



辽宁工程技术大学“十五”规划教材

流体力学

李忠华 张永利 孙可明 编著
章梦涛 主审



NEUPRESS
东北大学出版社

辽宁工程技术大学“十五”规划教材

流 体 力 学

李 忠 华 张 永 利 孙 可 明 编 著
 章 梦 涛 主 审

东 北 大 学 出 版 社

• 沈 阳 •

© 李忠华 张永利 孙可明 2004

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学 / 李忠华, 张永利, 孙可明编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2004.12
ISBN 7-81102-107-2

I. 流… II. ①李… ②张… ③孙… III. 流体力学 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 140603 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市光华印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 14

字 数: 350 千字

出版时间: 2004 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2004 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 王兆元

责任校对: 冬 雨

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 29.00 元

序

教材建设工作是整个教育工作中不可缺少的重要组成部分。邓小平同志曾指出，“教材很重要”，“编好教材是提高教学的关键”。教材建设工作已纳入了教育的整体规划，“九五”国内高校教材建设工作已经取得了重大成就。

我们必须深刻认识到，全面推进素质教育是深化我国教育改革的必由之路。21世纪世界各国经济、军事和综合国力的竞争，归根结底是科技与人才的竞争。因此，培养高素质的专业技术人才和管理人才是摆在我们面前的重要战略任务，也是我国高等教育事业肩负的光荣历史使命。目前，我校和全国其他高校一样，都面临着从应试教育向素质教育的转变，处在全面实施素质教育的理性认识和伟大实践中。

正是站在更新教育观念的认识高度，我们从教材改革入手。诚如徐中玉先生所说：“一种教材可以原封不动用上几十年的日子早已过去，不但几十年不行，几年还是不动也不行了。如果‘凝固’‘保守’也可算作‘稳定’，那么，这种‘稳定’其实是很不足取的，因为它实际乃是‘停滞’的饰词。而‘停滞’就会使我们的一切事业在这日新月异的时代更加落后。”这确是十分中肯的金玉良言！它发人深省，催人思考，促使我们解放思想，与时俱进，迈新步，谱新篇。

为了切实做好教材建设工作，辽宁工程技术大学教材建设委员会在本校各院（系）申报的近百部教材的基础上，组织专家精心论证，审议确定 20 部教材为辽宁工程技术大学“十五”规划教材。各位作者在教材编写中认真研究并吸收了多年来各种版本教材的成功经验，结合本校多年的教学实践经验，并反映当代国内外政治、经济、文化发展优秀成果和科学、技术先进水平。这里，我们衷心祝愿辽宁工程技术大学“十五”规划教材在我校教学中发挥应有的作用，祝愿教材出版后受到学生和读者的欢迎与爱护，使之日臻完善，像美丽的花朵装点我校校园的春天。

最后，对东北大学出版社给予我校教材建设的关心和帮助表示诚挚的谢意。

辽宁工程技术大学教材建设委员会

2004 年 5 月

前 言

本书系应用力学、工程力学专业“流体力学”课程教科书，也可作为大学理工科相关专业本科生和研究生修习流体力学的参考书。

20 世纪，特别是最近五十余年来，流体力学得到了空前的发展，传统领域得到扩大和深化，又出现了许多新兴的多门的分支领域。作为专业基础课教科书，不可能也无必要将流体力学全部内容收集到教科书中，成为一本手册式的著作。本书只选择流体力学中最基本的内容，即基本的物理现象、基本概念、基本定律及处理问题的基本方法，力求讲深讲透，以便建立一个比较完整和严密的体系。同时选择应用最普遍的流体力学几个具体领域给予介绍，以便读者学完本书之后能比较容易地跨进流体力学的“门槛”，为学习流体力学专门课程和通过参阅专门书刊文献解决实际流动问题铺平道路。

本书绪论及第 1 章和第 2 章讲述流体力学基本概念、基本定律，是流体力学中最基本的部分。其中心是建立流体力学基本方程组，从学习流体力学开始就必须准确和完整地掌握。立足于普遍形式的方程组，考虑具体领域的问题，这样才能够站得高、看得远，做到心中有数，条理清晰。无论流体力学哪个领域，基本方程组始终是基本的出发点之一。

