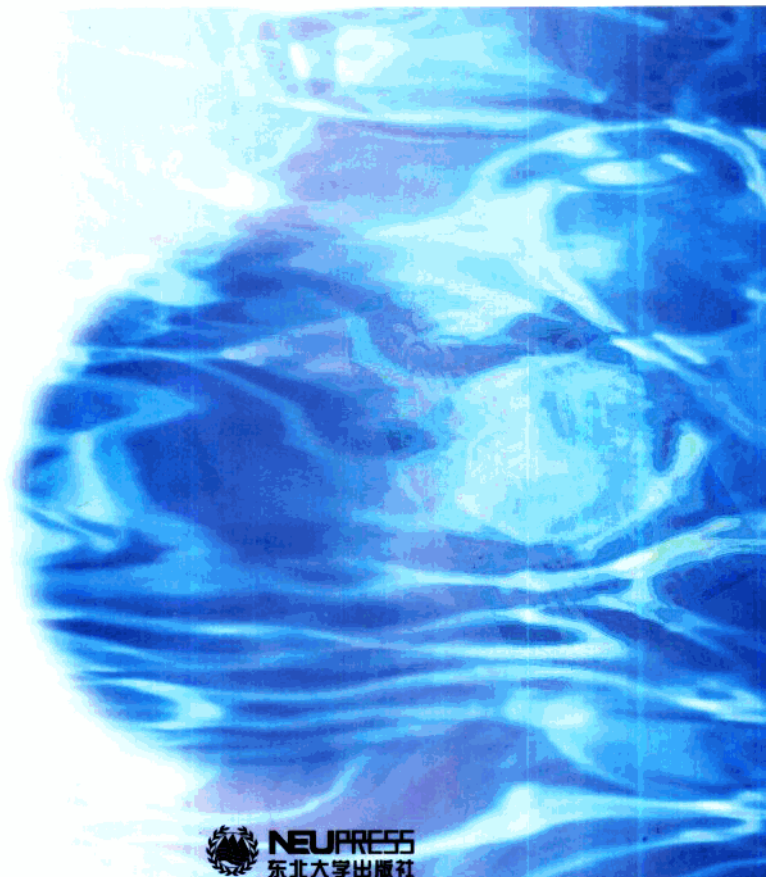


流体力学

段文义 郭仁东 李亚峰 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

前 言

本书是在全国高校专业调整后,根据必须加强基础教育的指导思想,为适应建筑设备工程、环境工程以及热动力工程、燃气输配工程等专业本科教学不同(100, 90, 80, 70)学时需要而编著的基础技术课教材。该书也可供有关专业硕士研究生及工程设计技术人员参考。本书是在我们多年教学讲义的基础上尽量吸收国内外有关教材的优点,并应用近代数学方法编著而成的。

流体力学是多领域工程技术专业中的基础技术课,是通用基础课,因此它具有自身的完整性和系统性。作为通用基础技术课,要求其有相当广阔和系统的理论基础。在此基础上,再力求结合专业知识。不能片面地要求基础技术课符合专业的要求,甚至专业需要什么就讲什么,这是编写教材中的“急功近利”的倾向,不符合加强基础教育的指导思想。同时要看到掌握基础理论和基础实验的重要性。众所周知,电子计算机的发明和发展,对科学研究和社会生活产生了和正在产生着深刻的影响。但是,它毕竟是工具,它不是万能的。若不懂得基础理论,不做基本的实验,依靠计算机的高效能臆断地计算一切,是会很有害的。任何一门自然学科的基本概念、基本原理和基本方法,仍然是计算机所不能替代的,而应该使计算机成为它们的工具。

本书在编著中,采用了从一般到特殊的体系,即用总纲统帅全书的内容。这个总纲就是从自然界普遍适用的规律建立起来的基本方程组,它们都是三维的,且基本上采用先矢量式,后分量式。这就从根本上改变了过去从一维到三维的繁琐的知识体系,而以三维流动的基本原理为纲,再加以特定条件进行简化直到常用的一维流动。这样,使知识系统化,抓纲带目条理化,物理概念形象清晰、严谨、确切,起点高、看得远、长期起作用;坚持下去,必有好处。

该书各章分类型列举并精选了一定数量的例题、思考题和习题,加强理论联系实际,有利于培养分析问题和解决问题的能力,训练基本功,又不搞“题海战术”,达到触类旁通,举一反三的目的。

