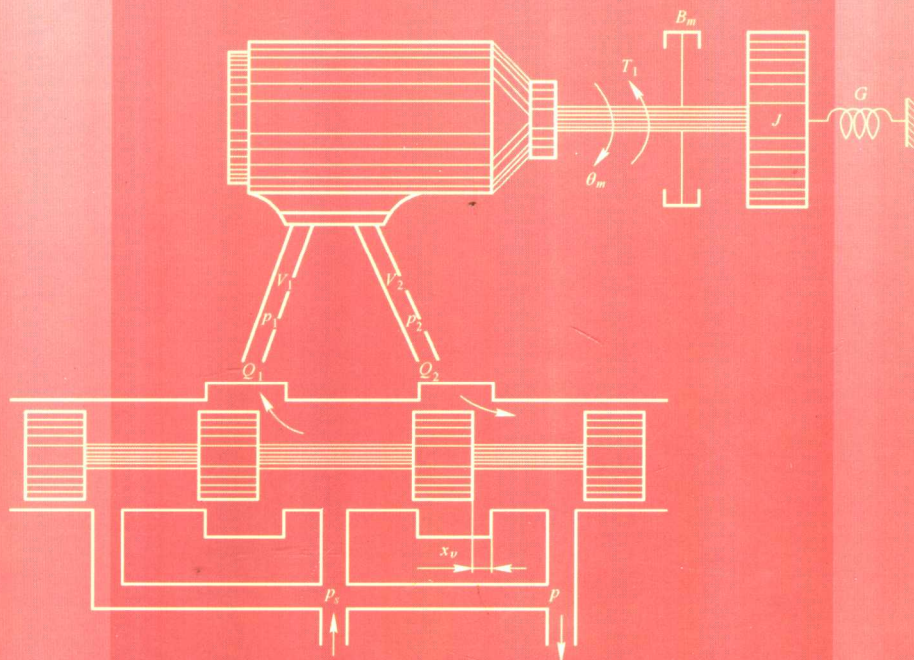


液压传动与控制

YEYA CHUANDONG YU KONGZHI

主 编 张平格

副主编 赵喜敬 张伟杰 姚贵英



冶金工业出版社

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

液 压 传 动 与 控 制

主 编 张平格
副主编 赵喜敬 张伟杰 姚贵英

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2004

图书在版编目(CIP)数据

液压传动与控制/张平格主编. —北京:冶金工业出版社,2004.8
ISBN 7-5024-3550-6

I. 液… II. 张… 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(2004)第 046485 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930;E-mail:bull 2820 @sina.com) 王雪涛

美术编辑 李 心 责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 牛晓波

北京市铁成印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004 年 8 月第 1 版,2004 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;20 印张;479 千字;305 页;1-4000 册

30.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

为了适应培养 21 世纪应用型工程技术人才的需要,更充分地反映我国液压传动与控制技术的进步,更好地为工程实际服务,编写过程中,编者参阅了大量有关文献,结合多年的教学实践经验,本着基本观点、基本理论、基本方法与实际应用相结合的原则,并考虑到本专业的通用性特点,力求简明扼要,介绍新技术,使本书体现液压技术的先进性和系统性。

本书内容包括:液压流体力学、液压元件(泵、马达、开关控制阀、比例控制阀、逻辑阀、伺服阀和辅助元件)的结构原理、液压系统基本回路、液压传动系统、液压系统的设计计算、液压伺服控制系统、液压系统的故障诊断与排除等。

本书由河北工程学院张平格主编,赵喜敬、张伟杰、姚贵英任副主编,潘越、刘志民、朱桂英参编。张平格编写第 8 章、第 11 章,赵喜敬编写第 1 章、第 2 章、第 3 章,张伟杰编写第 6 章,姚贵英编写第 5 章、第 9 章、第 10 章,潘越、刘志民编写第 7 章、第 12 章,朱桂英编写第 4 章。全书由张平格统稿。

河北工程学院于治福教授为本书主审,他对本书进行了详尽细致的审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

