

# 航空发动机燃烧室研发中的数值仿真探讨

## Numerical Simulation for Research and Development of Aero Engine Combustor

■ 索建秦 冯翔洲 梁红侠 巨翊宇 黎明 / 西北工业大学

数值仿真在燃烧室设计和研发的每一个阶段都可以发挥重要的作用，一方面可以节约研究经费、缩短研发周期；另一方面可以帮助研发人员理解和解释研究结果，进一步指导设计和研发工作。

数值仿真技术诞生于20世纪50年代，它是利用电子计算机，依靠数值解法和图像显示方法，对基本物理现象和工程问题进行数字模拟研究。数值仿真的适用范围和计算精度在很大程度上受限于计算平台性能（硬件和软件）、数值算法和各种物理模型。燃烧室是发动机核心机的三大部件之一，接收来自压气机的高压空气，通过燃烧将化学能转化为热能以驱动涡轮，进而带动压气机做功，因此燃烧室被称为发动机的“心脏”。随着计算机技术及数值模拟方法的发展，针对燃烧室的数值模拟近年快速发展，围绕燃烧室内复杂的物理化学过程开展了大量的数值仿真研究，并取得了一定的进展。

### 燃烧室工作特点、研发体系和研发特点

#### 燃烧室工作特点

燃烧室的工作条件非常苛刻，是发动机中承受最高压力和最高温度的部件。来自压气机的空气在燃烧室进口达到整个发动机中的最高压力，目前在研的发动机燃烧室进口压力高达7MPa；燃烧室进口的气流速度很高，目前可达到200m/s；燃烧室的工作温度也非常高，核心

燃烧区燃气温度可以达到2400K以上，远高于目前已有材料的熔点，因此火焰筒除使用高温合金材料外，还必须采用高效的冷却技术，以降低火焰筒的表面温度。

尽管燃烧室工作条件十分苛刻，其性能要求却不断提高。燃烧室的性能包括点火性能（地面和高空、高原和高寒条件下）、熄火性能（慢车贫油、吞水和吞冰及武器发射情况下）、燃烧效率、污染排放、出口温度分布、喷嘴积炭、寿命、结构和质量等方面的要求<sup>[1]</sup>。

#### 燃烧室研发体系

燃烧室设计研发体系包含5个阶段。第一和第二阶段属于预先研究的范围。在第一阶段中，针对基本概念中可能出现的问题进行科学研究。第二阶段为方案选择设计研究，要明确燃烧室整体技术方案和各零部件的技术方案。第三阶段是技术研发阶段，针对燃烧室的技术研发，纵向地往下进入初步设计。第四阶段是型号研发，结合方案选择设计研究中的总体方案、技术研发阶段的技术定型结果、售后服务中问题的信息反馈、总体和性能部门的要求以及循环参数，开始型号

