

 高职高专“十一五”规划示范教材

液压与气动技术

主 编 李海金 辛连学 副主编 辛 莉 汤建鑫
主 审 赵克定

 北京航空航天大学出版社

 高职高专“十一五”规划示范教材

液压与气动技术

主 编 李海金 辛连学
副主编 辛 莉 汤建鑫
主 审 赵克定

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书从工程实际应用的角度讲述了液压与气动的基础知识,液压元件与气动元件的工作原理、结构特点、使用和维护,液压基本回路与气动基本回路及其在典型设备上的应用,液压系统和气动系统的使用、维护、常见故障及其排除方法。

本书编写以培养高技能人才为目标,自始至终贯彻职业教育的定向性、实用性和先进性原则,努力减少对理论知识与计算公式的推导,突出应用能力和综合素质的培养,注意教、学、做相结合。

本书可作为高职高专院校、成人高校、民办高校及本科学校的职业技术学院机械类、近机械类专业的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/李海金,辛连学主编. —北京:北京
航空航天大学出版社, 2008. 2

ISBN 978 - 7 - 81124 - 131 - 0

I. 液… II. ①李…②辛… III. ①液压传动②气动技术
IV. TH137 TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 020965 号

液 压 与 气 动 技 术

主 编 李海金 辛连学

副主编 辛 莉 汤建鑫

主 审 赵克定

责任编辑:韩文礼

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:13.25 字数:339 千字

2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978 - 7 - 81124 - 131 - 0 定价:22.00 元

前 言

高等职业教育是高等教育的一个类型,其培养的是生产、建设、服务和管理第一线需要的高技能人才。在高等职业教育教学过程中特别注重学生职业技能的训练、职业岗位能力的培养。因而本书在编写过程中注重教材实用性、新颖性和通用性,教材的内容易懂、实用,反映了当今企业的生产和技术应用状况及发展趋势,更有利于学生技能的培养。本书特点如下:

1. 在内容编写上,理论知识方面以实用为主,够用为度,摒弃冗长的理论公式推导,着重定性分析;在液压与气动元件方面注重工作原理、构造、使用维修;在液压与气动系统方面注重典型性、实用性和先进性,突出实用技术的应用。

2. 部分章节后面安排了技能训练,突出培养学生的动手操作能力,使学生在学习知识和技能训练的过程中,初步形成解决液压与气压系统实际问题的综合职业能力和自学能力,也使得教、学、做三结合。

3. 在编写过程中参考了相关行业的职业技能鉴定规范和大量液压与气动方面的资料,吸收液压与气压领域中的新知识、新技术、新方法,内容新颖、适用。

4. 为了保持知识的完整性,液压传动和气动分两个独立部分进行编写,便于各校根据学生的专业情况进行选用。

本教材共分 13 章,前 10 章为液压部分,后 3 章为气动部分,书后有附录,可查找相关标准。

本教材由黑龙江农业工程职业学院李海金、辛连学任主编,黑龙江农业职业技术学院辛莉、嘉兴职业技术学院汤建鑫任副主编。大连水产学院职业技术学院的刘文萍、天津农学院职业技术学院的王秀芝、北京农业职业学院的王丽君也参与了编写。具体编写分工如下:李海金

编写第 1、2 章,辛连学编写第 9、13 章及附录,辛莉编写第 5 章,汤建鑫编写第 11、12 章,刘文萍编写第 4、8、10 章,王秀芝编写第 3、6 章,王丽君编写第 7 章。

本书由哈尔滨工业大学赵克定教授主审,提出了许多宝贵的修改意见,在此深表感谢,对在本书编写中给予支持和帮助的有关同志一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中若有不足之处,恳请读者批评指正,以便进一步修改完善。

