



绪 论

Introduction

本章指南

(The guideline in this chapter)

主要内容(Main contents): 结合实例主要讲述了液压与气压传动和液力传动的工作原理、组成及区别。讲述了液压传动系统对工作介质的主要性能要求,液压传动工作介质的污染、危害和控制,污染度的测定及等级。介绍了液压与气压传动和液力技术在汽车上的应用及特点。

重点(Key knowledge points): 熟练掌握与运用“系统压力取决于外负载”和“外负载的运动速度取决于流量”这两个重要特征。理解牛顿液体内摩擦定律。掌握液压传动工作介质的正确使用、对污染的控制及措施。正确理解液压与气压传动两个重要特征之间相互独立的特点。掌握液体的可压缩性、动力黏度和运动黏度公式的推导与计算。

教学目的和要求(Teaching objects and requirements): 通过学习液压千斤顶、自卸汽车车厢举倾机构的液压传动系统和剪切机气压传动系统的工作原理,正确理解静压传递原理即帕斯卡原理,理解液压传动的应用。通过离心式水泵与涡轮机的组合实例,正确理解液力传动的工作原理。理解液压传动系统对工作介质的主要性能要求,理解黏性是选择液压传动工作介质的重要依据。了解液压传动工作介质污染的原因及危害,如何采取正确的控制措施。了解液压传动与液力传动的区别,掌握液压与气压传动和液力技术在汽车上的应用及特点。

液压与气压传动和液力技术是现代机械设备中高速发展的重要技术之一,特别是与微电子技术、传感技术和计算机技术的紧密结合,使其进入了一个新的发展阶段,目前已广泛应用在工业各领域。由于近年来微电子技术、传感技术和计算机技术的飞速发展,液压、气动和液力零部件的制造技术进一步提高,使得液压与气压传动和液力技术不仅在作为一类基本的传动形式上占有重要地位,而且还以优良的静态、动态性能成为一种重要的控制手段。

目前,技术先进的汽车上已广泛采用液压、气动和液力技术进行传动及控制,使得现代汽车成为机、电、液、计算机一体化的高新技术产物,汽车技术已成为现代科学技术和物质文明的发展标志。

用液体作工作介质进行能量传递和控制的,称为液体传动。按其工作原理的不同,液体传动分为液压传动(静液压传动)(hydraulic transmission)(hydrostatic pressure transmission)和

液力传动(动液压传动)(hydraulic fluid power)(hydrokinetic energy transmission)。静液压传动主要是利用液体的压力能来传递能量；动液压传动主要是利用液体的动能来传递能量。

用气体作工作介质进行能量传递和控制的,称为气压传动(pneumatic transmission)。气压传动所用的工作介质是空气。

1.1 液压与气压传动和液力传动的工作原理及组成 (Operating principles and components of hydraulic and pneumatic and fluid power transmission)

1.1.1 液压传动的工作原理及组成(Operating principles and components of hydraulic transmission)

1. 液压传动的工作原理(Operating principles of hydraulic transmission)

液压传动是根据 17 世纪法国物理学家帕斯卡(Blaise Pascal)提出的液体静压力传动原理来实现的。现以图 1-1 所示的液压千斤顶(hydraulic jack)为例,简述液压传动的工作原理。

