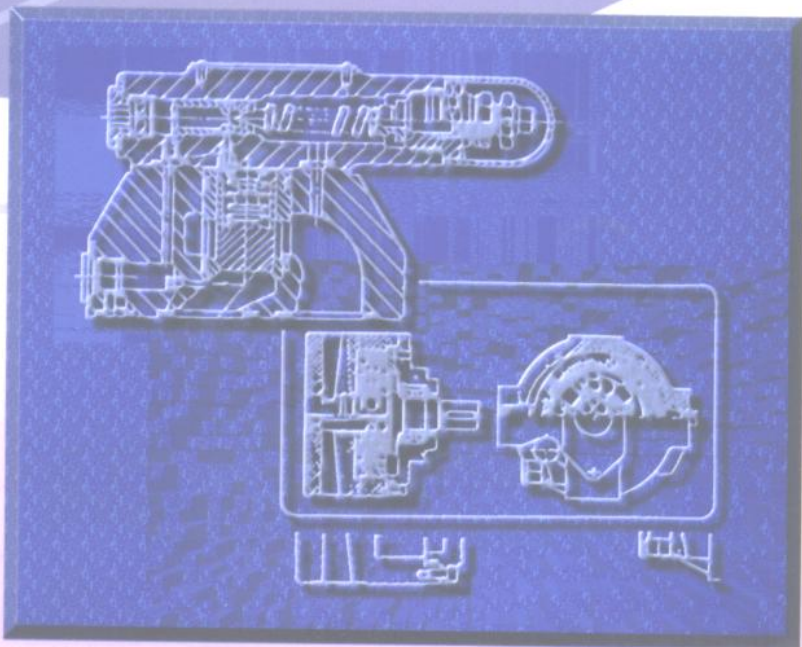


B

普通高等教育机电类规划教材

# 液压元件与系统

华中理工大学 李壮云 主 编  
浙 江 大 学 葛宜远 副主编  
华中理工大学 陈尧明



机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

# 液 压 元 件 与 系 统

主 编 李壮云 葛宜远  
副主编 陈尧明  
参 编 韩屋谷  
主 审 王明智



机 械 工 业 出 版 社

本书是全国高等学校机械工程与自动化专业教学指导委员会为适应课程体系和教学内容的改革需要而规划出版的“九五”国家级重点教材。

本书从液压元件与系统的控制机理出发,对各大类元件和系统的共性和个性分别进行阐述,深入浅出,利于培养学生举一反三和创新能力。主要内容包括:液压工作介质,液压阀的控制原理和性能分析,液压泵和液压马达(缸)的结构原理、主要性能、技术要点和变量机理,液压系统的组成与分类、静态性能分析,液压系统设计,污染控制,可靠性与失效分析。每章附有思考题和习题。

本书是机械工程及自动化专业流体传动与控制专业方向本科生教材,也可作为机械类专业本科生和研究生的教学参考书。从事液压技术的工程技术人员可作参考用书。

## 液 压 元 件 与 系 统

华中理工大学 李壮云 主编  
浙 江 大 学 葛宜远  
华中理工大学 陈尧明 副主编

\*

责任编辑:孙祥根 版式设计:冉晓华  
封面设计:姚 毅 责任校对:张晓蓉  
责任印制:路 琳

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街 22 号)

邮 政 编 码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787mm × 1092mm  $\frac{1}{16}$ ·印张 18·字数 440 千字

1999 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

印数 0 001—2 000 定价: 25.00 元

\*

ISBN 7-111-06871-8/TH·914 (课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

## 前 言

本书是根据全国流体传动及控制专业教学指导委员会推荐，由国家教委批准列为我国高等教育“九五”国家级重点教材出版规划而编写的。本书系我国高校机械工程及自动化专业流体传动与控制专业方向的专业教材，同时也可供从事液压元件和液压系统的工程技术人员、研究人员和高等工程院校有关专业师生学习和参考。

本书包括液压元件和液压系统两大部分。根据教学改革的需要，并且基于编者多年的教学和科研实践，在本书的体系和内容安排上，着重考虑了下列几点：

1) 打破原有教材按液压元件和液压系统基本回路分章节的传统体系，改为从元件和系统的共性出发，应用理论力学、流体力学和控制理论等基础知识去分析各大类液压元件和液压系统的基本规律和主要性能，形成新的体系。

2) 着重叙述基本理论、控制机理和静动态特性，力求为学生打下坚实的基础。但对结构和设计也作了适当介绍。

3) 突出不同类型元件和系统的主要特征、特性及其分析方法，以利于提高学生分析问题和解决问题的能力。每章附有思考题和习题，便于学生复习巩固及培养学生设计、计算能力。

4) 为了扩充学生的专业基础知识，增加了液压介质、污染控制、液压可靠性和失效分析等方面的内容，供教学时选用。

5) 选材注意贯彻“少而精”的原则。并注意尽量反映国内外有关液压技术的最新发展状况。

6) 内容的阐述注意循序渐进，注意启发性，便于自学。

本书由华中理工大学李壮云、浙江大学葛宜远主编，华中理工大学陈尧明副主编，燕山大学韩屋谷参编。全书编写分工如下：李壮云编写第一、二、十二及十三章；陈尧明编写第三、四及十一章；葛宜远编写第五至第七章；燕山大学韩屋谷编写第八至第十章。