编 者

2008 年 1 月

目 录

第 1 章 液压传动概述	1
1.1 液压传动系统的工作原理及组成	1
1.1.1 液压传动系统的工作原理	1
1.1.2 液压传动系统的组成	2
1.1.3 液压传动系统的图形符号	3
1.2 液压传动的特点与应用	4
1.2.1 液压传动的优点	4
1.2.2 液压传动的缺点	5
1.2.3 液压传动的应用	5
1.3 思考练习题	6
第 2 章 液压传动基础知识	7
2.1 液压油	7
2.1.1 液压油的性质	7
2.1.2 液压油的种类	9
2.1.3 液压油的选用	10
2.1.4 液压油的使用与维护	11
2.2 流 量	12
2.2.1 基本概念	12
2.2.2 液流连续性方程	13
2.2.3 孔口流量	13
2.2.4 缝隙流量	13
2.3 压 力	15
2.3.1 压力的概念及其特性	15
2.3.2 压力的表示方法	15
2.3.3 压力的传递	16
2.3.4 静止液体在固体表面上的作用力	16
2.3.5 伯努利方程	17
2.3.6 压力损失	18
2.4 液压冲击和气穴现象	19
2.4.1 液压冲击	19
2.4.2 气穴现象	20
2.5 思考练习题	20

第 3 章 液压动力元件	23
3.1 液压泵概述	23
3.1.1 液压泵的用途和分类	23
3.1.2 液压泵的工作原理	23
3.1.3 液压泵的性能参数	24
3.2 齿轮泵	26
3.2.1 齿轮泵的特点	26
3.2.2 外啮合齿轮泵	26
3.2.3 内啮合齿轮泵	30
3.2.4 双联齿轮泵	31
3.2.5 齿轮泵的使用与维修	31
3.3 柱塞泵	33
3.3.1 斜盘式轴向柱塞泵	33
3.3.2 斜轴式轴向柱塞泵	36
3.3.3 径向柱塞泵	37
3.3.4 柱塞泵的使用与维修	38
3.4 叶片泵	40
3.4.1 单作用叶片泵	40
3.4.2 双作用叶片泵	42
3.4.3 叶片泵的常见故障及排除方法	45
3.5 各类液压泵的性能比较及选用	46
3.5.1 各类液压泵的性能比较	46
3.5.2 液压泵的选用	47
3.6 技能训练 齿轮泵的拆装	47
3.7 思考练习题	48
第 4 章 液压执行元件	50
4.1 液压缸的类型和特点	50
4.1.1 活塞式液压缸	50
4.1.2 柱塞式液压缸	52
4.1.3 摆动式液压缸	53
4.1.4 其他液压缸	54
4.2 液压缸的结构	55
4.2.1 缸筒组件	55
4.2.2 活塞组件	56
4.2.3 密封装置	57
4.2.4 缓冲装置	59
4.2.5 排气装置	61

4.3 液压缸使用与维修	61
4.3.1 活塞式液压缸的使用	61
4.3.2 液压缸的常见故障及排除方法	61
4.4 液压马达	62
4.4.1 高速液压马达	63
4.4.2 低速大转矩液压马达	65
4.5 技能训练 液压缸的拆装	66
4.6 思考练习题	66
第5章 液压控制元件	68
5.1 方向控制阀	68
5.1.1 单向阀	69
5.1.2 换向阀	70
5.1.3 滑阀式换向阀的常见故障	75
5.2 压力控制阀	76
5.2.1 溢流阀	76
5.2.2 减压阀	78
5.2.3 顺序阀	78
5.2.4 压力继电器	79
5.2.5 压力控制阀的常见故障及排除方法	80
5.3 流量控制阀	81
5.3.1 节流阀	81
5.3.2 调速阀	82
5.3.3 分流集流阀	83
5.3.4 流量控制阀的常见故障及排除方法	84
5.4 新型液压控制元件	84
5.4.1 插装阀(插装式锥阀或逻辑阀)	84
5.4.2 叠加阀	87
5.4.3 电液比例控制阀	88
5.4.4 电液数字控制阀(简称数字阀)	88
5.5 技能训练 液压阀的拆装	89
5.6 思考练习题	91
第6章 液压辅助元件	93
6.1 蓄能器	93
6.1.1 蓄能器的作用	93
6.1.2 蓄能器的结构和性能	93
6.1.3 蓄能器的安装与使用	94
6.2 滤油器	95

