

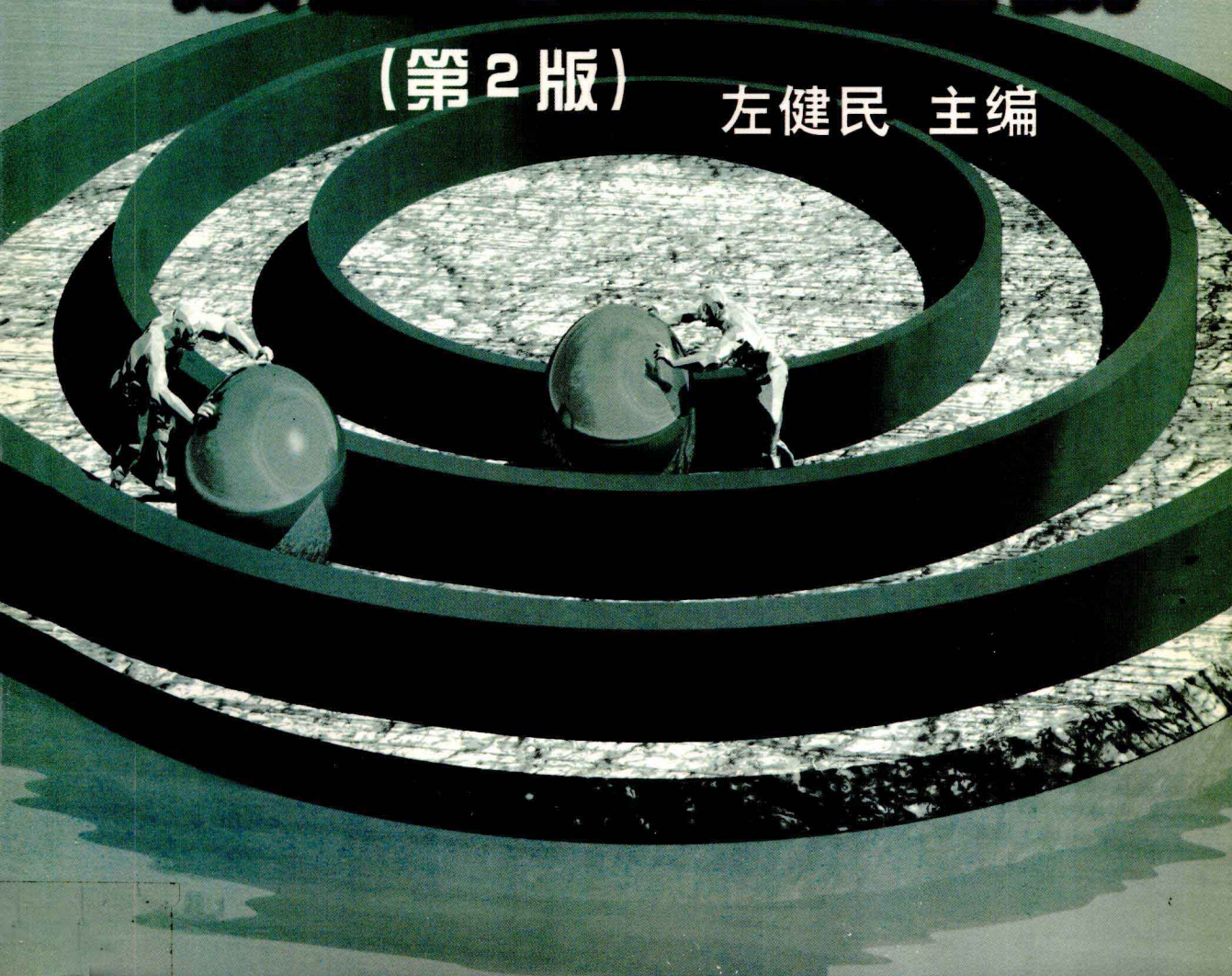


教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

液压与气压传动

(第2版)

左健民 主编



教育部 高职高专 规划教材

液 压 与 气 压 传 动

(第二版)

主 编 左健民
副主编 王芙蓉
参 编 陈国强
主 审 韩尾谷



机械工业出版社

本书主要讲述液压与气压传动的基础知识、元件、回路、系统及其应用。全书共十七章,分别介绍了液压传动的基础知识、液压元件、液压基本回路、液压传动典型系统、液压传动系统的故障诊断和排除、液压伺服和电液比例控制技术、气压传动基础知识、气源装置、气动元件、气动回路以及气动程序控制系统的设计方法等内容。本书在着重基本概念与原理阐述的同时,突出应用能力培养。

本书主要供职业技术学院和高等工程专科机械类和近机类专业学习使用,也可供成人高校、自学考试和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/左健民主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 1999.5

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-111-03756-1

I. 液… II. 左… 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(1999)第13023号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:邓海平 王世刚 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新

封面设计:李雨桥 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000年8月第2版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·19印张·468千字