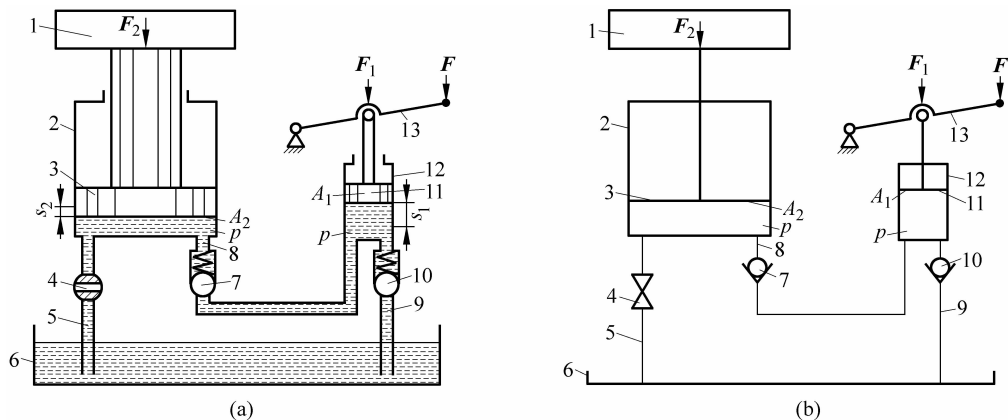


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

(FIGURE 1-1 Schematic illustration of operating principles of hydraulic jack)

(a) 结构原理图; (b) 图形符号

1—重物(外负载); 2—大液压缸(执行元件); 3—大活塞; 4—截止阀; 5—回油管; 6—液压油箱;
7—排油单向阀; 8—压油管; 9—吸油管; 10—进油单向阀; 11—小活塞; 12—小液压缸(手动液压泵); 13—杠杆

如图 1-1 所示,当液压千斤顶的杠杆 13 向上移动时,小液压缸 12 中的小活塞 11 向上移动,小液压缸无杆腔内的容积增大形成局部真空,排油单向阀 7 关闭。液压油箱 6 中的液体在大气压力作用下,经吸油管 9 打开进油单向阀 10 流入小液压缸的无杆腔;当使杠杆向下移动时,小活塞受驱动力 F_1 的作用,向下移动 s_1 的位移量,小液压缸无杆腔的容积减小,

油液受挤压,压力 p 升高,关闭进油单向阀,打开排油单向阀,油液经压油管8流入大液压缸2无杆腔,使大活塞3上移 s_2 的位移量,克服重物即外负载1的重力 F_2 而做功,即完成一次压油动作;如此不断地使杠杆上下移动,就会有油液不断地流入大液压缸的无杆腔,使外负载逐渐举升;当停止杠杆的上下运动时,大液压缸的无杆腔中的油压 p 关闭排油单向阀,使油液不能倒流,大活塞和外负载就停止在举升位置被锁住不动;当需要大活塞和外负载向下返回到原始位置时,就打开截止阀4,在外负载重力 F_2 的作用下,大液压缸无杆腔的液体经截止阀和回油管5流回液压油箱,大活塞和外负载即可回到原始位置。这就是液压千斤顶的工作原理。

由液压千斤顶的工作原理可知,小液压缸与进油单向阀和排油单向阀一起完成吸油与压油,将杠杆的机械能转换为油液的压力能输出,被称为手动液压泵(hand hydraulic pumps)。大液压缸将油液的压力能转换为机械能输出,顶起外负载,被称为举升液压缸,即执行元件。图1-1中的所有元件组成了一个最简单的液压传动系统,实现了力和运动的传递。

2. 液压传动的组成(Components of hydraulic transmission)

下面以图1-2所示的自卸汽车车厢举倾机构液压传动系统为例,进一步说明液压传动的组成。其工作原理是:当液压泵2运转时,从液压油箱经过滤器1吸油,手动换向阀4处于右位时,液压泵排出的压力油经单向阀3、手动换向阀右位、过滤器7和回油管道流回液压油箱,此时自卸汽车车厢举倾机构液压缸6处于不工作状态。推动手动换向阀换向到左位时,液压泵排出的压力油经单向阀、手动换向阀左位进入液压缸无杆腔,液压缸有杆腔油液经过滤器和回油管道流回液压油箱,通过活塞杆实现自卸汽车车厢举升。当外力去除后,在手动换向阀右侧弹簧力的作用下,手动换向阀返回到右位,液压缸无杆腔油液经手动换向阀右位、过滤器和回油管道流回液压油箱,自卸汽车车厢在自重作用下下降。

为了防止液压传动系统过载,在液压缸进油路并联安装溢流阀5,当液压传动系统压力超过溢流阀的调定值时,溢流阀开启,液压泵排出的压力油经溢流阀溢流流回液压油箱,液压传动系统压力保持恒定。

