

工程机械系列教材

# 工程机械 液压传动

王强 主编

GONGCHENG JIXIE YEYA CHUANDONG



国防工业出版社

National Defense Industry Press

工程机械系列教材

# 工程机械液压传动

王 强 主编



国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本教材以工程应用为目的,以液压流体力学为基础,以液压动力传递为主线,以液压元件和基本回路为基本框架,由浅入深地介绍了液压流体力学基础,各种液压元件的结构、工作原理、特点及应用,液压基本回路,并对典型工程机械液压传动系统进行分析;介绍了工程机械液压系统设计、使用维护及故障诊断与排除方法等内容。

本书可作为高等学校机械类和近机类专业的教学用书,也可作为工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程机械液压传动/王强主编. —北京:国防工业出版社,2013.4

工程机械系列教材

ISBN 978-7-118-08456-6

I. ①工... II. ①王... III. ①工程机械—液压传动—教材 IV. ①TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第068329号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12¼ 字数 277千字

2013年4月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价30.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

液压传动控制技术介于机械和电子技术之间,具有独特的优越性,在工程机械装备中得到了越来越广泛的应用,大大提高了我军工程机械装备的战术技术性能。

依据新的训练和考核大纲、有关的人才培养方案和课程标准,结合多年的教学经验与实践体会,吸收同行的经验和成果,在广泛征求意见的基础上,编写了本教材。教材主要讲述液压传动与控制技术的基本概念、工作原理,各种液压元件的结构、工作原理、特点及应用,液压基本回路,典型工程机械液压传动系统,工程机械液压系统设计、使用维护和故障诊断与排除方法等内容。教材注重学员对基本内容的掌握和应用,强调学以致用,突出实践能力的培养;注重教学内容的针对性、实用性和先进性,把重点放在提高学员运用液压技术、分析液压系统、维护液压元件及系统、分析和排除常见故障的能力上。

参加本教材编写的人员有王强(第1章、第4章~第7章)、张梅军(第2章、第3章、第8章~第10章),王强统稿,龚烈航教授主审。在编写过程中,得到了周建钊教授、郭刚副教授、储伟俊博士和王春丽女士的大力支持,还参考了很多教材和著作,在此向他们和被引用文献的作者表示深切的谢意。

由于时间仓促,编者水平所限,对于教材中存在的一些错误和不足之处敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>液压传动概述</b> .....	1
1.1	液压传动的工作原理与系统组成 .....	1
1.2	图形符号和液压系统图 .....	4
1.3	液压传动的特点及应用 .....	6
1.4	液压传动的现状和发展 .....	7
<b>第 2 章</b>	<b>液压流体力学基础</b> .....	9
2.1	液压油 .....	9
2.2	液体静力学.....	21
2.3	液体动力学.....	23
2.4	管道中液流的压力损失.....	25
2.5	孔口及缝隙的压力流量特性.....	28
2.6	液压冲击和气穴现象.....	31
<b>第 3 章</b>	<b>液压泵与液压马达</b> .....	33
3.1	主要性能与参数.....	33
3.2	齿轮泵与齿轮马达.....	36
3.3	叶片泵与叶片马达.....	41
3.4	柱塞式液压泵与马达.....	45
3.5	大力矩液压马达.....	50
3.6	液压泵与液压马达的使用与维护.....	52
<b>第 4 章</b>	<b>液压油缸</b> .....	56
4.1	液压缸基本类型和工作原理.....	56
4.2	液压缸的典型结构.....	59
4.3	液压缸的使用与维护.....	65
<b>第 5 章</b>	<b>控制调节装置</b> .....	67
5.1	液压阀概述.....	67
5.2	方向控制阀.....	69
5.3	压力控制阀.....	75
5.4	流量控制阀.....	80
5.5	新型液压控制装置.....	82
5.6	液压阀的使用与维护.....	85
<b>第 6 章</b>	<b>液压辅助装置</b> .....	89
6.1	密封装置.....	89

