



普通高等教育“十五”国家级规划教材



教育部高职高专规划教材

Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai



第3版

液压与气动技术

左健民 主编

本书共分 15 章, 主要讲述液压与气压传动的基础知识、液压元件、液压基本回路和系统、气源装置、气动元件、气动基本回路以及气动程序控制系统的分析与设计等。

本书在编写过程中, 强调以应用能力培养为主线, 基础理论以“够用”为度, 同时力求反映我国液压与气压传动发展的最新情况。本书在内容选取上尽量贴近工程实践, 编写了液压系统的故障诊断、使用维护和排除故障方面的内容, 切实做到用理论指导实践, 用理论知识分析问题和解决问题。

本书可供高专、高职院校机械工程类专业的学生使用, 也可供成人高校、自学考试和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气动技术/左健民主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2006. 6
普通高等教育“十五”国家级规划教材. 教育部高职高专规划教材
ISBN 7-111-19241-9

I. 液... II. 左... 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 (2006) 第 055839 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王海峰 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷

2006 年 8 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.75 印张 · 360 千字

0001—5000 册

定价: 26.00 元 (含 1CD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来,我国高等工程专科教育和职业教育发展迅速。截至2004年底,全国独立设置的普通高职高专院校共有1047所,其中职业技术学院872所,占全国普通高校总数的60.5%,加上类似独立学院性质和普通高校设置的高职院校,队伍更为庞大。从1998年到2004年底,我国普通高等院校的高职高专年招生数从54万人增长到237万人,在校生数从117万人增长到596万人,分别占全国普通高校招生数的53.1%和在校生数的44.7%。可见,高职高专院校已成为我国高等教育大众化的重要力量。经过广大教育工作者的探索和实践,已基本形成了具有高职高专特色的人才培养模式,其基本特征为:①以培养适应生产、建设、管理、服务第一线需要的高等技术应用型人才为根本任务;②以社会需求为目标、技术应用能力的培养为主线设计教学体系和培养方案;③以“应用”为主旨和特征构建课程和教学内容体系,基础理论教学以应用为目的,以必需够用为度,专业课加强针对性和应用性;④实践教学的主要目的是培养学生的技术应用能力,在人才培养方案中占有较大比例;⑤确立了“以就业为导向”的高等职业教育发展策略,为社会发展和经济建设培养了一大批高技能人才。高等职业教育的社会认可度已日益提高。教材作为人才培养过程中重要的基础,应充分体现人才培养的特点,为此,结合我们多年从事高职高专教育、进行教育教学改革和课程建设的实践,编写了本书。

本书主要讲述液压与气压传动的基础知识、液压元件、液压基本回路和应用、气源装置、气动元件、气动基本回路以及气动系统的应用等。

本书在编写过程中,强调以应用能力培养为主线,基础理论以“够用”为度,同时力求反映我国液压与气压传动发展的最新情况,在内容选取上尽量贴近工程实践。最近,编者有机会参加了省内外多所高职高专院校的人才培养工作水平评估,其中有高等专科学校,也有公办和民办高职院校。在评估过程中,也使编者逐渐加深对高职高专教育重要性的理解和认识,在我国现代化建设过程中,需要大批有技术的实用型人才,这不仅要使学生定好位,学好技能,广大教育工作者也要定好位,切实把握好“够用”和“必需”,切实提高学生的技能,做到用理论指导实践,用理论知识分析问题和解决问题。

本书由左健民任主编,孔凡新任副主编,王保升参加编写。其中,孔凡新编写了第三、五、六和七章,王保升编写了第十二、十三和十四章,其余由左健民编写。燕山大学韩屋谷教授任主审。

本书在编写过程中得到许多同行和专家的指点,也从许多文献中得到了有益的启发。由于编写水平有限,书中难免有不到之处,敬请广大读者指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第一章 液压传动基础知识	7
第一节 液压传动工作介质	7
第二节 液体静力学	14
第三节 液体动力学	18
第四节 定常管流的压力损失计算	21
第五节 孔口和缝隙流动	24
第六节 空穴现象	25
第七节 液压冲击	26
习题	27
第二章 液压动力元件	29
第一节 液压泵概述	29
第二节 齿轮泵	32
第三节 叶片泵	35
第四节 柱塞泵	40
第五节 液压泵的噪声	45
第六节 液压泵的选用	45
习题	46
第三章 液压执行元件	47
第一节 液压马达	47
第二节 液压缸	50
习题	58
第四章 液压控制元件	59
第一节 概述	59
第二节 方向控制阀	60
第三节 压力控制阀	68
第四节 流量控制阀	75
第五节 叠加式液压阀	80
第六节 二通插装阀	83
第七节 液压阀的连接	87
习题	89
第五章 液压辅助元件	91
第一节 管路和管接头	91
第二节 油箱	93
第三节 过滤器	94
第四节 密封装置	97
第五节 蓄能器	100
习题	102
第六章 液压基本回路	103
第一节 压力控制回路	103
第二节 速度控制回路	107
第三节 多缸工作控制回路	116
第四节 其他回路	120
习题	121
第七章 典型液压传动系统	124
第一节 概述	124
第二节 组合机床动力滑台液压系统	125
第三节 液压压力机液压系统	127
第四节 装卸堆码机液压系统	131
习题	132
第八章 液压伺服和电液 比例控制技术	134
第一节 液压伺服控制	134
第二节 电液比例控制	137
第三节 计算机电液控制技术	140
习题	142
第九章 液压系统的安装和使用	143
第一节 液压系统的安装和调试	143
第二节 液压系统的使用维护	147
习题	153
第十章 液压系统的故障诊断与排除	154
第一节 液压系统故障诊断的基本方法与步骤	154
第二节 液压系统常见故障诊断与排除	161
第三节 液压系统典型故障实例分析	170
习题	171
第十一章 气源装置及气动辅助元件	172
第一节 气源装置	172
第二节 气源净化装置	174
第三节 其他辅助元件	177
第四节 供气系统的管道设计	181

