

「十四五」精品课程建设规划教材·机电类

“十四五”精品课程建设规划教材·机电类

液压与气压传动

YEYA YU QIYA CHUANDONG

主 编 曹胜男

液压与气压传动

主 编 曹胜男

电子科技大学出版社

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

目 录

项目 1 液压与气压传动基础知识	1
任务 1 液压与气压传动认识	1
任务 2 了解液压油	10
任务 3 了解流体力学基础知识	17
任务 4 液压系统运行中常见问题分析与处理	29
任务 5 孔口及缝隙流量的分析	34
项目 2 液压动力元件、执行元件识别与应用	42
任务 1 液压动力元件的识别与应用	42
任务 2 液压执行元件识别与应用	70
项目 3 液压辅助元件的应用与检修	90
任务 1 油箱的功用、要求和分类	90
任务 2 热交换器	93
任务 3 油管和管接头使用	95
任务 4 油的污染和滤油器	98
任务 5 蓄能器	101
任务 6 压力表和压力表开关	104
项目 4 液压控制元件的识别与应用	112
任务 1 液压方向控制阀的识别与应用	112
任务 2 压力控制阀的识别与应用	124
任务 3 流量控制阀的识别与应用	133
项目 5 液压基本回路安装与调试	152
任务 1 方向控制回路的安装与调试	152
任务 2 压力控制回路的安装与调试	157
任务 3 速度控制回路的安装与调试	165
任务 4 多缸工作控制回路的安装与调试	176

项目 6 液压系统的设计、安装与调试	182
任务 1 液压系统的设计	182
任务 2 液压系统的安装与调试	197
任务 3 液压系统的使用维护、故障诊断与排除	205
项目 7 典型液压传动系统	217
任务 1 M1432A 型万能外圆磨床液压系统	217
任务 2 液压压力机液压系统	224
任务 3 数控机床液压系统	229
项目 8 气压传动元件的识别与应用	237
任务 1 气源装置及气动辅助元件	237
任务 2 气动执行元件的识别与应用	246
任务 3 气动控制阀的识别与应用	253
项目 9 气动基本回路的安装与调试	265
任务 1 方向、压力、速度控制回路的安装与调试	265
任务 2 其他常用回路的安装与调试	270
附录 常用液压与气动元件图形符号 (GB/T786.1—1993)	277
参考文献	283

项目 1 液压与气压传动基础知识

学习目标

- (1) 具备对简单的液压与气动系统图的识读能力、绘图能力。
- (2) 具备对液压与气动系统接线及元器件的安装布置能力，控制系统操作运行及调试能力，资料的搜集、查找及应用能力和同学间的相互评价能力。
- (3) 掌握液压与气动系统的工作介质、组成及工作原理，液压与气动系统的图形符号及识读方法。
- (4) 掌握简单的液压与气动回路图的绘制，专业绘图软件的应用及简单的液压与气动系统的安装与调试技能。

任务 1 液压与气压传动认识

任务描述

液压与气压传动系统是研究以液、气体为能源介质，来实现各种机械的传动和自动控制的学科。液压与气压传动广泛应用于国民经济各部门，尤其是制造业各领域。

本任务的目的是使学生了解液压传动与气压传动的基本概念；熟悉组成系统的各类元件的工作原理和工作性能，以及由这些元件所组成的各种基本控制回路的工作原理、工作性能和特点，了解液压传动与气压传动的优缺点及应用。

任务分析

为了实现运动和动力的传递，常用传动方式有机械、电气、流体传动方式。

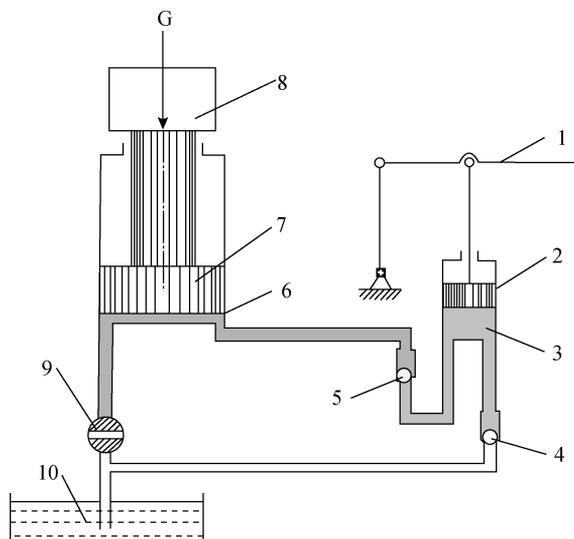
流体传动按介质的不同可分为液体和气体传动，流体传动主要依靠压力能实现运动和动力传递，故又称为液体传动和气体传动。

本任务主要是认识液压、气压系统；了解液压、气压的启动、停止操作步骤，并能抄绘液压、气压系统原理图。

 知识链接

一、液压传动的工作原理

液压与气压传动的基本工作原理是相似的，现以液压千斤顶的工作过程来简述液压传动的工作原理，图 1-1 所示为该液压系统的工作原理示意图。由图可知，该系统由举升液压缸和手动液压泵两部分组成，大油缸（6）、大活塞（7）、单向阀（5）和卸油阀（9）组成举升液压缸；杠杆手柄（1）、小活塞（2）、小油缸（3）、单向阀（4），（5）组成手动液压泵。活塞和缸体之间既保持良好的配合关系，又能实现可靠的密封。杠杆手柄（1）使小活塞（2）向上移动，小活塞（2）下端密封的油腔容积增大，形成局部真空，这时单向阀（5）关闭并阻断其所在的油路，而单向阀（4）打开使其所在油路畅通，油箱（10）中的液压油就在大气压的作用下通过吸油管道进入并充满小油缸（3），完成一次吸油动作；用力压下杠杆手柄（1），小活塞（2）下移，小活塞（2）下腔容积减小，腔内压力升高，这时单向阀（4）关闭，同时阻断其所在的油路，当压力升高到一定值时单向阀（5）打开，小油缸（3）中的油液经管道输入大油缸（6）的下腔，由于卸油阀（9）处于关闭状态，大油缸（6）中的液压油增多迫使大活塞（7）向上移动，顶起重物。再次提起手柄吸油时，单向阀（5）自动关闭，使油液不能倒流，从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动手柄，就能不断地把油液压入大油缸（6）下腔，使重物（8）逐渐地升起。如果打开卸油阀（9），大活塞（7）在其自重和重物（8）的作用下下移，大油缸（6）下腔油液便通过管道流回油箱（10）中，重物（8）就向下运动。这就是液压千斤顶的工作原理。



