

液压流体力学

苏尔皇 编



国防工业出版社

液 压 流 体 力 学

苏尔皇 编

國防工業出版社

内 容 简 介

本书主要讨论与液压技术有关的流体力学规律,包括液体的力学普遍规律和结合液压技术的各种应用;并讨论了管道中的压力脉动和管道动态理论,以及一维气体力学的基础知识。书中附有对设计计算有实用意义的数据、图表、曲线和适用于读者自学的每章内容总结、例题、思考题及习题。

本书为高等工业院校液压传动专业《液压流体力学》课程的教材,亦可供从事液压技术研究、设计和应用的工程技术人员参考。

液 压 流 体 力 学

苏尔皇 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张 16¹/₈ 373 千字

1979年12月第一版 1982年6月第二次印刷 印数: 9,201—18,600册

统一书号: 15034·1945 定价: 1.70元

前 言

本书是液压传动专业的技术基础课程教材。书中讨论液压技术所使用的工作流体的力学规律和流体在液压元件及系统中的力学行为。这些规律和行为将构成液压技术的工作原理和流体动力分析及计算的理论根据。

本书是根据一九七八年六机部所属高等院校液压传动专业教材会议拟定的液压流体力学课程教材编写大纲的内容编写的。编写时考虑到液压技术对液压流体的力学知识要求,并总结了历届教学实践的经验,力求既能具有完整的理论基础,又能结合液压技术的实际,并吸收国内外先进技术成果和反映现代科学技术水平。本书基本上是按照由浅入深的教学顺序编写的,在每章的最后附有本章内容总结及思考题以帮助读者学习。习题课的内容包含在例题和运算练习中。与每章配合的实验本书未予编入。书中内容较实际教学内容稍多,教学所需以外的部分都在每章的内容总结中加以说明。

本书共分十二章。

本书初稿内容的绝大部分曾作为教材试用过,这次又经修订和补充,但限于水平,不足之处一定很多,希望广大读者批评指正。

本书经上海交通大学朱世权和张培生二同志审定并提出许多有益的建议。哈尔滨工业大学液压传动教研室的同志们曾给予本书以多方面的具体的帮助,在此特表示深切的感谢。

目 录

主要使用符号表	1	第五章 流动液体的力学基本规律 II	74
第一章 绪论	3	5.1 流动液体的连续微分方程	74
1.1 液压流体力学研究的对象及其 工程实用意义	3	5.2 流动液体的运动微分方程	75
1.2 液压流体力学研究的方法	3	5.3 流动液体的力学问题解法概述	81
第二章 流体的力学性能	4	5.4 液体流场的数值计算方法概要	82
2.1 流体的力学概念及作用于流体上的力 的性质分析	5	5.5 相似理论和因次分析方法	91
2.2 流体的密度、重度 and 比重	7	本章内容总结	99
2.3 流体的热膨胀率、压缩率和体积 弹性系数	8	思考问题和运算练习	99
2.4 流体的粘度	10	第六章 液体在管道中的恒定流动	101
2.5 液体的含气量、空气分离压和 饱和蒸汽压	15	6.1 圆管中的匀速流动	101
2.6 液体的表面张力	16	6.2 非圆形断面管中的匀速流动	112
本章内容总结	16	6.3 进口起始段内的流动	114
思考问题和运算练习	16	6.4 局部损失和等管长	115
第三章 静止液体的力学基本规律	18	6.5 管道系统能量损失计算	123
3.1 静止液体中的压力及其性质	18	6.6 推荐流速和管道设计	126
3.2 静止液体中的压力分布规律	19	本章内容总结	128
3.3 静止液体的平衡微分方程及其应用	23	思考问题和运算练习	128
3.4 压力的传递	27	第七章 液压冲击和压力脉动	133
3.5 压力的测示单位及其能量意义	28	7.1 液压冲击现象的物理过程	133
3.6 压力对固体壁面的总作用力	30	7.2 液压冲击最大压力升高值计算	135
本章内容总结	35	7.3 直管中的液压冲击波及压力 脉动的传递和反射	138
思考问题和运算练习	35	7.4 直径突变的串联管道中的液压冲 击波和压力脉动的传递和反射	143
第四章 流动液体的力学基本规律 I	41	7.5 分支管道中的液压冲击波和压力 脉动的传递和反射	147
4.1 流动液体的运动状态和液流的数 学模型	41	本章内容总结	152
4.2 连续方程	52	思考问题和运算练习	152
4.3 能量方程	53	第八章 管道系统动特性	154
4.4 动量方程和动量矩方程	63	8.1 管道系统动特性基本方程	154
4.5 能量损失	68	8.2 管道系统动特性基本方程应用举例	160
本章内容总结	69	8.3 管道中的非恒定流动问题解法概要	165
思考问题和运算练习	70	本章内容总结	167
		思考问题和运算练习	167
		第九章 节流、射流和气穴现象	168