63 801—73 800册

定价:25.00元

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

自 20 世纪 80 年代以来,我国的高等专科教育和高等职业教育呈现出欣欣向荣的局面,初步形成了高职高专教育人才培养模式的基本特征,即:(1)以培养适应生产、建设、管理、服务第一线需要的高等技术应用性人才为根本任务;(2)以社会需求为目标、技术应用能力的培养为主线设计教学体系和培养方案;(3)以“应用”为主旨和特征构建课程和教学内容体系,基础理论教学以应用为目的,以必需够用为度。专业课加强针对性和应用性;(4)实践教学的主要目的是培养学生的技术应用能力,在教育计划中占有较大比例等。教材作为人才培养过程中重要的基础,应充分体现高职高专人才培养的特点,为此,结合我们多年从事高等工程专科教育,进行教学改革和课程建设的实践,在以前几轮教材建设的基础上,编写了这本《液压与气压传动》教材。

本书主要讲述液压与气压传动的基础知识、液压元件、液压基本回路和系统、气源装置、气动元件、气动基本回路以及气动程序控制系统的分析和设计等。

本书在编写过程中,强调以应用能力培养为主线,基础理论以“够用”为度,同时力求反映我国液压与气压传动发展的最新情况。考虑到高职高专人才的岗位群的特点,在内容选取上尽量贴近工程实践,编写了液压系统的故障诊断、使用维护和排除故障方面的内容。切实做到用理论指导实践,用理论知识分析问题和解决问题。

本书由左健民、王芙蓉、陈国强编写。其中,王芙蓉编写了第二、三、六、七、十二、十三、十四章,陈国强编写了第五、十章和附录,其余由左健民编写。本书由左健民任主编,王芙蓉为副主编并负责全书的统稿。全书由燕山大学韩尾谷教授主审。

本书在编写过程中,得到了许多同行和专家的指点,也从许多文献中得到了有益的启发。由于编者水平所限,书中定有许多不到之处,敬请广大读者指正。

编 者

2000 年 6 月

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来，在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下，各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看，具有高职高专教育特色的教材极其匮乏，不少院校尚在借用本科或中专教材，教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此，1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》（以下简称《基本要求》）和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》（以下简称《培养规格》），通过推荐、招标及遴选，组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师，成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍，并在有关出版社的积极配合下，推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种，用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间，在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上，充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验，解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题；然后再用2~3年的时间，在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，通过研究、改革和建设，推出一大批教育部高职高专教育教材，从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求，充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的，适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

目 录

前言		
出版说明		
绪论	1	
第一章 液压传动基础知识	7	
第一节 液压传动工作介质	7	
第二节 液体静力学	15	
第三节 液体动力学	18	
第四节 定常管流的压力损失计算	24	
第五节 孔口和缝隙流动	28	
第六节 空穴现象	31	
第七节 液压冲击	32	
习题	33	
第二章 液压动力元件	36	
第一节 液压泵概述	36	
第二节 齿轮泵	39	
第三节 叶片泵	43	
第四节 柱塞泵	50	
第五节 液压泵的噪声	56	
第六节 液压泵的选用	56	
习题	57	
第三章 液压执行元件	58	
第一节 液压马达	58	
第二节 液压缸	61	
习题	71	
第四章 液压控制元件	73	
第一节 概述	73	
第二节 方向控制阀	74	
第三节 压力控制阀	84	
第四节 流量控制阀	92	
第五节 叠加式液压阀	98	
第六节 三通插装阀	100	
第七节 液压阀的连接	104	
习题	106	
第五章 液压辅助元件	109	
第一节 管路和管接头	109	
第二节 油箱	111	
第三节 过滤器	112	
第四节 密封装置	115	
第五节 蓄能器	118	
习题	119	
第六章 液压基本回路	120	
第一节 压力控制回路	120	
第二节 速度控制回路	125	
第三节 多缸工作控制回路	137	
第四节 其它回路	141	
习题	142	
第七章 典型液压传动系统	145	
第一节 组合机床动力滑台液压系统	146	
第二节 万能外圆磨床液压系统	148	
第三节 液压压力机液压系统	152	
第四节 装卸堆码机液压系统	156	
习题	158	
第八章 液压伺服和电液比例控制技术	159	
第一节 液压伺服控制	159	
第二节 电液比例控制	163	
第三节 计算机电液控制技术	165	
习题	168	
第九章 液压系统的设计与计算	169	
第一节 明确设计要求、进行工况分析	169	
第二节 拟定液压系统原理图	172	
第三节 液压元件的计算和选择	173	
第四节 液压系统的性能验算	175	
第五节 绘制工作图和编制技术文件	176	
第六节 液压系统设计计算举例	177	
习题	184	
第十章 液压系统的安装、使用和故障诊断	185	
第一节 液压系统的安装和调试	185	
第二节 液压系统的使用维护	189	

