

高职高专机电类专业“十一五”规划教材



液压与气动技术

YEYA YU QIDONG JISHU

主编 胡世超 主审 肖龙



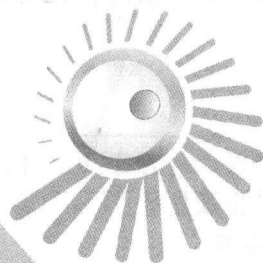
郑州大学出版社



液压与气动技术

YEYA YU QIDONG JISHU

主编 胡世超 主审 肖龙



 郑州大学出版社

内 容 简 介

本书主要包括:绪论,液压传动基础,液压泵和液压马达,液压缸,液压控制元件,液压系统辅助装置,液压系统常用回路,典型液压系统及设计简介,液压伺服系统,气压传动基础,气源装置及气动辅助元件,气动执行元件,气动控制元件及基本回路,气压传动系统实例等内容。本书注重基本概念与原理的讲解,突出应用能力和创新能力的培养,适合作为高职高专机电类和近机电类专业教学用书,也可作为教师、企业生产技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/胡世超主编. —郑州:郑州大学出版社,2008.9

高职高专机电类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-81106-895-5

I. 液… II. 胡… III. ①液压传动-高等学校:技术学校-教材②气动技术-高等学校:技术学校-教材 IV. TH137 TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 128832 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

新乡市凤泉印务有限公司印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:19.75

字数:471 千字

版次:2008 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

1/16

印次:2008 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-81106-895-5

定价:32.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

前言

本书按照“必需、够用、发展”的高职高专教育特点和突出实践能力培养的原则编写。在文字表述上,力求准确、通俗、简洁;在元件结构、原理上,力求简明、清晰、易懂,便于读者自学。书中同时引入先进技术信息,注重培养学生理解、分析、应用和创新的综合能力。

本书共分14章,主要内容包括:绪论,液压传动基础,液压泵和液压马达,液压缸,液压控制元件,液压系统辅助装置,液压系统常用回路,典型液压系统及设计简介,液压伺服系统,气压传动基础,气源装置及气动辅助元件,气动执行元件,气动控制元件及基本回路,气压传动系统实例等内容。为方便学生复习巩固学习内容,各章后均附有思考与练习。

液压与气动两部分内容既有联系,又相对独立,各学校可根据专业和课时情况选用。

本书由胡世超担任主编,邵堃任副主编,具体编写分工为:第3、7章由胡世超编写,第1、9章由邵堃编写,第2、4章由门清毅编写,第5章由张培训编写,第6、8章由郭侠编写,第10、11、12章由李晓东编写,第13、14章、附录由肖森鑫编写。全书由胡世超统稿,肖龙教授主审。

在编写本书过程中,得到了相关单位和有关同志的大力支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

本书是高职高专机电一体化技术、机械设计与制造、数控、模具设计与制造、自动化控制等专业的教学用书,也可作为教师、企业生产技术人员参考书。

由于编者水平有限,书中不足和错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

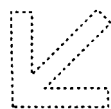
2008年5月

第1章 绪论	1
1.1 液压传动与气压传动的研究内容	1
1.2 液压与气压传动工作原理	1
1.3 液压与气压传动系统的组成与实例	2
1.4 液压与气压传动特点	5
第2章 液压传动基础	8
2.1 液压油	8
2.2 液体静力学基础	14
2.3 液体动力学基础	17
2.4 管路压力损失计算	23
2.5 孔口和间隙的流量特性	27
2.6 液压冲击和气穴现象	30
第3章 液压泵和液压马达	32
3.1 液压泵概述	32
3.2 齿轮泵	36
3.3 叶片泵	39
3.4 柱塞泵	45
3.5 螺杆泵	50
3.6 液压泵的选用	51
3.7 液压泵常见故障及维修	52
3.8 液压马达	56
第4章 液压缸	60
4.1 液压缸的类型和特点	60
4.2 液压缸的结构及其设计	65
4.3 液压缸的选用	71
第5章 液压控制元件	74
5.1 液压控制阀概述	74
5.2 方向控制阀及其应用	75

