

现代流体力学发展的回顾与展望*

李家春

中国科学院力学研究所, 北京 100080

提要 回顾流体力学发展的历史, 概述迄今在其各个分支领域中已取得的主要成就以及力学大师, 中国老一辈科学家的重要贡献。分析不同时期的发展特点, 尤其是近30年来, 由于计算流体力学日臻成熟, 非线性力学取得重大进展, 新兴学科分支不断涌现, 形成了现代流体力学的发展阶段。展望在21世纪, 流体力学的基础研究和应用研究必将在经济建设和社会发展的各个方面发挥重要作用。

关键词 流体力学; 科学史

近来, 人们都在关注和探讨21世纪世界和我国的科技发展。因此, 我们来回顾一下流体力学发展的历史和老一辈科学家的杰出贡献, 总结20世纪下半叶以来这一领域的重要进展, 展望未来的发展前景是很有必要的。这也是对我国近代力学的奠基人之一周培源教授最好的纪念。

1 经典流体力学的发展

流体力学是力学的重要分支之一。它象其它学科一样来自生产实践, 所以古代的流体力学同人类的生产活动有紧密的关系。如希腊的阿基米德关于浮力的定量理论, 帕斯卡的流体静力学关系, 达·芬奇和伽里略对运动物体阻力的研究。我国从李冰, 管仲治水, 沈括的浮漏仪, 葛洪的飞车到揭暄的旋涡试验等等。这些成就大多是对客观世界直观的定性认识, 尚未上升为理论。

经典流体力学是从17世纪开始形成的。首先要归功于牛顿发明了微积分。在他的著作《自然哲学的数学原理》一书中, 他还研究了粘性流体的剪应力公式, 声速和潮汐理论。在18世纪, 1738年, 提出了著名的伯努里定理。1752年, 达伦贝尔获得了连续性方程。尤其是, 欧拉于1775年提出了流体运动的描述方法和无粘性流体运动的方程组, 推动了无粘性流动, 包括有自由面的水波运动的研究。所以, 欧拉是理论流体动力学的奠基人。19世纪的主要进展是对无粘有旋和粘性流动的初步研究。1823年, 1845年, 纳维、斯托克斯分别导

* 在1994年11月24日纪念周培源教授逝世一周年会议上的邀请报告

出了粘性流体运动的基本方程组，这就是著名的 N-S 方程，并为当时哈根、泊肃叶通过实验得到的圆管中粘性流体的流量公式所验证(Sutera, Skalak 1993)，这是粘性流体运动理论的发端。1858年，亥姆霍兹给出的定理是研究旋涡运动的基本出发点，所以他们是无粘旋涡运动研究的创始人。19世纪对非线性波开始有了认识，如1834年罗素对于孤立波的实际观察，1847年斯托克斯获得的有限振幅波的三阶解都是典型的例子。通过对双曲型方程的研究，人们发现了间断解，1860年提出了黎曼问题。1869年，兰金给出了激波前后的关系式。这是对流动可压缩性的初步研究结果。由此可见，经典流体力学的出现，使我们的认识建立在严密的理论基础上。但是，它同具有实际应用，经验半经验的水力学却分道扬镳了。由于认识水平的限制，还无法从理论上解释运动物体所受的阻力（达伦贝尔佯谬），即对于两种最重要的流体：水和空气，其粘性很小，人们很难理解被经典理论所忽略的摩擦力怎么会在如此程度上影响流体的运动。所以，当时的情况是，水力学工程师观察着不能解释的现象，而数学家却解释着观察不到的事物（钱令希等1985，周光炯等1992）。

2 近代流体力学的发展

从19世纪末开始，人们主要深入细致研究流体粘性运动和高速运动的特性，从而使理论流体力学可以真正用来指导实践，本世纪上半叶航空事业的巨大成功就是有说服力的证明。在这一时期，流体力学的主要成就有：

1883年，雷诺的实验发现了流体运动的两种运动状态：层流和湍流，它是由后来被索末菲尔德命名的雷诺数的大小来决定的，并假设湍流是由于层流流动产生不稳定的结果。雷诺还引进了表观湍流应力或虚拟湍流应力这个具有基本重要意义的概念，并于1895年导出了雷诺平均方程，这是计算机出现以前解决工程问题的主要途径。雷诺发现的重要性在于它推动了整整一个世纪的湍流研究。尽管湍流问题还没有解决，但人们对它的认识深化了，并解决了大量实际问题，所以具有划时代的意义。正如雷诺本人所说：这项研究的结果既有实用价值，也有哲学意义。

