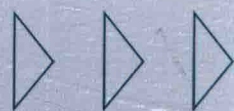


水力学



周洋 周强 ◎ 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

水 力 学

主 编 周 洋 周 强

副主编 王 超 王晓青



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共分为8章,内容主要包括绪论,水静力学,水动力学理论基础,量纲分析和相似原理,流动阻力和水头损失,孔口、管嘴和有压管道流动,明渠恒定流,渗流。

本书可作为高等工科学学校土木类、水利类专业及其他有关专业本科生的工程流体力学教材,也可作为专科相近专业学生的教学参考书,还可供土木、水利、环保、机械、化工、石油、气象等有关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

水力学/周洋,周强主编. —北京:北京理工大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-5682-6214-9

I. ①水… II. ①周… ②周… 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(2018)第193443号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京紫瑞利印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/14.5

字 数/340千字

版 次/2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷

定 价/58.00元

责任编辑/江 立

文案编辑/赵 轩

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

水力学是土木类、水利类专业的一门重要专业基础课。本书本着“宜广不宜深”的原则编写,尽量避免篇幅较长的数学公式推导,着重物理概念和现象的叙述,适当增加水力学在工程应用方面的典型案例。另外,本书在编写过程中力求做到基本原理、概念描述正确、清晰,文字简洁,便于教学;在内容选择上力求贯彻少而精的原则,体现实用性,图文并茂,图文密切结合。

本书内容主要包括水力学的基本概念、基本理论和水力学在工程中的应用,共分为8章。第1章为绪论,主要介绍流体物理性质、作用在流体上的力、流体力学模型及研究方法;第2章为水静力学,主要介绍压强及压力的特征和计算方法;第3章为水动力学理论基础,主要介绍流体流动的基本概念、流动形态、伯努利方程;第4章为量纲分析和相似原理,主要介绍量纲分析的概念与相似准则;第5章为流动阻力和水头损失,主要介绍阻力损失及其计算;第6章为孔口、管嘴和有压管道流动,主要介绍管路的水力计算问题;第7章为明渠恒定流,主要介绍明渠均匀流与非均匀流的流动问题;第8章为渗流,主要介绍渗流的基本概念以及渗流运动的基本微分方程。讲授本书大概需要40学时。

为了巩固基础理论和培养学生的分析计算能力,各章精选了一定数量的例题和习题。为便于应用,书中附有习题答案。

本书由周洋、周强担任主编,由王超、王晓青担任副主编。具体编写分工如下:周洋编写第1章、第3章、第5章;王超编写第4章、第7章、第8章;王晓青编写第2章、第6章;周洋、周强负责全书统稿。另外,冯超参与资料的搜集与整理工作。

本书可作为高等工科学学校土木类、水利类专业及其他有关专业本科生的工程流体力学教材,也可作为专科相近专业学生的教学参考书,还可供土木、水利、环保、机械、化工、石油、气象等有关工程技术人员参考。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请使用本书的读者批评指正。

编 者

第 1 章 绪论	(1)
1.1 水力学的任务及发展简史	(1)
1.2 流体的连续介质模型	(2)
1.3 流体的主要物理性质	(2)
1.3.1 密度	(2)
1.3.2 重度	(3)
1.3.3 黏性	(4)
1.3.4 黏性流体与理想流体	(5)
1.3.5 牛顿流体与非牛顿流体	(6)
1.3.6 压缩性	(6)
1.4 液体的表面性质	(7)
1.4.1 表面张力	(7)
1.4.2 毛细现象	(8)
1.5 作用于液体上的力	(8)
1.5.1 表面力	(8)
1.5.2 质量力	(9)
1.6 流体力学的研究方法	(9)
第 2 章 水静力学	(11)
2.1 静水压强的特性	(11)
2.2 流体静压强的特征	(12)
2.2.1 流体静压强的方向垂直于作用面, 并指向作用面	(12)
2.2.2 任一点流体静压强的大小与其作用面的方向无关	(13)
2.3 流体平衡微分方程及其积分	(14)
2.3.1 流体平衡微分方程	(14)

