



高职高专规划教材

YEYA CHUANDONG JI KONGZHI JISHU

# 液压传动及控制技术

□ 主 编 楼锡银  
副主编 钱振华



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

# 液压传动及控制技术

主 编 楼锡银  
副主编 钱振华



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 图书在版编目 (CIP)数据

液压传动及控制技术 / 楼锡银主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2012.8  
ISBN 978-7-308-07967-9

I. ①液… II. ①楼… III. ①液压传动②液压控制  
IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 177826 号

## 液压传动及控制技术

楼锡银 主编

---

责任编辑 王 波  
封面设计 刘依群  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 杭州中大图文设计有限公司  
印 刷 富阳市育才印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 16.75  
字 数 367 千  
版 次 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-07967-9  
定 价 33.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

# 前 言

随着应用电子技术、计算机技术、信息技术、自动控制技术等的发展和应⽤,液⽡传⽡与控制技术也在不断创新。液⽡传⽡技术已成为工业机械、⼯程建筑机械及国防尖端产品不可缺少的重要技术,其正向自动化、高精度、高效率、⼩速化、⼩功率、⼩型化、集成化、轻量化⽅⽡发展。

编者在吸收同类教材的编写经验和最新的教学、科研成果的同时,融⼊了编者的教学心得和体会,紧密联系液⽡技术的发展⽅⽡,增加了⽡前⼯程实践⽡⽤的一些具有代表性的液⽡元件,贯彻少⽡精、理论与实⽡相结合的原则,适当淡化了纯理论分析,侧重对⼯程技术应⽤能力的培养,加强了对学⽡分析问题、解决问题能力和创新意识的培养,紧扣机电类专业特点,采⽡理论实⽡一体化训练法,优化教材内容,增强了实⽡性,实现理论知识与技能训练的统一。具体体现在如下⼩个⽡⽡。

① 围绕机电类专业技能型紧缺人才的职业技能要求,去除烦琐深奥的理论知识,简化液⽡元件的⽡作原理,降低理论难度,突出元器件的识别⽡法及性能特点,突出基本回路的连接、调试及简单、液⽡系统⽡见故障的分析⽡法。

② 便于理论实⽡一体化教学法的应⽤。在液⽡基本元件的介绍中,按宏观认识→拆装结构→⽡作过程分析→故障分析的顺序进⽡。这样,使理论教学与动手操作有机结合,提高了教学效率,激发了学⽡的学习兴趣。

③ 打破原有学科体系框架,采⽡模块化进⽡整合。本教材分 8 个模块,每个模块的构建⽡以各基本回路为⼩模块。例如液⽡控制部分,由⽡向控制、压力控制和速度控制等⼩模块构成,这不仅便于理论的有效讲解,而且便于项⽡训练的实⽡,达到理论知识和技能训练内容的统一。

本书由楼锡银、钱振华、周忠友共同编写。其中,楼锡银编写了项⽡ 1、项⽡ 2、项⽡ 3、项⽡ 5;钱振华编写了项⽡ 6、项⽡ 7、项⽡ 8;周忠友编写了项⽡ 4。湖州机床厂有限公司⼯程师费新丽、液⽡系统设计⼯程师费纪龙也参与了本书的编写⽡作。本书由楼锡银担任主编,钱振华担任副主编。

本书在编写过程中,得到了学校领导和教务处有关同志的热情支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,恳请⼩⽡读者提出宝贵意见,以便修正。

编 者  
2012 年 3 月



# 目 录

项目 1 液压传动技术的应用 .....	1
1.1 压技术发展过程与趋势 .....	1
1.2 液压传动系统的组成 .....	2
1.3 液压压力的形成 .....	6
【思考与练习】 .....	8
项目 2 液压工作介质及流体力学基础 .....	9
2.1 工作介质 .....	9
2.2 静止液体的力学规律 .....	13
2.3 流动液体的基本力学特性 .....	16
2.4 伯努利方程 .....	18
2.5 管路内压力损失计算 .....	19
2.6 液流流过小孔及缝隙的流量 .....	24
【思考与练习】 .....	31
项目 3 液压控制阀 .....	33
3.1 液压控制阀分类及基本要求 .....	33
3.2 方向控制阀 .....	37
3.3 压力控制阀 .....	52
3.4 顺序阀 .....	63
3.5 压力继电器 .....	69
3.6 压力阀的比较 .....	72
3.7 流量控制阀 .....	75
3.8 逻辑阀 .....	80
3.9 电液伺服阀 .....	84
3.10 比例控制阀 .....	89
【思考与练习】 .....	90





