

文章编号:1000-8055(2017)05-1138-10

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.05.015

大规模 CFD 流场可视化分析系统的应用

王松^{1,2}, 王海洋², 吴亚东², 吴斌^{1,3}, 吴颖川⁴

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010;

3. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

4. 中国空气动力研究与发展中心 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 设计了大规模计算流体动力学(CFD)流场可视化分析系统(FVAS), 系统具有完善而实用的大规模三维定常和非定常流场数据预处理与特征提取、体绘制、几何图形(流线、等值面等)绘制、纹理绘制等功能, 并提供多种数据分析手段和良好的交互方法。通过 8 种展示方式、3 种显示模式以及 5 种视图类型展示流场数据内外流结构特征及其复杂的物理现象。同时系统针对时变数据提供动画展示功能并支持单机多核并行。案例分析表明该系统简单实用, 通用性高, 多种混合绘制技术能够有效展现燃烧室、进气道等流场数据内部反应情况, 切面、剖分等交互方式多视图显示局部细节特征, 并通过图表、曲线图等分析工具统计分析具体网格单元的信息。完成测试案例 300 例, 与传统 CFD 软件相比提升 70% 以上的绘制效率, 系统故障率为 0.6%, 功能事务成功率 100%, 有效加速对流场数据的分析统计过程。

关键词: 流场可视化分析系统(FVAS); 体绘制; 几何图形绘制; 纹理绘制; 可视化应用函数库; 多核并行

中图分类号: V211.73

文献标志码: A

Application of large-scale CFD flowfield visualization analysis system

WANG Song^{1,2}, WANG Hai-yang², WU Ya-dong²,

WU Bin^{1,3}, WU Ying-chuan⁴

(1. Institute of Electronic Engineering,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621010, China;

2. School of Computer Science and Technology,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

3. School of Information Engineering,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

4. Science and Technology on Scramjet Laboratory,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: A new visualization system for large scale computational fluid dynamics (CFD) flowfield data, called flow field visualization analysis system or FVAS for short, was presented. FVAS has several complete and practical functions such as three dimensional steady and unsteady flow field data preprocessing and feature extraction, volume rendering, glyph (streamline, isosurface, etc) rendering, texture rendering and so on. Many different

收稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(61303127); 四川省科技支撑计划(2014GZ0100, 2014SZ0223); 四川省教育厅重点项目(13ZA0169)

作者简介: 王松(1989—), 男, 博士生, 主要从事科学计算可视化、可视分析研究。

引用格式: 王松, 王海洋, 吴亚东, 等. 大规模 CFD 流场可视化分析系统的应用[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1138-1147. WANG Song, WANG Haiyang, WU Yadong, et al. Application of large-scale CFD flowfield visualization analysis system[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1138-1147.

data analysis methods and favorable interactions were also supported in the system. FVAS could show the inner-outer flow structure characteristics and complicated physical phenomena with eight ways of demonstration, three kinds of display modes and five types of views. FVAS also implemented animation display function for time-varying data and multi-core parallel rendering. Such cases verify that our system is simple, useful, and strongly universal. A variety of mixed rendering technologies can effectively show the internal responses in flow field data such as combustor dataset, air inlet dataset. Interactions including section and subdivision can show local features and details in multiple views, and analysis tools like chart and graph can statistically analyze the information of special grid cell. 300 test cases were completed in our system test. Compared with the traditional CFD software, our system can promote more than 70% rendering efficiency. The system fault rate is 0.6%, transaction success rate is 100%, and it can effectively accelerate the analysis and statistical process of flow field data.

Key words: flowfield visualization analysis system(FVAS); volume rendering; glyph rendering; texture rendering; visualization toolkit; multi-core parallel

流场可视化是计算流体力学和计算机图形学的交叉研究领域,具有极强的学科交叉性、应用相关性和技术前沿性。流场可视化是科学计算可视化的重要分支,是科学计算可视化领域发展最早、应用最广泛的主流研究方向。航空航天领域的飞行器气动设计^[1],高速汽车和列车的气动性能设计,造船中的水动力学,气象学领域的大气动力学,化学工业中的反应器内流动计算,设计河流、湖泊、港湾的土木工程设计中的流体动力学,以及生物医学中的计算血液动力学等问题,都需要通过流场可视化技术进行科学解释和分析^[2]。流场可视化运用计算机图形学的理论和技术,将 CFD 数值计算产生的流场数据以图形图像的形式直观呈现出来,借助交互式图形系统,从大量纷繁复杂的数据中提取有意义的信息,在帮助用户分析和理解复杂的流场流动机理,洞察流场物理现象和发现流动科学规律方面,正在发挥着越来越重要的作用。

与其他领域相比,CFD 流场数据的复杂性为可视化算法的精确性、有效性和实时性带来严峻挑战。从流场数据本身看,流场可视化具有以下特点:①数据类型复杂。CFD 数值计算结果中除了结构化网格和格点格式数据外,还包括非结构网格(或混合网格)数据和格心格式数据。复杂网格模型和数据格式导致可视化算法设计和实现困难,有效性和适用性差,时空复杂性高;②特征提取困难。流场中可能包含多种物理特征(如激波、漩涡等),对这些特征进行准确提取和绘制

是流场可视化的重要内容。而网格模型、数据类型和特征本身的复杂性导致流场特征提取困难,算法计算量大且精度难以保证;③物理量种类多样。CFD 数值计算结果中包含多种物理量,其中用户比较关注的标量有密度、温度、压力、涡量等,矢量有速度、动量、压力梯度、涡度等^[3]。这些物理量是分析流场状态、结构和特征的重要依据。从用户需求上看:①精确性。高精度的数值计算需要高精度的可视化方法与之匹配,才能帮助用户准确分析流场特性,评估计算方法的正确性与合理性;②有效性。网格生成技术和数值计算方法的发展使得流场数据类型多样,这要求可视化方法能够绘制各种复杂类型的流场数据,才能满足 CFD 领域日益增长的用户需求;③实时性。随着计算机性能的提高和数值计算精度的攀升,用户要求可视化算法具有对大规模复杂流场进行实时交互绘制的能力,为其提供强有力的科学研究工具。

