

# 航空发动机燃烧室数值仿真技术工程应用分析

## Engineering Applications of Numerical Simulation Technology for Aero Engine Combustor

■ 尚守堂 林宏军 程明 马宏宇 朱健 / 中国航发动所

随着计算流体力学和燃烧仿真模型的迅速发展，以数值仿真为主的燃烧室设计方法逐步取代以大量试验为主的常规设计方法成为可能，并为以最短的周期和最少的费用设计出高水平的航空发动机燃烧室开辟了新的技术途径。

**主** 燃烧室和加力燃烧室（如图1、图2所示）是航空发动机的重要部件，其燃烧性能的优劣将直接影响航空发动机的整机性能、动力输出和污染排放。燃烧室的工程研发具有学科集成度高、技术难度大、研发周期长、研制风险高等特点，其研发过程通常需要依赖大量的物理试验。出于降低研制成本、缩短研制周期和减少对物理试验依赖的初衷，20世纪70年代以来，燃烧数值仿真技术被引入到航空发动机的工程设计和型号优化过程中，使得燃烧室设计由基于物理样机的试验设计方法逐步转向基于燃烧虚拟仿真的设计方法。尤其是近年来，随着现代数学方法、计算机技术和燃烧仿真理论的迅速发展，燃烧数值仿真相关的物理、化学模型不断完善，使得数值仿真技术在航空发动机燃烧室工程研制过程中的作用日益突出，为燃烧室工程研制提供了新的技术手段。

