


普通高等教育机械电子工程类规划教材

# 液压与气压传动

雷秀 编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育机械电子工程类规划教材

# 液压与气压传动

雷 秀 编  
王奎升 审

机械工业出版社

本教材是 21 世纪高等教育机械电子工程类规划教材之一。教材共分十章：第一章讲述液压与气压传动技术发展、基本理论与应用，第二章讲述液压传动工作介质及其力学基础，第三章至第六章讲述液压传动元件，第七章讲述液压传动基本回路，第八章分析工程应用典型液压系统，第九章讲述液压系统设计的基本内容和实例，第十章讲述气压传动与控制技术。

本教材面向初学者，循序渐进地教学，理论与实践紧密结合，并突出工程案例和解决工程实际问题。本教材注重培养创新精神和开发创造思维，在基本理论的基础上引出新概念、新技术和新成果；力求以完整的元件结构图佐证工作原理，强化元件图形符号的贯彻和熟练掌握；传播高效传动技术；推进机、电、液（机、电、气）一体化技术、液压集成块及集成回路的教学与应用。在各章后给出了适量的思考题及习题，一并在书末附参考答案。

本教材适应于机械设计制造及自动化、材料成形及控制工程、金属材料工程、冶金与矿山机械工程、农业机械化与自动化、工程机械、轻工业机械等本科专业教学使用，也可作为相关专业成人教育、技术培训和专业技术人员参考书。

为满足广大教师制作挂图或电子课件的需要，本教材配备了全部图表的电子文件。需要者请与作者联系（carefree@imut.edu.cn）。

## 图书在版编目（CIP）数据

液压与气压传动/雷秀编. —北京：机械工业出版社，2005.9

普通高等教育机械电子工程类规划教材

ISBN 7-111-17123-3

I. 液... II. 雷... 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 089438 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：刘小慧 邓海平

责任编辑：邓海平 版式设计：霍永明 责任校对：李秋荣

封面设计：张 静 责任印制：杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm  $\frac{1}{16}$  · 17.25 印张 · 421 千字

定价：26.00 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）68326294

封面防伪标均为盗版

# 前 言

本教材为 21 世纪高等教育机械电子工程类规划教材之一。教材共分十章。第一章讲述液压传动与气压传动技术发展与应用概况,新技术、新概念及发展方向,液压传动工作原理与系统组成,液压系统原理图绘制与国家标准的贯彻,液压传动与控制的优缺点;第二章讲述液压传动工作介质的主要物理与化学性质、种类与特性、选用与维护,静力学与动力学基础,孔口、缝隙的流量-压力特性与计算,液压冲击、气穴现象与预防措施;第三章至第六章讲述液压能源元件、执行元件、调节控制元件和辅助元件的种类、结构和原理、特点与性能、基本计算与选择;第七章讲述液压传动基本回路;第八章讲述工程应用中典型液压传动系统的应用背景、功能、组成、原理、特点和回路分析;第九章讲述液压系统设计、计算和实例;第十章讲述气压传动,包括:气体介质特性与力学基础知识、气动能源元件和辅助元件、执行元件、控制元件(包括逻辑元件)、气动基本回路、典型应用系统分析、气动系统的  $X-D$  设计方法。

本教材的教学特点:一是以初学者为对象,循序渐进地深入教学;二是以理论与实践紧密结合,突出工程实际案例,解决工程实际问题;三是以培养创新精神、开发创造思维展现问题,在掌握基本理论的基础上引出新成果、新技术,进一步促进学习兴趣;四是以完整的元件结构图佐证工作原理;五是传播高效传动技术,确立节能意识;六是加强机电液(机电气)一体化和数字化新技术推广;七是推进液压集成块及其集成回路的教学与应用;八是在各章后安排了适量的思考题及习题,附录 B 给出了参考答案供参考。

本教材的结构特点:一是将液压传动与气压传动分章编排,第一章至第九章为液压传动,第十章为气压传动。气压传动一章内容全面,但主要突出本身特点和工程应用必须掌握的基本知识。二是以工作介质及流体力学知识为理论基础,以元件、回路为主要内容,以系统实例和设计为总结提高。三是按照能量输入、转换、控制、输出的基本规律安排先后内容。特别将液压马达与液压缸编在一节,气动马达与气缸编在一个大标题下,强调了执行元件的共性。四是强化元件图形符号的贯彻和熟练掌握,特别在讲述每种元件之前先给出相应元件的图形符号,使读者形成第一印象,并作为必须掌握的内容。

本教材适应于机械设计制造及自动化(机械制造工艺及设备、机械设计及制造、汽车与拖拉机、机车车辆工程、流体传动及控制、真空技术及设备、机械电子工程、设备工程与管理、林木与木工机械)、材料成形及控制工程(热加工工艺及设备、塑料成形工艺及设备)、金属材料工程(金属材料与热处理、金属压力加工、粉末冶金、复合材料、铸造、塑性成形工艺及设备、焊接工艺及设备)、冶金工程、农林机械化与自动化、工程机械、轻工业机械等本科专业,也可作为相关成人教育、技术培训和专业技术人员的参考书。

#### IV

本教材由雷秀编写，王奎升教授主审。在编写过程中曾得到华中理工大学许福玲教授、北京理工大学彭照伟教授的支持和建议，得到内蒙古液压技术研究所以及研究生李世忠、黄岩为文字录入的支持，编者在此一并表示衷心感谢。特别向本书参考文献的所有作者表示真诚的谢意。

