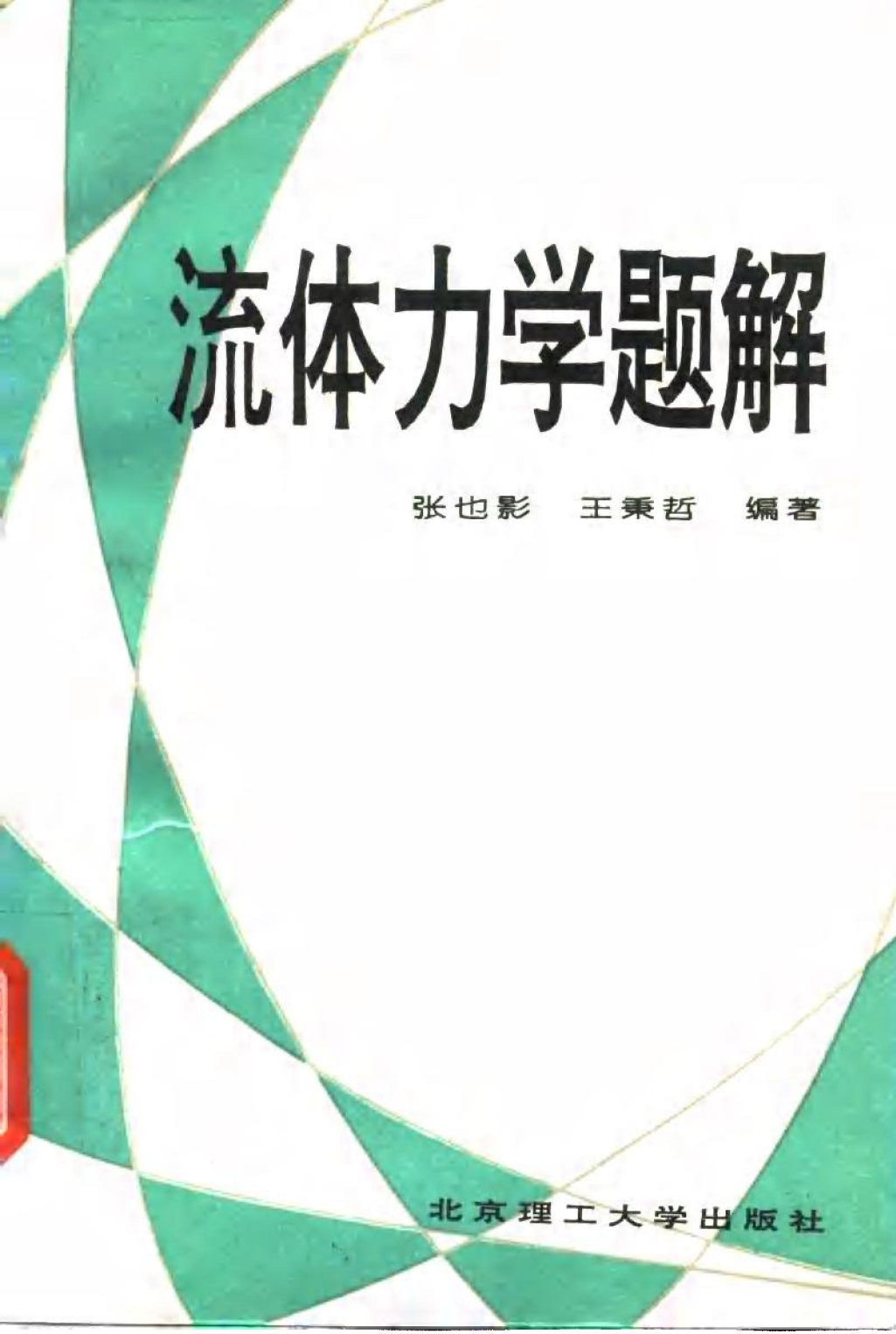




流体力学题解

张也影 王秉哲 编著

北京理工大学出版社

流体力学题解

张也影 王秉哲 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书可作为高等学校流体力学课程的教学参考书。为巩固学生所学理论、提高学生分析和解决问题的能力、培养学生运用思维的能力和严肃认真的科学作风,根据课程教学基本要求,作者对所选题目都作了详解。

