

# 基于小波去噪和 EMD 的船舶液位信号特性分析

秦品乐<sup>1,2</sup>, 林 焰<sup>1,2</sup>, 陈 明<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学电子与信息工程学院, 大连 116023; 2. 大连理工大学船舶 CAD 中心, 大连 116023)

**摘要:** 为提高船舶液舱液位测量精度, 研究了液位测量信号的特性, 提出基于小波去噪和经验模态分解(EMD)的水位信号处理新方法。用平移不变小波去噪算法对液位信号进行预处理, 消除异常事件对 EMD 方法的影响, 用 EMD 分解信号, 按照给定的置信度去除高频固有模式(IMF)分量, 提取低频 IMF 及趋势项进行重构, 得到的无干扰成分即为液位真实信号。理论及实验研究表明, 只有在有效消除异常干扰的情况下才能获得可靠的 IMF 分量, 采用该方法提取有异常干扰的液水位信号真实趋势是有效可行的。

**关键词:** 液位信号; 小波去噪; 平移不变; 经验模态分解

## Characteristics Analysis of Ship Liquid Level Signal Based on Wavelet De-noise and EMD

QIN Pin-le<sup>1,2</sup>, LIN Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023;

2. Ship CAD Center, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

**【Abstract】** To improve the accuracy of ship hold liquid level, the nonlinear characteristics of level signals are exploited. A novel method for analyzing the water level signals based on wavelet de-noises technique and Empirical Mode Decomposition(EMD) has been developed. Wavelet transformation with translation invariance is adopted to eliminate the effect of abnormal signals, and the new signal is decomposed into Intrinsic Mode Functions(IMF) by EMD. After removing high frequencies IMFs according to the given confidence degree, the low useful frequencies IMFs are extracted to reconstruct the true level signal. The results show the proposed method is reasonable and suitable to nonlinear and non-stationary water level signal.

**【Key words】** liquid level signal; wavelet de-noise; translation invariance; Empirical Mode Decomposition(EMD)

### 1 概述

船舶在风浪流海况下会产生不规则运动响应, 液舱液位瞬间变化对液位测量产生干扰, 使采样的数据不准确。为解决这一问题, 很多学者提出了解决办法, 如平滑滤波<sup>[1]</sup>、卡尔曼滤波、自适应噪声抵消<sup>[2]</sup>, 但由于船舶运动具有非平稳的随机性质, 摇晃造成在信号中产生异常点, 即信号在极短的时间内产生局部高频值, 这给信号去噪带来了很大的困难, 因此以上方法很难达到较高的测量精度。

文献[3]利用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法分析了余热锅炉汽包水位波动信号特性, 证明以该方法提取水位信号真实趋势是有效的, 但未考虑异常事件对 EMD 方法的影响。文献[4]分析了异常事件对 EMD 方法的影响, 并给出了一种解决方法, 但只适合异常时段较小的情形, 且方法较为繁锁。本文综合小波去噪和 EMD 的特点, 提出一种对液位信号进行处理提取真实高度的新方法。为了消除小波变换后在异常点附近产生的人为振荡, 即伪吉布斯现象, 利用基于平移不变快速小波去噪算法, 对信号数据进行预处理, 再进行 EMD 分解, 确定信号在不同频段的分辨率, 去除干扰成分, 提取液位信号的趋势项并进行计算, 从而提高了测量精度。

### 2 经验模态分解

经验模态分解方法是由文献[5]提出的一种新的数据分析方法。这种方法特别适用于非线性和非平稳时间序列的分析。EMD方法已经被广泛用于非线性的海洋波动数据分析、

机械振动信号和结构分析等领域的研究<sup>[5-6]</sup>。

经验模态分解算法本质上是一个有限次的滤波过程, 把随机序列分解为若干固有模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF)的线性组合。每个 IMF 是满足如下条件的函数<sup>[5]</sup>: (1)对整个时间序列来说, 极值的个数和穿过零点的个数必须相等或者只相差 1; (2)在任何一点, 最大值和最小值包络线的平均值为 0。

