

S H U I L I X U E

水力学

高海鹰 / 主编

高海鹰 马金霞 李 贺 / 编



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

水 力 学

高海鹰 主编

高海鹰 马金霞 李 贺 编

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 提 要

本书是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会制订的《流体力学(水力学)课程教学基本要求(A类)》编写的,讲授学时为40学时左右。全书共9章:绪论,水静力学,水运动学基础,水动力学基础,流动阻力与水头损失,孔口,管嘴出流和有压管流,明渠流和堰流及闸孔出流,渗流,量纲分析和相似原理。

本书注重加强基础理论知识,理论联系实际。内容精炼,深入浅出,通俗易懂,主要用于土木工程专业,适当兼顾其他专业的教学要求。各章都选配了典型例题、思考题和习题,书后附有习题答案和参考文献。

本书可作为高等学校土木工程、道路桥梁工程等专业本科生的教材,也可作为其他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/高海鹰主编. —南京:东南大学出版社,
2011.12

ISBN 978-7-5641-3171-5

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(2011)第 251027 号

水力学

出版发行	东南大学出版社
出 版 人	江建中
社 址	南京市四牌楼 2 号(邮编:210096)
电 话	025-83793191(发行) 025-57711295(传真)
网 址	http://www.seupress.com
电子邮箱	press@seupress.com
印 刷	江苏凤凰盐城印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	14.75
字 数	360 千
版 次	2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5641-3171-5
印 数	1~3 500 册
定 价	43.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与读者服务部联系。电话(传真):025-83792328)

前 言

本书主要是为高等学校土木工程专业编写的水力学教材。它是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会制订的《流体力学(水力学)课程教学基本要求(A类)》,在教学实践的基础上,吸收国内外有关教材的优点编写而成的。

本书是一本中、少学时数的教材,参考学时为40学时左右。内容精炼,重点突出,侧重基本原理、基本方法及其工程应用。精选的教学内容符合学科的内在联系和学生的认识规律并注重培养学生创新能力。本书根据课程教学内容的重点、难点和知识点,各章均有一定数量的例题、思考题和习题。

全书共9章,内容包括绪论,水静力学,水运动学基础,水动力学基础,流动阻力与水头损失,孔口,管嘴出流和有压管流,明渠流和堰流及闸孔出流,渗流,量纲分析和相似原理。

本书由东南大学高海鹰老师主编,东南大学马金霞老师和李贺老师参加了编写。各章编写分工如下:高海鹰(第7、8章),马金霞(第1、2、3、9章),李贺(第4、5、6章)。全书由高海鹰统稿。

在教材编写过程中,得到同行和专家的大力支持,得到了东南大学土木学院的关心和资助,在此表示衷心的感谢。

本书的出版还要感谢东南大学出版社的帮助和支持。

由于编者水平有限和时间较紧,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 水力学的任务及发展概况	1
1.1.1 水力学的任务	1
1.1.2 水力学的发展概况	1
1.2 连续介质假设·液体的主要物理性质	2
1.2.1 连续介质假设	2
1.2.2 液体的主要物理性质	3
1.3 作用在液体上的力	10
1.3.1 质量力	11
1.3.2 表面力	11
1.4 水力学的研究方法	11
1.4.1 理论分析方法	12
1.4.2 实验研究法	12
1.4.3 数值算法	12
思考题	13
习 题	13
第2章 水静力学	14
2.1 液体静压强的特性	14
2.1.1 静水压强	14
2.1.2 静水压强的特性	14
2.2 液体的平衡微分方程——欧拉平衡微分方程	16
2.2.1 液体的平衡微分方程	16
2.2.2 液体平衡微分方程的积分	18
2.2.3 等压面	19
2.3 水静力学基本方程	19
2.3.1 重力作用下的水静力学基本方程	19
2.3.2 压强的计量单位和表示方法	21
2.3.3 液体静力学基本方程的物理意义和几何意义	22
2.3.4 静水压强的测量	23
2.4 作用在平面上的静水总压力	26
2.4.1 图解法	26

