

# 液压与气动技术

YEYA YU QIDONG JISHU

沈仙法 主编



# 液压与气动技术

沈仙法 主编



机械工业出版社

本教材主要内容包括：液压传动概述，流体力学基础，液压动力元件，液压执行元件，液压控制元件与控制回路，液压辅助元件，典型液压系统，液压传动系统的设计计算，气压传动概述，气压传动元件，气动基本回路，气压传动系统，气动系统的安装调试及使用维护。

本教材适合本科院校机械类、近机械类专业师生使用，也可作为企业职工培训教材或供读者自学。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气动技术/沈仙法主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-111-57038-7

I. ①液… II. ①沈… 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 176059 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: 赵磊磊 责任编辑: 赵磊磊

责任校对: 潘蕊 封面设计: 张静

责任印制: 李昂

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.75 印张 · 397 千

字 0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-57038-7

定价: 45.00 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

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本教材是根据机械设计制造及其自动化、机械电子工程、材料成型与控制工程、汽车服务工程、车辆工程和电气工程及其自动化等专业的液压与气动技术课程教学需要编写的。本教材力求体现工程实际应用，为培养技术应用型本科人才而服务。

对于本教材有以下几点说明：

1) 本教材重点突出实际应用。由于液压与气动技术在工程中的应用日益广泛深入，因此本教材在内容的选择上，注重技术理论与工程实践的结合，特别在举例和习题选择上，尽量采用工程实例，以利于引导学生能够结合工程实际学习课程知识。

2) 在各章节安排及内容的叙述上，本教材充分体现既有利于提高学生的应用能力和综合素质，又尽可能与教学实际需要紧密结合的原则。由于在新的教学计划中，液压与气动技术课程的教学学时普遍较少，因此本教材在编写上对以下内容进行了处理：

① 对流体力学基础理论的阐述，力求准确、简练、明了，并简化有关理论推导，以适应少课时的教学需要。

② 将液压控制元件与液压基本回路结合在一起。这种“结合”，使得教学过程既体现控制元件在液压系统中的作用，又避免基本回路教学的枯燥乏味。

为了让学生将来能够适应工作岗位的需要，本教材的内容比讲课内容略有增加，以便于学生技术知识的拓展，适应今后从事相关技术工作的需要，也利于读者复习和自学。

3) 本教材在内容上适应多专业教学的需要，列举了机床、注塑机、汽车、自动控制系统等多方面的实例，可适应较多专业教学的需要。

4) 本教材全面系统地讲述了液压、气动典型常用元件的工作原理和结构，介绍了液压回路和液压系统、气动回路和气动系统的应用、维修维护，以及各种液压系统的工作原理及工作流程，以便于老师讲授和学生自学。

5) 本教材在每章都配有较多的习题，题目内容广泛，难度不一，可供不同层次的读者选做。

6) 本教材内容叙述尽量通俗易懂，使之适合本科院校机械类、近机械类专业师生使用。

7) 配有内容丰富的多媒体课件，供老师教学和读者自学使用。

参加本教材编写工作的有：三江学院的沈仙法（主编，编写第2、4、5和10章及附录）、沈鑫美（副主编，编写第3、6和11章）、王海巧（副主编，编写第

9 章)、陈本德(编写第 7 章)、王结群(编写第 8 章),南京工业大学浦江学院的徐海璐(编写第 1、12 和 13 章)。本书由陈本德老师负责统稿并担任主审。编写过程中王结群老师提出了很多中肯的意见。