EMD方法对信号的分解过程可概括成算法 1<sup>[5,7]</sup>:

算法 1 设  $X(t)$  是信号的时间序列:

- (1)初始化:  $r(t)=x(t)$ ,  $i=1$ ;
- (2)如果余量  $r(t)$  为单调函数或幅值小于设定阈值, 则算法停止;
- (3)否则, 提取第  $i$  个 IMF;
  - 1)初始化  $h(t)=r(t)$ ;
  - 2)计算  $h(t)$  的局部极大值和极小值;
  - 3)利用三次样条插值函数计算极大值包络线  $e_{\max}(t)$  和极小值包络线  $e_{\min}(t)$ ;
  - 4)计算  $e_{\max}(t)$  和  $e_{\min}(t)$  的平均值  $m(t)=[e_{\min}(t)+e_{\max}(t)]/2$ ;
  - 5)计算  $h(t)=h(t)-m(t)$ , 利用标准偏差 SD 判断滤波结果:

**基金项目:** 2006 辽宁省博士科研启动基金资助项目(20061065); 国家高新优船舶关键技术开发专项基金资助项目“ 货油装卸系统自动化和智能化研究 ”

**作者简介:** 秦品乐(1978 - ), 男, 博士研究生, 主研方向: 智能控制, 信息系统集成; 林 焰, 教授、博士生导师; 陈 明, 副教授

**收稿日期:** 2007-10-20 **E-mail:** qpl@nuc.edu.cn

$$SD = \sum_{i=0}^n |h_j(t) - h_{j-1}(t)|^2 / h_j^2(t) < \varepsilon$$

其中,  $\varepsilon \in [0.2, 0.3]$ 。若不满足 IMF 终止条件, 转(4), 否则转 2);

(4) $c(t) = h(t)$ ;

(5) $r(t) = r(t) - c(t)$ , 转(2);

算法最后可得到

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

其中,  $c_j(t)$  为一个 IMF;  $r_n(t)$  为残余函数, 一般为信号的平均趋势。即按从高频到低频的顺序对信号滤波, 最后得到一个常数或单调函数表示信号的趋势。

按式(2)构造一组时间序列, 进行 EMD 分解, 结果如图 1 所示。

$$s(t) = \sin(2p \times 5t) + 2\cos(2p \times 10t) + 3 \quad (2)$$

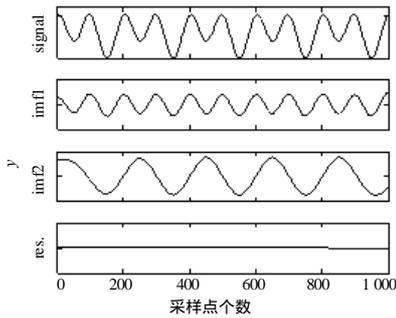


图 1 仿真信号 EMD 分解结果

尽管 EMD 方法已得到广泛的应用, 但自身还存在一些问题: 如果在真实过程中信号有独立异常点, 数据就会产生局部高频信号, 在运用 EMD 方法分析这种数据时, 就会产生本征模态函数的频率混叠现象, 使 IMF 失去物理意义。图 2 是式(2)构成的时间序列加入异常点后的 EMD 分解结果。

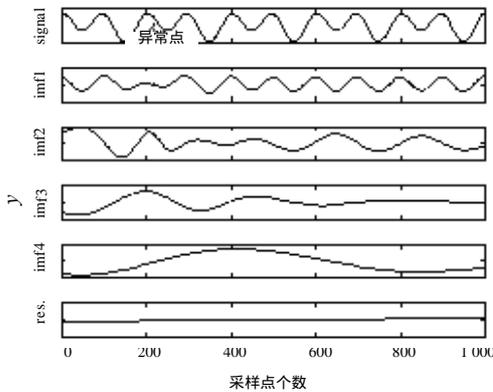


图 2 加入噪声后信号 EMD 分解结果

从图 2 可以看到, 由于信号中有异常点, 因此 IMF 分量 and 真实情况有很大的差别, 异常信号占据真实物理信号的位置, 被占据位置的真实成分移到了下一个 IMF, 并且产生了虚假分量。为了从数值上说明异常点对 EMD 分解的影响性, 用均方根误差作为评价指标, 其定义形式如式(3)所示:

$$RMSE = \sqrt{\sum (\hat{x}(t) - x(t))^2 / T} \quad (3)$$

其中,  $\hat{x}(t)$  为分解得到的 IMF 分量;  $x(t)$  为真值;  $T$  为时间序列的长度。信号主要 IMF 分量的 RMSE 结果见表 1。

表 1 仿真信号 EMD 分解的结果

	IMF1	IMF2	res.
无噪声信号	0.005 3	0.065 4	0.071 1
加噪声信号	0.388 8	1.044 1	1.210 5

从表 1 可见, 异常点使 IMF 分量与真实值误差变大, 所以得出结论: 对于存在独立异常事件的信号, 在进行 EMD 分解前, 要进行消除异常影响的预处理。

### 3 基于小波去噪的 EMD 方法

#### 3.1 小波阈值法滤波去噪<sup>[8]</sup>

基于小波变换的阈值滤波去噪方法基本思想是, 先设置一个阈值, 当小波系数小于这个临界阈值时, 主要是由噪声引起的, 予以去除; 当小波系数大于阈值时, 主要是由信号引起的, 那么直接保留这一部分(硬阈值方法)或者按某一固定量向 0 收缩(软阈值方法), 然后用新的小波系统进行小波重构得到去噪后的信号。

本文采用软阈值函数:

$$w_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda) & |w_{j,k}| > \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases}$$

其中,  $\text{sgn}(\bullet)$  为符号函数, 阈值  $\lambda$  的选取方法很多, 其中较好的有 VISU 方法:  $\lambda = \delta \sqrt{\ln N}$ ;  $\delta$  是噪声标准差, 值为  $\delta \approx M_x / 0.674 5$ ;  $M_x$  是小波系数幅值按顺序排列中间位的取值。另一个常见方法是基于 Stein 无偏风险估计值最小化 (SURE) 方法:

$$SURE(t) = n - \sum_i 2I(t - |a_i|) + \sum_i \min(a_i^2, t^2)$$

$$\lambda = \arg \min SURE(t)$$

SURE 阈值的选取依赖信号小波分解的层次, 而 VISU 方法的阈值是不变的。本文中对仿真信号的阈值滤波采用的是 SURE 方法。

#### 3.2 平移不变小波变换去噪

虽然用阈值法能取得很好的去噪效果, 但在某些情况下, 如在信号的不连续点处, 阈值法去噪会引起非自然产生的人为振荡, 如伪吉布斯现象, 即不连续点附近的信号会在一个特定的目标水平上下跳变。通过平移不变小波去噪, 能有效地抑制这种现象<sup>[9]</sup>。通常, 伪吉布斯现象的产生和信号不连续点的位置有关, 确切地说, 是信号特征和小波基元素特征之间的精确对准有关。如果通过平移含噪声信号来改变不连续点的位置, 对平移后的信号进行阈值法去噪处理, 则不会产生伪吉布斯现象。

基于平移不变小波变换去噪算法可以概括成算法 2<sup>[10]</sup>:

- (1)对带噪信号做循环平移;
- (2)对每次平移后的信号作离散小波变换, 得出各尺度上的小波系数;
- (3)对小波系数进行阈值处理, 得出估计小波系统;
- (4)利用估计小波系数进行离散小波重构;
- (5)进行逆循环平移, 并求平均, 得到去噪后的信号。

该方法不仅能有效地去除伪吉布斯现象, 还可得到比阈值法更小的均方根误差, 提高了信噪比(SNR)。图 3 从上到下的 4 个波形分别代表了原始信号、染噪信号、阈值滤波和平移不变滤波的滤波效果。

