

# 基于经验模态分解的燃烧不稳定性分析

付 宇, 郭志辉, 杨甫江, 车俊龙

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 实验研究了在常温常压条件下贫燃预混旋流火焰的燃烧不稳定性, 发生燃烧不稳定性时其压力脉动表现为非平稳信号. 利用一种基于经验模态分解(EMD)的希尔伯特-黄变换(HHT)算法对在当量比分别为 0.71 和 0.80 工况下的压力脉动信号进行了时频分析. 针对压力脉动信号进行经验模态分解, 选取主要的固有模态函数(IMF), 对 IMF 通过 HHT 变换得到瞬时频率并进行统计分析. 结果表明: 在当量比为 0.71 时, 压力信号呈间歇式的脉动, 其振型为拍振; 在当量比为 0.80 时, 脉动压力信号则呈现出极限环振型. 在基于 EMD 的 HHT 变换中, IMF 体现了燃烧不稳定性的固有模态且具有自适应性强的特点.

**关 键 词:** 贫燃预混; 燃烧不稳定; 经验模态分解; 固有模态函数; 希尔伯特-黄变换; 瞬时频率

**中图分类号:** V235.11

**文献标志码:** A

## Analysis on combustion instability based on empirical mode decomposition

FU Yu, GUO Zhi-hui, YANG Fu-jiang, CHE Jun-long

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines Aero-thermodynamics,  
School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** An experimental study was conducted in the lean-premixed swirl-stabilized combustor at atmospheric pressure and temperature in order to analyze the pressure oscillation in occurrence of the combustion instability. The fluctuating pressure signals exhibited as non-stationary signals. A new method using Hilbert-Huang transform (HHT) based on empirical mode decomposition (EMD) and intrinsic mode function (IMF) reconstruction was investigated. This method was applied to demonstrate the characteristics of pressure oscillations in the lean-premixed combustor when the equivalent ratio was at 0.71 and 0.80. The pulsating signals were decomposed with EMD, and IMF containing specific frequencies was obtained. Through the HHT and statistical analysis, the instantaneous frequency of the IMF was analyzed. The results show that the pressure oscillations display the characteristics of intermittent pulsating, and present the beat at the equivalent ratio of 0.71; whereas at the equivalent of ratio 0.80, the pressure oscillations feature the limit cycle. The validity of this method proves that the IMF reflects the inherent mode when the combustion instability occurs, and it has a strong adaptability.

**Key words:** lean-premixed; combustion instability;  
empirical mode decomposed (EMD); intrinsic mode function;  
Hibert-Huang transform; instantaneous frequency

燃烧不稳定性是限制低污染贫燃预混燃气轮机燃烧室发展的关键性问题之一<sup>[1]</sup>,也是燃气轮机、火箭发动机、冲压发动机、加力燃烧室等设计中经常遇到的问题<sup>[2]</sup>.燃烧不稳定性产生的原因是在燃烧过程中燃烧的热释放脉动与系统声脉动之间耦合而产生的大振幅压力脉动<sup>[3]</sup>.因此,如何有效分析压力脉动信号的特征是研究燃烧不稳定性的模态特征以及主动控制燃烧不稳定性的前提<sup>[4]</sup>.

目前,对燃烧不稳定中脉动信号的研究主要基于傅里叶变换(FFT)和谱分析来获取共振模态的频率幅值等特征<sup>[5-6]</sup>.然而燃烧室中火焰结构随来流扰动会发生回火、大幅摆动等特性,因而燃烧不稳定性产生的压力脉动表现为非平稳信号,即信号统计信息与时间相关.传统的傅里叶分析是一种纯频域分析方法,用频率不同的各复正弦分量的叠加来拟合原函数,其频谱将散布在整个频率轴上,无法反映出在时间的局部区域上信号的频率特征<sup>[7]</sup>.而对非平稳信号需要进行时频分析,传统的傅里叶变换无法满足要求.

基于模态分解法(mode decomposition method)的 HHT(Hilbert-Huang transform)变换是 1998 年 Huang 等提出的信号处理方法<sup>[8-10]</sup>,该方法适合应用于非线性非平稳的信号分析,并得到了广泛的应用<sup>[11-14]</sup>,被认为是 200 多年来以傅里叶变换为基础的线性和稳态频谱分析的一个重大突破<sup>[15]</sup>.HHT 变换与常用的时频变换如短时 FFT 以及小波分析相比,不用预先定好基函数,具有很强的自适应性,更适用于非平稳信号的处理.