习题	182	第四节 气液联动回路	212
第十二章 气动执行元件	183	第五节 计数回路	213
第一节 气缸	183	第六节 延时回路	214
第二节 气动马达	190	第七节 安全保护和操作回路	214
习题	191	第八节 顺序动作回路	216
第十三章 气动控制元件	193	习题	217
第一节 方向控制阀	193	第十五章 气压传动系统实例	218
第二节 压力控制阀	199	第一节 气液动力滑台气压传动系统	218
第三节 流量控制阀	201	第二节 工件夹紧气压传动系统	219
第四节 气动逻辑元件	201	习题	219
第五节 气动比例阀及气动伺服阀	205	附录	220
习题	207	附录 A 叠加阀系列型谱	220
第十四章 气动基本回路	208	附录 B 常用液压与气动元件图形符号	223
第一节 换向回路	208	参考文献	228
第二节 速度控制回路	209		
第三节 压力控制回路	211		

绪 论

一、液压与气压传动的研究对象

液压与气压传动是以有压流体（液压油或压缩空气）为工作介质，来实现各种机械的传动和自动控制的传动形式。液压传动与气压传动实现传动和控制的方法是基本相同的，它们都是利用各种元件组成所需要的各种控制回路，再由若干回路有机组合成能完成一定控制功能的传动系统来进行能量的传递、转换与控制。因此，要学习液压与气压传动及其控制技术，就首先要了解传动介质的基本物理性能；要了解组成系统的各类液压与气动元件的结构、工作原理以及由这些元件所组成的各种控制回路的作用和特点。

液压传动所用的工作介质为液压油或其他合成液体，气压传动所用的工作介质为空气，由于这两种流体的性质不同，所以液压传动和气压传动又各有其特点。液压传动传递动力大，运动平稳，但由于液体粘性大，在流动过程中阻力损失大，因而不宜作远距离传动和控制；而气压传动由于空气的可压缩性大，且工作压力低（通常在 1.0MPa 以下），所以传递动力不大，运动也不如液压传动平稳，但空气粘性小，传递过程中阻力小、速度快、反应灵敏，因而气压传动能用于远距离的传动和控制。

二、液压与气压传动的工作原理

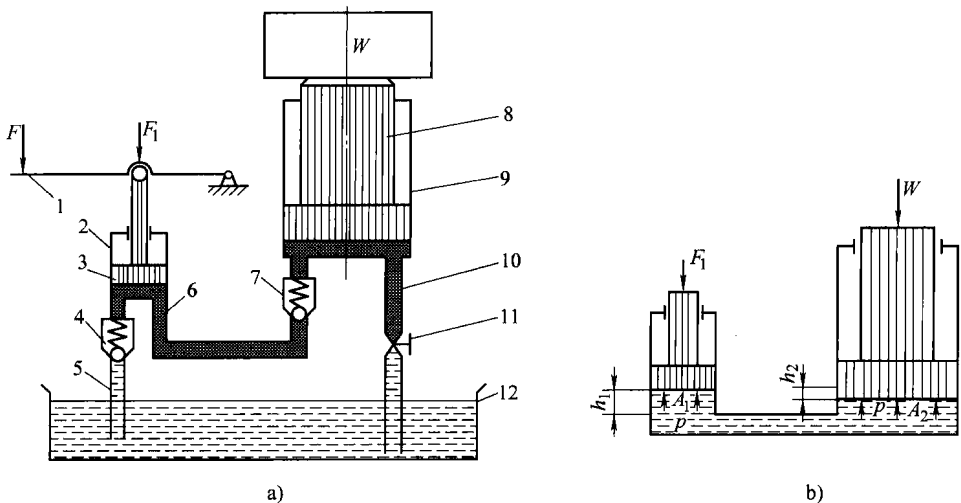


图 0-1 液压千斤顶

a) 液压千斤顶原理图 b) 液压千斤顶简化模型

1—杠杆手柄 2—小缸体 3—小活塞 4、7—单向阀 5—吸油管 6、10—管道
8—大活塞 9—大缸体 11—截止阀 12—通大气式油箱

液压与气压传动的基本工作原理是相似的，现以图 0-1 所示的液压千斤顶来简述液压传动的工作原理。由图 0-1a 可知，大缸体 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小缸体

2、小活塞3、单向阀4和7组成手动液压泵。如提起手柄使小活塞向上移动，小活塞下端油腔容积增大，形成局部真空，这时单向阀4打开，通过吸油管5从油箱12中吸油；用力压下手柄，小活塞下移，小活塞下腔压力升高，单向阀4关闭，单向阀7打开，下腔的油液经管道6输入大缸体9的下腔，迫使大活塞8向上移动，顶起重物。再次提起手柄吸油时，举升缸下腔的液压油将力图倒流入手动泵内，但此时单向阀7自动关闭，使油液不能倒流，从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动手柄，就能不断地把油液压入举升缸下腔，使重物逐渐地升起。如果打开截止阀11，举升缸下腔的油液通过管道10、阀11流回油箱，大活塞在重物和自重作用下向下移动，回到原始位置。

图0-1b为液压千斤顶的简化模型，据此可分析两活塞之间的力比例关系、运动关系和功率关系。

1. 力比例关系

当大活塞上有重物负载 W 时，大活塞下腔的油液就将产生一定的压力 p ， $p = W/A_2$ ，根据帕斯卡原理“在密闭容器内，施加于静止液体上的压力将以等值同时传到液体各点”。因而要顶起大活塞及其重物负载 W ，在小活塞下腔就必须产生一个等值的压力 p ，也就是小活塞上必须施加力 F_1 ， $F_1 = pA_1$ ，因而有