1 相关工作

国内外一些大的研究中心、国家实验室、大学及公司都在流场数据可视化技术和应用上投入了大量的人力和资金,开发了一些专业的软件工具包。目前在科学研究、工程设计等领域使用最广泛的流场可视化处理软件主要包括 Tecplot, En-Sight 和 Fieldview 等,这些工具和系统能够有效对流场数据进行可视化处理与分析。Tecplot 软件是 Tecplot 公司推出的功能强大的数据分析和可

视化处理软件,允许交互式开发、可视化、分析 CFD 数据,具有强大的 CFD 数据分析功能,如流变量计算和涡核提取等功能。EnSight 是计算引擎国际公司开发的面向计算流体力学、碰撞和结构分析等领域的数据可视化系统,对传统的可视化方法有着较好的集成,同时其并行化处理可明显提高绘制算法的性能。但上述软件的可视化功能主要侧重于二维数据分析,兼顾部分三维可视化功能,同时存在一些问题,如 Tecplot 处理数据规模较小,对三维复杂流动现象的可视化数据分析手段缺乏,并且不能对复杂数据细节特征进行描述,EnSight 对三维流场特征提取缺乏有效支持,同时这些软件不支持流场纹理可视化方法。针对现有的流场数据可视化处理软件难以满足三维复杂流动结构可视化日益增长的应用需求,本文开发了具有国产自主知识产权的大规模 CFD 流场可视化分析系统 FVAS,为用户提供了操作简单、适用性强、灵活方便、可扩展性好的流场可视化环境,能有效提供大规模流场科学数据高效率处理和可视化分析能力。

2 系统的总体功能结构

FVAS 系统的层次化总体功能结构如图 1 所

- 示,自底而上分为 5 层。
- 1) 原始数据层. 控制整个系统的数据读取功能,系统采用的数据输入/输出接口主要是文件接口,这些文件接口通常基于某种专用的数据格式。目前系统支持的文件格式有: Tecplot 格式、Plot3d 格式、VTK 格式、Openform 格式等。
 - 2) 数据解析层. 包含针对不同数据格式的数据解析器,将加载的流场数据根据数据模型和数据类型解析出数据的维数、定义域的维数、网格数据的组织形式、时间特性以及数据量等。
 - 3) 可视化展示层. 包含可视化映射模块、视图显示模块以及数据分析统计模块。可视化映射模提供了体绘制、线积分卷积纹理绘制、等值面绘制、几何形状绘制、矢量线及其衍生方式和多种单一方式混合绘制等可视化方式,显示模式控制视图显示方式,包括:普通二维、红蓝三维、偏振三维 3 种显示模式。数据分析模块提供曲线图、直方图、表格、时间戳等统计分析工具。
 - 4) 交互控制层. 通过鼠标拖拽控制可视化映射视图的观察视角、尺寸大小,同时提供剖分、切面、阈值、边界轮廓等具体分析手段。
 - 5) 数据保存层. 对于最后生成的可视化结果,系统提供图像、视频和数据 3 种类型的保

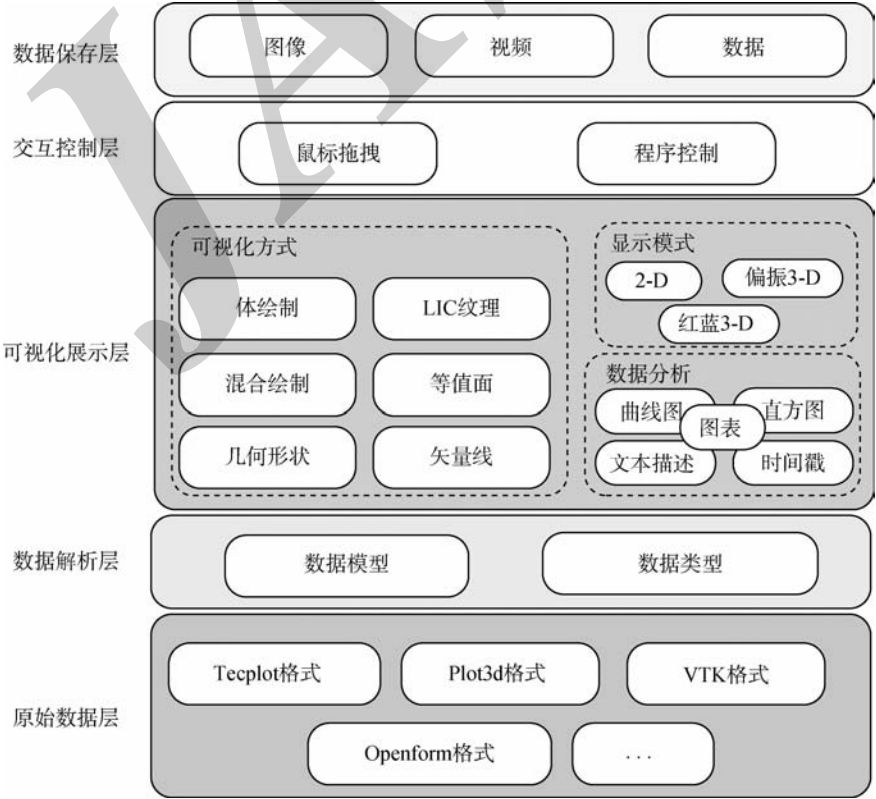


图 1 FVAS 系统总体功能结构

Fig.1 General function structure of FVAS

存方式,其中视频格式用于时变数据.

