

文章编号: 0253-2697(2006)02-0137-04

基于小波变换的套管金属磁记忆检测信号处理

张 军¹ 王 彪¹ 计秉玉²

(1. 哈尔滨工业大学航天学院 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 大庆油田有限责任公司 黑龙江大庆 163453)

摘要: 套管受到非均匀载荷的作用易产生塑性变形,在应力集中区,易造成套管弯曲、变形或错断,用金属磁记忆技术可有效判断套管应力集中区域。对于含有噪声非平稳性的井下磁记忆信号,把指数小波去噪技术和希尔伯特(Hilbert)变换应用到了磁记忆的信号分析中。基于信号与噪声在小波分析中不同尺度的传播特性,利用小波非线性滤波方法消除了噪声、提高了信噪比。同时利用 Hilbert 变换得到磁记忆信号的包络线,从而有效提取了特征量。

关键词: 套管损害;应力集中;金属磁记忆技术;小波分析法;信号分析

中图分类号: TE249

文献标识码: A

Signal processing for metal magnetic memory testing of borehole casing based on wavelet transform

Zhang Jun¹ Wang Biao¹ Ji Bingyu²

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163453, China)

Abstract: The stress concentration in the imbalanced section of plastically imbalanced casing resulted from uniform load can easily make the casing bending, deforming or breaking out. The metal magnetic memory technique is an effective method for searching the stress concentration zone. For analyzing the unsteady leakage magnetic signals containing noise, the wavelet exponential denoising method and Hilbert transformation were applied to signal analysis of metal magnetic memory. As a result, the available signal can be reserved, and the characteristic quantity of magnetic signals can be obtained.

Key words: casing damage; stress concentration; metal magnetic memory technique; wavelet analysis; signal analysis

套管在非均匀载荷的作用下产生变形或损坏,在应力集中区形成弯曲、变形或错断^[1-2]。为了及时准确地找出最危险的应力集中区域,20 世纪 90 年代后期,俄罗斯学者 Doubov 率先提出了一种崭新的金属诊断技术——磁记忆检测技术(MMM)^[3-4]。该方法不仅适于对金属部件应力集中区进行早期诊断,而且可以快速检测出已经出现的金属缺陷位置。对于井下套管的金属磁记忆信号,严格来说具有非平稳特性,并主要能量集中在低频段,为此笔者将小波分析引入数据采集系统中。首先,对井下数据采用汉宁窗数字平滑技术,剔除数据中可能出现的短促干扰信号和数据中无意义的孤立野值点;其次,把指数小波去噪技术和 Hilbert 变换应用到磁记忆的信号分析中,去除了高频噪声,提高了信噪比。滤波处理后的数据比较光滑,准确提取了磁记忆信号的特征量,并及时可靠地预测了套管应力集中程度。

1 磁记忆检测技术的机理和特点

现代材料科学和铁磁学研究证明,铁磁工件在运行时受工作载荷的作用,材料内部磁畴的取向会发生变化,并在地磁环境中表现为应力集中部位的局部磁场异常,在应力集中区形成类似缺陷的漏磁场分布形式,在工作载荷消除后仍然保留,这就是磁记忆检测技术的物理基础。被测铁磁工件上的漏磁场与机械应力的变化关系为^[3-5]

$$H_p = \frac{H}{\mu_0} \quad (1)$$

式中 H_p 为被测铁磁工件上的漏磁场, A/m; H 为机械应力的变化, MPa; H 为磁弹性效应不可逆分量,与机械应力、外磁场强度和温度有关; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ H/m。

磁记忆检测技术是在地磁环境下,测量铁磁材料所制成的工件表面散射磁场法向分量 $H_p(y)$,然后确

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50232030)资助。

作者简介:张 军,男,1972 年 11 月生,2004 年毕业于哈尔滨工业大学,现在哈尔滨工业大学和大庆油田博士后工作站,主要研究方向为模型预测控制,光纤通信和地震信号处理。E-mail: zhang_jun320@sohu.com