1—杠杆手柄；2—小活塞；3—小油缸；4，5—单向阀；
6—大油缸；7—大活塞；8—重物；9—卸油阀；10—油箱

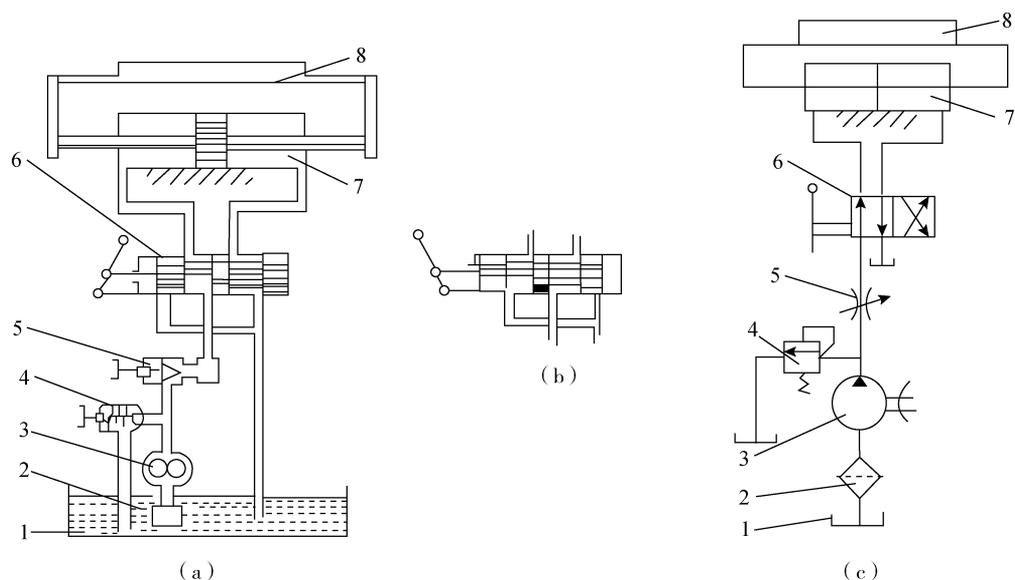
图 1-1 液压千斤顶的工作原理示意图

通过对上面液压千斤顶工作过程的分析，可以初步了解到液压传动的基本工作原理如下：

- (1) 液压传动是利用有压力的液体（液压油）作为传递运动和动力的工作介质。
- (2) 液压传动中要经过两次能量转换，先将机械能转换成油液的压力能，再将油液的压力能转换成机械能。
- (3) 液压传动是依靠密封容器或密闭系统中密封容积的变化来实现运动和动力传递的。

二、液压、气压传动系统的组成及符号

以图 1-2 所示组合机床工作台液压传动系统为例说明其组成。



(a) 典型液压系统原理结构示意图 (b) 换向阀 6 阀芯位置的改变 (c) 典型液压系统原理图形符号图

1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4—溢流阀；5—流量控制阀；

6—换向阀；7—液压缸；8—工作台

图 1-2 典型液压系统原理图

液压泵 (3) 由电动机驱动旋转，从油箱 (1) 中吸油，经过滤器 (2) 后被液压泵吸入并输出给系统。当换向阀 (6) 阀芯处于图 1-2 (a) 所示位置时，压力油经流量控制阀 (5)、换向阀 (6) 和管道进入液压缸 (7) 的左腔，推动活塞向右运动。液压缸右腔的油液经管道、换向阀 (6)、管道流回油箱 (1)。改变换向阀 (6) 阀芯的工作位置，使之处于左端位置时，如图 1-2 (b) 所示，液压缸活塞反向运动。工作台的移动速度是通过流量控制阀来调节的。阀口开大时，进入缸的流量较大，工作台的速度较快；反之，工作台的速度较慢。为适应克服大小不同阻力的需要，泵输出油液的压力应当能够调整。工作台低速移动时，流量控制阀开口小，泵输出多余的油液经溢流阀 (4) 和管道流回油箱，调节溢流阀 (4) 弹簧的预压力，就能调节泵输出口的油液

压力。

从上面的例子可以看出，液压传动系统主要由以下五部分组成。

(1) 动力元件。动力元件是将机械能转换成流体压力能的装置。常见的是液压泵，为系统提供压力油液，如图 1-2 中的液压泵 (3)。

(2) 执行元件。执行元件是将流体的压力能转换成机械能输出的装置。它可以是做直线运动的液压缸，也可以是作回转运动的液压马达、摆动缸，如图 1-2 中的液压缸 (7)。

(3) 控制元件。控制元件是对系统中流体的压力、流量及流动方向进行控制和调节的装置，以及进行信号转换、逻辑运算和放大等功能的信号控制元件，如图 1-2 中的溢流阀 (4)、流量控制阀 (5) 和换向阀 (6)。

(4) 辅助元件。辅助元件是保证系统正常工作所需的上述三种以外的装置，如图 1-2 中的过滤器 (2)、油箱 (1) 和管件。

(5) 工作介质。用工作介质进行能量和信号的传递。液压系统以液压油液作为工作介质。

图 1-2 (a)、(b) 中的各个元件是由半结构式图形画出来的，直观性强，易理解，但难于绘制，元件多时更是如此。在工程实际中，除某些特殊情况外，一般都用简单的图形符号绘制，如图 1-2 (c) 所示。图形符号只表示元件的功能，不表示具体结构和参数。

与液压传动相似，气压传动也有压力和流量两个重要参数。气压传动系统由五部分组成。

(1) 气源装置。气源装置即空气压缩机，是系统中的动力元件，它将电动机的机械能转变成气体的压力能，为各类气动设备提供动力。

(2) 执行元件。执行元件是系统的能量输出装置，它将空气压缩机提供的气压能转变成机械能，输出力和速度（转矩和转速），用以驱动工作部件，如气缸和气马达。

(3) 控制元件。控制元件是控制调节压缩空气的压力、流量和方向的元件，用来保证执行元件具有一定输出力（转矩）和速度（转速），如压力阀、流量阀、方向阀等。

(4) 辅助元件。系统中除上述三类元件外，其余元件称为辅助元件，如油雾器、储气罐、消声器等。它们对保证系统可靠、稳定的工作起重要作用。

(5) 传动介质。传动介质是系统中传递能量的流体，如压缩空气。

三、液压传动的优缺点

1. 优点

(1) 液压传动装置重量轻、结构紧凑、惯性小。例如，相同功率液压马达的体积为电动机的 12%~13%。液压泵和液压马达单位功率的重量指标，目前是发电机和电动机的十分之一，液压泵和液压马达可小至 0.0025 N/W（牛/瓦），发电机和电动机则约为 0.03 N/W。

(2) 由于液压传动是油管连接，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。例如，在井下抽取石油的泵可采用液压传动来驱动，以克服长驱动轴效率低的缺点。由于液压缸的推力很大，又加之容易布置，在挖掘机等重型工程机械上，已基本取代了老式的机械传动，不仅操作方便，而且外形美观大方。

(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，范围可达 1 : 2000，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。正因为此特点，金属切削机床中的磨床传动现在几乎都采用液压传动。

