

文章编号:1000-582X(2010)05-016-06

内燃机机械噪声和燃烧噪声的识别分离

王攀¹, 邓兆祥^{1,2}, 刘永超¹, 胡亮¹

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 汽车 NVH 及安全控制国家重点实验室, 重庆 400039)

摘要:针对内燃机噪声识别问题,建立了数学模型并编制了相应的程序,在程序中加入作用全局阈值的小波变换降噪程序,保证程序的抗干扰性后,实现了燃烧噪声和机械噪声的频谱分离和 A 计权声功率级计算。以某 CG125 型摩托车发动机为例,通过构造包含不同干扰噪声的理论算例仿真识别,验证了程序的准确性和实用性。识别结果表明:分离前后的燃烧噪声和机械噪声的频谱吻合良好, A 计权声功率级误差均小于 0.6 dB。

关键词:机械噪声;燃烧噪声;噪声源识别;气缸压力;小波变换

中图分类号: TB533.2

文献标志码: A

Identification of combustion noise and mechanical noise in internal combustion engine

WANG Pan¹, DENG Zhao-xiang^{1,2}, LIU Yong-chao¹, HU Liang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Control, Chongqing 400039, P. R. China)

Abstract: To identify internal combustion engine (IC engine) noise, a mathematical model is established, and the corresponding program is developed. By introducing global thresholds to decrease noise in the wavelet transforms program, the anti-interference of the program can be guaranteed, the spectrums of the combustion noise and mechanical noise are separated, and their A-weighted sound power levels are figured out. Taking a CG125 style motorcycle engine for an example, theoretical examples that include different interferential noises are constructed to simulate the identification and to validate the accuracy and practicability of the program. Results of the identification show that the spectrums of the combustion noise and mechanical noise before and after separation are agreed well; errors of A-weighted sound power level are all less than 0.6 dB.

Key words: mechanical noise; combustion noise; noise source identification; cylinder pressure; wavelet transforms

内燃机噪声一般可以分为机械噪声、燃烧噪声和空气动力性噪声,其中机械噪声和燃烧噪声合称为内燃机表面噪声^[1]。由于不同噪声产生的机理不同,控制的方法也有所不同,所以正确识别和分离内

燃机噪声源是开展发动机噪声控制的基础。其中空气动力性噪声主要是指进气噪声、排气噪声,由于这些声辐射源空间位置分隔较远,容易进行识别。但机械噪声和燃烧噪声都发生于内燃机内部并经内燃

收稿日期:2009-12-01

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC 2006 BA7013)

作者简介:王攀(1977-),男,重庆大学讲师,博士,主要从事汽车 NVH 控制和汽车系统动力学方面的研究。

邓兆祥(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)zxdeng@cqu.edu.cn。

机结构表面向外辐射,两者在发生的时间、空间、传播的途径和信号的基本频域特征等方面都重叠交织在一起,如何识别和分离这两类噪声就成了一个十分重要的难题。国内外学者对内燃机噪声源识别做了一些研究^[2-5],目前国内采用较多的是分别运行法^[3]和盲源分离技术^[5]等,由于分别运行法在倒拖时不能真实再现缸内的高温高压,所以测得的机械噪声会较真实值小,而采用盲源分离技术得到的分离结果常常只是波形和原信号相似,幅值信息常常是没有意义的,而国外的技术通常要求具有造价昂贵的消声室或半消声室,同时,即使有了这些设施,有很多内燃机因结构、重量尺寸及运转条件的限制也难于进行实验,对分析各种噪声对总噪声的贡献率进而进一步控制噪声十分不利。笔者针对内燃表面噪声的识别问题,通过采用改变点火(喷油)提前角的方法测得2种情况下的总噪声和缸压曲线,经过编制的程序对内燃机表面噪声进行识别和分离得到燃烧噪声和机械噪声的频谱和声功率级,从而得到两者在内燃机噪声中所占比例,对于进一步进行内燃机噪声控制有一定的价值。

