



高职高专“十二五”规划教材

液压与气压传动

赵忠宪 副主编

倪春杰 主编
贾汝民 主审

YU QIYA CHUANDONG



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

液压与气压传动

倪春杰	主 编
赵忠宪	副主编
贾汝民	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容包括液压传动和气压传动两部分。上篇液压传动部分讲述了：液压传动概述、液压流体力学基础、液压泵和液压马达、液压缸、液压控制阀、液压系统的辅助元件、液压基本回路、典型液压系统、液压伺服控制系统。下篇气压传动讲述了：气压传动系统基础知识、气源装置和辅助元件、气动执行元件、气动控制元件、气动基本回路及气动系统。附录列出常用液压与气动元件的图形符号和部分习题答案。本书力求简明扼要，图文并茂，精选了较多的工程应用实例，理论和实践相结合，注重理论的应用，突出应用能力、创新能力的培养，是一本针对性和实用性较强的教材。

本书可作为高职院校机电类和近机电类专业教学用书，也可作为教师和相关企业工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气压传动/倪春杰主编. —北京：化学工业出版社，2013.7
高职高专“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-17447-5

I. ①液… II. ①倪… III. ①液压传动-高等职业教育-教材②气压传动-高等职业教育-教材 IV. ①TH137
②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 109940 号

责任编辑：高 钰 李 娜	文字编辑：项 澈
责任校对：边 涛	装帧设计：刘丽华
出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）	
印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司	
787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 383 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷	
购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899	
网 址：http://www.cip.com.cn	
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。	

前 言

本书是基于高等职业院校机电类专业的培养目标、规格和要求，结合近年来教学改革的成果和课程改革实践的基础上精心组织编写的。

本书的特点是以液压、气压传动技术应用为主线，充分考虑高职教育的高等性、职业性，并结合高职学生的基础和学习特点，整合序化教学内容，注重理论和实践的结合，突出技术应用能力、创新能力的培养。书中内容深入浅出、图文并茂，并选编了较多的工程应用实例。为便于指导学生学习和对重点教学内容的掌握，每章还编写了学习目标和本章小结，并附有经过精选的习题及部分参考答案。

本书内容包括液压传动和气压传动两部分。上篇液压传动部分共九章：液压传动概述、液压流体力学基础、液压泵和液压马达、液压缸、液压控制阀、液压系统的辅助元件、液压基本回路、典型液压系统、液压伺服控制系统。下篇气压传动共五章：气压传动系统基础知识、气源装置和辅助元件、气动执行元件、气动控制元件、气动基本回路及气动系统。

本书由倪春杰主编，赵忠宪教授副主编，贾汝民教授主审。赵忠宪编写第一、第五、第七章，张旭燕编写第二～第四、第六章及习题参考答案，倪春杰编写第八～第十四章。

本书在编写过程中得到了单位同仁的大力支持以及马延斌、汪红的帮助，在此一并表示衷心的感谢！

由于我们的水平和经验有限，欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

目 录

上篇 液 压 传 动

第一章 液压传动概述	1	第七节 电液比例控制阀	108
第一节 液压传动的工作原理	1	第八节 电液数字阀	110
第二节 液压传动系统的组成及图形符号	2	本章小结	111
第三节 液压传动的特点及应用	4	习题	112
本章小结	6	第六章 液压系统的辅助元件	118
习题	6	第一节 蓄能器	118
第二章 液压流体力学基础	8	第二节 过滤器	121
第一节 液压油	8	第三节 油箱	124
第二节 液体静力学基础	13	第四节 热交换器	125
第三节 液体动力学方程	16	第五节 密封装置	126
第四节 液体流动时的压力损失	21	第六节 液压管件	127
第五节 液体流经小孔和缝隙的流量计算	24	本章小结	130
第六节 液压冲击和空穴现象	26	习题	130
本章小结	28	第七章 液压基本回路	131
习题	28	第一节 速度控制回路	131
第三章 液压泵和液压马达	33	第二节 方向控制回路	140
第一节 概述	33	第三节 压力控制回路	143
第二节 齿轮泵与齿轮马达	37	第四节 多缸动作回路	149
第三节 叶片泵和叶片马达	42	本章小结	155
第四节 柱塞泵和柱塞马达	47	习题	155
第五节 螺杆泵	51	第八章 典型液压系统	160
第六节 液压泵和液压马达的选用	52	第一节 3150K 通用液压机液压系统	160
本章小结	53	第二节 M1432A 型万能外圆磨床液压系统	163
习题	54	第三节 注塑机液压系统	168
第四章 液压缸	58	第四节 液压传动系统的安装、使用和维护	172
第一节 液压缸的类型	58	本章小结	175
第二节 典型液压缸结构	64	习题	175
本章小结	69	第九章 液压伺服控制系统	176
习题	69	第一节 液压伺服控制系统概述	176
第五章 液压控制阀	72	第二节 液压伺服阀	178
第一节 概述	72	第三节 典型液压伺服系统实例	181
第二节 方向控制阀	73	本章小结	183
第三节 压力控制阀	82	习题	184
第四节 流量控制阀	94		
第五节 二通插装阀	100		
第六节 叠加阀	105		