6.2	油管及管接头	92
6.3	滤油器	94
6.4	蓄能器	96
6.5	油箱、热交换器及压力表辅件	99
6.6	液压辅助装置的使用与维护	101
<b>第7章</b>	<b>液压基本回路</b>	<b>105</b>
7.1	压力控制回路	105
7.2	速度控制回路	108
7.3	方向控制回路	112
7.4	多执行元件控制回路	114
<b>第8章</b>	<b>工程机械液压传动系统</b>	<b>118</b>
8.1	推土机液压传动系统	118
8.2	装载机液压传动系统	124
8.3	挖掘机液压传动系统	129
8.4	汽车起重机液压系统	133
<b>第9章</b>	<b>液压传动系统的设计</b>	<b>141</b>
9.1	液压传动系统的设计步骤和设计要求	141
9.2	液压传动系统工况分析	142
9.3	液压传动系统方案的确定	144
9.4	液压传动系统原理草图拟定	146
9.5	液压元件的设计与选择	148
9.6	液压传动系统性能验算	154
9.7	液压传动系统技术文件编制	157
<b>第10章</b>	<b>液压系统安装、使用维护与故障诊断</b>	<b>158</b>
10.1	液压系统的安装和调试	158
10.2	液压传动系统的使用与维护	163
10.3	液压传动系统的故障诊断	172
<b>参考文献</b>		<b>188</b>

# 第 1 章 液压传动概述

在工程机械上,传动是指动力或能量由原动机(柴油机、汽油机等)向工作装置的传递。各种不同形式的传动,把原动机的转动变为工作装置各种不同形式的运动。例如,车轮的转动,推土机铲刀的升降,装载机铲斗的举升和收放,挖掘机动臂、斗杆、铲刀及转台的复杂运动等。

根据其工作介质的不同,常用的传动方式分为机械传动、液体传动、气体传动及电力传动等。

液体传动又称液体动力传动与控制,是以液体(液压油或液压力)为工作介质进行能量传递和控制的一种传动形式。液体传动包括液压传动和液力传动,本教材主要研究液压传动技术。

液压传动利用各种元件组成所需要的各种控制回路,再由若干回路有机组合成能完成一定控制功能的传动系统来进行能量的传递、转换与控制。因此,要运用液压传动及其控制技术、维护和修理液压系统,就要首先了解传动介质的基本物理性能及其静力学、运动学和动力学特性,了解组成系统的各类液压元件的结构、工作原理、性能,了解由这些元件所组成的各种控制回路的特点和性能。

## 1.1 液压传动的工作原理与系统组成

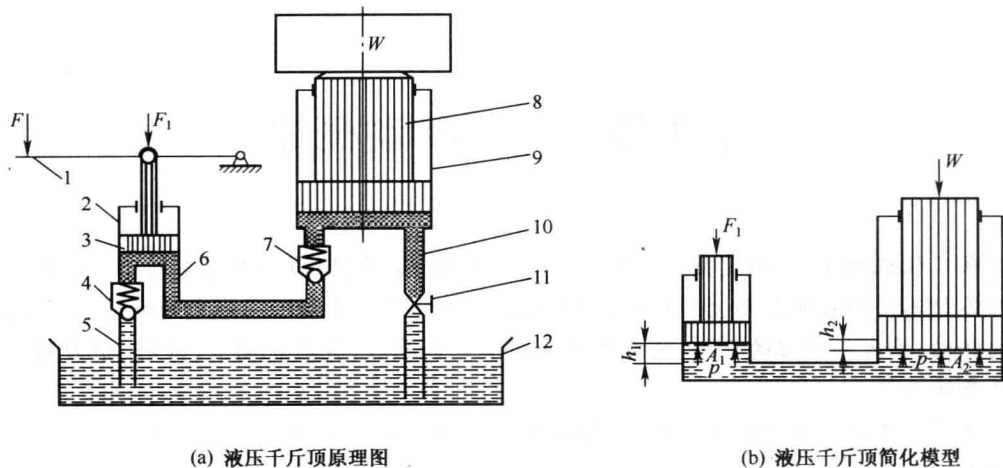
### 1.1.1 流体传动的基本工作原理

现以图 1-1 所示的液压千斤顶为例,来简述液压传动的工作原理。

提起手柄 1 使小活塞 3 向上移动,小活塞下端油腔容积增大,形成局部真空,这时单向阀 4 打开,通过吸油管 5 从油箱 12 中吸油;用力压下手柄,小活塞下移,小活塞下腔压力升高,单向阀 4 关闭,单向阀 7 打开,下腔的油液经管道 6 输入大缸体 9 的下腔,迫使大活塞 8 向上移动,顶起重物。再次提起手柄吸油时,举升缸下腔的压力油将力图倒流入手动泵内,但此时单向阀 7 自动关闭,使油液不能倒流,从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动手柄,就能不断地把油液压入举升缸下腔,使重物逐渐地升起。如果打开截止阀 11,举升缸下腔的油液通过管道 10、阀 11 流回油箱,大活塞在重物和自重作用下向下移动,回到原始位置。