<b>项目 4 液压动力元件和执行元件</b> .....	94
4.1 液压泵的结构与原理 .....	94
4.2 齿轮泵 .....	102
4.3 内啮合齿轮泵 .....	108
4.4 摆线转子泵 .....	111
4.5 螺杆泵 .....	114
4.6 叶片泵 .....	117
4.7 轴向柱塞泵 .....	120
4.8 液压马达 .....	124
4.9 液压缸 .....	131
<b>【思考与练习】</b> .....	146
<b>项目 5 液压辅件</b> .....	150
5.1 蓄能器 .....	150
5.2 过滤器 .....	155
5.3 油箱和热交换器 .....	162
5.4 管件 .....	164
5.5 密封装置 .....	167
5.6 压力计 .....	170
<b>【思考与练习】</b> .....	170
<b>项目 6 液压系统控制回路的安装与调试</b> .....	172
6.1 方向控制回路的安装调试 .....	172
6.2 压力控制回路的安装与调试 .....	174
6.3 速度控制回路的安装与调试 .....	182
6.4 多缸工作控制回路的安装与调试 .....	187
6.5 典型液压系统控制回路 .....	192
<b>【思考与练习】</b> .....	200
<b>项目 7 Y28-100/180 型双动液压机控制系统安装调试</b> .....	204
7.1 Y28-100/180 型双动液压机液压系统 .....	204
7.2 三菱 FX 系列 PLC 的应用 .....	210
7.3 Y28-100/180 型双动液压机液压控制系统的安装 .....	220
7.4 Y28-100/180 型双动液压机的调试和保养 .....	236
<b>【思考与练习】</b> .....	239

项目 8 液压传动系统的设计 .....	240
8.1 液压传动系统的设计计算 .....	240
8.2 四柱式液压机液压系统的设计计算 .....	247
【思考与练习】.....	254
参考文献.....	257



# 项目 1 液压传动技术的应用

## 技能目标

1. 能写有关液压技术在工程方面的应用报告；
2. 能够分析千斤顶中各元件的作用；
3. 能够分析千斤顶从动力输入、动力传输、重物顶起的整个过程；
4. 熟练绘制液压千斤顶工作原理图；
5. 熟练完成压力形成实训报告。

## 知识目标

1. 了解液压技术在工程上的应用情况；
2. 知道液压传动是以液体为介质进行工作的；
3. 理解机械能—液压能—机械能的两次能量转换输出动力的过程；
4. 理解液压传动的工作特性(流量  $q-v$ , 压力  $p-F$ )；
5. 知道通过流量、压力的控制来满足执行元件的运动要求。

## 任务说明

### 1.1 液压技术发展过程与趋势

液压技术是在水力学、工程力学和机械制造基础上发展起来的一门应用科学技术。液压传动是以流体作为工作介质对能量进行传动和控制的一种传动形式,利用有压的液体经由一些机件控制之后来传递运动和动力。相对于电力拖动和机械传动而言,液压传动具有输出力大,重量轻,惯性小,调速方便以及易于控制等优点,因而广泛应用于工程机械、建筑机械和机床等设备上。

1650年,布莱士·帕斯卡(Pascal)提出的水静压力原理(也称为帕斯卡原理)是液压技术的基础。1795年,英国伦敦的约瑟夫·布拉曼(Joseph Bramah)首次将帕斯卡原理应用于水压机,通过用水作为工作介质,以水压机的形式将其应用于工业上,诞生了世界上第一台水压机。由于要使用原油炼制品来作为传动介质,近代液压传动技术是由19世纪崛起并蓬勃发展的石油工业推动起来的。1905年,将工作介质由水改为





