

流 体 力 学

姜兴华 禹华谦
陈春光 谢永曜 编

西南交通大学出版社

内 容 简 介

全书共分为十章,包括绪论、流体静力学、流体运动的基本概念和基本方程、量纲分析和相似理论、能量损失和有压管流、流体的旋涡运动、不可压缩理想流体的无旋运动、粘性流体动力学基础、边界层理论、气体的一元流动。各章配备一定量的例题与习题,书末附有习题答案。

本书可作为机械类各专业、热能、动力、暖通、给排水、工程力学及土建类各专业本科的“流体力学”课程教材,亦可作为相应大专的教材,还可作为研究生、教师与有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / 姜兴华等编. — 成都: 西南交通大学出版社, 1999.9

ISBN 7-81057-362-4

I. 流... II. 姜... III. 流体力学 高等学校 教材
IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 49012 号

流 体 力 学

姜兴华 禹华谦 编
陈春光 谢永曜

*

出 版 人 宋绍南

责任编辑 徐静云

封面设计 郑 宏

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031)

成都市报华印装厂印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 16.75

字数: 405 千字 印数: 1~2000 册

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-362-4/O·106

定价: 22.00 元

前 言

流体力学不仅是工程力学、热能动力、流体机械、暖通、给排水等专业的主干课程之一，而且还是机械类各专业的重要基础技术课。流体力学在国民经济许多领域都有广泛的应用，土建类各专业亦不例外。

目前教学改革不断深入，存在将专材培养变为统材（大类）培养的趋势，要求流体力学教材基础性强、专业面宽、理论与实践较好结合，同时适当反映当前本学科发展的新成果。我们在原流体力学讲义的基础上，结合我们以往的教学经验，按照上述宗旨重新编写成本教材。

在编写过程中力求突出概念，打好基础，注重研究方法，适当反映专业需要，由简单到复杂，一般与特殊相结合，分层次编写。对打“*”号的章节部分内容可按专业需要、学时多少进行取舍。本书配备一定量的例题，精选习题，使具有一定的代表性、典型性与实践性。教材最后附有各章习题答案。总之，希望本教材有利于读者的自学，有利于读者分析问题与解决问题能力的提高，有利于教师的选用。

本教材主要适用于大学本科，但亦可供专科选用，还可作为研究生、教师与有关工程技术人员参考。

由于作者水平所限，我们能否实现上述意想，还有待广大读者经教学实践的检验。教材中的缺点与错误在所难免，殷切地希望大家批评指正。

本教材共分十章，由西南交通大学与四川工业学院四位教师合编。第一、六、七、九章由姜兴华执笔；第二、三、八章由禹华谦执笔；第四、五章由陈春光执笔；最后第十章由谢永曜执笔。

编 者

1999 年 7 月

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 流体力学的研究内容、应用、研究方法与发展简况	1
§ 1-2 连续介质假设	3
§ 1-3 作用在流体上的力	4
§ 1-4 流动性	6
§ 1-5 密度——流体的惯性	6
§ 1-6 压缩性与膨胀性	8
§ 1-7 粘性——分子动量输运特性	11
§ 1-8 导热性——分子能量输运特性	16
§ 1-9 扩散性——分子质量输运特性	17
* § 1-10 液体的表面张力与毛细（管）现象	17
习 题	18
第二章 流体静力学	20
§ 2-1 流体静压强及其特性	20
§ 2-2 流体平衡的微分方程及其积分	21
§ 2-3 流体静力学基本方程	24
§ 2-4 压强的计量及量测	25
§ 2-5 液体的相对平衡	29
§ 2-6 静止液体作用在平面上的总压力	31
§ 2-7 静止液体作用在曲面上的总压力	33
习 题	37
第三章 流体运动的基本概念和基本方程	43
§ 3-1 描述流体运动的方法	43
§ 3-2 流体运动的若干基本概念	44
§ 3-3 系统与控制体	48
§ 3-4 流体运动的连续性方程	48
§ 3-5 流体微团的运动分析	51
§ 3-6 理想流体的运动微分方程及其积分	54
§ 3-7 伯努利方程	57