下篇 气压传动

第十章 气压传动系统基础知识	185	本章小结	210
第一节 气压传动系统的工作原理、组成及其特点	185	习题	211
第二节 气压传动基础知识	187	第十三章 气动控制元件	213
本章小结	190	第一节 压力控制阀	213
习题	190	第二节 流量控制阀	215
第十一章 气源装置和辅助元件	191	第三节 方向控制阀	217
第一节 空气压缩机	191	本章小结	222
第二节 气源净化装置和辅助元件	194	习题	222
本章小结	201	第十四章 气动基本回路及气动系统 ...	224
习题	202	第一节 气动基本回路	224
第十二章 气动执行元件	203	第二节 气动系统实例	230
第一节 汽缸	203	本章小结	232
第二节 气动马达	208	习题	233
附录	235		
附录 1 常用液压与气动元件图形符号	235		
附录 2 部分习题参考答案	239		
参考文献	244		

上篇 液压传动

第一章 液压传动概述

学习目标：

- ① 掌握液压传动的基本概念、工作原理；
- ② 掌握液压传动系统的组成、能量转换关系及职能符号；
- ③ 了解液压传动的特点、应用和发展。

第一节 液压传动的工作原理

一、液压传动的概念

一部机器的主体通常由原动机、传动装置和工作机构三部分组成，同时配以一定的控制装置和辅助装置。原动机的作用是进行能量的转换，即将其他形式的能转换成机械能，是机器的动力源；工作机构的作用是对外做功，用来执行机器的运动功能；传动装置和控制装置介于原动机和工作机构之间，进行动力传递、控制和分配以及运动形式的转换。按照传动的机件或工作介质不同，传动可分为机械传动、电力传动和流体传动。

流体传动可分为液体传动和气体传动。按工作原理不同，液体传动又可分为液力传动和液压传动。前者是利用流体的动能进行能量转换和动力传递；后者是利用液体的静压力进行能量转换和动力传递，因而也称为静压传动。

液压传动是以密闭管路中的受压液体为工作介质进行能量的转换、传递、分配和控制的技术，又称为液压技术。

在上述概念中，将液体换成气体，便是气压传动。两者并在一起，即液压传动与气压传动，简称液压与气动。

二、液压传动的工作原理

研究液压传动的工作原理可以从最简单的液压千斤顶入手，图 1-1 所示为液压千斤顶的工作原理示意图。液压千斤顶由手动柱塞泵、举升缸、油路及元件和辅件构成。手动柱塞泵由

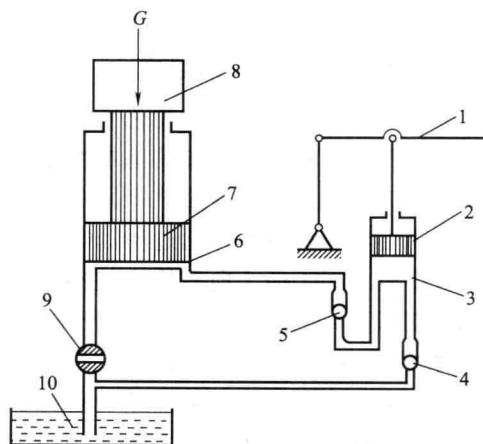


图 1-1 液压千斤顶的工作原理示意图

- 1—杠杆；2—小活塞；3—小缸体；4,5—单向阀；
- 6—大缸体；7—大活塞；8—重物；
- 9—卸油阀；10—油箱

杠杆 1、小活塞 2、小缸体 3、单向阀 4 和 5 等组成；举升缸由大缸体 6、大活塞 7、卸油阀 9 组成；另外还有重物 8 和油箱 10。

工作时，先提起杠杆 1，小活塞 2 被带动上升，小缸体 3 下腔的密闭容积增大，腔内压力降低，形成部分真空，单向阀 5 将所在油路关闭，而油箱 10 中的油液则在大气压力的作用下推开单向阀 4 的钢球，沿吸油孔道进入并充满小缸体 3 的下腔，完成一次吸油动作。接着压下杠杆 1，小活塞 2 下移，小缸体 3 下腔的密闭容积减小，其腔内压力升高，使单向阀 4 关闭，阻断了油液流回油箱的通路，并使单向阀 5 的钢球受到一个向上的作用力，当这个作用力大于大缸体 6 下腔对钢球的作用力时，钢球被推开，油液便进入大缸体 6 的下腔（卸油阀 9 处于关闭状态），推动大活塞 7 向上移动，将重物 8 顶起一段距离。反复提压杠杆 1，就可以使大活塞 7 推举重物 8 不断上升，达到起重的目的。将卸油阀 9 转动 90° ，大缸体 6 下腔与油箱连通，大活塞 7 在重物 8 重力作用下下移，下腔的油液通过卸油阀 9 排回油箱 10。

