

# 工程流体力学

华中工学院 力学系

一九八六年三月

# 前 言

本教材是根据1978年杭州教材会议精神，按照机械类专业制定的流体力学教学大纲编写的。在编写过程中，考虑了机制、锻压、铸造、仪表以及生物力学、流体控制与传动等专业的不同要求，可作为40~60学时的工程流体力学教程，亦可供有关教师及技术人员参考。

对于少学时的工程流体力学教材，以前大多是从水力学的角度侧重于一元管流的实际问题。我们根据多年的教学经验，认为不应侧重某一专业内容，而应提高这门课程的起点和加强其理论基础，使学生学完本课程后，具备向较深的知识领域过渡的能力。基于这些考虑，本教材具有如下特点：

从三元动流入手，加强了数理基础，提高了教材的通用性；注重理论联系实际，但不是简单的堆积各种工程问题，而是强调处理工程问题中具有典型意义的一般方法；对管道计算部分，选编了若干 BASIC 计算程序的例题，以利于训练计算能力；重视实验技术，特别介绍了目前比较先进的激光、热线测速仪的基本原理和使用方法；文字简练，重点突出、物理概念清晰。

本教材是由四位有教学经验的教师集体编写的。以章节先后为序：第一章、第八章由尹文俊编写；第二章、第四章由李光正编写；第三章、第六章由胡方朴编写；第五章、第七章由李国钧编写。全书由尹文俊审定，程鸣绘图。

由于编者水平有限，加之时间仓促，疏漏和谬误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者 1986年3月

# 目 录

## 前 言

第一章 绪论 .....	( 1 )
§1-1 工程流体力学的研究对象、任务和方法 .....	( 1 )
§1-2 流体作为连续介质的假设 .....	( 1 )
§1-3 流体的密度、重度和单位制的换算 .....	( 2 )
§1-4 流体的 <u>压缩性和膨胀性</u> .....	( 5 )
§1-5 流体的 <u>粘性</u> .....	( 8 )
§1-6 作用在流体上的力 .....	( 14 )
习题 .....	( 15 )
第二章 流体静力学 .....	( 18 )
§2-1 流体静压力及其特性 .....	( 18 )
§2-2 流体的平衡微分方程式及其积分、等压面概念 .....	( 20 )
§2-3 在重力作用下流体平衡时的压力分布规律 .....	( 21 )
§2-4 绝对压力、相对压力、真空度 .....	( 24 )
§2-5 液体的相对平衡 .....	( 27 )
§2-6 流体作用在平面壁上的总压力 .....	( 31 )
§2-7 流体作用在曲面壁上的总压力 .....	( 35 )
习题 .....	( 38 )
第三章 流体动力学基础 .....	( 43 )
§3-1 研究流体运动的两种方法 .....	( 43 )
§3-2 流体运动的基本概念 .....	( 46 )
§3-3 连续性方程 .....	( 50 )
§3-4 流体微团运动的分析、有旋流动和无旋流动 .....	( 54 )
§3-5 流体的内应力及其性质 .....	( 62 )
§3-6 应力形式的流体运动方程 .....	( 64 )
§3-7 不可压缩粘性流体的运动方程 (N-S 方程) .....	( 65 )
§3-8 无粘性流体的运动微分方程 .....	( 68 )
§3-9 无粘性流体微小流束的伯努里方程 .....	( 70 )
§3-10 粘性流体总流的伯努里方程 .....	( 79 )
§3-11 动量方程和动量矩方程 .....	( 84 )
习题 .....	( 90 )

第四章 因次分析及相似原理 .....	( 93 )
§4—1 因次(量纲)分析法 .....	( 93 )
§4—2 无量纲综合量的物理意义 .....	( 96 )
§4—3 流动相似原理 .....	( 97 )
习题 .....	( 100 )
第五章 粘性流体的流动 .....	( 101 )
§5—1 雷诺实验 .....	( 101 )
§5—2 粘性不可压缩流体运动方程组的讨论 .....	( 103 )
§5—3 两个平行平板间的层流流动 .....	( 104 )
§5—4 两同心圆筒间的流动 .....	( 106 )
§5—5 能量损失的两种类型 .....	( 107 )
§5—6 圆管中的层流运动 .....	( 108 )
§5—7 紊流概述 .....	( 111 )
§5—8 圆管紊流中的速度分布 .....	( 112 )
§5—9 圆管紊流的沿程损失系数 .....	( 114 )
§5—10 非圆形管道沿程损失的计算 .....	( 118 )
§5—11 局部损失 .....	( 120 )
§5—12 管路的水力计算 .....	( 122 )
§5—13 计算机在管路计算中的应用 .....	( 129 )
§5—14 边界层概念 .....	( 132 )
§5—15 边界层微分方程 .....	( 133 )
§5—16 边界层分离现象 .....	( 136 )
§5—17 物体的阻力 .....	( 138 )
§5—18 雷诺数很小的流动 .....	( 139 )
习题 .....	( 141 )
第六章 旋涡运动及平面势流的理论基础 .....	( 144 )
§6—1 旋涡运动的基本概念 .....	( 144 )
§6—2 旋涡运动的基本性质 涡束诱导出的速度 .....	( 148 )
§6—3 平面势流 速度势和流函数 流网 .....	( 154 )
§6—4 复势和复速度 .....	( 159 )
§6—5 基本的平面有势流动 .....	( 161 )
§6—6 平面势流的迭加 平行流绕圆柱体的无环量绕流及有环量绕流 .....	( 166 )
习题 .....	( 173 )

