



“十四五”工科专业教材改革创新型规划精品教材

液压与气压传动

王 萌 丁媛媛 周国华 主编

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

序

随着全球知识经济的快速发展,我国工业化建设也呈现迅猛发展之势,因而技术工人十分缺乏。为了顺应当前形势的发展要求,我国出台了一系列大力发展职业教育的政策:劳动和社会保障部门颁布了最新《国家职业标准》,继续实行职业准入制度,并将国家职业资格由三级(初、中、高)改为五级(初、中、高、技师、高级技师),对技术工人的工作内容、技能要求和相关知识进行了重新界定。教育部根据国务院“大力开展职业教育”的政策进行了职业教育的改革,职业院校相应地改制、扩招,以培养更多的技术工人。

“液压与气压传动”课程是根据教育部专业设置和课程整合的教改要求而设置的。为了在减少课堂教学学时的同时拓宽学生的知识面,本书将“液压传动”和“气压传动”两门课的教学内容根据教学需要进行整合,可以使学生掌握液压与气压传动相关的流体力学基础知识、液压和气压传动方面的知识,为后续的课程学习、设计训练和毕业后的工作奠定基础。其中,本书主要用作职业院校机械设计制造及其自动化专业的教材,也可作为高职院校其他相关专业的教材或参考书,并可供从事机械制造的工程技术人员和科技工作者参考使用。

应用型职业院校在人才培养上有着明显的区别,其培养的人才特征为:①就业导向与社会需求高度吻合;②扎实的理论基础和过硬的实践能力紧密结合;③具备良好的人文素质和科学技术素质;④具有面对职业应用的创新精神。因此,应用型职业院校只有着力培养“进入角色快、业务水平高、动手能力强、综合素质好”的人才,才能在激烈的就业市场竞争中站稳脚跟。

目前国内高职院校所采用的教材往往只是对理论性较强的职业院校教材的简单删减,针对性、应用性不够突出,因材施教的目的难以达到。因此亟须既有一定的理论深度又注重实践能力培养的系列教材,以满足应用型本科院校教学目标、培养方向和办学特色的需要。

本系列教材突出与办学定位、教学目标的一致性和适应性,既严格遵照学科体系的知识构成和教材编写的一般规律,又针对应用型本科人才培养目标及与之相适应的教学特点,精心设计写作体例,科学安排知识内容,围绕应用讲授理论,做到“基础知识够用、实践技能实用、专业理论管用”,同时注意适当融入新理论、新技术、新工艺、新成果,形成立体化教材,供教师参考使用。

前言

本书是应用型职业院校机械工程及自动化专业的教材之一，可作为机械设计制造及其自动化、过程装备及控制工程、材料成形及控制工程、动力与车辆工程等专业液压与气压传动课程的教材。全书共分为 11 个项目。项目一、项目二主要介绍液压传动的基本知识以及流体力学的基本理论；项目三至项目六主要介绍液压泵、液压马达、液压缸的选用与计算以及液压阀；项目七与项目八介绍液压基本回路、典型液压系统的组成、功能、特点以及应用情况；项目九介绍气压传动的基础知识；项目十介绍气动元件；项目十一介绍气动回路。

本书以少而精的理念进行取材和编排章节内容，着重基本内容的掌握和应用，注重理论与实践的紧密结合，突出内容的实用性和应用性。液压传动与气压传动分开讲述，以液压传动为主，气压传动则强调其特色部分，同时对每一部分内容的讲解都考虑到了其体系的完整性。重点放在通用元件、回路的工作原理、特点和应用上，同时注意先进技术的引入，注重对学生的工程技术应用能力以及创新能力的培养。本书力求做到“基础知识够用，实践技能实用，专业理论管用”。

本书中有关元件的图形符号、回路以及系统原理图全部采用了国家最新图形符号标准。由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编者

