

SHUILIXUE 水力学 SHUILIXUE 水力学 SHUILIXUE 水力学

土木工程系列教材

水力学

SHUILIXUE

(第三版)

■ 主 编 尹小玲 于 布



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

014035630

TV13
13-3

土木工程系列教材

内容简介

水 力 学

(第三版)

主编 尹小玲 于 布
参编 吴学伟 贾顺钟



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·



北航

C1723056

TV 13

13-3

014032830

内 容 简 介

本书根据全国土木工程专业指导委员会 1999 年 10 月定稿的《流体力学》教学大纲编写。内容包括基本理论和工程应用两大部分。基本理论部分包括绪论、水静力学、水动力学、流动阻力和水头损失。工程应用部分包含孔口、管嘴恒定出流,长、短管水力计算,支状、环状管网水力计算,恒定明渠流及渗流。每章均附适量习题并给出答案;书末列举了 9 个水力学实验,供有类似设备的院校选用。

本书适合于大土木专业本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/尹小玲,于布主编.—3 版.—广州:华南理工大学出版社,2014.2

(土木工程系列教材)

ISBN 978-7-5623-4163-5

I. ①水… II. ①尹… ②于… 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(2014)第 029320 号

水力学

尹小玲 于布 主编

出 版 人:韩中伟

出版发行:华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

http://www.scutpress.com.cn E-mail:scute13@scut.edu.cn

营销部电话:020-87113487 87111048(传真)

策划编辑:赖淑华

责任编辑:赖淑华 侯珏

印 刷 者:佛山市浩文彩色印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:20.5 字数:518 千

版 次:2014 年 2 月第 3 版 2014 年 2 月第 11 次印刷

印 数:22001~25000 册

定 价:37.50 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

第三版前言

本书作为土木工程系列教材之一，在第二版的基础上对全书再次进行修订，以使该教材能更好地适应当前水力学的学科发展和教学需要。

本次修订吸收了教材使用单位和有关专家的意见，本着保持原有的特色、不断完善提高的原则，主要进行了以下方面的工作：

- (1) 增加重要章节的例题，以帮助读者更好地理解和掌握相关的理论和方法；
- (2) 对全书进行全面的校核和修正，并对一些重要的概念增加实际应用方面的说明，加深读者理解。

本次修订由尹小玲负责，江辽协助完成部分绘图和校核工作。对于书中的缺点和不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 12 月

第二版前言

本书自2001年出版以来,深得广大读者的喜爱,被许多高校选作“水力学”课程的教材。本次修订是在作者多年使用的基础上,综合相关使用院校的反馈信息,按现在的教学大纲和考试要求,补充调整而成。

本次修订主要做如下改动:(1) 每章章末增加“本章小结”,旨在帮助读者梳理知识点。(2) 习题增加考试分值较重的选择题,以帮助读者明晰概念,理清似是而非的问题。(3) 适当增加了例题。(4) 补充了两个明渠流实验。

本次修订由尹小玲负责。限于时间和水平,如有疏漏敬请读者指正。

编者

2007年3月

第一版前言

作为教材的《水力学》有很多版本,尤其是多学时适合于水利类专业的为多。1991年全国高等学校建筑工程学科专业指导委员会第三次西安会议上明确提出水力学是建筑工程类专业四年制本科的必修技术基础课,并建议采用48学时。广东地区各高校实际执行的水力学课时有的为48,有的为32,1999年个别高校加到64。

无论是教师还是学生都希望能有一本与教学学时数相配合的教材。因此,依照1999年10月专业指导委员会定稿的《流体力学》课程教学大纲,为适应大土木专业的培养要求,特别是满足华南地区,尤其是广东省内大土木(建筑工程、道路桥涵、给水排水、环境工程等)专业的教学需要而编撰了本教材。

