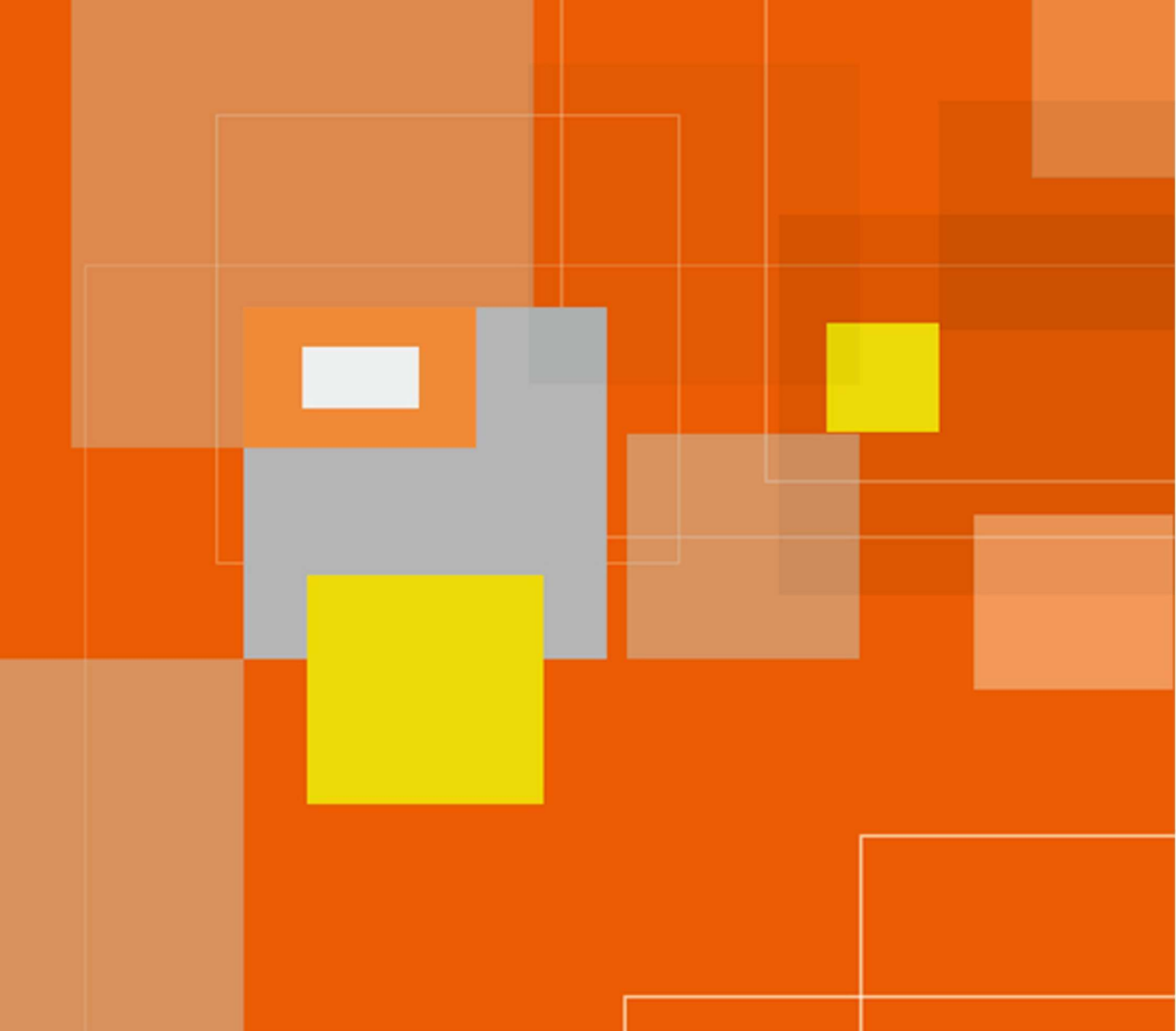




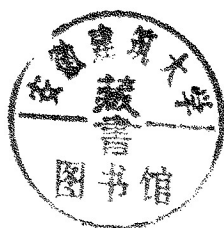
液压与气动控制及应用

● 主编 张帆 李梅红

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

液压与气动控制及应用

主 编 张 帆 李梅红
副主编 岳 鹏 胡玉文
主 审 闫嘉琪



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气动控制及应用 / 张帆, 李梅红主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.8
ISBN 978-7-5682-6090-9

I. ①液… II. ①张… ②李… 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 (2018) 第 185247 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 388 千字

版 次 / 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

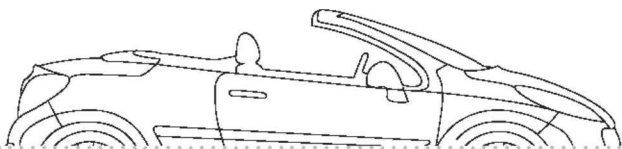
定 价 / 63.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李 洋



