

液 压 传 动 与 控 制 教 程

王懋瑶 主 编

天津大学出版社

内 容 提 要

本书阐述了液压传动的理论基础, 不仅系统地介绍了液压传动中的元件, 而且将其与基本回路有机地结合起来, 突出了典型系统的分析, 讲授了系统的设计方法, 对比较现代的比例控制、伺服控制以及最新技术的应用等也一一作了介绍。其内容全面, 取材较新, 文理通顺, 结构严谨, 可作为高等工科院校液压传动课程教材, 也可供从事该专业的工程技术人员自学参考。

液压传动与控制教程

王 懋 瑤 主 编

天津大学出版社出版
昌黎县印刷厂印刷
新华书店天津发行所发行

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 17.5 字数: 401千字

1987年2月第一版 1987年2月第一次印刷

印数 1—10000

ISBN 7—5618—0002—9

统一书号: 15401·4

定 价: 2.55 元

前 言

液压技术发展的历史并不太长,但发展的速度却很快。尤其在电子技术日益发展的今天,液压技术已迅速渗入各个科学领域。确切地说,“液压”是电子和机械技术之间的一种技术。因此,把“传动”和“控制”结合起来是发展的必然结果。

本门课程按其地位和性质应属一门基础技术课,适用于机械类有关专业。根据专业面适当放宽和结合生产实际的要求,学习本课程的主要目的是着重于基本内容的掌握和应用,而不局限于某个专业的需要,在满足基本内容要求的前提下,适当地照顾到有关专业的特点。

在课程体系上,以“系统(或回路)”和“传动”为主。根据系统由基本回路组成,回路由元件组成的从属关系,把元件与基本回路密切地结合起来,把辅助装置归其所属,这样主次分明,内容联系密切,克服过去相互脱节和内容重复的缺点,从而达到学以致用目的。

在内容处理上,贯彻少而精、理论联系实际的原则,由浅入深,通俗易懂,图文并茂,便于自学。

在教学方法上,建议加强实践性环节,除必要的实验外,对于液压元件及辅助装置应采用课堂教学与现场教学相结合的方式。课程学完以后,建议作一次综合性大型作业(或课程设计)。

本书由王懋瑶主编、潮有雄主审。参加编写的有:王懋瑶、张世同、宫嘉成、范竹先、廖奉樟、阎祥安、刘继元、曹玉平。全书共分十二章,其中第三章作为本课程的基本理论,不能削弱,其内容取舍的多少,取决于学生《流体力学》的基础。传动介质单列一章。

由于水平所限,难免存在缺点和错误,祈请读者批评指正。

编 者

1985年于天津大学

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
§ 1—1 基本概念	(1)
一、液压传动与控制	(1)
二、液压传动与控制的组成	(2)
§ 1—2 液压技术的应用与优点	(2)
第二章 液压传动介质	(5)
§ 2—1 液压油	(5)
一、液压油的主要物理性质	(5)
二、液压油的使用要求	(10)
三、液压油的选用	(11)
四、高水基液压油	(11)
§ 2—2 液压油的污染与控制	(13)
一、液压油污染的原因	(13)
二、液压油污染的控制	(14)
三、污染度的测定和污染等级	(14)
第三章 液压传动基本理论	(16)
§ 3—1 静止液体的力学特性	(16)
一、静压力及其性质	(16)
二、静力学基本方程	(16)
三、静止液体内压力传递—帕斯卡定理	(17)
四、压力的表示方法及单位	(18)
五、静止液体作用在固体表面上的作用力	(19)
§ 3—2 流动液体的基本方程	(19)
一、流动液体的一些基本概念	(20)
二、流动液体的连续性方程	(20)
三、流动液体的能量方程(伯努利方程)	(21)
四、动量方程	(25)
§ 3—3 液体流动时的压力损失	(27)

