

高等学校给水排水工程专业系列教材

# 工程流体力学

(水力学)

伍悦滨 主 编  
王 芳 副主编  
伍悦滨 编 写  
王 芳  
曹慧哲  
朱蒙生

中国建筑工业出版社

高等学校给水排水工程专业系列教材

# 工程流体力学(水力学)

伍悦滨 主 编

王 芳 副主编

伍悦滨 王 芳 曹慧哲 朱蒙生 编写

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学(水力学)/伍悦滨主编. —北京:中国建筑工业出版社, 2005  
(高等学校给水排水工程专业系列教材)  
ISBN 7-112-07676-5

I.工... II.伍... III.①工程力学 流体力学—高等学校—教材②水力学—高等学校—教材 IV. TB126②TV13  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 145043 号

本书是为高等学校给水排水专业水力学课程编写的本科教材,也是全国勘察设计注册公用设备工程师(给水排水)流体力学、水力学考试的首选参考书,同时可供其他专业及相关科技人员参考。

教材内容覆盖了全国勘察设计注册公用设备工程师(给水排水)执业资格考试基础考试大纲中对流体力学、水力学部分的全部内容要求。全书共 13 章:绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学基础、量纲分析和相似原理、流动阻力和能量损失、边界层和绕流运动、不可压缩流体的管道流动、明渠恒定流、堰流、渗流、紊流射流和扩散基本理论、流动要素量测。每章均有思考题和习题,附录有各章主要专业术语中英文对照。

\* \* \*

责任编辑:田启铭  
责任设计:赵力  
责任校对:刘梅 张虹

高等学校给水排水工程专业系列教材  
工程流体力学(水力学)  
伍悦滨 主编  
王芳 副主编  
伍悦滨 王芳 曹慧哲 朱蒙生 编写

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店总店科技发行所发行  
北京千辰公司制作  
印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:19 字数:473 千字  
2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月第一次印刷  
印数:1—4000 册 定价:26.00 元

ISBN 7-112-07676-5  
(13630)

版权所有 翻印必究  
如有印装质量问题,可寄本社退换  
(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>  
网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

# 前 言

本书是为高等学校给水排水专业水力学课程编写的教材,也可作为工民建、道路桥梁与交通工程、建筑环境与设备工程、环境工程等专业的流体力学和水力学教学参考用书。同时,由于本书内容覆盖了全国注册公用设备工程师(给水排水)执业资格考试基础考试大纲中对流体力学、水力学部分的内容要求,本书还可作为注册公用设备工程师(给水排水)流体力学、水力学复习考试的首选参考书。

本书的编写广泛吸收了国内各类优秀流体力学和水力学教材的精华,并结合了编者多年教学实践,力求有所发展和提高。为适应给水排水专业发展和培养目标的需要,加强了必要的理论基础并做到与专业密切结合,根据注册公用设备工程师(给水排水)执业资格基础考试大纲的要求,精心设计了全书的知识体系和内容;为培养学生科学思维、提高分析和解决工程问题的能力,各章均精心选编并设计了思考题和习题。

本书共 13 章,主编伍悦滨,副主编王芳。具体编写分工如下:第 1、9、10、11 章由伍悦滨编写,第 3、7、12、13 章由王芳编写,第 4、6、8 章由曹慧哲编写,第 2、5 章由朱蒙生编写。

鉴于编者水平有限,书中疏漏和不妥之处恳请各位读者、专家批评指正。

编 者  
2005 年 8 月

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 流体力学及其发展史 .....	1
1.2 作用在流体上的力 .....	4
1.3 流体的主要物理性质 .....	5
思考题 .....	11
习 题 .....	11
第 2 章 流体静力学 .....	13
2.1 静止流体中压强的特性.....	13
2.2 流体平衡微分方程.....	14
2.3 重力场中流体静压强的分布规律.....	16
2.4 流体的相对平衡.....	19
2.5 液体作用在平面上的总压力.....	22
2.6 液体作用在曲面上的总压力.....	24
思考题 .....	29
习 题 .....	29
第 3 章 流体运动学 .....	34
3.1 流体运动的描述方法.....	34
3.2 欧拉法的基本概念.....	36
3.3 连续性方程.....	40
3.4 流体微团运动的分析.....	43
思考题 .....	48
习 题 .....	48
第 4 章 流体动力学基础 .....	51
4.1 理想流体运动微分方程.....	51
4.2 元流的伯努利方程.....	52
4.3 实际流体总流的伯努利方程.....	54
4.4 总流的动量方程和动量矩方程.....	61
4.5 恒定平面势流.....	66
4.6 不可压缩黏性流体的运动微分方程.....	78
思考题 .....	81
习 题 .....	82
第 5 章 量纲分析和相似原理 .....	87
5.1 量纲和谐原理.....	87
5.2 量纲分析法.....	89