第七章 气体的一元流动 .....	(175)
§7-1 气体动力学基本方程 .....	(175)
§7-2 音速和马赫数 .....	(176)
§7-3 小扰动在气流中的传播 .....	(178)
§7-4 一元等熵气流的基本方程 .....	(179)
§7-5 滞止参数与临界参数 .....	(180)
§7-6 气流速度与通道形状的关系 .....	(181)
§7-7 收缩喷管和拉伐尔喷管 .....	(182)
§7-8 不可压缩流体的伯努里方程应用的限度 .....	(186)
§7-9 冲激波概述 .....	(188)
习题 .....	(190)
第八章 流体的压力、速度和流量测量 .....	(191)
§8-1 运动流体中的压力测量 .....	(191)
一 U形管压力计 .....	(191)
二 倾斜式微压计 .....	(192)
三 补偿式微压计 .....	(193)
§8-2 流速的测量 .....	(194)
一 皮托(pitot)管 .....	(194)
二 热线风速仪 .....	(196)
三 激光多普勒测速仪 .....	(200)
§8-3 流量测量 .....	(205)
一 节流式流量计 .....	(205)
二 转子流量计 .....	(210)
三 新型流量计简介 .....	(211)
§8-4 测试断面及测点的选择 .....	(211)
一 壁面静压的测量 .....	(211)
二 测试断面上测点的选择 .....	(212)

### 参 考 文 献

# 第一章 绪 论

## §1-1 工程流体力学的研究对象、任务和方法

工程流体力学是应用力学的一个分支，它是在不断总结生产实践和科学研究中逐渐发展起来的一门技术科学。

工程流体力学是根据理论流体力学的理论，再加以实验数据和经验公式来研究流体的力学规律。也就是说，工程流体力学是以理论分析和实验研究相结合的方法，研究流体的平衡、运动和流体与固体相互作用的规律，以及这些规律在实际工程中的应用。

流体包括液体与气体，水、石油、机油、空气、蒸汽、煤气等等都是流体力学的研究对象。液体和气体有其共同的地方，就是它们都没有一定的形状，只能抵抗压力，不能抵抗拉力和切力，具有流动性。它们不同的地方就是液体在容器内会形成一定的自由表面，液体的分子排列比较紧密，分子力较强，即使在极大的外力作用下，体积也只发生极微小的变形；而气体在容器内则不能形成自由表面，气体的分子排列比较松散，分子力较弱，在较小的外力作用下，体积可发生甚大的变形。所以通常把液体又称为不可压缩流体，而气体称为可压缩流体。

工程流体力学包括液体力学和气体力学两大部分。液体力学中通常以水为代表，分析研究水的一些基本规律。但是，当气体的流速远小于音速（一般在 50 米/秒以下），密度变化不大时，气体的压缩性通常可以忽略，即把它作为不可压缩流体处理，此时液体的各种力学规律对于气体也是适用的。气体力学是研究高速气体的运动规律，由于压缩性的影响，密度的变化，以及气体在改变密度的同时，还伴随有扰动波的形成。因此，不可压缩流体的流动与可压缩流体的流动是有本质区别的。

随着科学技术的迅速发展，流体力学已被广泛地应用于工业、农业、医学、航海、航空、航天及军事技术各个方面。它是水利类、动力类、机械类、仪表类、石油化工类、建筑类以及医学类各专业的一门重要技术基础课程。为学习各类专业课程、工作实践、以及各专业的发展和相互渗透，提供了必须的理论基础。学习本课程应着重于基本概念、基本理论和基本方法的理解和掌握。重视实验理论及操作技能，学会理论联系实际，并善于分析和解决工程中的各种流体力学问题。

## §1-2 流体作为连续介质的假设。

从物理学的观点来看，流体和一切物体都是由分子组成的，分子之间是有间隙的，而且流体分子总是不断地作杂乱无规则的热运动。但是流体力学所研究的并不是个别分子的微观运动，而是研究由大量分子组成的宏观流体在外力（如重力、压力差等）的作用下而引



起的机械运动。宏观流体的物理量(如压力、速度和密度等)都是大量分子的行为和作用的平均效果,而且这些宏观物理量都是可以从实验中直接观测的。

1753年,欧拉(Euler)建议采用连续介质这一假设来进行流体力学的研究。就是把真正的流体看成是一种假想的、由无限多流体质点(或称流体微团)所组成的稠密而无间隙的连续介质,而且这些连续介质仍然具有宏观的一切基本力学性质。▲

将流体看成连续介质也是符合实际的,因为即使是微小的流体质点,其体积相对于流动空间或流体中的固体来说是充分小而可忽略不计,但它相对于分子距和分子的平均自由行程的尺寸来说,却是足够大的,质点中仍含有大量的分子。例如在标准状况下,一立方毫米的空气中包含  $2.7 \times 10^{16}$  个分子,空气分子的平均自由程约为  $7 \times 10^{-6}$  厘米。一立方毫米的液体中有  $3 \times 10^{21}$  个分子,可见分子本身和分子距都极其微小。它与机械运动的距离相比是微不足道的。所以在对流体进行宏观研究时,完全可以把流体看成是既没有间隙,也没有分子运动的连续介质。

