

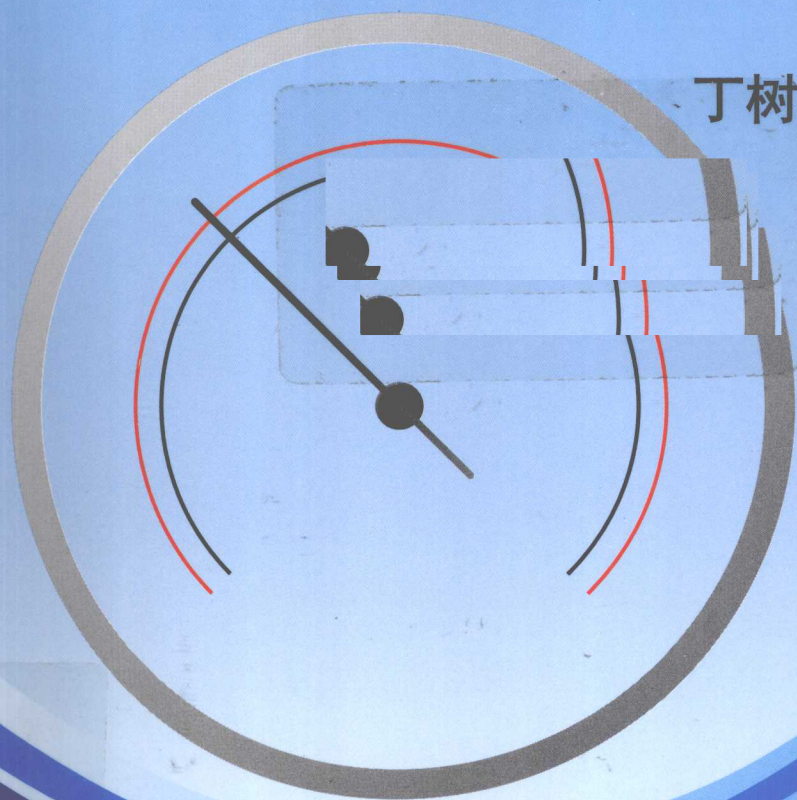


普通高等专科教育机电类规划教材
机械工业出版社精品教材

液压传动

第3版

丁树模 丁问司 主编



本书主要包括液压传动基础知识、液压元件的结构原理、常用液压回路、典型液压系统、液压伺服系统及液压传动系统设计计算等。全书着重基本概念和原理的阐述,突出理论知识的应用,加强针对性和实用性,并在较大程度上反映了国内外新的液压技术成果。

本书为普通高等专科学校教育机电类规划教材,除适用于普通高等专科学校机械类专业外,还适用于各类成人高校有关专业,并可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动/丁树模,丁问司主编. —3版. —北京:机械工业出版社, 2009.6 (2010.1重印)

普通高等专科学校教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-26746-1

I. 液… II. ①丁…②丁… III. 液压传动-高等学校-教材
IV. TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第048979号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王海峰 责任编辑:王丽滨 责任校对:魏俊云

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2010年1月第3版·第3次印刷

184mm×260mm·11.75印张·285千字

10 001—15 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-26746-1

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是高等职业技术学院机械类专业的技术基础课教材，是在 1999 年第 2 版的基础上进行修订而成的。

全书共分十章，主要包括液压传动基础知识、液压元件的结构原理与应用、常用液压回路、典型液压系统、液压伺服系统及液压传动系统设计与计算等。本书是根据高等职业技术人才培养目标的要求进行修订的，通过对内容的组织与精选，做到简化理论，突出重点，着眼于能力的培养，重视过程方法的应用。书中多采用简明易懂的插图，如立体图、结构示意图等，便于学生对教材内容的理解；各章均附有思考题和习题，并在书后给出部分习题的参考答案。全书严格执行了国家新的技术标准。此外，本书还在一定程度上介绍和反映了国内外比较成熟的液压新技术和新成果。

