

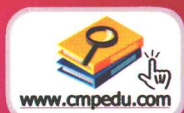


教育部高等职业教育示范专业规划教材

液压与气压传动

YEYA YU QIYA CHUANDONG

白柳 于军 主编



赠电子课件等



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书内容以液压与气压传动新技术为背景,取材新颖、实用,力求反映我国液压与气压传动行业的最新情况并符合我国高等职业技术教育的教学特点。本教材共分为两篇,第1篇为液压传动,包括第1~8章。第2篇为气压传动,包括第9~13章。主要内容包括液压与气压传动的流体力学基础,液压与气压传动元件的结构、工作原理及应用,液压与气压传动基本回路和典型系统的组成与分析等。在气压传动内容的选择上,既考虑到其内容的独立性和完整性,又考虑到与液压传动方面的共同点,力求使读者能够真正掌握液压与气压传动的主要内容。

在章节的编排上,本书力求简明扼要、言简意赅,并配备大量图表。为便于加深理解和巩固所学内容,在每章后面都附有小结和习题。

本书可作为高职、高专和高级技校等院校机械和机电一体化类专业以及相近专业的教材,也可作为中职、中专和中级技校等院校机械和机电一体化类专业的教材,还可供有关工程技术人员参考。

为方便教学,本书备有电子课件、习题参考答案和模拟试卷等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电或邮件索取,咨询电话:010-88379564、邮箱:cmpqu@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/白柳,于军主编. —北京:机械工业出版社,2009.8

教育部高等职业教育示范专业规划教材

ISBN 978-7-111-27310-3

I. 液… II. ①白…②于… III. ①液压传动-高等学校:技术学校-教材②气压传动-高等学校:技术学校-教材
IV. TH137 TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第103488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:于宁 责任编辑:曲世海

版式设计:张世琴 责任校对:李婷

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2009年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·13.5印张·328千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27310-3

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379758

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据机械工业出版社在 2007 年 12 月组织的“教育部高等职业教育示范专业规划教材建设研讨会（机电一体化专业）”的工作会议精神及会议审定的“液压与气压传动”教学大纲和编写提纲编写的。

本书在编写过程中，以职业岗位技能要求为出发点，力求理论联系实际，突出理论知识的应用，坚持理论以定性为主、定量为辅，定量为定性服务的原则；坚持以应会（技术应用）为主，应知为应会服务的原则，在介绍液压与气压传动基本理论的同时，重点分析了各类元件的工作原理、结构特点、使用场合及常见故障和排除方法。

全书分液压传动与气压传动两部分，共 13 章，主要内容包括液压与气压传动的流体力学基础；液压与气压传动元件的结构、工作原理及应用；液压与气动基本回路和典型系统的组成与分析等。为了便于读者加深理解并巩固所学知识，每章前有导读，后有小结，习题根据内容分为填空题、判断题、选择题、问答题、计算题和分析题等。

本书由白柳、于军主编。李绍鹏编写了第 1 章，白柳编写了第 5、6、7 章和第 10、11、12、13 章，于军编写了第 2、3、4、8 章，李铁军编写了第 9 章，王伟编写了附录部分。全书由白柳统稿，明立军副教授担任主审。

本书为高职高专类机电一体化专业教学用书，可作为高等专科学校、职工大学和成人教育学院等机电类专业的教学用书，也可供有关工程技术人员参考。

由于编者水平有限，且编写时间紧迫，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1篇 液 压 传 动

第1章 液压传动概述	1
1.1 液压传动的工作原理及系统组成	1
1.1.1 液压传动的工作原理	1
1.1.2 液压传动系统的组成	2
1.1.3 液压系统的图形符号	3
1.2 液压传动的特点	4
1.3 液压传动的发展与应用	4
小结	5
习题	5
第2章 液压流体力学基础	6
2.1 液压油	6
2.1.1 液压油的主要物理性质	6
2.1.2 液压油的分类和选用	10
2.2 液体静力学基础	12
2.2.1 液体静压力及其特性	12
2.2.2 液体静压力的基本方程	13
2.2.3 压力的表示方法及单位	14
2.2.4 帕斯卡原理	15
2.2.5 液体静压力对固体壁面的 作用力	16
2.3 液体动力学	17
2.3.1 基本概念	17
2.3.2 连续性方程	19
2.3.3 伯努利方程	20
2.3.4 定常流动的压力损失计算	22
2.4 孔口和缝隙的流量计算	24
2.4.1 孔口流量计算	24
2.4.2 缝隙流量计算	25
2.5 液压冲击与空穴现象	26
2.5.1 液压冲击	26
2.5.2 空穴现象	26
小结	27
习题	27