§ 3-8 动量方程	63
§ 3-9 动量矩方程	67
习 题	68
第四章 量纲分析和相似理论	73
§ 4-1 量纲分析的概念和原理	73
§ 4-2 量纲分析法	75
§ 4-3 流动相似性原理	78
§ 4-4 相似准则	80
§ 4-5 模型律	82
习 题	84
第五章 能量损失和有压管流	86
§ 5-1 沿程损失和局部损失	86
§ 5-2 层流和紊流	86
§ 5-3 管道沿程阻力的基本方程	88
§ 5-4 圆管中的层流运动	90
§ 5-5 紊流特征及紊流切应力	92
§ 5-6 圆管中的紊流运动	95
§ 5-7 管内流动的沿程损失	98
§ 5-8 局部损失	102
§ 5-9 管道流动计算	105
§ 5-10 孔口和管嘴出流	111
* § 5-11 水击简介	114
习 题	117
第六章 流体的旋涡运动	121
§ 6-1 涡线、涡管、涡束与涡强 (涡通量)	122
§ 6-2 速度环量, 斯托克斯定理	123
§ 6-3 汤姆生定理与拉格朗日定理	127
§ 6-4 亥姆霍兹旋涡三定理	128
§ 6-5 旋涡的诱导速度——毕奥—萨伐尔定律	130
习 题	133
第七章 不可压缩理想流体的无旋运动	135
§ 7-1 无旋流动的速度势	135
§ 7-2 平面流动的流函数	137
§ 7-3 势流叠加原理与奇点法	140
§ 7-4 基本平面势流	141

§ 7-5	一些基本平面势流叠加的例子	147
§ 7-6	平行直线流绕圆柱体的无环量流动	150
§ 7-7	平行直线流绕圆柱体的有环量流动,库塔—儒可夫斯基升力公式	152
§ 7-8	复势与复速度	155
§ 7-9	绕流物体的勃拉休斯合力与合力矩公式	158
* § 7-10	任意形状柱体绕流的库塔—儒可夫斯基升力公式	160
§ 7-11	物体平面绕流的保角变换法	161
§ 7-12	儒可夫斯基翼型绕流	164
§ 7-13	不可压缩理想流体空间轴对称势流	167
习 题		171
第八章	粘性流体动力学基础	174
§ 8-1	粘性流体的运动微分方程 (纳维—斯托克斯方程)	174
§ 8-2	两同心圆柱体间的流动	178
§ 8-3	两平行平板间的流动	181
§ 8-4	两倾斜平板间的缝隙流动 (二元润滑理论)	182
§ 8-5	绕圆球的小雷诺数流动	185
§ 8-6	紊流的基本方程——雷诺方程	186
习 题		188
第九章	边界层理论	190
§ 9-1	边界层概念	190
§ 9-2	不可压缩流体的边界层基本微分方程	192
§ 9-3	平板层流边界层的勃拉休斯相似解	194
§ 9-4	边界层动量积分关系式,位移 (排挤) 厚度与动量损失厚度	197
§ 9-5	平板层流边界层的近似解	200
§ 9-6	平板紊流边界层的近似解	201
§ 9-7	平板混合边界层的近似解	204
§ 9-8	曲面边界层的分离现象	206
§ 9-9	绕流物体的阻力,阻力系数	208
* § 9-10	卡门涡街 (列)	211
习 题		213
第十章	气体的一元流动	215
§ 10-1	音速与马赫数	215
§ 10-2	一元定常等熵气流的基本方程	218
§ 10-3	一元定常等熵气流的基本特性	220
§ 10-4	气流参数与通道面积的关系	223
§ 10-5	喷管	225

§ 10-6 有摩擦的管内流动	229
§ 10-7 有热交换的管内流动	234
§ 10-8 激波	238
习 题	248
附 录 10-1 气体动力函数表 ($k=1.4$)	250
附 录 10-2 气体动力函数表 ($k=1.3$)	250
附 录 10-3 有摩擦一元流动 (范诺线, $k=1.4$)	251
附 录 10-4 有热交换一元流动 (瑞利线, $k=1.4$)	252
附 录 10-5 正激波表 ($k=1.4$)	253
各章习题答案	254
参考文献	260

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学的研究内容、应用、研究方法与发展简况

一、研究内容

流体力学是近代力学的一大分支，它是研究流体（包括液体、气体与等离子体）的平衡和机械运动规律以及流体与周围物体之间相互作用的科学，主要是确定流体的速度分布、压强分布与能量损失，以及流体与固体相互间的作用力与作用力矩。

本书主要阐述不可压缩流体的平衡与机械运动规律，但最后一章还专门讨论可压缩流体的基本理论。本书从工程实践的要求出发，并贯彻由简到烦、由易到难的教学原则，先主要叙述一元流动的基本规律，而后主要研究二元乃至三元流动的一般规律。当然，流体力学可划分为理想流体动力学（包括静力学）、粘性流体动力学与气体动力学三大部分。