本书共11章,由段文义、郭仁东和李亚峰编著。段文义编著了第三、四、五、十一章,并对有关章节进行了调整和补充;郭仁东编著了第二、六、七、八章;李亚峰编著了第一、九章;李纲编写了第十章。全书最后由段文义老师

统编定稿。

本书第一至五章是本学科的理论基础（即基本原理），所有学习流体力学的学生都必须牢固准确和完整地掌握；第六至第十一章是流体力学的基础理论在各方面的具体应用，可根据不同专业和学时情况酌情讲授。

该书在编著过程中，得到沈阳建工学院和沈阳大学领导、教务处、市政环境工程系和教材科领导及老师的多方指导和大力支持；更荣幸的是得到东北大学出版社的全力协作，在此，一并表示真诚地谢意。

由于编著者水平有限，加之时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

2001年3月于沈阳

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 流体力学的任务、地位和学习方法	1
第二节 常用的流体力学模型	3
第三节 分析流体力学的理论基础	4
第四节 作用在流体上的力	4
第五节 流体的主要物理性质	7
复习思考题	21
习 题	21
第二章 流体静力学	24
第一节 概 述	24
第二节 流体静压强的特性	24
第三节 流体平衡微分方程式	26
第四节 重力作用下流体平衡压强分布	28
第五节 静止流体对壁面的压力	30
第六节 流体在重力与其他质量力作用下的压强分布规律	36
第七节 大气压强的分布规律	40
复习思考题	43
习 题	45
第三章 流体运动学	49
第一节 描述流体运动的两种基本方法	49
第二节 描述流体运动的基本概念	55
第三节 流体运动的分类	63
第四节 连续性微分方程	67
第五节 流体微团运动分析	72
第六节 有旋流动及其性质	79

第七节 无旋流动及其性质	84
复习思考题	88
习 题	89
第四章 流体动力学基础	92
第一节 流体质点、流体微团、局部导数和随体导数	92
第二节 输运公式	94
第三节 欧拉型积分形基本方程	97
第四节 恒定总流能量方程的应用	114
第五节 动量方程和动量矩方程的应用	122
第六节 连续性微分方程式	132
第七节 运动微分方程式	133
第八节 能量微分方程式	140
第九节 流体运动的初边值条件	142
第十节 葛罗米柯—兰姆方程与理想流体运动方程的积分	149
复习思考题	153
习 题	155
第五章 相似性原理和量纲分析	163
第一节 量纲概念与量纲和谐定理	163
第二节 相似概念及其基本内容	165
第三节 相似性原理简介及相似准则	169
第四节 量纲和相似准则分析推导方法	171
第五节 完全相似和近似相似(模型律)	185
复习思考题	192
习 题	192
第六章 流动阻力和能量损失	196
第一节 流动阻力和能量损失分类	196
第二节 雷诺实验及流态判别	197
第三节 均匀流动方程式	199
第四节 圆管中的层流运动	201
第五节 流体的紊流运动	203
第六节 紊流沿程阻力损失计算	206
第七节 局部阻力损失计算	212

复习思考题.....	217
习 题.....	217
第七章 孔口管嘴和管路流动.....	219
第一节 孔口管嘴出流.....	219
第二节 短管的水力计算.....	224
第三节 长管、串联、并联管水力计算.....	227
第四节 管网计算基础.....	232
第五节 有压管路中的水击.....	235
复习思考题.....	238
习 题.....	238
第八章 理想不可压缩流体平面无旋流动.....	240
第一节 理想不可压缩流体平面流动.....	240
第二节 理想不可压缩流体平面无旋流动及其性质.....	243
第三节 平面势流基础.....	245
第四节 平面势流叠加.....	251
第五节 圆柱体的绕流.....	257
第六节 求解平面势流的镜像法.....	265
复习思考题.....	267
习 题.....	268
第九章 附面层理论基础和绕流运动.....	271
第一节 附面层的概念及其结构.....	271
第二节 普朗特附面层微分方程.....	274
第三节 冯·卡门动量积分关系式.....	277
第四节 附面层动量积分关系式的应用.....	280
第五节 附面层的分离现象.....	292
第六节 绕流运动和悬浮速度.....	297
复习思考题.....	304
习 题.....	304
第十章 紊流射流.....	306
第一节 紊流射流算法概述.....	306
第二节 紊流射流的特征.....	308

