

▪ 普通高等学校职业教育教材 ▪

液压技术

吴卫荣 主编 周曲珠 张立新 副主编 张安全 主审



 中国轻工业出版社

普通高等学校职业教育教材

液 压 技 术

吴卫荣 主编
周曲珠 张立新 副主编
张安全 主审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

液压技术/吴卫荣主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2006. 3

普通高等学校职业教育教材

ISBN 7-5019-5229-9

I. 液... II. 吴... III. 液压技术-高等学校: 技术学校-教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 158033 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 邱亦刚

版式设计: 马金路 责任校对: 李 靖 责任监印: 胡 兵

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 北京公大印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2006 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.75

字 数: 400 千字

书 号: ISBN 7-5019-5229-9/TH·065 定价: 25.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010—65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010—85119817 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

51415J4X101ZBW

前 言

在教育部组织制定的《高职高专教育专门课程基本要求》、《高职高专教育专业人才培养目标及规格》以及《新世纪高职高专教育人才培养模式和内容体系改革与建设项目计划》基本精神指导下,本着以就业为导向,以企业需要的技术人才为教学目标的宗旨,通过教学实践,我们编写了《气动技术》与《液压技术》两教材。

传统的本科教材多数是把“气动”和“液压”作为一本书,因为,从理论上讲,它们有许多共同的原理;从学术上讲,它们都统一定义在流体的大范畴内;从教学上讲,相似结构和特点部分可以对照论述。这样做的优点在于既减少了重复,又增加了对比,同时还可减少课堂学时。但是我们在长期职业教育中感到,将“气动”和“液压”分成两本教材更有利于实践环节的教学,更有利于学生动手能力的培养。我们把来自实际中的“气动”和“液压”素材编制成两本“校本”教材,经过毕业学生在企业实干后的信息反馈,反复修改,在兄弟院校和中国轻工业出版社的大力支持下,整理成此教材。

本教材的编写目的就是要使学生学以致用,提高学生动脑与动手能力,即学生在课堂上学习了基本理论知识后,马上进实验室用计算机软件进行模拟仿真设计,再到实训现场用真实的元件对自己设计的系统进行组装。我们强调学生必须有很强的动手能力,力求学生进入企业后,能够快速适应企业,并快速成为具有实干能力的工程技术人员。因此我们建议这门课程理论与实践的课时比至少为1:1;当然也可以根据实际情况作调整。

当前的传动技术一般可分为机械传动、气压传动、液压传动和电气传动。气压传动、液压传动和电气传动不能独立使用,必须与机械传动相结合;液压技术虽然是机械技术的一个分支,但其工作原理却与一般的机械不同。作者根据实践经验和理论分析,经过大量的实例对液压系统的设计和应用作出说明,目的是使读者能正确合理地对液压系统进行分析、设计、使用和一般维护。

本书的第一、二、六章由苏州百得电动工具有限公司(Black & Decker)张立新高级工程师编写,第三、四、五、八、九、十章由苏州经贸职业技术学院周曲珠副教授编写,其余部分由吴卫荣高级工程师编写。

另外,我们特别感谢苏州工业园区职业技术学院、哈尔滨职业技术学院、四川绵阳职业技术学院、四川机电职业技术学院、苏州经贸职业技术学院、辽宁机电职业技术学院、辽宁信息职业技术学院、辽阳职业技术学院、湖北轻工职业技术学院、宜昌职业技术学院、河南机电高等专科学校、郑州牧业高等专科学校、天津职业大学等院校的老师魏宣燕、吴坚、陆伟、黄冬梅、吕思科、潘秀石、周文、钟绍实、王瑞、王德滨、马彪、黄定明、姚永刚、葛飞、李琰、张莘,他们在此书编写中提出许多宝贵意见和建议。

