

448

高等学校试用教材

液压流体力学

浙江大学 盛敬超 编

机械工业出版社

高等学校试用教材

液 压 流 体 力 学

浙江大学 盛敬超 编



机 械 工 业 出 版 社

液 压 流 体 力 学

浙江大学 盛敬超 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $21 \frac{1}{4}$ · 字数 520 千字

1980年5月北京第一版·1981年5月北京第二次印刷

印数 18,801—26,300 · 定价 2.00 元

*

统一书号: 15033 · 4855

编 者 的 话

流体力学内容十分广泛，各工程技术部门对它的要求不尽相同，因此需要有不同类型的教材。本书是为机械类液压传动及控制专业编写的，在阐明基本理论的基础上，适当地应用这些理论来研究专业中有关的问题，并反映当前科学的发展水平。这样不仅使它与专业实际有所结合，而且也使基础理论得到加强。因此本书内容力求系统地讲述流体运动的基本规律，着重阐明基本概念和处理问题的方法，对液压技术中某些流体力学问题也作了一定程度的探讨。

本书共十章，前六章为基础部分，每周讲授3~4学时，一学期可以修毕，这部分也可供机械制造类专业选作“工程流体力学”的教材。后四章如缝隙流动、往复运动密封、静压支承和管道非恒定流（管道动特性）都是液压技术中经常遇到的问题，虽属专题性质，本书用流体力学的基本理论予以探讨，这部分每周讲授2~3学时可供一学期之用。如果学时较少，可以略去打*号的节段，不会影响全书的连贯性。由于液压技术的应用日趋广泛，本书也可供有关技术人员作参考。

本书是根据1978年9月在兰州召开的第一机械工业部高等院校水力机械、液压传动专业教材编审会议通过的教学大纲编写的。编写过程中参考了吕世磐同志和我合写的“水力学”讲义和洪速吉同志编写的“流体力学”讲义，并承林建亚、蒋泳泉、沈之敏、杨余庆、凌俊杰、路甬祥等同志校阅了部分手稿，梁钧陶同志给我很多帮助。全书由哈尔滨工业大学许耀铭同志负责审阅。最后，第一机械工业部教材编辑室孙祥根同志对本书作了细致的校订工作。以上同志提出了很多宝贵意见，一并在内致谢！

一九七九年三月于杭州求是邨

目 录

第一章 绪论	7
§ 1-1 研究流体力学的方法	1
§ 1-2 流体的概念	2
§ 1-3 关于单位制	3
§ 1-4 流体中的作用力	5
§ 1-5 密度、重度、比容和比重	6
§ 1-6 流体的压缩性和热膨胀性	8
§ 1-7 流体的粘性	10
§ 1-8 流体的热容量和比热	14
§ 1-9 流体的含气量、空气分离压和汽化压	15
第二章 流体静力学	16
§ 2-1 静压强	16
§ 2-2 流体静力学的平衡方程式	17
§ 2-3 在重力场中不可压缩性流体的平衡	19
§ 2-4 大气压强、绝对压强和相对压强	21
§ 2-5 压强的测量	22
§ 2-6 液体的相对平衡	25
§ 2-7 液体对壁面作用力的计算	28
§ 2-8 浮力	31
§ 2-9 流体静力学在液压技术中的应用	31
第三章 流体运动学	34
§ 3-1 流体运动的基本概念	34
§ 3-2 研究流体运动的两种方法	38
§ 3-3 迹线、流线和标记线	39
§ 3-4 流管、流束、流量、过流断面和平均流速	41
§ 3-5 连续性方程	42
§ 3-6 起始条件和边界条件	47
§ 3-7 流体质点运动的分析	47
§ 3-8 有势流动和速度势函数	52
§ 3-9 平面流动和流函数	55
§ 3-10 几种简单的平面势流	57
* § 3-11 势流的叠加	60
* § 3-12 求解有势流动的其他方法	64
第四章 流体动力学	70
§ 4-1 流体质点的加速度	70
§ 4-2 理想流体的运动方程式	72
§ 4-3 运动方程式的积分	73
§ 4-4 不可压缩性流体的柏努利方程	77

