

# 改进HHT在线滤波算法在电液伺服系统控制中的应用

黄 静<sup>†</sup>, 李长春, 延 皓, 杨雪松

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)是一种针对非线性非平稳信号时频分析的有效方法, 在诸多领域有着广泛应用. 目前HHT变换主要应用于离线分析, 为了将HHT变换引入电液伺服控制系统, 实现了一种HHT的在线滤波方法, 通过改进的经验模式分解法(EMD), 能对系统的输出信号进行实时滤波处理, 并适用于电液伺服控制系统. 首先设定一定长度的滤波窗口, 利用文中改进后的EMD分解法对窗口内的数据进行经验模态分解, 从中得到噪声分量和其他干扰信号分量. 然后从原信号中去除噪声和干扰信号分量, 达到滤波的效果. 由于该滤波器的时延特性不随控制信号频率的改变而改变, 只与滤波器的窗口长度有关, 因此在控制器中可进行延时补偿, 将基于HHT在线滤波器的控制方法应用于电液伺服控制系统中, 系统输出在相位和控制效果方面都取得了良好的效果, 验证了该方法的实用性.

**关键词:** 在线分析; Hilbert-Huang变换(HHT); 电液伺服系统

**中图分类号:** TP206      **文献标识码:** A

## Application of improved HHT online filtering algorithm in the control of electro-hydraulic servo system

HUANG Jing<sup>†</sup>, LI Chang-chun, YAN Hao, YANG Xue-song

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** Hilbert-Huang transform is an effective method which is used to time-frequency analysis of non-linear and non-stationary signal, and is widely used in many fields. Hilbert-Huang transform is mainly used to off-line analysis by now, a new on-line filtering method based on Hilbert-Huang transform is proposed and applied to electro-hydraulic servo control system, this new filter can process system's output signal in real time by using the improved empirical mode decomposition (EMD) method. Firstly, there should set the length of filter's window and apply the improved EMD method to decompose the original signal data which is in the filter's window. After this the noise components and other interference signal components can be got. Secondly, the noise components and other interference signal components can be removed from the original signal to achieve the filtering effect. As the time delay characteristics of this filter is not changed with the change of input signal's frequency, it's only related with the filter window length, so the time delay can be compensated by system's controller. This new method is applied in electro-hydraulic servo control system and the output of this system has achieved good results both in phase and control effect, which illustrates the practicability of this new control method.

**Key words:** on-line analysis; Hilbert-Huang transform; electro-hydraulic servo system

## 1 引言(Introduction)

Hilbert-Huang变换(Hilbert-Huang transform)是由NASA的Norden E Huang等<sup>[1]</sup>在1998年提出的新的信号处理方法, 简称HHT. 该方法针对非线性、非平稳信号分析具有很强的适应性, 被认为是近年来对以傅立叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破. 目前HHT技术在很多领域都得到了广泛的应用并有很好的效果, 例如地球物理学、生物医学、图像处理、故障诊断等领域.

在液压系统中系统动态特性具有复杂多变的非平

稳特征<sup>[2]</sup>, 因为液压传动介质自身的特性以及液压系统容易受到温度、压力等环境的影响等原因, 使得液压缸的工作状态比较容易出现振动、噪声、冲击等不正常状态. 从系统的动态特性上来看具有复杂多变的非平稳特征, 体现在时域上的现象就是波形复杂, 频域尖峰繁多. 为了滤除信号中的各种噪声信号和干扰信号, 需要在控制系统中使用相应的数字滤波器来进行滤波, 由于普通数字滤波器是在频域进行设计和性能分析, 因此存在相位滞后和幅值衰减的问题.

鉴于液压系统的信号特点, HHT变换可以有效的

收稿日期: 2015-08-09; 录用日期: 2016-06-13.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: 13116339@bjtu.edu.cn; Tel.: +86 10-51685109.

本文责任编辑: 周彤.

北京高等学校青年英才计划项目(YETP0567)资助.

Supported by Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project (YETP0567).

对系统信号进行处理和分析, 可以从信号中将各阶噪声信号分解出来, 从而可以按实际需求“精确”去除噪声和干扰, 提取出有用信号, 达到滤波效果. 并且, 由于Hilbert-Huang变换是从信号本身的特征尺度出发对信号进行分解, 因此具有良好的适应性, 增强了处理信号的灵活性和有效性<sup>[3]</sup>. 但由于HHT变换过程中受经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)计算量以及端点效应<sup>[4-9]</sup>所带来的影响, 该方法主要应用于离线分析, 未能很好地应用于实时处理和在线滤波.

为了将HHT的优点应用于电液伺服系统的控制中, 改进了EMD分解方法并生成了在线滤波器, 针对该在线滤波器的特点, 重新设计了电液伺服系统的控制器.

## 2 Hilbert-Huang变换简介(Brief introduction of Hilbert-Huang transform)

Hilbert-Huang变换, 由经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)与Hilbert谱分析(Hilbert spectral analysis)两部分组成.

EMD分解过程是HHT变换的核心过程, 可以将复杂信号按照频率从高到低的次序分解为一系列具有时间尺度的IMF分量, 分解所得的IMF分量也大都具有明确的物理意义<sup>[10]</sup>. 其具体步骤如下:

1) 寻找信号 $x(t)$ 的所有局部最大值和最小值.

2) 根据极值点使用插值算法(三次样条插值法、阿克玛插值法、线性插值法等)拟合出极大值点所形成的上包络线 $x_{\max}(t)$ , 以及极小值点所形成的下包络线 $x_{\min}(t)$ .

3) 计算得出上、下包络线的平均值 $m(t)$ .

4) 用原信号 $x(t)$ 减去 $m(t)$ , 得出第一个组件 $h(t) = x(t) - m(t)$ . 如果 $h(t)$ 不满足终止条件式(1), 则继续重复步骤1)–4), 直至满足终止条件.

$$sd = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(h_{k-1}(i) - h_k(i))^2}{h_{k-1}^2(i)} \right], \quad sd \in [0.1, 0.3], \quad (1)$$

$sd$ 的值一般取0.1–0.3之间, 需要根据具体情况而定.

