



普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会规划推荐教材
江苏省高等学校精品教材

水力学 (第二版)

张维佳 主编
刘鹤年 主审

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会规划推荐教材
江苏省高等学校精品教材

水力学 (第二版)

张维佳 主编

刘鹤年 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学/张维佳主编. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 4

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材. 高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会规划推荐教材. 江苏省高等学校精品教材

ISBN 978-7-112-17986-2

I. ①水… II. ①张… 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 (2015) 第 064647 号

**普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会规划推荐教材
江苏省高等学校精品教材
水力学**

(第二版)

张维佳 主编

刘鹤年 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 287 千字

2015 年 6 月第二版 2015 年 6 月第九次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-17986-2

(27202)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书是普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材，高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会规划推荐教材，江苏省高等学校精品教材，根据高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会编制的《高等学校给排水科学与工程本科指导性专业规范》编写。

全书共分9章，主要内容有：绪论，水静力学，水动力学基础，相似原理和量纲分析，水头损失，有压管流，明渠流动，孔口、管嘴出流与堰流和渗流。本书针对给排水科学与工程专业的特点，在系统阐述基本理论与基本原理的基础上，注重对学生理论联系实际能力的培养。

本书也可作为环境工程、土木工程、水利工程和工程力学等专业水力学（工程流体力学）的教学用书。作为给排水科学与工程主干课程的教材，建议教学课时数80学时（含实验教学）。

为更好地支持本课程的教学，本书附配套教学课件，如有需要，请发邮件至 capbeijing@126.com 索取。

* * *

责任编辑：王美玲 齐庆梅

责任校对：姜小莲 党 蕾

第二版前言

本书是普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材，高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会推荐教材，江苏省高等学校精品教材，根据高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会编制的《高等学校给排水科学与工程本科指导性专业规范》编写。

作为给排水科学与工程专业主干课程之一的教材，本书仍保持与时俱进，除根据最新版的《室外给水设计规范》GB 50013—2006、《室外排水设计规范》GB 50014—2006 和《建筑给水排水设计规范》GB 50015—2003，对一些传统的概念、水力计算方法以及相关管材特性参数作了一定的补充和修改之外，还根据我国国家质量技术监督局于1990年发布的《关于在我国统一实行“1990年国际温标”的通知》，采用了1989年第77届国际计量委员会会议（CIPM）通过的1990年国际温标 ITS—90 纯水密度，并在此基础上给出了纯水密度与温度、纯水体积膨胀系数与温度的回归方法。根据《国际单位制及其应用》GB 3100—93，书中部分物理量的表述与符号也进行了适当修改。

为便于读者更好地学习水力学，本书在每章的最后增加了本章的小结及学习指导，适当增加了例题与习题。

参加本书编写的有苏州科技学院张维佳、王涌涛、吴玮、袁煦、袁文麒和张琼予，重庆大学龙天渝和哈尔滨工业大学曹慧哲。本书由苏州科技学院张维佳任主编，重庆大学龙天渝任副主编。张维佳编写第1、4、9章，龙天渝编写第2、3章，王涌涛编写第5章，吴玮编写第7章，袁煦编写第6章，曹慧哲编写第8章，全书由张维佳统稿。书中插图由苏州科技学院袁文麒和张琼予绘制。

本书由哈尔滨工业大学刘鹤年教授主审，在此再次表示诚挚的谢意。本书的编写承蒙高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会的指导、江苏省教育厅的鼓励、中国建筑工业出版社的帮助和苏州科技学院教学委员会以及苏州科技学院环境科学与工程学院的支持，在此再次一并致以最诚挚的感谢。

编者水平有限，书中仍难免有不妥之处，敬请读者继续予以批评指正。

前 言

本书是普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材，高等学校给水排水工程专业指导委员会推荐教材，江苏省高等学校立项建设精品教材。

随着社会的不断进步，高等学校人才培养模式的不断更新，水力学也迎来了新的挑战。为适应新形势下的要求，在保证基本知识体系的前提下，本书力求内容精练，编排更加合理，自学性更强。本书根据给水排水工程专业的特点，以一元流理论作为理论基础，简化数学过程，强调知识点的物理含义与工程背景，强调研究方法与实验手段，使读者在学习过程中不断积累自己理论联系实际的意识与能力。

