

流体力学的几个新的发展方向

赵国英 卞荫贵 (中国科学院力学研究所)

自然界中到处存在着流体运动。流体力学就是探索流体运动及其与物体相互作用的规律的学科。

本世纪初到五六十年代,代表整个流体力学发展方向的空气动力学,围绕着航空和航天中出现的包括声障、热障和黑障在内的各种问题,取得了突飞猛进、经久不衰的进展,从而在国计民生中发挥了重大的作用,同时也促进了这门学科的各种实验方法和理论方法的发展,并大大地改变了流体力学的面貌,使之成为一门成熟的学科。

六十年代以后,流体力学的发展重心,已从航空、航天转向大气、海洋、化工、能源、水利、港湾工程、生物工程、环境工程等领域。今天的流体力学,已经是自然科学中一个基础性很强、应用面极广的学科。本文拟介绍它的几个新的发展方向。

攻而未克的难题——湍流

尽管流体力学研究取得了相当巨大的进展,然而科学家们却清楚地知道,有一种流动机理并没有彻底了解,这就是湍流问题。早在1883年,雷诺(Reynolds)便用实验证明,流体运动有两种形态:层流和湍流。在层流中,流体质点沿着它们的轨迹层次分别地向前移动,其轨迹是一些平滑的随时间变化比较缓慢的曲线。在湍流中,流体质点的轨迹杂乱无章,互相交错,而且在迅速变化。流体微团在顺流运动的同时,还在作猛烈的掺混,湍流在某些情况下表现为非线性的随机运动,而在另一些情况下又表现为基本上有序的拟序结构。湍流是自然界中普遍存在的一种流动现象,而层流相对来

说比较少见。湍流与人类生存、国民经济、国防建设以及基础科学中的许多领域有密切的关系。从重要性来说,如果没有湍流,有害物质在地面上产生以后,就很难扩散开去,人类就无法生存。其次,湍流边界层、大气湍流、晴空湍流、湍流传质传热和等离子体湍流等问题,都是航空、气象、水利、水运、化工、冶金以及受控热核反应等学科的重要研究项目。

100余年来,尽管湍流问题作为一个整体来说,其谜底仍未能揭开,但是物理学、力学等领域里的不少科学家对这个问题都作过研究,而且在很多方面已取得了很大的进展。

人们早就发现,层流解在高雷诺数下阻力太小,对于一给定的层流,有一个有限的雷诺数,超过这个雷诺数,层流不复存在,而转换为湍流。我们把这个数称为临界雷诺数。现在对湍流的研究一般由此而分为两大部分。

第一部分研究层流受到扰动后在什么条件下失稳以及怎样转换为湍流。前者通常称为层流的稳定性理论。稳定性理论首先限于小扰动下的线性理论,其努力集中在求解层流失稳的基本方程 Orr-Sommerfeld 方程上。经过多年的研究,线性稳定性已得到充分的发展,目前流体力学工作者已开始着手于非线性稳定性理论的研究。

对于层流转捩为湍流的过程,实验流体力学工作者作了相当大量的工作。尽管如此,迄今为止进展甚微,事实上我们似乎永远也交不出关于转捩研究的最终报告。就一块光滑平板的绕流来说,经过多年的研究,现在一般认为,沿平板顺流而下时,转捩可分为7个阶段:(1)前缘附近的稳定层流,(2)不稳定的二维

Tollmien-Schlichting 波, (3) 三维不稳定波和发卡形涡旋的发展, (4) 高剪切流动区域上旋涡发生破碎, (5) 涡旋破碎级联成为充分发展的三维脉动, (6) 局部高强度脉动处形成湍斑, (7) 湍斑聚合而形成充分发展的湍流。但这仅仅是一种十分理想化的过程。随着来流条件、物面条件和压力梯度的不同, 转换过程会有许多差别。如果物面粗糙度足够严重, 流动立即转换成湍流而不出现湍斑; 在逆压梯度下, 由于分离或已分离的层流速度分布极不稳定, 可能会缺少某些中间过程, 通常称为“短路”现象。有时, 流动中常形成一个分离泡, 而在下游流动中不出现湍斑, 也看不到任何三维效应, 当流动再附时便已是完全的湍流了。