一、液体的流动状态	(28)
二、直管中的压力损失	(29)
三、局部损失	(35)
四、管路系统中总的压力损失	(38)
§ 3—4 小孔及间隙的流量计算	(38)
一、小孔流量计算	(39)
二、间隙的流量计算	(40)
§ 3—5 液压冲击与空穴现象	(45)
一、液压冲击	(45)
二、空穴现象	(48)
第四章 液压系统的能源装置	(50)
§ 4—1 油泵的基本概念	(50)
一、油泵的工作原理和油泵的种类	(50)
二、油泵的压力、流量及容积效率	(50)
三、油泵的功率和效率	(52)
§ 4—2 齿轮油泵	(53)
一、齿轮油泵的工作原理	(53)
二、齿轮油泵的流量	(54)
三、低压齿轮泵的结构	(55)
四、高压齿轮泵	(57)
五、齿轮泵的优缺点及使用	(60)
六、其它型式的齿轮油泵	(60)
§ 4—3 叶片式油泵	(61)
一、单作用式叶片泵	(61)
二、双作用式叶片泵	(64)
三、叶片油泵的使用要点	(69)
§ 4—4 柱塞式油泵	(69)
一、斜盘轴向柱塞式油泵	(70)
二、径向柱塞式油泵	(79)
§ 4—5 蓄能器	(82)
一、蓄能器的用途	(82)
二、蓄能器的种类和结构	(82)
三、气囊式蓄能器的容积计算	(83)
四、蓄能器的安装及使用	(85)
§ 4—6 液压能源系统中的其它装置	(86)
一、油箱	(86)

二、滤油器.....	(88)
第五章 液压系统的执行装置.....	(93)
§ 5—1 油缸的类型及其特点.....	(93)
一、活塞缸.....	(93)
二、柱塞缸.....	(97)
三、摆动缸.....	(99)
四、其它油缸.....	(101)
§ 5—2 油缸各组成部分的结构形式.....	(101)
一、活塞部分的结构.....	(101)
二、缸筒部分的结构.....	(103)
三、排气装置.....	(105)
四、密封装置.....	(106)
§ 5—3 油缸的设计和计算.....	(110)
一、中低压油缸的设计计算.....	(110)
二、高压缸的设计计算.....	(113)
§ 5—4 缓冲装置的设计.....	(118)
一、缓冲装置的结构.....	(118)
二、缓冲装置的计算.....	(119)
§ 5—5 油马达.....	(120)
一、油马达基本概念.....	(120)
二、叶片式油马达.....	(121)
三、轴向柱塞式油马达.....	(123)
第六章 液压回路的方向控制.....	(127)
§ 6—1 换向阀及换向回路.....	(127)
一、电磁换向阀及换向回路.....	(127)
二、电液换向阀及换向回路.....	(136)
三、手动换向阀及换向回路.....	(138)
§ 6—2 单向阀及控制回路.....	(139)
一、普通单向阀及控制回路.....	(139)
二、液控单向阀.....	(140)
三、充液阀及控制回路.....	(142)
第七章 液压回路的压力控制.....	(144)
§ 7—1 溢流阀.....	(144)
一、直动式溢流阀.....	(144)

二、先导式溢流阀	(145)
三、溢流阀的应用	(147)
§ 7—2 顺序阀	(148)
一、顺序阀的结构和工作原理	(148)
二、顺序阀的应用	(150)
三、单向顺序阀	(152)
§ 7—3 减压阀	(152)
一、减压阀的结构和工作原理	(152)
二、减压阀的应用	(153)
三、单向减压阀	(153)
§ 7—4 压力继电器	(154)
一、压力继电器的结构和工作原理	(154)
二、压力继电器的应用	(155)
§ 7—5 压力控制基本回路	(156)
一、安全调压回路	(156)
二、卸荷回路	(157)
三、保压回路	(158)
四、平衡及支承回路	(159)
五、预泄压快放油回路	(160)
六、减压回路	(161)
七、背压回路	(161)
八、增压回路	(161)
第八章 液压回路的流量控制	(162)
§ 8—1 节流阀及其节流调速回路	(162)
一、节流口的基本型式	(162)
二、节流阀的结构及工作原理	(163)
三、节流阀的静特性	(165)
四、节流阀的节流调速回路	(166)
§ 8—2 调速阀及其调速回路	(175)
一、调速阀的结构及工作原理	(175)
二、调速阀的流量特性	(177)
三、采用调速阀的节流调速回路	(178)
§ 8—3 溢流节流阀	(181)
§ 8—4 分流阀	(181)
§ 8—5 容积调速回路	(182)
一、变量泵和定量执行元件的调速回路	(183)

