

高性能计算现代化计划助推美国高超声速技术研究

HPCMP Boosting US Hypersonic Technology Research

■ 李茜 王乐 崔艳林 / 中国航发涡轮院

高超声速飞行器是一个复杂系统，在研制过程中不仅需要考虑各个子系统之间的耦合影响，还需要考虑高超声速飞行器独有的特征对复杂弹性变形、气动加热等因素的影响，因而精确建模十分复杂和困难。在此背景下，高性能计算现代化计划（HPCMP）在美国高超声速飞行器的关键技术开发与验证和缩短研制周期等方面发挥了举足轻重的作用。

高 超声速飞行器及其动力装置工作于高速、高空环境，地面试验状态很难反映真实的状况，并且吸气式飞行试验的时间往往很短，因此高精度数值仿真技术对于高超声速飞行器研制所起的作用尤为关键，有助于获取高超声速飞行器整个流场（包括飞行器表面）的信息（如压力、温度、密度和流速等），解释一些已发现但由于缺乏数据支撑而未能给出合理解释的现象，进而推动高超声速技术的发展，如图1所示。

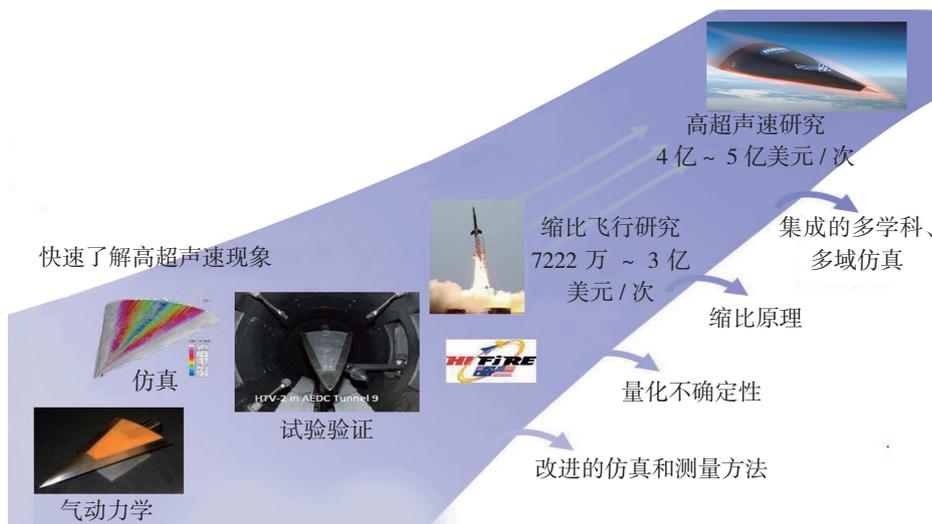


图1 高超声速技术的开发需要高精度数值仿真技术

高性能计算现代化计划的背景

为了支撑精确建模技术的发展，美国国防部于20世纪90年代提出了高性能计算现代化计划（HPCMP），拟通过提供超级计算能力、高速网络通信和计算科学专业知识，帮助开展世界范围的高性能计算能力研究和开发，提升复杂系统建模能力，保持美国在军事装备的领先优势。

HPCMP自启动以来，支持了超过600个高性能计算项目，超过

5000名科学家和工程师参与其中，其应用范围覆盖整个科学技术和试验验证领域，并在全美各地建立起4个主要资源共享中心（MSRC）、17家小型分布式研究中心（DC）、广域网服务中心和HPCMP软件开发支持中心。迄今为止，HPCMP为美国国防部提供了一个完整的先进计算环境，包括软件开发和系统设计方面的独特专业知识，强大的高性能计算系统和一流的广域研究网络。

在推动高超声速技术发展方

面，HPCMP有针对性地开展了多个项目，包括工程采办工具与环境（CREATE）、高超声速飞行器仿真（HVSI）、HPCMP应用软件（HASI）和高超声速研究先导等项目，为美国高超声速飞行器的设计开发夯实了理论和工具基础。

CREATE项目

美国国防部在HPCMP框架下于2006年启动了计算研究与工程采办工具与环境（CREATE）项目，致力于开

发和部署基于物理特性的高性能计算软件，通过高保真数字模型的构建和改进，支撑各军种武器装备的设计和实现。

CREATE项目包括用于飞行器的CREATE-AV、用于地面车辆的CREATE-GV、用于舰艇的CREATE-SH、用于射频天线的CREATE-RF和用于网格和构型的CREATE-MG等5个模块。其中，CREATE-AV使用范围最广、功能最强大，用于支撑美国数字工程战略及其采办项目。CREATE-AV能够分析和评估飞行器设计，有助于更好地理解在试系统，减少风洞试验和飞行试验的数量；采用完整的有限元结构分析，支持

