

火花相位对点火成功率影响的大涡模拟

王洪妍^{1, 2, 3}, 黄 勇^{1, 2, 3}, 刘云峰^{1, 2, 3}, 章宏宙^{1, 2, 3}, 王惜伟^{1, 2, 3}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 针对单头部模型燃烧室, 利用大涡模拟方法计算不同时刻点火时火焰的动态传播过程, 在一个流场脉动周期内研究火花相位变化对燃烧室点火成功率的影响。模拟结果表明: 对于不断脉动的燃烧室流场, 即使在可以点燃的工况范围之内, 也不能确保单个火花脉冲在任意时刻都能实现成功点火。对比分析燃烧室流场频率与单个火花脉冲特性发现, 单个火花脉冲的持续时间远小于流场脉动周期是导致火花相位严重影响点火成功率的根本原因。当采用大涡模拟方法研究点火问题时, 为了消除火花相位对点火成功率的影响, 建议采用连续多个火花脉冲点火方式代替单个火花脉冲点火方式, 火花脉冲持续时间应该至少覆盖一个完整的流场脉动周期。

关 键 词: 燃烧室; 点火; 频率; 火花相位; 大涡模拟

中图分类号: V231.2⁺4

文献标志码: A

Large eddy simulation on effect of spark phases on ignition reliability

WANG Hongyan^{1, 2, 3}, HUANG Yong^{1, 2, 3}, LIU Yunfeng^{1, 2, 3},
ZHANG Hongzhou^{1, 2, 3}, WANG Xiwei^{1, 2, 3}

- (1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: For the model combustor with a single dome, large eddy simulation was carried out to simulate the dynamic propagation process of flames at different ignition timing. In a pulsation cycle of the flow field, the effect of spark phases on ignition reliability was studied. The simulation results revealed that for the pulsating flow field in the model combustor, even within the range of ignition limits, the single spark pulse can not cause successful ignition at any spark phase. By comparing the frequency of the flow field with the characteristics of the single spark pulse, it was found that the duration of the single spark pulse was much shorter than the pulsation period of the flow field. This is the fundamental reason why spark phases seriously affect the ignition reliability. In order to eliminate the effect of spark phases on ignition reliability, it is suggested that a single spark pulse should be replaced by a series of spark pulses when using large eddy simulation to study ignition problems. And the duration of spark pulses should cover at least one complete pulsation cycle of the flow field.

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-III-0007-0032)

作者简介: 王洪妍(1998—), 女, 硕士生, 主要从事燃烧室点熄火特性研究。

通信作者: 黄勇(1964—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事燃烧室点熄火机理及预测研究等。E-mail: yhuang@buaa.edu.cn

引用格式: 王洪妍, 黄勇, 刘云峰, 等. 火花相位对点火成功率影响的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2344-2351. WANG Hongyan, HUANG Yong, LIU Yunfeng, et al. Large eddy simulation on effect of spark phases on ignition reliability[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2344-2351.

Keywords: combustor; ignition; frequency; spark phase; large eddy simulation

随着国际社会对环境问题的持续关注,对航空排放的日益重视,国际民用航空组织(ICAO)出台了一系列航空燃气轮机排放标准。因为贫油点火能有效降低 NO_x 和 CO₂ 的排放^[1],所以一直是国内外航空发动机行业的研究热点。

研究燃烧室贫油点火特性有实验和数值模拟两种方法。通过实验来研究燃烧室点火问题,周期较长,并且容易受到燃烧室几何结构的限制,难以使用光学诊断技术获得内部流场信息。随着计算机性能的不断提高,计算流体力学方法的不断完善,数值模拟逐渐成为研究燃烧室点火问题的重要方法^[2-3]。根据模拟尺度的不同,数值模拟可以分为直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)、雷诺平均模拟(Reynolds averaged Navier-Stokes simulation, RANS)、大涡模拟(large eddy simulation, LES)三种模拟方法。DNS 直接求解瞬态 Navier-Stokes(N-S)方程,可以获得全部的湍流和燃烧细节,但 DNS 需要非常小的网格尺寸和时间步长,从而需要大量的计算资源。因此 DNS 一般用于模拟简单几何模型下的低雷诺数流动,难以在实际工程问题中应用^[4]。RANS 可以得到时均参数,但却忽略了湍流燃烧的瞬时流动特性和流场脉动信息。LES 通过滤波将大尺度涡和小尺度涡分开,大尺度涡直接模拟,小尺度涡用模型来封闭,可以获得详细的瞬时流场信息和瞬时燃烧特性。因此国内外很多研究人员利用 LES 方法开展燃烧室点火特性的相关研究。