油,使液压技术又进一步得到提高。

我国的液压工业开始于 20 世纪 50 年代,目前正处于迅速发展、提高的阶段。其产品最初只用于机床和锻压设备,后来才用到拖拉机和工程机械上。自从 1964 年从国外引进一些液压元件生产技术,同时进行自行设计液压产品以来,我国的液压件生产已从低压到高压形成系列,并在各种机械设备上得到了广泛的使用。80 年代起更加速了对国外先进液压产品和技术有计划引进、消化、吸收和国产化工作,以确保我国的液压技术能在产品质量、经济效益、研究开发等各个方面全方位地赶上世界水平。随着工业迅猛发展逐日发展壮大,相继建立了科研机构和专业生产厂家,从事液压技术研究和液压产品生产。他们不但能生产液压泵,液压阀等液压元件,还设计制造了许多新型液压的元件,如电液比例控制阀,电液伺服阀等。到目前为止,液压元件的生产,已成为了我国液压元件产品的生产系列。液压技术的发展正向着高效率,高精度,高性能方向迈进。液压元件向着体积小,重量轻,微型化和集成化方向发展,液压技术,交流液压等新兴的液压技术正在开拓。又由于计算机的应用,更大大地推进了液压技术的发展,像液压系统的辅助设计,计算机仿真和优化,微机控制等工作,也都取得了显著成果。当前,液压技术在实现高压,高速,大功率,高效率,低噪音,经久耐用,高度集成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,在液压元件和液压系统的计算机辅助设计,计算机仿真和优化以及微机控制等开发性工作方面,日益显示出显著的成绩。微电子技术的进展,渗透到液压与气动技术中并与之结合,创造出了很多高可靠性,低成本的微型节能元件,为液压气动技术在工业各部门中的应用开辟了更为广泛的前景。今天,为了和最新技术的发展保持同步,液压技术必须不断发展,不断提高和改进元件和系统的性能,以满足日益变化的市场需求。液压技术下正在向高压、高速、大功率、高效率、低噪声、高可靠性、高度集成化、数字化等方面发展。液压与电气、液压与微电子技术、液压与计算机控制相结合的机电液一体化已成为世界液压技术的发展潮流。

## 1.2 液压传动系统的组成

### 1.2.1 液压传动系统举例

图 1-1 所示为一种常用的液压千斤顶的工作原理图。它主要由杠杆 1、小活塞 2、泵体 3 和单向阀 4、5 等组成的手动液压泵和由大活塞 7、缸体 6 等组成的液压缸构成,8 为重物,9 为截止阀,10 为油箱。

当提起杠杆 1 时,活塞 2 上升,泵体 3 下腔的工作容积增大(此时单向阀 5 关闭),腔内形成真空,油箱 10 中的油液在大气压的作用下推开单向阀 4 的钢球,进入并充满泵体 3 的下腔。当压下杠杆 1 时,活塞 2 下降,单向阀 4 关闭,泵体 3 中的油液推开单

向阀 5 进入缸体 6 的下腔,推动活塞 7 将重物 8 举起。反复提起压下杠杆,就可以使重物不断上升,达到起重的目的。

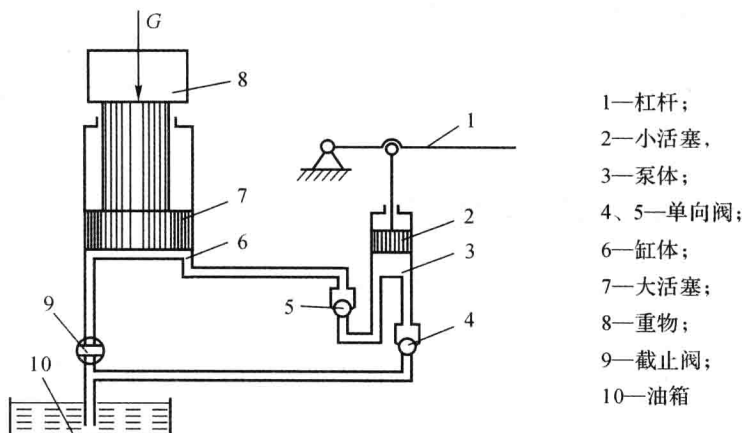


图 1-1 液压千斤顶的工作原理图

当活塞 7 停止运动时,只要停止杠杆 1 的运动,缸体 6 中的油压使单向阀 5 关闭,活塞 7 就自锁不动。如果需要重物下降,则可打开截止阀 9,使缸体 6 的下腔直接与油箱 10 相通,在重物  $G$  的作用下,活塞 7 向下移动,油液即排回油箱。在实际应用中要完成液压传动的任务,往往需要由许多不同的液压元件组成液压传动系统来实现。

