

对流体力学的研究方向和 若干近期工作的几点看法

高 智*

摘要 本文简述了流体力学研究的概貌和新动向,讨论了湍流、多相流、流体-结构物相互作用、物理化学流体力学和计算流体动力学等五方面的若干近期研究课题。

一、概况和动向

流体力学是力学学科中最主要的分支领域之一^[1]。力学是研究物质的机械运动和变形的科学,它的发展经历了几个重大阶段:(1) 17 世纪牛顿经典力学体系的建立,奠定了近代物理学和天文学的基础、导致了 18 世纪第一次工业革命;(2) 微积分的发现和连续介质力学方程的建立(这是指从 18 世纪提出 Euler 方程、19 世纪提出 Navier-Stokes 方程到本世纪初 Prandtl 提出边界层方程的近一个半世纪) 以及风洞实验技术的发展导致了本世纪中叶空气动力学和力学发展的一个鼎盛时期,力学以先导和带头作用推动了航空、航天事业的发展,使人类突破“声障”和“热障”而进入高速航行和空间时代。

流体力学现阶段发展的新动向,具有以下几个明显的特点:

1. 应用领域大大扩充,理论与应用的结合更加紧密。力学通过物理化、计算机化和实验定量化向纵深推进。流体力学原来主要应用于航空和水利,目前的应用领域有航空与航天、能源与资源、生物、生态与环境、海洋、地球内部与星际空间等。理论与应用之间的反馈周期大大缩短,两者的结合更加紧密。

2. 流体力学大力向新技术领域,向其它学科以及力学学科内的其它分支渗透,逐步开拓并形成若干新的边缘和交叉领域:如环境流体和地球物理流体力学、宇宙气体动力学、气体光学和物理化学流体力学等;又如介于流体力学和固体力学之间的流-固耦合和流变学问题的研究都已有了一定的或相当长的历史,但因现今海上钻井平台载荷和建筑物风载等问题以及高聚物合成工业和石油工业等的需要而使流-固耦合和流变学的研究大大活跃起来。

3. 物理化是力学发展的一个共同特点。物理化的实质是微观化,是进行微观、细观到宏观层次的综合研究。从物质的微观结构及其运动规律来确定物质的宏观性质是钱学森教授最先倡导的物理力学的内容^[1]。以细观(如分子团,微粒、气泡或液滴)为基础,阐明物质内在规律,阐明流体宏观运动和细观运动之间相互作用现象的研究,现在正从线性、单相和均匀问题转向研究非线性、多相和非均匀问题。

4. 计算机和计算流体力学的发展大大开拓了流体力学为工程服务的规模和能力,同时也

* 中国科学院力学研究所研究员。

使流体力学进入到计算机实验的新阶段。例如最早发现的混沌运动的例子是在数值模拟大气对流问题时发现的(1963)年。计算机有可能运算出新的现象和规律,帮助并开拓了人们的思维,从而大大改变了流体力学研究的格局,理论-计算-实验三者关系更加密切,计算流体动力学形成了一个主要的分支领域。

5. 以激光为基础的非接触流场诊断技术的迅速发展大大扩充了流体力学实验研究领域。例如,光子相关法、激光粒子成像测速、粒子动态分析、全息术、激光多普勒法、激光光谱法等结合计算机的使用,打开了对流体动力学实验进行微观—细观—宏观的综合检测并数值仿真的新时代。

