

Gongcheng Liuti Lixue



高等学校“十五”规划教材

工程流体力学

主 编 郭楚文

副主编 李意民 陈更林 徐卫红

126

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/郭楚文主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2002. 4

ISBN 7-81070-513-X

I. 工... II. 郭... III. 工程力学:流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 022033 号

书 名 工程流体力学

主 编 郭楚文

责任编辑 钟 诚

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮码 221008)

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 **印张** 18 **字数** 333 千字

版次印次 2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

印 数 1~1500 册

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

目 录

0 前言	(1)
1 流体的定义与物理性质	(5)
1.1 流体的定义	(5)
1.2 连续介质假设	(5)
1.3 流体的惯性	(6)
1.4 流体的压缩性和膨胀性	(7)
1.5 流体的粘性	(9)
1.6 液体的表面张力	(14)
习题	(17)
2 流体静力学	(19)
2.1 作用于流体上的力	(19)
2.2 流体的静压强及其特性	(21)
2.3 流体静力学基本方程	(22)
2.4 压强的测量	(27)
2.5 液体的相对平衡	(31)
2.6 静止液体对平面的作用力	(35)
2.7 静止液体对曲面的作用力	(38)
2.8 浮力与浮体的稳定性	(41)
习题	(42)
3 流体动力学	(48)
3.1 研究流体运动的方法	(48)
3.2 流体运动的基本概念	(51)
3.3 雷诺输运方程	(57)
3.4 连续性方程	(60)
3.5 动量方程	(61)
3.6 动量矩方程	(65)
3.7 能量方程	(66)

3.8	沿流线的伯努利方程	(67)
3.9	总流的伯努利方程	(69)
3.10	流体动力学基本方程的应用	(73)
	习题	(79)
4	相似理论与量纲分析	(85)
4.1	相似理论与模型试验	(85)
4.2	量纲分析与 π 定理	(92)
	习题	(96)
5	粘性流动和水力计算	(98)
5.1	粘性流体的两种流动状态	(98)
5.2	不可压缩粘性流体的运动 N-S 方程	(102)
5.3	不可压缩粘性流体的层流流动	(108)
5.4	粘性流体的紊流流动	(119)
5.5	沿程损失的实验研究	(124)
5.6	局部损失	(129)
5.7	管道水力计算	(133)
5.8	液体的出流	(142)
	习题	(147)
6	流体的涡旋流动	(155)
6.1	微分形式的连续方程	(155)
6.2	流体微团运动分析	(156)
6.3	涡旋运动的基本概念	(160)
6.4	卡门涡街	(165)
	习题	(168)
7	理想不可压流体的无旋流	(170)
7.1	理想流体的运动微分方程	(170)
7.2	欧拉积分式和伯努利积分式	(171)
7.3	理想流体流动的定解条件	(173)
7.4	速度势和流函数	(175)
7.5	几种简单的平面势流	(178)
7.6	势流叠加原理	(182)
7.7	平行流的圆柱绕流	(185)
7.8	三孔圆柱形探针	(192)
	习题	(194)

8 边界层理论初步	(196)
8.1 边界层的基本概念	(196)
8.2 层流边界层的微分方程	(198)
8.3 动理积分方程	(201)
8.4 边界层厚度定义	(202)
8.5 平板的层流边界层的近似计算	(204)
8.6 边界层的分离	(206)
习题	(209)
9 气体射流	(210)
9.1 无限空间淹没紊流射流的特征	(210)
9.2 圆断面射流的运动分析	(216)
9.3 平面射流	(221)
9.4 温差或浓差射流	(222)
习题	(229)
10 多孔介质中的渗流	(231)
10.1 多孔介质	(231)
10.2 达西定律	(232)
10.3 渗流基本微分方程	(235)
10.4 定解条件和渗流计算方法	(237)
习题	(241)
11 气体动力学初步	(242)
11.1 一元定常等熵气流的基本方程	(243)
11.2 微弱扰动的传播	(245)
11.3 声速与马赫数	(246)
11.4 气流的特定状态	(248)
11.5 激波	(252)
11.6 变截面管流	(259)
11.7 等截面摩擦管流	(265)
习题	(267)
名词英汉对照	(271)
参考文献	(278)