§ 4-5	压缩性流体的柏努利方程	78
§ 4-6	柏努利方程的适用范围和它的拓广	79
§ 4-7	纳维-斯托克斯方程	81
§ 4-8	实际流体总流的柏努利方程	86
§ 4-9	柏努利方程的应用	88
§ 4-10	动量定理	96
§ 4-11	动量定理的应用	98
§ 4-12	动量矩定理	104
§ 4-13	流体中压强波传递和马赫数	105
§ 4-14	相似理论	107
§ 4-15	量纲分析	110
第五章	流体阻力	118
§ 5-1	层流、紊流和雷诺判据	118
§ 5-2	流道中能量损失的种类	120
§ 5-3	圆管中的层流	122
§ 5-4	圆管中的紊流	125
* § 5-5	异形管道中的流动	132
§ 5-6	进口起始段	134
§ 5-7	局部损失	137
§ 5-8	管路计算	143
* § 5-9	压缩性流体在管道中的等温流动	151
* § 5-10	气体在绝热管道中的流动	154
* § 5-11	绝热流动时的临界压强和临界速度	157
* § 5-12	附面层理论	158
* § 5-13	平板上附面层的计算	161
* § 5-14	曲面上的附面层	166
* § 5-15	潜体的阻力	167
第六章	流体的出流	172
§ 6-1	孔口出流的分类和基本特征	172
§ 6-2	薄壁孔口的恒定自由出流	173
§ 6-3	流速系数、出流阻力系数和收缩系数	174
§ 6-4	厚壁孔的自由出流	177
§ 6-5	薄壁阻尼孔的出流	179
§ 6-6	阻尼长孔的出流	182
§ 6-7	滑阀和锥阀阀口流量系数	186
§ 6-8	喷嘴-挡板阀流量系数	190
§ 6-9	变水头下的液体出流	192
§ 6-10	节流汽穴	193
第七章	缝隙流动	200
§ 7-1	缝隙中的流速分布	200
§ 7-2	固定壁面所形成缝隙的泄漏量	201
§ 7-3	具有相对运动的平行面缝隙中的流动	203

§ 7-4	缸与柱塞滑动副的能量损失分析	207
§ 7-5	倾斜壁面缝隙间的流动	210
§ 7-6	液压卡紧现象	212
§ 7-7	液压卡紧力的计算	214
§ 7-8	平行圆盘缝隙间的层流	217
* § 7-9	二元缝隙流动	221
* § 7-10	其他形式的缝隙	228
* § 7-11	粘性变化的影响	229
第八章	滑动轴承和往复运动密封	236
§ 8-1	润滑理论的基本概念	236
* § 8-2	推力轴承	240
* § 8-3	向心滑动轴承	245
§ 8-4	密封润滑的基本概念	250
§ 8-5	往复运动密封润滑理论	252
§ 8-6	往复运动密封的泄漏量	254
§ 8-7	往复运动密封的摩擦阻力	258
第九章	静压支承	260
§ 9-1	静压支承的概念	260
§ 9-2	静压支承的计算和抗干扰能力	261
§ 9-3	关于油膜挤压	266
§ 9-4	不完全平衡型静压支承	271
§ 9-5	柱塞式液机完全平衡型滑履(靴)的能量分析和最佳尺寸	273
* § 9-6	变工况时滑履的最佳尺寸	276
§ 9-7	滑履的轴向刚度	280
§ 9-8	滑履的抗倾能力	283
§ 9-9	进口阻尼尺寸的决定	284
第十章	管道的非恒定流	286
§ 10-1	机电液模拟的概念	286
§ 10-2	液电、机电的等效回路	289
§ 10-3	管路动特性基本方程	292
§ 10-4	传播常数、传播算子和特性阻抗	296
§ 10-5	管路的谐振(不计液阻的近似解)	302
§ 10-6	消振的措施	306
* § 10-7	输送管道动态分析	307
* § 10-8	管端带有容腔的管路	313
* § 10-9	油击现象	316
* § 10-10	异径管路和分支管路	317

第一章 绪 论

自然界中各种物体都是相互联系、相互作用的，有作用必有反作用，物体间的作用和反作用这一对矛盾的斗争，就引起了物体的机械运动，并且我们把引起运动的原因抽象为力。所谓力学就是研究物体机械运动的科学，由于研究的对象不同，力学有许多分支，流体力学是以流体为对象，主要研究流体和流体及流体和固体之间的作用和反作用，也就是研究流体机械运动的规律，并把这些规律应用到有关的工程技术部门中去的力学分支。涉及流体的工程技术部门是多方面的，例如农田排灌、水利水电、城市给排水、船舶航运、石油开采、流体输送、液压传动等等，这些部门不仅流体种类各异，而且外界条件也有差别，这都对流体的运动有一定的制约，因此各部门都有不同的特殊问题。本书供液压专业应用，除了讨论流体机械运动的普遍规律外，还针对液压领域中某些特殊问题作原则性的论述。

液压传动是以油液为工作介质，通过人为的控制，达到按预定要求有控制的传递和转换能量。例如一台机床装置了由液压元件，管道等所组成的液压系统，将输入能量（动力机械输出的机械能）有控制的加以转换和传递，就能完成装夹、送进等动作；一台挖掘机装置了液压系统，就能有控制的进行挖掘、回转、卸料和行走等动作，尽管机器各式各样，动作千差万别，但通过油液进行能量转换和传递却是共同的。在液压元件或整个液压系统的特定环境下，油液的能量转换或传递过程中，不可避免地将出现一些不同于其他部门的特殊问题，了解这些问题使我们在设计使用液压元件和液压系统时，增加合理性，减少盲目性。

