

文章编号: 1000-6893(1999)06-0481-04

# 开放式气动力数值模拟系统研究

任碧宁, 白文, 朱培焯, 周天孝

(中国航空计算技术研究所, 陕西 西安 710068)

## DEVELOPMENT OF AN OPEN CFD NUMERICAL SIMULATION SYSTEM

REN Bin-ning, BAI Wen, ZHU Pei-ye, ZHOU Tian-xiao

(Aeronautics Computing Research Technology Institute, AVIC, Xi'an 710068, China)

**摘要:** 气动力数值模拟系统是 CFD 流场解算技术、网格生成技术、数据可视化技术和网络技术相结合的产物。描述了一种运行于计算机网格环境下多任务、多用户、交互式的数值模拟软件环境。气动力数值模拟系统, 该环境能计算模拟亚、跨、超音速绕流的气动力, 也能方便地集成模拟不同复杂气动布局飞机流场的解算程序。介绍了其网格生成、数据可视化、系统接口等核心部分的结构和功能。

**关键词:** CFD; 网格生成; 接口技术; 数据场可视化

**中图分类号:** V 211.3 **文献标识码:** A

**Abstract:** CFD numerical simulation system is a combined technology of CFD flow solving, grid generation, data visualization and networking. This paper described an integrated interactive CFD simulation system for subsonic, transonic and supersonic flows, running in a network environment. This system can easily integrate various flow solvers for complex configurations, including panel method codes, potential flow codes, and codes for Euler and Navier-Stokes equation through its unified data interface. This paper also described the development of the system architecture, the software structure, the pre-processor for geometry and grid generation, the powerful flow field solvers, and the advanced data visualization subsystem.

**Key words:** CFD; grid generation; data visualization; data interface

随着 CFD 数值模拟技术的迅速发展, 人们提出大量快速、稳定、高效的算法。模拟复杂流动的 CFD 算法以及可以计算复杂组合体(包括机翼、机身、平尾、立尾、外挂、挂架等)气动力数据的程序, 无论在方法的多样性还是在几何拓扑的复杂性方面都已逐步走向成熟<sup>[1]</sup>。另外, 随着具备大容量存储能力和超高速计算能力的计算机和工作站的出现, 以及与之相应的网络数据库、并行计算, 特别是数据可视化技术的迅速发展, 满足了气动力数值模拟对计算机软、硬件的较高需求。

在飞机研制和设计过程中, CFD 数值模拟技术与风洞实验相比, 能更快、更节省费用。飞机几何外形数据的前置处理在采用了先进的网格生成技术和交互图形技术后, 变得灵活、方便。尤其在飞机气动外形经常需要修改的预研选型阶段, 前置几何处理与风洞吹风模型制作相比, 周期缩短, 费用大大降低; 风洞实验过程中的数据采集由于受到模型形状和尺寸的限制, 其数据采集点分布

难尽人意, 而且流场空间采集点布置或流场观察介质施放往往会对流场形成干扰, 而 CFD 数值模拟的数据采集点可以任意选取。对于有些实验条件难以达到的流动状态, CFD 是唯一的模拟手段。采用先进的数据可视化技术可以实现流场抽象计算结果的显示、描述、分析、比较和解释。

## 1 系统结构

气动力数值模拟系统由前置处理、求解器、后置处理、数据库和 GUI 5 个子系统组成。其中: 前置处理 CAEGrid 的主要功能是模型输入、几何造型和网格生成; CFD 数值求解器 (Solver) 完成流场计算, 它可以由多个先进、成熟的飞机气动力计算程序构成; 后置处理 CFDV 负责计算结果数据的可视化 (Visualization); 图形用户界面 (GUI) 实现流程组织、执行交互式控制。软件系统的逻辑结构<sup>[2]</sup>如图 1 所示。

