

· 自动化技术 ·

基于HHT的涡街流量计脉动流噪声去除方法研究

彭杰纲, 方敏

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】 采用了Hilbert-Huang变换(HHT)的方法对去除涡街计脉动流噪声进行了研究。首先运用EMD尺度滤波方式对涡街计脉动流噪声进行滤波去噪。然后,将EMD尺度滤波结果和小波阈值运用于涡街计脉动流噪声去除的结果进行了对比,离线仿真结果表明,EMD尺度滤波去噪和小波阈值去噪都能达到较好的效果,但是前者更加简便,完全是自适应的,这也为涡街信号处理提供了一种新的滤波去噪的有效方法。

关键词 EMD尺度滤波; Hilbert-Huang变换; 小波阈值滤波; 脉动流 涡街信号

中图分类号 TH81

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.016

Denoising Method of Vortex Flowmeter Signal in Oscillatory Flow Based on Hilbert Huang Transformation

PENG Jie-gang and FANG Min

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract In this paper, Hilbert Huang transform (HHT) method is used to reduce vortex flow meter signal noise in oscillatory flow. The empirical mode decomposition (EMD)-scales filtering is used to erase vortex flow signal noise in oscillatory flow, and then the denoising effect of EMD-scales filter is compared with that of wavelet threshold filter using vortex flow meter signal noise in oscillatory flow. The signal simulation test shows that both EMD-scales filtering and wavelet threshold filtering can achieve good results, however, the former is more convenient and completely adaptive.

Key words empirical mode decomposition (EMD)-scales filtering; Hilbert-Huang transform (HHT); oscillatory flow; vortex flow signal; wavelet threshold filtering

涡街流量计是利用流体自然振荡原理来进行流量测量。涡街流量计的基本原理是在与被测介质流向垂直的方向放置一非流线型漩涡发生体,当流体流过该漩涡发生体时,在发生体后方两侧交替地分离释放出两列规则的交错排列的漩涡,称为冯·卡门涡街。当在漩涡发生体右(或左)下方产生一个漩涡后,就在漩涡发生体上产生一个升力。在漩涡发生体内部安装应力式压电传感器,可以将作用在漩涡发生体上的升力转换为电荷信号。电荷的变化频率与漩涡的脱离频率一致。通过检测压电传感器输出信号的变化频率,就可得到漩涡的分离频率。

涡街流量计进行测量时,外在噪声源、管壁振动和流体内部波动等,对测量结果都会产生明显的影响。针对外在噪声源和管壁振动问题,国内研究者对其进行了研究,目前主要的信号处理方法有基于FFT的经典谱分析法^[1]、基于Burg算法的现代谱估

计方法——最大熵谱法^[2]、自适应限波法^[3]、小波滤波方法^[4]、功率谱分析方法和互相关方法^[5-6]、自适应滤波方法。国外也有很多学者和公司都致力于涡街流量计去噪的研究,文献[7]研究了涡街流量计不同工作条件下的噪声情况,提出了强干扰条件下的信号处理方案。即在建立噪声模板的基础上,用频域转换和互相关功率谱相结合的方法来消除流量测量中的强噪声。但是,该方法只针对某些特定的噪声,实际噪声情况多种多样,不易获得所有噪声的模板。文献[8]通过增强钝体的刚度和自适应低通滤波方法来提高流量计的信噪比,根据信号频率来调整滤波器的截止频率提高仪表可靠性。文献[9]研究了工作环境的噪声对漩涡脱离频率的影响,采用基于FFT的谱分析来计算涡街信号频率,提高了流量计的测量精度。文献[10]首次用超声波直接测量涡街信号频率再计算出流量,与先测两个测量点之间的

收稿日期: 2010-07-21; 修回日期: 2011-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(61074182); 教育部博士点新教师基金(200806141058); 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2009J067)

作者简介: 彭杰纲(1971-)男, 博士, 副教授, 主要从事传感器技术及测控技术方面的研究。

旋涡通过的时间再计算流量的方法的结果进行融合,得到新的流量值,从而提高测量的精度。文献[11]采用自适应滤波来提高流量测量的精度,文献[12]研制了以数字跟踪滤波器(digital tracking filter)为核心的涡街流量计数字信号处理系统。

