

· 普通高等院校机电类规划教材 ·

液压与气动技术

YEYA YU QIDONG JISHU

王晓方 主编

普通高等院校机电类规划教材

液压与气动技术

王晓方 主编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气动技术/王晓方主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2006. 1

普通高等院校机电类规划教材

ISBN 7-5019-5154-3

I. 液... II. 王... 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 (2005) 第 124729 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 邱亦刚

版式设计: 马金路 责任校对: 燕 杰 责任监印: 胡 兵

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 河北省高碑店市鑫昊印刷有限责任公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.25

字 数: 466 千字

书 号: ISBN 7-5019-5154-3/TH·064 定价: 28.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010—65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010—85119817 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

50351J4X101ZBW

前 言

液压与气动技术是高等院校机电类专业学生必修的一门重要的技术基础课。近几年国内陆续出版了不少有关液压与气动方面的教材。随着教学改革的不深入,专业面的不断拓宽,课程的内容和体系也必须做相应的改革。尤其是在电子技术日益发展的今天,液压与气动技术已渗入到各个学科领域。因此,把液压与气动结合起来、把传动与控制结合起来是发展的必然结果。同时,对教材的针对性和实用性提出了较高的要求,即要求教材易懂、实用而且能反映当今先进的技术和应用情况,更要有利于学生分析问题和解决问题能力的培养。本教材突出“技术”二字正是体现了这两方面的特点。

本教材的作者都是长期工作在教学和科研第一线的教师和工程技术人员,本教材的主要特点是:

(1) 体系新颖 在教材体系上进行了大胆、合理的整合。即将液压与气动两部分内容融为一体。把它们相同的原理部分统一论述,统一定义在流体的大范畴内;不同的结构和特点部分对照论述。这样既减少了重复,又增强了对比性,力求用较少的授课学时,传授更多的知识。同时,为适应当前自动化技术的发展,增加了控制部分。实现了传动与控制结合、液压与气动结合。

(2) 内容新颖 本教材以当前应用并代表发展趋势的液压与气动新技术为背景,取材新颖、实用,对近年来新开发的液压、气压元器件以及可编程序控制器(PLC)在液气系统中的应用做了重点介绍。

(3) 应用性、实用性强 本教材通篇贯彻应用及实用原则,将液压、气动系统的安装调试与使用维护作为一章加以介绍。在例题与习题的安排上注意培养学生分析问题和解决问题的能力。

(4) 内容适当 在内容取舍上做到基础理论知识以必须、够用为度,删去了大量的理论推导及纯理论的公式定理。对设计类问题也尽可能使其简化,而更多的论述生产实际中一些应用问题,使学生易学、易懂。

本教材的内容包括:概论;液压与气压传动基础;液压与气压传动基本元件;液压与气压基本回路;典型液压、气压传动系统分析;液压、气压传动系统设计;液压、气压系统的安装调试与使用维护;液压动力自动控制;可编程序控制器(PLC)在液压系统中的应用共九章。

本教材由沈阳理工大学王晓方主编。本教材各章的编写情况是:第一章、第五章、第七章由沈阳理工大学雷镒编写;第二章由沈阳大学康凤华编写;第三章由王晓方编写;第四章、第六章的液压部分由沈阳工业大学王文友编写,气压部分由沈阳建筑大学孙军和王晓方编写;第八章、第九章由沈阳建筑大学高凤阳编写。全书由王晓方最后统稿审核。本教材在编写过程中得到了洪英发、崔广臣、诸葛晓舟、王莹、吕思科、王恭堂、吕众、黄冬梅、刘靖岩、周琳辉、彭德华等的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

本教材可作为普通高等院校、高等职业技术学院、成人高等教育等层次的机电类各专业的教学用书,也可供从事生产、科研工作的技术人员参考。

由于编者水平所限,再加上时间仓促,书中难免存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编者

2005年7月

目 录

第一章 概论	1
第一节 液压与气压传动的工作原理及工作特点.....	1
第二节 液压与气压传动系统的组成、分类及图形符号.....	3
第三节 液压与气动技术的应用与发展.....	5
复习思考题与习题.....	6
第二章 液压与气压传动基础	7
第一节 流体及物理性质.....	7
第二节 液压油的性质及选用.....	9
第三节 流体静力学基础	13
第四节 气体的性质及状态方程	16
第五节 流体动力学基础	20
第六节 流体在管路中流动时的特性	24
第七节 流体流经孔口和缝隙的流量	29
第八节 液压冲击和气穴现象	33
复习思考题与习题	35
第三章 液压与气压传动基本元件	37
第一节 液压泵与液压马达、空气压缩机与气压马达	37
第二节 动力缸	70
第三节 控制阀与气动逻辑元件	87
第四节 液压与气压辅助元件.....	133
复习思考题与习题.....	166
第四章 液压与气压基本回路	173
第一节 液压传动压力控制回路.....	173
第二节 液压传动速度控制回路.....	180
第三节 液压传动方向控制回路.....	192
第四节 液压传动多缸控制回路.....	193
第五节 液压逻辑回路.....	197
第六节 气动基本回路.....	198
复习思考题与习题.....	207
第五章 典型液压与气压系统分析	211
第一节 组合机床动力滑台液压系统.....	211
第二节 Q2-8 型汽车起重机液压系统	213
第三节 SZ-250A 型塑料注射成型机液压系统.....	216
第四节 射芯机气动系统.....	220
第五节 气动机械手气动系统.....	222

