

# 液 压 传 动 与 控 制

刘 秋 生 李 忠 文 主 编



華 東 工 學 院

一 九 九 〇 年 八 月

## 前 言

本书是根据高等工科院校机制专业本科对液压课程的要求，参照机电部一些高校的教学大纲，并结合我们自己的教学经验编写而成的。

由于液压传动和控制两种系统本来就不能截然分开，为了便于教学安排，本书将液压传动与控制的内容有机的融为一体。该教材与同类教材另一不同之处是，把“液压流体力学基础”一章，改为“压力与流量”，目的在于使读者明确压力和流量在液压系统中的重要性，牢固掌握分析液压元件，液压系统中的压力和流量的基本方法，避免盲目陷于流体力学的深奥的理论分析与公式推导。为了适应科学技术的发展，本书专列了“液压系统的节能和噪声控制”一章。本书每章之后均编有习题与思考题。本教材具有内容丰富，由浅入深，适用面广，既便于讲授，又便于自学的特点。

本书由刘秋生同志任主编，西安工业学院李忠文同志任副主编。参加编写的有刘秋生，李忠文（西工），王建伟（西工），柳东明

本书由东南大学王积伟同志主审。

书中难免有疏漏和错误的地方，欢迎读者批评指正。

# 目 录

第一章 绪论	1
第一节 液压传动系统的工作原理及组成	1
一、液压传动系统的工作原理	2
二、液压传动系统的组成	3
三、液压系统图的图形符号	3
第二节 液压系统的特点	3
一、液压系统的优点	4
二、液压系统的缺点	4
习题与思考题	4
第二章 液压油	5
第一节 液压油的种类	5
一、石油基矿物油	5
二、乳化型液压油	6
三、合成油	7
第二节 液压油的性质	7
一、液压油的密度和重度	7
二、液压油的粘性	8
三、液压油的可压缩性	12
四、液压油的其他性质	13
第三节 对液压油的要求与选用	14
一、对液压油的要求	14
二、液压油的选用	14
三、液压油的污染及其防止	14
习题与思考题	16
第三章 压力和流量	17
第一节 压力、流量和液压功率的概念	17
一、基本概念	17
二、压力与流量的单位	18
第二节 静止液体中的压力	20
一、静压力的产生及其分布规律	20

二、静压力的传递原理	21
三、静止液体作用于固体壁面上的力	22
第三节 流动液体中的液体压力和流速的变化规律	22
一、几个基本概念	23
二、连续性方程	26
三、伯努力方程	27
四、动量方程与流动液体对固体壁面的作用力	30
第四节 液压管路中的压力损失	34
一、沿程压力损失	34
二、局部压力损失	36
三、液压管路中的总的压力损失	37
四、液压系统的压力及其形成	37
第五节 液体流经小孔与缝隙的流量——压力特性	39
一、薄壁小孔	39
二、短孔和细长小孔	41
三、圆柱滑阀阀口	41
四、锥阀阀口	42
五、平面平行缝隙	42
六、圆环形缝隙	43
七、环形圆锥缝隙与液压卡紧力	45
第六节 液电相似	48
一、液阻、液容和液感	48
二、串联油路和并联油路	49
三、恒压源油路各液阻上的压降(压差)及静压技术	50
第七节 液压冲击和空穴现象	52
一、液压冲击	52
二、空穴现象	53
习题与思考题	54
<b>第四章 液动力元件——液压泵</b>	<b>57</b>
第一节 工作原理与基本概念	57
一、容积式泵的工作原理和种类	57
二、基本概念	58
第二节 齿轮泵	59
一、种类和特性	59
二、外啮合式齿轮泵的工作原理	59
三、外啮合式齿轮泵的流量和流量脉动	60

