

中国水利教育协会

高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

水力学

主编 高学平



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利教育协会
高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

水力学

主编 高学平



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本教材内容分为 17 章, 包括: 绪论, 流体静力学, 流体运动学, 流体动力学, 流动阻力和能量损失, 量纲分析与相似原理, 孔口管嘴和有压管流, 明渠恒定流, 水跃, 堰流及闸孔出流, 渗流, 明渠非恒定流, 船闸输水系统, 泥沙运动, 波浪运动, 泄水建筑物下游水流的衔接与消能, 高速水流。

本教材强调基本概念、基本原理和基本方法, 注重培养学生解决实际问题的能力。各章深入浅出, 循序渐进, 均有一定量的例题, 每章有知识点总结, 并有一定量的思考题和习题。

本教材是为水利水电工程、港口航道及海岸工程等专业水力学课程编写的教材, 也可作为其他相近专业的教材或参考书, 并可供有关专业工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

水力学 / 高学平主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019.4
全国水利行业“十三五”规划教材. 普通高等教育
ISBN 978-7-5170-7544-8

I. ①水… II. ①高… III. ①水力学—高等学校—教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第056786号

书 名	全国水利行业“十三五”规划教材(普通高等教育) 水力学
作 者	SHUILIXUE 主编 高学平
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 30.5印张 723千字
版 次	2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	75.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本教材是全国水利行业高等教育“十三五”规划教材，适用于水利水电工程、港口航道与海岸工程等专业。

教材内容分为相对独立的三部分，即理论基础（绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学、流动阻力和能量损失、量纲分析与相似理论）、基本应用（孔口管嘴和有压管流、明渠恒定流、水跃、堰流及闸孔出流和渗流）和专业应用（明渠非恒定流、船闸输水系统、泥沙运动、波浪运动、泄水建筑物下游水流的衔接与消能、高速水流）。各部分之间相互呼应，又自成系统，满足不同专业的教学要求。

本教材既保持了理论体系的完整性，又兼顾了后续专业课程的要求，同时考虑了教学课时的限制。在理论上保持一定的深度，在应用上留有一定的广度。强调基本概念、基本原理和基本方法的理解和掌握，每章配有思考题，对易于混淆的概念和原理从不同的角度提出问题，便于学生加深理解和掌握。强调启发性，注重分析问题和解决问题能力的培养，各章均列举足够数量的例题，对典型题目进行分类分析阐述，便于举一反三、触类旁通；每章列出知识点，对各章重点分条总结，便于掌握重点；每章配有习题，便于通过练习对所学知识熟练掌握。注重各知识点之间的联系以及内容的系统性，将各知识点有机地联系起来。

本教材参考了相关书籍的部分内容，汲取了其精华，引用了其中的部分插图，在此，编者向有关作者和出版社表示衷心的感谢。

本书采取集体讨论、分工执笔、主编统稿审定的编写方式。参加编写人员为：高学平（第1、2、3、4、6、7、8、9、12章）、李大鸣（第5章）、张晨（第7、8章）、孙博闻（第8、9章）、宋慧芳（第10、11章）、张金凤（第13章）、李绍武（第14章）、张庆河（第15章）、刘昉（第16、17章）。高学平担任本教材主编。

由于编者水平所限，书中不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

编者

2018年10月

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水力学的任务	1
1.2 连续介质	2
1.3 流体物理量	2
1.4 液体的主要物理性质	3
1.5 作用在流体上的力	9
1.6 理想流体与不可压缩流体	9
1.7 水力学的研究方法	10
本章知识点	11
思考题	11
习题	12
第 2 章 流体静力学	13
2.1 流体静压强及其特性	13
2.2 流体平衡微分方程及其积分	15
2.3 流体静压强分布规律	19
2.4 压强的量测	24
2.5 作用于平面上的静水总压力	26
2.6 作用于曲面上的静水总压力	32
2.7 浮力、潜体及浮体的稳定性	37
本章知识点	39
思考题	40
习题	42
第 3 章 流体运动学	46
3.1 流动描述	46
3.2 描述流体运动的基本概念	50
3.3 流体运动的连续性方程	55
3.4 流体微团运动分析	58
3.5 无涡流与有涡流	61