9.1 节流	168	10.11 圆锥环形间隙中沿锥面形 成线的流动	209
9.2 射流	175	本章内容总结	209
9.3 气穴现象	178	思考问题和运算练习	209
本章内容总结	180	第十一章 液压支承原理	212
思考问题和运算练习	180	11.1 可用作液压支承的液流效应	212
第十章 液体在间隙中的流动	183	11.2 动压支承计算	216
10.1 平行平板间隙中的平行流动	183	11.3 静压支承计算	218
10.2 倾斜平板间隙中的平行流动	189	本章内容总结	232
10.3 曲线型间隙中的平行流动	192	思考问题和运算练习	232
10.4 同心圆柱环形间隙中的平行流动	193	第十二章 一维气体力学基础知识	234
10.5 偏心圆柱环形间隙中的平行流动	196	12.1 准备知识	234
10.6 圆柱与圆锥构成的环形间隙中的 平行流动	198	12.2 恒定一维气体流动的基本方程	240
10.7 平行平板间隙中的旋转剪切流动	199	12.3 气体经短管和孔口的恒定过流	243
10.8 同心圆柱环形间隙中的旋转 剪切流动	201	12.4 管道中气体的恒定流动	248
10.9 偏心圆柱环形间隙中的旋转 剪切流动	203	本章内容总结	251
10.10 平行平板间隙中的径向流动	204	思考问题和运算练习	251
		参考文献	252

主要使用符号表

A	功	m	指数
$A、B、C$	点号；面号；常数；系数； 面积；长度	N	函数；功率；单位质量力在 n 方向的分量
C	比热；流量系数	Ne	牛顿数
a	加速度；音速	n	法线方向单位向量；转速； 指数；编号
$\mathbf{a}$	加速度向量	P	外作用力；法向总作用力
$a、b、c$	点号；系数；长度	p	压力
$D、d$	管道内直径	$\bar{p}$	压力的时间平均值
D_e	当量直径	$Q、q$	流量；热量
$^{\circ}E$	恩氏粘度	$R、r$	半径
E	材料弹性系数	R	总作用力；反作用力；气体 常数；反射系数
Eu	欧拉数	$^{\circ}R$	雷氏粘度
e	偏心率；内能	Re	雷诺数
F	单位外质量力；作用力	S	面积；通过系数
Fr	佛累德数	St	斯特罗哈数
f	函数	s	拉氏算符
G	重量	T	切向总作用力；周期；时间 间隔；绝对温度
g	地心引力加速度	t	时间；摄氏温度
H	高度；有效压差	U	函数；平均牵连速度
h	淹没深度；能量损失	u	点上的牵连速度
h_λ	沿程能量损失	V	体积
h_c	局部能量损失	v	比容
J	热功当量；刚度	V	断面平均流速
J	贝塞尔函数	$\mathbf{V}$	速度向量
J_{xx}	惯性矩	v	点上的流速
J_{xy}	惯性积	$\mathbf{v}$	点上的流速向量
j	加速度	$\bar{v}$	点上流速的时间平均值
K	体积弹性系数；系数	W	相对断面平均流速；周边 长度
K_e	表观体积弹性系数	w	点上的相对流速
k	系数		
$L、l$	长度		
M	质量；真空度；压力；力矩； 点号；马赫数		