流体力学以物理学与一般力学等为基础，又由于流体具有一定的物理特性，因而流体力学与固体力学有着一定的联系与区别。

二、应 用

流体力学是一门技术基础课，基础性很强，同时在工程技术中又有广泛的应用，与我国“四化”建设有着密切的关系。航空、宇航、造船、航运、机械、动力、水利、电力、铁路、公路、土建、冶金、化工、石油、环保、海洋、气象、天文、生物等部门无不涉及流体力学问题。在航空与造船工业中，各种飞机与船舶的外形设计与推进问题的解决都需要依靠流体力学理论，近代火箭技术与宇航事业对流体力学又提出了一系列复杂的问题和要求。在机械工业中，润滑、冷却、液压与液力传动、发动机中的燃烧、进排气管中的流动与增压问题、气力输送与气动控制问题的解决，都离不开流体力学的原理。在动力机械方面，为了提高水轮机、蒸汽透平、燃气轮机、水泵与压气机的功率和效率，都需利用流体力学理论设计形状合理、性能好的转子叶片、导流片及流道。在铁路与公路运输中，列车和汽车的空气阻力、列车制动、风流引起的桥梁振动、隧道与地下铁道中的通风等方面亦存在重要的流体力学问题。在水利工程中，水利枢纽、水库、水力发电站的设计与建造、洪峰的预报、河流、泥沙、波浪和渗流对水工建筑物的作用、水力机械化施工等都与流体力学问题紧密地结合在一起。土木建筑中的给水、排水和采暖、通风亦存在许多流体力学问题。在冶金工业中，也会遇到像气体炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动以及冷却、通风等流体力学问题。化学工业中的流体力学问题也很多，如各种化工设备与管道中流体的流动，而且大部分化学工艺流程都伴随有化学反应，存在传质与传热的流动问题。石油工业中亦有大量的流体力学问题，如油、水、气的渗流问题，油、气的自喷、抽吸和输送问题，还有原油的提炼、分解等。在环保工程中，对空气和水环境的监测和预报，大气和水污染的迁移、扩散及对周围环

境的侵蚀与影响，空气中液滴与液体中颗粒、气泡的运动，对流体流动的控制和利用等存在繁多的流体力学问题。在医学与生物工程中，心血管与呼吸系统疾病的防治、人造心脏、心肺机与呼吸器等的设计都和流体力学有着密切的关系。海洋工程中的波浪、环流与潮汐以及气象中的气旋、环流与季风等都存在大量的流体力学问题。即使天文方面，研究星云的运动及其相互作用，并用来解释星云、星球和宇宙的起源与演化，也运用了流体力学理论。

流体力学在工程技术中应用的例子不胜枚举。流体力学还在广泛的工程技术领域中不断向纵深发展，并与其它学科结合与交叉，形成了许多新分支与边缘学科，如工业流体力学、稀薄气体动力学、电磁流体力学、多相流体力学、非牛顿流体力学、环境流体力学、物理流体力学、化学流体力学、生物流体力学等等。

流体力学和固体力学有着密切的关系。流体力学与弹塑性力学同属于连续介质力学范畴，都采用连续介质力学的一般方法研究问题，就是基本方程亦有一定相似之处，如流体力学中的纳维—维托克斯方程与弹性力学中的拉麦方程，流体力学中的边界层概念应用到弹性力学板壳问题中得到了边缘效应方程，甚至在一定条件下固体可当作流体处理，如岩土定向爆炸、与固体物质的聚能爆炸中，爆震波的传播可当作气体中激波的传播。流变学就是统筹研究流体和固体的形变与流动。

三、研究方法与发展简况

流体力学采用实验研究、理论分析与数值计算的方法研究流体的平衡与机械运动规律。在不同的历史时期兴起不同的研究方法。

1. 实验研究法的开始

流体力学是从不断总结生产经验与实验研究基础上产生和逐渐发展起来的。18 世纪中叶以前是流体力学萌芽与发展初期，那时主要运用初等数学解决流体静力学与运动学问题，只涉及少量的流体动力学问题，实验设备与量测手段也比较简单。例如，我国墨子（约公元前 478—前 342）对浮力原理的初步探讨，公元前 300 年我国都江堰灌渠工程的治水经验，古希腊阿基米德（Archimede，公元前 287—前 212）原理，1643 年建立的托里拆里（Torricelli）原理，1650 年建立的帕斯卡（Pascal）原理，伽利略（Gallileo，1564—1642）及牛顿（Newton，1642—1727）用实验方法研究在流体中运动物体的阻力。

