

面向新型飞行器应用的 数值模拟与数字样机技术

Enabling Technologies of Numerical Simulations and Digital Prototyping
for New Aerospace Vehicles

浙江大学航空航天学院 郑 耀



郑 耀

长江特聘教授, 现任浙江大学航空航天学院常务副院长, 博士生导师。曾在英美两国学习工作 13 年, 1998 ~ 2002 年在美国国家航空航天局 (NASA) 工作, 2002 年回国, 获 2002 年度国家杰出青年科学基金。致力于大规模数值模拟技术的研究及相应的高端数字样机平台环境的建设, 强调领域间的交叉性和学科的多样性, 以推进数值模拟技术和数字化技术在各应用学科中的实质性应用。

数字样机技术是一项使用计算机模型来代替真实物理样机的计算机辅助工程技术, 它能显著缩短产品

高端数字样机是基于高性能计算和先进计算机辅助工程等技术来实现产品优化设计和制造的综合性技术, 研究高端数字样机技术对推动新型飞行器仿真应用具有特别重要的现实意义。

设计和制造周期, 降低开发成本, 提高产品质量。在欧美科技发达国家, 大至飞机, 小至日常工业用品的设计和制造, 都越来越离不开数字样机技术的发展和运用。

新型飞行器是涉及到力、热、光、电磁等多种物理现象的复杂大系统, 其设计过程需要借助大量的多场耦合数值模拟仿真, 这既给数字样机技术提出了许多新的挑战, 也为数字样机技术的发展提供了新的战略机遇。

浙江大学利用已经研发的支撑技术, 建立了面向新型飞行器大规模数值模拟的数字样机平台 HEDP (High End Digital Prototyping, 高端数字样机系统)。HEDP 提供面向计算机辅助工程的大规模并行数

值模拟和可视化平台, 集成以并行燃烧、机体 / 推进一体化、气动力 / 热和结构热防护等 4 个面向新型飞行器的并行求解器, 并在此基础上构建了网络化虚拟试验环境, 强调产品数字化设计的应用示范。

通过和航空航天科研单位、工业部门和兄弟院校建立的一系列合作关系, 目前这一技术已得到了很大的发展, 可为飞行器的外形设计和优化、飞行器推进系统的设计及优化以及工业产品的设计和优化提供技术支持。

系统整体架构

系统设计时主要考虑的特性包括:

(1) 并行和分布式计算。对新

型飞行器的精确模拟计算量较大,在某些情况下并行和分布式计算是唯一的解决办法。系统总框架使用C/S架构,所有模块都可以在远程服务器端分布式运行。系统提供(或集成)高性能并行数值求解库,并行程序调试、跟踪和性能分析工具,所有计算密集型模块实现并行计算。当前使用消息传递接口MPI作为基础并行通信接口。

(2) 即插即用和可扩展性。系统核心只实现模块和数据的管理、协调,各种具体模块通过TCP消息与核心交互,动态地即插即用,协同解决特定问题。一个模块是一个独立的可执行程序。系统核心支持4种通信方式:共享内存、管道、Socket和文件。根据模块运行的位置、程序员的习惯、数据的多少,以及问题的特征,模块可以选择不同的通信实现方式。

(3) 丰富的计算支撑技术。一个高端数字样机系统应该提供丰富的支撑技术,使用户可以通过组合模块,方便地开展多样化的计算模拟。根据当前需求,系统选择和开发的配套支撑工具主要包括几何建模、几何修复、网格生成、区域分解、科学可视化以及远程任务提交、任务监控、任务调度、资源管理等。

(4) 可视操纵。图形界面和可视操纵可以大大降低软件系统学习和使用的门槛,使得用户能够以更为直观的方式进行操纵计算,提高效率。系统提供友好的图形界面,所有的支撑模块贯穿了可视化的功能,能够使用户交互地驾驭计算的整个过程,能够利用集群并行绘制功能以及立体显示墙实现计算结果的立体显示和操纵。

(5) 跨平台。系统的核心和系统的主要模块能够在多数常见的计算平台上运行,如Linux(IA32/IA64)、Windows、Unix系列平台(SGI Irix、IBM AIX等);能够支



持各种主要硬件平台,包括共享内存架构SMP和分布式内存的MPP、集群等。

系统主要支撑技术

1 CAD数据转换和修复

产品设计多数由不同组织和公司协同完成,因此产品开发往往使用不同类型的软硬件和CAD系统。虽然IGES和STEP等国际标准被广泛地应用在工业界,但这些数据交换标准可能丢失高层的设计信息。由于不同系统之间的公差处理等底层算法的不同,在原始系统中有效的模型以IGES或STEP作为交换媒介进行数据转换后,可能在接收系统中变成无效模型。另外,在进行CAD系统和CAE系统数据转换和数据映射时,由于对产品特征模型的定义和要求并不完全兼容,也产生了许多新的问题,例如CAD系统的公差以及细节特征的处理、CAE系统所需的实体拓扑关系的重建等。因此,研究更加有效的产品数据交换方法是非常必要的。