湍流的第二部分研究是针对已经转换为充分发展的湍流流动的。对于任何空间点, 湍流中流体流动都满足非定常 Navier-Stokes 方程, 所以至少可以用数字计算机对湍流作数值计算, 但10年前已有人指出, 这种努力是徒劳的。拿一个较为简单的湍流管流作为例子, 当雷诺数为 10^7 时, 为了计算出包括湍流速度脉动在内的精细结构, 需要 10^{22} 次数字运算, 当时典型的电子计算机每次运算时间大约为10微秒, 共需 3×10^9 年。如果未来的计算机以光速为“极限速度”, 即每次运算时间为1毫微秒, 那末也需要32000年。所以从数字上来看, 这种方法永远也不可能模拟真实的湍流。

由于存在这种困难, 人们正在研究一种所谓大涡模拟的方法。这种方法并不是去直接求解非定常的 Navier-Stokes 方程, 而是去模拟湍流涡旋。这里所涉及到的主要概念是大涡从主流吸收能量, 它们是各向异性的, 且因流动不同而不同, 大涡输送着湍流脉动的大部分动能和动量。小涡的作用在于耗散能量, 趋向于各向同性, 它所输运的只是湍流脉动的一小部分能量和动量。因此, 大涡是要计算的, 而小涡则可用小的亚网格尺度的涡旋来模拟。这种模拟对计算机的记忆和速度有极高的要求, 一旦有了足够的计算机功率, 就可以大体上根

据基本原则模拟从层流到湍流的转换、气动噪声、表面压力脉动并表征所有与湍流有关的能量。这种做法, 尽管目前进行的是最初步的研究工作, 但近年来已取得了一定的进展, 可以相信, 它的潜力是十分巨大的。

目前具有实际应用价值的湍流分析方法有两种: (1) 湍流相关函数的统计理论, (2) 湍流平均量的半经验分析。前者主要用于科学上发现湍流精细尺度“结构”, 或积累有关知识; 后者是工程师们去寻求解决实际问题的预测方法。

必须进一步强调的是, 近十年来, 湍流在实验和理论两方面都取得了相当巨大的进展。在实验方面, 主要是相干结构的发现和观察, 其中的一个关键性实验是布朗(Brown)和罗什科(Rosko)在七十年代初期关于湍流混合层的工作。虽然人们很早就观察到了相干结构, 并且可以列举出其中呈现相干结构迹象的早期实验事实, 但是布朗和罗什科首先认识到这种观察的意义, 并清楚地说明了湍流混合层中大尺度涡旋结构的存在性和重要性。随后, 布朗和怀南特(Winant)证明了这种混合层的生长过程(按量级分析它们必须是线性的)主要是由大尺度涡旋聚合而非它们各自增长的结果。至少在一种剪切流动中显示出了明显的类涡旋结构, 这就深刻地改变了通常对这种流动的看法, 特别是在稳定性和湍流之间建立了紧密的联系。湍流边界层和湍流斑的近期工作在某种程度上是与Taylor-Gortler失稳相关的, 它把这种失稳作为湍流边界层中出现纵向涡旋的一种可能的机理。这使得用平均速度分布加上随机脉动来描述剪切湍流的方法受到了冲击。

还应指出的是, 湍斑、布朗-罗什科涡旋以及湍流边界层中的纵向涡旋, 都是用最原始的实验方法——流场显示得到的。湍流边界层中发现的另一个重要现象“猝发”也是用同一手段得到的。而与早期工作相反, 目前流场显示的主要目的是用来建立流动的总的拓扑结构。

