

高等学校水利类教材

工程流体力学



齐鄂荣 曾玉红 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校水利类教材

工程流体力学

■ 齐鄂荣 曾玉红 编著

武汉大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/齐鄂荣,曾玉红编著. —武汉:武汉大学出版社,
2005.8

高等学校水利类教材

ISBN 7-307-04556-7

I. 工… I. ①齐… ②曾… III. 工程力学:流体力学
IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 045056 号

责任编辑:李汉保 责任校对:刘欣 版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北新华印务有限责任公司

开本:787×1092 1/16 印张:28 字数:675千字

版次:2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

ISBN 7-307-04556-7/TB·16 定价:45.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

内容简介

本书力求以一种较新颖的方式介绍工程流体力学的基本原理及其应用。

全书共分 12 章,内容包括绪论、流体静力学、流体运动的基本概念和基本方程、流体运动的流态与水头损失、有压管道中的定常流与孔口管嘴出流、有压管道中的非定常流、气体动力学基础、明渠中的定常流与堰流、理想流体的旋涡运动、理想不可压缩流体的无旋运动、实际流体绕过物体的流动、量纲分析与相似原理等。

本书可以作为热能与动力工程以及机械类、土建类、环境保护类专业本科生的流体力学或工程流体力学课程教材,也可以用于其他相近专业的教学参考书,同时也可供相关工程技术人员参考。

前 言

本书是为热能与动力工程专业大学本科专业基础课“工程流体力学”所编写的教材。热能与动力工程专业是经国家教育部专业调整后成立的新专业,该专业涵盖了原“热能动力工程”、“水利水电动力工程”和“流体机械工程”等三个专业的内容。由于原三个专业的工程流体力学课程有不同的侧重面,其教材和教学大纲各不相同。如“热能动力工程”需要讲解与气体有关的可压缩流体动力学;“水利水电动力工程”和“流体机械工程”则需讲解水击、明渠流动等。三个专业合并后,迫切需要一本能与之相适应的工程流体力学新教材。这个新教材不仅应涵盖工程流体力学课程所必需的基本内容,还应包括原热能动力专业的气动特点和原水电动力专业及流体机械的水利特点,也应适合其他的相近专业。这是本教材编写的背景和指导思想。

另外,现有的工程流体力学教材受历史条件限制,所涉及的专业知识面一般较窄。而从本教材所涵盖的基础内容来看,涉及了较宽的知识面,完全符合当前宽口径、厚基础的办学思想。从编写的内容来看,可以作为其他相近专业工程流体力学或流体力学课程的教材或参考书。这也是本教材的特色之一。

本书作者从事工程流体力学教学工作多年,在撰写本书时,作者注意融汇平时的教学经验和体会,力求对一些基本概念和难点进行深入浅出的叙述,非常方便读者的自学和初学者的入门。在本书的选材上,作者注意理论基础与相关专业和工程实践的结合,不论是求学的学生或是需充电的在职技术人员,都可以从中获得收益。为适应当前科技的发展,本书还在管网、水击及明渠水面曲线等方面的计算,引入了一些数值计算的方法和电算程序,能对读者解决一些复杂工程问题起到抛砖引玉的作用。此外,本书各章之后均编写了一些思考题和习题,可以帮助读者复习和思考,能加深读者对本专业基础理论的理解。

工程流体力学是一门专业基础课或技术基础课,为保证有足够篇幅叙述基本原理和基本概念,有些偏重于专业的内容,如气体动力学中的等截面摩擦管流、斜激波等;水击中的调压井计算;明渠定常流中的河道水面曲线的计算;堰流中有关堰型的计算;有势流动中的叶栅等,本教材作了删减,都留到相关专业课中讲授。这样做可以适应当前课内学时减少的需要,也使全书结构更紧凑,表述更流畅。

由于本学科理论性较强,也涉及较多的高等数学及物理学等学科的知识,建议读者在复习基础学科相关内容的基础上,注意基础理论和基本技能的学习,积极参与各种实验和实践环节的活动,踏踏实实地多做各种练习。在学习的过程中,注意体会流体力学观察现象和分析问题的思路,注意培养自己解决实际问题的能力。另外由于本学科还具有工程应用的特点,建议读者要联系实际的学习,逐步培养良好的工程观念。包括:计算和解题时学会配合清晰的图、表来表达;所需的已知和未知条件要交代清楚,所用参数的来源及取值要交代清楚,所用的方程和公式要交代清楚;解题的过程简练清晰,步骤一目了然;最后得到的解要有