流体既被看作是连续介质,则反映宏观流体的各种物理量都是空间坐标的连续函数。因此,在以后的讨论中就可以引用连续函数的解析方法,来研究流体处于平衡和运动状态下的有关物理参数之间的数量关系。

把流体作为连续介质来处理对绝大多数的工程技术问题都是可行的。但在某些问题中,气体分子的自由行程相对于流体中的固体(或限制流体运动的固体)的几何尺寸来说,不能忽略时,例如,在火箭飞行的高空中,空气非常稀薄(在120公里的高空处空气分子的平均自由行程约为1.3米)工业中的真空冶炼、气蚀现象以及高真空技术中的极稀薄的气体就都不能视为连续介质了。本课程只研究连续介质的平衡和运动规律。

### §1-3 流体的密度、重度和单位制的换算

#### 一、流体的密度

流体和固体一样,具有质量,单位体积内所具有的质量称为质量密度,或简称密度,常用  $\rho$  表示。密度是描述流体质量在空间分布的物理量。在均质流体中某一流体体积  $V$  中的平均密度是用下式定义的。

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

式中  $\rho$ ——流体的密度(千克/米<sup>3</sup>);

$V$ ——流体的体积(米<sup>3</sup>);

$M$ ——体积  $V$  中所包含的流体质量(千克)。

流体中某一点  $a$  的流体密度则用下式定义:

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

上式取极限时应注意:(1)在  $\Delta V \rightarrow 0$  的过程中,必须将  $a$  点始终包围在体积  $\Delta V$  中;(2)  $\Delta V \rightarrow 0$  是体积缩小为无限小的流体质点,但其中仍然包含有足够多的分子,符合于流体作为连续介质的基本假定。在以后的公式中如遇到类似情况都应这样理解,不再赘述。

## 二、流体的重度

任何物体在地心吸引力作用下都有重量，在均质流体中，流体具有的重量与其所占有的容积之比称为重度(或容重)，常用 $\gamma$ 表示，重度是描述流体重量在空间分布的物理量。类似于密度的定义，某一流体体积 $V$ 中的平均重度和流体中某一点 $a$ 的重度分别为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

$$\gamma = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-4)$$

因此，密度、重度与比容之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

$$v = \frac{g}{\gamma} = \frac{1}{\rho} \quad (1-6)$$

式中  $\gamma$ ——流体的重度(牛/米<sup>3</sup>)

$g$ ——重力加速度(米/秒<sup>2</sup>)

$v$ ——流体的比容(米<sup>3</sup>/千克)

表1-1 列出了在标准大气压下水、空气和水银的密度随温度而变化的数值。表1-2 列出了在标准大气压下几种常用流体的密度和重度。

表1-1 不同温度下的水、空气和水银的密度(千克/米<sup>3</sup>)

流体名称	温 度 (°C)						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

表1-2 常用流体的密度和重度、比重

流体名称	温度(°C)	密度(千克/米 <sup>3</sup> )	重度(牛/米 <sup>3</sup> )	比重(sd)
蒸馏水	4	1000	9806	1
海水	15	1020~1030	10000~10100	1.02~1.03
普通汽油	15	700~750	6860~7350	0.7~0.75
石油	15	880~890	8630~8730	0.88~0.89
润滑油	15	890~920	8730~9030	0.89~0.92
柴油	15	876	8590	0.876
液压油	15	860~900	8440~8830	0.86~0.90
酒精	15	790~800	7750~7850	0.79~0.80
水银	0	13600	133400	13.6
熔化生铁	1200	7000	68600	7
空气	0	1.239	12.68	注: 为便于计算, 以下气体均推算到0°C
氧	0	1.429	14.02	
氮	0	1.251	12.28	
氢	0	0.0899	0.881	
一氧化碳	0	1.250	12.27	
二氧化碳	0	1.976	19.40	
二氧化硫	0	2.927	29.10	
水蒸汽	0	0.804	7.88	



### 三 单位制的换算

国际单位制 (SI) 目前已广泛采用, 本书亦采用国际单位制, 但是, 许多物理参数和有关技术数据、图表资料, 仍有绝对单位制和工程单位制的, 为了正确使用和计算, 现将上述三种单位制中, 有关物理量的单位及相互换算关系列出, 见表1—3。

