

# 液 压 传 动 与 控 制 教 程

王懋瑶 主 编

天津大学出版社

# 液压传动与控制教程

等 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、禩有雄主审。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)         |
| <b>第五章 液压系统的执行装置·····</b> | <b>(93)</b>  |
| § 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)        |
| <b>第六章 液压回路的方向控制·····</b> | <b>(127)</b> |
| § 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)        |
| <b>第七章 液压回路的压力控制·····</b> | <b>(144)</b> |
| § 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) |
| <b>第八章 液压回路的流量控制</b> | (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)        |
| <b>第九章 典型液压系统分析·····</b>                 | <b>(192)</b> |
| § 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<br>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)        |
| <b>第十章 比例控制与伺服控制·····</b>                | <b>(209)</b> |
| § 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) |
| <b>第十一章 液压系统的设计</b>      | (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) |
| <b>第十二章 液压新技术</b>        | (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

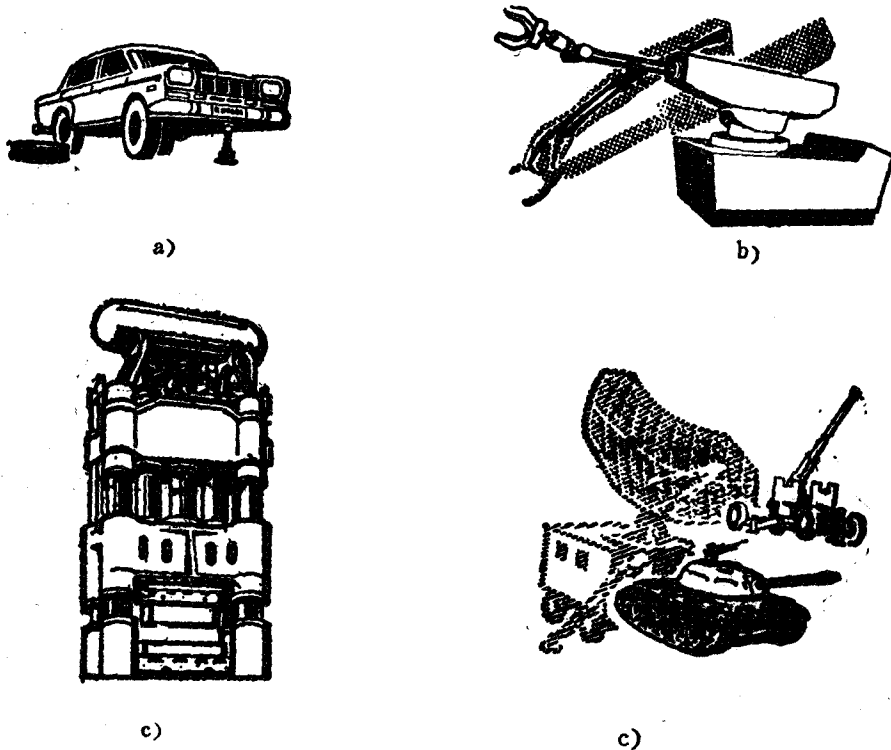


图 1—1 液压技术应用举例

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。

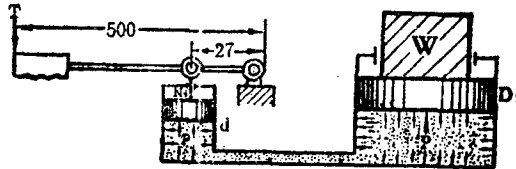


图 1—2 千斤顶液压传动原理

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。

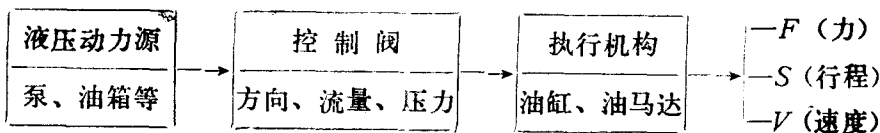


图 1—3 简单液压系统的组成

## § 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、大型舰艇及电子技术的发展，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。

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—2N，而直流电机则高达15—20N。这说明在同等功率下，前者的重量只有后者的10—20%；至于尺寸相差更大，前者约为后者的12—13%。这是由于电机的磁场电力强度只能达到0.4—0.6MPa（4—6 kgf/cm<sup>2</sup>），而柱塞泵的压力则可高达32MPa（320 kgf/cm<sup>2</sup>）。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—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—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0.1rad/s，而且起动机效率率高，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 $\rho$ 。

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

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 $\gamma$ 。

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

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 $\rho = 900$  ( $\text{kg/m}^3$ )，重度 $\gamma = 8.83 \times 10^3$  ( $\text{N/m}^3$ )。

##### 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 $\beta$ 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  $\Delta P$ ——液体压力的变化值；  
 $\Delta V$ ——液体体积在压力变化  $\Delta P$  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  $\beta$  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  $K = 1.4 \sim 2 \times 10^9 \text{ P}$ ，而钢的弹性模量为  $2.06 \times 10^{11} \text{ P}$ ，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  $\Delta P$  后，油液体积缩小了  $\Delta V_1$ ，而容器体积增大了  $\Delta V_c$ ，这时油液的等效体积弹性模量  $K'$  的表达式为：

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

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

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

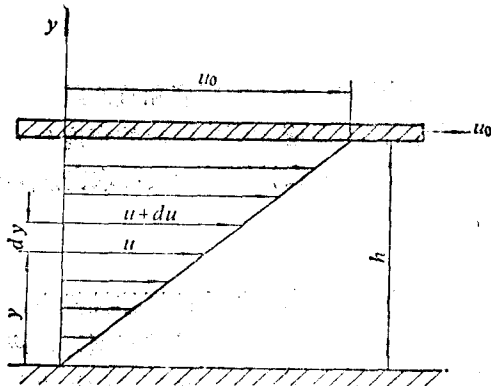


图 2-1 相对运动与粘性

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