前言

P R E F A C E

本书包括液压传动、气压传动、气-电综合系统三部分内容，内容选取上按照由简单到复杂的认知规律，如“系统的认知→系统的分析和构建→系统的使用与维护→综合控制系统的构建”，共设置七个学习项目。每个学习项目根据需要选取贴近生活和生产实际的若干个工作任务，主要论述了液压与气动的基础知识、液压与气动元件的功能及选用、液压与气动回路的功能和应用、液压与气动系统的分析及构建、液压与气动系统的使用维护及故障排除、基于 PLC 控制的气-电综合技术的构建等。

本教材的编写在形式上以读者为本，利用增强现实（AR）技术，提供界面友好、形象直观、条理清晰、便于学习的交互式学习环境，并提供图文、声像并茂的多种资源；在内容上从应用角度出发，力求贯彻少而精、理论联系实际的原则，突出基本知识和基本技能的培养，主要特点体现为：

（1）通过自主开展的人机交互方式，提供多种直观形象的动画、视频及虚拟仿真三维交互模型，展现学生不能直接观察到的液压与气动元件的内部结构及各种回路的控制原理，既实现了教师日常教学的信息化，又提高了学生的自主学习兴趣和能力，从而方便了“教”与“学”的过程。

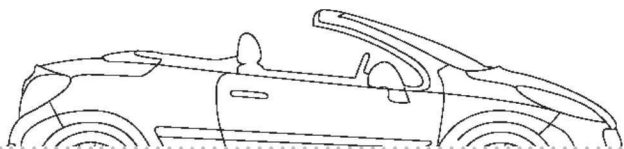
（2）结合现代技术发展需要和工业实际应用情况，增加了新型元件比例阀和插装阀的应用及基于 PLC 的综合控制技术；同时做到气动与液压并重，既考虑到两个内容的独立性和完整性，又考虑到两者的共同点，力求读者能真正掌握液压与气动控制技术。

（3）所有工作任务均取材于实际生产中的应用，与生产实际紧密结合。各任务基本按照“任务引入→任务分析→相关知识→任务实施→技能训练→知识拓展→思考与练习”的教学模式来实施，重视知识、能力、素质的协调发展，体现了“教、学、做合一”的教育特色，实现了学生与企业员工的无缝对接。

本书由张帆、李梅红担任主编，胡玉文、岳鹏担任副主编，其中张帆负责全书的统筹工作，并承担项目一、项目二中任务 4、项目五、项目六、项目七及附录的编写；项目二中任务 6、7 及项目四由李梅红编写；项目二中任务 1、2、3、5、8 由岳鹏编写；项目三由胡玉文编写。本书由闫嘉琪担任主审。

鉴于编者学识和经验有限，书中难免有错漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者



目 录

C O N T E N T S

项目一 液压传动认知	1
任务1 认识液压系统	1
任务2 认识压力和流量	8
项目二 液压系统的分析与构建	20
任务1 液压机动力元件的选择	20
任务2 自卸式汽车执行元件的选择	36
任务3 汽车起重机支腿锁紧回路的构建	51
任务4 粘压机调压回路的构建	63
任务5 液压钻床顺序控制回路的构建	72
任务6 车床进给系统速度控制回路的构建	85
任务7 液压站的组成及使用	101
任务8 注塑机液压系统的构建	110
项目三 液压系统的使用及维护	126
任务1 组合机床液压系统分析及使用维护	126
任务2 汽车起重机液压系统故障分析及排除	136
项目四 气压传动认知	146
任务1 认识气压传动系统	146
任务2 认识气源装置	150
项目五 气动系统分析与构建	160
任务1 夹紧机构执行元件的选择	160
任务2 板材成型装置气动系统的构建	168
任务3 剪板机气动控制系统的构建	181
任务4 打印机气动控制系统的构建	189
任务5 塑料圆管熔接装置气动控制系统的构建	202
项目六 气动系统的使用及维护	209
任务1 客车车门气动系统的使用及维护	209
任务2 加工中心气动系统的故障分析与排除	215



项目七 气-电综合控制系统构建	224
任务1 认识 PLC	224
任务2 气动打印机气-电控制系统构建	231
任务3 雨伞试验机气-电控制系统构建	236
任务4 包裹提升装置液-电控制系统构建	242
附录 常用液压与气动元件图形符号 (GB/T 786.1—2009)	247
参考文献	256

项目一

液压传动认知

本项目以工程实践中常用的液压传动系统为载体分析其工作过程，使学生掌握液压传动的工作原理、系统的组成及特点；认识液压系统中的两个重要的参数——压力和流量；了解液压系统在工程实际中的应用。

