

# 第 1 章 液压传动概述

## 【知识目标】

- (1) 认识液压传动的工作原理及组成。
- (2) 根据《流体传动系统及元件 图形符号和回路图 第 1 部分:图形符号》(GB/T 786.1—2021)绘制系统图形。
- (3) 掌握液压传动系统的组成及每部分的作用。

## 【能力目标】

- (1) 以千斤顶、组合机床、液压机为例,了解简单液压系统的工作过程、各组成部分的名称和作用。
- (2) 以组合机床、液压机为例,掌握液压系统的优点和缺点,初步了解工程机械中常见传动方式的优点和缺点。
- (3) 结合我国液压发展史、现状和成就,培养学生脚踏实地、自立自强、爱岗敬业的精神,进一步理解科学技术在国家富强、民族复兴中的地位和作用。



液压传动的工作介质

## 1.1 工程机械的传动

工程机械的传动有多种方式,如机械传动、电气传动、液压传动、液力传动、气压传动等。

**机械传动:**通过齿轮、齿条、蜗轮、蜗杆等机件直接把动力传送到执行机构。

**电气传动:**利用电力设备,通过调节电参数传递或控制动力。

**液压传动:**利用密封系统中的受压液体传递动力。

**液力传动:**利用液体静流动的动能传递动力。

**气压传动:**利用压缩空气进行动力传递。

以上传动方式各有优劣,应用场合也有很大的区别,其中液压传动在同等功率输入下可以输出较大的推力或力矩。用液体作为工作介质进行能量传递的方式称为液体传动。按照其工作原理的不同,液体传动又可分为液压传动和液力传动两种形式。液压传动主要是利用液体的压力能来传递能量,这种传动方式通过动力元件(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(缸或马达)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;而液力传动则主要利用液体的动能来传递能量。

## 1.2 液压传动的工作原理及组成

液压千斤顶就是一个简单的液压传动装置,下面以图 1-1 所示的液压千斤顶为例说明液压传动的工作原理。

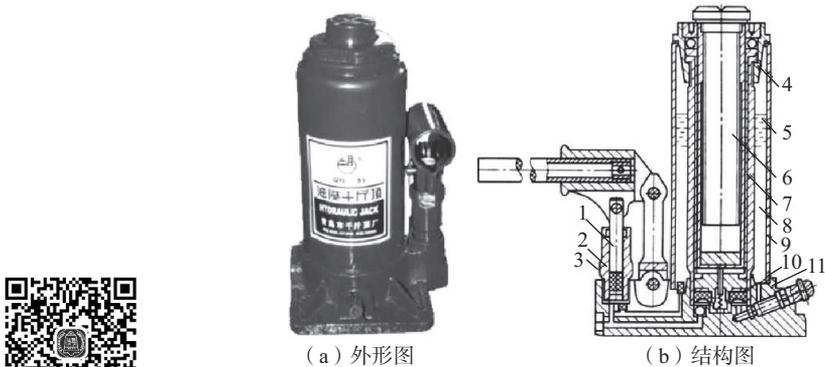


图 1-1 液压千斤顶

1—小柱塞;2—小缸;3—密封圈;4—顶帽;5—液压油;6—调节螺杆;  
7—大柱塞;8—大缸;9—外壳;10—密封圈;11—底座



液压与气压传动的  
工作原理

为了便于说明,将图 1-1(b)所示的结构图简化为图 1-2(a)所示的液压千斤顶原理图。如图 1-2(a)所示,大缸 9 和大柱塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小缸 2、小柱塞 3、单向阀 4 和单向阀 7 组成手动液压泵。提起杠杆手柄使小柱塞向上移动,小柱塞下端油腔容积增大,形成局部真空,这时单向阀 4 打开,通过吸油管道 5 从油箱 12 中吸油;用力压下杠杆手柄,小柱塞 3 下移,小柱塞下腔压力升高,单向阀 4 关闭,单向阀 7 打开,下腔的油液经吸油管道 6 输入大缸 9 的下腔,迫使大柱塞 8 向上移动,顶起重物。再次提起杠杆手柄吸油时,举升液压缸下腔的压力油本应倒流入手动泵内,但此时单向阀 7 自动关闭,使油液不能倒流,从而保证重物不会自行下落。不断往复扳动杠杆手柄,就能不断地把油液

