



教育部高职高专规划教材

液 压 传 动

► 时彦林 主编 侯维芝 主审



化学工业出版社

教材出版中心

教育部高职高专规划教材

液 压 传 动

时彦林 主编
侯维芝 主审

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

液压传动/时彦林主编. —北京:化学工业出版社,
2006.1

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-7961-3

I. 液… II. 时… III. 液压传动-高等学校:技术
学院-教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 142301 号

教育部高职高专规划教材

液 压 传 动

时彦林 主编

侯维芝 主审

责任编辑:张双进

责任校对:宋 玮

封面设计:于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真:(010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 277 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7961-3

定 价: 19.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

职业教育要办出特色，教材建设十分关键。本教材在编写过程中注意了职业教育和职业培训的特点，教材内容侧重于理论知识的应用，强调理论联系实际和对学生的实践训练，贯彻以应用为目的。主要问题以讲清楚为主，不做过多的理论推导，理论以“必须、够用”为原则，力求做到重点突出、少而精、文字简练，内容讲解深入浅出，通俗易懂，易教易学。

本书共 11 章，主要包括概论、液压传动基本概念、液压油、液压泵、液压缸、液压马达、液压控制阀、液压辅助装置、液压基本回路、液压传动系统、液压传动系统的安装调试与运转维修。在编写过程中，力求体现岗位技能为目标的职教特点，在叙述和表达方式上又努力做到深入浅出、直观易懂、触类旁通。在编写中，力求反映中国液压传动发展的新成果，统一采用法定单位和 1993 年国家技术监督局发布的 GB/T 786.1—93 规定的图形符号。

在思考题的编选上，考虑了职业教育的特点，尽量结合实际应用，在加深对理论理解的同时，提高对知识运用的灵活性。目的是克服重理论轻实践，重知识轻技能倾向，体现以“能力本位”的指导思想。

在书后附有综合练习题，并为授课教师免费提供参考答案。有需要者请与责任编辑联系，E-mail: zhangshuangjm68@sina.com。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、职工大学、函授学院、成人教育学院等大专层次教学用书，也可供职工技术培训、中等职业教育及有关工程技术人员参考。

本书由时彦林任主编，张文灼、袁建路、陈涛任副主编，侯维芝主审，参加编写的还有李鹏飞、阎志坡、王彦霞、朱晓红、胡向阳、郝宏伟。

由于我们学识水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2005 年 10 月

目 录

1 概论	1
1.1 液压传动系统的组成及图形符号	1
1.2 液压系统的分类	3
1.3 液压传动的特点	3
1.4 中国液压技术的发展	4
思考题	5
2 液压传动基本概念	6
2.1 液压传动中的压力	6
2.2 液压传动中的流量和平均流速	8
2.3 液压系统中的压力损失	9
2.4 液压冲击和气穴现象	10
思考题	11
3 液压油	12
3.1 液压油的物理性质	12
3.2 液压油的类型和选择	14
3.3 液压油的污染及控制	16
3.4 液压油的使用及管理	18
思考题	19
4 液压泵	20
4.1 液压泵概述	20
4.2 齿轮泵	22
4.3 叶片泵	28
4.4 柱塞泵	35
4.5 各类液压泵的性能比较及应用	44
思考题	45
5 液压缸	46
5.1 液压缸的分类及特点	46

5.2 液压缸的计算.....	47
5.3 液压缸的结构.....	48
5.4 液压缸的拆装修理.....	51
5.5 液压缸常见故障及排除方法.....	53
思考题	54
6 液压马达	55
6.1 液压马达类型及应用范围.....	55
6.2 齿轮液压马达.....	56
6.3 叶片液压马达.....	57
6.4 轴向柱塞式液压马达.....	58
6.5 径向柱塞式液压马达.....	59
6.6 摆动液压马达.....	61
思考题	62
7 液压控制阀.....	63
7.1 概述.....	63
7.2 方向控制阀.....	64
7.3 压力控制阀.....	74
7.4 流量控制阀.....	85
7.5 电液伺服阀.....	88
7.6 比例阀、插装阀和叠加阀.....	91
思考题	95
8 液压辅助装置	96
8.1 蓄能器.....	96
8.2 油箱	100
8.3 过滤器	101
8.4 热交换器	105
8.5 压力计和压力计开关	107
8.6 油管和管接头	108
思考题.....	109
9 液压基本回路	110
9.1 压力控制回路	110
9.2 速度控制回路	115
9.3 方向控制回路	123
9.4 多缸控制回路	124
思考题.....	129