2. 理论分析法的兴起

18 世纪中叶以后开始形成一门独立的流体力学学科，此时开始运用高等数学，采用理论分析法研究流体的平衡与机械运动规律，流体动力学得到了较大的发展。理论分析法一般是在实践与实验的基础上对运动流体提出合理的假设，建立简化的力学模型，再根据物理与一般力学中的原理与定理，建立基本方程，最后利用边界条件及初始条件求数学解析解，并与实验作比较。理论分析法包括有限体积法、微元体积法、速度势法、保角变换法等。在这方面，欧拉（L. Euler，1707—1783）与拉格朗日（Lagrange，1736—1813）是“理论流体力学”的奠基人。在这一时期往往理论与实验相分离，一方面形成注重理论的“古典流体力学”，但不能很好解决一些实际流体力学问题，如 1752 年从理论上提出了关于实际流体中运动物体阻力为零的所谓“达朗伯（Dalembert）疑题”，另一方面又产生了偏重实验的“水力

学”，如伯努利（D. Bernoulli, 1700—1782）在实验研究孔口出流与变截面管流的基础上得到了流体运动的能量关系式，即著名的伯努利方程。直到 19 世纪上半叶，由于纳维（L. Navier, 1823）和斯托克斯（G. G. Stokes, 1845）建立了粘性流体的运动微分方程——称为 N-S 方程，19 世纪末雷诺（O. Reynolds）又发现了两种流体运动状态——层流与紊流，并建立了不可压缩流体紊流运动的基本方程，使理论与实验较好地结合在一起，开始形成“粘性流体力学”。19 世纪末还产生了实验性理论——雷诺的相似理论与瑞利（Reyleigh）的量纲分析法，进一步为流体力学的实际应用创造了良好的条件。

20 世纪初以来，由于航空、航天、涡轮机等工业的发展，空气动力学与气体动力学取得了极大的成就，特别是库塔（W. M. Kutta）与儒可夫斯基（H. E. Жуковский）建立了机翼理论，1904 年普朗特（L. Prandtl）又提出了著名的边界层理论，这使得流体力学理论进一步完善。

3. 数值计算法的发展

本世纪 60 年代后由于计算方法与电子计算机的发展，形成了“计算流体力学”，广泛地采用了有限差分法、有限单元法、边界元法与谱方法等数值计算法。数值计算法能求解许多理论分析法无法完全解决的问题，利用数值模拟还节省了实验研究法所需的大量人力、物力、财力与时间。

但是，数值计算法无法替代实验研究法与理论分析法。首先，理论分析与数值计算结果需要获得实验的验证与进一步启迪。近代实验设备与实验手段日趋完善，如采用先进的流动显示设备、风洞与水洞、激光流速仪，用计算机对实验进行数据采集、检测与控制。此外，理论分析法是数值计算的基础，对实验研究亦具有指导意义。理论分析法在近代亦有较大的发展，如流动稳定性理论、非定常流动理论、粘性流体的三元流动理论、跨音速理论等，理论分析法还采用张量分析、拓扑学等数学工具，并与相关学科相互渗透，形成许多新分支与边缘学科（如前所述）。总之，实验研究、理论分析与数值计算这三种方法相互补充、相互促进、相互渗透，为流体力学的不断发展作出巨大的贡献。

§ 1-2 连续介质假设

从物理学知道，流体和固体一样，由无数不规则随机热运动的分子构成，分子之间有着比分子尺度大得多的间隙，所以从微观上讲流体是离散的，因而流体中各空间点上不同瞬时的物理量是不连续的。

流体力学是一门宏观力学，感兴趣的是流体宏观的平衡与机械运动规律，它不研究微观的分子运动，只考虑大量分子运动的统计平均特性。为此，首先由欧拉在 1753 年提出连续介质力学模型的假设：（1）不考虑分子间隙，认为介质是连续分布于流体所占据的整个空间；（2）表征流体属性的诸物理量，如密度、速度、压强、切应力、温度等在流体连续流动时是时间与空间坐标变量的单值、连续可微函数。这样就可利用数学分析这一有力的数学工具研究确定流体的平衡与机械运动规律。

流体力学属于连续介质力学的范畴。但是，有时还要利用分子运动论与统计力学的观点

来解释流体的物理量、物理现象以及运动规律。例如，密度 ρ 是大量分子的统计平均值 (§ 1-4)，压强 p (§ 1-2) 是无数个流体分子运动及碰撞的结果，温度 T 表征了大量流体分子热运动的平均动能，流体粘性 (§ 1-5) 的产生是由于各流层中流体分子运动及相互作用的结果。在流体力学中经常要考虑体积为无限小但具有大量分子的集合体（称为流体微团）的运动及其统计效应。此外，连续介质假设并不排斥在流体中可存在奇点，即可存在连续函数的不连续点。