通过对上述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是利用有压力的液体为工作介质来传递运动和动力的工作过程。驱动杠杆 1 上下移动以产生机械能，通过小活塞 2、小缸体 3 以及单向阀 4 和 5 转换成了油液的压力能，此压力能又通过大缸体 6 和大活塞 7 转换成举升重物（负载）运动的机械能，对外做功。图 1-1 中的元件组成了一个简单的液压传动系统，实现了力和运动的传递。

从液压千斤顶的工作过程可以看出，液压传动有以下特点。

① 液压传动以液体（一般为矿物油）作为传递运动和动力的工作介质，而且传动中必须经过两次能量转换：首先，通过动力装置（泵）把机械能转换为液体的压力能；然后再通过执行装置（液压缸或液压马达）把液体的压力能转换为机械能。

② 油液必须在密闭容器（或密闭系统）内传送，而且必须有密闭容积的变化。如果容器不密封，就不能形成必要的压力；如果密闭容积不变化，就不能实现吸油和压油，也就不可能利用受压液体传递运动和动力。

第二节 液压传动系统的组成及图形符号

一、液压传动系统的组成

图 1-2 (a) 所示为一台简化了的机床往复运动工作台的液压传动系统，可以通过它进一步了解液压传动系统应具备的基本性能和组成情况。

在图 1-2 (a) 中，液压缸 8 固定在床身上，活塞连同活塞杆带动工作台 9 做往复运动。液压泵 3 由电动机驱动，通过滤油器 2 从油箱 1 中吸油并送入密闭的系统内。

若将换向阀手柄 7 向右推，使阀芯处于如图 1-2 (b) 所示位置，则来自液压泵的压力油经节流阀 5 到换向阀 6 并进入液压缸 8 左腔，推动活塞连同工作台 9 向右移动。液压缸 8 右腔的油液经换向阀 6 流回油箱。若将换向阀手柄 7 向左拉，使阀芯处于如图 1-2 (c) 所示位置，则来自液压泵的压力油经节流阀 5 到换向阀 6 并进入液压缸 8 右腔，推动活塞连同工作台 9 向左移动。液压缸 8 左腔的油液经换向阀 6 流回油箱。若换向阀阀芯处于如图 1-2 (a) 所示中间位置时，液压缸两腔被封闭，活塞停止不动。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。改变节流阀 5 的开口大小，可以改变进入液压缸的液压油流量，从而控制工作台的移动速度，多余的液压油经溢流阀 4 和溢流管道排回

油箱。当节流阀开口较大时,进入液压缸的液压油流量较大,工作台的移动速度较快;反之,当节流阀开口较小时,工作台移动速度则较慢。

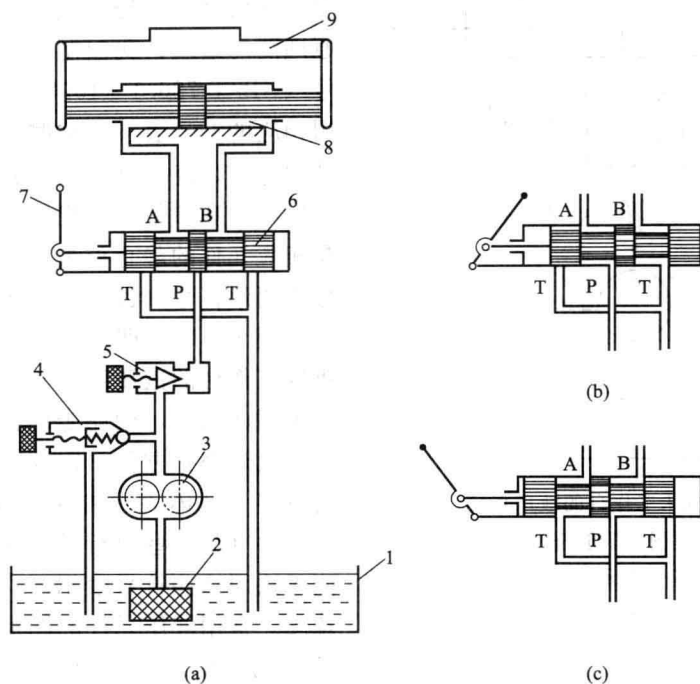


图 1-2 机床工作台液压传动系统

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

转动溢流阀 4 的调节螺钉,可调节弹簧的预紧力。弹簧预紧力越大,密闭系统中的油压就越高,工作台移动时,能克服的最大负载就越大;预紧力越小,其能得到的最大工作压力就越小,能克服的最大负载也越小。另外,在一般情况下,液压泵向系统的输油量多于液压缸所需油量,多余的油液须通过溢流阀及时地排回油箱。所以,溢流阀 4 在该液压系统中起调压、溢流的作用。

