

基于信号分析的发电机组辐射噪声盲源分离和识别

景亚兵^{1,2}, 刘昌文¹, 毕凤荣¹

(1. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 内燃机研究所, 天津 300072)

Blind Source Separation and Identification of Generator Radiation Noise Based on Signal Analysis

JING Yabing^{1,2}, LIU Changwen¹, BI Fengrong¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For generator radiation noise, the algorithm for empirical mode decomposition with independent elements(IE-EMD) combining the advantages of independent component analysis algorithm and empirical mode decomposition algorithm was used to decompose the noise sources into a series of independent component by using a single observation signal to ensure the independence of isolated sound sources. At the same time, the wavelet transform technique was used to analyze the independent components and the corresponding relations between the different generator noise sources and independent components were determined by the time-frequency analysis results which was verified by experiments. Results show that these independent components correspond to valve train noise, balancing shaft drive gear noise, timing gear noise and intake air noise.

摘要: 具有独立分量的经验模态分解算法结合了独立成分分析算法和经验模态分解算法的优点, 可通过单个观测信号将噪声源分解成一系列独立分量, 保证了分离出的声源的独立性, 同时利用小波变换技术对各个独立分量进行了分析, 通过时频分析结果确定了各独立分量与发电机组各噪声源的对应关系, 并通过试验进行了验证。研究结果表明: 这些独立分量分别对应着配气机构噪声、平衡轴驱动齿轮噪声、正时齿轮噪声和进气噪声。

关键词: 内燃机; 发电机组; 盲源分离; 独立成分分析; 经验模态分解; 小波变换

Key words: IC engine; generator; blind source separation; independent component analysis; empirical mode decomposition; wavelet transform

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.02.025

中图分类号: TK411⁺.6

文献标识码: A

0 概述

以内燃机作为动力源的发电机组, 其振动噪声信号同内燃机一样是典型的非稳态时变信号, 物理声源的识别是其振动噪声控制的前提和重点^[1]。经

验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、独立成分^[2]分析(independent component analysis, ICA)等盲源分离^[3]技术的应用, 可帮助提取声振信号特征、识别物理声源。其中, EMD法可以对单个噪声信号进行分解, 但是由于其求取本征

收稿日期: 2015-04-19

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAF07B04)

作者简介: 景亚兵(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为车辆及发动机振动噪声控制, E-mail: robin@tju.edu.cn;

毕凤荣(联系人), E-mail: fr_bi@tju.edu.cn。

模态函数(intrinsic mode function, IMF)是用极值包络曲线的平均值近似代替数据局部的平均值,因此不能确保 IMF 分量完全正交,即在声源分离时不能保证分离出的噪声源独立。ICA 算法分解结果彼此独立,但要求源信号数不超过观测信号数,即在声源分离时噪声测点数量不少于声源数量。而具有独立分量的经验模态分解方法(independent element empirical mode decomposition, IE-EMD)^[4]是将二者结合起来,运用 EMD 算法通过单个观测信号分离出多个信号源,结合 ICA 算法将 IMF 分量从原信号中分离出来,保证分量间的独立性,从而通过单个观测信号分解得到相互正交的分解分量。

IE-EMD 法和 ICA 法一样,忽略信号功率信息,可以分离出小功率信号,所以对于幅值微小的突变信号分离更具优势;同时,由于 IE-EMD 法不考虑信号功率信息,所以分离信号与信号源在幅值和相位上均不同,但 IE-EMD 法可有效地将独立信号源的波形分离出,虽然幅值、相位信息丢失,但通过波形可以得到信号源的频谱结构,可用于声源识别。本文中采用 IE-EMD 法对发电机组辐射的单通道噪声信号进行分解,得到正交的本征模态函数(IMF),保证分离的声源独立;利用连续小波变换(continue wavelet transform, CWT)分析 IMF 分量的局部时频特性,然后利用发电机组及内燃机的先验知识^[5],完成噪声源识别^[6-9],并通过试验进行了验证。