虽然这些方法都在一定程度上取得一些效果,但是都没有考虑由于流体脉动干扰引起的主频移动现象的影响。并且前面的方法受到传统的傅里叶变换的束缚,最后一种方法采样点数多,计算时间长,实时性差。针对以上问题,本文提出一种新的信号处理方法——希尔伯特黄变换(HHT)来去除涡街流量计的脉动流噪声。

本文运用HHT中EMD尺度滤波法对脉动流中的涡街流量信号进行了研究并滤波,并与传统的小波阈值滤波进行对比,实验结果表明HHT中的EMD尺度滤波更简单,效果更明显。

1 基本理论

1.1 涡街流量计工作原理

涡街流量的工作原理如图1所示,在一定的雷诺数范围内由旋涡发生体诱发的旋涡分离频率正比于管道内的平均流速,从而由流速得到流体的流量,在流体力学中有以下关系成立:

$$f = (S_r v) / d$$

式中, S_r 为斯特劳哈数(在一定流态下是常数); f 为旋涡脱离频率; v 为流体速度; d 为旋涡发声体宽度。

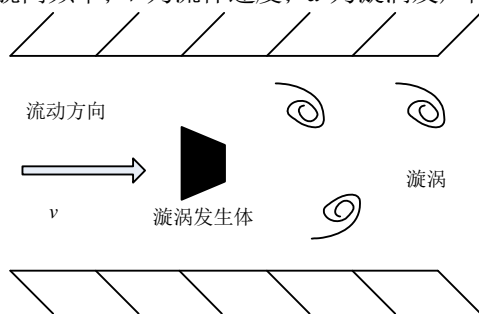


图1 涡街流量计原理图

1.2 希尔伯特黄变换

希尔伯特黄变换(HHT)是文献[13]提出的一种新的信号分析方法,主要适用于处理非平稳信号。希尔伯特黄变换主要由两部分组成:经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)和Hilbert变换。经过EMD分解后,信号被分解成有限个固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),然后对这些相互无关的IMF进行Hilbert变换,求出它们的瞬时频率。HHT的优势在于EMD分解过程是自适应的,省去了选择小波基这个难点;而且分解后的IMF相互无关,

且有具体的物理意义。

1.2.1 瞬时频率

瞬时频率 ω 定义为:

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

这样定义的限制条件是,只有当信号表达式 $x(t) = a(t) \cos \varphi(t)$, $x(t) = a(t)e^{i\varphi(t)}$ 时,方能求瞬时频率。

1.2.2 固有模态函数(IMF)

要成为IMF必须同时满足两个条件:

1) 在整个时间序列中,局部极值点个数和过零点的个数必须相等,或最多只能相差一个;2) 在任意时刻,由局部极大值点形成的包络(上包络线)和局部极小值的包络(下包络线)的平均必须为零,即上下包络线相对于时间轴局部对称。

条件1)是显而易见的,类似传统的平稳高斯窄带过程;条件2)是一种新的思想,这样定义的瞬时频率不会产生非对称波形式引起的不必要的波动。

1.2.3 EMD分解

EMD分解是将一个复杂的信号分解成若干个IMF之和,并且分解出的每个IMF必须满足IMF的两个条件。采用以下步骤对信号 $x(t)$ 进行EMD分解。

1) 先确定信号 $x(t)$ 所有的局部极值点,然后用三次样条插值函数去拟合,形成信号的上下包络,计算上下包络的均值 $m_1(t)$ 。2) 令 $h_1(t) = x(t) - m_1(t)$,理想的是 $h_1(t)$ 满足 IMF 的条件时将 $h_1(t)$ 记为 $c_1(t)$ 。3) 一般情况下 $h_1(t)$ 是不满足 IMF 条件的,就将 $h_1(t)$ 当成原始信号来处理,重复前面的步骤。先得到上下包络的平均 $m_{11}(t)$,再去判断 $h_{11}(t) = h_1 - m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件;直到 h_{1k} 满足 IMF 的条件为止,记 $c_1(t) = h_{1k}(t)$ 。4) 将 $c_1(t)$ 从 $x(t)$ 中分离出来,令 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ 。将 $r_1(t)$ 又当作原始数据,重复上面的步骤,按照相同的方法筛选出其他的满足条件的 IMF 分量,直到不能满足筛选条件为止,这时只剩下一个残留分量 $r_n(t)$ 。

$$r_1(t) - c_2(t) = r_2(t)$$

$$r_n(t) - c_n(t) = r_n(t)$$

式中, $r_n(t)$ 为残余分量,代表信号的平均趋势。信号与筛分出的 IMF 之间的关系为:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t)$$