1904年，普朗特凭他丰富的经验和物理直觉，提出了著名的边界层理论。他在海德贝尔格的数学年会上宣读了“具有很小摩擦的流体运动”，证明了绕固体的流动可以分为两个区域，一是物体附近很薄的一层(边界层)，其中摩擦起着主要的作用；二是该层以外的其余区域，这里摩擦可以忽略不计。他指出有可能精确地分析在一些很重要实际问题中所出现的粘性流动。边界层理论的重大意义在于，在人们还不可能求解完整的 N-S 方程以前，解决了阻力问题，使人类的飞行至少提前了半个世纪。同时，它还是奇异摄动理论中匹配渐近展开法的雏形。1913年，普朗特继库塔-儒库夫斯基以后研究升力，提出了升力线理论和最小诱导阻力理论，解决了有限翼展机翼的升力问题，为航空工程作出了贡献。1925年，普朗特提出了混合长度理论，配合系统的实验，首先通过雷诺平均方程从理论上分析了湍流流动。所以，普朗特不愧是近代流体力学的奠基人(Oswatitsh, Wieghardt 1987, Schlichting 1979)。

1910年，泰勒研究了激波内部的结构。1923年，他又得到了两个同心圆筒间流动失稳的条件，形成所谓的泰勒涡。他还研究了强爆炸、穿甲、液滴问题。泰勒的主要贡献还是在湍流领域。他从1915年起就对大气湍流和湍流扩散发生了兴趣，还提出了湍流的涡扩散理论。到1935年，泰勒建立了均匀各同性湍流的理论，通过相关或谱分析的统计方法来研究

这种理想化的湍流模型。尽管这条途径似乎也不能克服湍流研究的根本困难，但在这一时期湍流研究的理论成果使人们加深了对湍流结构和机理的认识，其意义仍是不可估量的。泰勒科学工作的特点是善于把深刻的物理洞察力和高深的数学方法结合起来，并擅长设计简单而又完善的专门实验来证实他的理论。所以，泰勒在力学界的影响是深远的（Binnie 1978）。

1911年，卡门证明了圆柱尾流内涡街的稳定性，可以解释桥梁风振，机翼颤振等现象。对湍流模型，他提出了相似性原理。1929年起定居美国以后，在加州理工学院建立古根海姆空气动力学实验室（GALCIT），几乎汇集了世界上最优秀的人才，成为当时世界上空气动力学的研究中心。那里超前的理论研究，为人类的航空航天事业奠定了基础，所以他被誉为航空航天大师。卡门在这一时期的成果集中在气动方面，包括机翼的举力面理论，亚声速流近似理论，跨声速相似理论，超声速流细长体理论。1940年，他在美国的数学会年会上，号召工程师为非线性问题拼搏，预见到非线性力学在今后科学发展中的重要地位。他也象普朗特一样，善于透过现象抓住本质，提炼出合理的数学模型，树立了数学理论和工程实际相结合的典范（Sears 1979）。

我们还要提到当时的苏联科学家的杰出贡献。比如，谢多夫完善了量纲分析和相似理论，并应用于强爆炸和湍流问题。柯尔莫果洛夫虽是一个伟大的统计数学家，但他总是力图把他的纯粹数学的研究成果同实际应用结合起来，如物理系统的布朗运动，统计弹道学。30年代，他研究了多变量随机函数和随机场理论，这使他对湍流发生了兴趣。1941年，他提出了局部各向同性湍流的理论，在局部相似性的假定下，可以得到惯性子范围存在的条件和结构函数，能谱的幂次律。此外，他还补充了用湍流能量和典型频率的微分方程来求解雷诺平均方程。显然，这是最早的二方程模式，他的结果往往被用来检验新理论的标准，也被他的学生用于研究大气边界层湍流。流体力学界于1991年隆重纪念柯尔莫果洛夫的重要文章发表50周年，充分说明他的著作是不朽的。1944年，理论物理学家朗道提出了经过无限次分叉从层流过渡到湍流的一条途径。