1 发电机组辐射噪声的分离和识别

发电机组噪声的产生非常复杂,从产生的原因和部位来分一般包括燃烧噪声、机械噪声、进气噪声、排气噪声、冷却风扇噪声、发电机噪声等。采用 IE-EMD 法对单缸发动机驱动的 5 kW 发电机组噪声信号进行盲源分离,仅需根据发电机组测试评价要求,在距离机组控制面板表面 1 m 处布置 1 个测点,机组发动机转速 3 000 r/min(发电工频 50 Hz),加载 75% 标定负载,在半消声试验室内进行测试,环境背景噪声为 25 dB,采样频率设为 25.6 kHz,记录 A 计权信号如图 1 所示。

1.1 声源分离结果

利用 IE-EMD 法对测量的发电机组辐射噪声信号进行分离,得到前 5 个独立分量,如图 2 所示。每个独立分量表征发电机组的一个噪声源。由图 2 可以看出,这些独立分量都是复杂的宽频带随机信号,无法判断对应于发电机组的哪一种噪声源,因此需要进一步对各独立分量进行小波变换分析。

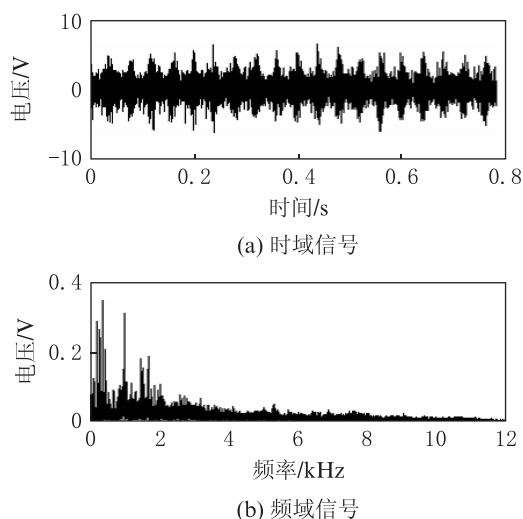


图 1 发电机组控制面板 1 m 处辐射噪声(A 计权)

1.2 独立分量的小波分析及声源识别

连续小波变换(CWT)具有良好的时频局部特性表征能力,对各独立分量进行连续小波变换,分析其时频局部特性,结合发电机组、内燃机噪声源的先验知识,可识别各独立分量与发电机组物理声源之间的对应关系^[10-11]。本文中小波变换采用 cmorlet 1-1.5 小波基,变换时长选取两个发动机工作循环(发动机 4 r),各独立分量变换结果见图 3。

由独立分量 IMF1 和 IMF2 小波分析的时频图可知,独立分量 IMF1 和 IMF2 的频率变化都具有明显的周期性,能量集中点总出现在曲轴转角 $340^{\circ} \sim 420^{\circ}$ 范围内,分量 IMF1 的能量主要分布在 4 kHz ~ 8 kHz,分量 IMF2 的能量主要分布在 1 kHz ~ 5 kHz。由发电机组的发动机配气相位可知,曲轴转角为 $340^{\circ} \sim 420^{\circ}$ 正是排气门关闭、进气门开启时刻。气门关闭落座时,在弹簧力作用下,开启的气门回到关闭状态,与气门座之间产生撞击,发出噪声,并在气门座缸盖系统的固有频率附近出现峰值;而气门开启时,由于存在配气间隙,摇臂与气门之间产生撞击,发出噪声,并在配气机构固有频率附近频段出现峰值;由此可以判定分量 IMF1 和 IMF2 为配气机构噪声,是由发动机气门开启、落座时的冲击引起的。

由独立分量 IMF3 和 IMF4 小波分析的时频图可知,独立分量 IMF3 和 IMF4 的时频分布比较复杂,且频带成分变化随着曲轴转角呈现一定的周期性,IMF3 的能量主要分布在 1 kHz ~ 3 kHz 的频带内,其中最为突出的频率成分在 2 kHz 左右;IMF4 的能量主要分布在 0.5 kHz ~ 2.0 kHz 的频带内,其中最为突出的频率成分在 1.5 kHz 左右。齿轮啮合过程中,两齿面接触点的相对滑动速度和方向交替

