

高等学校试用教材

液 压 元 件

浙江大学 林建亚
华中工学院 何存兴 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

031006

高等学校试用教材

液 压 元 件

浙江 大学 林建亚

华中工学院 何存兴

主编

机械工业出版社

本书主要论述各类液压控制阀、液压泵、液压马达、液压缸等液压元件的工作原理、结构特点、性能以及基本设计理论，并对液压传动中采用的各种液压辅件作了概要叙述。其中对液压控制阀的静态特性进行了较详细的分析。

本书为高等工科院校流体传动及控制专业的教材，也可作为各机械设计类专业的教学用书。此外，可供科研、设计单位及工厂中从事液压技术设计、应用的有关科技人员参考。

液 压 元 件

浙 江 大 学 林 建 亚 主 编
华 中 工 学 院 何 存 兴

*

责任编辑：孙祥根

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(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 787×1092¹/₁₆·印张 20¹/₄·字数 499 千字

1988 年 11 月北京第一版·1988 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,900·定价：4.00 元

*

ISBN 7-111-00854-5/TH·149(课)

前 言

本书是根据机械制造（冷加工类）教材编审委员会液压传动及控制教材编审组于1983年制定的教学大纲、1984年通过的教材编写大纲及1986年南京教材会议精神编写的专业教材。适用于流体传动及控制专业及机械制造类的有关专业作为教材，也可供工程技术人员参考。

本书着重叙述液压元件的基本工作原理，典型元件的结构技术要素，运动学和动力学分析，元件的特性及分析、设计方法。以上述基本内容为核心，突出不同类型元件的特征及分析方法，并对动态特性的分析方法在典型液压元件，尤其是在液压控制阀中的应用，作了比较详细的介绍。在选材上力求贯彻“少而精”的编写原则，并反映近年来液压元件的发展状况。

本书由浙江大学林建亚、华中工学院何存兴主编。第一、二、三、四、五、六章由林建亚编写；第十一、十四章由何存兴编写；第七、八、九、十、十二章由葛宜远编写；第十三、十五、十六、十七章由陈尧明编写。全书由林建亚负责统稿。

甘肃工业大学王明智为本书主审，对本书的原稿进行了细致详尽的审阅，提出了不少宝贵的意见。机械委教材编辑室孙祥根、燕山大学王益群、西安交通大学王佑民、成都科技大学张光函、沈阳工业大学吴书远、同济大学史志祥、吉林工业大学纪国军等根据各自多年的教学工作经验，对书稿提出了许多有益的建议和修改意见。编者在此谨致以由衷的谢意！

由于编者水平有限，书中难免有疏误及缺点，恳切希望读者批评指正。

编者

1988年1月

目 录

第一篇 液压控制阀

第一章 绪论	1
§ 1-1 液压传动的原理	1
§ 1-2 液压传动的优缺点及应用	3
§ 1-3 液压传动的工作液体	5
第二章 液压控制阀概述	8
§ 2-1 液压阀的功能和分类	8
§ 2-2 液压阀上的作用力	10
§ 2-3 阀口形状及流量系数	18
§ 2-4 液压桥路及液压阻尼	22
§ 2-5 液压阀的级间耦合及控制方式	28
§ 2-6 液压阀的控制输入装置概述	30
第三章 压力控制阀	37
§ 3-1 压力阀的分类及性能	37
§ 3-2 直动式压力阀	42
§ 3-3 先导式压力阀	49
§ 3-4 压力阀的设计要点	57
§ 3-5 比例压力阀	61
第四章 流量控制阀	68
§ 4-1 流量阀的分类及性能	68
§ 4-2 节流阀	73
§ 4-3 调速阀	78
§ 4-4 比例流量阀	82
第五章 方向控制阀	89
§ 5-1 方向阀的功能及分类	89
§ 5-2 方向阀的换向性能	102
§ 5-3 方向阀的压力损失及内泄漏	107
§ 5-4 比例方向阀	109

第二篇 液压泵及液压马达

第六章 液压泵及液压马达概述	115
§ 6-1 液压泵及液压马达的工作原理及分类	115
§ 6-2 液压泵及液压马达的性能参数	117
§ 6-3 液压泵及液压马达的工作特点	121