Jones 等^[5]利用 LES 方法模拟了稳定时和接近贫油熄火边界时火焰的两种燃烧状态,并将模拟结果与实验进行对比,证明 LES 能够再现实验观察到的非预混喷雾火焰特征。Hervo 等^[6]模拟了简化的航空发动机燃烧室的点火过程,对成功点火的传播过程进行分析表明,火焰传播可分为两个主要阶段:①火焰进入速度较低且液滴充足的区域;②火焰在燃烧室内快速膨胀。并指出 LES 方法能够定性地再现火焰传播过程。Eckel 等^[7]对旋流稳定喷雾火焰进行了模拟,认为 LES 可以再现燃油分布、火焰位置等主要特征,模拟出的液滴尺寸、液滴速度等参数与实验数据进行对比,一致性较好。Tyliszczak 等^[8]采用 LES 方法模拟以煤油为燃料的燃气轮机燃烧室的冷态流场和点火过程,分析火花参数对点火过程的影

响。模拟结果表明,在同一位置点火,初始火核越大,点火成功率越高。

林宇震等^[9]通过对比点火成功与点火失败的模拟结果指出,火焰主要受到传播过程中瞬时参数的影响,火焰能够传播进入回流区是点火成功的关键。颜应文等^[10]对环形燃烧室火焰筒的瞬态反应流进行了 LES 研究,模拟结果反映了真实燃烧室的瞬时流动特性和瞬时燃烧特性。杨洪磊等^[11]利用数值模拟方法研究火核尺寸、点火能量以及点火持续时间对环管型燃烧室点火成功率的影响,结果表明点火能量不足、点火持续时间较短以及火核尺寸太小是导致点火失败的三个原因。周瑜等^[12]模拟了双旋流燃烧室的动态点火过程,结果表明单次点火形成的火核不能持续引燃周围的燃油,火焰在较短的时间内熄灭,导致点火失败。

综上所述,LES 方法能够很好地再现燃烧室的流场结构、喷雾分布以及火焰传播过程,已经开展的研究工作大多集中于探究火花尺寸、点火持续时间、点火能量、点火位置不同对燃烧室点火过程及结果的影响,研究火花相位对点火成功率影响的相关文献较少。

所谓火花相位,是指启动点火时刻在流场脉动周期内的位置,不同的火花相位对应着不同的启动点火时刻。本文针对单头部模型燃烧室,利用 LES 方法模拟一个流场脉动周期内不同时刻点火时的火焰动态传播过程。通过分析流场脉动频率,研究火花相位变化对燃烧室点火特性的影响。

1 几何模型和网格划分

本文的研究对象是单头部模型燃烧室。该模型燃烧室为全环燃烧室的 1/18,包含一个头部,头部设有轴径向旋流器(一级为轴向旋流器,二级为径向旋流器),火焰筒侧壁上设有四个主燃孔和四个掺混孔。利用 UG NX12.0 软件对单头部模型燃烧室进行建模,模型省去了喷油器和点火器结构,保留了所有的冷却孔,结构示意图如图 1 所示。其中坐标原点位于套筒出口截面中心处, X 轴为燃烧室长度方向, Y 轴为燃烧室高度方向, Z 轴为燃烧室宽度方向。

利用 Fluent 软件对燃烧室几何模型划分网格,网格具体划分情况如图 2 所示。

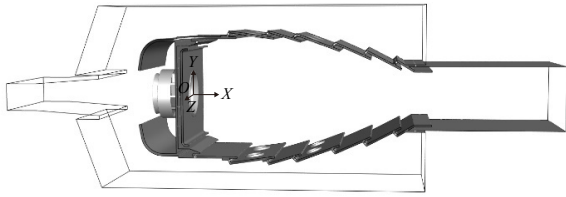


图 1 燃烧室几何模型

Fig. 1 Geometrical model of the combustor

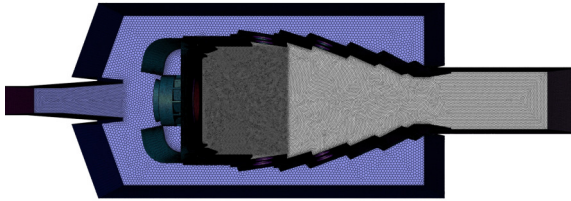


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational grids

为确定合适的网格数量,确保网格精度达到要求,在不同网格数量(145 万、336 万、567 万、817 万、1 289 万)下对燃烧室进行稳态模拟。如图 3 所示为中心轴线处回流区长度随网格数量的变化曲线,可以看出网格数量大于 567 万后继续增加网格数量对计算结果影响较小。因此为了保证计算精度同时减少计算时间,最终确定网格数量为 567 万。

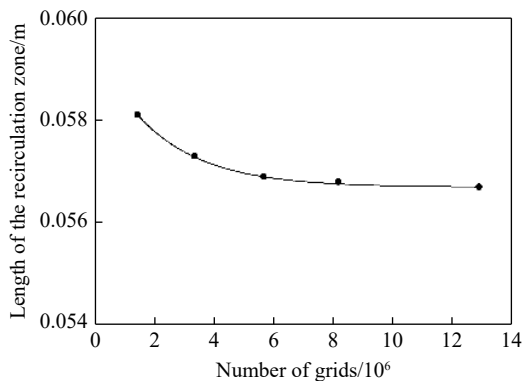


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Verification of grid independence

2 计算方法及边界条件

2.1 计算方法及数学模型

本文采用 LES 方法模拟湍流燃烧过程,时间步长为 10^{-5} s。压力速度耦合方法采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法,质量方程、能量方程及组分方程的离散求解采用二阶迎风插值格式,动量方程的离散求解采用有

