



高 等 教 育 规 划 教 材

液压传动

..... 容一鸣 陈传艳 主编



化学工业出版社



高 等 教 育 规 划 教 材

液压传动

..... 容一鸣 陈传艳 主 编

李 硕 熊轶娜 副主编

江苏工业学院图书馆
藏书章



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共 10 章,第 1 章介绍液压传动的基本知识;第 2 章介绍液压流体力学基础,是基本理论部分;第 3 章~第 6 章是液压元件部分,主要介绍基本液压元件的结构、工作原理、性能和应用;第 7 章主要介绍常用基本液压回路的组成、原理、性能和应用场合,核心是调速回路;第 8 章通过典型液压系统,介绍液压系统分析的方法、步骤和分析内容;第 9 章介绍液压系统的设计步骤、设计计算方法;第 10 章介绍液压控制系统的工作原理与应用实例。

本书理论与实践相结合,侧重对工程技术应用能力的培养。另外,为方便教学,配套电子教案。

本书可作为高等学校机械类专业的教材,也可作为高职高专、成人教育、自学考试等机械类专业的教材,还可供从事液压传动与控制技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动/容一鸣,陈传艳主编. —北京:化学工业出版社,2009.8
高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-05579-8

I. 液… II. ①容…②陈… III. 液压传动-高等学校-教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 094615 号

责任编辑:韩庆利 高 钰
责任校对:陈 静

文字编辑:陈 喆
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 413 千字 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.80 元

版权所有 违者必究

高等教育规划教材

液 压 传 动

编写人员名单

主 编 容一鸣 陈传艳

副主编 李 硕 熊轶娜

参 编 张玉平 齐洪方 李喜梅 吴 娇

前 言

液压传动是一门基础课程。本课程的主要任务是使学生掌握液压传动的基础知识,各种液压元件的结构、原理、性能及用途,主要液压基本回路的组成、原理、特点及应用,分析液压系统的基本方法,了解液压系统设计的基本方法,为学习后续专业课程打下基础。

本书共 10 章,第 1 章介绍液压传动的基本知识;第 2 章主要介绍液压油和液压流体力学基础;第 3 章~第 6 章主要介绍液压元件的结构、原理、性能和应用;第 7 章介绍液压基本回路;第 8 章介绍典型液压系统的分析方法和分析内容;第 9 章介绍液压系统的设计计算方法;第 10 章简单介绍液压伺服系统的工作原理与应用实例。

本书编者多年从事相关的教学和研究工作。在本书编写过程中,编者吸收了同类教材的编写经验和最新的教学、科研成果,融入了编者的教学心得和体会,紧密联系液压技术近期的发展,增加了目前工程实践常用的一些具有代表性的液压元件,如比例阀、插装阀、叠加阀、数字阀、步进液压缸等。贯彻少而精、理论与实践相结合的原则,适当淡化了纯理论分析,侧重对工程技术应用能力的培养,加强了对学生分析问题、解决问题能力和创新意识的培养。本书涉及的元件、回路以及系统原理图全部按照国家最新图形符号标准绘制,并摘录于附录中。

本书由武汉理工大学容一鸣、湖北水利水电职业技术学院陈传艳担任主编,华中科技大学武昌分校李硕、湖南长沙航空职业技术学院熊轶娜担任副主编;参编人员还有张玉平、齐洪方、李喜梅、吴娇等。全书由容一鸣统稿。

在本书的编写过程中,得到了武汉理工大学华夏学院、湖北水利水电职业技术学院、华中科技大学武昌分校、湖南长沙航空职业技术学院的大力支持与帮助,特此致谢。

由于编者水平和经验有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年于武汉东湖新技术开发区



第1章 绪论	1
1.1 液压传动的工作原理及组成	1
1.1.1 压力和流量的概念	1
1.1.2 压力能和液压功率	2
1.1.3 液压传动的工作原理	2
1.1.4 液压传动系统的工作原理及组成	4
1.1.5 液压传动系统的职能符号	5
1.2 液压传动技术的优缺点	5
1.3 液压传动技术的应用与发展	6
1.3.1 液压传动技术的应用	6
1.3.2 液压传动技术的发展	6
思考与练习	7
第2章 液压流体力学基础	8
2.1 液体的物理性质	8
2.1.1 液体的密度	8
2.1.2 液体的可压缩性	8
2.1.3 液体的黏性	9
2.1.4 对液压油的要求、选用和使用	12
2.2 液体静力学基础	14
2.2.1 液体中的压力	15
2.2.2 静压力基本方程	15
2.2.3 静压力传递原理	16
2.2.4 液体作用于容器壁面上的力	17
2.3 流动液体力学基础	18
2.3.1 基本概念	18
2.3.2 流量连续性方程	20
2.3.3 伯努利方程	21
2.3.4 动量方程	24
2.4 管道内压力损失的计算	27
2.4.1 液体的流动状态	27
2.4.2 沿程压力损失	29
2.4.3 局部压力损失	32
2.4.4 管路中的总压力损失	33
2.5 孔口和间隙的流量-压力特性	33
2.5.1 孔口的流量-压力特性	33
2.5.2 液体流经间隙的流量	36
2.6 液压冲击和气穴现象	40
2.6.1 液压冲击	40
2.6.2 气穴现象	43

