

流体物理学 (III)

5.2 时兴学科领域

5.2.1 空气动力学

通过渐近方法达到新的理论认识, 加上作为研究方法的对理论的数值仿真, 计算机在数据的取得和分析中的应用, 以及对湍流过程物理机理的更好了解, 这些加快了空气动力学的前进步伐。由于紧迫需要和以上这些知识进步的激励, 人们已在提高民航运输机效率, 改进直升机和有人驾驶再入飞行器的性能, 以及加强军用飞机与武器装备的效能等方面取得很大成就。这些进展的主要内容之一, 是将计算机用作数值仿真装置, 帮助和促进对高速流动的了解, 并有助于进行数据分析; 此外, 还将它用作设计工具。第二个内容是扩展了渐近分析, 以了解流动(如形成机翼环流并决定机翼升力的绕机翼后缘的流动)中丰富的物理过程。第三个内容是了解了象直升机旋翼叶片周围绕流那样的流动, 并已看到其应用。最近的重大进展有: 为了对飞机的绕流进行仿真, 详细了解了粘性流与无粘性流如何相互作用而发展高效空气动力学算法; 超临界流的空气动力学; 曾一度认为物理上不能实现的无激波流动的利用。

在高速流动方面有着取得较大成就的种种机会, 它们将使以往10年的成就得到扩展。过去的成就集中在三个主要技术领域: 高效民用与军用运输机的成就; 高度机动战斗机的成就; 飞机发动机涡轮机的成就。这些成就仍将主要来自我们对分离流和非定常流了解的进展, 来自我们对新的气动力设计方法的专门知识, 来自我们开始了解并从而有本领模拟或许控制湍流, 以及来自不断扩大计算机在仿真气动力流场方面的应用。在许多流动中有技术价值的是分离流或非定常流, 或者二者兼而有之的流动。我们正在开始了解这些分离流和非定常流的基本物理过程, 以及可以怎样利用它们(往往是两者结合地)来提高技术设备的效率和性能。

在过去的一些时间里已经知道, 气动力装置在高亚声速马赫数下运行时效率最高, 只要在这样的马赫数下能够避免产生激波。但这些流动是彼此独立的并且当初曾认为是不实际的。在最近几年间已证明, 这些数学上独立的解是实际值, 并已研究出能求得这些解的特殊方法。这些方法目前已普及到如此程度, 它们可以常规地用于设计过程, 保证达到跨声速设计包络面的极值。

本世纪末, 我们也许能再把今天运输机的燃料节省一半。这种大量的节省将依靠高速流动(包括飞行器的外部流动及穿过其发动机的内部流动)空气动力学方面的许多设计改革来实现。空气动力学将对此作出重大贡献。单单为了这点, 这些高速流动的基本物理过程就是特别重要的。另外, 如果人们从定常的附着流转向非定常的分离流以改进装置的性能, 那就有许多装置的设计或许还可以根本改变。我们对这些非定常分离流的物理过程的了解刚刚开始, 而这种了解是特别重要的。

显然，在计算流体力学（CFD）和湍流基础研究的应用方面，欧洲人正在某些领域赶上我们。一些人认为，在把真实物理过程跟数值物理过程区别开方面，他们很快就要跟我们并驾齐驱，而在发挥超级计算机的效能方面他们将比我们快。另一方面，苏联尽管在理论方面相当强，但在计算流体力学方面却显然是弱的。尽管许多欧洲的设备比我们的更新更好，但这些设备往往来自美国首先实现的思想。

空气动力学迅速进步的主要障碍在于：大学不能充分获得超级计算机，目前在计算机中央处理机规模上的限制；大学科学研究经费不足；我们一些实验设备陈旧并且费钱；以及缺乏对转换和湍流的了解。研究经费必须针对包括分析（理论）、实验及数值仿真这三部曲的所有三个环节。