1.2.4 EMD尺度滤波

信号经EMD分解成有限个IMF分量后, 每一个IMF都代表着某一特征尺度, 即EMD具有尺度滤波的性质。

对一个含有 n 阶IMF成分的低通尺度滤波器可表示为:

$$X_l = \sum_k^n C_j(t) + r_n$$

高通尺度滤波器可以表示为:

$$X_h = \sum_1^k C_j(t) \quad 1 < k < h < n$$

带通尺度滤波器可以表示为:

$$X_b(t) = \sum_k^h C_j(t)$$

利用经验模式分解后固有模态函数得到的信号的波动成分为:

$$X_f(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) = X(t) - r_n(t)$$

因此, 可以将信号的波动看成是原始信号通过一个带通滤波器, 去除了高频噪声和趋势项得到的。

1.3 小波阈值去噪

小波阈值去噪是先将信号进行小波分解, 再对分解后的信号选用合适的阈值进行阈值去噪。小波分解是将时域信号分解成细节信号和近似信号。而阈值去噪分硬阈值和软阈值, 一般情况下软阈值效果更好。常用的4种经典阈值有: sqtwolog是固定的阈值形式, 它所产生的阈值为 $\text{sprt}(2\lg(\text{length}(X)))$, X 表示信号。rigrsure是基于stein的无偏/似然估计原理的自适应阈值选择。Minimaxi是固定阈值选择形式, 产生一个最小均方差的极值。heursure是rigrsure和sqtwolog两种阈值的综合, 选择的是最优预测变量阈值, 如果信噪比小, 就采用这种固定的阈值形式。

1.4 信噪比

信噪比定义为:

$$\text{SNR} = 20\lg \left(\frac{\sum_n f^2(n)}{\sum_n [f(n) - f'(n)]^2} \right)$$

其中, $f(n)$ 为不含噪声的原始信号, 是滤波去噪后的信号。

2 仿真

2.1 工程背景

图2为实验装置及测试系统原理图。实验装置是气体流量实验系统, 它由5个部分组成。I是流场干扰模拟装置, 用于在实验室条件下模拟流场波动; II是实验表体; III是标准流量校准装置, 采用临界流文丘利喷嘴流量计作为校准其他仪表的基准; IV是压差产生装置, 通过真空泵产生负压, 入口和出口之间产生一个压差, 形成小型风洞; V是计算机测试系统, 用于测量传感器的输出, 主要由电荷放大器及便携式动态信号分析仪(分析仪有4个输入通道, 一个输出通道; 120 MHz TMS320VC33 DSP, 21 kHz处理率; 32位浮点DSP; ICP传感器供电; USB接口, 支持热插拔; 重量小于200 g, 抗振动外壳)和计算机所组成。

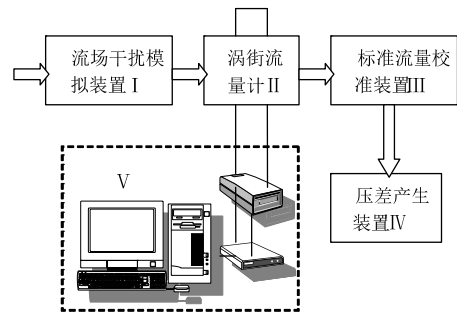


图2 实验装置

用以上装置进行数据测量, 可以将抽象的问题转换成具体问题: 去除由流场干扰模拟装置的周期性干扰。本文的具体做法为: 在脉动流下的涡街信号进行EMD分解后, 噪声和信号都在IMF中, 先要从各阶IMF中找出含有涡街干扰频率成分的那些IMF, 然后将这些强干扰去掉, 也就是用EMD尺度滤波的方式来对脉动场下的涡街流量信号进行滤波降噪。

