基于 DWT 的汽油机爆震信号分析

王彦岩 杨建国 宋宝玉

(哈尔滨工业大学 汽车学院，威海 264209)

摘 要：为提高爆震检测精度，研究了离散小波变换在爆震信号分析中的应用.利用离散小波变换从汽油机的振动信号中提取出了轻微爆震特征，提出了一种根据离散小波变换特征域子带信号能量大小来评价爆震强度的指标，根据爆震发生时特征域子带信号能量阶跃变化的特性，提出了确定爆震阈值的方法，该方法经检验能准确判断发生爆震的临界值.研究成果为将小波变换应用于汽油机爆震的实时精确控制打下基础，可进一步通过点火提前控制使汽油机在轻微爆震区工作，汽油机的动力性、经济性都能够得到提高.

关 键 词：汽油机；爆震；小波变换

中图分类号：TK 411.22

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)10-1166-04

Knock signal analysis for gasoline engines based on discrete wavelet transform

Wang Yanyan Yang Jianguo Song Baoyu

(School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China)

Abstract: For the increasing of knock detection precision, the application of discrete wavelet transform(DWT) in the analysis of gasoline engine knock signal was studied. First, the knock feature was extracted from gasoline engine cylinder block acceleration signals by using DWT. Then, the parameter for evaluating knock intensity based on the energy of DWT decomposition detail coefficient was put forward. According to the character of DWT decomposition detail coefficient energy step change when knock took place, the method of confirming the knock threshold value was brought out, and the effectiveness of the method was also tested. The research results build the foundation of applying DWT to accurate and real-time knock control of gasoline engine. Further more, gasoline engine can work at slight knock zone by spark advance control, and the performance of gasoline engine can also be improved.

Key words: gasoline engine; knock; wavelet transform

爆震是限制汽油机性能提高的主要因素之一.发动机发生严重爆震时，燃烧不充分，机体强烈振动，发动机动力性、经济性和排放性能都下降.但研究表明，当轻微爆震时，爆震接近等容燃烧，汽油机的经济性与动力性均有所提高.理想的情况是发动机始终工作在轻微爆震区以提高性能，但不发生强烈爆震而损害发动机.这对爆震信号的检测和强度判断精度提出了更高的要求.

目前，实用的爆震检测主要有通过测量气缸压力和测量气缸振动两种方法[1].依靠压力传感器检测由于属于直接测量，相对精确，但成本高，通常只在试验台架上使用.车用的方法是用爆震传感器测量由气缸压力变化引起的机体振动频带，一般同时借助于滤波和频谱分析，给出相应的信号输出.这种方法精度低，不能检测出轻微爆震特征，通常点火提前角要留有余量，使发动机在远离爆震的区域工作，会牺牲掉发动机的一部分性能.

收稿日期：2008-09-23

作者简介：王彦岩(1974—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，博士生，wyy_lj@sina.com.

小波变换近年来广泛应用于机械故障诊断、边缘检测等领域[2-3]. 离散小波变换良好的时频分析特性,为从成分复杂的振动信号中提取轻微的爆震特征提供了可能.

1　汽油机爆震试验

爆震试验在一 HYUNDAI 汽油机台架上进行. 用一只 kistler 压力传感器测取第 1 缸缸内的压力信号,同时用一只 IMI 加速度传感器(621B40)自第 1 缸缸盖上测取加速度振动信号. 传感器输出的模拟信号经一动态分析仪 35670A 以 102.4 kHz 的采样频率采集、A/D 转换及放大后存储在微机的硬盘上. 试验原理如图 1 所示.

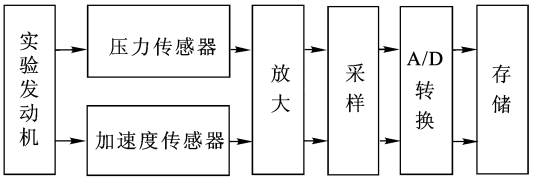
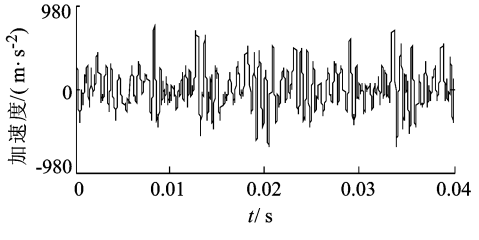
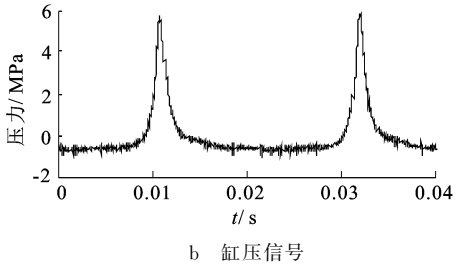


图 1　试验原理框图

试验转速为 5 800 r/min,过程中节气门全开. 爆震的产生通过改变点火提前角来实现. 点火提前角以 2°的步长自正常值 28°增加到 38°. 试验中,直到点火提前角增大到 38°,汽油机始终未出现人耳可辨的明显的气缸敲击声. 图 2 为点火提前角为 38°时,在试验台架上利用加速度传感器和缸压传感器同时检测到的信号波形图.



a　振动信号



b　缸压信号

图 2　点火提前角 38°时振动信号与缸压信号

2　离散小波变换

令 $A_j[\cdot]$ 和 $D_j[\cdot]$ 为一对算子,$A_j[f(t)]$ 和 $D_j[f(t)]$ 分别代表第 j 层信号 $f(t)$ 的小波变换的近似部分和细节部分,则离散小波变换的分解算法为[4]

$$\left.\begin{aligned} A_0[f(t)] &= f(t) \\ A_j[f(t)] &= \sum_k H(k-2t)\cdot A_{j-1}[f(t)] \\ D_j[f(t)] &= \sum_k G(k-2t)\cdot A_{j-1}[f(t)] \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中,$t=1,2,\cdots,N$; $j=1,2,\cdots,J$; $J=\log_2 N$; $H(t)$ 和 $G(t)$ 为一对正交镜像小波分解滤波器; $H(t)$ 为低通滤波器; $G(t)$ 为高通滤波器.

离散小波变换的重构算法为[4]

$$A_j[f(t)] = 2\Big\{\sum_k h(k-2t)\cdot A_{j+1}[f(t)] + \sum_k g(k-2t)\cdot D_{j+1}[f(t)]\Big\} \quad (2)$$

式中,$t=1,2,\cdots,N$; $j=J-1,J-2,\cdots,1,0$; $J=\log_2 N$. $h(t)$ 和 $g(t)$ 为一对正交镜像小波重构滤波器; $h(t)$ 为低通滤波器; $g(t)$ 为高通滤波器.

式(1)和式(2)所表示的算法实际上是二进离散小波变换,从频域的角度来说,它实际上是将信号分解到一系列二进带宽的子带上. 本文采用改进的单个子带信号重构算法,来获得一系列子带上与原始信号具有相同时间分辨率的子带信号.

3　基于 DWT 的爆震特征提取

取图 2 中的两循环振动信号进行离散小波变换. 选取 Daubchies 小波 db2,小波变换尺度取 2^3,观察振动信号的 DWT(Discrete Wavelet Transform)结果(见图 3),子带信号 d_1(理论频率范围为 25 600～51 200 Hz)和 d_2(理论频率范围为 12 800～25 600 Hz)上在 0.031 s 附近都有明显的冲击存在. d_3(理论频率范围为 6 400～12 800 Hz)上未见明显的冲击存在. 其中 d_2 的频率范围,正处于爆震的特征频率带内(现在公认的爆震存在的频率为 5 000～25 000 Hz 之间),与图 2 中压力信号比较可知,0.031 s 所处时刻也符合爆震产生的时间. 可以确定循环 2 发生了爆震,而循环 1 未见爆震特征. 说明改进的单子带重构算法能够很好的将信号瞬间的微弱成分检测出来,d_2 子带可作为爆震特征域. 因此 DWT 从气缸的振动信号中直接提取出了轻微爆震特征.

对 30°,32°,34°,36°点火提前角时的振动信号进行小波分析,在 d_2 特征频带内,没有发现爆震存在,说明发动机的点火提前角留有一定的余量.

图 4 为一个点火提前角 36°时的实例,与同时测得的压力信号比较,振动信号 d_2 子带中没有可分辨得出的爆震冲击存在.

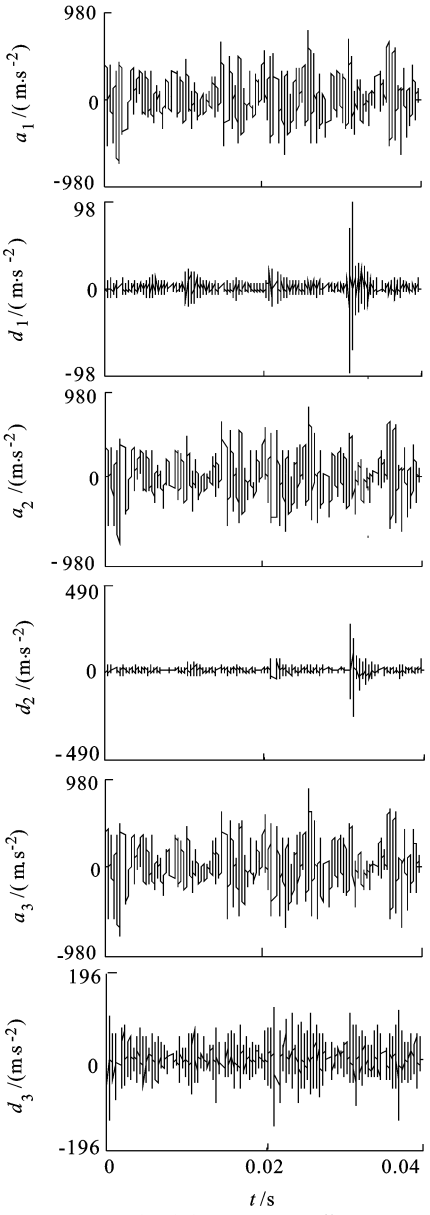
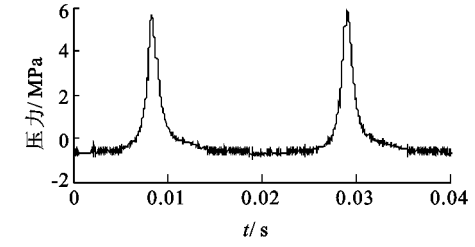
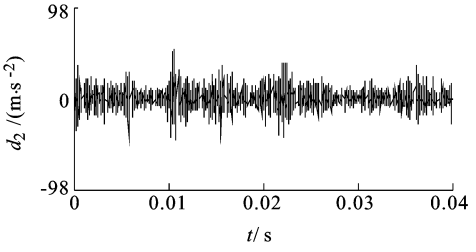


图3 点火提前角38°时振动信号的DWT分析



a 缸压信号



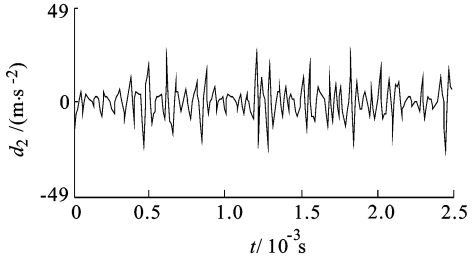
b d_2 子带信号

图4 点火提前角36°缸压与特征域子带信号

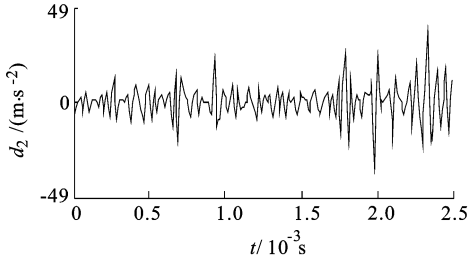
4 基于DWT的爆震强度判定

4.1 爆震强度评价指标

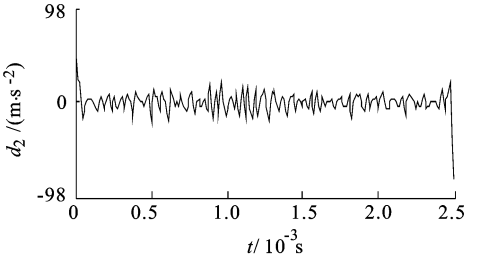
对不同点火提前角下的振动信号，只截取可能发生爆震的一段(燃烧过程上止点后0～90°曲轴转角)，分别对其进行了离散小波变换，d_2 子带特征域信号见图5.



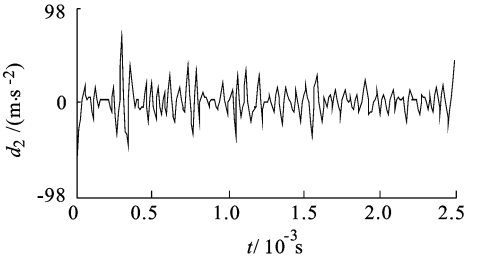
a 点火提前角30°



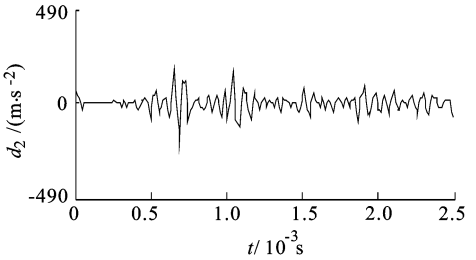
b 点火提前角32°



c 点火提前角34°



d 点火提前角36°



e 点火提前角38°

图5 不同点火提前角下特征域子带信号

从图5可看出，点火提前角增大后(30°，32°，

34°,36°),特征域信号幅值变化不大,但当有爆震发生后(38°),特征域信号幅值达到了正常点火提前角的数倍.随着汽油机工作区域越接近发生爆震区域,特征域信号平均幅值随着升高.

说明爆震的强弱程度可以用特征域子带信号的能量高低来标志,发生爆震,则特征域上的信号能量大;反之,则特征域上的信号能量小.

本文提出爆震强度评价指标:

$$K = E/E_n \tag{3}$$

K 表示在爆震可能发生的时间域内,特征域上信号的平均能量 E 与爆震临界点(阈值)平均能量 E_n 的比值.即根据 K 的大小来判断爆震的强弱.$K<1$ 时,可以认为没有发生爆震;$K>1$ 时,发生了爆震.K 值越大,爆震的强度越大.

其中特征域上信号的平均能量 E 为

$$E = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N_j} d_k^2 \tag{4}$$

式中,d_k 为特征域子带信号的细节部分;N 为上止点后 0～90°曲轴转角的特征信号数量.

4.2　爆震域值确定

爆震阈值的确定是发动机爆震检测的关键.

取点火提前角为 38°时的 40 个循环的振动信号,对其进行 DWT 后提取爆震特征,确定有 11 个循环发生爆震.对所有循环在 d_2 子带特征域上的能量进行统计处理.用式(4)方法计算各循环下 E,得 E 分布见图 6.未发生爆震循环的 E 值在 0.34 到 4.76 之间,发生爆震循环的 E 值在 16.96 到 22.34 之间.即没有发生爆震的循环,特征域信号平均能量的分布集中在一定的区域内;发生爆震的循环,特征域信号平均能量阶跃性增大.可确定汽油机该工况下爆震阈值为 17.

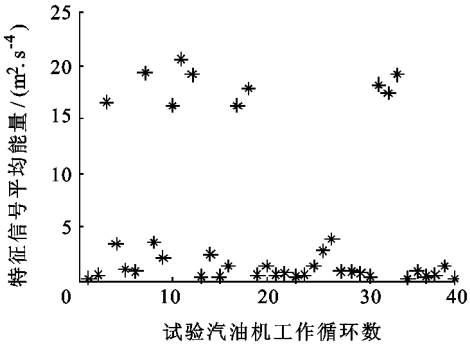


图 6　振动信号特征域能量统计

5　结 束 语

本文采用离散小波变换方法能有效地从发动机振动信号中提取出轻微爆震特征.提出的基于 DWT 特征域信号平均能量的爆震强度评价方法,精度较高,同时运算量小,为将小波算法进一步应用于汽油机爆震的实时控制奠定了基础.

参考文献(References)

[1] 武得钰,傅茂林,李建权,等.火花点火发动机爆震强度评价指标的研究[J].内燃机学报,1997,15(1):62－69
Wu Deyue, Fu Maolin, Li Jianquan, et al. A study on knock intensity indices in spark ignition engines[J]. Transactions of CSICE, 1997, 15(1):62－69(in Chinese)

[2] Borg J M, Saikalis G, Oho S. Knock signal analysis using the discrete wavelet transform[C]// SAE World Congress. Detorit:[s. n.], 2006:1－10

[3] Li J, Zuo M J, Ken R Fyfe. Mechanical fault detection based on the wavelet de-noising technique[J]. Journal of Vibration and Acoustic, 2004, 126(1):9－16

[4] Ya Wu, Du R. Feature extraction and assessment using wavelet packets for monitoring of machining processes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1996, 10(1): 29－53

(编　辑:张　嵘)