表3列出了过去的但仍是最新的进展，它们在技术上的应用，发展快的领域和机会，对这些领域中某些方面前进的障碍以及相应方面的外国竞争状况。

表3 空气动力学（高速流动）

过去的但仍是最新的进展	技术上的应用	发展快的领域和机会	前进的障碍	外国的竞争
气动力算法（如算符法、因子分解法）	全速度范围的飞机设计	Euler与Reynolds平均仿真，自适应网格	大学不能充分获得超级计算机（包括国家科学院）	欧洲在计算流体力学和湍流基础研究进展的应用方面超过我们
无粘性与粘性相互作用	翼型、机翼和压缩机设计	无粘性与粘性相互作用	基础研究经费不足	
Panel法（线性理论，计算流体力学）	亚声速与超声速设计	减小湍流阻力		
真实气体效应（反应速率，计算流体力学）	航天机与导弹再入，行星再入	湍流的直接仿真	工业对新成果的应用落后	
分离流（了解，计算流体力学）	高效机翼，特技飞机	旋涡流	数值计算跟实际物理脱节	欧洲同样能把真实物理过程与数值物理过程区别开
超临界空气动力学（理论，计算流体力学）	民用和军用飞机效率	非定常流		苏联在理论方面强，计算流体力学方面弱
转换和湍流（理论，实验）	飞机性能，特别是阻力	湍流或转换的控制		
非定常流（了解，实验，计算流体力学）	直升机旋翼，军用机动飞机	分离流——三维与非定常流		
旋涡升力（了解，实验，计算流体力学）	超声速飞机，直升机			
测试手段	流场细节探测和分析	测试手段，诊断，数据分析和显示	运行中的设备陈旧且费用昂贵	欧洲的许多设备更新更好
矢量计算机，超级计算机	计算空气动力学	灵巧的风洞	计算机中央处理机规模，研究人员来源	苏联缺乏这类设备，日本在超级计算机方面正赶上
国家跨声速设备	高Re仿真	跨声速试验		这种技术美国领先

我们现在正开始更好地了解向湍流转换过程中的基本物理现象，通过这种了解，我们正在开始研究抑制这种转换甚至湍流的方法。这些控制方法的范围包括：从向边界层输入声波直到从表面上除去大部分边界层。

5.2.2 生物流体力学

过去10年里生物流体力学研究经历了一段空前的发展。它涉及我们对人、动物、植物的功能的几乎每一方面的了解,而在所有这些方面,流体力学的流动和作用力都起着重要的作用。自60年代末以来,以生物科学与医学科学为一方,以物理科学与工程学为另一方,这两大方面研究工作者之间,一个学科交叉、互相依赖、互相吸收的非常有利的风气已经形成。这里我们将简要地概述若干主要的活跃领域。它们或是最近已取得显著进展,或是在新概念的重要发展中正取得进步。所有这些疑难领域的特征是,由于已逐渐跟生物学与医学研究人员建立了密切合作,为了解释现象而建立的数学模型或实验室的模拟实验,跟以往相比,更为密切结合生物学实际得多。

在最近半个世纪中,流体力学工作者对于研究鸟与昆虫的飞行,鱼与哺乳动物的游泳,以及微生物的运动的兴趣不断增长。在过去的10年里,对于鸟的飞行,海鸟从浪上掠水,蜜蜂与蜂鸟在空中悬停的空气动力学,金枪鱼之类的大鱼的高效游泳,以及从引起霍乱的霍乱弧菌等大量微生物的鞭毛推进与纤毛推进,到输卵管中一个卵细胞的粘液纤毛运动,都得到了新的见解。为了解释纤毛的非同时行波运动,生殖器官以及支气管和气管中极重要的粘液纤毛泵送机制,进行了理论工作和精巧的证实性实验。最近的大量研究表明,粘液的流变性质可能对精子的泳动有深刻影响,需要对这种流体的微结构作更基础性的研究。热致运动对哺乳动物和鱼类游泳的影响是另一个很有趣的新领域。