复习思考题与习题·····	224
第六章 液压与气压传动系统设计·····	226
第一节 液压传动系统设计·····	226
第二节 气动系统设计·····	238
复习思考题与习题·····	252
第七章 液压与气压系统的安装调试与使用维护·····	253
第一节 液压系统的安装与调试·····	253
第二节 液压系统的使用与维护·····	256
第三节 液压系统及其元件常见故障的排除方法·····	256
第四节 气压系统的安装调试与使用维护·····	263
第五节 气压系统主要元件的常见故障及其排除方法·····	266
复习思考题与习题·····	269
第八章 液压动力自动控制·····	270
第一节 液压动力自动控制概述·····	270
第二节 液压放大元件·····	271
第三节 液压动力机构·····	275
第四节 液压伺服系统 ·····	281
复习思考题与习题·····	290
第九章 可编程序控制器 (PLC) 在液压系统中的应用 ·····	291
第一节 PLC 概述 ·····	291
第二节 PLC 控制系统设计及实例 ·····	298
复习思考题与习题·····	309
部分习题参考答案·····	310
附录 液压与气压传动常用图形符号·····	312
主要参考文献·····	316

第一章 概 论

第一节 液压与气压传动的工作原理及工作特点

液压与气动技术是研究以流体作为工作介质来实现传动和控制的技术。它们的工作原理基本相同，这里以综合对比的方法来论述。

一、液压传动的工作原理

图 1-1 是简化的液压系统原理图。它是利用液体的压力能来传递动力的。两个直径不同的液压缸 2 和 4 之间用管道 3 连通，缸内各有一个与内壁紧密配合的活塞 1 和 5 构成了密封容积，并都充满了液体。如果活塞 5 上有重物 W ，则活塞 1 上施加的力 F 达到一定值时，就能防止重物 W 的下降。当活塞 1 在力 F 作用下向下运动时，重物 W 将随之向上运动。也就是说，密封容积中的液体可以传递力和运动。在传动过程中密封容积的液体受到挤压，产生一定压力作用在活塞上。设活塞 1 和 5 的面积分别为 A_1 和 A_2 ，则活塞 1 单位面积上受到的压力 $p_1 = F/A_1$ ，活塞 5 单位面积上受到的压力 $p_2 = W/A_2$ 。根据流体力学的帕斯卡定律“平衡液体内某一点的压力值能等值地传递到密闭液体内各点”，则有

$$p_1 = p_2 = \frac{F}{A_1} = \frac{W}{A_2} \quad (1-1)$$

或

$$\frac{W}{F} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1-2)$$

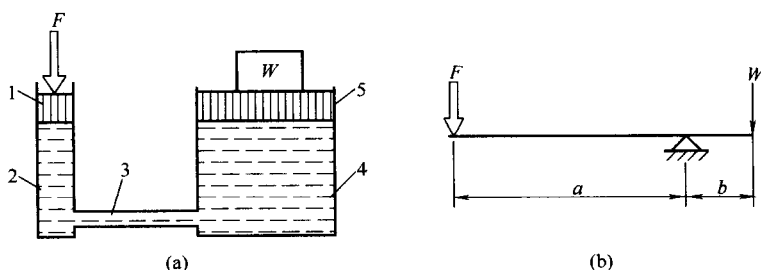


图 1-1 简化的液压系统原理图

1、5—活塞 2、4—液压缸 3—管道

用机械传动的杠杆比来分析，如图 1-1 (b) 所示有 $Fa = bW$ ，即 $a/b = W/F$ ，于是 $A_2/A_1 = a/b$ 。不考虑泄漏和液体可压缩性，液压传动与机械杠杆传动相当。根据式 (1-1)， $p = W/A_2$ 。外负载 W 的存在，活塞 1 才能施加上作用力 F ，而有了负载作用力，才产生液体压力。所以就负载和液体压力两者来说，负载是第一性的，压力是第二性的。即有了负载，液体才会有压力，并且压力的大小决定于负载。于是得到一个重要概念：液压传动中液体压力决定于负载。今后在分析液压传动中元件和系统的工作原理时经常要用到这个概念。实际上液压传动中液体的压力相当于机械传动中构件的应力。机械构件的应力也是决定于负载的，但机械构件在传动时可以承受拉、压、弯、剪等各种应力，而液体传动中液体只承受压力，这是两者的重要区别。