分析,分析是否合理,验算是否妥当。

参加本书编写工作的有齐鄂荣(第一章~第八章、第十一章),曾玉红(第九章~第十章、第十二章),全书由齐鄂荣主编。硕士生邱兰、贺翠华绘制了本书的插图,并对全书初稿进行试读,提出了许多很好的建议;本科生胡昌夏对本书部分习题进行了试做,也提出了一些很好的建议。在此,作者对他们表示感谢!同时,感谢各位关心本书编写的老师和同事们!

本书主审为华中科技大学李万平教授,他对本书书稿作了大量细致工作,提出了许多宝贵的意见和修改建议,在此表示感谢!

由于作者的水平所限,本书中难免出现缺点和错误,在此恳请读者批评指正。

齐鄂荣

2005年3月

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| § 1.1 工程流体力学的任务及在工程中的应用 | 1 |
| § 1.2 流体的定义与特征以及连续介质的概念 | 2 |
| § 1.3 流体的主要物理性质 | 3 |
| § 1.4 作用在流体上的力 | 12 |
| § 1.5 工程流体力学的研究方法 | 13 |
| 复习思考题 1 | 14 |
| 习题 1 | 15 |
| 第二章 流体静力学 | 17 |
| § 2.1 流体静压强及其特性 | 17 |
| § 2.2 流体平衡的微分方程及等压面 | 19 |
| § 2.3 重力作用下的液体平衡 | 23 |
| § 2.4 压强的计量与压强的测量 | 28 |
| § 2.5 几种质量力同时作用下的液体平衡 | 33 |
| § 2.6 静止液体对平面的作用力 | 36 |
| § 2.7 静止液体对曲面的作用力 | 41 |
| 复习思考题 2 | 45 |
| 习题 2 | 46 |
| 第三章 流体动力学基础 | 53 |
| § 3.1 研究流体运动的两种基本方法 | 53 |
| § 3.2 流体运动的几个基本概念 | 56 |
| § 3.3 流体运动的连续性方程 | 63 |
| § 3.4 理想流体的运动方程 | 67 |
| § 3.5 实际流体总流的能量方程 | 73 |
| § 3.6 定常总流的动量方程与动量矩方程 | 80 |
| § 3.7 空化与空蚀 | 85 |
| § 3.8 附录 | 87 |
| 复习思考题 3 | 88 |
| 习题 3 | 89 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 第四章 流体运动的流态与水头损失 | 96 |
| § 4.1 流动阻力与水头损失 | 96 |
| § 4.2 实际流体的两种流动型态 | 98 |
| § 4.3 流体的层流流动 | 102 |
| § 4.4 流体的紊流流动 | 105 |
| § 4.5 紊流的结构与沿程水头损失系数的实验研究 | 111 |
| § 4.6 计算沿程水头损失的谢才公式 | 121 |
| § 4.7 局部水头损失的计算 | 124 |
| 复习思考题 4 | 129 |
| 习题 4 | 129 |
| 第五章 有压管道中的定常流与孔口、管嘴出流 | 133 |
| § 5.1 简单管道的水力计算 | 133 |
| § 5.2 复杂管道的水力计算 | 149 |
| § 5.3 管网的计算原理与方法 | 152 |
