

结合系统辨识的甲烷掺氢预混 火焰热声稳定性研究

郑鹏飞, 李祥晟, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究甲烷掺氢燃料对燃气轮机燃烧室热声振荡特性的影响,利用计算流体力学结合系统辨识(CFD-SI)的方法对某旋流预混燃烧室进行了数值研究。在非定常 CFD 模拟中提取上游速度与火焰整体热释放率波动的时间序列,并通过相关性分析进行系统辨识,获取了不同甲烷掺氢比下的火焰传递函数(FTF),并结合低阶网络模型对燃烧室热声不稳定性进行了分析。结果表明,随着体积掺氢比的提高,火焰逐渐由“V”形变为“M”形,燃烧器出口处的涡结构先形成后消失,这导致了燃烧室热声振荡特性的改变。在体积掺氢比低于 30% 时,火焰响应不发生较大变化,燃烧室振荡频率小幅提高;当掺氢比在 30%~60% 时,火焰对低频的响应逐渐增强,对高频响应先增强后减弱,燃烧室在 200 Hz 附近热声模态的振荡消失,火焰稳定性增强,但高频纯声学模态被激发;而当掺氢比达到 60% 时,燃烧室内重新出现热声模态的振荡。对于以天然气作为燃料的燃气轮机,适当的掺氢比能改善燃烧室内的热声不稳定性,但氢气加入会更容易激发燃烧室的高频纯声学模态,使其在高频范围内出现振荡。

关键词: 甲烷掺氢;热声振荡;火焰传递函数;低阶网络模型

中图分类号: TK40 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202306016 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0142-10

Study of Thermoacoustic Stability of Hydrogen-Mixed Methane Premixed Flame Combined with System Identification

ZHENG Pengfei, LI Xiangsheng, FENG Zhenping

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To study the influence of hydrogen-mixed methane fuel on the thermoacoustic oscillation characteristics of gas turbine combustor, a swirl-stabilized premixed combustor was numerically studied in this paper by means of computational fluid dynamics combined with system identification (CFD-SI). The time series of upstream velocity fluctuation and the overall heat release rate fluctuation were extracted from one transient CFD simulation, then the flame transfer functions (FTFs) for different hydrogen mixing ratio were obtained by correlation analysis. Furthermore, the FTFs were used in the low-order network model to analyze the thermoacoustic instability of the combustor. The results showed that with the increase of hydrogen mixing ratio, the flame gradually deforms from “V” to “M” shape, and the vortex structure at the outlet of the burner first forms and then disappears, which leads to the change of the thermoacoustic oscillation characteristics.

收稿日期: 2022-12-06。 作者简介: 郑鹏飞(1996—),男,硕士生;李祥晟(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家科技专项资助项目(J2019-III-0020-0064)。

网络出版时间: 2023-03-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230321.1635.002.html>

tion characteristics of the combustor. When the ratio is lower than 30%, the flame response does not change significantly, and the oscillation frequency increases slightly. When the ratio is in the range of 30%—60%, the flame's response to low frequency is gradually enhanced, and the response to high frequency is first enhanced and then weakened. And the thermoacoustic oscillation of the combustor near 200 Hz disappears, which means the flame stability enhanced, but a high-frequency pure acoustic mode is excited. And when the ratio reaches 60%, the thermoacoustic oscillation reappears in the combustor. For gas turbines fueled by natural gas, a proper hydrogen mixing ratio can improve the thermoacoustic stability in the combustor, but the addition of hydrogen can more easily stimulate a high-frequency pure acoustic mode of the combustor, making it oscillate in a high frequency range.

Keywords: hydrogen-mixed methane; thermoacoustic oscillation; flame transfer function; low-order network model

氢气是一种重要的清洁无碳能源,用氢气代替天然气或将氢气掺混到天然气中,对二氧化碳减排有重要影响。氢气具有独特的存储能量的能力,因而为了减少发电产生的温室气体排放以减轻其对气候变化的影响,越来越多的学者和研究机构开始关注利用氢气发电的可能性。然而,氢气的加入会使燃料特性发生改变,燃烧过程中的声学特性也会随之改变,对掺氢后的热声不稳定性也需要做进一步的研究。

燃气轮机燃烧室中出现的热声不稳定性不仅会增加噪声或污染物(如未燃烧的碳氢化合物或氮氧化物)的排放,还会产生高幅值的压力波动,从而导致燃烧室部件的损坏^[1]。因此,在燃气轮机的早期设计阶段分析燃烧不稳定性极为重要,这一工作可通过低阶网络模型进行。该方法是对燃烧室进行热声不稳定性分析的一种有效方法,它将系统声学 and 扰动火焰响应的计算解耦,其中声波的产生、传播和反射/传输由低阶声学网络模型获得,声学干扰引起的火焰的不稳定放热,通过线性分析的火焰传递函数(FTF)或非线性分析的火焰描述函数(FDF)来表征。这一方法的优点是能够快速获取燃烧室中火焰-声相互作用模态的频率与增长率^[2]。

FTF 包含火焰响应的信息,是分析燃烧室热声不稳定性的关键,可以通过实验、解析模型或数值模拟来获取,国内外学者针对 FTF 开展了大量研究。实验方面, Jones 等^[3]证明了火焰特征长度的改变会对 FTF 增益峰值产生较大影响。Bunce 等^[4]进一步证明了 FTF 特性的变化源自于湍流火焰速度的改变。刘石等^[5]研究了甲烷旋流预混火焰的 FTF,表明其在各当量比下都具有低通特性,且增益

