

高 等 学 校 教 材

液压与气压传动

► 董林福 赵艳春 主编



化 学 工 业 出 版 社

教 材 出 版 中 心

高等学校教材

液压与气压传动

董林福 赵艳春 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气压传动/董林福, 赵艳春主编. —北京: 化学工业出版社, 2005.8

高等学校教材

ISBN 7-5025-7624-X

I. 液… II. ①董…②赵… III. ①液压传动-高等学校-教材②气压传动-高等学校-教材 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 103260 号

高等学校教材

液压与气压传动

董林福 赵艳春 主编

责任编辑: 程树珍

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 顾淑云 于志岩

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 455 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7624-X

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是高等院校机械设计制造及其自动化专业教材,也可作为科研设计单位、厂矿、企业技术人员的参考书。

《液压与气压传动》课程是根据教育部专业设置和课程整合的要求而设置的。本教材是在征求有关院校意见、结合编者多年的教学经验和应用体会、参考有关文献编写而成的。全书共分14章,第1章介绍液压与气压传动的组成及基本原理;第2章介绍液压油品种及其性质、流体力学的基础知识;第3章~第6章介绍常用液压泵、液压马达、液压缸、液压阀及液压辅件的工作原理、性能特点、典型结构及应用;第7章、第8章介绍液压基本回路、典型液压系统举例;第9章介绍液压伺服系统的工作原理、液压伺服阀的性能特点;第10章介绍液压系统的设计计算;第11章介绍气压传动基础知识;第12章介绍气动元件典型结构、性能特点及应用;第13章介绍气动基本回路;第14章介绍气动系统程序控制设计。每章后面都附有适量的思考题或习题,以巩固和加强所学的知识。书后附有习题参考答案、《液压与气压传动》图形符号。本教材适用于讲授54学时左右。在教学过程中,可根据实际情况进行适当的删减。

本书在编写过程中,贯彻少而精、理论联系实际、学以致用原则。在教材的组织 and 选材上,着重考虑以下几方面。

(1) 本着少而精、学以致用原则,着重讲解基本原理和基本方法,把重点放在使读者正确掌握液压与气压元件的工作原理和性能的基础上,合理、正确地应用液压与气压元件、分析和设计液压与气压传动系统。

(2) 既考虑到液压与气压传动的共性,又注意保持二者的完整性和独立性。在介绍液压与气压传动的组成及基本原理时,将二者统一起来,合编在第1章中,避免后续章节中重复出现。为了使读者理顺思路、避免概念混淆,在介绍液压与气压传动的理论知识、元件、基本回路、系统设计及性能分析等,将二者分章编写。

(3) 为了适应加强基础、扩大专业的需要,对理论基础知识的阐述,力求准确、简练、明了。根据新的专业目录,尽量扩大涉及面,拓宽专业口径及专业方向,使本书可适用诸多工业领域(机械类、电子、冶金、轻工、航空航天、采矿)的专业。

(4) 本着理论联系实际的原则,在讲清系统和元件基本原理的基础上,还列举了大量实践例子,可使读者对本学科的现状有概括性的了解,对读者从事液压与气压传动设计有较大的帮助。

(5) 为了适应21世纪科技发展的需要,考虑到科技进步,除了介绍普通元件和系统外,还注意介绍该学科国内外的最新技术和发展趋势(如三通插装阀、电液比例阀、电液伺服阀及其控制以及新型气缸等)。本书将插装基本回路编入液压基本回路一章中,是其他同类教材所不具备的。

(6) 本书所采用的图形符号都符合国家最新标准,所采用的单位符号符合国际单位制。

本书由董林福教授、赵艳春副教授(博士)主编。参加编写人员有:董林福(第1章~第3章、第5章、第7章、第4章部分内容);赵艳春(第8章、第10章~第14章);于玲(第9章);王树强、张利国(第6章);李爽(第4章部分内容)。全书由董林

福教授统稿。

在本书的编写过程中，得到了许多同志的帮助，赵旭东、张宇、汪波绘制了本书的部分CAD图，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2005 年 6 月