思考与练习	44
第3章 液压泵和液压马达	47
3.1 液压泵及液压马达概述	47
3.1.1 液压泵的工作原理	47
3.1.2 液压泵的主要性能参数	48
3.1.3 液压马达的性能参数	50
3.1.4 液压泵和液压马达的分类	52
3.2 齿轮泵和齿轮马达	53
3.2.1 齿轮泵的工作原理	53
3.2.2 齿轮泵的排量计算	54
3.2.3 齿轮泵的结构特点分析	55
3.2.4 提高齿轮泵压力的措施	56
3.2.5 内啮合齿轮泵	56
3.2.6 齿轮马达	57
3.3 叶片泵和叶片马达	58
3.3.1 双作用式叶片泵	58
3.3.2 单作用式叶片泵	62
3.3.3 限压式变量叶片泵	63
3.3.4 叶片式液压马达	65
3.4 轴向柱塞泵和轴向柱塞马达	66
3.4.1 轴向柱塞泵的工作原理和排量	66
3.4.2 斜盘式轴向柱塞泵的结构及特点	67
3.4.3 斜轴式轴向柱塞泵的结构及特点	70
3.4.4 轴向柱塞马达	70
3.5 螺杆泵和螺杆马达	71
3.5.1 螺杆泵的工作原理及特点	72
3.5.2 螺杆马达的工作特点	72
3.6 液压泵及液压马达的性能和选用	73
3.6.1 液压泵的选用	73
3.6.2 液压马达的选用	73
思考与练习	74
第4章 液压缸	76
4.1 液压缸的类型、特点和基本参数计算	76
4.1.1 活塞式液压缸	76
4.1.2 柱塞式液压缸	79
4.1.3 摆动式液压缸	80

4.1.4 组合液压缸	81	6.2.1 液压油的污染及控制	146
4.2 液压缸的典型结构	83	6.2.2 过滤器的功用和类型	147
4.2.1 缸体组件	83	6.2.3 过滤器的性能指标	148
4.2.2 活塞组件	84	6.2.4 过滤器的选用	149
4.2.3 液压缸的密封	85	6.2.5 过滤器的安装	149
4.2.4 缓冲装置	87	6.3 液压油箱及热交换器	150
4.2.5 排气装置	88	6.3.1 油箱	150
4.3 液压缸的设计计算	89	6.3.2 热交换器	151
4.3.1 液压缸的主要尺寸计算	89	6.4 管道和管接头	153
4.3.2 液压缸的校核	91	6.4.1 油管的种类与选用	153
思考与练习	92	6.4.2 管接头的种类与选用	153
第5章 液压控制阀	93	6.5 密封装置	155
5.1 液压控制阀概述	93	6.5.1 对密封装置的要求	155
5.1.1 液压控制阀在基本结构及工作 原理上的共性	93	6.5.2 密封装置的种类及特点	156
5.1.2 液压控制阀的分类	93	思考与练习	158
5.1.3 液压控制阀的性能参数	93	第7章 液压基本回路	159
5.1.4 对液压控制阀的基本要求	93	7.1 压力控制回路	159
5.2 方向控制阀	94	7.1.1 调压回路	159
5.2.1 单向阀及其应用	94	7.1.2 卸荷回路	160
5.2.2 滑阀式换向阀及换向回路	96	7.1.3 减压回路	161
5.2.3 转阀式换向阀	103	7.1.4 增压回路	162
5.2.4 球式换向阀	103	7.1.5 保压回路	162
5.3 压力控制阀	106	7.1.6 平衡回路	164
5.3.1 溢流阀	106	7.2 调速回路	165
5.3.2 减压阀及减压回路	113	7.2.1 调速回路概述	165
5.3.3 顺序阀及顺序动作回路	116	7.2.2 节流调速回路	166
5.3.4 压力继电器及其应用	120	7.2.3 容积调速回路	170
5.4 流量控制阀	123	7.2.4 容积节流调速回路	173
5.4.1 节流阀	123	7.2.5 三种调速回路的比较	176
5.4.2 调速阀	125	7.3 速度换接和快速运动回路	176
5.4.3 溢流节流阀	126	7.3.1 速度换接回路	176
5.4.4 分流集流阀	128	7.3.2 快速运动回路	177
5.5 其他控制阀	130	7.4 方向控制回路	178
5.5.1 逻辑阀	130	7.4.1 换向回路	178
5.5.2 电液比例控制阀	132	7.4.2 锁紧回路	180
5.5.3 电液数字阀	137	7.4.3 制动回路	181
思考与练习	140	7.5 多执行元件控制回路	181
第6章 液压系统的辅助元件	143	7.5.1 顺序动作回路	181
6.1 蓄能器	143	7.5.2 同步回路	184
6.1.1 蓄能器的功用	143	7.5.3 多缸互不干涉回路	186
6.1.2 蓄能器的类型	143	思考与练习	189
6.1.3 蓄能器的容量计算	145	第8章 典型液压传动系统	191
6.1.4 蓄能器的安装和使用	145	8.1 组合机床动力滑台液压系统	191
6.2 过滤器	146	8.1.1 YT4543 型动力滑台液压系统	191
		8.1.2 YT4543 型动力滑台液压系统的	

