

樊瑞 李建华 主编



液压技术

YEYAJISHU

中国纺织出版社

1003098

PLD 器件与 EDA 技术

液 压 技 术

樊 瑞 李建华 主编
401

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国纺织出版社

内 容 提 要

全书共有十一章,第一、二章为液压传动基础部分,讲述了液压油的特性和液压流体力学的基础知识;第三~六章,讲述了各类液压元件的结构、工作原理、特性及应用;第七~九章为基本回路典型系统和一般液压系统的设计与计算;第十章为液压元件及系统的动态特性,第十一章对液压传动中的CAD技术作了简单介绍。

本书可作为机械类各专业和自动化专业的本、专科教材,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压技术/樊瑞,李建华主编. —北京:中国纺织出版社, 1999.9

ISBN 7-5064-1715-4/TH·0008

I. 液… II. ①樊… ②李… III. 液压技术—高等学校—教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 61033 号

责任编辑:李东宁 特约编辑:王 颖
责任设计:李 然 责任校对:陈 红

中国纺织出版社出版发行
地址:北京东直门南大街6号
邮政编码:100027 电话:010—64168226
郑州工业大学印刷厂印刷 各地新华书店经销
1999年9月第一版第一次印刷
开本:787×1092 1/16 印张:14.75
字数:322千字 印数:1—3500 定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书为高等院校机电一体化、机械设计制造及自动化、材料成型及控制工程等非液压专业教材。全书共十一章。主要内容包括液压传动基础知识、液压元件、液压系统、典型液压系统、液压系统的设计与计算、液压元件和系统的动态特性及液压传动中的 CAD 技术。

在编写过程中,根据液压技术课程的教学大纲要求,力求贯彻少而精、理论联系实际,提高学生的实际应用能力的原则,在较全面地阐述有关液压技术基本内容的基础上,力求反映我国以及世界液压技术行业发展的最新动向(如液压油的抗污染与防护、液压马达的低速稳定性、电液数字阀、插装阀、叠加阀、组合密封装置等),这也是本书的一个显著特点。本书元件的图形符号、回路和系统原理图均采用国家最新图形符号绘制。

本书适用于普通院校机械类专业、自动化等专业,也适用于各类成人高校自学考试等有关机械类专业。

本书由郑州纺织工学院樊瑞、李建华主编,袁守华、李力任副主编。参加编写的人员均任教于郑州纺织工学院,樊瑞编写第一章、第五章的第一、二、三、五、六、七、八、九节;李建华编写第二章和第七章的第二节;袁守华编写第三章;李力编写第八、九章和第七章的第一节;杜虹编写第四章和第七章的第三、四节;吴杲编写第六章和第五章的第四节;安向东编写第十、十一章。全书由樊瑞统稿。

本书由燕山大学机械工程学院韩屋谷教授主审,郑州纺织工学院牛建设副教授任副主审,他们仔细审阅了书稿并提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨致衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请各位读者批评指正。

编者

1999 年 8 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 液压传动发展概况	1
第二节 液压传动的工作原理及其组成	1
第三节 液压传动的优缺点	4
第四节 液压传动在机械中的应用	5
习题	6
第二章 液压传动基础知识	7
第一节 液压油	7
第二节 液体静力学	13
第三节 液体动力学	18
第四节 管道内压力损失的计算	30
第五节 小孔及间隙流动	37
第六节 液压冲击及空穴现象	44
习题	48
第三章 液压动力元件	51
第一节 液压泵的概述	51
第二节 齿轮泵	53
第三节 叶片泵	58
第四节 柱塞泵	67
第五节 液压泵的噪声	71
第六节 液压泵的选用	72
习题	73
第四章 液压执行元件	74
第一节 液压马达	74
第二节 液压缸	80
习题	94
第五章 液压阀	95
第一节 概述	95
第二节 方向控制阀	96
第三节 压力控制阀	106
第四节 流量控制阀	115
第五节 叠加式液压阀	120
第六节 电液比例控制阀及二通插装阀	123