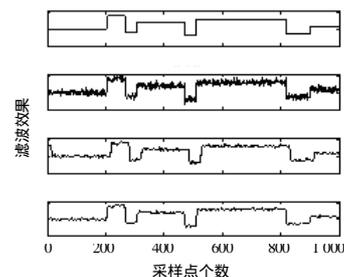


图 3 阈值法与平移不变法去噪比较

从图3中可以看出：基于平移不变阈值法去噪的效果比一般阈值法的去噪效果好，在信号不连续点处，伪吉布斯现象得到了很好的滤除。采用相关系数(R)评价2种方法与参考信号的相关性(见表2)。

表2 2种方法与参考信号的相关系数

	SURE 阈值法去噪	平移不变阈值法去噪
R	0.827 1	0.987 8

从以上分析可得出结论，采用基于平移不变的小波阈值法去除异常点的影响，比一般阈值法去噪效果更好，可以用于分析存在异常点的水位信号。

### 3.3 基于平移不变小波去噪的 EMD 方法

为了减小异常点对 EMD 方法的影响及由其在小波去噪中引起的人为振荡，本文将算法1与算法2相结合，对第2节的带噪信号做滤波处理，结果如图4所示。

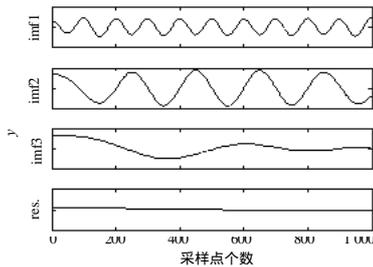


图4 基于平移不变小波阈值去噪的 EMD 分解

从图4和表3的分析可以得出，虽然本文提出的方法在 EMD 分解中也产生了虚假模态，但分量1和分量2更逼近仿真分量。

表3 2种情况 EMD 分解的均方根误差

	IMF1	IMF2	res.
RMSE	0.028 7	0.091 7	0.092 7

## 4 现场数据分析

由以上分析可知，将基于平移不变小波去噪的 EMD 方法应用到船舶舱室液位信号处理中，分解得到的各部分分量的物理意义是：零均值的固有模态代表了液面波动及测量噪声，残余项则是信号中的趋势，它反映了在没有波动及噪声情况下液位的高度趋势。所以，基于经验模态分析的水位高度测量实质就是利用 EMD 方法去除信号中反映波动及噪声的高频成分，提取更能反映液面高度的趋势项。

为了计算方便，选用形状规则的容器作为实验设备。图5是实验环境为浪高1.4m，设备在有尾倾状况下产生横摇时传感器测得的液位数据(设备中的静态液高为1.0m)；图6是相同实验环境下产生纵摇时传感器测得的液位数据。图7、图8为2组信号采用本文提出的方法得到的 EMD 分解结果。