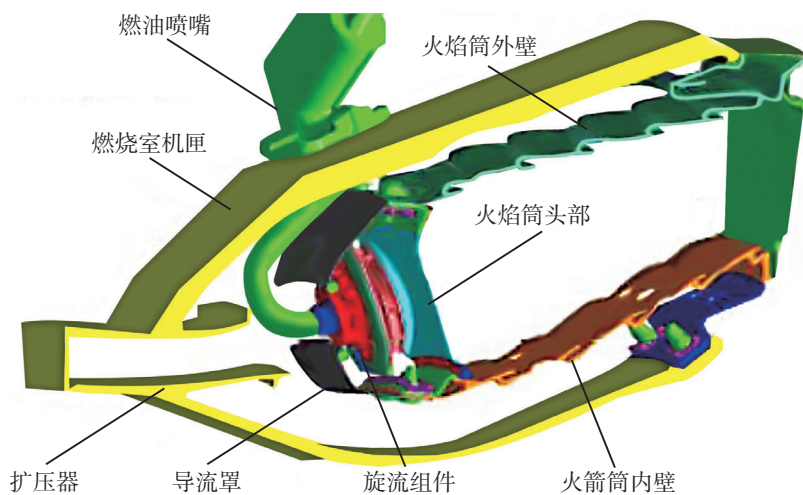


图1 典型主燃烧室示意

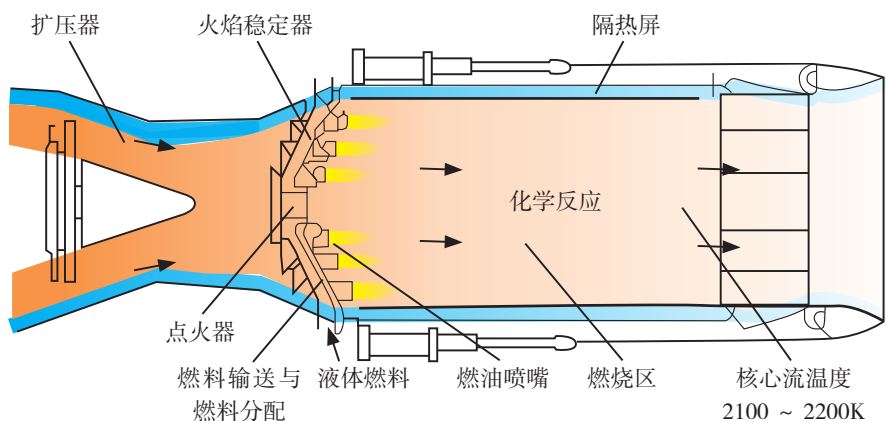


图2 加力燃烧室示意

### 燃烧室数值仿真工程应用的背景

#### 燃烧室设计的关键问题

燃烧室作为航空发动机动力的主要来源，其研制的过程受到了航空发动机研制机构的重点关注，通

常在其工程设计过程中需要关注如下技术问题。

一是燃烧室气动热力性能评估与优化（如图3所示）。主要关注主

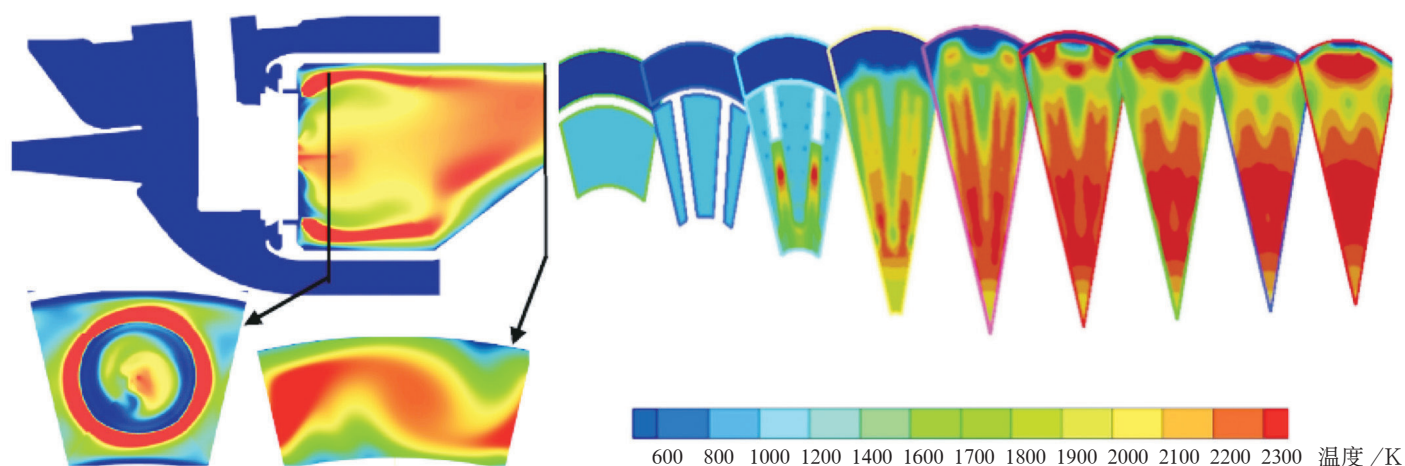


图3 主燃烧室/加力燃烧室综合燃烧性能评估

燃烧室和加力燃烧室的总压损失、燃烧效率、出口温度等气动热力性能参数，相关参数的评估和优化对航空发动机的综合性能有重要影响，必须在设计期间进行全面评估和优化。

二是燃烧室点火、熄火与动态燃烧稳定性预测。在工程设计过程中燃烧室的点火、熄火特性和动态燃烧稳定性，对发动机的使用包线、加速性和可靠性影响很大，工程分析与预测的方法并不完善，技术难度高，在设计中必须重点关注。

三是燃烧室构件装配与变形协调仿真及冷却、换热分析和强度寿命评估。燃烧室构件冷态装配与热态变形协调，以及因高温引起的刚度、强度和寿命问题突出。因此在设计中，需要掌握构件冷态装配与热态变形协调情况、冷却与换热特性和强度寿命状况，重点关注构件冷态装配配合与热态变形协调仿真，以及温度分析和强度寿命评估，改进和优化构件的温度和载荷分布，提升其工作的可靠性。

四是燃烧室详细燃烧过程研究。随着航空发动机设计技术的发展，

燃烧室部件内部燃烧过程的详细分析将对燃烧室部件设计提供重要的技术参考，尤其是航空发动机“正向设计”需求的提出。以往单纯的对燃烧室宏观性能参数的获取与分析，已不能满足先进燃烧室的设计需要，燃烧过程的精细化研究成为燃烧室工程设计所关注的新的发展方向。