5.3 相似理论基础.....	93
5.4 相似定理.....	97
5.5 模型试验.....	99
思考题.....	101
习 题.....	102
<b>第 6 章 流动阻力和能量损失.....</b>	<b>104</b>
6.1 流动阻力和能量损失的分类 .....	104
6.2 实际流体的两种流动状态 .....	105
6.3 均匀流动方程式 .....	109
6.4 圆管中的层流运动 .....	110
6.5 紊流理论基础 .....	113
6.6 圆管紊流中的沿程水头损失 .....	119
6.7 非圆管的沿程水头损失 .....	127
6.8 局部水头损失 .....	129
6.9 恒定总流水头线的绘制 .....	136
思考题.....	139
习 题.....	140
<b>第 7 章 边界层和绕流运动.....</b>	<b>144</b>
7.1 边界层的基本概念 .....	144
7.2 边界层动量方程 .....	147
7.3 曲面边界层的分离现象与卡门涡街 .....	148
7.4 绕流阻力和升力 .....	150
思考题.....	154
习 题.....	154
<b>第 8 章 不可压缩流体的管道流动.....</b>	<b>156</b>
8.1 孔口出流 .....	156
8.2 管嘴出流 .....	160
8.3 简单管道中的恒定有压流 .....	163
8.4 复杂长管的恒定有压流 .....	171
8.5 沿程均匀泄流管道中的恒定有压流 .....	175
8.6 管网水力计算基础 .....	178
8.7 有压管道中的水击 .....	183
思考题.....	187
习 题.....	187
<b>第 9 章 明渠恒定流.....</b>	<b>195</b>
9.1 概述 .....	195
9.2 明渠均匀流的特征及其形成条件 .....	197
9.3 明渠均匀流的水力计算 .....	198
9.4 无压圆管均匀流 .....	204
9.5 明渠运动状态 .....	208

9.6	水跃和水跌 .....	213
9.7	棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析 .....	218
9.8	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算 .....	225
	思考题 .....	227
	习 题 .....	228
<b>第 10 章</b>	<b>堰流 .....</b>	<b>230</b>
10.1	堰流及其特征 .....	230
10.2	宽顶堰溢流 .....	231
10.3	薄壁堰和实用堰溢流 .....	234
10.4	小桥孔径的水力计算 .....	237
10.5	水工建筑物下游的水流衔接与消能 .....	240
	思考题 .....	244
	习 题 .....	244
<b>第 11 章</b>	<b>渗流 .....</b>	<b>246</b>
11.1	渗流的基本概念 .....	246
11.2	渗流基本定律 .....	248
11.3	井和集水廊道的渗流计算 .....	252
11.4	井群的渗流计算 .....	256
	思考题 .....	257
	习 题 .....	257
<b>第 12 章</b>	<b>紊流射流和扩散基本理论 .....</b>	<b>259</b>
12.1	紊流自由淹没射流的结构与特征 .....	259
12.2	圆断面射流的运动分析 .....	262
12.3	温差射流与浓差射流 .....	265
12.4	分子扩散 .....	269
12.5	层流扩散 .....	271
12.6	紊流扩散 .....	272
12.7	剪切流的离散 .....	273
	思考题 .....	275
	习 题 .....	275
<b>第 13 章</b>	<b>流动要素量测 .....</b>	<b>277</b>
13.1	压强与液位的量测 .....	277
13.2	流速量测 .....	281
13.3	流量量测 .....	286
13.4	流动显示与全流场测速法 .....	290
	思考题 .....	291
	习 题 .....	291
<b>附录</b>	<b>本书各章主要专业术语中、英文对照 .....</b>	<b>293</b>
	<b>主要参考文献 .....</b>	<b>297</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 流体力学及其发展史

### 1.1.1 流体力学的研究对象

液体与气体统称为流体。

流体力学是研究流体机械运动规律及其应用的科学。

工程流体力学则主要研究流体力学的基本原理及其在工程中的应用。

流体区别于固体的最基本力学特征就是具有流动性。观察流动现象,诸如微风吹过平静的水面,水面因受气流的摩擦(沿水面作用的切力)而流动,斜坡上的水因受重力沿坡面方向的切向分力而流动。这些现象表明,流体静止时不能承受切力,或者说任何微小切力的作用,都会使流体流动,直到切力消失,流动才会停止,这就是流动性的力学解释。此外,流体无论静止或运动都几乎不能承受拉力。

流体力学研究的内容是机械运动规律。流体运动遵循机械运动的普遍规律,如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量转化和守恒定律等,并以这些普遍规律,作为建立流体力学理论的基础。

