

JIANGSUSHENG GAODENG XUEXIAO LIXIANG JINGPIN JIAOCAI

GONGCHENG LIUTI LIXUE

江苏省高等学校立项精品教材

工程流体力学

主 编 郭楚文

副主编 李意民 陈更林 王利军

第3版

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏省高等学校立项建设教材

工程流体力学

(第3版)

主 编 郭楚文

副主编 李意民 陈更林 王利军



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是江苏省高等学校立项精品教材,主要包括:流体的定义与物理性质、流体静力学、流体动力学、相似理论、黏性流动和水力计算、流体的涡旋流动、理想不可压流体的无旋流、边界层理论基础、气体动力学基础、气体紊动射流、多孔介质中的渗流。

本书可作为高等院校热能与动力工程、建筑环境与能源应用工程、环境工程、安全科学与工程等专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/郭楚文主编.—3版.—徐州:
中国矿业大学出版社,2017.2

ISBN 978-7-5646-3404-9

I. ①工… II. ①郭… III. ①工程力学—流体力学
IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 008775 号

书 名 工程流体力学(第3版)

主 编 郭楚文

责任编辑 陈红梅

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 18 字数 333 千字

版次印次 2017年2月第3版 2017年2月第1次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

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。

4 000 多年前的大禹治水,说明我国古代已有大规模的水利工程。

公元前 256~前 251 年,李冰父子带领民众修建的都江堰水利工程,既有利于岷江洪水的疏排,又能常年用于灌溉农田。这说明当时人们对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到相当的水平。

在我国古代,以水为动力的简单机械也有长足的发展,如水轮提水、水磨等;还根据流体力学原理发明了铜壶滴漏计时工具,也就是利用孔口出流使铜壶的水位变化来计算时间。这说明当时人们对孔口出流已有相当的认识。

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的人是古希腊的阿基米得,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,奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,流体力学没有重大发展。

目前,流体力学已发展成为基础科学体系的一部分,同时又在工业、农业、交通运输、天文学、地学、生物学、医学等方面得到广泛应用。由于工业生产和尖端技术的发展需要,促使流体力学和其他学科相互浸透,形成了许多边缘学科,使这一古老的学科发展成包括多个学科分支的全新的学科体系,焕发出强盛的生机和活力。这一全新的学科体系目前已包括:(普通)流体力学、黏性流体力学、计算流体力学、气体动力学、稀薄气体动力学、水动力学、渗流力学、非牛顿流体力学、多相流体力学、磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、流变学、地球流体力学,等等。

二、流体力学的研究方法

目前,解决流体力学问题、进行流体力学研究的方法可以分为现场观测、实验室模拟、理论分析、数值计算 4 个方面。

流体力学学科的形成和发展过程见下表:

时 期	有代表性的事件
公元前 3 世纪	阿基米得提出浮力定律
1638 年	托里拆利论证了孔口出流的基本规律
1653 年	帕斯卡提出流体静力学的基本关系式
1687 年	牛顿提出黏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流体的伯努利定理
1744 年	达朗伯提出了达朗伯疑题
1755 年	欧拉提出流体运动的描述方法和无黏性流体运动的方程组
1781 年	拉格朗日引进流函数和势函数的概念
1845 年	亥姆霍兹提出了涡旋第一定理与第二定理
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
1895 年	雷诺提出湍流基本方程
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
1906 年	普朗特在格丁根建造马赫数为 1.5 的超声速风洞
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
1911 年	卡门证明圆柱尾流内涡街的稳定性
1913 年	布拉休斯提出了计算紊流光滑管阻力系数的经验公式
1914 年	伯金汉提出了著名的 π 定理,进一步完善了量纲分析法
1930 年	卡门提出了计算紊流粗糙管阻力系数的理论公式
1933 年	尼古拉兹公布了阻力系数的实测结果
1938 年	钱学森提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门—钱学森解法
1939 年	科勒布茹克提出过渡区阻力系数计算公式
1940 年	周培源奠定湍流模式理论基础
1944 年	莫迪给出实用管道的当量粗糙度阻力系数图
1946 年	钱学森和郭永怀提出高超声速流动中的相似律
1947 年	第一台电子计算机问世后,数值计算方法成为解决流体力学问题的新方法
1952 年	吴仲华发表《在轴流、径流和混流式亚声速和超声速叶轮机械中的三元流普遍理论》
1965 年	中国在无锡建成长 474 m 的实验水池