10 液压传动系统	130
10.1 Q2-8 型液压起重机液压系统	130
10.2 组合机床动力滑台液压系统	133
10.3 连铸机中间包滑动水口液压系统	135
10.4 液压系统常见故障产生原因及排除方法	139
思考题	141
11 液压传动系统的安装调试与运转维护	143
11.1 液压系统的安装与调试	143
11.2 液压系统的运转与维护	146
思考题	147
综合练习题	148
附录 常用液压传动图形符号 (摘自 GB 786.1—93)	169
参考文献	173

1

概 论

液压传动是利用密闭系统中的受压液体来传递运动和动力的一种传动方式。液压传动装置本质上是一种能量转换装置，它以液体作为工作介质，通过动力元件液压泵将原动机（如电动机）的机械能转换为液体的压力能，然后通过管道、控制元件（液压阀）把有压液体输往执行元件（液压缸或液压马达），将液体的压力能又转换为机械能，以驱动负载实现直线或回转运动，完成动力传递。

1.1 液压传动系统的组成及图形符号

图 1-1 为一台简化了的机床工作台液压传动系统。在图 1-1 (a) 中，液压泵 3 由电动机（图中未示出）带动旋转，从油箱 1 中吸油。油液经过滤器 2 过滤后流往液压泵，经液压泵向系统输送。来自液压泵的压力油流经节流阀 5 和换向阀 6 进入液压缸 7 的左腔，推动活塞连同工作台 8 向右移动。这时，液压缸右腔的油通过换向阀经回油管排回油箱。

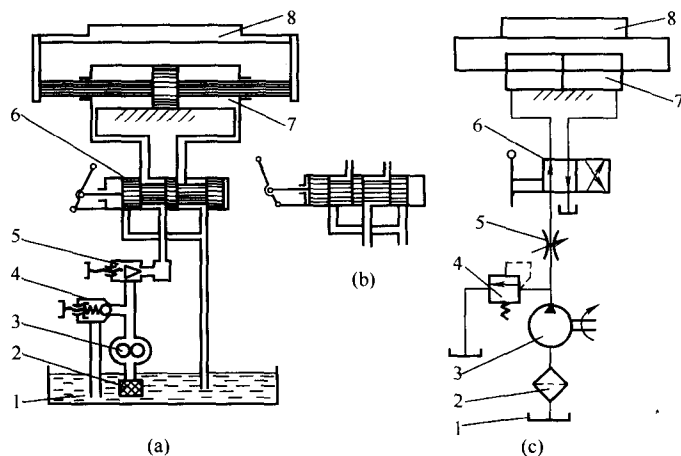


图 1-1 机床工作台液压传动系统

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

2 液压传动

如果将换向阀手柄扳到左边位置,使换向阀处于如图 1-1 (b) 所示的状态,则压力油经换向阀进入液压缸的右腔,推动活塞连同工作台向左移动。这时,液压缸左腔的油亦经换向阀和回油管排回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀开口较大时,进入液压缸的压力油流量较大,工作台的移动速度也较快;反之,当节流阀开口较小时,工作台移动速度则较慢。

工作台移动时必须克服阻力,例如克服切削力和相对运动表面的摩擦力等。为适应克服不同大小阻力的需要,泵输出油液的压力应当能够调整;另外,当工作台低速移动时节流阀开口较小,泵出口多余的压力油亦需排回油箱。这些功能是由溢流阀 4 来实现的,调节溢流阀弹簧的预压力就能调整泵出口的油液压力,并让多余的油在相应压力下打开溢流阀,经回油管流回油箱。