2.1 系统详细设计

FVAS 系统框架结构设计如图 2 所示,主体界面部分采用 QT 界面库设计实现,数据解析及可视化功能实现部分调用开源可视化开发工具包 VTK 进行开发,部分格式文件读入功能依靠 BOOTSTRAP 工具包,单机多核并行操作采用开源消息传递接口库 (Open MPI, open message passing interface) 二次开发实现. 系统详细设计主要难点包括数据解析模块、可视化展示模块及交互控制模块.

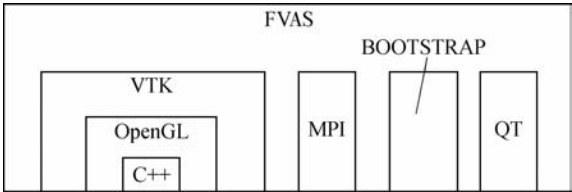


图 2 FVAS 系统框架结构设计
Fig. 2 Frame structural design of FVAS

数值模拟产生的流场数据通常是离散的采样数据,基于各种科学数据类型及结构,抽象出通用的数据模型及其表示,是流场可视化重要的数据预处理部分. 本文中的 FVAS 系统中数据读取模块采用基于专用数据格式的文件接口,针对不同类型的数据格式都需要进行数据解析,从而方便后期的可视化映射. 数据解析具体过程如图 3 所示,对于加载后的原始数据,提取数据维度和定义域维度,从而定义数据的组织形式生成网格,最后在每个网格点上添加相应的物理量信息,对于时变数据提取对应的时间特性,完成数据类型的分类并建立数据模型.

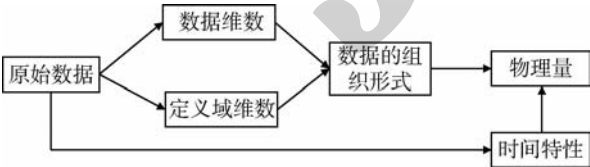


图 3 数据解析流程
Fig. 3 Workflow of data parser

以 Tecplot 格式和 VTK 格式为例, Tecplot 格式主要是为了给多样的数据集类型提供统一的数据描述,并且为数据与可视化软件的交互提供一种简单的方式. 它支持的数据集类型有结构网格、非结构网格、混合网格等. Tecplot 支持两种类型不同的数据:规则数据和有限元数据. 规则数据由一维、二维或三维逻辑数组定义,这些数组定义

顶点和体元的相互关系. 有限图元数据定义一个点(顶点)集合以及这些点相关的元素. 有限元数据分为线数据、面数据和体数据. VTK 数据格式是开源软件 VTK 可视化工具包提供的一种数据格式,给多样的数据集类型提供一种一致的数据描述,并且为数据与可视化软件的交互提供一种简单的方式. 它支持的数据集类型有:结构化点、结构网络、直线网络、多边形数据和域数据.

2.2 可视化展示

本系统中流场数据可视化展示模块遵循 Stolte 等人提出的可视化循环模型^[4]的基本流程,如图 4 所示. 对解析出的流场数据,采用合适的可视化技术实现数据的可视化映射和绘制,并提供多种不同的数据分析方式,帮助用户发现流场数据的内部信息. 系统包含体绘制、LIC 纹理绘制、等值面、几何绘制、矢量线和混合绘制多种可视化方式,支持 3 种显示模式并提供曲线图、直方图、表格等数据分析统计手段.

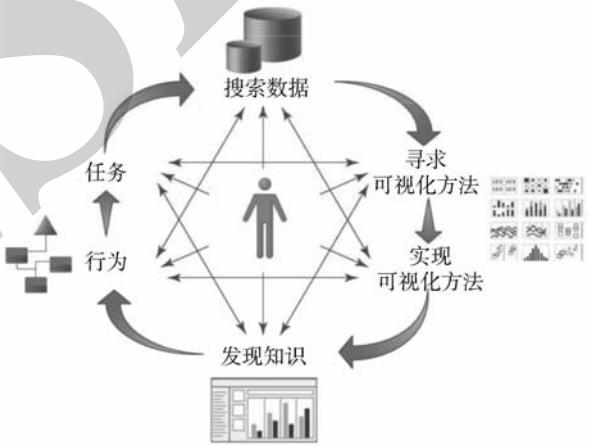


图 4 可视化循环模型
Fig. 4 Cycle of visual analysis

2.2.1 体绘制

体绘制将 3-D 空间中的标量场视为能够发射、吸收和传播光线的半透明材料,使用户能够完整的了解数据体,它的特点是对三维数据的总体显示,对它的不同层次、材料、特性的各个组成部分在一幅图像中整体表现出来,得到三维体数据的全局图像^[5]. 对于此类数据场的绘制采用的方法不同于传统的面绘制方法,它采用体光照模型直接从三维数据场中绘制出需要研究的物理量. 体绘制算法的作用就是将离散分布的三维标量场,按照一定的规则转换为图形显示设备的帧缓存中的二维离散信号,即生成每个像素点颜色的 RGB 值. 体绘制技术基本绘制流程如图 5 所示.