二、对若干研究方向和近期工作的几点看法

1. 湍流

湍流和湍流交换现象在天体、大气、海洋、江河湖泊、地幔对流、生物圈、流体动力机械和运输器的绕流流场中到处存在,因此湍流是流体力学中最有普遍和实际意义、也是最困难的基本科学问题。美国把湍流列为下一世纪可取得突破性进展的八大科技项目之一,分析其科学根据我们认为主要在于:(1)科学(或称巨型)计算机的迅速发展,将使人们能够使用很小于Kolmogorov湍流微尺度的计算网格,直接数值仿真实验室和工程规模的湍流现象,这是十分重要的。(2)湍流研究的关键是实验。以激光为基础的非接触测试技术的蓬勃发展,计算机数据采集处理和图象显示能力的大幅度提高,将使人们有可能从分子、分子团直到大尺度旋涡结构对湍流及转捩现象进行更深入细致的实验研究。例如近年来正在兴起的连续波可调谐激光诱导荧光(或吸收)光谱流场诊断技术^[2,3],不仅具有非接触测量、空间分辨率高、无需在被测流场中添加微粒等使流场严格地不受扰动的优点,而且有可能对大体积流场实现空间多点和多参数(包括速度、压力、密度和温度等)同时定量检测。可调谐染料激光器的频率和时间分辨率将会大幅度提高,本世纪90年代频率分辨率可望达到1赫芝^[4],这相当于光谱分辨速度的能力为 10^{-6} 米/秒量级,从而为大体积三维湍流流场的精细检测提供了诱人的前景。(3)关于动力学系统和数学系统的不稳定性和分叉而导致混沌现象的近期发现,以及湍流拟序结构的新发现,使人们对自然规律有了新的认识,揭示了湍流和其它一些自然现象的内在联系,为湍流研究提供了一些可能的途径。(4)近百年来湍流研究积累了丰硕的成果,吸引了众多的研究人才,包括力学、物理、数学等方面的高水平人才。

湍流无疑是流体力学未来研究的一个主要方向,但在近期内,计算机以及非接触测试技术还有很大的差距,特别在我国更是这样。因此,近期课题的选择需要明确目标突出重点,既要为长远研究打基础、又要能够取得较明显的阶段成果。近期选题的几点建议如下:

(1)重视和有计划地开展以激光为基础的非接触流场检测新技术和测量新方法的研究,同时开展相应的理论分析和数值模拟,进行从分子团到大尺度涡综合研究湍流的探索。例如,上节提到的连续波可调谐激光光谱流场检测技术可能是最值得重点支持的项目,当然也应当发展其他的有效检测技术和方法。

(2)有选择地开展湍流的直接数值仿真(DTS)。尽管采用什么方程描述湍流仍有争议,

但比较得到公认的,目前仍是 Navier-Stokes (NS) 原始方程。NS 原始方程经 Reynolds 平均运算后、得到两个非完全的方程组、因此存在封闭性问题; NS 原始方程经“滤波”运算后的大涡模拟,同样存在封闭性问题。恰当的封闭方案可以合理地算出脉动强度和 Reynolds 应力等湍流特性,对工程应用是十分需要的。

(3) 粘性剪切流动不稳定、转换和大尺度拟序结构之间的关系,同时结合其他一些过程(例如光学不稳定性混沌态,气泡破碎等)的不稳定、分叉与混沌现象,探讨确定性系统内在随机性的共同规律。

(4) 积极开展湍流控制和利用的研究,开展湍流减阻和减轻流动噪声的研究。

2. 多相流体力学

多相流体力学是研究同种或异种化学成分多相介质(例如,液-气两相和液-气-固三相,共存条件下的流体动力学特性。多相介质流动在自然界、工程技术和日常生活中广泛存在)例如风沙,含尘埃的大气和云雾,江河湖泊污染,石油的开采、运输和炼制,化学工业中各种炉、塔和床中的流动,金属冶炼,等离子体喷涂,雾化器流、航空与航天飞行器的粒子云侵蚀等等。因此,多相流研究不仅服务面广,应用价值大,而且也是许多流体力学分支领域如环境流体力学、燃烧空气动力等的共同基础。近年来多相流研究文献年年数以千计,从实验检测(观察流型,测量各相的速度、流量、尺寸、浓度、体积分数和温度分布等)、半经验处理和数值求解多相流基本方程等多条途径进行研究。尽管如此,在多相流的定量计算与人们的定性知识之间还存在很大的差距,实验检测各相的流速目前有的还不可能,多相流问题的解决还要经历一段路程。这是由于多相流动实际上是一种非定常、非平衡和非稳定的流动,影响因素很多,且有不稳定性,是一种“不确定”的科学。因而需要不断改进和完善我们的研究对策,以便能够抓住问题的核心。关于近期工作的几点建议如下:

(1) 多相流的基本方程组及其数值模拟。多相流的基本方程组通常采用时间平均或空间平均方法导出。方程组类型较多,但多是不完备的方程组,与湍流平均方程的求解一样,存在困难的封闭问题,且不确定因素较多。虽然如此,数值模拟多相流问题对工程设计依然十分有用^[5,6]。使用无量纲化多相流方程组数值结果的必要前提是存在相似律,对此,机理性研究(例如流型及其变化、相与相交界面处的界面现象等)很有必要,把熟知的单相流结果推广到多相流情况将大有利于问题的解决。

(2) 结合工程和工艺过程设计的要求,积极发展多相流的实验检测和流场显示技术。

(3) 多相悬浮体系(即流体中包含大量尺寸在 10^{-2} — 10^2 微米大小的固体微粒或液滴或气泡时组成的流体-微粒体系)的细观研究。研究微粒集合的动力学、微粒沉降、相互作用以及微粒聚并等特性,微粒群绕流环境的流场特性,微粒与流体之间的动量、能量与质量交换特性,以及整个悬浮体系的动力学特性(如输运特性和流变特性等)。研究从确定性运动到扩散占优势的微粒运动的过渡理论等。

(4) 多相湍流研究。对气-固、液-固两相流动,研究颗粒跟随性、以及颗粒随机运动与气(液)体湍流运动之间的相互关系。

3. 流体与结构物的相互作用

流体与结构物的相互作用是工程技术界十分关心的基本问题,例如航天器和航空器的阻力和气动加热问题、结构物的风载和浪载、流动管道的磨损、流动诱导结构物振动以及声-流动诱导振动等等。因此流体与结构物的相互作用从来就是流体力学研究的一个核心内容。这类问题的解决,除实验和理论分析外,数值模拟变得十分重要。流体与结构物的相互作用既涉及流体和固体自身的问题,还涉及流-固之间的动力学耦合甚至热耦合问题。

(1) 关于流体力学方面的问题。复杂流动(例如无粘和粘性干扰流动等)的数值模拟已获得越来越大的成功,但仍有不少复杂且带有共同性的基本问题,它们的解决需要实验-计算-理论三方面的共同努力。这些问题主要有:(a)分离-旋涡流动。流动分离和旋涡(包括旋涡的形成、脱落、发展和破碎或流动再附)往往是联系在一起的,并且往往是湍流和非定常流动。关于它们的实验研究,亟待发展大体积流场多点、多参数的同时定量检测技术(例如湍流中提到的连续波可调谐激光光谱流场诊断技术等),以期获得空间多点处的速度、温度和压力等实测资料,获得分离-旋涡流动的流型显示,使我们能够“看到”分离-旋涡流动的内部结构。在理论研究方面,分离性态及识别,分离准则及判据(特别是关于三维分离),分离-旋涡流动的渐近结构和空间尺度分布以及解析分析都很有必要。关于分离-旋涡流动的数值模拟和计算机实验,需要发展更有效的数值方法和新的计算概念,发展自适应网格和网格生成技术,以及计算机判读和显示技术。对于湍流情况,不论使用较广泛的 Reynolds 平均 NS 方程、还是新近的大涡模拟技术,都存在封闭方程组的问题。因此,湍流模式的研究和选择都很重要。已有的湍流模式没有一种具有明显的通用性,需要研究并选择适应于分离、旋涡和再附流动,以及分离、旋涡脱体直到破碎的湍流模式。这是与湍流研究密切相关的一项研究。(b)边界层效应。为工程技术界关心的流动现象(例如涡轮机、汽车、飞机等)几乎都包含大雷诺数剪切流动、且多数为边界层型的湍流流动。因此,绕设备壁流动的湍流边界层特性将大大影响设备的性能及使用寿命。虽然边界层理论、实验和应用已取得巨大的丰硕成果,但针对工程设备高效益设计的要求仍有很大差距。例如 80 年代初美国汽车以头部为参考面积的平均阻力系数为 0.4,而已达到的最小平均阻力系数为 0.1^[6],阻力减小一点显然将带来巨大的节能和经济效益。因此应当重视边界层效应的研究,特别应重视新思想新概念的提出,例如使用了后掠机翼和无噪声发动机的现代运输机就是经验和新概念相结合的产物,又如高分子减阻等。