从上述例子可以看出,构成液压系统的各个部分及其功能作用如表 1-1 所示。

表 1-1 液压系统的组成

组 成 部 分		功 能 作 用
原动机	电动机 发动机	向液压系统提供机械能
液压泵	齿轮泵 叶片泵 柱塞泵	把原动机所提供的机械能转变成油液的压力能,输出高压油液
执行元件	液压缸 液压马达 摆动马达	把油液的压力能转变成机械能去驱动负载作功,实现往复直线运动,连续转动或摆动
控制阀	压力控制阀 流量控制阀 方向控制阀	控制从液压泵到执行元件的油液的压力,流量和流动方向,从而控制执行元件的力、速度和方向
液压辅件	油箱	盛放液压油,向液压泵供应液压油,回收来自执行元件的完成了能量传递任务之后的低压油液
	管路	输送油液
	过滤器	滤除油液中的杂质,保持系统正常工作所需的油液清洁度
	密封	在固定连接或运动连接处防止油液泄漏,以保证工作压力的建立
	蓄能器	储存高压油液,并在需要时释放
	热交换器	控制油液温度
液压油		是传递能量的工作介质,也起润滑和冷却作用

在如图 1-1 所示的液压系统原理图中,组成系统的各个液压元件的图形基本上表示了它们的结构原理,称为结构式原理图。结构式原理图近似实物,直观易懂,当液压系统出现故障时,分析起来也比较方便。但它不能全面反映元件的职能作用,且图形复杂难于绘制,当系统元件数量多时更是如此。为了简化液压系统原理图的绘制,使分析问题更方便,中国于 1965 年发布了液压系统图形符号国家标准 (GB 786—65),以后又经修订,但与国际标准尚有差异。为了便于参与国际交流及合作,国家技术监督局参照国际 ISO 291—1—1991 规定,于 1993 年又发布了液压气动图形符号国家标准 (GB/T 786.1—93),以代替 (GB 786—76)。这些图形符号,只表示元件的职能、操作方式及外部连接通路,不表示元件的具体结构和参数,也不表示连接口的实际位置和元件的安装位置。同时规定,液压元件的图形符号

应以元件的静止位置或零位来表示。本书书末附录中介绍了常用液压图形符号，供读者参考。对于图 1-1 所示的液压系统，若用国家标准 GB/T 786.1—93 绘制，则其系统原理图如图 1-1 (c) 所示。

1.2 液压系统的分类

按照液压回路的基本构成，可以把液压系统划分为开式系统和闭式系统；按照液压系统的主要功用可分为传动系统和控制系统；按实现速度控制的方式可分为阀控制和泵控制；按换向阀中位状态可分为开中位和闭中位；按系统的用途可分为固定设备用和车辆用等。现将开式系统、闭式系统、阀控制、泵控制举例如表 1-2 所示。

表 1-2 液压系统的分类

类 别	说 明
开式系统	泵从油箱抽油，经系统回路返回油箱，应用普遍，油箱要足够大
闭式系统	马达排出的油液返回泵的进油口，多用于车辆的行走驱动，用升压泵补油，并且用冲洗阀局部换油
阀控制	通过改变节流口的开度来控制流量，从而控制速度。按节流口与执行元件的相对位置可分为进口节流、出口节流和旁通节流
泵控制	通过改变泵的排量来控制流量，从而控制速度。效率较高

1.3 液压传动的特点

1.3.1 液压传动的优点

液压传动在工程机械、矿山机械、冶金机械、机床工业、轻工机械、农业机械等工业部门都有着广泛的应用。之所以如此，是因为它与其他传动形式相比有着许多优点。

- ① 液压传动能方便地实现无级调速，调速范围大。
- ② 在相同功率情况下，液压传动能量转换元件的体积较小，质量较轻。
- ③ 工作平稳，换向冲击小，便于实现频繁换向。
- ④ 便于实现过载保护，而且工作油液能使传动零件实现自润滑，故使用寿命较长。
- ⑤ 操纵简单，便于实现自动化。特别是和电气控制联合使用时，易于实现复杂的自动工作循环。
- ⑥ 液压元件易于实现系列化、标准化和通用化。

1.3.2 液压传动的缺点

液压传动的主要缺点如下。

- ① 液压传动中的泄漏和液体的可压缩性使传动无法保证严格的传动比。
- ② 液压传动有较多的能量损失（泄漏损失、摩擦损失等），故传动效率不高，不宜做远距离传动。

③ 液压传动对油温的变化比较敏感,不宜在很高和很低的温度下工作。

④ 液压传动出现故障时不易找出原因。

综合上述,液压传动的优点远多于其缺点。正因为如此,它在和电力传动、机械传动的竞争中不断发展和完善,在各工业领域中获得越来越广泛的应用;其缺点将随着工业技术水平的不断发展而逐渐得到克服和弥补。