考虑到本书的独立性,书中将解题所需的基本原理、基本公式和必要资料汇编为内容提要列于各章题解之前。这样,读者即可执此一书研读流体力学的解题方法。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学题解/张也影,王秉哲编著. —北京:北京理工大学出版社,1996

ISBN 7—81045—112—X

I. 流… I. ①张… ②王… II. 流体力学-题解 IV. 035-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 05420 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 11.625 印张 296 千字

1996 年 4 月第一版 1996 年 4 月第一次印刷

印数:1—6000 册 定价:16.00 元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

前 言

培养学生的解题能力,对于工程流体力学这样一门技术基础课来说,无疑是教学当中必不可少的一个重要环节。通过解题可以巩固所学理论、提高分析和解决问题的能力;通过解题可以运用思维能力和培养严肃认真的科学作风。在目前各种教材百花齐放的形势下,向读者提供一本可供参考的《流体力学题解》无疑也是需要的。

作者应广大读者的要求,决定出版以机械类工程流体力学为主要内容的流体力学题解。考虑到本书的独立性,将解题所需的基本原理、基本公式及必要资料汇编为内容提要列于各章题解之前。这样,读者可执此一书研读流体力学的解题方法。

作者力求对每个题目都能提供正确的解题思路和简捷的解题方法,对每个数据都争取作到准确无误。我们在讲授流体力学课程时,作过许多不同类型的习题,把一些具有典型的题目布置给学生作为作业;在批改作业当中发现不少学生很有创见,甚至提出过许多教师意想不到的问题和有独到见解的解题方法。由此我们预料到本书读者也不会囿于书中的现状,而会开阔思路、大胆提出许多新鲜的见解。本书如果能起到抛砖引玉的作用,那已经就是作者的希望了。

限于水平和成书的仓促,本书的错误和缺欠肯定还有不少,希望读者给以指正。

张也影 王秉哲

1996年1月

目 录

第一章 绪 论

§ 1-1 内容提要	(1)
一、流体的密度、重度、比体积和比重	(1)
二、流体的压缩性和膨胀性	(5)
三、流体的粘性	(8)
四、缝隙流体中牛顿内摩擦定律的应用	(15)
五、液体的表面张力与汽化压强	(16)
§ 1-2 习题解答	(17)

第二章 流体静力学

§ 2-1 内容提要	(42)
一、平衡流体上的作用力	(42)
二、流体平衡的微分方程式	(42)
三、重力场中的平衡流体	(43)
四、可压缩流体的静压强分布公式	(44)
五、静压强的计算	(45)
六、平衡流体对壁面的作用力	(46)
七、液压机工作原理	(51)
八、液体的相对平衡	(51)
§ 2-2 习题解答	(55)

第三章 流体动力学基础

§ 3-1 内容提要	(128)
一、欧拉法描述流体运动	(128)
二、流体运动中的几个基本概念	(129)
三、连续性方程式	(130)
四、流体微团的运动分析	(132)

五、实际流体的运动微分方程式	(133)
六、伯努利方程式及其应用	(133)
七、动量方程式及其应用	(139)
八、动量矩方程式	(142)
§ 3-2 习题解答	(143)
第四章 相似原理	
§ 4-1 内容提要	(192)
一、相似原理	(192)
二、 π 定理和量纲分析的应用	(197)
§ 4-2 习题解答	(198)
第五章 管中流动	
§ 5-1 内容提要	(213)
一、雷诺数与临界雷诺数	(213)
二、圆管中的层流	(214)
三、圆管中的紊流	(219)
四、管路中的沿程阻力	(223)
五、管路中的局部阻力	(227)
六、管路计算	(234)
七、管路中水击现象	(236)
§ 5-2 习题解答	(237)
第六章 孔口出流	
§ 6-1 内容提要	(276)
一、薄壁孔口出流	(276)
二、厚壁孔口出流	(280)
三、孔口及机械中的气穴现象	(282)
四、变水头作用下的孔口出流	(283)
§ 6-2 习题解答	(284)
第七章 缝隙流动	
§ 7-1 内容提要	(304)
一、平行平面缝隙与同心环形缝隙	(304)
二、偏心环形缝隙	(307)