界中心差分格式。亚网格模型为 Smagorinsky-Lilly 模型。气相采用欧拉方法求解,液相采用拉格朗日离散相模型(discrete phase model, DPM)求解。燃油液滴由空心锥喷射器喷入,液滴尺寸符合 Rosin-Rammler 分布。

选用的化学反应机理为 Franzelli 等^[13]提出的两步总包反应机理。相应的化学反应方程式如下:



为了验证提出的两步总包反应机理的可靠性, Franzelli 等^[13]用该机理在较宽的压力范围($p \in [101325, 1215900]$ Pa)、来流温度范围($T_f \in [300, 700]$ K)和当量比范围($\phi \in [0.6, 2.0]$)内计算了一维层流火焰的火焰传播速度与绝热火焰温度,并与详细化学反应机理的计算结果进行了比较。比较结果显示:该机理正确预测了火焰传播速度、燃烧后的气体温度等参数。同时,使用该机理计算得出的点火延迟时间也符合相应的实验结果。

采用能量沉积模型(energy deposition model, ED model)模拟电火花能量释放过程,通过在能量方程中加入能量源项的方法近似再现初始火核的形成^[14]。能量源项可表示为

$$\dot{Q}(X, Y, Z, t) = \frac{\varepsilon_i}{4\pi^2 \sigma_s^3 \sigma_t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma_s}\right)^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_0}{\sigma_t}\right)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{\Delta_s}{4\sqrt{\ln 10}} \quad (4)$$

$$\sigma_t = \frac{\Delta_t}{4\sqrt{\ln 10}} \quad (5)$$

其中 ε_i 为点火能量,取 1.5 J; σ_s 、 σ_t 分别控制了能量源的大小和持续时间; r 为到火花中心的距离; t 为时间; t_0 为能量源项达到最大值的时刻; Δ_s 为火花特征尺寸; Δ_t 为火花持续时间。

选择动态增厚火焰模型作为湍流燃烧模型。动态增厚火焰模型的基本思想就是在保证火焰传播速度不变的情况下将火焰增厚,使得可以在较粗的网格上对火焰进行解析^[15]。考虑到亚网格火焰褶皱,该模型引入效率函数 E 来修正反应速率^[16-18]。同时定义探针因子 S 来区分反应区和非反应区,从而保证增厚火焰模型仅在反应区触发。国内外许多研究学者已经成功将动态增厚火焰模型应用于针对点火问题的 LES 中,例如 Lacaze 等^[19]用该模型模拟非预混甲烷射流的点火过程。Boileau

等^[20]用该模型研究全环燃烧室火焰传播过程,王凯兴等^[21]用该模型对中心分级燃烧室进行湍流燃烧模拟。

2.2 边界条件

采用质量流量入口,压力出口,绝热无滑移壁面的边界条件。模拟工况条件如表 1 所示。

表 1 模拟工况
Table 1 Simulated condition

温度/K	压力/Pa	燃料质量流量/(kg/s)	空气质量流量/(kg/s)
288	101 325	0.002 4	0.12

3 模拟结果分析

3.1 冷态瞬时流场

燃烧室内存在周期性的振荡现象,典型燃烧室的流动特征频率在几百赫兹量级^[22]。为了通过 LES 方法得到燃烧室冷态流场的脉动频率,在开始点火之前监测坐标为(24,0,0)mm 处速度大小随时间的变化,速度检测点位置如图 4 所示。图 4 为点火前某一时刻的冷态瞬时流场,图中黑色箭头表示速度矢量,圆点即为速度监测点(24,0,0)mm 的位置。从图中可以看出速度检测点位于回流区内。

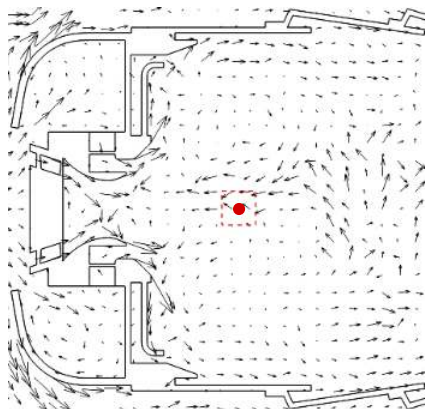


图 4 速度监测点位置

Fig. 4 Location of the speed monitoring point

采样时间为 50 ms,采样频率为 20 kHz,采样结果如图 5 所示。

分析图 5 发现,检测点处速度大小随时间不断脉动,但仅分析时域图不能得到脉动频率的有用信息,因此需要对原始信号进行频谱分析。通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),将信号从时域转换到频域并进行分析,如图 6 所示即为相应的频域图。

