



北京市高等教育精品教材立项项目

流体传动

与控制基础

Fundamentals of Fluid Power & Control

彭熙伟 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



附赠光盘

北京市高等教育精品教材立项项目

流体传动与控制基础

主 编 彭熙伟

参 编 陈金兵 张百海

主 审 李运华 彭光正

机 械 工 业 出 版 社

本书旨在提供流体传动与控制的基础知识,内容主要包括液压传动和气压传动技术两部分。全书共分12章。第1章、第2章分别介绍了液压传动和液压流体力学的基础知识,第3章至第6章主要介绍了液压元件的工作原理、性能、特点,第7章介绍了液压基本回路,第8章介绍了液压系统设计计算与应用实例。第9章至第11章主要介绍气压传动的基础知识,气动元件、气动基本回路,以及气压传动在工业自动化生产线的具体应用。第12章展望了未来的流体动力技术。

本书系北京市高等教育精品教材立项项目,是为自动化、自动化装置和机械电子工程等机电类专业的技术基础课“流体传动与控制基础”的教学而编写,也可作为其他各类成人高校、电大、自学考试等有关机电类专业的教材,并可供从事流体传动与控制技术的工程技术人员参考。本书配套的多媒体课件可用于辅助教学,课件直观形象。

图书在版编目(CIP)数据

流体传动与控制基础/彭熙伟主编. —北京:机械工业出版社, 2005.3
北京市高等教育精品教材立项项目
ISBN 7-111-16140-8

I. 流... II. 彭... III. ①液压传动②液压控制 IV. TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第011355号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:邓海平 蔡开颖 责任编辑:冯铨 版式设计:李瑞华

责任校对:申春香 封面设计:王伟光 责任印制:陶湛

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年4月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·16.25印张·320千字

定价:29.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版



前 言

为满足 21 世纪我国社会主义现代化建设和科学发展的需要, 根据加强基础、拓宽专业面、宽口径培养高素质创新人才的要求, 配合“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”, 为自动化、自动化装置和机械电子工程等专业的技术基础课“流体传动与控制基础”的教学所需编写了本书。

国内现有的同类教材主要适用于机械类、机械工程及自动化、流体传动与控制专业方向, 这些教材的使用都需要掌握较深的机械结构、设计方面的基础知识, 而对于机械知识非常有限的自动化专业学生的教学就较难以适用。“流体传动与控制”作为动力传动与控制技术领域的重要组成部分, 与工业自动化技术应用的许多领域有着密切的横向联系, 在航空、航天、舰船、武器装备、冶金、工程机械、农业机械和自动化生产线等各领域得到了广泛的应用。按照加强基础、拓宽专业面、宽口径培养高素质创新人才的要求, 有必要为自动化、自动化装置和机械电子工程等机电类专业的技术基础课“流体传动与控制基础”的教学而编写相适应的教材。

本教材广泛参考了国内外同类教材和其他有关文献, 力图形成以下特点:

- 1) 本书旨在提供“流体传动与控制”工程应用的基础知识, 以拓宽和加强学生的技术基础知识, 增强适应能力, 满足现代制造业对高素质专业人员的需要。
- 2) 本书主要阐述流体动力的基本概念、基本原理和基本方法, 注重流体动力系统的工作过程和实际应用, 深度和广度适合自动化等机电类专业培养目标的要求。
- 3) 对液压流体力学基础知识的阐述, 力求物理概念准确、简练、清晰, 而不拘泥于抽象的流体力学方程推导, 为液压元件和液压系统的学习提供必要的基础知识。
- 4) 对液压泵、执行元件的阐述, 突出不同类型元件的基本概念、原理、特点、基本特性的计算和应用, 而不拘泥于机械结构、设计介绍和静动态特性的理论分析。
- 5) 对液压阀的阐述, 突出各种常规阀的基本概念、原理、特点, 并结合回路介绍具体应用。考虑到液压技术的不断进步, 增加了先进的比例阀、比例控制技术的内容。
- 6) 对液压回路和系统的阐述, 突出典型回路和系统的主要特征、特性及其分析方法, 力求分析简练、清晰, 适合自动化专业工程技术的应用要求。
- 7) 考虑到自动化专业学生有限的机械知识, 力求大量采用直观的实物照片、实物剖视图和简洁的原理图, 而不像同类教材所采用复杂的机械结构剖视图, 对流体动力元件、系统进行介绍, 以增强直观的感性认识。

