



基于改进 EMD 的船舶液舱液位测量方法及数据分析

秦品乐^{*1,2}, 林焰^{1,2}, 陈明²

(1. 大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 分析了自由浮态下提高液位测量精度的方法, 然后针对采集到的非平稳液位信号, 提出了一种改进的局部经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法进行滤波处理, 去除信号中各瞬时频率成分, 提取信号的平均趋势, 并计算液位有效高度. 仿真结果表明, 采用改进后的局部 EMD 方法能有效地提高分解精度, 实验数据的分析表明提出的液位测量方法是可行的, 具有工程应用价值.

关键词: 船舶; 液位测量; 非平稳信号; 经验模态分解; B 样条插值
中图分类号: TN911.6 **文献标志码:** A

0 引言

液货船上的货油、压载水及燃油等监控的关键是舱室液位的测量, 其测量精度直接影响液货体积度量的准确性. 准确的测量可以减少贸易纠纷, 同时也可以为浮态、稳性计算提供相关数据. 韩章等^[1]研究了静水状态下液位修正的方法, 给出了用测量管测量横倾或纵倾液位的修正方法, 但由于没有考虑在横倾的同时会产生纵倾, 即空间自由浮态, 从而导致液位修正不准确.

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, 会对测量产生干扰, 使采样的数据不准确. 为解决这一问题, 很多学者也提出了一些解决方法, 如平滑滤波^[2]、卡尔曼滤波、维纳滤波、自适应噪声抵消^[3], 但由于船舶运动具有非平稳随机性质, 以上方法很难达到较高的测量精度. 文献^[4]提出了经验模态分解(EMD)的方法来处理时间序列信号, 该方法是一种无需任何先验知识的自适应时频分析方法, 在时间和频率上都有相当高的精确度, 尤其适用于非线性非稳态信号.

本文给出船舶在静水中任意浮态下用雷达液位计测量液位的修正方法, 提出一种改进的局部经验模态分解方法, 并通过仿真及实验数据分析

验证方法的正确性.

1 液位测量的修正

测量液位的方法很多, 目前在大型油船中应用较多的是压力式和雷达式传感器, 雷达式的测量精度比压力式的高, 而对于大型油船, 液位高度相差几毫米, 由此算出的油量就会有很大的差别, 所以本文以雷达式液位测量系统为例说明修正方法.

雷达式液位测量系统测量原理是: 传感器安装在液舱顶部, 测量出液面距舱顶的距离, 然后用液舱高减去此距离便为液位高度, 以上计算均假设船舶处于正浮状态, 传感器处于液面形心处. 然而由于船体型线的变化, 同一舱室处在不同高度的液面形心不一定在一条垂线上, 实际中雷达液位计尽量安装在液面最高位时的形心处, 该坐标是个估计值, 且存在安装误差. 同时船舶一般处于自由浮态, 既有横倾又有纵倾, 这样会使测量误差进一步变大, 所以必须对测量值进行修正.

如图 1 所示, 假设船舶处于横倾状态, 横倾角为 A , 舱内液面平行于水面. 液面上的 M 点为测量点, f 点为液面形心. 雷达液位计一般垂直直线布置, 其横坐标为 Y . 测量液位高度 (L_m) 是指舱

收稿日期: 2007-06-10; 修回日期: 2009-03-28.
基金项目: 辽宁省“百千万人才工程”培养经费资助项目(2007186-25).
作者简介: 秦品乐*(1978-), 男, 博士生, E-mail: qinpinle@gmail.com; 林焰(1963-), 男, 教授, 博士生导师.

室高度减去测量距离,利用此高度表示液位实际高度,会带来一定的误差.根据船舶静力学中等体积小角度倾斜原理,即倾斜前后的液面交点通过该液面形心,可利用 f 点的液位高度 (L_{fc}) 表示实际液位.由图 1 可得如下公式:

$$L_{fc} = L_m + (Y_f - Y) \cdot \tan A;$$

$$A = \arcsin [(T_s - T_p)/W] \quad (1)$$

其中 T_s 、 T_p 分别为左右吃水,可通过吃水传感器测量得到; W 为船的型宽,为常数.

