

21 世纪高等职业教育
机械专业基础规划教材

液压技术 与应用

邱国庆 主编
张岐生 主审

诚邀教授名家执笔

引入工程实践环节

强调教材整体配合

重点图例汇集成册

强调练习
与实践相结合
免费提供
电子教案、课件
和习题答案

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪高等职业教育机械专业基础规划教材

液压技术与应用

邱国庆 主编

张岐生 主审

人民邮电出版社

21 世纪高等职业教育机械专业基础规划教材

编写委员会

主 任： 翁其金 王其昌 李迈强

副 主 任： 刘亚琴 邱国庆 钱泉森 陈洪涛 虞建中
向 伟

委 员： （排名不分先后）

马西秦	邓志久	朱江峰	胡照海	周 虹
徐志扬	宋文学	贾崇田	刘战术	朱登洁
朱国平	唐 健	廖兆荣	首 珩	朱光力
蔡冬根	苏 珉	张光明	林海岚	罗学科
李 奇	张志鸣	周明湘	李名望	王浩钢
刘向东	瞿川钰	朱国平	窦 凯	杨好学
迟之鑫	王春海	刘小群	孟 奎	余少玲
郑 金	陈福安	左文钢	王泽中	陈智刚
黎 震	张国文	赵先仲	蔡向朝	陈加明
丁学恭	黄 海	杨化书		

执行编委 杨 堃 蔡冬根 王浩钢 林海岚 李 奇

审读主任 张岐生 彭炎荣 段来根 李 华

前 言

在当今世界上，高度发达的制造业和先进的制造技术已经成为衡量一个国家综合经济实力和科技水平的最重要标志之一，成为一个国家在竞争激烈的国际市场上获胜的关键因素。目前，中国制造业已跻身世界第四位，中国已成为制造业大国，但尚不是制造业强国。中共十六大明确提出：“用高新技术和先进适用技术改造传统产业，大力振兴装备制造业。”当前，要从制造大国走向制造强国，必须优先发展先进制造业。这就要求，必须大力发展以数控技术为主的先进制造技术，提高模具设计制造水平，提升计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）的技术水平。

自改革开放以来，到目前为止制造业在中国国民经济中的比重已占到 45%，制造业成为 GDP 增长的主要支撑力量。无论从制造业占国民生产总值和财政收入的比重来讲，还是从扩大就业、保持社会稳定来讲，我们都可以肯定地说，至少在 21 世纪前 50 年制造业仍然是我国国民经济增长的主要源泉。

制造业要发展，人才是关键。尽快拥有一批高技能人才和高素质劳动者，是先进制造业实现技术创新和技术升级的迫切要求，高等职业教育担负着培养高技能人才的根本任务。中国打造“世界工厂”，为中国高等职业教育的发展提供了难得的机遇和艰巨的挑战。

为顺应中国制造业的深层次发展和现代设计方法、数控技术的广泛应用，人民邮电出版社组织全国知名专家，经过与现代数控、模具生产制造企业技术人员的反复研讨，编写了适合当前技术改革、紧跟技术发展的相关高等职业学校教材，包括数控技术规划教材、模具设计与制造技术规划教材、机械专业基础规划教材、计算机辅助设计与制造技术规划教材四个系列，系列之间紧密联系、相辅相成。

四个系列教材均以高等职业教学中的实际技能要求为主旨，内容简明扼要，突出重点。编写方法上注重发挥实例教学的优势，引入众多生产应用实例和操作实训题，便于读者对全书内容的融会贯通，加深理解。其特色主要有如下几点：

1. 教材的重点实例全部编入图册，形成全套教材的整体配合。图册既可以作为全套教材的总结，又可以作为工程实例中的模板。既可以使学生们在三年的学习之后，通过图册加以回顾；又可以在工作中，通过对已学实例加以修改完成工程项目要求。

2. 教材的例图尽量使用当前常用的新图，尽量贴近工程。

3. 辅助设计的教材全部采用“案例教学”的教学方法，并且设计了软件学会之后与工程实践相结合的实践教程（实践教程配有视频教学光盘）。

4. 采用螺旋结构、分四层逐级深入的教学方法，形成各系列教材的整体配合。

5. 课程的整体设计上，特别强调与工程实践的联系。各系列中最后的几门课程，尽量联系到当代工程的实例，使学生们在学习了一定的知识、掌握了相关的技能后，能够应用于工程中。