由于编者水平有限,教材中难免存在错误或疏漏之处,恳请读者予以指正。

**编 者**

# 目 录

前言	
第 1 章 液压传动概述	1
1.1 液压传动的工作原理	1
1.2 液压传动系统的组成及图形符号	2
1.3 液压传动的特点	2
1.4 液压传动技术的应用及发展	3
本章小结	3
习题	3
第 2 章 流体力学基础	4
2.1 液压传动工作介质	4
2.1.1 液体的密度	4
2.1.2 可压缩性	4
2.1.3 液体的黏性	5
2.2 对液压油的要求及其分类与选择	6
2.2.1 对液压油的要求	6
2.2.2 液压油的分类	7
2.2.3 液压油的选择	7
2.3 液体静力学基础	8
2.3.1 液体静压力及其特性	8
2.3.2 液体静力学基本方程	8
2.3.3 压力的表示方法及单位	9
2.3.4 帕斯卡原理	9
2.3.5 静止液体对固体壁面的作用力	10
2.4 液体动力学基础	10
2.4.1 基本概念	10
2.4.2 连续性方程	12
2.4.3 伯努利方程	12
2.4.4 动量方程	13
2.5 液体流动时管路内的压力损失	14
2.5.1 沿程压力损失	14
2.5.2 局部压力损失	14
2.5.3 管路系统中的总压力损失	15
2.6 液体流经孔口及缝隙的流量	16
2.6.1 液体流经小孔的流量	16
2.6.2 液体流经间隙的流量	17
2.7 液压冲击和空穴现象	19
2.7.1 液压冲击	19
2.7.2 空穴现象	19
本章小结	20
习题	20
第 3 章 液压动力元件	23
3.1 液压泵概述	23
3.1.1 液压泵的工作原理与特点	23
3.1.2 液压泵的分类	24
3.1.3 液压泵的主要性能参数	24
3.2 齿轮泵	26
3.2.1 外啮合齿轮泵	26
3.2.2 内啮合齿轮泵	27
3.2.3 螺杆泵	28
3.3 叶片泵	29
3.3.1 单作用叶片泵	29
3.3.2 限压式变量叶片泵	30
3.3.3 双作用叶片泵	32
3.4 柱塞泵	33
3.4.1 径向柱塞泵	33
3.4.2 轴向柱塞泵	34
3.5 液压泵的选用	36
3.6 液压泵的常见故障及其排除方法	37
3.6.1 齿轮泵的常见故障及其排除方法	37
3.6.2 叶片泵的常见故障及其排除方法	38
3.6.3 柱塞泵的常见故障及其排除方法	38
本章小结	39
习题	39
第 4 章 液压执行元件	41
4.1 液压马达	41
4.1.1 液压马达的分类	41
4.1.2 液压马达的主要性能参数	42

4.1.3 液压马达的图形符号 .....	43	5.4.6 速度控制回路 .....	99
4.2 液压缸 .....	43	5.4.7 速度控制回路故障诊断 .....	110
4.2.1 液压缸的分类及特点 .....	43	5.5 叠加阀与插装阀 .....	112
4.2.2 液压缸的典型结构 .....	47	5.5.1 叠加阀 .....	112
4.2.3 液压缸结构设计 .....	51	5.5.2 插装阀 .....	113
4.3 液压执行元件的常见故障及其 排除方法 .....	53	5.6 电液伺服阀与电液比例阀 .....	115
4.3.1 液压马达的常见故障及其 排除方法 .....	53	5.6.1 电液伺服阀及其应用 .....	115
4.3.2 液压缸的常见故障及其 排除方法 .....	55	5.6.2 电液比例阀及其应用 .....	117
本章小结 .....	57	5.7 其他液压基本回路 .....	119
习题 .....	58	本章小结 .....	123
<b>第5章 液压控制元件与控制回路</b> .....	<b>59</b>	习题 .....	123
5.1 液压阀概述 .....	59	<b>第6章 液压辅助元件</b> .....	<b>128</b>
5.1.1 液压阀的分类 .....	59	6.1 油箱 .....	128
5.1.2 液压阀的基本要求 .....	60	6.1.1 油箱的作用与分类 .....	128
5.2 方向控制阀及方向控制回路 .....	60	6.1.2 油箱的结构设计 .....	128
5.2.1 单向阀 .....	60	6.2 蓄能器 .....	130
5.2.2 换向阀 .....	61	6.2.1 蓄能器的功能 .....	130
5.2.3 方向控制阀的常见 故障及其排除 .....	67	6.2.2 蓄能器的类型和结构特点 .....	131
5.2.4 方向控制回路 .....	69	6.2.3 蓄能器的安装及使用注意事项 .....	132
5.2.5 方向控制回路故障诊断 .....	70	6.3 过滤器 .....	132
5.3 压力控制阀及压力控制回路 .....	73	6.4 密封装置 .....	134
5.3.1 溢流阀 .....	74	6.4.1 对密封装置的要求 .....	134
5.3.2 减压阀 .....	77	6.4.2 密封装置的类型和特点 .....	134
5.3.3 顺序阀 .....	78	6.5 油管与管接头 .....	137
5.3.4 压力继电器 .....	79	6.5.1 油管 .....	137
5.3.5 压力控制阀的常见 故障及其排除 .....	80	6.5.2 管接头 .....	137
5.3.6 压力控制回路 .....	84	6.6 其他辅助装置 .....	138
5.3.7 压力控制回路故障诊断 .....	89	6.6.1 流量计 .....	138
5.4 流量控制阀及速度控制回路 .....	95	6.6.2 压力表 .....	138
5.4.1 节流口的流量特性和形式 .....	95	6.6.3 压力表开关 .....	138
5.4.2 节流阀 .....	96	本章小结 .....	139
5.4.3 调速阀 .....	97	习题 .....	139
5.4.4 溢流节流阀 .....	97	<b>第7章 典型液压系统</b> .....	<b>140</b>
5.4.5 流量控制阀的常见 故障及其排除 .....	98	7.1 组合机床动力滑台液压系统 .....	140
		7.1.1 YT4543 型动力滑台液压 系统分析 .....	140
		7.1.2 YT4543 型动力滑台液压 系统的特点 .....	143
		7.2 C7620 型卡盘多刀半自动车床 液压系统 .....	143