2.4.2 解析法	28
2.5 作用在曲面上的静水总压力	31
2.6 浮力·潜体及浮体的稳定	35
2.6.1 浮力的计算——阿基米德原理	35
2.6.2 物体在静止液体中的浮沉	36
2.6.3 潜体及浮体的稳定	36
2.7 液体的相对平衡	37
思考题	39
习 题	40
第3章 水运动学基础	44
3.1 描述液体运动的两种方法	44
3.1.1 拉格朗日法	44
3.1.2 欧拉法	45
3.1.3 迹线·流线·脉线	48
3.2 液体运动的基本概念	51
3.2.1 流管·流束·过流断面·元流·总流	51
3.2.2 流量·断面平均速度	52
3.3 液体运动的分类	52
3.3.1 恒定流和非恒定流	52
3.3.2 均匀流和非均匀流·渐变流和急变流	54
3.3.3 有压流(有压管流)、无压流(明渠流)、射流	55
3.3.4 一元流、二元流、三元流	55
3.4 液体运动的连续性方程	55
3.4.1 系统和控制体	56
3.4.2 液体运动的连续性微分方程	56
3.4.3 恒定总流的连续性方程	57
思考题	58
习 题	58
第4章 水动力学基础	60
4.1 理想液体的运动微分方程——欧拉运动微分方程	60
4.2 理想液体元流的伯努利方程	61
4.2.1 理想液体运动微分方程式的积分	61
4.2.2 理想液体元流的伯努利方程	62
4.2.3 理想液体元流伯努利方程的意义	63
4.3 实际液体运动微分方程	65
4.3.1 液体质点的应力状态	65
4.3.2 实际液体运动微分方程	65

4.4	实际液体恒定元流的伯努利方程	66
4.5	实际液体总流的伯努利方程	67
4.5.1	渐变流过水断面上的动水压强分布	67
4.5.2	恒定总流的伯努利方程	67
4.5.3	总流伯努利方程的应用	69
4.6	恒定总流的动量方程	71
4.6.1	恒定总流的动量方程	71
4.6.2	动量方程应用	72
	思考题	74
	习 题	75
第5章	流动阻力与水头损失	80
5.1	流动阻力与能量损失的两种形式	80
5.1.1	沿程阻力和沿程水头损失	80
5.1.2	局部阻力及局部水头损失	80
5.2	液体的两种流动形态	80
5.2.1	雷诺实验	81
5.2.2	层流、湍流的判别标准	82
5.3	恒定均匀流的沿程水头损失和基本方程式	83
5.3.1	均匀流基本方程	83
5.3.2	圆管过水断面上切应力分布	84
5.4	圆管中的层流运动	85
5.4.1	断面流速分布	85
5.4.2	沿程水头损失的分析和计算	86
5.5	液体的湍流运动	87
5.5.1	湍流的基本特征及时均化	87
5.5.2	湍流切应力	88
5.5.3	普朗特混合长度理论	88
5.5.4	湍流核心与粘性底层	89
5.6	湍流沿程损失的分析和计算	90
5.6.1	尼古拉兹实验曲线	90
5.6.2	人工粗糙管沿程阻力系数的半经验公式	91
5.6.3	实用管道沿程阻力系数的确定	92
5.6.4	实用管道沿程阻力系数的经验公式	93
5.7	局部水头损失的分析和计算	95
5.7.1	局部水头损失的分析	95
5.7.2	圆管突然扩大的局部水头损失	96
5.8	边界层基本概念	98
5.8.1	边界层	98

思考题	99
习 题	99
第 6 章 孔口、管嘴出流和有压管流	102
6.1 薄壁孔口的恒定出流	102
6.1.1 小孔口的自由出流	102
6.1.2 小孔口的淹没出流	103
6.1.3 小孔口的收缩系数及流量系数	104
6.1.4 大孔口的流量系数	105
6.2 管嘴恒定出流	105
6.2.1 圆柱形外管嘴的恒定自由出流	105
6.2.2 其他形式管嘴	107
6.3 短管的水力计算	108
6.3.1 自由出流	108
6.3.2 淹没出流	109
6.3.3 短管的水力计算	110
6.4 长管的水力计算	113
6.4.1 简单长管	113
6.4.2 串联管路	117
6.4.3 并联管路	118
6.4.4 沿程均匀泄流管路	118
思考题	120
习 题	120
第 7 章 明渠流和堰流及闸孔出流	123
7.1 恒定明渠均匀流	123
7.1.1 明渠的分类	123
7.1.2 明渠均匀流的特征与发生条件	125
7.1.3 明渠均匀流的基本公式	126
7.1.4 明渠的水力最优断面和允许流速	126
7.1.5 明渠均匀流水力计算的基本问题	129
7.2 恒定明渠非均匀流若干基本概念	137
7.2.1 缓流和急流	137
7.2.2 断面单位能量、临界水深、临界底坡	138
7.3 水跃和跌水	144
7.3.1 水跃	144
7.3.2 跌水	145
7.4 恒定明渠非均匀渐变流动的基本微分方程	145
7.5 棱柱体渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的分析	147