CAD数据交换比较前沿的技术是特征级数据交换,研究的技术包括元素永久命名一致性、统一几何误差和准确度、歧义性消除等。当前STEP标准的第108部分(几何产品

造型的参数化和约束条件)正在制定,专门为解决这些问题。当前HEDP系统中,我们开发了IGES文件和系统几何数据格式之间的转换程序,并通过补洞等手段处理公差问题,然后进行必要的拓扑关系重建。

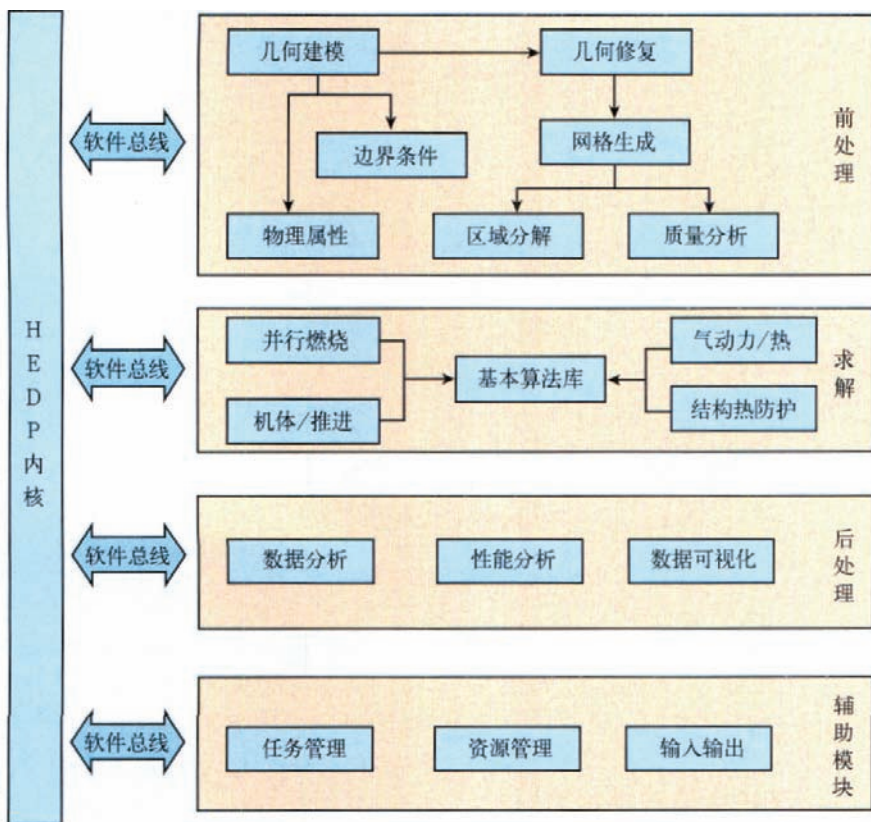
2 几何网格生成

在物理场现象与过程的计算机模拟中,网格生成是使问题得以解决的基本途径。网格生成作为一个独立的研究领域已经发展了40多年,对它的研究在国外至今仍然非常活跃。

HEDP系统中集成了一套网格生成工具,包括粘性流体边界层网格生成、各向异性网格生成、混合网格生成、三维结构化网格生成、自适应网格生成以及并行网格生成等。另外,系统还集成了相应的质量优化程序。

3 高性价比可视环境构建

沉浸式设备提供的信息感知渠道非常丰富,有助于设计人员对问题的快速把握和全面认识。一方面,大场景的沉浸式展示能使用户对产品有身临其境的直观感受,能充分利用人类本能的模式识别能力和直觉感知能力,使得数据场的特征发现非常容易;另一方面,立体显示能提供深度信息,数字样机针大多是面向三维



HEDP软件体系架构

对象的,增加一个维度信息的显示能拓宽观察范围。

HEDP系统构建了一种基于通用设备的可伸缩立体显示墙。与其他虚拟现实设备相比,该显示墙是一种高性价比,容易实现和维护的大屏幕显示设备。这种立体显示墙使用微机集群驱动一组普通的中低档投影机构成,投影机可以拼接成各种客户需要的尺寸和形状。投影机阵列中每2个投影机形成一个立体投影对,投影到屏幕上的同一区域,实现被动立体。通过计算机视觉的方法可以实现投影图像几何和色彩上的无缝拼接,所以投影机位置不需要在物理上进行精确定位,其安装和维护的成本都较低。由于完全使用标准硬件,构建的方法和支撑软件都具有良好的可伸缩性,所以用户可以在一定的限制内,根据需要非常迅速地搭建多种分辨率和显示尺寸的显示墙。