在本书的编著过程中,我们参考了大量文献,在此谨向有关作者表示衷心感谢;同时,在本书的编写过程中,得到了有关领导和相关老师的大力支持和帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中的不妥与疏漏,敬请广大读者批评指正。

编 者
2004 年 4 月

目 录

1 液压传动概述	1
1.1 液压传动的基本工作原理及组成.....	1
1.1.1 液压传动的基本工作原理.....	1
1.1.2 液压传动的主要工作特征.....	2
1.1.3 液压传动系统的组成.....	2
1.2 液压传动系统的工作特点.....	4
1.2.1 液压传动的主要优点.....	4
1.2.2 液压传动的主要缺点.....	4
思考题与习题.....	4
2 液压传动中的工作液体	5
2.1 液体的主要物理性质.....	5
2.1.1 液体的压缩性.....	5
2.1.2 黏性.....	5
2.2 液压传动中的工作介质.....	7
2.2.1 液压传动系统对工作介质的基本要求.....	7
2.2.2 常用工作介质的基本类型及其主要性能.....	9
2.2.3 选用工作介质的基本原则.....	11
2.3 工作介质的污染及其控制.....	11
2.3.1 污染物的种类及危害.....	11
2.3.2 污染的原因.....	11
2.3.3 污染的测定.....	11
2.3.4 污染度的等级.....	12
2.3.5 工作介质的污染控制.....	13
2.4 液压冲击与气穴现象.....	14
2.4.1 液压冲击.....	14
2.4.2 气穴与气蚀现象.....	16
思考题与习题.....	17
3 液压流体力学	18
3.1 液体静力学.....	18
3.1.1 液体静压力及其特性.....	18
3.1.2 静止液体的平衡微分方程.....	18
3.1.3 重力场中静止液体的基本方程式.....	19

3.1.4 压力表示方法	19
3.2 液体运动学	19
3.2.1 液体流动的几个基本概念	19
3.2.2 流动的连续性方程式	22
3.3 液体动力学	23
3.3.1 理想液体运动的微分方程式	23
3.3.2 理想液体微小流束的伯努利方程式	24
3.3.3 实际液体的伯努利方程式	25
3.3.4 动量方程式	26
3.4 流动阻力	27
3.4.1 流态、雷诺数	28
3.4.2 黏性流体的运动微分方程式	28
3.4.3 管内层流运动的沿程损失	29
3.4.4 管内紊流运动的沿程损失	30
3.4.5 沿程阻力系数	31
3.4.6 局部阻力损失	33
3.5 孔口和缝隙液流	34
3.5.1 孔口液流	34
3.5.2 缝隙流	35
思考题与习题	38
4 液压泵和液压马达	41
4.1 概述	41
4.1.1 液压泵的用途和分类	41
4.1.2 液压泵的工作原理	42
4.2 液压泵和液压马达的基本性能参数	42
4.2.1 液压泵的性能参数	42
4.2.2 液压马达的主要性能参数	44
4.3 齿轮泵	45
4.3.1 外啮合齿轮泵	45
4.3.2 摆线转子泵	49
4.4 叶片泵	50
4.4.1 单作用叶片泵	50
4.4.2 双作用叶片泵	54
4.5 柱塞泵	56
4.5.1 轴向柱塞泵	56
4.5.2 径向柱塞泵	63
4.6 螺杆泵	65
4.6.1 螺杆泵的工作原理	65
4.6.2 螺杆泵的分类	66
4.6.3 螺杆泵的用途	66

