

文章编号: 1006-1355(2014)01-0178-05

EMD-Robust ICA 在柴油机噪声源识别中的应用

于宏志¹, 沈颖刚¹, 毕凤荣²

(1. 昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500;

2. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了有效地从复杂的单一通道噪声信号中分离和识别柴油机的噪声源, 采用经验模态分解(EMD)和基于峭度的鲁棒性独立分量分析(RobustICA)相结合的方法, 将EMD分解后的本征模态函数与原噪声信号作为RobustICA的输入, 借助RobustICA良好的抗噪性, 不需要对观测信号进行滤波处理就可以实现单一通道观测信号的源分量分离。模拟仿真的结果充分说明了该方法的可行性。应用于某四缸柴油机噪声信号分析, 对分离出的独立分量进行小波(CWT)时频分析, 结合内燃机的特性, 从单一通道噪声信号中准确识别出柴油机的燃烧噪声和活塞敲击噪声。

关键词: 声学; 柴油机; 经验模态分解; 鲁棒性独立分量分析; 噪声源识别

中图分类号: TB5

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.01.040

Application of EMD-Robust ICA to Noise Sources Identification of Diesel Engines

YU Hong-zhi¹, SHEN Ying-gang¹, BI Feng-rong²

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract : To effectively identify the noise sources of diesel engines from single-channel noise signal, the method combining the empirical mode decomposition (EMD) with the robust independent component analysis (Robust ICA) is proposed. In this method, the instinct mode functions (IMF) after correlation analysis integrated with original noise signal are used as virtual channels of Robust ICA. In virtue of the anti-noise advantage of Robust ICA, the single-channel noise signal can be separated into several originally independent components without filtering processing. Result of simulation shows the effectiveness and feasibility of this method. Then, this method is applied to the noise signal analysis of a four-cylinder diesel engine. The continuous wavelet transform (CWT) is used for analysis of the separated independent components in time and frequency domains. Combined with fast Fourier transform (FFT), the combustion noise and piston slap noise of the diesel engine can be identified precisely from the single-channel noise signal.

Key words : acoustics ; diesel engine ; empirical mode decomposition (EMD) ; Robust ICA ; identification of noise source

柴油机由于其良好的动力性、燃油经济性和排放等性能, 目前已广泛地应用于大中型汽车上, 今后还将向小型汽车和轿车普及, 然而柴油机存在严重的振动和噪声问题, 如何快速、准确的识别振动源与噪声源是降噪减振的前提^[1]。

文章尝试采用EMD-Robust ICA相结合的方法对单一通道噪声信号进行盲源分离, 克服了独立分

量分析要求传感器数目必须大于等于分离出分量数目的限制^[2]; 借助Robust ICA良好的抗噪性, 不需要对观测信号进行滤波处理就可以实现单一通道观测信号的源分量分离^[3]。

1 经验模态分解

EMD的主要思想是根据信号本身的局部时间尺度特征, 将一个时序信号分解为一组由高频到低频的均值为零的本征模态函数与一个余项的和^[4]

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

收稿日期: 2012-03-06

作者简介: 于宏志(1985-), 男, 山东青岛人, 硕士生, 目前从事柴油机噪声源识别方面的研究。

E-mail: yuhongzhi1985@gmail.com

IMF 需要满足以下两个条件:

1) 整个数据段范围内, 极大值点(极大值点和极小值点的总个数)的数目与过零点的数目相等, 或最多相差一个;

2) 对于选定的一段信号, 局部极大值点构成的上包络线与局部极小值点构成的下包络线均值为零。

对于给定的信号 $x(t)$, EMD 的步骤为:

1) 确定 $x(t)$ 所有的极大值点与极小值点;

2) 采用三次样条插值, 获得 $x(t)$ 极大值点的上包络线 $x_{\max}(t)$ 、极小值点的下包络线 $x_{\min}(t)$;