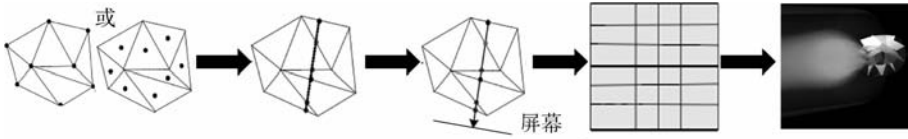


图 5 体绘制基本流程示意图

Fig. 5 Basic schematic flow of volume rendering

目前本系统支持 Projected TETRA 四面体投影算法^[6]、HAVS(hardware-assisted visibility sorting)硬件辅助的可见性排序算法^[7-8]、Z-Sweep 图像空间和对象空间结合的可见性排序算法^[9]、Bunyk ray cast 光线投射算法四类映射方法^[10]。①基于对象空间的四面体投影算法 Projected tetra:经典的四面体网格体元投影算法,建立在对象空间可见性排序的基础上,将每个四面体单元近似为包含可见性信息的半透明多边形后再进行绘制。②硬件辅助的可见性排序算法 HAVS:对象空间的可见性排序在中央处理器上完成,负责按几何信息(中心位置)对四面体单元进行深度排序(粗排序);图像空间的可见性排序在 GPU 上完成,设计一种新的数据结构(k -Buffer)实现片元级的深度排序(细排序)。从而,在同一时刻, k -Buffer 仅对当前像素 Buffer 中的 k 个片元进行排序,即对应于每个像素的链表长度为 k 。与 A-Buffer 技术相比(对任意像素,需要对与之相关的所有片元进行排序),不仅显著降低了时空开销,而且更易于利用目前的图形硬件来加速排序过程。③图像空间和对象空间结合的可见性排序算法 Z-Sweep:针对非结构数据集的快速、高效单元投影绘制算法,采用平行于观察视角的切面扫描数据集并实现投影映射,投影顶点周边的单元面作为新的扫描切面,从而增加 Z 值。整体算法利用顶点 Z 值的隐形全局有序性提高扫描效率,同时绘制过程中只需保存少数包含空间信息的切面数据,从而减少内存占用率。④基于图像空间的光线投射算法 Bunyk ray cast:从视点出发,经屏幕空间中的每个像素点向对象空间发射光线。光线在穿越数据场的过程中,对体数据进行采样,在每条光线上形成一系列按深度排序的采样点,将同一条光线上的所有采样点数据值映射成光学属性(颜色和不透明度)并按深度顺序累加,形成最终的像素颜色。体绘制效果如图 6 所示,从绘制效率上,Projected TETRA 算法速度最快,HAVS 算法、Z-Sweep 算法次之,Bunyk ray cast 算法速度最慢。从绘制质量上,Bunyk ray cast 算法绘制效果最好,Projected TETRA 绘制质量较差。

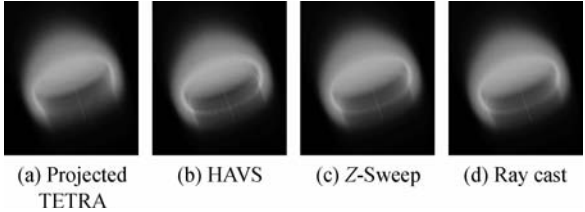


图 6 体绘制算法效果对比

Fig. 6 Contrast of volume rendering results

2.2.2 矢量线

矢量线将各个时间步的粒子连接起来,用连线表示粒子的运动轨迹。矢量线包括 3 种:

1) 流线。描述在当前流场状态下,即假定流场不发生变化,粒子随时间运动形成的轨迹。用 $\mathbf{x}_{\text{stream}}(t, x_0, t_0)$ 表示 t_0 时刻通过点 x_0 的矢量线, $\mathbf{v}(x, t)$ 表示 t 时刻 x 处的速度(矢量)。则流线的形式化定义为

$$\mathbf{x}_{\text{stream}}(t, x_0, t_0) = x_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{v}(\mathbf{x}_{\text{stream}}(s; x_0, t_0), \tau) ds \quad (1)$$

2) 迹线。描述一个质点在流场中随时间变化所形成的轨迹,与流线不同的是,此时的流场是随着时间变化的时变流场。迹线的形式化定义为

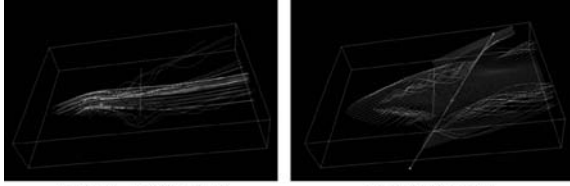
$$\mathbf{x}_{\text{path}}(t, x_0, t_0) = x_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{v}(\mathbf{x}_{\text{path}}(s; x_0, t_0), s) ds \quad (2)$$

3) 脉线。描述的是通过流场中某点的粒子形成的轨迹。 t 时刻从 x_0 处释放的所有粒子(由粒子释放时刻不同,用 s 表示粒子释放的时刻, $s \in [t_{\min}, t]$, 其中 $t_{\min}$ 表示第 1 个粒子释放的时刻)形成脉线形式化定义为

$$\mathbf{x}_{\text{streak}}(t, x_0, t_0) = \mathbf{x}_{\text{path}}(t, x_0, s) \quad (3)$$

矢量线方法中核心问题是种子点位置选取,不合适的种子点位置容易导致绘制视觉混乱,不利于用户观察流场结构,同时可能会丢失流场中某些重要的特征。本系统提供两种交互式放置种子点的方法:①中心点源放置法。用户直接通过设置坐标指定点源位置,同时支持设定种子点半径和种子点数目,这些种子点会均匀的分布在设定的球体内,用户可以根据生成矢量线的结果动态来改变种子点的数目和半径,如图 7(a)所示。

②控制线段法。在数据可视化体中用户指定一条控制线段,通过手动输入线段的坐标或使用鼠标进行拖动来设置控制线的位置和长度。然后指定生成种子点的数目,在线段上均匀分布指定数目的种子点信息,如图 7(b)所示。



