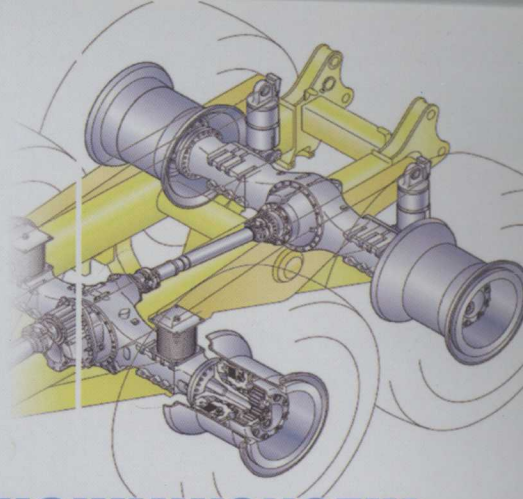




# CHELIANGYEYACHUANDONGJICHUJIKONGZHI

# 车辆液压传动基础及控制

田晋跃 于英 编著



兵器工业出版社

# 车辆液压传动基础及控制

田晋跃 于 英 编著

兵器工业出版社

## 内 容 简 介

本书分为两大部分。第一部分主要面向高等院校车辆工程专业本科生,内容包括:液压传动基础;典型液压元件;液压传动基本回路和系统设计方法等。第二部分主要面向高等院校的车辆工程研究生,主要内容包括:液压系统稳态特性;液压系统建模;液压系统动态特性等。

该书除可作为高等院校教材使用外,也可供从事机械研制、使用、检测以及其他相关专业的工程技术人员学习参考。

著 者 田 晋 于 英

### 图书在版编目 (CIP) 数据

车辆液压传动基础及控制/田晋跃,于英编著. —北京:  
兵器工业出版社, 2007. 12

ISBN 978 - 7 - 80172 - 935 - 4

I. 车… II. ①田…②于… III. 汽车—液压传动装置—  
液压控制—高等学校—教材 IV. U463. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 145777 号

出版发行: 兵器工业出版社  
发行电话: 010 - 68962596, 68962591  
邮 编: 100089  
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号  
经 销: 各地新华书店  
印 刷: 北京银祥福利印刷厂  
版 次: 2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷  
印 数: 1—1050

责任编辑: 常小虹  
封面设计: 李 晖  
责任校对: 全 静  
责任印制: 赵春云  
开 本: 787 × 1092 1/16  
印 张: 18. 75  
字 数: 464 千字  
定 价: 30. 00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

# 前 言

本书主要介绍了液压传动基础，并以车辆行走机构液压系统以及车辆液压系统控制为基点而编写。全书共九章，系统地阐述了液压系统的型式、特点、设计原则及设计计算方法，同时提供液压系统建模、系统静态和动态分析的方法。全书适当介绍了国外一些典型回路以及相应的历结构、新技术和设计方法。本书以车辆液压系统设计所需的知识为主，建立了车辆液压系统特有的学科体系，并考虑了与其他专业课之间的联系。

本书可作为车辆工程以及工程机械、建筑机械、矿山机械、石油矿场机械、起重运输机械等大专院校本科生和研究生专业教学参考书，也可供科研单位、工厂及有关工程技术人员参考使用。

