



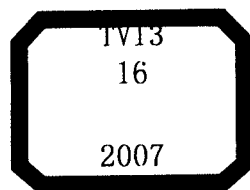
世纪高等教育给水排水工程系列规划教材

水力学

裴国霞 唐朝春 主编
李玉柱 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等教育给水排水工程系列规划教材

水 力 学

主 编	裴国霞	唐朝春	
副主编	许吉现	马立山	
参 编	岳少青	王全金	李仙岳
	郝拉柱	洪 静	李代云
主 审	李玉柱		

机 械 工 业 出 版 社

本书是依据全国高等学校给水排水工程专业本科四年制“水力学”课程的教学基本要求编写的,讲授学时在80~90学时之间。全书共11章:绪论,水静力学,液体运动学,水动力学基础,流动阻力和水头损失,量纲分析与相似原理,孔口、管嘴出流和有压管流,明渠恒定均匀流,明渠恒定非均匀流,堰流及闸孔出流,渗流。

本书注重加强基础,理论联系实际,主要用于给水排水工程专业,适当兼顾环境工程、土木工程等专业的要求。各章均有一定数量的例题、习题和思考题。例题和习题注意将现代计算手段与传统的典型计算方法相结合。

本书可作为高等学校给水排水工程、环境工程、土木工程等专业本科生的教材,也可作为其他相近专业以及工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/裴国霞,唐朝春主编. —北京:机械工业出版社,2007.3

(21世纪高等教育给水排水工程系列规划教材)

ISBN 978-7-111-20863-1

I. 水... II. ①裴... ②唐... III. 水力学-高等学校-教材
IV. TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第027353号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘涛 责任编辑:刘涛 马军平 版式设计:冉晓华
责任校对:李秋荣 封面设计:王伟光 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 12.75印张 · 494千字

标准书号:ISBN 978-7-111-20863-1

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379720

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是为高等学校给水排水工程专业编写的水力学教材，适当兼顾环境工程、土木工程等专业的要求，也可作为从事相近专业工作的教师、科研人员、研究生和工程技术人员的参考书。

本书以 21 世纪本科生培养目标和适用于水力学教学目的为总的指导思想，在保证基础知识的前提下，精选、吸收现有国内外水力学教材的优点，适当反映学科新发展，力求更具有思想性、科学性、启发性、先进性和教学的适用性。

本书在内容上注重加强基础，理论联系实际，加强实践性与应用性知识的内容。以既符合科学系统性又符合教学和认知规律的体系来阐述水力学的基本概念、基本原理和基本方法，引导学生获取知识，培养学生创新能力。

为了能适应不同专业对内容需求而进行取舍的教学灵活性，本书适当增加了选讲或学生自学内容。为了巩固基本概念，提高分析问题和解决问题的能力，各章均有一定数量的例题、习题和思考题。例题和习题注意将现代计算手段与传统的典型计算方法相结合。

本书由裴国霞、唐朝春主编，许吉现、马立山副主编。全书共 11 章，各章编写分工如下：第 1 章由岳少青（河北建筑工程学院）编写；第 2 章由王全金（华东交通大学）编写；第 3 章由裴国霞（内蒙古农业大学）编写；第 4 章由裴国霞、李仙岳（内蒙古农业大学）编写；第 5 章由许吉现（河北工程大学）编写；第 6 章由郝拉柱（内蒙古农业大学）编写；第 7 章由洪静（河北建筑工程学院）编写；第 8、9 章由唐朝春（华东交通大学）编写；第 10 章由马立山（河北建筑工程学院）编写；第 11 章由唐朝春（华东交通大学）、李代云（江西广播电视大学）编写。