在通常的工程问题中连续介质假设是完全合理的，在此基础上获得问题的解与实验结果比较具有足够的精度。研究表明，在标准状态下（1 个物理大气压，即 101 325 Pa，温度为 0℃）1 mm³ 体积中含有 2.7×10^{16} 个空气分子，分子平均自由程为 7×10^{-5} mm，或者含有 3.4×10^{19} 个水分子，分子平均自由程为 3×10^{-7} mm。可见在通常工程问题中，要研究的流体线性尺度或流体微团的大小远远大于分子大小及其运动尺度，所以微团中包含有足够多的分子，足以体现流体的分子统计平均特性。

但是，当所研究问题的特征尺寸接近或小于分子大小及其运动平均自由程时，连续介质假设就不再适用。例如，研究火箭在高空稀薄气体中飞行时稀薄空气的特征尺寸较大，如在 120 km 高空处空气分子的平均自由程为 1.3 m，与火箭的特征尺寸比较具有相同的数量级，此时连续介质假设就不再合理，需要用分子运动论与统计力学的微观方法研究稀薄空气动力学问题。类似地，对于高真空泵与高真空技术中的流体，或者含有空泡的液体与高速掺气水流，亦不能用连续介质力学的方法研究问题。此外，在存在流动的间断面——超音速气流中的激波面的情况下，由于激波面的厚度与分子平均自由程具有相同数量级（约为 10^{-4} mm ~ 10^{-5} mm），因而可认为激波面前后的气流参数发生突变，此时连续介质假设亦不再成立。

§ 1-3 作用在流体上的力

与固体力学一样，在流体力学中作用在流体上的力亦分为质量力与表面力两类。

一、质量力（体积力）

质量力又称为体积力，它是所在力场（如重力场、磁场、电力场）作用于流体各质点（或各微团）的分布力（相应地为重力、磁力、电力）。质量力与周围流体的存在无直接的关系。对于均质流体，总质量力的大小与流体的质量（或体积）成正比。

当运用达朗伯原理研究流体作直线加速运动或曲线运动时需要考虑虚加的惯性力。惯性力也属于质量力。

为方便起见，通常用单位质量的质量力 f 来表示质量力，简称为单位质量力（图 1-1），某点

$$f = \lim_{\Delta M \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta M} = \frac{dF}{dM} \quad (1-1)$$

式中， ΔM 为流体微元体的质量； ΔF 为作用在该

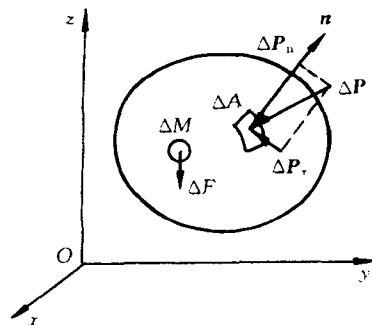


图 1-1 质量力与表面力

微元体上的质量力。只有把流体当作连续介质时，流体中各点才存在上述极限。

在直角坐标中单位质量力表示为

$$\mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k}$$

其中， f_x 、 f_y 、 f_z 分别为单位质量力在坐标轴 x 、 y 、 z 上的分量； $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 为对应坐标轴上的单位矢量。例如，当坐标轴 z 铅垂向上时，单位质量流体的重力分量为

$$f_x = f_y = 0, f_z = -g$$

当应用达朗伯原理研究流体匀加速直线运动时，单位质量惯性力

$$\mathbf{f} = -\mathbf{a}$$

可见，单位质量的惯性力在数值上等于对应的加速度大小，而方向与对应加速度方向相反；但重力与重力加速度同向。

通常单位质量力及其分量是已知的。

二、表面力

在流体力学中，表面力是周围相接触流体作用于所研究流体（分离体）表面上的分布力，它与周围流体的存在有直接的关系。例如，大气压力、水压力与摩擦力都是表面力，当人在风中行走或在水中游泳时就会感受到这种表面力的作用。

可用通过某点微元面积单位面积上的表面力——表面应力 $\mathbf{p}_n$ 来表示表面力（图 1-1），某点

$$\mathbf{p}_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{P}}{\Delta A} \quad (1-2)$$