§ 1-1 研究流体力学的方法

人的认识是客观存在的事物在人的主观意识里的反映，即认识依赖于实践。自然科学是人类在改造自然界的实践过程中建立和发展起来的，我们的祖先在与洪水搏斗，在开河修渠、引水灌溉、水能利用，在海上航行等等与自然界的斗争过程中，逐渐地发现了流体运动的规律而建立了本门学科，我们要有批判地继承前人的科学遗产，在这个基础上通过自己不断的实践，包括观察，实验和生产实践，获得丰富的材料，加以分析、综合、归纳、演绎，从中找出规律性。

自然现象往往是错综复杂的，仅凭观察、实验和实践只能建立感性认识，必须根据十分丰富的感觉材料分析事物的矛盾，并加以抽象简化，即抽出现象中的主要矛盾和矛盾的主要方面，略去其它次要矛盾，然后综合起来，加以归纳，形成概念，得出普遍的原理或定律，这就是将感觉材料加以去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里的改造制作，也就是感性认识跃进到理性认识的过程。

为了得出进一步的结论，更好地为生产实际服务，我们还需在所得到的普遍原理或定律的基础上，针对不同的具体条件，加以推理演绎，得出某些具体的结论来。归纳和演绎，正如分析和综合一样，也是相互联系、相互补充的，研究了许多不同事物的特殊本质后，用归纳的办法进行概括，帮助我们找出事物的共同本质，对于那些特定条件下的具体事物，则又可在归纳所得的基础上，利用推理演绎的办法来进行研究。由于流体力学中所注意的主要是

量的关系,因此在推理演绎时,往往要广泛采用数学工具,例如从经典力学的几个基本定律,经过数学演绎而得出反映流体运动普遍规律的连续性方程,能量方程和动量方程,又从这些基本方程中推演出各种具体的计算公式。由于许多现象极为复杂,以及对它们的研究不够充分,严格的数学演绎推理并不能完全解决问题,流体力学往往还要依靠科学实验的方法,统计、分析、综合实验所得的数据,归纳成修正理论公式的系数,或直接建立经验的或半经验的计算公式。

人类认识一事物总不能立刻完全无遗地接触到所有各个方面,所以经过实践得到的理论认识还须再回到实践中去,在实践中继续更深入地揭露事物的本质,从而检验理论是否正确,进一步深化我们的认识,推进学科的发展。

§ 1-2 流体的概念

流体是由分子所组成的,分子之间有一定的空隙(气体的空隙较大,液体较小),这样就产生空间点上运动参数(速度、压强、密度等)不定的问题,例如空间内某点(图1-1),刚好在分子空隙中,这点的运动速度为零,但当某个分子运动到该点时,该点突然具有该分子的运动速度,这就给我们处理问题带来了困难,但是我们知道分子是很小的,分子之间的空隙尺度也是很小的,就分子间空隙较大的气体来讲,在标准状态下($t = 0^{\circ}\text{C}$, $p = 1\text{atm}$) 22.4 升的体积中含有 6.02×10^{23} 个分子,即在 1cm^3 的体积中有 $n = \frac{6.02}{22.4} \times 10^{19} = 2.69 \times 10^{19}$ 个分子,因此气体分子

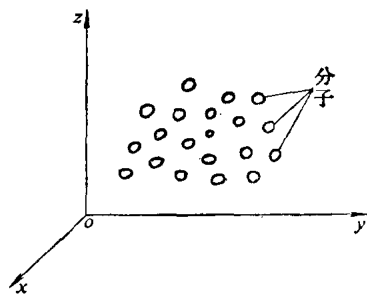


图1-1 流体分子在空间分布的模式

之间的空隙尺度约为 $n^{-\frac{1}{3}}\text{cm}$, 即 $3.34 \times 10^{-7}\text{cm}$ 的数量级(液体分子间的空隙尺度则更小),它与分子本身的尺度比较起来可能是较大的,但与常用的宏观尺寸比较起来就微不足道,由于流体力学是研究流体宏观表象的运动,并不顾问它的

内部微观结构,因此,我们以宏观的质点作为介质的基本单位,一个质点可包含着一群分子,质点的运动参数即为该群分子运动参数的统计平均值,并且认为介质质点与质点间没有间断的空隙,而是连绵不断的组成,即把液体和气体都看成具有绵续性的连续介质。这样,在流体中运动参数将为空间点坐标轴和时间的连续函数,使我们有可能采用数学工具来处理解决问题。

流体分子之间存在着相互吸引的内聚力,流体分子与固体分子之间又作用着附着力,如果流体与固体的接触附着力大于内聚力,则流体将为固体壁面吸附而湿润固体,水和油液都能被绝大多数固体所吸附,吸附于固体壁面的流体层原则上将具有与固体壁面相同的速度。如果附着力小于内聚力,则流体不会吸附于固体,例如汞和玻璃。

