

基于阶比滤波的单通道缸盖振动信号盲源分离*

孙宜权^{1,2}, 张英堂¹, 陈爱民², 李志宁¹, 尹刚¹

(1. 军械工程学院一系 石家庄, 050003) (2. 66267 部队 石家庄, 050081)

摘要 传统盲源分离方法要求传感器观测信号数目不小于源信号数目,且在源信号平稳、相互独立的前提下,才能得到较为准确的分离信号,但对于发动机缸盖振动非平稳信号,由于激励源较多,这些条件不易满足。为实现缸盖振动信号盲源分离,提出了基于阶比滤波的单通道缸盖振动信号盲源分离方法。利用燃爆激励信号频率随转频变化的先验信息,通过阶比滤波得到阶比分量,将阶比分量和单通道信号组成多维观测信号,通过快速独立成分分析方法得到了缸盖振动非平稳信号的分离信号。仿真和应用研究证明了该方法的有效性。

关键词 缸盖振动; 阶比滤波; 盲源分离; 快速独立成分分析

中图分类号 TK413; TH11

引言

利用缸盖振动信号可对发动机燃烧过程进行研究。为了从缸盖振动信号中得到表征燃爆激励的信号,已有的方法通过自适应神经滤波器模型滤除噪声干扰^[1],或利用燃爆激励能量分布进行线性滤波^[2]。由于发动机缸盖振动信号激励源较多且多呈现非平稳性,上述方法得到的燃爆激励信号信噪比相对不高。随着盲源分离算法(blind source separation, 简称 BSS)的提出,并在图像和语音处理等领域获得了成功的应用^[3],将 BSS 引入到缸盖振动信号分析成为一种趋势。在盲源分离过程中往往假设观测信号数不小于源信号数,而这个假设在缸盖振动信号分析中不一定成立,欠定盲源分离、单通道盲源分离普遍存在。欠定盲源分离可通过经验模态分析方法(empirical mode decomposition, 简称 EMD)解决,但要求源信号满足平稳性^[4],对发动机缸盖振动非平稳信号并不适用。

为了克服以上不足,笔者提出了基于阶比滤波的单通道发动机缸盖振动信号盲源分离方法。首先利用得到的阶比分量将观测信号升维,变为适应盲源分离,然后再进行信号盲源分离。仿真和应用研究表明,该方法能对非平稳信号进行盲源分离。

1 阶比滤波方法

笔者利用 Gabor 变换对信号进行阶比滤波,其中阶比定义为

$$o = 60f/n \quad (1)$$

其中: f 为阶比信号振动频率; o 为阶比(order); n 为参考轴转速。

由于 Gabor 变换是可逆的联合时频变换,通过离散的时频网格表示信号,时频谱图的 Z 坐标表示时间, X 坐标表示频率, Y 坐标表示谱值。Gabor 变换通过 Gabor 系数方程得到,如式(2)^[5]所示

$$C_{m,n} = \sum_{k=0}^{L-1} s[k] \gamma^* [k - m\Delta M] e^{-j\frac{2\pi nk\Delta N}{L}} \quad (2)$$

其中: $\Delta M, \Delta N$ 为时间和频率采样间隔; M, N 为时、频域采样点数; $L = M\Delta M = N\Delta N$ 为数据点数; γ 为窗函数。

根据式(2)得到时频系数,利用阶比信号振动频率进行滤波,滤除阶比信号振动频率以外成分,然后根据式(3)将时频系数重构得到相应的时域信号

$$s[k] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} C_{n,m} h[k - m\Delta M] e^{j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (3)$$

其中: h 为窗函数

* 国家自然科学基金资助项目(50775219)

收稿日期:2012-03-29;修回日期:2012-05-31

2 欠定盲源分离方法

由于设备的结构、尺寸与安装条件等因素的限制,通常仅通过有限传感器监测设备的运行状态。对比较多的源信号,传感器的数量一般少于振源的数量,使得盲源分离处于欠定,在一些情况下仅得到单一通道的测量信号^[6]。因此,欠定盲源分离与单一通道盲源分离普遍存在于故障诊断研究中。