7.2.1 C7620 型卡盘多刀半自动车床液压系统分析 .....	143	8.6.2 编制技术文件 .....	163
7.2.2 C7620 型卡盘多刀半自动车床液压系统的特点 .....	145	8.7 液压系统设计计算实例 .....	163
7.3 XS-ZY-250A 型注塑机液压系统 .....	145	8.7.1 分析系统工况 .....	163
7.3.1 XS-ZY-250A 型注塑机液压系统分析 .....	145	8.7.2 液压缸主要参数的确定 .....	164
7.3.2 XS-ZY-250A 型注塑机液压系统的特点 .....	148	8.7.3 液压系统图的拟订 .....	165
7.4 汽车防抱死制动系统 (ABS) .....	148	8.7.4 液压元件的选择 .....	167
7.4.1 汽车防抱死制动系统 (ABS) 的功用、结构及工作原理 .....	148	8.7.5 液压系统的性能验算 .....	168
7.4.2 汽车 ABS 的特点 .....	150	本章小结 .....	169
7.5 锡锭熔炼自动送料装置液压系统 .....	151	习题 .....	169
7.5.1 锡锭熔炼自动送料装置液压系统分析 .....	151	<b>第 9 章 气压传动概述</b> .....	171
7.5.2 锡锭熔炼自动送料装置液压系统的特点 .....	152	9.1 气压传动系统的工作原理及组成 .....	171
7.6 液压系统的常见故障及其排除方法 .....	152	9.1.1 气压传动系统的工作原理 .....	171
本章小结 .....	153	9.1.2 气压传动系统的组成 .....	172
习题 .....	153	9.2 气压传动的特点 .....	172
<b>第 8 章 液压传动系统的设计计算</b> .....	157	9.2.1 气压传动的优点 .....	172
8.1 液压系统设计要求和工况分析 .....	157	9.2.2 气压传动的缺点 .....	173
8.1.1 明确液压系统设计要求和工况分析 .....	157	9.3 气压传动的应用和发展 .....	173
8.1.2 进行工况分析 .....	157	9.3.1 气压传动的应用 .....	173
8.2 确定系统的主要参数 .....	158	9.3.2 气压传动的发展过程 .....	173
8.2.1 系统工作压力的确定 .....	158	9.3.3 气动系统的技术改进 .....	175
8.2.2 执行元件主要结构参数的确定 .....	159	本章小结 .....	175
8.2.3 执行元件流量的确定 .....	159	习题 .....	175
8.2.4 绘制执行元件的工况图 .....	159	<b>第 10 章 气压传动元件</b> .....	176
8.3 确定液压系统方案与拟订液压系统原理图 .....	159	10.1 气动动力装置 .....	176
8.4 液压元件的计算和选择 .....	160	10.1.1 空压机 .....	176
8.4.1 液压泵的选择 .....	160	10.1.2 气动辅件 .....	178
8.4.2 液压控制阀的选择 .....	161	10.1.3 气动辅助元件的常见故障及其排除方法 .....	182
8.4.3 液压辅助元件的选择 .....	161	10.2 气动执行元件 .....	183
8.5 液压系统性能验算 .....	161	10.2.1 气缸 .....	183
8.5.1 管路系统压力损失的验算 .....	162	10.2.2 气马达 .....	186
8.5.2 系统发热温升的验算 .....	162	10.2.3 气缸的常见故障及其排除方法 .....	187
8.6 绘制工作图与编制技术文件 .....	163	10.3 气动控制元件 .....	188
8.6.1 绘制工作图 .....	163	10.3.1 压力控制元件 .....	188
		10.3.2 流量控制元件 .....	190
		10.3.3 方向控制元件 .....	191
		10.3.4 逻辑元件及其应用举例 .....	194
		10.3.5 气动比例阀及气动伺服阀 .....	198
		10.3.6 气动控制元件的常见故障及其排除方法 .....	200