在这一时期，以周培源为代表的中国流体力学家已跻身于国际的学术舞台，为近代流体力学的发展作出了突出的贡献。1945年，周培源在美国“应用数学季刊”上发表了“关于湍流关联速度和湍流脉动方程的解”，首先得到了相关函数的微分方程，为现代湍流高阶矩模式理论奠定了基础。以后又提出了湍流的旋涡结构理论。钱学森早在30年代就来到了加州从事空气动力学的研究，并同卡门一起提出了近似计算高亚声速流气动力的卡门-钱公式。40年代提出了跨声速流的相似律。他还开创了高超声速流和稀薄气体动力学新领域。郭永怀同钱学森在研究跨声速流时提出了上下临界马赫数的概念，并发现当飞行速度超过下临界马赫数时，理论上连续解依然可以存在。只有来流速度超过上临界马赫数时，才会出现激波。所以，真正有意义的是上临界马赫数。他还研究了跨声速流的稳定性，这是超临界翼的早期研究。在以后的10年中，郭永怀从事激波边界层相互作用及高超声速流的研究，特别是，1953年在研究有限长平板边界层二阶理论时，提出了克服奇异性的途径，后被钱学森命名为PLK方法。1944年，林家翘解决了流动稳定性理论中的一个数学疑难，指出稳定性问题中，流体粘性趋于零并不等价于无粘性的情况，并用渐近方法求解了奥尔-索末菲尔方程，理论上得到的TS波后来为低湍流度风洞实验证实。中国科学家的上述成果已载入史册，这是每一个炎黄子孙的光荣（钱令希等1993）。

从以上这段历史可以看到,以普朗特为代表的应Ⓔ力学学派的风格在近代力学发展中的决定性意义,从哥廷根,剑桥,加州到莫斯科以及中国科学家的研究集体都为它的形成作出了贡献,其主要特点是工程科学同数学的紧密结合.由于这一风格的影响,流体力学又回到了生产实践,解决了人类为实现飞行的理想所面临的关键技术问题.同时也推动了流体力学自身的发展,使粘性流动和可压缩流动的理论得到了完善,为20世纪下半叶现代流体力学的发展奠定了基础.

3 现代流体力学的发展

所谓现代流体力学指的是,用现代的理论方法、计算和实验技术,研究同现代人类社会生产活动和生存条件紧密相关的流动问题的学科领域.所以,现代流体力学正处在一个用理论分析,数值计算,实验模拟相结合的方法,以非线性问题为重点,各分支学科同时并进的大发展时期.这一时期,渐近分析方法日臻成熟,已经成为一门独立的学科分支,Sturrock 和 Whitham 分别提出了多重尺度法和平均变分法, Van Dyke 的延伸摄动级数理论扩大了适用的参数范围.纯粹数学中泛函,群论,拓扑学,尤其是微分动力系统的发展为研究非线性问题提供了有效的手段.由于建成了适合于研究不同马赫数、雷诺数范围典型流动现象的风洞、激波管、弹道靶以及水槽、水洞、转盘等实验设备,发展了热线技术,激光技术,超声技术和速度、温度、浓度及涡度的测量技术,流动显示和数字化技术延长了人的感官,可以观察新的物理现象,并获得更多的信息.最重要的是,计算机的迅猛发展,从根本上改变了流体力学面临非线性方程就束手无策的状况.大量数据采集和处理也就成为可能.因为实际问题大多是学科交叉的,新兴学科领域的出现也是十分自然的.在这一时期的主要成就如下:

计算流体力学已发展成熟,出现了有限差分,有限元,有限分析,谱方法和辛算法,建立了计算流体力学的完整的理论体系,即稳定性理论,数值误差耗散,色散原理,网格生成和自适应技术,迭代和加速收敛方法.提出了许多有效格式,如TVD和ENO格式,Godunov方法和拉格朗日算法,为求解自由边界问题的MAC方法,为提高分辨率的紧致格式等等.计算流体力学在高速气体动力学和湍流的直接数值模拟中发挥了重大作用.前者主要用于航天飞机的设计,由于物体几何形状和流场极其复杂,涉及宽阔的流动范围,要考虑内自由度激发和化学反应,计算流体力学家为此进行了不懈的努力(Tirsky 1993).此外,还研究了非定常流的控制,超临界翼的设计等问题.后者要求分辨到Kolmogorov耗散尺度,计算工作量极大,如果没有先进的计算机是不可能完成的.目前,超级计算机,工作站的性能有了飞跃,最高速度可达每秒数百亿次,存储达数十吉,并行度也在提高,因此,人们已经可以用欧拉方程,雷诺平均方程求解整个飞机的流场,以及雷诺数达到 10^5 的典型流动的湍流问题.计算流体力学几乎渗透到流体力学的每个分支领域(Borris 1989).

非线性流动问题取得重大进展.自60年代起,对色散波理论进行了系统的研究,发现了孤立子现象,发展了求解非线性发展方程完整的理论和数值方法,并被广泛应用于其它学科领域.物理上,提出了波作用量守恒原理,揭示了共振相互作用是子系统间交换能量的方式,并应用于深水波演化的研究.三维非线性波和与波有关的流动相互作用是这一领域的研究前沿(Hammack 1993).非线性稳定性的研究主要针对转捩问题,探讨不稳定波的发展情

况,用三波共振,二次不稳定来解释K型流向涡结构和N型拉姆达涡结构的转换方式,用波包来研究湍流斑的形成。由于理论分析的局限性,要结合数值方法才能描述转换的全过程(Robinson 1991)。湍流的基础研究从统计方法转向拟序结构的研究,因为拟序结构对于动量、能量、质量的传输起着决定性的作用,也便于控制。拟序结构可用流动显示,条件采样识辨,基于Lumley的物理思想,近年来,Sirovich提出的POD方法从数学上定义了拟序结构,并在理论上证明了可用最少量的模态来近似描述无限维动力系统,这是理论分析和数据处理的重要手段(Berkooz 1993)。RNG(重正化群)理论正在完善,并应用于剪切湍流。发展了Boltzmann格子气模型以克服方法原有的不足,并有效地研究了渗流问题。上述两种方法是有发展前景的。目前,为了要研究间歇现象,解释非高斯分布,人们又对统计方法与确定PDF发生了兴趣(Lumley 1989)。

出现了以下一些新兴的学科分支:

生物流体力学。主要研究人体的生理流动,包括心血管、呼吸、泌尿、淋巴系统的流动。流体的非牛顿流行为(如血液属卡森流体),管道的分叉和变形,肺与肾脏的多孔性,微循环通过细胞膜的传质,流动的尺度现象(如法罗伊斯-林奎斯特效应)是人体生理流动的特征,这方面的研究为发展生物医学工程(如治疗动脉粥样硬化,人造心瓣等)作出了贡献。此外,还研究了植物体内的生理流动,鱼类的泳动和鸟类的飞行,体育运动力学等。

地球和星系流体力学。它是主要研究大气、海洋、地幔运动一般规律的学科分支,包括全球尺度、天气尺度、中尺度的运动。其特点是要考虑旋转和层结效应,包括泰勒柱、埃克曼层、地转近似、罗斯贝波、惯性波、内波、双扩散、异重流等现象,深化了人类对自然现象的认识。还发展了星系的密度波理论,解释了观察到的旋臂,揭示了长期维持的机理,解答了缠卷的疑难。

磁流体力学和等离子体物理。主要研究在磁场中的流体运动规律,包括磁流体力学波与稳定性。虽然低温等离子体早已在工业中得到应用,但直到40年代,才由阿尔芬建立磁流体力学这门学科,并在天体与空间物理中得到应用。50年代以来主要动力是受控热核反应的研究,一直在寻求适当的磁场位形与解决磁约束或惯性约束问题的途径。目前提出的办法有,托卡马克,磁镜装置,激光,电子束,离子束聚变。研究中遇到不少困难,道路是曲折的,但是,一旦实现点火,前景诱人,人类不必再为能源枯竭担忧了。地球磁场的起源和逆转也是一个磁流体力学问题。