$X、Y、Z$	单位外质量力的沿坐标分量	η	效率; 系数
Z_0	管道特性阻抗	Θ	单位质量力的圆周分量
$x、y、z$	坐标	θ	角度
$\alpha、\beta、\gamma$	方向角; 角度; 系数	λ	沿程损失系数; 系数
α	动能修正系数; 热膨胀率; 空气溶解量	μ	动力粘度
α_0	动量修正系数	ν	运动粘度
β	压缩率	ρ	密度
Γ	管道的传递系数	σ	应力; 气穴系数
γ	重度	τ	切应力
Δ	粗糙度	φ	角度; 系数
δ	比重; 管道壁厚; 缝隙高度	χ	湿周
ε	偏心率	ψ	流函数
ζ	局部损失系数	ω	角速度; 角频率

第一章 绪 论

1.1 液压流体力学研究的对象及其工程实用意义

液压流体力学是研究流体的整体机械运动规律，以及运用这些规律进行液压技术工程计算的科学。

液压技术以油液和气体等流体作为工作介质。在液压系统中，动力机构的固体机械能以外作用力的形式作用于流体，使其在包围它的固体边界的约束下，产生一定的整体机械运动，并以一定的规律把能量传递到执行机构，再以相反的形式转变为执行机构的机械能。在此过程中，最基本的就是本课程所讨论的外作用力与流体的惯性反作用力两方面的对立统一规律。这种对立统一的矛盾决定了流体在液压系统和元件内部的运动情况，同时也就决定了系统和元件的工作性能。所以，本课程是液压气压系统和元件内部工作过程及流体动力计算的理论基础，是正确分析和应用这些系统和元件的理论依据。

1.2 液压流体力学研究的方法

本课程讨论的内容属于技术科学，其研究问题的方法大致按如下的步骤进行：

(1) 从液压技术的生产实践中提取具有普遍性的问题作为研究的对象。

(2) 通过实践和实验来认识问题的本质。这包括弄清问题的要点，问题中对现象起主要作用的因素和次要的因素，问题中对现象本身不起多大作用因而可以略去不计的因素等等。

(3) 建立数学模型。模型是形象化了的自然现象。是通过对现象本质的认识，吸收一切主要因素，略去一切次要因素后创造出来的一个理想结构物。同一对象，在不同的问题中，可能因为侧重的本质不同而建立起完全不同的、甚至互相矛盾的模型，但却可通过对象本身的全面性质而统一起来。建立模型也就是假设，也就是对客观事物的简化处理，这是整个研究过程中最困难最易出错的地方。由于人们通过实践和实验所观察的终究只是有限数量的事实，所以是否已真正抓住了问题的本质需要慎重探讨。如果假设，也就是模型本身就不合理，则研究所得必将是谬误的结论。

(4) 在模型的基础上进行解析计算，从而获得理论的定量关系。

(5) 通过实践检验和修正理论，再用理论来指导和预见实践。所建立的模型是否合理必须在实践中加以检验和修正。并且不能忘记被我们忽略掉的各种因素，有时必须计及这种因素才能导致问题的精确解答，所以只有通过实践的检验，然后理论才能成立。正确的理论的价值在于能用以指导和预见实践。从实践得到的理论还必须回到实践。这是一切科学发展的共同道路。

第二章 流体的力学性能

要研究流体——包括液体和气体——的力学行为，首先需了解流体与力学有关的各种性能。在一般的力学过程中，通常都只有几种性能在起主导的作用，因而可以从工程实用的观点出发，对所讨论的过程加以简化，从而获得抽象的研究对象。往往只有这样才能使科学分析得以顺利进行。本章是为分析在哪些情况下可以取舍哪些性能做初步准备的。更多的简化抽象措施将在书中需要的地方陆续提出。

本章主要介绍液体的力学性能。气体的力学性能只在其与液体相同或密切相关时才加以论及，其与液体不同的部分将在第十二章中介绍。

在计算流体的力学问题时，必然要联系到各种单位。在不同的度量衡制度中，同一种量可有不同的单位，计算时常常容易混淆以致造成错误，为明确起见，在这里先介绍度量衡制度。

目前世界上使用的度量衡制度分公制和英制两大类。在公制和英制中，又各包含绝对制和工程制两种。绝对制和工程制的区别在于它们选用的基本度量单位不同，任何一个力学度量衡制度都应包含三个基本单位，这就是长度、质量或力、时间。其它各种力学度量单位都可由这三个基本单位组合而成。在绝对制中以长度、质量、时间为基本单位；在工程制中以长度、重量、时间为基本单位。公制绝对制中根据所用基本单位的尺度不同又分为厘米·克·秒制即 CGS 制和米·千克(公斤)·秒制即 MKS 制两种。MKS 制于 1960 年被定为国际单位制 SI 中的力学单位。各单位制使用的单位名称及代号如表 2-1 所示。