6.2.1 滤油器的功用及过滤精度	95
6.2.2 滤油器的类型及结构	95
6.2.3 滤油器的安装	97
6.3 油管及管接头	98
6.3.1 油管	98
6.3.2 管接头	98
6.4 油箱	99
6.4.1 油箱的作用	99
6.4.2 油箱的结构	100
6.5 压力表及压力表开关	101
6.5.1 压力表	101
6.5.2 压力表开关	102
6.6 思考练习题	102
第7章 液压基本回路	103
7.1 压力控制回路	103
7.1.1 调压回路	103
7.1.2 卸荷回路	105
7.1.3 减压回路	106
7.1.4 增压回路	107
7.1.5 保压回路	107
7.1.6 平衡回路	109
7.2 速度控制回路	110
7.2.1 调速回路	110
7.2.2 增速回路	112
7.2.3 速度换接回路	114
7.3 方向控制回路	116
7.3.1 换向回路	116
7.3.2 制动回路	117
7.3.3 锁紧回路	118
7.4 多缸工作控制回路	118
7.4.1 顺序动作回路	119
7.4.2 多缸同步回路	120
7.4.3 互不干扰回路	122
7.4.4 互锁回路	123
7.5 技能训练 液压基本回路的安装与调试	124
7.6 思考练习题	124
第8章 典型液压传动系统	127
8.1 汽车起重机液压系统	127

8.1.1 概 述	127
8.1.2 液压系统的工作原理	128
8.1.3 系统的主要特点	130
8.2 组合机床动力滑台液压系统	130
8.2.1 概 述	130
8.2.2 液压系统的工作原理	131
8.2.3 液压系统的特点	132
8.3 数控车床液压系统	133
8.3.1 概 述	133
8.3.2 液压系统的工作原理	134
8.3.3 液压系统的特点	135
8.4 液压机液压系统	135
8.4.1 概 述	135
8.4.2 YA32-200 型四柱万能液压机液压系统	135
8.4.3 YA32-200 型四柱万能液压机液压系统的特点	137
8.5 思考练习题	138
第 9 章 液压伺服系统	139
9.1 液压伺服系统概述	139
9.1.1 液压伺服系统控制原理	139
9.1.2 液压伺服系统的基本特点	140
9.1.3 液压伺服系统的分类	140
9.1.4 液压伺服系统的优缺点	141
9.2 液压伺服系统实例	141
9.2.1 车床液压仿形刀架	141
9.2.2 机械手伸缩运动伺服系统	142
9.2.3 液压转向助力器	143
9.3 思考练习题	144
第 10 章 液压系统的使用与维护	145
10.1 液压系统的正确使用	145
10.1.1 调 试	145
10.1.2 正确使用	146
10.2 液压系统常见故障分析及排除	148
10.2.1 液压系统故障的特点	148
10.2.2 液压系统故障分析的一般方法	148
10.2.3 处理液压故障的步骤	150
10.2.4 液压系统常见的故障诊断及排除方法	151
10.3 思考练习题	152

第 11 章 气压传动概述	153
11.1 气压传动系统的工作原理及组成	153
11.1.1 气压传动系统的工作原理	153
11.1.2 气压传动系统的组成	154
11.2 气压传动的特点	154
11.2.1 气压传动的优点	154
11.2.2 气压传动的缺点	154
11.3 空气的基本性质	155
11.3.1 空气的特性	155
11.3.2 空气的质量等级	155
11.4 思考练习题	156
第 12 章 气动元件	157
12.1 气源装置	157
12.1.1 空气压缩机	157
12.1.2 气源净化装置	158
12.2 辅助元件	160
12.2.1 油雾器	160
12.2.2 消声器	161
12.3 气动执行元件	162
12.3.1 气 缸	162
12.3.2 气动马达	165
12.4 气动控制元件	165
12.4.1 方向控制阀	166
12.4.2 压力控制阀	168
12.4.3 流量控制阀	170
12.5 气动逻辑元件	171
12.5.1 “是门”和“与门”元件	171
12.5.2 “或门”元件	171
12.5.3 “非门”与“禁门”元件	171
12.5.4 “或非”元件	172
12.5.5 “双稳”记忆元件	172
12.6 技能训练 气动元件拆装与结构观察	173
12.7 思考练习题	174
第 13 章 气动基本回路及应用实例	177
13.1 气动基本回路	177
13.1.1 方向控制回路	177