从机床工作台液压系统的工作过程可以看出,一个完整的、能够正常工作的液压系统,应该由以下五个部分组成。

(1) 动力元件 动力元件是指液压泵,是系统的动力源。它的作用是将原动机输入的机械能转变成油液的压力能。

(2) 执行元件 执行元件是指液压缸、液压马达等。它将油液的压力能转变成机械能,驱动执行机构对外做功。

(3) 控制调节元件 控制调节元件包括各种阀类,如图 1-2 中的换向阀、节流阀、溢流阀等,用来控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向。

(4) 辅助元件 液压系统中除上述几项以外的其他元件都属于辅助元件,如油箱、过滤器、空气滤清器、压力表、蓄能器、热交换器、油管、管接头等。

(5) 工作介质 工作介质是指液压油,利用它来传递运动和动力。

二、液压传动系统的图形符号

在图 1-2 (a) 中,组成液压系统的各个元件是用半结构式图形画出来的,这种图直观性

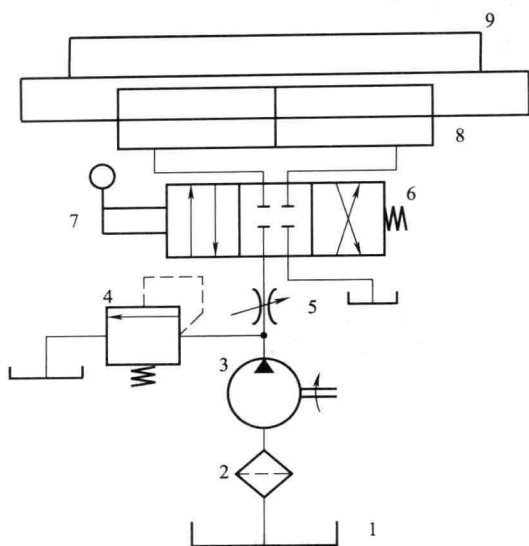


图 1-3 机床工作台的液压系统
工作原理图（职能符号图）

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

强，容易理解，当系统发生故障时，根据此图检查也较方便，但难于绘制，特别当系统中元件较多时，绘制更不方便。为简化液压原理图的绘制，我国制订了一套液压图形符号（GB/T 786.1—1993），将各液压元件都用相应的符号表示。这些符号只表示相应元件的职能、连接系统的通路，不表示元件的具体结构和参数，并规定各符号所表示的都是相应元件的静止位置或零位置，称这种符号为图形符号（也称为职能符号）。

图 1-3 所示即为用职能符号绘制的上述机床工作台的液压系统工作原理图。由于这种图图面简洁，油路走向清楚，对系统的分析、设计都很方便，因此现在世界各国采用的较多（具体表示方法大同小异）。如果有些元件（如某些自行设计的非标准件）的职能无法用这些符号表示时，仍可采用结构示意图。常用液压元件的图形符号在以后讲述具体元件时还要提到。GB/T 786.1—1993

液压与气动图形符号见本书附录。

三、液压传动系统的能量转换

液压传动系统在工作过程中的能量转换和传递情况如图 1-4 所示。

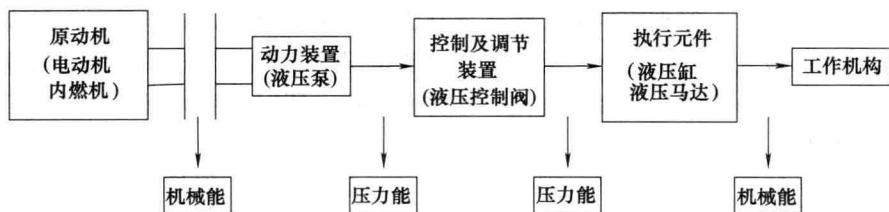


图 1-4 液压传动系统能量转换和传递情况

第三节 液压传动的特点及应用

一、液压传动的优点

液压传动系统与机械传动、电力传动等系统相比，具有如下优点。

① 在同等功率的情况下，液压装置的体积小、重量轻、惯性小。例如，输出同样的功率，液压马达的重量为电动机重量的 10%~20%，而且还能传递较大的力矩。

② 在运行中能方便地实现无级调速，调速范围比较大，可达 100:1~2000:1，并且低速性能好。

③ 工作比较平稳、反应快、冲击小，能频繁启动和换向。液压传动装置的换向频率高，

回转运动每分钟可达 500 次, 往复直线运动每分钟可达 400~1000 次。

④ 易于实现自动化, 且该系统的控制、调节比较简单, 与电气控制配合使用能实现复杂的顺序动作和远程控制。

⑤ 易于实现过载保护, 工作安全可靠。当系统超负载时, 油液可以经溢流阀回到油箱。另外液压传动以油液为工作介质, 润滑性好, 并且功率损失所产生的热量可由流动着的油液带走, 避免局部温升, 所以使用寿命长。