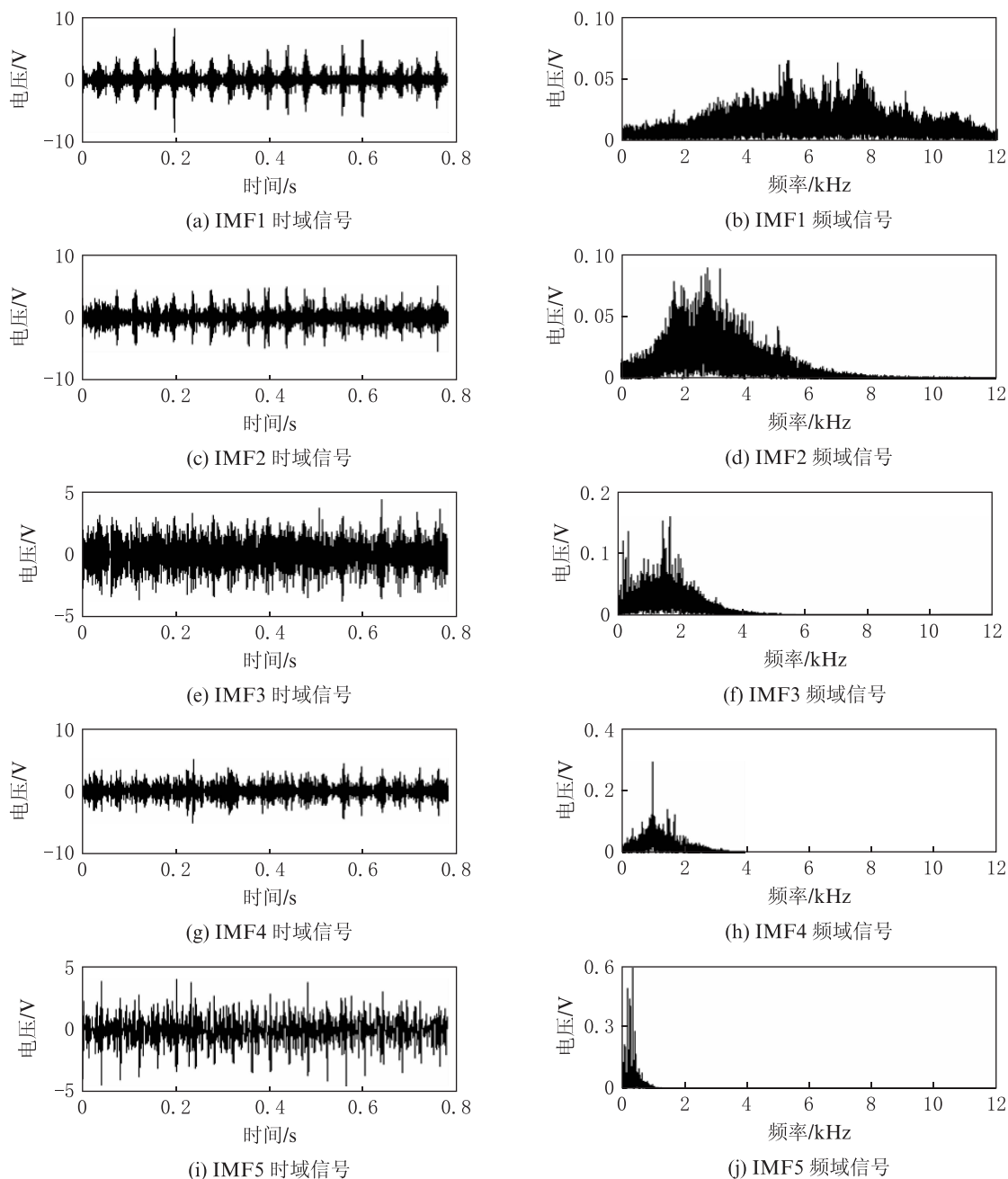


图2 发电机组辐射噪声信号 IE-EMD 分离结果

变化,因此其滑动摩擦力的方向也交替变化,从而产生冲击力。由于制造、安装误差、齿轮变形和轴系扭振等因素影响,齿与齿之间会存在撞击力。这两个力将引起振动,从而辐射噪声。其噪声主要频率(Hz)为:

$$f_m = \frac{n}{60}z \quad (1)$$

式中, n 为轴的转速, r/min ; z 为齿轮齿数。

试验用发电机组的曲轴上装有平衡轴驱动齿轮和正时齿轮,曲轴转速为 $3\,000\,r/min$,平衡轴驱动齿轮齿数为 43,正时齿轮为 29 齿。该发动机平衡轴驱动齿轮噪声频率可由式(1)计算,为 $2\,150\,Hz$,同理计算得到正时齿轮噪声频率为 $1\,450\,Hz$ 。独立分量