第三节	液压系统的故障诊断与排除	195	第三节	压力控制回路	262
第十一章	气压传动基础知识	214	第四节	气液联动回路	262
第一节	空气的物理性质	214	第五节	计数回路	264
第二节	气体状态方程	216	第六节	延时回路	264
第三节	气体流动规律	217	第七节	安全保护和操作回路	265
第四节	逻辑运算简介	221	第八节	顺序动作回路	266
习题	.....	222	习题	.....	268
第十二章	气源装置及气动辅助元件	223	第十六章	气动程序系统及其设计	269
第一节	气源装置	223	第一节	行程程序控制系统的 设计步骤	269
第二节	气源净化装置	225	第二节	多缸单往复行程程序 回路设计	270
第三节	其它辅助元件	227	第三节	多缸多往复行程程序 回路设计	276
第四节	供气系统的管道设计	232	习题	.....	278
习题	.....	233	第十七章	气压传动系统实例	279
第十三章	气动执行元件	234	第一节	气动机械手气压传动系统	279
第一节	气缸	234	第二节	气动钻床气压传动系统	281
第二节	气动马达	241	第三节	气液动力滑台气压传动 系统	283
习题	.....	242	第四节	工件夹紧气压传动系统	284
第十四章	气动控制元件	244	习题	.....	285
第一节	方向控制阀	244	附录	.....	286
第二节	压力控制阀	250	附录 A	叠加阀系列型谱	286
第三节	流量控制阀	251	附录 B	常用液压与气动元件 图形符号	289
第四节	气动逻辑元件	252	参考文献	.....	296
第五节	气动比例阀及气动伺服阀	256			
习题	.....	258			
第十五章	气动基本回路	259			
第一节	换向回路	259			
第二节	速度控制回路	260			

绪 论

一、液压与气压传动的研究对象

液压与气压传动是研究以有压流体（压力油或压缩空气）为能源介质，来实现各种机械的传动和自动控制的学科。液压传动与气压传动实现传动和控制的方法是基本相同的，它们都是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，要研究液压与气压传动及其控制技术，就首先要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；要了解组成系统的各类液压与气动元件的结构、工作原理、工作性能以及由这些元件所组成的各种控制回路的性能和特点，并在此基础上进行液压与气压传动控制系统的设计。

液压传动所用的工作介质为液压油或其它合成液体，气压传动所用的工作介质为空气，由于这两种流体的性质不同，所以液压传动和气压传动又各有其特点。液压传动传递动力大，运动平稳，但由于液体粘性大，在流动过程中阻力损失大，因而不宜作远距离传动和控制；而气压传动由于空气的可压缩性大，且工作压力低（通常在 1.0MPa 以下），所以传递动力不大，运动也不如液压传动平稳，但空气粘性小，传递过程中阻力小、速度快、反应灵敏，因而气压传动能用于远距离的传动和控制。

二、液压与气压传动的工作原理

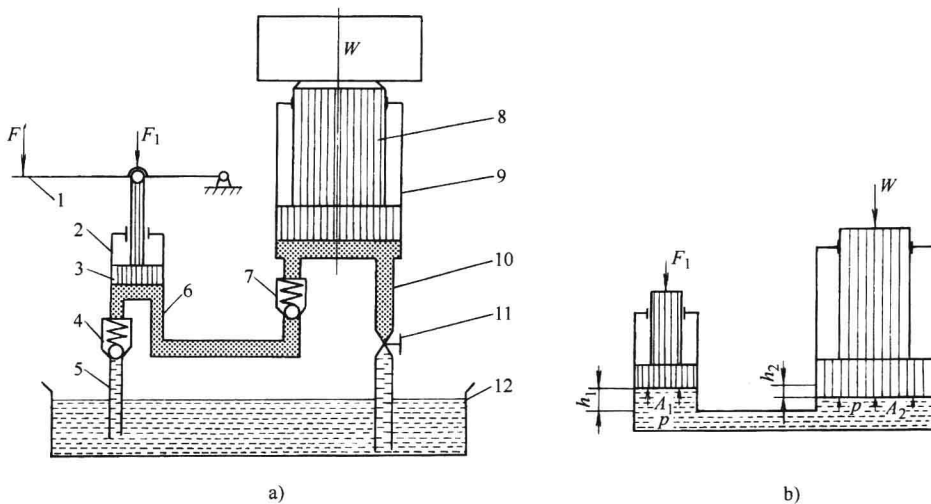


图 0-1 液压千斤顶

a) 液压千斤顶原理图 b) 液压千斤顶简化模型

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—通大气式油箱

液压与气压传动的 basic 工作原理是相似的，现以图 0-1 所示的液压千斤顶来简述液压传动的工作原理。由图 0-1a 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。如提起手柄使小活塞向上移动，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。

图0-1b为液压千斤顶的简化模型，据此可分析两活塞之间的力比例关系、运动关系和功率关系。

1. 力比例关系

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动液体各点”。因而要顶起大活塞及其重物负载 W ，在小活塞下腔就必须产生一个等值的压力 p ，也就是说小活塞上必须施加力 F_1 ， $F_1=pA_1$ ，因而有

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{W}{A_2}$$

或

$$\frac{W}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad (0-1)$$

式中， A_1 、 A_2 分别为小活塞和大活塞的作用面积； F_1 为杠杆手柄作用在小活塞上的力。

式(0-1)是液压传动和气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，亦即 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，即在液压和气压传动中工作压力取决于负载，而与流入的流体多少无关。

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0-1b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

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

或

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (0-2)$$

式中， h_1 、 h_2 分别为小活塞和大活塞的位移。

从式(0-2)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

$$A_1 \frac{h_1}{t} = A_2 \frac{h_2}{t}$$

即

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (0-3)$$

式中， v_1 、 v_2 分别为小活塞和大活塞的运动速度。

从式(0-3)可以看出，活塞的运动速度和活塞的作用面积成反比。

Ah/t 的物理意义是单位时间内液体流过截面积为 A 的某一截面的体积,称为流量 q^{\ominus} ,即

$$q = Av$$

因此

$$A_1v_1 = A_2v_2 \quad (0-4)$$

如果已知进入缸体的流量 q , 则活塞的运动速度为

$$v = \frac{q}{A} \quad (0-5)$$

调节进入缸体的流量 q , 即可调节活塞的运动速度 v , 这就是液压传动与气压传动能实现无级调速的基本原理。从式 (0-5) 可得到另一个重要的基本概念, 即活塞的运动速度取决于进入液压 (气压) 缸 (马达) 的流量, 而与流体压力大小无关。

