

文章编号: 1000-8055(2010)02-0314-06

过渡态工况下环形燃烧室热态三维数值模拟

王慧汝, 金捷, 刘大响

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机数值仿真研究中心, 北京 100191)

摘 要: 利用商用软件对环形燃烧室从慢车到最大状态的过渡态过程进行了数值模拟, 并通过与传统的工程计算方法(利用稳态计算来近似过渡态计算)得到的结果进行分析比较, 研究了过渡态过程对燃烧室温度场的影响, 结果表明: ①过渡态计算与对应工况点的单点稳态计算存在一定的差别, 主要表现在稳态计算的出口温度比过渡态计算的整体偏高; ②时间步长是影响过渡态计算的关键因素, 较小的时间步长能够使不同时刻流场参数之间的相互联系更加紧密, 计算结果也就更接近于过渡态的真实过程; ③过渡态计算中出口平均温度相对于油气比的变化在时间上具有一定的滞后性。

关 键 词: 环形燃烧室; 过渡态; 出口温度分布; 滞后现象; 温度场; 数值模拟

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Numerical simulation of three dimension combustion in an annular combustor during a transient state

WANG Hui ru, JIN Jie, LIU Da xiang

(Aeroengine Numerical Simulation Research Center, School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A numerical investigation of an annular combustor in a transient state (from idle to maximum) was conducted with commercial software FLUENT by adding the UDF (user defined function) subroutines. Temperature field was studied by comparing with traditional method (which used steady simulation at some discrete operation conditions to approximate the transient state). The results show that: (1) there are large differences between transient and steady simulation at corresponding operation condition, the outlet temperature distribution of steady simulation is higher than the transient simulation; (2) the time step is a critical factor affecting the accuracy of transient simulation, a small time step could account for the close interaction with flow field parameters of different times; (3) a hysteresis phenomenon during the transient state exists at the averaged outlet temperature in relation to fuel air ratio.

Key words: annular combustor; transient state; outlet temperature distribution; hysteresis phenomenon; temperature field; numerical simulation

随着计算燃烧学和计算流体动力学的快速发展, 数值模拟已成为燃烧室设计中重要的辅助手段。目前, 国内燃烧室的数值模拟^[1-5]大部分是模拟燃烧室设计点的性能, 还未见有公开文献对燃

烧室过渡态进行数值模拟。而燃烧室过渡态性能对涡轮叶片、火焰筒的热疲劳寿命的准确确定, 发动机的过渡态性能、稳定的工作范围等有着重要的影响, 因此有必要进行详细地研究。

收稿日期: 2009-03-13; 修订日期: 2009-12-23

作者简介: 王慧汝(1984-), 男, 山西长治人, 博士生, 主要从事航空发动机数值模拟方面研究。

燃烧室的过渡态过程主要包括点火过程, 从慢车到最大状态的加速过程, 最大状态到慢车的减速过程, 贫油熄火等过程. 国外研究者已经对点火过程^[6], 贫油熄火过程^[7]展开了数值模拟研究, 但慢车到最大状态的加速过程还未检索到相关数值模拟的研究文献. 因此本文重点对燃烧室从慢车到最大状态的过渡态过程进行研究.

为了近似获得该段过渡态过程的性能参数, 工程上常用的方法是把该段过渡态过程分解成不同时刻的工况点, 对每个工况点单独进行稳态计算来获得. 这样做没有考虑前一个时刻流场变化对后一个时刻流场的影响, 而从理论上来说, 描述过渡态的控制方程是抛物线型的, 即某一时刻的物理量取决于该时刻以前的情况及其对应的边界条件.

因此, 本文通过在商用软件 FLUENT 中添加 UDF (user-defined function) 程序, 实现燃烧室从慢车到最大状态这段过渡态过程的自动计算, 使得上一时刻的计算结果自动地作为下一时刻的初场, 这样流场参数在过渡态过程中相互依赖、影响的特点就得到了体现. 同时, UDF 程序根据给定的时间步长确定计算的离散时间点和相对应的工况参数, 利用 FLUENT 进行计算, 直至完成过渡态过程的计算.