第三节 紊流射流主体段运动分析.....	311
第四节 温差射流和浓差射流.....	314
第五节 工程设备中常见的其他射流.....	320
复习思考题.....	324
习 题.....	324
第十一章 一元气体动力学基础.....	326
第一节 概 述.....	326
第二节 一元气体动力学基本方程.....	327
第三节 描述可压缩流体特征三个指标.....	332
第四节 变截面一元气流等熵流动.....	340
第五节 喷管中的等熵流动.....	347
第六节 等截面等温一元有摩擦管流.....	353
第七节 等截面绝热一元有摩擦管流.....	359
复习思考题.....	363
习 题.....	363
参考文献.....	366

第一章 绪 论

本章除阐明全书的概况,所研究的物理量的性质、物理模型,学习本学科的目的和任务外,着重阐述了本学科在科技发展和国民经济建设中的地位,以及学好本学科的基本方法。

第一节 流体力学的任务、地位和学习方法

一、流体力学研究的对象和任务

流体力学是研究流体静止(相对静止)和运动的力学规律及其在工程实际中应用的一门学科。因此,流体力学研究的对象是流体,流体力学研究的任务是如何很好地、有效地把流体静止和运动的力学规律应用到各个实际工程领域中去,改造大自然,造福于人类。

(一)流体

简言之,流体是流动的物质,液体和气体统称为流体。具有代表性的液体是水,具有代表性的气体是空气(大气)。流体的基本特性是具有易流动性。所谓易流动性就是流体在静止时不能承受任何小的剪切力和拉力的性质。如果承受了剪切力或拉力,哪怕多么小,则静止状态就被破坏,易流动性是流体命名的由来。

(二)固体、液体、气体的不同点

1. 固体

固体有一定的体积和一定的形状,固体的运动方式只有平动和转动;固体按受力和变形关系分为塑性体和弹性体(一个给定的力,产生一定的变形,如果力撤除以后,产生永久变形叫塑性体;如果力撤除以后,变形立即消失,称为弹性体)。

2. 液体

液体有一定的体积而无一定的形状,液体不易被压缩,有自由表面,具有界面现象——表面张力特性。

3. 气体

气体既无一定体积又无一定的形状,能够充满任意给定的空间,因而气体易于被压缩,没有自由表面,无界面现象——无表面张力特性。

4. 液体和气体的相同点

液体和气体的相同点是:无一定的形状,均具有易流动性,它们除有固体的平动和转动外,更重要的是具有变形运动(线变形和剪切角变形运动)。

二、流体力学的地位

概括地说,流体力学是从人类同自然斗争中发展起来又去指导人类更好地改造自然为人类创造其幸福的一门学科。具体地说,流体力学的发展总是和尖端科学技术的发展而联系在一起的,它是涉及各个领域应用极其广泛的技术基础学科。

自然界存在着的物质按集态分为三种状态——固体、液体和气体,这是依理论力学的划分方法;而依热力学方法可把物质划分为两大类:流体和固体(非流体)。流体包括液态和气态。这就是说,流体力学这一学科就研究了自然界三态存物的两态。流体是人类永恒的伴侣,没有哪一个领域,哪一个部门,乃至个人能离开流体而存在的。所以研究流体静止和运动的力学规律及其应用的流体力学,在人类发展的历史长河中起着重要作用。航空航天技术的迅猛发展,人类征服宇宙空间事业的发展,都是以流体力学为基础理论学科的。

同时,流体力学与许多学科是相互渗透,相得益彰的,使这门古老的学科不断地获得新鲜血液,显得更富有青春和活力。

在高新技术、知识经济的今天,流体力学更加是流体工程、流体机械、热能、建筑、环保、航海、宇航、兵器、化工、冶金、水利、发电、石油、采矿、农林、轻工、气象、纺织、生物工程等领域的重要基础理论课之一,尤其是对于建筑设备与环境工程、市政工程、土木工程等专业,是基础的基础。