3. 功率关系

由式 (0-1) 和式 (0-3) 可得

$$F_1v_1 = Wv_2 \quad (0-6)$$

式 (0-6) 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 (0-6) 还可得出

$$P = pA_1v_1 = pA_2v_2 = pq \quad (0-7)$$

由式 (0-7) 可以看出, 液压与气压传动中的功率 P 可以用压力 p 和流量 q 的乘积来表示, 压力 p 和流量 q 是流体传动中最基本、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。

从以上分析可知, 液压传动和气压传动是以流体的压力能来传递动力的。

三、液压与气压传动系统的组成

图 0-2 所示为一驱动机床工作台的液压传动系统, 它由油箱 1、过滤器 2、液压泵 3、溢流阀 4、换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7、液压缸 8 以及连接这些元件的油管、管接头等组成。该系统的工作原理是: 液压泵由电动机带动旋转后, 从油箱中吸油, 油液经过滤器进入液压泵的吸油腔, 当它从液压泵中输出进入压力油路后, 在图 0-2a 所示状态下, 通过换向阀 5、节流阀 6, 经换向阀 7 进入液压缸左腔, 此时液压缸右腔的油液经换向阀 7 和回油管排回油箱, 液压缸中的活塞推动工作台 9 向右移动。

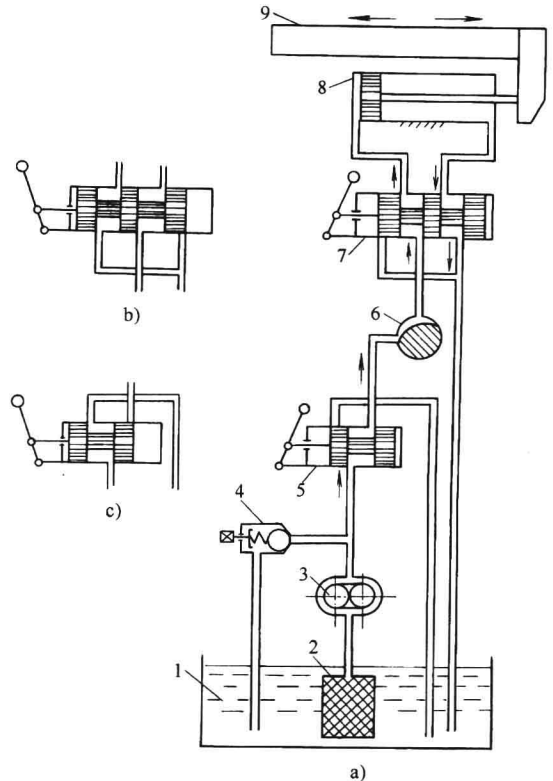


图 0-2 机床工作台液压系统的工作原理图

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

\ominus 流量 q ——全书中涉及的流量主要为体积流量, 而非质量流量。因此体积流量在书中简称为流量, 符号用 q ; 而质量流量的符号用 q_m , 名称不变。

如果将换向阀 7 的手柄移动成图 0-2b 所示的状态,则经节流阀的压力油将由换向阀 7 进入液压缸的右腔,此时液压缸左腔的油经换向阀 7 和回油管排回油箱,液压缸中的活塞将推动工作台向左移动。因而换向阀 7 的主要功用就是控制液压缸及工作台的运动方向;系统中换向阀 5 若处于图 0-2c 的位置,则液压泵输出的压力油将经换向阀 5 直接回油箱,系统处于卸荷状态,液压油不能进入液压缸,所以换向阀 5 又称为开停阀。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的,当节流阀的开口大时,进入液压缸的油液流量就大,工作台移动速度就快;反之,工作台移动速度将减小。因而节流阀 6 的主要功用是控制进入液压缸的流量,从而控制液压缸活塞的运动速度。

液压缸推动工作台移动时必须克服液压缸所受到的各种阻力,因而液压缸必须产生一个足够大的推力,这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。要克服的阻力越大,液压缸中的油液压力越高;反之压力就越低。系统中输入液压缸的油液由节流阀调节,液压泵所输出的多余的油液须经溢流阀和回油管排回油箱,这只有在压力管路中的油液压力对溢流阀的阀芯(图中为钢球)的作用力等于或略大于溢流阀中弹簧的预压力时,油液才能顶开溢流阀中的钢球流回油箱,所以在图示系统中液压泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的,它和液压缸中的压力(由负载决定的)不一样大,一般情况下,液压泵出口处的压力值大于液压缸中的压力,因而溢流阀在液压系统中的主要功用是控制系统的工作压力。

图 0-3 为一可完成某程序动作的气动系统的组成原理图,其中的控制装置是由若干气动元件组成的气动逻辑回路。它可以根据气缸活塞杆的始末位置,由行程开关等传递信号,在作出逻辑判断后指示气缸下一步的动作,从而实现规定的自动工作循环。