峰值会随当量比增加而向高频偏移。于丹等^[6]指出涡环形成的时滞对 FTF 的相位有较大影响,是研究燃烧不稳定性的关键。FTF 解析模型在层流火焰的研究中应用较多,如经典的 $n\tau$ 模型,而更先进的模型基于火焰面波动的机制与线性化的 G 方程建立^[7-8]。Palies 等^[9]在文献[8]的基础上推导了湍流火焰的 FTF 解析模型,但在相位上的预测结果不佳。传统的数值模拟方法与实验过程类似,通过在燃烧室上游施加不同频率的正弦波激励,提取数据后通过频谱分析获取各频率对应的 FTF。由于数值模拟的便捷性,许多学者通过此方法来研究火焰的 FTF^[10-11]。

然而,FTF 的实验测定昂贵且困难,并且需要长时间的运行测试以及复杂的后处理过程,FTF 的解析模型又难以准确预测旋流预混火焰的动态响应,传统的数值模拟方法由于是单频率激励,需要进行大量模拟才能覆盖所研究的所有频率范围。当对燃烧室线性响应进行研究时,可以利用计算流体力学结合系统辨识(CFD-SI)的方法,通过一次模拟获得火焰在所研究频率范围内的 FTF。

CFD-SI 方法最先由 Gentemann 等^[12]提出并验证, Giauque 等^[13]通过与传统谐波激励方法进行对比证明了该方法的可靠性,该方法逐渐被用于燃烧室热声特性的研究中。Komarek 等^[14]利用该方法研究了理想预混火焰对旋流数与速度波动的响应,并在此基础上建立了一种基于对流时滞的 FTF 解析模型。Tay 等^[15]通过 CFD-SI 方法对一种旋流预混燃烧室进行了一系列的研究,探究了燃烧室壁面热边界条件、壁面约束比等条件对 FTF 的影响,并在所获得的 FTF 基础上利用低阶网络模型对燃

烧室进行了稳定性分析。Andreini 等^[16]对一种小型预混燃烧室进行了 FTF 提取并利用有限元方法对其进行了稳定性分析。杨旻等^[17]利用该方法识别 FTF 并对多种火焰进行了研究,结果表明火焰仅对低频段响应明显,且工况的不同会影响响应频率带的分布。王博涵等^[18]通过该方法识别了甲烷与甲烷掺氢预混火焰的 FTF,并指出在掺氢与低限制比条件下扰动与热释放相位差更小。此外,CFD-SI 方法已经成功应用到了工业燃气轮机的稳定性分析中^[19]。在甲烷掺氢方面, Kim 等^[20]通过实验测得了甲烷预混火焰的 FTF 并探究了掺氢的影响,氢气的掺入使火焰在燃烧动力学方面更稳定,但更易与系统的高频声模态耦合。张晓宇等^[21]的研究表明随着氢气体积分数的增加,热声振荡的范围会逐渐增大,燃烧室振荡模态也会有所改变。昌运鑫等^[22]的实验表明当体积掺氢比较低时燃烧室内的压力振荡变化不大,但随着掺氢比的提升,压力波动振幅逐渐增大,更易发生振荡燃烧。

目前,国内在燃烧室热声稳定性研究领域已经开展了一定的研究,但基于 CFD 结合系统辨识方法预测燃烧稳定性的研究相对较少,对甲烷掺氢后的热声特性也尚未完全了解。本文对贫预混条件下甲烷与甲烷掺氢火焰进行了数值模拟,基于 CFD-SI 方法获取其 FTF,并结合低阶网络模型对燃烧室稳定性进行了分析。

1 理论方法

1.1 CFD-SI 方法

由于不存在当量比波动,理想预混火焰对上游扰动的响应表现为对质量流量(即速度)的响应,当上游速度波动传播到火焰前锋时会引起火焰形状、表面积等发生改变,从而引起热释放率的波动。其传递函数可表示为

$$\text{FTF}(\omega) = \frac{Q'(\omega)/\bar{Q}}{u'_b(\omega)/\bar{u}_b} \quad (1)$$

式中: Q' 、 u'_b 分别为燃烧室体积积分热释放率波动与上游参考平面处速度的波动,在非定常模拟中提取并用其平均值归一化。

当扰动幅值较小时,可将理想预混火焰视作一个单输入单输出(SISO)的线性时不变因果系统,其特性可完全由其单位脉冲响应(UIR)来表示^[16]。CFD-SI 方法是基于 Wiener-Hopf 方程的最优线性最小二乘估计,所以也被称为 Wiener-Hopf 方法,基本过程如图 1 所示。

通过非定常 CFD 模拟中施加宽带激励,提取燃烧室热释放率波动与速度波动的时间序列分别作为系统的响应 r 与输入信号 s ,然后计算其互相关变量与自相关矩阵分量

$$c_i = \frac{1}{N-L+1} \sum_{k=L}^N s_{k-i} r_k, \quad i = 0, \dots, L \quad (2)$$

$$\Gamma_{ij} = \frac{1}{N-L+1} \sum_{k=L}^N s_{k-i} s_{k-j}, \quad i, j = 0, \dots, L \quad (3)$$

得到互相关变量与自相关矩阵后,求解 Wiener-Hopf 方程便能得到系统的 UIR

$$\mathbf{\Gamma} \mathbf{h} = \mathbf{c} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{h}$ 为系统 UIR 的系数向量; $\mathbf{\Gamma}$ 为自相关矩阵; $\mathbf{c}$ 为互相关变量。UIR 在时域上表示了系统的特性,通过 z 变换可得到系统频域上的特性,即

$$\text{FTF}(\omega) = \sum_{k=0}^L h_k e^{-i\omega \Delta t} \quad (5)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率; Δt 为采样时间间隔。

利用相关性分析求解 UIR 的方法本质上是通过 Wiener 滤波器最小化噪声影响的过程。其中,滤波器阶数 L 是一个可调参数,其选择的原则是确保滤波器的内存 ($\tau_{\text{mem}} = L\Delta t$) 不小于系统的任何时滞^[23]。

