

基于内禀模态高频积分能量法的煤油 发动机爆震因子计算方法

盛 敬^{1,2}, 魏民祥¹, 刘国满³, 李玉芳¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南昌工程学院 机械与电气工程学院, 南昌 330099;

3. 中兴通讯股份有限公司 承载网预研部, 南京 210012)

摘 要: 提出了基于内禀模态高频积分能量法的爆震因子计算方法. 该方法对电控二冲程煤油发动机缸内燃烧压力信号进行经验模态分解, 自适应得到若干内禀模态函数分量与残余函数. 对内禀模态函数分量采用快速傅里叶变换得到爆震高频信号分量, 选取残余函数峰值对应的曲轴转角为爆震窗口起始曲轴转角, 对爆震窗口宽度分析, 得到合理爆震窗口宽度持续曲轴转角为 30° . 利用内禀模态高频积分能量法对无爆震、轻微爆震、中度爆震与强烈爆震工作循环的缸内燃烧压力信号进行爆震因子计算, 得到 4 个工作循环的爆震因子分别为 0.6642, 1.8191, 3.0275, 5.3717, 可表征爆震的强弱. 研究表明基于内禀模态高频积分能量法的爆震因子计算方法简便、快速有效.

关 键 词: 爆震因子; 内禀模态高频积分能量法; 缸内燃烧压力; 爆震窗口宽度; 电控二冲程煤油发动机
中图分类号: V231.2⁺2; TN911.72; TK46⁺1 **文献标志码:** A

Calculating method of knock factors based on method of intrinsic mode function high-frequency integral energy for kerosene engine

SHENG Jing^{1,2}, WEI Min-xiang¹, LIU Guo-man³, LI Yu-fang¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

3. Bearer Network Product Pre-research Department,
Zhongxing Telecom Equipment Corporation Limited, Nanjing 210012, China)

Abstract: The method of intrinsic mode function high-frequency integral energy was proposed. In this method, the cylinder combustion pressure signals of the electronic controlled two-stroke kerosene engine were decomposed into a finite number of intrinsic mode function components and the residual function using the empirical mode decomposition method. The knock high frequency signal component was obtained by analyzing the intrinsic mode function components using the fast Fourier transform (FFT). The crank angle corresponding to the peak of the residual function peak was chosen as the starting crank angle of the knock window. Then the knock factors were calculated using the method of intrinsic mode function high frequency integral energy based on the knock high frequency signal component.

收稿日期:2013-06-05

基金项目:南京航空航天大学基本科研业务费专项基金(NS2012.37)

作者简介:盛敬(1980—),女,山东济宁人,讲师,博士生,主要从事内燃机电子控制技术研究.

By analyzing the knock window width, it's learnt is that a reasonable constant crank angle of knock window width is 30° . Knock factors of cylinder combustion pressure signals for four cycles were calculated using the method of intrinsic mode function high-frequency integral energy. Four cycles include non-knocking cycle, slight knock cycle, moderate knock cycle and strong knock cycle. The knock factors of four cycles include 0.6642, 1.8191, 3.0275 and 5.3717, which could represent the strength of knock. Research shows that the method of intrinsic mode function high-frequency integral energy in the process of knock factors calculation for the electronic controlled two-stroke kerosene engine is practical and effective.

Key words: knock factors; method of intrinsic mode function high-frequency integral energy; cylinder combustion pressure; knock window width; electronic controlled two-stroke kerosene engine

随着无人机及低空小型飞行器的发展,燃烧煤油的活塞发动机是当前小型航空活塞发动机的热点.电控二冲程煤油发动机拥有同排量功率高、加速性好、结构简单、质量轻、成本低等优点^[1],特别适合作为小型无人机、超轻型飞机和动力翼伞等飞行器的动力装置^[2],煤油燃料在运输及使用安全性、油料管理和价格等方面存在优势^[3].但煤油抗爆震性能差^[4],连续且强烈的爆震会使气缸盖及活塞顶部等处过热,造成发动机机体及其零部件损毁^[5].强烈爆震问题极大限制了煤油发动机使用安全性、动力性能和经济性能的发挥.因此,对电控二冲程煤油发动机爆震状态进行监控以及对爆震强度进行评价具有重要的研究意义.