2.3.2 流体平衡微分方程的积分及等压面	(15)
2.4 重力作用下流体静压强的基本方程	(15)
2.4.1 方程的推导	(15)
2.4.2 帕斯卡原理	(16)
2.4.3 连通器原理	(16)
2.4.4 流体静压强分布图	(17)
2.5 流体压强的测量	(19)
2.5.1 流体压强的表示形式	(19)
2.5.2 流体压强的度量	(20)
2.6 流体压强的测量仪器	(21)
2.6.1 金属式测压计	(21)
2.6.2 电测式测压计	(21)
2.6.3 液柱式测压计	(21)
2.7 流体相对静止时的压强分布	(24)
2.7.1 做等加速度直线运动的流体的压强分布	(24)
2.7.2 等角速旋转容器内的流体的压强分布	(25)
2.8 静止流体作用在平面上的总压力	(26)
2.8.1 解析法	(26)
2.8.2 图算法	(29)
2.9 静止流体作用在曲面上的总压力	(31)
第3章 水动力学理论基础	(36)
3.1 流体运动的描述	(36)
3.1.1 拉格朗日法	(36)
3.1.2 欧拉法	(37)
3.1.3 流体质点加速度和质点导数	(37)
3.2 研究流体运动的若干概念	(39)
3.2.1 恒定流与非恒定流	(39)
3.2.2 一元流、二元流和三元流	(39)
3.2.3 流线与迹线	(40)
3.2.4 流管、元流、总流、过流断面	(41)
3.2.5 流量、断面平均流速	(41)
3.2.6 均匀流与非均匀流	(42)
3.2.7 渐变流与急变流	(42)
3.2.8 系统与控制体	(43)
3.3 流体运动的连续性方程	(44)
3.4 流体运动的连续性微分方程	(45)
3.5 流体的运动微分方程及其积分	(47)

3.5.1	理想流体的运动微分方程	(47)
3.5.2	实际流体的运动微分方程	(48)
3.5.3	欧拉运动微分方程的积分	(49)
3.6	恒定总流伯努利方程 (能量方程)	(50)
3.6.1	理想流体恒定元流的伯努利方程	(50)
3.6.2	理想流体伯努利方程的物理意义和几何意义	(51)
3.6.3	元流能量方程的应用举例	(51)
3.7	实际流体恒定总流的伯努利方程及其适用条件	(52)
3.7.1	实际液体恒定总流的伯努利方程	(52)
3.7.2	实际流体恒定总流能量方程的适用条件	(54)
3.7.3	实际流体恒定总流能量方程附带的几点说明	(54)
3.7.4	恒定总流的能量方程应用举例	(55)
3.8	恒定总流的动量方程	(57)
3.8.1	恒定总流动量方程的推导	(57)
3.8.2	总流动量方程的应用	(58)
3.8.3	总流动量方程的解题步骤	(58)
3.8.4	推论	(59)
第4章	量纲分析和相似原理	(65)
4.1	量纲分析概述	(65)
4.1.1	量纲和单位	(65)
4.1.2	无量纲数	(66)
4.2	量纲和谐原理	(67)
4.3	量纲分析法	(69)
4.3.1	雷利法	(69)
4.3.2	π 定理	(70)
4.4	相似原理	(74)
4.4.1	相似理论的基本概念	(74)
4.4.2	牛顿相似定律	(75)
4.5	相似准则	(75)
4.5.1	重力相似准则 (佛汝德模型)	(75)
4.5.2	阻力相似准则	(76)
4.5.3	压力相似准则	(77)
4.5.4	表面张力相似准则	(78)
4.5.5	弹性力相似准则	(78)
4.5.6	惯性力相似准则	(78)
第5章	流动阻力和水头损失	(81)
5.1	流动阻力和水头损失的分类	(81)