近年来湍流理论工作方面值得一提的是非

线性动力学系统的混沌及与之相关的奇异吸引子的研究。

混沌是指确定性系统中出现类随机过程。确定性系统即动力学系统往往是由常微分方程、偏微分方程、差分方程，甚至简单的代数迭代方程描述的。对于一组完全确定的初值，动力学系统应给出一个确定的过程。但对于某些系统，这种过程对于初值的任何微小扰动都极为敏感，因而物理上所得到的结果似乎是随机的过程。混沌来自非线性，非线性会引起两个变量之间关系的多值性，非线性力学中的许多现象如分叉、跳跃、突变、同步则又是由多值性导致的。混沌是比分叉更复杂的一种现象，逐次分叉则往往会出现混沌的前兆。

1963年，洛伦茨(Lorenz)对三维非线性系统的一个最简单的例子作了研究。这个例子的基本方程可由许多问题(如 Bénard 对流)推导得到，它有3个不稳定平衡解。数值模拟的结果表明，由原点或中心出发的轨道分别单调地或以振动的方式离出发点转向一中心，然后再回到另一中心，如此往返不已。从空间的角度来看，它是状态空间中的超越曲面，结构十分复杂，这是奇异吸引子的一种，称为洛伦茨吸引子。

混沌及与它相关的奇异吸引子的一些结果从思想方法上冲击了数理学科的许多分支，涉及统计物理的基本观点及人们对确定性、随机性、统计规律的认识。对于混沌的研究，始于七十年代，现正方兴未艾。

在对混沌的研究中，洛伦茨吸引子对湍流工作者很有启示，能不能用混沌来解释从层流向湍流转换的现象，能否用混沌(似随机而有结构)反映湍流的拟序结构，这些当然是十分困难的问题。要把 Navier-Stokes 方程化成简单的常微分方程组一定要经过大胆的取舍，而这样做会不会把问题的本质弄颠倒呢？最近有人对 Bénard 对流进行了广泛的研究，能给出所谓倍化周期分叉，在实验上也得到了周期64解，与这些解有关的比值与许多分叉导致混沌

的有普遍意义的 Feigenbaum 数 6.6692 相吻合。这些结果正在有力地激励着湍流工作者，至少向他们指出，不妨从别的路子来考察一下湍流的发生机理。

计算流体力学的兴起

从本世纪初到五六十年代，由于航空、航天事业的发展，在普兰特尔(Prandtl)、冯·卡门(von Kármán)等著名学者的带动下，空气动力学的理论和实验技术日臻完善。但是，由于计算工具和计算方法的限制，为了解决实际问题，理论分析工作往往要对问题作十分大的简化(例如把方程加以线性化)。这在很多场合下不能满足工程实践的需要，工程师们不得不依靠大量实验并运用相似规律进行外推。六十年代以后，计算机、巨型计算机和有关的计算方法得到了迅速发展，彻底地改变了流体力学理论计算的面貌，形成了计算流体力学这门新兴的学科。

迄今为止，流体力学家们已经有了三种解决流体力学问题的行之有效的工具。这就是理论分析、数值方法和实验模拟。理论分析的优点在于能迅速地给出封闭形式的解，结果清晰、普遍，许多流动的解析解与实验结果一样对于流体力学及其发展是极其珍贵的。但是，对于非线性情况，只有少数幸运的流动才能给出解析结果。

实验模拟的结果一般都比较真实，它是理论分析和数值方法的基础，因此，从原则上来说，实验的重要性不容低估。然而，实验模拟往往受到一定的限制，首先是要受到模型尺寸的限制，一般，实验要模拟几个无量纲参数，但往往不能全部满足，只能择其主要而牺牲其余。例如，风洞很少能模拟飞机飞行雷诺数和再入飞行器周围流场中的温度场等。其次是实验还会受到边界的影响，如一架飞机在无限大的空间中飞行，风洞模拟这种流动要受到洞壁的干扰。此外，在实验中杂质和测量本身都会对所得结果产生影响。

与理论分析和实验模拟不同的是,数值方法并没有以上带根本性的缺点或限制。当然它也有自己的不足之处,那就是计算机的速度和贮存量。在过去,这两个不足之处曾使得我们在求解流体力学问题时不得不对流体力学的 Navier-Stokes 方程作出大胆的简化。然而,近年来,计算机的内存和速度大大地提高了,在目前已占有越来越大的优势。但是,流体力学中的基本物理现象的观察、流体流动机理的研究以及流体的基本物理参数的测量,仍必须依靠实验方法来完成。

计算流体力学的发展概貌可用计算空气动力学的发展为例来说明。计算空气动力学的发展大体上可分成四个阶段:(1)线化欧拉方程,(2)非线性化欧拉方程,(3)雷诺平均的 Navier-Stokes 方程,(4)完全的 Navier-Stokes 方程。当今在计算机效率和数值方法方面已经取得了巨大的进步,所以我们应该能够对复杂形状的飞行器进行第一阶段的计算,并且也能够为简单的几何形状的物体进行第四阶段的计算。必须说明的是,计算流体的各发展阶段中,并不否定以前阶段所取得的成果及其实用性,而只可能对此作出改进。同时,每进入一个新的发展阶段,允许我们对一些新的物理现象作出模拟。例如,在第一阶段中可以模拟亚声速升力分布,第二阶段可以模拟跨声速波阻,第三阶段使机翼颤振得以计算,而第四阶段使边界层转捩和气动噪声得以模拟。另外,在第三阶段中涉及到湍流模型问题,流体力学家们在这方面还有大量工作可做。在第四阶段中,由于流动十分复杂,人们必须探讨湍流的物理机制,并进行有关的数值模拟,有关大涡的模拟便是其中的一项主要工作。

工程界对计算流体力学的发展寄予极大的希望。一些飞机导弹和航天部门的设计者憧憬着有一天能在计算机上设计一个完整的飞行器,而空气动力学家们则把这称为他们对计算空气动力学的要求。为了实现这一理想,人们正在几方面作努力,其中包括三维计算网格的

产生、湍流模型、计算方法、计算机主机的设计和输入输出数据的加工。所有这些方面,目前正在不断取得进展。例如,为了模拟一个完整飞行器的真实流动,计算机的速度至少要达到 1000 MFLOPS (MFLOPS 即 1 兆次浮点运算/秒),要有 2.88 兆字的内存,而这个目标在 1988 年便能实现。

一个值得重视的流体力学分支——多相流

从物理学上来看,流动系统是两相的,或者是三相的。它们可以是液滴加气体,固体颗粒加气体,固体颗粒加液体,气泡加液体,固体颗粒和液滴加气体。但是,从力学上来看,物理学上的两相系统,例如由固体颗粒与气体或液体构成的系统,往往应该看作多相系统,主要原因是在空间同一点上,不同种类和不同尺寸的粒子常常具有不同的速度和温度。

在当今工业化愈益发达的时代,多相流在工业上的应用日益广泛,目前国际上已出现了研究热潮,各方面的学术活动也十分活跃。现在刊登多相流的世界性杂志已超过 300 种。1974 年开始出版了国际多相流杂志。1970 年以来,有关多相流的书已出版几十本。在国内,多相流的研究也开始受到重视。不过,尽管多相流具有极其广泛的应用,理论上也很有价值,但是多相流问题有其固有的复杂性,理论计算和实际观察也不是一件很容易的事,因此不少作者把多相流与湍流问题并列为本世纪末下世纪初流体力学的两项主要研究课题。