特点	193	9.4.3 液压辅件的计算与选择	221
8.2 压力机液压系统	194	9.5 液压系统性能验算	222
8.2.1 YB32-200 型液压机的液压 系统	194	9.5.1 液压系统压力损失验算	222
8.2.2 YB32-200 型液压机液压系统的 特点	196	9.5.2 液压系统发热和温升验算	222
8.3 数控加工中心液压系统	197	9.6 绘制正式工作图、编制技术文件	223
8.4 SZ-250A 型塑料注射成型机液压 系统	199	9.6.1 绘制液压系统原理图的要求	224
8.4.1 SZ-250A 型塑料注射成型机液压 系统	199	9.6.2 液压装置的结构设计	224
8.4.2 注塑机液压系统的特点	203	9.6.3 编制技术文件	224
8.5 QY20B 型汽车起重机液压系统	203	9.7 液压系统设计计算举例	224
8.5.1 QY20B 型汽车起重机液压 系统	203	9.7.1 负载分析	225
8.5.2 汽车起重机液压系统的特点	207	9.7.2 液压缸主要参数的确定	226
8.6 M1432B 型万能外圆磨床液压 系统	207	9.7.3 液压系统图的拟定	227
8.6.1 M1432B 型外圆磨床的液压 系统	207	9.7.4 液压元件的选择	228
8.6.2 M1432B 型外圆磨床液压系统的 特点	212	9.7.5 液压系统的性能验算	230
思考与练习	212	思考与练习	231
第 9 章 液压传动系统的设计	214	第 10 章 液压控制系统	232
9.1 液压系统的设计依据和工况分析	214	10.1 液压控制系统的基本概念	232
9.1.1 液压系统的设计依据	214	10.1.1 液压控制系统的工作原理	232
9.1.2 液压系统的工况分析	214	10.1.2 液压控制系统的类型及组成	233
9.2 液压系统主要参数的确定	217	10.2 液压控制系统的控制元件	234
9.2.1 系统工作压力的确定	217	10.2.1 控制滑阀	234
9.2.2 执行元件参数的确定	217	10.2.2 喷嘴挡板阀	236
9.2.3 执行元件流量的确定	218	10.2.3 射流管阀	237
9.2.4 执行元件的工况图	218	10.3 电液伺服阀	237
9.3 液压系统原理图的拟定和方案论证	218	10.3.1 电液伺服阀的组成和工作 原理	237
9.4 计算和选择液压元件	219	10.3.2 电液伺服阀的静态特性	238
9.4.1 液压泵的确定与驱动功率的 计算	220	10.3.3 电液伺服阀的动态特性	239
9.4.2 液压控制阀的选择	220	10.4 液压控制系统应用实例	240
		10.4.1 机液伺服控制系统应用实例	240
		10.4.2 电液伺服控制系统应用实例	242
		思考与练习	243
		附录	244
		附录 1 常用液压元件图形符号 (摘自 GB/T 786.1—93)	244
		附录 2 伯努利方程推导的微分方法	249
		参考文献	252

第1章 绪论

一部机器主要由动力装置、传动装置、工作执行装置、操纵或控制装置四部分构成。动力装置的性能参数一般都不可能满足工作执行装置各种工况的要求,这种矛盾就由传动装置来解决。所谓传动,就是指能量(动力)由动力装置向工作执行装置的传递,通过各种不同的传动方式,将动力装置的转动变为执行装置的各种不同形式的运动。一般工程技术中使用的动力传递方式有机械传动、电气传动、气压传动、液体传动以及它们组合而成的复合传动。

用液体作为工作介质进行能量(动力)转换、传递的传动方式称为液体传动,液体传动分为液力传动和液压传动两种形式。液力传动主要是利用液体的动能来传递能量,而液压传动则主要是利用液体的压力能来传递能量。本书主要介绍液压传动技术。

液压传动利用液压泵,将原动机(发动机、电动机)的机械能转变为液体的压力能,然后利用液压缸或液压马达,将液体的压力能转变为机械能,以驱动负载,并获得执行机构所需的运动速度。液压传动的理论基础是液压流体力学。