考虑到所培养的大多数学生将从事土木工程的设计、施工与监理工作,从事科学研究的只占很小部分,所以本教材的编撰侧重于工程应用,基本理论要求阐述透彻,物理概念清楚。

主要内容分为两大部分:基本理论和工程应用。基本理论部分包含绪论、水静力学、水动力学、流动阻力和水头损失。其中绪论、水静力学与流动阻力和水头损失紧扣教学大纲。量纲分析融入于绪论中,以掌握两种单位制的换算及量纲和谐原理为基点。对于运动学和动力学基础部分,重点放在一维总流的三大方程上,采用三维数学分析来推导欧拉静力平衡方程,但不形成三维分析的完整体系,不涉及欧拉运动方程、纳维埃-斯托克期方程和雷诺方程。工程应用部分包含孔口、管嘴恒定出流,长、短管水力计算,支状、环状管网水力计算及电算实例。明渠恒定流动由明渠恒定均匀流水力计算、明渠恒定非均匀流水面曲线分析和分段求和法计算水面曲线与堰、闸水流三部分组成。渗流部分以集水廊道和各类井的计算、扬压力计算、流网为主要内容。

在实际教学中,如果是32学时,可以讲到基本理论即第1~4章止;如果是48学时,建议加讲第5章、第7章,即孔口、管嘴恒定出流和有压管道恒定流及渗流部分;如果是64学时,则可以讲完全书。

每章之后附有习题,总题量有145道(不含思考题),习题参考答案统附于书末。

此外,列举了8个水力学实验供有类似试验设备的院校作参考选用,通过实际提高学生的水力学四测(水位、流量、流速及流向、压强)能力。

书末还附有有关专业名词的英语索引。

编撰工作采取集体讨论、分工执笔、主编审定的方式。参加执笔的有:华南理工大学于布(第1、2、3、4章)、尹小玲(第6章)、贾顺钟(水力学实验),林洁梅参与了部分实验的绘图工作,广州大学吴学伟(第5、7章)。由于布主编。

由于水平所限,书中如有不完善之处,恳望读者指正。

编者

2000年7月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 水力学的研究对象	(1)
1.2 液体的基本特征和主要物理性质	(1)
1.2.1 液体的基本特征	(1)
1.2.2 国际单位制 (SI) 和工程单位制	(2)
1.2.3 液体的主要物理性质	(3)
1.3 作用于液体上的力	(11)
1.3.1 表面力	(11)
1.3.2 质量力	(12)
第2章 水静力学	(15)
2.1 静水压强的概念	(15)
2.1.1 静水压强的定义	(15)
2.1.2 静水压强的特性	(15)
2.2 液体的平衡微分方程与等压面	(18)
2.2.1 液体的平衡微分方程	(18)
2.2.2 等压面	(20)
2.3 重力作用下静水压强的分布规律	(21)
2.3.1 重力作用下静水压强的基本公式	(21)
2.3.2 绝对压强、相对压强、真空压强和压强的表示方法	(23)
2.3.3 静水压强基本方程的能量意义和几何意义	(26)
2.4 水静力学在量测上的应用	(27)
2.4.1 测压管	(27)
2.4.2 压差计	(28)
2.5 作用于平面上的静水总压力	(31)
2.5.1 图解法	(31)
2.5.2 分析法	(34)
2.6 作用于曲线上的静水总压力	(40)
2.6.1 曲面上静水总压力的大小	(40)

2.6.2 静水总压力的方向	(43)
2.6.3 静水总压力的作用点	(43)
2.7 作用于物体上的静水总压力、浮力、浮体的平衡	(46)
2.7.1 作用于物体上的静水总压力——阿基米德原理	(46)
2.7.2 沉体、潜体及浮体的平衡	(47)
本章小结	(48)
第3章 恒定总流的基本方程	(56)
3.1 描述液体运动的两种方法	(56)
3.1.1 拉格朗日法和欧拉法	(56)
3.1.2 质点的加速度：当地加速度、迁移加速度与全加速度	(58)
3.1.3 液体运动的一些基本概念	(61)
3.2 恒定总流的连续性方程	(66)
3.3 恒定总流的能量方程	(68)
3.3.1 理想液体恒定微小流束的能量方程	(69)
3.3.2 实际液体恒定流微小流束的能量方程	(71)
3.3.3 实际液体恒定总流的能量方程	(71)
3.4 恒定总流的动量方程	(86)
3.4.1 恒定总流动量方程式的推导	(86)
3.4.2 恒定总流动量方程式的应用条件和技巧	(90)
3.4.3 恒定总流动量方程式应用举例	(91)
3.4.4 动量方程与能量方程的异同	(95)
本章小结	(96)
第4章 流动型态和水头损失	(104)
4.1 流动阻力和水头损失的分类	(104)
4.1.1 流动阻力的分类	(104)
4.1.2 水头损失的分类	(106)
4.1.3 水头损失的叠加原理	(106)
4.2 实际液体流动的两态	(107)
4.2.1 雷诺试验	(107)
4.2.2 层流和紊流的判别	(109)
4.2.3 雷诺数的物理意义	(110)
4.3 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	(111)
4.3.1 沿程水头损失与边壁切应力的关系	(111)