本章小结 .....	202	12.1.4 干扰信号及其分类 .....	215
习题 .....	202	12.1.5 X-D图法的设计步骤 .....	216
<b>第11章 气动基本回路</b> .....	<b>204</b>	12.2 气动系统实例 .....	220
11.1 方向控制回路 .....	204	12.2.1 气动控制机械手 .....	220
11.1.1 单作用气缸换向回路 .....	204	12.2.2 工件夹紧气压传动系统 .....	222
11.1.2 双作用气缸换向回路 .....	204	12.2.3 数控加工中心换刀系统 .....	223
11.2 压力控制回路 .....	205	12.2.4 工件尺寸自动分选机气动系统 .....	224
11.2.1 一次压力控制回路 .....	205	12.2.5 平带传输纠偏系统 .....	224
11.2.2 二次压力控制回路 .....	206	12.2.6 气动夹抱提升装置 .....	225
11.2.3 高低压转换回路 .....	206	12.2.7 八轴仿形铣加工机床 .....	227
11.3 速度控制回路 .....	206	本章小结 .....	229
11.3.1 单作用气缸速度控制回路 .....	206	习题 .....	229
11.3.2 双作用气缸速度控制回路 .....	206	<b>第13章 气动系统的安装调试及使用维护</b> .....	<b>231</b>
11.3.3 快速往返回路 .....	207	13.1 气动系统的安装与调试 .....	231
11.3.4 气液转换速度控制回路 .....	207	13.1.1 气动系统的安装 .....	231
11.3.5 气液阻尼缸速度控制回路 .....	208	13.1.2 气动系统的调试 .....	232
11.4 其他常用基本回路 .....	208	13.2 气动系统的使用与维护 .....	232
11.4.1 延时回路 .....	208	13.2.1 使用注意事项 .....	232
11.4.2 安全保护回路 .....	208	13.2.2 压缩空气的污染及预防 .....	232
11.4.3 双手操作安全回路 .....	209	13.2.3 气动系统的日常维护 .....	233
11.4.4 顺序动作控制回路 .....	210	13.2.4 气动系统的定期检修 .....	233
本章小结 .....	210	本章小结 .....	234
习题 .....	210	习题 .....	234
<b>第12章 气压传动系统</b> .....	<b>212</b>	<b>附录 常用液压与气动元件图形符号</b> (摘自 GB/T 786.1—2009) .....	<b>235</b>
12.1 气压传动系统设计 .....	212	<b>参考文献</b> .....	<b>241</b>
12.1.1 设计的内容及步骤 .....	212		
12.1.2 程序控制的分类 .....	213		
12.1.3 行程程序的符号规定及表示方法 .....	214		

# 第 1 章 液压传动概述

## 教学目标与要求

理解液压传动的工作原理；掌握液压传动系统的组成及图形符号；掌握液压传动的优缺点；了解液压传动技术的发展概况。

## 教学重点

液压传动的工作原理；液压传动系统的组成；液压传动的优缺点。

## 教学难点

液压传动系统的工作原理。

液压传动是指以液体为工作介质，利用密闭系统中的受压液体来传递运动和动力的一种传动方式。这种传动方式通过动力元件（液压泵）将原动机的机械能转换为油液的压力能，然后通过管道、控制元件，借助执行元件（液压缸或液压马达）将油液的压力能转换为机械能，驱动负载实现直线或回转运动。本章主要介绍液压传动的工作原理、液压传动系统的组成及图形符号以及液压传动的特点。

## 1.1 液压传动的工作原理

液压传动是利用静压传动原理来工作的，工作介质为液体。液压千斤顶的工作原理图如图 1-1 所示。图中大、小液压缸 6 和 3 内分别装有大、小活塞 7 和 2，活塞与缸体有良好的配合关系。其中小液压缸是液压系统的动力元件，大液压缸是液压系统的执行元件。当用手提起杠杆 1 时，小活塞也随之上升，小液压缸下腔的密闭容积增大，压力下降，形成部分真空，油箱的油液在大气压力的作用下，经油管 and 单向阀 4 进入小液压缸，此时单向阀 5 关闭。接着压下杠杆 1，小活塞下移（此时单向阀 4 关闭，油液不能流回油箱），腔内压力升高。当压力达到一定大小时，油液便打开单向阀 5，进入大液压缸 6 的下腔，推动大活塞上移将重物 8 举起。若如此反复上述动作，则重物就会不断升起，直至达到要求的位置。由此可知，液压千斤顶力与运动的传递就是通过液压缸内的液体来实现的。

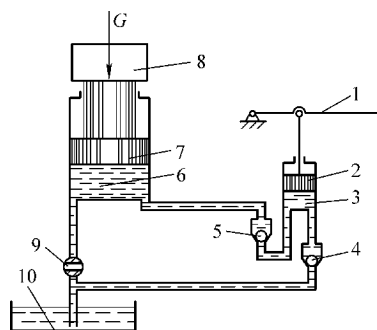


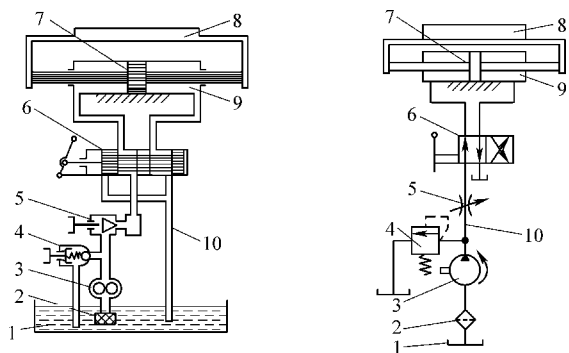
图 1-1 液压千斤顶的工作原理图  
1—杠杆 2—小活塞 3—小液压缸  
4、5—单向阀 6—大液压缸 7—大活塞  
8—重物 9—放油阀 10—油箱