令 $I_1(t) = h(t)$ , 原始信号 $x(t)$ 减去 $I_1(t)$ 后的余项 $r(t) = x(t) - I_1(t)$ 作为下一次待分解信号, 重复步骤1)–4)依次分解出 $I_2(t), I_3(t), \dots$ , 当 $r(t)$ 为单调序列或者常值序列时, 终止分解过程.

数据EMD分解过程中寻找极值点以及极值点包络线和包络线的平均值如图1所示.

## 3 EMD分解过程优化(Optimization of EMD process)

从EMD分解方法可以看出, 包络线的包络情况及端点效应<sup>[11]</sup>影响着整个分解结果, 国内外学者做了很多研究<sup>[12-14]</sup>, 也进行了一些实际的应用<sup>[15-18]</sup>. 尤其

是在线滤波时, 由于滤波窗口长度一般都较小, 数据长度较短, 端点效应更加明显.

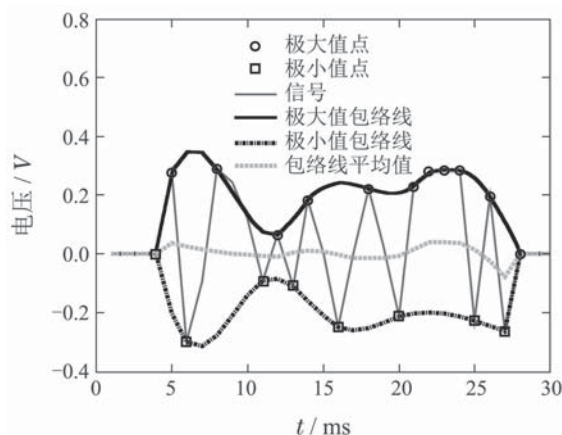


图1 EMD分解过程示意图

Fig. 1 EMD decomposition process

针对端点对短数据的影响以及包络线更好包络的问题, 本文对EMD分解方法做出了以下的改进:

1) 在寻找极值点的过程中, 如果端点处 $x_1$ 或 $x_{\text{end}}$ 满足式(2)–(3), 也要将其纳入极值点.

$$x_1 = \max(x_1, \dots, x_{\text{end}}) \text{ 或} \\ x_1 = \min(x_1, \dots, x_{\text{end}}), \quad (2)$$

$$x_{\text{end}} = \max(x_1, \dots, x_{\text{end}}) \text{ 或} \\ x_{\text{end}} = \min(x_1, \dots, x_{\text{end}}). \quad (3)$$

2) 寻找数据局部极值点的本质是找出数据中的变化趋势转折点, 依据该原则对极值点的定义式(4)–(5)之外做如下扩展.

$$x(i) > x(i-1), \text{ 且 } x(i) > x(i+1), \quad (4)$$

$$x(i) < x(i-1), \text{ 且 } x(i) < x(i+1). \quad (5)$$

数据的极大值点扩展定义如下:

$$x(i) = x(i-1), \text{ 且 } x(i) > x(i+1), \quad (6)$$

$$x(i) = x(i+1), \text{ 且 } x(i) > x(i-1). \quad (7)$$

数据的极小值点扩展定义如下:

$$x(i) = x(i-1), \text{ 且 } x(i) < x(i+1), \quad (8)$$

$$x(i) = x(i+1), \text{ 且 } x(i) < x(i-1). \quad (9)$$

3) 在极大值和极小值之间进行插值, 待插值点的判断和插值方法如下:

1) 假如原数据中找出了 $m$ 个极值点 $[x_{\max 1}, x_{\max 2}, x_{\max 3}, \dots, x_{\max m}]$ , 根据每两个极值点之间的间距 $D_j$ 计算得出极值点之间的平均间距 $D_{\text{avg}}$ :

$$D_{\text{avg}} = \frac{\sum_{j=1}^{m-1} D_j}{m-1}. \quad (10)$$

2) 寻找出极值点间距里的最大间距 $D_{\max}$ , 对

$D_{\max}$  进行判断是否需要插值, 如果满足下列判断条件之一则需要插值, 判断条件如下:

a) 如果  $m = 1, D_{\max} \geq N/2$ ,  $N$  为滤波数据长度,  $m$  为极值点的个数.

b) 如果  $m \geq 2, D_{\max} \geq 1.5 \cdot D_{\text{avg}}$ ,  $m$  为极值点的个数.

3) 在最大间距  $D_{\max}$  内部插值时, 按照计算得出的平均间距  $D_{\text{avg}}$ , 选择当前被分解信号里的原始数据作为插值点. 假如最大间距出现在  $x_{\max i}, x_{\max j}$  之间,  $1 \leq i < j \leq m$ , 则插值后的极值点序列变为

$$[x_{\max 1}, x_{\max 2}, x_{\max 3}, \dots, x_{\max i}, x_{t1}, x_{t2}, x_{t3}, \dots, x_{tn}, x_{\max j}, x_{\max m}]$$

假如  $x_{\max i}$  对应原数据中的  $x(a)$ , 即  $x_{\max i} = x(a)$ , 则

$$t_1 = a + 1D_{\text{avg}}, t_2 = a + 2D_{\text{avg}}, \dots, t_n = a + nD_{\text{avg}}$$

4) 为了提高EMD的分解效率, 减少分解时间, 增加一个分解终止条件, 其表达式如下:

$$s = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(x(i) - I(i))^2}{x(i)^2} \right], s < 0.1, \quad (11)$$

式中:  $x(i)$  为待分解的原始数据;  $I(i)$  为分解后得到的IMF分量;  $N$  为数据长度;  $s$  表示分量  $I(i)$  和原始数据  $x(i)$  的方差, 若该方差小于设定的阈值即可认为两段数据“相似”, 则可以停止分解过程.

#### 4 HHT在线滤波器的设计(Design of HHT on-line filter)

基于第3节中的优化过程, HHT在线滤波的计算过程如下:

1) 设定滤波窗口的长度为  $n$ , 即有一个长度为  $n$  的队列, 每采集一个点, 窗口里的数据往前挪动一个位置, 然后将最新的数据放在队列的最后一个位置上. 队列  $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$  变为  $[x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n+1}]$ .

2) 依次找出队列  $[x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n+1}]$  中所有的局部极大值点队列

$$x_{\max} = [x_{\max 1}, x_{\max 2}, x_{\max 3}, \dots, x_{\max p}]$$

局部极大值点应满足式(4)(6)–(7).