4.3.2 沿程水头损失与流层间切应力的关系	(113)
4.3.3 沿程水头损失的通用计算公式	(114)
4.4 圆管中的层流运动	(115)
4.4.1 圆管均匀层流的流速分布	(116)
4.4.2 圆管均匀层流的断面平均流速	(116)
4.4.3 圆管均匀层流的流量	(117)
4.4.4 圆管均匀层流的沿程水头损失	(117)
4.4.5 圆管均匀层流的动能改正系数	(118)
4.5 紊流运动的基本概念	(118)
4.5.1 紊流的形成过程	(119)
4.5.2 紊流运动要素的脉动现象与时均化的概念	(120)
4.5.3 紊流附加切应力与普朗特的动量传递理论	(123)
4.5.4 紊流中的层流底层及紊流中的流区	(126)
4.5.5 紊流的流速分布	(129)
4.6 紊流的沿程水头损失	(133)
4.6.1 沿程阻力系数的试验研究	(134)
4.6.2 实际管道(自然粗糙)沿程阻力系数	(137)
4.6.3 计算沿程水头损失的经验公式	(142)
4.7 局部水头损失	(145)
4.7.1 圆管突然扩大的局部水头损失	(146)
4.7.2 管道局部水头损失系数	(147)
4.8 边界层基本概念和绕流阻力	(154)
4.8.1 边界层基本概念	(154)
4.8.2 边界层的分离现象与绕流阻力	(155)
本章小结	(159)
第5章 孔口、管嘴恒定出流和有压管道恒定流	(163)
5.1 孔口、管嘴出流和有压管流的基本概念	(163)
5.2 孔口、管嘴恒定出流的基本公式	(164)
5.2.1 液体流经薄壁孔口的恒定出流	(164)
5.2.2 液体经管嘴的恒定出流	(167)
5.3 有压管道的恒定流	(170)
5.3.1 短管的水力计算	(170)
5.3.2 长管的水力计算	(176)
5.3.3 管网的水力计算	(183)

本章小结	(191)
第6章 明渠恒定流动	(197)
6.1 明渠的几何特性	(197)
6.1.1 明渠的底坡	(197)
6.1.2 明渠的横断面	(198)
6.1.3 过水断面的几何要素	(198)
6.1.4 棱柱形渠道与非棱柱形渠道	(199)
6.2 明渠均匀流	(199)
6.2.1 明渠均匀流的特性和形成条件	(200)
6.2.2 明渠均匀流基本公式	(201)
6.2.3 明渠均匀流水力计算	(202)
6.2.4 水力最优断面和允许流速	(206)
6.2.5 无压圆管均匀流水力计算	(209)
6.3 明渠恒定非均匀流	(213)
6.3.1 明渠的流动状态	(213)
6.3.2 断面比能、比能曲线	(215)
6.3.3 临界水深	(217)
6.3.4 临界底坡	(218)
6.3.5 水跃和水跌	(221)
6.3.6 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	(226)
6.3.7 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(233)
6.4 堰流及闸孔出流	(235)
6.4.1 堰流的类型及基本公式	(236)
6.4.2 闸孔出流基本公式	(241)
本章小结	(242)
第7章 渗流	(248)
7.1 渗流现象和渗流模型	(248)
7.1.1 渗流现象	(248)
7.1.2 水在土中的存在形态	(249)
7.1.3 土的渗流特性	(249)
7.1.4 渗流模型	(249)
7.2 渗流的基本定律	(250)
7.2.1 达西定律	(250)