近年来,气液两相流和气固两相流是多相流取得进展的主要领域。

气液两相流的研究工作已延续了三四十年。高温高压大型锅炉机组的出现,特别是原子电站的建立,使得汽水两相流动和热交换问题在设备设计和安全运行中越来越显得重要。同时,在石油化学工业中,由于设计参数的提高、工艺的进步,就得利用多介质多相流动过程,这也给气液两相流动提出了新的课题。此外,在天然气液化、海水淡化、制冷系统的蒸

发器、重沸器、冷凝器,以及内燃机和燃油炉液体燃料的燃烧过程中都有复杂的气液两相流动。目前各国都很重视这种流动,研究工作的规模也很庞大。

气液两相流动与单相流动的区别在于有相界面存在。介质除了在流道壁面或绕流物体表面上有动量、能量或质量的交换外,两相之间也存在着这种交换,而且两相间能量交换还会引起机械能的损失,使整个系统的能量平衡变得复杂起来。另外,在气液两相流动中,即使气相介质和液相介质的质量比例相同,两相间的分布状态也可以是各种各样的,既可以是分散的,也可以是密集的。密集时又有不同程度的聚并现象,例如小气泡并成大气泡,小液滴并成大液滴,甚至两相互分开。不同的分散状态称为不同的流动模式,不同的流动模式下两相间的动量质量和能量运输的规律也不一样。

气液两相流的研究方法有三种:经验方法,在一定的参数范围内收集实验和工业的有关数据,并且用系统的参数建立经验公式,再利用这种经验公式进行内插或外推预测新的情况;分析方法,从基本原则出发,推导出两相流的基本关系;唯象方法,从物理上考虑流动的流态或流动机制,对现象进行详细的观察,并进行适当的测量,然后从理论上构造流动的物理模型去描述所研究的现象,再把局部的模型结合起来以取得对流动的完整描述,并把所得结果应用于预测和设计。从目前的发展趋势来看,由于学科的发展,尤其是大型计算机的出现,预测两相流的经验方法正在消失。分析和唯象的方法趋向于互相结合,这就是研究者们根据对现象的观察和分析,建立包括流动传热传质在内的数学模型,直接通过计算得到结果,并通过试验对模型作出必要的修正。

多相流中,固体粒子与气体并存的流动称为气固两相流。许多工业设备中都涉及到气体中带有固体颗粒或气体在固体颗粒中运动的情况。工程技术中的气力输送与分离,火炮的发射,固体火箭尾喷管的流动,各种液雾、金属

颗粒、煤粉与空气混合物之间的燃烧,煤粉气化,流态化床,地球物理和天体物理中尘埃的流动等都属于气固两相流。自然界中云雾、雨滴、冰晶雪花或冰雹的运动也可以归纳为这类流动。液固两相流的处理方法与气固两相流基本相同,它们的典型例子有水利工程中的泥沙沉淀、化学工程中的流化床反应器、液体渗流、泥浆流动和近年来在国外已得到大量研究的水煤浆输送,血液流动大体上也属于这一类型。

气固两相流动可分为三种流动形式:(1)当固体颗粒尺寸较大,在支撑栅管和链条上形成稳定的料层,颗粒间及颗粒与支撑栅管和链条间没有相对运动,气体以较小的相对速度流经颗粒间的孔隙,这种流动称为固定床流动;(2)当颗粒尺寸在从几百微米到几厘米之间变化时,如气固两相流速度较大,但又不足以全部吹走以致破坏颗粒床层时,固体颗粒在床层中作上下沸腾运动,这种流动称为沸腾床流动;(3)固体颗粒直径小于100微米,气流速度比沸腾床大,气固间的相对速度能保证固体颗粒悬浮于气流之中,并随气流而运动,这种流动属于气力输送过程,称为悬浮运动。

在气固两相流动的分析试验中,首先取得成功的是固体微粒为稀相的情况。在一些早期的简化分析中,不考虑颗粒对气相流场的干扰,按照单相气体动力学计算出气体的流场,然后再分析固体粒子在此流场中的运动情况,这种处理方法称为单向耦合。近年来,不少作者考虑了固相粒子对气相流动的影响,这种处理方法称为双向耦合。关于固体颗粒为浓相的情况,目前理论分析和试验工作进行得很少。