目 录

1 液压与气压传动概述	1	3.1 液压泵概述	32
1.1 液压与气压传动的概念与工作原理	1	3.1.1 液压泵的基本工作原理及其分类	32
1.2 液压与气压传动的组成	2	3.1.2 液压泵的主要性能参数	33
1.3 液压与气压传动系统图的表示方法	4	3.2 齿轮泵	34
1.4 液压与气压传动的优缺点	5	3.2.1 外啮合齿轮泵	34
1.4.1 液压传动的优缺点	5	3.2.2 内啮合齿轮泵	38
1.4.2 气压传动的优缺点	5	3.3 叶片泵	38
思考题	6	3.3.1 单作用叶片泵	38
2 液压流体力学基础	7	3.3.2 双作用叶片泵	41
2.1 液压油	7	3.4 柱塞泵	44
2.1.1 液压油的主要性质	7	3.4.1 斜盘式轴向柱塞泵	44
2.1.2 液压油的要求	9	3.4.2 斜轴式轴向柱塞泵	49
2.1.3 液压油的选用	10	3.4.3 径向柱塞泵	50
2.1.4 液压油的品种选择	11	3.5 螺杆泵	51
2.2 液体静力学基础	11	3.6 液压泵的选用	52
2.2.1 液体静压力及其特性	11	思考题	53
2.2.2 液体静力学基本方程	12	习题	53
2.2.3 压力的表示方法	12	4 液压执行元件	54
2.2.4 帕斯卡原理	13	4.1 液压马达	54
2.2.5 液体静压力作用在固体壁面上 的力	13	4.1.1 液压马达概述	54
2.3 液体动力学基础	14	4.1.2 齿轮马达	55
2.3.1 基本概念	14	4.1.3 叶片马达	56
2.3.2 连续性方程	15	4.1.4 柱塞马达	57
2.3.3 伯努利方程	15	4.1.5 液压马达的选用	60
2.3.4 动量方程	17	4.2 液压缸	60
2.4 液体流动时的压力损失	19	4.2.1 液压缸的类型及特点	60
2.4.1 流态和雷诺数	19	4.2.2 液压缸结构设计	66
2.4.2 沿程压力损失	20	4.2.3 液压缸的设计计算	70
2.4.3 局部压力损失	22	思考题	73
2.4.4 管路系统的总压力损失	23	习题	74
2.5 孔口和缝隙流动	23	5 液压控制阀	76
2.5.1 液体流经孔口的流动特性	23	5.1 概述	76
2.5.2 液体在缝隙中流动的特性	24	5.2 方向控制阀	76
2.6 液压冲击及气穴现象	27	5.2.1 单向阀	76
2.6.1 液压冲击	27	5.2.2 换向阀	79
2.6.2 气穴与气蚀现象	29	5.3 压力控制阀	88
思考题	29	5.3.1 溢流阀	88
习题	30	5.3.2 减压阀	93
3 液压泵	32	5.3.3 顺序阀	97
		5.3.4 压力继电器	100

5.4 流量控制阀	101	7.1.1 调压回路	139
5.4.1 常用的节流口形式及特点	101	7.1.2 减压回路	139
5.4.2 节流口的流量特征及影响流量 稳定性的因素	102	7.1.3 保压回路	139
5.4.3 节流阀	104	7.1.4 增压回路	141
5.4.4 调速阀	104	7.1.5 平衡回路	141
5.4.5 溢流节流阀	107	7.1.6 卸荷回路	142
5.4.6 分流-集流阀	108	7.1.7 缓冲回路	143
5.5 二通插装阀	109	7.2 速度控制回路	143
5.5.1 插装阀的结构组成	110	7.2.1 调速回路	143
5.5.2 二通插装阀的工作原理	110	7.2.2 快速运动回路	150
5.5.3 插装式方向控制阀	111	7.2.3 速度换接回路	152
5.5.4 插装式压力控制阀	114	7.3 方向控制回路	152
5.5.5 插装式流量控制阀	115	7.3.1 换向回路	153
5.6 电液比例阀	116	7.3.2 锁紧回路	154
5.6.1 比例电磁铁	116	7.4 多缸动作控制回路	155
5.6.2 电液比例压力阀	117	7.4.1 顺序动作回路	155
5.6.3 电液比例流量阀	119	7.4.2 同步回路	156
5.6.4 电液比例方向阀	120	7.4.3 多缸工作互不干扰回路	158
思考题	121	7.5 插装基本回路	159
习题	121	思考题	161
6 液压辅助元件	124	习题	161
6.1 油箱	124	8 典型液压系统及举例	166
6.1.1 油箱容积的确定	124	8.1 C7620 型卡盘多刀半自动车床液 压系统	166
6.1.2 油箱的结构	124	8.2 M1432A 型万能外圆磨床液压系统	167
6.1.3 设计油箱时应注意的问题	125	8.3 XS-ZY-250A 型注塑机液压系统	169
6.2 蓄能器	125	8.4 HTL10800 型注塑机液压系统	170
6.2.1 蓄能器的功用	125	8.5 HS-H 型回转工作台式多工位组合 机床液压系统	172
6.2.2 蓄能器的分类	126	8.6 200 T 密胺热压成型机液压系统分析	174
6.2.3 蓄能器容量的计算	128	思考题	176
6.2.4 蓄能器的使用和安装	129	9 液压伺服系统	177
6.3 滤油器	129	9.1 液压伺服系统概述	177
6.3.1 滤油器的主要性能指标	129	9.1.1 液压伺服系统的工作原理及其 组成	177
6.3.2 对滤油器的要求	130	9.1.2 液压伺服系统的分类和基本 特点	179
6.3.3 滤油器分类	130	9.2 液压伺服阀	180
6.3.4 滤油器选用与安装	131	9.2.1 液压伺服阀的分类及其特性	180
6.4 热交换器	132	9.2.2 滑阀式伺服阀	180
6.4.1 冷却器	132	9.2.3 喷嘴挡板式伺服阀	183
6.4.2 加热器	132	9.2.4 射流管式伺服阀	183
6.5 油管及管接头	133	9.3 电液伺服阀	184
6.6 密封件	134	9.3.1 电液伺服阀的构成及分类	184
6.6.1 密封件的作用和分类	134	9.3.2 电液伺服阀的特性	186
6.6.2 橡胶密封圈的种类和特点	135	9.3.3 电液伺服阀的选择	187
思考题	137		
7 液压基本回路	138		
7.1 压力控制回路	138		