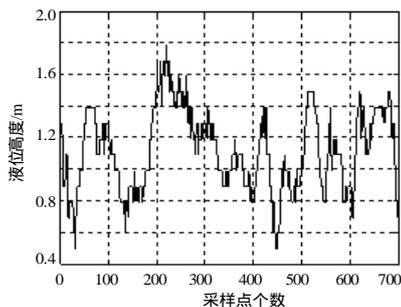


图5 横摇时传感器测量信号

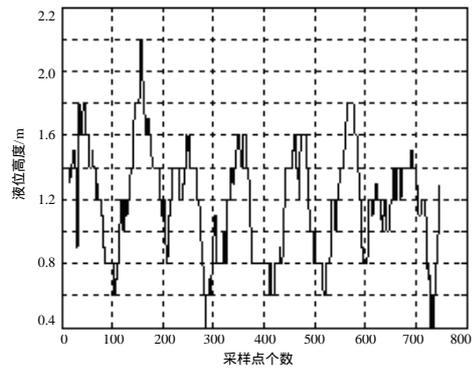


图6 纵摇时传感器测量信号

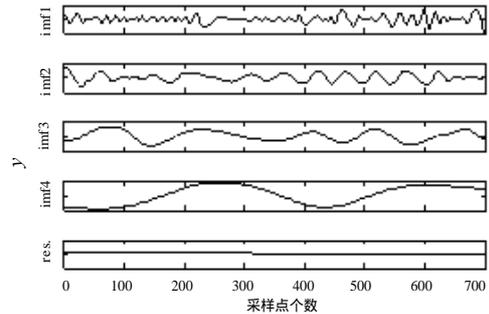


图7 横摇信号本文方法 EMD 分解结果

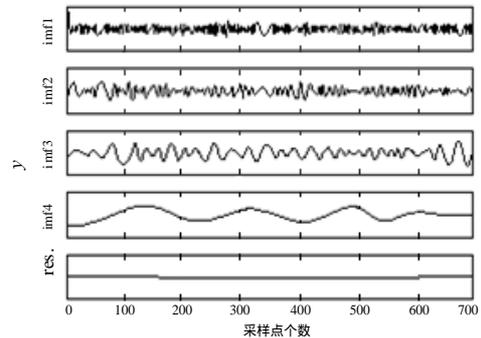


图8 纵摇信号本文方法 EMD 分解结果

表4列出了各 IMF 和原信号序列的相关系数。其中，IMF2, IMF3, IMF4 与原序列相关性较明显；IMF1 是高频干扰，相关性较差；最后一项是信号的线性趋势。

表4 各 IMF 分量与参考信号的相关系数

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	res.
R1	0.161 9	0.532 8	0.673 8	0.440 3	0.002 8
R2	0.110 1	0.448 8	0.523 9	0.366 8	0.004 1

设置一定的置信度区间，去除高频的 IMF 分量，提取低频的 IMF4 和线性趋势项进行重构即可得到真实的水位波动信号，再对此序列求均值，即为液位值。

表5对比分析了测量数据求均值和本文方法，从分析中可以看到，本文提出的液位测量方法对测量精度有较为显著的提高，从而证明了方法的有效性。

表5 数据分析

	状态	真实值/m	计算结果/m	相对误差/(%)
测量数	横摇		1.024 7	2.47
据均值	纵摇	1.0	1.038 3	3.83
本文方	横摇		1.002 8	0.28
法滤波	纵摇		1.004 6	0.46

## 5 结束语

(1)异常事件产生局部高频,对 EMD 分解有较大的影响,可能使高频的 IMF 分量失去物理意义,产生虚假分量。针对这种情况,本文提出一种新的解决方法:小波变换与 EMD 方法相结合,利用平移不变法消除异常点处由小波阈值去噪引起的人为振荡,然后对去噪后的时间序列进行 EMD 分解,减少或消除异常事件对 EMD 分解的影响,为提取真实液位信号提供理论依据。

(2)针对一种船舶液位信号进行分析。采用本文方法将液位信号进行 EMD 分解,去除高频部分及相关性较高的 IMF 分量,提取低频 IMF 及趋势项进行重构,即可得到真实水位趋势,为开发高精度船舶液位测量系统提供了可靠的数据。

### 参考文献

- [1] 齐国清. 油船舱内液面高度测量雷达系统[J]. 中国造船, 1997, (2): 96-100.
- [2] 韩新洁, 孟宪尧. 船舶液位测量中海浪的滤波处理[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25(1): 11-14.
- [3] 王 强, 曹小玲, 苏 明. 余热锅炉汽包水位波动信号的 EMD 特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 22(2): 15-19.

(上接第 9 页)

## 5 结束语

本文详细描述了一种优化压缩 cache 替换策略的方法。该方法利用压缩 cache 中额外的 tag 资源形成影子 tag 机制,探测并修正压缩 cache 的 LRU 替换策略的错误替换决策,形成基于 LRU 修正的替换策略 MLRU-C。模拟实验证明,MLRU-C 替换策略能有效地降低 cache 失效率,改善压缩 cache 的性能。

### 参考文献

- [1] Alameldeen A R, Wood D A. Frequent Pattern Compression: A Significance-based Compression Scheme for L2 Caches[R]. Computer Sciences Department, University of Wisconsin-Madison, Technical Report: 1500, 2004-04.