IV 流体传动与控制基础

8) 对于气压传动, 考虑到与液压传动的共性, 简单介绍了气压传动基础知识和气动元件、气动回路的特点, 重点阐述气压传动在工业自动化生产线的具体应用。

9) 本书力求以少而精原则取材, 图文并茂, 深入浅出, 并编排有例题和精选的习题, 使学生更好地掌握流体传动与控制技术的基础知识。

10) 本书名词术语、物理符号、单位及液压气动图形符号等均采用最新国家标准。

本书由彭熙伟任主编, 陈金兵、张百海参编。彭熙伟编写第1、3、4、5、6、7、8、12章和附录; 陈金兵编写第9、11章; 彭熙伟、陈金兵编写第10章; 张百海编写第2章; 由彭熙伟对全书进行统稿和制作多媒体课件。本书由北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院李运华担任液压传动部分主审, 北京理工大学信息科学技术学院彭光正担任气压传动部分主审。

本书在编写过程中, 得到了《液压与气动》编辑部陈维、中船重工集团第七〇七研究所(九江)陈建萍、博世力士乐(中国)有限公司、SMC(中国)有限公司、派克汉尼汾公司和威格士液压系统(中国)有限公司的大力支持和帮助; 同时, 本书的出版还得到了北京市高等教育精品教材建设立项项目的资助, 编者在此一并表示衷心感谢。

由于编写本教材的工作量大, 时间短, 加上编者水平有限, 书中难免有不妥之处, 欢迎广大读者批评指正。

北京理工大学

彭熙伟

2005年2月

目 录

前言

第1章 液压传动概述..... 1

- 1.1 液压传动的定义及发展概况 1
- 1.2 液压传动的基本原理、组成及特点 7
- 1.3 液压传动的工作介质 11
- 习题 13

第2章 液压流体力学基础 14

- 2.1 液体的主要物理性质 14
- 2.2 液体静力学基础 16
- 2.3 液体动力学方程 18
- 2.4 液体在管道中的流动状态和压力损失 24
- 2.5 液体流经小孔的流量计算 29
- 习题 31

第3章 液压动力元件 32

- 3.1 概述 32
- 3.2 齿轮泵 35
- 3.3 叶片泵 40
- 3.4 柱塞泵 44
- 3.5 液压泵的功率和效率 53
- 习题 57

第4章 液压执行元件 58

- 4.1 液压缸 58
- 4.2 液压马达 66
- 习题 76

第5章 液压控制阀 78

- 5.1 概述 78
- 5.2 方向控制阀 79
- 5.3 压力控制阀 92

5.4 流量控制阀 106

5.5 插装阀 114

5.6 电液比例阀 118

习题 127

第6章 液压辅助元件 129

6.1 油箱及温控装置 129

6.2 过滤器 133

6.3 蓄能器 139

6.4 管件及管接头 143

6.5 密封装置 145

习题 148

第7章 液压基本回路 150

7.1 压力控制回路 150

7.2 调速回路 155

7.3 快速运动和速度换接回路 173

7.4 多缸动作控制回路 176

习题 179

第8章 液压系统的设计计算与应用实例 182

8.1 液压系统的设计计算 182

8.2 液压系统应用实例 187

习题 195

第9章 气压传动基础知识 197

9.1 气压传动系统的特点 197

9.2 气压传动系统的组成 199

9.3 空气的基本性质 200

9.4 理想气体状态方程及变化过程 202

习题 204

第10章 气动元件与基本回路 205

10.1 气源系统及气动辅件 205

10.2 气动执行元件	212	12.1 液压传动的发展动向	243
10.3 气动控制元件	219	12.2 气压传动的发展动向	244
10.4 气动基本回路	231	习题	245
习题	234	附录 常用液压气动图形符号	246
第 11 章 气动系统在自动化装置中		附表 1 管路、管路接口和接头 ...	246
的应用	236	附表 2 动力源和检测器	246
11.1 气动技术在平带纠偏中的应用...	236	附表 3 控制方法	247
11.2 举升转向装置	238	附表 4 泵、马达和液压缸	248
11.3 气动力控制及位置控制在自动化		附表 5 控制阀	249
装置中的应用	240	附表 6 辅助元件	250
习题	242	参考文献	251
第 12 章 流体动力技术展望	243		