9.4 液压伺服系统实例	188	12.2.3 摆动马达	233
9.4.1 机液伺服系统应用实例	188	12.3 气动控制元件	235
9.4.2 电液伺服系统应用实例	190	12.3.1 方向控制阀	235
思考题	191	12.3.2 压力控制阀	237
10 液压系统的设计	192	12.3.3 流量控制阀	241
10.1 液压系统设计的步骤	192	12.3.4 气动逻辑元件与射流元件	243
10.1.1 明确设计要求	192	思考题	246
10.1.2 执行元件的选择	192	13 气动回路	247
10.1.3 初定液压回路的工作压力	193	13.1 基本回路	247
10.1.4 载荷组成的确定和计算	193	13.1.1 换向回路	247
10.1.5 绘制负载图和速度图	194	13.1.2 调速回路	248
10.1.6 拟定液压系统简图	194	13.1.3 压力回路	248
10.1.7 确定执行元件的主要参数	195	13.2 其他回路	249
10.1.8 绘制执行元件的工况图	196	13.2.1 过载保护回路	249
10.1.9 液压元件的选择	196	13.2.2 消声回路	249
10.1.10 液压系统的性能验算	197	13.2.3 气压互锁回路	250
10.1.11 绘制正确的液压系统图	199	13.2.4 自动往复回路	250
10.1.12 设计液压装置, 编制技术 文件	199	13.2.5 任意位置停止回路	250
10.2 液压系统设计实例	200	思考题	252
思考题	204	14 气动系统程序控制设计	253
11 气压传动理论基础	205	14.1 程序顺序控制方法	253
11.1 空气的物理性质	205	14.1.1 行程程序控制回路的设计 方法	253
11.1.1 空气的密度	205	14.1.2 本章常用的符号表示方法	253
11.1.2 空气的压力	205	14.2 X-D 线图法	253
11.1.3 空气的黏性	206	14.2.1 列写工作程序	254
11.1.4 空气的压缩性和膨胀性	206	14.2.2 绘制 X-D 线图, 判别并消除障 碍信号	254
11.1.5 空气的湿度和含湿量	206	14.2.3 绘制气动逻辑原理图	258
11.2 气体状态方程	208	14.2.4 气控回路原理图的绘制	258
11.2.1 理想气体状态方程	208	14.3 多缸单往复系统信号动作线图 设计法	259
11.2.2 气体状态变化过程	209	思考题	262
11.3 管道中气体的运动特性	211	附录 液压与气压传动常用图形符号 (摘自 GB/T 786、1—93 参照 ISO 1219—1977)	263
11.3.1 声速和马赫数	211	附表 1 基本符号、管路及连接	263
11.3.2 气体流动的基本方程	211	附表 2 控制机构和控制方法	263
11.3.3 气体流速与管道的截面积的 关系	212	附表 3 液压泵、液压(气)马达和液压 (气)缸	264
11.3.4 通流能力	213	附表 4 控制元件	265
11.3.5 充气 and 放气的过程	214	附表 5 辅助元件	266
习题	216	习题参考答案	268
12 气动元件	217	参考文献	272
12.1 气源装置及其辅件	217		
12.1.1 气源装置	217		
12.1.2 辅件	224		
12.2 气动执行元件	227		
12.2.1 气动马达	228		
12.2.2 汽缸	231		

1 液压与气压传动概述

液压与气压传动是属于自动控制领域的一门重要学科。它的发展已有二三百年的历史。然而它在工业上真正得到推广和使用,是在 20 世纪中叶以后。近几十年来随着控制技术、微电子技术、计算机技术和传感技术的发展,极大地推动了液压与气压传动技术的迅速发展,使其成为包括传动、控制、检测在内的一门完整的自动控制技术。它广泛应用于国民经济的各领域,已成为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。