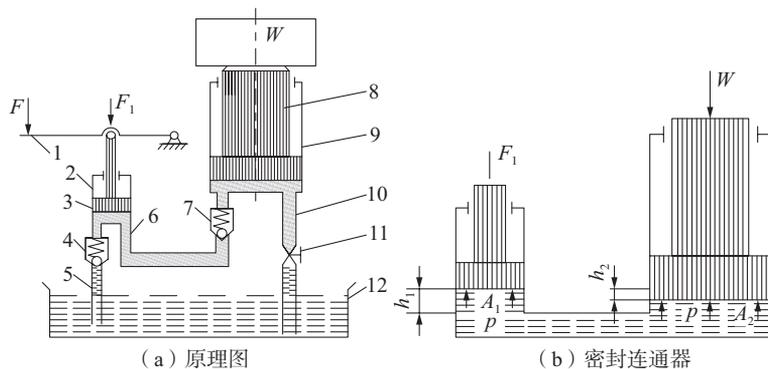


图 1-2 液压千斤顶原理图

1—杠杆手柄;2—小缸;3—小柱塞;4、7—单向阀;5、6、10—吸油管道;  
8—大柱塞;9—大缸;11—截止阀;12—油箱

压入举升液压缸的下腔,使重物逐渐升起。如果打开截止阀 11,举升液压缸下腔的油液通过吸油管道 10 和截止阀 11 流回油箱,大柱塞 8 在重物和自重的作用下向下移动,回到原始位置。

如果将图 1-2(a)简化为图 1-2(b)所示的密封连通器,可更清楚地分析两柱塞之间的力比例关系、运动关系和功率关系。

### 1. 力比例关系

当大柱塞上有重物负载  $W$  时,只有小柱塞上作用一个主动力  $F_1$  才能使密闭连通器保持力的平衡。此时大柱塞下腔的油液产生的压力为  $\frac{W}{A_2}$ ,小柱塞下腔产生的压力为  $\frac{F_1}{A_1}$ 。根据帕斯卡“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”的原理,即密封连通器中的压力应该处处相等,有

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

或

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

式中: $A_1$ 、 $A_2$  分别为小柱塞和大柱塞的作用面积; $F_1$  为杠杆手柄作用在小柱塞上的力; $p$  为油液的工作压力。

由式(1-1)可知, $p = \frac{W}{A_2}$ ,即当负载  $W$  增大时,流体工作压力  $p$  随之增大, $F_1 = pA_1$  也随之增大;反之,负载  $W$  很小,流体压力就很小, $F_1$  也很小。由式(1-2)可知,在液压传动中,力不但可以传递,而且通过作用面积( $A_2 > A_1$ )的不同,力还可以放大。千斤顶之所以能够以较小的推力顶起较重的负载,原因就在于此。

### 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 1-2(b)可以看出,被小柱塞压出的油液的体积必然等于大柱塞向上升起后大缸中油液增加的体积,即

$$A_1 h_1 = A_2 h_2 \quad (1-3)$$

或

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-4)$$

式中: $h_1$ 、 $h_2$  分别为小柱塞和大柱塞的位移。

将  $A_1 h_1 = A_2 h_2$  两端同除以活塞移动的时间  $t$  可得

$$\frac{A_1 h_1}{t} = \frac{A_2 h_2}{t} \quad (1-5)$$

即

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-6)$$

式中: $v_1$ 、 $v_2$  分别为小柱塞和大柱塞的运动速度。

$\frac{Ah}{t}$  的物理意义是单位时间内液体流过截面积为  $A$  的某一截面的体积,称为流量  $q$ ,即  $q = Av$ 。根据液体通过大缸和小缸的截面流量相等,得