### 1.1.2 连续介质模型

流体力学研究的对象是流体,从微观角度来看,流体是由大量的分子构成的,这些分子都在作无规则的热运动。由于分子之间存在空隙,描述流体的诸物理量(如密度、压强和流速等)在空间的分布是不连续的。同时,由于分子的随机运动,导致空间任一点上流体物理量在时间上的变化也是不连续的。显然,以分子为对象来研究流体的运动,将极为困难。现代物理研究表明,在标准状况下, $1\text{cm}^3$ 的水中约有 $3.3 \times 10^{22}$ 个水分子,分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ ;  $1\text{cm}^3$ 气体约有 $2.7 \times 10^{19}$ 个分子,分子间的距离约为 $3 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。可见分子间距离之微小,即使在很小的体积中也含有大量的分子,足以得到与分子数目无关的各项统计平均特性。

流体力学的研究目的是流体的宏观机械运动规律,而这一规律恰恰是研究对象中所有分子微观运动的宏观表现。1755年瑞士数学家和力学家欧拉(L. Euler 1707—1783),首先提出把流体当做是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体来研究,这就是连续介质模型。所谓质点,是指含有大量分子的,与一切流动空间相比体积可忽略不计的,又具有一定质量的流体微团。建立连续介质模型,是为避开分子运动的复杂性,对流体物质结构的简化。建立连续介质模型后,流体运动中的物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数,这样就可用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质模型对于学过固体力学的读者并不陌生。在材料力学和弹塑性力学中,都是把受力构件当做连续介质,来研究应力和变形的规律。可以说连续介质模型是固体力学和

流体力学等许多分支学科共同的理论基础。

## 1.1.3 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法主要为理论分析、数值计算和实验研究三种。

理论分析是通过对流体性质及流动特性的科学抽象,提出合理的理论模型,应用已有的普遍规律,建立控制流体运动的闭合方程组,将实际的流动问题转化为数学问题,在相应的边界条件和初始条件下求解。理论分析的研究方法由欧拉首先创立,并逐步完善,迄今已发展成流体力学的一个分支——理论流体力学,成为流体力学的主要组成部分。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。

数值计算是在应用计算机的基础上,采用各种离散化方法(有限差分法、有限元法等),建立各种数值模型,通过计算机进行大规模数值计算和数值实验,得到在时间和空间上许多数字组成的集合体,最终获得定量描述流场的数值解。近年来,这一方法得到很大发展,也已形成流体力学的一个分支——计算流体力学。

实验研究则是通过对具体流动的观测与测量来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证,实验又需要理论来指导。流体力学的实验研究包括原型观测和模型试验,通常以模型试验为主。

上述三种方法互相结合,为发展流体力学理论,解决复杂的工程技术问题奠定了基础。

## 1.1.4 流体力学的发展史

流体力学形成和发展的历史可分为四个阶段。

第一阶段 流体力学形成的萌芽阶段(16 世纪以前的时期)。

最早的流体力学理论是公元前 250 年左右由希腊哲学家阿基米德(Archimedes B. C. 287 – B. C. 212)提出的《论浮体》,它至今仍是流体静力学的一个重要的组成部分。但此后长达 1700 多年,流体力学未见有重大的进展。直到 15 世纪后期,在由意大利开始的文艺复兴时期,流体力学发展的停滞局面才被打破。公元 1500 年意大利物理学家和艺术家达·芬奇(Da Vinci 1452—1519)提出了《论水的运动和水的测量》一文,并导出了不可压缩流体的质量守恒方程。但他的著作直到 19 世纪末 20 世纪初才被发现。

总的看来,在 16 世纪以前,近代的自然科学还未形成。人类对自然界的认识,还只是一些直观的轮廓,以及和哲学混在一起的观念。流体力学还没有具备发展成一门独立科学的条件。但是人类在长期生产实践中积累的丰富经验,为流体力学的发展打下了感性认识的基础。

第二阶段 流体力学奠定了作为一门独立科学的基础阶段(16 世纪中叶~18 世纪中叶)。

16 世纪中叶~17 世纪中叶是这一阶段的前期。此时由于人们还未找到力和运动之间的普遍联系,尚未发现数学分析的方法,所以当时的一些成就都偏重于流体静力学方面。

17 世纪中叶~18 世纪中叶是这一阶段的后期。1687 年牛顿(I. Newton 1642—1727)提出了著名的力学定律,奠定了物质机械运动的理论基础。大致同时创立的微积分原理,也为流体力学的发展提供了必要的条件,1738 年瑞士物理学家伯努利(D. Bernoulli 1700—1782)在他写的《水动力学》一书中首次系统地阐明了水动力学的一些基本概念,并用能量原理解决了一些流动问题。1755 年瑞士数学家欧拉在他的著作《流体运动的一般原理》中建立了理想流体运动微分方程式。他首先应用数学分析方法研究流体力学问题,为理论流体力学的发展开辟了新的道路。这些成就为流体动力学奠定了基础。