⑥ 液压元件易于实现系列化、标准化、通用化。

⑦ 易于实现回转、直线运动, 且元件排列布置灵活。

二、液压传动的缺点

液压传动具有以下缺点。

① 难以保证严格的传动比。液压传动的工作介质为液体, 容易泄漏; 同时由于油液的可压缩性, 管路会产生变形, 所以液压传动不能用于传动比恒定性要求较高的场合。

② 油液对油温变化比较敏感, 不适于在很高或很低的温度下工作、对油液污染也很敏感。

③ 液压系统中需要进行两次能量转换, 在能量传递过程中有机械损失、压力损失、泄漏损失等现象, 所以效率较低, 不宜做远距离传动。

④ 液压元件制造精度高, 造价较贵, 需要组织专业生产。液压系统使用和维护人员要求具有一定的专业知识及技术素质, 故液压系统的生产及管护成本较高。

⑤ 由于液压传动装置中多见于元件及管路的集成化模式, 具有一定的不可见性, 且系统影响因素较多, 故出现故障时不易追查原因, 不易迅速排除。

总的来说, 液压传动的优点较多, 缺点正随着科学技术的进步而逐步被克服, 液压传动在现代化生产中有着广阔的发展前景。

三、液压传动的发展及应用

液压传动相对于机械传动是一门新的技术。17 世纪中叶法国物理学家帕斯卡提出静压传动原理, 即帕斯卡原理, 成为液压技术的理论基础。17 世纪末期, 英国著名科学家牛顿对液体黏度及其阻力研究的成果, 是现代流体动力润滑理论的基础。18 世纪中叶, 瑞士科学家伯努利提出了理想液体常态运动方程, 即伯努利方程。18 世纪末期, 英国制造出世界上第一台水压机。液压传动在工业上被广泛采用和快速发展是在第二次世界大战后 50 多年的时间。

第二次世界大战期间, 军事工业的需要促使液压技术得到迅猛发展, 液压技术相继在飞机、坦克、舰艇等武器装备上推广使用。战后, 液压技术很快转入民用工业, 在机床、工程机械、冶金机械、塑料机械、农业机械、汽车、船舶等行业得到了广泛的应用和发展。20 世纪 60 年代以来, 随着原子能技术、空间技术、计算机技术的发展, 液压技术已成为包括传动、控制和检测在内的一门完整的自动化技术。当前, 液压技术正向高压、高速、大功率、高效率、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。

液压传动具有很多优点, 所以在工农业生产、国防航空等各部门应用广泛。在机床设备上, 主要是利用其可以实现无级变速、自动化程度高、能实现换向频繁的往复运动的优点, 多用于进给传动装置、往复运动传动装置、辅助装夹装置等; 在工程机械、压力机械上多利用其结构简单、输出力量大的特点; 航空工业采用它的原因是液压设备重量轻, 体积小。

表 1-1 详细列出了液压传动在各个行业中的应用情况。

表 1-1 液压传动在各个行业中的应用情况

行业名称	应用场合举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、压路机等
建筑机械	打桩机、平地机等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、高空作业车等
农业机械	联合收割机、拖拉机等
轻工、化工机械	打包机、注塑机、矫直机、橡胶硫化机、造纸机等
起重运输机械	起重机、叉车、装卸机、液压千斤顶等
矿山机械	开采机、提升机、液压支架等
纺织机械	织布机、抛砂机、印染机等

本章小结

液压传动是利用密闭在管路中的受压液体来传递力和运动的。在传动力时基于帕斯卡原理；在传递运动时遵守质量守恒和能量守恒定律。流量和压力是液压系统的重要参数。压力决定于负载，流量决定执行元件的速度。液压动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件和工作介质都是液压系统的组成部分。

另外，本章对液压传动系统的特点、应用、发展历史、现状和发展趋势作了概述，理解这方面的知识是必要的。

习 题

一、判断题

1. 液压传动装置实质上是一种能量转换装置。 ()
2. 液压传动不能实现无级调速。 ()

二、填空题

1. 一部完整的机器主要由三部分组成，即_____、_____、_____。
2. 液压传动主要是以_____能来传递和转换能量的，而液力传动则是以_____来转换和传递能量的。
3. 液压传动的工作原理是以_____为作为工作介质，依靠_____来传递运动，依靠_____来传递动力。
4. 传动机构通常分为_____、_____、_____。

三、简答题

1. 简述液压传动的工作原理？
2. 液压传动由哪几部分组成？各组成部分的作用是什么？
3. 液压传动与机械传动、电气传动比较，有哪些优缺点？

四、计算题

1. 如图 1-5 所示，在液压千斤顶的压油过程中，已知柱塞泵活塞 1 的面积 $A_1 = 1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，液压缸活塞 2 的面积 $A_2 = 9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，管路 3 的截面积 $A_3 = 1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。若活塞 1 的下压速度 V_1 为 0.2 m/s ，试求活塞 2 的上升速度 V_2 和管路内油液的平均流速 $\overline{V}_3$ 。

2. 如图 1-6 所示液压千斤顶中, 小活塞直径 $d=10\text{mm}$, 大活塞直径 $D=40\text{mm}$, 重物 $G=5000\text{kg}$, 小活塞行程 20mm , 杠杆 $L=500\text{mm}$, $l=25\text{mm}$ 。问:

(1) 杠杆端需加多少力才能顶起重物?