1.4 中国液压技术的发展

中国液压工业经过 40 余年的发展,已形成了门类齐全、有一定技术水平并初具规模的生产科研体系。中国现有主要生产企业近 300 家,液压产品的年产量为 450 万件,为机床、工程机械、冶金机械、矿山机械、农业机械、汽车、铁路、船舶、电子、石油化工、国防、纺织、轻工等行业机械设备提供种类比较齐全的产品。目前液压元件约有 1000 个品种,近万个规格。

改革开放以来,中国液压工业先后引进技术几十项,为提高产品质量和扩大生产能力起到了重要作用。目前已和美国、日本、德国、意大利等国家以及中国的台湾地区的液压公司建立了一些合资企业,这些企业也为推动中国液压工业的发展做出了应有的贡献。中国通过科研攻关和对引进技术的消化吸收,产品技术水平不断提高,如生产的高压齿轮泵、中高压变量叶片泵、高压斜轴式及斜盘式柱塞泵/马达、高压液压控制阀、叠加阀、电液伺服阀、比例阀、精密过滤器、精密气源处理装置、微型和小型气动电磁阀、无油润滑气缸及阀门、高压往复密封及回转密封等。另外在 CAD 和 CAT 技术、污染控制、故障诊断、机电一体化、现代控制工程技术的应用等方面均取得很好的成果,并已应用于实际生产中。

中国液压、气动工业虽然取得了很大的发展,但与主机发展要求以及和世界先进水平相比还有差距,主要表现如下。

① 产品品种少,产品结构不合理,高新技术产品构成比例低。目前国内生产的液压产品品种仅是国外的 1/5。在国产产品中,低档产品占总产量的 70%~80%,重点主机和重大技术装备配套率仅为 40%。

② 产品品种单一,系列化程度不高,缺少适应主机的变型、派生和专用产品。因此,可供用户选择的范围小,不适应主机多样化发展的要求。

③ 产品性能指标不高,且国外的液压、气动产品寿命比中国的产品高,中高压叶片泵噪声比中国的产品低。又如产品的清洁度,以电磁阀为例,国外电磁阀(6mm 通径)为 1~5mg,而中国的电磁阀为 10~20mg。国内外液压气动产品性能比较,如表 1-3 所示。

表 1-3 国内外液压气动产品性能比较

产 品 名 称	国内	国外	产 品 名 称	国内	国外
液压电磁阀的寿命/万次	100~300	1000	中高压叶片泵噪声/dB	75~80	60~70
气动电磁阀的寿命/万次	500~1000	3000~5000	电磁阀(6mm 通径)的清洁度/mg	10~20	1~5

④ 设计技术水平不高,缺少必要的试验条件,自主开发能力薄弱,CAD、CAT 技术应用还不普遍,产品设计还处于经验设计、静力学设计阶段。

根据中国液压工业的技术差距,有关部门已拟定出 21 世纪前 10 年主机对液压、气动产

品的性能和质量的新要求，即解决差距的措施。

思 考 题

1. 何谓液压传动？
2. 液压传动由哪几部分组成，它们各有什么作用？
3. 液压传动有哪些优缺点？

2

液压传动基本概念

2.1 液压传动中的压力

液压传动中所说的压力概念是指当液体相对静止时，液体单位面积上所受的法向力。在物理学中则称为压强。

2.1.1 压力单位

如图 2-1 所示，若法向作用力 F 均匀地作用在静止液体中某一面积为 A 的平面上，则容器内就产生一个压力 p 。

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

压力 p 的单位为 N/m^2 （牛/米²），也称为帕（Pa）。目前工程上常用 MPa（兆帕）作为压力单位， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。工程上，中国曾长期采用过的单位 kgf/cm^2 ， $1\text{kgf/cm}^2 = 9.0867 \times 10^4\text{Pa}$ ；它们换算关系是

$$1\text{MPa} = 1\text{MN/m}^2 = 10.2\text{kgf/cm}^2 \approx 10\text{kgf/cm}^2$$

2.1.2 静压力的特性

① 液体的压力沿着内法线方向作用于承压面，即静止液体只承受法向压力，不承受剪切力和拉力，否则就破坏了液体静止的条件。

② 静止液体内，任意点处所受到的静压力各个方向都相等。

液压系统中实际流动的液体具有黏性，而且因管道截面积不同或在截面中的位置不同，各点的流速不同，即液体不是处于平衡状态的静止液体。但实测表明，在密闭系统中流动的液体，其压力与受相同外载下静压力的数值相差很小。