四个系列的教材分别适合于高职高专院校机械类专业的数控、模具、基础和辅助设计的

课程教学，也可选作数控、模具技能培训教材或从事数控加工和模具设计的广大工程技术人员的参考书。

我们衷心希望，全国关心高等职业教育的广大读者能够对教材的不当之处给予批评指正，来信请发至 yangkun@ptpress.com.cn。

21 世纪高等职业教育机械专业基础规划教材编写委员会

编者的话

高等职业技术教育培养的专业人才应具备工程实践能力，所用教材要着重于学生技术能力的培养。因此，从工程应用的角度出发，编写一本易懂、实用，有利于培养学生应用技能的教材，是本书作者的初衷。

本书是“21 世纪高等职业教育机械专业基础规划教材”之一。全书包括理论基础篇、液压元件篇、液压回路系统篇和实践篇等共 4 篇 11 章内容。本教材具有以下特点：

(1) 内容适度、易懂。在内容取舍方面，一是把握了基础理论以必需和够用为度；二是力求反映液压行业发展的最新情况。在进行理论分析时，简化理论推导，注重分析方法、结论及其应用。全书配有大量的图例，让学生易学、易懂。

(2) 注重实用性。为培养学生的动手能力和加强职业训练，本教材专门编写了实践篇。通过实习、实验，一方面使学生搞清楚结构图上难以表达的复杂结构和空间油路，加深对液压元件结构和工作原理的理解；另一方面，使学生感性地认识零件的材料、外形尺寸、工艺与配合要求、零部件拆装方法等知识，提前得到一定的职业技能的训练。此外，考虑到高职、高专学生毕业后主要从事技术应用工作，所以本教材删除了传统教材中的“液压系统设计”的内容。

(3) 各章均编写了小结与习题，以指导学生学习和巩固所学知识，培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书主要适用于高职高专、职业大学、成人高校、函授大学和自学考试的机械、机电类各专业，也可作为普通工科院校非机械类专业的教材，还可供有关工程技术人员参考使用。

本书主编为邱国庆，副主编林木生。参加编写的还有曾维林、黄丽燕、刘文倩等。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2006 年 2 月

目 录

绪论	1
----	---

第 1 篇 理论基础篇

第 1 章 液压油	5
第 1 节 液压油的用途和种类	5
第 2 节 液压油的主要性质	7
第 3 节 对液压油的基本要求和选用	10
第 4 节 液压油的污染及控制	12
小结	13
习题	13
第 2 章 流体力学基础	14
第 1 节 液体静力学基础	14
第 2 节 液体动力学基础	18
第 3 节 液体流动时的压力损失	23
第 4 节 小孔和缝隙流量	28
第 5 节 液压冲击和气穴现象	33
小结	34
习题	34

第 2 篇 液压元件篇

第 3 章 液压动力元件	38
第 1 节 液压泵基本概念	38
第 2 节 齿轮泵	42
第 3 节 叶片泵	47
第 4 节 柱塞泵	53
第 5 节 液压泵的使用	58
小结	61
习题	62
第 4 章 液压执行元件	63
第 1 节 液压马达	63
第 2 节 液压缸	67
小结	82

习题	83
第5章 液压控制元件	84
第1节 液压控制阀概述	84
第2节 方向控制阀	85
第3节 压力控制阀	94
第4节 流量控制阀	104
第5节 新型控制阀	108
小结	115
习题	116
第6章 液压辅助元件	118
第1节 油管和管接头	118
第2节 油箱	121
第3节 滤油器	123
第4节 蓄能器	126
第5节 密封装置	127
小结	131
习题	131

第3篇 液压回路系统篇

第7章 液压基本回路	132
第1节 方向控制回路	132
第2节 压力控制回路	134
第3节 速度控制回路	143
第4节 多缸工作控制回路	158
小结	163
习题	164
第8章 典型液压系统	166
第1节 怎样看液压系统图	166
第2节 组合机床动力滑台液压系统	167
第3节 万能外圆磨床液压系统	169
第4节 液压压力机液压系统	175
第5节 塑料注射成型机液压系统	179
小结	184
习题	184

第4篇 实践篇

第9章 液压元件拆装实习	187
第1节 概述	187
第2节 液压泵拆装实习	188

第3节 液压马达和液压缸拆装实习	189
第4节 液压控制阀拆装实习	190
小结	191
习题	192
第10章 液压回路实验	193
第1节 透明液压传动实验台简介	193
第2节 实验操作注意事项	195
第3节 液压基本回路实验	196
小结	204
习题	205
第11章 液压系统的安装、使用与维护	206
第1节 液压系统的安装	206
第2节 液压系统的使用与维护	207
第3节 液压系统的调试	210
第4节 液压系统的故障分析与排除	211
小结	213
习题	213
附录 A 常用液压与气动元件图形符号（摘自 GB/T786.1—1993）	214
附录 B 常用单位换算表	219
参考文献	221