三、平行圆盘缝隙·····	(308)
四、倾斜平面缝隙·····	(310)
§ 7-2 习题解答·····	(313)
第八章 气体流的一元流动	
§ 8-1 内容提要·····	(334)
一、音速和马赫数·····	(334)
二、一元气流的流动特性·····	(335)
三、等熵和绝热气流的基本方程式与基本概念·····	(337)
四、收缩喷管与拉伐尔喷管的计算·····	(341)
§ 8-2 习题解答·····	(343)
附录 本书物理量的符号、单位与量纲 ·····	(359)

第一章 绪 论

§ 1-1 内容提要

一、流体的密度、重度、比体积和比重

流体密度

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

式中： M ——流体的质量(kg)； V ——流体的体积(m^3)。

流体重度

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-2)$$

式中： G ——流体的重量(N)； V ——流体的体积(m^3)。

流体比体积

$$v = \frac{V}{M} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-3)$$

以上三个物理量可以互相换算，由于重量等于质量乘以重力加速度， $G=mg$ ，则有

$$\gamma = \rho g = \frac{1}{v} g \quad (1-4)$$

在 ρ 、 γ 、 v 中任知其一，即可求得其余两个数值。

流体比重

$$D = \frac{G}{G_w} = \frac{M}{M_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{v}{v_w} \quad (1-5)$$

4℃蒸馏水的比重当然是1。在法定单位和SI制中：

$$\left. \begin{array}{l} 4^{\circ}\text{C 蒸馏水密度} \quad \rho_w = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ 4^{\circ}\text{C 蒸馏水重度} \quad \gamma_w = 9810 \text{ (N/m}^3\text{)} \\ 4^{\circ}\text{C 蒸馏水比体积} \quad V_w = 0.001 \text{ (m}^3\text{/kg)} \end{array} \right\} \quad (1-6)$$

由此可知：在法定单位和 SI 制中流体密度、重度、比体积的数值与流体比重的关系为

$$\left. \begin{array}{l} \rho = 1000D \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ \gamma = 9810D \text{ (N/m}^3\text{)} \\ V = \frac{0.001}{D} \text{ (m}^3\text{/kg)} \end{array} \right\} \quad (1-7)$$

为了参阅早期的图书资料，顺便将工程制中流体密度、重度、比体积的数值及它们与流体比重的关系列下

$$\left. \begin{array}{l} 4^{\circ}\text{C 蒸馏水重度} \quad \gamma_w = 1000 \text{ (kgf/m}^3\text{)} \\ 4^{\circ}\text{C 蒸馏水密度} \quad \rho_w = 102 \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2\text{/m}^4\text{)} \\ 4^{\circ}\text{C 蒸馏水比体积} \quad V_w = 0.00198 \text{ (m}^4\text{/kgf} \cdot \text{s}^2\text{)} \end{array} \right\} \quad (1-8)$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho = 102D \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2\text{/m}^4\text{)} \\ \gamma = 1000D \text{ (kgf/m}^3\text{)} \\ V = \frac{0.00981}{D} \text{ (m}^3\text{/kg)} \end{array} \right\} \quad (1-9)$$

液体的密度、重度、比体积均与流体的温度和压强有关。标准大气压($\rho=1.01325\text{bar}$)下的常见液体的物理性质可参考表 1-1，标准大气压下水、原油、空气比重随温度的变化可参考表 1-2。

