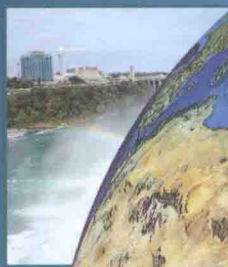


普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

(水力学)

向文英 主 编
龙天渝 副主编
张 智 主 审



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学 (水力学)

向文英 主 编

龙天渝 副主编

张 智 主 审



化学工业出版社

本书分为两篇,上篇为基本理论篇,内容包括绪论、流体静力学、流体运动学与势流理论、流体动力学、相似原理与量纲分析、流动阻力与水头损失;下篇为工程应用篇,内容包括孔口、管嘴出流与有压管路、紊流射流与扩散、明渠均匀流、明渠非均匀流、堰流与闸孔出流、渗流、一维气体动力学基础。同时教材兼顾了国内外学者对教材的要求。

本书可作为普通高等院校给水排水工程、环境工程、市政工程、土木工程等专业师生的教材,也可作为工程技术人员和研究生入学考试的参考书,还可作为给水排水工程专业注册设备工程师的学习教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学(水力学)/向文英主编. —北京:
化学工业出版社, 2015.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-22578-8

I. ①工… II. ①向… III. ①工程力学-流体力学-
高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第298191号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:荣世芳

责任校对:宋 玮

装帧设计:刘剑宁

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张20¼ 字数504千字 2015年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.90元

版权所有 违者必究

前言

本教材在编者多年教学实践和科学研究工作的基础上，在专业指导委员会的指导下编写而成。编写过程中学习了国内外先进的学科建设与教学经验，博采众家之长，力求具有较强的专业教育特色。按照全国高等学校环境工程与科学、给水排水、土木工程专业的最新教学大纲，和普通高等教育“十二五”国家级规划的要求，针对给水排水工程、环境工程、土木工程专业，解决工程中存在的水力学问题，既具有丰富的基础理论知识，又具有丰富的专业知识和极强的专业特色。真正让同学们感到工程流体力学（水力学）课程的工程性与重要性，学习起来具有更强的主动性和积极性。

本教材从基本理论、基本原理、计算方法出发，由浅入深，从简单的理想流体到复杂的实际流体，从一般的三维流动到简化的一维流动，学习起来更加易懂。根据给水排水工程专业、环境工程专业、土木工程专业的发展，融入新的前沿研究方向和实际工程经验，力求将经典理论与实际工程应用相结合，强化基础、重视实际、计算简便、思路清晰。

教材共包括 13 章，分为上篇和下篇两部分，上篇为基本理论篇，内容包括绪论、流体静力学、流体运动学与势流理论、流体动力学、相似原理与量纲分析、流动阻力与水头损失；下篇为工程应用篇，内容包括孔口、管嘴出流与有压管路、紊流射流与扩散、明渠均匀流、明渠非均匀流、堰流与闸孔出流、渗流、一维气体动力学基础。同时教材兼顾了国内外学者对教材的要求。

书中融入了科学研究的最新成果和技术资料，及时反映学科发展的方向和新知识，引入目前著名的大型工程三峡工程、南水北调工程作为实际例证。既拓宽专业知识面，又力求做到具有科学性、理论性、系统性和专业针对性。教材编写尽量考虑到不同层次同学的要求，由浅入深、循序渐进，具有较强的逻辑性与实用性。

参加本书编写的有重庆大学的龙天渝（第 2 章、第 3 章、第 13 章）；程光均（第 5 章、第 9 章、第 12 章）；向文英（第 1 章、第 4 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 10 章、第 11 章）；安强（第 6~12 章习题与答案）。本书由重庆大学张智主审。在编写过程中得到了校内外领导、老师们的帮助与支持，在此一并表示衷心感谢！

