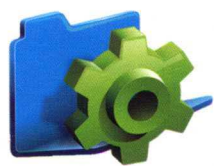


■ 国家骨干高职院校重点建设专业教材



高职机械类
精品教材

液压与气压传动 项目式教程

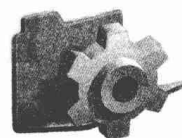
主审 杨海卉

主编 王建军

YEYA YU QIYA CHUANDONG
XIANGMUSHI JIAOCHENG

中国科学技术大学出版社

国家骨干高职院校重点建设专业教材
高职机械类精品教材



液压与气压传动 项目式教程

YEYA YU QIYA CHUANDONG
XIANGMUSHI JIAOCHENG

主 审 杨海卉
主 编 王建军
副主编 袁帮谊 刘欣玉
编 员 (以姓氏笔画为序)
丁啊林 王建军
刘欣玉 袁帮谊
潘 露

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

液压与气压传动,又称液压气动技术,是机械设备中发展非常快的技术之一。特别是近年来,随着机电一体化技术的发展,与微电子、计算机技术相结合,液压与气压传动进入了一个新的发展阶段。

本书是按照项目化教学组织方式进行编写的,共分8个项目,若干个任务。主要内容包括液压传动基础知识、液压元件、液压基本回路、典型液压系统、气压传动基础知识、气源装置与气动元件、气动回路和气压传动系统实例以及液压与气压系统的设计计算,强调了传授知识与培养能力并重的教学思想。

本书图文并茂,通俗易懂。每个项目都有项目能力训练,在内容编排上遵循理论学习的认知规律和操作技能的形成规律,使学生在项目的引领下更好地将理论与实践有机地融合为一体,更加突显了对学生良好的职业情感和职业能力的培养目的。本书可作为高职、中职各机械类专业教学用书和成人高校或高级技能人才的短期培训用书,也可供从事流体传动与控制技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动项目式教程/王建军主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014.8
ISBN 978-7-312-03439-8

I. 液… II. 王… III. ① 液压传动—高等学校—教材 ② 气压传动—高等学校—教材
IV. ①TH137 ②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 110617 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥学苑印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 13.75
字数 352 千
版次 2014 年 8 月第 1 版
印次 2014 年 8 月第 1 次印刷
定价 28.00 元

前 言

液压与气压传动技术,又称液压气动技术,是机械设备中发展非常快的技术之一。特别是近年来,随着机电一体化技术的发展,与微电子、计算机技术相结合,液压与气压传动进入了一个新的发展阶段。

本教材是在院级精品课程“液压与气压传动”教学实践的基础上,结合“工程教育”的教学理念编写而成的。全书包括液压传动和气压传动两大部分内容,以液压与气压传动技术为主线,以项目任务式进行编排;共分8个项目,若干个任务。主要内容包括液压传动基础知识、液压元件、液压基本回路、典型液压系统、气压传动基础知识、气源装置与气动元件、气动回路和气压传动系统实例以及液压与气压系统的设计计算,强调了传授知识与培养能力并重的教学思想,阐明了液压与气动技术的基本原理,着重培养学生分析、设计液压与气动基本回路的能力,安装、调试、使用、维护液压与气动系统的能力,诊断和排除液压与气动系统故障的能力。在编写的过程中充分考虑高职高专教育的职业特色和高职学生的学习特点,在内容的设计上注重理论联系实际,以必需、够用为度,力求做到少而精。

本书由安徽机电职业技术学院王建军老师担任主编,袁帮谊老师、刘欣玉老师担任副主编。参加编写工作的有:安徽机电职业技术学院王建军老师(项目二、四、五、六)、袁帮谊老师(项目八)、刘欣玉老师(项目三)、潘露老师(项目七、思考题、附录)、丁响林老师(项目一)。全书由王建军老师统稿。

本书由安徽机电职业技术学院杨海卉教授担任主审,他对全稿进行了细致详尽的审阅,提出了许多十分有益的建议和宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014年1月2日于芜湖

目 录

前言	(i)
项目一 液压传动的基础知识	(1)
任务一 液压传动系统的认知	(1)
任务二 液压油的认识和选用	(5)
任务三 液体的静力学和动力学规律的认知	(7)
项目二 液压传动系统组成元件	(19)
任务一 液压动力元件的认知	(19)
任务二 液压执行元件的认知	(30)
任务三 液压控制元件的认知	(45)
任务四 液压辅助元件的认知	(71)
项目三 液压基本回路分析	(85)
任务一 压力控制基本回路的认知	(85)
任务二 速度控制基本回路的认知	(90)
任务三 方向控制基本回路的认知	(101)
任务四 多执行元件控制基本回路的认知	(103)
项目四 液压传动工程实例分析	(110)
任务 液压传动系统分析	(110)
项目五 气压传动的基础知识	(124)
任务一 气压传动基础的认知	(124)
任务二 气源装置和辅件的认知	(126)
任务三 气压执行元件的认知	(134)
项目六 气压传动控制元件和控制回路	(141)
任务一 气动控制元件的认知	(141)
任务二 气动控制基本回路	(155)