太原重型机械学院王明智为本书主审。主审对本书原稿进行了细致的审阅，提出了许多宝贵的意见。

由于编者水平所限，书中难免存在缺点和疏误，恳请广大读者批评指正。

编 者  
1998年10月

# 目 录

前 言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 液压传动的工作原理和 工作特征 .....	1
第二节 传动方式比较及液压 传动的特点 .....	3
第三节 液压技术的发展概况 .....	5
思考题和习题 .....	7
<b>第二章 液压介质</b> .....	8
第一节 液压介质的功用及类型 .....	8
第二节 液压介质的主要性能要求 .....	9
第三节 矿油型液压油的分类及特点 .....	14
第四节 难燃液压油的分类及特点 .....	16
第五节 液压介质的选择 .....	17
第六节 液压介质的合理使用和维护 .....	19
思考题和习题 .....	21
<b>第三章 液压控制阀概述</b> .....	22
第一节 液压控制阀的分类及 典型结构 .....	22
第二节 液压控制阀的结构组成 .....	35
第三节 液压控制阀的控制原理 .....	41
思考题和习题 .....	43
<b>第四章 液压控制阀性能分析</b> .....	45
第一节 压力调节与调压偏差 .....	45
第二节 流量调节与等流量特性 .....	53
第三节 换向性能与工作可靠性 .....	60
第四节 液压控制阀的动特性 .....	67
第五节 液压控制阀的噪声 .....	72
思考题和习题 .....	73
<b>第五章 液压泵和液压马达概述</b> .....	75
第一节 液压泵和液压马达的 主要性能 .....	75
第二节 液压泵和液压马达的分类、典型 结构及工作原理 .....	78
思考题和习题 .....	100
<b>第六章 液压泵和液压马达的技术     要点</b> .....	102
第一节 液压泵的高速趋势 .....	102
第二节 液压泵的高压化趋势 .....	103
第三节 液压泵的低噪声要求 .....	108
第四节 低速大转矩马达 .....	112
第五节 液压马达的爬行机理 .....	116
第六节 液压泵和液压马达的 摩擦副 .....	120
思考题和习题 .....	123
<b>第七章 液压泵和液压马达的变量</b> .....	124
第一节 液压泵和液压马达的 变量原理与型式 .....	124
第二节 液压泵控制原理及动态 分析 .....	130
第三节 变量泵的其他控制形式 .....	136
第四节 变量液压马达工作原理 .....	142
第五节 恒速控制变量液压马达 .....	144
思考题和习题 .....	148
<b>第八章 液压缸</b> .....	149
第一节 液压缸的性能与分类 .....	149
第二节 缓冲装置与密封装置 .....	154
第三节 数字控制液压缸和 模拟控制液压缸 .....	163
第四节 低摩擦液压缸 .....	165
思考题和习题 .....	169
<b>第九章 液压系统分类与组成</b> .....	171
第一节 液压系统的分类 .....	171
第二节 液压系统的组成 .....	179
思考题和习题 .....	194
<b>第十章 液压系统的性能分析</b> .....	196
第一节 液压系统的静态特性 .....	196
第二节 液压系统的动态特性 .....	209
思考题和习题 .....	213
<b>第十一章 液压系统设计</b> .....	216
第一节 液压系统的方案设计 .....	216
第二节 液压系统的参数设计 .....	219
第三节 液压元件的正确选择 .....	221
第四节 液压装置的结构设计 .....	225

第五节 液压系统设计举例·····	232	思考题和习题·····	259
思考题和习题·····	236	<b>第十三章 液压可靠性及失效分析</b> ·····	260
<b>第十二章 液压系统污染控制</b> ·····	238	第一节 可靠性及其数量指标·····	260
第一节 污染控制的意义及污染物 类型·····	238	第二节 失效的定义、判据及液压 失效分类·····	265
第二节 油液污染度测定及污染度 等级·····	239	第三节 液压失效模式、机理和 产生原因·····	268
第三节 过滤器·····	243	第四节 失效分析类型与失效模式、 影响分析·····	270
第四节 过滤系统的设计·····	247	第五节 失效树分析·····	273
第五节 液压元件的污染磨损及 污染敏感度·····	254	思考题和习题·····	280
第六节 液压系统污染控制措施·····	257	<b>参考文献</b> ·····	282

# 第一章 绪 论

## 第一节 液压传动的工作原理和工作特征

一部机器通常由三部分组成，即原动机→传动装置→工作机。原动机的作用是把各种形态的能量转变为机械能，是机器的动力源；工作机是利用机械能对外做功；传动装置设在原动机和工作机之间，起传递动力和进行控制的作用。传动的类型有多种，按照传动所采用的机件或工作介质的不同可以分为：机械传动、电力传动、气压传动和液体传动。

用液体作工作介质进行能量传递和控制的，称为液体传动。按其工作原理不同，又可分为液压传动和液力传动。前者主要利用液体的压力能来传递动力；后者主要利用液体的动能传递动力。

液压传动是利用液体静压传动原理来实现的。现以图 1-1 所示的液压千斤顶为例来说明液压传动的工作原理和特征。图中缸体 3 和柱塞 4 组成提升液压缸；杠杆 5、缸体 6、柱塞 7 和单向阀 8、9 组成手摇液压泵；2 为控制阀；10、11 和 1 分别为管道和油箱。当液压泵柱塞 7 向上运动时，油腔 A 内压力降低，形成局部真空，油箱 1 中的油液在大气压力作用下，顶开单向阀 8，经吸油管 11 进入 A 腔。当柱塞 7 向下运动时，A 腔油液受挤压，压力升高，迫使单向阀 8 关闭，顶开单向阀 9 向 B 腔输送压力油，推动柱塞 4 上移，使负载 G 的位置升高。柱塞 7 动作快，重物 G 升高就快。

如果杠杆 5 停止动作，B 腔油液压力迫使单向阀 9 关闭，重物 G 停止在新的位置上。如果打开控制阀 2，则 B 腔中油液经阀 2 流回油箱 1，重物 G 在重力作用下下降。阀 2 开度大，重物 G 下降快。

由上述简例可以分析得出液压传动的一般工作特征。在图 1-1 所示的柱塞和液体之间有力的作用，单位面积上所受的力称为工作压力。设液体表面单位面积受柱塞 7 作用的压力为  $p$ ，如果柱塞 7 运动稳定，且不计阻力损失，根据帕斯卡原理，该压力  $p$  将均匀地传递到封闭液体内所有各点，由此可得

