



普通高等教育规划教材

液压与气动技术

第二版

杨永平 主 编
王旭飞 孟欣 副主编

YEYA YU
QIDONG JISHU



化学工业出版社



普通高等教育规划教材

液压与气动技术

第二版

杨永平 主 编
王旭飞 孟欣 副主编

EYA YU
QIDONG JISHU



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书共 13 章,全面系统地阐述了液压传动概述、液压传动基础知识、液压泵和液压马达、液压缸、液压控制元件及基本回路、液压辅助元件、典型液压系统、气压传动基本知识、气动执行元件、气动控制阀和气动回路、典型气压传动系统、故障诊断与对策、液压与气动发展现状与趋势等方面的内容,并在书末附以必要的附录。本书在相应章节还附有精选的应用实例供学习者分析以加深相关知识的运用、理解。

本书深入浅出,图文并茂,选编了较多的应用实例,并注意与数控技术应用专业的联系,凸显了实用性和技能性。在内容上力求先进,体系力求新颖。在每章还编写了课后思考题和习题,有利于学生巩固所学的知识,加深对基本概念的理解,并提高分析、解决实际问题的能力。

本书既可以作为高等院校数控技术应用专业及机械、机电类各相关专业的教材,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/杨永平主编. —2 版. —北京:化学工业出版社, 2011.7

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-11466-2

I. 液… II. 杨… 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 (2011) 第 106585 号

责任编辑:高 钰

文字编辑:高 震

责任校对:吴 静

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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 328 千字 2011 年 8 月北京第 2 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:25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书系统地介绍了液压与气动技术的基本原理、液压与气动元件及回路、液压与气动系统在数控机床等机械装备上的应用等知识。从液压与气动的基本概念和基础知识出发,注重理论联系实际,强调知识的系统性、实用性。本书为适应机电制造业发展和 21 世纪高校应用型技术人才培养目标的需求,以培养技术应用能力为目标,以技能要求为出发点,归纳出液压与气动技术的共性与个性;阐述了基本理论、基本内容和基本方法,并提供了相关的背景资料。深入浅出,图文并茂,选编了较多的应用实例。并注意与机电各专业的联系,凸显了实用性和技能性。内容力求先进,体系力求新颖。既保证了高等教育的标准要求,又力求创新。教材中还编写了课后思考题和习题,有利于学生巩固所学的知识,加深对基本概念的理解,并提高分析、解决实际问题的能力。

本书由杨永平主编,王旭飞、孟欣任副主编,杨明亮教授主审。参编人员有王旭飞、孟欣、赵永强、吴克刚、武得钰、王小军。全书共分十三章,其中第一章至第六章由杨永平编写,第七章由吴克刚编写,第八章由武得钰编写,第九章由王小军编写,第十章由王旭飞编写、第十一章由赵永强编写,第十二章、十三章和附录由孟欣编写。全书由杨永平统稿。

在教材编写过程中,尽管我们尽心尽力,但由于学术水平有限,教材中存在的缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编者

2011 年 4 月

目 录

第一章 液压传动概述	1
第一节 液压传动及其应用领域.....	1
第二节 液压传动的工作原理.....	1
一、简化模型.....	2
二、液压传动能量的转换及传递.....	2
三、液压传动系统的主要组成.....	3
四、液压传动的优点缺点.....	4
复习思考题.....	5
第二章 液压传动基础	6
第一节 液压传动的工作介质.....	6
一、液压液的主要物理性质.....	6
二、对液压液的要求	10
三、液压液种类的选择	10
四、液压液的正确使用及维护	11
第二节 静止液体的力学基本规律	12
一、液体静压力及其特性	12
二、重力作用下静力学基本规律	13
三、静压力对固体壁画的总作用力	13
第三节 液体流动时的能量	14
一、理想液体流动时的能量	14
二、实际液体流动时的能量	15
三、管路压力损失	15
第四节 液体流经小孔和间隙时的流量	16
一、液体流经小孔的流量	16
二、液体流经间隙的流量	16
第五节 液压冲击	16
一、液压冲击产生的原因	17
二、液压冲击值计算公式	17
三、液压冲击的危害	18
四、减少液压冲击应采取的措施	18
第六节 气穴现象与气蚀	19
一、气穴现象	19
二、产生气穴现象的原因	19
三、气穴对系统产生的危害	19

