

高精度数值风洞在飞行器设计中的作用

The Role of TH-HiNWT in Flight Vehicle Design

燕振国 / 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室

摘要: 计算流体力学 (CFD) 是飞行器气动设计的重要手段。为了满足我国大型运输机等重大项目对气动数据的需求, 将计算流体力学与“天河”超级计算机结合初步建成了世界上首座高精度数值风洞 (TH-HiNWT)。TH-HiNWT在研制过程中突破了CFD的高精度计算方法在复杂流场中存在的计算稳定性差等难题。国际上首次将高精度计算方法应用到工程问题的大规模流动模拟中, TH-HiNWT将为大型客机、大型运输机等设计提供可靠的海量数据。

Abstract: Computational Fluid Dynamics (CFD) is a very important tool for flight vehicle design. To meet the demand of flight vehicle design, such as the design of Large Transport, the first High-order Numerical Wind Tunnel (TH-HiNWT) in the world is preliminarily built up by combining CFD methods with Tianhe super computers. Many scientific and technical difficulties, such as the instability of high-order methods when used in complex problems, are conquered during building TH-HiNWT. High-order CFD methods are firstly used for simulations of large engineering problems. TH-HiNWT will offer massive reliable data for the design of large passenger aircraft and Large Transport.

关键词: 计算流体力学; 数值风洞; TH-HiNWT; 超级计算机; 飞行器设计

Keywords: computational fluid dynamics; numerical wind tunnel; TH-HiNWT; super computer; flight vehicle design

0 引言

计算流体力学 (CFD) 是计算科学与流体力学相结合的综合学科, 它与风洞试验和理论分析共同构成流体力学的三大研究手段。与风洞试验手段相比, 它具有成本低、周期短、不受风洞条件限制等优势; 与理论分析相比, 它可以处理复杂问题而不需要对流动问题做过多简化。无论从节省研制费用、缩短设计时间出发, 还是从提高设计水平出发, 随着计算机和CFD技术的进一步发展, CFD将给各类航空航天飞行器的气动设计带来一场革命。空中客车公司明确指出, 在未来的飞机设计中, 数值模拟和优化设计系统的作用将贯穿整个飞机的设计过程, 而风洞试验将仅在正样设计阶段发挥一定的作用, 风洞试验的主要目的是验证数值模拟和优化设计系