(2) 此时液体内所产生的压力为多少?

(3) 杠杆上下一一次, 重物升高多少?

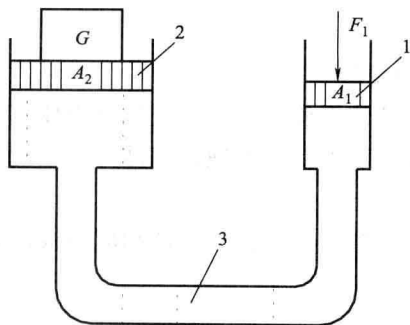


图 1-5 计算题 1 图

1,2—活塞; 3—管路

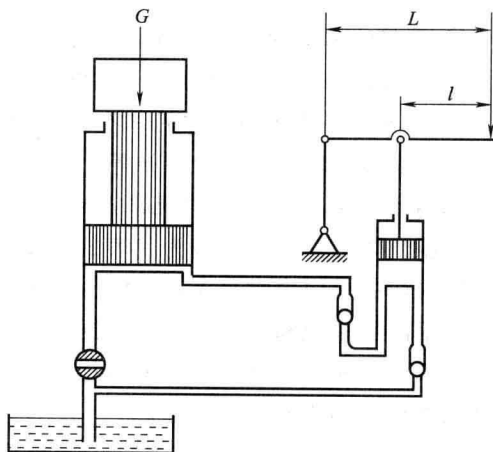


图 1-6 计算题 2 图

第二章 液压流体力学基础

学习目标:

- ① 掌握液压油的物理性质、对液压油的要求、液压油的选用原则;
- ② 掌握液压流体力学的基本概念及静压基本方程的应用;
- ③ 重点掌握液体动力学的三个基本方程研究的主要问题及应用、液体流动时压力损失的计算、小孔和缝隙的流量特性等;
- ④ 掌握液压冲击和气穴现象产生的原因、危害及控制措施。

液压流体力学是以油液为代表的液体力学,它是研究液体平衡、运动及液体与固体间相互作用规律的一门力学分支,是液压系统和元件工作过程及动力计算的理论基础,是正确分析和应用液压系统和元件的理论依据。

本章主要介绍与液压传动密切相关的流体力学的基本内容,为分析、设计和应用液压系统及元件打下必要的理论基础。

第一节 液 压 油

在液压传动中,工作液体绝大部分为液压油。液压油既是液压传动中能量传递和转换的工作介质,又是传动机构和零部件的润滑剂。液压传动系统的工作性能如何,很大程度上取决于所采用的液压油的性能、质量。因此了解液压油的物理性质、掌握液压油的选择原则,对于正确理解液压传动的基本原理,合理设计和使用液压系统都是非常必要的。

一、液压油的物理性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度,通常用 ρ 表示

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-1)$$

式中 V ——液体的体积, m^3 ;

m ——液体的质量, kg 。

密度是液体的一个重要的物理参数,它的大小随着液体的温度或压力的变化会产生一定的变化,但在常用的温度和压力范围内,其变化量较小,一般可忽略不计,故实际应用中可认为液压油密度不受温度和压力变化的影响。一般液压油的密度为 900kg/m^3 。

2. 可压缩性

液体受压力作用而使体积减小的性质称为液体的可压缩性。体积为 V 的液体,当压力增大 Δp 时,体积减小 ΔV ,则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \times \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (2-2)$$

式中 k ——液体的体积压缩系数, m^2/N ;

Δp ——液体压力的变化量, N/m^2 ;

ΔV ——压力变化 Δp 时液体体积的变化量, m^3 ;

V ——增压前液体的体积, m^3 。

它的物理意义是: 单位压力变化下的体积相对变化量。

由于压力增大时, 液体的体积减小, 即 Δp 和 ΔV 的符号始终相反, 为保证 k 为正值, 在式 (2-2) 的右边加一负号。

k 的倒数称为液体的体积弹性模量, 以 K 表示

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{V \Delta p}{\Delta V} \quad (\text{N} / \text{m}^2) \quad (2-3)$$

