

土 建 大 类 系 列 规 划 教 材

流 体 力 学



■ 刘占孟 兰 蔚 主编



科学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了流体力学的基本概念、基本理论和工程应用。全书共分 10 章, 主要内容包括流体静力学和流体动力学的基础理论, 流动阻力与能量损失, 孔口、管嘴出流和有压管流, 流体测量, 明渠流动, 堰流, 渗流, 量纲分析和相似原理, 涵盖了全国勘察设计注册工程师考试大纲中流体力学的相关知识点。每章后均附有思考题与习题, 以帮助复习基础知识和检查学习效果。

本书可作为高等院校土建类各相关专业的教材, 也可作为全国勘察设计注册工程师考试的参考用书, 还可作为从事流体力学工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/刘占孟, 兰蔚主编. —北京: 科学出版社, 2017

(土建大类系列规划教材)

ISBN 978-7-03-051113-3

I. ①流… II. ①刘… ②兰… III. ①流体力学—高等职业教育—教材
IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 309599 号

责任编辑: 杜 晓 李 欣 / 责任校对: 张 曼

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 376 000

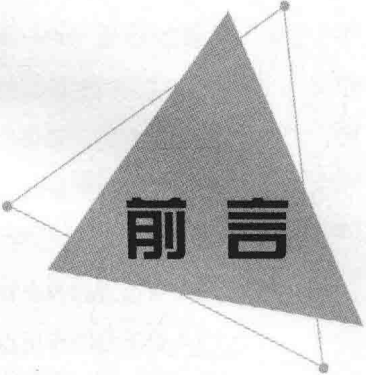
定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62132124 (VA03)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



前言

本书是根据高等院校土建类各相关专业中少学时流体力学课程的教学基本要求而编写的,着重阐述流体现象和物理概念,以流体力学的基本概念、基本原理为主,避免烦琐的数学推导,力求与工程实际相结合。

本书内容主要包括流体静力学和流体动力学的基础理论,流动阻力与能量损失,孔口、管嘴出流和有压管流,流体测量,明渠流动,堰流,渗流,量纲分析和相似原理,涵盖了全国勘察设计注册工程师考试大纲中流体力学的相关知识点。

编者在编写本书的过程中得到了科学出版社、华东交通大学、南阳理工学院、南昌大学科技学院、江西水利职业学院、江西现代职业技术学院等单位的大力支持,并得到华东交通大学给排水科学与工程专业卓越工程师计划的资助,在此一并表示由衷的感谢。

本书由刘占孟、兰蔚任主编,张磊、占鹏、王晓玘、戴红玲任副主编,全书内容由编者共同讨论设定。第1章由戴红玲、占鹏编写,第2~5章由刘占孟编写,第6~8章、第10章由兰蔚编写,第9章由王晓玘、张磊编写。罗军、周园对稿件进行了部分文字校对工作。全书由刘占孟统稿、定稿。

由于编者水平有限,不当之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

2.2 液体平衡方程及其积分	16
2.2.1 欧拉平衡方程	16
2.2.2 质量力的势函数	18
2.3 重力作用下液体静压强的分布规律	19
2.3.1 液体静压强基本方程式	19
2.3.2 液体静压强基本方程式的意义	21
2.3.3 等压面、连通器、帕斯卡原理	22

目 录

0.1	绪论	1
0.2	1.1 流体力学及其研究内容	1
0.3	1.2 流体的主要物理性质	2
0.4	1.2.1 惯性	2
0.5	1.2.2 重力特性	3
0.6	1.2.3 黏滞性	3
0.7	1.2.4 压缩性和热胀性	6
0.8	1.2.5 表面张力	9
0.9	1.2.6 汽化压强	10
1.0	1.3 作用在流体上的力	11
1.1	思考题与习题	12
1.2	第2章 流体静力学	14
1.3	2.1 流体静压强及其特性	14
1.4	2.1.1 流体静压强的定义	14
1.5	2.1.2 流体静压强的特性	15
1.6	2.2 液体平衡方程及其积分	16
1.7	2.2.1 欧拉平衡方程式	16
1.8	2.2.2 质量力的势函数	18
1.9	2.3 重力作用下流体静压强的分布规律	19
2.0	2.3.1 流体静压强基本方程式	19
2.1	2.3.2 流体静压强基本方程式的意义	21
2.2	2.3.3 等压面、连通器、帕斯卡定律	22