1 几何模型和网格划分

计算模型为环形燃烧室整环的 1/18, 如图 1 所示. 该环形燃烧室由带有压气机末级导向叶片的前置扩压器、双路气动雾化喷嘴, 带有双涡流器和文氏管的机械加工的环形火焰筒. 火焰筒向外倾斜 13°. 火焰筒内外环各有一排主燃孔和掺混孔, 各 5~6 排气膜冷却缝槽. 计算网格采用非结构化网格, 在主燃区, 旋流器等局部区域加密, 以提高计算精度和准确性, 网格单元个数大约 250 万, 如图 2 所示.

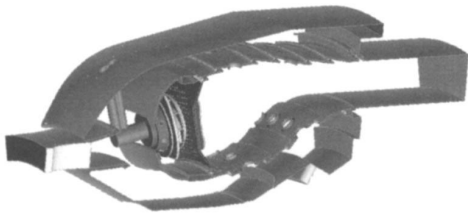


图 1 1/18 环型燃烧室

Fig. 1 One eighteenth of an annular combustor

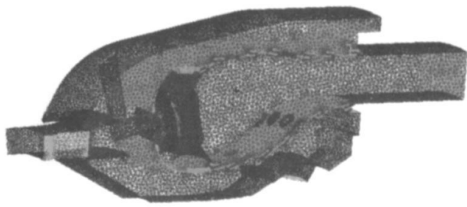


图 2 计算域网格

Fig. 2 Grid configuration of the geometrical model

2 数值计算方法

2.1 数学模型

数值计算采用 FLUENT 6.2 商用软件. 湍流模型选用模拟漩涡流动能力强, 且比 RNG (renormalization group) 模型更容易收敛的 Realizable $k-\epsilon$ 双方程模型^[8]封闭平均雷诺应力. 数值算法采用 SIMPLE 算法, 近壁区采用标准壁面函数处理. 两相流计算采用颗粒随机轨道模型, 在全流场中用拉格朗日方法跟踪离散液滴的运动和输运^[9]. 对于化学反应的处理采用小火焰模型^[10-14], 航空煤油用简化平均分子式 C_7H_{16} 代替, 小火焰模型所需的化学反应过程采用 C_7H_{16} 的详细 42 步机理^[9], 计算过程中没有考虑辐射和燃油的二次雾化过程.

2.2 计算工况

选取地面慢车到最大状态作为过渡态工况, 其进口总压总温, 油气比随时间的变化规律如图 3 和图 4 所示. 此变化规律通过为 UDF 子程序嵌入 FLUENT 中.

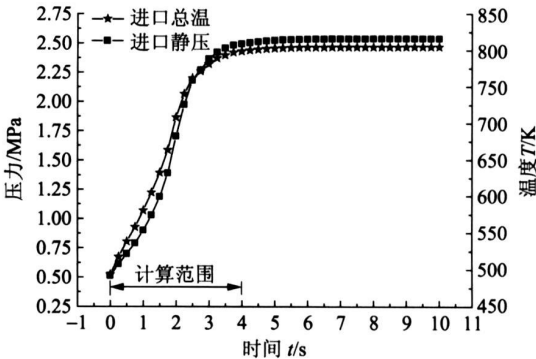


图 3 进口总温和总压随时间的变化曲线

Fig. 3 Sketch of inlet total temperature and pressure versus time

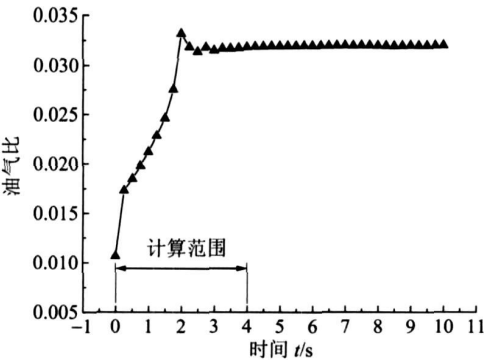


图 4 油气比随时间的变化曲线

Fig.4 Sketch of fuel air ratio versus time

2.3 边界条件

1) 进出口边界条件

进口采用质量进口边界条件,UDF 子程序根据每个计算时间点给定相对应的进口总温、总压、空气流量、供油量等参数.出口截面采用质量出口(outflow)边界条件.