四、预防气穴及气蚀所采取的措施	19
复习思考题	19
第三章 液压泵和液压马达	20
第一节 液压泵概述	20
一、液压泵的工作原理	20
二、常用液压泵种类和图形符号	21
三、液压泵的性能参数	21
第二节 常用液压泵的工作原理和应用	22
一、齿轮泵	22
二、叶片泵	24
三、柱塞泵	27
第三节 液压泵的选用	29
第四节 液压马达	30
一、液压马达的分类	30
二、液压马达的工作原理	30
三、液压马达的主要参数	31
复习思考题	31
第四章 液压缸	33
第一节 液压缸的分类与工作原理	33
一、活塞缸	33
二、柱塞缸	35
三、摆动液压缸	35
四、组合液压缸	36
第二节 液压缸的典型结构	37
一、缸筒组件	37
二、活塞组件	38
三、液压缸的密封	38
四、液压缸的排气装置	40
五、液压缸的制动和缓冲	40
第三节 液压缸的设计计算	41
一、液压缸主要参数的确定	41
二、液压缸主要零部件强度校核	42
三、液压缸设计与计算应注意的问题	43
复习思考题	44
第五章 液压控制元件及基本回路	45
第一节 液压控制元件的类型和基本要求	45
一、液压控制元件的作用和分类	45
二、液压阀的性能要求	45
第二节 方向控制阀及方向控制回路	46
一、单向阀	46

二、换向阀	47
第三节 压力控制阀及压力控制回路	55
一、溢流阀	55
二、顺序阀	61
三、减压阀	63
四、压力继电器	66
第四节 流量控制阀及速度控制回路	68
一、流量控制阀	68
二、节流调速回路	74
三、容积调速回路	77
四、容积节流调速回路（联合调速）	80
第五节 其他速度控制回路	82
一、快速运动回路	82
二、速度转换回路	83
第六章 辅助元件	86
第一节 蓄能器	86
一、蓄能器的功用	86
二、蓄能器的类型	86
三、滤油器	88
第二节 液压油的污染和过滤	88
一、液压油污染度	88
二、过滤精度	89
第三节 滤油器	89
一、滤油器分类	89
二、滤油器的选用	90
三、滤油器的安装位置	91
第四节 热交换器	92
一、液压系统的发热和预热	92
二、冷却器的结构与选用	93
三、加热器的结构和选用	94
第五节 液压油箱	94
一、开式油箱	95
二、挠性隔离式油箱	95
三、油管和管接头	95
四、胶管总成	97
五、快速接头	98
六、压力表和压力表开关	99
第六节 密封件	99
一、密封件的作用和分类	99
二、橡胶密封圈的种类和特点	100

三、同轴组合密封装置·····	101
复习思考题·····	101
第七章 典型液压传动系统 ·····	102
第一节 数控车床液压系统·····	102
第二节 YT4543 型动力滑台液压系统 ·····	104
一、概述·····	104
二、动力滑台液压系统的特点·····	105
第三节 机械手液压系统·····	105
一、概述·····	105
二、机械手实例·····	106
第四节 汽车转向液压系统·····	107
第五节 叉车液压系统·····	109
复习思考题·····	110
第八章 气压传动基本 ·····	111
一、气动技术概述·····	111
二、气动技术的特点·····	112
第一节 空气的主要性质及气体状态方程·····	113
一、空气的主要性质·····	113
二、气体状态方程·····	114
第二节 气源装置·····	115
一、空气压缩机·····	116
二、气源净化装置·····	118
第三节 气动三大件·····	122
一、空气过滤器·····	122
二、调压阀·····	122
三、油雾器·····	123
复习思考题·····	125
第九章 气动执行元件 ·····	126
第一节 汽缸·····	126
一、汽缸的分类·····	126
二、几种特殊汽缸的工作原理·····	127
三、标准化汽缸·····	130
第二节 气动马达·····	131
一、气动马达的分类和工作原理·····	131
二、气动马达的优缺点·····	132
三、各种气动马达的特点及应用范围·····	132
复习思考题·····	133
第十章 气动控制阀和气动回路 ·····	134
第一节 常用气动控制阀及其基本回路·····	134
一、方向控制阀及其所组成的回路·····	134