表1-3 不同单位制的单位及相互换算关系

物理量	国际单位制			绝对单位制	工程单位制	三种单位制换算关系 1(国际单位) = $\alpha$ (绝对单位) = $\beta$ (工程单位)
	中文代号	国际代号	用基本单位表示			
长度 $L$	米	m	m	厘米 cm	米 m	1米 = 100厘米 = 1米
质量 $M$	千克 (公斤)	kg	kg	克 g	公斤力·秒 <sup>2</sup> /米	1公斤 = 10 <sup>3</sup> 克 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·秒 <sup>2</sup> /米
时间 $T$	秒	S	S	秒 S	秒 S	1秒 = 1秒 = 1秒
热力学温度 K	开尔文	K	K	开 K	开 K	1K = 1K = 1K
力 $F$	牛	N	m·kg·s <sup>-2</sup>	达因	公斤力 kgf	1牛 = 10 <sup>5</sup> 达因 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力
力矩	牛·米	N·m	m <sup>2</sup> ·kg·s <sup>-2</sup>	达因·厘米	公斤力·米 kgf·m	1牛·米 = 10 <sup>7</sup> 达因·厘米 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·米
压力 $p$	帕 = $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2}$	pa = $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	m <sup>-1</sup> ·kg·s <sup>-2</sup>	达因/厘米 <sup>2</sup>	公斤力/米 <sup>2</sup>	1帕 = 10 <sup>5</sup> 达因/厘米 <sup>2</sup> = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力/米 <sup>2</sup>
密度 $\rho$	千克/米 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ·kg	克/厘米 <sup>3</sup>	公斤力·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup>	1 $\frac{\text{千克}}{\text{米}^3}$ = 10 <sup>-3</sup> $\frac{\text{克}}{\text{厘米}^3}$ = $\frac{1}{9.81}$ $\frac{\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$
比重 $\nu$	米 <sup>3</sup> /千克	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	厘米 <sup>3</sup> /克	米 <sup>3</sup> /公斤力	1 $\frac{\text{米}^3}{\text{千克}}$ = 10 <sup>3</sup> $\frac{\text{厘米}^3}{\text{克}}$ = 9.81 $\frac{\text{米}^3}{\text{公斤力}}$
重度 $\gamma$	牛/米 <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>	m <sup>-2</sup> ·kg·s <sup>-2</sup>	达因/厘米 <sup>3</sup>	公斤力/米 <sup>3</sup>	1 $\frac{\text{牛}}{\text{米}^3}$ = 10 <sup>-1</sup> $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^3}$ = $\frac{1}{9.81}$ $\frac{\text{公斤力}}{\text{米}^3}$
动力粘性系数 $\mu$	帕·秒 = $\frac{\text{牛} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$	pa·s = $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$	m <sup>-1</sup> ·kg·s <sup>-1</sup>	泊 = $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2} \cdot \text{秒}$	公斤力/米 <sup>2</sup> ·秒	1帕·秒 = 10泊 = $\frac{1}{9.81}$ $\frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$
运动粘性系数 $\nu$	米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	斯 = 厘米 <sup>2</sup> /秒	米 <sup>2</sup> /秒	1 $\frac{\text{米}^2}{\text{秒}}$ = 10 <sup>4</sup> 斯 = 1 $\frac{\text{米}^2}{\text{秒}}$
功、能 $W$	焦 = 牛·米	J = N·m	m <sup>2</sup> ·kg·s <sup>-2</sup>	尔格 = 达因厘米	公斤力·米	1焦 = 1牛·米 = 10 <sup>7</sup> 达因·厘米 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·米
功率 $N$	瓦 = 焦/秒	W = J/s	m <sup>2</sup> ·kg·s <sup>-3</sup>	尔格/秒 = 达因·厘米/秒	公斤力·米/秒	1瓦 = 1 $\frac{\text{焦}}{\text{秒}}$ = 10 <sup>7</sup> $\frac{\text{达因} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}}$ = $\frac{1}{9.81}$ $\frac{\text{公斤力} \cdot \text{米}}{\text{秒}}$

[例1-1] 某燃料油, 其体积为  $492\text{cm}^3$ , 质量为  $0.446\text{kg}$ 。试求: (1) 以国际单位制表示的密度和重度各为若干? 并换算出绝对单位制及工程单位制的密度和重度。(2) 导出一般换算关系式。  $1\text{N}/\text{m}^3 = 10^{-1}$  达因/ $\text{cm}^3 = \frac{1}{9.81}\text{kgf}/\text{m}^3$ 。

[解] (1) 已知质量  $M = 0.446\text{kg}$ , 体积  $V = 492\text{cm}^3$  国际单位制

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{0.446}{492 \times 10^{-6}} = 906\text{kg}/\text{m}^3$$

$$\gamma = \rho \cdot g = 906 \times 9.81 = 8892\text{N}/\text{m}^3$$

绝对单位制

$$\rho = 10^{-3}\rho = 0.906\text{g}/\text{cm}^3$$

$$\gamma = 10^{-1}\gamma = 889\text{达因}/\text{cm}^3$$

工程单位制

$$\rho = \frac{1}{9.81}\rho = 92.3\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

$$\gamma = \frac{1}{9.81}\gamma = 906\text{kgf}/\text{m}^3$$

(2)  $1\text{N} = 10^5$  达因;  $1\text{m}^3 = 10^6\text{cm}^3$ ,

$1\text{kgf} = 9.81\text{N}$ ;  $1\text{N}/\text{m}^3 = 10^{-1}$  达因/ $\text{cm}^3$ 。

所以

$$1\text{N}/\text{m}^3 = \frac{1}{9.81}\text{kgf}/\text{m}^3$$

$$1\text{N}/\text{m}^3 = 10^{-1}\text{达因}/\text{cm}^3 = \frac{1}{9.81}\text{kgf}/\text{m}^3$$

