

高等学校教材

液压与气动技术

张利平 编著



化学工业出版社

·北京·

本书是高等学校机械工程类教材。内容包括：液压与气动技术的研究对象、基本原理、系统组成、图形符号、特点和应用发展概况；液压工作介质的主要物理性质、种类与特性、选用与维护，液体静力学和动力学、管道液流的能量损失计算、孔口和缝隙液流特性、液压冲击及气穴现象；液压元件（能源元件、执行元件、控制元件和辅助元件）的结构原理、特点与选用；液压基本回路的构成、原理及特点；典型液压系统的功能结构、系统组成、原理及特点；液压系统的设计、计算流程与实例；气压传动，包括气动工作介质及其力学基础、气动元件（能源元件及辅助元件、执行元件、控制元件和逻辑元件）、气动基本回路、典型气动系统分析、气动系统的设计方法等。各章末附有思考题、习题及习题参考答案。书末附录部分编入了液压气动技术中常用物理量单位换算及常用液压气动图形符号（GB/T 786.1—1993）。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、金属材料工程、材料成型及控制工程、过程装备与控制工程（化工机械）、机车车辆、工程机械、冶金机械、农林机械、轻纺机械等专业的通用教材（讲授50学时左右），也可作为高等职业教育、成人教育、自学考试、技术培训的基础教材，同时可作为工矿企业及科研院所相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

液压与气动技术/张利平编著. —北京：化学工业出版社，2007.4

高等学校教材

ISBN 978-7-122-00190-0

I. 液… II. 张… III. ①液压传动-高等学校-教材
②气压传动-高等学校-教材 IV. TH137 TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 041886 号

责任编辑：刘俊之 金玉连

文字编辑：李玉峰

责任校对：陶燕华

装帧设计：韩 飞

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 刷：大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 $\frac{3}{4}$ 字数410千字 2007年6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：28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

液压与气动技术是近半个多世纪以来机械学中发展极快的学科分支。由于液压与气动技术所具有的独特技术优势,使其在国民经济各领域获得了广泛应用,成为工业、农业、国防和科学技术现代化进程中不可替代的一项基础技术及现代传动与控制的重要手段,也是当代工程技术人员所应掌握的重要基础技术之一。

本书是作者对《液压传动与控制》教材在使用过程中存在的问题进行总结分析的基础上,进行了较大删改加工并增写气压传动内容而成,以使其更加有利于教学实际并满足高等学校人才培养的需要。

本书追求基础性、系统性、先进性和实用性的统一,以使读者学完本书后,能真正掌握液压气动技术的主要内容和设计方法,具备一定的工程应用能力和开发创造能力。为此,在选材、编排和论述中,着重于基本概念、原理和方法的介绍,贯彻少而精、理论联系实际的原则;在介绍传统内容的同时,注意反映液压与气动技术在元件及系统设计分析方法上的一些新发展和新成就,推进机-电-液(气)一体化技术的教学与应用。在内容编排上,以液压技术为主线,气动技术单独成章,以顾及气压传动内容的独立性及完整性。在体系结构上,液压与气动均按照基础理论—元件—基本回路—系统分析和设计的结构进行论述;对于液压与气动元件,则侧重于基本原理的介绍而不过多涉及其具体结构。对于典型系统,编入较多的实例,以满足机械类不同行业的需要;在叙述上,突出重点和共性问题,深入浅出,以便于自学。各章末附有相应思考题、习题及习题参考答案,以有利于学生复习巩固课堂所学内容,提高分析、解决实际问题的能力;书后附有液压气动技术中常用物理量的单位及换算、现行液压气动图形符号国家标准,以便于读者查阅使用。

本书主要作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、金属材料工程、材料成形及控制工程、过程装备与控制工程(化工机械)、机车车辆、工程机械、冶金机械、农林机械、轻纺机械等专业的通用教材(讲授50学时左右),也可作为高等职业教育、成人教育、自学考试、技术培训的基础教材,同时可作为工矿企业及科研院所相关工程技术人员的参考书。本书由张利平编著。编写过程中,参阅了国内外大量相关教材和文献,谨此向各位作者一并表示真诚的感谢。

由于水平所限,本书难免存在不妥之处,敬请广大读者指正。

编著者
2006年12月

目 录

第 1 章 液压与气动技术概述	1
1.1 液压与气动技术的研究对象及课程目标	1
1.2 液压与气压传动的工作原理及组成部分	1
1.2.1 工作原理	1
1.2.2 工作特征	2
1.2.3 液压与气动系统的组成部分	3
1.2.4 液压与气动系统原理图及图形符号	4
1.3 液压与气动技术的特点及应用	5
1.3.1 液压与气动技术的特点	5
1.3.2 液压与气动技术的应用	7
1.4 液压与气动技术的发展概况	8
思考题与习题	9
第 2 章 液压工作介质及其力学基础	10
2.1 液压工作介质	10
2.1.1 液压工作介质的物理性质	10
2.1.2 对工作介质的要求	12
2.1.3 工作介质的种类及特性	12
2.1.4 液压工作介质的选用	13
2.1.5 工作介质的使用和污染控制	14
2.2 液体静力学	14
2.2.1 液体静压力及其特性	15
2.2.2 静压力的分布	15
2.2.3 压力的表示方法、单位与分级	16
2.2.4 液体静压力的传递	18
2.2.5 静压力对固体壁面的作用力	18
2.3 液体动力学	19
2.3.1 基本概念	19
2.3.2 连续性方程	20
2.3.3 伯努利方程	21
2.3.4 动量方程	22
2.4 管道中液流的能量损失	24
2.4.1 液体的两种流态及雷诺判据	24
2.4.2 等直径圆管中的沿程压力损失	25
2.4.3 局部压力损失	27
2.4.4 管路系统总的压力损失	27
2.5 孔口和缝隙流动特性	27
2.5.1 孔口压力流量特性	28
2.5.2 缝隙压力流量特性	30
2.6 气穴现象及液压冲击	34
2.6.1 气穴现象	34
2.6.2 液压冲击	34
思考题与习题	36
第 3 章 液压能源元件	39
3.1 液压泵的基本工作原理与类型	39
3.1.1 液压泵的基本工作原理	39
3.1.2 液压泵的类型及图形符号	39
3.2 液压泵的主要性能参数	40
3.2.1 工作压力和额定压力	40
3.2.2 排量和流量	40
3.2.3 功率及效率	40
3.3 齿轮泵	41
3.3.1 外啮合齿轮泵	41
3.3.2 外啮合齿轮泵的结构要点与性能特点	42
3.3.3 内啮合齿轮泵简介	44
3.4 叶片泵	44
3.4.1 单作用叶片泵及限压式变量叶片泵	44
3.4.2 双作用叶片泵	47
3.5 柱塞泵	49
3.5.1 轴向柱塞泵	49
3.5.2 径向柱塞泵	52
3.6 各类液压泵的性能比较及选择	53