定工件的应力集中区域(见图1)。基本定性准则是找出铁磁性金属表面磁场强度法向分量在零值线上、下剧烈变化的区域,并计算该分量梯度,在数值上等于磁场强度最大值和最小值的模数差值与两点之间距离的比值^[6],这是俄罗斯动力诊断公司的专利技术。

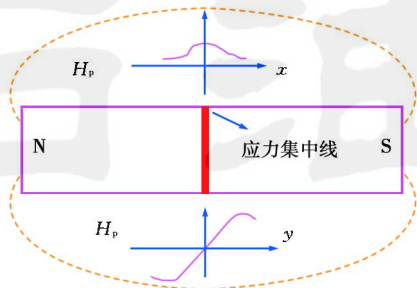


图1 磁记忆检测原理

Fig. 1 Principle of metal magnetic memory testing

磁记忆检测的特点是早期诊断,在许多情况下,最危险的是濒临损伤前的状态,而传统的无损检测方法是很难检测到的。磁记忆检测技术的主要优点是:磁记忆检测是以应力和变形集中区为标志的最危险区域的无损检测方法,进行早期诊断,较为准确地评价设备的安全性;对设备外露部分的检验无须设备停止工作,因而磁记忆检测不仅能检测正在检修的设备,也能检测正在运行的设备;无须去除被检测对象表面涂层及进行打磨等预处理,探头最大提离高度为150 mm,提离效应小;利用地球磁场,无须设置专门的磁化装置(消磁或者激磁);检测设备体积小、重量轻,同时能改善劳动条件,降低劳动强度;该方法适合于生产现场和野外作业,检测速度快,现场应用十分方便。

2 磁记忆信号处理和小波分析

在工业现场,尤其是井下的干扰和噪声对数据影响很大。在磁记忆检测中,噪声主要来源于3个方面:测量噪声;探头抖动造成提离变化产生的干扰信号;被测对象表面沉积物、支撑架等非缺陷因素产生的干扰信号。

在实际检测中,磁记忆信号属于随机信号,严格来说不具有平稳性,而利用傅立叶分析法只能笼统分析磁记忆信号的频谱性质,不具有局部的时域和频域分析特性,因此采用小波分析磁记忆信号。

2.1 数据平滑

磁记忆信号是低频微弱空间域信号,首先对采集的数据进行数字平滑,剔除数据中可能出现的短促干扰信号和数据中无意义的孤立野值点。通常采用的数字方法有平滑数字滤波、限幅滤波、加权递推滤波、维纳滤波、卡尔曼滤波以及自适应滤波等。考虑到检测

系统的实时性,采用汉宁滤波器,其表达式为

$$f(m) = \sum_{n=0}^m x(n) \cdot h(m-n) \quad (2)$$

$$h(n) = \begin{cases} 0.25 & (n=0, 2) \\ 0.50 & (n=1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中 $x(n)$ 是传感器采集的数据序列; $f(m)$ 为平滑器输出; $h(m-n)$ 为汉宁窗函数。

2.2 小波分析

小波变换具有良好的时频特性,在时域和频域同时具备定位能力。对高频分量采用逐渐精细的时域和空域步长,可以聚焦到被处理信号的任何细节,具有多分辨率的特性,在降低噪声的同时能够较好地保留边缘。因此,小波变换在信号图像降低噪声、压缩、编码等领域应用广泛。

小波是函数空间 $L^2(\mathbf{R})$ 中满足下述“容许性条件”的一个函数或者信号 $\psi(x)$:

$$C = \int_{\mathbf{R}} |\psi(x)|^2 dx < \infty \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R}^+ = \mathbf{R} - \{0\}$, 表示非零实数全体; ω 为频域自变量; $\psi(x)$ 也称为小波母函数。

对于任意的函数或者信号 $f(x)$, 其小波变换定义为^[7-8]

$$W_f(a, b) = \int_{\mathbf{R}} f(x) \cdot \psi_{(a,b)}(x) dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbf{R}} f(x) \cdot \left[\frac{x-b}{a} \right] \psi \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (4)$$