结 论

一、液压技术的研究对象及其应用

液压技术是一门研究以有压流体为传动介质,来实现能量传递和控制的学科。

液压传动相对于机械传动来说,是一门新的技术。液压传动的真正推广使用是近 50 多年的事。特别是 20 世纪 60 年代以来,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发展,渗透到国民经济的各个领域之中,在工程机械、冶金、军工、农机、汽车、轻纺、船舶、石油、航空和机床工业中,液压技术得到了普遍的应用。当前,液压技术正向高压、高速、大功率、高效率、低噪声、低能耗、经久耐用、高度集成化等方向发展;同时,新型液压元件的应用、液压系统的计算机辅助设计、计算机仿真和优化、微机控制等方面,也日益取得显著的成果。

我国的液压工业始于 20 世纪 50 年代,其产品最初应用于机床和锻压设备,后来又用于拖拉机和工程机械。自 1964 年开始从国外引进液压元件生产技术,同时自行设计液压产品以来,我国的液压元件生产已形成系列,并在各种机械设备上得到了广泛的使用。目前,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元件新产品,加强产品质量可靠性和新技术应用的研究,积极采用国际标准和执行新的国家标准,合理调整产品结构,对一些性能较差的不符合国家标准的液压件产品采取逐步淘汰的措施。可以看出,液压传动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。为了满足国民经济发展的需要,液压技术必将继续获得飞速发展,它的应用将越来越广泛。

二、液压传动的工作原理

现以图 0-1 所示的液压千斤顶来简述液压传动的工作原理。图中大小两个液压缸 6 和 3 的内部分别装有活塞 7 和 2,活塞和缸体之间保持一种良好的配合关系,活塞不仅能在缸内滑动,而且配合面之间又能实现可靠的间隙密封。在这里,小液压缸是液压装置的动力元件(液压泵),大液压缸是执行元件。当用手向上提起杠杆 1 时,小活塞 2 就被带动上升,于是小缸 3 的下腔密封容积增大,腔内压力下降,形成部分真空,这时钢球 5 将所在的通路关闭,油箱 10 中的油液就在大气压力的作用下推开钢球 4 沿吸油孔道进入小缸的下腔,完成一次吸油动作。接着,压下杠杆 1,小活塞下移,小缸下腔的密封容积减小,腔内压力升高,这时钢球 4 自动关闭了油液流回油箱的通路,小缸下腔的压力油就推开钢球 5 挤入大缸 6 的下腔,推动大活塞将重物 8 (重力为 G) 向上顶起一段距离。如此反复地提压杠杆 1,就可以使重物不断升起,达到起重的目的。

若将放油阀 9 旋转 90° ,则在重物 8 的自重作用下,大缸中的油液流回油箱,活塞下降

到原位。

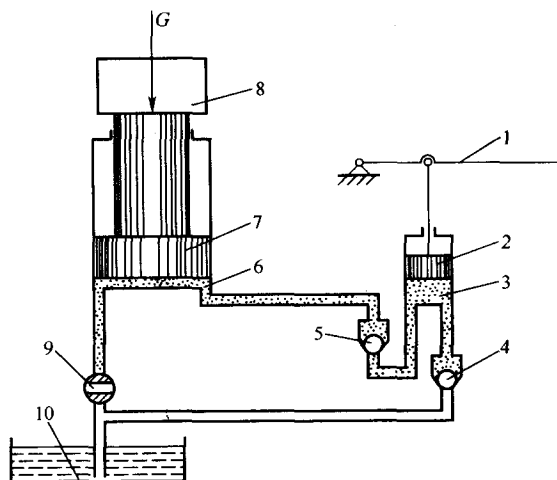


图 0-1 液压千斤顶的工作原理

1—杠杆；2—小活塞；3、6—液压缸；4、5—钢球；7—大活塞；
8—重物；9—放油阀；10—油箱

分析液压千斤顶的工作过程,可知液压传动的工作原理有以下几个要点:

(1) 液压传动是以密封容积中的有压液体作为传递动力和运动的工作介质;