流体能承受较大的压应力,却几乎不能承受张应力。对切应力的抵抗极弱,不管作用的剪切力是怎样的微小,流体总会发生连续地变形,这就是流体的易流性,它使流体本身不能保持一定的形状,只能取得所在容器的形状。

流体在流动时呈现出内摩擦力,这个力的大小一方面取决于流体的种类,另一方面也与运动状态有关,但在流体中不存在起始运动前的静摩擦力,在相对静止的流体中也不存在内摩擦力。

流体具有抗压缩能力，液体的抗压缩能力极大，在很大压强作用下，液体的体积变化却极微小，例如增加 180 个大气压，油液的体积仅缩小约 1%，就是把油液封闭在长 100cm，断面积为 1cm^2 的厚壁管中，在一端用活塞封闭，要使油柱缩短 1cm，需加 1764N（牛顿）的力。除去这个力，它也能恢复到原来的长度，这说明液体具有很小的压缩性，也具有很小的体积弹性。因此，在绝大多数情况下，我们常忽略液体体积的变化，认为液体具有不可压缩性，这时也就不考虑液体的体积弹性。只有在某些特殊情况下，例如高压领域，液压冲击等方面，液体的压缩性和体积弹性才显示出它的影响，这时就必须予以重视。

易流性是液体和气体区别于固体的基本宏观表象，而不可压缩性（严格地讲应为少压缩性）则是液体区别于气体的基本宏观表象。

由于液体的易流性和不可压缩性或少压缩性，它才可以作为液压传动的介质，迅速和正确地传递力和运动。但是事物总是有两面性的，液体有了易流性，也就不可避免地带来了渗漏和泄漏问题，在液压系统中必须采用各种密封装置，以防止漏油。密封装置又带来了摩擦阻力，造成能量损失。由于液体的少压缩性，在运动状态变换时，往往产生较大的液压冲击，影响元件的使用寿命和系统的可靠性。这就逼使我们采取适当的措施，减少冲击以便使液压元件和液压系统有较高的效能和良好的工作条件。

§ 1-3 关于单位制

不论计量什么物理量都必须有一个标准，物理量的计量就是将被量度的量与标准量进行比较，以确定被量度的物理量为标准量的多少倍数，通常称该标准量为单位尺度，或简称为单位。一般来说，物理量的计量单位是可以任意选择的，由于某些物理量之间存在着相互联系，我们可以用一些物理量的单位来量度另一些物理量，例如选定了长度和时间单位后，速度和加速度的量度就可以用长度和时间组合起来的单位来计量。这样，对某些量选定了一些独立的基本单位后，其他量的单位就可以通过基本单位来组合。组合后的单位称为导出单位。基本单位和导出单位的总和称为单位制。由于历史原因，使得目前科技领域内存在着不同的单位制，单位制的混乱对国内外科学技术的交流 and 经济贸易都有一定的障碍，因此各方面都希望能建立一种国际通用的统一单位制。从第九届国际度量衡会议（1948 年）开始讨论这个问题，陆续制订出 7 个基本单位和新单位制草案，7 个基本单位如下：

米〔长度单位〕 m；

千克〔质量单位〕 kg；

秒〔时间单位〕 s；

安培〔电流单位〕 A；

开尔文〔热力学温度单位〕 K；

坎德拉〔光强度单位〕 cd；

摩尔〔物理量单位〕 mol。

1956 年国际度量衡局常会通过了这个新单位制，并命名为国际单位制（Système International d'Unités），规定用 SI 为其国际符号，1960 年第 11 届国际度量衡会议批准了这个单位制。由于某些物理量在各个科技和经济领域内，在数值上可以相差亿万倍，为了实用起见，在应用 SI 单位的同时，允许应用以它为基础所导出的分单位和倍单位，在主单位符号

前加词冠，组成成分单位或倍单位的符号，例如毫米 (mm)，微安 (μA) 等，词冠及符号如表 1-1 所示。

表1-1 国际单位 (SI) 词冠

倍数与分数	词 冠 名 称	国 际 名 称	中 文 符 号	国 际 符 号	备 注
10^{18}	艾克萨	Exa	艾	E	
10^{15}	拍它	Peta	拍	P	
10^{12}	太拉	tera	太	T	
10^9	吉咖	giga	吉(千兆)	G	
10^6	兆	mega	兆	M	
10^3	千	kilo	千	k	
10^2	百	hecto	百	h	
10	十	deca	十	da	
10^{-1}	分	deci	分	d	
10^{-2}	厘	centi	厘	c	
10^{-3}	毫	milli	毫	m	
10^{-6}	微	micro	微	μ	
10^{-9}	纳诺	nano	纳(毫微)	n	
10^{-12}	皮可	pico	皮(微微)	p	
10^{-15}	非姆托	femto	非	f	
10^{-18}	阿托	atto	阿	a	