IMF3 和 IMF4 的频率组成与平衡轴驱动齿轮噪声频率和正时齿轮噪声频率相符,因此判定 IMF3 是平衡轴驱动齿轮噪声,IMF4 是正时齿轮噪声。

由独立分量 IMF5 的小波分析的时频图可知,IMF5 的频率变化也具有明显的周期性,能量集中在 $500\,Hz$ 以下,总出现在曲轴转角 $360^\circ \sim 580^\circ$ 范围内,此时进气门开启,发动机处于进气过程。当进气门开启时,进气管中产生一个压力脉冲,随着活塞的移动,压力波受到阻尼;当进气门关闭时,同样产生一个压力脉冲,并受到阻尼而迅速消失。两个压力脉冲周期性地发生,形成周期性的进气噪声,其噪声频率成分主要集中在低频范围,因此判定 IMF5 是进气噪声。

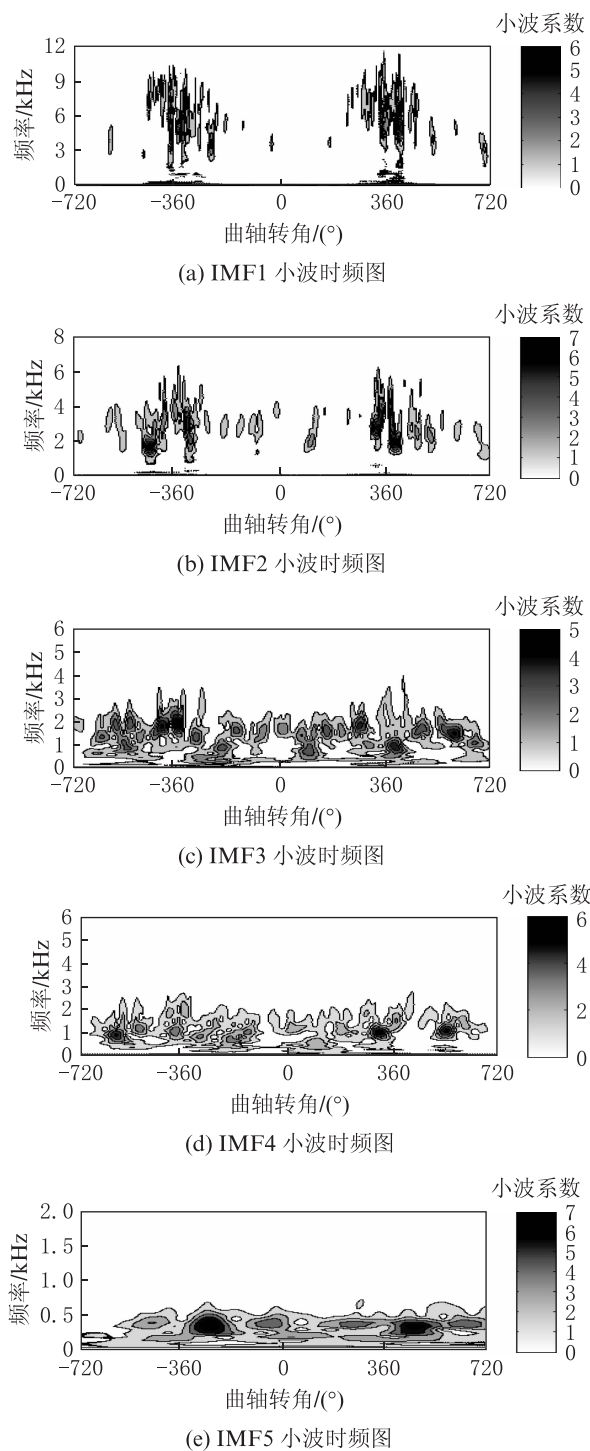


图 3 独立分量 IMF1~IMF5 小波变化时频图

2 试验验证

首先使用声强测试系统测量发电机组表面辐射噪声。发电机组工况及测试环境与前文相同。测量包络面包围发电机组,距离发电机组表面 15 cm,测点间距 5 cm。记录包络面各测点的声强信号,进一步处理得到各面的声强分布图。