统的计算结果。

当前, CFD已经在航空、航天领域得到了大量成功应用。图1给出了波音公司不同飞机设计中采用的CFD软件

以及风洞试验情况。上世纪80年代, 波音公司设计波音767飞机时, 利用风洞测试了77套不同的机翼; 而在上世纪90年代中期, 波音公司在737NG的

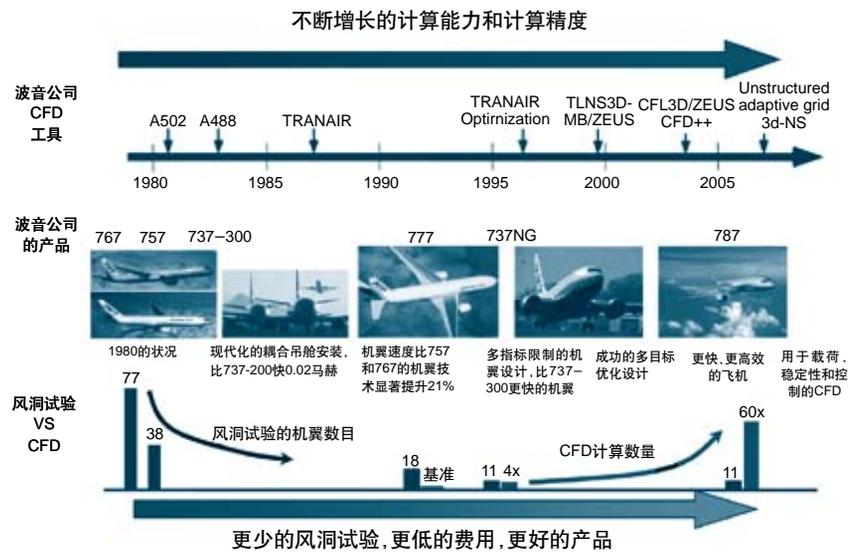


图1 波音公司不同飞机设计采用的CFD软件以及风洞试验情况

设计过程中,只测试了10套不同的机翼,降低了大量成本,减小了研制周期。在这巨大的变化中,CFD起到了非常关键的作用。波音公司指出,CFD的有效应用是现代运输机成功设计的关键因素^[1]。综合考虑市场竞争压力、飞机安全性、企业经济效益等因素,灵活、广泛、仔细地采用CFD手段是波音产品研发的主要策略。

数值风洞(Numerical Wind Tunnel, NWT)是将计算流体力学(CFD)软件系统与大型计算机系统有机结合,能提供满足型号工程设计精度和效率要求的飞行器气动数据。相比一般的CFD软件,数值风洞系统经过大量系统测试,能够生成准确的气动数据,且具有更快的计算速度和更大的计算容量,可为飞行器气动设计提供海量数据。

为大幅度提高现代飞行器的设计水平,发达国家投入大量的人力、物力建设数值风洞。上世纪80~90年代,日本JAXA利用当时世界排名第一的超级计算机建成了数值风洞,并开始对下一代数值风洞的建设展开论证和调研^[2,3];2007年,美国NASA基于当时排名世界第四的Columbia计算机进行了数值风洞建设^[4]。国内计算流体工作者也开发了众多的CFD模拟软件,但在数值风洞的建设方面刚刚起步。尤其需要指出的是,以上的数值风洞和CFD软件均是基于二阶空间离散精度的计算格式,在现代飞行器气动设计中设计的阻力、热流、力矩等关键气动特性模拟精度方面还不能满足型号单位的设计要求,而更高精度的CFD方法的研究尚处于起步阶段,距离实际工程应用尚有很大的差距^[5]。

近年来,我国的航空事业得到了蓬勃的发展,为了满足国产支线飞机、大型客机、大型运输机、新一代

战斗机、高超声速飞行器等一大批国家重大专项和重点项目的迫切需求,突破高精度计算方法应用于工程实际的瓶颈,与高效能计算机系统紧密结合,建设具有完全自主知识产权的高精度数值风洞对我国自主飞行器的研制具有重要意义。

基于先后排名世界第一的超级计算机“天河”一号和“天河”二号,我国初步建成了世界第一座高精度数值风洞(TH-HiNWT)。TH-HiNWT的建设解决了一些列关键的技术难题,达到了国际先进水平。

1 提供更准确的计算结果

当前的飞机设计不再仅仅满足于飞机的基本性能,对飞机的起飞重量、经济性、舒适性、研制和制造成本控制都提出了更高的要求。更准确的计算数据才能为飞机的减阻等设计提供可靠的依据。相比传统的计算方法,高精度计算方法在高精度、捕捉更多流场信息等方面具有明显的优势。2006年开始,欧盟资助了高精度计算方法和软件研究计划ADIGMA,10个国家的22个欧洲航空宇航研究机构和工业部门参与其中^[5];2011年,NASA兰利中心的报告中也指出,高精度计算方法是急需发展的重要工具^[6]。然而,经过了数十年的研究,得到的结论却是国际上主要的高精度计算方法还处于起步阶段,离直接服务于航空工程设计很遥远^[5]。美国、日本的数值风洞和国际上知名的CFD软件还只是基于2阶精度计算方法构建的。