缸内燃烧压力信号为爆震分析提供了直接而可靠的信息,利用缸内燃烧压力信号进行爆震强度判定是火花点火发动机爆震状态监控和爆震强度评价的重要手段^[6].而利用缸内燃烧压力信号进行爆震强度评价的缺点是安装在缸盖上的气缸压力传感器的成本较高,然而随着传感器技术发展,采用气缸压力传感器获取缸内燃烧压力信号的成本会逐渐降低,甚至在工业批量生产的发动

机上都能够安装该类型传感器,将会使采用缸内燃烧压力信号进行爆震强度判定的方法逐步得到推广^[7].

目前通过分析缸内燃烧压力信号进行爆震强度评价是现阶段最准确的爆震强度判定方法之一,以缸内燃烧压力信号高频积分能量作为爆震强度判定标识是其中重要的一种算法^[8].为了进行缸内燃烧压力信号爆震强度评价,本文通过对大量爆震工作循环的缸内燃烧压力信号的分析,提出了基于内禀模态高频积分能量法的煤油发动机爆震因子计算方法.

1 基本原理

本文提出的内禀模态高频积分能量法包括经验模态分解与高频积分能量法两部分,具体流程如图1所示.

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),能把非平稳、非线性信号分解成一组稳态和线性的数据序列集,即内禀模态函数(intrinsic mode function, IMF)^[9].内禀模态函数必须满足两个条件:①对于一系列数据,极值点和过零

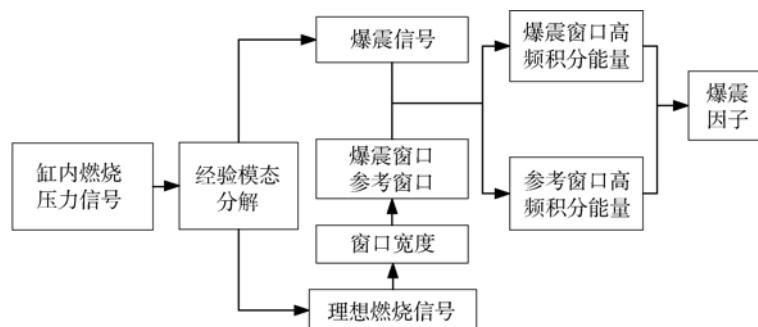


图1 内禀模态高频积分能量法流程图

Fig. 1 Flow chart of method of intrinsic mode function high-frequency integral energy

点数目相等或至多相差一点;②在任意点,由局部极大点构成的包络线和局部极小点构成的包络线的平均值为 $0^{[10]}$.

经验模态分解利用局部极大值和极小值的包络来进行^[11].一旦获得所有极值点,所有的局部极大值用三次样条插值函数插值形成数据的上包络线,同样,所有的局部极小值通过插值形成数据的下包络线,上包络和下包络的平均值记作 $m_1(t)$,原数据 $s(t)$ 减去 $m_1(t)$ 得到 $h_1(t)$

$$s(t) - m_1(t) = h_1(t) \quad (1)$$

重复进行上述处理过程 k 次,直到 $h_1(t)$ 符合IMF的定义要求,所得到的均值趋于0为止,得到了第1阶IMF分量 $c_1(t)$,它代表信号 $s(t)$ 中最高频率的分量

$$h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) = h_{1k}(t) \quad (2)$$

$$c_1(t) = h_{1k}(t) \quad (3)$$

将 $c_1(t)$ 从 $s(t)$ 中分离出来,得到一个去掉高频分量的差值信号 $r_1(t)$

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t) \quad (4)$$

将 $r_1(t)$ 作为原始数据,重复以上步骤,得到 n 阶IMF分量 $c_n(t)$

$$r_{n-1}(t) - c_n(t) = r_n(t) \quad (5)$$

当 $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 满足给定的终止条件(通常使 $r_n(t)$ 成为一个单调函数)时^[12],可得到

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (6)$$

式中 $r_n(t)$ 为残余函数,代表信号的平均趋势.而各阶IMF分量 $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ 分别包含了信号不同时间特征尺度大小的成分,其尺度依次由小到大.