如果端点  $x_2, x_{n+1}$  满足条件式(2)或者式(3), 则  $x_2, x_{n+1}$  也纳入队列  $x_{\max}$  内.

3) 依次找出队列  $[x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n+1}]$  中所有的局部极小值点

$$x_{\min} = [x_{\min 1}, x_{\min 2}, x_{\min 3}, \dots, x_{\min q}]$$

局部极小值点应满足式(5)(8)–(9).

4) 利用第3.1节中优化方法(3), 对极值队列  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  进行插值, 得到新的队列  $x'_{\max}$  和  $x'_{\min}$ .

5) 插值后的局部极值点队列  $x'_{\max}$  和  $x'_{\min}$  利用样条插值算法在  $[\max_1, \max_p], [\min_1, \min_q]$  范围内插值, 可得到队列  $[x_2, x_2, x_3, \dots, x_{n+1}]$  的上包络线队列  $e_{\max} = [e_{\max 1}, e_{\max 1+1}, e_{\max 1+2}, \dots, e_{\max p}]$  和下包络线队列

$$e_{\min} = [e_{\min 1}, e_{\min 1+1}, e_{\min 1+2}, \dots, e_{\min q}]$$

6) 在  $[2, n+1]$  区间范围内扩展包络线队列  $e_{\max}$  和  $e_{\min}$ , 即在区间  $[\max_1, \max_p]$  和  $[\min_1, \min_q]$  之外的使用原数据填充, 即

$$e'_{\max} = [x_2, x_3, \dots, x_{\max 1-1}, e_{\max 1}, e_{\max 1+1}, \dots, e_{\max p}, x_{\max p+1}, x_{\max p+2}, \dots, x_{n+1}]$$

$$e'_{\min} = [x_2, x_3, \dots, x_{\min 1-1}, e_{\min 1}, e_{\min 1+1}, \dots, e_{\min q}, x_{\min q+1}, x_{\min q+2}, \dots, x_{n+1}]$$

7) 进行信号分解, 首先计算得出上、下包络线的均值  $m(t) = (e'_{\max}(t) + e'_{\min}(t))/2$ , 用原数据  $x(t)$  减去  $m(t)$  可以得到差值  $h(t), h(t) = x(t) - m(t)$ . 利用分解终止条件式(1)和式(11)对  $h(t)$  进行判断, 如果不满足条件, 则针对  $h(t)$  继续重复步骤(2)–(7), 直至满足终止条件. 此时得到的  $h(t)$  即为第1个分量 IMF1,  $\text{IMF1}(t) = h(t)$ .

8) 原数据  $x(t)$  减去 IMF1(t) 可以得到余量  $r(t)$ , 针对  $r(t)$  重复步骤(2)–(7), 依次可以得到各阶分量 IMF2, IMF3, IMF4, ...

整个分解过程可以通过表1来表示. 表中  $m$  表示包络线的中值,  $h$  表示余项.

表 1 IMF各阶分量分解过程

Table 1 The decomposition process of IMF components

阶次	初始数据	第1次分解	第2次分解	第3次分解	...	第k次分解	结果
IM1	$x$	$x - m_{11} = h_{11}$	$h_{11} - m_{12} = h_{12}$	$h_{12} - m_{13} = h_{13}$	...	$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$	$\text{IMF}_1 = h_{1k}$
IM2	$r_1 = x - \text{IMF}_1$	$r_1 - m_{21} = h_{21}$	$h_{21} - m_{22} = h_{22}$	$h_{22} - m_{23} = h_{23}$	...	$h_{2(k-1)} - m_{2k} = h_{2k}$	$\text{IMF}_2 = h_{2k}$
IM3	$r_2 = r_1 - \text{IMF}_2$	$r_2 - m_{31} = h_{31}$	$h_{31} - m_{32} = h_{32}$	$h_{32} - m_{33} = h_{33}$	...	$h_{3(k-1)} - m_{3k} = h_{3k}$	$\text{IMF}_3 = h_{3k}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
IMF <sub>n</sub>	$r_{n-1} = r_{n-2} - \text{IMF}_{n-1}$	$r_{n-1} - m_{n1} = h_{n1}$	$h_{n1} - m_{n2} = h_{n2}$	$h_{n2} - m_{n3} = h_{n3}$	...	$h_{n(k-1)} - m_{nk} = h_{nk}$	$\text{IMF}_n = h_{nk}$

### 4.1 分解次数的确定(Determination of the decomposition's order)

针对实际系统, 将系统的输出信号进行EMD分解, 其分解结果如图2所示. 从图中可以看出, 系统的噪声和干扰主要集中在前4个IMF分量中, 因此在进行EMD分解时, 只需要分解到IMF<sub>4</sub>即可终止. 设原始信号为 $X(t)$ , 分解后的各个IMF分量依次为 $IMF_1(t)$ ,  $IMF_2(t)$ ,  $\dots$ ,  $IMF_4(t)$ , 则滤波后的信号为 $y(t) = x(t) - IMF_1(t) - \dots - IMF_4(t)$ .