7.5.1 顺坡渠道($i>0$)的水面曲线	148
7.5.2 平坡渠道($i=0$)的水面曲线	149
7.5.3 逆坡渠道($i<0$)的水面曲线	150
7.5.4 水面曲线的共性与分析方法	152
7.6 恒定明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	154
7.6.1 棱柱体渠道中水面曲线的计算	155
7.6.2 非棱柱体渠道中水面曲线的计算	155
7.7 堰 流	157
7.7.1 薄壁堰流	160
7.7.2 实用堰流	163
7.7.3 宽顶堰流	165
7.8 小桥孔径的水力计算	170
7.8.1 小桥孔径的水力计算	170
7.9 闸孔出流	173
7.9.1 闸孔自由出流	174
7.9.2 闸孔淹没出流	175
思考题	176
习 题	176
第8章 渗 流	179
8.1 概 述	179
8.2 渗流的简化模型	180
8.3 渗流基本定律	180
8.3.1 达西定律	180
8.3.2 达西定律的适用范围	181
8.3.3 渗透系数及其确定方法	182
8.4 恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	183
8.4.1 恒定均匀渗流	183
8.4.2 恒定渐变渗流	184
8.4.3 渐变渗流的基本微分方程	184
8.5 恒定渐变渗流浸润曲线的分析和计算	185
8.6 集水廊道的渗流	188
8.7 井的渗流	189
8.7.1 完全潜水井	189
8.7.2 完全自流井	191
8.7.3 大口井	193
8.8 井群的水力计算	194
8.8.1 完全潜水井的井群	194
8.8.2 完全自流井的井群	195

思考题	196
习 题	196
第 9 章 量纲分析和相似原理	198
9.1 量纲分析	198
9.1.1 量纲和单位	198
9.1.2 量纲和谐原理	200
9.1.3 瑞利法	200
9.1.4 π 定理	202
9.2 流动相似原理	205
9.2.1 几何相似	206
9.2.2 运动相似	206
9.2.3 动力相似	207
9.2.4 初始条件和边界条件相似	207
9.2.5 牛顿一般相似原理	208
9.3 相似准则	209
9.3.1 重力相似准则	209
9.3.2 粘滞力相似准则	210
9.3.3 压力相似准则	211
9.3.4 弹性力相似准则	212
9.3.5 表面张力相似准则	213
9.4 模型实验	213
9.4.1 雷诺模型	214
9.4.2 弗劳德模型	216
思考题	217
习 题	217
习题答案	220
参考文献	224

第 1 章 绪 论

1.1 水力学的任务及发展概况

1.1.1 水力学的任务

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律及其在生产实践中的应用的一门学科,是力学的一个分支。流体力学研究最多的流体是水和空气。它的主要基础是牛顿运动定律、质量守恒定律和能量守恒定律。若研究对象主要是水流,且又侧重于应用的,称水力学。水力学广泛应用于土木工程、交通运输、水利、环境工程等领域。