研究计划，型号研发不允许失败。第五阶段是产品服役后的售后服务阶段，在这一阶段中设计上仍需不断地改进。

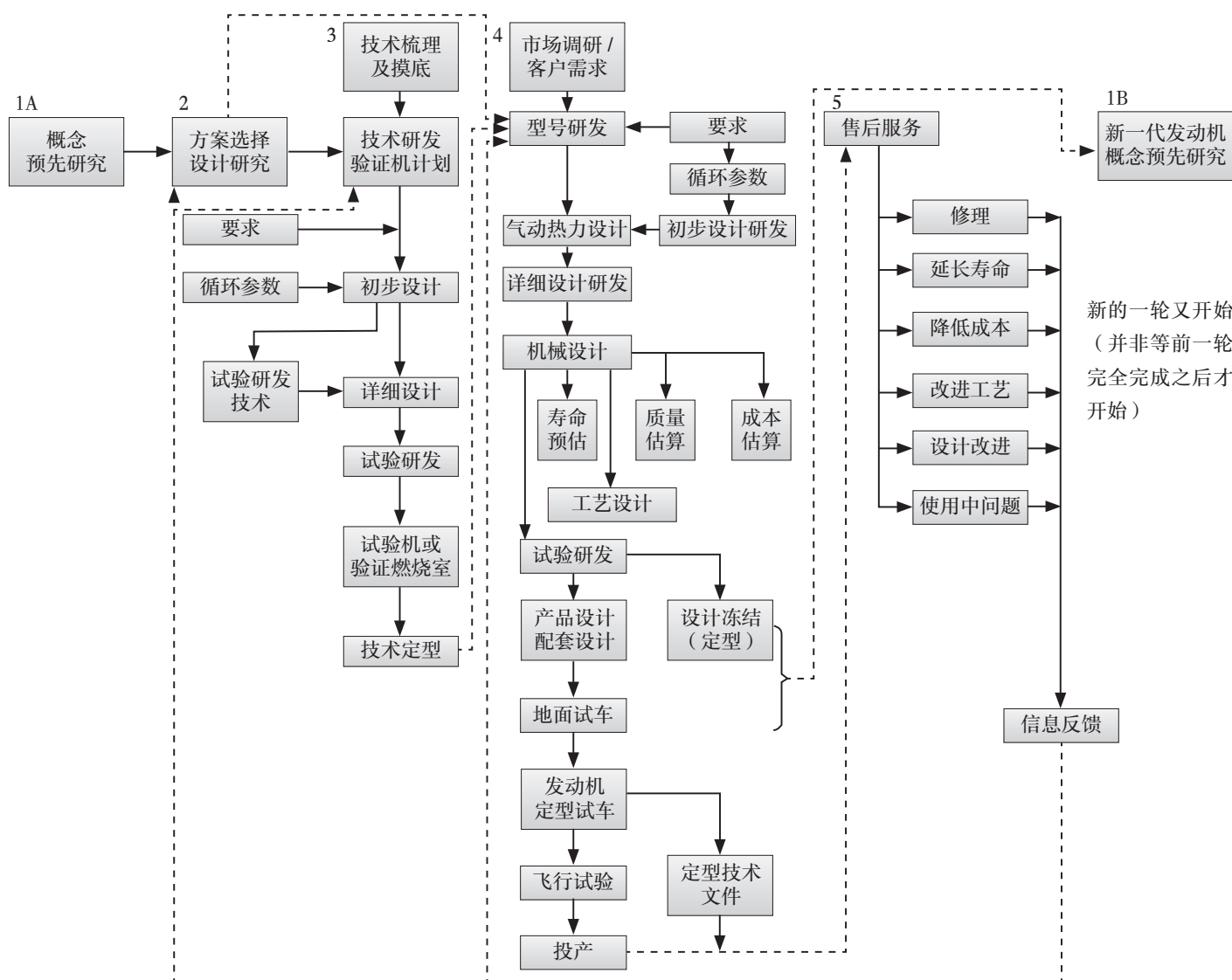
#### 燃烧室研发特点

在燃烧室设计过程中，要满足诸多性能方面的要求，设计上的举措往往是互相矛盾的，为改善其中的一个性能问题，设计上的举措可能导致另一个性能恶化，设计者必须在诸多的选项中做出妥协和折中。目前，燃烧室研发仍以试验为主，所有的设计均需要试验验证。

随着飞机对发动机要求的不断提高，对燃烧室的要求也愈来愈高，其研发难度大为提高。一方面燃烧室的许多性能要求会导致设计上的举措互相矛盾，例如，高温升燃烧室中大工况下冒烟与小工况下贫油熄火的矛盾，低污染燃烧室中氮氧化物（NO<sub>x</sub>）排放与一氧化碳（CO）排放的矛盾等。另外，燃烧室研发还具有周期长和资金需求高等特点。

### 数值仿真在燃烧室研发中的地位与作用

近年来，数值仿真在燃烧室方面的应用也得到快速的发展，在燃烧室



燃烧室研发体系<sup>[2]</sup>

设计研发过程的各阶段发挥作用。燃烧室的数值仿真结果可以帮助研发人员进一步理解燃烧室中的各种物理现象，解释研究结果，总结变化规律和设计方法。数值仿真可在一定程度上节约研究经费并缩短研发周期。针对已有的试验结果，将试验总结出的参数、经验公式等耦合进数值仿真软件中，对试验中遇到的问题进行有针对性的研究。这样既保证计算结果能基本符合定性要求，又可以减少试验次数，达到

节约经费及缩短研发周期的目的。

需要强调的是，燃烧室仿真不等于燃烧仿真。因为航空发动机燃烧室工作过程非常复杂，其仿真与燃烧仿真有很大的不同。

燃烧室的工作过程包含复杂的雾化、蒸发和化学反应过程。在雾化液滴尺寸分布方面，目前缺少高反压下喷入高温空气中的燃油雾化数据、初始液雾质量、液滴尺寸、初始喷射速度及方向等随喷嘴出口径向、轴向或周向分布的数据，因