(2) 执行元件所能承载的大小与油液压力和液压缸活塞有效作用面积有关, 而它的运动速度取决于单位时间内进入缸内油液容积的多少:

(3) 液压传动装置本质上是一种能量转换装置, 液压泵先把机械能转换为便于输送的油液压力能, 通过液压回路后, 执行元件又将油液压力能转换为机械能输出做功。

三、液压传动系统的组成及图形符号

1. 液压传动系统的组成

图 0-2 所示为一台简化了的机床工作台液压传动系统。我们可以通过它进一步了解一般液压传动系统应具备的基本性能和组成情况。

在图 0-2 (a) 中, 液压泵 3 由电动机 (图中未示出) 带动旋转, 从油箱 1 中吸油。油液经过滤器 2 过滤后流往液压泵, 经泵向系统输送。来自液压泵的压力油流经节流阀 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排回油箱。

如果将换向阀手柄扳到左边位置，使换向阀处于图 0-2（b）所示的状态，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 7 左腔的油亦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，工作台移动速度则较慢。

工作台移动时必须克服阻力,例如克服切削力和相对运动表面的摩擦力等。为适应克服不同大小阻力的需要,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,泵出口多余的压力油亦需要排回油箱。这些功能是由溢流阀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，经回油管流回油箱。

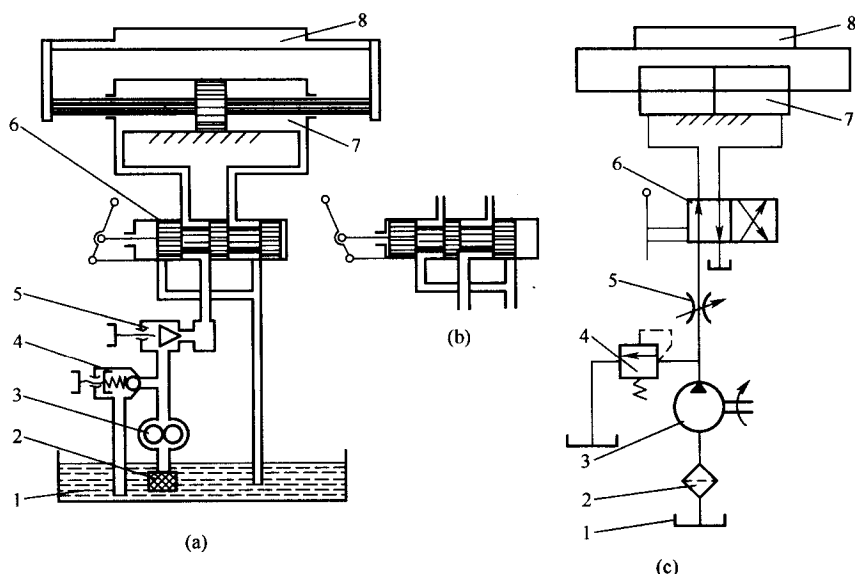


图 0-2 机床工作台液压传动系统

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

由上面的例子可以看出，液压传动系统主要由以下几个部分组成。

(1) 动力元件。一般是液压泵。它的功用是将原动机输入的机械能转换为流体的压力能，以驱动执行元件运动。

(2) 执行元件。一般指作直线运动的液压缸、作回转运动的液压马达。它的功用是将流体的压力能转换为机械能，以驱动工作部件。

(3) 控制元件。指各种阀类元件，它们的作用是控制和调节液压系统中流体的压力、流量和流动方向，以保证工作机构完成预定的工作运动。

(4) 辅助元件。指除以上三种以外的其他装置，如油箱、滤油器、蓄能器等，它们的作用是提供必要的条件，使系统得以正常工作和便于监测控制。

(5) 传动介质。即液压油，其作用是传递实现运动和动力的。

2. 液压传动系统的符号

液压传动系统的图形符号有结构原理图和职能符号图两种。在图 0-2 (a) 中，组成液压系统的各个元件是用半结构式图形画出来的，这种图形直观性强，较易理解，但难于绘制，系统中元件数量多时更是如此。在工程实际中，除某些特殊情况外，一般都用简单的图形符号来绘制液压系统原理图。对于图 0-2 (a) 所示的液压系统，若用国家标准 GB786.1—1993 规定的液压图形符号绘制，则其系统原理图如图 0-2 (c) 所示。图中的符号只表示元件的功能，不表示元件的结构和安装位置。使用这些图形符号，可使液压系统图简单明了，便于绘制。GB786.1—1993 常用液压与气动元件图形符号见本书附录 A。