在过去10年中一个引起广泛兴趣的疑难领域是关于动脉疾病的流体动力学问题。越来越多的资料有力地启示我们:在任何给定时间处于更新过程(细胞死亡和补充)中的一小群内皮细胞(血管内壁细胞层)可以使动脉壁对脂蛋白的渗透性质产生很大的变化;而由流体剪应力引起的这些变化也许是动脉病变的一个重要起因。已作了一些实验,并且提出了一种微观流体动力学理论,来了解不论在组织培养物中还是在体内,胆固醇和其他大分子穿过内皮层的囊式输送,以及流体应力对内皮细胞功能的影响。对于较大的血管建立了完善的数值模型和实验模型,以探明体内的应力分布。这些模型跟由动物实验和尸体解剖观察所得知的那些易于发生动脉粥样化损害的部位有关系。

心血管流体力学和流动血液的流变特性已是生物流体力学工作者研究的传统领域。该领域以往的大量研究是把动脉树作为脉搏压力传播和衰减的有分支的非均匀的传递通道来考察,或者是研究血液的非牛顿流动性质。在过去10年里,在高度柔顺的可瘪静脉的流体力学方面,在微循环中血液的可变形细胞组分的运动方面,以及心室活动的更真实的数值模拟方面,都开辟了新的研究途径。以动脉树和支气管树中某些流动现象为模型,研究定常与非定常流动条件下可瘪管的非线性响应,已经从中发现了若干新的现象。类似地,在微循环流动中已经观察到并解释了象红细胞膜在剪切流中的坦克履带式运动这类令人感兴趣的新的行为。其他微循环流动现象,如在整个毛细血管床上的血细胞比容不足,仍未有满意的解释。

有些重要的现象中,生物组织表现为多孔介质的性状。突出的例子有:在受载荷的关节软骨中,间质水的移动和溶质的扩散;血浆穿过血管壁的渗透;在淋巴循环中,间质液的排出;角膜的水合作用;眼房水从眼睛前腔中排出。在所有以上问题中,人们正在考察处于压力载荷下并耦合生物-物理现象的生物多孔基质的固结作用。在生物传热理论中碰到了一个不同类型的二相流问题,这里,人们会想确定组织的局部传热特性如何受血液流动的影响。

未来研究的一个特别富有成果的领域是细胞的和细观流体动力学的运输过程。这些问题常因具有静电力、电动力和化学力而变得很复杂。曾用线性稳定性理论将细胞膜模拟为其表面受分子力扰动的粘性流体层。目前正在研究中的、细胞生理学家很感兴趣的一些重要细胞运输过程，有细胞摄粒作用，细胞排粒作用和囊式运输。细胞层中分子进入和穿过毗邻细胞间的胞间通道的运动，为解释渗透的微结构以及生物学家在描述其细胞膜运输实验时普遍采用的唯象系数，提供了流体动力学依据。水、小离子和蛋白质的运输，是发生在细胞层的不连续部位并且不是均匀地穿过整个膜的表面，这跟气体分子的情况不一样。下部组织中这种输运行为的后果刚开始探究。

肺中气体、血液和水的流动同样很重要。这些流动是在非常柔软的器官中进行。肺功能正常时血管和肺泡经受大的变形。血液的氧合和 CO_2 的除去依靠多种酶的参与，它们大大促进了物质的输送。水流入淋巴或肺泡的状况决定人是否患了水肿。根据毛细血管壁的结构（超微结构，分子生物学）可以确定血液健康或有病。因此，为要了解呼吸和灌注，必须将流体动力学跟非线性有限弹性理论及生物化学结合起来。这些方面过去10年中已经作出了显著进展，但详细的定量了解要等将来。

这个简要的概述略去了许多专门器官如眼，耳，泌尿系统和肠胃系统，以及胎盘等许多极其吸引人的问题，那里仍然存在着许多流体力学工作者开展研究的机会。我们还只是集中于基本的生理过程，没有提到范围广泛的新的医疗设备，仪器，或已推广的假体，或通过应用流体动力学原理在人道器官设计中已取得的主要进展。为了临床诊断，继续在探索新的无损测量局部血液流动的方法。