采用有限差分方法实现复杂外形流动的高精度数值模拟存在两大技术瓶颈:几何守恒问题和边界信息高精度传输问题。几何守恒的不满足会引入一定的不守恒误差,在网格复杂

时会严重影响有限差分方法的计算稳定性、与控制方程的相容性,严重时可能造成计算无法进行,这在高精度有限差分方法中尤其突出。国际上从上世纪50年代已经开始开展几何守恒问题的研究,但一直未获得突破性进展。高精度数值风洞(TH-HiNWT)研究团队提出了对称守恒网格导数计算方法,解决了复杂外形流动高精度数值模拟的几何守恒问题^[7],使高精度有限差分格式的计算稳定性大大提高,应用于复杂问题成为可能。复杂流动问题通常外形复杂、网格量大,需要采用多块网格来适应复杂外形和提高计算效率,此时如何保证各块网格对接时的高精度又是一个难题。针对该问题,TH-HiNWT研究团队提出了高阶特征对接方法和跨边界高阶插值方法,解决了复杂外形流动高精度数值模拟的边界信息高精度传输问题,保证了对接边界计算的高精度^[8]。上述关键技术的解决为采用高精度格式模拟复杂外形提供了技术支撑。该团队在此基础上还构建了数值风洞核心流场解算器,在国际上率先将高精度计算方法推广到了大规模工程应用中。

为了给国家重大工程提供可靠的数据,该团队开展了全面精细的验证与确认工作,确保TH-HiNWT模拟结果的准确性和工程实用性;选用从低速到高超声速系列二维/三维国际标准算例,通过与实验结果、二阶精度计算结果的精细比较,对高精度计算方法在壁面压力与热流、阻力计算、最大升力系数预测等方面的模拟结果进行了全面考核。测试结果表明,TH-HiNWT模拟结果在激波位置的准确预测、抖振边界的预测、飞行器失速预测、湍流模拟等方面都具有明显优势,计算结果的可靠性得到了充分验证。

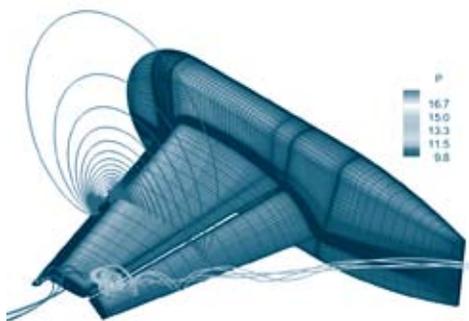


图2 国际CFD验证与确认的标准构型—梯形翼构型

图2给出了国际CFD验证与确认的一个标准构型——梯形翼构型。梯形翼构型具有大量精细、可靠的实验数据，可以很好地考核数值计算的正确性。图3给出了梯形翼构型的计算结果，从图中可以看到TH-HiNWT的计算结果（标记为WCNS）可以更好地与实验结果相吻合，优于许多国内外知名的CFD软件。

2 具有更快的计算速度

一个飞机设计的过程中，从起飞、爬升、平飞一直到降落，需要数以万计的计算状态对飞行器的气动性能进行全面评估，进行全机数值模拟时通常需要几千万到几亿的计算网格点，计算量非常巨大。传统的“小作坊”式CFD计算系统根本无法满

足飞机设计过程中的海量数据需求，必须发展具有更快计算速度的数值风洞系统。

TH-HiNWT是在先后排名世界第一的“天河”一号和“天河”二号超级计算机基础上建成的。“天河二号”超级计算机拥有80,000个处理器，2,120,000个计算核心，峰值浮点运算速度可以达到33.86千万亿次，比原先世界上最快的美国能源部橡树岭国家实验室的“泰坦”还要快74%。在硬件速度方面，TH-HiNWT更具有领先优势。

同时，TH-HiNWT在软件层次方面得到了优化。针对复杂应用网格生成工作量巨大的问题，研究人员对复杂网格生成方法展开了研究，提高了网格生成的自动化程度和网格质量。针对“天河”的硬件特点，研究人员对大规模并行情况下的数值风洞软件体系结构进行了研究，采用了CPU并行、GPU并行、CPU/GPU协同并行、CPU/MIC协同并行四种并行技术，构建了更加适合大规模并行计算的底层构架。在世界上最大规模异构并行的复杂算例中单GPU对8CPU核的并行加速比达到1.86，处于世界领先水平^[9]。