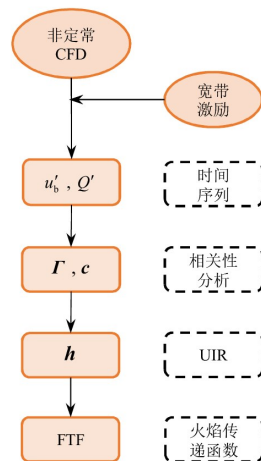


图 1 CFD-SI 方法基本过程

Fig. 1 The basic process of CFD-SI method

1.2 激励信号

激励信号的选择对于识别过程的准确性有很大的影响,由于脉冲信号在时域上较难实现且容易产生较大误差,通常选择宽带信号对系统进行激励。系统识别中常用的宽带信号有叠加正弦(SINE)信号、宽带白噪声(WN)信号与离散随机二进制

(DRBS)信号 3 种。文献[24]的研究表明 DRBS 信号具有较低的波峰因子,激励特性更好。本文选用 DRBS 信号对燃烧室上游速度进行激励,DRBS 信号具有如下形式

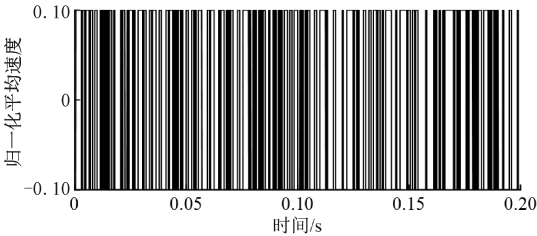
$$u(n\Delta t) = u_0 + u_0 A \text{sgn}(\text{rand}(n) - 0.5) \quad (6)$$

式中: u_0 为入口平均速度; $u(n\Delta t)$ 为宽带激励后的入口速度; A 为激励信号幅值; $\text{rand}(n)$ 为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数; $\text{sgn}(\)$ 为符号函数,只输出 ± 1 。此外,本文对 DRBS 信号进行了滤波以对其频率进行限制

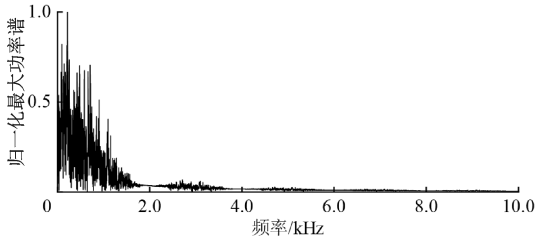
$$P_{\text{clock}} = \frac{f_{\text{nyq}}}{f_c} \quad (7)$$

$$u_{\text{filt}}(n\Delta t) = \begin{cases} u(n\Delta t), & n = 1 \\ u(m\Delta t), & n = mP_{\text{clock}} \\ u((n-1)\Delta t), & n \neq mP_{\text{clock}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_{\text{nyq}} = 1/2\Delta t$ 为系统的奈奎斯特频率; f_c 为滤波器截止频率; $u_{\text{filt}}(n\Delta t)$ 为滤波后的入口速度; m 为正整数。信号的设计基于 Matlab 平台进行,利用随机函数产生了截止频率为 1 000 Hz 的 DRBS 信号,其时域与频域特性如图 2 所示。可以看出,通过限制频率以后 DRBS 信号高频段的信息被有效过滤,信号功率主要集中在低频范围内,由于燃烧室轴向热声振荡通常在低频范围内出现,这样的信号在 FTF 的识别过程中会具有更高的信噪比,有利于减小识别过程的误差。信号自相关特性如图 3 所示,可以看出该信号具有白噪声特性,能满足激励信号低相关性的要求。



(a)DRBS 信号的时域分布



(b)DRBS 信号的功率谱

图 2 截止频率为 1 000 Hz 的 DRBS 信号

Fig. 2 DRBS signal with cut-off frequency of 1 000 Hz

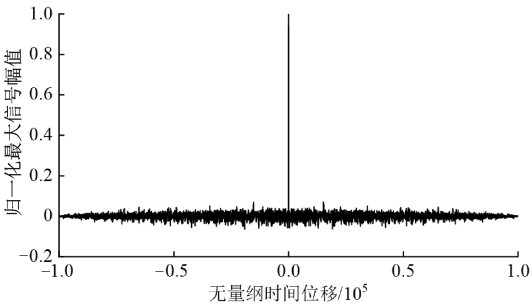


图 3 DRBS 信号的自相关

Fig. 3 Autocorrelation of DRBS signal

1.3 低阶网络模型

低阶网络模型的基本思想是将热声系统划分为声学的网络单元,每个单元对应系统的特定组件,例如管道、喷嘴或孔口、火焰、某种声学边界等。单元之间的未知量的耦合关系被组合成单元的传递或散射矩阵,所有网络元素的传递矩阵系数组成网络的系统矩阵,然后求解代数问题。

在线性声学和谐波时间相关性的假设下,利用网络模型,将系统动态特性在频率空间中表示。系统的未知量是在单元终端处声学变量的复值幅度。随后使用线性声学方程或经验输入方程式来提供声学变量,即每个单元上压力 p' 和速度 u' 的扰动(或黎曼不变量 f 和 g)之间的耦合关系

$$\begin{bmatrix} p'_u \\ u'_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'_d \\ u'_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ g_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_u \\ g_u \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$p'(x,t) = \rho c (f + g) \quad (11)$$

$$u'(x,t) = f - g \quad (12)$$

式中 T, G 为声学传递矩阵。

2 数值模型

2.1 形体和网格

数值计算所采用的燃烧室形体为 Richards 等^[25]在美国能源部国家技术实验室(NETL)建立的单喷嘴燃烧室。NETL 实验装置示意图如图 4 所示,装置主要由进气室、燃烧室、可变截面耐火活塞以及排气段组成。预热空气通过轴向旋流器并与燃料充分混合后进入燃烧室,旋流器由 11 个安装在中心体上呈 45° 的直叶片组成,安装在燃烧室上游 70 mm 处;环形进气道内、外径分别为 38.1、63.5 mm;采用壁面水冷的圆筒型燃烧室长为 198 mm,内径为 198 mm;活塞长为 229 mm,内径为 104 mm。