1. 现场观测

现场观测是对自然界固有流动现象或已有工程的实际流动现象,利用各种仪器进行系统观测,进而总结出流体运动的规律,并以此预测流动现象的演变。例如,16世纪以前,人们只能根据肉眼观测到的天象物象来判断天气或气候的变化,一些有预示性的云天现象被编成谚语而流传,如“朝霞不出门,晚霞行千里”、“东虹日头西虹雨”等。今天,这些谚语仍然在我国农村广为流传。17世纪中叶,意大利人托里拆利发明了气压表,气象观测进入到应用仪器阶段,随着气象站的建立和气象理论的发展,出现了根据当地气象资料演变规律来预测未来天气的单站预报方法。

现场观测的优点是能够直接对真实的流动进行观测,容易发现新的流动现象。但是,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,影响到对流动现象的研究和规律的总结;现场观测还要花费大量物力、财力和人力。

2. 实验室模拟

在流体力学的发展过程中,实验方法是最先使用的一种,对流体力学的发展作出过巨大贡献。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。200多年来流体力学发展史上每一项重大进展都离不开实验。

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:对于不同情况,需要做不同的实验,即所得结果的普适性较差。

3. 理论分析

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

应用理论分析方法的主要步骤是:(1)根据所给流动问题的特点进行合理的假定,建立简化的数学力学模型;(2)根据实际流动情况,给定流动的初始条件与边界条件;(3)求出方程组的解析解,并结合具体流动解释这些解的物理含义和流动机理;(4)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。

理论分析方法的优点是: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:数学上的困难很大,只有极少数流动问题能获得分析解。按目前数学发展的水平来看,有不少问题将在今后几十年以内是难以从纯数学角度完善解决的。

4. 数值计算

流体力学的基本方程组非常复杂,如果不依靠计算机进行数值计算,就只能对比较简单的情形进行计算。随着计算机技术的不断进步,以及流体力学各种计算方法的发明,使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题得以求解。

应用数值计算方法的主要步骤:(1) 选择适当的数学力学模型;(2) 将流体运动方程进行离散化,转化为高阶线性方程组;(3) 选用适当的数值方法,利用计算机的速度与容量,进行具体的数值计算,并将所得结果绘制成图表。

数值方法的优点: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:对复杂而又缺乏完善数学模型的问题仍无能为力。

解决流体力学问题时,现场观测、实验室模拟、理论分析和数值计算 4 种方法是相辅相成的。实验只有通过理论指导,才能从大量分散的、表面上毫无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论。反之,理论分析和数值计算也要以现场观测和实验室模拟结果为基础,建立流动的数学力学模型;并通过实验来检验这些模型的完善程度。此外,很多实际流动往往异常复杂,理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难,难以得到具体结果,只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

三、工程流体力学

流体力学是宏观地研究流体受力和运动规律的科学,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。

虽然流体力学是一门成熟的基础学科,理论体系已经非常完善,但是各个特定的专业对流体力学基础知识的要求各有侧重。而且工程流体力学更是以工程问题为背景,要求教材能够更好地与实践相结合,因而其专业性更强。

在 2002 年,我们针对热能与动力工程专业,同时兼顾建筑环境与能源应用工程、环境工程、安全科学与工程等专业组织编写了《工程流体力学》(第 1 版),该书已在中国矿业大学以及部分兄弟院校的本科教学中使用多年。另外,本书作为“江苏省高等学校立项精品教材”项目,于 2010 年进行了再版工作,出版了《工程流体力学》(第 2 版)。随着教育改革的不断深入,此次再版主要是在第 2