K 表示液体产生单位体积相对变化量所需要的压力增量。在常温下, 纯净液压油的体积弹性模量 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{ Pa}$, 数值很大, 故一般可认为液压油是不可压缩的, 只有在研究液压系统的动态特性和高压情况时, 才考虑液压油的可压缩性。但是, 若液压油中混入空气, 其抗压缩能力会显著下降, 并将严重影响液压系统的工作性能。因此, 在考虑液压油的可压缩性时, 必须综合考虑液压油本身的可压缩性、混在油中空气的可压缩性以及盛放液压油的封闭容器 (包括管道) 的容积变形等因素的影响。

3. 黏性

(1) 黏性的意义 当液体在外力作用下流动时, 由于液体本身分子之间内聚力以及与固体壁面的附着力的存在, 使液体内部各处的速度产生差异。如图 2-1 所示, 液体在管路中流动时速度并不相等, 紧贴管壁的液体速度为零, 管路中心处的速度最大。如果将管中液体的流动看成是许多无限薄的同心圆筒形的液体层的运动, 运动较慢的液体层阻滞运动较快的液体层, 而运动较快的液体层又带动运动较慢的液体层, 这种液体层之间相互的作用类似于固体之间的摩擦过程, 因而在液体之间产生摩擦力。由于这种摩擦力是发生在液体内部的, 所以称为内摩擦力。液体的这种性质, 称为液体的黏性。液体只有流动时, 才会呈现黏性, 而静止的液体不呈现黏性。它是液体一个非常重要的特征, 是选择液压油的主要依据。黏性的大小用黏度来衡量。

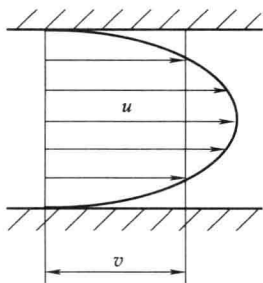


图 2-1 液体在管路内的速度分布

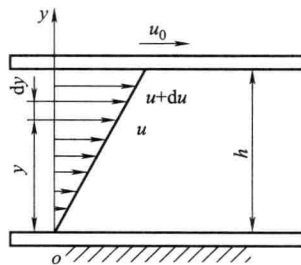


图 2-2 液体黏性示意图

(2) 液体黏度 常用的黏度有绝对黏度、运动黏度、相对黏度三种。

① 绝对黏度 绝对黏度也称动力黏度, 用 μ 表示。图 2-2 所示两平行平板之间充满液体, 上平板以速度 u_0 向右运动, 下平板固定不动。紧贴于上平板的液体在吸附力作用下跟随上平板以速度 u_0 向右运动, 紧贴于下平板的液体在黏性作用下保持静止, 中间液体的速度由上至下逐渐减小。当两平行板距离减小时, 速度近似按线性规律分布。

实验表明 (牛顿内摩擦定律), 液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F 与液层间接触面积 A 、液层间相对速度 du 成正比, 而与液层间的距离 dy 成反比。可用下式表示

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

若用单位面积上的摩擦力, 即切应力 τ 来表示液体黏性, 则上式可改成

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

式中 μ ——比例系数, 称为动力黏度, 单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒);

du/dy ——速度梯度, 即液层相对运动速度对液层间距离的变化率。

由式 (2-5) 可知, 液体动力黏度 μ 的物理意义是: 当速度梯度等于 1 时, 流动液体内接触液体层间单位面积上产生的内摩擦力。

② 运动黏度 动力黏度 μ 和液体密度 ρ 的比值, 就称为运动黏度, 用 ν 表示

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

运动黏度的单位是 m^2/s , 工程单位制使用的单位还有 cm^2/s , 通常称为 St (斯), 工程中常用 cSt (厘斯) 来表示, $1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$ 。运动黏度 ν 虽没有明确的物理意义, 但习惯上常用它来标志液体的黏度, 例如国产液压油的牌号就是该种油液在 40°C 时的运动黏度 ν 的平均值。如改善其防锈及抗氧化性的精制矿物油 (通用机床液压油) L-HL-46, 数字 46 表示该液压油在 40°C 时的运动黏度为 46cSt (平均值)。

③ 相对黏度 相对黏度又叫条件黏度, 它是采用特定的黏度计在规定的条件下测量出来的液体黏度。由于测量条件不同, 各国所用的相对黏度也不同。中国、德国和俄罗斯等国家采用恩氏黏度 ($^\circ\text{E}$), 美国采用塞氏黏度 (SSU), 英国采用雷氏黏度 (R)。

恩氏黏度用恩氏黏度计测定: 将 200mL 被测液体装入恩氏黏度计的容器中, 在某一特定温度 t ($^\circ\text{C}$) 下, 测出液体经其下部直径为 2.8mm 小孔流尽所需的时间 t_1 , 与同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需的时间 t_2 (通常为 51s) 的比值, 便是被测液体在这一温度时的恩氏黏度