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{W}{A_2}$$

或

$$\frac{W}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad (0-1)$$

式中， A_1 、 A_2 分别为小活塞和大活塞的作用面积； F_1 为杠杆手柄作用在小活塞上的力。

式(0-1)是液压传动和气压传动中力传递的基本公式，由于 $p = W/A_2$ ，因此，当负载 W 增大时，流体工作压力 p 也要随之增大，亦即 F_1 要随之增大；反之若负载 W 很小，流体压力就很低， F_1 也就很小。由此建立了一个很重要的基本概念，即在液压和气压传动中，工作压力取决于负载，而与流入的流体多少无关。

2. 运动关系

如果不考虑液体的可压缩性、漏损和缸体、油管的变形，则从图0-1b可以看出，被小活塞压出的油液的体积必然等于大活塞向上升起后大缸扩大的体积。即

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

或

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (0-2)$$

式中， h_1 、 h_2 分别为小活塞和大活塞的位移。

从式(0-2)可知，两活塞的位移和两活塞的面积成反比，将 $A_1 h_1 = A_2 h_2$ 两端同除以活塞移动的时间 t 得

$$A_1 \frac{h_1}{t} = A_2 \frac{h_2}{t}$$

即

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (0-3)$$

式中, v_1 、 v_2 分别为小活塞和大活塞的运动速度。

从式 (0-3) 可以看出, 活塞的运动速度和活塞的作用面积成反比。

Ah/t 的物理意义是单位时间内液体流过截面积为 A 的某一截面的体积, 称为流量 $q^\ominus$, 即

$$q = Av$$

因此

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (0-4)$$

如果已知进入缸体的流量 q , 则活塞的运动速度为

$$v = \frac{q}{A} \quad (0-5)$$

调节进入缸体的流量 q , 即可调节活塞的运动速度 v , 这就是液压传动与气压传动能实现无级调速的基本原理。从式 (0-5) 可得到另一个重要的基本概念, 即活塞的运动速度取决于进入液压 (气压) 缸 (马达) 的流量, 而与流体压力大小无关。

3. 功率关系

由式 (0-1) 和式 (0-3) 可得

$$F_1 v_1 = W v_2 \quad (0-6)$$

式 (0-6) 左端为输入功率, 右端为输出功率。这说明在不计损失的情况下输入功率等于输出功率。由式 (0-6) 还可得出

$$P = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = pq \quad (0-7)$$

由式 (0-7) 可以看出, 液压与气压传动中的功率 P 可以用压力 p 和流量 q 的乘积来表示, 压力 p 和流量 q 是流体传动中最基本、最重要的两个参数, 它们相当于机械传动中的力和速度, 它们的乘积即为功率。

从以上分析可知, 液压传动和气压传动是以流体的压力能来传递动力的。

三、液压与气压传动系统的组成

图 0-2 所示为一驱动机床工作台的液压传动系统, 它由油箱 1、过滤器 2、液压泵 3、溢流阀 4、换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7、液压缸 8 以及连接这些元件的油管、管接头等组成。该系统的工作原理是: 液压泵由电动机带动旋转后, 从油箱中吸油, 油液经过滤器进入液压泵的吸油腔, 当它从液压泵中输出进入液压油路后, 在图 0-2a 所示状态下, 通过换向阀 5、节流阀 6, 经换向阀 7 进入液压缸左腔, 此时液压缸右腔的油液经换向阀 7 和回油管排回油箱, 液压缸中的活塞推动工作台 9 向右移动。

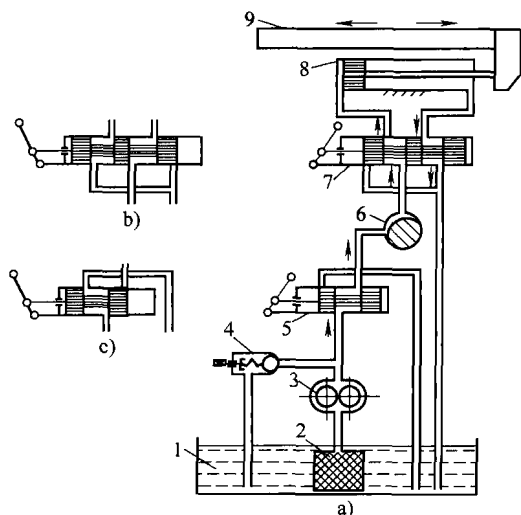


图 0-2 机床工作台液压系统的工作原理图
1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—溢流阀
5、7—换向阀 6—节流阀 8—液压缸 9—工作台

⊖ 流量 q ——全书中涉及的流量主要为体积流量, 而非质量流量。因此体积流量在书中简称为流量, 符号为 q ; 而质量流量的符号为 q_m , 名称不变。

如果将换向阀 7 的手柄移动成图 0-2b 所示的状态, 则经节流阀的液压油将由换向阀 7 进入液压缸的右腔, 此时液压缸左腔的油经换向阀 7 和回油管排回油箱, 液压缸中的活塞将推动工作台向左移动。因而换向阀 7 的主要功用就是控制液压缸及工作台的运动方向。系统中换向阀 5 若处于图 0-2c 的位置, 则液压泵输出的液压油将经换向阀 5 直接回油箱, 系统处于卸荷状态, 液压油不能进入液压缸, 所以换向阀 5 又称为开停阀。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的, 当节流阀的开口大时, 进入液压缸的油液流量就大, 工作台移动速度就快; 反之, 工作台移动速度将减小。因而节流阀 6 的主要功用是控制进入液压缸的流量, 从而控制液压缸活塞的运动速度。