3.6 恒定平面势流	63
本章知识点	73
思考题	74
习题	75
第4章 流体动力学	76
4.1 理想流体运动微分方程及其积分	76
4.2 实际流体运动微分方程及其积分	82
4.3 实际流体恒定总流能量方程	90
4.4 实际流体非恒定总流的能量方程	99
4.5 实际流体恒定总流的动量方程	100
本章知识点	110
思考题	111
习题	112
第5章 流动阻力和能量损失	117
5.1 液流形态及其判别标准	117
5.2 水头损失的分类	120
5.3 均匀流基本方程	121
5.4 层流运动	123
5.5 紊流运动	124
5.6 沿程阻力系数的变化规律及其影响因素	131
5.7 沿程损失的经验公式——谢齐公式	137
5.8 边界层与边界层分离现象简介	139
5.9 局部水头损失	142
本章知识点	148
思考题	149
习题	150
第6章 量纲分析与相似原理	153
6.1 量纲分析	153
6.2 流动相似的概念	157
6.3 相似准则	159
6.4 模型设计	162
本章知识点	166
思考题	167
习题	167
第7章 孔口管嘴和有压管流	168
7.1 薄壁孔口恒定出流	168
7.2 管嘴恒定出流	171

7.3 孔口(管嘴)的变水头出流	174
7.4 短管的水力计算	175
7.5 长管的水力计算	180
7.6 有压管路中的水击	191
本章知识点	196
思考题	198
习题	199
第8章 明渠恒定流	202
8.1 明渠的类型	202
8.2 明渠均匀流的特征及形成条件	204
8.3 明渠均匀流基本公式	205
8.4 明渠均匀流水力计算	209
8.5 明渠非均匀流特征及流动描述	215
8.6 明渠非均匀渐变流微分方程	222
8.7 明渠非均匀流水面曲线变化规律及其定性分析	224
8.8 明渠非均匀渐变流水面曲线计算	229
8.9 天然河道水面曲线的计算	231
本章知识点	233
思考题	235
习题	235
第9章 水跃	238
9.1 水跃特征及其描述	238
9.2 水跃基本方程	239
9.3 水跃的基本计算	240
9.4 水跃发生的位置	245
9.5 扩散渠道中的水跃	246
本章知识点	247
思考题	248
习题	248
第10章 堰流及闸孔出流	249
10.1 堰的类型及堰流基本公式	250
10.2 薄壁堰	252
10.3 宽顶堰	255
10.4 实用断面堰	259
10.5 闸孔出流	266
本章知识点	270
思考题	271

习题	271
第 11 章 渗流	273
11.1 渗流的基本概念	273
11.2 渗流的基本定律	275
11.3 地下水的恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	278
11.4 均质土坝的渗流	284
11.5 渗流场问题的理论基础	286
11.6 井的渗流	290
11.7 求解渗流问题的流网法	295
11.8 水电比拟法	298
本章知识点	301
思考题	302
习题	303
第 12 章 明渠非恒定流	305
12.1 明渠非恒定流的特征和分类	305
12.2 明渠非恒定渐变流基本方程	307
12.3 初始条件及边界条件	311
12.4 特征线法	312
12.5 直接差分法	319
本章知识点	329
思考题	330
习题	330
第 13 章 船闸输水系统	331
13.1 船闸输水系统形式	331
13.2 短廊道输水系统的水力计算	333
13.3 孔口输水系统灌泄水的水力计算	345
13.4 分散式输水系统灌泄水的水力计算	350
13.5 惯性力影响的计算	354
13.6 廊道阀门后动水压强随时间的变化	356
本章知识点	358
思考题	358
习题	359
第 14 章 泥沙运动	360
14.1 泥沙特性	360
14.2 泥沙运动形式	364
14.3 泥沙起动	366
14.4 沙波运动	373