#### 数值仿真对燃烧室设计的作用

针对上述燃烧室工程设计所关注的重要问题，常规的设计方法是在燃烧室设计中采用燃烧室设计结合工程燃烧室试验开展研制。而随着计算流体力学和计算燃烧学的迅速发展，以及燃烧室仿真技术在工程应用中的逐步深入，使得以基于计算机数值模拟、燃烧诊断为主的全新燃烧室设计方法取代以大量试验为主的常规设计方法成为可能。例如，在燃烧室方案设计中应用数值仿真手段，可为方案筛选、性能评估与方案优化提供必要的技术支撑；在燃烧室的详细设计中，通过燃烧室部件气动参数与燃烧性能的计算分析，可以模拟燃烧的全过程，增强设计人员对内部燃油雾化、两

相流动与火焰传播等物理化学过程规律的理解，为设计中多参数的优化问题和关键参数的选取提供技术参考；而在工程验证阶段，通过开展燃烧室的虚拟试验和遍历性仿真，将有效发挥其“试验前预测”的能力，大大减少试验工作量，提高燃烧室研发的质量，节约经费，有效降低研制的风险和成本，缩短研制周期。

#### 燃烧室数值仿真技术的工程应用现状

在航空发动机燃烧室研制过程中，燃烧数值仿真技术的工程应用可有效缩短燃烧室的研制周期，减少试验的数量和设计的风险，因而备受重视。各大航空发动机公司一直以来高度关注燃烧室仿真技术及软件的开发与工程应用（如图4所示）。各研发机构除采用ANSYS、Fluent、CFX、Star-CCM+等商用软件开展燃烧室性能评估和方案设计外，针对工程应用需求，基于工程试验数据还自主开发了专用的仿真软件，推动燃烧室数值仿真技术的发展和工程应用。

针对数值仿真对航空发动机工程研制的支撑需求，美国先后实施了燃烧室模拟评估（CME）、国家燃烧计算模块（NCC）、燃烧室设计模拟评估（CDME）、推进系统数值仿真（NPSS）等一系列数值模拟领域的重大研究计划，逐步推进航空发动机和燃烧室数值仿真技术的发展，并通过仿真方法的工程应用，验证了仿真技术的适用性，提升了燃烧室性能评估的精度。

同时，GE航空集团、普惠公司和罗罗公司等针对燃烧室工程研制的需要，开发了专门的燃烧室性能仿真软件，如GE航空集团的CONCERT湍流燃烧软件、普惠公司的PREACH软件包、罗罗公司的PACE、PRECISE软件包和赛峰集团的AVBP软件等，并结合商用计算流体力学（CFD）程序，如ANSYS、Fluent等，用于生产型和研究型燃烧室的性能预估，并指导新型燃烧室的设计。

在燃烧室性能预测方面，GE航空集团基于燃烧室研究团队开发的用于燃烧室性能研究的“无附加因素”试验前预测方法，完成了针对头部富油和头部贫油的旋流杯燃烧室，包括单环腔燃烧室（SAC）和

双环腔燃烧室（DAC）；双环预混旋流燃烧室（TAPS）和三环腔头部的干低排放的DACRS混合器燃烧室的试验数据与数值仿真精度的对比验证研究，使仿真预测结果和试验数据的一致性达到了令人满意的水平。在燃烧室工程设计和优化方面，GE航空集团基于NCC计划搭建的燃烧室性能分析平台，已完成了包括CFM56的双环腔燃烧室、CF6-80的低排放燃烧室LEC、GE90的双环腔燃烧室、LM1600、LM2500和LM6000的低污染燃烧室等多个新型燃烧系统的设计和优化。

罗罗公司则使用自行编制的PRECISE软件，预估生产型和研究型燃烧室的流场和出口温度分布以及低污染排放等燃烧性能来指导燃烧室设计与研制。意大利菲亚特（FIAT）公司则在与罗罗公司合作研制EJ200发动机加力燃烧室的过程中，大量采用了燃烧数值仿真技术，对加力燃烧室扩压器、稳定器、隔热屏流场进行计算分析，优化了设计方案。