(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) 液压传动容易实现自动化，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、液压油的可压缩性等因素，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，液体的黏性会起变化，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条件下工作。

(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) 液压系统发生故障不易检查和排除。

总之，液压传动的优点是主要的，随着设计制造和使用水平的不断提高，有些缺点正在逐步加以克服，液压传动有着广泛的发展前景。

四、液压传动的应用

驱动机械运动的机构以及各种传动和操纵装置有多种形式。根据所用的部件和零件，可分为机械的、电气的、气动的、液压的传动装置。经常还将不同的形式组合起来运用——四位一体。由于液压传动具有很多优点，液压技术在各种工业中的应用越来越广泛。

在机床上，液压传动常应用在以下的一些装置中：

(1) 进给运动传动装置。磨床砂轮架和工作台的进给运动大部分采用液压传动；车床、六角车床、自动车床的刀架或转塔刀架采用液压传动；铣床、刨床、组合机床的工作台等的进给运动也都采用液压传动。这些部件有的要求快速移动；有的要求慢速移动；有的则既要求快速移动，也要求慢速移动。这些运动多半要求有较大的调速

范围，要求在工作中无级调速；有的要求持续进给，有的要求间歇进给；有的要求在负载变化下速度恒定，有的要求有良好的换向性能等。所有这些要求都是可以用液压传动来实现的。

(2) 往复主体运动传动装置。龙门刨床的工作台、牛头刨床或插床的滑枕，由于要求作高速往复直线运动，并且要求换向冲击小、换向时间短、能耗低，因此都可以采用液压传动。

(3) 仿形装置。车床、铣床、刨床上的仿形加工可以采用液压伺服系统来完成，其精度可达 0.01~0.02 mm。此外，磨床上的成形砂轮修正装置亦可采用这种系统。

(4) 辅助装置。机床上的夹紧装置、齿轮箱变速操纵装置、丝杆螺母间隙消除装置、垂直移动部件平衡装置、分度装置、工件和刀具装卸装置、工件输送装置等，采用液压传动后，有利于简化机床结构，提高机床自动化程度。

(5) 静压支承。重型机床、高速机床、高精度机床上的轴承、导轨、丝杠螺母机构等处采用液体静压支承后，可以提高工作平稳性和运动精度。

液压传动在其他机械工业部门的应用情况见表 1-1。

表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用

行业名称	应用实例
工程机械	起重机、液压挖掘机、装载机、推土机、消防车、压路机等
机床工业	磨床、铣床、刨床、组合机床、数控机床等
土木水利工程	防洪闸门及堤坝装置、桥梁操纵机构等，发电厂涡轮机调速装置、核发电厂等
钢铁工业	冶金机械、提升装置、轧辊调整装置等
汽车装备	汽车助力转向、液压 ABS、液力自动变速等
机电一体化	机械手、注塑机、各种大型游戏机等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
船舶机械	甲板起重机械（绞车）、船头门、舱壁阀、船尾推进器等
军工机械	火炮操纵装置、飞行器仿真、飞机起落架的收放装置和方向舵控制装置等

★ 任务实施

机床工作台模拟液压系统认知实训

一、场地及设备

- (1) 场地：液压气动实训室、实训基地。
- (2) 设备：机床工作台液压系统。

二、实训目的

通过在实验台上组装机床工作台液压系统，学生应掌握机床工作台液压系统的基

本组成，掌握液压传动的工作原理和特点。

三、实训要点

- (1) 掌握液压传动的基本原理，并了解其优缺点。
- (2) 掌握液压传动系统的基本组成。

四、预习要求

- (1) 液压传动与气压传动的基础知识。
- (2) 熟悉液压千斤顶的工作原理；掌握机床工作台液压系统的组成；读懂机床工作台系统工作原理图。

五、实训过程

1. 安全注意事项

- (1) 液压实训涉及电、高压油，因此要保证实训设备和元器件的完好性。
- (2) 要正确地安装和固定好元件。
- (3) 管路要连接牢固，若软管脱出可能会引起事故。
- (4) 限位元件不应放在动作杆的对面，而应使其侧面与杆接触。
- (5) 不得使用超过限制的工作压力。
- (6) 按要求接好回路，检查无误后才能启动电机。
- (7) 实训内容不能按要求实现时，要仔细检查错误点，仔细分析产生错误的原因。
- (8) 做液压实训时，在有压力的情况下不准拆卸管子。
- (9) 要严格遵守各项安全操作规程。

2. 观摩教学

(1) 实验台元件讲解

介绍实验台上元件和模拟机床工作台液压系统实验所需的元件。

(2) 实验台原理讲解

①压力的建立和调压。泵的工作压力是初学液压气动课程的同学难以建立起来的一个概念。通过认识溢流阀和泵，建立调压回路。首先将压力调为零，然后慢慢地调高压力，通过压力表显示压力的变化值。

②缸的运动方向的控制与换向。首先要学生了解缸是如何运动起来的。没有压力油，缸是不运动的；有压力油，如果油路不通，缸也是不运动的。只有进油路和回油路都是通畅的，压力油进入到缸的一腔，缸的工作压力能克服外负载，缸才能够运动起来。换向动作是通过换向阀来实现的。

(3) 机床工作台模拟液压系统动作

按照液压系统工作原理图，将所需元件布置在实验台面板上，用油管连接。检查无误后，调松溢流阀，打开电源开关。启动液压泵，调节溢流阀、操作换向阀，改变

液压缸的方向；改变节流阀，控制液压缸的运动速度。

(4) 学生操作训练

六、实训小结

通过分组训练，讨论实训中发现的问题，分析并解决问题，完成实训报告。

气动系统组成认知实训

一、实训目的

通过实验使学生了解气压基本回路的连接方法，进一步熟悉几种常见的气压基本回路的功能及性能参数，熟悉气压元件及其在系统中的作用。

二、实训要点

- (1) 掌握气动系统的基本组成。
- (2) 掌握气压传动的优缺点及应用。

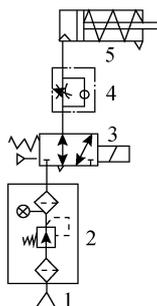
三、预习要求

- (1) 气压传动系统的组成及工作原理。
- (2) 气压传动系统的优缺点。

四、实训过程

(1) 依据实训要求选择所需的气动元件 [单作用气缸（弹簧回位）、单向节流阀、二位三通单电磁换向阀、三联件、长度合适的连接软管]，并检验元器件的实用性能是否正常。

(2) 在看懂原理图的情况下，按照原理图 1-3 搭建实验回路。



1—气源；2—气动三联件；3—二位三通单电磁阀；4—单向节流阀；5—单作用气缸

图 1-3 单作用气缸工作原理图

(3) 将二位三通单电磁换向阀的电源接入口插入相应的电器控制面板输出口。

(4) 确认连接安装正确稳妥,把三联件的调压旋钮旋松,通电,开启气泵。待泵工作正常,再次调节三联件的调压按钮,使回路中的压力在系统工作压力以内。

(5) 当二位三通电磁换向阀通电时,右位接入,气缸左腔进气,气缸伸出;失电时气缸靠弹簧的弹力回位(在缸的伸缩过程中,通过调节单向节流阀中的单向节流阀控制气缸动作的快慢)。

(6) 实验完毕后,关闭泵,切断电源,待回路压力为零时拆卸回路,清理元器件并放回规定的位置。

五、实训小结

学生分组训练,互相讨论,分析下列问题,完成实训报告。

(1) 若把回路中单向节流阀拆掉重做一次实验,气缸的活塞运动是否会很平稳?冲击效果是否很明显?回路中用单向节流阀的作用是什么?