二、定量泵和变量油马达的调速回路·····	(184)
三、变量泵和变量油马达的调速回路·····	(185)
§ 8—6 容积节流调速回路·····	(186)
一、限压式变量泵和调速阀的调速回路·····	(186)
二、差压式变量泵和节流阀的调速回路·····	(187)
§ 8—7 快速运动回路·····	(188)
一、双泵并联快速运动回路·····	(188)
二、用蓄能器的快速运动回路·····	(189)
三、用增速缸的快速运动回路·····	(189)
§ 8—8 速度换接回路·····	(190)
一、快速运动和工作进给运动的换接回路·····	(190)
二、两种工作进给速度的换接回路·····	(190)
第九章 典型液压系统分析·····	(192)
§ 9—1 以速度变换为主的液压系统·····	(192)
一、系统的特点和要求·····	(192)
二、典型液压系统的分析举例·····	(193)
§ 9—2 以换向精度为主的液压系统·····	(196)
一、以换向精度为主的液压系统的特点与要求·····	(196)
二、换向形式的分析·····	(196)
三、典型液压系统分析举例——M1432A型万能 外圆磨床液压系统·····	(198)
§ 9—3 以压力变换为主的液压系统·····	(201)
一、系统的特点与要求·····	(201)
二、典型液压系统分析举例·····	(202)
§ 9—4 多个执行元件配合工作的液压系统·····	(205)
一、多个执行元件配合工作的液压系统概述·····	(205)
二、典型液压系统分析举例·····	(205)
三、液压系统特点·····	(208)
第十章 比例控制与伺服控制·····	(209)
§ 10—1 电液比例控制·····	(209)
一、电液比例压力阀·····	(209)
二、电液比例流量阀·····	(210)
三、电液比例换向阀及复合阀·····	(215)
§ 10—2 液压伺服控制概述·····	(215)
一、液压伺服系统的工作原理·····	(215)

二、液压伺服系统的组成和分类	(216)
§ 10—3 液压伺服阀	(217)
一、滑阀	(217)
二、喷嘴挡板阀	(221)
三、射流管阀	(222)
§ 10—4 液压伺服系统分析	(222)
一、机液伺服系统	(222)
二、电液伺服系统	(229)
第十一章 液压系统的设计	(233)
§ 11—1 液压系统的设计步骤	(233)
一、确定对液压系统的要求	(233)
二、拟定液压系统原理图	(234)
三、计算和选择液压元件	(234)
四、对液压系统进行必要的验算	(234)
五、绘制正式工作图和编制技术文件	(235)
§ 11—2 液压元件的计算和选择	(235)
一、执行元件主要参数的计算	(235)
二、选定油泵和确定电机功率	(240)
§ 11—3 液压系统性能的验算	(245)
一、液压系统压力损失的验算	(245)
二、液压系统发热温升的计算	(246)
§ 11—4 液压装置的结构设计	(248)
一、液压装置的结构形式	(248)
二、液压元件的配置形式	(248)
三、管路的连接方式	(250)
§ 11—5 液压传动系统设计示例	(250)
一、确定对液压系统的工作要求	(250)
二、拟定液压系统工作原理图	(251)
三、计算和选择液压元件	(251)
四、液压系统性能的验算	(256)
第十二章 液压新技术	(257)
§ 12—1 高压大流量小型化	(257)
§ 12—2 伺服控制与比例控制	(258)
§ 12—3 二通插装阀 (Cartridge)	(258)
§ 12—4 球式逻辑阀 (流体元件)	(260)