综上所述,流体力学这一学科在我国社会主义四个现代化建设事业中更将发挥着极其重要的作用。

三、关于学好流体力学这门课的几点意见

1. 掌握从一般到特殊的学习方法

学习任何一门自然科学,都要善于掌握从一般到特殊的学习方法,都要抓住它的纲。这个纲就是从物体的机械运动的普遍规律出发,并考虑到所研究问题特性建立的一般形式基本方程组,再根据具体条件去分析具体问题。纲起着统帅的作用。这样学习,起点高,对问题认识深刻、全面,掌握了一般形的基本方程组,其他的派生方程只是基本方程在不同的条件下的简化应用。如此,才能抓住要领,使知识条理化、系统化。

2. 在掌握“三基”上下功夫

要认真看书,在掌握基本原理、基本概念和基本方法上下功夫。对这“三基”要反复思考、理解。理解了的知识,才是自己的知识,才能应用。

3. 认真听课适当记笔记

对自己认为是重点、难点的地方,着重听老师对重点、难点的处理方法,对典型的课堂例题,老师分析问题的思路和解题的步骤,应该有所记录。这对学习大有好处。

4. 初步预习,有准备地听课

即使不能全面预习,对关键的较难的章节最好预习,才能有准备地、主动地听课。念书念书,要把70%以上的精力放在看书学习上。书看懂了、理解了,理解了的知识才易于记忆。

5. 解题规范化,加强基本功

对于任何一门自然科学所精选的习题,都应该看作是该学科的精华。讲课的老师不搞题海战术,要分析题型,精选作业题;学生对所留的作业,应认真分析归类,明确考核的知识点,掌握解题的思路和方法步骤,达到触类旁通、举一反三的目的。

6. 要抄题做作业

一门自然科学的作业本,只有抄题做作业才能算是一本有价值的可参考的资料,这也是训练基本功的手段之一。同时,要坚持用物理方法解题,尽量杜绝用算术方法解题的习惯。

7. 重视实验,亲自动手做实验

认真做教学大纲规定的所有实验,每一个教学实验,都是对学过的基本理论的进一步理解、应用和升华;必须亲自动手做实验,一方面培养独立完成课业的能力,另一方面也为将来进行科学实验研究奠定基础。

第二节 常用的流体力学模型

所谓流体力学模型,是对所研究的实际流体的物理结构和物理性质进行科学地较符合实际的简化,以便推导出流体运动规律的数学表达式。

最基本的流体力学模型是连续介质力学模型,常用的还有不可压缩流体力学模型、理想流体力学模型和静止(相对静止)力学模型。

一、流体的连续介质模型

连续介质的假设(模型)是 1753 年瑞士物理学家欧拉首先提出的。他假设流体(液体和气体)充满着它所占据的一个空间体积,总是不留任何间隙的(其中没有真空的地方,也没有分子间的间隙和分子的运动)连续体,这就是连续介质模型。这是对流体的物质结构进行了简化。

连续介质模型具有下列性质。

(1) 流体是连续分布的物质,它可以无限分割为具有均布质量的宏观微元体。这个微元体在宏观上无限小,小到 $\delta v \rightarrow 0$, 作为空间的一点,微观上无限大,其内部包含着巨量分子数(气体: $2.69 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 分子),满足数学统计平均量,具有宏观属性;

(2) 在不发生化学反应和离解等非平衡热力学过程的运动流体中,微元体内流体状态服从热力学关系;

(3) 除了特殊面外,流体的力学和热力学状态参数在时空中是连续分布的,并且通常是无限可微的。连续介质力学模型是最基本的贯穿流体力学始终的力学模型。

二、不可压缩流体力学模型

对于流体和马赫数 $M < 0.3$ 的低速气流可忽略流体的压缩性和热胀性,认为其体积(或密度)是不变的,这称为不可压缩流体力学模型。因不计压缩性,密度 $\rho = \text{常数}$,使问题得到简化。

不可压缩流体力学模型是对流体的物理性质进行简化。

三、理想流体力学模型

所谓理想流体就是不考虑黏性作用的流体这种模型叫理想流体力学模型,这也是对流体的物理性质进行简化。欧拉于 1755 年在他的著作《流体运动的一般原理》中,首先提出理想流体的概念,并建立了理想流体运动微分方程——欧拉运动微分方程。