13.1.2 压力控制回路.....	178
13.1.3 速度控制回路.....	179
13.1.4 位置控制回路.....	181
13.1.5 往复动作回路.....	181
13.1.6 安全保护回路.....	182
13.2 气压传动应用举例.....	183
13.2.1 工件夹紧气压传动系统.....	183
13.2.2 数控加工中心气动换刀系统.....	184
13.2.3 公共汽车车门气压传动系统.....	184
13.3 气动系统的使用与维护.....	185
13.3.1 气动系统的使用.....	185
13.3.2 气动系统的维护.....	186
13.3.3 气动系统常见故障原因与排除方法.....	187
13.4 技能训练 气动基本回路的安装与调试.....	191
13.5 思考与练习题.....	192
附录 常用液压与气动元件图形符号.....	194
参考文献.....	198

第 1 章 液压传动概述

一部完整的机器一般是由原动机、传动部分、控制部分和工作机构等组成。传动部分只是一个中间环节,其作用是把原动机(电动机、内燃机等)输出的动力传送给工作机构。传动有多种方式,如机械传动、电力传动、气压传动、液体传动以及它们的组合——复合传动等。

机械传动:通过轴、齿轮、齿条、蜗轮蜗杆、皮带、链条和杠杆等机械零件直接传递动力和进行控制的一种传动方式,它是发明最早且应用最为普遍的传动方式。

电力传动:利用电力设备并调节各种参数来传递动力和进行控制的一种传动方式。

气压传动:以压缩空气为工作介质,进行能量传递和控制的一种传动方式。

液体传动:以液体为工作介质进行能量传递和控制的一种传动方式。在液体传动中,根据其能量传递形式不同,又分为液压传动和液力传动。液力传动主要是利用液体动能进行能量转换的传动方式,如液力耦合器和液力变矩器。液压传动是利用液体压力能进行能量转换的传动方式。在机械上采用液压传动技术,可以简化机器的结构,减轻机器质量,减少材料消耗,降低制造成本,减轻劳动强度,提高工作效率和工作的可靠性。

1.1 液压传动系统的工作原理及组成

1.1.1 液压传动系统的工作原理

人们常常使用一种小巧的起重工具——液压千斤顶,它是一个简单的液压传动系统。图 1-1 是该液压系统的工作原理示意图。工作时,当人将手柄 8 向上扳动时,连杆带动小柱塞 7 向上移动,小液缸下腔形成真空,储存在油箱 2 内的油经过油道 c 和单向阀 6 吸入此腔;当手柄 8 被压下时,小柱塞向下移动,小液缸下腔的油经油道 b 和单向阀 3 压入大液缸下腔(此时单向阀 6 关闭),迫使大柱塞 1 上升,顶起重物。这样,手柄不断上下往复扳动,就能不断地把油箱 2 中的油压入大液缸下腔,使大活塞顶着重物慢慢上升。单向阀 3 的作用是保证进入大液缸的油不能倒流,从而使重物保持在上升位置。若要使重物降下,可拧开放油螺塞 5,使大液缸内的油经油道 a 和单向阀 4 回到油箱 2,使大柱塞下降,控制放油口的大小,就可以控制重物下降的速度。小液缸的主要作用是通过不断地完成吸油和压油的动作,将人所做的功转换为

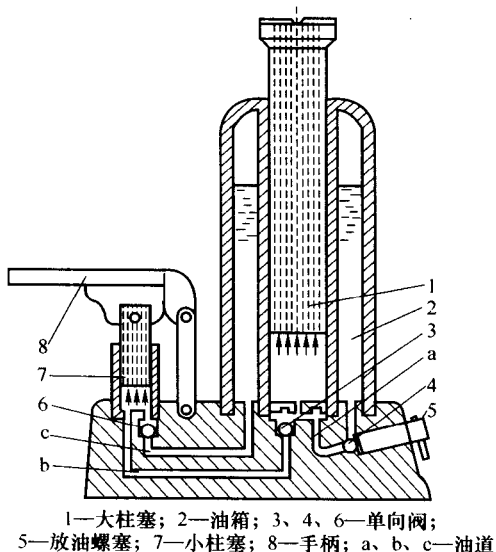


图 1-1 液压千斤顶工作原理示意图

油液的液压能,实际上它是一个手动柱塞泵;而大液压缸的作用则是将油液的液压能转化为顶升重物的机械能,它相当于一个柱塞式液压缸。

由上述液压千斤顶的工作过程,可以看出液压千斤顶的正常工作需要三个条件:一是必须具有液体(液压油);二是处于密封容器内的液体(液压油)由于工作容积的变化而能够流动;三是液体(液压油)具有压力。流动并具有一定压力的液体能做功,它具有压力能。