根据液压千斤顶和自卸汽车车厢举倾机构液压传动系统的工作原理可知,液压传动是以液体为工作介质的,一个完整的液压传动系统由以下五个主要部分组成。

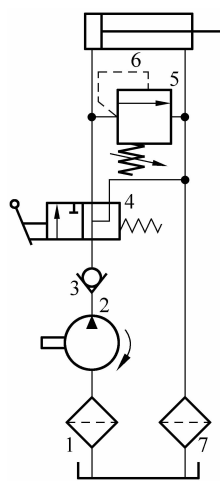


图 1-2 汽车车厢举倾机构液压传动系统工作原理图

(FIGURE 1-2 Schematic illustration of hydraulic transmission system operating principles of automobile lift mechanism)

1,7—过滤器;2—液压泵;3—单向阀;

4—二位三通手动换向阀;5—溢流阀;6—液压缸

(1) 液压动力元件(Hydraulic power components)

液压动力元件是将原动机输出的机械能转换成液体压力能的元件,向液压传动系统提供压力油。常见的液压动力元件是液压泵。

(2) 液压执行元件(Hydraulic actuator components)

液压执行元件是将液体的压力能转换成机械能的元件,液压马达驱动外负载作回转运动,液压缸驱动外负载作直线运动。

(3) 液压控制元件(Hydraulic control components)

液压控制元件是对液压传动系统中液体的压力、流量和流动方向进行控制和调节的阀类,如压力、流量和方向等控制阀。

(4) 液压辅助元件(Hydraulic accessories)

液压辅助元件是上述三个组成部分以外的其他元件,如液压油箱、滤油器、蓄能器、加热器、冷却器、管道和接头等。

(5) 液压工作介质(Hydraulic operating medium)

液压工作介质是传递能量和信号的介质,即液压油。

3. 液压传动的特点(Features of hydraulic transmission)

(1) 单位功率的质量轻,即能以较轻的设备质量获得很大的输出力和转矩。如在同等功率下,液压马达的质量只有电动机的 10%~20%。液压传动可以采用很高的工作压力,一般已达到 32MPa,个别场合更高。

(2) 操作简单方便和省力,易于实现机器的自动化。当采用机电液联合控制时,不仅可实现更高层次的自动控制,而且还可以实现远距离遥控。

(3) 液压传动系统借助压力控制阀等可自动实现过载保护,工作安全可靠,能实现自润滑,使用寿命长。

(4) 借助集成阀块、硬管、软管和接头等把液压元件连接起来,可以方便灵活地布置传动机构,使机器的整体结构简化。

(5) 液压装置运动比较平稳,由于体积小、质量轻,因此其响应速度快,惯性小,起动、制动迅速,换向冲击小,便于实现频繁换向。如在同等功率条件下,加速电动机需要 1s 至几秒,加速液压马达仅需 0.1s。液压装置的换向频率,在实现往复回转运动时可达 500 次/min,实现往复直线运动时可达 1000 次/min。

(6) 液压元件已实现了标准化、系列化和通用化,使液压传动系统的设计、制造和使用都比较方便。

(7) 液压传动的执行元件可在运行过程中方便地实现无级调速,调速范围大,可达 (100~1000):1,且最低稳定转速比较小,即低速性能好。如单作用静力平衡马达的最低稳定转速可小于 5r/min,多作用内曲线马达可在 0.5~1r/min 下平稳运行。

(8) 在液压传动系统工作中,因功率损失而产生的热量可以被流动的液压油带走,所以能避免在系统中某些局部位置上产生过度温升。

1.1.2 气压传动的工作原理及组成(Operating principles and components of pneumatic transmission)

1. 气压传动的工作原理(Operating principles of pneumatic transmission)