书中有“*”标记的章节为选修内容，授课教师可根据具体情况

合取。

本书由清华大学李玉柱教授主审，李教授对本书的整体结构和内容提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。在编写过程中，也得到同行和专家的热情鼓励和支持，并吸收了他们许多宝贵的建议，同时在绘图和校阅中也得到不少同志的帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在缺陷，恳请读者批评、指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水力学的任务及其发展概况	1
1.2 液体的连续介质模型	3
1.3 作用在液体上的力	5
1.4 液体的主要物理性质	7
1.5 水力学的研究方法	15
思考题	17
习题	17
第 2 章 水静力学	19
2.1 静水压强及其特性	19
2.2 液体的平衡微分方程及其积分	21
2.3 重力作用下的液体平衡	25
2.4 压强的度量及量测	27
2.5 重力和惯性力同时作用下的液体平衡	31
2.6 平面上的静水总压力	34
2.7 曲面上的静水总压力	39
2.8 浮力及浮体与潜体的稳定性	42
思考题	48
习题	49
第 3 章 液体运动学	55
3.1 描述液体运动的两种方法	55
3.2 液体运动的基本概念	59
3.3 液体运动的类型	65
3.4 连续性方程	69
3.5 液体微团运动的基本形式	74
3.6 无旋流与有旋流	78
思考题	82
习题	83
第 4 章 水动力学基础	85
4.1 理想液体元流的能量方程	85
4.2 实际液体元流的能量方程	89
4.3 实际液体总流的能量方程	90

4.4	恒定总流动量方程	102
4.5	理想液体运动微分方程及其积分	111
4.6	实际液体运动微分方程	118
4.7	恒定平面势流	123
	思考题	132
	习题	132
第5章	流动阻力和水头损失	139
5.1	液流阻力与水头损失	139
5.2	液体流动的两种型态	141
5.3	恒定均匀流水力坡度与切应力的关系	145
5.4	圆管中的层流运动	148
5.5	液体的湍流运动简介	151
5.6	湍流沿程损失的分析与计算	161
5.7	局部损失的分析与计算	172
5.8	边界层基本概念及绕流阻力	182
	思考题	189
	习题	190
第6章	量纲分析与相似原理	194
6.1	量纲分析法	194
6.2	相似基本原理	202
6.3	相似准则	205
6.4	相似原理的应用	212
	思考题	217
	习题	217
第7章	孔口、管嘴出流和有压管流	220
7.1	薄壁孔口恒定出流	220
7.2	管嘴恒定出流	225
7.3	孔口的变水头出流	228
7.4	短管水力计算	229
7.5	长管水力计算	238
7.6	复杂管道水力计算	244
7.7	管网水力计算基础	250
7.8	有压管道中的水击	253
7.9	湍动射流及湍动扩散	258
	思考题	267
	习题	268
第8章	明渠恒定均匀流	275
8.1	明渠特征及均匀流的形成	275

8.2 明渠均匀流的计算公式	279
8.3 明渠水力最优断面和允许流速	280
8.4 明渠均匀流水力计算的基本问题	283
8.5 无压圆管均匀流的水力计算	287
8.6 复式断面渠道的水力计算	290
思考题	292
习题	293
第9章 明渠恒定非均匀流	295
9.1 概述	295
9.2 缓流、急流、临界流及其判别	297
9.3 断面单位能量和临界水深	300
9.4 水跃和水跌	306
9.5 明渠非均匀渐变流的基本微分方程	316
9.6 明渠非均匀渐变流水面曲线分析	317
9.7 明渠非均匀渐变流水面曲线计算	326
思考题	333
习题	334
第10章 堰流及闸孔出流	337
10.1 堰流定义和分类	338
10.2 堰流基本公式	341
10.3 薄壁堰流	342
10.4 实用堰流	346
10.5 宽顶堰流	348
10.6 闸孔出流	354
思考题	359
习题	360
第11章 渗流	362
11.1 渗流基本概念	362
11.2 渗流基本定律	364
11.3 恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	367
11.4 恒定渐变渗流浸润曲线的分析与计算	369
11.5 井和集水廊道的水力计算	374
11.6 井群的水力计算	380
11.7 用流网法求解渗流问题	383
思考题	388
习题	388
习题答案 (部分)	391
参考文献	398

第 1 章

绪 论

1.1 水力学的任务及其发展概况

水力学是高等工科院校很多专业的一门重要技术基础课，它是力学的一个分支。水力学的主要任务是研究液体（主要是水）的平衡和机械运动规律及其实际应用。

自然界的物质一般有三种存在形式，即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。流体在运动过程中，表现出与固体不同的特点。从力学分析的意义上看，流体和固体的主要差别在于它们抵抗外力的能力不同。固体有抵抗拉力、压力和切向力的能力。当外力作用于固体时，固体将产生相应的变形以抵抗外力。而处于静止状态下的流体只能承受法向压力，几乎不能承受拉力。流体还不能抵抗切向力，即流体在很小的切向力作用下将发生连续不断的变形，直到切向力消失为止。流体的这种特性称为易流动性。至于气体与液体的差别在于它们的可压缩程度不同，气体易于压缩，而液体难于压缩。由于液体所具有的物理力学特性与固体和气体不同，在历史的发展中，逐渐形成了水力学这样一门独立的学科。在一定的条件下，水力学的基本原理也适用于气体。本书主要是探讨液体（主要是水）的运动。