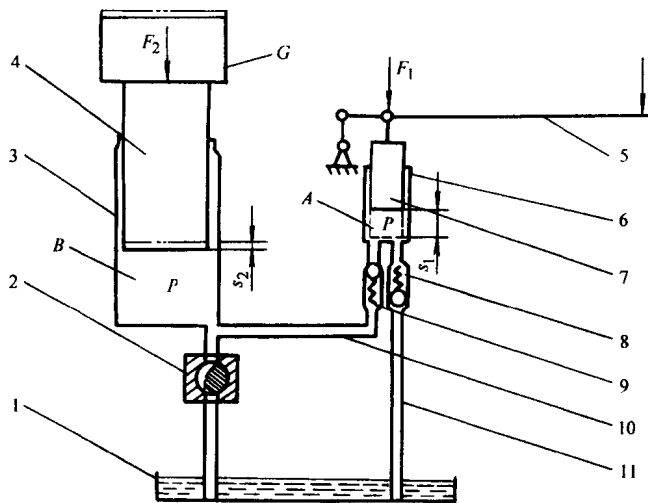


图 1-1 油压千斤顶工作原理图

- 1—油箱 2—控制阀 3、6—缸体 4、7—柱塞 5—杠杆  
8、9—单向阀 10、11—管道

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

或 
$$F_2 = pA_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-2)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ ——柱塞 7、4 的有效工作面积；

$F_1$ 、 $F_2$ ——柱塞 7、4 上的作用力。

由式(1-1)可以看出，当  $A_1$ 、 $A_2$  一定时，负载力  $F_2$  愈大，则液压缸油腔中的压力  $p$  也愈大，即泵的输出压力也愈大。这说明液压系统中的压力大小是由外负载决定的(负载包括外力及液阻)，并不决定于液压泵，泵只是按负载大小提供压力而已。由于考虑安全，液压系统中的压力不允许任意提高，但只要改变负载缸工作面积  $A_2$ ，理论上可以得到任意大小的工作力  $F_2$ 。因此，利用液压传动很容易制造出工业上需要的大型液压设备。

另外，如果不考虑液体的压缩性、泄漏和管路变形等因素，根据连续性原理，图 1-1 中柱塞 7 下行所扫过的容积应该等于柱塞 4 上行所扫过的容积，即

$$A_1 s_1 = A_2 s_2 \quad (1-3)$$

上式两边同除以运动时间  $t$ ，得

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = q$$

或 
$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{q}{A_2} \quad (1-4)$$

式中  $s_1$ 、 $s_2$ ——液压泵柱塞 7 和液压缸柱塞 4 的位移；

$v_1$ 、 $v_2$ ——液压泵柱塞 7 和液压缸柱塞 4 的平均运动速度；

$q$ ——液压泵输出的平均流量，即输入液压缸的流量。

式(1-4)表明，柱塞 4 的速度  $v_2$  与输入液压缸的流量  $q$  成正比，与柱塞工作面积  $A_2$  成反比。如果柱塞工作面尺寸一定，只要连续改变泵的流量  $q$ ，就可以连续地改变柱塞运动速度，从而实现无级调速。

显而易见，单位时间内柱塞 7 和 4 所做的功即功率  $P$  分别为

$$P_1 = v_1 F_1 = \frac{q}{A_1} p A_1 = pq$$

和 
$$P_2 = v_2 F_2 = \frac{q}{A_2} p A_2 = pq$$

由此可见， $P_1 = P_2$ ，它表明液压传动符合能量守恒及转化定律。

综上所述，可以归纳出液压传动的基本特征是：以液体为工作介质，靠处于密闭容器内的液体静压力来传递力，静压力的大小取决于负载；负载速度的传递是按液体容积变化相等的原则进行的，其速度大小取决于流量。如果忽略损失，液压传动所传递的力与速度无关。

实际的液压系统功能不一，形式多样，但其组成主要包括下列五部分。

(1) 液压泵 它把机械能转变为液压能，是液压系统的能源装置。

(2) 执行元件 它把液压能转变为机械能，包括作直线运动的液压缸和作回转运动的液压马达。

(3) 控制元件 包括对系统中液体压力、流量和方向进行控制和调节的压力阀、流量阀及方向阀等。

(4) 辅助元件 为保证系统正常工作所需的上述三类元件以外的装置，在系统中起到输



送、贮存、加热、冷却、过滤及测量等作用。

(5) 工作介质 利用它进行能量和信号传递。

本书将分别对上述五部分进行深入介绍。

## 第二节 传动方式比较及液压传动的特点

每种传动方式各有其特点、用途和适用范围。

机械传动是通过齿轮、齿条、带、链条等机件传递动力和进行控制，其优点是传动准确可靠、制造容易、操作简单、维护方便和传动效率高等。缺点是一般不能进行无级调速，远距离传动较困难，结构比较复杂等。

电力传动是利用电力设备并调节电参数来传递动力和进行控制。主要优点是：能量传递方便；信号传递迅速；标准化程度高；易于实现自动化等。缺点是：运动平稳性差，易受外界负载的影响；惯性大，起动及换向慢；成本较高；受温度、湿度、振动、腐蚀等环境影响较大。为了改善其传动性能，有些场合，往往与机械、气压或液压传动结合使用。

气压传动是用压缩空气作为工作介质进行能量传递和控制。优点是：结构简单；成本低；易于实现无级调速；阻力损失小；动作迅速反应快；防火、防爆，对工作环境适应性好。缺点是：空气易压缩，负载对传动特性的影响较大；工作压力低（一般小于 0.8MPa），只适用于小功率传动。