4.6.4 螺杆泵的特点	66
4.7 液压马达	67
4.7.1 液压马达的结构特点和分类	67
4.7.2 齿轮式液压马达的工作原理	67
4.7.3 叶片式马达的工作原理	68
4.7.4 轴向柱塞马达的工作原理	68
4.7.5 内曲线多作用式径向柱塞马达的基本结构和工作原理	69
4.7.6 曲轴连杆型径向柱塞式液压马达的基本结构和工作原理	70
4.7.7 摆线马达的结构和工作原理	71
思考题与习题	73
5 液压缸	74
5.1 液压缸的分类	74
5.2 液压缸的典型结构和组成	75
5.2.1 液压缸的典型结构	75
5.2.2 液压缸的组成	76
5.2.3 几种典型的液压缸	78
5.3 液压缸的设计	80
5.3.1 设计依据和设计步骤	80
5.3.2 确定基本参数	81
5.3.3 液压缸的结构计算和校核	83
思考题与习题	84
6 液压控制阀	85
6.1 概述	85
6.1.1 按功能分类	85
6.1.2 按阀的控制方式分类	85
6.1.3 按结构形式分类	85
6.1.4 按连接方式分类	86
6.2 压力控制阀	86
6.2.1 溢流阀	91
6.2.2 减压阀	94
6.2.3 顺序阀	96
6.2.4 压力继电器	96
6.3 流量控制阀	96
6.3.1 节流口的形式和流量特性	97
6.3.2 节流阀	99
6.3.3 调速阀	101
6.3.4 旁通调速阀(又称溢流节流阀)	101
6.3.5 温度补偿调速阀	102
6.3.6 分流集流阀	102

6.4 方向控制阀	104
6.4.1 单向阀	104
6.4.2 换向阀	106
6.5 电液比例阀	115
6.5.1 电液比例阀概述	115
6.5.2 比例阀的特点	115
6.5.3 电—机械转换器	116
6.5.4 比例压力阀	117
6.5.5 比例流量阀	118
6.5.6 比例方向阀	119
6.6 逻辑阀	120
6.6.1 逻辑阀的组成	120
6.6.2 逻辑阀单元——插装件	120
6.6.3 逻辑方向阀	121
6.6.4 逻辑压力阀	125
6.6.5 逻辑流量阀	126
思考题与习题	127
7 液压传动系统辅件	128
7.1 油箱	128
7.1.1 油箱容积的确定	128
7.1.2 油箱结构	128
7.2 滤油器	130
7.2.1 滤油器的主要性能参数	130
7.2.2 常用滤油器的类型、结构与性能	132
7.2.3 滤油器的选择	134
7.2.4 滤油器在液压传动系统的安装位置	135
7.3 蓄能器	136
7.3.1 蓄能器的功用	136
7.3.2 蓄能器的容量计算	137
7.4 油管 and 管接头	138
7.4.1 油管的种类	138
7.4.2 油管通径和壁厚的选择	139
7.5 密封装置	139
7.5.1 密封装置的类型	140
7.5.2 密封元件的常用材料	140
7.5.3 常用密封元件的结构和性能	140
7.6 冷却器和加热器	143
7.6.1 冷却器	143
7.6.2 加热器	143
思考题与习题	144

8 液压系统基本回路	145
8.1 压力控制回路	145
8.1.1 调压回路	145
8.1.2 减压回路	146
8.1.3 增压回路	146
8.1.4 卸荷回路	147
8.1.5 保压回路	147
8.1.6 平衡回路	149
8.1.7 顺序回路	149
8.2 速度控制回路	150
8.2.1 调速回路	150
8.2.2 快速运动回路	157
8.2.3 速度换接回路	158
8.3 方向控制回路	159
8.3.1 简单换向回路	159
8.3.2 复杂换向回路	159
8.4 多执行元件工作控制回路	161
8.4.1 顺序动作回路	161
8.4.2 同步回路	162
8.5 其他回路	165
8.5.1 缓冲制动回路	165
8.5.2 浮动回路	165
思考题与习题	167
9 液压传动系统	169
9.1 液压系统分类	169
9.1.1 按工作液体的循环方式分类	169
9.1.2 按执行元件类型分类	169
9.1.3 按系统回路的组合方式分类	170
9.2 典型液压系统	170
9.2.1 组合机床动力滑台液压系统	170
9.2.2 Q2-8 型汽车起重机液压系统	173
9.2.3 YA32-200 型四柱万能液压机液压系统	175
9.2.4 AM-50 型掘进机液压系统	178
9.2.5 DY-150 型采煤机牵引部液压系统	180
思考题与习题	181
10 液压系统的设计计算	183
10.1 明确系统的设计要求	183
10.2 分析工况,确定主要参数	184