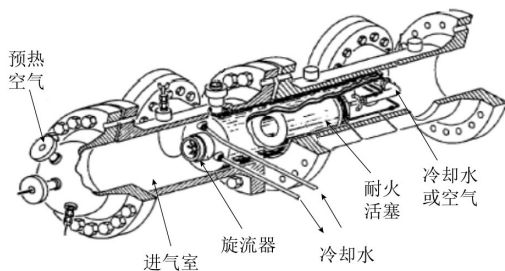


图 4 NETL 实验装置示意图

Fig. 4 Diagram of the NETL experimental setup

计算区域选择旋流器后进气道段至活塞出口, 利用 ICEM 划分结构化网格, 划分的流体域网格如图 5 所示, 总网格数约为 70 万, 沿轴向最大网格尺寸约为 3 mm, Föller 等^[26]的研究已证明当网格分辨率超过每波长 50 个时, 声波传播的耗散误差可以忽略。对于低于 1 000 Hz 的研究, 最大波长约为 340 mm, 该网格尺寸可以满足需求。

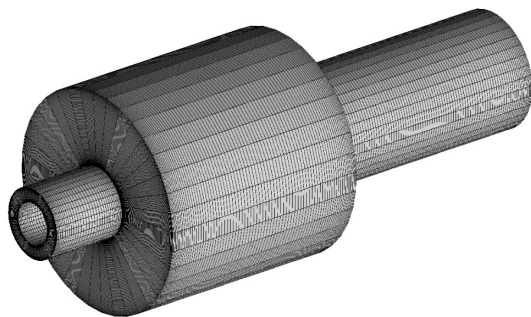


图 5 划分的流体域网格

Fig. 5 Diagram of the fluid domain mesh

2.2 数值模型和边界条件

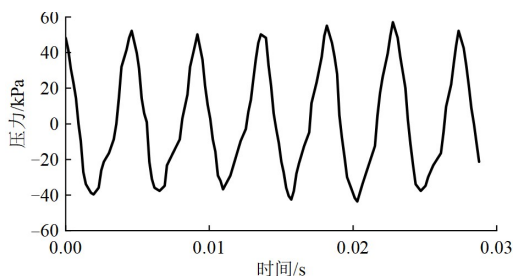
数值模拟使用商用软件 ANSYS Fluent 2021 R1 进行, 在燃烧室发生振荡的实验条件 (0.75 MPa、当量比 $\phi=0.77$ 、入口速度为 30 m/s) 下对甲烷与甲烷掺氢火焰进行了可压缩求解。湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 两方程模型, 对于具有强流线弯曲、涡流和旋流等特性的流动, 该模型在精度上有明显改进。湍流化学作用通过有限速率/涡耗散模型 (FR/EDM) 表示, 该模型同时考虑 Arrhenius 定律与涡耗散作用, 并以其中最小项表示化学反应源项。压力速度耦合使用 SIMPLE 算法求解, 空间离散采用二阶格式以确保求解精度。

数值计算过程中, 入口边界采用速度入口, 其轴向速度为 30 m/s, 进口温度为 533 K, 出口为压力出口并设置无反射边界条件。燃烧室水冷壁面为无滑

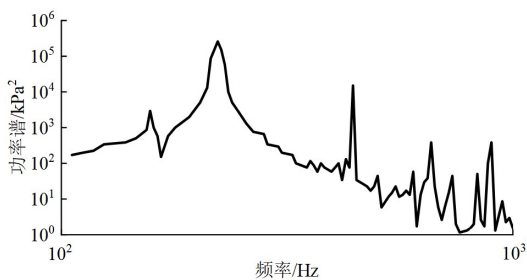
移壁面, 温度设置为 300 K, 其余壁面为绝热无滑移壁面。

计算获得统计稳定的解之后, 在入口处施加 DRBS 信号进行激励。在燃烧器出口上游 5 mm 处记录其速度波动, 并记录燃烧室体积积分热释放值。非定常计算时间步长设置为 1×10^{-5} s, 由此确定系统的奈奎斯特频率为 50 000 Hz; 施加激励后记录数据时长为 250 ms, 由此获得的频率分辨率为 4 Hz。

文献[25]中对应工况下燃烧室内的压力波动情况及其功率谱如图 6 所示, 该工况下燃烧室压力振幅超过运行压力的 5%, 在 220 Hz 的频率附近发生振荡。本研究在该工况下利用上述方法所预测的燃烧室振荡频率为 208.4 Hz, 误差约为 5.3%, 具有较高的准确性。



(a) 压力随时间的变化



(b) 功率谱

图 6 实验中压力波动情况及其功率谱^[25]