项目一 液压传动概述	1
任务一 液压传动的工作原理和组成	1
任务二 液压系统的图形符号	5
项目二 液压流体力学基础	9
任务一 液压油	9
任务二 液体静力学	15
任务三 液体动力学	18
任务四 流动阻力和能量损失（压力损失）	24
任务五 孔口和缝隙流量	28
任务六 空穴现象和液压冲击	32
项目三 液压泵和液压马达	35
任务一 概述	35
任务二 齿轮泵	37
任务三 叶片泵	41
任务四 柱塞泵	51
任务五 螺杆泵	58
任务六 液压泵的性能比较及应用	59
任务七 液压马达	60
项目四 液压缸	67
任务一 液压缸的种类及特点	67
任务二 液压缸的结构	73
任务三 液压缸的设计与计算	76
项目五 液压控制阀	89
任务一 液压控制阀概述	89
任务二 方向控制阀	90
任务三 压力控制阀	100
任务四 流量控制阀	110



任务五 温度补偿调速阀	114
任务六 分流阀和集流阀	114
项目六 液压辅助装置	118
任务一 过滤器	118
任务二 油管与管接头	120
任务三 油箱	122
任务四 蓄能器	124
任务五 其他辅助装置	125
项目七 液压基本回路	129
任务一 方向控制回路	129
任务二 压力控制回路	130
任务三 速度控制回路	134
任务四 多缸顺序动作控制回路	138
任务五 同步动作控制及多缸工作互不干扰回路	141
项目八 典型液压系统	148
任务一 组合机床动力滑台液压系	148
任务二 液压机液压系统	151
任务三 Q2-8 型汽车起重机液压系统	154
项目九 气压传动概述	159
任务一 气压传动的工作原理	159
任务二 气压传动系统的组成	160
任务三 气动技术的特点	160
项目十 气动元件	162
任务一 气源装置	162
任务二 气动执行元件	171
任务三 气动控制元件	174
任务四 气动辅助元件	181
项目十一 气动回路	184
任务一 压力、换向、速度控制回路	184
任务二 其他常用气动回路	187
参考文献	190

项目一 液压传动概述

一部完整的机器主要由动力部分、传动部分、执行部分、控制部分等四部分组成。原动机就是传递动力的设备，如电动机、内燃机等。工作机构就是完成工作任务的直接工作部分，如磨床，车床的刀架、车刀、卡盘等。由于原动机的功率和转速变化范围有限，为了适应工作机构对力和速度变化范围较宽的要求，以及其他操纵性能（如停车、换向等）的要求，在原动机和工作机构之间设置了传动装置（或称传动机构）。传动机构通常分为机械传动、电气传动和流体传动机构。

机械传动是通过轴、齿轮、齿条、蜗轮、蜗杆、皮带、链条和杠杆等机件直接传递动力和进行控制的一种传动方式，它是发展最早，应用最为普遍的传动形式。电气传动是利用电力设备调节电参数来传递动力和进行控制的一种传动方式。流体传动是以流体为工作介质来进行能量的传递、转换和控制的传动方式。流体传动可分为液体传动和气体传动。液体传动是以液体作为工作介质进行能量传递的传动方式，包括液压传动和液力传动。液压传动和机械传动相比，具有许多优点，因此在机械工程中，液压传动被广泛采用。液压传动是以液体作为工作介质来进行能量传递的一种传动形式，它通过能量转换装置（如液压泵），将原动机（如电动机）的机械能转变为液体的压力能，然后通过封闭管道、控制元件等，由另一能量装置（如液压缸、液压马达）将液体的压力能转变为机械能，以驱动负载和实现执行机构所需的直线或旋转运动。

任务一 液压传动的工作原理和组成

一、液压与气压传动的工作原理

液压与气压传动的基本工作原理是相似的。为了方便理解，现以图 1-1 所示的液压千斤顶来简述液压传动的工作原理。由图 1-1（a）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，小缸体下腔压力升高，单向阀 4 关闭，单向阀 7 打开，小缸体下腔的油液经管道 6 和单向阀 7 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，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 截止阀 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。

通过对液压千斤顶工作过程的分析可知，液压传动的原理是以油液为工作介质，依靠密封容积的变化来传递运动，依靠油液内部的压力来传递动力。液压传动装置本质上是一种能量转换装置，它先将机械能转换为便于输送的液压能，然后又将液压能转换为机械能做功。