剪切机气压传动系统组成及工作原理如图 1-3 所示。剪切机气压传动系统工作原理如下：空气压缩机 2 由电动机 1 驱动，产生的压缩空气经冷却器 3、油水分离器 4 进行降温及初步净化后，送入储气罐 5 备用，再经分水过滤器 6、减压阀 7、油雾器 8 和二位四通气控换向阀 9 下位到达气缸 10 有杆腔。剪切机此时剪刀口张开，处于剪切板材的预备工作状态。当送料机构将原材料送入剪切机到达预定位置即将行程阀 12 的触头向左推使其右位处于工作状态时，二位四通气控换向阀下腔的压缩空气经行程阀排入大气。在弹簧的作用下阀芯下移使二位四通气控换向阀上位处于工作状态时，压缩空气经其上位进入气缸无杆腔，活塞连同动剪刀快速向下运动将坯料切下。坯料切断落下后，行程阀在弹簧的作用下阀芯右移复位，二位四通气控换向阀下腔气压上升使其阀芯上移下位处于工作状态，压缩空气进入气缸有杆腔，活塞连同动剪刀快速向上运动复位，剪切机再次处于剪切板材的预备工作状态。

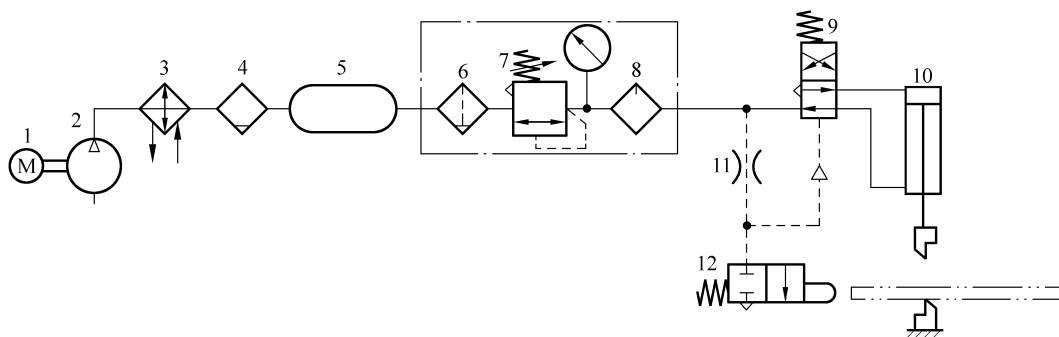


图 1-3 剪切机气压传动系统工作原理图

(FIGURE 1-3 Schematic illustration of operating principles of shearing machine pneumatic transmission system)

1—电动机；2—空气压缩机；3—冷却器；4—油水分离器；5—储气罐；6—分水过滤器；7—减压阀；8—油雾器；9—二位四通气控换向阀；10—气缸；11—节流阀；12—行程阀

2. 气压传动的组成(Components of pneumatic transmission)

根据剪切机气压传动系统的工作原理可知，气压传动是以气体为工作介质的，一个完整的气压传动系统由以下五个主要部分组成。

(1) 动力元件(Pneumatic power components)

动力元件又称气源装置，它是将机械能转化成气体压力能的装置，为各类气动设备提供压力气体。气源装置的主体部分是空气压缩机，另外还有气源净化辅助设备。

(2) 气动执行元件(Pneumatic actuator components)

气动执行元件是将气体压力能转化成机械能的装置，输出力和速度(或转矩和转速)，以

驱动外负载。常见的气动执行元件是气缸和气动马达。

(3) 气动控制元件(Pneumatic control components)

气动控制元件控制和调节气压传动系统中气体的压力、流量和流动方向,以保证气动执行元件达到所要求的输出力(或转矩)、运动速度和运动方向。这类气动元件主要包括方向控制阀、流量控制阀、压力控制阀和逻辑元件等。

(4) 气动辅助元件(Pneumatic accessories)

气动辅助元件是上述三个组成部分以外的其他元件,如冷却器、过滤器、油雾器、干燥器、消声器、管道和接头等。它们对保证气压传动系统可靠、稳定的工作起着重要作用。

(5) 气动工作介质(Pneumatic operating medium)

气动工作介质是传递能量和信号的介质。

3. 气压传动的特点(Features of pneumatic transmission)