| § 5.4 孔口、管嘴出流 | 161 |
| 复习思考题 5 | 168 |
| 习题 5 | 169 |
| 第六章 有压管道中的非定常流 | 177 |
| § 6.1 水击现象 | 177 |
| § 6.2 水击基本方程 | 186 |
| § 6.3 水击简化方程的解析法 | 190 |
| § 6.4 水击方程的特征线法 | 197 |
| § 6.5 减小水击压强的措施与调压井 | 203 |
| § 6.6 计算实例 | 205 |
| 复习思考题 6 | 210 |
| 习题 6 | 210 |
| 第七章 气体动力学基础 | 212 |
| § 7.1 气体动力学基本方程组 | 212 |
| § 7.2 声速与马赫(Mach)数 | 214 |
| § 7.3 微弱扰动在可压缩流体中的传播 | 217 |
| § 7.4 气体的一维等熵定常流动 | 220 |
| § 7.5 正激波 | 228 |
| § 7.6 截面面积变化的管流 | 238 |
| 复习思考题 7 | 254 |
| 习题 7 | 254 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第八章 明渠中的定常流、堰流 | 257 |
| § 8.1 明渠的几何特性 | 257 |
| § 8.2 明渠均匀流 | 260 |
| § 8.3 缓流、急流、临界流 | 266 |
| § 8.4 水跃 | 276 |
| § 8.5 明渠非均匀渐变流 | 280 |
| § 8.6 堰流 | 293 |
| 复习思考题 8 | 302 |
| 习题 8 | 303 |
| 第九章 理想流体的旋涡运动 | 306 |
| § 9.1 流体微团运动的分析 | 306 |
| § 9.2 有旋流动与无旋流动 | 313 |
| § 9.3 有涡流动中的几个基本概念 | 315 |
| § 9.4 速度环量、斯托克斯定理 | 316 |
| § 9.5 汤姆逊定理、亥姆霍兹旋涡定理 | 322 |
| § 9.6 旋涡的诱导速度 | 327 |
| § 9.7 旋涡的形成、卡门涡街 | 334 |
| 复习思考题 9 | 340 |
| 习题 9 | 341 |
| 第十章 理想不可压缩流体的无旋运动 | 344 |
| § 10.1 有势流动与速度势函数 | 344 |
| § 10.2 基本方程及其定解条件 | 346 |
| § 10.3 平面流动的流函数 | 349 |
| § 10.4 平面势流运动与流网 | 352 |
| § 10.5 平面势流运动的叠加 | 356 |
| § 10.6 绕圆柱体无环量平面流动 | 367 |
| § 10.7 绕圆柱体有环量平面流动、库塔-儒可夫斯基公式 | 371 |
| § 10.8 平面叶栅绕流简述 | 373 |
| 复习思考题 10 | 376 |
| 习题 10 | 376 |
| 第十一章 实际流体的流动与边界层 | 380 |
| § 11.1 不可压缩粘性流体的运动方程 | 380 |
| § 11.2 不可压缩粘性流体的层流流动 | 387 |
| § 11.3 粘性流体绕圆球的小雷诺数流动 | 391 |
| § 11.4 边界层的基本概念及边界层厚度 | 396 |
| § 11.5 层流边界层方程 | 399 |