14.5 推移质运动	375
14.6 悬移质运动	377
本章知识点	385
思考题	386
习题	387
第 15 章 波浪运动	389
15.1 波浪基本描述	389
15.2 势波的概念	390
15.3 微幅波理论	392
15.4 斯托克斯 (Stokes) 有限振幅波理论	401
15.5 作用在直立墙上的波浪力	404
15.6 作用在孤立结构物上的波压力	412
本章知识点	421
思考题	422
习题	422
第 16 章 泄水建筑物下游水流的衔接与消能	424
16.1 衔接与消能的主要方式	424
16.2 泄水建筑物下游收缩断面水深的计算	426
16.3 底流消能的水力计算	429
16.4 挑流消能的水力计算	438
16.5 面流消能及戽流消能	446
本章知识点	448
思考题	448
习题	448
第 17 章 高速水流	451
17.1 高速水流的脉动压强与水工建筑物的振动	451
17.2 高速水流的空化与水工建筑物的空蚀	457
17.3 高速水流的掺气	463
17.4 急流冲击波	467
本章知识点	471
思考题	472
习题	472
附录 A 常用单位换算表	473
附录 B 梯形及矩形渠道均匀流水深求解图	474
附录 C 梯形及矩形渠道均匀流底宽求解图	475
参考文献	476

第 1 章 绪 论

自然界中的物体一般有三种存在形态：固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。固体能维持其固有形状和体积；液体能保持比较固定的体积，但没有一定的形状，随容器的形状而变化，具有自由表面；气体则充满整个容器，没有固定的体积和形状，没有自由表面。因此，区分三种物态的标准，一是体积变化量，即压缩性；二是物体能否流动，即流动性。固体和液体的压缩性小（比气体压缩性要小得多），用压缩性可以把气体和固体或液体区别开来。流动是一种剪切现象，当物体在微小剪切力的作用下不能维持平衡，不断地发生变形，这就是流动。液体和气体在微小剪切力的作用下，很容易发生变形，因而具有流动性；固体在微小剪切力的作用下可以维持平衡，因而不具有流动性。用流动性可以把固体和流体区分开来。

本章主要介绍水力学的任务、流体连续介质概念、液体的主要物理性质以及作用于流体上的力。

1.1 水 力 学 的 任 务

水力学的任务是研究液体（主要是水）的平衡、运动规律及其实际应用。

水力学所研究的基本规律，一是关于液体平衡的规律，它研究液体处于静止或相对静止状态时，作用于液体上各种力之间的关系，这一部分称为流体静力学（水静力学）；二是关于液体的运动规律，它研究液体在运动状态时，作用于液体上的力与运动要素之间的关系，以及液体运动特性与能量转换等，这一部分又可分为流体运动学和流体动力学。实际应用即是利用上述基本规律解决工程中的实际问题。

水力学是许多工程实践的基础，在水力发电、港口航道、农田水利、环境保护、土木建筑、道路桥梁、市政建设等部门，都将遇到大量与液体运动规律有关的问题。例如，水利枢纽的设计、港口设计、航道设计、洪峰预测、河流泥沙、城市供水系统中管路布置、水泵选择等，要解决这些问题必须具备水力学的知识。因此，水力学是一门重要的应用性的技术基础学科。

水力学是研究水流运动的一门学科。因水流运动和其他液体流动以及一部分气体运动具有共同的性质和规律，所以也可以把液流和气流合在一起研究，称为流体力学。一般将侧重于理论方面的流体力学称为理论流体力学，侧重于应用的称为工程流体力学。

水力学以试验起家，以总结经验公式为主要法宝。人类知识的深化，总是以经验上升为理论，用理论取代经验的方式前进的。与过去的水力学相比，现代水力学的理论基础大大加强。因而对水流问题的求解，也从以试验为主转变为理论分析和试验方法并重的途径。即使利用试验方法，也尽可能地用理论指导，避免盲目试验。如果只用过去的水力学

知识来阅读现代的水力学文献，会感到困难重重，甚至难以理解。水力学的发展，与其他学科一样，在于不断地用数理分析方法所得出的结论来替换水力学自己暂时的和近似的解答。当前科学技术的发展趋势是学科之间的相互渗透、综合。水力学的研究范围越来越广，并且派生出许多新的学科，如计算水力学、环境水力学、生态水力学等。水力学是一门既古老又富有生机的学科。

本书主要研究以水为代表的液体的平衡和运动规律及其应用，其基本理论也适用于各种液体和忽略压缩性影响的气体。

1.2 连续介质

流体和任何物质一样，都是由分子组成的，分子与分子之间是不连续而有空隙的。例如，常温下每立方厘米水中约含有 3×10^{22} 个水分子，相邻分子间距离约为 3×10^{-8} cm。因而，从微观结构上说，流体是有空隙的、不连续的介质。