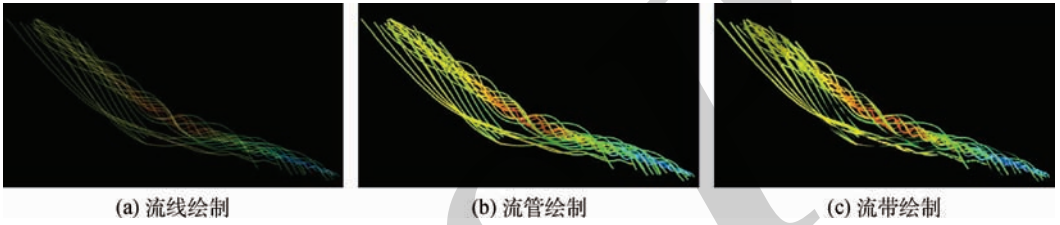
(a) 中心点源放置法 (b) 控制线段法

图 7 矢量线种子点放置策略

Fig. 7 Placement strategy of streamline seeds

本系统支持流线、脉线两种矢量线绘制方法。流线绘制采用基于数值积分的方法,从一个初始的起点通过一系列小的时间步长“生长”而成。脉线指在某一特定时间间隔下,一段时间内相继经过空间一固定点的流体质点依次串连起来而形成的曲线,可由迹线方程间接求解。

根据矢量线的特性与不足之处,衍生了矢量管、矢量带等可视化显示方式,如图 8 所示。矢量管是在流线周围创建二维管状表面从而增加阴影和深度线索,使得轨迹更加清晰。矢量带是在流线周围创建二维面状结构从而增加轨迹的平移、转动以及剪切变形率,减少视觉复杂度。



(a) 流线绘制 (b) 流管绘制 (c) 流带绘制

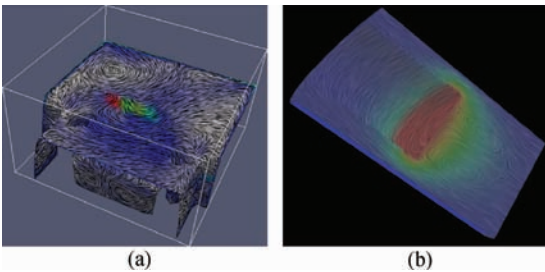
图 8 矢量线及其衍生方式展示效果

Fig. 8 Results of streamline rendering and those rendering technologies derived from streamline

2.2.3 线积分卷积纹理绘制

线积分卷积 (LIC, linear integral convolution) 方法^[11]用一个一维卷积核函数沿流线方向对噪声纹理进行卷积,从而生成一个可以表达矢量场的静态图像。这种方法可以很好地显示运动方向,表达矢量场的细节,生成的图像质量比较高,缺点是计算耗时,容易引入高频噪声,而且矢量的大小也很难通过其纹理反映。LIC 的基本原理^[12]是将噪声数据根据矢量场方向信息进行卷积,从而得到在图像空间上连续的 LIC 纹理,该方法本质上是一种滤波方法,绘制效果如图 9 所示。

首先采用积分方式生成流线,流线生成后,根据流线索引相应噪声纹理,进行卷积



(a) (b)

图 9 LIC 纹理绘制效果

Fig. 9 Rendering results of LIC texture

$$F_{out}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^l F_{in}(P_i)h_i + \sum_{i=1}^{l'} F_{in}(P'_i)h'_i}{\sum_{i=1}^l h_i + \sum_{i=1}^{l'} h'_i} \quad (4)$$

式中 P_i, P'_i 分别为流线正反方向的点; $F_{in}(P_i), F_{in}(P'_i)$ 为输入纹理白噪声的灰度值; l, l' 为积分步长; $F_{out}(x, y)$ 为输出图像中像素的灰度值; h_i 为作为权值,是滤波卷积核,在生成静态图像是为盒函数即

$$h_i = \int_{s_i}^{s_i + \Delta s_i} k(w)dw \quad (5)$$

因汉宁窗不仅有高斯窗函数的属性,而且又具有简单的积分形式,可以用来代替盒函数形成运动的图像。汉宁窗函数可以表示为

$$k(w) = \frac{1 + \cos(cw)}{2} \cdot \frac{1 + \cos(dw + \beta)}{2} = \frac{1}{4} [(1 + \cos(cw) + \cos(dw + \beta) + \cos(cw)\cos(dw + \beta))] \quad (6)$$

式中 c, d 为汉宁窗函数的扩大系数和波纹函数; β 为相位移动的弧度。 $k(w)$ 从 a 到 b 的积分可以表示为

$$\int_a^b k(w)dw = \frac{1}{4} \left[b-a + \frac{\sin(bc) - \sin(ac)}{c} + \frac{\sin(bd + \beta) - \sin(ad + \beta)}{d} + \frac{\sin(b(c-d) - \beta) - \sin(a(c-d) - \beta)}{2(c-d)} + \frac{\sin(b(c+d) + \beta) - \sin(a(c+d) + \beta)}{2(c+d)} \right] \quad (7)$$

2.3 交互控制

流场可视化与交互共同加快了研究人员观察分析复杂流场数据的速度. 流场可视化用可见的

形式展现数据重要的特征,可以使用户简洁有效地理解所有数据的重要特征^[13]. 为了让用户理解数据中的变化规律以及个性特征,必须提供良好的交互手段,这对分析人员洞察数据必不可少^[14]. 本系统支持鼠标操作和程序控制两种途径实现交互操作. 通过鼠标拖拽改变观察视角,滚动滑轮控制视图大小,框选操作选择感兴趣区域,通过程序控制完成自定义区域、平面、显示范围和提取边界等过程,以及修改各类算法具体参数来改善可视化效果. 部分交互控制效果如图 10 所示.