对缸内燃烧压力信号进行经验模态分解,得到各阶IMF分量,包含从高频到低频不同频率段的成分,其中包括爆震引起的高频分量压力信号,以及低频分量压力信号即理想燃烧曲线等.选择低频分量压力信号峰值作为爆震窗口起始角度及参考窗口终点,对爆震窗口和参考窗口对应的高频压力信号取绝对值,得到两个窗口的高频幅值并分别积分,计算爆震窗口和参考窗口内的高频能量比,即爆震因子 K_f ^[13].当爆震因子超过某一个阈值时,即为一个爆震事件^[14].

$$K_f = \frac{\int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} |p_k|}{\int_{\varphi_0}^{\varphi_0 - \Delta\varphi} |p_r|} \quad (7)$$

式中 φ_0 为爆震起始曲轴转角,即低频理想燃烧压

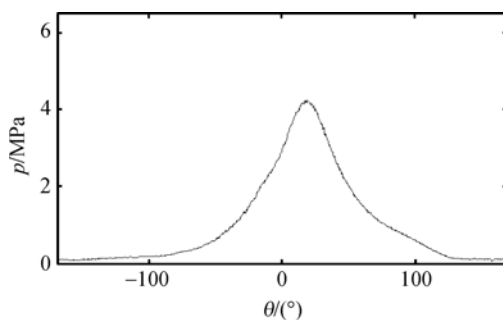
力曲线峰值对应曲轴转角, $\Delta\varphi$ 为窗口宽度持续曲轴转角, p_k 为爆震窗口高频信号压力幅值, p_r 为参考窗口高频信号压力幅值.分子为爆震窗口内高频积分能量,分母为参考窗口内高频积分能量.

2 基于内禀模态高频积分能量法的爆震因子计算方法

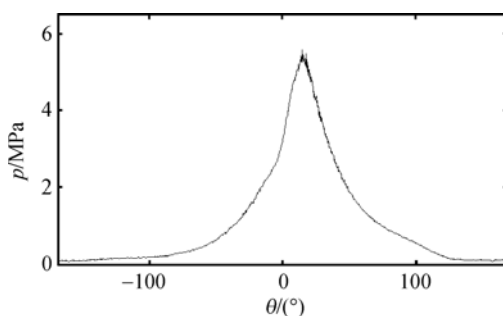
2.1 缸内燃烧压力信号检测

缸内燃烧压力信号检测在电控二冲程煤油发动机试验台架上进行,发动机试验台架主要由EST-2002型内燃机测控系统、CWF110G电涡流测功机、Kistler6125A型火花塞式压力传感器、DH5902多通道数据采集系统、试验发动机等组成.为保持爆震信号的高频特性,DH5902多通道数据采集系统的信号采样频率设定为200 kHz.

为进行基于内禀模态高频积分能量法的煤油发动机爆震因子计算方法研究,本文选取进气温度为301 K、发动机转速为5700 r/min、节气门开度为40%、点火提前曲轴转角为25°工作循环的4个工作循环进行分析,这4个工作循环分别为无爆震工作循环(1)、轻微爆震工作循环(2)、中度爆震工作循环(3)、强烈爆震工作循环(4),4个工作循环对应的缸内燃烧压力信号 p 曲线如图2所示,图中横坐标 θ 表示发动机工作循环对应的曲轴转角,曲线具体数据见表1.



(a) 工作循环1



(b) 工作循环2

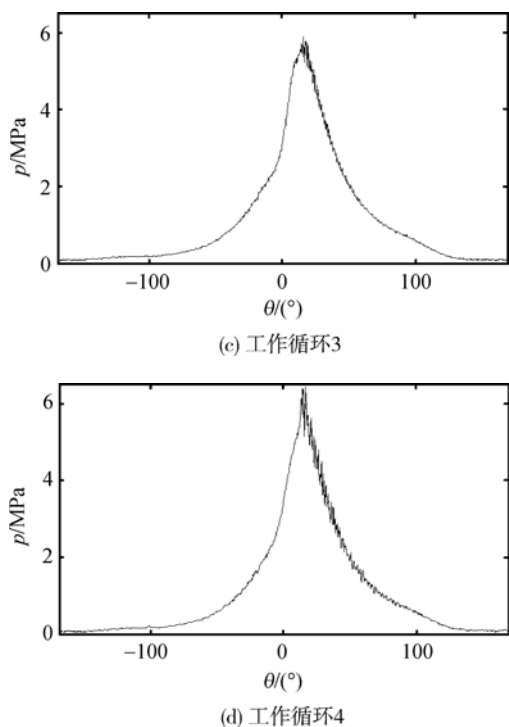


图2 4个工作循环的缸内燃烧压力信号曲线图
Fig. 2 Cylinder combustion pressure signal graph of four working cycles

