

高等院校应用型人才培养机械类规划教材



液压传动与控制

主编 李振军 刘建英
副主编 温倩 禹同娥 方月



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校应用型人才培养机械类规划教材

液压传动与控制

主编 李振军 刘建英
副主编 温倩 禹同娥 方月



机械工业出版社

本书结合高等学校机械制造、机械设计、机电一体化、模具设计与制造、纺织机械等机械工程类专业的教学要求,根据相关教学标准编写。全书共十章,内容包括绪论、液压传动基础知识、液压动力元件、液压执行元件、液压控制阀、辅助元件、液压基本回路、典型液压系统、液压传动系统的设计与计算、液压系统的安装调试和运转维护。

本书适合高等学校机械制造、机械设计、机电一体化、模具设计与制造、纺织机械等机械工程类专业的本科和高职高专层次学生作为课堂教学教材,也适合各类自考或自学人员作为参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动与控制/李振军,刘建英主编. —北京:机械工业出版社,2009.5
高等院校应用型人才培养机械类规划教材
ISBN 978-7-111-27110-9

I. 液… II. ①李…②刘… III. ①液压传动—高等学校—教材
②液压控制—高等学校—教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 069741 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:曲彩云 责任印制:杨 曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13 印张·317 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27110-9

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前言

液压技术是实现现代传动和控制的关键技术之一，近年来与微电子技术、计算机技术相结合，使液压技术进入了一个崭新的历史阶段。液压技术与传动、控制、检测等技术一起成为对现代机械装备技术进步有重要影响的基础技术，其应用遍布各个工业领域，如机床、工程机械、冶金机械、农业机械、塑料机械、锻压机械、航空、航天、航海、石油与煤炭等领域都广泛采用了液压技术。液压技术的采用对机械产品的质量和生产水平的提高起到了极大的促进和保证作用，因此，采用液压技术的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志。

本书是为高等学校机械制造、机械设计、机电一体化、模具设计与制造、纺织机械等机械工程类专业编写的《液压传动与控制》教材。全书共十章，内容包括绪论、液压传动基础知识、液压动力元件、液压执行元件、液压控制阀、辅助元件、液压基本回路、典型液压系统、液压传动系统的设计与计算、液压系统的安装调试和运转维护。

本书的编写工作由河南工程学院的李振军、刘建英、温倩、禹同娥、方月等共同完成。由李振军、刘建英担任主编，温倩、禹同娥、方月担任副主编，由河南工程学院张红松博士主审，张老师对书稿进行了认真细致的审阅，并提出了极为宝贵的修改意见，对提高本书的编写质量给予了很大的帮助，在此表示感谢。

在本书的编写过程中，参考了许多同类教材和习题集，谨致谢意。

限于编者水平，误漏欠妥之处在所难免，欢迎广大同仁和读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 液压传动的定义.....	1
第二节 液压传动的优缺点.....	1
第三节 液压传动的工作原理及其组成.....	2
第四节 液压传动发展概况.....	5
第五节 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	8
第一节 液压油的主要性质及选用.....	8
第二节 液体静力学.....	14
第三节 液体动力学.....	18
第四节 管道内压力损失的计算.....	24
第五节 小孔及间隙流动.....	28
第六节 液压冲击及空穴现象.....	35
习题.....	39
第三章 液压动力元件	41
第一节 液压泵概述.....	41
第二节 柱塞泵.....	44
第三节 齿轮泵.....	48
第四节 叶片泵.....	53
第五节 液压泵的噪声.....	62
第六节 液压泵的选用.....	63
习题.....	63
第四章 液压执行元件	65
第一节 液压缸.....	65
第二节 液压马达.....	77
习题.....	85
第五章 液压控制阀	88
第一节 概述.....	88
第二节 方向控制阀.....	89
第三节 压力控制阀.....	99
第四节 流量控制阀.....	107
习题.....	113
第六章 辅助装置	116
第一节 滤油器.....	116
第二节 油箱.....	119

第三节	管件·····	121
第四节	蓄能器·····	123
第五节	热交换器·····	126
第六节	密封装置·····	128
习题	·····	131
第七章	液压基本回路 ·····	132
第一节	速度控制回路·····	132
第二节	压力控制回路·····	144
第三节	方向控制回路·····	148
第四节	多缸动作回路·····	150
习题	·····	154
第八章	典型液压系统 ·····	156
第一节	M1432A 型万能外圆磨床液压系统·····	156
第二节	组合机床液压系统·····	159
第三节	MLS ₃ -170 型采煤机牵引部液压系统·····	162
第四节	连铸机中间包滑动水口液压系统·····	167
习题	·····	171
第九章	液压传动系统的设计与计算 ·····	173
第一节	明确设计要求进行工况分析·····	173
第二节	确定液压系统主要参数·····	176
第三节	液压元件的选择·····	178
第四节	液压系统性能的验算·····	182
第五节	绘制正式工程图和编写技术文件·····	184
第六节	液压系统的设计计算举例·····	184
习题	·····	189
第十章	液压系统的安装调试和运转维护 ·····	190
第一节	液压系统的安装和调试·····	190
第二节	液压系统的使用维护·····	194
习题	·····	199
参考文献	·····	200

