

# 项目一

## 认识液压与气压传动控制技术

### 一、项目引入

液压与气压传动是以流体（液体和气体统称为流体）作为工作介质进行能量传递和控制的一种方式。由于流体独特的物理性，它在能量传递、系统控制、支撑和减小摩擦等方面发挥着十分重要的作用，所以液压与气动技术发展十分迅速，现已广泛应用于工业、农业、国防等多个领域。目前，液压技术正在向高压、高速、大功率、高效率、低噪声和高度集成化、数字化等方向发展；气压传动正向节能化、小型化、轻量化、位置控制的高精度化以及机、电、液相结合的综合控制技术方向发展。

液压与气压传动实现传动和控制的方法基本相同，都是利用各种元件组成具有所需功能的基本控制回路，再将若干基本回路加以综合利用而构成能完成特定任务的传动和控制系统，实现能量的转换、传递和控制。因此，要掌握液压与气压传动技术就必须了解传动工作介质的基本物理性质及其力学特性，研究各类元件的结构、工作原理和性能，以及各种基本控制回路的性能和特点。这是进行液压与气压传动系统分析、故障诊断和设计计算的基础，是本学科的主要研究内容。

### 二、液压与气压传动的工作原理及其组成

#### （一）液压与气压传动的工作原理

液压系统以液体作为工作介质，而气动系统以气体作为工作介质。两种工作介质的不同在于液体几乎不可压缩，气体却具有较大的可压缩性。液压与气压传动在基本工作原理、元件的工作机理以及回路的构成等方面是极为相似的。下面以图 1-1 所示液压千斤顶的工作原理为例来介绍。液压缸 9 为举升缸（大缸），手柄 1 操纵的液压缸 2 为动力缸（液压泵，即小缸），两缸通过管道 6 连接构成密闭连通器。当操纵手柄 1 上下运动时，小活塞 3 在液压缸 2 内随之运动，液压缸 2 的容积是密闭的，当小活塞 3 上行时，液压缸 2 下腔的容积扩大而形成局部真空，油箱 12 中的液体在大气压力作用下，通过吸油管 5 推开吸油阀 4，流入小活塞的下腔。当小活塞下行时，液压缸 2 的下腔容积缩小，在小活塞的作用下，受到挤压的液体通过

管道 6 打开单向阀 7, 进入液压缸 9 的下腔 (此时吸油阀 4 关闭), 迫使大活塞 8 向上移动。如果反复扳动手柄 1, 液体就会不断地被送入大活塞下腔, 推动大活塞及负载上升。如果打开截止阀 11, 可以控制液压缸 9 下腔的油液通过管道 10 流回油箱, 活塞在重物的作用下向下移动并回到初始位置。

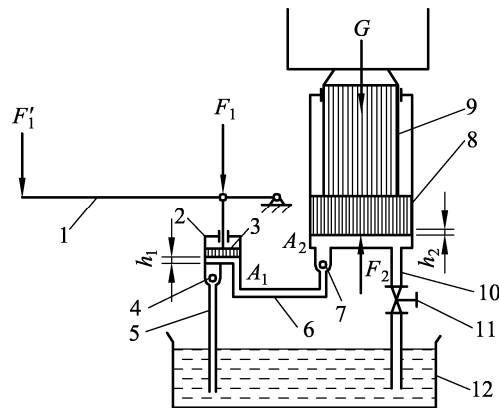


图 1-1 液压千斤顶的工作原理

1—手柄; 2, 9—液压缸; 3—小活塞; 4—吸油阀; 5—吸油管; 6, 10—管道;  
7—单向阀; 8—大活塞; 11—截止阀; 12—油箱

图 1-1 所示的系统不能对重物的上升速度进行调节, 也没有设置防止压力过高的安全措施。但仅从这一基本系统, 也能得出有关液压与气压传动的一些重要概念。

设大、小活塞的面积为  $A_2$ ,  $A_1$ , 当作用在大活塞上的负载和作用在小活塞上的作用力分别为  $G$  和  $F_1$  时, 由帕斯卡原理可知, 大、小活塞下腔以及连接导管构成的密闭容积内的油液具有相等的压力值 ( $p$ ), 如忽略活塞运动时的摩擦阻力, 则有

$$p = \frac{G}{A_2} = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1} \quad (1-1)$$