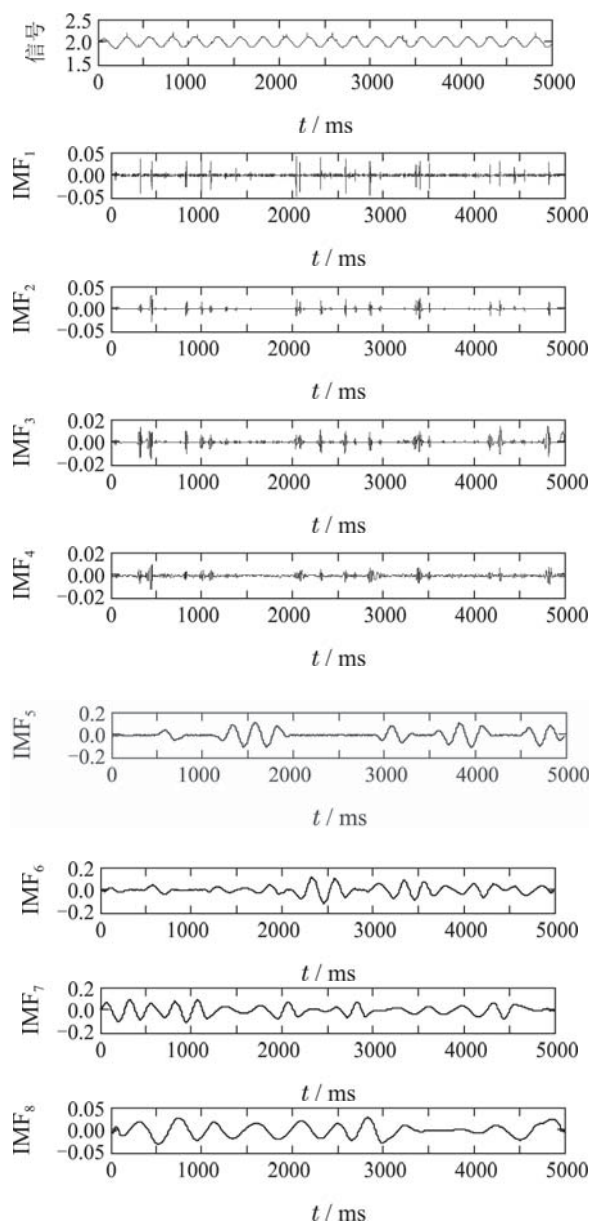


图 2 实际信号的EMD分解结果图

Fig. 2 EMD decomposition result of real signal

### 4.2 滤波窗口长度的选择(Determination of the filtering window's length)

利用Hilbert-Huang变换对数据进行EMD分解, 需要针对一定长度的数据. 因此需要预先设定一定长度的滤波窗口, 窗口中的数据采用先进先出(FIFO)的方

式入队列. 在窗口数据长度对滤波效果的影响主要表现在2个方面:

1) 数据长度越长, 里面包含的信息越多, 通过EMD分解能更好的分解出相应的干扰信号和噪声信号.

2) 数据长度越长, 处理的时间越长, 越不利于在线实时处理. 并且在线滤波时, 为了消除端点的影响, 取滤波后窗口中间位置的值作为滤波结果, 因此窗口长度越长, 滤波后信号的相位滞后越大.

这两个方面是相互矛盾的, 需要针对具体系统进行均衡. 在本系统中, 当输入的控制信号为4 Hz的标准正弦信号时, 针对系统的输出信号, 选取窗口长度为20和50后的滤波效果如图3-4所示.

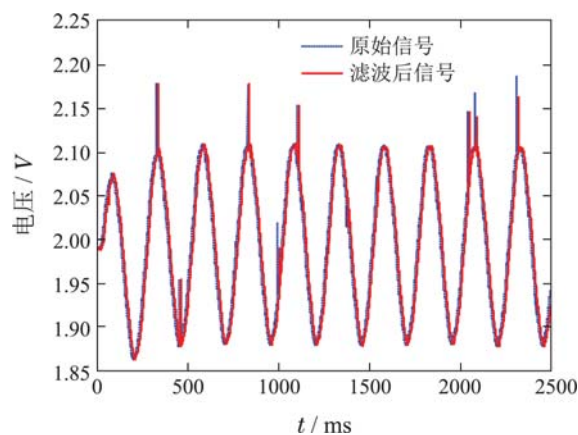


图 3 窗口长度为20的滤波效果图

Fig. 3 The filtering result when window length is 20

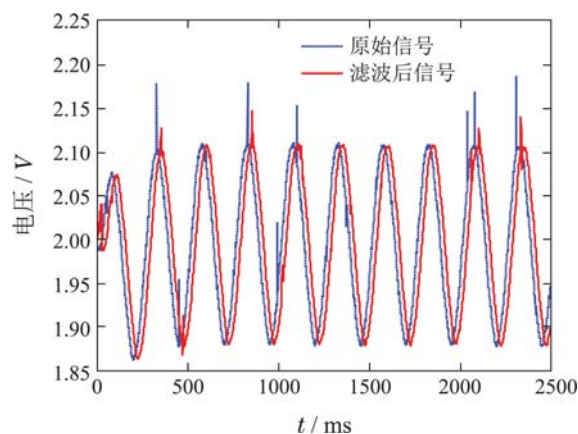


图 4 窗口长度为50的滤波效果图

Fig. 4 The filtering result when window length is 50

从两幅对比图中可以看出, 滤波窗口的长度为50时滤波效果较好. 因此本系统中滤波窗口长度选为50.

### 4.3 仿真验证(Simulation)

1) 针对改进点1和2, 未进行极值点定义的扩展时的包络线如图5所示. 图中点 $P_2, P_{19}$ 为数据拐点, 若不使用扩展定义式(6)-(9), 则不满足定义式(4)-(5), 不

能作为极值点,从而导致点 $P_4, P_{18}$ 没有完备的包络线:  $P_4$ 缺少上包络线,  $P_{18}$ 缺少下包络线. 根据EMD分解算法,  $P_4$ 点在下一次EMD的分解中的值为

$$P_4 - (P_{4\max} + P_{4\min})/2 = P_4 - (P_4 + P_4)/2 = 0,$$

使得极值点 $P_4, P_{18}$ 在本次EMD分解过程中被漏掉了,也就意味着EMD分解针对这两个点没有滤波作用. 根据EMD分解算法,图5中的信号减去上下限包络线的平均值以后变为图6中的信号曲线图. 随着EMD分解算法的继续进行,这种影响持续进行,并往数据中心发展,最终导致EMD分解算法只能分解出滤波窗口内中心位置的噪声分量,如图7所示,因此滤波效果只在数据段的中间位置起到效果,而在其他位置处基本没有效果.