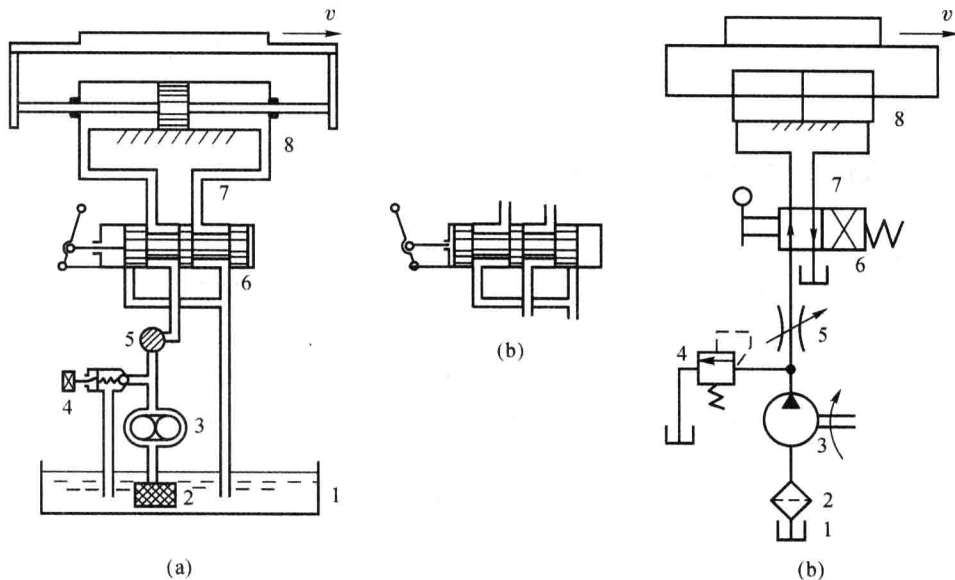


图 1-2 机床工作台液压传动系统



如图 1-2 所示的机床工作台往复运动的传动系统,工作台 8 由活塞杆带动作直线往复运动,液压系统中的工作油液由齿轮泵 3 供给。为了改变工作台的运动方向,设置了手动换向阀 6,以改变进入液压缸的油液流向。节流阀 5 用来改变进入液压缸的油液流量,以控制工作台的运动速度。溢流阀 4 在控制液压泵输出油液压力的同时,也起着把泵输出的多余油液排回油箱的作用。管道和管接头用于将这些元件连接起来。

### 1.2.2 液压传动系统的组成和作用

从以上的例子可以看出,液压传动系统主要由以下 4 个部分组成。

#### 1. 动力元件

动力元件(液压泵)是把机械能转换成液体压力能的元件,作为系统的供油能源,如图 1-1 中的手动液压泵和图 1-2 中的齿轮泵 3。

#### 2. 执行元件

执行元件(液压缸或液压马达)是把液体的压力能转换成机械能的元件,对负载做功,如图 1-1 和图 1-2 中作直线运动的液压缸。

#### 3. 控制元件

控制元件(各种液压控制阀)是控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向的元件,用来实现执行元件的作用力、运动速度和运动方向的控制与调节,如图 1-2 中的溢流阀 4、节流阀 5 和换向阀 6 等元件。

#### 4. 辅助元件

辅助元件是除上述三项以外的其他元件,如图 1-2 中的油箱 1、过滤器 2、油管 7 等,它们对保证液压系统可靠、稳定、持久地工作有着重要的作用。

### 1.2.3 液压传动的优缺点及其应用

#### 1. 液压传动的优点

液压传动与机械传动、电气传动、气压传动相比有下列一些优点:

(1)在相同功率下,液压传动装置的体积小,重量轻,惯性小,结构紧凑。液压传动一般使用的压力在 7MPa 左右,也可高达 50MPa。例如,液压马达的体积仅为同功率电动机的 12%~13%,重量仅为同功率电动机的 10%~20%。