表1 4个工作循环的缸内燃烧压力信号曲线数据
Table 1 Cylinder combustion pressure signal graph data of four working cycles

工作循环	缸内燃烧压力 信号峰值/MPa	峰值对应曲轴 转角/(°)	发动机 工作状态
1	4.236	18.900	无爆震
2	5.477	17.870	轻微爆震
3	5.897	15.820	中度爆震
4	6.414	14.450	强烈爆震

从表1可以看出,随爆震强度的增强,缸内燃烧压力信号峰值增大,峰值对应的曲轴转角位置提前。

2.2 爆震窗口起始曲轴转角分析

本文为进行电控二冲程煤油发动机爆震因子计算,首先选取工作循环4的缸内燃烧压力信号进行经验模态分解,结果如图3所示。其中纵坐标下标 $I_1 \sim I_3$ ($I_1 = c_1(t)$, $I_2 = c_2(t)$, $I_3 = c_3(t)$) 表示3阶IMF高频分量, R ($R = r_n(t)$) 表示残余函数对应的燃烧压力信号。

对爆震信号的3阶IMF高频分量进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),得到3阶IMF高频分量的频谱图如图4所示,3阶IMF高频分量的频谱分析数据见表2。

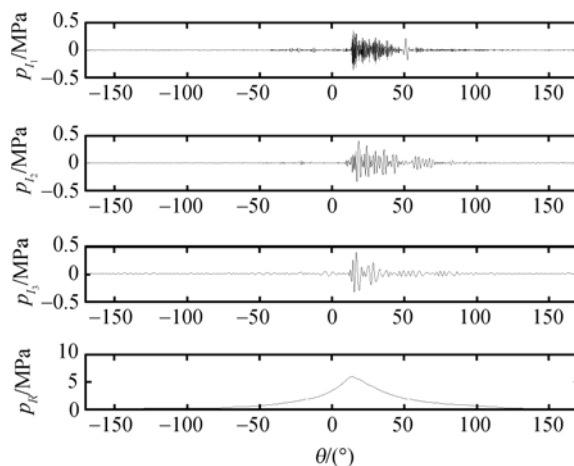


图3 工作循环4的IMF分量与残余函数R的缸内燃烧压力信号

Fig. 3 Cylinder combustion pressure signal of IMF components and residual function

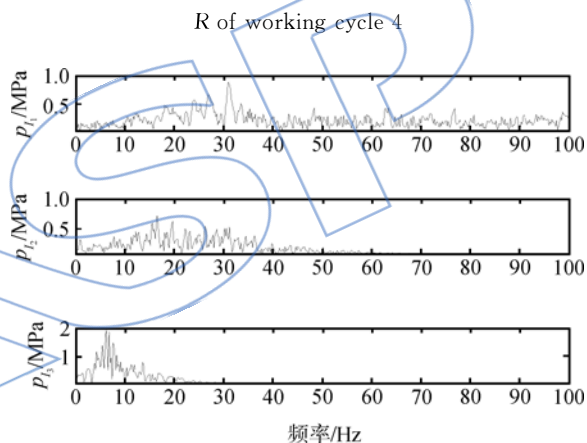


图4 3阶IMF高频分量的频谱图

Fig. 4 Spectrogram of three order IMF high frequency components

表2 3阶IMF高频分量的频谱数据

Table 2 Spectrum data of three order IMF high frequency components

IMF 高频分量	中心频率/kHz	振幅峰值/MPa
I_1	30.860	0.8780
I_2	16.410	0.7116
I_3	6.055	1.9210

由表2可知,第3阶IMF高频分量 I_3 的中心频率为6.055 kHz,信号强度最大,经大量试验数据爆震特征提取,得出该电控二冲程煤油发动机的缸内燃烧压力信号爆震特征频率范围为5~12 kHz^[15],因此第3阶IMF高频分量 I_3 为发动机爆震压力波振荡引起的高频信号分量。取第3阶IMF高频分量 I_3 与残余函数 R ,利用高频积分能