第 3 章讲述理想流体动力学，虽然实际流体都有粘性，理想流体只是实际气体的近似，但应用它分析没有涡的绕流流动流场及物面的压强分布，迄今仍是相当好的理论和方法。同时还提供了有关流动性质的许多有益的资料，介绍了处理问题的许多方法。理想流体动力学在流体力学中占有重要的位置，是进一步处理复杂流动问题必不可少的基础，必须学深学透。第 4 章介绍流体运动中常遇见的涡旋运动的产生、发展和消亡的规律，为讲解理想流体的无旋运动及今后学习涡动力学作准备。

流体流动阻力是流体力学最重要问题之一。流动阻力来自于真实流体，流体具有粘性，因而粘性流体力学在流体力学中占有相当重要位置。第 5 章和第 6 章就是阐明粘性流动特点，建立粘性流体动力学基本方程及近似解法，着重

通过边界层理论分析流体在流动时的阻力。

自然界和工程中流体大部分为紊流，同时还存在大量的扩散现象、气体流动和渗流流动。本书第 7，8，10 章介绍其流动特点、流动的支配基本方程，以及流体力学基本方程在研究复杂流动问题中的应用，并适当地对典型解法给予说明。第 11 章是实验流体力学，重点讲授量纲分析及相似理论。

第 9 章介绍主要运用于航空航天部门的气体动力学。而主要运用于航海海洋部门的水力学不予介绍。同时，气体动力学和水波动力学已有不少的专门教材和专著，以本书为基础，可以顺利地进行阅读。

本书由李忠华、张永利、孙可明三位教师根据我校力学专业教学计划和流体力学教学大纲而撰写，参考了众多的流体力学教材，并结合本校流体力学教学实践，是一本颇有新意的流体力学课程教科书。

章梦涛

2004 年 9 月

目 录

第0章 绪 论	1
0.1 流体力学的研究内容 and 应用	1
0.2 流体力学发展沿革	3
0.3 连续介质假设	5
0.4 流体力学的研究方法	6
第1章 流体运动学	9
1.1 描述流体的两种方法	9
1.2 流场的几何表示	12
1.3 流体微团运动分析	14
1.4 无涡流及有涡流	17
习 题	18
第2章 流体力学基本方程	22
2.1 输运定理	22
2.2 质量体上流体动力学方程	23
2.3 控制体上的积分型的动力学基本方程	24
2.4 控制体上微分型流体动力学基本方程	25
2.5 微分型流体动力学基本方程组封闭性讨论	26
2.6 边界条件和初始条件	26
习 题	27
第3章 理想流体动力学	31
3.1 理想流体运动的基本方程	31
3.2 兰姆-葛罗米柯方程及其积分	32
3.3 理想不可压缩流体无旋流动	38
3.4 理想不可压缩流体平面定常无旋流动	40
3.5 复变函数概念与复势	42
3.6 不可压缩流体平面定常无旋运动问题数学提法	43
3.7 基本平面流动和复势	44
3.8 基本解的叠加	48

3.9 理想不可压缩轴对称定常无旋流动	55
3.10 附加质量力和附加质量	59
习 题	61
第 4 章 旋涡运动的基本理论	65
4.1 速度环量、涡线、涡管及涡（通）量	65
4.2 斯托克斯定理——速度环量与涡（通）量之间关系	66
4.3 速度环量不随时间变化的凯尔文定理	68
4.4 涡管强度保持不变的亥姆霍兹定理	69
4.5 直线涡内部和外部的速度和压强分布	71
习 题	73
第 5 章 粘性流动的基本理论	78
5.1 牛顿流体的本构方程	78
5.2 牛顿型流体的运动方程——N-S 方程	80
5.3 粘性流动的相似律	82
5.4 不可压缩粘性流解析解	83
5.5 粘性流体运动的近似解	87
5.6 小雷诺数圆球绕流	88
习 题	92
第 6 章 边界层理论	94
6.1 高雷诺数流动常规摄动的奇异性	94
6.2 边界层理论	94
6.3 边界层厚度	98
6.4 边界层的动量积分方程式	100
6.5 光滑平板上层流边界层	102
6.6 边界层近似的推广	105
6.7 边界层的分离现象	106
6.8 圆形层流射流	107
习 题	109
第 7 章 紊 流	111
7.1 紊流的产生	111
7.2 紊流的基本方程——雷诺方程	112
7.3 紊流的半经验理论	115
7.4 圆管中定常紊流	120
7.5 紊流的计算模型	124
7.6 绕平板定常紊流边界层	125
习 题	129