§ 12—5	交流液压·····	(261)
§ 12—6	液压技术计算机化·····	(263)
	一、用计算机进行设计·····	(263)
	二、用计算机进行试验·····	(263)
	三、液压系统的计算机控制·····	(263)
§ 12—7	污染与噪声的控制·····	(264)
	一、污染的控制与研究·····	(264)
	二、噪声、振动的控制与研究·····	(264)
§ 12—8	液压技术的节能与能量回收·····	(264)
	一、发展新型传动介质与相应的元件·····	(264)
	二、提高元件效率, 发展低能耗元件·····	(265)
	三、提高液压系统的效率·····	(265)
	四、能量回收·····	(265)
§ 12—9	数字式控制阀·····	(267)

第一章 绪 论

§ 1—1 基 本 概 念

一、液压传动与控制

液压传动与控制是以液体（油、高水基液压油、合成液体）作为介质来实现各种机械量的输出（力、位移或速度等）的。它与单纯的机械传动、电气传动和气压传动相比，具有传递功率大、结构小、响应快等特点，因而被广泛的应用于各种机械设备及精密的自动控制系统。

用液体作为工作介质进行能量的传递称为液体传动。液体传动按其工作原理的不同分为容积式和液力式。前者是以液体的压力能进行工作的，故一般称容积式为液压传动。而后者除压力能外，还以液体的动能进行工作。