图 1-1（b）所示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。

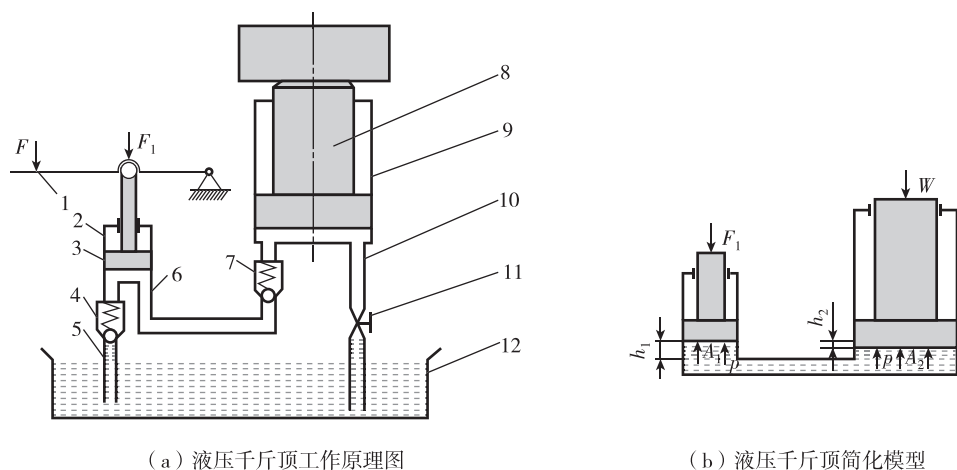


图 1-1 液压千斤顶

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

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到液体各点”。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 ， $F_1 = PA_1$ ，因有

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

或

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

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 (1-1) 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，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 1-1 (b) 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体下腔扩大的体积，即

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

或

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-2)$$

式中， h_1 、 h_2 分别为小活塞和大活塞的位移。

由式 (1-2) 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

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

即

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-3)$$

式中, v_1 、 v_2 分别为小活塞和大活塞的运动速度。

由式 (1-3) 可知, 活塞的运动速度和活塞的作用面积成反比。

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

$$q = Av$$

因此

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1-4)$$

如果已知进入缸体的流量 q , 则活塞的运动速度为

$$v = \frac{q}{A} \quad (1-5)$$

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 (1-5) 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 (1-1) 和式 (1-3) 可得

$$F_1 v_1 = W v_2 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 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 (1-6) 还可得出

$$P = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = pq \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 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 F 和速度 v , 它们的乘积即为功率。

从以上分析可知, 液压与气压传动是以流体的压力能来传递动力的。

二、液压传动系统组成

图 1-2 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、工作台 9 以及联接这些元件的油管、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 1-2 (a) 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 8 的左腔, 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。

如果将换向阀 7 的手柄移动成图 1-2 (b) 所示的状态, 则经节流阀 6 的压力油将由换向阀 7 进入液压缸 8 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 1-2 (c) 所示的位置, 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慢。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。在液压缸活塞面积一定的情况下要克服的阻力越大, 液压缸中的油液压力就越高; 反之压力就越低。系统中输入液压缸的油液的流量由节流阀调节, 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应略大于液压缸中的油液压力,因而溢流阀在液压系统中的主要功用是控制和调节系统的工作压力。

由上面的例子可以看出,液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,一般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,一般指做直线运动的液压缸、做回转运动的液压马达等。

(3) 控制调节装置:对液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压系统。

(4) 辅助装置:指除以上三种以外的其他装置,如油箱、过滤器、空气过滤器、油雾器、蓄能器等,它们对保证液压系统可靠和稳定地工作有重大作用。

(5) 传动介质:指传递能量的流体,即液压油或压缩空气。

三、液压系统优缺点

液压传动的主要优点有:

- (1) 液压传动可以在很大的调速范围内较方便地实现无级调速。
- (2) 运动平稳可靠反应快能高速启动、制动和频繁换向。
- (3) 与机械传动相比,在输出功率相同的情况下液压传动装置的体积小、重量轻、惯性小,而且能传递大的力和转矩。
- (4) 控制和调节比较简单操作方便易于实现自动化。当和电气控制配合使用时,易于实现各种复杂的程序动作和远程控制。
- (5) 易于实现过载保护。因采用液体作为工作介质故能够自行润滑,减少了零件的磨损,提高了元件的使用寿命。