第 8 章 扩散理论	130
8.1 扩散的基本概念	130
8.2 混合物系统中的浓度、速度和单位面积的质量（或摩尔）流量	131
8.3 菲克第一定律与质量扩散率（或系数）	132
8.4 双组分混合物的连续性方程	133
8.5 扩散方程的应用	137
8.6 紊流扩散方程	142
8.7 污染物在大气中的扩散	143
8.8 层流与紊流的浓度边界层方程	145
8.9 质量积分方程	146
习 题	147
第 9 章 气体动力学基础	149
9.1 无粘性可压缩流体运动方程组	149
9.2 小扰动在可压缩流体中的传播 声速与马赫数	150
9.3 伯努利方程和气体动力学函数	154
9.4 一维定常等熵管流	160
9.5 正激波	164
9.6 拉瓦尔喷管内的流动	171
习 题	173
第 10 章 渗 流	174
10.1 多孔介质	174
10.2 达西定律	175
10.3 等温渗流的偏微分方程及其定解条件	177
10.4 非等温渗流能量方程	178
10.5 孔隙介质中不可压缩流体稳定运动	178
10.6 孔隙介质中单相液体的非稳定渗流	181
10.7 气体渗流	183
10.8 多相渗流	186
习 题	187
第 11 章 流体力学的实验研究方法	189
11.1 流动相似原理	189
11.2 相似准则	190
11.3 量纲分析	192
11.4 工程模型研究	195
11.5 流场测试技术	197
习 题	202

附录 A 场论初步	204
附录 B 张量初步	208
附录 C 流体力学常用公式	210
参考文献	214

第0章 绪论

0.1 流体力学的研究内容和应用

0.1.1 流体力学的研究对象

流体力学(Fluid Mechanics)是力学的一个分支,是研究流体,包括液体(liquid)和气体(gas),在外力作用下宏观平衡及运动的规律,以及流体与其他运动形态之间相互作用规律的科学。

流体力学中研究得最多的流体是水和空气。除水和空气以外,流体还包括作为汽轮机工作介质的水蒸气,润滑油,地下石油,含泥沙的江水,血液,超高压作用下的金属和燃烧后产生的成分复杂的气体,高温条件下的等离子体,等等。它的主要基础是牛顿运动定律(Newton's law of motion)和质量守恒定律(mass conservation law),还要用到热力学定律(thermodynamic law),有时还用到宏观电动力学的基本定律(basic laws)、本构方程(constitutive equation)和物理学、化学的基础知识。

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科。它的研究对象随着生产的需要与科学的发展在不断地更新、深化和扩大。20世纪50年代以前,它主要围绕航空、航天、大气、海洋、航运、水利和各种管路系统等方面,研究流体运动中的动量传递(momentum transfer)问题,即局限于研究流体的运动规律,以及流体与固体、液体或大气界面之间的相互作用力问题。50年代以后,能源、环境保护、化工、油气开采、采矿和土木建筑等领域中的流体力学问题,逐渐受到重视。这类问题的特征是:尺度小,速度低,并在流体运动过程中还伴随有传热传质(heat and mass transfer)现象。近年来,流体的对流传热、传质问题研究受到高度重视,并获得巨大进展。这样,流体力学的研究对象,从流体的动量扩展到它的热量与质量传递,即除了研究流体的运动规律外,还要研究它的传热、传质规律;在固体、液体或气体界面处,不仅研究相互之间的作用力,而且还需要研究它们之间的传热、传质规律。

气象、水利的研究,船舶、飞行器、叶轮机械和核电站的设计及其运行,可燃气体或炸药的爆炸,生物体内体液的循环,以及天体物理的若干问题等,都广泛地用到流体力学知识。许多现代科学技术所关心的问题既受流体力学的指导,同时也促进了它不断地发展。1955年后,电子计算机的发展又给予流体力学以极大的推动。

流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。从流体作用力的角度,可分为流体静力学、流体运动学和流体动力学;从对不同“力学模型(mechanical model)”的研究来分,有理想流体动力学(ideal fluid mechanics)、粘性流体动力学(viscous fluid dynamics)、紊流流体动力学(turbulent dynamics)、不可压缩流体动力学(incompressible fluid dynamics)、可压缩流体动力学(compressible fluid dynamics)和非牛顿流