Fig. 6 Pressure fluctuation and its power spectrum in the experiment

3 结果分析和讨论

3.1 湍流燃烧场

不同体积掺氢比下燃烧室中间截面的温度分布如图 7 所示, 图中黑线表示轴向速度零等值线, 由于进一步提高掺氢比时出现回火现象, 本文最高掺氢比为 60%。

通过对比可以看出, 各掺氢比下燃烧室内都能形成稳定的中心回流区与角涡回流区, 且因受壁面影响, 角涡回流区附近温度低于中心回流区域。从

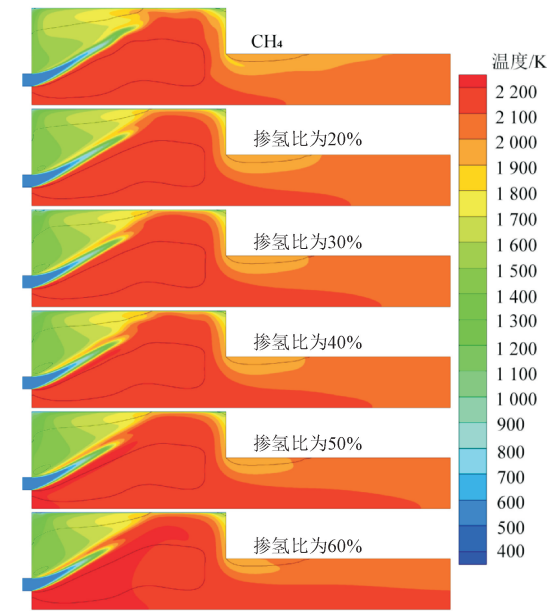


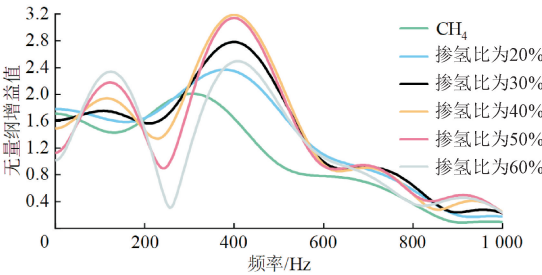
图 7 不同掺氢比下的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution under different hydrogen mixing ratios

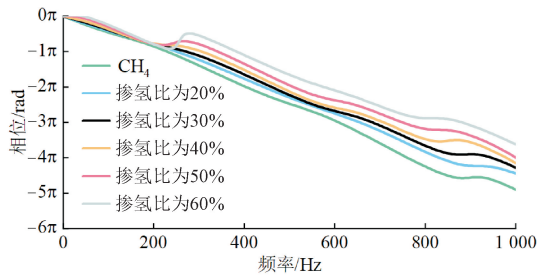
温度分布来看,纯甲烷火焰主要集中在内剪切层,火焰整体呈现“V”形,随着掺氢比的增加外剪切层中反应有所增强,可以明显看到外剪切层附近温度有所升高,火焰逐渐转变为“M”形,且由于氢气具有更高的火焰传播速度,火焰整体长度也随掺氢比的提高而缩短。另一方面,相较于纯甲烷火焰,掺氢以后燃烧器出口附近出现较小的回流涡结构,在 20% 掺氢比工况下该涡结构还未完全成形,但在更高掺氢比下,该位置形成了稳定的涡结构,并在最高掺氢比(60%)时明显减小。当上游扰动传播到燃烧器出口时,会受到该涡结构的影响,所以扰动对火焰面波动的影响会受到阻碍从而使“M”形火焰的抗干扰能力比“V”形火焰更强^[27]。火焰结构与燃烧室内流场结构的改变将会对燃烧室稳定性产生一定的影响。

3.2 火焰传递函数

火焰传递函数表征了火焰热释放对声波扰动的响应,通过其增益可判断火焰是否有不稳定的风险,FTF 的相位信息反应了火焰的时滞;当增益高于 1 时,一般可认为火焰存在发生燃烧不稳定的高风险^[17]。本文利用 Wiener-Hopf 方法所求得的 FTF 如图 8 所示,将纯甲烷工况作为标准工况,在该工况下传递函数表现出低通特性,在频率低于 484 Hz 时 FTF 增益大于 1,火焰对上游速度波动存在明显响应,而在高于此值后增益逐渐降低,火焰响应减弱。



(a)FTF 增益随频率的变化



(b)FTF 相位随频率的变化

图 8 不同掺氢比下的 FTF

Fig. 8 FTFs at different hydrogen mixing ratios

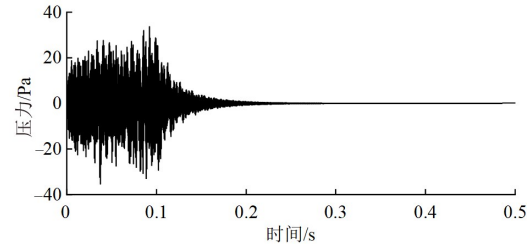
由于氢气与甲烷燃料特性的差异,掺入氢气以后 FTF 特性出现了相应的改变。在掺氢比较低时(20%),FTF 特性整体上与标准工况接近,但其增益峰值向更高频的方向发生偏移,且增益大于 1 的频带范围有所拓宽,这表明在该工况下振荡频率会在原来的基础上向高频位置偏移。进一步提高掺氢比(30%~60%),FTF 增益的特性与标准工况出现了差异,除了最大值同样进一步偏向更高频率以外,在低频范围内(112~124 Hz)出现了另一极大值,并随掺氢比的提高而逐渐增大且向高频方向偏移,这表明掺氢比的增加使得火焰对低频的响应有所增强。此外,当掺氢比过高(50%、60%)时,FTF 的增益在高频范围内反而出现减小的情况,尤其是在 60% 掺氢比下 FTF 增益最大值出现急剧降低,这表明过高的掺氢比反而弱化了火焰的高频响应。另一方面,对比不同掺氢比与标准状况下的相位可以看出,随着掺氢比的提高相位逐渐减小,这是因为氢气火焰传播速度更快导致掺氢火焰相比纯甲烷火焰更短,扰动从上游传播到火焰面的时滞也会相应地减小。

结合 3.1 节分析与 FTF 特性的改变可知,FTF 在高频范围的响应主要受燃烧器出口涡结构的影响,而低频的响应随掺氢比增加会逐渐增强。在较低掺氢比下,由于甲烷反应占据主导地位,氢气的加入只是使火焰形状发生了微小改变,且燃烧器出口位置涡结构尚未形成,所以 FTF 特性不发生明显变

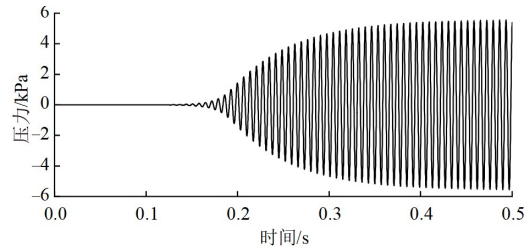
化。当掺氢比增加到 30%、40% 时, 氢气反应的作用越发显著, 改变火焰形状的同时对燃烧室内流场结构产生明显影响, 在燃烧器出口形成了稳定的涡结构, 所以 FTF 特性与标准工况产生了较大差异, 其增益在低频范围与高频范围内都持续增大。进一步提高掺氢比, 低频范围的增益继续增大, 同时随着燃烧器出口处涡的减小高频范围内的增益逐渐减小。

3.3 稳定性分析

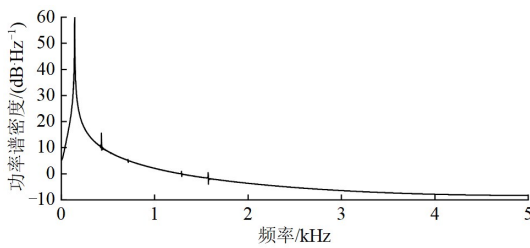
在低阶网络模型的实现方面, 本文对不同掺氢比氢气燃烧反应的平均流特性采用 Cantera 开源代码计算, 反应机理采用 Gri3.0, 声学求解部分采用低阶网络模型 OSCILOS^[28] 进行, 基于线性声学理论求解扰动传播方程以获取特征值和燃烧室的热声模态。采用 Palies 等^[29] 在 EM2C 所进行的实验及数据对该方法进行了验证, 实验中可以改变燃烧器前增压室和火焰筒长度以改变燃烧室的特征值。针对实验中稳定和不稳定的工况分别进行了验证计算, 图 9 为两种工况的计算结果, 可知稳定与不稳定的工况都能进行较好地预测, 且不稳定时预测的频率为 143 Hz, 实测频率为 140 Hz。



(a) 稳定燃烧时的压力波动



(b) 不稳定燃烧时的压力波动



(c) 不稳定燃烧时的功率谱密度

图 9 压力随时间的变化及不稳定燃烧功率谱密度

Fig. 9 Evolution of pressure over time and power spectral density of unstable combustion

对 NETL 燃烧室热声低阶网络模型的构建如图 10 所示, 主要包含进气室、燃烧室及排气管道等, 旋流器部分换算成相当量直径的圆形截面通道。蓝色与绿色截面分别表示进出口; 由于频率较低, 火焰长度远小于声波波长, 故火焰被视为紧凑的火焰薄层, 用图中红色截面代表火焰热扰动产生的位置。

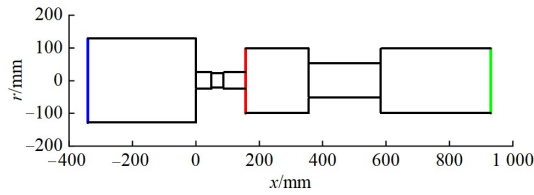


图 10 燃烧室低阶网络模型构建

Fig. 10 Construction of low-order network model for combustor

入口边界设置为封闭入口, 出口边界反射系数计算式为^[30]

$$\hat{R}(s) = - \left(1 + \frac{\tau_r^2}{2} s^2 \right) e^{-1.22\tau_r s} \quad (13)$$

式中: $\tau_r = r/\bar{c}$, r 为管道出口半径, $\bar{c}$ 为出口处声速; $s = i2\pi f$ 为一个复变量。燃烧室出口反射系数如图 11 所示。

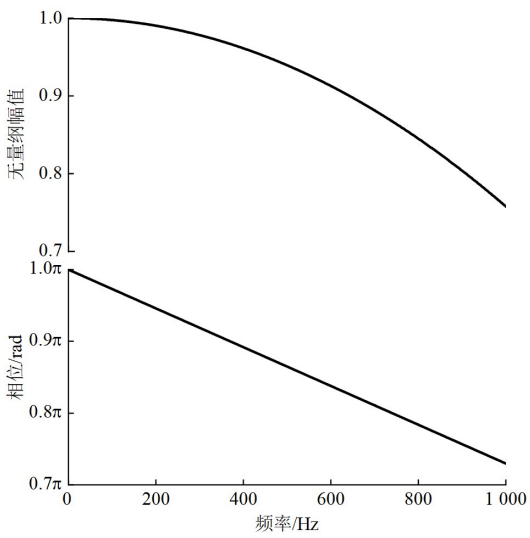


图 11 燃烧室出口反射系数

Fig. 11 Outlet reflection coefficient of combustion chamber

不同掺氢比下燃烧室中热声稳定性分析的结果如图 12 所示, 燃烧室内出现了低频的热声模态与高频的纯声学模态。所有工况在 40、640 Hz 附近都是稳定的, 标准工况与 20% 掺氢比时燃烧室内存在 200 Hz 左右的振荡; 在 30%~50% 掺氢比时这一模

态消失,但燃烧室的高频声本征模态被激发,在 675 Hz 频率附近发生振荡;在 60% 掺氢比时 200 Hz 左右的模态重新出现,此时燃烧室内同时存在低频热声模态与高频纯声学模态的振荡。所有不稳定工况下预测的频率及其增长率如表 1 所示。