本书在表现手法上作了一些尝试。比如符号与插图等，在执行我国现行各类标准的基础上，力争与国际接轨。为便于读者进一步学习，书中关键词汇后附有英文同义词。

作为给水排水工程专业主干课程之一的教材，本书与时俱进，根据最新版的《室外给水设计规范》GB 50013—2006、《室外排水设计规范》GB 50014—2006和《建筑给水排水设计规范》GB 50015—2003，对一些传统的概念、水力计算方法以及相关管材特性参数作了适当的补充和修改。例如，将自由水头统称为最小服务水头，增补以塑料管材为代表的新型管材并去掉已废除的镀锌钢管以及灰口铸铁管等，不再介绍以旧钢管、旧铸铁管为研究对象的舍维列夫公式，增补了目前国内外在配水管网等水力计算中使用较多且效果较好的海曾-威廉公式等，以适应专业发展的不断需求。

为更好地支持本课程的教学，本书附配套教学课件，下载网址：www.cabp.com.cn/td/cabp16882.rar，密码是16882，也可与作者联系，邮箱：wvzhang@mail.usts.edu.cn。

本书由苏州科技学院张维佳和王涌涛共同编写，张维佳主编并统稿。书中插图由苏州科技学院袁文麒和张琼予绘制。

本书由哈尔滨工业大学刘鹤年教授主审，得到了刘鹤年教授十分宝贵的意见和建议，在此谨表诚挚的谢意。本书的编写承蒙高等学校给水排水工程专业指导委员会的指导、江苏省教育厅的鼓励、中国建筑工业出版社的帮助和苏州科技学院教学委员会以及苏州科技学院环境科学与工程系的支持，在此一并致以最衷心的感谢。

编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

符 号 表

A —面积 (m^2)	Fr —弗汝德数 [无量纲]
A_r —面积比尺 [无量纲]	F_r —力比尺 [无量纲]
a —加速度 (m/s^2)	F_s —表面力 (N)
—管道比阻 (s^2/m^6);	F_v —黏滯力, 切向力 (N)
—水跃高度 (m)	F_{vr} —黏滯力比尺 [无量纲]
a_r —加速度比尺 [无量纲]	f_b —单位质量力 (N)
B —宽度 (m)	f_s —应力 (Pa)
—明渠水面宽 (m)	g —重力加速度, $g=9.8\text{m/s}^2$
b —明渠底宽 (m)	H —总水头 (m)
—堰宽 (m)	—堰上水头 (m)
C —系数 [无量纲]	H_s —水泵安装高 (m)
—谢才系数 ($\text{m}^{0.5}\text{s}^{-1}$)	—最小服务水头 (m)
C_D —阻力系数 [无量纲]	h —水深 (m)
C_{HW} —海森-威廉系数 [无量纲]	—水头 (m)
c —音速 (m/s)	h_c —临界水深 (m)
—波速 (m/s)	h_c —作用面形心点水深 (m)
D —圆管或圆球直径 (m)	h_l —沿程水头损失 (m)
E —管材弹性模量 (Pa)	h_l —总水头损失 (m)
Eu —欧拉数 [无量纲]	h_m —局部水头损失 (m)
e —绝对粗糙度 (m)	—平均水深 (m)
—明渠断面单位能量 (m)	h_N —明渠均匀流正常水深 (m)
F —力 (N)	h' —水跃跃前水深 (m)
F_b —质量力 (N)	h'' —水跃跃后水深 (m)
F_D —阻力 (N)	I —惯性矩 (m^4)
F_I —惯性力 (N)	I_c —对过作用面形心轴惯性矩 (m^4)
F_{Ir} —惯性力比尺 [无量纲]	i —明渠底坡 [无量纲]
F_L —升力 (N)	i_c —临界底坡 [无量纲]
F_P —压力 (N)	J —水力坡度 [无量纲]
F_{Pr} —压力比尺 [无量纲]	—水跃函数