第 1 章

液压传动概述

1.1 液压传动的定义及发展概况

1.1.1 何谓液压传动

在回答何谓液压传动之前,首先要说明什么是传动?顾名思义,传动就是传递动力之意,也就是传递能量。泛泛地说,采用机械元件(机构)传递动力的称为机械传动,通过电器元件传递动力的称为电气传动,而用液体作介质利用其压力能传递动力的就称为液压传动。

液压传动系统与一般的液体输送系统不同。后者是基于离心机的工作原理,即流入泵体中的液体被高速旋转的叶轮甩出去而获得动能,从而使液体可以从一处输送到另一处,如自来水供水系统、煤气输送系统或一些化工原料的输送系统等。离心泵输出液体的压力大小取决于叶轮的旋转速度和输出时管路流动所受的阻力。由于在离心泵的进口和出口之间没有密封隔离带,故当出口压力随着流动阻力的增大而增大时,泵的输出流量就将减少。实际上,有可能发生泵虽连续旋转而完全不输出流量的情况。正因为如此及其他的原因,离心泵很难应用于传递动力的液压系统中。

通常所说的液压传动是基于容积式液压泵的工作原理,即泵每转一周就输出一定体积的液体。输出液体的压力取决于出流所受的阻力,而输出流量除了泄漏损失外与输出液体的压力无关。泵连续旋转就可连续输出液体,即把泵旋转的机械能转换为液体的压力能,通过液体的压力能就可传递动力。简而言之,液压传动是以液体为工作介质,进行能量的转换、传递、分配和控制的一门技术科学。而液压传动系统的功能则是把机械能变成液体的压力能,借助受压液体通过执行元件对外做功。

1.1.2 发展概况

液体静压传动技术起源于著名的“帕斯卡原理”,在1650年由法国人帕斯卡(Pascal)提出来,即“作用在封闭液体上的压力,可以无损失地传递到各个方向,并与作用面保持垂直”。该原理解释了为什么用锤子敲击充满了液体的玻璃瓶的瓶塞时,会使该玻璃瓶的瓶底破裂。由于液体基本上是不可压缩的,则作用在瓶塞上的力被传送到玻

玻璃瓶内的各个部位,如图 1-1 所示,结果,在大面积上受到的力要比该瓶塞上受到的力大得多。例如,瓶塞的面积是 1cm^2 ,瓶底的面积是 20cm^2 ,则瓶塞上作用 100N 的力所产生的压力就是 $100\text{N}/\text{cm}^2$,这个压力无损失地传递到玻璃瓶的瓶底,作用在瓶底 20cm^2 的面积上并产生 2000N 的作用力。因此,在瓶塞上作用一个中等大小的力就有可能使瓶底破碎。帕斯卡原理描述了封闭的液体在传递动力、放大力和控制运动中的应用。

1750 年,意大利科学家伯努利 (Bernoulli) 在做了许多实验后,提出了流体流动时必定遵循能量守恒规律,即“伯努利定律”。这两个定律奠定了流体静压传动的理论基础。18 世纪末,Joseph Bramah 首次在伦敦用水作为工作介质把流体静压传动应用于“水压机”。

而使用油作为传动介质,又解决了密封问题,对液压传动的发展具有划时代的意义。1906 年美国弗吉尼亚号军舰上火炮采用液压传动驱动,由此开拓了液压传动广泛应用于工业各个领域的先河。第二次世界大战期间,军事装备对反应迅速、动作准确、输出功率大的液压传动和控制装置的需求,促使液压技术迈上了新的台阶。如舰艇和飞机的操作系统,以及声纳和雷达的驱动系统等。随着加工能力和材料强度的不断提高,液压系统的压力也不断地提高,高功率质量比,又使其在行走机械、航海、交通运输和航空航天等领域得到青睐。到 20 世纪 70 年代,液压传动已成为“工业的肌肉”。

1.1.3 液压传动的应用

液压传动在现代化的工业生产各领域得到了广泛的应用。

1. 在工程机械、起重运输中的应用

工程机械包括挖掘机械、装载机械、推土机械、压路机械、桩土机械、凿岩机械和钢筋混凝土机械等,主要用于土方、石方、铺路等施工过程,可以大大减轻劳动强度,提高工效和劳动生产率。图 1-2 所示为履带式单斗液压挖掘机械,通过液压缸的直线运动完成挖掘机的铲土、卸土的控制,通过液压马达完成转台回转的位置控制。

