DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.1997.01.013

高超声速与超声速喷流的数值计算和实验研究

王承尧 王正华 陈宏

（国防科技大学，长沙 410073）

［关键词］ 喷流数值模拟，多机并行计算，炮风洞实验

喷流干扰的研究对航天飞机、载人飞船和机动弹头的控制系统，对多级火箭的级间分离和对超声速冲压发动机燃烧室的研究等均有重要作用，将对战略战术导弹与航天飞行器的研制产生重大影响。喷流干扰流场中存在着激波、粘性剪切层、分离旋涡、湍流和化学非平衡流等，某些机理至今尚不清楚，因此喷流干扰流场的研究有明确的工程背景和重要的学术意义。从研究手段来说，国外自60年代起就进行了喷流干扰与撞击流场的实验，以后还进行了系统的地面实验与部分飞行试验。但是地面实验设备要求高、投资大，模拟技术和某些相似准则尚存在问题，而飞行试验费用昂贵。随着计算机软、硬件和计算方法的飞快发展，用计算流体动力学（CFD）手段，配合必要的实验验证来分析与研究喷流干扰流场及其他空气动力学问题，是一个需要进一步重视和加强的发展方向。

把CFD手段用于工程技术问题必须解决以下几个重要课题：(1)与先进的超级并行计算机相匹配的高效高速数值计算方法和网格生成技术；(2)计算结果的可用性实验验证；(3)计算结果的可视化和现在国外已进行的数值虚拟风洞的研究。我们在前一阶段，瞄准了上述关键问题，对涉及(1)、(2)两个课题方面的问题进行了研究，取得了较好的阶段性成果，获国防科工委科技进步奖二等奖两项、三等奖多项，现在正继续对上述三个方面的问题进行深入的研究。

1. 由于高超声速与超声速横向喷流干扰流场存在上述的激波、旋涡等干扰，是空气动力学复杂流场之一，必须用雷诺平均的N-S方程组作为控制方程并辅以湍流工程模型进行求解，在喷口附近网格必须加密。对一个典型三维高超声速喷流强干扰流场，用MacCormack显格式求解，在Cray-Ⅱ计算机上约需运行40 CPU小时[1]，这是典型的必须在超级计算机上进行的大规模科学计算问题。目前，从超级计算机的发展来看，受门切换和光传输速度的限制，仅靠器件性能的提高来提高运算速度和改进计算机性能，已越加困难了，只能在计算中引入越来越多的并行性。为此，挖掘超级计算机的潜力，充分发挥超级计算机的作用，研究CFD的超级计算方法（并行算法）就成为当务之急。我们在国内首次把CFD与超级（并行）计算相结合，在银河Ⅱ计算机上通过向量化和多机并行化，使总运行时间缩短至原先的1/20，填补了国内空白，并在银河-Ⅱ的考机过程中发挥了良好的作用。另一方面，为了验证数值计算结果的可靠性及其他教学科研的需要，我们研制了高超声速炮风洞，其主要参数是：实验段

本文于1996年5月6日收到。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

直径0.5 m，实验马赫数$Ma=7—10$，工作时间25—40 ms。经鉴定委员会鉴定，认为该风洞在流场品质和测压可靠性等方面居国内先进水平。该风洞现已投入运行，为数值计算结果的实验验证作出了贡献。

在CFD与向量化、多处理机化相结合的研究方面，我们以轴对称单锥底部或肩部带横向喷流强干扰流场作为算例，采用贴体网格，以MacCormack显式差分格式求解雷诺平均的N-S方程组并辅以Bladwin-Lomax湍流模型进行数值计算。该串行程序已在VAX-780机上运行。如果对程序不作修改而让银河机的YFJ编译器自动向量化，加速比较低，仅为1.22。为提高加速比，我们采取了下列措施对程序进行了重构[2]：(1)将编译选择与编译指导命令有机地结合，使尽可能多的最内层循环能进行向量化；(2)循环变换与短向量操作。如果外层循环长于内层循环，进行循环交换后运算结果不变，且仍能向量操作，就采用循环变换技术，这可缩短程序运行时间，而采用向量操作，无须按机器向量长度分段取数，从而提高了加速比；(3)循环替代与循环分割。由于GOTO与IF语句搭配使用的语句无法向量化，采用银河FORTRAN中的条件语句进行向量化，从而缩短了运行时间，同时把循环中无法向量化的内容从循环体中分开，使标量运算部分减到最小。通过上述努力，在银河-Ⅰ计算机上向量加速比提高近6倍，即由原来的标量运算时间792.6473 s，减少到向量化后的132.7007 s（不作循环交换时为147.1947 s）。如果计算中所取的网格更密，则向量化的效果会更好。

