

Application of Denoising Method Based on Wavelet Packet in Metal Magnetic Memory Testing Signal Processing

Shujun Liu, Zhuxin Li, Yi Su, Zhen Zhang

Dept. of Petroleum Supply Engineering, LEU, Chongqing, China

Email: 119042856@qq.com

Abstract: In the paper, the wavelet packet denoising theory is applied to MMM signal processing. Through an example, the wavelet packet denoising method is verified. It can greatly eliminate signal noises and increase the SNR. the wavelet packet is an ideal tool for MMM signal processing.

Keywords: Metal Magnetic Memory; Wavelet Packet; Denoising

小波包降噪在金属磁记忆检测信号处理中的应用

刘书俊, 李著信, 苏毅, 张镇

后勤工程学院 军事供油工程系, 重庆, 中国, 401311

Email: 119042856@qq.com

摘 要: 将小波包降噪理论应用于金属磁记忆检测(MMM)信号的处理, 试验表明, 小波包降噪能有效地消除噪声, 提高信噪比, 是金属磁记忆检测信号处理的理想工具。

关键词: 金属磁记忆检测; 小波包; 降噪

1 引言

20 世纪 90 年代, 俄罗斯学者 Doubov 率先提出金属磁记忆检测技术^[1]。它是迄今为止管道缺陷早期诊断和预报方面唯一可行的无损检测方法。其原理可以简述为: 处于地磁场环境下工作的铁磁性管道受载荷的作用, 内部会发生磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向, 并在应力与变形集中区形成最大的漏磁场 H_p 的变化, 即应力集中区域的磁场切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零值点, 如图 1 所示。通过测定漏磁场法向分量 $H_p(y)$, 计算梯度值 $K = dH_p(y)/dx$, 即可推断铁磁性管道的应力集中区。

对于采集到的金属磁记忆检测信号进行数字信号处理, 分析信号特征是能否成功判定应力集中存在与否的关键。由于在检测过程中不可避免的有噪声混入, 而且磁记忆信号非常微弱, 使得噪声的干扰更为严重, 因此如何将有用信号从背景噪声中提取出来, 实现信噪分

离是首先要解决的问题。传统的基于傅立叶变换的降噪方法, 只能用于信号和噪声频带重叠部分非常小或者两者完全分离的情况下, 通过滤波的方法将信号和噪声分开。磁记忆信号谱和噪声是任意重叠的, 使用传统傅立叶方法不能达到有效降噪和提取有用信号的目的, 而小波变换具有数学显微镜的称号, 具备“自动对焦”功能, 能有效地区分有用信号和噪声^[2]。

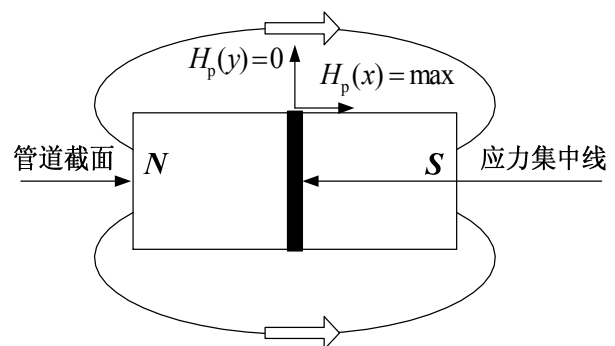


Figure 1. Schematic of magnetic memory method

图 1 磁记忆检测原理图

基金项目: 中国人民解放军总后勤部项目(油 20040207)“输油管道剩余寿命预测技术及装备研究”资助。

2 小波包^[3-5]

小波包分析是从小波分析延伸出来的一种对信号进行更加细致的分解和重构方法。在小波分析中每次只对上次分解的低频部分进行再分解，对高频部分则不再分解，故在高频频段分辨率较差。小波包分析不但对低频部分进行分解，而且对高频部分也做了二次分解，所以小波包可以对信号的高频部分做更加细致的刻画，对信号的分析能力更强，小波的分解过程和小波包的分解过程如图 2 所示。

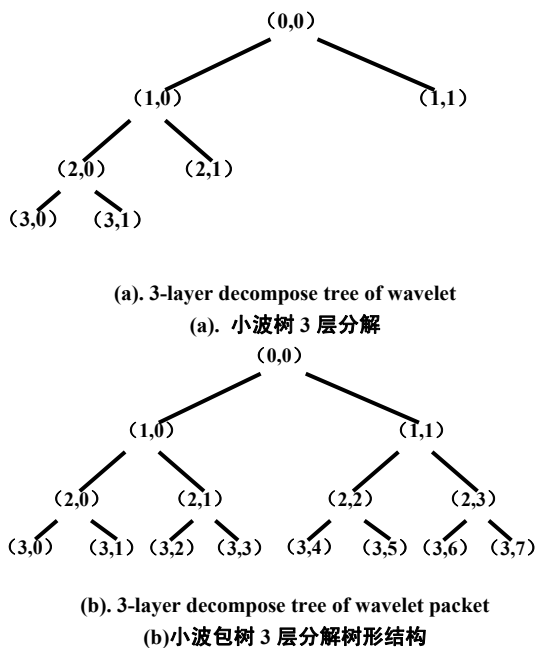


Figure 2. 3-layer decompose tree of wavelet and wavelet packet
图 2. 小波和小波包分解过程

3 小波包降噪步骤^[6]

通常，利用小波包对信号降噪可以按照以下步骤进行：

- 1) 信号的小波包分解：选择一个小波基并确定一个小波分解的层次 N ，然后对信号进行 N 层小波包分解。
- 2) 计算最佳树（即确定最佳小波包基）：对于一个给定的熵标准，计算最佳小波包分解树。
- 3) 对各个分解尺度下的高频系数选择一个适当的阈值进行阈值量化处理：为了得到最优的结果以满足特定的分析和信息评价标准，阈值要通过反复实验不断调整来确定。
- 4) 小波包重构：根据第 N 层的小波包分解低频系数

和量化处理系数进行小波重构。

在这四个步骤中，最关键的是如何选择阈值和如果进行阈值的量化，从某种程度上说，它直接关系到信号降噪的质量。

4 阈值选择

4.1 基于 Donoho 提出的阈值算法^[7]

经典的阈值选择是基于 Donoho 提出的阈值算法，对小波系数进行阈值处理有两种方法。即软阈值算法

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k})(|W_{j,k}| - \lambda), & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j,k}| \leq \lambda \end{cases}, \text{ 硬阈值算法}$$

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} W_{j,k}, & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j,k}| \leq \lambda \end{cases}. \text{ 式中: } W_{j,k} \text{ 为含噪信号小波}$$

变换后的小波系数， λ 为阈值， $\hat{W}_{j,k}$ 为经过阈值降噪处理后的小波系数估计值。

4.2 改进型阈值

由于软、硬阈值方法自身存在的缺点^[8]，直接使用降噪效果都不是很理想。易方等提出一种改进型的阈值处理函数^[9]。表达式为

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \alpha \text{sgn}(W_{j,k})(|W_{j,k}| - \lambda) + \sqrt{1 - \alpha^2} W_{j,k}, & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j,k}| \leq \lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\alpha = \exp(-(|W_{j,k}| - \lambda)^2 / m)$ ， m 是正常数项。当 $m \rightarrow 0$ ， $\alpha \rightarrow 0$ ，改进阈值函数 $\hat{W}_{j,k}$ 变为硬阈值函数；当 $m \rightarrow \infty$ ， $\alpha \rightarrow 1$ ，改进阈值函数 $\hat{W}_{j,k}$ 变为软阈值函数。它克服了硬阈值函数在 $\pm\lambda$ 处是不连续的缺点，提高了重构信号的光顺性；同时克服了软阈值函数存在恒定偏差的缺点。

5 小波包降噪实例分析

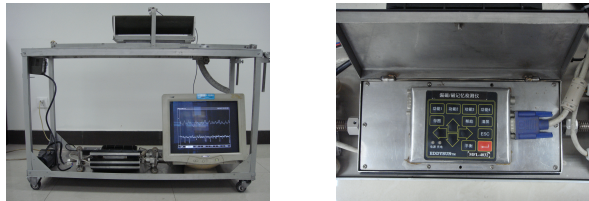
5.1 试验材料

试验选用一段长 1000mm 的 UGY-94 输油管道，材质为 X60JY 带钢。在其上设置了 9 处早期微裂纹缺陷，分别位于 136mm、181mm、322mm、372mm、526mm、569mm、752mm、776mm、959mm 处。

5.2 信号采集

试验采用课题组与厦门爱德森公司联合研发的 MFL-4032 漏磁/磁记忆检测仪对钢管进行磁记忆信号采集，如图 3 所示，该检测仪磁记忆探头通道数为 16

个，现在仅对 1 通道检测信号进行分析。



(a)MMM experiment platform (a)试验台架
(b)MMM Control panel (b)仪器控制面板

Figure 3. Experiment equipment
图 3. 试验设备

5.3 信号降噪

如图 4、图 5，对比分析检测信号 $H_p(y)$ 与梯度值 K ，由于试验采集的曲线，峰值毛刺较多，仅仅依照俄罗斯动力诊断公司的定性判断应力集中规则^[10]，无法明确地对图中的应力集中区域进行标示。

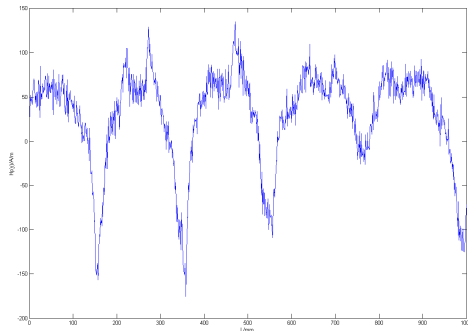


Figure 4. MMM signal
图 4. 检测信号

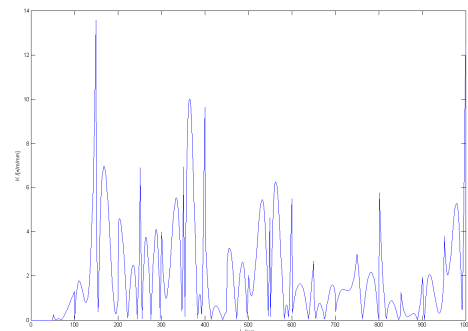


Figure 5. gradient K
图 5. 信号梯度曲线

5.3.1 小波降噪

将试验采集的信号进行小波降噪，其步骤为：在 MATLAB 7.1 中小波分析 GUI 中选择 db2 小波，分解层数为 4 层。降噪后的信号曲线如图 6 所示，相应的梯度曲线如图 7 所示。从 $H_p(y)$ 看，在 181mm、

371mm、529mm、565mm 位置曲线过零点，梯度值在对应的位置也存在极大值。可以判定钢管以上位置有应力集中或缺陷。但在 100~150mm、315~330mm、725~800mm、925~970mm 处，由于降噪效果不够理想，仍然存在峰值毛刺的干扰，导致无法进一步对应力集中或缺陷进行判定。

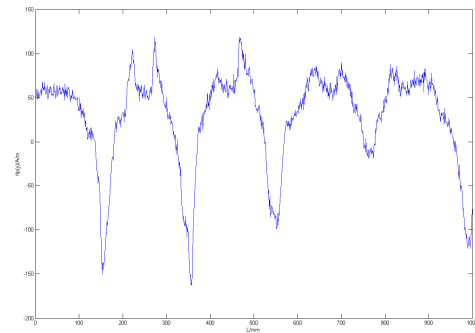


Figure 6. MMM signal after wavelet denoising
图 6. 小波降噪后的曲线

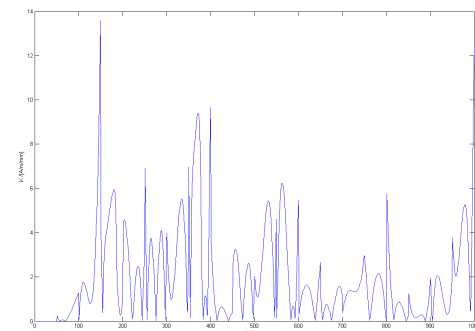


Figure 7. gradient K after wavelet denoising
图 7. 信号梯度曲线

5.3.2 小波包降噪

将所采集的信号进行小波包降噪，分析小波选用 db2 小波，分解层数为 4 层，小波阈值采用易方等提出的改进型小波阈值^[9]。降噪后的信号曲线如图 8 所示，相应的梯度曲线如图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出，信号经过小波包降噪后，基本消除了峰值毛刺的干扰，信号梯度变化也可以较好地指示应力集中区域。根据俄罗斯动力诊断公司的定性判断应力集中规则，很容易判定管道在 136mm，181mm、324mm、371mm、529mm、565mm、750mm、777mm、958mm 处存在应力集中或缺陷，这与实际情况基本吻合。