3) 计算上下包络线的均值

$$m(t) = [x_{\max}(t) + x_{\min}(t)]/2;$$

4) 求 $x(t)$ 与 $m(t)$ 的差: $h(t) = x(t) - m(t)$, 判断 $h(t)$ 是否满足 IMF 的两个要求, 不满足时将 $h(t)$ 当作新的信号, 回到步骤 1);

5) 当 $h(t)$ 满足 IMF 的两个要求时, 此时的 $h(t) = h_1(t) = \text{imf}_1$;

6) 记 $d(t) = x(t) - h_1(t)$, 将 $d(t)$ 作为新的信号, 回到步骤 1), 依次得到 imf_2 、 $\text{imf}_3 \cdots \text{imf}_n$;

7) 当依次筛出的 $h_{k-1}(t)$ 与 $h_k(t)$ 标准差小于 0.2 时终止筛选过程。

由于 EMD 存在模态混叠以及边界效应等问题, 实际分解得到的分量数目多于原信号组成分量数目, 需要采用相关性分析对伪分量加以剔除^[5,6]。

2 鲁棒性独立分量分析

2.1 独立分量分析原理

如图 1 所示, ICA 解决的问题就是在源信号 S 和混合矩阵 A 未知的情况下, 仅根据测得的混合信号 X , 求出一个分离矩阵 W , 使 X 经过分离后所得输出 Y 是 S 的最优估计^[7]:

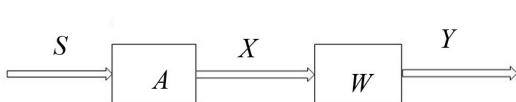


图 1 ICA 流程图

2.2 鲁棒性独立分量分析

Robust ICA 是由 V. Zarzoso 和 P. Common 于 2010 年提出的一种基于峭度和最优步长的独立成分分析算法^[3]。通过峭度对照函数进行最佳步长的搜索, 找到解混矩阵 W , 计算出源信号的近似值。

最佳线性优化步长 μ_{opt} 的计算公式为

$$\mu_{\text{opt}} = \arg_{\mu} \max |\kappa(W + \mu g)| \quad (2)$$

式(2)中 $\arg_{\mu} \max$ 表示最佳优化步长 μ_{opt} 是 $|\kappa(W + \mu g)|$ 所有值中的最大输出。

典型的搜索方向为梯度 g 的方向

$$g = \nabla_w \kappa(W) \quad (3)$$

其中

$$\nabla_w \kappa(W) = \frac{4}{E^2\{|y|^2\}} \left\{ E\{|y|^2 y \cdot X\} - \frac{\left(E\{|y|^4\} - |E\{y^2\}|^2 \right) E\{y \cdot X\}}{E\{|y|^2\}} \right\} \quad (4)$$

Robust ICA 的理论基础是数值优化领域中的精确线性搜索。然而传统的线性搜索只能在搜索方向达到局部最优化。Robust ICA 中采用的线性搜索方法能保证在每个分量的分离过程中达到最优, 通过代数计算全局优化步长, 沿搜索方向实现峭度的最优化。

在每一次迭代运算过程中, Robust ICA 采用以下步骤来执行全局最佳步长—OS (Optimal step-size-based optimization) 的优化:

1) 计算 OS 多项式的系数。在峭度作为对照函数时, OS 多项式的表达式为

$$p(\mu) = \sum_{k=0}^4 a_k \mu^k \quad (5)$$

2) 提取 OS 多项式的根 $\{\mu^k\}_{k=1}^4$;

3) 在迭代方向上选择使得最佳优化步长 $\mu_{\text{opt}} = \arg \max_k |\kappa w + \mu_k g|$ 最大的根;

4) 根据更新的步长 μ_{opt} 值更新 W^+ : $W^+ = W + \mu_{\text{opt}} g$;

5) 对 W^+ 进行标准化: $W^+ \leftarrow \frac{W^+}{\|W^+\|}$ 。

相比于 Fast ICA, Robust ICA 减少了迭代次数, 加快了收敛速度, 极大的减少了运算量; Robust ICA 提升了当信号存在坏点和伪局部极值时的鲁棒性; 在小样本空间下, 其均方误差 SMSE 也明显优于 Fast ICA 算法。