水力学的基本任务包括三个方面:1)研究液体宏观机械运动的基本规律(包括静止状态);2)研究产生上述宏观机械运动的原因;3)研究液体与建筑物之间的相互作用。

1.1.2 水力学的发展概况

水力学的发展同其他自然科学学科一样,既依赖于生产实践和科学实验,又受社会诸因素的影响,我国在防止水患、兴修水利方面有着悠久的历史。相传约公元前 2300 年的大禹治水,就表明古代先民有过长期、大规模的防洪实践。秦代在公元前 256—前 210 年间修建的都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,都说明当时人们对明渠流和堰流的认识已达到相当高的水平,尤其是都江堰工程在规划、设计和施工等方面都具有很好的科学水平和创造性,至今仍发挥效益。陕西兴平出土的西汉时期的计时工具实物——铜壶滴漏,就是利用孔口出流使容器水位发生变化来计算时间的,这说明当时对孔口出流,已有相当的认识。北宋时期,在运河上修建的真州复闸,与 14 世纪末在荷兰出现的同类船闸相比早 300 多年。14 世纪以前,我国的科学技术在世界上是处于领先地位的。但是,近几百年来由于闭关锁国使我国的科学技术事业得不到应有的发展,水力学始终处于概括性的定性阶段而未形成严密的科学理论。

约在公元前 250 年希腊物理学家阿基米德(Archimedes)提出了浮体定律。此后,欧洲各国长期处于封建统治时期,生产力发展非常缓慢,直到 15 世纪文艺复兴时期,水力学尚未形成系统的理论。

16 世纪以后,资本主义处于上升阶段,在城市建设、航海和机械工业发展需要的推动下,逐步形成了近代的自然科学,水力学也随之得到发展。如意大利的达·芬奇(L. da Vinci)是文艺复兴时期出类拔萃的美术家、科学家兼工程师,他倡导用实验方法了解水流流态,并通过实验描述和讨论了许多水力现象,如自由射流、漩涡形成等;1612 年伽利略(G. Galileo)

建立了物体沉浮的基本原理;1650年帕斯卡(Blaise Pascal)建立了平衡液体中压强传递规律——帕斯卡定理,从而使水静力学理论得到进一步的发展。1686年牛顿(Isaac Newton)提出了液体内部摩擦的假设和粘滞性的概念,建立了牛顿内摩擦定律。

18—19世纪,水力学与古典流体力学(古典水动力学)沿着两条途径建立了液体运动的系统理论,形成了两门独立的学科。古典流体力学的奠基人是瑞士数学家伯努利(Daniel Bernoulli)和他的朋友欧拉(Leonhard Euler)。1738年伯努利提出了理想液体运动的能量方程,即伯努利方程;1755年欧拉首次导出理想液体运动微分方程——欧拉运动微分方程。到19世纪中叶,大体建成了理想液体运动的系统理论,习惯上称为“水动力学”或者古典流体力学,使它发展称为力学的一个分支。古典流体力学这一理论体系在数学分析工作中,采用实验观测手段,得出经验公式,或在理论公式中引入经验系数以解决实际工程问题。如1732年皮托(Henri Pitot)发明了量测流速的皮托管;1769年谢才(A. de Chezy)建立了明渠均匀流动的谢才公式;1856年达西(H. Darcy)提出了线性渗流的达西定律,等等。这些成果被总结为以实际液体为对象的重经验重实用的水力学。古典流体力学和水力学都是关于液体运动的力学,但前者忽略粘性、重数学、重理论,后者考虑粘性、偏经验、偏实用。

临近19世纪中叶,1821—1845年,纳维(L. M. H. Navier)和斯托克斯(G. G. Stokes)等人成功地修正了理想液体运动方程,添加粘性项使之成为适用于实际流体(粘性流体)运动的纳维-斯托克斯方程。19世纪末,雷诺(O. Reynolds)于1883年发表了关于层流和紊流两种流态的系列试验结果,提出了动力相似率,后又于1895年建立了紊流时均化的运动方程——雷诺方程。这两方面成果对促进前述两种研究途径的结合有着重要的作用,可以说是建立近代粘性流动理论的两大先驱性工作。

生产的需要永远是科学发展的强大动力。19世纪20世纪之交,由于现代工业的迅速发展,特别是航空工业的崛起,提出了许多复杂问题,而古典流体力学与水力学都不能很好地说明和解决,这在客观上要求建立理论与实验密切结合的,以实际流体(包括液体和气体)运动为对象的理论。1904年普朗特(L. Prandtl)创立的边界层理论,揭示了基础上的试验理论,大大提高了探索水流运动规律和对实验资料进行理论分析的水平。尤其是半个世纪以来,电子计算机的广泛应用使许多比较复杂的水力学问题通过理论分析、试验研究和数值计算三者的结合得到解决。可以预见,理论分析、实验研究和数值计算三者相辅相成的研究方法将赋予水力学以新的生机,使水力学在各个工程技术领域中发挥更大的作用。