起重运输机械也称物料搬运机械,主要用于生产过程中的物料搬运,可显著提高生产率、减轻体力劳动和降低生产成本。起重运输机械主要包括液压升降台、叉车、液压起重机和液压绞车等。图 1-3 所示为液压汽车起重机,液压缸支腿用于起重作业时承受整车负载,使轮胎不接触地面;回转液压马达控制吊车平台的回转;伸缩液压缸控制吊臂的伸缩;吊臂液压缸控制吊臂仰角的高低;卷筒液压马达驱动卷筒旋转可完

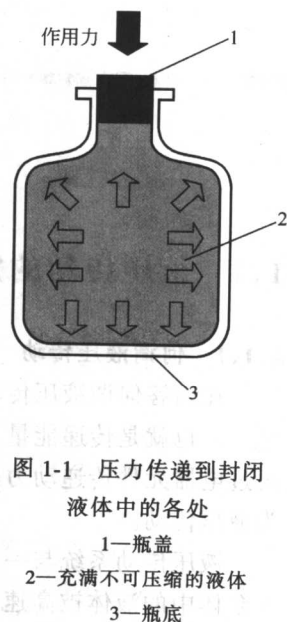




图 1-2 单斗液压挖掘机

成重物的升降控制。

2. 在农林领域中的应用

液压传动在联合收割机、拖拉机、大型农机具和牧业机械等农业机械中的应用，主要用于农机操作系统、转向系统和驱动系统的控制等，它可使农业机械操作灵活，并实现自动控制，因而可提高劳动生产率、机器的使用性能和经济效益。图 1-4 所示为谷物联合收割机，液压操作系统控制联合收割机割台的升降、拨禾轮的升降和水平调节、脱粒滚筒的无级变速等；液压转向系统控制转向机构实现机器转向；液压驱动系统可无级变速控制机器的行走。



图 1-3 液压汽车起重机

此外，液压传动还在木材采运、木材加工、人造板机械和营林机械等林业机械中得到广泛应用。

3. 在塑料、橡胶和轻工机械中的应用

在某些以易燃易爆的溶剂、粉末等作为原材料或产品的化工厂中，其生产过程可能会产生各种易燃、易爆的粉尘、蒸汽或气体。而这类生产过程中电气设备产生的电弧、电火花和发热等，都有可能引起燃烧或爆炸事故。因此，在化工机械中采用液压传动与控制实现生产过程的机械化、自动化更为安全和可靠。如注塑机、切胶机、压制机、硫化机和加压过滤机等。图 1-5 所示为塑料注射成型机，用于热塑性塑料的成型加工。