四、外啮合式齿轮泵结构上的几个技术问题	60
五、提高外啮合齿轮泵压力的措施	62
第三节 叶片泵	62
一、种类和特性	62
二、双作用叶片泵——受力平衡式叶片泵	62
三、单作用叶片泵——受力不平衡式叶片泵	66
四、外反馈式限压式变量叶片泵	68
第四节 柱塞泵	70
一、种类与特性	70
二、径向柱塞泵	70
三、轴向柱塞泵	70
第五节 液压泵的选用	72
习题与思考题	73
<b>第五章 液压执行元件——液压马达与液压缸</b>	<b>75</b>
第一节 液压马达	75
一、液压马达与液压泵在结构上的异同	75
二、基本概念	75
三、齿轮液压马达工作原理与输出转矩	76
四、叶片液压马达工作原理与输出转矩	77
五、柱塞马达工作原理与输出转矩	78
六、低速大扭矩液压马达的结构特点	79
第二节 摆动液压缸	81
一、类型与工作原理	81
二、输出转矩与角速度	81
第三节 直线往复式液压缸	82
一、类型	82
二、输出推力和速度	82
三、差动式连接液压缸的特点	84
四、其它液压缸	85
五、液压缸的缓冲与排气	86
六、液压缸的典型结构	88
七、液压缸的设计要点	88
习题与思考题	91
<b>第六章 液压控制元件——液压阀</b>	<b>93</b>
第一节 方向控制阀	93

08	一、单向阀	93
08	二、换向阀	94
08	三、三位换向阀的中位机能	100
08	第二节 压力控制阀	102
08	一、溢流阀	102
08	二、减压阀	107
08	三、顺序阀	109
07	四、压力继电器	111
07	第三节 流量控制阀	112
07	一、节流阀	112
07	二、调速阀和溢流节流阀	114
07	第四节 电液比例控制阀	118
07	一、比例控制压力阀	118
07	二、比例控制流量阀	118
07	三、比例控制方向阀	119
07	第五节 逻辑阀	120
07	一、逻辑阀的结构形式	120
07	二、用逻辑阀组成的方向阀	121
07	三、用逻辑阀组成的压力阀	122
07	四、用逻辑阀组成的流量阀	122
07	第六节 伺服阀	122
07	一、机液伺服阀	123
18	二、伺服阀的静特性	126
18	三、电液伺服阀	129
18	习题与思考题	131
08	<b>第七章 液压辅助元件</b>	135
08	第一节 蓄能器	135
08	一、蓄能器的作用	135
08	二、蓄能器的类型	135
08	三、蓄能器的容量计算	137
08	四、蓄能器的使用和安装	139
08	第二节 滤油器	140
08	一、对滤油器的要求	140
08	二、滤油器的类型	140
08	三、滤油器的选用和安装	142
08	第三节 油箱和热交换器	144

001	一、油箱	144
001	二、热交换器	146
002	第四节 密封装置	147
102	一、对密封装置的要求	147
102	二、密封装置的类型和特点	147
102	三、密封装置的摩擦阻力	150
702	习题与思考题	151
<b>第八章 液压基本回路</b>		152
<b>第一节 速度控制回路</b>		152
	一、调速回路	152
	二、增速回路与减速回路	169
	三、速度换接回路	171
<b>第二节 压力控制回路</b>		173
	一、调压回路	173
	二、减压回路	174
	三、卸荷与平衡回路	175
	四、保压与卸压回路	177
<b>第三节 多缸控制回路</b>		179
	一、顺序动作回路	179
	二、同步回路	181
	三、多缸快慢速互不干扰回路	182
	四、多缸卸荷回路	183
<b>第四节 换向控制回路</b>		183
	一、对换向回路的一般要求	183
	二、行程控制制动的换向回路	184
	三、时间控制制动的换向回路	185
	习题与思考题	186
<b>第九章 典型液压系统</b>		192
<b>第一节 外圆磨床液压系统</b>		192
	一、外圆磨床对换向回路性能的要求	192
	二、M1432A 外圆磨床液压系统的工作原理	192
	三、M1432A 外圆磨床液压系统的特点	195
<b>第二节 组合机床液压系统</b>		196
	一、组合机床一般的工作循环	196
	二、YT4543 型动力滑台液压系统	196