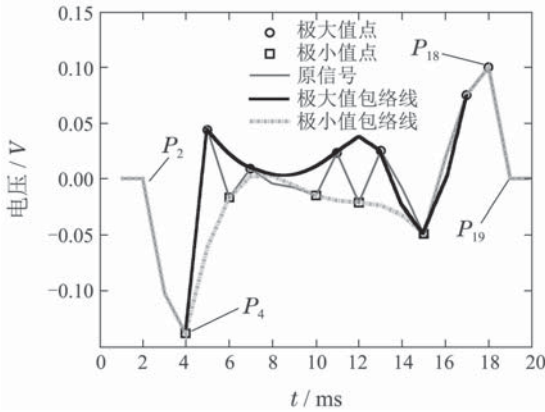


图5 数据拐点示意图a  
Fig. 5 The data changing point chart a

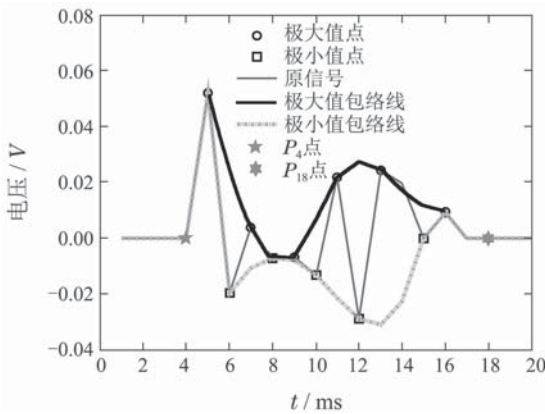


图6 数据拐点示意图b  
Fig. 6 The data changing point chart b

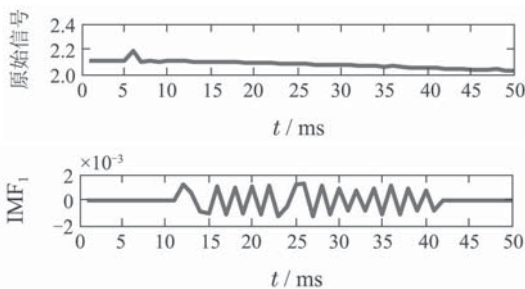


图7 数据拐点不作为极值点的分解效果

Fig. 7 The result without considering data changing points

使用改进后的EMD分解效果如图8所示. 从图8中可以看出,改进后的EMD分解方法针对整个数据段都能较好地分解出其中的噪声分量.

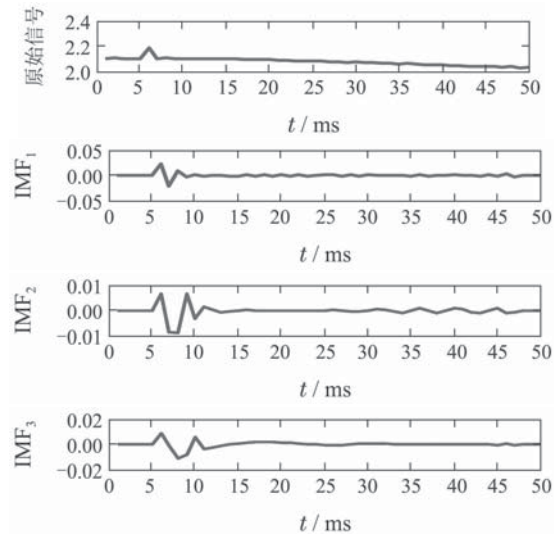


图8 数据拐点作为极值点以后的分解效果图

Fig. 8 The result with considering data changing points

2) 针对改进点3,在极值点跨度较大时未插值的包络线如图9所示. 包络线由于变形较大不能对原始数据进行很好的包络,导致该段数据的EMD分解效果差. 使用改进后EMD分解法,其插值以后的包络线如图10所示. 从图中可以看出,经过插值后包络线的包络情况得到了很大改善,使得分解效果更好.

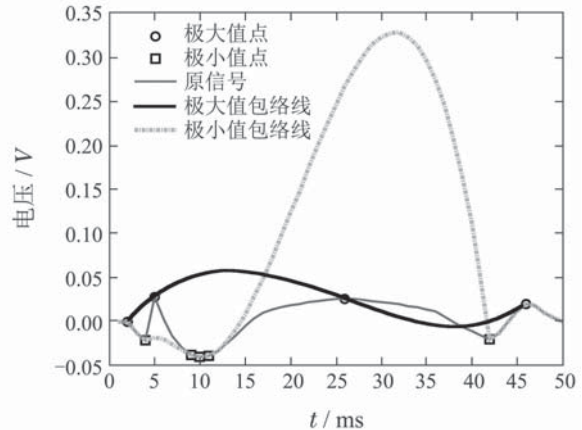


图9 极值点跨度过大对包络线的影响

Fig. 9 The influence of large extreme points span

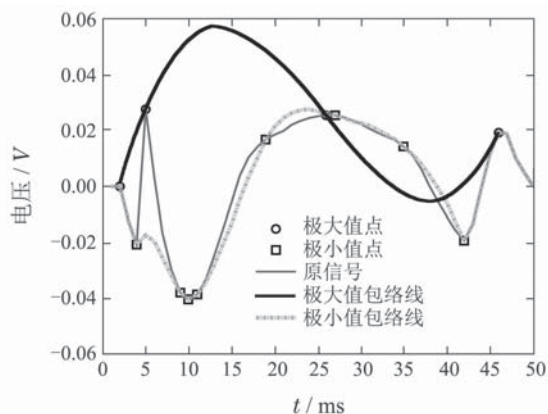


图 10 插值后的包络线示意图

Fig. 10 The envelop line after interpolation

3) 针对改进点4, 如图11所示, 该段数据在分解过程中噪声分量仅为第1个分量IMF1, 第2个分量IMF2就是期待的有用信号. 在滤波的过程中就只能去除IMF1, 如果将IMF2和IMF3都去除的话, 就只能得到全零的滤波结果. 增加了停止判断条件式(11)以后, 分解过程中在分解到IMF2时则停止了分解, 在滤波过程中只去除噪声分量IMF1, 从而获得了正确的滤波结果.

