

3D版



普通高等教育3D版机械类规划教材

液压与气压传动

陈清奎 刘延俊 成红梅 等编著



双色印刷

安卓版APP



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等

教材

液压与气压传动 (3D 版)

陈清奎 刘延俊 成红梅 葛媛媛 编著
刘玉慧 赵玲玲 王凤良
万金领 主审

机械工业出版社

本书是山东高校机械工程教学协作组组织编写的“普通高等教育3D版机械类规划教材”之一。全书共13章,主要包括:液压传动及流体力学的基本理论;液压元件的结构、原理、性能及选用;液压基本回路,典型液压系统的组成、功能、特点及应用;液压系统的设计与计算;液压伺服系统;气压传动特有的元件以及回路设计方法与实例;液压气动系统的安装、调试、使用与维护;液压系统的故障诊断。

本书在编写过程中,力求贯彻内容少而精、理论与实践相结合的原则,紧密结合液压与气压传动技术的最新成果。另外,本书配套了利用虚拟现实(VR)技术、增强现实(AR)技术等开发的3D虚拟仿真教学资源。

本书适用于普通工科院校机械类各专业本科生,也适用于各类成人教育高校、自学考试等机械类专业学生,还可供从事流体传动与控制技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动:3D版/陈清奎等编著. —北京:机械工业出版社, 2017.4

普通高等教育3D版机械类规划教材

ISBN 978-7-111-56656-4

I. ①液… II. ①陈… III. ①液压传动-高等学校-教材②气压传动-高等学校-教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第085682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:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 李超 余皞

责任校对:刘岚 封面设计:张静

责任印制:常天培

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2017年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·490千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56656-4

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



陈清奎 教授、博士，山东建筑大学国家级建筑工程及装备虚拟仿真实验教学中心主任，机械制造及其自动化学科负责人，济南科明数码技术股份有限公司董事长。

主要研究方向包括教育信息化技术、文化创意与数字化、虚拟现实技术、数字化设计与制造。主持完成了“国家863计划CIMS应用示范工程——山东常林集团CHL-CIMS应用示范工程”“上海世博会网上世博山东馆”等70余项项目。出版专著1本，主编出版教材5本。获山东省科技进步二等奖等若干奖项，获国家专利14项、软件著作权27项。现任山东3D科技创新产业联盟副理事长、山东动漫行业协会副会长、济南动漫游戏协会副会长及虚拟现实专业委员会主任、济南影视传媒协会副理事长等。

虚拟现实（VR）技术是计算机图形学和人机交互技术的发展成果，具有沉浸感（Immersion）、交互性（Interaction）、构想性（Imagination）等特征，能够使用户在虚拟环境中感受并融入真实、人机和谐的场景，便捷地实现人机交互操作，并能从虚拟环境中得到丰富、自然的反馈信息。在特定应用领域中，虚拟现实技术不仅可解决用户应用的需要，若赋予丰富的想象力，还能够使人们获取新的知识，促进感性和理性认识的升华，从而深化概念、萌发新的创意。

机械工程教育与虚拟现实技术的结合，为机械工程学科的教与学带来显著变革：一方面，通过虚拟仿真的知识传达方式实现更有效的知识认知与理解。基于虚拟现实的教学方法，以三维可视化的方式传达知识，表达方式更富有感染力和表现力。虚拟现实技术使抽象、模糊变为了具体、直观，将单调乏味变成丰富多变、极富兴趣，令常规不可观察变为近在眼前、触手可及。例如虚拟过程，就是将真实世界中无法看到的变化，或变化太快、太慢的过程，以及太微观、太宏观的事物与变化过程呈现出来。另一方面，通过虚拟仿真的实践方式实现知识转化与能力培养。亲身经历与感受比空洞抽象的说教更具说服力，主动地去交互与被动地观看有质的差别。虚拟实验就是让学习者在创设的虚拟环境中，通过与虚拟对象的交互，如拆解、装配、驱动与操控等，带给学习者一定程度的实践体验，增加学习者的直接经验，辅助将知识转化为能力。

教育部编制了《教育信息化十年发展规划（2011—2020 年）》（以下简称《规划》），提出了建设数字化技能教室、仿真实训室、虚拟仿真实训教学软件、数字教育教学资源库和 20000 门优质网络课程及其资源，遴选和开发 1500 套虚拟仿真实训实验系统，建立数字教育资源共建共享机制，制定政府购买优质数字教育资源与服务的相关政策，支持使用者按需购买资源与服务，以鼓励企业和其他社会力量开发数字教育资源、提供资源服务等要求。按照《规划》的指导思想，教育部启动了相关的若干建设工程，包括自 2013 年起评选国家级虚拟仿真实验教学中心的工作（至今已评选了 300 个），开展名校建设工程，力推虚拟仿真教学资源的规划、建设与应用。近年来，很多学校陆续采用虚拟现实技术建设了各种学科专业的数字化虚拟仿真教学资源，并投入应用，取得了很好的教学效果。