第4章 液压执行元件 56

4.1 液压马达 56	4.3 液压缸 59
4.1.1 基本工作原理 56	4.3.1 类型及工作参数 59
4.1.2 类型及图形符号 57	4.3.2 液压缸的组成 62
4.1.3 主要性能参数 57	4.3.3 选型与设计要点 65
4.2 摆动液压马达 58	思考题与习题 67

第5章 液压控制元件 68

5.1 液压阀概述 68	5.4 流量控制阀 87
5.1.1 基本结构与原理 68	5.4.1 节流阀 87
5.1.2 分类 68	5.4.2 调速阀 88
5.1.3 基本性能参数 69	5.4.3 溢流节流阀 90
5.1.4 对液压阀的基本要求 70	5.5 叠加阀与插装阀 91
5.2 方向控制阀 70	5.5.1 叠加阀 91
5.2.1 单向阀 70	5.5.2 插装阀 91
5.2.2 换向阀 72	5.6 电液控制阀 93
5.2.3 多路换向阀 76	5.6.1 电液伺服阀 94
5.3 压力控制阀 77	5.6.2 电液比例阀 98
5.3.1 溢流阀 77	5.6.3 电液数字阀 102
5.3.2 减压阀 82	5.7 常用液压阀的性能比较及选择 104
5.3.3 顺序阀 83	5.8 水压控制阀简介 104
5.3.4 溢流阀、减压阀、顺序阀的综合 比较 85	5.8.1 水压溢流阀 105
5.3.5 压力继电器 85	5.8.2 水压节流阀 105
	思考题与习题 105

第6章 液压辅助元件 108

6.1 过滤器 108	6.4.1 种类及结构 115
6.1.1 液压油液的污染度等级和过滤器的 功用 108	6.4.2 设计要点 117
6.1.2 过滤器的类型 109	6.5 油管和管接头 118
6.1.3 选用与安装 111	6.5.1 油管 118
6.2 热交换器 112	6.5.2 管接头 119
6.2.1 冷却器 112	6.6 压力表及压力表开关 119
6.2.2 加热器 112	6.6.1 压力表 119
6.3 蓄能器 113	6.6.2 压力表开关 121
6.3.1 功用 113	6.7 密封装置 121
6.3.2 类型 113	6.7.1 功用及要求 121
6.3.3 容量计算 114	6.7.2 类型及特点 121
6.4 液压油箱 115	思考题与习题 123

第7章 液压基本回路 124

7.1 速度控制回路 124	7.1.3 速度换接回路 135
7.1.1 调速回路 124	7.2 压力控制回路 136
7.1.2 快速运动回路 132	7.2.1 调压回路 136

7.2.2 减压回路	136	7.3.2 锁紧回路	142
7.2.3 增压回路	136	7.4 多执行元件控制回路	143
7.2.4 卸荷回路	137	7.4.1 顺序动作回路	143
7.2.5 平衡回路	138	7.4.2 同步动作回路	144
7.2.6 保压和泄压回路	139	7.4.3 多缸动作互不干扰回路	145
7.3 方向控制回路	140	思考题与习题	146
7.3.1 往复直线运动换向回路	140		

第8章 典型液压系统分析 148

8.1 YT4543 型组合机床动力滑台液压 传动系统	148	8.4.2 液压系统分析	157
8.1.1 主机功能结构	148	8.5 BF1010 型单臂仿形刨床液压伺服 控制系统	159
8.1.2 液压系统分析及特点	149	8.5.1 主机功能结构	159
8.2 YA32-200 型四柱万能液压机液压 传动系统	151	8.5.2 液压系统分析及特点	159
8.2.1 主机功能结构	151	8.6 高压输电线间隔棒振摆试验装置 电液伺服控制系统	162
8.2.2 液压系统分析及特点	151	8.6.1 主机功能结构	162
8.3 JS01 型工业机械手液压传动系统	154	8.6.2 液压系统分析	162
8.3.1 主机功能结构	154	8.7 XS-ZY-250A 型塑料注射成型机 电液比例控制系统	163
8.3.2 液压系统分析及特点	154	8.7.1 主机功能结构	163
8.4 1m ³ 履带式全液压单斗挖掘机液压 传动系统	156	8.7.2 液压系统分析及特点	163
8.4.1 主机功能结构	156	思考题与习题	164

第9章 液压系统的设计计算 166

9.1 液压系统的设计流程	166	多轴钻孔组合机床液压系统设计	183
9.1.1 明确技术要求	166	9.2.1 技术要求	183
9.1.2 液压系统的功能设计	167	9.2.2 工况分析	183
9.1.3 组成元件设计	173	9.2.3 确定主要参数, 编制工况图	183
9.1.4 液压系统性能验算	178	9.2.4 拟定液压系统原理图	185
9.1.5 液压系统的技术设计	180	9.2.5 组成液压元件设计	185
9.1.6 注意事项	182	9.2.6 验算液压系统性能	188
9.2 液压传动系统设计计算示例-单面		思考题与习题	189