第七章 齿轮泵	123
§ 7-1 外啮合齿轮泵的工作原理及流量公式	123
§ 7-2 外啮合齿轮泵的困油现象及噪声	128
§ 7-3 外啮合齿轮泵的径向力	133
§ 7-4 外啮合齿轮泵设计要点	138
§ 7-5 中高压齿轮泵的结构特点	141
§ 7-6 内啮合齿轮泵	146
第八章 叶片泵	150
§ 8-1 双作用叶片泵的工作原理和流量	150
§ 8-2 双作用叶片泵的定子曲线及叶片数	152
§ 8-3 双作用叶片泵的结构	158
§ 8-4 中高压叶片泵	161
§ 8-5 变量叶片泵	163
第九章 螺杆泵	167
§ 9-1 螺杆泵的工作原理及流量公式	167
§ 9-2 螺杆泵的螺杆受力分析及结构特点	172
第十章 轴向柱塞泵	175
§ 10-1 轴向柱塞泵的工作原理及分类	175
§ 10-2 斜盘式轴向柱塞泵的运动学分析	179
§ 10-3 斜盘式轴向柱塞泵的动力学分析	184
§ 10-4 轴向柱塞泵的配流盘和滑靴	189
§ 10-5 斜盘式轴向柱塞泵的设计要点	196
§ 10-6 无铰式轴向柱塞泵的运动学和动力学分析	198
§ 10-7 阀配流径向柱塞泵	204
第十一章 液压马达	209
§ 11-1 液压马达的转矩和转速	209
§ 11-2 高速液压马达	210
§ 11-3 低速大扭矩液压马达	215
第十二章 液压泵和液压马达的调节	244
§ 12-1 变量调节原理及分类	244
§ 12-2 恒压控制变量泵	246
§ 12-3 变量泵的其他形式	250

N

§ 12-4 变量液压马达	254	§ 15-1 液压介质的污染	289
§ 12-5 变量马达的排量调节	255	§ 15-2 滤油器的种类及特点	290
第十三章 液压缸	260	§ 15-3 滤油器的选择与计算	295
§ 13-1 液压缸的分类及特点	260	第十六章 密封件	297
§ 13-2 液压缸的设计计算	265	§ 16-1 密封件的分类及特点	297
第三篇 液 压 辅 件			
第十四章 蓄能器	275	§ 16-2 密封件的摩擦力	303
§ 14-1 蓄能器的作用及分类	275	第十七章 油箱、热交换器、管路及 接头	305
§ 14-2 蓄能器的结构和性能特点	277	§ 17-1 油箱	305
§ 14-3 蓄能器的参数计算与选择	287	§ 17-2 热交换器	308
第十五章 滤油器	289	§ 17-3 管路及接头	313
		参考文献	319

第一篇 液压控制阀

第一章 绪 论

§ 1-1 液压传动的原理

任何一台独立的机器都有能源供给装置——原动机，以及对工作对象进行作业的工作机构。

根据机器的设计要求，工作机构的输出量（力、速度、位移等）应该符合一定的规律，即具有一定的特性。由于原动机的输出特性往往不可能与机器工作任务要求的特性相适应，因此，在原动机与工作机构之间就需要配备某种传动装置，以便将原动机的输出量进行适当的变换，使工作机构的性能满足机器的要求。

传动装置的类型主要有机械传动、电气传动和流体传动。有时采用它们混合组成的复合传动。

流体传动是以流体（液体、气体）为工作介质来进行能量转换、传递和控制的传动形式。以液体为工作介质时为液体传动，以气体为工作介质时则为气压传动。

液体传动又分为性质截然不同的两种传动型式：液压传动和液力传动。液压传动的主要特点是靠密封工作腔的容积变化来进行工作，它主要通过液体介质的压力（压强）来进行能量的转换和传递。液力传动的主要特点是靠工作部分的叶轮进行工作，它除了小部分是利用液体的压力外，主要通过液体介质的动能来进行能量的转换和传递。

一、液压传动的原理

实际应用的液压传动装置大多数比较复杂。为了说明液压传动的工作原理，现以图 1-1 所示的手动液压千斤顶为例。这是一种最简单的液压传动装置。

图中所示的手动泵，至今仍在某些地区作为一种日常取水的装置使用。当掀动手柄杠杆时，手动泵 1 的活塞作往复运动。当活塞上提时，由于泵缸容积的增大而形成真空，油箱中的液体在大气压力的作用下，经过进油阀 4 而进入泵内（此时排油阀 3 处于关闭状态）。活塞下压时，液体被挤出泵缸，顶开排油阀输送到液压缸 2 中（此时吸油阀自动关闭），迫

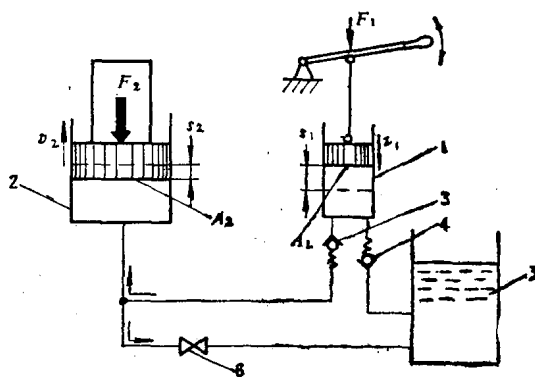


图 1-1 液压千斤顶原理图

1—手动泵 2—液压缸 3—排油单向阀 4—进油单向阀 5—油箱 6—截止阀

使液压缸的活塞带动负载重物一起上升。

工作时，截止阀6关闭。当需要将液压缸的活塞放下时，打开此阀，液体即在重力作用下经过此阀排往油箱。

根据帕斯卡原理液体的静力学特性可知，显然

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{S_1}{S_2} \quad (1-1)$$

由于 $A_2 \gg A_1$ ，所以液压千斤顶是一种增力装置。

从液压千斤顶这一简单的液压传动装置可见：

1) 液体介质起到将机械能进行转换和传递的作用。与动力源（此处为人力）相连的手动泵，将施加在杠杆上的机械能转换为液体的压力势能；与工作机构相连的液压缸，将液体的压力势能转换为机械能输出。