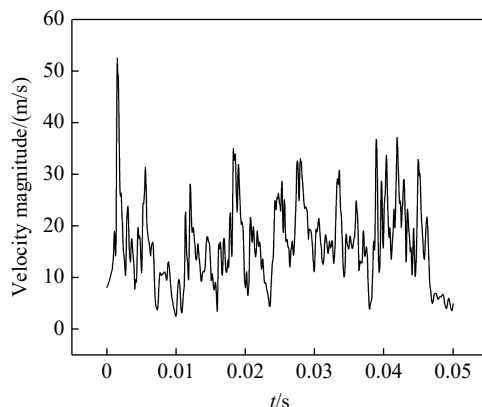


图 5 监测点处速度大小的时域图

Fig. 5 Time domain diagram of velocity magnitude at the monitoring point

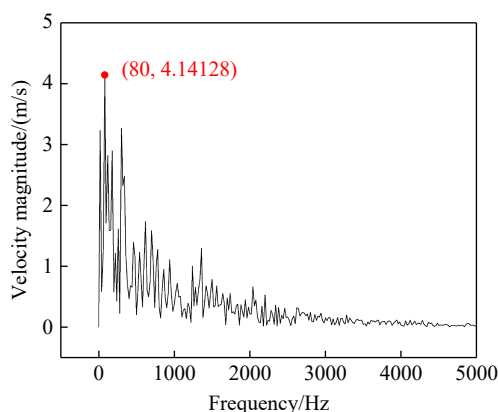


图 6 监测点处速度大小的频域图

Fig. 6 Frequency domain diagram of velocity magnitude at the monitoring point

从频域图中可以看出利用 LES 方法计算出的燃烧室流场脉动频率为 80 Hz,则燃烧室流场脉动周期为 12.5 ms。分析对比实际燃烧室流场频率与使用 LES 方法计算出的燃烧室流场频率发现,由于 LES 方法忽略了大量高频小尺度涡的信息,导致模拟得到的燃烧室流场频率略低于实际燃烧室流场频率,模拟得到的燃烧室流场脉动周期要比实际燃烧室流场脉动周期长。

3.2 不同火花相位的点火过程

在进行燃烧室贫油点火实验时发现,在可燃工况条件下,单个火花不能保证在任意时刻均成功点燃燃烧室。换句话说,在不同时刻点火可能会导致完全不一样的实验结果,即火花相位变化影响了燃烧室的点火成功率。为了研究火花相位不同对燃烧室点火成功率的影响,通过 LES 方法计算得到充分发展的冷态流场以后,分别在 50、58 ms 冷态流场计算结果的基础上启动单个火花

脉冲点火。点火持续时间为 0.2 ms, 点火中心位置如图 7 所示, 坐标为 (24,35,0) mm。

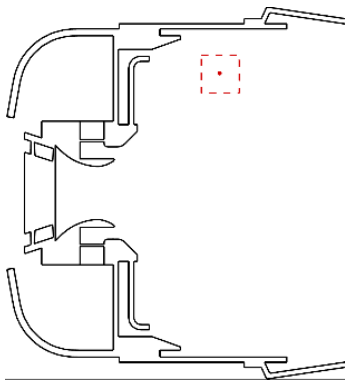


图 7 点火中心位置

Fig. 7 Location of the ignition center

3.2.1 在 50 ms 启动单个火花点火的结果分析

如图 8 所示是单个火花脉冲示意图。可以看出, 在 50 ms 启动点火后, 经过 0.2 ms 点火结束, 燃烧室内不再有外部能量输入。

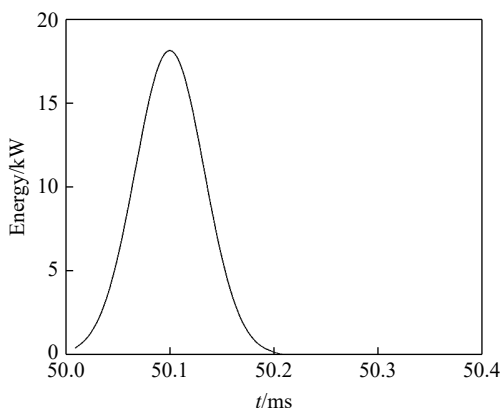


图 8 单个火花脉冲

Fig. 8 Single spark pulse

图 9 所示是模拟出该工况下燃烧室的点火动态过程, 左图以 1500 K 等温面的变化来表示火焰的传播过程, 右图是点火中心截面 ($X=24$ mm) 的温度云图和速度矢量图, 其中黑实线是 X 方向速度为零的等值线, 黑实线所包围区域即为回流区。

通过图 9 可以看出, 50.5 ms 时, 火核已经产生。52 ms 时, 火焰体积增大, 小部分火焰被回流区捕获。到了 55 ms, 火焰体积继续增大, 其中有一小部分火焰脱落并向下游传播, 大部分火焰向回流区传播。60 ms 时, 火焰在气流的剪切作用下被分成两部分: 一部分沿轴向传播; 另一部分沿径向传播进入回流区并向旋流器出口处发展。65 ms 时, 进入回流区的火焰快速增长, 稳定在旋流器出口附近, 同时火焰不断向四周传播。65 ms