181	第三节 机械手液压系统 .....	199
841	一、概述 .....	199
741	二、JD100 立式精锻机自动上料机械手液压系统的工作原理及特点 .....	200
741	第四节 液压机液压系统 .....	204
741	一、对液压系统的要求 .....	204
601	二、YA32-200 型四柱万能液压机液压系统的工作原理及特点 .....	204
181	第五节 液压伺服控制系统 .....	207
581	一、概述 .....	207
581	二、阀控缸式仿形刀架液压伺服系统 .....	208
581	三、泵控马达式液压伺服系统 .....	209
581	习题与思考题 .....	210
981	第十章 液压传动系统的设计计算 .....	214
581	第一节 液压传动系统的设计步骤 .....	214
471	一、确定液压系统方案 .....	214
471	二、液压元件的计算和选择 .....	221
471	三、液压系统性能的验算 .....	223
771	四、绘制正式液压装置图 .....	225
671	第二节 液压系统设计计算举例 .....	225
671	一、液压缸的负载和工况分析 .....	225
181	二、液压缸主要参数的确定 .....	227
581	三、液压系统图的拟定 .....	228
881	四、液压元件的选择 .....	230
881	五、液压系统性能的验算 .....	231
881	习题与思考题 .....	234
181	第十一章 液压元件及系统的动态特性分析 .....	235
381	第一节 概述 .....	235
581	一、液压元件及系统动态特性研究的内容 .....	235
581	二、液压元件及系统动态特性研究的方法 .....	236
581	第二节 液压元件的动态特性分析 .....	236
581	一、液压管道的动态特性 .....	236
581	二、直动式溢流阀的动态特性 .....	239
681	三、液压缸的动态特性 .....	244
881	四、液压泵的动态特性 .....	248
881	第三节 液压传动系统动态特性分析 .....	253
881	一、一般液压传动系统的传递函数 .....	253



二、定压式调速阀进油节流调速系统的动态特性分析 .....	258
三、液压传动系统动态特性计算举例 .....	265
第四节 液压伺服系统的动态特性分析 .....	267
一、系统的传递函数 .....	268
二、系统的稳定性分析 .....	270
三、系统的响应特性分析 .....	271
四、系统的稳态误差 .....	273
习题与思考题 .....	275
<b>第十二章 液压系统的节能与噪声控制 .....</b>	<b>277</b>
第一节 液压系统的节能 .....	277
一、结构措施 .....	277
二、油路措施 .....	279
第二节 液压系统的噪声及其控制 .....	281
一、液压系统噪声产生的原因 .....	281
二、降低液压系统噪声的措施 .....	283
习题与思考题 .....	284
<b>附录 I SI 单位和单位换算表 .....</b>	<b>285</b>
<b>附录 II 液压系统常用图型符号 .....</b>	<b>290</b>
<b>主要参考资料 .....</b>	<b>296</b>

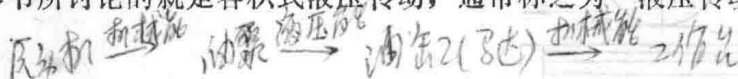
# 第一章 绪 论

传动装置是任何一部机器所不可缺少的组成部分，其作用是进行能量的传递和控制，以实现预期的设计目的。传动装置的形式有多种，按照传动所采用的工作介质不同可分为：机械传动、电气传动、气压传动和液压传动。液压传动是以液体为工作介质来传递能量和进行控制的装置。根据能量传递形式的特点和工作原理的不同，液压传动可分为静压传动和液力传动两大类。

液力传动是将原动机的机械能转换成液体的动能并以此来进行能量的传递和控制，如液力变矩器、液力偶合器等，其所传递的力和速度取决于液体射流的能量。

静压传动是将原动机的机械能转换成液体的压力能，并依靠密闭容积的变化来实现能量的传递和控制，其传递的速度取决于容积变化的快慢，而其工作能力取决于液体受压的程度和其作用的面积，故又称为容积式液压传动。

本书所讨论的就是容积式液压传动，通常称之为“液压传动”，其理论基础是液压流体力学。



## 第一节 液压传动系统的工作原理及其组成

### 一、液压传动系统的工作原理

液压传动系统的种类很多，其复杂程度相差很大，下面介绍一个简化了的平面磨床工作台的液压系统，用以简略地说明液压传动系统的工作原理。

图 1-1 表示某平面磨床工作台液压系统的工作原理图。由图可见，液压系统由油箱 1，滤油器 2，液压泵 4，溢流阀 8，开停阀 11，节流阀 13，换向阀 15，液压缸 19 等元件，以及连接这些元件的油管 3、5、9、10、12、14、18、27、29 和 30 等组成。液压缸的缸体固定在床身上，活塞杆 26 和工作台固接在一起。

当电动机带动液压泵 4 旋转时，液压泵便从油箱 1 中吸油，油液经滤油器 2 通过油管 3 进入液压泵后，被输送到油管 10。在图 1-1(a)所示的状态下，油液流经开停阀 11，油管 12，节流阀 13，油管 14，换向阀 15，油管 18 进入液压缸 19 的左腔；液压缸右腔的油液经油管 27，换向阀 15，油管 29 流回油箱。于是液压油推动活塞 25 并带动工作台一起向右运动，这就实现了用液压油来驱动机床部件的运动。

工作台的侧面装有行程挡块 21 和 24。当工作台向右移动到其左挡块 21 碰到换向杆 17 时，换向杆绕其支点 16 顺时针方向转动，拨动换向阀阀芯 28 使之移向左位，如图 1-1(b)所示的状态。此时，从油管 14 来的油液经换向阀 15 后，沿油管 27 进入液压缸的右腔，液压缸左腔的油液经油管 18，换向阀 15，油管 29 流回油箱，于是推动活塞并带动工作台一起向左

运动。当工作台向左移动到其右挡块 24 碰到换向杆 17，使其逆时针方向转动而使阀芯 28 移向右位，回复到图 1-1(a) 的状态时，工作台又向右运动。如此循环下去，工作台便不停地实现左右复往运动，使得磨削加工得以持续地进行下去。

调节节流阀 13 开口的大小，就可以改变单位时间内进入液压缸油液的体积的多少，从而就可以改变工作台运动速度的大小。假如节流口开大一些，单位时间流经节流阀而进入液压缸的油液的体积就多一些，工作台的运动速度就会快一些，反之假如节流口关小一些，单位时间进入液压缸的油液的体积就会少一些，从而使工作台运动的速度慢一些。

溢流阀 8 的作用是调节和稳定系统所需要的最大工作压力，并溢出多余的油液。当工作台运动时，液压缸的活塞必须克服导轨的摩擦阻力和切削阻力，此时进入液压缸的油液必须具有足够的稳定压力，才能推动工作台运动。阻力越大，油液所具有的稳定压力就必须越高。调节溢流阀 8 中的弹簧 7 使之与液压缸的最大阻力相平衡。当液压系统中油液的压力稍大于溢流阀的弹簧调定压力时，钢珠 6 就被顶开，油液经油管 5 流回油箱，这时油液的压力，即液压泵的输出压力不再升高而保持一个定值。由此可见，溢流阀在控制油液最高压力