由于编者水平和时间有限，疏漏之处在所难免，欢迎读者提出宝贵意见！

编者

2015 年 1 月

目 录

上篇 流体力学的基本理论

第 1 章 绪论	3
1.1 流体力学的任务及其发展史	3
1.2 连续介质模型	4
1.3 流体的主要物理性质	4
1.4 作用在流体上的力	11
1.5 流体力学的研究方法	12
习题	13
第 2 章 流体静力学	15
2.1 流体静压强及其特性	15
2.2 流体平衡微分方程	17
2.3 重力场中的液体平衡	19
2.4 液柱式测压计	22
2.5 液体的相对平衡	24
2.6 静止液体作用在平面上的总压力	27
2.7 静止液体作用在曲面上的总压力	33
2.8 潜体与浮体的平衡和稳定	36
习题	38
第 3 章 流体运动学与势流理论	43
3.1 流体运动的描述方法	43
3.2 流体流动的若干基本概念	46
3.3 恒定总流的连续性方程	49
3.4 流体运动的连续性微分方程	51
3.5 流体微团运动的分析	52
3.6 有旋流动和无旋流动	56
3.7 恒定平面势流	59
3.8 势流的叠加原理与复合势流	63

习题	68
第 4 章 流体动力学	70
4.1 理想流体的运动微分方程	70
4.2 理想流体元流的能量方程	72
4.3 实际流体的运动微分方程 —— (Navier-stokes) 纳维斯托克斯方程	77
4.4 实际流体的能量方程	79
4.5 实际流体能量方程的工程应用	87
4.6 不可压缩气体的能量方程	91
4.7 恒定总流的动量方程	93
习题	97
第 5 章 相似原理与量纲分析	103
5.1 流动相似	103
5.2 动力相似准则	105
5.3 模型实验与工程应用	109
5.4 量纲分析	111
习题	116
第 6 章 流动阻力与水头损失	118
6.1 流动阻力与水头损失的两种类型	118
6.2 实际流体流动的两种型态——层流与紊流	120
6.3 均匀流的沿程水头损失	123
6.4 圆管层流运动	125
6.5 紊流运动	128
6.6 圆管中沿程阻力系数的变化规律及影响因素	132
6.7 局部水头损失	142
6.8 边界层理论与绕流运动	147
习题	153

下篇 流体力学在工程中的应用

第 7 章 孔口、管嘴出流与有压管路	159
7.1 恒定孔口出流	159
7.2 恒定管嘴出流	163

7.3	短管的水力计算	165
7.4	长管的水力计算	166
7.5	枝状管网的水力计算	173
7.6	环状管网的水力计算	177
7.7	有压管路中的水击	181
	习题	184

第 8 章	紊流射流与扩散	192
8.1	紊流射流的分类与特性	192
8.2	圆断面射流	196
8.3	平面射流	198
8.4	扩散的基本方程	200
8.5	紊流扩散	202
8.6	剪切流的离散	203
	习题	205

第 9 章	明渠均匀流	208
9.1	恒定明渠均匀流的特征	209
9.2	明渠均匀流的基本公式	210
9.3	水力最优断面及允许流速	212
9.4	明渠均匀流的水力计算	215
9.5	无压圆管的水力计算	219
9.6	复式断面的水力计算	222
	习题	222

第 10 章	明渠非均匀流	225
10.1	断面单位能量与临界水深	225
10.2	急流、缓流与临界流	229
10.3	水跃与跌水	232
10.4	恒定明渠非均匀渐变流微分方程	237
10.5	棱柱体渠道中恒定明渠非均匀渐变流的水面曲线	238
10.6	天然河道水面曲线的计算	245
	习题	247

第 11 章	堰流与闸孔出流	251
11.1	堰流的分类与流量公式	251

11.2	薄壁堰	254
11.3	实用堰	256
11.4	宽顶堰	259
11.5	闸孔出流	261
	习题	264
第 12 章	渗流	266
12.1	渗流的基本概念	266
12.2	渗流模型与达西渗流定律	267
12.3	地下水的均匀渗流与非均匀渐变渗流	271
12.4	棱柱体地下明渠恒定渐变渗流浸润曲线分析	273
12.5	井与集水廊道	277
12.6	井群	284
	习题	287
第 13 章	一维气体动力学基础	292
13.1	可压缩气流的一些基本概念	292
13.2	无黏性气体的一维恒定流动	295
13.3	实际气体在等截面管道中的流动	302
	习题	307
	部分习题参考答案	308
	参考文献	315

上篇

流体力学的基本理论

第 1 章 绪论

1.1 流体力学的任务及其发展史

流体是日常生活中不可缺少的物质之一，它广泛应用于水利工程、交通运输、土木、市政、环境、机械、船舶、化工、冶金、石油开采、矿业、生命科学等领域。本书重点研究在环境工程、市政给水排水工程、土木工程中流体的机械运动规律及其在工程中的应用，具体任务就是研究以水为代表的流体在污染防治、取用、输送、排泄和处理过程中的平衡和机械运动的规律及其在工程中的应用。水力学中水的基本规律同样适合于性质基本相同（牛顿流体）的其他液体和不可压缩气体。