全书共九章，第一、第五、第六、第七、第八和第九章由田晋跃编写，第二、第三、第四章由于英编写。

研究生孟峰、殷新锋、顾磊、沈亮和刘斌利用放假为本书绘制插图，编著者在此表示致谢。

由于我们水平有限，书中难免存在不少缺点和错误之处，望读者批评指正。

编著者

# 目 录

|                  |    |
|------------------|----|
| 第一章 绪论           | 1  |
| 第二章 车辆液压传动基础     | 7  |
| 第一节 液压传动基础       | 7  |
| 一、静止液体的性质        | 7  |
| 二、流动液体的性质        | 8  |
| 三、液体流动中的压力损失     | 11 |
| 四、液体流经小孔和缝隙的流量计算 | 17 |
| 五、液压冲击与空穴现象      | 19 |
| 第二节 液压工作介质       | 22 |
| 一、液压工作介质的物理性质    | 22 |
| 二、液压工作介质的选用      | 26 |
| 第三章 液压传动基本元件     | 28 |
| 第一节 液压泵和液压马达     | 28 |
| 一、概述             | 28 |
| 二、齿轮液压泵和齿轮液压马达   | 30 |
| 三、叶片液压泵和叶片液压马达   | 36 |
| 四、柱塞液压泵和柱塞液压马达   | 47 |
| 第二节 液压缸          | 51 |
| 一、液压缸的基本类型       | 51 |
| 二、液压缸的构造         | 54 |
| 三、液压缸的设计计算       | 60 |
| 第三节 液压阀          | 63 |
| 一、压力控制阀          | 64 |
| 二、方向控制阀          | 74 |
| 三、流量控制阀          | 81 |
| 四、比例阀和逻辑阀        | 84 |
| 五、全液压转向流量放大阀     | 87 |
| 第四节 辅助装置         | 89 |
| 一、蓄能器            | 89 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 二、滤油器 .....                  | 92         |
| 三、油箱设计和液压泵的安装 .....          | 94         |
| 四、管道元件及密封 .....              | 95         |
| <b>第四章 液压传动基本回路 .....</b>    | <b>98</b>  |
| 第一节 压力控制回路 .....             | 98         |
| 一、调压回路 .....                 | 98         |
| 二、减压回路 .....                 | 99         |
| 三、卸荷回路 .....                 | 100        |
| 四、保压回路 .....                 | 101        |
| 五、增压与增力回路 .....              | 102        |
| 六、平衡回路 .....                 | 103        |
| 第二节 速度控制回路 .....             | 104        |
| 一、节流调速回路 .....               | 104        |
| 二、容积调速回路 .....               | 108        |
| 三、速度换接回路 .....               | 110        |
| 第三节 顺序动作控制回路 .....           | 111        |
| 一、行程控制顺序动作回路 .....           | 111        |
| 二、压力控制顺序动作回路 .....           | 112        |
| 三、时间控制顺序动作回路 .....           | 114        |
| 第四节 同步回路 .....               | 114        |
| 一、液压缸串联的同步回路 .....           | 114        |
| 二、液压缸并联的同步回路 .....           | 114        |
| 三、用分流阀的同步回路 .....            | 115        |
| 四、伺服控制式同步回路 .....            | 116        |
| <b>第五章 车辆液压系统和系统设计 .....</b> | <b>117</b> |
| 第一节 车辆液压系统 .....             | 117        |
| 一、大型工程车辆全液压转向流量放大系统 .....    | 117        |
| 二、车辆全液压制动系统 .....            | 120        |
| 三、港口牵引车鞍座液压缸同步系统 .....       | 121        |
| 四、车辆转向系统动态负荷传感系统 .....       | 123        |
| 第二节 车辆液压系统设计 .....           | 126        |
| 一、液压系统的设计 .....              | 127        |
| 二、电液系统的设计 .....              | 134        |
| <b>第六章 车辆液压系统稳态特性 .....</b>  | <b>137</b> |
| 第一节 液压泵马达的稳态特性 .....         | 137        |
| 一、液压泵马达的流量分析 .....           | 137        |