或

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-2)$$

式中  $F_2$ ——油液作用在大活塞上的作用力,  $F_2 = G$ 。

式 (1-1) 说明, 系统的压力  $p$  取决于负载的大小。

式 (1-2) 表明, 当  $A_2 / A_1 \gg 1$  时, 作用在小活塞上一个很小的力  $F_1$ , 便可在大活塞上产生一个很大的力  $F_2$  以举起负载 (重物)。这就是液压千斤顶的工作原理。

另外, 设大小活塞移动的速度为  $v_1$  和  $v_2$ , 在不考虑泄漏情况下稳态工作时, 有

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_v \quad (1-3)$$

或

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = \frac{q_v}{A_2} \quad (1-4)$$

式中  $q_v$  ——流量，单位时间内输出（或输入）液体的体积。

式（1-4）表明，大缸活塞运动的速度（在缸的结构尺寸一定时）取决于输入的流量。

使大活塞上的负载上升所需的功率为

$$P = F_2 v_2 = p A_2 \frac{q_v}{A_2} = p q_v \quad (1-5)$$

式中， $p$  的单位符号为 Pa， $q_v$  的单位符号为  $\text{m}^3/\text{s}$ ， $P$  的单位符号为 W。由此可见，液压系统的压力和流量之积就是功率，称之为液压功率。

## （二）液压与气压传动系统的组成

图 1-2 为一台简化的磨床工作台液压系统工作原理，电动机驱动液压泵 3 旋转，从油箱 1 经滤油器 2 吸油。泵输出的压力油经换向阀 5（图示位置）、节流阀 6 和换向阀 7（图示位置）进入液压缸 8 的左腔，推动活塞向右运动。液压缸右腔的油液经换向阀 7 流回油箱。当换向阀 7 的阀芯处于图 1-2（b）所示的位置时，液压缸活塞将带动工作台向左运动。当换向阀 5 的阀芯处于图 1-2（c）所示的位置时，泵输出的压力油经换向阀 5 直接流回油箱，此时，系统处于卸荷状态。由此可知，换向阀的主要功能是控制和改变油液的流动方向，进而控制液压缸及工作台的运动方向，且还有启动、停止功能。工作台的运动速度由节流阀 6 调节。改变节流阀的开度可以改变进入液压缸的流量。液压泵排出的多余油液，可通过溢流阀 4 流回油箱。液压缸的工作压力由外负载决定，液压泵的工作压力由溢流阀 4 调定，其调定值应略高于液压缸的工作压力，以克服管道、节流阀和溢流阀的压力损失。液压系统的工作压力不会超过溢流阀的调定值，因此溢流阀对液压系统还能起到过载保护作用。

图 1-3 为自制气动压力机，图 1-4 为它的工作原理。当工料被送至压力机的预定位置时，控制手动换向阀换向，使气缸上腔与压缩空气源连通，下腔与大气连通，气缸活塞向下移动，带动压力板向下对工料施压。单次施压完成后，控制手动换向阀换向，气缸下腔与压缩空气源连通，上腔排气，活塞带动压力板向上运动，压力机再次处于预备工作状态。此压力机经进一步升级扩展可用电磁阀控制换向，也可使用蓝牙或其他连接方式通过智能控制模块进行控制。

液压气动系统简介请浏览下方 AR 资源。

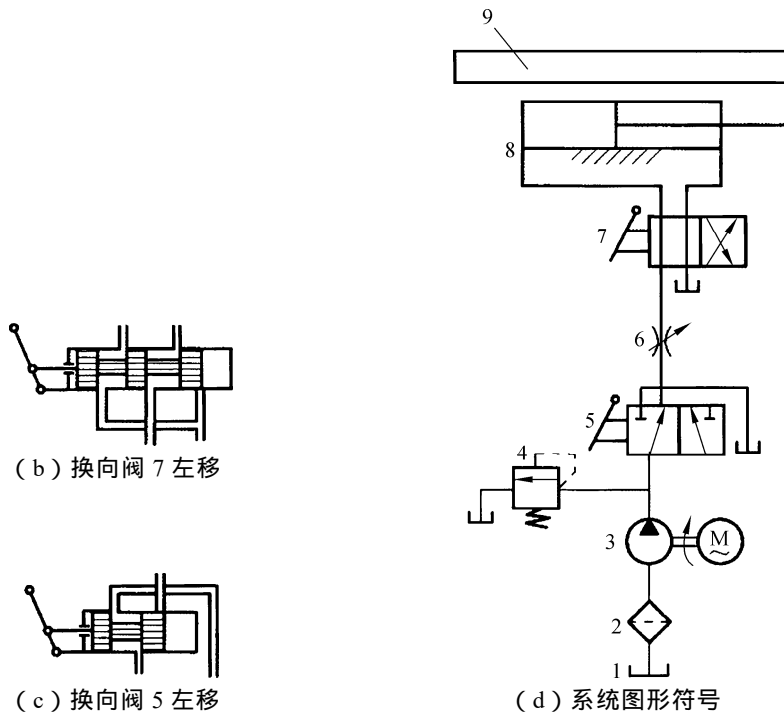
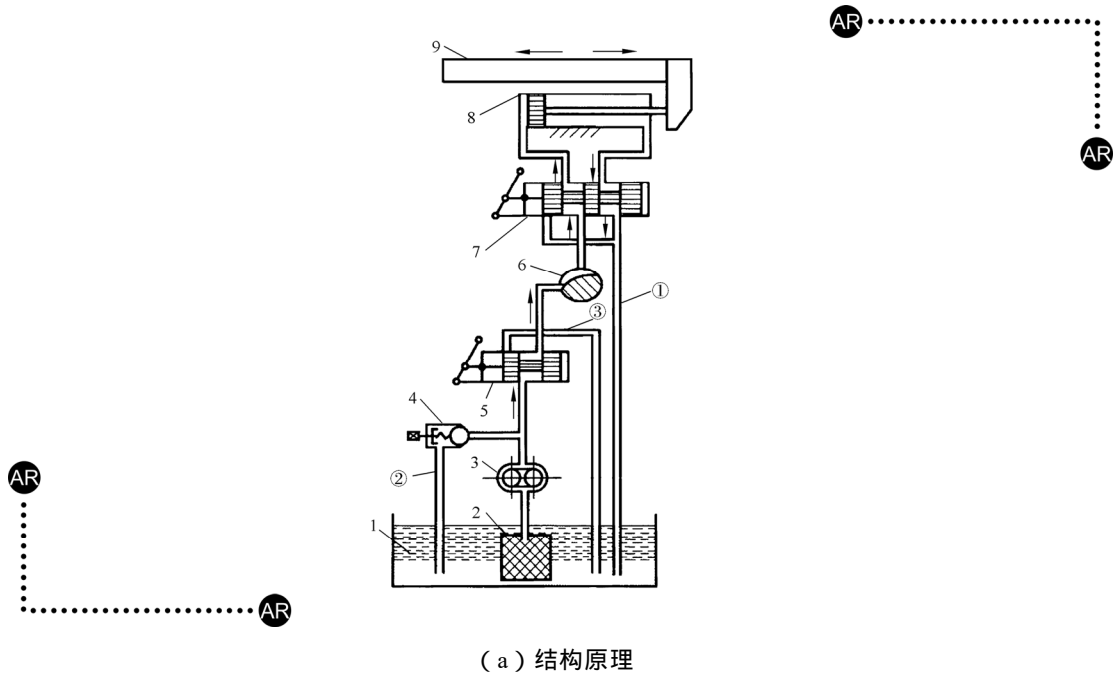


图 1-2 磨床工作台液压系统工作原理

1—油箱；2—滤油器；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

微型压力机制作过程及工作原理请浏览下方 AR 资源。

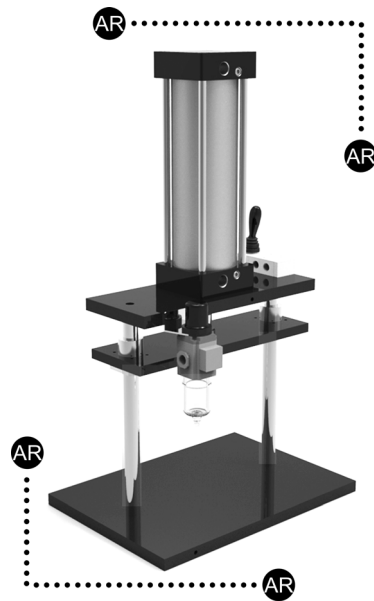


图 1-3 气动压力机

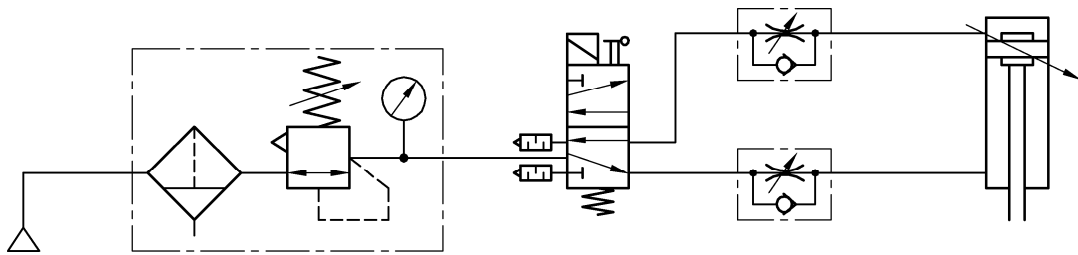


图 1-4 气动压力机的工作原理

从上述两个实例可以看出，液压、气压传动系统除工作介质（液压油或压缩空气）外，一般由以下四部分组成：

### 1. 动力元件

液压泵或气源装置，它们将原动机输入的机械能转换为流体的压力能，向系统提供压力介质。

### 2. 执行元件

液压缸或气缸、液压马达或气马达，它们是将流体压力能转换为机械能的装置，以克服负载阻力，驱动工作部件做功。

### 3. 控制元件

压力、流量、方向控制阀，如溢流阀、节流阀、换向阀和逻辑元件。

### 4. 辅助元件

辅助元件主要包括各种管件、油箱、过滤器、蓄能器、仪表和密封装置等。

### （三）液压与气压系统的图形符号

如图 1-2 (a) 所示, 将组成液压系统的各个元件用半结构式图形表示出来的简图, 称为结构原理图。这种原理图直观性强、容易理解, 但图形比较复杂, 难于绘制, 系统元件数量多时更是如此。为此, 除某些特殊情况外, 通常采用职能符号来绘制液压系统原理图。用国家标准 GB/T 786.1—2009 规定的液压元件图形符号绘制的磨床工作台液压系统图和气动压力机的系统图如图 1-2 (d) 和图 1-4 所示。这些图形符号只表示元件的职能, 并不表示元件的结构和参数。使用图形符号, 可使系统简单明了, 便于绘制。

## 三、液压与气压传动的优缺点

### （一）液压传动的特点

#### 1. 液压传动的优点

(1) 单位体积输出功率大。在同等的功率下, 液压装置的体积和质量小。液压马达的体积和质量只有相同功率电动机的 12% 左右。

(2) 液压装置工作比较平稳。由于质量小、惯性小、反应快, 液压装置易于实现快速启动、制动和频繁换向。

(3) 液压装置能在较大范围内实现无级调速。

(4) 液压传动易于实现自动化。如将液压控制和电气、电子控制或气动控制结合起来, 整个传动装置能实现很复杂的顺序动作, 并能方便地实现远程控制。

(5) 液压装置易于实现过载保护。

(6) 由于液压元件已经实现了标准化、系列化和通用化, 液压系统的设计、制造和使用都比较方便。

#### 2. 液压传动的缺点

(1) 油液的泄漏、油液的可压缩性、油管的弹性变形会影响运动传递的正确性, 故液压传动不宜用于要求具有精确传动比的场合。

(2) 由于油液的黏度随温度变化而变化, 从而影响运动的稳定性, 故不宜在温度变化范围较大的场合下使用液压传动。

(3) 由于工作过程中有较多的能量损失 (如管路压力损失、泄漏等), 液压传动的效率不高, 不宜用于远距离传动。

(4) 为了减少泄漏, 液压元件的制造精度要求高, 故制造成本较高。

### （二）气压传动的特点

#### 1. 气压传动的优点

(1) 以空气为工作介质, 来源方便, 使用后可以直接排入大气中, 处理简单, 不污染环境。

(2) 由于空气流动损失小, 压缩空气便于集中供气并可实现远距离传输和控制。

(3) 与液压传动相比较, 气压传动具有动作迅速、反应快等优点。液压油在管路中流动

速度一般为  $1 \sim 5 \text{ m/s}$ ，而气体流速可以大于  $10 \text{ m/s}$ ，甚至接近声速，在  $0.02 \sim 0.03 \text{ s}$  即可以达到所要求的工作压力及速度。此外，气压传动维护简单，管路不易堵塞，且不存在介质变质、补充和更换等问题。

(4) 工作环境适应性强，特别是在易燃易爆、多尘埃、强辐射、振动等恶劣环境下工作时要比液压、电子、电气控制优越。

(5) 结构简单、轻便，安装维护简单，压力等级低，使用安全可靠。

(6) 空气具有可压缩性，气动系统能够实现自动过载保护。

## 2. 气压传动的缺点

(1) 由于空气具有可压缩性，导致气缸的运动稳定性较差，动作速度易受负载变化的影响。

(2) 工作压力较低（一般为  $0.4 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ），系统输出力较小，传动效率较低。

(3) 气动系统具有较大的排气噪声。

(4) 工作介质空气本身没有润滑性，需要加油雾器进行润滑。

## 四、液压与气压传动技术的应用和发展

### (一) 液压与气压传动技术的应用

液压与气压传动在机械设备中的应用非常广泛。有的是利用液压传动能传递大的动力，且结构简单、体积小、质量小的优点，如工程机械、航空工业、矿山和冶金机械等；有的是利用液压传动操纵控制方便，能较容易地实现复杂工作循环的优点，如各类金属切削机床、轻工和运输机械等。采用气压传动是由于空气工作介质对环境适应性好，能防爆、防燃的特点；在印染、印刷等轻工业和医药、食品行业，则是利用了气压传动操作方便且无污染的特点。液压与气压传动技术的应用具体列于表 1-1 中。

表 1-1 液压与气压传动在各行业中的应用

行业名称	应用举例
机床工业	磨床、铣床、刨床、拉床、自动和半自动车床、组合机床、数控机床等
工程机械	装载机、推土机、挖掘机、压路机、铲运机等
起重机械	汽车吊、港口龙门吊、升降平台、叉车等
矿山机械	液压支架、凿岩机、开凿机、破碎机、提升机等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	轧钢机、转炉、压力机等
轻工机械	打包机、自动计量灌装机、注塑机、矫直机、造纸机等
锻压机械	压力机、锻压机、空气锤等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车转向器、减振器等
智能机械	机器人、模拟驾驶舱、数字式体育锻炼机等

气动工具

气镐、气扳机、气动搅拌机等

## （二）液压与气压传动技术的发展

当前，液压技术随着原子能、空间技术、计算机技术的发展而迅速发展，并逐渐渗透到各个工业领域中去。液压元件小型化、系统集成化已是发展的必然趋势。特别是液压技术与传感技术、微电子技术的紧密结合，出现了电液比例阀、数字阀、电液伺服阀等机电液一体化的新型组合元件，使液压技术向着高压、高速、高效、大功率、低噪声、节能耐用、集成方向发展。

气动技术发展也非常迅速，许多国家已大量生产标准化的气动元件，在生产中广泛采用气动技术。气动技术的微型化、节能化、无给油化、位置控制的高精度化以及与电子技术、PLC 技术的有机结合，是当前气动技术的发展特点和方向。

## 五、流体力学基础

### （一）流体传动的工作介质

#### 1. 液压油的主要性质

##### （1）液体的密度。

单位体积液体的质量称为液体的密度，用  $\rho$  表示，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

式中  $V$ ——液体的体积， $\text{m}^3$ ；

$m$ ——液体的质量， $\text{kg}$ 。

密度是液体的一个重要物理参数，一般液压油的密度值为  $900 \text{ kg/m}^3$ ，通常情况下，液体的密度随温度或压力的变化可以忽略不计。

##### （2）液体的可压缩性。

液体在压力作用下体积减小的这种性质称为液体的可压缩性。在常温下，一般可认为油液是不可压缩的，但当液压油中混有空气时，其抗压缩能力会显著降低，在使用中应尽量减少油液中混入的气体及其他易挥发物质的含量，以减小对液压系统工作性能的不良影响。

##### （3）液体的黏性。

在日常生活中，我们都能体会到液体有黏性。将杯中的水倒干净非常容易，但如果要将杯中的油液倒干净则不像倒水那么简单了，这是因为油液的黏性比水的黏性大。

在外力作用下液体在管道中流动时，各流层的运动速度不相等，越接近管壁的流层速度越小，管子中心的流层速度最大。这是由于液体与管壁之间的附着力和液体分子间的内聚力造成其流动受到牵制，阻碍流层间的相对滑动，在相邻流层之间便产生了内摩擦力。液体流动时的这种内摩擦阻力称为液体的黏性。如图 1-5 所示，假设两平行平板间充满液体，当上板以  $u_0$  的速度向右运动，下平板固定不动时，液体在附着力的作用下，紧贴上平板的一层液体也以相同的速度  $u_0$  向右运动，而紧贴下平板的一层液体仍保持不动，其中间各层液体在内聚力的作用下相互牵制，运动快的一层液体带动运动慢的一层液体向右运动，而运动慢的液体



对运动快的液体起阻滞作用。不难看出，液体从上到下按递减的速度向右运动。当平板间的距离很小时，各流层的速度呈线性分布。

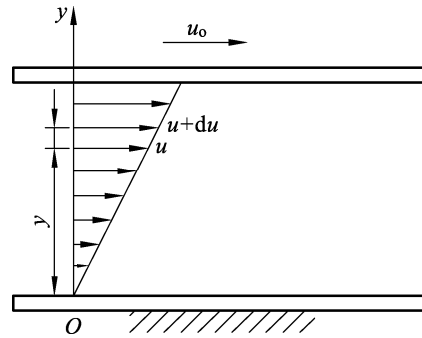


图 1-5 液体黏性

根据牛顿的液体内摩擦定律，液体流动时两液层之间的内摩擦力  $F$  与液层间接触面积  $A$  和液层间相对速度  $du$  成正比，而与液层间距离  $dy$  成反比，即

$$F = mA \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中  $m$  ——比例系数，称为黏性系数或动力黏度；

$\frac{du}{dy}$  ——速度梯度，即液层间相对速度对液层距离的变化率。若

$\frac{du}{dy} = 0$ ，说明液体处于

静止状态，根据式 (1-7) 知内摩擦力  $F = 0$ ，因此静止液体不显示黏性。

液体的黏度是指它在单位速度下流动时单位面积上产生的内摩擦力，是衡量液体黏性大小的物理量，也是液压系统选择液压油的重要依据。液体黏度的大小直接影响液压系统的正常工作、工作效率和灵敏度。

用  $t$  表示切应力，则单位面积上的内摩擦力为

$$t = \frac{F}{A} = m \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

黏度  $m$  称为动力黏度，法定计量单位符号为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。它的物理意义是面积各为  $1 \text{ cm}^2$ 、相距为  $1 \text{ cm}$  的两层液体，以  $1 \text{ cm/s}$  的速度相对运动时所产生的内摩擦力。

液体的动力黏度与它的密度  $\rho$  之比，称为运动黏度，用  $\nu$  表示，即  $\nu = \frac{m}{\rho}$ ，其法定计量单位符号是  $\text{m}^2/\text{s}$  或  $\text{mm}^2/\text{s}$ 。

工程上，常用运动黏度表示油的牌号。液压油的牌号用它在  $40^\circ\text{C}$  的温度下的运动黏度平均值来表示。例如，某一牌号 L-HL22 普通液压油就是指这种油在  $40^\circ\text{C}$  时的运动黏度的平均值为  $22 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

液体的黏度随液体的压力和温度的变化而变化。