流体力学（水力学）和其他学科一样是随着生产的发展而发展起来的一门古老而又新兴的科学。在我国，相传四千多年前就有了大禹治水；西汉武帝（公元前 120—公元前 111 年）时期，为引洛水灌溉农田，在黄土高原上修建了龙首渠；公元 256—210 年间修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程。其中都江堰工程至今还发挥着巨大的作用，造福于成都平原，在 2008 年 5 月 12 日四川汶川八级大地震中安然无恙。这些水利工程无疑显示出古代中国人民对水的运动规律的认识、利用和高度智慧。

国外，公元前 250 年欧洲出现了阿基米德定律。16 世纪以后随着资本主义的发展，在城市建设、航海、机械等领域的发展需求推动下，形成了近代的自然科学，水力学得到了不断发展。18 世纪中叶以后，随着牛顿古典力学的建立，也形成了古典流体力学，利用严密的数学分析方法建立了流体的基本运动方程，为工程流体力学奠定了理论基础。与此同时，生产的快速发展，形成了实验水力学，在明渠水流、有压管流、紊流理论等方面得到了大量的经验公式和图表。然而，这些公式缺少理论指导，受到较大的局限。直至 20 世纪，随着航空事业的迅猛发展，使得古典流体力学和实验水力学结合，形成现代流体力学。现代流体力学以古典流体力学的基本理论为基础，结合实验数据和经验公式，研究实际工程所要求的精度范围内的近似解。如侧重于理论，称为理论流体力学；侧重于应用则称为工程流体力学，如研究水体的也称为水力学，研究空气的称为空气动力学。

近代，我国人民在不断利用水体的自然资源和更好地满足人们生活生产需要过程中，修建了许多大型的水利工程，如葛洲坝水利枢纽、小浪底水利枢纽、三峡水利枢纽、南水北调工程等。这些工程为工程流体力学（水力学）积累了丰富的经验和大量现场实测数据。同样，航空航天事业在我国的快速发展，也为理论流体力学和工程流体力学积累了大量的研究成果和应用实例。

工程流体力学就是这样不断地随着数学、生产的发展而不断发展，因此它既是一门古老的学科，也是一门新兴学科。随着计算数学的发展、计算机技术的发展，流体力学派生出计算流体力学。随着生产的发展，派生出多相流体力学、环境流体力学、生物流体力学等。

1.2 连续介质模型

自然界的物质以三种形态存在,即固态、液态和气态。物质处于固态、液态和气态下,其力学特性不同,突出表现为它们对外力的承受能力不同。其中,固体物质由于其分子间距离很小,内聚力很大,可以保持一定的形状和体积,可承受一定量的拉力、压力和剪切力。液体和气体物质分子间距离较大,内聚力较小,都不能承受拉力,静止时也不能承受剪切力,仅在做相对运动时可承受剪切力,能承受较大的压力。因此,气体和液体统称为流体。

众所周知,不管何种形态的物质都是由分子组成的,以水为代表的液体和以空气为代表的气体也不例外。从微观的角度看,分子之间总是存在一定的空隙,并不断地进行着随机热运动。分子之间的这种空隙间距因物质的形态不同而不同。固态物质分子之间的空隙间距最小,液态物质次之,气态物质最大。以液态分子间的距离为例,相邻分子间的距离大约为 $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。分子之间随着热运动特性不断地发生碰撞,进行能量和动量交换。因此,从微观结构和运动上说,分子在空间或时间上都是不连续的。

工程流体力学中站在宏观角度,流体运动的特征尺度及特征时间远远大于分子间距及分子碰撞时间,不考虑分子的个别行为,从统计平均的观点,以工程实际问题所要求的宏观特性去研究流体运动,已完全能够满足实际工程问题所要求的精度。通常,假定流体由没有几何维度的流体质点组成,流体质点间没有空隙,连续地充满其所占据的几何空间,称这个假定为连续介质模型。所谓流体质点,是指微观上足够大而宏观上又充分小的流体分子微团,这些流体的分子微团内包含足够多的分子,它们的运动物理量按统计平均值考虑。宏观上充分小是指分子团的宏观尺寸远远小于所研究问题的特征尺度,使得分子团内各分子的物理量可以认为是均匀分布,并可将它近似地看成是一个几何上没有维度的点。