普通高等教育 3D 版机械类规划教材是由山东高校机械工程教学协作组组织驻鲁高等学校教师，按照教育部高等学校机械类专业教学指导委员会机械类专业的培养计划及各课程教学大纲要求编写的，充分体现了“三维可视化及互动学习”的特点，将难于学习的知识点以 3D 教学资源的形式进行介绍，其配套的虚拟仿真教学资源由济南科明数码技术股份有限公司开发完成，并建设了“科明 365”在线教育云平台（www.keming365.com），提供有适合课堂教学的“单机版”、适合集中上机学习的“局域网络版”、适合学生自主学习的“安卓

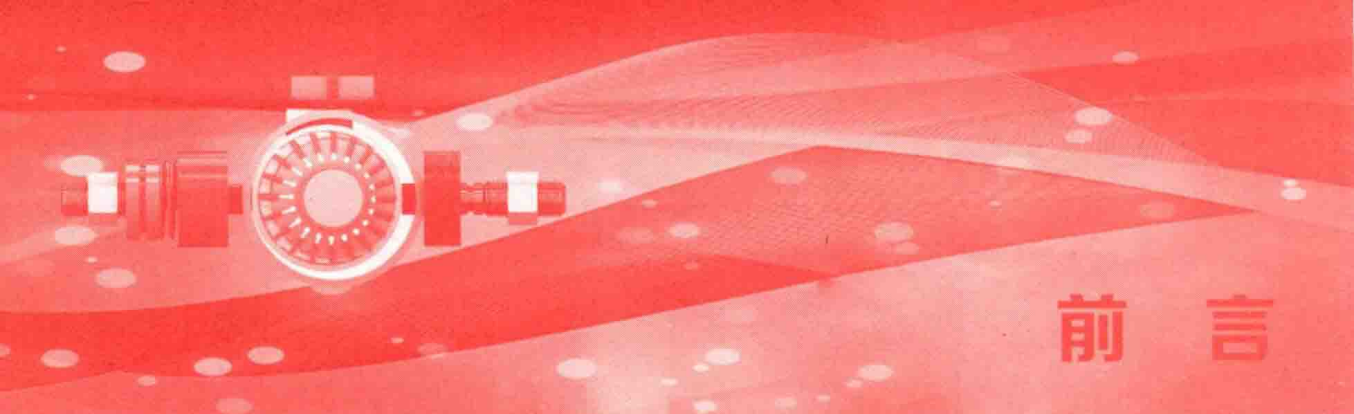


手机版”，构建了“没有围墙的大学”“不限时间、不限地点、自主学习”的学习资源。

古人云，天下之事，闻者不如见者知之为详，见者不如居者知之为尽。

本系列教材的陆续出版，将很好地解决普遍存在的实践教学条件难以满足卓越工程师教育需要的问题。这将为机械工程教育创造理论与实践有机结合的条件，有利于培养适应制造业快速发展需要的卓越工程师，有效助推中国制造 2025 战略的实施。

山东高校机械工程教学协作组
于济南



前言

本书是山东高校机械工程教学协作组组织编写的“普通高等教育 3D 版机械类规划教材”之一。

本书编写按照高等学校机械类专业教学指导委员会机械类专业的培养计划及各课程教学大纲的要求,充分利用虚拟现实(VR)、增强现实(AR)等技术开发的虚拟仿真教学资源,体现“三维可视化及互动学习”的特点,将难于学习的知识点以 3D 教学资源的形式进行介绍,力图达到“教师易教、学生易学”的目的。本书配有安卓手机版的 3D 虚拟仿真教学资源,扫描封底上方的二维码下载 APP,即可使用。书中标有  图标表示免费使用,标有  图标表示收费使用。本书提供免费的教学课件,欢迎选用本书的教师登录机工教育服务网(www.cmpedu.com)下载。济南科明数码技术股份有限公司还提供有互联网版、局域网版、单机版的 3D 虚拟仿真教学资源,可供师生在线下载(www.keming365.com)使用。