任务1 认识液压系统

知识目标

- ◇ 掌握液压传动系统的基本原理和组成；
- ◇ 了解液压传动系统的优缺点、应用及发展。

技能目标

- ◇ 能正确区分液压传动系统的各组成部分；
- ◇ 会分析液压传动系统各部分的作用。



液压传动系统应用非常广泛，在工程机械中，如液压千斤顶（图 1-1-1）、挖掘机、推土机、装载机、压路机等；在农业机械中，如联合收割机等；在汽车行业，如液压自卸式汽车、高空作业车、汽车起重机等；在机床设备中，如外圆磨床（图 1-1-2）、冲床等；在冶金行业中，如加热炉、轧钢机、压力机等都用到液压传动系统。那么什么是液压传动系统？它是怎样工作的？



图 1-1-1 液压千斤顶



图 1-1-2 外圆磨床



任务分析

如图 1-1-1 所示的液压千斤顶可用来举升重物,图 1-1-2 所示的外圆磨床工作台可做纵向往复运动,两者的运动都是通过液压传动系统来实现的。液压传动和机械传动(如齿轮传动、带传动、链传动)、电力传动等传动方式一样,是进行能量传递和控制的一种传动形式。

相关知识

液压传动是利用液体作为传动介质对能量进行传递和控制的一种传动形式,从而实现各种机械的传动和自动控制。相对于机械传动来说,流体传动是一门新技术。液压传动是利用各种液压元件组成能够实现特定功能的基本回路,再由若干基本回路有机组合成能完成一定控制功能的传动系统,从而进行能量的传递、转换与控制。

一、液压传动的工作原理

1. 液压千斤顶的工作原理

液压千斤顶(图 1-1-1)是一种起重高度较低(低于 1 m)的最简单的起重设备,它主要用于厂矿和交通运输等部门,用作车辆修理及其他起重和支撑等工作。

图 1-1-3 所示为液压千斤顶的工作原理图,其结构主要由手动柱塞液压泵(杠杆手柄 1、油缸 2、活塞 3)和液压缸(活塞 8、油缸 9)两大部分构成。工作时关闭截止阀 11,当向上提杠杆手柄 1 时,活塞 3 被带动上升,泵体油腔中的工作容积增大而产生真空,由于单向阀 7 反向关闭,油箱 12 中的油液在大气压力的作用下,打开单向阀进入并充满泵体油腔,此过程为吸油过程;当压下杠杆手柄 1 时,活塞 3 被带动下移,泵体油腔中的工作容积减小而压力增大,由于单向阀 4 反向关闭,泵体油腔中受到挤压的油液只能打开单向

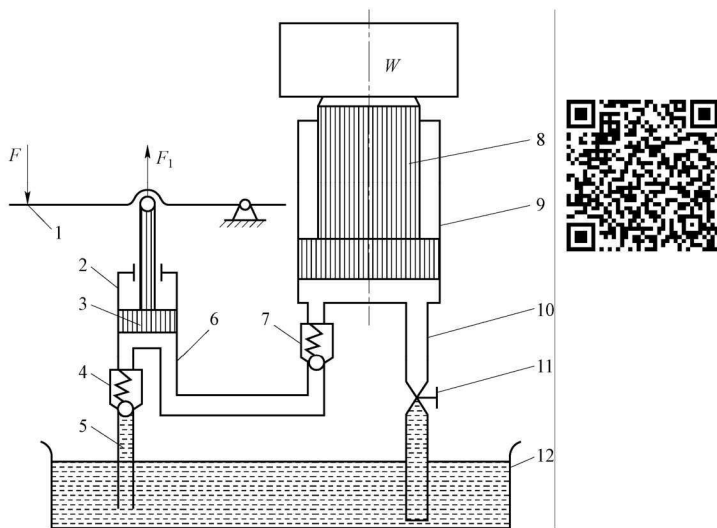


图 1-1-3 液压千斤顶工作原理图

1—杠杆手柄; 2, 9—小油缸; 3, 8—小活塞; 4, 7—单向阀; 5—吸油管; 6, 10—管道; 11—截止阀; 12—油箱

阀 7 进入油缸 9 的下油腔，此过程为压油过程；当油液压力升高到能够克服重物 W 时，即可举起重物。

2. 外圆磨床工作台的液压传动系统

M1432A 型万能外圆磨床（图 1-1-2）是应用最普遍的外圆磨床，主要用于磨削外圆柱面和圆锥面，还可以磨削内孔和台阶面等。图 1-1-4 所示为其外形图，其中机床工作台的纵向往复运动、砂轮架的快速进退运动和尾座套筒的缩回运动都是以油液为工作介质，利用液压传动系统来传递动力的。下面主要分析磨床工作台的液压传动系统。

