

文章编号: 1001-3806(2014)04-0546-05

## 小波和稀疏分解在非连续性薄膜去噪中的应用

陈功, 朱锡芳, 许清泉, 徐安成, 杨辉

(常州工学院 电子信息与电气工程学院, 常州 213022)

**摘要:** 为了在传感器测量锂电池非连续性膜厚前不需测量 C 型机构的固有频率和扫描振动频率, 采用 3 层小波-阈值判断-稀疏分解信号处理去噪方法, 进行了理论分析和实验验证。该方法不需固有频率和扫描振动频率的先验知识, 在不同 C 型机构扫描速率模式下, 通过迭代选取最佳匹配的原子序列保留锂电池薄膜厚度分布, 滤除局部噪声波动, 实现稀疏迭代去噪。结果表明, 相对于小波算法, 在缺乏先验知识的条件下, 稀疏分解算法具有较好的去噪性能, 其均方差值达  $5\mu\text{m} \sim 7\mu\text{m}$ , 是一种操作简单、可行有效的方法。

**关键词:** 信号处理; 去噪; 稀疏分解; 锂电池薄膜

中图分类号: TP274

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.022

### Applications of wavelets and sparse decomposition in non-continuous film de-noising

CHEN Gong, ZHU Xifang, XU Qingquan, XU Ancheng, YANG Hui

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** In order to avoid measuring the inherent frequency and the scanning vibration frequency of C-dynamic scanning system before measuring discontinuous film thickness of lithium battery with laser sensors, the 3-layer wavelet-threshold judgment-sparse decomposition signal processing de-noising method was used. Theoretical analysis and experimental verification were made. Without prior knowledge of the inherent frequency and the scanning vibration frequency and under different C-dynamic scanning mode, the best-matching atomic sequence was selected by iteration and the film thickness distribution of lithium battery was reserved, fluctuations of the local noise were filtered and sparse iterative de-noising was realized. The results show that comparing with the wavelet algorithm and in the absence of the prior knowledge, sparse decomposition algorithm has better de-noising performance and is a simple, practical and effective method. Mean square error of sparse decomposition algorithm is  $5\mu\text{m} \sim 7\mu\text{m}$ .

**Key words:** signal processing; de-noising; sparse decomposition; film of lithium battery

### 引言

利用 C 型扫描机构可以实现锂电池薄膜的实时、在线、自动测量, 但是在扫描过程中存在不同扫描速率下的动态噪声<sup>[1-3]</sup>。采用 3 层-阈值-7 层多

分辨率小波算法可以实现非连续性锂电池薄膜精确去噪, 但是该算法需要测量 C 型扫描机构固有频率以及该机构在不同速度扫描时振动激励下振动频率, 由此决定小波分解层数和重构系数<sup>[1-2]</sup>。

MALLAT 和 ZHANG 所提出的稀疏分解是近年来的研究热点, 已经在图像、视频、医学信号处理等方面得到了广泛的应用<sup>[4-11]</sup>, 稀疏分解算法可以在缺乏噪声的统计特性的条件下, 自适应地选择合适的基函数来完成信号的分解, 可以利用字典的冗余特性捕捉原始信号的自然特征<sup>[12]</sup>。

锂电池薄膜生产过程中, 针对锂电池薄膜的非连续性, 首先采用 3 层小波算法实现初步去噪, 采用阈值判断滤除铝膜部分, 最后采用稀疏分解算法通过迭代滤除连续性锂电池薄膜扫描振动噪声, 重构

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20130245); 江苏省常州市科技计划资助项目 (CE20120071); 江苏省常州市高新区科技发展计划资助项目 (XE120121408); 常州市光电子材料与器件重点实验室资助项目 (20130694)

作者简介: 陈功 (1979-), 男, 博士, 讲师, 现主要从事光、声信号与信息处理的研究。

E-mail: realchengong@sina.com

收稿日期: 2013-08-20; 收到修改稿日期: 2013-09-02

锂电池实际膜厚。该算法不需测量 C 型扫描机构固有频率和扫描振动频率,能适应不同扫描速度下的薄膜测厚。

## 1 多分辨率小波和阈值判断

### 1.1 3 层小波算法实现初步去噪

由参考文献[2],当锂电池生产线且和 C 型机构同时运行,采用 3 层小波和阈值联合去噪实现动态误差初步去噪。

在工业环境下包含涂层薄膜和铝膜实时厚度分布公式  $v(n) = d - s_1(n) - s_2(n)$ 。其中  $d$  为上下传感器修正后的垂直间距值,  $s_1(n)$  为上传感器到上薄膜表面间距,  $s_2(n)$  为下传感器到下薄膜表面间距,  $n$  为对静态薄膜的采样点数,  $n = 1, 2, \dots, N$ , 其中  $N$  为最大采样点数,小波分解层数为 3。可采用多尺度分解公式和重构过程得到处理后厚度分布值  $v'(n)$ 。其多分辨率分解过程:

$$\begin{cases} a_0(n) = v(n) \\ a_j(n) = \begin{cases} \sum_{k=2n+1}^{2n+8} a_{j-1}(k)h_0(k-2n), & (k \leq N) \\ 0, & (k > N) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $a_j(n)$  为 3 层小波处理中的低频段小波分解系数,  $j$  为小波分解层数, 在 3 层小波处理中  $j = 1, 2, 3$ ;  $k$  为中间变量,  $k$  的取值范围为正整数;  $h_0(k-2n)$  为 3 层小波处理中的低通数字滤波器的离散值,  $h_0(k-2n)$  实现高频信号的滤除, 其取值范围为  $h_0(1) \sim h_0(8)$ 。实验证明, db4 小波基函数的选取, 可以使重构误差最小, 其构造为:

$$\begin{cases} h_0(1) = 0.230377813308896 \\ h_0(2) = 0.714846570552915 \\ h_0(3) = 0.63088076793986 \\ h_0(4) = -0.0279837694168599 \\ h_0(5) = -0.187034811719093 \\ h_0(6) = 0.0308413818355607 \\ h_0(7) = 0.0328830116668852 \\ h_0(8) = -0.010597401785089 \end{cases} \quad (2)$$

根据(1)式计算获得  $a_3(n)$ , 将  $a_3(n)$  代入下述

$$\text{重构过程: } a_2'(n) = \sum_{k=\frac{n-8}{2}}^{\frac{n-1}{2}} a_3(n)h_0(n-2k), a_1'(n) =$$

$$\sum_{k=\frac{n-8}{2}}^{\frac{n-1}{2}} a_1'(n)h_0(n-2k), v'(n) = a_0'(n)$$

其中,  $a_j'(n)$  为 3 层小波处理中的小波重构公式,  $a_0'(n)$  为 3 层小波处理中的第 0 层小波重构公式,  $h_0(n-2k)$  为 3 层小波处理中的低通数字滤波器的离散值,  $h_0(n-2k)$  实现高频信号的滤除,  $h_0(n-2k)$  的范围为  $h_0(1) \sim h_0(8)$ ,  $v'(n)$  为 3 层小波处理后的厚度分布值。

图 1 中突出的部分为含噪锂电膜分布, 凹陷的为铝膜分布。图中 1 层~2 层小波算法并不能有效滤除扫描振动噪声, 第 4 层小波算法将锂电膜和铝膜的交替分布看成是周期性噪声滤波, 滤波结果不能反映实际锂电池薄膜分布。第 3 层小波既实现初步滤波又能如实反映实际锂电膜分布。

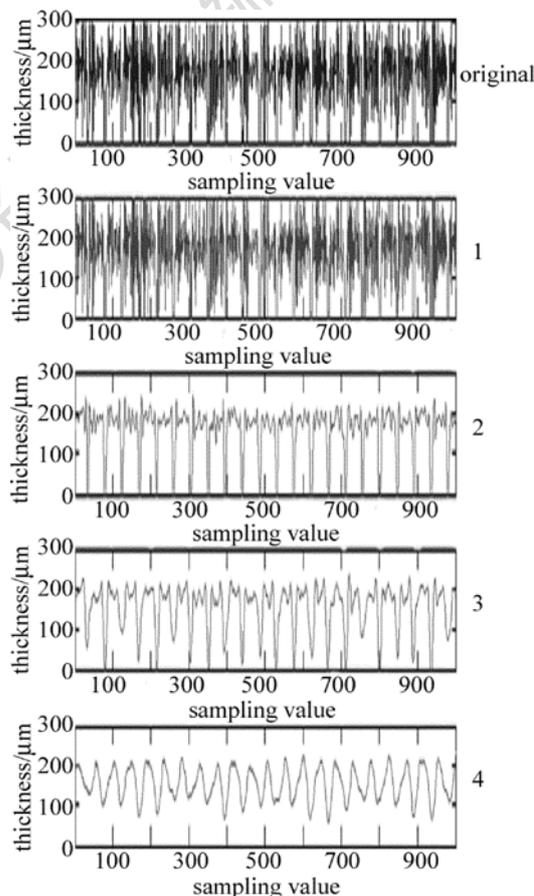


Fig. 1 Data of film thickness of dynamic scanning and data of 1~4 layers wavelet de-noising (from top to bottom)