5.3 压力控制阀及其应用	83
5.4 流量控制阀及其应用	92
5.5 新型液压控制元件及其应用	94
第6章 液压系统辅助装置	105
6.1 蓄能器	105
6.2 过滤器	109
6.3 压力计与压力计开关	112
6.4 油箱及其附件	114
6.5 管件	119
6.6 密封装置	124
第7章 液压系统常用回路	129
7.1 方向控制回路	129
7.2 压力控制回路	133
7.3 速度控制回路	142
7.4 多缸工作控制回路	160
7.5 液压马达回路	167
第8章 典型液压系统及其设计简介	174
8.1 组合机床动力滑台液压系统	174
8.2 YB32-200 型四柱万能液压机	178
8.3 XZ-250A 型注塑机液压系统	182
8.4 液压系统的设计简介	185
第9章 液压伺服系统	193
9.1 液压伺服系统概述	193
9.2 液压伺服系统的控制元件	197
9.3 电液伺服阀	203
9.4 典型液压伺服系统实例	215
第10章 气压传动基础	222
10.1 空气的主要物理性质及气体状态方程	222
10.2 气体流动的基本方程	228
第11章 气源装置及气动辅助元件	231
11.1 气源装置	231

11.2 气源净化装置及辅助元件	235
第12章 气动执行元件	247
12.1 气缸	247
12.2 气动马达	256
第13章 气动控制元件及基本回路	259
13.1 压力控制阀及压力控制回路	259
13.2 流量控制阀及速度控制回路	264
13.3 方向控制阀及换向回路	269
13.4 其他常用回路	280
13.5 气动逻辑元件简介	285
第14章 气压传动系统实例	290
14.1 气动控制机械手	290
14.2 数控加工中心气压换刀系统	292
附录 常用液压与气动图形符号	295
参考文献	303

第1章



绪 论

1.1 液压传动与气压传动的研究内容

液压传动和气压传动均为流体传动,它是以流体(液压油或压缩空气)作为工作介质对能量进行传递和控制的学科。液压传动与气压传动实现传动和控制的方法基本相同,都是根据流体力学的基本原理,利用流体的压力能进行能量的传递和控制。元件组成所需要的基本控制回路,并再由若干基本控制回路组合构成能完成一定控制功能的传动系统,进而实现能量的转换、传递与控制。研究液压与气压传动及其控制技术,就必须了解传动介质的基本物理性能及其静力学、运动学和动力学特性,研究各类元件的结构、工作原理和性能以及由此所组成的各种基本回路的性能和特点,并在此基础上进行液压与气压传动控制系统的设计。

1.2 液压与气压传动工作原理

液压传动与气压传动的工作原理是基本相似的,现以图 1.1 所示的液压千斤顶为例来简要说明液压传动的工作原理。

如图 1.1 所示,由大缸体 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;此时,油箱 12 中的油液会在大气压力的作用下,经吸油管 5 顶开单向阀 4 进入泵下腔内;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,下腔内的油液经管道 6 顶开单向阀 7 进入举升液压缸 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,举升缸下腔的压力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。反复上下扳动杠杆手柄,则液压油会不断地补充进入到大缸体内,重物就会慢慢升起。手动泵停止工作,大活塞停止运动。打开截止阀 11,举升缸下腔的油液在重力的作用下通过管道 10、阀 11 排流回油箱,重物随大活塞一起向下移动并落回原位。

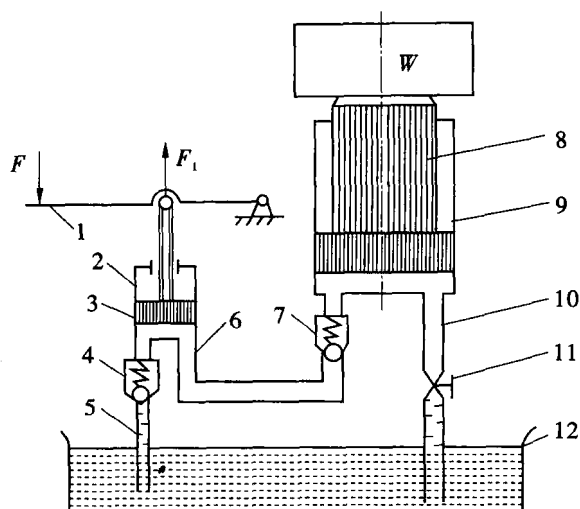


图 1.1 液压千斤顶工作原理

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 - 油箱

由上述分析可知, 液压与气压传动是以流体为工作介质, 利用流体的压力能来传递运动和动力的一种传动方式。它们具有以下基本特征:

- (1) 以流体为传动介质来传递运动和动力。
- (2) 液压与气压传动必须在密闭容器内进行。
- (3) 依靠密闭容器的容积变化传递运动。
- (4) 依靠流体的静压力传递动力。

1.3 液压与气压传动系统的组成与实例

1.3.1 液压与气压传动系统组成实例

图 1.2 为机床工作台液压系统结构原理图。该系统的工作原理是: 液压泵由电动机带动旋转后, 从油箱中经过滤器吸油, 由泵输出压力油→换向阀 5→节流阀 6→换向阀 7→液压缸 8 左腔, 推动活塞并带动工作台向右移动; 此时, 液压缸右腔的油液→换向阀 7→回油管→油箱。如果将换向阀 7 的手柄位置转换成图 1.2 (b) 所示状态, 则经节流阀的压力油→换向阀 7→液压缸 8 右腔, 此时, 液压缸左腔的油液→换向阀 7→回油管→油箱, 液压缸中的活塞将带动工作台向左移动。由此可知, 换向阀的主要功用是控制和改变液压油的流动方向, 进而控制液压缸及工作台的运动方向。当系统中的换向阀 5 处于图 1.2 (c) 位置时, 则液压泵输出的压力油将经换向阀 5 直接流回油箱, 此时, 系统处于卸荷状态, 压力油不能进入液压缸, 所以换向阀还有启动、止停功能。

工作台工作时的运动速度是由节流阀 6 来调节, 并与溢流阀配合实现的。改变节流阀的开口大小, 可以改变进入液压缸的流量, 由此可控制液压缸活塞的运动速度, 并使液

压泵输出的多余流量经溢流阀流回油箱。节流阀的主要功用是控制进入液压缸的流量,进而控制液压缸活塞的运动速度。

为了克服推动工作台时所受到的各种阻力(如摩擦阻力、切削阻力等),液压缸必然要产生一个足够大的推力,这个推力就是由液压缸中的油液压力产生的,当阻力增大时,油液压力随之增大;反之,油液压力随之减小。根据工作时阻力的不同,要求液压泵输出的油液压力能够进行调节,这个功能是由溢流阀4实现的。当油液压力对溢流阀阀芯的作用力略大于溢流阀中弹簧对阀芯的作用力时,阀芯才能移动,使阀口打开,油液经溢流阀流回油箱,泵输出的压力将不再升高。由此可知,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)不一样大;因为,液压系统中液压油流经管路及元件时有压力损失,所以,液压泵出口处的油液压力值大于液压缸中的压力值,溢流阀在液压系统中的主要功用是调节和稳定系统的最大工作压力。

图1.3所示为该液压系统的图形符号图。结构原理图直观形象,易于理解,但图形复杂,不便于绘制,一般常用标准的元件图形符号来绘制液压和气压系统图。图中的液压与气压图形符号见附录《常用液压与气动元件图形符号(GB/T 786.1—1993)》。