Contents

0	Preface	(1)
1	Fluids and Their Properties	(5)
1.1	The Definition of Fluids	(5)
1.2	Continuum Hypotheses	(5)
1.3	Inertia of Fluids	(6)
1.4	Compressibility and Expansibility of Fluids	(7)
1.5	Viscosity of Fluids	(9)
1.6	Surface Tension of Liquid	(14)
	Problems	(17)
2	Fluid Statics	(19)
2.1	Forces Exerted on Fluids	(19)
2.2	Static Pressure of Fluids and Its Properties	(21)
2.3	Basic Equation of Fluid Statics	(22)
2.4	Measurement of Pressure	(27)
2.5	Relative Equilibrium of Liquid	(31)
2.6	Forces on a Plane Due to Hydrostatic Pressure	(35)
2.7	Forces on a Curved Surface Due to Hydrostatic Pressure	(38)
2.8	Buoyancy and Stability of Floating Bodies	(41)
	Problems	(42)
3	Fluid Dynamics	(48)
3.1	Methods for Studying the Motion of Fluids	(48)
3.2	Basic Concepts of Flow	(51)
3.3	Reynolds' Transport Equation	(57)
3.4	Continuity Equation	(60)
3.5	Momentum Equation	(61)
3.6	Moment Equation of Momentum	(65)
3.7	Energy Equation	(66)
3.8	Bernoulli's Equation along a Streamline	(67)

3.9	Bernoulli's Equation along a Total Flow	(69)
3.10	Applications of Basic Equations of Fluid Dynamics	(73)
	Problems	(79)
4	Similarity	(85)
4.1	Similarity and Model Experiments	(85)
4.2	Dimensional Analysis and π Theorem	(92)
	Problems	(96)
5	Viscous Flow and Hydraulic Calculation	(98)
5.1	Two Flow States of Viscous Fluid	(98)
5.2	Navier-Stokes Equation of Incompressible Viscous Fluid	(102)
5.3	Laminar Flow of Incompressible Viscous Fluid	(108)
5.4	Turbulent Flow of Viscous Fluid	(119)
5.5	Experimental Study on the Head Loss along the Flow Path ...	(124)
5.6	Local Head Loss	(129)
5.7	Hydraulic Calculation for Pipe Networks	(133)
5.8	Flow in open Channels	(142)
	Problems	(147)
6	Vortex Flow	(155)
6.1	Differential Continuity Equation	(155)
6.2	Flow Analysis of Fluid Particles	(156)
6.3	Basic Concepts of Vortex Flow	(160)
6.4	Karman Vortex Street	(165)
	Problems	(168)
7	Irrotational Flow of Ideal Incompressible Fluids	(170)
7.1	Differential motion Equation of Ideal Fluids	(170)
7.2	Euler's and Bernoulli's Integral Equation	(171)
7.3	Initial and Boundary Conditions of Flow of Ideal Fluids	(173)
7.4	Velocity Potential and Stream Function	(175)
7.5	Some Simple Two-dimensional Potential Flows	(178)
7.6	Combination of Potential Flows	(182)
7.7	Straight Line Flow Past a Cylinder	(185)
7.8	Cylindrical Probe	(192)
	Problems	(184)

8	The Introduction to the Theory of Boundary Layer	(196)
8.1	Concepts of Boundary Layer	(196)
8.2	Differential Equation of Laminar Boundary Layer	(198)
8.3	Integral Moment Equation of Boundary Layer	(201)
8.4	The Thickness Definition of Boundary Layer	(202)
8.5	The Approximate Calculation of Laminar Boundary Layer	(204)
8.6	The Separation of boundary layer	(206)
	Problems	(209)
9	Gat Jet	(210)
9.1	Characters of Submerged Turbulent Jet	(210)
9.2	Flow Analysis of Circular Jet	(216)
9.3	Plane Jet	(221)
9.4	Jet with Temperature of Concentration Difference	(222)
	Problems	(229)
10	Seepage in Porous Media	(231)
10.1	Porous Media	(231)
10.2	Darcy's Law	(232)
10.3	Basic Equations of Seepage	(235)
10.4	Initial Conditions, Boundary Conditions and Calculation Methods of Seepage	(237)
	Problems	(241)
11	The Introduction to Aerodynamics	(242)
11.1	Basic Equations of Isentropic Flow	(243)
11.2	The Spread of Weak Disturb	(245)
11.3	Velocity of Sound and Mach Number	(246)
11.4	Special States of Gas Flow	(248)
11.5	Shock Wave	(252)
11.6	Flow Through Pipe with Variational Areas	(259)
11.7	Friction Flow in Pipe with Constant Areas	(265)
	Problems	(267)
	References	(278)