2.1.3 压力的表示

根据度量基准的不同，液体压力分为绝对压力和相对压力。若以绝对零压为基准来度量

的液体压力，称为绝对压力；若以大气压为基准来度量的液体压力，称为相对压力。相对压力也称为表压力。由图 2-1 可见，它们与大气压的关系为

$$\text{绝对压力} = \text{相对压力} + \text{大气压}$$

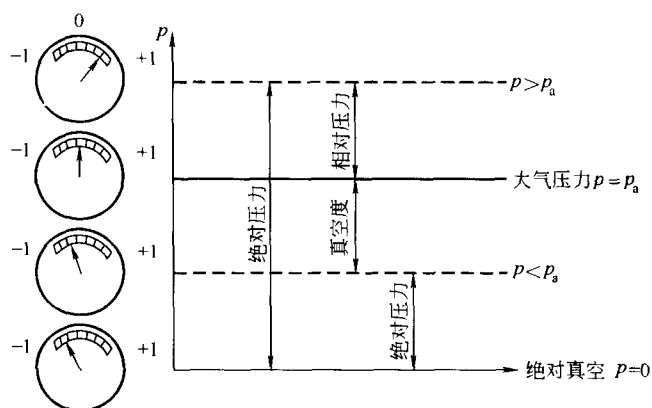


图 2-1 压力的度量

在一般液压系统中，某点的压力通常指的都是表压力。凡是用压力表测出的压力，也都是表压力。

若某液压系统中绝对压力小于大气压，则称该点出现了真空，其真空的程度用真空度表示（见图 2-1）。

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

2.1.4 压力的传递

压力的传递遵循帕斯卡原理或静压传递原理。作用在密闭容器中的静止液体的一部分上的压力，以相等的压力传递到液体的所有部分。

如图 2-2 所示，设小活塞的面积 A_1 与大活塞的面积 A_2 之比为 $1:10$ ，在小活塞上施加 1kN 的力，则在大活塞上就有 10kN 的向上推力。至于速度，小活塞的运动速度要为大活塞速度的 10 倍。从行程来说，也是 10 倍。

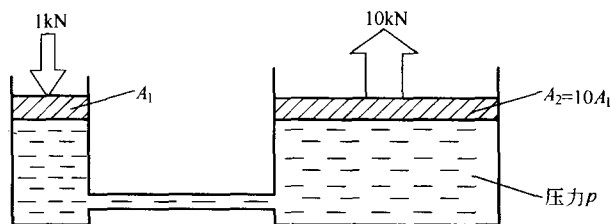


图 2-2 相互连通的容器

2.1.5 工作压力形成

在图 2-3 中，液压泵连续地向液压缸供油，当油液充满后，由于活塞受到外界负载 F 的阻碍作用，使活塞不能向右移动，若液压泵继续强行向液压缸中供油，其挤压作用不断加剧，压力也不断升高，当作用在活塞有效作用面积 A 上的压力升高到足以克服外界负载时，

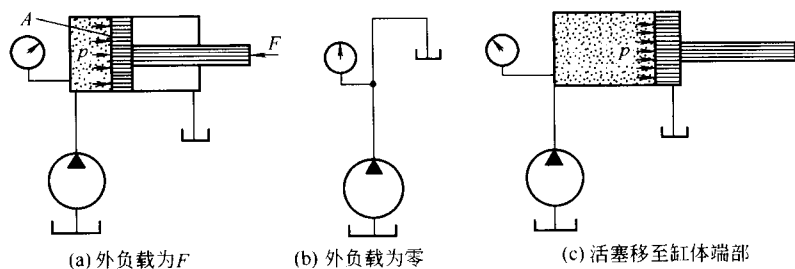


图 2-3 液压系统压力的形成

活塞便向右运动，这时系统的压力为 $p = \frac{F}{A}$ 。

如果 F 不再改变，则由于活塞的移动，使液压缸左腔的容积不断增加，这正好容纳了液压泵的连续供油量，此时油液不再受到更大的挤压，因而压力也就不会再继续升高，始终保持相应的 p 值。