10.2.1	工况分析	184
10.2.2	确定主要参数	184
10.3	拟定液压系统原理图	186
10.3.1	概述	186
10.3.2	拟定系统原理图时应注意的问题	186
10.4	液压元件的计算与选择	187
10.5	液压系统的性能验算	187
10.5.1	回路压力损失验算	187
10.5.2	发热温升验算	188
10.6	液压系统的设计计算举例	188
10.6.1	工况分析	188
10.6.2	液压缸主要参数的确定	189
10.6.3	液压系统图的拟定	190
10.6.4	液压元件的选择	191
10.6.5	液压系统的性能验算	192
	思考题与习题	193
11	液压伺服控制系统	194
11.1	液压伺服控制系统概述	194
11.1.1	液压伺服控制原理及其特点	194
11.1.2	液压伺服控制系统的组成和分类	196
11.1.3	液压伺服控制的优缺点及其应用	197
11.2	液压伺服阀	198
11.2.1	液压伺服阀的结构及分类	198
11.2.2	零开口四边滑阀的分析	200
11.2.3	正开口四边滑阀的分析	203
11.2.4	双边滑阀的分析	205
11.2.5	带一个固定节流口的单边滑阀的分析	206
11.2.6	液压伺服阀的功率输出及效率	208
11.3	液压动力元件	209
11.3.1	四通阀控制双出杆液压缸	209
11.3.2	四通阀控制液压马达	218
11.4	机液伺服控制系统	219
11.4.1	系统的组成及方块图	220
11.4.2	系统的稳定性分析	221
11.4.3	系统的稳态误差	222
11.4.4	机液伺服系统的实际应用	224
11.5	电液伺服阀	232
11.5.1	电液伺服阀的结构及工作原理	232
11.5.2	电液伺服阀的基本特性	235
	思考题与习题	238

12 液压系统故障诊断、维修及保养	239
12.1 液压系统故障诊断步骤与方法	239
12.1.1 液压系统故障产生的特征	239
12.1.2 液压系统故障诊断的步骤	240
12.1.3 液压系统故障诊断的方法	241
12.1.4 诊断故障部位的方法	244
12.1.5 建立故障档案	248
12.2 常用液压元件故障原因与消除对策	250
12.2.1 液压泵故障原因与消除对策	250
12.2.2 液压缸故障原因与消除对策	255
12.2.3 液压阀故障原因与消除对策	259
12.3 液压回路的故障诊断与排除	267
12.3.1 压力控制回路的故障诊断与排除	267
12.3.2 速度控制回路的故障诊断与排除	278
12.3.3 方向控制回路的故障诊断与排除	280
12.4 液压系统常见故障及排除方法	284
12.4.1 振动和噪声	284
12.4.2 液压冲击	289
12.4.3 “爬行”	291
12.4.4 液压卡紧	295
12.4.5 温度过高	295
附录 常用液压元件图形符号	299
附表 1 基本符号和管路及联结	299
附表 2 控制机构和控制方法	299
附表 3 泵和马达	300
附表 4 执行元件	300
附表 5 控制元件	300
附表 6 辅助元件	301
参考文献	302
术语索引	303
部分习题与思考题的答案	305