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

因此,如果已知进入缸体的流量  $q$ ,则柱塞运动速度为

$$v = \frac{q}{A} \quad (1-8)$$

调节进入液压缸的流量  $q$ ,即可调节柱塞的运动速度  $v$ ,这就是液压传动可以实现无级调速的基本原理。它揭示了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缸的流量,而与流体的压力无关。

### 3. 功率关系

由式(1-2)和式(1-6)可得

$$F_1 v_1 = W v_2 \quad (1-9)$$

式(1-9)左侧为输入功率,右侧为输出功率,这说明在不计损失的情况下输入功率等于输出功率,由式(1-9)可得出

$$P = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = p q \quad (1-10)$$

由式(1-10)可以看出,液压传动中的功率  $P$  可以用压力  $p$  和流量  $q$  的乘积表示,压力  $p$  和流量  $q$  相当于机械传动中的力和速度,二者的乘积为功率。

### 4. 两个重要的概念

在液(气)压传动中,压力  $p$  和流量  $q$  是两个最重要的参数,两者的乘积是功率  $P$ 。

液压传动中,液体受到的压力相当于机械传动构件所受到的压应力。在液压传动中,工作压力取决于负载,而与流入的流体多少无关。值得注意的是,在固体力学中,压力的单位是牛(N),而在液(气)压系统中,由于流体本身的特性,只有研究单位面积上所受的力才有意义,所以使用的单位是  $\text{N}/\text{m}^2$ ,即固体力学中的压强(单位为 Pa),常用单位为 MPa( $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ )。

流量决定了执行元件的速度。在液(气)压系统中,所有的调速回路都和流量有关。在本课程中,流量的常用单位是  $\text{L}/\text{min}$ 、 $\text{mL}/\text{min}$  或者  $\text{L}/\text{s}$ 、 $\text{mL}/\text{s}$ 。其中,  $1\text{L}=10^{-3}\text{m}^3=10^3\text{mL}$ 。

## 1.3 液压传动系统的组成及图形符号

### 1.3.1 液压传动系统的组成

图 1-3(a)所示为一驱动机床工作台的液压传动系统。该系统的工作原理是:液压泵 3 由电动机带动从油箱 1 中吸油,油液经过过滤器 2 进入液压泵 3 的吸油腔,当油液从液压泵进入压力油路后,经节流阀 5 至换向阀 6,流入液压缸 7 的左腔,由于液压缸的缸体固定,活塞在压力油液的推动下,通过活塞杆带动工作台 8 向右运动,同时液压缸 7 右腔的油液经换向阀 7 流回油箱。



液压系统的组成和液压传动的特点

如果将换向阀 6 扳到左边位置,使换向阀 6 处于图 1-3(b)所示位置时,则油液经换向阀 6 进入液压缸 7 的右腔,推动活塞连同工作台向左运动,同时液压缸 7 左腔的油液经换向阀 6 流回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀 5 进行调节的。当节流阀的开口较大时,进入液压缸的油液量大,工作台的移动速度快,同时经溢流阀 4 溢流回油箱的油液相应减少;当节流阀的开口较小时,工作台的移动速度变慢,同

时经溢流阀 4 溢流回油箱的油液相应增加。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,这些阻力由液压泵输出油液的压力来克服。根据工作时阻力的不同,要求液压泵输出的油液压力应能进行控制,这个功能由溢流阀 4 完成。当油液压力对溢流阀的阀芯作用力略大于溢流阀中弹簧对阀芯的作用力时,阀芯才能移动,使阀口打开,油液经溢流阀溢流回油箱,压力不再升高,此时,泵出口处的油液压力由溢流阀决定。