物理化学流体力学。它是50年代由列维奇倡导的,研究同扩散、渗析、返混、电泳、聚并、燃烧、流态化和毛细流等物理化学现象有关的流体力学分支。多相流专门研究两相以上同种或异种化学成分物质组成的混合物的流动。如用单流体模型,有泡沫流和栓塞流;如用双流体模型,有液固、气固和气液流动;如果在流动中颗粒碰撞占主导地位,隙间流体的作用可以忽略,则可用颗粒流模型。多相流在自然界与在化工,冶炼和石油工业中有广泛的应用。实际上,渗流的出现应以上一世纪的达西定律为标志,50年代以后,进一步发展了非等温、非均匀介质,非牛顿和多相渗流,物理化学渗流,生物渗流。本世纪20年代建立了流变学,以后逐步形成非牛顿流体力学,包括变粘度、有屈服应力、有时效和粘弹性的流体运动。有些现象,如爬杆、挤胀和减阻等是非牛顿流所特有的。测定了各种非牛顿流体的本构关系,揭示其与介质内部结构,如高分子链、蜡晶结构、悬浮固体颗粒、纤维、血球的联系。描述非牛

顿流体的运动与稳定性,并应用于塑料、化纤、彩胶、橡胶和造纸工业。

4 21世纪展望

在展望下一世纪流体力学发展以前,我们来分析一下中国和世界的现状。一方面,我国的研究工作已有一定的基础与积累,另一方面,同国际学术界相比,研究的总体水平还有一定差距;一方面,我国的经济有了飞速的发展,另一方面,同世界上发达国家相比,我们还较落后,科研经费的投入还很不足;所以在制定规划时,要考虑中国的国情,要继续跟踪高技术,同时,一定要把重点放在同国计民生紧密有关的问题上。在这里,我们列出一些对未来我国经济和社会发展是重要的,与流体力学有关的科学技术问题:

能源 世界对能源的需求日益增长。我国正处在经济腾飞时期,必需加速与能源有关的工业的发展。我国能源以煤为主,地理分布不匀。石油,天然气产量虽已有一定规模,但大庆油田已进入后期开采,维持原有产量有一定难度。已探明,西部塔克拉玛干沙漠石油储量不少,但输送是个大问题。我国海上石油有一定储量,近海采油已有一定基础,还要进一步向300 m以上的深海进军。我国水力资源丰富,水电,核电很有潜力,在近期要大力开发。在能源开采,输送和利用中有大量流体力学问题,如在发展张力腿式平台(TLP)时,要解决的关键技术问题是,由非线性波与结构的相互作用引起的慢漂运动与高频共振;在三次采油中,为有效地采用强化采油技术驱替仍残留在多孔岩体中的多半原油,要避免粘性指进现象;石油,天然气,水煤浆的输送涉及管道中不同流态的多相流驱动问题;水电站的关键技术之一是防止水轮机叶片受空泡和泥沙侵蚀;要采用射流技术来提高燃烧效率等等。

环境 人口增长与工业发展使人类面临严峻的环境问题,已引起世界各国的关注。现代社会人类的生存环境涉及气候、生态、污染、灾害等不同尺度,多学科交缘的问题,如全球变化、臭氧空洞、酸雨、土地沙漠化、厄尔尼诺、台风、风暴潮、滑坡、泥石流等。可用建立观测站网,采用诸如遥感等各种现代测试手段,并用数值模拟来进行动力学的预测。多数环境问题是因发生在地球表层的流体运动和界面过程引起的,也存在大量流体力学问题。可重点研究陆气海气界面过程,污染物扩散输运,风沙、泥沙、泥石流运动等问题。因此要研究层结流体中的湍流边界层,在陆地要考虑植被的影响,在海上要计及不规则波浪、气泡、水滴的作用;远距离污染物的输送涉及干沉积、湿沉积、大气化学、放射性衰变等物理化学过程。为解决泥沙问题,首先要确定不同成分泥沙的本构关系,波流与岸线、泥底的相互作用,才能预测在复杂波流场中的泥沙输运与地貌变化。泥石流要解决分类、起动、运动、沉积、预报和防治问题。研究电磁波在湍流大气中的传播及其与界面的相互作用是为了正确反演遥感信息,取得重要环境数据(李家春 1991)。为控制环境污染,要研究清洁燃烧技术,流态化与等离子体技术,实现废弃物的无害化处理,并回收能量和物质。