由上面的例子可以看出,液压与气压传动系统主要由以下几个部分组成:

(1)能源装置 把机械能转换成流体的压力能的装置,最常见的是液压泵或空气压缩机。

(2)执行装置 把流体的压力能转换成机械能的装置,一般指作直线运动的液(气)缸、作回转运动的液(气)压马达等。

(3)控制调节装置 对液(气)压系统中流体的压力、流量和流动方向进行控制和调节的装置。例如溢流阀、节流阀、换向阀等。这些元件的不同组合组成了能完成不同功能的液(气)压系统。

(4)辅助装置 指除以上三种以外的其它装置,如油箱、过滤器、分水滤气器、油雾器、蓄能器等,它们对保证液(气)压系统可靠和稳定地工作有重大作用。

(5)传动介质 传递能量的流体,即液压油或压缩空气。

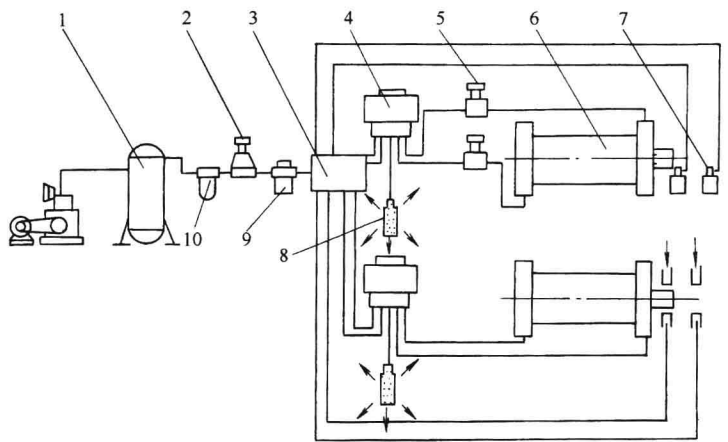


图 0-3 气压传动系统的组成

1—气压发生装置 2—压力控制阀 3—逻辑元件 4—方向控制阀 5—流量控制阀 6—气缸 7—行程开关 8—消声器 9—油雾器 10—过滤器

四、液压与气压传动的优缺点

液压与气压传动同电力拖动系统、机械系统相比有许多优异的特点，下面从拖动负载能力和控制方式性能两个方面进行比较。

1. 拖动能力

由于气压传动系统的使用压力一般在 $0.2\sim 1.0\text{MPa}$ 范围之内，因此它不能作为功率大的动力系统。在此只对液压传动系统与电力拖动系统作比较。从所能达到的最大功率看，液压系统远不如电力拖动系统，但液压传动最突出的优点是出力大、重量轻、惯性小以及输出刚度大，可用以下指标来表示：

(1) 功率—质量比 这意味着同样功率的控制系统，液压系统体积小、重量轻，这是因为机电元件，例如电动机由于受到磁性材料饱和和作用的限制，单位质量的设备所能输出的功率比较小，液压系统可以通过提高系统的压力来提高输出功率，这时仅受到机械强度和密封技术的限制。在典型情况下，发电机和电动机的功率—质量比仅为 165W/kg 左右，而液压泵和液压马达可达 1650W/kg ，是机电元件的 10 倍，在航空、航天技术领域应用的液压马达可达 6600W/kg 。作直线运动的动力装置将更加悬殊，从单位面积出力来看，液压缸的出力一般可达到 $700\sim 3000\text{N/cm}^2$ ，而直流直线式电动机为 30N/cm^2 左右。

(2) 力—质量比 液压缸的力—质量比一般为 13000N/kg ，而直流直线式电动机仅为 130N/kg 。一般回转式液压马达的转矩—惯量比是同容量电动机的 $10\sim 20$ 倍，一般液压马达为 $61\times 10^3\text{N}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ （近年来发展的无槽电动机具有很高的转矩—惯量比，同液压马达相当）。转矩—惯量比大，意味着液压系统能够产生大的加速度，也就是说时间常数小，响应速度快，具有优良的动态品质。

2. 控制方式性能

液压及气压传动在组成控制系统时，与机械装置相比，其主要优点是操作方便、省力、系统结构空间的自由度大，易于实现自动化，且能在很大的范围内实现无级调速，传动比可达 $100:1$ 至 $2000:1$ 。如与电气控制相配合，可较方便地实现复杂的程序动作和远程控制。此外，流体传动还具有传递运动均匀平稳，反应速度快，冲击小，能高速起动、制动和换向；易于实现过载保护；流体控制元件标准化、系列化和通用化程度高，有利于缩短机器的设计、制造周期和降低制造成本。

当然，液压和气压传动也有一定的缺点，例如传动介质易泄漏和可压缩性会使传动比不能严格保证；由于能量传递过程中压力损失和泄漏的存在使传动效率低；流体传动装置不能在高温下工作；流体控制元件制造精度高以及系统工作过程中发生故障不易诊断等。