项目七 液压与气压传动系统设计计算	(166)
任务一 液压传动系统的设计计算	(166)
任务二 气压传动系统的设计计算	(183)
项目八 液压与气压传动系统的常见故障分析与排除	(190)
任务 常见的液压与气压系统故障分析与排除了解	(190)
附录 常用液压与气压元件图形符号(GB/T 786.1—1993)	(205)
参考文献	(211)

项目一 液压传动的基础知识

液压传动是以液体(通常是油液)作为工作介质,利用液体压力来传递动力和进行控制的一种传动方式。它通过液压泵,将电动机的机械能转换为液体的压力能,又通过管路、控制阀等元件,经液压缸(或液压马达)将液体的压力能转换成机械能,驱动负载和实现执行机构的运动。

同其他传动相比,由于液压传动具有明显的优点,因此发展迅速,并得到了广泛的使用,尤其是在高效率的自动化、半自动化机械中,应用更为广泛。当前,液压技术已经成为机械工业发展的一个重要方面。

任务一 液压传动系统的认知

任务导入

- ① 了解液压传动的基本工作原理。
- ② 了解液压传动系统的基本结构组成。
- ③ 了解液压传动的优缺点。

相关知识

一、液压传动的原理

液压传动,是以流体(液压油液)为工作介质进行能量传递和控制的一种传动形式。液压传动的工作原理可以用一个液压千斤顶的工作原理来说明。

如图 1.1 所示的是液压千斤顶的工作原理图。液压千斤顶主要由手动柱塞液压泵(杠杆 1、泵体 2、活塞 3)和液压缸(活塞 11、缸体 12)两大部分构成。大、小活塞与缸体、泵体的接触面之间的良好配合,既能保证活塞移动顺利,又能形成可靠的密封。液压千斤顶的工作过程如下:

工作时,关闭放油阀 8,向上提起杠杆,活塞 3 被带动上升,如图 1.1(b)所示,泵体液压缸 4 的工作容积增大,单向阀 7 由于受液压缸 10 中油液的作用力而关闭,液压缸 4 形成真空,油箱 6 中的油液在大气压力的作用下推开单向阀 5 的钢球,进入并充满液压缸 4。压下杠杆,活塞 3 被带动下移,如图 1.1(c)所示,泵体液压缸 4 的工作容积减小,其内的油液在外力的挤压作用下压力增大,迫使单向阀 5 关闭,而单向阀 7 中的钢球被推开,油液经油管 9 进入缸体液压缸 10,缸体液压缸的工作容积增大,推动活塞 11 连同重物 G 一起上升。反复提、压杠杆就能不断从油箱吸入油液并压入缸体液压缸 10,使活塞 11 和重物不断上升,从而

达到起重的目的。提、压杠杆的速度越快,单位时间内压入缸体液压缸 10 的油液越多,重物上升的速度越快;重物越重,下压杠杆的力就越大。停止提、压杠杆,单向阀 7 被关闭,缸体液压缸中的油液被封闭,此时,重物保持在某一位置不动。

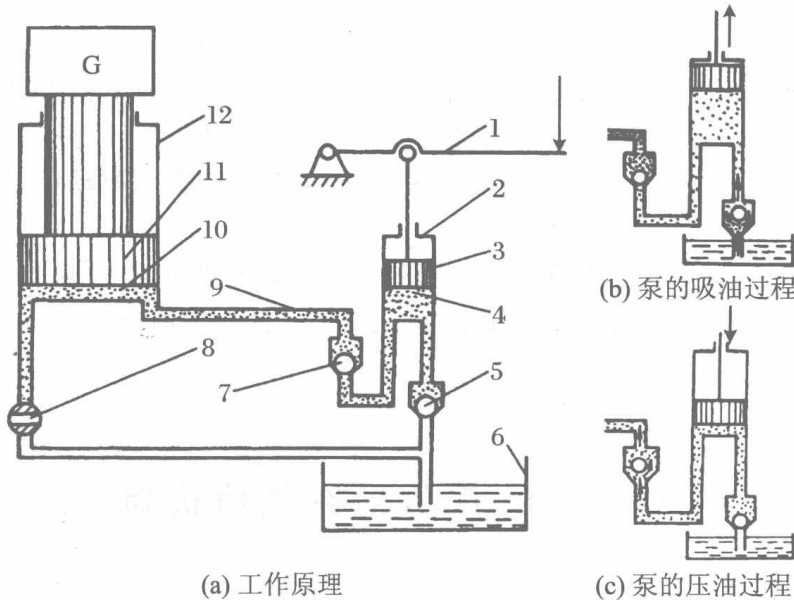


图 1.1 液压千斤顶的工作原理

1. 杠杆;2. 泵体;3,11. 活塞;4,10. 液压缸;5,7. 单向阀;6. 油箱;8. 放油阀;9. 油管;12. 缸体

下面对其运动关系进行分析。

1. 压力与负载的关系

在图 1.1 中,设缸 10 的活塞面积为 A_2 ,负载力为 G ,缸 10 产生的液体压力(压强)为 $p_2 = G/A_2$ 。

由帕斯卡原理知,缸 4 的压力 p_1 应等于缸 10 中的压力 p_2 ,即 $p_1 = p_2 = p$ 。

为了克服负载 G 使缸 10 的大活塞能向上运动,作用在缸 1 小活塞上的力 F_1 和压力 p_1 与作用在缸 6 大活塞上的负载力 G 和压力 p_2 之间分别应有如下关系:

$$F_1 = p_1 A_1 = p A_1$$

$$G = p_2 A_2 = p A_2$$

液体的压力可以表示为

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{G}{A_2}$$

在 A_1 、 A_2 一定时,负载 G 越大,系统中所需要的压力 p 也越高,所以液压传动系统的工作压力取决于外负载。

2. 速度与流量的关系

当如图 1.1 所示的液压系统工作时,缸 1 中排出的液体体积必然等于进入缸 6 中的液体体积。设缸 1 活塞的位移为 S_1 ,缸 6 活塞的位移为 S_2 ,则有

$$S_1 A_1 = S_2 A_2$$

将上式两边同除以运动时间 t ,得

$$q_1 = v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_2$$

此时,缸 6 上升的速度为

$$v_2 = \frac{q_2}{A_2}$$

由上述可知,液压传动是靠密闭工作容腔容积变化相等的原则来实现运动传递的,所以液压传动系统的运动速度快慢取决于输入流量的大小。

3. 液压功率

由图 1.1 可知,缸 6 工作时的瞬时输出功率等于速度与负载力的乘积,即

$$P = pA_1 v_1 = pA_2 v_2$$

因此,液压传动系统的液压输出功率等于系统输出流量和压力两个基本参数的乘积。

二、液压传动系统举例

图 1.2(a)为一简化了的机床工作台液压传动系统。其动力装置为液压泵 3,执行装置为双活塞杆液压缸 6,控制调节装置包括人力控制(手动)三位四通换向阀 7、节流阀 8、溢流阀 9,辅助装置包括油箱 1、过滤器 2、压力计 4 和管路等。

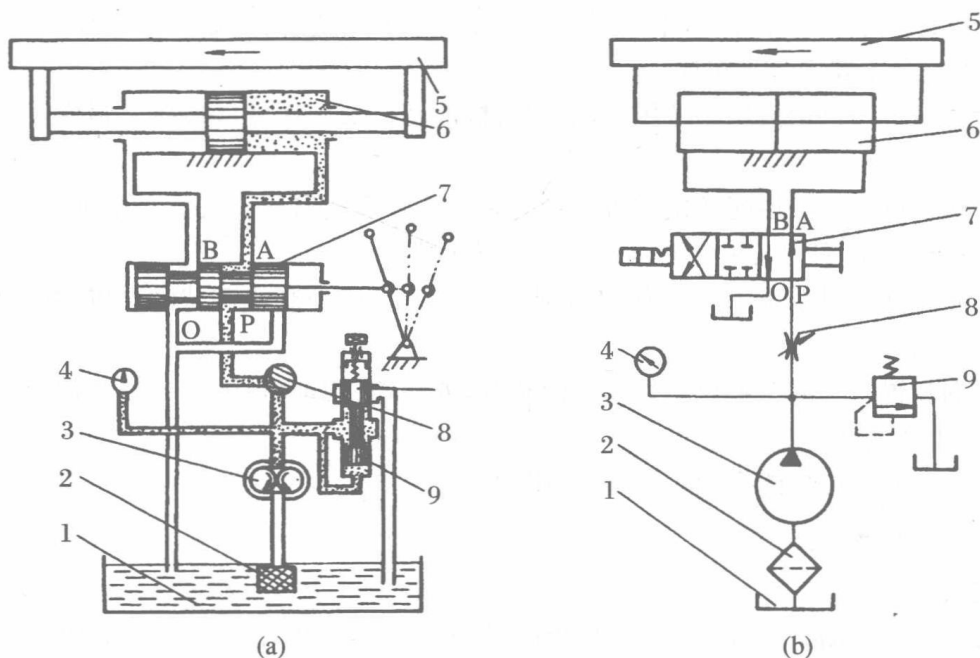


图 1.2 机床工作台液压传动系统

1. 油箱; 2. 过滤器; 3. 液压泵; 4. 压力计; 5. 机床工作台; 6. 液压缸; 7. 换向阀; 8. 节流阀; 9. 溢流阀

液压泵由电动机驱动进行工作,油箱中的油液经过滤器被吸,流往液压泵吸油口,并经液压泵升压后向系统输出。油液经节流阀、换向阀的 P-A 通道(换向阀的阀芯在图示的左边位置)进入液压缸的右腔,推动活塞连同工作台 5 向左运动,液压缸左腔的油液则经换向阀的 B-O 通道流回油箱。节流阀开口的大小调节油液的流量,从而调节液压缸连同工作台的运动速度。由于节流阀开口较小,在开口前后油液存在压力差,当系统压力达到某一数值时,溢流阀被打开,使系统中多余的油液经溢流阀开口流回油箱。当换向阀的阀芯移至右边位置时,来自液压泵的压力油液经换向阀的 P-B 通道进入液压缸的左腔,推动活塞连同工作台向右运动,液压缸右腔的油液则经换向阀的 A-O 通道流回油箱。