2) 壁面边界条件

$u = 0, v = 0$.近壁处的湍流动能 k 及其耗散率的 ϵ 值由壁面函数法确定.

3) 周期性边界条件

燃烧室的两侧面设定为旋转周期性边界条件,旋转角度为 20° .

4) 燃油喷射

给定喷射类型为雾化锥形式,喷射角度与喷嘴中心轴线成 13° ,液滴分布采用 Rosin Rammler 分布.

2.4 计算内容

在综合考虑计算模型的复杂性和计算所需的时间之后,选取参数变化范围较大的时间段 $t = 0 \sim 4.0\text{ s}$ 进行等时间步长的过渡态计算.计算分两次进行,时间步长分别选取 0.05 s 和 0.25 s .同时,选取过渡态过程中的某一个时刻的进口空气流量,总温和供油量等参数单独进行稳态计算以便进行稳态和对应的过渡态计算的比较分析.

3 计算结果与分析

3.1 稳态和过渡态计算对比分析

图 5~ 图 7 给出了时间步长为 $0.05, 0.25\text{ s}$, $t = 0.75, 2.75, 4.0\text{ s}$ 时刻过渡态计算和对应时间点工况条件下稳态计算的径向出口温度分布,从图中不难看出,稳态和过渡态计算之间存在着较大的差异.这主要是因为:存在于主燃区内的高温(如图 8 和图 9 所示)通过输运和扩散作用向出口

方向传递,对于稳态计算在获得收敛解时,温度场和流场各个参数与对应的工况是吻合的,出口温度较为真实地反映了该油气比下能量变化所导致的温度变化(暂时不考虑辐射,热损失等).

而对于过渡态计算而言,在一个时间步内,如果主燃区的高温还没来得及传至出口截面,工况参数就已经发生变化,进入下一个时刻的计算,那么此时计算的出口温度分布就与该工况条件下能量变化所能导致的温度场应有的变化不相一致.因此过渡态与稳态计算结果就会有所差别.图 8 和图 9 分别给出 $t = 0.75\text{ s}$ 时刻所对应的稳态工况和过渡态工况条件下计算得到的环形燃烧室剖面的温度分布,从图中可以看出,在主燃孔之后稳态计算的温度已经与过渡态计算的温度有差别,出口温度分布因此也会有所差别.从图 5~ 图 7 还可以进一步得出,稳态计算比过渡态计算的出口温度整体偏高(75% 叶高位置的温度相差最高达 150 K).

同时,由图 10 和图 11 给出的出口截面温度云图可以发现,过渡态计算的出口温度沿周向分布比稳态计算的结果更加不均匀(75% 叶高位置尤为突出).这种现象同样可以解释为过渡态计算时,圆周向方向存在的温度梯度导致的变化还未来得及向各个方向传递完全就已经进入下一个时间点的计算;而稳态计算的结果完成了这一过程,因此过渡态计算的出口温度沿周向分布相对于稳态计算更加不均匀.

3.2 时间步长对过渡态计算的影响

图 5~ 图 7 给出了不同时间步长时过渡态计算的出口温度分布,从图中可以得知,时间步长取得越大,主燃区的高温就越有足够的时间传递到出口截面,出口温度分布就越接近稳态计算结果.

相反,时间步长变小之后,主燃区温度的变化还没传递到出口截面,工况参数就已经发生了变化,进行下一个时间步的计算,这时主燃区的温度继续发生变化,全场温度的变化都是以上一个时间步的温度场为基础的.这样过渡态过程中各个时间点之间的相互关联、影响的特点就得到了体现,越接近真实的过渡态过程.

同时图 7 显示时间步长 0.05 s 与 0.25 s 的出口温度分布基本重合.这表明在给定的过渡态过程的后半期,参数变化开始缓慢的时候,时间步长对过渡态计算的影响因素减小.因此时间步长这时可以适当放大.