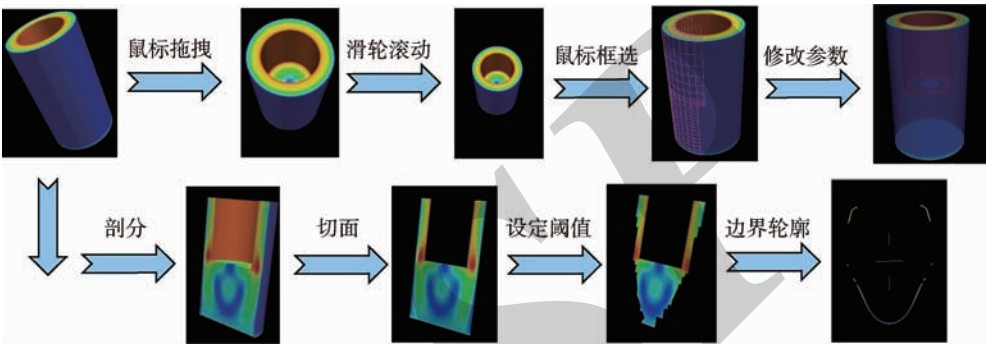


图 10 部分交互效果图
Fig. 10 Rendering results of part interactive functions

3 案例测试与分析

3.1 系统简介

FVAS 系统主界面如图 11 所示,主要分为 5 个部分:菜单栏、控制栏、功能区域、绘制区域和状态栏. 其中控制栏包含数据读取、操作撤销、动画播放控制、活动变量控制和显示方式设置. 功能区域主要由各类可视化方式、数据分析工具等组成,支持一键绘制操作.

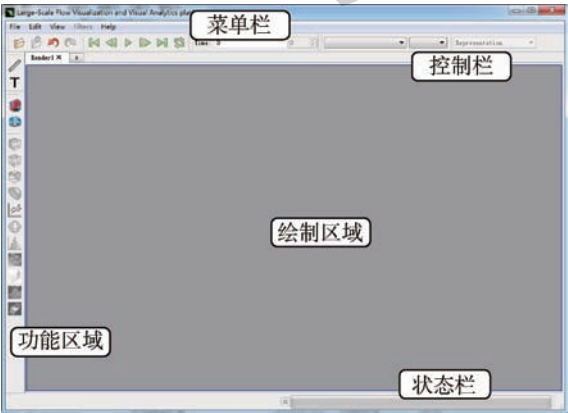


图 11 FVAS 系统主界面
Fig. 11 Main interface of FVAS

3.2 测试结果与分析

基于 VS 2010+QT+VTK 开发环境,在配置为 Intel Core(TM)i5 2.67 Hz 处理器(24 GB 内存)和 NVIDIA GeForce GTX970 显卡(4 G 显存)的计算机上设计实现 FVAS 系统. 为验证本系统的实验效果,采用多类数据集测试系统. 具体测试数据集如表 1 所示,数据涵盖了多种分辨率、数据格式、数据类型和数据大小的测试集.

3.2.1 旋转加热磁盘周边空气流动数值模拟

旋转加热磁盘周边空气流动数值模拟是计算流体力学中的经典算例,图 12 是应用 FVAS 系统中的混合可视化技术展示的效果图. 在这个综合案例,通过体绘制方式展示了该模型整体的温度变化情况,同时通过流管和图形混合绘制表现模型内部温度气流运动情况,流管表明运动轨迹,圆锥图案表明运动方向,从而更清晰明了的展现模型内部特征信息. 通过流线和图形绘制动态显示在旋转过程中向量场中的运动状态,图 13 是截取的若干关键时间步的绘制效果.

表 1 测试数据集

Table 1 Test data sets

数据集	数据格式	数据类型	网格规模		时间步	数据量/MB
			单元数	顶点数		
旋转加热磁盘	VTK	时变结构	7 472	8 499	10	2.1
模拟进气道	Plot3d	非时变非结构	8 264 000	8 568 624	1	2 611.3
尾管燃烧室	Openform	时变混合	116 321	37 514	113	1 730.5

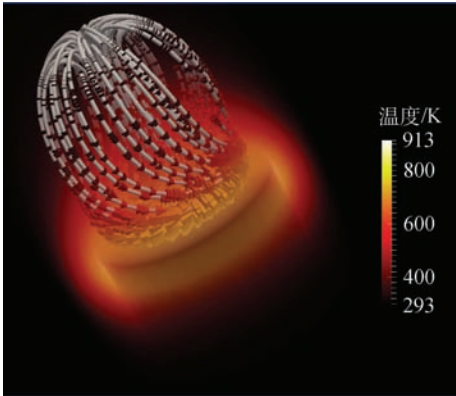


图 12 旋转加热磁盘周边空气流动混合绘制效果图

Fig. 12 Mixture rendering result of simulation dataset of the flow of air around a heated and spinning disk

3.2.2 分析进气道数据集分析

以某研究机构的模拟进气道数据集为例,三维显示展示进气道起动与不起动时流道流场、静

压对比,从而预测宽范围工作进气道性能,包括起
动性能、预测亚临界、亚额定状态进气道性能,为
进一步机理分析与流场控制提供指导^[15].综合应
用体绘制、流线展现进气道内流信息,如图 14(a)
所示,并通过多个视图拼接同时显示进气道的基本
结构、整体进气道以及关键部件的温度分布情况
等.由于进气道数据集规模较大,在绘制时应用多
核并行功能,有效提高绘制效率,如图 14(b)所示.