本书可作为大专院校工业自动化、电气控制、自动控制、机电一体化等专业的教学用书,对于广大技术工程人员,这也是一本更新知识结构的参考书。

希望同行、专家、学生能够对此教材的不足多提宝贵意见,我们将不断修订,使此教材能够在中国高等职业教育的改革中发挥积极的作用。

编者

苏州工业园区职业技术学院

目 录

第一章 绪论	1
第一节 液压传动的工作原理及其组成	1
第二节 液压传动的优缺点及应用	3
第二章 液压系统流体力学基础	5
第一节 液压传动中的两个重要参数	5
第二节 管道内压力损失	8
第三节 液体流经小孔和间隙时的流量	10
第四节 液压冲击及空穴现象	13
第五节 液压油	15
第三章 液压动力元件	18
第一节 液压泵概述	18
第二节 齿轮泵	22
第三节 叶片泵	25
第四节 柱塞泵	31
第五节 液压泵的选用	34
第四章 液压执行元件	36
第一节 液压马达	36
第二节 液压缸	41
第三节 液压缸的典型结构和组成	46
第四节 液压缸的设计和计算	47
第五章 液压控制元件	52
第一节 概述	52
第二节 压力控制阀	52
第三节 方向控制阀	59
第四节 流量控制阀	67
第五节 液压逻辑元件	71
第六节 比例阀、叠加阀和伺服阀	73
第六章 辅助装置	79
第一节 油箱	79
第二节 蓄能器	80
第三节 滤油器	81
第四节 密封装置	84
第五节 其他辅助元件	86
第七章 液压图形规范	89
第一节 常用元件的符号	89

第二节	方向阀接口及其位置	95
第三节	阀门控制方式	96
第四节	控制流程图的绘制	97
第五节	液压回路的编号	99
第六节	液压回路的绘制	101
第七节	液压位移-步骤图	102
第八章	液压基本回路	109
第一节	方向控制回路	109
第二节	速度控制回路	110
第三节	压力控制回路	119
第四节	多缸动作回路	124
第九章	典型液压系统	130
第一节	林木球果采集机械手液压系统	130
第二节	组合机床液压系统	132
第十章	液压传动系统设计与计算	135
第一节	液压传动系统主要工作参数的确定	135
第二节	拟定液压系统图	139
第三节	液压元件的选择	140
第四节	液压系统性能的验算	142
第五节	正式工作图的绘制, 编写技术文件和设计液压装置	144
第六节	液压系统设计计算举例	144
第十一章	电子液压	151
第一节	常用传感器工作原理及应用	151
第二节	常用电气元件的符号及使用	161
第三节	典型电气回路及其控制	166
第四节	典型液压系统及其电气控制	172
第五节	综合实例	181
第六节	液压与 PLC 控制	187
第十二章	液压系统维护	209
第一节	经常性的维护工作	209
第二节	定期的维护工作	209
第三节	故障诊断与对策	210
第四节	维修工作	216
第五节	液压维护案例	217
实训第一部分	纯液压实训项目	225
一、	自动车床	225
二、	包裹抬举装置	226
三、	拉伸压力机	226
四、	纸张压辊	229
五、	淬火炉	229

六、锅炉门·····	230
七、传送带的方向校正装置·····	233
八、喷漆室·····	234
九、圆周自动进给机床·····	236
十、压印机·····	240
十一、平面磨床·····	242
十二、钻床·····	244
十三、舱壁门·····	246
十四、砂轮切割机·····	250
十五、推土槽车·····	251
十六、压粘机·····	252
十七、安装设备·····	254
十八、安装设备的计算·····	255
十九、铣床·····	256
二十、自卸槽车·····	258
实训第二部分 电子—液压实训项目 ·····	260
一、升降台·····	260
二、传送带零部件选择·····	260
三、弯曲装置·····	261
四、压合装置·····	262
五、冲模机·····	262
六、控制一扇门·····	264
七、切削加工单元·····	265
八、钻床进给·····	266
九、压力机·····	266
十、进料装置·····	267
十一、装配设备·····	268
十二、包裹提升装置·····	270
十三、锯床·····	271
参考文献 ·····	273

第一章 绪 论

[教学目标]

- (1) 熟悉液压传动的工作原理及组成。
- (2) 了解液压传动的优缺点及其应用。

第一节 液压传动的工作原理及其组成

一、液压传动的工作原理

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。

图 1-1 是液压千斤顶的工作原理图。大油缸 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小油缸 2、小活塞 3、单向阀 4 和 7 组成手动液压泵。如提起手柄使小活塞向上移动，小活塞下端油腔容积增大，形成局部真空，这时单向阀 4 打开，通过吸油管 5 从油箱 12 中吸油；用力压下手柄，小活塞下移，小活塞下腔压力升高，单向阀 4 关闭，单向阀 7 打开，下腔的油液经管道 6 输入举升油缸 9 的下腔，迫使大活塞 8 向上移动，顶起重物。再次提起手柄吸油时，单向阀 7 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举升缸下腔，使重物逐渐地升起。如果打开截止阀 11，举升缸下腔的油液通过管道 10、截止阀 11 流回油箱，重物就向下移动。这就是液压千斤顶的工作原理。