量法进行爆震因子计算,第 3 阶 IMF 高频分量 I_3 与残余函数 R 如图 5 所示。

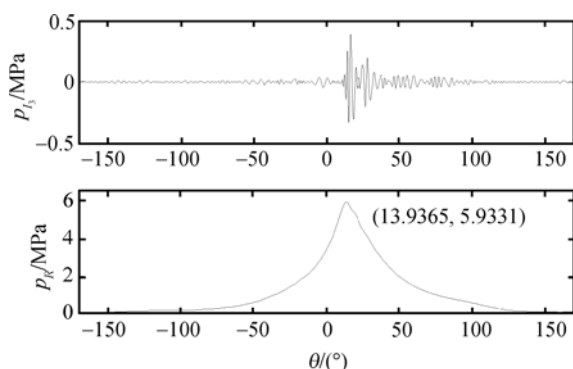


图 5 工作循环 4 第 3 阶 IMF 分量 I_3 与残余函数 R 的缸内燃烧压力信号

Fig. 5 Cylinder combustion pressure signal of the third IMF component I_3 and residual function

R of working cycle 4

由图 5 可以看出,低频理想燃烧压力曲线残余函数 R 分量的压力峰值坐标为 (13.9365, 5.9331),即低频理想燃烧曲线压力峰值对应曲轴转角为 13.9365°,选择该曲轴转角作为爆震窗口的起始角度及参考窗口的终止角度。利用同样的方法,可以对工作循环 1、工作循环 2 与工作循环 3 进行分析,得出 4 个工作循环的爆震窗口起始曲轴转角与低频理想燃烧压力曲线峰值见表 3。

表 3 4 个工作循环的爆震窗口起始曲轴转角数据
Table 3 Knock window starting crank angle data of four working cycles

工作循环	爆震窗口起始曲轴转角/(°)	低频理想燃烧压力曲线峰值/MPa
1	18.8955	4.2010
2	15.3045	5.3722
3	15.1335	5.5711
4	13.9365	5.9331

从表 3 可以看出,随爆震强度的增强,缸内燃烧压力信号的低频理想燃烧压力曲线峰值增大,爆震窗口起始曲轴转角位置提前。

2.4 爆震窗口宽度持续曲轴转角的选择

为分析爆震窗口宽度对爆震因子的影响,针对 4 个工作循环,分别利用内禀模态高频积分能量法计算窗口宽度持续曲轴转角 $\Delta\varphi$ 为 10°,20°,30°,40°,50°时的爆震因子值。图 6 为 4 个工作循环在不同爆震窗口宽度持续曲轴转角时的爆震因子分布图。

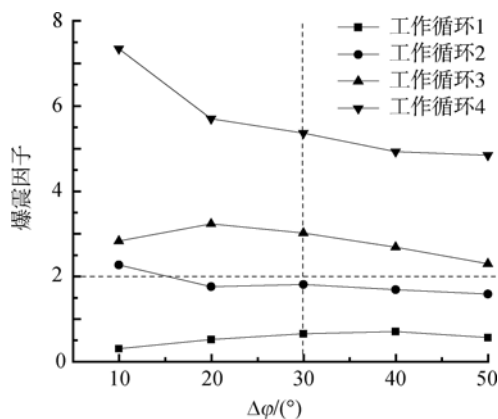


图 6 4 个工作循环在不同爆震窗口宽度持续曲轴转角时的爆震因子分布

Fig. 6 Knock factor distribution of four working cycles in different constant crank angles of knock window widths

由图 6 可以看出,无爆震工作循环、轻微爆震工作循环、中度爆震工作循环以及强烈爆震工作循环的爆震因子值有明显差别。无爆震工作循环的爆震因子均小于 2,随着爆震程度的逐步加强,爆震因子逐步增大。

随窗口宽度持续曲轴转角的增大,爆震因子呈减小趋势,不同工作循环的爆震因子之间的差值也呈现减小的趋势,因此爆震窗口宽度持续曲轴转角不宜设置过大。但将爆震窗口宽度持续曲轴转角设置的过小时,某些工作循环的爆震因子会因过于接近而不易区分爆震强度。爆震窗口宽度持续曲轴转角设置在 30°时,不同爆震强度的工作循环的爆震因子可有明显的区分。

以工作循环 4 为例,因爆震窗口的起始曲轴转角为 13.9365°,分别设置窗口宽度持续曲轴转角为 10°,20°,30°,40°,50°时,在不同爆震窗口宽度持续曲轴转角下,可得到爆震窗口的终止曲轴转角与参考窗口的起始曲轴转角,如表 4 所示。

表 4 工作循环 4 的爆震窗口持续曲轴转角
Table 4 Constant crank angle of knock window of working cycle 4