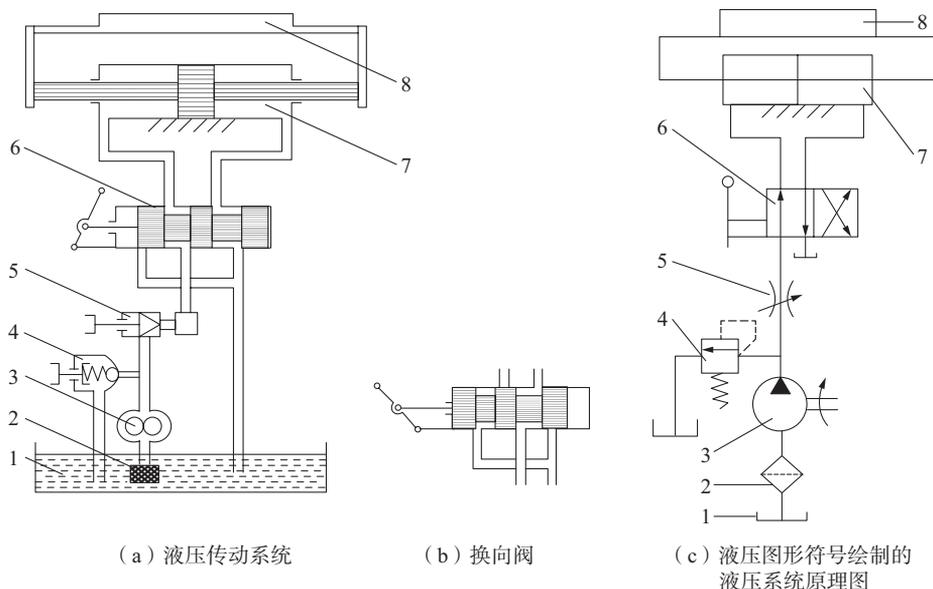


图 1-3 机床工作台液压系统工作原理图

1—油箱;2—过滤器;3—液压泵;4—溢流阀;5—节流阀;6—换向阀;7—液压缸;8—工作台

由上述例子可以看出,液压系统主要由以下五个部分组成。

(1) 动力元件:最常见的形式就是液压泵,它是将电动机输出的机械能转换成油液液压能的装置,其作用是向液压系统提供压力油。

(2) 执行元件:包括液压缸和液压马达,它是将油液的液压能转换成驱动负载运动的机械能的装置。

(3) 控制元件:包括各种阀类,如溢流阀、节流阀、换向阀等。这些元件的作用是控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向,以保证执行元件完成预期的工作。

(4) 辅助元件:上述三种元件以外的其他装置,包括油箱、油管、过滤器以及各种指示器和仪表。它们的作用是提供必要的条件,使系统可以正常工作和便于监测控制。

(5) 工作介质:传动液体,通常称液压油。液压系统就是通过工作介质实现运动和动力传递的。

液压系统的各组成部分遵循系统性原则,保证系统有条不紊地工作。系统性原则也称为整体性原则,它要求把决策对象视为一个系统,以系统整体目标的优化为准绳,协调系统中各分系统的相互关系,使系统完整、平衡。因此,在决策时,应该将各个小系统的特性放到大系统的整体中进行权衡,以整体系统的总目标来协调各个小系统的目标。实际上就是从整体着眼,部分着手,统筹考虑,各方协调,达到整体的最优化。从系统目的整

体性来说,当局部和整体发生矛盾时,局部利益必须服从整体利益。

我们应当树立全局观念,立足于整体,统筹全局,选择最佳方案,实现最优目标,从而达到整体功能大于部分功能之和的理想效果。同时,重视个人的作用,用个人的发展推动整体的发展。课程中告诫同学,要将个人和集体、理想与现实紧密相连,培养全局意识,拓宽眼光与视野。

### 1.3.2 液压传动系统的图形符号

在图 1-3(a)中,组成液压系统的各个元件用半结构图画出来,这种画法直观性较强,容易理解,但难以绘制。所以,在工程实际中,除特殊情况外,一般都用简单的图形符号来绘制液压系统原理图。图 1-3(c)所示为采用《流体传动系统及元件 图形符号和回路图 第 1 部分:图形符号》(GB/T 786.1—2021)规定的液压图形符号绘制的液压系统原理图。使用这些图形符号,可以使液压系统图简单明了,便于绘制。

在 GB/T 786.1—2021 中,这些图形符号有以下几条基本规定。

(1) 符号只表示元件的职能、连接系统的通路,不表示元件的具体结构和参数,也不表示元件在机器中的实际安装位置。

(2) 元件符号内的油液流动方向用箭头表示,线段两端都有箭头的,表示流动方向可逆;但有时箭头只表示连通,不一定指流动方向。

(3) 符号均以元件的静止位置或零位置表示。当系统的动作另有说明时,可作例外。

## 1.4 液压传动的特点及应用

### 1.4.1 液压传动的特点

与机械传动、电气传动、气压传动相比,液压传动有以下特点。

#### 1. 液压传动的优点

- (1) 液压传动能够方便地实现无级调速,调速范围较大。
- (2) 在同等功率的情况下,液压传动装置体积小、重量轻、结构紧凑。
- (3) 工作平稳,换向冲击小,便于实现频繁换向。
- (4) 易于实现过载保护。液压元件能自行润滑,使用寿命较长。
- (5) 操作简单、方便,易于实现自动化。特别是与电气控制联合使用时,易于实现复杂的自动工作循环。

(6) 液压元件实现了标准化、系列化、通用化,便于设计、制造和使用。

#### 2. 液压传动的缺点

- (1) 液压传动中液体的泄漏和可压缩性使传动无法保证严格的传动比。
- (2) 液压传动对油温的变化比较敏感,不宜在很高或很低的温度下工作。
- (3) 液压传动有较多的能量损失(主要由液体泄漏和元件摩擦等因素导致),故传动效率较低。
- (4) 液压传动出现故障时不易查找原因。
- (5) 为了减少泄漏和满足某些性能上的要求,对液压元件配合件的制造精度要求较

高,加工工艺较复杂。

(6) 在高压、高速、高效率和大流量的情况下,常常会产生较大的噪声。

### 1.4.2 液压传动的应用

由于液压传动具有比较显著的优点,所以广泛应用于机床、汽车、航空航天、工程机械、矿山机械、起重运输机械、建筑机械、农业机械、冶金机械、轻工机械和智能机械等领域。液压传动自17世纪帕斯卡提出静压传递原理和1795年世界上第一台水压机诞生以来,已有200多年的历史。但直到20世纪30年代,由于工艺制造水平的提高,才较普遍地应用于起重机、机床及其他工程机械。特别是在第二次世界大战期间,由于军事工业迫切需要反应快且精度高的自动控制系统,因而出现了液压伺服系统。20世纪60年代以后,由于原子能、空间技术、大型舰船及计算机技术的发展,不断地对液压技术提出新的要求,液压传动也得到了很大的发展,并渗入国民经济的各个领域。现在液压传动在某些领域内甚至已占有压倒性的优势,如国外生产的95%的工程机械、90%的数控加工中心、95%以上的自动线都采用了液压传动<sup>①</sup>。如今采用液压传动的程度已经成为衡量一个国家工业水平的主要标志之一。液压传动系统的工程应用见表1-1。

表 1-1 液压传动系统的工程应用

行业名称	应用场所举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、沥青混凝土摊铺机、压路机、铲运机等
起重运输机械	汽车起重机、港口龙门起重机、叉车、装卸机械、带式运输机、液压无级变速装置等
矿山机械	凿岩机、开掘机、开采机、破碎机、提升机、液压支架等
建筑机械	压桩机、液压千斤顶、平地机、混凝土输送泵车等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	高炉开铁口机、电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注射机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
机床工业	半自动车床、刨床、龙门铣床、磨床、仿形加工机床、组合机床及加工自动线、数控机床及加工中心、机床辅助装置等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、汽车中的ABS系统、转向器、减振器等
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等

当前,液压传动技术在实现高压、高速、大功率、高效率、低噪声、经久耐用、高度集成化、微型化、智能化等各项要求方面都取得了重大的进展,在完善比例控制、伺服控制、数字控制等技术上也有许多新成就。此外,液压传动已广泛应用于智能机器人、海洋开发、地震预测及各种电液伺服系统,使液压传动技术应用提高到一个崭新的高度。

液压传动技术的持续发展体现出以下一些比较重要的特征:

(1) 提高元件性能,创新新型元件,使元件不断小型化和微型化;

<sup>①</sup> 据深圳立木信息咨询发布的《中国液压市场调查及投资战略研究报告(2020版)》。

- (2) 高度的组合化、集成化和模块化;
- (3) 和微电子技术相结合,走向智能化;
- (4) 研究和开发特殊传动介质,推进工作介质多元化。

20世纪50年代,我国开始生产各种通用液压元件。目前,我国已生产出许多自行设计的新型系列产品,如插装式锥阀、电液比例阀、电液伺服阀、电液脉冲电动机及其他新型液压元件。我国所生产的液压元件在品种与质量等方面和国外先进水平相比,还存在一定的差距,其主要原因是材料技术和制造工艺水平较低,但是可以预见,随着我国工业技术的发展,以及材料技术和制造水平的提升,液压传动技术也将获得进一步发展,一般有机械设备的场合,均可采用液压传动技术,其未来可期。

## ► 知识延伸

### 两弹一星功勋奖章获得者——钱学森

钱学森(1911—2009),1959年加入中国共产党,空气动力学家、系统科学家,工程控制论创始人之一,中国科学院学部委员、中国工程院院士,两弹一星功勋奖章获得者(见图1-4)。

1956年初,钱学森提出《建立我国国防航空工业的意见书》。同时,钱学森组建了国防部第五研究院,并担任首任院长。他主持完成了“喷气和火箭技术的建立”规划,直接领导了用中近程导弹运载和原子弹“两弹结合”试验,参与制定了中国第一个星际航空的发展规划,发展建立了工程控制论和系统学等。在钱学森的领导下,1964年10月16日,中国第一颗原子弹爆炸成功;1967年6月17日,中国第一颗氢弹空爆试验成功;1970年4月24日,中国第一颗人造卫星发射成功。



图1-4 两弹一星功勋奖章获得者——钱学森

钱学森提出了跨声速流动相似律,并与卡门一起,最早提出了高超声速流的概念,为空气动力学的发展奠定了重要的理论基础。高亚声速飞机设计中采用的公式是以卡门和钱学森名字命名的卡门-钱学森公式。钱学森与卡门合作进行的可压缩边界层的研究,创立了“卡门-钱近似”方程。与郭永怀合作,最早在跨声速流动问题中引入上下临界马赫数的概念。

1953年,钱学森正式提出物理力学概念,开拓了高温高压的新领域。1961年,他编著的《物理力学讲义》正式出版。1984年,钱学森把物理力学扩展到原子分子设计的工程技术方面。

在20世纪40年代,钱学森提出并实现了火箭助推起飞装置(JATO),使飞机跑道距离缩短;在1949年提出了火箭旅客飞机概念和关于核火箭的设想;在1953年研究了跨星际飞行理论的可能性;在1962年出版的《星际航行概论》中,提出了用一架装有喷气发动机的大飞机作为第一级运载工具;他发展了系统学和开放的复杂巨系统的方法论。

在我国液压与气动技术应用的发展历史上涌现出一大批高技术型人才,对我国科学技术的发展具有重要的推动作用。

## 观察与实践

### 认识液压系统

#### 1. 实训目的

通过观看视频和操作液压挖掘机、液压千斤顶,体验和了解液压系统的工作情况,认识各类液压元件,掌握其作用。在实训过程中,通过让学生认识、观察、分析具体的液压元件,增强对元件的感性认识,在此基础上掌握液压元件的作用和符号。利用 FluidSIM 5 仿真软件熟悉液压元件的结构,激发学生学习液压知识的兴趣,让学生在学中做,了解液压系统的应用。

#### 2. 实训设备

液压试验台、试验用小型液压挖掘机、液压千斤顶。

#### 3. 实训前的准备工作

了解实训台、液压挖掘机、液压千斤顶等设备的工作模式以及组成部分和功能。

#### 4. 实训过程

(1) 观察挖掘机,回答下列问题。

- ① 挖掘机工作时要做哪些动作,即工作流程是什么?
- ② 挖掘机的各主要组成元件,隶属液压系统的哪一部分?
- ③ 元件之间如何连接?

(2) 选择手动控制模式,分别操纵 4 个手动换向阀操作挖掘机,回答下列问题。

- ① 4 个手动换向阀 1、2、3、4 分别控制挖掘机的哪个动作?
- ② 以其中一个手动换向阀为例,向前和向后扳动操作手柄,液压缸的动作有什么不同?

(3) 选择自动控制模式,扳动操纵杆,回答以下问题。

操纵杆动作时,电磁换向阀的得电指示灯亮和液压缸的工作有什么关系?(以其中一个液压缸为例)

(4) 操作液压千斤顶,重复步骤(1)~(3)。

#### 5. 实训评价

本实训项目的评价内容包括专业能力评价、方法能力评价及社会能力评价等。其中,项目测试占 30%,自我评定占 20%,小组评定占 10%,教师评定占 30%,实训报告和答辩占 10%,总计为 100%,具体见表 1-2。

表 1-2 实训项目综合评价表

评定形式	比重	评定内容	评定标准	得分
项目测试	30%	(1) 根据图形符号识读气动元件; (2) 画出指定阀件的图形符号,并说出该符号的含义; (3) 说出液压系统的组成和各部分的作用	好(30),较好(24),一般(18),差(<18)	
自我评定	20%	(1) 学习工作态度; (2) 出勤情况; (3) 任务完成情况	好(20),较好(16),一般(12),差(<12)	

续表

评定形式	比重	评定内容	评定标准	得分
小组评定	10%	(1) 责任意识; (2) 交流沟通能力; (3) 团队协作精神	好(10), 较好(8), 一般(6), 差(<6)	
教师评定	30%	(1) 小组整体学习情况; (2) 制订计划、执行情况; (3) 任务完成情况	好(30), 较好(24), 一般(18), 差(<18)	
实训报告和答辩	10%	答辩内容	好(10), 较好(8), 一般(6), 差(<6)	
成绩总计:		组长签字:	教师签字:	

## 本章小结

(1) 液压传动是以液体为工作介质的,利用密封系统中的受压液体传递运动和动力。

(2) 液压传动中力和速度都是可以传递的,通过活塞作用面积的改变,力可以放大或缩小,速度也可以提高或降低。

(3) 压力和流量是液压传动中两个最重要的参数,液压传动中工作压力的大小取决于负载,与流量无关;活塞的运动速度取决于进入液压缸的流量,与压力无关;液压传动的功率可以用压力和流量的乘积表示。

(4) 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。

(5) 液压系统原理图是采用《流体传动系统及元件 图形符号和回路图 第1部分:图形符号》(GB/T 786.1—2021)规定的液压图形符号进行绘制的。

## 思考与习题

1. 什么是液压传动? 液压传动的基本原理是什么?
2. 液压传动系统由哪几部分组成? 各部分的主要作用是什么?
3. 液压元件在系统中是如何表示的?
4. 与其他传动方式相比,液压传动有哪些优点和缺点?
5. 日常生活中见过哪些液压设备和液压装置?