本书第 1 版的编写人员是丁树模、姚如一、周堃敏、来晓光；第 2 版的编写人员是丁树模、周骥平、盛英、赵奎、王侠。这次修订工作由丁树模、丁问司、张伍、陈华、王刚、冯燕、黎志亮完成，丁树模、丁问司任主编，张伍、陈华任副主编。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和错误之处，敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 液压传动的工作原理	1
第二节 液压传动系统的组成及图形符号	1
第三节 液压传动的优缺点及应用	3
思考题	4
第二章 液压传动基础知识	5
第一节 液压油	5
第二节 液体静力学	11
第三节 液体动力学基础	14
第四节 液体流动时的压力损失	20
第五节 小孔和缝隙流量	24
第六节 液压冲击和气穴现象	28
思考题和习题	29
第三章 液压泵和液压马达	33
第一节 液压泵概述	33
第二节 齿轮泵	36
第三节 叶片泵	39
第四节 柱塞泵	44
第五节 螺杆泵	48
第六节 各类液压泵的性能比较及应用	49
第七节 液压马达	50
思考题和习题	53
第四章 液压缸	55
第一节 液压缸的类型和特点	55
第二节 液压缸的结构	59
第三节 液压缸的设计与计算	67
思考题和习题	69
第五章 液压控制阀	71
第一节 概述	71
第二节 方向控制阀	72
第三节 压力控制阀	81
第四节 流量控制阀	87
第五节 比例阀、二通插装阀和数字阀	90
思考题和习题	95
第六章 液压辅助元件	97
第一节 蓄能器	97

第二节 过滤器	99
第三节 压力计和压力计开关	102
第四节 油箱	103
第五节 管件	105
思考题和习题	108
第七章 液压回路	109
第一节 方向控制回路	109
第二节 压力控制回路	110
第三节 速度控制回路	116
第四节 多缸工作控制回路	125
思考题和习题	128
第八章 典型液压传动系统	131
第一节 组合机床动力滑台液压系统	131
第二节 外圆磨床液压系统	133
第三节 液压机液压系统	138
第四节 汽车起重机液压系统	141
第五节 塑料注塑成型机液压系统	144
思考题和习题	148
第九章 液压传动系统的设计与计算	150
第一节 液压传动系统的设计 步骤和内容	150
第二节 液压系统设计计算举例	159
第三节 CAD 在液压系统设计中的应用	164
思考题和习题	165
第十章 液压伺服系统	166
第一节 概述	166
第二节 液压伺服阀	167
第三节 电液伺服阀	170
第四节 液压伺服系统实例	171
第五节 对液压伺服系统的基本要求	173
思考题	174
附录	175
附录 A 常用液压传动图形符号 (摘自 GB 786.1—1993)	175
附录 B 部分习题参考答案	179
参考文献	181

第一章 概 论

用液体作为工作介质来实现能量传递的传动方式称为液体传动。液体传动按其工作原理的不同分为两类：主要以液体动能进行工作的称为液力传动(如离心泵、液力变矩器等)；主要以液体压力能进行工作的称为液压传动。后者是本书所要讨论的内容。

第一节 液压传动的工作原理

图 1-1 为液压千斤顶的工作原理示意图，我们可以用它来说明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，不仅活塞能在缸内滑动，而且配合面之间又能实现可靠的密封。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。

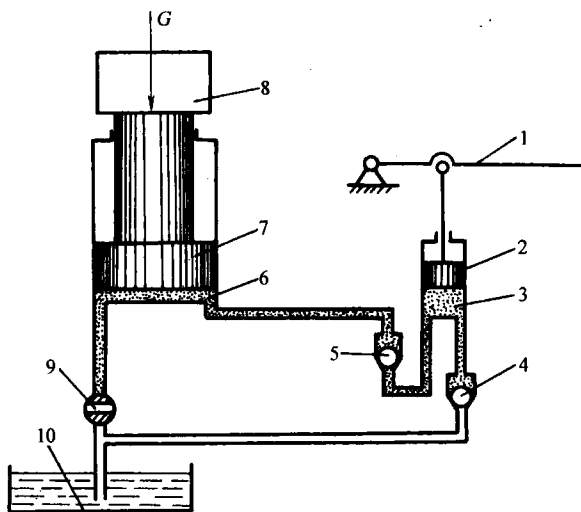


图 1-1 液压千斤顶的工作原理

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

若将放油阀 9 旋转 90° ，则在物体 8 的自重作用下，大缸中的油液流回油箱，活塞下降到原位。

从此例可以看出，液压千斤顶是一个简单的液压传动装置。分析液压千斤顶的工作过程，可知液压传动是依靠液体在密封容积变化中的压力能实现运动和动力传递的。液压传动装置本质上是一种能量转换装置，它先将机械能转换为便于输送的液压能，后又将液压能转换为机械能做功。