同理,可以对纵倾时液位高度进行修正.纵倾时雷达液位计测量液位示意图见图 2.假设纵倾角为 B ,液位计的纵向坐标为 X ,液面形心的纵向坐标为 X_f ,由图 2 可得下式:

$$L_{fc} = L_m + (X_f - X) \cdot \tan B;$$

$$B = \arcsin [(T_f - T_a)/L_s] \quad (2)$$

其中 T_f 、 T_a 分别为艏艉吃水,可通过传感器测量得到; L_s 为船两柱间距离,为常数.

由式(1)、(2)可以求出在静水中船舶处于任意倾斜状态时液位修正公式:

$$L_{fc} = L_m + (Y_f - Y) \cdot \tan A + (X_f - X) \cdot \tan B \quad (3)$$

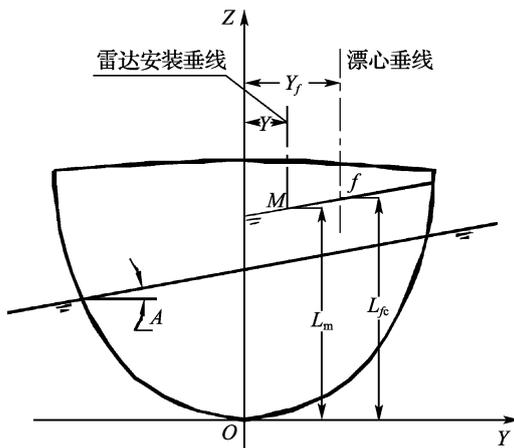


图 1 横倾时测量液位示意图

Fig. 1 Liquid level when listing

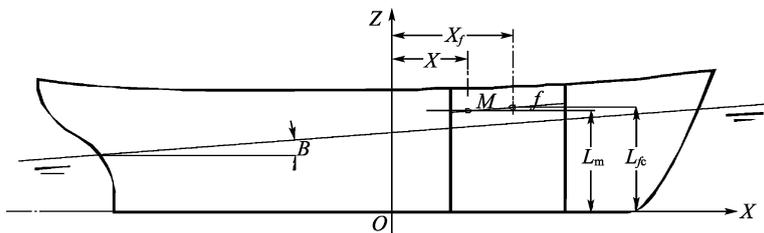


图 2 纵倾时测量液位示意图

Fig. 2 Liquid level when trimming

2 信号处理方法及改进

由于风浪的影响,采集到的液位信号具有了非线性非平稳性质,根据信号自身特点,本文采用一种改进的经验模态分解方法进行分析,进而提高测量精度.经验模态分解是由 Huang 等^[4]提出的一种新的信号时域分解方法,该方法已经在很多方面得到了有效的应用^[5~8].

2.1 EMD 算法的基本思想

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式函数(IMF)的线性组合.每个 IMF 是满足如下条件的函数:

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零.

EMD 方法对信号的分解过程可概括如下^[4,5]:

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,否则:

(3) 提取第 i 个 IMF;

(3.1) 初始化 $h(t) = r(t)$;

(3.2) 计算 $h(t)$ 的局部极大值和极小值;

(3.3) 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 $e_{min}(t)$;

(3.4) 计算 $e_{max}(t)$ 和 $e_{min}(t)$ 的平均值 $m(t) = [e_{min}(t) + e_{max}(t)]/2$;

(3.5) 计算 $h(t) = h(t) - m(t)$,利用标准偏差 SD 判断滤波结果:

$$SD = \sum_{j=0}^n \frac{|h_j(t) - h_{j-1}(t)|^2}{h_j^2(t)} < \epsilon,$$

式中 $\epsilon \in [0.2, 0.3]$. 若满足 IMF 中止条件, 转(4), 否则转(3.2);

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

$$(5) r(t) = r(t) - c(t), \text{转(2).}$$

算法最后可得到 $X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t)$, 式

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.