本文利用基于经验模态分解的 HHT 变换对贫燃预混旋流模型燃烧室中燃烧不稳定性发生时的非平稳脉动压力信号进行了分解,结果显示,压力脉动信号的瞬时频率随当量比变化呈现出不同的统计分布特性.

# 1 信号分析原理

HHT 变换是由经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和 Hilbert 变换两部分组成,经验模态分解法的核心思想是将复杂的信号分解为一系列固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),通过分解获得的各个 IMF 分量包含了原信号的不同时间尺度的局部特征信号,IMF 没有固定的表达式,而是依据信号本身的振动情况自适应的确定<sup>[16]</sup>.得到 IMF 后,再对数据

进行 Hilbert 变换,得到瞬时频率及瞬时振幅,进而可得到信号的 Hilbert 谱,以实现对信号的时频分析<sup>[14-16]</sup>.

## 1.1 瞬时频率

一般来说,非平稳信号的幅值和频率是随时间变化的函数.瞬时频率表征信号在局部时间点上的瞬态频率特征,在整个采样周期上的瞬时频率则反映了信号频率的时变规律.

对于随机时间序列  $X(t)$ ,对其进行 Hilbert 变换,可以得到  $Y(t)$  如下<sup>[17-19]</sup>:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi}C\int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau}d\tau \tag{1}$$

其中  $C$  为柯西主值(Cauchy principal value).该式表示  $Y(t)$  是  $X(t)$  与  $\frac{1}{\pi\tau}$  的卷积.可以得到一个解析信号  $Z(t)$  如下:

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \\ \theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \end{cases} \tag{3}$$

得到了相位,就可以得到瞬时频率,因为瞬时频率就是相位导数.

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{4}$$

## 1.2 固有模态函数 IMF

为了使获得的瞬时频率有意义,需要将信号分解为单分量的形式.因此,Huang 等创造性地提出了经验模态分解方法,将原信号分解为许多窄带分量,每一分量被称为固有模态函数,或者称为本征模态函数.每个 IMF 满足以下两个条件<sup>[8]</sup>:

- 1) 在整个数据范围内,极值点和过零点的数量相等或者相差一个.
- 2) 在任意点处,所有极大值点拟合成的上包络线和所有极小值点拟合成的下包络线的平均值为零.

为了使用瞬时频率定义,必须要把随机数据归结为 IMF 组件,这样才可以为每个 IMF 组件定义瞬时频率.

## 1.3 经验模态分解 EMD

经验模态分解是一个筛选过程,这个筛选过程依据信号本身的特点自适应地把一个复杂信号分解为有限个 IMF,实现振动模式的提取.该方法的基本思路是用上、下包络线的平均值去确定

“瞬时平衡位置”,进而提取出 IMF. 上、下包络线是通过 3 次样条函数对极大值点和极小值点进行拟合而得到的<sup>[16]</sup>. 分解得到的 IMF 表现为从高频到低频的层层过滤. 而燃烧不稳定性中能量主要集中在共振模态中,将 IMF 按能量排列,选取前几个 IMF,将其余 IMF 作为噪声滤掉.

1.4 Hilbert 谱

通过经验模式分解过程得到所有可提取的固有模态函数后,在 Hilbert 变换的基础上,根据式(1)~式(4)可以计算得到瞬时频率. 对每一个 IMF 作 Hilbert 变换并求出相应的解析函数的幅值谱和瞬时频率,从而原始信号  $X(t)$  可以用下面方式表示:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp\left(i \int \omega_j(t) dt\right) \quad (5)$$

在这里没有考虑余项  $r_n$ ,因为它只是单调函数或常量. 尽管 Hilbert 变换可以把单调函数看成是振动的一部分,但是余项中的能量很小,一般情况可以不用考虑.

由 Hilbert 变换得出的振幅和频率都是时间的函数,如果用三维图形表达幅值、频率和时间之间的关系,或者把振幅用灰度的形式显示在频率一时间平面上,就可以得到 Hilbert 谱  $H(\omega, t)$ .

对  $H(\omega, t)$  进行时间积分就可以得到 Hilbert 边际谱  $h(\omega)$ .  $H(\omega, t)$  表征信号的幅值在整个频率上随频率和时间的变化规律; $h(\omega)$  则表征信号在每个频率上的总振幅或能量.

