



21世纪高等院校创新型项目成果

液压与气压传动技术

Yeya yu Qiya Chuandong Jishu

◎主 编 苑章义 王益军 车业军

◎主 审 马宪亭

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气压传动技术/苑章义, 王益军, 车业军主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 6630 - 7

I. ①液… II. ①苑…②王…③车… 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 (2012) 第 192699 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址: [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地质印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 19

字 数 / 432 千字

版 次 / 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑 / 张慧峰

印 数 / 1 ~ 1000 册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 48.00 元

责任印制 / 王美丽

前 言

本书在编写时坚持以素质为基础、能力为本位的指导思想,按照“校企合作,工学结合”人才培养模式的要求,构建基于工作过程或岗位作业流程的课程构架,遵循高等教育课程观、学习观、教学观和传播观,逐步形成适应社会经济发展和岗位需要的机电类专业高等教材。

为使本教材适应当前教育培养服务于生产、建设、管理、服务第一线所需要的高等技术应用型专门人才的需要,强化学生综合职业能力的培养以及基础理论知识的创新和整体素质的提高,我们在教材编写过程中坚持理论知识“必需、够用”的原则选择理论知识,舍弃了传统教材中繁琐的文字叙述、理论性较强的公式推导、复杂的元件结构图,取而代之的是简要的文字说明、结论性的经验公式、清晰的元件回路简图和生动的典型实例。教材中将大量的形象图片和必要的说明文字有机的进行组合,在一定程度上降低了理论难度,可以帮助学生减轻阅读负担,提高学习效率,增强感性认识。

另外,我们在精心构建课程内容的基础上,无论内容还是学时均富有弹性,以便于不同专业、不同学制、不同学时、不同地区、不同学校对教材内容的灵活选用。

为体现教材的先进性,反映生产过程中的实际技术水平,我们在编写时邀请企业相关人员共同研究教材内容,并深入到企业一线去搜集资料,与企业技术专家进行探讨,因此本教材是理论与实际的结合,能够反映企业生产的最新技术。本教材编写任务安排如下:全书由苑章义、王益军、车业军主编,李宗玉、冯爱华、谷晓妹、唐岩担任副主编,参加编写的有褚彩萍、温红、王金新、时培刚、张国良、司秋菊、李华、刘玉来,本书由马宪亭主审。本书在编写过程中得到了主、参编所在单位的大力支持和帮助,在此我们表示诚心的谢意。

由于时间仓促,编者水平和经验有限,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

项目 1 液压传动的基础知识	1
任务 1 液压传动认识	3
任务 2 液压油的性质和选用	7
任务 3 流体力学分析	13
任务 4 液压系统运行中压力损失、液压冲击、气穴现象	25
任务 5 孔口及缝隙流量分析	29
习题	31
项目 2 液压系统组成元件	32
任务 1 液压泵的工作原理和性能参数	37
任务 2 液压系统的动力元件	41
子任务 1 齿轮泵	41
子任务 2 叶片泵	45
子任务 3 柱塞泵	50
子任务 4 螺杆泵	54
子任务 5 液压泵的选用	55
任务 3 液压系统的执行元件	56
子任务 1 液压马达的工作原理和性能参数	56
子任务 2 液压缸的工作原理	60
子任务 3 液压缸的结构	66
任务 4 液压系统的控制元件	71
子任务 1 液压控制阀工作原理和性能参数	71
子任务 2 方向控制阀	73
子任务 3 压力控制阀	84
子任务 4 流量控制阀	94
任务 5 液压系统的液压辅助元件	99
习题	110
项目 3 液压系统基本回路	115
任务 1 压力控制回路分析	119
任务 2 速度控制回路分析与组建	126
任务 3 方向控制回路	142
任务 4 多缸动作回路	145
习题	151
项目 4 典型液压控制系统	154