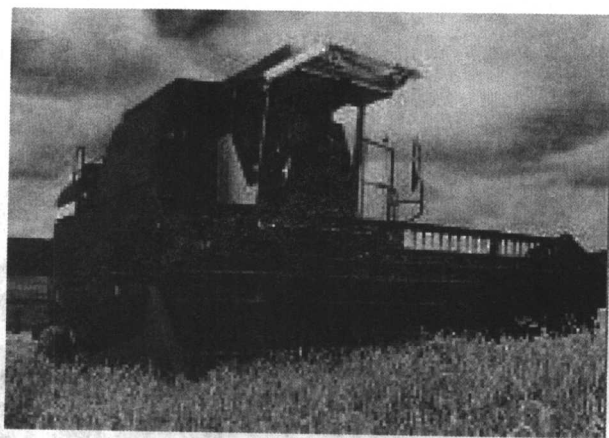


图 1-4 谷物联合收割机

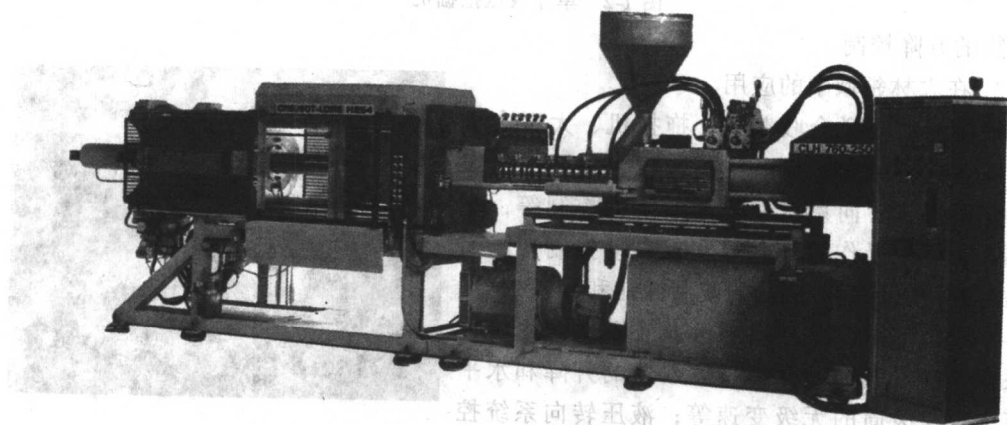


图 1-5 塑料注射成型机

此外，液压传动与控制还在其他轻工机械中得以广泛应用。如造纸工业中的纸张超级压光机、卷纸张力控制、纸边纠偏控制；陶瓷坯料滚压成型机；氮肥厂的造气自动机；皮革削匀机、皮革液压剖层机；香皂研磨机；纺织机械中的整经机和浆纱机等。

4. 在运动模拟器中的应用

液压传动与控制具有控制精度高、响应速度快、加速能力强的性能特点，因而在要求达到多种运动控制的模拟器中获得了重要的应用。运动模拟器能产生或模拟与实际工况相一致的工作条件（环境），以此来测试产品的性能、进行疲劳试验和科学研究等，从而降低成本、节省时间和提高效率。如飞行模拟器、舰船运动模拟器、汽车道路模拟器和航天仿真设备等。图 1-6 所示为飞行模拟器，可用于飞行员的培训和飞行仿

真研究等。

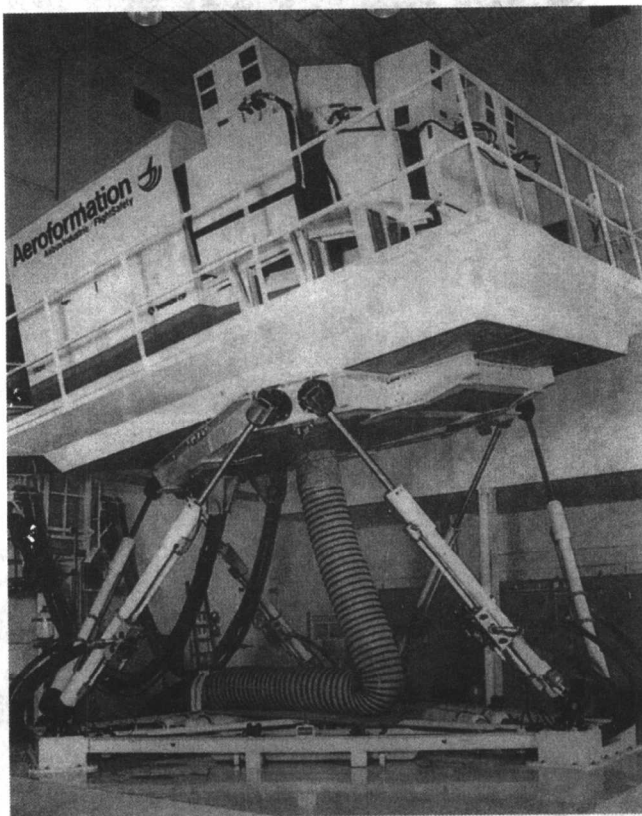


图 1-6 飞行模拟器

5. 在重工业中的应用

在重工业生产过程中，要使用大量的机械和设备。这些机械和设备的特点是大型化、重型化，并能适应恶劣的工作环境，而且自动化程度高。液压传动与控制的特点正适合于这些工作性能的要求。例如，冶金工业的高炉炉顶加料装置，轧机的压下装置、轧辊的平衡和换辊装置，带钢卷取和跑偏控制装置等；金属加工中的高压造型机、压铸机和射压造型机等；锻压机械中的锻机、剪板机、液压机和对向成型机等。图 1-7 所示为 12000t 液压机，可用于冷冲压、压装、冷挤压和弯曲等。