7.2.2 达西定律的适用范围	(251)
7.2.3 渗透系数	(252)
7.3 恒定渐变渗流的杜比公式	(252)
7.3.1 恒定均匀渗流和非均匀渗流的断面流速分布	(252)
7.3.2 恒定渐变渗流的基本微分方程和浸润曲线	(254)
7.4 井和集水廊道的渗流计算	(258)
7.4.1 集水廊道	(258)
7.4.2 无压完整井	(258)
7.4.3 承压完整井	(260)
7.4.4 大口井和基坑排水	(260)
7.4.5 井群	(261)
7.5 应用流网解平面渗流问题	(263)
7.5.1 平面有压渗流流网的绘制	(263)
7.5.2 利用流网进行渗流计算	(264)
本章小结	(266)
附录一 水力学实验	(268)
附录二 英语专业名词索引	(299)
习题参考答案	(309)
参考文献	(312)
附图 I	(313)
附图 II	(314)
附图 III	(315)
附图 IV	(316)

第1章 绪 论

1.1 水力学的研究对象

水力学是一门介于基础科学和专业技术之间的技术科学。水力学的研究对象是以水为代表的液体的平衡和机械运动的规律及其在工程中的应用。水力学是力学中流体力学的一个分支。

水力学所研究的基本规律包括水静力学和水动力学两大部分。水静力学是研究液体处于平衡状态时的力学规律；水动力学是研究液体处于运动状态时，作用于液体上的力与表征运动状态的各种物理量之间的关系，以及液体的运动特性与能量守恒和转换的规律。水静力学是学好水动力学的基础，水动力学则是液体运动规律的普遍原理。

在国民经济的众多部门，如水利工程、土木工程、给水排水工程、港口和航运工程、机械工程、石油和化学工程、采矿和冶金工程、能源工程、环境工程等都需要水力学的知识，因此水力学已成为高等工科院校许多专业特别是土木工程专业的一门必修的重要技术基础课。

水力学所需的前修课程是高等数学、物理、理论力学和材料力学。

1.2 液体的基本特征和主要物理性质

1.2.1 液体的基本特征

物质有三种状态：固体、液体和气体。

固体的分子间距离很小，内聚力很大，所以它能保持固定的形状和体积，它能承受一定的拉力、压力和剪切力。而液体则不同，其分子间距大于固体的分子间距，内聚力小，极易改变自己的形状，可以随器而方圆，具有易流动性。液体几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形，在微小的剪切力作用下，就很容易发生变形和流动。气体也具有易流动性，根据这一特征，液体和气体又都称为流体。

液体和气体相比，液体分子的内聚力比气体大得多，在一般的压力和温度变化的情况下，液体虽不能保持固定的形状，但能保持固定的体积。在重力场中，当液体不能充满容器时，将形成一个自由表面。

根据物理学的研究， 1 cm^3 体积的水含有 3.3×10^{23} 个水分子，水分子之间的平均间距是 $3 \times 10^{-8}\text{ cm}$ ，液体分子各自进行着复杂的微观运动。由于水力学并不着眼于研究液体分子的微观世界，而是研究整个液流的宏观机械运动，因此在水力学中引入了连续介质的假定，也就是假定液体质点之间没有空隙存在，液体质点连续地充满所占空间，其物理性质

和运动要素都是连续分布的。这里所说的质点是指液体内部具有无限小的体积和相应质量的点。有了连续介质的假定,一方面就能充分利用数学上连续函数这一有力工具进行液体的研究,另一方面,也可以满足大多数工程实际问题宏观要求,因为分子间空隙的距离与工程问题中水流的尺度相比较,是极为微小的。