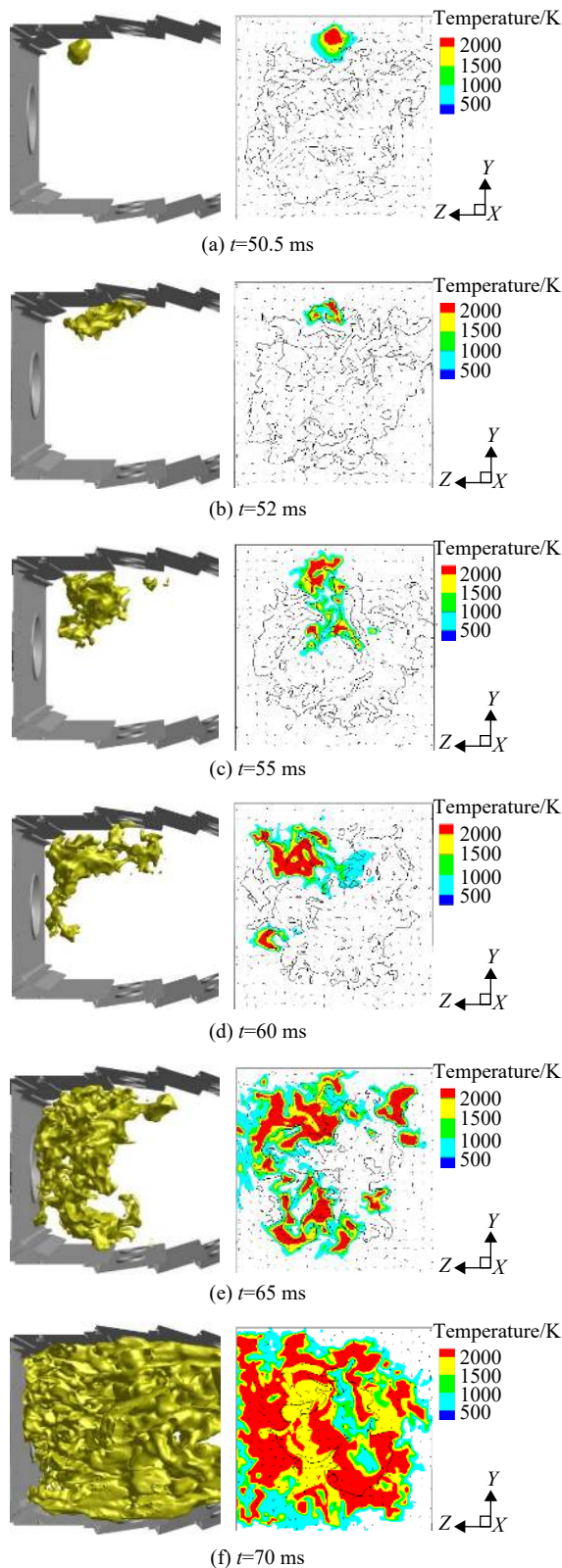


图 9 在 50 ms 启动单个火花点火的动态过程

Fig. 9 Dynamic process of single spark ignition at 50 ms

到 70 ms, 火焰充满火焰筒头部区域后继续向下游传播, 最终成功引燃整个燃烧室。

3.2.2 在 58 ms 启动单个火花点火的结果分析

为了研究不同火花相位对点火成功率的影响,

在一个流场脉动周期内选择 58 ms 时启动单个火花脉冲点火, 火花持续时间为 0.2 ms。

图 10 所示是模拟出该工况下燃烧室的点火动态过程, 左图以 1 500 K 等温面的变化来表示火焰的传播过程, 右图是点火中心截面($X=24$ mm)的温度云图和速度矢量图, 其中黑实线是 X 方向速度为零的等值线, 黑实线所包围区域即为回流区。

从图 10 中可以看出此次点火在 4 ms 后失败。58.5 ms 时, 初始火核已经形成。59 ms 时, 火焰表面皱褶变形。59 ms 到 60 ms, 火焰的热量不足以蒸发和点燃周围的燃油进行反应放热, 火焰体积明显减小。到了 62 ms, 火焰完全被气流吹灭, 点火失败。通过点火中心截面的温度云图和速度矢量图可以看出, 火焰传播过程中没有受到负 Y 方向气流速度的作用, 使火焰没有进入回流区, 从而导致点火失败。