尽管编者尽心尽力，但由于水平有限，书中难免存在疏漏和错误，敬请广大师生和读者批评指正。

**编者**

于呼和浩特

# 目 录

前 言		
<b>第一章 绪论</b> .....	1	
第一节 液压与气压传动技术发展概况 .....	1	
第二节 液压传动工作原理与系统组成 .....	2	
第三节 液压传动系统原理图及图形符号 .....	5	
第四节 液压传动的优缺点及其应用 .....	5	
思考题与习题 .....	7	
<b>第二章 液压传动工作介质及其力学基础</b> .....	8	
第一节 工作介质 .....	8	
第二节 液体静力学基础 .....	14	
第三节 流动液体运动学和动力学基础 .....	17	
第四节 流动液体的能量损失 .....	23	
第五节 孔口及缝隙流量计算 .....	27	
第六节 液压冲击和气穴现象 .....	32	
思考题与习题 .....	34	
<b>第三章 液压传动能源元件</b> .....	37	
第一节 概述 .....	37	
第二节 齿轮式液压泵 .....	40	
第三节 叶片式液压泵 .....	45	
第四节 柱塞式液压泵 .....	52	
第五节 液压能源元件的选用 .....	57	
思考题与习题 .....	57	
<b>第四章 液压传动执行元件</b> .....	59	
第一节 液压马达 .....	59	
第二节 液压缸 .....	65	
思考题与习题 .....	78	
<b>第五章 液压传动调节与控制元件</b> .....	80	
第一节 概述 .....	80	
第二节 方向控制阀 .....	81	
第三节 压力控制阀 .....	88	
第四节 流量控制阀 .....	97	
第五节 叠加阀和插装阀 .....	100	
第六节 伺服阀、比例阀和数字阀 .....	103	
思考题与习题 .....	110	
<b>第六章 液压传动辅助元件</b> .....	113	
第一节 油箱 .....	113	
第二节 过滤器 .....	115	
第三节 压力表及开关 .....	119	
第四节 管件及接头 .....	120	
第五节 密封件 .....	123	
第六节 热交换器 .....	129	
第七节 蓄能器 .....	131	
思考题与习题 .....	134	
<b>第七章 液压传动系统基本回路</b> .....	135	
第一节 方向控制回路 .....	135	
第二节 压力控制回路 .....	138	
第三节 速度控制回路 .....	145	
第四节 多执行元件控制回路 .....	157	
思考题与习题 .....	160	
<b>第八章 典型液压传动系统分析</b> .....	163	
第一节 组合机床液压传动系统分析 .....	163	
第二节 液压机液压传动系统分析 .....	166	
第三节 塑料注射机液压传动系统分析 .....	168	
第四节 汽车起重机液压传动系统分析 .....	172	
第五节 人造板热压机液压系统分析 .....	175	
思考题与习题 .....	177	
<b>第九章 液压传动系统设计与计算</b> .....	180	
第一节 液压传动系统的设计与计算 .....	180	
第二节 液压传动系统设计举例 .....	192	
思考题与习题 .....	198	
<b>第十章 气压传动</b> .....	200	
第一节 概述 .....	200	
第二节 气压传动基础知识 .....	201	
第三节 气压传动能源元件和辅助元件 .....	212	
第四节 气压传动执行元件 .....	219	
第五节 气压传动调节与控制元件 .....	224	
第六节 气压传动基本回路 .....	236	
第七节 气压传动系统实例分析 .....	243	
第八节 气压传动系统设计 .....	246	
思考题与习题 .....	252	
<b>附录</b> .....	254	
附录 A 常用液压与气动元件图形符号 .....	254	
附录 B 习题参考答案 .....	261	
<b>参考文献</b> .....	265	



## 第一章

# 绪 论

### 第一节 液压与气压传动技术发展概况

液压传动技术的发展从法国帕斯卡提出著名的液体静压传递原理到现在已有 350 多年了。它之所以不像机械传动和电气传动那样普及和被人们熟知，是因为液压传动本身的特殊性致使其发展和普及较为缓慢。从帕斯卡原理的建立，到 1795 年英国布拉玛制造出用水作为传动介质的第一台水压机并应用于工程实际就经历了近 150 年。气压传动的实际应用也可以追溯到 18 世纪。但是，它的大力发展和广泛应用也只是 20 世纪 60 年代以后的事。

液压传动技术的发展是与石油化学工业、金属材料工业、机械、电子制造业及流体力学和其他相关学科的发展紧密联系在一起。所以，直到 20 世纪初，液压传动技术从理论到实际应用才基本成熟，30 年代才形成了包括液压泵、液压马达、液压缸和控制阀为主要元件的设计和生产能力并应用于民用和军事装备中。到 60 年代，液压与气动技术进入了广泛的发展阶段。除了通用液压与气动元件的通用化、系列化、标准化设计和制造外，液压与气动伺服控制元件及系统，比例技术的研发和使用也比较普遍。如各种金属和非金属加工机床、工程机械、舰艇、飞机、火炮、工业机器人等自动和半自动控制与动力驱动中广泛地应用了液压与气动技术。时至今日，液压元件的工作压力在 32~42MPa 已非常普遍，100MPa 以上已不是新鲜事。组合机床、加工中心、注塑和压铸机械已具有工控机、单片机或 PC 机控制水平。气压传动与控制技术除了应用于机床、汽车、农机、铸造、锻造、轧钢、采矿、交通运输、机器人、气动工具的传动和控制以外，更广泛地应用于自行车、手表、纺织、服装、皮革、造纸、IC 卡、食品、饮料、化工等生产机械和技术测量中。由于液压与气动技术的成熟和进步，具有液压、气动和电气联合传动和控制的设备也已得到应用。全世界微电子技术的飞速发展对液压与气压传动技术既是技术挑战，同时也带来了技术支持。21 世纪