但是，我们所关心的不是个别分子的微观运动，而是大量分子“集体”所显示的特性，也就是所谓的宏观特性或宏观量，这是因为分子间的孔隙与实际所研究的流体尺度相比是极其微小的。因此，可以设想把所讨论的流体分割成为无数无限小的基元个体，相当于微小的分子集团，称之为流体的“质点”。从而认为，流体就是由这样的一个紧挨着一个的连续质点所组成的，没有任何空隙的连续体，即所谓的“连续介质”。同时认为，流体的物理力学性质，例如密度、速度、压强和能量等，具有随同位置而连续变化的特性，即视为空间坐标和时间的连续函数。因此，不再从那些永远运动的分子出发，而是在宏观上从质点出发来研究流体的运动规律，从而可以利用连续函数的分析方法。长期的实践和科学实验证明，利用连续介质假定所得出的有关流体运动规律的基本理论与客观实际是符合的。

所谓流体质点，是指微小体积内所有流体分子的总体，而该微小体积是几何尺寸很小（但远大于分子的平均自由行程），但包含足够多分子的特征体积，其宏观特性就是大量分子的统计平均特性，且具有确定性。

1.3 流体物理量

根据流体连续介质假定，任一时刻流体所在空间的每一点都被相应的流体质点所占据。流体的物理量是指反映流体宏观特性的物理量，如密度、速度、压强、温度和能量等。对于流体物理量，如流体质点的密度，可以定义为微小体积内大量数目分子的统计质量除以该微小体积所得的平均值，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V'} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

式中 Δm —— 体积 ΔV 中所含流体的质量；

$\Delta V'$ —— 微小体积。

按数学的定义，空间一点的流体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

由于微小体积 $\Delta V'$ 很小, 按式 (1.1) 定义的流体质点密度可以视为流体质点质心(几何点)的流体密度, 这样就应与式 (1.2) 定义的空间点的流体密度相一致。为把物理概念与数学概念统一起来, 方便利用有关连续函数的数学工具, 今后均采用如式 (1.2) 所表达的流体物理量定义。所谓某一瞬时空间任意一点的物理量, 是指该瞬时位于该空间点的流体质点的物理量。在任一时刻, 空间任一点的流体质点的物理量都有确定的值, 它们是坐标点 (x, y, z) 和时间 t 的函数。例如, 某一瞬时空间任意一点的密度是坐标点 (x, y, z) 和时间 t 的函数, 即

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1.3)$$

每一个物理量都包括量的数值和量的种类, 物理量的种类习惯上称为量纲; 量度物理量的基准称为单位。量纲与单位不同, 例如河宽 $B=5\text{m}$, 也可以用 $B=500\text{cm}$ 表示。这里, 河宽是表示“长度”的物理量, 而“m”或“cm”是该长度的单位。所以, 单位不同, 量的数值也就不同。但量纲只有一个, 即长度, 记作 L。

在国际单位制 (SI) 中, 以长度、时间、质量作为基本量, 其单位和表示符号分别为米 (m)、秒 (s)、千克 (kg)。力则为导出量, 单位为牛顿 (N), 1 牛顿定义为: 在 1 牛顿的力作用下, 质量为 1 千克的物体得到 1 米/秒² 的加速度, 即 $1\text{N}=1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。

物理量虽然很多, 但可以分为两类: 一类是有量纲的量, 如速度、加速度等; 另一类则是无量纲的量, 如圆周率 π 、摩擦系数等。有量纲的物理量虽然很多, 但其量纲也可分为基本量纲与导出量纲。基本量纲是性质完全不同的独立量纲, 其中任何一个不能由另外的组合而得。研究以水为代表的流体时, 基本量纲有质量 M、时间 T、长度 L 三种。其他物理量的量纲都可以由这三种基本量纲以不同方式组合而成, 称为导出量纲, 例如速度的量纲为 LT^{-1} , 力的量纲为 MLT^{-2} 。

1.4 液体的主要物理性质

流体运动的规律与作用于流体的外部因素及条件有关, 而外部因素及条件通过流体自身的内在物理性质来表现。一般来说, 流体的主要物理性质可归纳为惯性、重力特性、黏滞性、压缩性与膨胀性、表面张力特性。虽然这些物理性质都在不同程度上决定和影响着流体的运动, 但每一种性质的影响程度并不相同。一般而言, 重力特性、黏滞性对流体运动的影响起着重要作用。