任务 1 液压系统图的阅读和分析方法	157
任务 2 组合机床动力液压滑台液压系统	159
任务 3 汽车起重机液压系统	163
任务 4 数控加工中心液压系统分析	166
项目 5 气压传动	172
任务 1 气压传动的基础知识	175
任务 2 气压传动系统的组成	180
子任务 1 气源装置和辅助元件	181
子任务 2 气动执行元件	187
子任务 3 气动控制元件	190
任务 3 气压传动常用回路分析及应用	201
子任务 1 数控加工中心气动换刀系统	210
子任务 2 气液动力滑台气压传动系统	212
习题	214
项目 6 液压伺服系统	215
任务 1 液压伺服系统的工作原理和应用	219
任务 2 液压伺服阀	222
任务 3 电液伺服阀	227
任务 4 液压伺服系统应用举例	234
子任务 1 机械手伸缩运动伺服系统	235
子任务 2 液压助力器	235
习题	237
项目 7 液压系统的安装、调试和故障分析	238
任务 1 液压系统的安装	241
任务 2 液压系统的调试	243
任务 3 液压系统的典型故障和排除方法	245
习题	248
项目 8 气动系统的安装、调试和故障分析	249
任务 1 气动系统的安装和调试	252
任务 2 气动系统的典型故障和排除方法	255
习题	260
项目 9 液压仿真软件 Fluidsim	261
任务 1 液压仿真软件简介	263
任务 2 Fluidsim 仿真软件	265
任务 3 利用 FluidSIM 软件进行组合机床滑台的仿真	274
习题	279
附录	281
参考文献	292

项目 1 液压传动的基础知识

【项目需求】

 液压（与气动）技术有着悠久的发展历史，从 1795 年世界上第一台水压机诞生，到现在已有 200 多年的历史，但由于工艺制造水平低下，水压机发展缓慢，几乎停滞不前；随着工艺制造水平的提高，到 20 世纪 30 年代，开始生产液压元件，并首先应用于机床；到 20 世纪 50、60、70 年代，由于工艺水平有很大提高，液压技术也迅速发展，是机械设备中发展速度最快的技术之一，也是一种很有发展前途的技术，是实现现代传动和控制的关键技术，其发展速度仅次于电子技术，特别是近年来流体技术与微电子、计算机技术相结合，使液压与气动技术进入了一个新的发展阶段。据有关资料记载，国外生产的 95% 的工程机械、90% 的数控加工中心、95% 的自动生产线，几乎都采用了液压与气动技术。在国民经济各个领域，从蓝天到水下，从军用到民用，从重工业到轻工业，到处都有液压与气动技术，其水平的高低已成为一个国家工业发展水平的重要标志。

【项目工作场景】

 液压与气压传动是以有压力的流体（压力油或压缩空气）为工作介质，来实现各种机械的传动和控制。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，以此来进行能量的传递、转换及控制。因此，要掌握液压和气压传动及其控制技术，就首先要了解它们的工作原理，了解液体静力学、运动学和动力学特性，了解液压系统运行时的一些常见问题。

【方案设计】

步骤	教学内容	教学方法	指导要点	教学手段 教学材料	师生活动	时间分配
任务 1 引入学习领域	①第一堂课，教师先自我介绍，将自己的电话、邮箱写在黑板上，方便师生相互联系。 ②播放视频：液压传动技术在工程机械中的应用，激发学生的学习兴趣。 ③介绍液压传动技术在工程机械中的应用	多媒体演示，讲授		黑板 PPT		

续表

步骤	教学内容	教学方法	指导要点	教学手段 教学材料	师生活动	时间分配
任务1 引入学习领域	①学习领域介绍：课程地位、课程性质、课程目标、考核方式、授课方式。 ②划分工作小组：以寝室为单位，每个寝室8人为一个大组，每大组分为两个小组，每组推举一名组长	讲授		PPT	学生明确本学习领域任务、目的	
实施任务2	①告知任务：认识液压传动的工作原理。 ②案例：液压千斤顶工作视频、动画。 ③告知目标：能口述千斤顶的工作过程	案例教学		千斤顶工作视频、动画	任务布置	
	①小组讨论：千斤顶如何把重物顶起，千斤顶工作原理分析。 ②知识回顾：帕斯卡原理	讨论教学		PPT	学生自由讨论、交流	
	①小结：液压传动原理的要点。 ②介绍两个概念：压力和流量	启发式教学		PPT	归纳总结	
实施任务3	①告知任务3：认识液压系统的组成及表示方法。 ②案例：推土机工作装置液压系统。 ③告知目标：能口述液压传动系统的五大组成部分；能指出各组成部分的主要功用；能说明液压系统的两种表示方法	案例教学		视频、图片 PPT	学生明确本学习领域任务、目的	
	①步骤1：讲述推土机液压系统的组成及作用，归纳液压系统的组成	启发式教学		PPT, 图片	听讲、提问	
	②步骤2：讲述液压系统的表示方法	讲授法		PPT, 图片		
	③小组练习：画出千斤顶的液压系统图		巡回指导	草稿纸	练习	
参观	①参观学习：液压实训室	体验式教学法		实训基地	观察、体验	