第七节	电液伺服阀	128
第八节	电液数字阀	136
第九节	液压阀的连接	137
	习题	139
第六章	辅助装置	141
第一节	蓄能器	141
第二节	滤油器	143
第三节	油箱	147
第四节	热交换器	149
第五节	管件	150
第六节	密封装置	152
第七章	液压基本回路	155
第一节	速度控制回路	155
第二节	压力控制回路	169
第三节	方向控制回路	174
第四节	多缸动作回路	175
	习题	179
第八章	典型液压系统	182
第一节	组合机床液压系统	182
第二节	M1432A 型万能外圆磨床液压系统	184
第三节	注塑机液压系统	188
	习题	190
第九章	液压传动系统设计与计算	192
第一节	明确设计要求 进行工况分析	192
第二节	确定液压系统主要参数	195
第三节	液压元件的选择	196
第四节	液压系统性能的验算	200
第五节	绘制正式工作图和编写技术文件	201
第六节	液压系统设计计算举例	202
	习题	207
第十章	液压元件和系统的动态特性	208
第一节	带管道的溢流阀的动态特性	208
第二节	限压式变量泵的动态特性	210
第三节	带管道的液压缸的动态特性	211
第四节	液压泵—蓄能器组合的动态特性	214
第五节	机—液位置伺服系统的动态特性	216
第十一章	液压传动中的 CAD 技术	222
	参考文献	227

第一章 绪 论

第一节 液压传动发展概况

自 18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起,液压传动技术已有二三百年的历史。直到 20 世纪 30 年代它才较普遍地用于起重机、机床及工程机械。在第二次世界大战期间,由于战争需要,出现了由响应迅速、精度高的液压控制机构所装备的各种军事武器。第二次世界大战结束后,战后液压技术迅速转向民用工业,液压技术不断应用于各种自动机及自动生产线。本世纪 60 年代以后,液压技术随着原子能、空间技术、计算机技术的发展而迅速发展。因此,液压传动真正的发展也只是近三四十年的事。当前液压技术正向迅速、高压、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)、机电一体化技术、可靠性技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

我国的液压技术最初应用于机床和锻压设备上,后来又用于拖拉机和工程机械。现在,我国的液压元件随着从国外引进一些液压元件、生产技术以及进行自行设计,现已形成了系列,并在各种机械设备上得到了广泛的使用。

第二节 液压传动的工作原理及其组成

一、液压传动的工作原理

液压传动的工作原理,可以用一个液压千斤顶的工作原理来说明。

图 1-1 是液压千斤顶的工作原理图。大油缸 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小油缸 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 输入举升油缸 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,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、截止阀 11

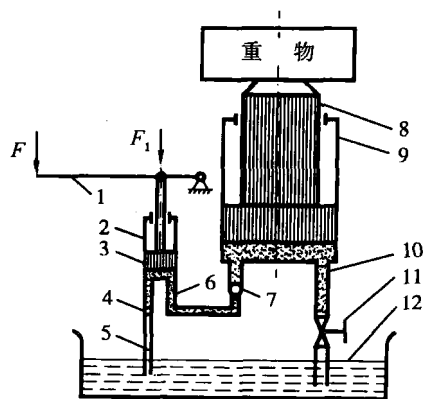


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

1—杠杆手柄 2—小油缸 3—小活塞
4,7—单向阀 5—吸油管 6,10—管道
8—大活塞 9—大油缸 11—截止阀 12—油箱

流回油箱,重物就向下移动。这就是液压千斤顶的工作原理。

通过对上面液压千斤顶工作过程的分析,可以初步了解到液压传动的基本工作原理。液压传动是利用有压力的油液作为传递动力的工作介质。压下杠杆时,小油缸 2 输出压力油,是将机械能转换成油液的压力能,压力油经过管道 6 及单向阀 7,推动大活塞 8 举起重物,是将油液的压力能又转换成机械能。大活塞 8 举升的速度取决于单位时间内流入大油缸 9 中油容积的多少。由此可见,液压传动是一个不同能量的转换过程。