(2) 采用三位五通双电磁换向阀是否能实现缸的定位?主要是利用了三位五通双电磁换向阀的什么机能?



知识拓展

液压传动的发展

自18世纪末英国制成世界上第一台水压机算起,液压传动技术已有二三百年的历史。直到20世纪30年代它才较普遍地用于起重机、机床及工程机械。在第二次世界大战期间,由于战争需要,出现了由响应迅速、精度高的液压控制机所装备的各种军事武器。第二次世界大战结束后,战后液压技术迅速转向民用工业,液压技术不断应用于各种自动机及自动生产线。

20世纪60年代以后,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。当前液压技术正向迅速、高压、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时,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)、计算机直接控制(CDC)、机电一体化技术、可靠性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。

我国的液压技术最初应用于机床和锻压设备上,后来又用于拖拉机和工程机械。现在,随着从国外引进一些液压元件、生产技术以及进行自行设计,已形成了系列,并在各种机械设备上得到了广泛的使用。



巩固提高

1. 哪些设备使用了液压技术?(实习工厂或露天作业的设备)
2. 什么是液压传动?基本工作原理是什么?
3. 液压传动系统由哪些部分组成?各部分的作用是什么?
4. 液压元件在系统图中是怎样表示的?
5. 和其他传动方式相比,液压传动有哪些主要优点和缺点?
6. 一个典型的气动系统由哪几个部分组成?

7. 试陈述气压传动的工作原理。
8. 简述气压传动与液压传动的区别与联系。

任务 2 了解液压油

任务描述

液压油是液压传动系统中的工作介质，而且还对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却和防锈作用。液压传动系统的压力、温度和流速在很大的范围内变化，液压油的质量优劣直接影响液压系统的工作性能。因此，合理地选用液压油也是很重要的。

本任务的目的是了解液压油的作用，掌握液压油黏性的物理意义，掌握液压油的黏温特性及可压缩性，掌握液压油的选择。

任务分析

液压传动是以液压油（通常为矿物油）作为工作介质来传递动力和信号，因此液压油质量（物理、化学性能）的优劣，尤其是力学性能对液压系统工作的影响很大。所以，在研究液压系统之前，必须对所用的液压油及其性能进行较深入了解，以便进一步理解液压传动的基本原理。

知识链接

一、液压油的物理性质

1. 液压油的密度

单位体积某种液压油的质量称为该种液压油的密度，以 ρ 表示。即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

式中， V 表示液压油的体积； m 表示液压油质量。

液压油的密度随压力的增加而加大，随温度的升高而减小，但一般情况下，由压力和温度引起的这种变化都较小，可以忽略不计，故在实际应用中可认为液压油的密度不受压力和温度变化的影响。一般液压油的密度为 900 kg/m^3 。

2. 液压油的黏性

1) 物理意义

液体在外力作用下流动时，由于液体分子间的内聚力要阻碍液体分子之间相对运动，因而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的黏性。黏性的大小用黏度表示，黏性是液体重要的物理特性，也是选择液压油的重要依据之一。

液体流动时，由于液体的黏性及液体和固体壁面间的附着力，流动液体内部各层

间的速度大小不等。如图 1-4 所示, 设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, 紧贴于下平板的液体层速度为零, 紧贴于上平板的液体层速度为 v_0 , 而中间各层液体的速度则根据该层到下平板的距离大小近似呈线性规律分布。因此, 不同速度流层相互制约而产生内摩擦力。

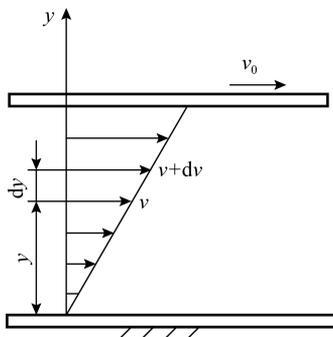


图 1-4 液体黏性示意图

实验测定结果指出, 液体流动时相邻液层之间的内摩擦力 F 与液层间的接触面积 A 和液层间的相对速度 dv 成正比, 而与液层间的距离 dy 成反比。即

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-2)$$

式中, μ 是比例常数, 称为液体的黏性系数或黏度; $\frac{dv}{dy}$ 为速度梯度。

若以 τ 来表示单位接触面积上的内摩擦力, 即切应力。则由式 (1-2) 可得

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表达的是牛顿的液体内摩擦定律。

在液体静止时, 由于 $\frac{dv}{dy} = 0$, 液体内摩擦力为零, 因此, 静止的液体不呈现黏性。

2) 黏度

流体黏性的大小用黏度来表示。常用的黏度有动力黏度、运动黏度和相对黏度。

(1) 动力黏度 μ 。动力黏度又称绝对黏度, 可由式 (1-2) 推导出:

$$\mu = \frac{F}{A} \frac{dy}{dv} = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知动力黏度 μ 的物理意义是: 液体在单位速度梯度 ($\frac{dv}{dy} = 1$) 下流动时, 单位接触面积上的内摩擦力的大小。

动力黏度的国际 (SI) 计量单位为牛顿·秒/米², 符号为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 或为帕·秒, 符号为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动黏度 ν 。某种液体的运动黏度是该液体的动力黏度与其密度的比值。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

在 SI 中, 液体的运动黏度的单位为米²/秒, 符号为 m²/s。由于该单位偏大, 实际上常用 cm²/s, mm²/s 以及以前沿用的非法定计量单位 cSt (厘斯), 它们之间的关系是

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^6 \text{ mm}^2/\text{s} = 10^6 \text{ cSt}$$

运动黏度没有什么明确的物理意义, 因在理论分析和计算中常遇到 $\frac{\mu}{\rho}$ 的比值, 为方便起见, 用 ν 表示。国际标准化组织 ISO 规定, 各类液压油的牌号是按其在一定温度下运动黏度的平均值来标定的。我国生产的全损耗系统油和液压油采用 40 °C 时的运动黏度值 (mm²/s) 为其黏度等级标号, 即油的牌号。例如牌号为 L-HL32 的液压油, 就是指这种油在 40 °C 时的运动黏度平均值为 32 mm²/s。