有了以上的连续介质模型,在以后的流体计算中,就可以利用数学上的连续函数理论计算和分析流体的物理性质和运动规律以及相关计算。当然,并不是所有流体都可以采用这一连续介质模型,如高空稀薄气体,原因在于高空稀薄气体由于分子间距太大而无法按连续介质模型进行计算。

与此同时,在连续介质模型的基础上,一般还认为流体具有均匀性和各向同性,即均质流体。当然流体随着其本身具有的性质和边界条件不同也会发生变化。

1.3 流体的主要物理性质

1.3.1 易流动性

流体在静止时不能承受剪切力,即使在很小的剪切力作用下,静止流体都将发生连续不断的变形运动,直到剪切力消失为止,这称为流体的易流动性。液体与气体两者的差别在于液体分子内聚力比气体分子内聚力大得多,液体具有一定的体积,但无一定的形状;气体则是可以充满任何形状的体积,既不具有一定的体积也无一定的形状。气体易于压缩,而液体难以压缩。但当气体流速远小于声速时,气体的密度变化很小,气体的运动规律与液体相同。

1.3.2 流体的密度

流体密度是指单位体积流体具有的质量,以“ ρ ”表示。密度是反映流体惯性特性的物理量。设均质流体质量为 M ,体积为 V ,则其密度为

$$\rho = M/V \quad (1-1)$$

非均质流体,对于流体中某点的密度可表示为:

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

式中, Δm 、 ΔV 分别为微元体的质量和体积。密度 ρ 的单位为 kg/m^3 。流体的密度随温度和压强而变化,在压强变化不太大时,密度主要随温度而变化。表1-1为标准大气压下水的密度。

在给水排水工程、环境工程和土木工程的水力计算问题中,通常采用一个标准大气压、温度为 4°C 时的水的密度: $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 水的密度 (标准大气压下)

温度 $t/^\circ\text{C}$	0	4	10	15	20	25	30
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.9	1000.0	999.7	999.1	998.2	997.0	995.7
温度 $t/^\circ\text{C}$	40	50	60	70	80	90	100
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	992.2	988.0	983.2	977.8	971.8	965.3	958.4

为反映流体的重力特征,称单位体积流体所具有的重量为流体的容重或重度,以“ γ ”表示。容重与密度的关系为:

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

一个标准大气压下, 4°C 的水容重 $\gamma = \rho g = 9800\text{N}/\text{m}^3$ 。常温常压下水银密度为 $\rho_{\text{Hg}} = 13.6 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$,容重为 $\gamma_{\text{Hg}} = 133.3 \times 10^3\text{N}/\text{m}^3$ 。 20°C 常压下干空气的密度为 $\rho_{\text{空气}} = 1.2\text{kg}/\text{m}^3$,容重为 $\gamma_{\text{空气}} = 11.8\text{N}/\text{m}^3$ 。

1.3.3 流体的黏性与理想流体模型

1.3.3.1 流体的黏性

流体在做相对运动时具有抵抗剪切变形的能力,这种特性称为流体的黏性或黏滞性。黏性是流体本身的属性,相对运动时黏性以内摩擦力体现,也称剪切力。流体在运动过程中内摩擦力做功转换为热能消失,从而使流体产生机械能损失。

流体产生黏性的原因体现在两个方面:一是流体分子内聚力;二是分子碰撞引起的动量交换。对于液体,分子内聚力随温度升高而减小,分子碰撞引起的动量交换则随温度升高而增大,但液体分子的动量交换对液体黏性的影响不大,故液体的温度升高时黏性减小。气体因内聚力较小,黏性主要由分子碰撞引起的动量交换产生,温度升高,动量交换加剧,因此,气体黏性随温度升高而增大。

可用黏性系数表示流体黏性的强弱,如动力黏滞系数或运动黏性系数。动力黏滞系数以“ μ ”表示,其国际制单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,也称为动力黏度。 μ 表示单位角变形速度所引起的内摩擦力。运动黏性系数综合反映流体的黏性和密度的相对比值,以“ ν ”表示,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