(6) 液压元件实现了系列化标准化和通用化,故易于设计、制造和推广使用。

液压传动的主要缺点有:

- (1) 液压传动存在不可避免的液体泄漏同时液体不是绝对不可压缩的故不能保证严格的传动比。
- (2) 由于在能量转换和传递过程中存在着压力损失和泄漏,因而效率低。
- (3) 温度的变化可使液体的黏度受到影响故不宜在高温和低温条件下工作;同时液体要求有较好的

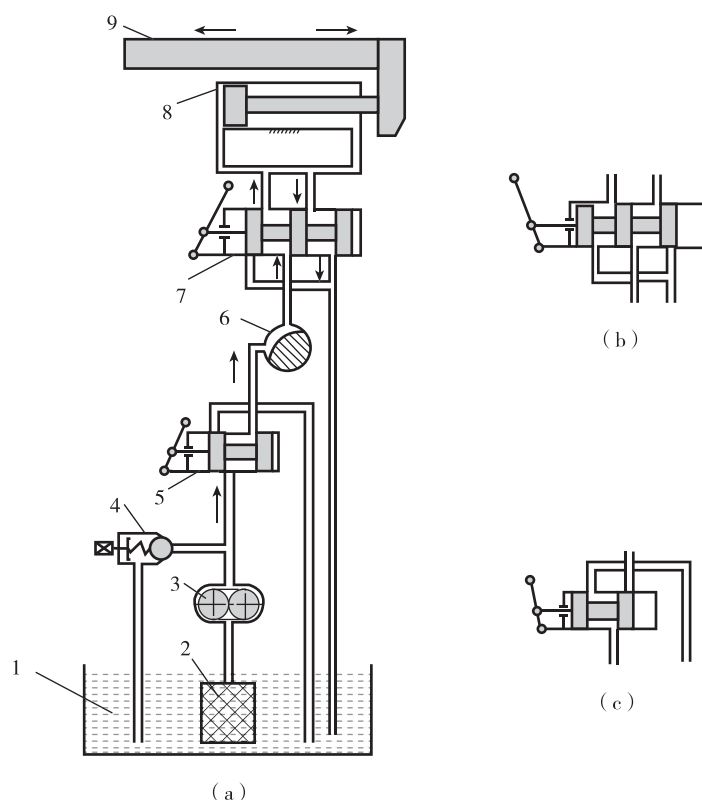


图 1-2 机床工作台的液压传动系统

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

过滤设施。

(4) 当液体受污染后会使液压系统发生故障且出现故障时不易直观地查找原因。

总的说来, 液压传动优点是主要的, 而其缺点将会随着科学技术的发展、设计制造水平的提高而逐步得到解决液压传动将会得到更广泛的应用。

任务二 液压系统的图形符号

图 1-3 为液压系统的半结构原理图, 这种原理图直观性强, 容易理解, 但图形较复杂, 特别是元件较多时, 绘制很不方便。为简化原理图的绘制, 系统中各元件可采用符号来表示, 这些符号只表示元件的职能, 不表示元件的结构和参数。GB/T 786. 1-1993 为液压元件职能符号的国家标准。