(2)液压传动的各个元件,可根据需要方便、灵活地来布置。

(3)速度调整容易。液压传动装置只要调整流量控制阀即可在运转过程中轻易实现无级调速,且调速范围较大,如某些情况下可达 1000:1。

(4)液压传动装置的工作比较平稳,反应快,冲击小,能高速启动、制动和换向。例如,往复直线运动的换向频率每分钟可达 400~1000 次。

(5)液压传动装置的控制、调节比较简单,操纵比较方便、省力,易于实现自动化,液

压设备配上电磁阀、电气元件、可编程控制器和计算机等,可装配成各式自动化机械,能实现复杂的顺序动作和远程控制。

(6) 液压传动装置易于实现过载保护。液压系统中装有溢流阀,当压力超过设定压力时,阀门开启,液压经由溢流阀流回油箱,此时液压油不处在密闭状态,故系统压力永远无法超过设定压力。例如,系统中设置安全阀后,就可以防止超载而发生故障。同时,油液能使各相对运动表面自行润滑,所以液压传动装置的使用寿命较长。

(7) 液压元件已经实现了系列化、标准化、通用化,故易于设计、制造和推广使用。

### 2. 液压传动的缺点

(1) 液压传动装置以液体作为工作介质,往往容易形成泄漏。同时,油液也具有一定的可压缩性。由于这些原因,因而液压传动的效率较低,一般为75%~80%,有时甚至在50%以下。

(2) 液压传动装置由于在能量转换及传递过程中存在着机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失等问题,因而无法保证严格的传动比。

(3) 因为油液的温度变化会引起油液的黏度变化,从而影响系统的工作性能,所以液压传动装置一般不宜在低温及高温下工作。另外,液压传动对油液的污染亦比较敏感,要求有良好的过滤设施。

(4) 液压传动需要有单独的能源(如液压泵站),液压能不能像电能那样从远处传来,液压元件制造精度高,造价高,因此价格较贵。此外,液压装置的使用与维修要求有较高的技术水平和一定的专业知识,所以必须组织专业生产。

(5) 工作时会有噪声。液压系统工作时出现噪声是不可避免的,如液压泵发生“困油现象”、“气穴现象”时,就可能产生尖锐、刺耳的声音,并常伴有振动,严重时会造成液压泵的损坏。

(6) 液压传动装置出现故障时不易查找原因,不易迅速排除。

### 3. 液压技术的应用

由于液压技术的诸多优点,使其发展很快,特别是经过最近半个世纪的飞速发展,液压技术已成为包括传动、控制、检测在内的对现代机械装备技术进步有重要影响的基础技术,其应用遍布各个工业领域。从蓝天到水下,从军用到民用,从重工业到轻工业,到处都有液压传动及控制技术的应用。国外生产的95%的工程机械、90%的数控加工中心、95%的自动生产线都采用了液压传动与控制技术。由于液压技术的采用对机电产品的质量和生产水平的提高起到了极大的促进和保证作用,因而采用液压技术的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志。可以预见,随着科学技术的不断发展,液压技术将会在许多工业部门中发挥越来越大的作用。



## 1.3 液压压力的形成

### 1.3.1 液压传动的基本概念

任何一部机器都有传动机构,借助它以达到对动力进行传递和控制的目的。按照传动所采用的机构或工作介质的不同可分为机械传动、电气传动和流体传动。

流体传动是以流体(液体、气体)为工作介质进行能量转换、传递和控制的传动形式。以液体为工作介质时为液体传动;以压缩空气为工作介质时为气体传动。

液体传动又分为性质截然不同的两种传动形式:液压传动和液力传动。液压传动主要利用液体静压能来传递运动和动力,其工作原理基于物理学中的帕斯卡原理,也称静液传动或容积式传动。液力传动主要利用液体动能来传递运动和动力,其工作原理基于流体力学中的动量矩定理。

### 1.3.2 液压传动的工作原理

液压传动应用了液体的两个最重要的特征:①假定液体不可压缩;②静止液体压力各向相等。

图 1-1 所示为液压传动的工作原理图。右边是液压泵 1,左边是液压缸 3,均配以密封的活塞,中间用管道 5 连接起来。当小活塞 2 上作用有较小的主动力时,液压泵就产生相应的压力,根据帕斯卡原理,这个压力等值传递到液压缸 3,平衡作用于大活塞 4 上的很大的作用力。当小活塞向下移动时,液压泵排出的液体进入液压缸下腔,使大活塞提升,推动负载作功。这就是液压传动的工作原理。