2 脉动压力信号分析

2.1 实验系统及装置

贫燃预混旋流模型燃烧室实验系统由空气供应系统,燃料(甲烷)供应系统,预混段,燃烧室,数据采集系统和数据处理系统 6 个部分组成. 数据采集系统包括 4 个动态压力传感器,一个温度传

感器和一个光电倍增管. 实验系统示意图如图 1 所示. 文中主要对位于燃烧室中的 4 号压力传感器 4 进行分析说明.

实验中旋流器的旋流数为 0.6,保持空气流量不变,通过调节燃气流量与空气预混合后在不同当量比条件下燃烧. 实验中利用动态压力传感器对动态压力进行测量,采样频率为 4 000 Hz,采样时长 4 s,获得脉动压力信息. 随着当量比的升高,燃烧室中燃烧从稳定燃烧向不稳定燃烧过渡. 下面将在燃烧室处于不稳定燃烧时的两个当量比 0.71 和 0.80 为例,以 4 号动态压力传感器测量得到的信号为原始数据,进行 HHT 变换,在得到的 IMF 中选取最主要的模态,对其瞬时频率和瞬时幅值进行统计分析,得到脉动信号的振荡特性.

2.2 脉动信号分析结果

图 2 是当量比为 0.71 时,燃烧室中燃烧段处所测量得到的动态压力通过经验模态分解后的 IMF 时序图(图 2(a))与相应的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)图(图 2(b)). 图中从上到下按频率( $f$ )从高到低共分解了 11 个 IMF 以及最后一个单调的趋势项(IMF 1~IMF 12). EMD 分解中总是把最主要的信息提取出来,即最先分解出来的 IMF,因为其包含了原序列最主要的信息. 图 2 中第 1 个 IMF(IMF 1)占据了绝大部分的能量. 因此,下文将以 IMF 1 模态为重点,主要分析其瞬时频率和瞬时幅值谱的变化规律.

图 3 为当量比 0.71 时的 IMF 1 动态压力序列图,由于原始信号采集数量很大,图 3 中选取前 0.5 s 内的数据进行详细分析,其中采样频率为 4 kHz. 图中横轴采用压力序列采样点个数来表示,采样点个数为 2 000,也即时长为 0.5 s. 通过图 3 可以看出动态压力呈现出时强时弱的间歇性脉动. 图 4 为 IMF 1 动态压力的 FFT 图,FFT 结果