2) 作为动力元件的液压泵和液压缸，都是靠密封工作腔的容积变化来实现液体的吸入、排出。

作为一个完整的传动装置，除了液压泵和液压缸（当输出不是直线运动而是旋转运动时，则为液压马达）这两类动力元件外，还需要配备对液流的流量、压力和流动方向进行控制的液压控制阀和其它必要的辅助元件。

本书的内容就是论述组成液压传动系统的这些液压元件——液压控制阀、液压泵、液压马达、液压缸以及各种液压辅助元件。

二、液压动力元件的特征

机械传动、电气传动、流体传动的不同工作原理，使它们不但在结构上有很大区别，并且在工作性能上各有明显的特点。仅就传动装置最重要的参数——传递的作用力（或力矩）以及运动速度来说，液压动力元件有以下两个基本特征：

1. 动力元件上的负载作用力 F 与液压介质的压力 p 之间的关系，符合液体静力学原理。因此，对于图 1-1 中的液压泵（手动泵）和液压缸来说，存在以下关系

$$\begin{aligned} F_1 &= p_1 A_1 \\ F_2 &= p_2 A_2 \end{aligned} \quad (1-2)$$

在用管道连通的容腔中， $p_1 = p_2 = p$ 。

当结构尺寸要素 A_1 和 A_2 一定时，液压缸中的压力 p 取决于举升负载重物所需要的作用力 F_2 ，而手动泵上的作用力 F_1 则取决于压力 p 。所以，被举升的负载越重，则液体介质的压力越高，所需作用力 F_1 也就越大。反之，如果空载工作，并且不计摩擦力，则压力 p 以及使手动泵工作所需要的力 F_1 都为零。

液压动力元件的动力学参数（ F ）的这一特征，可以简略地表述为“压力取决于负载”。

2. 动力元件的运动速度 v 与液体介质的流量 Q 之间的关系，符合液流的连续性方程，即符合工作腔容积变化相等的原则。对于图 1-1 中的液压泵和液压缸来说

$$\begin{aligned} Q_1 &= v_1 A_1 \\ Q_2 &= v_2 A_2 \end{aligned} \quad (1-3)$$

由于活塞的面积 A_1 和 A_2 已定，所以液压缸所带动的工作机构的移动速度 v_2 只取决于输入流量的大小。输入液压缸的流量 Q_2 越多，则运动速度 v_2 越高。

液压动力元件的运动学参数（ v ）的这一特征，可以简略地表述为“速度取决于流量”。

还应着重指出，上述两个特征是独立存在的，互不影响。不管液压千斤顶的负载如何变化，只要供给的流量一定，则重物上升的运动速度就一定。同样，不管液压缸的活塞移动速度多大，只要负载重量一定，则推动负载所需的液体压力就确定不变。

由此可见，液动力元件的上述特征使它们的理论速度特性具有很好的负载刚性。

液压元件按照工作压力的大小，有低压、中压、中高压、高压和超高压之分。表 1-1 是压力分级的范围。

表1-1 压力分级

压力分级	低 压	中 压	中 高 压	高 压	超 高 压
压力范围/MPa	0~2.5	>2.5~8	>8~16	>16~32	>32

§ 1-2 液压传动的优缺点及应用

液压传动由于具有一系列特点，因此获得广泛的应用。任何事物的优缺点都是相对的。以下列出的各点，是指与一般的机械传动或电气传动相比较而言。

一、液压传动的主要优点

1. 体积小、重量轻，可适用于不同功率范围的传动 由于液压传动的动力元件可以采用很高的压力（一般已可达 32MPa，个别场合更高）来进行能量转换，因此具有体积小、重量轻的特点。单位功率的重量远小于一般的电机。在中、大功率以及实现直线往复运动时，这一优点尤为突出。

2. 操纵控制方便，并且易于实现无级调速 可以采取各种不同的方式（手动、机动、电动、气动、液动等）操纵液压控制阀，来改变液流的压力、流量和流动方向，就能调节液压缸或液压马达的输出力、速度、位移。毋需特殊的措施就可以达到无级调速的目的，并且调速范围宽广。

3. 可以简便地与电控部分组成电液结合成一体的传动、控制器件，实现各种自动控制 这种电液控制既具有液压传动输出功率适应范围大的优点，又可以充分利用电子技术控制方便、灵活等特点，因而具有很强的适应性和广阔的应用领域。

4. 工作安全性好，易于实现过载保护 从液动力元件的两个基本特征可知，工作机构的载荷、速度将直接反映为液流的压力、流量。因此，通过对液流参数的监控，就能实现对机器的安全保护。