1.1 液压与气压传动的概念与工作原理

液压与气压传动是以有压流体(液压油和压缩气体)作为传动介质来实现能量传递和控制的一种传动形式。将各种元件组成不同功能的基本控制回路,若干基本控制回路再经过有机组合,就构成一个完整的液压(气压)传动系统。它们的基本原理、元件工作机理及回路构成等诸多方面极其相似,所不同的是作为液压传动的液压油几乎不可压缩,作为气压传动的空气具有较大的压缩性。下面以图 1-1 所示的液压千斤顶工作原理示意图为例说明其工作原理。

如图 1-1 所示,当向上提杠杆 1 时,小缸 3 内的小活塞 2 上移,小缸下部形成真空,此时单向阀 4 关闭,油箱 6 内的液压油通过油管 and 单向阀 5 被吸入小缸下腔。当向下压杠杆 1 时小活塞下移,液压油被挤出,压力升高,此时单向阀 5 关闭,小缸 3 内的液压油顶开单向阀 4 进入大缸 8 下腔,迫使大活塞 9 向上移动举起重物。经过反复提升和下压杠杆时,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。为使被举高的重物顺利放下,设置了截止阀 7。

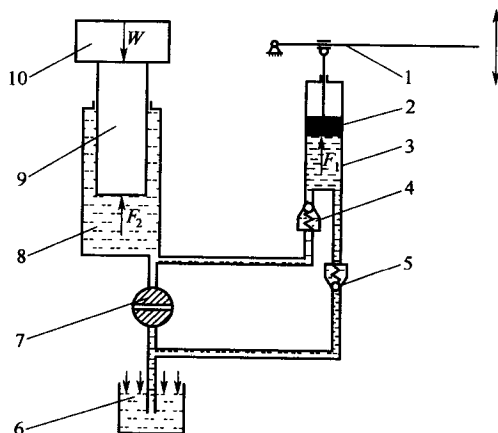


图 1-1 液压千斤顶的传动原理

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

(1) 力的传递原理

在图 1-1 中设大、小活塞的面积分别为 A_2 和 A_1 , 作用在大活塞上的外负载为 W , 大活塞下端受力为 F_2 , 施加于小活塞上的作用力为 F_1 。根据帕斯卡原理, 由大、小缸下腔和连通导管所形成的密闭容器内的液压油, 具有相等的压力值。设此液压力为 p , 若忽略压力损失, 则有

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

或

$$F_1 = \frac{WA_1}{A_2} \quad (1-2)$$

式 (1-1) 是液压传动中力传递的基本公式, 由于 $p = \frac{W}{A_2}$, 所以当外负载 W 增大时, 液

体的压力也随着增大,由此得出液压传动中力的传递原理:液压传动是用液体作为工作介质来进行力的传递,液体的工作压力(液体压力)取决于外负载的大小,而与流入的液体体积多少无关。

式(1-2)表明:当 $A_2/A_1 \geq 1$ 时,有 $W \geq F_1$,即用一个很小的作用力,就可以驱动一个很大的外负载,力得到了放大。

(2) 速度调节原理

在图 1-1 中,若不计泄漏、液体的压缩性、缸和油管的弹性变形,则从小缸体中压出的液体体积一定等于大缸中由于活塞上升而扩大的体积。设大、小缸活塞上升和下降高度分别为 h_2 和 h_1 ,则有

$$A_1 h_1 = A_2 h_2 \quad (1-3)$$

或
$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-4)$$

式(1-4)表明两活塞的位移量与两活塞的面积成反比。将式(1-3)两边同除以活塞的运动时间 Δt ,得

$$A_1 \frac{h_1}{\Delta t} = A_2 \frac{h_2}{\Delta t} \quad (1-5)$$

或
$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1-6)$$

式中 v_1, v_2 ——小活塞和大活塞的运动速度。

式(1-5)中 $A \frac{v}{\Delta t}$ 的物理意义是单位时间内流入某一截面 A 的液体体积,定义为流量 q ,即 $q = vA$

进而得
$$v = \frac{q}{A} \quad (1-7)$$

式(1-7)是液压传动中速度调节的基本公式。调节进入液压缸的液体流量,就可以改变活塞的运动速度,由此得出液压传动中的速度调节原理:液压执行机构的运动速度取决于输入流量的大小,而与液体压力大小无关。