针对四冲程发动机缸盖振动信号,在压缩上止点附近,振动信号主要由燃爆激励产生。由于燃爆振动信号的频率随发动机转频($n/60$, n 为发动机曲轴转速)变化,在一个工作循环内曲轴转两转,故燃爆振动信号的能量主要集中在 $ck/2$ ($k=1,2,\dots;c$ 为气缸数)阶比分量上。

本研究充分利用缸盖振动信号的这一特性,通过阶比滤波得到相应的阶比分量,以阶比分量和原观测信号组成新的多维信号解决单通道缸盖振动非平稳信号盲源分离的难题。

3 仿真信号盲源分离精度分析

为分析单通道信号盲源分离精度,引入高斯白噪声和频率随转速变化的仿真信号

$$s = \sin(2\pi f_1 t) \quad (4)$$

其中: f_1 为转频;转速 $n=60f_1$ 。

受噪声干扰仿真信号,未受噪声干扰仿真信号和阶比滤波信号(以6倍转频为期望频率)如图 1

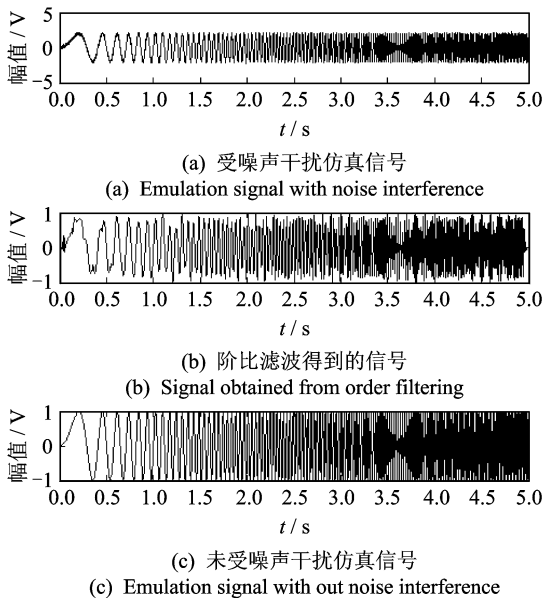


图 1 仿真信号与阶比滤波信号

Fig. 1 Emulation and order filtering signals

所示。

将噪声干扰的仿真信号看作单通道观测信号,将阶比滤波信号看作虚拟的另一个观测信号,此时将欠定盲源分离转变为定盲源分离。基于快速独立成分分析(FastICA)方法分离得到的信号如图 2 所示。

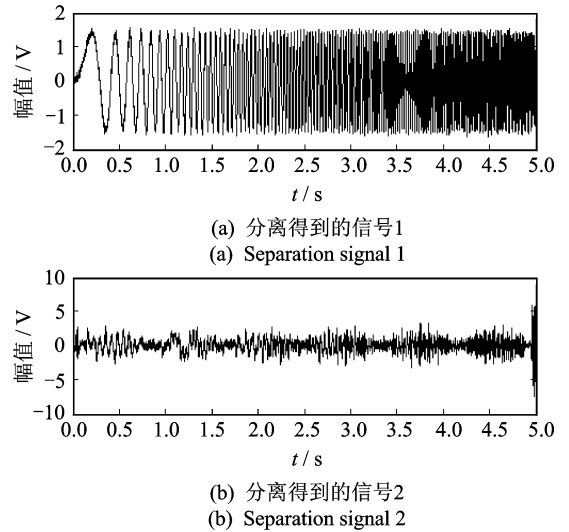


图 2 盲源分离后得到的分离信号

Fig. 2 Separation signals using blind source separation method

分离得到信号 1 是未受噪声干扰仿真信号的估计,分离得到信号 2 是噪声干扰。将阶比滤波信号分离得到信号 1 进行归一化处理,与未受噪声干扰仿真信号对比,得到误差曲线如图 3 所示。