[例1-2] 已经测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为:  $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.6\%$ ,  $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.4\%$ ,  $\alpha_{\text{O}_2} = 4.2\%$ ,  $\alpha_{\text{N}_2} = 75.6\%$ ,  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$ , 试求烟气的密度。

[解] 混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算。

由表1-2 查得:  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_{\text{CO}_2} = 1.98\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_{\text{SO}_2} = 2.93\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_{\text{O}_2} = 1.43\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_{\text{N}_2} = 1.25\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$\rho_{\text{烟}} = 1.98 \times 0.136 + 2.93 \times 0.004 + 1.25 \times 0.756 + 0.804 \times 0.062 = 1.34\text{kg}/\text{m}^3。$$

## §1-4 流体的压缩性和膨胀性

### 一、流体的压缩性

当作用在流体上的压力增加时, 流体的体积就会减小, 这种特性称为压缩性。压缩性的大小用体积压缩系数  $\beta_p$  表示, 其定义为: 在温度不变的条件下增加一个单位压力时所发生的体积相对变化率, 即

$$\beta_p = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1-7)$$

式中  $V$ ——原有的体积 ( $\text{米}^3$ );

$dV$ ——体积的改变量 ( $\text{米}^3$ );

$dp$ ——压力的改变量 (大气压);

$\beta_p$ ——体积压缩系数(大气压) $^{-1}$ 或(米<sup>2</sup>/牛)。

因压力增加, 体积缩小,  $dp$  与  $dV$  异号, 故在等号右边加一负号。

体积压缩系数的倒数为体积弹性系数或弹性模量, 用  $k_p$  表示

$$k_p = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{V dp}{dV} \quad (1-8)$$

式中  $k_p$ ——弹性系数(或称弹性模量)(牛/米<sup>2</sup>)或(帕)。

工程上常用体积弹性系数去衡量流体压缩性的大小。显然  $k_p$  值大的流体的压缩性小,  $k_p$  值小的流体的压缩性大。

在一定温度下水的弹性系数与压力的关系列于表 1-4。由表中可见水的  $k_p$  值很大, 即它的压缩性很小。其它液体的压缩性亦很小, 因此, 工程上一般认为液体是不可压缩的, 但在特殊情况下, 如水击作用和高压液压传动系统中, 则必须考虑液体的压缩性。

表1-4 水的体积弹性系数(10<sup>9</sup>牛/米<sup>2</sup>)

温度(°C)	压 力 (工程大气压)				
	5	10	20	40	80
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

纯液体的压缩性很小, 即体积弹性模量很大。例如压力为 1~500bar 时, 纯水的平均  $k_p$  值约为  $2.1 \times 10^4 \text{ bar}$ 。纯液压用油的平均  $k_p$  值在  $1.4 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{ bar}$  范围内, 但如果液体中混有不溶解的气体, 则体积弹性模量就有很大的降低, 如在 100bar 压力作用下, 当油中混有 1% 的气体时,  $k_p$  值下降约为纯油的 35.6%, 混有 4% 的气体时, 则约为纯油的 12.2%, 其压缩性大为降低。因此, 在液压系统中, 要尽可能避免油中混进气体。由于实际操作过程中不可能完全避免气体混入, 为可靠起见, 在设计液压系统中常取油的弹性模量  $k_p \approx 700 \text{ bar}$ 。混入不同的气体量时的体积弹性模量列于表 1-5。表中  $V_m$  为混气油液的体积,  $V_G$  为混入的气体体积,  $K_m$  为混气油液的体积弹性模量。

表1-5 混入气体对  $k_p$  值的影响

$V_G/V_m$	$K_m(\text{bar})$	$V_G/V_m$	$K_m(\text{bar})$
0	$18.0 \times 10^3$	0.04	$2.70 \times 10^3$
0.005	$9.50 \times 10^3$	0.06	$1.53 \times 10^3$
0.010	$6.42 \times 10^3$	0.08	$1.17 \times 10^3$
0.020	$3.91 \times 10^3$	0.10	$9.50 \times 10^3$

上表说明了在一定压力作用下, 油液中夹带气体对体积弹性模量的影响。如果在大气压作用下的混气油液的体积为  $V_0$ , 纯油液的体积为  $V_1$ 。则在压力  $p$  作用下的混气油液的体积弹性模量  $k_m$  值, 按下式计算

$$k_m = \left( \frac{V_f/V_o + p_a/p}{V_f/V_o + k_t p_a/p^2} \right) \quad (1-9)$$

式中  $p_a$ ——大气压力

$k_t$ ——纯油液体积弹性模量。

## 二、流体的膨胀性

流体体积随着温度而变化的特性称为膨胀性。单位温升所引起的体积相对变化量称为体积膨胀系数，以  $\beta_t$  表示。当压力不变时，体积膨胀系数由下式确定

$$\beta_T = \frac{dV/V}{dt} = \frac{dV}{V dt} \quad (1-10)$$

式中  $dt$ ——为温度的改变量 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$\beta_t$ ——体积膨胀系数 ( $^{\circ}\text{C}$ ) $^{-1}$ 。