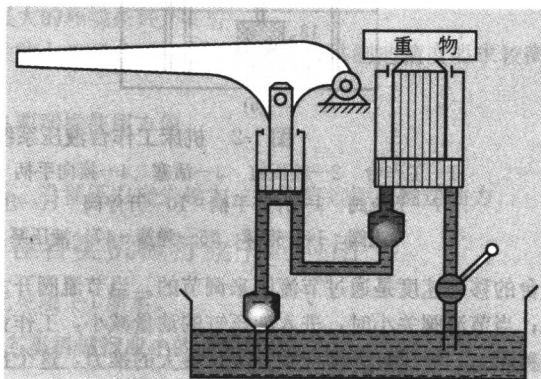
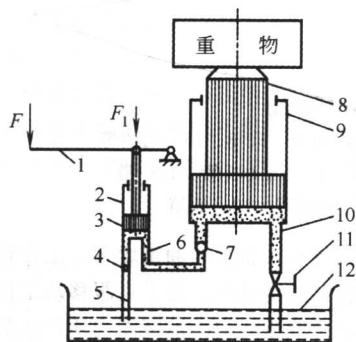


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

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

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。液压传动是利用有压力的油液作为传递动力的工作介质。压下杠杆时，小油缸 2 输出压力油，是将机械能转换成油液的压力能，压力油经过管道 6 及单向阀 7，推动大活塞 8 举起重物，是将油液的压力能又转换成机械能。大活塞 8 举升的速度取决于单位时间内流入大油缸 9 中油容积的多少。由此可见，液压传动是一个不同能量的转换过程。

二、液压传动系统的组成

液压千斤顶是一种简单的液压传动装置。下面分析一种驱动机床工作台的液压传动系统。如图 1-2 所示，它由油箱、滤油器、液压泵、溢流阀、开停阀、节流阀、换向阀、液压缸以及连接这些元件的油

管、接头组成。其工作原理如下：液压泵由电动机驱动后，从油箱中吸油。油液经滤油器进入液压泵，油液由泵腔的低压侧吸入，从泵的高压侧输出，在图 1-2 (a) 所示状态下，通过开停阀、节流阀、换向阀进入液压缸左腔，压力油推动活塞连同工作台向右移动。这时，液压缸右腔的油经换向阀和回油管 6 排回油箱。

如果将换向阀手柄转换成图 1-2 (b) 所示状态，则压力管中的油将经过开停阀、节流阀和换向阀进入液压缸右腔，压力油推动活塞连同工作台向左移动，并使液压缸左腔的油经换向阀和回油管 6 排回油箱。

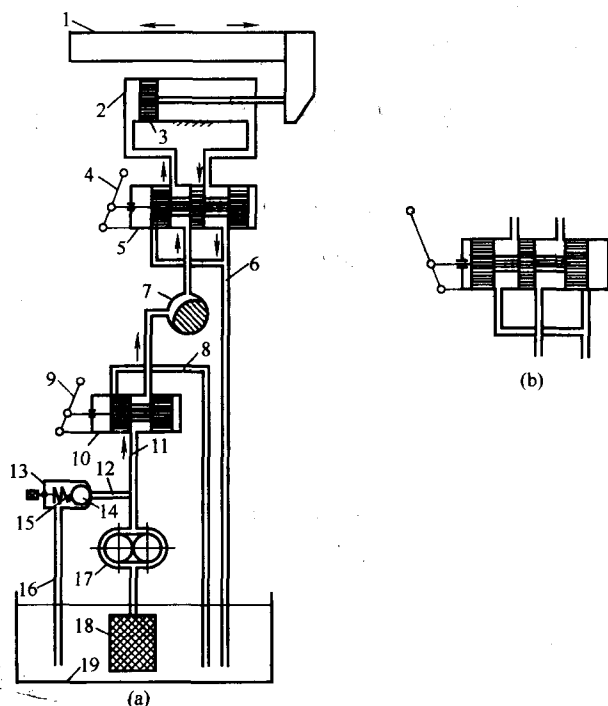


图 1-2 机床工作台液压系统工作原理图

1—工作台 2—液压缸 3—活塞 4—换向手柄 5—换向阀 6、8、16—回油管
7—节流阀 9—开停手柄 10—开停阀 11—压力管 12—压力支管 13—溢
流阀 14—钢球 15—弹簧 17—液压泵 18—滤油器 19—油箱