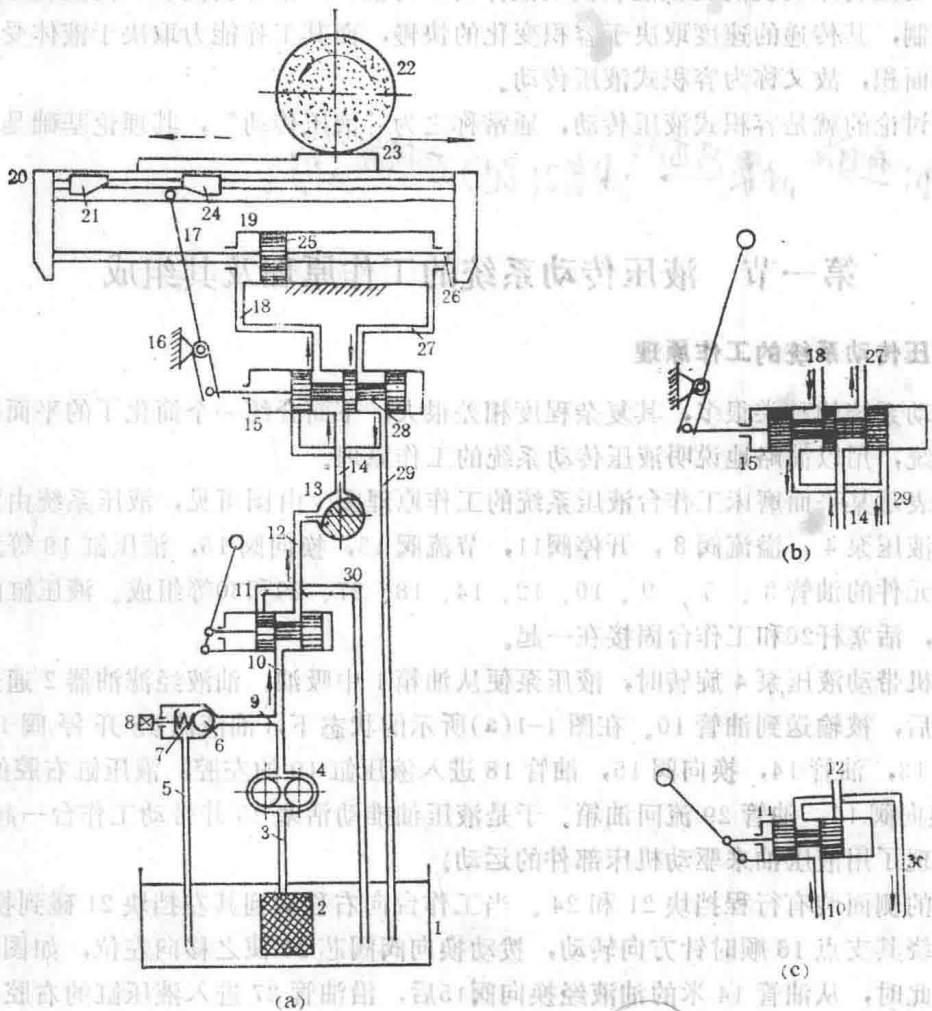


图 1-1 磨床工作台液压系统半结构图

的同时，还起着将液压泵(这里是定量泵，其单位时间内所输出的油液体积不变)输出的多余油液流回油箱的作用。

当要求工作台短期停止运动时(如装卸工件或测量尺寸等)，可以推动开停阀11的操纵手柄，使其阀芯处于左位，如图1-1(c)的状态，这时液压泵输出的油液由油管10，开停阀11和油管30直接流回油箱，不再进到液压缸中去，工作台于是就停止运动。

滤油器2的作用是滤去油中的污物杂质，保证进入液压泵和系统的油液清洁，使系统能正常工作。

如上所述，液压传动就是依靠受压力的液体并借助于密闭容积的变化来实现能量的转换和传递的。

## 二、液压传动系统的组成

从上面的例子可以看出，液压传动系统的主要组成部分有以下几个方面：

1. 动力元件部分，如各种类型的液压泵。它是把电动机输出的机械能转换成液体的压力能。
2. 执行元件部分，如各类液压缸和液压马达。它是把液体的压力能转换成机械能以带动工作部件做功。
3. 控制元件部分，如各种类型的控制阀类。它们适控制与调节液压系统中油液的压力，流量和流动方向，以满足液压系统工作性能的要求并实现各种不同的工作循环。
4. 辅助元件部分，除上述三项以外的其他元件的总称，包括油箱、滤油器、油管等。它们对保证液压系统工作的可靠性、稳定性和持久性都有着重要的作用。

此外，还有必不可少的传动工作介质，通常是液压油。

## 三、液压系统图的图形符号

图1-1所示的液压系统基本上表示了各元件的结构原理。它直观性强，容易看懂，对初学者是比较方便的，但绘制不便，特别是当液压系统复杂时更是如此。为了简化液压系统复杂原理图的绘制，世界各国多以图形符号来绘制。我国已制订了液压系统图的图形符号(GB786-76)。这些符号只表明元件的职能，连接系统的道路，并不表示各元件的具体结构。图1-2就是用图形符号绘制出的液压系统的工作原理图，各元件的编号与图1-1相对应。这种图简洁明了，绘制方便。