2.2 信号EMD分解

实验数据是在加入182 Hz脉动流干扰、流速分别为42、67、112 m³/h下测出的, 将它们分别记为 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$, 改变实验条件, 不加入脉动流干扰, 测得相同流速下的序列作为对比信号。先对 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$ 这3个信号进行EMD分解, 如图3所示^[14-15]。

表1 EMD分解后前几阶IMF的频谱

f_0/Hz	流量			
		42	67	112
未加干扰	主频	130	200	310

	增加主频	800	800	800,1 600
	分解层数	8	6	8
加入	IMF ₁ /Hz	高频噪声	高频噪声	高频噪声
182 Hz	IMF ₂ /Hz	800	800	1 600
扰动干扰	IMF ₃ /Hz	400~800	400	750
	IMF ₄ /Hz	200	200	310
	IMF ₅ /Hz	100	100	150~250

表1是EMD分解后前几阶IMF的频谱,从表中可以看出,在加入182 Hz脉动流干扰下,每个信号都有个800 Hz的主频,有的信号还有倍频出现,这些频率都是涡街干扰频率。需要将这些干扰频率用EMD尺度滤波的方式将其滤掉。 $c_1(t)$ 含有的几乎都是高频信号,比较嘈杂,频率成分比较丰富,但是幅度较小;随着分解的继续进行,IMF的频率越来越低,波长越来越长,直到不满足分解条件为止。

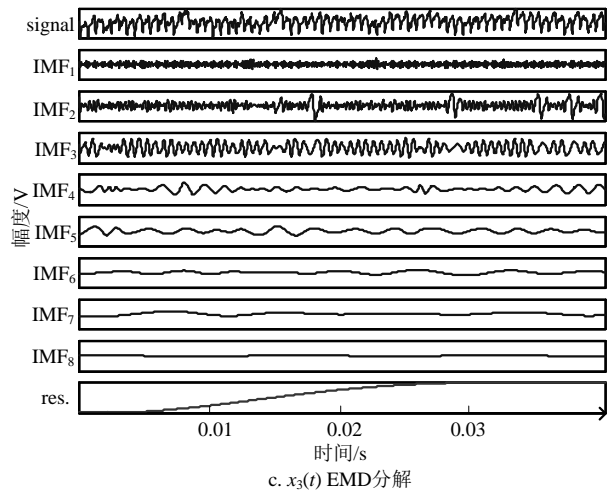
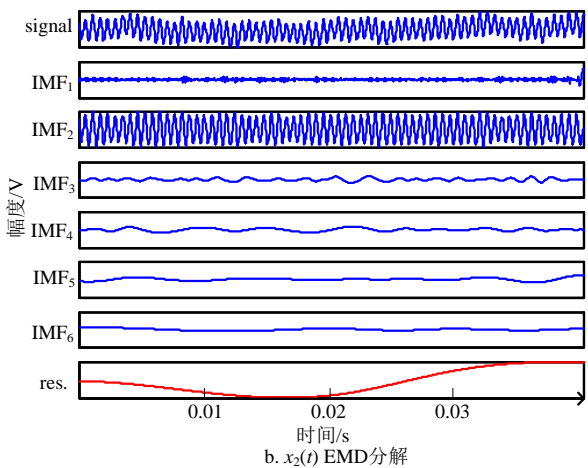
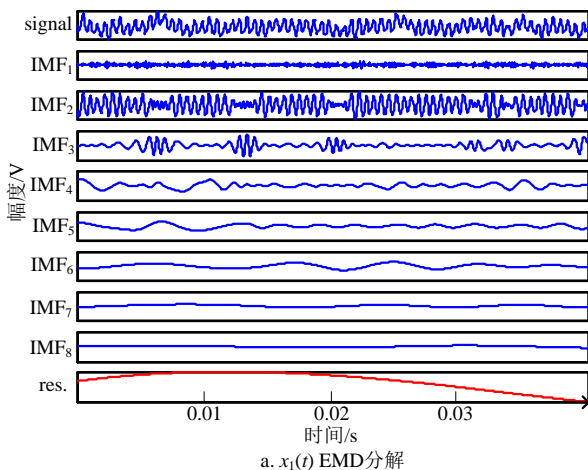