人们最早对流体知识的认识是从治水、供水、灌溉、航行等方面开始的，在远古时代就在诸多方面取得了很大的成就。公元前 2000—公元前 1000 年，埃及、巴比伦、罗马、希腊和印度等地的水利工程、造船和航海等事业的发展就是很好的例证，说明人们在大量的与自然斗争和生产实践中，对水流运动的规律已经有了一定的认识。而我们的祖先于远古时代就在水利工程方面做出过许多杰出的贡献。公元前 2286—公元前 2278 年的大禹治水已成为中华民族的千古佳话。公元前 300 多年，人们为了消除岷江水患和发展生产，在四川灌县修建了著名的都江堰水利工程，将岷江分为内外两江。在枯水期，由内江满足下游

的灌溉用水；而在洪水期，由外江泄洪保证下游灌区的安全，由此总结出“深淘滩，低作堰”，说明当时我国人民对明渠水流和堰流已经有了一定的认识和掌握。由公元前485年开始修建，直到隋朝才完成的大运河，从杭州到北京长达1782km，运河使用的多处船闸，以及各段设置的合理性，充分表明了我国劳动人民在建设水利工程方面的聪明才智。这些工程至今仍在农业生产和交通等方面起着重要的作用。

水力学的萌芽，人们认为是从距今约2200年以前古希腊学者阿基米德（Archimedes，公元前287—公元前212）写的《论浮体》一书开始的。书中首次提出了相对密度的概念，发现了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理，奠定了水静力学的基础。

15世纪末以来，随着文化、思想以及生产力的发展，水力学和流体力学也与其他学科一起有了显著的进展。著名的物理学家、艺术家列奥纳德·达·芬奇（Leonardo Da Vinci，1452—1519）比较系统地研究了沉浮、孔口出流、物体运动阻力、流体在管路和水渠中流动等问题。斯蒂芬（S. Stevin，1548—1620）发表了“水静力学原理”。伽利略（G. Galileo，1564—1642）首先提出，运动物体的阻力随着流体介质密度的增大和速度的提高而增大。托里拆利（E. Torricelli，1608—1647）论证了孔口出流的基本规律。帕斯卡（B. Pascal，1623—1662）建立了液体中压强传递的“帕斯卡原理”。1686年牛顿（I. Newton，1642—1727）提出了流体粘性的概念，通过实验建立了流体内摩擦力的确定方法——牛顿内摩擦定律，为粘性流体力学初步奠定了理论基础。1738年伯努利（D. Bernoulli，1700—1782）对孔口出流和管道流动进行了大量的观察和测量研究，建立了流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。1775年欧拉（L. Euler，1707—1783）提出了描述无粘性流体的运动方程——欧拉运动微分方程，他是理论流体力学的奠基人。

从17世纪中叶起是流体力学的形成与发展时期，其间逐步建立和发展了流体力学的理论与实验方法，流体力学的研究逐渐沿着理论流体力学（古典流体力学）和应用流体力学（水力学）两个方向发展，前者是在某些假设下以严密的数学推论为主，从理论上处理问题，后者则以实践和实验研究为主，侧重于解决工程实际问题。

从19世纪起，由于工农业生产的蓬勃发展，大大促进了流体力学的进展。随着生产规模逐渐扩大，技术更为复杂，以纯理论分析为基础的流体力学和以实验研究为主的水力学已不能适应技术发展的需要，因此出现了理论分析和试验研究相结合的趋势，在这种结合的研究中，量纲分析和相似原理起着重要的作用。1883年雷诺（O. Reynolds，1842—1912）通过实验证实了粘性流体的两种流动状态——层流和湍流的客观存在，并得到了判别流态的雷诺数，从而为