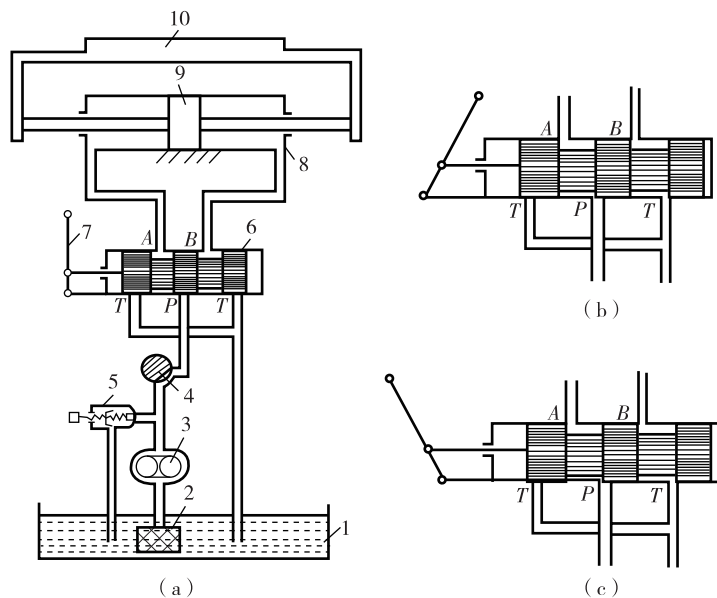


图 1-3 简单机床的液压传动系统

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

为便于大家看懂用职能符号表示的液压系统图, 现将图 1-3 中出现的液压元件的图形符号介绍如下(图 1-4)。

(1) 液压泵图形符号由一个圆加上一个实心三角以及圆外的旋转运动方向来表示, 三角尖向外, 表示油液的方向。图 1-4 中旋转方向为单向箭头, 表示单向旋转; 若为双向箭头, 则表示双向旋转。图 1-4 中无斜向穿过圆的箭头为定量泵, 有箭头则为变量泵。

(2) 换向阀的图形符号为改变油液的流动方向, 换向阀的阀芯位置要变换, 它一般可变动 2~3 个位置, 而且阀体上的通路数也不同。根据阀芯可变动的位置数和阀体上的通路数, 可组成 \times 位 \times 通换向阀。其图形意义为:

- 1) 换向阀的工作位置用方格表示, 有几个方格即表示几位阀。
- 2) 方格内的箭头符号表示油流的连通情况(有时与油液流动方向一致), “T” 表示回油口。这些符号在一个方格内和方格的交点数, 即表示阀的通路数。
- 3) 方格外的符号为操纵阀的控制符号, 控制形式有手动、电动和液动等。

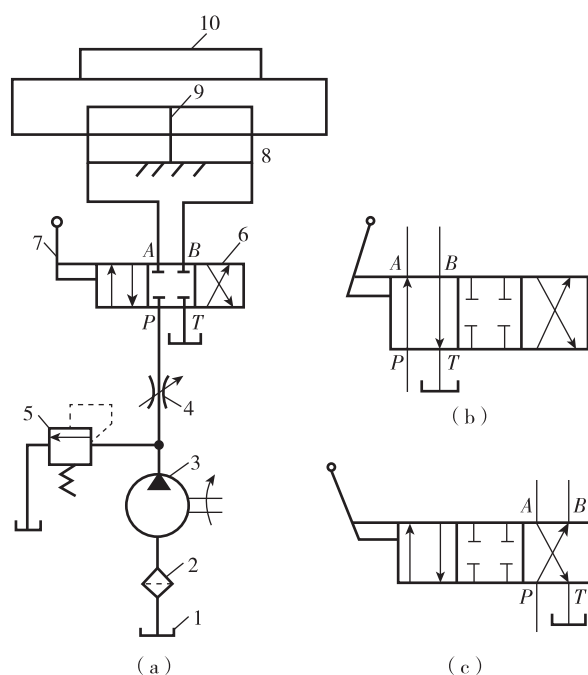


图 1-4 简单机床的液压传动系统（用智能符号表示）

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

(3) 压力阀图形符号相当于阀芯，方格中的箭头表示油流的通道，两侧的直线代表进出油管。图 1-4 中的虚线表示控制油路，压力阀就是利用控制油路的液压力与另一侧弹簧力相平衡的原理进行工作的。

(4) 节流阀图形符号两圆弧所形成的缝隙即节流孔道，油液通过节流孔使流量减少，图 1-4 中节流阀的箭头表示节流孔的大小可以改变，称为可调节流阀，亦即通过该阀的流量是可以调节的。