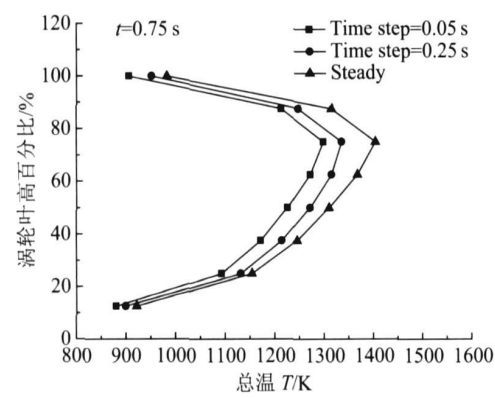


图5 $t=0.75\text{ s}$ 过渡态和稳态计算的出口温度分布

Fig. 5 Outlet total-temperature distribution of transient and steady simulation at $t=0.75\text{ s}$

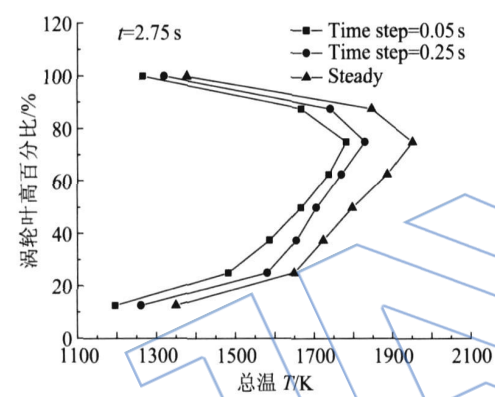


图6 $t=2.75\text{ s}$ 过渡态和稳态计算的出口温度分布

Fig. 6 Outlet total-temperature distribution of transient and steady simulation at $t=2.75\text{ s}$

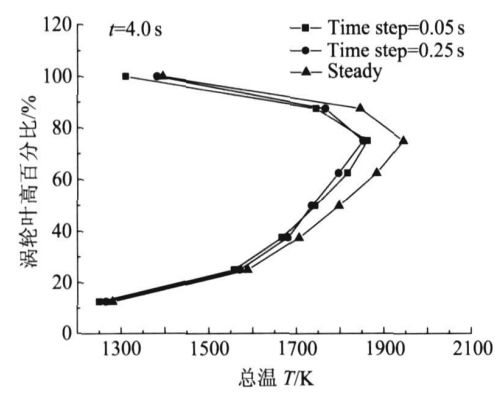


图7 $t=4.0\text{ s}$ 过渡态和稳态计算的出口温度分布

Fig. 7 Outlet total-temperature distribution of transient and steady simulation at $t=4.0\text{ s}$

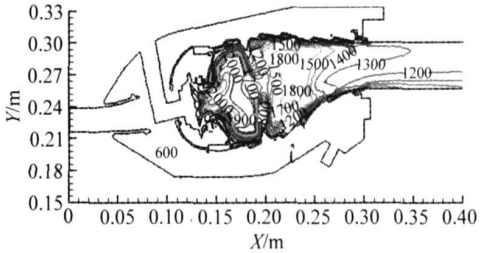


图8 $t=0.75\text{ s}$ 稳态计算的燃烧室剖面总温(单位:K)

Fig. 8 Contours of total-temperature of the combustor cross-section for steady simulation at $t=0.75\text{ s}$ (unit: K)

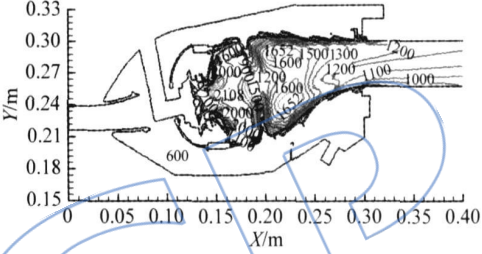


图9 $t=0.75\text{ s}$ 过渡态计算的燃烧室剖面总温(单位:K)

Fig. 9 Contours of total-temperature of the combustor cross-section for transient simulation at $t=0.75\text{ s}$ (unit: K)

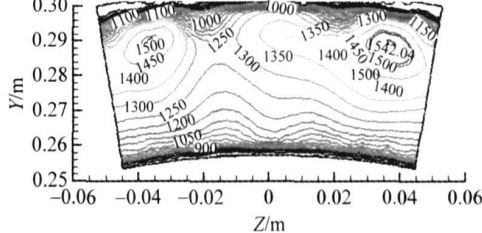


图10 $t=0.75\text{ s}$ 稳态计算出口截面总温(单位:K)