二、压力控制阀及其所组成的回路·····	137
三、流量控制阀及其所组成的回路·····	138
第二节 其他常用气动回路·····	139
一、气液联动回路·····	139
二、延时回路·····	140
三、往复动作回路·····	141
四、安全保护回路·····	142
第三节 气动逻辑元件·····	143
一、气动逻辑元件的分类·····	143
二、高压截止式逻辑元件·····	144
三、逻辑元件应用实例·····	146
复习思考题·····	147
第十一章 典型气压传动系统 ·····	149
第一节 阅读气压传动系统图的一般步骤·····	149
第二节 气液动力滑台·····	149
一、概述·····	149
二、气液动力滑台回路原理图·····	149
第三节 气动机械手·····	150
一、概述·····	150
二、气动机械手的动作原理·····	150
第四节 公共汽车车门气压传动系统·····	152
第五节 工件夹紧气压传动系统·····	153
第六节 气动系统在机床上的应用·····	153
第七节 PLC 气动程序控制系统·····	155
一、程序控制系统的组成·····	155
二、可编程序控制系统·····	156
复习思考题·····	157
第十二章 故障诊断与排除 ·····	158
第一节 故障·····	158
一、初期故障·····	158
二、突发故障·····	158
三、老化故障·····	158
第二节 故障诊断方法·····	158
一、经验法·····	159
二、推理分析法·····	159
第三节 常见故障、原因与排除·····	160
一、空气过滤器的常见故障与排除办法·····	160
二、减压阀的常见故障与排除办法·····	161
三、油雾器的常见故障与排除办法·····	161
四、溢流阀常见故障与排除办法·····	161

五、方向阀常见故障与排除方法·····	162
六、汽缸常见故障与排除方法·····	162
第十三章 液压与气动技术的新发展·····	163
第一节 液压传动技术的新发展·····	163
一、液压传动技术的发展状况·····	163
二、液压技术的发展趋势·····	167
第二节 气压传动技术的新发展·····	170
一、气压传动技术的发展状况·····	171
二、气压传动技术的发展趋势·····	171
复习思考题·····	172
附录 液压气动图形符号·····	173
参考文献·····	205

第一章 液压传动概述

第一节 液压传动及其应用领域

一部完整的机器通常是由原动机、传动机构和工作机三部分组成。传动机构是在原动机和工作机间起传递动力作用的中间环节，它包括机械传动、电气传动、流体传动及其组合——复合传动等类型。

流体传动是以流体为工作介质进行能量传递、转换和控制的传动，它包括液体传动和液压传动。液体传动以液体为工作介质，包括液压传动和液力传动。液压传动是利用液体的压力能进行能量传递、转换和控制的一种传动形式。该传动形式具有许多突出的优点，在国民经济中得到广泛的应用，其应用领域见表 1-1。

表 1-1 液压传动在国民经济中的应用

行业名称	应 用 领 域
工程机械	液压挖掘机、液压装载机、推土机、全液压振动压路机、液压铲运机等
起重运输机械	轮胎吊、岸边(或堆场)集装箱起重机、叉车(或集装箱叉车)、集装箱正面吊运机、皮带运输机等
矿山机械	凿岩机、全断面液压掘进机、开采机、破碎机、提升机、液压支架等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机、混凝土泵车、回转窑液压系统等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农机悬挂系统等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机构、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注塑机、橡胶硫化机、造纸机及浆纱机液压系统等
汽车机械	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减振器等
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人(机械手)等
机床工业	磨床、车床、龙门刨床、牛头刨床及镜床等
军事工业	火炮瞄准系统、坦克火炮控制系统、战略飞行器液压系统等
船舶及海洋工程	舰船舵机液压系统、工程船舶(如挖泥船、打桩船)、舱盖启闭液压系统、海洋石油钻探平台等