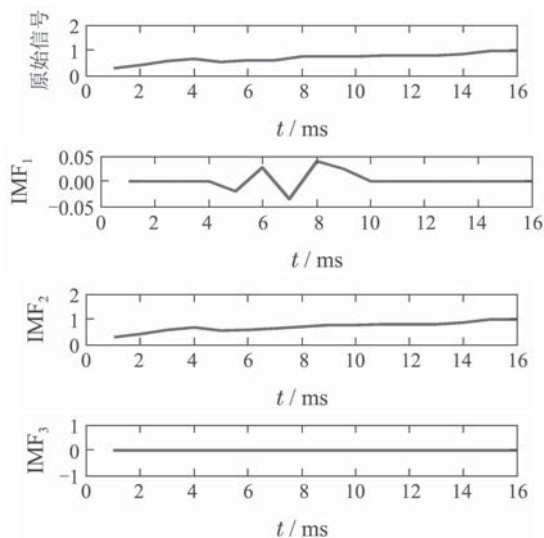


图 11 噪声分量仅为第1个分量说明图

Fig. 11 The noise component is only the first component

#### 4.4 实际的滤波效果(Filtering effect of the real signal)

采用优化后的EMD分解方法, 针对实际液压系统的信号, 分别进行了巴特沃斯滤波(低通滤波器, 通带为0-20 Hz, 通带衰减不超过3 dB, 在150 Hz处衰减至少为60 dB)和HHT在线滤波器. 其效果对比如图12所示. 图中原始信号为10 Hz的正弦信号, 并叠加上白噪声信号, 使其信噪比为21.93 dB. 从图12中可以看出, 使用了HHT在线滤波器的效果在相位滞后方面要优于普通的巴特沃斯滤波器.

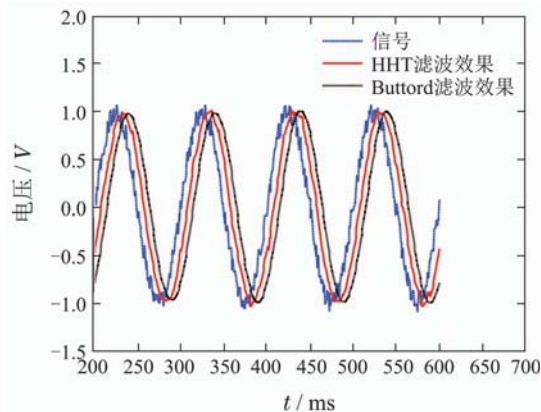


图 12 实际信号滤波效果对比图

Fig. 12 The filtering result of real signal

### 5 控制器的设计及效果(Design and effect of the controller)

从HHT在线滤波器的设计可以看出, 该滤波器的相位延迟仅与滤波窗口长度选择有关. 如果滤波窗口长度为 $n$ , 由于取窗口的中间位置的值作为滤波结果则相位延后为 $n/2$ 个采样周期, 且该相位延后不随输入信号频率的改变而改变. 因此可以在电液伺服系统的控制器中进行补偿. 系统组成框图和实物图如图13-14所示.

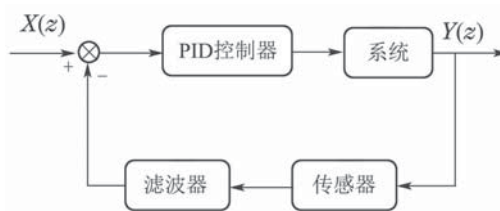


图 13 系统组成框图

Fig. 13 System composition block diagram

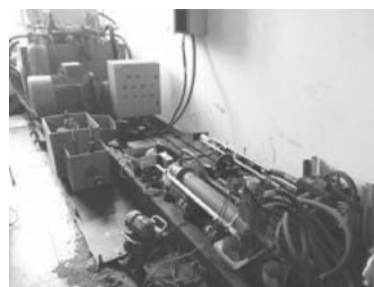


图 14 电液伺服系统实物图

Fig. 14 The picture of real electro hydraulic servo system

在系统中由于在反馈环节引入了滤波器, 由于滤波器本身的幅频特性和相频特性, 会导致滤波以后的信号在相位和幅值方面受影响, 且其影响随滤波器输入端信号的频率改变而改变. 但是由于HHT在线滤波器具有自适应的特性, 对滤波器输入端的信号的频率不敏感. 可以根据滤波窗口长度的选择在系统中进行补偿.

该电液伺服系统是位置控制系统,其离散传递函数为

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{z^{-\frac{n}{2}} B(z^{-1})}{A(z^{-1})},$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3},$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3},$$

式中:  $Y(z)$ 为系统的输出,  $X(z)$ 为系统的输入;  $z^{-n/2}$ 表示系统具有的 $n/2$ 阶延迟. 该延迟与HHT在线滤波器的窗口长度有关. 为了补偿该延迟, 将系统的输入  $X(z)$ 变为提前 $n/2$ 阶的输入信号  $X(z + n/2)$ , 用于抵消HHT滤波器引入的延迟. 因此系统输出为

$$Y(z) = \frac{z^{-\frac{n}{2}} B(z^{-1})}{A(z^{-1})} X(z + \frac{n}{2}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} X(z). \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 经过补偿以后, 系统的频率特性只与系统本身有关, 与HHT在线滤波器无关.

将该控制器用于实际的系统中, 分别在2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz四个频率点进行验证, 并与采用普通数字滤波器的控制效果进行了对比, 对比效果图如图15-22所示.