CFD 数值模拟系统软件各个子系统之间的数据传输以文件读取的方式进行。系统的接口标准约定了接口文件中数据的内容、格式与顺序, 是子系统之间信息传递的重要协议。

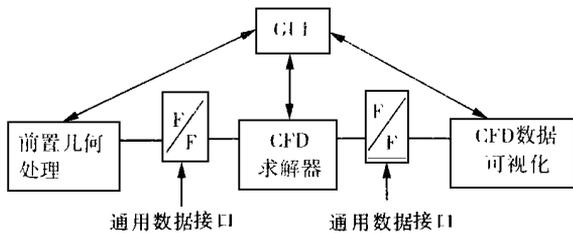


图1 系统结构

系统的输入数据是前置处理的前端对外接口——模型几何数据文件。模型几何数据文件可以采用CAD系统格式的几何造型数据格式,也可以通过一系列的曲线和曲面定义。而这些曲线和曲面又通过一系列有序离散点定义,模型几何数据文件存放这些离散点的坐标。系统的后端接口是数据可视化系统输出的网格数据文件、每个模型各个状态的流场计算结果数据文件、工程图线图表、图形图象文件等。

前置子系统与求解器子系统之间的数据传输接口标准包括:前置子系统生成求解器子系统需要的边界条件文件、物面标记文件和计算网格数据文件。求解器子系统与后置子系统之间数据传输的接口标准包括:求解器子系统生成的供数据可视化子系统使用的分布计算结果文件和气动力系数文件,其中分布计算结果文件的格式与前置子系统生成的计算网格数据文件一致,均采用国际普遍使用的PLOT3D格式。求解器子系统与系统GUI之间数据传输的接口标准包括:流场计算状态文件和流场解算收敛过程数据文件(系统通过该文件实施对计算过程的监控)。

CFD数值模拟系统良好的开放性正体现在采用CFD领域广泛使用的接口文件作为开放式集成接口标准。由于前置处理部分具有强大而全面的功能,能生成满足大多数CFD求解程序需要的计算网格;数据可视化子系统又能很好地满足CFD求解程序所需的图形可视化要求;再加上简单统一的接口文件系统,使得符合系统接口标准的先进解算程序很容易集成进来。

## 2 前置处理

前置处理包括:几何处理、网格生成以及指定流动参数、边界条件和求解器参数等内容。几何处理一般采用CAD系统进行;流动参数、边界条件和求解器参数等在系统内通过GUI交互输入;网格生成采用图形交互式系统CAEGrid进行。

CAEGrid系统具有处理复杂气动外形的能

力,能生成复杂气动外形的三维多块结构化计算网格,这种网格是目前CFD研究和工程应用中最为广泛采用的网格类型。

网格生成方法包括:代数方法和椭圆方程方法。其中:代数方法即是所谓的最优无限插值(Optimal Transfinite Interpolation)方法;边界网格点分布采用指数函数或双曲正切函数控制;体网格内部的网格点分布和光滑性采用改进的Thomas-Middlecoff椭圆方程方法实现。因此,用户可以获得理想的网格点分布,网格的边界正交性采用Sorenson椭圆方程方法控制。

CAEGrid具有丰富的曲线/曲面生成和操作功能,可以生成多种常用的曲线和曲面;自由曲线和曲面可以采用均匀Akima三次样条、基于弧长的Akima三次样条、均匀三次B-样条或非均匀三次B-样条逼近;曲线和曲面网格可以投影到各种曲面上以保证网格的贴体性;曲面网格还可以采用椭圆方程方法光滑化和正交化。

CAEGrid还具有网格质量分析的功能。通过计算定义光滑性和正交性的各种参数和采用多种算法计算网格单元体积,给出曲面网格和体网格质量的统计数字。CAEGrid还采用了所谓的间接引用参数(Indirectly Addressed Parameter)等先进实用的多块网格生成技术。CAEGrid是一个图形交互式的网格生成系统,同时交互过程可以保存到所谓的日志文件(Journal File)中,用户可以编辑日志文件,并以批处理方式运行。这一功能对于CFD工程应用非常重要。