## 1.2 液压传动系统的组成及图形符号

### 1. 液压传动系统的组成

图 1-2 所示为磨床工作台液压系统的工作原理图。电动机带动液压泵 3 从油箱 1 吸油，并将压力油送入管路。从液压泵输出的压力油就是推动工作台往复运动的能量来源。

如图 1-2a 所示，当换向阀处于图示位置左位工作时，压力油首先经过节流阀 5，再经换向阀 6 和油管，然后进入液压缸 9 左腔，推动活塞 7 并带动工作台 8 向右运动。液压缸右腔的油液被排出，经换向阀 6 和油管流回油箱。当换向阀换至右位工作时，由液压泵输出的液压油经节流阀 5、换向阀 6 和油管，进入液压缸 9 的右腔，推动活塞并带动工作台向左运动，而液压缸左腔的油液经换向阀 6、油管流回油箱。工作台在做往复运动时，其速度由节流阀 5 调节，克服负载所需的工作压力由溢流阀 4 控制。图 1-2b 所示为用图形符号表示的工作原理图。



a) 用结构符号表示

b) 用图形符号表示

图 1-2 磨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—节流阀  
6—换向阀 7—活塞 8—工作台 9—液压缸 10—油管

从上面的例子可知，液压传动系统由以下四个主要部分组成：

(1) **动力元件（液压泵）** 它向液压系统供给压力油，将电动机输出的机械能转换为液体的压力能。

(2) **执行元件（液压缸、液压马达）** 它将液体的压力能转换为机械能。

(3) **控制元件** 如压力阀、流量阀、方向阀等，其功能是控制液体的压力、流量和方向，保证执行元件完成预期的动作。

(4) **辅助元件** 如油管、油箱、过滤器、压力表等，其功能为连接、储油、过滤、测量等。

### 2. 液压系统的图形符号

图 1-2a 所示的液压系统工作原理图中，各元件的图形基本上表达了它的结构原理，故称为结构原理图。其优点是直观、便于理解，但结构复杂、难于绘制。在实际工作中，一般用图形符号来绘制，如图 1-2b 所示。图形符号只表示元件的功能，并不表示元件的具体结构和参数，具有图形简单、原理明了的优点，便于阅读、分析、设计和绘制。

## 1.3 液压传动的特点

液压传动之所以能得到广泛的应用，是由于其具有以下优点：

1) 液压传动与机械传动、电气传动方式相比，在输出相同功率的条件下，具有体积小、重量轻、惯性力小、动作灵敏的特点。

2) 工作平稳，换向冲击小，便于实现频繁换向。这是机械设备中尤其是金属切削机床常用液压传动的主要原因。

3) 可以在较大的调速范围内较方便地实现无级调速。

- 4) 操作简单, 便于实现自动化。
- 5) 液压装置易于实现过载保护, 能自润滑, 使用寿命长。
- 6) 液压元件易于实现系列化、标准化、通用化, 便于设计、制造和推广使用。

任何事物都是一分为二的, 液压传动也存在以下缺点:

- 1) 由于液压传动的泄漏与液体的可压缩性, 因此液压传动不宜用在传动比要求严格的传动中。
  - 2) 液压传动能量损失大, 因此传动效率低。
  - 3) 液压传动对温度变化比较敏感, 故不易在低温或高温下工作。
  - 4) 发生故障时不易检查和排除。
- 随着科学技术的发展, 这些问题正在被逐步解决。

### 1.4 液压传动技术的应用及发展

液压传动有许多突出的优点, 因此, 它的应用非常广泛。例如, 一般工业用的塑料加工机械、压力机械、机床等; 行走机械中的工程机械、建筑机械、农业机械、汽车等; 钢铁工业用的冶金机械、提升装置、轧辊调整装置等; 矿山机械中的液压钻机、采煤机、提升机、液压支架等; 土木水利工程用的防洪闸门及堤坝装置、河床升降装置、桥梁操纵机构、大洋采矿等; 发电厂涡轮机调速装置、核发电厂等; 船舶用的甲板起重机械(绞车)、船头门、舱壁阀、船尾推进器等; 特殊技术用的巨型天线控制装置、测量浮标、升降旋转舞台等; 军事工业用的火炮操纵装置、船舶减摇装置、飞行器仿真、飞机起落架的收放装置和方向舵控制装置等。液压传动与控制是现代机械工程的基础技术, 由于其在功率重量比、无级调速、自动控制、过载保护等方面的独特技术优势, 使其成为国民经济中各行业、各类机械装备实现传动与控制的重要手段。

液压传动和气压传动称为流体传动, 是工业、农业生产中应用广泛的一门技术。如今, 流体传动技术水平的高低已成为一个国家工业发展水平的重要标志。历史的经验证明, 流体控制学科技术的发展, 仅有20%是靠本学科的科研成果推动, 来源于其他领域发明的占50%, 移植其他技术成果占30%, 即大部分来源于其他相关学科进步的推动。