0 前言

一、流体力学发展简史

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。

虽然人们对流体的特性和规律早就有所认识,并大量地应用于生产和生活中,如农业灌溉、水利工程、浮力定律等等,但是直到 17 世纪下叶才逐步建立和发展了解决流体力学问题的理论与实验方法。表 0-1 概略地列出了流体力学的发展过程。

表 0-1 流体力学发展简表

时 期	有 代 表 性 的 事 件
公元前 20 世纪以前	• 在箭的尾部安装一些羽毛一类的配重物保证箭的飞行稳定; • 开沟引渠、修筑田埂,灌溉农业的出现; • 发明独木舟、风帆。
公元前 20 世纪至 17 世纪下叶	• 兴建水利,开凿运河,如大运河和闻名世界的都江堰等; • 发明了利用反作用原理控制船舶航向的木橹和尾舵; • 水车、水磨与风车的出现; • 阿基米德提出浮力定律; • 帕斯卡提出流体静力学的基本关系式。
17 世纪下叶至 20 世纪初叶	• 1678 年牛顿提出粘性流体的剪应力公式; • 1732 年皮托发明了测量流体总压的皮托管; • 1738 年伯努利提出著名的定常不可压缩流体的伯努利定理; • 1775 年欧拉提出流体运动的描述方法和无粘性流体运动的方程组; • 1781 年拉格朗日引进流函数的概念; • 1845 年亥姆霍兹提出了涡旋第一与第二定理; • 1856 年达西通过实验,提出著名的达西公式; • 1883 年雷诺通过实验发现流动有两种状态,即层流与湍流。
20 世纪初叶至中叶	• 1902 年库塔与儒可夫斯基分别提出库塔—儒可夫斯基定理和假定; • 1904 年瑞利首先提出用量纲分析法求流动相似性参数; • 1904 年普朗特在自建水槽中进行了试验后,提出著名的边界层理论; • 1910 年儒可夫斯基首先用共形映射法获得儒可夫斯基理想翼型; • 1920 年 A. 布泽曼改进了 15 年前由普朗特设计建造的 $M=1.5$ 的第一座超声速风洞,并投入使用; • 1947 年第一台电子计算机问世后,数值计算方法继实验与分析方法之后,成为解决流体力学问题的第三种方法。

续表 0-1

时 期	有 代 表 性 的 事 件
20 世纪中叶以后	• 与邻近学科相互渗透,形成许多新分支或交叉学科,如计算流体力学、实验流体力学、可压缩气体力学、磁流体力学、非牛顿流体力学、生物流体力学、多相流体力学、环境流体力学; • 现有的流体力学运动方程组并不能完全准确地描述某些新现象和新问题,必须采用纯实验的方法或实验与计算相结合的方法。

二、流体力学的研究方法

目前,解决流体力学问题的方法有实验、理论分析与数值计算三种。

1. 实验方法

在流体力学的发展过程中,实验方法是最先使用的一种,对流体力学的发展做出过巨大贡献。即使是现在,如果没有实验方法,航空、航天事业和大型水利枢纽等复杂系统仍然无法顺利实现。应用实验方法的主要步骤是:

- (1) 对所给定的问题,选择适当的无量纲相似参数,并确定其大小范围;
- (2) 准备试验条件,其中包括模型的设计制造与设备仪器的选择使用等;
- (3) 制订试验方案并进行试验;
- (4) 整理和分析实验结果,并与其他方法所得的结果进行比较。

实验方法的优点是:能直接解决生产中的复杂问题,能发现流动中的新现象和新原理,它的结果可以作为检验其他方法是否正确的依据。这种方法的缺点是:对不同情况,需作不同的实验,即所得结果的普适性较差。

2. 分析方法

分析方法就是从理论上对所研究的流动问题进行求解。应用分析方法首先根据所给问题的特点,作出合理的假定,建立简化的数学模型;然后根据初始条件与边界条件求出初值问题或边值问题的分析解;最后还必须选取适当的算例,用分析解进行具体的数值计算以检验简化模型的合理性。