5.1.1 沿程阻力和沿程水头损失	(81)
5.1.2 局部阻力和局部水头损失	(81)
5.1.3 总水头损失	(82)
5.2 实际流体流动的两种形态	(82)
5.2.1 雷诺实验	(82)
5.2.2 层流、紊流的判别标准——临界雷诺数	(84)
5.3 均匀流基本方程式与沿程水头损失计算公式	(86)
5.4 圆管中的层流运动	(88)
5.4.1 圆管层流的沿程阻力	(88)
5.4.2 圆管层流的速度分布	(89)
5.4.3 圆管层流沿程水头损失的计算	(90)
5.5 圆管中的紊流运动	(92)
5.5.1 紊流的基本特征	(92)
5.5.2 紊流运动的时均化	(93)
5.5.3 紊流的切应力分布及断面速度分布	(94)
5.5.4 圆管紊流流核与黏性底层	(96)
5.5.5 沿程水头损失	(98)
5.6 管中沿程阻力系数变化规律	(98)
5.6.1 尼古拉兹实验	(98)
5.6.2 沿程阻力系数 λ 的计算公式	(100)
5.6.3 工业管道和柯列勃洛克公式	(101)
5.6.4 莫迪图	(102)
5.6.5 计算沿程阻力系数的其他经验公式	(102)
5.7 边界层理论简介	(105)
5.7.1 边界层的基本概念	(106)
5.7.2 边界层分离	(106)
5.8 局部水头损失	(108)
5.8.1 局部水头损失产生的原因	(108)
5.8.2 局部水头损失系数的影响因素	(109)
5.8.3 常见管道局部阻力系数的确定	(109)
5.8.4 局部阻碍之间的相互干扰	(115)
5.9 物体的阻力与减阻	(117)
第6章 孔口、管嘴和有压管道流动	(123)
6.1 孔口出流	(123)
6.1.1 孔口出流的分类	(123)
6.1.2 薄壁小孔口恒定出流	(124)
6.1.3 孔口非恒定出流	(127)

6.2 管嘴恒定出流	(128)
6.3 管路的水力计算	(129)
6.3.1 短管的水力计算	(130)
6.3.2 工程中常见短管水力计算	(132)
6.4 长管的水力计算	(136)
6.4.1 简单管路	(136)
6.4.2 串联管路	(138)
6.4.3 并联管路	(139)
6.4.4 沿程均匀泄流管路	(140)
6.5 管网简介	(141)
6.6 离心式水泵及其水力计算	(142)
6.6.1 离心式水泵的工作原理	(142)
6.6.2 离心泵的性能参数	(143)
6.6.3 水力计算	(143)
6.7 水击简介	(145)
6.7.1 水击现象分析	(146)
6.7.2 水击压强的计算	(148)
6.7.3 水击波的传播速度	(149)
第7章 明渠恒定流	(154)
7.1 明渠的类型	(154)
7.1.1 按明渠横断面形状分类	(154)
7.1.2 按断面形状、尺寸是否沿流程变化分类	(156)
7.1.3 按明渠底坡分类	(156)
7.2 明渠均匀流	(157)
7.2.1 明渠均匀流的特性及形成条件	(157)
7.2.2 明渠均匀流的水力计算公式	(158)
7.2.3 明渠均匀流水力计算的基本问题	(160)
7.2.4 明渠均匀流水力计算的其他问题	(162)
7.3 明渠非均匀流的基本概念	(166)
7.3.1 缓流、急流和临界流	(166)
7.3.2 佛汝德数	(168)
7.3.3 断面比能和临界水深	(169)
7.4 水跃和跌水	(172)
7.4.1 水跃	(172)
7.4.2 跌水	(175)
7.5 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	(177)
7.6 棱柱体渠道中恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	(178)