J_p —测压管水头线坡度 [无量纲]	r —半径 (m)
—明渠水面线坡度 [无量纲]	r_0 —圆管半径 (m)
K —流量模数 (m^3/s)	T —温度 ($^{\circ}\text{C}$)
—仪器常数 ($\text{m}^{2.5}/\text{s}$)	—时间 (s)
—体积模量 (Pa)	s —管道阻抗 (s^2/m^5);
—卡门通用常数 [无量纲]	t —时间 (s)
k —渗透系数 (m/s)	—温度 ($^{\circ}\text{C}$)
L —长度 (m)	t_r —时间比尺 [无量纲]
l —长度 (m)	U —流速 (m/s)
—混合长度 (m)	u —点流速 (m/s)
l_r —长度比尺 [无量纲]	u_r —流速比尺 [无量纲]
m —质量 (kg)	V —体积 (m^3)
—堰流量系数 [无量纲]	v —断面平均流速 (m/s)
—明渠边坡系数, [无量纲]	v_r —流速比尺 [无量纲]
n —粗糙系数 [无量纲]	v_* —阻力流速 (m/s)
—土的孔隙度 [无量纲]	W —重量 (N)
n_t —环状管网环数 [无量纲]	W_r —重量比尺 [无量纲]
n_j —环状管网结点数 [无量纲]	X —单位质量力 x 方向分力 (m/s^2)
n_p —环状管网管段数 [无量纲]	x —坐标值 (m)
P —湿周 (m)	Y —单位质量力 y 方向分力 (m/s^2)
—堰高 (m)	y —坐标值 (m)
p —压强或相对压强 (Pa)	y_c —作用面形心点坐标值 (m)
p_a —大气压强 (Pa)	y_D —压力中心坐标值 (m)
p_{abs} —绝对压强 (Pa)	Z —单位质量力 z 方向分力 (m/s^2)
p_{amb} —环境大气压强 (Pa)	z —坐标值 (m)
p_e —表压强 (Pa)	—位置水头, 距基准面高度 (m)
p_v —真空压强 (Pa)	—标高 (m)
q_v —体积流量 (m^3/s)	α —角度
q_{vp} —通过流量 (m^3/s)	—动能修正系数 [无量纲]
q_{vs} —途泄流量 (m^3/s)	—无压圆管充满度 [无量纲]
q_j —节点流量 (m^3/s)	α_h —水力最优充满度 [无量纲]
q_u —单宽流量 (m^2/s)	α_v —体膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ 或 K^{-1})
R —水力半径 (m)	β —动量修正系数 [无量纲]
Re —雷诺数 [无量纲]	β_h —水力最优宽深比 [无量纲]
R_h —水力最优水力半径 (m)	Γ —速度环量 (m^2/s)

δ —管壁厚度 (m)	ν —运动黏度 (m^2/s)
—堰顶厚度 (m)	ρ —密度 (kg/m^3)
ϵ —收缩系数 [无量纲]	σ —表面张力系数 (N/m)
ζ —局部阻力系数 [无量纲]	σ_s —堰淹没系数 [无量纲]
θ —角度	τ —切应力 (Pa)
θ_h —水力最优充满角	τ_0 —壁面切应力 (Pa)
κ —压缩率 (Pa^{-1})	φ —流速势
λ —模型比尺 [无量纲]	—流速系数 [无量纲]
—沿程阻力系数 [无量纲]	ψ —流函数
μ —动力黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	ω —角速度 (s^{-1})
—流量系数 [无量纲]	

目 录

符号表

第1章 绪论	1
1.1 水力学及其任务	1
1.2 作用在液体上的力	2
1.3 液体的主要物理性质	3
小结及学习指导	9
习题	9
第2章 水静力学	11
2.1 静止液体中压强的特性	11
2.2 液体平衡微分方程	13
2.3 重量作用下静止液体中压强的分布规律	14
2.4 液柱式测压计	20
2.5 液体的相对平衡	23
2.6 液体作用在平面壁上的总压力	26
2.7 液体作用在曲面壁上的总压力	30
小结及学习指导	33
习题	34
第3章 水动力学基础	38
3.1 液体运动的描述方法	38
3.2 欧拉法的基本概念	40
3.3 连续性方程	42
3.4 液体运动微分方程	45
3.5 伯努利方程	47
3.6 动量方程	56
3.7 液体微团运动的分析	59
3.8 平面流动	64
3.9 几种基本的平面势流	66
3.10 势流叠加	68
小结及学习指导	70