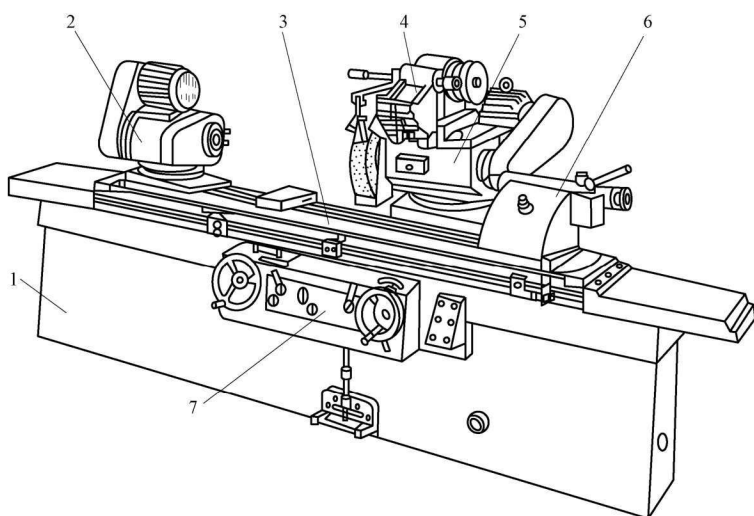


图 1-1-4 M1432A 型外圆磨床外形图

1—床身；2—工件头架；3—工作台；4—内磨装置；5—砂轮架；6—尾座；7—控制箱

图 1-1-5 所示为外圆磨床工作台的液压系统结构原理图，其工作过程如下：液压泵 3 在电动机（图中未画出）的带动下旋转，油液由油箱 1 经过滤器 2 被吸入液压泵，然后压力油将通过节流阀 5 和三位四通手动换向阀 6，如果换向阀 6 此时处于如图 1-1-5 (b) 所示的状态，油液将进入液压缸 7 的左腔，推动活塞和工作台 8 向右移动，液压缸 7 右腔的油液经换向阀 6 排回油箱。如果将换向阀 6 转换成如图 1-1-5 (c) 所示的状态，则压力油进入液压缸 7 的右腔，推动活塞和工作台 8 向左移动，液压缸 7 左腔的油液经换向阀 6 排回油箱。工作台 8 的移动速度由节流阀 5 来调节，当节流阀开度增大时，进入液压缸 7 的油液增多，工作台的移动速度增大；当节流阀关小时，工作台的移动速度减小。液压泵 3 输出的压力油除了进入节流阀 5 以外，还通过打开溢流阀 4 流回油箱。如果将手动换向阀 6 转换成如图 1-1-5 (a) 所示的状态，液压泵输出的油液经手动换向阀 6 截止，因此只能通过溢流阀 4 流回油箱，这时工作台停止运动。

在工作过程中，液压泵 3 输出的压力油一部分进入节流阀 5，另外一部分打开溢流阀 4 流回油箱。液压泵的工作压力由溢流阀 4 调定，其调定值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，因此溢流阀对整个系统还能起过载保护作用。

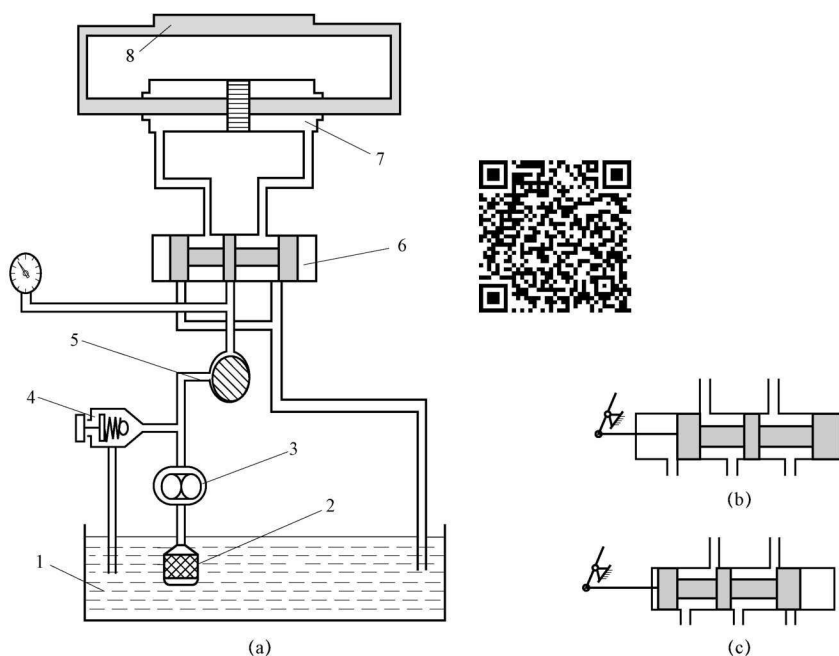


图 1-1-5 外圆磨床工作台液压系统结构原理图

(a) 换向阀处于中位; (b) 换向阀处于右位; (c) 换向阀处于左位

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

从以上两个实例可以得出结论: 液压传动是以液体作为工作介质, 依靠受压液体在密封容积中产生的液体压力能来传递运动和动力的一种传动方式。其特点是:

- (1) 以液体为传动介质, 传递运动和动力。
- (2) 由于液体只有一定的体积而没有固定的形状, 所以液压传动必须在密闭容器内进行。
- (3) 依靠密封容积的变化传递运动。
- (4) 依靠压力的变化传递动力。

液压传动的实质是能量的相互转化过程: 液压泵将电动机的机械能转换为液体的压力能, 然后通过液压缸或液压电动机将液体的压力能再转换为机械能以推动负载运动, 即“机械能→液体的压力能→机械能”。

二、液压系统的组成

在实际工作中, 为简化液压传动系统的绘制, 国家颁发了新液压气动图形符号国家标准 (GB/T 786.1—2009), 并有以下要求:

- (1) 只表示元件的功能、操作方式及外部连接通路;
- (2) 不表示元件的具体结构和参数;
- (3) 不表示连接口的实际位置和元件的安装位置。
- (4) 液压元件的图形符号应以元件的静止位置或零位来表示。

用图形符号既便于绘制, 又可使液压系统简单明了。图 1-1-6 所示为磨床工作台液压

系统工作原理图形符号。

从图 1-1-6 可以看出,一个完整的液压传动系统主要由以下几个组成部分:

(1) 动力装置:为系统提供动力,把机械能转换成液体压力能的装置,一般最常见的是液压泵。

(2) 执行装置:带动运动部件运动,把液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、做回转运动的液压电动机等。

(3) 控制调节装置:对液压系统中流体的压力、流量与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、蓄能器等,它们能保证液压系统可靠、稳定、持久的工作。

(5) 传动介质:系统中传递能量的液体,即液压油。

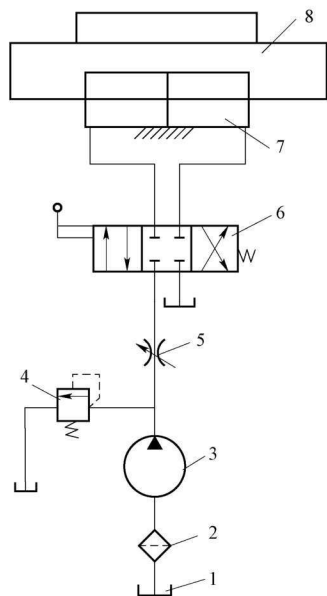


图 1-1-6 磨床工作台液压系统
工作原理图形符号

1—油箱; 2—过滤器; 3—液压泵; 4—溢流阀;

三、液压传动系统的特点

1. 液压传动的优点

与其他传动方式相比,液压传动具有以下优点:

(1) 传动平稳。在液压传动装置中,由于油液的压缩量非常小,在通常压力下可以认为不可压缩,依靠油液的连续流动进行传动。油液有吸振能力,在油路中还可以设置液压缓冲装置,故不像机械机构因加工和装配误差而引起振动和撞击,从而使传动十分平稳,便于实现频繁的换向。因此,它广泛地应用于要求传动平稳的机械上,如磨床就全部采用了液压传动。

(2) 质量轻、体积小。在输出同样功率的条件下,液压传动体积和质量小,因此惯性小、动作灵敏,这对液压仿形、液压自动控制和要求减轻质量的机器来说,是特别重要的。例如,现今的挖掘机占绝大部分的是全液压、全回转挖掘机。

(3) 承载能力大。液压传动易于获得很大的力和转矩,因此广泛用于压制机、隧道掘进机、万吨轮船操舵机和万吨水压机、集装箱龙门吊等。

(4) 容易实现无级调速。在液压传动中,调节液体的流量就可实现无级调速,并且调速范围很大,最大可达 2 000:1。

(5) 易于实现过载保护。液压系统中采取了很多安全保护措施,能够自动防止过载,避免发生事故。

(6) 液压元件能够自动润滑。由于采用液压油作为工作介质,使液压传动装置能自动润滑,因此元件的使用寿命较长。

(7) 容易实现复杂的动作。采用液压传动能获得各种复杂的机械动作,如仿形车床的液

压仿形刀架、数控铣床的液压工作台，可加工出不规则形状的零件。

(8) 简化机构。采用液压传动可大大地简化机械结构，从而减少了机械零部件数目。

(9) 便于实现自动化。在液压系统中，液体的压力、流量和方向是很容易控制的，再加上电气装置的配合，很容易实现复杂的自动工作循环。目前，液压传动在要求比较高的组合机床和自动线上应用得很普遍。