续表

步骤	教学内容	教学方法	指导要点	教学手段 教学材料	师生活动	时间分配
课堂总结	师生共同复习：本堂课的学习内容	讲述				
布置作业	①查阅资料：与其他传动形式相比较， 液压传动具有哪些优点、缺点？ ②查阅资料，写成小论文（任选一题）： a. 液压传动技术的发展概况； b. 中国液压技术的发展历程			作业本	课后查阅资料，完成作业	

【相关知识和技能】

- 知识目标：1. 理解液压传动的工作原理；
2. 掌握液压系统的组成和表示方法；
3. 了解液压传动技术在机械中的应用；
4. 掌握液压油的物理性质和选用；
5. 了解液压流体力学的相关方程。
- 技能目标：1. 能对照千斤顶、推土机等分析其工作原理；
2. 能利用帕斯卡原理进行压力计算；
3. 根据液压系统的要求，能正确选用液压油的牌号。
- 情感目标：1. 培养独立思考能力；
2. 培养自主学习能力；
3. 能够利用各种媒体查找所需资料。

任务1 液压传动认识

【任务目标】

- ①通过液压千斤顶的工作过程掌握液压传动的基本工作原理；
- ②了解液压传动的优缺点；
- ③了解液压传动的应用与发展。

【任务分析】

一台机器不管是多么的复杂，都是由动力机构、传动机构和工作机构三部分组成。而传动机构是动力传递的中间桥梁，根据其传动形式的不同，传动机构可分为机械传动、电力传动、液体传动和气体传动，在一些精密设备和重要设备上液压传动应用非常广泛。通过本任

务的学习，初步掌握液压传动的工作原理和工作特点，为后续内容的学习奠定基础。

【知识准备】

1 液压传动的工作原理

液压与气压传动的基本工作原理是相似的，现以液压千斤顶的工作过程来简述液压传动的工作原理，图 1.1 所示为该液压系统的工作原理示意图。由图可知，该系统由举升液压缸和手动液压泵两部分组成，大油缸 6、大活塞 7、单向阀 5 和卸油阀 9 组成举升液压缸，杠杆手柄 1、小活塞 2、小油缸 3、单向阀 4 和 5 组成手动液压泵。活塞和缸体之间既能保持良好的配合关系，又能实现可靠的密封。

提起手柄 1 使小活塞 2 向上移动，小活塞 2 下端密封的油腔容积增大，形成局部真空，这时单向阀 5 关闭并阻断其所在的油路，而单向阀 4 打开使其所在油路畅通，油箱 10 中的液压油就在大气压的作用下通过吸油管道进入并充满小油缸 3，完成一次吸油动作；用力压下手柄 1，小活塞 2 下移，小活塞 2 下腔容积减小，腔内压力升高，这时单向阀 4 关闭同时阻断其所在的油路，当压力升高到一定值时单向阀 5 打开，小油缸 3 中的油液经管道输入大油缸 6 的下腔，由于卸油阀 9 处于关闭状态，大油缸 6 中的液压油增多迫使大活塞 7 向上移动，顶起重物。再次提起手柄吸油时，单向阀 5 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大油缸 6 下腔，使重物 8 逐渐地升起。如果打开卸油阀 9，大活塞 7 在其自重和重物 8 的作用下下移，大油缸 6 下腔的油液便通过管道流回油箱 10 中，重物 8 就向下运动。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如下：