软硬件的有机结合使得TH-HiNWT拥有世界领先的大规模并行计算效率，并在我国自主研发的支线客机ARJ等飞行器的气动力计算中得到了验证。图4给出了ARJ典型计算结果。采用TH-HiNWT，ARJ的常规气动特性计算效率有了较大提高，3000万网格规模的计算可以达到1000状态/天，可计算和处理的网格规模也由千万量级提高到百亿量级。这大幅地缩短了计算周期，为飞机的设计提供了海量可靠数据。

3 提供更精细的流场显示

流动显示和流场特征的提取是CFD非常关键的最后一步，直接关系到计算结果中的关键信息是否能够成功获取。在大型客机C919的数值模拟中，虽然TH-HiNWT提供了精细、准确的计算结果，但是过大的计算数据无法显示成为困扰研究人员和设计师的主要问题。对于TH-HiNWT计算得到的TB级流场数据，国际上最著名的流动显示软件都无能为力。

经过数十年的研发，TH-HiNWT拥有了自主流场显示系统。该系统不仅具备了国外同类软件的大部分主要功能，打破了国外流动显示软件的垄

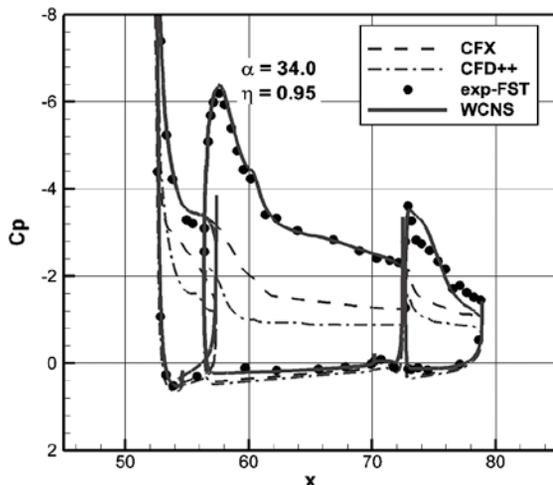
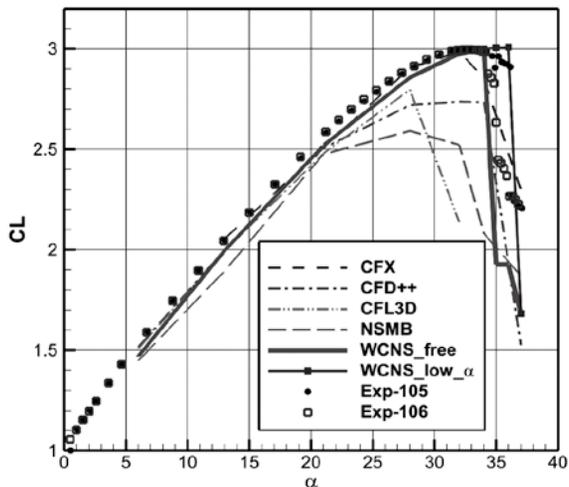