2.2 EMD 算法的改进

Rilling 等^[5]对基本算法中的滤波中止条件进行了改进, $m(t)$ 仍是取上下包络的均值 $e(t)$, 不同的是 IMF 均值条件的判断成为 $\sigma(t) = |m(t)/a(t)|$, 其中 $a(t) = (e_{\max} - e_{\min})/2$. 相应的停止条件有两个: 一是满足 $\sigma(t) < \theta_1$ 的时刻个数与全部持续时间之比至少 $1 - \sigma$ 成立(其中 $\theta_1 = 0.05, \alpha = 0.05$); 二是对每个时刻 t , 有 $\sigma(t) < \theta_2$, $\theta_2 \approx 10\theta_1$. 两个条件相互补充, 限定了信号的大范围波动, 从而保证整体的零均值. 并且在此基础上, Rilling 还给出了局部 EMD 方法, 在时间序列较短的情况下仍能使用 EMD 方法.

Chen 等^[9]仍然使用 Huang 的 IMF 标准差 SD 判断准则, 但第一个 IMF 采用 B 样条函数, 其余的 IMF 均采用一个三次样条函数, B 样条函数可以组成样条空间的基. Chen 的改进避免了求包络, 把“极值点—包络—均值”变成为“极值点—均值”. 郑天翔等^[10]将前两者的方法综合, 对基于全序列的 EMD 方法进行改进, 取得了较好的效果.

基本 EMD 的筛选过程是针对于全长序列

的, 只要局部范围包络均值没达到中止条件, 筛选过程就会进行下去, 这样就会出现过分解现象, 污染下面的固有模态. 针对这种现象, Rilling 提出了局部 EMD 算法: 在算法 1 步骤(3.4)与(3.5)之间增加一步, 增加一个权重函数 $w(t)$, 对于 $\sigma(t) > \theta_1$ 的点, 置 $w(t) = 1$, 用 $h(t) = h(t) - w(t)m(t)$ 代替算法(3.5)步的 $h(t)$ 函数. 改进的本质就是为了防止过分解, 对引起过分解的局部区域进行分解, 而其他部分不进行. 但 Rilling 仍用三次样条函数来求包络、求均值.

为了进一步提高局部 EMD 算法的分解效果, 本文借鉴文献[7]的思想, 对该算法进行了改进. 对于局部 EMD 中的 $m(t)$ 应用 Chen 的 B 样条函数求解, 即第一次 IMF 过程采用式(3)的 B 样条函数, 使之成为样条空间的基, 其余的 IMF 还是采用一个三次样条函数.

$$m(t) = b(t) = \sum_{j \in Z} \frac{1}{4} [x(\tau_{j+1}) + 2x(\tau_{j+2}) + x(\tau_{j+3})] B_{j_4}(t) \quad (4)$$

由于 Chen 的算法不需要计算上下包络, 而局部 EMD 方法中 $\sigma(t)$ 依赖于包络, 可直接将 $b(t)$ 作为 $\sigma(t)$. 其中局部 EMD 算法中参数选取如下: $\alpha = 0.05, \theta_1 = 0.05, \theta_2 \approx 10\theta_1$. 为了验证算法的正确性, 构建一组理想时间序列, 如下式:

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

该时间序列由频率 5 Hz 的正弦函数和 10 Hz 的余弦函数叠加而成. 本文改进后的局部 EMD 与 Rilling 的局部 EMD 分解结果如图 3 所示.