1.4.1 惯性

流体与固体一样, 具有惯性。惯性是物体保持原有运动状态的性质。运动状态的任何改变, 都必须克服惯性的作用。惯性的大小以质量来度量, 质量越大, 惯性越大, 运动状态越难改变。当流体受外力作用使运动状态发生改变时, 由于流体的惯性引起对外界抵抗的反作用力称为惯性力。

设物体的质量为 m , 加速度为 a , 则惯性力为 $F=-ma$, 式中负号表示惯性力的方向与物体加速度方向相反。需要指出, 惯性力不是能够引起物体运动或使物体有运动趋势的

主动力，而是为了使物体加速所必须克服的一种力。

流体的质量以密度来反映。单位体积流体所含的质量称为密度，以 ρ 表示。对于均质流体，若体积为 V 的流体具有的质量为 m ，则密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.4)$$

密度的单位为千克/米³ (kg/m^3)，其量纲为 ML^{-3} 。流体的密度随温度和压强的变化而变化。对液体而言，其密度随压强和温度的变化甚微，在实际计算中可视为常数。例如水的密度，实用上以在一个标准大气压强下、温度为 4℃ 时的最大密度作为计算值，其数值为 1000 千克/米³ (kg/m^3)。表 1.1 给出了不同温度下水的密度值，由表可知，温度在 0~30℃ 时，其密度较 4℃ 时只减小 0.4%；但当温度在 80~100℃ 时，其密度比 4℃ 时减小 2.8%~4%。因此，在温差较大的热水循环系统中，应设膨胀接头或膨胀水箱以防止管道被水胀裂。此外，当温度为 0℃ 时，冰的密度 $\rho_{\text{冰}} = 916.7 \text{kg}/\text{m}^3$ ，水的密度 $\rho_{\text{水}} = 999.9 \text{kg}/\text{m}^3$ ，两者的密度不同，冰的体积比水的体积约大 9%，故路基、水管、水泵等在冬季温度过低时应增加防冻措施。

在一个标准大气压强下，温度为 20℃ 时，水银（汞）的密度为 $13550 \text{kg}/\text{m}^3$ ，通常计算时取 $\rho_{\text{H}} = 13.6 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 。在一个标准大气压强下，温度为 20℃ 时，干空气的密度 $\rho_{\text{a}} = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1.1 不同温度下水的物理性质数值表

温度 /℃	密度 ρ /(kg/m^3)	动力黏滞系数 μ /($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏滞系数 ν /($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	体积弹性系数 K /($10^9 \text{N}/\text{m}^2$)	表面张力系数 σ /(N/m)
0	999.9	1.787	1.787	2.04	0.0762
4	1000.0	1.568	1.568	—	—
5	1000.0	1.514	1.514	2.06	0.0754
10	999.7	1.304	1.304	2.11	0.0748
15	999.1	1.137	1.138	2.14	0.0741
20	998.2	1.002	1.004	2.20	0.0736
25	997.1	0.891	0.894	2.22	0.0726
30	995.7	0.789	0.802	2.23	0.0718
40	992.3	0.654	0.659	2.27	0.0701
50	988.1	0.548	0.554	2.30	0.0682
60	983.2	0.467	0.475	2.28	0.0668
70	977.8	0.405	0.414	2.25	0.0650
80	971.8	0.355	0.366	2.21	0.0630
90	965.3	0.316	0.327	2.16	0.0612
100	958.4	0.283	0.295	2.07	0.0594

注 表中数据主要引自夏震寰的《现代水力学（一）控制流动的原理》。

1.4.2 重力特性

物体受地球引力的性质称为重力特性。地球对流体的引力即为重力，或称重量。重力

单位是牛顿 (N) 或千牛顿 (kN), $1\text{kN}=10^3\text{N}$ 。质量为 m 的流体, 其所受重力 G 为

$$G = mg \quad (1.5)$$

式中 g ——重力加速度。

1.4.3 黏滯性

流体具有易流动性, 对于像水这样的流体, 无论多么微小的切向作用力一经作用于静止流体时, 其原来的静止状态将被破坏而开始变形, 即开始流动。但是当流体一旦流动时, 流体分子间的作用力立即显示为对流动的阻抗作用, 即显示出所谓黏滯性阻力。流体的这种阻抗变形运动的特性称为黏滯性。需要说明的是, 当流体运动一旦停止, 这种阻力就立即消失。因此, 黏滯性在流体静止或相对静止时是不显示作用的。流体运动时的黏滯阻力只能使流动缓慢下来, 但不能阻止静止流体在任何微小切向力作用下开始流动。

