

机电类专业应用型人才培养特色教材

# 液压与气压

# 传动控制技术

杨晓宇 编

- ▶ 教育部卓越工程师教育培养计划推荐教材
- ▶ 教育部高等院校特色专业教材
- ▶ 国家工程教育认证专业教材
- ▶ “机电测控技术基础课程群北京市优秀教学团队”项目资助

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



非  
外  
借

机电类专业应用型人才培养特色教材

# 液压与气压传动控制技术

杨晓宇 编



机械工业出版社

本书从应用型本科院校教育培养目标要求出发,遵循液压与气压传动课程体系与内容的改革精神,参照目前高等院校专业教学基本要求,在总结近年来教学改革探索研究和实践经验的基础上编写而成。

全书共10章,以介绍液压传动为主,简单介绍气压传动。内容包括液压传动与控制概述、液压传动流体力学基础、液压动力元件、液压执行元件、液压控制阀、液压辅助元件、液压基本回路、典型液压系统、液压系统的设计计算、气压传动。各章后均附有定量的习题。

本书可作为普通高等工科院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程及控制工程、汽车工程等专业的教材,也可作为成人教育、自学考试等的教材,还可供从事液压传动与控制技术的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动控制技术/杨晓宇编. —北京:机械工业出版社, 2017. 11

机电类专业应用型人才培养特色教材

ISBN 978-7-111-58528-2

I. ①液… II. ①杨… III. ①液压传动-高等学校-教材②气压传动-高等学校-教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第285082号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐 责任校对:肖琳

封面设计:陈沛 责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·346千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-58528-2

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

# 序

为了适应我国制造业迅速发展的需要，需要培养大批素质高、工程能力与实践能力强的应用复合型人才，这需要在本科教学中改变以往重视工程科学，轻视工程实践训练；注重理论知识的传授，轻视创新精神的培养；注重教材的系统性和完整性，缺乏工程应用背景等现象。本套机电测控类系列教材的编著者结合近年来在机电测控类课程群建设以及 CDIO 教学改革方面的经验积累，组织主要专业课程授课教师在总结多年教学的基础上，本着“重基本理论、基本概念，突出实践能力和工程应用”的原则，进行了本套教材的编写工作，力求建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的机电测控类本科教材，以满足工程应用型人才的要求。本套教材突出以下特点：

(1) 科学定位。本套教材主要面向工程应用的、具有较好理论素养与实际结合能力的、动手和实践能力强的、复合型、复合型人才的培养，不同于培养研究型人才的教材，也不同于一般应用型本科的教材。

(2) 简化理论知识的讲授，突出教学内容的实用性，强调对学生实践能力和技术应用能力的培养。

(3) 采用循序渐进、由浅入深的编写模式，强调实践和实践属性，精练理论，突出实用技能，内容体系更加合理；

(4) 注重现实社会发展和就业需求，以培养工程综合能力为目标，强化应用，有针对性地培养学生的实践能力；

(5) 教材内容的设置有利于扩展学生的思维空间和学生的自主学习；着力于培养和提高学生的综合素质，使学生具有较强的创新能力，促进学生的个性发展。

本套机电测控类系列教材由俞建荣、曹建树组织策划并主持编写。

本套机电测控类系列教材得到北京市高等学校人才强教深化计划资助项目 (PHR200907221) 暨北京市机电测控技术基础课程群优秀教学团队的资助。

俞建荣 曹建树

# 前 言

“液压与气压传动”是机械类专业一门重要的专业基础课，具有实践性强、与生产实际联系紧密等特点。随着新兴产业的不断涌现，并与现代电子和信息技术相结合，进一步推动了液压与气压技术的发展，使其在国民经济各行业获得了广泛应用。本书从各院校应用型本科的定位和该课程的性质及培养目标的要求出发，结合教学实际，总结教改情况，以液压传动技术为主线，阐明了液压与气动技术的基本原理，着重培养学生分析、设计液压与气动基本回路的能力。在教材内容的设计上，注重理论联系实际，在内容的取舍上力求做到少而精。在内容安排上重点突出应用性，旨在培养适应社会发展需求的高素质应用型人才。