设计和质量管理的快速闭合；通过组件设计特征耐久性和损伤容限的工程分析，建立疲劳裂纹萌生和扩展模型，进行设计特征几何迭代，直至满足设计寿命指标。

在CREATE-AV项目下共开发了3个软件，分别为用于学术研究的快速概念设计软件DaVinci、用于旋翼飞行器的高保真、全尺寸、多物理分析软件Helios和用于固定翼飞行器的高保真、全尺寸、多物理分析软件Kestrel。

作为固定翼飞行器飞发一体化建模仿真软件，Kestrel针对高超声速技术进行了相应设计，具体架构如图2所示。经过数年的发展和完善，

Kestrel现已用于高超声速飞行器的研究和开发。

2015年，美国空军研究实验室(AFRL)下属的空军科学研究办公室(AFOSR)采用CREATE-AV确认了高超声速建模的需求，并明确了不同高超声速飞行器所需Kestrel的能力和开发时间，如图3所示。从图中可以看出，典型的高超声速飞行器所需的软件能力从低到高依次为助推滑翔高超声速导弹、吸气式高超声速巡航导弹和可重复使用的高超声速飞机。

2017年3月，美国空军装备司令部负责装备采办的机构公布了面向高对抗突防型高超声速飞行器(HCPHV)的基于物理的设计与分析能力的项目，该项目基于情报、监视、侦察(ISR)任务规范开展高超声速平台概念研究，采用Kestrel开展了高超声速进气道性能研究。

HVSI项目

为了提高高超声速飞行器研究和开发的能力，美国国防部在HPCMP下于2018年启动了高超声速飞行器仿真研究(HVSI)项目，旨在联合美国国防预先研究计划局(DARPA)、国家航空航天局(NASA)和各军种的高超声速研究人员，集中解决高超声速飞行器仿真中存在的瓶颈问题，目标包括：支持美国空军、陆军和海军30多个高超声速项目，为这些项目提供了近5亿CPU小时，相比2016财年增加了20%（2018财年达到10亿CPU小时）；提供额外的公开和加密资源，加速高超声速装备采办；为超过700名用户提供CREATE-AV软件，支持其高超声速技术研究。