流动受到的阻力和能量损失的研究奠定了基础。1894年雷诺又提出了湍流流动的基本方程——雷诺方程。瑞利 (L. Rayleigh, 1842—1919) 在相似原理的基础上, 提出了实验研究的量纲分析法中的一种方法——瑞利法。而弗劳德 (W. Froude, 1810—1879) 和雷诺等学者提出的一系列数学模型, 为相似理论在流体力学中的应用开辟了更为广阔的途径。

1904年普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953) 通过观测流体对固体边壁的绕流, 提出了边界层的概念, 并通过对层流边界层的研究, 形成了层流边界层理论, 解决了绕流物体的阻力计算问题, 他还在研究湍流流动时提出了著名的混合长度理论; 1933年尼古拉兹 (J. Nikuradse) 发表的论文中, 公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——著名的尼古拉兹曲线图, 对各种人工光滑管和粗糙管的水头损失因素进行了系统的实验研究和量测, 为管道的沿程水头损失计算提供了依据。我国科学家的杰出代表钱学森早在1938年发表的论文中, 便提出了平板可压缩层流边界层的解法, 在空气动力学、航空工程技术等科学领域做出许多开创性的贡献。

20世纪中叶以后, 科学技术的高速发展, 以及1947年第一台计算机问世后, 数值计算技术得到了飞速发展, 并且在求解水力学问题中得到了广泛的应用, 水力学中的数值计算已成为继理论分析和实验研究之后的第三种重要的研究方法, 是目前对于各种复杂的流体流动问题求解压力场、速度场的重要工具。

水力学在很多工程中有广泛的应用。如城市的生活和工业用水, 一般都是从水厂集中供应, 水厂利用水泵把河、湖或井中的水抽上来, 经过净化和消毒后, 再通过管路系统把水输送到各用户。有时, 为了均衡水泵负荷, 还需要修建水塔。这样, 就需要解决一系列水力学问题, 如取水口的布置、管路布置、水管直径和水塔高度等的计算, 水泵容量和井的产水量计算。在修建铁路、公路, 开凿航道, 设计港口等工程时, 也必需解决一系列水力学问题。如桥涵孔径的设计, 站场路基排水设计, 隧道通风、排水的设计等。随着生产的发展, 还会不断地提出新课题。学习水力学的目的, 是根据有关专业的需要, 获得分析和解决有关水力学问题的能力, 并为进一步学习和研究打下基础。

1.2 液体的连续介质模型

液体是由大量不断运动着的分子所组成, 而且每个分子都在不断地作无规则的热运动。从微观的角度看, 由于分子之间存有空隙, 因此描述液体运动的物理量 (如流速、压强等) 的空间分布也是不连续的。同时, 由于分子的随机热运动, 又导致物理量在时间上的不连续性。

现代物理研究指出, 在标准情况下, 每立方厘米液体中, 约有 3.3×10^{22} 个

液体分子, 相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。可见, 分子间的距离相当微小, 而在很小的体积中, 包含了难以计数的分子。在一般工程中, 所研究液体的空间比分子尺寸大得多, 而且要解决的工程问题是液体大量分子运动的统计平均特性, 即宏观特性。正因为这样, 在研究液体的机械运动中, 所取的最小液体微元是液体微团, 它的体积无穷小却又包含无穷多个液体质点。从宏观看, 与流动所涉及的特征长度相比, 该微团的尺度充分的小, 小到在数学上可以作为一个点来处理; 而从微观看, 与分子的平均自由行程相比, 该微团的尺度又充分的大, 包含有足够多的分子, 使得这些分子的共同物理属性的统计平均值有意义。这样, 便不必去研究液体的微观分子运动, 而只研究描述液体运动的宏观物理属性; 便可以不考虑分子间存在的间隙, 而把液体视为由无数连续分布的液体质点组成的连续介质。这就是 1755 年瑞士数学家欧拉提出的“连续介质模型”, 认为液体是由无数质点组成, 质点之间没有空隙, 连续充满其所占据空间的连续介质。水力学所研究的液体运动是连续介质的连续流动。实践证明, 采用液体的连续介质模型, 所得出的有关液体运动规律的基本理论与客观实际是相符合的。