表 1-1 标准大气压($p=1.01325\text{bar}$)下常见液体的物理性质

液 体	温度 t / $^{\circ}\text{C}$	比重 D	密度 ρ / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比体积 V / $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	重度 γ / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$
蒸馏水	4	1	1000	1×10^{-3}	9810
苯	20	0.895	895	1.12×10^{-3}	8780
四氯化碳	20	1.588	1588	0.63×10^{-3}	15580
原油	20	0.856	856	1.17×10^{-3}	8397
汽油	20	0.678	678	1.47×10^{-3}	6650
甘油	20	1.258	1258	0.79×10^{-3}	12340
煤油	20	0.808	808	1.24×10^{-3}	7926
水银	20	13.59	13590	0.074×10^{-3}	133300
润滑油	20	0.918	918	1.09×10^{-3}	9005
水	20	0.998	998	1.002×10^{-3}	9790
海水	20	1.025	1025	0.976×10^{-3}	10055
酒精	20	0.789	789	1.27×10^{-3}	7740
辛烷 C_8H_{18}	20	0.702	702	1.42×10^{-3}	6887
松节油	20	0.862	862	1.16×10^{-3}	9456
蓖麻油	20	0.960	960	1.04×10^{-3}	9417
亚麻仁油	20	0.942	942	1.06×10^{-3}	9241
液氢	-257	0.072	72	13.9×10^{-3}	706
液氧	-195	1.206	1206	0.83×10^{-3}	11830

体积压缩 系数 β_p /(1/bar)	体积弹性 模数 K /bar	动力粘度 μ /(Pa · s)	运动粘度 ν /(m ² · s ⁻¹)	汽化压强 p_v /(Pa 绝对)	表面张力 系数 σ /(N · m)
0.485×10^{-4}	20600	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}	870	0.075
0.97×10^{-4}	10300	0.65×10^{-3}	0.73×10^{-6}	10000	0.029
0.91×10^{-4}	11000	0.97×10^{-3}	0.61×10^{-6}	12100	0.027
—	—	7.2×10^{-3}	8.4×10^{-6}	—	0.03
—	—	0.29×10^{-3}	0.43×10^{-6}	55000	—
0.23×10^{-4}	43500	1490×10^{-3}	1184×10^{-6}	0.014	0.063
—	—	1.92×10^{-3}	2.4×10^{-6}	3200	0.025
0.038×10^{-4}	262000	1.63×10^{-3}	0.12×10^{-5}	0.17	0.51
—	—	440×10^{-3}	479×10^{-6}	—	—
0.46×10^{-4}	21800	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-6}	2340	0.073
0.43×10^{-4}	23360	10.8×10^{-3}	1.05×10^{-6}	2300	0.074
1.1×10^{-4}	8958	1.19×10^{-3}	1.5×10^{-6}	5900	0.022
1.15×10^{-4}	8666	0.547×10^{-3}	0.78×10^{-6}	14000	0.022
0.88×10^{-4}	11370	1.49×10^{-3}	1.73×10^{-6}	5100	0.027
0.53×10^{-4}	18760	0.961×10^{-3}	1.00×10^{-6}	—	—
0.57×10^{-4}	17620	0.455×10^{-3}	0.48×10^{-6}	—	—
—	—	0.021×10^{-3}	0.29×10^{-6}	21400	0.025
—	—	82×10^{-3}	68×10^{-6}	21400	0.015

表 1-2 标准大气压($p=1.01325\text{bar}$)下水、原油、空气比重随温度的变化

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20
水	0.9998	1.0000	0.9997	0.9991	0.9982
原油	0.8693	0.8662	0.8631	0.8600	0.8569
空气	1.293×10^{-3}	1.273×10^{-3}	1.248×10^{-3}	1.226×10^{-3}	1.205×10^{-3}
温度/ $^{\circ}\text{C}$	25	30	40	50	60
水	0.9970	0.9957	0.9922	0.9880	0.9832
原油	0.8538	0.8507	0.8445	0.8383	0.8321
空气	1.185×10^{-3}	1.165×10^{-3}	1.128×10^{-3}	1.098×10^{-3}	1.060×10^{-3}
温度/ $^{\circ}\text{C}$	70	80	90	100	
水	0.9778	0.9718	0.9653	0.9584	
原油	0.8259	0.8196	0.8136	0.8074	
空气	1.029×10^{-3}	1.000×10^{-3}	0.973×10^{-3}	0.946×10^{-3}	