机械传动、电气传动、液压传动是自动化的三大支柱。在机械工程中,液压传动被广泛采用。本章主要介绍液压传动的工作原理、组成、优缺点、应用领域与发展。

1.1 液压传动的工作原理及组成

在密闭容积内,施加在静止液体边界上的压力,在液体内部可以向所有方向等值地传递到液体各点,这就是帕斯卡原理。帕斯卡原理是液压传动的基础。

1.1.1 压力和流量的概念

液体单位面积上所受的垂直力称为压力,通常用 p 表示。这里定义的压力在物理学中称为压强,但在液压工程中习惯称为压力。

当液体面积 ΔA 上作用有垂直力 ΔF 时,液体内部该点处的压力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.1)$$

数学上一个变量趋近于零,在物理上指趋近于空间中的一个点。

液体的压力有如下特性:液体的压力沿内法线方向作用于承压面;静止液体内部任一点的压力在各个方向都相等。

由此可知,静止液体总是处于受压状态,且液体内部的任何质点都是受平衡压力作用的。

在液压工程中,压力常用单位为 10^5 Pa 、 MPa 。

液体体积 V 对时间 t 的变化率称为(几何)流量,通常用 q 表示,即

$$q = \frac{dV}{dt} \quad (1.2)$$

一般地,式(1.2)只给出了流量的定义,并不能直接计算流量,因此,工程上常将流

量定义为：单位时间内通过某通流截面 A 的液体体积。即

$$q = Av$$

式中 A ——通流截面积， m^2 ；

v ——通过截面 A 上各点的液体的平均流速， m/s 。

流量的单位为 m^3/s ，常用 L/min 。

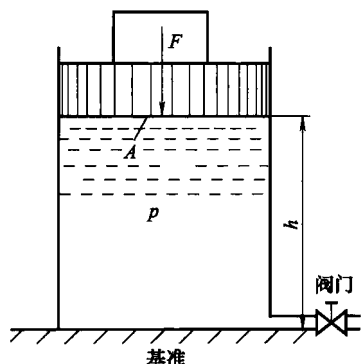


图 1.1 能量转换

实际上，液压传动技术就是围绕压力和流量这两个参数展开的。

1.1.2 压力能和液压功率

如图 1.1 所示，液压缸中的活塞上的物体的重力为 F ，活塞的截面积为 A ，物体相对基准的位置高度为 h ，则物体具有机械位能 Fh 。物体处于平衡状态，则密封在液压缸中的液体将产生的压力为

$$p = \frac{F}{A} \text{ 或 } F = pA \quad (1.3)$$

因此有

$$Fh = pAh = pV \quad (1.4)$$

式中 V ——液压缸中液体的体积， $V = Ah$ 。

式 (1.4) 中， pV 称为压力能（液压能）。也就是说，具有压力的液体就具有能做功的能量。式 (1.4) 也表明机械能与压力能之间的相互转换关系。

如果开启截止阀阀门，则活塞上的物体下移，则有

$$F \frac{h}{t} = Fv = pAv = pq$$

式中， Fv 为机械功率，因此 pq 称为液压功率。也就是说，液压功率用下式计算，即

$$P = pq \quad (1.5)$$

1.1.3 液压传动的工作原理

液压千斤顶是常见的液压传动装置，图 1.2 为其工作原理示意图。图中，大小两个液压缸 II 和 I 内分别装有活塞，活塞可以在缸内滑动，且密封可靠。要举升重物 12 时，截止阀 8 应关闭。当向上提起杠杆 1 时，液压缸 I 的活塞向上移动，缸 I 下腔的密封容积增大，腔内压力下降，这时排油单向阀 3 关闭，形成一定的真空度，油箱 5 中的油液在大气压力的作用下推开吸油单向阀 4 进入缸 I 的下腔，从而完成了一次吸油过程。接着，压下杠杆 1，缸 I 活塞下移，下腔密封油腔的容积减小，油液受到挤压，压力上升，关闭吸油单向阀 4，压力油推开排油单向阀 3 进入液压缸 II 的下腔，从而推动大活塞克服重物 12 的重力 G 上升而做功。如此反复地提、压杠杆 1，就可以将重物 12 逐渐升起，从而达到起重的目的。

当需要液压缸 II 的活塞停止运动时，可使杠杆 1 停止运动，液压缸 II 中的液压力使排油

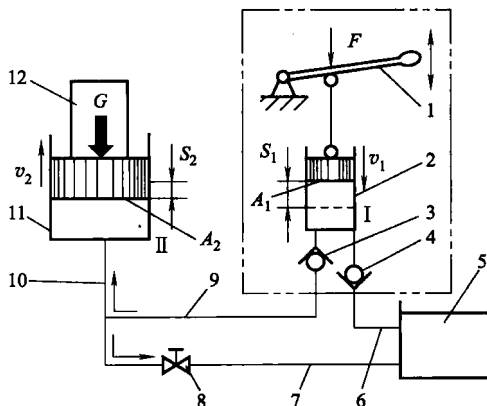


图 1.2 液压千斤顶的工作原理

- 1—杠杆；2—液压缸 I；3—排油单向阀；
4—吸油单向阀；5—油箱；6,7,9,10—油管；
8—截止阀；11—液压缸 II；12—重物

单向阀 3 关闭, 液压缸 II 的活塞就被锁住不动。当需要液压缸 II 的活塞放下时, 可打开截止阀 8, 液压油在重力作用下经截止阀 8 排回油箱 5, 缸 II 活塞下降到原位。