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀开大时，进入液压缸的油量增多，工作台的移动速度增大；当节流阀关小时，进入液压缸的油量减小，工作台的移动速度减小。为了克服移动工作台时所受到的各种阻力，液压缸必须产生一个足够大的推力，这个推力是由液压缸中的油液压力所产生的。要克服的阻力越大，缸中的油液压力越高；反之压力就越低。这种现象正说明了液压传动的一个基本原理——压力决定于负载。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，应该由以下五个主要部分来组成：

1. 能源装置

它是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. 执行装置

它是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. 控制调节装置

它是对系统中的压力、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、开停阀等。

4. 辅助装置

上述三部分之外的其它装置，例如油箱，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，即液压油等。

第二节 液压传动的优缺点及应用

一、液压传动的优缺点

1. 液压传动的优点

液压传动之所以能得到广泛的应用，是由于它具有以下的主要优点：

- (1) 液压传动借助油管的连接可以方便灵活地布置传动机构，这比机械传动优越。
- (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1：2000，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) 液压装置借助于设置溢流阀等易于实现过载保护，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，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. 液压传动的缺点

- (1) 液压传动是以液压油为工作介质，在相对运动表面间很难避免漏油等因素，同时油液又是可以压缩的，因此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，液体黏度变化，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。
- (6) 由于采用油管传输压力油，距离越长，沿程压力损失越大，故不宜远距离输送动力。

二、液压传动在各类机械行业中的应用

液压传动在一些机械工业部门的应用情况见表 1-1 所示。

表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用实例

行业名称	应用场所举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、压路机、铲运机等
起重运输机械	汽车吊、港口龙门吊、叉车、装卸机械、皮带运输机等
矿山机械	凿岩机、开掘机、开采机、破碎机、提升机、液压支架等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减振器等
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等

小 结

1. 液压传动的定义及其特点。

2. 液压系统的五大组成部分及其作用。
3. 液压传动的优缺点。

复习思考题

- 1-1 什么是液压传动？简述其工作原理。
- 1-2 液压系统由哪几部分组成？试说明各部分的作用。
- 1-3 试比较液压、气动与机械传动。

第二章 液压系统流体力学基础

【教学目标】 本章介绍有关液压传动的流体力学基础，重点为液压传动中的两个主要参数（压力与流量）的基本概念、单位及液体静压方程、连续性方程、伯努利方程。要求理解基本概念。

第一节 液压传动中的两个重要参数

压力和流量是流体传动及其控制技术中最基本、最重要的两个参数。本章主要讨论三个基本方程式，即液流的连续性方程、伯努利方程、动量方程。

一、压 力

（一）压力的定义及单位

1. 压力的定义

在一般情况下，压力是空间坐标和时间的标量函数。流体中一点的压力又称为该点流体的静压，也即单位面积上所受的垂直力称为压力（必须注意，它在物理学中称为压强）。压力通常用 p 表示。

2. 压力的单位

（1）在国际单位制（SI）中，压力的单位为 N/m^2 ，即 Pa（帕斯卡），由于 Pa 单位太小，因而常采用 kPa（千帕）和 MPa（兆帕）

$$1\text{MPa}=10^3\text{kPa}=10^6\text{Pa}$$

（2）在重力单位制中（工程中常使用），压力的单位采用 bar（巴）和 kgf/cm^2 （千克力每平方厘米）

$$1\text{bar}=1.02\text{kgf/cm}^2=0.1\text{MPa}=14.5\text{psi}(\text{磅/平方英寸})$$

3. 压力的表示方法

通常用压力计测得的压力是以大气压力为基准的压力值，称为相对压力或表压力。以 $p=0$ （完全真空）绝对真空作为基准所表示的压力称为绝对压力。当绝对压力小于大气压力时，大气压力与绝对压力之差称为真空压力或真空度。相对压力是以大气压力作为基准所表示的压力，由测压仪表所测得的压力都是相对压力。因此相对压力=绝对压力-大气压力。绝对压力、表压力和真空度的关系见图 2-1。

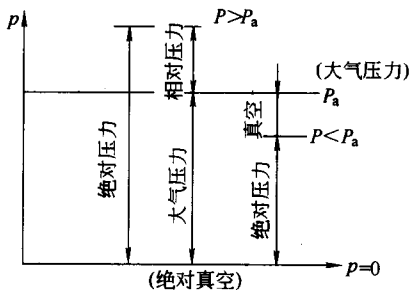


图 2-1 绝对压力、相对压力及真空度

4. 液压系统中压力

如图 2-2 所示液压泵的出油腔、液压缸左腔以及连接管道组成一个密封容积。液压泵启动后，将油箱中的油吸入这个密封容积中，活塞杆有向右运动的趋势，但因受到负载 R 的作用（包括活塞与缸体之间的摩擦力）阻碍这个密封容积的扩大，于是其中的油液受到压缩，压力就升高。当压力升高到能克服负载 R 时，活塞才能被液压油所推动，此时