图3 EMD分解

2.3 EMD尺度滤波

要对这3个信号进行EMD尺度滤波实质上就是需要从IMF中找出扰动干扰的那阶或几阶IMF,将其去掉。在加入扰动电压后,流速在42 m³/h时,扰动干扰频率分布在IMF₂中;流速在67 m³/h时,扰动干扰频率分布也在IMF₂中;流速在112 m³/h时,扰动干扰频率分布在IMF₂和IMF₃中。在流速较大时,在112 m³/h时有二倍频出现,有个1 600 Hz的频率。用EMD尺度滤波后的信号如图4所示。图4a~图4i中横坐标表示时间(单位: s),纵坐标表示幅度(单位: mV)。

从图3的3个信号经过EMD尺度滤波后,发现信号比原始信号有了很大的改善,并且去噪后的信号可以大致反映出对比信号的波动, $x_3(t)$ 序列去噪效果稍差。

2.4 与小波滤波对比

把用小波滤波效果最好的信号进行重构,如图5所示。图中,3个信号都是小波五层分解,阈值选择的是rigrsure, x_1 、 x_2 、 x_3 分别选用的小波基是bior3.7、db8、coif5;横坐标表示时间(单位: s),纵坐标表示幅度(单位: mV)。

表2 信噪比

信号	流量/m ³ ·h ⁻¹	去噪前的信噪比	EMD尺度滤波后的信噪比	小波阈值去噪后的信噪比
x_1	42	-5.204 7	4.352 1	4.226 1
x_2	67	-7.457 2	3.589 2	3.356 5
x_3	112	-7.650 9	2.813 7	2.694 7

表3 主频相对误差

表3.1 182 Hz脉动流干扰的主频相对误差

流量/m ³ ·h ⁻¹	f_0 /Hz	e_{WT} (%)	e_{HHT} (%)
42	128.9	17.3	13.4
67	199.3	-9.7	5.8
112	312.6	-6.1	-5.1

表3.2 295 Hz脉动流干扰的主频相对误差

流量/m ³ ·h ⁻¹	f ₀ /Hz	e _{WT} (%)	e _{HHT} (%)
36	113.5	-15.1	-13.2
67	199.3	-7.2	-6.2
112	312.6	-6.7	-6.1
178	495.7	-5.6	-3.7
220	625.9	-4.5	-3.3

分析小波阈值去噪首先要选用阈值和小波基, 而整个阈值去噪的难点就是小波基的选择, 选用不同的小波基, 阈值去噪的效果是不一样的。从图4可以看出, 用小波阈值滤波也可以达到较好的效果, 去噪后的信号基本上反映了信号的波动情况。求信噪比时, 由于两个信号是两次测量, 需要移动点数, 使之尽量为同步信号, 误差为一个采样点, EMD尺度滤波和小波滤波后的信噪比如表2所示。

比较以上两种去噪方法, 可以发现都能达到去噪的目的, 在相同流速情况下, 用EMD尺度滤波比小波滤波方式效果更好, 而且EMD尺度滤波方法比小波阈值去噪的方法要简单, 整个EMD分解的过程是自适应分解的, 不用像小波滤波方法去选择分解

尺度、阈值和小波基。在频域上去噪信号用频率衡量, 误差信号定义为:

$$e = \frac{f - f_0}{f_0} \times 100\%$$

式中, f 为去噪后测量的频率; f_0 为没有加噪的信号测量出的频率。

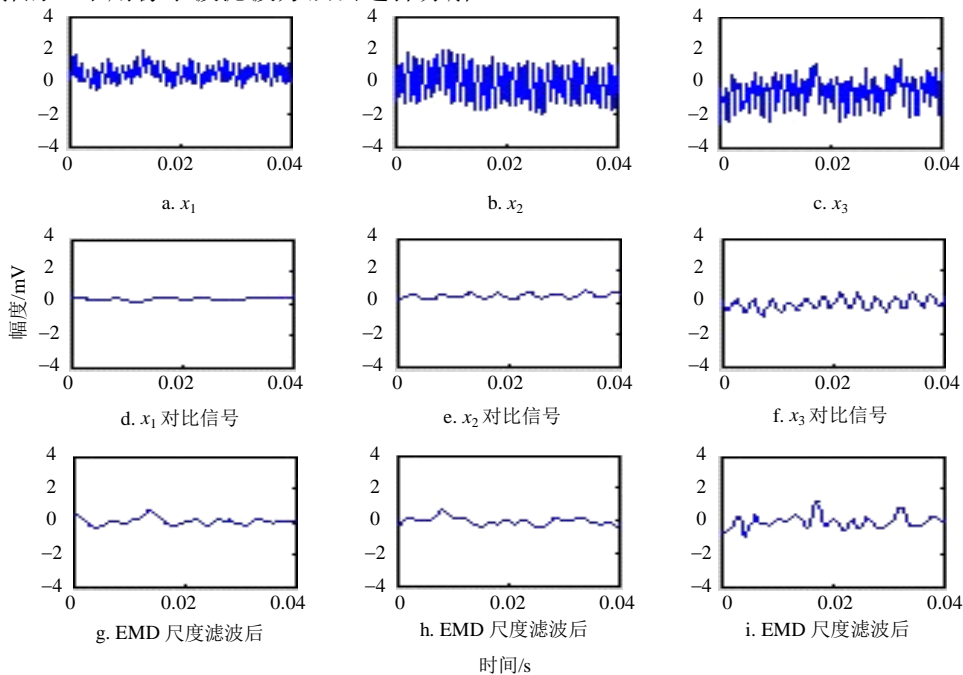


图4 EMD尺度滤波后信号

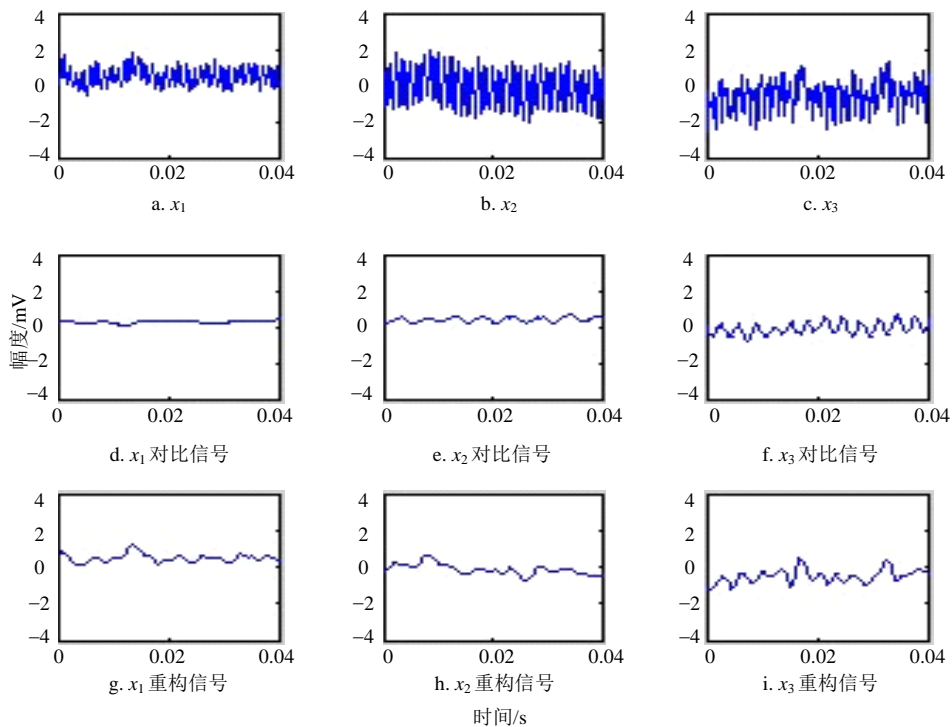


图5 小波阈值去噪后的信号

表3为小波阈值去噪和EMD尺度滤波后主频的相对误差,表3.2中流量为 $42\sim 112\text{ m}^3/\text{h}$,加入 182 Hz 脉动流干扰即是前面进行EMD尺度滤波和小波阈值滤波的3组信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$;同理可以计算出表3中流量为 $36\sim 220\text{ m}^3/\text{h}$,加入的脉动流干扰为 295 Hz ,增加的主频为 $1\ 100\text{ Hz}$ 。