第10章 气压传动 191

10.1 气动工作介质及其力学基础	191	10.4.1 方向控制阀	207
10.1.1 气动工作介质	191	10.4.2 压力控制阀	211
10.1.2 气体力学基础	192	10.4.3 流量控制阀	212
10.2 气动能源元件及辅助元件	197	10.4.4 气动逻辑控制元件	213
10.2.1 气动能源元件	197	10.5 气动基本回路	215
10.2.2 气动辅助元件	199	10.5.1 速度控制回路	215
10.3 气动执行元件	203	10.5.2 压力控制回路	217
10.3.1 气缸	204	10.5.3 方向控制回路 (换向回路)	218
10.3.2 气马达	205	10.5.4 多执行元件控制回路	219
10.3.3 摆动气马达	206	10.5.5 安全保护与操作回路	220
10.4 气动控制元件	207	10.5.6 计数回路	221

10.6 典型气动系统分析	222	10.7 气动系统的设计计算	226
10.6.1 机床夹具气动系统	222	10.7.1 设计计算流程	226
10.6.2 动力滑台气液驱动系统	222	10.7.2 气动控制回路的设计：信号-	
10.6.3 十六工位石材连续磨机气动		动作（X-D）线图法	226
系统	223	思考题与习题	233
10.6.4 粒状物料计量装置气动系统	225		
附录			235
附录 I 液压气动技术常用物理量单位及		附录 II 常用液压气动图形符号	236
换算	235		
参考文献			243

第 1 章 液压与气动技术概述

1.1 液压与气动技术的研究对象及课程目标

一部完备的机器都是由原动机、传动装置和工作机三部分组成。原动机（电动机或内燃机）是机器的动力源；工作机是机器直接对外做功的部分；而传动装置则是设置在原动机和工作机之间的部分，用于实现动力（或能量）的传递、转换与控制，以满足工作机对力（或转矩）、工作速度（或转速）及位置的要求。

按照传动件（或工作介质）的不同，传动有机械传动、电气传动、液压传动、气压传动及复合传动等类型。液压传动与气压传动，简称为液压与气动技术，是研究以有压流体（压力油或压缩空气）为工作介质，并以压力能实现各种机械的动力（或能量）的传递、转换与控制的学科。

液压与气动技术是高等学校机械类各专业的一门重要技术基础课程，其主要教学目标为，在介绍液压气动技术工作介质的基本物理性质及其力学特性基础上，使学生了解组成液压与气动系统的各类元件的基本构成、工作原理、性能以及由这些元件所组成的各种控制回路的性能和特点，从而进行液压与气动系统的分析及设计。

1.2 液压与气压传动的工作原理及组成部分

液压与气动的基本工作原理是相似的。本节首先以液压千斤顶为例，说明液压传动的工作原理及其三个主要特征，然后介绍液压与气动系统的组成部分及系统的图形符号。

1.2.1 工作原理

如图 1-1 所示，液压缸 1 与单向阀 3、4 一起构成手动液压泵，完成吸油与压油。当向上抬起杠杆时，手动液压泵的活塞 2 向上运动，活塞 2 的下部容腔 a 的容积增大形成局部真空，致使压油单向阀 3 关闭，油箱 8 中的油液在大气压作用下经吸油管 5 顶开吸油单向阀 4 进入 a 腔。当活塞 2 在力 F_1 作用下向下运动时，a 腔的容积减小，油液因受挤压，故压力升高，于是，被挤出的液体将吸油单向阀 4 关闭，而将压油单向阀 3 顶开，经油管 6 进入液压缸 10 的 b 腔，推动活塞 11 上移顶起重物（重力 F_2 ）。手摇泵的活塞 2 不断上下往复运动，重物逐渐被抬高。当重物上升到所需高度后，停止活塞 2 的运动，则液压缸 10 的 b 腔内油液压力将使压油单向阀 3 关闭，b 腔内的液体被封死，活塞 11 连同重物一起被闭锁不动。

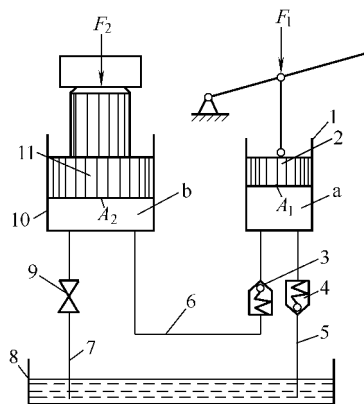


图 1-1 液压千斤顶工作原理图
1,10—液压缸；2,11—活塞；3—压油单向阀；4—吸油单向阀；5,6,7—油管；8—油箱；9—截止阀；a,b—油腔

2 液压与气动技术

此时，截止阀 9 关闭。如打开截止阀 9，则液压缸 10 的 b 腔内液体便经油管 7 排回油箱 8，于是活塞 11 将在自重作用下下移恢复到原始位置。

气压传动与液压传动的主要差别为：前者的工作介质来自大气，工作完毕气体一般直接排向大气而不回收，通常工作压力较低（一般 $\leq 1\text{MPa}$ ），而后者的工作压力较高（一般为几个兆帕甚至几十兆帕）。

1.2.2 工作特征

由上述液压千斤顶的工作原理可知，由液压缸 1 与单向阀 3、4 一起组成的手动液压泵，将杠杆的机械能转换为油液的压力能输出，完成吸油与压油；液压缸 10 将油液的压力能转换为机械能输出，举起重物，手动液压泵和举升重物的液压缸（简称举升液压缸）组成了最简单的液压传动系统，实现了动力（力和运动）的传递与转换。其工作特征如下。