- (1) 液压传动是利用有压力的液体（液压油）作为传递运动和工作介质的；
- (2) 液压传动中要经过两次能量转换，先将机械能转换成油液的压力能，再将油液的压力能转换成机械能；
- (3) 液压传动是依靠密封容器或密闭系统中密封容积的变化来实现运动和动力的传递的。

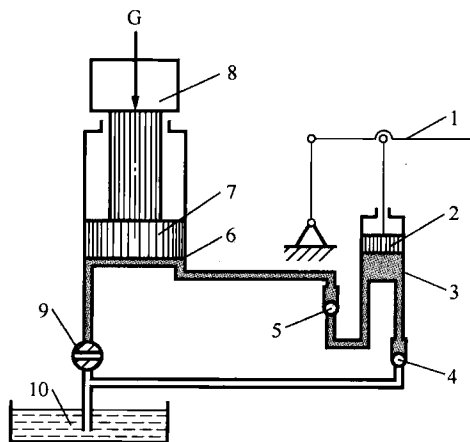


图 1.1 液压千斤顶的工作原理示意图

1—杠杆手柄；2—小活塞；3—小油缸；4、5—单向阀；6—大油缸；
7—大活塞；8—重物；9—卸油阀；10—油箱

2 液压传动的优缺点

2.1 优点

(1) 液压传动装置的重量轻、结构紧凑、惯性小。例如,相同功率下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0.002 5 N/W(牛/瓦),发电机和电动机则约为0.03 N/W。

(2) 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,又加之其极易布置,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。

(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1:2 000,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。

2.2 缺点

(1) 液压系统中的漏油、液压油的可压缩性等因素,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,液体黏性变化,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。

3 液压传动的应用

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，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0.01~0.02 mm。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 所示。

表 1.1 液压传动在各类机械行业中的应用

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、皮带运输机械等
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构、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、减震器等
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

4 液压传动的发展

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。

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。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。

【任务实施】

1. 在液压实训室,拆装液压千斤顶,了解其内部构造,说明其工作原理。
2. 在液压仿真实训室,查阅资料,了解液压传动技术的发展历程和在机械工程方面的应用。

【任务总结】

通过本任务的学习,初步了解液压系统的发展历史、液压系统的组成、工作原理以及在机械工程中的应用。

任务2 液压油的性质和选用

【任务目标】

- ①掌握液压油黏性的物理意义;
- ②掌握液压油黏度的几种表示方法;
- ③掌握液压油的黏温特性;
- ④掌握液压油的可压缩性;
- ⑤掌握液压油的选择。

【任务分析】

液压油是液压传动系统的工作介质,其物理性质直接影响液压传动系统的工作稳定性,通过本次任务的学习,掌握液压油的性质尤其是其物理性质,是根据液压系统的要求选择确定液压油牌号的基础。

【知识准备】

液压油是液压传动系统中的工作介质,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将直接影响液压系统的工作性能。因此,合理的选用液压油也是很重要的。

1 液压油的物理性质

1.1 液压油的密度

单位体积某种液压油的质量称为该种液压油的密度,以 ρ 表示,即

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1.1)$$

式中: V ——液压油的体积;

m ——体积为 V 的液压油质量。

液压油的密度随压力的增加而加大，随温度的升高而减小，但一般情况下，由压力和温度引起的这种变化都较小，可以忽略不计，故在实际应用中可认为液压油的密度不受压力和温度变化的影响。

1.2 液压油的黏性

1.2.1 物理意义

液体在外力作用下流动时，由于液体分子间的内聚力要阻碍液体分子之间相对运动，因而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的黏性。黏性的大小用黏度表示，黏性是液体重要的物理特性，也是选择液压油的重要依据之一。

液体流动时，由于液体的黏性及液体和固体壁面间的附着力，流动液体内部各层间的速度大小不等。如图 1.2 所示，设两平行平板间充满液体，下平板不动，而上平板以速度 v_0 向右平动。由于液体的黏性作用，紧贴于下平板的液体层速度为零，紧贴于上平板的液体层速度为 v_0 ，而中间各层液体的速度则根据该层到下平板的距离大小近似呈线性规律分布。因此，不同速度流层相互制约而产生内摩擦力。

