



全国高等职业教育规划教材

液压与气压 传动技术

主 编 陈 平

副主编 张双侠 胡小勇



电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书在讲解液压与气压传动技术的基本知识的同时,着重介绍其实际应用,主要内容包括:液压与气压传动元件的结构、工作原理及应用,液压与气压传动基本回路和典型系统的组成与分析,液压与气压传动设备的使用和维护等。

本书可作为高职高专院校机电一体化、机械设计制造及自动化、数控等专业的教学用书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动技术/陈平主编. —北京:机械工业出版社,2010.5

全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-111-30307-7

I. ①液… II. ①陈… III. ①液压传动—高等学校:技术学校—教材②气压传动—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第060115号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:石陇辉 章承林 版式设计:霍永明

责任校对:申春香 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2010年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.25印张·300千字

0001-4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30307-7

定价:23.00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

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

出版说明

根据“教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见”中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位，促进学生技能的培养，以及教材内容要紧密结合生产实际，并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神，机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补，并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师，针对相关专业的课程设置，融合教学中的实践经验，同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的，具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中，本系列教材获得了较高的评价，并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中，除了保持原有特色外，针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中，核心基础课程的教材在保持扎实的理论基础的同时，增加实训和习题；实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合；涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时，根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来，本系列教材具有以下特点：

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度，强调专业技术应用能力的训练，适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述容易理解、清晰简洁，多用图表来表达信息；增加相关技术在生产中的应用实例，引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新，及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念，并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合，提高教学服务水平，为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快，加之我们的水平和经验有限，因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息，以利于我们今后不断提高教材的出版质量，为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

为了适应高等职业教育和工程技术的进步，编者总结了多年来在“液压与气压传动”课程教学实践中的经验，吸取了相关专业的教学改革新思路，在广泛咨询工厂企业对应用型人才需求的基础上，编写了本教材。

本书力求精简理论知识，丰富实际应用，采用先进技术内容，体现以职业能力为本位、以应用为核心、以“必需、够用”为度的编写原则，以适应我国高等职业教育发展和应用型技术人才培养的需要。

全书包括液压传动和气压传动两部分，共 11 章，主要介绍了液压与气压传动元件的结构、工作原理及应用，液压与气压传动基本回路和典型系统的组成与分析，液压与气压传动设备的使用和维护等。

本书可作为高职高专院校机电一体化专业、机械设计制造及自动化专业、数控专业的“液压与气压传动”课程的教学用书，也可供相关工程技术人员参考。

本书由陈平（无锡职业技术学院）担任主编，张双侠（新疆昌吉职业技术学院）、胡小勇（无锡职业技术学院）任副主编，朱耀武（无锡职业技术学院）主审。参与编写的还有李华、胡斌、郑贞平。

本书是编者多年工作经验的总结，但是由于水平有限，书中缺点和错误之处难免，恳请广大读者批评指正，以便今后改进。

为配合教学，本书为广大读者提供电子教案，读者可以从机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 免费下载。

编者

目 录

出版说明

前言

第1章 液压与气压传动基础知识 1

1.1 液压传动概述 1

1.1.1 液压传动的工作原理 1

1.1.2 液压传动系统的组成 2

1.1.3 液压传动的特点 3

1.2 流体力学基础 4

1.2.1 液压传动工作介质的性质 4

1.2.2 流体流动时的压力损失 7

1.2.3 工作介质的选用 8

1.3 气穴现象和液压冲击 10

1.3.1 气穴现象 10

1.3.2 液压冲击 11

1.4 气压传动概述 11

1.4.1 气压传动系统的工作原理 12

1.4.2 气压传动系统的组成 12

1.4.3 气压传动的特点 12

1.5 液压与气动系统中的图形
符号 12

习题 13

第2章 液压动力元件 14

2.1 液压泵 14

2.1.1 液压泵概述 14

2.1.2 液压泵的工作原理及特点 15

2.1.3 液压泵的主要性能参数 16

2.1.4 液压泵的选用 18

2.1.5 液压泵的噪声 18

2.2 齿轮泵 19

2.2.1 外啮合齿轮泵 19

2.2.2 内啮合齿轮泵 22

2.3 叶片泵 23

2.3.1 单作用叶片泵 23

2.3.2 双作用叶片泵 25

2.3.3 双联叶片泵与双级叶片泵 27

2.4 柱塞泵 28

2.4.1 径向柱塞泵 29

2.4.2 轴向柱塞泵 29

2.4.3 柱塞泵的安装使用注意事项 32

习题 32

第3章 液压执行元件 34

3.1 液压马达 34

3.1.1 液压马达的特点及分类 34

3.1.2 液压马达的工作原理及应用 34

3.1.3 液压马达的基本参数 37

3.1.4 马达的性能及选用 38

3.2 液压缸 39

3.2.1 液压缸的分类 39

3.2.2 液压缸的工作原理 40

3.2.3 液压缸的结构 44

习题 45

第4章 液压控制元件 46

4.1 液压控制元件概述 46

4.1.1 液压阀的作用 46

4.1.2 液压阀的分类 46

4.1.3 液压阀的连接方式 47

4.1.4 对液压阀的基本要求 47

4.2 方向阀的结构及应用 47

4.2.1 单向阀 47

4.2.2 换向阀 49

4.3 压力控制阀的结构及应用 57

4.3.1 溢流阀 57

4.3.2 减压阀 60

4.3.3 顺序阀 62

4.3.4 压力继电器 64

4.4 流量控制阀的结构及应用 65

4.4.1 流量控制原理及节流口形式 66

4.4.2 节流阀 67

4.4.3 调速阀 69

4.4.4 溢流节流阀 70

4.5 其他液压阀的结构及应用 72

4.5.1 叠加阀 72

4.5.2 电液控制阀	74	7.1.3 动力滑台液压系统的特点	113
习题	76	7.2 输送带液压系统	114
第5章 液压辅助元件	77	7.2.1 概述	114
5.1 蓄能器	77	7.2.2 输送带液压系统的工作原理	114
5.1.1 蓄能器的作用	77	7.2.3 输送带液压系统的特点	115
5.1.2 蓄能器的分类	78	7.3 加工中心液压系统	116
5.1.3 蓄能器的使用和安装	78	7.3.1 概述	116
5.2 过滤器	78	7.3.2 加工中心液压系统的工作原理	116
5.2.1 过滤器的功用和类型	79	7.3.3 加工中心液压系统的特点	119
5.2.2 过滤器的主要性能指标	79	7.4 注塑机液压系统	119
5.2.3 过滤器的选用与安装	80	7.4.1 概述	119
5.3 油箱	81	7.4.2 注塑机液压系统的工作原理	121
5.3.1 油箱的功用和结构	81	7.4.3 注塑机液压系统的特点	124
5.3.2 设计油箱时应注意的问题	81	习题	125
5.4 管路和管接头	82	第8章 液压系统的使用与维护	126
5.4.1 管路	82	8.1 液压系统的安装和调试	126
5.4.2 管接头	83	8.1.1 液压系统的安装	126
5.5 密封装置	85	8.1.2 液压系统的调试	128
5.5.1 对密封装置的要求	85	8.2 液压系统的维护	130
5.5.2 密封装置的类型和特点	85	8.2.1 经常性的维护工作	130
习题	87	8.2.2 定期的维护工作	130
第6章 液压系统常用回路	88	8.3 液压系统的故障分析与排除	131
6.1 速度控制回路	88	8.3.1 液压系统的故障分析	131
6.1.1 调速回路	88	8.3.2 液压系统故障的特点	132
6.1.2 快速运动回路	96	8.3.3 故障诊断步骤	133
6.1.3 速度换接回路	97	8.3.4 故障诊断方法	134
6.2 压力控制回路	99	8.3.5 故障分析及排除	136
6.2.1 调压回路	99	8.3.6 内漏故障的排除	136
6.2.2 减压回路	100	8.3.7 维修工作	137
6.2.3 增压回路	101	习题	138
6.2.4 卸荷回路	102	第9章 气动元件的结构及应用	139
6.2.5 保压回路	103	9.1 气源装置及气动辅助元件	139
6.3 多缸动作回路	104	9.1.1 气源装置	139
6.3.1 顺序动作回路	104	9.1.2 气动辅助元件	144
6.3.2 同步运动回路	106	9.2 气动执行元件	147
6.3.3 互不干扰回路	108	9.2.1 气缸	147
习题	109	9.2.2 气马达	149
第7章 典型液压系统	110	9.3 气动控制阀及其应用	150
7.1 组合机床动力滑台液压系统	110	9.3.1 方向控制阀及换向回路	150
7.1.1 概述	110	9.3.2 压力控制阀及压力控制回路	152
7.1.2 动力滑台液压系统的工作原理	111	9.3.3 流量控制阀及速度控制回路	155

9.4 气动逻辑元件及其应用	157	习题	168
习题	159	第 11 章 典型气动系统及气动系统的	
第 10 章 气压传动基本回路	160	使用与维护	169
10.1 方向、压力、速度控制回路 ...	160	11.1 机械手气动系统	169
10.1.1 方向控制回路	160	11.2 工件夹紧气动系统	171
10.1.2 压力控制回路	160	11.3 加工中心气动系统	171
10.1.3 速度控制回路	161	11.4 气动计量系统	172
10.2 程序动作回路	162	11.5 气动系统的使用与维护	173
10.2.1 顺序动作回路	162	11.5.1 气动系统的安装与调试	174
10.2.2 往复动作回路	164	11.5.2 气动系统使用的注意事项	174
10.2.3 延时回路	165	11.5.3 气动系统的日常维护工作	174
10.2.4 计数回路	165	11.5.4 气动系统的定期维护工作	175
10.2.5 同步回路	166	11.5.5 气动系统故障的种类及其排除	
10.3 气液联动回路	166	方法	176
10.3.1 气液转换器的控制回路	166	习题	177
10.3.2 气液阻尼缸的控制回路	166	附录 部分常用液压与气动元件图形	
10.4 安全保护回路	167	符号	179
10.4.1 双手操作安全回路	167	参考文献	186
10.4.2 其他安全保护回路	168		

第 1 章 液压与气压传动基础知识

1.1 液压传动概述

液压与气压传动统称为流体传动，都是利用有压流体（液体或气体）作为工作介质来传递动力或控制信号的一种传动方式。

不论液压传动还是气压传动，相对于机械传动来说，都是一门新兴的技术。利用液体的压力来传递动力是从 18 世纪英国制成第 1 台水压机开始的，至今已经有 200 多年的历史了。直到 20 世纪 30 年代，液压传动才较普遍地用于起重机、机床、数控机床及工程机械等设备中。液压传动由于具有重量轻、传递的动力大、能无级调速、易于实现过载保护等优点，在现代农业、制造业、能源工程、化学工程、交通运输与物流工程、采矿与冶金工程、油气探采与加工、建筑、水利与环保工程、航天与海洋工程等领域获得了广泛的应用。

液压传动正向高速化、高压化、集成化、大流量、大功率、高效、低噪声、经久耐用的方向发展。尤其是 20 世纪 50 年代以来，液压技术与电子及信息技术相结合，开发出了许多机电一体化的元器件及系统。新型液压元件和液压系统借助于计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助测试（CAT）、计算机直接智能控制（CDC）及现场总线控制与实时监测等技术，实现机、电、液一体化、智能化和网络化，是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

1.1.1 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图来说明。

图 1-1 所示是液压千斤顶的工作原理图。大液压缸 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小液压缸 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 进入举升大液压缸 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

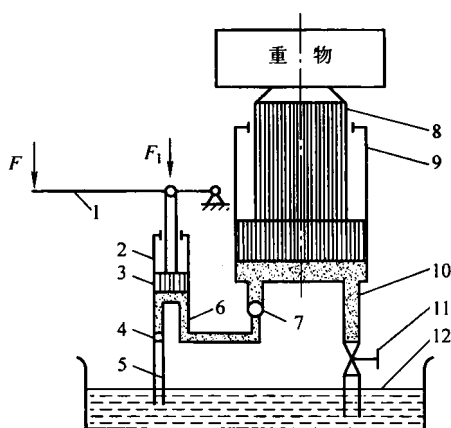


图 1-1 液压千斤顶的工作原理图
1—杠杆手柄 2—小液压缸 3—小活塞
4、7—单向阀 5—吸油管 6、10—管道
8—大活塞 9—大液压缸
11—截止阀 12—油箱

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。

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液体作为传递动力的工作介质。压下杠杆时，小液压缸 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液压缸 9 中油容积的多少。

1.1.2 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、过滤器、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，从油箱中吸油。油液经过滤器进入液压泵，油液由泵腔的低压侧吸入，从泵的高压侧输出，在图 1-2a 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。

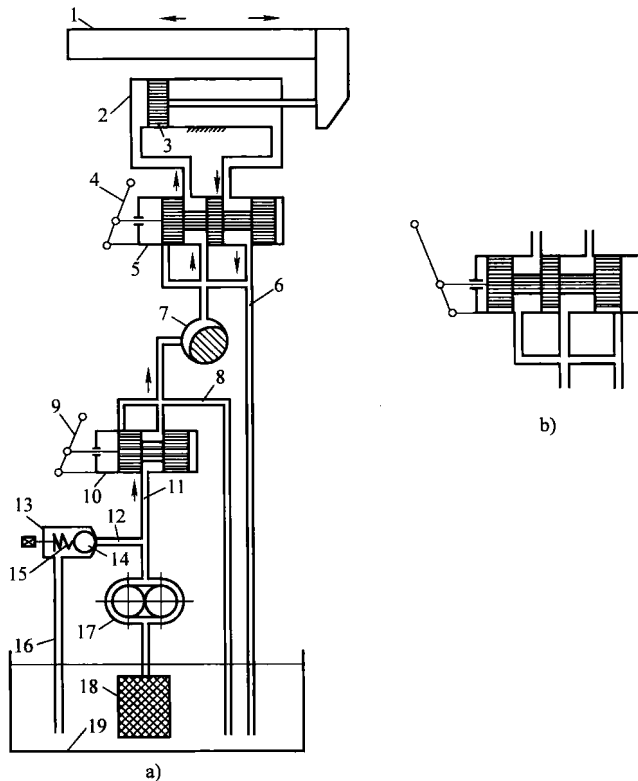


图 1-2 机床工作台液压系统工作原理图

- 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—过滤器 19—油箱

如果操作手柄将换向阀转换成图 1-2b 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。

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，进入液压缸的流量增多，工作台的移动速度增大；当节流阀关小时，进入液压缸的流量减小，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。最常见的能源装置为液压泵。

(2) 执行元件 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和作回转运动的液压马达。

(3) 控制元件 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) 辅助元件 上述三部分之外的其他装置，如油箱、过滤器、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 传递能量和信号的流体，如液压油。

1.1.3 液压传动的特点

1. 液压传动的优点

1) 由于液压系统中各元件之间是用油管连接的，借助于油管的连接，可以方便灵活地布置液压传动机构中各元件的位置，这是比机械传动优越的地方。由于液压缸的推力很大，又极易布置，所以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。

2) 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，调速比可达 1:2000，并可在液压装置运行的过程中进行调速。

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

4) 传递运动均匀平稳，负载变化时速度较稳定。所以，金属切削机床中的磨床传动现在几乎都采用液压传动。

5) 液压传动容易实现自动化。借助于各种控制阀，特别是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。

6) 液压装置易于实现过载保护。如在系统中设置溢流阀等，就能实现过载保护。同时液压件能自行润滑，因此使用寿命长。

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) 液压传动系统是以液压油为工作介质的，在相对运动表面间不可避免地存在油液泄漏，同时油液又不是绝对不可压缩的，因此液压传动不能保证严格的传动比，不宜应用在传动比要求严格的场合，例如螺纹和齿轮加工机床的传动系统。

2) 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。

3) 液压传动对油温的变化比较敏感，温度变化时，液体粘性变化，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下工作。

4) 液压系统发生故障不易检查和排除。

5) 液压传动要求有单独的能源，不像电源那样使用方便。

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。

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。

1.2 流体力学基础

流体力学是液压传动的理论基础，学好它有助于正确理解和掌握液压传动的基本理论和规律，为分析、设计以及使用液压传动系统做好准备。

1.2.1 液压传动工作介质的性质

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。

在液压传动系统中，液体是有粘性的，并在流动中表现出来。液体的粘性是指流动中产生内摩擦力（粘性力）的性质，它总是阻碍液体的相对滑动，抵抗剪切变形，造成流动阻力和能量损耗。同时液体是可压缩的，液体的可压缩性是指液体受压力后其密度发生变化的性质。液压油和水的可压缩性很小，通常按不可压缩流体处理，即认为其密度等于常数。

所谓理想液体是指没有粘性的液体，在等温的条件下一般把粘度、密度视作常量来讨论液体的运动规律。然后再通过实验对产生的偏差加以补充和修正，使之符合实际情况。

1. 压力及其性质

(1) 压力的定义 单位面积上流体所受的垂直力称为压力。压力通常用 p 表示。

(2) 压力的单位 在国际单位制中（SI），压力的单位为 N/m^2 ，即 Pa（帕），由于单位 Pa 太小，因而常采用 kPa（千帕）和 MPa（兆帕）。 $1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

(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、相对压力和真空度的关系如图 1-3 所示。

(4) 液压系统中压力的形成 如图 1-4 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。液压泵起动后，将油箱中的油吸入液压泵，然后压入这个密封容积中，

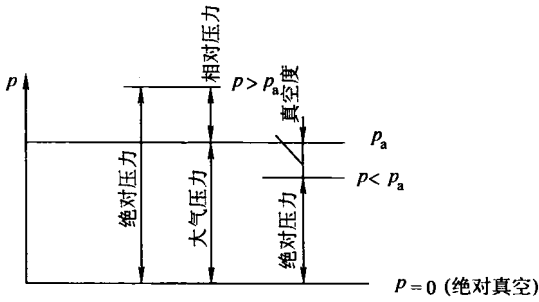


图 1-3 绝对压力、相对压力和真空度的关系

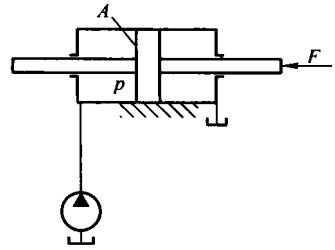


图 1-4 液压系统中压力的形成

活塞杆有向右运动的趋势，但因受到负载 F 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 F 时，活塞才能被液体压力推动，此时，这个密封容积中的压力

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

式中， A 为活塞的有效面积。

所以，液压系统中的压力的大小决定于外负载。负载 F 增加，系统中的压力 p 就增加，反之亦然。液体的自重也能产生压力，但一般情况下较小，因而通常情况下液体自重产生的压力可忽略不计。

2. 压力的传递

液压传动区别于其他传动方式主要有如下两个特征（由于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) 压力的传递 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 1-5 所示。

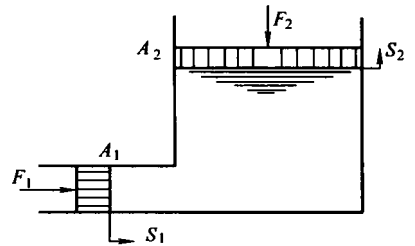


图 1-5 帕斯卡原理示意图

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (1-2)$$

或

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-3)$$

当 $A_2 \geq A_1$ 时，有 $F_2 \geq F_1$ 。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，则由体积流量守恒原理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

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-4)$$

及

$$q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1-5)$$

根据帕斯卡原理可以得出以下推论：活塞的推力等于液体压力与活塞面积的乘积；液体压力 p 由外负荷建立，由式 (1-1) 可知，当 $F=0$ 时， $p=0$ 。

(2) 速度的传递 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。如果设法调节进入缸体的流量，即可调节活塞的移动速度，所以流体传动较易实现无级调速。

3. 流量

(1) 定义与单位 液体具有粘性，并在流动时表现出来，因此研究流动液体时就要考虑其粘性，而液体的粘性阻力是一个很复杂的问题，这就使我们对流动液体的研究变得复杂。因此，我们引入理想液体的概念。理想液体就是指没有粘性、不可压缩的液体。首先对理想液体进行研究，然后再通过实验验证的方法对所得的结论进行补充和修正。这样，不仅使问题简单化，而且得到的结论在实际应用中仍具有足够的精确性。我们把既具有粘性又可压缩的液体称为实际液体。

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

在图 1-6a 中，我们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都不随时间而变，这就是恒定流动。在图 1-6b 中，我们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，这种流动为非恒定流动。

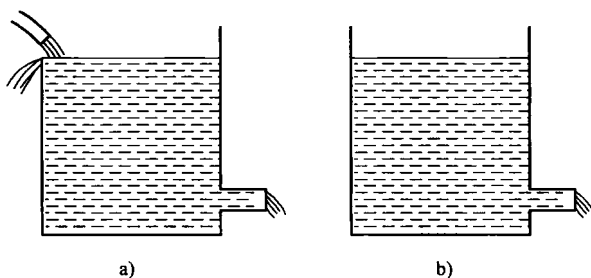


图 1-6 恒定流动与非恒定流动
a) 恒定流动 b) 非恒定流动

(2) 迹线、流线、流管、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 1-7a 所示。

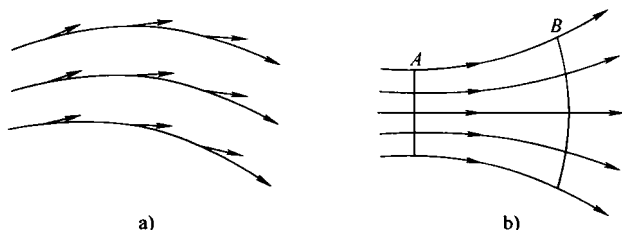


图 1-7 流线和流束
a) 流线 b) 流束

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和，称为流束，如图 1-7b 所示。

5) 通流截面：垂直于流束的截面称为通流截面，如图 1-7b 所示的截面 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 $q = \frac{V}{\Delta t}$ ，体积分量的单位是 m^3/s ，常用单位为 L/min （升/分）。

2) 平均流速：在实际液体流动中，由于粘性摩擦力的作用，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面积。令此流量与上述实际流量相等，得

$$q = \int_A u dA = vA \quad (1-6)$$

则平均流速为

$$v = \frac{q}{A} \quad (1-7)$$

1.2.2 流体流动时的压力损失

1. 流动状态、雷诺数

实际液体具有粘性，是产生流动阻力的根本原因。然而流动状态不同，阻力大小也不同。所以先要研究两种不同的流动状态——层流和湍流。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。

雷诺试验装置如图 1-8 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，这说明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。

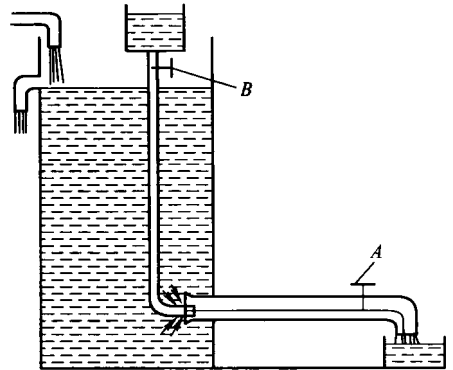


图 1-8 雷诺试验装置

(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) 湍流 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，这种流动称为湍流或紊流。

液体的流动状态可通过雷诺数 Re 来判断

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

式中 d ——管道直径；

v ——液体流动速度；

ν ——液体的运动粘度。

液体流动时由层流转化为湍流时的雷诺数 Re 叫做临界雷诺数。当雷诺数 Re 小于临界雷诺数时为层流，大于临界雷诺数时为湍流。

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

2. 液体流动时的能量

(1) 理想液体流动时的能量 理想液体在管道中流动时具有三种能量——压力能、动能、势能。按照能量守恒定律，在各个截面处的总能量是相等的。

(2) 实际液体流动时的能量 实际液体因为具有粘性，所以存在内摩擦力，而且受管道形状、尺寸和管壁表面粗糙度的影响，在流动中会产生扰动造成能量损失。

3. 管路压力损失

在液压系统中，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。

液压系统中的压力损失分为两类，一类是液体沿等直径直管流动时所产生的压力损失，称为沿程压力损失。这类压力损失是由液体流动时的内、外摩擦力所引起的。另一类是液体流经局部障碍（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，在局部形成旋涡引起液体质点间，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，称为局部压力损失。

沿程压力损失的大小主要取决于管路的长度、内径、液体的流速和粘度等。液体的流态不同，沿程压力损失也不同。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、流通截面变化等部位所引起的压力损失。液流通过这些地方时，由于液流方向和速度均发生变化，形成旋涡，如图 1-9 所示，使液体质点间相互撞击，从而产生较大的能量损耗。

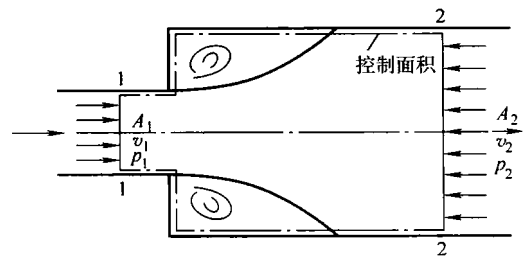


图 1-9 突然扩大处的局部损失

1.2.3 工作介质的选用

液压工作介质在液压传动系统中不但起传递动力的作用，而且对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却、缓蚀、冲洗系统内的污染物并带走热量等重要作用。因此液压工作介质的品质——物理、化学性质的优劣直接影响液压系统的工作性能。

液压系统工作介质的主要性能包括：密度、粘度和粘-温特性、润滑性与抗磨性、防锈和耐蚀性、氧化安定性和热安定性、抗剪切安定性、抗乳化性和水解安定性、抗泡性、对密封材料的相容性、抗燃性等。液压工作介质有以矿物油为主的液压油和高水基液。本书主要介绍液压油的分类和选用。

1. 液压油的分类

GB/T 7631—2003 规定了 L 类（润滑剂、工业用油和相关产品）的 H 组（液压系统）产品的详细分类，液压油的分类见表 1-1。

表 1-1 液压油的分类

组别符号	应用范围	特殊应用	更具体的应用	组成和特性	产品符号 ISO-L	典型应用	备注	
H	液压系统	流体静压系统	用于要求使用环境可接受液压液的场合	无抑制剂的精制矿油	HH			
				精制矿油, 并改善其防锈和抗氧化性	HL			
				HL 油, 并改善其抗磨性	HM	有高负荷部件的一般液压系统		
				HL 油, 并改善其粘温性	HR			
				HM 油, 并改善其粘温性	HV	建筑和船舶设备		
				无特定难燃性的合成液	HS		特殊性能	
				甘油三酸酯	HETG	一般液压系统 (可移动式)	每个品种的基础液的最小含量应不少于 70% (质量分数)	
				聚乙二醇	HEPG			
				合成酯	HRES			
				聚 α 烯烃和相关烃类产品	HEPR			
			流体静压系统	液压导轨系统	HM 油, 并具有抗粘-滑性	HC	液压和滑动轴承导轨润滑系统合用的机床在低速下使振动或间断滑动 (粘-滑) 减为最小	这种液体具有多种用途, 但并非在所有液压应用中皆有效
			流体静压系统	用于使用难燃液压液的场合	水包油型乳化液	HFAE		通常含水量大于 80% (质量分数)
		化学水溶液			HFAS		通常含水量大于 80% (质量分数)	
		油包水乳化液			HFB	选择本产品时应小心, 因可能对环境与健康有害		
		含聚合物水溶液			HFC			
		磷酸酯无水合成液			HFDR			
		其他成分的无水合成液			HFDU			
			流体动力系统	自动传动系统		HA		组成和特性的划分原则待定
	偶合器和变矩器			HN				

2. 液压油的选用

液压油通常按以下几方面进行选用:

(1) 按工作机械的不同要求选用 精密机械与一般机械对粘度要求不同。精密机械宜采用较低粘度的液压油, 如机床液压伺服系统, 为保证伺服动作灵敏性, 也宜采用粘度较低的液压油。

(2) 按液压泵的类型选用 液压泵是液压系统的重要元件, 其运动速度较高, 并且压力、温升都较高, 工作时间又长, 因而对粘度要求较严格。因此, 选择液压油的粘度时应先考虑到液压泵。在一般情况下, 可将液压泵要求液压油的粘度作为选择液压油的基准, 见表 1-2。

表 1-2 按液压泵类型推荐用的液压油运动粘度 (50℃) 范围 (单位: mm²/s)

泵 类 型		工作温度 5 ~ 40℃	工作温度 40 ~ 80℃
叶片泵	工作压力 ≤ 7MPa	19 ~ 29	25 ~ 44
	工作压力 > 7MPa	31 ~ 42	35 ~ 55
齿轮泵		19 ~ 42	58 ~ 98
轴向柱塞泵		26 ~ 42	42 ~ 93
径向柱塞泵		19 ~ 29	38 ~ 135

(3) 按液压系统工作压力选用 系统工作压力较高时, 液压油粘度要取大一些, 以免系统中泄漏过多, 效率过低; 工作压力较低时, 宜用粘度较低的油。

(4) 按工作环境温度选用 由于矿物油的粘度受温度变化影响较大, 所以当环境温度较高时, 粘度要取得较大些。

(5) 按运动速度选用 当工作部件的运动速度很高时, 液压油的流速也高, 液压损失随着增大, 为减少由于与液体摩擦而造成的能量损失, 宜选用粘度较低的液压油。

1.3 气穴现象和液压冲击

在液压传动中, 液压冲击和气穴现象会对液压系统的正常工作产生不利的影响, 因此需要了解这些现象的成因, 并采取措施加以防治。

1.3.1 气穴现象

在液压系统中, 由于某种原因会产生低压区 (如流速很大的区域压力会降低)。当压力低于空气分离压力时, 溶于液体中的空气就游离出来, 以气泡的形式存在于液体中, 使原来充满管道的液体出现了气体的空穴, 这种现象称为气穴现象。

当液压系统中出现气穴现象时, 大量的气泡破坏了液流的连续性, 造成流量和压力脉动。气泡随液流进入高压区时又急剧破灭, 以致引起局部压力冲击, 发出噪声并引起振动。当附着在金属表面上的气泡破灭时, 它所产生局部高温和高压会使金属剥蚀, 这种由气穴造成的腐蚀作用称为气蚀。气蚀会使液压元件的工作性能变坏, 并大大地缩短使用寿命。

气穴多发生在阀口和液压泵的进口处。由于阀口通道狭窄, 液流的速度增大, 压力大大下降, 造成气穴的产生。若泵的安装高度过高, 吸油管直径太小, 吸油阻力太大或泵的转速过高, 会造成进口处真空度过大, 也会产生气穴。此外, 当液流流经节流部位时, 流速增高、压力降低, 在节流部位前后压差达到一定程度时, 也会产生气穴。

减小和预防气穴产生的措施:

- 1) 液压泵的吸油管管径不能过小, 并应限制液压泵吸油管中油液的流速, 降低吸油高度。
- 2) 液压泵转速不能过高, 以防吸油不充分。
- 3) 管路尽量平直, 避免急转弯及狭窄处。