(1) 气压传动工作介质是空气,取之不尽,用之不竭,用后的空气直接排到大气中,不污染环境。

(2) 对工作环境适应性好,在易燃、易爆、多尘埃、强辐射及振动等恶劣环境下,能可靠地工作,比电子、电气控制和液压优越。

(3) 过载能自动保护,使用安全可靠,维护简单。

(4) 气压传动可以在一定的超负载工况下运行,且不发生过热现象。

(5) 空气黏度小,流动阻力很小,压力损失小,便于集中供气,可实现远距离输送和控制。

(6) 气压传动的动作速度快。气体流速一般大于 10m/s ,因此在 $0.02\sim 0.03\text{s}$ 内就可达到所要求的工作压力和速度,气缸动作速度一般为 $0.05\sim 0.5\text{m/s}$ 。

1.1.3 液力传动的工作原理及结构形式(Operating principles and structures of fluid power transmission)

1. 液力传动的工作原理(Operating principles of fluid power transmission)

液力传动也是以液体作为工作介质进行能量传递的,液力传动是通过液体循环流动过程中的动能来传递能量的。

液力传动的工作原理如图 1-4 所示。发动机 5 带动离心式水泵叶轮 4 将液体从储水池 1 中吸入,获得动能;由离心式水泵叶轮打出的高速液体由连接管路 6、导向装置 8 进入涡轮机,冲击涡轮机叶轮 9,从而使涡轮机旋转,并由输出轴 10 输出机械能驱动工作机构运动。很明显,离心式水泵是将发动机的机械能转换成液体的动能的主要装置,涡轮机是将液体动能重新转换成机械能的装置。因此,通过离心式水泵与涡轮机的组合,实现了能量的传递。

因为离心式水泵与涡轮机的效率低,再加上连接管路的损失,液力传动系统总效率一般低于 70% ,故不宜直接应用。为了提高效率,德国人盖尔曼·弗丁格尔首先将离心式水泵和涡轮机工作轮装在一个壳体内,从而取消了连接管路,成为液力传动的雏形,其效率提高

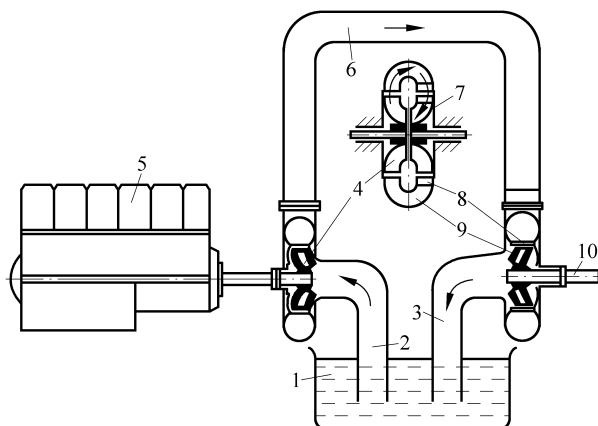


图 1-4 液力传动的工作原理图

(FIGURE 1-4 Schematic illustration of operating principles of fluid power transmission)

1—储水池；2—进水管；3—出水管；4—离心式水泵叶轮；5—发动机；6—连接管路；

7—液力变矩器工作原理简图；8—导向装置；9—涡轮机叶轮；10—输出轴

到 80% 以上, 达到了实用程度。起离心式水泵作用的工作轮称为泵轮, 起涡轮机作用的工作轮称为涡轮。通常将泵轮和涡轮统称为工作轮。

液力传动可看成是一个离心式水泵和一台涡轮机的组合体, 但只采用了它们的核心, 即泵轮、涡轮, 有时还有导轮, 见图 1-4 中液力变矩器工作原理简图 7。将它们紧密地组合成一个整体, 使工作液体在这些叶轮中循环流动来达到传递能量的目的。

2. 液力传动的结构形式 (Structures of fluid power transmission)

如上所述, 液力传动的的基本结构如下。

- (1) 能量输入部件(一般称泵轮): 它可以把发动机传来的机械能转换为液体的动能。
- (2) 能量输出部件(一般称涡轮): 它将液体的动能转换为机械能而输出。