液压缸推动工作台移动时必须克服液压缸所受到的各种阻力, 因而液压缸必须产生一个足够大的推力, 这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。要克服的阻力越大, 液压缸中的油液压力越高; 反之压力就越低。系统中输入液压缸的油液由节流阀调节, 液压泵所输出的多余的油液须经溢流阀和回油管排回油箱, 这只有在压力管路中的油液压力对溢流阀的阀芯 (图中为钢球) 的作用力等于或略大于溢流阀中弹簧的预压力时, 油液才能顶开溢流阀中的钢球流回油箱。所以在图示系统中, 液压泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的, 它和液压缸中的压力 (由负载决定的) 不一样大, 一般情况下, 液压泵出口处的压力值大于液压缸中的压力值, 因而溢流阀在液压系统中的主要功用是控制系统的工作压力。

图 0-3 为一可完成某程序动作的气动系统的组成原理图, 其中的控制装置是由若干气动元件组成的气动逻辑回路。它可以根据气缸活塞杆的始末位置, 由行程开关等传递信号, 在作出逻辑判断后指示气缸下一步的动作, 从而实现规定的自动工作循环。

由上面的例子可以看出, 液压与气压传动系统主要由以下几个部分组成:

(1) 能源装置 把机械能转换成流体的压力能的装置, 一般最常见的是液压泵或空气压缩机。

(2) 执行装置 把流体的压力能转换成机械能的装置, 一般指作直线运动的液 (气) 压缸、作回转运动的液 (气) 压马达等。

(3) 控制调节装置 对液 (气) 压系统中流体的压力、流量和流动方向进行控制和调节的装置。例如溢流阀、节流阀、换向阀等。这些元件组合成了能完成不同功能的液 (气) 压系统。

(4) 辅助装置 指除以上三种以外的其他装置, 如油箱、过滤器、分水过滤器、油雾器、蓄能器等, 它们对保证液 (气) 压系统可靠和稳定地工作起重大作用。

(5) 传动介质 传递能量的流体, 即液压油或压缩空气。

四、液压与气压传动的优缺点

液压与气压传动同电力拖动系统、机械系统相比有许多优异的特点, 下面从拖动能力和

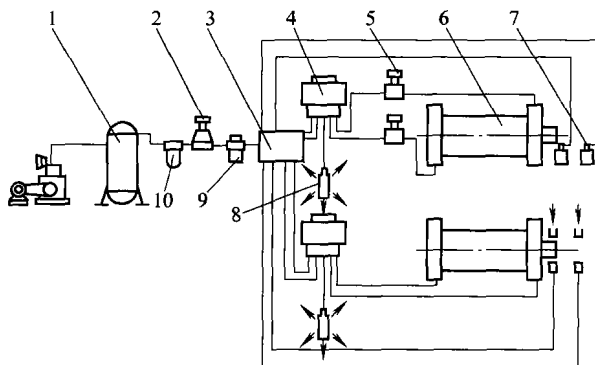


图 0-3 气压传动系统的组成

- 1—气压发生装置 2—压力控制器 3—逻辑元件
4—方向控制阀 5—流量控制阀 6—气缸 7—行程开关
8—消声器 9—油雾器 10—过滤器

控制方式性能两个方面进行比较。

1. 拖动能力

由于气压传动系统的使用压力一般在 $0.2 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 范围之内，因此它不能作为功率大的动力系统。在此只对液压传动系统与电力拖动系统作比较。从所能达到的最大功率看，液压系统远不如电力拖动系统，但液压传动最突出的优点是输出力大、重量轻、惯性小以及输出刚度大，可用以下指标来表示：

(1) 功率—质量比 这意味着同样功率的控制系统，液压系统体积小、重量轻，这是因为机电元件，例如电动机由于受到磁性材料饱和作用的限制，单位质量的设备所能输出的功率比较小，液压系统可以通过提高系统的压力来提高输出功率，这时仅受到机械强度和密封技术的限制。在典型情况下，发电机和电动机的功率—质量比仅为 165 W/kg 左右，而液压泵和液压马达可达 1650 W/kg ，是机电元件的 10 倍。在航空、航天技术领域应用的液压马达可达 6600 W/kg ；作直线运动的动力装置将更加悬殊，从单位面积输出力来看，液压缸的输出力一般可达到 $700 \sim 3000 \text{ N/cm}^2$ ，而直流直线式电动机的输出力仅为 30 N/cm^2 左右。

(2) 力—质量比 液压缸的力—质量比一般为 13000 N/kg ，而直流直线式电动机仅为 130 N/kg 。一般回转式液压马达的转矩—惯量比是同容量电动机的 $10 \sim 20$ 倍，一般液压马达为 $61 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ （近年来发展的无槽电动机具有很高的转矩—惯量比，同液压马达相当）。转矩—惯量比大，意味着液压系统能够产生大的加速度，也就是说时间常数小，响应速度快，具有优良的动态品质。

2. 控制方式性能

液压及气压传动在组成控制系统时，与机械装置相比，其主要优点是操作方便、省力，系统结构空间的自由度大，易于实现自动化，且能在很大的范围内实现无级调速，传动比可达 $100:1$ 至 $2000:1$ 。如与电气控制相配合，可较方便地实现复杂的程序动作和远程控制。此外，流体传动还具有传递运动均匀平稳，反应速度快，冲击小，能高速起动、制动和换向；易于实现过载保护；流体控制元件标准化、系列化和通用化程度高，有利于缩短机器的设计、制造周期和降低制造成本。