第二节 液压传动系统的组成及图形符号

图 1-2 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 1-2a 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。

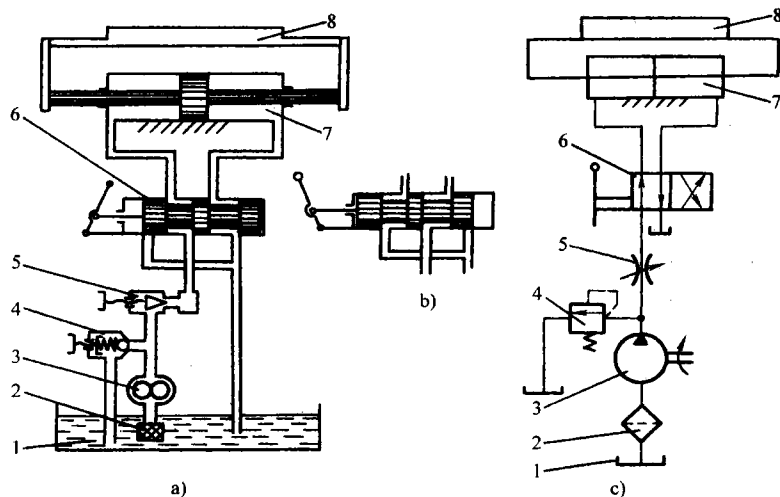


图 1-2 机床工作台液压传动系统

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

如果将换向阀手柄扳到左边位置, 使换向阀处于图 1-2b 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。

从上述例子可以看出, 液压传动系统由以下五个部分组成:

(1) 动力元件 动力元件即液压泵, 它将原动机输入的机械能转换为流体介质的压力能, 其作用是为液压系统提供压力油, 是系统的动力源。

(2) 执行元件 执行元件是指液压缸或液压马达, 它是将液压能转换为机械能的装置, 其作用是在压力油的推动下输出力和速度(或力矩和转速), 以驱动工作部件。

(3) 控制元件 包括各种阀类, 如上例中的溢流阀、节流阀、换向阀等。这类元件的

作用是用以控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向，以保证执行元件完成预期的工作。

(4) 辅助元件 包括油箱、油管、过滤器以及各种指示器和控制仪表等。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) 工作介质 工作介质即传动液体，通常称液压油。液压系统就是通过工作介质实现运动和动力传递的。

在图 1-2a 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 1-2a 所示的液压系统，若用国家标准 GB 786.1—1993 规定的液压图形符号绘制，则其系统原理图如图 1-2c 所示。图中的符号只表示元件的功能，不表示元件的结构和参数。使用这些图形符号，可使液压系统图简单明了，便于绘制。GB 786.1—1993 液压图形符号见本书附录 A。

第三节 液压传动的优缺点及应用

一、液压传动的优缺点

液压传动与其他传动方式相比较，有如下主要优点：

- 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) 工作平稳，换向冲击小，便于实现频繁换向。
- 4) 便于实现过载保护，而且工作油液能使传动零件实现自润滑，故使用寿命较长。
- 5) 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) 液压元件易于实现系列化、标准化和通用化。

液压传动的主要缺点是：

- 1) 液压传动中的泄漏和液体的可压缩性使传动无法保证严格的传动比。
- 2) 液压传动有较多的能量损失(泄漏损失、摩擦损失等)，故传动效率不高，不宜作远距离传动。
- 3) 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。
- 4) 液压传动出现故障时不易找出原因。

总的来说，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。

二、液压传动的应用和发展

液压传动相对于机械传动来说，是一门新的技术。如果从 1795 年世界上第一台水压机诞生算起，液压传动已有 200 多年的历史。然而，液压传动的真正推广使用却是近 50 多年的事情。特别是 20 世纪 60 年代以后，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、微机控制等工作，也日益取得显著的成果。

我国的液压工业开始于 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件新产品（如中高压齿轮泵、比例阀、叠加阀及新系列中的高压阀等）。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，对一些性能差的不符合国家标准的液压件产品（如中低压阀等）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。