随着电子技术、计算机技术、信息技术、自动控制技术及新工艺、新材料的发展和应用, 液压传动技术也在不断创新。液压传动技术已成为工业机械、工程建筑机械及国防尖端产品不可缺少的重要技术, 而其向自动化、高精度、高效率、高速化、高功率、小型化、轻量化方向发展, 是不断提高它与电传动、机械传动竞争能力的关键。

### 本章小结

- 1) 液压传动是以液体作为工作介质来传递运动和动力的。
- 2) 液压传动系统是由动力元件、执行元件、控制调节元件、辅助元件四个部分组成的。

### 习 题

1. 何谓液压传动? 液压传动系统有哪些基本组成部分? 各部分的作用是什么?
2. 试述液压传动的工作原理及其组成。
3. 液压传动与机械传动相比有哪些优缺点?
4. 试述液压传动的发展概况。

## 第 2 章 流体力学基础

### 教学目标与要求

了解液压油的分类，学会选择液压油；了解液体的黏性和可压缩性等概念，掌握黏性的三种表示方法；掌握液体静压力的概念及特性；掌握压力的表示方法及单位换算；熟练使用液体静力学方程解决问题，理解压力传递原理及等压面的概念；掌握压力的形成，熟悉液体对固体壁面上作用力的计算；理解连续性方程和伯努利方程的物理意义，并能应用方程解决实际问题；能应用沿程压力损失和局部压力损失公式计算压力损失；熟悉液体流经小孔的流量公式，掌握各种孔的流量特性；了解液压冲击和空穴现象。

### 教学重点

液压油的黏性及其影响；液体静压力的概念；流量的概念及单位；连续性方程和伯努利方程的应用；液体流经小孔的流量公式。

### 教学难点

伯努利方程、动量方程的推导及应用；液体流动时的能量损失的计算。

## 2.1 液压传动工作介质

### 2.1.1 液体的密度

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 ( $\text{m}^3$ )。

液压油的密度随压力的增加而加大，随温度的升高而减小，一般情况下，由压力和温度引起的这种变化都较小，可将其近似地视为常数。

### 2.1.2 可压缩性

液体受压力的作用发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。液体的可压缩性可用体积压缩系数来表示，即

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

式中  $\beta$ ——体积压缩系数；

$\Delta V$ ——液体的体积变化量；

$V_0$ ——液体的初始体积；

$\Delta p$ ——压力变化值。

式中的负号是为使 $\beta$ 为正值而取的, 因为 $\Delta p > 0$ 时,  $\Delta V < 0$ 。

由式(2-2)可知, 液体体积压缩系数 $\beta$ 越大, 说明液体受压后, 可压缩性大; 反之, 体积变化小, 可压缩性小。

液体的可压缩性对液压系统的动态性能影响较大, 因此对高压系统或液压系统进行动态特性分析和计算时, 必须考虑液体可压缩性的影响; 对于中、低压液压系统, 因液体的可压缩性很小, 一般认为液体是不可压缩的。当液体中混入空气时, 其可压缩性将显著增加, 并将严重地影响液压系统的工作状态。

### 2.1.3 液体的黏性

#### 1. 液体黏性的意义

液体在外力作用下流动时, 分子间的内聚力会阻碍分子间的相对运动而产生一种内摩擦力。这一特性称为液体的黏性。黏性是液体重要的物理特性, 也是选择液压油的主要依据。

黏性使流动液体内部各层间的速度不等。如图2-1所示, 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。由于黏性, 紧贴于下平板的液体层速度为零, 紧贴于上平板的液体层速度为 $u_0$ , 而中间各液体层的速度按线性分布。因此, 不同速度流层相互制约而产生内摩擦力。

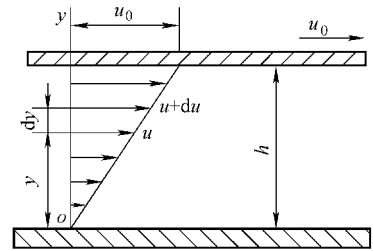


图2-1 液体黏性示意图

实验测定指出, 液体流动时相邻液层间的内摩擦力 $F$ 与液层间的接触面积 $A$ 和液层间的距离 $dy$ 成反比, 即

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

式中  $\mu$ ——比例常数, 称为黏性系数或黏度;

$du/dy$ ——速度梯度。

若以 $\tau$ 表示切应力, 即单位面积上的内摩擦力, 则

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

这就是牛顿的液体内摩擦定律。

#### 2. 液体的黏度

液体黏性的大小用黏度来度量, 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 $\mu$  动力黏度可由式(2-4)导出, 即

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

由此可知, 动力黏度的物理意义是: 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。动力黏度又称为绝对黏度。动力黏度的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