目前世界上已有不少国家先后以政府命令的方式，或以国家标准的型式，采用国际单位制。我国于 1959 年国务院发布了《关于统一计量制度的命令》确定国际公制 (米制) 为我国的基本计量制度，并保留原来以国际公制为基础而制定的市制，废除了英制。1977 年 7 月国务院又颁发《计量管理条例(试行)》，明确规定“我国的基本计量制是米制(即公制)，逐步采用国际单位制”。由于米制的力学物理量单位中有 CGS 制，MKS 制和重力制三种，它们的差别是选取了不同的基本单位 (见表 1-2)。由于我国目前在工程技术领域中习惯采用重

表1-2 不同单位制的基本单位

物 理 量 名 称	基 本 单 位			
	CGS制	MKS制	重 力 制	SI制
长度	厘米(cm)	米(m)	米(m)	米(m)
质量	克(g)	千克(kg)	—	千克(kg)
力	—	—	公斤力(kgf)	—
时间	秒(s)	秒(s)	秒(s)	秒(s)

力制，这个单位制中力的单位尺度公斤力 (1kgf) 定义为：处于 45° 纬度海平面上 (重力加速度 $g = 9.80665\text{m/s}^2$) 在真空中国际千克原器所受的重力。国际单位制中力是导出单位，选取使 1kg 质量的物体能获得 1m/s^2 加速度的力作为它的单位尺度，并命名为牛顿，用符号 N 表示，即

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 100\text{kg} \cdot \text{cm/s}^2 \quad (1-1)$$

按这样的定义，在上述条件下国际千克 (公斤) 原器所受的重力为 $9.80665\text{N} \approx 9.81\text{N}$ ，由

此可见二种单位制中力的单位有以下的关系：

$$1\text{kgf} = 9.81\text{N}$$

(1-2)

重力制中选择量度力的单位作为基本单位，并且又是用重力来定义，由于重力加速度随地方而异，因此在不同的地方，确定的公斤力（kgf）就要求不同的质量，这对贸易上带来了一定的麻烦，因为人类的贸易活动中买卖的应该是质量，并不是地球对它的吸引力，而且重力制对空间技术也是不适合的，所以国际单位制中把基本单位 kg 作为质量的量度单位，它的力学物理量单位基本上与已获广泛应用的 MKS 制相一致。

重力制是将被废止的单位制，但在目前逐步采用 SI 制的过渡时期就要求我们了解二种单位制，要熟悉 SI 制，也要了解重力制，并能掌握它们之间的换算方法，本书采用 SI 制单位。某些常用物理量的 SI 制与重力制单位的对照换算关系如表 1-3。

表1-3 常用物理量的单位换算

物理量名称	SI 制		重 力 制		换 算 关 系
	名 称	符 号	名 称	符 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		kgf	1kgf = 9.81N
压强	帕斯卡	Pa = N/m ²		kgf/cm ²	1kgf/cm ² = 9.81 × 10 ⁴ Pa
密度		kg/m ³		kgf · s ² /m ⁴	1kgf · s ² /m ⁴ = 9.81kg/m ³
粘度		Pa · s		kgf · s/m ²	1kgf · s/m ² = 9.81Pa · s
能，功	焦耳	J = N · m		kgf · m	1kgf · m = 9.81J
功率	瓦	W = J/s		kgf · m/s	1kgf · m/s = 9.81W
频率	赫	Hz		Hz	

国际单位制中压强用 N/m² 为单位称为帕斯卡，因为这个单位量值太小，在某些工程技术上使用不便，因此欧洲油空压协会（CETOP）建议采用其倍单位巴（bar）为油空压技术的压强单位：

$$1\text{bar} = 10^5\text{N/m}^2 = 10\text{N/cm}^2 = 1000\text{ kg/cm} \cdot \text{s}^2$$

(1-3)

它与重力制单位的关系为

$$1\text{bar} = 1.02\text{ kgf/cm}^2$$

$$1\text{kgf/cm}^2 = 0.98\text{ bar}$$

§ 1-4 流体中的作用力

力是引起物质机械运动的原因，因此要研究流体的相对静止和运动规律，首先必须明确流体上的作用力。在流体中取出任意一块体积为 ΔV 的流体，它的质量为 Δm，这块流体上作用力可以分为质量力与表面力两类，质量力作用在该体积 ΔV 内所有流体质点上，力的大小与该 ΔV 体积内的流体质量 Δm 成正比，而与 ΔV 以外的流体无关。重力、离心力及一切由于加速度存在而产生的惯性力均为质量力。单位质量的质量力称为单位质量力，单位质量力数值上就等于加速度，设单位质量力在座标轴 x、y、z 的投影 X、Y、Z，则 X、Y、