体力学(non-Newtonian fluid dynamics)等,还有二相或多相流体动力学(two-phase or more phase fluid dynamics)及多孔介质流体力学。

0.1.2 流体的概念及其性质

根据现代科学的观点,物质可分为五种状态:固态、液态、气态、等离子态和凝聚态。液体和气体统称为流体。流体是一种具有流动性的变形体,它与弹性固体的区别在于当受外力作用时,其变形的形式不同。当对流体施加剪切外力时,不论此外力如何小,它总会发生变形,并且将不断地继续变形下去。这种不断继续变形的运动称为流动(flow)。

流体主要具有以下物理性质。

- 流动性(flow property)——流体是在剪切外力作用下会发生流动的物体,它不能在承受剪切力的同时,使自己保持静止状态。流体的这个宏观性质称为流动性。受到切应力作用发生连续变形的流体称为运动流体(motion fluid)。不受切应力作用的流体称为静止流体(static fluid)。流体中存在切应力是流体处于运动状态的充分必要条件。

- 可压缩性(compressible property)——流体在受到一定压力差或温度差的条件下,其体积或密度可以改变的性质称为可压缩性。流体的可压缩性通常用体积压缩系数 β_p 来表示。流体的体积压缩系数(volume compressive coefficient)定义为,在一定温度下,单位压力增量产生的体积相对减少率,即

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

体积压缩系数 β_p 的单位是压力单位的倒数($1/\text{Pa}$),恒为正值。流体的可压缩性也可用体积压缩系数 β_p 的倒数即体积弹性模量(volume modulus of elasticity) $E_v = 1/\beta_p$ 来表示。

真实流体都是可以压缩的,其压缩程度依赖于流体的性质和外界条件。液体在通常的压力或温度下,压缩性很小,可作为不可压缩流体处理。对于气体,温度和压力的变化均会显著影响其可压缩性;如果所受压力差较小,运动速度较小,并且没有很大的温度差时,实际上所产生的体积变化不大,可近似地将气体视为不可压缩的。

- 粘性(viscosity)——流体在静止时虽不能抵抗切应力,但在运动时,对相邻两层流体间的相对运动,即相对滑动速度却是有抵抗力的,这种抵抗力称为粘性应力(viscous stress)。流体所具有的这种抵抗流体相对滑动或普遍说来抵抗变形的性质称为粘性。粘性大小依赖于流体的性质,并显著地随温度而变化。当流体的粘性较小、运动的相对速度也不大时,所产生的粘性应力相对于其他类型的力如惯性力可忽略不计,近似地把流体看成是无粘性的,这样的流体称为理想流体。因此可以将流体分为理想流体(ideal fluid)和粘性流体(viscous fluid)两大类。

流体的粘性通常用动力粘性系数(coefficient of dynamic viscosity)(也称粘度) μ 来表示,其单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$;也可用运动粘性系数(coefficient of kinematic viscosity)(也称为运动粘度) $\nu = \mu/\rho$ 来表示,其单位为 m^2/s 。

- 流体还有热传导(thermal conduction)及扩散(diffusion)等性质。当流体中存在着温度差时,温度高的地方将向温度低的地方传送热量,这种现象称为热传导。当流体为两种以上物质的混合物,且存在某组分浓度差时,浓度高的地方将向浓度低的地方输送该组分的物质,这种现象称为扩散。

0.1.3 流体力学在工程实际中的应用

流体力学在工程实际中有着广泛的应用。

航空工程和造船工业中的基本问题,如飞机及船体的外形设计、操纵性、稳定性等向流体力学提出了广泛的研究课题,并促使流体力学得到了很大的发展。20 世纪初,世界上第一架飞机出现以后,飞机和其他各种飞行器得到迅速发展。20 世纪 50 年代开始的航天飞行,使人类的活动范围扩展到其他星球和银河系。航空航天事业的蓬勃发展是同流体力学的分支学科——空气动力学和气体动力学的发展紧密相连的。目前已经发展为超音速空气动力学、稀薄空气动力学等。这些学科是流体力学中最活跃、最富有成果的领域。