本书适用于普通工科院校机械类各专业本科生,也适用于各类成人教育高校、自学考试等机械类专业学生,还可供从事流体传动与控制技术的工程技术人员参考。

本书由山东建筑大学陈清奎、山东大学刘延俊、山东建筑大学成红梅、泰山学院葛媛媛、临沂大学刘玉慧、山东理工大学赵玲玲、烟台南山学院王凤良编著;本书配套的 3D 虚拟仿真教学资源由济南科明数码技术股份有限公司开发完成,并负责网上在线教学资源的维护、运营等工作,主要开发人员包括陈清奎、刘海、何强、孙宏翔、栾飞、周鹏、李晓东、王佳等。本书由齐鲁工业大学万金领担任主审。

本书的编写得到了山东山大液压气动有限公司、SMC(中国)有限公司济南营业所、山东机械工程学会液压气动专业委员会的大力支持与帮助,编者在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编者
于济南

目 录

序

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 液压传动的发展 1

1.2 液压传动的工作原理及液压传动系统的组成 2

1.3 液压元件的图形符号 3

1.4 液压传动的优缺点及应用 4

思考题与习题 6

第 2 章 液压油与液压流体力学基础 7

2.1 液体的物理性质 7

2.2 液体静力学基础 13

2.3 液体动力学基础 16

2.4 液体流动时的压力损失 22

2.5 液体流过小孔和缝隙的流量 26

2.6 液压冲击和气穴现象 29

思考题与习题 31

第 3 章 液压泵与液压马达 34

3.1 概述 34

3.2 齿轮泵 37

3.3 叶片泵 43

3.4 柱塞泵 52

3.5 各类液压泵的性能比较及应用 60

3.6 液压马达 61

思考题与习题 64

第 4 章 液压缸 66

4.1 液压缸的工作原理、类型和特点 66

4.2 液压缸基本参数的计算 68

4.3 液压缸的典型结构 74

4.4 液压缸的设计 78

思考题与习题 83

第 5 章 液压控制阀 84

5.1 概述 84

5.2 方向控制阀 85

5.3 压力控制阀 100

5.4 流量控制阀 113

5.5 比例控制阀 119

5.6 插装阀及叠加阀 124

思考题与习题 132

第 6 章 液压辅助元件 135

6.1 过滤器 135

6.2 蓄能器 138

6.3 油箱 141

6.4 热交换器 143

6.5 连接件 144

6.6 密封装置 147

思考题与习题 152

第 7 章 液压基本回路 153

7.1 压力控制回路 153

7.2 速度控制回路 158

7.3 方向控制回路 170

7.4 多缸动作回路 172

思考题与习题 176

第 8 章 典型液压系统 180

8.1 液压系统图的阅读和分析方法 180

8.2 YT4543 型动力滑台液压系统 181

8.3 MLS₃-170 型采煤机及其液压牵引系统 183

8.4 Q2-8 型汽车起重机液压系统 187

8.5 YB32-200 型压力机的液压系统 189

8.6 XS-ZY-250A 型注塑机比例液压系统 192

8.7 盘式热分散机比例压力和流量复合控制液压系统 195

8.8 XLB1800×10000 平板硫化机的液压系统 197

思考题与习题 199



第 9 章 液压系统的设计与计算	201	思考题与习题	278
9.1 液压系统的设计步骤和方法	201	第 12 章 液压气动系统的安装、调试、 使用与维护	279
9.2 液压系统设计计算举例	207	12.1 液压系统的安装	279
思考题与习题	211	12.2 液压系统的调试	282
第 10 章 液压伺服系统	212	12.3 液压系统的使用、维护和保养	285
10.1 概述	212	12.4 气动系统的安装调试与使用维护	288
10.2 典型的液压伺服控制元件	214	思考题与习题	291
10.3 电液伺服阀	217	第 13 章 液压系统的故障诊断	292
10.4 液压伺服系统实例	218	13.1 液压系统的故障原因分析	292
思考题与习题	222	13.2 液压系统的故障特征与诊断步骤	293
第 11 章 气压传动	223	13.3 液压系统的故障诊断方法	296
11.1 气压传动基本知识	223	13.4 150kN 电液机液压系统的故障诊断 实例	305
11.2 气源装置及辅助元件	224	思考题与习题	307
11.3 气动执行元件	229	附录 液压与气压传动常用图形符号 ...	308
11.4 气动控制元件	233	参考文献	314
11.5 气动基本回路	245		
11.6 气动系统实例	255		
11.7 气动系统的设计	257		