| | |
|----------------------------|------------|
| § 11.6 层流边界层方程的精确解····· | 403 |
| § 11.7 边界层的动量积分关系式····· | 405 |
| § 11.8 平板边界层的近似计算····· | 408 |
| § 11.9 边界层的分离现象、绕流阻力····· | 415 |
| 复习思考题 11····· | 417 |
| 习题 11····· | 417 |
| 第十二章 量纲分析与相似原理····· | 420 |
| § 12.1 量纲分析的意义与量纲和谐原理····· | 420 |
| § 12.2 量纲分析方法····· | 423 |
| § 12.3 流动的力学相似····· | 427 |
| § 12.4 模型相似准则····· | 429 |
| § 12.5 相似原理的应用····· | 434 |
| 复习思考题 12····· | 435 |
| 习题 12····· | 435 |
| 参考文献····· | 437 |

第一章 绪 论

§ 1.1 工程流体力学的任务及在工程中的应用

工程流体力学是研究流体机械运动及其在工程实际中应用的一门技术基础学科。该学科是力学的一个分支,其研究对象是包括液体与气体在内的流体。工程流体力学的任务是采用实验与理论分析的方法研究流体处于平衡状态时的规律与流体在做机械运动时的规律,并将这些规律用于工程实际。

工程流体力学所研究的基本规律主要在两方面:其一,流体处于平衡状态时,研究作用于流体上各种力之间的关系,以及流体平衡时的条件等;其二,流体处于运动状态时,研究作用于流体上的力与运动要素之间的关系,以及流体的运动特性与能量转换等。由于工程流体力学是将流体的运动作为宏观机械运动进行研究,而不是作为微观分子运动来研究,因而工程流体力学主要运用物理学与理论力学中的质量守恒、动量守恒与能量守恒等基本规律来研究流体流动,以及从能量的转换、热量与异质的扩散等方面探讨流体流动的内部结构与形态。另外,工程流体力学除了讨论液体的流动外,还以一定的篇幅讨论气体的流动。而气体在流速较大的状态下,具有可压缩性,其流动规律不同于液体,这时除了压强外,气体的密度、温度等运动要素都随流动而不断变化。因而还需要增加物理学与热力学中关于热能与机械能转化等的基本规律来研究气体的流动。因此,物理学、理论力学与热力学都是学习工程流体力学的必要基础课。作为描述与分析流体流动的主要手段与工具,高等数学也是一门重要的基础课程。

工程流体力学作为一门技术性学科,在工程实际中有着广泛的应用。如水利工程中的农田水利、水力发电、水工建筑及施工、机电排灌等方面都与水的运动相关,都需要应用工程流体力学解决与水的运动规律相关的生产技术问题;电力工业中,不论是水电站、热电站,还是核电站与地热电站,其生产运行的工作介质都是水、气和油等流体,所有的动力设备的设计与运行都必须符合流体流动规律;航空航天工业中,飞机、火箭与导弹等各种飞行器的运行环境都在大气中,这些飞行器的设计与运行都必须符合空气动力学的基本原理;机械工业中,大量遇到的润滑、冷却、液压传动、气体传动以及液压与气体控制等问题都需应用流体力学的原理加以解决;土木工程中的给水排水、采暖通风等行业,各种设施和设备都与水、气体等流体流动相关,在设计与施工中需充分利用流体力学的基本原理;化学工业中大部分化学工艺流程都伴随有化合物的化学反应、传质与传热的流动问题;石油工业中的油、气与水的渗流、自喷、抽吸与输送问题;以及海洋中的波浪、环流、潮汐与大气中的气旋、环流、季风等都是流体力学的问题,都需根据流体力学的基本原理进行研究与解决。总的来说,工程流体力学是许多行业与部门必须应用和研究的一门重要学科,可以说,只要有流体的地方,就有

流体力学的用武之地。

本教材不可能具体讲述在上述行业中流体在各种具体的设施与设备中的流动规律,作为一本基础性和入门性教材,只能讲述基本的和共同性的流体流动规律。通过本课程的学习,力争掌握工程流体力学的基本概念、基本原理、基本计算方法与基本实验技能,为各类后续课程的学习打下坚实的基础,也为今后从事各种以流体为工作介质、工作对象的生产与研究工作奠定必要的理论基础。

§ 1.2 流体的定义与特征以及连续介质的概念

1.2.1 流体的定义与特征

自然界物质的存在通常为三种状态:固体、液体与气体。这三种物质分子间的结构是不相同的。反映在宏观上,固体能保持其固定的形状与体积;液体有固定的体积,无固定的形状;气体则无固定的形状与体积。由于液体与气体具有无固定形状、能流动的共同特点,一般称为流体。流体与固体的主要区别在变形方面。在外力的作用下,固体虽然会发生微小变形,但只要不超出弹性限度,在去掉外力后,固体的变形可以消失。而流体在静止状态时,只能承受压力,不能承受切力。哪怕所承受的切力再微小,只要时间足够长,原先处于静止的流体将发生变形且流动。流体一般也不能承受拉力,这种特性就是流体的易流动性。从严格意义上说,只要具有易流动性特性的物质可以定义为流体。因此,除了液体与气体为流体外,等离子体、熔化的金属也属于流体。

流体与固体所具有上述不同的特性,是因为其内部的分子结构与分子间的作用力不同而造成的。一般来说,流体的分子间距比固体的分子间距大得多,流体分子间的作用力相对于固体要小得多,流体的分子运动比固体较为剧烈,因此流体就具有易流动性,也不能保持其一定的形状。

流体中液体与气体的主要区别在于压缩性。由于液体的分子间距远小于气体的分子间距,当液体受压时,只要分子间距稍有变小,则分子间的排斥力就会增大以抵抗所施加的压力,使得液体的分子间距很难再变小,也就是液体很不易被压缩,或液体的压缩性极小。这也是液体具有一定的体积的原因,而且也使得液体具有自由表面。而气体由于分子间距很大,分子间的吸引力微小,分子间的热运动起主要作用,就使得气体没有一定的形状,也没有一定的体积,总能均匀充满容纳它的容器,没有自由表面,具有很大的压缩性。