在连续介质假设的基础上,一般还认为液体具有均匀等向性,即液体是均质的,各部分和各方向的物理性质是一样的。

概括地说,在水力学中,认为液体是易流动、不可压缩、均匀等向的连续介质。

1.2.2 国际单位制(SI)和工程单位制

1977年国家计量局宣布,我国关于量和使用单位的使用要与国际接轨,采用国际单位制。然而,目前还有一些较早年代出版的技术书籍、文献资料以及一些资深专业技术人员还习惯于采用工程单位制。为了学习方便,有必要弄清楚两种单位制之间的差别及换算关系。

1.2.2.1 量纲和单位

量纲(因次)——表示物理量性质的属性,通常以大写英文字母框以方括号表示。如长度量纲为 $[L]$,时间量纲为 $[T]$,质量量纲为 $[M]$,力的量纲为 $[F]$ 等。相同性质的单位都属于同一量纲,如年、月、日、时、分、秒都以 $[T]$ 表示。不同性质的单位属于不同的量纲,如秒、米、牛顿分属于 $[T]$ 、 $[L]$ 、 $[F]$ 。

单位——量度各种物理量数值大小的标准,是表示物理量的具体量度。不同的物理量以不同的单位表示,相同的物理量也可以有不同的单位。如长度单位可以用厘米、米、公里、浬等表示,重力单位可以用牛顿、千牛、吨等表示。

量纲可以分为基本量纲和诱导量纲两种。

基本量纲——具有独立性,即一个基本量纲不能从其他基本量纲推导出来,也就是不依赖于其他基本量纲。如长度量纲 $[L]$,时间量纲 $[T]$ 和质量量纲 $[M]$ 是互相独立的,不能从 $[L]$ 、 $[T]$ 中得出 $[M]$,也不能从 $[T]$ 、 $[M]$ 中得出 $[L]$ 和不能从 $[L]$ 、 $[M]$ 中得出 $[T]$ 。

诱导量纲——可以由基本量纲推导出来的量纲。

力学中任何一个物理量的量纲均可用三个基本量纲的指数乘积形式来表示。如 x 为一物理量,其量纲可用下式表示:

$$[x] = [L^\alpha T^\beta M^\gamma] \quad (1-1)$$

上式称为量纲公式。 x 的性质可由指数 α 、 β 、 γ 来反映:当 $\alpha \neq 0$, $\beta = \gamma = 0$ 时,是几何学的量;当 $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$, $\gamma = 0$ 时是运动学的量;当 $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$, $\gamma \neq 0$ 时是动力学的量;当 $\alpha = \beta = \gamma = 0$,即 $[x] = [L^0 T^0 M^0] = [1]$ 时,此时 x 为无量纲量,称为纯数。

1.2.2.2 国际单位制(SI)和工程单位制的差别及换算关系

两种单位制的差别在于所选择的基本量纲不同,从而引出的诱导量纲也不同。下面以水力学普遍遵循的牛顿第一定律 $F = ma$ 为例。

国际单位制(SI):

基本量纲选用 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$,则诱导量纲

$$[F] = \left[\frac{ML}{T^2} \right] = [MLT^{-2}]$$

如果长度、时间、质量的单位分别采用 m、s、kg, 则力的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$, 即为 1 N ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)。

工程单位制:

基本量纲选用 [L]、[T]、[F], 则诱导量纲

$$[M] = \left[\frac{FT^2}{L} \right] = [FT^2L^{-1}]$$

如果长度、时间、力的单位分别采用 m、s、kgf, 则质量的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 。

需要说明的是, 严格地说, kg 和 kgf 是不同的, kg 表示质量, kgf 表示重量、力。但在有些书和资料上并没将两者严格区分开。

两种单位制的重量换算基本关系是

$$1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N} \quad (1-2)$$

质量换算基本关系是

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} = 9.8 \text{ kg} \quad (1-3)$$