二、液压传动系统的组成

液压千斤顶是一种简单的液压传动装置。下面分析一种驱动工作台的液压传动系统。如

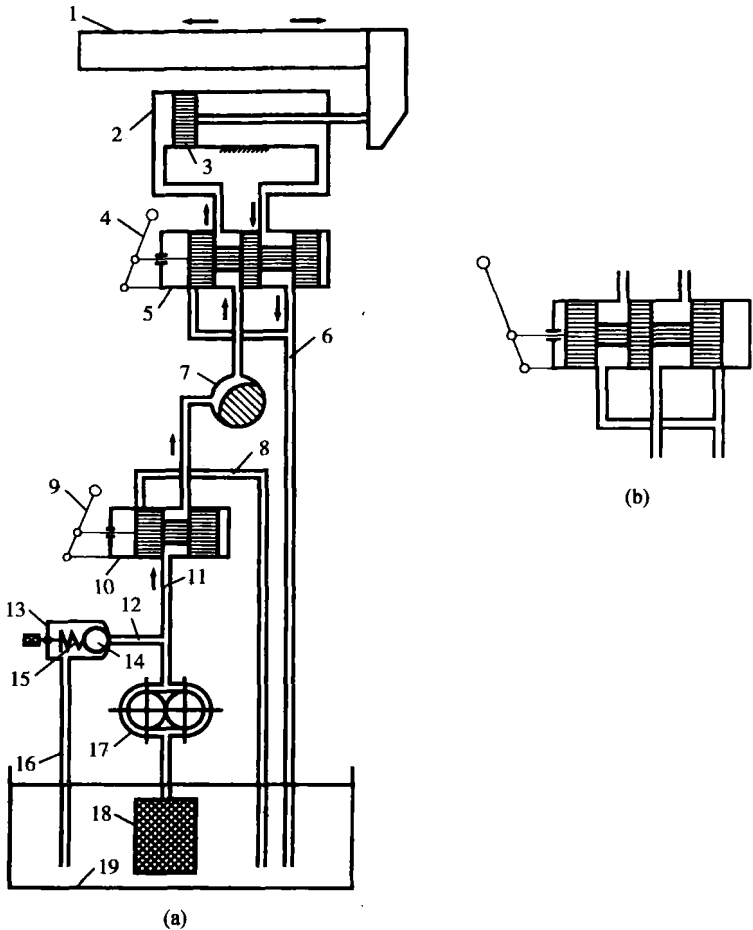


图 1-2 机床工作台液压系统工作原理图

- 1—工作台 2—液压缸 3—活塞 4—换向手柄 5—换向阀
6, 8, 16—回油管 7—节流阀 9—开停手柄 10—开停阀
11—压力管 12—压力支管 13—溢流阀 14—钢球 15—弹簧
17—液压泵 18—滤油器 19—油箱

图 1-2 所示,它由油箱、滤油器、液压泵、溢流阀、开停阀、节流阀、换向阀、液压缸以及连接这些元件的油管、接头组成。其工作原理如下:液压泵由电动机驱动后,从油箱中吸油。油液经滤油器进入液压泵,油液在泵腔中从入口低压到泵出口高压,在图 1-2(a)所示状态下,通过开停阀、节流阀、换向阀进入液压缸左腔,推动活塞使工作台向右移动。这时,液压缸右腔的油经换向阀和回油管 6 排回油箱。

如果将换向阀手柄转换成图 1-2(b)所示状态,则压力管中的油将经过开停阀、节流阀和换向阀进入液压缸右腔、推动活塞使工作台向左移动,并使液压缸左腔的油经换向阀和回油管 6 排回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀开大时,进入液压缸的油量增多,工作台的移动速度增大;当节流阀关小时,进入液压缸的油量减小,工作台的移动速度减小。

为了克服移动工作台时所受到的各种阻力,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所产生的。要克服的阻力越大,缸中的油液压力越高;反之压力就越低。这种现象正说明了液压传动的一个基本原理——压力决定于负载。

从机床工作台液压系统的工作过程可以看出,一个完整的、能够正常工作的液压系统,应该由以下五个主要部分来组成:

1. 能源装置 它是供给液压系统压力油,把机械能转换成液压能的装置。最常见的形式是液压泵。

2. 执行装置 它是把液压能转换成机械能的装置。其形式有作直线运动的液压缸,有作回转运动的液压马达,它们又称为液压系统的执行元件。

3. 控制调节装置 它是对系统中的压力、流量或流动方向进行控制或调节的装置。如溢流阀、节流阀、换向阀、开停阀等。

4. 辅助装置 上述三部分之外的其他装置,例如油箱,滤油器,油管等。它们对保证系统正常工作是必不可少的。

5. 工作介质 传递能量的流体,即液压油等。

三、液压传动系统图的图形符号

图 1-2 所示的液压系统是一种半结构式的工作原理图。它有直观性强、容易理解的优点,当液压系统发生故障时,根据原理图检查十分方便,但图形比较复杂,绘制比较麻烦。我国已经制定了一种用规定的图形符号来表示液压原理图中的各元件和连接管路的国家标准,即“液压系统图图形符号(GB786—76)”。我国制订的液压系统图图形符号(GB786—76)中,对于这些图形符号有以下几条基本规定。