## 3 CFD求解器

CFD求解器子系统的气动力计算能力是衡量气动力数值模拟系统性能和功能的重要指标。“八五”期间“气动力数值模拟系统”已经集成的解算器有以下功能:能计算模拟在亚、跨、超音速绕流状态下,正常布局、鸭式布局、双立尾布局以及腹部进气、两侧进气、外挂干扰等;飞机全机纵向的力和力矩特性、压力分布和流场、动导数等气动力数据和一定的大攻角特性数据。所用流动模型为线化理论、跨音速势流和Euler/N-S方程等,采用行之有效、成熟可靠的多种求解策略,不同精度的离散格式和稳定快速的计算方法。

目前已集成的多块网格Euler/N-S方程解算程序,能够在中等攻角范围内( $\alpha < 20^\circ$ )和跨音速段提高流场压力分布的数值精度和工程实用化能力;外挂物与飞机流场干扰及投放模拟从面元法

上升到 Euler 流动模拟; Euler/N-S 流动模拟可采用并行算法。

#### 4 CFD 数据可视化

数据可视化子系统 CFDV 是气动力数值模拟系统的重要组成部分。其作用是用计算机图形学的可视化方法,把抽象的 CFD 数值模拟结果所蕴涵的内容直观形象地表现出来,使用户能够方便地对这些数据进行分析、比较和研究,更有效地控制计算过程,更准确地分析流动机理。CFDV 提供图形界面交互和脚本批处理两种操作方式;可使用鼠标直接对图形进行交互操作,图形响应及时迅速,用户界面友好。该系统提供多种先进的可视化工具:系统可以用线架或光照模型的方式显示计算模型的外形;具有单块或多块结构化计算网格的显示功能,提供 16 种功能函数用以检测评估 2D, 3D 网格质量。等值线(Counter line)及云图(Cloud map)是标量数据的重要描述工具。系统可以根据用户的需要在机体表面、任意网格面、自由剖切面或其他特征面上绘制等值线或云图。三维空间等值面(Iso-surface)是理解空间数据的重要工具,系统可以根据 CFD 研究人员的需要计算和绘制等值面。与向真实风洞中加入有色介质或微粒的方式相似,CFD 数值模拟系统中也采用施放粒子并跟踪其运动轨迹的办法分析流动特性。系统可以使用粒子跟踪法显示矢量场的流线,而且流线起点的放置很灵活;系统还可以采用刺状图、流带(ribbon)等方式显示矢量场数据。矢量场的拓扑结构抽取了矢量场的主要特征,是分析差分方程结果的全局构造和映射方法。系统提供确定流场拓扑结构的功能。提供图线绘制功能实现对模拟结果的定量分析。可以显示物面或网格上各种计算结果的曲线,并可以和实验数据比较。非结构化网格及其流场的显示描述工具。具有自由灵活的文本和标注功能,提供动态显示功能和多种图形格式输出功能。

#### 5 实例及结论

该气动力数值模拟系统的硬件平台是 SGI 工作站,采用 C, FORTRAN, MOTIF 混合编程模式,充分发挥工作站操作系统的先进性,使以程序集成为主松散结合的气动力数值模拟系统具有多任务、多用户、高度图形交互的功能。算例结果与实验结果符合良好。经测试,系统各功能模块具有较强的鲁棒性,而且界面友好,操作灵活。该软

件系统的研制是将独立分散的网格生成、流场解算、数据可视化技术整合集成为商品化软件的重要尝试。

用户有多种方式使用该系统。可以从原始数据出发,依次采用系统的前置处理子系统处几何数据和生成网格,采用系统的流动求解程序进行计算,采用系统的数据可视化子系统进行后置处理和流动分析;也可以直接输入计算网格,从采用系统的流动求解程序进行计算开始;还可以直接输入计算网格和计算结果,只采用系统的数据可视化子系统进行后置处理和流动分析。