二、气压传动的工作原理

气压传动是以压缩空气为介质来传递动力的，空气介质在气动系统中的流程如图 1-2 所示。

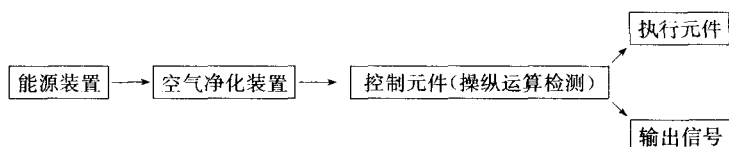


图 1-2 气压传动流程图

一般的气动系统按图 1-3 工作，按下启动阀 m 接通气源使 F_A 阀换向，气流进入气缸 A

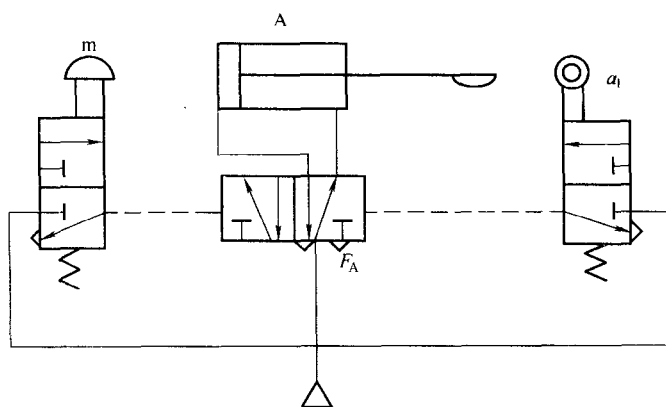


图 1-3 气缸作一次往复运动回路

左腔推动活塞右行，到达行程终点时压下行程阀 a_1 ，气源又通过阀 a_1 使阀 F_A 换向，气流进入气缸 A 右腔使活塞杆退回。每按动一次启动阀 m 就可使气缸活塞往复一次，这就是气压传动的简化工作原理。因为用空气作介质，其性能与液压传动有所不同。

三、液压传动与气压传动的工作特点

1. 液压传动与机械传动、电

动传动、气压传动相比较的主要特点

1) 液压传动各执行元件的动作和力（力矩）是靠液体来传递的，所以液体的质量和清洁度将直接关系到液压设备的运行状况。因此必须做到控制油液污染、控制泄漏和控制温升及吸入空气等。

2) 在相等功率条件下，液压传动设备比机械传动设备体积小、重量轻、运动惯性小、动态性能好，换向频率高。其往复回转运动可达每秒 500 次，往复直线运动可达每秒 1000 次。

3) 液压系统便于与电气控制系统联合使用，自动化程度高。

4) 液压设备由标准化、通用化程度较高的液压元件组成，便于设计制造和推广使用。

5) 液压传动设备具有自我润滑和自动防止过载的保护能力，故使用起来安全可靠。

6) 由于液压传动的各执行机构所传递的力、速度、位移可无级调节（调节范围可达 $1:2000$ ），故能迅速适应被控制参数的变化。

7) 液压元件属于精密零件，因此元件的修理较困难。

8) 液压设备的故障有隐蔽性和多变性，因此故障原因的判断要比机械故障的判断难得多。

2. 气压传动与其它传动形式相比较的主要特点

1) 气体流动时惯性小，所以气动元件的动作快，反应灵敏，在系统中建立起一定压力

和流速所需的时间较短。

2) 空气的黏性小, 因此在管道中流动时压力损失小, 便于集中供气和压缩空气的远距离输送。

3) 气动系统中回气可直接排入大气, 不需要设置回气管路, 系统比较简单。

4) 气动系统中的工作介质是空气, 因此不存在变质、补充和更换问题, 经济性好。

5) 气动系统的工作性能对温度变化不敏感, 几乎在 $0\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围均可工作, 并且在高温下不会发生燃烧或爆炸。

6) 由于空气的压缩性远大于液体的压缩性, 因此, 气动系统的使用压力较低, 一般限制在 $0.2\sim 0.8\text{MPa}$ 范围之内, 它只能作为功率不大的动力系统。且气压传动的效率比液压传动低。但同时由于工作压力低, 可降低对气动元件的材料和制造精度的要求。

7) 空气的容积模量比液压油小得多, 所以气动系统的速度刚度比液压系统低, 低速稳定性差; 气动输出力不如液压传动大, 但气动的噪声却较大, 尤其在超声速排气时需加装消声器。

8) 空气没有润滑性能, 其中又含有水蒸气, 所以气动元件的工作条件比液压元件差。

9) 气压信号比电气信号传播速度慢, 所以气动系统的快速性和响应频率不如电气控制系统。与机械传动相比, 也不如机械传动准确可靠。

10) 气动系统对一定限度的外泄漏是允许的, 因为外漏的空气不会污染工作环境, 也不会影响气压传动的质量。但由于气动系统本身工作压力不高, 所以要尽可能地减少泄漏。

第二节 液压与气压传动系统的组成、分类及图形符号

一、液压传动系统的组成及图形符号

图 1-4 是一个用于实现工作台往复运动的液压系统图。图 1-4 (a) 中, 液压泵 3 由电动机带动旋转, 从油箱 1 中吸油。油液经滤油器 2 过滤后被液压泵吸入并输出给系统。液压泵输出的压力油经节流阀 5 和换向阀 6 进入液压缸 7 的左腔, 推动活塞连同工作台 8 向右移动, 这时液压缸右腔的油通过换向阀经回油管 9 排回油箱。如果将换向阀操纵手柄搬到左边位置, 使换向阀处于图 1-4 (b) 所示位置, 则压力油经换向阀进入液压缸的右腔, 推动活塞连同工作台向左移动, 这时, 液压缸左腔的油经换向阀和回油管排回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀开口较大时, 进入液压缸