(1)符号只表示元件的职能,连接系统的通路,

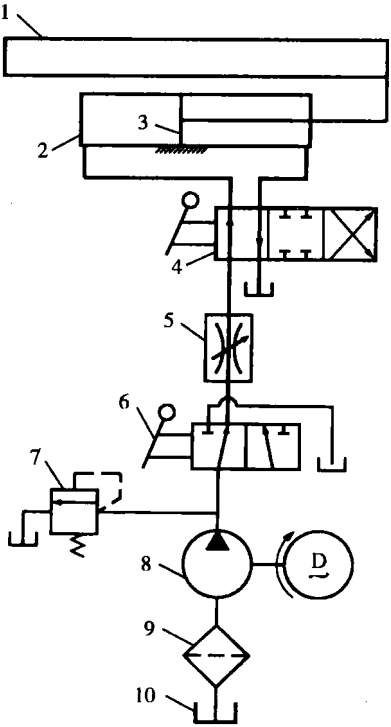


图1-3 机床工作台液压系统的图形符号图

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

不表示元件的具体结构和参数,也不表示元件在机器中的实际安装位置。

(2)元件符号内的油液流动方向用箭头表示,线段两端都有箭头的,表示流动方向可逆。

(3)符号均以元件的静止位置或中间零位置表示,当系统的动作另有说明时,可作例外。

图 1-3 所示为图 1-2(a)系统用国标《GB786—76 液压系统图图形符号》绘制的工作原理图。使用这些图形符号可使液压系统图简单明了,且便于绘图。

第三节 液压传动的优缺点

液压传动之所以能得到广泛的应用,是由于它具有以下的主要优点:

(1)由于液压传动是油管连接,所以借助油管的连接可以方便灵活地布置传动机构,这是比机械传动优越的地方。例如,在井下抽取石油的泵可采用液压传动来驱动,以克服长驱动轴效率低的缺点。由于液压缸的推力很大,又加之极易布置,在挖掘机等重型工程机械上,已基本取代了老式的机械传动,不仅操作方便,而且外形美观大方。

(2)液压传动装置的重量轻、结构紧凑、惯性小。例如,相同功率液压马达的体积为电动机的 12%~13%。液压泵和液压马达单位功率的重量指标,目前是发电机和电动机的十分之一,液压泵和液压马达可小至 0.0025N/W(牛/瓦),发电机和电动机则约为 0.03N/W。

(3)可在大范围内实现无级调速。借助阀或变量泵、变量马达,可以实现无级调速,调速范围可达 1:2000,并可在液压装置运行的过程中进行调速。

(4)传递运动均匀平稳,负载变化时速度较稳定。正因为此特点,金属切削机床中的磨床传动现在几乎都采用液压传动。

(5)液压装置易于实现过载保护——借助于设置溢流阀等,同时液压件能自行润滑,因此使用寿命长。

(6)液压传动容易实现自动化——借助于各种控制阀,特别是采用液压控制和电气控制结合使用时,能很容易地实现复杂的自动工作循环,而且可以实现遥控。

(7)液压元件已实现了标准化、系列化和通用化,便于设计、制造和推广使用。

液压传动的缺点是:

(1)液压系统中的漏油等因素,影响运动的平稳性和正确性,使得液压传动不能保证严格的传动比。

(2)液压传动对油温的变化比较敏感,温度变化时,液体粘性变化,引起运动特性的变化,使得工作的稳定性受到影响,所以它不宜在温度变化很大的环境条件下工作。

(3)为了减少泄漏,以及为了满足某些性能上的要求,液压元件的配合件制造精度要求较高,加工工艺较复杂。

(4)液压传动要求有单独的能源,不像电源那样使用方便。

(5)液压系统发生故障不易检查和排除。

总之,液压传动的优点是主要的,随着设计制造和使用水平的不断提高,有些缺点正在逐步加以克服。液压传动有着广泛的发展前景。

第四节 液压传动在机械中的应用

驱动机械运动的机构以及各种传动和操纵装置有多种形式。根据所用的部件和零件,可分为机械的、电气的、气动的、液压的传动装置。经常还将不同的形式组合起来运用——四位一体。由于液压传动具有很多优点,使这种新技术发展得很快。液压传动应用于金属切削机床也不过四五十年历史。航空工业在1930年以后才开始采用。特别是最近二三十年以来液压技术在各种工业中的应用越来越广泛。

在机床上,液压传动常应用在以下的一些装置中:

1. 进给运动传动装置 磨床砂轮架和工作台的进给运动大部分采用液压传动;车床、六角车床、自动车床的刀架或转塔刀架;铣床、刨床、组合机床的工作台等的进给运动也都采用液压传动。这些部件有的要求快速移动,有的要求慢速移动。有的则既要求快速移动,也要求慢速移动。这些运动多半要求有较大的调速范围,要求在工作中无级调速;有的要求持续进给,有的要求间歇进给;有的要求在负载变化下速度恒定,有的要求有良好的换向性能等等。所有这些要求都是可以用液压传动来实现的。

2. 往复主体运动传动装置 龙门刨床的工作台、牛头刨床或插床的滑枕,由于要求作高速往复直线运动,并且要求换向冲击小、换向时间短、能耗低,因此都可以采用液压传动。

3. 仿形装置 车床、铣床、刨床上的仿形加工可以采用液压伺服系统来完成。其精度可达0.01~0.02mm。此外,磨床上的成形砂轮修正装置亦可采用这种系统。

4. 辅助装置 机床上的夹紧装置、齿轮箱变速操纵装置、丝杠螺母间隙消除装置、垂直移动部件平衡装置、分度装置、工件和刀具装卸装置、工件输送装置等,采用液压传动后,有利于简化机床结构,提高机床自动化程度。

5. 静压支承 重型机床、高速机床、高精度机床上的轴承、导轨、丝杠螺母机构等处采用液体静压支承后,可以提高工作平稳性和运动精度。

液压传动在其他机械工业部门的应用情况见表1-1所示。

表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用实例

行业名称	应 用 场 所 举 例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、压路机、铲运机等
起重运输机械	汽车吊、港口龙门吊、叉车、装卸机械、皮带运输机等
矿山机械	凿岩机、开掘机、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、平地机等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
汽车工业	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、机器人等

习 题

- 1-1 液压传动有哪些基本组成部分？试说明各组成部分的作用。
- 1-2 如何绘制常用液压元件的图形符号？
- 1-3 液压传动有哪些优缺点？

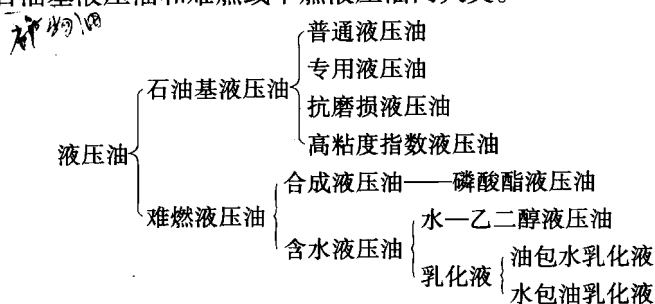
第二章 液压传动基础知识

第一节 液 压 油

液压油不仅是液压传动系统传递能量的工作介质,而且还对液压装置的机构与零件起润滑、冷却和防锈作用。液压系统中液体的压力、流速和温度在很大范围内变化着,液压油质量的优劣直接影响液压系统的工作。

一、液压油的分类

液压油分为石油基液压油和难燃或不燃液压油两大类。



1. 石油基液压油 这种液压油是以石油的精炼物为基础,加入各种为改进性能的添加剂而成。添加剂有抗氧添加剂、油性添加剂、抗磨添加剂等。不同工作条件要求具有不同性能的液压油,不同品种的液压油是由于精制程度不同和加入不同的添加剂而成。

2. 合成液压油 磷酸酯液压油是难燃液压油之一。它的使用范围宽,可达 $-54\sim 135^{\circ}\text{C}$ 。抗燃性好,氧化安定性和润滑性都很好。缺点是与多种密封材料的相容性很差,有一定毒性。

3. 水—乙二醇液压油 这种液体由水、乙二醇和添加剂组成,而蒸馏水占 $35\%\sim 55\%$,因而抗燃性好。这种液体的凝固点低,达 -50°C ,粘度指数高($130\sim 170$),为牛顿流体。缺点是能使油漆涂料变软。但对一般密封材料无影响。

4. 乳化液 乳化液属抗燃液压油,它由水、基础油和各种添加剂组成。分水包油乳化液和油包水乳化液,前者含水量达 $90\%\sim 95\%$,后者含水量达 40% 。

二、液压油的物理性能

1. 密度 液体单位体积内的质量称为密度,通常用 ρ 表示:

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

式中: m 为液体质量(kg); V 为液体的体积(m^3)。

矿物油的密度 $\rho = 850\sim 960(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

2. 重度 液体单位体积的重量称为重度,以 γ 表示:

$$\gamma = G/V \quad (2-2)$$

式中: G 为液体的重量(N); V 为液体的体积(m^3)。

矿物油的重度 $\gamma = 8400\sim 9500\text{N}/\text{m}^3$ 。

液压油的密度和重度均随压力的增大而加大,随温度的升高而减小。一般情况下,由压力和温度引起的这种变化都较小,可将其近似地示为常数。

由于 $G = mg$, 所以 $\gamma = \rho g$ 。

3. 液体的可压缩性 液体受压力的作用而体积缩小的性质称为液体的可压缩性。可压缩性定义为单位压力变化下的液体体积的相对变化量,用体积压缩系数 β 表示。设体积为 V_0 的液体,其压力变化量为 Δp ,液体体积变化量为 ΔV ,则:

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

式中: β 为液体的压缩系数 (m^2/N)。

由于压力增大时液体的体积减小,因此式(2-3)右边需加负号,以使 β 为正值。常用液压油的压缩系数 $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

液体的压缩系数 β 的倒数称为液体的体积弹性模量,用 K 表示,即:

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p V_0}{\Delta V} \quad (2-4)$$

液压油的体积弹性模量 K 为 $(1.4 \sim 1.9) \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。而钢的 $K = 2.1 \times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$, 液压油的 K 比钢的小 100~150 倍。液体的可压缩性很小,在很多情况下可以忽略不计。但受压体积较大或进行液压系统动态分析时,必须考虑液体的可压缩性。

当液体中混有空气时,其压缩性便显著增加(其弹性模量则显著减小)。例如,液压油中混有 1% 的空气时,其体积弹性模量降到纯油的 5% 左右;当混有 5% 的空气时,其 K 值降到纯油的 1% 左右。所以,在设计和使用液压系统时应尽量防止空气混入油中。

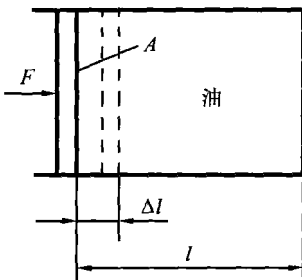


图 2-1 液压弹簧刚度计算示意图

封闭在容器内的液体在外力作用下的情况极像一根弹簧,这个“液压弹簧”的刚度可由图 2-1 求出。设液柱长度为 l ,承压面积为 A 。当外力变化 ΔF 时,导致液柱压力变化 $\Delta p = \Delta F/A$,液柱体积变化 $\Delta V = A \Delta l$ (Δl 为液柱长度变化量)。利用式(2-4)求得其刚度 K_s 为:

$$K_s = -\frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{A^2 K}{V_0} \quad (2-5)$$

4. 液体的粘性 液体在外力作用下流动时,由于液体分子间的内聚力而产生一种阻碍液体分子之间进行相对运动的内摩擦力,液体的这种产生内摩擦力的性质称为液体的粘性。由于液体具有粘性,当流体发生剪切变形时,流体内部就产生阻滞变形的内摩擦力,由此可见,粘性表征了流体抵抗剪切变形的能力。处于相对静止状态的流体中不存在剪切变形,因而不存在变形的抵抗,只有当运动流体流层间发生相对运动时,流体对剪切变形的抵抗,也就是粘性才表现出来。粘性所起的作用为阻滞流体内部的相互滑动,在任何情况下它都只能延缓滑动的过程而不能消除这种滑动。

粘性的大小可用粘度来衡量,粘度是选择液压用流体的主要指标,是影响流动流体的重要物理性质。

当液体流动时,由于液体与固体壁面的附着力及流体本身的粘性使流体内各处的速度大

小不等,以流体沿如图 2-2 所示的平行平板间的流动情况为例,设上平板以速度 u_0 向右运动,下平板固定不动。紧贴于上平板上的流体粘附于上平板上,其速度与上平板相同。紧贴于下平板上的流体粘附于下平板上,其速度为零。中间流体的速度按线性分布。我们把这种流动看成是许多无限薄的流体层在运动,当运动较快的流体层在运动较慢的流体层上滑过时,两层间由于粘性就产生内摩擦力的作用。根据实际测定的数据所知,流体层间的内摩擦力 F 与流体层的接触面积 A 及流体层的相对流速 du 成正比,而与此二流体层间的距离 dz 成反比,即:

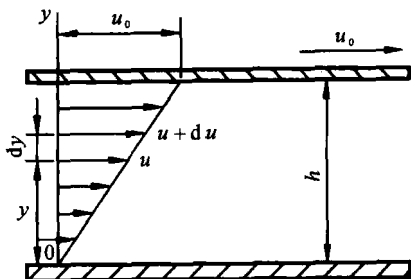


图 2-2 液体的粘性示意图

$$F = \mu A \frac{du}{dz}$$

以 $\tau = F/A$ 表示切应力,则有:

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

式中: μ 为衡量流体粘性的比例系数,称为绝对粘度或动力粘度; du/dz 表示流体层间速度差异的程度,称为速度梯度。

上式是液体内摩擦定律的数学表达式。当速度梯度变化时, μ 为不变常数的流体称为牛顿流体, μ 为变数的流体称为非牛顿流体。除高粘性或含有大量特种添加剂的液体外,一般的液压用流体均可看作是牛顿流体。

流体的粘度通常有三种不同的测试单位。

(1)绝对粘度 μ 。绝对粘度又称动力粘度,它直接表示流体的粘性即内摩擦力的大小。

动力粘度 μ 在物理意义上讲,是当速度梯度 $du/dz = 1$ 时,单位面积上的内摩擦力的大小,即:

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

动力粘度的国际(SI)计量单位为牛顿·秒/米²,符号为 N·s/m²,或为帕·秒,符号为 Pa·s。

(2)运动粘度 ν 。运动粘度是绝对粘度 μ 与密度 ρ 的比值:

$$\nu = \mu / \rho \quad (2-8)$$

式中: ν 为液体的动力粘度, m²/s; ρ 为液体的密度, kg/m³。

运动粘度的 SI 单位为米²/秒, m²/s。还可使用 CGS 制单位:斯(托克斯), St 斯的单位太大,应用不便,常用 1% 斯,即 1 厘斯来表示,符号为 cSt,故:

$$1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

运动粘度 ν 没有什么明确的物理意义,它不能像 μ 一样直接表示流体的粘性大小,但对 ρ 值相近的流体,例如各种矿物油系液压油之间,还是可用来大致比较它们的粘性。由于在理论分析和计算中常常碰到绝对粘度与密度的比值,为方便起见才采用运动粘度这个单位来代替 μ/ρ 。它之所以被称为运动粘度,是因为在它的量纲中只有运动学的要素长度和时间因次的缘故。

$$30^* \nu = 7 \sim 33 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

机械油的牌号上所标明的号数就是表明以厘斯为单位的,在温度 50℃ 时运动粘度 ν 的平均值。例如 10 号机械油指明该油在 50℃ 时其运动粘度 ν 的平均值是 10cSt。蒸馏水在 20.2℃ 时的运动粘度 ν 恰好等于 1cSt,所以从机械油的牌号即可知道该油的运动粘度。例如 20 号油说明该油的运动粘度约为水的运动粘度的 20 倍,30 号油的运动粘度约为水的运动粘度的 30 倍,如此类推。

动力粘度和运动粘度是理论分析和推导中经常使用的粘度单位。它们都难以直接测量,因此,工程上采用另一种可用仪器直接测量的粘度单位,即相对粘度。

(3)相对粘度。相对粘度是以相对于蒸馏水的粘性的大小来表示该液体的粘性的。相对粘度又称条件粘度。各国采用的相对粘度单位有所不同。有的用赛氏粘度,有的用雷氏粘度,我国采用恩氏粘度。恩氏粘度的测定方法如下:测定 200cm³ 某一温度的被测液体在自重作用下流过直径 2.8mm 小孔所需的时间 t_A ,然后测出同体积的蒸馏水在 20℃ 时流过同一孔所需时间 t_B ($t_B = 50 \sim 52s$), t_A 与 t_B 的比值即为流体的恩氏粘度值。恩氏粘度用符号 $^{\circ}E$ 表示。被测液体温度 t ℃ 时的恩氏粘度用符号 $^{\circ}E_t$ 表示。

$$^{\circ}E_t = t_A / t_B \quad (2-9)$$

工业上一般以 20℃、50℃ 和 100℃ 作为测定恩氏粘度的标准温度,并相应地以符号 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 和 $^{\circ}E_{100}$ 来表示。