第一章 绪论

本章主要介绍液压传动发展概况和工作原理，也简要介绍液压传动的优缺点以及液压传动在机械中的应用情况。

通过本章的学习，帮助读者大致了解液压传动的相关背景和概况，为后面的具体学习进行必要的知识铺垫。

第一节 液压传动的定义

一部完备的机器都是由原动机、传动装置和工作机三部分组成的。原动机是机器的动力源；工作机是机器直接对外做功的部分；传动装置则是设置在原动机和工作机之间的部分，用于实现动力的传递、转换与控制，以满足工作机对力（或转矩）、工作速度（或转速）及位置的要求。

按照传动件的不同，传动分为机械传动、电气传动、液体传动及复合传动等类型。液体传动又包括液力传动和液压传动。液力传动是以动能进行工作的液体传动；液压传动则是以液体作为工作介质，并以压力能进行动力（或能量）的传递、转换与控制的液体传动，它是本书主要介绍的内容。

第二节 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) 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质量指标，目前是发电机和电动机的 1/10，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。

2) 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。

3) 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。

4) 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。

5) 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。

6) 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。

7) 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。

液压传动的缺点是：

1) 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。

2) 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。

3) 液压传动对油温的变化比较敏感，温度变化时，液体粘度变化，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。一般工作温度在 $-15\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内较合适。

4) 液压系统发生故障不易检查和排除。

5) 液压传动在能量转换过程中，特别是在节流调速系统中，其压力、流量损失大，故系统效率较低。

6) 液压传动要求有单独的能源，不像电源那样使用方便。

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。

第三节 液压传动的工作原理及其组成

一、液压传动系统的组成

下面分析一种驱动工作台的液压传动系统。如图 1-1 所示，它由油箱、过滤器、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。油液经过滤器进入液压泵，油液在泵腔中从入口低压到泵出口高压，在图 1-1a 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 1-1b 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，由以下五个主要部分来组成：

(1) 能源装置 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 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。

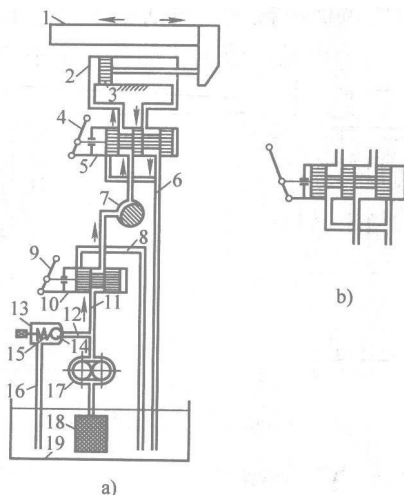


图 1-1 机床工作台液压系统工作原理图

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—过滤器 19—油箱

(3) 控制调节装置 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 是指除上述三部分之外的其他装置，例如油箱、过滤器、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。

二、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 1-2 是液压千斤顶的工作原理图。大液压缸 9 和大活塞 8 组成举升液压缸，杠杆手柄 1、小液压缸 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 输入举升大液压缸 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，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 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，小液压缸 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液压缸 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。

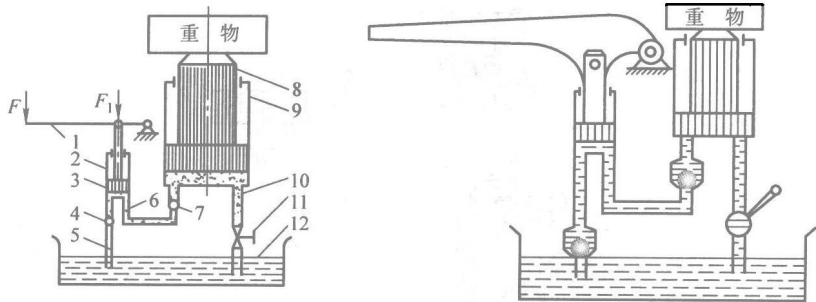


图 1-2 液压千斤顶工作原理图

- 1—杠杆手柄 2—小液压缸 3—小活塞 4, 7—单向阀 5—吸油管 6, 10—管道
8—大活塞 9—大液压缸 11—截止阀 12—油箱

三、液压传动系统图的图形符号

图 1-1 所示的液压系统是一种半结构式的工作原理图，它具有直观性强、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《液压气动图形符号》(GB/T786. 1-1993)，该标准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，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。