1.2 连续介质假设·液体的主要物理性质

1.2.1 连续介质假设

根据物质结构理论,液体和自然界任何物质一样,都是由分子组成,分子与分子之间是不连续且有空隙的。所有物质的分子都处在永不停息的不规则运动之中,相互间经常碰撞、掺和,进行动量、热量(能量)、质量的交换。然而,水力学主要是研究液体的宏观机械运动规律,以宏观角度去分析,几乎观察不到分子间的空隙,且分子间空隙的间距与实际工程中的液流尺寸相比,是极为微小的。

基于上述的原因,在水力学中,提出连续介质假设,把液体当作连续介质看待,假设液体是一种连续充满其所占据空间且毫无空隙的连续体,并认为液体的各物理量的变化随时间和空间也是连续的,这种假设的连续体称为连续介质。连续介质假设是瑞士学者欧拉(Euler)于1753年提出的,它作为一种假设在水力学的发展上起了巨大的作用。根据长期的生产和科学实验证明:利用连续介质假设所得出的有关液体运动规律的基本理论与客观实际是十分符合的。只有在某些特殊水力学问题(例如空化水流、掺气水流等)中,才考虑水的不连续性。因此,本书只讨论作为连续介质的液体。

1.2.2 液体的主要物理性质

液体运动的规律与液体本身的物理性质及外界作用在液体上的力有关。

1) 易流动性

固体在静止时,可以承受切应力(剪应力);液体在静止时,不能承受切应力,只要在微小的切应力作用下,就发生流动而变形。液体在静止时不能承受剪力、抵抗剪切变形的性质称为易流动性。

2) 质量·密度·重量·重度

物体所具有的保持其原有运动状态不变的特性称为惯性。表示惯性大小的物理量度是质量。质量越大惯性也越大。液体和其他物质一样亦具有质量。

单位体积液体所含有的质量称为液体的密度,以符号 ρ 表示,其国际制单位是千克/立方米(kg/m^3)。若一均质液体质量为 m ,体积为 V ,其密度 ρ 为

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

对于非均质液体,由连续介质假设可为

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

在一个标准大气压下,不同温度时水的密度等主要物理性质见表1-1。计算时,一般采用水的密度值为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,水银的密度值为 $13.6 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 水的物理特性(在一个标准大气压下)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度 ρ / (kg/m^3)	粘度 $\mu \times 10^3$ / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动粘度 $\nu \times 10^6$ / (m^2/s)	表面张力 σ / (N/m)	汽化压强 p_v / kPa 绝对压强	弹性模量 $E \times 10^6$ / kPa	体(膨)胀 系数 $\alpha_v \times$ $10^4 / \text{K}^{-1}$	导热系数 κ / [$\text{W}/$ ($\text{m} \cdot \text{K}$)]
0	999.8	1.781	1.785	0.0756	0.61	2.02	-0.6	0.56
5	1000.0	1.518	1.519	0.0749	0.87	2.06	0.1	
10	999.7	1.307	1.306	0.0742	1.23	2.10	0.9	0.58
15	999.1	1.139	1.139	0.0735	1.70	2.15	1.5	0.59
20	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.34	2.18	2.1	0.59
25	997.0	0.890	0.893	0.0720	3.17	2.22	2.6	
30	995.7	0.798	0.800	0.0712	4.24	2.25	3.0	0.61
40	992.2	0.653	0.658	0.0696	7.38	2.28	3.8	0.63

续表 1-1

温度/℃	密度 ρ / (kg/m ³)	粘度 $\mu \times 10^3$ / (Pa · s)	运动粘度 $\nu \times 10^6$ / (m ² /s)	表面张力 σ / (N/m)	汽化压强 p_v / kPa 绝对压强	弹性模量 $E \times 10^6$ / kPa	体(膨)胀 系数 $\alpha_v \times$ 10 ⁴ /K ⁻¹	导热系数 κ /(W/ (m · K))
50	988.0	0.547	0.553	0.067 9	12.33	2.29	4.5	
60	983.2	0.466	0.474	0.066 2	19.92	2.28	5.1	0.65
70	977.8	0.404	0.413	0.064 4	31.16	2.25	5.7	
80	971.8	0.354	0.364	0.062 6	47.34	2.20	6.2	0.67
90	965.3	0.315	0.326	0.060 8	70.10	2.14	6.7	
100	958.4	0.282	0.294	0.058 9	101.33	2.07	7.1	0.67