式中， ΔA 为分离体表面上的微元面积； $\Delta \mathbf{P}$ 为作用在该微面积上的表面力。只有把流体当作连续介质，流体中各点才存在上述极限。该极限 $\mathbf{p}_n$ 是表示通过某点外法向单位矢量为 $\mathbf{n}$ 的微元面积 ΔA 上的应力， $\mathbf{p}_n$ 与 $\mathbf{n}$ 的方位不一定一致。实际运动流体中某点的表面应力 $\mathbf{p}_n$ 取决于该点的位置与微元面积的方位 $\mathbf{n}$ 以及时间变量 t ，也即实际运动流体中点的应力是坐标点的多值函数。

通常将表面应力分解为法向应力与切向应力两个分量。某点的法向应力

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{P}_n}{\Delta A} \quad (1-3)$$

式中 $\Delta \mathbf{P}_n$ 为 $\Delta \mathbf{P}$ 在该微元面积法向的分量。由于流体具有流动性（§ 1-4），所以可以说，流体无法承受拉应力，只有压应力，因此 p 称为压强。至于当液体存在自由表面（液体与气体的交界面）时存在的表面张力（§ 1-10）很小，通常可忽略不计。某点的切向应力（称为切应力或剪应力）

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{P}_\tau}{\Delta A} \quad (1-4)$$

式中 $\Delta \mathbf{P}_\tau$ 为 $\Delta \mathbf{P}$ 在该微元面积上切向分量。

压强与切应力的单位在我国法定计量单位中为帕斯卡（Pascal，通常用 Pa 表示），但有工程上以巴（bar）为压强单位。

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar}$$

此外，压强还采用大气压或液柱高度作单位（见 § 2-4）。

§ 1-4 流 动 性

流体具有流动性，这是流体区别于固体的最根本的物理特性。

流体十分容易变形与流动，这就是流动性。流体不能保持固定的形状，可随容器形状的改变而改变，甚至在允许的条件下可在自重作用下流动。尤其是气体，甚至不能保持一定的体积，可充满它所能达到的整个空间，所以气体的流动性比液体更显著。

流体具有流动性，相应地流体的受力形式就与固体不同。我们知道，固体在平衡和运动时，可承受拉、压、弯、剪、扭，在一定的外力作用下（有时还很大）只发生不大的变形，而且到一定程度就停止变形。若要进一步变形，往往必须再增加力的作用。但是流体由于存在流动性，无论平衡还是运动都无法承受拉应力（当液体有自由表面时存在的表面张力很小，通常可忽略），只能承受压应力。一般流体静止时无法承受剪切力（即不存在静摩擦力），只有变形运动（内部产生相对运动）时才能承受不大的剪应力。这就是说，在微小的剪切力作用下流体平衡就会破坏，只要有充分的时间任其变形，就会产生连续不断的变形，即形成流动。即使外力不变，流体亦会继续变形运动。

流体具有较大的流动性，这是因为与固体相比流体的分子间距大，分子间吸引力（内聚力）小，尤其是气体，因而液体分子可作无规则振动与不大距离的移动，气体分子还可作剧烈的自由运动，而固体分子只能作围绕固定位置的振动。

§ 1-5 密度——流体的惯性

与固体一样，流体亦具有惯性。密度是惯性的度量。流体中某点的密度就是该点单位体积流体的质量，它反映了流体在空间某点的质量密集程度，表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-5)$$

对于连续介质，流体中各点都存在上述极限。在均质流体中，各点的密度相同。此时

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-6)$$

我国法定计量单位中密度的单位为 kg/m^3 。密度 ρ 取决于流体的种类、温度与压强。流体的密度随温度的改变呈现不大的变化。对于液体，压强的影响几乎可忽略。表 1-1 列出了在 1 个标准（物理）大气压与常温时几种常用流体的密度，表 1-2 列出了在 1 个标准（物理）大气压时水、空气与水银在不同温度下的密度。

表 1-1 常用流体的密度

流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m^3)	流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m^3)
蒸馏水	4	1 000	空 气	0	1.293
海 水	15	1 020~1 030	氧	0	1.429
普通汽油	15	700~750	氮	0	1.251
石 油	15	880~890	氢	0	0.089 9
润滑油	15	890~920	一氧化碳	0	1.250
酒 精	15	790~800	二氧化碳	0	1.976
水 银	0	13 600	二氧化硫	0	2.927
熔化生铁	1 200	7 000	水蒸汽	0	0.804

表 1-2 不同温度下水、空气和水银的密度 (kg/m^3)

流 体 名 称	温 度						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.946 5
水银	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350

从表可见, 在 1 个标准 (物理) 大气压时, 4°C 蒸馏水的 $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$, 20°C 空气的 $\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ 。通常情况下水的密度要比空气大 800 多倍。