如果用压力表实测图 2-3 中 (b) 和 (c) 所示的两种情况，则测得如图 (b) 所示状态时的压力等于零。这是因为此时外界的负载为零（不计管道的阻力），油液的流动没有受到阻碍，因此建立不起压力。在图 (c) 的情况下，当活塞移至缸体的端部时，由于液压泵连续供油，而液压缸左腔的容积却无法增加，所以系统的压力急剧升高，假如系统没有保护措施，系统的薄弱环节将被破坏。

由上述分析得知，液压系统中的压力，是由于液体受到各种形式的外界载荷的阻碍，使油液受到挤压，其压力的大小决定于外界载荷的大小。

2.2 液压传动中的流量和平均流速

2.2.1 流速与流量

在研究问题时，一般把液体看作既无黏性又不可压缩的理想液体。

液体流动时，若液体中任一点处的压力、速度和密度都不随时间而变化，则这种流动称为恒定流动（亦称稳定流动或定常流动）。反之，只要压力、速度或密度中有一个随时间变化，就称为非恒定流动。

液体在管道中流动时，其垂直于流动方向的截面称为过流断面（或称通流截面）。

液压传动是靠流动着的有压液体来传递动力，油液在油管或液压缸内流动的快慢称为流速。由于流动的液体在油管或液压缸的截面上的每一点的速度并不完全相等，因此通常说的流速都是平均流速。流速的单位在 SI 中为 m/s ，用 v 表示。

单位时间内流过某通流截面的液体的体积称为流量，用 q_v 表示，流量的单位在 SI 中为 m^3/s ，工程上过去用 L/min （升/分）。

2.2.2 流量与活塞速度

如图 2-4 所示，液压系统中的流量常指通过油管进入液压缸的流量。以流量为

q_v (m^3/s) 的液体进入液压缸推动活塞运动, 取移动的活塞表面积为有效截面 A (m^2), 显然液压缸中的液体流动速度与活塞运动速度相等, 且为液体平均流速度 v , 所以活塞的运动速度为

$$v = q_v / A \quad (2-2)$$

当液压缸有效面积一定时, 活塞的运动速度决定于输入液压缸的流量。

2.2.3 层流与紊流

(1) 层流

层流是指液体流动时, 液体质点没有横向运动, 互不混杂, 呈线状或层状的流动。

(2) 紊流

紊流是指液体流动时, 液体质点有横向运动 (或产生小旋涡), 做混杂紊乱状态的运动。

液体的流动状态为层流或紊流, 通过雷诺数 Re 来判断。液体在圆管中流动时的雷诺数 Re 用数学式表示为

$$Re = vd/\nu \quad (2-3)$$

式中 d ——管道直径, m ;

v ——液体流动速度, m/s ;

ν ——液体的运动黏度, m^2/s 。

液体流动的状态, 由层流转为紊流的条件由临界雷诺数决定。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紊流。

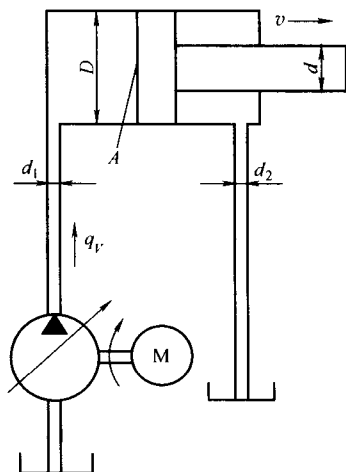


图 2-4 简单液压系统

2.3 液压系统中的压力损失

实际液体具有黏性, 在管道中流动就会产生阻力, 这种阻力叫液阻。由于液阻的存在, 液体在管道中流动时, 就必须克服前进路上的阻力, 这种能量消耗称为压力损失。

2.3.1 沿程损失

液体在等径直管中流动时, 由于液体内部的摩擦力而产生的能量损失称为沿程压力损失, 其计算公式为

$$\Delta p_{\text{沿}} = \lambda \rho \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \quad (2-4)$$

式中 λ ——沿程阻力系数;

ρ ——液体的密度;

l ——管道长度;

d ——管道的内径;