液压系统图中规定：液压元件的图形符号应以元件的静止状态或零位来表示。由此，可将图 1-3 对应画成图 1-4 所示的用职能符号表示的液压系统原理图。

相关实验

压力形成实验

一、实验目的

理解液压传动中压力的基本概念，强化“压力取决于负载”的重要理论。

二、实验仪器及材料

实验台架由容器、活塞、托盘、压力表等组成活塞与容器管壁间应密封良好，如图 1-5 所示。量杯；200g、500g、1000g 砝码各一个；0~0.25MPa 压力表，精度等级 0.5；实验用 N46 号液压油。

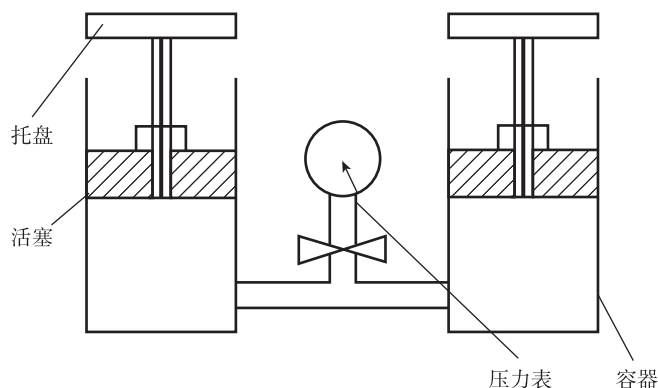


图 1-5 压力形成实验

三、实验步骤

- (1) 用量杯将液压油倒入实验仪器标线位置。
- (2) 将活塞装入仪器任一管口内并缓慢压下直至液面稍微溢出中心螺孔，同时保持另一管口敞开。
- (3) 螺纹处装 O 型密封圈并将托盘拧入活塞压紧密封圈打开压力表开关。
- (4) 空载演示：用手在托盘上方施加压力活塞开始缓慢下移，此时观察压力表。在另一管口为封闭的情况下，没有任何压力指示。
- (5) 以不同速度重复步骤 4 仔细观察压力表的变化。
- (6) 将另一活塞装入仪器另一管口内，直至液面稍微溢出中心螺孔，将 O 型密封圈装到螺孔处并将托盘拧入活塞压紧密封圈。
- (7) 负载实验：在托盘上添加 200g 砝码，另一侧托盘用手施加压力使其缓慢下移，此时注意观察压力表变化情况。
- (8) 在托盘上分别添加 500g、1000g 砝码重复步骤 7 观察压力表变化情况。

课后习题

1. 什么是液压传动？液压传动的基本工作原理是什么？
2. 液压传动系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
3. 简述液压传动的优缺点。
4. 如图 1-6 所示的液压千斤顶中， F 是手掀动手柄的力，假定 $F = 300\text{N}$ ，两活塞直径分别为 $D = 20\text{mm}$ ， $d = 10\text{mm}$ ，试求：
 - (1) 作用在小活塞上的力 F_1 ；
 - (2) 系统中的压力 p ；
 - (3) 大活塞能顶起重物的质量 G ；
 - (4) 大、小活塞的运动速度之比 v_1/v_2 。
5. 在图 1-7 的简化液压千斤顶中， $T = 294\text{N}$ ，大、小活塞的面积分别为 $A_2 = 5 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 、 $A_1 = 10^{-3}\text{m}^2$ ，忽略损失，试解答下列各题。