由图 1-1(a)可知,大缸体 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小缸体 2、小活塞 3、单向阀 4 和 7 组成手动液压泵。

图 1-1(b)为液压千斤顶的简化模型,据此可分析两活塞之间力的比例关系、运动关系和功率关系。



(a) 液压千斤顶原理图

(b) 液压千斤顶简化模型

图 1-1 液压千斤顶工作原理图

1—杠杆手柄;2—小缸体;3—小活塞;4、7—单向阀;5—吸油管;  
6、10—管道;8—大活塞;9—大缸体;11—截止阀;12—油箱。

### 1. 力的比例关系

当大活塞上有重物负载  $W$  时,大活塞下腔的油液就将产生一定的压力  $p$ ,  $p = W/A_2$ 。

根据帕斯卡原理“在密闭容器内,施加于静止液体上的压力将以等值同时传到液体各点”。因而,要顶起大活塞及其重物负载  $W$ ,在小活塞(液压泵)下腔就必须产生一个等值的压力  $p$  (液压泵的排油压力  $p$  称为系统压力);也就是说,小活塞上必须施加力  $F_1$ ,  $F_1 = pA_1$ , 因而有

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{W}{A_2} \quad \text{或} \quad \frac{W}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1-1)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$  ——小活塞和大活塞的作用面积;

$F_1$  ——杠杆手柄作用在小活塞上的力。

式(1-1)是液压传动中力传递的基本公式,由于  $p = W/A_2$ , 因此,当负载  $W$  增大时,流体工作压力  $p$  也要随之增大,即  $F_1$  要随之增大;反之,若负载  $W$  很小,流体压力就很低,  $F_1$  也就很小。由此建立了一个很重要的基本概念,即在液压传动中,工作压力取决于负载,而与流入的液体多少无关。

### 2. 运动关系

如果不考虑液体的可压缩性、漏损和缸体、油管的变形,则从图 1-1(b)可以看出,被小活塞压出的油液的体积,必然等于大活塞向上升起后大缸扩大的体积,即

$$A_1 h_1 = A_2 h_2 \quad \text{或} \quad \frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-2)$$

式中,  $h_1$ 、 $h_2$  分别为小活塞和大活塞的位移。

从式(1-2)可知,两活塞的位移和两活塞的面积成反比,将  $A_1 h_1 = A_2 h_2$  两端同除以活塞移动的时间  $t$ ,得



$$A_1 \frac{h_1}{t} = A_2 \frac{h_2}{t}, \quad A_1 v_1 = A_2 v_2$$

即 
$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-3)$$

式中,  $v_1$ 、 $v_2$  为小活塞和大活塞的运动速度。

从式(1-3)可以看出,活塞的运动速度和活塞的作用面积成反比。

单位时间内液体流过截面积为  $A$  的某一截面的体积,称为液体的流量  $Q$ ,即

$$Q = Av \quad (1-4)$$

如果已知进入缸体的流量  $Q$ ,则活塞的运动速度为

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1-5)$$

由上述可见,液压传动是靠密闭工作容积变化相等的原则实现运动(速度和位移)传递的。调节进入缸体的流量  $Q$ ,即可调节活塞的运动速度  $v$ ,这就是液压传动能实现无级调速的基本原理。

从式(1-5)可得到另一个重要的基本概念,即活塞的运动速度取决于输入流量的大小,而与外负载大小无关。

### 3. 功率关系

由式(1-1)和式(1-3)可得

$$F_1 v_1 = W v_2 \quad (1-6)$$

式(1-6)左端为输入功率,右端为输出功率,这说明在不计损失的情况下,输入功率等于输出功率。由式(1-6)还可得出

$$P = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = p Q \quad (1-7)$$

由式(1-7)可以看出,液压传动中的功率  $P$  可以用压力  $p$  和流量  $Q$  的乘积来表示,压力  $p$  和流量  $Q$  是液压传动中最基本、最重要的两个参数,它们相当于机械传动中的力和速度,它们的乘积即为功率。

由以上分析可知,液压传动是以液体的压力能来传递动力的。

#### 1.1.2 液压传动系统的组成

工程实际中的液压传动系统,在液压泵—液压缸的基础上还设置有控制液压缸的运动方向、运动速度和最大推力的装置。下面以图 1-2 所示典型液压系统为例,说明其组成。

液压泵 3 由电动机驱动旋转,从油箱 1 经过滤器 2 吸油。当换向阀 5 阀芯处于图示位置时,压力油经阀 4、阀 5 和管道 9 进入液压缸 7 的左腔,推动活塞向右运动。液压缸右腔的油液经管道 6、阀 5 和管道 10 流回油箱。改变阀 5 阀芯工作位置,使之处于左端位置时,液压缸活塞反向运动。