实际上,一切流体都具有一定程度的黏滞性。提出理想流体力学模型的意义在于研究流体诸方程中,不考虑令人头痛的黏性项,从而使问题大大简化。

有关平衡流体力学模型在第二章中详细说明。

第三节 分析流体力学的理论基础

自然界中所存在的一切物质的运动,毫无例外地都遵循着质量守恒定律和能量守恒定律这两个普遍定律。因此,流体运动也必然遵守这些定律。流体力学是研究流体(包括液体和气体)宏观机械运动的,必然遵守牛顿的力学定律;当考虑压缩性时,还必然要遵循热力学第二定律。故而分析流体力学的理论基础是:

- (1) 质量守恒定律(连续性方程);
- (2) 能量守恒定律——热力学第一定律(能量方程式);
- (3) 牛顿运动第二定律(由它导出动量守恒定理、动量矩守恒定理、动能定理等);
- (4) 热力学第二定律(当考虑压缩性时,热力学第一定律不说明有多少热能够转化为功,它不谈这一点。第一定律仅涉及已转化为功的那部分热。论及多少热可以转化为有用功的是第二定律。热力学第二定律,阐述了一切自然体系,将自发变化而趋向平衡态或静止态。与体系自发变化能力相联系的参数称为它的熵 S)。

上述这些定律既不以所讨论的流体的性质为转移,又与所考虑的具体流动过程无关,是一切流体、一切运动形式都必须遵循的。只要把上述定律应用于运动流体,并考虑到流体具有易流动性(变形)的特点,就得到了流体力学中的基本规律了。再附加以流动的初始条件和流动区域边界上的边界条件,就完全确定了一个特殊的问题了。

最后,必须特别指出:以上的论述只适于均匀的单组分流体,不考虑扩散和化学反应的影响,也不考虑电磁效应的影响。若考虑多组分和有化学反应及磁效应的流体,还必须考虑另外三个基本定律,即各组分守恒定律,各种化学反应定律和磁流体力学有关定律。本书不考虑后三种影响。

第四节 作用在流体上的力

一切流体只有在力(外力)的作用下,才能产生一定的运动状态(当然也包括静止在内)。外力是流体产生机械运动的外因,流体自身的特性是运动状态的内因。因此,流体在做机械运动的同时,在流体的内部各个质点之间必以一定的应力相互作用着。流体力学就是研究作用在流体上的力与运动状态的关系的。本节介绍作用在流体上的力的分析方法和力的分类。

一、用截面分离法分析作用在流体上的力

流体是连续介质,运动时,各流体质点之间以一定的应力相互作用着,在研究作用在流体上的力时,必须把所要研究的那部分流体从其他流体中分离出来。一般采用假想的截面从图 1-1 所示的流体中分离出一小块流体 ΔV 。

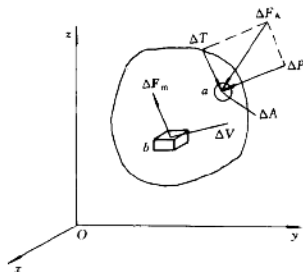


图 1-1 表面力和质量力

根据等效力效应来分析作用在流体 ΔV 上的力。外界作用在这块流体上的力按其作用方式不同,分为质量力和表面力两大类。

二、质量力

作用在所取流体 ΔV 的每个质点(微团上)并且和质量 Δm 成正比的力叫质量力,用 ΔF_m 表示。 ΔF_m 与 ΔV 以外的流体存在无关。

常接触到的质量力有重力、离心惯性力、直线惯性力、静电力等。这里所说的质量力,一般指保守的质量力(只和始末位置有关,而和路径无关的力)。

1. 单位质量力(质量力强度)

有度量价值的是作用在单位质量上的质量力(也称为质量力强度),用 f 表示。

$$f = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_m}{\rho \Delta V} = \frac{dF_m}{\rho dV} \quad (1-1)$$

对均质流体有

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

式中, $\Delta V (V)$ 为所有流体微团的体积(m^3); $\Delta m = \rho \Delta V$ 是所取流体微团所有的质量; $\Delta F (F)$ 作用在 $\rho \Delta V (\rho V)$ 质量上的力。

在直角坐标系中有

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{mx}}{\rho \Delta V} = \frac{dF_{mx}}{\rho dV} \\ f_y &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{my}}{\rho \Delta V} = \frac{dF_{my}}{\rho dV} \\ f_z &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{mz}}{\rho \Delta V} = \frac{dF_{mz}}{\rho dV} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