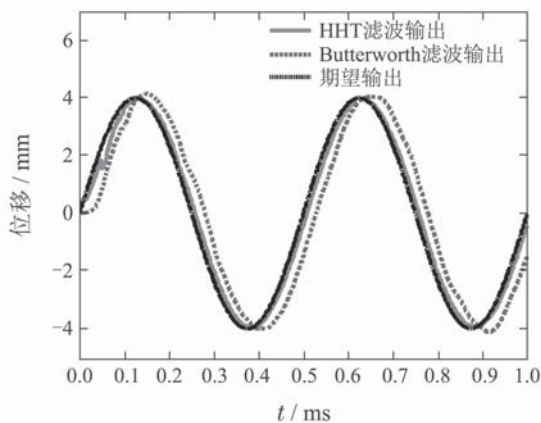


图 15 2 Hz频点效果对比图

Fig. 15 The effect comparison when frequency is 2 Hz

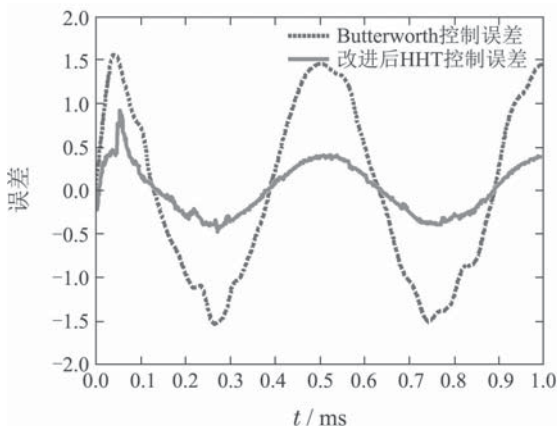


图 16 2 Hz频点误差对比图

Fig. 16 The error comparison when frequency is 2 Hz

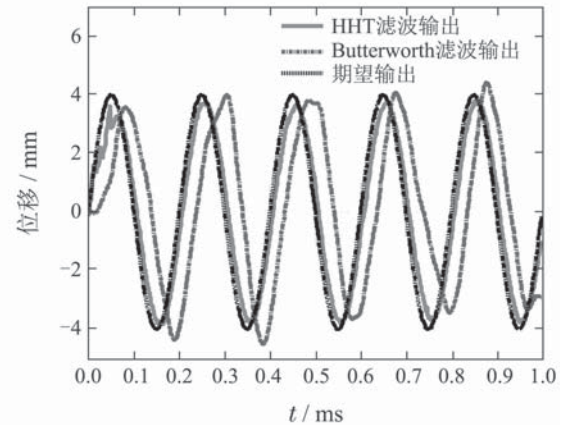


图 17 5 Hz频点效果对比图

Fig. 17 The effect comparison when frequency is 5 Hz

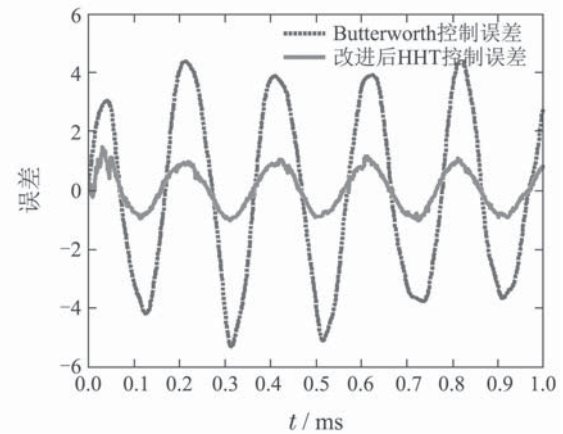


图 18 5 Hz频点误差对比图

Fig. 18 The error comparison when frequency is 5 Hz

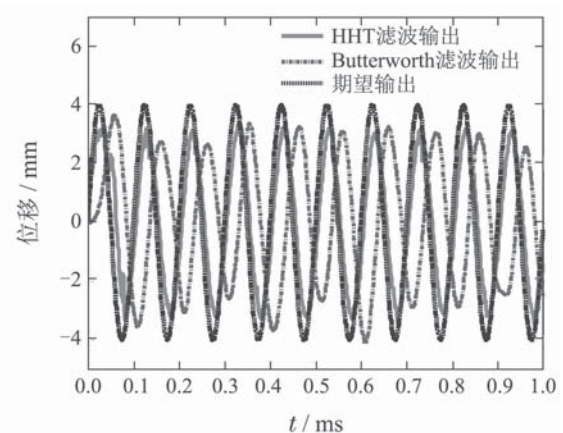


图 19 10 Hz频点效果对比图

Fig. 19 The effect comparison when frequency is 10 Hz

从各个频点的控制效果对比图中可以看出, 随频率的升高, 使用普通数字滤波器的控制输出其相位误差越来越大, 而基于HHT在线滤波器的控制输出相位误差要优于普通数字滤波器的, 整体的控制效果也是基于HHT在线滤波器的控制器要较优一些.

从对比图中还可以发现随频率的提高, 改进后 HHT 的滤波器滤波效果有下降, 其主要原因有 2 个: 一是随着频率的变高, 滤波窗口内的数据变化更剧烈, 之前设定的窗口长度不再是最佳长度, 需要做出调整. 二是随着频率的提高, 端点效应的影响更加明显, 达不到最佳的滤波效果, 需要采用其他更具有针对性的端点抑制方法.

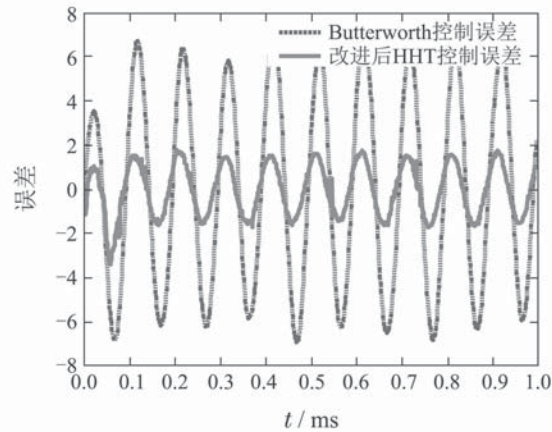


图 20 10 Hz 频点误差对比图

Fig. 20 The error comparison when frequency is 10 Hz

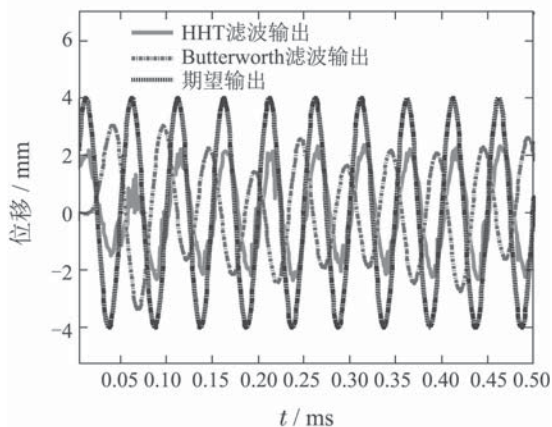


图 21 20 Hz 频点效果对比图

Fig. 21 The effect comparison when frequency is 20 Hz

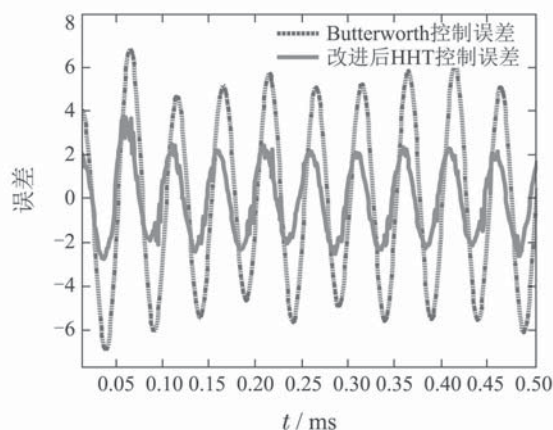


图 22 20 Hz 频点误差对比图

Fig. 22 The error comparison when frequency is 20 Hz

因此本文提出的方法在系统频率较高的情况下具有一定的局限性, 该方法中滤波窗口长度同信号频率之间的关系以及针对短数据的端点抑制方法还有待进一步的研究.