2.4	压强的测量	26
2.4.1	压强的表示方法	26
2.4.2	压强的计量单位	27
2.4.3	压强的测量仪器	29
2.5	作用于平面上的静水总压力	34
2.5.1	总压力的大小和方向	36
2.5.2	总压力的作用点	37
2.6	作用于曲面上的静水总压力	39
2.6.1	总压力的大小	40
2.6.2	总压力的方向和作用点	42
	思考题与习题	43
第3章	流体动力学	46
3.1	研究流体运动的两种方法	46
3.2	描述流体运动的基本概念	48
3.3	恒定流连续性方程式	53
3.4	恒定流能量方程式	56
3.4.1	元流能量方程	56
3.4.2	总流能量方程	58
3.4.3	能量方程式的意义及总水头线与测压管水头线的绘制	61
3.4.4	能量方程的应用条件、解题的一般步骤及注意事项	63
3.5	恒定流的动量方程	67
	思考题与习题	73
第4章	流动阻力与能量损失	78
4.1	流动阻力与能量损失的两种形式及能量损失的计算公式	78
4.2	层流与紊流	80
4.2.1	雷诺实验	80
4.2.2	沿程损失 h_f 和平均流速 v 的关系	81
4.2.3	流态的判别标准——雷诺数	82
4.3	恒定均匀流的沿程水头损失和基本方程式	86
4.3.1	均匀流的沿程水头损失	87

4.3.2	均匀流基本方程	87
4.3.3	圆管均匀流过流断面上的切应力分布	88
4.4	沿程水头损失	89
4.4.1	沿程阻力系数及其影响因素的分析	89
4.4.2	尼古拉兹实验	90
4.4.3	莫迪图	92
4.5	局部损失	94
4.5.1	局部损失的原因	94
4.5.2	局部损失的计算	96
4.5.3	减小阻力的措施	103
4.6	绕流阻力与升力	105
4.6.1	绕流运动与边界层的基本概念	105
4.6.2	绕流阻力与升力	107
	思考题与习题	109
第 5 章	孔口、管嘴出流和有压管流	111
5.1	孔口出流	111
5.1.1	孔口自由出流	111
5.1.2	孔口淹没出流	113
5.2	管嘴出流	115
5.2.1	圆柱形外管嘴的恒定出流	115
5.2.2	其他形式的管嘴	118
5.3	有压管流	119
5.3.1	简单管路的水力计算	120
5.3.2	复杂管路的水力计算	124
5.4	有压管路中的水击现象	130
5.4.1	水击现象	130
5.4.2	防止水击危害的措施	133
	思考题与习题	134
第 6 章	流体测量	137
6.1	压力的测量	137
6.1.1	概述	137

6.1.2	压力标准的传递	138
6.1.3	压力的测量仪器	139
6.1.4	流体静压力的测量	142
6.1.5	运动流体中压力的测量	144
6.2	流速的测量	145
6.2.1	毕托管测速	146
6.2.2	测速仪器	148
6.3	流量的测量	150
6.3.1	文丘里流量计	151
6.3.2	喷嘴流量计	153
6.3.3	孔板流量计	154
6.3.4	测量流量的其他方法	156
	思考题与习题	161
第 7 章	明渠流动	165
7.1	概述	165
7.1.1	明渠的几何性质	165
7.1.2	明渠的分类	167
7.1.3	明渠流动的特点	168
7.2	明渠均匀流	169
7.2.1	水力特征和形成条件	169
7.2.2	过水断面的几何要素	171
7.2.3	明渠均匀流基本公式	171
7.2.4	水力最优断面和允许流速	172
7.2.5	明渠均匀流的水力计算	174
7.3	无压圆管均匀流	178
7.4	明渠的流动状态	180
7.4.1	明渠流动状态的判别	181
7.4.2	断面单位能量、临界水深及临界底坡	183
7.5	水跃和水跌	190
7.5.1	水跃	190
7.5.2	水跌	194