思考题

- 1-1 何谓液压传动？液压传动的基本工作原理是怎样的？
- 1-2 液压传动系统有哪些组成部分？各部分的作用是什么？
- 1-3 液压元件在系统图中是怎样表示的？
- 1-4 和其他传动方式相比较，液压传动有哪些主要优、缺点？

第二章 液压传动基础知识

液压传动是以液体(液压油)作为工作介质来进行能量传递的,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和使用液压系统都是非常必要的。

第一节 液 压 油

一、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

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

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。随着液体温度或压力的变化,其密度也会发生变化,但这种变化量通常不大,可以忽略不计。一般液压油的密度为 900kg/m^3 。

(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。体积为 V 的液体,当压力增大 Δp 时,体积减小 ΔV ,则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

$$\kappa = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \quad (2-2)$$

式中 κ ——液体的压缩系数。

由于压力增大时液体的体积减小,因此式(2-2)的右边必须加一负号,以使 κ 为正值。

κ 的倒数称为液体的体积模量,以 K 表示,即

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

式中 K ——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 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{MPa}$,数值很大,故一般可认为油液是不可压缩的。

应当指出,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,应力求减少液压油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。由于油液中的气体难以完全排除,实际计算中常取液压油的体积模量 $K = 0.7 \times 10^3 \text{MPa}$ 。

(三) 粘性

1. 粘性的物理本质

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粘性。粘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，由于液体的粘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，下平板不动，上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体的粘性作用，紧贴下平板的液体层速度为零，紧贴 upper 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

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

式中 μ ——比例常数，称为动力粘度。

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

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

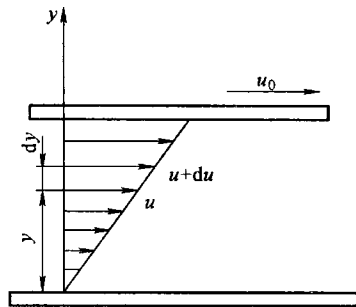


图 2-1 液体的粘性

这就是牛顿液体内摩擦定律。

由式(2-5)可知，在静止液体中，因速度梯度 $du/dy = 0$ ，内摩擦力为零，所以液体在静止状态下是不呈粘性的。

2. 粘度

液体粘性的大小用粘度来表示。常用的粘度有三种，即动力粘度、运动粘度和条件粘度。

(1) 动力粘度 动力粘度又称绝对粘度，由式(2-4)可得

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

可知动力粘度的物理意义是：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。

动力粘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, $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$) 之间的关系是

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$$

(2) 运动粘度 动力粘度和该液体密度的比值称为运动粘度，以 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

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，称为运动粘度。

运动粘度的法定计量单位是 m^2/s (米²/秒)，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 规定统一采用运动粘度来表示油的粘度等级。我国生产的全损耗系统用油和液压油采用 40℃ 时的运动粘度值 (mm^2/s) 为其粘度等级标号^①，即油的牌号。例如牌号为 L—HL32 的液压油，就是指这种油在 40℃ 时的运动粘度平均值为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

3. 粘度和温度的关系

油液对温度的变化极为敏感，温度升高，油的粘度即降低。油的粘度随温度变化的性质称为油液的粘温特性。不同种类的液压油有不同的粘温特性。图 2-2 所示为几种典型液压油的粘温特性曲线图。