当然，液压和气压传动也有一定的缺点，例如传动介质易泄漏和可压缩性会使传动比不能严格保证；由于能量传递过程中压力损失和泄漏的存在，使传动效率低；流体传动装置不能在高温下工作；流体控制元件制造精度高以及系统工作过程中发生故障不易诊断等。

气压传动与液压传动相比，有如下优点：

1) 空气取自周围大气，无介质费用和供应上的困难，将用过的气体排入大气，处理方便。泄漏不会严重影响工作，不会污染环境。

2) 空气的粘性很小，在管路中的阻力损失远远小于液压传动系统，宜于远程传输及控制。

3) 工作压力低，元件的材料和制造精度低。

4) 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，也适用于食品及医药的生产过程。

5) 气动元件可以根据不同场合，采用相应材料，使元件能够在恶劣的环境（强振动、强冲击、强腐蚀和强辐射等）下进行正常工作。

气压传动与电气、液压传动相比有以下缺点：

- 1) 气压传动装置的信号传递速度限制在声速（约 340m/s）范围内，所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置，并且信号要产生较大的失真和延滞，也不便于构成较复杂的回路，但这个缺点对工业生产过程不会造成困难。
- 2) 空气的压缩性远大于液压油的压缩性，因此在动作的响应能力、工作速度的平稳性方面不如液压传动。
- 3) 气压传动系统输出力较小，且传动效率低。

五、液压与气压传动的应用及发展

在工业生产的各个部门应用液压与气压传动技术的出发点是不尽相同的。例如，工程机械、矿山机械、压力机械和航空工业中采用液压传动的主要原因是取其结构简单、体积小、重量轻、输出力大；机床上采用液压传动是取其能在工作过程中方便地实现无级调速，易于实现频繁的换向，易于实现自动化；在电子工业、包装机械、印染机械、食品机械等方面应用气压传动主要是取其操作方便，且无油、无污染的特点。表 0-1 是液压与气压传动在各类机械行业中的应用举例。

表 0-1 液压与气压传动在各类机械行业中的应用

行业名称	应用举例	行业名称	应用举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机	轻工机械	打包机、注塑机
矿山机械	凿石机、开掘机、提升机、液压支架	灌装机械	食品包装机、真空镀膜机、化肥包装机
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机	汽车工业	高空作业车、自卸式汽车、汽车超重机
冶金机械	轧钢机、压力机、步进加热炉	铸造机械	砂型压实机、加料机、抛砂机、压铸机
锻压机械	压力机、模锻机、空气锤	纺织机械	织布机、印染机
机械制造	组合机床、冲床、自动线、气动扳手		

液压与气压传动发展到目前的水平主要是由于液压与气压传动本身的特点所致，随着工业的发展，液压与气压传动技术必将更加广泛地应用于各个工业领域。

液压技术自 18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起，已有 200 年的历史了，但其真正的发展只是在第二次世界大战后 50 余年的时间内，战后液压技术迅速转向民用工业，在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步推广。20 世纪 60 年代以来，随着原子能、空间技术、计算机技术的发展，液压技术得到了很大的发展，并渗透到各个工业领域中去。当前液压技术正向高压、高速、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时，新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助测试（CAT）、计算机直接控制（CDC）、计算机实时控制技术、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术，以及污染控制技术等也都是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

气压传动技术在科技飞速发展的当今世界，发展将更加迅速。随着工业的发展，气动技术的应用领域已从汽车、采矿、钢铁、机械工业等行业迅速扩展到化工、轻工、食品、军事工业等各行各业。气动技术已发展成包含传动、控制与检测在内的自动化技术。由于工业自动化技术的发展，气动控制技术以提高系统可靠性，降低总成本为目标，研究和开发系统控制技术和机、电、液、气综合技术。显然，气动元件当前发展的特点和研究方向主要是节能化、小型化、轻量化、位置控制的高精度化，以及与电子学相结合的综合控制技术。

第一章 液压传动基础知识

本章主要讲述液压油的物理性质、液压油的使用与污染控制、液体静力学的基本特性、液体流动的运动特性等液压传动的基础知识。

本章重点

1. 液压油的物理性质。
2. 液体静力学和运动学的基础知识。

本章难点

液压粘性的概念。

流体传动包括液体传动和气体传动，以液体的静压能传递动力的液压传动是以油液作为工作介质的，为此必须了解油液的种类及物理性质、油液的静力学和运动学规律。

从微观的观点来看，油液与其他流体相同，也是由一个一个的、不断作不规则运动的分子组成的。分子之间存在着间隙，它们是不连续的。但是由于分子之间的间隙是极其微小的，因而在研究宏观的机械运动时，可以认为它是一种连续介质。在稳态工作时，也不考虑其可压缩性。另一方面，由于油液分子与分子间的内聚力极小，几乎不能抵抗任何拉力而只能承受较大的压应力；不能抵抗剪切变形而只能对变形速度呈现阻力。不管作用的剪切力怎样微小，油液总会发生连续的变形，这就是油液的易流动性，它使得油液本身不能保持一定的形状，只能呈现所处容器的形状。

第一节 液压传动工作介质

液体是液压传动的工作介质。最常用的工作介质是液压油。此外，还有乳化型传动液和合成型传动液。

一、液压传动工作介质的性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度。体积为 V ，质量为 m 的液体的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减小，随压力的提高而稍有增加，但变动值很小，可以认为是常值。我国采用 20°C 时的密度作为油液的标准密度，以 ρ_{20} 表示。常用液压油和传动液的密度见表 1-1。