5. 液压传动装置各元件之间仅靠管路联接，没有严格的定位要求。因此结构布置可以根据机器的具体情况灵活决定，与机械传动的严格安装要求相比，简单方便得多。

6. 液压传动的响应快，动态特性好 由于液压元件的运动部分质量小，因此液压传动的动态响应，比同等功率等级的电传动高数倍乃至十倍以上。

二、液压传动的主要缺点

1. 由于受液体流动阻力和泄漏的影响，液压传动的传动效率不够高，一般为 75%~85% 左右，所以影响了功率的利用，并带来系统发热、需要冷却等问题。

2. 工作性能易受温度变化的影响。因为当温度变动时，液体的粘度会发生变化，从而影响液流的状态。

3. 当液压元件、系统某处的密封失效而产生外泄漏时，油液会污染工作场所。

4. 液压元件的制造和维护要求均较高，价格也较贵。

三、液压元件的发展及液压传动的应用

1650年Pascal提出的水静压力原理是液压传动的基础。简单的液压元件的出现，虽然可以追溯到更早的年代，但是，作为工业应用则开始于1795年，英国J. Bramah首次用水作为介质，以水压机的形式将其付诸实践。真正实际应用则在19世纪50年代的英国工业革命时代，W. Armstrong采用蒸汽机驱动水泵作为动力源，将水压机实用化并应用了重锤式蓄能器。1870年左右，液压传动曾扩展应用于压榨机、铰盘、千斤顶等装置。

19世纪末，由于出现电力驱动而一度使液压技术停滞不前。直到1906年，美国战舰Virginia号以液压传动取代电力驱动，用于起吊和操纵火炮，首次将油作为介质，较好地解决了润滑和密封问题而使液压技术开始迅速发展。

液压元件是发展液压技术的基础。活塞泵虽然应用最早，1910年出现的Hele Shaw径向柱塞泵又为提供结构紧凑、压力较高的液压动力源开创了新的一页，这种类型的泵直至60年代仍有应用。1920年左右发明的Thoma型轴向柱塞泵，则导致发展出一系列在高压系统中应用最广的轴向泵型式，最初是万向铰式的单铰泵、双铰泵，后来又发展出无铰式和滑履式以及其他型式。齿轮泵是一种较早的液压泵，与目前的外啮合齿轮泵结构相近的Serviere泵，在1593年就已出现。叶片泵的雏型也产生于16世纪末，但直到1925年Vickers发明了双作用叶片泵，才使它成为完善的型式，这种泵的基本结构一直沿用至今。本世纪40年代，苏联和瑞典发展并奠定了具有流量平稳、低噪声特点的螺杆泵的设计理论和结构。

英国Chamberlain公司的径向曲轴连杆式马达，是最早应用的一种低速大扭矩液压马达。50年代以后，许多国家发展出多种径向柱塞式低速马达，为不需要减速装置的液压直接驱动创造了有利条件。

除了泵和马达液压动力元件外，液压阀的发展对推进液压技术起了十分重要的作用。在常规的定值控制阀中，需要特别指出的是19世纪中叶由Fleeming Jenkin发明的压差补偿型流量阀和1935年由Harry Vickers发明的先导型溢流阀。这二种阀的工作原理对于发展液压阀的匹配耦合、压力补偿和先导控制起了开创性的作用。

40年代初首先应用在飞机上的电液伺服阀，开辟了液压技术向高响应、高精度发展的新领域。美国的Blackburn和Lee在50年代发表的电液伺服器件设计理论和实践，为电液伺服控制奠定了基础。

60年代末至70年代初，先后在瑞士和日本出现了比例方向阀和比例压力阀、比例流量阀，这标志着介于定值控制和伺服控制之间的比例控制技术的诞生。从70年代后期起，比例技术进入了新的发展阶段，采用各种反馈控制原理的电液比例阀不断涌现，元器件的性能大幅度提高，应用领域扩展到许多闭环系统。

电液伺服控制和电液比例控制赋予液压技术以更强的活力，使液压技术不仅作为一种基本的传动型式占有重要的地位，并且以优良的静态、动态性能而成为一种重要的控制手段。

目前，液压传动已遍布各个工业领域，从军用到民用，从重工业到轻工业，从蓝天到水下，到处都有各种液压传动及控制的装置。

液压传动的应用领域可归纳为以下几个主要方面：

1. 各种举升、搬运作业。尤其在行走式机械和较大驱动功率的场合，液压传动已经成

为一种主要的型式。例如，从起重、装载等工程机械和起重运输机械到消防、维修、搬运等特种车辆装备；船舶的起货机、起锚机；高炉、炼钢炉设备；船闸、舱门的启闭装置；各种自动输送线等。

2. 各种需要作用力大的推、挤、压、剪、切、挖等作业装置。在这些场合，液压传动已经具有垄断地位。例如，各种液压机；金属的压铸、成型设备；金属材料的轧制、压延、拉伸、剪切设备；塑料注射机、吹塑机、挤塑机等塑料机械；拖拉机、收割机以及其它砍伐采掘用的农业机械和林业机械；隧道、矿井或地面的挖掘设备；各种船舶的舵机等。