(3) 能量转换原理

由式(1-1)和式(1-6)可得

$$F_1 v_1 = W v_2 = F_2 v_2 \quad (1-8)$$

由式(1-8)还可以得出

$$P = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = p q \quad (1-9)$$

式中 P ——液压缸所传递的功率。

式(1-9)表明,液压传动的功率等于压力 p 与流量 q 的乘积。压力和流量是液压传动中两个重要参数。它们相当于机械传动中的力和速度,它们的乘积即为功率。

在上述的液压千斤顶工作过程中,小活塞将输入的机械能转化为液体的压力能,再由大活塞将液体的压力能转化为机械能,以推动外负载。由此可得液压传动中的能量转换原理:液压传动实际上就是机械能-压力能-机械能的能量转换过程。

1.2 液压与气压传动的组成

液压与气压系统的组成部分相同,它们都是由能源装置、执行元件、控制元件、辅助元

件组成的。下面以图 1-2 所示的磨床工作台液压系统的工作原理图和图 1-3 所示的气压传动系统的组成为例,说明这四部分的功能和元件的作用。

(1) 能源装置

能源装置是将机械能转化为流体的压力能的装置。包括液压泵、气压发生装置。在图 1-2 中,液压泵 4 由电动机带动旋转后,从油箱 1 吸油,当换向阀 12 的阀芯处于图 1-2 (a) 所示位置时,压力油经滤油器 2、液压泵 4、压力管 9、节流阀 10、换向阀 12 进入液压缸 15 的左腔,推动活塞 14 向右移动,工作台 16 克服阻力而做功。在这一过程中,液压泵将电动机旋转的机械能转化为输入到管道中的液压能。

在图 1-3 中,由电动机 1、空气压缩机 2 和气罐 3 组成了气压发生装置,它是获得压缩空气的能源装置。其主体部分是空气压缩机,另外还有气源净化设备。空气压缩机将电动机旋转的机械能转化为空气的压力能,而气源净化设备用以降低压缩空气的温度,除去压缩空气中的水分、油分以及污染杂质等。

使用气动设备较多的厂矿常将气源装置集中在压气站(俗称空压站)内,由压气站再统一向用气点(车间和用气设备等)分配、供应压缩空气。

(2) 执行元件

将液体的压力能转化为机械能的元件。如:液压缸、液压马达;气缸、气动马达等。

在图 1-2 的液压缸 15 中,输入到缸内的为压力油,压力油具有一定压力能,液压缸将

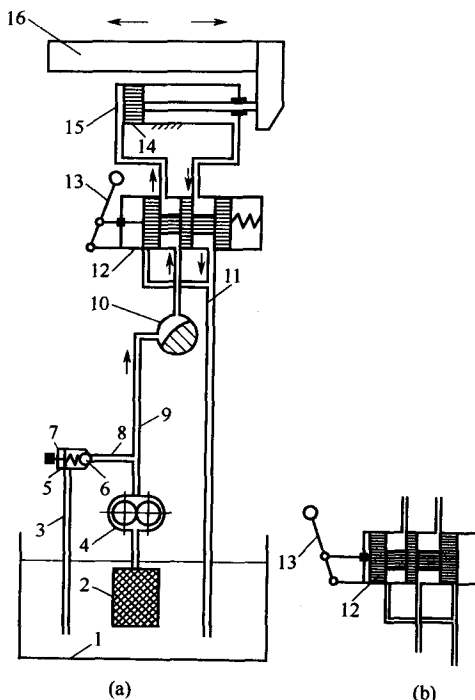


图 1-2 磨床工作台液压系统的工作原理图
1—油箱; 2—滤油器; 3, 11—回油管; 4—液压泵;
5—弹簧; 6—钢球; 7—溢流阀; 8—压力支管;
9—压力管; 10—节流阀; 12—换向阀; 13—换向手柄; 14—活塞; 15—液压缸; 16—工作台

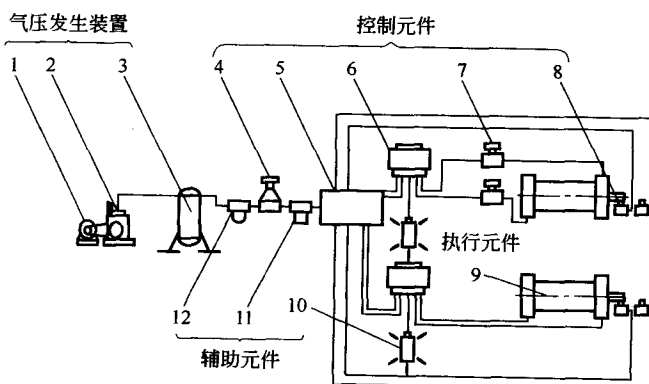


图 1-3 气压传动系统的组成

1—电动机; 2—空气压缩机; 3—气罐; 4—压力控制阀; 5—逻辑元件;
6—方向控制阀; 7—流量控制阀; 8—行程阀; 9—气缸;
10—消声器; 11—油雾器; 12—分水滤气器