液压传动的应用极为普遍，如机床和图 1—1 的一些示例。图中 a) 为一个体积很小的液压千斤顶把几吨重的汽车顶起来；b) 是一个灵巧的机械手；c) 是万吨压力

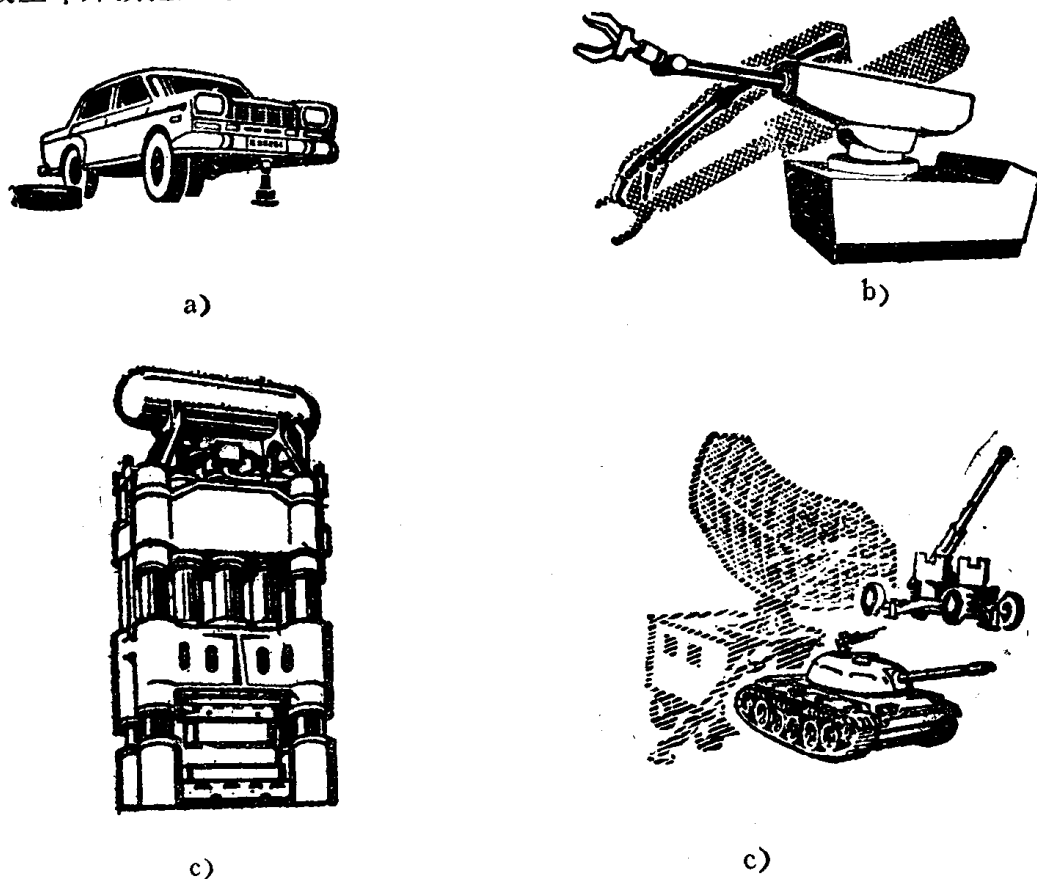


图 1—1 液压技术应用举例

机；d) 是军用的火炮坦克及雷达等。这些常用的机械设备都采用了液压传动与控制。其基本原理都是利用密闭容器中的油液压力来传递运动。

图 1—2 是液压千斤顶的传动原理图。通过杠杆给予小活塞一定的压力，根据油压传递原理，此压力迅速传至大活塞，将重物顶起。能顶多重，决定于施加的压力和两个活塞有效面积之比值。

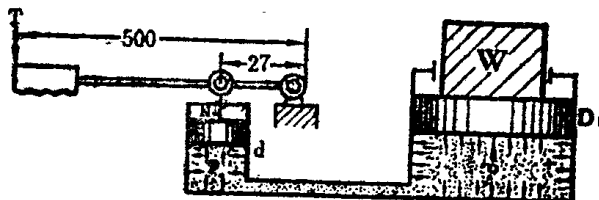


图 1—2 千斤顶液压传动原理

由上图可知，所顶起的重物大小、上升速度的快慢、上升过程中的稳定性、连续性和精确性，完全取决于控制的方式与方法。所以液压传动与控制是不可分割的两个组成部分。从输出机械量的连续性和精度来分可归纳为：开关控制、伺服控制和比例控制。开关控制输出的机械量是间断的，有级的；伺服控制输出的机械量是连续的，无级的；而比例控制是介于开关与伺服之间的控制方式。

二、液压传动与控制的组成

根据图 1—2 可以看出，一个最简单的液压传动系统必须由下列几部分组成：液压动力源、各种控制阀、执行机构及其他辅助件等。如图 1—3 所示。

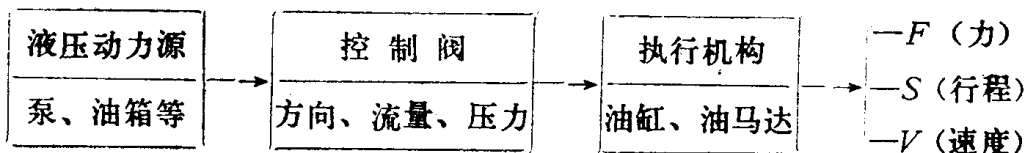


图 1—3 简单液压系统的组成

§ 1—2 液压技术的应用与优点

液压传动与控制是一门新的学科，它的发展历史虽然较短，但发展的速度却非常之快。自从1795年制成了第一台压力机起，液压技术进入了工程领域；1906年开始应用于国防战备武器。

第二次世界大战期间，由于军事工业迫切需要反应快、精度高的自动控制系统，因而出现了液压伺服控制系统。从60年代起，由于原子能、空间技术、大型船舰及电子技术的发展，不断地对液压技术提出新的要求，从民用到国防，由一般的传动到精确度很高的控制系统，这种技术得到更加广泛的发展和应用。

在国防工业中：海、陆、空各种战备武器均采用液压传动与控制。如飞机、坦克、舰艇、雷达、火炮、导弹及火箭等。

在民用工业中:

(一) 机床工业: 目前机床传动系统中采用液压传动与控制的, 如磨床、铣床、刨床、拉床、珩磨机、压力机、剪床及组合机床等;

(二) 冶金工业: 有电炉控制系统、轧钢机的控制系统、平炉装料、转炉控制、高炉控制、带材跑偏及恒张力装置等;

(三) 工程机械: 有推土机、挖掘机、联合采煤机、隧道掘进机、压路机、凿岩机及桥梁启闭等;