的液压与气压传动技术必然向着小体积、高压大流量、高效低耗、高可靠性、高稳定性、高频响、高度集成化、数字化、网络化和智能化方向发展。

我国开展液压与气压传动技术的研发和产品生产相对较晚。但从 1953 年生产出第一台齿轮泵开始至今,我国的液压工业,已建立起数以百计的液压、气动元件生产厂和公司,年产数千万件液压、气动元件。全国百余所科研院所和大学在进行着普及教育和产品的研发。全国通过《机床与液压》、《液压与气动》、《液压、气动与密封》等期刊,以及各级学术团体和学术会议与国内外学术界和制造业界进行着广泛的学术交流及技术合作。目前,我国的液压、气动工业与其他国家基本保持同步,某些研究成果已走在世界同行前列。

21 世纪,液压与气动技术的普及和应用标志着一个国家基础工业的发展水平。我国液压与气动工业经历了 50 年,尤其是近 20 多年的产品研发、对外技术交流、技术引进和消化吸收,到处可以见到液压和气动设备在运转,初步体现出我国液压、气动工业已具有一定规模。但从整体来看,我们与世界工业强国相比仍有一定差距。因此,大力普及教育和技术培训,对于推动我国液压与气动技术发展,提升基础工业水平具有重要意义。

## 第二节 液压传动工作原理与系统组成

液压传动是以液体作为工作介质,在密闭容器内进行能量的转换、调节控制和传递的一种传动形式。液压传动与机、电传动形式相比具有某些特殊的优点,其应用遍及各个工业领域,成为国民经济发展中不可替代的重要技术之一。

### 一、液压传动工作原理

液压传动工作原理来源于帕斯卡液体静压传递原理。液压传动的应用是从简单到复杂逐渐应用和发展起来的,下面以三个例子说明其工作原理。

#### 1. 连通器

由图 1-1 可知,连通器是由管道将横截面积为  $A_1$  和  $A_2$  的两个圆柱形容器连通而成。其内部装有某种液体,并且分别用活塞封闭其两圆柱形容器,构成一个活塞可动的、密闭的特殊容器。当给活塞  $A_1$  施加外力  $F_1$  时,容器内液体受到压缩而形成压力  $p$  ( $p = F_1/A_1$ ) 传到液体各点。因此,液体在活塞  $A_2$  上产生一个向上的作用力  $F_2$  ( $F_2 = pA_2 = F_1 A_2/A_1$ )。显然,两活塞面积  $A_2$  和  $A_1$  的比值越大,产生的  $F_2$  也越大。由此说明,连通器具有力的放大能力,是省力装置。

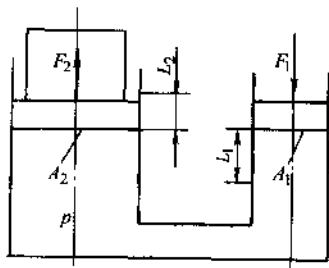


图 1-1 连通器工作原理

当忽略容器中液体压缩性和外部泄漏时,在  $F_1$  作用下,活塞  $A_1$  向下运动  $L_1$ , 活塞  $A_2$  则向上运动  $L_2$ 。故有  $A_1 L_1 = A_2 L_2$ , 称液体容积不变。在本例中,密闭容器内液体在活塞  $A_1$  上将原动力  $F_1$  转变成压力  $p$ , 在活塞  $A_2$  上又将压力  $p$  转变成向上的推力  $F_2$ , 这说明了能量的转换。

由图 1-1 可知,活塞  $A_1$  向下运动所做的功为  $W_1$ , 活塞  $A_2$  向上运动所做的功为  $W_2$ , 则

$$W_1 = F_1 L_1 = p A_1 L_1 = p V_1 \quad (1-1)$$

$$W_2 = F_2 L_2 = p A_2 L_2 = p V_2 \quad (1-2)$$



根据上述,在不考虑摩擦损失、液体压缩性和外部泄漏时

$$W_1 = W_2 = pV_1 = pV_2 \quad (1-3)$$

式(1-3)说明了能量的转换和传递。但要注意,在实际转换和传递中存在能量损失,故传递并不省功。

### 2. 千斤顶

连通器说明了液压传动的基本原理和最简单的系统锥形,经过少量的改变即可组成比较熟悉的液压千斤顶,如图1-2所示。

液压千斤顶是车辆和救援工作必备的一种工具,实用性很强。图1-2中,油箱1储存工作介质(油液);手动泵2是由柱塞缸配以吸油阀**b**、排油阀**c**和杠杆**a**组成,作用是向液压缸3提供压力油液;液压缸3的作用是推动负载;截止阀4的作用是在工作完毕时让液压缸中的油液排回油箱,使液压缸下降复位。

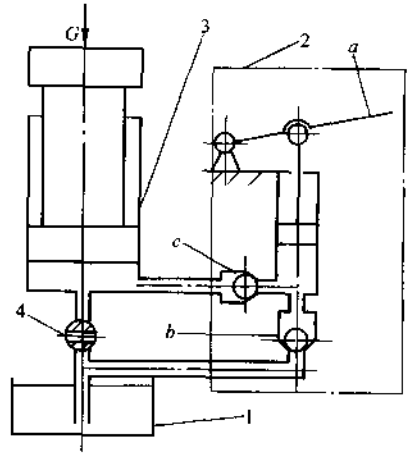


图 1-2 千斤顶原理图

- 1—油箱 2—手动柱塞泵  
3—液压缸 4—截止阀

液压千斤顶工作原理是:当向上提动杠杆,带动工作柱塞向上运动时,工作腔容积增大,形成部分真空,油箱内的油液在大气压作用下推开吸油阀进入工作腔,称手动泵的吸油过程;当向下压杠杆时,带动工作柱塞向下运动,工作腔内的油液压力升高,关闭吸油阀,开启排油阀进入液压缸的下腔,推动其活塞克服重力  $G$  向上运动,称手动泵的排油过程。当连续地上下提压杠杆时,液压缸的活塞克服重力向上一步一步地升高。