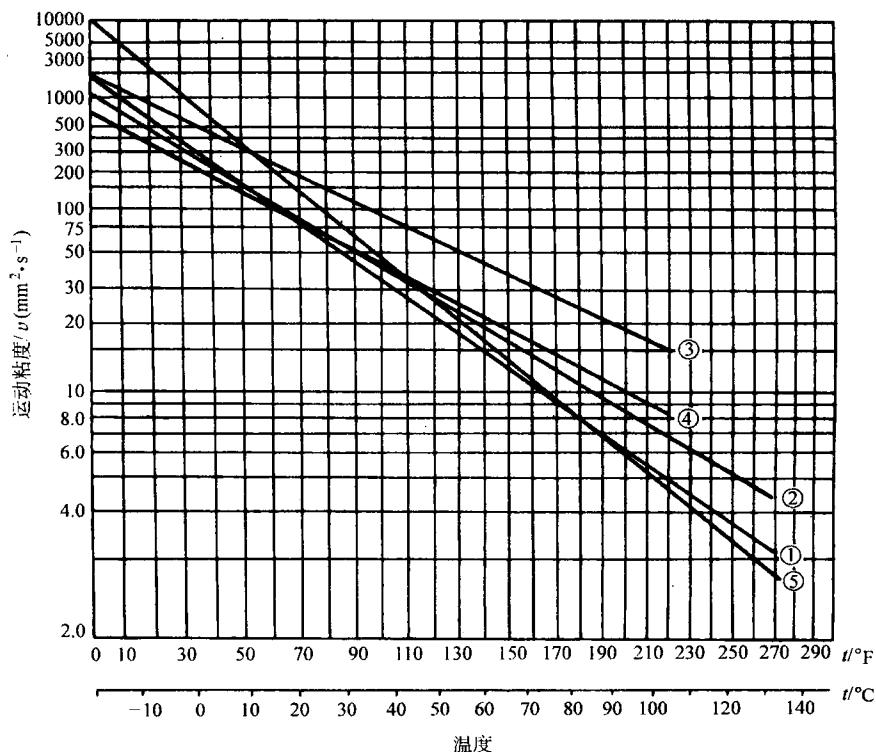


图 2-2 典型液压油的粘温特性曲线

- ①—矿油型普通液压油 ②—矿油型高粘度指数液压油 ③—水包油乳液
④—水-乙二醇液 ⑤—磷酸酯液

粘温特性较好的液压油，粘度随温度的变化较小，因而油温变化对液压系统性能的影响较小。

国际和国内常采用粘度指数 VI 值来衡量油液粘温特性的好坏。粘度指数 VI 值较大，表示油液粘度随温度的变化率较小，即粘温特性较好。一般液压油的 VI 值要求在 90 以上，优

① 我国过去曾用 50℃ 时的运动粘度值作为油的粘度等级标号，如 15、20、30、40、60 号，其相对应的新的粘度等级标号分别为 L—HL22、L—HL32、L—HL46、L—HL68、L—HL100。

异的在 100 以上。

4. 粘度和压力的关系

液体所受的压力增大时，其分子间的距离减小，内聚力增大，粘度亦随之增大。但对于一般的液压系统，当压力在 32MPa 以下时，压力对粘度的影响不大，可以忽略不计。

(四) 其他性质

液压油还有其他一些物理化学性质，如抗燃性、抗凝性、抗氧化性、抗泡沫性、抗乳化性、缓蚀性、润滑性、导热性、相容性(主要是指对密封材料不侵蚀、不溶胀的性质)以及纯净性等，都对液压系统工作性能有重要影响。对于不同品种的液压油，这些性质的指标也有不同，具体可见油类产品手册。

二、液压油的选用

为了正确选用液压油，需要了解对液压油的使用要求，熟悉液压油的品种及其性能，掌握液压油的选择方法。

1. 对液压油的使用要求

液压传动用油一般应满足如下要求：

- 1) 粘度适当，粘温特性好。
- 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) 体积膨胀系数小，比热容大。
- 8) 燃点高，凝点低。
- 9) 对人体无害，成本低。

对于具体的液压传动系统，则需根据情况突出某些方面的使用性能要求。

2. 液压油的品种

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列于表 2-1。

矿油型液压油润滑性和防锈性好，粘度等级范围较宽，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、高粘度指数液压油、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。

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，使用过程中易生成粘稠胶块，阻塞元件小孔，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。

表 2-1 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,改善粘温特性,可用于环境温度在 $-20 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 的高压系统
	高粘度指数液压油	L—HR	L—HL 油加添加剂,改善粘温特性,VI 值达 175 以上,适用于对粘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,改善粘-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
乳化型	水包油乳化液	L—HFA	又称高水基液,特点是难燃、粘温特性好,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,粘温特性和耐蚀性好,能在 $-30 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 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 $-54 \sim 135^{\circ}\text{C}$ 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

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,广泛适用于在 $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 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、高粘度指数液压油、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 2-1)。