版的基础上对全书内容进行修订、更新,使其不断满足能源动力类专业本科教学的需求,并兼顾建筑环境与能源应用工程、环境工程、安全科学与工程等专业。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。

本书内容理论联系实际,注重学生动手能力、观察能力和分析问题能力的培养。书中的例题和习题主要取材于工程实践,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,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,使学生在专业知识的同时,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 11 章:

第 1 章流体的定义与物理性质,主要讲述连续介质假设和流体的物性。

第 2 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 3 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 4 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 5 章黏性流动和水力计算,主要讲述黏性流体的流动规律和流动的阻力计算。

第 6 章流体的涡旋流动,主要讲述有旋流动的规律。

第 7 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 8 章边界层理论基础,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 9 章气体动力学基础,主要讲述可压缩流体的流动规律。

第 10 章气体紊动射流,主要讲述射流的基本结构、动力特性。

第 11 章多孔介质中的渗流,主要讲述在多孔介质中流体的渗透流动规律。

本书由中国矿业大学郭楚文担任主编,由中国矿业大学李意民、陈更林、王利军担任副主编。

由于水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2016 年 11 月

目 录

1 流体的定义与物理性质	1
1.1 流体的定义	1
1.2 连续介质假说	2
1.3 流体的物理性质	3
习题 1	12
2 流体静力学	16
2.1 作用在流体上的力	16
2.2 静止流体中的应力特性	18
2.3 流体静力学基本方程	19
2.4 压强的测量	26
2.5 液体的相对平衡	31
2.6 静止液体对固体表面的作用力	35
2.7 浮力与浮体的稳定性	40
习题 2	42
3 流体动力学	47
3.1 研究流体运动的方法	47
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	63
3.6 动量矩方程	67
3.7 能量方程	68
3.8 沿流线的伯努利方程	70
3.9 总流的伯努利方程	72

3.10 流体力学基本方程的应用	75
习题 3	79
4 相似理论与量纲分析	86
4.1 相似理论与模型试验	86
4.2 量纲分析与 π 定理	95
习题 4	100
5 黏性流动与水力计算	103
5.1 黏性流体的两种流动状态	103
5.2 不可压黏性流体的 N-S 方程	106
5.3 不可压黏性流体的层流流动	112
5.4 黏性流体的紊流流动	123
5.5 沿程损失的实验研究	127
5.6 局部损失	133
5.7 管道水力计算	136
5.8 液体出流	146
5.9 水击现象	151
习题 5	155
6 流体的涡旋流动	161
6.1 流体微团运动分析	161
6.2 涡旋运动的基本概念	163
6.3 卡门涡街	168
习题 6	170
7 理想不可压流体的无旋流	173
7.1 理想流体的运动微分方程	173
7.2 欧拉积分式和伯努利积分式	174
7.3 理想流体流动的定解条件	176
7.4 速度势和流函数	178
7.5 几种简单的平面势流	181

7.6 势流叠加原理	185
7.7 平行流的圆柱绕流	188
7.8 三孔圆柱形探针	195
习题 7	197
8 边界层理论基础	200
8.1 边界层的基本概念	200
8.2 层流边界层的微分方程	202
8.3 动量积分方程	205
8.4 边界层厚度的定义	207
8.5 平板层流边界层的近似计算	209
8.6 边界层的分离	211
习题 8	214
9 气体动力学基础	216
9.1 一元定常等熵气流的基本方程	217
9.2 微弱扰动的传播	219
9.3 声速与马赫数	220
9.4 气流的特定状态	222
9.5 激波	226
9.6 变截面管流	233
9.7 等截面摩擦管流	237
习题 9	240
10 气体紊动射流	243
10.1 射流的分类	243
10.2 无限空间淹没紊流射流的特征	244
10.3 圆断面射流的运动分析	248
10.4 平面射流	252
10.5 温差或浓差射流	253
习题 10	258

11 多孔介质中的渗流	261
11.1 多孔介质.....	261
11.2 渗流的达西定律.....	263
11.3 渗流基本微分方程.....	267
11.4 渗流计算方法.....	268
习题 11	273
 参考文献	 275