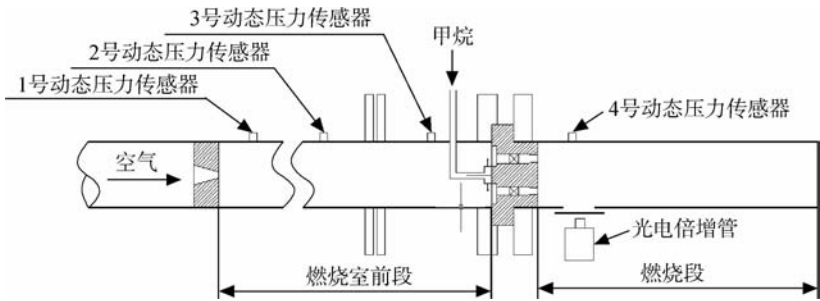


图 1 实验系统示意图  
Fig. 1 Experimental system sketch

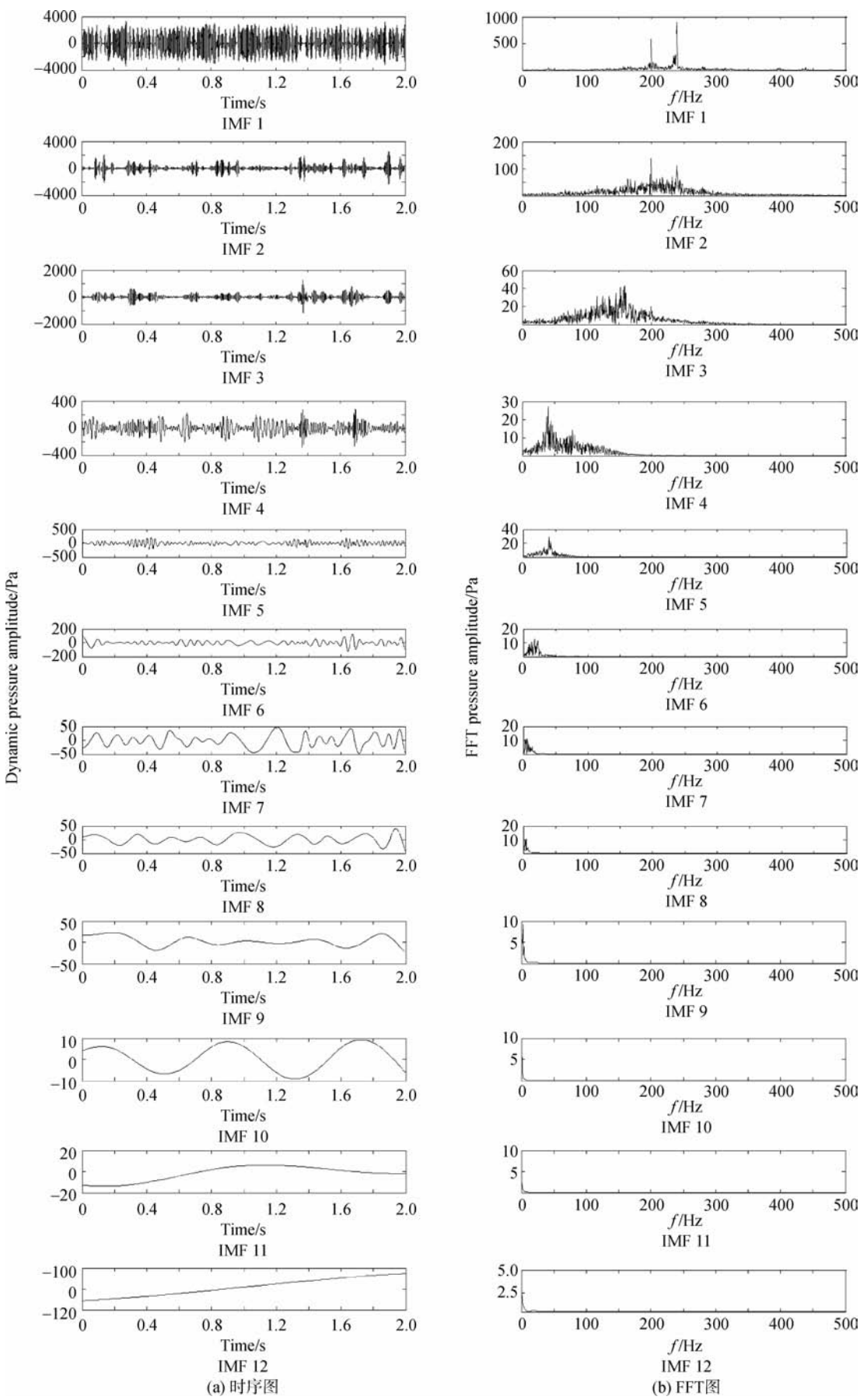


图 2 经验模态分解的 IMF 时序图与 FFT 图

Fig. 2 Diagrams of IMF decomposed by EMD method and diagrams of FFT

显示 IMF1 中包含两个主要的模态,频率分别 199 Hz 和 239 Hz,对应的幅值分别为 464.3 Pa 和 1069.2 Pa. 从图 3 中可以看出,信号序列的动态压力幅值的峰值随时间不断变化,峰值最高值约为 3500 Pa,远大于 FFT 变换中两个模态的幅值之和,而幅值最小时接近 0 Pa,可见 FFT 结果不能完全反映出脉动压力特性.

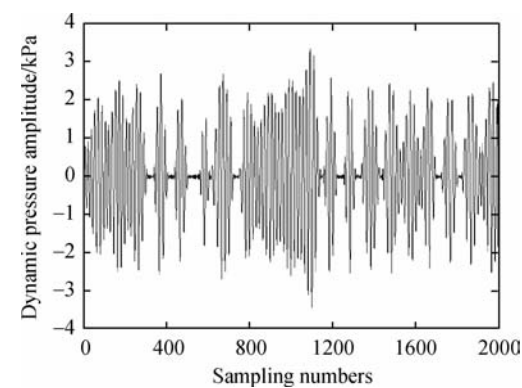


图 3 当量比为 0.71 时 IMF 1 动态压力序列图  
Fig. 3 IMF 1 dynamic pressure diagram at equivalent ratio of 0.71