1 数学模型的建立

1.1 基本假设

一般来说燃烧噪声可以看作燃烧过程中燃烧室内产生的压力振动经过内燃机结构衰减为外表面的机械振动而辐射出去的全部噪声,把燃烧噪声与气缸压力的比值定义为内燃机燃烧噪声的传递函数,把活塞对缸套的敲击,正时齿轮、配气机构、喷油系统等运动件之间的机械撞击所产生的振动而激发的噪声称为机械噪声。人类对内燃机噪声做了很多有益研究并且已经有一些结论^[6-13],这些结论也是内燃机噪声识别的前提条件:

1)在转速等其他工况条件不变的条件下,合适的改变点火(喷油)提前角,机械噪声是没有变化的。

2)内燃机的燃烧噪声与气缸压力的比值即内燃机传递函数不随转速、负荷及点火(喷油)提前角等因素变化,仅由内燃机本身的结构决定。

1.2 噪声识别和分离的原理

基于前面的假设,内燃机噪声对于每个频率成分都有以下基本公式:

$$P_1 = P_m + H \times P_{C1}, \quad (1)$$

$$P_2 = P_m + H \times P_{C2}. \quad (2)$$

式中: P_1 、 P_2 分别为2次发动机总噪声声压; P_m 为机械噪声的声压; P_{C1} 、 P_{C2} 分别为2次不同缸压谱即缸压曲线经过傅里叶变换后的频谱; H 为缸压谱与

燃烧噪声间的传递函数。

通过推导容易得到该公式对于声强以及声功率也同样适用,只是传递函数相应的发生了变化。改变点火(喷油)提前角可以在保持内燃机的机械噪声声功率和传递函数不变的情况下改变燃烧噪声声功率,从而实现对机械噪声和燃烧噪声的识别与分离。

根据式(1)、(2)可以进一步推导出

$$L_{WC1} = L_{W1} + 10 \lg \left\{ \frac{[1 - 10^{0.1(L_{W2} - L_{W1})}]}{[1 - 10^{0.1(L_{PY2} - L_{PY1})}]} \right\}, \quad (3)$$

$$L_{WC2} = L_{WC1} + L_{PY2} - L_{PY1}, \quad (4)$$

$$L_{Wm} = L_{W1} + 10 \lg [1 - 10^{0.1(L_{WC1} - L_{W1})}]. \quad (5)$$

式中: L_{W1} 、 L_{W2} 分别为2次点火(喷油)提前角时测得的总声功率; L_{PY1} 、 L_{PY2} 分别为2次点火(喷油)提前角时的缸压谱,可由测得的时域缸压曲线经过傅里叶变换再通过求声压公式得到; L_{WC1} 、 L_{WC2} 分别为求出的2次点火(喷油)提前角时燃烧噪声声功率; L_{Wm} 为机械噪声声功率。

可见在保持转速等条件不变情况下,改变点火(喷油)提前角,可以测得2次点火(喷油)提前角情况下的总声功率谱和缸压曲线,然后对于每个频率成分应用此公式,最后就可以得出燃烧噪声和机械噪声的声功率频谱图和传递函数,经过A计权以后可以得出燃烧噪声和机械噪声的声功率级。

1.3 小波降噪的原理

在信号的测试、采集、传输、记录、分析和回放过程中,随机误差和系统误差等是难以避免的。比较以往内燃机燃烧噪声与机械噪声的测试方法^[8],笔者引入了小波变换对信号进行降噪处理,提高了机械噪声和燃烧噪声的精度。利用小波变换进行降噪时,可以使正交基的选取更接近信号本身,同时采用一定的方法选取阈值就能够生成最小方差估计的降噪信号,这样就很容易降低甚至消除干扰噪声^[14-15]。

图1是小波降噪的基本过程,其中: A 为原始信号; w 为干扰噪声; s 为混合后的信号; F 为阈值; M 为掩码算子; f 为重建小波系数后的信号。其过程为:将混合信号 s 进行小波变换得到分解系数,作用阈值 F 后,模值小的系数被置零,只保留模值大的系数项,掩码算子 M 的作用是保留特定的系数并把其他系数置零,它是阈值算子的推广,可以通过引入系数模值的掩码算子来实现阈值算子,最后将处理后的系数通过小波重构恢复原始信号。