表 2-1

单 位 制		长 度		质 量		重 量(力)		时 间		备 注
		名称	代号	名称	代号	名 称	代 号	名称	代号	
公 制	绝对制	厘米	cm	克	g	达 因	dyn	秒	s	又名 CGS 制
		米	m	千 克 (公斤)	kg	牛 顿	N	秒	s	又名 MKS 制
	工程制	米	m			公斤力	kgf	秒	s	又名 MKFS 制
英 制	绝对制	英尺	ft	磅	lb			秒	s	
	工程制	英尺	ft			磅 力	lbf	秒	s	

在公制绝对制中，1 克的质量相当于 1 厘米³的蒸馏水在 4℃时的质量，1 千克的质量称千克又称公斤。力的单位称达因，它相当于给 1 克质量以 1 厘米/秒²的加速度所需要的力。10⁵ 达因称为 1 牛顿。在公制工程制中，1 公斤力相当于给 1 公斤的质量以 9.81 米/秒²的加速度所需要的力。

我国以前都用公制工程制，今后将逐步改用国际单位制。因此，本书使用国际单位制及允许和国际单位并用的单位。二者及其换算关系，见表 2-2。

表 2-2

物理量 名称	SI 制		公制工程制		换算关系
	名称	代号	名称	代号	
长度	米	m	米	m	
时间	秒	s	秒	s	
质量	千克	kg	质量工程单位	kgf·s ² /m	
力	牛顿	N	公斤力	kgf	1 kgf = 9.81 N ≈ 10 N
压力	帕斯卡	$P_a = \left[\frac{N}{m^2} \right]$		kgf/cm ²	1 kgf/cm ² = 9.81 × 10 ⁴ P _a
密度		kg/m ³		kgf·s ² /m ⁴	1 kgf·s ² /m ⁴ = 9.81 kg/m ³
粘度	帕秒	P _a ·s		kgf·s/m ²	1 kgf·s/m ² = 9.81 P _a ·s
能，功	焦耳	J = [N·m]	公斤力·米	kgf·m	1 kgf·m = 9.81 J
功率	瓦	$W = \left[\frac{J}{s} \right]$		kgf·m/s	1 kgf·m/s = 9.81 W

注：压力单位 P_a 数值大小使用不便，因而允许并用巴(bar)和标准大气压(atm)，其相互关系为：

1 P_a = 1 × 10⁻⁵ bar = 9.86923 × 10⁻⁶ atm。从而粘度单位允许并用巴秒(bar·s)。1 bar·s = 1 × 10⁵ P_a·s；运动粘度用[m²/s]或[cm²/s]。

2.1 流体的力学概念及作用于流体上的力的性质分析

1. 流体的力学概念

力学上，我们把流体看成是由极其微小，在空间仅占有位置的位置的质点所组成的微团构成的，连续的，易于流动的介质。

事实上，从微观的观点看来，流体是由一个一个的、不断不规则地运动着的分子组成的。分子间存在着间隙，它们是不连续的。但就工程技术来说，哪怕是在最小的计算单位所规定的空间里，仍然包括了不可数计的分子。这些分子总在永恒不息地运动着，从宏观上看来都处于平衡的状态。我们的任务只在求流体分子所表现出来的平均性质。所以完全可以把流体看成是一种连续的介质。这一假定的正确性已为无数事实所证明。根据连续性假定流体的一切物理量在其存在空间就都是连续的、可微的，就有可能利用解析数学连续函数理论上所取得的一切成就作为我们研究的工具。

在一般的情况下，本书研究的是均质的，即在整个存在空间其质量均布的液体。但在某些特定的情况下或在研究气体流动时，我们将把研究对象看成是非均质的。

我们又把液体看成是易于流动的介质，它的质点与质点间的凝聚力极小以致于不能抵抗任何拉力而只能存在压力。质点间不能抵抗剪切变形而只能对变形速度呈显阻力。无数的质点组成液体整体，它具有良好的流动性。它本身没有固定的形状，但能取得所处容器的形状。这一假定在连续性假定的基础上从工程上看来也是完全合理的。