6. 在交通运输中的应用

如图 1-8 所示的运输船舶，控制船舶航向的舵机，减小船舶横摇的减摇装置，可调螺距推进器，甲板机械上的起货机、起锚机和舱口盖启闭装置等广泛采用了液压传动

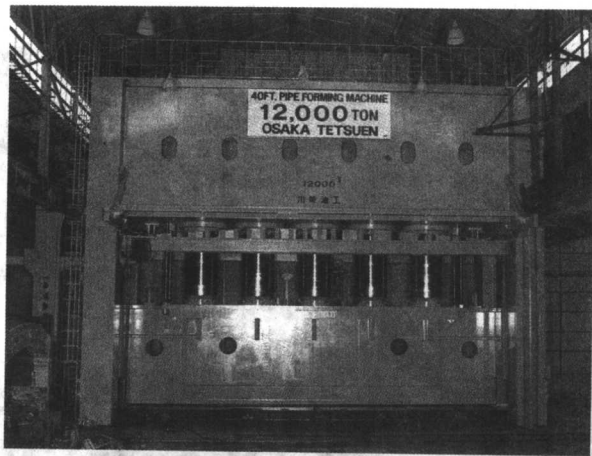


图 1-7 12000t 液压机



图 1-8 民用运输船舶

与控制技术。液压技术在其他交通运输中的应用还有道路与桥梁建设中的岩石掘进机、液压凿岩台车、喷浆机械手等，以及汽车工程中的汽车动力转向、制动系统、轿车自动变速系统等。

7. 在航空航天工业中的应用

液压技术的快速响应、高功率与质量之比、高精度和高加速能力的特点，使其在航空航天工业中的应用极其广泛。如图 1-9 所示的民用客机，发动机的转速与推力控

制、起落架收放、发电机的恒速装置和方向舵、升降舵、副翼的偏转控制等均采用了液压技术。此外,液压技术在航天工程中的运载火箭、地面设备、航天飞机、导弹、人造卫星等也有广泛的应用。



图 1-9 民用客机

8. 其他领域的应用

液压传动在其他领域的应用还很多,如石油机械、煤炭采掘机械、发电设备、建筑材料工业、金属切削机床、机器人以及火炮、雷达等控制系统中的应用等等。

总之,液压传动与控制在现代工业生产的各领域获得了广泛的应用。20世纪90年代以来,液压技术在高压、高速、大功率、高效节能、低噪声、延长使用寿命、高度集成化等方面取得了重大进展。液压技术与传感技术、微电子技术密切结合,发展成为包括传动、控制和检测在内的一门完整的自动化技术。

在现代工业生产过程中,动力的传动与控制有四种基本方式,即液压传动与控制、气压传动与控制、电气传动与控制、机械传动与控制。各种传动方式都有其优、缺点,生产过程总是选用最适合的动力传动方式,有的也可能是几种传动方式的组合应用。

1.2 液压传动的基本原理、组成及特点

1.2.1 液压传动的基本原理

液压传动系统的工作原理是帕斯卡原理,最早由英国机械师 Bramah 把这一原理应用到水压机上,如图 1-10 所示。一个 500N 的作用力施加在面积为 1cm^2 的小活塞上,这样,密闭液体内部各处的压力均为 $500\text{N}/\text{cm}^2$,即大活塞每平方厘米上也受到 500N 的作用力,若大活塞面积为 10cm^2 ,则大活塞可以撑起的重量或力为

$$\text{作用力} = \text{压力} \times \text{面积}$$

$$\text{即} \quad \frac{500\text{N}}{1\text{cm}^2} \times 10\text{cm}^2 = 5000\text{N}$$

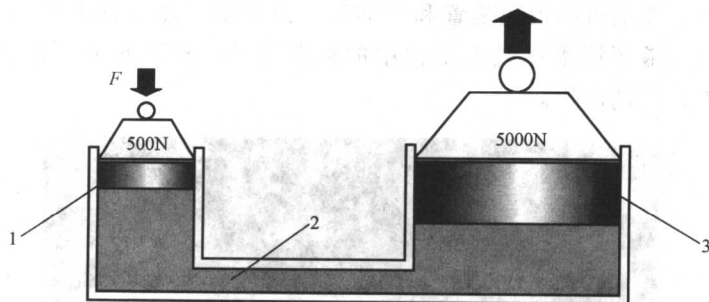


图 1-10 帕斯卡原理示意图

1—小活塞 2—液体 3—大活塞

显然，若大活塞面积为 100cm^2 ，则大活塞可以撑起 50000N 的重量。

图 1-10 的工作原理也可以这样描述： 500N 的作用力 F 在 1cm^2 面积上产生的压力等于 5000N 的作用力在 10cm^2 面积上产生的压力。由于两个活塞底面的压力相等，则活塞没有运动，处于平衡状态。如果小活塞上再施加一个较小的外力，即仅仅用来克服两个活塞的摩擦力和液体在管路流动所产生的粘性阻力，使小活塞下降，则压力差的作用使管路中的液体流动并推动大活塞上升。小活塞下降 10cm ，大活塞将上升 1cm 。也就是说，大活塞的运动是小活塞推动液体移动的结果。此时，较小的输入力被转换为较大的输出力。但输入的能量仍等于输出的能量，即输入的力乘以小活塞位移，等于输出的力乘以大活塞位移。这符合能量守恒的基本定律。