在一定压力作用下水的体积膨胀系数与温度的关系列于表1-6。实验指出，在一个大气压下，温度较低时 ( $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ )，温度每增高  $1^{\circ}\text{C}$ ，水的体积相对改变量仅为万分之 1.5，温度较高时 ( $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$ )，也只改变万分之 7。其它液体的膨胀系数亦很小。因此，在实际计算中除特殊需要外，一般不考虑液体的膨胀性。对于常用的液压油，膨胀系数的大小也只认为取决于油液密度。液压油的膨胀系数列于表1-7。

表1-6 水的膨胀系数  $\beta_T (1/^{\circ}\text{C})$

压力 (工程大气压)	温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
1	$14 \times 10^{-7}$	$150 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$556 \times 10^{-6}$	$719 \times 10^{-6}$
100	$43 \times 10^{-7}$	$165 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$548 \times 10^{-6}$	$704 \times 10^{-6}$
200	$72 \times 10^{-7}$	$183 \times 10^{-6}$	$426 \times 10^{-6}$	$539 \times 10^{-6}$	
500	$149 \times 10^{-7}$	$236 \times 10^{-6}$	$429 \times 10^{-6}$	$523 \times 10^{-6}$	$661 \times 10^{-6}$
900	$229 \times 10^{-7}$	$289 \times 10^{-6}$	$437 \times 10^{-6}$	$514 \times 10^{-6}$	$621 \times 10^{-6}$

表1-7 液压油的膨胀系数  $\beta_T (1/^{\circ}\text{C})$

$\rho (15^{\circ}\text{C})$	0.70	0.80	0.85	0.90	0.92
$\beta_t$	$8.2 \times 10^{-4}$	$7.7 \times 10^{-4}$	$7.2 \times 10^{-4}$	$6.4 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-4}$

对于气体，当压力或温度改变时，都将引起其体积、重度和密度的显著变化。对于完全气体可用状态方程式表示它们之间的关系。即

$$pv = RT \quad (1-11)$$

或

$$p/\rho = RT \quad (1-11a)$$

式中， $p$ ——气体的绝对压力 (帕)；

$v$ ——气体的比容 (米<sup>3</sup>/千克)；

$R$ ——气体常数 (米·牛/千克·开)

对于空气  $R = 287 \text{米} \cdot \text{牛} / \text{千克} \cdot \text{开}$ ;

$T$ ——热力学温度(开);

$\rho$ ——气体的密度(千克/米<sup>3</sup>)

[例1-3] 如图 1-1 所示的飞机液压系统中的油缸, 已知油缸内径  $d = 15\text{cm}$ , 长度  $L = 45\text{cm}$ , 油完全封闭在油缸内。试求

(1) 当油温由  $t_1 = -20^\circ\text{C}$  上升到  $t_2 = 20^\circ\text{C}$  时, 油液体积的增加值。设油的膨胀系数  $\beta_t = 6.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。

(2) 当油缸为绝对刚体时, 求此缸内的压力变化。设油的压缩系数  $\beta_p = 5 \times 10^{-6} \text{cm}^2 / \text{N}$ 。

[解] (1) 油原有体积为

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi}{4} d^2 L \\ &= \frac{\pi}{4} \times 15^2 \times 45 \\ &= 7952 \text{cm}^3 \end{aligned}$$

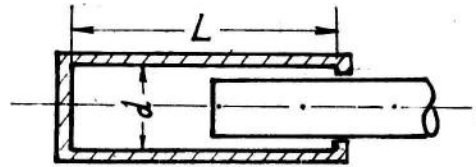


图 1-1

当温度变化为  $\Delta t = t_2 - t_1 = 20 - (-20) = 40^\circ\text{C}$  时, 油的体积增值为

$$\begin{aligned} \Delta V &= \beta_t \cdot V \cdot \Delta t = 6.5 \times 10^{-4} \times 7952 \times 40 \\ &= 206.7 \text{cm}^3 \end{aligned}$$

体积的相对增值为

$$\frac{\Delta V}{V} \times 100\% = 2.6\%$$

(2) 当液体体积增大  $\Delta V = 206.7 \text{cm}^3$  后, 若油缸体为绝对不变形, 势必将  $(V + \Delta V)$  的油液挤压在容积为  $V$  的油缸内, 使油液被压缩了  $\Delta V$ , 因而引起压力的增加为

$$\Delta p = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\beta_p} = \frac{206.7}{7952 \times 5 \times 10^{-6}} = 5190 \text{N/cm}^2.$$

## §1-5 流体的粘性

### 一、流体的粘性及其内摩擦定律

自然界一切实际流体都具有粘性, 流体的粘性是流体质点(或流层)间发生相对滑移时, 相邻质点(或流层)间产生切向摩擦力(或称粘性阻力)的性质。这种摩擦力产生于流体内部, 故称为内摩擦力。

我们可以用下面的实验, 说明流体的粘性产生内摩擦力。取两块平行平板, 假定它们相距  $h$ , 其间充满静止流体。下板固定不动, 上板以匀速  $U$  平行于下板运动时, 如图 1-2。