以上的工程上完全允许的假定，将在科学分析上带来巨大的便利。

2. 作用于流体上的力的性质分析

我们从所研究的流体中取出一块体积，兹研究作用于此体积上的力。作用于此体积上的力可分为质量力和表面力。

(1) 质量力

质量力作用于所研究流体的所有质点上，它可以是由于其它物体对所研究的流体的作用而真实地加于流体上的，诸如重力等。这类质量力一般又称之为外质量力。质量力还可以是由于所研究的流体具有加速度，根据达朗贝尔原理而虚拟地加于流体上的，诸如离心力等，这类质量力一般称之为惯性力。

质量力为向量，它与所研究的流体的质量成正比，因此，宜用单位质量所受的质量力来度量其大小。单位质量所受的质量力叫单位质量力。单位外质量力将用 F 表示，而以 X 、 Y 、 Z 表示其沿坐标 x 、 y 、 z 的分量。单位惯性力等于所研究的流体所具有的加速度 a 而逆其方向。单位质量力为单位外质量力和单位惯性力之和，它可以写成 $(F-a)$ 。

(2) 表面力

表面力作用于所研究的流体的外表面上。如所研究的流体是从流体整体中取出的一部分，则对流体整体来说，此表面力将表现为内力。表面力为向量，它与所作用的面积大小成正比，因此，宜用单位面积上所受的表面力来度量其大小。单位面积上所受的表面力叫内应力或简称之为应力。通常都将内应力分解为沿法线方向的分量和沿切线方向的分量而分别研究之，此两分量可认为是非向量。由于流体不能承受拉力，故内应力的法线方向的分量必然沿作用面的内法线方向，也就是说必然是个压应力，或简称之为压力。内应力的切线方向的分量叫切应力，或简称之为切力。

为确定作用于所研究表面的某点 A 上的表面力的大小，可取包含该 A 点在内的所研究表面上的微元面积 ΔS ，以作用于 ΔS 上的表面力为 ΔP ，其法向分量为 Δp ，切向分量为 $\Delta \tau$ ； ΔP 、 Δp 和 $\Delta \tau$ 分别称为 ΔS 面上的应力、压力和切力的总作用力。比值

$$P = \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad p = \frac{\Delta p}{\Delta S} \quad \text{和} \quad \tau = \frac{\Delta \tau}{\Delta S}$$

分别称为 ΔS 面上的平均应力、平均压力和平均切力。令面积 ΔS 向 A 点收缩到零，于是上述诸比值将趋向于某极限

$$\begin{aligned} P_A &= \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \\ p_A &= \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta S} \\ \tau_A &= \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \tau}{\Delta S} \end{aligned} \tag{2-1}$$

此极限值 P_A 、 p_A 和 τ_A 分别称为作用于所研究的表面的 A 点上的应力、压力和切力。

切力中包括表面张力和粘性内摩擦力，表面张力在液压技术上一般均不予考虑，至于压力和粘性内摩擦力，我们将于以后在适当的地方再加以详细地讨论。

2.2 流体的密度、重度和比重

1. 密度

某一流体微团的质量 ΔM 与其体积 ΔV 之比, 当 ΔV 向微团中的某点收缩到零时, 其比值的极限值称为该流体在该点的密度 ρ

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV}$$

对均质流体, 设其体积 V 中的质量为 M , 则此流体的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{M}{V}$$

2. 重度

如把 1. 中的质量换成重量 ΔG 和 G , 则可得重度 γ 的定义及其表达式如下

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV}$$

对均质流体

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

据力学第二定理有

$$G = Mg$$

故有

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (2-2)$$

在 SI 制中不使用重度的概念, 当遇到 γ 时通常均直接以 ρg 表示之。

3. 比重

某种均质流体, 其重量与一标准大气压力下温度 4°C 时同体积蒸馏水重量之比称为该流体的比重, 通常以符号 δ 表示:

$$\delta = \frac{\text{一定体积的某种均质流体的重量}}{1 \text{ 标准大气压力下 } 4^\circ\text{C} \text{ 时同体积蒸馏水的重量}}$$