此压力能转化为活塞 14 往复运动的机械能，输出力和速度。与液压缸相同，图 1-3 中的气缸 9 也将输入的气压能转化为往复运动的机械能。

(3) 控制元件

用来控制流体的压力、流量和流动方向的元件。如：压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀等。

在图 1-2 中，液流方向由换向阀 12 控制，当其处于图 1-2 (b) 所示的位置时，液压油进入液压缸 15 的右腔，缸左腔的压力油经换向阀 12 流回油箱。调节节流阀的开口，就可以改变进入油缸的流量，从而改变活塞的运动速度。溢流阀 7 与节流阀相配合，节流阀开口关小时，多余的液压油顶开钢球 6 流回油箱。油泵的输出压力由溢流阀调定，它的最大调定压力是油缸的最大工作压力和液压油的压力损失之和。

气压传动的控制元件又称操作、运算、检测元件，其各元件在系统中的作用与液压传动相应元件相同。

(4) 辅助元件

除上述元件以外的其他元件，即保证系统正常工作的辅助元件。如：液压传动中的油箱、滤油器、蓄能器等；气压传动中的分水滤气器、油雾器、消声器等；液压与气压传动中的管道、管接头、压力计等。

1.3 液压与气压传动系统图的表示方法

在绘制液压与气压传动系统图时，应以传动原理图来表示。所谓液压与气压传动原理图是指：由代表各种液压与气压元件、辅助元件及连接形式的图形符号组成，用来表示液压与气压工作原理的简图。

液压与气压传动的原理图的绘制通常有两种表示方法，一种是以元件的结构简图表示的原理图，如图 1-2 (a) 所示，这种图形比较直观、清楚明了，但图形太繁琐，绘制麻烦，元件多时几乎不可能绘制出来；另一种是用图形符号绘制的原理图，如图 1-4 所示，它简单明了，便于绘制，是常用的方法。中国制订的液压、气动图形符号标准为 GB 786.1—93 (见附录)。

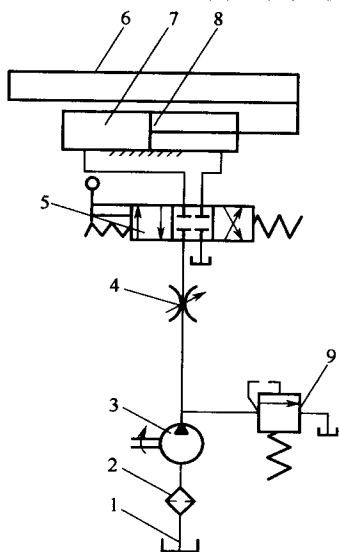


图 1-4 机床工作台液压系统的图形符号图

1—油箱；2—滤油器；3—液压泵；
4—节流阀；5—换向阀；6—工作台；
7—液压缸；8—活塞；9—溢流阀

用图形符号绘制液压与气压原理图时应注意以下几个问题。

① 图形符号应以静态或零位来表示，当组成系统的动作另有说明时，可以例外。

② 在系统中，若元件无法用图形符号表示时，允许用结构简图表示。

③ 元件符号只表示元件的职能和连接系统的通路，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和元件的安装位置。

④ 元件的图形符号在传动系统中的布置，除有方向性的元件符号 (如油箱、仪表等) 外，可根据具体情况水平和垂直绘制。

⑤ 元件符号的大小以清晰、美观为原则，可根据图样幅面的大小作相应调整，但应注意保证图形符号本身的比例。

1.4 液压与气压传动的优缺点

1.4.1 液压传动的优缺点

(1) 液压传动的优点

① 易于实现无级调速。通过调节流量就可以实现无级调速，而且调速范围大，最大可达 2000 : 1，容易获得极低的速度。

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做功的，因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，即承载能力大。

④ 元件使用寿命长。因元件在油中工作，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。

⑧ 体积小、质量轻、结构紧凑。

(2) 液压传动的缺点

① 传动比不精确。由于运动零部件间会产生一定的泄漏，加上液压油并非绝对不可压缩，从而导致使传动比不如机械传动精确。

② 不易实现远距离传递动力。当采用管路传输液压油而传递动力时，由于存在较多的能量损失（泄漏损失、摩擦损失），故不易远距离输送动力。

③ 油温变化时，液压油黏度的变化会影响系统的稳定工作。

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。

⑥ 液压元件制造精度要求高；系统维护技术水平要求高。

1.4.2 气压传动的优缺点

(1) 气压传动的优点

① 工作介质获取容易。工作介质为空气，可以在大气中获取，同时用过的空气可以直接排放到大气中去，处理方便。而且可以利用空气的可压缩性储存能量，集中供气。

② 输出力和速度调节容易。气缸动作速度一般为 50~500mm/s，比液压和电气装置动作速度快。

③ 气动系统结构简单、维修方便，管路不易堵塞，也不存在介质变质、补充更换等问题。因气动系统的压力较低（一般 0.3~0.8MPa），所以气动元件的材料和制造精度要求低。