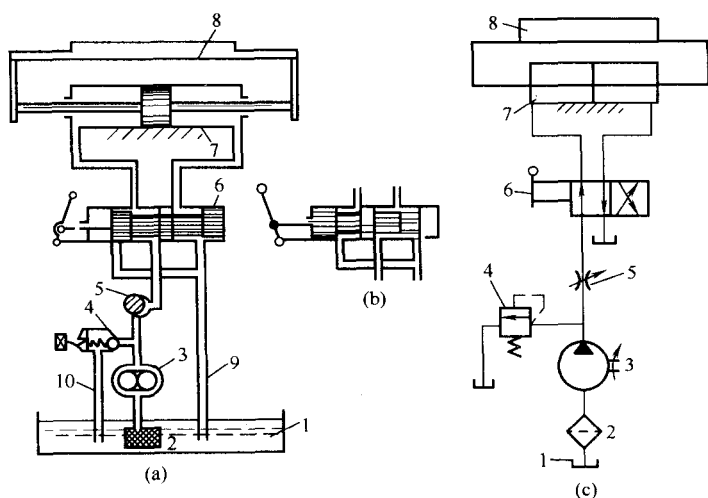


图 1-4 机床工作台液压传动系统图

1—油箱 2—滤油器 3—液压泵 4—溢流阀 5—节流阀 6—换向阀
7—液压缸 8—工作台 9、10—回油管

的流量较大,工作台的移动速度也较快;反之,当节流阀开口较小时,工作台的移动速度则较慢。工作台移动时,必须克服阻力,如克服切削力和相对运动表面的摩擦力等。为适应克服大小不同阻力的需要,泵输出油液的压力应当能够调整。另外,当工作台低速移动时,节流阀开口较小,泵输出的多余的油液亦需排回油箱。这是由溢流阀4来实现的,调节溢流阀弹簧的预压力,就能调整泵输出口的油液压力,并让多余的油在相应压力下打开溢流阀经回油管10流回油箱。图1-4所示的液压系统具有代表性,它所用元件的类型较齐全,从而可以得出结论,任何一个完整的液压系统总是由以下五个部分组成:

(1) 动力元件 即液压泵,其功用是为液压系统提供压力油源,是将原动机的机械能转换为液压能的装置。

(2) 执行元件 指液压缸和液压马达。它是将液压能转化为机械能的装置。液压缸输出往复运动的力和速度,而液压马达输出扭矩和转速。

(3) 控制调节元件 指各种控制阀。如图1-4中的溢流阀、节流阀、换向阀等。是用来控制和调节液流压力、流量和方向的,以保证执行元件完成预定的动作。

(4) 辅助元件 指油箱、油管、滤油器、蓄能器和压力表等,是构成液压系统的必不可少的元件。

(5) 工作介质 即传动液体,通常采用液压油,它用于实现运动和动力传递的同时,也当润滑剂使用。

图1-4(a)中组成液压系统的各元件,是用半结构图形画的。它直观性强、容易理解,但难于绘制,系统元件数量多时更是如此。在工作实际中,除少数特殊情况外,一般都采用液压图形符号来绘制,如图1-4(c)所示,图形符号只表示元件的功能,而不表示元件的具体结构和参数。使用图形符号既便于绘制,又可使液压系统简单明了,液压图形符号可参见书后附录和有关液压气动手册。

二、气压传动系统的组成及图形符号

如图1-5是一个能自动完成某种程序动作的气动系统,其中的控制装置是由若干元件组成的气动逻辑回路。它可根据气缸活塞杆的始末位置,由传感器(包括行程开关及紊流放大器)传回信号,作出逻辑判断,并指示气缸下一步动作,从而实现机器的自动化(详细内容在后面的逻辑回路中阐述)。气动系统的组成(与液压系统对应)如下:

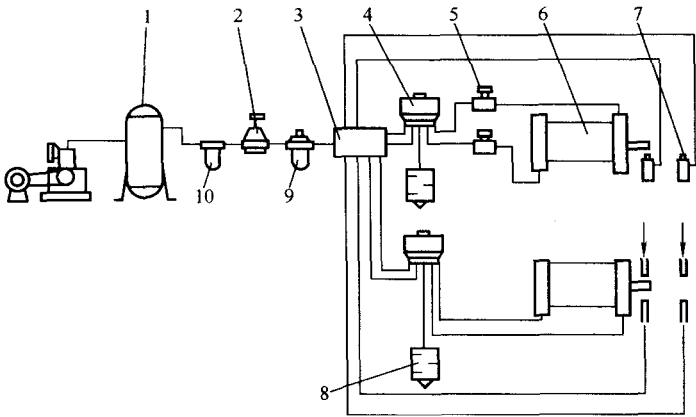


图1-5 气动系统的组成

1—气压发生装置 2—压力控制阀 3—逻辑元件 4—方向控制阀 5—流量控制阀 6—执行元件 7—传感器 8—消声器 9—油雾器 10—过滤器

断,并指示气缸下一步动作,从而实现机器的自动化(详细内容在后面的逻辑回路中阐述)。气动系统的组成(与液压系统对应)如下:

(1) 能源元件 是气动系统的动力源,它的功用是把机械能转换为气体能量,这种元件其实就是空气压缩机,一般分为两类:

1) 容积式压缩机:①往复式:其中又可分为两种方式,一种是活塞式,有单缸、

双缸和多缸等；另一种是膜片式。②回转式：可分为滑片式、螺杆式、转子式，这类方式应用较为广泛。

2) 速度式压缩机：可分为轴流式、离心式和混流式，它们比容积式压缩机应用的要少些。

(2) 控制元件 是控制和调节压缩空气的压力、流量和流动方向的元件。

(3) 执行元件 是把气体能量转换为机械能的一种装置。它可分为气缸（单作用、双作用、特殊气缸）和气马达（回转马达和摇摆马达）。

(4) 辅助元件 包括以下各部分：

1) 空气净化设备。是滤掉空气中灰尘及水分的设备，主要有过滤器、干燥器、分水滤气器、后冷却器。

2) 给油器。功用是供给气动运动部件摩擦副润滑油，有油雾器、油杯等。

3) 消声器。用于降低气动系统的噪声。

4) 各种转换器。包括气电转换器、气液转换器、放大器、显示器、延时器、程序器等。

5) 其它辅助元件。包括气罐、压力计、管接头、管路等。

气压图形符号可参见书后附录和有关液压气动手册。

三、液压气动系统的分类

1. 液压系统

液压系统可分为下列几种：

(1) 压力变换为主的系统 如液压机等。

(2) 速度变换为主的系统 ①直线运动，又可分为断续直线运动（如组合机床液压系统）和连续直线运动（如磨床工作液压系统）。②回转运动，指泵和马达组合的传动系统。

(3) 多路复合系统 如挖掘机系统和同步系统等。

(4) 开式回路系统 液压缸和液压马达回油口接油箱，便于散热和过滤液压油。

(5) 闭式回路系统 指液压缸和液压马达回油接液压泵进油口形成闭合循环，需装辅助泵，用来补充液压系统的泄漏。

2. 气动系统

气动系统按控制回路与液压系统一样，可分为开环控制和闭环控制两大类：

(1) 开环控制 其输入量与输出量之间没有连续的比较，该控制应用较为广泛。

(2) 闭环控制 其输入量与输出量之间要连续地进行测量并随时进行比较。其输入信号与来自输出量的反馈信号之差称为误差信号。闭环系统又称为反馈系统，它依靠误差信号来调节供应到系统的参量，以使输出量向着减小误差信号的方向变化。

第三节 液压与气动技术的应用与发展

一、液压技术的应用与发展

相对于机械传动来说，液压传动是一门新技术。如果从 17 世纪帕斯卡发现了静压传递原理，1795 年世界上发明第一台水压机算起，液压技术的发展已经历了三百多年的历史。然而液压传动是在第二次世界大战后才普遍应用起来的，特别是在 20 世纪 60 年代后，随着原子能科学、空间技术、计算机技术的发展，液压技术也得到了很大的发展，并且渗透到了

国民经济的各个领域。

当前，液压技术正向高压、高速、大功率、高效率、低噪声、低耗能、经久耐用和高度集成化方向发展；同时新型元件的应用、计算机仿真和优化、微机控制等方面，也日益取得显著成果。我国的液压件生产已形成完整系列，并在各种设备上推广使用。我国机械工业在认真消化、推广从国外引进的先进液压技术的同时，大力研制开发国产液压件新产品，如中高压齿轮泵、比例阀、叠加阀、数字阀及新系列中高压阀等。液压技术在我国的应用与发展已经进入了一个崭新的历史阶段。

二、气动技术的应用与发展

以空气为介质做功的机器发明得很早。开始是利用自然风力推动风车，风车又带动水车来提水灌田，后来采用压缩空气在炼丹术中用风箱吹火等。近代用于采煤的风钻、火车的制动闸及汽车的刹车与车门开闭等都是气动技术的实际应用。

伴随着工业机械化和自动化的发展，欧、美、日等发达地区和国家从 20 世纪 50 年代起就大力发展气动技术，用以实现对各种工业化生产的自动化控制，使得它在石油、化工、轻工、交通运输、国防等行业中得到了广泛的应用。至于在机械工程中如机床的程序控制、组合机床、轴承加工、汽车、农机和机械加工工艺中的铸造、锻压、冲压等设备中的应用更为普遍。风动工具均采用气动技术。甚至在测量技术方面也用到了气动技术。

国外的气动工业近年来发展迅速，水平也在日益提高，已发展成气电一体化。我国的气动工业起步较晚，与国际水平相比差距较大，在品种、性能、寿命、可靠性方面都有待提高。近年来，相继从国外引进了先进的生产技术，正在逐步改变目前国内气动工业的低水平、质量差、数量少的局面。