(2) 运动黏度 $\nu$  动力黏度 $\mu$ 与液体密度 $\rho$ 之比称为运动黏度, 即

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

运动黏度的法定单位是 $\text{m}^2/\text{s}$ , 常用 $\text{mm}^2/\text{s}$ 表示。它们与以前沿用的非法定计量单位cSt(厘斯)的关系为 $1\text{m}^2/\text{s} = 10^6\text{mm}^2/\text{s} = 10^6\text{cSt}$ 。

运动黏度没有明确的物理意义，因在理论分析和计算中常遇到 $\mu$ 和 $\rho$ 的比值，为方便起见定义了运动黏度，用 $\nu$ 表示。工程中常用它来标志液体的黏度。我国液压油的牌号，就是用这种油液在40℃时的运动黏度 $\nu$ 的平均值表示的。例如，牌号为L—HL46的液压油，是指在40℃下测定的运动黏度 $\nu$ 的平均值为46mm<sup>2</sup>/s的普通液压油。

**(3) 相对黏度** 相对黏度又称为条件黏度。由于液体的动力黏度和运动黏度都难以直接测定，因此工程上常用特定的黏度计在规定的条件下直接测定液体的黏度，即相对黏度。根据测定条件不同，各国采用的相对黏度的单位也不同。中国、德国及俄罗斯等国采用恩氏黏度 $^{\circ}E_t$ 。

恩氏黏度由恩氏黏度计测定。方法是：将200mL温度为 $t$ （单位为℃）的被测液体装入恩氏黏度计的容器，经其底部直径为2.8mm的小孔流出，测出液体流尽所需时间 $t_1$ ，再测出200mL温度为20℃的蒸馏水在同一黏度计中流尽所需时间 $t_2$ ，这两个时间的比值即为被测液体在温度 $t$ 下的恩氏黏度，即

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

工业上常用20℃、50℃、100℃作为测定恩氏黏度的标准温度，其相应恩氏黏度分别用 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 、 $^{\circ}E_{100}$ 表示。

工程中常采用先测出液体的相对黏度，再根据关系式换算出动力黏度或运动黏度的方法。

恩氏黏度与运动黏度（m<sup>2</sup>/s）的换算关系式为

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

### 3. 压力和温度对液体黏度的影响

**(1) 压力** 当工作压力增大时，液体分子间的距离减小，内摩擦力增大，即黏度也将随之增大；但在一般液压系统使用的压力范围内，黏度增大的数值很小，故可忽略不计。

**(2) 温度** 液压油的黏度对温度十分敏感，温度升高，黏度下降。我国把液压油的黏度随温度变化的性质称为黏温特性。通常情况下低温应选择黏度小的油液，以减小摩擦；高温应选择黏度大的油液。几种国产液压油的黏温特性曲线如图2-2所示。

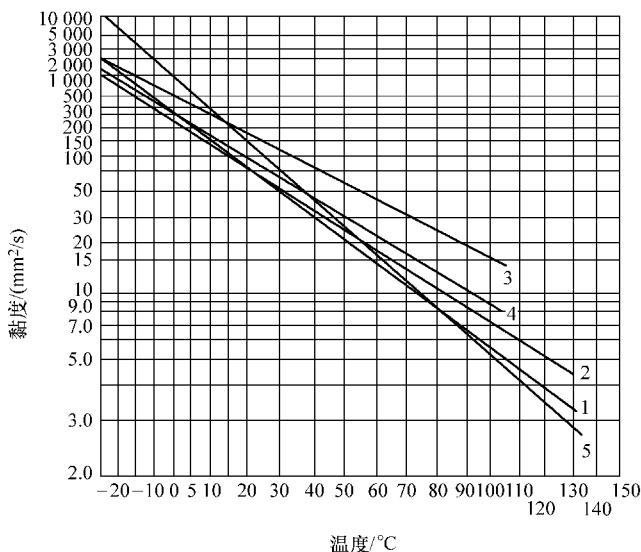


图 2-2 几种国产液压油的黏温特性曲线

- 1—通用石油型 2—高黏度指数石油型
- 3—水包油型 4—水-乙二醇型 5—磷酸酯型

## 2.2 对液压油的要求及其分类与选择

### 2.2.1 对液压油的要求

在液压传动系统中，为了更好地传递运动和动力，液压油应满足下列要求：

- 1) 合适的黏度  $\nu = (15 \sim 68) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，良好的黏温特性。

- 2) 润滑性能好，质地纯净，杂质少。
- 3) 对热、氧化、水解和剪切都有良好的稳定性。
- 4) 有良好的抗泡沫性和抗乳化性，对金属和密封件有良好的相容性。
- 5) 体积膨胀系数、流动点和凝固点低，比热容、闪点和燃点高。
- 6) 对人体无害，对环境污染小，成本低。