Fig. 10 Contours of total-temperature of outlet for steady simulation at $t=0.75\text{ s}$ (unit: K)

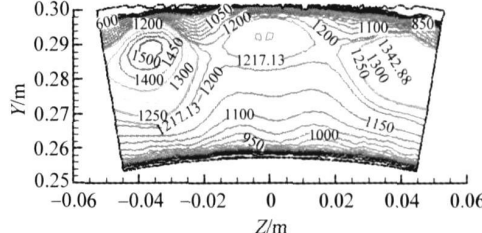


图11 $t=0.75\text{ s}$ 过渡态计算的出口截面总温(单位:K)

Fig. 11 Contours of total-temperature of outlet for transient simulation at $t=0.75\text{ s}$ (unit: K)

3.3 过渡态计算结果分析

图 12 给出了时间步长为 0.05s 下,出口温度随时间的变化关系.从图中可以看出,前 2.0s 内,出口温度分布曲线渐进式地向高温方向移动,在 $t=1.75\text{ s}$ 时刻到 $t=2.20\text{ s}$ 时刻之间,出口温度分布曲线向高温方向有大幅度地跨越,随后出口温度分布曲线向低温方向回移,在 $t=3.0\text{ s}$ 以后,出口温度分布曲线缓慢向高温方向移动.

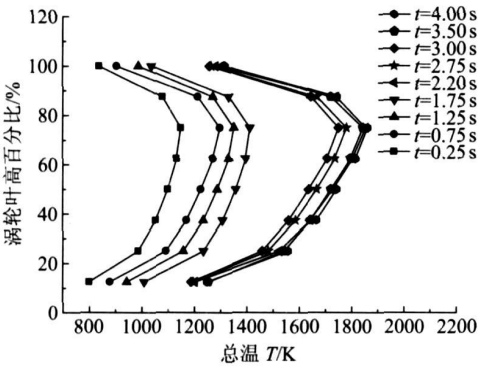


图 12 不同时刻的过渡态计算出口温度分布
Fig.12 Outlet total temperature distribution versus time for transient simulation

这一现象与油气比随时间的变化关系(图 4)是相一致的.从图 4 可知,前 2.0s 内油气比稳步增加,在 $t=2.0\text{ s}$ 附近油气比达到峰值,在 $t=2.0\text{ s}$ 之后油气比下降,油气比在 $t=3.0\text{ s}$ 后变化趋于平缓.

为了进一步验证上述结论,给出油气比和出口平均温度随时间的变化关系(图 13).从中可以看出,在前 2.0s 内油气比增加时,出口平均温度也增加,在 $t=2.0\text{ s}$ 附近油气比增加较快时,出口

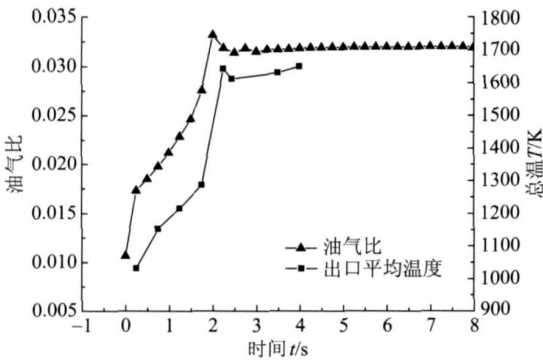


图 13 过渡态计算出口平均温度和油气比随时间变化规律
Fig.13 Outlet mean total temperature and fuel air ratio versus time for transient simulation

平均温度增幅也较大($t=2.20\text{ s}$ 时刻比 1.75 s 时刻平均温度增加了 27%,大约 400 K 左右).在 $t=2.0\text{ s}$ 之后油气比下降,出口平均温度也随之下降,油气比在 $t=3.0\text{ s}$ 后变化趋于平缓,出口平均温度随着进口总温、总压的增加而小幅增加.