分析以上数据, 182 Hz 脉动流干扰中 800 Hz 的主频和 295 Hz 脉动流干扰中的 $1\ 100\text{ Hz}$ 的主频都被滤掉了,计算出滤波后的主频和没有加干扰的主频比较接近;小流量的去噪后的效果普遍没有大流量的效果好,并且在相同流量时,用HHT方法比小波方法的误差要小些。

3 结论

基于HHT去噪的方法是一种新的数据处理方法,用HHT滤波的方法可以实现涡街流量信号滤波的目的。相比其他方法,用HHT滤波更加简便,整个EMD分解的过程不用去选择基函数,是自适应分解的。从上面的实验可以看出处理涡街流量信号既简单又有效,同时为处理涡街流量信号领域提供了一种新的方法。

参考文献

[1] 陈洁, 李斌. 涡街流量信号处理中FFT谱分析法的探讨[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(3): 244-247.
CHEN Jie, LI Bing. FFT spectral analysis in vortex signal processing[J]. Journal of Shanghai University, 2004, 10(3):

244-247.
[2] 顾倩, 张崇巍. 最大熵谱分析法在流量测量中的应用[C]//全国第六届非电量电测会议. [地址不详]: [出版者不详], 1990: 113-117.
GU Qian, Zhang Chong-wei. Maximum entropy spectral analysis in the flow measurement applications[C]//The 6th Non-Electric Quantity Electrical Measurement Conference. [S.l.]: [s.n.], 1990: 113-117.
[3] 徐科军, 汪安民. 涡街流量计信号估计的自适应陷波方法[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2): 206-207, 214.
XU Ke-jun, WANG An-ming. An adaptive notch filtering method of signal estimation for vortex flowmeters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(2): 206-207, 214.
[4] 黄云志, 徐科军. 基于IIR小波滤波器的涡街流量计数字信号处理系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2142-2146.
HUANG Yun-zhi, XU Ke-jun. Digital signal processing system based on IIR wavelet filter for vortex flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(12): 2142-2146.
[5] 王峰, 鞠文涛, 胡亮, 等. 自适应FFT功率谱分析在涡街流量计中的应用[J]. 机床与液压, 2008, 36(10): 116-118, 147.
WANG Feng, JU Wen-tao, HU Liang, et al. The application of adaptive FFT power spectrum analysis in vortex flowmeter[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(10): 116-118, 147.
[6] 李小京. 用二重互相关算法扩展涡街流量计测量下限[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 25-26, 29.
LI Xiao-jing. Extending measured value of vortex flowmeter at lower velocity by using quadratic cross correlation algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technology,

- 2008, 27(1): 25-26, 29.
- [7] SCHLATTER G L, BARRETT W D, WAERS J F, et al. Signal processing method and apparatus for flowmeter, WO90104230[P]. 1990.
- [8] KAWANO T, MIYATA T, SHIKUYA, et al. Intelligent vortex flowmeter[C]//Conf on Advances in Instrumentation and Control. [S.l.]: [s.n.], 1992: 35-43.
- [9] AMADI-ECHENDU J E, ZHU H J, HINGHAM E H. Analysis of signals from vortex flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1993, 4(4): 225-231.
- [10] MENZ B. Vortex flow meter with enhanced accuracy and reliability by means of sensor fusion and self-validation[J]. Journal of the International Measurement Confederation, 1997, 22: 123-128.
- [11] Cook W E. Adaptive filter with sweep filter analyzer for a vortex flowmeter, US6212975[S]. 2001.
- [12] KLEVEN L A. Rapid transfer function determination for a tracking filter, US5942697[S]. 1999.
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for linear and nonstationary time series analysis[C/OL]. Proc R Soc London A 454, 1998: 992-995. [2010-02-10]. <http://www.jstor.org/stable/53161>.
- [14] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P. On empirical mode decomposition and its algorithms[C]//IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. [S.l.]: IEEE, 2003, NSIP-03: 236-243.
- [15] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Sig Lett, 2004, 11(2): 112-114.

编辑 漆蓉