习题	70
第4章 相似原理和量纲分析	74
4.1 相似原理	74
4.2 模型实验	78
4.3 量纲分析	81
小结及学习指导	89
习题	89
第5章 水头损失	92
5.1 水头损失的分类	92
5.2 雷诺实验与流态	93
5.3 沿程水头损失与切应力的关系	97
5.4 圆管中的层流运动	98
5.5 液体的紊流运动	101
5.6 紊流的沿程水头损失	104
5.7 局部水头损失	113
5.8 边界层与绕流阻力	117
小结及学习指导	120
习题	121
第6章 有压管流	124
6.1 短管的水力计算	124
6.2 长管的水力计算	128
6.3 管网水力计算基础	136
6.4 有压管流中的水击	141
小结及学习指导	146
习题	146
第7章 明渠流动	149
7.1 明渠流动概述	149
7.2 明渠均匀流	151
7.3 无压圆管均匀流	157
7.4 明渠非均匀流基本概念	161
7.5 水跃和水跌	167
7.6 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	172
7.7 明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	179
小结及学习指导	181
习题	181

第8章 孔口、管嘴出流与堰流	184
8.1 孔口出流	184
8.2 管嘴出流	187
8.3 堰流	189
小结及学习指导	197
习题	197
第9章 渗流	199
9.1 概述	199
9.2 渗流的达西定律	200
9.3 地下水的渐变渗流	202
9.4 井和井群	205
小结及学习指导	210
习题	211
部分习题参考答案	212
主要参考文献	216

第1章 绪 论

1.1 水力学及其任务

水力学 (hydraulics) 是研究液体机械运动规律及其应用的科学。

液体 (liquid) 与气体 (gas) 统称为流体 (fluid)。

流体力学 (fluid mechanics) 是研究流体机械运动规律的科学。水力学是流体力学的一个分支。

液体不同于固体的最基本特征就是具有流动性 (mobility)。流动性是指在任何微小切力的作用下, 液体都会连续变形的特性。这种变形称为流动。直到切力消失, 流动才会停止。无论静止或运动, 液体几乎不能承受拉力, 只能承受压力。

力学研究的内容是物体机械运动规律。液体运动遵循机械运动的普遍规律, 如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量转化和守恒定律等, 并以这些普遍规律, 形成水力学理论的基础。

与所有物质相同, 液体是由大量的分子构成的。由于分子之间存在空隙, 描述液体的物理量 (如密度、压强和流速等) 在空间的分布是不连续的; 而分子的随机热运动又导致了空间任一点上液体物理量在时间上变化的不连续。水力学的研究内容是液体的宏观运动规律, 而这一规律恰恰是研究对象中所有分子微观运动的宏观表现。欧拉 (L. Euler, 瑞士数学家、力学家, 1707~1783 年) 于 1755 年首先提出了连续介质 (continuum) 模型的概念, 即把液体看成是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体。这里的质点是指与流动空间相比体积可以忽略不计而又具有一定质量的液体微团。这样, 既可避开分子运动的复杂性, 又可将液体运动中的物理量视为空间坐标和时间变量的连续函数, 采用数学分析方法来研究液体运动。

水力学的问题可以通过三种研究方法得以解决, 理论分析、实验研究和数值计算。理论分析和实验研究是本学科形成以来, 一直采用的、既可以单独解决问题又可互补的手段。前者通过对液体性质及流动特性的科学抽象, 提出合理的理论模型, 应用已有的普遍规律, 建立控制液体运动的方程组, 将流动问题转化为数学问题, 并在一定的边界条件和初始条件下求解。后者则是通过对具体流动的观察与测量来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证, 实验又需用理论来指导。数值计算则是随着计算技术与计算机技术的不断发展, 采用各种

离散化方法（有限元法或有限差分法等），建立各种数值模型，通过计算机进行大规模计算，获得定量描述流场的现代方法。这三种方法互相结合，可为解决复杂的工程技术问题奠定良好的基础。