在显示墙基础上,HEDP实现了

一个分布式协同可视化系统。这个框架分成2部分:分布式可视化子系统和CESC_Remote_DI协同部件。该框架有许多优点,在协同部件之间

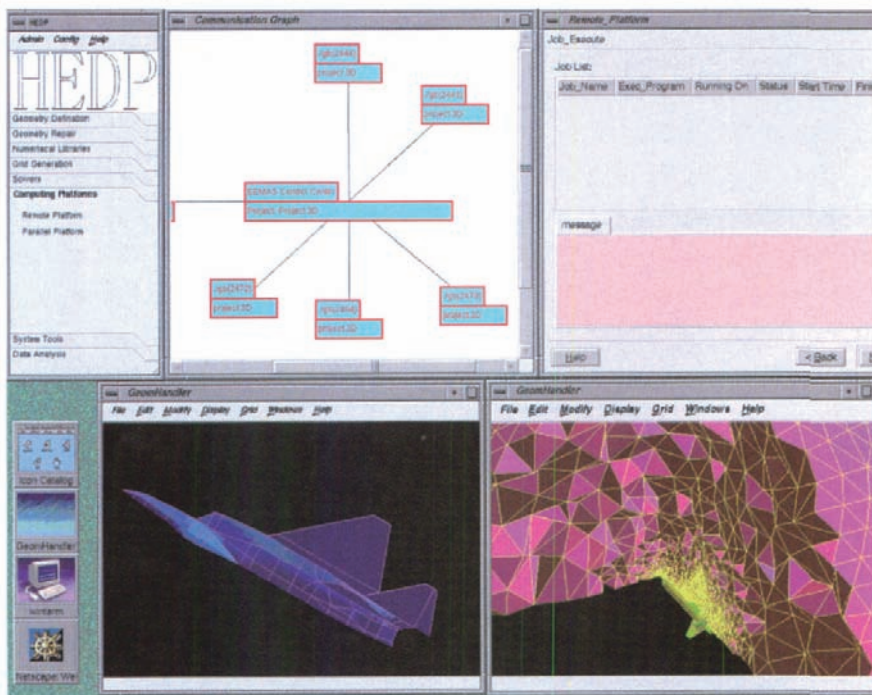
通信的带宽要求很小,因为部件之间传输的是脚本命令。并且该系统在协同环境下的响应速度与单机时候的响应速度几乎一样。因此所有的协同者几乎在同时能够看到高精度的、动态的3D场景。如果网络带宽允许,CESC_Remote_DI协同部件正常和桌面视频工具一起使用,否则该协同部件和电话会议工具一起使用。这些远程协同会话可以记录在一个脚本文件中,同时也可以张贴到网上供其他科学家们在他们适当的时候重放和修改。

应用实例

1 飞行器空气动力学模拟

飞行器外流场的空气动力学问题,具有几何模型和力学现象的双重复杂性。为了验证数字样机HEDP在此类问题,特别是在复杂外形气动特性计算、多体干扰气动特性计算以及多体分离气动特性计算等方面的可靠性,我们开展了针对复杂问题的非结构网格生成研究和动网格技术研究。