1.2.2 液压传动系统的组成

现以液压千斤顶为例，阐明液压传动系统的基本构成部分。图 1-11 所示为液压千斤顶的工作原理图。液压千斤顶由油箱 1、单向阀 2 和 4、手摇泵 3、液压缸 5 和放油阀 6 等组成。当手摇泵手柄向上提起时，手摇泵 3 的活塞向上运动，其下腔产生真空，单向阀 4 关闭，单向阀 2 在大气压力作用下开启，同时油箱 1 中的液体被吸入腔中。而当压下手摇泵手柄时，手摇泵 3 下腔中液体受压，关闭单向阀 2，压力升高到一定值使单向阀 4 开启，液体进入液压缸 5，并推动负载向上运动，达到抬起重物的目的。连续上下摇动手摇泵手柄，液压缸 5 升起高度就会增加。而当要放下重物时，只要打开手动放油阀 6，使液压缸 5 中的压力油流回油箱即可。

作为最简单的液压传动系统，液压千斤顶包含了液压传动系统的各个基本组成部分：

- 1) 液压能源——手摇泵。
- 2) 执行元件——液压缸。
- 3) 控制元件——放油阀。

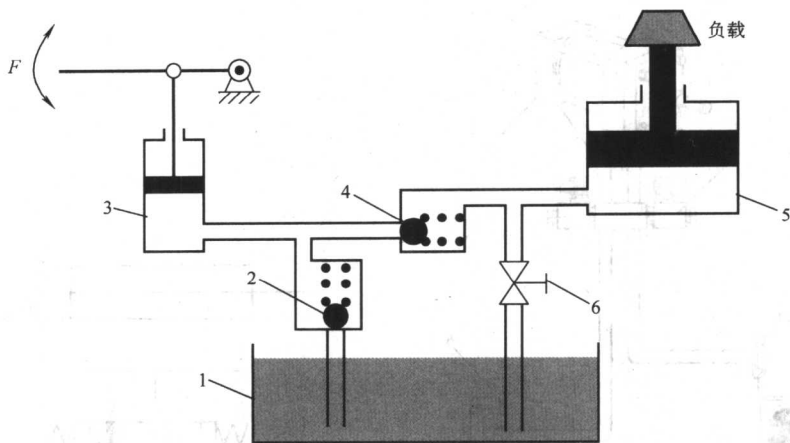


图 1-11 液压千斤顶工作原理

1—油箱 2、4—单向阀 3—手摇泵 5—液压缸 6—放油阀

4) 液压辅件——油箱、连接件、管路等。

从能量转换和传递角度看，一个基本的液压传动系统如图 1-12 所示。液压泵把机械能转换成液体的压力能，液体压力能经过系统管路的传递和液压阀的控制，最后通过执行元件液压缸（对于旋转运动则是液压马达）把液体的压力能转换成机械能对外输出做功；系统中的辅助元件过滤器用来保证油液的清洁度，而油箱则是用来盛油以便油液的循环利用。在图 1-12a 中，液压系统的各元件采用了直观的形象图形表示，它直观性强，容易理解，但难于绘制。在实际工作中，通常采用图形符号来绘制液压系统原理图，如图 1-12b 所示。图中的元件符号只表示元件职能，不表示元件的结构和参数。使用图形符号，可使液压系统简单、明了，而且便于绘制。常见液压气动元件的图形符号见本书附录。

1.2.3 液压传动的特点

同电气传动相比，除了两种传动应用场合有所不同以外（如一些防爆场合不宜采用电动机），液压传动尚有其独到之处，这里仅就其性能上的特点阐述如下：

1) 液压缸执行元件易于实现直线往复运动，并能输出较大的力。

2) 电动机的输出扭矩与电流成正比，其大小受磁饱和和损耗限制。而液压马达输出的扭矩（对液压缸而言是输出的力）与压力差成正比，其大小只受元件结构强度限制。因而液压传动装置体积小、质量轻，即通常所说的功率与质量之比大，可达 4kW/kg 以上，这在行走机械和航空设备上的应用更能体现这一技术优点。

