

涉及许多方面,如湍流机理、超音速飞行系统引起的生态问题、点火与火焰的不稳定、液滴碰撞、稀薄气体、流动稳定性、旋涡破裂、激波与附面层干扰、冯诺曼激波反射、激波与涡的干扰等等,充分显示了计算流体力学在流动机理研究方面的重要作用。

(5) 应用研究 应用研究包含的范围也十分广泛,有大量全机流场计算、旋翼问题计算、航空发动机内流计算、导弹投放问题、飞机外挂物问题、飞行器气动设计问题、水下流体力学问题、汽车外流问题、汽车发动机内流问题、其它一般工业空气动力学问题等等。这表明计算流体力学在解决工程实际问题方面具有重要的应用价值。

### 3. 方向和差距

从这次会议可以看出,计算流体力学主要向两个方面发展:一方面是研究流动非定常稳定特性、分叉解及湍流流动的机理,为流动控制,如湍流控制提供理论依据,开展更为复杂的非定常、多尺度的流动特征,高精度、高分辨率的计算方法和并行算法的研究;另一种发展趋势是将计算流体力学直接用于模拟各种实际流动,解决工业生产中提出来的各种问题,

这些问题除航空航天领域中的复杂外形绕流或内流以及超声速燃烧的数值模拟外,计算流体力学已经应用于大气、生态环境、汽车工业、高速火车、高速船舶、燃烧火焰以及工业中化学反应对材料的腐蚀等各个领域,显示了计算流体力学强有力的活力,表明了计算流体力学已逐渐成为推动生产力发展的重要手段之一。美国和日本在这两方面做得更为突出。在我国经济飞速发展的今天,一些流体力学的问题的解决,将有利于我国的国民经济建设工作,我们需要迎头追赶。

通过这次会议可以发现我们的差距是:基础研究方面开创性的研究工作不多;在应用方面我们还没有广泛应用计算流体力学去解决国民经济的具体问题。因此,发展我国的巨型计算机、增加科学研究经费、积极从国民经济的发展项目中提炼研究课题,为国民经济服务;更迫切的是,要造就一批稳定的高质量的研究队伍,才能使计算流体力学研究工作能有更大的发展。

国家自然科学基金委员会数理科学部 供稿

## 第一届国际直接数值模拟和大涡模拟会议介绍

张兆顺

清华大学工程力学系,北京 100084

### 1. 会议概况

第一届国际直接数值模拟和大涡模拟会议(AFOSR International Conference on DNS/LES)是由美国空军科学研究部(AFOSR)资助组织的国际会议。会议于1997年8月4日至8日由美国路易斯安那技术大学主办,在路易斯安那州罗斯顿市举行。来自17个国家的90余人参加会议。会议交流论文73篇,其中大会报告14篇。我国学者提交论文4篇,张兆顺应邀在大会上作了“近壁湍流的流型和湍能耗散”的报告。

### 2. 对当前DNS/LES的总体形势的基本估计

直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)和大涡数值模拟LES(Large Eddy Simulation, LES)是近代湍流研究中用计算机直接求解Navier-Stokes方程的一种方法。这种方法于70年代初开始提出,随着计算机的不断改善,这种方法发展很快,无论是作为研究的工具或者工程应用的手段,都愈来愈得到关注。DNS和LES作为湍流研究的手段已得

到广泛的应用,是否能在近期用于工程实际是人们普遍关心的问题,这就是本次会议的主要议题。

本次会议请美国空军科研部的流体力学分部主任Dr. Len Sakell和NASALangley研究中心的Dr. Ronald Joslin分别就DNS和LES在航空和航天科学和工程中的应用情况和前景作了较为全面的介绍;还请了美国IBM公司和SGI公司的科技人员介绍了计算机发展的展望。在会议报告结束以后,与会的代表开展了一次自由讨论。绝大部分代表,包括美国空军科研部的流体力学分部主任Dr. Len Sakell和NASALangley研究中心的Dr. Ronald Joslin认为:目前经验性或半经验性的湍流模式仍然是工程设计中主要的方法,但是这种方法对于非定常湍流、复杂几何湍流(特别是分离流)的预测是很不准确的。因此,发展DNS和LES很有必要,美国空军科研部的流体力学分部主任Dr. Len Sakell表示将继续支持DNS和LES的研究。发展DNS和LES的关键是计算机条件,美国IBM公司和SGI公司的科技人员认为:满足DNS和LES需要的

计算机内存有可能在近期实现,而满足计算速度的计算机还需要较长时间,他们和与会的一部分计算流体力学专家都强调采用并行算法和改进计算方法作为近期的目标。与会的少数代表对于是否能够在不太长的时间内实现 DNS 和 LES 的工程应用表示怀疑。所有代表认为应当积极开展 DNS 和 LES 的研究,使得湍流研究的成果尽快地应用于工程实际。