在工程上还经常采用比容的概念。比容 ν 是密度的倒数, 即单位质量流体的体积。

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (1-7)$$

比容的单位通常是 m^3/kg 。

对于物理与热力学中的理想气体——不考虑分子本身的体积以及分子间作用力的气体, 在流体力学中称为完全气体, 以免与后面即将叙述的理想流体的概念相混淆。在常温常压下一般气体 (如空气、氮、氧、二氧化碳) 都可近似地当作完全气体。完全气体的密度 ρ 或比容 ν 服从下列的状态方程, 称为克拉贝龙 (Clapeyron) 方程:

$$p = \rho RT \quad (1-8)$$

或
$$p\nu = RT \quad (1-8a)$$

式中, 压强 p 为绝对压强 (Pa); T 为绝对温度 (K); R 为气体常数 ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$), 几种常用气体的气体常数 R 值见表 1-3。例如空气, $R = 287\text{ N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 。表中还列出这些气体的比热比 (又称为等熵指数) k 。

表 1-3 标准海平面上 20°C 时常用气体的物理常数

气体种类	气体常数 R ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	定压比热 C_p ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	定容比热 C_v ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	比热比 k	气体种类	气体常数 R ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	定压比热 C_p ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	定容比热 C_v ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	比热比 k
空气	287	1 003	716	1.40	氢	4 120	14 450	10 330	1.40
氮	287	1 040	743	1.40	甲烷	520	2 250	1 730	1.30
氧	260	909	649	1.40	二氧化碳	188	858	670	1.28
氦	2 077	5 220	3 143	1.66	水蒸气	462	1 862	1 400	1.33

在流体力学中会遇到正压流体与斜压流体的概念。正压流体是指密度 ρ 仅仅是压强 p 的函数的流体, 否则就称为斜压流体。例如, 均质流体、等温变化过程与等熵变化过程流体就是正压流体; 而地面附近大气的密度除了与压强有关, 还与温度及湿度有关, 因而是斜压流体。海水的密度不仅与压强有关, 还与温度及含盐度有关, 所以亦是斜压流体。

最后需要指出, 密度的概念与流体的相对密度 (又称为比重) d 不同。液体的相对密度通常是指该液体的密度与 4°C 纯水密度之比值。显然, 相对密度 (比重) d 是一无量纲数。不同液体的相对密度可参见图 1-4 或图 1-5。

§ 1-6 压缩性与膨胀性

流体与固体相比有较大的压缩性与膨胀性。流体的压缩性是指在温度一定时流体的体积或密度随压强改变的性质，而流体的膨胀性是指在压强一定时流体的体积或密度随温度改变的性质。

一、压缩性

流体的压缩性通常用体积压缩系数 β （简称为压缩系数）来表示，它是温度一定而压强升高 1 个单位时流体的体积缩小率，即

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{p}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-9)$$

因为质量一定时 $\rho V = M = \text{常量}$

两边微分得

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

代入前式可得确定 β 的另一式子

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-9a)$$

β 的单位为 $\text{m}^2/\text{N} = 1/\text{Pa}$ 。式 (1-9) 中的负号是考虑到压强 p 增加时体积 V 减小，而 β 应为正值。压缩系数 β 越大，说明了流体越容易被压缩。

压缩系数 β 的倒数 E 叫作体积弹性模量，简称为弹性模量，它是单位体积缩小所需的压强增量，即

$$E = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-10)$$

E 的单位与压强相同，为 $\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$ 。弹性模量 E 越大，说明流体越不容易被压缩，即流体的弹性越大。一定温度下不同压强时水的体积弹性模量 E 值见表 1-4。通常情况下常用流体的 β 值与 E 值见表 1-5。

表 1-4 水的体积弹性模量 E (10^9 Pa)

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	压 强 (MPa)				
	0.490	0.981	1.961	3.923	7.845
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

表 1-5 通常情况下常用流体的 β 值与 E 值

流体种类	β ($10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$)	E (10^9 N/m^2)
二氧化碳	64	1.56
酒精	110	0.909
甘油	21	4.762
水银	3.7	27.03
水	49	2.04

例如，在 20°C 、1 个工程大气压（即 $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$ ）压强时水的体积弹性模量 $E = 1.98 \times 10^9 \text{ Pa} = 2.02 \times 10^4$ 工程大气压，说明了在通常情况下水的体积减小 1% 需要增加 2.02×10^4 工程大气压，即每增加 1 个工程大气压，水的体积才减小约 $1/20\,000$ 。可见液体的压缩性甚小，一般情况下可忽略。当然，与固体相比液体的压缩性还是较大，如常温下的低碳钢，弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，它比水的弹性模量大得多。