分析方法的优点是能明确给出各种参量之间的变化关系,具有普遍规律性。其缺点是数学上的困难很大,只有极少数流动问题能获得分析解。

3. 数值方法

用计算机进行数值计算,是 20 世纪中叶才出现的一种方法。这种方法是把一般的流体运动方程进行离散化,转化为高阶线性方程组,选用适当的数值方法,利用计算机的速度与容量,进行具体计算,并将所得结果绘制成图表。

数值方法的优点是许多用分析法无法求解的问题,用此法可以求得它们的数值解。其缺点是对复杂而又缺乏完善数学模型的问题,仍无能为力。

三、工程流体力学

流体力学是宏观地研究流体受力和运动的规律的科学,是力学的一个重要分支,是许多工业技术部门必须应用和研究的一门重要的基础学科。

工程流体力学是以流体力学理论为基础,研究并解决在工程上遇到的各种流动问题。它是一门专业基础性课程,其应用领域极其广泛,如水利工程、造船工业、航空工业、水电站、润滑、冷却、液压传动、给水排水、采暖通风等。

编者在工程流体力学课程多年的教学实践中发现,不同的专业对工程流体力学教材有着某些不同的要求。为了满足不同层次、不同专业、不同学时的工程流体力学课程的要求,我们在参考了现有的各种工程流体力学教材的基础上,编写了本教材。本教材的适用专业为热动力类专业、建筑环境工程专业、安全技术及工程专业、水文及水资源专业、机械工程及自动化专业等,也可作为其他相关专业的流体力学课程教材。教师在教学过程中,通过选择教学内容,可满足不同专业、不同学时的工程流体力学课程的教学要求。

本教材在介绍流体力学基本理论的同时,通过工程应用实例和习题,贴近工程实际,培养学生理论联系实际的综合能力。

此外,考虑到目前大学生的英语基础较好,本教材特意加入了所有专业词的英译,使在学习专业知识的同时,积累和掌握流体力学的有关专业英语词汇,为将来阅读原文专业资料打下基础。

本教材共分十一章:

第一章,流体的定义与性质,主要讲述连续介质假设和流体的物性。

第二章,流体静力学,主要讲述流体处于平衡和相对平衡状态下的压强分布规律及流体对固体壁面的作用力。

第三章,流体动力学,主要讲述流动的基本概念、流体动力学基本方程及其应用。

第四章,相似理论,主要讲述相似条件、相似准则和量纲分析方法。

第五章,粘性流动和水力计算,主要讲述粘性流体的流动规律和流动的阻力计算。

第六章,涡旋流动,主要讲述有旋流动的规律。

第七章,理想不可压流体的无旋流,主要讲述典型的势流及其叠加。

第八章,边界层理论初步,主要讲述边界层的基本概念、边界层的近似计算和分离现象。

第九章,射流,主要讲述射流的基本结构、动力特性。

第十章,多孔介质中的渗流,主要讲述在孔介质中流体的渗透流动规律。

第十一章,气体动力学初步,主要讲述可压缩流体的流动规律。

参加本教材编写的有中国矿业大学郭楚文、李意民、陈更林和华北科技学院徐卫红。

由于编者水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2002年3月

1 流体的定义与物理性质

流体(fluid)的运动规律不但与外界条件有关,而且与其自身的物理性质有关。本章将介绍流体的定义和有关主要物理性质。

1.1 流体的定义

物质由原子和分子组成。在不同的外界条件下,组成物质的原子和分子间的距离及相互作用的强弱不同,物质存在的状态有气态、液态和固态。在常温常压下,气态物质分子间的平均距离大于分子直径的十倍,分子间的相互作用微弱,气体的分子可以自由运动,能够充满它所达到的空间,故气体不能保持一定的体积和形状,极易变形。当外部压力变化时,其体积将明显改变,具有较大的压缩性(compressibility)。液态物质分子间平均距离约为分子直径的一倍,分子间相互作用较强,液体的分子能够在其他分子间移动,但不能像气体的分子自由运动,通常可以保持其固有体积,但不能保持其形状,也不像气体极易变形。固态物质则具有固定的形状和体积。