通过相关数值仿真软件的工程应用表明，仿真软件对燃烧室流程参数的计算和性能评估不但可定性，而且还可在一定程度上定量满足工

程应用要求，使得燃烧室的工程研制周期缩短、研发成本大幅降低。

## 燃烧仿真技术工程应用关键和趋势分析

为了提升数值仿真技术在燃烧室工程研制上的适用性，必须以燃烧室研制的关键工程问题为出发点，力求从物理化学模型构建、燃烧室数值方法研究、高保真软件开发和工程应用等多个方面取得突破，逐步实现基于燃烧数值仿真技术的燃烧室“正向设计”方法建立和工程应用验证的目标，为此仍需重点开展如下研究工作。

### 燃烧数值仿真物理/化学模型的完善

在湍流燃烧计算模型研究方面，发展燃油雾化—蒸发仿真模型，构建复杂旋流场下的油气两相流动的数值模拟方法，实现燃烧室内多种喷嘴雾化的气液界面捕捉，燃油的一次、二次雾化过程的模拟，以及对火焰筒内部燃油蒸气浓度，燃油液滴的空间分布、速度分布、流量分布的精确预测。同时发展并简化国产RP-3燃油的化学反应模型，实现宽广工作范围的航空燃油化学反应动力学的工程应用，有效避免

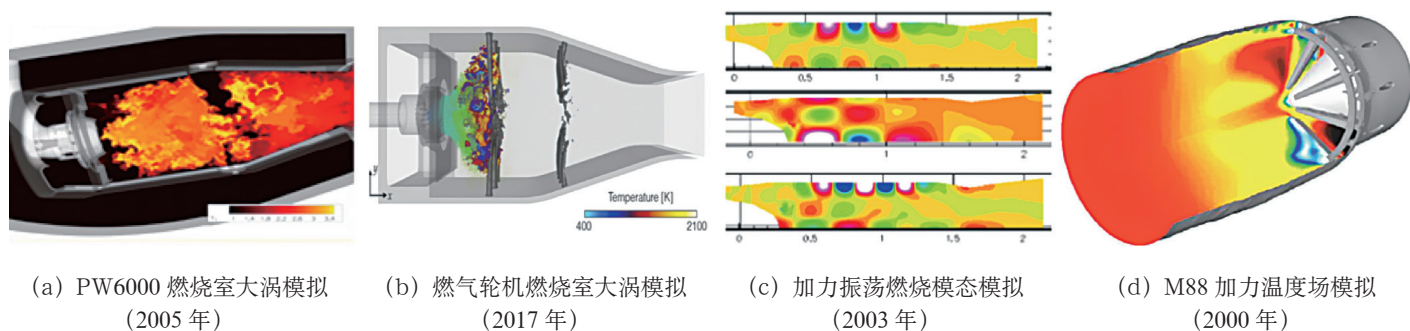


图4 燃烧室仿真技术的工程应用示例



化学反应对燃烧精度的影响；此外进一步开展高效湍流燃烧机理和燃烧计算模型的修正研究，为航空发动机燃烧室流场/燃烧场和综合性能的精确评估软件的构建提供相关模型的支撑。

### 加快LES高保真燃烧数值仿真软件的自主开发和工程应用

针对燃烧室工程设计中燃烧数值仿真过多依赖商业软件，而商用软件可扩展性受限，型号研制中积累的经验无法在软件中得以应用的问题，重点开展基于大涡模拟（LES）方法的高保真、高效燃烧数值仿真软件开发。基于LES湍流燃烧方法，结合高保真燃油蒸发模型、自适应湍流燃烧模型、化学反应机理模型，实现燃烧室复杂几何条件下三维两相非定常湍流燃烧的高效并行数值模拟，并基于工程燃烧室详细试验数据完成考核、验证；实现对燃烧室内燃烧流场的速度、密度、温度、组分浓度和湍流度等平均物理量，以及燃烧脉动趋势和瞬时数值的计算，满足工程应用的要求。