1.2.2 连续介质的概念

从分子的微观结构来看,流体是由分子所组成的。例如在标准状态下,气体的平均分子间距约为 $3.3 \times 10^{-7} \text{cm}$,平均分子直径约为 $2.5 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。在 1mm^3 的体积内,气体的分子数为 2.7×10^{16} 个。水的平均分子间距约为 $3.1 \times 10^{-8} \text{cm}$,平均分子直径约为 $2.5 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。在 1cm^3 的体积内,水的分子数为 3.34×10^{22} 个。

从上述分子结构来看,流体是由大量做随机运动的分子所组成的,这些离散分子之间是存在着空隙的,分子之间相互碰撞,交换着动量与能量。从微观角度来看,流体内部的质量分布存在着不连续与不均匀分布的情况,反映流体状况的物理量也会因为分子的随机运

动在空间与时间上呈现不连续的情况。然而,对日常所见的水等流体的宏观流动,用仪器与肉眼观察所见流体的流动是均匀的、连续的,反映流体运动特征的物理量是连续的,并且这些所观察的物理量是确定的且确实存在的。也就是说,流体所反映的微观结构与运动在时间与空间上都充满着不均匀性、离散性与随机性,而宏观结构与运动又明显呈现出均匀性、连续性与确定性。这两种如此不同的特性,和谐地统一在流体这个物质中,形成了流体运动的两个重要方面。

工程流体力学是一门研究流体宏观运动特性与规律的学科。从宏观角度来看,对于所讨论的一些实际工程问题,如各种设备、管道等的特征尺寸,往往远大于流体的分子距与分子自由程;这些实际工程的时间尺度,远大于分子运动的时间尺度;反映这些宏观运动状态的物理量实际是大量分子的运动所贡献的,是大量分子的统计平均值。因此,瑞士学者欧拉(Euler)在1753年提出了以连续介质的概念为基础的研究方法,该方法在流体力学的发展上起了巨大作用。连续介质的概念认为流体是由流体质点连续地、没有空隙地充满了流体所在的整个空间的连续介质。在此,作为被研究的流体中最基本要素的流体质点,是指微观上充分大、宏观上充分小的分子团。也就是说,对于质点这个在宏观上非常小的体积内,微观中含有大量的分子,这些分子的运动具有统计平均的特性,使得这个质点所表现的物理量在宏观上是确定的。例如边长 10^{-3}cm 的立方体,容积为 10^{-9}cm^3 ,在宏观上是非常小的一个点,而在这个体积内,在标准状态下,却包含有 2.69×10^{10} 个气体分子。在 10^{-6}s 这个对宏观来说非常短的时间尺度内,在 10^{-9}cm^3 体积内的气体分子互相碰撞的次数将达 10^{14} 次,这个时间尺度对微观来说是足够长的。可见用连续介质的概念作为工程流体力学的基本假设是合理的。

这样一来,连续介质认为流体质点是连续而不间断地紧密排列的,那么表征流体特性的各物理量的变化,在时间与空间上是连续变化的。也就是说,这些物理量是空间坐标与时间的单值连续函数。因此,可以利用以连续函数为基础的高等数学来解决工程流体力学的问题。

需要指出的是,流体连续介质的概念对大部分工程实际问题都是正确的,但对某些问题却是不适用的。如果所研究的问题的特征尺度接近或小于分子的自由程,连续介质的概念将不再适用。如在高空飞行的火箭、导弹,由于空气稀薄,分子的间距很大,可以与物体的特征尺度相比拟,虽然能找到可获得稳定平均值的分子团,显然这个分子团是不能当做质点的。又如激波内的气体运动,激波的尺寸与分子的自由程同阶,激波内的流体只能看做分子而不能当做连续介质来处理。

§ 1.3 流体的主要物理性质

流体的运动形态与运动规律,除了与边界等外部影响因素有关外,还取决于流体本身的物理性质与特征。在全面系统地研究流体的平衡与运动之前,应首先讨论流体的一些主要物理性质。