第二节 液压传动的工作原理

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。

一、简化模型

液压传动的简化模型如图 1-1 所示, 图中两个不同直径的圆筒 2、4 和活塞 1、5 分别构成两对圆柱配合副, 活塞可以沿圆筒内壁自由滑动, 两者的配合间隙很小, 假设摩擦力及通过其配合间隙所产生的泄漏不计。圆筒 2、4 下腔通过管道 3 连通。由圆筒内壁、活塞与管道构成密闭容积, 在密闭容积中充满工作介质——工作液体。

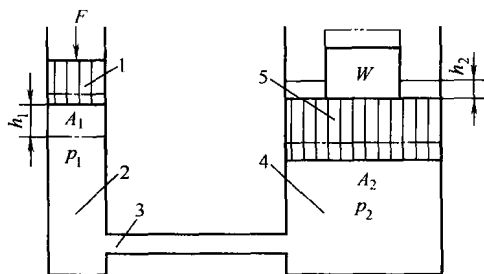


图 1-1 液压传动的简化模型

1、5—活塞；2、4—圆筒；3—管道

二、液压传动能量的转换及传递

1. 液压传动可以传递力

如图 1-1 所示, 将重物 W 放在活塞 5 上, 为了平衡 (或提升) 重物 W , 必须在活塞 1 上施加力 F , 此时, W 是工作负载, F 是主动力。不计活塞重力, 可得活塞 5 下腔的压力 $p_2 = W/A_2$ (A_2 为活塞 5 的面积)。根据帕斯卡原理, 该压力等值地传递作用到活塞 1 上, 即: $p_1 = p_2 = p$ (活塞 1 下腔的压力 $p_1 = F/A_1$, A_1 为活塞 1 的面积)。由此作用在活塞 1 上的主动力 F :

$$F = pA_1 = \frac{W}{A_2} A_1 = W \frac{A_1}{A_2} \quad (1-1)$$

由式(1-1) 可以看出:

(1) 活塞 1 上施加力 $F = WA_1/A_2$, 就能阻止活塞 5 上的重物 W 下降, 力是通过密闭容积中的液体传递的。

(2) 当 $A_2 > A_1$ 时, $A_1/A_2 < 1$, 则 $F < W$, 即用一个小的力就可以驱动一个大的负载, 力得到了放大。

(3) 当 $W = 0$ 时, $p = 0$, $F = 0$, 即当外负载为零时, 不可能在密闭容积内形成压力; 只有当 $W \neq 0$ 时, 才可能施加力 F , 并在密闭容积内形成压力 p 。

在不考虑泄漏的条件下, 液压传动中的工作压力取决于外负载。

2. 液压传动可以传递运动

如图 1-1 所示, 当在活塞 1 上施加一定的力使其下移 h_1 时, 活塞 5 将克服负载力 W 并上升 h_2 。由于不存在泄漏及忽略液体的可压缩性, 在 Δt 时间内从圆筒 2 中排出的液体体积 V_1 与通过管道 3 排入圆筒 4 内的体积 V_2 相等, 即:

$$V_1 = V_2 \text{ 或 } A_1 h_1 = A_2 h_2 \quad (1-2)$$

式(1-2) 表明两活塞的位移与其面积成反比。将式(1-2) 两边同时除以 Δt , 得

$$\frac{A_1 h_1}{\Delta t} = \frac{A_2 h_2}{\Delta t}, \text{ 即 } u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (1-3)$$

式中 u_1, u_2 ——活塞 1、5 运动的平均速度。

下面介绍一个十分重要的概念: 流量。流量是单位时间内流过某一通流截面的流体的体积, 记作 q , $q = V/t$, 即 $q = uA$ 。流量的单位为 m^3/s 。

在上例中, $q_1 = u_1 A_1$, $q_2 = u_2 A_2$, 因此, 式(1-3) 可写作: $q_1 = q_2 = q$, 即:

$$u_2 = \frac{q}{A_2} \quad (1-4)$$

由式(1-4) 可见, 液压传动可以传递运动。在液压传动中, 液压执行机构的运动速度取

决于输入流量的大小，而与外负载无关（在忽略泄漏、液体的压缩性及容器、管路变形的条件下）。

3. 液压传动可以传递动力

在图 1-1 简化模型中，输入的机械功率 $N_i = Fu_1$ ，输出的机械功率 $N_o = Wu_2$ 。在不计任何损失时， $N_i = N_o$ ，即：

$$N_i = Fu_1 = \frac{F}{A_1} A_1 u_1 = pq = \frac{W}{A_2} A_2 u_2 = Wu_2 = N_o \quad (1-5)$$