3. 高响应、高精度的控制。例如火炮的跟踪驱动；炮塔的稳定装置；舰艇的消摆等特种装置；飞机、导弹的姿态控制和驱动；高精度加工机床的定位系统；工业机器人的驱动及控制；金属板材、皮革的切片及压下的厚度控制；高速卷取装置；电站调速系统；高性能振动台和试验机等。

4. 多种工作程序组合的自动操纵与控制。例如组合机床；机械加工自动线；各种多工作程序的轻工机械等。

5. 特殊工作场所。例如地下、水下、防爆等特殊环境的作业装备。

§ 1-3 液压传动的工作液体

液体作为液压传动的介质，对工作性能有重要影响。本节仅对工作液体进行概要的叙述，更详尽的内容可以查阅有关书籍及手册。

一、对工作液体的基本要求

1. 润滑性 工作液体不仅是液压传动的介质，而且还对运动副起润滑作用。因此，工作液体的油膜应对材料表面有牢固的吸附力，并且油膜的抗挤压强度高。

2. 粘性 粘性过低会增加泄漏，粘性过大则使摩擦损失增大。因此，工作液体应该具有与工作条件相符的适当的粘性，并且油温变化时粘度的变化应该小，即要求粘度指数尽可能高。

3. 洁净度 工作液体中不应含有超过规定的固体颗粒、杂质，以及由于油品老化而析出的沥青等渣质。对工作液体的污染度已有相应的计量标准来评价。

4. 防蚀性及相容性 工作液体所具有的少量活性物质及酸度，对与其相接触的金属材料不应产生腐蚀性。水基工作液体则应具有防锈性。工作液体对密封材料、涂料等非金属材料化学作用程度（即相容性）应仔细考虑。某些液体对密封材料有一定的影响。

5. 抗燃性 矿物油具有可燃性，因此作为液压油使用时要求其闪点、燃点高。在易燃、易爆场所应选用合成油或乳化液型的液体。

6. 抗泡性 油中混有气泡时，应能迅速析出，以免被带到液压系统中去而影响工作。

7. 稳定性 水分、受热和氧化均会加速油质的恶化、过早丧失正常的工作性能并析出沥青等杂质。因此工作液体的稳定性应好，以保证使用寿命。

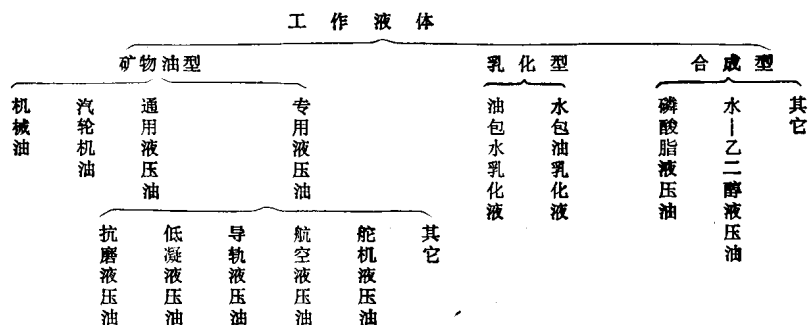
此外，长期接触工作液体应该对人身健康无害。

为了提高上述性能，液压传动采用的矿物油或非矿物油型工作液体中，均适当地添有诸如抗氧化、抗泡、油性、抗磨、改进粘度指数、降凝、防锈等添加剂。

二、工作液体的种类及选择

(一) 工作液体的种类及主要性能

液压传动可使用的工作液体种类很多，主要可分为三类：矿物油型（石油基型）、乳化型以及合成型。矿物油型为可燃性液体，后两种为抗燃性液体。每一类中又有不同品种：



在表 1-2 中列出了主要的工作液体性质。

(二) 工作液体主要品种的简要说明

1. 机械油 是一种价格较低的工业用中质润滑油，抗氧化稳定性较差，常用于一般机床、机械的润滑。在液压传动中用于要求不高的场合。目前增加抗氧、抗泡剂后的机械油性能已有改善。

2. 汽轮机油 是以深度精制的润滑油馏分为基础，加入其它添加剂调合而成。它是一种抗氧化、抗乳化性好，相当纯净的液压用油。常用于要求较高的液压系统。

3. 通用液压油（精密机床液压油） 它以汽轮机油馏分为基础，再加入多种添加剂。其抗氧化、抗磨、抗泡、粘温性能均好。适用于要求较高的中、低压液压系统。

以上三种油的低温性不够好，因此主要用于室内的液压装备。

4. 抗磨液压油 是一种油膜具有较高的强度和抗磨性的液压油，适用于高压系统（特别

表 1-2 工作液体的性质

种类	可燃性液体					抗燃性液体			
	矿物油型					合成型		乳化型	
	机械油	汽轮机油	通用液压油	抗磨液压油	低凝液压油	磷酸脂液	水—乙二醇液	油包水型	水包油型
性能									
密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	0.85~0.90					1.1~1.5	1.04~1.10	0.92~0.94	1.0
粘度	小~大	小~大	小~大	小~大	小~大	小~大	小~大	小	小
粘度指数 不低于	—	90	90	95	130	130~180	140~170	130~150	极高
润滑性	优	优	优	优	优	优	良	良	可
防腐蚀性	优	优	优	优	优	良	良	良	可
闪点/ $^{\circ}C$ 不低于	165~200	180~195	170~200	170	150~170	难燃	难燃	难燃	不燃
凝点/ $^{\circ}C$ 不高于	-10~-15	-10~-15	-10	-25	-35~-45	-20~-50	-50	-25	-5