(3) 相对黏度。相对黏度又称条件黏度, 它是采用特定的黏度计在规定条件下测出来的液体黏度。各国采用的相对黏度单位有所不同, 美国采用赛氏黏度, 英国采用雷氏黏度, 法国采用巴氏黏度, 我国采用恩氏黏度。

恩氏黏度用符号 °E 表示, 被测液体温度为 t (°C) 时的恩氏黏度用符号 °E_{*t*} 表示。恩氏黏度用恩氏黏度计测定, 其方法是: 将 200 mL 温度为 t (°C) 的被测液体装入黏度计的容器, 经其底部直径为 2.8 mm 的小孔流出, 测出液体流尽所需时间, 再测出 200 mL 温度为 20 °C 的蒸馏水用同一黏度计流尽所需时间 (通常 51 s), 这两个时间的比值即为被测液体在温度 t 下的恩氏黏度, 即

$$^{\circ}E_t = \frac{t_A}{t_B} = \frac{t_A}{51 \text{ s}} \quad (1-6)$$

工业上一般以 20 °C、50 °C 和 100 °C 作为测定恩氏黏度的标准温度, 相应地以符号 °E₂₀, °E₅₀, °E₁₀₀ 来表示。

恩氏黏度与运动黏度 (mm²/s) 的换算关系:

当 $1.3 \leq E \leq 3.2$ 时, 有

$$\nu = 8^{\circ}E - \frac{8.64}{^{\circ}E} \quad (1-7)$$

当 °E > 3.2 时, 有

$$\nu = 7.6^{\circ}E - \frac{4}{^{\circ}E} \quad (1-8)$$

(4) 黏度与压力、温度的关系。当液体所受压力增大时, 其分子间的距离减小, 内聚力增大, 黏度也随之增大。但对于一般的液压系统, 当压力在 10 MPa 以下时, 油液的黏度受压力变化的影响很小, 可以忽略不计。

油液的黏度对温度变化十分敏感, 温度升高, 黏度将显著降低。油液的黏度随温度变化的性质称为油液的黏温特性。不同种类的液压油具有不同的黏温特性。油液黏温特性的好坏常用黏度指数 VI (黏温变化程度与标准油相比较所得的相对数值) 来表示, 黏度指数 VI 值越大, 说明其黏度随温度变化越小, 黏温特性越好。一般液压油的 VI 值要求在 90 以上, 优质的在 100 以上。几种常用油液的黏度指数列于表 1-2 中。

表 1-2 常用油液的黏度指数

油液种类	黏度指数	油液种类	黏度指数
通用液压油 L-HL	90	高含水液压油 L-HFA	130
抗磨液压油 L-HM	95	油包水乳化液 L-HFB	130~170
低温液压油 L-HV	130	水-乙二醇液 L-HFC	140~170
高黏度指数液压油 L-HR	160	磷酸酯液 L-HFDR	130~180

3) 液体的可压缩性

液体受压力增大而发生体积减小的特性称为液体的可压缩性。可压缩性用体积压缩系数表示,并定义为单位压力变化下的液体体积的相对变化量。设体积为 V 的液体,当压力增大 Δp 时,液体体积减小 ΔV ,则体积压缩系数 κ 为

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-9)$$

由于压力增加时液体的体积减小 ($\Delta V < 0$),因此式 (1-9) 中等号右边加一负号,以使为正值。

液体的压缩系数 κ 的倒数称为液体的体积模量,用 K 表示。即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\Delta p \frac{V}{\Delta V} \quad (1-10)$$

K 表示产生单位体积相对变化量所需要的压力增量。在实际应用中,常用 K 值说明液体抵抗压缩能力的大小。

在常温下,纯净油液的体积模量 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^3$ MPa,其可压缩性是钢的 $\frac{1}{150} \sim \frac{1}{100}$ 倍(钢的弹性模量为 2.1×10^5 MPa),故一般可认为油液是不可压缩的。

在中、低压系统中,液体的可压缩性对液压系统的性能影响很小,故可将液压油看成不可压缩的,但在高压系统中或研究液压系统的动态特性时,就得考虑液压油的可压缩性。另外,由于空气的可压缩性很大,所以当液压油中混有空气时,其抗压缩能力会大大降低,这会严重影响液压系统的工作性能。在有较高要求或压力变化较大的液压系统中,应采取措施尽量减少工作介质中混入的空气及其他易挥发物质(如汽油、煤油和乙醇等)的含量。

二、对液压油的要求及选用

液压油是液压传动系统中的传动介质,而且还对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却和防锈作用。液压传动系统的压力、温度和流速在很大的范围内变化,因此液压油的质量优劣直接影响液压系统的工作性能。故此,合理地选用液压油也是很重要的。

1. 对液压油的性能要求

液压油是液压传动系统的重要组成部分,是用来传递能量的工作介质。除了传递能量外,它还起着润滑运动部件和保护金属不被锈蚀的作用。液压油的质量及其各种

性能将直接影响液压系统的工作。从液压系统使用油液的要求来看,有下面几点:

- (1) 适宜的黏度和良好的黏温性能。
- (2) 润滑性能好。
- (3) 良好的化学稳定性。
- (4) 对液压装置及相对运动的元件具有良好的润滑性。
- (5) 对金属材料具有防锈性和防腐性。
- (6) 比热、热传导率大,热膨胀系数小。
- (7) 抗泡沫性好,抗乳化性好。
- (8) 油液纯净,含杂质量少。
- (9) 流动点和凝固点低,闪点和燃点高。

此外,对油液的无毒性、价格便宜等,也应根据不同的情况有所要求。

2. 液压油的选用

正确而合理地选用液压油,乃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。例如,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、系统的发热温升等。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。

三、液压油的污染与防护

液压油是否清洁,不仅影响液压系统的工作性能和液压元件的使用寿命,而且直接关系到液压系统是否能正常工作。液压系统多数故障与液压油受到污染有关,因此控制液压油的污染是十分重要的。

1. 液压油被污染的原因

液压油被污染的原因主要有以下几方面:

- (1) 液压系统的管道及液压元件内的型砂、切屑、磨料、焊渣、锈片、灰尘等污垢在系统使用前冲洗时未被冲洗干净,在液压系统工作时,这些污垢进入到液压油里。
- (2) 外界的灰尘、砂粒等,在液压系统工作过程中通过往复伸缩的活塞杆、流回油箱的漏油等进入液压油里。另外在检修时,稍不注意也会使灰尘、棉绒等进入液压油里。
- (3) 液压系统本身也不断地产生污垢,而直接进入液压油里,如金属和密封材料的磨损颗粒,过滤材料脱落的颗粒或纤维及油液因油温升高氧化变质而生成的胶状物等。