|                |     |
|----------------|-----|
| 二、流量损失         | 139 |
| 三、转矩损失         | 142 |
| 第二节 液压阀的稳态特性   | 142 |
| 第三节 液压伺服系统     | 151 |
| 一、阀控缸式伺服系统     | 151 |
| 二、阀控马达式伺服系统    | 155 |
| 第七章 液压系统建模     | 158 |
| 第一节 液压马达动态建模   | 159 |
| 第二节 液压阀动态建模    | 160 |
| 一、溢流阀          | 160 |
| 二、电磁换向阀        | 161 |
| 三、伺服阀          | 163 |
| 第三节 液压系统动态建模   | 165 |
| 一、阀控缸马达液压伺服系统  | 165 |
| 二、变量泵控定量液压马达系统 | 166 |
| 第四节 系统管路动态建模   | 167 |
| 一、波导模型         | 167 |
| 二、频率响应分析       | 170 |
| 三、时域分析         | 176 |
| 第八章 液压系统动态特性   | 187 |
| 第一节 线性系统分析     | 187 |
| 一、线性化技术        | 187 |
| 二、拉氏变换和 $S$ 平面 | 188 |
| 三、框图和传递函数      | 190 |
| 四、频率响应         | 192 |
| 五、闭环响应         | 196 |
| 六、状态空间法        | 201 |
| 第二节 非线性系统分析    | 204 |
| 一、相平面分析        | 204 |
| 二、描述函数分析       | 208 |
| 第三节 液压系统仿真     | 210 |
| 第四节 数字控制系统分析   | 216 |
| 一、采样和 $Z$ 变换   | 217 |
| 二、闭环系统分析       | 219 |
| 三、频率响应         | 223 |
| 四、数字控制器设计      | 226 |
| 第五节 系统识别       | 227 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 一、富氏变换                   | 228 |
| 二、功率谱分析                  | 229 |
| 三、系统识别                   | 231 |
| 第九章 电液系统控制               | 236 |
| 第一节 伺服阀控液压缸系统的位置控制       | 236 |
| 一、位置控制的静态精度和动态特性         | 236 |
| 二、传递函数和稳定性               | 240 |
| 第二节 伺服阀控液压马达系统的速度控制和位置控制 | 243 |
| 一、速度控制                   | 243 |
| 二、位置控制                   | 246 |
| 三、管路对系统响应和稳定性的影响         | 251 |
| 第三节 广义状态控制器              | 260 |
| 一、使用 Ackermann 方程分配极点    | 261 |
| 二、状态观察器                  | 263 |
| 三、减阶观察器                  | 265 |
| 第四节 微机控制系统               | 268 |
| 一、离散状态空间理论               | 269 |
| 二、系统识别                   | 279 |
| 三、自适应控制                  | 283 |
| 四、脉宽调制技术                 | 286 |
| 参考文献                     | 290 |

# 第一章 绪 论

液压传动系统适用于大功率、高精度控制的场合，其应用范围从机器人、宇航飞行器等精密控制系统到锻压轧钢设备、工程机械、车辆和机床等工业生产领域，其位置精度可达0.1mm，动力可达数兆瓦。

图1-1为大型盾构机的外形图。盾构机目前已广泛应用于各种土建工程领域。利用盾构技术解决地下工程中长距离掘进。盾构机由主机及后配套辅助系统构成。刀盘驱动及控制均为液压方式。