当换向阀的阀芯处于中间位置时,换向阀的进、回油口全被堵死,使液压缸两油腔既不进油也不回油,活塞停止运动。此时,液压泵输出的压力油液全部经过溢流阀流回油箱,即

在液压泵继续工作的情况下,也可以使工作台在任意位置停止。

三、液压元件的图形符号

如图 1.1 和图 1.2(a)所示的液压千斤顶和机床工作台液压系统结构原理图具有直观性强、容易理解的特点,但绘制较复杂,特别是系统中元件较多时,绘制更为困难。如果采用图形符号来代表各液压元件,绘制液压系统原理图将既方便又清晰。图 1.2(b)就是用图形符号绘制的机床工作台液压系统图。图中的图形符号只表示元件的功能、操作(控制)方法及外部接口,不表示元件的具体结构及参数、接口的实际位置和元件的安装位置。《液压气动图形符号》(GB/T 786.1—1993)对液压气动元(辅)件的图形符号作了具体规定,常用液压元件及液压系统其他有关装置或器件的图形符号见附录。

任务实施

一、液压传动系统的组成

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 5 个主要部分来组成:

① 能源装置 供给液压系统压力油,把机械能转换成液压能的装置。最常见的形式是液压泵。

② 执行元件 把液压能转换成机械能的装置。其形式有作直线运动的液压缸,有作回转运动的液压马达,它们又称为液压系统的执行元件。

③ 控制元件 对系统中的压力、流量或流动方向进行控制或调节的装置,如溢流阀、节流阀、换向阀等。

④ 辅助装置 上述三部分之外的其他装置,如油箱、滤油器、油管等。它们对保证系统正常工作是必不可少的。

⑤ 工作介质 传递能量的流体,即液压油。

二、液压传动的优缺点

1. 优点

① 由于液压传动是由油管连接的,所以借助油管的连接可以方便灵活地布置传动机构,这是比机械传动优越的地方。

② 液压传动装置的重量轻、结构紧凑、惯性小。

③ 可在大范围内实现无级调速。借助阀或变量泵、变量马达,可以实现无级调速,调速范围可达 1:2 000,并可在液压装置运行的过程中进行调速。

④ 传递运动均匀平稳,负载变化时速度较稳定。

⑤ 液压装置易于实现过载保护。借助于设置溢流阀等,同时液压件能自行润滑,因此使用寿命长。

⑥ 液压传动易于实现自动化。借助于各种控制阀,特别是采用液压控制和电气控制结合使用时,能很容易地实现复杂的自动工作循环,而且可以实现遥控。

⑦ 液压元件已实现了标准化、系列化和通用化,便于设计、制造和推广使用。

2. 缺点

① 液压系统中的漏油等因素,影响运动的平稳性和正确性,使得液压传动不能保证严格的传动比。

② 液压传动对油温的变化比较敏感,温度变化时,液体黏性变化,引起运动特性的变化,使得工作的稳定性受到影响。所以它不宜在温度变化很大的环境下工作。

③ 为了减少泄漏,以及为了满足某些性能上的要求,液压元件的配合件制造精度要求较高,加工工艺较复杂。

④ 液压传动要求有单独的能源,不像电源那样使用方便。

⑤ 液压系统发生故障时,不易检查和排除。

任务二 液压油的认识和选用

任务导入

① 了解液压油的主要物理性质。

② 掌握液压油的选用方法。

相关知识

一、液压油的主要物理性质

1. 液体的密度

密度即单位体积液体的质量。体积为 V 、质量为 m 的液体,其密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

矿物型液压油的密度随温度和压力的变化而变化。压力增加,密度加大;温度升高而密度减小,但其变动值很小,可认为其为常数,一般矿物油系液压油在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时密度在 $850\sim 960\text{ kg/m}^3$ 之间。

2. 液体的可压缩性

可压缩性是指液体受压力作用而发生体积变化的性质。

液体的压缩性可用体积压缩系数 $k(\text{m}^2/\text{N})$ 来表示:

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V}$$

液体体积压缩系数的倒数,称为液体的体积弹性模量,以 K 表示,即 $K = 1/k$ 。

液压油的体积模量为 $(1.4\sim 1.9) \times 10^9\text{ N/m}^2$ 。对于液压系统来说,一般认为其不可压缩,但在混入空气后,动态性能要求提高,在压力变化范围大的高压系统中要考虑可压缩性的影响。实际计算时一般取其体积模量为 $(0.7\sim 1.4) \times 10^9\text{ N/m}^2$ 。