7.6 棱柱形明渠非均匀渐变流水面曲线分析	194
7.6.1 明渠非均匀流的定义、形成及特征	194
7.6.2 棱柱形渠道非均匀渐变流微分方程	195
7.6.3 水面曲线分析	196
思考题与习题	201
第8章 堰流	202
8.1 堰流的定义和特征	202
8.2 堰流的分类	203
8.3 堰流基本公式	205
8.4 薄壁堰流	208
8.4.1 矩形薄壁堰流	208
8.4.2 三角形薄壁堰流	210
8.5 实用堰流	211
8.6 宽顶堰流	213
8.6.1 自由式出流	213
8.6.2 淹没式出流	215
8.6.3 侧收缩的影响	216
思考题与习题	218
第9章 渗流	220
9.1 概述	220
9.2 渗流基本定律	222
9.3 井和井群	226
9.3.1 潜水完整井	226
9.3.2 承压完整井	229
9.3.3 井群	230
思考题与习题	232
第10章 量纲分析和相似原理	234
10.1 量纲分析的概念和原理	235
10.1.1 量纲的概念	235

10.1.2	无量纲量	236
10.1.3	量纲和谐原理	237
10.2	量纲分析法	238
10.2.1	瑞利法	238
10.2.2	π 定理	239
10.2.3	量纲分析方法的讨论	242
10.3	相似理论基础	242
10.3.1	相似原理	243
10.3.2	相似准则	245
10.4	模型实验设计	249
	思考题与习题	252
	参考文献	254
第7章	明渠流动	163
7.1	概述	163
7.1.1	明渠的几何要素	163
7.1.2	明渠的边界条件	163
7.1.3	明渠流动的基本概念	163
7.2	明渠均匀流	169
7.2.1	水力最佳断面	169
7.2.2	水力最优断面	171
7.2.3	明渠均匀流的基本公式	171
7.2.4	水力最佳断面与水力最优断面	172
7.2.5	明渠均匀流的水力计算	174
7.3	非均匀流的水力计算	178
7.3.1	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.2	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.3	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.4	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.5	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.6	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.7	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.8	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.9	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.10	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.11	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.12	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.13	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.14	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.15	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.16	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.17	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.18	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.19	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.20	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.21	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.22	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.23	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.24	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.25	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.26	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.27	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.28	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.29	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.30	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.31	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.32	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.33	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.34	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.35	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.36	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.37	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.38	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.39	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.40	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.41	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.42	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.43	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.44	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.45	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.46	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.47	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.48	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.49	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.50	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.51	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.52	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.53	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.54	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.55	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.56	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.57	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.58	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.59	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.60	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.61	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.62	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.63	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.64	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.65	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.66	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.67	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.68	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.69	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.70	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.71	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.72	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.73	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.74	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.75	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.76	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.77	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.78	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.79	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.80	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.81	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.82	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.83	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.84	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.85	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.86	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.87	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.88	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.89	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.90	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.91	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.92	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.93	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.94	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.95	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.96	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.97	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.98	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.99	明渠非均匀流的水力计算	178
7.3.100	明渠非均匀流的水力计算	178
7.4	明渠的流动状态	180
7.4.1	明渠流动状态的判别	180
7.4.2	明渠单位流量、临界水深及临界底坡	180
7.5	水跃和水跌	190
7.5.1	水跃	190
7.5.2	水跌	190