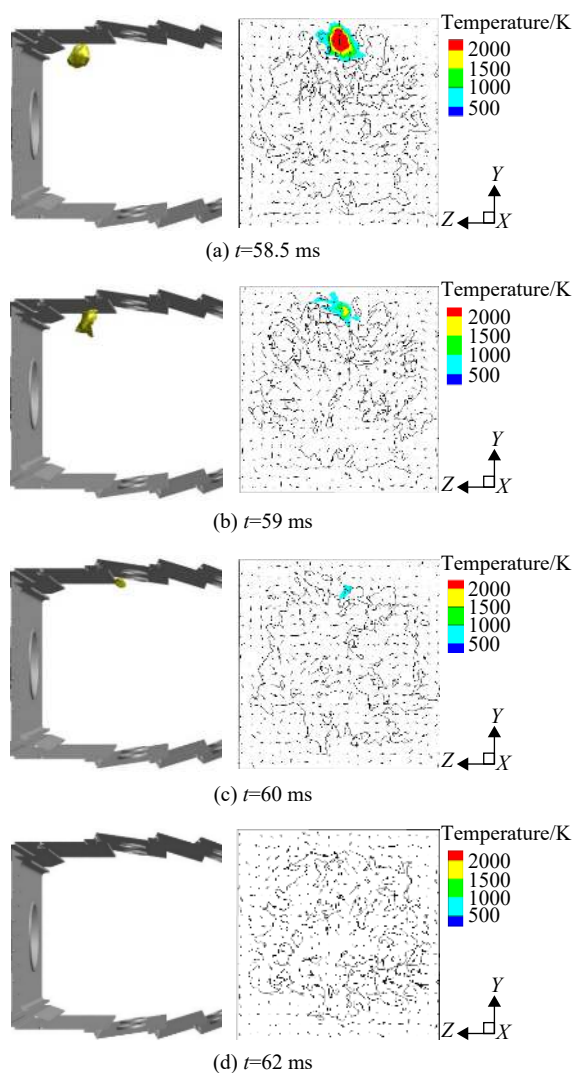


图 10 在 58 ms 启动单个火花点火的动态过程

Fig. 10 Dynamic process of single spark ignition at 58 ms

3.3 不同火花相位的点火结果分析

将不同火花相位点火的模拟结果进行总结, 如表 2 所示。可以发现不同火花相位导致了不同的点火模拟结果。其中算例 1 点火成功说明油气比处于可燃范围之内, 算例 2 点火失败说明, 对于不断脉动的燃烧室流场, 如果采用单个火花脉冲的点火方式, 即便在可以点燃的工况范围之内, 也不能确保在任意时刻都能实现成功点火, 可见火花相位对点火成功率有着重要的影响。

表 2 不同火花相位的模拟结果

Table 2 Simulated results of different spark phases

算例	启动点火时刻/ms	火花持续时间/ms	模拟结果
1	50	0.2	点火成功
2	58	0.2	点火失败

对比分析火花脉冲特性与燃烧室流场脉动特性发现, 单个火花脉冲持续时间不能覆盖至少一个完整的流场脉动周期, 且远小于流场脉动周期。这是导致火花相位严重影响点火成功率的根本原因。同时, 由于 LES 方法忽略了大量高频信息, 导致模拟得到的流场频率低于实际燃烧室的流场频率, 即模拟得到的流场脉动周期大于实际燃烧室的流场脉动周期, 这将会进一步加剧模拟过程中火花相位对点火成功率的影响。

3.4 连续多个火花脉冲点火方式

通过文中第 3.3 节的分析可知, 在利用 LES 方法研究燃烧室点火问题时, 为了消除火花相位对点火成功率的影响, 火花脉冲持续时间应该至少覆盖一个完整的流场脉动周期。因此, 可以采用连续多个火花脉冲点火方式代替单个火花脉冲点火方式。如图 11 所示是 9 个火花脉冲所释放功率随时间的变化。

从图 11 中可以看出该点火方式的单个火花持续时间为 0.5 ms, 火花间隔为 1 ms, 总的火花脉冲持续时间为一个流场脉动周期, 即 12.5 ms。

采用 9 个火花脉冲点火方式在 58 ms 冷态流场计算结果基础上进行点火, 模拟出的火焰动态传播过程如图 12 所示, 其中左图以 1 500 K 等温面的变化来表示火焰的动态传播过程, 右图是点火中心截面($X=24$ mm)的温度云图和速度矢量图, 图中黑实线是 X 方向速度为零的等值线, 黑实线所包围区域即为回流区。

从图 12 中可以看出, 第一个火花结束后, 火

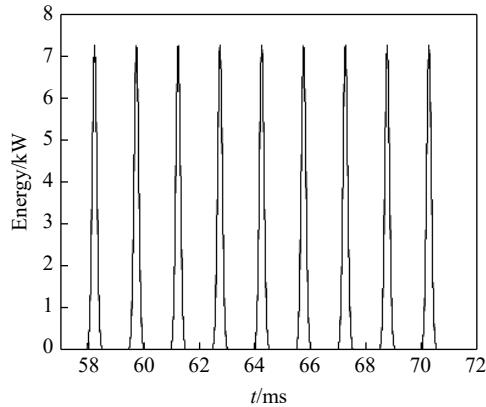


图 11 9 个火花脉冲

Fig. 11 Nine spark pulses

焰没有引燃周围的燃油, 火焰体积明显减小, 认为第一个火花点火失败。第二个火花结束以后, 火焰大部分集中于点火位置附近, 只有小部分火焰脱落沿径向传播。第三个火花结束后, 火焰表面皱褶变形, 火焰没有受到气流作用传播进入回流区, 由此认为前三个火花不能点燃燃烧室。直到第四个火花结束以后, 火焰开始在气流作用下向回流区传播。成功进入回流区后, 火焰不断引燃周围的燃油使高温区体积增大, 最终火焰稳定在旋流器出口附近。70 ms 到 75 ms, 火焰继续向四周传播。75 ms 时, 火焰充满整个回流区。随后火焰从火焰筒头部向下游传播, 最终引燃整个