3) 电动机就电压—速度而言，可以简化为一阶惯性环节；而液压执行元件就流量—速度而言，是一个固有频率很高的二阶振荡环节。因而采用液压执行元件的机构响

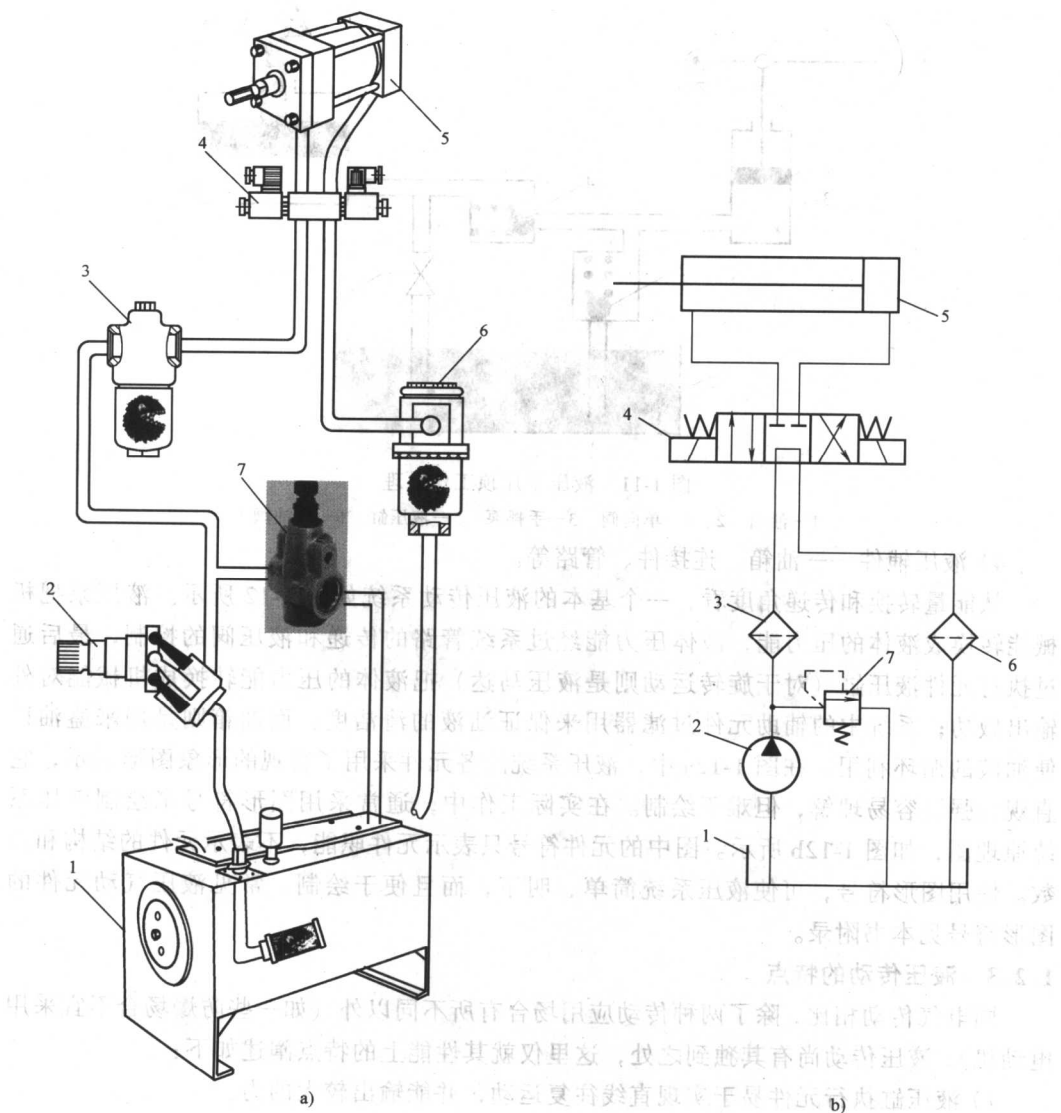


图 1-12 一个基本的液压传动系统

a) 直观工作原理图 b) 用图形符号表示

1—油箱 2—液压泵 3、6—过滤器 4—换向阀 5—液压缸 7—溢流阀