气压传动与液压传动相比，有如下优点：

1) 空气可以从大气中取之不竭，无介质费用和供应上的困难，将用过的气体排入大气，处理方便。泄漏不会严重影响工作，不会污染环境。

2) 空气的粘性很小，在管路中的阻力损失远远小于液压传动系统，宜于远程传输及控制。

3) 工作压力低，元件的材料和制造精度低。

4) 维护简单，使用安全，无油的气动控制系统特别适用于无线电元器件的生产过程，也适用于食品及医药的生产过程。

5) 气动元件可以根据不同场合，采用相应材料，使元件能够在恶劣的环境（强振动、强冲击、强腐蚀和强辐射等）下进行正常工作。

气压传动与电气、液压传动相比有以下缺点：

1) 气压传动装置的信号传递速度限制在声速(约 340m/s) 范围内, 所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置, 并且信号要产生较大的失真和延滞, 也不便于构成较复杂的回路, 但这个缺点对工业生产过程不会造成困难。

2) 空气的压缩性远大于液压油的压缩性, 因此在动作的响应能力、工作速度的平稳性方面不如液压传动。

3) 气压传动系统出力较小, 且传动效率低。

五、液压与气压传动的应用及发展

在工业生产的各个部门应用液压与气压传动技术的出发点是不尽相同的。例如, 工程机械、矿山机械、压力机械和航空工业中采用液压传动的主要原因是取结构简单、体积小、重量轻、输出力大; 机床上采用液压传动是取其能在工作过程中方便地实现无级调速, 易于实现频繁的换向, 易于实现自动化; 在电子工业、包装机械、印染机械、食品机械等方面应用气压传动主要是取其操作方便, 且无油、无污染的特点。表 0-1 是液压与气压传动在各类机械行业中的应用举例。

表 0-1 液压与气压传动在各类机械中的应用

行业名称	应用举例	行业名称	应用举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机	轻工机械	打包机、注塑机
矿山机械	凿石机、开掘机、提升机、液压支架	灌装机械	食品包装机、真空镀膜机、化肥包装机
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机	汽车工业	高空作业车、自卸式汽车、汽车起重机
冶金机械	轧钢机、压力机、步进加热炉	铸造机械	砂型压实机、加料机、压铸机
锻压机械	压力机、模锻机、空气锤	纺织机械	织布机、抛砂机、印染机
机械制造	组合机床、冲床、自动线、气动扳手		

液压与气压传动发展到目前的水平主要是由于液压与气压传动本身的特点所致, 随着工业的发展, 液压与气压传动技术必将更加广泛地应用于各个工业领域。

液压技术自 18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起, 已有 300 年的历史了, 但其真正的发展只是在第二次世界大战后 50 余年的时间内, 战后液压技术迅速转向民用工业, 在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步推广。本世纪 60 年代以来, 随着原子能、空间技术、计算机技术的发展, 液压技术得到了很大的发展, 并渗透到各个工业领域中去。当前液压技术正向高压、高速、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时, 新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助测试 (CAT)、计算机直接控制 (CDC)、计算机实时控制技术、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术, 以及污染控制技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

气压传动技术在科技飞速发展的当今世界发展将更加迅速。随着工业的发展, 气动技术的应用领域已从汽车、采矿、钢铁、机械工业等行业迅速扩展到化工、轻工、食品、军事工业等各行各业。气动技术已发展成包含传动、控制与检测在内的自动化技术。由于工业自动化技术的发展, 气动控制技术以提高系统可靠性, 降低总成本为目标。研究和开发系统控制技术和机、电、液、气综合技术。显然, 气动元件当前发展的特点和研究方向主要是节能化、小型化、轻量化、位置控制的高精度化, 以及与电子学相结合的综合控制技术。

第一章 液压传动基础知识

本章主要讲述液压油的物理性质、液压油的使用与污染控制。液体静力学的基本特性、液体流动时的运动特性、流经管路的压力损失以及流经孔口和缝隙的流量等液压传动的基础知识。

本章重点

1. 液压油的物理性质；
2. 液体动力学基础知识。即连续性方程和伯努利方程、液体流经管路的压力损失等；
3. 流经孔口的流量及其与压力差、孔型的关系等。

本章难点

1. 液体粘性的概念；
2. 伯努利方程及其物理意义；
3. 液压冲击的概念及压力波的传递。

流体传动包括液体传动和气体传动，以液体的静压能传递动力的液压传动是以油液作为工作介质的，为此必须了解油液的种类、物理性质，研究油液的静力学、运动学和动力学规律。

从微观的观点来看，油液与其它流体相同，也是由一个一个的、不断作不规则运动的分子组成的。分子之间存在着间隙，它们是不连续的。但是由于分子之间的间隙是极其微小的，因而在研究宏观的机械运动时可以认为它是一种连续介质，这样就可以把油液的运动参数看作是时间和空间的连续函数，并有可能利用解析数学来描述它的运动规律。

另一方面，由于油液分子与分子间的内聚力极小，几乎不能抵抗任何拉力而只能承受较大的压应力；不能抵抗剪切变形而只能对变形速度呈现阻力。不管作用的剪力怎样微小，油液总会发生连续的变形，这就是油液的易流动性，它使得油液本身不能保持一定的形状，只能呈现所处容器的形状。

第一节 液压传动工作介质

液体是液压传动的工作介质。最常用的工作介质是液压油。此外，还有乳化型传动液和合成型传动液。

一、液压传动工作介质的性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度。体积为 V ，质量为 m 的液体的密度 ρ 为