本书共 10 章，主要内容包括液压传动基础、常用液压元件的结构原理、液压基本回路、典型液压系统实例分析、液压系统的设计计算和气压传动等。

本书在编写过程中力求突出以下特点：

1) 充分考虑应用型本科人才培养的特点，在教学内容设计上，注重教材的理论性和系统性的同时，注重理论联系实际，注重与前后课程的联系，力求做到少而精。

2) 部分章节重点、难点附有典型例题分析，以提高学习效率。

3) 为指导学生学习，各章开篇均列出了该章的内容提要、基本要求，重点和难点，各章均附有典型练习题。

本书编写力求适应高等教育的改革和发展，但由于编者水平有限，书中难免有错误和不足之处，敬请读者批评指正，编者在此深表感谢。

# 目 录

序	
前言	
第 1 章 液压传动与控制概述	1
1.1 液压传动系统的定义及工作原理	1
1.1.1 压力与负载的关系	1
1.1.2 速度与流量的关系	2
1.1.3 能量转换关系	2
1.2 液压传动系统的组成和表示方法	2
1.2.1 液压传动系统的组成	2
1.2.2 液压传动系统的表示方法	4
1.3 液压传动系统的优缺点	4
1.3.1 液压传动的优点	4
1.3.2 液压传动的缺点	5
1.4 液压传动的应用	5
1.5 液压传动的发展前景	6
习题	6
第 2 章 液压传动流体力学基础	7
2.1 液压传动的工作介质	7
2.1.1 液压传动工作介质的物理性质	7
2.1.2 液压传动系统对工作介质的性能要求	10
2.1.3 液压传动工作介质的类型与选用	10
2.2 液体静力学	11
2.2.1 液体静压力(压强)的性质和单位	11
2.2.2 液体压力的表示方法	12
2.2.3 静压力方程及其物理本质	13
2.2.4 液体静压力对固体壁面的作用力	14
2.3 液体动力学	14
2.3.1 基本概念	15
2.3.2 连续性方程	16
2.3.3 伯努利方程	17
2.3.4 动量方程	21
2.4 管道中液流的特性	23
2.4.1 液体的两种流态及雷诺数判断	24
2.4.2 沿程压力损失	24
2.4.3 局部压力损失	27
2.4.4 管路中总的压力损失	28
2.5 液体流经小孔和缝隙的流量压力特性	29
2.5.1 液体流经小孔的流量压力特性	29
2.5.2 液体流经缝隙的流量压力特性	31
2.6 液压冲击和气穴及气蚀现象	34
2.6.1 液压冲击	34
2.6.2 气穴、气蚀现象	36
习题	38
第 3 章 液压动力元件	40
3.1 概述	40
3.1.1 液压泵的分类和职能符号	40
3.1.2 液压泵的性能参数	40
3.1.3 液压泵的性能及检测	42
3.2 齿轮泵	43
3.2.1 外啮合齿轮泵的工作原理	43
3.2.2 排量、流量计算和流量脉动	44
3.2.3 CB—B 型齿轮泵存在的问题和结构特点	44
3.2.4 内啮合齿轮泵	46
3.2.5 齿轮泵的优缺点	47
3.3 叶片泵	47
3.3.1 单作用叶片泵	47
3.3.2 双作用叶片泵	50
3.3.3 复合泵	51
3.4 柱塞泵	53
3.4.1 径向柱塞泵	53
3.4.2 轴向柱塞泵	54
3.5 液压泵性能比较和选用	56
习题	57
第 4 章 液压执行元件	59
4.1 液压马达	59
4.1.1 液压马达的工作原理及分类	59
4.1.2 液压马达的性能参数	59
4.1.3 高速液压马达	61

4.1.4 低速大转矩液压马达 .....	62	6.4 密封装置 .....	128
4.1.5 各类液压马达的性能比较及其 选用 .....	65	6.4.1 系统对密封装置的要求 .....	128
4.2 液压缸 .....	66	6.4.2 密封装置的选用 .....	128
4.2.1 液压缸的分类及计算 .....	66	6.5 管道与管接头 .....	129
4.2.2 液压缸的设计和计算 .....	72	6.5.1 管道 .....	129
习题 .....	76	6.5.2 管接头 .....	130
<b>第5章 液压控制阀</b> .....	<b>77</b>	6.6 换热器 .....	131
5.1 概述 .....	77	6.6.1 冷却器 .....	131
5.1.1 液压控制阀的功用、分类 .....	77	6.6.2 加热器 .....	131
5.1.2 阀口的结构形式和流量计算 公式 .....	78	习题 .....	132
5.2 压力控制阀 .....	79	<b>第7章 液压基本回路</b> .....	<b>133</b>
5.2.1 溢流阀 .....	79	7.1 压力控制回路 .....	133
5.2.2 减压阀 .....	84	7.1.1 调压回路 .....	133
5.2.3 顺序阀 .....	88	7.1.2 减压回路 .....	134
5.2.4 压力继电器 .....	90	7.1.3 增压回路 .....	135
5.3 流量控制阀 .....	92	7.1.4 卸荷回路 .....	136
5.3.1 节流阀 .....	92	7.1.5 保压回路 .....	138
5.3.2 调速阀和溢流节流阀 .....	94	7.1.6 平衡回路 .....	139
5.4 方向控制阀 .....	98	7.2 速度控制回路 .....	140
5.4.1 单向阀 .....	98	7.2.1 调速回路 .....	140
5.4.2 换向阀 .....	102	7.2.2 快速运动回路 .....	144
5.5 插装阀、数字阀 .....	111	7.2.3 速度换接回路 .....	145
5.5.1 插装阀 .....	111	7.3 方向控制回路 .....	146
5.5.2 数字阀 .....	115	7.3.1 换向回路 .....	147
5.6 液压控制阀的总结和展望 .....	118	7.3.2 锁紧回路 .....	148
习题 .....	119	7.4 多缸工作控制回路 .....	149
<b>第6章 液压辅助元件</b> .....	<b>121</b>	7.4.1 顺序动作回路 .....	149
6.1 过滤器 .....	121	7.4.2 同步回路 .....	151
6.1.1 油液的污染度和过滤器的过滤 精度 .....	121	7.4.3 多缸快慢速互不干扰回路 .....	152
6.1.2 过滤器的种类和典型结构 .....	122	习题 .....	152
6.1.3 过滤器的选用原则、安装位置 及注意的问题 .....	123	<b>第8章 典型液压系统</b> .....	<b>154</b>
6.2 蓄能器 .....	124	8.1 组合机床动力滑台液压系统 .....	154
6.2.1 蓄能器的作用、类型及其结构 .....	124	8.1.1 概述 .....	154
6.2.2 蓄能器的参数计算 .....	125	8.1.2 YT4543 型动力滑台液压系统 工作原理 .....	154
6.2.3 蓄能器的安装、使用与维护 .....	126	8.1.3 YT4543 型动力滑台液压系统 特点 .....	157
6.3 油箱 .....	127	8.2 3150kN 通用压力机液压系统 .....	158
6.3.1 油箱的作用和种类 .....	127	8.2.1 概述 .....	158
6.3.2 油箱的基本结构、设计、使用和 维护 .....	127	8.2.2 工作原理 .....	158
		8.2.3 性能分析 .....	161
		8.3 注塑机液压系统 .....	162
		8.3.1 概述 .....	162