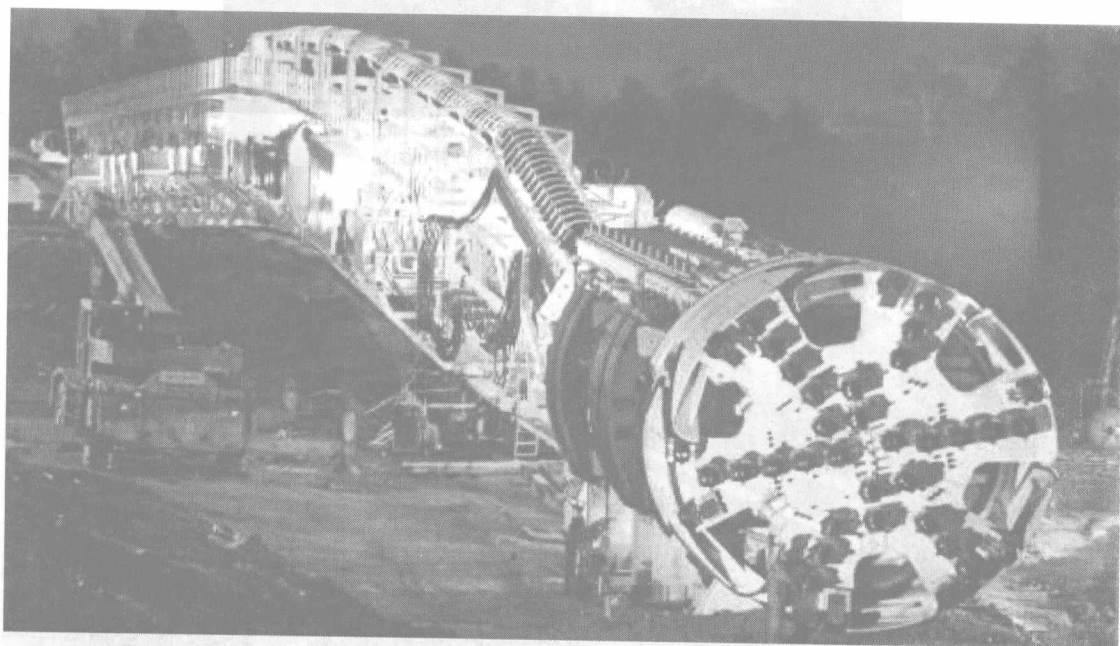


图1-1 盾构机外形图

图1-2为大型高精度物理仿真系统的外形图。高精度物理仿真系统可广泛用于航空、航海及陆路运输的仿真试验。全系统由机械台体、液压、电控、测量等分系统构成。

图1-3为典型的工程机械外形图。工程机械主要用于道路、机场、路堤、海港、大坝等工程的基础施工，工作装置的液压驱动和控制要求十分高，具有作业性能好、生产效率高、适应能力强的特点。