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

工业上常用 20°C 、 50°C 、 100°C 作为测定恩氏黏度的标准温度, 其恩氏黏度分别可以用符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 、 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示。

恩氏黏度与运动黏度之间, 可用如下经验公式换算

$$\text{当 } 1.35 < ^\circ\text{E} \leq 3.2 \text{ 时} \quad \nu = 8^\circ\text{E} - \frac{8.64}{^\circ\text{E}} \quad (2-8)$$

$$\text{当 } ^\circ\text{E} > 3.2 \text{ 时} \quad \nu = 7.6^\circ\text{E} - \frac{4}{^\circ\text{E}} \quad (2-9)$$

(3) 黏度与温度、压力的关系 液压油的黏度对温度变化十分敏感, 温度升高, 黏度将显著降低。液压油的黏度随温度变化的性质称为黏温特性。不同种类的液压油具有不同的黏温特性。国产常用油的黏温特性如图 2-3 所示。液压油的黏温特性还用其黏温变化程度与标准油相比较的相对数值 (即黏度指数 VI) 来表示, VI 值越大, 表示其黏度随温度的变化越小, 黏温特性越好。

液体的黏度会随压力的变化而变化。当液体所受压力增大时, 其分子间距减小, 内聚力增大, 黏度也随之增大。但在机床液压系统所使用的压力范围内, 液压油的黏度受压力变化的影响甚微, 可以忽略不计; 若压力高于 10MPa, 如新型建材机械的液压系统或压力变化

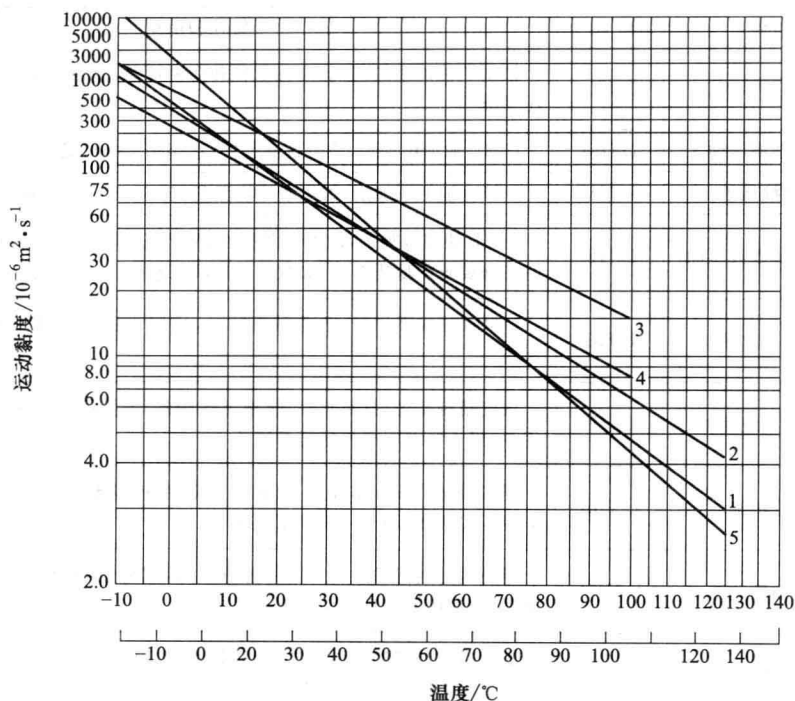


图 2-3 国产常用油的黏温曲线

1—石油型普通液压油；2—石油型高黏度指数液压油；3—水包油乳化液；4—水-乙二醇液；5—磷酸酯液

较大时，则应考虑压力对黏度的影响。不同的液压油有不同的黏度、压力变化关系，这种关系称为液体的黏压特性。

二、液压油的性能要求

在液压传动中，液压油既是传动介质，又是润滑剂，所以对其性能有以下要求。

① 适宜的黏度和良好的黏温特性。一般要求液压油的运动黏度（40℃）为 $(14 \sim 68) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

② 良好的抗乳化性和抗泡沫性。良好的抗乳化性即要求油液与水接触时不形成乳化液，而是游离状态，以便分离。良好的抗泡沫性意味油液在工作中产生的气泡少，且气泡能很快破灭和混溶于油液中的微小气泡容易释放出来。

③ 良好的抗氧化稳定性、热稳定性。

④ 良好的流动性和抗燃性。良好的流动性意味着油液具有较低的凝点，可在低温的环境下启动和运行。良好的抗燃性即要求在高温环境下具有较高的闪点和燃点。

⑤ 清洁性好。清洁的油液是液压系统正常工作的重要条件。良好的清洁性意味着油液中的水分、灰分和酸性物质少。

⑥ 良好的使用特性。要求无毒、无害和对人体无明显刺激，易储存，成本低。

三、液压油的种类

液压油主要可分为矿物油型、乳化型和合成型三大类。主要品种及其特性和用途见表 2-1。