3. 液体的黏性

液体在外力作用下流动(或有流动趋势)时,分子间的内聚力为阻止分子间的相对运动而产生一种内摩擦力,这种性质叫作液体的黏性。液体只有在流动(或有流动趋势)时才会呈现黏性,静止液体是不呈现黏性的。

黏性使流动液体内部各处的速度不相等,以图 1.3 为例,若两平行平板间充满液体,下平板不动,而上平板以速度 v_0 向右平动。由于液体的黏性作用,紧靠下平板和上平板的液

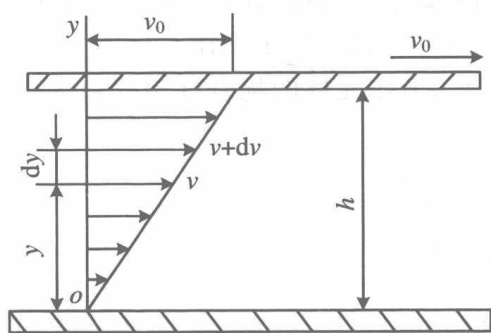


图 1.3 液体的黏性示意图

体层速度分别为 0 和 v_0 。通过实验测定得出,液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_t ,与液层接触面积 A 和液层间的速度梯度 dv/dy 成正比,即

$$F_t = \mu A \frac{dv}{dy}$$

式中, μ 为比例常数,称为黏性系数或黏度。如以 τ 表示切应力,即单位面积上的内摩擦力,则

$$\tau = \frac{F_t}{A} = \mu \frac{dv}{dy}$$

液体的黏性用黏度表示,表示方式有动力黏度、运动黏度、相对黏度。

(1) 动力黏度

动力黏度又称绝对黏度,用 μ 表示:

$$\mu = \frac{F}{A \frac{dv}{dy}} = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}}$$

物理意义:当速度梯度为 $dv/dy = 1$ (即单位速度梯度)时,流动液体内接触液层间单位面积上的内摩擦力。法定计量单位为帕·秒(Pa·s)。

(2) 运动黏度

运动黏度用 ν 表示:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

运动黏度没有明确的物理意义。在工程中,液体的黏度常用这种表示方法。法定计量单位为 m^2/s 。以前使用的单位为 cSt(厘斯),关系为 $1 m^2/s = 10^6 cSt = 10^6 mm^2/s$ 。

(3) 相对黏度(条件黏度)

根据测量的仪器和条件不同分为:美国的赛氏黏度(SSU)、英国的雷氏黏度(R)和我国及欧洲的恩氏黏度($^{\circ}E$)。

恩氏黏度:它表示 200 mL 被测液体在 $t^{\circ}C$ 时,通过恩氏黏度计小孔($\phi = 2.8 mm$)流出所需的时间 t_1 ,与同体积 $20^{\circ}C$ 的蒸馏水通过同样小孔流出所需时间 t_2 的比值。

恩氏黏度与运动黏度(mm^2/s)之间的换算关系为

$$\nu = 8 \text{ 恩氏黏度值} - \frac{8.64}{\text{恩氏黏度值}} \quad (1.35 < \text{恩氏黏度值} \leq 3.2)$$

$$\nu = 7.6 \text{ 恩氏黏度值} - \frac{4}{\text{恩氏黏度值}} \quad (\text{恩氏黏度值} > 3.2)$$

液体的黏度随液体的压力和温度而变。对液压传动工作介质来说,压力增大时,黏度增大。在一般液压系统使用的压力范围内,增大的数值很小,可以忽略不计。但液压传动工作介质的黏度对温度的变化十分敏感,称为“黏温特性”,温度升高,黏度下降。这个变化率的大小直接影响液压传动工作介质的使用,其重要性不亚于黏度本身。

液压传动工作介质还有一些其他性质,如稳定性(热稳定性、氧化稳定性、水解稳定性、剪切稳定性等)、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性以及相容性(对所接触的金属、密封材料、涂料等作用程度)等,它们对工作介质的选择和使用有重要影响。这些性质需要在精炼的矿物油中加入各种添加剂来获得,其含义较为明显,不多作解释,可参阅有关资料。

二、液压油的牌号和选用

正确而合理地选用液压油,是保证液压设备高效率正常运转的前提。

选用液压油时,可根据液压元件生产厂样本和说明书所推荐的品种号数来选用液压油,或者根据液压系统的工作压力、工作温度、液压元件种类及经济性等因素全面考虑,一般是先确定适用的黏度范围,再选择合适的液压油品种,同时还要考虑液压系统工作条件的特殊要求。如在寒冷地区工作的系统则要求油的黏度指数高、低温流动性好、凝固点低;伺服系统则要求油质纯、压缩性小;高压系统则要求油液抗磨性好。在选用液压油时,黏度是一个重要的参数。黏度的高低将影响运动部件的润滑、缝隙的泄漏以及流动时的压力损失、系统的发热升温等。所以,在环境温度较高,工作压力高或运动速度较低时,为减少泄漏,应选用黏度较高的液压油;否则相反。