由液压千斤顶的工作原理可以看出, 驱动杠杆 1 向下移动的机械能, 通过缸 I 以及吸油、排油单向阀 4、3 转换成油液的压力能, 此压力能再通过液压缸 II 转换成克服负载 (举升重物) 的机械能, 对外做功, 实现了能量的转换和传递。

在液压传动中, 将机械能转化为压力能的装置称为液压泵, 而将压力能转换为机械能对外做功的装置称为执行装置, 有液压缸和液压马达。

综上所述, 可以得出如下结论: 所谓液压传动是以液体为传动介质, 依靠密封容积和变化来传递运动和动力的一种传动方式。液压传动装置从本质上讲是一种能量转换装置, 它先将机械能转换为便于输送的液压能, 然后将液压能转换为机械能做功。

从液压千斤顶的工作原理、动力传递的过程, 可以了解液压传动的基本特性。

(1) 力的传递

小活塞下移时, 打开排油单向阀 3, 使两个液压缸油腔变成一个密闭连通器。在大活塞上有负载 G , 当小活塞上作用一个主动力 F , 使密闭连通器保持力的平衡。此时, 油液受压后在内部建立了压力, 有

$$\text{大活塞上的压力为 } p_2 = \frac{G}{A_2}, \text{ 而小活塞上的压力为 } p_1 = \frac{F}{A_1}$$

式中 A_1 、 A_2 ——小、大活塞的有效作用面积。

因密闭连通器中压力处处相等, 即 $p_2 = p_1 = p$, 所以有

$$\frac{G}{A_2} = \frac{F}{A_1} = p \quad (1.6)$$

这样, 可以用较小的力平衡大活塞上很大的负载力, 即

$$G = \frac{A_2}{A_1} F \quad (1.7)$$

当系统的结构参数 A_1 、 A_2 不变时, 从式 (1.6) 可知, 负载 G 越大, 举升它需要的压力 p 就越大, 亦即需要提供的压力 p 就越大, 由此可以得出一个重要的结论, 即液压系统中的工作压力取决于负载, 取决于液体流动时需要克服的阻力。

由式 (1.7) 可以看出, 大小活塞的面积比 A_2/A_1 越大, 作用力放大的效果就越明显, 只要在小活塞上施加一个很小的力 F , 就可以使大活塞上产生一个很大的举升力举起重物 G 。请注意, 这里只是作用力被放大了, 并不是能量放大。

(2) 运动的传递

根据质量守恒定律, 从缸 I 中压出的油液的体积必然等于液压缸 II 中大活塞上升所让出的体积, 即有

$$V = A_1 s_1 = A_2 s_2$$

式中 s_1 、 s_2 ——小活塞和大活塞的位移量。

设小活塞、大活塞移动 s_1 、 s_2 位移的时间为 t , 则有

$$\frac{V}{t} = A_1 \frac{s_1}{t} = A_2 \frac{s_2}{t}$$

即

$$q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.8)$$

因此有

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{q}{A_2} \quad (1.9)$$

由式 (1.9) 可知, 如果调节进入缸 II 的流量 q , 就可以调节大活塞的运动速度 v_2 。由此可以得出另一个重要的结论, 即液压系统中执行元件的运动速度取决于流量。

(3) 功率的转换与传递

由图 1.2 知, 缸 I 输入的机械功率为 Fv_1 , 转换为液压功率 pq , 缸 II 将液压功率 pq 转换为机械功率, 对外做功 Gv_2 。

1.1.4 液压传动系统的工作原理及组成

以图 1.3 所示磨床工作台液压传动系统的工作原理图为例。这个系统可使工作台克服各种阻力作直线往复运动, 并且工作台的运动速度可以调节。图中, 液压泵 3 由电动机驱动旋转, 从油箱 1 中吸油, 油液经过滤器 2 进入液压泵。