(四) 农业方面: 有联合收割机的控制系统、拖拉机的悬挂装置等;

(五) 汽车工业: 有全液压越野车、液压自卸式汽车、液压高空作业车、消防车(云梯车及消防照明)等;

(六) 轻纺工业: 有塑料注射机、橡胶硫化机、造纸机、印刷机及纺织机等;

(七) 船舶工业: 有工程船舶(全液压挖泥船、打捞船、打桩船及采油平台)、水翼船、气垫船及船舶辅机(起货机、锚机、舵机、舱盖启闭及船底启闭、船队联接装置及防摇鳍)等。

另外, 近几年又出现了太阳跟踪系统、海浪模拟装置、飞机驾驶模拟、船舶驾驶模拟器、地震再现、火箭助飞发射装置、宇航环境模拟、高层建筑防震系统及紧急刹车装置等, 均采用了液压技术。

总之, 一切工程领域, 凡是有机械设备的场合, 均可采用液压技术。它的发展如此之快, 应用如此之广, 其原因就是液压技术有着优异的特点, 归纳起来如下:

1. 单位功率的重量轻、结构尺寸小。据统计, 轴向柱塞泵每千瓦功率的重量只有 $1.5 \sim 2 \text{ N}$, 而直流电机则高达 $15 \sim 20 \text{ N}$ 。这说明在同等功率下, 前者的重量只有后者的 $10 \sim 20\%$; 至于尺寸相差更大, 前者约为后者的 $12 \sim 13\%$ 。这是由于电机的磁场电力强度只能达到 $0.4 \sim 0.6 \text{ MPa}$ ($4 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$), 而柱塞泵的压力则可高达 32 MPa (320 kgf/cm^2)。这就是飞机上的操舵装置、起落架、发动机的自动调节系统、自动驾驶仪、炮塔瞄准系统、导弹的发射与控制均采用液压的原因。

2. 反应速度快。电动机转动部件的惯量可达到其输出转矩的 50% 左右, 而液压马达则不大于 5% 。所以在加速中同等功率的电动机需一秒到几秒的时间, 而液压马达只需 0.1 秒。因此, 液压传动与控制可在高速状态下启动、制动和换向。对于旋转运动的液压马达每分钟可达 500 次; 直线往复运动的液压马达每分钟可达 $400 \sim 1000$ 次。这是其他传动控制方式无法比拟的。再加上其精度高、抗负载刚度大的优点, 在自动控制系统中, 具有稳、准、快的特点, 因而被广泛应用于战备武器及复杂精密的自动控制系统。

3. 大范围内实现无级调速, 而且调速性能好。调速范围可达 $200 \sim 250$ ($100:1$ 至 $2000:1$), 而电动机通常只能达到 20 。机械钢球变速器虽然也能实现无级调速, 但调速范围和传动功率都比较小。电气传动亦能无级调速, 但调速范围小, 角速度过低则不稳定, 而且本身不易实现大功率的直线往复运动。而液压传动可直接利用恒速的交流电动机, 特别油压马达可在极低的转速下输出很大的转矩(转速可低到 1 转/分)。例如柱塞液压马达最低角速度可低到 0.1 rad/s , 而且启动机械效率高, 内曲线液压马达可高达

98%。

4.能传递较大的力或转矩。传递较大的力或转矩是液压传动的突出优点。例如人造金刚石必须在5—6万个大气压下才能制造出来。5—6万个大气压力相当于大拇指甲大小的面积上作用 $5—6 \times 10^5 \text{ N}$ 的力。这样的超高压目前只能用强烈爆炸力和钢铁熔液迅速冷却才能得到,但这两种方法均不适用,而采用液压技术,用增压油缸就很容易解决。另外,象万吨液压机、大型舵机、采油平台、地震再现模拟装置、航天环境模拟装置、鱼雷发射装置、原子能反应堆的防护控制系统和挖掘机等,这样大的力或转矩只能采用液压传动和控制才比较容易实现。

