

文章编号: 1000-8055(2023)12-2883-12

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220045

中心分级旋流燃烧室不稳定燃烧动态压力 信号特征分析

王旭怀, 刘 勇, 张 祥, 杨 晨, 李 昊

(南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 针对中心分级旋流模型燃烧室中出现的不稳定燃烧特征进行试验研究, 在常压试验中同步采集了不同工况下燃烧室动态压力脉动信号、释热率脉动信号和高速火焰图像信号。通过经验模态分解(EMD)对压力脉动信号进行分析, 发现脉动特征主要集中在前 3 阶本征模态(IMF)中。这些 IMF 通过快速傅里叶变换(FFT)进行主频分析后发现分别与释热率脉动、气流旋流脉动和火焰不稳定脉动特征频谱吻合。进而可以判断通过 EMD 可以从单一燃烧室压力脉动信号中分解出 3 个主要物理过程的脉动特征, 为进一步分析工程级燃烧室试验中振荡燃烧的诱发机制和燃烧诊断提供了数据处理方法。

关 键 词: 不稳定燃烧; 火焰不稳定; 经验模态分解; 本征模态函数; 傅里叶变换

中图分类号: V231; TK16

文献标志码: A

Characteristic analysis of dynamic pressure signal of unstable combustion in central staged swirl combustor

WANG Xuhuai, LIU Yong, ZHANG Xiang, YANG Chen, LI Hao

(Key Laboratory of Aero-engine Thermal Environment and Structure,

Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The unsteady combustion characteristics in the central staged swirl model combustor were experimentally studied. The dynamic pressure pulsation signal, heat release rate pulsation signal and high-speed flame image signal of the combustor under different working conditions were synchronously collected in the atmospheric pressure test. The pressure pulsation signal was analyzed by empirical mode decomposition (EMD), finding that the pulsation characteristics were mainly concentrated in the first three intrinsic mode function (IMF). These IMFs were found to be consistent with the characteristic spectra of heat release rate pulsation, airflow swirl pulsation and flame instability pulsation, respectively, after the main frequency analysis by fast Fourier transform (FFT). Furthermore, it can be judged that the pulsation characteristics of three main physical processes can be decomposed from the single pressure pulsation signal of combustor through EMD decomposition, thus providing a data processing method for further analyzing the induction mechanism and combustion diagnosis of oscillatory combustion in engineering combustor test.

收稿日期: 2022-01-25

基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2019-009)

作者简介: 王旭怀(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为燃烧室不稳定燃烧。

引用格式: 王旭怀, 刘勇, 张祥, 等. 中心分级旋流燃烧室不稳定燃烧动态压力信号特征分析[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2883-2894.

WANG Xuhuai, LIU Yong, ZHANG Xiang, et al. Characteristic analysis of dynamic pressure signal of unstable combustion in central staged swirl combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 2883-2894.

Keywords: unstable combustion; flame instability; empirical mode decomposition; intrinsic mode function; Fourier transform

为降低燃烧室中污染物排放,贫燃预混燃烧是目前民用航空发动机和地面燃机采用较多的燃烧方式之一。但这种燃烧方式工作在贫燃熄火极限(lean blow-off limits, LBO)附近,火焰不稳定(flame instability, FI)容易诱发振荡燃烧(combustion instability, CI),导致燃烧室中有大幅压力振荡产生。因此研究振荡燃烧产生机制和演变特征,进行燃烧诊断和预警在工程燃烧试验中具有重要意义^[1-5]。

在工程级燃烧室试验中,燃烧室压力脉动信号基本上是能获得的唯一反映燃烧不稳定的信号,因此动态压力(dynamic pressure, DP)是燃烧状态诊断的重要依据。然而该信号是多种物理过程耦合形成,是燃烧流场各种特征的综合表现。如果能从综合信号中获得其蕴含的多过程信息,并逆向重构各物理过程的时序特征,将是了解燃烧状态演变的重要手段,对研究触发燃烧振荡的诱因和演变过程具有重要意义。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是 Huang 等^[6]在 1998 年提出的一种信号处理的方法,其主要思想将原信号分解成为若干个本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),经过多次“过滤”后原信号会被分解为多个 IMF 和一个余量,各阶分量会包含原信号的局部特征,可以更准确地提取原信号的特征。EMD 的信号分解方法与快速傅里叶变换(FFT)和离散小波变换(DWT)不同,后两者分解信号基于频率指定,而 EMD 可以认为是基于原始信号的某种内在特征进行分解。EMD 被大量地应用在信号特征提取中, Bi 等^[7]将发动机爆震产生的振动信号进行降噪处理后利用 EMD 识别出爆震特征。Boda 等^[8]利用 EMD 对心电信号进行分解后对分量进一步处理后有效去除了心电图信号中电力线干扰和基线漂移的影响。Amoura 等^[9]将 EMD 得到的测井噪音信号的 IMF 进行阈值筛选后再重构后来确定地层中岩性特性。EMD 在研究燃烧动态信号特征中也有运用。Yan 等^[10]利用 EMD 对气化炉撞击火焰噪声信号进行分解后发现燃烧室系统具有非均匀性向均匀性的动态变化特征,同时比较了不同数量燃烧器之间的能量分布差异,发现 4 个燃烧器的稳定性要优于两个燃烧器的稳定性。李珊等^[11]对燃烧器火焰静电信号进行 EMD 后,将得到的多个

IMF 信号进行降噪处理后发现甲烷扩散火焰和预混火焰中的能量谱分布有一定的相似性。付宇等^[12]利用 EMD 对燃烧不稳定时的 DP 信号进行分解,同时对 IMF 进行希尔伯特-黄变换(HHT),对瞬时频率分析后发现 IMF 可以体现燃烧不稳定性的固有模态。冀树德等^[13]利用 EMD 对柴油机盖上面采集到的非线性非稳态的复杂信号进行分解后发现各阶 IMF 可以表征较为单一的故障特征。在不稳定燃烧发生时,燃烧室 DP 信号中应该包含了流动和燃烧所产生的压力脉动的叠加。郑丹伟等^[14]通过模型燃烧室 DP 信号分析指出,其主要构成为释热率脉动、流场结构脉动和火焰低频脱落脉动 3 种主要过程,并能通过 EMD 进行分解,但是缺乏对工程级别液体燃烧室燃烧的验证。Giassi 等^[15]在甲烷扩散火焰中对火焰图像进行了详细分析后得到 CH^* 浓度变化和释热率之间的相关性以及 CH^* 浓度与释热率成正比的关系。赖安卿等^[16]利用图像 FFT、本征正交分解和动力学模态分解 3 种方法对振荡燃烧时火焰图像进行分解后得到火焰脉动幅值、主频等信息,同时能够分离出火焰脉动结构特征。Steinberg 等^[17]对旋流燃烧中主要流动结构进行研究后发现火焰结构周期性的剪切脉动和环形涡脱落是造成不稳定燃烧的重要原因。

本文在工程级中心分级燃烧室常压试验中,对冷态和燃烧时的 DP 信号进行采集分析,同时利用高速摄影仪对燃烧室内火焰动态变化进行拍摄获得火焰不稳定图像信息,采用 CH^* 信号测量释热率脉动信息。在这些信息基础上,采用 EMD 获得了燃烧室 DP 信号的内涵组成,为燃烧不稳定的演变机理和预警诊断建立基础。

1 试验系统

前述分析燃烧室中 DP 信号是包含释热率脉动、流动脉动和火焰脉动 3 种主要过程。通常流动脉动表现为流场中的各种尺度的涡结构:湍流导致的小尺度涡结构和旋流器等宏观结构产生的泰勒尺度级的涡旋结构脱落;这部分结构在冷态流场中是固有的。在燃烧流场中,因为温度场改变会导致其特性有所变化,但是其特征(例如旋进涡脉动特性)变化不太大^[13],即旋进涡特征可以从冷态流场中进行识别,并认为其在热态流

场中还保留其主要特征。不稳定燃烧包括燃烧不稳定(CI)和火焰不稳定(FI),其中 CI 即振荡燃烧,FI 在工程级燃烧器中通常表现为火焰吹脱^[1]。其中 CI 表现为相对高频的释热率周期性脉动,FI 表现为相对低频的火焰周期性脱落^[18]。因此可以认为在不稳定燃烧 DP 信号中至少包含了释热率脉动、火焰低频脉动和涡旋结构脉动特征。为了验证不稳定燃烧信号的内涵分解方法在工程级燃烧室中的适应性,建立中心分级燃烧试验系统并分别测量了冷态流场下的燃烧室 DP 信号和燃烧时燃烧室 DP 信号、CH*脉动信号和高速火焰图像信号。

1.1 测量系统布局

中心分级燃烧室试验系统如图 1 所示。试验

系统由中心分级燃烧室、进排气管道、供气系统、供油系统、动态压力测量系统和高速图像采集系统等组成。中心分级燃烧室头部旋流几何结构如图 2 所示。该中心分级模型燃烧室采用单管燃烧室布局,燃烧室头部由一级径向旋流器(主级)与两级轴向旋流器(值班级)组成。旋流器结构参数如表 1 所示。燃烧室主级通过周向均匀分布的直射式喷嘴供油,值班级通过旋流雾化喷嘴供油。同时,头部及火焰筒配置有冷却孔对燃烧室壁面进行高温防护。试验燃料为 RP-3 航空煤油。燃烧室进口空气通过压气机后方电加热器加热后进入燃烧室,空气温度为常温至 873.15 K(600 ℃)。燃烧产生的高温烟气经喷淋水冷却后,经烟气处理装置处理后排放。

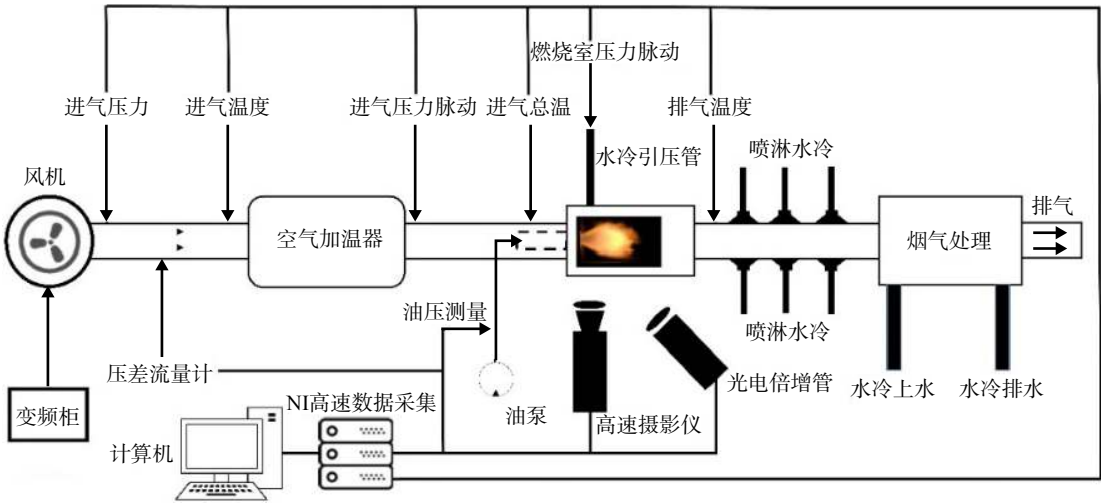


图 1 试验系统布局示意图
Fig. 1 Layout diagram of test system

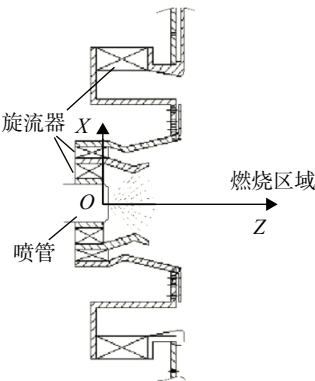


图 2 旋流器头部结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of swirler head

进气压力脉动、燃烧室压力脉动及油压脉动通过动态压力传感器测量,传感器型号为 PCB113B28。燃烧室压力脉动测点距旋流器出

口 50 mm,位于主级旋流器产生的回流区包线极大值点附近。此外,为保证压力传感器正常工作,采用 350 mm 长水冷式引压管测量燃烧室压力脉动。火焰释热率脉动通过测量火焰 CH*化学荧光信号间接测量。CH*化学荧光波长为 435.3 nm,因此,本文通过 435 nm±5 nm 带通滤光片筛选 CH*荧光信号,荧光强度通过滨松光子 CH348 型测光探测器测量。火焰图像采用 IDT-Y5 型 CCD 高速摄影仪拍摄。进气压力、供油压力通过压力变送

表 1 旋流器结构参数
Table 1 Structural parameters of swirler (°)

位置	值班级		主级
	一级轴向	二级轴向	径向
数值	30	35	-60

器测量;进气温度与燃烧室温度通过热电偶测量。以上信号接入 NI 多通道数据采集系统后由计算机记录。

1.2 试验方案

该燃烧室在贫油时容易发生振荡燃烧状态,所以试验测试方案为:在每一个进气参数下,保持进气量和温度不变,首先富油点火后稳定,然后逐渐降低燃油油量,直至熄火。在此过程中会出现火焰脉动、燃烧振荡等现象。图 3 为进口空气质量流量为 100 g/s 的时长为 55 s 的连续调节

工况。蓝色曲线为油气比变化,黑色曲线为 DP 变化。整个过程分为 4 个阶段: M1 为供油稳定后的富油稳定燃烧状态,此时火焰有小尺寸的间歇性。M2 为供油降低后的 FI 燃烧阶段,该阶段压力脉动振幅比 M1 的大,但是比 M3 小,火焰有大尺度的间歇性; M3 是油气比进一步减小后出现振荡燃烧阶段,该阶段明显特征为压力脉动幅值高,具有单峰主频;在随油气比减小时振幅变化较小直至熄火; M4 为熄火后冷态阶段,此时燃烧室内压力脉动幅值最小。

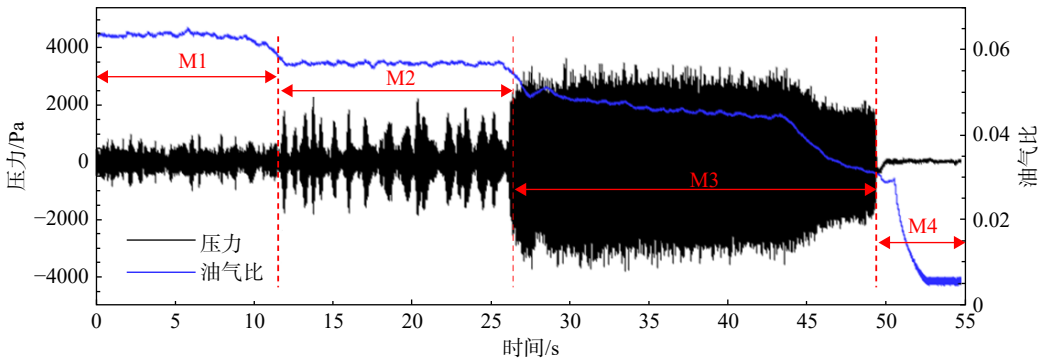


图 3 燃烧室压力脉动随油气比调节的变化
Fig. 3 Variation of combustor pressure pulsation with oil-gas ratio regulation

在试验中,典型 FI(M2)燃烧和 CI(M3)阶段燃烧压力脉动时域信号经过 FFT 处理后频谱结果如图 4 所示,可以明显看出在 CI 下存在高振幅的单峰主频。

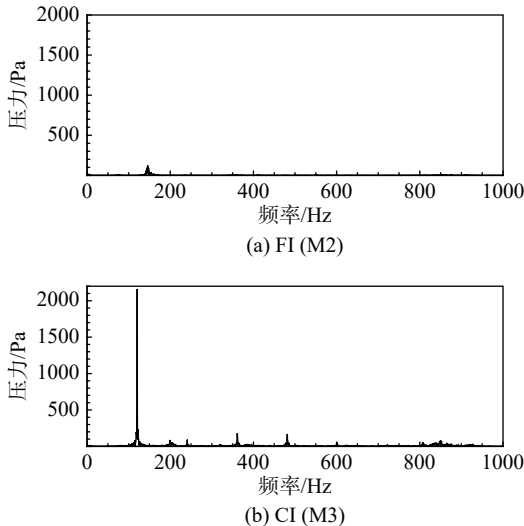


图 4 FI 状态和 CI 状态压力信号频谱结果
Fig. 4 Pressure signal spectrum results of FI state and CI state

针对常压下 3 种不同进口空气质量流量进行变油气比试验,分别为 100.2 g/s(A 组)、130.1 g/s(B 组)及 140 g/s(C 组);每组进气条件下分别从

高油气比至低油气选取合适的工况,如表 2 所示。

表 2 中心分级燃烧室不稳定燃烧试验工况
Table 2 Unstable combustion test conditions of central staged combustor

试验编号	进口空气质量流量/(g/s)	进气温度/K	进口 Re	油气比
A01	100.2	426	40 400	0.063
A02	100.2	426	40 400	0.057
A03	100.2	426	40 400	0.050
A04	100.2	426	40 400	0.046
A05	100.2	426	40 400	0.038
A06	100.2	426	40 400	0.033
B01	130.1	423.4	52 000	0.054
B02	130.1	423.4	52 000	0.052
B03	130.1	423.4	52 000	0.048
B04	130.1	423.4	52 000	0.046
B05	130.1	423.4	52 000	0.044
B06	130.1	423.4	52 000	0.038
C01	140.0	434	56 800	0.050
C02	140.0	434	56 800	0.048
C03	140.0	434	56 800	0.045
C04	140.0	434	56 800	0.044
C05	140.0	434	56 800	0.040
C06	140.0	434	56 800	0.038

通过理论计算, 该中心分级试验台的 1 阶纵向声学固有频率约为 120 Hz, 试验中振荡主频也接近此值。所以选择 2 000 Hz 采样率对燃烧室内压力脉动、释热率脉动和火焰图像进行采集。

2 试验结果分析

经过前述分析, 燃烧室 DP 信号应包含了释热率脉动、流动结构脉动和火焰脉动三大基本物理过程的信息, 是这些信息的耦合体现。因此本文将从燃烧室 DP、CH^{*}脉动信号、冷态流场 DP 和火焰高速图像 4 个信号特征着手, 试图建立前者与后三者之间的内涵联系。

2.1 燃烧室压力信号结果分析

燃烧室内压力信号, 以 A 组工况燃烧室内 DP 信号为例, 图 5 为各工况 2 s 内的压力脉动信号, A01 和 A02 油气比较高, 此时压力脉动波形存在明显间歇性, 其波形为经典 FI 状态下的 DP 波形信号。在 A01 油气比基础上降低油气比至 A02 时, 压力脉动间歇性明显, 波形特征为 FI, 但整体压力幅值有所增加; 进一步降低油气比会使得燃烧室处于 CI 状态。B、C 两组工况与此类似。

图 6 为 A01~A033 个工况下的 DP 信号进行 FFT 计算后得到的脉动频谱结果。在 A01 和 A02 两组工况中, 主频峰值会随着油气比的降低而增加, 主峰所在的频率会减小, 但都在 140 Hz 附近; 70 Hz 附近的次高峰也有类似变化。A03 中由于 CI 的影响, 主频峰值会骤增, 同时脉动频谱中存在 120 Hz 的单频主峰, 没有其他明显的次高峰; A 组其余工况均处于 CI 状态, 脉动频谱与 A03 频谱相似。

为了探究 FI 状态下出现 146 Hz 主频的原因, 对 A 组不同状态下的燃烧室动态油压信号进行 FFT 计算后得到频谱结果如图 7 所示, 能够看出 FI 状态时存在 50 Hz 和 146 Hz 的主峰和次高峰。50 Hz 主峰与工频一致, 146 Hz 是油泵供油时存在的脉动主频; 随着油气比的降低 FI 状态变为 CI 状态时, 受燃烧室振荡影响会出现 120 Hz 声学振荡频率, 其脉动强度会高于油泵对供油脉动的影响。

图 8 为不同进口空气质量流量下 DP 主频峰值变化结果, 在 A 组 100 g/s 时高油气比 FI 状态下的峰值会远小于 CI 状态下主频峰值, 降低油气比至 CI 状态时 DP 峰值会发生骤增, 燃烧室振荡

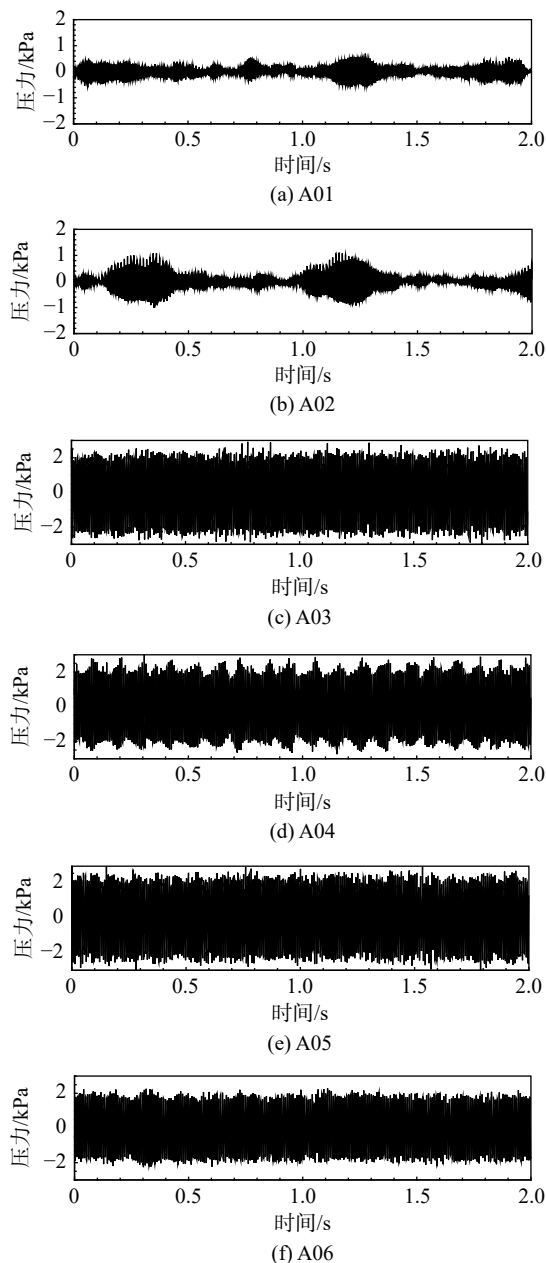


图 5 A 组各工况的 0~2 s 内 DP 信号

Fig. 5 DP signal within 0—2 s under each working condition of group A

强度会大大增加; 在 3 组进气量中当燃烧处于 CI 状态时, 会存在临界油气比使得 DP 主频峰值达到最大, 当在此油气比基础上继续减小油气比后 DP 峰值会逐渐减小。这种 DP 峰值减小主要是因为油气比降低至一定程度时, 燃烧室内能量密度会随着油气比的减小而减小, 进一步导致振荡强度的降低。

A02 处于 FI 过渡到 CI 的中间状态, 其波形信号间歇性是燃烧室内多种复杂因素共同的影响结果, 原始信号时域频域中包含了燃烧室内多物理过程的丰富信息。本文拟用 EMD 对其进行分

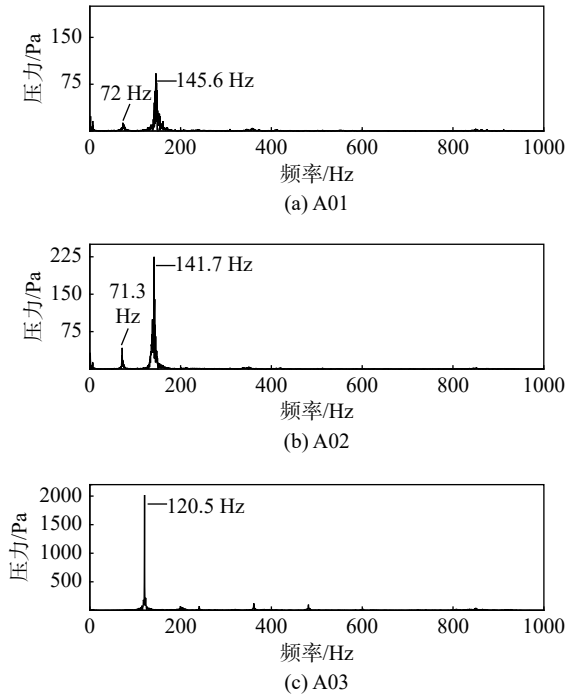


图 6 DP 信号频谱

Fig. 6 Spectrum of DP signal

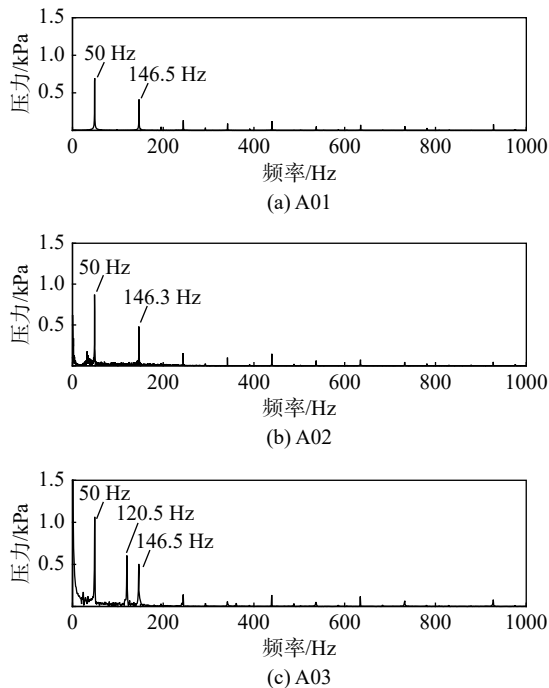


图 7 油压信号频谱

Fig. 7 Spectrum of fuel pressure signal

解, 试图重构出各主要过程的信号特征。对压力脉动信号进行 EMD 后, 可以获得共 7 阶 IMF 分量, 能量主要集中在前 3 阶, 其他低阶分量幅值和主频很小。前 3 阶分量(记为 IMF1~IMF3)波形与频谱如图 9 所示, 从上至下依次为 IMF1~IMF3 信号及其频谱结果。IMF1 波形与压力脉动

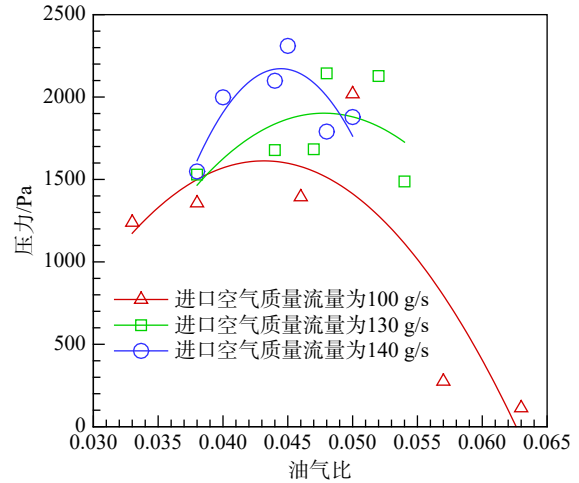


图 8 不同进口空气质量流量下压力脉动峰值变化

Fig. 8 Variation of pressure fluctuation peak value under different inlet air mass flows

波形及幅值较为相近, 两者脉动主频一致, 是原始信号的主要特征, 但是没有出现 71.3 Hz 的次高峰; IMF2 波形依旧存在较强间歇性, 其脉动能量集中在 53 Hz 附近较宽频带中; IMF3 脉动主频集中在 23 Hz 附近的低频带中。通常可以认为经过 EMD 后得到 3 个分量具有相对独立性, 对应了 3 个独立的物理过程。

按照上述处理方法对试验中其他工况进行统计后得到不同进口空气质量流量下压力脉动各阶分量变化如图 10 所示。IMF1 脉动频率在 A 组进气量下变化较大, 在油气比较高处于 FI 状态时, 脉动主频高于低油气比 CI 状态时的脉动主频; 在 CI 状态下, 进口空气质量流量对 IMF1 影响较小, 其主频变化范围集中在试验系统声学横向振荡本征频率 120 Hz 附近。IMF2 在进口空气质量流量一定的条件下, 其脉动主频存在围绕某一固定基值上下小幅度变化; 随着进口空气质量流量的增加, 各个工况变化的基值也会逐渐增加。A 组工况中从 FI 状态转变为 CI 状态时 IMF3 脉动主频会从 17 Hz 逐渐上升 23 Hz 直至饱和为 26 Hz。通过上述分析, FI 和 CI 状态下压力脉动的前 3 阶 IMF 脉动频率会有明显的两种状态的变化特征: IMF1 的主频在贫油 CI 状态时, 各个进气量下都趋于系统固有频率; 而 IMF2 和 IMF3 的主频随着进气量/Re 有明显的正向关系, 说明这两个分量所对应的物理过程变化特性与流场平均速度有正相关。后继部分将基于分量信号的频域特征去对应到合适的物理过程。DP 信号前 3 阶主频峰值能量占比变化如图 11。IMF1 占比是前 3 阶分

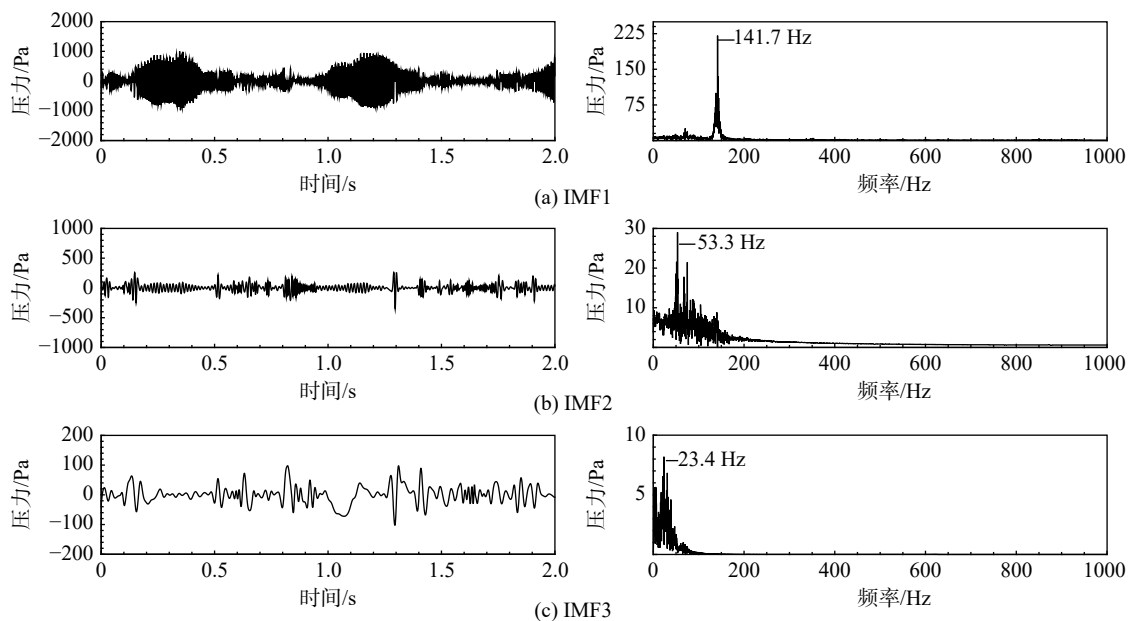


图 9 A02 压力脉动各个分量的时频域

Fig. 9 Time frequency spectrum of each component of A02 pressure pulsation

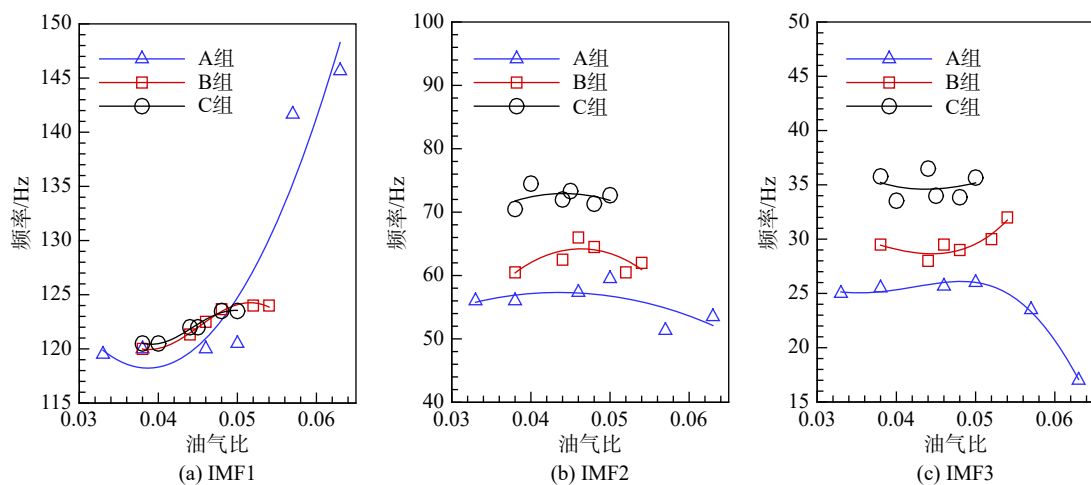


图 10 DP 各阶分量脉动主频变化

Fig. 10 Variation of pulsation dominant frequency of DP components

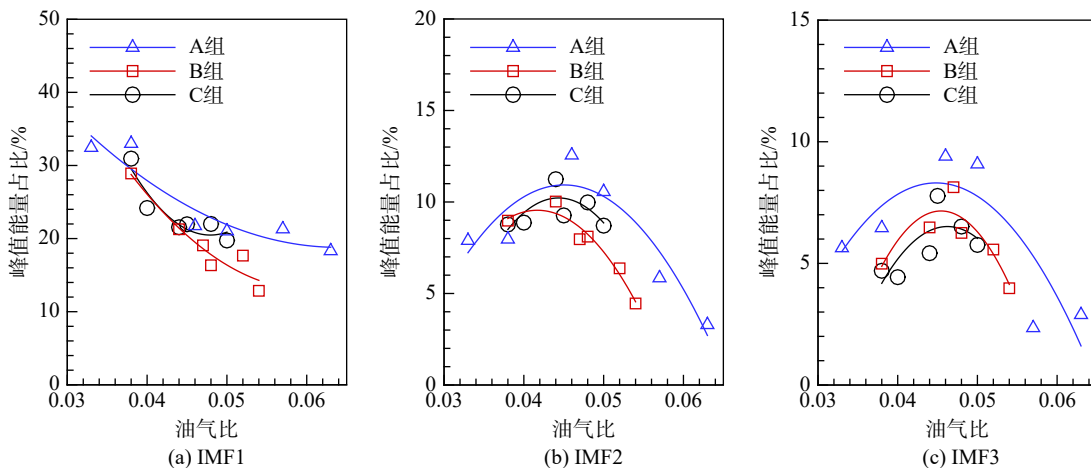


图 11 DP 各阶分量脉动峰值能量占比变化

Fig. 11 Variation of the proportion of pulsation peak energy of DP components

量中最高的,随着油气比的逐渐减小占比会逐渐增加;表明 IMF1 峰值与不稳定燃烧程度呈正相关,随着燃烧状态从 FI 过渡到 CI 状态,IMF1 所代表的物理过程占比逐渐增大。IMF2 与 IMF3 主频能量占比变化规律相近,随着油气比减小会存在先增加后减小的趋势,在某个临界油气比下会存在峰值;但前者整体占比会略高于后者。为了分析各阶分量变化是何种因素影响的,将对燃烧室中其他特征量变化进行详细分析。

2.2 冷态时压力信号结果分析

燃烧流场中的第二大压力脉动的影响因素是流场结构造成的宏观脉动。进口空气通过多级旋流器进入燃烧室后,经过旋流作用后空气形成的流场会存在分布不均匀产生脉动。为了分析燃烧室内流场结构对于 DP 的影响,对不点火时冷态燃烧室流场中 DP 信号进行分析。不通气时燃烧室内 1 s 内 DP 信号如图 12(a)所示,此时由于背景环境噪声的影响,DP 信号会出现低频脉动部分会掺杂高频脉动。为了降低背景噪声内的影响,对原始脉动信号进行滤波后通过 FFT 计算得到其无量纲频谱结果如图 12(b)所示,整体 DP 频谱分布接近白噪声分布,但在低频部分存在 50 Hz 附近的脉动主频,这一频率可能是跟燃烧室存在的固有特性有关。

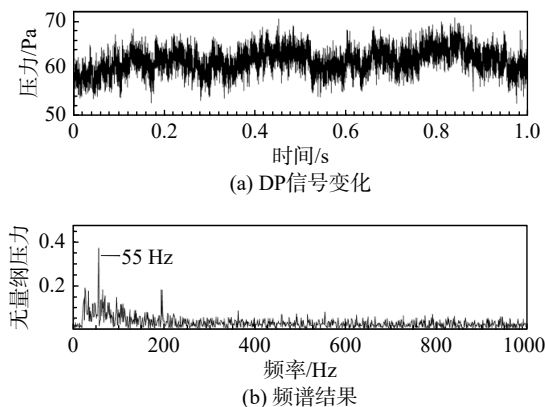


图 12 无进气时燃烧室内 DP 频谱

Fig. 12 DP spectrum in combustor without inlet air

对燃烧室内供气不点火情况下的 DP 信号进行类似降噪处理后得到 B、C 两组进口空气质量流量下无量纲 DP 脉动频谱如图 13 所示。两种进气量下的频谱中都存在 50 Hz 附近的脉动主频,这一频率与不通气时的脉动主频一致,说明 50 Hz 是固定工频;各个进气量下的频谱中分别存在一