表 1-1 中列举了各种传动方式的几种重要传动性能比较。与其他传动方式相比，液压传动有其独特的优点，主要是：

表 1-1 各种传动方式的主要传动特性比较

性能比较 传动方式	功率与 重量比	转矩与 转动惯量比	响应 速度	可控性	负载 刚度	调速 范围
机械传动	小	小	低	差	中等	小
电力传动	小	小	中等	中等	差	中等
机电传动	小	小	中等	中等、好	差	中等、大
气压传动	中等	中等	低	中等	差	小
液压传动	大	大	高	好	大	大

1) 单位功率的重量轻，即能以较轻的设备重量获得很大的力和转矩。例如，液压缸的力与重量比，比直流电动机约大 100 倍；中等功率液压马达与一般直流电动机相比较，其转矩与惯量比大 10~20 倍，功率与重量比大 8~10 倍。图 1-2 为具有相同功率的液压马达、电动机与内燃机外形尺寸比较图。对于 300kW 的液压马达，其重量约为 2100N，而 300kW 电动机的重量约为 16000N，300kW 内燃机的重量约为 15000N。这主要由于受电动机材料磁饱和以及散热的限制，电力元件中单位面积电磁力仅 0.3MPa 左右，而液压元件的工作压力已达到 32~35MPa 或更高的水平，因此与电力传动相比，液压传动的结构紧凑，重量轻，功率与重量比大，利用液压传动容易获得很大的驱动力和转矩。所以对于功率较大（大于 10kW），

而且响应速度要求较高(大于 100Hz)的设备,往往必须采用液压传动。对于飞机、舰船及行走机械,采用液压传动,则更具有减少载重和少占仓室空间的优越性。

2) 由于体积小、重量轻,因而惯性小,起动、制动迅速。例如起动一个中等功率的电动机需要几秒钟,而起动相当功率的液压马达则只需 0.1s 左右。所以利用液压传动易于实现平稳地频繁起、停、换向或变速。

3) 在运行过程中能方便地进行无级调速;调速范围大,可达 100:1 到 2000:1;而且低速性能好,例如多作用内曲线马达可在 0.5~1r/min 下平稳运转,单作用静力平衡马达的最低稳定转速可小于 5r/min。采用电力传动虽能无级调速,但调速范围小得多,且低速时不稳定。

4) 借助结构简单的液压缸可轻易地实现直线往复运动,这对机械传动相当困难,而对电力传动则更难实现。

5) 易于实现自动化。液压传动的控制调节比较简单,操作比较方便、省力,易于实现自动化。特别是与电力或气压传动配合使用时,更易于实现省力化、自动化和远距离操纵。

6) 易于实现过载保护,工作安全可靠。液压系统的工作压力很容易由压力控制元件来控制,只要设法控制压力在规定限度内,就可以达到防止过载、避免事故的目的,使工作安全可靠。

7) 液压系统的各种元件可随设备的需要任意安排,可以把液压马达或液压缸安置在远离原动机的任意位置,不需中间的机械传动环节。如果液压马达或液压缸在工作时本身位置也在变动,只要采用挠性管道联接就可以了,这是机械传动难以实现的。

8) 液体工作介质具有弹性和吸振能力,使液压传动运转平稳、可靠。运转时可自润滑,且易于散热,所以使用寿命较长。

9) 易于实现标准化、系列化和通用化,便于设计、制造和推广使用。

液压传动虽然存在许多突出的优点,但也存在以下一些缺点:

1) 液压传动以液体作为工作介质,在液压元件相对运动摩擦副间无法避免泄漏,再加上液体压缩性及管路弹性变形等原因,难以实现严格的传动比。泄漏使能量损失增加,效率降低。特别是使用矿物油作工作介质时,泄漏造成环境污染、石油资源的浪费,油液燃烧可能导致重大事故。

2) 液体粘度和温度有密切关系,当粘度随温度变化时,将直接影响泄漏、压力损失及通过节流元件的流量等,从而引起执行元件运动特性的变化。加之,液压油等工作介质的性能及使用寿命均受温度影响很大,所以液压系统不宜在很高和很低的温度下工作。

3) 传动效率较低。液压系统中能量要经过两次转换,在能量转换及传递过程中存在机械摩擦损失、压力损失及泄漏损失。加之对液压系统能量利用不尽合理等原因,使液压传动的效率偏低。

4) 液压系统的工作可靠性目前还不如电力传动和机械传动。主要原因是工作中液压元件的摩擦副承受很大的比压和相对运动速度,容易导致磨损失效。特别是当工作介质污染严重时,会加剧磨损,可能导致控制流道堵塞,使工作可靠性降低。

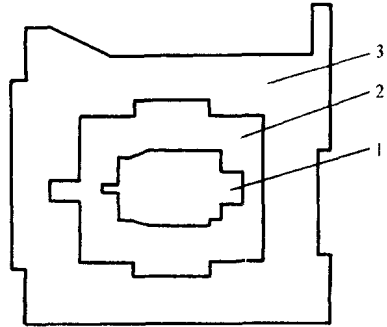


图 1-2 相同功率液压马达、电动机与内燃机外形尺寸比较图  
1—液压马达 2—电动机 3—内燃机

5) 液压元件的制造精度要求高, 造价较贵。使用、维护要求有一定的专业知识和较高的技术水平。

6) 液压能的获得与传送不如电能方便。由于压力损失等原因, 液压能不宜远距离输送。

7) 液压系统中各种元件、附件及工作介质均在封闭的系统内工作, 故障征兆难以及时发现, 故障原因较难确定。

总的说来, 液压传动的优点很多, 但其缺点也不能忽视。为了提高其竞争能力, 液压技术一直在不断发展, 借助现代科技的支持及相关学科的科技成果, 使其缺点逐步被克服, 性能不断提高, 应用领域不断扩大。当前广泛应用液压技术的领域, 一般包括下列五个方面:

1) 工业应用。包括应用于锻压机械、注塑机、挤压机、冶金机械、轧钢机械、矿山机械、食品机械、包装机械、提升机械、机床、加工中心、机器人、试验机以及其他生产设备等, 国际上一般称为工业液压技术。