HVSI项目的重点是通过使用高

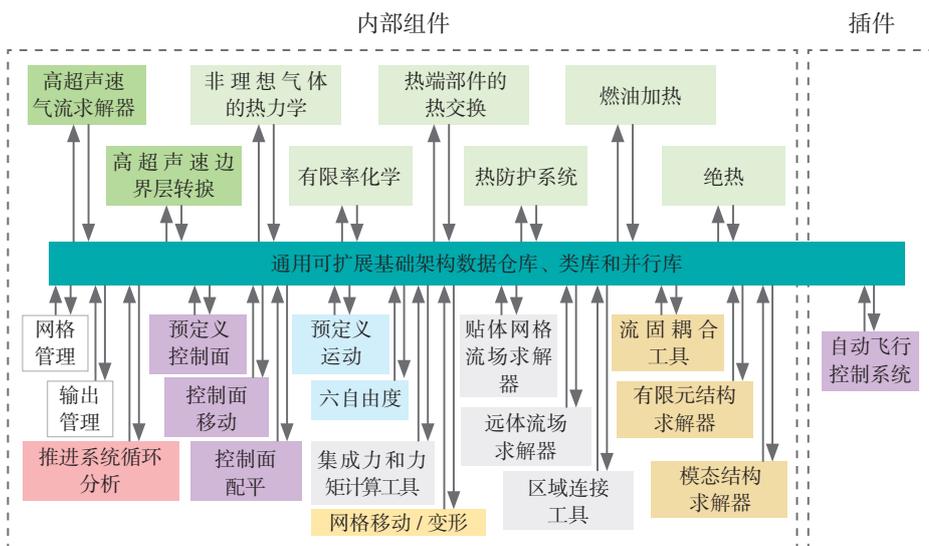


图2 针对高超声速技术设计的Kestrel架构

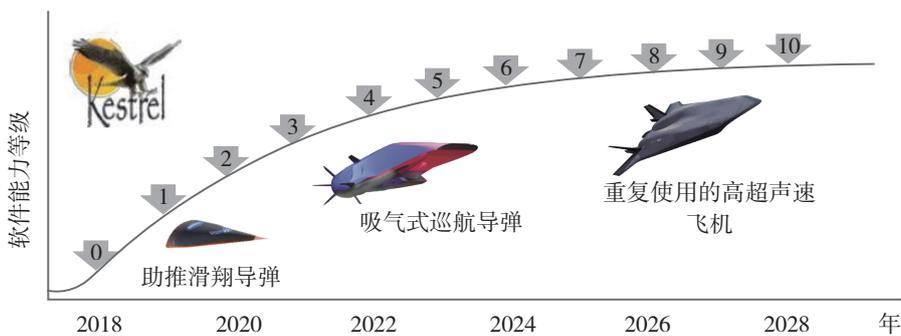


图3 不同高超声速飞行器所需Kestrel软件能力

表1 HASI开展的高超声速技术研究项目

序号	项目名称	负责机构	研究内容
1	用于液体火箭燃烧仿真的可扩展物理先进计算工程平台 (SPACE) 项目	空军研究实验室	通过在CREATE软件中增加内部燃烧仿真能力,帮助开发下一代推进系统
2	使用动态雷诺数平均的纳维-斯托克斯(N-S)/大涡仿真的飞机发动机多部件工作的多物理仿真	空军研究实验室	开发可以更准确反映超燃冲压发动机非定常、湍流气流的多维度、多物理算法,包括在当前和未来国防部超级计算机中进行化学反应计算,更好地分析飞机和发动机之间的流热耦合
3	高速涡流反应流体的动力学和属性	空军科学研究所办公室	研究用于超燃冲压发动机的下一代物理驱动燃烧模型

性能计算软件和硬件,加速高超声速武器和ISR系统的开发,具体包括:通过整合美国国防部、能源部、NASA以及从事高超声速研究、开发、测试和评估(RDT&E)的机构,促进高超声速飞行器仿真的国家愿景的实现;资助上述机构在高超声速飞行器仿真相关领域的研究工作;促进高超声速研究领域里政府、学术界和行业采办伙伴可用的生产质量仿真软件的研发;创建高超声速仿真、验证和确认数据的国家数据库;提供非密和加密的计算资源,实现高超声速系统仿真能力的明显飞跃。

HVSI项目还设立了一个技术咨询委员会,由来自政府、工业和学术界的专家组成,负责监督HVSI的相关工作。委员会的职责包括:协助制定路线图,特别是在优先发展的主题(边界层转捩、烧蚀、流体/热/结构相互作用等);协助评估每个专题的技术成熟度(TRL),以及将TRL提高到能够完成模型或仿真方法的水平可能需要耗费的时间。通过以上措施,HVSI力求在未来10年

中,保证每个仿真软件(如Createt-AV Kestrel)都可以不断升级和改进,以满足采办需求。例如,HSVI选择资助的第一个项目是高超声速湍流模型建模,由于几乎此前所有的湍流模型都是利用低速边界层数据建立的,因此已有的湍流模型通常不适合高速应用,此项目对高超声速技术发展的重要性不言而喻。

HASI项目

为了满足工程领域对现代软件的需求,缩小研究需求与实际算法、程序与框架之间存在的差距,美国国防部在2015年启动了HPCMP应用软件研究(HASI)项目。根据HPCMP计划的年度报告显示,HASI开展了多个面向高超声速技术的研究项目,详见表1。

高超声速研究先导项目

为满足在关键研究和工程领域的需要,美国国防部在HPCMP下,从2014年开始启动了多个先导项目,这些项目占用了HPCMP约30%的计算资源,其中一个项目名为“高

速飞行器的非定常压力和受热环境”(UPTH),旨在确定全尺寸高超声速飞行器的全耦合高保真的流热耦合反应,对指定的计算流体力学(CFD)和构型软件进行优化。经过几年的开发,该先导项目的技术转移用于HiFIRE-6项目中全尺寸高超声速飞行器的大涡仿真。

此外,还有多个高超声速项目得到了HPCMP的支撑。美国空军空射快速响应武器(ARRW)的项目指标在前期研制中曾长期处于保密状态,而飞行轨迹和基本参数的首次亮相出现在美国国防部的《高性能计算现代化计划2019—2020财年年度亮点》报告中,由此可看出两者的紧密关系。

结束语

高性能计算现代化计划作为美国国防部在多领域力推的基础研究项目,将赋能计算机辅助设计、虚拟原型机设计和数值仿真,以此缩短采办周期、节省费用,以及提升国防武器装备的性能。相较于传统的基于理论和试验的研发模式,高性能计算背景下的计算机建模和仿真能够探索出更多的设计方案,并持续提高能效比。从相关资料可以看出,HPCMP计划围绕高超声速技术开展了多项针对性研究项目,其中部分研究成果已经转移用于美国高超声速飞行器的开发过程。美国国防部未来将以每两年为一个周期,持续、快速升级高超声速武器,可以肯定的是,HPCMP计划下研发的先进高性能计算手段将帮助该目标得以实现。

航空动力

(李茜,中国航发涡轮院,高级工程师,主要从事航空发动机科技情报研究)