7.6.1	渐变流水面曲线的分区	(178)
7.6.2	棱柱体渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的定性分析	(179)
7.6.3	水面曲线分析的步骤及注意要点	(180)
7.7	棱柱体渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(183)
7.8	天然河道中水面曲线的计算	(187)
第8章 渗流		(191)
8.1	渗流的基本概念	(192)
8.1.1	土壤中水的形态	(192)
8.1.2	土壤的性质	(192)
8.1.3	渗流模型	(193)
8.2	渗流的达西定律	(194)
8.2.1	达西定律	(194)
8.2.2	达西定律的适用范围	(195)
8.2.3	渗透系数	(195)
8.3	恒定无压渗流	(196)
8.3.1	均匀渗流	(197)
8.3.2	渐变渗流的基本公式	(197)
8.3.3	地下水无压恒定渐变渗流的浸润线	(198)
8.4	井的渗流	(204)
8.4.1	普通完全井	(204)
8.4.2	承压完全井	(206)
8.4.3	井群	(207)
8.5	土坝渗流	(209)
8.5.1	上游段的计算	(210)
8.5.2	下游段的计算	(211)
8.5.3	浸润线	(212)
8.6	渗流运动的基本微分方程	(212)
8.6.1	渗流的连续性方程	(212)
8.6.2	渗流的运动方程	(212)
8.6.3	渗流的流速势与拉普拉斯方程	(213)
8.6.4	渗流场的边界条件	(213)
8.7	用流网法求解平面渗流	(215)
参考文献		(220)

绪 论

1.1 水力学的任务及发展简史

流体力学是力学的一个重要分支,是研究流体平衡和运动规律及其应用的一门科学。

流体是液体与气体的总称。流体的种类繁多,例如水、油和空气就是常见的流体。从力学的角度分析,流体与固体的主要区别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体可以抵抗一定的拉力、压力和剪切力。而流体几乎不能承受拉力,处于静止状态下的流体还不能抵抗剪切力,也就是流体在很小的剪切力作用下就将发生连续不断的变形。流体的这种宏观力学特性称为易流动性。流体涉及面很广,流体力学的应用范围也很广。一般流体力学以气体和液体作为研究对象,它们具有各自的特性,气体没有一定的体积,不存在自由液面,易于压缩;液体具有一定的体积,有自由液面,不易压缩。

流体力学是人类与自然界做斗争和生产实践中发展起来的。对流体力学学科的形成做出第一个贡献的是古希腊的阿基米德,他建立了包括浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,流体力学没有重大发展。16世纪以后,资本主义制度兴起,生产力迅速发展,自然科学也发生了质的飞跃。这些都为工程流体力学的发展提出了要求和创造了条件。

18—19世纪,以伯努利方程式、欧拉运动微分方程式为代表的流体力学理论基础,由于存在简化和假设,结论与实际情况有着一定的差别,因此古典流体力学不能完全解决所有的流体力学问题。由此产生了利用实验方法得出一些经验公式来修正理论分析的误差,如达西公式、谢才公式等。20世纪,随着航空、水利、石油等工业的迅猛发展,理论流体力学和实验流体力学得到了完美的结合。20世纪60年代以来,随着计算机的出现与发展,计算流体力学得到了迅速发展,它使过去无法计算的许多问题得以解决。

土建大类各专业的教学需要介绍一些流体力学知识。工程流体力学在土建工程中有着广泛的应用,如水利工程的建设、造船工业的发展是同水静力学的建立和水动力学的发展密切

相关的；城市的工业与生活供水，一般都是由水厂集中供应，水厂利用水泵将河、湖的水抽上来，经过一系列的净化和消毒处理后，通过管路系统把水输送到各个用户，这个过程需要解决一系列工程流体力学问题，如取水口的布置、管路的布置、水管直径等；供暖与通风过程也需要进行热量的供应、空气的调节、燃气的输配、降尘降温的设计计算等。此外，修建铁路、公路需要讨论桥涵孔径的大小、路基排水、隧道通风及排水等水力学的计算问题。因此，水力学是高等工科院校土建类专业的一门重要的技术基础课。