Robust ICA 作为盲源分离的一种新方法, 将其应用于柴油机的声振特性分析, 虽然可以分离出柴油机的振动源及噪声源, 然而盲源分离算法要求传感器的数目必须大于等于分离得到的源分量的数目, 这在一定程度上限制了盲源分离算法在实际中的应用。

3 EMD-Robust ICA 融合方法

3.1 EMD-Robust ICA 流程

针对上述 EMD 方法与 Robust ICA 方法的不足,

把EMD方法与Robust ICA方法进行有机的结合,提出EMD-Robust ICA融合方法。

3.2 模拟仿真

为了验证EMD-Robust ICA在分离信号上的能力,运用EMD-Robust ICA方法对模拟信号进行仿真试验分析,图2给出了三个模拟源信号:

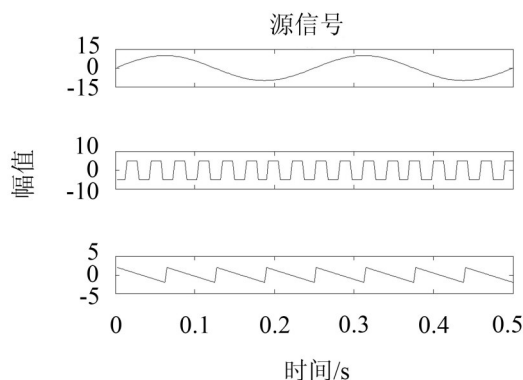


图2 源信号

采用随机混合矩阵的方法得到三个混合信号,任取某一路混合后的信号作为EMD分解的对象,得到5个IMF以及一个余项。

采用相关性分析剔除伪分量(r 表示各分量与被处理信号的相关系数):

imf	1	2	3	4	5
r	0.01	0.72	0.03	0.55	0.35

取imf 2、imf 4、imf 5及前面EMD分解的那一路观测信号作为Robust ICA的输入,得到3个分量,如图3所示:

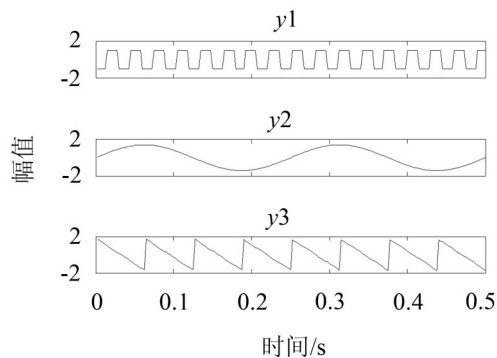


图3 EMD-Robust ICA处理结果

对比图2与图3,虽然采用EMD-Robust ICA处理后的信号其幅值与排序都发生了变化,但是波形与频率信息得到了很好的保持。

4 EMD-Robust ICA在柴油机噪声源分离中的应用

4.1 数据采集

选取某四缸四冲程柴油机进行噪声数据的采集分析与处理,此时四缸机在3 000 r/min的转速下满负荷稳态运转。采用LMS Scada III声振测试系统进行数据的采集与保存,采样频率为1.28 kHz。因第9点包含内燃机工作时产生的绝大部分噪声成分,以第9点的噪声数据为分析研究对象,测点布置如图4所示,原始噪声信号如图5所示:

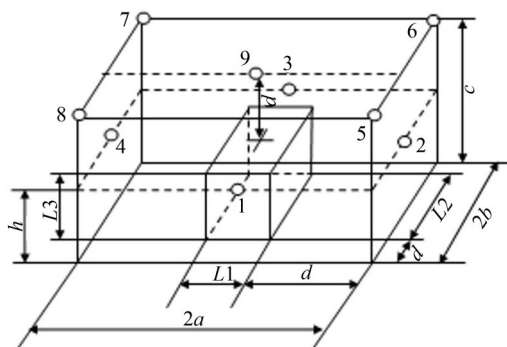


图4 测点布置

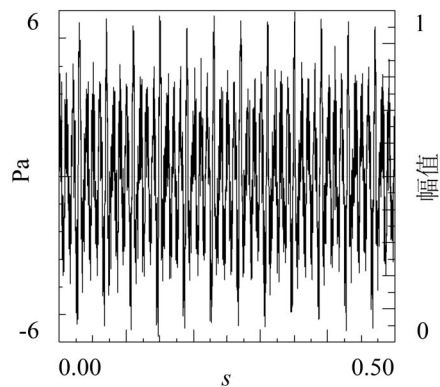


图5 第9点噪声信号

4.2 分离结果及分析

对采集到的噪声数据进行EMD分解,得到10个IMF及一个余项。信号中含有的间歇性成分会导致EMD的2阶滤波网络特性折中,IMF分量失去自身的物理意义,导致模态混叠现象以及虚假IMF分量的出现。采用相关性分析剔除IMF分量中的伪分量:

imf	1	2	3	4	5
r	0.12	0.19	0.26	0.30	0.77
imf	6	7	8	9	10
r	0.30	0.003	0.003	0.002	0.004

选取前6个IMF及原噪声信号作为Robust ICA的输入,得到7个分量如图6所示:

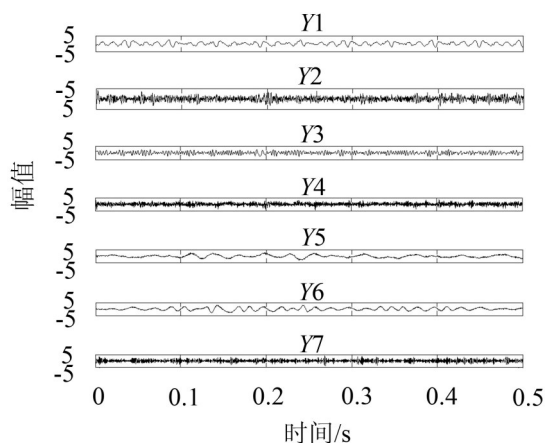


图6 Robust ICA盲源分离结果

根据盲源分离的原理可知,每个盲源分离得到的分量都可能是柴油机噪声的激励源。由于分离得到的各分量其相对应的激励源是不确定的,借助于小波变换良好的时频分辨特性,对分离得到的各分量进行连续小波变换与快速傅里叶变换,借助内燃机的先验知识,进一步确定各分量对应的激励源。

图7与图8是单一通道噪声信号分离结果中比较突出的两个分量,其时频分析结果如下所示:

由图7可知分量Y1的能量主要集中在1 kHz以下的低频段,以102 Hz的频率成分最为显著,每隔180°曲轴转角周期性出现。由于测试用柴油机为4缸4冲程,转速为3 000 r/min,基频为50 Hz,发火频率为100 Hz,发火间隔角为 $720^\circ/4=180^\circ$ 。因此,断

定分量Y1为缸内燃烧激励引起的燃烧噪声。

由图8可知分量Y3的能量主要集中在1 kHz以下,以401.9 Hz的频率成分最为显著,每隔360°曲轴转角周期性出现。由于活塞与缸套之间存在间隙,在曲轴旋转平面内,活塞承受周期性变化的侧向力作用,对缸套造成强烈的冲击,从而产生敲击噪声。由于测试用柴油机为4缸4冲程,转速为3 000 r/min,活塞敲击噪声的频率为400 Hz($f=ni/30$,其中 n 为发动机的转速, i 为发动机的气缸数)。因此断定此分量对应的噪声源是活塞敲击噪声。

5 结 语

(1) EMD-Robust ICA融合方法解决了独立分量分析要求传感器数目必须大于等于分离得到分量数目的限制;

(2) 借助Robust ICA良好的抗噪性,不需要对观测信号进行滤波就可实现单一通道观测信号的源分量分离^[15],在减少运算量的同时有效的保证了分离结果的鲁棒性,成功分离出了某四缸柴油机的燃烧噪声和活塞敲击噪声。