(2)流-固动力学耦合及热耦合方面的问题。关于风-结构物,风-海流-结构物相互作用下结构物的动载荷,流动诱导结构物振动,声-流动诱导振动以及叶轮机械热响应等工程问题,需要进行流-固动力学耦合或热耦合的研究,这种研究包括分析、实验和数值计算。工程问题中流-固交界面的形状通常比较复杂,有限差分法计算这类问题存在一定的困难。由于有限元法可以灵活地采用各种形状和不同尺寸的单元,比较容易适应复杂的边界和区域,给出流体力学方程组和固体方程的耦合计算,因此应用的价值和潜力都很大。在流-固耦合问题的通常条件下,描述结构物特性和粘性流场的变量对时间和空间坐标均具有很好的解析性质,因此边界元法大有用武之地,边界元法降低了计算的维数、又提高了计算精确度。

(3)多相流与结构物的相互作用问题。大自然中最大量和最主要的流体是空气和水,实际的空气和水往往为多相流(二相流)形态,因此需要研究多相流与结构物的相互作用。

4. 物理化学流体力学

物理化学流体力学研究单相或多相流体的宏观运动与流体介质物理化学过程之间的相互作用现象,说明流体的动力学以及物理化学物质。显然,这是流体力学与物理和化学相互交叉的学科领域。在常温和常压的条件下,微观为平衡,细观为均匀,因而描述问题的基本方程组是 Navier-Stokes 方程加上化学动力学唯象反应方程,例如燃烧、化学反应流动和再入飞行器非平衡绕流计算等就是这样。但在如湍流点火过程、流动-辐射耦合(指辐射诱导的流动和耦合辐射的流动)、空气动力学分子束装置中的流动等问题中,细观的非均匀性和微观的非平衡分布能够与流体的宏观运动之间产生强烈的相互作用,描写这类问题需要利用 Boltzmann 方程之类的分子分布几率方程和新的输运特性(粘度、热导率和质量扩散系数)。近期选题的几点建议如下:

(1) 气流与激光的相互作用现象。气体的宏观运动特别是湍流运动能够大大影响气体与激光的相互作用、大大影响激光的传播过程,呈现若干与气体激光(气体无宏观运动)基本规律不同的反常现象,如低气压气流化学激光增益的反常饱和、饱和强度与流速成比例等。气流与激光相互作用现象的研究,对强激光的湍流大气传输、对大功率气流激光功率输出和光学品质的改善等具有直接的应用价值和意义。

控制气流运动以获得期望的光学效应是气体光学的研究内容,例如控制气流运动使气体折射率改变、能够获得光学透镜效应,因此可研制气流光学透镜。新型的气流透镜是高强度激光输出的必要“元件”,因而研究激光与气流运动相对关系以改善激光传输特性,具有重要的意义。