1 液压传动概述

一部机器至少由以下 3 部分组成:原动机、传动机构和工作机构。

原动机:为机器提供动力,如电动机、内燃机等。

工作机构:机器完成工作任务的直接工作部分,如剪床的剪刀,车床的刀架、车刀、卡盘,工程起重机的起升机构、回转机构等。

传动机构:改变原动机输出的运动参数和动力参数,以适应机器工作性能的要求。传动机构通常分为机械传动、电气传动和流体传动机构。

流体传动是以流体为工作介质进行能量转换、能量传递和能量控制的传动。它包括液体传动和气体传动。液体传动又包括液力传动和液压传动。

液力传动主要是利用液体的动能进行能量转换、能量传递和能量控制的传动系统。

液压传动主要是利用液体的压力能进行能量转换、能量传递和能量控制的传动系统。

1.1 液压传动的的基本工作原理及组成

1.1.1 液压传动的的基本工作原理

现以液压千斤顶为例,来说明液压传动的工作原理及其系统组成。

图 1-1 所示为液压千斤顶工作原理图。

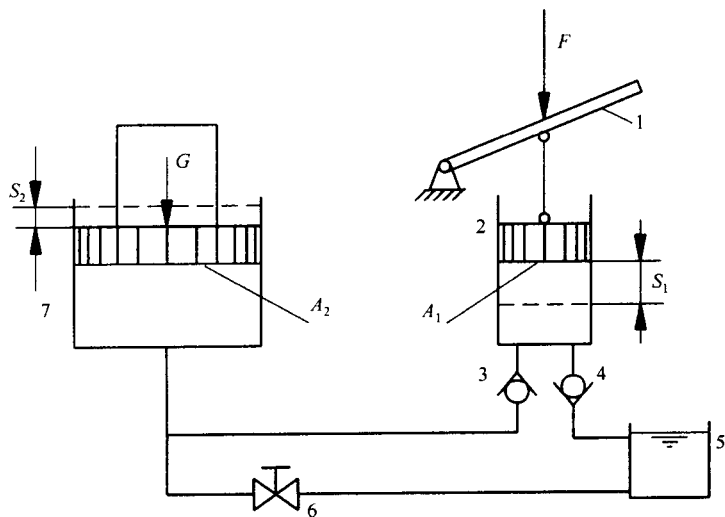


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

1—手柄; 2—手动泵; 3—排油单向阀; 4—吸油单向阀; 5—油箱; 6—截止阀; 7—液压缸

当手柄 1 带动活塞向上运动时,手动泵 2 的容积增大形成局部真空,使排油单向阀 3 关闭,油箱 5 中的液体在大气压力的作用下,从油箱经管道及吸油单向阀 4 进入泵 2,此为吸油过程;当手柄 1 带动活塞下压时,吸油单向阀 4 关闭,泵 2 中的液体推开排油单向阀 3 经

管道进入液压缸 7, 迫使活塞克服外负载 G 向上运动从而对外做功, 此为排油过程。当手动泵 2 的活塞在手柄 1 的带动下不断上下往复运动时, 负载 G 就不断上升; 当需要液压缸 7 的活塞停止时, 使手柄 1 停止运动, 此时排油单向阀 3 在液压力作用下关闭, 液压缸 7 的活塞就自锁不动。工作时截止阀 6 关闭, 当需要液压缸 7 的活塞放下时, 打开此阀, 液体在重力作用下经此阀流回油箱 5。这就是液压千斤顶的工作原理。

1.1.2 液压传动的主要工作特征

1.1.2.1 液体压力实现力(或力矩)的传递

图 1-1 中, 液压泵 2 的活塞面积为 A_1 , 驱动力为 F_1 , 液体压力为 p_1 , 液压缸 7 的活塞面积为 A_2 , 负载力为 G , 液压力为 p_2 。

稳态时, 液压泵 2 的活塞和液压缸 7 的活塞的静力平衡方程式分别为:

$$\begin{cases} F_1 = p_1 A_1 \\ G = p_2 A_2 \end{cases} \quad (1-1)$$

如不考虑管道的压力损失, 则:

$$p_1 = p_2 \quad (1-2)$$

于是输出力, 即所能克服的外负载为:

$$G = p_2 A_2 = p_1 A_1 \quad (1-3)$$

式(1-3)即为力传递的基本方程式。由此可知:

$$p_1 = F_1 / A_2 = p_2 \quad (1-4)$$

从以上分析可得出以下结论:

液压泵的工作压力 p_1 取决于外负载(执行元件的结构尺寸一定)。

1.1.2.2 液压泵速度(或转速)的传递

液压泵速度(或转速)传递是靠液体“容积变化相等”原则进行的。

图 1-1 中, S_1 表示液压泵 2 活塞的行程, S_2 表示液压缸 7 活塞的行程。如不考虑泄漏、液体的压缩管路的变形, 则:

$$A_1 S_1 = A_2 S_2 \quad (1-5)$$

将式(1-5)两端同时除以时间:

$$\frac{A_1 S_1}{t} = \frac{A_2 S_2}{t} \quad \text{即} \quad A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\text{则} \quad v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{Q_1}{A_2} \quad (1-6)$$