石油和天然气的开采、地下水的开发利用,要求人们了解流体在多孔或缝隙介质中的运动,这是流体力学分支之一——多孔介质流体力学——研究的主要对象。多孔介质流体力学还涉及土壤盐碱化的防治,化工中的浓缩、分离和多孔过滤,燃烧室的冷却等技术问题。

沙漠迁移、河流泥沙运动、管道中煤粉输送、化工中气体催化剂的运动等,都涉及流体中带有固体颗粒或液体中带有气泡等问题,这类问题是多相流体力学研究的范围。

等离子体(plasma)是自由电子、带等量正电荷的离子以及中性粒子的集合体。等离子体在磁场作用下有特殊的运动规律。研究等离子体的运动规律的学科称为等离子体动力学和电磁流体力学,它们在受控热核反应、磁流体发电、宇宙气体运动等方面有广泛的应用。

风对建筑物、桥梁、电缆等的作用使它们承受载荷和激发振动;废气和废水的排放造成环境污染;河床冲刷迁移和海岸遭受侵蚀……研究这些流体本身的运动及其同人类、动植物间的相互作用的学科称为环境流体力学(environmental fluid mechanics),其中包括环境空气动力学(aerodynamics)、建筑空气动力学。这是一门涉及经典流体力学、气象学(meteorology)、海洋学(oceanography)和水力学(hydraulics)、结构动力学(structural dynamics)等的新兴边缘学科。

生物流体力学研究人体或其他动植物中有关的流体力学问题,例如血液在血管中的流动,心、肺、肾中的生理流体运动和植物中营养液的输送。此外,还研究鸟类在空中的飞翔、动物在水中的游动,等等。

近年来,科学技术飞速发展,流体力学与其他学科相互渗透,形成了一系列边缘学科,如电磁流体力学(electromagnetic fluid mechanics)、化学流体力学(chemical fluid mechanics)、高温气体力学(high-temperature gas mechanics)、爆炸力学(explosive mechanics)、生物流体力学(biomechanics of fluid)、地球流体力学(terrestrial fluid mechanics)等。这些学科的出现使得流体力学这一古老学科更加充满朝气。

可见,流体力学既是一门基础学科,同时又是一门应用科学。

0.2 流体力学发展沿革

第一个对流体力学学科的形成作出贡献的是古希腊的阿基米得(Archimedes),他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学(fluid statics)的基础。

流体力学是在认识与改造自然的斗争中,随着实践经验的不断积累、技术与知识水平的逐渐提高而形成和发展起来的。这一过程大致可分为五个时期:

• 第一时期:公元前 20 世纪前。我们的祖先在制作工具的过程中,提出了抛射体在流体中的运动问题,意识到为了稳定飞行方向、减少阻力、扩大射程必须把石器制作得尽量接近球形;掌握了开沟引渠、修筑田埂技术;出现了利用风力推动船舶前进的工具——风帆;利用孔口出流原理制成计时用的陶制单壶滴漏。

• 第二时期:公元前 20 世纪至 17 世纪下半叶。为了发展农业、便利交通和改善饮用水,各文明古国均大力整治河道,兴建水利,开凿运河和发展灌溉,利用地下水。中国发明了利用反作用原理控制船舶航向的木橹和尾舵;墨子对浮力现象作了仔细观察和定性概括;阿基米得提出了浮力的定量理论;《黄帝内经》中确定了人体的血液循环理论;达·芬奇重视观察与实验方法,描绘和叙述了许多重要流动现象,正确地叙述了相对性原理和归纳了定常流动的连续性原理;伽利略首先将实验方法引入力学,并用以研究运动物体的阻力;帕斯卡等通过现场测量,提出流体静力学的基本关系式,进行了旋涡实验;马里奥特发明了测量运动物体阻力的天秤。