2. 液压传动的缺点

(1) 工作过程中常有较多的能量损失（如摩擦损失、泄漏损失等）、漏油等因素影响到液压运动的平稳性和正确性，不能保证严格的传动比，且不宜远距离传动。

(2) 液压传动对油温的变化比较敏感，工作稳定性很容易受到温度的影响，不宜在很高或很低的温度条件下工作。

(3) 为了减少泄漏及性能上的要求，液压元件的配合件制造精度较高，加工工艺较复杂，造价较高，对工作介质的污染比较敏感。

(4) 液压传动要求有单独的能源，不像电源那样使用方便，并且发生故障不易检查和排除。因此对维修人员的要求很高，需要系统地掌握液压传动知识并有一定的实践经验。

(5) 随着高压、高速、高效率和大流量，液压元件和系统的噪声增大，泄漏增多，容易造成环境污染。

四、液压系统的应用

液压技术与气动、机械、电气和电子技术一起，互相补充，已发展成为实现生产过程自动化的一个重要手段，在机械工业、冶金工业、轻纺食品工业、化工、交通运输、航空航天、国防建设等各个部门已得到广泛的应用。由于液压技术有许多突出优点，从民用到国防，由一般传动到精确度很高的控制系统，即在国防工业中，如飞机、坦克、导弹等；在机床工业中，如磨床、铣床、组合机床等；在冶金工业中，如电炉控制系统、平炉装料、转炉控制等；在工程机械中，如挖掘机、汽车起重机、平地机、压路机等；在农业机械中，如联合收割机、拖拉机等；在锻压机械中，如压力机、模锻机、空气锤等；在汽车工业中，如液压自卸式汽车、液压高空作业车、消防车等；在轻纺工业中，如塑料注塑机、造纸机、印刷机、纺织机等；在船舶工业中，如全液压挖泥船、打捞船、采油平台、气垫船等，液压技术都得到了广泛的应用。



认识液压实训台，指出液压传动系统中各组成部分及其作用。



在实训台上安装外圆磨床液压传动系统，实训步骤如下：

(1) 在老师指导下根据液压回路原理图正确选择相应元器件，在实训台上安装回路。

(2) 检查各油口连接情况后，启动液压泵，按下相应按钮，液压执行元件带动工作台实现往复运动。

- (3) 重点观察液压系统所实现的运动方式,能指出液压传动的工作原理和系统的组成。
- (4) 完成实训,经老师评估后关闭油泵,拆下管路,将元件放回原来位置。



液压传动技术的发展

第一阶段: 液压传动从 17 世纪帕斯卡提出静压传递原理、1795 年世界上第一台水压机诞生,已有 200 多年的历史,但由于没有成熟的液压传动技术和液压元件,且工艺制造水平低下,故发展缓慢,几乎停滞。

第二阶段: 20 世纪 30 年代,由于工艺制造水平提高,开始生产液压元件,并首先应用于机床。

第三阶段: 20 世纪 50—70 年代,工艺水平有了很大提高,液压与气动技术也迅速发展,渗透到国民经济的各个领域:从蓝天到水下,从军用到民用,从重工业到轻工业,到处都有流体传动与控制技术。

目前,液压技术正向高压、高速、大功率、高效、低噪声、高性能及高度集成化、模块化、智能化的方向发展。同时,在新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助测试(CAT)技术、计算机直接控制(DDC)技术、计算机实时控制技术、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术,以及污染控制技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向;气压传动技术在科技飞速发展的当今世界发展将更加迅速。随着工业的发展,气动技术的应用领域已从汽车、采矿、钢铁、机械工业等行业迅速扩展到化工、轻工、食品、军事工业等各行各业。



一、填空题

1. 液压传动是以_____为工作介质进行能量传递和控制的一种传动形式。
2. 液压传动系统主要由_____、_____、_____、_____及传动介质五部分组成。
3. 液压泵是_____元件,是把_____能转换成_____能的装置。
4. 液压缸是把_____能转换成_____能的装置。
5. 液压电动机是_____元件,是把_____能转换成_____能的装置。
6. 液压阀的功用是控制液压系统中液体的_____、_____和_____。

二、判断题

- () 1. 液压传动不容易获得很大的力和转矩。
- () 2. 液压传动可在较大范围内实现无级调速。
- () 3. 液压传动系统不宜远距离传动。
- () 4. 液压传动的元件要求制造精度高。
- () 5. 液压传动是依靠密封容积中液体静压力来传递力的,如万吨水压机。
- () 6. 与机械传动相比,液压传动其中的一个优点是运动平稳。

() 7. 在液压传动系统中, 常用的工作介质是汽油。

三、简答题

1. 举例说明在日常生活中见到过哪些是用液压传动的机械设备。
2. 液压传动系统的工作原理及实质是什么?
3. 液压传动系统有哪些基本组成部分? 各部分的作用是什么?
4. 液压传动系统的优缺点有哪些?

任务2 认识压力和流量

知识目标

- ◇ 掌握液体静压力的形成和特性;
- ◇ 掌握液体动力学的性质;
- ◇ 掌握液压油的性质。

技能目标

- ◇ 会计算液压传动系统的输出力及液体的流速;
- ◇ 能合理选用液压油。

任务引入

对于一台液压设备来说, 要使工作部件克服不同负载, 液压泵输出的油液就必须具有一定的压力, 并能根据负载大小进行调节; 另外, 为满足不同的加工工艺要求, 运动部件的速度也可以进行调整。如图 1-2-1 所示的液压千斤顶, 若要举起重量为 G 的小汽车, 那么人该施加多大的力 F_1 呢?