以一个完整的应用过程为例,用户首先需要按照系统定义的模型几何数据文件格式准备几何数据文件;然后,采用系统的前置处理子系统处理几何数据,生成网格,指定边界条件和流动特性,系统自动生成一致的计算网格文件、物面标记文件和边界条件/流动特性文件,提交系统的流动求解程序进行计算;用户通过系统的图形用户界面对计算过程进行监控;一旦计算完成,系统自动生成一致的计算网格文件和计算结果文件,用户采用系统的数据可视化子系统进行后置处理和流动分析。

图 2 给出某型飞机的多块网格示意图。图 3 以某型十字弹翼流场的数值模拟为例,给出几个网格面上用于网格质量评价的 J 向纵横比(J Aspect ratio)分布图;图 4 给出某型飞机  $Ma = 0.6, \beta = 0^\circ$  时极曲线的计算值与实验值比较;图 5 给出某型飞机  $Ma = 0.95, \alpha = 4^\circ, \beta = 4^\circ$  时的流场综合显示,其中包括物面及网格面压力分布云图、流带、等值线和网格扭曲比分布图。

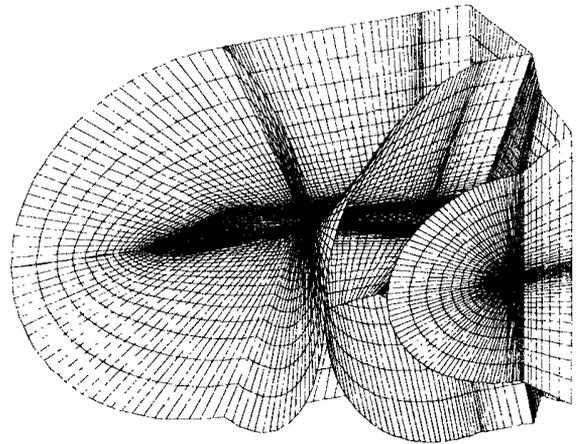


图 2 某型飞机的多块网格结构

气动力数值模拟系统可以用于初步设计选型和参数修改,扩大选型范围,可以部分取代风洞实

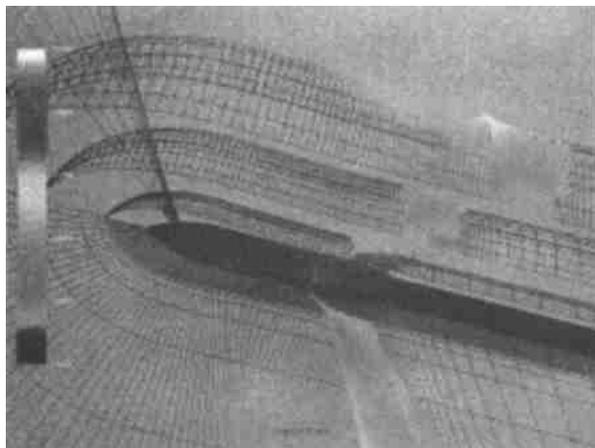


图3 几个网格面上J向纵横比显示

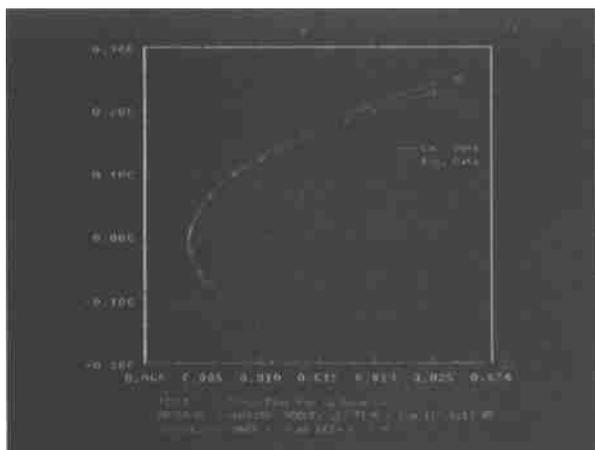


图4 某型飞机 $Ma = 0.6, \beta = 0$ 时的极曲线

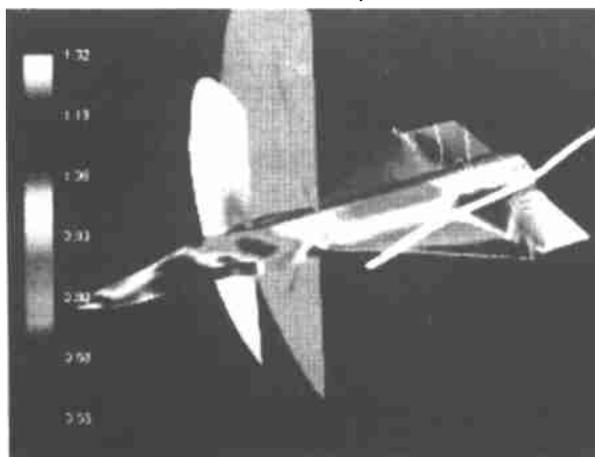


图5 某型飞机 $Ma = 0.95, \alpha = 4^\circ, \beta = 4$ 的流场综合显示

验,减少吹风次数,从而节省大量的试验费用。可以用于飞机气动力的计算机辅助设计,先进气动布局研究和气动力研究。其数据可视化子系统是研究分析流动机理、探讨新气动现象的有力工具。

## 6 进一步的工作

气动力数值模拟系统今后的一个发展方向是