① 力的传递靠液体压力实现，系统工作压力取决于负载。

现以 F_2 表示作用在活塞 11 上的负载力（其大小与输出力相等）， A_2 表示活塞 11 的面积， p_2 表示力 F_2 在 b 腔中产生的液体压力；以 F_1 表示作用在活塞 2 上的输入力， A_1 表示活塞 2 的面积， p_1 表示力 F_1 在 a 腔中产生的液体压力（液压泵的排油压力），则活塞 11 与活塞 2 的静力平衡方程分别为

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= p_2 A_2 \\ F_1 &= p_1 A_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

如果不考虑管路的压力损失，则液压泵的排油压力（即油腔 a 内的液体压力） p_1 与油腔 b 内的液体压力 p_2 相等，即

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

于是，系统的输出力（即所能克服的负载）为

$$F_2 = p_2 A_2 = p_1 A_2 = p A_2 \quad (1-3)$$

由式(1-2)可引出液压与气动的第一个工作特征为：在系统结构参数（此处为活塞面积 A_1 和 A_2 ）一定情况下，系统工作压力 p 决定于负载，负载越大，压力越大，而与流入的流体多少无关。

② 运动速度的传递靠容积变化相等原则实现，运动速度取决于流量。

如果不考虑液体的压缩性和泄漏损失等因素，则液压泵排出的液体体积必然等于进入举升液压缸的液体体积，即容积变化相等，可表示为

$$A_1 x_1 = A_2 x_2 \quad (1-4)$$

式中， x_1 、 x_2 分别为液压泵活塞和举升液压缸活塞的位移。

上式两边同除以运动时间 t 得

$$A_1 \frac{x_1}{t} = A_2 \frac{x_2}{t} \quad (1-5)$$

即
$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1-6)$$

或
$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-7)$$

式中， v_1 、 v_2 分别为液压泵活塞和举升液压缸活塞的平均运动速度。

由式(1-7)可看出，活塞的运动速度与活塞的作用面积成反比。

$A \frac{x}{t}$ 的意义是单位时间内液体流过截面积 A_1 和 A_2 的体积，称为流量 q ，即

$$q = A v \quad (1-8)$$

若已知进入液压缸的流量 q ，则活塞的运动速度为

$$v=q/A \quad (1-9)$$

综上可引出液压传动与气压传动的第二个工作特征为：在系统结构参数一定情况下，运动速度的传递是靠工作容积变化相等的原则实现的。活塞的运动速度取决于输入流量的大小，而与外负载无关。调节进入液压缸（气缸）的流量 q ，即可调节活塞的运动速度 v 。

③ 系统的动力传递符合能量守恒定律，压力与流量的乘积等于功率。

如果不计任何损失，则系统的输入功率 P_1 与输出功率 P_2 相等，即有

$$P_1 = F_1 v_1 = P_2 = F_2 v_2 \quad (1-10)$$

考虑式(1-1)和式(1-9)，则式(1-10)可表示为

$$P = P_1 = F_1 v_1 = p A_1 \frac{q_1}{A_1} = P_2 = F_2 v_2 = p A_2 \frac{q_2}{A_2} = p q \quad (1-11)$$

由式(1-11)可引出液压与气动的第三个工作特征为：液压和气动是以流体的压力能来传递动力的，并且符合能量守恒定律，压力与流量的乘积等于功率。

综上所述可看出：

a. 由于液压传动与气压传动中的工作介质是在受调节和控制下工作，故流体传动不仅可以作为“传动”之用，而且还能作为“控制”之用，二者很难截然分开。

b. 与外负载力相对应的流体参数是压力，与运动速度相对应的流体参数是流量，故压力和流量是流体传动中两个最基本的参数。

c. 如果忽略各种损失，流体传动传递的力与速度彼此无关，故流体传动既可实现与负载无关的任何运动规律，也可借助各种控制机构实现与负载有关的各种运动规律。

d. 液压与气动可以省力但不省功。

1.2.3 液压与气动系统的组成部分

先来看两个例子。图 1-2 所示为一驱动机床工作台的液压传动系统，当液压泵 3 由电动机驱动旋转时，从油箱 1 经过滤器 2 吸油。当换向阀 7 [有 P、T (T₁)、A、B 四个油口和三个工作位置] 的阀芯处于图示工作位置时，压力油经管路 14、阀 5、阀 7 (P→A) 和管路 11 进入液压缸 9 的左腔，推动活塞（杆）及工作台 10 向右运动。液压缸 9 右腔的油液经管路 8、阀 7 (B→T) 和管路 6、4 排回油箱。如果扳动换向手柄 12 切换阀 7 的阀芯，使之处于左端工作位置，则液压缸活塞反向运动。如果切换阀 7 的阀芯，使之处于中间位置时，则液压缸 9 在任意位置停止运动。调节和改变流量控制阀 5 的开度大小，可以调节进入液压缸 9 的流量，从而控制液压缸活塞及工作台的运动速度。液压泵 3 排出的多余油液经管路 15、溢流阀 16 和管路 17 流回油箱。液压缸 9 的工作压力取决于负载。液压泵 3 的最大工作压力由溢流阀 16 调定，其调定值应为液压缸的最大工作压力及系统中油液流经各类阀和管路的压力损失之和。因此，系统的工作压力不会超过溢流阀的调定值，溢流阀对系统还起超载保护作用。如将图 1-2 中的液压缸 9 垂直安装，用于驱动起重设备即可实现升降运动控制；如将液压缸换为液压马达，即可实现回转运动的控制。

图 1-3 为用于铜管管端挤压胀形的胀管机气动系统，空压机 1 及储气罐 3 经过滤器 4 和油雾器 6 向合模气缸 13 和胀形气缸 9 提供压缩空气，两气缸的活塞杆在压缩空气作用下推动负载运动；气缸 9 和气缸 13 的动作方向变换分别由换向阀 7 和换向阀 11 控制。而气缸 9 的伸出速度可通过单向流量控制阀 8 的开度调节，气缸工作压力可以根据负载大小通过减压阀 5 调节；整个系统的最高压力由安全阀 2 限定。消声器 10 和 12 用于降低换向阀的排气噪声。如将图 1-3 中的气缸 9 垂直安装，则可用于实现升降运动控制；也可将气缸换为气马达用于回转运动的控制。