• 第三时期:17 世纪下半叶至 20 世纪初叶。这是流体力学初步形成与发展时期,逐步建立与发展了解决流体力学问题的理论与实验方法,并初步加以利用。牛顿(Newton)利用理论与实验相结合的方法,研究运动物体所受的阻力(resistance),并首先提出粘性流体的剪应力(shear stress)公式,为建立粘性流体的运动方程组创造了条件;皮托(Pitot)发明了测量流体总压的皮托(Pitot tube)管;伯努利(Bernoulli)提出著名的定常不可压缩流体的伯努利定理(Bernoulli theory);罗蒙诺索夫提出质量守恒定律;达兰贝尔(d'Alembert)在研究物体阻力时获得达兰贝尔佯谬(d'Alembert paradox),并提出流体的连续性方程;欧拉(Euler)提出流体运动的描述方法和无粘性流体运动的方程组,成为流体力学的奠基人;拉格朗日(Lagrange)引进流函数概念,并获得无旋流动所应满足的动力学条件,提出求这类流动的复位势法,完善了无粘性无旋流动的基本理论;傅立叶(Fourier)与菲克(Fick)分别提出傅立叶导热公式和菲克第一扩散定律,为研究流体的传热传质问题奠定了基础;纳维和斯托克斯建立了不可压缩与可压缩粘性流体的运动方程组,开始了粘性流体运动的研究;亥姆霍兹引进涡旋的基本概念,提出了涡旋定理(vortex theory),成为无粘性有旋运动的创始人;雷诺(Reynolds)用不同直径的圆管进行一系列实验,发现流动有两种状态,即层流(laminar flow)与紊流(turbulence)。

• 第四时期:20 世纪初叶至中叶:主要围绕发展航空航天事业的需要进行研究。普朗特(Prandtl)学派从 1904 年到 1921 年逐步将 N-S 方程(Navier-Stokes equation)作了简化,从推理、数学论证和实验测量等各个角度,建立了边界层理论(boundary layer theory),能实际计算简单情形下,边界层内流动状态和流体同固体间的粘性力(cohesive force)。同时,普朗特又提出了许多新概念,并被广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中去。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力(friction drag),使上述两种情况得到了统一。20 世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展,期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况和阻力等问题,这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。20 世纪初,以儒柯夫斯基、恰普雷金、普朗特等为代表的科学家,开创了以无粘不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼怎样会受到举力,从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性,使人们重新认识无粘流体的理论,肯定了它指导工程设计的重大意义。机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无粘流体(non-viscous fluid)理论同粘性流体(viscous fluid)的边界

层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高到 50m/s 以上,又迅速扩展了从 19 世纪就开始的、对空气密度变化效应的实验和理论研究,为高速飞行提供了理论指导。20 世纪 40 年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,进而实现了航天飞行,使气体高速流动的研究进展迅速,形成了气体动力学、物理-化学流体动力学等分支学科。这些巨大进展是和采用各种数学分析方法和建立大型、精密的实验设备和仪器等研究手段分不开的。从 20 世纪 50 年代起,电子计算机不断完善,使原来用分析方法难以进行研究的课题,可以用数值计算方法来进行,出现了计算流体力学这一新的分支学科。与此同时,由于民用和军用生产的需要,液体动力学(liquid dynamics)等学科也有很大进展。20 世纪 60 年代,根据结构力学(structured mechanics)和固体力学(solid mechanics)的需要,出现了计算弹性力学问题的有限元法。经过十多年的发展,有限元分析(finite element analysis)这项新的计算方法开始在流体力学中应用。

- 第五时期:20 世纪中叶以后:流体力学的研究内容有了明显的扩大,开始研究气象、海洋、石油、化工、能源、环保和建筑等领域中的流体力学问题,并与有关邻近学科相互渗透,形成许多新分支或交叉学科,如计算流体力学(calculating fluid mechanics)、实验流体力学(experimental fluid mechanics)、可压缩气体力学(compressive fluid mechanics)、磁流体力学(magnetic fluid mechanics)、化学流体力学(chemical fluid mechanics)、多相流体力学(more-phase fluid mechanics)、环境流体力学(environmental fluid mechanics)、渗流流体力学(seepage fluid mechanics)、生物流体力学(biomechanics of fluid)等。

综观流体力学的发展历史,可以看出:

生产和生活的需要是产生和发展科学技术的动力。没有水利、化工、航天、航空、能源等方面的需要,就没有现在的流体力学;

流体力学中的一切重要现象和原理,几乎都是通过实验的方法发现的,实验方法对流体力学的发展具有特别重要的意义;

流体力学的研究内容遵循从简单到复杂、从具体到抽象、从特殊到一般的原则;