二、流体的压缩性和膨胀性

1. 气体状态方程式

$$pV = MRT \tag{1-10}$$

或写成

$$pV = RT \tag{1-11}$$

及

$$\frac{p}{\rho} = RT \tag{1-12}$$

式中： p ——绝对压强(N/m^2)； V ——气体比体积(m^3/kg)； T ——是气体的热力学温度(K)； R ——因气体种类不同的气体常数，它的单位可由 pV/T 的单位导出，它的数值可根据气体分子量 m 由下式确定

$$R = \frac{\text{通用气体常数}}{\text{气体分子量}} = \frac{8314}{m} \text{ (J/kg} \cdot \text{K)} \tag{1-13}$$

常用气体的分子量 m 及气体常数 R 可参阅表 1-3。

表 1-3 常见气体的物理性质(标准大气压, 20 °C)

气 体	空气	二氧化碳 (CO ₂)	一氧化碳 (CO)	氦 (He)
分子量 m /(g)	28.96	44.01	28.01	4.003
气体常数 R /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	287	188.9	296.5	2077
定压比热 C_p /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	1005	814.7	1032	5192
定容比热 C_v /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	717.2	621.2	734.7	3115
绝热指数 k	1.400	1.304	1.404	1.667
密度 ρ /(kg · m ⁻³)	1.205	1.84	1.16	0.166
动力粘度 μ /(Pas · s)	0.18 × 10 ⁻⁴	0.148 × 10 ⁻⁴	0.182 × 10 ⁻⁴	0.197 × 10 ⁻⁴
运动粘度 ν /(m ² · s ⁻¹)	14.9 × 10 ⁻⁶	8 × 10 ⁻⁶	15.7 × 10 ⁻⁶	118 × 10 ⁻⁶
气 体	氢 (H ₂)	沼气 (CH ₄)	氮 (N ₂)	氧 (O ₂)
分子量 m /(g)	2.016	16.04	28.01	32.00
气体常数 R /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	4124	518.3	296.2	259.8
定压比热 C_p /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	14180	2191	1032	660.0
定容比热 C_v /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	10060	167.2	734.8	471.1
绝热指数 k	1.410	1.310	1.404	1.401
密度 ρ /(kg · m ⁻³)	0.0839	0.668	1.16	1.33
动力粘度 μ /(m ² · s ⁻¹)	0.09 × 10 ⁻⁴	0.134 × 10 ⁻⁴	0.176 × 10 ⁻⁴	0.2 × 10 ⁻⁴
运动粘度 ν /(m ² · s ⁻¹)	107 × 10 ⁻⁶	20 × 10 ⁻⁵	15.2 × 10 ⁻⁶	15 × 10 ⁻⁶

2. 流体压缩性和膨胀性的系数表示法

(1)流体的体积膨胀系数。当压强不变时,每增加单位温度所产生的流体体积相对变化率称为气体的体积膨胀系数,用 β_T 表示。气体的体积膨胀系数可由气体状态方程式(令 $p=C$)求得