是叶片泵), 以及户外温度不低于 -15°C 的场合。

5. 低凝液压油 该油的低温起动性能好, 粘度指数较高, 常温时的性能也令人满意, 并且其抗剪切性能好。适用于 $-25\sim-35^{\circ}\text{C}$ 以内低温地区的户外高压系统。

6. 航空液压油 (红油) 是一种经过特殊加工的矿物油, 粘温性能和润滑性均好, 凝点低。普遍用于航空液压系统中。在各种矿物油型液压油中, 它的价格最贵。

7. 磷酸脂液 是一种合成液, 主要优点是抗燃, 并且使用温度范围宽广 ($-54\sim 135^{\circ}\text{C}$)。可用于临近高温热源。缺点是与某些密封材料不相容, 略有毒性, 并且价格贵。

8. 水—乙二醇液 含水量达 $35\%\sim 55\%$ 的合成液。优点是抗燃、低凝 (-50°C)、粘度指数高。由于含水量高, 使用上限温度为 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

9. 油包水型乳化液 含水量达 40% 的外相为油、内相为水的乳化液。既有矿物油的性质, 又具有抗燃性。缺点是使用温度不高 ($60\sim 70^{\circ}\text{C}$)。

10. 水包油型乳化液 含水量约 95% , 并有一定的润滑性。价格低廉, 使用温度上限不高 ($60\sim 70^{\circ}\text{C}$)。适用于用量大、低压并要求不燃的液压系统, 如矿井的液压支架。

三、工作液体的选用

选择工作液体时考虑的因素主要是:

1. 液压系统的环境条件 如气温的上、下限, 系统的冷却条件, 有无高温热源和明火。

2. 液压系统的工作条件 如液压泵的类型、工作压力、与金属及密封和涂料的相容性。其中, 液压泵的工作条件是选择液压油时的首要依据, 应尽可能满足液压泵样本中提出的油品要求。

3. 液压油的性质 如各类液压油的理化指标和使用性能。

4. 经济性和供货情况 如液压油的价格、使用期限、对液压元件寿命的影响, 以及当地油品的货源等。

矿物油型液压油制备容易, 来源多, 价格较低, 因此应优先选用。此外, 一般规则是工作压力低时选粘度较低的油品, 压力高时选粘度较高的油品。

第二章 液压控制阀概述

在液压系统中，除了需要液压泵供油和液压马达（或液压缸）作为执行元件来驱动工作装置外，还必需配备一定数量的液压控制阀来对液流的流动方向、压力的高低以及流量的大小进行适当的控制，以便执行元件能按照负载的要求来进行工作。因此，液压控制阀是直接影响液压系统工作过程和工作特性的重要元器件。

本章着重叙述液压阀的基本共性问题，以便为今后各章进行不同类型液压阀的分析、计算打下基础。此外，还将讨论各种主要的控制输入装置的基本性能、特点和选用原则。

§ 2-1 液压阀的功能和分类

液压控制阀（简称液压阀）的品种繁多，除了不同品种、规格的通用阀外，还有许多专用阀和复合阀。就液压阀的基本类型来说，可按以下几种方式进行分类：

一、按功能分类

1. 压力控制阀 用来控制液压系统中液流压力的阀。如：

安全阀——在紧急情况下打开，为防止系统压力过载而设置的阀。

溢流阀——用来将多余的液体排回油箱而维持液压系统的压力基本恒定。

减压阀——将液压回路的压力降低到负载要求的调定值的阀。

顺序阀——控制压力超过规定值时，使液流经过阀进入油路中去的一种切换阀。

2. 流量控制阀 用来控制液压系统中液流流量的阀。如：

节流阀——由可调液阻构成的阀。通过调节阀口开度来控制流量的大小。

调速阀——通过的流量大小可以不受阀进出口压力变化影响的一种流量阀。基本上是带压力补偿的节流阀。

分流阀——按一定流量比例将进油分成两股出油的阀。

3. 方向控制阀 用来控制液压系统中液流的流动方向的阀。如：

单向阀——只允许液体沿一个方向流动，反向时则阀关闭。

换向阀——可以将两个或两个以上的油口进行接通或断开的阀。

截止阀——设置在一根管路上的开关阀。

除了上述具有单一功能的通用阀以外，还有一些专用阀和复合阀具有两种以上的功能，例如既能控制方向又能控制压力，或既能控制方向又能控制流量，等等。

二、按控制方式分类

1. 定值或开关控制阀 这类液压阀借助于通断型电磁铁或手调机构等方式，将阀芯位置或阀芯上的弹簧设定在某一工作状态，从而使液流的压力、流量或流向保持某一定值。这种阀属于最常见的普通液压阀。