Z 就相当于座标轴 x 、 y 、 z 向的加速度。例如体积为 ΔV 的流体上受到重力作用，且 xoy 为一水平面，如果该流体只受到地球引力的作用则单位质量力在 x 、 y 、 z 座标轴上的投影为：

$$X = 0, Y = 0, Z = -\frac{\Delta mg}{\Delta m} = -g$$

式中的负号表示重力加速度 g 与座标轴 z 方向相反。

流体是连续介质，被研究的流体 ΔV 是由四周的流体所包围，这些流体与 ΔV 流体的表面相互接触，相互之间将引起作用力，例如摩擦力，压力等。

这些作用力的特点是只与接触表面积有关，而与流体的质量或体积无关，所以称为表面力，单位表面积上的表面力通常称为应力，它是表面力在表面积上的强度。按表面力作用在表面上的方向不同，可将表面力分为法向力和切向力，法向力与表面的法线方向一致，切向力则与表面相切。例如在 ΔA 的表面上作用着 ΔF_n 的法向力和 ΔF_r 的切向力（图 1-2），则 ΔA 上的平均法向应力 p_m 和切向应力 τ_m 为：

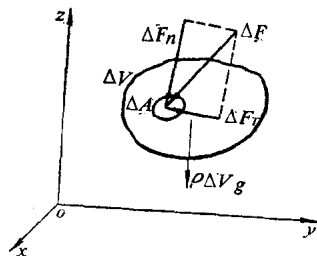


图1-2 流体中的作用力

$$p_m = \frac{\Delta F_n}{\Delta A}, \quad \tau_m = \frac{\Delta F_r}{\Delta A}$$

将微小面积 ΔA 趋近于零为极限，则可得流体内某定点处的应力

$$\begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} = \frac{dF_n}{dA} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_r}{\Delta A} = \frac{dF_r}{dA} \end{aligned} \quad (1-4)$$

流体中的切应力 τ 是由于流体的粘性和流体具有相对运动，发生内摩擦而产生的，当流体相对静止时，切应力 τ 就不再存在，流体表面上就只有法向力，又因为流体不能承受张力，所以法向力只能向着流体表面内法线方向，即为压力，在这种情况下，法向应力即为单位面积上的压力，是相对静止流体表面积上的压力强度，称为静压强[⊖]。

必须指出，如果略去流体的粘性，这种流体称为理想流体，理想流体内也不存在切应力，因此理想流体内的压强和静压强具有相同的性质。

§ 1-5 密度、重度、比容和比重

流体是物质，它具有质量。单位体积流体内的质量称为密度，用符号 ρ 表示。在流体内任意点处取某一微小体积 ΔV ，该体积内包含的流体质量为 Δm ，则平均密度为 $\rho_m = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ ，因为流体是连续介质，将体积 ΔV 无限缩小趋近于零为极限，则可得该任意点处的流体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-5)$$

⊖ 在工程技术上习惯地把表示压力强度的压强称为压力，而把压力称为总压力，我们认为压强的名词更为合理，因此本书中把压力强度称为压强。

密度的倒数称为比容，用符号 v 表示，即 $v = \frac{1}{\rho}$ ，它是单位质量流体所占的体积。流体的密度 ρ 和比容 v 将随着它所处的压强 p 和温度 T 而变，即 $\rho = \rho(p, T)$ ， $v = v(p, T)$ 。因为压强与温度均是空间点座标和时间的函数，因此，密度和比容也将是空间点座标和时间的函数，即

$$\begin{aligned}\rho &= \rho(x, y, z, t) \\ v &= v(x, y, z, t)\end{aligned}$$

由此可见，密度的全微分为

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial x} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y} dy + \frac{\partial \rho}{\partial z} dz + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \quad (1-6)$$

液体的密度随温度和压强的变化极为微小，一般情况下可以忽略不计，因此在液压技术中常把液压油液的密度看作常数，即 $\rho = C$ 或 $d\rho = 0$ 。

对于气体，如果不计气体分子之间的相互作用力和分子本身的尺寸，把气体作为完全气体（也称理想气体），则它的密度 ρ ，绝对温度 T ($T = 273 + t$) 及绝对压强 p 之间的关系，可用状态方程表示：

$$pv = RT$$

或

$$p = \rho RT$$

空气、氮、氩、氢、氧、氮、二氧化碳等气体，除了高压和低温状态外（例如压强不超过 200 bar，绝对温度不低于 253 K），基本上都能遵循上述规律，这样，气体的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1-7)$$

式中 R 为气体常数，不同气体具有不同的 R 值，但气体常数与气体分子量 M_w 的乘积则为一恒定值，称为普适气体常数，用 R_u 表示。必须指出， R 是有量纲的，它的单位将随压强，密度和温度所取的单位而定，当压强以 Pa 计，密度以 kg/m^3 计，温度以 K 计时， R 的单位为 $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ，这时气体普适常数 $R_u = M_w R = 8.3143 \times 10^3 \text{ J}/\text{kgmol}\cdot\text{K} = 8.3143 \text{ kJ}/\text{kgmol}\cdot\text{K}$ 。如果压强以 bar 计，则 R 的单位为 $\text{bar}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$ ，普适常数 $R_u = 8.3143 \times 10^{-2} \frac{\text{bar}\cdot\text{m}^3}{\text{kgmol}\cdot\text{K}}$ 。表 1-4 示出了各种气体的 R 值。