运动黏性系数的国际制单位为 m^2/s 。液体的黏性强弱可以用动力黏性系数 μ 或运动黏性系数 ν 度量。黏性系数的值大,黏性越强;相反,黏性系数的值小,黏性越弱。影响黏性系数的因素有压力和温度,其中压力的影响很小,因而温度起着决定性作用。表 1-2 列出了不同温度下水体的黏性系数 μ 、 ν 的值。

水的运动黏性系数还可以按下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-5)$$

式中, t 为水温,以 $^{\circ}\text{C}$ 计; ν 的单位为 cm^2/s 。

表 1-2 不同水温下的黏性系数值

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$\nu / (10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	1.785	1.519	1.306	1.139	1.003	0.893	0.800	0.727
$\mu / (10^{-3} \text{N}/\text{m}^2)$	1.781	1.518	1.307	1.139	1.002	0.890	0.798	0.723
温度 $t/^{\circ}\text{C}$	40	45	50	60	70	80	90	100
$\nu / (10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	0.658	0.605	0.553	0.474	0.413	0.364	0.326	0.294
$\mu / (10^{-3} \text{N}/\text{m}^2)$	0.653	0.599	0.547	0.466	0.404	0.354	0.315	0.282

1.3.3.2 牛顿内摩擦定律

实际流体总是具有黏性的,静止时也不例外。若流体做相对运动,则各流层之间或流体与固壁之间便产生了剪切力,即内摩擦力。内摩擦力的大小与两流层的接触面积或流体与固壁的接触面积的大小有关,当然还与流体本身具有的黏性强弱和相对运动的快慢有关,这一点可通过下面的实验加以验证。

设一水槽中水体作二维平行直线运动,见图 1-1(a)。由于水槽内水很浅,可近似认为其内沿水深方向的速度成线形分布。当水面放置一平板,并给一拉力使其做匀速运动,则水体

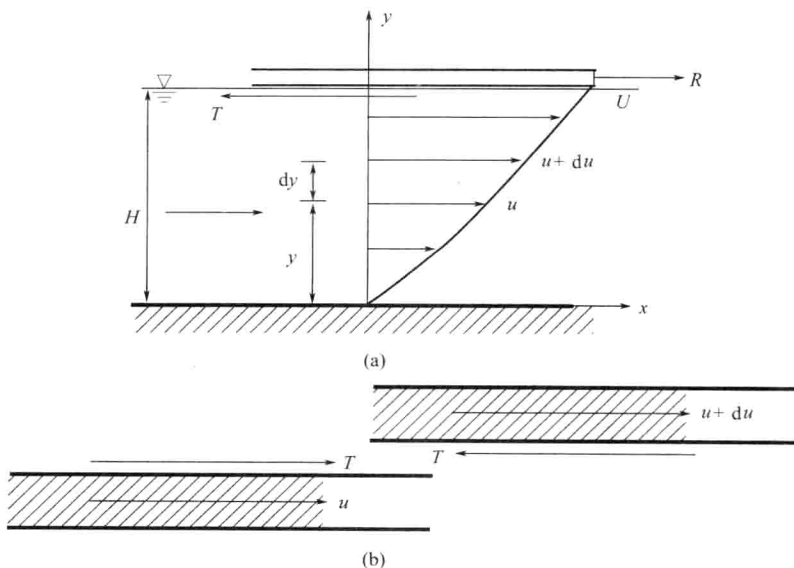


图 1-1 流体在水槽中的剪切流动

给予平板的摩擦力可由作用在平板上的拉力测得。经多次反复测得剪切力 T 与平板的面积 A 、速度 U 、流体黏度 μ 成正比，与水槽深度 H 成反比。即为：

$$T = A\mu \frac{U}{H} \quad (1-6)$$

根据速度三角形，可知任意点的速度为： $u(y) = \frac{U}{H}y$ ，则 $\frac{du}{dy} = \frac{U}{H}$ ，有：

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

式中， τ 为单位面积上的内摩擦力， $\tau = \mu \frac{T}{A}$ 称为内摩擦切应力，简称切应力； μ 为动力黏滞系数，其值随流体种类及温度、压强的不同而异； $\frac{du}{dy}$ 为流速梯度，为两层流速差与距离的比值。