1.2 流体的连续介质模型

众所周知，任何流体都是由无数分子组成的，分子与分子间有空隙，这就是说，从微观角度看，流体并不是连续分布的物质。但是，流体力学并不研究微观的分子运动，只研究流体的宏观机械运动。在研究流体的宏观运动中，所取的最小的流体微元是体积为无穷小的流体微团（或称流体质点）。流体微团虽小，但包含着为数众多的分子。在工程上， 1 mm^3 是很小的体积，但它在标准状态（ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $101\ 325\text{ Pa}$ ）下所包含的气体分子数约有 2.7×10^{16} 个，而包含的水分子数约有 3.4×10^{19} 个。可见，流体分子及其间的空隙都是极其微小的。

在研究流体运动时，只要所取的流体微团包含有足够多的分子，使各物理量的统计平均值有意义，就可以不去研究无数分子的瞬时状态（此为分子动力学的研究内容），而只研究描述流体运动的某些宏观属性（例如密度、速度、压强、温度等）。这就是说，可以不去考虑分子间存在的空隙，而把流体视为由无数连续分布的流体微团所组成的连续介质，这就是流体的连续介质假设。基于上述原因，1753 年，瑞士学者欧拉提出了一个基本假说，即流体是由其本身质点毫无空隙地聚集在一起、完全充满所占空间的一种连续介质。把流体视为连续介质后，流体运动中的物理量均可视为空间和时间的连续函数，这样就可以利用数学中的连续函数分析方法来研究流体运动。实践证明，采用流体的连续介质模型解决一般工程中的流体力学问题是可以满足要求的。

1.3 流体的主要物理性质

流体机械运动规律不仅与作用于液体的外部因素及边界条件有关，更主要的是取决于液体本身所具有的物理性质。因此，在研究流体平衡与运动之前，首先要讨论流体的主要物理性质。

1.3.1 密度

液体与任何物体一样，具有惯性。惯性是指物体保持其原有运动状态的特性。惯性的大小以质量来度量，质量越大的物体，惯性也越大。流体的密度是流体的重要属性之一，表征

流体在空间某点质量的密集程度。如流体中围绕着某点的体积为 ΔV ，其中流体的质量为 Δm ，则比值 $\Delta m/\Delta V$ 为体积 ΔV 内流体的平均密度。令 $\Delta V \rightarrow 0$ 取该比值的极限，便可得到该点处的流体密度，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \tag{1-1}$$

式中 ρ ——流体单位体积内所具有的质量 (kg/m^3)。

假如流体是均匀的流体，显然流体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-2}$$

式中 m ——流体的质量 (kg)；

V ——流体的体积 (m^3)。

在土建工程的大多数水力计算问题中，通常视密度为常数，采用在一个标准大气压下，温度为 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的蒸馏水密度来计算，此时 $\rho = 1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 列出了在标准大气压下，不同温度下几种常用流体的密度。

表 1-1 标准大气压下水、空气、水银的密度随温度变化的数值

温度/ $^\circ\text{C}$	水的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	空气的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水银的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0	999.87	1.293	13 600
4	1 000.00	—	—
5	999.99	1.273	—
10	999.73	1.248	13 570
15	999.13	1.226	—
20	998.23	1.205	13 550
25	997.00	1.185	—
30	995.70	1.165	—
40	992.24	1.128	13 500
50	988.00	1.093	—
60	983.24	1.060	13 450
70	977.80	1.029	—
80	971.80	1.000	13 400
90	965.30	0.973	—
100	958.40	0.946	13 350