万有引力特性是指任何物体之间相互具有吸引力的性质,其引力称为万有引力。地球对物体的引力称为重力,或称重量,用符号 G 表示。若物体质量为 m , 则

$$G = mg \tag{1-3}$$

式中: g 为重力加速度,本书中采用 9.8 m/s^2 。

单位体积液体的重量称为液体的重度,以符号 γ 表示,其单位是牛顿/立方米(N/m³)。

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{1-4}$$

密度与重度的关系为

$$\gamma = \rho g \tag{1-5}$$

不同液体的重度是不同的,同一液体的重度随温度和承受的压强而变化。但因水的重度随温度与压强的变化甚微,一般工程上视为常数,计算时采用 $9\,800 \text{ N/m}^3$ 。几种常见液体的重度见表 1-2。

表 1-2 几种常见液体的重度 γ 值(标准大气压力下)

液体名称	汽油	纯酒精	蒸馏水	海水	水银
重度/N/m ³	6 664~7 350	7 778.3	9 800	9 996~10 084	133 280
测定温度/℃	15	15	4	15	0

3) 粘性

当液体处在运动状态时,若液体质点之间存在着相对运动,则质点间会产生内摩擦力抵抗其相对运动,抵抗剪切变形,这种性质称为液体的粘性。此内摩擦力又称粘滞力。如果把液体看成一个整体,内摩擦力就好像固体力学中的剪(切)力,所以亦称剪力或切力。由于内摩擦力,液体部分机械能转化为热能而消失,粘性是液体的一个非常重要的性质。下面介绍牛顿平板实验所得的液体粘性及其规律——牛顿内摩擦定律。

如图 1-1(a),设有两块水平放置的平行平板,其间充满液体。两平板间距 h 很小,平板面积 A 足够大,以致可以忽略边界条件对液流的影响。下平板固定不动,上平板受水平力 F 的作用,在自身平面内以等速 U 向右移动。由于液体质点粘附于固体壁上,故下平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 。当间距 h 或等速 U 不是太大

时,两板间的沿法线方向 y 轴的液体速度分布按直线变化,由零增至 U ,且液体质点是有规则的一层一层向前运动而不互相混掺(这种各液层之间互不干扰的运动称为“层流运动”,在以后的章节中将详细讨论这种运动的特性),如图 1-1(a)所示。若离下平板距离为 y 处的流速为 u ,在相邻的 $y+dy$ 处的流速为 $u+du$ 。由于两相邻液层的流速不同(也就是存在相对运动),两液层之间将成对地产生内摩擦力,如图 1-1(b)所示。这情况像液体是由一系列薄片层所组成,它们的每一层相对于邻层有一很小的滑动。现距下平板 y 处作一同上平板平行的平面,取一薄层,厚度为 dy ,将 dy 薄层分成上、下两部分。上层的流速为 $u+du$,下层的流速为 u 。下层的液体对上层的液体作用了一个与流速方向相反的摩擦力,上层的液体对下层的液体作用了一个与流速方向一致的摩擦力。根据牛顿第三定律,这两个力大小相等方向相反,都有抵抗其相对运动的性质。作用在上层的液体上的摩擦力有减缓其流动的趋势,作用在下层的液体上的摩擦力有加速其流动的趋势。

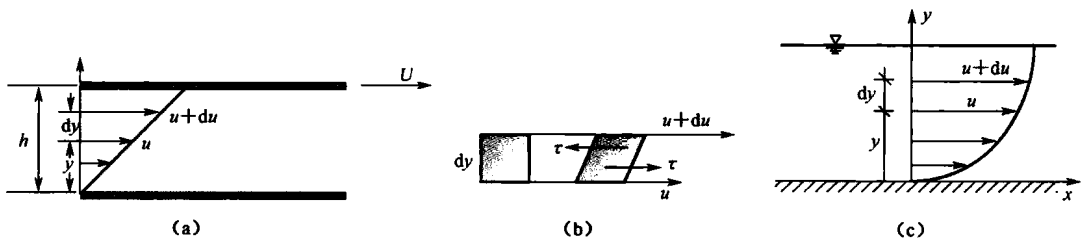


图 1-1 速度分布

将相邻液层接触面的单位面积上所产生的内摩擦力用符号 τ 表示。由于内摩擦力与作用面平行,故常称 τ 为切应力。根据前人的科学实验证明, τ 与两液层的速度差 du 成正比,与两液层之间的距离 dy 成反比,同时与液体的性质有关,可得