由测试结果可知,发电机组 5 个测试面中空滤器对应包络面辐射噪声的声功率级最大,其次为发

动机缸头对应包络面,其声强分布如图 4 所示。从图 4(a)可以看出空气滤清器进气口附件声强值最大,从图 4(b)可以看出发动机缸头下方声强值最大。

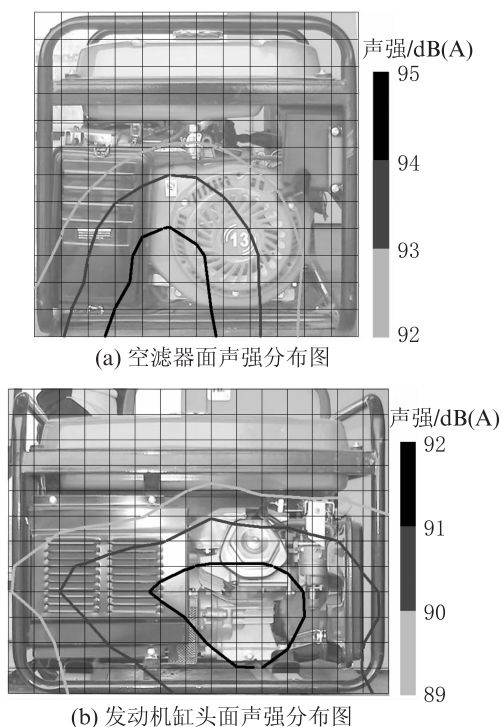


图 4 空滤器面和发动机缸头面声强分布图

根据声强法声源识别结果,在声强最大处(即图 4(a)中空滤器进气口和图 4(b)中发动机缸头下方)分别布置传感器以测量噪声信号;同时,测量曲轴转角信号、转速信号、气缸压力信号、进气门和排气门振动信号,测试时机组工况及测试环境与前文相同。

对采集到的时域信号进行处理,根据曲轴转角信号完成时域信号到角度域信号的转换,得到各测量信号随曲轴转角变化的角度域信号。通过对所测信号的分析可得到噪声峰值对应的发动机工作状态,如图 5 所示。

由图 5(a)可知发动机的工作时刻。将图 5(b)缸头下方噪声数据与图 5(c)空滤器进气口噪声数据对比可知:缸头下方测点噪声峰值与排气门落座、进气门开启的振动加速度峰值所在时刻吻合,因此判定气门开启、落座时的冲击是引起缸头下方测点噪声的主要原因;而空滤器进气口声强较高,并且其噪声峰值仅出现在进气阶段,因此判定此噪声为进气噪声。

同时,对图 4(b)中发动机缸头下方测点进行阶次分析,测试时机组转速由 1 100 r/min 逐渐增加到 3 900 r/min,测试环境与前文相同,得到阶次分析云图如图 6 所示。从图 6 可看出,该测点 29 阶和 43 阶噪声较高,由前文已知该发动机曲轴上安装有 29