2. 比例控制阀 这类阀的输出量（流量、压力）可以按照输入信号的变化规律连续、成比例地进行调节。它们常采用比例电磁铁将输入的电信号转换成力或阀的机械位移量，来

进行控制。也可以采用其它形式的电气输入控制器件。

由于比例阀结构简单、工作可靠、价格较低，性能较普通的定值控制阀有明显提高，并且可以通过电信号进行连续控制，因此在许多场合获得了广泛应用。

3. 伺服控制阀 这类阀的工作性能类似于比例控制阀。它们也是通过改变输入信号(电量或机械量)来对输出的液流参数进行连续、成比例的控制。与比例控制阀相比除了在结构上有差异外，主要在于伺服阀具有很高的动态响应和静态性能。不过，它的价格较贵，使用维护要求较高。

有关伺服控制阀的内容安排在《液压伺服控制系统》课程中作专门讲授，因此本书不进行详细讨论。

三、按连接方式分类

1. 管式 管式阀通过阀体上的螺纹孔直接与管接头、管路相连(大型阀则用法兰连接)。由于这种阀不需要过渡的连接安装板，因此比较简单。但是各个阀只能分散布置，并且由于与管路直接相联而使装卸维护不够方便。

2. 板式 板式阀是一种基本的连接方式。采用板式阀时需要配专用的过渡连接板，管路与连接板相联，而阀仅用螺钉固定在连接板上。由于这种连接方式在装卸阀时不影响管路，并且有可能将阀集中布置，因此板式结构的阀已成为主要的结构型式。

3. 集成式 液压阀是液压系统中使用数量最多的元件。为了力求使结构布置紧凑、简化管路，就采用了各种不同的集成连接方式，将阀集中

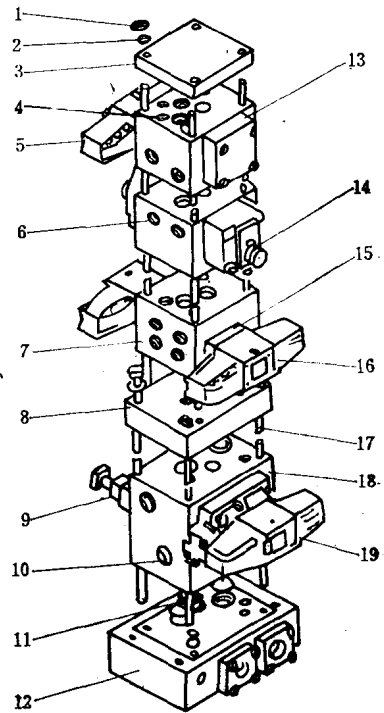


图2-1 集成式液压阀组件

1—螺母 2—弹簧垫圈 3—上盖板
4、11—“O”形密封圈 5、16—电磁阀
6、10—管接头接口 7—集成块 8—过渡板

表2-1 公称压力和公称流量系列参数

公称压力 P_g / (MPa)			公称流量 Q_g / (L · min ⁻¹)					
	1.0	10	100		1	10	100	1000
		12.5	125				125	1250
	1.6	16	160		1.6	16	160	1600
		20	200				200	2000
0.25	2.5	25		0.25	2.5	25	250	2500
		32				32	320	3200
0.4	4.0	40		0.4	4	40	400	4000
		50				50	500	5000
0.63	6.3	63		0.6	6	63	630	
	8.0	80				80	800	

布置。如用钻孔的方式将管路集中排列在集成块（阀板）中，而将板式阀安装在集成块的周围（见图2-1）；将相同通径而功能各异的板式阀设计成可以串联叠加，组成完整系统的叠加阀；取消阀体而将阀套、阀芯构成单独的组件，以便直接与布有管道的阀块中相应的孔配合而构成液压系统的插装阀。

为了适应不同应用场合的需要，液压阀的品种和规格远远超过其它液压元件。因此，必须实现它的系列化、标准化、通用化，以利于组织生产，提高产品质量并便于应用。液压阀除了其工作参数——额定工作状态下的公称压力和公称流量（或者表征液压阀进出口名义尺寸的公称通径）应符合国家标准外，它们的外部连接尺寸也应符合有关标准。表2-1是公称压力和公称流量的系列参数标准。