第三阶段 流体力学沿着古典流体力学和水力学两条道路发展的阶段(18世纪中叶~19世纪末)。

欧拉提出的不考虑流体内部摩擦阻力的理想流体,是一种经过简化的抽象的流体。只有在摩擦阻力很小的流动中,由这个方程得到的解答才能较好地符合实际。否则,理论得到的结果甚至可能是荒谬的。到19世纪,急剧发展的工程技术又向流体力学提出了许多用理想流体无法解决的问题。在这种情况下,1826年法国工程师纳维(L. M. H. Navier 1785—1836)首先提出了考虑流体内部摩擦阻力的黏性流体运动微分方程。此后,很多人致力于研究该微分方程的数学解答。这些研究大大丰富了流体力学的内容,逐渐形成了现在的所谓古典流体力学。

黏性流体运动微分方程虽然考虑了摩擦阻力,但它的形式比较复杂,只有在极简单的情况下才能求解。但是,当时迅速发展的生产又向流体力学提出了一系列问题,要求解决。于是人们不得不求助于实验,以便根据工程总结与模型试验来解决工程技术问题。水力学就是这样逐渐形成的。水力学是在伯努利成就的基础上,利用大量的实验资料,来解决那些在古典流体力学中无法解决的问题的。

第四阶段 发展成为近代流体力学的阶段(由19世纪末至今)。

从19世纪后期开始,流体力学以空前的速度蓬勃地发展起来。流体力学在这一阶段的发展有以下两个特点。

(1)理论与实验密切结合,大大促进了流体力学的发展速度。英国人雷诺(O. Reynolds 1842—1912)于1882年首先阐明的相似原理大大提高了对实测资料进行理论概括的能力,从而加速了理论与实验的结合。雷诺以后,实验技术有了很大提高,实验作用也有所扩大。研究流体运动的实验室(水力学实验室和空气动力学实验室)陆续建立。水力学实验由以现场进行的实物观测为主,逐渐发展为实物观测与模型试验并重。试验的目的也不像先前那样局限于解决具体工程问题,同时还加强了对基本理论的验证和基本规律的寻求。理论与实验的密切结合,是近代流体力学迅速发展的重要因素。

(2)理论与生产实践的密切联系,使流体力学的研究领域不断扩大,出现了很多新的分支。这一阶段的最重要特点还在于理论与生产实践的紧密联系。流体力学逐渐广泛地应用于生产实践。在生产实践的推动下,大大丰富了流体力学的内容。流体力学的研究领域不断扩大,出现了许多新的分支。

近代流体力学的发展,首先是和本世纪航空事业的蓬勃兴起分不开的。例如平面势流理论、机翼理论、螺旋桨理论和边界层理论等,都是在航空事业的推动下发展起来的。其中德国人普朗特(L. Prandtl 1875—1953)于1904年首先提出的边界层理论,对进一步推动流体力学与生产实践的联系起了重大作用。其他如与多方面问题有关的紊流理论,与高速飞行和涡轮机制造有关的气体动力学理论等,本世纪以来都取得了巨大的成就。20世纪40年代以来,由于超高速飞行、火箭技术、原子能利用、电子计算机等尖端技术以及其他新兴工业的发展,给流体力学提供了许多新的课题,大大开拓了流体力学的研究领域,促使一些流体力学新分支的诞生,如电磁流体力学、化学流体力学、计算流体力学、非牛顿流体力学、多相流体力学等等,这些新分支一般都具有边缘科学的性质。流体力学正越来越多地和其他有关的科学结合,这正是人们的认识由简单到复杂,逐渐认识到物质的不同运动形式之间的相互联系和转化关系的结果。

我国在防治水害和运用水利方面有着悠久的历史。在中国古代的典籍中,就有相传4000多年前大禹治水“疏壅导滞”,使滔滔洪水各归于河的记载。先秦时期(B. C. 256—B. C. 251)在岷江中游建都江堰,从此成都平原“水旱从人,食无饥馑,无凶年”。东汉初杜诗制造了水排,就是利用山溪水流驱动鼓风机用于炼铁,这可以说是近代水力机械的先驱。古时计时工具——铜壶滴漏的出现,说明当时对孔口出流的规律已有了定量的认识。只是近代中国长期处在封建统治之下,科学技术严重滞后,致使我国在流体力学发展成为一门严密学科的关键时期,未能作出应有的贡献。

中华人民共和国成立以来,随着工农业发展的需要,人们对流体力学进行了大量的理论和实验研究,获得了很多重要的成果。我国著名科学家钱学森、周培源、郭永怀等在流体力学方面都有卓越的成就和巨大的贡献。特别是改革开放以来,我国在与流体力学有关的工农业生产、工程以及国防建设工程等方面都取得很大的进展和成就。1992年开始兴建的长江三峡工程已经如期实现水库初期蓄水、永久船闸通航和首批机组并网发电三大目标。南水北调世纪工程分西、东、中三条调水方案,也已开始分布实施。同时我国在防治水污染、保护和合理利用水资源、保护和改善大气环境质量、市政建设、给水排水工程等方面也都取得了可喜成绩。

## 1.1.5 工程流体力学(水力学)的研究对象和任务

水力学是研究液体平衡和机械运动规律及其在生产实践中应用的一门科学。水力学研究的主要对象是以水为代表的液体,并因此得名。传统水力学由水静力学和水动力学两大部分组成。其理论基础和流体力学是相同的,但以采用一维总流的分析方法为主。近二三十年来,现代生产建设的迅速发展,如高坝和巨型电站的建设、海洋开发和环境污染的防治等,对水力学提出了更多问题,同时科学技术的进步又为水力学的研究提供了更多更好的方法,这样水力学的研究就从以一维流动为主,扩展到二维、三维流动;从单相扩展到多相流动;从水量计算扩展到水质分析等等。水力学的分支也由传统的管道水力学、河流水力学、地下水力学等,扩展增加了电站水力学、计算水力学、环境水力学等新的分支。总之,随着社会的发展和科学技术的进步,水力学学科的研究内容正在不断变化、发展和提高。

水力学是许多工程实践的基础。工农业生产的许多部门,在给水处理、水利工程、道路桥梁、石油开采和机械制造等方面,都能碰到大量与液体运动规律有关的生产技术问题。例如,在建筑工程和交通土建工程中,基坑排水、围堰修建、桥渡设计等都要用到水力学知识;在给水处理工程中,无论是地表取水、水厂的水处理和输配水管路设计都离不开水力学基本理论。因此水力学是很多工科专业非常重要的一门专业基础课。

## 1.2 作用在流体上的力

力是造成机械运动的原因,因此研究流体机械运动的规律,就要从分析作用于流体上的力入手。作用在流体上的力,按作用方式可分为两类。

### 1.2.1 表面力

表面力是通过直接接触,施加在接触表面上的力。

在流体中取隔离体为研究对象,如图1.1所示,周围流体对隔离体的作用以分布的表面力代替。表面力的大小用应力来表示。设 $A$ 为隔离体表面上的一点,包含 $A$ 点取微小面

积  $\Delta A$  ,若作用在  $\Delta A$  上的总表面力为  $\Delta \vec{F}_s$  ,将其分解为法向分力(压力)  $\Delta P$  和切向分力  $\Delta T$  ,则  $\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$  为  $\Delta A$  上的平均压应力 ,取极限  $p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA}$  为  $A$  点的压应力 ,又称为  $A$  点的压强 ;  $\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA}$  为  $A$  点的切应力。

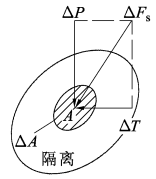


图 1.1 表面力

应力的单位是帕斯卡(Pascal),简称帕,以符号 Pa 表示,  $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

### 1.2.2 质量力

质量力是指施加在隔离体每个质点上的力,重力是最常见的质量力。此外,若所取坐标系为非惯性系,建立力的平衡方程时,其中的惯性力如离心力、科里奥利(Coriolis)力也归为质量力。

质量力大小用单位质量力表示。设均质流体的质量为  $m$  ,所受质量力为  $\vec{F}_B$  ,则单位质量力为

$$\vec{f}_B = \frac{\vec{F}_B}{m}$$

单位质量力在各坐标轴上的分量为

$$X = \frac{F_{BX}}{m}, \quad Y = \frac{F_{BY}}{m}, \quad Z = \frac{F_{BZ}}{m}$$

$$\vec{f}_B = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

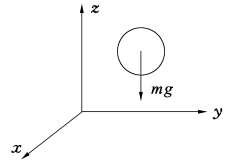


图 1.2 重力

若作用在流体上的质量力只有重力,如图 1.2 所示,则

$$F_{BX} = 0, \quad F_{BY} = 0, \quad F_{BZ} = -mg$$

单位质量力则分别为  $X = 0, Y = 0, Z = \frac{-mg}{m} = -g$ 。单位质量力的单位为  $\text{m}/\text{s}^2$  ,与加速度单位相同。

## 1.3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素,同流体运动有关的主要物理性质有惯性、黏滞性和压缩性。

### 1.3.1 惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质,要改变物体的运动状态,就必须克服惯性的作用。

质量是惯性大小的度量,单位体积的质量称为密度,以符号  $\rho$  表示。若均质流体的体积为  $V$  ,质量为  $m$  ,其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

密度的单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

液体的密度随压强和温度的变化量很小,一般可视为常数。通常情况下,水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$  ,水银的密度为  $13600\text{kg}/\text{m}^3$ 。气体的密度随压强和温度变化,一个标准大气压下  $0^\circ\text{C}$  空气的密度为  $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。在一个标准大气压条件下,水的密度见表 1.1,其他几种

常见流体的密度见表 1.2。

水的密度

表 1.1

温度(°C)	0	4	10	20	30	40	60	100
密度(kg/m <sup>3</sup> )	999.87	1000.0	999.73	998.23	995.67	992.24	983.24	958.38

几种常见流体的密度

表 1.2

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度(°C)	20	20	20	20	15	15
密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.20	799	1590	13550	700~750	1020~1030

### 1.3.2 黏滞性

黏滞性是流体固有的物理性质。

(1)黏滞性 图 1.3 所示的两个平行平板间充满静止流体,两平板间距离为  $h$ ,以  $y$  方向为法线方向。保持下平板固定不动,使上平板沿所在平面以速度  $U$  运动。与上平板表面相邻的一层流体,随平板以速度  $U$  运动,并逐层向内影响,各层相继流动,直至与下平面相邻的速度为零的流层。在  $U$  和  $h$  都较小的情况下,各流层的速度沿法线方向呈直线分布。

上平板带动与其相邻的流层运动,而能影响到内部各流层运动,说明内部各流层间存在着切向力,即内摩擦力,这就是黏滞性的宏观表象。也就是说,黏滞性就是流体的内摩擦特性。

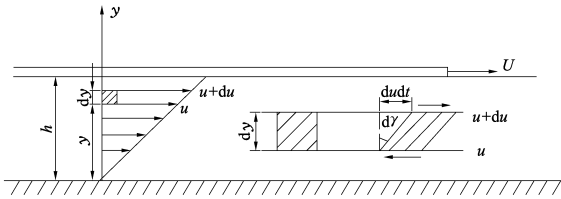


图 1.3 黏滞性实验

(2)牛顿内摩擦定律 通过大量的实验,牛顿(Newton)在 1687 年提出:流体的内摩擦力(切力) $T$  与流速梯度  $\frac{du}{dy}$  成比例;与流层的接触面积  $A$  成比例;与流体的性质有关;与接触面上的压力无关。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

以应力表示

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.3)$$

式(1.3)称为牛顿内摩擦定律,式中  $\frac{du}{dy}$  为流速在法线方向的变化率,称为速度梯度。为进一步说明该项的物理意义,在厚度为  $dy$  的上、下两流层间取矩形流体微团,如图 1.3 所示。因上、下层的流速相差  $du$ ,经  $dt$  时间,微团除位移外,还发生剪切变形  $d\gamma$ ,即

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du dt}{dy}$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt}$$

可知速度梯度  $\frac{du}{dy}$  实为流体微团的剪切变形速率  $\frac{d\gamma}{dt}$  故牛顿内摩擦定律又可表示为

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \tag{1.4}$$

上式表明流体因黏滞性产生的内摩擦力与微团的剪切变形速率成正比,所以黏滞性的定义又可表示为流体阻抗剪切变形的特性。

凡符合牛顿内摩擦定律的流体,称为牛顿流体,如水、空气、汽油、煤油、乙醇等;凡不符合的流体,称非牛顿流体,如聚合物液体、泥浆、血浆等。牛顿流体和非牛顿流体的区别,可用图 1.4 表示,  $\tau_0$  为初始(屈服)切应力。本书只讨论牛顿流体。

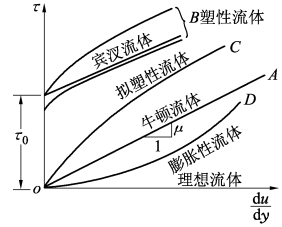


图 1.4 非牛顿流体的流动曲线

$\mu$  是比例系数,称为动力黏滞系数,单位是  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。动力黏滞系数是流体黏滞性大小的度量,  $\mu$  值越大,流体越黏,流动性越差。