比重 δ 为一无量纲量。

由上所述可知, 在视 g 为不变常数的条件下, 密度、重度和比重是用以衡量流体质量的完全等价的参数。只要确定了其中的一个, 则另两个也就随之而定。

表 2-3 列出了 1 atm 压力下几种常见均质流体的密度和比重以供参考之用。

流体的密度和比重都是压力和温度的函数。以密度为例, 在一般情况下, 其与压力和温度之间有如下的关系:

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial t} (t - t_0) + \frac{\partial \rho}{\partial p} (p - p_0) = \rho_0 [1 - \alpha (t - t_0) + \beta (p - p_0)]$$

$$\alpha = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\beta = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial p} = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p}$$

式中, ρ 、 p 、 t 分别为流体的密度、压力和温度在其初始值 ρ_0 、 p_0 、 t_0 附近的值; V 则为其初始时之总体积; α 和 β 分别称为流体的热膨胀率和压缩率, 其说明见 2.3 节。

表 2-3

类 别	温度 t / °C	密度 [千克/米 ³]	比 重
空 气	0	1.293	0.00129
蒸 馏 水	4	1000	1
海 水	15	1020~1030	1.02~1.03
乙 醚	0	740	0.74
酒 精	15	790~800	0.79~0.80
甲 醇	4	810	0.81
飞机汽油	15	650	0.65
普通汽油	15	700~750	0.70~0.75
煤 油	15	750	0.75
矿物油系液压油	15	850~900	0.85~0.90

2.3 流体的热膨胀率、压缩率和体积弹性系数

1. 热膨胀率

当流体的温度发生变化时, 其体积产生相应的变化的性质叫热膨胀性, 热膨胀性的大小可用热膨胀率 α 来衡量。其定义为: 当流体的温度改变 1°C 时, 其体积 V 的相对变化值, 即

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t} [1/^\circ\text{C}]$$

从工程实用的观点看来, 可认为 α 是只取决于流体本身而与压力及温度无关的常数, 对常用的液压油, 其数值可参阅表 2-4。

表 2-4

15°C 时的比重	0.70	0.80	0.85	0.90	0.92
α	8.2×10^{-4}	7.7×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}

2. 压缩率和体积弹性系数

流体受压力的作用发生体积变化的性质叫压缩性。压缩性的大小可用压缩率 β 来衡量。其定义为: 当流体所受的压力改变一巴时, 其体积 V 的相对变化值, 即

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} [1/\text{巴}]$$

式中, ∂V 表示原来压力为 p 体积为 V 的流体, 当压力增加到 $p + \partial p$ 时, 其体积减少的数量。由于希望 β 为正值, 而当压力增加 ∂p 为正值时, 体积总是减少 ∂V 为负值, 所以在上式的右边要加一负号。

还可以用压缩率 β 的倒数 K 来衡量流体的压缩性, K 称为体积弹性系数或体积弹性模数。

$$K = \frac{1}{\beta} = -\partial p \frac{V}{\partial V} \text{ (巴)}$$

液体的体积弹性系数 K 值随压力和温度的变化而变化并与压缩的过程有关, 等温压缩和绝热压缩的 K 值略有不同。但从工程实用的观点看来, 可认为 K 只取决于流体本身。对常用的不混有空气的矿物油系液压油, 可取 $\beta = 5 \sim 7 \times 10^{-5} \text{ 1/巴}$; $K = 1.4 \sim 2.0 \times 10^4 \text{ 巴}$ 。如油中混有空气, 则其压缩性将显著增加。例如, 油中混有 1% 空气时, K 值将降到纯油的 5% 左右。油中混有 5% 空气时, K 值将降到纯油的 1% 左右。

由上述 β 和 K 的数值可知, 如压力变化不大, 则液体体积的变化很小, 故在讨论液压系统的静态性能时, 通常都允许把液体看成是不可压缩的。但在讨论液压系统的动态性能时, 由于压力变化很大, 液体的压缩性将成为影响系统刚度的重要因素。此外, 油中混入空气的压缩性和管道容器等用以封闭液体的固体壁面的变形将与液体的压缩性完全相同地影响系统的刚度, 因此, 宜将它们作为一个整体来讨论其压缩性而引用表观体积弹性系数 K_e 的概念以代替 K , K_e 的意义如下。