如前面所述,温度变化需要一定的时间,因此图 12 和图 13 中油气比先发生变化后,一段时间间隔后出口温度才开始体现这种变化,即出口平均温度相对于油气比的变化在时间上具有一定的滞后性.如油气比在 $t=2.0\text{ s}$ 达到最大值,但出口平均温度在 $t=2.20\text{ s}$ 才达到相应的最大值.

4 结 论

1) 过渡态计算结果表明,某时刻的温度场与对应工况参数的稳态计算结果相比存在一定的差别,主要表现在稳态计算得到的出口温度比过渡态计算的整体偏高(75%叶高位置最高相差 150 K 左右).

2) 过渡态计算过程中,当时间步长取得小时,上一个时间步流场参数的变化量还来不及完全扩散至全场,工况参数就已经发生变化,当前时间点流场参数的变化是基于上一个时间点的流场参数而变化的.因此小的时间步长使不同时刻流场参数之间的相互联系更加紧密,计算结果也就更接近于过渡态的真实过程.

3) 过渡态计算中工况参数改变,流场参数随之改变需要一定的时间,导致出口温度相对于油气比的变化在时间上具有一定的滞后性.

由于缺乏相关的过渡态实验数据,本文使用的相关计算模型还需要进一步校验,但本文通过 UDF 程序,自动实现了以过渡态控制规律为自变量的过渡态计算,减少了人工干预,为进一步优化过渡态控制规律提供了有利基础.

参考文献:

[1] 雷雨冰, 胡好生, 赵坚行. 环形回流燃烧室两相反应流场的数值研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 350-354.
LEI Yubing, HU Haosheng, ZHAO Jianxing. Numerical study of two phase reacting flow in annular reversed combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(4): 350-354. (in Chinese)
[2] 胡好生, 蔡文祥, 赵坚行, 等. 回流燃烧室燃烧过程的三维数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 454-459.
HU Haosheng, CAI Wenxiang, ZHAO Jianxing, et al. Numerical simulation of three dimensional combustion flows in annular reversed combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 454-459. (in Chinese)

- [3] 王平, 张宝诚. 航空发动机燃烧室主燃区的数值模拟分析 [J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 47-51.
WANG Ping, ZHANG Baocheng. Numerical simulation analysis of an aeroengine combustor primary zone [J]. Aeroengine, 2005, 31(1): 47-51. (in Chinese)
- [4] 蔡文祥, 赵坚行, 张靖周. 带圆筒头部火焰筒两相燃烧流场及性能计算 [J]. 推进技术, 2007, 28(2): 122-126.
CAI Wenxiang, ZHAO Jianxing, ZHANG Jingzhou. Numerical study of two phase field and combustion performance in annular combustor with cylindrical heads [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(2): 122-126. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] Boileau M, Staffelbach G. LES of an ignition sequence in a gas turbine engine [J]. Combustion and Flame, 2008, 154: 2-22.
- [7] Kim W W, Lienau J J, van Slooten P R, et al. Towards modeling lean blow out in gas turbine flame holder applications [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128: 40-48.
- [8] Yakhot V, Orszag S A. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Phys. Fluids: A, 1992, 4(7): 1510-1520.
- [9] FLUENT 公司. FLUENT 用户手册 [M]. 刘奇, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- [10] Peters N. Turbulent combustion [M]. London: Cambridge University Press, 2000.
- [11] Barths H, Peters N, Brehm N, et al. Simulation of pollutant formation in a gas turbine combustor using unsteady flamelets [R]. Twenty-Seventh Symposium on Combustion, 1998: 184F-1847.
- [12] Claramunt K, Consul R, Carbonell D, et al. Analysis of the laminar flamelet concept for nonpremixed laminar flames [J]. Combustion and Flame, 2006, 145: 845-862.
- [13] Pistch H, Chen M, Peters N. Unsteady flamelet modeling of turbulent hydrogen air diffusion flames [R]. Twenty-Seventh Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1998: 1057-1064.
- [14] Coelho P J, Peters N. Unsteady modeling of a piloted methane/air jet flame based on the Eulerian particle flamelet model [J]. Combustion and Flame, 2001, 124(3): 503-518.