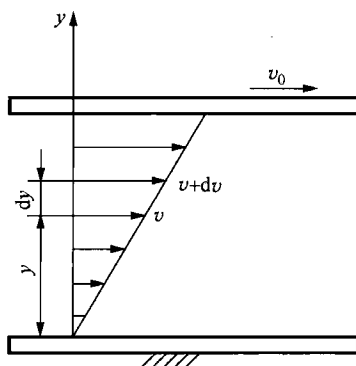


图 1.2 液体黏性示意图

实验测定结果指出，液体流动时相邻液层之间的内摩擦力 F 与液层间的接触面积 A 和液层间的相对速度 dv 成正比，而与液层间的距离 dy 成反比，即

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1.2)$$

式中： μ ——比例常数，称为液体的黏性系数或黏度；

$\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度。

若以 τ 来表示单位接触面积上的内摩擦力，即切应力，则由式 (1.2) 可得

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.3)$$

式 (1.3) 表达的是牛顿的液体内摩擦定律。

在液体静止时，由于 $dv/dy = 0$ ，液体内摩擦力 F 为零，因此，静止的液体不呈现黏性。

1.2.2 黏度

流体黏性的大小用黏度来表示。常用的黏度有动力黏度、运动黏度和相对黏度。

(1) 动力黏度 μ

动力黏度又称绝对黏度,可由式(1.2)导出,即

$$\mu = \frac{F}{A \frac{dv}{dy}} = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (1.4)$$

由式(1.4)可知动力黏度 μ 的物理意义是:液体在单位速度梯度 ($\frac{dv}{dy} = 1$) 下流动时,单位接触面积上的内摩擦力的大小。

动力黏度的国际(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 $Pa \cdot s$ 。

(2) 运动黏度 ν

某种液体的运动黏度是该液体的动力黏度 μ 与其密度 ρ 的比值,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.5)$$

在SI中,液体的运动黏度的单位为米²/秒,符号为 m^2/s ,由于该单位偏大,实际上常用 cm^2/s 、 mm^2/s 以及以前沿用的非法定计量单位 cSt (厘斯),它们之间的关系是 $1m^2/s = 10^4 cm^2/s = 10^6 mm^2/s = 10^6 cSt$ 。

运动黏度 ν 没有什么明确的物理意义,因在理论分析和计算中常遇到 μ/ρ 的比值,为方便起见用 ν 表示。国际标准化组织 ISO 规定,各类液压油的牌号是按其在一定温度下运动黏度的平均值来标定的。我国生产的全损耗系统油和液压油采用 40℃ 时的运动黏度值 (mm^2/s) 为其黏度等级标号,即油的牌号。例如牌号为 L-HL32 的液压油,就是指这种油在 40℃ 时的运动黏度值平均值为 32 mm^2/s 。

(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条件下测出来的液体黏度。各国采用的相对黏度单位有所不同,美国采用赛氏黏度,英国采用雷氏黏度,法国采用巴氏黏度,我国采用恩氏黏度。

恩氏黏度用符号 $^{\circ}E$ 表示,被测液体温度为 $t^{\circ}C$ 时的恩氏黏度用符号 $^{\circ}E_t$ 表示。恩氏黏度用恩氏黏度计测定。其方法是:将 200 mL 温度为 $t^{\circ}C$ 的被测液体装入黏度计的容器,经其底部直径为 2.8 mm 的小孔流出,测出液体流尽所需时间 t_A ,再测出 200 mL 温度为 20℃ 的蒸馏水用同一黏度计流尽所需时间 t_B (通常 $t_B = 51 s$);这两个时间的比值即为被测液体在温度 t 下的恩氏黏度,即

$$^{\circ}E_t = \frac{t_A}{t_B} = \frac{t_A}{51 s} \quad (1.6)$$

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

恩氏黏度与运动黏度 (mm^2/s) 的换算关系为:

$$\text{当 } 1.3 \leq ^{\circ}E \leq 3.2 \text{ 时, } \nu = 8^{\circ}E - \frac{8.64}{^{\circ}E} \quad (1.7)$$

$$\text{当 } ^{\circ}E > 3.2 \text{ 时, } \nu = 7.6^{\circ}E - \frac{4}{^{\circ}E} \quad (1.8)$$