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = \frac{1}{V} \frac{d}{dT} \left(\frac{MRT}{p} \right)$$

$$= \frac{MR}{Vp} = \frac{1}{T} \tag{1-14}$$

对于水,在常温常压下,其数值的数量级为 1/10000,液体中溶解有少量气体时,其体积膨胀系数稍大一些。水的体积膨胀系数参考表 1-4。

表 1-4 水的体积膨胀系数 $\beta_v/(\frac{1}{^\circ\text{C}}\text{或}\frac{1}{\text{K}})$

压 强 /(工程大 气压)	温 度 /(℃或 K)				
	1~10	10~20	45~50	60~70	90~100
1	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
100	0.43×10^{-4}	1.61×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
200	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	—
500	1.49×10^{-4}	2.36×10^{-4}	4.29×10^{-4}	5.23×10^{-4}	6.61×10^{-4}
900	1.29×10^{-4}	2.89×10^{-4}	4.37×10^{-4}	5.14×10^{-4}	6.21×10^{-4}

(2)流体的体积压缩系数。体积相对变化量 $-\Delta V/V$ 与 Δp 的比值的极限称为流体的体积压缩系数,用 β_p 表示。气体的体积压缩系数也可用气体状态方程(令 $T=C$)求得

$$\begin{aligned} \beta_p &= \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = - \frac{1}{V} \frac{d}{dp} \left(\frac{MRT}{p} \right) \\ &= - \frac{MRT}{V} \left(- \frac{1}{p^2} \right) = \frac{1}{p} \end{aligned} \tag{1-15}$$

β_p 与 p 成反比,充分说明气体的压缩特性。液体体积压缩系数约为 1/20000(1/bar),这说明,相对于气体来说,液体是不容易压缩的。水的体积压缩系数可以参考表 1-5。

表 1-5 水的体积压缩系数 $\beta_p / \left(\frac{1}{\text{bar}} \right)$

温度/℃	压 强 /bar				
	4.9	9.8	19.6	39.2	78.5
0	0.539×10^{-4}	0.537×10^{-4}	0.531×10^{-4}	0.523×10^{-4}	0.515×10^{-4}
5	0.528×10^{-4}	0.523×10^{-4}	0.517×10^{-4}	0.507×10^{-4}	0.492×10^{-4}
10	0.523×10^{-4}	0.517×10^{-4}	0.507×10^{-4}	0.497×10^{-4}	0.481×10^{-4}
15	0.517×10^{-4}	0.510×10^{-4}	0.502×10^{-4}	0.488×10^{-4}	0.470×10^{-4}
20	0.515×10^{-4}	0.505×10^{-4}	0.495×10^{-4}	0.481×10^{-4}	0.460×10^{-4}

(3)流体的体积弹性模数。工程上也常用 β_p 的倒数来表示压缩性, β_p 的倒数用 K 表示,称作流体的体积弹性模数。即

$$K = \frac{1}{\beta_p} = -V \frac{dp}{dV} \tag{1-16}$$

K 的单位是 bar 或 Pa。 K 的物理意义是当温度不变时,每产生一个单位体积相对变化率所需要的压强变化量。 K 值越大(β_p 越小)。表示流体越不容易压缩。

常见的液体的体积压缩系数 β_p 及体积弹性模数 K 可以从表 1-1 或表 1-5 中查得。

三、流体的粘性

如图 1-1 所示,在互相平行且间隙 δ 很小的两平板之间充满液体,下板固定,上板受 F 力的作用并以均匀速度 U 沿 x 方向运动。在流体内部由于液体分子之间的内聚力,上层流体必然带动下层流体,而下层流体必然阻滞上层流体。于是在液流横断面上就出现了如图 1-1 所示的速度分布。当 δ 很小时,速度分布近似直线规律 $u=ky$ 。

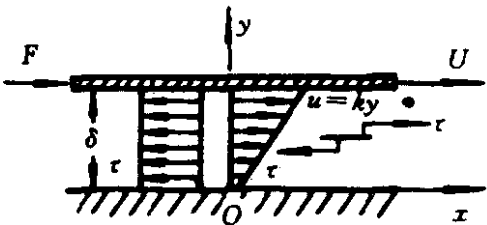


图 1-1 流体的粘性

如果取液体外边界的上、下平板为分离体,则液体的切应力就会表现为阻止上板运动的摩擦力,或者表现为拖动下面固定平板的摩擦力。反之,如果取整个流体为分离体,则运动平板拖拉顶部液层向右,固定平板阻止底部液层运动。流体运动时内部产生切应力的这种性质叫做流体的粘性。固体没有这种性质。流体处于平衡状态时,其粘性无从表现,只有当流体运动时,流体的粘性才能显示出来。