式中 a 为尺度参数; b 为平移参数; $\psi_{(a,b)}$ 为小波函数的共轭函数。

因此,对任意的函数 $f(x)$, 它的小波变换是一个二元函数。这是小波变换和 Fourier 变换不相同的地方。常用的二进离散小波变换,函数 $f(x)$ 的二进离散小波变换记为 $W_f^k(b)$, 定义为

$$W_f^k(b) = W_f(2^{-k}, b) = \int_{\mathbf{R}} f(x) \cdot \psi_{(2^{-k}, b)}(x) dx \quad (5)$$

被处理信号 $f(x)$ 的离散序列 $f(k)$ 经过低通和高通分解及二抽取,得到了二进尺度下的一组离散小波系数(细节信息)和离散近似信息(低频),即小波变换能把信号分解到表示不同频带的各个尺度上,并且重构过程是可逆的。

噪声和信号在小波变换下具有不同的特性^[9]: 噪声几乎是处处奇异的。在小波变换下,噪声的平均幅值与尺度因子 2^j 成反比,平均模极大值个数与 2^j 成反比。即噪声的能量随尺度的增大迅速减小。信号多数情况下光滑性要好一些,在较小的若干个尺度上,信号的小波变换随尺度的增大幅值不会减小;噪声在不同尺度上的小波变换是高度不相关的。信号的小波

变换则一般具有很强的相关性,相邻尺度上的局部模极大值几乎出现在相同的位置上,并且有相同的符号。

2.3 小波指数下降消除噪声方法

对于含噪声信号 $f(x)$,在小波域模型为

$$y(t_i) = f(t_i) + \sigma \cdot n(t_i) \quad (6)$$

式中 $n(t)$ 为高斯白噪声,零均值; σ 为噪声强度; $i = 0, 1, \dots, n_0$ 。

从污染的观测数据 $y(t)$ 中获得的原始信号 $f(t)$ 对磁记忆信号来说尤其重要。通常利用俄罗斯动力诊断公司提出的梯度极大值判断套管应力集中区域的位置,若数据有噪声,则求到的梯度值会严重偏离真实值,失去了磁记忆的特有“记忆功能”。

小波非线性滤波方法大致可分为以下3个步骤:

对 $y(t_i)$,进行多尺度分解(设尺度为 j) 正交小波分解,获得各尺度的小波分解系数 $W_{j,k}$ ($j = 1, 2, \dots, J$; $k = 0, 2, \dots, 2^{j-1}$); 取相应的阈值,用非线性域值函数方法(软阈值或者硬阈值)作用于小波分解系数 $W_{j,k}$,得到新的小波系数 $W_{j,k}$; 用新的小波系数 $W_{j,k}$ 进行信号重构,得到去除噪声的信号 $f(t)$ 。

为了提高信噪比,笔者采用指数下降小波消噪方法^[10]。对于小波变换的高频系数,绝对值小的噪声成分较多,绝对值大的噪声成分较少。因此,可以让绝对值大的系数基本不变,除以一个大于1而接近于1的降噪因子,较小的系数除以较大的降噪因子。

$$W_{j,k} = W_{j,k} / d \quad (7)$$

$$d = \exp(-|W_{j,k}| / a + b) + 1 \quad (8)$$

$$|W_{j,k}| = \begin{cases} \mu \cdot 2 & (d = 2) \\ 0 & (d = \mu) \end{cases} \quad (9)$$

式中 a 为常数, $[1, 10]$, 一般取 $a = 2$; μ 为 $|W_{j,k}|$ 的均值; b 为 $W_{j,k}$ 的标准差。

参数 a 和 b 为

$$a = (\mu \cdot 2) / b \quad (10)$$

$$b = \ln(\mu - 1) \quad (11)$$

得到 $W_{j,k}$ 后,通过小波逆变换即可重构 $f(t)$ 。

2.4 磁记忆信号的 Hilbert 变换

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 连续变换定义为

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{t} \cdot x(t) = \frac{1}{t} + \frac{x(t)}{t} d$$

得到 $x(t)$ 的解析信号为

$$W(t) = x(t) + j\bar{x}(t) \quad (12)$$

对符合固有模态条件的信号而言,则振幅

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

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。对磁记忆信号是合适的,因为应力集中区域的漏磁信号是奇异的。