1.2.3 黏度与压力、温度的关系

当液体所受压力增大时，其分子间的距离减小，内聚力增大，黏度也随之增大。但对于一般的液压系统，当压力在 10 MPa 以下时，油液的黏度受压力变化的影响很小，可以忽略不计。

油液的黏度对温度变化十分敏感，温度升高，黏度将显著降低。油液的黏度随温度变化的性质称为油液的黏温特性。不同种类的液压油具有不同的黏温特性。油液黏温特性的好坏常用黏度指数 VI（黏温变化程度与标准油相比较所得的相对数值）来表示，黏度指数 VI 值越大，说明其黏度随温度变化越小，黏温特性越好。一般液压油的 VI 值要求在 90 以上，优异的在 100 以上。几种常用油液的黏度指数列于表 1.2 中。

表 1.2 几种常用油液的黏度指数

油液种类	黏度指数	油液种类	黏度指数
通用液压油 L-HL	90	高含水液压油 L-HFA	130
抗磨液压油 L-HM	95	油包水乳化液 L-HFB	130 ~ 170
低温液压油 L-HV	130	水—乙二醇液 L-HFC	140 ~ 170
高黏度指数液压油 L-HR	160	磷酸酯液 L-HFDR	130 ~ 180

1.3 液体的可压缩性

液体因所受压力增大而发生体积减小的特性称为液体的可压缩性。可压缩性用体积压缩系数 k 表示，并定义为单位压力变化下的液体体积的相对变化量。设体积为 V 的液体，当压力增大 Δp ，液体体积减小 ΔV ，则体积压缩系数：

$$k = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \tag{1.9}$$

由于压力增加时液体的体积减小（ $\Delta V < 0$ ），因此式（1.9）中等号右边加一负号，以使 k 为正值。

液体的压缩系数 k 的倒数称为液体的体积弹性模数，用 K 表示。即

$$K = \frac{1}{k} = - \Delta p \frac{V}{\Delta V} \tag{1.10}$$

K 表示产生单位体积相对变化量所需要的压力增量，在实际应用中，常用 K 值说明液体抵抗压缩能力的大小。在常温下，纯净油液的体积模量 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^3$ MPa，其可压缩性是钢的 100 ~ 150 倍（钢的弹性模量为 2.1×10^5 MPa），故一般可认为油液是不可压缩的。

在中、低压系统中，液体的可压缩性对液压系统的性能影响很小，故可将液压油看成不可压缩的，但在高压系统中或研究液压系统的动态特性时，就得考虑液压油的可压缩性。另外，由于空气的可压缩性很大，所以当液压油中混有空气时，其抗压缩能力会大大降低，这会严重影响液压系统的工作性能，所以在有较高要求或压力变化较大的液压系统中，应采取措施尽量减少工作介质中混入的空气及其他易挥发物质（如汽油、煤油和乙醇等）的含量。

2 对液压油的要求及选用

2.1 液压传动工作介质的要求

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黏度适当，黏温特性好；
- ②润滑性能好，防锈能力强；
- ③质地纯净，杂质少；
- ④对金属和密封件有良好的相容性；
- ⑤氧化稳定性好，长期工作不易变质；
- ⑥抗泡沫性和抗乳化性好；
- ⑦比热大，体积膨胀系数小；
- ⑧燃点高，凝点低。