1 流体的定义与物理性质

流体力学(fluid mechanics)是力学的重要分支。流体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

任何物质都是由原子和分子组成的。在不同的外界条件下,组成物质的原子和分子间的距离及其相互作用会发生变化,因而在自然界和工程技术领域,物质的一般存在状态有气态、液态和固态 3 种。而等离子态和凝聚态是两种极端状态,不在本书的讨论范围。

凡具有一定体积和形态的物体称为固体,它是物质存在的基本状态之一。组成固体的分子之间的距离很小,分子之间的作用力很大,绝大多数分子只能在平衡位置附近做无规则振动,所以固体能保持一定的体积和形状。在受到不太大的外力作用时,其体积和形状改变很小。当撤去外力的作用,能恢复原状的物体称弹性体,不能完全恢复的称为塑性体。

气体分子间的距离很大,分子间的相互作用力很小,彼此之间不能约束,所以气体分子的运动速度较快,其体积和形状都随着容器而改变。气体分子都在做无规则的热运动,在它们之间没有发生碰撞(或碰撞器壁)之前,气体分子做匀速直线运动,只有在彼此之间发生碰撞时,才改变运动的方向和运动速度的大小。由于与器壁碰撞和自身相互碰撞而产生压强(pressure),因此温度越高,分子运动越剧烈,压强就越大。又因为气体分子间的距离远远大于分子本身的体积,所以气体的密度较小,且很容易被压缩。总之,对一定量的气体而言,它既没有一定的体积,也没有一定的形状,它总是充满盛它的容器。

液体的分子结构介于固体与气体之间,它有一定的体积,却没有一定的形状。液体的形状取决于容器的形状。在外力作用下,液体的压缩性极小,不易改变其体积,但流动性较大。从微观结构来看,液体分子之间的距离要比气体分子之间的距离小得多,所以液体分子彼此之间是受分子力约束的,一般情况下分子不容易逃逸。液体分子一般只在平衡位置附近做无规则振动,在振动过程中各

分子的能量将发生变化。当某些分子的能量大到一定程度时,将做相对的移动而改变它的平衡位置,所以液体具有流动性(flowability)。

根据以上分析可知,气体和液体都是在自然条件下没有固定形状的物质,我们将其统称为流体(fluid),即能够流动的物质,流动性是其主要特征。从力学的角度,流体的定义如下:

流体是一种受任何微小剪切力作用都能产生连续变形的物质。

流体不能承受切应力(又称剪应力, shear stress),在切应力作用下能够发生无限制的变形,即流动(如空气、水)。固体则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。

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,既可能呈现流体的特性,也可能呈现固体的特性。还有些物质介于固体和液体之间,如泥浆、沥青、牙膏等,必须受到大于某程度的剪应力才会开始流动,因而不能算是严格的流体。

自然界中观察到的流体运动通常都是非常混乱的,然而流体的运动必须符合力学的一般原理。因此,力学的基本概念成为研究流体运动不可或缺的工具。

1.2 连续介质假说

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,每个分子都在不停地不规则运动着,互相碰撞,交换动量、能量,因而流体的微观结构和运动无论在时间或空间都充满着不均匀性、离散性和随机性。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^{-6} 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却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、连续性和确定性如此不同却又和谐地统一在流体中,形成了流体运动的两个重要方面。

在关于流体运动的一般工程和科学问题中,将描述流体运动的空间尺度精确到 0.01 mm ,也即空间尺度 10^{-6} mm^3 ,就可以满足精度要求。在这样小的体积内,所包含的分子数量仍然足以使其统计平均物理量与个别分子的运动无关。而流体力学是研究流体的宏观机械运动,它研究的是流体的宏观特性,即大量分子的平均统计特性。