④ 使用安全。气动装置具有防火、防爆、防潮等特点，使用温度范围广。

(2) 气压传动的缺点

① 由于空气具有可压缩性，因此传递运动的平稳性差。

② 系统工作压力低（0.4~0.8MPa）又因结构尺寸不易过大，因此气缸的输出推力不可能很大。

③ 气信号传递速度较慢，仅限于声速范围内，因此气压传动不易用于要求高速度的复杂回路中。

④ 排气声音大，需加消声器。

⑤ 气压传动的传递效率还比较低。

综上所述液压与气压传动中，优点是主要的，而其缺点将在液压与气压传动的发展中不断被克服和改善。

思 考 题

- 1-1 什么是液压与气压传动？
- 1-2 液压与气压传动由哪几部分组成？每部分的功能是什么？
- 1-3 液压传动中液体压力是由什么决定的？如何调节执行元件的运动速度？
- 1-4 举例说明液压传动中的能量转换关系。
- 1-5 用图形符号绘制液压与气压原理图时应注意哪些问题？
- 1-6 简述液压与气压传动的优缺点。

2 液压流体力学基础

流体包括液体和气体。液体是液压传动的工作介质，是进行能量传递的中间媒介。因此了解液体的基本力学性质，掌握液体在平衡状态和运动状态下的力学规律，对于正确理解液压传动原理，合理设计和使用液压系统都是十分必要的。

2.1 液压油

2.1.1 液压油的主要性质

(1) 密度

单位体积的质量称为密度，即

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

式中 ρ ——液体密度， kg/m^3 ；

V ——液体体积， m^3 ；

m ——体积为 V 的液体质量， kg 。

密度是一个重要物理量，当液体温度和压力变化时，其密度也会发生变化，但变化一般很小，通常视密度为定值。液压油的密度一般为 $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 可压缩性

液体受压力的作用后其体积缩小的性质称为可压缩性。可压缩性的大小用体积压缩系数 β 表示，其物理意义为：单位压力变化时，液体体积的相对变化值。

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

式中 Δp ——压力的变化值， Pa ；

V_0 ——液体初始体积， m^3 ；

ΔV ——液体受压力 Δp 作用后体积的变化值， m^3 。

由于压力增加时液体的体积减小，两者的变化方向相反，为使 β 成为正值，在上式右边加一负号。

一般矿物油的 $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ 。

压缩系数的倒数称为液体的体积模量，即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V_0 \quad (2-3)$$

液压油的体积模量 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{Pa}$ 。而钢的体积模量 $K = 2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，液压油的弹性模量是钢的 $0.67\% \sim 0.95\%$ 。一般情况下，液压油的压缩性对液压系统影响不大，可忽略不计。但在高压下或研究系统的动态性能、设计液压伺服系统时，则必须予以考虑。

影响液体体积模量的因素，主要是温度和压力，温度升高时， K 值减小，在液压油正常工作温度范围内， K 值会有 $5\% \sim 25\%$ 的变化；压力升高时， K 值增大，但这种变化规律不呈线性，当压力大于 3MPa 时， K 值基本不变化。

当液压油中混有空气时， K 值会明显减小。如液压油中混有 1% 的空气时， K 值降到纯油时的 5% ；当混有 5% 的空气时， K 值降到纯油时的 1% 左右。因此在设计、使用液压系

统时应尽量避免空气混入液压油中。

(3) 黏性

液体在外力作用下发生流动（或有流动趋势）时，分子与固体壁面之间的附着力和分子

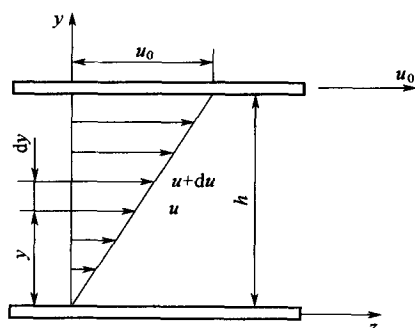


图 2-1 液体黏性示意

之间内聚力的作用，会导致液体内部各处的流速不等，越贴近壁面的液体流速越慢，越远离壁面的液体流速越快，流动较快的液体层可以带动较慢的液体层，反之流动较慢的液体层可以阻滞较快的液体层。这样当快的液体层在慢的液体层上滑过时，在液体层之间会产生内摩擦力。人们将液体流动时产生内摩擦力的性质称为黏性。由黏性定义可知，液体只有在流动时才显黏性，静止的液体是不显黏性的。如图 2-1 所示，假设两平行平板之间充满着液体，下平板固定不动，上平板以速度 u_0 向右运动。由于液体的黏性，贴附于下平板的液体层流速为 0，贴附于上平板的液体层以速度

u_0 与上平板一起向右移动，中间各层液体的流速由上而下呈线性递减规律变化。由实验可知：相邻两层液体层之间的内摩擦力大小 F_f 与液层面积 A 成正比，与液层间的速度梯度 du/dy 成正比，即