必须指出,尽管气固两相流动的研究已有二十多年的历史,并且取得了相当的进展,但是至今甚至气固两相流动的基本方程、两相间的相互作用仍然存在着争议。我们认为,气固两相流问题的根本困难在于如何准确地描述两相之间的动量、能量和质量交换,特别在固相浓度较大或气相处于湍流情况下时尤其如此。

(下转 739 页)

十一、国内研究情况

尽管我国人工心脏的研究工作起步较晚，但很受重视。1978年国家科委在广州市召开了全国人工心脏科研会议，将此列为重点项目，制定了研究规划。北京市、上海市、广州市都组织了专门力量，各项研究工作相继开展起来。

北京医学科学院和有关单位协作，1978年开始人工心脏研究，先后研制出单心室血泵、双心室血泵，并进行了体外模拟试验、生物材料评价和动物实验。用山羊做了左心室辅助人工心脏实验，最长存活287小时。

上海第二医科大学等单位对圆筒血泵、囊型血泵SP I、SP II和SP III以及气动隔膜型血泵进行了研究，在42次动物存活实验中，最长存活60小时。叶椿秀把涤纶细孔网布与环氧树脂紧密融合制作血泵，泵体薄，重量轻，制造周期短，造价低廉，性能和强度均达到要求。最近一种带电机和电池，重量800克的单心室血泵又在上海第二医科大学人工心脏研究室诞生。

广州市有关单位在血泵、模拟装置和动物实验方面也做了大量工作。1984年，一种用国产原料合成的，用于制造人工心脏及辅助循环装置的优质高分子材料——聚醚聚氨酯/聚二甲基硅氧烷嵌段共聚物在中山医科大学研制成功。各种测试表明，这种材料具有优良的强度和弹性，耐挠曲性、抗凝血性和生物相容性也非常优异。

十二、展 望

八十年代初期，人工心脏的研制已进入临床试验性植入的阶段。初步经验表明，用全植入人工心脏对病人进行较长时期的循环支持是可行的，人工心脏的前景是乐观的。但从目前各国研究的情况来看，还有许多工程学、医学、社会经济学和伦理学方面的问题有待进一步解决。表1列出从目前中、短期使用向长期使用过渡的人工心脏所要解决的技术上的问题。

表1 人工心脏技术上需要解决的问题

整个系统从体外型向佩戴型或植入型过渡
血泵
缩小体积
使形状更加合适
选择最佳植入部位
抗血栓性
耐久性
供人工心脏使用的新型瓣膜
驱动装置
气动向液压传动或机械驱动过渡
非搏动性血流
监测和控制
可以遥控的微型换能器
安装微处理机
对血液动力学和代谢状况进行经常监测和分析
病人的术后处理
能源
可以佩戴
可以反复充电
可以植入

随着临床植入病例的逐渐增多，八十年代后期，将能对人工心脏的临床使用情况作出更为恰当的评价。再下一个10年，临床使用的数量将会有较大增长。那时将是生物医学工程普结硕果的时代，作为现代科学技术最新成果的高度结晶，植入人工心脏的费用将与心脏移植不相上下，病人可以有更好的生活质量和更长的预期寿命。让我们期待着这个时代的到来。

(上接727页)

近年来，能源危机波及全世界，随着两次采油、水煤浆输运、煤的气化、燃烧等问题的出现，多相流体动力学正在出现一个新的发展阶段，在这个流体力学分支中，许多问题的解决还仅仅是个开端。

本文仅就湍流、计算流体力学、多相流等几个问题作了简要的介绍和评述。流体力学发展很快，分支甚多，近年来，水力学、生物流体动力学、等离子体动力学等各方面都取得了很大的进展，但本文就不详述了。