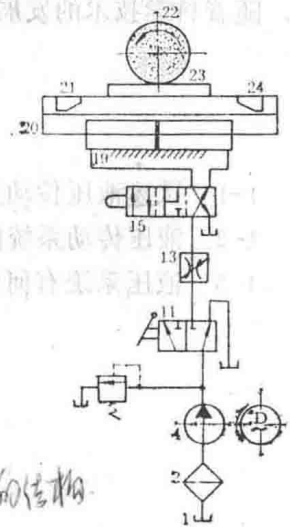


图1-2 磨床工作台液压系统职能符号图

## 第二节 液压系统的特点

液压传动和控制系统与其他各类传动和控制方式相比较，有着明显的特点。

## 一、液压系统的优点

1. 在同等功率输出的情况下，液压传动体积小，重量轻，因而惯性小，动作灵敏，可以实现频繁的启动和换向，回转运动和换向频率每分钟可达 500 次，往复直线运动的换向频率每分钟可达 400~1000 次。
2. 能在比较大的范围内实现无级调速，且调速方便，调速比可达 5000。
3. 工作比较平稳，冲击小，能在高速下实现制动和启动。
4. 控制、调节比较简单，操纵方便，省力，易于实现自动化。当与电气控制联合使用时，能实现更为复杂的自动工作循环和远程控制。
5. 易于实现过载保护。由于多数采用油液作为工作介质，因而能实现自行润滑，磨损小，寿命长。
6. 液压元件易于实现标准化，系列化，运用化，便于设计，制造和推广使用。

## 二、液压系统的缺点

液压系统的主要缺点为：

1. 泄漏
2. 噪音

随着科学技术的发展，上述两缺点，肯定会在很大程度上得到克服和控制。

## 习题与思考题

- 1-1 试述液压传动系统的工作原理。
- 1-2 液压传动系统由几部分组成，各部分的作用是什么？
- 1-3 液压系统有何优缺点？

## 第二章 液 压 油

在液压传动与控制系统中，液压油的质量和性能，直接影响着液压系统的工作性能和液压元件的使用寿命。

### 第一节 液压油的种类

液压传动与控制系统中所使用的工作介质种类很多，按其组成和性能主要分为三大类。即石油基矿物油，乳化液和合成液。

#### 一、石油基矿物油

这类液压油是属于易燃型的。它是以石油为基础精炼而成，并加入各种添加剂以改进其性能。添加剂有抗氧化添加剂，抗磨添加剂，油性添加剂，粘度指数改进剂，抗泡沫添加剂，防锈剂等。不同品种的液压油，除精炼程度不同外，就是按照不同工作性能的要求而加入不同的添加剂而构成的。现分别简述如下：

##### 1. 机械油

它是由浅度精炼的润滑油馏分制成，除了加入适量的降凝固剂以外，有时还加入抗泡沫剂。它用于一般机床的润滑和普通机床的液压系统。正常情况下的使用寿命为半年。常用的有10, 20, 30, 40, 50和90号等机械油。

##### 2. 汽轮机油

汽轮机油是用比机械油精炼程度深的润滑油馏分后加入0.3%的抗氧化剂调合而成。它有使用寿命长特点，换油期约为一年左右。该油的抗氧化安定性好。按50℃时的运动粘度值分为20, 30, 40, 45, 55号。

##### 3. 普通液压油

普通液压油是采用汽轮机油馏分作基础油，加入抗腐，抗氧化，抗泡沫，抗磨，防锈等添加剂调合而成。用于高精密的机床，或要求较高的低、中压液压系统，故又称为精密机床液压油。换油周期可达一年以上。其凝固点为-10℃，故只适用于0℃以上的工作环境。

##### 4. 液压一导轨油

其基础油与普通液压油相同。除具有普通液压油所具有的全部添加剂外，还含有油性剂，用以防止低速爬行。有静压支承导轨的机床必须选用这种液压油作为导轨部分的工作油液。

##### 5. 数控液压油

它是低粘度的变压器油馏分后并加入抗磨剂，增粘剂，油性剂和抗氧化剂等调合而成。除具有一般良好性能外，其突出的特点是粘度指数可达到175以上，且抗剪切安定性好。同

时还具有较好的润滑性，不会产生低速爬行和低速不稳定现象。

#### 6. 低凝液压油

它是用低凝点的机械油或汽轮机油为基础油，加入抗磨，抗氧，抗腐，抗泡，防锈，降凝和增粘等添加剂调合而成。该液压油在低温下具有良好的起动性能，在正常温度下又具有满意的工作性能。在粘度指数在 130 以上，而且抗剪的性能好，适用于零下 15℃ 以下的室外高压系统。