此外，还有无毒性、价格便宜等要求。对于具体的液压系统，则需根据实际情况突出某些方面的性能要求。

2.2 液压传动工作介质的选用

各种液压油都有其特性，都有一定的适用范围。正确而合理地选用液压油，可提高液压传动系统的工作可靠性，延长液压元件的使用寿命。

2.2.1 液压油品种的选择

液压油的品种很多，主要可分为矿油型、乳化型和合成型。液压油的主要品种及其特性和用途列于表 1.3 中。

表 1.3 液压油的主要品种及其特性和用途

类型	名称	ISO 代号	特性和用途
矿油型	普通液压油	L-HL	精制矿油添加剂，提高抗氧化和防锈性能，适用于室内一般的中低压系统
	抗磨型液压油	L-HM	L-HL 油加添加剂，改善抗磨性能，适用于工程机械、车辆液压系统
	低温液压油	L-HV	L-HM 油加添加剂，改善黏温特性，可用于环境温度在 -20℃ ~ -40℃ 的高压系统
	高黏度指数液压油	L-HR	L-HL 油加添加剂，改善黏温特性，VI 值达 175 以上，适用于对黏温特性有特殊要求的低压系统，如数控机床液压系统
	液压导轨油	L-HG	L-HM 油加添加剂，改善黏 - 滑性能，适用于机床中液压和导轨润滑合用的系统
	全损耗系统用油	L-HH	浅度精制矿油，抗氧化性、抗泡沫性较差，主要用于机械润滑，可作液压代用油，用于要求不高的低压系统
	汽轮机油	L-TSA	深度精制矿油加添加剂，改善抗氧化、抗泡沫等性能，为汽轮机专用油，可作液压代用油，用于一般液压系统

续表

类型	名称	ISO 代号	特性和用途
乳化型	水包油乳化液	L-HFA	又称高水基液，特点难燃、黏温特性好，有一定的防锈能力，润滑性差，易泄露。适用于有抗燃要求、油液用量大且泄露严重的系统
	油包水乳化液	L-HFB	既具有矿油型的抗磨、防锈性能，又具有抗燃性，适用于有抗燃要求的中压系统
合成型	水—乙二醇液	L-HFC	难燃，黏温特性和抗蚀性好，能在-54℃~60℃温度下使用，适用于有抗燃要求的中低压系统
	磷酸酯液	L-HFDR	难燃，润滑抗磨性能和抗氧化性能良好，能在-54℃~135℃温度范围内使用；缺点是有毒。适用于有抗燃要求的高压精密液压系统

液压油品种的选择可参考表 1.3，具体还应根据液压传动系统所处的工况条件，主要是根据温度、压力和液压泵类型等来确定。

(1) 工作温度 工作温度主要对液压油的黏温特性和热稳定性提出要求，选用时可参
 照表 1.4。

表 1.4 按工作温度选择液压油的品种

液压油工作温度/℃	< -10	-10 ~ 80	> 80
液压油品种	HR、HV、HS	HH、HL、HM	优等 HM、HV、HS

(2) 工作压力 工作压力主要对液压油的润滑性（抗磨性）提出要求，选用时可参
 照表 1.5。

(3) 液压泵类型 液压泵类型较多，常见的有齿轮泵、叶片泵和柱塞泵。一般而言，
 齿轮泵对液压油的抗磨性要求比叶片泵和柱塞泵低，因此齿轮泵可选用 L-HL 或 L-HM 液
 压油，而叶片泵和柱塞泵一般选择 L-HM 液压油。

表 1.5 按工作压力选择液压油的品种

工作环境	工 况		
	压力 $p \leq 7.0 \text{ MPa}$ 温度 $t < 50^\circ\text{C}$	$7.0 < p \leq 14.0 \text{ MPa}$ 温度 $t < 50^\circ\text{C}$	$p > 14.0 \text{ MPa}$ 温度 $50^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$
室内、固定液压设备	HL	HL、HM	HM
露天寒冷和严寒区	HV	HV、HS	HV、HS
高温热源或明火附近	HFAE	HFB、HFC	HFDR

2.2.2 黏度等级的选择

液压油的品种选定之后，还必须确定其黏度等级。黏度对液压系统工作稳定性、可靠
 性、效率、温升及磨损都有影响。黏度过高对系统润滑有利，但会增加系统的阻力，使得系
 统压力损失增大，效率降低；黏度过低会增加设备的外泄漏，导致系统工作压力不稳定，严
 重时会使泵的磨损加剧。在选择黏度等级时应注意以下几个方面：

(1) 工作压力 工作压力较高的液压系统宜选用黏度较高的液压油，以减少泄漏；反
 之，选用黏度较低的液压油。