1.3.2 重度

液体还具有万有引力特性。在水力学中涉及的万有引力就是重力。一质量为 m 的液体，所受的重力大小为

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

式中 g ——重力加速度 (m/s^2)。

液体的重度是指单位体积液体所具有的重量。以 γ 表示。一质量为 m ，体积为 V 的均质流体，其重度为

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

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

在土建工程的水力计算问题中，通常视重度为常数，取在一个标准大气压下，4℃时的蒸馏水重度 $\gamma = 9\,800\text{ N/m}^3$ 。几种常见流体的重度如表 1-2 所示。

表 1-2 几种常见流体的重度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度/(N·m ⁻³)	12	133 280	6 664 ~ 7 350	7 778.3	15 600	9 996 ~ 10 084
温度/℃	20	0	15	15	20	15

1.3.3 黏性

流体在运动状态下抵抗剪切变形能力的性质，称为黏滞性或黏性。黏性是流体的固有属性，是运动流体产生机械能损失的根源。

如图 1-1 (a) 所示，两块相隔一定距离的平行平板水平放置，其间充满液体，下板固定不动，上板在力 F' 的作用下以速度 u 沿 x 方向运动。实验表明，黏附于上板的流体在平板切向方向上产生的黏性摩擦力 F 即 F' 的反作用力，和两块平板间的距离成反比，和平板的面积 A 、平板的运动速度 u 成正比，比例关系式如下：

$$F = \mu A \frac{u}{h} \tag{1-6}$$

式中 μ ——流体的动力黏度，是流体的重要物理属性 (Pa·s)。
 u/h ——在速度的垂直方向上单位长度上的速度增量，称为速度梯度。

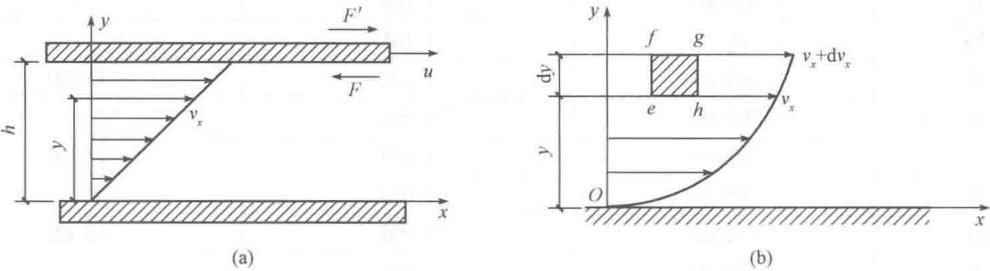


图 1-1 流体黏性实验及速度分布

(a) 流体黏性实验；(b) 黏性流体速度分布

显然在上述情况下，速度分布为直线，速度梯度为常数，属于特殊情况。一般速度分布为曲线，如图 1-1 (b) 所示， x 方向上的速度用 v_x 表示时，速度梯度可表示为 $\frac{dv_x}{dy}$ ，此时速度梯度为一变量，在每一速度层上有不同的数值，将 $\frac{dv_x}{dy}$ 代入式 (1-6)，两端同时除以平板面积 A ，则可以得到作用在平板单位面积上的切应力 τ ：

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} \tag{1-7}$$

式(1-7)即牛顿内摩擦定律。式中, $\frac{dv_x}{dy}$ 为流速梯度, 表示流速沿垂直于流动方向 y 的变化率, 实质上它代表流体微团的剪切变形速率。现证明如下:

如图1-2所示, 在运动的流体中取一正方形的流体微团, 在 t 时刻其形状为 $efgh$, 经过一无限小的时间间隔 Δt 后, 由于上、下层流速的差别, 其形状变为 $e'f'g'h'$, 产生角变形 $\Delta\varphi$, 角变形速度可由几何关系推出。

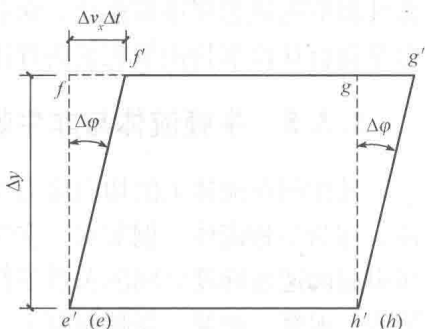


图1-2 微团变形

$$\frac{d\varphi}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta v_x \Delta t}{y}}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dy}$$