### 3. 今后重点发展的领域和研究课题

#### (1) DNS 和 LES 共同需要进一步研究的问题

为了使 DNS 和 LES 的应用范围逐渐扩大(高雷诺数和复杂外型),应当开展以下的研究:

(i) 并行算法 国外已经发展至可以使用 128 个处理器进行并行计算,主要内容是加快处理器间的数据传输,即 MPI (Massive Pararell Interface),这里需要将流体力学的数值方法和并行机的算法一起进行研究,以加快计算的速度。

(ii) 无结构网格的 DNS 和 LES 为了适应复杂外型的湍流计算,湍流的直接数值模拟和大涡数值模拟将从简单流动的谱方法向差分或有限元离散方法发展。对于规则网格的差分方法,高精度的紧致格式已经得到普遍应用。对于不规则或无结构网格的高精度计算方法需要进行研究。

(2) LES 需要研究的问题 LES 是介于 DNS 和湍流模式之间的一种直接数值模拟的方法,它需要有满意的亚格子模型。为了使 LES 能够较好地预测复杂湍流,需要研究以下问题:

(i) 亚格子动力模型 亚格子动力模型是 LES 方法的重点研究内容

(ii) 近壁亚格子模型 近壁区的湍流有它独特的性质,已有的代数形式的亚格子模型均未能得到满意的结果,需要从物理上研究该区域中的亚格子模型。

(iii) 不规则或无结构网格的亚格子模型 为了适应复杂外型的湍流计算,需要有不规则或无结构网格的亚格子模型,因为亚格子模型和网格几何有关,如何将已有规则网格的亚格子模型发展到不规则网格是一个关键问题。

(3) 发挥 DNS 和 LES 有优势的研究领域 DNS 和 LES 在以下方面具有优势,在这些领域中湍流模式的预测方法几乎是无能为力的。

(i) 湍流的转捩 湍流从层流的转捩的预测是工程中十分重要的问题,直接数值模拟有可能将湍流由层流向湍流转捩的全过程进行数值模拟。目前,可以对二维机翼的流动转捩过程进行 DNS 或 LES 的数值模拟。

(ii) 非定常湍流 DNS 和 LES 是非定常湍流的预测的有效方法,因为建立非定常湍流的模式和求解非定常湍流的模式方程并不比 DNS 或 LES 更为方便。

(iii) 噪声和高速湍流的预测

### 4. 一些主要国家的研究情况及评价

无论是理论或应用,美国在 DNS 和 LES 的研究方面居国际领先地位。理论研究主要在大学的流体力学和应用数学的学科开展,其中以美国 Stanford 大学机械系的流体力学和热科学部的水平最高,研究力量最强,不仅有 DNS 和 LES 研究,还有湍流实验研究相互配合。在其他一流水平的大学中也有很高水平的研究,如 MIT、布朗大学等。应用研究主要在 NASA 的各研究中心和一些大企业的研究部门,如波音公司和 IBM 公司等。

欧洲国家的研究队伍较美国小些,但水平也比较高,例如德国的 Schumann、Friedrich 教授,法国的 Lesieur 教授(参加本次会议)等在 DNS 和 LES 研究中都有杰出的贡献。研究工作也集中在一流大学和国家实验室。在亚洲,日本的研究队伍最大,因为日本的计算机条件很好,在一些大学和国家实验室里计算机条件甚至优于美国。但是,日本在 DNS 和 LES 研究的理论方面比较薄弱,日本科学家在各种国际会议上发表不少 DNS 和 LES 的结果,但是这些结果的准确性往往受到各种质疑。

### 5. 我国在 DNS 和 LES 方面的研究情况和建议

我国 DNS 和 LES 的研究起步较晚,从 80 年代起,在高等学校和科学院陆续开始 DNS 和 LES 的研究。无论在研究的广度和深度方面和国外都有较大差距。研究的薄弱环节是计算机条件,没有大型计算机,仅从理论上讨论 DNS 和 LES 就没有实际意义。近几年来,清华大学在 DNS 和 LES 方面作了一些研究,计算条件都是采用荷兰或德国大学国际合作的方式解决;中科院力学所在 DNS 的高精度格式的研究方面开展了一些工作,具体计算和日本东京大学合作。

无论在理论上或是工程应用上湍流是急待解决的问题,而 DNS 和 LES 是研究湍流问题的重要途径,尤其是 LES,可望于不太长的时间内成为工程计算方法。虽然我国起步较晚,但是已有研究基础,近年来,国内计算机条件有较大的改善,充分利用已有计算机条件和已有研究基础,有可能跟踪和赶上国际前沿水平。对于已有工作基础的单位给予足够的经济资助购置先进的工作站和使用国内大型计算机的机时费用,在理论和应用的某些方面就可能较快赶上国际先进水平。