以图 1.1 说明流体的黏滯性作用, 图示流体沿底部壁面作平直的直线运动, 且相邻层质点之间互不掺混, 即作成层的向前运动。由于流体和壁面的“附着力”, 紧邻壁面的流层将黏附在壁面上而静止不动。这样, 壁面以上的流层由于受这个不动流层的阻滞, 而形成了如图 1.1 所示的流速分布曲线。这就是说, 运动较快的流层将作用于运动较慢的流层上一个切向力, 方向与运动方向相同, 促其运动加快。反之, 运动较慢的流层将作用于运动较快的流层上一个与运动方向相反的切应力, 使其运动减慢。这样, 流体的黏滯性就使流体内部出现了成对的切力, 即内摩擦力。科学实验证明, 内摩擦力 (切力) T 与下述因素有关:

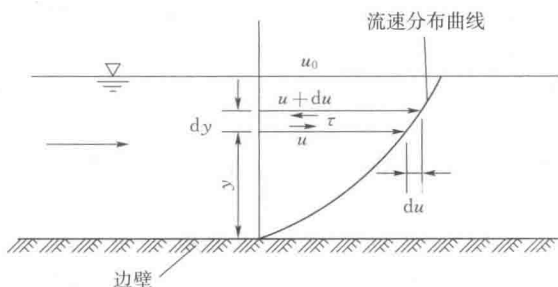


图 1.1 流体沿底部壁面的直线运动

(1) 与两流层间的速度差 (即相对速度) du 成正比, 和流层间距离 dy 成反比。
 (2) 与流层的接触面积 A 成正比。
 (3) 与流体的种类有关。
 (4) 与接触面上压力的大小无关。

内摩擦力的数学表达式可写为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.6)$$

单位面积上的内摩擦力称为切应力, 以 τ 表示, 则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.7)$$

式中 μ ——随流体种类不同而异的比例系数, 称为黏滯系数。

两流层间流速差与其距离的比值 du/dy 称为速度梯度。式 (1.6) 或式 (1.7) 称为牛顿内摩擦定律。它可以表述为: 作层流运动的流体, 相邻流层间单位面积上所作用的内摩擦力 (或黏滯力) 与速度梯度成正比, 同时与流体种类有关。

下面对式 (1.7) 中各项作进一步说明:

(1) 速度梯度 du/dy 。它表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率, 单位为 s^{-1} 。

为理解速度梯度的意义, 从图 1.1 中将相距为 dy 的两层流体分离出来, 并取两层

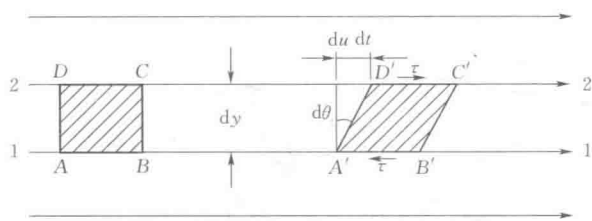


图 1.2 微分流体的剪切变形

间矩形微分流体 $ABCD$ 来研究, 即如图 1.2 所示的流层 1—1 和流层 2—2 间流体。设微分体经过 dt 时段后运动至新的位置 $A'B'C'D'$, 因流层 2—2 与流层 1—1 间存在流速差 du , 微分体除位置改变而引起平移运动之外, 还伴随着形状的改变, 由原来的矩形变成了平行四边形, 也就是产生了剪

切变形 (角变形), AD 边和 BC 边都发生了角变形 $d\theta$, 其剪切变形速度为 $d\theta/dt$ 。同时, 在 dt 时段内, D 点比 A 点多移动的距离为 $du/dt \cdot dt$ 。因 dt 为微小时段, 角变形 $d\theta$ 也为微小量, 可以认为 $d\theta \approx \tan(d\theta) = du/dt \cdot dy$, 故

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.8)$$

可见, 速度梯度 du/dy 实际上是代表流体微团的剪切变形率 (或称剪切变形速度, 也称直角变形速度)。所以, 牛顿内摩擦定律也可以理解为切应力与剪切变形速度成正比。