第1章 绪论

1.2.2 流体特性

流体处于地球引力场中，其内部各质点均受到重力作用，且流体内部各质点之间存在着相互作用力，这种相互作用力称为流体的内聚力。流体的内聚力与流体的分子间距离有关，当分子间距离较小时，内聚力较大；当分子间距离较大时，内聚力较小。流体的内聚力与流体的温度有关，温度越高，内聚力越小；温度越低，内聚力越大。流体的内聚力与流体的压力有关，压力越大，内聚力越大；压力越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的速度有关，速度越大，内聚力越大；速度越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的密度有关，密度越大，内聚力越大；密度越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的粘度有关，粘度越大，内聚力越大；粘度越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的表面张力有关，表面张力越大，内聚力越大；表面张力越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的毛细管力有关，毛细管力越大，内聚力越大；毛细管力越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的润湿性有关，润湿性越好，内聚力越大；润湿性越差，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触角有关，接触角越大，内聚力越大；接触角越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触面积有关，接触面积越大，内聚力越大；接触面积越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触时间有关，接触时间越长，内聚力越大；接触时间越短，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触速度有关，接触速度越大，内聚力越大；接触速度越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触压力有关，接触压力越大，内聚力越大；接触压力越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触温度有关，接触温度越高，内聚力越小；接触温度越低，内聚力越大。流体的内聚力与流体的接触湿度有关，接触湿度越大，内聚力越大；接触湿度越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触风速有关，接触风速越大，内聚力越大；接触风速越小，内聚力越小。流体的内聚力与流体的接触风向有关，接触风向不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触地形有关，接触地形不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触地貌有关，接触地貌不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触植被有关，接触植被不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触土壤有关，接触土壤不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触岩石有关，接触岩石不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触生物有关，接触生物不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触人类有关，接触人类不同，内聚力不同。流体的内聚力与流体的接触其他有关，接触其他不同，内聚力不同。

流体及流体力学现象充斥在人们日常生活和生产的各个方面，如云彩的漂浮、鸟的飞翔、水的流动、天气的变化、管道内液体的流动、风道内气体的流动、空气阻力和升力、建筑物上风力的作用、土壤内水分的运动、石油通过地质结构的运动等。流体力学是动力工程、城市建筑工程、环境工程、水利工程、机械工程、石油和化学工程、航空航天工程及生物工程等诸多领域研究和应用的基础学科之一。因此，从事与流体流动相关的研究和工程应用的技术人员都应该或必须了解流体力学的基本原理及应用。

1.1 流体力学及其研究内容

流体力学是一门应用性广、基础性强的学科，它研究的对象主要是流体的内部及其与相邻固体和其他流体之间的动量、热量及质量的传递和交换规律，这不仅广泛存在于自然界和各种工程技术中，而且随着生产的发展、科学技术的进步和人民生活的改善而不断扩大、充实、更新和提高。

流体是气体和液体的总称。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体，所以流体力学是与人类日常生活和生产事业密切相关的。大气和水是最常见的两种流体，大气包围着整个地球，地球表面的70%是水。大气运动、海水运动（包括波浪、潮汐、中尺度涡旋、环流等）乃至地球深处熔浆的流动都是流体力学的研究内容。

除水和空气以外，流体还包括作为汽轮机工作介质的水蒸气、润滑油、地下石油、含泥沙的江水、血液，超高压作用下的金属和燃烧后产生的成分复杂的气体、高温条件下的等离子体等。气象、水利的研究，船舶、飞行器、叶轮机械和核电站的设计及其运行，可燃气体或炸药的爆炸，以及天体物理的若干问题等，都广泛地用到流体力学的知识。许多现代科学技术所关心的问题既受流体力学的指导，又促进了其不断发展。1950年后，电子计算机的发展又给予流体力学以极大的推动。

流体力学是力学的基本原理在液体和气体中的应用。力学原理包括质量守恒、能量守恒和牛顿运动定律。流体力学的基本内容包括研究流体处于平衡状态时的压力分布和

对固体壁面作用的流体静力学；研究不考虑流体受力和能量损失时的流体运动速度和流线的流体运动学；研究流体运动过程中产生和施加在流体上的力和流体运动速度与加速度之间关系的流体动力学。

1.2 流体的主要物理性质

流体的物理性质取决于其分子结构，有些物理性质对流体受力和流体运动有着非常显著的影响，所以学习流体力学及工程应用时必须首先了解流体的物理性质。本节介绍与流体运动密切相关的流体主要物理性质。