这个过程基于以下的假设,即携带的原始信号在频域或小波域的能量相对集中,表现为能量密集区域的信号分解系数较大,而干扰噪声信号的能量

谱相对分散,所以系数的绝对值较小。对于内燃机噪声的降噪来说是符合这个条件的,这样就可以通过作用阈值的方法过滤掉绝对值小于一定阈值的小波系数,从而达到降噪效果。

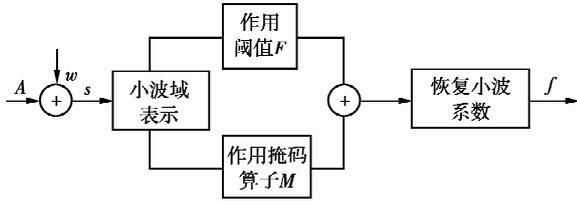


图 1 小波降噪的基本过程

2 程序的设计

内燃机噪声识别程序的过程如图 2 所示。

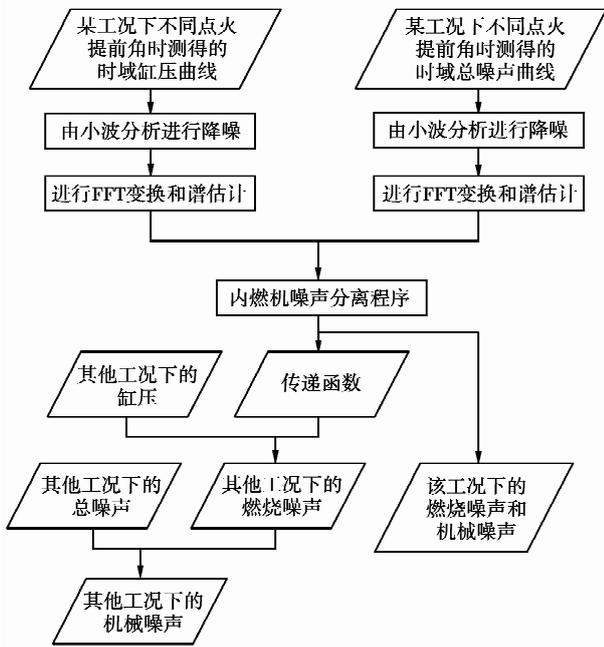


图 2 内燃机噪声分离程序

根据公式利用 MATLAB 编制程序对 2 次点火(喷油)提前角的时域缸压曲线进行快速傅里叶变换得到频谱 P_{Y1} 和 P_{Y2} ,再利用声压级和参考声压的概念通过式(6)、(7)得到缸压谱 L_{PY1} 、 L_{PY2} 。

$$L_{PY1} = 20\lg\left(\frac{P_{Y1}}{P_0}\right), \quad (6)$$

$$L_{PY2} = 20\lg\left(\frac{P_{Y2}}{P_0}\right). \quad (7)$$

式中: P_{Y1} 、 P_{Y2} 分别为频域上的气缸压力; P_0 为参考声压,其值为 2.0×10^{-5} Pa。

为了计算的方便,要对时间不足 1 s 缸压曲线

进行延拓,使频率分辨率为 1 Hz。为了保证程序的实用性在程序中加入利用小波包分析的降噪程序,与普通的小波分析相比可以在更高的频率范围内区分有用信号与干扰噪声。在进行降噪之前,首先选择小波基函数对信号进行分解,熵标准选用 SURE (基于 Stein 的无偏似然估计)原则,因为这种熵标准对高斯白噪声信号降噪效果最好,分解后的小波系数用 SURE 原则确定的全局阈值进行处理,由处理后的系数重构出降噪后的总噪声信号。将降噪后的总噪声和缸压谱载入根据式(3)、(4)和(5)编制的内燃机噪声分离程序。还要根据公式讨论特殊情况使程序能顺利运行,如在某个频率 $L_{PY1} = L_{PY2} = 0$ 会导致除 0 使程序无法继续进行,容易得出在这种情况下应有 $L_{Wm} = L_{W1}$ 。得出机械噪声和燃烧噪声的频谱后为了计算其声功率级,根据 A 计权修正的国际标准(IEC 标准)利用编制的应用 A 计权网络计算声功率级的程序,得出每个频谱的 A 计权声功率级。

3 程序的算例验证

3.1 算例验证目的

由于内燃机燃烧噪声和机械噪声的分离并没有一种准确的试验方法,真实的燃烧噪声和机械噪声也不可能预知,为了能够有效验证程序可以准确分离噪声,笔者构造了理论算例对程序进行验证,验证过程如图 3 所示。