当工作完毕,转动截止阀,液压缸的活塞在重力作用下退回复位。同时,将液压缸工作腔的油液排回到油箱内。液压缸的活塞全部下降后,反向关闭截止阀,为下次工作做好准备,此为换向过程。

液压千斤顶与连通器相比,结构上增加了操作杠杆、吸油阀、排油阀和回油截止阀,使得液压缸活塞上升、下降和停留得到了控制。液压缸活塞的运动速度取决于对杠杆的操纵速度,上升的高度取决于操作杠杆的次数。液压千斤顶虽已具备了液压传动系统的主要组成元件,但是输出是不连续的,输出的力、速度和运动方向的控制是粗略的,只能用于简单操作。

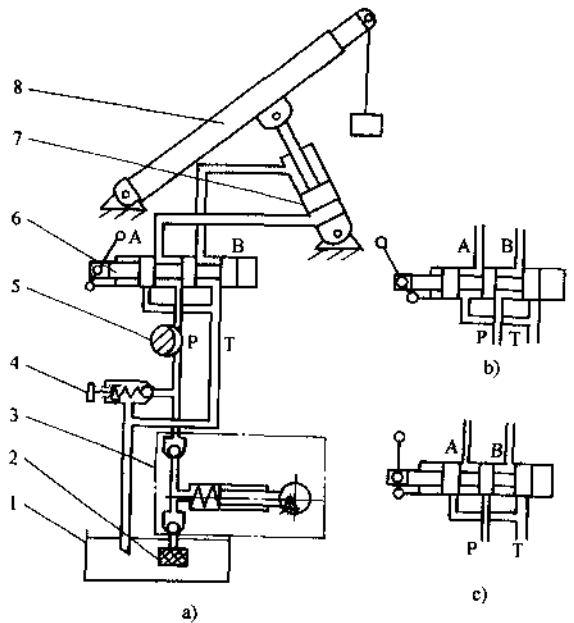


图 1-3 起重机液压举升系统原理图

- 1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—溢流阀  
5—流量阀 6—换向阀 7—液压缸 8—起重臂

### 3. 起重设备液压举升系统

图1-3a是用半结构原理图描述的起重设备举升液压系统。该系统主要由油箱1、过滤器2、液压泵3(只说明工作原理不代表具体某种泵)、溢流阀4、流量阀5、换

向阀6、液压缸7和油管等组成。

在图示状态, 液压泵3在原动机带动下通过过滤器2从油箱1中吸油, 并向压力管道排油。压力管道内的油液经过溢流阀4对压力的控制, 经过流量阀5对流量的控制后经换向阀6的P口、左环形通道、A口进入液压缸7的下腔, 液压缸上腔的油液经过换向阀的B口、右环形通道、T口、回油管流回油箱。液压缸活塞杆在油液作用下克服重力伸出, 完成举升和吊装任务。当需要液压缸下降时, 操纵换向阀工作在图1-3b状态。此时, 流过流量阀的油液经换向阀的P口、右环形通道、B口进入液压缸的上腔, 推动液压缸活塞退回。而液压缸下腔的油液经换向阀的A口、左环形通道、T口及回油管流回油箱。当操纵换向阀工作在图1-3c状态时, 液压缸停止不动, 液压泵排出的油液压力升高, 溢流阀开启溢流, 起到了安全保护作用。

当操纵换向阀工作在右位或左位时, 液压缸作上升或下降运动; 当操纵换向阀在中间位置时, 阀芯中间台肩关闭进油口P, 液压缸的活塞可短时间停留在某个位置不动。这就是换向阀的换向功能。

当需要增大举升速度时, 调节流量阀使其开口增大, 单位时间内进入液压缸的油液体积增大, 则举升速度增大。当需要减小举升速度时, 则调节流量阀使其开口减小即可。此时, 液压泵排出的多余油液将从溢流阀溢流回油箱, 这就是流量阀的调速功能。

当增加举升负载时, 可能出现液压缸不动的现象, 这说明油液全部从溢流阀溢流回油箱了。调节溢流阀的弹簧力使其增大, 液压缸即可运动, 这就是溢流阀的调压功能。

本例描述了应用在工程实际中的液压传动系统基本形式, 具有通用性。可想而知: 将液压缸水平安装, 驱动机床工作台时就可实现工作台的往复运动控制; 将液压缸换成能够实现回转运动的液压马达驱动起重机的塔座、机床回转工作台或车辆行走机构即可实现回转运动的控制。

以上通过三个例子介绍了液压传动的基本工作原理和特点。也可以反映液压传动技术的发展过程。液压传动技术应用广泛, 系统组成的繁简程度也有很大差异, 不可能一一介绍。但是, 通过上述三个例子至少要掌握下面几个基本概念:

- 1) 液压传动是以液体作为工作介质传递能量的。
- 2) 工作介质是在受调节和控制下工作的。
- 3) 液压传动是在密闭容器内以液体的压力能进行能量传递的。
- 4) 液压传动系统中液体的工作压力取决于负载的大小, 且取决于最小负载。
- 5) 液压传动可以省力, 但不省功。