在分析黏性流体运动规律时,动力黏滞系数  $\mu$  和密度  $\rho$  经常以比的形式出现,将其定义为流体的运动黏滞系数

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.5}$$

单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

气体的黏滞性不受压强影响,液体的黏滞性受压强影响也很小。黏滞性随温度而变化,不同温度下水和空气的动力黏滞系数分别见表 1.3 和表 1.4。

不同温度下水的黏滞系数

表 1.3

$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

不同温度下空气的黏滞系数

表 1.4

$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	1.72	13.7	50	1.96	18.6
10	1.78	14.7	60	2.01	19.6
20	1.83	15.7	70	2.04	20.5
30	1.87	16.6	80	2.10	21.7
40	1.92	17.6	90	2.16	22.9

续表

$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
100	2.18	23.6	180	2.51	33.2
120	2.28	26.2	200	2.59	35.8
140	2.36	28.5	250	2.80	42.8
160	2.42	30.6	300	2.98	49.9

由表 1.3 和表 1.4 可见,水的动力黏滞系数随温度升高而减小,空气的动力黏滞系数则随温度升高而增大。原因是液体分子间的距离小,分子间的引力即内聚力是构成黏滞性的主要因素,温度升高,分子动能增大,间距增大,内聚力减小,动力黏滞系数随之减小;气体分子间的距离远大于液体,分子热运动引起的动量交换是形成黏滞性的主要因素,温度升高,分子热运动加剧,动量交换加大,动力黏滞系数随之增大。

(3)理想流体 流体黏滞性的存在,往往给流体运动规律的研究带来极大困难。为了简化理论分析,特引入理想流体概念,即所谓无黏性的流体( $\mu=0$ )。理想流体实际上是不存在的,它只是一种对物性简化的力学模型。

由于理想流体不考虑黏滞性,使得对流动的分析大为简化,从而容易得出理论分析的结果,该结果对某些黏滞性影响很小的流动,能够较好地符合实际,对黏滞性影响不能忽略的流动,则可通过实验加以修正,从而能比较容易地解决许多实际流动问题。这是处理黏性流体运动问题的一种有效方法。

**【例 1.1】** 旋转圆筒黏度计,外筒固定,内筒由同步电机带动旋转。内外筒间充入实验液体,如图 1.5 所示。已知内筒半径  $r_1 = 1.93\text{cm}$ ,外筒半径  $r_2 = 2\text{cm}$ ,内筒高  $h = 7\text{cm}$ 。实验测得内筒转速  $n = 10\text{r}/\text{min}$ ,转轴上扭矩  $M = 0.0045\text{N}\cdot\text{m}$ 。试求该实验液体的黏度。

**【解】** 充入内外筒间隙的实验液体,在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小,速度近似直线分布,不计内筒端面的影响,内筒壁的切应力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta}$$

式中

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \delta = r_2 - r_1$$

扭矩

$$M = \tau A r_1 = \tau \times 2\pi r_1 h \times r_1$$

解得

$$\mu = \frac{15M\delta}{\pi^2 r_1^3 h n} = 0.952\text{Pa}\cdot\text{s}$$

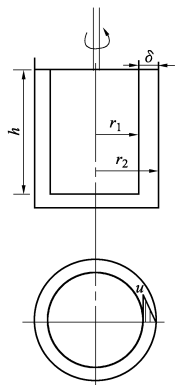


图 1.5 旋转黏度计

### 1.3.3 压缩性和热胀性

压缩性是流体因压强增大,分子间距离减小,体积缩小,密度增大的性质。热胀性是温度升高,分子间距离增大,体积膨胀,密度减小的性质。

(1)液体的压缩性和热胀性 液体的压缩性用压缩系数  $\kappa$  表示。若在一定温度下,液体的体积为  $V$ ,压强增加  $dp$  后,体积减小  $dV$ ,则压缩系数为

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1.6)$$

单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。根据液体压缩前后质量不变

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

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

则

$$\kappa = \frac{d\rho/\rho}{d\rho} \quad (1.7)$$

液体的压缩系数随温度和压强变化,水在  $0^\circ\text{C}$  不同压强下的压缩系数见表 1.5。表中符号  $p_{\text{at}}$  表示工程大气压,  $p_{\text{at}} = 98000\text{Pa}$ 。

水的压缩系数

表 1.5

压强(at)	5	10	20	40	80
压缩系数( $\text{m}^2/\text{N}$ )	$0.538 \times 10^{-9}$	$0.536 \times 10^{-9}$	$0.531 \times 10^{-9}$	$0.528 \times 10^{-9}$	$0.515 \times 10^{-9}$

压缩系数的倒数是体积模量,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1.8)$$

$K$  的单位是  $\text{N}/\text{m}^2$ 。进行水击计算时,水的体积模量可取  $K = 2.1 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。