8.3.2 工作原理 .....	162	习题 .....	187
8.3.3 性能分析 .....	166	<b>第 10 章 气压传动</b> .....	188
8.4 汽车起重机液压系统 .....	167	10.1 气压传动概述 .....	188
8.4.1 概述 .....	167	10.1.1 气压传动的组成及工作原理 .....	188
8.4.2 Q2—8 型汽车起重机工作原理 .....	168	10.1.2 气压传动的优缺点 .....	188
8.4.3 Q2—8 型汽车起重机性能分析 .....	171	10.1.3 气压传动系统的组成 .....	189
8.5 车床液压系统 .....	172	10.1.4 气压传动技术的应用和发展 .....	190
8.5.1 概述 .....	172	10.2 气源装置及辅件 .....	190
8.5.2 C7620 型卡盘多刀半自动车床 工作原理 .....	172	10.2.1 气源装置 .....	191
8.5.3 C7620 型卡盘多刀半自动车床的 主要性能特点 .....	174	10.2.2 辅助元件 .....	194
习题 .....	174	10.2.3 管路系统设计 .....	197
<b>第 9 章 液压系统的设计和计算</b> .....	176	10.3 气动执行元件 .....	199
9.1 明确液压系统的设计要求 .....	176	10.3.1 气缸 .....	199
9.2 工况分析和确定液压系统的主要 参数 .....	177	10.3.2 气动马达 .....	201
9.2.1 工况分析 .....	177	10.4 气动控制元件 .....	202
9.2.2 确定主要参数 .....	177	10.4.1 方向控制阀 .....	202
9.3 液压系统原理图的拟定 .....	179	10.4.2 压力控制阀 .....	206
9.4 液压元件的计算和选择 .....	180	10.4.3 流量控制阀 .....	208
9.5 液压系统的性能验算 .....	181	10.4.4 气动逻辑元件 .....	210
9.5.1 系统压力损失验算 .....	181	10.5 气动基本回路 .....	212
9.5.2 系统发热及温升验算 .....	181	10.5.1 换向控制回路 .....	212
9.6 绘制正式工作图和编写技术文件 .....	181	10.5.2 压力控制回路 .....	213
9.7 液压系统的设计计算举例 .....	182	10.5.3 速度控制回路 .....	214
9.7.1 负载分析 .....	182	10.5.4 其他基本回路 .....	215
9.7.2 负载图和速度图的绘制 .....	183	10.6 气动系统实例 .....	217
9.7.3 液压缸主要参数的确定 .....	183	10.6.1 气液动力滑台气压系统 .....	217
9.7.4 液压系统图的拟定 .....	184	10.6.2 走纸张力气控系统 .....	218
9.7.5 液压元件的选择 .....	185	10.6.3 气动计量系统 .....	219
		习题 .....	221
		<b>参考文献</b> .....	222



# 第 1 章 液压传动与控制概述

**基本要求：**通过学习，掌握液压传动的工作原理、液压系统的组成及液压传动的应用。

**重点：**掌握液压传动与控制的基本原理、系统组成。

**难点：**液压传动与控制的基本原理。

## 1.1 液压传动系统的定义及工作原理

液压传动系统是由一些功能不同的液压元件组成的，在密闭的回路中依靠运动液体的压力能进行能量传递，通过对液体的相关参数（如压力、流量等）进行调节和控制，以满足工作装置输出力、速度（或转矩、转速）的一种传动装置。液压传动系统的类型很多，应用范围也十分广泛，下面以图 1-1 所示的液压千斤顶的工作原理为例来说明其工作原理。