### 1.2 阈值判断实现锂电池薄膜连续化

非连续薄膜中含有铝膜部分, 因此需要滤除无用的信息, 本文中采用阈值上下限分割法实现非涂层(铝膜)厚度的去除。设阈值如下所示:

$$v_1(n) = \begin{cases} v'(n), & (g_1 < v'(n) < g_2) \\ 0, & (\text{else}) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $g_1$  为阈值下限,  $g_2$  为阈值上限。阈值上下限的设置要求是既能去除非涂层(铝膜)的厚度, 同时要尽可能保留较多的有效膜厚信息。

经实验中上下限阈值分别取为  $170\mu\text{m}$  和  $200\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。设  $N$  个  $v_1(n)$  信号的平均值为:

$$d_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_1(n) \quad (4)$$

图 2a、图 2c 和图 2b、图 2d 分别为扫描速率  $41\mu\text{m/s}$  和扫描速率  $34\mu\text{m/s}$  时, 3 层小波和阈值判断后对比图。

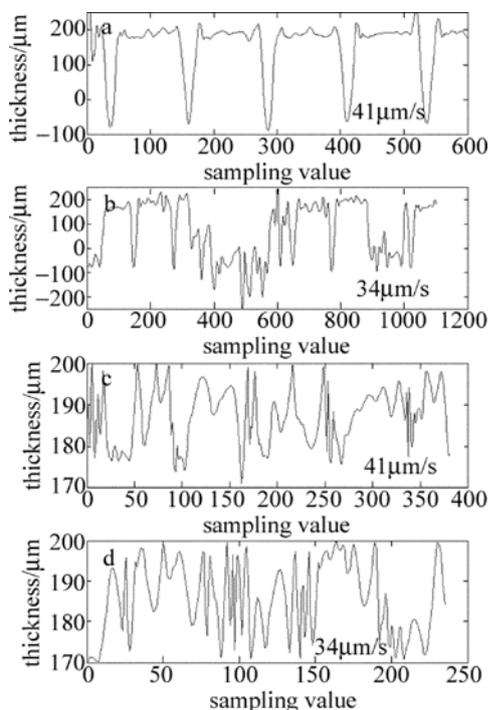


Fig. 2 Contrast between the three-layer wavelet and threshold algorithm

由图 2 可知, 在不同的 C 型机构扫描速率下, 虽然阈值判断滤除了铝膜成分, 保留了连续性锂电池薄膜分布, 但是薄膜的分布波动性较大, 且保留了不同扫描速度下 3 层小波未滤除的动态噪声, 事实上, C 型移动机构的振动频率在不同扫描速率下一致且频率主要集中在 130Hz, 当采样频率为 1kHz 时, 4 层小波的频带分布能够有效区分误差和膜厚信号。因此需要进一步采取措施滤除动态噪声。而 4 层小波算法, 需要测量 C 型机构的固有频率以及该机构在不同速度扫描时振动激励下振动频率, 由此决定小波分解层数和重构系数, 而采用稀疏去噪算法则能解决上述问题。

## 2 连续性膜厚信号的 MP 稀疏去噪

稀疏匹配跟踪(matching pursuit, MP)算法是一种自适应信号分解迭代算法, 在每次迭代过程中都会在一个高度冗余的过完备字典中选择最匹配的原子来逼近信号的局部时频结构。从膜厚去噪角度看, 膜厚信号结构特性上波动性较小, 分布比较平缓, 具有一定结构且结构特性与原子特性吻合; 而振动噪声的局部波动性较大, 随机不相关, 没有结构特性。如果能从含噪信号中提取有意义的原子, 则提取出的部分为薄膜分布信号; 如果不能继续从信号残差中提取有意义的信号, 则认为信号残差中全是噪声。在信号稀疏分解迭代过程中, 每次分解迭代过程都选择与信号或信号残差内积最大的原子, 分布比较平缓的膜厚信号首先被提取, 随后开始逐步提取局部分布的噪声细节信息, 稀疏分解就是不断跟踪并提取最能匹配于原始信号及其残差信号原子相向量的过程, 这些被提取的原子向量即为实际膜厚分布。迭代终值条件采用相干比来判断。

其具体实现步骤如下。

(1) 定义 Hilbert 空间中一个过完备字典  $D = \{g_{\gamma_m}(t)\} (m=0, 1, \dots, M-1)$ 。其中  $M$  为迭代终止值,  $\|g_{\gamma_m}(t)\| = 1$ 。在字典构造时一般选取 Gabor 原子, 其公式如下<sup>[12]</sup>:

$$g_{\gamma_m}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) \cos(\nu t + \omega) \quad (5)$$