物质通常有三种存在状态：气态、液态和固态。流体与固体不同，固体分子通常比较紧密，由于分子间吸引力很大而使其保持固定形状。而流体分子间吸引力小，分子间黏附力小，不能够将流体的不同部分保持住，因此流体没有一定的形状。静止流体在非常微小的切向力作用下将会流动，并且只要切向力存在，流动必将持续，因此流动性是流体最基本的特性，这是它便于用管道、渠道进行输送，适宜作供热、供冷等工作介质的主要原因。

流体中气体分子间距比液体大，气体容易压缩，当外部压力去除时，气体将不断膨胀，因此，气体只有在完全封闭时才能保持平衡。液体相比较而言是不可压缩的，如果去除所有的压力，除了其自身具有的蒸汽压力外，分子间的黏附力使其保持在一起，因此，液体不能无限地膨胀。液体有自由表面，即有蒸汽压力的表面。

本书在阐述流体力学中，除了特殊情况外，一般不严格区分液体和气体，统称为流体。因为它们具有相同的行为和现象。

1.2.1 惯性

惯性是流体保持原有运动状态的性质。质量是用来度量物体惯性大小的物理量，质量越大，惯性也就越大。流体和固体一样，也具有质量。通常用密度来表示其特征。

单位体积流体的质量称为流体的密度，以符号 ρ 表示，单位是 kg/m^3 。在连续介质假设的前提下，对于均质流体，其密度的表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中 V ——流体的体积， m^3 ；

m ——流体的质量， kg 。

密度对流体的影响主要体现在单位体积流体的惯性力和加速度的大小。低密度流体，如气体，惯性力小，达到相同加速度时需要的力也小，因此，物体在空气中的运动比在液体（如水）中的运动要容易，同样，提升相同容积的空气比水要容易得多。

1.2.2 重力特性

流体处于地球引力场中，它所受的重力是地球对流体的引力。

单位体积流体的重量称为流体的容重，以符号 γ 表示，单位是 N/m^3 ，对于均质流体，其容重的表达式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{1.2}$$

式中 V ——流体的体积， m^3 ；
 G ——流体的重量， N 。

由于物体的重量等于质量与重力加速度的乘积，即重量 $G = mg$ ，故密度与容重的关系为

$$\gamma = \rho g \tag{1.3}$$

不同流体的密度和容重各不相同，同一种流体的密度和容重则随温度和压强而变化。一个标准大气压（ $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ ）下，常用流体的密度和容重见表 1.1。

表 1.1 常用流体的密度和容重（标准大气压下）

名称	水	水银	纯乙醇	煤油	空气	氧	氮
密度/（ kg/m^3 ）	1000	13 590	790	800~850	1.2	1.43	1.25
容重/（ N/m^3 ）	9807	133 318	7745	7848~8338	11.77	14.02	12.27
测定温度/℃	4	0	15	15	20	0	0

1.2.3 黏滞性

黏滞性是流体固有的，是有别于固体的主要物理性质。当流体相对于物体运动时，流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力（切向力或剪切力）以反抗相对运动，从而产生了摩擦阻力。这种在流体内部产生内摩擦力以阻抗流体运动的性质称为流体的黏滞性，简称黏性。

早在 1686 年，牛顿根据试验成果首先提出：处于相对运动的两层相邻流体之间的内摩擦力 T ，其大小与流体的物理性质有关，并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 和流层的接触面积 A 成正比，而与接触面上的压力无关。其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \tag{1.4}$$

式中 μ ——比例系数。在 A 和 $\frac{du}{dy}$ 相同的条件下黏性越大的流体，其内摩擦力越大，因而， μ 也越大，故可以用 μ 来量度流体的黏性。 μ 称为动力黏度，可简称黏度。在国际单位制中， μ 的单位为牛顿·秒/平方米 ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) 或帕斯卡秒 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力（即切应力），则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.5)$$