爆震窗口宽度持续曲轴转角/(°)	参考窗口起始曲轴转角/(°)	爆震窗口终止曲轴转角/(°)
10	3.9365	23.9365
20	-6.0635	33.9365
30	-16.0635	43.9365
40	-26.0635	53.9365
50	-36.0635	63.9365

从图5中可以看出该发动机爆震压力波振荡主要集中在 $0\sim 50^\circ$ 范围内,爆震窗口内应包含由爆震引起的完整高频振动信号以及较少的噪声信号.如果爆震窗口宽度持续曲轴转角较小,不能将完整高频振动信号进行积分计算,使得爆震因子计算值偏小.而爆震窗口宽度持续曲轴转角较大时,包含了过多的噪声信号,影响了爆震因子的计算精度,因此爆震窗口宽度持续曲轴转角选择要适中.图7为工作循环4的爆震窗口宽度持续曲轴转角为 30° 时的第3阶IMF分量与残余函数R的缸内燃烧压力信号.当爆震窗口与参考窗口宽度持续曲轴转角选择 30° 时,爆震窗口可包含较完整的高频振动波,同时又避免了 50° 以外噪声对积分能量的影响.因此对于该煤油发动机,爆震窗口宽度持续曲轴转角设置为 30° 是合理的.

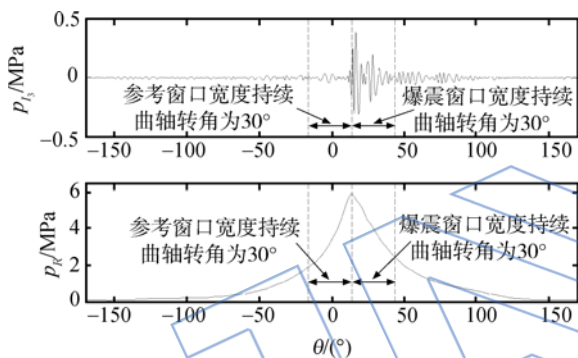


图7 工作循环4爆震窗口宽度持续曲轴转角为 30° 时的第3阶IMF分量 I_3 与残余函数R的缸内燃烧压力信号

Fig. 7 Cylinder combustion pressure signal of the third IMF component I_3 and residual function R of working cycle 4, when constant crank angle of knock window width of 30°

2.5 爆震因子计算

取 30° 作为爆震窗口及参考窗口宽度持续曲轴转角,对工作循环4的爆震窗口和参考窗口内的第3阶IMF高频分量进行整流如图8所示,将整流后的爆震窗口及参考窗口的高频信号分别积分如图9所示,计算爆震窗口和参考窗口内的高频能量比,即爆震因子为5.3717.

利用内禀模态高频积分能量法对其他3个工作循环的缸内燃烧压力信号进行爆震因子计算,得到4个工作循环的爆震因子,见表5.由表5可以看出,不同爆震强度下的爆震因子存在着较明显的差异,因此该爆震因子可用来表征爆震的强弱.

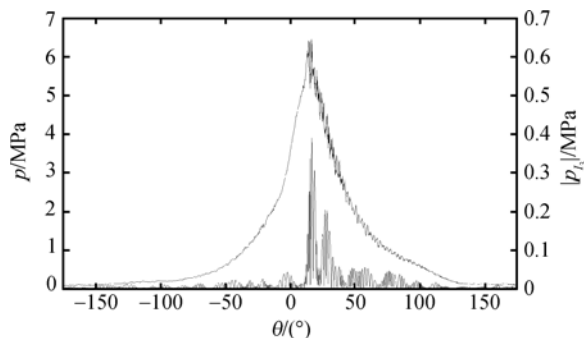


图8 工作循环4的缸内燃烧压力信号与第3阶IMF分量 I_3 压力绝对值

Fig. 8 Cylinder combustion pressure signal and pressure absolute value of the third IMF component I_3 of working cycle 4