## 二、液压系统的组成

由前面例子可知, 液压传动不论用于什么场合, 也不论系统简单与复杂, 液压系统基本上由下面五部分组成:

(1) 能源元件 能源元件是将原动机输入的机械能转变成液压能的能量转换元件。能源元件通常指各种液压泵, 如图1-3、图1-4中的元件3。

(2) 执行元件 执行元件是将工作介质的压力能转变成机械能驱动负载做功的能量转换元件。执行元件指各种液压缸、液压马达, 如图1-3、图1-4中的元件7。

(3) 调节控制元件 调节控制元件用以调节控制工作介质的压力、流量和流动方向。调节控制元件指各种液压阀, 如图1-3、图1-4中的元件4、5、6。

(4) 辅助元件 辅助元件指除了上述三大类元件以外的其它元件。辅助元件包括油箱、过滤器、管道、接头、密封件、蓄能器、加热器和冷却器等等。

(5) 工作介质 工作介质是传递能量和压力信号的载体。工作介质指包括液压油在内的各种液压液。

### 第三节 液压传动系统原理图及图形符号

#### 一、液压系统原理图

描述液压系统工作原理、基本组成、所能完成的基本任务、工作循环及控制方式的说明性原理图被称为液压系统原理图。液压系统原理图有多种表示法。图 1-3 是以半结构简图表示的原理图，特点是表达形象，直观。但是，对于复杂系统来说，这种原理图绘制起来需要较大的工作量，而且显得混乱难辨，不便于技术交流。为了解决这一问题，各国颁布了自己的标准。我国先后三次颁布液压与气动元件图形符号标准。目前执行的是 GB/T 786.1—1993《液压气动图形符号》规定的图形符号标准。用标准图形符号绘制的液压系统原理图简洁明了，绘图省工省时，便于阅读分析和技术交流。图 1-4 是用标准图形符号绘制的液压系统原理图，描述的系统与图 1-3 是同一个系统，其优点显而易见。

#### 二、图形符号

GB/T 786.1—1993 中规定了液压、气动元件标准图形符号和绘制方法。元件图形符号只表示其功能、操作（控制）方法及外部连接口，并不表示具体结构、性能参数、连接口的实际位置和元件的安装位置。例如，图 1-4 中的元件 3 只表示单向定量泵，实际上可以是单向定量柱塞泵或单向齿轮泵等（又有不同规格和型号之分）。元件图形符号表示元件的静止或零位状态。在绘制回路图或系统原理图时，元件图形符号的大小可根据图纸幅面大小按适当比例增大或缩小绘制。原则是清晰美观。元件的方向可以根据具体情况进行水平绘制、垂直绘制或反转 180°绘制。但是，油箱必须水平绘制并且开口向上。

学习和牢固掌握元件的标准图形符号是学习和应用液压传动技术的关键内容之一。具体绘制方法和要求将在后续章节中逐步贯彻。常用的标准图形符号列于本教材附表中，以供查阅和使用。

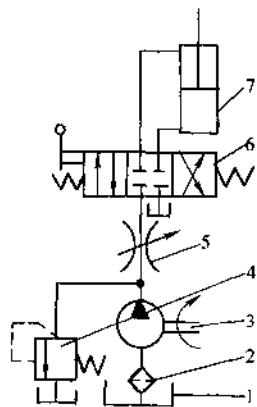


图 1-4 用图形符号绘制的液压原理图

1—油箱 2—过滤器 3—液  
压泵 4—溢流阀 5—流量阀  
6—换向阀 7—液压缸

### 第四节 液压传动的优缺点及其应用

#### 一、液压传动的优缺点

##### (一) 主要优点

液压传动与其它传动方式相比较，具有以下主要优点：

- 1) 液压传动可以获得更大的输出力或转矩，而结构并不复杂。
- 2) 液压传动可以实现较大范围的无级调速，且可在运行中直接调节。
- 3) 液压传动易于实现过载保护。
- 4) 液压传动动作灵敏，启动、停止和换向响应快，冲击小。

- 5) 液压传动自润滑性能好;
- 6) 液压传动易于实现通用化、系列化和标准化,设计和组装周期短。
- 7) 液压传动易于实现自动化,易与数控技术和智能化技术相结合。

### (二) 主要缺点

液压传动目前仍存在以下主要缺点:

- 1) 液压传动因工作介质的可压缩性、泄漏等原因,难以保证严格的定比传动。
- 2) 液压传动的工作介质受温度变化影响大,不宜在极高温度和极低温度下直接工作。
- 3) 液压传动中阻力损失、泄漏损失较大,传动效率仍然较低,故不宜远距离传动。
- 4) 液压传动系统出现故障不太容易诊断。

液压传动技术之所以得到各工业领域的普遍应用,就是因为具有上述诸多的优点。它存在的缺点和问题正被列为课题研究解决。

## 二、液压传动与控制技术的应用

工程实际中都是基于液压传动与控制技术的某种优点而应用的。例如:液压机是利用液压传动能够输出极大的压制力而应用;金属切削机床是利用液压传动具有无级调速、频繁启动性、换向快速性和平稳性等应用;工程机械和所有运动机械是利用液压传动结构简单,体积小、重量轻,可多执行元件工作的功能得到应用等等。到目前为止,液压传动与控制技术已在 20 多个领域的不同方面得到应用,举例如下:

(1) 金属切削机床中的应用 金属切削机床中的应用有:组合机床动力滑台液压系统、万能外圆磨床液压系统、平面磨床液压系统、半自动转塔式车床液压系统、龙门刨床液压系统、拉床液压系统等。

(2) 锻压机械中的应用 锻压机械中的应用有:液压机液压系统、锻锤液压系统、锻造机械手液压系统、快锻机液压系统等。

(3) 铸造机械中的应用 铸造机械中的应用有:压铸机液压系统、垂直分型无箱射压造型机液压系统等。

(4) 橡、塑机械中的应用 橡、塑机械中的应用有:塑料注射成形机液压系统、橡胶硫化机液压系统等。

(5) 冶金工业中的应用 冶金工业中的应用有:高炉(炉顶、布料、热风炉)装置液压系统、电弧炉液压系统、方坯连铸液压系统、板坯连铸机液压系统、棒材线材机组液压系统、型材机组液压系统、带钢跑偏液压控制系统等。

(6) 轻工机械中的应用 轻工机械中的应用有:造纸机械液压系统、皮革机械液压系统、香皂研磨机液压系统、陶瓷坯料成型机液压系统等。

(7) 纺织机械中的应用 纺织机械中的应用有:整经机液压系统、浆纱机液压系统、织造机中的液压系统等。

(8) 建筑材料机械中的应用 建筑材料机械中的应用有:回转窑液压系统、水泥机械立窑液压系统、石料磨光机液压系统等。

(9) 石油机械中的应用 石油机械中的应用有:石油钻机液压系统、采油机械液压系统、钻井平台桩腿升降机液压系统等。

(10) 煤炭采掘机械中的应用 煤炭采掘机械中的应用有:井下长壁采煤工作面综合机械液压系统、巷道掘进机液压系统、支柱液压系统、斗轮机液压系统等。

(11) 农业机械中的应用 农业机械中的应用有：联合收割机液压系统、土豆收获机液压系统、甜菜收获机液压系统、拖拉机液压系统等。

(12) 林业机械中的应用 林业机械中的应用有：木材集材机液压系统、人造板热压机液压系统等。

(13) 起重机械中的应用 起重机械中的应用有：汽车起重机液压系统、高空作业升降机液压系统等。

(14) 工程机械中的应用 工程机械中的应用有：装载机液压系统、铲运机液压系统、挖掘机液压系统、平路机液压系统、剪切破碎设备液压系统等。

(15) 汽车运输中的应用 汽车运输中的应用有：汽车助力转向液压系统、自卸式载货车车厢举升液压系统、汽车制动液压系统、汽车变速器液压系统等。

(16) 铁道工程机械中的应用 铁道工程机械中的应用有：凿岩机液压系统、钢轨校直机液压系统、钢轨焊接机液压系统、钢轨瘤刨平机液压系统、换轮机液压系统等。

(17) 航空工业中的应用 航空工业中的应用有：飞机舵机、起落架、前轮转向、进气道 喷口等液压控制系统。

(18) 船舶中的应用 船舶中的应用有：船舶舵机液压系统、甲板机械液压系统、减摇液压系统等。

(19) 航运管理中的应用 航运管理中的应用有：水闸液压系统、船闸液压系统等。

(20) 兵器中的应用 兵器中的应用有：高炮瞄准液压系统、坦克火炮稳定液压系统、舰炮缓冲液压系统、导弹发射液压系统、火箭推进器液压控制系统等。

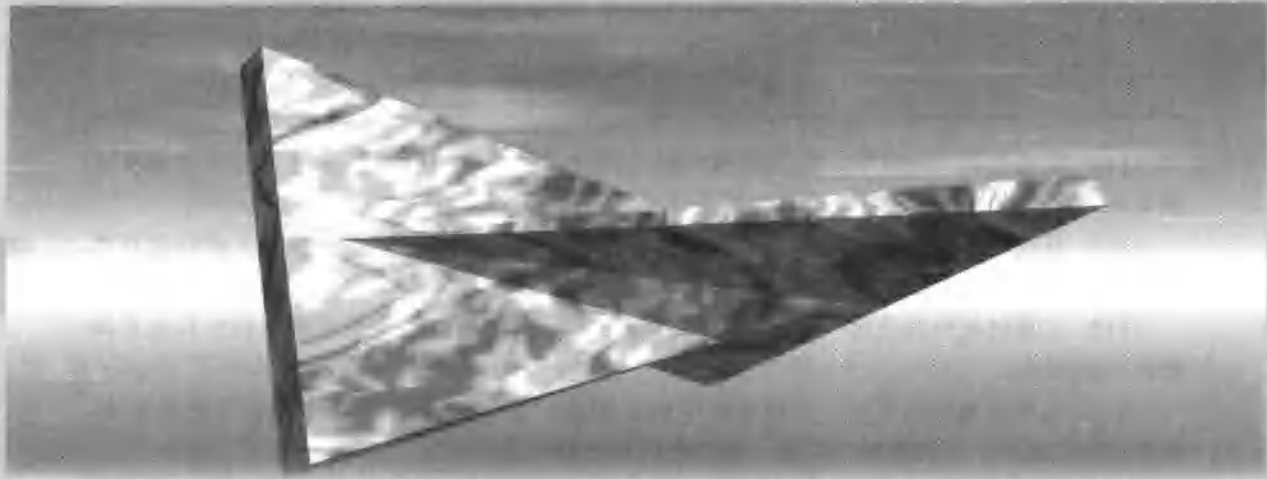
(21) 机器人、模拟器中的应用 机器人、模拟器中的应用有：示教再现机器人液压系统、飞行驾驶舱模拟器液压系统、舰载雷达稳定平台液压系统等。

(22) 打包机械中的应用 打包机械中的应用：羊毛棉花打包机液压系统、金属切屑压块机液压系统、废纸打包机液压系统等。

以上列举了液压传动应用领域的一些实例，说明液压传动不仅是在某一方面的动力传输，更重要的是在自动控制中所起的作用。液压传动与控制实例远远超出上述的举例，随着其他工业技术的发展和需要，将会出现更多的应用。

### 思考题与习题

- 1-1 什么是液压传动？
- 1-2 液压传动工作原理是什么？
- 1-3 液压传动可以省功还是省力？
- 1-4 液压传动系统由哪几部分组成？各起何作用？
- 1-5 液压元件用什么图形符号表示？图形符号绘制的一般要求是什么？
- 1-6 液压传动系统工作压力如何形成？取决于什么？
- 1-7 液压传动系统的工作压力如何调节和控制？
- 1-8 液压传动系统中执行元件运动速度大小取决于什么？
- 1-9 液压传动系统中执行元件输出的力或转矩大小取决于什么？
- 1-10 液压传动中功率损耗有哪些？为什么要采用液压传动？
- 1-11 与机械传动、电气传动相比，液压传动有何优、缺点？
- 1-12 液压传动技术今后发展方向是什么？



## 第二章

# 液压传动工作介质及其力学基础

液压传动中工作介质起着重要的作用。工作介质的种类、化学、物理性质和力学特性一直是被研究的课题，伴随着液压传动技术发展的全过程。本章是液压传动技术的基础，对本章的学习和掌握有助于后续章节的学习和深入研究。

### 第一节 工作介质

#### 一、工作介质概述

液压传动工作介质的种类比较多。最初用水作为介质，随着液压元件材料的金属化，为了防止锈蚀，后来使用油液作为介质。随着对传动性能要求的提高和石油工业的发展，不同种类的石油型油液和难燃液被研制成功并广泛应用。为了节约石油，防止污染和耐高温，目前又开始研发以纯水、海水为介质的液压元件和传动系统。一种被称为电流变流体作为工作介质的传动技术具有更加诱人的新颖性。使用这种介质可使控制更加简化，只要增大或减小控制口的电场强度即可对这种介质的流量和流动方向进行调节和控制。不过这种介质及其相关的匹配元件仍处在研究阶段。另外，磁流变流体也在研究之中。

综上所述，液压传动系统中的工作介质均为液体，通常称为液压液。

#### 二、工作介质的功用和要求

##### 1. 主要功用

- 1) 传递能量和压力信号。
- 2) 对元件进行润滑。
- 3) 防止锈蚀。
- 4) 散热。

##### 2. 一般要求

能夠滿足上述主要功用的同時，對工作介質有以下基本要求：

- 1) 粘度要適當，受溫度變化影響小。
- 2) 純淨無雜質。
- 3) 潤滑性好，具有防銹能力。
- 4) 與系統的其它材料要有良好的相容性。
- 5) 抑制泡沫能力和抑制乳化能力強。
- 6) 燃點高，凝點低。
- 7) 阻電能力強。
- 8) 對人體無損害等。

### 三、工作介質的特性

作為工作介質的液液具有液體的基本共性，即無固定形態，在外力作用下極易流動。所以，液液可存在於液壓系統這樣的特殊容器中，在壓力差作用下能通過管道、孔口和各種縫隙流動並傳遞能量。除了這些共性，工程實際中更要掌握下面一些液體特性：

#### (一) 密度

單位體積的液體具有的质量稱為液體密度，用  $\rho$  表示。對於均質液體，其密度為

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

式中  $V$ ——液體的體積 ( $\text{m}^3$ )；

$m$ ——液體的质量 ( $\text{kg}$ )。

密度  $\rho$  是液體的一個重要參數。不同種類液體的密度是不同的，而且會隨着溫度和壓力的變化而變化。由於在通常使用條件下變化不太明顯，可以忽略。通常使用的石油基液液，其密度可取  $\rho = 900 \text{kg/m}^3$  進行計算。

#### (二) 可壓縮性

當液體受到壓力作用時，其體積會減小，這種特性被稱為液體的可壓縮性。通常用壓縮系數  $k$  來表示

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

式中  $V$ ——液體的初始體積 ( $\text{m}^3$ )；

$\Delta V$ ——液體受到壓力作用前後的體積差 ( $\text{m}^3$ )；

$\Delta p$ ——液體體積發生變化前後的壓力差 ( $\text{N/m}^2$ )。

因為壓力增大時液體體積減小，為了使  $k$  為正值，式中乘以“-”號。

在工程實際應用中，常用液體體積模量  $K$  表示液體抵抗壓力能力的大小

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

對於石油基液液  $K \approx (1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{MPa}$ ，與鋼的體積模量相比雖然小些，但仍是很大的。所以，在一般工程中視為不可壓縮。

液體中溶入空氣後會使  $K$  值減小。所以，實際使用中應盡量減少空氣混入液液中的機會。同時，在一般計算中，可取  $K = (0.7 \sim 1.4) \times 10^3 \text{MPa}$ 。

#### (三) 粘性

##### 1. 粘性的定義

任何液体在外力作用下流动时,因液体分子间的内聚力会产生内摩擦力阻止其相对运动。这种性质被称为液体的粘性。

图 2-1 是描述液体粘性的实验模型。图中,间距为  $h$ , 面积为  $A$  的两平行平板间充满某种液体。当下板固定, 上板沿图示方向以  $u_0$  速度被平行拖动时, 紧贴在上板一层  $dy$  厚度的液体也以  $u_0$  的速度同方向运动。而次一层  $dy$  厚度的液体则减小速度  $du$ , 并且逐层减小  $du$ , 直至固定板上紧贴的一层液体速度减为零。之所以各层液体具有  $du$  的差值是因为运动液体之间存在内摩擦力而阻止相邻层液体的运动。此模型同时说明液体只有在运动时才呈现出粘性, 静止液体是不呈现粘性的。

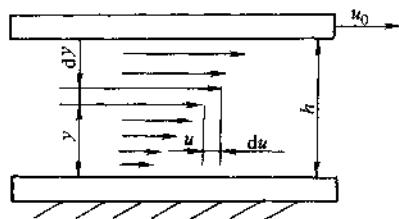


图 2-1 液体的粘性模型

实验结果表明, 相对运动的两层液体间的摩擦力大小与相邻两层液体接触面积、速度梯度有如下关系

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

式中  $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度 (1/s);

$A$ ——相邻层液体接触面积 ( $m^2$ );

$\mu$ ——比例常数或称粘性系数 ( $Pa \cdot s$ );

$F$ ——内摩擦力 (N)。

式 (2-4) 也可用牛顿液体内摩擦定律表示, 即

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

式中  $\tau$ ——液体切应力 ( $N/m^2$ )。

## 2. 粘性的表示及度量

液体粘性及其大小用粘度来表示。常用的粘度的表示方法有三种, 即动力粘度、运动粘度和相对粘度。

(1) 动力粘度 动力粘度又称绝对粘度, 用  $\mu$  来表示

$$\mu = \frac{F}{A} \frac{dy}{du} \quad (2-6)$$

动力粘度的定义是: 单位速度梯度的液体, 在单位接触面积上所承受的摩擦力。动力粘度的单位为  $Pa \cdot s$ 。

(2) 运动粘度 运动粘度用  $\nu$  表示

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

式 (2-7) 表明, 液体的运动粘度  $\nu$  是其动力粘度  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值。运动粘度的单位为  $m^2/s$ 。国际上通用运动粘度  $\nu$  来表示液体的粘度。同时, 采用温度在  $40^\circ C$  时运动粘度的平均值作为液压液的粘度代号。例如 HL32 液压液, 表示这种液压液在  $40^\circ C$  时的平均运动粘度为  $32 \times 10^{-6} m^2/s$ 。又如 HM46 液压液, 表示这种液压液在  $40^\circ C$  时的平均运动粘度为  $46 \times$



$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 等等。ISO 按运动粘度平均值划分了粘度等级, 见表 2-1。

表 2-1 运动粘度等级

粘度等级	40℃时粘度平均值 $\nu$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	40℃时粘度范围 $\nu$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	粘度等级	40℃时粘度平均值 $\nu$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	40℃时粘度范围 $\nu$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
VG10	10	9.0 ~ 11.0	VG46	46	41.1 ~ 50.6
VG15	15	13.5 ~ 16.5	VG68	68	61.2 ~ 74.8
VG22	22	19.8 ~ 24.2	VG100	100	90.0 ~ 110.0
VG32	32	28.8 ~ 35.2			

(3) 相对粘度 相对粘度又称条件粘度。相对粘度是根据特定测量条件制定的。国际上各国采用的测量条件不尽相同, 常见的有通用赛氏秒 SUS (美国、英国用)、商用雷氏秒  $R_1S$  (英国、美国用)、巴氏度 $^{\circ}B$  (法国用) 和恩氏度 $^{\circ}E$  (中国、德国和俄罗斯用) 等。

恩氏度 $^{\circ}E$  是用恩氏粘度计测量的, 方法是: 先测出 200mL 被测液体在  $t^{\circ}C$  时流经恩氏粘度计 (具有  $\phi 2.8\text{mm}$  小孔的漏斗式量具) 所需的时间, 并记为  $t_1$ ; 再测出 200mL 蒸馏水在 20℃ 时流经同一恩氏计所需的时间, 记为  $t_2$  ( $t_2 = 52\text{s}$ );  $t_1/t_2$  即为此条件下的恩氏度 $^{\circ}E$ 。

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

用恩氏粘度计测出的恩氏粘度必须换算成运动粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) 表示, 换算关系为

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

#### (四) 粘温性

液体粘度与温度之间的关系简称粘温性。一般来说, 液体粘度随温度升高而减小, 随温度降低而增大。粘温性常用粘度指数 VI 表示。VI 反映液体的粘度随温度变化程度与标准液体的粘度变化程度之比。粘度指数 VI 高, 说明粘度随温度变化小, 即粘温性好。常用液压液的粘度指数 VI 值均大于 90。常用液压液的粘度—温度特性由图 2-2 表示。

#### (五) 粘压性

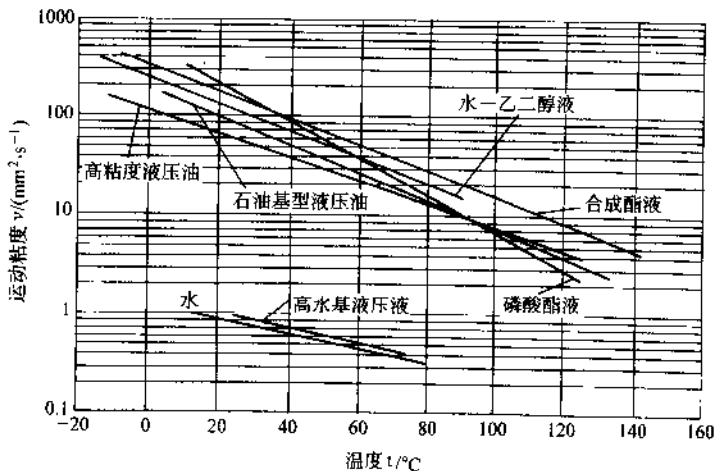


图 2-2 液压液粘度—温度特性曲线