2) 行走机械。包括应用于工程机械、建筑机械、农业机械、汽车以及其他可移动设备等, 一般称为行走机械液压技术。

3) 航空及航天。包括应用于飞机、宇宙飞船及卫星发射装置等, 一般称为航空航天液压技术。

4) 舰船(艇)。包括应用于船舶、舰艇中的甲板机械、操作系统及控制系统等, 一般称为船舶液压技术。

5) 海洋开发工程。包括应用于海洋开发平台、海底钻探、水下作业工具等, 一般称为海洋工程液压技术。

### 第三节 液压技术的发展概况

液压技术的发展是与流体力学的理论研究成果和工程材料、液压介质等相关学科的发展紧密相联的。1650年帕斯卡提出了封闭静止液体中压力传播的帕斯卡原理; 1686年牛顿揭示了粘性流体的内摩擦定律; 到18世纪, 流体力学的两个重要方程——连续性方程和伯努利能量方程相继建立, 这些理论成果为液压技术的发展奠定了理论基础。1795年英国人布拉默(J. Bramah)发明了世界上第一台水压机, 是他首先利用水不仅进行能量传递, 而且传递控制信号, 标志现代液压技术工程应用的开始。水压机的发明还与当时铸铁等工程材料及一些新的制造方法的出现密切相关。1851年阿姆斯特(W·G·Armstrong)发明重锤式蓄能器以后, 促使液压传动的应用迅速增加, 到19世纪90年代, 液压传动已应用于压力机、起重机、卷扬机、包装机、试验机等诸多工业部门。

由于水的润滑性差, 易产生锈蚀。电力传动的兴起曾一度使水压传动应用减少。直到1905~1908年威廉斯(H·Williams)和詹尼(R·Janney)两位美国工程师发明了用油作工作介质的轴向柱塞式液压传动装置以后, 液压技术这种停滞不前的情况才有所改观。加之, 1910年肖(H·Shaw)研制出用油作介质的径向柱塞泵, 威克斯(H·Vickers)于1936年又发明了先导式溢流阀, 特别是20世纪30年代丁腈橡胶等耐油密封材料的出现, 使液压传动逐步取代水压传动, 并得到迅速发展。

第二次世界大战期间, 由于军事工业迫切需要反应快、动作准、功率大的液压传动系统及伺服机构, 以武装各种军事装备, 因此各种高压元件获得进一步发展。战后50年代, 液

压技术迅速转人民用工业，在机床、工程机械、船舶机械、压力机械、冶金机械、轧钢机械、农业机械、汽车行业等部门得到广泛应用。由于伺服阀的造价贵、抗污染能力差，60年代末，比电液伺服阀价廉、维护容易且具有一定控制精度的电液比例阀应运而生。由于矿物油易燃，在高温、明火、矿井等特殊环境下，难燃液逐步取代了矿物油作为液压系统工作介质。经过最近半个世纪的进一步发展，液压技术已成为包括传动、控制、检测在内的、对现代机械装备的技术进步有重要影响的基础技术，已广泛应用于各工业部门，例如，国外生产的95%的工程机械，90%的数控加工中心，95%以上的自动生产线都采用了液压传动。液压技术的采用对机电产品质量和水平的提高起到了极大的促进和保证作用。采用液压技术的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志，世界先进工业国家均对液压技术的发展给予了高度重视。

当前，液压技术在实现高压、高速、大功率、高效率、低噪声、高可靠性、高度集成化等要求方面都取得了重大进展，在完善发展比例控制、伺服控制、开发数字控制技术以及机电液一体化方面也有许多新成就。随着科学技术的进步以及为了适应主机的使用要求和增强本身的竞争能力，液压技术仍然在不断发展，有些缺点正在不断被克服，其应用范围在不断扩大。目前主要发展动向如下有以下几方面：

1) 提高效率，降低能耗。通过减少摩擦和内漏，能量回收，蓄能器应用，二次调节，负载压力、流量和功率匹配以及用微型计算机对液压系统进行自适应控制等手段来降低能耗。

2) 提高控制性能，适应机电一体化主机发展的需要。这要求开发低控功率阀门，研制适应野外条件的电液比例阀，远控多路阀，适应各种工况的电液伺服阀，低成本比例阀以及不需要A/D、D/A转换，可以直接和计算机接口，易于数字显示的数字阀等。

3) 发展集成、复合、小型化、轻量化元件。随着液压系统复杂化程度和机电一体化要求的提高，要求液压元件具有高可靠性、减少配管、减少压力损失、提高效率、节省安装空间、易维修等特点，为此，必须广泛发展集成、复合、小型化、轻量化元件。继集成块式、叠加阀式、插装式之后，近几年又出现了将液压控制元件附加在液压执行元件或液压泵之上的一体化的复合式液压装置。

4) 加强以提高安全性和保护环境为目标的研究开发。包括水基难燃介质、无污染的纯水液压技术的研究、开发和应用，降低噪声，提高密封性能、减少泄漏等。

5) 提高液压元件和系统的可靠性。世界各国都把可靠性作为选择液压产品的首要准则。提高可靠性是一项系统工程，除靠科学的设计、先进的材料及完善的工艺外，还应注意应用和维护的可靠性。开展液压失效机理分析，系统状态监测、故障诊断及可靠性预测，降低元件污染敏感度等方面的研究，加强污染控制与新型工程材料的应用等对提高可靠性都有重要意义。

6) 标准化和多样化。由于技术革新的频繁出现、应用领域不断扩大、产品寿命周期缩短等原因，要求不断开发新型元件，使液压元件的品种越来越多。由于产品多样化，不利于专业化，不宜采用传统的大批量生产方式。为了解决多样化与专业化之间的矛盾，在设计中，应研究满足多样化要求的标准化设计方式，要充分利用最少要素，经过组合达到多品种。即在标准单元组合基础上，附加变化部分形成多样化；内部结构不变，只改变连接安装尺寸；利用成组技术，找出零件的类似性，进行通用化、标准化。在生产中，应采用多样化