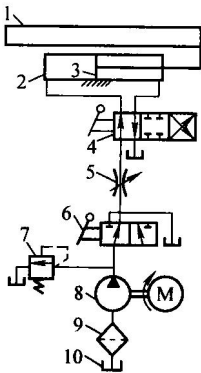


图 1-3 机床工作台液压系统的图形符号图

- 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—过滤器 10—油箱

- (2) 元件符号内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 1-1a 系统用国标 GB/T786. 1-1993 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。

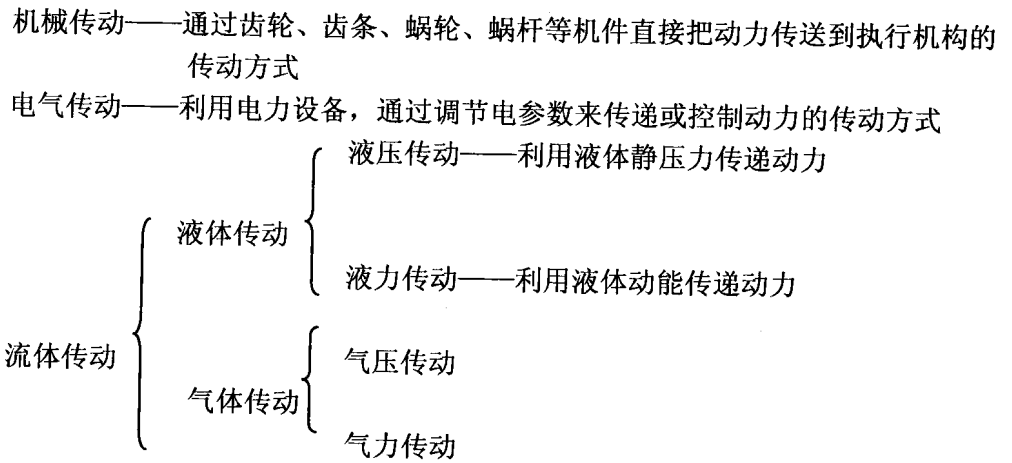
第四节 液压传动发展概况

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，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。

20 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几十年的事。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，随着我国由国外引进液压元件、生产技术发展到进行自行设计，现已形成了系列化，并在各种机械设备上得到了广泛的使用。

一切机械都有其相应的传动机构借助于它达到对动力的传递和控制的目的。机械的常见传动方式如下：



第五节 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，传动装置可分为机械式、电气式、气动式、液压式。经常还将不同的形式组合起来运用。

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；卧式车床、转塔车床、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、丝杆螺母间隙消除装置、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。

表 1-1 液压传动在其他机械工业部门的应用情况

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	汽车起重机、港口龙门起重机、叉车、装卸机械、带式运输机等
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、数字式健身或训练机、模拟驾驶舱、机器人等

习 题

- 1.1 液压传动与机械传动、电气传动和气压传动相比较，有哪些优缺点？
- 1.2 元件在系统图中是怎样表示的？
- 1.3 液压传动有哪些基本组成部分？

- 1.4 动力元件的作用是什么？常用的动力元件有哪些？
- 1.5 执行元件的作用是什么？常用的执行元件有哪些？
- 1.6 控制元件的作用是什么？常用的控制元件有哪些？
- 1.7 什么是液压传动系统图？
- 1.8 液压传动系统图的优点是什么？

第二章 液压传动基础知识

本章介绍有关液压传动的流体力学基础，重点为液体静压方程、连续性方程、伯努利方程的应用，压力损失、小孔流量的计算。要求学生理解基本概念、牢记公式并会应用。

第一节 液压油的主要性质及选用

液压油是液压传动系统中的传动介质，而且还对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却和防锈作用。

液压传动系统的压力、温度和流速在很大的范围内变化，因此液压油的质量优劣直接影响液压系统的工作性能。故此，合理地选用液压油是很重要的。

一、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。液压系统使用油液的要求有以下几点：

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) 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) 比热容、热导率大，热膨胀系数小。

5) 对金属材料具有防锈性和防腐性。

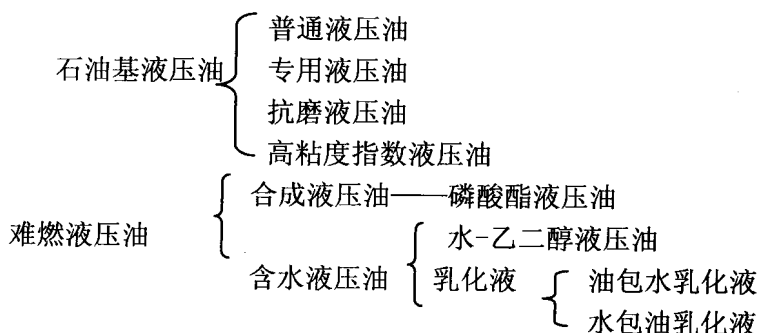
6) 流动点和凝固点低，闪点(明火能使油面上油蒸气引燃，但油本身不燃烧的温度)和燃点高。

