

计算流体力学正在蓬勃发展

Flourishing Computational Hydromechanics

李海东

(清华大学工程力学系, 博士生 北京 100084)

一门年轻而富有生命力的学科

自 1965 年正式建立计算流体力学学科以来, 仅短短 30 年, 已发展为跨及流体力学、偏微分方程数值理论、数值分析和计算机科学等多种领域的交叉学科, 并日益在生产实践中发挥越来越重要的作用。

计算流体力学的研究任务 计算流体力学产生于人类的生产实践活动, 随着船舶下水、飞机上天等一系列实践活动的产生, 急需解决的流体力学问题也随之而来。如船舶在水中航行时, 如何减小水的粘性阻力和兴波阻力, 波浪运动、风载荷对船舶结构有何影响。又如飞机航行时如何提高飞机的升力, 如何控制飞行高度、方向等等。这些基本的流动问题并不是我们想象的那样容易解决。首先流体力学方程组是一个非线性偏微分方程组, 只有在极其理想的条件下才能得到一些简单的解析解, 对于真实的工程流动问题几乎是无能为力。当然实验研究是解决工程流体力学问题的一个有效手段。然而无论是在水池中做风浪试验, 还是在风洞中做模型吹风试验, 一方面耗资巨大, 另一方面不可能对原型进行试验, 总是对一定比例的缩小模型进行试验, 这就有很大的局限性, 在推广应用到原型生产中去时不能保证完全没有问题。而且模型试验周期长, 使得相应的研制周期加长。因此如何能摆脱理论求解的复杂性和模型试验的局限性, 进而有效地解决工程流体力学问题, 已成为生产实践中的一个迫切要求。计算流体力学正是在这种实践的需要下应运而生, 它以流体力学理论为基础, 以数值方法为手段, 通过计算机模拟可以有效地解决上述工程流动问题。

高新技术发展提出了新要求, 也提供了新机遇

随着人类生产实践活动的不断发展, 科学技术的日新月异, 电子、航空、汽车、高速列车等一大批高新技术产业的诞生与发展要求以精确设计来实现节约原料、节约能源而同时能够准确、安全运行的

目标。这就给计算流体力学的发展提出了新的要求。如, 如何提高电子原器件封装中的对流换热效率, 以防止高温烧毁原器件; 计算机硬盘磁头在读写操作时稀薄空气流动对读写数据准确性的影响。又如超音速飞机飞行时如何安全渡过跨音速区的问题。再如高速列车运行时如何减小阻力和降低噪声。这些问题都不是通常意义的计算流体力学方法所能够准确而有效地解决的。因而必须研究新的能够达到高精度高分辨率的计算方法。这就是高精度计算格式产生的工程背景。当然, 理论的产生并不完全局限于生产实践活动。科学研究中遇到的问题也会不断地提出产生新理论的要求。例如, 随着人们对流动细观结构研究的不断深入, 越来越要求人们准确掌握小尺度物理量的变化规律, 而小尺度量通常是和大尺度量混杂在一起的, 对于这种大小尺度量混杂的流场进行数值模拟且要分辨出小尺度结构变化规律是十分困难的, 采用低阶格式和加密网格的办法能够有一定的效果, 但并不能完全解决问题, 并且随着网格数的增加, 计算量和所需的计算机内存也相应地需要增加, 而高精度计算格式则可以克服这一缺点, 并且能够更为有效地捕捉到小尺度结构的变化规律。

实践与理论的不断互动, 形成计算流体力学的新热点、新动力 实践不仅产生了理论的需要, 并且提供了理论发展的可能性和实现这种可能性的必要条件。只有在今天的条件下, 才有可能使高精度计算方法成为计算流体力学的一个研究热点。在 80 年代以前, 客观条件大大地限制了高精度计算方法的发展, 一方面当时的计算机运算能力有限, 每秒运算 10 万次的机器还是罕见之物, 其运算能力尚不足以用来尝试高精度计算格式的大量运算, 更何况有限的计算机资源被大量地用于军事目的; 另一方面社会生产活动的粗糙性尚未要求十分精确的计算结果, 二阶精度格式所得到的结果已能够满足工程上的需要, 更为精确的计算结果在当时的工艺水平下难以加工实现。这一切决定了当时的工程流动问题的计算是以低阶精度格式为主导地位。进

入 80 年代以后,随着超大规模集成电路技术的迅猛发展,计算机硬件技术相应地有了突飞猛进,千万次机、亿次机逐渐进入人们的实践活动范围。同时计算方法的不断改进和数值分析理论的发展使得高精度数值模拟已不再是天方夜谭,而是举手之劳。离开这些丰富的物质技术基础,高精度计算方法的理论是不可能有所发展的。