5.2.3 导电流体的流动

通过与自感应磁场或外加磁场的相互作用，导电性将引起彻体力和能量，它们跟流体耦合，产生一些复杂的现象，这些现象是 Navier-Stokes 方程所描述的经典流体中没有的，其范围包括，从象 Alfvén 波和向前传播的粘性尾流这样一些纯磁流体动力学现象，到涉及热和电离现象的更复杂的类型，如在非平衡等离子体中的电离和电热不稳定性等现象。

对这些复杂现象的研究为地核的行为和日冕中发生的事件提供了解释。继续研究磁流体动力学，对于这些领域和宇宙学的未来进展是极重要的。

磁流体动力学 (MHD) 的潜在的工程应用有核聚变动力，电断路器，太空电推进装置，操纵熔融金属，以及 MHD 发电，核聚变在本报告中另作详细介绍。在经过最近20年极大的努力之后，目前对电推进和 MHD 发电的拨款处于低水平。许多重要现象仍只是得到部分的探索或者尚未发现。在此领域继续进行基础研究很重要。完全撇开它在智力上的挑战不谈，将来它可能还有别的重要应用。

5.2.4 地球物理流体力学

自然界的流体力学包括范围很广泛的物理现象，从大气动力学、海洋动力学和气候变化到地幔和地核内的地质过程。这门学科已自然而然地发展到考虑行星的大气和天体物理学中的流体现象。

使大气和海洋的地球物理流体力学 (GFD) 复杂的原因是，在行星运动尺度和分子扩散显得重要的最小的运动尺度之间差 10^{10} 的量级。因而天气的理论或者计算机仿真必须设法包括所有较小尺度流体动力学的累积效应，它们是：内波，锋，二维湍流及三维湍流，对

流云。对这些中间尺度运动正在加紧研究，例如对猛烈风暴和云的模拟，以及锋动力学等的研究显然正在取得大量进展。

气候变化的仿真另外还必须精确地考虑多年的天气，不论其累积效果如何。另一方面，海洋环流理论必须考虑到，海洋环流对大气中风和热的变化的非常慢的反应。这理论还必须计及盐度和温度的不同作用，二者均影响流体的浮力。在高纬度处，海冰使地球流体动力学复杂化。海洋以大到 1000 年的时间尺度在气候系统中起着惯性轮的作用。1982—1983 年位于热带太平洋上的埃尔尼诺 (El Nino) 现象引起的全球范围气象剧烈异常，向我们表明了海洋与大气很强的相互作用性质。波传播理论已成功地描述了热带和全球的变化序列中的若干环节。

除这些短期事件以外，我们即将经受到大气中 CO_2 增加的全球性影响。对未来半个世纪气候变化的预测，有赖于对总环流及其热与水分平衡的复杂的流体动力学模拟。这些重要的问题除了涉及经典流体力学外，还涉及与化学过程（如大气中的气溶胶和海洋中的碳的化学过程）的相互作用，辐射效应，多相和多组分流体（如对流云和海冰中的）和生物学。（生物圈以多种方式跟流体大气层和海洋相互作用。）这些相互作用在可能的核战争的灾难性恶果中极其重要，这时大气中可能饱含着大量微粒，太阳也许成年累月地晦暗无光。

在这个领域中一个有前途的研究分支是 Lagrange 流体力学。它的理论和测量是以运动流体粒子作为坐标基准。

我们正在看到，对海洋总环流的了解有迅速进展，既包括对海面上空风所加应力的力学响应，也包括对大气与海洋之间热量通量与水分通量的热力学响应。系统的复杂性会使计算机仿真得不到任何平滑解 (brute-force solution)。但大可乐观的是，一些新的方法将导致一种解决：首先，应用微电子学、遥感（尤其是从轨道卫星上遥感）和计算机分析，现在可能对大气和海洋作全新测量；其次，环流的简单的理论模型正在涌现，这有助于减少系统的表面上的复杂性。这些关于环流、波传播、湍流级串以及涡运动诱发平均环流的理论，正为海洋-大气系统的耦合模型打下基础。理论、观察、计算机和实验室实验的密切结合是这项研究工作的特征。