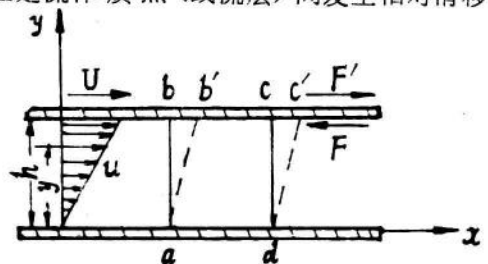


图 1-2

两板间的流体便发生不同速度的运动状态。即呈现出：附着在动板下面的流体层将以  $U$  的速度运动，愈往下速度愈小，直到附着在下面固定板上的流体层速度为零，形成这样的线性速度分布规律。

这一现象说明，每一运动较慢的流体层都是在运动较快的流体层带动下运动的。同时每一运动较快的流体层(快层)，也受到运动较慢的流体层(慢层)的阻碍而不能运动更快。可见，相邻流体层间发生相对运动或相对滑移时，必定产生切向摩擦阻力，若要维持这种运动，必须在上板施加与摩擦阻力  $F$  大小相等方向相反的切向力  $F'$ 。实验证明，流体内摩擦阻力的大小与速度  $U$  成正比，与接触面积  $A$  成正比，而与两板间距离  $h$  成反比，写成等式有

$$F = \mu A \frac{U}{h} \quad (1-12)$$

单位面积上的摩擦阻力称为切向应力，用  $\tau$  表示。

$$\tau = \mu \frac{U}{h} \quad (1-13)$$

一般情况下，流体流动的速度并不按直线变化，如图 1-3 所示。这样，我们可以取出一无限薄的流体层进行研究。坐标为  $y$  处的流速为  $u$ ，坐标为  $y+dy$  处的流速为  $u+du$ ，显然在厚度为  $dy$  的薄层中，速度梯度为  $du/dy$ ，将式 (1-13) 推广应用于流体的各个薄层，可得牛顿 (I. Newton) 内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

即作用在流层上的切向应力与速度梯度成正比，其比例系数  $\mu$  称为流体的动力粘度。同样的流体，其速度梯度大的，切应力大，能量损失也大；其速度梯度小的，切应力小，能量损失也小。当流体处于静止状态，或以相同的速度流动时，因为没有速度梯度，切应力为零，流体的粘性作用就显示不出来。

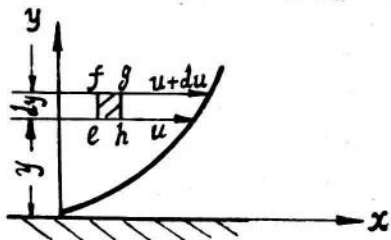


图 1-3

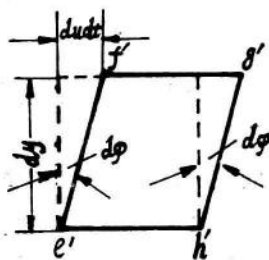


图 1-4

## 二、速度梯度

速度梯度  $du/dy$  是在垂直于流速的方向上单位长度内的速度增量。它的单位是 (1/秒)，它的大小表示流速在其法线方向上变化率的大小，也表示流体微团角变形速度的大小。这可证明如下：在运动流体中取出一正方形的流体微元平面，如图 1-3 阴影线所示。由于流层上、下的流速不相等，经过无限小的时间间隔  $dt$  之后，原来为正方形的流体微元平面  $efgh$ ，变形为菱形  $e'f'g'h'$ ，原来为直角的  $\angle hef$  变成锐角  $\angle h'e'f'$ ，角度减小了  $d\varphi$ ，如图 1-4 所示。于是，由几何关系可求得角变形速度  $d\varphi/dt$  如下



$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{du/dt}{dy} = \frac{du}{dy}$$

对于速度梯度为常数的情况，经过  $t$  时间后的角变形图示意于图1—2。因此，这就表明速度梯度实质上就是粘性流体运动时的角变形速度。

### 三、粘性系数

从(1-14)式，有

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-15)$$

因此，当  $du/dy=1$  时， $\mu = \tau$ ，即当速度梯度等于1时，在数值上  $\mu$  就等于接触面上的切应力，在速度梯度相同的情况下， $\mu$  值的大小，就显示出流体粘性的大小。

从(1-15)式知， $\mu$  的量纲为  $[F/L^2] \cdot [T]$ ，具有动力学量纲，故称为动力粘性系数，它的国际单位为 牛/米<sup>2</sup>·秒或帕·秒、千克/米·秒；它的绝对单位为 达因/厘米<sup>2</sup>·秒 = 泊 [此单位为泊肃叶(Poiseuille)所建立，而称泊]。实际应用中也常用厘泊，即1厘泊 = 0.01泊。它的工程单位为公斤力/米<sup>2</sup>·秒。

在流体力学的分析和计算中，常出现动力粘性系数  $\mu$  与流体密度  $\rho$  的比值，以符号  $\nu$  表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-16)$$

$\nu$  的国际单位和工程单位均为米<sup>2</sup>/秒，其绝对单位为厘米<sup>2</sup>/秒 = 斯 [此单位为斯托克斯(Stokes)所建立而称为斯]。实际应用中也常用厘斯，1厘斯 = 0.01斯。因为  $\nu$  具有运动学的量纲，故称为运动粘性系数。 $\mu$  与  $\nu$  的三种单位制换算关系，参见表1-1。