5.易实现功率放大。这在控制系统中是非常重要的一个特点,它可以减少执行部件所需的操纵力,以微小的信号输入而得到较大的功率输出。如采用伺服阀的操纵系统,飞机上的机翼操纵和船舶的操舵装置等;在数控机床上可用极微弱的脉冲信号,然后经过液压转矩放大器来驱动执行部件。对于电液伺服控制系统其放大倍数可达30万倍。

6.操纵、控制调节比较方便、省力,易实现自动化。尤其和电气控制结合起来,能实现复杂的顺序动作和远程控制。

7.液压系统易于实现过载保护;由于用油作为传动介质,故能自动润滑,元件使用寿命较长。

8.液压元件已标准化、系列化和通用化,便于设计和选用。液压元件的布置更换方便,成本较低。

液压传动与控制目前尚有一些缺点,如:

1.有一定的泄漏现象,使容积效率降低,不易实现定比传动,而且会污染环境,解决不好,对运动的平稳性有一定的影响。但这种现象在逐渐地得到克服和控制。

2.油液在流动中产生一定的阻力损失。在高压高速下会使油温升高,影响油的粘性和元件的寿命。

3.液压元件制造精度要求高,使用维护比较严格。

4.液压系统的故障原因有时不易查明。

第二章 液压传动介质

在液压传动系统中，通常采用矿物油作为工作介质，所以一般都将液压传动工作介质称为液压油，除矿物油外近年来又出现了以水为主要成分的高水基液压油。

由于液压油的性质及其质量将直接影响液压系统的工作，因此有必要对液压油的性质进行研究，对各种液压油的选用和污染的控制进行探讨。

§ 2—1 液 压 油

一、液压油的主要物理性质

1. 密度与重度

对于均质的液体来说，单位体积所具有的质量叫做密度 ρ 。

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

式中 m ——液体的质量；

V ——液体的体积。

对于均质的液体，单位体积所具有的重量叫做重度 γ 。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-2)$$

式中 G ——液体的重量；

V ——液体的体积。

由于 $G = mg$ 所以密度与重度的关系为：

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

式中 g ——重力加速度。

液压油的密度和重度都随压力和温度的变化而变化。液体的密度和重度随温度升高而下降，随压力增加而增大。但是在一般的工作条件下，温度和压力引起的密度和重度的变化很小，可近似地认为液压油的密度和重度都是不变的。在计算时一般可取密度 $\rho = 900$ (kg/m^3)，重度 $\gamma = 8.83 \times 10^3$ (N/m^3)。

2. 压缩性

液体受压力的作用发生体积变化的性质叫做压缩性。由于液体的压缩性极小，所以在很多场合下是可以忽略不计的。但是在压力较高或进行动态分析时就必须考虑液体的压缩性。液体压缩性的大小是用体积压缩系数 β 来表示，就是指液体所受的压力每增加一个单位压力时，其体积的相对变化量，即

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

式中 ΔP ——液体压力的变化值；

ΔV ——液体体积在压力变化 ΔP 时，其体积的变化量；

V ——液体的初始体积。

式中负号是因为压力增大时，液体的体积减小，反之则增大。为了使 β 值为正值，故加一负号。

液体体积压缩系数的倒数，称为液体体积弹性模量，用 K 表示，即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (2-5)$$

常用液压油的压缩系数 $\beta = 5 \sim 7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 故 $K = 1.4 \sim 2 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，而钢的弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ，可见液压油的弹性模量约为钢的弹性模量的 1.65% 左右。

在实际液压系统中，由于液压元件的变形以及油中混有空气等原因，使实际的可压缩性显著增加，也就是使体积弹性模量降低。

设封闭容器中压力增加 ΔP 后，油液体积缩小了 ΔV_1 ，而容器体积增大了 ΔV_c ，这时油液的等效体积弹性模量 K' 的表达式为：

$$K' = - \frac{\Delta P \cdot V}{\Delta V_1 + \Delta V_c}$$

则

$$\begin{aligned} \frac{1}{K'} &= - \frac{\Delta V_1 + \Delta V_c}{\Delta P \cdot V} = - \frac{\Delta V_1}{\Delta P \cdot V} - \frac{\Delta V_c}{\Delta P \cdot V} \\ &= \frac{1}{K} + \frac{1}{K_c} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中 K ——油液的体积弹性模量。