2. 粘性

液体在外力作用下流动（或有流动趋势）时，分子间的内聚力要阻止分子相对运动而产生的一种内摩擦力，这种现象叫做液体的粘性。液体只有在流动（或有流动趋势）时才

会呈现出粘性，静止液体是不呈现粘性的。

表 1-1 常用工作介质的密度		(单位: kg/m ³)	
种 类	ρ_{20}	种 类	ρ_{20}
石油基液压油	850 ~ 900	增粘高水基液	1003
水包油乳化液	998	水—乙二醇液	1060
油包水乳化液	932	磷酸酯液	1150

粘性使流动液体内部各处的速度不相等，以图1-1为例，若两平行平板间充满液体，下平板不动，而上平板以速度 u_0 向右平动。由于液体的粘性，紧靠下平板和上平板的液体层速度分别为零和 u_0 ，而中间各液层的速度则视它距下平板的距离按曲线规律或线性规律变化。

液体的粘度是指它在单位速度梯度下流动时单位面积上产生的内摩擦力。粘度是衡量液体粘性的指标。粘度 μ 称为动力粘度，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒），以前沿用的单位为 P（泊， $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ）， $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$ （厘泊）。

液体的动力粘度与其密度的比值，称为液体的运动粘度 ν ，即 $\nu = \mu/\rho$ ，单位为 m^2/s 。以前沿用的单位为 St（斯）， $1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$ （厘斯） $= 10^6\text{mm}^2/\text{s}$ 。就物理意义来说， ν 不是一个粘度的量，但习惯上常用它来标志液体粘度。液压传动工作介质的粘度等级是以 40°C 时运动粘度（以 mm^2/s 计）的中心值来划分的，如某一种牌号 L-HL22 普通液压油在 40°C 时运动粘度的中心值为 $22\text{mm}^2/\text{s}$ 。

液体的粘度随液体的压力和温度而变。对液压传动工作介质来说，压力增大时，粘度增大。在一般液压系统使用的压力范围内，增大的数值很小，可以忽略不计。但液压传动工作介质的粘度对温度的变化十分敏感，如图 1-2 所示，温度升高，粘度下降，这个变化率的大小直接影响液压传动工作介质的使用，其重要性不亚于粘度本身。

3. 其他性质

液压传动工作介质还有其他一些性质，如稳定性（热稳定性、氧化稳定性、水解稳定性、剪切稳定性等）、抗泡沫性、抗乳化性、防锈

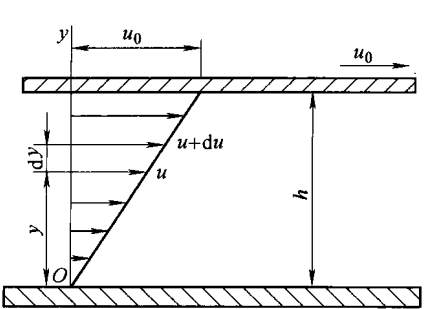


图 1-1 液体的粘性示意图

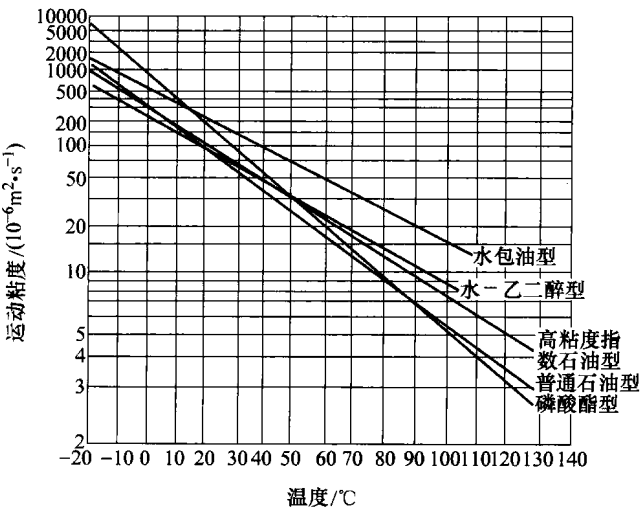


图 1-2 粘度和温度间的关系

性、润滑性以及相容性（对所接触的金属、密封材料、涂料等作用程度）等，都对它的选择和使用有重要影响。这些性质需要在精炼的矿物油中加入各种添加剂来获得，其含义较为明显，不多作解释，可参阅有关资料。

二、对液压传动工作介质的要求

不同的工作机械、不同的使用情况对液压传动工作介质的要求有很大的不同。为了很好地传递运动和动力，液压传动工作介质应具备如下性能：

- 1) 合适的粘度， $\nu_{40} = (15 \sim 68) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，较好的粘温特性。
- 2) 润滑性能好。
- 3) 质地纯净，杂质少。
- 4) 对金属和密封件有良好的相容性。
- 5) 对热、氧化、水解和剪切都有良好的稳定性。温度低于 57°C 时，油液的氧化进程缓慢之后，温度每增加 10°C ，氧化的程度增加一倍，所以控制液压传动工作介质的温度特别重要。
- 6) 抗泡沫好，抗乳化性好，腐蚀性小，防锈性好。
- 7) 体积膨胀系数小，比热容大。
- 8) 流动点和凝固点低，闪点（明火能使油面上油蒸气闪燃，但油本身不燃烧时的温度）和燃点高。
- 9) 对人体无害，成本低。

对轧钢机、压铸机、挤压机和飞机等液压系统则须突出耐高温、热稳定、不腐蚀、无毒、不挥发、防火等项要求。

三、工作介质的分类和选用

1. 分类

液压系统工作介质的品种以其代号和后面的数字组成，代号中 L 是石油产品的总分类号“润滑剂和有关产品”，H 表示液压系统用的工作介质，数字表示为该工作介质的某个粘度等级。石油型液压油是最常用的液压系统工作介质，其各项性能都优于全损耗系统用油 L-AN（原称机械油）。机械油是一种低品位、浪费资源的产品，不再生产，HL 液压油已被列为机械油的升级换代产品。石油型液压油粘度等级有自 15 至 150 等多种规格，选用见表 1-2。