表1-4 气体的物理性质

气体名称	分子式	分子量	R kJ/kg·K	$R \times 10^3$ bar·m ³ /kg·K	0℃时的等 压比热 c_p kJ/kg·K	绝热指数 $k = c_p/c_v$
空气	—	28.98	0.2869	2.869	1.004	1.40
氦	He	4.003	2.077	20.77	5.236	1.66
氩	Ar	39.95	0.2081	2.081	0.523	1.67
氢	H ₂	2.016	4.124	41.24	14.24	1.41
氧	O ₂	32.00	0.2598	2.598	0.914	1.40
氮	N ₂	28.01	0.2968	2.968	1.04	1.40
一氧化碳	CO	28.01	0.2968	2.968	1.041	1.40
二氧化碳	CO ₂	44.00	0.1889	1.889	0.819	1.301

由 (1-7) 式可知，气体密度并不完全取决于压强，这对气体力学的分析带来了不便，但

我们知道，气体的状态变化又遵循 $p/\rho^n = C$ 的规律，而且很多工程问题可以归属于下列二种特殊情况：

(1) 等温变化过程， $n = 1$ ，即 $p/\rho = C$ ；

(2) 等熵变化过程， $n = k$ ，即 $p/\rho^k = C$ 。

这里 k 称为等熵指数，各种气体的 k 值见表 1-4。

在 SI 制中，质量以千克 (kg) 计，体积用立方米 (m^3) 计，则密度 ρ 的单位是 kg/m^3 ，比容的单位为 m^3/kg 。

在重力制中，质量的单位是公斤力·秒²/米 ($\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$)，体积以立方米计，则密度 ρ 的单位为 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 。

由于地球的引力，质量为 Δm 的物体产生 ΔG 的重力，重力是质量和重力加速度 g 的乘积

$$\Delta G = \Delta m g$$

地球对单位体积内质量的吸引而产生的重力称为重度，用符号 γ 表示

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{\Delta m g}{\Delta V} = \rho g \quad (1-8)$$

在重力制中，重度的单位是 kgf/m^3 ，在 SI 制中以质量为基本物理量，所以不推荐使用重度这一名词，只用密度 ρ 来作有关的计算。

SI 制中密度的单位是 kg/m^3 (或 kg/cm^3)，在重力制中，重度的单位是 kgf/m^3 (或 kgf/cm^3)，因此 SI 制中的密度与重力制中的重度具有相同的数值，如表 1-5。

物质与同体积 4°C 的的水的重量的比率，称为比重，用符号 S 表示，即

$$S = \frac{\gamma V}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}} V} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1-9)$$

比重 S 是没有量纲的纯量。

表1-5 液体的密度与比重

液 体	温 度 $^{\circ}\text{C}$	SI制, ρ , kg/m^3 重力制, γ , kgf/m^3	SI制, ρ , kg/cm^3 重力制, γ , kgf/cm^3	比 重 S
水	4	1000	10^{-3}	1
汞	15	13600	13.6×10^{-3}	13.6
液压矿物油	15	850~900	$0.85 \times 10^{-3} \sim 0.9 \times 10^{-3}$	0.85~0.9
汽油	15	700~800	$0.7 \times 10^{-3} \sim 0.8 \times 10^{-3}$	0.7~0.8
酒精	18	790	0.79×10^{-3}	0.79
熔化生铁	1200	7000	7×10^{-3}	7

§ 1-6 流体的压缩性和热膨胀性

所有流体将随着压强和温度的变化而发生体积变化，前者表征为压缩性，而后者则为热膨胀性。前已述及，压强和温度对液体的体积影响甚微，但气体则很显著。

一定体积 V 的流体，当压强增大 $d p$ 时，体积减少了 $d V$ ，则表征流体压缩性的压缩系数 β 为

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

压缩系数 β 的倒数称为体积弹性模量, 用符号 K 表示, 即

$$K = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} = -v \frac{dp}{dv} \quad (1-11)$$

由于压强增大时体积必然减小, 所以在式中加入负号后就可获得正的 β 或 K 值。由于气体压强变化的同时, 可能产生温度的变化, 因此必需知道变化过程, 才能确定 β 或 K 值, 在工程上常遇到的是等温和等熵过程, 如果用下角标 T 表示等温过程, s 表示等熵过程, 则

$$\beta_T = - \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad \text{或} \quad K_T = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T$$

$$\beta_s = - \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_s \quad \text{或} \quad K_s = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s$$

因为在等温过程时 $p_v = C$, 所以 $\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = - \frac{p}{v}$, 而等熵过程时 $p_v^k = C$, 则 $\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = - \frac{k p}{v}$, 代入上式得气体的体积弹性模量为:

$$\left. \begin{aligned} K_T &= p \\ K_s &= k p \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

