

高温升燃烧室超大涡模拟技术研究

Research on Very-Large Eddy Simulation Technology for High Temperature Rise Combustor

张宏达 朱健 / 中国航发动力所 韩省思 / 南京航空航天大学

超大涡模拟是近年来新发展的一种数值模拟技术，具有计算精度高和适用性强的特点，同时对计算资源要求较小，将其应用于高温升燃烧室数值模拟，可解决复杂气动热力场精准辨析的瓶颈问题。

随着燃烧室性能的不不断提高，其内部结构设计往往十分复杂，相应流场结构和燃烧特性亦十分复杂，如图1所示。燃烧室内流场结构呈现多尺度、多物理场、强耦合等特征。无论是主燃烧室还是加力燃烧室，均涉及两相燃烧过程，其中湍流、燃烧、燃油雾化蒸发、掺混等基础物理过程对燃烧具有决定性的影响，对这些物理化学过程进行高精度数值模拟是一项严峻的挑战。

数值仿真技术

数值仿真技术是燃烧室设计的重要工具之一。相对于试验技术，数值仿真技术能够提供详细的流场信息，而且具有缩短研制周期、节约成本等优点。燃烧室数值模拟作为数值仿真领域内的典型代表，具有学科交叉广、复杂程度高等特点，目前主要发展了雷诺平均方法（RANS）、大涡模拟方法（LES）和直接数值模拟方法（DNS）等3种基本的数值模拟方法。

DNS不需要任何模型，直接求解所有的湍流和化学反应时间及空间尺度，具有最高的模拟精度，但计算资源消耗巨大，仅用于低雷诺数基础燃烧问题研究，短期无法应



图1 燃烧室内部燃烧过程大涡模拟结果

用于实际的燃烧室仿真计算。RANS方法针对湍流燃烧平均场进行求解，采用模型模化全部的湍流脉动信息，计算量小，但是精度较差，特别对于航空发动机燃烧室的强旋流、瞬态流动过程，RANS存在本质的缺陷，无法满足下一代航空发动机燃烧室的精细化设计要求。LES的计算量介于RANS与DNS之间，目前常应用于中低雷诺数流动和燃烧计算。

燃烧室中流动雷诺数很高，相应燃烧大涡模拟需要的计算资源显

著增加，仅单头部燃烧室大涡模拟计算需要的计算网格量就在几亿至几十亿量级，如此高的计算资源消耗限制了大涡模拟在工程研制中的广泛使用。面向航空发动机燃烧室工程需求，可承受的高精度数值模拟方法是近期急需发展的数值仿真技术。基于自适应湍流模拟技术（如超大涡模拟技术）及混合雷诺平均—大涡模拟方法框架建立燃烧的高精度计算模型和方法，是国际上燃烧数值模拟的一个重要发展趋势。

超大涡模拟技术

超大涡模拟技术^[1]是近年来新发展的一种自适应湍流模拟技术,在保证计算精度与传统大涡模拟相当的前提下,大幅提高计算效率、缩短计算时间,实现对仿真精度和仿真效率的兼顾。相比于传统的RANS和LES,超大涡模拟建模中考虑了更多的特征长度尺度,如表1所示。RANS只考虑流场中存在的最大长度尺度,即积分长度尺度,无法描述流场中的小尺度结构;LES建模中只考虑了湍流滤波长度尺度,与网格尺度直接相关,由于求解的湍流尺度在模型中没有显性体现,因此LES对计算网格极为敏感,需要很细密的计算网格才能得到高精度的计算结果。在超大涡模拟技术理论框架中,建模过程中直接考虑了积分长度尺度、湍流滤波长度尺度和柯尔莫哥洛夫长度尺度(即最小的湍流尺度)3个具有代表性的流场特征长度尺度,因此超大涡模拟技术能够整体考虑流场的多尺度特征,以此构建分辨率控制函数,可以依据流场涡系演化的实时特征,实现从RANS、LES到DNS之间的光滑过渡,自适应调整湍流模化与湍流求解之间的比重大小,从而显著减弱了对计算网格的敏感性,在保证高计算精度的同时显著降低计算量。

针对航空发动机燃烧室强旋流、

强分离的特点,创新团队应用超大涡模拟方法进行大量的计算测试与不断发展,包括各类复杂的具有挑战性的分离流动^[2]、强旋流流动^[3]计算等,展示出了高计算精度与鲁棒性。新发展的超大涡模拟方法具有LES的计算精度,同时计算量较LES至少减少1个数量级以上,因此在燃烧室数值仿真方面具有很大的应用潜力。