绪 论

液压传动和机械传动相比,具有许多优点,因此在机械工程中,液压传动被广泛采用。液压传动是利用密闭系统中的受压液体作为工作介质来进行能量传递的一种传动形式,它通过能量转换装置(液压泵),将原动机(电动机)的机械能转变为液体的压力能,然后通过封闭管道、控制元件等,由另一能量装置(液压缸或液压马达)将液体的压力能转变为机械能,以驱动负载和实现执行机构所需的直线或旋转运动。

本章介绍液压传动的发展、工作原理、组成、优缺点及应用。

1.1 液压传动的发展

液压传动相对机械传动来说,是一门新技术。如果从世界上第一台水压机问世算起,至今已有 200 多年的历史。然而,液压传动直到 20 世纪 30 年代才真正得到推广应用。

第二次世界大战期间,由于军事工业需要反应快、精度高、功率大的液压传动装置,从而推动了液压技术的快速发展;战后,液压技术迅速转向民用,在机械制造、工程建设机械、农业机械、汽车等行业中逐步得到推广。20 世纪 60 年代后,随着原子能、空间技术、计算机技术的发展,液压技术也得到了很大发展,并渗透到各个工业领域中去。当前液压技术正向着高压、高速、大功率、高效率、低噪声、高寿命、高度集成化、复合化、小型化以及轻量化等方向发展;同时,新型液压元件和液压系统的计算机辅助测试(CAT)、计算机直接控制(CDC)、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,也是当前液压技术发展和研究的方向。

我国的液压技术开始于 20 世纪 50 年代,液压系统最初应用于机床和锻压设备,后来又用于拖拉机和工程机械。自 1964 年开始从国外引进一些液压元件的生产技术,同时自行开发设计液压产品,经过 20 多年的艰苦探索和发展,特别是 20 世纪 80 年代初期引进美国、日本、德国的先进技术和设备,我国的液压技术水平得到了很大提高。目前,我国的液压元件已从低压到高压形成系列,并生产出许多新型的元件,如插装式锥阀、电液比例阀、电液数字控制阀等。我国机械工业在消化、推广国外引进的先进液压技术的同时,大力开展产品国产化工作,研制、开发国产液压元件新产品,加强产品可靠性和新技术应用的研究,积极采用国际标准,合理调整产品结构,对一些性能差且不符合国际标准的液压元件产品,采用逐步淘汰的措施。随着科学技术的迅猛发展,液压技术也将获得进一步发展,在各行业中的应用将更加广泛。



1.2 液压传动的工作原理及液压传动系统的组成

1.2.1 液压传动的工作原理

图 1-1 是简单机床的液压传动系统图。液压缸 8 固定在床身上，活塞 9 连同活塞杆带动工作台 10 做直线往复运动。电动机带动液压泵 3 旋转，液压泵 3 经过滤器 2 从油箱 1 吸油，油液通过节流阀 4 流至换向阀 6。当手柄 7 处于图 1-1a 所示位置时，P 与 A、B、T 均不通，液压缸 8 不通油，所以工作台停止。