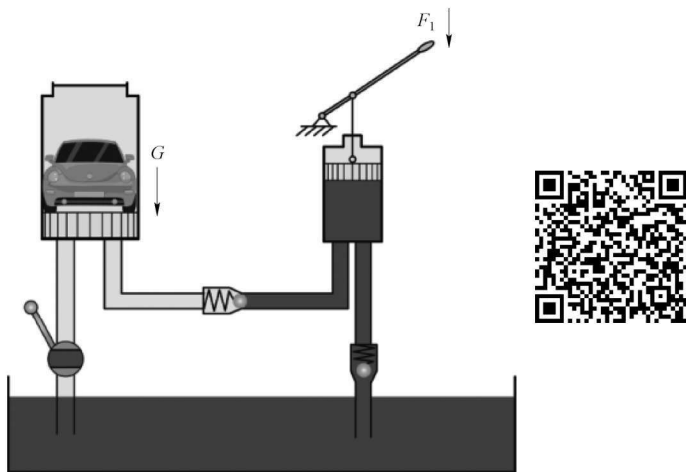


图 1-2-1 液压千斤顶工作示意图

任务分析

上述任务中单靠人力是不可能将小汽车举起的, 需靠液压系统将人力放大, 这是如何实

现的？压力和流量是流体传动及其控制技术中最基本、最重要的两个技术参数，外界负载的变化引起液体压力的变化，流量的变化引起运动部件速度的变化。下面引入流体传动中压力和流量的相关知识。



一、压力

1. 液体静压力

1) 静压力的定义

当液体处于静止状态时，其单位面积上所受的法向作用力常用 p 表示。在这里压力与压强的概念相同，物理学中称为压强，工程实际中称为压力。

若法向力 F 均匀地作用在面积 A 上，则压力可表示为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-2-1)$$

式中， F ——法向作用力 (N)；

A ——承压面积 (m^2)。

总之，当液体受到外力的作用时，就会形成液体的压力，如图 1-2-2 所示。

2) 静压力的单位

压力的单位为 N/m^2 ，即帕斯卡 (帕)，符号为 Pa，工程上常用兆帕或工程大气压来表示压力，不同单位压力之间的换算关系如下：

1 兆帕 (MPa) = 10^3 千帕 (kPa) = 10^6 帕 (Pa)

1 工程大气压 (at) = 1 千克力/厘米² (kgf/m^2) = 9.8×10^4 帕 (Pa) ≈ 0.1 兆帕 (MPa)

1 米水柱 (mH_2O) = 9.8×10^3 Pa

1 毫米汞柱 (mmHg) = 1.33×10^2 Pa

3) 静压力的特性

静止液体压力具备两个重要特性：

(1) 液体静压力的方向总是沿着承压面的内法线方向，如图 1-2-2 所示容器中各承压面处表示的液体的压力方向；

(2) 静止液体内任一点的液体静压力在各个方向上都大小相等，如图 1-2-3 所示。

4) 压力的表示方法

根据度量基准不同，压力的表示方法有两种，即绝对压力和相对压力。

(1) 绝对压力：以绝对真空 ($p=0$) 作为基准所表示的压力。

(2) 相对压力：以大气压力 ($p=p_a$) 作为基准所表示的压力。由于大多数测压仪表所测得的压力都是相对压力，故相对压力也称表压力。

① 1 kgf = 9.806 65 N。

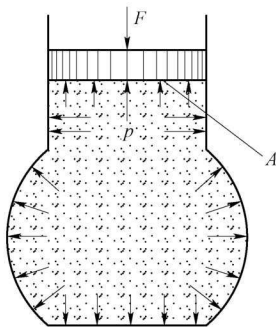


图 1-2-2 压力的表示方法

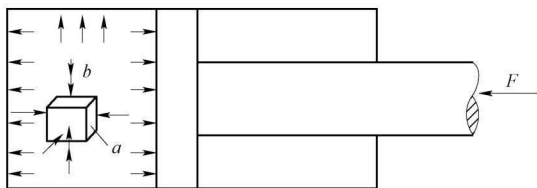


图 1-2-3 液体质点受力分析图

注：当绝对压力小于大气压力时，负相对压力数值部分叫作真空度。绝对压力、相对压力和真空度的相互关系如图 1-2-4 所示，其关系表示如下：

绝对压力 = 相对压力 + 大气压力

真空度 = 大气压力 - 绝对压力 = - (绝对压力 - 大气压力)