因此,在研究流体的宏观机械运动时,可以取到宏观上足够小的一个流体微团(fluid element),其尺度与所研究问题的特征尺寸相比要足够小,完全可以满

足精度的要求;同时,它又包含有足够数量的分子,使个别分子的随机性不影响其物理性质,呈现大量分子的平均特性,即微观上足够大。我们将这种宏观上足够小、微观上足够大的流体微团称为流体质点。

根据以上分析,提出流体的连续介质假说(continuum hypothesis)如下:

虽然流体是由大量分子组成的非连续介质,但是流体力学研究的是流体的宏观机械运动。可以取到宏观上足够小、微观上足够大的流体微团(称为流体质点),从而将流体看做是由空间上连续分布的流体质点(fluid particle)所组成的连续介质(continuum)。

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,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,如研究高空稀薄气体中飞行的物体,此时研究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)就不能采用这一假设了。

1.3 流体的物理性质

1.3.1 流体的惯性

物质维持原有运动状态的特性称为惯性,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。

流体的密度(density)是指单位体积流体所具有的质量,单位为 kg/m^3 ,即

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

表 1-1 列出了在标准状态下常见流体的密度。表 1-2 列出了在标准大气压下不同温度时水、空气的密度。

表 1-1 标准状态下常见流体的密度

流体名称	蒸馏水	汽油	酒精	水银	润滑油	空气	海水	氧气	氮气
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000	725	800	13 600	900	1.293	1 025	1.492	1.251

流体的比体积(specific volume)是指单位质量流体所具有的体积,单位为 m^3/kg ,即

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

表 1-2

不同温度下水、空气的密度

单位: kg/m³

温度/℃ 流体类别	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

混合气体的密度可按各组分气体所占的体积分数计算,即

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

1.3.2 流体的压缩性和膨胀性

流体的体积随压力变化的特性称为流体的压缩性(compressibility)。流体的压缩性的大小用体积压缩系数(compression coefficient)来度量,单位为 Pa⁻¹。温度不变时,增加单位压强所引起流体体积的相对变化量称为体积压缩系数。设流体的体积为 V ,则

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

或

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

式(1-4)中,符号“-”表示体积与压强的变化相反,即压强增大时,体积减小,以使得流体的体积压缩系数总为正值。压缩系数越大,表示越容易压缩。

体积压缩系数的倒数称为体积模量(压缩模量, bulk modulus),单位为 Pa,即

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

体积模量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,说明流体越难以压缩。

不同温度、不同压力下水的体积模量列于表 1-3。可以看出,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,工程实际中常将压缩性很小的液体视为不可压流体。

流体的体积和密度随温度变化的特性称为流体的膨胀性(expansibility)。流体的膨胀性用体积膨胀系数(volume expansion coefficient)来表示,单位为 K⁻¹。当压力不变时,增加单位温度所引起的体积相对变化量称为体积膨胀系数。若流体的体积为 V ,则

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

表 1-3

水的体积模量

单位: GPa

压强/MPa 温度/℃	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

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。对实际气体而言,当压力不大于 10 MPa 时,它们之间的关系遵守理想气体(完全气体,perfect gas)状态方程

$$pV = RT \quad (1-8)$$

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,液体的压缩性一般比较小的,而气体的压缩性比较大。

在工程实际问题中,通常把液体视为不可压流体(incompressible fluid),即忽略体积的微小变化,而把液体的密度视为常量,使工程计算大为简化。只有当液体的温度和压力变化很大时,如研究水中爆炸和高压液压系统时,才需要考虑液体的可压缩性。

通常把气体作为可压缩流体(compressible fluid)来处理,特别是在流速较高、压强变化较大的场合,它们的体积变化是不容忽视的。但是,在流速不高、压强变化较小的场合中,便可忽略压缩性的影响,把气体视为不可压流体。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。

根据流体的压缩性,可将流体分成可压缩流体和不可压流体。

1.3.3 流体的黏滞性

流体在受到外部剪切力作用时会发生变形,其内部相应会产生对变形的抵抗,并以内摩擦力的形式表现出来。

流体的黏滞性(viscosity)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,简称黏性。流体的黏性是流体的固有属性。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。但是,不