1.3.1 流体的质量与重量

质量是物质的一个基本属性,质量与物体的惯性和重量紧密相连。质量是物体惯性大

小的量度,质量越大,惯性则越大。根据理论力学中的达朗贝尔(D'Alembert)原理,惯性力的表达式为

$$F = -ma \quad (1-1)$$

式中: F ——惯性力; m ——物体的质量; a ——加速度。负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

流体与其他物质一样,具有质量。对于流体所具有的质量,可以用密度 ρ 来表征。密度 ρ 的定义是单位体积的流体所具有的质量。

对于均质流体,即任意点处的密度均相同的流体,其密度表达式为

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

式中: m ——流体的质量; V ——流体的体积。

对于非均质流体,即各点处的密度不相同的流体,其密度表达式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

在国际单位制(SI)中,质量的单位是 kg,体积的单位是 m^3 ,密度的单位是 kg/m^3 。

地球上的物体,不论是处于运动状态的还是处于静止状态的,都要受到地心引力的作用。物体的重量就是地心引力的结果,因此也称为重力,用 G 表示。设流体的质量为 m ,重力加速度为 g ,则重量 G 为

$$G = mg \quad (1-4)$$

流体所具有的重量,可以用重度 γ 来表征。重度 γ 的定义是单位体积的流体所具有的重量。重度也称容重、重率。重度与重量、体积的关系式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-5)$$

比较式(1-2)与式(1-5),重度与密度有下列关系

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-6)$$

在国际单位制(SI)中,重量的单位是 N,重力加速度的单位是 m/s^2 ,重度的单位是 N/m^3 。

流体的质量与流体在地球上所处的位置无关,而流体的重力则与流体在地球上所处的位置相关。从式(1-4)可见,这是因为流体的重力与重力加速度成正比,而其中的重力加速度是随地球的纬度与海拔高度而变化的。在计算时,可以取北纬 45° 海平面上重力加速度值 $g = 9.80665 m/s^2$,作为近似,可以取 $g = 9.81 m/s^2$ 或 $g = 9.8 m/s^2$ 。

作为流体,无论是气体还是液体,其密度都随压强与温度而变化。但对于液体,这种变化一般极其微小,因此液体的密度常可以视为常数。如水的密度,由表 1-3 可见,密度随温度的变化是非常小的。在计算时,一般取水在一个大气压下,温度为 $4^\circ C$ 时的最大密度值,即 $\rho = 1000 kg/m^3$ 。

表 1-1 给出了一些常用气体在标准大气压与 $20^\circ C$ 下的物理性质,表 1-2 给出了一些常用液体在标准大气压下的物理性质,表 1-3 给出了水在不同温度下的物理性质。

表 1-1 在标准大气压与 20℃ 下常用气体的物理性质

| 气 体 | 密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$ | 动力粘度 $\mu \times 10^5 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$ | 气体常数 $R / [J / (\text{kg} \cdot \text{K})]$ |
|-------|------------------------------------|---|---|
| 空 气 | 1.205 | 1.80 | 287 |
| 二氧化碳气 | 1.84 | 1.48 | 188 |
| 一氧化碳气 | 1.16 | 1.82 | 297 |
| 氮 气 | 0.166 | 1.97 | 2 077 |
| 氢 气 | 0.0839 | 0.90 | 4 120 |
| 氮 气 | 1.16 | 1.76 | 297 |
| 氧 气 | 1.33 | 2.00 | 260 |
| 甲 烷 | 0.668 | 1.34 | 520 |
| 饱和蒸汽 | 0.747 | 1.01 | 462 |

表 1-2 在标准大气压下常用液体的物理性质

| 液 体 种 类 | 温度 $t / ^\circ\text{C}$ | 密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$ | 动力粘度 $\mu \times 10^4 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$ |
|---------|-------------------------|------------------------------------|---|
| 纯 水 | 20 | 998 | 10.1 |
| 海 水 | 20 | 1 026 | 10.6 |
| 20% 盐水 | 20 | 1 149 | |
| 乙醇(酒精) | 20 | 789 | 11.6 |
| 苯 | 20 | 895 | 6.5 |
| 四氯化碳 | 20 | 1 588 | 9.7 |
| 氟利昂-12 | 20 | 1 335 | |
| 甘 油 | 20 | 1 258 | 14 900 |
| 汽 油 | 20 | 678 | 2.9 |
| 煤 油 | 20 | 808 | 19.2 |
| 原 油 | 20 | 850 ~ 928 | 72 |
| 润滑油 | 20 | 918 | |
| 氢(液态) | -257 | 72 | 0.21 |
| 氧(液态) | -195 | 1 206 | 2.8 |
| 水 银 | 20 | 13 555 | 15.6 |