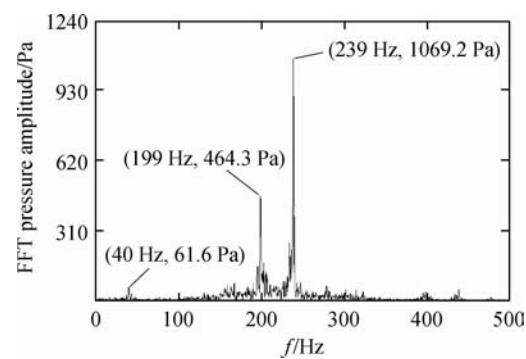


图 4 当量比为 0.71 时的 FFT 图  
Fig. 4 FFT signal diagram at equivalent ratio of 0.71

图 5 和图 6 分别为 IMF 1 动态压力的瞬时幅值图和瞬时幅值统计图. 图 5 中的红线是频率为 40 Hz 的正弦曲线,其幅值为 850 Pa,平均值为 1650 Pa,黑线为动态压力的瞬时幅值变化曲线. 正弦曲线的平均值与幅值参数分别与瞬时幅值的平均值与标准差相等. 对比两条曲线可以看出瞬时幅值呈现出较为明显的周期性变化,其原因为两个频率相近的模态叠加而形成了拍振,其周期为 40 Hz,等于图 4 中 FFT 的两个模态的频率之差. 图 6 为瞬时幅值的统计直方图,其中横坐标为瞬时幅值区间,纵坐标为瞬时幅值的统计数目值,其所有幅值区间的统计总数为采样数. 图中可以

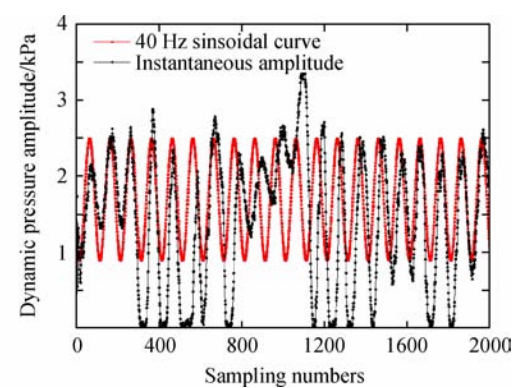


图 5 当量比为 0.71 时瞬时幅值图  
Fig. 5 Instantaneous amplitude at equivalent ratio of 0.71

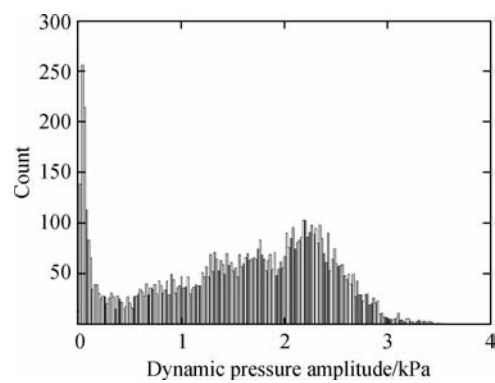


图 6 当量比为 0.71 时瞬时幅值统计图  
Fig. 6 Statistical chart of instantaneous amplitude at equivalent ratio of 0.71

看出瞬时幅值的采样点数量统计在靠近 0 Pa 和 2200 Pa 左右存在两个峰值,幅值为 0 Pa 表示脉动压力存在间歇,幅值为 2200 Pa 表示脉动压力的不稳定模态的幅值特征,说明压力脉动呈现出时强时弱的拍振振型.

IMF 1 动态压力的瞬时频率如图 7 所示,图

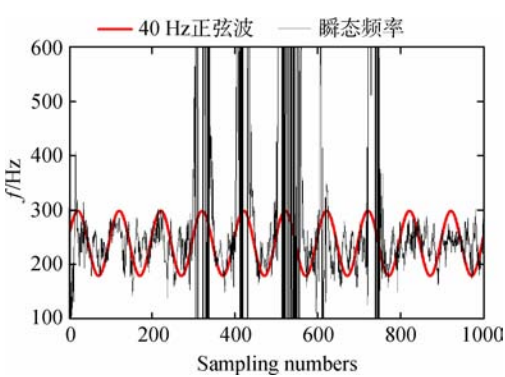


图 7 当量比为 0.71 时瞬时频率图  
Fig. 7 Instantaneous frequency at equivalent ratio of 0.71

中红线是频率为 40 Hz 的正弦波曲线,其频率变化幅值 60 Hz,平均值为 240 Hz,黑线为瞬态频率变化曲线. 正弦曲线的频率为拍振频率,其平均值与幅值参数分别与瞬态频率的平均值与标准差相等. 与图 5 相比,瞬时频率变化过程中 40 Hz 的周期并不明显,且在脉动压力间歇处其瞬态频率变化较大,失去了其值的物理意义. 图 8 是 IMF 1 动态压力的瞬时频率统计图,横坐标为瞬时频率区间,纵坐标为瞬时频率的统计数目值. 利用高斯分布对其拟合,从图中可以看出瞬时频率的统计分布呈高斯分布,其频率期望值(230 Hz)大于 FFT 变化中两个模态的平均值(219 Hz),表明在整个采样序列中频率为 239 Hz 的模态比频率为 200 Hz 的模态持续的时间更长.

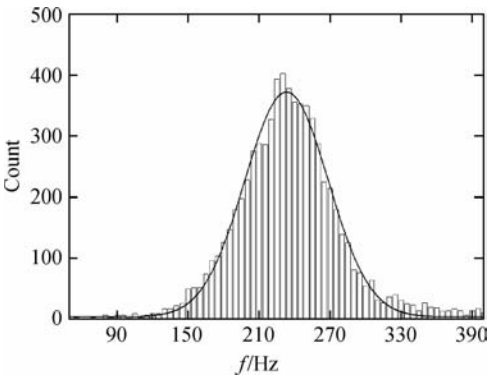


图 8 当量比为 0.71 时瞬时频率统计图  
Fig. 8 Statistical chart of instantaneous frequency at equivalent ratio of 0.71

图 9 和图 10 分别为当量比为 0.80 时的脉动压力信号利用经验模态分解后得到的能量值最大的 IMF 图,也即 IMF 1 图,和相应的 FFT 图. 为了使脉动压力变化显示得更加清晰,图 9 处理时采用了采样时间为 0.1 s 内的数据,横坐标仍以采样点来表示,可观察到脉动压力的峰值在 4 kPa 左右摆动,压力脉动呈现出极限环振型. 图 10 是当量比为 0.80 时的 FFT 图,通过 FFT 图可以看出在当量比为 0.80 时,IMF 中只含有一个占主导地位的模式,其频率为 239 Hz,幅值为 4 kPa.

图 11 和图 12 分别为当量比为 0.80 时 IMF 1 的动态压力的瞬时频率和瞬时频率统计图,图 11 中瞬时频率分布呈现较为明显的周期变化,其平均值约为 240 Hz,与 FFT 变化分析中的模态频率值相等. 图 11 中瞬时频率峰值的变化与图 9 中 IMF 的峰值变化趋势相反,在随着时间的变化中,动态压力的峰值越高,瞬态频率的峰值越小.

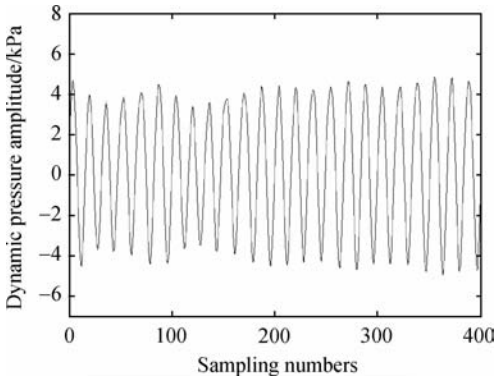


图 9 当量比为 0.80 时的 IMF 1 动态压力序列图  
Fig. 9 IMF 1 dynamic pressure diagram at equivalent ratio of 0.80

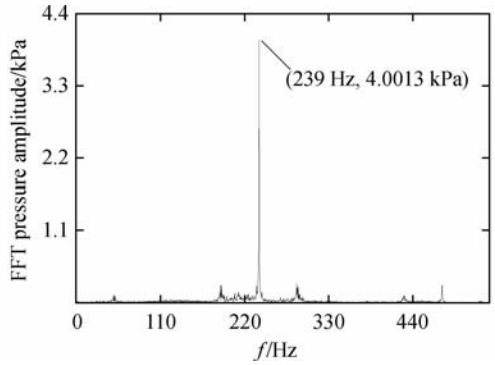


图 10 当量比为 0.80 时的 FFT 图  
Fig. 10 FFT signal diagram at equivalent ratio of 0.80

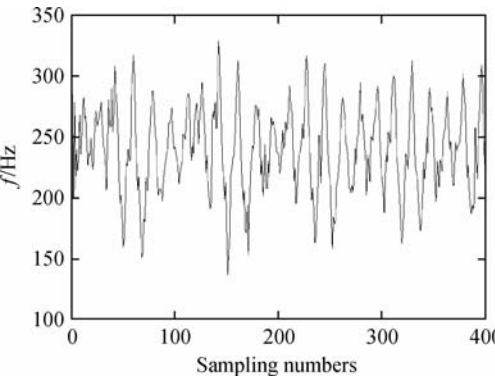


图 11 当量比为 0.80 时的瞬时频率图  
Fig. 11 Instantaneous frequency at equivalent ratio of 0.80

图 12 中利用高斯分布对瞬时频率进行了拟合,结果显示,拟合后频率期望值与 FFT 变化值一致.

图 13 对瞬时幅值的统计分布进行了高斯拟合,拟合获得的曲线幅值的期望为 4 463.5,方差为 399,结果显示当量比为 0.80 时,脉动压力的幅值大小呈现了较明显的正态分布特性.

对比两个不同当量比情况下的 IMF 1 图可

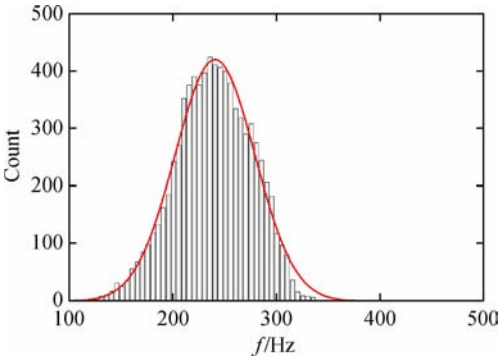


图 12 当量比为 0.80 时的瞬时频率统计图  
Fig. 12 Statistical chart of instantaneous frequency at equivalent ratio of 0.80

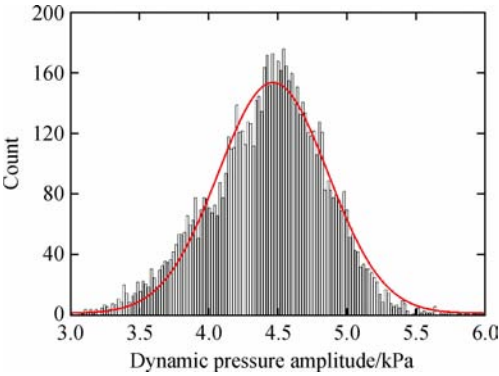


图 13 当量比为 0.80 时瞬时幅值统计图  
Fig. 13 Statistical chart of instantaneous amplitude at equivalent ratio of 0.80

以看出,当量比为 0.71 时动态压力的幅值随着时间呈现出时强时弱的间歇性脉动,而当量比增加到 0.80 时,动态压力的幅值并不存在时强时弱的间歇性脉动,而是较为平稳的周期性变化.通过对比图 8 和图 12 可以看出,随着当量比由 0.71 增加到 0.80,由于当量比的变化,火焰结构发生了变化,引起了燃烧不稳定性激励模态的变化,190 Hz 模态幅值大幅减小,241 Hz 模态大幅升高.因而不会引起拍振即间歇性脉动的产生,导致了脉动振幅的增强.从而导致当量比增加后燃烧不稳定性增强.

3 结 论

本文利用基于 EMD 的 HHT 方法,对贫燃预混旋流燃烧室中发生燃烧不稳定时的脉动压力信号进行了分解,得到了 IMF 并对其进行 Hilbert 变化,分析了在不同当量比工况下燃烧室中发生燃烧不稳定时脉动压力的瞬时幅值与瞬时频率,得到以下结论:

- 1) EMD 方法利用上、下包络线确定瞬时平衡位置,进而分解得到 IMF 分量以及单调的趋势项,具有自适应性强的特点.
- 2) 基于 EMD 的 HHT 变换,分析了当量比为 0.71 和当量比为 0.80 工况时燃烧室中发生燃烧不稳定时的脉动压力信号. 结果发现当量比为 0.71 时,动态压力信号存在间歇式的脉动,发生了两个频率相叠加而形成了拍振现象. 对瞬时频率的统计结果进行高斯拟合,其频率期望值表明了 在采样序列中 239 Hz 模态比 200 Hz 模态持续的时间更长.
- 3) 当量比为 0.80 时,对脉动压力信号进行分解后得到的 IMF 1 只包含了一个主要的模态. 压力脉动呈现出极限环振型. 瞬时频率幅值的峰值与瞬时幅值的峰值成反比. 通过对瞬时频率的统计结果进行高斯拟合得到的频率期望值与 FFT 结果一致. 瞬时幅值的统计结果与拟合结果显示了脉动压力峰值的分布特性.
- 4) HHT 变换后的统计结果与 FFT 的结果相比更符合燃烧不稳定性时脉动压力的非稳态现象. 通过对 HHT 变换得到的 IMF,瞬时频率与幅值的统计分析,可以分析不同当量比时,燃烧不稳定性不同模态的变化过程;对瞬时频率与幅值的瞬时特征分析,可以对描述燃烧不稳定性的场振子模型中的参数进行模型参数辨识,这是下一步的研究重点.

参考文献:

[ 1 ] 林宇震,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

[ 2 ] Portillo J E,Sisco J C,Corless M J,et al. Generalized combustion instability model[R]. AIAA-2006-4889,2006.

[ 3 ] Lieuwen T C,Yang V. Combustion instability; basic concept[R]. Arlington,Texas:Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling, 2005.

[ 4 ] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2009,35(4):293-364.

[ 5 ] 翁方龙,朱民,李东海. 黎开管中燃烧振荡的非线性现象研究[J]. 工程热物学报,2013,34(8):1582-1585.

WENG Fanglong,ZHU Min,LI Donghai. Nonlinear phenomena of combustion instability in a Rijke tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34 ( 8 ): 1582-1585. (in Chinese)

[ 6 ] Barbosa S,Scoufflaire P,Ducruix S. Time resolved flow-field, flame structure and acoustic characterization of a staged multi-injection burner[J]. Proceedings of the Com-

bustion Institute,2009,32(2):2965-2972.

[ 7 ] 张海燕,方勇,彭章友.“信号处理”课程中三种信号分析方法的比较[J]. 电气电子教学学报,2011,33(5):15-17.  
ZHANG Haiyan, FANG Yong, PENG Zhangyou. The comparison of three signal analysis methods in signal processing courses[J]. Journal of Electrical and Electronic Education,2011,33(5):15-17. (in Chinese)

[ 8 ] Huang N E,Shen Z,Long S R,et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Royal Society of London Proceedings, .1998,454(1971):903-995.

[ 9 ] Huang N E,Shen Z,Long S R,et al. A new view of nonlinear water waves;the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2003,31(1):417-457.

[10] Huang N E,Wu M C,Long S R,et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proceedings of the Royal Society: A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2003, 459(2037): 2317-2345.

[11] Jha R,YAN Feng,Ahmadi G. Energy-frequency-time analysis of structural vibrations using Hilbert-Huang transform[R]. AIAA-2004-1975,2004.

[12] Pai P F,HU Jiazhu. Nonlinear structural dynamics characterization by decomposing time signals using Hilbert-Huang transform[R]. AIAA-2006-1882,2006.

[13] 龚志强,邹明玮,高新全,等. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究[J]. 物理学报, 2005,54(8):3947-3958.  
GONG Zhiqiang, ZOU Mingwei, GAO Xinquan, et al. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series[J]. Acta Physica Sinica,2005,54(8):3947-3958. (in Chinese)

[14] 徐晓刚,徐冠雷,王孝通,等. 经验模式分解(EMD)及其应用[J]. 电子学报,2009,37(3):581-585.  
XU Xiaogang,XU Guanlei,WANG Xiaotong,et al. Empirical mode decomposition and its application[J]. Acta Electronica Sinica,2009,37(3):581-585. (in Chinese)

[15] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.  
WANG Ting. Research on EMD algorithm and its application in signal denoising[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2010. (in Chinese)

[16] 付晓波. 经验模态分解法理论研究与应用[D]. 太原:太原理工大学,2013.  
FU Xiaobo. Research on empirical mode decomposition theory and its application[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2013. (in Chinese)

[17] Chu P C,Fan C W,Huang N E. Derivative-optimized empirical mode decomposition for the Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics,2014,259(6):57-64.

[18] Schlurmann T. Spectral analysis of nonlinear water waves based on the Hilbert-Huang transformation[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2002,124(1): 22-27.

[19] Yang F,Fan C A,Chen F. Application of the empirical mode decomposition method to the identification of disc brake squeal[R]. ASME Paper IMECE 2002-39224,2002.

(编辑:叶 青)