乳化型工作介质简称乳化液，它由两种互不相容的液体（如水和油）构成。液压系统乳化液分为两大类，一类是少量油分散在大量水中，称为水包油乳化液（O/W 也称高水基液）；另一类是水分散在油中，称为油包水乳化液（W/O）。

水包油乳化液中油约占 5% ~ 10%（体积分数）左右。油的作用是作为各种添加剂的载体，和添加剂一起形成极微小的油滴，分散悬浮在水中，有 L—HFAE7、10、15、22、32 等五个品种。使用温度为 $5 \sim 50^\circ\text{C}$ 。其特点是粘度低、泄漏大，系统压力不宜高于 7MPa，增粘型高水基液的工作压力不宜高于 14MPa；水的饱和蒸汽压高，易汽化，易气蚀，泵的吸油口应保持正压，泵的转速不应超过 1200r/min；而且，其润滑性远低于油，高水基泵的寿命只有液压泵的一半。水包油乳化液多用于液压支架及用液量特别大的液压系统。

油包水乳化液含油 60%（积分数），水滴直径小于 $1.5\mu\text{m}$ ，其性能接近液压油，抗燃性高于液压油，使用油温不得高于 65°C ，以免汽化。油包水乳化液有 L—HFB22、32、46、68、100 等五个品种。

表 1-2 液压系统工作介质分类 (GB11118.1—1994)

分 类	名 称	代 号	组成和特性	应 用
石油型	精制矿物油	L—HH	无抗氧化剂	循环润滑油，低压液压系统
	普通液压油	L—HL	HH 油，并改善其防锈和抗氧化性	一般液压系统
	抗磨液压油	L—HM	HL 油，并改善其抗磨性	低、中、高压系统，特别适合于有防磨要求带叶片泵的液压系统
	低温液压油	L—HV	HM 油，并改善其粘温特性	能在 -20 ~ -40℃ 的低温环境中工作，用于户外工作的工程机械和船用设备的液压系统
	高粘度指数液压油	L—HR	HL 油，并改善其粘温特性	粘温特性优于 L—HV 油，用于数控机床液压系统和伺服系统
	液压导轨油	L—HG	HM 油，并具有粘—滑特性	适用于导轨和液压系统共用一种油品的机床，对导轨有良好的润滑性和防爬性
	其他液压油		加入多种添加剂	用于商品质的专用液压系统
乳化型	水包油乳化液	L—HFAE	需要难燃液的情况	
	油包水乳化液	L—HFB		
合成型	水—乙二醇液	L—HFC		
	磷酸酯液	L—HFDR		

水—乙二醇传动液有 L—HFC15、22、32、46、68、100 等六个品种。乙二醇占 20% ~ 40%（体积分数，后同），水占 35% ~ 55%，增粘剂约占 10% ~ 15%，其余为添加剂。抗燃性优于液压油，使用温度为 -18 ~ 65℃，低温性能好，适合于飞机液压系统。润滑性不如液压油，泵的磨损比用液压油的泵高 3 ~ 4 倍，系统压力应低于 14MPa。

磷酸酯传动液有 L—HFDR15、20、32、46、68 等五个品种。使用温度为 -20 ~ 100℃。它是用各种无水的磷酸酯做基础，再加入各种添加剂而制成的。它的难燃性好，自燃点高，挥发性低，氧化稳定性好，润滑性好。但粘温性和低温性能较差，和丁腈橡胶不相容。有微毒，应避免和皮肤直接接触。适用于冶金设备、汽轮机等高温、高压系统，也常用于大型民航客机的液压系统。

2. 工作介质的选用原则

(1) 液压系统的工作条件 按系统中液压元件，主要是液压泵来确定工作介质的粘度，见表 1-3。同时，要考虑工作压力范围、油膜承载能力、润滑性、系统温升程度、工作介质与密封材料和涂料是否相容等要求。

(2) 液压系统的工作环境 主要是环境温度的变化范围、有无明火和高温热源、抗燃性等要求。还要考虑环境污染、毒性和气味等因素。

(3) 综合经济分析 选择工作介质时要通盘考虑价格和使用寿命，高质量的液压油从一次购置的角度来看花费较大，但从使用寿命、元件更换、运行维护、生产效率的提高上讲，总的经济效益是非常合算的。

表 1-3 按液压泵类型推荐用工作介质的粘度

液压泵类型		工作介质粘度 $\nu_{40}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
		液压系统温度 5 ~ 40℃	液压系统温度 40 ~ 80℃
齿轮泵		30 ~ 70	65 ~ 165
叶片泵	$p < 7.0\text{MPa}$	30 ~ 50	40 ~ 75
	$p \geq 7.0\text{MPa}$	50 ~ 70	55 ~ 90
径向柱塞泵		30 ~ 80	65 ~ 240
轴向柱塞泵		40 ~ 75	70 ~ 150

四、液压系统的污染控制

工作介质的污染是液压系统发生故障的主要原因。它严重影响液压系统的可靠性及液压元件的寿命，因此工作介质的正确使用、管理以及污染控制，是提高液压系统的可靠性及延长液压元件使用寿命的重要手段。

1. 污染的根源

进入工作介质的固体污染物有四个主要根源，它们是：已被污染的新油、残留污染、侵入污染和内部生成污染。了解每一个根源，都是液压系统的污染控制措施和过滤器设置的主要考虑因素。

(1) 已被污染的新油 虽然液压油和润滑油是在比较清洁的条件下精炼和调合的，但油液在运输和储存过程中会受到管道、油桶和储油罐的污染。其污染物为灰尘、砂土、锈垢、水分和其他液体等。