表 1-3 不同温度下水的物理性质

| 水温 $t / ^\circ\text{C}$ | 密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$ | 重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$ | 粘度 $\mu / (10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$ | 运动粘度 $\nu / (10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$ | 体积弹性模量 $K / (10^9 \text{Pa})$ | 表面张力系数 $\sigma / (\text{N}/\text{m})$ |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|--|-------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 999.9 | 9.805 | 1.781 | 1.785 | 2.02 | 0.075 6 |
| 5 | 1000.0 | 9.807 | 1.518 | 1.519 | 2.06 | 0.074 9 |
| 10 | 999.7 | 9.804 | 1.307 | 1.306 | 2.10 | 0.074 2 |
| 15 | 999.1 | 9.798 | 1.139 | 1.139 | 2.15 | 0.073 5 |
| 20 | 998.2 | 9.789 | 1.002 | 1.003 | 2.18 | 0.072 8 |
| 25 | 997.0 | 9.777 | 0.890 | 0.893 | 2.22 | 0.072 0 |
| 30 | 995.7 | 9.764 | 0.798 | 0.800 | 2.25 | 0.071 2 |
| 40 | 992.2 | 9.730 | 0.653 | 0.658 | 2.28 | 0.069 6 |
| 50 | 988.0 | 9.689 | 0.547 | 0.553 | 2.29 | 0.067 9 |
| 60 | 983.2 | 9.642 | 0.466 | 0.474 | 2.28 | 0.066 2 |
| 70 | 977.8 | 9.589 | 0.404 | 0.413 | 2.25 | 0.064 4 |
| 80 | 971.8 | 9.530 | 0.354 | 0.364 | 2.20 | 0.062 6 |
| 90 | 965.3 | 9.466 | 0.315 | 0.326 | 2.14 | 0.060 8 |
| 100 | 958.4 | 9.399 | 0.282 | 0.294 | 2.07 | 0.058 7 |

1.3.2 流体的压缩性与膨胀性

流体的压缩性是指流体在压力的作用下,会发生体积压缩变形的特性。流体的膨胀性是指流体当温度升高时,会发生体积膨胀增大的特性。对于流体的这两个特性,液体与气体差别很大,下面分别叙述。

1. 液体的压缩性

液体的压缩性可以用体积压缩系数 β_p 来表示,其含义是,在温度不变的条件下,压强每增加一个单位,液体体积的相对变化量,即

$$\beta_p = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1-7)$$

式中: V ——液体受压前的体积, m^3 ; dV ——液体体积的变化量, m^3 ; dp ——液体压强增加量, Pa。

体积压缩系数 β_p 的单位为 $1/\text{Pa}$ 或 m^2/N 。由于压强增加时,液体的体积减小,则 dp 为正时, dV 为负,故在式(1-7)中等号右侧加一负号,以使体积压缩系数 β_p 保持正值。

表 1-4 给出了 0°C 时水的体积压缩系数 β_p 值。从表 1-4 可见,水的体积压缩系数是很小的。如常温下的水所受的压强在 $0 \sim 98.07 \times 10^5 \text{Pa}$ ($0 \sim 100$ 个工程大气压)内变化时,其 β_p 的值大约为 $5 \times 10^{-10} m^2/\text{N}$ 。这个数值相当于压强改变一个大气压,液体体积相对压缩量约为二万分之一,可见体积变化量甚微。

表 1-4 0°C 时水的体积压缩系数 β_p

| 压强 $\times 10^5/\text{Pa}$ | 4.9 | 9.81 | 19.61 | 39.23 | 78.45 | 98.07 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta_p \times 10^{-9}/(1/\text{Pa})$ | 0.539 | 0.537 | 0.531 | 0.532 | 0.515 | 0.500 |