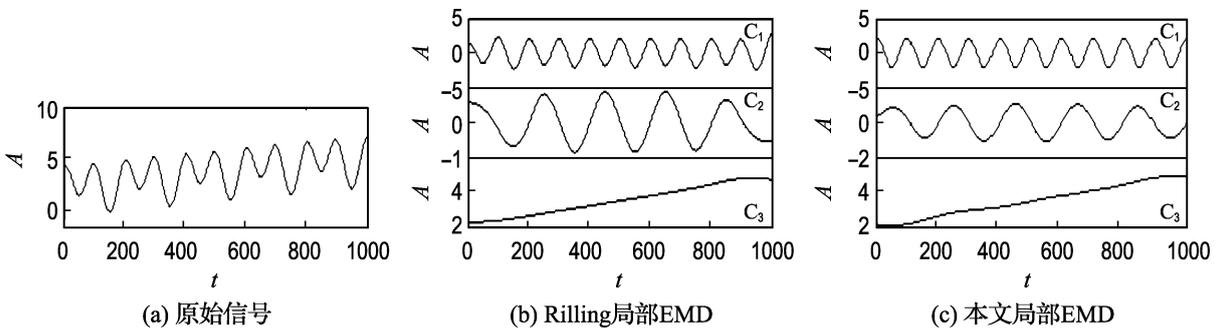


图 3 仿真信号 EMD 结果

Fig. 3 EMD result of the simulation signal

图 3(a)是待分解信号; 图 3(b)中 C_1, C_2 是 IMF 分量, C_3 是残余分量, 即信号的平均趋势; 图

3(c)中的 C_1, C_2, C_3 具有与图 3(b)中相同的物理意义. 且从图中可以直观地看出, 本文的方法对局

部 EMD 分解结果有较明显的改进.

为了从数值上说明改进 EMD 方法分解的正确性,用均方根误差作为评价指标.其定义为以下形式: $E = \sqrt{\sum (\hat{x}(t) - x(t))^2 / T}$. 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. 从对比结果表 1 中可以看出采用局部 EMD 方法可以得到正确的结果,并且本文对局部 EMD 分解方法的改进效果较为显著.

表 1 EMD 分解结果与真实值间的均方根误差

Tab. 1 RSME between the results of EMD and the real value

分解方法	C_1	C_2	C_3
Rilling 局部 EMD	0.231 4	0.237 6	0.072 3
本文局部 EMD	0.092 7	0.101 8	0.066 4

3 实测数据分析

为了计算方便,本文选用形状规则的容器作

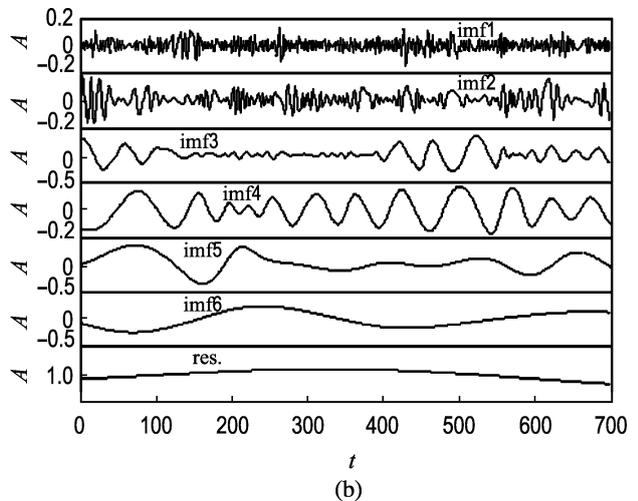
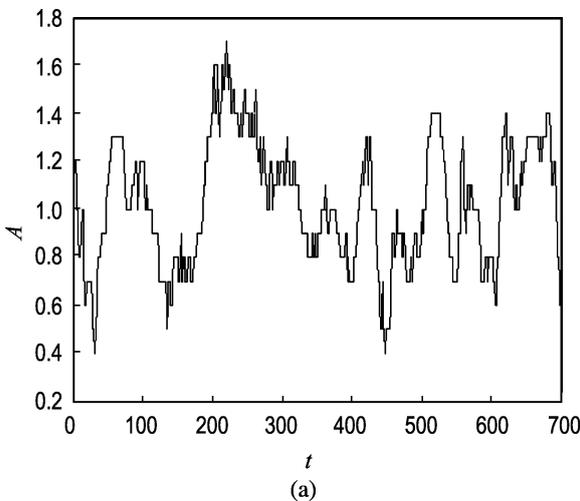