根据物质在外力作用下运动的特征,可分为两类:流体和固体。流体不能承受切应力(shear force),在切应力作用下能够发生无限制的变形即流动,如空气、水。这种特性称为流动性(flowability)。所以流体是一种受任何微小的剪切力作用时,都会产生连续变形的物质。流动性是流体的主要特征,如水能够沿任意微小倾斜的平面流动。固体能承受一定的切应力,其切应力与变形的大小呈一定的比例关系。介于固体和流体之间还有其他物质,如粘弹性体、塑性体等。

然而流体与固体之间并没有明显的界限,同一物质在不同的条件下可以呈现不同的力学特性,即可能呈现流体的特性,也可能呈现固体的特性。例如沥青,在短期载荷下可作固体处理,而在长期载荷下,表现出流体的特性。

1.2 连续介质假设

流体由大量的分子组成。从微观上看,流体分子间存在大量的间隙,每个分子都在无休止地不规则运动着,互相碰撞,交换动量、能量,因此流体的微观结构

和运动无论在时间上或空间上都充满着不均匀性、离散性、随机性。但是在通常情况下,一个很小的体积内流体的分子数量极多。例如,在标准状态下, 1 mm^3 体积内含有 2.69×10^{16} 个气体分子,分子之间在 10^{-8} s 内碰撞 10^{20} 次,所以,人们用仪器测量到的或肉眼观察到的流体的宏观结构和运动又明显地呈现出均匀性、连续性、确定性。微观运动的不均匀性、离散性、随机性和宏观运动的均匀性、连续性、确定性如此不同却又和谐地统一在流体这一物质中,形成了流体运动的两个重要方面。

流体力学研究流体的宏观机械运动,是流体的宏观特性,即大量分子的平均统计特性。一般工程问题的特征长度远大于 1 mm ,特征时间远大于 10^{-6} s ,所以有足够的理由认为流体是由空间上连续分布的流体质点组成的连续介质 (continuum)。这些流体质点与所研究问题的特征尺寸相比足够小,即宏观上足够小;而又包含足够多的流体分子,呈现大量分子平均特性,即微观上足够大。

根据流体的连续介质模型,任意时刻流动空间的任一点都为相应的流体质点占据,表征流体性质和运动特性的物理量一般为时间和空间的连续函数,就可以应用数学分析中连续函数这一有力工具来分析和解决流体力学问题。

但是,在一些特殊的场合,例如研究高空稀薄气体中飞行的物体时,问题的特征尺寸与分子平均自由行程达到同一数量级(例如,在 120 km 高处空气分子平均自由行程约为 1.3 m),就不能用这一假设了。但如果研究的是地球这样大的物体,则高空稀薄气体又可看成连续介质。可见,流体的连续介质模型是一个具有相对意义的概念。

1.3 流体的惯性

物质维持原有运动状态的特性称为惯性(inertia),它是物质本身固有的属性,运动状态的任何变化都必须克服惯性的作用。衡量惯性大小的物理量是质量,也可以用单位体积的质量即密度表示。

1.3.1 流体的密度

流体的密度(density)是指单位体积的流体的质量

$$\rho = dm/dV \quad (1-1)$$

表 1-1 列出了在标准大气压下常见流体的密度,表 1-2 列出了在标准大气压下不同温度时水、空气和水银的密度。

表 1-1

常见流体的密度

流 体 名 称	温 度/℃	密 度/kg·m ⁻³
蒸 馏 水	4	1000
海 水	15	1020~1030
普通汽油	15	700~750
润 滑 油	15	890~920
酒 精	15	790~800
水 银	0	13600
空 气	0	1.293
氧	0	1.429
氮	0	1.251
氢	0	0.0089
一氧化碳	0	1.250
二氧化碳	0	1.976

表 1-2

不同温度下水、空气的密度/kg·m⁻³

流体名称	温 度/℃						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.72	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9465
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

1.3.2 流体的比容

流体的比容(specific volume)是指单位质量流体的体积

$$V = \frac{1}{\rho} \quad (1-2)$$

1.3.3 混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i a_i \quad (1-3)$$

1.4 流体的压缩性和膨胀性

1.4.1 流体的压缩性

流体的体积随压力变化的特性称为流体的压缩性。压缩性的大小用压缩系数(compression coefficient)来度量。温度不变时,单位压力的变化所引起的体积