作为一门独立学科，水力学可以借助上述三种方法直接解决工程实际问题，作为专业基础，可在诸多的领域中得到广泛的应用。例如航海领域中的船舶航行；水利工程中的引水与防洪；动力工程中的水力发电；机械工程中的液压传动与润滑；石油工程中的固井、采油与输油；化学工程中的分离、成型与输送；近海工程的海浪作用；医疗领域中的体内微循环与血液流变学；体育竞赛中游泳与赛艇等技术改进；军事工程中水下导弹、鱼雷以及舰艇等；农业领域中的喷灌技术；交通工程中的道路桥涵设计与港口设计；建筑工程中的基坑排水与建筑材料的输送以及环境工程领域的水污染治理等。特别是在市政工程中，从水源取水、水厂净化、管网输水与用户配水等给水系统到废水的收集、管渠输送、泵站提升与污水处理厂的各级处理等排水系统，涉及了一系列的水力学问题。

1.2 作用在液体上的力

作用在液体上的力，按作用方式可分为表面力（surface force）和质量力（body force）两类。

1.2.1 表面力

在液体中任取隔离体为研究对象，如图 1-1 所示。通过直接接触，施加在隔离体表面上的力为表面力。表面力的大小用应力来表示。设 A 为隔离体表面上任意一点，包含 A 点取微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的表面力为 ΔF_s 。若将该力分解为法向分力（压力） ΔF_P 和切向分力 ΔF_V ，则 ΔA 上的平均正应力 $\bar{\sigma}$ 和平均切应力 $\bar{\tau}$ 可分别表示为

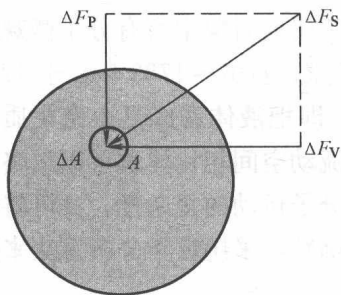


图 1-1 表面力

$$\bar{\sigma} = \frac{\Delta F_P}{\Delta A} \quad (1-1)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta F_V}{\Delta A} \quad (1-2)$$

取极限可分别得

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_P}{\Delta A} = \frac{dF_P}{dA} \quad (1-3)$$

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

其中 σ 为 A 点的正应力, 在水力学中可表示为 A 点的压强 (pressure) p ; τ 为 A 点的切应力 (shear stress)。

应力的单位以帕斯卡 (B. Pascal, 法国数学家, 1623~1662 年) 命名, 简称帕, 用符号 “Pa” ($1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$) 表示。

1.2.2 质量力

质量力是指施加在隔离体内每个质点上的力。重量是最常见的质量力。

质量力的大小用单位质量液体所受质量力, 即单位质量力表示。设均质液体质量为 m , 所受质量力为 F_b , 即

$$F_b = F_{bx}i + F_{by}j + F_{bz}k \quad (1-5)$$

则单位质量力为

$$f_b = \frac{F_b}{m} = \frac{F_{bx}}{m}i + \frac{F_{by}}{m}j + \frac{F_{bz}}{m}k = Xi + Yj + Zk \quad (1-6)$$

式中 X 、 Y 和 Z 分别为单位质量力 f_b 在坐标轴 x 、 y 和 z 上的分量。

若作用在液体上的质量力只有重量, 并设 z 为铅垂坐标, 则有

$$F_{bx}=0, F_{by}=0, F_{bz}=-mg$$

单位质量力在坐标轴 x 、 y 和 z 上的分量分别为 $X=0$ 、 $Y=0$ 和 $Z=\frac{-mg}{m}=-g$ 。

单位质量力的单位为米每二次方秒 (m/s^2), 与加速度单位相同。

1.3 液体的主要物理性质

1.3.1 惯性

惯性 (inertia) 是物体维持原有运动状态的性质, 是液体与固体共有的物理性质。质量是惯性大小的度量。单位体积的质量称为密度 (density), 以符号 ρ 表示。体积为 V , 质量为 m 的均质液体的密度可表示为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

各点密度不相同的非均质液体密度可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-8)$$

密度的单位是千克每立方米 (kg/m^3)。

液体的密度随压强和温度的变化量很小, 一般可视为常数。通常情况下, 水

的密度为 1000kg/m^3 ，水银的密度为 13600kg/m^3 。

1989 年第 77 届国际计量委员会会议 (CIPM) 通过了 1990 年国际温标 ITS—90 纯水密度表。我国国家质量技术监督局也于 1990 年发布了《关于在我国统一实行“1990 年国际温标”的通知》，并从 1994 年起在全国实施，取代 1968 年的标准。