切应力 τ 的单位为 Pa。

式 (1.5) 中 $\frac{du}{dy}$ 表示速度沿垂直于速度方向的变化率。为了更好地理解流速梯度的意义，在图 1.1 (a) 中垂直于流动方向的 y 轴上任取一边长为 dy 的方形流体质点 $acdb$ ，并将它放大成图 1.1 (b)。由于其下表面的速度 u 小于上表面的速度 $u+du$ ，经过 dt 时段以后，下表面移动的距离 udt 小于上表面移动的距离 $(u+du)dt$ ，因而方形 $acdb$ 变形为 $a'c'd'b'$ ，两流层间的垂直连线 ac 和 bd 在 dt 时段里变化了角度 $d\theta$ 。由于 dt 是一个微小时段，因此转角 $d\theta$ 也很小，所以

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{dudt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.6)$$

可见，流速梯度就是直角变形速度，它是在切应力作用下发生的，故又称剪切变形速度。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。

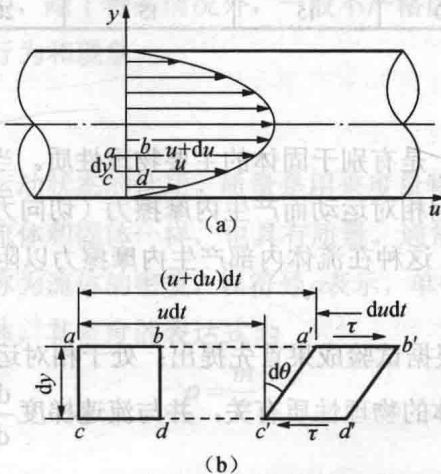


图 1.1 液体质点的剪切变形速度

工程问题中还经常用动力黏度与密度的比值来表示流体的黏性，其单位是 m^2/s ，具

有运动学的量纲，故称为运动黏性系数，以符号 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.7}$$

流体的黏性一般随温度和压强的变化而变化，但实验表明，在低压情况下（通常指低于 100 个大气压），压强的变化对流体的黏性影响很小，一般可以忽略。温度则是影响流体黏性的主要因素，而且液体和气体的黏度随温度的变化规律是不同的，液体的黏性随温度的升高而减小，而气体的黏性则随温度的升高而增大。原因是：①黏性取决于分子间的引力和分子间的动量交换；②随温度升高，分子间的引力减小而动量交换加剧；③液体的黏滞力主要取决于分子间的引力，而气体的黏滞力则取决于分子间的动量交换。

表 1.2 列出了水在一个大气压下、不同温度时的黏性系数。

表 1.2 水的黏性系数（一个大气压下）

温度/℃	$\mu \times 10^{-3}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu \times 10^{-6}/(\text{m}^2/\text{s})$	温度/℃	$\mu \times 10^{-3}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu \times 10^{-6}/(\text{m}^2/\text{s})$
0	1.781	1.785	40	0.653	0.658
5	1.518	1.519	45	0.589	0.595
10	1.300	1.306	50	0.547	0.553
15	1.139	1.139	60	0.466	0.474
20	1.002	1.003	70	0.404	0.413
25	0.890	0.893	80	0.354	0.364
30	0.798	0.800	90	0.315	0.326
35	0.693	0.698	100	0.282	0.294

表 1.3 列出了空气在一个大气压下、不同温度时的黏性系数。

表 1.3 空气的黏性系数（一个大气压下）

温度/℃	$\mu \times 10^{-3}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu \times 10^{-6}/(\text{m}^2/\text{s})$	温度/℃	$\mu \times 10^{-3}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu \times 10^{-6}/(\text{m}^2/\text{s})$
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

最后需指出：牛顿内摩擦定律不是对所有流体都适用，有些特殊的流体不满足牛顿

内摩擦定律，如人体中的血液、油漆、黏土和水的混合溶液等，这些流体称为非牛顿流体。能满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、空气和许多润滑油等。本书仅涉及牛顿流体的力学问题。