通过对液压千斤顶工作过程的分析,使我们对液压传动的基本工作原理有了一个初步的了解。所谓液压传动就是指在密封容积内,利用液体的压力能来传递动力和运动的一种传动方式。它先将机械能转换为便于输送的液体压力能,再将液体压力能转换为机械能对外做功。

1.1.2 液压传动系统的组成

图 1-2 表示一驱动机床工作台的液压传动系统,这个液压传动系统比千斤顶液压系统复杂得多,其可使工作机构作直线往复运动、克服各种阻力和调节工作机构的运动速度。我们可以通过它进一步了解一般液压传动的工作原理和液压传动系统的基本组成。

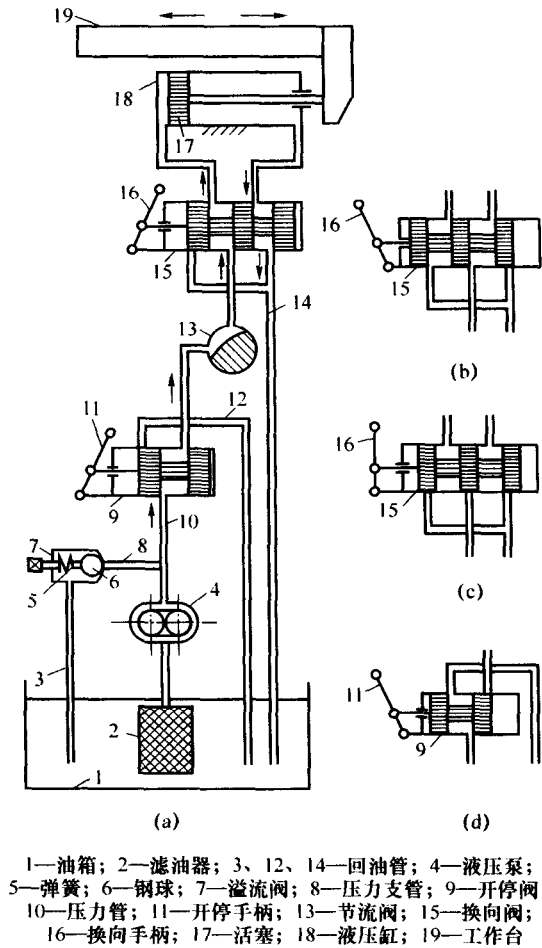


图 1-2 机床工作台液压传动系统的工作原理图

在图 1-2(a)中,液压泵 4 由电动机(图中未示出)驱动旋转,从油箱 1 中吸油。油液经滤油器 2 进入液压泵 4,当它从液压泵输出进入压力管 10 后,通过开停阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 左腔,推动活塞 17 和工作台 19 向右移动。这时,液压缸 18 右腔的油经换向阀 15 和回油管 14 回油箱。

如果将换向手柄 16 转换成图 1-2(b)所示的状态,则压力管 10 中的油经过开停阀 9、节流阀 13 和换向阀 15 进入液压缸 18 右腔,推动活塞 17 和工作台 19 向左移动,并使液压缸左腔的油经换向阀 15 和回油管 14 回油箱。

工作台 19 的移动速度是由节流阀 13 来调节的。当节流阀口开大时,进入液压缸 18 的油液增多,工作台的移动速度增大;当节流阀口关小时,工作台的移动速度减小。

如果将换向阀手柄 16 转换成图 1-2(c)所示的状态,压力管中的油液经溢流阀 7 和回油管 3 回油箱,不输到液压缸中去,工作台停止运动,而液压系统保持溢流阀调定的压力。

如果将开停手柄 11 转换成图 1-2(d)所示的状态,压力管中的油液将经开停阀 9 和回油管 12 回油箱,不输到液压缸中去,工作台也停止运动,但液压系统卸荷。