4 液压与气动技术

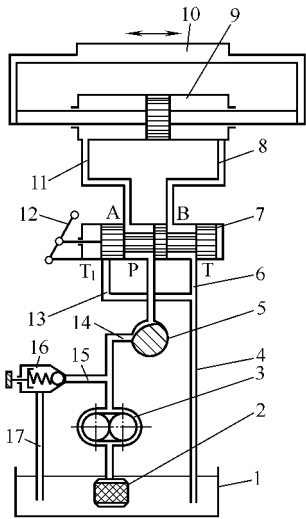


图 1-2 机床工作台液压系统原理结构示意图

1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4,6,8,11,13,14,15,17—管路；5—流量控制阀；7—换向阀；9—液压缸；10—工作台；12—换向手柄；16—溢流阀

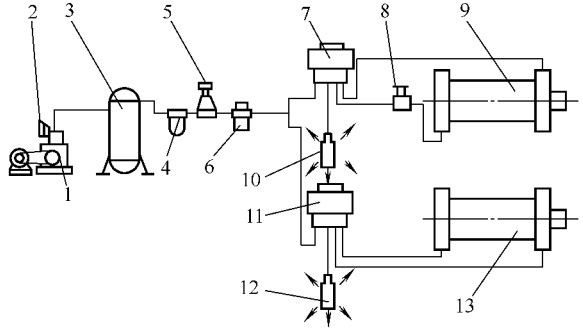


图 1-3 胀管机气动系统

1—空压机；2—安全阀；3—储气罐；4—过滤器；5—减压阀；6—油雾器；7,11—换向阀；8—单向流量控制阀；9—胀形气缸；10,12—消声器；13—合模气缸

由上述两例可以看出，液压与气动系统一般都是由能源元件、执行元件、控制调节元件、辅助元件四个部分组成，各部分的功用如表 1-1 所列。一般而言，能够实现某种特定功能的液压元件的组合，称为回路；为了实现对某一机器或装置的工作要求，将若干特定的基本功能回路按一定方式连接或复合而成的总体称为系统。

表 1-1 液压与气动系统的组成部分及功用

组成部分	液压系统	气动系统	功能作用
能源元件	液压泵	空气压缩机	将原动机(电动机或内燃机)供给的机械能转变为流体的压力能,输出具有一定压力的油液或空气
执行元件	液压缸、液压马达和摆动液压马达	气缸、摆动气缸和气马达	将工作介质(液体或气体)的压力能转变为机械能,用以驱动工作机构的负载做功,实现往复直线运动、连续回转运动或摆动
控制调节元件	各种压力、流量、方向控制阀及其它控制元件	各种压力、流量、方向控制阀,逻辑控制元件及其它控制元件	控制调节系统中从动力源到执行元件的流体压力、流量和方向,从而控制执行元件输出的力(转矩)、速度(转速)和方向以保证执行元件驱动的主机工作机构完成预定的运动规律
辅助元件	油箱、过滤器、管件、热交换器、蓄能器及指示仪表等	过滤器、管件、油雾器、消声器及指示仪表等	用来存放、提供和回收介质(液压油液);滤除介质中的杂质、保持系统正常工作所需的介质清洁度;实现元件之间的连接及传输载能介质;显示系统压力、温度等

1.2.4 液压与气动系统原理图及图形符号

描述液压系统或气动系统的基本组成、工作原理、功能、工作循环及控制方式的说明性原理图称为液压系统原理图或气动系统原理图。系统原理图有多种表示方法，但为了便于绘制和技术交流，一般采用标准图形符号绘制系统原理图，而不采用图 1-2 所示的半结构形式绘制。由于图形符号仅表示液压、气动元件的功能、操作（控制）方法及外部连接口，并不表示液压、气动元件的具体结构、性能参数、连接口的实际位置及元件的安装位置，因此，

用来表达系统中各类元件的作用和整个系统的组成、油路联系和工作原理，简单明了，便于绘制。利用专门开发的计算机图形库软件，还可大大提高液压、气动系统原理图的设计、绘制效率及质量。

各国都有自己的液压、气动图形符号标准。我国迄今先后三次（分别于1965年、1976年和1993年）颁布了液压与气动图形符号标准。目前执行的标准是GB/T 786.1—93《液压气动图形符号》，该标准规定了液压、气动元件标准图形符号和绘制方法。在液压系统设计中，应严格执行这一标准。本书附录列出了常用液压、气动元件的标准图形符号备查。图1-4即为按GB/T 786.1—93绘制的图1-2所示的液压系统原理图；图1-5为用图形符号绘制的某胀管机的气动系统原理图。

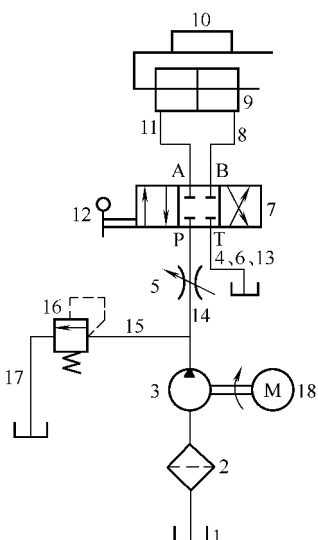


图 1-4 用图形符号绘制的机床工作
台液压系统原理图

1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4,6,8, 11,13,14,15,17—管路；5—流量控制阀；7—换向阀；9—液压缸；10—工作台；12—换向手柄；16—溢流阀；18—电动机