其他行星大气层的研究跟地球物理流体力学有密切关系：尽管这些行星上有许多新的物理、化学效应，但跟地球上的流动对照，已初步发现了一些明显的相似性。除了它们本身固有的意义外，研究其他行星的价值在于更好地了解我们自己的地球。例如，已在木星环流中观察到彼此孤立的强大旋涡；它们的模型有助于了解地球上的流动（从小型猛烈风暴到由墨西哥湾流脱出的强大涡流）。地球上总环流的模型已能仿真外行星的某些带状流，只要简单地适当修改其行星自转和密度分层。

5.2.5 多相流动

涉及多于一相的流动（多相流动）的分析所提出的问题，比单相流动所遇到的问题复杂得多。其中的道理是，一般说来，不同相的混合是不均匀的，需要详细了解这些相在流场中如何分布。通过下面几个例子可以明白这些流动的重要性：

- 原油在管道中的输送往往涉及液态和固态碳氢化合物一起的流动。气体和液体在水平管道中低速流动时形成分层结构，液体沿管子底部流动，气体则跟着液体同时流动。液体流速增加或方位变化到某个上倾角时，可能出现下述情况：气体与液体间歇地流动，从而产生大

的压力脉动,这种脉动转而能够引起振动损伤。所以在通常情况,最好是设法避免栓塞流。但遗憾的是,目前可用的模型律既不能预测在什么条件下出现栓塞,也不能预测栓塞的性质。

• 另一个例子可在核反应堆中看到。核反应堆一般典型地用水带走核衰变所生的热。由于液体沸腾,在冷却段中产生蒸汽和液体的二相流动。流动特性可以多种多样,从蒸汽泡和液体混合而成的泡沫流动到蒸汽与液滴混合、随器壁上液膜同时流动的环形流。设计这些冷却系统使器壁上液膜不致干掉是极重要的,因为在液膜会干掉的情况下冷却将不充分,这时可能产生失去控制的剧烈反应。

• 作为最后一例,我们要提到在管道里以浆体形式的固体(如煤)输送。这里的主要工程考虑之一是避免颗粒沉淀。这可以通过选择合适的颗粒粒度范围和恰当的管道设计来达到。在很长的直管中,颗粒因重力而沉淀;这种沉淀受到湍流和其他流体动力作用的对抗,在某种意义上对此还不是很了解。为了给浆体管道设计提供坚实的理论基础,需对这些流体动力作用进一步作基础研究。

事实上,可以并不夸张地说,几乎化学工业中设备制造的每个方面都面临着多相的问题。这些方面包括气体同液体或固体同液体的接触,冷凝器和锅炉的设计,化学反应中气体的逸出,减压阀的设计,以及相的分离。极为常见的情况是,一个化工过程设计的失败(往往费用极大)可以归因为对多相流动系统中某个部件放大的后果缺乏了解。对这个问题的认识使大公司识别出流动系统中的关键部件并作全尺寸的试验,以确保安全的化工过程设计。

多相流动的模型律问题,可以用考虑计算很长直管中的压力降为例来说明。跟单相流大不相同,在那里存在着可靠的关系式,因而不要求具有详细的湍流流场知识;在多相流中却有这么多的决定多相流系统的独立变量,以致量纲分析会引出过多的无量纲组而无法采用。结果,对于多相流,人们必须有流动物理过程的详细模型,以使用有意义的方式把实验结果关联起来。

工程手册中给出的现行设计方法通常是,利用不同相的性质的某种组合而成的一些流体性质,将单相的关系式加以修改。认识到这种作法的不妥已经有25年了。很显然,计算压力降的方法必须适合于预期存在的流动状态。