液压油(液)的品种很多,主要分为两种:矿物型液压油和难燃型液压油,另外还有一些专用液压油。

液压油的牌号(即数字),表示在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下油液运动黏度的平均值(单位为 mm^2/s)。过去的牌号,是指在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时油液运动黏度的平均值。常用黏度等级为 $10\sim 100$ 号,主要集中在 $15\sim 68$ 号,最常用的为 $32, 46, 68$ 号。

例如,液压油代号为 L-HM32,则其含义为:L——润滑剂类;H——液压油组;M——防锈、抗氧化和抗磨型;32——黏度等级 $32\text{ mm}^2/\text{s}$ 。

任务实施

对于液压油(液)的选择,需要查阅液压设计相关手册。

① 选择品种 根据液压系统所处的工作环境、系统的工况条件(压力、温度和液压泵类型)以及技术经济性(价格、使用寿命等),再按液压油(液)性能综合考虑选择。

② 选择黏度 根据系统的工作温度范围、液压泵的类型、工作压力等因素确定。

任务三 液体的静力学和动力学规律的认知

任务导入

- ① 了解液体的静力学及其重要特征。
- ② 了解液体流动的性质及规律。
- ③ 了解液压传动中的冲击和空穴现象。

相关知识

一、液体静力学基础

液体静力学主要是讨论液体静止时的平衡规律及其应用。“液体静止”指的是液体内部质点间没有相对运动,不呈现黏性,至于盛装液体的容器,不论它是静止的或是匀速、匀加速运动都没有关系。

1. 静压力及其特征

作用在液体上的力有两种类型：一种是质量力，另一种是表面力。

质量力作用在液体的所有质点上，它的大小与质量成正比，如重力、惯性力等。单位质量液体受到的质量力称为单位质量力，在数值上等于重力加速度。

表面力作用于所研究液体的表面上，如法向力、切向力。表面力可以是其他物体（例如活塞、大气层）作用在液体上的力，也可以是一部分液体间作用在另一部分液体上的力。对于液体整体来说，其他物体作用在液体上的力属于外力，而液体间的作用力属于内力。由于理想液体质点间的内聚力很小，液体不能抵抗拉力或切向力，即使是微小的拉力或切向力都会使液体发生流动。因为静止液体不存在质点间的相对运动，也就不存在拉力或切向力，所以静止液体只能承受压力。

所谓静压力是指静止液体单位面积上所受的法向力，用 p 表示。

液体内某质点处的法向力 ΔF 对其微小面积 ΔA 的极限称为压力 p ，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

若法向力均匀地作用在面积 A 上，则压力表示为

$$p = \frac{F}{A}$$

式中， A 为液体有效作用面积， F 为液体有效作用面积 A 上所受的法向力。

压力的法定单位为 Pa 或 N/m^2 ，工程上常用 kPa 或者 MPa ， $1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ MPa}$ ，常用压力单位换算见表 1.1。

表 1.1 常用压力单位

牛/厘米 ² (Pa)	公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²)	巴 (bar)	标准大气压 (atm)	工程大气压 (at)	毫米水柱 (mmH ₂ O)	毫米水银柱 (mmHg)
10 ⁵	1.019 72	1	1.019 72	0.986 923	1.019 72×10 ⁴	7.500 62×10 ²

静压力具有下述两个重要特征：

- ① 液体静压力垂直于作用面，其方向与该面的内法线方向一致。
- ② 静止液体中，任何一点所受到的各方向的静压力都相等。

2. 液体静压力基本方程

在重力作用下的静止液体，其受力情况如图 1.4(a)所示。

由图 1.4 分析可知， A 点所受的压力为

$$p = p_0 + \rho gh$$

式中， g 为重力加速度，此表达式即为液体静压力的基本方程。由此式可知：

- ① 静止液体内任一点处的压力由两部分组成，一部分是液面上的压力，另一部分是液体重力所产生的压力。
- ② 同一容器中同一液体内的静压力随液体深度的增加而线性增加。
- ③ 连通器内同一液体中深度相同的各点压

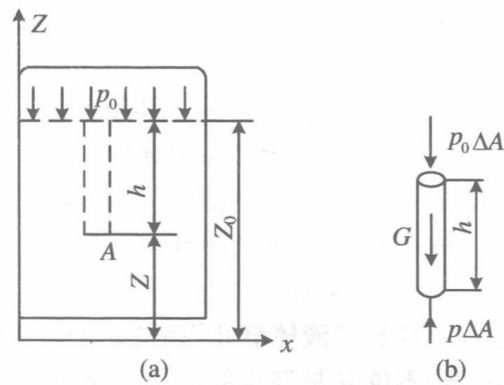


图 1.4 重力作用下的静止液体

力都相等。由压力相等的点组成的面称为等压面。重力作用下静止液体中的等压面是一个水平面。

3. 液体压力的传递

对于密封容器内的静止液体,当边界上的压力 p 发生变化时,例如增加 Δp ,则容器内任意一点的压力将增加同一数值 Δp 。也就是说,在密封容器内施加于静止液体任一点的压力将以等值传递到液体各点。这就是帕斯卡原理或静压传递原理。