1.2.4 压缩性和热胀性

流体的压缩性是指在温度不变的条件下，流体的体积随压强的增加而缩小；流体的热胀性是指在压强不变的条件下，流体的体积随温度的升高而增大。

1. 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩性一般用体积压缩系数或体积弹性模量来度量。在一定温度下，液体原有的体积为 V ，在压强增量 dp 作用下，体积改变了 dV ，则压缩系数为

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \tag{1.8}$$

- 式中

 - β ——液体体积压缩系数， m^2/N ；
 - V ——压缩前液体的体积， m^3 ；
 - dV ——液体体积变化量， m^3 ；
 - dp ——压强的增加值， N/m^2 。

式中的负号是由于 $dp>0$ ， $dV<0$ ，为使压缩系数为正值而加的。

压缩系数的倒数为液体弹性模量，用 E 表示，单位是 N/m^2 ，即

$$E = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} \tag{1.9}$$

β 越大或 E 越小，液体的压缩性也越大。

表 1.4 为 0°C 时水在不同压强下的压缩系数。

表 1.4 水在不同压强下的压缩系数

压强/kPa	500	1000	2000	4000	8000
压缩系数/ (m^2/N)	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

从表 1.4 中可以看出，水的压缩系数是很小的。例如，压强由 4000kPa 增加到 8000kPa 时相对体积的变化为

$$-\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta p = 0.515\times10^{-9} \times (8000 - 4000) \times 10^3 \approx 0.21\times10^{-2}$$

该数值表明，此时水的相对体积的变化大约为 0.2% 。所以工程上一般可将液体视为不可压缩的，即认为液体的体积（或密度）与压力无关。但在瞬间压强变化很大的特殊场合（如第 5 章讨论的水击问题），则必须考虑水的压缩性。

液体的热胀性一般用体积热胀系数 α 来度量。在一定的压力下，液体原有的体积为

V ，当温度升高 dT 时，体积变化为 dV ，则热胀系数为

$$\alpha = \frac{dV/V}{dT} \tag{1.10}$$

式中 α ——液体的体积热胀系数， $1/K$ ；
 V ——热胀前液体的体积， m^3 ；
 dV ——液体体积变化量， m^3 ；
 dT ——温度的增加值， K 。

水的密度在 $4^{\circ}C$ 时具有最大值，高于 $4^{\circ}C$ 后，水的密度随温度升高而下降。液体热胀性非常小，表 1.5 列举了水在一个大气压下，不同温度时的容重及密度。

表 1.5 一个大气压下水的容重及密度

温度 / $^{\circ}C$	容重 / (N/m^3)	密度 / (kg/m^3)	温度 / $^{\circ}C$	容重 / (N/m^3)	密度 / (kg/m^3)	温度 / $^{\circ}C$	容重 / (N/m^3)	密度 / (kg/m^3)
0	9806	999.9	20	9790	998.2	60	9645	983.2
1	9806	999.9	25	9778	997.1	65	9617	980.6
2	9807	1000	30	9775	995.7	70	9590	977.8
3	9807	1000	35	9749	994.1	75	9561	974.9
4	9807	1000	40	9731	992.2	80	9529	971.8
5	9807	1000	45	9710	990.2	85	9500	968.7
10	9805	999.7	50	9690	988.1	90	9467	965.3
15	9799	999.1	55	9657	985.7	100	9399	958.4

从表 1.5 中可以看出，温度升高 $1^{\circ}C$ 时，水的密度降低仅为万分之几。因此，一般工程中也不考虑液体的热胀性。但在热水采暖工程中，当温度变化较大时，需考虑水的热胀性，并应注意在系统中设置膨胀水箱。

2. 气体的压缩性和热胀性

气体和液体在这方面大不相同，压强和温度的改变对气体密度的影响很大，当实际气体远离其液态时，这些气体可以近似地看作理想气体。理想气体的压力、温度、密度间的关系应服从理想气体状态方程，即

$$\frac{p}{\rho} = RT \tag{1.11}$$

式中 p ——绝对压强， Pa ；
 T ——绝对温度， K ；
 ρ ——密度， kg/m^3 ；