即在流动过程中流体微团的角变形速度等于速度梯度。此公式表明黏性即运动流体抵抗剪切变形的能力。

在流体力学中还常引用动力黏度与密度的比值, 称为运动黏度, 用 ν 表示, 单位为 m^2/s , 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

温度对流体黏度的影响很大。液体的黏度随温度上升而减小, 气体的黏度随温度上升而增大, 这就是说, 温度对这两类流体黏度的影响趋向正好相反。这是由于形成流体黏性的主要因素不同。对于液体, 分子间的引力形成液体黏性的主要因素, 当温度升高时, 分子间的空隙增大, 吸引力减小, 液体的黏度降低。对于气体, 气体分子做混乱运动时在不同流速的流层间所进行的动量交换是形成其黏性的主要因素, 温度越高, 气体分子的混乱运动越强烈, 动量交换越频繁, 气体的黏度越大。

水的运动黏度随温度变化的近似经验关系式为

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-9)$$

式中 ν ——运动黏度 (cm^2/s);

t ——温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

其他流体的黏度可查阅有关流体力学计算手册。

1.3.4 黏性流体与理想流体

自然界中的实际流体都具有黏性, 所以实际流体又称黏性流体。为了处理工程实际问题方便, 建立一个没有黏性的理想流体模型, 把假想的没有黏性的流体作为理想流体。它是一种假想的流体模型, 在实际中并不存在。在流体力学中引入理想流体的概念, 是因为在实际流体的黏性作用表现不出来的场合 (像在静止流体中或均匀等速流动的流体中), 完全可以把实际流体当理想流体来处理。在许多场合, 想求得黏性流体流动的精确解是很困难的。对某些黏性不起主要作用的问题, 先不计黏性的影响, 使问题的分析大为简化, 从而有利于掌握流体流动的基本规律。至于黏性的影响, 可根据实验引进必要的修正系数, 对由理想流体制出的流动规律加以修正。此外, 即使是黏性为主要影响因素的实际流动问题, 先研究不计

黏性影响的理想流体的流动，而后引入黏性影响，再研究黏性流体流动的更为复杂的情况，也是符合认识事物由简到繁的规律的。

1.3.5 牛顿流体与非牛顿流体

凡作用在流体上的切向应力与它所引起的速度梯度之间的关系符合牛顿内摩擦定律的流体，称为牛顿流体，例如水、空气、汽油、煤油、乙醇等。凡作用在流体上的切向应力与它所引起的速度梯度之间的关系不符合牛顿内摩擦定律的流体，称为非牛顿流体，例如聚合物溶液、泥浆、血浆、新拌混凝土、泥石流等。牛顿流体与非牛顿流体的区别如图 1-3 所示，其中 τ_0 为初始切应力。本书主要讨论牛顿流体。

1.3.6 压缩性

当作用在流体上的压强增大时，流体的宏观体积将会减小，这种性质称为流体的压缩性。压缩性的大小可以用体积压缩率 β 或体积模量 K 来度量。设压缩前的体积为 V ，压强增加 dp 后，体积减小 dV ，则体积压缩率为

$$\beta = -\frac{dV}{V dp} \quad (1-10)$$

由于 dp 与 dV 符号始终相反，表示压力上升时，体积减小。 β 的单位为 m^2/N ， β 越大，流体的压缩性越大。

工程上还常用流体的体积模量 K 衡量流体的压缩性，它是体积压缩率的倒数，即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dV/V} \quad (1-11)$$