K_c ——封闭容器的体积弹性模量。

3. 粘性

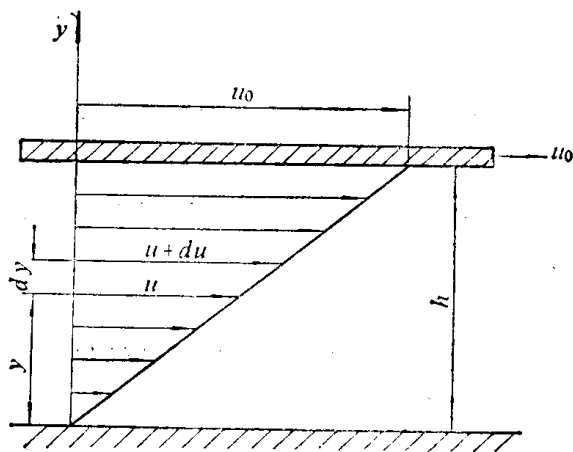


图 2-1 相对运动与粘性

当油在外力作用下流动时，由于油液分子间内聚力的作用，而产生阻碍其分子相对运动的内摩擦力，这种现象称为液体的粘性。所以只有油液在运动时，才会显示出油液的粘性，而对于静止的液体是不显示粘性的。粘性只能阻碍、延缓液体内部的相对运动，但不能消除这种运动。

粘性的大小用粘度来表示。它是选择液压油的主要指标。

图 2-1 所示，设两平行平板之间充满油液，上平板以速度 u_0 向右运动，而下

平板固定不动，紧挨着上平板的油液在附着力的作用下跟随上平板一起以速度 u_0 向右运动，紧挨着下平板的油液则保持静止不动。中间油液的速度由上到下逐渐减小。当两平板距离较小时，速度递减近似为线性规律。这时我们可将中间油液看作许多薄层，由于各层的速度不同，流动快的流层会拖动慢的流层，而流动慢的流层又会阻滞流动快的流层。这样流层之间就产生了相互作用力，即内摩擦力。由实验得出流层间的内摩擦力 F_τ 与流层的接触面积 A 及流层的相对速度 du 成正比，而与流层间的距离 dy 成反比，即

$$F_\tau = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-7)$$

式中 μ ——比例系数，称为动力粘度；

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度，即流层相对速度对流层距离的变化率。

如以 $\tau = \frac{F_\tau}{A}$ 表示切应力，则有

$$\tau = \frac{F_\tau}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-8)$$

动力粘度 μ 为常数的液体称为牛顿液体， μ 为变数的液体称为非牛顿液体。除高粘度或含有特种添加剂的油液外，一般液压油均可看成牛顿液体。

由2-8式可得动力粘度 μ 的表达式

$$\mu = \frac{F_\tau}{A \frac{du}{dy}} \quad (2-9)$$

由上式可看出 μ 的物理意义是当速度梯度等于1时，相接触的流层间单位面积上的内摩擦力。

在国际单位制(SI)中， μ 的单位是帕斯卡秒($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)，代号为帕·秒(Pa·s)。

在C、G、S单位制中， μ 的单位为达因·秒/厘米²($\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$)，

1达因·秒/厘米²($\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$) = 1泊(Poise) = 100厘泊(CP)

因为1牛(N) = 10^5 达因(dyn)

所以1帕·秒(Pa·s) = 10泊(P)

动力粘度 μ 与液体密度 ρ 之比值叫做运动粘度 ν ，即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-10)$$

在国际单位制(SI)中以米²/秒(m^2/s)为单位。在CGS制中以厘米²/秒(cm^2/s)为单位，通常称为“沱”(Stokes)，1沱(St) = 100厘沱(cSt)

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