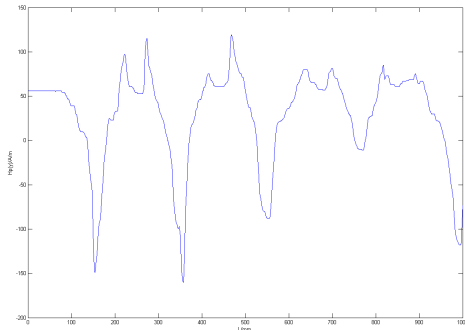


Figure 8. MMM signal after wavelet packet denoising
图 8.小波包降噪后的信号曲线

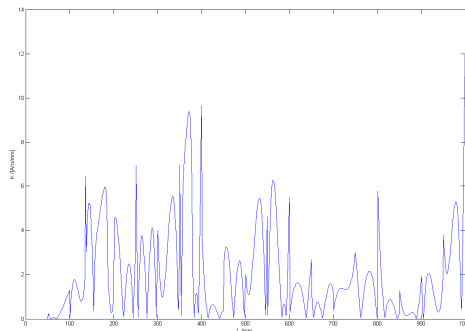


Figure 9. gradient K after wavelet packet denoising
图 9.信号梯度曲线

使用降噪处理后磁记忆信号的信噪比 SNR 和均方误差 $RMSE$ 对小波和小波包降噪进行评判。即

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_N s^2(n)}{\sum_N [s(n) - \hat{s}(n)]^2} \right) \quad (2)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_N [s(n) - \hat{s}(n)]^2} \quad (3)$$

式中: $s(n)$ 为原始信号, $\hat{s}(n)$ 为小波阈值降噪后的估计信号, N 为采样点。

Table 2. SNR and $RMSE$ of wavelet and wavelet packet

表 2.小波和小波包降噪的信噪比和均方根误差

性能指标	降噪算法	
	小波	小波包
SNR /dB	25.127	31.003
$RMSE$ /dB	0.341	0.302

从表 2 可以看出小波包降噪信噪比和均方根误差指标优于小波降噪方法。

6 结论

磁记忆检测信号非常微弱, 噪声干扰非常严重。本文将小波包降噪理论应用于金属磁记忆检测信号的处理, 通过试验证明, 小波包降噪效果优于小波降噪, 能有效地消除噪声, 提高信噪比, 是金属磁记忆检测信号处理的理想工具。

References (参考文献)

- [1] Doubov A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9/10): 401-405.
- [2] özkaramanli H. &özmen B. Comparative image compression performance analysis of multi- wavelets constructed using B-spline super functions [J]. Electronics Letters, 2003, 39(22).
- [3] HE Zheng-jia, CHAI Yanyang et al. Fault Diagnosis Principles of Non-stationary Signal and Applications to Mechanical Equipment[M]. Beijing:HIGHER EDUCATION PRESS,2000. 何正嘉, 瞿艳阳等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 何正嘉, 瞿艳阳, 张西宁. 现代信号处理及其工程应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007
- [5] Beijing E-FECIT Infa-Tech Co.,LTD. MATLAB APPLICATION AND MATLAB7[M]. Publishing house of electronics industry, 2005
飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [6] FAN Xian-feng,JIANG Xing-wei. Singnal de-noise based on wavelet packets transform[J]. JOURNAL OF INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2003, 7: 809-811.
范显峰, 姜兴渭. 基于小波包变换的信号去噪方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 7: 809-811.
- [7] Donoho DL. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995,41(3): 613-627.
- [8] Pan Quan, Zhang Lei, Dai Guanzhong, et al. Two denoising methods by wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999,47(12): 3401-3406.
- [9] YI Fang, LI Zhu-xin, SU Yi, WANG Pengfei,WU Hao. Denoising algorithm for metal magnetic memory signals of oil pipeline based on improved wavelet threshold[J]. ACTA PETROLEI SINICA. 2009, 30(1): 141-144.
易方, 李著信, 苏毅, 王鹏飞, 吴昊. 基于改进型小波阈值的输油管道磁记忆信号降噪方法[J]. 石油学报. 2009, 30(1): 141-144.
- [10] Doubov A.A. Principle features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT methods [J]. CINDE Journal, 2006, 27(3):16-20.