(2) 残留污染 液压系统和液压元件在装配和冲洗中的残留物。如毛刺、切屑、型砂、涂料、橡胶、焊星和棉纱纤维等。

(3) 侵入污染 液压系统运行过程中，由于油箱密封不完善以及元件密封装置损坏而由系统外部侵入的污染物。如灰尘、砂土、切屑以及水分等。

(4) 内部生成污染 液压系统运行中系统本身所生成的污染物。其中既有元件磨损剥离、被冲刷和腐蚀的金属颗粒或橡胶末，又有油液老化产生的污染物等，这一类污染物最具有危险性。

2. 污染引起的危害

液压系统的故障有 75% 以上是由工作介质污染物所引起的。污染物颗粒具有各种形状和尺寸并由各种材料构成，大多数是磨粒性的。它们与元件表面相互作用时，产生磨粒磨损和表面疲劳。从元件表面犁削和切削出碎片，加速元件磨损，使内泄漏增加，降低泵、阀等元件的效率和精度，这些变化一开始很难觉察，尤其对泵来说，最终会引起失效。这种失效是不能恢复的退化失效。最容易引起磨损的颗粒是处于间隙尺寸的颗粒。

当一个大颗粒进入泵或阀时，可能使泵或阀卡死，或者堵塞阀的控制节流孔，引起突发失效。细小颗粒淤积也能引起突发失效，有时，颗粒或污染物妨碍阀的归位，使阀不能完全关闭，当阀再次打开时，该颗粒或污染物可能被冲走，于是，出现一种讨厌的间歇失效，导致液压系统不能正常工作。

颗粒、污染物和油液氧化变质生成的粘性胶质堵塞过滤器，使液压泵运转困难，产生噪声。水分和空气的混入使工作介质的润滑性能降低，并使它加速氧化变质，产生气蚀，使液

压元件加速腐蚀，液压系统出现振动和爬行等现象。

这些故障轻则影响液压系统的性能和使用寿命，重则损坏元件使元件失效，导致液压系统不能工作，危害是非常严重的。

3. 污染的测定

工作介质的污染度是指单位容积工作介质中固体颗粒污染物的含量。含量可用重量或颗粒数表示，因而相应的污染度测定方法有称重法和颗粒计数法两种。

(1) 称重法 把 100mL 的工作介质样品进行真空过滤并烘干后，在精密天平上称出颗粒的重量，然后依标准定出污染等级。这种方法只能表示工作介质中污染物的总量，不能反映颗粒尺寸的大小及其分布情况。这种方法设备简单，操作方便，重复精度高，适用于工作介质日常性的质量管理场合。

(2) 颗粒计数法 颗粒计数法是测定工作介质样品单位容积中不同尺寸范围内颗粒污染物的颗粒数，借以查明其区间颗粒浓度（单位容积油液中含有某给定尺寸范围的颗粒数）或累计颗粒浓度（单位容积油液中含有大于某给定尺寸的颗粒数）。目前，用得较普遍的有显微镜颗粒计数法和自动颗粒计数法。

显微镜颗粒计数法也是将 100mL 工作介质样品进行真空过滤，并把得到的颗粒经溶剂处理后，放在显微镜下，找出其尺寸大小及数量，然后依标准确定工作介质的污染度。这种方法的优点是能够直接看到颗粒的种类、大小及数量，从而可推测污染原因，但要求有熟练的操作技术，操作时间长，劳动强度低，精度低。

自动颗粒计数法是利用光源照射工作介质样品时，工作介质中颗粒在光电传感器上投射所发出的脉冲信号来测定工作介质的污染度的。由于信号的强弱和多少分别与颗粒的大小和数量有关，将测得的信号与标准颗粒产生的信号相比较，就可以算出工作介质样品中颗粒的大小与数量。这种方法能自动计数，测定简便、迅速、精确，可以及时从高压管道中抽样测定，因此得到了广泛的应用，但是此法不能直接观察到污染颗粒本身。

4. 污染度的等级

为了描述和评定工作介质污染的程度，以便对它进行控制，有必要规定出工作介质的污染度等级。下面介绍我国制定的国家标准 GB/T 14039—1993《液压系统工作介质固体颗粒污染等级代号》和目前仍被采用的美国 NAS1638 油液污染度等级。

我国制定的 GB/T 14039—1993《液压系统工作介质固体颗粒污染等级代号》等效采用国际标准 ISO 4406—1987。固体颗粒污染等级代号由斜线隔开的两个标号组成：第一个标号表示 1mL 工作介质中大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒数；第二个标号表示 1mL 工作介质中大于 $15\mu\text{m}$ 的颗粒数。按显微镜颗粒计数法或自动颗粒计数法取得颗粒计数数据。针对大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒数规定为第一个标号，针对大于 $15\mu\text{m}$ 的颗粒数规定为第二个标号，两个标号间用斜线隔开。标号的含义如表 1-4 所示，例如：污染等级代号 18/15 表示在 1mL 给定工作介质中大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒有 1300 ~ 2500 个，大于 $15\mu\text{m}$ 的颗粒有 160 ~ 320 个。这种用双标号标志的污染等级代号来说明实质性的工程问题是较科学的，因为 $5\mu\text{m}$ 左右的颗粒对堵塞元件缝隙的危害最大，而大于 $15\mu\text{m}$ 的颗粒对元件的磨损作用最为显著，用它来反映工作介质污染度较为恰当，这种标准得到了普遍的采用。但是，现行的 ISO 4006 标准还有一个不足，它未报告小于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒计数，这些非常细小的淤泥颗粒的聚集也能导致故障。为了弥补这一点，有些厂商已将污染等级代号用大于 $2\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 的颗粒数三个标号表示。例如，三标