这个领域的研究有三个主要方面:(1)多相现象的基础研究;(2)计算不同流动中的相如何分布;(3)为了计算复杂流动情况中相的分布,不但要发展计算机程序,还要提出设计用的方程。基础研究可以包括这样一些课题,如颗粒在流动气流中被湍流卷挟和运动的机理,或者空气在液体膜上流过产生波的机理。这项研究的第二个方面,包括用诊断工具确定某特殊流动中各相如何分布,并用基础研究对新观测到的分布提供解释。关于多相流研究的最后一个方面,是提出设计用的方程和计算机程序以计算相的分布。如今对各个相分别考虑微分方程并用它们作为数值计算的基础,已经习以为常了。可惜的是,关于多相流的这方面的研究,很可能大大地超前于我们现有的基础知识。

6. 三种基本研究方法

6.1 模拟方法和分析方法

在自然界和工业环境中所发现的现象,是用物理学术语加以鉴别和描述的。而这种物理学的描述必然是无量纲形式的数学上的表达。这是描述主要的物理机理,然后用渐近方法或分析方法,或用数值方法解所得到的这些方程,这种过程包括;根据综合所得的数据建立物

理上可行的概念模型；合理地导出控制方程及相应的初始边界条件；以及研究把感兴趣的物理过程定量表示的解。

所有牛顿流体的物理过程，最后都是通过适当推广的 Navier-Stokes 方程组来描述，此方程组可以包括化学效应和辐射传递。对于非牛顿流体也发展了与此相仿的处理方法。除非求解过程是以对完整的普遍方程进行数值仿真为基础，否则就需要合理的近似方法来把这完整数学方程组简化成跟物理模型一致的较简形式。从中挑出有意义的参量组，然后用它们建立完整方程的渐近表达式。在了解经典的特定近似(如边界层理论和势流理论)方面，已容许将这类方法作重大改进，并推动了发展描述非常复杂流动的方法(如对于后缘流动，激波与边界层的相互作用，以及三角翼的空气动力学的多层描述法)。事实上，除了湍流现象这个值得注意的例外，在本章所述的每个分支中的主要过程均可认为是应用了现代合理近似法的结果。

简化方程组一经确定，就必须寻找其解法。人们可以用严格的分析方法，渐近的分析方法，计算技术，甚至形式的数学方法去求得解及解的界、特性和唯一性。对于大多数流体物理过程，很少找到有用的精确分析解。在有限的参量值范围内，渐近解给出物理现象的定量描述。在高度非线性问题(如化学性质活泼的系统)中需用奇异摄动法求简洁、一致有效的基于展开式的解。这对于时间尺度与长度尺度不可比较的那些体系尤其重要。

数值仿真必须包括对精度和分辨率的估计，以便将物理上可行的解跟代表数值计算的人为结果的那些解区分开。用分析方法导出的渐近解不仅作为数值试验方法的基准是有用的，而且对提供分辨真实物理量时必不可少的数值的时间尺度与长度尺度也是有用的。当数值模型使用描述所研究过程的完整方程组时，对基准数值仿真的需要尤其重要。在这种情况下，同时发生的各种物理过程的总体将很大，把不可比较的长度和时间尺度过程加以分辨是必不可少的。

只有在湍流领域，由于缺乏明确的概念模型，所以不能作数学模拟。从 Navier-Stokes 方程导出的平均方程总有不确定的项，它们仅以特定的封闭近似来描写。迄今数学方法还没有得到合理导出的封闭的法则，为了使这个问题得到较好解答而进行更加集中的努力，或许会富有成果。

6.2 计算流体力学

最近一些年里在计算流体力学方面取得了迅速进步。这方面发展的动力，很大程度来源于现在有了可靠而强大的计算机手段。这又转而刺激了了解流体动力学基本过程的理论和实验研究。我们现在有能力计算许多复杂的非定常二维流动与定常三维流动(计入可压缩性与粘性的影响)，仅在几年前这还是不可能的或者说不切实际的。可是，还有许多障碍必须克服。