不计任何损失时，液压传动中能量的转换及传递过程框图如图 1-2 所示。

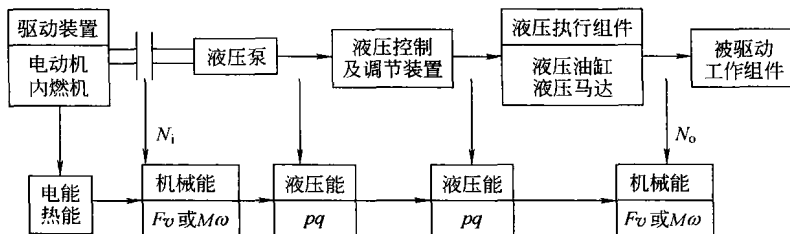


图 1-2 液压传动中能量的转换及传递框图

三、液压传动系统的主要组成

1. 往复运动液压传动系统

液压传动系统的基本组成可以用如图 1-3 所示磨床工作台往复运动简化液压系统结构原理图加以说明。图中，液压泵 3 由电动机驱动旋转，经过滤器 2 从油箱 1 吸油，向系统提供具有一定流量和压力的液压油。液压缸 7 是一对圆柱配合副，它带动工作台 8 做往复运动。当液压缸左腔进液压油时（此时，液压缸右腔与油箱相通），活塞带动工作台向右运动；反之，活塞带动工作台向左运动。换向阀 5 控制液压泵供给的液压油是进入液压缸的左腔还是右腔，从而控制液压缸的运动方向。改变流量控制阀 4 的开口大小可以改变进入液压缸的流量，从而调节工作台的运动速度。液压泵输出多余的液压油经溢流阀 11、油管 12 返回油箱。

在液压系统中，液压泵的工作压力取决于外负载以及油液流经阀与管道的压力损失之和，液压泵的最大工作压力不会超过溢流阀 11 的调定值。溢流阀 11 对系统起溢流定压或过载保护的作用。

此外，系统还有存储液压油的油箱 1，连接各组件的管道、管接头，防止杂物进入泵和液压系统的过滤器 2 及蓄能器、检测仪表等辅助组件。

2. 液压系统的主要组成

由上述可知，液压传动系统是由若干具有特定功能的液压元件（部件）组成并完成某种具体任务的一个整体。通常一个完整的液压系统由以下五个部分组成。

（1）液压动力元件：如液压泵等。将原动机的

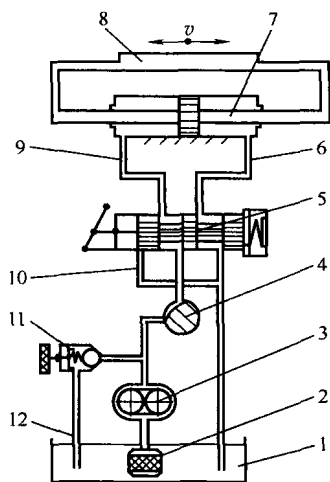


图 1-3 磨床工作台液压系统结构原理图
1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4—流量控制阀；5—换向阀；6, 9, 10, 12—油管；7—液压缸；8—工作台；11—溢流阀

机械能 (Fu 或 $M\omega$) 转换成液压能 (pq)。

(2) 液压执行元件：如液压缸、液压马达等。将液压能转换成机械能。

(3) 液压控制元件：如各种控制阀。利用这些元件对系统中的液体压力、流量及方向进行控制或调节，以满足工作装置对传动的要求。

(4) 液压辅助元件：起辅助作用，如油箱、滤油器、管路、管接头及各种控制、检测仪表等。其作用是储存、输送、净化工作液及监控系统等。在有些系统中，为了进一步改善系统性能，还采用了蓄能器、加热器及散热器等辅助元件。