矿油型液压油有很多优点,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。

3. 液压油的选择

液压油的选择,首先是油液品种的选择。选择油液品种时,可根据是否液压专用、有无起火危险、工作压力及工作温度范围等因素进行考虑(参见表 2-1)。

液压油的品种确定之后,接着就是选择油液的粘度等级。粘度等级的选择是十分重要的,因为粘度对液压系统工作的稳定性、可靠性、效率、温升以及磨损都有显著的影响。在选择粘度时应注意液压系统在以下几方面的情况:

(1) 工作压力 工作压力较高的系统宜选用粘度较大的液压油，以减少泄漏。

(2) 运动速度 当液压系统的工作部件运动速度较高时，宜选用粘度较小的液压油，以减轻液流的摩擦损失。

(3) 环境温度 环境温度较高时宜选用粘度较大的液压油。

在液压系统的所有元件中，以液压泵对液压油的性能最为敏感。因为泵内零件的运动速度最高，工作压力也最高，且承压时间长，温升高。因此，常根据液压泵的类型及其要求来选择液压油的粘度。各类液压泵适用的粘度范围如表 2-2 所示。

表 2-2 各种液压泵适用的液压油粘度范围

液压泵类型		粘度/(mm ² ·s ⁻¹)(40℃)		液压泵类型		粘度/(mm ² ·s ⁻¹)(40℃)	
		5~40℃ ^①	40~80℃ ^①			5~40℃ ^①	40~80℃ ^①
叶片泵	7MPa 以下	30~50	40~75	齿轮泵		30~70	95~165
	7MPa 以上	50~70	50~90	径向柱塞泵		30~50	65~240
螺杆泵		30~50	40~80	轴向柱塞泵		30~70	70~150

① 5~40℃、40~80℃系指液压系统温度。

三、液压油的污染及其控制

液压油受到污染，常常是系统发生故障的主要原因。因此，控制液压油的污染是十分重要的。

1. 污染的危害

液压油被污染指的是液压油中含有水分、空气、微小固体颗粒及胶状生成物等杂质。液压油污染对液压系统造成的危害主要是：

1) 固体颗粒和胶状生成物堵塞过滤器，使液压泵运转困难，产生噪声；堵塞阀类元件小孔或缝隙，使阀动作失灵。

2) 微小固体颗粒会加速零件磨损，使元件不能正常工作；同时，也会擦伤密封件，使泄漏增加。

3) 水分和空气的混入会降低液压油的润滑能力，并使其氧化变质；产生气蚀，使元件加速损坏；使液压系统出现振动、爬行等现象。

2. 污染的原因

液压油被污染的原因主要有以下几方面：

(1) 残留物污染 这主要是指液压元件在制造、储存、运输、安装、维修过程中带入的砂粒、铁屑、磨料、焊渣、锈片、棉纱和灰尘等，虽经清洗，但未清洗干净而残留下来，造成液压油污染。

(2) 侵入物污染 这主要是指周围环境中的污染物(空气、尘埃、水滴等)通过一切可能的侵入点，如外露的往复运动活塞杆，油箱的进气孔和注油孔等侵入系统，造成液压油污染。