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

式中 A 为活塞的有效面积。

结论：液压系统中的压力是由于油液的前面受负载阻力的阻挡，后面受液压泵输出油液的不间断推动而处于一种“前阻后推”的状态下产生的，而压力的大小决定于外负载。当然，液体的自重也能产生压力，但一般较小，因而通常情况下液体自重产生的压力忽略不计。

（二）液压传动的基本特征

液压传动区别于其它传动方式主要有如下两个特征（由于传动中液体的压力损失相对工作压力比较

小, 讨论中忽略液体的压力损失和容积损失):

1. 特征一

力(或力矩)的传递是按照帕斯卡原理(或静压传递原理)进行的, 即在密闭容器中的静止液体, 由外力作用在液面的压力能等值地传递到液体内部的所有各点。如图 2-3 所示。

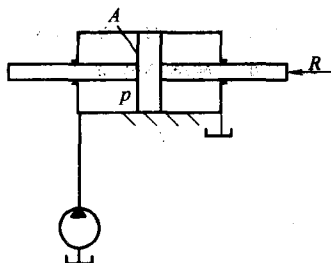


图 2-2 液压系统中压力的形成

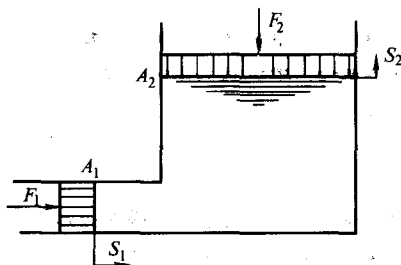


图 2-3 帕斯卡原理示意图

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (2-2)$$

或

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (2-3)$$

当 $A_2 \gg A_1$ 时, 有 $F_2 \gg F_1$ 。利用这个原理可以制成力的放大机构如液压千斤顶等。

如果不考虑流体的可压缩性、漏损以及缸体与管路的变形, 则由体积流量守恒可得到两活塞移动距离 S_1 、 S_2 、移动速度 v_1 和 v_2 之间的关系为

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2-4)$$

$$q_v = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2-5)$$

根据帕斯卡原理可以得出以下推论:

① 活塞的推力等于油压力与活塞面积的乘积。

② 油压力 p 由外负荷建立, 由式 (2-1) 可知, 当 $R=0$ 时, $p=0$ 。

2. 特征二

速度或转速的传递按“容积变化相等”的原则进行。这就是有人把液压传动叫做“容积式液力传动”的原因。如果能设法调节进入缸体的流量, 即可调节活塞的移动速度, 也就是流体传动中能实现无级调速。

【例 2-1】如图 2-4 为 49kN 的液压千斤顶, 活塞 A 的直径 $D_A = 1.3\text{cm}$, 柱塞 B 的直径 $D_B = 3.4\text{cm}$, 杠杆长度如图所示, 问杠杆段应加多大力才能起重 49kN 的重物?

解: 由于压力决定于负载, 若起重 49kN 重物所需液压油压力

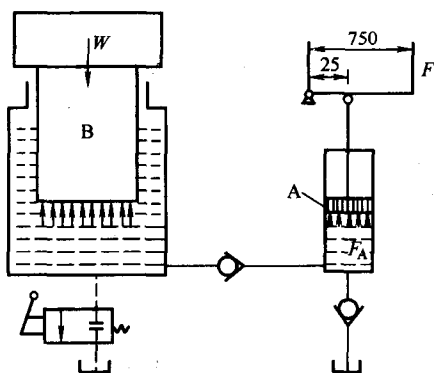


图 2-4 液压泵的工作原理

A—活塞 B—柱塞 W—重物

$$p = \frac{W}{A_B} = \frac{W}{\frac{\pi}{4} D_B^2} = \frac{49 \times 10^3}{\frac{\pi}{4} \times 3.4^2 \times 10^{-4}} = 53.9 \text{ (MPa)}$$

$$\text{作用到活塞 A 上的力 } F_A = p A_A = p \frac{\pi}{4} D_A^2 = 53.9 \times 10^6 \times \frac{\pi}{4} \times 1.3^2 \times 10^{-4} = 7.154 \text{ (kN)}$$

$$\text{在杠杆端应施加的力 } F = \frac{F_A \times 25}{750} = \frac{7154 \times 25}{750} = 238 \text{ (N)}$$