采用了连续介质模型之后, 才可以定义某点处的物理量, 并了解“某点处”的含义。如图 1-1a 所示, 在液体中取包含 $A(x, y, z)$ 点的微元体积 ΔV , 在此体积中液体的质量为 Δm , 则其平均密度为 $\Delta m / \Delta V$ 。当 ΔV 很大时, 由于物质在空间分布的不均匀性, 引起 $\Delta m / \Delta V$ 的变化曲线如图 1-1b 所示; 当 ΔV 逐步缩小时, $\Delta m / \Delta V$ 随 ΔV 的缩小趋于确定的极限值, 这是因为 ΔV 越小, 包含于 ΔV 内的分子愈来愈均匀。但是, 当 ΔV 进一步缩小, 比 $\Delta V'$ 更小时, 其中所含的分子数较少, 由于分子随机进出的分子数不能随时平衡, 使所含质量 Δm 时大时小, 致使平均密度时大时小, 表现出分子的随机运动特性, $\Delta m / \Delta V$ 不再具有明确的数值。由此可见, $\Delta V'$ 是一种特征体积, 它的体积很小, 但又包含了足够多的分子。在此特征体积中, 使平均密度具有确定的数值, 表征了其中足够多分子的统计平均值, 即液体的宏观密度。

我们把 $\Delta V'$ 中所有液体分子的集合称为液体微团。因此, 连续介质中的一“点”是指液体质点; 而连续介质本身则是由无限多的液体质点所组成。由此, 我们定义 A 点处的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V' \rightarrow \Delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1)$$

当 $\Delta V'$ 趋于无穷小时, 则

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

在任意时刻, 空间任意点的液体质点的密度都有确定值, 因此密度是坐标点

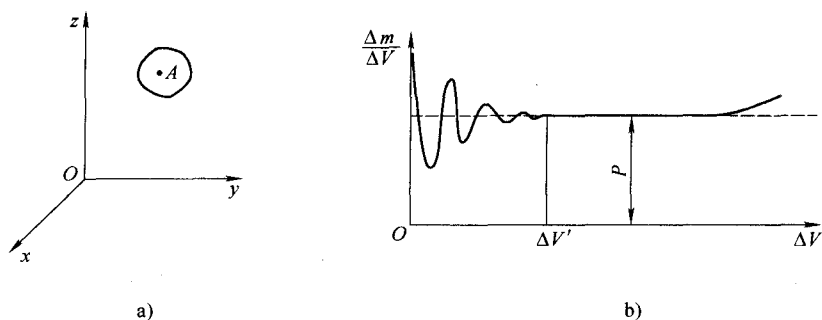


图 1-1

(x, y, z) 和时间 t 的函数, 即

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

至于连续介质一点处的速度, 就是指某瞬时恰与该点重合的液体微团质心的速度。其他如某点处的压强及其他参数的概念由此可以推出。

有了连续介质假设, 在研究流体的宏观运动时, 就可以把一个本来是大量的离散分子或原子的运动问题近似为连续充满整个空间的流体质点的运动问题。液体的密度、压强、速度、温度等物理量一般在空间和时间上都是连续分布的, 都应该是空间坐标和时间的单值连续可微函数, 这样便可以用解析函数的诸多数学工具去研究液体的平衡和运动规律, 为水力学的研究提供了很大的方便。正因为这样, 连续介质假设是水力学中一个根本性的假设。

连续介质模型在一般气体运动中也可适用。

1.3 作用在液体上的力

任何物体的平衡和运动都是受力作用的结果, 为了研究流体平衡和运动的规律, 必须分析作用在液体上的力。作用在液体上的力, 按其物理性质, 有重力、摩擦力、惯性力、弹性力、表面张力等。但在水力学中分析液体运动时, 如果按其作用特点或类型, 可将作用力分为表面力和质量力两大类。

1.3.1 表面力

表面力是作用于液体的表面上的力, 是相邻液体或其他物体作用的结果, 通过相互接触面传递。表面力的大小与作用面积成正比, 单位面积上的表面力称为应力, 它是表面力在作用面积上的强度。为研究方便, 常

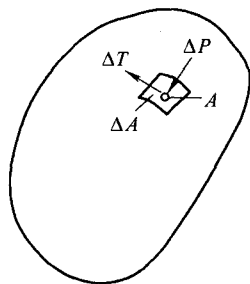


图 1-2

将应力分解为与作用面平行的切向应力及与作用面正交的法向应力（或压强）。

如图 1-2 所示，在液体中取包含 A 点的微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的法向力为 ΔP ，切向力为 ΔT ，则 A 点的压强 p 及切应力 τ 分别为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-3)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-4)$$