当向上提升杠杆 1 时，小缸 3 内的小活塞 2 上移，小缸下部因容积增大而形成真空，此时单向阀 5 关闭，油箱 10 内的液压油通过油管和单向阀 4 被吸入到小缸下腔并充满腔体。当向下压杠杆 1 时，小活塞 2 下移，液压油被挤出，压力升高，此时单向阀 4 关闭，小缸 3 内的液压油顶开单向阀 5 进入大缸 6 的下腔，迫使大活塞 7 向上移动举起重物 8。这样，经过反复提升和下压杠杆，就能将油箱的液压油不断吸入小缸，压入大缸，推动大活塞逐渐上移而将重物举起。为把重物从举高的位置顺利放下，系统设置了截止阀（放油螺塞）9。

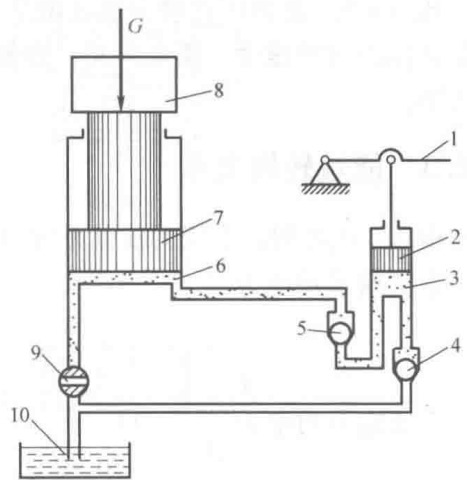


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

1—杠杆 2—小活塞 3—小缸 4、5—单向阀  
6—大缸 7—大活塞 8—重物  
9—截止阀 10—油箱

### 1.1.1 压力与负载的关系

在图 1-1 中，设小活塞和大活塞的面积分别为  $A_1$  和  $A_2$ ，作用在大活塞上的外负载为  $G$ ，施加于小活塞上的作用力为  $F_1$ ，则小腔（小缸 3）中的液体压力  $p_1 = F_1/A_1$ ，在大腔（大缸 6）中所产生的液体压力（压强） $p_2 = G/A_2$ （忽略活塞自重、摩擦力等）。根据帕斯卡原理：加在密封容器中的压力（压强）能够按照原来的大小向液体的各个方向传递，即  $p_1 = p_2 = p$ 。若忽略压力损失，则可以表示为

$$p = F_1/A_1 = G/A_2 \quad (1-1)$$

或

$$F_1 = GA_1/A_2 \quad (1-2)$$

式 (1-1) 表明，在  $A_1$ 、 $A_2$  一定时，负载  $G$  越大，系统中的液体压力  $p$  越高，外界对系统的作用力  $F_1$  就越大，因此系统的液体压力  $p$  取决于外负载的大小。式 (1-2) 表明，当  $A_1/A_2 < 1$  时，作用在小活塞上一个很小的力  $F_1$ ，便可以在大活塞上产生一个很大的力，以

举起重物  $G$ 。

### 1.1.2 速度与流量的关系

在图 1-1 中, 若不计液体的泄漏、可压缩性和系统的弹性变形等因素, 则从小缸中排出的液体体积一定等于进入大缸中的液体体积。设小活塞、大活塞运动一次的位移分别为  $S_1$ 、 $S_2$ , 则有

$$A_1 S_1 = A_2 S_2 \quad (1-3)$$

将式 (1-3) 两边同时对活塞运动的时间求导, 得

$$q_1 = A_1 v_1 = A_2 v_2 = q_2 = q \quad (1-4)$$

式中  $v_1$ 、 $v_2$ ——小活塞的平均运动速度和大活塞的平均运动速度;

$q_1$ 、 $q_2$ ——小缸输出的平均流量和大缸输入的平均流量。

由式 (1-4) 可以得到一般公式

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

式 (1-5) 是液压传动中速度调节的基本公式, 表明调节进入液压缸的液体流量, 即可调节活塞的运动速度。由此可见, 在液压传动系统中, 执行机构的运动速度取决于输入流量的大小。

### 1.1.3 能量转换关系

由图 1-1 可知, 系统的能量是守恒的。

系统输入功率为

$$P_i = F_1 v_1 = \frac{F_1}{A_1} A_1 v_1 = p_1 q_1 \quad (1-6)$$

系统输出功率为

$$P_o = G v_2 = \frac{G}{A_2} A_2 v_2 = p_2 q_2 \quad (1-7)$$

在不考虑系统其他能量损失的情况下,  $P_i = P_o = P$ , 都等于液压传动的功率, 即

$$P = pq \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表明, 液压传动的功率等于液体的压力  $p$  和流量  $q$  的乘积。所以压力和流量是液压传动中的两个重要的基本参数。它们相当于机械传动中直线运动的力和速度, 旋转运动中的转矩和转速。

## 1.2 液压传动系统的组成和表示方法

### 1.2.1 液压传动系统的组成

图 1-2 是磨床液压传动系统原理图。该液压系统能实现磨床工作台的往复运动及运动过程中的换向、调速及进给力的控制。为了实现这些功能, 需要在液压泵和液压缸之间设置一些装置。其工作原理如下:

电动机驱动液压泵3旋转,从油箱1经过滤器2吸油,并向系统提供具有一定流量的压力油。当换向阀6的阀芯处于图1-2b所示位置时,压力油经节流阀4和管道进入液压缸8的左腔,推动液压缸8的活塞9向右运动。液压缸8右腔的油液经管道、换向阀6流回油箱。当改变换向阀6阀芯的位置,如图1-2c所示,使其处于左端位置时,液压缸8的活塞9将作反向运动。换向阀6的作用是实现磨床工作台的换向运动。节流阀4的作用是调节磨床工作台10的运动速度。溢流阀5的作用是调节并稳定液压系统的工作压力,同时排出多余的压力油,对整个液压系统起过载保护作用。工作台的移动速度是由节流阀4来调节的,开大节流阀的开口,进入液压缸8的流量增多,工作台的移动速度就会增大;反之,工作台的移动速度则减慢。此时液压泵3排出的多余油液经溢流阀5和管道流回油箱1。系统工作时,液压缸8工作压力的大小取决于磨削工件所需的进给力的大小。液压泵3的最高工作压力由溢流阀5调定。

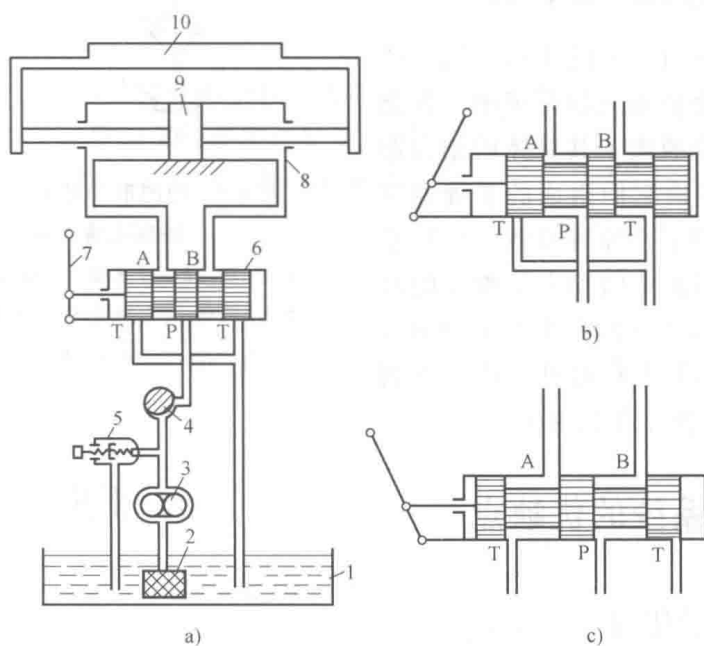


图 1-2 磨床工作台液压系统工作原理图

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—节流阀 5—溢流阀  
6—换向阀 7—手柄 8—液压缸 9—活塞 10—工作台

液压传动系统主要由动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件、工作介质五部分组成。

### 1. 动力元件

动力元件是一种能量转换装置,能将机械能转换成流体压力能。动力元件包括各种液压泵。

### 2. 执行元件

执行元件也是一种能量转换装置,能将流体的压力能转换成机械能输出。这种元件可以是做直线运动和往复摆动的液压缸,也可以是做旋转运动的液压马达。

### 3. 控制元件

控制元件是对液压系统中流体的压力、流量及流动方向等参数进行控制和调节,或者实

现信号转换、逻辑运算和放大等功能的元件。

#### 4. 辅助元件

辅助元件是指除上述三种元件以外的其他元件,即保证系统正常工作所需的辅助元件,如液压系统中的油箱、蓄能器、过滤器、管道、管接头、压力表等。辅助元件对于液压与气压系统的正常工作是必不可少的。

#### 5. 工作介质

液压系统以液压油或高水基液体作为工作介质,用它来进行能量和信号的传递。

### 1.2.2 液压传动系统的表示方法

为了简化液压传动系统的表示方法,通常采用图形符号来绘制系统的原理图。各类元件的图形符号完全脱离了其具体的结构形式,只表示其职能,由它们组成的系统原理图能简明表达系统的工作原理及各元件在系统中的作用。为此国家专门制定了相关的液压传动常用图形符号的标准(见 GB/T 786.1—2009)。图 1-3 是采用图形符号绘制的磨床工作台液压系统工作原理图。

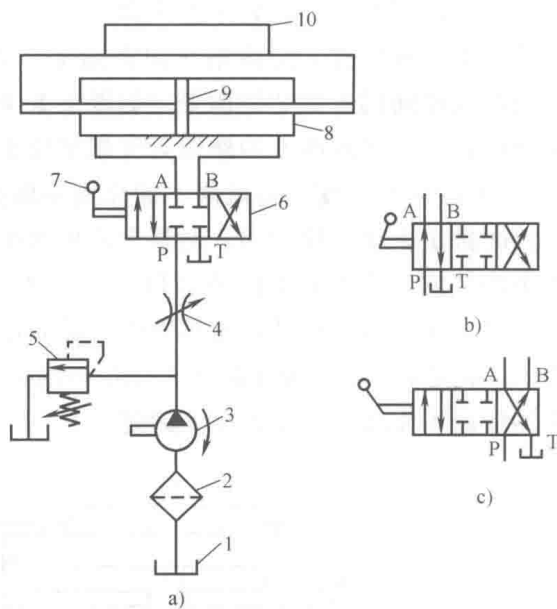


图 1-3 用图形符号表示的磨床工作台  
液压系统工作原理图

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—节流阀  
5—溢流阀 6—换向阀 7—手柄 8—液压缸  
9—活塞 10—工作台

## 1.3 液压传动系统的优缺点

### 1.3.1 液压传动的优点

1) 易于实现无级调速。通过调节流量可在运行过程中方便地实现无级调速,调速范围可达 2000:1,容易获得极低的运动速度。

2) 传递运动平稳。靠液压油的连续流动传递运动,液压油几乎不可压缩,且具有吸振能力,因此执行元件运动平稳。

3) 承载能力大。液压传动是将液压能转化为机械能驱动执行元件而做功的,系统很容易获得很大的液压能。因此驱动执行元件做功的机械能也大,可以很方便地实现低速大转矩传动或者低速大推力传动。

4) 元件使用寿命长。元件在油中工作,润滑条件充分,可延长其使用寿命。

5) 易于实现自动化。系统的压力、流量和流动方向容易实现调节和控制,特别是与电气、电子和气动控制联合起来使用时,能使整个系统实现复杂的程序动作,也可方便地实现远程控制。

6) 易于实现过载保护。液压传动采取了多种过载保护措施,能自动防止过载,避免发生事故。

7) 易于实现标准化、系列化和通用化。液压元件属机械工业基础件, 在国内外有许多专门从事液压元件制造的厂家, 除油箱和少量的专用件外, 一般的液压元件都能直接购买, 且规格齐全、品种多样。

8) 系统的布局 and 安装灵活。液压元件的布置不受严格的空位置限制, 各元件之间用管道连接, 布局 and 安装有较大的灵活性。

9) 体积小、质量轻、惯性小、反应快、结构紧凑, 易于实现快速起动、制动和频繁的换向。

### 1.3.2 液压传动的缺点

1) 不能实现严格的传动比。由于传动介质的泄漏等因素的影响, 导致传动比不如机械传动精确。

2) 传动效率偏低。在液压传动中, 系统需经两次能量转换, 因而相对于机械和电气系统, 其传动效率偏低。

3) 油温变化时, 液压油黏度的变化会影响系统工作的稳定性。系统在高温工作时, 采用石油基液压油为工作介质的系统还需注意防火问题。

4) 液压油中混入空气, 容易产生振动和噪声。

5) 发生故障不易检查与排除, 且工作介质被污染后, 会造成液压元件阀芯卡死等现象, 使系统不能正常工作。

6) 液压元件制造精度要求高, 系统维护技术水平要求高。

综上所述, 在液压传动系统中, 优点是主要的, 而其缺点随着科学技术的进步和发展会不断被克服和改善。

## 1.4 液压传动的应用

液压传动在各个行业的应用情况见表 1-1。

表 1-1 液压传动在各个行业的应用

行业名称	应用场合举例
机床工业	磨床、铣床、拉床、刨床、压力机、自动车床、组合车床、数控机床、加工中心等
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	起重机、叉车、装卸机械、传动带运输机、液压千斤顶等
矿山机械	开采机、凿岩机、开掘机、破碎机、提升机、液压支架等
建筑机械	打桩机、平地机等
农业机械	联合收割机的控制系统、拖拉机和农用机的悬挂装置等
冶金机械	电炉控制系统、轧钢机控制系统等
轻工机械	注塑机、打包机、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、汽车转向器、减振器等
船舶港口机械	起货机、起锚机、舵机等
铸造机械	砂型压实机、加料机、压铸机等
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

## 1.5 液压传动的发展前景

随着液压机械自动化程度的不断提高, 液压元件应用数量急剧增加, 元件小型化、系统集成化是必然的发展趋势。特别是近十年来, 液压技术与传感技术、微电子技术密切结合, 出现了诸如电液比例控制阀、数字阀、数字缸、电液伺服液压缸等机(液)电一体化元器件, 使液压技术在高压、高速、大功率、节能高效、低噪声、使用寿命长、高度集成化等方面取得了重大进展。液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助试验(CAT)和计算机实时控制(computer real-time control)也是当前液压技术的发展方向。

### 习 题

1. 什么是液压传动? 液压传动和机械传动相比有哪些优缺点?
2. 液压传动由哪几部分组成? 每部分的功能是什么?
3. 液压传动中液体的压力是由什么决定的?
4. 液压传动系统的基本参数是什么? 它们与哪些因素有关?

## 第2章 液压传动流体力学基础

**基本要求：**通过学习，掌握流体静、动力学计算，液体流动时的压力计算，薄壁孔口流量计算，了解液压传动的工作介质。

**重点：**掌握流体静、动力学计算。

**难点：**液体流动时的压力计算，薄壁孔口流量计算。

液压传动是属于自动控制领域的一门重要学科，它是以液体为工作介质，以液体的压力能进行能量传递和控制的一种传动形式。液压传动中的工作介质在液压传动及控制中不仅起传递能量和信号的作用，还起润滑、冷却和防锈的作用。工作介质性能的好坏、选择是否得当，对液压系统能否可靠、有效地工作影响很大。本章主要叙述了液压传动工作介质的性质，揭示了工作介质的污染原因及控制方法，论述了液体静力学、动力学的性质，阐述了液体动力学的3个运动方程，管道中液流的特性，液压冲击和气穴现象。通过本章学习，使学生对工作介质在管道中流动的流体力学特性有一个较全面的了解。

### 2.1 液压传动的工作介质

#### 2.1.1 液压传动工作介质的物理性质

液压传动工作介质的物理性质有多项，现选择与液压传动性能密切相关的三项参数作介绍。

##### 1. 密度

单位体积液体所具有的质量为该液体的密度，用公式表示为

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

式中  $\rho$ ——液体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$m$ ——液体的质量，( $\text{kg}$ )；

$V$ ——液体的体积，( $\text{m}^3$ )。

严格来说，液体的密度随着压力或温度的变化而变化，但变化量一般很小，在工程计算中可以忽略不计。在进行液压系统相关参数的计算时，通常取液压油的密度为  $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

##### 2. 可压缩性

液体受增大的压力作用而使体积缩小的性质称为液体的可压缩性。设容器中液体原来的压力为  $p_0$ ，体积为  $V_0$ ，当液体压力增大  $\Delta p$  时，体积缩小  $\Delta V$ ，则液体的可压缩性可用压缩系数  $k$  来表示，它是指液体在单位压力变化下体积的相对变化量，用公式表示为

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2-2)$$

式中  $k$ ——压缩系数 ( $\text{m}^2/\text{N}$ )。



由于压力增大时液体的体积减小，为了使  $k$  为正值，所以式 (2-2) 的右边有一负号。液体压缩系数  $k$  的倒数，称为液体的体积弹性模量，简称体积模量，用  $K$  表示，即

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V_0 \tag{2-3}$$

表 2-1 列举了各种工作介质的体积模量。因钢的弹性模量为  $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ ，由表可见，石油基液压油的可压缩性是钢的 100~150 倍。液体的体积模量与温度、压力有关。温度升高时， $K$  值减小，在液压油正常工作范围内， $K$  值会有 5%~25% 的变化；压力增大时， $K$  值增大，但这种增大不呈现线性关系，当  $p \geq 3 \text{MPa}$  时， $K$  值基本上不再增大。由于空气的压缩性很大，当液压油液中混有游离气泡时， $K$  值将大幅度减小。例如，当油中混有 1% 空气气泡时，体积模量则降低到纯油的 5% 左右；当油中混有 5% 空气气泡时，体积模量则降低到纯油的 1% 左右。故液压系统在设计和使用时，要采取措施尽量减少工作介质中的游离气泡的含量。

一般情况下，工作介质的可压缩性在研究液压系统静态（稳态）条件下工作的性能时，影响不大，可以不予考虑；但在高压下或者研究系统动态性能及计算远距离操纵的液压系统时，必须予以考虑。

表 2-1 各种工作介质的体积模量 (20℃, 0.1MPa)

介质种类	体积模量 $K/\text{MPa}$	介质种类	体积模量 $K/\text{MPa}$
石油基液压油	$(1.4 \sim 2.0) \times 10^3$	水-乙二醇基型	$3.45 \times 10^3$
油包水乳化液	$2.3 \times 10^3$	磷酸酯基型	$2.65 \times 10^3$
水包油乳化液	$1.95 \times 10^3$		

### 3. 黏性

(1) 黏性的定义 液体在外力作用下流动（或者有流动趋势）时，液体分子间内聚力要阻止分子间的相对运动，在液层相互作用的界面之间会产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的黏性。液体只有在流动（或者有流动趋势）时才会呈现出黏性，静止液体是不呈现黏性的。黏性是液压油的各项物理性质中最重要的特性，也是选择液压油的一个很重要的依据。