利用俄罗斯动力诊断公司的专利和软件直接对采集信号求取梯度,有时很难判断梯度极大值所对应的区域,可比性较差。为进一步提取应力集中处的磁记忆信号极大梯度值,将小波消噪后的信号进行 Hilbert 变换,然后再求取梯度,使得“磁记忆”特征更加突出。

3 数据试验

为提高数据采集的精度,试验中采用双通道传感器,并且提高高度相同,套管长度大约为 1 m,套管材料为中碳钢,直径为 140 mm。金属磁记忆设备在套管外侧沿着直线测量,未对表面做任何处理。

俄罗斯动力诊断公司的专家在 2004 年鞍山磁记忆应用会议上提出了补充判断应力集中区域的规则,主要是通过梯度极大值区域和过零点区域来评判^[11]。图 2 和图 3 给出双通道传感器采集的平均加权后数据和梯度变化,采用俄罗斯的 TSC-1M 型硬件设备,

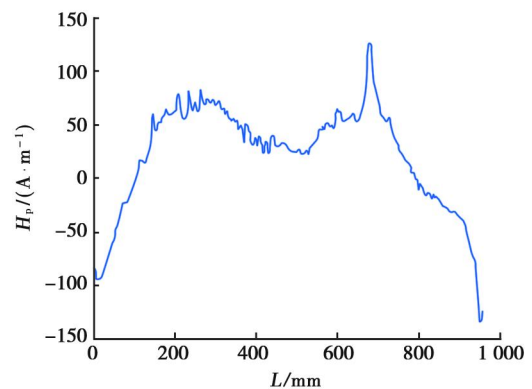


图2 通道采集的数据

Fig.2 Data of channel

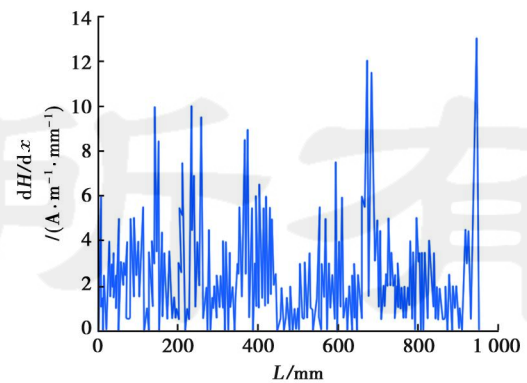


图3 梯度曲线

Fig.3 Gradient curve

MM-CYSTEM 软件,每 2 mm 采集一次数据。目前国内的磁记忆主要集中在拉伸试验,而井下套管主要是长期受到地应力的挤压作用。试验中在套管 700 mm

附近周期加载 160 kN 的压力,套管已经出现明显的微弱变形。如果不进行数据去噪处理,单纯根据俄罗斯动力诊断公司应力集中的定性判断规则,很难判断图 3 中应力集中区域,容易造成误判。如梯度极大值在 150 mm、250 mm、400 mm 附近特征较明显,但却不是应力集中区域。原因是数据采集中包含很多测量噪声,这样的梯度变化不是真正的低频磁记忆信号的梯度变化趋势。

将采集的双通道数据平均加权后,先采用汉宁窗口预处理。对平滑后的数据进行小波去噪,具体步骤如下:小波基函数选择:Db 系列小波正交,紧支,对不规则信号敏感,消失矩阶数适中。通过大量数字试验,选择 Db4 函数。分解层数:小波分解层数对于消噪的效果影响很大,若分解层数过多,会导致对所有的小波空间的系数都进行阈值处理,这样会造成信号的严重的损失,消噪后的信噪比反而下降,同时计算负荷增大;若分解层数过少,则噪声很难全部提取出来,信噪比提高不多。经过对比,分解层数选为 4 层。阈值选择:对小波分解的第一层、第二层高频系数;根据小波指数下降方法得到新的小波分解系数序列,然后重构信号。

图 4 是滤波后的信号经过 Hilbert 变换的包络图,从图中可以看到在 700 mm 时变化幅值最大,这里是信号发生突变的区域,即应力集中区域。图 5 的梯度