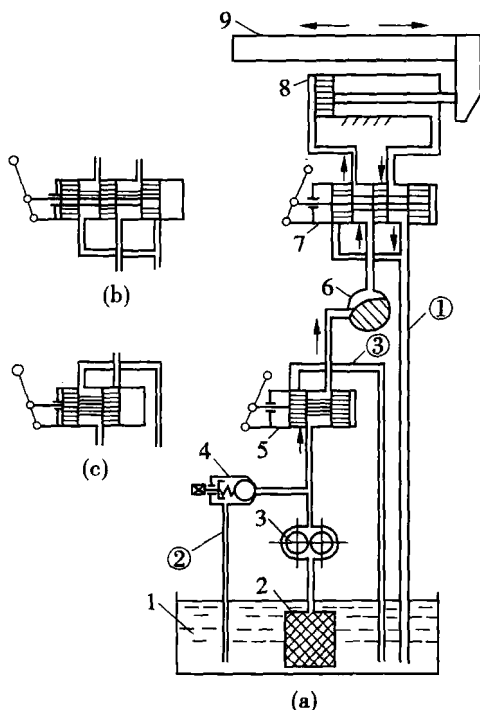


图 1.2 机床工作台液压系统结构原理

1 - 油箱;2 - 过滤器;3 - 液压泵;4 - 溢流阀;
5 - 换向阀;6 - 节流阀;7 - 换向阀;8 - 液压缸

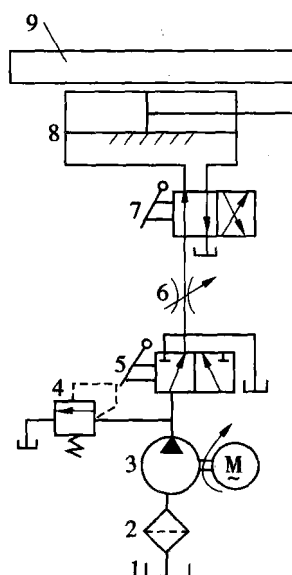


图 1.3 机床工作台液压系统的图形符号图

1 - 油箱;2 - 过滤器;3 - 液压泵;4 - 溢流阀;
5 - 换向阀;6 - 节流阀;7 - 换向阀;8 - 液压缸

图1.4为气动剪板机的工作原理图。当工料送入剪板机并到达预定位置时,工料将行程阀8的阀芯向右推动,换向阀的A腔经行程阀8与大气相通,换向阀阀芯在弹簧的作用下移到下位,将气缸上腔与大气连通,下腔与压缩空气连通。气缸活塞杆带动剪刀将工

料切断,并随之松开行程阀 8 的阀芯使之复位,将排气口封死,换向阀的 A 腔压力上升,阀芯上移,使气路换向。气缸上腔进压缩空气,下腔排气,活塞带动剪刀向下运动,剪板机再次处于预备工作状态。

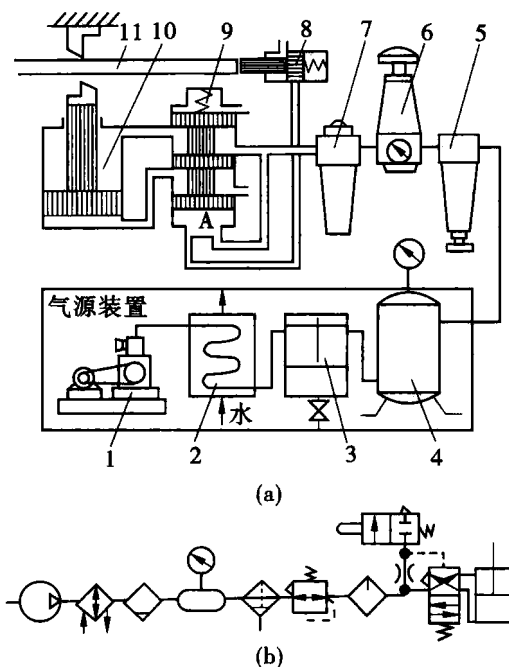


图 1.4 气动剪切机的工作原理图

(a) 结构原理图; (b) 图形符号图

1 - 空气压缩机; 2 - 冷却器; 3 - 油水分离器; 4 - 贮气罐; 5 - 分水滤气器;
6 - 减压阀; 7 - 油雾器; 8 - 行程阀; 9 - 气控换向阀; 10 - 气缸; 11 - 工料

1.3.2 液压与气压传动系统的组成

从上述两个实例可以看出,液压与气压传动系统主要是由以下几部分组成:

(1) 能源装置 液压泵或气源装置,其功用是将原动机输出的机械能转换成流体的压力能,为系统提供动力。

(2) 执行机构 将流体的压力能转化为机械能。实现这种转化的装置是液压缸(液压马达)或气缸(气动马达),它们的功用是将流体的压力能转换成机械能,输出力和速度(或转矩和转速),驱动工作机构做功,实现直线运动或旋转运动。

(3) 控制元件 包括各种阀类元件,其功用是控制和调节系统中流体的压力、流量、流动方向及系统执行机构的动作程序,以保证执行机构按要求工作。

(4) 辅助元件 保证系统正常工作所需的各种辅助装置,如管路、管接头、油箱或贮气罐、过滤器、冷却器、消声器、压力表等。

(5) 工作介质 传递能量的流体,即液压传动中的液压油或气压传动中的压缩空气。

液压与气压传动系统在工作中的能量转换和传递过程是:

机械能(电动机)→流体压力能(液压泵,空气压缩机)→机械能(液(气)压缸、液(气)压马达)。

1.4 液压与气压传动特点

液压与气压传动的工作原理基本相似,都是以流体为工作介质进行能量的传递和转换,其系统组成也基本相同,但由于两者的工作介质不同,故两种系统有其各自的特点。

1.4.1 液压传动特点

1.4.1.1 液压传动的优点

(1)在同等体积下液压装置能比电气装置产生出更大的动力。在输出同等功率的条件下,液压装置的体积小、重量轻、惯性小、结构紧凑。液压马达的体积和质量只有同等功率电动机的12%左右。

(2)液压装置能在大范围内实现无级调速,调速范围可达2000:1,它还可以在运行的过程中进行调速。

(3)液压装置工作比较平稳。由于质量轻、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)液压传动装置的控制和调节比较简单,操纵比较方便、省力。当机、电、液结合起来使用时,整个传动装置能实现很复杂的顺序动作,也能方便地实现远程控制和自动化。

(5)液压传动易于实现过载保护,同时,液压油能自行润滑相对运动表面,因此液压元件的使用寿命长。

(6)由于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。

(7)用液压传动实现直线运动远比用机械传动简单。

1.4.1.2 液压传动的缺点

(1)液压传动是以液体为工作介质,在相对运动表面间难免有泄漏,同时又因为液体具有压缩性,因此不适宜在传动比要求严格的场合使用。

(2)液压传动在工作过程中有较多的能量损失(摩擦损失、泄漏损失等),因此不宜于远距离传动。

(3)液压传动对油温变化比较敏感,它的工作稳定性很容易受到温度的影响,因此它不适宜在很高或很低的温度条件下工作。

(4)为了减少泄漏,液压元件在制造精度上的要求较高,因此它的造价比较高,对工作介质的污染也比较敏感。

(5)液压传动系统因为是密闭的系统,所以出现故障时诊断困难,也就对维修人员提出了更高的要求,既需要系统地掌握液压传动的理论知识,又要具有一定的实践经验。

(6)随着高压、高速、高效率和大流量化,液压元件和系统的噪声日益增大,这也是需要解决的问题。



1.4.2 气压传动特点

1.4.2.1 气压传动的主要优点

(1) 空气可以从大气中直接取得,同时用过的空气也可直接排放到大气中去,处理方便,不需要专门的回气装置,也没有污染。

(2) 空气的黏度很小,在管路中的压力损失也小,因此便于集中供气和远距离输送。

(3) 气动动作迅速,反应快,维护简单,调节方便,特别适合一般设备的控制。

(4) 压缩空气的工作压力较低,因此对气动元件的材质要求较低。

(5) 工作环境适应性好,能够在恶劣的环境下进行正常的工作。

(6) 使用安全,没有防爆的问题,并且便于实现过载保护。

1.4.2.2 气压传动的主要缺点

(1) 空气具有很大的可压缩性,不易实现准确的速度控制和很高的定位精度,负载变化时对系统的稳定性影响较大。

(2) 气动装置中的信号传递速度较慢,仅限于声速的范围内。所以气动技术不宜用于信号传递速度要求较高的复杂线路中。

(3) 气动系统工作压力较低,只适用于压力较小的场合。

(4) 排气噪声大,高速排气时要用消声器。

1.4.3 液压与气压传动的应用

工业生产中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。有的是利用它们在传递动力上的长处,如工程机械和航空工业中采用液压传动主要是取其结构简单、体积小、重量轻、输出的功率大;有的是利用它们在操纵控制方面的优势,如机床上采用液压传动是取其在工作过程中能实现无级调速、易于实现频繁的换向、易于实现自动化;在采矿、冶炼、化工等行业,采用气压传动是取其空气工作介质对环境适应性好,能防爆、防燃等特点;在印染、印刷等轻工业和医药、食品行业,是利用了气压传动操作方便且无污染的特点。表 1.1 中列出了液压与气压传动在各种行业中的一般应用。