燃烧模型

航空发动机燃烧室中的燃烧过程是一个复杂的气液两相燃烧过程,针对稀疏相的两相燃烧过程已发展了多种数值计算方法。现阶段工程中应用比较广泛的是基于欧拉-拉格朗日的耦合方法,气相和液相的相互作用过程通过基本的物理模型来模化,因此湍流燃烧过程的数值计算主要在气相燃烧过程的基础上开展。湍流燃烧相互作用模型是燃烧数值模拟的关键所在,也是长期以来的研究热点。除了早期广泛使用的旋涡破碎模型(EBU)外,当前主要的燃烧模型包括基于火焰面建表的燃烧模型、概率密度函数(PDF)输运方法、增厚火焰燃烧模型(TFM)、涡耗散概念模型(EDC)、部分搅拌反应器模型(PaSR)和条件矩封闭模型(CMC)等,其中基于火焰面建表的燃烧模型、增厚火焰燃烧模型等方法在工程中具有较大的应用潜力,关于湍流燃烧模

型的详细论述见参考文献[4]。在超大涡模拟方法框架下,进一步发展相应的湍流燃烧模型,对实现工程燃烧室的高精度数值计算具有十分重要的作用。

超大涡模拟技术在燃烧室计算中的应用

超大涡模拟技术已在商业仿真软件平台Fluent及CFX、开源计算软件平台OpenFOAM及Code_Saturne上集成和广泛验证,创新团队运用基于 $k-\omega$ 模型的超大涡模拟方法完成了工程相关的LM6000燃气轮机燃烧室和高温升燃烧室两相燃烧过程高精度仿真计算。

LM6000燃气轮机预混燃烧室燃烧计算

LM6000燃气轮机预混燃烧室是一简化的单头部燃烧室,主要结构如图2(a)所示。方腔燃烧室除了旋流进口外,在上下壁面处分别设有一个冷气狭缝进口,燃料进口为当量比0.56的甲烷空气旋流预混气。基于燃料射流入口直径 D ,平均轴向速度以及燃料的运动黏度计算得到的雷诺数(Re)近似为320000,入口旋流数为0.56。计算采用结构化网格,网格数量约210万。图2(b)给出了燃烧室中截面处的瞬时温度分布,可以看出,在旋流驻定火焰作用下,火焰面在靠近射流出口处均具有明显的旋流杯结构。燃烧室的

表1 不同数值模拟方法建模中的特征长度尺度

数值计算方法	雷诺平均方法	大涡模拟方法	直接数值模拟	超大涡模拟方法
特征长度尺度	L_i (积分长度尺度)	L_c (滤波长度尺度)	L_k (柯尔莫哥洛夫长度尺度)	L_i (积分长度尺度) L_c (滤波长度尺度) L_k (柯尔莫哥洛夫长度尺度)
数量	1	1	1	3