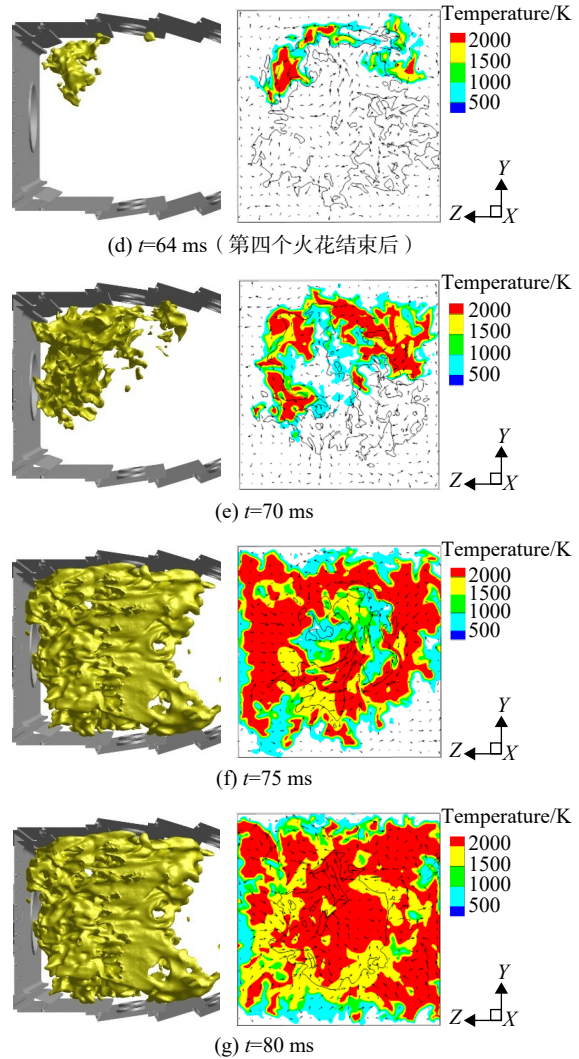
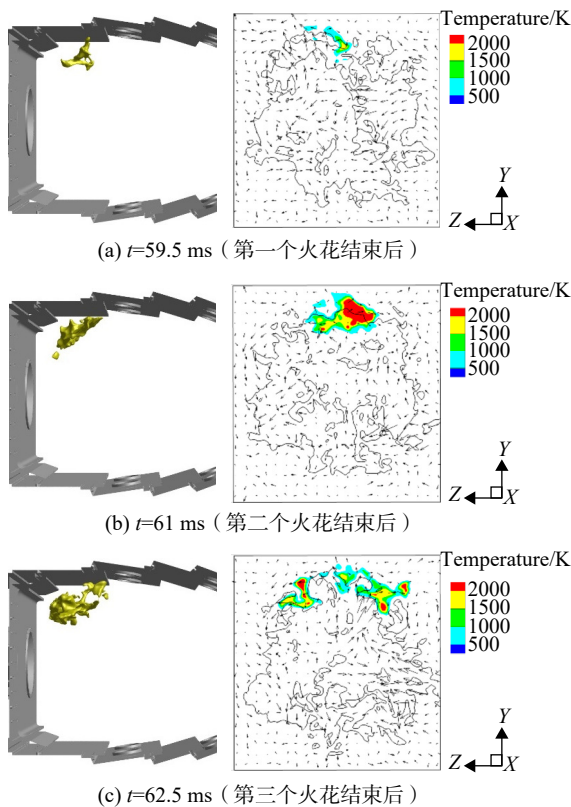


图 12 在 58 ms 启动多个火花点火的动态过程

Fig. 12 Dynamic process of multiple sparks ignition at 50 ms

燃烧室, 点火成功。

分析 9 个火花脉冲点火的动态过程发现, 前三个火花并不能点燃燃烧室, 再次证明了单个火花并不能在任意时刻都实现成功点火, 火花相位严重影响着点火模拟结果。将不同火花脉冲的模拟结果进行总结, 如表 3 所示。算例 2 点火失败算例 3 点火成功说明, 多个火花脉冲点火方式能有效消除火花相位对点火成功率的影响, 即在可以点燃工况范围之内, 多个火花脉冲点火方式能进一步保证点火的成功率。

表 3 不同火花脉冲的模拟结果

Table 3 Simulated results of different spark pulses

算例	启动点火时刻/ms	火花持续时间/ms	模拟结果
2	58	0.2	点火失败
3	58	12.5	点火成功

4 结 论

本文通过 LES 方法模拟单头部模型燃烧室的冷态流场和动态点火过程, 研究不同火花相位对燃烧室点火成功率的影响。通过分析数值模拟结果得到以下结论:

1) LES 结果表明, 对于不断脉动的燃烧室流场, 如果采用真实的火花脉冲, 即便在可以点燃的工况范围之内, 也不能确保单个火花脉冲在任意时刻都能实现成功点火, 即火花相位对点火成功率有着重要的影响。