30 年的辉煌——大量复杂工程应用难题得到解决

计算流体力学之所以在短短 30 年的时间内变得如此辉煌,正是因为它解决了大量的工程应用问题,如计算流体力学中的面元法被广泛地应用于飞机制造工业,用它来设计飞机外形,确定气动载荷,有效地提高了设计效率,减少了风洞试验次数,从而大大降低了设计成本,波音 777 客机就是完全由计算机设计的,其中计算流体力学软件在设计中占有相当大的比例。目前 FLOW-3D、COMMIX、PHOENIX 等计算流体力学软件被广泛地应用于涡轮机叶片设计、效率计算、核反应堆冷却剂流动计算,以及换热器、空调等等大量的工程实际问题,成为解决工程流动问题不可缺少的手段。不仅如此,通过流体力学数值模拟,人们还发现了一些尚未被认识到的物理现象,从而指导人们有目的地进行科学研究活动。

高阶精度格式理论的成功,导致大批高新技术产品问世 高精度计算格式理论的研究成果在一个更高的层次上促进了计算流体力学及其应用的发展。首先它使计算流体力学实现了一些以往低阶精度格式无法完成的工作,如将激波间断的分辨率提高到一个网格内。这对于低阶精度方法是不可想象的,提高了激波间断的分辨率也就提高了分辨小尺度复杂流动结构的能力,人们利用高精度格式已能够对大小尺度混杂的流动现象进行较为准确的直接数值模拟。这就使得流体力学研究者能够重复仔细观察实验中难以观察到的物理现象,如圆管内湍流拟序结构的发展过程和三维激波与旋涡的相互干扰流动等。而且由于高精度计算格式能够在较少的网格上对复杂流动进行准确的模拟,大大地节约了计算机资源,这对于计算机资源并不十分丰富的发展中国家来说是具有重大意义的。而且由于高精度计算格式提高了求解复杂流动问题的能力,使得流体机械、航天、航空工业有了新的发展,大批凝聚了高精度计算成果的高技术产品逐渐问世,如低噪声高效风机、高降噪比消音器、大推进比火箭发动机等等。

理论的正确应用源于严谨的适用条件 在将

新的理论应用于实践,指导生产实践活动时应注意理论应用的条件性。首先应用于实践的理论必须具有可信度,不能把心血来潮,随意构想出来的理论用于实践,那样势必造成严重的后果。同时应根据物理问题的特点和要求决定选择何种计算方法。如求解单个非线性对流方程,使用非线性一阶精度的迎风差分格式就能得到很好的结果,而使用各种高精度格式未必能得到同样好的结果,同时却花费了大量的计算时间,实在是得不偿失。在研究工作中很多人把该问题作为检验高精度计算格式的算例也是不科学的。又如求解核反应堆堆芯冷却剂流动的问题时,由于其物理结构的复杂性,其数学模型的建立过程就带有很大的近似性。这时就应选用与其数学模型近似程度类似的计算方法去求解,而盲目地选用高精度计算格式则不仅是完全没有必要的,而且有可能导致谬误的结果。在求解工程问题时选用何种计算格式更应当由效益/耗费比来确定,如在设计水轮机叶片时,采用二阶精度计算格式既能满足工程需要,又节省了大量的机时,是切实可行的方法;而如果采用高精度计算格式,当然能够得到更好的计算结果,但制造工艺流程却未必能实现。运用解析离散高精度格式时也要注意同样的问题,它不是解决一切问题的万能钥匙,其适用范围是有一定的限制的。第一要求计算域网格总数大于格式精度阶数;第二在对大梯度物理问题进行模拟时,要注意在一个波长区间内布置足够多的网格点,满足抽样定理的要求,而并不是任意少的网格都能得到好的计算结果。只有在实践中注意理论的适用条件,才能最大限度地发挥理论在实践活动中的能动性。

计算流体力学的未来在于前瞻性和跨学科的综合

时刻把握理论研究的发展方向,并具有高度的前瞻性对于做好实际工作是十分有益的。当前随着计算机技术的日新月异和所需解决的工程问题的复杂性不断加强,计算流体力学已不再是以计算为唯一目的的学科,而是计算机技术、计算方法、网格技术、图形图像技术等多种技术的综合体。计算流体力学的研究也扩展成为包含网格生成、区域分解和并行计算、算法结构以及流场显示等多方面内容的立体交叉结构。计算流体力学的未来发展方向不仅仅在于克服当前方法的不足之处和对现有方法的完善,更应根据实践活动不断提出新的需要确定理论的发展方向与途径。

(责任编辑 蔡德诚)