交通 发展东方快车,高速火车,地铁与其它公共交通工具已提到议事日程上。东方快车马赫数为8,可在两小时内达到地球上任何一个地方。鉴于不再用火箭作为推进器,而是采用吸气式冲压发动机,并有较高的静温静压,化学反应快,如何达到充分混合,实现点火,稳定火焰,减小损失,提高超声速燃烧的效率是关键技术。另一方面,新材料可以允许再度使用细长体和尖前缘的气动外形,以达到高的升阻比,复杂物体的高超声速绕流仍要加强研究。空天飞机也会遇到类似的技术问题(Cheng 1993, Ferri 1973)。我国已建成广深准高速铁

路，并决定投资千亿元建设北京上海间的高速铁路。日本的新干线，法国的 TGV 的高速火车时速可达 250 km，采用磁悬浮技术后，速度还可以提高。在高速列车车头前会形成压力波，两车相遇和通过隧道时要考虑这个问题。要设计好的气动外形与采用其它措施，减小阻力，并要求有较好的侧向稳定性。节能型小轿车在良好的城市规划条件下，会有一定程度发展。由于节能与环境的需要，未来的趋向是轻量化，要设计具有低阻负升力美观大方的小轿车，以满足市场的需求 (Hucho 1993)。为发展航运事业，要设计高速、安全、“绿色”船舶，研制新型水上、水陆两栖运输工具 (如地效翼船)，开辟、疏浚航道，建设深水泊位的集装箱码头，也有许多与船舶工程，海岸与港湾工程有关的流动问题。

材料 主要是指材料加工过程中的流动问题，以晶体生长为例，由于重力作用，会引起对流运动，产生位错和缺陷，掺杂也不均匀，从而影响晶体的质量。在空间微重力条件下，似乎质量可以得到改善，但实际情况并不如此，所以流体物理的研究得到了重视。要解决因表面张力、重力脉动、相变引起的马拉高尼对流与振荡现象对晶体质量的影响。由于生产大而优质的砷化镓是微电子工业的重要组成部分，所以，这项研究是很有前景的 (Ostrach 1982)。钢材连铸工艺可节省大量能源，这是钢铁工业的发展趋向。电磁搅拌可以提高产品质量，在冶金工业中有广泛应用。在等离子体喷涂和微粉生产中也要利用力学原理来控制质量。

信息与控制 微流体力学是一门新兴的学科。仿照因芯片生产的需要而发展起来的光刻、蚀刻、沉积相结合的 IC 工艺和 X 射线光刻、电铸、铸塑相结合的 LIGA 工艺，生产小到微米乃至纳米量级的微电源、微机械、微传感器，可以进行测量、控制与致动，具有灵敏、精确、节能、低廉、体积小的优点。这类微系统已被应用在剂量和化学分析，喷墨打印，医疗系统中。要研究在这些微系统中流速、压力和温度的分布，它们与宏观流体力学有区别，如要考虑稀薄效应、尺度效应、表面张力的作用等等 (Gravesen 1993)。电流变液是另一个有前景的领域。它是一种两相悬浮液，由不导电的母液和均匀散布在其中的电介质微粒构成。离它在电场中会产生屈服应力而固化，撤去电场后，又恢复了流体的特性，可以用于控制，如合器、制动器、阻尼器、减振器和液压阀等 (朱克勤等 1994)。

生物 生物学对人类的健康，农、林、牧业的革命有密切关系，在 21 世纪，无疑是头等重要的。细胞力学旨在了解细胞分裂、粘附、吞噬、运动的机理以及应力与生长的关系，这对理解生理病理现象，攻克癌症，心血管疾病等都有重要意义。为了研制生物代用品，如人造胰脏、皮肤、血管、血液等来恢复、维持、改善人体组织的功能，形成了组织工程。生物学家的研究成果要转化为产品或进行生物加工，要依靠生物反应器，要利用力学原理实现分离、纯化与高效生长，以保证正常新陈代谢，保障细胞不受损伤。所以，流体力学可在生物技术和生物工程中发挥作用，在细胞层次上进行研究与同工程紧密结合是未来生物流体力学的发展趋向 (吴望一 1994)。