(3) 生成物污染 这主要是指液压系统在工作过程中产生的金属微粒、密封材料磨损颗粒、涂料剥离片、水分、气泡及油液变质后的胶状生成物等，造成液压油污染。

3. 污染的控制

液压油污染的原因很复杂，液压油自身又在不断产生脏物，因此要彻底防止污染是很困难的。为了延长液压元件的寿命，保证液压系统正常工作，将液压油污染程度控制在某一限

度以内是较为切实可行的办法。实用中常采取如下几方面措施来控制污染：

(1) 力求减少外来污染 液压装置组装前后必须严格清洗，油箱通大气处要加空气过滤器，向油箱灌油应通过过滤器，维修拆卸液压元件应在无尘区进行。

(2) 滤除系统产生的杂质 应在系统的有关部位设置适当精度的过滤器，并且要定期检查、清洗或更换滤芯。

(3) 定期检查更换液压油 应根据液压设备使用说明书的要求和维护保养规程的规定，定期检查更换液压油。换油时要清洗油箱，冲洗系统管道及元件。

第二节 液体静力学

液体静力学所研究的是静止液体的力学性质。这里所说的静止，是指液体内部质点之间没有相对运动，至于液体整体完全可以像刚体一样作各种运动。

一、液体的压力

液体单位面积上所受的法向力称为压力。这一定义在物理学中称为压强，但在液压传动中习惯称为压力。压力通常以 p 表示。

液体的压力有如下特性：

- 1) 液体的压力沿着内法线方向作用于承压面。
- 2) 静止液体内任一点的压力在各个方向上都相等。

由上述性质可知，静止液体总是处于受压状态，并且其内部的任何质点都是受平衡压力作用的。

二、重力作用下静止液体中的压力分布

如图 2-3a 所示，密度为 ρ 的液体在容器内处于静止状态。为求任意深度 h 处的压力 p ，可以假想从液面往下切取一个垂直小液柱作为研究体，设液柱的底面积为 ΔA ，高为 h ，如图 2-3b 所示。由于液柱处于平衡状态，于是有

$$p\Delta A = p_0\Delta A + \rho gh\Delta A$$

因此得

$$p = p_0 + \rho gh$$

(2-7)

式(2-7)称为液体静力学基本方程式。由式(2-7)可知，重力作用下的静止液体，其压力分布有如下特征：

1) 静止液体内任一点处的压力都由两部分组成：一部分是液面上的压力 p_0 ，另一部分是该点以上液体自重所形成的压力，即 ρg 与该点离液面深度 h 的乘积。当液面上只受大气压力 p_a 作用时，则液体内任一点处的压力为

$$p = p_a + \rho gh \quad (2-8)$$

2) 静止液体内的压力随液体深度呈直线规律分布。

3) 离液面深度相同的各点组成了等压面，此等压面为一水平面。

三、压力的表示方法和单位

根据度量基准的不同，液体压力分为绝对压力和相对压力两种。如式(2-8)所示的压力

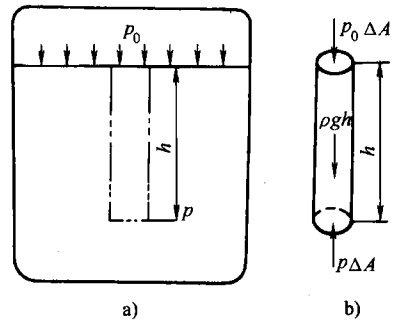


图 2-3 重力作用下的静止液体

p ，其值是以绝对真空为基准来度量的，叫做绝对压力；而式中超过大气压力的那部分压力 $p - p_a = \rho gh$ ，其值是以大气压力为基准来度量的，是相对压力。在地球的表面上，一切受大气笼罩的物体，大气压力的作用都是自相平衡的，因此一般压力仪表在大气中的读数为零，用压力计(亦称压力表)测得的压力数值显然是相对压力。在液压技术中，如不特别指明，压力均指相对压力。

如果液体中某点的绝对压力小于大气压力，这时，比大气压力小的那部分数值叫做真空度。由图 2-4 可知，以大气压力为基准计算压力时，基准以上的正值是相对压力，基准以下的负值就是真空度。例如，当液体中某点的绝对压力为 $0.3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时，其相对压力为 $p - p_a = 0.3 \times 10^5 \text{ Pa} - 1 \times 10^5 \text{ Pa} = -0.7 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，即该点的真空度为 $0.7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (这里取近似值 $p_a = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$)。

压力的单位除法定计量单位 Pa (帕, N/m^2) 外，还有以前沿用的一些单位，如 bar (巴)、工程大气压 at (即 kgf/cm^2)、标准大气压 atm 、水柱高 (mmH_2O) 或汞柱高 (mmHg) 等。各种压力单位之间的换算关系见表 2-3。

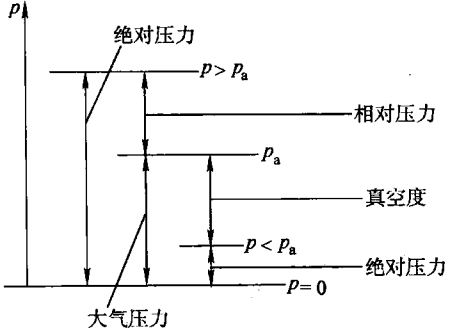


图 2-4 绝对压力、相对压力和真空度

表 2-3 各种压力单位的换算关系

Pa	bar	kgf/cm ²	at	atm	mmH ₂ O	mmHg
1 × 10 ⁵	1	1.01972	1.01972	0.986923	1.01972 × 10 ⁴	7.50062 × 10 ²