流体力学中仍有一些重要的基本问题如紊流、涡旋运动、流动的稳定性(flow stability)、非定常流动等未获圆满解决,有待于流体力学工作者进一步努力。

0.3 连续介质假设

连续介质假设(continuum hypothesis)认为流体质点连续地充满了流体所在的整个空间,流体质点所具有的宏观物理量(如质量、速度、压力、温度等)满足一切应该遵循的物理定律和物理性质,如牛顿定律(Newton's law)、质量守恒定律(conservation of mass law)、能量守恒定律(conservation of energy law)、热力学定律(thermodynamic law)。但流体的某些物理常数和关系还必须由实验决定。连续介质假设的基础就是由于宏观问题的特征尺度和特征时间如机翼和翼弦、机翼的振动周期与分子间距离及碰撞时间相比大得不可比拟,个别分子行为几乎不影响大量分子统计平均后的宏观物理量,因此在考虑流体宏观运动时不必刻意考虑分子结构,可以认为真实流体所占有空间可近似地看做由连续流体质点连续地、无空隙地充满着。所谓流体质点是宏观充分小、微观充分大的分子团,与所研究问题的特征尺寸相比充分小,使得分子团内的平均物理量可被看成均匀不变的,因为可以把它近似看成几何上没有维度的一个点,与分子运动尺寸比要足够大,但其中要有大量分子。对分子团进行

统计平均后,能得到稳定平均值,少数分子出入分子团不影响稳定平均值。

在时间上,也是如此微观充分长,即与碰撞时间比,在这段时间内进行多次碰撞,进行统计平均能得到稳定数值。在宏观上,与特征时间比足够小,才能看成为一个瞬间。

实际上,连续介质假设是合理的。例如,在1个大气压、0℃时,1cm³体积中所含气体分子约为 2.7×10^{19} ,即使在 10^{-9} cm³这宏观上很小的体积内,也有 2.7×10^{10} 个分子。从微观上这体积还很大,在相同条件下每立方厘米气体分子在一秒钟内要碰撞 10^{27} 次,因而在1μs这宏观上很短的时间内,在 10^{-9} cm³内分子仍要碰撞 10^{14} 次。另外,在个别情况下连续介质假设也可以不成立,如导弹和卫星飞行,分子间距离太大,虽然可以获得稳定平均值的分子团,但却不能视为一个质点,又如激波内气体运动,激波尺寸与自由路程等价,只能将激波内的流体看成分子。

0.4 流体力学的研究方法

在力学中,广泛采用了抽象的理论模型,如质点(particle),质点系(particle system),刚体(rigidity),连续介质(continuum)等。理论力学就是研究力学的一般性原理和运动规律,以及质点、质点系、刚体这些理论模型的运动规律。研究连续介质力学理论运动规律的学科称连续介质力学(continuum mechanics),分为固体力学和流体力学两个分支。

流体力学有实验研究、理论分析和数值计算三种研究方法。

0.4.1 实验研究方法

实验研究(experimental method)包括现场观测和实验室模拟两个方面。

现场观测是对自然界固有的流动现象或已有工程的全尺寸流动现象,利用各种仪器进行系统观测,从而总结出流体运动的规律,并借以预测流动现象的演变。过去对天气的观测和预报,基本上就是这样进行的。

不过,现场流动现象的发生往往不能控制,发生条件几乎不可能完全重复出现,影响到对流动现象和规律的研究;现场观测还要花费大量物力、财力和人力。因此,人们建立实验室,使这些现象能在可以控制的条件下出现,以便于观察和研究。实验能显示运动特点及其主要趋势,有助于形成概念,检验理论的正确性。

二百年来,流体力学发展中每一项重大进展都离不开实验。现场观测常常是对已有事物、已有工程的观测,而实验室模拟却可以对还没有出现的事物、没有发生的现象(如待设计的工程、机械等)进行观察,使之得到改进。因此,实验室模拟是研究流体力学的重要方法。

0.4.2 理论分析方法

理论分析(theoretical analysis)是根据流体运动的普遍规律如质量守恒(mass conservation)、动量守恒(momentum conservation)、能量守恒(energy conservation)等,利用数学分析的手段,研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。

理论分析的步骤大致如下:

① 建立“力学模型(model of mechanics)”,即针对实际流体的力学问题,分析其中的各种矛盾并抓住主要方面,对问题进行简化而建立反映问题本质的“力学模型”。流体力学中最常用的基本模型有:连续介质、牛顿流体、不可压缩流体、理想流体(ideal fluid)、平面流动