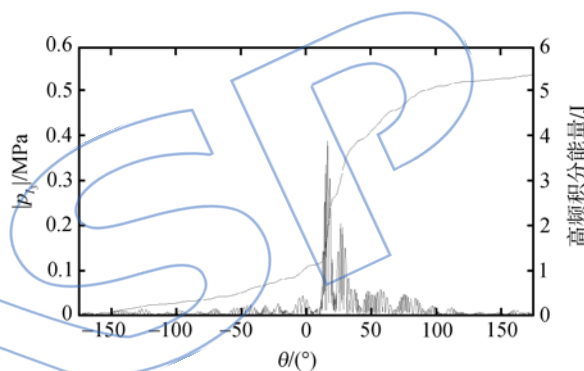


图9 第3阶IMF分量 I_3 压力绝对值以及高频积分能量

Fig. 9 Pressure absolute value of the third IMF component I_3 and integral high-frequency energy

表5 4个工作循环的爆震因子

Table 5 Knock factor of four working cycles

工作循环	发动机工作状态	爆震因子
1	无爆震	0.6642
2	轻微爆震	1.8191
3	中度爆震	3.0275
4	强烈爆震	5.3717

本文对大量电控二冲程煤油发动机无爆震工作循环、轻微爆震工作循环、中度爆震工作循环以及强烈爆震工作循环的缸内燃烧压力信号利用内禀模态高频积分能量法进行爆震因子计算,结果表明,该算法能快速有效地进行爆震因子计算,算法简便.

3 结 论

本文提出了基于内禀模态高频积分能量法对电控二冲程煤油发动机缸内燃烧压力信号进行爆震因子计算. 运用经验模态分解自适应地将缸内燃烧压力信号在频域内分解成各阶 IMF 分量, 得到爆震压力波振荡引起的高频信号分量 I_3 与低频理想燃烧压力曲线残余函数 R , 对爆震窗口宽度持续曲轴转角选取进行了分析, 得到合理的爆震窗口宽度持续曲轴转角为 30° , 然后利用高频积分能量法进行爆震因子计算. 对大量无爆震工作循环、轻微爆震工作循环、中度爆震工作循环以及强烈爆震工作循环的缸内燃烧压力信号的爆震进行计算分析, 结果表明基于内禀模态高频积分能量法的爆震因子计算方法算法简便, 能快速有效地计算出爆震因子.

参考文献:

- [1] Obodeh O, Akhere N C. Experimental study on the effects of kerosene-doped gasoline on gasoline-powered engine performance characteristics[J]. Journal of Petroleum and Gas Engineering, 2010, 1(2): 37-40.
- [2] Sher E. Scavenging the two-stroke engine[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1990, 16(2): 95-124.
- [3] Cathcart G, Dickson G, Ahern S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 2005-32-0065, 2005.
- [4] ZHEN Xudong, WANG Yang, XU Shuaiqing, et al. The engine knock analysis: an overview[J]. Applied Energy, 2012, 92: 628-636.
- [5] Fonseca M M, Yoshida M I, Fortes I C P, et al. Thermo-gravimetric study of kerosene-doped gasoline[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007, 87(2): 499-503.
- [6] Falkowski D T, Abate D L, Cho P. The Performance of a spark-ignited stratified-charge two stroke engine operating on a kerosene based aviation fuel[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 972737, 1997.
- [7] 张力, 康健, 徐凤雏, 等. 基于爆震因子统计特性的爆震燃烧识别方法[J]. 内燃机学报, 2011, 29(2): 152-156.
ZHANG Li, KANG Jian, XU Fengchu, et al. Knock diagnosis based on statistical characteristics of knock factor[J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(2): 152-156.
- [8] Ettetfagh M M, Sadeghi M H, Pirouzpanah V, et al. Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: a parametric modeling approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(6): 1495-1514.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 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 A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] Huang N E, Wu M L, Qu W, et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2003, 19(3): 245-268.
- [11] Nunes J C, Guyot S, Deléchelle E. Texture analysis based on local analysis of the bidimensional empirical mode decomposition[J]. Machine Vision and Applications, 2005, 16(3): 177-188.
- [12] Rai V K, Mohanty A R. Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert-Huang transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6): 2607-2615.
- [13] Brecc G, Bellettre J, Tazerout M. A new indicator for knock detection in gas SI engines[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42(5): 523-532.
- [14] Hudson C, Gao X, Stone R. Knock measurement for fuel evaluation in spark ignition engines[J]. Fuel, 2001, 80(3): 395-407.
- [15] 盛敬, 魏民祥, 刘国满, 等. 基于内禀模态特征能量法煤油机爆震特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 462-468.
SHENG Jing, WEI Minxiang, LIU Guoman, et al. Knock feature extraction based on intrinsic mode function feature energy method for a kerosene engine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 462-468.