$$\tau \propto \frac{du}{dy}$$

引入一比例系数 μ , 则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中 μ 随液体种类不同而不同,称为动力粘滞系数也称粘度,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ 。 τ 的单位为 Pa 。两液层流速差与其距离的比值 $\frac{du}{dy}$ 称为流速梯度,它表示速度沿垂直于速度方向 y 轴的变化率。

式(1-6)就是著名的“牛顿内摩擦定律”,它可表述为:作层流运动的液体,相邻液层间单位面积上所作用的内摩擦力(或切应力)与流速梯度成正比,同时与液体的性质有关。

接触面上总内摩擦力 F 则为

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

在一般情况下,液体中的速度分布不一定是直线,而是曲线,如图 1-1(c)所示,牛顿内摩擦定律亦适用于上述情况。

可以证明流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 实质上是代表液体微团的剪切变形速度。取图 1-1 中流层厚度

为 dy 的矩形薄层 $abcd$ ，将薄层放大后如图 1-2 所示。薄层上层的流速为 $u + du$ ，下层的流速为 u 。经过 dt 时段后，薄层由原来的位置移至图 $a'b'c'd'$ 的位置。液体微团除位置改变引起平移运动外，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(或角变形)。 ad 边和 bc 边都发生了角位移 $d\theta$ ，其剪切变形速度为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。由于 dt 很小， $d\theta$ 亦很小，如图 1-2 可得，

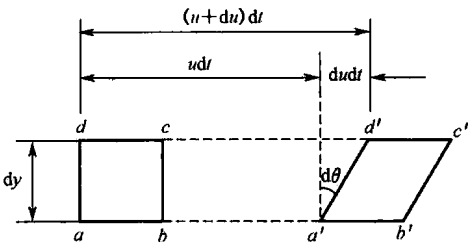


图 1-2 速度梯度

即

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{du dt}{dy}$$
$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \tag{1-8}$$

由式(1-8)可知，速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 就是液体微团的直角变形速度。因为它是在剪切应力的作用下发生的，所以亦称剪切变形角速度。

根据上面推导，切应力 τ 的公式(1-6)又可以表达为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \tag{1-9}$$

因此，牛顿内摩擦定律又可以表述为：液体作层流运动时，相邻液层间所产生的切应力与剪切变形速度成正比。所以液体的粘滞性可视为液体抵抗剪切变形的特性。需指出，液体在静止时，不能承受切应力以抵抗剪切变形。

在以后还会遇到液体粘度 μ 与液体密度 ρ 的比值，以 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-10}$$

式中： ν 的单位为 m^2/s 。因为它没有力的量纲，是一个运动学要素，为了区别起见， ν 称运动粘度， μ 则称动力粘度。

液体的粘度随压强变化的影响很小，随温度的变化如表 1-3 所示。

表 1-3 一个大气压下空气的粘性系数

温度/ $^{\circ}C$	$\mu \times 10^3 / (Pa \cdot s)$	$\nu \times 10^6 / (m^2/s)$	温度/ $^{\circ}C$	$\mu \times 10^3 / (Pa \cdot s)$	$\nu \times 10^6 / (m^2/s)$
0	0.017 2	13. 7	90	0. 021 6	22. 9
10	0.017 8	14. 7	100	0. 021 8	23. 6
20	0.018 3	15. 7	120	0. 022 8	26. 2
30	0.018 7	16. 6	140	0. 023 6	28. 5
40	0.019 2	17. 6	160	0. 024 2	30. 6
50	0.019 6	18. 6	180	0. 025 1	33. 2
60	0.020 1	19. 6	200	0. 025 9	35. 8
70	0.020 4	20. 5	250	0. 028	42. 8
80	0.021	21. 7	300	0. 029 8	49. 9