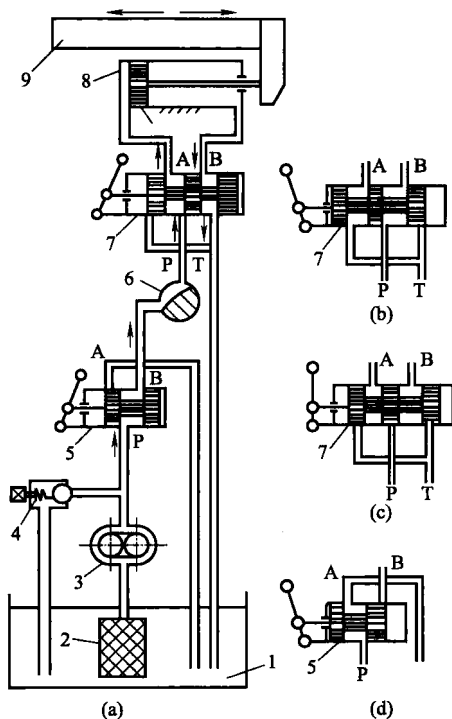


图 1.3 磨床工作台液压传动系统原理图

- 1—油箱; 2—过滤器; 3—液压泵; 4—溢流阀;
5—开停阀; 6—节流阀; 7—换向阀;
8—液压缸; 9—工作台

当液压油从液压泵输出进入油管后, 通过开停阀 5、节流阀 6 流至换向阀 7。换向阀 7 有左、中、右三个工作位置。

若将换向阀 7 的阀芯推到右边, 如图 1.3(a) 所示, 液压泵 3 输出的液压油将流经开停阀 5、节流阀 6、换向阀 7 的 P 口、A 口进入液压缸 8 左腔, 推动活塞和工作台向右移动。与此同时, 液压缸右腔的油液经换向阀 7 的 B 口、T 口经回油管排回油箱。

当换向阀 7 的阀芯处于左位时, 如图 1.3(b) 所示, 则液压油经 P 口、B 口进入液压缸 8 右腔; 液压缸左腔的液压油经 A 口、T 口排回油箱, 工作台向左移动。

由此可见: 由于设置了手动换向阀 7, 所以可改变液压油的流向, 使液压缸 8 不断换向, 实现工作台的往复运动。

工作台运动时, 要克服阻力, 主要是磨削力、工作台与导轨之间的摩擦力等, 这些阻力, 由液压泵提供给液压缸的油液的压力能来克服; 要克服的

阻力越大, 液压缸中的油压越高; 反之压力就越低。根据工作情况不同, 液压泵输出油液的压力可以通过溢流阀 4 进行调整。

工作台的运动速度可通过节流阀 6 来调节。节流阀的作用是通过改变节流阀开口量的大小, 来调节通过节流阀油液的流量, 从而控制工作台的运动速度, 此时, 液压泵输出的多余的油液只能在一定压力下通过溢流阀 4 溢流回油箱。当节流阀口开大时, 进入液压缸的油液增多, 活塞 (和工作台) 移动速度增大, 当节流阀口关小时, 进入液压缸的油液减少, 活塞 (和工作台) 的移动速度减小。

当手动换向阀 7 的阀芯处于中位时, 如图 1.3(c) 所示, 由于所有油口 P、T、A、B 均封闭, 油路不通, 液压油不能进入液压缸 8, 活塞停留在某个位置上, 所以工作台 9 不动。此时, 开停阀 5 阀芯应处于左位, 如图 1.3(d) 所示, 液压泵输出的液压油经开停阀 5 的 P

口、A 口流回油箱。液压泵输出的油液没有压力，液压泵的这种工作状态称为压力卸荷。

图中过滤器 2，用于滤去油液中的污染物。

由此可知，液压传动系统主要由以下五部分组成：

① 动力元件 主要指各种液压泵。它的作用是把原动机（电动机）的机械能转变成油液的压力能，给液压系统提供压力油，是液压系统的动力源。

② 执行元件 指各种类型的液压缸、液压马达。其作用是将油液的压力能转变成机械能，输出一定的力（或力矩）和速度（角速度），以驱动负载，对外做功。

③ 控制调节元件 主要指各种类型的液压控制阀，如上例中的溢流阀、节流阀、换向阀等。它们的作用是控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向，从而保证执行元件能驱动负载，并按规定的方向运动，获得规定的运动速度。

④ 辅助装置 指油箱、过滤器、油管、管接头、压力表等。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 指各种类型的液压油。

1.1.5 液压传动系统的职能符号

图 1.3 是采用半结构式图形表示的液压系统原理图。这种原理图，直观性强，容易理解，但图形较复杂，绘制不方便。为简化原理图的绘制，在工程实际中，除某些特殊情况外，系统中各元件一般采用国家标准规定的图形符号来表示，这些符号只表示元件的职能，不表示元件的结构和参数，通常称为职能符号。GB/T 786.1—1993 规定了液压传动图形符号。利用液压图形符号绘制液压系统原理图，简单方便。图 1.4 所示为用职能符号绘制的上述磨床工作台液压传动系统原理图。

需要说明的是，液压元件图形符号表示的是元件的常态（静止状态）或零位，未必是其工作状态。元件图形符号只表示元件的职能和连接系统的通路，不表示元件的具体结构和参数，也不表示系统管路的具体位置和元件的安装位置。