参考文献:

- [1] 郑旭. 车辆与内燃机振动信号盲分离及噪声源识别的研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [2] DU Xian-feng, LI Zhi-jun, BI Feng-rong. Source separation of diesel engine vibration based on the empirical mode decomposition and independent component analysis [J]. *Chinese Journal of Mechanical*

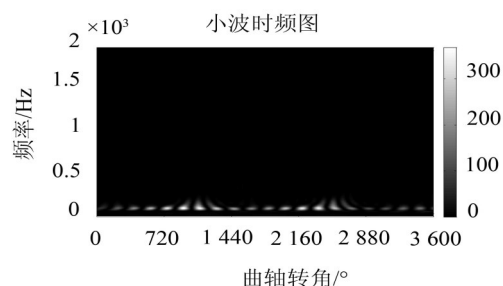
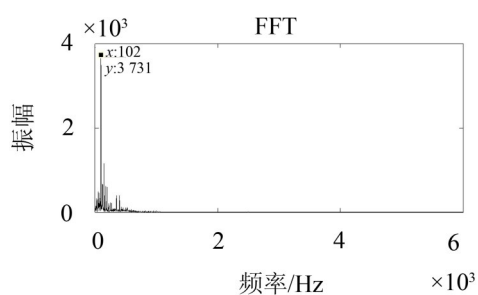


图7 分量Y1的频谱分析

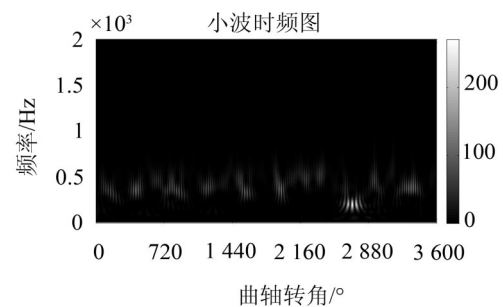
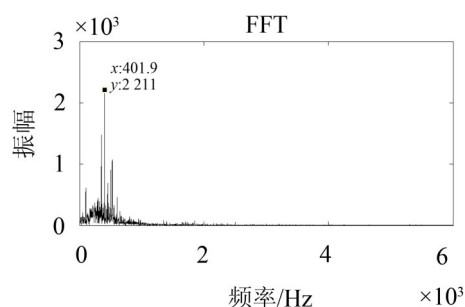


图8 分量Y3的频谱分析

Engineering, 2012, 25(3):557-563.

- [3] Vicente Zarzoso, Pierre Comon. Robust independent component analysis by iterative maximization of the kurtosis contrast with algebraic optimal step size[J]. **IEEE Transactions on Neural Networks**, 2010, 21 (2): 248-261.
- [4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. 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**, 1998, 454:903-995.
- [5] 汤宝平, 董绍江, 马靖华. 基于独立分量分析的EMD模态混叠消除方法研究[J]. **仪器仪表学报**, 2012, 33(7): 1477-1482.
- [6] 纪少波, 程勇, 唐娟, 等. 缸盖振动加速度信号与燃烧过程时域相关性分析[J]. **内燃机工程**, 2010, 31(3): 71-75.
- [7] Hyvarinen A, Oja E. Independent component analysis: algorithms and applications[J]. **Neural Network**, 2000, 13: 411-30.
- [8] 金阳, 郝志勇. 内燃机稳定工况下缸盖振动信号的3种时频分析技术比较研究[J]. **内燃机工程**, 2011, 32 (6):

81-85.