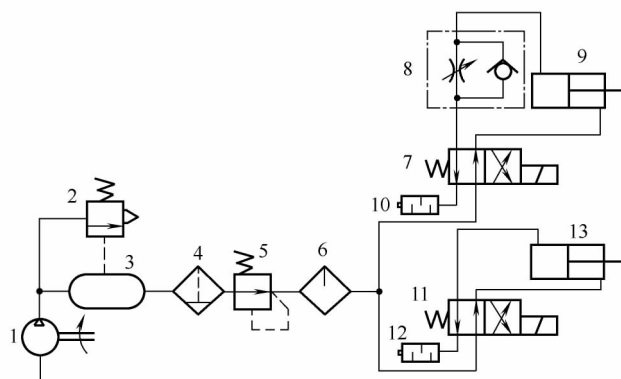


图 1-5 用图形符号绘制的胀管机气动系统原理图

1—空压机；2—安全阀；3—储气罐；4—过滤器；5—减压阀；6—油雾器；7,11—换向阀；8—单向流量控制阀；9—胀形气缸；10,12—消声器；13—合模气缸

绘制系统原理图时的注意事项为：

- ① 元件图形符号的大小可根据图纸幅面大小按适当比例增大或缩小绘制，以清晰美观为原则；
- ② 元件一般以静态或零位（例如电磁换向阀应为断电后的工作位置）画出；
- ③ 元件的方向可视具体情况进行水平、垂直或反转 180° 绘制，但液压油箱必须水平绘制且开口向上。

1.3 液压与气动技术的特点及应用

1.3.1 液压与气动技术的特点

(1) 液压技术的特点

- ① 单位功率的重量轻（能以较轻的设备重量获得很大的输出力和转矩）。统计资料表

6 液压与气动技术

明, 液压泵和液压马达单位功率的重量只有发电机和电动机的 $1/10$, 液压泵和液压马达可小至 0.0025N/W , 而同等功率的发电机和电动机则约为 0.03N/W 。至于尺寸, 前者约为后者的 $12\% \sim 13\%$ 。就输出力而言, 用泵很容易得到极高压力的液压油液, 将此油液传送到液压执行元件后即可产生很大的输出力和转矩。所以液压技术具有重量轻、体积小和出力大的突出特点, 有利于机械设备及其控制系统的微型化、小型化并进行大功率作业。

② 布局灵活方便。液压元件的布置不受严格的空位位置限制, 容易按照机器的需要通过管道实现系统中各部分的连接, 布局安装具有很大的柔性, 能构成用其它方法难以组成的复杂系统。

③ 调速范围大。通过控制阀, 液压传动可以在运行过程中实现液压执行元件大范围的无级调速, 调速范围可达 2000 。

④ 工作平稳、快速性好。油液具有弹性, 可吸收冲击, 故液压传动传递运动均匀平稳; 易于实现快速启动、制动和频繁换向。往复回转运动的换向频率可达 500 次/min, 往复直线运动的换向频率高达 1000 次/min。

⑤ 易于操纵控制并实现过载保护。液压系统操纵控制方便, 易于实现自动控制、远距离遥控和过载保护; 运转时可自行润滑, 有利于散热和延长使用寿命。

⑥ 易于自动化和机电液一体化。液压技术容易与电气、电子控制技术相整合, 组成机—电—液一体化的复合系统, 实现自动工作循环。

⑦ 易于实现直线运动。用液压传动实现直线运动比机械传动简便。

⑧ 系统设计、制造和使用维护方便。液压元件属于机械工业基础件, 已实现了标准化、系列化和通用化, 因此, 便于液压系统的设计、制造和使用维护, 有利于缩短机器设备的设计制造周期并降低制造成本。

⑨ 不能保证定比传动。由于液体的压缩性和泄漏等因素的影响, 液压技术不能严格保证定比传动。

⑩ 传动效率偏低。传动过程中, 需经两次能量转换, 常有较多的能量损失, 因此传动效率偏低。

⑪ 工作稳定性易受温度影响。液压系统的性能对温度较为敏感, 不宜在过高或过低温度下工作, 采用石油基液压油作传动介质时还需注意防火问题。

⑫ 造价较高。液压元件制造精度要求较高, 以防止和减少泄漏, 所以造价较高。

⑬ 故障诊断困难。液压元件与系统容易因液压油液污染等原因造成系统故障, 且发生故障不易诊断。

(2) 气动技术的特点

① 介质提取处理便利。空气容易从大气中提取, 无介质费用和供应上的困难, 用后的气体排入大气, 处理方便, 一般不需回收管道和容器, 介质清洁, 不会污染环境, 管道不宜阻塞, 不存在介质变质及补充等问题。

② 能源可储存。压缩空气可储存在储气罐中, 突然断电等情况时, 主机及其工艺流程不致突然中断。

③ 动作迅速, 反应灵敏。一般只需 $0.02 \sim 0.3\text{s}$ 即可建立起所需压力和速度。能实现过载保护, 便于自动控制。

④ 阻力损失和泄漏小。压缩空气传输过程中的阻力损失一般仅为油路的千分之一, 空气便于集中供应和远距离输送。外泄漏不会像液压传动那样造成压力明显降低和环境污染。

⑤ 成本低廉。工作压力低, 气动元件的材料和制造精度低, 制造容易, 成本较低。

⑥ 工作环境适应性好。气动元件可以根据不同场合, 采用相应材料, 使元件能够在强

振动、强冲击、多尘埃、强腐蚀和强辐射等恶劣的环境下进行正常工作，不会因温度变化影响其传动控制性能。

⑦ 维护简单，使用安全。无油的气动控制系统特别适用于无线电元器件的生产过程及食品或医药生产过程。

⑧ 输出力和转矩小。因工作压力较低，且结构尺寸不宜过大，故气动系统输出力或转矩较小，且传动效率低。

⑨ 动作稳定性稍差。空气的压缩性远大于液压油的压缩性，故在动作的响应能力、工作速度的平稳性方面不如液压传动，但若采用气-液复合传动装置即可取得满意效果。

⑩ 工作频率和响应速度远不如电子装置。气压传动装置的信号传递速度限制在声速（约 340ms）范围内，故其工作频率和响应速度远不如电子装置，且信号要产生较大的失真和延滞，也不便于构成较复杂的控制回路，但这一缺点对工业生产过程不会造成困难。