第3章 液压动力元件	30
3.1 液压泵概述	30
3.1.1 液压泵的工作原理及特点	30
3.1.2 液压泵的主要性能参数	31
3.2 齿轮泵	33
3.2.1 外啮合齿轮泵的工作 原理及特点	33
3.2.2 齿轮泵的常见故障现象、产生原因 及排除方法	36
3.3 叶片泵	37
3.3.1 单作用叶片泵	37
3.3.2 双作用叶片泵	39
3.3.3 限压式变量叶片泵	40
3.3.4 叶片泵的常见故障现象、产生原因 及排除方法	42
3.4 柱塞泵	42
3.4.1 径向柱塞泵	43
3.4.2 轴向柱塞泵	43
3.4.3 柱塞泵的常见故障现象、产生原因 及排除方法	45
3.5 液压泵的选用	46
3.5.1 液压泵类型的选择	46
3.5.2 液压泵额定压力和额定 流量的确定	47
小结	47
习题	47
第4章 液压执行元件	49
4.1 液压马达	49
4.1.1 液压马达的特点及分类	49
4.1.2 液压马达的工作原理	50
4.1.3 液压马达的基本参数	51
4.1.4 液压马达的常见故障现象、产 生原因及排除方法	52

4.2 液压缸	52	6.6.1 热交换器	109
4.2.1 液压缸的分类	52	6.6.2 压力计	110
4.2.2 液压缸的计算	54	6.6.3 压力计开关	110
4.2.3 液压缸的典型结构及组成	57	小结	111
4.2.4 液压缸的常见故障现象、产生原因 及排除方法	60	习题	111
小结	60	第7章 液压基本回路	113
习题	61	7.1 压力控制回路	113
第5章 液压控制元件	63	7.1.1 调压回路	113
5.1 方向控制阀	64	7.1.2 减压回路	114
5.1.1 单向阀	64	7.1.3 增压回路	115
5.1.2 换向阀	67	7.1.4 卸荷回路	115
5.2 压力控制阀	75	7.1.5 保压回路	116
5.2.1 溢流阀	75	7.1.6 平衡回路	117
5.2.2 减压阀	79	7.2 速度控制回路	118
5.2.3 顺序阀	82	7.2.1 调速回路	118
5.2.4 压力继电器	83	7.2.2 快速运动回路	128
5.3 流量控制阀	85	7.2.3 速度换接回路	130
5.3.1 节流口形式	85	7.3 方向控制回路	131
5.3.2 普通节流阀	87	7.3.1 换向回路	131
5.3.3 调速阀	87	7.3.2 锁紧回路	132
5.4 插装阀及电液比例控制阀	89	7.4 多缸动作回路	133
5.4.1 插装阀	89	7.4.1 顺序动作回路	133
5.4.2 电液比例控制阀	93	7.4.2 同步回路	134
5.5 液压阀的常见故障现象、产生 原因及排除方法	94	7.4.3 多缸快慢速互不干扰回路	136
小结	97	小结	137
习题	98	习题	137
第6章 液压辅助元件	100	第8章 液压传动系统实例	141
6.1 油管及管接头	100	8.1 组合机床动力滑台的液压系统	141
6.1.1 油管	100	8.1.1 概述	141
6.1.2 管接头	100	8.1.2 YT4543 型动力滑台液压系统的 工作原理	142
6.2 油箱	102	8.1.3 YT4543 型动力滑台液压 系统的特点	144
6.3 过滤器	102	8.2 数控机床的液压系统	144
6.3.1 过滤精度	102	8.2.1 概述	144
6.3.2 过滤器的类型、特点与安装	103	8.2.2 数控车床液压系统的 工作原理	144
6.4 蓄能器	105	8.2.3 数控车床液压系统 的特点	146
6.4.1 蓄能器的类型及结构特点	105	8.3 汽车起重机液压系统	146
6.4.2 蓄能器的用途及安装	106	8.3.1 概述	146
6.5 密封装置	107	8.3.2 液压系统的工作原理	147
6.5.1 对密封装置的要求	107	8.3.3 液压系统的主要特点	149
6.5.2 密封装置的类型和特点	107		
6.6 其他附件	109		

8.4 液压压力机液压系统	150
8.4.1 概述	150
8.4.2 YB32—200 型液压压力机液压系统 的工作原理	150

8.4.3 液压系统的主要特点	152
小结	153
习题	153

第2篇 气压传动

第9章 气压传动概述	156
9.1 空气的物理性质	156
9.1.1 空气与湿空气	156
9.1.2 气体体积的易变性	157
9.2 气体状态方程与气体流动规律	157
9.2.1 气体状态方程	157
9.2.2 气体流动规律	158
9.3 气压传动系统的工作原理及组成	158
9.3.1 气压传动系统的工作原理	158
9.3.2 气压传动系统的组成	159
9.4 气压传动的特点	160
9.4.1 气压传动的优点	160
9.4.2 气压传动的缺点	160
小结	160
习题	160

第10章 气源装置及气动辅助元件	162
10.1 气源装置	162
10.1.1 压缩空气站概述	162
10.1.2 空气压缩机	163
10.2 气源净化装置	164
10.2.1 空气过滤器	164
10.2.2 除油器	164
10.2.3 空气干燥器	165
10.2.4 后冷却器	165
10.2.5 储气罐	166
10.3 其他辅助元件	166
10.3.1 油雾器	166
10.3.2 消声器	168
10.3.3 转换器	168
小结	169
习题	169

第11章 气动执行元件	170
11.1 气缸	170
11.1.1 气缸的分类	170
11.1.2 几种常见气缸的工作原理	

和使用场合	170
11.1.3 标准化气缸简介	173
11.1.4 气缸的选用	173
11.1.5 气缸的常见故障现象、产生原因 及排除方法	173
11.2 气动马达	174
11.2.1 气动马达的工作原理	174
11.2.2 气动马达的工作特性	174
11.2.3 气动马达的特点及应用	175
小结	175
习题	176

第12章 气动控制元件	177
12.1 方向控制阀	177
12.1.1 单向型控制阀	177
12.1.2 换向型控制阀	178
12.1.3 方向控制阀的常见故障现象、 产生原因及排除方法	181
12.2 压力控制阀	182
12.2.1 减压阀的工作原理	182
12.2.2 压力控制阀的常见故障现象、 产生原因及排除方法	183
12.3 流量控制阀	183
12.4 气动逻辑元件	183
12.4.1 气动逻辑元件的分类	184
12.4.2 高压截止式逻辑元件	184
小结	186
习题	186

第13章 气动基本回路及气动 系统	187
13.1 换向回路	187
13.1.1 单作用气缸换向回路	187
13.1.2 双作用气缸换向回路	187
13.2 压力控制回路	188
13.2.1 一次压力控制回路	188
13.2.2 二次压力控制回路	188

13.2.3 高低压转换回路	188	13.5.2 气动机械手气压传动系统	193
13.3 速度控制回路	189	13.5.3 气液动力滑台气压传动 系统	195
13.3.1 单作用缸速度控制回路	189	13.6 气压传动系统的常见故障现象、产生 原因及排除方法	196
13.3.2 双作用缸速度控制回路	189	小结	196
13.3.3 气液转换速度控制回路	190	习题	196
13.3.4 缓冲回路	190	附录	198
13.4 其他常用回路	191	附录 A 常用单位换算表	198
13.4.1 安全保护回路	191	附录 B 常用液压与气动图形符号	198
13.4.2 双手同时操作回路	191	参考文献	205
13.4.3 延时回路	192		
13.5 气压传动系统实例	193		
13.5.1 工件夹紧气压传动系统	193		

第1篇 液 压 传 动

第1章 液压传动概述

导读：液压传动是以液体作为工作介质，利用液体的压力能进行能量的传递和控制的一门技术。液压传动具有许多优点，被广泛应用于机械、建筑、冶金、化工以及航空航天等领域。如今，随着微电子和计算机技术的发展，机、电、液技术的紧密结合，使液压技术的发展和應用又进入了一个崭新的阶段。

本章从实例入手，介绍液压传动的工作原理、系统组成、图形符号及优缺点。

一切机械都有其相应的传动机构并借助于它达到对动力的传递和控制的目的。

机械传动——通过机械零件如齿轮、齿条等直接把动力传送到执行机构的传动方式。

电气传动——利用电力设备，通过调节电参数来传递或控制动力的传动方式。

流体传动 { 液体传动 { 液压传动——以液体作为工作介质，并以其压力能进行能量传递的方式
液力传动——利用液体的流动动能进行能量的传递
气体传动：气压传动——利用气体压力能实现运动和动力传递的方式

1.1 液压传动的工作原理及系统组成

1.1.1 液压传动的工作原理

液压传动的工作原理，可以用液压千斤顶的工作原理来说明。

图 1-1 是液压千斤顶的工作原理图。大液压缸 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小液压缸 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，则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 输入大液压缸 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，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大液压缸 9 下腔，使重物逐渐地升起。如果打开截止阀 11，大液压缸 9 下腔的油液通过管道 10、截止阀 11 流回油箱，重物就下落。

通过对上面液压千斤顶工作过程的分析，可以初步了解到液压传动的基本工作原理。液压传动是利用有压力的油液作为传递动力的工作介质。压下杠杆时，小液压缸 2 输出压力油，是将机械能转换成油液的压力能；压力油经过管道 6 及单向阀 7，推动大活塞 8 举起重物，是将油液的压力能再转换成机械能。大活塞 8 举升的速度取决于单位时间内流入大液压

缸9中油液的多少。由此可见,液压传动是一个不同能量的转换过程。它具有以下特点:

- 1) 以液体为传动介质传递运动和动力。
- 2) 由于液体只有一定的体积而没有固定的形状,所以液压传动必须在密闭的容器内进行。

1.1.2 液压传动系统的组成

液压千斤顶是一种简单的液压传动装置。下面分析一种驱动工作台的液压传动系统。图1-2所示为简化的机床工作台液压传动系统结构原理图,液压泵3在电动机(图中未画出)的带动下旋转,油液由油箱1经过滤器2被吸入液压泵,由液压泵输入的压力油通过节流阀6、换向阀7进入液压缸8,并驱动工作台动作。当换向阀两端的电磁铁均不通电时,阀芯处于中间位置,如图1-2a所示,此时管路P、A、B、T均不连通,液压缸两腔油液被封闭,工作台不能运动。若换向阀7左端电磁铁通电,将阀芯推向右端,处于图1-2b所示位置,则此时管路P、A连通, B、T连通,压力油经管路P、换向阀7、管路A流入液压缸8的左腔,活塞9在压力油的推动下,通过活塞杆带动工作台向右运动,同时,液压缸右腔的油液经管路B、换向阀7、管路T流回油箱1。当换向阀7右端电磁铁通电时,阀芯被推至左端,处于图1-2c所示位置,压力油经管路P、换向阀7、管路B流入液压缸8的右腔,推动工作台向左运动,此时,液压缸8左腔的油液经管路A、换向阀7、管路T流回油箱。因此,可通过控制换向阀7两端电磁铁的通断电情况,使换向阀7的阀芯左、右移动,从而控制工作台的往复运动。

工作台的往复运动速度可根据需要进行调整,由节流阀6和溢流阀5配合来实现。节流阀就像水龙头一样,可以开大,也可以关小。当开大时,经节流阀6进入系统的油液就增多,工作台的运动速度就加快,同时经溢流阀5流回油箱的油液就相应减少;当关小时,工作台的运动速度就减慢,同时经溢流阀5流回油箱的油液就相应增加,从而控制工作台的运动速度。工作台运动时,还要克服一定的阻力,这些阻力由液压泵输出油液的压力来克服,因此,要求液压泵输出的油液压力应能进行调节,这个功能是由溢流阀5来完成的。

从上述例子可以看出,一个完整的液压传动系统由以下几部分组成:

- 1) 动力元件:液压泵,是将原动机输出的机械能转换成液体压力能的元件,其作用是向液压系统提供压力油。液压泵是液压系统的“心脏”。
- 2) 执行元件:液压缸和液压马达,把液体压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件。
- 3) 控制元件:各种控制阀,包括压力、方向和流量控制阀,是对系统中油液压力、流量和方向进行控制和调节的元件。
- 4) 辅助元件:上述三个组成部分以外的其他元件,如管道、管接头、油箱和过滤器等为辅助元件,起连接、输油、过滤、储存压力油和测压等作用,它们对保证液压系统可靠稳定地工作,具有非常重要的作用。
- 5) 工作介质:液压油,是传递能量的介质,直接影响着液压系统的工作性能和可靠性。

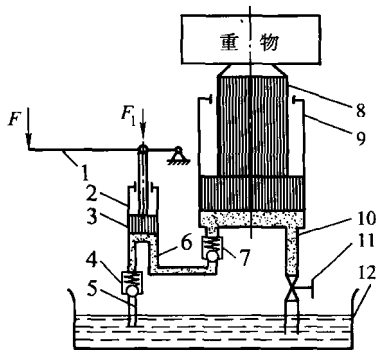


图 1-1 液压千斤顶的工作原理图

- 1—杠杆手柄 2—小液压缸 3—小活塞
4、7—单向阀 5—吸油管
6、10—管道 8—大活塞
9—大液压缸 11—截止阀 12—油箱

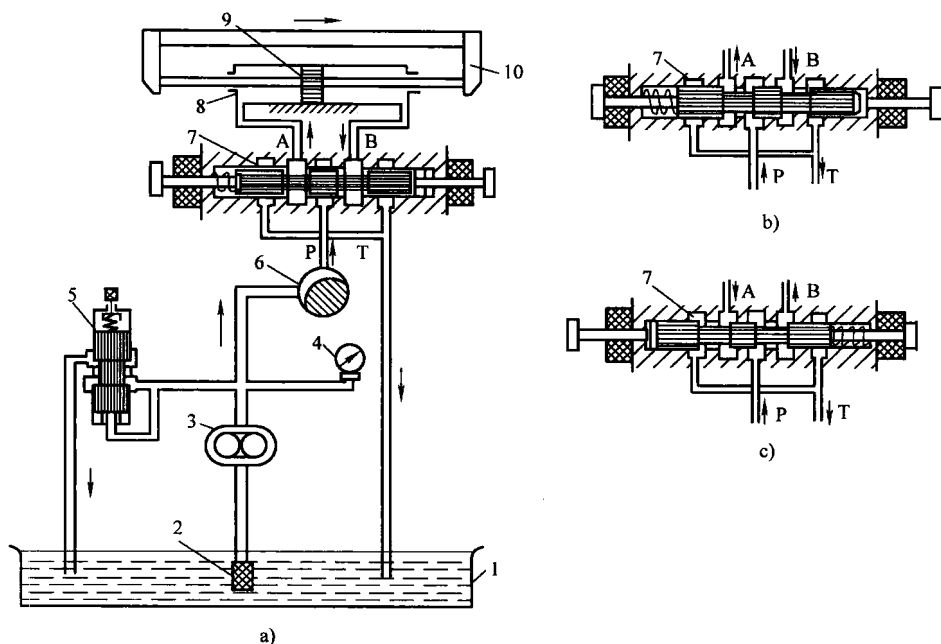


图 1-2 简化的机床工作台液压传动系统结构原理图

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

1.1.3 液压系统的图形符号

图 1-2 所示的液压系统图是一种半结构式的工作原理图，称为结构原理图。它直观性强，容易理解，但难于绘制。在实际工作中，除少数特殊情况外，一般都采用国标 GB/T 786.1—1993 所规定的液压与气动图形符号（参见附录 B）来绘制，如图 1-3 所示。图形符号表示元件的功能，而不表示元件的具体结构和参数；反映各元件在油路连接上的相互关系，不反映其空间安装位置；只反映元件的静态位置或初始位置的工作状态，不反映其传动过程。使用图形符号既便于绘制，又可使液压系统简单明了。液压元件的图形符号在系统中均以元件的静止位置或常态位表示。但在实际使用中，有些液压元件无法采用图形符号绘制时，仍允许采用结构原理图表示。

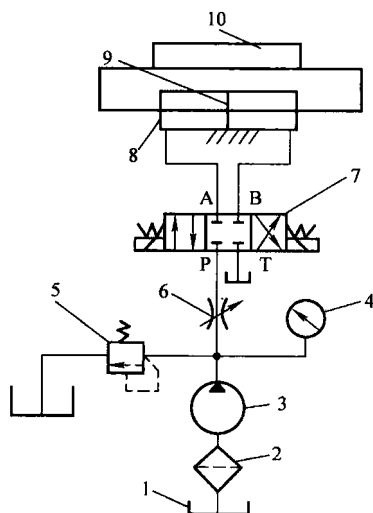


图 1-3 简化的机床工作台液压传动系统图

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

1.2 液压传动的特点

液压传动与机械传动、电气传动相比有以下优点：

- 1) 在同等功率情况下，液压元件体积小、重量轻、结构紧凑。例如同功率液压马达的重量约为电动机的 1/6。
- 2) 操纵控制方便，可实现大范围的无级调速（调速范围达 1 ~ 2000），并且可在运行过程中进行调速。
- 3) 工作平稳、可靠。由于重量轻，惯性小，反应快，噪声低，传动精度高，易于实现快速启动、制动和频繁换向。
- 4) 采用矿物油为工作介质，零件相对运动表面润滑好，使用寿命长。
- 5) 容易实现过载保护，当采用电液联合控制甚至计算机控制时，可实现大负载、高精度、远距离自动控制。
- 6) 液压元件实现了标准化、系列化和通用化，便于设计、制造和使用。

液压传动的缺点：

- 1) 液压传动不能保证严格的传动比，这是由于液压油的可压缩性和泄漏造成的。
- 2) 工作性能易受温度变化的影响，因此不宜在高温或低温下工作。
- 3) 由于流体流动的阻力损失和泄漏较大，所以总效率较低。如果处理不当，那么泄漏不仅污染场地，而且还可能引起火灾和爆炸事故。
- 4) 液压元件出现故障时较难查找。
- 5) 为了减少泄漏，液压元件在制造精度上要求较高，因此造价高，且对油液的污染比较敏感。

总的说来，液压传动的优点是主要的，其缺点将随着科学技术的发展而进一步得到克服。

1.3 液压传动的发展与应用

自 18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起，液压传动技术已有二三百年的历史。直到 20 世纪 30 年代它才较普遍地用于起重机、机床及工程机械。在第二次世界大战期间，由于战争需要，出现了由响应迅速、精度高的液压控制机构所装备的各种军事武器。第二次世界大战结束后，液压技术迅速转向民用工业，不断应用于各种自动机及自动化生产线上。

20 世纪 60 年代以后，液压技术随着原子能技术、空间技术和计算机技术的发展而迅速发展。因此，液压传动真正的发展也只是近三四十年的事。当前液压技术正向迅速、高压、大功率、高效、低噪声、经久耐用和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）、机电一体化技术和可靠性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。而且，我国的液压元件现已形成了标准化、系列化和通用化的产品。

近 30 年来，由于航空航天技术、控制技术、材料科学、微电子技术和计算机技术等学科的发展，再次将液压技术推向前进，使它发展成为包括传动、控制和检测在内的一门完整

的自动化技术,在国民经济的各个部门,如工程机械、数控加工中心、冶金机械和航空航天工程等领域得到了广泛应用。

小 结

1. 液压传动必须在密闭的容器内进行。
2. 液压传动是以液体的压力能来传递运动和动力的一种传动方式。
3. 液压传动系统由动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件和工作介质五部分组成。
4. 液压元件的图形符号和系统原理图按 GB/T 786.1—1993 绘制,系统中元件符号均按静态位置绘制。

习 题

1-1 填空题

1. 液压传动是以()为传动介质,利用液体的()来实现运动和动力传递的一种传动方式。
2. 液压传动必须在()进行,依靠液体的()来传递动力,依靠()来传递运动。
3. 液压传动系统由()、()、()、()和()五部分组成。
4. 在液压传动中,液压泵是()元件,它将输入的()能转换成()能,向系统提供动力。
5. 在液压传动中,液压缸是()元件,它将输入的()能转换成()能。
6. 各种控制阀用以控制液压系统所需要的()、()和(),以保证执行元件满足各种不同的工作要求。
7. 液压元件的图形符号只表示元件的(),不表示元件()和(),以及连接口的实际位置和元件的()。
8. 液压元件的图形符号在系统中均以元件的()表示。

1-2 判断题

1. 液压传动不易获得很大的力和转矩。 ()
2. 液压传动装置工作平稳,能方便地实现无级调速,但不能快速启动、制动和频繁换向。 ()
3. 液压传动与机械、电气传动相配合时,易实现较复杂的自动工作循环。 ()
4. 液压传动系统适宜在传动比要求严格的场合采用。 ()

第2章 液压流体力学基础

导读：液体是液压传动的工作介质，液压传动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。在液压系统中液压油的主要作用是传递能量和信号，同时也起润滑、冷却和防锈等作用。

本章主要讲述液体的物理性质、液体的压力及表示方法、液体静力学的基本特性和液体流动的基本规律等，它对正确理解和掌握液压传动的基本原理是十分重要的。本章难点是液压油的粘性和伯努利方程的应用。

液压油的物理性质 { 密度
可压缩性
粘性

三个重要方程 { 液体静压力基本方程： $p = p_0 + \rho gh$
连续性方程： $v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{常数}$
理想液体的伯努利方程： $\frac{p_1}{\rho g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$

2.1 液压油

2.1.1 液压油的主要物理性质

1. 密度

液体的密度是指单位体积液体的质量，即

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2-1}$$

式中， ρ 是液体的密度 (kg/m^3)； m 是液体的质量 (kg)； V 是液体的体积 (m^3)。

密度是液压油的一个重要物理性质。一般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，可以认为是常数。我国采用 20°C 时的密度 ρ_{20} 作为油液的标准密度，一般取液压油的密度为 900kg/m^3 ，取水的密度为 1000kg/m^3 。常用液压油和传动液的密度见表 2-1。

表 2-1 常用工作介质的密度 (单位： kg/m^3)

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

液体的可压缩性是指液体受压后体积会减小的性质，其大小可用两种参数表示：

(1) 体积压缩率 κ 体积压缩率 κ 是指液体在单位压力变化下体积的相对变化量，即

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \times \frac{\Delta V}{V}$$

(2-2)

式中， κ 是液体的体积压缩率 ($1/\text{Pa}$)； Δp 是压力的变化量 (Pa)， $\Delta p = p_1 - p$ ； p 、 p_1 分别是液体变化前后的压力 (Pa)； ΔV 是体积相对变化量 (m^3)， $\Delta V = V_1 - V$ ； V 、 V_1 分别是液体压力变化前后的体积 (m^3)。

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。

(2) 体积模量 K 液体体积压缩率 κ 的倒数称为体积模量 K ，即 $K = 1/\kappa$ ，也称体积弹性模量，又称压缩模量。各种液压传动工作介质的体积模量见表 2-2。由表中石油型液压油体积模量的数值可知，它的可压缩性是普通钢材的 100 ~ 150 倍(钢的体积模量为 $(200 \sim 210) \times 10^9 \text{Pa}$)。

表 2-2 各种液压传动工作介质的体积模量 (20℃, 1atm)

液压传动工作介质种类	K/Pa	液压传动工作介质种类	K/Pa
石油型	$(1.4 \sim 2.0) \times 10^9$	水-乙二醇液	3.15×10^9
水包油乳化液(W/O 型)	1.95×10^9	磷酸脂液	2.65×10^9

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。在液压传动正常的工作范围内， K 值的变化为 5% ~ 25%。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，则 K 值将大大减小。故应将液压系统中油液中的空气含量减少到最低值。

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，但对于对动态性能要求不高、而仅考虑在静态（稳态）下工作的液压系统，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间的相对运动而产生一种内摩擦力，这种现象称为液体的粘性。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。液体粘性的大小用粘度来表示。粘度是选择液压油的主要指标，是影响液体流动的重要物理性质。

(1) 粘度的物理意义 液体流动时，粘性会使液体内部各处的速度不相等，以图 2-1 为例来说明。设距离为 h 的两平行平板间充满液体，上平板以速度 u_0 相对于静止的下平板向右移动。由于液体的粘性，紧靠上平板的液体层将随上平板一起以速度 u_0 向右移动，紧靠下平板的液体层将与下平板一起静止不动，而中间各层液体则从上至下按照递减的速度向右移动，这是因为相邻两层液体间存在内摩擦力，该力对上层液体的运动起阻滞作用，而对下层液体起拖拽作

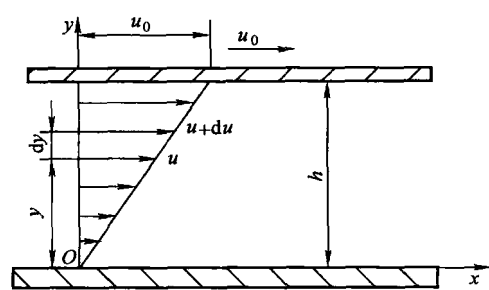


图 2-1 液体的粘性示意图

用。中间各液层的速度视它距下平板的距离按曲线规律或线性规律变化。

由试验可知,液体流动时,相邻液层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A 、液层间的速度梯度 du/dy 成正比,即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-3)$$

式中, μ 是比例常数,称为粘度。如以 τ 表示切应力,则

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

即各液层之间的切应力 τ 等于单位面积 A 上具有的内摩擦力 F , 这就是牛顿的液体内摩擦定律。

由式 (2-4) 可知,对于静止液体来说,速度梯度 $du/dy = 0$, 所以液体在静止状态下是不呈现粘性的。

(2) 粘度的三种表示方法

1) 动力粘度 μ 。动力粘度简称粘度。由式 (2-4) 可得

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

可见,动力粘度 μ 是液体在单位速度梯度下流动时,单位面积上产生的内摩擦力。 μ 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 与以前 CGS 制中 μ 的单位 P(泊) 之间的关系为

$$1 \text{Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{P}$$

2) 运动粘度 ν 。运动粘度 ν 是液体的动力粘度 μ 与其密度 ρ 的比值,即

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

式中, ν 的单位是 m^2/s , 在 CGS 制中 ν 的单位 St(斯), 常用单位是 cSt(厘斯), 它们之间的关系为

$$1 \text{m}^2/\text{s} = 10^4 \text{St(斯)} = 10^6 \text{cSt(厘斯)} = 10^6 \text{mm}^2/\text{s}$$

就物理意义来说, ν 不是一个粘度的量,只是工程上常用它标志液压油的粘度。一般来说,液压传动工作介质的粘度等级是以 40°C 时运动粘度的中心值来划分的,如某一种牌号 L—HL22 表示普通液压油在 40°C 时运动粘度的中心值为 $22 \text{cSt}(\text{mm}^2/\text{s})$ 。

3) 相对粘度。相对粘度又称为条件粘度。它是采用特定的粘度计,在规定的条件下测量出来的液体粘度。根据测量条件不同,各国采用的相对粘度的单位也不同。美国用的 SSU(赛氏秒)称为赛氏粘度,英国用的 Rs(雷氏秒)称为雷氏粘度,我国和欧洲一些国家采用的 $^\circ\text{E}$ 称为恩氏粘度。

恩氏粘度是采用恩氏粘度计在规定的条件下测量出来的液体相对于水的粘度。即将 200mL 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8 \text{mm}$ 小孔的恩氏粘度计的容器中,在某一温度 $t(^\circ\text{C})$ 下测出全部液体在自重作用下流过小孔所需的时间 t_1 , 然后再测出同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需的时间 t_2 ($t_2 = 50 \sim 52 \text{s}$), 则 t_1 与 t_2 的比值即是该液体在 $t(^\circ\text{C})$ 时的恩氏粘度,即

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-7)$$

恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 与运动粘度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ 的关系为

$$\nu = \left(7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad (2-8)$$

(3) 调合油粘度 调合油指两种粘度不同的液压油混合而成的油。调合油粘度为

$$^{\circ}\text{E} = \frac{a^{\circ}\text{E}_1 + b^{\circ}\text{E}_2 - c(^{\circ}\text{E}_1 - ^{\circ}\text{E}_2)}{100} \quad (2-9)$$

式中, $^{\circ}\text{E}_1$ 、 $^{\circ}\text{E}_2$ 分别为混合前两种液压油的相对粘度 ($^{\circ}\text{E}_1 > ^{\circ}\text{E}_2$); a 、 b 分别为两种液压油在调合油中所占的百分数 ($a\% + b\% = 100\%$); c 是与 a 、 b 有关的试验系数,数值见表2-3。

表 2-3 试验系数 c 的数值

a	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

调和油粘度计算举例:

【例 2-1】有两种液压油,在相同温度下,甲液为 9L, $^{\circ}\text{E}_1 = 7$;乙液为 21L, $^{\circ}\text{E}_2 = 5$,将两种油混合,求混合油的粘度。

解:根据题意 $^{\circ}\text{E}_1 = 7$, $^{\circ}\text{E}_2 = 5$,则

$$a = \frac{9}{21 + 9} \times 100 = 30 \quad b = \frac{21}{21 + 9} \times 100 = 70$$

查表 2-3,得 $c = 17.9$,则

$$^{\circ}\text{E} = \frac{a^{\circ}\text{E}_1 + b^{\circ}\text{E}_2 - c(^{\circ}\text{E}_1 - ^{\circ}\text{E}_2)}{100} = \frac{30 \times 7 + 70 \times 5 - 17.9(7 - 5)}{100} = 5.242$$