3.2.3 尾管燃烧室数据集

燃烧室中的气动热力过程是非常复杂且强耦
合的,而湍流混合与化学反应在时间尺度上比较
接近,因此湍流和化学反应紧密耦合.湍流混合和
有限的化学反应速率结合在一起具有显著的三维
流动效应^[16].特别是在可能存在激波的高速区域
内,亚声速流动可能包含于超声速流动中,三维显
示喷出的羽流形的桶状激波,流场中的弓形激波

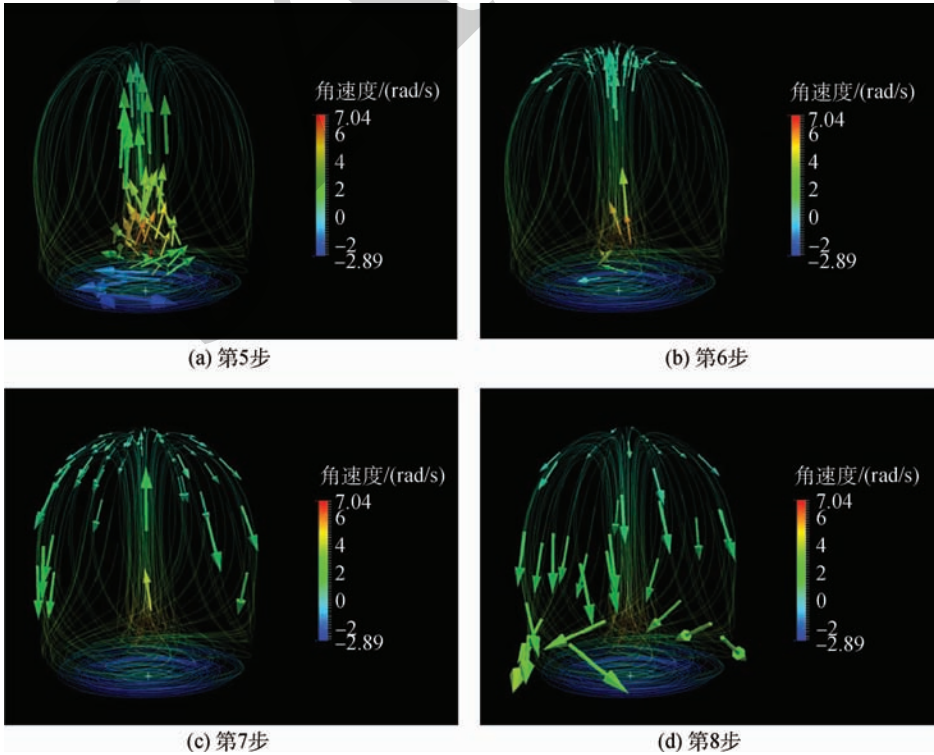


图 13 动态显示向量场运动状态效果图

Fig. 13 Results of dynamic display motion state in vector field

导致的气流分离并在射流前面形成的回流区. 在 FVAS 系统中采用纹理绘制、体绘制等技术展现燃烧室内部反应, 并通过切面、剖分等交互方式多视图显示燃烧室随时间改变燃烧室外壁、燃烧室内部整体、内部具体切面的温度变化情况, 具体如图 15 所示.

3. 2. 4 专家意见和建议

本文系统已经在相关单位安装测试并使用,

得到 CFD 流场专家的广泛好评. 根据专家的反馈意见, FVAS 系统提供了绝大部分常用的 CFD 流场可视化分析工具, 操作简单、方便实用, 同时专家也希望在后续的工作中开发针对专业数据的特定分析功能并实现一键操作, 并支持针对特大变混合格网数据的实时绘制, 这些功能将会更大程度上减轻用户分析复杂结构流场的工作难度, 并提高分析准确性.