相比之下，气体的压缩性要比液体大得多。其压缩性与热力过程有关。例如，对于等温过程，

$$\frac{p}{\rho} = \text{常量}$$

即密度 ρ 与压强 p 成正比，当压强从 1 个大气压增加到 2 个大气压时密度要增加 2 倍，这时必须考虑气体的压缩性。但是，在通常情况下（如外界温度变化不大）若气流速度远小于音速，则流场中由速度改变而引起的压强变化不大，相应的密度变化亦不大。例如，当空气气流速度小于 100 m/s 时，利用伯努利方程（3-32）等可求得流场中的密度变化约小于 5%，此时我们可近似地认为气体与液体一样，亦可不考虑其压缩性，这就是说，在通常情况下运动速度远小于音速的气体的运动规律在定性上与液体完全相同。

二、膨胀性

流体的膨胀性可用体积膨胀系数 α （简称为膨胀系数）表示，它是压强一定而温度升高 1 个单位时流体的体积增加率，即

$$\alpha = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-11)$$

α 的单位为 $1/\text{K}$ 或 $1/^\circ\text{C}$ 。一定压强下不同温度时水的体积膨胀系数见表 1-6， 25°C 时常用流体的体积膨胀系数见表 1-7。

表 1-6 水的体积膨胀系数 α ($1/\text{K}$ 或 $1/^\circ\text{C}$)

压强 (MPa)	温 度 ($^\circ\text{C}$)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.098 1	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
9.807	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
19.61	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
49.03	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
88.26	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

表 1-7 常用流体的体积膨胀系数 α (25℃)

流体种类	α ($10^{-6} 1/K$)	流体种类	α ($10^{-6} 1/K$)
汽油	504	甘油	500
酒精	1 098	水银	181.8
苯	1 386	水	257

液体的体积膨胀系数很小。例如，水在 1 个工程大气压（即 9.81×10^4 Pa）条件下， $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 时 $\alpha = 150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ，说明了温升 1°C 时体积仅增加 $1.5/10\ 000$ ，或者说在 1 个工程大气压条件下水温从 0°C 增加到 100°C ，水的体积仅增加 4.3%。但是气体的膨胀性较大。对于自然对流与传热学中的问题，当气体被加热或冷却时，必须考虑气体的膨胀性。气体的膨胀性与其热力过程有关。例如，对于等压过程

$$\rho T = \text{常量}$$

即 ρ 与 T 成反比，温度 T 增加 1 倍，相应地密度 ρ 就要减小 1 倍。显然这时必须考虑气体的膨胀性。但是，在通常情况下当气流速度远小于音速时，流场中由速度改变而引起的温度变化不大，相应的密度变化亦不大。例如，当空气气流速度小于 100 m/s 时，利用建立在热力学第一定律基础上的能量方程 (10-12) 可求得空气温度变化小于 5°C ，故相应地密度变化约小于 5%，此时可近似地忽略气体的膨胀性。

三、可压缩流体与不可压缩流体

以上说明了液体的压缩性很小，膨胀性亦很小，气体的压缩性与膨胀性虽然较大，但是在通常情况下当气流速度远小于音速时（如小于 100 m/s ），压强与温度变化不大，则密度变化亦不大，此时仍可忽略流体的压缩性与膨胀性。

密度可视为常数的流体称为不可压缩流体。不可压缩流体是一种近似的力学模型，采用这种模型，可大大简化工程问题的求解。

许多工程问题中都可把流体当作不可压缩流体处理。例如，研究水利工程中一般河道与渠道内的水流运动，船舶航行时的流体流动阻力，汽车行驶时的空气阻力，给水、排水与通风工程中渠道与管道内流体的流动，锅炉尾部烟道中烟气的流动。但是，还有另外一些工程问题中必须考虑流体的压缩性。例如，研究高速气流的运动，或动力气象学中高程相差较大（如大气展布高度大于 100 m ）的大气运动，或外加压强变化较大时的气体运动（如活塞运动时气缸中的气体），或气流加速度较大的运动（如燃烧时爆震波的传播、超声波），或温度变化较大（加热或冷却）的气体运动。即使是液体，某些情况下亦要考虑其压缩性，例如水击（又称水锤）问题，水下爆炸及高压液压传动问题中的液体。

例 1-1 求气体等温压缩时的弹性模量。

解 对于等温压缩过程

$$\frac{p}{\rho} = \text{常数}$$

两边微分后得

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{p}{\rho}$$

进一步由式 (1-10) 得