即

$$1 \text{ 公斤力} = 9.8 \text{ 牛顿}$$

和

$$1 \text{ 工程质量单位} = 9.8 \text{ 千克}$$

1.2.3 液体的主要物理性质

1.2.3.1 惯性、质量和密度

惯性就是物体保持原有运动状态的物理性质。惯性的大小以质量来度量, 质量愈大的物体, 惯性也愈大。当液体受到外力作用而使运动状态发生改变时, 由于液体的惯性引起抵抗外力而企图保持原有运动状态的反作用力称为惯性力。设液体的质量为 m , 加速度为 a , 则惯性力为

$$F = -ma \quad (1-4)$$

式中负号表示惯性力的方向与液体的加速度方向相反。

液体单位体积内所具有的质量称为密度, 以符号 ρ 表示。

对于均质液体

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

式中, m 为质量; V 为体积。

对于非均质液体

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-6)$$

在国际单位制中, 密度的单位为 kg/m^3 。在一般的情况下, 水的密度随温度和压力的变化而发生的变化甚微, 通常认为它是常数。取 101.3 kPa (一个标准大气压) 下, 温度为 4 °C 时的水的最大密度为计算值, 即 $\rho_w = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

不同温度下水的密度值见表 1-1。

表 1-1 不同温度下水的物理性质的数值表

温度 (℃)	容重 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	粘滞系数 μ (10 ⁻³ N · s/m ²)	运动粘滞系数 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	体积弹性系数 K (10 ⁹ N/m ²)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

1.2.3.2 万有引力、重量和容重

物体之间相互具有吸引力,这个吸引力称为万有引力。地球对物体的引力称为重力,或称为重量,以符号 G 表示。质量为 m 的液体,所受重力的大小为

$$G = mg \quad (1-7)$$

式中, g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

液体单位体积内所具有的重量称为容重,或称重率、重度,以符号 γ 表示。

对于均质液体

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-8)$$

对于非均质液体

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-9)$$

在国际单位制中,容重的单位是 N/m^3 或 kN/m^3 。水的容重随温度和压强变化而发生的变化甚微,一般工程上视为常数,取在 $101\,325 \text{ Pa}$ (一个标准大气压) 下 4°C 时的容重值 $\gamma_w = 9\,800 \text{ N/m}^3$ 为计算值。

由式(1-7) $G = mg$, 将该式两边除以体积 V , 则得 $\frac{G}{V} = \frac{m}{V}g$, 并以容重和密度表示,就得到两者之间的重要关系式:

$$\gamma = \rho g \quad (1-10)$$

或

$$\rho = \gamma/g \quad (1-11)$$

几种常见液体的容重值见表 1-2。

表 1-2 几种常见液体的容重 γ 值(标准大气压下)

液体名称	汽油	纯酒精	蒸馏水	海水	水银
容重(N/m^3)	6 664 ~ 7 350	7 778.3	9 800	9 996 ~ 10 084	133 280
温度($^{\circ}\text{C}$)	15	15	4	15	0

1.2.3.3 粘滞性和粘滞系数

液体具有粘滞性是液体最具特色和固有的物理性质，它有别于以往所学的物理学概念。

液体在静止时是不能承受切力而抵抗剪切变形的。但在运动状态时，液体质点之间或流层之间就存在着相对运动，此时，液体质点之间或流层之间会抗拒相对运动而产生质点之间或流层之间的内摩擦力，内摩擦力做功而耗散有效机械能。液体的这一特性称为粘滞性。

液体在宽、浅的水槽中流动，如果以横坐标表示液体质点在流动方向的速度 u ，以纵坐标 y 表示质点距槽底的距离，在不同的水深位置布设测点，测出这些点的沿流动方向的平均速度，可以绘成流速随水深的变化曲线 $u = u(y)$ ，如图 1-1 所示。与固体边界水槽底部接触的液体质点由于附着力的作用，和槽底无相对滑动，流速为零，水力学中称之为壁面不滑动条件。槽底以上各流层中质点的速度因不同程度地受到不动质点的阻滞影响而减慢。离槽底愈近，阻滞影响愈大，该流层质点的速度愈小；离槽底愈远，阻滞影响愈小，该流层质点的速度愈大。