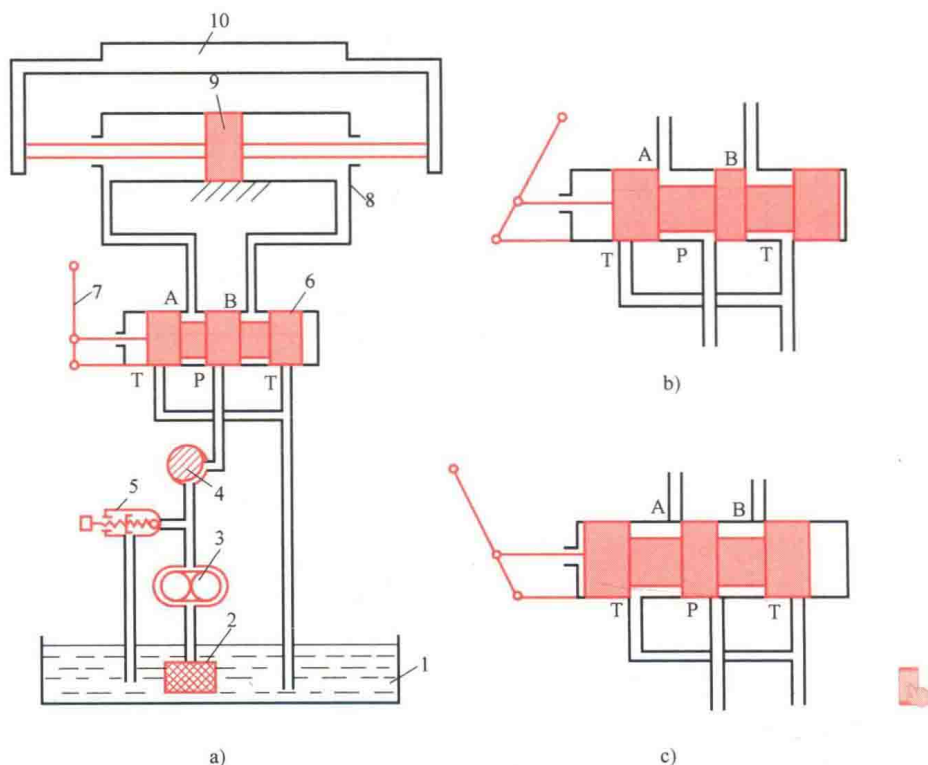


图 1-1 简单机床的液压传动系统

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—节流阀 5—溢流阀 6—换向阀
7—手柄 8—液压缸 9—活塞 10—工作台

若将手柄 7 推至图 1-1b 所示位置，这时油液从 $P \rightarrow A \rightarrow$ 液压缸 8 左腔；液压缸 8 右腔 $\rightarrow B \rightarrow T$ ，工作台 10 向右移动。

若将手柄 7 推至图 1-1c 所示位置，这时油液从 $P \rightarrow B \rightarrow$ 液压缸 8 右腔；液压缸 8 左腔 $\rightarrow A \rightarrow T$ ，工作台 10 向左移动。

由此可见：由于设置了换向阀 6，使其阀芯处于不同的位置，就可改变液压油的通路，使液压缸运动不断换向，从而实现工作台的往复运动。

工作台速度 v 通过节流阀 4 调节。节流阀的作用是利用改变节流阀开口的大小，调节通过节流阀油液的流量，从而控制工作台的速度。

工作台运动时，要克服阻力，包括切削力和相对运动件表面的摩擦力等，这些阻力，由



液压泵输出油液的压力能来克服,根据工作情况的不同,液压泵输出油液的压力应该能够调整。另外,一般情况下,液压泵排出的油液往往多于液压缸所需油液,多余的油液经溢流阀 5 流回油箱。过滤器 2 为网式过滤器,起滤油作用。

通过上述分析可知:

- 1) 液压传动是依靠运动着的液体的压力能来传递动力的,它与依靠液体的动能来传递动力的“液力传动”不同。
- 2) 液压系统工作时,液压泵将机械能(电动机)转变为压力能;执行元件(液压缸或液压马达)将压力能转变为机械能。
- 3) 液压传动系统中的油液是在受调节、控制的状态下进行工作的。
- 4) 液压传动系统必须满足它所驱动的运动部件在力和速度方面的要求。
- 5) 液压传动是以受压的液体作为工作介质来传递信号和动力的。

1.2.2 液压传动系统的组成

通过上述分析可知,液压传动系统由五个部分组成:

- (1) 能源装置 它把输入的机械能转变成油液的压力能。最常见的是液压泵,它为液压系统提供液压油,使整个系统进行运转。
- (2) 执行装置 将油液的压力能转变成机械能,并对外做功,使运动部件运动,如液压缸、液压马达。
- (3) 控制调节装置 它是控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向的装置。图 1-1 所示液压传动系统中,溢流阀、节流阀、换向阀等液压元件即属于该类装置。
- (4) 辅助装置 它们是除上述三项以外的其他装置,如图 1-1 中的油箱、过滤器、油管等。它们对保证液压系统可靠、稳定、持久地工作,具有重要作用。
- (5) 工作介质 液压油或其他合成液体。



1.3 液压元件的图形符号

图 1-1 为液压系统的半结构原理图,这种原理图直观性强,容易理解,但图形较复杂,特别是元件较多时,绘制很不方便。为简化原理图的绘制,系统中各元件可采用符号来表示,这些符号只表示元件的职能,不表示元件的结构和参数。

为便于大家看懂用图形符号表示的液压系统图,现将图 1-1 中出现的液压元件的图形符号介绍如下。

1. 液压泵的图形符号

由一个圆加上一个实心三角来表示,三角箭头向外,表示油液的方向。图 1-2 中无箭头的为定量泵,有箭头的为变量泵。

2. 换向阀的图形符号

为改变油液的流动方向,换向阀的阀芯位置要变换,它一般可以变动 2~3 个位置,而且阀体上的通路数也不同。根据阀芯可变动的位置数和阀体上的通路数,可组成 x 位 y 通阀。其图形意义如下:

- 1) 换向阀的工作位置用方格表示,有几个方格即表示几位阀。



2) 方格内的箭头符号表示油流的连通情况 (有时与油液流动方向一致), “T” 是表示油液被阀芯闭死的符号, 这些符号在一个方格内和方格的交点数即表示阀的通路数。

3) 方格外的符号为操纵阀的控制符号, 控制形式有手动、电动和液动等。

3. 压力阀的图形符号

方格相当于阀芯, 方格中的箭头表示油流的通道, 两侧的直线代表进出油口。图中的虚线表示控制油路, 压力阀就是利用控制油路的液压力与另一侧弹簧力相平衡的原理进行工作的。

4. 节流阀的图形符号

两圆弧所形成的缝隙即为节流孔道, 油液通过节流孔使流量减少, 图中的箭头表示节流孔的大小可以改变, 亦即通过该阀的流量是可以调节的。

液压系统图中规定: 液压元件的图形符号应以元件的静止状态或零位来表示。

由此可将图 1-1 对应画成图 1-2 所示的用图形符号表示的液压系统原理图。

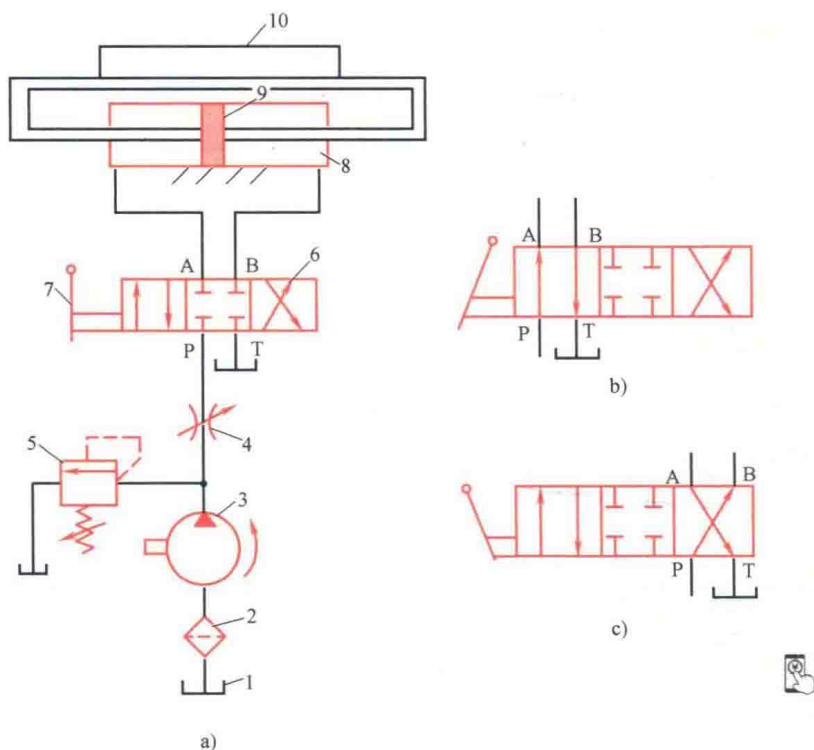


图 1-2 简单机床的液压传动系统原理图 (用图形符号表示)

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—节流阀 5—溢流阀 6—换向阀
7—手柄 8—液压缸 9—活塞 10—工作台

1.4 液压传动的优缺点及应用

1.4.1 液压传动的优缺点

1. 主要优点

液压传动与机械传动、电力传动、气压传动相比, 具有下列优点:

1) 液压传动能在运行中实行无级调速, 调速方便且调速范围比较大, 可达 $100:1 \sim$



2000 : 1。

2) 在同等功率的情况下, 液压传动装置的体积小、重量轻、惯性小、结构紧凑 (如液压马达的重量只有同功率电动机重量的 10%~20%), 而且能传递较大的力或转矩。

3) 液压传动工作比较平稳, 反应较快, 冲击小, 能高速起动、制动和换向。液压传动装置的换向频率为: 回转运动每分钟可达 500 次, 往复直线运动可达 400~1000 次。