表 1.1 液压与气压传动在各种行业中的一般应用

行业名称	应用举例	行业名称	应用举例
工程机械	装载机、推土机、挖掘机等	机械制造	组合机床、剪板机、自动生产线
矿山机械	液压支架、凿岩机、开凿机	筑路机械	压路机、养路机、捣箍机
起重机械	汽车起重机、升降平台、叉车	轻工机械	打包机、自动计量灌装机
冶金机械	轧钢机、转炉、压力机	纺织机械	印染机、织布机、抛纱机
锻压机械	压力机、锻压机、空气锤	气动工具	气镐、气扳机、气动搅拌机

1.4.4 液压与气压传动的发展

随着机电一体化设备自动化程度的不断提高,液压与气压元件在机电设备中的应用越来越广。液压元件呈小型化、系统集成化已是发展的必然趋势。特别是液压技术与传感技术、微电子技术的紧密结合,使得近年来出现了诸多新型元件,如电液比例阀、数字阀、电液伺服阀等,机液电一体化的组合元器件,使液压技术向着高压、大功率、低噪音、节能高效、集成方向发展。

气动技术已发展成包括传动、检测与控制在内的自动化技术。气动技术作为柔性制造系统(FMS)在自动生产线、机器人、自动包装流水线、半导体电子行业等方面成为不可缺少的重要手段。气动技术的微型化、节能化、无油化、位置控制的高精度化及与电子技术、PLC 技术与气动技术的结合,是当前气动技术的发展特点和方向。



思考与练习

1. 什么是液压和气压传动,各自有何传动特点?
2. 液压与气压传动系统的基本组成有哪几部分?
3. 系统压力取决于什么?
4. 液压与气压传动的基本特征是什么?
5. 试举例说明液压与气压传动系统的工作原理。

第2章



液压传动基础

液体(液压油)是液压传动的工作介质,是能量进行传递的中间媒介。因此,了解液体的基本性质,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以及合理设计、使用和维护液压系统都是非常必要的。

2.1 液压油

液压油不仅作为工作介质传递能量,还发挥润滑、防腐及冷却等作用。液压油性质的不同及其随着工作环境进行的变化会影响液压系统的工作性能及工作可靠性。

2.1.1 液体的密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

式中 V ——液体的体积(m^3);

m ——体积为 V 的液体的质量(kg);

ρ ——液体的密度(kg/m^3)。

密度是液体的一个重要的物理参数。随着液体温度或压力的变化,其密度会发生一定的变化,但由于变化量通常不大,可以忽略不计。一般液压油的密度为 $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。



2.1.2 液体的黏性

2.1.2.1 黏性的物理本质

液体在外力作用下流动时,分子间的内聚力会阻碍分子间的相对运动而产生内摩擦力,液体的这种性质称为液体的黏性。黏性是液体的重要物理性质,也是选择液压油的主要依据之一。

液体流动时,由于液体的黏性以及液体和固体壁面间的附着力,会使液体内部各层间的速度大小不等。如图 2.1 所示,设两平行平板间充满液体。下平板固定不动,上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体的黏性作用,紧贴下平板的液体层速度为零,紧贴于上平板的液体层速度为 u_0 。而中间层液体的速度则根据它与下平板间的距离大小近似呈线性规律分布。

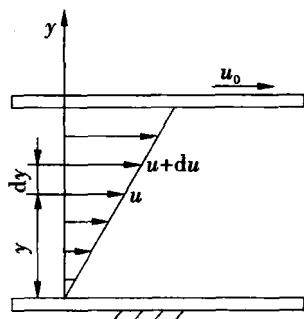


图 2.1 液体的黏性

实验测定结果指出,液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A 、液层间的速度梯度 du/dy 成正比,即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

式中 μ ——比例系数,称为液体的动力黏度。

若以 τ 表示内摩擦切应力,即液层间在单位面积上的内摩擦力,则式(2.2)可改写为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.3)$$

这就是牛顿液体内摩擦定律。

由式(2.3)可知,在静止液体中,因速度梯度 $du/dy = 0$,内摩擦力 F 为零,所以液体在静止状态下是不呈黏性的。

2.1.2.2 黏度

液体黏性的大小用黏度来表示。常用的黏度有三种,即动力黏度、运动黏度和条件黏度。

(1) 动力黏度 动力黏度又称为绝对黏度,它是表征流动液体内摩擦力大小的黏性系数,用 μ 表示。由式(2.3)可知

$$\mu = \frac{F}{A \frac{du}{dy}} = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (2.4)$$