液体的热胀性用热胀系数  $\alpha_V$  表示,若在一定压强下,液体的体积为  $V$ ,温度升高  $dT$  后,体积增加  $dV$ ,则

$$\alpha_V = \frac{dV/V}{dT} = -\frac{d\rho/\rho}{dT} \quad (1.9)$$

$\alpha_V$  的单位是温度的倒数,为  $^\circ\text{C}^{-1}$  或  $\text{K}^{-1}$ 。液体的热胀系数随压强和温度而变化,水在 1 标准大气压下,不同温度时的热胀系数见表 1.6。

水的热胀系数

表 1.6

温度( $^\circ\text{C}$ )	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
热胀系数( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	$0.14 \times 10^{-4}$	$0.15 \times 10^{-4}$	$0.42 \times 10^{-4}$	$0.55 \times 10^{-4}$	$0.72 \times 10^{-4}$

由表 1.5 和表 1.6 可见,水的压缩性和热胀性都很小,一般均可忽略不计。但在特殊情况下,如有压管道中的水击,水中爆炸波的传播等,就必须考虑水的压缩性;在液压封闭系统或热水采暖系统中,要考虑当工作温度变化较大时体积膨胀对系统造成的影响。

(2)气体的压缩性和热胀性 气体具有显著的压缩性和热胀性。压强与温度的变化对气体密度的影响很大。通常情况下,气体密度、压强与温度之间的关系满足理想气体状态方程式

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.10)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压强, Pa;

$T$ ——气体的热力学温度, K;

$\rho$ ——气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对于空气,  $R = 287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;对于其他气体,在标准

状况下,  $R = \frac{8314}{n}$ ,  $n$  为气体的分子量。

(3)不可压缩流体 实际流体都是可压缩的,然而有些流体在流动过程中,密度变化很

小,可以忽略,由此引出不可压缩流体的概念。所谓不可压缩流体,是指每个质点在运动全过程中,密度不变的流体。对于均质的不可压缩流体,密度时时处处都不变化,即  $\rho = \text{常数}$ 。不可压缩流体是又一理想化的力学模型。

液体的压缩系数很小(体积模量很大),在一定的压强变化范围内,密度几乎不变。一般的液体平衡和运动问题,都可按不可压缩流体进行理论分析。

气体的压缩性远大于液体,是可压缩流体。但在气流的速度不大,远小于音速(约 340m/s),管道也不很长的气体流动过程中,诸如建筑工程中的通风管道、低温烟道等,密度没有明显变化,也可作为不可压缩流体处理。

### 1.3.4 表面张力特性

在液体自由表面的分子作用半径范围内,由于分子引力大于斥力,在表层沿表面方向会产生张力,这种张力称表面张力。它不仅在液体与气体接触的周界面上发生,而且还会在液面与固体或一种液体与另一种液体相接触的周界面上发生。表面张力的大小可用表面张力系数  $\sigma$  来度量。 $\sigma$  是自由表面上单位长度所受的张力,单位为  $\text{N/m}$ 。 $\sigma$  值随液体的种类和温度而变化。水的  $\sigma$  值列于表 1.7。

水的表面张力系数

表 1.7

温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
表面张力系数 $\sigma$ ( $\text{N/m}$ )	0.0756	0.0749	0.0742	0.0735	0.0728	0.0720	0.0712	0.0696	0.0679	0.0662	0.0644	0.0626	0.0608	0.0589

由于表面张力的作用,如果把细管竖立在液体中,液体就会在细管中上升(如水)或下降(如水银),分别如图 1.6(a)、(b)所示,这种现象称毛细现象。因为表面张力很小,一般不考虑它的影响。在某些情况,如用细管做测压管或液体在地下流动等,需考虑毛细现象。

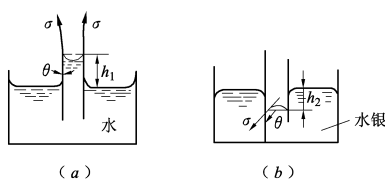


图 1.6 毛细现象

### 1.3.5 汽化压强

液体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化,液体汽化为蒸汽。汽化的逆过程称为凝结,蒸汽凝结为液体。在液体中,汽化与凝结同时存在,当这两个过程达到动平衡时,宏观的汽化现象停止。此时该液体的蒸汽称为饱和蒸汽,饱和蒸汽所产生的压强称为饱和蒸汽压,或汽化压强。液体的汽化压强与温度有关,水的汽化压强见表 1.8。

水的汽化压强

表 1.8

水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	0	5	10	15	20	40	50	60	70	90	100
汽化压强 (kPa)	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	7.38	12.3	19.9	31.2	70.1	101.33

当水流某处的压强低于其汽化压强时,该处会汽化,形成空化现象,对水流和相邻的固体壁面将产生不良影响,出现气蚀。