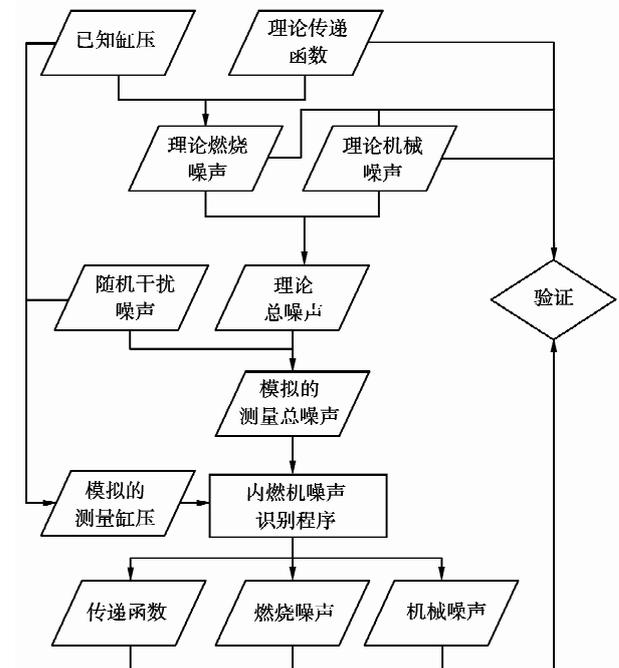


图 3 内燃机噪声分离程序的验证过程

3.2 验证过程

以某 125 单缸四冲程汽油发动机为例来介绍整个验证过程。图 4 是点火提前角分别为 16° 和 20° 时(正常点火)的缸压曲线,经过对比发现后者最高压力点比前者高 0.32 MPa,说明后者具有较大能量,也导致了 2 个点火提前角的缸压谱和总噪声的不同。

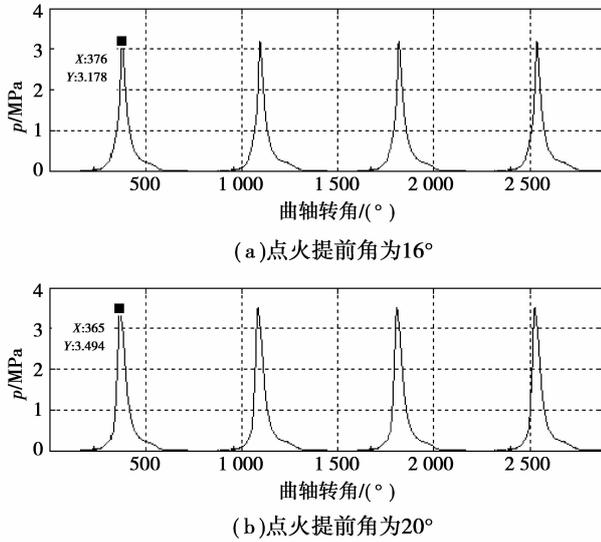


图 4 不同点火提前角的缸压曲线

图 5 是典型的缸压谱与燃烧噪声之间的传递函数,从该传递函数可以看出:发动机结构对缸压谱中 2 000 Hz 以下的频率成分衰减较大,而对 2 000 ~ 5 000 Hz 的频率成分有较大的传递函数,因为这一频段容易引起发动机机体表面和各个零件的共振,从而使发动机辐射出较大噪声,而 5 000 Hz 以上的传递函数介于两者之间^[16]。由缸压得到缸压谱后,再由式(8)、(9)可以得到 2 种气缸压力下的燃烧噪声。

$$L_{WC1} = L_{PY1} - L_A, \quad (8)$$

$$L_{WC2} = L_{PY2} - L_A. \quad (9)$$

式中 L_A 是每个频率的衰减量。

以该转速下倒拖时的机械噪声作为验证过程中的机械噪声,它与燃烧噪声根据噪声叠加原理进行能量叠加得到理论总噪声曲线;在加入使内燃机噪声信号有不同信噪比的白噪声来模拟干扰噪声后,得到含干扰的总噪声;对总噪声信号进行小波包分析,用 SURE 原则选取阈值对信号进行小波分解系数处理,再重构信号得到降噪后的总噪声信号。图 6 依次显示了点火提前角为 16° 时的 3 种总噪声信号。