#### 7. 抗磨液压油

抗磨液压油的基础油与普通液压油相同，仅视摩擦表面的金属材料的不同而加入一定比例的抗磨剂（如钢对钢的表面，加入二烷基二硫代磷酸锌），此外还加入抗氧化，抗腐蚀，抗泡沫，抗锈蚀等添加剂，总量约为 1.5~3% 左右。该液压油的抗磨效果比较好，适用于高、中压液压系统，特别适用于高压叶片泵。凝点为 -25℃ 左右，故可适用于 -15℃ 以上的工作环境。

#### 8. 清净液压油

清净液压油是指油中所含的固体杂质，颗粒的粒度和数量都予以严格控制的油液。此外还要求有较高的抗氧化安定性。

### 二、乳化型液压油

乳化型液压油属于抗燃性液压油，它是一种极小的悬浮液滴分散在另一种液体中的分散体。一般说来，液滴的大小和化液乳之间的系系如下：

液滴大小	0.05μ以下	0.05~0.1μ	0.1~1μ	1~10μ
乳化液外观	透明乳状	灰白色乳状	蓝白色乳状	乳白色乳状

乳化液液滴能否均匀保持的关键在于乳化剂加入的数量。液滴吸附在水和油的分界面上，以降低界面能力和表面张力，从而使水和油这两种不相溶的液体能够均匀地分散、乳化。根据水和油的不同混合比例，这种油液主要可分为下述两大类：

#### 1. 水包油乳化油液

此种油液含水量可达 90~95%，其余部分大多为矿物油和各种添加剂，这样，少量的油滴就被包在大量的水内，故取名叫水包油。液压支架所用的乳化液即属于这种液压油。它由大约含有 5% 的乳化油和 95% 的水组成。乳化油由基础油，乳化剂，防锈剂，助溶，防霉剂和抗泡剂组成。乳化液中的水质好坏，对乳化液的稳定性，润滑性，防锈性都有很大的影响，所以必须予以足够的重视。

#### 2. 油包水乳化液

此种油液是含 50% 的基础油，40% 的水和各种添加剂组成的多相体系。一般是外相为油，内相为水的白色乳状液。水滴直径约为 1.5μ。其优点是较好的润滑性，防锈性，又有抗燃；但是其缺点是使用温度不能高于 60~70℃。

### 三、合成油

#### 1. 水-乙二醇液压油

这种油液含有 35~55% 的蒸馏水，所以属于抗燃性液压油。除含有水和乙二醇以外，还加有增调剂，抗磨剂，抗腐剂等。其粘度随水的增加而减小，抗燃性则相反，故要保持适当比例的水。其最大优点是凝点低(约-50℃)，粘度指数高(130~170)，为牛顿液体。这种油液除能使油漆涂料变软而外，对一般密封材料无影响，因此便于液压系统更换油液。

#### 2. 磷酸脂液压油

这种油液的优点是使用温度范围宽，可达-54℃~135℃，抗燃性，抗氧化安定性和润滑性都很好。但缺点是与多种密封材料的相容性很差，而且具有一定的毒性。

#### 3. 硅油

硅油的主要特点是压缩系数大，安定性好，耐剪切等。多用于作为减振器的工作油液。

## 第二节 液压油的性质

液体具有良好的流动性，它本身没有固定的形状，而取决于其容器的形状。在工程上把液体看成是由许多极其微小的质点组成的连续介质，其质点间的凝聚力极小，不能抵抗任何拉力和剪切力，只能承受压力并对流动呈现阻力。此外，液体还具有下述一些基本性质。

### 一、液压油的密度和重度

#### 1. 密度

单位体积中所含液体的质量称为该液体的密度，用  $\rho$  来表示。对于均质液体来说

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中  $m$ ——液体的质量  
 $V$ ——液体的体积