(5) 工作介质：液压液是动力传递的载体。

3. 液压图形符号

在工程实际中，必须采用标准的液压图形符号来绘制液压系统原理图。我国已制定了“气动与液压”图形符号标准 GB/T 786—93。图 1-4 为磨床工作台液压系统原理图。图中各元件的图形符号不表示其具体的结构及参数，只表示元件的职能、操作（控制）方法及外部连接。用标准符号绘制的液压系统图表明组成系统的元件、元件间的相互关系及整个系统的工作原理，并不表示其实际安装位置及布管。

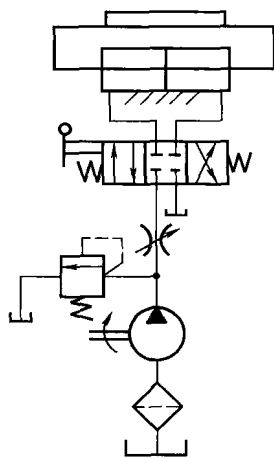


图 1-4 磨床工作台液压系统原理图

四、液压传动的优点缺点

1. 液压传动的优点

液压传动之所以在工程实际中应用广泛，是因为它与机械传动等相比，具有许多优点。

(1) 液压传动可在运行过程中方便地实现大范围的无级调速，调速范围可达 1000 : 1。液压传动装置可在极低的速度下输出很大的力。例如，液压马达当转速达 1r/min 时仍具有良好的特性，这是电气传动不能实现的，如果采用机械传动装置减速，其减速器结构往往十分庞大。

(2) 在输出相同功率的情况下，液压传动装置的体积小、质量轻、结构紧凑、惯性小。由于液压系统中的压力比电枢磁场中单位面积上的磁力大 30~40 倍，液压传动装置的体积和质量只占相同功率电动机的 12% 左右。因此，液压传动易于实现快速启动、制动及频繁换向，每分钟的换向次数可达 500 次（左右摆动）、1000 次（往复移动）。

(3) 液压传动易于实现自动化，特别是采用电液和气液传动时，可实现复杂的自动控制。

(4) 液压装置易于实现过载保护。当液压系统超负荷（或系统承受液压冲击）时，液压油可以经溢流阀排回油箱，系统得到过载保护。

(5) 易于设计、制造。液压元件已实现了标准化、系列化和通用化。液压系统的设计、制造和使用都比较方便。液压元件的排列布置也有很大的灵活性。

2. 液压传动的缺点

(1) 不能保证严格的传动比。这是由于液压介质的可压缩性和不可避免的泄漏等因素引起的。

(2) 系统工作时，对温度的变化较为敏感。液压介质的黏性随温度变化而变化，从而使液压系统不易保证在高温和低温下都具有良好的工作稳定性。

(3) 在液压传动中，能量需经过两次变换，且液压能在传递过程中有流量和压力损失，所以系统能量损失较大，传输效率较低。

(4) 元件的制造精度高、造价高，对其使用和维护提出了较高的要求。

(5) 出现故障时，比较难于查找和排除，对维修人员的技术水平要求较高。

复习思考题

1-1 什么是液压传动？它具有哪些特点？

1-2 液压传动系统由哪儿部分组成？各组成部分的作用是什么？

1-3 液压传动的优点缺点是什么？

第二章 液压传动基础

液体是液压传动的工作介质。因此,研究、了解液体的主要物理性质,掌握液体平衡和运动的主要力学规律,对于正确理解液压传动原理,及合理设计、使用、维护液压系统都是十分重要的。

第一节 液压传动的工作介质

液压传动以液体为工作介质传递能量。同时,液体还有润滑、防腐、防锈及冷却作用。工作液性质的不同及品质的优劣会大大影响液压系统的工作性能及工作的可靠性。

一、液压液的主要物理性质

1. 液压液的密度及重度

单位体积物质的质量及重力分别称为该物质的密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 及重度 $\gamma(\text{N}/\text{m}^3)$, 即

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

式中 m 、 W ——液体的质量及重力;