1.3.2 液压与气动技术的应用

由于液压与气动独特的技术优势，使其成为现代机械工程的基本技术构成和现代控制工程的基本技术要素，并在国民经济各行业得到了广泛应用，表 1-2 列举了近年来液压与气动技术的一些应用实例。

表 1-2 液压与气动技术的应用

应用领域	采用液压技术的机器设备和装置	采用气动技术的机器设备和装置
机械制造	离心铸造机、液压机、焊接机、淬火机、金属切削机及数控加工中心、机械手及机器人等	造型机、压力机、组合机床、动力头、真空吸附工作台、工业机械手和机器人等
能源与冶金工业	电站锅炉、煤矿液压支架及钻机、海洋石油钻井平台及石油钻机、高炉液压泥炮、轧机及板坯连铸机等、铝型材连续挤压生产线等	热电站锅炉房通风设备、核电站的燃料和吸收器进给装置、露天和地下矿场的矿石开采的辅助设备、轧钢机、捆綁机、熔炉辅助设备、切断机和锯机的夹紧和驱动装置、卷线机、打标机等
铁路和公路交通	铺轨机、隧道工程衬砌台车、汽车维修举升机、架桥机等	公共交通车门启闭、喷砂控制、紧急制动锁、十字门控制和驱动器；入口门控制；路标装置等；车轮防空转装置
建材、建筑、工程机械及农林牧机械	陶瓷高压注浆成型机、钢筋弯箍机及校直切断机、混凝土泵、液压锤、碎石器、打桩机、越野起重机、各类挖掘机械、联合收割机、球果采集机器人、饲草打包机及压块机等	砖块、毛坯石和瓷砖的成形机、吹型机、喷漆装置、挖掘机、推土机、穿孔器、田间作业设备的倾斜、提升和旋转装置、农作物保护和杂草控制设备、动物饲养饲料计量和传送装置、粪便收集和清除装置、蛋类分选系统、通风设备、剪羊毛和屠宰设备、收割机、水果和蔬菜分选设备等
家用电器与五金制造	显像管玻壳剪切机、电冰箱压缩机的电机转子叠片机、冰箱箱体折弯机、电冰箱内胆热成型机、制冷热交换器管件成型机、制钉机、门锁成形压机等	印刷电路板自动上料机、阴极套筒切口机、显像管转运机械手、穿芯电容测试仪、钢制家具的装配辅助设备、冲压机、切断机、压边机等
轻工、纺织及化工	表壳热冲压成型机、皮革熨平机、人造板热压机、木家具多向压机、纸张复卷机、骨肉分割机、纺丝机、印花机、卷染机、轧光机、注塑机、吹塑机、橡胶硫化机、乳化炸药装药机等	伐木机、家具制造机及试验机、造纸机、印刷机、皮革加工机、制鞋机、纺纱机和编织机、混合器和硫化压机中的关闭装置、测试设备等
航空航天工程、河海工程及武器装备	大型客机、飞机场地面设备、卫星发射等航空航天设备、河流穿越设备、舵机、水下机器人及钻孔机、波浪补偿起重机、炮塔俯仰装置、地空导弹发射装置等	飞机供油车气动联锁装置、飞行体主推力喷嘴摆角控制系统、船舶前进倒车的转换装置、导弹自动爬行气动系统、气动布雷装置及鱼雷发射管系统
计量质检、装置、特种设备及公共设施	万能试验机、电梯、纯水灭火器、客运索道、剧院升降舞台、游艺机、捆钞机、医用牵引床、垃圾破碎机和压榨机、污泥自卸车、万吨高层建筑物的整体平移工程等	计量和称量控制、供水系统水位控制；教育、广告策划可视系统、投影屏幕和黑板操作、示范及训练模型；包装灌装机和挤压机、废金属打包机、眼玻璃体注吸切割器等

1.4 液压与气动技术的发展概况

公元前,希腊人发明的螺旋提水工具、埃及人用热空气-水力驱动的寺庙大门、用风箱产生压缩空气助燃和中国的水轮等,可以说是液压与气动技术最古老的应用。

1648年法国的B.帕斯卡(B. Pascal)提出的液体静压力传递的基本定律及1850~1851年德国的克劳修斯(R. Clausius)和英国人开尔文(Kelvin)分别独立提出的热力学第二定律等为20世纪液压与气动技术的发展提供了科学基础。尽管早在1795年英国人约瑟夫·布瑞玛(Joseph Bramah)就登记了第一台液压机的英国专利,在18世纪,伦敦就出现了液压印刷机,艾菲尔铁塔就利用水压千斤顶来调节,然而由于早期无成熟的液压元件等原因,直到20世纪初液压技术的理论和工程实际应用才基本成熟。第二次世界大战期间,由于军事上的需要,出现了以电液伺服系统为代表的响应快、精度高的液压元件和控制系统,从而使液压技术得到了迅猛发展。战后液压技术很快转入民用工业,在机械制造、起重运输机械及各类施工机械、船舶、航空等领域得到了广泛发展和应用。20世纪60年代以来,随着原子能、航空航天技术、微电子技术的发展,液压技术在更深、更广阔的领域得到了发展。