改变流量控制阀 4 的开口,可以改变进入液压缸的流量,从而控制液压缸活塞的运动速度。液压泵排出的多余油液经溢流阀 11 和管道 12 流回油箱。液压缸的工作压力取决于负载;液压泵的最大工作压力由溢流阀 11 调定,其调定值应为液压缸的最大工作压力及系统中油液流经阀和管道的压力损失之总和。因此,系统的工作压力不会超过溢流阀

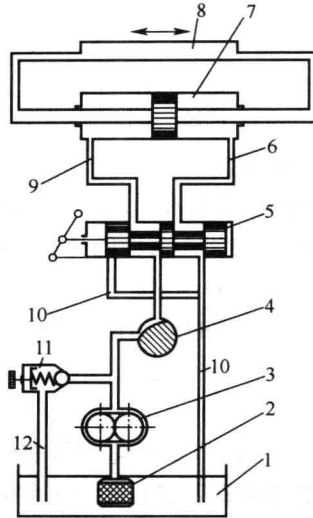


图 1-2 典型液压系统原理结构示意图

1—油箱;2—过滤器;3—液压泵;4—节流阀;5—换向阀;  
6、9、10、12—管道;7—液压缸;8—工作台;11—溢流阀。

的调定值,溢流阀对系统还起着过载保护作用。

从上面的例子可以看出,流体传动系统主要由以下 5 个部分组成。

(1) 能源装置:把机械能转换成流体压力能的装置。主要是液压泵,给系统提供压力油。

(2) 执行元件:把流体的压力能转换成机械能输出的装置。它可以是作直线运动的液压缸,也可以是作回转运动的液压马达。

(3) 控制元件:对系统中流体压力、流量和流动方向进行控制或调节的装置,以及进行信号转换、逻辑运算和放大等功能的信号控制元件。如上例中的溢流阀、流量控制阀、换向阀等。

(4) 辅助元件:除上述三种元件以外的装置。如油箱、过滤器、管件密封装置和蓄能器等,它们对保证液压系统可靠和稳定地工作有重大作用。

(5) 传动介质:传递能量的液体,即液压油(或液液液)。

液压系统就是按机械的作业要求,用油管将上述各液压元件合理地组合在一起,形成一个整体,使之完成一定的工作循环。

## 1.2 图形符号和液压系统图

下面再以图 1-3 所示推土机的液压系统为例,进一步说明液压传动的工作原理及液压系统的组成。

推土机的液压系统通常由液压泵 1、液压缸 2、换向阀 3、安全阀 4、油箱 5 及滤油器 6 等组成。发动机带动液压泵从油箱中吸油,以较高的油压将这些油输出。压力油进入液压缸,使液压缸的活塞杆伸缩,从而带动铲刀升降。换向阀有  $P$ 、 $A$ 、 $B$  和  $T$  4 个油口,分别与液压泵、液压缸上下腔及油箱相通。换向阀的阀杆有 4 个操纵位置,分别对应于铲刀的

4 种工作状态: 阀杆处于位置 I 时, 在换向阀内部 P 口与 T 口通, A、B 口被封闭, 此时, 从液压泵来的油从 P 口进入, 经 T 口回油箱, 液压缸活塞杆保持在一定位置, 铲刀高度不变, 这是换向阀的中立位置; 阀杆在位置 II 时, 换向阀内部 P 与 B 通, A 与 T 通, 液压泵来的油经换向阀进入液压缸下腔, 活塞杆缩回, 铲刀提升, 液压缸上腔的油经换向阀的 A 和 T 口回油箱; 阀杆在位置 III 时, 液压泵来的油经换向阀进入液压缸上腔, 使铲刀下降; 阀杆在位置 IV 时, 换向阀内部 4 个口全通, 铲刀呈浮动状态。

