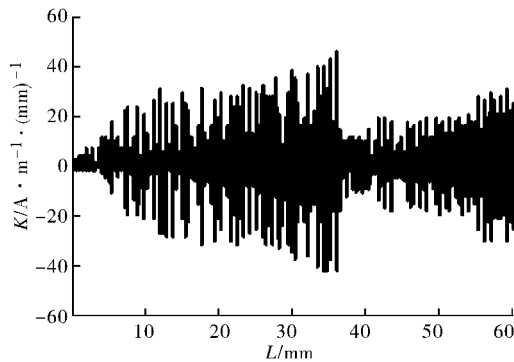


图6 环境干扰状态磁记忆信号梯度值

Fig.6 Gradient of MMM signal with interference

图7是小波滤波去噪后的信号,由图7可见信号已经得到了平滑处理,能够较清晰地看出试件各位置对应的信号变化。对比图5(a)曲线,去噪后的信号和未受干扰影响的信号基本一致,但法向磁场强度未出现过零点,仍然未出现明显的信号特征。进一步对降噪后的信号求取梯度值,如图8所示。图8中在25附近已经出现了梯度极值点,但不够清晰。

对小波降噪后的图7信号进行 Hilbert 变换,可以得到信号的包络图。再对信号包络求取梯度值,其梯度曲线如图9所示。对比图8和图9可以

看出,对包络后的信号求取梯度,比直接对信号求取梯度更清晰的显示信号梯度极值特征,能够更准确的表征应力集中区域。

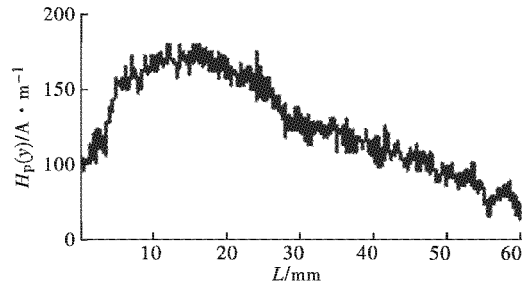


图7 小波去噪结果

Fig.7 Result after wavelet de-noising

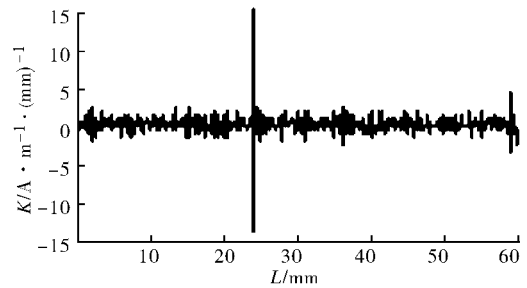


图8 小波去噪后的梯度

Fig.8 Gradient after wavelet de-noising

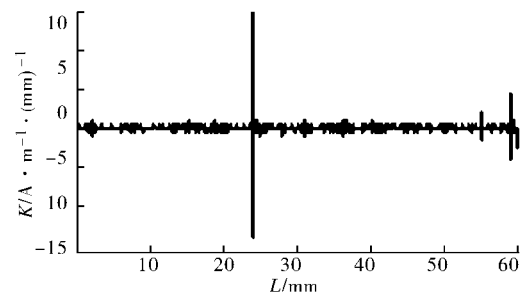


图9 对信号包络求取梯度

Fig.9 Gradient obtained from signal envelope

4 结 语

a. 对试件采集的磁记忆信号进行分析可以发现,环境磁场干扰对磁记忆检测结果有着重要的影响。若检测时环境磁场过大,则采集的观测信号会失去对应力集中区的指示作用。因此在对再制造对象进行磁记忆检测时,应尽量避免环境磁场的干扰,或者对含噪信号采用适当的去噪方法,提高应力评价的准确性。

b. 在磁记忆信号处理中,利用小波阈值去噪技术和 Hilbert 变换,可以有效地提取磁记忆信号特征,从而进一步判断铁磁性构件的应力集中状况,有望实现金属磁记忆技术对再制造对象剩余寿命的定量检测。

参考文献:

- [1] Doubov A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory[J]. *Welding in the world*, 1998, 41(6):196-199.
- [2] 董世运,徐滨士,董丽虹,等. 金属磁记忆检测技术用于再制造毛坯寿命预测的试验研究[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(5):71-75.
- [3] 张卫民,董韶平,张之敬. 金属磁记忆的现状与发展[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(10):892-896.
- [4] 任吉林,林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
- [5] 吴文秀,韩兴. 基于磁记忆检测的应力集中程度分级试验研究[J]. *石油天然气学报*. 2007, 29(1):144-146.
- [6] 王慧琴. 小波分析与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2011.
- [7] 张军,王彪,计秉玉. 基于小波变换的套管金属磁记忆检测信号处理[J]. *石油学报*, 2006, 27(2):137-140.

Feature extraction method of metal magnetic memory signals for remanufacturing objects

ZENG Shou-jin^{1,2}, LIU Zhi-feng², JIANG Ji-bin¹, CHEN Bing-san¹

(1. Department of Electromechanical and Automation Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: According to the situation that the signals are easy to be interfered by environmental magnetic field while the remanufacturing objects are tested. Using metal magnetic memory (MMM) in engineering practice, a signal de-noising and feature extraction method for MMM was proposed by using the wavelet analysis and Hilbert transform. The MMM testing instrument was used to collect the magnetic signals of a ferromagnetic specimen. The noise signals interfered by environmental magnetic field were processed by utilizing the wavelet threshold de-noising method, and meanwhile, Hilbert transform was used to extract the signal envelope. The signal feature was obtained by calculating the gradient at last. The results show that the reduction of noise is improved by using the wavelet threshold de-noising method, the envelope curve can be obtained by using Hilbert transform and the signal features can be extracted effectively.

Key words: metal magnetic memory; wavelet analysis; feature extraction; threshold de-noising

本文编辑:陈小平



(上接第 14 页)

Determination of olanzapine content by reversed phase high performance liquid

HUANG Kun^{1,2}, GUO Qing-dong², XIE Fang^{1,2}, WANG Zeng-ming^{1,2}, GUO Jia¹, MEI Xing-guo²

(1. Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Pharmacology and Toxicology, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850, China)

Abstract: To establish a high performance liquid chromatography method for determining the content of olanzapine and in orally disintegrating tablets, the best HPLC conditions were set as follows: a Venusil ASB C₁₈ (4.6 mm × 150 mm, 5 μm) column, mobile phase of buffer solution (pH = 2.5) - acetonitrile (45:55), ultraviolet absorption detector of 259 nm, column temperature of 25 °C, flow rate of 1.5 mL · min⁻¹, injection volume of 20 μL. The results show that the linearity of olanzapine is in the range of 20.33 to 203.30 μg · mL⁻¹ (r = 0.9998), the average recovery is 100.12% with relative standard deviation(RSD) of 0.33%, the limit of detection(LOD) is 1 ng. The method is sensitive, quick, repeatable, and thus it can be provided for determining the content of olanzapine and in orally disintegrating tablets.

Key words: high performance liquid chromatography; olanzapine; orally disintegrating tablets; quantitative determination

本文编辑:张 瑞