设有如图 2-1 所示的容器, 其中液体所占容积为 V_l , 气体所占容积为 V_g , 其总容积为 V_t ; $V_t = V_l + V_g$; 其压力为 p , 当压力由 p 增至 $p + \Delta p$ 后, 其总容积变为 $V_t + \Delta V_t$, 此时, 气体的被压缩量为 $-\Delta V_g$, 液体的被压缩量为 $-\Delta V_l$, 容器的固壁膨胀出 ΔV_e 的容积, 于是

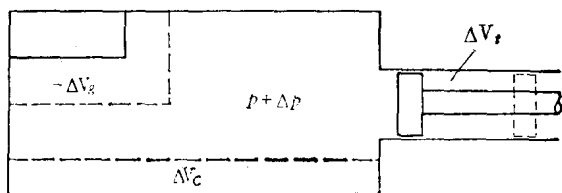


图 2-1

$$\Delta V_t = -\Delta V_g - \Delta V_l + \Delta V_e$$

兹定义表观体积弹性系数 K_e 为:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{\Delta V_t}{V_t \Delta p} = \frac{V_g}{V_t} \left(-\frac{\Delta V_g}{V_g \Delta p} \right) + \frac{V_l}{V_t} \left(-\frac{\Delta V_l}{V_l \Delta p} \right) + \left(\frac{\Delta V_e}{V_t \Delta p} \right)$$

$$\text{液体的体积弹性系数} \quad K = -\frac{V_l \Delta p}{\Delta V_l}$$

$$\text{气体的体积弹性系数} \quad K_g = -\frac{V_g \Delta p}{\Delta V_g}$$

可定义封闭容积的体积弹性系数 K_e 为:

$$K_e = \frac{V_t \Delta p}{\Delta V_e}$$

从而可得

$$\frac{1}{K_e} = \frac{V_g}{V_t} \left(\frac{1}{K_g} \right) + \frac{V_l}{V_t} \left(\frac{1}{K} \right) + \frac{1}{K_e}$$

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_e} + \frac{1}{K} + \frac{V_g}{V_t} \left(\frac{1}{K_g} - \frac{1}{K} \right)$$

对一般的液压系统, 可认为容积变形主要由管道产生, 在此假定条件下可取:

$$K_e = \frac{\delta E}{D}$$

此处, D 为管道的内径; δ 为管道的壁厚, 对常用钢质油管 $\frac{D}{\delta} = 6.1 \sim 13.2$; E 为管材的弹性系数, 对钢材, 可取 $E = 2.1 \times 10^6$ 巴; K 为所用液体其中不混有空气时的体积弹性系数; $\frac{V_g}{V_l}$ 为油中混入空气的相对量, 其值需按具体情况确定。对等温过程可取 $K_g = p$ 。对绝热过程可取 $K_g = 1.4 p$ 。此处, p 为空气承受的压力, 在计算液压系统的动态性能时, 通常都认为过程是绝热的。

2.4 流体的粘度

2.4.1 粘度的定义及其测示单位

流体在外力作用下流动时, 流体微团间有相对运动并从而产生摩擦力, 流体的这种内部产生内摩擦力的性质称为粘性。流体流动时才会出现粘性。静止不动的流体不呈现粘性。粘性所起的作用为阻滞流体内部的相互滑动, 在任何情况下它都只能延缓滑动的过程而不能消除这种滑动。

粘性的大小可用粘度来衡量, 粘度是选择液压用流体的主要指标, 是影响流体流动的重要力学性能。

流体流动时, 流体与固体壁面的附着力及流体本身的粘性使流体内各处的速度大小不等, 以流体沿如图 2-2 所示的平行平板间的流动情形为例, 设上平板以速度 V_0 向右运动, 下平板固定不动。紧贴于上平板上的流体粘附于上平板上, 其速度与上平板相同。紧贴于下平板上的流体粘附于下平板上, 其速度为零。中间流体的速度按线性分布。我们把这种流动看成是许多无限薄的流体层在运动, 当运动较快的流体层在运动较慢的流体层上滑过时, 两层间由于粘性就产生内摩擦力的作用。根据实际测定的数据得知, 流体层间的内摩擦力 T 与流体层的接触面积 S 及流体层的相对流速 dv 成正比, 而与此二流体层间的距离 dz 成反比, 即