的相对变化量称为压缩系数,即

$$k = - \frac{dV/V}{dp} = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-4)$$

或

$$k = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-5)$$

式(1-4)中,负号表示体积与压力的变化相反,即压力增大时,体积减小,以使得压缩系数总为正的。压缩系数越大,表示越容易压缩。

压缩系数的倒数称为体积模量(或弹性系数)(body modulus),即

$$K = \frac{1}{k} = - \frac{Vdp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-6)$$

体积模量的物理意义是压缩单位体积的流体所需要做的功,它表示了流体反抗压缩的能力。 K 值越大,说明流体越难压缩。

通常温度下水的体积模量列于表 1-3。由表中看出,水的 K 值很大,故它的压缩系数很小。其他液体也是如此。所以,工程实际中常将液体看做是不可压缩流体。

表 1-3 水的体积模量(GPa)

温度/℃	压 强/MPa				
	0.49	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

1.4.2 流体的膨胀性

流体的体积随温度变化的特性称为膨胀性(expansibility)。膨胀性的大小用体膨胀系数来度量。压力不变时,单位温度的变化所引起的体积的相对变化量称为体膨胀系数,即

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-7)$$

与压缩性一样,液体的膨胀性也很小。除温度变化很大的场合外,在一般工程问题中不必考虑液体的膨胀性。

通常情况下,气体的密度随压力和温度的变化很明显。对实际气体,当压力不大于 10 MPa 时,它们之间的关系遵守完全气体^① 状态方程。

① 热力学中的理想气体,在这里称为完全气体,以便与无粘性的理想流体相区别。

$$pV = RT$$

(1-8)

1.4.3 可压缩流体和不可压缩流体

由上述可知,流体的压缩性是流体的基本属性,任何流体都是可以压缩的,只是可压缩的程度不同而已。例如,水的压缩性比较小,通常每增加 0.1 MPa,其体积变化率不到 1/10000。其他液体的压缩性一般也是比较小的。气体的压缩性比较大,像等温过程中完全气体的体积同绝对压强成反比,压强增大一倍,体积便要缩小一半,足见气体的压缩性之大。

在工程实际问题中是否考虑流体的压缩性,要视具体情况而定。通常把液体视为不可压缩流体,即忽略在一般工程中没有多大影响的微小的体积变化,而把液体的密度视为常量。这样处理问题可使工程计算大为简化。但是,在水击现象、水下爆炸等类问题中,都是把水作为可压缩流体来处理的,因为水的压缩性虽然很小,但在这类问题中却是不能忽视的。通常把气体作为可压缩流体来处理,特别是在流速较高、压强变化较大的场合,它们体积的变化是不容忽视的,必须把它们的密度视为变量。但是在流速不高、压强变化较小的场合,便可忽略压缩性的影响,把气体视为不可压缩流体。例如,在标准状态下,当空气的流速等于 102 m/s 时,不考虑压缩性所引起的计算值相对误差约等于 2.3%,这在工程计算中一般是可以忽略不计的。这样,对不可压缩流体得出的各种运动规律便可直接应用到这类气体的流动研究中。

1.5 流体的粘性

1.5.1 流体的粘性

流体的粘性(viscous)是指流动流体内部存在内摩擦力的特性,或者说是流体抵抗变形的特性。流体的粘性是流体的属性。流体在平衡时不能承受剪切力,即在很小的剪切力作用下,流体就会连续变形,但不同的流体在相同的剪切力作用下其变形的速度是不同的,也就是不同的流体抵抗剪切力的能力不同。如液体能够沿微小倾斜的平板任意流动,但不同的液体流动速度是不一样的。

1.5.2 牛顿内摩擦定律

牛顿在其名著《自然科学的数学原理》中研究了流体的粘性。设有两块相距很近且足够大的平行平板,平板之间充满流体,如图 1-1 所示。下平板固定不动,上平板在牵引力 F 的作用下以均匀速度 U 作惯性运动。与平板接触的流体附着于平板的表面,与下平板接触的流体速度为 0;与上平板接触的流体速度为 U ,并带动两平板之间的流体运动。在 h 和 U 不大的情况下,两板之间流体的速度呈线性分布。由于流体内部各流层的运动速度不同,存在相对运动,使流体内部