§ 2-2 液压阀上的作用力

进行设计、分析和试验研究时，必须对液压阀工作过程中的力学特性有透彻的了解。其中，最基本的是对阀芯上受力状况的定性分析和定量计算。

一、液压力

在液压件中，重力引起的液体压力差相对于工作压力来说占的比重极小，因此可以忽略不计。在计算时认为同一液体容腔中各点的压力 p 相等。

作用在容腔周围固体壁面上的液压力 F_p 的大小为

$$F_p = \iint_S \vec{p} dS$$

当壁面为平面时，液压力就等于压力 p 与面积 S 的乘积：

$$F_p = pS \quad \bullet$$

二、液动力

液流经过阀口时，由于流动方向和流速的变化造成液体动量的改变，因此阀芯上会受到附加的作用力——液动力。

在阀口开度一定的稳定流动情况下，液动力为稳态液动力。当阀口开度发生变化时，还有瞬态液动力的作用。

从原则上说，液动力可以根据动量定律来进行计算。但是对于不同结构形式的阀，情况有所不同。以下对两种最常见的阀芯结构形式：圆柱滑阀和锥阀来进行分析。

（一）滑阀

对于某一固定的阀口开度 x 来说，根据动量定律（参考图2-2中虚线所示的控制体积），可求得沿阀芯轴线方向的稳态液动力 F_0 。

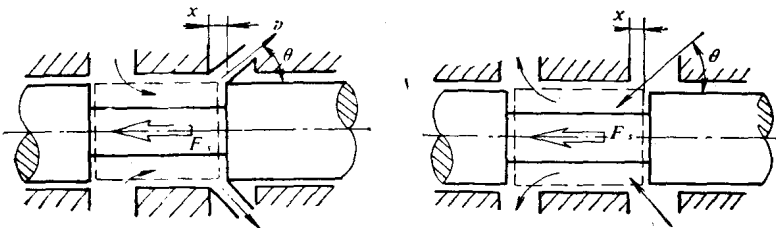


图2-2 滑阀的液动力

控制体积内的液体对其边界面的反作用力为

$$\vec{F} = -(m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1) = -(\Delta m\vec{v}) \quad (2-1)$$

该力沿阀芯的轴线方向的分力就是稳态液动力 F_s 。其值为正时作用力指向流动方向，负值时为反方向。因此，如图 2-2 a 和图 2-2 b 所示，不管液流流动方向如何，滑阀上的液动力 F_s 始终是使阀口趋于关闭。

在图 2-2 所示情况下，阀芯左侧完全开启，此处的流速很小，并且其流动方向接近于半径方向，它的动量影响可略而不计，因此液动力的绝对值为

$$F_s = \rho Q v \cos \theta \quad (2-2)$$

式中 θ ——液流经过阀口时的射流角。

冯·米塞斯 (Misses Von) 在假定液流是二维、无旋、无摩擦和不可压缩的前提下，计算出径向间隙 C_r 为零时理想直角锐边滑阀的射流角为 $\theta = 69^\circ$ 。由于径向间隙的影响，在小开口时 θ 角将有所减小 (见图 2-3，图中 x 为阀口开度)。一般计算时取 $\theta = 69^\circ$

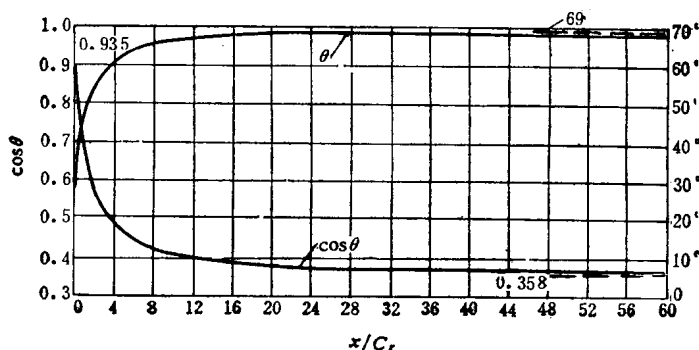


图2-3 阀口射流角

根据流体力学，式 (2-2) 可写成：

$$F_s = (2 C_d C_v w \cos \theta) x \Delta p \quad (2-3)$$

式中 w ——阀口梯度，即阀口的过流周长；

C_d ——流量系数；

C_v ——流速系数；

x ——阀口开度；

Δp ——阀口前后压力差。

虽然流量系数 C_d 与雷诺数有关，但是由于一般情况下阀口的流速比较高，所以可取 C_d 为常数。此时计算式 (2-2) 可写成

$$F_s = K_s x \Delta p \quad (2-4)$$

其中液动力系数 $K_s = 2 C_d C_v w \cos \theta$ 为常数。

以上稳态液动力的计算式已为实验结果所证实，只在阀口开度很小时才有较大误差。这主要是由于径向配合间隙和阀口棱边实际上存在一定大小的圆角所造成的影响。

当压差 Δp 一定时，由式 (2-4) 可见，稳态液动力正比于阀口开度 x 。此时液动力相当于刚度为 $K_s \Delta p$ 的液压弹簧的作用。因此， $K_s \Delta p$ 也称为液动力刚度。

当阀芯处于运动状态因而开口量 x 发生变化时，除了上述稳态液动力外，还存在瞬态液动力。这是由于阀口开度变化时流量也变化，所以阀腔内的流速将随之而改变 (图 2-4)。