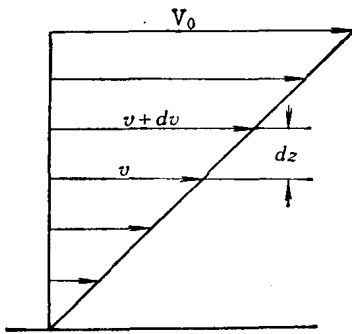


图 2-2

$$T = \mu S \frac{dv}{dz}$$

以 $\tau = \frac{T}{S}$ 表示切应力, 则有

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (2-3)$$

$\frac{dv}{dz}$ 称为流速梯度, 或称剪切率。 μ 称为流体的粘度, 它为一能衡量流体粘性的比例系数。当流速梯度变化时, μ 为不变常数的流体称为牛顿流体, μ 为变数的流体称为非牛顿流体。除高粘性或含有大量特种添加剂的液体外, 一般的液压用流体均可看作是牛顿流体。

流体的粘度通常有三种不同的测示单位。

1. 绝对粘度 μ

绝对粘度又称动力粘度，它直接表示流体的粘性即内摩擦力的大小。它之所以称为动力粘度是因为在它的量纲中有动力学的要素力的缘故。

2. 运动粘度 ν

运动粘度是绝对粘度 μ 与密度 ρ 的比值：

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

运动粘度 ν 没有什么明确的物理意义，它不能象 μ 一样直接表示流体的粘性大小，但在 ρ 值相近的流体，例如各种矿物油系液压油之间，还是可用来大致地比较它们的粘性。由于在理论分析和计算中常常碰到绝对粘度与密度的比值，为方便起见才采用运动粘度这个单位来代替 $\frac{\mu}{\rho}$ 。它之所以被称为运动粘度，是因为在它的量纲中只有运动学的要素长度和时间的缘故。

绝对粘度和运动粘度常用 CGS 制来度量，在 CGS 制中，绝对粘度的单位为达因·秒/厘米² 或称泊。运动粘度的单位为厘米²/秒或称沱。1% 沱称为厘沱。其与 SI 单位制及公制工程制间的关系如下：

$$1 \text{ 泊} = 10^{-1} \text{ 帕秒} = 0.0102 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒} / \text{米}^2;$$

$$1 \text{ 沱} = 100 \text{ 厘沱} = 10^{-4} \text{ 米}^2 / \text{秒}。$$

机械油的牌号上所标明的号数就是表明该油以厘沱为单位的，在温度 50℃ 时运动粘度 ν 的平均值。例如 10 号机械油指明该油在 50℃ 时其运动粘度 ν 的平均值是 10 厘沱。蒸馏水在 20.2℃ 时的运动粘度 ν 恰好等于 1 厘沱，所以机械油的牌号可以确实地帮助我们说明该油的运动粘度。例如 20 号油说明该油的运动粘度约略为水的运动粘度的 20 倍，30 号油的运动粘度约略为水的运动粘度的 30 倍，如此类推。

动力粘度和运动粘度是理论分析和推导中经常使用的粘度单位。它们都难以直接测量，因此，工程上采用另一种可用仪器直接测量的粘度单位，即相对粘度。

3. 相对粘度

相对粘度又称条件粘度，它是使用特定的粘度计在规定条件下可以直接测量的粘度，根据测定条件的不同，各国采用的相对粘度单位不同，美国用赛氏粘度 SSU，英国用雷氏粘度°R，我国和德国、苏联用恩氏粘度°E。

恩氏粘度适用于液体，它是被测液体与水的粘性的相对比较值。它用恩氏粘度计来测定。其办法是在某个标准温度 t 下，将被试液体 200 厘米³ 装入恩氏粘度计的容器中，测定这些液体经容器底部小孔（直径 $\phi 2.8\text{mm}$ ）流尽的时间 t_1 ，又在 20℃ 时将 200 厘米³ 的蒸馏水装入恩氏粘度计的同一容器中，测出这些水经容器底部小孔流尽的时间 t_2 。时间 t_1 和 t_2 的比值就是被试液体在该标准温度 t 下的恩氏粘度

$$^{\circ}E_t = \frac{t_1}{t_2}$$

式中， t_1 为 200 厘米³ 的被试液体在温度 t 下流尽的时间（秒）， t_2 为 200 厘米³ 的蒸馏水在温度为 20℃ 时流尽的时间（秒）， t_2 的平均值是 51 秒。