二、流 量

(一) 定义与单位

1. 理想液体与定常流动

在理想液体（不考虑液体的黏性、压缩）液体流动时，可以将流动液体中空间任一点上质点的运动参数，例如压力 p 、流速 v 及密度 ρ 表示为空间坐标和时间的函数，例如：

$$p = p(x, y, z, t) \quad (2-6)$$

$$v = v(x, y, z, t) \quad (2-7)$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2-8)$$

如果空间上的运动参数 p 、 v 及 ρ 在不同的时间内都有确定的值，即它们只随空间点坐标的变化而变化，不随时间 t 变化，对液体的这种运动称为定常流动或恒定流动。但只要有一个运动参数随时间而变化，则就是非定常流动或非恒定流动。

定常流动时，

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0, \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2-9)$$

在流体的运动参数中，只要有一个运动参数随时间而变化，液体的运动就是非定常流动或非恒定流动。

在图 2-5 (a) 中，对容器出流的流量给予补偿，使其液面高度不变，这样，容器中各点的液体运动参数 p 、 v 、 ρ 都不随时间而变，这就是定常流动。在图 2-5 (b) 中，不对容器的出流给予流量补偿，则容器中各点的液体运动参数将随时间而改变，例如随着时间的消逝，液面高度逐渐减低，因此，这种流动为非定常流动。

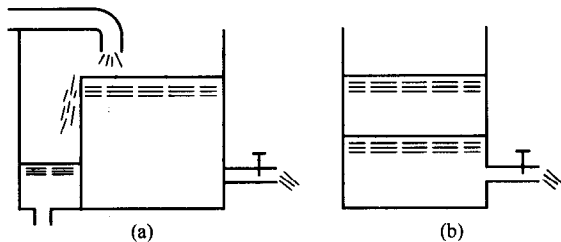


图 2-5 恒定出流与非恒定出流

(a) 恒定出流 (b) 非恒定出流

2. 迹线、流线、流束和通流截面

(1) 迹线 迹线是流场中液体质点在一段时间内运动的轨迹线。

(2) 流线 流线是流场中液体质点在某一瞬间运动状态的一条空间曲线。如图 2-6 (a) 所示。

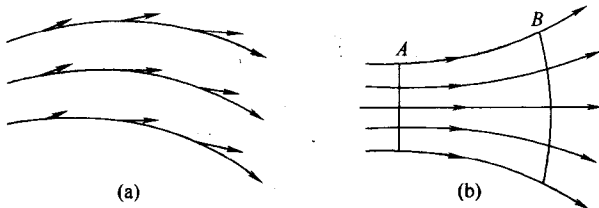


图 2-6 流线和流束

(a) 流线 (b) 流束

(3) 流管 某一瞬时 t 在流场中画一封闭曲线，经过曲线的每一点作流线，由这些流线组成的表面称流管。

(4) 流束 充满在流管内的流线的总体，称为流束。如图 2-6 (b) 所示。

(5) 通流截面 垂直于流束的截面称为通流截面。如图 2-6 (b) 中的截面 A、B。

3. 流量和平均流速

(1) 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，即 $q = \frac{V}{\Delta t}$ ，体积流量的单位是 m^3/s ，常用单位为 L/min (升/分)。

对微小流束，通过 dA 上的流量为 dq ，其表达式为：

$$dq = u dA \quad (2-10)$$

$$q = \int_A u dA \quad (2-11)$$

(2) 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 u 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 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。令此流量与上述实际流量相等，得：

$$q = \int_A u dA = vA \quad (2-12)$$

则平均流速为 v ：

$$v = \frac{q}{A} \quad (2-13)$$

4. 流量连续性原理

连续性方程是质量守恒定律应用于运动流体的数学表达式。如图 2-7 所示，当流体流过某一流管的 1-1、2-2 截面，假定液体不可压缩，则液体在同一单位时间内流过同一通道、两个不同通流截面的液体体积应相等，即 $v_1 = v_2$ ，