- [9] 王霞, 刘昌文, 毕凤荣, 等. 基于独立分量分析及小波变换的内燃机辐射噪声盲源分离和识别[J]. **内燃机学报**, 2012, 30 (2): 166-171.
- [10] 李军, 张永祥, 李琳. 基于盲源分离的柴油机激励源振动响应分离方法研究[J]. **内燃机工程**, 2009, 30 (3): 61-64.
- [11] 景国玺, 郝志勇, 金阳, 等. 发动机燃烧噪声和活塞拍击噪声的产生机理试验研究[J]. **振动工程学报**, 2010, 23 (6): 655-659.
- [12] 石林锁, 袁涛. 内燃机振动信号的盲源分离方法试验研究[J]. **内燃机学报**, 2007, 25 (5): 463-468.
- [13] 徐红梅, 郝志勇, 杨陈, 等. 基于EMD和HHT的内燃机噪声信号时频特性研究[J]. **内燃机工程**, 2008, 29 (6): 60-64.
- [14] 耿相军, 程勇. 基于小波技术的柴油机振动信号特征参数的研究[J]. **内燃机工程**, 2010, 31 (4): 100-104.
- [15] 张俊红, 李林洁, 刘海, 等. 基于经验模态分解和独立分量分析的柴油机噪声源识别技术[J]. **内燃机学报**, 2012, 30 (6): 544-549.

(上接第139页)

大。当扫描角度是1度时,平均计算误差最小,为2.72 dBA,当扫描角度达到15度时,误差达到3.63 dBA,扫描角度为30度时误差值为4.84 dBA。综合比较,扫描角度不大于5度在噪声模拟中较为合适,最大误差为3.01 dBA。

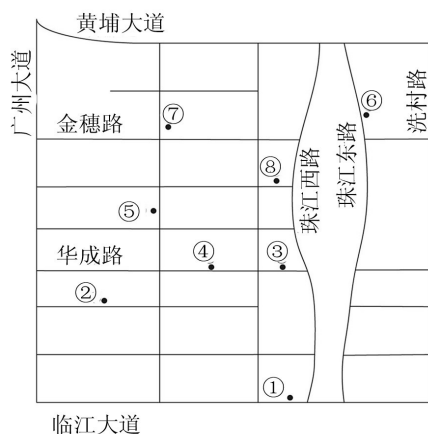


图4 珠江新城交通噪声实测点布设图

表2 不同扫描角度下的计算模拟误差

扫描角度	1°	5°	10°	15°	20°	30°
计算误差 (dBA)	2.72	3.01	3.38	3.63	3.95	4.84

3 结语

本文使用ISO 9613-2噪声衰减计算模型模拟出整个珠江新城的交通噪声分布,分析了不同道路分割精度对噪声模拟的影响。结果表明,道路分割的

扫描角度越大,模拟值与实测值的误差越大。综合比较可得,扫描角度不大于5度的道路分割方式较为合适,噪声模拟误差为3.01 dBA。

参考文献:

- [1] 龚瑞婷. 城市道路交通噪声污染分析与对策研究[J]. **北京建筑工程学院学报**, 2004, 20(1): 84-87.
- [2] 刘培杰, 孙海涛, 王红卫. 噪声模拟软件Cadna/A在交通噪声预测评价中的应用[J]. **电气技术**, 2008, 32(7): 64-67.
- [3] 李锋, 蔡铭, 刘济科. 基于微观交通仿真的交叉口交通噪声模拟方法[J]. **环境科学与技术**, 2010, 33(5): 179-182.
- [4] Pamanikabud P, Tansatcha M. Geoinformatic prediction of motorway noise on buildings in 3D GIS[J]. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2009, 14: 367-372.
- [5] Pamanikabud P, Tansatcha M. 3 D analysis and investigation of traffic noise impact from a new motorway on building and surrounding area[J]. **Applied Acoustics**, 2010, 71: 1185-1193.
- [6] Ishizuka T, Fujiwara K. Traffic noise reduction at balconies on a high-rise building façade[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2012, 131(3): 2110-2117.
- [7] ZHONG Jin-J, TIE Jun-C. Spatial distribution prediction of steady-state sound field with the ray-tracing method[J]. **Journal of Vibration and Acoustics**, 2008, 130: 064503.
- [8] GB/T 17247.2-1998. 声学 户外声传播的衰减 第2部分: 一般计算方法[S].
- [9] 张玉芬, 邓学钧. 道路交通环境工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 47-48.