液压传动系统中的能量转换和传递情况见图 1-3。

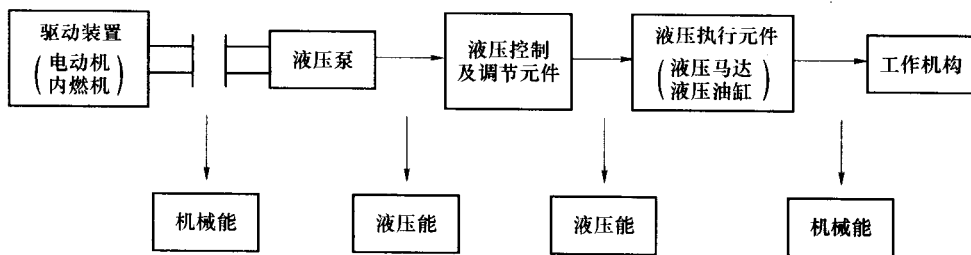


图 1-3 液压传动系统中的能量转换和传递图

从液压千斤顶和机床工作台液压传动系统的工作过程可以看出,液压传动系统若能正常工作必须由以下五部分组成:

(1) 动力元件 动力元件指液压泵,它是将原动机输入的机械能转换成油液压力能的能量转换装置,其作用是给液压系统提供压力油,是液压系统的动力源。

(2) 执行元件 执行元件指液压缸或液压马达,它是将油液压力能转换为机械能的能量转换装置,其作用是在压力油的推动下输出力和速度(或转矩和转速),以驱动工作机构。

(3) 控制元件 控制元件指各种液压阀,如换向阀、节流阀、溢流阀等,其作用是用来控制或调节液压系统中油液流动方向、压力和流量,以保证液压执行元件和工作机构完成指定工作。

(4) 辅助元件 辅助元件指油箱、蓄能器、油管、管接头、过滤器、压力表以及流量计等,这些元件起贮油、蓄能、输油、连接、过滤、测量压力和测量流量等作用,对保证液压系统正常工作有着重要的作用。

(5) 工作介质 工作介质指传动液体,通常被称为液压油。它在液压传动及控制中主要起传递动力和信号的作用。

1.1.3 液压传动系统的图形符号

在图 1-2 中,组成液压传动系统的各个元件是用半结构式图形画出来的。这种图形

直观性强,容易理解,但绘制起来比较麻烦,特别是在液压传动系统中的液压元件数量比较

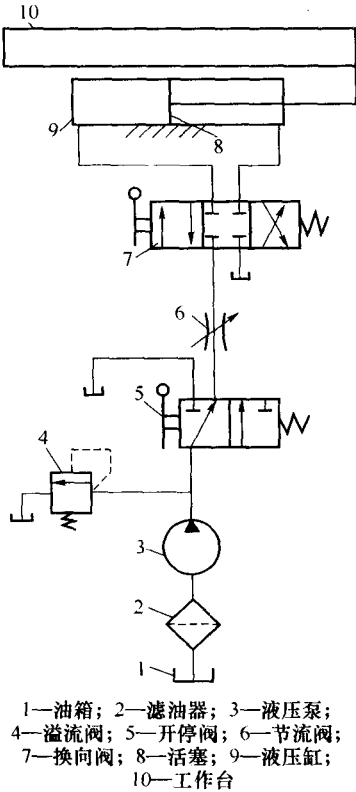


图 1-4 机床工作台液压传动系统的

工作原理图(用图形符号表达)

时,符号的大小应以清晰美观为原则,绘制时可根据图纸幅面的大小酌情处理,但应保持图形本身的适当比例。

多时更是如此。所以,在工程实际中,除某些特殊情况外,一般都是用简单的图形符号来绘制液压传动系统原理图。对图1-2所示的液压传动系统,其系统原理图如果用国家标准 GB/T 786.1—93 所规定的液压图形符号绘制时,如图 1-4 所示。在这里,图中的符号只表示元件的功能、操作(控制)方法及外部连接口,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。在绘制液压元件的图形符号时,除非特别说明,图中所示状态均表示元件的静止位置或零位置,并且除特别注明的符号或有方向性的元件符号外,它们在图中可根据具体情况作水平或垂直绘制。使用这些图形符号后,可使液压传动系统图简单明了,便于绘制。当有些液压元件无法用图形符号表达或在国家标准中未列入时,可根据标准中规定的符号绘制规则和所给出的符号进行派生。当无法用标准直接引用或派生时,或有必要特别说明系统中某一元(辅)件的结构和工作原理时,可采用局部结构简图或采用它们的结构或半结构示意图表示。在用图形符号来绘制液压传动系统原理图

1.2 液压传动的特点与应用

1.2.1 液压传动的优点

液压传动被广泛地应用于各行各业之中,是因为它与其他传动方式相比有以下一些主要优点:

(1) 在同等体积下,液压装置能产生出更大的动力,也就是说,在同等功率下,液压装置的体积小、质量轻、结构紧凑。液压传动采用高压时,能输出很大的力或力矩,可实现低速大吨位传动,这是其他传动方式所不能比的突出优点。

(2) 液压装置容易做到对速度的无级调节,调速范围大,而且对速度的调节还可以在工作过程中进行。

(3) 液压装置工作平稳,换向冲击小,便于实现频繁换向。

(4) 液压装置易于实现过载保护,能实现自润滑,使用寿命长。

(5) 液压装置易于实现自动化,可以很方便地对液体的流动方向、压力和流量进行调节和

控制,并能很容易地和电气、电子控制或气动控制结合起来,实现复杂的运动、操作。

(6) 液压元件易于实现系列化、标准化和通用化,便于设计、制造和推广使用。

1.2.2 液压传动的缺点

(1) 液压传动中的泄漏和液体的可压缩性使这种传动无法保证严格的传动比,故液压传动系统在对传动比要求比较严格的情况下不宜使用。

(2) 液压传动中能量损失(泄漏损失、溢流损失、节流损失、摩擦损失等)较大,传动效率相对较低,不宜作远距离传动。

(3) 液压传动对油温的变化比较敏感,不宜在较高或较低的温度下工作。

(4) 为减少泄漏,液压元件的制造和装配精度要求较高,因此液压元件及液压设备的造价较高。

(5) 当液压系统出现故障时,不易找出故障原因。

1.2.3 液压传动的应用

液压传动相对于机械传动来说是一门新学科。但相对于计算机等新技术,它又是一门较老的技术。如果从17世纪中叶帕斯卡提出静压传动原理、18世纪末英国制成第一台水压机算起,液压传动已有二三百年的历史。只是由于在早期还没有成熟的液压传动技术和液压元件,而使它没有得到普遍的应用。随着科学技术的不断发展,各行各业对传动技术有了不断的要求,特别是第二次世界大战后,液压传动才被广泛地应用起来。主要应用如下:

(1) 一般工业用液压系统 塑料加工机械(注塑机)、压力机械(锻压机)、重型机械(废钢压块机)、机床(全自动六角车床、平面磨床)等。

(2) 行走机械用液压系统 工程机械(挖掘机)、起重机械(汽车吊)、建筑机械(打桩机)、农业机械(联合收割机)、汽车(转向器、减振器)等。

(3) 钢铁工业用液压系统 冶金机械(轧钢机)、提升装置(电极升降机)、轧辊调整装置等。

(4) 土木工程用液压系统 防洪闸门及堤坝装置(浪潮防护挡板)、河床升降装置、桥梁操纵机构和矿山机械(凿岩机)等。

(5) 发电厂用液压系统 涡轮机(调速装置)、核发电厂等。

(6) 特殊技术用液压系统 巨型天线控制装置、测量浮标、飞机起落架的收放装置及方向舵控制装置、升降旋转舞台等。

(7) 船舶用液压系统 甲板起重机械(绞车)、船头门、舱壁阀、船尾推进器等。

(8) 军事工业用液压系统 火炮操纵装置、舰船减摇装置、飞行器仿真等。

上述说明不包括所有应用的可能性。目前,液压传动技术在实现高压、高速、大功率、高效率、低噪声、长寿命、高度集成化等方面都取得了很大的进展。同时,由于它与微电子技术密切配合,能在尽可能小的空间内传递出尽可能大的功率并加以准确地控制,从而使得它在各行各业中发挥出了巨大作用。