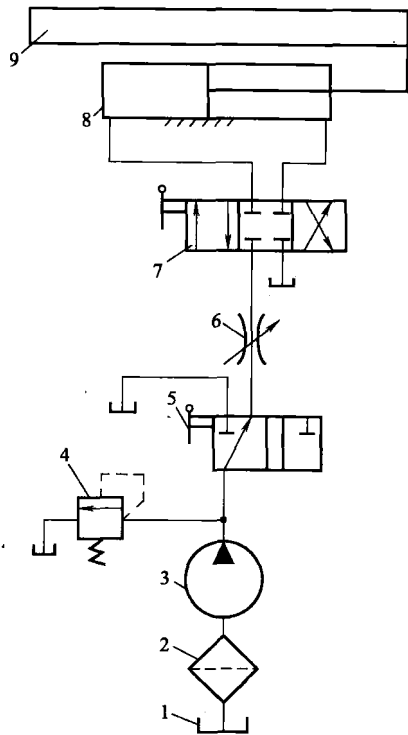


图 1.4 用职能符号绘制液压传动系统原理图（数字代表意义同图 1.3）

1.2 液压传动技术的优缺点

(1) 主要优点

① 便于实现无级调速，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机重量的 $10\% \sim 20\%$ ），而且能传递较大的力或转矩。

③ 工作平稳，反应快、冲击小，能频繁启动和换向。液压传动装置的换向频率，回转运动可达 500 次/min ，往复直线运动可达 $400 \sim 1000 \text{ 次/min}$ 。

④ 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

用能实现复杂的顺序动作和远程控制。

⑤ 易于实现过载保护,系统超负载,油液经溢流阀流回油箱。由于采用油液作为工作介质,能自行润滑,所以寿命长。

⑥ 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 易于实现回转、直线运动,且元件排列布置灵活。

⑧ 在液压传动系统中,功率损失所产生的热量可由流动着的油带走,故可避免机械本体产生过度温升。

(2) 主要缺点

① 液体作为工作介质,易泄漏,且具有可压缩性,故难以保证严格的传动比。

② 液压传动中有较多的能量损失(摩擦损失、压力损失、泄漏损失),传动效率低,所以不宜作远距离传动。

③ 液压传动对油温和负载变化敏感,不宜在很低或很高的温度下工作,对污染很敏感。

④ 液压传动需要有单独的能源(例如液压泵站),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,须组织专业化生产。

⑥ 液压传动装置出现故障时不易查找原因,不易迅速排除。

总之,液压传动优点较多,其缺点正随着科学技术的发展逐步加以克服,因此,液压传动在现代工业中有着广阔的发展前景。

1.3 液压传动技术的应用与发展

液压传动相对机械传动来说,是一门新的传动技术。如果从1795年世界上第一台水压机问世算起,至今已有200余年的历史。然而,直到20世纪30年代液压传动才真正推广应用。

在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发展。战后,液压技术迅速转向民用,在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步得到推广。20世纪60年代后,随着原子能技术、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。

1.3.1 液压传动技术的应用

液压传动技术在国民经济各领域中都得到了广泛的应用。但各部门应用液压传动的出发点不同。工程机械、压力机械采用液压传动的的原因是结构简单,输出力量大;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技术主要是可实现无级调速,易于实现自动化,能实现换向频繁的往复运动。液压传动技术在机械工业部门的应用见表1.1。

1.3.2 液压传动技术的发展

当前液压技术正向着高压、高速、大功率、高效率、低噪声、长寿命、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方面,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,液压元件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年从国外引进一些液压元件生产技术,同时自行设计液压产品,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

表 1.1 液压传动技术在机械行业中的应用

行业名称	应用场合举例
机床工业	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、压路机等
汽车工业	环卫车、自卸式汽车、平板车、高空作业车等
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、化工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、胶片冷却机、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

先进技术和设备，使我国的液压技术水平有了很大的提高。目前，我国的液压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。我国机械工业在认真消化、推广国外引进的先进液压技术的同时，大力研制、开发国产液压件新产品，加强产品质量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，对一些性能差而且不符合国家标准的液压件产品，采用逐步淘汰的措施。由此可见，随着科学技术的迅猛发展，液压技术将获得进一步发展，在各种机械设备上的应用将更加广泛。

思考与练习

- 1.1 何谓液压传动？举例说明液压传动的工作原理。
- 1.2 液压传动系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
- 1.3 与其他传动方式比，液压传动有何优点？有何缺点？

第2章 液压流体力学基础

液压传动以液体作为工作介质来传递能量和运动。因此,了解液体的主要物理性质,掌握液体平衡和运动的规律等主要力学特性,对于正确理解液压传动原理、液压元件的工作原理,以及合理设计、调整、使用和维护液压系统都是十分重要的。

2.1 液体的物理性质

液体是液压传动的工作介质,同时它还起到润滑、冷却和防锈的作用。液压系统能否可靠、有效地进行工作,在很大程度上取决于系统中所用的液压油液的物理性质。

2.1.1 液体的密度

液体的密度定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (2.1)$$

式中 ρ ——液体的密度, kg/m^3 ;

ΔV ——液体中任取的微小体积, m^3 ;