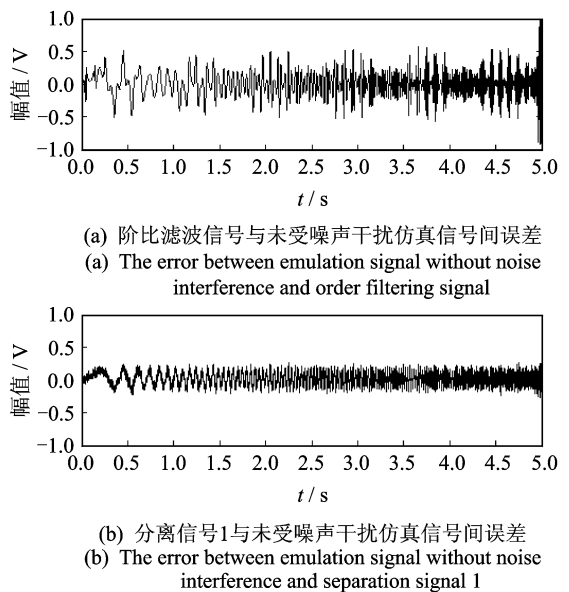


图 3 误差曲线

Fig. 3 The error curved drawing

由上述分析可知,阶比滤波得到的信号表征了频率随变频变化的仿真信号,但因其时频分辨率不高,得到阶比滤波信号的信噪比低。从图3(a)可知,信号间误差均值为0.153 43 V,误差最大值达到了0.930 4 V。本研究提出的基于单通道观测信号的盲源分离方法有效解决了该问题。从图3(b)可知,信号间误差均值为0.088 239 V,误差最大值为0.278 01 V,相比较阶比滤波信号,得到的分离信号信噪比有明显提高。

4 应用研究

由于发动机的燃爆激励信号与缸内压力信号有密切的相关性^[1],通过分离得到的高信噪比燃爆激励信号可间接测量发动机缸压。实验在SGZ150型12缸四冲程发动机上进行,在发动机变速工况下采集各通道信号,采样频率为20 kHz,传感器布置如图4所示。

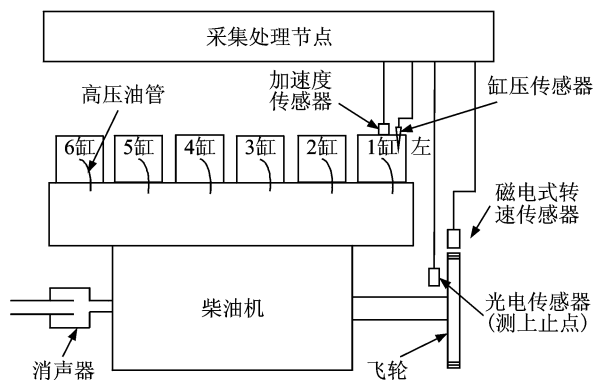


图4 各传感器安装位置

Fig. 4 Fixing position of each sensor

为实现燃爆激励信号至缸内压力信号之间的映射,本研究以压缩上止点前后60°CA分离得到的左1缸燃爆激励信号为输入,以同步采集的左1缸缸压信号为输出,通过极限学习机进行训练^[7-8],随机选取其他样本进行检验。由于发动机在变速工况下运转,每个工作循环内采集数据的长度不一致,使得极限学习机无法工作,而等角度重采样将信号从时域变换到角域,解决转速变化对信号分析的影响。

4.1 等角度重采样

等角度重采样通过计算磁电式转速传感器信号的上升沿过零点时间数组作为鉴相脉冲信号。当发动机飞轮齿数为 z 时,发动机每运行一转有 z 个鉴

相脉冲信号。发动机曲轴转角 θ 与时间 t 在相邻的3个鉴相脉冲内的关系^[9]为

$$\theta(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (5)$$

其中: b_0, b_1, b_2 为待定系数; t 为时间点。

在时域中,设一个鉴相脉冲间隔对应的曲轴转角增量为 $\Delta\varphi$,则式(5)中待定系数 b_0, b_1, b_2 可以通过3个连续的鉴相脉冲到达时间 t_1, t_2, t_3 得到,可知

$$\begin{cases} \theta(t_1) = 0 \\ \theta(t_2) = \Delta\varphi \\ \theta(t_3) = 2\Delta\varphi \end{cases} \quad (6)$$

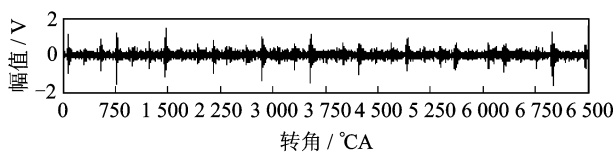
将式(6)带入式(5),可得

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta\varphi \\ 2\Delta\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式(7)求出 b_0, b_1, b_2 后,将其带入式(5)可得