此仿真结果往往与实际相差较大；针对多组分燃料液滴的蒸发，数值仿真中常用单组分燃油替代多组分燃油作简化处理，这对仿真结果中的油气分布以及出口温度分布也有很大影响；针对复杂化学反应过程，用总包反应进行替代完全不可行，对于NO<sub>x</sub>排放和冒烟计算，采用8个或10个方程组成的简化机理也远远不够。

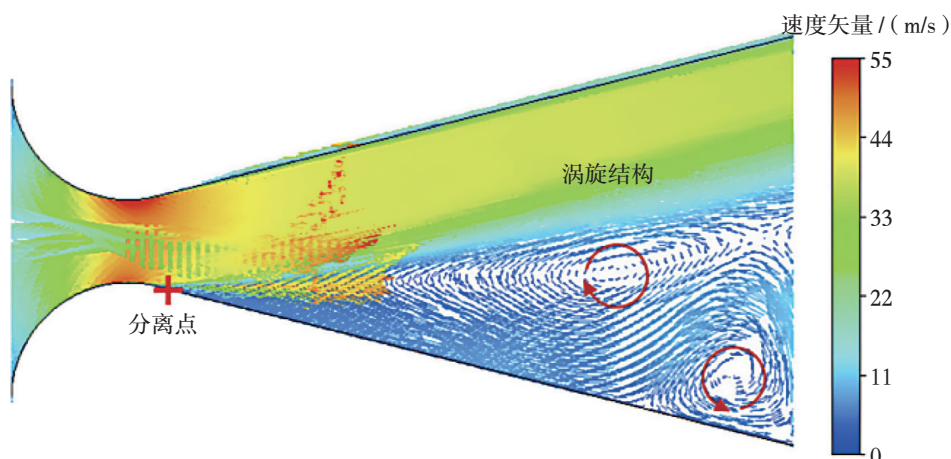
综上所述，结合数值仿真优势，再考虑到燃烧室内复杂物理化学反

应过程，在燃烧室气动热力设计和结构设计中均可应用数值仿真方法，下文将逐一进行介绍。

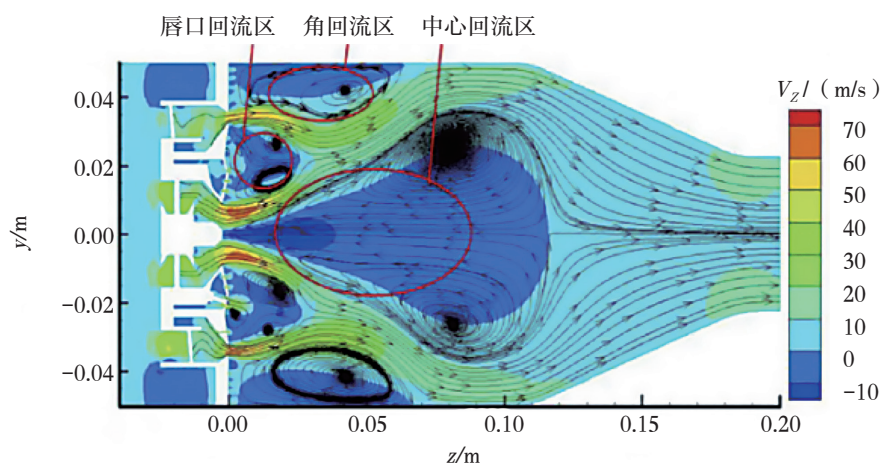
## 数值仿真在燃烧室气动热力设计中的应用

### 燃烧室内空气流动——扩压器

在设计阶段，数值仿真可用于研究不同结构扩压器中的流动特性。利用数值仿真方法，可以模拟出分离点位置以及分离点后流场结构，寻找出引起流动损失的关键因素。依据数值仿真结果，可以对扩压器结构进行优化，防止边界层分离过早的发生，降低扩压器的总压损失。



扩压器内流动速度矢量图<sup>[3]</sup>



火焰筒内轴向速度云图与流线图<sup>[4]</sup>

### 燃烧室内空气流动——火焰筒

在设计燃烧室头部及火焰筒时，为了获得良好的燃烧性能，首先需要有一个合理的流场结构。通过数值仿真技术，可以对火焰筒内部流动特性进行研究。不仅可以得到火焰筒内剪切层、回流区大小和分布情况，也可以获得火焰筒内气流的流量分配比例以校验设计方案。通过改变旋流器关键参数，流场结构也会随之发生变化，进而影响到燃烧特性。