顺便指出，在静止液体中，由于液体不能承受拉力，所以作用在 ΔA 上的法向力只有压力 ΔP 。

1.3.2 质量力

质量力是作用在液体每一个质点上的力，其大小与液体的质量成正比。最常见的是重力，对于非惯性坐标系，质量力还包括惯性力。质量力常用单位质量力作为分析基础。单位质量力是指单位质量的液体所受的质量力。若液体是均质的，其质量为 m ，总质量力为 F ，则单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-5)$$

若总质量力在坐标上的投影分别为 F_x ， F_y ， F_z ，则单位质量力 f 在相应坐标的投影为 f_x ， f_y ， f_z ，则

$$f_x = \frac{F_x}{m}$$

$$f_y = \frac{F_y}{m}$$

$$f_z = \frac{F_z}{m}$$

即

$$f = f_x i + f_y j + f_z k$$

单位质量力的单位为 m/s^2 ，与加速度的单位相同。

水力学中碰到的普遍情况是液体所受的质量力只有重力。由于重力 G 的大小与液体的质量 m 成正比， $G = mg$ ，所以液体所受的单位质量力的大小等于重力加速度， $G/m = g$ 。当采用直角坐标系时，取 z 轴垂直向上为正，重力在各向的分力为 G_x ， G_y ， G_z ，单位质量力在相应坐标的投影为

$$f_x = G_x/m = 0$$

$$f_y = G_y/m = 0$$

$$f_z = G_z/m = -g$$

1.4 液体的主要物理性质

力对液体的作用，都是通过液体自身的物理性质来表现的。在进行水力分析和计算时，必须首先了解液体的物理属性。因此从宏观角度来探讨液体的物理性质是研究液体运动的出发点。本节将讨论与液体运动相关的主要物理性质。

1.4.1 液体的密度

液体与任何物体一样，具有惯性。惯性就是物体保持原有运动状态的特性。液体和固体一样，也具有质量，单位体积液体所含有的质量称为液体的密度，用 ρ 表示。

非均质液体的密度 ρ 由式(1-2)表示，均质液体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

式中， ρ 为液体的密度(kg/m^3)； m 为液体的质量(kg)； V 为液体的体积(m^3)。

在工程计算中，常取 4°C 时水的密度 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 作为计算值。

表1-1列举了水在一个标准大气压($1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$)条件下，密度随温度的变化。几种常见流体的密度见表1-2。

表 1-1 水的密度

密度/ (kg/m^3)	999.87	1000.0	999.73	998.23	995.67	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
测定温度/ $^\circ\text{C}$	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100

表 1-2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
密度/(kg/m^3)	1.205	13590.3	679.5 ~ 749.5	793.1	1590.7	1019.3 ~ 1028.2
测定温度/ $^\circ\text{C}$	20	0	15	15	20	15

1.4.2 粘性和理想液体

粘性是液体所具有的重要属性。实际液体都具有粘性。在水力学问题的研究中，由于粘性影响所带来的复杂性使无数研究者付出了艰辛的劳动。因而，对液体的这一属性必须给予足够的重视。

1. 粘性的概念和内摩擦力产生的原因

我们来做一个简单的实验。如图 1-3 所示的装置，在固定螺柱下端悬挂一个圆筒体，其外面放置一个能绕垂直轴旋转的圆筒形容器。在内、外圆筒体的小缝隙间充以某种液体（水或油均可）。当外筒开始旋转时，可以发现内圆筒随之产生同方向的扭转。当外筒转速达到定值 ω 时，内圆筒将平衡在一定的扭转角度上，一旦外筒停止转动，内圆筒也将随之恢复到原来的位置。这个实验清楚地说明处于内筒和外筒之间的液体存在着一种彼此阻碍对方运动的趋势。更多的实验和现象告诉我们，当液体在外力作用下，液体质点间出现相对运动时，随之产生阻抗液体质点间相对运动的内摩擦力，液体产生内摩擦力的这种性质称为粘性。