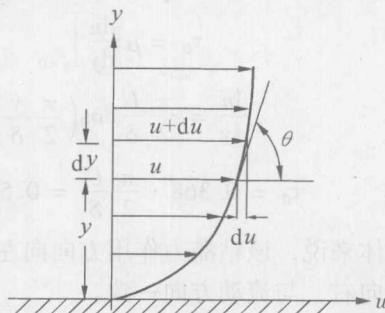


图 1-1

液面质点受到空气阻力的影响，速度会比液面下一定深度的质点流速略小。假设距离槽底边界为 y 处的质点流速为 u ，在离槽底边界为 $y + dy$ 处的质点流速为 $u + du$ ， dy 为两液层之间的距离。由于这两层相邻流层的流速不相同，两个流层之间存在着相对运动。基于液体具有粘滞性，它们彼此具有抗拒这种相对运动的性质：下面一层液体对上面一层液体作用了一个与流速方向相反的摩擦力，力图减缓快层的速度；而上面一层液体对下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的摩擦力，力图加快运动较慢流层的速度。这两个摩擦力大小相等、方向相反，都具有抗拒其相对运动的性质。这种摩擦力不同于物理学上的外摩擦力，它并非存在于液体与固体边壁之间，而是存在于液体质点之间、流层之间，因此这种摩擦力称为内摩擦力。内摩擦力是形成流动阻力的主要原因，为了克服内摩擦力而维持液流的运动，需要消耗有效机械能而做功。所以液体的粘滞性是液体机械能量损失的根源。

1686 年，牛顿(Newton)根据试验提出并经后人加以验证的牛顿内摩擦定律表达如下：液体沿某一固体表面做平行直线运动，在有相对运动的相邻两层液体的交界面上，将产生内摩擦力，内摩擦力的大小与液体的性质有关，并与流速梯度和液体接触的面积 A 成正比，而与接触面上的正压力无关。写成数学表达式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

式中 μ ——表征液体粘滞性质的动力粘滞性系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 即 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕斯卡·秒);

A ——液体接触的面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度, 即 $\text{grad } u$, 它是单位深度的流速增量, s^{-1} 。

设 τ 代表单位面积上的内摩擦力, 即粘滞切应力, 则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

例 1-1 某牛顿流体粘滞系数为 $0.368 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 其在固定边壁附近的流动速度分布如图 1-2 所示, 求边壁处粘滞切应力 (用边壁区最大流速 U 和最大距边壁高度 δ 表示)。

解: 由牛顿内摩擦定律, 边壁处粘滞切应力

$$\tau_0 = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0}$$

其中

$$\frac{du}{dy} = \frac{\pi}{2} \frac{U}{\delta} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{\delta}\right)$$

所以
$$\tau_0 = 0.368 \cdot \frac{\pi}{2} \frac{U}{\delta} = 0.578 \frac{U}{\delta}$$

对流体来说, 该粘滞力作用方向向左, 与流动方向相反, 阻滞流动; 对边壁来说, 作用方向则向右, 与流动方向一致。

例 1-2 两块平行固定的平板之间有一可活动隔板, 在板间空隙分别注入两种不同的牛顿流体, 如图 1-3a 所示。现在隔板以 4 m/s 的速度平行移动, 求作用在板壁上的粘滞切应力。假设板面积很大, 可以不考虑边缘影响, 且板间流体的流速分布为线性分布。

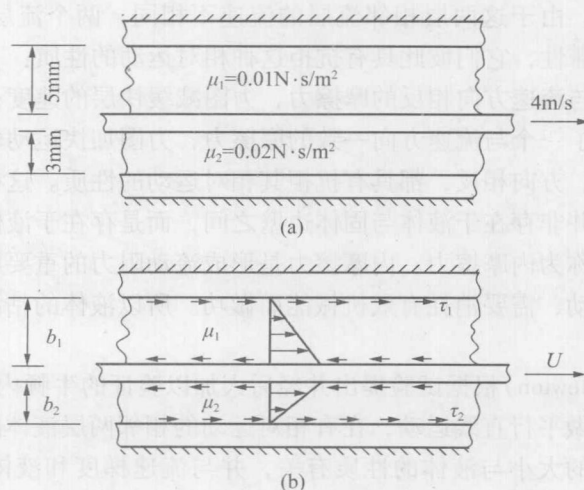


图 1-3