在液压传动系统中,通常是外力产生的压力要比液体自重所产生的压力大得多,自重所产生的压力可忽略不计。因此,我们认为静止液体内部各点的压力处处相等。

根据帕斯卡原理和静压力的特性,液压传动不仅可以进行力的传递,而且还能将力放大或改变力的方向。

如图 1.5 所示的是应用帕斯卡原理推导压力与负载关系的实例。图中垂直液压缸(负载缸)的截面积为 A_1 ,水平液压缸截面积为 A_2 ,两个活塞上的外作用力分别为 F_1 、 F_2 ,则缸内压力分别为 $p_1 = F_1/A_1$, $p_2 = F_2/A_2$ 。由于两缸充满液体且互相连接,根据帕斯卡原理有 $p_1 = p_2$ 。因此有

$$F_1 = \frac{F_2 A_1}{A_2}$$

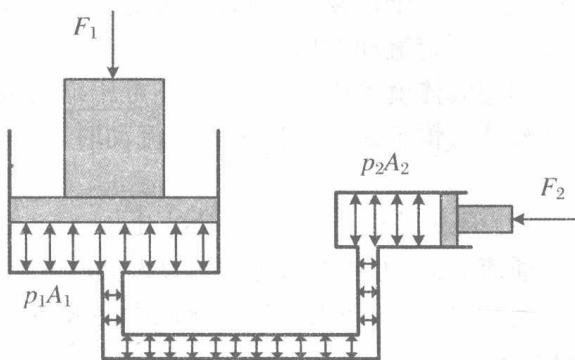


图 1.5 静压传递原理应用实例

上式表明,只要 A_1/A_2 足够大,用很小的力 F_1 就可产生很大的力 F_2 。液压千斤顶就是按此原理制成的。

如果垂直液压缸的活塞上没有负载,即 $F_1 = 0$,则当略去活塞重量及其他阻力时,不论怎样推动水平液压缸的活塞也不能在液体中形成压力。这说明液压系统中的压力是取决于负载的,这是液压传动的一个基本概念。

4. 相对压力、绝对压力和真空度

相对于大气压(即以大气压为基准零值时)所测量到的一种压力,称它为相对压力或表压力。另一种是以绝对真空为基准零值时所测得的压力,称为绝对压力。当绝对压力低于大气压时,习惯上称为出现真空。因此,某点的绝对压力比大气压小的那部分数值叫作该点的真空度。

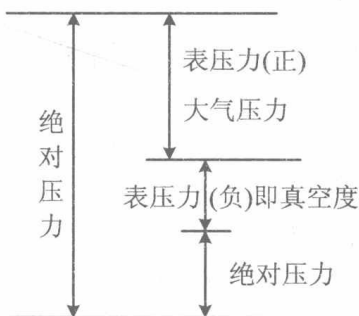


图 1.6 相对压力、绝对压力和真空度

三者之间的相对关系如图 1.6 所示。

5. 液体静压力对固体壁面的作用力

静止液体和固体壁面相接触时,固体壁面上各点在某一方向上所受静压作用力的总和,便是液体在该方向上作用于固体壁面上的力。在液压传动计算中质量力可以忽略,静压力处处相等,所以可认为作用于固体壁面上的压力是均匀分布的。

当固体壁面是曲面时,作用在曲面各点的液体静压力是不平行的,曲面上液压作用力在某一方向上的分力等于液体静压力与曲面在该方向的垂直面内投影面积的乘积。

二、液体动力学基础

液体动力学主要讨论 3 个基本方程式,即液流的连续性方程、伯努利方程和动量方程。它们是刚体力学中的质量守恒定理、能量守恒定理及动量守恒原理在流体力学中的具体应用。前两个方程描述了压力、流速与流量之间的关系,以及液体能量相互间的变换关系,后者描述了流动液体与固体壁面之间作用的情况。液体是有黏性的,并在流动中呈现出来。

1. 基本概念

(1) 理想液体与恒定流动

液体具有黏性,并在流动时表现出来,因此研究流动液体时就要考虑其黏性,而液体的黏性阻力是一个很复杂的问题,这就使我们对流动液体的研究变得复杂。因此,我们引入理想液体和恒定流动的概念。

理想液体就是指没有黏性、不可压缩的液体。我们把既具有黏性又可压缩的液体称为实际液体。恒定流动是指液体在流动时,液体任一点压力、速度、密度都不随时间变化的流动形式。