气动技术的发展比液压要晚。在19世纪后期才出现了利用压缩空气输送信件的气动邮政,并将气动技术用于舞台灯光设备驱动、印刷机械、木材、石料与金属加工设备、牙医钻具和缝纫机械等。第二次世界大战后,为了解决宇航、原子能等领域中电子技术难于解决的高温、巨震、强辐射等难题,加速了气压传动与控制技术的研究。自20世纪50年代末,美军Harry Diamond实验室首次公开了某些射流控制的技术内容后,气动技术作为工业自动化的廉价、有效手段受到人们的普遍重视,各国竞相研制、推广。60年代中期,法国LECO等公司首先研制成功了对气源要求低、动作灵敏可靠的第二代气动元件,继之各工业发达国家在气动元件及系统的研究、应用方面都取得了很大进展,各种结构新颖的气缸、新型气源处理装置等新型气动元件、辅件也不断涌现。随着工业技术的发展和生产自动化要求的提高,气动控制元件也有不少改进,气动逻辑元件和真空元件的研究和应用也取得了很大进展。随之,气动技术的应用领域也得到迅猛扩展,涵盖了机械、汽车、电子、冶金、化工、轻工、食品、军事各行业。

液压气动行业具有小产品、大市场、技术密集、制造精细、投资强度大、回报时间长等特点。根据各类相关主机产品朝着节能、环保、高效、自动、安全、可靠等方向发展,液压与气动技术及其产品要求向节能化、智能化、电子化、高压化、小型化、集成化、复合化、个性化、长寿命、高可靠性、绿色化(低污染、低噪声、低振动、无泄漏)等方向发展。创新与发展,为装备制造业提供动力传动与控制技术全面解决方案已成为近代液压与气动技术的重要主题。

我国的液压与气动技术是随着新中国建立、发展而发展起来的。1952年试制出我国第一只液压齿轮泵,1959年国内建立了首家专业化液压元件厂,1967年开始建立气动元件专业厂。经过半个世纪的发展,我国液压气动行业已形成了一个门类比较齐全,有一定生产能力和技术水平的工业体系,现有数以百计的各类液压、气动元件厂(公司),形成了国内自行开发、引进技术制造、合资生产、仿制消化的多元化格局。目前,我国的液压气动元件制造业已能为国民经济多种部门提供较为齐全的液压气动元件产品,已基本能适应各类主机产品的一般需要。在液压气动行业的标准化方面,截止到2004年5月,国内共有液压气动标准145项,这些标准多数与国际标准化组织(ISO)所颁布的同类标准相一致,从而为提高我国液压气动元件的标准化、系列化、通用化程度,组织专业化生产,提高产品的性能,发

展新品种和互换性，以及国际间的技术交流及机电产品配套出口贸易提供了有利条件。在教育、科研和学术交流及技术合作方面，目前全国有百余所科研院所和大学在进行着普及教育和产品研发；全国通过《液压与气动》、《机床与液压》、《液压气动与密封》等科技期刊，中国液压气动密封工业网等网站，以及各级学术团体、学术会议、展览会，与国内外学术界和制造业界进行着广泛的学术交流及技术合作。总之，目前我国的液压气动工业与其他国家基本保持同步，某些成果还走在了世界同行前列。但是也应指出，我国的液压气动工业尚与主机发展需求及世界先进水平存在不少差距，亟待开发研制技术含量高且质量稳定的高档产品，以满足国民经济发展及各类主机行业的需求。

思考题与习题

- 1-1 试述液压传动与气压传动的定义，并分述其主要优点。
- 1-2 液压系统与气动系统通常由哪几部分组成？各组成部分的功用是什么？
- 1-3 气压传动与液压传动相比，主要差别是什么？
- 1-4 液压传动与气压传动有何工作特征？
- 1-5 液压气动行业具有哪些特点？液压与气动技术及其产品的发展方向如何？

第2章 液压工作介质及其力学基础

本章是液压技术的理论基础，将在介绍液压工作介质的主要物理性质及要求、种类和选用的基础上，着重叙述液体力学的基本内容，其中包括液体静力学、液体动力学及液体流经管道及孔口缝隙时的力学特性等。

2.1 液压工作介质

液压工作介质（液压油或合成液体等）在系统中的主要功用是传递能量和信号，同时还起着润滑、防锈、冲洗污染物质及带走热量等重要作用。液压系统运转的可靠性、准确性和灵活性，在很大程度上取决于所使用的工作介质。

2.1.1 液压工作介质的物理性质

(1) 密度

单位体积内所包含液体的质量称为密度，用 ρ 表示，即

$$\rho = m/V \quad (2-1)$$

式中， m 和 V 分别为液体的质量和体积。

液体的密度会随着温度的增加而略有减小，随着压力的增加略有增大，从工程使用角度可认为液压工作液体的密度不受温度和压力变化的影响。通常，矿物型液压油的密度为 900kg/m^3 。

(2) 可压缩性

在温度不变的情况下，液体在压力（压强）改变时改变自身体积的性质，称为液体的可压缩性。可压缩性用体积压缩系数（单位压力变化下引起的体积相对变化量） k 或体积弹性模量 K_e 表示，即

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

$$K_e = 1/k \quad (2-3)$$

式中， Δp 为压力的增量； ΔV 为体积的变化量。

由于压力增加时液体体积减小，故式(2-2)须加一负号，以使 k 为正值。

k 值越小，亦即 K_e 值越大，则液体的可压缩性越小。液压油液的体积弹性模量为 $K_e = (1.2 \sim 20) \times 10^3 \text{MPa}$ ，数值很大，因此对于一般液压系统，可以认为液体不可压缩。只有在液体中混入空气、高压液压系统或考虑液压系统的动态特性时，才计及液体的可压缩性。

(3) 黏性

① 黏性的定义 液体在外力作用下流动（或有流动趋势）时，液体分子间内聚力会阻碍分子相对运动而产生一种内摩擦力，这种特性称为液体的黏性。显然，静止液体不呈黏性。

现观察图 2-1 所示的黏性平板实验，设在两个平行平板之间充满液体，当上平板以速度