四、液压传动的主要优缺点

液压传动与其他传动方式相比较，主要有以下优点。

- (1) 液压传动能方便地实现无级调速，调速范围大。
- (2) 在相同功率情况下，液压传动能量转换元件的体积较小，重量较轻。
- (3) 液压传动工作平稳，反应速度快，冲击小，能高速启动、制动和换向。
- (4) 液压系统便于实现过载保护。
- (5) 液压系统操纵简单，便于实现自动化。特别是和电气控制联合使用时，易于实现复杂的自动工作循环。
- (6) 油液元件能够自行润滑，元件的使用寿命长。
- (7) 液压元件易于实现系列化、标准化和通用化，故便于设计、制造。

液压传动的主要缺点如下。

- (1) 由于泄漏及流体的可压缩性，使它们无法保证严格的传动比。
- (2) 液压传动对油温的变化比较敏感，不宜在很高和很低的温度下工作，且易污染环境。
- (3) 不宜远距离输送动力。
- (4) 油液元件制造精度要求高，加工装配较困难，且对油液的污染较敏感。
- (5) 由于液压元件和工作介质都在封闭的油路内工作，发生故障不易检查。

总的说来，液压传动的优点是十分突出的，它的缺点将随着科学技术的发展而逐渐得到克服。

习 题

1. 何谓液压传动？液压传动的基本工作原理是怎样的？
2. 液压传动系统有哪些组成部分？各部分的作用是什么？
3. 与其他传动方式相比较，液压传动主要有哪些优、缺点？

第 1 篇 理论基础篇

液压传动的理论知识主要包括液压油和流体力学两部分。

由于液压传动是以液体（通常是液压油）作为工作介质来进行能量传递的，因此，了解液压油的基本性质、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和使用液压系统都是非常必要的。

第 1 章

液 压 油

液压油的质量直接影响液压系统的工作性能，据统计，许多液压设备的故障皆是由于液压油的使用不当而造成的，因此，必须对液压油有充分的了解，以便正确选择和合理使用。

第 1 节 液压油的用途和种类

一、液压油的用途

在液压系统中，液压油有以下几种作用。

- (1) 传递运动与动力。将泵的机械能转换成液体的压力能并传至各处，由于油本身具有黏度，因此，在传递过程中会产生一定的能量损失。
- (2) 润滑。液压元件内各移动部位都可受到液压油充分润滑，从而降低元件磨损。
- (3) 密封。液压油本身的黏性对细小的间隙有密封的作用。
- (4) 冷却。系统损失的能量会变成热，被油带出。

二、液压油的种类

液压油的品种很多，主要分为三大类型：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见表 1-1。

矿油型液压油润滑性和防锈性好，黏度等级范围较宽，因而在液压系统中应用很广。据统计，目前有 90% 以上的液压系统采用矿油型液压油作为工作介质。

矿油型液压油的主要品种有普通液压油、抗磨液压油、低温液压油、高黏度指数液压油、液压导轨油及其他专用液压油（如航空液压油、舵机液压油等），它们都是以全损耗系统用油

为基础原料，精炼后按需要加入适当的添加剂制得的。

表 1-1 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	精制矿油加添加剂，提高抗氧化和防锈性能，适用于室内一般设备的中低压系统
	抗磨液压油	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，适用于环境温度在-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，适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，适用于一般液压系统
乳 化 型	水包油乳化液	L-HFA	又称高水基液，特点是难燃、黏温特性好，有一定的防锈能力，润滑性差，易泄漏，适用于有抗燃要求、油液用量大且泄漏严重的系统
	油包水乳化液	L-HFB	既具有矿油型液压油的抗磨、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-30℃~60℃温度下使用，适用于有抗燃要求的中性能低压系统
	磷酸酯液	L-HFDR	难燃，润滑、抗磨和抗氧化性能良好，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

目前，我国液压传动采用全损耗系统用油和汽轮机油的情况仍很普遍。全损耗系统用油是一种机械润滑油，价格虽较低廉，但精制过程精度较浅，抗氧化稳定性较差，使用过程中易生成黏稠胶块阻塞元件小孔，从而影响液压系统性能。系统压力越高，问题越严重。因此，只有在低压系统且要求不高时才可用全损耗系统用油作为液压代用油。至于汽轮机油，虽经深度精制并加有抗氧化、抗泡沫等添加剂，其性能优于全损耗系统用油，但它是汽轮机专用油，并不充分具备液压传动用油的各种特性，只能作为一种代用油，用于一般液压传动系统。