Δm ——体积 ΔV 中的液体质量, kg 。

在数学上 ΔV 趋近于 0 的极限,在物理学上是指趋近于空间中的一个点,应理解为体积为无穷小的液体质点,该点的体积同所研究的液体体积相比完全可以忽略不计,但它实际上包含足够多的液体分子。因此,密度的物理含义是,质量在空间点上的密集程度。

对于均质液体,其密度是指单位体积内所含的液体质量。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

式中 m ——液体的质量, kg ;

V ——液体的体积, m^3 。

液压传动常用液压油的密度见表 2.1。

表 2.1 液压传动常用液压油的密度

液压油种类	L-HM32 液压油	L-HM46 液压油	油包水 乳化液	水包油 乳化液	水-乙二醇	通用磷酸酯	飞机用磷 酸酯
密度/(kg/m^3)	0.87×10^3	0.875×10^3	0.932×10^3	0.9977×10^3	1.06×10^3	1.15×10^3	1.05×10^3

液压油的密度随温度的升高而略有减小,随工作压力的升高而略有增加,通常对这种变化忽略不计。一般计算中,石油基液压油的密度可取为 $\rho = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2.1.2 液体的可压缩性

液体受压力作用时,其体积减小的性质称为液体的可压缩性。液体可压缩性的大小可以用体积压缩系数 k 来表示,其定义为:受压液体在发生单位压力变化时的体积相对变化量,即

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \times \frac{\Delta V}{V} \quad (2.3)$$

式中 V ——压力变化前液体的体积；

Δp ——压力变化值；

ΔV ——在 Δp 作用下液体体积的变化值。

由于压力增大时液体的体积减小，因此上式右边必须冠一负号，以使 k 成为正值。

液体体积压缩系数的倒数，称为体积弹性模量 K ，简称体积模量。

$$K = -\frac{V}{\Delta V} \Delta p \quad (2.4)$$

体积弹性模量 K 的物理意义是液体产生单位体积相对变化量所需要的压力。

表 2.2 表示几种常用液压油液的体积弹性模量。由表中可知，石油基液压油体积模量的数值是钢 ($K=2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$) 的 $1/(100 \sim 170)$ ，即它的可压缩性是钢的 $100 \sim 170$ 倍。

表 2.2 各种液压油液的体积模量 (20℃, 大气压)

液压油种类	石油基	水-乙二醇基	乳化液型	磷酸酯型
K/Pa	$(1.4 \sim 2.0) \times 10^9$	3.15×10^9	1.95×10^9	2.65×10^9

液压油的体积弹性模量与温度、压力有关。当温度增大时， K 值减小，在液压油液正常的工作范围内， K 值会有 $5\% \sim 25\%$ 的变化；压力增大时， K 值增大，但这种变化不呈线性关系，当 $p \geq 3 \text{ MPa}$ 时， K 值基本上不再增大。

在常温下，纯液压油的平均体积弹性模量的值在 $(1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{ MPa}$ 范围内，数值很大，因此在液压传动中，一般认为液压油是不可压缩的。

当液压油中混入未溶解的气体后， K 值将会有明显的降低。在一定压力下，油液中混入 1% 的气体时，其体积弹性模量降低为纯油的 50% 左右，如果混有 10% 的气体，则其体积弹性模量仅为纯油的 10% 左右。由于油液在使用过程中很难避免混入气体，因此研究液压元件和系统动态特性时，必须考虑液压油可压缩性的影响，一般取 $K=700 \text{ MPa}$ 。

当考虑液体的可压缩性时，封闭在容器内的液体在外力作用时的特征极像一个弹簧：外力增大，体积减小；外力减小，体积增大。这种弹簧的刚度 K_h ，在液体承压面积 A 不变时，如图 2.1 所示，可以通过压力变化 $\Delta p = \Delta F/A$ 、体积变化 $\Delta V = A\Delta l$ (Δl 为液柱长度变化) 和式 (2.4) 求出，即

$$K_h = -\frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{A^2 K}{V} \quad (2.5)$$

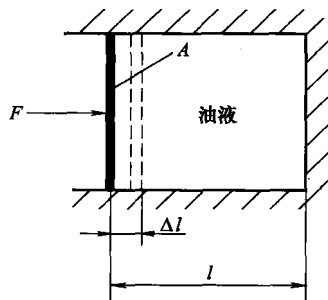


图 2.1 油液弹簧的刚度计算简图

2.1.3 液体的黏性

(1) 液体黏性的概念

液体在外力作用下流动 (或有流动趋势) 时，由于分子之间存在内聚力，从而在液体内部产生一种内摩擦力，液体的这种性质称为黏性。

如图 2.2 所示，设距离为 h 的两平行平板间充满液体，下平板固定，而上平板在外力 F 的作用下，以速度 u_0 向右平移。由于液体和固体壁面间的附着力，黏附于下平板的液层速度为零，黏附于上平板的液层速度为 u_0 ，而由于液体的黏性，中间各层液体的速度则随着液层间距离 Δy 的变化而变化。当上下板之间距离 h 较小时，液体的速度从上到下近似呈线