式中,  $t=1, 2, \dots, T$ ,  $T$  为原子信号长度,  $g(t) = e^{-\pi t^2}$  是高斯窗函数,  $\gamma = (s, u, \nu, \omega)$  是时频参量,  $s, u, \nu, \omega$  分别表示原子的伸缩、位移、频率和相位。

(2) 设 C 型机构以某一速度动态测量时所测信号为  $x(p)$ ,  $p=1, 2, \dots, P$ ,  $P \geq T$ ,  $P$  为信号长度。令  $x(p) = R_0 x$ , 其中  $R_0 x$  为初始残差信号。

(3) 通过 MP 算法选择最佳原子  $g_{\gamma_0}(t) \in D$ , 使得  $|\langle R_0 x, g_{\gamma_0}(t) \rangle|$  最大, 得到残差为  $R_1 x = R_0 x - \langle R_0 x, g_{\gamma_0}(t) \rangle g_{\gamma_0}(t)$ , 再次通过 MP 算法选择最佳原子  $g_{\gamma_1}(t) \in D$ , 使得  $|\langle R_1 x, g_{\gamma_1}(t) \rangle|$  最大, 得到残差为  $R_2 x = R_1 x - \langle R_1 x, g_{\gamma_1}(t) \rangle g_{\gamma_1}(t)$ ,  $\dots$ ,  $R_m x = R_{m-1} x - \langle R_{m-1} x, g_{\gamma_{m-1}}(t) \rangle g_{\gamma_{m-1}}(t)$ 。

(4) 照此步骤不断迭代, 定义相干比  $\lambda(R_{m-1} x) = \frac{|\langle R_{m-1} x, g_{\gamma_m}(t) \rangle|}{\sup_{g_{\gamma_m} \in D} \|R_{m-1} x\|}$ , 该值随着迭代次数增加逐

渐减小,若设置为某一收敛值,则迭代到第  $M$  次结束。得到残差第  $M + 1$  次残差:  $R_{M+1}x = R_Mx - \langle R_Mx, g_{\gamma_M}(t) \rangle g_{\gamma_M}(t)$ 。

(5) 最后得到  $y(p) = \sum_{m=0}^M \langle R_mx, g_{\gamma_m}(t) \rangle g_{\gamma_m}(t) + R_{M+1}x$ 。

### 3 实验结果和分析

针对 C 型机构不同扫描速率,采用上述 3 层小波-阈值判断-稀疏分解算法(算法 1)和 3 层小波-阈值判断-4 层小波(算法 2)进行比较。图 3 为两种扫描速率迭代值稀疏分解算比较图。图 4 为两种算法波形比较图,图 4a 为扫描速率是  $41\mu\text{m/s}$  时,稀疏迭代 11 次算法 1 输出波形,图 4b 为扫描速率是  $34\mu\text{m/s}$  时,稀疏迭代 8 次算法 1 输出波形,而图 4c 和图 4d 分别为扫描速率是  $41\mu\text{m/s}$  和是  $34\mu\text{m/s}$  时

算法 2 的输出波形。其中算法 1 中通过实验确定两种扫描速率情况下的相干比迭代终值条件为 0.4。

由图 2 和图 4 得到表 1 中的数据。表 1 中可以看出,处理前为 3 层小波-阈值判断后数据,经过稀疏分解检测数据至少偏差带宽减少 10%,均方差减少 22%。以均方差来衡量检测精度,经 3 层小波-阈值判断-稀疏分解抑制后,对动态扫描检测时的精度

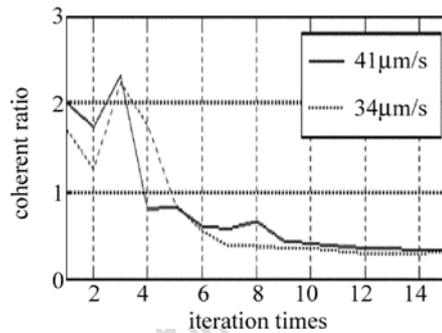


Fig. 3 Iteration value at two scanning speeds

Table 1 Contrast of measurement data before and after being processed by different algorithms

mode	before processed/ $\mu\text{m}$		after processed(wavelet) / $\mu\text{m}$		after processed(sparse) / $\mu\text{m}$		enhance(sparse)/%	
	deviation	mean square	deviation	mean square	deviation	mean square	deviation	mean square
	bandwidth	error	bandwidth	error	bandwidth	error	bandwidth	error
$41\mu\text{m/s}$	28.83	6.68	19.65	4.88	24.75	5.23	14	22
$34\mu\text{m/s}$	29.72	8.81	24.20	5.65	26.63	6.89	10	22