复习思考题与习题

1-1 两个水平放置的液压缸如图 1-6。活塞 5 用以推动一个工作台，工作台上运动阻力为 F_R ，活塞 1 上施加作用力 F ，液压缸 2 的缸径为 20mm，而液压缸 4 的缸径为 50mm， F_R 为 1960N，在以下几种情况下，计算密封容积中液体压力并分析两活塞的运动。①当活塞 1 上作用力 F 为 314N。②当 F 为 157N。③当 F 为 628N。（不考虑活塞与液压缸之间的摩擦力以及液体通过间隙的泄漏）。

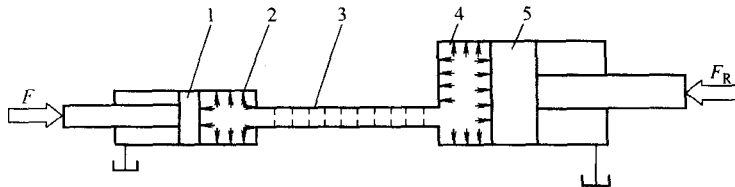


图 1-6 题 1-1 图

1、5—活塞 2、4—液压缸 3—管道

1-2 何谓液压和气压传动？它们的工作原理有何相同点和不同点？

1-3 液压系统有哪些组成部分？各部分的作用是什么？气动系统的组成也相同吗？

1-4 试比较液压与气压传动的特点。

第二章 液压与气压传动基础

第一节 流体及物理性质

一、流体的概念

流体这个术语指的是液体和气体。对于已知质量的液体，它有与容器形状无关的确定的容积。这意味着虽然液体形状总是取决于容器的形状，但它也只是充满与液体容积相等的那部分容器的容积。例如把水倒入一个容器，而水不能充满这个容器，那么水将形成自由表面，如图 2-1 所示。

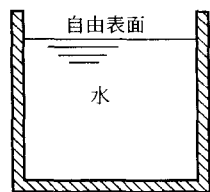


图 2-1 液体的自由表面

液体被认为是不可压缩的，因此它的容积不能随着压力的变化而变化。这一点并不完全正确，但是由于压力的变化使液体容积的变化很小，以致在大多数工程应用中是可以忽略的。

气体与液体相反，它是很容易压缩的流体。另外，气体的容积是变化的，气体始终充满容纳它的容积。图 2-2 说明了这一点，图中的气体总是充满其容器，即气体的分子总是充满整个容器。因此，一定质量的液体有一定的容积，而一定质量的气体却总是充满容纳它的容积。压力对气体的影响很大：压力增加，气体容积减小；而压力减小，气体容积增大。

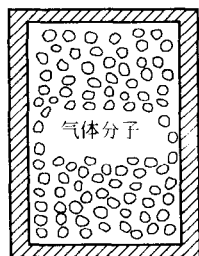


图 2-2 气体始终充满容器

在日常生产、生活中，经常看到许多有关流动现象：例如水在河中流动，燃气在管中输送，空气从喷嘴喷出等。这些现象都说明流体不同于固体的最基本特征，就是具有流动性。

流体的基本特征——流动性，是由它的力学性质决定的。流体在静止时不能承受切向力，只要流体受到切向力的作用，即使这切向力非常微小，也要发生不断的变形，流体各质点之间就要发生相对运动。流体的这个性质，称为流动性。这是它便于用管道或渠道进行输送，适宜作供热、制冷等工作介质的主要原因。可是，另一方面，流体和固体一样，能够承受较大的压力。我们可以利用蒸汽压力推动气轮机来发电，利用液压、气压传动各种机械等，都是流体抗压能力和流动性的应用。

二、流体的物理性质

(一) 流体的密度和比容

单位体积流体的质量称为流体的密度，用 ρ (kg/m^3) 表示。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中： m 为流体的质量 (kg)； V 为流体的体积 (m^3)。

流体的密度随压力的增大而增大，随温度的升高而减小。液体的密度随压力和温度的变

化较小，一般可忽略。

单位质量流体所占的体积称为比体积，是流体密度的倒数，用 γ (m^3/kg) 表示。

$$\gamma = \frac{V}{m} \quad (2-2)$$

(二) 流体的压缩性

流体受压力的作用而体积减小的性质称为流体的压缩性。可用压缩性系数 β (m^2/N) 表示，定义为单位压力变化下的流体体积相对变化量。

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

式中： Δp 为压力的增加量， ΔV 为流体体积的减小量。

流体的压缩性系数的倒数称为流体的体积弹性模数，用 k 表示。液体的压缩性很小，在稳态工作条件下可忽略。气体的可压缩性大，只有气体在管道中流动速度不大时，可认为气体不可压缩。气体的压缩性取决于气体的状态过程，式 (2-3) 仅描述了气体在等温过程的压缩性。