式(1-7)即为牛顿内摩擦定律，它反映流体做相对运动时，各流层间及流体与固壁间的内摩擦切应力与流体黏性及流速梯度成正比。

值得提出的是牛顿内摩擦定律是针对流体质点做有规则的一层一层向前运动而不相互混掺的流动，后面的理论中这种流动称为层流运动。由于流体具有黏性，因而各个流层的流速并不相等，固壁上的流体质点由于黏性的作用而粘在固壁上不动，速度等于固壁的速度。对于流体中的任意流层，上层流速为 $u + du$ ，相邻下层流速为 u 。在这两层之间将出现成对的切应力，如图 1-1 (b) 所示。下层流体对上层流体起阻碍作用，则内摩擦力与流速方向相反；与此同时，上层流体对下层流体起推动作用，内摩擦力与流速方向相同。这两个内摩擦力大小相等、方向相反。在流动过程中，内摩擦力做功，从而消耗掉流体的机械能，产生了机械能损失，这将在后面的章节中详细讨论。

牛顿内摩擦定律还可以由流体微团的剪切变形速率确定。

在两层流体 $u + du$ 、 u 层中取出一高度为 dy 的矩形微元体 $ABCD$ ，经过 dt 时间后，微团变形为 $A'B'C'D'$ ，并产生了一角变形，如图 1-2 所示。

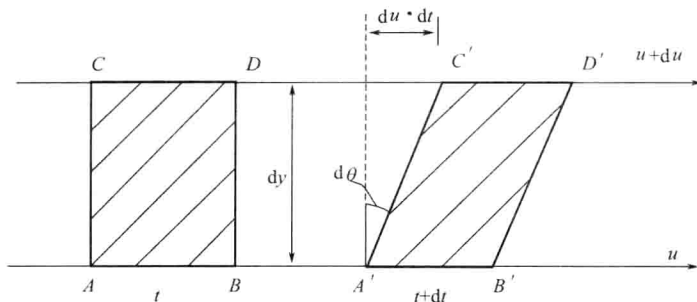


图 1-2 流体微元体的剪切角变形

由于上下流层存在流速差 du ，经 dt 时间后微元体形状发生变化，由原来的矩形变为平行四边形，即产生了剪切变形（或角变形），微元体产生了 $d\theta$ 的角变形，其剪切变形速度为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。上层流体较下层流体多移动了距离 $du dt$ ，则有：

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

$$\text{所以 } \frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-8)$$

将式(1-8)代入式(1-7), 牛顿内摩擦定律又可写为:

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明: 流体做层流运动时, 相邻流层之间所产生的内摩擦切应力的的大小与剪切角变形速度成正比。

【例 1-1】 有一底面积为 $1\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的平板, 质量为 5kg , 沿一与水平面成 20° 角的斜面匀速下滑, 见图 1-3。已知水的温度为 20°C , 平板与斜面的距离为 0.6mm 。试求平板运动的速度和受到的摩擦力为多少?

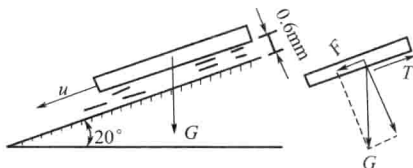


图 1-3 【例 1-1】图

【解】 根据题目已知水温, 查表 1-2 得此温度下水的动力黏度 $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

由于平板沿斜面匀速下滑, 其摩擦力等于重力的分力, 有:

$$T = G \sin \theta = 5 \times 9.8 \sin 20^\circ \text{ N} = 16.76 \text{ N}$$

根据牛顿内摩擦定律, 采用式 (1-9): $\tau = \mu \frac{du}{dy} \approx \mu \frac{u}{y} = \frac{T}{A}$

$$\text{得: } u = y \frac{T}{\mu A} = 0.0006 \times \frac{16.76}{1.002 \times 10^{-3} \times 1 \times 0.5} \text{ m/s} = 20.07 \text{ m/s}$$

1.3.3.3 牛顿流体与非牛顿流体

按式(1-9)可绘出切应力与流速梯度的关系曲线, 见图 1-4 中曲线 1。该曲线为一条过圆心的直线, 即是在温度不变的条件下, 切应力随流速梯度呈线性增长, 并且, 当剪切变形