2. 油液污染的危害

液压油污染严重时,直接影响液压系统的工作性能,使液压系统经常发生故障,使液压元件寿命缩短。造成这些危害的原因主要是污垢中的颗粒。对于液压元件来说,

这些固体颗粒进入到元件里,会使元件的滑动部分磨损加剧,并可能堵塞液压元件里的节流孔、阻尼孔,或使阀芯卡死,从而造成液压系统的故障。水分和空气的混入使液压油的润滑能力降低并加速使它氧化变质,产生气蚀,使液压元件加速腐蚀,使液压系统出现振动、爬行等。

3. 防止污染的措施

造成液压油污染的原因多而复杂,液压油自身又在不断地产生脏物,因此要彻底解决液压油的污染问题是很困难的。为了延长液压元件的寿命,保证液压系统可靠地工作,将液压油的污染度控制在某一限度以内是较为切实可行的办法。对液压油的污染控制工作主要是从三个方面着手:

(1) 防止污染物侵入液压系统。

(2) 把已经侵入的污染物从系统中清除出去。

(3) 定期换油。污染控制要贯穿于整个液压装置的设计、制造、安装、使用、维护和修理等各个阶段。



知识拓展

抗磨液压油的分类及选用

抗磨型液压油是在抗氧防锈型液压油基础上发展起来的,与普通的抗氧防锈型液压油相比,它的制备技术比较复杂。经过几十年的发展,抗磨液压油的质量已有较大提高。抗磨液压油具有突出的抗磨性,良好的润滑性、抗氧化性和热安定性等特点。

抗磨液压油在中、高压系统中使用时,不仅具有良好的抗氧防锈性,而且其抗磨性能尤为突出。据报道,使用抗磨液压油的高压油泵的寿命比用抗氧防锈型液压油的高压油泵的寿命要长3倍。

1. 抗磨液压油的类型

根据抗磨液压油添加的抗磨剂组成分,抗磨液压油可分为两类:一类是以二烷基二硫代磷酸锌为主剂的有灰(锌)型抗磨液压油;另一类是不含金属盐的无灰型液压油。对叶片泵来说,第一类液压油具有较好的抗磨性、热氧化安定性和防锈性能。在经济条件允许的情况下,应尽量选用抗磨液压油。虽然抗磨液压油比普通的抗氧防锈型液压油价格偏高,但抗磨液压油在提高设备运行的安全性、可靠性、减少磨损量、延长系统和各元件的使用寿命等方面起着普通的抗氧防锈型液压油或机械油不可替代的作用。从整体经济利益看,使用抗磨液压油是可行的。

另外,在制药工业与食品工业中,污染可能会给人体健康带来损害,因此,这类工业设备的液压系统所使用的液压油必须完全符合食品工业的有关规定。在需要用抗磨液压油时,应无条件地按要求选用抗磨液压油。同样,对于高泄漏的液压系统,为防止污染环境,要求选用的液压油具有无毒并易于生物降解,这对抗磨液压油的质量又提出了更高的要求。

2. 抗磨液压油品种的确

一个液压系统在确定选用抗磨液压油后,使用哪种类型的抗磨液压油就要从液

系统设备元件的材质、工作温度、压力及经济性等方面来考虑。

对于一个工作温度较高，工作压力大，含铜、银部件的液压系统来说，应尽量避免使用有灰（锌）型抗磨液压油，以防止液压油对系统元件造成严重腐蚀。对于一个精度高、高速、高效、数显全自动的液压系统来说，不但需要选用的油品具有优异的润滑性，还要求其具有优良的抗磨性、氧化安定性、水解安定性、热稳定性及抗乳化性等，这时一般选用无灰型抗磨液压油。

研究表明，对于具有钢摩擦副作用的叶片泵来说，更适合选用有灰（锌）型抗磨液压油，并且其泵的性能与含锌量有直接关系，而柱塞泵更适合选用无灰型抗磨液压油。

3. 抗磨液压油黏度的确定

合适的抗磨液压油黏度对保证整个液压系统的正常运转具有重大意义。确立抗磨液压油的品种后，就要考虑在工作环境下的黏度问题。由于液压系统的工作温度一般变化较大，因此，首先要求抗磨液压油的黏温特性要好，即黏度随温度的变化不会产生较大波动。根据液压系统的起动温度、工作温度及液压泵的类型来确定所选抗磨液压油的最高黏度和最低黏度。如果油品的黏度过高，会引起油液输送阻力增大、系统压降提高、传动效率降低、油温也随之升高，很可能造成起动困难，并产生气穴腐蚀现象，使液压系统不能正常工作；反之，若油品黏度偏小，则会使系统的泄漏量增加、油泵的容积效率降低，同时对系统的压力和速度难以控制，甚至造成系统控制失灵，发生不可预料的后果。

4. 与抗磨液压油相匹配的材质

在选用抗磨液压油时，还必须考虑到与抗磨液压油相接触的设备材质是否与其相适应。也就是说，抗磨液压油对这些材料是否有侵蚀作用，反过来，这些材料是否会使液压油变质、污染。若两者不相适应，就有可能造成金属的严重腐蚀和非金属材料的溶解、膨胀及老化，抗磨液压油的迅速污染、变质，会大大缩短整个液压系统的使用寿命，造成不可估量的损失。

研究发现，抗磨液压油适应所有金属及绝大部分非金属材料，但与天然胶、丁基胶、乙丙胶不适应，因此，不能与这些材质密切接触，长期共存。

5. 抗磨液压油的混用

用户选用了合适的抗磨液压油后，在实际使用过程中有时会发现，如果将两种或两种以上不同厂家生产、具有相同黏度等级的油品混合使用，往往会导致液压系统不能正常工作。这是因为不同厂家生产的两种油品即使是同类型、同等级，由于其化学组成未必完全相同，混合后，某些成分可能会发生化学反应，有时甚至会生成沉积物，从而严重影响液压系统的正常工作。

因此，不同厂家生产的抗磨液压油，即使产品的类型、黏度等级都相同也不能随便混用。若某些场合必须混合使用，也应经过多次混用试验，确认无副作用后再使用。

抗磨液压油以其优异的润滑性、良好的抗氧性、热安定性及突出的高抗磨性，已成为现代多数大型液压设备的首选油。根据液压系统的工况条件、液压设备类型、液压介质工作温度范围、液压介质与材料的匹配性及经济因素等，正确选用抗磨液压

油对保证液压系统的高效工作, 延长液压设备元件的使用寿命有很重要的现实意义。

目前, 我国抗磨液压油的品种开发和用油水平与国外相比, 还存在较大差距, 抗磨液压油还未普遍使用, 但随着我国液压技术的不断进步, 抗磨液压油的普及已成为一种趋势。同时, 随着一些先进液压设备构件的日趋复杂化、精细化, 对抗磨液压油的质量也提出了更加苛刻的要求。为了使用、维护和保养的方便, 开发一种性能优良、通用性强的抗磨液压油已成为今后研究工作的重点。



巩固提高

1. 什么是液体的黏性? 常用的黏度表示方法有哪几种? 它们的表示符号和单位各是什么?
2. 液压油的牌号和黏度有什么关系? 如何选择液压油的黏度?
3. 试简述黏度与温度、黏度与压力的关系。
4. 20 °C 时 200 mL 蒸馏水从恩式黏度计中流尽的时间为 51 s, 如果 200 mL 的某液压油在 40 °C 时从恩式黏度计中流尽的时间为 232 s, 已知该液压油的密度为 900 kg/m³, 试求该液压油在 40 °C 时的恩式黏度、运动黏度和动力黏度。
5. 液压油的污染有何危害? 如何控制液压油的污染?