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

矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减小，随压力的提高而稍有增加，但变动值很小，可以认为是常值。我国采用 20°C 时的密度作为油液的标准密度，以 ρ_{20} 表示。常用液压

油和传动液的密度见表 1-1。

表 1-1 常用工作介质的密度 (kg/m³)

种 类	ρ_{20}	种 类	ρ_{20}
石油基液压油	850~900	增粘高水基液	1003
水包油乳化液	998	水-乙二醇液	1060
油包水乳化液	932	磷酸酯液	1150

2. 可压缩性

压力为 p_0 、体积为 V_0 的液体，如压力增大 Δp 时，体积减小 ΔV ，则此液体的可压缩性可用体积压缩系数 κ ，即单位压力变化下的体积相对变化量来表示

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

由于压力增大时液体的体积减小，因此上式右边须加一负号，以使 κ 成为正值。液体体积压缩系数的倒数，称为体积弹性模量 K ，简称体积模量。即 $K=1/\kappa$ 。表 1-2 为各种液压传动工作介质的体积模量的数值。由表中石油型液压油体积模量的数值可知，它的可压缩性是钢的 100~150 倍。

液压传动工作介质的体积模量和温度、压力有关：温度增加时， K 值减小，在液压传动工作介质正常的工作范围内， K 值会 5%~25% 的变化；压力增大时， K 值增大，但这种变化不呈线性关系，当 $p \geq 3\text{MPa}$ 时， K 值基本上不再增大。液压传动工作介质中如混有气泡时， K 值将大大减小。

表 1-2 各种液压传动工作介质的
体积模量 (20°C, 大气压)

液压传动工作介质种类	$K/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$
石油型	$(1.4 \sim 2.0) \times 10^9$
水包油乳化液 (W/O 型)	1.95×10^9
水-乙二醇液	3.15×10^9
磷酸酯液	2.65×10^9

封闭在容器内的液体在外力作用下的情况极像一个弹簧：外力增大，体积减小；外力减小，体积增大。这种弹簧的刚度 κ_h ，在液体承压面积 A 不变时（图 1-1），可以通过压力变化 $\Delta p = \Delta F/A$ 、体积变化 $\Delta V = A\Delta l$ （ Δl 为液柱长度变化）和式（1-2）求出，即

$$\kappa_h = -\frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{A^2 K}{V} \quad (1-3)$$

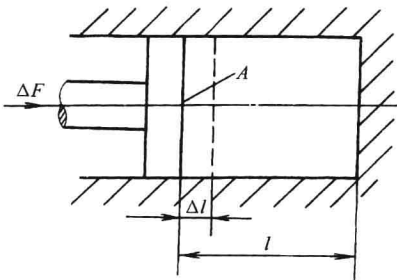


图 1-1 液压弹簧的刚度计算简图

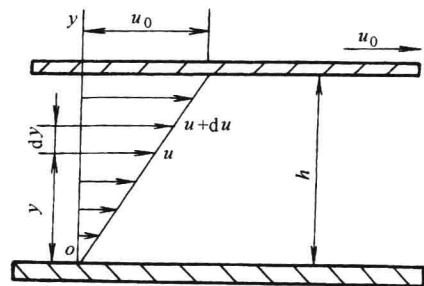


图 1-2 液体的粘性示意图

液压传动工作介质的可压缩性对在动态工作的液压系统来说影响极大；但当液压系统在静态下（稳态）工作时，一般可以不予考虑。

3. 粘性

液体在外力作用下流动（或有流动趋势）时，分子间的内聚力要阻止分子相对运动而产生的一种内摩擦力，这种现象叫做液体的粘性。液体只有在流动（或有流动趋势）时才会呈现出粘性，静止液体是不呈现粘性的。

粘性使流动液体内部各处的速度不相等，以图 1-2 为例，若两平行平板间充满液体，下平板不动，而上平板以速度 u_0 向右平动。由于液体的粘性，紧靠下平板和上平板的液体层速度分别为零和 u_0 ，而中间各液层的速度则视它距下平板的距离按曲线规律或线性规律变化。

实验测定指出，液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_t 与液层接触面积 A 、液层间的速度梯度 du/dy 成正比，即

$$F_t = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中 μ 为比例常数，称为粘性系数或粘度。如以 τ 表示切应力，即单位面积上的内摩擦力，则

$$\tau = \frac{F_t}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

这就是牛顿的液体内摩擦定律。

液体的粘度是指它在单位速度梯度下流动时单位面积上产生的内摩擦力。粘度是衡量液体粘性的指标。粘度 μ 称为动力粘度，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒），以前沿用的单位为 P（泊， $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ）， $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$ （厘泊）。

液体的动力粘度与其密度的比值，称为液体的运动粘度 ν ，即 $\nu = \mu/\rho$ ，单位为 m^2/s 。以前沿用的单位为 St（斯）， $1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$ （厘斯） $= 10^6\text{mm}^2/\text{s}$ 。就物理意义来说， ν 不是一个粘度的量，但习惯上常用它来标志液体粘度，液压传动工作介质的粘度等级是以 40°C 时运动粘度（以 mm^2/s 计）的中心值来划分的，如某一种牌号 L—HL22 普通液压油在 40°C 时运动粘度的中心值为 $22\text{mm}^2/\text{s}$ 。