(三) 流体的膨胀性

流体受热体积变大的性质称为流体的膨胀性，用体积膨胀系数 α 表示。流体的膨胀性定义为流体在压力不变的条件下，温度每升高 1°C 所发生的体积相对变化量。

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta V}{V} \quad (2-4)$$

式中： ΔT 为温度的增加量； ΔV 为流体体积的增加量。

液体的膨胀性一般可忽略。气体只有在温度变化不大时，其膨胀性可忽略。气体的膨胀性取决于气体的状态过程。

(四) 流体的黏性

流体分子间的内聚力阻止分子间的相互运动而产生内摩擦力的性质称流体的黏性。流体只有流动时才有黏性，静止流体是不呈现黏性的。

流体黏性的大小用黏度来衡量。黏度通常是对液体而言，它是选择液压油的主要指标，是影响液体运动的重要物理性质。

1. 黏度的定义

流体流动时，由于它和固体壁面间的附着力及它的黏性，其内部各流层间的速度不等。如图 2-3，在两个平行平板间充满液体，两平行平板间的距离为 h ，上平板以速度 u_0 相对于静止的下平板向右移动。当两平板间的距离较小时，各液层的速度按线性规律分布。

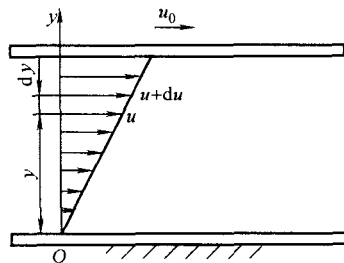


图 2-3 液体黏性示意图

实验测定指出：液体流动时，相邻液层间的内摩擦力 F 与液层间的接触面积 A 及液层间相对运动的速度 du 成正比，而与液层间的距离 dy 成反比。即：

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

若用单位面积上的摩擦力 τ (切应力) 来表示，则式 (2-5) 可以改写成：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-6)$$

式中： μ 为比例系数，称为动力黏度； du/dy 为速度梯度。

式 (2-6) 称为牛顿液体内摩擦定律，对油、水、空气等牛顿流体均适用。

2. 黏度的不同表示方法和单位

(1) 动力黏度 μ 式 (2-6) 中的 μ 是由液体种类和温度决定的比例系数，它是表征液体黏性的内摩擦因数。用它来表示黏度的大小，称为动力黏度，或称绝对黏度。它可由下式表示：

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (2-7)$$

由此可知，液体动力黏度是液体在单位速度梯度下流动时，单位面积上产生的内摩擦力。动力黏度 μ 的法定计量单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ，用 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 表示。

(2) 运动黏度 ν 动力黏度 μ 和液体密度 ρ 之比值称为运动黏度，用 ν 表示。即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-8)$$

运动黏度本身没有明确的物理意义，因为在其单位中只有长度和时间的量纲，所以称为运动黏度，它是在液压分析和计算中经常遇到的物理量。运动黏度 ν 的法定计量单位是 m^2/s 。运动黏度 ν 并不是一个黏度的量，但工程中液体的黏度常用运动黏度来标志。如机械油的牌号，就是用这种油液在 40°C 时的运动黏度 ν (mm^2/s) 的平均值来标志的。

直接测量绝对黏度很不方便，因此在工程上采用简便的方法，即测量液体的相对黏度。

(3) 相对黏度 相对黏度又称条件黏度。它是采用特定的黏度计，在规定的条件下测出来的液体黏度。根据测量条件不同，各国采用的相对黏度的单位也不同。如美国采用国际赛氏黏度 (SSU)，英国采用雷氏黏度 (R)，我国和欧洲一些国家采用恩氏黏度 ($^\circ\text{E}$)。

恩氏黏度由恩氏黏度计测定，即将 200cm^3 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8\text{mm}$ 小孔的恩氏黏度计的容器中，在某一特定温度 ($^\circ\text{C}$) 时，测定全部液体在自重作用下流过小孔所需的时间 t_1 与同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需的时间 t_2 之比值，便是该液体在此温度 ($^\circ\text{C}$) 时的恩氏黏度。恩氏黏度用符号 $^\circ\text{E}_t$ 表示：

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-9)$$

工业上常用 20°C 、 50°C 、 100°C 作为测定恩氏黏度的标准温度，并分别以相应的符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 、 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示。

恩氏黏度和运动黏度 (m^2/s) 的换算关系为：

$$\nu = \left(7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad (2-10)$$

第二节 液压油的性质及选用

一、液压油的种类

在液压传动系统中所使用的液压油大多数是石油基液压油，但也有合成液体、水包油乳化液（也称为高水基）和油包水乳化液等。近些年来，水压传动的研究又有上升的趋势，水压传动包括纯水传动和海水传动等。这里主要介绍液压传动的液压油，它们的种类如表 2-1 所示。

表 2-1

液压油的种类

石油基液压油	无添加剂的石油基液压油(L—HH) HH+抗氧化剂、防锈剂(L—HL) HL+抗磨剂(L—HM) HL+增黏剂(L—HR) HM+增黏剂(L—HV) HM+防爬剂(L—HG)		
难燃液压油	含水液压油	高含水液压油(L—HFA)	水包油乳化液(L—HFAE)
		水的化学溶液(L—HFAS)	
	合成液压油	油包水乳化液(L—HFB)	
		水-乙二醇(L—HFC)	
磷酸酯液(L—HFDR) 氯化烃(L—HFDS) HFDR+HFDS(L—HFDT) 其它合成液压油(L—HFDU)			