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

式中 η ——动力黏性系数，简称动力黏度。

如以 τ 表示切应力，即单位面积上的内摩擦力，则

$$\tau = \frac{F_f}{A} = \eta \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

这就是牛顿内摩擦力定律。 η 为常数的液体称为牛顿液体， η 为变数时的液体称非牛顿液体。在液压传动中，除高黏度液体或含有特种添加剂的液压油，一般的液压油均可看成牛顿液体。

液体的黏性大小可用黏度表示，常用的黏度单位有以下三种。

a. 动力黏度 η 是以液体流动时产生内摩擦力的大小来表示的黏度。由式 (2-5) 可知，动力黏度可表示为

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

动力黏度的物理意义是：当速度梯度为 1 时，相邻两液层间单位面积上的内摩擦力。在法定计量单位和 SI 制中，动力黏度的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒）。

b. 运动黏度 ν 液体动力黏度与其密度之比称为该液体的运动黏度，即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2-7)$$

运动黏度没有明显的物理意义，只是在计算时常出现 η/ρ 而引入的。因其中只有长度和时间的量纲，故而得名为运动黏度。在法定计量单位和 SI 制中，运动黏度的单位是 m^2/s （米²/秒）或 mm^2/s （毫米²/秒）。

中国机械油的牌号就是用机械油在 40℃ 时的运动黏度 ν （以 mm^2/s 计）的平均值来标志的。

c. 相对黏度 相对黏度又称条件黏度。包括恩氏黏度 E （中国、德国、前苏联）、通

用塞氏秒 SUS (美国、英国)、商用雷氏秒 R₁s (英国、美国) 等。

恩氏黏度的测定方法是：将 20mL 温度为 t °C 的被测液体装入底部开有 $\phi 2.8\text{mm}$ 小孔的恩氏黏度计内，测出液体流尽所需时间 t_1 ，再测出相同体积温度为 20°C 时的蒸馏水在同一容器中流尽所需时间 t_2 ；这两个时间之比即为被测液体在温度为 t °C 下的恩氏黏度。恩氏黏度一般用 $^{\circ}\text{E}_t$ 表示，即

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

恩氏黏度与运动黏度的换算关系为

$$\nu = \left(7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (2-9)$$

(4) 液压油的其他性质

液压油还有其他一些性质，如润滑性，氧化安定性，剪切安全性，防锈和抗腐蚀性，抗乳化性，抗泡沫性，对密封材料的相容性（对密封材料不起作用的其相容性好，否则若使密封材料软化和硬化的其相容性不好）等，这些性质对液压油的选择和使用都有一定的影响。

2.1.2 液压油的要求

在液压系统中，液压油是传送动力的介质，液压油的性能直接影响到液压传动的性能，因此液压油应满足下列几点要求。

(1) 适当的黏度和良好的黏温性能

液压油的黏度太大，系统压力损失大、效率低，而且泵的吸油状况恶化，容易产生气穴和气蚀现象（见 2.6.2 节）。此外由于季节的改变以及机器在启动前后和正常运转过程中，液压油的温度会发生变化。因此，为了使液压系统能够正常和稳定工作，要求液压油的黏度随温度变化要小。

(2) 好的润滑性能

液压油应当能在零件滑动的表面上形成强度较高的油膜，以便形成液体润滑，避免干摩擦。

(3) 质地纯净、杂质少、质量好

液压油中如含有酸碱物质，会使金属机件和密封装置受腐蚀；如含有机械类的杂质，会使管路堵塞；如含有易挥发性物质，会在长期使用后液压油变稠，黏度提高，同时会在液压油中形成气泡。

(4) 良好的化学稳定性

良好的化学稳定性包括良好的氧化安全性，热安定性及不易氧化、变质等。

(5) 良好的抗乳化性和抗泡沫性

液压油液中若混入水分会使其乳化，降低油的润滑性能，增加油的酸值，缩短油的使用寿命。液压油若在使用中产生气泡，工作时会产生气穴，甚至断流，影响系统正常工作。

(6) 具有良好的相容性

良好的相容性即对密封件、管路、橡胶软管等无溶解作用。

(7) 闪点高、凝固点低

闪点是指明火能使油面油蒸汽闪燃，但本身不燃烧时的温度。液压系统在需要防火的地方其液压油闪点要高。在寒冷的气候下使用时，凝固点要低。

(8) 其他

对人体无害、对环境污染小，价格便宜。