1. 牛顿内摩擦定律

流体中的切应力为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{\delta} \quad (1-17)$$

式中 U/δ 代表沿速度的垂直方向每个单位长度上的速度变化率,一般称速度梯度。因此(1-17)式表明流体中的切应力与速度梯度成正比。当两平板间的

速度分布 $u = u(y)$ 为直线规律时,液流横截面上各点的速度梯度是一个常数,因而液流横截面上各点的切应力也是一个常数,如图

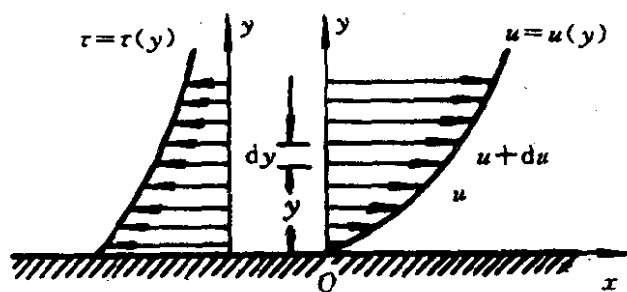


图 1-2 液流截面上速度非线性分布的切应力 1-1 所示。有时液流截面上的速度分布不一定是直线规律,如图 1-2 所示。因而流体中的切应力也是 y 坐标的函数,其大小为

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-18)$$

当 $du/dy > 0$ 时,式中取“+”号;当 $du/dy < 0$ 时,取“-”号,以保持切应力永为正值。

(1-18)式通称牛顿内摩擦定律,其物理意义仍然是切应力与速度梯度成正比,只不过它更普遍,而(1-17)式只是它的一个简化特例而已。

2. 流体的粘度

对于牛顿流体, τ 与 du/dy 成比例, 但比例常数 μ 则与流体的种类有关。对于不同的流体, 其比例常数 μ 不一样。粘性也就不同, 因而称代表粘性大小的比例常数

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-19)$$

为流体的动力粘度。 μ 的物理意义是单位速度梯度下的切应力, 因而从 μ 的大小可以直接判断流体粘性的大小。

动力粘度 μ 的单位是 $N \cdot m^{-2} \cdot s = Pa \cdot s = 10^{-5} bar \cdot s$

在许多工程流体力学的理论公式中常常出现 μ 和液体密度 ρ 的比, 为简化起见, 用 ν 表示, 称

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-20)$$

为流体的运动粘度。

运动粘度的单位是 $m^2 \cdot s^{-1}$ 。

在 CGS 制中: 动力粘度 μ 的单位 $dyn \cdot s \cdot cm^{-2}$, 称为泊 (Poise), 代号为 P, 其 1% 称为厘泊, 代号为 cP。运动粘度 ν 的单位是 $cm^2 \cdot s^{-1}$, 称为斯 (Stoke) 代号为 St, 其 1% 称为厘斯, 其代号为 cSt。

由于物理学上的 CGS 单位由来已久, 泊、斯等专用单位至今仍在石油和机械工业中广泛使用, 表 1-6 中列出的 μ 和 ν 的各种单位及其相互换算关系。

$$\mu \text{ 的量纲是 } [\mu] = \frac{M}{TL} \quad (1-21)$$

$$\nu \text{ 的量纲是 } [\nu] = \frac{L^2}{T} \quad (1-22)$$

μ 的物理意义是单位速度梯度下的切应力。 μ 的大小可以直接判定流体粘性的大小。 ν 的物理意义是动力粘度与密度之比, 如果两种流体密度相差很多, 单纯从 ν 的值判断不了它的粘度大小, ν 值只适用于判断密度几乎恒定的同一流体在不同温度、压强下