在一个标准大气压条件下，水的密度见表 1-1。其他几种常见液体的密度见表 1-2。

水的密度

表 1-1

温度(°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	70	80	100
密度(kg/m ³)	999.840	999.972	999.699	998.203	995.645	992.212	998.030	983.191	977.759	971.785	958.345

根据 1990 年国际温标 ITS—90 纯水密度表，纯水密度与温度的变化关系可回归成四次方程，即

$$\rho = -1 \times 10^{-7} T^4 + 4 \times 10^{-5} T^3 - 0.0076 T^2 + 0.0513 T + 999.88 \quad (1-9)$$

几种常见液体的密度 (20°C)

表 1-2

液体名称	酒精	汽油(90#)	汽油(93#)	煤油	原油(大庆)	四氯化碳	海水
密度(kg/m ³)	789	722	725	810	860	1590	1030

1.3.2 黏滞性

黏滞性 (viscosity) 是液体特有的物理性质。

间距为 h 的两个平行平板间充满静止液体，如图 1-2 所示。下板固定不动，

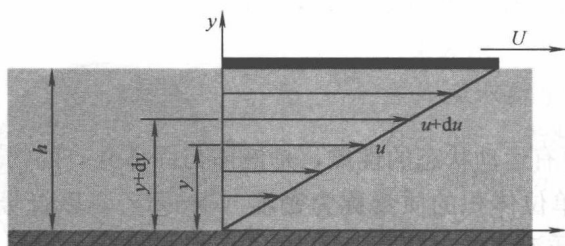


图 1-2 黏滞性实验

上板以速度 U 平行下板运动。紧贴下板的液体质点黏附在板壁上，速度为零；紧贴上板的一层液体，则随其以速度 U 运动。在 U 、 h 都比较小的情况下，两平板间各流层的速度沿法线方向呈直线分布。

与上板相邻的液层随上板一同运动，并自上而下地带动内部各液层运动。相反，静止的下板及其相邻液层又自下而上地影响各层的流动。这说明液体内部各液层间存在着切向力，又称内摩擦力。这种由于液体相对运动产生内摩擦力以抵抗其运动的性质就是黏滞性，或者说，黏滞性就是液体的内摩擦特性。

根据研究，1687 年牛顿 (I. Newton, 英国物理学家，1642~1727 年) 提出：内摩擦力 (切力) F_v 与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 成比例，与液层的接触面积 A 成比例，

与液体的性质有关,即

$$F_V = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

或

$$\tau = \frac{F_V}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-11)$$

上式称为牛顿内摩擦定律 (Newton's equation of viscosity)。

式中比例系数 μ 称为动力黏度 (dynamic viscosity), 单位是帕秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。动力黏度是液体黏滞性的度量, μ 值越大, 液体越黏, 流动性越差。

液体的黏滞性还可用力黏度 μ 与液体密度 ρ 的比值表示, 即运动黏度 (kinematic viscosity)。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-12)$$

运动黏度 ν 的单位为二次方米每秒 (m^2/s)。

液体的黏滞性随温度而变化, 不同温度下水的黏度见表 1-3, 其他几种常见液体黏度见表 1-4。

不同温度下水的黏度

表 1-3

$T(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

其他几种常见液体的黏度 (20°C)

表 1-4

液体名称	四氯化碳	水银	煤油	原油	SAE10 润滑油	甘油
$\mu(10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.970	1.56	1.92	7.20	82.0	1499
$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	0.611	0.115	2.38	8.41	89.3	1191

【例 1-1】 如图 1-3 所示, 相距 20mm 的两平行平板间充满 20°C 的某种润滑油, 油中有一面积 $A=0.5\text{m}^2$ 、厚度忽略不计的薄板, 该薄板与两平行板并于一侧平板间距 $h_1=7\text{mm}$ 。若以

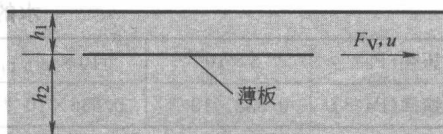


图 1-3 油中薄板