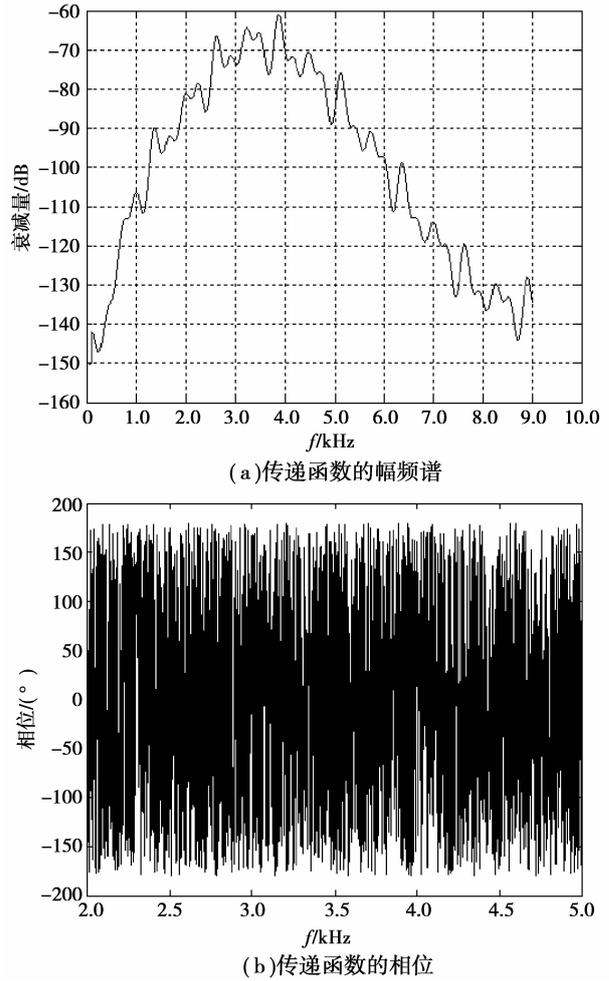


图 5 燃烧噪声的传递函数

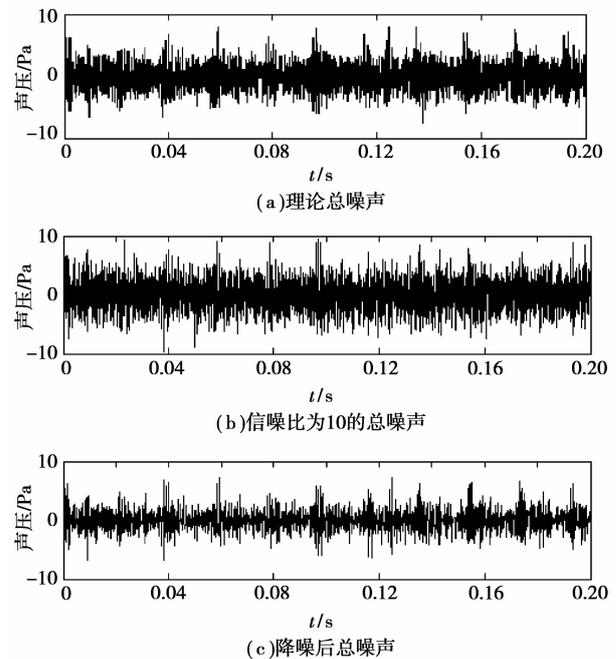


图 6 总噪声降噪效果对比

3.3 结果对比

在程序中载入进行降噪处理后的 2 个时域的缸压曲线和 2 个总噪声,程序经过图 2 所示的识别计算过程就可以得到燃烧噪声和机械噪声频谱以及声功率值,表 1 是不同信噪比的内燃机噪声分离结果,可以看到利用小波包分析降噪有效降低了随机干扰噪声的影响,提高了内燃机噪声分离的精度。图 7 给出了信噪比为 10 时的分离出的噪声与理论噪声

的频谱对比,原始的机械噪声和燃烧噪声通过实验以及理论计算分别得到。可以看出识别出的机械噪声和燃烧噪声频谱与理论频谱吻合良好,可见该方法从总噪声中成功分离出了燃烧噪声和机械噪声,并得出了它们的频谱和声功率,同时有效降低了干扰噪声对识别结果的影响,提高了识别精度,验证了程序的准确性和实用性。