综上所述，在未来，流体力学仍有着极其广阔的应用前景，对于人类和我国的经济建设和社会的持续发展的各个方面有着不可忽视的作用。根据以上所提出的重要科学技术问题，还可以看出，21 世纪的流体力学是本世纪现代流体力学发展的深化和继续，随着计算机的不断更新换代，不但可以解决极其困难复杂的正问题，将结果形象逼真地显示出来，而且可以进行优化设计与控制。所以要继续发展大规模科学与工程计算，研究并行算法与可视化技

术,使计算流体力学在其中发挥更大的作用。由于未来社会面临的大多是高技术问题,基础研究与应用研究不可分割,所以,仍要加强如涡、波、稳定性、湍流、两相流、非平衡流的研究,研究其中的非线性相互作用现象,并解决同实际应用背景紧密相关的关键技术问题。要了解其它学科的新成就,培养跨学科的人才,以推动交叉学科分支如生物流体力学,环境流体力学,微重力流体力学,微流体力学,电流变学等的发展。我们要发扬老一辈科学家执着追求真理的精神艰苦奋斗,进一步发展流体力学这一古老而又崭新的学科领域,为人类进步和我国的四化建设作出贡献。

参 考 文 献

- Berkooz G, Holmes P, Lumley J L. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25** (1993) : 537—576
- Binnie A M. Some notes on the study of fluid mechanics in Cambridge, England. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **10** (1978) : 1—10
- Borris J P. New directions in computational fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **21** (1989) : 345—385
- Cheng H K. Perspective on hypersonic viscous flow research. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25** (1993) : 455—484
- Ferri A. Mixing controlled supersonic combustion. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **5** (1973) : 301—338
- Gravesen P, et al. Microfluidics a review. *J. Micromech. & Microeng.*, **3** (1993) : 168—182
- Hammack J L, Herderson D M. Resonant interaction among surface water waves. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25** (1993) : 55—98
- Hucho W H, et al. Aerodynamics of road vehicles. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25** (1993) : 485—536
- Lumley J L. Whither Turbulence? Turbulence at the Crossroads. Lecture Notes in Physics 357, Springer-Verlag, Berlin (1990)
- Ostrach S. Low gravity fluid flows. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **14** (1982) : 313—345
- Oswatitsh K, Wiegardt K. Ludwig Prandtl and his Kaiser-Wilhelm Institut. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **19** (1987) : 1—25
- Robinson S K. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **23** (1991) : 610—639
- Sears W R, Sears M R. The Karman Years at GALCIT. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **11** (1979) : 1—10
- Schlichting H. Boundary Layer Theory. 7th ed., McGraw Hill Company (1978) : 17—21
- Sutera S P, Skafak R. The history of Poiseuille's law. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25** (1993) : 1—19
- Tirsky G A. Gasdynamical models of hypersonic aerodynamics and heat transfer with real gas properties. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25** (1993) : 151—181
- 李家春, 环境流体力学——它的意义内容和方法. *力学与实践*, **13**, 2 (1991) : 1—12
- 钱令希等. 中国大百科全书力学卷. 大百科全书出版社, 北京 (1985) : 334—343
- 钱令希等. 中国科学技术专家传略. 中国科学技术出版社, 北京 (1993) : 1—19, 62—78, 122—165
- 吴望一. 细胞力学和细胞工程. “21世纪的中国力学”, 北京 (1994) 98—99
- 周光炯等. 流体力学. 北京大学出版社, 北京 (1992) 1—10
- 朱克勤等. 电流变液和电流变效应. *力学进展*, **24** (1994) : 154—162

RETROSPECTS AND PROSPECTS OF FLUID MECHANICS

Li Jiachun

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080,

Abstract An overview on the developments of modern fluid mechanics is presented in this article. We have briefly described the main achievements in various branches of the subject and the contributions to them by great masters in the mechanics community and by Chinese scientists of older generation. In particular, maturity of computational fluid mechanics, advances in nonlinear mechanics and emergence of new branches are responsible for the formation of the features of this period in the last three decades or so. When looking forward to the coming century, the basic and applied researches in the fluid mechanics can certainly find wide applications to the sustainable economical and social development in the future society.

Keywords *Fluid mechanics; History of sciences*