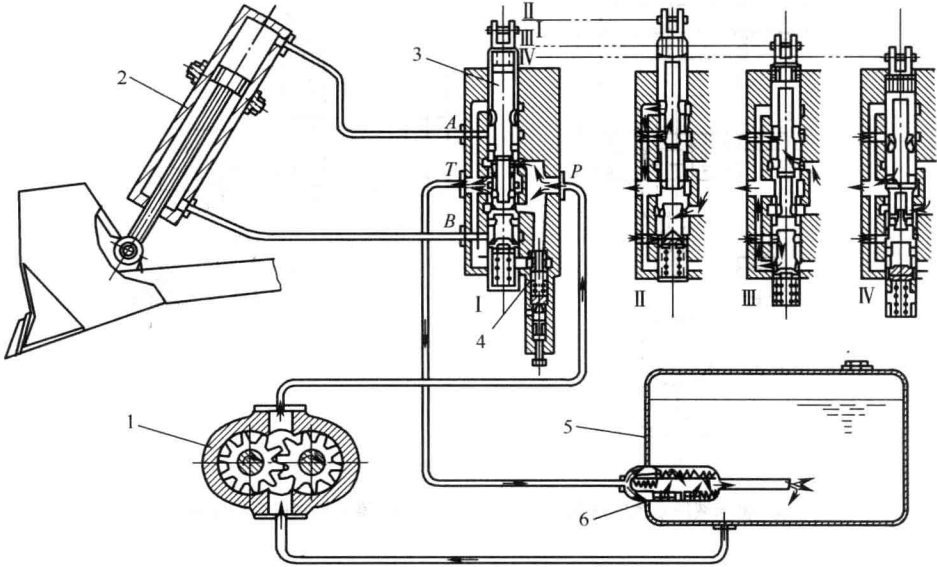


图 1-3 推土机液压系统结构图

1—液压泵; 2—液压缸; 3—换向阀; 4—安全阀; 5—油箱; 6—滤油器。

在阀杆处于位置 II 或 III 时, 如果液压缸的活塞杆伸缩到极限位置, 液压泵来的油无处可去, 其压力便急剧上升, 当系统油压升高到一定值时, 安全阀 4 开启, 液压泵来的油通过安全阀 4 流回油箱, 油压便不会继续上升, 从而保证液压泵及油管等元件的安全。

如上所述, 液压系统由许多元件组成, 如果用各元件的结构图来表达整个液压系统, 则绘制起来非常复杂, 而且往往难于将其原理表达清楚, 因而实践中常以各种符号表示元件的职能, 并将各元件的符号用通路连接起来组成液压系统图, 以表示液压传动及控制系统的原理。

我国已制定“液压与气动”图形符号标准 GB/T 786—93, 见附录。图 1-4 就是按 GB/T 786—93 绘制的图 1-2 和图 1-3 所示液压系统原理图。

液压系统图和图形符号脱离了元件的具体结构, 只表示元件的职能、连接系统的通路和整个系统的工作原理, 不表示元件的具体结构和参数, 也不表示系统管路的具体位置及元件的安装位置。

系统图中的元件符号均以静止位置或零位置表示, 例如, 图 1-2 中的换向阀 5 有三个位置, 图 1-3 中的换向阀 3 有 4 个位置, 在系统图 1-4 中与整个油路连接的只以其零位置 (即未扳动阀杆时) 表示。图 1-4(a) 中的安全阀 11 和图 1-4(b) 中的安全阀 4 有时开, 有时关, 在系统图中则以其静止位置 (阀不受油压作用时) 表示。只有为了说明系统的工作原