### 针对燃烧室点火/熄火和振荡燃烧问题开展数值仿真的专项研究

针对燃烧室中点火、熄火和振荡燃烧等非定常燃烧问题，重点开展工程可用的点火、熄火预测模型和数值模拟结合技术研究，逐步适用于航空发动机燃烧室宽工况变化的点火、熄火数值仿真方法和预测模型，解决现有预估模型对真实条件下的燃烧室点火、熄火特性预估不准确的问题，确保航空发动机燃烧室满足稳定工作和安全性要求，同时开展燃烧室热声耦合燃烧不稳定性预测模型及抑制方法研究，力求建立燃烧不稳定性的模态预测方

法，对振荡燃烧进行有效预测。

### 航空发动机燃烧室多学科耦合仿真的方法研究

燃烧室的设计研发涉及气动、强度和传热等多学科耦合仿真的问题，因此需要发展适用于工程设计中所需的燃烧室多学科耦合仿真方法研究，最终突破燃烧室流、固、热耦合仿真技术。研究将针对燃烧室构件强度、寿命仿真评估需求，发展燃烧室强度工程分析软件，实现对燃烧室构件的应力与变形、振动、屈曲、蠕变、疲劳寿命、损失容限、可靠性等进行计算分析与仿真评估，并在燃烧室的不同设计阶段得到应用。发展燃烧室构件冷态装配与热态变形协调仿真，基于结构设计软件，对燃烧室构件之间冷态装配位置关系、配合间隙、浮动补偿等，以及热态下变形、位移干涉等进行计算分析与仿真评估。此外，开展强度和换热计算的耦合计算方法研究，重点针对燃烧室部件复杂壁面通道建模及覆壁气膜流动、换热规律的计算研究，完成高温燃气辐射换热模型研究、校验和高温燃气辐射换热模型三维数值模拟分析及验证，建立适用于航空发动机换热和辐射模型，实现喷嘴、火焰筒的受热变形与流场的耦合计算与预测，确保燃烧室的可靠性和完整性。

### 高保真燃烧数值仿真软件的验证/确认研究

基于模型试验和试验数据的软件校核和验证（V&V）是提高燃烧仿真软件可信度和工程适用性的重要环节。因此，在燃烧数值仿真软件的工程应用研究中，须针对航空发动机燃烧室高保真数值仿真方法与软件，采用模型燃烧室算例和实

际工程算例进行验证；建设用于软件验证的航空发动机主燃烧室和加力燃烧室试验数据库，制定适用于工程应用的数值仿真软件验证和确认规范，构建工程可用的三维两相湍流非定常燃烧仿真预测能力评估体系，开展高保真燃烧数值仿真软件的V&V工作，提升软件的工程适用性和计算的精度，实现高保真仿真软件在型号设计计算平台上的部署，以及在工程设计中的广泛应用，突破燃烧室设计和性能预估的技术瓶颈。

## 结束语

针对航空发动机工程设计需求的燃烧室仿真技术及其工程应用，已成为航空发动机研制发展的必然趋势，必将推动航空发动机燃烧室设计和预测方法的创新发展，实现航空发动机燃烧室设计由试验驱动的传统研发模式（试出来的）向仿真驱动的预测研发模式（迭代优化出来的）的转变。作为航空发动机设计技术发展的方向之一，在燃烧室仿真工程应用方面仍然有很多的关键技术亟待突破，科研院所与院校应坚持以航空发动机研制需求为牵引，依托重大专项支持，扩大能力获取网络，加强仿真能力建设，重点开展仿真建模、理论研究、平台建设、软件校核验证等方面的工作，努力实现航空发动机燃烧室设计过程从简单仿真到精细仿真的转变，加快仿真技术在燃烧室工程设计中的应用与推广，提升燃烧室的研制和仿真水平。

航空动力

（尚守堂，中国航发动力所，研究员，主要从事航空发动机燃烧室设计）