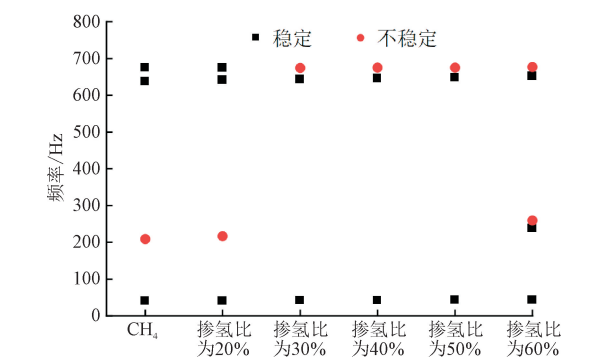


图 12 热声稳定性分析的结果
Fig. 12 Results of thermoacoustic stability analysis

表 1 各工况下振荡频率与增长率
Table 1 The oscillation frequency and growth rate under each working condition

掺氢比/%	振荡频率/Hz	增长率/(rad · s ⁻¹)
0	208.4	154.3
20	216.9	192.6
30	674.4	2.0
40	674.9	5.5
50	675.4	8.0
60	259.0	112.7
	676.6	6.0

从稳定性分析的结果来看,掺氢比对燃烧室热声振荡特性有着明显的影响。在 20% 掺氢比时,氢气的加入不会明显改变燃烧室热声特性,但会使燃烧室热声振荡频率有所提高,与前述分析一致,这是因为在该工况下甲烷反应占据主导地位。随着掺氢比的提高(30%~50%),位于 200 Hz 左右的不稳定模态消失,燃烧室在 675 Hz 左右的高频范围内发生振荡,这说明掺氢比较高的火焰在燃烧动力学方面更稳定,但氢气的加入使火焰更易与燃烧室的高频声本征模态耦合而引起高频纯声学模态的振荡。掺氢比为 60% 时,燃烧室除了在 676.6 Hz 下发生振荡外,还出现了 259.0 Hz 的不稳定模态,这与燃烧器出口处涡结构的减小有关。此外,所有热声模态对应的增长率都较大而纯声学模态对应的增长率都接近 0,这说明在燃烧室内纯声学模态振荡的发展

十分缓慢,比热声模态的振荡更便于控制。

综上所述,掺氢比的不同对甲烷掺氢火焰的热声特性有明显影响。相比于纯甲烷火焰,低掺氢比时,氢气的加入对火焰的影响程度有限,火焰形状改变较小更接近“V”形火焰,抗干扰能力较弱,上游扰动易使火焰面产生较大波动,且火焰长度缩短降低了扰动传播时滞,所以依旧发生低频范围内的振荡且频率有小幅增高,但燃烧器出口处未形成稳定的涡结构,燃烧室内部声波传播情况不发生明显变化,所以未激发燃烧室高频纯声学模态的振荡。进一步提高掺氢比,氢气的影 响变得明显,火焰更接近“M”形,受上游扰动的影响变小,火焰低频的不稳定性消失,但燃烧器出口处稳定的涡结构的形成导致燃烧室内声波的传播出现变化,火焰与燃烧室高频声本征模态相耦合,引起了高频纯声学模态的振荡。当掺氢比过高时,燃烧器出口处的涡逐渐减小,对上游扰动的阻碍作用变小,火焰面波动受扰动影响变大,低频率范围内的振荡重新出现。

4 结 论

本文对 NETL 燃烧室进行了数值研究,利用 CFD-SI 方法获取了不同掺氢比下甲烷掺氢火焰的 FTF,并结合低阶网络模型对燃烧室热声不稳定性进行了分析。结果表明,氢气的存在会使火焰形状由“V”形逐渐转变为“M”形且火焰长度缩短,同时掺氢比的提高会使燃烧室内流场结构发生改变,在燃烧器出口附近形成回流涡,火焰形状与流场结构的改变最终导致了燃烧室热声振荡特性的改变。在低掺氢比时,燃烧室振荡频率有所提高;进一步提高掺氢比时,燃烧室内低频的热声模态消失,但高频声本征模态被激发,燃烧室在高频率下发生振荡;掺氢比过高时,燃烧室内的低频热声模态重新出现。所以燃用天然气的燃烧室,当掺入氢气后,其不稳定特性会发生改变,原本出现热声不稳定的燃烧室,其振荡消失,而随着掺氢比的提高,系统会重新不稳定,但模态会发生变化。

参考文献:

[1] 杨亚晶,王万征. Rijke 管热声不稳定的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(5): 21-26.
YANG Yajing, WANG Wanzheng. Experimental study on thermoacoustic instability in a Rijke tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(5): 21-26.