V ——液体的体积;

g ——重力加速度。

液压液的密度因液体的种类而异,表 2-1 列出几种常用液压液的密度值。液压液的密度随温度的升高而略有减小,随着工作压力的升高而略有增加。通常对这种变化忽略不计,认为矿物油的密度 $\rho = 900 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 2-1 液压液的密度

种类	矿物型	水包油	油包水	水-乙二醇	磷酸酯	高水基
	液压液	乳化液	乳化液	液压液	液压液	液压液
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	850~960	990~1000	910~960	1030~1080	1120~1200	1000

2. 液压液的可压缩性

液压液的可压缩性是指液体体积随工作压力变化而变化的特性。液体的可压缩性可用体积压缩系数 β 或其倒数——液体的体积弹性模数 K 来表示。

体积压缩系数:

$$\beta = -\frac{\Delta V/V_0}{\Delta p} \quad (2-2)$$

体积弹性模数:

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V_0} \quad (2-3)$$

式中 V_0 ——压力变化前的体积；

Δp ——压力变化值；

ΔV ——在 Δp 的作用下液体体积的变化值。

式中的负号是为了使 β 或 K 为正值，因为当 $\Delta p > 0$ （压力增加）时， $\Delta V < 0$ （液体体积减小）。表 2-2 列举了几种常用液压液的体积弹性模数。

表 2-2 液压液的体积弹性模数

液压液种类	石油基	乳化液型	水-乙二醇型	磷酸酯型
K/MPa	$(1.4\sim2)\times 10^3$ (纯净液体)	1.95×10^3	3.15×10^3	2.65×10^3

由表 2-2 可知，对于石油基液压液，其体积弹性模数是钢（ $K=2.06\times 10^{11}\text{Pa}$ ）的 $1/(100\sim170)$ ，也就是说，它的可压缩性是钢的 $(100\sim170)$ 倍。

液压液的体积弹性模数 K 与压力、温度等因素有关。当温度升高时， K 值将减小；当工作压力增大时， K 值会增大。

当液压液中混入气体后，液体的体积弹性模数将大大下降。含气后液压液的综合体积弹性模数为 K_m ：

$$\frac{1}{K_m} = \frac{V_G}{V_t} \frac{1}{K_G} + \frac{V_f}{V_t} \frac{1}{K_f} \tag{2-4}$$

式中 V_G ——混入气体的体积；

V_f ——纯液体体积；

V_t ——混气液体的总体积， $V_t=V_G+V_f$ ；

K_G ——气体的体积弹性模数；

K_f ——纯液体的体积弹性模数。

当 $K_f=1.4\times 10^3\text{MPa}$ ， $V_G/V_f=1\%$ （体积含气量），工作压力为 10MPa ， $K_G=10\text{MPa}$ 时，其综合体积弹性模数 $K_m\approx 0.7\times 10^3\text{MPa}$ 。由此可见，该值比纯液体的体积弹性模数下降了近一半。

由于在液压系统中不可避免地存在一定量的游离空气，因此在分析计算时，对矿物基液压液取 $K=(0.7\sim1.4)\times 10^3\text{MPa}$ 。

在对高压液压系统进行动态特性分析、计算时，必须考虑液压液可压缩性的影响。

3. 液压液的黏性

流体在外力作用下流动（或有流动趋势）时，分子间的内聚力阻止分子间相对运动而产生一种内摩擦力，流体的这种特性称为黏性。黏性的大小可以用黏度来度量。

如图 2-1 所示，两相距 h 的平行平板间充满液体，上平板以速度 u_0 向右运动，下平板静止不动，贴近两平板的液体粘附在平板上。紧贴于上平板的液体层以与平板相同的速度 u_0 运动，粘附于下平板的液体速度为零，而中间各层液体的运动速度从上到下近似呈线性递减的规律分布。

实验结果表明，液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_f 与液层接触面积 A 、液层间的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比，还与液体的种类有关。即：

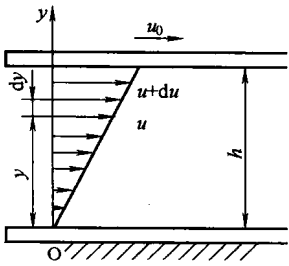


图 2-1 黏性示意图