式(1-6)即为运动速度传递的基本方程式。由此可得出如下结论:

执行元件的运动速度(或转速)只与输入流量大小有关(执行元件的结构尺寸一定), 理论上讲与外负载无关。

在实际工作中, 泄漏是不可避免的, 泄漏量与液体压力有关, 压力越大, 泄漏越多。因此, 当负载发生变化时, 泄漏量的变化, 使实际流量发生变化, 从而影响执行元件运动速度的变化。

1.1.3 液压传动系统的组成

图 1-2 为机床工作台液压传动系统图。

工作台要求实现慢速向右进给,然后向左快速退回的动作循环。

图中液压缸活塞通过活塞杆与工作台固定在一起,液压缸缸体固定在机床身上。图示电磁换向阀6处于通电状态,液压泵3排出的液体输入液压缸9的左腔,使其容积不断扩大,推动活塞和工作台向右作进给运动。这时,液压缸右腔的容积缩小回液,它排出的液体经管道及节流阀8返回油箱1。调节节流阀8的阀口通流面积,便可控制液压缸右腔的回液流量,达到控制进给速度的目的。

如果令电磁阀断电,则阀心便在弹簧力的作用下左移,使电磁换向阀6处于右位工作。这时液压泵排出的液体经过单向阀7输入液压缸右腔,推动活塞杆和工作台向左返回。而其左腔容积不断缩小回液,回液经电磁换向阀6直接流回油箱。在此过程中,液体不受节流阀的控制,工作台快速返回。

溢流阀4与液压泵的排液口并联。当活塞进给速度较慢时,系统中积累多余的液体将使其压力升高。压力上升到足以克服溢流阀阀心的弹簧力作用时,就将阀心推开,使多余的液体直接返回油箱,防止系统过载。

系统中压力表5用于监测系统的工作压力;吸液口滤油器2,可以防止工作液体中的大颗粒固体杂质进入液压泵和传动系统,避免损坏液压元件。

由液压千斤顶和机床的液压传动系统可以看出,一个完整的液压传动系统包括以下5个基本组成部分。

1.1.3.1 液压动力元件

将原动机(常用的有人力机构、电动机和内燃机等)所提供的机械能转变为工作液体的液压能的机械装置,通常称为液压泵或油泵。

1.1.3.2 液压执行元件

将液压泵所提供的工作液体的液压能转变为机械能的装置。做直线往复运动的执行元件称为液压缸或油缸;做连续旋转运动的执行元件称为液压马达或油马达。

1.1.3.3 液压控制元件

对液压系统中工作液体的压力、流量和流动方向进行调节控制的机械装置,通常简称为液压控制阀或液压阀,如压力控制阀、流量控制阀、方向控制阀等。

1.1.3.4 液压辅助元件

上述三个组成部分以外的其他元件,如油箱、管道、管接头、密封元件、滤油器、蓄能器、冷却器、加热器以及各种液体参数的监测仪表等。它们的功能是多方面的,各不相同。

1.1.3.5 工作液体

工作液体是液压传动中能量传递载体,也是液压传动系统中最本质的一个组成部分。

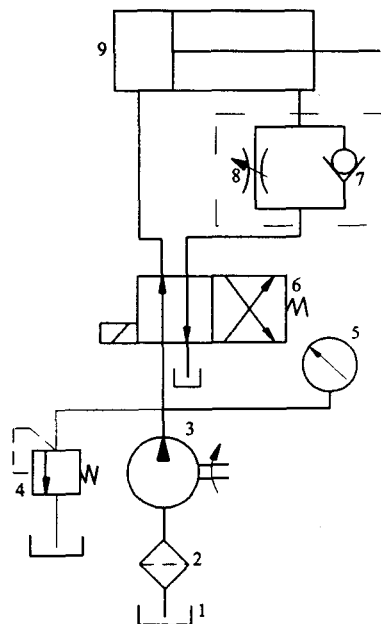


图 1-2 机床工作台液压传动系统图

1—油箱;2—滤油器;3—液压泵;4—溢流阀;5—压力表;
6—换向阀;7—单向阀;8—节流阀;9—液压缸

1.2 液压传动系统的工作特点

液压传动系统有以下几个工作特点。

1.2.1 液压传动的优点

与机械传动、电力传动相比,液压传动具有以下优点:

- (1) 可实现大范围的无极调速(调速范围可达 2000:1);
- (2) 同功率比较时,液压传动具有质量轻、体积小、运动惯量小、反应速度快等特点;
- (3) 液压传动的各元件,可根据需要方便、灵活地来布置;
- (4) 操纵省力,控制方便,易于实现自动化或遥控;
- (5) 易于实现过载保护;
- (6) 工作介质一般采用矿物油,相对运动表面可自行润滑,因此可提高系统和元件的使用寿命;
- (7) 易于实现直线运动。

1.2.2 液压传动的缺点

- (1) 液压传动系统同时存在压力损失、容积损失和机械损失,因此传动效率较低;
- (2) 工作性能易受温度变化的影响,因此不易在较高或较低的温度条件下工作;
- (3) 液压元件的制造精度要求较高,因而价格较贵;
- (4) 由于液体介质的泄漏及可压缩性影响,不能得到严格的定传动比;
- (5) 系统的故障诊断比较困难,使用和维修要求有较高的技术水平;
- (6) 油液泄漏不仅污染场地,如处理不当,还可能引起火灾或爆炸事故。

思考题与习题

- 1-1 液压传动系统由哪几个基本部分组成,它们的基本功能是什么? 试用示意图说明。
- 1-2 试比较液压传动与机械传动和电力传动的主要优缺点。
- 1-3 用附表中液压系统图形符号表示图 1-1 的液压千斤顶原理图。
- 1-4 说明图 1-2 所示的机床工作台传动系统,若用机械传动来实现同样功能,至少应由哪些部分和零件组成,试用简图表示之。
- 1-5 如图 1-1 所示,某液压千斤顶(设效率为 1)可顶起 10 t 重物。试计算在 30 MPa 压力下,液压缸 7 的活塞面积 A_2 为多大? 当人的输入功率为 100 W 时,将 10 t 重物提起 0.2 m 高所需的时间为多少?

2 液压传动中的工作液体

工作液体是液压能的载体,其基本功能是进行能量的转换和传递。此外,它还对液压元件和系统进行润滑和冷却。

2.1 液体的主要物理性质

2.1.1 液体的压缩性

液体体积随作用压力的变化而发生相应变化的性质称为液体的压缩性。其压缩性的大小用压缩系数 β 表示,即:

$$\beta = \lim \left(\frac{\Delta V}{V \Delta p} \right) = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2-1)$$

其平均值为:

$$\bar{\beta} = - \frac{1}{V} \left(\frac{V' - V}{p' - p} \right) \quad (2-2)$$

式中 p, p' ——压力, Pa;

V, V' ——压力为 p 和 p' 的液体体积, m^3 ;

dp ——压力增量, Pa;

dV ——压力增加到 $p + dp$ 时的液体体积减少量, m^3 。

既然液体具有压缩性这一物理性质,那么当液体受到压缩时,它必然产生一种向外膨胀的力。当液体受到压缩时,所产生的这种向外膨胀的力,可以看成是一种弹性力,其大小用弹性系数 K 来表示:

$$K = \frac{1}{\beta} = - V \frac{dp}{dV} \quad (2-3)$$

2.1.2 黏性

俗话说:“人往高处走,水往低处流”。但水为什么往低处流呢?从力学的角度考虑,这是因为高处的水在重力的作用下,沿着水的表面方向产生了剪切力,破坏了水的静止状态,水在剪切力的作用下开始滑动,从而产生了水的流动。