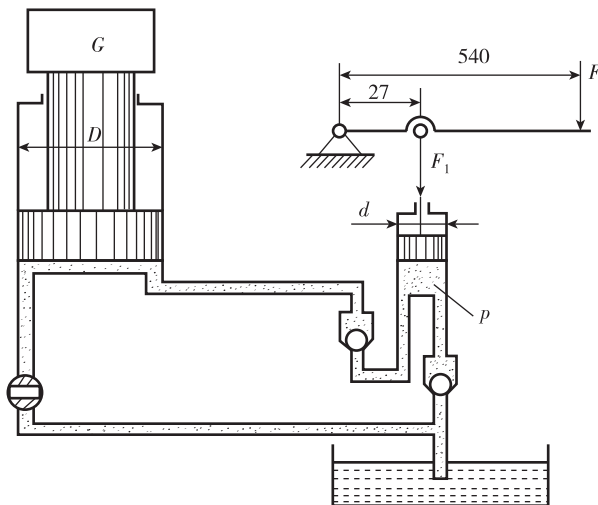


图 1-6 液压千斤顶



- (1) 通过杠杆机构作用在小活塞上的力 F_1 ，及此时系统压力 p 为多少？
- (2) 大活塞能顶起重物的重力 G 为多少？
- (3) 大、小活塞运动速度哪个快？快多少？
- (4) 设需顶起的重物 $G = 19600\text{N}$ 时，系统压力 p 为多少？作用在小活塞上的力 F_1 应为多少？

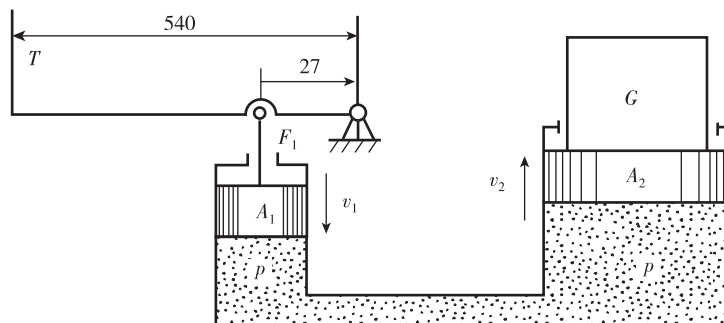


图 1-7

6. 如图 1-8，已知活塞面积 $A = 10^{-2}\text{m}^2$ ，包括活塞自重在内的总负重 $G = 10\text{kN}$ ，问：从压力表上读出的压力 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 各是多少？

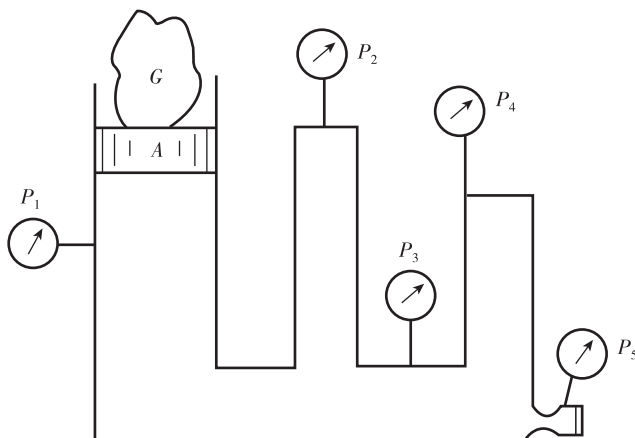


图 1-8

7. 图 1-9 为液压装置， $d_1 = 20\text{mm}$ ， $D_1 = 80\text{mm}$ ， $d_2 = 40\text{mm}$ ， $D_2 = 120\text{mm}$ ， $q_1 = 25\text{L/min}$ 。试求： v_1 、 v_2 、 q_2 各为多少？

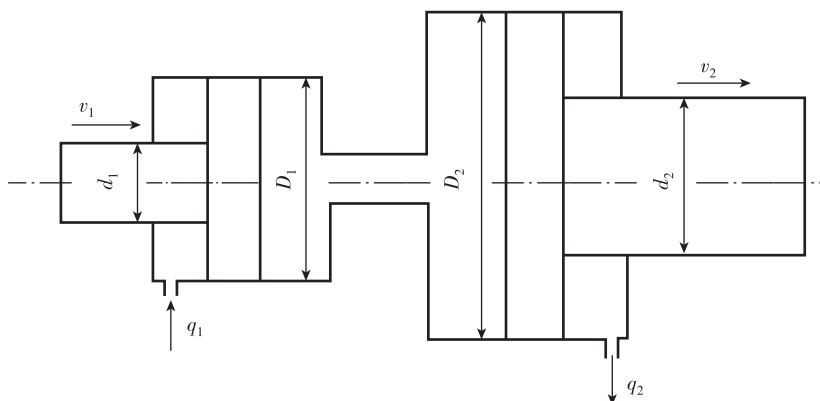


图 1-9