图1-4为汽车的转向驱动桥外形图，其转向执行机构和悬架的阻尼系统采用了液压控制技术。

图1-5为液压驱动的医疗手术刀，用于医院的外科手术。

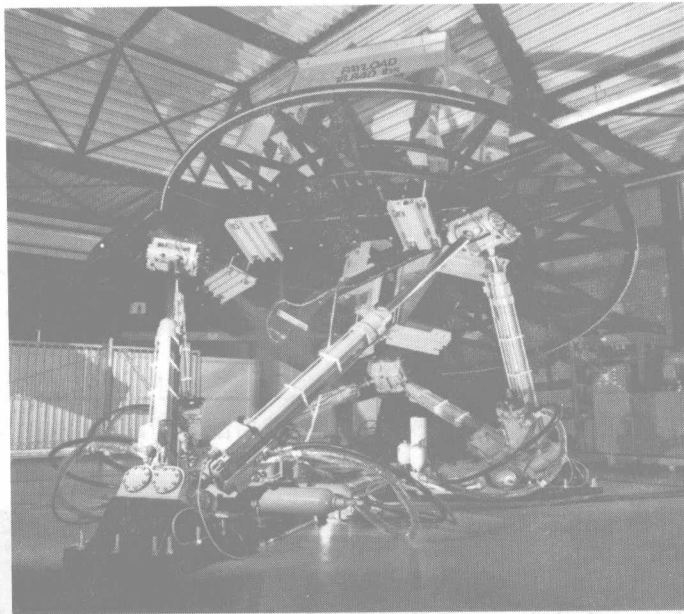


图 1-2 高精度物理仿真系统的外形图



图 1-3 工程机械外形图

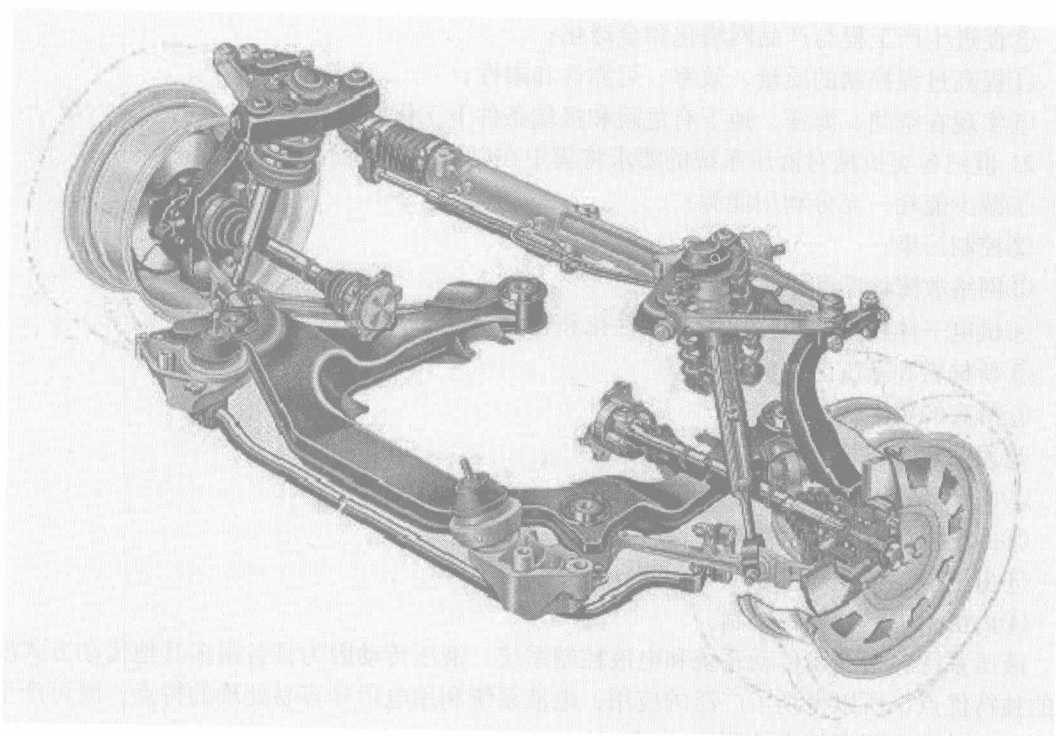


图 1-4 汽车转向驱动桥外形图

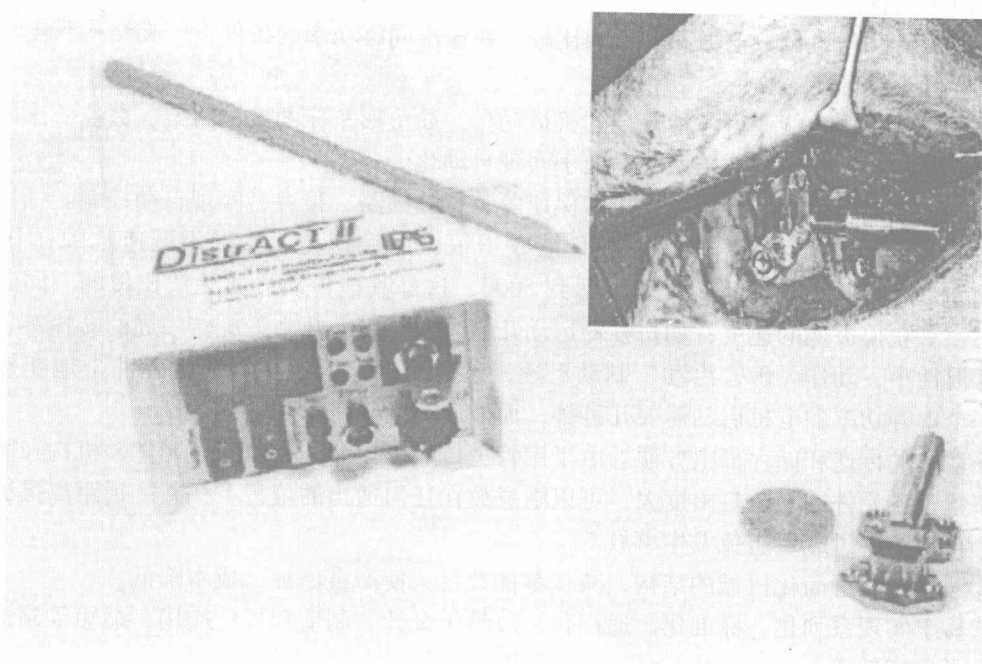


图 1-5 液压驱动的医疗手术刀

目前液压传动的主要进展:

- ①系统实现了 NC/CAM/CAE/CIMS, FMS;
- ②机电一体化;

- ③促进生产工程与产品网络化和全球化;
- ④提高过程控制的质量、效率、可靠性和柔性;
- ⑤实现在空间、海洋、地下有危险和极端条件下工作的装备制造与运行。

21 世纪各类机械对液压系统的要求将集中在以下几个方面:

- ①减少能耗, 充分利用能源;
- ②控制污染;
- ③网络故障诊断和主动维护;
- ④机电一体化, 实现液压系统柔性化和智能化;
- ⑤新材料和新工艺的应用;
- ⑥更高的可靠性。

毫无疑问, 各种机械的控制会实现:

- ①由开环控制转入闭环;
- ②由逻辑控制转入运动控制;
- ③由单机运转到多机联动 (CIMS);
- ④由机上控制到远程控制。

液压系统包括液压传动系统和电液控制系统。液压传动因为具备很多其他传动方式所没有的独特优点, 所以得到了广泛的应用; 电液系统利用电信号容易处理的特点, 既可产生很大动力, 又可实现高精度控制。

液压传动优点:

①液压传动与机械、电力和气动相比较, 在输出同等功率的条件下, 其结构紧凑、体积小、质量轻、承载能力强。

②采用液压传动能获得各种复杂的机械动作, 如仿形车床的液压刀架、数控铣床的液压工作台, 以及自动线中的液压系统, 便于实现自动化。

③液压系统有卸荷、减压、增压和保压等装置和回路, 很容易实现自动控制。

④可以自由地实现无级调速, 而且能获得很大的调速比。如果用调速范围在  $0.02 \sim 100\text{L/min}$  的节流阀, 它的调速比可以达到 5000, 这是其他传动方式无法比拟的。同时液压传动还容易获得极低的速度, 如每秒钟运动几微米的速度, 几十天旋转一周的转速等。

⑤惯性小, 动作灵敏, 启动、制动迅速, 运动平稳, 可实现快速而无冲击地变速和换向。一个中等功率的电机启动需要几秒钟, 而液压马达只需  $0.1\text{s}$ 。

⑥动力的传递和储存都很方便。由于用管道传递压力油, 所以液压元件、机构和装置都易于布置, 各元件的安装自由度大, 可以随意放在任何适当的位置上, 并能远距离操纵。

⑦自动防止过载, 避免发生事故。

⑧液压传动可简化机械的结构, 减少零件数目, 使产量增加, 成本降低。

⑨易于实现系列化、标准化、通用化, 故易于设计、制造和推广应用, 缩短了制造周期并提高了生产效率。

液压传动也有一些缺点, 主要是:

①液压传动装置以液体为工作介质, 无法避免泄漏。液体的泄漏和液体的可压缩性使液压传动无法保证严格的传动比。

②液压传动装置由于在能量转换及传递过程中存在着机械摩擦损失、压力损失和泄漏损

失而使总效率降低,不宜于作远距离传动。

③液压传动装置对油温和负载变化比较敏感,不宜在低温及高温条件下工作。液压传动装置对油液的污染亦比较敏感,要求有良好的过滤设备。

④液压传动装置要求有单独的能源(例如液压泵站),液压能不像电能那样可远距离输送。

⑤液压元件制造精度要求高,造价贵,需组织专业生产。

⑥液压传动装置出现故障时,不易检查原因,不易迅速排除。

总的来说,液压传动的优点较多,其缺点随着生产技术的发展正在逐步加以克服,液压传动在现代化的生产中有着广阔的发展前景。

### 1. 液压传动的工作原理

以液压千斤顶为例,其工作原理如图1-6所示。搬动手柄小活塞1上下移动,当小活塞向上移动时,活塞下腔容积增大,形成真空。在大气压力作用下油液经管道、单向阀4进入油缸下腔;当压下手柄时,小活塞下移,密封容积腔内的油液受到挤压,则下腔的油液经管道、单向阀3输入大油缸7的下腔(因受油压的作用,单向阀4关闭,与油箱的油液隔断)迫使大活塞8向上移动,顶起重物。反复搬动手柄,油液就不断地输入大油缸的下腔,推动大活塞缓慢上升。如果将图1-6简化为图1-7的密闭连通器,可以清楚地分析其动力传递过程:在大活塞上有负载,当小活塞上作用一个主动力 $P$ ,使密闭连通器保持力的平衡。