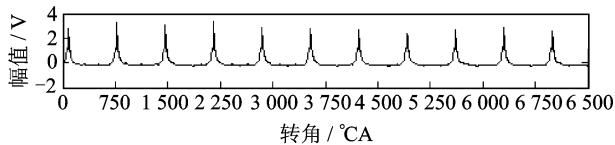
$$t = \frac{1}{2b_2} [\sqrt{4b_2(\theta - b_0) + b_1^2} - b_1] \quad (8)$$

根据式(8)可求出等角度采样时恒定角增量 $\Delta\theta$ 对应的需插值的时间点。再根据所求出的时间点,利用插值算法对缸盖振动信号进行插值,求出振动信号角域里对应于采样点的幅值,如图5所示。



(a) 左1缸缸盖振动信号

(a) Cylinder head vibration signal of left one cylinder



(b) 左1缸缸压信号

(b) Cylinder pressure signal of left one cylinder



(c) 上止点信号

(c) Top dead center signal

图5 等角度重采样信号

Fig. 5 Constant angle resampling signals

4.2 结果分析

在发动机压缩上止点前后60°CA范围内,可认为缸盖振动信号包含燃爆激励信号和噪声干扰。以

此范围内的缸盖振动信号与阶比滤波得到的 6 阶比分量组成新的观测信号,如图 6 所示。由于通过一个振动加速度传感器获得观测信号,并且该传感器安装在气缸附近,因此本研究不考虑传播路径对信号的影响。基于线性瞬时混合模型得到分离信号 1 和分离信号 2 如图 7 所示。

建立的极限学习机输入层有 1 000 个单元,对应于分离得到的低频燃爆激励响应信号,为消除分离得到信号幅值的不确定性,本研究将分离得到的信号归一化处理;隐藏层有 300 个节点;输出层有 1 000 个单元,为同步等角度重采样得到的实际测量气缸压力。采用 30 个样本对极限学习机进行训练,随机选取检测样本对极限学习机进行检验,如图 8 所示。可以看出,极限学习机得到的识别缸压与实际

际压力值比较吻合。表 1 列出了部分识别缸压最大值为与实测缸压最大值,识别误差不超过 10%。为了描述识别缸压与实际缸压的接近程度,计算了两者之间的欧氏距离。从表 1 可知,两者之间具有较高的接近程度,表明极限学习机的识别效果令人满意。

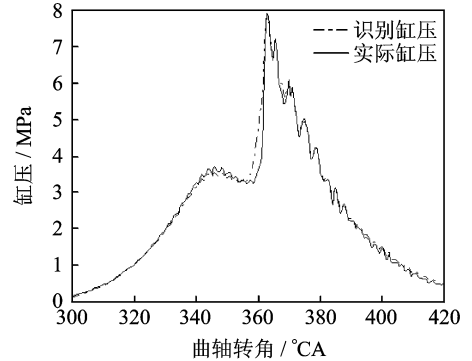


图 8 气缸压力识别结果

Fig. 8 The identifying result of cylinder pressure

表 1 识别缸压与实测缸压比较

Tab. 1 The compare between identify and actual measurement cylinder pressure

样本号	实测缸压最大值/MPa	识别缸压最大值/MPa	识别误差/%	欧氏距离/MPa
1	7.065 2	7.137 2	1.009	0.159 16
2	7.913 1	7.822 4	1.159 2	0.096 036
3	8.549 7	7.803 6	9.56	0.173 35

5 结 论

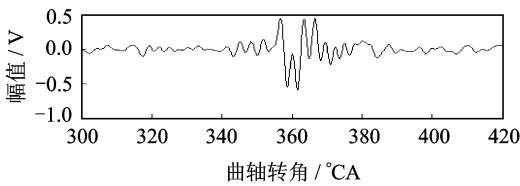
1) 利用阶比滤波方法可以得到频率随转频变化的燃爆激励非平稳信号,有效消除了噪声干扰。利用阶比分量和原信号组成新的观测信号,通过盲源分离的方法得到了更高信噪比的燃爆激励信号。