(2) 切应力 τ , 或称单位面积的内摩擦力、单位面积上的黏滯力。单位为 N/m^2 , 简称 Pa。量纲为 $ML^{-1}T^{-2}$ 。切应力 τ 不仅有大小, 还有方向。现以图 1.2 微分矩形流体变形后的 $A'B'C'D'$ 来说明 τ 的方向: 上表面 $D'C'$ 上面的流层运动较快, 有带动较慢的 $D'C'$ 流层前进的趋势, 故作用于 $D'C'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相同。下表面 $A'B'$ 下面的流层运动较慢, 有阻抗较快的 $A'B'$ 流层前进的趋势, 故作用于 $A'B'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相反。对于相接触的两个流层来讲, 作用在不同流层上的切应力, 必然是大小相等、方向相反。这里需要说明的是, 内摩擦力虽然是流体阻抗相对运动的性质, 但它不能从根本上制止流动的发生。因此, 流体的易流动特性不因有内摩擦力存在而消失。当然, 内摩擦力在流体静止或相对静止状态 (即流体质点间没有相对运动) 时是不显示作用的。

(3) 黏滯系数 μ 。单位是牛顿·秒/米² ($N \cdot s/m^2$) 或帕斯卡·秒 ($Pa \cdot s$), 量纲为 $ML^{-1}T^{-1}$ 。黏滯系数 μ 的大小表征流体黏滯性的强弱。不同流体有不同的 μ 值, 黏滯性大的流体 μ 值大, 黏滯性小的流体 μ 值小。 μ 的物理意义可以这样来理解: 当取 $du/dy = 1$ 时, 则 $\tau = \mu$, 即 μ 表征单位速度梯度作用下的切应力, 所以它反映了黏滯性的动力特性, 因此也称 μ 为动力黏滯系数。

流体的黏滯性常用另一种形式的黏滯系数 ν 来表示, 它是动力黏滯系数 μ 和流体密度 ρ 的比值, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.9)$$

因 ν 不包括力的量纲而仅仅具有运动的量纲 [L^2/T], 故称 ν 为运动黏滯系数。常用单位是米²/秒 (m^2/s) 或厘米²/秒 (cm^2/s), 习惯上把 1 厘米²/秒称为 1 斯托克斯。同样, 运动黏滯系数 ν 表征流体黏滯性的强弱。在相同条件下, ν 值越大, 说明黏滯性越大,

流体流动性越低；反之， ν 值越小，说明黏滞性越小，流体流动性越高。

液体的黏滞系数随温度而变化。水的黏滞系数随温度升高而减小（表 1.1）。几种常见液体在常温下的运动黏滞系数 ν 值见表 1.2。

表 1.2 几种液体的运动黏滞系数

液体名称	温度/°C	ν /(cm ² /s)	液体名称	温度/°C	ν /(cm ² /s)
汽油	18	0.0065	石油	18	0.2500
酒精	18	0.0133	重油	18	1.4000
煤油	18	0.0250	甘油	20	8.7000

最后还须指出，牛顿内摩擦定律只适用部分流体，对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律（即切应力与剪切变形速度呈线性关系）的流体称为牛顿流体，反之称为非牛顿流体。如水、空气和油类等，在温度不变条件下，这类流体的 μ 值不变，剪切应力与剪切变形速度呈线性关系，是牛顿流体。本书研究的是牛顿流体，非牛顿流体（如泥浆、血浆、油漆、颜料等）可参考有关著作。

1.4.4 压缩性与膨胀性

流体受压时体积缩小、密度增大的性质称为流体的压缩性。流体受热时体积膨胀、密度减小的性质称为流体的膨胀性（也称热胀性）。

液体不能承受拉力，但可以承受压力。液体分子间的距离与气体相比是比较小的，当对液体施加压力时，体积的压缩也即分子间距离的缩短，导致分子之间巨大排斥力的出现，并和外加压力维持平衡状态，如果外加力一旦取消，分子立即恢复原来的相互距离，即液体立即恢复其原来的体积。这正像固体一样，液体呈现了对于压力的弹性抵抗作用。液体的压缩性以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来表示。体积压缩系数是液体体积的相对缩小值与压强增值之比。设 V 为液体原来的体积，当加压 $d\rho$ 后，体积相应地压缩了 dV ，则其体积压缩系数为

$$\beta = -\frac{dV}{V d\rho} \quad (1.10)$$

考虑压力增加时体积相应减小， dV 与 $d\rho$ 的符号始终是相反的，为保持 β 为正，式中加负号。 β 越大，则液体压缩性越大。 β 的单位为米²/牛顿（m²/N）。