## 6 结论(Conclusions)

基于 EMD 分解的 HHT 在线滤波器, 其本质就是利用数据中极大值和极小值所形成的包络线, 依次从高频到低频迭代分解出数据段中的各个信号分量. 为了使极值点形成的包络线能更好的包络数据曲线, 本文对 EMD 分解过程做了 4 点改进, 使其更加有利于在线滤波功能; 并针对电液伺服系统设计了相应的控制器, 应用于实际的电液伺服系统中. 由于 HHT 在线滤波器具有自适应的特性, 能准确去除信号的里各个噪声和干扰分量, 其时延特性不随输入信号频率的改变而改变. 同传统数字滤波器的实际效果对比中可以看到, 其滤波效果和控制效果有一定的改进. 文中所提到的方法在数据的某些局部的滤波效果还有待进一步改进和完善.

## 参考文献(References):

- [1] 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(1971): 903 – 995.
- [2] WANG Linhong, WU Bo, DU Runsheng, et al. Nonlinear dynamic characteristics of moving hydraulic cylinder [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(12): 12 – 19.  
(王林鸿, 吴波, 杜润生, 等. 液压缸运动的非线性动态特征 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(12): 12 – 19.)
- [3] LI Qing, ZHANG Guoping, LIU Yang. A study of Hilbert-Huang transform and its filtering character [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2009, 43(2): 235 – 238.  
(李卿, 张国平, 刘洋. Hilbert-Huang 变换及其滤波特性研究 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 43(2): 235 – 238.)
- [4] HE Zhi, WANG Qiang, SHEN Yi, et al. Surver on end effects mitigation of Hibert-huang transform [J]. *Software*, 2011, 32(10): 1 – 7.  
(贺智, 王强, 沈毅, 等. 希尔伯特-黄变换端点效应抑制算法综述 [J]. *软件*, 2011, 32(10): 1 – 7.)
- [5] GUO Mingwei, NI Shihong, ZHU Jiahai, et al. HHT/EMD end extension method in vibration signal analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(8): 62 – 66.  
(郭明威, 倪世宏, 朱家海, 等. 振动信号中 HHT/EMD 端点延拓方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(8): 62 – 66.)
- [6] MARCUS D, TORSTEN S. Performance and limitations of the Hilbert-Huang transform (HHT) with an application to irregular water waves [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(14/15): 1783 – 1834.
- [7] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P. On empirical mode decomposition and its algorithms [R]. *Proceedings of IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, NSIP-03, 2003: 1.
- [8] FLEUREAU J, NUNES J C, KACHENOURA A, et al. Turning tangent empirical mode decomposition: a framework for mono-and multivariate signals [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(3): 1309 – 1316.
- [9] ANTONIO H C, STEPHAN H. Adaptive time-frequency analysis based of autoregressive modeling [J]. *Signal Processing*, 2011, 91(4): 740 – 749.



- [10] SOBIESKI I P, KROO I M. Collaborative optimization using response surface estimation [J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(10): 1931 – 1938.
- [11] RAMANDEEP K, VIKRAMJIT S. Time-frequency domain characterization of stationary and non stationary signals [J]. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2014, 2(5): 438 – 447.
- [12] PARK J H, LIM H, MYUNG N H. Analysis of jet engine modulation effect with extended Hilbert-Huang transform [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(3): 215 – 216.
- [13] LI Zhao, ZHOU Xiaojun, XU Yun. End effect treatment for EMD based on the period superposition extrapolation of mean generating function [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(15): 138 – 143.  
(李钊, 周晓军, 徐云. 基于均生函数周期叠加外推法的EMD端点问题的研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(15): 138 – 143.)
- [14] WANG X L, LI H. Multiscale prediction of wind speed and output power for the wind farm [J]. *Journal of Control Theory & Applications*, 2012, 10(2): 251 – 258.
- [15] GUO Mingwei, NI Shihong, ZHU Jiahai, et al. HHT/EMD end extension method in vibration signal analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(8): 62 – 66.  
(郭明威, 倪世宏, 朱家海, 等. 振动信号中HHT/EMD端点延拓方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(8): 62 – 66.)
- [16] YANG Peihong, YUE Lihai, KANG Lan, et al. Study on HHT based low frequency oscillation monitor for power system [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2014, 51(21): 110 – 114.  
(杨培宏, 岳立海, 亢岚, 等. 基于HHT的电力系统低频振荡监测器的研究 [J]. *电测与仪表*, 2014, 51(21): 110 – 114.)
- [17] TANG Jian, CHAI Tianyou, CONG Qiumei, et al. Modeling mill load parameters based on selective fusion of multi-scale shell vibration frequency spectra [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(12): 213 – 217.  
(汤健, 柴天佑, 丛秋梅, 等. 选择性融合多尺度筒体振动频谱的磨机负荷参数建模 [J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(12): 213 – 217.)
- [18] LU Zhimao, JIN Hui, ZHANG Chunxiang, et al. Voice activity detection in complex environment based on hilbert-huang transform and order statistics filter [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 213 – 217.  
(卢志茂, 金辉, 张春祥, 等. 基于HHT和OSF的复杂环境语音端点检测 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 213 – 217.)

### 作者简介:

**黄 静** (1983–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机械电子工程, E-mail: huangjing\_mail@tom.com;

**李长春** (1971–), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为机械电子工程, E-mail: licc@bjtu.edu.cn;

**延 皓** (1979–), 男, 博士, 副教授, 研究方向为机电一体化和液压控制系统, E-mail: hyan@bjtu.edu.cn;

**杨雪松** (1986–), 男, 博士研究生, 研究方向为流体传动及运动控制, E-mail: 11116323@bjtu.edu.cn.