### 1.3.3 液压传动常用的基本公式

#### 1. 负载作用力 $F$ 与液压介质压力 $p$ 之间的关系

在图 1-1 所示的简单液压传动装置中,设液压泵活塞 2 的面积为  $A_1(\text{m}^2)$ ,液压缸活塞 4 的面积为  $A_2(\text{m}^2)$ ,工作腔与管道 5 中都充满油液并与大气隔绝。在液压缸活塞上放有重物  $G$ ,设它所产生的重力为  $F_2(\text{N})$ ,设大活塞 7 顶着重物时保持恒速运动,则根据力平衡方程:

$$F_2 - G = 0 \quad (1-1)$$

作用在液压泵活塞上的作用力为  $F_1(\text{N})$ ,根据液体静力学原理,存在以下关系:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p_1 A_1 \\ F_2 &= p_2 A_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$



由于压力在传递过程中是等值的,故  $p_1 = p_2 = p$ , 因而

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

$$F_2 = G = pA_2 \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知,液压传动中负载  $F$  与压力  $p$  之间的关系可表述为:液压系统的压力取决于负载,并且随着负载的变化而变化。

### 2. 运动速度 $v$ 与液体介质流量 $q$ 之间的关系

假定不考虑液体的泄漏,也不考虑油液的可压缩性以及泵体、缸体和管道的弹性变形,在传动过程中,各工作腔容积变化是相等的,也即符合液流的连续性方程,所以有

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = q(\text{m}^3/\text{s}) \quad (1-4)$$

则

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} (\text{m/s}) \quad (1-5)$$

从式(1-5)可以可知,由于  $A_2$  比  $A_1$  大得多,因此液压缸活塞的运动速度比液压泵活塞的运动速度小得多,可见此液压传动装置是一个减速传动机构。因为  $A_1$  和  $A_2$  已定,所以液压缸带动工作机构的移动速度  $v_2$  的大小与输入流量成正比,输入液压缸的流量  $q$  越大,则运动速度  $v_2$  就越大。

因此,液压传动中运动速度  $v$  与流量  $q$  的关系可表述为:液压缸的运动速度取决于进入液压缸的流量,并且随着流量的变化而变化。

### 3. 液压传动的功率计算

功率是力和速度的乘积。如果忽略各种摩擦损失和漏损,则液压泵输入的功率和液压缸输出的功率符合能量守恒原理,即

$$P_1 = F_1 v_1 (\text{N} \cdot \text{m/s})$$

$$P_2 = F_2 v_2 (\text{N} \cdot \text{m/s})$$

由于  $P_1 = P_2 = P$ , 因而

$$P = F_1 v_1 = F_2 v_2 (\text{N} \cdot \text{m/s}) \quad (1-6)$$

为了区别这两种功率,我们把  $P_1 = F_1 v_1$  称为液压泵的输入功率,把  $P_2 = F_2 v_2$  称为液压缸(或液压马达)的输出功率。

我们将  $F_1 = pA_1$ 、 $F_2 = pA_2$  代入式(1-6),就得到液压传动中常用的功率公式:

$$P = pA_1 v_1 = pA_2 v_2 = pq \quad (1-7)$$

式中: $p$ ——压力( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$q$ ——流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

由式(1-7)可知:在液压传动中,功率就是压力与流量的乘积。

### 思考与练习

1. 何谓液压传动？举例说明液压传动的工作原理。
2. 液压传动系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
3. 与其他传动方式相比，液压传动有何优点？有何缺点？
4. 什么是压力？压力有哪几种表示方法？液压系统的工作压力与外界负载有什么关系？