7) 抗泡沫性好，抗乳化性好。

8) 油液纯净，含杂质量少。

此外，对油液的无毒性、价格等，也应根据不同的情况有所要求。

二、液压油的分类



(1) 石油基液压油 这种液压油是以石油的精炼物为基础，加入各种可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，不同品种的液压油其精制程度不同或加入的添加剂不同。

(2) 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，有一定的毒性。

(3) 水-乙二醇液压油 由水、乙二醇和添加剂组成，而蒸馏水占 $35\%\sim 55\%$ （质量分数），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 $90\%\sim 95\%$ （质量分数），后者含水量达 40% （质量分数）。

三、液压油的物理特性

1. 密度 ρ

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

式中， m 为质量（kg）； V 为体积（ m^3 ）。一般矿物油的密度为 $850\sim 950\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2. 重度 γ

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

一般矿物油的重度为 $8400\sim 9500\text{N}/\text{m}^3$

因 $G = mg$ ，所以

$$\gamma = G/V = \rho g \quad (2-3)$$

3. 液体的可压缩性

液体受压力作用而体积减小的特性称为液体的可压缩性。

压力为 p ，体积为 V_0 的液体，如压力增大 Δp 时，体积减小 ΔV ，则此液体的体积压缩率为

$$\beta = -\Delta V / \Delta p V_0 \quad (2-4)$$

体积模量

$$K = 1/\beta$$

式中， ΔV 为体积减小量； Δp 为压力增大量； V_0 为原体积。

4. 流体的粘性

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力；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力，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。

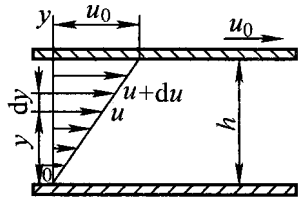


图 2-1 液体的粘性示意图

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部各处的速度大小不等。以流体沿如图 2-1 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，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 dy 成反比，即

$$F = \mu A du / dy \tag{2-5}$$

以 $\tau = F / A$ 表示切应力，则有

$$\tau = \mu du / dy \tag{2-6}$$

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/dy 表示流体层间速度差异的程度，称为速度梯度。

上式是液体内部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) 动力粘度 μ 动力粘度又称绝对粘度，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，单位面积上内摩擦力的大小，即

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \tag{2-7}$$

动力粘度的国际 (SI) 计量单位为牛顿·秒/米²，符号为 $N \cdot s/m^2$ ，或为帕·秒，符号

为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动粘度 ν 运动粘度是动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值

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

式中, μ 为液体的动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); ρ 为液体的密度 (kg/m^3)。

运动粘度的 SI 单位为 m^2/s 。过去曾用 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, 但这都是非法定单位, 它与法定单位 (m^2/s) 的换算关系如下

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

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动力粘度与密度的比值, 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。全损耗系统用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°C 时运动粘度 ν 的平均值。例如 10 号全损耗系统用油指明该油在 50°C 时其运动粘度 ν 的平均值是 10cSt。蒸馏水在 20.2°C 时的运动粘度 ν 恰好等于 1cSt, 所以从全损耗系统用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, 依此类推。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大小来表示该液体粘性的。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 200cm^3 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°C 时流过同一孔所需时间 t_B ($t_B=50\sim 52\text{s}$), 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 $^\circ\text{E}$ 表示。被测液体温度 $t^\circ\text{C}$ 时的恩氏粘度用符号 $^\circ\text{E}_t$ 表示

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

工业上一般以 20°C 、 50°C 和 100°C 作为测定恩氏粘度的标准温度, 并相应地以符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 和 $^\circ\text{E}_{100}$ 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

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

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

$$^\circ\text{E} = [a^\circ\text{E}_1 + b^\circ\text{E}_2 - c(^\circ\text{E}_1 - \text{E}_2)] / 100 \quad (2-11)$$

式中, $^\circ\text{E}$ 为混合液体的恩氏粘度; $^\circ\text{E}_1$ 、 $^\circ\text{E}_2$ 分别为用于混合的两种油液的恩氏粘度, $^\circ\text{E}_1 > ^\circ\text{E}_2$; a 、 b 分别为用于混合的两种液体 $^\circ\text{E}_1$ 、 $^\circ\text{E}_2$ 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。

(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