例 2-1 如图 2-5 所示，容器内盛有油液。已知油的密度 $\rho = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，活塞上的作用力 $F = 1000 \text{ N}$ ，活塞的面积 $A = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，假设活塞的重量忽略不计，问活塞下方深度为 $h = 0.5 \text{ m}$ 处的压力等于多少？

解 活塞与液体接触面上的压力

$$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 10^6 \text{ N}/\text{m}^2$$

根据式(2-8)，深度为 h 处的液体压力为

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho gh = 10^6 \text{ N}/\text{m}^2 + 900 \times 9.8 \times 0.5 \text{ N}/\text{m}^2 = 1.0044 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2 \\ &\approx 10^6 \text{ N}/\text{m}^2 = 10^6 \text{ Pa} \end{aligned}$$

从本例可以看出，液体在受外界压力作用的情况下，由液体自重所形成的那部分压力 ρgh 相对甚小，在液压系统中常可忽略不计，因而可近似认为整个液体内部的压力是相等的。以后我们在分析液压系统的压力时，一般都采用这种结论。

四、静止液体内压力的传递

如图 2-5 所示密闭容器内的液体，当外力 F 变化引起外加压力 p_0 发生变化时，只要液体仍保持原来的静止状态不变，则液体任一点的内部压力将发生同样大小的变化。这就是说，在密闭容器内，施加于静止液体的压力可以等值地传递到液体各点。这就是帕斯卡原理，或称静压传递原理。

在图 2-5 中, 活塞上的作用力 F 是外加负载, A 为活塞横截面面积, 根据帕斯卡原理, 容器内液体的压力 p 与负载 F 之间总是保持着正比关系

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-9)$$

可见, 液体内的压力是由外界负载作用所形成的, 即压力决定于负载, 这是液压传动中的一个重要的基本概念。

例 2-2 图 2-6 所示为相互连通的两个液压缸, 已知大缸内径 $D = 100\text{mm}$, 小缸内径 $d = 20\text{mm}$, 大活塞上放置物体的质量为 5000kg 。问在小活塞上所加的力 F 有多大才能使大活塞顶起重物?

解 物体的重力为

$$G = mg = 5000\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 = 49000\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 49000\text{N}$$

根据帕斯卡原理, 由外力产生的压力在两缸中相等, 即

$$\frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{G}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

故为了顶起重物应在小活塞上加力为

$$F = \frac{d^2}{D^2} G = \frac{20^2}{100^2} \times 49000\text{N} = 1960\text{N}$$

本例说明了液压千斤顶等液压起重机械的工作原理, 体现了液压装置的力放大作用。

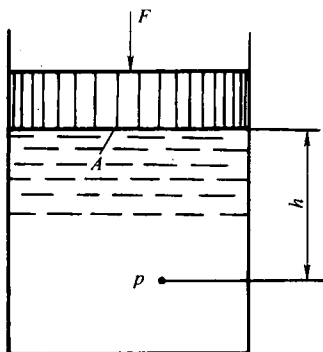


图 2-5 静止液体内的压力

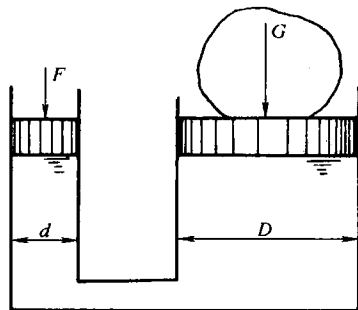


图 2-6 帕斯卡原理应用实例

五、液体对固体壁面的作用力

液体和固体壁面相接触时, 固体壁面将受到总液压力的作用。

当固体壁面为一平面时, 液体压力在该平面上的总作用力 F 等于液体压力 p 与该平面面积 A 的乘积, 其作用方向与该平面垂直, 即

$$F = pA \quad (2-10)$$

当固体壁面为一曲面时, 液体压力在该曲面某 x 方向上的总作用力 F_x 等于液体压力 p 与曲面在该方向投影面积 A_x 的乘积, 即

$$F_x = pA_x \quad (2-11)$$