(2) 黏性的度量 度量黏性大小的物理量称为黏度。常用的黏度有三种：动力黏度、运动黏度和相对黏度。

1) 动力黏度。如图 2-1 所示，设两平行平板间充满液体，下平板不动，上平板以速度  $u_0$  向右平动。由于液体的黏性和液体与固体壁面间作用力的共同影响，导致液体流动时各层的速度大小不等，紧贴下平板的液体黏附于下平板上，其速度为零，紧贴上平板的液体黏附于上平板上，其速度为  $u_0$ ，中间各层的速度分布从上到下按线性规律变化。可以把这种流动看作是无限薄的油层在运动，速度快的液层带动速度慢的，速度慢的液层阻止速度快的液层。

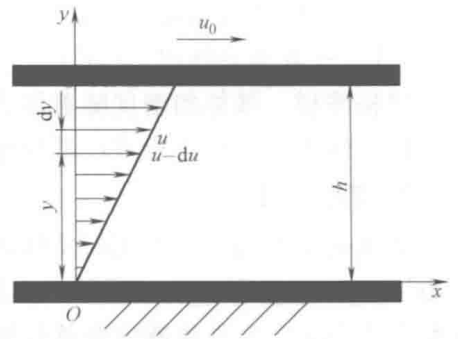


图 2-1 液体的黏性示意图

实验测定指出：液体流动时相邻液层间的内摩擦力  $F_f$  与液层接触面积  $A$ 、液层间的相对速度梯度  $du$  成正比，与液层的距离  $dy$  成反比， $du/dy$  称为两液层间的速度梯度或剪切率，即

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

式中  $\mu$ ——比例系数，称为黏性系数或动力黏度，也称绝对黏度。

以  $\tau = \frac{F_f}{A}$  表示液层间的切应力，即单位面积上的内摩擦力，则有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 即为牛顿液体的内摩擦定律。当动力黏度只与液体种类有关而与速度梯度无关时，这种液体称为牛顿液体，否则为非牛顿液体。除高黏度或者含有特种添加剂的油液外，一般的液压油均可视为牛顿液体。

动力黏度的物理意义就是液体在单位速度梯度下，单位面积上的内摩擦力大小。由式 (2-4) 和式 (2-5) 可知，对一定的  $F_f$  或  $\tau$ ， $\mu$  越大， $du/dy$  越小，即液体发生的剪切变形越小，抵抗液层之间相对移动的能力越强。

在国际单位制和我国的法定计量单位中， $\mu$  的单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$  (帕·秒) 或  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  (牛·秒/米<sup>2</sup>)；而在国外文献资料中， $\mu$  的单位常常使用 P (泊)、cP (厘泊) 或  $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  (达因·秒/厘米<sup>2</sup>)， $10\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$ 。从  $\mu$  的单位可以看出， $\mu$  具有力、长度、时间的量纲，即具有动力学的量，故称动力黏度。

2) 运动黏度。在同一温度下，液体的动力黏度  $\mu$  与它的密度  $\rho$  之比称为运动黏度，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

在国际单位制和我国的法定计量单位中， $\nu$  的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ ；在国外文献、资料中， $\nu$  的单位为  $\text{cm}^2/\text{s}$ ，通常称为 St (斯)。St 的单位较大，工程上常用 cSt (厘斯) 来表示， $1\text{St} = 100\text{cSt}$ 。因运动黏度具有长度和时间的量纲，即具有运动学的量，故称运动黏度。

运动黏度  $\nu$  没有明确的物理意义，是一个在液压传动计算中经常遇到的物理量，习惯上常用来标志液体的黏度。例如，全损耗系统用油的牌号，就是这种油液在  $40^\circ\text{C}$  时的运动黏度  $\nu$  的平均值，40 号全损耗系统用油就是指这种全损耗系统用油在  $40^\circ\text{C}$  时的运动黏度  $\nu$  的平均值为  $40\text{cSt}$ 。

3) 相对黏度。动力黏度和运动黏度是理论分析和推导中常使用的黏度单位，但它们难以直接测量，实际中，要先求出相对黏度，然后再换算成动力黏度和运动黏度。相对黏度是特定测量条件下制定的，又称条件黏度。测量条件不同，各国采用的相对黏度符号也不同，如中国、德国、俄罗斯用恩氏黏度  $^\circ E$ ，美国、英国采用通用赛氏秒  $SUS$  或商用雷氏秒 ( $R_1S$ )，法国采用巴氏度  $^\circ B$  等。

恩氏黏度的测定方法：将  $200\text{mL}$  温度为  $t^\circ\text{C}$  的被测液体装入恩氏黏度计的容器内，让此液体从底部  $\phi 2.8\text{mm}$  的小孔流尽所需的时间  $t_1$ ，再测出相同体积温度为  $20^\circ\text{C}$  的蒸馏水在同一黏度计中流尽所需的时间  $t_2$ ，这两个时间之比即为被测液体在  $t^\circ\text{C}$  下的恩氏黏度，即