如果液力传动装置只有上述两部件, 则称这一液力传动装置为液力偶合器, 如图 1-5 所示。如果除上述两部分之外, 还有一个固定的导流部件(它可装在泵轮的入口处或出口处), 则称这个液力传动装置为液力变矩器, 如图 1-6 所示。

为了扩大液力元件的使用范围, 可将液力偶合器或液力变矩器与各种机械元件组合成一个整体, 被称为液力机械元件(液力机械偶合器或液力机械变矩器)。应该指出的是, 液力偶合器只起传递转矩的作用, 而不能改变转矩的大小; 而液力变矩器能根据需要无级地改变传动比与转矩比, 即具有变矩的作用。

3. 液力传动的特点 (Features of fluid power transmission)

- (1) 简化机械操纵, 易于实现自动控制。
- (2) 可带载起动, 并具有稳定良好的低速运行性能。
- (3) 自动适应性能好。液力变矩器能在一定范围内自动地适应外负载变化, 实现无级变速、变矩调节。
- (4) 防振隔振性能强。液力传动的工作介质是液体, 故能吸收并减小来自发动机和机械传动系统的振动, 且能延长机械设备的使用寿命。

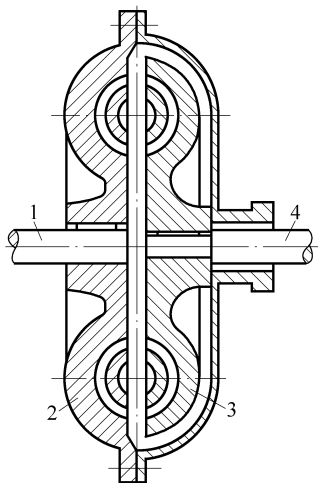


图 1-5 液力偶合器结构图

(FIGURE 1-5 Structural figure of hydrodynamic coupler)

1—主动轴；2—泵轮；3—涡轮；4—输出轴

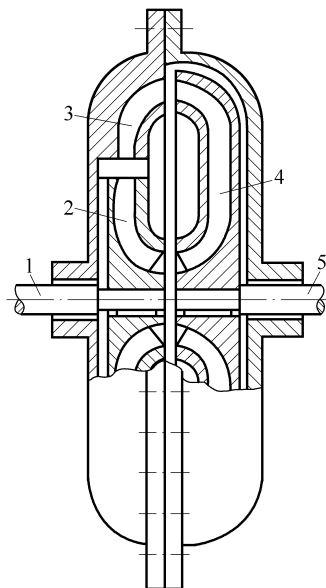


图 1-6 液力变矩器结构图

(FIGURE 1-6 Structural figure of hydraulic torque converter)

1—主动轴；2—泵轮；3—导轮；4—涡轮；5—输出轴

1.2 液压与气压传动的基本特征(Features of hydraulic and pneumatic transmission)

液压与气压传动的两个基本特征如下。

1. 按照帕斯卡原理(静压传递原理)进行力(或力矩)的传递(Force or torque transmission with respect to Pascal's Law or Hydrostatic Pressure Transmission Theory)

在液压千斤顶(见图 1-1)工作的过程中,从进油单向阀和小液压缸无杆腔通过管路到大液压缸无杆腔和截止阀之间形成了密闭的工作容积,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(The effect of a force acting on stationary liquid spreads within the liquid. The amount of pressure in the liquid is equal to the acting force, with respect to the area being acted upon. The pressure always acts at right angles to the limiting surfaces of the container)”。因此,密闭容器内液体的压力 p 即液压泵的排油压力,又称为系统压力,其平衡方程式为

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

式中: p ——系统压力;

F_1 ——驱动力;

F_2 ——外负载力；

A_1 ——小液压缸活塞面积；

A_2 ——大液压缸活塞面积。

可见,在 A_1 、 A_2 一定时,外负载力 F_2 越大,系统压力 p 也越高,所需的驱动力也越大,即系统压力是由外负载建立起来的,而与流入执行元件大液压缸的流体多少无关。这是液压与气压传动工作原理的第一个重要特征:系统压力取决于外负载(The pressure of system is dependent on the external load)。

2. 按照“容积变化相等”的原则进行速度或转速的传递(Speed or rotate speed with respect to Variable Volume Equivalence Principle)