任务3 了解流体力学基础知识



任务描述

液压系统是利用液体的压力能来传递运动和动力的, 了解流体力学的知识是很有必要的。流体力学是研究流体(液体或气体)处于相对平衡、运动、流体与固体相互作用时的力学规律, 以及这些规律在实际工程中的应用。它包括两个基本部分: 一部分是液体静力学; 另一部分是液体动力学。

本任务的目的是掌握液体静力学基础知识和液体动力学基础知识, 了解液压冲击与气穴现象。



任务分析

流体力学是连续介质力学的一门分支, 是研究流体(包含气体及液体)现象以及相关力学行为的科学。可以按照研究对象的运动方式分为流体静力学和流体动力学, 它是研究流体平衡和运动的力学规律及应用的科学。

本任务主要是通过对流体运动规律的探究, 来掌握液压传动的基本原理, 即连续性原理和静压传递原理等, 并进一步理解液体流动时的压力损失。



知识链接

一、流体静力学基础知识

1. 液体的静压力及其特性

1) 液体的静压力

静止液体在单位面积上所受的力称为静压力，若在液体内部某点处微小面积 A 上作用有法向力 F ，则 $\frac{F}{A}$ 的极限就定义为该点处的静压力，并用 p 表示。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-11)$$

若在液体的面积 A 上，所受的为均匀分布的作用力 F ，则静压力可表示为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-12)$$

液体静压力在物理学上称为压强，在工程实际应用中习惯上称为压力。

2) 液体静压力的特性

- (1) 液体静压力垂直于其承压面，其方向和该面的内法线方向一致。
- (2) 静止液体内部任一点所受到的静压力在各个方向上都相等。

2. 液体静力学的基本方程

如图 1-5 (a) 所示，密度为 ρ 的液体在外力作用下处于静止状态。若要求液体离液面深度为 h 处的压力，可以假想从液面往下切取一个高为 h 、底面积为 A 的垂直小液柱（见图 1-5 (b)），这个小液柱在重力 G ($=mg = \rho vg = \rho gh \Delta A$) 及周围液体的压力作用下处于平衡状态。于是有

$$p \Delta A = p_0 \Delta A + \rho gh \Delta A \quad (1-13)$$

等式两边同除以 ΔA ，则得

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-14)$$

式 (1-14) 即为液体的静压力基本方程式，由此基本方程式可知静止液体的压力分布有如下特征。

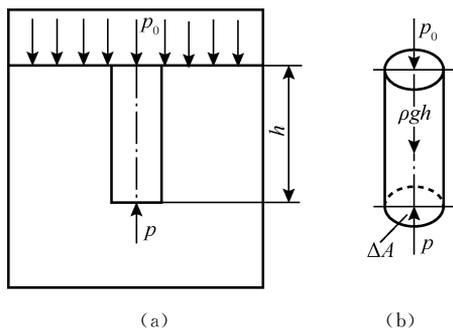


图 1-5 重力作用下静止液体受力分析

(1) 静止液体内任一点的压力由两部分组成：一部分是液面上的外加压力 p_0 ；另一部分是该点以上液体自重所形成的压力，即 ρg 与该点离液面深度 h 的乘积。当液面上只受大气压力 p_a 作用时，液体任一点处的压力为

$$p = p_0 + \rho g h$$

静止液体内的任一点压力随该点距离液面的深度呈直线规律递增。

(2) 离液面深度相同处各点的压力均相等，而压力相等的所有点组成的面称为等压面。在重力作用下静止液体中的等压面为水平面，而与大气接触的自由表面也是等压面。

(3) 对静止液体，如液面外加压力为 p_0 ，液面与基准水平面的距离为 h_0 ，液体任一点的压力为 p ，与基准水平面的距离为 h ，则由静压力基本方程式可得

$$\frac{p_0}{\rho} + h_0 g = \frac{p}{\rho} + h g = \text{常量} \quad (1-15)$$

式中， $\frac{p}{\rho}$ 为静止液体中单位质量液体的压力能； $h g$ 为单位质量液体的势能。公式的物理意义为：静止液体中任一质点的总能量保持不变，即能量守恒。

(4) 在常用的液压装置中，一般外加压力 p 远大于液体自重所形成的压力 $\rho g h$ ，因此分析计算时可忽略 $\rho g h$ 不计，即认为液压装置静止液体内部的压力是近似相等的。在以后有关章节分析计算压力时，都采用这一结论。

3. 静压传递原理

如图 1-6 所示盛放在密闭容器内的液体，其外加压力发生变化时，只要液体仍保持其原来的静止状态不变，液体中任一点的压力将发生同样大小的变化。这就是说，在密闭容器内，施加于静止液体上的压力将等值地同时传递到液体各点。这就是静压传递原理，或称为帕斯卡（Pascal）原理。

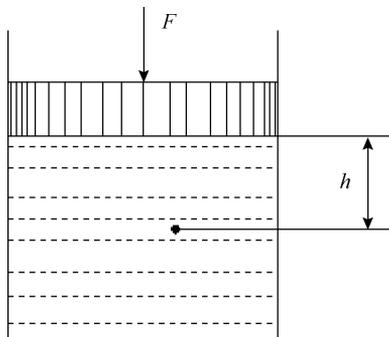


图 1-6 静止液体内的压力

在图 1-6 中，活塞上的作用力 F 对液面产生外加压力， A 为活塞横截面积，根据静压传递原理，容器内液体的压力 p 与负载 F 的关系是

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-16)$$

当活塞横截面积一定时，由式 (1-16) 可知压力 p 与负载 F 之间总保持着正比

关系。若 $F=0$ ，则 $p=0$ ； F 越大，液体内的压力也越大。由此可见，液体内的压力是由外界负载作用所形成的，则液压系统内工作压力的大小取决于外负载的大小，这是液压传动中的一个重要的基本概念。

例 1-1 如图 1-7 所示，容器内充满油液。已知油的密度 $\rho=900 \text{ kg/m}^3$ ，活塞上的作用力 $F=1000 \text{ N}$ ，活塞面积 $A=1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，忽略活塞的质量。求活塞下方深度为 $h=0.5 \text{ m}$ 处的静压力等于多少。

解 根据公式得活塞与油液接触面上的压力

$$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{1000}{1 \times 10^{-3}} = 10^6 \text{ Pa}$$