在最近20年计算空气动力学有了进展，包括从计算细长体绕流的线性理论，到飞机状构形的绕流的非线性无粘性理论。用雷诺平均的 Navier-Stokes 方程连同湍流模拟来计算较简单气动力外形的三维可压缩粘性绕流，最近10年间大为活跃。代表着当前发展阶段的这些计算，只要求对总的湍流效应作空间-时间分辨，而把其余的(不过是非常重要的)湍流效应的描写留给真实的模拟。这阶段对计算机存储和速度的要求远低于下一阶段或最后阶段的要求，后者通过网格和时间步长分辨率表示所有尺度的携带能量的湍流涡。随着当前和最近将来的计算机技术和数值方法的进展，我们现在到了这样的门口：把雷诺平均的计算扩展到飞行条件下的整个飞机。为了跨入这个门口，把这些计算实际应用于飞机设计，要求：在围绕

一个跟飞机构形一样复杂的几何形状调整网格点系统时解决若干拓扑问题；发展加速收敛的方法以提高解可压缩粘性流动方程的数值方法的效率；以及实现自适应解的网格系统。

在现有的湍流模型能够计及中等程度或大量分离的强相互作用流场的影响之前，还要求取得许多进展。在不久的将来以至遥远的将来是否具备这样的能力，尚无把握。可是，目前的模型能够计算只有很少或没有分离区的湍流边界层相互作用到工程精度。随着新计算机即将出现，不久就有可能研究出将粘性流的计算扩展到复杂的三维流动所要求的方法，而不必等待进一步改进湍流模型；这仍然是合乎逻辑的下一步骤。对于接近设计条件的流动，这些计算也将满足工程精度，并可以用于计算起始的分离，激波与旋涡边界层的相互作用，抖振，减小的升力，以及干扰现象。湍流模型的改进将进一步扩大应用范围，直至用于战术机动飞机。

在今后两年中，计算机手段将达到能够以量级为每秒钟 5×10^8 次的浮点运算速率（较现有计算机快两个数量级）处理数据，同时，磁心存储量超过 16×10^6 字。这种计算能力将有可能进行雷诺平均的 Navier-Stokes 计算；计算的物体形状跟现代的飞机一样复杂，而计算费用和时间却跟目前计算十分简单的几何形状所需的相同。为使这种计算实际用于气动力设计，要求在减少计算机费用和机时方面作进一步改进。可是，作为对计算机技术进步的补充，正在发展新的数值方法以提高数值计算的效率。如果这方面的研究保持现有速度前进，那就可以预言，在今后 5 年里数值计算的效率将提高为以前的 5 倍；并且为解可压缩粘性流动方程。计划在今后 15 年里可能将运算速度提高两个数量级。

6.3 实验方法

6.3.1 测试手段

流体力学测试手段经过以往 10 年的发展，促使广泛的计算机分析与如下一些完善的技术相结合，如湍流研究中热线探测仪输出信号的条件采样。还有激光技术的极迅速广泛的应用，例如，有用于测转动温度的 Raman 散射，Doppler 测速仪及激发技术（LIF，即激光诱发荧光），还有基于激光散射原理的测量颗粒和液滴粒度的仪器。这些技术符合气体动力学和燃烧研究方面努力寻求测量流体流动中能量积聚（energy budget）的历史趋势。气体或流体中的经典力学状态和量子力学状态中的能量分布，在流体物理的许多研究领域中的基础性的。

新近发展的技术使人们能够以先前不可能的方法去研究流动。这些方法大多数有个缺点，即它们用起来相当麻烦而费时。可是，由于若干领域（医学图象显示，大型数组处理机）的综合发展，现在可以预料，流体动力学测试手段将有一场革命。

理想的流体力学仪器是能够近似作点分辨的，非侵入的，并能从相当大的流动体积里同时取得数据且显示出该体积任意截面上的流动。把用于医学图象显示中的 X 射线层析摄影的计算机技术，跟多角投影几何学中的单光子和多光子激发或散射技术相结合，可以设想，再有几年有效的支持，理想的流体力学仪器的许多特性将可以达到。要注意，近年来的发展，比如说湍流中大尺度结构的鉴别和研究，强烈地依赖于流动显示方法，包括用几个探针逐点测量，费劲地再现流动中截面的信息，然后用计算机处理和显示其结果。