由于液体的质量在压缩过程中保持不变,由式(1-2)可得

$$\frac{dV}{V} = - \frac{dp}{\rho} \quad (1-8)$$

这时体积压缩系数 β_p 也可以表示为

$$\beta_p = \frac{dp/\rho}{dp} \quad (1-9)$$

液体的压缩性还可以用体积弹性系数 K 来表示,体积弹性系数 K 是体积压缩系数 β_p 的倒数

$$K = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (1-10)$$

体积弹性系数 K 也称为体积弹性模量。从式(1-10)可见, β_p 越小,则 K 越大,而 β_p 越小或 K 值越大,则液体越不易压缩, $K = \infty$ 就表示绝对不可压缩的刚性物质。 K 的单位是 N/m^2 或 Pa。

2. 液体的膨胀性

液体的膨胀性可以用体积膨胀系数 β_t 来表示,其含义是在压强不变的条件下,温度每

增加 1°C , 液体体积的相对变化量, 即

$$\beta_t = \frac{dV/V}{dt} \quad (1-11)$$

式中: dt ——液体温度增加量, $^{\circ}\text{C}$; β_t ——体积膨胀系数, $1/^{\circ}\text{C}$ 。

表 1-5 给出了水的体积膨胀系数 β_t 值。从表 1-5 可见, 水的体积膨胀系数也是很小的。如 水在 $0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1 个工程大气压) 时, 在常温下 ($10 \sim 20^{\circ}\text{C}$), 温度每增高 1°C , 水的体积相对增加量仅为万分之一点五; 温度较高时, 也仅为万分之七。

表 1-5 水的体积膨胀系数 β_t

| 压强 $\times 10^5 / \text{Pa}$ | 温 度/ $^{\circ}\text{C}$ | | | | |
|------------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 1 ~ 10 | 10 ~ 20 | 40 ~ 50 | 60 ~ 70 | 90 ~ 100 |
| 0.98 | 14×10^{-6} | 150×10^{-6} | 422×10^{-6} | 556×10^{-6} | 719×10^{-6} |
| 98 | 43×10^{-6} | 165×10^{-6} | 422×10^{-6} | 548×10^{-6} | 704×10^{-6} |
| 196 | 72×10^{-6} | 183×10^{-6} | 426×10^{-6} | 539×10^{-6} | |
| 490 | 149×10^{-6} | 236×10^{-6} | 429×10^{-6} | 523×10^{-6} | 661×10^{-6} |
| 882 | 229×10^{-6} | 289×10^{-6} | 437×10^{-6} | 514×10^{-6} | 621×10^{-6} |

3. 气体的压缩性

气体的压缩性要比液体的压缩性大得多, 这是因为气体的密度随着温度与压力的变化将发生显著变化。气体的密度、温度与压力之间的关系可以由物理学、热力学中的完全气体 (物理学中称为理想气体) 状态方程来确定, 即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \text{或} \quad pV = RT \quad (1-12)$$

式中: p ——气体的绝对压强, Pa ; ρ ——气体的密度, kg/m^3 ; V ——气体的体积, m^3 ; T ——气体的热力学温度, K ; R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

常用气体的气体常数可见表 1-1。热力学温度, 也称开尔文温度, 有关系式 $T = T_0 + t$, t 的单位 $^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 273\text{K}$ 。

工程上, 可以按下式计算在不同的压强与温度下气体的密度 ρ

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \frac{p}{10.13 \times 10^4} \quad (1-13)$$

式中, ρ_0 为标准状态下某种气体的密度; 温度 t 的单位为 $^{\circ}\text{C}$; 压强 p 的单位为 Pa 。其中标准状态为 0°C 、 $10.13 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时的状态, 这时空气有 $\rho_0 = 1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$; 烟气有 $\rho_0 = 1.34 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

从完全气体状态方程式 (1-12) 可知, 当温度不变时, 完全气体的体积与压强成反比。这时如果压强扩大一倍, 则体积缩小为原来的一半; 当压强不变时, 完全气体的体积与温度成正比。可见, 气体的压缩性是很大的。

4. 不可压缩流体的假设

由前面的叙述可知, 压强与温度的变化都会引起流体密度的变化。一般来说, 任何流