4) 液压传动装置的控制、调节比较简单, 操纵比较方便、省力, 易于实现自动化与电气控制配合使用, 从而实现复杂的顺序动作和远程控制。

5) 液压传动装置易于实现过载保护, 若系统超负载, 油液经溢流阀回油箱。由于采用油液作为工作介质, 能自行润滑, 因此寿命长。

6) 液压传动易于实现系列化、标准化、通用化, 易于设计、制造和推广使用。

7) 液压传动易于实现回转运动和直线运动, 且元件排列、布置灵活。

8) 液压传动中, 由于功率损失所产生的热量可由流动着的油液带走, 所以可以避免在系统某些局部位置产生过度温升。

2. 主要缺点

1) 液体为工作介质, 易泄漏, 油液可被压缩, 因此不能用于传动比要求准确的场合。

2) 液压传动中有机械损失、压力损失、泄漏损失等, 效率较低, 所以不宜做远距离传动。

3) 液压传动对油温和负载变化敏感, 不宜于在低、高温下使用, 对污染也很敏感。

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。

5) 液压元件制造精度高、造价高, 所以须组织专业生产。

6) 液压传动装置出现故障时不易追查原因, 不易迅速排除。

总的来说, 液压传动优点较多, 缺点正随着生产技术的发展逐步加以克服, 因此, 液压传动在现代化生产中有着广阔的发展前景。

1.4.2 液压传动的应用

由于液压传动的优点很多, 所以在国民经济各部门中得到了广泛的应用, 但各部门应用液压传动的出发点不同, 工程机械、压力机械采用的原因是结构简单、输出力大; 航空工业采用的原因是重量轻、体积小。

机床中采用液压传动主要是因为其可以实现无级变速、易于实现自动化、能实现换向频繁的往复运动。为此, 液压传动常用在机床的如下一些装置中。

1. 进给运动传动装置

这项应用在机床上最为广泛: 磨床的砂轮架; 卧式车床、转塔车床、自动车床的刀架或转塔刀架; 磨床、钻床、铣床、刨床的工作台或主轴箱; 组合机床的动力头和滑台等, 都可以采用液压传动。这些部件有的要求快速移动, 有的要求慢速移动 ($2\text{mm}/\text{min}$), 有的则要求快慢速移动。这些部件的运动多数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仍然能保持恒定, 有的要求有良好的换向性能; 所有这些采用液压传动是最合适的。

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都可以采用液压传动实现其所需的高速往复



运动，前者的运动速度可达 $60 \sim 90 \text{m/min}$ ，后两者可达 $30 \sim 50 \text{m/min}$ 。这些情况下采用液压传动，在减小换向冲击、降低能量消耗、缩短换向时间等方面都很有利。

3. 回转主体运动传动装置

车床主轴可采用液压传动来实现无级变速的回转主体运动，但这一应用目前还不普遍。

4. 仿形装置

车床、铣床、刨床的仿形加工可采用液压伺服系统来实现，精度可达 $0.01 \sim 0.02 \text{mm}$ 。此外，磨床上的成形砂轮修正装置和标准丝杠校正装置也可采用这种系统。

5. 辅助装置

机床上的夹紧装置、变速操纵装置、丝杠螺母间隙消除装置、垂直移动部件的平衡装置、分度装置及工件和刀具的装卸、输送、储存装置等，都可以采用液压传动来实现，这样做有利于简化机床结构，提高机床的自动化程度。

6. 步进传动装置

数控机床上工作台的直线或回转步进运动，可根据电气信号迅速而准确地由电液伺服系统实现。开环系统定位精度较低（ $<0.01 \text{mm}$ ），但成本低；闭环系统的定位精度和成本都较高。

7. 静压支承

重型机床，高速机床，高精度机床上的轴承、导轨和丝杠螺母机构，如果采用液压系统做静压支承，可得到很高的工作平稳性和运动精度。

液压传动在各个行业中的应用见表 1-1。

表 1-1 液压传动在各个行业中的应用

行业名称	应用场合举例
机床	磨床、铣床、刨床、拉床、压力机、自动机床、组合机床、数控机床、加工中心等
工程机械	挖掘机、装载机、推土机等
汽车	自卸式汽车等
农业机械	联合收割机的控制系统、拖拉机的悬挂装置等
轻工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
冶金机械	电炉控制系统、轧钢机控制系统等
起重运输机械	起重机、叉车、装卸机械、液压千斤顶等
矿山机械	开采机、提升机、液压支架、采煤机等
建筑机械	打桩机、平地机等
船舶港口机械	起货机、锚机、舵机等
铸造机械	砂型压实机、加料机、压铸机等