动力黏度的物理意义是:液体在单位速度梯度下流动时,接触液层间单位面积上的内摩擦力。

动力黏度的法定计量单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$),它与以前沿用的非法定计量单位 P (泊, $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$) 之间的换算关系是 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$ 。

(2) 运动黏度 动力黏度和该液体密度的比值称为该液体的运动黏度,以 ν 表示。



$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.5)$$

运动黏度的法定计量单位是 m^2/s (米²/秒), 该单位偏大, 它与以前沿用的非法定计量单位 cSt(厘斯) 之间的关系是 $1\text{m}^2/\text{s} = 10^6 \text{cSt}$ 。

运动黏度无实际物理意义, 由于其单位里只有长度单位和时间单位, 类似于运动学的物理量, 故称其为运动黏度。国际标准化组织 ISO 规定统一采用运动黏度来表示液压油的黏度等级。例如, 牌号为 L-HL46 的液压油, 表示这种液压油在 40 °C 时的运动黏度的平均值为 46 mm^2/s 。

(3) 条件黏度 条件黏度又称为相对黏度。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。测量条件不同, 采用的相对黏度单位也不同。例如, 我国及德国、俄罗斯采用恩氏黏度($^{\circ}E$)。美国采用赛氏黏度(SSU), 英国采用雷氏黏度(R)。

2.1.2.3 黏度和温度的关系

液压油的黏度对温度的变化极为敏感, 温度升高, 油的黏度降低。油的黏度随温度变化的性质称为液压油的黏温特性。不同种类的液压油有不同的黏温特性。图 2.2 为几种典型液压油的黏温特性曲线图。

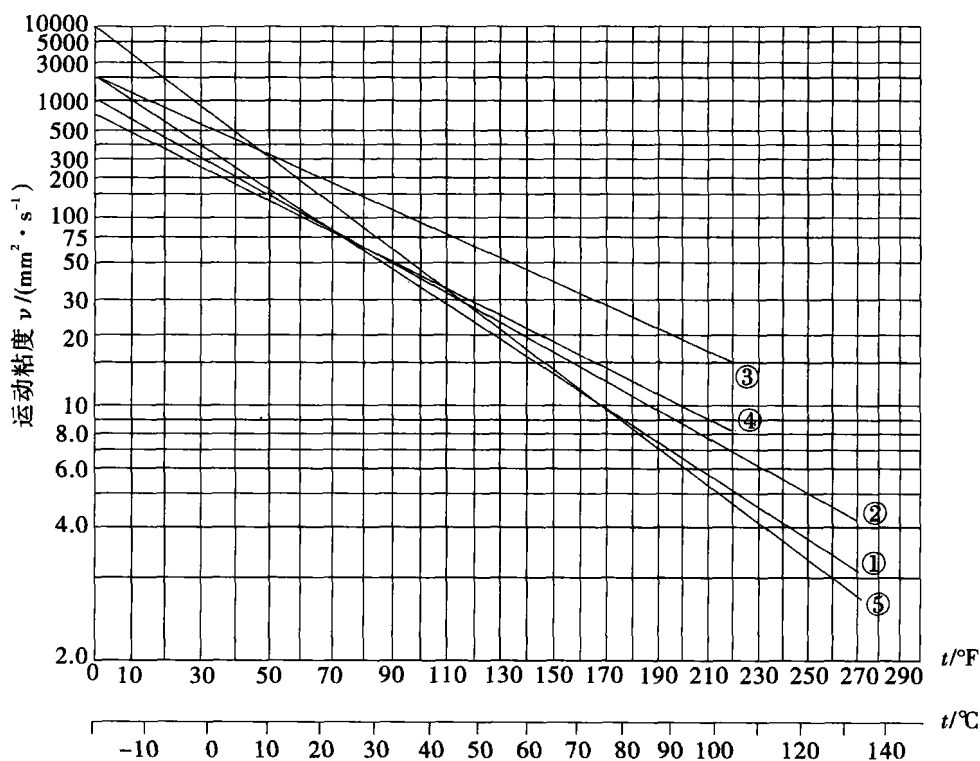


图 2.2 几种典型液压油的黏温特性曲线图

- ① - 矿油型普通液压油; ② - 矿油型高黏度指数液压油;
③ - 水包油乳化液; ④ - 水 - 乙二醇液; ⑤ - 磷酸酯液