式中， K 的单位为 Pa 。

液体的压缩性很小，例如水在 $10\text{ }^{\circ}C$ 时的体积模量 $K \approx 2 \times 10^9\text{ } Pa$ 。此数值说明，每增加一个大气压，水的体积相对压缩值约为两万分之一。所以一般在工程中认为水的压缩性可以忽略，相应水的密度和重度可视为常数。但在讨论管道中水流的水击问题时，水的压缩性则必须考虑。对于气体，通常将其作为可压缩流体来处理。如果压力差较小、运动速度较小，又无很大温度差，可将气体作为不可压缩流体来处理。压缩将导致流体的体积减小，从而引起流体的密度增大，可见考虑压缩性要比不考虑压缩性复杂。

不同温度时水的主要物理性质数值如表 1-3 所示。

表 1-3 不同温度时水的主要物理性质

温度/ $^{\circ}C$	重度 / $(kN \cdot m^{-3})$	密度 / $(kg \cdot m^{-3})$	动力黏度 / $(\times 10^{-3} Pa \cdot s)$	运动黏度 / $(\times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1})$	体积模量 / $(\times 10^{-9} Pa)$
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02
5	9.807	1 000.0	1.518	1.519	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10

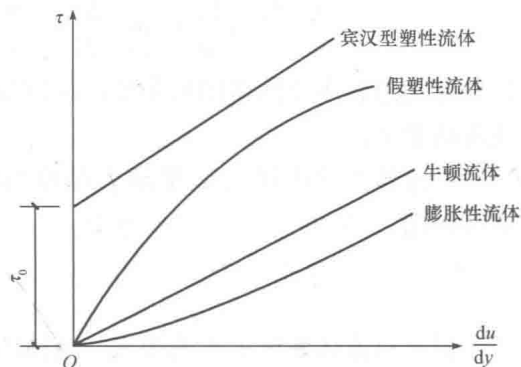


图 1-3 牛顿流体与非牛顿流体的区别

续表

温度/℃	重度 / (kN · m ⁻³)	密度 / (kg · m ⁻³)	动力黏度 / (× 10 ³ Pa · s)	运动黏度 / (× 10 ⁶ m ² · s ⁻¹)	体积模量 / (× 10 ⁻⁹ Pa)
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07

1.4 液体的表面性质

1.4.1 表面张力

当液体与气体及液体与固体有界面，即当出现液体的自由表面时，液体的表面性质必须加以考虑。在流体力学中，重要的是液体的表面张力及由表面张力引起的毛细现象。

液体的分子间是有吸引力的。液体分子吸引力的作用范围很小，在以3~4倍平均分子距为半径的球形范围内，称该球形范围为“影响球”。“影响球”的半径 r 一般为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ cm。若某分子距自由液面的距离大于或等于“影响球”的半径 r ，如图1-4中的A、B，则在“影响球”内的液体分子对该分子的吸引力恰好相互平衡。若该分子距自由液面的距离小于“影响球”的半径 r ，如图1-4中的C，则由于“影响球”在自由表面上面的部分没有液体分子，“影响球”内的分子对该分子的吸引力便不能互相平衡，而构成一个合力，此合力从自由表面向下作用在该分子上。当某分子处于自由表面上时，如图1-4中的D，向下的合力达到最大值。厚度小于“影响球”半径的液面下的薄层称为表面层。表面层内的所有液体分子均受向下的吸引力，从而把表面层紧紧地拉向液体内部。

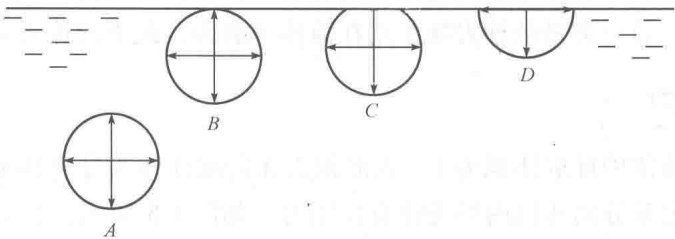


图1-4 近液面分子受到的吸引力