理确实需要画出元件在其他工作位置时,才不按上述规定画,但此时需作说明。

当需要标明元件的名称、型号和参数(如压力、流量、功率、管径等)时,一般在系统图的元件表中标明,必要时也可标注在元件符号的旁边。

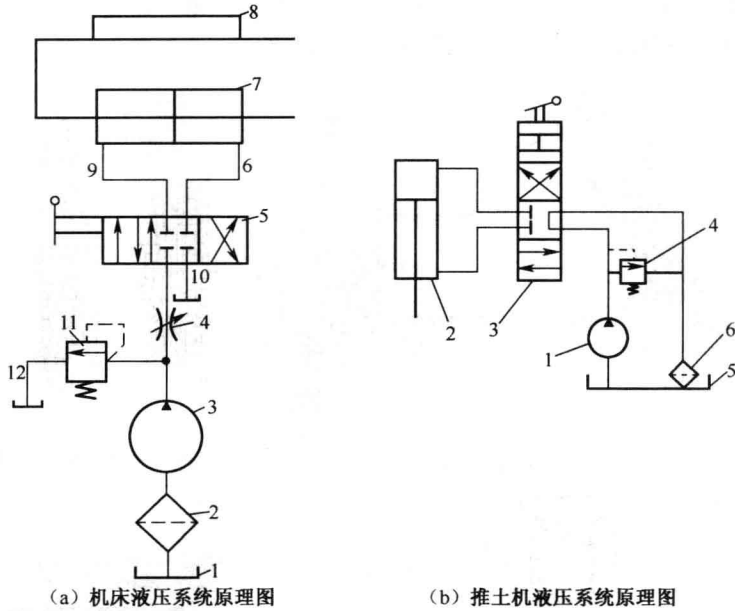


图 1-4 液压系统原理图

## 1.3 液压传动的特点及应用

### 1.3.1 液压传动的特点

#### 1. 优点

- (1) 体积小,输出力大。
- (2) 不会有过负载的危险。
- (3) 输出力调整容易。
- (4) 速度调整容易。
- (5) 易于实现自动化。

#### 2. 缺点

- (1) 接管不良造成油外泄,除了会污染工作场所外,还有引起火灾的危险。
- (2) 油温上升时,黏度降低;油温下降时,黏度升高。油的黏度发生变化时,流量也会跟着改变,造成速度不稳定。

(3) 系统将马达的机械能转换成液体压力能,再把液体压力能转换成机械能来做功,能量经两次转换损失较大,能源使用效率比机械传统低。

- (4) 液压系统大量使用各式控制阀、接头及油管,为了防止泄漏损耗,元件的加工精

度要求较高。

### 1.3.2 液压传动的应用

液压传动与控制技术应用在机床、工程机械、冶金机械、塑料机械、农林机械、汽车、船舶、航天航空等国民经济的诸多行业,是自动化技术不可缺少的手段。

从蓝天到水下,从军用到民用,从重工业到轻工业,到处都有流体传动与控制技术的应用。例如,火炮跟踪、飞机和导弹飞行、炮塔稳定、海底石油探测平台固定、煤矿矿井支撑、矿山用的钻机、火车的刹车装置、液压装载、起重、挖掘、轧钢机组、数控机床、多工位组合机床、全自动液压车床、液压机械手等,表 1-1 是液压传动的应用及应用举例。

表 1-1 液压传动的应用及应用举例

行业名称	应用场所举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、压路机、铲运机等
起重运输机械	汽车吊、港口龙门吊、叉车、装卸机械、皮带运输机等
矿山机械	凿岩机、开掘机、开采机、破碎机、提升机、液压支架等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减震器等
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等

## 1.4 液压传动的现状和发展

### 1.4.1 液压传动的发展过程

1650 年,法国人 B. 帕斯卡首先提出了静止液体中压力传递的基本规律——帕斯卡定理,为液压传动奠定了理论基础。1795 年,英国人 J. 布拉默创制的以水为工作介质的液压传动的初级形式,诞生了世界上第一台水压机。1905 年,将工作介质水改为油,进一步改善其性能。

第一次世界大战(1914—1918)后液压传动广泛应用,1925 年,维克斯(F. Vickers)发明了压力平衡式叶片泵,为近代液压元件工业或液压传动的逐步建立奠定了基础。20 世纪初康斯坦丁·尼斯克(G. Constantimscu)对能量波动传递所进行的理论及实际研究;1910 年对液力传动(液力联轴节、液力变矩器等)方面的贡献,使这两方面领域得到了发展。

第二次世界大战(1941—1945)期间,在美国机床中有 30% 应用了液压传动。第二次世界大战后,电液伺服阀的出现使液压伺服系统得到了新的发展,它把电子控制和液压传动有机地结合起来,开辟了液压传动应用的新领域。

日本液压传动的发展较欧美等国家晚了近 20 多年。在 1955 年前后,日本迅速发展液压传动,1956 年成立了“液压工业会”。近 20 年~30 年间,日本液压传动发展之快,居

世界领先地位。

液压传动的发展经历了从启蒙期、发展期到成型期和成熟期四个阶段。

第一阶段:液压传动从17世纪帕斯卡提出静压传递原理、1795年,世界上第一台水压机诞生,已有200多年的历史,但由于没有成熟的液压传动技术和液压元件,且工艺制造水平低下,发展缓慢,几乎停滞。

第二阶段:20世纪30年代,由于工艺制造水平提高,开始生产液压元件,并首先应用于机床。

第三阶段:20世纪50年代~70年代,工艺水平有了很大提高,液压与气动技术也迅速发展,渗透到国民经济的各个领域:从蓝天到水下,从军用到民用,从重工业到轻工业,到处都有流体传动与控制技术。

第四阶段:20世纪80年代初期引进美国、日本、德国的先进技术和设备,使我国的液压技术水平有了很大的提高。

### 1.4.2 液压传动的发展趋势

国外液压传动与控制技术主要向以下几个方向发展:

(1) 节省能耗,提高效率,广泛应用负荷传感系统,它具有流量适应控制和负载压力自动补偿功能,效率可提高30%以上。

(2) 用AC电机或变频电机驱动定量泵 由其组成的系统可提高效率最高达50%。

(3) 发展机电一体化元件和系统 如电子控制变量泵(即用电子系统控制泵的各种变量形式)。

(4) 发展具有比例阀的耐污染和伺服阀高精度、高频响的直动型电液控制阀。

(5) 发展内置电子系统的电液伺服比例元件、电磁阀、液压定位油缸等。

总之,目前液压传动技术正在向着高压、高速、高效率、大流量、大功率、微型化、低噪声、低能耗、经久耐用、高度集成化方向发展,向着用计算机控制的机电一体化方向发展。

## 第2章 液压流体力学基础

工程机械液压传动主要用油液作为传递能量的介质。作为一种液体,油液具有许多特性。液压流体力学就是研究液体平衡和运动规律、液体与液压元件(包括管道)间相互作用规律的一门科学。

为了更好地理解和掌握液压传动的原理及液压元件的结构和性能,正确地设计、使用和维护工程机械液压系统,必需首先掌握“液压流体力学”的基本知识。

### 2.1 液压油

液压油是液压传动的主要工作介质,此外,还有乳化型传动液和合成传动液。

#### 2.1.1 液压油的性质

##### 1. 密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度。体积为  $V$ 、质量为  $m$  的液体,其密度为

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

液压油的密度随温度的上升而有所减小,随压力的升高而稍有增加,但变化量很小,可以忽略不计;所以在一般使用条件下,可以近似地把液压油的密度当作常量。各类液压油的密度也是不同的,液压油的密度一般可以取  $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

##### 2. 可压缩性

液体受压力作用而发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。体积为  $V$  的液体,当压力增大  $\Delta p$  时,若体积变化量为  $\Delta V$ ,则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

$$k = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \quad (2-2)$$

式中,  $k$  为液体的压缩系数。

由于压力增大时,液体的体积减小,即  $\Delta V$  为负值,为了使压缩系数  $k$  具有正值,在上式的右边需加一个负号。 $k$  的倒数称为液体的体积弹性模量,即

$$K = \frac{1}{k} = - \frac{\Delta p}{\Delta V} V \quad (2-3)$$

$K$  表示产生单位体积相对变化量所需要的压力增量,在实际应用中,常用  $K$  值说明液体抵抗压缩能力的大小。

液压油的平均体积弹性模量  $K$  值在  $(1.2 \sim 2) \times 10^3 \text{MPa}$  范围内,数值很大,故对于一般液压系统,可认为油液是不可压缩的。但某些情况下,例如,在研究液压系统的动态特性,包括研究液流的冲击、系统的抗振稳定性、瞬态响应,以及计算远距离操纵的液压机构

时,往往必须考虑液压油的可压缩性。

当液压油中混入有不溶解的气体时,其体积弹性模量会大大降低,并将严重影响液压系统的工作性能。因此,在液压系统运行过程中,尽量减少油液中的空气含量。考虑到一般液压系统中很难避免混入气体,所以计算中可取  $K = 700\text{MPa}$ 。

### 3. 黏性

当液体在外力作用下流动时,一般液体各层液体分子间内聚力会阻碍分子相对运动,即分子之间产生一种内摩擦力,这一特性称为液体的黏性。黏性是液体的重要物理特性,也是选择液压用油的依据。

液体流动时,由于液体和固体壁面间的附着力以及液体的黏性,会使液体各层间的速度大小不等。如图 2-1 所示,设在两个平行平板之间充满液体,当上平板以速度  $v_0$  相对于静止的下平板向右移动时,在附着力的作用下,紧贴于上平板的液体层速度为  $v_0$ ,而中间各层液体的速度则从上到下近似呈线性递减的规律分布,这是因为在相邻两液体层间存在有内摩擦力的缘故,该力对上层液体起阻滞作用,而对下层液体则起拖曳作用。