思考题与习题

1-1 何谓液压传动？其基本工作原理是什么？

1-2 液压传动系统主要由哪几部分组成？试说明各部分的作用。

1-3 液压传动与其他传动相比有哪些优缺点？

第 2 章

液压油与液压流体力学基础

液压传动是以液体作为工作介质进行能量传递的，因此，了解液体的物理性质，掌握液体在静止和运动过程中的基本力学规律，对于正确理解液压传动的基本原理、合理设计和正确使用液压系统都是非常必要的。

2.1 液体的物理性质

2.1.1 液体的密度

单位体积液体的质量称为液体的密度，通常用 ρ 表示。

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

式中， V 是液体的体积 (m^3)； m 是液体的质量 (kg)。

密度是液体的一个重要的物理参数。密度的大小随着液体的温度或压力的变化会产生一定的变化，但其变化量较小，一般可忽略不计。常用液压油的密度约为 $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2.1.2 液体的可压缩性

液体受压力作用而使体积减小的性质称为液体的可压缩性。体积为 V 的液体，当压力增大 Δp 时，体积减小 ΔV ，则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (2-2)$$

式中， κ 为液体的体积压缩系数。由于压力增大时，液体的体积减小，即 Δp 与 ΔV 的符号始终相反，为保证 κ 为正值，在式 (2-2) 的右边加一负号。

κ 的倒数称为液体的体积模量，以 K 表示，即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{V \Delta p}{\Delta V} \quad (2-3)$$

K 表示液体产生单位体积相对量所需要的压力增量。在常温下，纯净液压油的体积模量 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{Pa}$ ，数值很大，故一般可认为液压油是不可压缩的。若液压油中混入空气，其抗压缩能力会显著下降，并将严重影响液压系统的工作性能。因此，在考虑液压油的可压缩性时，必须综合考虑液压油本身的可压缩性、混在油中空气的可压缩性以及盛放液压油的



封闭容器（包括管道）的容积变形等因素的影响，常用等效体积模量 K' 表示， $K' = (0.7 \sim 1.4) \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

在变动压力下，液压油的可压缩性的作用极像一个弹簧，即压力升高，油液体积减小；压力降低，油液体积增大。当作用在封闭液体上的外力发生 ΔF 的变化时，如果液体承压面积 A 不变，则液柱的长度必有 Δl 的变化（图 2-1）。在这里，体积变化 $\Delta V = A\Delta l$ ，压力变化 $\Delta p = \Delta F/A$ ，即

$$K = -\frac{V\Delta F}{A^2\Delta l}$$

或

$$K_h = \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{\Delta p A}{\Delta l} = \frac{A^2}{V} K \quad (2-4)$$

式中， K_h 是“液压弹簧”的刚度。

2.1.3 液体的黏性

1. 黏性的意义

液体在外力作用下流动时，液体分子间的内聚力会阻碍其分子的相对运动，即具有一定的内摩擦力，这种性质称为液体的黏性。黏性是液体的重要物理性质，也是选择液压油的主要依据。

液体流动时，由于液体和固体壁面间的附着力以及液体本身的黏性会使液体各层面间的速度大小不等，如图 2-2 所示。设两平板间充满液体，下平板固定不动，上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体黏性的作用，黏附在下平板表面上的液层速度为零，黏附在上平板表面上的液层速度为 u_0 ，而中间各液层的速度则随着其与下平板间的距离大小近似呈线性规律变化。

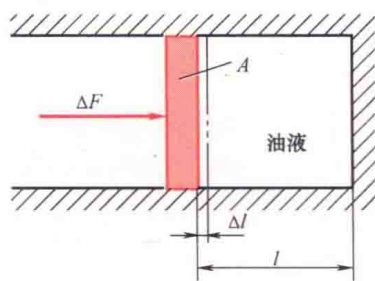


图 2-1 “液压弹簧”的刚度计算

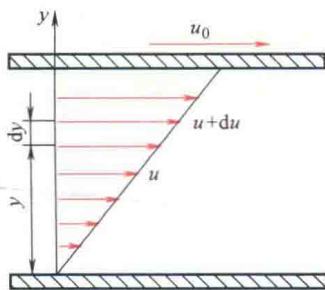


图 2-2 液体的黏性

实验证明，液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_f 与液层接触面积 A 成正比，与液层间的速度梯度 du/dy 成正比，即

$$F_f = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

式中， μ 是比例系数，称为动力黏度。若以 τ 表示液层间单位面积上的内摩擦力，则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-6)$$

式 (2-6) 称为牛顿液体内摩擦定律。

2. 黏度

黏性的大小用黏度表示。常用的黏度有三种，即动力黏度、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，根据牛顿液体的内摩擦定律