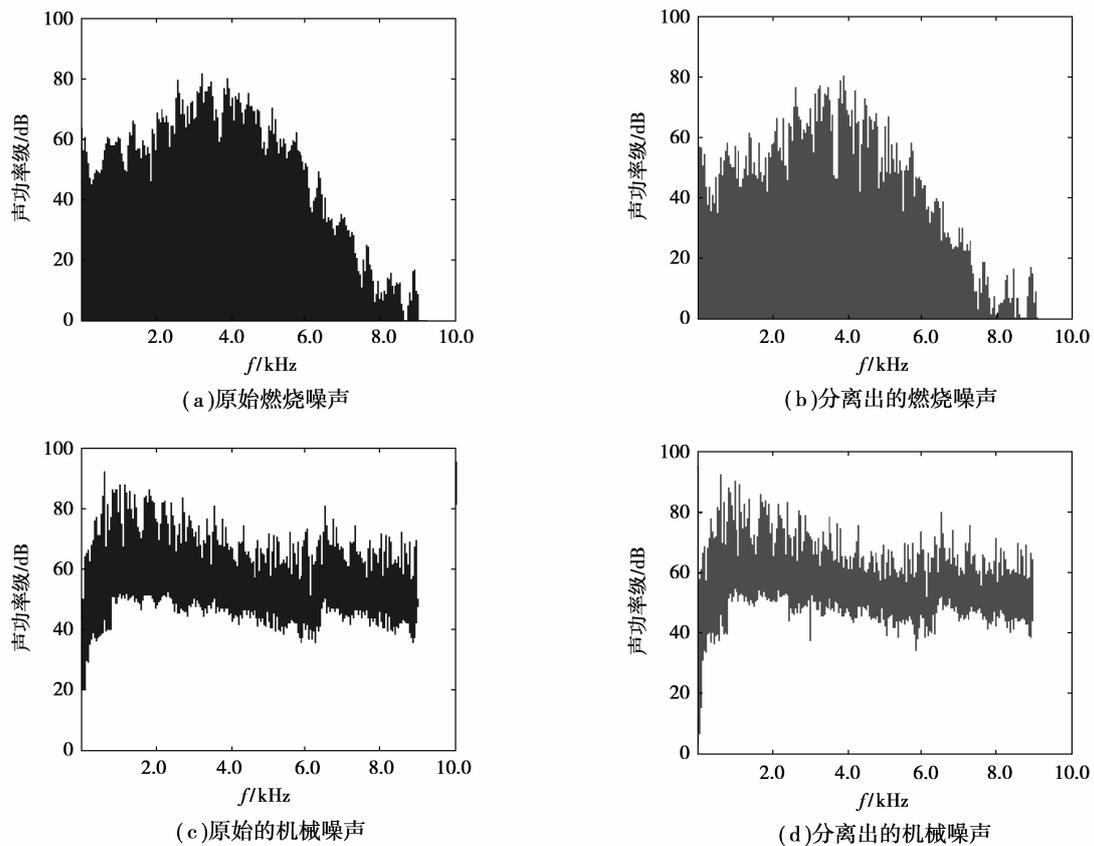


图 7 分离噪声频谱与理论噪声对比

表 1 不同信噪比的内燃机总噪声的噪声分离效果

dB(A)

信噪比	理论值		分离值				误差			
	燃烧噪声	机械噪声	燃烧噪声		机械噪声		燃烧噪声		机械噪声	
			不降噪处理	降噪处理	不降噪处理	降噪处理	不降噪处理	降噪处理	不降噪处理	降噪处理
10	100.69	103.07	101.74	100.14	101.99	102.55	1.05	0.55	1.08	0.52
12	100.69	103.07	101.25	100.32	102.35	102.72	0.56	0.37	0.72	0.35
16	100.69	103.07	101.08	100.50	102.40	102.86	0.39	0.19	0.67	0.21