流体的粘度与温度和压力有关。

(1) 温度对流体粘度的影响很大，液体的粘度随温度上升而减小，气体的粘度随温度上升而增大。液体和气体的粘性之所以不同，主要是由于其分子运动和分子引力的特点不同。从微观分子结构来看，液体分子距离小，分子引力大，分子运动只是在原处摆动，液体层在作相对运动时，粘性阻力主要是分子引力所产生。当温度升高时，分子摆动加剧，因而更利于流层间作相对滑动；同时，分子引力随温度升高而减小，因此，其粘性也就随温度的升高而减小。气体的分子距离大，分子引力很小，分子运动比较剧烈，气体的粘性阻力主要是分子运动引起的分子掺混而产生的。至于分子引力引起的粘性阻力在气体中可以忽略不计，当温度升高时，气体分子运动加剧了，因此，粘性也就随温度升高而加大。

水的动力粘度与温度的关系，可近似地用下述经验公式计算

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-17)$$

式中  $\mu_0$ ——水在0℃时的动力粘度(千克/米·秒)；

$t$ ——水温的摄氏度数(℃)。

气体的动力粘度与温度的关系，可近似地用下述经验公式计算

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-18)$$

式中  $\mu_0$ ——气体在0°C时的动力粘度(千克/米·秒)；

$T$ ——气体的热力学温度(开)；

$C$ ——依气体种类而定的常数。

(1-18)式只适用于压力不太高(例如  $p \leq 10$  工程大气压)的场合,这时可视气体的粘度与压力无关。

常用气体的粘度、分子量和常数  $C$  列于表 1-8。水和空气的粘度随温度的变化列于表 1-9 和表 1-10。

表1-8 常用气体的粘度、分子量和常数  $C$

流体名称	$\mu_0 \times 10^6$ (千克/米·秒)	$\nu_0 \times 10^6$ (米 <sup>2</sup> /秒)	$M$ 分子量	$C$ 常数	备注
空气	17.09	13.20	28.96	111	标准大气压下
氧	19.20	13.40	32.00	125	0°C
氮	16.60	13.30	28.02	104	
氢	8.40	93.50	2.016	71	
一氧化碳	16.80	13.50	28.01	100	
二氧化碳	13.80	6.98	44.01	254	
二氧化硫	11.60	3.97	64.06	306	
水蒸汽	8.93	11.12	18.01	961	

混合气体的动力粘度可用下列近似公式计算

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-19)$$

式中  $\alpha_i$ ——混合气体中  $i$  组分气体所占的体积百分数；

$M_i$ ——混合气体中  $i$  组分气体的分子量；

$\mu_i$ ——混合气体中  $i$  组分气体的动力粘度。

表1-9 水的粘度与温度的关系(标准大气压)

温度 (°C)	$\mu \times 10^3$ (千克/米·秒)	$\nu \times 10^6$ (米 <sup>2</sup> /秒)	温度 (°C)	$\mu \times 10^3$ (千克/米·秒)	$\nu \times 10^6$ (米 <sup>2</sup> /秒)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表1-10 空气的粘度与温度的关系(标准大气压)

温度 (°C)	$\mu \times 10^6$ (千克/米·秒)	$\nu \times 10^6$ (米 <sup>2</sup> /秒)	温度 (°C)	$\mu \times 10^6$ (千克/米·秒)	$\nu \times 10^6$ (米 <sup>2</sup> /秒)
0	17.09	13.20	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.80	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.12	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

普通的压力对流体的粘度几乎没有什么影响，可以认为流体的粘度只随温度变化，但是，如果压力变化值大于200工程大气压时，影响就较显著，例如，水在 $10^5$ 工程大气压作用下的粘度为水在1工程大气压作用下的二倍。油液的粘度随压力的升高而增大的关系，可近似地用下列经验公式计算

$$\mu_p = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (1-20)$$

式中  $\mu_p$ ——压力为  $p$  时的动力粘度；

$\mu_0$ ——压力为 1 工程大气压时的动力粘度；

$\alpha$ ——粘压系数，取决于油的物理性质及温度，一般液压油  $\alpha = 0.002 \sim 0.003$  厘米<sup>2</sup>/公斤力。

油液粘度与温度的关系，在常用温度范围内(20°C~80°C)，可用下述经验公式计算

$$\mu_t = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (1-21)$$

式中  $\mu_t$ ——温度为  $t$  时的动力粘度；

$\mu_0$ ——温度为  $t_0$  时的动力粘度；

$\lambda$ ——油液的粘温系数，取决于油液的物理性质。对矿物系液压油可取

$$\lambda = (1.8 \sim 3.6) 10^{-2} 1/^\circ\text{C}.$$

国产液压油的运动粘性系数和粘温系数列于表 1-11。

### 流体粘度的测量

粘性系数是流体粘度大小的标志，粘性系数的测定方法有两大类。第一类是直接测定  $\mu$ ,  $\nu$  的数值，因此， $\mu$ ,  $\nu$  叫做绝对粘度，各种毛细管粘度计都是用来测定绝对粘度的，这种方法较难掌握。第二类是通过测量与其有关的其它物理量，再由有关方程进行计算而得到。例如，应用第五章中讨论的圆管层流，小雷诺数下运动的落球法都可以求得流体