产品加工方式和生产体系，为此，国外广泛采用数控(NC)、加工中心(MC)和柔性制造单元(FMC)组成的生产线，实现成批生产自动化，提高效率，保证质量。

7) 开拓新的应用领域。应该广泛采用新材料、新工艺和新的工作介质，提高产品的性能和工作可靠性，开发新型元件，以便满足一些新的应用领域的特殊需要。

我国从 20 世纪 50 年代末期开始发展液压工业，特别是 80 年代到 90 年代，国家对液压行业进行了重点改造，并先后引进了近五十项国外技术，使我国液压行业的产品水平、科研开发能力和工艺装备水平都有大幅度提高，液压技术在各工业部门得到广泛的应用。但是与国外先进水平相比差距很大，主要表现在：产品水平低，品种规格少，自我开发能力薄弱成套性差，特别是对重大技术装备、重点工程的配套率严重不足；产品质量不稳定，可靠性差，寿命短；一些新的应用领域如航天航空，海洋工程，生物医学工程，机器人，微型机械及高温、明火环境下所急需的一些特殊元件，几乎处于空白。液压工业已成为影响我国机械工业和扩大机电产品国际交往的瓶颈产业，迅速改变这种落后面貌，是我国液压技术界和工业界所面临的迫切任务。

### 思考题和习题

1-1 液压千斤顶尺寸如图 1-3 所示： $D = 50\text{mm}$ ， $d = 10\text{mm}$ ， $a = 400\text{mm}$ ， $b = 100\text{mm}$ ，若举起的物体  $G$  的重量为  $6.25 \times 10^4\text{N}$  (包括活塞自重)，小活塞的速度  $v_1 = 50\text{mm/s}$ ，不计摩擦阻力和泄漏，试确定作用力  $F$ ，大活塞运动速度  $v_2$  以及流量  $q$  的大小。

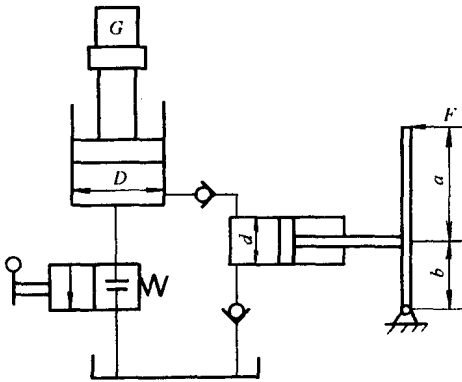


图 1-3 题 1-1 图

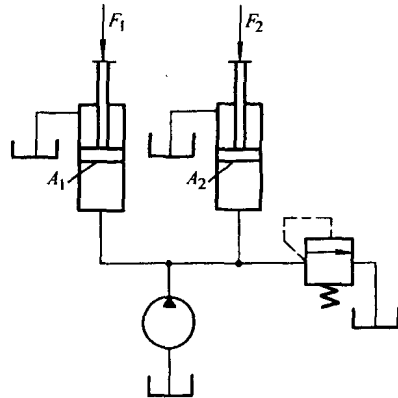


图 1-4 题 1-2 图

1-2 在图 1-4 所示的系统中，液压泵的额定压力为  $2.5\text{MPa}$ ，流量为  $10\text{L/min}$ ，溢流阀的调定压力为  $1.8\text{MPa}$ ，两液压缸活塞面积  $A_1 = A_2 = 30\text{cm}^2$ ，负载  $F_1 = 3\text{kN}$ ，负载  $F_2 = 4.5\text{kN}$ ，不计各种损失和溢流阀的调压偏差，试分析计算：

- 1) 液压泵起动后哪个液压缸先动作，为什么？速度分别为多少？
- 2) 各液压缸的输出功率和液压泵的最大输出功率为多少？

1-3 液压传动的优点很多，试列举三种应用场合，分别说明这三种场合主要取液压传动的什么优点？

## 第二章 液 压 介 质

### 第一节 液压介质的功用及类型

液压系统中用以传递能量的工作介质是系统中重要的组成部分，它在系统中要完成一系列功能，主要包括：

- 1) 传递能量和信号；
- 2) 润滑液压元件，减少摩擦和磨损；
- 3) 散热；
- 4) 防止锈蚀；
- 5) 密封液压元件对偶摩擦副中的间隙；
- 6) 传输、分离和沉淀非可溶性污染物；
- 7) 为元件和系统失效提供诊断信息。

液压系统的工作介质一直在不断变化和发展。最早使用的液压介质主要是水。20世纪初石油工业兴起后，由于油的润滑性、防锈蚀性能等比水好，矿物油很快取代水而成为液压系统主要的工作介质。油液易燃，为安全起见，以后又开发了难燃介质。近几年来，由于对环境保护的要求越来越高，人们又在研究用纯水(海水或淡水)及具有生物降解性能的液体如植物油等作液压介质。总之，随着液压技术应用领域的不断扩大和性能要求的不断提高，其工作介质的品种越来越多，但目前最广泛使用的仍然是矿物油型液压油。

按 ISO6743/4 (GB7631.2—87)，液压介质分为两大类：一类是易燃的烃类液压油(矿油型和合成烃型)；另一类是难燃(或抗燃)液压液。难燃液包括含水型如高水基液(HFA)、油包水乳化液(HFB)、水-乙二醇(HFC)及无水型合成液(HFD，如磷酸酯)两大类。各种液压介质的主要理化性能见表 2-1，本章主要介绍矿油型液压油及水基难燃液。