### 燃油喷射及油气混合

针对燃油喷射、雾化及油气混合过程，通过数值仿真技术，可以

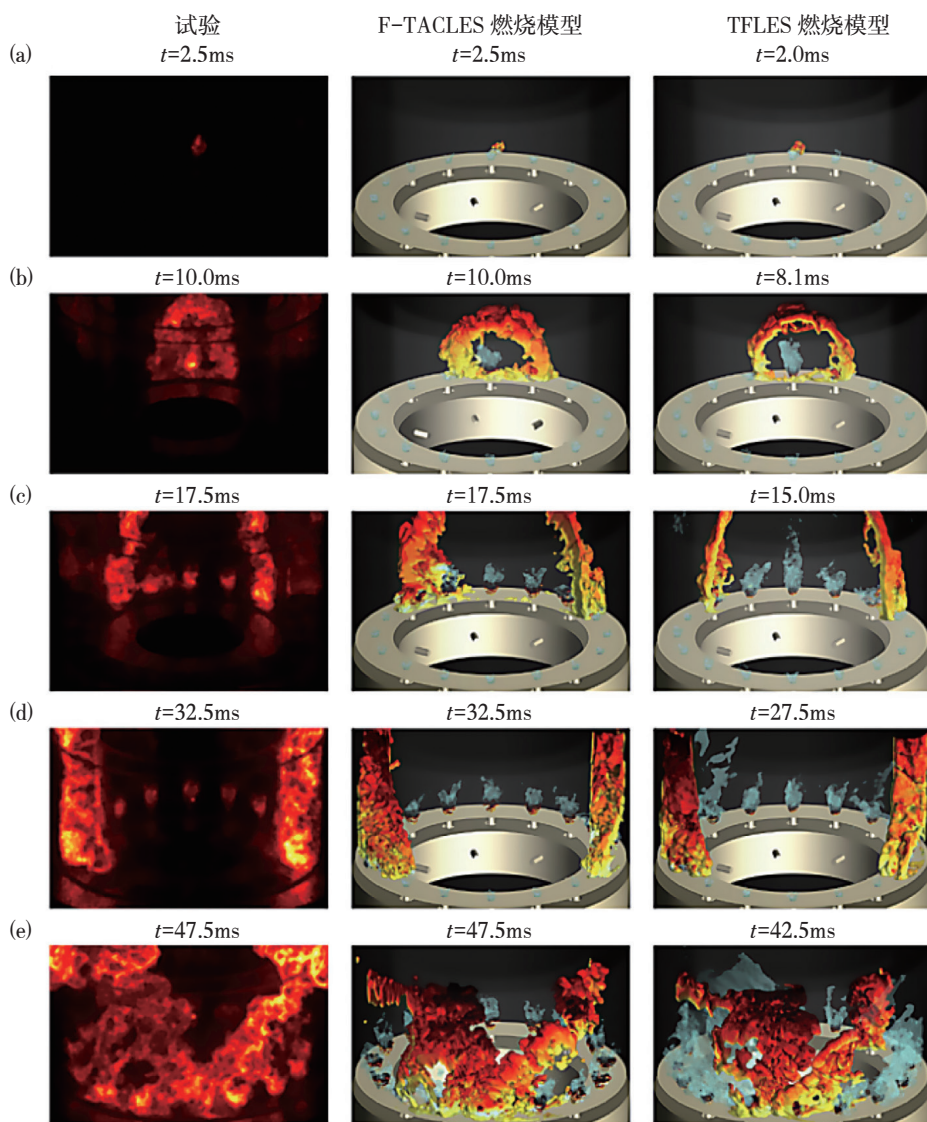
获得喷嘴下游油雾的非定常破碎及雾化过程，探究流动和喷嘴参数对破碎及雾化的作用；还可以获得燃烧室头部结构参数和气动参数对燃油雾化过程、液滴空间分布及油气比分布的影响规律；也可得到油气比三维空间混合及分布的情况，为燃烧室头部模型优化提供依据。