[2] ZHU Rongjun, PAN Deng, JI Chenzhen, et al. Com-

- bustion instability analysis on a partially premixed swirl combustor by thermoacoustic experiments and modeling [J]. *Energy*, 2020, 211: 118884.
- [3] JONES B, LEE J G, QUAY B D, et al. Flame response mechanisms due to velocity perturbations in a lean premixed gas turbine combustor [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(2): 021503.
 - [4] BUNCE N, LEE J G, QUAY B D, et al. Mixture-forced flame transfer function measurements and mechanisms in a single-nozzle combustor at elevated pressure [C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2011: 1317-1326.
 - [5] 刘石, 翁方龙, 张晓宇, 等. 甲烷旋流预混火焰动力学特性的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(1): 198-201.
LIU Shi, WENG Fanglong, ZHANG Xiaoyu, et al. Experimental investigation of methane premixed swirling flame dynamics [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(1): 198-201.
 - [6] 于丹, 郭志辉, 杨甫江. 贫燃预混燃烧室中的分布式火焰传递函数分析 [J]. *推进技术*, 2016, 37(12): 2210-2218.
YU Dan, GUO Zhihui, YANG Fujian. Experimentally study on distribution of flame transfer function in a lean premixed combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12): 2210-2218.
 - [7] BOYER L, QUINARD J. On the dynamics of anchored flames [J]. *Combustion and Flame*, 1990, 82(1): 51-65.
 - [8] SCHULLER T, DUROX D, CANDEL S. A unified model for the prediction of laminar flame transfer functions: comparisons between conical and V-flame dynamics [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 134(1/2): 21-34.
 - [9] PALIES P, SCHULLER T, DUROX D, et al. Modeling of premixed swirling flames transfer functions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2967-2974.
 - [10] 韩啸, 张弛, 韩猛, 等. 基于 LES 的分层旋流火焰流场结构与火焰响应研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(6): 1535-1543.
HAN Xiao, ZHANG Chi, HAN Meng, et al. LES study on the flow field and flame response of a stratified swirling flame [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(6): 1535-1543.
 - [11] 高宇鹏, 李俊杰, 刘巍, 等. 基于热声解耦方法的燃烧不稳定性预测 [J]. *实验流体力学*, 2022, 36(1): 11-18.
 - [12] GAO Yupeng, LI Junjie, LIU Wei, et al. Prediction of the combustion instability based on the thermos-acoustic decoupling method [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(1): 11-18.
 - [13] GENTEMANN A, HIRSCH C, KUNZE K, et al. Validation of flame transfer function reconstruction for perfectly premixed swirl flames [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Vienna, Austria: Turbo Expo, 2004: GT2004-53776.
 - [14] GIAUQUE A, POINSOT T, NICOUD F. Validation of a flame transfer function reconstruction method for complex turbulent configurations [C]//14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference). Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 2943.
 - [15] KOMAREK T, POLIFKE W. Impact of swirl fluctuations on the flame response of a perfectly premixed swirl burner [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(6): 061503.
 - [16] TAY WO CHONG L, POLIFKE W. Large eddy simulation-based study of the influence of thermal boundary condition and combustor confinement on premix flame transfer functions [J]. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2013, 135(2): 021502.
 - [17] ANDREINI A, FACCHINI B, INNOCENTI A, et al. Flame transfer function identification and thermoacoustic analysis of an annular heavy-duty gas turbine combustor [C]//22nd International Congress on Sound and Vibrations. Florence, Italy: ICSV22, 2015: 12-16.
 - [18] 杨畅, 余志健. 基于火焰传递函数的旋流预混火焰稳定性分析 [J]. *燃气轮机技术*, 2021, 34(1): 14-20.
YANG Yang, YU Zhijian. Stability analysis of a swirling premixed combustor based on flame transfer functions [J]. *Gas Turbine Technology*, 2021, 34(1): 14-20.
 - [19] 王博涵, 孙潇峰, 姜磊, 等. 贫预混火焰动力学及稳定性分析 [J]. *燃气轮机技术*, 2019, 32(3): 34-40.
WANG Bohan, SUN Xiaofeng, JIANG Lei, et al. Dynamics and stability analysis of lean premixed flame [J]. *Gas Turbine Technology*, 2019, 32(3): 34-40.
 - [20] INNOCENTI A, ANDREINI A, FACCHINI B, et al. Numerical analysis of the dynamic flame response of a spray flame for aero-engine applications [J]. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2017, 9(4): 310-329.
 - [21] KIM K T, LEE J G, LEE H J, et al. Characterization

- of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean-premixed flames in a gas turbine combustor [J]. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2010, 132(4): 041502.
- [21] 张晓宇, 张昊, 张彤枫, 等. 合成气预混火焰的热声振荡 [J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(2): 117-122. ZHANG Xiaoyu, ZHANG Hao, ZHANG Tongfeng, et al. Thermo-acoustic oscillation of premixed syngas [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(2): 117-122.
- [22] 昌运鑫, 宋恒, 韩猛, 等. 掺氢功率比对富氢甲烷燃烧振荡特性的影响 [J]. *推进技术*, 2023, 44(1): 182-195. CHANG Yunxin, SONG Heng, HAN Meng, et al. Effects of hydrogen power ratio on combustion oscillation characteristics of hydrogen-enriched methane [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(1): 182-195.
- [23] SCHULZ O, NOIRAY N. Autoignition flame dynamics in sequential combustors [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 192: 86-100.
- [24] HUBER A, POLIFKE W. Dynamics of practical premixed flames; model structure and identification [J]. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2009, 1(2): 199-228.
- [25] RICHARDS G A, JANUS M C. Characterization of oscillations during premix gas turbine combustion [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 1998, 120(2): 294-302.
- [26] FÖLLER S, POLIFKE W. Determination of acoustic transfer matrices via large eddy simulation and system identification [C]//16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Stockholm, Sweden; AIAA, 2010; 2010-3998.
- [27] SCHULLER T, DUROX D, CANDEL S. Self-induced combustion oscillations of laminar premixed flames stabilized on annular burners [J]. *Combustion and flame*, 2003, 135(4): 525-537.
- [28] OSOLOS. The open source combustion instability low order simulator [EB/OL]. [2022-08-09]. <https://www.osolos.com/>.
- [29] PALIES P, DUROX D, SCHULLER T, et al. Non-linear combustion instability analysis based on the flame describing function applied to turbulent premixed swirling flames [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(10): 1980-1991.
- [30] LI Jingxuan, MORGANS A S. Time domain simulations of nonlinear thermoacoustic behaviour in a simple combustor using a wave-based approach [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 346: 345-360.

(编辑 赵炜)