2) 基于典型燃烧室流动频率及模拟出的燃烧室流动频率, 并对比分析火花脉冲特性发现, 单个火花脉冲的持续时间不能覆盖至少一个完整的流场脉动周期, 且远小于流场脉动周期。这是导致火花相位严重影响点火成功率的根本原因。

3) 由于 LES 方法过滤掉了大量高频小尺度涡信息, 导致模拟出的燃烧室流场脉动频率略低于实际燃烧室流场脉动频率, 这将会进一步加剧模拟过程中火花相位对点火成功率的影响。

4) 在数值模拟过程中, 为了消除火花相位对点火成功率的影响, 火花脉冲持续时间应该至少覆盖一个完整的流场脉动周期, 可以采用连续多个火花脉冲点火方式代替单个火花脉冲点火方式, 从而提高点火成功率。

参考文献:

- [1] RANKIN D D. Lean combustion: technology and control[M]. London: Academic Press, 2011.
- [2] GICQUEL L Y M, STAFFELBACH G, POINSOT T. Large eddy simulations of gaseous flames in gas turbine combustion chambers[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(6): 782-817.
- [3] ZHAO Dongmei, XIA Yifan, GE Haiwen, et al. Simulations of flame propagation during the ignition process in an annular multi-injector combustor[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 2019, 29(6): 1947-1964.
- [4] 张腾. 基于大涡模拟的多旋流燃烧室两相燃烧研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHANG Teng. Large eddy simulation of the two-phase combustion in a multi-swirling combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [5] JONES W P, LYRA S, NAVARRO-MARTINEZ S. Numerical investigation of swirling kerosene spray flames using large eddy simulation[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1539-1561.
- [6] HERVO L, SENONER J M, BIANCHERIN A, et al. Large-eddy simulation of kerosene spray ignition in a simplified aeronautic combustor[J]. *Flow Turbulence Combust*, 2018, 101(2): 603-625.
- [7] ECKEL G, GROHMANN J, CANTU L, et al. LES of a swirl-stabilized kerosene spray flame with a multi-component vaporization model and detailed chemistry[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 207: 134-152.
- [8] JONES W P, TYLISZCZAK A. Large eddy simulation of spark ignition in a gas turbine combustor[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2010, 85(3): 711-734.
- [9] QIAO Yingjie, MAO Ronghai, LIN Yuzhen. Large eddy simulation of the ignition performance in a lean burn combustor[R]. ASME Paper GT2015-43872, 2015.
- [10] 颜应文, 赵坚行, 张靖周, 等. 环形燃烧室两相喷雾燃烧的大涡模拟[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(5): 824-830.
YAN Yingwen, ZHAO Jianxing, ZHANG Jingzhou, et al. Large-eddy simulation of turbulent spray combustion in an annular combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(5): 824-830. (in Chinese)
- [11] 杨洪磊, 李雅军, 杨仁, 等. 燃气轮机燃烧室点火特性[J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(1): 60-63.
YANG Honglei, LI Yajun, YANG Ren, et al. Research on performance of gas turbine combustor ignition[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(1): 60-63. (in Chinese)
- [12] 周瑜, 黄渊, 陈伟强, 等. 高空来流条件下航空发动机双旋流燃烧室点火特性数值模拟[EB/OL]. [2022-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1813.V.20220222.1627.010.html>.
- [13] FRANZELLI B, RIBER E, SANJOSE M, et al. A two-step chemical scheme for kerosene-air premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1364-1373.
- [14] LACAZE G, CUENOT B, POINSOT T, et al. Large eddy simulation of laser ignition and compressible flow in a rocket-like configuration[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(6): 1166-1180.
- [15] 夏一帆. 面向航空发动机燃烧室点火问题的数值计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
XIA Yifan. A study of numerical methods for the ignition process in aeroengine combustors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [16] COLIN O, DUCROS F, VEYNANTE D, et al. A thickened flame model for large eddy simulations of turbulent premixed combustion[J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(7): 1843-1863.
- [17] ANGELBERGER C, EGOLFOPOULOS F, VEYNANTE D. Large eddy simulations of chemical and acoustic effects on combustion instabilities[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2000, 65(2): 205-222.
- [18] LEGIER J P, POINSOT T, VEYNANTE D. Dynamically thickened flame LES model for premixed and non-premixed turbulent combustion [C]//Proceedings of the Summer Program. Stanford, California: Stanford University, 2000: 157-168.
- [19] LACAZE G, RICHARDSON E, POINSOT T. Large eddy simulation of spark ignition in a turbulent methane jet[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(10): 1993-2009.
- [20] BOILEAU M, STAFFELBACH G, CUENOT B, et al. LES of an ignition sequence in a gas turbine engine[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(1/2): 2-22.
- [21] 王凯兴, 刘富强, 范雄杰, 等. 点火位置对中心分级燃烧室点火过程影响的研究[EB/OL]. [2022-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1813.V.20220222.1627.010.html>.
- [22] BRANDT D E, WESORICK R R. GE gas turbine design philosophy[R]. Schenectady, US: GE Power Systems, 1994.

(编辑: 陈 越)