从表 1-1 和表 1-3 可看出，液体(水)的粘度随温度升高而减小，而气体则相反

(表 1-3)。要从产生流体粘性的因素出发分析其原因。流体粘性既取决于分子间的引力,又取决于分子间的动量交换。对于气体而言,气体的分子间距较大,分子间的作用力(吸引力)影响很小,分子的动量交换率因温度升高而加剧,因而使切应力随之而增大;液体的分子间距较小,吸引力影响较大,随着温度的升高,吸引力减小,使切应力亦随之而减小。这亦说明液体粘性形成的机理与气体不等同。

还需指出,牛顿内摩擦定律只能适用于一般流体,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的流体称为牛顿流体,如水、空气、汽油、煤油、乙醇等;反之称为非牛顿流体,如聚合物液体、泥浆、血浆等,如图 1-3 所示。

图 1-3 中,横坐标为 $\frac{du}{dy} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)$, 纵坐标为 τ 。牛顿流

体,其 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 呈直线关系,在图 1-3 表现为通过坐标原

点的一条直线,如图 1-3 直线 A,直线的斜率为动力粘度 μ ;如图 B 为一种非牛顿流体,叫宾汉流体,如牙膏、泥

浆、血浆等,这种流体在允许塑性流动以前承受住某一初始切应力,当这一切应力达到某一值 τ_0 时,才开始剪切变形,但变形率是常数;C 线为另一种非牛顿流体,叫拟塑性流体,如尼龙、橡胶的溶液等,其粘度随剪切变形速度的增加而减小;D 线也为非牛顿流体,叫膨胀性流体,如生面团、浓淀粉糊等,其粘度随剪切变形速度的增加而增加;无粘性流体(理想流体)因没有粘性,在图中用水平轴表示;真正的弹性固体,用铅垂轴表示。

在研究液流运动时,由于液体粘性的存在,将使液体运动的分析变得很复杂。在水力学中,为了简化分析,引入了“理想液体”的概念。理想液体和实际液体的根本区别是没有粘性。先对理想液体进行研究,然后再对粘性的作用进行专门研究后加以修正、补充。这种修正、补充大部分是以实验资料为依据的。在某些情况下,若粘性的影响不是很大,通过对理想液体的研究,可以得出实际可用的结果。理想液体只是实际液体在某种条件下的一种近似(简化)模型。

例 1-1 如图 1-4 所示,一底面积为 $45 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,高 1 cm 的木块,质量为 5 kg ,沿涂有润滑油的斜面向下作等速运动,木块速度 $u = 1 \text{ m/s}$,油层厚度 $\delta = 1 \text{ mm}$ 。斜坡角 $\theta = 22.62^\circ$,由木块所带动的油层的运动速度呈直线分布。求润滑油的粘度 μ 值。

解: 木块重量沿斜坡分力 F 与切力 T 平衡时,等速下滑,故:

$$mg \sin \theta = T = \mu A \frac{du}{dy}$$

$$\mu = \frac{mg \sin \theta}{A \frac{u}{\delta}} = \frac{5 \times 9.8 \times \sin 22.62^\circ}{0.4 \times 0.5 \times \frac{1}{0.001}} = 0.1047 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

例 1-2 如图 1-5(a)所示,汽缸内壁直径 $D = 12 \text{ cm}$,活塞直径 $d = 11.96 \text{ cm}$,活塞长度 $l = 14 \text{ cm}$,活塞往复运动的速度 $v = 1 \text{ m/s}$,润滑油的 $\mu = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。试问作用在活塞上

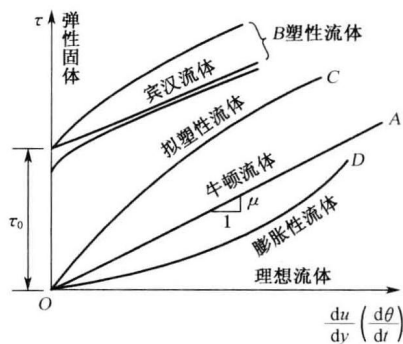


图 1-3 牛顿流体与非牛顿流体

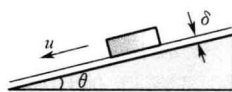


图 1-4 例 1-1 图