图 4 实测数据分析

Fig. 4 Measure data analysis

表 2 实验数据分析

Tab. 2 Data analysis of experimentation

数据修正	真实值/m	计算结果/m	相对误差/%
测量数据均值	1.0	1.024 7	2.47
仅采用数据修正	1.0	1.014 2	1.42
数据修正且滤波	1.0	0.996 2	0.38

为实验设备.图 4(a)是实验环境为浪高 1.4 m,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 1.0 m).表 2 对比分析了测量数据求均值、求均值后采用式(3)修正及局部 EMD 分解滤波再用修正方法修正 3 种方法.

从图 4(a)中可以看到,由于环境的影响,传感器测量的数据值有较大的波动,如果用传统的滑动窗口求均值的方法,从表 2 中可以看出,所得结果的误差还是比较大的.图 4(b)为本文提出的改进局部 EMD 分解结果.将改进的局部 EMD 方法应用到液位信号处理中,分解得到的各部分分量都是有物理意义的:零均值的本征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面的高度.去除高频的 IMF 分量,提取线性趋势项即可得到真实的液位信号,对此序列求均值,然后再采用式(3)修正该值,即为当前的液位值.从分析结果中可以看到,本文提出的液位测量方法对测量精度有较为显著的提高,从而证明了方法的正确性.

4 结 语

船舶液货舱液位高度是计量液货、掌握船舶装载状况的基础.为了提高其测量精度,本文提出了一种可行的解决方法.首先用本文改进的局部经验模态分解方法对有波浪影响的液位信号进行

滤波处理, 提取趋势项, 对所得结果求其均值, 即得到去噪后的测量液位值; 然后采用文中所提液位修正方法, 对该值进行修正, 得到精度较高的液位值. 仿真结果及实验数据分析都表明采用本文的方法可以得到较为精确的液位高度, 方法是有效可行的.

致谢: 大连理工大学电子与信息工程学院邱天爽教授提供了指导帮助, 中山大学科学计算与计算机应用系博士生郑天翔提出了宝贵意见.

参考文献:

- [1] 韩章, 谈浩, 庄才亮. 液货船液位遥测系统[J]. 机电设备, 1994(6):3-8
- [2] 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
- [3] 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
- [4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *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, 454:903-995

- [5] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P. On empirical mode decomposition and its algorithms [C] // *IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, NSIP-03, Grado (I)*. New York: IEEE, 2003
- [6] 殷明华, 孔凡让, 朱忠奎, 等. 基于经验模态分解的舰船液位测量方法研究[J]. 自动化仪表, 2005, 26(7):19-20
- [7] 陈娟, 邱天爽. Hilbert_Huang 变换及其在信号处理中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2005
- [8] LIU B, XU Y S. Gearbox fault diagnosis using empirical mode decomposition and Hilbert spectrum [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20:718-734
- [9] CHEN Q H, HUANG N E, RIBMENSCHNEDER S, *et al.* A B-spline approach for empirical mode decompositions [J]. *Advances in Computational Mathematics*, 2006, 24(1-4):171-195
- [10] 郑天翔, 杨力华. 经验模式分解算法的探讨和改进[J]. 中山大学学报, 2007, 46(1):1-6

Data analysis of ship hold liquid level measurement based on improved empirical mode decomposition

QIN Pin-le^{*1,2}, LIN Yan^{1,2}, CHEN Ming²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A method in improving accuracy for liquid level measurement in ship free-floatation is analyzed. Then an analysis method for the non-stationary liquid level signals, derived from the improved local empirical mode decomposition (EMD), is proposed. While the transient frequency compositions are eliminated, the average trend of the signals is extracted by which the liquid level can be accounted. The simulation is shown that the improved local EMD is better than the basic's local EMD. By analyzing the measure data, the conclusion is drawn that the proposed liquid level measurement is viable and has applicable value in engineering.

Key words: ship; liquid level measurement; non-stationary signal; empirical mode decomposition (EMD); B-spline interpolation