### 点火/熄火

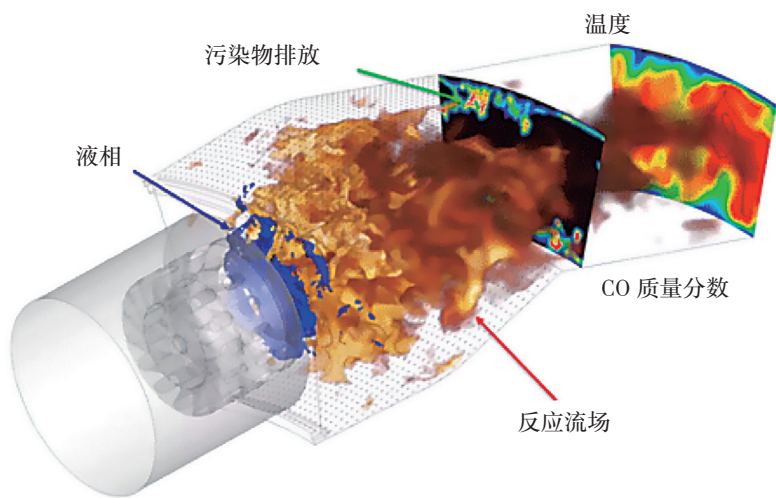
燃烧室点火/熄火过程总是伴随着相当复杂的物理化学过程，燃烧区的回流区尺寸、流场结构以及油气分布均会影响燃烧室的点火/熄火性能。通过数值仿真方法，一方面可以得到燃烧室内瞬态点火/熄火过程，阐明火核形成、传播发展、火焰稳定以及熄火的变化过程，确定影响燃烧室点火/熄火过程的关键参数，获得燃烧室内火焰稳定机理；另一方面通过研究燃烧室点火/熄火边界随燃烧室关键特征参数变化的影响规律，揭示流场和油雾分布与点火/熄火之间的相互作用，并研究燃烧室点火/熄火边界随关键特征参数的变化规律。

### 燃烧室性能

燃烧室性能参数主要包括燃烧效率、总压损失、污染排放和出口温度分布。目前，燃烧效率最常用的测试方法为燃气分析法，利用数值仿真技术，通过提取燃烧室出口的EICO和EIHC数值即可计算得出。燃烧室总压损失对发动机效率和耗油率有很大影响，利用数值仿真方法，确定影响燃烧室总压损失的因素，为方案改进提供依据。燃烧室污染物主要包括CO、NO<sub>x</sub>、未燃碳氢化合物和碳颗粒等，利用数值仿真方法，一方面可以通过监测出口截面污染物组分数值，完成污染物



点火过程试验与数值仿真对比图<sup>[5]</sup>



燃烧室性能数值仿真图<sup>[6]</sup>

测量；另一方面，也可通过研究燃烧过程分析污染物生成机理，为方案改进提供依据。燃烧室出口温度分布要求是涡轮寿命的根本保证，利用数值仿真可以对出口截面的温度分布及其影响因素进行研究，为出口温度分布调试提供依据。

### 火焰筒冷却及壁面温度分布

火焰筒及头部均需要冷却，使其在相应气动热负荷及材料下，工作温度可以保证燃烧室要求的寿命。与试验方法相比，利用数值仿真可以得到火焰筒壁面上每一点的温度和温度梯度分布。此外也可以更直观地看到热点的数值与分布情况。因此，可以更全面地反应火焰筒的冷却效果，可为火焰筒寿命评估提供数据支撑。

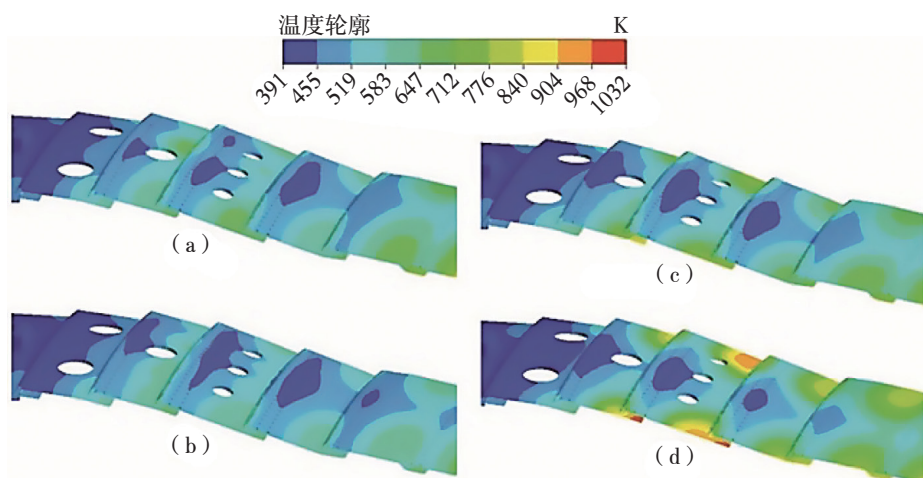
## 数值仿真在燃烧室结构设计中的应用

### 火焰筒和机匣强度

燃烧室在工作时，火焰筒表面存在一定的温度梯度，进而产生热应力。利用数值仿真方法，可以研究不同工况下，火焰筒与机匣的结构动力学参数随燃烧室内温度变化的规律，通过分析热应力的影响因素为火焰筒热防护和机匣强度设计提供依据<sup>[8]</sup>。