激光流场诊断(例如激光荧光法、吸收法和散射法等)是根据了探测辐射不影响流场而流动却影响辐射的事实,因此可以“真实地”检测流场和提供分子团尺度的流场信息。例如在连续波可调谐激光光谱法中,流体非饱和增益(或吸收)线形的空间多点检测提供了分子速度分布几率密度及其空间变化的资料。利用计算机对实验几率密度作运算,即可算出流体的运动及性质。这样的实验-计算前景可观,但对激光检测技术提出了相当高的要求。

(2) 细观尺度现象的研究。对气体的分子物理过程和化学反应来说,以扩散效应为主的细观尺度的运动十分重要,因此需要研究细观非均性,扩散特性以及分子间长程力等对化学反应的影响,研究从确定性运动向扩散为主的细观运动过渡的机理和理论。

(3) 微观自由度非平衡流动,在超声速分子束致冷气流中, Doppler 线宽大大压窄,分子内部自由度(振动和转动)以及平动自由度都处于非平衡状态,动量传递碰撞截面急剧增大,这导致膨胀致冷流中大分子的生成和解离。另一方面, Doppler 近似自由的分子容易选择激励,因此有可能“孤立地”研究两个选择态的碰撞动力学过程,研究大分子的生成和离解动力学过程。这些动力学过程与气流运动的耦合相当复杂,这方面的研究对激光同位素分离、激光化学和超精细粉状材料的制备等具有直接的应用价值和理论意义。当用数值方法研究分子尺度现象具有显著影响的流动时, Monte Carlo 方法具有突出的优点,它容易同时考虑分子间的随机碰撞和分子内的量子跃迁过程,关键是计算高压情况。

5. 计算流体动力学:

流体数值模拟的重要性和应用领域远不止本文谈到的内容。结论性的看法可以引用文献[5]的观点: 计算流体力学的革命性的研究成果已用于并将继续用于解决以往理论分析和实验模拟难以解决的问题。最后,对计算与流体力学的关系作点讨论。尽管计算机以惊人的速度迅猛发展,但是,那种选取最完全的方程组任凭计算机去算的想法并不合理和可取,这是因为即使对单相流动,在 $Re > Re_c$ (Re_c 为临界 Reynolds 数) 时流动可能成为不稳定的三维随机流动。可见,检验 NS 方程的正确性、论证 NS 方程解的存在唯一性在物理上或许完全没有意义,因此出现了与湍流研究相类似的情况,即不仅有定量计算的问题,还有方程-流场关系的理论问题。这表明抓住流动主要矛盾因素的力学近似实属必要,而边界层方程、Euler 方程、简化 NS 方程和 NS 方程的计算对流体力学的研究同样至关重要,计算流体动力学的研究既要重视计算也要重视流体力学。

后记: 本文原系作者在国家自然科学基金委员会力学科学组召集的座谈会(1987年8月)上的发言稿。《中国科学基金》编辑部约稿后,根据篇幅要求和编辑同志的建议作了修改。

参 考 文 献

- [1] 中国大百科全书《力学》,中国大百科全书出版社,1985。
- [2] J. C. Mc Daniel, B. Hiller, R. K. Hanson, *Opt. Lett.*, **8**, 1 (1983), 51.
- [3] 高智,力学学报, **18**·3(1985), 215。
- [4] R. R. Jacobs, *Lasers & Applications*, Dec. (1985), 47.
- [5] *Physics Through the 1990's: Plasmas and Fluids*, National Academy Press, Washington, D. C. (1986), 48—76。(本文的中译稿见《力学进展》1988年1—3期)。
- [6] O. C. Jones, Jr., F. Kreith, F. M. White, *ASME Journal of Fluids Engineering*, **103**, 4 (1981), 509.

NEW RESEARCH TRENDS AND RECENT SUBJECTS OF STUDY IN FLUID MECHANICS

Gao Zhi

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science*)

Abstract

The article briefly discusses the new research trends in fluid mechanics and explains some recent subjects of study in turbulent flows, multiphase flows, fluid-structure interactions, physico-chemical hydrodynamics and computational fluid dynamics.