2) 通过对信号等角度重采样,将信号从时域变换到角域,消除了转速变化对信号分析的影响。

3) 利用分离得到的燃爆激励信号,间接获得了发动机气缸压力,为车辆及时发现故障、避免事故提供了一条技术途径。

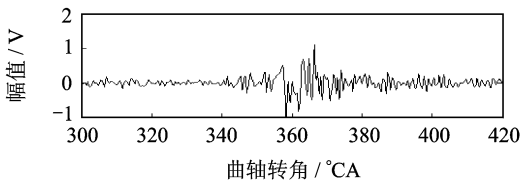
参 考 文 献

[1] 乔新勇,刘建敏,刘玮. 基于振动测量的发动机气缸压缩压力检测方法[J]. 内燃机工程,2008,29(4):63-66.
Qiao Xinyong, Liu Jianmin, Liu Wei. A method for measuring compression pressure in engine cylinder



(a) 阶比滤波后信号

(a) Signal obtained from order filtering

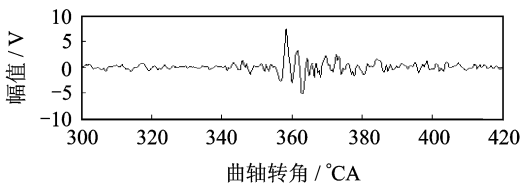


(b) 缸盖振动原始信号

(b) Cylinder head vibration signal of original

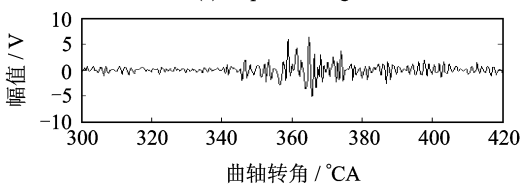
图 6 观测信号

Fig. 6 The observation signals



(a) 分离信号1

(a) Separation signal 1



(b) 分离信号2

(b) Separation signal 2

图 7 盲源分离信号

Fig. 7 The separation signals

- based on vibration measurement[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(4): 63-66. (in Chinese)
- [2] 史玉鹏, 刘建敏, 许世永, 等. 基于缸盖振动的柴油机喷油、燃烧信息检测研究[J]. 车用发动机, 2011, 3: 74-78.
Shi Yupeng, Liu Jianmin, Xu Shiyong, et al. Detection of fuel injection and combustion based on cylinder head vibration for diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2011, 3: 74-78. (in Chinese)
- [3] 刘婷婷, 任兴民. 独立分量分析在机械振动信号分离中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1): 36-41.
Liu Tingting, Ren Xingmin. Application of independent component analysis to vibration signal separation of rotational machine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 36-41. (in Chinese)
- [4] 毋文峰, 陈小虎, 苏勋家. 基于经验模式分解的单通道机械信号盲分离[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 13-15.
Wu Wenfeng, Chen Xiaohu, Su Xunjia. Blind source separation of single-channel mechanical signal based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 13-15. (in Chinese)
- [5] 孔庆鹏. 发动机变速阶段振动信号阶比跟踪研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [6] 马建仓, 石庆斌, 程存虎. 航空发动机转子振动信号的分离测试技术[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1): 1-5.
Ma Jiancang, Shi Qingbin, Cheng Cunhu. Vibration signal separation techniques in aeroengine test[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- [7] Rong Haijun, Huang Guangbin, Sundararajan N, et al. Online sequential fuzzy extreme learning machine for function approximation and classification problems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 39(4): 1067-1072.
- [8] Lan Yuan, Yeng C S, Huang Guangbin. Ensemble of online sequential extreme learning machine[J]. Neurocomputing, 2009, 72(1): 3391-3395.
- [9] 康海英, 祁彦洁, 王虹, 等. 利用倒阶次谱和经验模态分解的轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1): 60-65.
Kang Haiying, Qi Yanjie, Wang Hong, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on order cepstrum analysis and empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 60-65. (in Chinese)



第一作者简介: 孙宜权, 男, 1981年10月生, 博士研究生。主要研究方向为车辆检测和故障诊断。曾发表《柴油机气缸密封性检测方法研究》(《车用发动机》2011年第4期)等论文。
E-mail: syq2stone@163.com