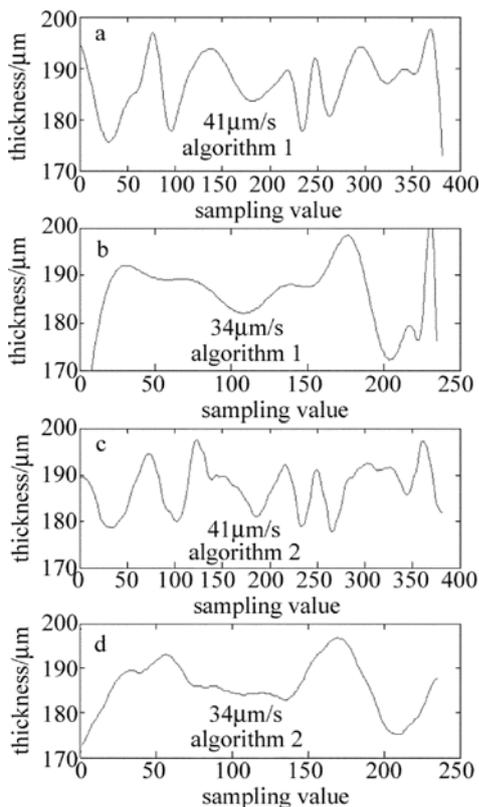


Fig. 4 Contrast between two algorithms

可以达到  $5\mu\text{m} \sim 7\mu\text{m}$ 。

实验表明:4 层小波算法以及小波基函数的确定需要得到 C 型机构固有和振动频率,而稀疏分解算法只要通过经验确定通用的稀疏分解迭代停止条件,在不同扫描速度下均可以实现较高精度的去噪。虽然稀疏算法的均方差值和偏差带宽略高于 4 层小波算法,但在缺乏先验知识的条件下,该算法具有明显的优势。

### 4 小 结

锂电池非连续性薄膜生产过程中采用 C 型机构动态扫描测厚时,扫描机构的固有频率和动态噪声会严重影响实测厚度。常规 3 层小波-阈值判断-4 层小波算法需要明确上述振动噪声的频率,稀疏分解算法能通过匹配跟踪含噪信号中的稀疏成分,不断跟踪并提取最能匹配于原始信号的原子向量,即为实际膜厚分布。实验表明:相对于小波算法,在缺乏先验知识的情况下,3 层小波-阈值判断-稀疏分解算法能较准确地反映实际薄膜分布。

### 参 考 文 献

[1] ZHOU J F. Research on errors analysis and precision control in high-precision convexity measurement with laser for thin sheet

- [D]. Changsha: Central South University, 2006: 32-65 (in Chinese).
- [2] CHEN G, ZHU X F, XU Q Q, *et al.* Multi-resolution wavelet in discontinuous coating thickness measurement [J]. Control Engineering of China, 2013, 20(1): 175-178 (in Chinese).
- [3] WANG C, ZHAO B. Research of thin plate thickness measurement based on single lens laser triangulation [J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 6-9 (in Chinese).
- [4] MALLT S, ZHANG Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [5] ZHAO R Z, LIU X Y, LI Ch Ch, *et al.* Wavelet denoising based on sparse representation [J]. Science in China: Information Science, 2010, 40(1): 33-40 (in Chinese).
- [6] PLUMBLEY M, BLUMENBACH T, DAUDET L, *et al.* Sparse representations in audio and music [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 98(6): 995-1005.
- [7] NEFF R, ZAKHOR A. Matching pursuit video coding: dictionary approximation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(1): 13-26.
- [8] FADILI M J, STARCK J L, BOBIN J, *et al.* Image decomposition and separation using sparse representations: an overview [J]. Proceedings of IEEE, 2010, 98(6): 983-994.
- [9] WANG C G. The ECG feature wave detection and data compression based on the sparse decomposition [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 58-77 (in Chinese).
- [10] LIU H, YANG J A, HUANG W J. Acoustic signal de-noising based on parallel sparse decomposition [J]. Journal of Circuits and Systems, 2012, 17(6): 64-69 (in Chinese).
- [11] LI Y, GUO S X. A new method to estimate the parameter of  $1/f$  noise of high power semiconductor laser diode based on sparse decomposition [J]. Journal of Physics, 2012, 61(3): 1-6 (in Chinese).
- [12] WANG J Y, YIN Z K. Sparse signal and image decomposition and preliminary application [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006: 72-116 (in Chinese).