(2) 通流截面、流量和平均流速

通流截面:液体在管道中流动时,垂直于流动方向的截面称为通流截面。

流量:单位时间内通过通流截面的液体的体积称为流量,用 q 表示,常用单位为 L/min 和 m^3/s 。

对于微小流束,通过 dA 上的流量为 dq ,其表达式为

$$dq = v dA$$

则整个通流截面的流量为

$$q = \int_v v dA$$

平均流速:在实际液体流动中,由于黏性摩擦力的作用,通流截面上流速 v 的分布规律难以确定,因此引入平均流速的概念,即认为通流截面上各点的流速均为平均流速,用 v_a 来表示,则通过通流截面的流量就等于平均流速乘以通流截面积。令该流量与上述实际流量相等,得

$$q = \int_v v dA = v_a A$$

则平均流速为

$$v_a = \frac{q}{A}$$

2. 流量连续性方程

连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的一种表达形式。油液的可压缩性极小,通常可视作理想液体。

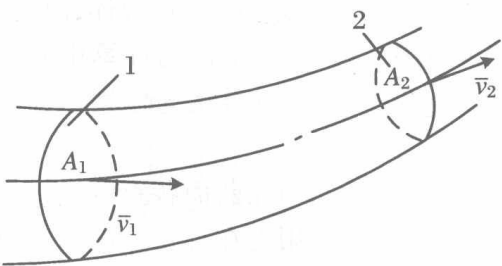


图 1.7 液流连续性原理

在如图 1.7 所示的管路中,流过截面 1 和截面 2 的质量相等,即

$$\rho_1 \bar{v}_{a1} A_1 = \rho_2 \bar{v}_{a2} A_2$$

理想液体忽略了可压缩性,由于 $\rho_1 = \rho_2$,得

$$\bar{v}_{a1} A_1 = \bar{v}_{a2} A_2$$

或写成

$$q = A v_a = \text{常数}$$

这称为流体连续性方程。理想液体(不可压缩的液体)在无分支管路中恒定流动时,流过任一通流截面的流量相等。也就是流速和通流截面面积成反比,管路截面面积小(管径细)的地方平均流速大,管路截面面积大(管径粗)的地方平均流速小。

3. 伯努利方程

伯努利方程是能量守恒定律在流体力学中的一种表达形式。如图 1.8 所示,密度为 ρ 的液体在通道内流动,重力加速度为 g ,现任取两通流截面 1 和截面 2 作为研究对象,两截面至水平参考面的距离分别为 h_1 和 h_2 ,流速分别为 v_1 和 v_2 ,压力分别为 p_1 和 p_2 。此时液流单位质量在截面 1 和截面 2 的能量构成见表 1.2。

表 1.2 能量构成(单位质量)

	截面 1	截面 2
压力能	$\frac{p_1}{\rho}$	$\frac{p_2}{\rho}$
位能	gh_1	gh_2
动能	$\frac{1}{2} v_1^2$	$\frac{1}{2} v_2^2$

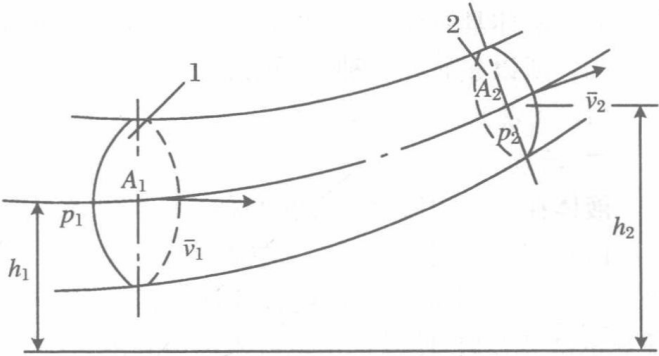


图 1.8 伯努利方程示意图

根据能量守恒定律得

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{1}{2} v_2^2 = \text{常数}$$

上式就是伯努利方程。由此方程可知,在重力作用下,在通道内流动的液体具有 3 种形式的能量,即压力能、位能和动能。这 3 种形式的能量在液体流动过程中可以相互转化,但其总和在各个截面处均为定值。

实际液体在通道内流动时,液体内摩擦力作用会造成能量损失;通道局部形状和尺寸的骤然变化会引起液流扰动,相应也会造成能量损失。实际液体的伯努利方程需考虑能量的损失。因此,实际液体的伯努利方程为

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{1}{2} a_1 v_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{1}{2} a_2 v_2^2 + gh_w$$

式中, a_1 和 a_2 为动能修正系数,紊流取 1,层流取 2; gh_w 为能量损失。

4. 动量方程

动量方程是动量定理在流体力学中的具体应用,可用来计算流动液体作用在限制其流动的固体壁面上的总作用力。

$$\sum F = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t}$$

将 $m = \rho V$ 和 $\frac{V}{\Delta t} = q$ 代入上式得

$$\sum F = \rho q (v_2 - v_1)$$

作用在液体控制体积上的外力总和等于单位时间内流出控制表面与流入控制表面的液体的动量之差。

注意: