

普通高等教育规划教材

液压与气压 传动控制技术

张喜瑞 主编

张国健 文伟 副主编

YEYA YU QIYA CHUANDONG KONGZHI JISHU



化学工业出版社



普通高等教育规划教材

液压与气压传动控制技术

张喜瑞 主编
张国健 文 伟 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了机械类各专业通用的液压与气压控制技术的基本内容,为了适应拓宽专业面的需要,在教材中吸收了一些汽车液压和液力传动的拓展内容,为相关专业学生直接服务社会打下良好基础。书中内容包括液压泵和液压马达、液压缸、液压辅助元件、方向控制阀、压力控制阀、流量控制阀、液压基本回路、典型液压系统及实例、气压传动等,注重理论与实践的有机结合,图文并茂。

本书可以作为高等院校机械类或近机械类专业的有关液压与气压传动及控制内容的教材和教学参考书,也可以供高等职业院校和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动控制技术/张喜瑞主编. —北京:化学工业出版社, 2016. 8

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-27604-9

I. ①液… II. ①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. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第158874号

责任编辑:韩庆利

文字编辑:张燕文

责任校对:王素芹

装帧设计:关飞

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)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张12 $\frac{3}{4}$ 字数307千字 2016年11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: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书根据机械类本科专业教学大纲编写，可以作为高等院校机械类或近机械类专业的有关液压与气压传动及控制内容的教材和教学参考书，也可以供高等职业院校和工程技术人员参考。

该教材注重理论与实践的有机结合，在内容上介绍以机械类各专业通用的液压与气压控制技术的基本内容，为了适应拓宽专业面的需要，在教材中吸收了一些汽车液压和液力传动的拓展内容，为相关专业学生直接服务社会打下良好基础。

本书共 11 章，由海南大学张喜瑞任主编，副主编为海南省锅炉压力容器与特种设备检验所张国健、海南大学文伟，参编为海南省技师学院钟海健、海南大学王文、中国热带农业科学院科技信息研究所李媛；由海南大学梁栋、李粤负责本书审稿工作。

本书编写分工为：张喜瑞编写第 2 章、第 4~6 章；文伟编写第 9~11 章；张国健编写第 1 章；钟海健编写第 3 章；王文编写第 7 章；李媛编写第 8 章及负责插图绘制。统稿工作由主编和副主编共同完成。

在本书编写过程中，得到了海南大学林妙山副教授、中国热带农业科学院科技信息研究所李媛及海南省锅炉压力容器与特种设备检验所技术人员、海南省技师学院相关老师的支持与帮助，我们在此表示衷心感谢。

本书为海南大学 2016 年度自编教材资助项目（项目编号：Hdzbjc1607）。

由于水平有限，不妥之处在所难免，竭诚希望广大读者批评指正。

编者

目 录

1 液压传动概述	1
1.1 液压传动定义与发展概况	1
1.1.1 液压传动的定义	1
1.1.2 液压传动的发展概况	1
1.2 液压传动的工作原理及系统构成	2
1.2.1 液压传动系统的工作原理	2
1.2.2 液压传动系统的组成	3
1.2.3 液压系统的图形符号	3
1.3 液压传动的优缺点	4
1.3.1 液压传动系统的主要优点	4
1.3.2 液压传动系统的主要缺点	4
1.4 液压传动的工作介质	4
1.4.1 液压系统对工作介质的要求	4
1.4.2 液压工作介质的种类	5
习题	7
2 液压泵和液压马达	8
2.1 液压泵、液压马达概述	8
2.1.1 容积泵、马达的工作原理	8
2.1.2 液压泵、液压马达的基本性能参数	9
2.2 齿轮泵	10
2.2.1 外啮合齿轮泵的结构及工作原理	10
2.2.2 齿轮泵的流量和脉动率	11
2.2.3 齿轮泵的结构特点	11
2.2.4 内啮合齿轮泵的结构及工作原理	13
2.3 叶片泵	14
2.3.1 单作用叶片泵	14
2.3.2 双作用叶片泵	17

2.3.3 单作用叶片泵与双作用叶片泵的特点比较·····	21
2.4 柱塞泵 ·····	21
2.4.1 斜盘式轴向柱塞泵·····	22
2.4.2 斜轴式轴向柱塞泵·····	23
2.4.3 径向柱塞泵·····	24
2.5 液压马达 ·····	25
2.5.1 液压马达的主要性能参数·····	25
2.5.2 高速液压马达·····	26
2.5.3 低速大扭矩液压马达·····	27
2.6 液压泵及液压马达的工作特点 ·····	30
2.6.1 液压泵的工作特点·····	30
2.6.2 液压马达的工作特点·····	30
小结 ·····	30
习题 ·····	31
3 液压缸 ·····	32
3.1 液压缸的类型及特点 ·····	32
3.1.1 活塞式液压缸·····	32
3.1.2 柱塞式液压缸·····	34
3.1.3 摆动式液压缸·····	35
3.1.4 伸缩式液压缸·····	36
3.1.5 齿条活塞液压缸·····	36
3.2 液压缸的设计计算 ·····	36
3.2.1 液压缸工作压力的确定·····	37
3.2.2 液压缸主要尺寸的确定·····	37
3.2.3 液压缸的校核·····	38
3.3 液压缸的结构设计 ·····	38
3.3.1 液压缸的典型结构·····	38
3.3.2 缸筒与端盖的连接·····	39
3.3.3 活塞组件·····	40
3.3.4 缓冲装置·····	42
3.3.5 排气装置·····	42
小结 ·····	43
习题 ·····	43
4 液压辅助元件 ·····	44
4.1 滤油器 ·····	44

4.1.1	对过滤器的要求	44
4.1.2	过滤器的类型及特点	44
4.1.3	过滤器的安装	45
4.2	蓄能器	46
4.2.1	蓄能器的作用	46
4.2.2	蓄能器的结构形式	46
4.2.3	蓄能器的容量计算	48
4.3	油箱	49
4.3.1	油箱的基本功能	49
4.3.2	油箱的容积与结构	49
4.4	管件	50
4.4.1	管道	50
4.4.2	管接头	51
4.5	热交换器	52
4.5.1	冷却器	52
4.5.2	加热器	52
	小结	53
	习题	53
5	方向控制阀	54
5.1	阀口特性与阀芯的运动阻力	54
5.1.1	阀口流量公式及流量系数	54
5.1.2	节流边与液压桥路	55
5.1.3	阀芯驱动与阀芯运动阻力	58
5.2	单向阀	61
5.2.1	普通单向阀	61
5.2.2	液控单向阀	62
5.3	换向阀	63
5.3.1	换向机能	64
5.3.2	换向阀的操纵方式	66
5.3.3	电磁球式换向阀	71
5.4	方向阀在换向与锁紧回路中的应用	72
5.4.1	换向回路	72
5.4.2	锁紧回路	74
5.5	液压阀的连接方式	74
	小结	76
	习题	76

6 压力控制阀	78
6.1 压力的调节与控制	78
6.1.1 调压原理	78
6.1.2 压力负反馈	79
6.1.3 先导控制	81
6.2 溢流阀	83
6.2.1 直动型溢流阀	83
6.2.2 先导型溢流阀	84
6.2.3 电磁溢流阀	88
6.2.4 溢流阀静态特性与动态特性	89
6.3 减压阀	91
6.3.1 先导级由减压出口供油的减压阀	91
6.3.2 先导级由减压进口供油的减压阀	93
6.4 顺序阀	95
6.4.1 直动型顺序阀	95
6.4.2 先导型顺序阀	96
6.5 压力继电器	98
6.6 压力阀在调压与减压回路中的应用	99
6.6.1 调压回路	99
6.6.2 减压回路	101
小结	102
习题	102
7 流量控制阀	104
7.1 节流口的流量特性	104
7.1.1 节流口的流量特性公式	104
7.1.2 影响流量稳定性的因素	104
7.1.3 节流口的形式与特征	106
7.2 流量负反馈	107
7.2.1 流量的压差法测量与反馈	107
7.2.2 流量的位移法测量与反馈	108
7.3 节流阀	109
7.3.1 节流阀	110
7.3.2 单向节流阀	110
7.4 调速阀	112
7.4.1 串联减压式调速阀的工作原理	112

7.4.2	温度补偿调速阀	113
7.4.3	溢流节流阀	113
7.5	分流阀	114
7.5.1	分流阀	115
7.5.2	集流阀	116
7.5.3	分流集流阀	116
7.5.4	分流阀精度及影响分流阀精度的因素	116
7.6	插装阀、比例阀、伺服阀	117
7.6.1	插装阀	117
7.6.2	电液比例阀	120
7.6.3	电液伺服阀	122
小结	126
习题	127
8	液压基本回路	128
8.1	快速运动回路	128
8.1.1	液压缸差动连接的快速运动回路	128
8.1.2	双泵供油的快速运动回路	129
8.2	调速回路	129
8.2.1	调速方法简介	129
8.2.2	采用节流阀的节流调速回路	130
8.2.3	容积调速回路	133
8.3	同步回路	135
8.3.1	液压缸机械连接的同步回路	136
8.3.2	采用调速阀的同步回路	136
8.3.3	用串联液压缸的同步回路	136
8.4	顺序回路	137
8.4.1	行程控制顺序回路	137
8.4.2	压力控制顺序回路	138
8.5	平衡回路	139
8.5.1	采用单向顺序阀的平衡回路	139
8.5.2	采用液控单向阀的平衡回路	139
8.6	卸荷回路	140
8.6.1	执行元件不需保压的卸荷回路	140
8.6.2	执行元件需要保压的卸荷回路	140
小结	141
习题	141

9 典型液压系统及实例	143
9.1 组合机床动力滑台液压系统	143
9.2 液压机液压系统	146
9.3 汽车起重机液压系统	149
9.4 电弧炼钢炉液压传动系统	151
小结	153
习题	153
10 液压传动系统的设计和计算	155
10.1 液压传动系统的设计步骤	155
10.1.1 明确设计要求、工作环境,进行工况分析	155
10.1.2 液压系统原理图的拟定	156
10.1.3 液压元件的计算和选择	157
10.1.4 液压系统技术性能的验算	160
10.1.5 绘制正式工作图和编制技术文件	161
10.2 液压系统设计举例	161
10.2.1 确定对液压系统的工作要求	161
10.2.2 拟定液压系统工作原理图	162
10.2.3 计算和选择液压元件	162
习题	166
11 气压传动	167
11.1 气压传动概述	167
11.1.1 气压传动的组成及工作原理	167
11.1.2 气压传动的优缺点	167
11.2 气源装置及辅件	168
11.2.1 气源装置	168
11.2.2 气动辅助元件	169
11.3 气动执行元件	174
11.3.1 气缸	174
11.3.2 气马达	176
11.4 气动控制元件	178
11.4.1 压力控制阀	178
11.4.2 流量控制阀	180

11.4.3 方向控制阀.....	182
11.5 气动回路举例	188
小结	191
习题	191
参考文献.....	192

1

液压传动概述

1.1 液压传动定义与发展概况

1.1.1 液压传动的定义

一部完整的机器是由原动机、传动机构及控制部分、工作机（含辅助装置）组成的。原动机包括电动机、内燃机等。工作机即完成该机器的工作任务是直接工作部分，如剪床的剪刀，车床的刀架、车刀、卡盘等。由于原动机的功率和转速变化范围有限，为了适应工作机的工作力和工作速度变化，以及其他操纵性能的要求，在原动机和工作机之间设置了传动机构，其作用是把原动机输出的功率经过变换后传递给工作机。

传动机构通常分为机械传动机构、电气传动机构和流体传动机构。流体传动是以流体为工作介质进行能量转换、传递和控制的传动。它包括液压传动、液力传动和气压传动。

液压传动和液力传动均是以液体作为工作介质来进行能量传递的传动方式。液压传动主要是利用液体的压力能来传递能量；而液力传动则主要是利用液体的动能来传递能量。由于液压传动有许多突出的优点，因此它被广泛地应用于机械制造、工程建设、石油化工、交通运输、军事器械、矿山冶金、轻工、农机、渔业、林业等各方面。同时，也被应用到航空航天、海洋开发、核能工程和地震预测等各个工程技术领域。

1.1.2 液压传动的发展概况

液压传动相对于机械传动来说，是一门新学科，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，液压传动已有几百年的历史，只是由于早期技术水平和生产需求的不足，液压传动技术没有得到普遍应用。随着科学技术的不断发展，对传动技术的要求越来越高，液压传动技术自身也在不断发展，特别是在第二次世界大战期间及战后，由于军事及建设需求的刺激，液压技术日趋成熟。第二次世界大战前后，成功地将液压传动装置用于舰艇炮塔转向器，其后出现了液压六角车床和磨床，一些通用机床到20世纪30年代才用上了液压传动。第二次世界大战期间，在兵器上采用了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置，它大大提高了兵器的性能，也大大促进了液压技术的发展。战后，液压技术迅速转向民用，并随着各种标准的不断制定和完善及各类元件的标准化、规格化、系列化而在机械制造、工程机械、农业机械、汽车制造等行业中推广开来。近30年来，由于原子能技术、航空航天技术、控制技术、材料科学、微电子技术等学科的发展，再次使液压技术向前迈进，使它发展成为包括传动、控制、检测在内的一门完整的自动化技术，在国民经济的许多领域都得到了应用，如工程机械、数控加工中心、冶金自动线等。采用液压传动的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。

1.2 液压传动的工作原理及系统构成

1.2.1 液压传动系统的工作原理

图 1.1 所示为磨床工作台液压传动系统工作原理。液压泵 4 在电动机（图中未画出）的带动下旋转，油液由油箱 1 经过滤器 2 被吸入液压泵，由液压泵输入的压力油通过手动换向阀 11、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 的左腔，推动活塞 17 和工作台 19 向右移动，液压缸 18 右腔的油液经换向阀 15 排回油箱。如果将换向阀 15 转换成如图 1.1(b) 所示的状态，则压力油进入液压缸 18 的右腔，推动活塞 17 和工作台 19 向左移动，液压缸 18 左腔的油液经换向阀 15 排回油箱。工作台 19 的移动速度由节流阀 13 来调节。当节流阀开大时，进入液压缸 18 的油液增多，工作台的移动速度增大；当节流阀关小时，工作台的移动速度减小。液压泵 4 输出的压力油除了进入节流阀 13 以外，其余的打开溢流阀 7 流回油箱。如果将手动换向阀 9 转换成如图 1.1(c) 所示的状态，液压泵输出的油液经手动换向阀 9 流回油箱，这时工作台停止运动，液压系统处于卸荷状态。

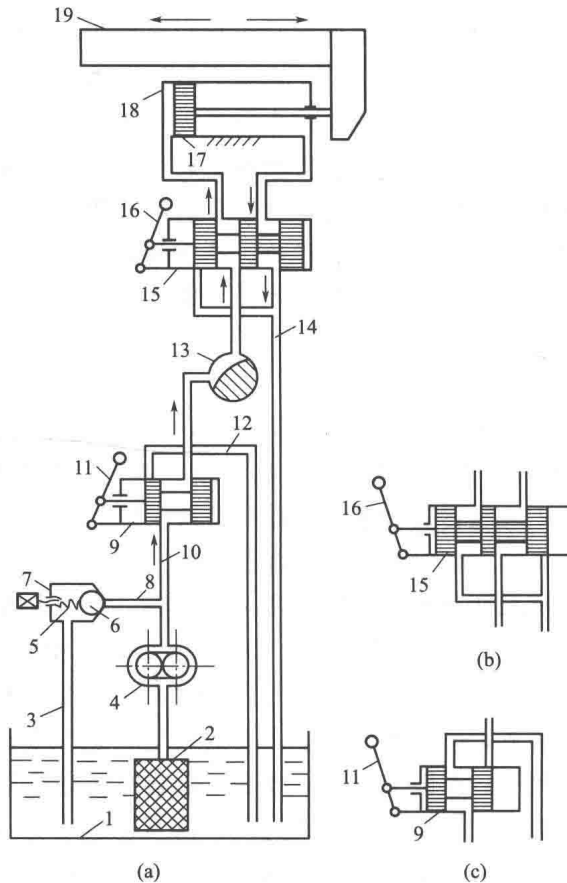


图 1.1 磨床工作台液压传动系统工作原理

1—油箱；2—过滤器；3,12,14—回油管；4—液压泵；5—弹簧；6—钢球；7—溢流阀；8,10—压力油管；
9—手动换向阀；11,16—换向手柄；13—节流阀；15—换向阀；17—活塞；18—液压缸；19—工作台

1.2.2 液压传动系统的组成

从上述例子可以看出，液压传动是以液体作为工作介质来进行工作的，一个完整的液压传动系统由以下几部分组成。

① 液压泵（动力元件） 是将原动机所输出的机械能转换成液体压力能的元件，其作用是向液压系统提供压力油，液压泵是液压系统的“心脏”。

② 执行元件 把液体压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件，执行元件包括液压缸和液压马达。

③ 控制元件 包括压力、方向、流量控制阀，是对系统中油液压力、流量、方向进行控制和调节的元件。图 1.1 中换向阀 15 即属控制元件。

④ 辅助元件 上述三个组成部分以外的其他元件，如管道、管接头、油箱、滤油器等为辅助元件。

1.2.3 液压系统的图形符号

图 1.1(a) 所示的液压系统图是一种半结构式的工作原理图。它直观性强，容易理解，但难于绘制。在实际工作中，除少数特殊情况外，一般都采用 GB/T 786.1 所规定的液压与气动图形符号来绘制，如图 1.2 所示。图形符号表示元件的功能，而不表示元件的具体结构和参数；反映各元件在油路连接上的相互关系，不反映其空间安装位置；只反映静止位置或初始位置的工作状态，不反映其过渡过程。使用图形符号既便于绘制，又可使液压系统简单明了。

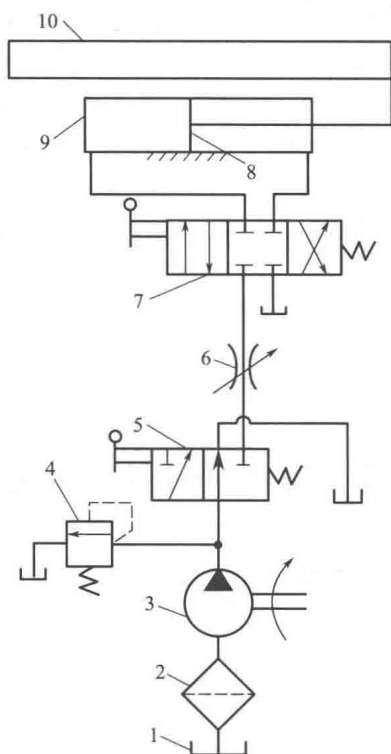


图 1.2 用图形符号表示的磨床工作台液压系统图

1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4—溢流阀；5—手动换向阀；6—节流阀；7—换向阀；
8—活塞；9—液压缸；10—工作台

1.3 液压传动的优缺点

1.3.1 液压传动系统的主要优点

液压传动与机械传动、电气传动相比有以下主要优点。

① 在同等功率情况下，液压执行元件体积小、重量轻、结构紧凑。例如，同功率液压马达的重量为电动机的 1/6 左右。

② 液压传动的各种元件，可根据需要方便、灵活地来布置。

③ 液压装置工作比较平稳，由于重量轻，惯性小，反应快，液压装置易于实现快速启动、制动和频繁的换向。

④ 操纵控制方便，可实现大范围的无级调速（调速范围达 2000 : 1），可以在运行的过程中进行调速。

⑤ 一般采用矿物油为工作介质，相对运动面可自行润滑，使用寿命长。

⑥ 容易实现直线运动。

⑦ 既易于实现机器的自动化，又易于实现过载保护，当采用电液联合控制及计算机控制后，可实现大负载、高精度、远程自动控制。

⑧ 液压元件实现了标准化、系列化、通用化，便于设计、制造和使用。

1.3.2 液压传动系统的主要缺点

① 液压传动不能保证严格的传动比，这是由于液压油的可压缩性和泄漏造成的。

② 工作性能易受温度变化的影响，因此不宜在很高或很低的温度条件下工作。

③ 由于液体流动的阻力损失和泄漏较大，所以效率较低。如果处理不当，泄漏不仅污染场地，而且还可能引起火灾和爆炸事故。

④ 为了减少泄漏，液压元件在制造精度上要求较高，因此它的造价高，且对油液的污染比较敏感。

总体来讲，液压传动的优点是突出的，它的一些缺点有的现已大为改善，有的将随着科学技术的发展而进一步得到克服。

1.4 液压传动的工作介质

1.4.1 液压系统对工作介质的要求

液压工作介质一般称为液压油（有部分液压介质已不含油的成分）。液压工作介质的性能对液压系统的工作状态有很大影响，液压系统对工作介质的基本要求如下。

① 有适当的黏度和良好的黏温特性。

黏度是选择工作介质的首要因素。液压油的黏性，对减少间隙的泄漏、保证液压元件的密封性能都起着重要作用。黏度过高，各部件运动阻力增加，温升快，泵的自吸能力下降，同时，管道压力降和功率损失增大。反之，黏度过低会增加系统的泄漏，并使液压油膜支承

能力下降，而导致摩擦副间产生摩擦。所以工作介质要有合适的黏度范围，同时在温度、压力变化下和剪切力作用下，油的黏度变化要小。

液压工作介质黏度用运动黏度 ν 表示。在国际单位制中 ν 的单位是 m^2/s ，在实际应用中油的黏度常用 mm^2/s 表示。

黏度是液压油（液）划分牌号的依据。按 GB/T 3141 的规定，液压油（液）产品的牌号用黏度的等级表示，即用该液压油（液）在 40°C 时的运动黏度中心值表示。

表 1.1 列出了常用液压油的新、旧黏度等级牌号的对照（1982 年以前的旧标准是以 50°C 时的黏度值作为液压油的黏度等级牌号）。

表 1.1 常用液压油的牌号和黏度

ISO 3448—1992 黏度等级	GB/T 3141—1994 黏度等级(现牌号)	40°C 的运动黏度 $/(\text{mm}^2/\text{s})$	1983~1990 年的 过渡牌号	1982 年以前相近 的旧牌号
ISO VG15	15	13.5~16.5	N15	10
ISO VG22	22	19.8~24.2	N22	15
ISO VG32	32	28.8~35.2	N32	20
ISO VG46	46	41.4~50.6	N46	30
ISO VG68	68	61.2~74.8	N68	40
ISO VG100	100	90~110	N100	60

所有工作介质的黏度都随温度的升高而降低，黏温特性好是指工作介质的黏度随温度变化小，黏温特性通常用黏度指数表示。一般情况下，在高压或高温条件下工作时，为了获得较高的容积效率，不使油的黏度过低，应采用高牌号液压油；低温时或泵的吸入条件不好时（压力低、阻力大），应采用低牌号液压油。

② 氧化安定性和剪切安定性好。

工作介质与空气接触，特别是在高温、高压下容易氧化、变质。氧化后酸值增加会增强腐蚀性，氧化生成的黏稠状油泥会堵塞滤油器，妨碍部件的动作以及降低系统效率。因此，要求它具有良好的氧化安定性和热安定性。

剪切安定性是指工作介质通过液压节流间隙时，要经受剧烈的剪切作用，会使一些聚合型增黏剂高分子断裂，造成黏度永久性下降，在高压、高速时，这种情况尤为严重。为延长使用寿命，要求剪切安定性好。

③ 抗乳化性、抗泡沫性好。

工作介质在工作过程中可能混入水或出现凝结水。混有水分的工作介质在泵和其他元件的长期剧烈搅拌下，易形成乳化液，使工作介质水解变质或生成沉淀物，引起工作系统的腐蚀，所以要求工作介质具有良好的抗乳化性。空气混入工作介质后会产生气泡，混有气泡的介质在液压系统内循环，会产生异常的噪声、振动，所以要求工作介质具有良好的抗泡沫性和空气释放能力。

④ 闪点、燃点要高，能防火、防爆。

⑤ 有良好的润滑性和防腐性，不腐蚀金属和密封件。

⑥ 对人体无害，成本低。

1.4.2 液压工作介质的种类

液压工作介质按照 GB/T 7631.2（等效采用 ISO 6743/4）进行分类，主要有石油基液

压油和难燃液液压液两大类。

1.4.2.1 石油基液压力

(1) L-HL 液压力

L-HL 液压力 (又称普通液压力) 采用精制矿物油作基础油, 加入抗氧、抗腐、抗泡、防锈等添加剂调合而成, 是当前我国供需量最大的主品种, 用于一般液压系统, 但只适于 0°C 以上的工作环境。其牌号有 HL-32、HL-46、HL-68。在其代号 L-HL 中, L 代表润滑剂类, H 代表液压力, L 代表防锈、抗氧化型, 最后的数字代表运动黏度。

(2) L-HM 液压力

L-HM 液压力 (又称抗磨液压力, M 代表抗磨型) 的基础油与普通液压力相同, 除加有抗氧剂、防锈剂外, 主剂是极压抗磨剂, 以减少液压力件的磨损。适用于 -15°C 以上的高压、高速工程机械和车辆液压系统。其牌号有 HM-32、HM-46、HM-68、HM-100、HM-150。

(3) L-HG 液压力

L-HG 液压力 (又称液压力-导轨油) 的基础油与普通液压力相同, 除加入了普通液压力所具有的全部添加剂外, 还加有油性剂, 用于导轨润滑时有良好的防爬性能。适用于机床液压力和导轨润滑合用的系统。

(4) L-HV 液压力

L-HV 液压力 (又称低温液压力、稠化液压力、高黏度指数液压力) 用深度脱蜡的精制矿物油, 加抗氧、抗腐、抗磨、抗泡、防锈、降凝和增黏等添加剂调合而成。其黏温特性好, 有较好的润滑性, 以保证不发生低速爬行和低速不稳定现象。适用于低温地区的户外高压系统及数控精密机床液压系统。

(5) 其他专用液压力

其他专用液压力包括航空液压力 (红油)、炮用液压力、舰用液压力等。

1.4.2.2 难燃液压力

难燃液压力可分为合成型、油水乳化型和高水基型三大类。

(1) 合成型抗燃工作液

① 水-乙二醇液 (L-HFC 液压力) 这种液体含有 $35\% \sim 55\%$ 的水, 其余为乙二醇及各种添加剂 (增稠剂、抗磨剂、抗腐蚀剂等)。其优点是凝点低 (-50°C), 有一定的黏性, 而且黏度指数高, 抗燃。适用于要求防火的液压系统, 使用温度范围为 $-18 \sim 65^{\circ}\text{C}$ 。其缺点是价格高, 润滑性差, 只能用于中等压力 (20MPa 以下)。这种液体密度大, 所以吸入困难。水-乙二醇液能使许多普通涂料软化或脱离, 可换用环氧树脂或乙烯基涂料。

② 磷酸酯液 (L-HFDR 液压力) 这种液体的优点是, 使用的温度范围宽 ($-54 \sim 135^{\circ}\text{C}$), 抗燃性好, 抗氧化安定性和润滑性都很好。允许使用现有元件在高压下工作。其缺点是价格昂贵 (为液压力的 $5 \sim 8$ 倍); 有毒性; 与多种密封材料 (如丁腈橡胶) 的相容性很差, 而与丁基胶、乙丙胶、氟橡胶、硅橡胶、聚四氟乙烯等均可相容。

(2) 油水乳化型抗燃工作液 (L-HFB、L-HFAE 液压力)

油水乳化液是指互不相溶的油和水, 使其中的一种液体以极小的液滴均匀地分散在另一种液体中所形成的抗燃液体。分水包油乳化液和油包水乳化液两大类。

(3) 高水基型抗燃工作液 (L-HFAS 液压力)

这种工作液不是油水乳化液。其主体为水, 占 95% , 其余 5% 为各种添加剂 (抗磨剂、