表 2-1 液压介质特性的比较

介 质 类 型	矿物油	HFA	HFB	HFC	HFD	水
密度(15℃时)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.85~0.9	约 1	0.95	约 1.05	约 1.25	1
运动粘度(38℃时)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	21~44	约 1	66	44	44	约 1
蒸汽压力(50℃时)/MPa	1.0×10 <sup>-9</sup>	0.01		0.01~0.015	小于 10 <sup>-6</sup>	0.012
水的质量分数(%)	无	95	40	35~55	无	100
热膨胀系数(40℃时)/℃ <sup>-1</sup>	7.2×10 <sup>-4</sup>			7.5×10 <sup>-4</sup>		3.85×10 <sup>-4</sup>
导热率(20℃时)/(W·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	0.11~0.14	0.598		约 0.3	约 0.13	0.598
比热容(常压, 20℃时)/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	1.89			3.3		4.18

(续)

介质类型	矿物油	HFA	HFB	HFC	HFD	水
声速(20℃时)/(m·s <sup>-1</sup> )	1300			1680	1407	1480
表面张力(25℃时)/(N·m <sup>-1</sup> )	3.4 × 10 <sup>-2</sup>			3.6 × 10 <sup>-2</sup>		7.2 × 10 <sup>-2</sup>
工作温度范围/℃	-6 ~ 65	4 ~ 50	4 ~ 50	-20 ~ 50	-6 ~ 65	4 ~ 50
闪点/℃	210	无	无	无	245	无
燃点/℃	320 ~ 360	无	无	无	505	无
对球轴承的润滑性	好	很差	差	很差	较差	很差
对圆锥滚子轴承的润滑性	好	很差	差	很差	较差	很差
粘度指数	70 ~ 110		130 ~ 170	140 ~ 170	低到高	高
防火性	差	很好	好	很好	好	很好
防腐性	很好	一般	好	好	较好	差
对环境污染性	高	较少	高	高	很高	无

## 第二节 液压介质的主要性能要求

如果把液压泵比作液压系统的“心脏”，其工作介质就是液压系统的“血液”，它对液压设备的工作寿命、性能和可靠性有极为重要的影响。因此液压系统根据其组成、结构、工作条件、性能要求和周围环境等因素，对其工作介质的品质和性能提出一系列相应的要求。这些要求不仅是选择介质的主要依据，而且也是判断介质是否失效和在特殊条件下是否适用的依据。

### 一、粘度

粘度是油液对流动阻力的度量。液压介质应该具有合适的粘度，粘度过大，将导致机械效率降低，温升加大，泵的吸入性能变差，起动困难、甚至产生气蚀，控制灵敏度下降，掺混在油液中的空气难以分离出来。粘度太低，将使泄漏增加、容积效率降低，控制精度下降，润滑油膜变薄、磨损加剧。因此，粘度是选择液压油液的重要依据。

油液粘度是随温度而变化的。工作过程中液压系统内温度变化较大，加之不同地区、不同环境和不同季节的影响，也会使油温发生较大变化。如果粘度随温度变化的幅度较大，则对液压系统维持正常工作十分不利，因此要求液压油液的粘度随温度变化越小越好，这就要求油液具有良好的粘温特性，这样才有利于确保油液粘度不超过液压系统正常工作所要求的最佳范围。图 2-1 表示部分液压介质的粘温特性。

对于油液粘度随温度变化的程度，常用粘度指数 VI 来表示。它代表被测油液的粘度随温度变化的程度与标准油的粘度随温度变化的程度之间的相对比较值。粘度指数越高，表示油液粘度受温度的影响越小，其粘温特性越好。为了提高油液的粘度并改善其粘温特性，往往添加粘度指数添加剂，它是一种高分子聚合物，常用的有聚异丁烯、聚甲基丙烯酸酯等。

另外，还要考虑油液的粘压特性(图 2-2)。一般而言，压力升高，由于分子间距离缩

小，油液粘度增加。对于矿物油而言，其粘度随压力升高而增加的特性在高压范围内表现得特别强烈。当采用矿物油润滑时，在滚动轴承、齿轮啮合等场合，接触部位压力很高，油液粘度剧增，很容易形成液体弹流润滑膜。对于水及靠增粘剂增加粘度的液压介质，如水-乙二醇等，压力增加，粘度增加很少，故采用这些介质润滑时难以形成弹流润滑膜。