单位质量力及其分量的单位是加速度单位,即 m/s^2 。

2. 质量力的合力和合力矩

质量力的合力:

$$F_m = \int_V f \rho dV \quad (1-5)$$

质量力的合力矩:

$$M = \int_V r \times f \rho dV \quad (1-6)$$

三、表面力

作用于分离体表面上且与表面积大小成正比例的力,称为表面力,用 $\Delta F_s (F_s)$ 表示。

表面力是接触力,可以是周围流体通过直接接触面而作用于分离体表面 A 上的力,也可以是作用于流体边界面(例如液体与固体或气体的接触面)上的力。如图 1-1 所示,在分离体表面上取包含 a 点在内的微元面积 ΔA ,以 ΔF_s (表面力是矢量,因为表面面积是矢量,称为面积矢)表示。一般地 ΔF_s 与 ΔA 斜交。在流体力学的分析中为了研究方便,把 ΔF_s 分解为两

个分量:沿 ΔA 法线方向的 ΔP 和沿切线方向的 ΔT 。因为流体不能承受拉力, ΔP 一定指向 ΔA 的内法线方向。故一般 ΔP 为压力。作用在流体微团表面上的压力是有大小、有方向、有合力作用点的矢量,它的大小和方向都与受压面密切相关。而 ΔT 为切向力。

1. 表面力的应力表示

作用在单位面积的表面力,称为表面力强度,在力学中称为应力。一般应力也有压应力和切应力两个分量。

(1) 压应力(压强)。单位面积上承受的压力称为压应力(压强)。对均匀分布的表面力,其大小为:

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

因为表面力是均匀分布的,所以 $\bar{p}$ 与 ΔA 的大小与位置无关。

对非均匀分布的表面力,则定义

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-7)$$

流体中某一点的压力强度, p 简称为压强。点压强是标量,因为一点的法线方向不定。

(2) 切应力。如同定义点压强一样,当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时,此值 $\frac{\Delta T}{\Delta A}$ 的极限即为度量 a 点切向力强度,也叫切应力。即

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-8)$$

在国际单位制(SI)中,力的单位用牛顿(N),面积的单位用平方米(m^2),所以压强和切应力的单位用帕斯卡($1Pa = 1N/m^2$)。

2. 表面力的合力和合力矩

(1) 压力的合力和力矩。在力学上,表面积是矢量,称面积矢。

$$dA = dA \cdot n$$

式中, n 是微元面积外法线方向上的单位向量。

所以合压力为

$$P = - \int_A p dA \cdot n = - \int_A p dA \quad (1-9)$$

合力矩

$$M = - \int_A r \times (pn) dA = - \int_A r \times p dA \quad (1-10)$$

(2) 切力合力和合力矩。切力合力

$$T = \int_A \tau dA \cdot n = \int_A \tau dA \quad (1-11)$$

切力合力矩

$$M = \int_A r \times (\tau n) dA = \int_A r \times \tau dA \quad (1-12)$$

第五节 流体的主要物理性质

一、惯性

惯性是一切物体维持原有运动状态能力的性质,流体也不例外,也具有惯性。表征惯性的物理量是质量,用 m 表示。

密度是单位体积流体所具有的质量,它是描述流体质量在空间分布程度的物理量,用 ρ 表示。

均质流体

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-13)$$

非均质流体

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-14)$$

式中, m 是体积为 V 的流体内的质量; V 包含质量 m 的体积; Δm 是体积为 ΔV 微元体积内质量; ΔV 是包含质量 Δm 的流体微元体积。 $\Delta V \rightarrow 0$ 表示微观无限大,宏观上无限小的质点。

在国际单位制中,密度的单位是 kg/m^3 。

二、重力特性

重力特性是物体(包括流体)受地球地心引力作用的性质,表征重力特性的物理量是重量,用 G 表示。

1. 容重(重度)

容重是单位体积流体所具有的重量,它是描述流体重量在空间分布程度的物理量,用 γ 表示。

对均匀流体

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-15)$$

对非均质流体

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-16)$$

式中, γ 是流体的容重; G 是体积为 V 的流体所受的重量; V 是重量为 G 的流体的体积; ΔG 是微元体积 ΔV 的流体的重量; ΔV 是具有重量为 ΔG 的流体的体积。