水之所以流动,其原因是水对其剪切力的阻抗很小,即抵抗剪切力的能力很小。同样,其他液体也具有这种特性。

但是,如果把水和油放置在两个同样的流道中,会发现二者的流动速度是不同的,即二者流动的快慢程度不同。这说明二者承受切应力的能力是不同的。液体承受切应力大小的能力反映了液体的一种物理性质——黏性,即黏性是液体承受切应力大小的能力。

黏性是液体阻止自身发生剪切变形的一种特性,它存在于液体的内部。由于液体黏性的存在,液体在流动过程中,因克服自身的内摩擦力必然要做功。因此,液体的黏性是液体产生机械能量损失的根源。

2.1.2.1 牛顿内摩擦定律

如图 2-1 所示, I 和 II 为互相平行的两块平板,其间充满液体。若 I 板固定,而 II 板以

某一等速向右平移,由于液体附着力的作用,直接与 I 板相接触的液体层,将具有同 I 板相

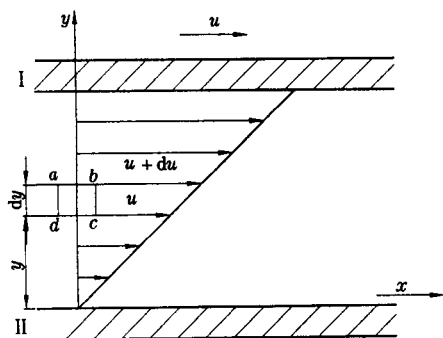


图 2-1 平行平板流动

同的速度 u 而随之移动,紧靠 II 板的液体层则不动,但中间各层液体由于其质点间的内摩擦力作用,层与层之间互相影响,相对滑动。流速较快的液体层,对相邻流速较慢的液体层,有一个加速作用,流速较慢的液体层,对相邻流速较快的液体层,有一个减速的作用,在流速不同的液体层之间,黏性引起的内摩擦力是成对出现的。

经过实验得知,两平板间各层液体的速度变化如图 2-1 中所示,各层间产生的内摩擦力 F ,与接触面积 A ,相对速度差 du 成正比,而与垂直距离 dy 成反比,即 $F \propto Adu/dy$ 。如乘以比例常数,则有:

$$F = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

令 τ 为单位面积上的内摩擦力,则:

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

式(2-4)和式(2-5)中的 du/dy 称为速度梯度,即速度在垂直于该速度方向上的变化率。

2.1.2.2 动力黏度

式(2-4)和式(2-5)中的比例系数 μ ,它代表着液体的一种物理性质——黏性,称为绝对黏度或动力黏度。它表示两层相距 1 m,具有相对速度 1 m/s 的相对滑动的液体,在其 1 m² 的接触面上所发生的内摩擦力的大小,其单位为 N·s/m²。

2.1.2.3 运动黏度

在实际应用中,常常运用动力黏度与密度的比值,即运动黏度,来表示液体运动黏度的大小。运动黏度用 ν 表示,则:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

液压油的牌号一般都以运动黏度 ν 的 10⁻⁶ 运动黏度值来表示。比如 20 号机械油,指的就是这种油在 50℃ 时运动黏度的平均值 $20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.1.2.4 相对黏度(条件黏度)

由于液体的动力黏度和运动黏度直接测量比较困难,因此,在工程上常采用另一种可用仪器直接测量的黏度表示方法,即相对黏度。各国采用的相对黏度的单位有所不同。我国同欧洲一些国家采用恩氏黏度^{°E}。

恩氏黏度的测定方法是利用恩氏黏度计。在一定温度下,将 200 mL 的被测液体从恩氏黏度计流出所需时间 t 与同体积 20℃ 下的蒸馏水从该恩氏黏度计中流出所需时间 t_B 之比称为恩氏黏度,用符号^{°E}表示:

$$^{\circ}E = \frac{t}{t_B} \quad (2-7)$$

一般均以 50℃ 为测量时的标准温度,符号为^{°E}₅₀。从上式看出,恩氏黏度只是一个比值,没有因次。