石油基液压油（液）是以精炼后的机械油为基料，按需要加入适当的添加剂而制成。所加入的添加剂大致有两类：一类是用来改善油液化学性质的，如抗氧化剂、防锈剂等；另一类是用来改善油液物理性质的，如增黏剂、抗磨剂等。矿物油型液压油润滑性好，但抗燃性差。为此又研制出难燃型液压油（乳化型、合成型等）用于轧钢机、压铸机或挤压机等，来满足耐高温、热稳定、不腐蚀、无毒、不挥发、防火等要求。

二、液压油的性质

液压油的性质除了具有流体的物理性质之外，温度和压力是影响液压油黏度的两个重要因素。

（一）黏度与温度的关系

温度对油液黏度影响很大，当油液温度升高时，其黏度显著下降。油液黏度的变化直接影响液压系统的性能和泄漏量，因此希望黏度随温度的变化越小越好。不同的油液有不同的黏度温度的变化关系，这种关系叫做油液的黏温特性。

对于黏度不超过 15°E 的液压油，当温度在 30～150℃ 范围内，可用下述近似公式计算某温度时的运动黏度：

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n$$

(2-11)

式中： ν_t 为某温度时油液的运动黏度 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)； ν_{50} 为温度为 50℃ 时油液的运动黏度 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)； n 为与油液黏度有关的特性指数，见表 2-2。

表 2-2

特性指数 n 的数值

$^{\circ}\text{E}_{50}$	1.2	1.5	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	15.0
$\nu_{50}/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	2.5	6.5	9.5	12	21	30	38	45	52	60	68	76	113
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49	2.52	2.56	2.75

油液温度为 t °C 时的黏度，除用上述公式计算外，还可以从图表中直接查出。图 2-4 为几种常用的国产液压油的黏温图。

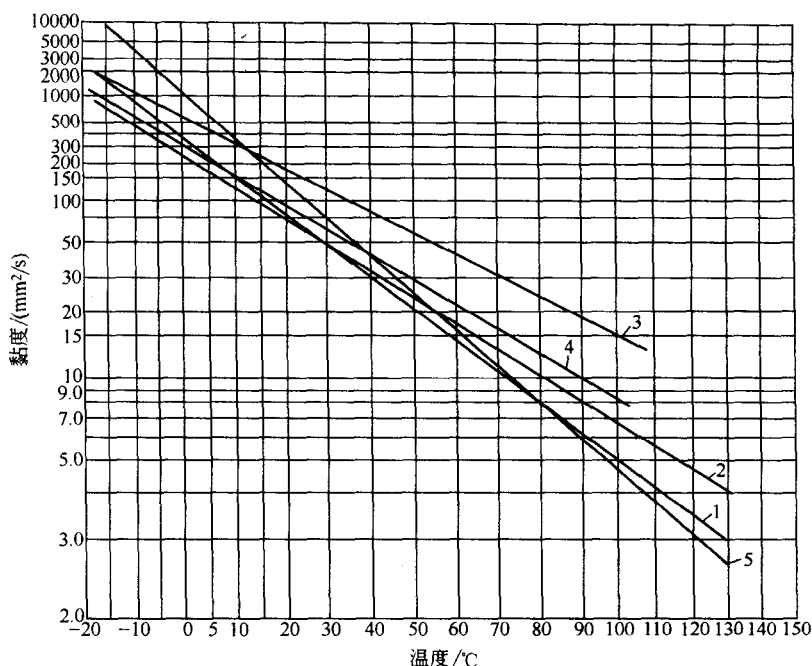


图 2-4 几种国产液压油的黏温图

1—石油型普通液压油 2—石油型高黏度指数液压油 3—抗燃性水包油乳液

4—抗燃性水-乙二醇液 5—抗燃性磷酸酯液

(二) 黏度与压力的关系

压力对油液的黏度也有一定的影响。压力越高，分子间的距离越小，因此黏度变大。不同的油液有不同的黏度压力变化关系，这种关系叫做油液的黏压特性。

黏度随压力变化关系为：

$$\nu_p = \nu_0 e^{bp} \quad (2-12)$$

式中： ν_p 为压力 p 时的运动黏度 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)； ν_0 为一个大气压下的运动黏度 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)； b 为黏度压力系数，对一般液压油 $b=0.002\sim 0.003$ 。

在实际应用中，当液压系统中使用的矿物油压力在 $0\sim 50\text{MPa}$ 的范围内时，可按下式计算油的黏度：

$$\nu_p = \nu_0 (1 + 0.003p) \quad (2-13)$$

在液压系统中，若系统的压力不高，压力对黏度的影响较小，一般可忽略不计。当压力较高或压力变化较大时，则压力对黏度的影响必须考虑。

(三) 其它特性

液压油还有其它一些物理化学性质，如抗燃性、抗氧化性、抗凝性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性、导热性、稳定性以及相容性（主要指对密封材料、软管等不侵蚀、不溶胀的性质）等，这些性质对液压系统的工作性能有重要影响。对于不同品种的液压油，这些性质的指标是不同的，具体应用时可查油类产品手册。

三、液压油的调和

选择合适黏度的液压油，对液压系统的工作性能有着十分重要的作用。有时现有的油液