### 装配关系

燃烧室是由大量零部件组装而成的。在设计阶段，要确定零件的装配位置、装配顺序及喷嘴的安装与取出方案。利用仿真系统可进行燃烧室的虚拟装配，从而详细地展示整个拆装的工艺流程，包括工具的选择和拆装步骤等。这对于燃烧室乃至发动机的知识普及和教学培训都有积极的效果<sup>[9]</sup>。

火焰筒壁温分布图<sup>[7]</sup>

### 支撑对流动和性能的影响

扩压器与火焰筒的支承结构以及燃油喷嘴/杆均会对燃烧室内部流动和燃烧性能产生影响,利用数值仿真技术能够评估其对燃烧室性能的影响,指导燃烧室内部支撑方式及燃油喷嘴/杆布局的优化。

### 燃烧室数值仿真体系建设

目前,商用软件在燃烧室数值仿真研究中仍然占据主导地位,为了建设自主的数值仿真体系,需要做到以下几点。

首先,需要自主研发燃烧室专用的数值仿真软件,包括网格划分、针对燃烧室数值仿真计算的算法以及模型和后期数据处理软件等。这些均需要自主编写的源代码支撑。

其次,需要统一规划,分步实施。统一规划需要总体部门对整机数值仿真体系进行规划,分步实施主要从3个方面体现:第一,针对整机,需要先进行单独部件,例如压气机、燃烧室、涡轮的数值仿真研究,再进行整机数值仿真;第二,针对单独部件,例如燃烧室,需要从简单到复杂逐步开展数值仿真工作;第

三,针对硬件基础,需要搭建强大的计算平台,开发高效的并行算法以提高计算效率,缩短研发周期。

最后,需要加强不同学科之间,科研院所、高校及企业间的合作,充分共享研究成果,整合资源,建设规模庞大的数据库,全面提升数值仿真能力,实现优势互补,促进技术创新<sup>[10]</sup>。

### 结束语

数值仿真技术可以在发动机燃烧室的研发中发挥重要的作用。为了进一步发展我国的航空发动机事业,我们一定要立足自主研发之路,尊重科学发展规律,突破核心关键技术,发扬持之以恒精神,充分发挥举国体制的优势,尽快建成中国独立自主的航空发动机及燃烧室数值仿真体系。

航空动力

(索建秦,西北工业大学动力与能源学院,教授,主要从事航空发动机及燃气轮机燃烧室相关理论、技术、研发和试验方面的研究)

#### 参考文献

[1] 金如山,索建秦.先进燃气轮机燃烧室[M].

北京:航空工业出版社,2016.

- [2] 尉曙明.先进燃气轮机燃烧室设计研发[M].上海:上海交通大学出版社,2014.
- [3] Meng X, Zuo Z, Nishi M, Liu S. A numerical study on the flow mechanism of performance improvement of a wide-angle diffuser by inserting a short splitter vane[J]. Processes, 2020, 8(2):143.
- [4] 李乐,索建秦,于涵,等.中心分级多点直喷燃烧室冷态流动特性研究[J/OL].推进技术. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190661>
- [5] Philip M, Boileau M, Vicquelin R, et al. Large eddy simulation of the ignition sequence of an annular multiple injector combustor[J]. Proceedings of the combustion institute, 2015, 35(3):3159-3166.
- [6] Lorenzo P. Numerical and experimental investigation on an effusion-cooled lean burn aeronautical combustor: aerothermal field and emissions[J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2018, 141.
- [7] Wei X G, Li J, He G Q. Influence of structural parameters on the performance of vortex valve variable-thrust solid rocket motor[J]. International journal of turbo & jet engine, 2017, 34(1): 1-9.
- [8] 邵康,张静静,董龙雷,等.燃烧室复杂结构的热振特性研究[J].装备环境工程,2015,12(6):126-132.
- [9] 金丹,赵彩霞,郑步生.涡喷6发动机涡轮及加力燃烧室虚拟装配系统开发[J].军民两用技术与产品,2016(3):59-62.
- [10] 徐恒,郝会会.研究所、高校和企业的技术创新分工研究[J].郑州航空工业管理学院学报,2006(4):109-112.