4 结论

1) 目前内燃机噪声识别方法多种多样,但采用改变点火(喷油)提前角方法,所需测量的原始数据

较少,识别的精度较高,能同时得到机械噪声和燃烧噪声的频谱和声功率级,对于不同类型的内燃机具有一定的普遍应用性。

2) 在完成一次识别后得到的内燃机燃烧噪声和

缸压之间的传递函数可以用于其他工况下燃烧噪声和机械噪声的识别分离。

3)利用小波变换对总噪声和缸压进行降噪处理后再进行噪声识别可以减小干扰噪声的影响,从而提高内燃机噪声的识别精度。

参考文献:

- [1] 何渝生,邓兆祥,陈朝阳. 汽车噪声控制[M]. 北京:机械工业出版社,1999:67-71.
- [2] 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 NAN, LIU YUE-HUI. Application of independent component analysis to decomposition of engine acoustic signals[J]. Journal of Tianjin University, 2006,39(4):454-457.
- [3] 魏凯,毕凤荣. 发动机燃烧噪声与机械噪声对整机贡献度的实验研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2007,36(4):82-84.
HE KAI, BI FENG-RONG. Experimental analysis of combustion noise and mechanical noise contribution for motorcycle engine[J]. Small Internal Combustion and Motorcycle, 2007,36(4):82-84.
- [4] BADAOU M E, DANIERE J, GUILLET F, et al. Separation of combustion noise and piston-slap in diesel engine, Part I: separation of combustion noise and piston-slap in diesel engine by cyclic wiener filtering[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(6):1209-1217.
- [5] SERVIERE C, LACOUME C, BADAOU M E, et al. Separation of combustion noise and piston-slap in diesel engine, Part II: separation of combustion noise and piston-slap using blind source separation methods[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(6):1218-1229.
- [6] SHU G Q, LIANG X Y. Identification of complex diesel engine noise sources based on coherent power spectrum analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1):405-416.
- [7] 卫海桥,舒歌群. 内燃机缸内压力与燃烧噪声的研究[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(1):56-61.
WEI HAI-QIAO, SHU GE-QUN. Cylinder pressure and combustion noise of internal combustion engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(1):56-61.
- [8] 郑栋梁,李中付,华宏星. 内燃机燃烧噪声与机械噪声的测试方法[J]. 噪声振动与控制,2002,22(3):44-48.
- ZHENG DONG-LIANG, LI ZHONG-FU, HUA HONG-XING. A measuring method for combustion noise and mechanical noise of internal combustion engine[J]. Noise and Vibration Control, 2002, 22(3):44-48.
- [9] ZERVAS E. Comparative study of some experimental methods to characterize the combustion process in a SI engine [J]. Energy, 2005, 30(10):1803-1816.
- [10] LITAK G, TACCANI R, RADU R, et al. Estimation of a noise level using coarse-grained entropy of experimental time series of internal pressure in a combustion engine[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 23(5):1695-1701.
- [11] KAMINSKI T, WENDEKER M, URBANOWICZ K, et al. Combustion process in a spark ignition engine: dynamics and noise level estimation[J]. Chaos, 2004, 14(2):461-466.
- [12] WENDEKER M, LITAK G, CZARNIGOWSKI J, et al. Nonperiodic oscillations of pressure in a spark ignition engine[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering, 2004, 14(5):1801-1806.
- [13] CHOI G M, TANAHASHI M, MIYAUCHI T. Control of oscillating combustion and noise based on local flame structure[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2):1807-1814.
- [14] 王军,张幽彤,王宪成,等. 基于小波变换的柴油机气缸压力信号降噪[J]. 测试技术学报,2008,22(2):140-144.
WANG JUN, ZHANG YOU-TONG, WANG XIAN-CHENG, et al. De-noising of cylinder pressure signal in diesel engine based on wavelet transform[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(2):140-144.
- [15] 成礼智,郭汗伟. 小波与离散变换理论与工程实践[M]. 北京:清华大学出版社,2005:16-19.
- [16] 卫海桥,舒歌群,梁兴雨,等. 燃烧噪声一级影响模型的多元回归分析[J]. 内燃机工程,2006,27(4):66-69.
WEI HAI-QIAO, SHU GE-QUN, LIANG XING-YU, et al. Multi-regression analysis of the first-level influence model of combustion Noise [J]. Chinese Journal Combustion Engine Engineering, 2006,27(4):66-69.

(编辑 张 芊)