普通液压油是以精制的石油润滑油馏分，加有抗氧化、防锈和抗泡沫等添加剂制成的，其性能可满足液压传动系统的一般要求，广泛应用于在 0℃~40℃工作的中、低压系统。

矿油型液压油中的其他油品，包括抗磨液压油、低温液压油、高黏度指数液压油、液压导轨油等，都是经过深度精制并加有各种不同的添加剂制成的，对相应的液压系统具有优越的性能（见表 1-1）。

矿油型液压油虽然有很多优点，但其主要缺点是可燃。在一些高温、易燃、易爆的工作场合，为了安全起见，应该在液压系统中使用难燃性液体，如水包油、油包水等乳化液，或水-乙二醇、磷酸酯等合成液。

第2节 液压油的主要性质

一、密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度，即

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

式中， V ——液体的体积；

m ——体积为 V 的液体的质量；

ρ ——液体的密度。

密度是液体的一个重要的物理参数。液体温度或压力的不同，其密度也会发生变化，但这种变化量很小，可以忽略不计。油的密度一般为 900kg/m^3 。矿物油的比重约为 $0.85\sim 0.95$ ，其比重越大，泵吸入性越差。

二、可压缩性

液体受压力作用而发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。

液压油在低、中压下一般被认为是不可压缩的，但在高压时其压缩性就不可忽略。纯油的可压缩性是钢的 $100\sim 150$ 倍。可压缩性会降低液体运动的精度，增大压力损失，延迟传递信号时间等。

当液压油中混有空气时，其抗压缩能力将显著降低，这会严重影响液压系统的工作性能。在有较高要求或压力变化较大的液压系统中，应力求减少油液中混入的气体及其他易挥发物质（如汽油、煤油、乙醇和苯等）的含量。

三、黏性

1. 黏性的物理性质

液体在外力作用下流动时，分子间的内聚力要阻止分子间的相对运动，因而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的黏性。黏性是液体的重要物理性质，也是选择液压用油的主要依据之一。

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 1-1 所示，设两平行平板间充满液体，下平板不动，上平板以速度 u_0 向右平移。由于液

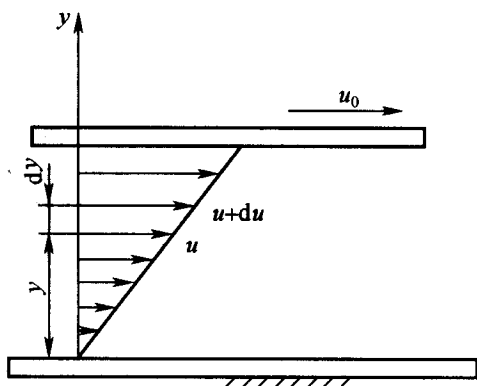


图 1-1 液体的黏性示意图

体的黏性作用，紧贴下平板的液体层速度为 0 ，紧贴上平板的液体层速度为 u_0 ，而中间各层

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。

实验表明,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

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

式中, μ 是比例常数,称为动力黏度。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

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式(1-3)就是牛顿液体内摩擦定律。

由式(1-3)可知,在静止液体中,因速度梯度 $du/dy=0$,内摩擦力为 0,所以流体在静止状态下是不呈黏性的。

2. 黏度

黏度表示液体黏性的大小。常用的黏度有三种,即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

(1) 动力黏度

动力黏度又称绝对黏度,是用液体流动时所产生的内摩擦力的大小来表示的黏度,由式(1-2)可得

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

由上式可知,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, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

(2) 运动黏度

在相同温度下,液体的动力黏度和它的密度的比值称为运动黏度,以 ν 表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

比值 ν 无物理意义,但它却是工程实际中经常用到的物理量。

运动黏度的法定计量单位是 m^2/s ,它与以前沿用的非法定计量单位 cSt (厘斯)之间的关系是

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

国际标准化组织(ISO)规定统一采用运动黏度来表示油的黏度等级。我国生产的全损耗系统用油和液压油采用 40°C 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°C 时的运动黏度平均值为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对黏度

相对黏度又称条件黏度,是根据一定的测量条件测定的,中国、德国等都采用恩氏黏度 $^\circ\text{E}$,美国用赛氏黏度 SSU,英国则用雷氏黏度 R。

恩氏黏度用恩氏黏度计测定,将被测油放在一个特制的容器里(恩氏黏度计),加热至