必须注意，只有在液体流动时才会表现出粘性，静止液体不呈现粘性。粘性的作用表现为阻碍液体内部的相对运动，从而阻碍液体的流动。这种阻碍作用只能延缓相对运动的过程，而不能消除这种现象。这是粘性的重要特征。

粘性是由分子间的相互吸引力和分子不规则运动的动量交换产生的。液体温度增高时粘性减小，这是因为液体分子间的相互吸引力随温度增高而减小，而分子动量交换对液体粘性的作用影响不大。气体粘性的决定性因素是分子不规则运动的动量交换产生的阻力，温度增高动量交换加剧，因此气体粘性随温度增高而增大。压强变化对分子动量交换影响甚微，通常予以忽略。

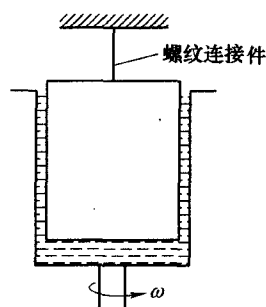


图 1-3

2. 牛顿内摩擦定律和粘性的表示方法

液体的粘性，即流动液体内部所产生的内摩擦力如何用定量的数学关系予以表达？这种力的大小取决于哪些条件？这是一个必须首先解决的问题。

1686 年，牛顿通过大量的实验，总结出“牛顿内摩擦定律”，现以简图 1-4 说明实验的内容及其结果。设两个平行平板相距为 h ，其间充满了液体，平板面积为 A ，其面积足够大，以至可忽略边缘对液流的影响。设下板固定不动，上板以匀速 U 向右运动。由于液体质点粘附于固体壁上，故下板上的液体质点的速度为零，而上板上的液体质点的速度为 U 。上、下板间的液体作平行于平板的流动，可以看成是许许多多无限薄层的液体作平行运动。当 h 或 U 不是太大时，实际测得液体的速度为线性分布，如图 1-4 所示。而液体的内摩擦力就产生在我们设想的这种有相对运动的薄层之间。

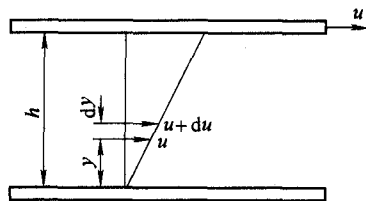


图 1-4

在液体作层流（层流和湍流概念将在第 5

章讲述) 剪切流动时, 内摩擦力 (或切向力) T 的大小, 经实验证明: ①与两液层间的速度差 (即相对速度) du 成正比, 和流层间距离 dy 成反比; ②与液层的接触面积 A 的大小成正比; ③与液体的种类有关; ④与液体的压力大小无关。

内摩擦力的数学表达形式可写作

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

这就是牛顿内摩擦定律。若以 $\tau = \frac{T}{A}$ 表示单位面积上的内摩擦力, 称切应力, 则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

现对上式各项阐述如下:

1) $\frac{du}{dy}$ 称为速度梯度, 速度梯度表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率。为了理解速度梯度的意义, 我们在图 1-4 中垂直于速度方向的 y 轴上, 任取液体矩形 $abcd$ 如图 1-5 所示。由于下表面的速度 u 小于上表面的速度 $(u + du)$, 经过 dt 时间后, 下表面所移动的距离 udt 小于上表面所移动的距离 $(u + du) dt$ 。因而 $abcd$ 变形为 $a'b'c'd'$ 。也就是说, 两液层间的垂直连接线 ac 及 bd , 在 dt 时间中变化了角度 $d\theta$ 。由于 dt 很小, 因此 $d\theta$ 也很小。所以

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{du dt}{dy}$$

故

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

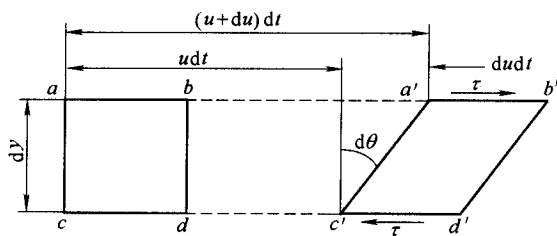


图 1-5

可见, 速度梯度就是直角变形速度。这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的, 所以, 也称剪切变形速度。因为液体的基本特征是具有流动性, 在切应力的作用下, 只要有充分的时间让它变形, 它就具有无限变形的可能性。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, 即

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-9)$$