快速采集大量数据是提高风洞试验效率的重要方面，因为只有如此，才能充分利用实验研究中引入的联机计算技术。

在大气科学中的测试手段已有急剧增长。如今地面遥感技术使我们可以测量大气的湍流

结构,详细显示内波、湍流、云、猛烈风暴和急流。随着中尺度结构这一新图象的出现,理论研究受到了巨大冲击。

新技术的发展还导致新的海洋探测器的研制。这些探测器随海洋的运动而漂移,由卫星予以探询,可以预期,在未来10年中,它们将提供大量流动资料。

测量手段特别重要且困难的一个领域是燃烧研究。在燃烧方面,我们现在似乎处于一个实验技术活跃发展的时期。某些10年前不可能测量的物理量,如今可以常规地测量了(如转动温度),有些今天不可能测量的关键物理量,10年内将可能常规地测量(如某些联合概率密度函数)。正在取得的进步,大部分与光学技术有关。

在过去10年间发展的光学方法有,测温度和各种化学物质浓度的 Raman 光谱学(各种类型的),测密度的 Rayleigh 散射,测速度的激光 Doppler 测速仪,测原子团浓度的共振荧光,以及测温度场的激光全息摄影。因为燃烧环境对人相当有害,光学装置的远距测量这一特点所能具有的重要性,超过其明显的非侵入测量的优点。利用光学方法获得的时间和空间分辨力已发展到这种地步,有化学反应的湍流流动中许多有意义的物理量可以按照某一空间-时间分辨基准进行测量。在设备完善的实验室中应用光学方法研究反应流动,近年来已得到很多重要的知识:例如,用于活塞发动机的壁面上猝灭层的性质,已靠这些方法获得很大程度的阐明;跟早先的判断相反,已证实未燃烧的碳氢化合物不是来源于器壁猝灭层。要是没有新的光学方法,那就不会有这种进步。

还有一些重要资料不很容易得到。例如,在湍流扩散火焰中浓度的联合概率密度函数及浓度梯度值(实际就是所谓的标量耗散率),在热释放率理论和熄灭理论中起核心作用,但是还没有得到什么实验资料。这只是燃烧方面光学技术前沿的测量技术的一例。在下一个10年内,很有可能得到所需的结果。继续改进光学方法本领的前景良好。此外,有一些需要试验(并需输入参量)的理论可以由上述这些改进得到好处。所以,我们可以想象,燃烧方面的实验技术(尤其是光学技术)在未来10年中将是一个活跃的领域。

6.3.2 流动实验设备

跟流体力学的直接应用有关的实验设备(如用于飞机研究的风洞)一直有用。为获得高雷诺数而建的低温风洞现正进入应用,这是为了研究空气动力学而发展实验设备的历史趋势的最近一例。目前致力于发展一种有自适应壁的或者说“灵巧的”跨声速风洞,这个迹象表明,有专门用处的新的气动力学实验设备,未来10年中将进入联机运行。

可是,单纯建立研究流体物理方程的专用实验设备是困难的。在我们看来,也许需要设计致力于流体运动的物理学特殊领域研究的实验设备。我们建议,流体物理学界留心这领域可能的需要,并且,如果合适,在全国性会议上就此问题开展公开的讨论。

要是各种独特的全国性实验设备都可以由大学和其他方面的研究人员按规定办法来使用,那么这将会对流体物理很有好处。我们认为,这个方案可以把新思想注入运行这种实验设备的机构,又能让范围扩大的有才能的研究者进行现代技术水平的实验。一般说来,大型全国性实验设备往往较大学的实验设备力量雄厚。为访问学者进行实验提供接触机会和有吸引力的安排,或许是这些实验设备多出成果的一条有效途径。

俞稼槃译自: Physics Through the 1990s: Plasmas and Fluids. National Academy Press, Washington, D.C.(1986): 76—94。(董务民校)