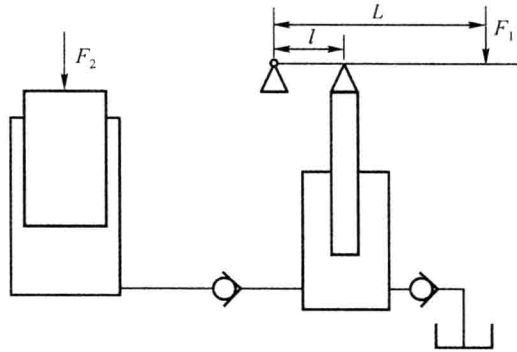


图 1-3 题 1-5 图

5. 如图 1-3 所示的液压千斤顶，小柱塞直径  $d=10\text{mm}$ ，行程  $S_1=25\text{mm}$ ，大柱塞直径  $D=50\text{mm}$ ，重物产生的力  $=50\text{kN}$ ，手压杠杆比  $L:l=500:25$ ，试求：
  - (1) 此时密封容积中的液体压力  $p$  是多少？
  - (2) 杠杆端施加力  $F_1$  为多少时，才能举起重物？
  - (3) 在不计泄漏的情况下，杠杆上下动作一次，重物的上升高度  $S_2$  是多少？



## 项目2 液压工作介质及流体力学基础

### 技能目标

1. 能够对液压油进行分类；
2. 了解液压油的性质及选用原则；
3. 掌握绝对压力、相对压力和真空度之间的关系。

### 知识目标

1. 熟悉液压油的黏度与温度关系；
2. 了解压力表示方法；
3. 了解液压冲击与气穴现象。
4. 了解小孔流动的特点；
5. 理解流体动力学基本方程。

### 任务说明

## 2.1 工作介质

### 2.1.1 工作介质的主要物理性质

#### 1. 密度

密度是液体单位体积的质量,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中: $m$ ——液体的质量;

$V$ ——液体的体积。

一般条件下,由于工作介质的密度随温度和压力的变化很小,常把液体的密度当作常量使用。





2. 液体的可压缩性

(1) 液体的可压缩性

液体所受压力增加时体积变小的性质叫液体的可压缩性。其定义为单位压力变化时液体体积的相对变化量,用体积压缩系数  $k$  表示,即

$$k = - \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

式中:  $\Delta p$  —— 压力的变化值;

$V_0$ 、 $\Delta V$  —— 分别表示液体的初始体积和受  $\Delta p$  作用后的体积变化值。由于  $\Delta p$  增加时  $\Delta V$  为负增长量,为使  $k$  为正值,上式右项前有一负号。在实际使用时,常用  $k$  的倒数  $K$  来衡量液体的可压缩性,  $K$  称为液体的体积弹性模量。

$$K = \frac{1}{k} = - \frac{V_0 \Delta p}{\Delta V} \tag{2-2}$$

石油型液压油的  $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^3 \text{ MPa}$ 。考虑到一般液压系统中难免混入气体,所以在计算时常常取  $K = (0.7 \sim 1.4) \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

压力变化不大时,液体体积变化很小,因此在讨论系统的静态特性时,通常不考虑油的可压缩性,而在研究液压系统的动态特性时,油的可压缩性则为重要因素。

(2) 液压弹簧的刚度系数

在变动压力下,液压油可压缩性的作用如一个弹簧,即压力升高,油液体积减小;压力降低,油液体积增大。这个弹簧的刚度可用如下方法求出(见图 2-1)。当作用在封闭液体上的外力发生  $\Delta F$  的变化时,如果液体承压面积  $A$  不变,则液柱的长度有  $\Delta l$  的变化。体积变化为  $\Delta V = A \cdot \Delta l$ , 压力变化为  $\Delta P = \Delta F/A$ , 代入式(2-2)中可得

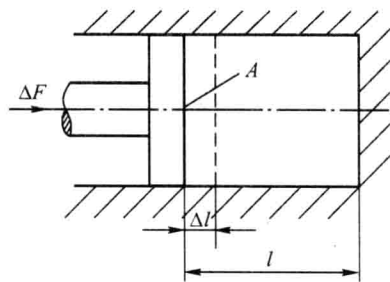


图 2-1 “液压弹簧”刚度计算简图

$$K = - \frac{V_0 \Delta F}{A^2 \Delta l} \tag{2-3}$$

故

$$K_h = - \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{KA^2}{V_0} \tag{2-4}$$

式中:  $K_h$  —— 液压弹簧的刚度系数,单位 N/m。