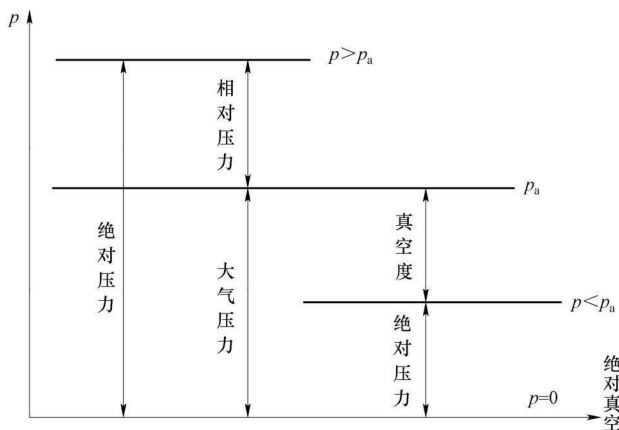


图 1-2-4 压力的表示方法

由此可知，当以大气压力为基准计算压力时，基准以上的正值是表压力，基准以下的负值就是真空度。

2. 液体静力学基本方程式

如图 1-2-5 所示，密度为 ρ 的液体在容器内处于静止状态，作用在液面上的压力为 p_0 ，如计算距液面深度为 h 处 A 点压力 p ，由于液柱处于平衡状态，于是有

$$p \cdot \Delta A = p_0 \cdot \Delta A + \rho g h \cdot \Delta A \quad (1-2-2)$$

故

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1-2-3)$$

式 (1-2-3) 称为液体静力学基本方程。由方程可知：

(1) 静止液体内部任一点处的压力由两部分组成：一部分是液面上的压力 p_0 ，另一部分是液柱和重力所产生的压力 $\rho g h$ 。当液面上只受大气压力 p_a 时，则 $p = p_a + \rho g h$ 。

(2) 静止液体内部的压力随液体深度 h 的增加而线性规律递增。

(3) 距液面深度相同的各点压力相等。由压力相等的各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。

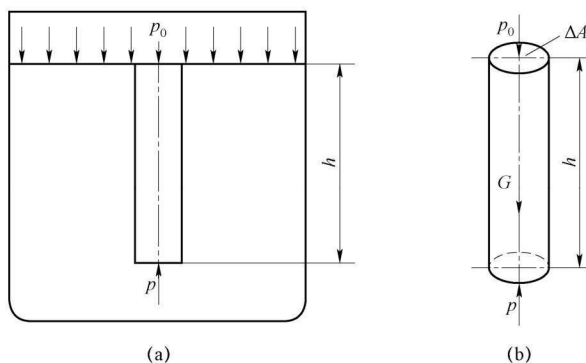


图 1-2-5 静压力的计算

3. 液体压力的传递（帕斯卡原理）

由液体静力学基本方程可知，静止液体内任一点处的压力都包含了液面上的压力 p_0 。这说明在密封容器内，施加于静止液体上的压力，能等值地传递到液体中各点，这就是液体压力传递原理，也称为帕斯卡原理。液压传动就是在这个原理的基础上建立起来的。

在实际的液压传动中，由外力所产生的压力要比液体自重形成的压力大得多，为此可将静力学基本方程中的 ρgh 项忽略不计，而认为静止液体内各点的压力相等。在如图 1-2-6 所示的密闭连通器中，各容器上压力表指示的数值都相同。

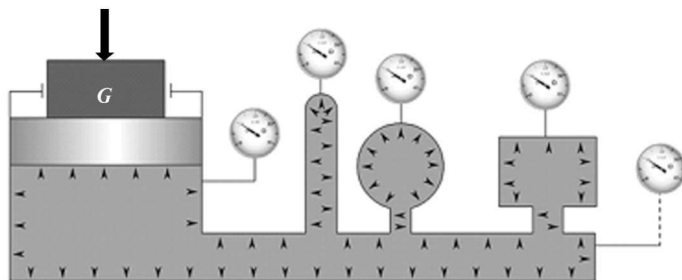


图 1-2-6 连通器

例 1-2-1 图 1-2-7 所示为相互连通的两个液压缸，已知大缸内径 $D=100\text{ mm}$ ，小缸

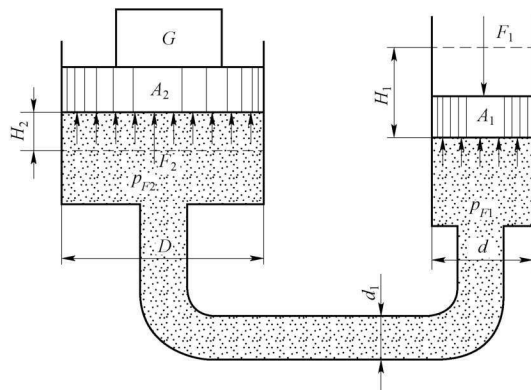


图 1-2-7 例 1-2-1 图

内径 $d=30\text{ mm}$ ，大活塞上放一重物 $G=20\text{ kN}$ 。问在小活塞上应加多大的力 F_1 ，才能使大活