(4) 粘度与压力、温度的关系 液体的粘度随液体压力和温度的变化而变化。当液体的压力增加时,其分子间的距离将减小,于是内聚力增大,粘度也随之增大。但实际上,在一般液压系统使用的压力范围内,压力对粘度的影响很小,可以忽略不计。但当压力大于 20MPa 或压力变动较大时,则需要考虑压力对粘度的影响。

液体粘度随温度变化的性质称为粘温特性,不同种类油液的粘温特性不同,如图 2-2 所示。液体粘度对温度的变化十分敏感,温度升高,粘度将明显下降。因为液压油粘度的变化直接影响液压系统的工作性能,所以希望油液粘度随温度的变化越小越好。

实际上在液压系统工作时,油温不能太高,最好控制在 30 ~ 60℃ 之间。油温过高,除粘度降低外,油液还容易氧化变质,析出沥青等杂质堵塞油路,影响系统工作的可靠性。此外,油温过高还将降低油液的使用寿命。

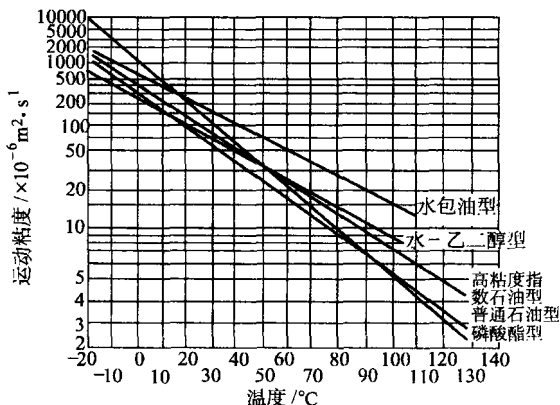


图 2-2 粘度和温度的关系

2.1.2 液压油的分类和选用

1. 对液压油的要求

液压油是液压传动最常用的工作介质，如果说液压泵是液压系统的“心脏”，那么液压油就是液压系统的“血液”。液压油的性能会直接影响液压系统工作的可靠性、灵敏性、稳定性、系统效率和零件寿命等。

为了很好地完成液压传动工作介质的主要功能，选用液压油时应满足下列要求：

- 1) 粘度适当，粘温特性好。在使用温度范围内，粘度随温度的变化越小越好。
- 2) 润滑性能好。在规定的范围内有足够的油膜强度，以免产生干摩擦。
- 3) 质地纯净，杂质少，抗泡沫性好。油液中含有机机械杂质易堵塞油路，若含有易挥发性物质，则会使油液中产生气泡，影响运动平稳性。
- 4) 化学稳定性好。在储存和工作过程中不易氧化变质，以防产生胶质沉淀物，影响系统正常工作；防止油液变酸，腐蚀金属表面。
- 5) 对金属和密封件有良好的相容性。腐蚀性小，防腐性能好。
- 6) 闪点要高，凝固点要低。一般液压系统中所用的液压油的闪点为 $130 \sim 150^{\circ}\text{C}$ ，凝固点为 $-10 \sim -15^{\circ}\text{C}$ 。
- 7) 体积膨胀系数小，比热容大。
- 8) 对人体无害，成本低。

2. 液压油的分类

液压系统工作介质的品种由其代号和后面的数字组成，如 L-HL22 或 L-HM32。代号中左边第一个 L 是石油型产品的总分类号，H 表示液压系统用的工作介质，数字前的 L 或 M 代表加入有关添加剂后产品的性能代号，具体分类和代号见表 2-4，数字表示为该工作介质的粘度等级（22 或 32 分别表示该液压油在 40°C 时，运动粘度的中心值大约为 $22\text{mm}^2/\text{s}$ 或 $32\text{mm}^2/\text{s}$ ，见表 2-6）。

表 2-4 液压系统工作介质分类

分类	名称	代号	组成和特性	应 用
石油型	精制矿油	L-HH	无抗氧剂	适用于循环润滑油，低压液压系统
	普通液压油	L-HL	在 HH 油基础上，改善其防锈和抗氧性	适用于一般液压系统
	抗磨液压油	L-HM	在 HL 油基础上，改善其抗磨特性	适用于低、中、高压系统，特别是有防磨要求、带叶片泵的液压系统
	低温液压油	L-HV	在 HM 油基础上，改善其粘温特性	能在 $-20 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 的低温环境中工作，用于户外工作的工程机械和船用设备的液压系统
	高粘度指数液压油	L-HR	在 HL 油基础上，改善其粘温特性	粘温特性优于 L-HV 油，用于数控机床液压系统和伺服系统
	液压导轨油	L-HG	在 HM 油基础上，具有抗粘滑特性	适用于导轨和液压系统共用一种油品的机床，对导轨有良好的润滑性和防爬性
	其他液压油		加入多种添加剂	用于高品质的专用液压系统