知道恩氏粘度以后,利用下列的经验公式,将恩氏粘度换算成运动粘度。

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

为了使液体介质得到所需要的粘度,可以采用两种不同粘度的液体按一定比例混合,混合后的粘度可按下列经验公式计算。

$$^{\circ}E = \frac{a^{\circ}E_1 + b^{\circ}E_2 - c(^{\circ}E_1 - ^{\circ}E_2)}{100} \quad (2-11)$$

式中: $^{\circ}E$ 为混合液体的恩氏粘度; $^{\circ}E_1$ 、 $^{\circ}E_2$ 分别为用于混合的两种油液的恩氏粘度, $^{\circ}E_1 > ^{\circ}E_2$; a 、 b 分别为用于混合的两种液体 $^{\circ}E_1$ 、 $^{\circ}E_2$ 各占的百分数, $a + b = 100$; c 为与 a 、 b 有关的实验系数,见表 2-1。

表 2-1

系数 c 的值

$a/\%$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$b/\%$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

(4)压力对粘度的影响。在一般情况下,压力对粘度的影响比较小,在工程中当压力低于 5MPa 时,粘度值的变化很小,可以不考虑。当液体所受的压力加大时,分子之间的距离缩小,内聚力增大,其粘度也随之增大。因此,在压力很高以及压力变化很大的情况下,粘度值的变化就不能忽视。在工程实际应用中,当液体压力在低于 50MPa 的情况下,可用下式计算其粘度:

$$\nu_p = \nu_0 (1 + \alpha p) \quad (2-12)$$

式中： ν_p 为压力在 p (Pa) 时的运动粘度； ν_0 为绝对压力为 1 个大气压时的运动粘度； p 为压力 (Pa)； α 为决定于油的粘度及油温的系数，一般取 $\alpha = (0.002 \sim 0.004) \times 10^{-5}, 1/\text{Pa}$ 。

(5) 温度对粘度的影响。液压油粘度对温度的变化是十分敏感的，当温度升高时，其分子之间的内聚力减小，粘度就随之降低。不同种类的液压油，它的粘度随温度变化的规律也不同。我国常用粘温图表示油液粘度随温度变化的关系。

对于一般常用的液压油，当运动粘度不超过 $76\text{mm}^2/\text{s}$ ，温度在 $30 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内时，可用下述近似公式计算其温度为 $t^\circ\text{C}$ 的运动粘度：

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \tag{2-13}$$

式中： ν_t 为温度在 $t^\circ\text{C}$ 时油的运动粘度； ν_{50} 为温度为 50°C 时油的运动粘度； n 为粘温指数。

粘温指数 n 随油的粘度而变化，其值可参考表 2-2。

表 2-2 粘 温 指 数

$\nu_{50}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	2.5	6.5	9.5	12	21	30	38	45	52	60
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49

三、液压系统对液压油的要求

液压油是液压传动系统的重要组成部分，是用来传递能量的工作介质。除了传递能量外，它还起着润滑运动部件和保护金属不被锈蚀的作用。液压油的质量及其各种性能将直接影响液压系统的工作。从液压系统使用油液的要求来看，有下面几点：

1. 适宜的粘度和良好的粘温性能 一般液压系统所用的液压油其粘度范围为：

$$\nu = 11.5 \times 10^{-6} \sim 35.3 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s} (2 \sim 5^\circ\text{E}_{50})$$

2. 润滑性能好 在液压传动机械设备中，除液压元件外，其他一些有相对滑动的零件也要用液压油来润滑，因此，液压油应具有良好的润滑性能。为了改善液压油的润滑性能，可加入添加剂以增加其润滑性能。

3. 良好的化学稳定性 即对热、氧化、水解、相容都具有良好的稳定性。

4. 对液压装置及相对运动的元件具有良好的润滑性

5. 对金属材料具有防锈性和防腐性

6. 比热、热传导率大，热膨胀系数小

7. 抗泡沫性好，抗乳化性好

8. 油液纯净，含杂质量少

9. 流动点和凝固点低，闪点(明火能使油面上油蒸气内燃，但油本身不燃烧的温度)和燃点

高

此外，对油液的无毒性、价格便宜等，也应根据不同的情况有所要求。

四、液压油的选用

正确而合理地选用液压油，乃是保证液压设备高效率正常运转的前提。

选用液压油时，可根据液压元件生产厂样本和说明书所推荐的品种号数来选用液压油，或者根据液压系统的工作压力、工作温度、液压元件种类及经济性等因素全面考虑，一般是先确