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \text{常量}$$

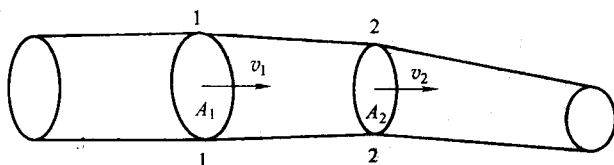


图 2-7 液流的连续性原理

v_1 、 v_2 分别为截面 1、2 处的平均流速。

A_1 、 A_2 分别为通流截面 1、2 处的面积。

上式表明：流速和通流面积成反比，内径大即 d 大，则 A 大， v 小。反之，内径小即 d 小，则 A 小， v 大。

第二节 管道内压力损失

一、流动状态、雷诺数

实际液体具有黏性，是产生流动阻力的根本原因。然而流动状态不同，则阻力大小也是不同的。所以先研究两种不同的流动状态——层流和紊流。

液体在管道中流动时存在两种不同状态，其阻力性质也不相同。

试验装置如图 2-8 所示，试验时保持水箱中水位恒定和尽可能平静，然后将阀门 A 微微开启，使少量水流流经玻璃管，即玻璃管内平均流速 v 很小。这时，如将颜色水容器的阀门 B 也微微开启，使颜色水也流入玻璃管内，我们可以在玻璃管内看到一条细直而鲜明的颜色流束，而且不论颜色水放在玻璃管内的任何位置，它都能呈直线状，这说明

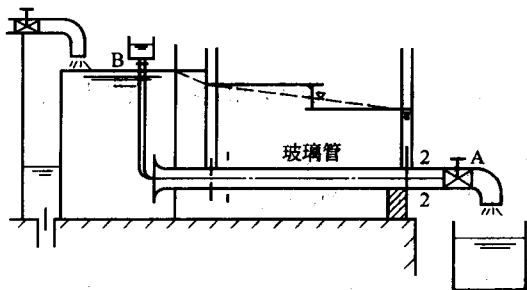


图 2-8 雷诺试验

管中水流都是安定地沿轴向运动, 液体质点没有垂直于主流方向的横向运动, 所以颜色水和周围的液体没有混杂。如果把 A 阀缓慢开大, 管中流量和它的平均流速 v 也将逐渐增大, 直至平均流速增加至某一数值, 颜色流束开始弯曲颤动, 这说明玻璃管内液体质点不再保持安定, 开始发生脉动, 不仅具有横向的脉动速度, 而且也具有纵向脉动速度。如果 A 阀继续开大, 脉动加剧, 颜色水就完全与周围液体混杂而不再维持流束状态。

1. 层流

在液体运动时, 如果质点没有横向脉动, 不引起液体质点混杂, 而是层次分明, 能够维持安定的流束状态, 这种流动称为层流。

2. 紊流

如果液体流动时质点具有脉动速度, 引起流层间质点的相互错杂交换, 这种流动称为紊流或湍流。

液体的流动状态通过雷诺数 Re 来判断, 液体在圆管中流动的 $Re = \frac{vd}{\gamma}$,

式中 d ——管道直径;

v ——液体流动速度;

γ ——液体的运动黏度。

液体流动时由层流转化为紊流时的雷诺数 Re 就叫临界雷诺数 Re_0 , 当雷诺数 Re 小于临界雷诺数 Re_0 时为层流; 大于临界雷诺数 Re_0 为紊流。

由雷诺数 Re 的数学表达式可以知道惯性力和黏性力是影响液体流动的主要因素, 惯性力起主导作用时呈紊流状态, 黏性力起主导作用时呈层流状态。

二、液体流动时的能量

1. 理想液体流动时的能量

所谓理想液体是指既无黏性又不可压缩的液体。理想液体在管道中流动时, 具有三种能量: 液压能、动能、位能。按照能量守恒定律, 在各个截面处的总能量是相等的。

假设液体质量为 m (其体积为 V), 根据流体力学和物理学可知, 在截面 1、2 处 (图 2-9) 的能量分别为:

截面 1: 体积为 V 的液体的压力能: $p_1 V$,

动能: $\frac{1}{2} m v_1^2$, 位能: mgh_1

截面 2: 体积为 V 的液体的压力能: $p_2 V$,

动能: $\frac{1}{2} m v_2^2$, 位能: mgh_2

根据质量守恒定律——在各截面处的总能量是相等的, 可列出:

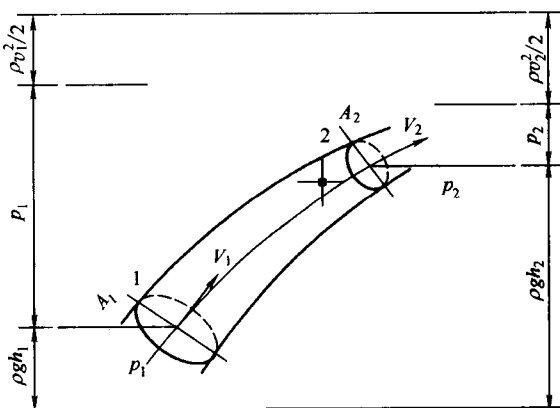


图 2-9 伯努利方程示意图

$$p_1 V + \frac{1}{2} m v_1^2 + mgh_1 = p_2 V + \frac{1}{2} m v_2^2 + mgh_2 \quad (2-14)$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (2-15)$$

式 (2-15) 即为理想液体的伯努利方程——是能量守恒定律在流体力学中的一种表达形式。

2. 实际液体流动时的能量

实际中的液体因为具有黏性, 因而存在内摩擦力, 而且管道形状和尺寸不是完全一样, 在流动中会产生扰动造成能量损失。因而实际液体在流动时的伯努利方程为:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2 + \Delta p \quad (2-16)$$

Δp 是液体从截面 1 流到截面 2 的过程中的压力损失。

因而，伯努利方程在液压系统中的实用的应用形式为：

$$p_1 = p_2 + \Delta p$$

式中 Δp ——总压力损失。

三、管路压力损失

1. 沿程压力损失和局部压力损失

在液压传动中，液体在管道内运动时的能量损失包括由摩擦阻力所引起的沿程能量损失和局部能量损失，工程上通常用压差形式表示能量损失，称为压力损失，这就是实际液体流动的伯努利方程式中的 Δp 项的含义。

液压系统中的压力损失分为两类，一类是油液沿等直径直管流动时所产生的压力损失，称之为沿程压力损失。这类压力损失是由液体流动时的内、外摩擦力所引起的。另一类是油液流经局部障碍（如弯头、接头、管道截面突然扩大或收缩）时，由于液流的方向和速度的突然变化，在局部形成漩涡引起油液质点间以及质点与固体壁面间相互碰撞和剧烈摩擦而产生的压力损失，称之为局部压力损失。

压力损失过大也就是液压系统中功率损耗的增加，这将导致油液发热，泄漏量增加，效率下降和液压系统性能变坏。

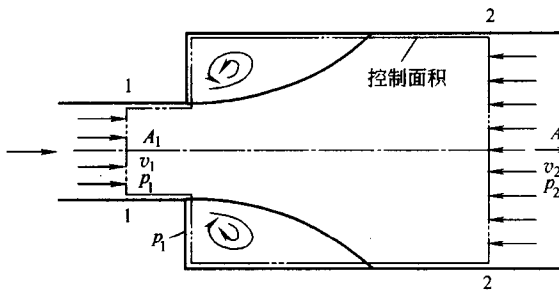


图 2-10 突然扩大处的局部损失

沿程压力损失的大小主要取决于管路的长度、内径、液体的流速和黏度等。液体的流态不同，沿程压力损失也不同。液体在圆管中以层流流动，这在液压传动中最为常见。因此，在设计液压系统时，常希望管道中的液流保持层流流动的状态。

局部压力损失是液体流经阀门、弯管、通流截面变化等所引起的压力损失。液流通过这些地方时，由于液流方向和速度均发生变化，形成漩涡（如图 2-10），使液体的质点间相互撞击，从而产生较大的能量损耗。

2. 管路系统中的总压力损失与效率

管路系统的总压力损失等于所有沿程压力损失和所有局部压力损失之和。

第三节 液体流经小孔和间隙时的流量

一、液体流经小孔时的流量

流体从孔口出流的情况是多种多样的，从孔口边缘形状和出流情况可将孔口分为薄壁孔口和厚壁孔口。在液压系统中，通常利用液压阀的小孔的开口大小来控制流量，以达到调速的目的。

根据理论分析和实验得出，各种孔口的流量压力特性均可用下列的通式表示：

$$q = KA\Delta p^m \quad (2-17)$$

式中 q ——通过小孔的流量；

A ——节流孔口的通流面积；

K ——由孔口的形状、尺寸和液体性质决定的系数；

Δp ——小孔前后的压力差

m ——由节流孔的形状（即由孔的长度与孔径之比）决定的指数。对薄壁小孔节流 $m=0.5$ ，细长孔 $m=1$ ，其他类型的孔 $m=0.5\sim 1$ 。

从上式可以看出，流经节流口的流量可以通过调节它的节流面积 A 或者改变它的前后压力差 Δp 来