个次高峰主频 61 Hz 和 77.3 Hz,出现这一结果的原因是进口空气通过旋流叶片时,受到旋流剪切作用后产生应力变化作用进一步引起 DP 脉动主频变化。

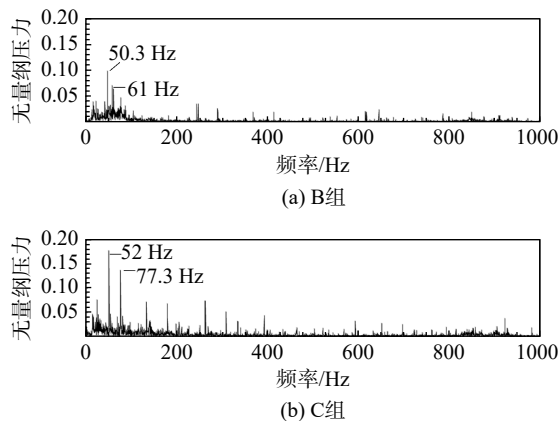


图 13 不同进气量下冷态 DP 频谱

Fig. 13 Cold state DP spectrum under different air intakes

按上述降噪方法统计其余工况中流场结构脉动引起的脉动主频变化结果如图 14 所示,能够看出随着进口空气质量流量的增加,冷态时 DP 脉动主频会逐渐增加;同时这一频率随进口空气质量流量变化偏离呈非线性增加。不同进口空气质量流量下冷态 DP 主频变化与上文中 IMF2 脉动主频变化近似一致,说明 IMF2 包含了该气量下的冷态流场结构宏观脉动信息。

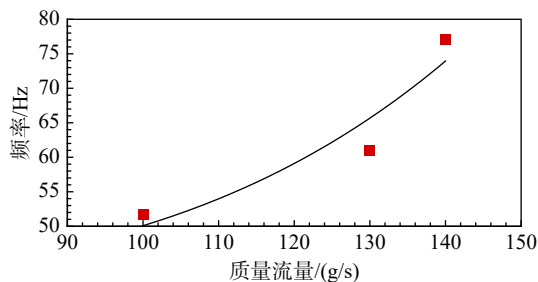


图 14 冷态 DP 次主频随进口空气质量流量变化

Fig. 14 Variation of secondary dominant frequency of cold DP with inlet mass flow of air

2.3 CH*信号结果分析

燃烧流场中最重要的压力脉动来源是预混气微团在剧烈化学反应(燃烧)时的瞬时压力变化,此为单极子源项。整个燃烧区有大量的高释热率微团构成复合压力脉动源项。本文通过 CH*滤镜配合光电管采集释热率脉动信息。但是这种 CH*信号是高释热率微团随流场结构运动后形成的总体脉动特征,因此理论上,CH*信号脉动是基于拉

格朗日观点的燃气微团释热率脉动和燃烧空间流场结构脉动的综合效果。

试验中 FI 状态及 CI 状态下的 CH^* 强度脉动信号及其频谱如图 15 所示, 不同状态下 CH^* 信号差异较大, 高油气比 FI 状态下其整体强度集中

在 $0 \sim 2 \text{ V}$ 之间, 存在间歇短时间尺度; CI 状态下其强度不会出现 FI 状态下间歇性特征, 整体幅值集中在 $0 \sim 3 \text{ V}$ 。从频谱结果来看, FI 状态下 CH^* 脉动强度较小, 不会出现明显单峰主频, CI 状态下会出现单峰主频, 主频峰值会远远大于 FI 主频峰值。

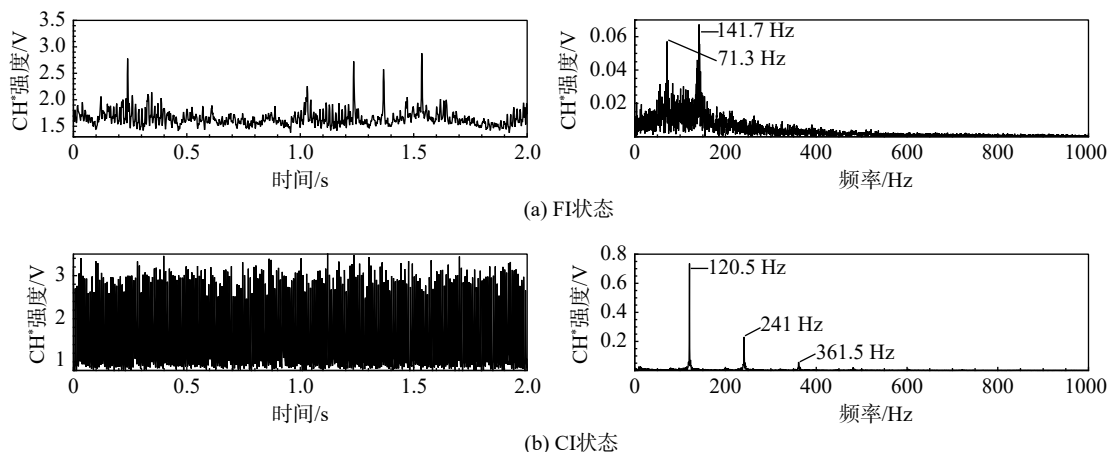


图 15 不同燃烧状态下 CH^* 信号及频谱

Fig. 15 CH^* signal and spectrum under different combustion conditions

选择 FI 状态下 IMF1 从增加至衰减过程中其与 CH^* 信号进行对比如图 16, 能够看出 IMF1 变化过程中 CH^* 也会出现高低幅值交替性变化, 两种信号变化频率相同, 整体处于同相变化。

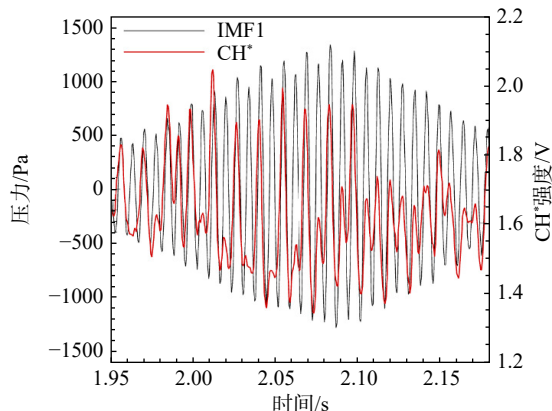


图 16 IMF1 与 CH^* 信号变化

Fig. 16 Variation of IMF1 and CH^* signals

通过对 FI 状态下两种信号的分析发现其变化存在一致性, 为了验证此结论, 对所有工况下 CH^* 脉动主频进行统计后得到 3 种不同进口空气质量流量下的 CH^* 脉动主频变化如图 17 所示。从图中能够看出高油气比 FI 状态下的 CH^* 脉动主频会随着油气比的减小而逐渐减小并稳定在 CI 状态下 120 Hz 附近; 比较 CH^* 脉动主频与图 10(a) 中 DP 的 IMF1 脉动主频变化后发现两者

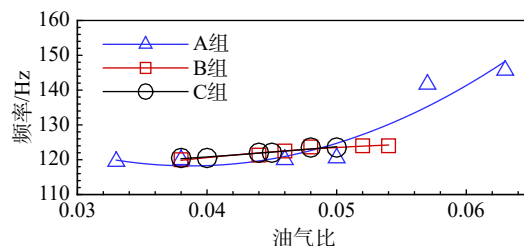


图 17 CH^* 脉动频率变化

Fig. 17 Variation of CH^* pulsation frequency

频率变化一致, 推导出 DP 的 IMF1 脉动分量可以代表释热率脉动特性变化。

2.4 火焰图像结果分析

火焰脱火是构成 DP 变化的重要因素之一, 在燃烧中火焰会随主流空气流动向下游运动时位置会逐渐拉伸, 火焰会发生脱火现象。脱火会改变高温团在燃烧室内的位置以致空间温度分布不均匀, 进一步产生 DP 变化。本节将对燃烧时火焰脱火变化特性进行分析。图 18 为 150 帧火焰变化图像结果中选择其中 40 帧存在火焰脱火的图像, 火焰面脱落现象大约出现了两次(时间 $t=2 \sim 3 \text{ ms}$ 和 $t=18 \sim 19 \text{ ms}$)。主流空气方向从右向左流动, 能够明显看出燃烧室内反应区会有周期性的明暗交替出现, 这是因为火焰发光高温区会被吹向下游, 受到旋流作用, 火焰会呈现周向不均匀分布, 同时在回流区部分有燃气团被点燃,

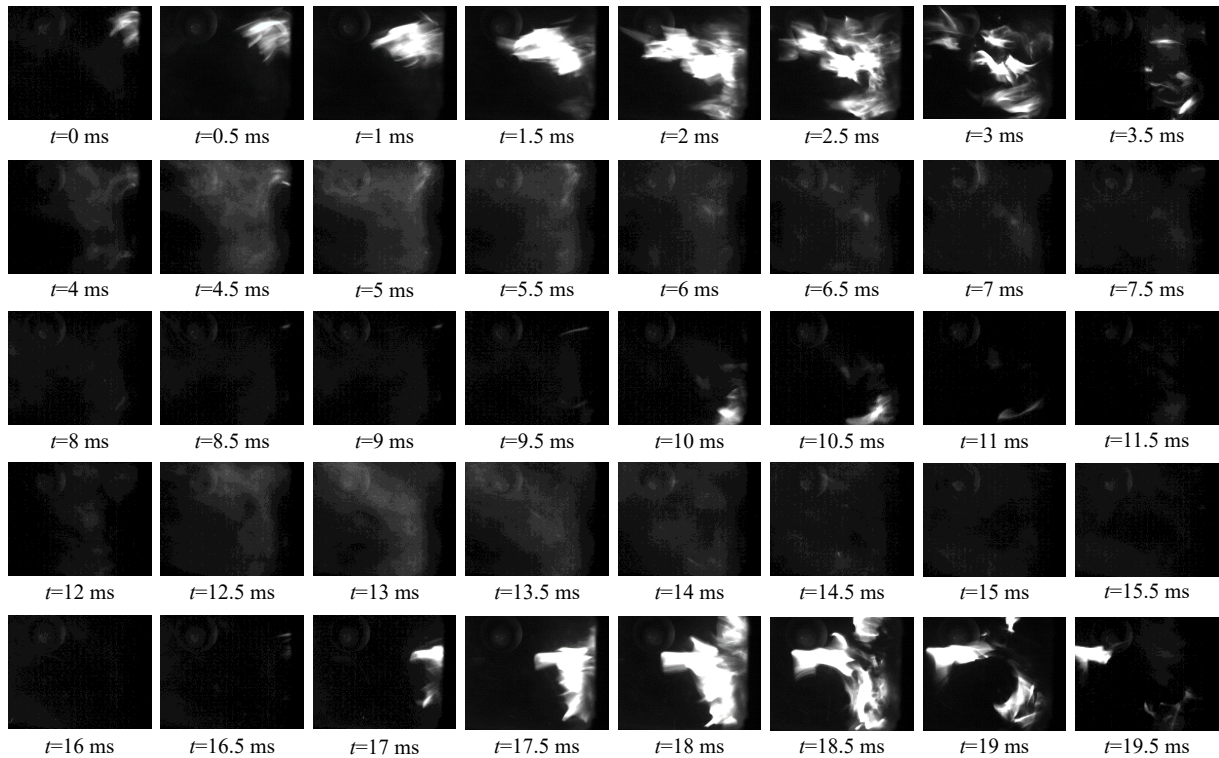


图 18 火焰变化图像

Fig. 18 Flame change images

使得燃烧室内存在 3 种类型的图像: 明亮火焰、高温团、黑暗区。在图像中出现明亮火焰时, 大部分明亮火焰长度较短, 会存在明显的抖动; 有部分火焰会脱离旋流器根部火焰主体外延到中心外的区域, 利用火焰图像的轴向长度变化确定火焰脱落是否发生, 这种火焰面脱落的原因有很多, 包括主流空气受到旋流剪切的作用使得火焰面被逐渐拉伸、同时压力脉动变化造成空气密度分布不均匀进一步反馈到压力脉动这一机制使得火焰面变得不连续及回流区对火焰面的作用等。拍摄频率为 2 000 Hz, 频次大概为 $2 \times 2\,000 / 150 = 26.7$ Hz。

从上述分析来看, 发生火焰脱落时, 会有明显的火焰团飘落。统计图像中距离旋流器最远像素作为评判火焰脱落的依据。先对火焰图像进行中

值滤波处理, 再对火焰图像进行二值化处理, 进一步提取火焰面外部轮廓边界, 统计边界最远像素 $P_{\max}$ 作为火焰面峰值。图 19 是原始图像、经过滤波和二值化处理后得到火焰图像以及边界 $P_{\max}$ 。

选择合适的阈值对火焰长度进行筛选, 认为低于此阈值的火焰边界是火焰面的稳定抖动长度, 过滤后进行归 0 处理, 超过这一阈值认为此时燃烧室发生脱火。A 组所有工况下火焰图像进行上述分析筛选后得到 1 s 内火焰脱火长度如图 20 所示, 能够看出火焰脱火间隔并不规律, 同时发生火焰脱火时火焰长度存在近似正弦波变化; A01~A06 的结果分别为 20、24、25、26、27、26 Hz, 能够看出随 FI 状态下进入 CI 状态时脱火频率会逐渐增加, 最后 CI 状态时基本保持 26 Hz 不变。

对 B、C 两组的脱火频率按照上述方法统计后发现 CI 状态时脱火频率会围绕 29 Hz 和 35 Hz 浮动, 说明 CI 状态时火焰脱火频率会随着进口空气质量流量的增加而增加。这一变化规律与燃烧时 DP 信号 IMF3 脉动频率变化一致, 可以认为 IMF3 变化包含了脱火变化规律信息。

2.5 结果讨论

燃烧室内 DP 信号经过 EMD 后能量主要集

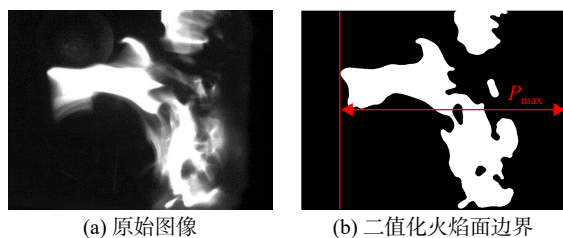


图 19 火焰长度分析

Fig. 19 Analysis of flame length

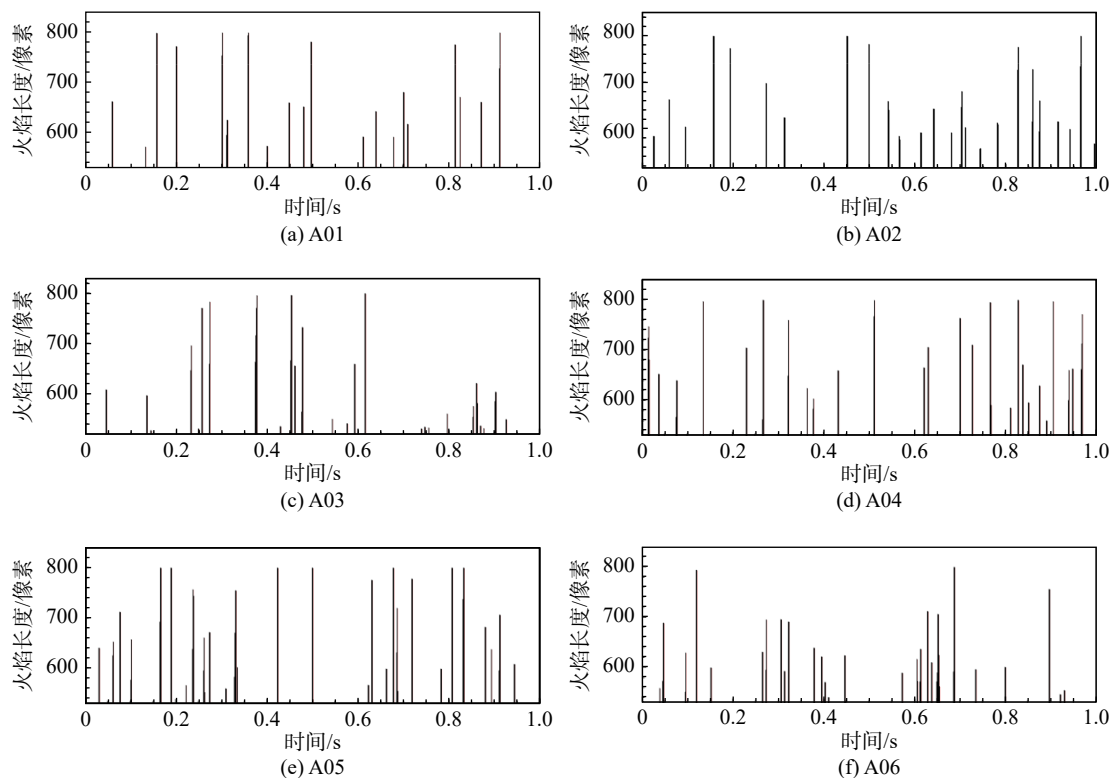


图 20 A 组火焰脱落频率

Fig. 20 The frequency of flame shedding in group A

中在前 3 阶, 分别对其进行 FFT 计算后发现 IMF1 和 IMF3 在不同燃烧状态下频率有较大变化; CI 状态下各阶分量频率变化范围较小。对燃烧室内冷态条件下的 DP 信号、释热率及火焰脱火图像进行分析, 可以看出 IMF1 频率范围和变化趋势与释热率频率特性一致, 即 IMF1 主要表现了释热率脉动特征; IMF2 频率范围和特征与冷态下燃烧室 DP 频率特征相近, 即 IMF2 主要表现了流场结构脉动特征; IMF3 频率范围和变化特征与火焰图像处理吹脱变化特性相近, 即 IMF3 反应了火焰宏观低频吹脱特征。在图 11 中各阶分量中 IMF1 脉动峰值能量占比是 3 阶分量中最高的, 同时会随着油气比的减小而增加, 这表明燃烧室中释热率脉动对 DP 脉动的影响作用占据主要地位; IMF2 和 IMF3 能量占比较小, 随着油气比的减小出现先增加后减小; 对比燃烧室内 DP 峰值变化, 这表明在不稳定燃烧强度较大时宏观流场 DP 脉动和火焰脱落的影响作用也会达到最大。

3 结 论

本文对旋流燃烧室中出现的不稳定燃烧时燃烧室内压力脉动、释热率脉动及火焰形状变化特

性进行了研究。在本文研究的雷诺数变化范围中, 可以得到以下结论:

1) 燃烧时不同状态下动态压力信号波形幅值差异较大, FI 状态下动态压力波形会出现明显间歇性, 同时随着油气比的减小间歇性会降低; 当触发 CI 状态时, 动态压力幅值会骤增, 同时频谱中会出现明显单峰主频。

2) 冷态流场中动态压力脉动主频会随着进口空气质量流量的增加而逐渐增加。

3) 对燃烧时动态压力信号经过 EMD 得到的前 3 阶分量进行分析后发现 IMF1 在 FI 状态下的脉动主频会高于 CI 状态下的脉动主频; 处于 CI 状态时, 进气量对其主频变化影响较小。IMF2 脉动特征受油气比变化影响较小, 脉动频率会随着进气量的增加而增加。IMF3 脉动频率变化与油气比及进气量有关; 当进气量保持不变时, 降低油气比从 FI 状态进入 CI 状态时, 脉动主频会逐渐增, 继续降低油气比主频围绕某一定值变化; 同时当进气量增加时, CI 状态下脉动主频会逐渐增加。通过对 CH^* 信号、冷态宏观流场结构脉动信息及火焰脱火图像进行频域分析后发现其脉动特征变化分别与动态压力前 3 阶分量脉动特征变化一致。

参考文献:

- [1] TIMOTHY C L, VIUOR Y. Combustion instabilities in gas turbine engines[M]. Fort Collins, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [2] COHEN J, ANDERSON T. Experimental investigation of near-blowout instabilities in a lean, premixed step combustor[R]. AIAA 1996-819, 1996.
- [3] KELLER J J. Thermoacoustic oscillations in combustion chambers of gas turbines[J]. *AIAA Journal*, 1995, 33(12): 2280-2287.
- [4] 张均勇, 张宝诚. 航空发动机燃烧室工作稳定性研究[J]. *航空发动机*, 2001, 27(1): 31-39.
ZHANG Junyong, ZHANG Baocheng. Study on working stability of aero-engine combustion chamber[J]. *Aeroengine*, 2001, 27(1): 31-39. (in Chinese)
- [5] HOBSON D E, FACKRELL J E, HEWITT G. Combustion instabilities in industrial gas turbines: measurements on operating plant and thermoacoustic modeling[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122(3): 420-428.
- [6] HUANG N E, SHEN Zheng, 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.
- [7] BI Fengrong, MA Teng, WANG Xu. Development of a novel knock characteristic detection method for gasoline engines based on wavelet-denoising and EMD decomposition[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 517-536.
- [8] BODA S, MAHADEVAPPA M, DUTTA P K. A hybrid method for removal of power line interference and baseline wander in ECG signals using EMD and EWT[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 67: 102466.
- [9] AMOURA S, GACI S, BARBOSA S, et al. Investigation of lithological heterogeneities from velocity logs using EMD-Hölder technique combined with multifractal analysis and unsupervised statistical methods[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109588.
- [10] YAN Shisen, LIANG Qinfeng, GUO Qinghua, et al. Analysis on acoustic characteristics of opposed multi-burner gasifier[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 72(1): 43-47.
- [11] 李珊, 闫勇, 吴佳丽, 等. 基于EMD降噪的燃烧器火焰静电信号能量熵分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(1): 285-293.
LI Shan, YAN Yong, WU Jiali, et al. Energy entropy analysis of flame signals obtained by an electrostatic sensor array based on EMD denoising method[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(1): 285-293. (in Chinese)
- [12] 付宇, 郭志辉, 杨甫江, 等. 基于经验模态分解的燃烧不稳定性分析[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(3): 623-630.
FU Yu, GUO Zhihui, YANG Fujiang, et al. Analysis on combustion instability based on empirical mode decomposition[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(3): 623-630. (in Chinese)
- [13] 冀树德, 张晖, 贾桢. EMD在柴油机燃烧不良诊断中的应用[J]. *现代车用动力*, 2007(4): 28-31.
JI Shude, ZHANG Hui, JIA Zhen. Application of EMD method in diagnose of bad combustion in diesel engine[J]. *Modern Vehicle Power*, 2007(4): 28-31. (in Chinese)
- [14] 郑丹伟, 刘勇, 张祥. 基于火焰图像诊断的模型燃烧室燃烧不稳定特性[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(7): 1481-1488.
ZHENG Danwei, LIU Yong, ZHANG Xiang. Combustion instability characteristics of model combustor based on flame image diagnosis[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(7): 1481-1488. (in Chinese)
- [15] GIASSI D, CAO Su, BENNETT B A V, et al. Analysis of CH^* concentration and flame heat release rate in laminar coflow diffusion flames under microgravity and normal gravity[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 167: 198-206.
- [16] 赖安卿, 刘云鹏, 付尧明, 等. 振荡燃烧火焰图像处理[J]. *燃烧科学与技术*, 2020, 26(1): 10-17.
LAI Anqing, LIU Yunpeng, FU Yaoming, et al. Image processing of combustion oscillating flame[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2020, 26(1): 10-17. (in Chinese)
- [17] STEINBERG A M, ARNDT C M, MEIER W. Parametric study of vortex structures and their dynamics in swirl-stabilized combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3117-3125.
- [18] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F, et al. Vortex-shedding and mixing layer effects on periodic flashback in a lean premixed prevaporized gas turbine combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2901-2908.

(编辑: 秦理曼)