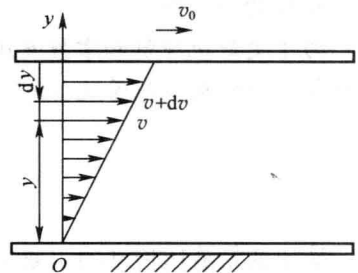


图 2-1 液体黏性示意图

实验测定结果表明,液体流动时相邻液层间的内摩擦力  $F_f$  与液层接触面积  $A$ 、液层间的速度梯度  $dv/dy$  成正比,即

$$F_f = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (2-4)$$

式中  $\mu$  ——比例系数,又称为黏度系数或动力黏度。

若以  $\tau$  表示液层间在单位面积上的内摩擦力,则上式可写成

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2-5)$$

这就是牛顿液体内摩擦定律。

由上式可知,在静止液体中,因速度梯度  $dv/dy = 0$ ,故内摩擦力为零。因此,在静止状态下,液体是不呈现黏性的。

液体黏性的大小用黏度来表示。常用的黏度有三种,即动力黏度、运动黏度和相对黏度等。

#### 1) 动力黏度 $\mu$

动力黏度是表征液体黏度的内摩擦系数,故

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

由此可知,动力黏度的物理意义是:当速度梯度等于 1 时,接触液体液层间单位面积上的内摩擦力  $\tau$ ,即为动力黏度又称绝对黏度。

在我国法定计量单位制及 SI 制中,动力黏度  $\mu$  的单位是  $\text{Pa} \cdot \text{s}$  (帕·秒)或用  $\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$  ( $\text{牛} \cdot \text{秒}/\text{米}^2$ )表示。

在 CGS 制中, $\mu$  的单位为  $\text{dyn} \cdot \text{S}/\text{cm}^2$  (达因·秒/厘米<sup>2</sup>),又称为 Pa (泊)。Pa 的百



分之一称为 cpa(厘泊)。其换算关系如下:

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{p} = 10^3 \text{cpa}$$

### 2) 运动黏度 $\gamma$

动力黏度  $\mu$  和该液体密度  $\rho$  之比值  $\gamma$  称为运动黏度,即

$$\gamma = \mu/\rho \quad (2-7)$$

运动黏度  $\gamma$  没有明确的物理意义。因为在其单位中只有长度和时间的量纲,所以称为运动黏度。它是工程实际中经常用到的物理量。

在我国法定计量单位制及 SI 制中,运动黏度  $\gamma$  的单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ (米<sup>2</sup>/秒)。

在 CGS 制中,  $\gamma$  的单位是  $\text{cm}^2/\text{s}$ (厘米<sup>2</sup>/秒),通常称为 St(沩)。1St(沩) = 100cSt(厘沩)。两种单位制的换算关系为

$$1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$$

就物理意义来说,  $\gamma$  并不是一个黏度的量,但工程中常用它来标志液体的黏度。例如,液压油的牌号,就是这种油液在 40℃ 时的运动黏度  $\gamma$  ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ) 的平均值。如 L-AN32 液压油就是指这种液压油在 40℃ 时的运动黏度  $\gamma$  的平均值为  $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

### 3) 恩氏黏度

动力黏度  $\mu$ 、运动黏度  $\gamma$  不易直接测量,只用于理论计算,实际测量中常用相对黏度(又称条件黏度)。在中国、德国、苏联等用的相对黏度是恩氏度 $^{\circ}\text{E}$ ;美国用的是赛氏秒 SSU;英国用雷氏秒 R;法国用的是巴氏度 $^{\circ}\text{B}$ 。

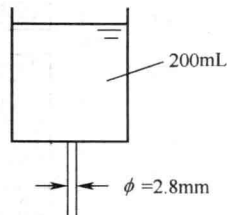


图 2-2 恩氏黏度计示意图

图 2-2 是恩氏黏度计示意图,设  $t_1$  是 200mL 测量油液流出的时间, $t_2$  是 200mL 20℃ 蒸馏水流出的时间,则恩氏黏度的大小为

$$^{\circ}\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-8)$$

恩氏黏度与 50℃ 运动黏度的换算关系:

$$\gamma = \left( 7.31^{\circ}\text{E}_t - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}_t} \right) \times 10^{-6} \quad (2-9)$$

50℃ 时运动黏度(旧标准)与 40℃ 运动黏度(新标准)润滑油名称对照关系如表 2-1 所列,各种黏度分类对比如图 2-3 所示。因此,恩氏黏度、运动黏度和动力黏度三者之间可互相转换。

表 2-1 新旧润滑油名称对照表

旧	2,4,6、 8,10 号 主轴油	7,10、 20,30、 40 号机械油	13,19 号压缩 机油	200 号 齿轮油	39 汽 缸油	44 号 轴承油	10,15 号汽轮机油	11,14 号柴油 机油
新	N2、N5、 N7、N15 号主轴油	N10、N22、 N32、N46、 N68 号 HL	N100 ~ N150、N220 压缩机油	N320 齿轮油	N680	N64	30,40 号 SB	30,40 号 CA