方便用户,尽量减少人工介入,降低对用户的CFD专业技术知识要求。因此,为了进一步扩展气动力数值模拟系统的功能,使之走向实用化,还需要在以下方面加强工作:进一步提高该软件的方便性、灵活性和易学易用性,走软件商品化的道路;采用高性能并行计算机作为CFD数值模拟系统硬件平台,逐步实现前后置处理及流场解算程序的并行化;采用client/server体系结构,实现模型数据、网格数据、CFD计算结果数据的数据库管理,方便用户对数据的存储、检索和统一管理,保证数据的独立性、安全性和可恢复性;进一步完善气动图线图表功能;增加非结构化网格的网格生成和计算能力,集成非结构化网格解算软件;增加远程访问能力,使用户可以通过局域或广域网方便地使用系统,访问系统模型数据、网格数据、CFD计算结果数据,查询浏览系统图象图片资料。

## 参 考 文 献

- [1] LI L i, ZHU Pei-ye ANSS-An integrated software system for computational aerodynamic[A]. In: Proceeding of the Russian-Chinese Symposium on Aerodynamics and Flight Dynamics[C], Moscow. 1997.
- [2] Craig Witherspoon, Coletta Witherspoon. Optimizing client/server networks[M]. 北京:电子工业出版社, 1996.

### 作者简介:



任碧宁 男,33岁,高级工程师。1987年获空气动力学学士学位,曾从事CFD数值模拟研究工作,现为CAD/CAM国家重点实验室博士研究生,研究方向为数据可视化。研究兴趣为CFD数值模拟及其数据可视化。电话:5261012转3100, Email: renbn@i631.nwpu.edu.cn.



白文 男,1968年6月生,工程师,博士研究生。目前研究兴趣为CFD前置处理和网格生成、流动数值模拟以及模拟的可靠性。电话:5261012转3102, Email: wenbai@i631.nwpu.edu.cn.

朱培焯 男,58岁,研究员。1993年获西德工学博士学位,从事CFD数值计算研究,现任中国CFD学会理事、中国计算物理学会理事。

周天孝 男,1938年8月生,研究员,博士生导师,航空气动力数值模拟重点实验室主任,研究方向为计算数学和计算流体力学。