对于液体来说, 即使在绝热条件下, 压强改变而引起温度的变化是极为微小的, 因此可以不考虑温度的变化。纯液体的压缩系数很小, 即体积弹性模量很大, 例如压强为 $1 \sim 500 \text{ bar}$ 时, 纯水的平均 $K \approx 2.1 \times 10^4 \text{ bar}$, 纯液压用油的平均 K 值则在 $1.4 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{ bar}$ 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。液压系统计算中常用 $K \approx 7000 \text{ bar}$ 。

体积为 V_m 的混气油液中, 如果气体的体积为 V_g , 则纯油液的体积 $V_f = V_m - V_g$, 当压强增加 Δp 时, 混气油液的体积减小 ΔV_m , 应为气体体积减小 ΔV_g 和纯油液体积减小 ΔV_f 的总和, 即

$$\Delta V_m = \Delta V_g + \Delta V_f$$

因为体积弹性模量为: $K_m = \frac{-V_m \Delta p}{\Delta V_m}$, $K_g = - \frac{V_g \Delta p}{\Delta V_g}$ 及 $K_f = - \frac{V_f \Delta p}{\Delta V_f}$, 代入上式得

$$\frac{V_m \Delta p}{K_m} = \frac{V_g \Delta p}{K_g} + \frac{V_f \Delta p}{K_f}$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{K_m} = \frac{V_g}{V_m} \left(\frac{1}{K_g} \right) + \frac{V_f}{V_m} \left(\frac{1}{K_f} \right) = \frac{V_g}{V_m} \left(\frac{1}{K_g} \right) + \left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) \left(\frac{1}{K_f} \right) \quad (1-13)$$

例如某油液 ($K_f = 1.8 \times 10^4 \text{ bar}$), 混有一定的气体, 作用 100 bar 压强后油液的温度不变, 则 $K_g = 100 \text{ bar}$, 这样, 混气油液的体积弹性模量 K_m 为

$$\frac{1}{K_m} = \frac{V_g/V_m}{100} + \frac{1 - V_g/V_m}{1.8 \times 10^4}$$

由此可以计算出不同混入气体量时的体积弹性模量如表 1-6。

上例说明, 在一定压强下油液夹带 1% 气体时弹性模量降为纯油的 35.6%, 夹带 4% 气体时则仅为纯油液的 12.2%。由此可见, 在需要大体积弹性模量的场合下必需严格排除油液中夹带的气体。实际计算中常用 $K = 7000 \text{ bar}$ 是有根据的。

表1-6 混入气体对K的影响

V_g/V_m	$K_m, \text{ bar}$	V_g/V_m	$K_m, \text{ bar}$
0	1.8×10^4	0.04	2.70×10^3
0.005	9.50×10^3	0.06	1.53×10^3
0.01	6.42×10^3	0.08	1.17×10^3
0.02	3.91×10^3	0.10	9.50×10^2

上面我们说明了在一定压强下油液中夹带气体对体积弹性模量的影响。如果在大气压强下混入油液的气体体积为 V_g ，纯油液的体积为 V_f ，则在 p 压强下的混气油液的体积弹性模量 K_m 值可按式〔1〕计算：

$$K_m = \left[\frac{V_f/V_g + p_a/p}{V_f/V_g + K_f p_a/p^2} \right] K_f \quad (1-14)$$

式中 p_a ——大气压强；

K_f ——纯油液体积弹性模量。

流体体积随温度变化而变化的性质称为热膨胀性，热膨胀性的大小可用热膨胀系数 α 表示，它是指流体在恒定压强的条件下温度改变所引起的相对体积变化率：

$$\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right) \quad (1-15)$$

对于液压用油 α 只决定于油液本身而与压强和温度无关，其数值可参看表 1-7。

表1-7 不同密度的油液的 α 〔2〕

ρ_{15°	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}

对于气体则由状态方程 $pV = RT$ 可得

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p}$$

则

$$\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p v} = \frac{R}{RT} = \frac{1}{T} \quad (1-16)$$

§ 1-7 流体的粘性

流体流动时，由于流体与固体壁面的附着力和流体本身之间的分子运动和内聚力，使流体各处的速度产生差异。例如两平面间充满流体，设下平面固定不动，而上平面以速度 U 运动，贴近两平面的流体必粘附于平面上，紧贴于运动面上的流体质点必以与运动平面相同的速度 U 运动，而紧贴于下平面的流体质点的速度为零，平面间流体层的速度各不相同，但按一定规律分布。运动较快的流层可以带动较慢的流层，反之运动较慢的流层则又阻滞运动较快的流层，不同速度流层之间相互制约，产生类似固体摩擦过程的力，称为内摩擦力。流体

〔1〕 Hayward A. T. J., Aeration in hydraulic Systems—its assesment and control, I. Mech. E. Proc. Conf. Oil Hydraulic Power Transmission, Nov. 1961 pp. 216~224.

〔2〕 上海煤矿机械研究所编：液压传动设计手册，上海人民出版社，1976 p. 1020.