图3 梯形翼构型TH-HiNWT计算结果与国内外知名软件结果对比

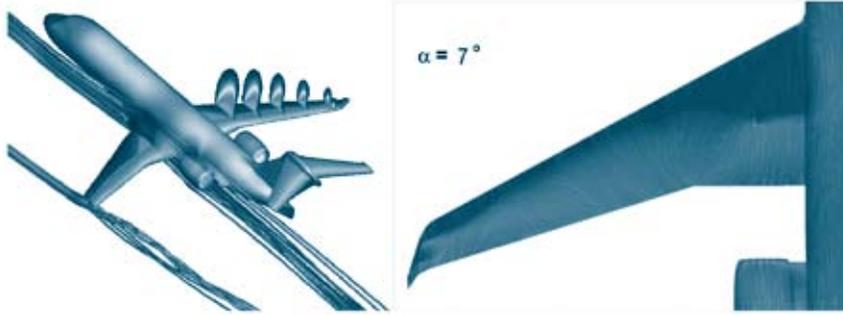


图4 ARJ-700支线飞机的复杂流场

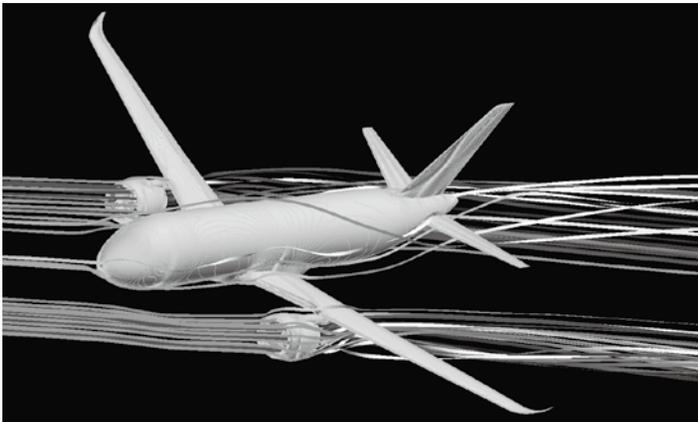


图5 C919飞机表面压力云图和空间流线分布

断地位，并且还支持TB级海量数据的处理，将纹理显示、体绘制流场信息提取等国际领先技术集成到软件系统，能够提供更加精细的流场显示结果。流场显示系统不仅使得TH-HiNWT具有海量数据处理、更精细的流场细节提取、更准确的流场数据分析功能，而且使得设计师能够获取最关键的气体流动特征^[10]。图5给出了国产大飞机C919的流场显示结果。

4 结束语

基于天河高效能计算机的高精度数值风洞建设不仅为现代飞行器的气动设计提供先进的技术手段，也为复杂流动机理的研究提供了基础平台。尽管高精度数值风洞的研发与应用取得重大进展，但仍然存在非定常计算效率不高、网格生成人力成本较大等问题。TH-HiNWT还需要围绕高精

度非定常计算方法、复杂构型高效率网格生成技术、超大规模并行计算技术、虚拟现实技术、多种物理模型等方面持续开展研究。

AST

参考文献

[1] Johnson Forrster T., Edward N. Tinoco, N. Jong Yu. Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle [J]. Computers & Fluids, 2005, 35(10):1115-1151.

[2] Hirose N., M. Fukuda. Numerical Wind Tunnel (NWT) and CFD research at National Aerospace Laboratory [C]. High Performance Computing on the Information Superhighway. 1997. Seoul: 99-103.

[3] Next Numerical Wind Tunnel System at NAL[J]. Special Publication of National Aerospace Laboratory, 2000,

46:69-72.

[4] Columbia (supercomputer) [EB/OL]. [17 September, 2013]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Columbia_\(supercomputer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Columbia_(supercomputer)).

[5] Kroll Norber. ADIGMA-Adaptive High-order Variational Methods for Aerodynamic Applications in Industry [R]. German Aerospace Center (DLR), 2009.

[6] Schuster David M. High-order Methods in NASA's Next Generation of Computational Fluid Dynamics Tools [C]. European Workshop on High-order Nonlinear Numerical Methods for Evolutionary PDEs: Theory and Applications. 2011.

[7] Deng Xiaogang, Yaobing Min, Meiliang Mao, Huayong Liu, Guohua Tu, Hanxin Zhang. Further studies on geometric conservation law and applications to high-order finite difference schemes with stationary grids [J]. Journal of Computational Physics, 2013, 239:90-111.

[8] Deng X. G., M. L. Mao, G. H. Tu, Y. F. Zhang, H. X. Zhang. Extending Weighted Compact Nonlinear Schemes to Complex Grids with Characteristic-Based Interface Conditions [J]. AIAA Journal, 2010, 48(12):2840-2851.

[9] Xu Chuanfu. Parallelizing a High-order CFD Software for 3D, Multi-block, Structured Grids on the TianHe-1A Supercomputer [C]. ISC13. 2013.

[10] 李思昆, 蔡勋, 王文珂, 王攀, 王怀晖, 沈恩亚. 大规模流场科学计算可视化 [M]. 第1版. 国防工业出版社. 2013.

作者简介

燕振国，硕士，主要从事计算流体力学相关研究。