假定系统密封非常好没有任何损失,手动液压泵排出的液体体积必然等于进入大液压缸的液体体积,即

$$A_1 s_1 = A_2 s_2 = V \quad (1-2)$$

式中: V ——小液压缸排出的液体体积；

s_1 ——小液压缸活塞位移；

s_2 ——大液压缸活塞位移。

式(1-2)两端同除以活塞运动时间 Δt ,得

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

式中: v_1 ——小液压缸活塞平均运动速度；

v_2 ——大液压缸活塞平均运动速度。

在流体力学中,单位时间内流过某一通流截面的流体体积叫做流量(Liquid volume V divided by time t is flow q),则流量为

$$q = \frac{V}{\Delta t} \quad (1-4)$$

则式(1-3)可变为

$$v_2 = \frac{q}{A_2} \quad (1-5)$$

因为 A_1 、 A_2 是常数,所以大液压缸活塞的平均运动速度 v_2 正比于进入其内的流量 q ,而与流体压力大小无关,即与外负载无关。这是液压与气压传动工作原理的第二个重要特征:外负载的运动速度取决于流量(The speed, at which the external load moves, is dependent on the flow which is fed to the actuator components)。

由式(1-1)和式(1-5)可以看出,液压与气压传动的两个重要特征是相互独立的。压力 p 和流量 q 是液压与气压传动中两个最基本的参数。

在图 1-1 中,若忽略各种能量损失,小液压缸输入的机械功率等于大液压缸输出的机械功率,即

$$P = F_1 v_1 = F_2 v_2 = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = p A_2 \frac{q}{A_2} = p q \quad (1-6)$$

在式(1-6)中,压力 p 的单位为 Pa,流量 q 的单位为 m^3/s ,则功率 P 的单位为 W。由此可见,液压传动系统工作压力 p 与流量 q 之积就是功率,称为液压功率 P (Operating

pressure p times flow q is hydraulic power P of hydraulic transmission system)。上述液压千斤顶的工作过程是先将手驱动的机械能转变为液体压力能,后又将液体压力能转变为机械能。

1.3 液压与气压传动的图形符号表示(Diagram symbols of hydraulic and pneumatic transmission system)

图 1-1(a)所示的液压传动系统工作原理图是一种半结构式的,其直观性强、易于理解,但图形比较复杂,尤其是液压传动系统中元件数量较多时,绘制起来就很麻烦。图 1-1(b)所示的液压千斤顶和图 1-2 所示的自卸汽车车厢举倾机构的液压传动系统工作原理图是用液压传动系统图形符号绘制而成的,图 1-3 所示的剪切机气压传动系统工作原理图是用气压传动系统图形符号绘制而成的,表明了组成系统的元件、元件间的相互关系及整个液压与气压传动系统的工作原理。这些图简单明了,便于绘制,图形符号表示元件的功能,而不表示元件的具体结构、实际安装位置和参数。图中的符号可参见附录 A 国家标准 GB/T 786.1—2009 中规定的部分液压与气压传动系统图形符号。

1.4 液压传动工作介质(Hydraulic transmission operating medium)

1.4.1 液压传动工作介质的分类(Classification of hydraulic transmission operating medium)

1. 液压传动工作介质按黏度的分类(Hydraulic transmission operating medium viscosity variety)

国家标准《工业液体润滑剂 ISO 黏度分类》(GB/T 3141—1994)对液压及润滑油液的黏度进行了分级,液压及润滑油液的黏度牌号是用 40℃时油液运动黏度(mm^2/s)中心值的近似值表示的。液压传动工作介质常用的有 10、15、22、32、46、68、100、150 号等八个黏度等级,最主要的为 15~68 号。

2. 液压传动工作介质按品种的分类(Hydraulic transmission operating medium variety)

国家标准 GB/T 7631.2—2003(与 ISO 6743/4—1999 等效)对液压传动系统中使用的工作介质进行了分类,见表 1-1。目前 90%以上的液压传动设备采用的工作介质是石油基液压传动工作介质。