液体被压缩时其质量并不改变，即质量增量 $dm = 0$ ，故 $dm = \rho dV + V d\rho = 0$ 或 $dV/V = -d\rho/\rho$ ，因而体积压缩系数又可写为

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\rho} \quad (1.11)$$

体积弹性系数 K 是体积压缩系数的倒数，即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1.12)$$

K 的单位为牛顿/米²（N/m²）， K 越大，表示液体越不容易被压缩。

不同的液体有不同的 β 或 K 值，同一种液体其 β 或 K 值随温度和压强而变化，但这种变化甚微，一般可视为常数。例如，压强每升高 1 个大气压，水的密度约增加 1/

20000；大约增加 1000 个大气压才可使水的体积减小 5%。其他液体也有类似的性质，因而可以认为液体是不可压缩的。只有在某些特殊情况，如水击等问题才需考虑水的压缩性。水的体积弹性系数 K 值列于表 1.1。例如，15℃ 时水的体积弹性系数 $K = 2.14 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。

温度较低时（10~20℃），每增加 1℃，水的密度约减小 1.5/10000；温度较高时（90~100℃），每增加 1℃，水的密度约减小 7/10000，故一般情况下液体的膨胀性可以忽略。只有在某些特殊情况，如热水采暖等问题才考虑水的热胀性。对于气体，虽然温度和压强对 β 和 K 值的影响较液体为显著，但在一般速度不高的流动情况下，也可将其视为不可压缩流体来处理。只有在压强变化过程非常迅速或者速度较高的流动情况下，才必须考虑压缩性。

1.4.5 表面张力特性

表面张力是自由表面上液体分子由于受两侧分子引力不平衡，使自由表面上液体分子受到极其微小的拉力，这种拉力称为表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触面上发生，而且还会在液体与固体，或一种液体与另一种液体（如汞和水等）相接触的周界上发生。

因为气体分子的扩散作用，不存在自由表面，故气体不存在表面张力。表面张力是液体的特有性质。即使对液体来讲，表面张力在平面上并不产生附加压力，因为其处于平衡状态，只有在曲面上才产生附加压力以维持平衡。

表面张力的大小，可以用表面张力系数 σ 来度量。表面张力系数是指在自由表面（把这个面看作一个没有厚度的薄膜一样）单位长度上所受拉力的数值，单位为牛顿/米（N/m）。 σ 的大小随液体种类、温度和表面接触情况而变化。对于和空气接触的自由面，当温度为 20℃ 时，水的 $\sigma = 0.0725 \text{ N/m}$ ，水银的 $\sigma = 0.0538 \text{ N/m}$ 。

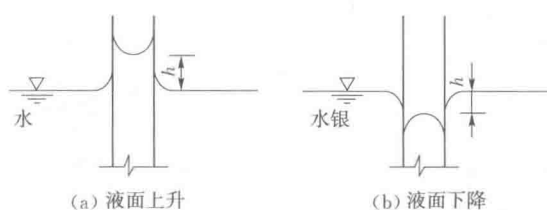


图 1.3 毛细管现象

如果把两端开口的细玻璃管竖直放进液体中，由于表面张力的影响，使玻璃管中液面和与之相联通容器中的液面不在同一水平面上，液体会在细管中上升或下降 h 高度，如图 1.3 所示，这种现象称为毛细管现象。

毛细管升高或下降值 h 的大小和管径大小及液体种类有关。在一般实验室温度（20℃）下，可用下列近似公式来估算毛细管高度：

$$\text{水的毛细升高} \quad h = \frac{30}{d} \quad (1.13)$$

$$\text{水银的毛细降低} \quad h = \frac{10.15}{d} \quad (1.14)$$

式中 d ——玻璃管内径。

h 及 d 均以毫米计。可见，管的内径越小，毛细管升高或下降值越大。所以，用来测量压强的玻璃管内径不宜太小，否则就会产生很大的误差。