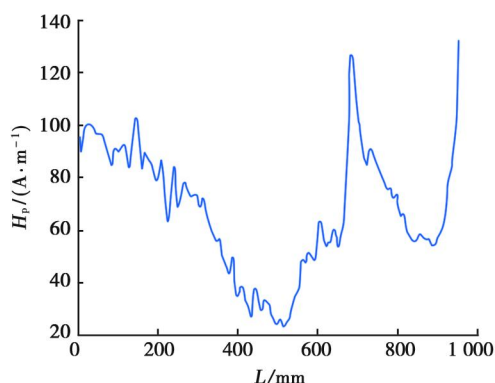


图 4 小波消噪后的包络图

Fig. 4 Envelope curves of wavelet after denoising

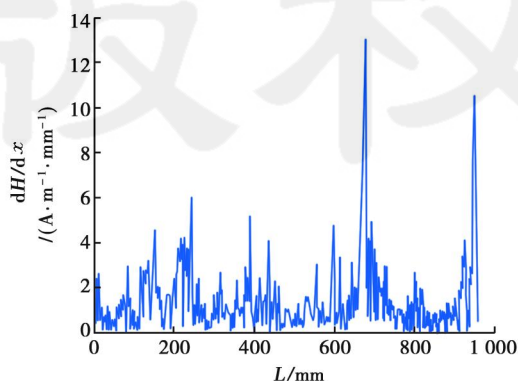


图 5 包络的梯度

Fig. 5 Gradient curve of envelope

曲线中同样有梯度极大值,其他地方梯度没有明显的特征。这样,梯度变化很好地指示了应力集中区域(梯度极大值和过零点区域),与实际套管出现变形区域的位置相同(700 mm)。边缘的梯度最大值不予考虑,原因是传感器在边缘处提高高度发生了变化。

通过大量试验,利用基于小波指数下降方法去除噪声技术有效地滤掉了高频噪声,使得信号光滑,Hilbert 变换后的包络图更准确地表明了梯度最大区域。

4 结 论

(1) 通过多次不同压力载荷的试验发现,金属磁记忆方法能有效检测出应力集中区域,套管的最终损坏和变形区域都是发生在应力集中区域,两者对应关系准确,灵敏度高。

(2) 在磁记忆分析软件中利用了指数小波去噪技术和 Hilbert 变换,可以有效地提取磁记忆信号的最大梯度特征量,准确确定套管应力集中区域,适应井下复杂的环境。

(3) 井下套管的磁记忆信号和应力的对应关系(定量化)及危险等级的确定,可以通过大量的试验样本和神经网络、支持向量机分类等方法来解决。将金属磁记忆应用到井下套管检测,预防套损井发生,具有重大的经济效益。

参 考 文 献

- [1] 马振国. 用磁记忆检测技术预测井下套管故障[J]. 石油矿场机械, 2004, 33(6): 99-101.
- [2] 李军, 陈勉, 张辉. 定向井套管应力随地应力条件的变化规律研究[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 109-112.
- [3] Doubov A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory[J]. Welding in the world, 1998, 41(6): 196-199.
- [4] 温伟刚, 萨殊利. 金属磁记忆检测的机理及实现[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(4): 67-70.
- [5] 任吉林. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 32-58.
- [6] 张卫民, 董韶平. 金属磁记忆的现状与发展[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10): 892-896.
- [7] 冉启文. 小波变换与分数傅立叶变换理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 18-20.
- [8] 王潜龙, 王冶, 冯全科. 钻进过程中基于小波包理论的岩性识别研究[J]. 石油学报, 2005, 25(3): 91-94.
- [9] 刘东辉, 陈德志. 一种基于小波分析的除噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 21(6): 636-637.
- [10] 杨风暴, 韩焱. 图像的小波指数降噪法及其应用[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 61-64.
- [11] 杜波夫. 金属磁记忆方法和已知磁无损检测方法的原则性区别[G]. 2004 年全国电磁(涡流)检测技术研讨会论文集. 北京: 无损检测学会, 2004: 182-185.