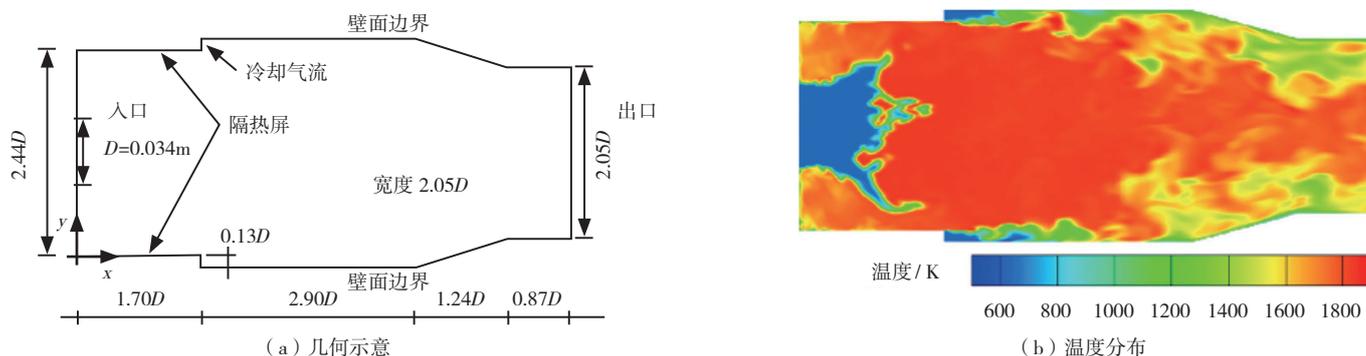


图2 LM6000燃气轮机预混燃烧超大涡模拟计算结果

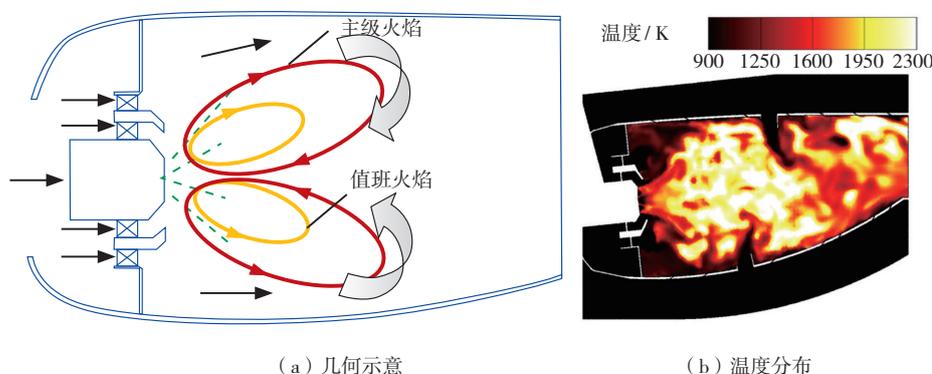


图3 高温升燃烧室两相燃烧超大涡模拟计算结果

温度分布均具有明显的“颈部”结构，这主要是由于狭缝冷气对燃烧室冷却产生的特有结构，并且与燃烧室主流形成剪切作用。火焰面产生明显的褶皱，说明当前的计算能够很好地捕捉较为精细的流场结构。

高温升燃烧室两相燃烧计算

航空发动机高温升燃烧室如图3(a)所示，其燃烧室头部由三级旋流器和双油路喷嘴组成^[5]。采用四面体非结构网格对计算模型进行网格划分，网格总数约为1500万，选取发动机热力循环设计点燃烧室工作参数作为数值模拟状态点。高温升燃烧室头部中心截面的瞬时温度场分布如图3(b)所示。在火焰筒头部，由于燃油不断蒸发吸热，蒸发的燃气被卷吸进入头部中心回流区，回流区内较低的气流

速度为燃烧创造了有利条件，并不断补充新鲜空气，大部分燃料在回流区中燃烧，导致燃料快速消耗，温度迅速升高。另外，火焰筒大孔射流对回流区产生了截断作用，大孔射流中一部分受回流区的卷吸作用参与了回流，另一部分与高温燃气来流发生掺混。

结束语

针对下一代先进发动机的研制需求，创新团队以加强正向设计、提高仿真能力、提升燃烧室部件的性能和可靠性为目标，深入系统地开展燃烧室超大涡模拟技术研究，建立超大涡模拟高精度仿真方法及相应的工具、流程、规范，实现在通用计算仿真平台上的集成，对解决航空发动机燃烧室复杂气动热力场精准

辨析的瓶颈问题具有重要意义，有力支撑了燃烧室设计方案的快速评估、筛选和优化，初步解决了大涡模拟对计算资源要求过高难以在型号中广泛应用的难题。

航空动力

(张宏达，中国航发动力所，工程师，主要从事先进发动机燃烧室技术研究)

参考文献

- [1] Han X S, Krajnovic S. Validation of a novel very large eddy simulation method for simulation of turbulent separated flow [J]. International journal for numerical methods in fluids, 2013, 73: 436-461.
- [2] Han X S, Krajnovic S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model [J]. AIAA journal, 2015, 53: 1103-1108.
- [3] Xia Z Y, Han X S, Mao J K. Assessment and validation of very-large-eddy simulation turbulence modeling for strongly swirling turbulent flow [J]. AIAA journal, 2020, 58: 148-163.
- [4] 张宏达. 湍流预混和分层燃烧中亚格子模型研究及其在大涡模拟中的应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [5] 张宏达, 万斌, 张成凯, 等. 高温升燃烧室综合燃烧性能超大涡模拟 [J]. 航空发动机, 2020, 46 (6): 11-15.