则深度为 h 处的液体压力为

$$p = p_0 + \rho gh = 10^6 + 900 \times 9.8 \times 0.5 = 1.0044 \times 10^6 \approx 10^6 \text{ Pa}$$

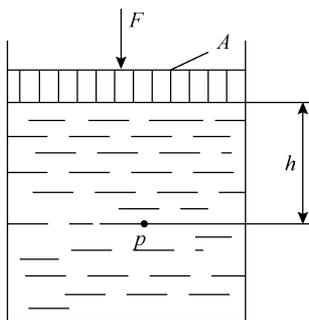


图 1-7 液体内压力计算

由本例可以看出，自重所产生的那部分静压力 ρgh 很小。

例 1-2 如图 1-8 所示为相互连通的两个液压缸，大缸的直径 $D=30 \text{ cm}$ ，小缸的直径 $d=3 \text{ cm}$ ，若在小活塞上加的力 $F=200 \text{ N}$ ，问大活塞能举起重物的重量 G 为多少？

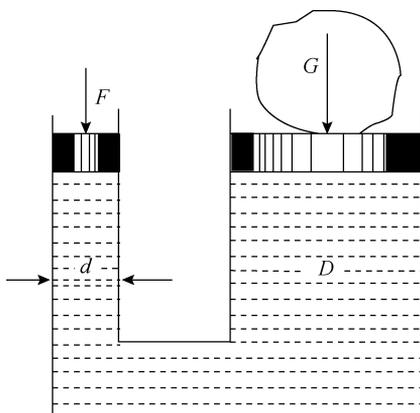


图 1-8 帕斯卡原理的应用实例

解 根据帕斯卡原理，由外力产生的压力在两缸中的数值应相等，即

$$p = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4G}{\pi D^2}$$

故大活塞能顶起重物的重量 G 为

$$G = \frac{D^2}{d^2} F = \frac{30^2}{3^2} \times 200 = 20\,000 \text{ N}$$

由本例可知，液压装置具有力的放大作用。液压机、液压千斤顶和万吨水压机等，都是利用该原理工作的。

4. 压力的测量与表示方法

根据度量基准的不同，液体压力分为绝对压力和相对压力两种。绝对压力以绝对真空为基准度量。相对压力或表压力以大气压为基准进行度量。因为大气中的物体受大气压的作用是自相平衡的，所以用压力表测得的压力数值是相对压力。在液压技术中所提到的压力，如不特别指明，均为相对压力。

绝对压力和相对压力的关系如下：

$$\text{相对压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

当绝对压力小于大气压力时，习惯上称为出现真空，绝对压力比大气压力小的那部分压力数值称为真空度。即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

当绝对压力低于大气压时，绝对压力不足于大气压力的那部分压力值，称为真空度。此时相对压力为负值，又称负压。绝对压力、相对压力和真空度的关系如图 1-9 所示。由图可知，以大气压 p_a 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。

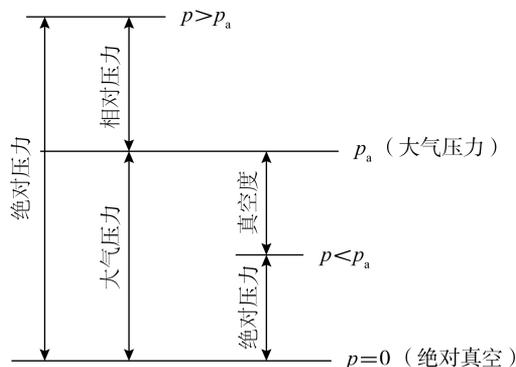


图 1-9 绝对压力、相对压力和真空度的关系

压力的单位除法定计量单位 Pa（帕， N/m^2 ）外，还有暂时允许使用的单位 bar（巴）和以前常用的一些单位，如工程大气压、水柱高或汞柱高等。各种压力单位之间的换算关系如下：

$$1 \text{ Pa (帕)} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$1 \text{ bar (巴)} = 1 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$1 \text{ at (工程大气压)} = 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$1 \text{ m H}_2\text{O (米水柱)} = 9.8 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ mmHg (毫米汞柱)} = 1.33 \times 10^2 \text{ N/m}^2$$

5. 流体对固体壁面的作用力

如图 1-10 所示, 具有一定压力的液体与固体壁面相接触时, 固体壁面将受到总的液压力的作用。当不计液体的自重对压力的影响时, 可认为作用于固体壁面上的压力是均匀分布的。

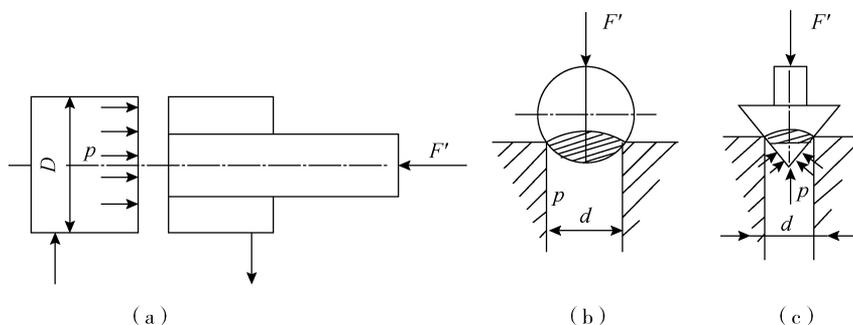


图 1-10 液压力作用在固体壁面上的力

当固体壁面是一个平面时 [见图 1-10 (a)], 液体压力在该平面上的总作用力 F 等于液体压力与该平面面积 A 的乘积, 其作用力方向与该平面垂直。即

$$F = pA \quad (1-17)$$

当固体壁面是一个曲面时, 液体压力在该曲面某方向上的总作用力等于液体压力与曲面在该方向上的投影面积的乘积。比如求 x 方向总作用力 F_x 的表达式为

$$F_x = pA_x \quad (1-18)$$

式 1-18 中, A_x 为曲面在 x 方向上的投影面积。

如图 1-10 (b), (c) 所示的球面和圆锥面, 若要求液压力 p 沿垂直方向 (y 方向) 作用在球面和圆锥面上的力, 其力 F_y (与图中 F' 方向相反) 就等于压力作用在该部分曲面在垂直方向的投影面积 A_y 与压力 p 的乘积, 其作用点通过投影圆的圆心, 其方向向上。即

$$F_y = pA_y = p \frac{\pi d^2}{4} \quad (1-19)$$

二、液体动力学基础

液体动力学主要研究液体的流动状态、液体在外力作用下流动时的运动规律及液体流动时的能量转换关系。

(一) 基本概念

1. 理想液体和恒定流动

由于液体具有黏性, 而且黏性只是在液体运动时才体现出来, 因此在研究流动液体时必须考虑黏性的影响。液体中的黏性问题非常复杂, 为了分析和计算问题的方便,