

不稳定燃烧状态多尺度峭度诊断方法

刘重阳^{1,2}, 张 祥³, 刘 勇³

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000;
3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为建立先进航空发动机和燃气轮机燃烧室工程试验中不稳定燃烧状态评定方法, 提出了一种基于燃烧室压力脉动信号多尺度峭度指标的诊断方法, 联合诊断两种不稳定燃烧状态: 燃烧不稳定(CI)和火焰不稳定(FI), 并在气体燃料旋流燃烧室和航空煤油贫油预混预蒸发燃烧室两组试验中进行验证分析。研究表明: 采用规范化后的平均峭度指标, 可用作 CI 状态判据, 但不适用于 FI 诊断; 采用基于时间尺度无关性的最佳时间尺度来定义的 CI 峭度指标和 FI 峭度指标, 可以反映压力振荡等级和压力时序间歇性, 且各自与 CI 和 FI 程度形成递增关系; 建立的瞬时压力峭度和间歇性峭度综合判定准则, 可为燃烧室燃烧不稳定性在线评价提供判据。

关 键 词: 燃烧不稳定; 火焰不稳定; 压力脉动; 峭度指标; 时间尺度

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Multi-scale kurtosis index diagnosis method of unstable combustion states

LIU Chongyang^{1,2}, ZHANG Xiang³, LIU Yong³

- (1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China;
3. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to establish a method of evaluating unstable combustion states in advanced aeroengine and gas turbine combustion chamber engineering tests, a diagnosis method based on the multi-scale kurtosis index of the combustion chamber pressure pulsation signal was proposed, two unstable combustion states: combustion instabilities (CI) and flame instabilities (FI), were diagnosed, and the test and analysis were carried out in the gas fuel swirl combustor and liquid kerosene lean premixed pre-vaporized combustor. The results of the study showed that the normalized mean kurtosis index can be used as a CI status criterion, but it is not suitable for FI diagnosis; the CI and FI kurtosis indexes defined by the optimal time scale based on time scale independence can indicate the pressure oscillation level and the intermittent feature of pressure sequence, and the parameters have an increasing relationship with the CI and FI degree correspondingly; the established comprehensive judgment norm based on instantaneous pressure kurtosis and intermittent kurtosis can provide a criterion for online evaluation of combustion instability.

收稿日期: 2021-12-26

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: 刘重阳(1980—), 男, 博士生, 主要从事航空发动机燃烧室试验测试技术研究。

引用格式: 刘重阳, 张祥, 刘勇. 不稳定燃烧状态多尺度峭度诊断方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2116-2128. LIU Chongyang, ZHANG Xiang, LIU Yong. Multi-scale kurtosis index diagnosis method of unstable combustion states[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2116-2128.

Keywords: combustion instability; flame instability; pressure pulsation; kurtosis index; time scale

现代航空发动机高温升燃烧室和燃气轮机低排放燃烧室在设计、试验和实际运行中经常发生不稳定燃烧现象,预防和抑制不稳定燃烧状态对发动机和飞行安全具有重要意义^[1-2]。在燃烧室部件研制过程中,迫切需要对试验中的不稳定燃烧状态进行在线监测,为试验安全、状态分析和设计优化及时提供支撑。而在工程试验中,燃烧室动态压力(dynamic pressure, DP)或声压信号为最易获得的不稳定信号。因此从 DP 信号中获得不稳定状态判据是最合适的方式^[3-6]。诸多学者基于压力信号对燃烧不稳定机理、振荡特征等进行了大量研究^[7-12]。

燃烧室中的不稳定燃烧状态包含两种:燃烧不稳定(combustion instability, CI)和火焰不稳定(flame instability, FI)。前者描述了一种燃烧释热率和声振的耦合现象,即释热率脉动、声学脉动和油气比脉动三者之间形成了正反馈,又称为振荡燃烧^[2]。当发生 CI 时,燃烧室会出现大振幅的压力波,极易导致机体损毁。后者描述了火焰偏离其稳定状态,朝脱火(FI)、熄火或回火方向发展。在低污染燃烧室中,由于其工作状态通常为贫油,易产生 FI^[13]。在发动机变工况时也容易发生 FI,导致发动机空中熄火,需要再点火,对机体运行也极具危害性。从 CI 的产生机制上看,FI 经常是其诱发源,如果 FI 没有导致熄火,则有可能导致 CI。

对于 CI 不稳定性,一般直接采用压力振幅的变化来标识,例如采用压力振幅的方均根值(RMS)来表述^[14],当 RMS 高于特定值,如 50~100 kPa 时,为会危害机体的剧烈振荡;或者振幅变化超过一定阈值,例如 2%^[15],则判为剧烈振荡。这种判断针对 CI 具有合理性:在热声耦合时会出现大的压力振幅,不稳定程度与压力振幅呈正相关。然而对于以 FI 为代表的燃烧不稳定状态则不适用:FI 的不稳定性表现为压力时序上的间歇性。由于贫油时燃烧功率下降,压力脉动振幅大概率是减小的,仅据此参数则不能正确反映 FI 的不稳定性。另外从频域上看,CI 和 FI 的频率范围也不同:CI 一般表现为纵向振荡,与整个燃烧系统的固有频率相关,在台架试验中表现为 100 Hz 及以上的频率;在 FI 状态中经常表现为 10~40 Hz^[16-17]。综上,CI 状态下通常表现为高频、高压力振幅,FI 状态为低频、间歇性的低压力振幅。因此,需要探寻不同的表征参数以对 CI 和 FI 状

态进行准确标识和判断。

峭度 K (kurtosis, 也称峰度或峰态)通常用来检测时间序列中的冲击信号,是广泛应用于机械运行部件故障特征提取的方法之一^[18-20]。该值反映了时序信号偏离正态分布的程度,偏离程度越大表明时序信号中包含偏离随机性信号的概率越大。对于正态分布的随机信号 $K \approx 3$,正弦信号 $K=1.5$ 。在机械故障诊断中,峭度通常表现为正峭度,例如在齿轮箱故障诊断中 $K > 8$ 即可能意味着严重故障。在燃烧室中,不稳定信号也可用峭度来表征,通常为负峭度,即 $K < 3$ 。Nair 等^[17]研究了 CH_4 燃烧器值班火焰在不同工况下的动态信号,发现噪声、OH 信号的实时峭度在油气比降低、接近 FI 时出现明显的波动,特征频率为 10~25 Hz,峭度均值在 2.5 附近。Song 等^[4]对火箭发动机、贫燃预混燃气轮机和航空发动机 3 种燃烧试验装置的 CI 信号特征进行了分析:燃烧室从启动到 CI 演变过程中,DP 振幅增大,其分布远远偏离正态分布;在 CI 时,峭度接近 1.5(正弦波)。因此作者认为,如果 DP 信号峭度接近 1.5,则可作为 CI 的判据。Joo 等^[21]采用 DP 信号峭度对 $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{CO}$ 混合燃料的燃烧稳定性进行了分析,获得了信号特征与时间窗口长度的敏感性关系,给出了不同工况下 $K=1.775 \sim 1.93$ 的稳定性判据^[22]。

目前,峭度指标虽已被多位学者用来作为 CI 和 FI 状态的判据,然而并没有给出能够同时评价 CI 和 FI 的方案,以及合理时间窗口长度(以下称为时间尺度)的选取方法。本文在分析 CI 和 FI 的 DP 信号频域特征基础上,提出了基于两个时间尺度上的峭度特征进行燃烧状态诊断的方案,并建立了时间尺度选择方法。通过在两个模型燃烧室上的验证,表明该方案能够区分 CI 和 FI,为燃烧室工程试验在线不稳定性评定提供了判据。

1 定义

1.1 规范化峭度 K^*

峭度 K 定义为信号 $p = \{p_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 的归一化 4 阶中心矩:

$$K = \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i - \bar{p}}{\sigma} \right)^4 \quad (1)$$

式中 $\bar{p}$ 为信号的平均值, σ 为标准差。对于正态分布信号, $K \approx 3$ 。通常不稳定燃烧 DP 的 K 基本为负

峭度(<3),为了表征不稳定程度,本文采用式(1)规范化后的绝对值来标识:

$$K^* = |K - 3| \quad (2)$$

式中 K^* 只表征信号偏离随机分布(正态分布)的程度。在此定义下,正态分布的 $K^* \approx 0$ 。为了简化起见,下文简称规范化峭度 K^* 为峭度。

1.2 瞬时峭度 K_{pr}^*

对于在线分析,采用固定时间尺度为 n 的数据去统计平均峭度,形成瞬时峭度(temporal kurtosis, TK)。信号 p 在某时刻 τ 的瞬时峭度 K_{pr}^* 采用前 δt_p 时长内 n 个数据点进行统计:

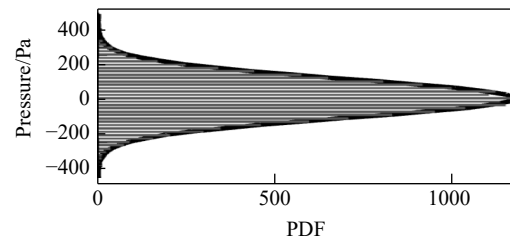
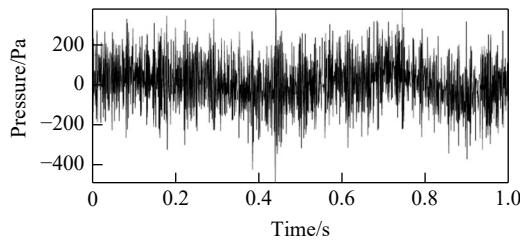
$$K_{pr}^* = \left| \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i - \bar{p}}{\sigma} \right)^4 - 3 \right| \quad (3)$$

其中 n 的取值要能够涵盖分析对象物理过程的多个周期,依赖于工况。Song等^[4]采用了时间尺度 $\delta t_p = 0.02$ s,即大约5~6个周期,来分析CI的信号特征。Nair等^[17]采用了 $\delta t_p = 0.5$ s来统计FI的DP峭度。本文后面讨论了一种合理确定最佳时间尺度的优化方法,获得了在两种模型燃烧室试验条件下均适用的 $\delta t_p = 0.1$ s。下文所有DP统计信号均采用了此时间尺度。

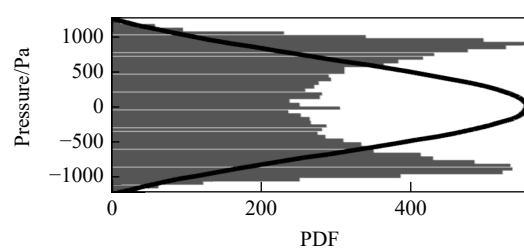
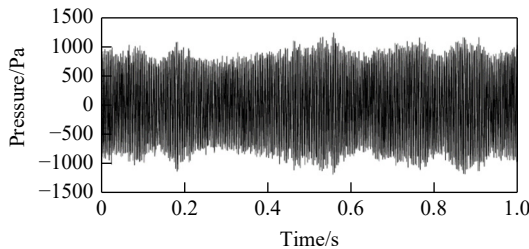
1.3 平均峭度 $\bar{K}_p$

在进行工况识别时,对于参数不变下的整个工况采用平均峭度 $\bar{K}_p$ 来表征。其定义为在工况时长内,针对信号 p ,采用时间尺度 δt_p 去平移整个工况区间获得 m 个 K_{pr}^* 的平均值:

$$\bar{K}_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_{pr_i}^* \quad (4)$$



(a) 稳定燃烧状态, $\bar{K}_p = 0.3398$



(b) CI状态, $\bar{K}_p = 1.4591$

在实际的不稳定燃烧过程中,FI经常是引起CI的诱因,因此典型的不稳定燃烧演变过程中,FI和CI经常混杂在一起。这种混杂信号表现为低频的FI信号上承载着高频的CI信号。如果单纯采用同一尺度的DP平均峭度来作为诊断参数,很难给出FI特征。

图1给出了燃烧室中DP信号的几种典型状态。每组试验数据的总时长为8 s,采样率为2 kHz,16 000个数据点。图中左侧为其中1 s时长的DP时序,右侧为8 s时长的压力概率分布(PDF),柱状图为统计值,实线为其正态分布拟合。其平均峭度 $\bar{K}_p$ 为按照式(4)计算的8 s平均值,即与正态分布的偏离。其中图1(a)为稳定燃烧状态,从PDF分布上看,信号基本接近随机信号, $\bar{K}_p = 0.3398$;图1(b)为CI状态,信号在频域上表现为有较强的单峰形态,PDF远远偏离正态分布, $\bar{K}_p = 1.4591$,该值与文献[22]的值是一致的(两者定义有区别);图1(c)为FI状态,该状态在低功率燃烧下会出现,信号的低频特征比较明显,其 $\bar{K}_p = 0.6012$,偏离正态分布的程度小于CI;图1(d)为CI前的FI状态,其高功率燃烧状态下贫油时易出现,表现为在间歇的低频FI中承载高频脉动(CI)。在通常的不稳定燃烧和燃烧状态转换中,图1(d)状态是经常出现的,该状态 $\bar{K}_p = 0.8428$,且振幅比图1(b)状态小,表明该状态比图1(b)稳定。但从波形来看,图1(d)状态表现出了很强的火焰间歇性,且图像显示其为强烈的FI状态,是触发后继CI的前导特征,仅根据 $\bar{K}_p$ 值很难分辨出该状态。此外由于0.1 s的时间尺度是针对CI特征的,不能覆盖FI的低频尺度。

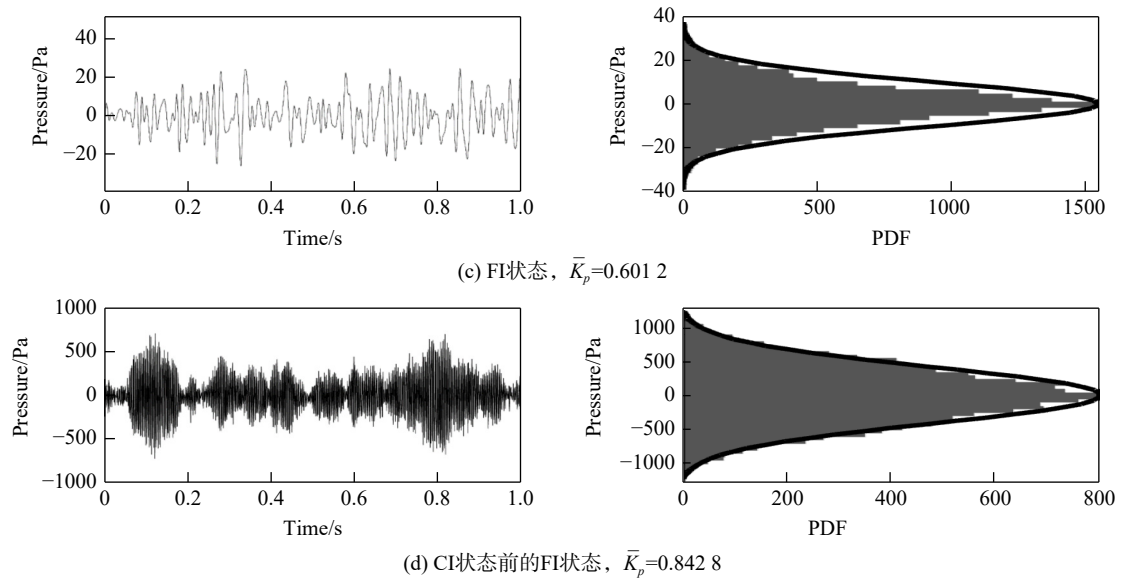


图1 几种典型燃烧状态下的燃烧室 DP 及其分布

Fig. 1 DP and its distribution of combustor in several typical combustion states

因此, 据图1可以得到: 稳定燃烧状态下 $\bar{K}_p \sim 0$, 接近正态分布; CI 状态下, $\bar{K}_p > 1$, 有比较好的区分度; FI 状态下, 采用单一的 $\bar{K}_p$ 难以描述包含两种脉动特征的不稳定状态, 不适合实时诊断使用。从 Nair 等^[17] 和后文描述的试验来看, FI 的特征频率要比 CI 小一个数量级, 适合 CI 的时间尺度并不能包含 FI 的多个周期。CI 的不稳定表现在 DP 振幅上, 相同工况下各时段的频率基本一致; 而 FI 表现为 DP 的间歇性, 其压力振幅在周期内是大幅度变化的。因此考虑从振幅的间歇性变化特征上来体现 FI 状态。

1.4 间歇性峭度 $\bar{K}_s$

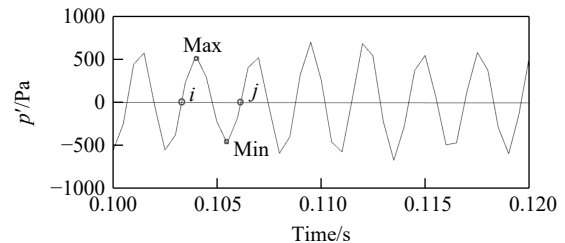
定义某时间点振幅 s_i 为信号 p 在该时刻前一个波形周期内的最大值减最小值:

$$s_i = p_{i,\max} - p_{i,\min} \quad (5)$$

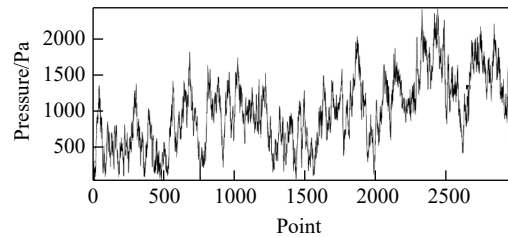
在数字信号处理中, 所谓一个周期的处理方式(如图2(a)): ①首先将信号 p 进行规范化, 所有信号减去平均值获得 p' ; ②遍历到一个 p' 值从负转正的位置作为一个周期的起点 i ; ③然后查找到紧邻的 p' 从负转正的位置作为终点 j ; ④统计 $i \sim j$ 之间的最大值和最小值, 计算振幅 s_i ; ⑤所有振幅形成的时间序列按式(4)计算 s_i 的平均峭度 $\bar{K}_s$ 作为间歇性峭度(图2(b)、图2(c))。

对图1中的3个典型工况(分别为稳定燃烧状态、CI 状态、CI 状态前的 FI 状态)进行 8 s 时长的平均计算, 结果如表1。 $\bar{K}_s$ 对 FI 不稳定具有敏感性, 且呈正相关; 在 CI 状态前的 FI 状态时,

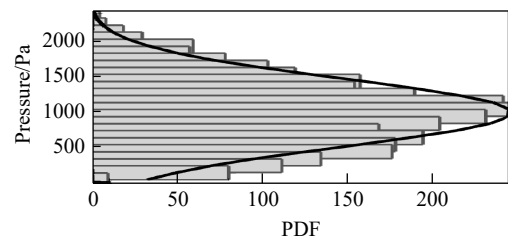
$\bar{K}_s=0.5588$, 更接近文献[17]的 FI 值。 $\bar{K}_p$ 对 CI 具有敏感性, 且呈正相关, 在 CI 状态前的 FI 状态时, $\bar{K}_p=0.8428$, 为非 CI 状态, 综合判断 CI 状态前的 FI 状态为 FI 的主要特征, 此时预警系统可以触发



(a) 振幅时序统计



(b) CI状态前FI状态的振幅时序统计



(c) 振幅分布

图2 振幅时序的计算

Fig. 2 Time sequence computation of the amplitude

报警,预示后继将大概率发生 CI 状态。因此在信号实时诊断上,可以结合这两个信号来确定燃烧状态: $\bar{K}_p > 1$ 为 CI 状态,值越大 CI 状态越强;当 $\bar{K}_p < 1$ 时,基于 $\bar{K}_s$ 判断为 FI 状态, $\bar{K}_s > 0.5$ 则为 FI 状态,值越大 FI 状态越强。从后文可以看到,在 $\bar{K}_p > 1$ 时, $\bar{K}_s$ 意义不明确,因为此时其受 $\bar{K}_p$ 的影响大。

表 1 典型工况下的 DP 平均峭度和间歇性峭度

Table 1 DP mean kurtosis and intermittent kurtosis under typical operating conditions

状态	$\bar{K}_p$	$\bar{K}_s$
稳定燃烧	0.339 8	0.325 5
CI	1.459 1	0.337 1
CI 前的 FI	0.842 8	0.558 8

由于 FI 的特征频率要比 CI 小一个数量级,因此本文从两个时间尺度上分别计算 DP 平均峭度和间歇性峭度,即在 δt_p 尺度上定义反映 CI 特征的峭度 $\bar{K}_{pr}$;在间歇性时间尺度 δt_s 上通过振幅时序定义反映 FI 特征的峭度 $\bar{K}_{sr}$,并定义 $\delta t_s = r \delta t_p$,其中 r 的大小需要建立规则去确定,优化后 $r=5$ 。本文后续将通过两个试验系统验证这两个指标对不稳定燃烧状态的判别效果,并建立两个最佳时间尺度的选择方法。

2 试验验证

本文在两个燃烧室模型上进行了燃烧不稳定状态诊断方法研究,分别为气态燃料的两级旋流扩散燃烧室(简称 G 燃烧室,工况号以 G 开头)和航空煤油燃料的贫油预混预蒸发(LPP)模型燃烧室(简称 L 燃烧室,工况号以 L 开头)。利用燃烧室压力脉动信号,并分别采用 δt_p 和 δt_s 去分析 $\bar{K}_{pr}$ 和 $\bar{K}_{sr}$,试图从这两个尺度上去确定燃烧状态。

扩散燃烧在发动机燃烧室中不是典型的导致 CI 的燃烧方式。其燃烧组织形式通常不会像预混燃烧那样贫油时形成油气比空间分布的间断性,所以后者更容易导致燃烧不稳定。但是扩散火焰与预混火焰相比,形态更具有完整性,容易从图像上检测火焰不稳定,形成合适的数字图像处理算法;同时也更容易证明在变工况状态下,单纯的 FI 也是引起 CI 的一个重要诱因。因此本文采用了 G 燃烧室来作为燃烧状态诊断研究相对清晰的对象。

两个试验中,选择 PCB-113B28 动态压力传

感器采集 DP,其量程为 0~344 738 Pa,灵敏度为 0.014 5 mV/Pa,压力传感器采用水冷保护。同时采用 CH253 型测光探测器来测量 CH* 光强信号以表征释热率脉动,其输入电压为 ± 12 V,光谱响应范围为 185~900 nm,峰值波长为 400 nm。采用 NI 采集卡同步采集所有信号,包括燃料流量和供燃料压力,采集频率为 2 kHz。

2.1 G 燃烧室试验

试验模型和测点布局如图 3 所示,主要包括进气段、燃烧室和排气段。燃烧所需空气由风机供给,通过外径 $d_{air}=50$ mm 的管道经两级轴向旋流器进入燃烧室。在燃烧室进口采用热线风速仪测量进气平均速度。燃料丙烷由直径 $d_{fuel}=12$ mm 的管路供给,经旋流器周向 12 个射流孔进入燃烧室。燃烧室长度 $a=300$ mm,横截面为正方形,边长 $l=100$ mm,两侧面设有石英玻璃观察窗,可用于高速摄影和 CH* 光强信号采集。燃烧室顶部布置有 4 个脉动压力测点以采集燃烧室内的 DP 信号。燃料流量由 AST10-H 热式气体质量流量控制器控制调节。

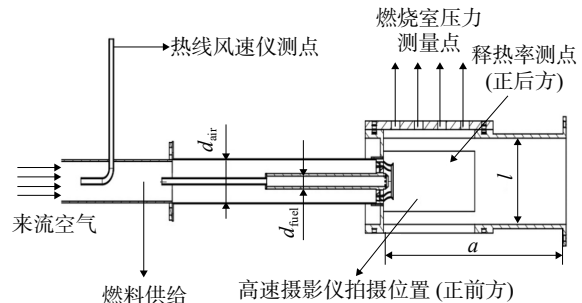


图 3 G 燃烧室不稳定燃烧状态诊断试验模型

Fig. 3 Test model of G combustor for unstable combustion state diagnosis

采用 3 组不同的空气进气流量($\dot{m}_a$)进行试验,每组流量下通过调节丙烷的供给量,即调节当量比 ϕ 来营造不稳定燃烧场。过程中每个工况信号时长为 8 s,采用 $\delta t_p=0.1$ s, $\delta t_s=0.5$ s 作为时间尺度去平移信号,分别计算 $\bar{K}_p$ 和 $\bar{K}_s$ 的平均值作为状态识别参数,具体如表 2 所示,其中 $Q=\dot{m}_g \times h_{lv} \times \eta$ 为燃烧功率, $\dot{m}_g$ 为燃料流量, h_{lv} 为燃料低位热值, η 为通过温升法测量的燃烧效率。同时结合火焰高速摄影图像和释热率脉动数据给了燃烧状态描述。该燃烧室在 CI 状态时主频在 330 Hz 左右,对火焰图像处理获得火焰 FI 频率在 20 Hz 左右,且随工况而改变^[16]。

表 2 G 燃烧室燃烧状态识别试验工况表

Table 2 Test conditions of combustion state identification in G combustor

工况	$\dot{m}_a/(g/s)$	Φ	Q/kW	$\bar{K}_p$	$\bar{K}_s$	状态
GA01	9.24	0.39	1.166	0.339 8	0.325 5	稳定
GA02	9.24	0.34	0.999	0.282 9	0.461 8	稳定
GA03	9.24	0.28	0.833	0.372 5	0.423 6	稳定
GA04	9.24	0.26	0.783	0.355 4	0.332 6	稳定
GA05	9.24	0.23	0.683	0.547 8	0.441 1	稳定
GA06	9.24	0.19	0.583	0.270 6	0.579 1	FI
GB01	9.85	0.42	1.333	0.299 6	0.410 3	稳定
GB02	9.85	0.37	1.166	0.316 2	0.442 8	稳定
GB03	9.85	0.32	0.999	0.319 6	0.464 3	稳定
GB04	9.85	0.26	0.833	0.433 4	0.473 3	稳定
GB05	9.85	0.24	0.749	0.776 3	0.549 3	FI
GB06	9.85	0.21	0.666	1.378 9	0.482 2	CI
GC01	11.00	0.38	1.333	0.314 3	0.366 6	稳定
GC02	11.00	0.33	1.166	0.358 2	0.334 6	稳定
GC03	11.00	0.28	0.999	0.842 8	0.558 8	FI
GC04	11.00	0.26	0.916	1.454 9	0.373 9	CI
GC05	11.00	0.24	0.833	1.458 8	0.469 6	CI
GC06	11.00	0.21	0.750	1.459 1	0.337 1	CI

图 4 给出了各工况前 1 s 的 DP 信号时序, 图 5 给出了 G 燃烧室各工况下, $\bar{K}_p$ 和 $\bar{K}_s$ 指标随当量比的变化趋势, 实际试验是按逐步降低当量比的方向来进行的。结合表 2 中的数据可看到:

1) 当量比较高时, 燃烧均表现为稳定状态, 即火焰稳定, 没有明显燃烧脉动和噪声, 表中标示为“稳定”。

2) GA 工况进气量相对较低, 直到 GA06 工况接近吹脱熄火时也没有出现高振幅的 CI 状态。GA 工况下所有的 $\bar{K}_p$ 均小于 1 (图 5(a) 所示), DP 信号始终比较接近正态分布, 表明该进气量下, 不能产生 CI。但是从图 5(b) 中可以看出, 在降当量比过程中, $\bar{K}_s$ 值有波动, 在油气比最低工况下 (GA06), 出现了 $\bar{K}_s > 0.5$, 此时波形也出现了微弱的间歇性, 这表明系统出现了明显的 FI 不稳定。

3) GB 工况进气量略有增加, 随着当量比的逐步降低, 至 GB06 工况诱发了 CI 状态, 此时压力振幅明显比其他稳定工况高, 振幅接近 1 kPa, 燃烧室内也出现了明显的燃烧噪声和火焰剧烈抖动。工况变化过程中, 随着当量比降低, $\bar{K}_p$ 和 DP 的振幅急剧增大, 至 GB06 工况时 $\bar{K}_p = 1.378 9 > 1$, 出现了较为明显的 CI, 与观察到的现象一致。而从 $\bar{K}_s$ 来看, 其在当量比变化过程中也是波动的, 至 GB05 工况时达到最大值, DP 波形也出现了明

显的间歇性变化, 此时火焰图像上也出现了漂离根部的火焰吹脱, 即出现了 FI。至诱发 CI 后 (GB06 工况), 间歇性峭度又减弱至 $\bar{K}_s = 0.482 2$, 反而说明此时 FI 相对 GB05 工况是稳定的。即在 CI 状态出现时, 火焰有可能是动态稳定的, 反而不易吹脱。

4) GC 工况的进气量继续增加, 在 GC03 工况时出现了 FI, 其后续 3 个工况的 $\bar{K}_p > 1$, 达到 CI 状态, 而且在诱发 CI 后, $\bar{K}_s$ 降低。

5) 这 3 组试验中, 均在 CI 状态前出现了 FI, 这说明在 FI 状态后, 继续减小当量比转为贫油燃烧的话, 可诱发 CI 状态的出现。因此针对 G 燃烧室的不稳定燃烧状态识别, 可以初步形成方法。首先在小尺度 δt_p 上计算 $\bar{K}_p$ 来监测 CI, $\bar{K}_p > 1$, 就可以判别为 CI; 如果 $\bar{K}_p < 1$, 此时燃烧并不一定是稳定的, 需要计算长尺度 δt_s 下的 $\bar{K}_s$, 如果 $\bar{K}_s > 0.5$, 则表明系统出现 FI。

通常来说, 火焰不稳定 FI 最直观的判断为测量火焰图像的稳焰位置是否发生漂移。例如对于简单的预混射流火焰, 测量火焰根部托举高度的变化可以判断 FI 程度; 然而对于旋流燃烧室, 判断 FI 状态则比较复杂。文献 [16] 通过对火焰高速图像进行数字图像处理, 观测到燃烧区火焰沿流向的最远扫掠位置变化可以作为 FI 程度的依

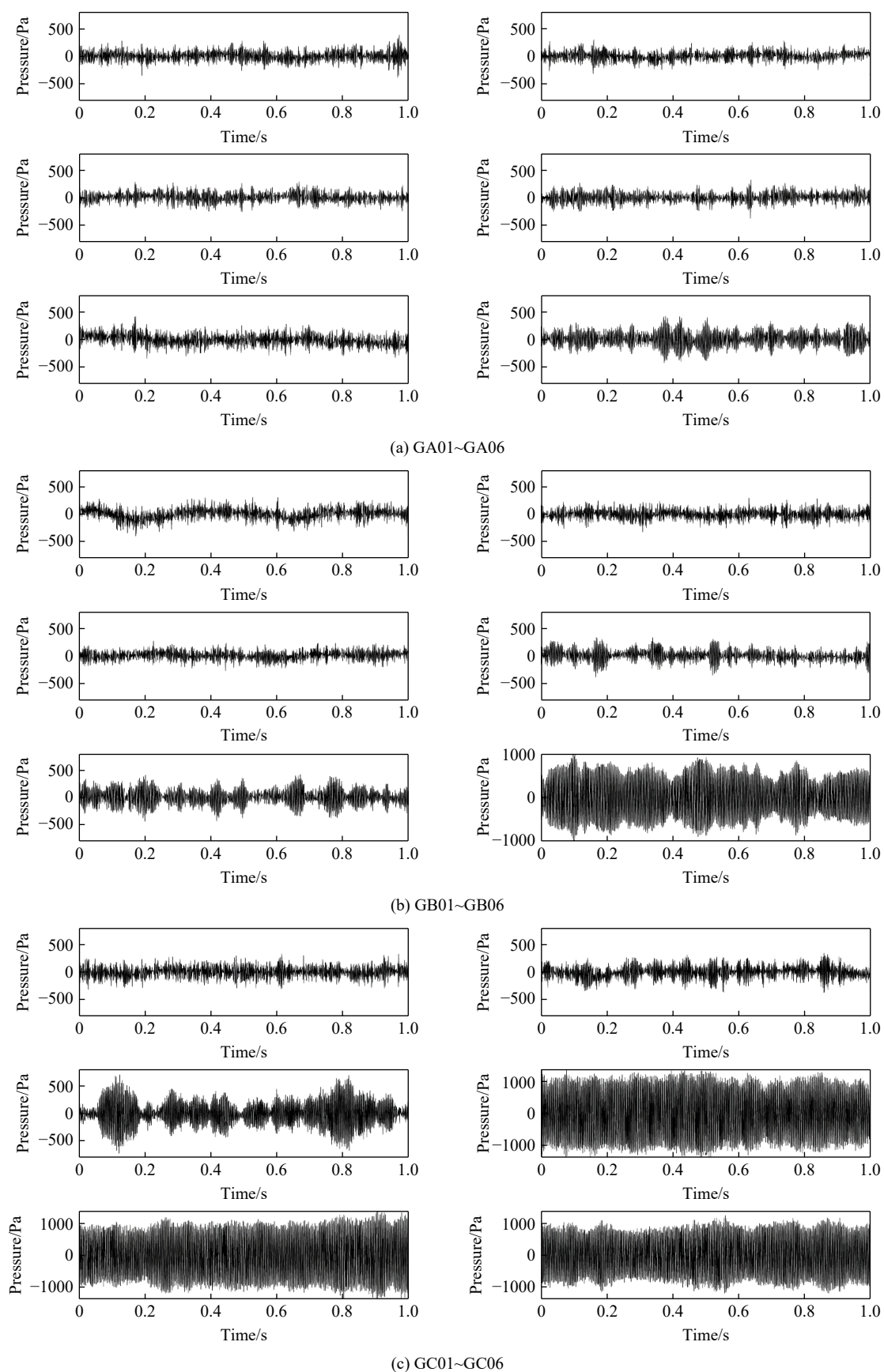
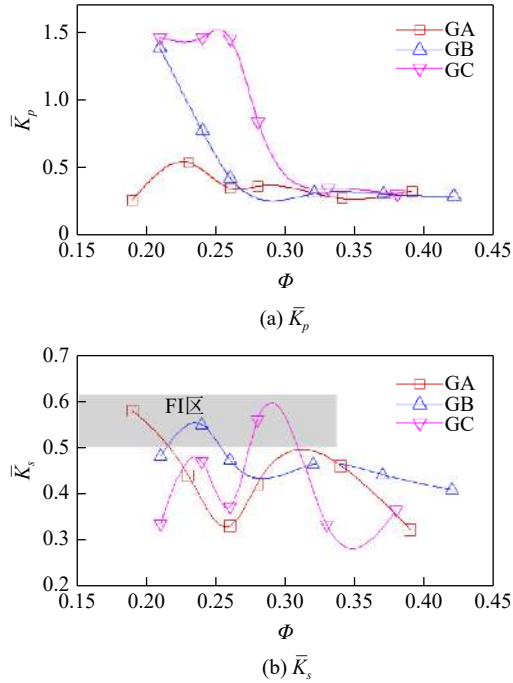


图 4 G 燃烧室试验 DP 信号

Fig. 4 DP signal of G combustor test

图5 G燃烧室不同当量比下 $\bar{K}_p$ 和 $\bar{K}_s$ Fig. 5 $\bar{K}_p$ and $\bar{K}_s$ of G combustor at different fuel equivalence ratios

据。图6为GC03工况的观测区火焰长度的脉动变化时序,其中低于1.38倍平均长度的脉冲被认为是火焰稳定,图6中被省略,保留的被认为是FI状态。对比图4中GC03压力脉动信号和图6脉冲信号可以看出:反映了间歇性强度的压力脉动较高密集区,例如图4中0.1、0.3、0.5、0.6、0.8s的位置信号,分别在图6中对应了火焰尾缘脉动较剧烈的时间位置,两者之间的同步性可以确定压力脉动中的大尺度间歇结构为FI所导致。

2.2 L燃烧室试验

为了进一步验证上述识别方法在接近真实的

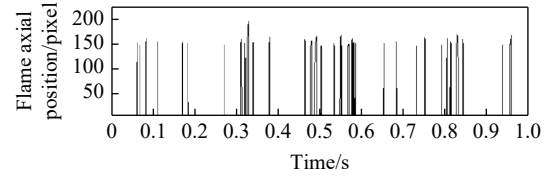


图6 GC03工况高速图像处理的火焰尾缘位置时序信号

Fig. 6 Time signal of flame trailing edge position using image processing under GC03 condition

燃烧室上应用的可行性,在L燃烧室上进行了试验验证,该试验系统如图7所示。试验在常温常压环境下进行,空气由罗茨风机供给,通过电加热器加热后进入燃烧室。燃烧室出口燃气经喷水降温后排入烟气处理装置后再排入大气。通过变频器调节风机频率实现进气流量控制,在加热器前安装有压差流量计测量空气流量。燃料为航空煤油,通过油泵供入。LPP模型燃烧室头部由一级径向主级旋流器和一个两级轴向值班级旋流器组成,燃烧区开有观察窗和DP测量开孔,通过CH*测量释热率,同时采用高速摄影拍摄火焰动态图像。

L燃烧室的试验工况如表3所示,共进行了3组不同空气流量下的变当量比试验,并分别在 δt_p 和 δt_s 尺度上计算了 $\bar{K}_p$ 和 $\bar{K}_s$ 指标。此燃烧室试验工况大部分燃烧状态处在CI状态,主要因为试验采用小进气量的常压试验,导致喷嘴雾化较差,形成油气比空间剧烈波动。图8给出了LA工况的DP波形。高速摄像的火焰图像经数字图像处理,采用前述G燃烧室中相同的火焰尾缘扫描位置的判断方法,确定了图8中LA01和LA02压力波动大尺度间歇结构是由FI引起。由于CI的原因,LB和LC的波形基本与LA03~LA06的波形

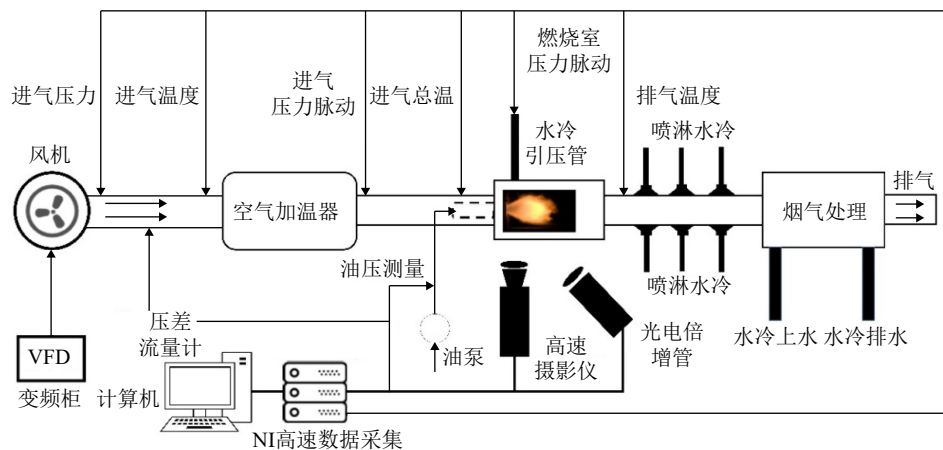


图7 L燃烧室不稳定燃烧状态诊断试验测量布局

Fig. 7 Measurement layout of L combustor for unstable combustion state diagnosis

差别不大,图中没有给出。

图 9 给出了 L 燃烧室各工况下,随着当量比变化 $\bar{K}_p$ 和 $\bar{K}_s$ 指标变化趋势。结合图 8 可看出: LA 工况在初始相对富油燃烧时(LA01 和 LA02 工况), DP 出现了低频的间歇性脉动,其 $\bar{K}_p$ 略小

于 1, $\bar{K}_s > 0.5$,从图像上也发现火焰规律性向后吹脱,因此这两个工况可定为 FI 状态;其余工况 $\bar{K}_p$ 均大于 1,但 $\bar{K}_s$ 也均大于 0.5,且图像上未看到明显的火焰吹脱,因此这些工况可定性为 CI 状态。由此可见 $\bar{K}_s$ 的统计值会受到 CI 的影响,继而可以

表 3 L 燃烧室燃烧状态识别试验工况表
Table 3 Test conditions of combustion state identification in L combustor

工况	$\dot{m}_a/(g/s)$	ϕ	Q/kW	$\bar{K}_p$	$\bar{K}_s$	状态
LA01	100	0.75	20.7	0.924 6	0.591 7	FI
LA02	100	0.73	20.1	0.964 5	0.937 8	FI
LA03	100	0.70	19.3	1.365 4	0.734 0	CI
LA04	100	0.68	18.7	1.375 0	0.829 4	CI
LA05	100	0.56	15.5	1.438 9	0.620 2	CI
LA06	100	0.49	13.5	1.449 6	0.619 8	CI
LB01	130	0.81	27.9	1.214 7	0.823 0	CI
LB02	130	0.77	26.5	1.226 1	0.928 7	CI
LB03	130	0.71	24.5	1.216 2	0.991 4	CI
LB04	130	0.70	24.1	1.174 8	1.126 7	CI
LB05	130	0.65	22.4	1.282 6	0.809 0	CI
LB06	130	0.56	19.3	1.399 5	0.633 9	CI
LC01	140	0.75	27.9	1.224 7	1.104 1	CI
LC02	140	0.71	26.4	1.277 3	0.847 1	CI
LC03	140	0.67	25.0	1.244 3	0.943 1	CI
LC04	140	0.65	24.2	1.222 7	0.907 7	CI
LC05	140	0.60	22.3	1.321 4	0.849 7	CI
LC06	140	0.56	20.8	1.318 8	0.872 6	CI

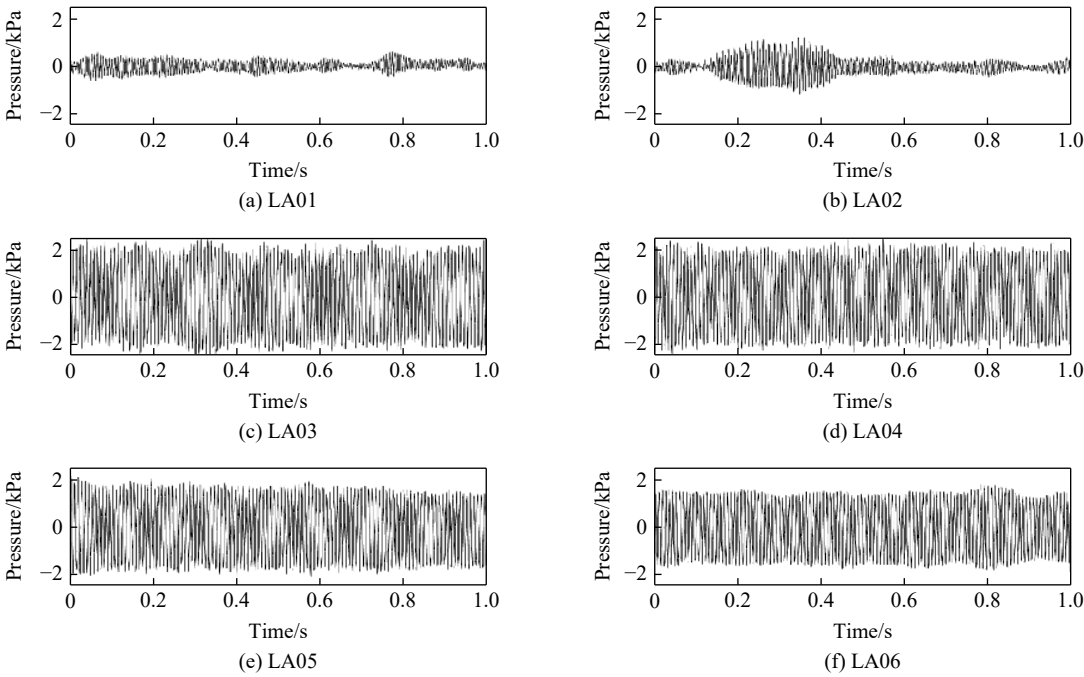


图 8 L 燃烧室 LA01~LA06 工况试验 DP 信号
Fig. 8 DP signal of L combustor test at condition LA01—LA06

初步认为: 在 $\bar{K}_p \leq 1$ 时, $\bar{K}_s > 0.5$ 可以作为 FI 不稳定判据, $\bar{K}_s$ 值越大, FI 越剧烈; $\bar{K}_p > 1$ 可以作为 CI 的判据, 此时 $\bar{K}_s$ 值受 $\bar{K}_p$ 的影响比较大, 对判定 FI 状态有干扰, 不过据 $\bar{K}_p$ 值确认处于 CI 状态, 就表明火焰本身是不稳定的。

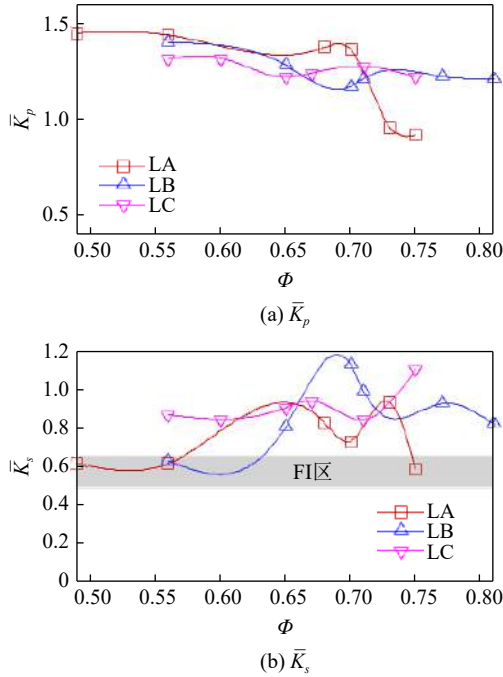


图9 L 燃烧室不同当量比下 $\bar{K}_p$ 和 $\bar{K}_s$
Fig. 9 $\bar{K}_p$ and $\bar{K}_s$ of L combustor at different fuel equivalence ratios

3 诊断方法与分析

3.1 诊断方法

上述 G 燃烧室和 L 燃烧室各工况采用了该信号时间尺度内的平均峭度值来作为燃烧状态识别判据。在实际的燃烧室试验中, DP 信号在时间方向上是连续变化的。为了实现在线诊断, 可采用短时间尺度, 对当前信号进行缓存, 信号时序存储到一定尺度后, 对当前的时间尺度内的数据进行峭度指标计算。

图 10 为 G 燃烧室变工况连续 DP 信号, 取其中 11 s 的变化过程分析。前 2 s 为稳定燃烧状态, 此时当量比较高, DP 幅值较低, 约 1 s 位置之后开始调低当量比, 直至 10.7 s 左右熄火。在燃烧阶段, 最高 DP 幅值是稳定燃烧时的 5 倍。根据图 10 数据, 采用式(4)定义, 分别计算和绘制瞬时压力峭度 $\bar{K}_{pr}$ 和间歇性峭度 $\bar{K}_{sr}$ 的时序分布, 如图 11 所示。其中 $\bar{K}_{pr}$ 采用时间尺度 $\delta t_p = 0.1$ s 计算均值, 两个 $\bar{K}_{pr}$ 点间隔时长为 $\delta t_p / 4$; 采用 $\delta t_s = 5\delta t_p$ 的时间

尺度计算 $\bar{K}_{sr}$ 。图 11 中显示的峭度为经过中值滤波后的值, 过滤了原始峭度值中的脉动性, 起到平滑信号的作用。由于峭度计算受时间尺度影响, 关于时间尺度的选取, 在后文讨论。

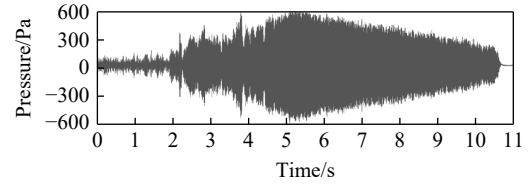


图 10 G 燃烧室变当量比下的连续 DP 信号
Fig. 10 Continuous time signal of DP under varied fuel equivalence ratio conditions in G combustor

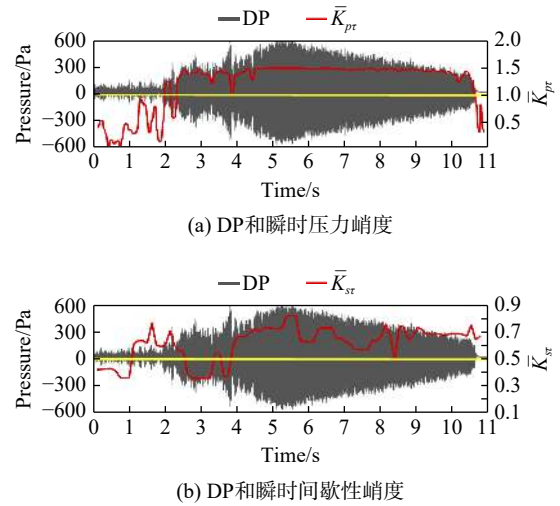


图 11 G 燃烧室变当量比下的瞬时峭度时序
Fig. 11 Time sequence of instantaneous kurtosis under varied fuel equivalence ratio conditions in G combustor

从 DP 信号看, 约 1 s 位置之后, 压力波出现较明显的间歇性: 1~2 s 间出现了不均匀的波动, 此时从视频图像上观察到, 火焰出现了不稳定, 但是压力幅值较低, 且没有明显的燃烧噪声, 但这期间 $\bar{K}_{pr} < 1$, $\bar{K}_{sr} > 0.5$, 可以明显标识出 FI 现象; 也标志了非 CI 的状态(图中黄线为 $\bar{K}_{pr} = 1$); 2 s 后当量比下调过程中, DP 振幅先增加, 然后降低, 直到 10.7 s 熄火前, $\bar{K}_{pr}$ 均大于 1, $\bar{K}_{sr}$ 有波动, 按前述分析, 此阶段 $\bar{K}_{sr}$ 值不作为状态判断标识, 仅依据 $\bar{K}_{pr}$ 可判定此阶段为 CI 状态; 快接近熄火时 ($t = 10.65$ s 左右), $\bar{K}_{pr} < 1$, $\bar{K}_{sr} > 0.5$, 按前述判据, 此时应为 FI 状态, 与火焰熄火前的不稳定状态恰好一致, 即 CI 状态消失, FI 不稳定占主导地位。

图 12 为 L 燃烧室的变工况连续 DP 信号, 取其中 50 s 的变化过程分析。其中前 5 s 为相对稳

定的燃烧状态。从第 5 s 起,开始降低当量比,到 22 s 时出现 CI,且直接达到最大振幅。这主要是因为在小空气流量工况下,煤油雾化质量较差,降低当量比时,油气掺混变化的顺滑性比丙烷燃料的 G 燃烧室差,因此没有出现 DP 的渐变过程。在 5~22 s 之间可明显看到 DP 间歇性脉动的波形,此时图像观察到的火焰也有明显吹脱状态。采用与 G 燃烧室相同的方法处理得到瞬时压力峭度 $\bar{K}_{pr}$ 和间歇性峭度 $\bar{K}_{sr}$ 的时序分布,如图 13 所示。可看到整个过程中 $\bar{K}_{pr}$ 的波动性较大,22 s 之前 $\bar{K}_{pr}$ 值大部分小于 1, 22~44.55 s 之间, $\bar{K}_{pr} > 1$; 而 $\bar{K}_{sr}$ 在 5~44.55 s 之间都大于 0.5。按照前述的识别方法,将 5~22 s 之间的燃烧判定为 FI 状态, 22~44.55 s 期间判定为 CI 状态也是符合实际的。此外,在熄火前后 ($t=44.55$ s 左右), $\bar{K}_{pr} < 1$, $\bar{K}_{sr} > 0.5$, 这短暂时间内 CI 和 FI 状态的转换规律也与 G 燃烧室相同。

通过上述分析,可证明采用 $\bar{K}_{pr}$ 和 $\bar{K}_{sr}$ 两个参数形成燃烧不稳定组合判据是合理、有效的。但是在图 11(b) 和图 13(b) 上还注意到,在熄火后较长时间内 $\bar{K}_{sr} > 0.5$, $\bar{K}_{pr} < 1$, 但不能判定为 FI 状态。

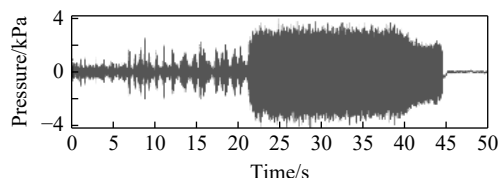
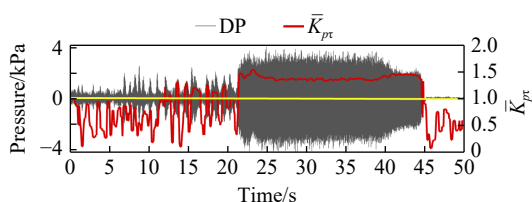
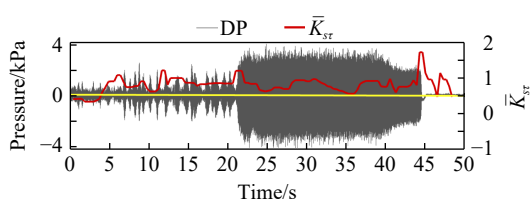


图 12 L 燃烧室变当量比连续 DP 信号

Fig. 12 Continuous time signal of DP under varied fuel equivalence ratio conditions in L combustor



(a) DP 和瞬时压力峭度



(b) DP 和瞬时间歇性峭度

图 13 L 燃烧室变当量比连续瞬时峭度时序

Fig. 13 Time sequence of instantaneous kurtosis under varied fuel equivalence ratio conditions in L combustor

这个值是由冷态空气流中的旋流等因素造成的流动间歇性导致的。因此要判断试验全程期间的 FI 状态,还需要结合其他参数判断是燃烧还是冷态工况。

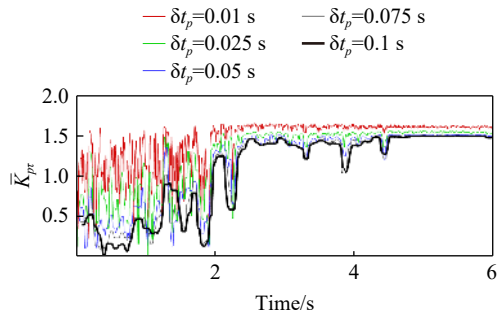
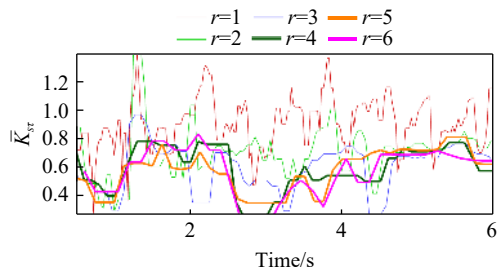
3.2 时间尺度处理策略

在文中第 3.1 节的描述和文献 [4,21-22] 中都指出峭度计算值依赖于时间尺度,即 DP 峭度和间歇性峭度计算需要给定合理时间尺度 δt_p 和 δt_s 才有意义,因此最佳时间尺度的确定对决定 $\bar{K}_{pr}$ 和 $\bar{K}_{sr}$ 能否作为燃烧不稳定状态判据至关重要。由于 CI 和 FI 两者反映的物理过程不同,需要从各自特征来确定时间尺度。FI 的频率要远低于 CI 频率,所以 FI 的时间尺度要远大于 CI 时间尺度,才能检测到 FI 特征。时间尺度越短,计算结果的脉动性越剧烈,不利于工况识别;反之,则结果脉动性降低,输出结果平顺性更好,有利于工况识别。但是时间尺度越大,对工况的敏感性下降,预测的提前量会降低,甚至丧失了预警价值。

本文采用尺度无关性来确定最佳时间长度:从较小的时间尺度逐步增加时长,到统计结果基本变化不大时,将该时间尺度作为最佳值。比这个值更大的尺度,没有预警价值,比这个值小,信号脉动性大,不利于在线预警。本文基于产生 CI 前会出现 FI 的现象,通过对 FI 的识别来预测后继 CI 出现的可能性,从而实现预警。

图 14 为 G 燃烧室不同 δt_p 尺度 (0.01~0.1 s) 下 $\bar{K}_{pr}$ 的计算结果的对比。可看到:在 0.01 s 和 0.025 s 时,在非 CI 段 (0~2 s) $\bar{K}_{pr}$ 波动剧烈,在 CI 段 (2 s 后) $\bar{K}_{pr}$ 波动幅度逐步降低直至平稳。因此尺度无关性主要通过 CI 段上数值的差异来判断。从图上可看到 0.05、0.075 s 和 0.1 s 三个时间尺度的 CI 段 $\bar{K}_{pr}$ 值基本接近,而且随着 δt_p 的增大,非 CI 段的脉动降低,有利于 FI 状态判别。由此可认为:当燃烧处于 CI 状态时,时间尺度的影响较小;在非 CI 状态时,时间尺度越大, $\bar{K}_{pr}$ 峭度值脉动越小。因此,本文选择了 $\delta t_p = 0.1$ s 作为 DP 峭度的最佳计算尺度。

对于间歇性峭度 $\bar{K}_{sr}$ 的计算,其时间尺度 δt_s 文采用 δt_p 的倍数关系确定: $\delta t_s = r \delta t_p, r \geq 1$ 。为了获得合适的倍率 r ,同样采用尺度无关性方法确定。图 15 为 G 燃烧室上不同尺度倍率 r (1~6) 下的 $\bar{K}_{sr}$ 计算值的对比。可看到:在 r 比较小的时候,其值受到 $\bar{K}_{pr}$ 的影响较大,同时脉动也大;当 $r=4, 5, 6$ 时,图中的 3 条线(粗线)比较接近。因此本文选取 $r=5$ 来作为合理倍率。

图 14 G 燃烧室不同时间尺度下的 $\bar{K}_{pr}$ Fig. 14 $\bar{K}_{pr}$ under different time scales in G combustor图 15 G 燃烧室不同尺度倍率下的 $\bar{K}_{sr}$ Fig. 15 $\bar{K}_{sr}$ under different time scale factors in G combustor

至于 L 燃烧室, 由于其 CI 主频 (120 Hz) 比 G 燃烧室低, FI 频率 (20~30 Hz) 接近。所以采用和 G 燃烧室相同的时间尺度进行 $\bar{K}_{pr}$ 和 $\bar{K}_{sr}$ 计算和分析是合适的。

综上所述, 通常的峭度定义反映时序信号偏离正态分布的程度, 由于燃烧不稳定信号大多为负峭度, 所以直接采用该定义不太符合不稳定性越大峭度越大的直观规律。本文通过分析 FI 产生时的低频间歇性脉动特征, 结合火焰图像分析, 提出的燃烧不稳定状态的 DP 平均峭度和间歇性峭度组合判据方案, 能够有效诊断出燃烧 CI 和 FI 状态。

4 结 论

本文提出了一种基于两种时间尺度下的规范化峭度指标诊断燃烧不稳定状态的方法, 并分别在扩散燃烧和预混燃烧室中进行了分析和验证。形成了一些方法和结论如下:

1) 采用规范化后的平均峭度指标能够形成峭度值和不稳定燃烧程度间的正向指示, 方便形成简洁、有效的燃烧不稳定状态诊断方法。

2) 对 DP 信号直接进行峭度分析, 可以获得 CI 状态判据, 但是不适用于 FI 诊断。通过在更大时间尺度上定义间歇性峭度指标, 两者相结合, 通过验证与分析, 建立了燃烧全过程的不稳定状

态判定准则。在燃烧状态下, $\bar{K}_{pr} \leq 1$ 且 $\bar{K}_{sr} \geq 0.5$ 时为 FI 不稳定, 随后有触发 CI 的可能性, 同时可以此作为 CI 的预警指标; $\bar{K}_{pr} > 1$ 为 CI 状态, 此时 $\bar{K}_{sr}$ 受 CI 影响, 不作为判据使用。

3) 峭度统计值与时间尺度相关, DP 峭度随着时间尺度 δt_p 的增加, 会趋于一致, 采用一致性下最小的时间尺度作为其最佳时间尺度, 以及采用 δt_p 的倍数关系来确定间歇性峭度的最佳时间尺度的方法是合适的。

参考文献:

- [1] NATANZON M S, CULICK F E C. Combustion instability[M]. Moscow: AIAA, 1999.
- [2] LIEUWEN T C, YANG V. Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience fundamental mechanisms and modeling[M]. Reston, US: AIAA, 2005: 68-73.
- [3] CHANDRACHUR B, O'CONNOR J, RAY A. Data-driven detection and early prediction of thermoacoustic instability in a multi-nozzle combustor[EB/OL]. [2022-05-22]. <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1820495>.
- [4] SONG W J, CHA D J. Temporal kurtosis of dynamic pressure signal as a quantitative measure of combustion instability[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104(1): 577-586.
- [5] SANTOS E A, MARTINS C A, JÚNIOR C L N. A new approach to treating pressure oscillations in combustion instability phenomena[J]. Applied Acoustics, 2016, 114: 27-35.
- [6] ROUWENHORS D, POLIFKE W, HERMAN J. Online monitoring of thermoacoustic eigenmodes in annular combustion systems based on a state space model[R]. ASME Paper GT2016-56671, 2016.
- [7] KOBAYASHI H, GOTODA H, TACHIBANA S. Nonlinear determinism in degenerated combustion instability in a gas turbine model combustor[J]. Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 510(15): 345-354.
- [8] BUSCHHAGEN T, GEJJI R, PHILO J, et al. Experimental investigation of self-excited combustion instabilities in a lean, premixed, gas turbine combustor at high pressure[R]. ASME Paper GT2017-64614, 2017.
- [9] LAERA D, BERTOLOTTO E, FERRANTE A, et al. Modelling of thermoacoustic combustion instabilities phenomena: application to an experimental rig for testing full scale burners[R]. ASME Paper GT2014-25273, 2014.
- [10] WORTH N A, DAWSON J R. Effect of equivalence ratio on the modal dynamics of azimuthal combustion instabilities[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3743-3751.
- [11] HALE A A, COTHRAN W D, SABO K M. Analysis technique to determine the underlying wave structure of combustion instabilities from surface mounted high response static pressure sensors[R]. ASME Paper GT2018-75509, 2018.
- [12] BALUSAMY S, LI L B, HAN Z, et al. Nonlinear dynamics of a self-excited thermoacoustic system subjected to acoustic forcing[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3229-3236.
- [13] BHATTACHARYA A, GUPTA B, HANSDA S, et al. Lean blowout phenomena and prior detection of lean blowout in a premixed model annular combustor[R]. ASME Paper GTINDIA2019-2491, 2019.

- [14] 金如山, 索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [15] ANGELLO L. Tuning approaches for DLN combustor performance and reliability[R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute Report 1005037, 2005.
- [16] 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)
- [17] NAIR S, LIEUWEN T. Acoustic detection of imminent blowout in pilot and swirl stabilized combustors[R]. ASME Paper GT2003-38074, 2003.
- [18] 郗涛, 杨威振. 优化VMD与CNN在齿轮箱故障诊断方面的研究[EB/OL].[2022-05-22]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200521>.
- [19] 侯泽林. 旋转机械故障诊断的研究现状及发展前景[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(4): 210-213. HOU Zelin. Research status and development prospect of fault diagnosis of the rotating machinery[J]. *Mechanical Research and Application*, 2021, 34(4): 210-213. (in Chinese)
- [20] 吕凯波, 娄培生, 谷丰收, 等. 基于声压信号能量峭度的早期切削颤振预警技术研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 50-55. LÜ Kaibo, LOU Peisheng, GU Fengshou, et al. A study on early chatter monitoring based on energy kurtosis index of acoustic signals[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(20): 50-55. (in Chinese)
- [21] JOO S, CHOI J, LEE M C, et al. Prognosis of combustion instability in a gas turbine combustor using spectral centroid & spread[EB/OL]. [2022-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120180>.
- [22] CHOIB J, CHOI O, LEE M C, et al. On the observation of the transient behavior of gas turbine combustion instability using the entropy analysis of dynamic pressure[EB/OL]. [2022-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110099>.

(编辑: 陈 越)