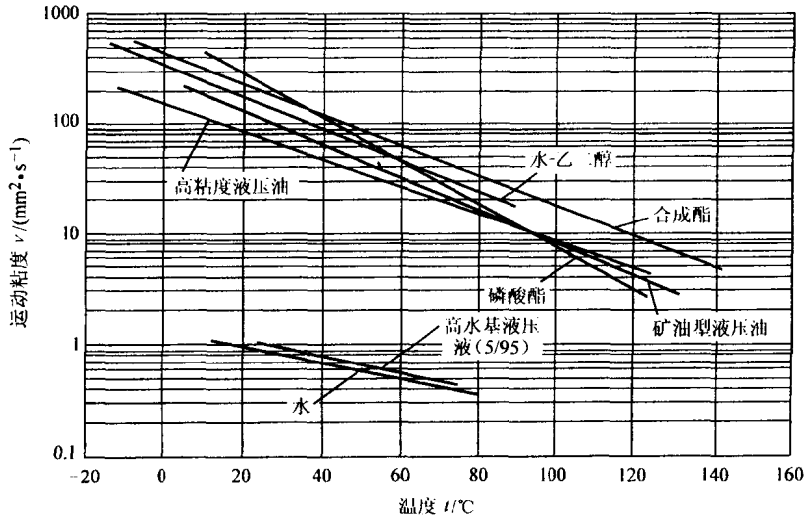


图 2-1 部分液压介质的粘度-温度特性

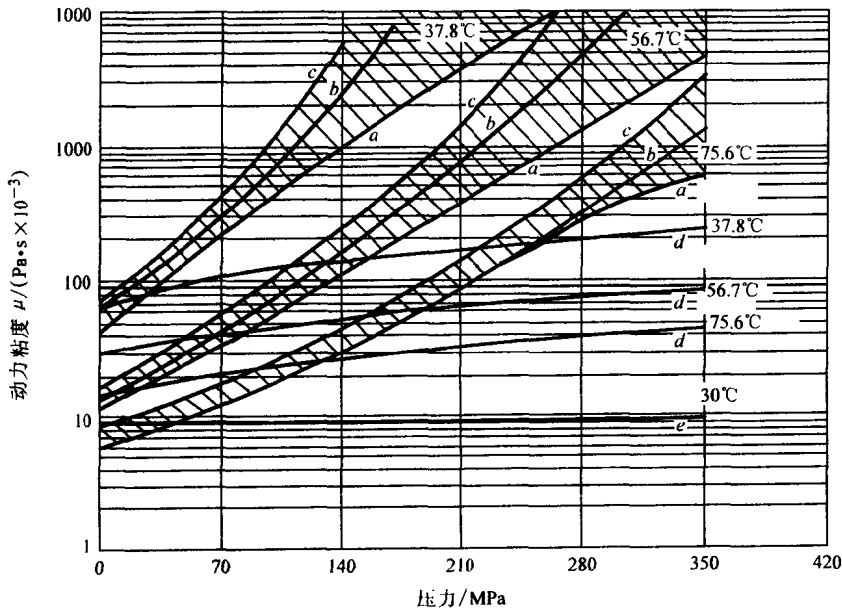


图 2-2 部分液压介质的粘度-压力特性

a—矿物液压油 b—磷酸酯 c—磷酸酯为基础的液体 d—水-乙二醇 e—水

## 二、抗磨性

抗磨性是一种与润滑油粘度无关，而主要靠加入的添加剂在对偶表面形成润滑膜而减少磨损的一种性能。在液压元件中均存在若干重载、交变而又高速滑动的摩擦副，理想的是，通过合理设计应使摩擦副中形成适当油(液)膜把对偶表面隔开，使摩擦副处于液体润滑状



态。然而,在实际工作过程中不可能一直保持完全液体润滑状态,例如在起动、停止、低速运动、载荷增大、高温等情况下,润滑油膜可能还没建立起来(如起动时)或者可能厚度变薄。如果使用水基介质时,由于粘度低,润滑油膜可能很薄。当液膜厚度小于表面粗糙度时,将产生对偶表面材料的直接接触而导致干摩擦,使摩擦阻力增加,磨损加剧,加速元件磨损失效。

为了使在难以形成液体润滑的情况下避免产生干摩擦,就必须提高工作介质的抗磨性能,即在液压介质中加入油性添加剂及极压抗磨添加剂,通过吸附或化学反应作用,在相对运动表面形成厚度很薄( $0.1\mu\text{m}$ 以下)但具有良好润滑性能的边界润滑膜,把两个对偶表面隔开,阻止基体材料直接接触,使摩擦副承载能力大为提高,磨损显著减小,这种润滑状态称为边界润滑。与液体润滑不同,边界润滑膜的形成及其润滑性能与工作介质的粘度无关,而主要与所加的添加剂有关。

改善抗磨性能的油性添加剂是一种极性较强的物质,常用的有油酸、硫化鲸鱼油、硫化烯烃棉子油等。通过物理的或化学的吸附作用,在金属表面形成边界吸附膜把两个对偶表面隔开,能有效地减少摩擦和磨损。因吸附膜对温度十分敏感,热易导致分子解吸、乱向或溶化,所以只在低温低载的情况下才能起边界润滑作用。在油性添加剂不能起作用的高温、高载的条件下,就利用所加入的极压添加剂与金属表面活性较大的原子产生化学反应而形成低熔点、高塑性的化学反应膜,其切应力和熔点比金属低,在较高温度作用下,容易产生塑性变形(软化),把金属表面凹处填平,使表面变得更加光滑(叫化学抛光作用)。化学反应膜有较高的强度,能承受较大载荷,能有效地防止对偶金属咬合、烧结和减少磨损。液压介质中常用的极压添加剂是二烷基二硫代磷酸锌(ZDTP或ZDDP)等。添加了极压剂的液压油称为抗磨液压油。

### 三、氧化稳定性和热稳定性

氧化稳定性是指油液抵抗与含氧物质,特别是与空气起化学反应而保持其性质不发生永久变化的能力。这种反应的结果可能形成固体沉淀物、胶状物和酸性物质,使元件产生锈蚀、堵塞和加剧磨损。油液的氧化速度随温度升高而加快,同时还受机械搅拌及金属的催化作用而加剧。

为了延长液压油液的使用寿命,必须提高其氧化稳定性。为此,要添加抗氧化添加剂,抗氧化剂有游离基抑制剂、过氧化物分解剂和金属钝化剂等三种类型。

热稳定性是指油液在高温时抵抗化学反应和分解的能力。当温升达到一定程度时,油液将产生一些裂化或聚合作用。裂化使分子质量减小而产生一些挥发性较高的物质;聚合产生一些树脂状物质、焦油甚至焦炭。在和金属及其他有催化作用的物质相接触的过程中,化学反应过程在某一极限温度以上可能变得很快,所以液压油不宜在这一极限温度以上工作。

### 四、抗乳化性和水解稳定性

阻止油液与水混合形成乳化液的能力称为抗乳化性。水解稳定性是指油液抵抗与水起化学反应的能力。

水可能通过多种途径侵入液压系统的油液中。例如,从油箱吸气孔吸入的潮湿空气冷凝成水珠滴入油液中,或通过液压缸活塞杆密封等部位侵入系统。由于油和水的亲和作用,几乎所有矿物油都具有不同程度的吸水性。油液的吸水能力取决于基础油的性质、所加添加剂以及温度等因素。油液吸水量的最大限度称为饱和度。当油液暴露在潮湿大气中,经过数周