#### 2. 重度

单位体积中所含液体的重量为该液体的重度，用  $\gamma$  来表示。对于均质液体来说

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

式中  $G$ ——液体的重量  
 $V$ ——液体的体积

在国际单位制(SI)中，密度的单位为千克/米<sup>3</sup>(kg/m<sup>3</sup>)，重度的单位为牛顿/米<sup>3</sup>(N/m<sup>3</sup>)，由于  $G=mg$ ，所以液体的密度和重度的关系是：

$$\gamma = \rho g \quad (2-3)$$

式中  $g$ ——重力加速度，单位是米/秒<sup>2</sup>(m/s<sup>2</sup>)， $g=9.81\text{m/s}^2$ 。

液压油的密度和重度随温度和压力而变化。一般是随着温度的升高而减小，随着压力的



增高而加大。但是变化很小，所以在一般液压系统中，可以近似地把液压油的密度和重度当作常量来处理。液压系统中常用的液压油为矿物油，在计算时可取  $\rho=0.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ； $\gamma=8.83 \times 10^3 \text{N/m}^3$ 。

目前，在我国工程制(MKFS)应用还较为普遍。在工程制中，重度的单位是公斤力/米<sup>3</sup>( $\text{kgf} \cdot \text{m}^{-3}$ )，因此一般矿物油液压油的重度  $\gamma=0.9 \times 10^3 \text{kgf} \cdot \text{m}^{-3}$  (或  $0.9 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{cm}^{-3}$ )，而其密度  $\rho=92 \text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$  (或  $0.92 \times 10^{-6} \text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{cm}^{-4}$ )。

### 3. 比重

液体的比重是指该液体的重度与 4℃时蒸馏水的重度之比。它是一个没有量纲的纯数。矿物油液压油的比重可取为 0.9。

## 二、液压油的粘性

### 1. 粘性的定义

当液体在外力作用下流动时，由于液体质点之间的内聚力所呈现出来的内摩擦力，阻碍液体内部质点间的相对运动，液体的这种特性叫做液体的粘性。液体在静止时不呈现出粘性。

例如两平行平板间液体的流动，如图 2-1 所示，两平板间的距离为  $y$ 。设下平板不动，上平板以速度  $u_1$  向右运动。由于液体与固体壁面间附着力的作用，使上平板表面的液层以速度  $u_1$  向右运动，而下平板表面的液层速度为零，而中间油液的运动速度，则由于液体质点间的内聚力作用，运动较快的液层拖动运动较慢的液层，而运动较慢的液层又阻滞较快的液层，至使各液体层的流动速度各不相同，但是按一定的规律分布。由于液体流动时的阻滞作用而产生的内摩擦力  $F$  与液层的接触面积  $A$  及其相对运动的速度梯度  $du/dy$  成正比，即：

$$F = \mu A (du/dy) \quad (2-4)$$

以  $\tau = F/A$  表示单位面积上的切应力，则有：

$$\tau = \mu (du/dy) \quad \tau \text{ 的单位 Pa.} \quad (2-5)$$

上式称为牛顿内摩擦力定律。 $\mu$  是表征液体粘性的比例系数。在流体力学中，把当速度梯度变化时  $\mu$  为常数的液体称为牛顿液体，而  $\mu$  为变数的液体称为非牛顿液体。除高粘度或含有特种添加剂的油液外，一般液压油均可视为牛顿液体。

### 2. 粘性的表示方法

液体粘性的大小用粘度来表示。粘度是选用液压油的主要性能指标，是影响液体力学性质的重要因素。粘度通常用三种方法来表示。

(1) 动力粘度  $\mu$ 。它直接表示流动液体的摩擦阻力的大小，即

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (2-6)$$

在国际单位制中，动力粘度的单位为牛顿·秒·米<sup>-2</sup>( $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ )，即帕·秒(Pa·s)。我国常用CGS制来表示，动力粘度的单位为达因·秒·厘米<sup>-2</sup>( $\text{dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ )，一般称为泊(P)，泊的百分之一称厘泊(cP)。在工程制中，动力粘度的单位为公斤力·秒·米<sup>-2</sup>( $\text{kgf} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ )。这几个单位制之间的换算关系如下：