液体的粘度随液体的压力和温度而变。对液压传动工作介质来说，压力增大时，粘度增大。在一般液压系统使用的压力范围内，增大的数值很小，可以忽略不计。但液压传动工作介质的粘度对温度的变化十分敏感，如图 1-3 所示，温度升高，粘度下降。这个变化率的大小直接影响液压传动工作介质的使用，其重要性不亚于粘度本身。

4. 其它性质

液压传动工作介质还有其它一些性质，如稳定性（热稳定性、氧化稳定性、水解稳定性、剪切稳定性等）、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性以及相容性（对所接触的金属、密封材料、涂料等作用程度）等，

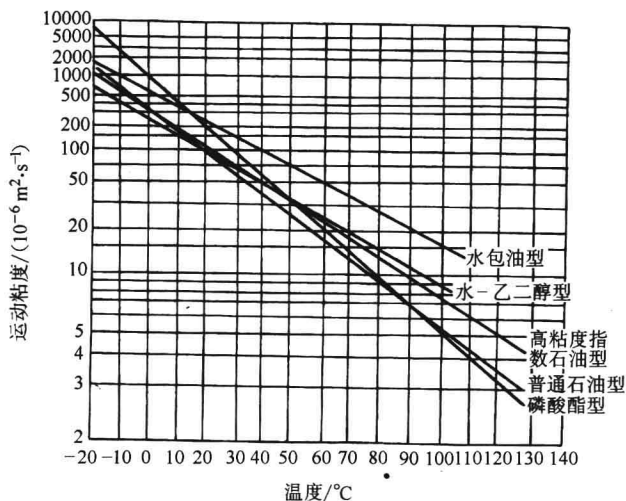


图 1-3 粘度和温度间的关系

都对它的选择和使用有重要影响。这些性质需要在精炼的矿物油中加入各种添加剂来获得,其含义较为明显,不多作解释,可参阅有关资料。

二、对液压传动工作介质的要求

不同的工作机械、不同的使用情况对液压传动工作介质的要求有很大的不同。为了很好地传递运动和动力,液压传动工作介质应具备如下性能:

- 1) 合适的粘度, $\nu_{40} = (15 \sim 68) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 较好的粘温特性。
- 2) 润滑性能好。
- 3) 质地纯净, 杂质少。
- 4) 对金属和密封件有良好的相容性。
- 5) 对热、氧化、水解和剪切都有良好的稳定性。温度低于 57°C 时, 油液的氧化进程缓慢, 之后, 温度每增加 10°C , 氧化的程度增加一倍, 所以控制液压传动工作介质的温度特别重要。
- 6) 抗泡沫好, 抗乳化性好, 腐蚀性小, 防锈性好。
- 7) 体积膨胀系数小, 比热容大。
- 8) 流动点和凝固点低, 闪点(明火能使油面上油蒸气闪燃, 但油本身不燃烧时的温度)和燃点高。
- 9) 对人体无害, 成本低。

对轧钢机、压铸机、挤压机和飞机等液压系统则须突出耐高温、热稳定、不腐蚀、无毒、不挥发、防火等项要求。

三、工作介质的分类和选用

1. 分类

液压系统工作介质的品种以其代号和后面的数字组成, 代号中 L 是石油产品的总分类号“润滑油和有关产品”, H 表示液压系统用的工作介质, 数字表示为该工作介质的某个粘度等级。石油型液压油是最常用的液压系统工作介质, 其各项性能都优于全损耗系统用油 L—AN (原称机械油), 机械油是一种低品位、浪费资源的产品, 不再生产, HL 液压油已被列为机械油的升级换代产品。石油型液压油粘度等级有自 15 至 150 等多种规格, 选用见表 1-3。

乳化型工作介质简称乳化液。它由两种互不相容的液体(如水和油)构成。液压系统乳化液分为两大类, 一类是少量油分散在大量水中, 称为水包油乳化液(O/W 也称高水基液); 另一类是水分散在油中, 称为油包水乳化液(W/O)。

水包油乳化液中油约占 $5\% \sim 10\%$ 左右, 油的作用是作为各种添加剂的载体, 和添加剂一起形成极微小的油滴, 分散悬浮在水中。有 L—HFAE7、10、15、22、32 等五个品种。使用温度为 $5 \sim 50^\circ\text{C}$ 。其特点是粘度低、泄漏大, 系统压力不宜高于 7MPa , 增粘型高水基液的工作压力不宜高于 14MPa ; 水的饱和蒸汽压高, 易汽化, 易气蚀, 泵的吸油口应保持正压, 泵的转速不应超过 $1200\text{r}/\text{min}$; 而且, 其润滑性远低于油, 高水基泵的寿命只及液压泵的一半。水包油乳化液多用于液压支架及用液量特别大的液压系统。

油包水乳化液含油 60% , 水滴直径小于 $1.5\mu\text{m}$ 。其性能接近液压油, 抗燃性高于液压油。使用油温不得高于 65°C , 以免汽化。油包水乳化液有 L—HFB22、32、46、68、100 等五个品种。

水—乙二醇传动液有 L—HFC15、22、32、46、68、100 等六个品种。乙二醇占 $20\% \sim 40\%$, 水占 $35\% \sim 55\%$, 增粘剂约占 $10\% \sim 15\%$, 其余为添加剂。抗燃性优于液压油, 使用温度为