### 2.2.2 液压油的分类

液压油的种类很多，主要分为三大类型：石油型、乳化型和合成型，见表 2-1。

表 2-1 液压油的分类

分类	名称	代号	组成和特性	应用
石油型	精制矿物油	L-HH	无抗氧化剂	循环润滑油、低压液压系统
	普通液压油	L-HL	HH 油，改善其防锈和抗氧化性	一般液压系统
	抗磨液压油	L-HM	HL 油，改善其耐磨性	低、中、高液压系统，特别适合于有耐磨要求、叶片泵的液压系统
	低温液压油	L-HV	HM 油，改善其黏温特性	能在 -40 ~ 20℃ 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
	高黏度指数液压油	L-HR	HL 油，改善其黏温特性	黏温特性优于 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	HL 油，改善其黏温特性	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	
乳化型	水包油乳化液	L-HFAE	需要难燃液体的场合	
	油包水乳化液	L-HFB		
合成型	水-乙二醇液	L-HFC		
	磷酸酯液	L-HFDR		

### 2.2.3 液压油的选择

正确选择液压油对提高液压系统工作性能、工作可靠性和延长使用寿命具有十分重要的意义。

液压油的选择包括品种和黏度的确定。选择品种时，应考虑液压系统的工作环境及液压油的抗燃性、抗凝性、润滑性、耐磨性、黏温特性、抗爬行性等方面的要求。

选择液压油的黏度时，应注意以下几个方面：

- 1) 工作压力。工作压力高时，应选择黏度较大的液压油，以减少泄漏。
- 2) 环境温度。环境温度高时，选用黏度大的液压油，以减少容积损失。
- 3) 运动速度。工作部件相对运动速度高时，应选用黏度较小的液压油，以减少摩擦损失。

各类液压泵推荐用液压油的黏度见表 2-2。

表 2-2 各类液压泵推荐用液压油的黏度

泵型	压力	运动黏度/(mm <sup>2</sup> /s)		适用品种和黏度等级
		5~40℃	40~80℃	
叶片泵	7MPa 以下	30~40	40~75	HM 油, 32、46、68
	7MPa 以上	50~70	55~90	HM 油, 46、68、100
螺杆泵	—	30~50	40~80	HL 油, 32、46、68
齿轮泵	—	30~70	95~165	HL 油 (中、高压用 HM), 32、46、68
径向柱塞泵	—	30~50	65~40	HL 油 (高压用 HM), 32、46、68
轴向柱塞泵	—	40	70~150	HL 油 (高压用 HM), 32、46、68

注: 5~40℃、40~80℃均为液压系统工作温度; HL、HM 分别为改善了耐磨性、黏温特性的精制矿物油。

## 2.3 液体静力学基础

液体静力学主要研究液体在外力作用下处于静止状态时的力学规律及其应用。所谓“静止液体”是指液体内部质点间没有相对运动, 不呈现黏性。

### 2.3.1 液体静压力及其特性

根据力作用方式的不同, 作用在液体上的力可以分为质量力和表面力。质量力作用于液体的每一个质点上, 其大小与液体质量成正比, 如重力、惯性力等; 表面力作用于液体的某一面积上, 与受力面积成正比。表面力可以分为垂直于表面的法向力和平行于表面的切向力。当液体静止时, 由于液体质点间没有相对运动, 因而不存在切向力, 只有法向力。液体内某点处单位面积上所受到的法向力称为液体的静压力 (工程中习惯称为压力), 即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2-9)$$

由于液体内部不能承受拉力, 液体静压力具有两个重要特性:

- 1) 液体静压力的方向沿着作用面的内法线方向。
- 2) 静止液体中任一点上各方向的液体静压力均相等。

### 2.3.2 液体静力学基本方程

如图 2-3a 所示, 容器内的液体处于静止状态, 液面上的压力为  $p_0$ , 研究距液面深度为  $h$  处的压力 (任意深度  $h$  处的压力)。在液体中取出图 2-3b 所示的垂直小液柱, 液柱高为  $h$ , 底面积为  $\Delta A$ , 处于平衡状态时, 液柱在垂直方向的力平衡方程为

$$p\Delta A = p_0\Delta A + \rho gh\Delta A$$

即 
$$p = p_0 + \rho gh \quad (2-10)$$

式 (2-10) 为液体静力学基本方程。由式 (2-10) 可以得出以下几点结论:

- 1) 静止液体内任意一点的压力由两部分组成: 一部分是液面上的压力  $p_0$ , 另一部分是该点以上液体自重形成的压力  $\rho gh$ 。
- 2) 静止液体内压力随深度  $h$  按线性规律变化。

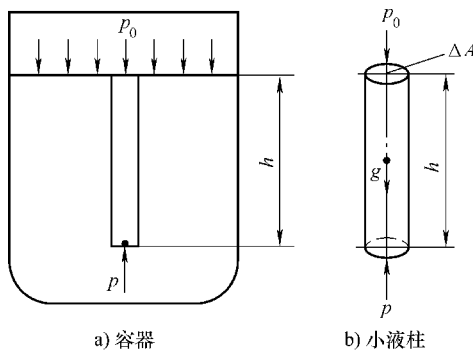


图 2-3 静止液体压力分布规律