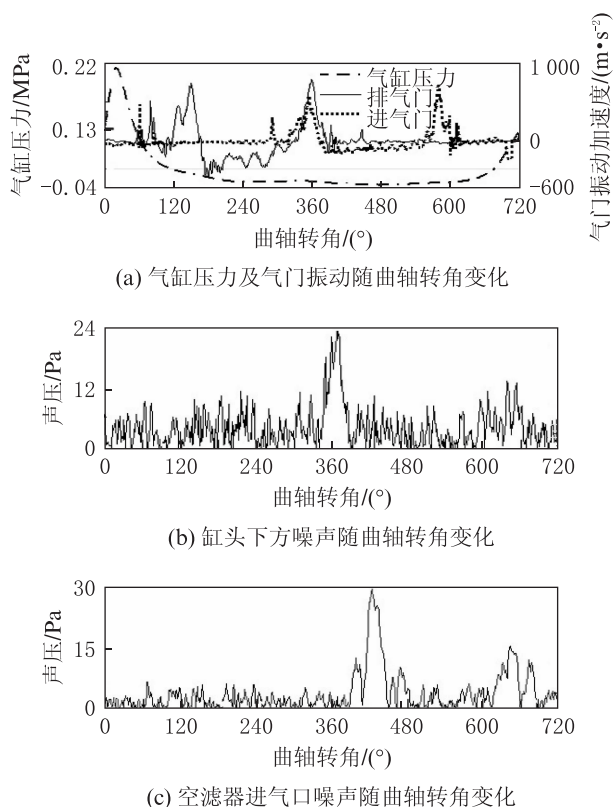


图5 角度域分析

齿正时齿轮和43齿的平衡轴驱动齿轮,因此判定该测点29阶和43阶噪声为齿轮啮合噪声。

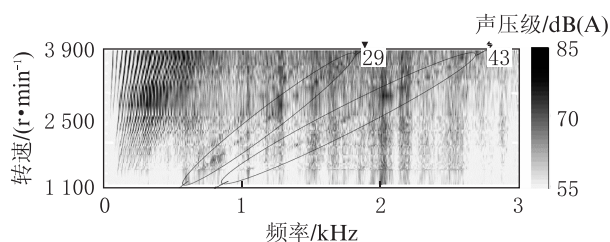


图6 缸头下方测点阶次分析

运用声强法识别出本文中单缸发动机驱动的发电机组的主要声源位于缸头下方及空滤器进气口,通过角度域分析、阶次分析判定缸头下方及空滤器进气口处的噪声主要由气门开启、落座冲击噪声、齿轮啮合噪声和进气噪声构成,而燃烧噪声、风扇噪声、电机噪声等不是该发电机组的主要噪声源,这与基于IE-EMD算法和小波分析的噪声源识别结果一致。

3 结论

(1) 将IE-EMD算法应用到噪声源信号识别中,避免了独立分量算法需要多通道输入信号的假设条件,实现了单通道输入噪声信号的分离,得到互不相关又相互统计独立的噪声源信号。

(2) 将小波分析技术应用到IE-EMD得到的噪

声源信号识别中,能有效识别出各独立源信号所表征的发电机组噪声源,它们分别为配气系统噪声、平衡轴驱动齿轮噪声、正时齿轮噪声和进气噪声。

参考文献:

- [1] 李顶根,邓杰.基于独立分量分析技术的内燃机噪声源识别[J].内燃机,2009(3):46-49.
LI D G, DENG J. Noise sources recognition based on independent component analysis technology [J]. Internal Combustion Engines, 2009, (3): 46-49.
- [2] HYWARINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent component analysis [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 2001.
- [3] 梅铁民.盲源信号分离时域与频域算法研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [4] 李洪,郝豪豪,孙云莲.具有独立分量的经验模态分解算法研究[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):245-248.
LI H, HAO H H, SUN Y L. Improved algorithm for empirical mode decomposition with independent elements[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 245-248.
- [5] 徐红梅,郝志勇,郭磊,等.基于独立成分小波分析的内燃机噪声源识别[J].内燃机工程,2007,28(6):61-65.
XU H M, HAO Z Y, GUO L, et al. Noise source identification of internal combustion engine based on independent component and wavelet analysis [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(6): 61-65.
- [6] LI W, GU F, BALL A D, et al. A study of the engine noise from diesel engines using the independent component analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(6): 1165-1184.
- [7] HYWARINEN A, OJA E. Independent component analysis: algorithms and applications[J]. Neural Networks, 2000, 13(4): 411-430.
- [8] HAO Z Y, HAN J. Identification of diesel front sound source based on continuous wavelet transform [J]. Journal of Zhejiang University (Science), 2004, 5(9): 1069-1075.
- [9] 葛楠,刘月辉.独立分量分析在内燃机噪声信号分离中的应用[J].天津大学学报,2006,39(4):454-457.
GE N, LIU Y H. Application of independent component analysis to decomposition of engine acoustic signals[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(4): 454-457.
- [10] 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.
WANG X, LIU C W, BI F R, et al. Blind source separation and identification of engine radiation noise based on independent component analysis and wavelet transform[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(2): 166-171.
- [11] 金岩,郝志勇,杨陈.内燃机噪声信号的独立分量分析[J].内燃机工程,2007,28(4):81-83.
JIN Y, HAO Z Y, YANG C. Study on noise of IC engine using independent component analysis [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(4): 81-83.