(上接第 12 页)

将立体匹配方法由二维搜索降低为一维搜索,但由于极点的计算方法容易受到图像噪声的影响,因此相比较而言,本文的降维搜索方法的精度、可靠性更高一些。

在计算相似度的时候,对彩色图像的 HSI 颜色空间进行多通道相关系数计算,并采用信息融合的方法对这 3 个相关系数进行综合评价,得到更为精确的像素相关性,提高了匹配准确度。试验的结果也证明,与仅使用灰度进行匹配的方法比较,本文方法充分利用了彩色图像所包含的信息,匹配的精度有明显的提高。

## 5 结束语

本文利用镜面成像的特点,将立体匹配的搜索由二维降为一维,是可靠的降维方法。应用本文的降维理论进行立体匹配获得的同名点的定位准确度也较高。镜像图像中的物体与其镜面中的像是由相机一次成像得到的,在同一成像平面,避免了以往三维建模中的立体像对重投影环节,有效避免了误差的引入。基于镜像图像的立体匹配算法是镜像图像三维建模的一个关键环节。本文方案明显减少误差,有效提高了三维建模的精度,促进了基于图像的三维建模在制造业中

- [4] 赵进平. 异常事件对 EMD 方法的影响及其解决方法研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001: 31(6): 805-814.
- [5] Nordenn E H, Shen Zheng, Steven R L, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1998(454): 454: 903-995.
- [6] Peng Z K, Peter W T, Chu F L. An Improved Hilbert-Huang Transform and Its Application in Vibration Signal Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(1/2): 187-205.
- [7] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. On Empirical Mode Decomposition and Its Algorithms[C]//Proc. of IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. [S. l.]: IEEE Press, 2003-06: 9-11.
- [8] 曾祥利, 傅 彦, 青华平. 一种基于小波变换的数据除噪方法[J]. 计算机应用, 2005, 25(9): 2140-2142.
- [9] Donoh D L. Denoising by Soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] 汤宝平, 杨昌棋, 谭善文, 等. 基于平移不变的小波去噪方法及应用[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(3): 1-5.

- [2] Chen David, Peserico E, Rudolph L. A Dynamically Partitionable Compressed Cache[C]//Proceedings of the Singapore-MIT Alliance Symposium. Singapore: [s. n.], 2003-01.
- [3] Alameldeen A R, Wood D A. Adaptive Cache Compression for High-performance Processors[C]//Proceedings of the 31st Annual International Symposium on Computer Architecture. [S. l.]: IEEE Press, 2004 : 212-223.
- [4] Hallnor E, Reinhardt S. A Unified Compressed Memory Hierarchy[C]//Proc. of the 11th Symposium on High Performance Computer Architecture. [S. l.]: IEEE Press, 2005.
- [5] Belady L A. A Study of Replacement Algorithms for Virtual Storage Computers[J]. IBM Systems Journal, 1996, 5(2): 78-101.

的应用推广。

### 参考文献

- [1] Cox I, Hingorani S, Rao S. A Maximum Likelihood Stereo Algorithm[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 63(3): 542-567.
- [2] Falkenhagen L. Hierarchical Block-based Disparity Estimation Considering Neighbourhood Constraints[C]//Proc. of International Workshop on SNHC and 3D Imaging. Rhodes, Greece: [s. n.], 1997.
- [3] Crowley J L, Martin J. Experimental Comparison of Correlation Techniques[C]//Proc. of International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Karlsruhe: [s. n.], 1995-03.
- [4] Ohta Y, Kanade T. Stereo by Intra- and Inter-scanline Search Using Dynamic Programming[J]. IEEE Trans. on PAMI, 1985, 7(2): 139-154.
- [5] Pollard S, Mayhew J, Frisby J. PFM: A Stereo Correspondence Algorithm Using a Disparity Gradient Limit[J]. Perception, 1985, 14(4): 449-470.
- [6] Yang Zhangwei, Cohen F S. Cross-weighted Moments and Affine Invariants for Image Registration and Matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 804-814.