银河-Ⅱ巨型多处理机系统由紧耦合的共享主存的4个处理机组成，主频为50 MHz，向量长度为64，内存256 MB，峰值运算速度为400 MFlops。银河-Ⅱ提供了一组供用户试调用的多任务库子程序，支持宏任务和微任务两种并行程序设计方式。宏任务对粗粒度任务并行效果好，微任务不仅对粗粒度且对细粒度任务并行效果均好，我们采用的是宏任务方式。我们所作的并行实际上包含两级并行，外层循环采用多任务并行，内层循环采用向量并行。

然后，我们在银河-Ⅱ上进行了多处理机多任务并行计算的研究，主要采用三个步骤：首先，采取多任务划分，用循环分裂的静态负载平衡方法进行同步并行计算。即把原程序中每一个可划分为能进行多任务并行计算的外层循环，根据处理机数进行等分，每个处理机只完成它所分配的那部分工作；而当处理机间需进行数据交换时就设一个同步点，这样每一时间步所得的物理量与串行计算的结果完全一样。其次，我们对运行同步中的子程序类型进行研究，通常宏任务库有四类子程序，即(1)任务类子程序，它处理任务（具有子程序形式并可以调度的计算单位）的创建和同步，以及管理与任务有关的信息；(2)事件类子程序，用于实现任务的同步；(3)锁类子程序，主要用于代码的临界区和共享数据的保护；(4)会合类子程序，主要用来支持一种常见的会合方式，即几个并发任务在会合点会合后再恢复并行执行。四类子程序中任务类子程序开销最大，会合类次之，锁类与事件类开销较少。我们发现，当处理机台数n较大时，用会合类子程序实现同步比较简单且开销也少；而当n较小时，则可用锁类或事件类子程序实现同步。第三个步骤是对变量类型进行区分。没有很好区分变量类型是多机多任务运行的结果与单机运行结果不一致的主要因素，因此要把临时被引用的变量和在循环中可被多个任意子程序访问的变量区分开，这样所得的结果就合理。采用上述三个步骤后，多处理机多任务并行计算的加速比就可提高。最终，四处理机加速比达3.545，二处理机加速比达1.868，可与美国在Cray-XMP上所行的加速比相媲美。现将银河-Ⅰ与银河-Ⅱ上运行结果列于表1[3]。从表1可见，通过向量化和多处理机多任务计算，四处理机向量

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

并行计算的加速比是19.23，接近20（在这个结果中不计银河-Ⅱ单机标量运算速度比银河-Ⅰ快3倍的影响）。除上述研究外，我们还发展了一种新的隐式有限体积数值方法，并编制出相应的实用程序，计算中采用了国际上最新发展起来的基于变分原理的自适应网格技术，该法具有精度高、收敛快和捕捉激波分辨率高的特点。这些研究为正在开展的超级并行计算机（MPP）上的并行算法研究奠定了基础。

表1 运行结果

机器类型	运行方式	运行时间（s）	加速比
银河-Ⅰ	标量（串行）	792.6473	
银河-Ⅰ	向量运算（不作循环交换）	146.1947	5.4218（向量）
银河-Ⅱ	单机向量（不作循环交换）	17.9650	
银河-Ⅱ	四处理机向量并行运算	13.5286	3.5454