在国际单位制中,容重的单位为 N/m^3 。

2. 密度和容重的关系

由于重量 $G = gm = \rho g V$, $\gamma = \frac{G}{V}$, 故有

$$\gamma = \rho g \quad (1-17)$$

3. 比重

物理学中将物体的密度 ρ (或容重 γ) 与 4°C 时蒸馏水的密度 ρ_w (或容重 γ_w) 之比,叫比

重,用 S 表示,即

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (1-18)$$

很明显,4℃时水的比重为1;而水银的比重一般采用 $S_{\text{汞}} = 13.6$ 。比重是无量纲量,不能与容重混淆。

表1-1给出了几种常用流体的密度。

表1-1 常用流体的密度和重度

流 体 名 称	温度/℃	密度/(kg/m ³)	重度/(N/m ³)
蒸 留 水	4	1000	9807
海 水	15	1020~1030	10000~10100
普 通 汽 油	15	700~750	6860~7350
石 油	15	880~890	8630~8730
润 滑 油	15	890~920	8730~9030
酒 精	15	790~800	7750~7840
水 银	0	13600	133400
熔 化 生 铁	1200	7000	68600
空 气	0	1.293	12.68
氧	0	1.429	14.02
氮	0	1.251	12.28
氢	0	0.0899	0.881
一 氧 化 碳	0	1.25	12.27
二 氧 化 碳	0	1.976	19.40
二 氧 化 硫	0	2.927	29.1
水 蒸 气	0*	0.804	7.88

* 为便于计算机推算到0℃。

SI制中, $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$, $\gamma_w = 9807\text{N/m}^3$; 20℃标准大气压时, 空气 $\rho = 1.20\text{kg/m}^3$; $\gamma = 11.77\text{N/m}^3$ 。

三、流体的压缩和膨胀性

流体受压体积缩小, 密度增大的性质称为流体的压缩性; 流体受热体积膨胀, 密度减小的性质称为流体的膨胀(热胀)性。

流体之所以有压缩性和热胀性, 完全是由流体的微观物质结构所决定的。流体的内部分子的分布相对于固体来说疏松得多, 分子之间有一定的距离, 在常温常压下空气的分子平均自由程约为几十纳米(10^{-8}m)量级, 液体分子间的距离要比此值小得多。当作用于流体的压强增加时, 可使流体分子间的距离减小, 密度便增大; 温度的升高可使流体分子间的距离增大, 其密度便减小。但是由于气体和液体内部分子间距离大小差别很大, 因此, 气体和液体的压缩性和热胀性差别也很大。液体的压缩性和膨胀性都很小, 压强每增加一个大气压, 水的密度约增加二万分之一。在温度较低时($10\sim 15^\circ\text{C}$), 温度每增加 1°C , 水的密度减小约万分之一点五, 温度较高时($90\sim 100^\circ\text{C}$), 水的密度减小也只有万分之七, 因为水的压缩性和膨胀都很小, 所以除像水击、热水供暖等问题需要考虑水的压缩性和膨胀性外, 一般均忽略水(液体)的压缩性和热胀性, 将其当做不可压缩流体处理。

气体的压缩性和膨胀性要比液体大得多。不管是压强还是温度, 对气体的密度影响都必须考虑, 同时要比液体复杂得多, 属于热力学问题, 通过普通的平衡热力学联系起来, 一般按完

全气体状态方程表示大气密度随温度与压强的关系,通常把气体视为可压缩流体。

下面分别论述液体和气体的压缩性和膨胀性。

(一)液体的压缩性和膨胀性

1. 液体的压缩性

液体当压强增加一个单位时,其体积的相对减小值(率),叫液体的压缩性系数,用 β_p 表示

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-19)$$

式中, V 为液体原有的体积; dp 是压强的增加值; dV 是体积的减小值。因为压强增加,液体体积减小,式中 $\frac{dV}{dp}$ 永为负值,所以等号右侧取负号,使 β_p 为正值。

由于系统质量守恒,压缩前后其质量 ρV 不变,所以有

$$d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0, \text{ 即 } \frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

故压缩性系数还可写成:

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-20)$$

β_p 值愈大,说明液体的压缩性愈大。 β_p 的单位是压强单位的倒数,即 m^2/N 。

流体压缩性系数的倒数 $1/\beta_p$,称为流体的弹性模量(这是因为流体具有弹性,在涉及声波传播的流动问题中,表示密度随压强增加的变化,显示热力学特性,这个特性是体积弹性模量),用 E 表示:

$$E = \frac{1}{\beta_p} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-21)$$

弹性模量的单位是 N/m^2 。表 1-2 列出了水在 0°C 时不同压强下的压缩系数。表中的压强单位为工程大气压的符号($1\text{at} = 98070\text{N}/m^2$)。

表 1-2 水的压缩系数

压 强/at	5	10	20	40	80
$\beta_p \times 10^9/(m^2/N)$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

2. 液体的膨胀性

流体在一定压强下,温度增加单位温度时液体体积的相对变化值(率),叫液体的膨胀系数,用 β_t 表示,即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-22)$$

膨胀系数的单位是 $1/T$ 。

液体的压缩性系数和膨胀系数在热水供暖系统和热电站、水电站系统中及一切水工系统中防止水击现象发生有广泛地应用。表 1-3 给出了一个大气压下不同温度时水的膨胀系数。

表 1-3 水的膨胀系数

温 度/ $^\circ\text{C}$	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\beta_t \times 10^4/(1/^\circ\text{C})$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

为了便于应用,表 1-4 给出了一个大气压下水在不同温度时的重度和密度。

例 1-1 水在常温下,由 5at 压强增加到 10at 压强时,求水密度的相对变化率(用 % 表示)

($p = 5 \text{at}$ 时, $\beta_p = 0.53 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$)

解 此题是液体在常温下压缩性系数公式的应用。

方法一:

$$\beta_p = \frac{d\rho/\rho}{dp} \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = \beta_p dp = 0.538 \times 10^{-9} \times (10 - 5) \times 9.807 \times 10^4 = 0.0264\%$$

表 1-4 水的重量和密度

温度/℃	重度/(kN/m ³) ^①	密度/(kg/m ³)	温度/℃	重度/(kN/m ³)	密度/(kg/m ³)
0	9.805	999.9	35	9.749	994.1
1	9.805	999.9	40	9.731	992.2
2	9.807	1000.0	45	9.710	990.2
3	9.807	1000.0	50	9.690	988.1
4	9.807	1000.0	55	9.657	985.7
5	9.807	1000.0	60	9.645	983.2
6	9.807	1000.0	65	9.617	980.6
7	9.805	999.9	70	9.590	977.8
8	9.805	999.9	75	9.561	974.9
9	9.805	999.8	80	9.529	971.8
10	9.804	999.7	85	9.500	968.7
15	9.798	999.1	90	9.467	965.3
20	9.789	998.2	95	9.433	961.9
25	9.778	997.1	100	9.399	958.4
30	9.764	995.7		—	—

注: ①在国际单位制中常将 10^3 写为千, 用符号 k 表示。

方法二: 积分 $\frac{d\rho}{\rho} = \beta_p dp$ 有

$$\ln \rho - \ln \rho_0 = \beta_p (p_2 - p_1)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \exp[(\beta_p (p_2 - p_1))] = \exp[0.538 \times 10^{-9} (10 - 5) \times 98070] = 1.00264$$

$$\text{所以 } \frac{\rho}{\rho_0} - 1 = 1.00264 - 1$$

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = 0.00264 = 0.264\%$$

故水的密度的相对变化率为 0.264%。

(二) 气体的压缩性和膨胀性

分析气体的压缩性和膨胀性, 属于热力学问题。对于理想气体的热力学状态用下列参数来描述: 压强(p)、比容(v)或密度(ρ)、温度(T)、内能(e_i)、焓(h)和熵(s)。为了给出一个无论对理想气体还是对非理想气体都普遍适用的热力学状态方程, 再引入一个压缩因子 z , 这样共有 $p, v(\rho), T, e_i, h, s$ 和 z 共 7 个参数。大量研究实验证明, 由分子量为 m 的单一化学组分所构成的均匀体系, 其中压强 p 、比容 v 、温度 T 和压缩因子 z 具有下列关系:

$$z = \frac{pv}{RT} = \frac{p}{\rho RT} \quad (1-23)$$

式(1-23)就是对所有气体都适用的气体通用状态方程式。

该方程式涵盖了包括理想气体状态方程在内的目前所具有各种各样的非理想气体状态方