我们应用HEDP平台中集成的



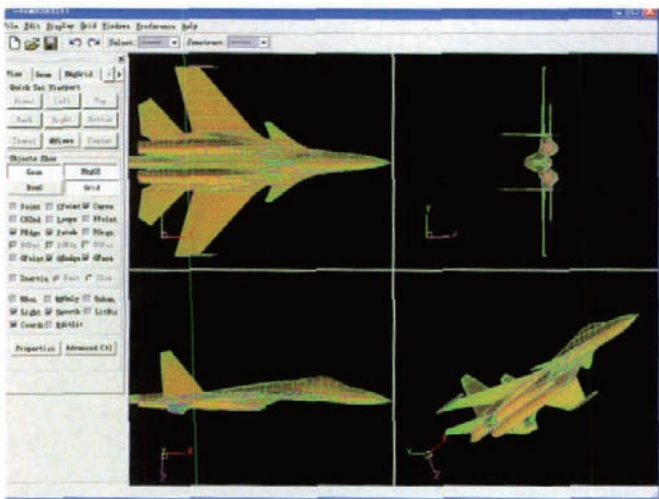
典型工作界面截图

空气动力学求解器进行了多种飞行器外流场的数值仿真。

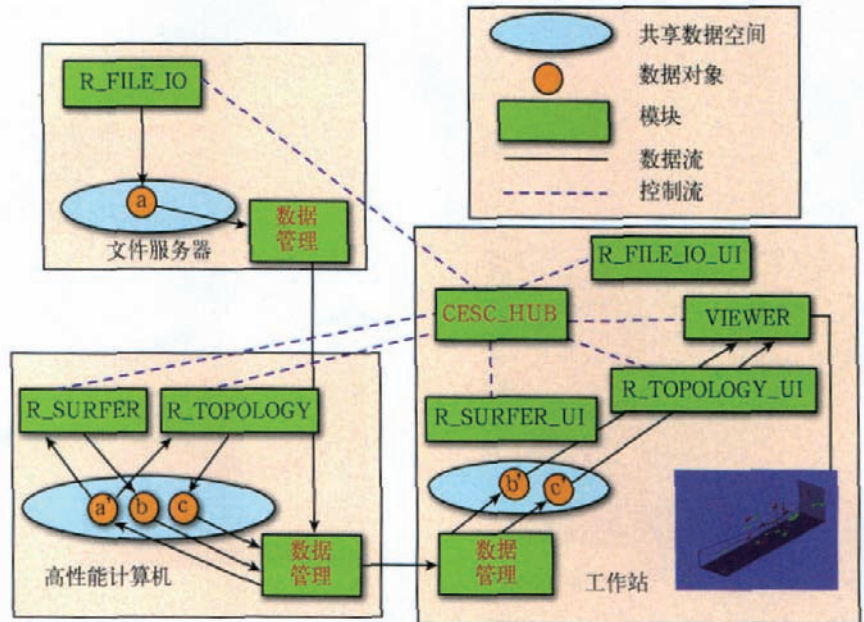
2 超燃冲压发动机的仿真

超燃冲压发动机燃烧室流场非常复杂,高超声速气流在冲压发动机内流动的时间尺度与内部燃烧的化学反应的时间尺度接近,非平衡效应非常强烈,是一个复杂的化学非平衡流场。HEDP的超声速燃烧求解器建立在非结构混合网格系统上,既具备处理复杂几何问题的能力,又保留了结构网格系统的求解精度。控制方程的有限体积离散采用类似有限元的高阶低耗散格式和人工黏性技术,可以实现高精度的流动计算和波系结构捕捉。三维燃烧流动中的湍流多尺度效应采用大涡模拟技术进行考虑。化学源项的计算采用基于CHEMKIN基元反应的有限率方法,准确考虑多组分非平衡燃烧效应。

为了对数字样机HEDP的超声速燃烧计算能力进行可靠性验证,我们对澳大利亚HyShot项目设计的超燃冲压发动机进行了数值模拟和试验对比。澳大利亚HyShot项目的发动机中使用了“前体燃料喷射”概念,燃料与空气在进口段发生预混,因此不需要在燃烧室内增加额外的混合设施,可以有利减小壁面造成的摩擦阻力。



HEDP中三视图状态下观测某飞机的几何外形



系统的分布式可视化框架

计算任务在64个CPU的SGI机器上完成。试验数据取自澳大利亚昆士兰大学Odam Judy的博士论文。仿真的结果与试验结果吻合程度较好,而且整个流程方便快捷,验证了整个系统的有效性。

3 结构与热防护并行模拟

高超声速飞行器因为气动加热会带来结构与热防护问题,而且飞行器结构几何模型和加热过程的复杂性会使这类问题的数值求解变得异常困难,除扩展HEDP平台的特殊网格生成与处理能力,发展各向异性的棱柱体网格等几何网格的生成技术之外,同时为了高效地处理结构与热防护的复杂问题,基于消息传递界面(MPI)的并行模式,开发了基于松耦合的应力场与温度场耦合分析程序。针对高梯度的温度场问题,研究并实现了非线性温度场

与结构/材料分析等多场耦合分析的调度策略,对于非烧蚀性热防护问题,能够进行较为有效的模拟分析。

总结和展望

高端数字样机是基于高性能计算和先进计算机辅助工程等技术来实现产品优化设计和制造的综合性技术,研究高端数字样机技术对推动新型飞行器仿真应用具有特别重要的现实意义。

HEDP系统采用黑板架构和模块化设计,能够动态插拔各种支撑模块,从而简化了各类高端技术在数字样机设计中的应用。在未来的工作中,我们将结合新型飞行器数值模拟中的具体问题对系统进行进一步的完善。

尽管目前国内高端数字样机的应用市场基本被国外产品所垄断,随着国内高端数字样机技术应用需求的不断增长,以及工业界和研究界对这一领域重要性认识的不断加深,通过相关领域专家的通力合作、潜心研究和开发,自主创新的高端数字样机技术和国外技术之间的差距一定会慢慢缩小。

(责编 依然)