2. 在实验研究中，我们首先研制成KD-01高超声速炮风洞，该风洞全长4.3 m，洞体由高速段、第一夹膜机、低压段、第二夹膜机、型面喷管、实验段、扩压段、真空罐等组成，并配有行程控制系统、夹膜系统、真空抽吸系统、气动力和压力数据采集系统，及流场光学显示系统等。高、低压段内径为103 mm，型面喷管出口直径为500 mm，可调马赫数 $Ma=7$，8，9，10，喉道可根据马赫数改变而更换，实验段截面积为1 m^2，真空罐容积为75 m^3，$Ma=8$时，实验用单位雷诺数可达 1.3×10^7/m，有效使用运行时间30 ms，目前使用的最高驱动压力12.5 MPa。在国家自然科学基金及国防"八五"预研基金的支持下，学校开始重视对该风洞的研制并进行了相应的投资，于1993年底建成并通过了鉴定，随后进行了飞行器测压实验，获得型号部门的高度赞扬，认为该风洞不仅为教学科研提供了有力工具，而且可在国家型号任务的气动攻关中发挥重大作用。尤其在CFD的实验验证方面，我们在炮风洞中进行了高超声速横向喷流（锥柱体的喷流干扰）流场的物面压力测试与纹影摄相观察，验证了CFD的结果，并发现在CFD中湍流模型的正确选取和正确决定喷流压强比是验证成败的关键因素，这在CFD的实验验证研究上迈出了重要的一步。事实证明，该设备是CFD实验验证的一个重要手段，通过计算和实验人员混合编组，互相讨论，不仅发现CFD计算中有不少值得改进的地方，而且发现实验模型的设计，实验参数的测定与修正，实验方案的设计等方面存在不足，最终使CFD与实验研究的水平都有了一个新的提高。

总之，把CFD的复杂流场数值模拟与向量化和多机多任务并行化的超级计算相结合，使计算效率提高近20倍；把数值模拟与地面风洞实验相配合，进行CFD的实验验证，使CFD的结果可用性增加，且对计算与实验水平均有较大提高，这就是本项研究的创新之处。

参考文献

[1] Shang J S, MacMaster D L et al. Interaction of Jet in Hypersonic Cross Stream. AIAA paper 87-0055, 1987.
[2] 王正华，王承尧. 轴对称横向喷流干扰流场的巨型机向量并行计算. 宇航学报，1995，**16**（1）：45.
[3] 王正华，王承尧. 显式差分程序的巨型机宏任务并行计算. 空气动力学学报，1995，**13**（2）：125.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

THE NUMERICAL CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF HYPERSONIC AND SUPERSONIC JET FLOWFIELDS

Wang Chengyao　Wang Zhenghua　Chen Hong
(*National University of Defence Technology*, *Changsha* 410073)

Key words　jet flowfield numerical simulation, multiprocessing parallel calculation, gun wind tunnel experiment

·资　料·

1996年获国家自然科学基金面上项目资助的前20名科研院所名单

（按资助金额排序）

金额单位：万元

单位名称	项数	资助金额
中国科学院物理研究所	22	278.00
中国科学院地质研究所	17	236.40
中国科学院地球化学研究所	16	221.00
中国科学院力学研究所	19	218.00
中国科学院广州地球化学研究所	17	197.00
中国科学院地理研究所	15	195.50
中国科学院长春应用化学研究所	17	183.50
中国科学院金属研究所	14	178.50
中国科学院大气物理研究所	12	177.00
中国医学科学院基础医学研究所	17	176.00
中国科学院感光化学研究所	16	175.70
中国科学院生物物理研究所	17	170.50
中国科学院化学研究所	16	166.50
中国科学院生态环境研究中心	16	161.00
中国人民解放军军事医学科学院	16	160.00
中国科学院海洋研究所	15	154.00
中国科学院动物研究所	16	152.00
中国科学院高能物理研究所	15	145.20
中国科学院水生生物研究所	16	144.70
中国科学院上海有机化学研究所	13	144.50
中国林业科学研究院	14	144.50

注：因最后两个单位资助金额并列，所以为21个科研院所。

（综合计划局信息处供稿）

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net