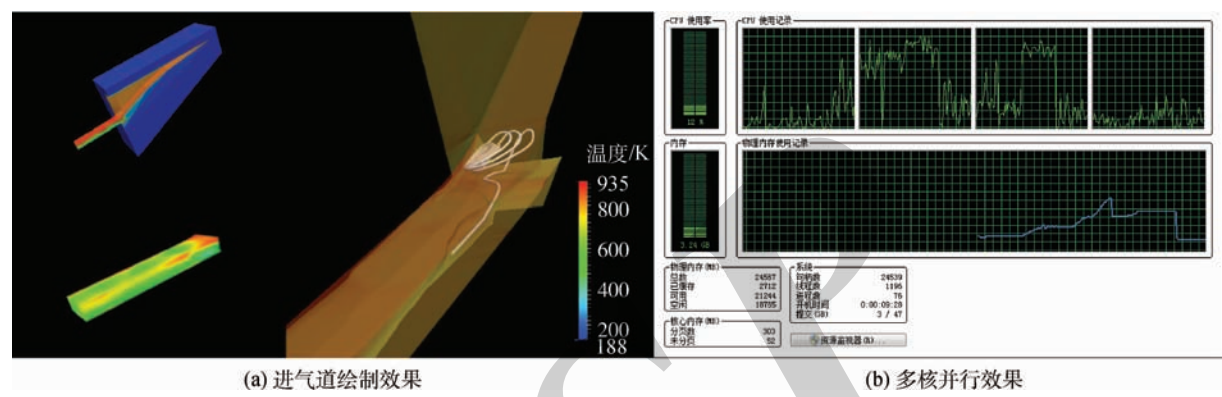


图 14 模拟进气道数据集多视图绘制

Fig. 14 Result of simulated air inlet data set with multiple views

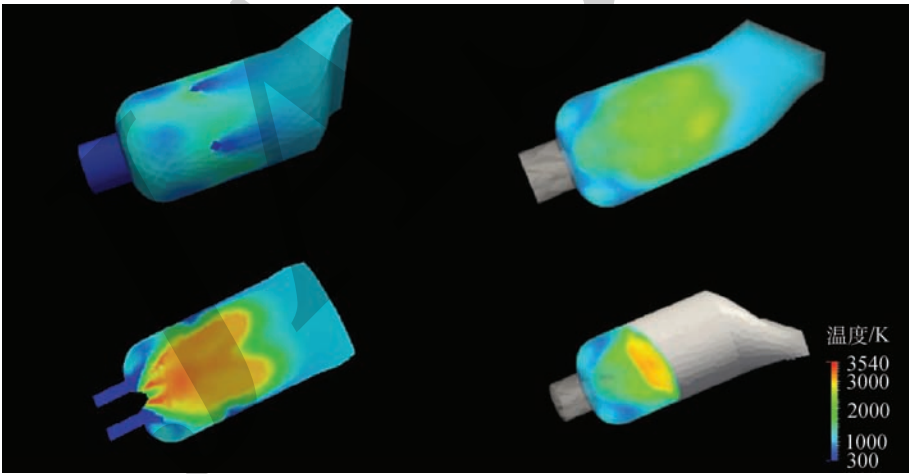


图 15 模拟尾管燃烧室数据集多视图绘制效果

Fig. 15 Multiple view result of simulated combustion chamber data set

4 结论与未来工作

本文从 CFD 流场领域实际需求出发, 提出了一个通用性流场数据可视化的系统框架, 设计开发了大规模 CFD 流场可视化分析系统 FVAS, 实现了对 CFD 三维流场数据的可视化展示. 该系统具备以下特点: ①操作简便, 界面美观, 交互灵活, 良好的多核处理能力有效提高绘制效率; ②支持 Tecplot, VTK 等典型科学数据格式, 通用性高; ③具备体绘制、图形绘制等多种可视化表现方式,

有效展现流场数据内部反应情况; ④支持 8 种展示方式、3 种显示模式以及 5 种视图类型, 便于显示局部细节特征和具体网格单元; ⑤采用松散耦合的架构设计, 便于协同开发与维护, 面向对象的开发模式, 各功能模块相对独立. 测试结果表明该系统简单实用, 通用性高, 可以有效的展现流场数据中的特征信息, 帮助用户更好的理解分析复杂 CFD 流场物理现象.

该系统提供了一套良好的流场可视分析平台框架, 下一阶段我们会对系统中的算法进行优化

补充,如基于 GPU 加速的体绘制、针对专业数据的特定功能定制,实现一键操作等等,完成并行平台框架的搭建与完善,并采用大屏沉浸式展示方式更好地展现流场特征。

参考文献:

[1] 吴颖川,贺元元,贺伟,等. 吸气式高超声速飞行器机体推进一体化技术研究进展[J]. 航空学报, 2015, 36(1): 245-260.
WU Yingchuan, HE Yuanyuan, HE Wei, et al. Progress in airframe-propulsion integration technology of air-breathing hypersonic vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 245-260. (in Chinese)

[2] 李思昆,蔡勋,王文珂,等. 大规模流场科学计算可视化[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

[3] John. 计算流体力学基础及其应用[M]. 吴颂平,刘赵森,译. 北京:机械工业出版社,2007.

[4] Stole C, Hanrahan P. Polaris: a system for query, analysis and visualization of multi-dimensional relational databases[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(1): 52-65.

[5] 马千里. CFD 非结构网格流场体绘制可视化方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2012.
MA Qianli. Study of the volume rendering visualization for unstructured-grid flow fields from the CFD simulation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)

[6] Shirley P, Tuchman A. A polygonal approximation to direct scalar volume rendering[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1990, 24(5): 63-70.

[7] Callahan S P, Ikits M, Combajld D, et al. Hardware-assisted visibility sorting for unstructured volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(3): 285-295.

[8] Hu J, Wang W K, Ma Q L, et al. Optimization and implementation of unstructured grid volume rendering algorithm [R]. Paris: The 2nd International Conference on Computer

Application and System Modeling, 2012.

[9] Mitchell J S B, Silva C T, Farias R, et al. ZSWEEP: an efficient and exact projection algorithm for unstructured volume rendering[R]. New York: The 2000 IEEE Symposium on Volume Visualization, 2000.

[10] Bunyk P, Kaufman A, Silva C T. Simple, fast, and robust ray casting of irregular grids[R]. Dagstuhl, Germany: Scientific Visualization Conference, 1997.

[11] Xu H X, Ma Q L, Li S K, et al. Multi-resolution texture visualization of vector field based on fuzzy feature measurement[J]. Engineering and Computer Science, 2011, 2188(1): 504-509.

[12] 刘占平,汪国平,董士海. 一种新的 Volume LIC 可视化方法[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(5): 470-474.
LIU Zhanping, WANG Guoping, DONG Shihai. A new method of Volume LIC for 3D vector field visualization [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(5): 470-474. (in Chinese)

[13] 沈恩亚. CFD 三维流场数据典型特征交互分析技术的研究与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
SHEN Enya. Research and implementation of interactive analysis technology for typical characteristics in CFD three-dimensional flow field data [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

[14] Thomas J J, Cook K A. Illuminating the path: the research and development agenda for visual analytics[M]. Richland WA, US: Pacific Northwest National Laboratory, 2005.

[15] 吴颖川,贺元元,余安远,等. 展向截断面乘波压缩前体进气道气动布局研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(7): 1570-1575.
WU Yingchuan, HE Yuanyuan, YU Anyuan, et al. Aero-dynamic layout of spanwise truncated curved waverider compression inlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(7): 1570-1575. (in Chinese)

[16] Liu Z Q, Sun Z G, Chen H N, et al. Numerical simulation of low-speed combustion using openFOAM on multi-core cluster systems[R]. Qinhuangdao, Hebei: The 2th International Conference on Information Computing and Applications, 2011.

(编辑:叶 青)