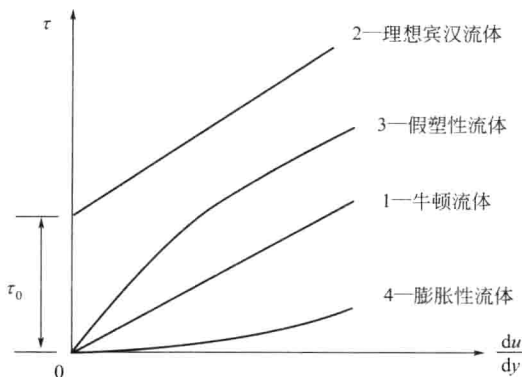


图 1-4 切应力与流速梯度关系曲线

速度为零时, 切应力也为零, 满足这种条件的流体称为牛顿流体。日常生活中有水、空气、汽油、煤油、酒精、甲苯、乙醇等。牛顿内摩擦定律仅适用于牛顿流体。

不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。非牛顿流体包括理想宾汉流体、假塑性流体、膨胀性流体。其中, 理想宾汉流体是指流体承受的切应力达到某一值 τ_0 时, 才开始出现剪切变形, 但其切应力 τ 与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 仍然为线性关系, 如泥浆、血浆等,

图中为曲线 2。图 1-4 中曲线 3 为假塑性流体, 这类流体有尼龙、橡胶溶液、颜料、油漆等; 曲线 4 为膨胀性流体, 这类流体有生面团、淀粉糊等。假塑性流体与膨胀性流体的切应力 τ 与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 均为非线性关系。在本书范围内只讨论牛顿流体。

1.3.3.4 理想液体模型

如某种流体的黏性系数为零, 称其为理想流体, 这种流体在现实生活中实际上是不存在

的。但总有一些流体的黏性系数很小，或是在特定条件下忽略其黏性以简化计算，它并不影响整个系统的计算精度。对于这种简化模型称理想流体模型。

实际流体边界条件具有多样性，因此流动极其复杂，理论分析和数学求解非常困难。有了“理想流体”的概念和理想流体模型的简化后使计算大为简化，理想液体模型带来的误差，用实验加以修正。这在以后的分析中经常采用。

1.3.4 流体的压缩性与不可压缩模型

1.3.4.1 液体的压缩性

作用在流体上的压强增加，流体体积减少；相反，压强减小，流体的体积增加，这种性质称流体的压缩性。流体的压缩性可用压缩系数 β 表示，有时也将这种特性称为弹性，采用体积弹性系数 K 表示。

设流体的体积为 V ，当其上压强增加 $d\rho$ ，则体积减少了 dV ，密度增加了 $d\rho$ 。则流体压缩系数 β 可表示为：

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

压缩系数单位为 m^2/N ，即压强单位的倒数。“-”表示体积变化与压强变化方向相反。压缩系数反映了体积随压强成负向变化，密度随压强成正向变化的关系，即压强增加，流体的体积减少，而密度加大。体积弹性系数则定义为压缩系数的倒数，为：

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

体积弹性系数的单位为 N/m^2 。不同流体，压缩性和弹性不同，但同种流体其压缩性和弹性也随温度、压强而不同。以水为例，常温下水的压缩系数为 $\beta = 5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ ，并且水的压缩系数随温度、压强变化较小。

流体体积不但受到压力的影响，还受到温度的影响。当流体温度升高，体积膨胀；温度降低，体积缩小，流体的这种性质称为流体的膨胀性或热胀性。可用体积膨胀系数 α_T 表示。设流体的温度增加 dT ，体积膨胀系数 α_T 定义为：

$$\alpha_T = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = \frac{d\rho}{\rho dT} \quad (1-12)$$

体积膨胀系数的单位为 T^{-1} 。与压缩系数一样，水的热膨胀系数很小，一般可忽略不计。只有在一些特殊情况下计入其压缩性和膨胀性。如有压管路中的水击现象由于压力过大，必须考虑液体的可压缩性；热水采暖等问题则需考虑液体的膨胀性。

1.3.4.2 气体的压缩性

气体具有显著的压缩性和膨胀性。温度与压强的变化对气体的密度影响很大。在温度不过低，压强不过高时，气体的密度、压强和温度服从理想气体的状态方程。即：

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-13)$$

式中， p 为气体的绝对压强， N/m^2 ； T 为气体的热力学温度， K ； R 为气体常数， $\text{m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，对于空气 $R = 287 \text{m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，其他气体 $R = \frac{8314}{n} \text{m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，