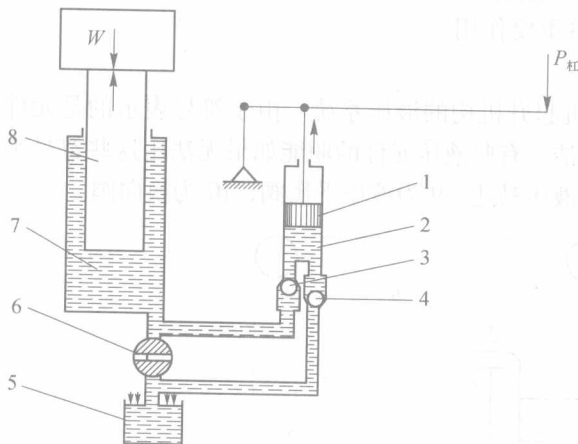


图1-6 液压千斤顶原理图

1—小活塞; 2—小油缸; 3、4—单向阀; 5—油箱;  
6—放油阀; 7—大油缸; 8—大活塞

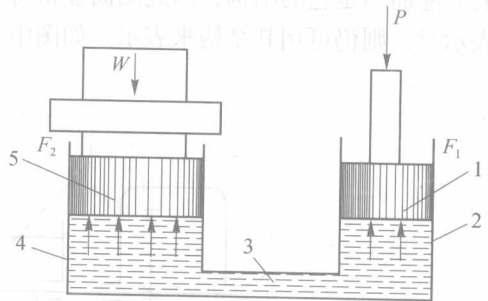


图1-7 密闭连通器

1—小活塞; 2—小油缸; 3—管路;  
4—大油缸; 5—大活塞

根据静力平衡原理:

$$\text{大活塞5上的压力} = \frac{W}{F_2};$$

$$\text{小活塞1上的压力} = \frac{P}{F_1};$$

式中  $F_2$ ——大活塞的面积;

$F_1$ ——小活塞的面积。

根据密闭容器中压力处处相等的原则,故

$$\frac{W}{F_2} = \frac{P}{F_1} = p$$

这样,可用较小的力平衡大活塞上很大的负载力

$$W = \frac{F_2 P}{F_1} \quad (1-1)$$

由此可知,在液压传动中,力不但可以传递,而且通过作用面积 ( $F_1 > F_2$ ) 的不同,力可以放大。千斤顶之所以能够用较小的力,顶起较重的负载,原因就在这里。

由上述可知,液压传动实际上是一种能量转换装置,它是靠油液通过密闭容积的变化传递运动,依靠油液内部的压力传递动力。只要控制油液的压力、流量和流动方向,便可以控制液压设备动作所要求的推力(转矩)、速度(转速)和方向。

## 2. 液压系统的组成

由上述可知,液压传动系统主要由以下4个部分组成:

①能源装置:将机械能转换成液压能的一种装置,一般常见形式为液压泵,它为液压系统提供压力油,使整个系统能够动作起来。

②执行装置:把油液的液压能转换成机械能的装置。如液压缸、液压马达等。

③控制调节装置:控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向的装置。如溢流阀、节流阀、换向阀等。

④辅助装置:液压系统除上述三项装置以外的其他装置。如油箱、滤油器、油管等,对保证液压系统可靠、稳定、持久地工作,有着重要作用。

## 3. 液压系统图

图1-8为应用这种符号绘制的汽车起重机起升机构的液压系统。由于符号表示的是元件的职能而不是它的结构,因此图面显得特别简洁。有些液压元件的职能如果无法用这些符号来表示时,则仍可用其结构来表示。如图中1为液压马达,9为液压平衡阀,10为换向阀。

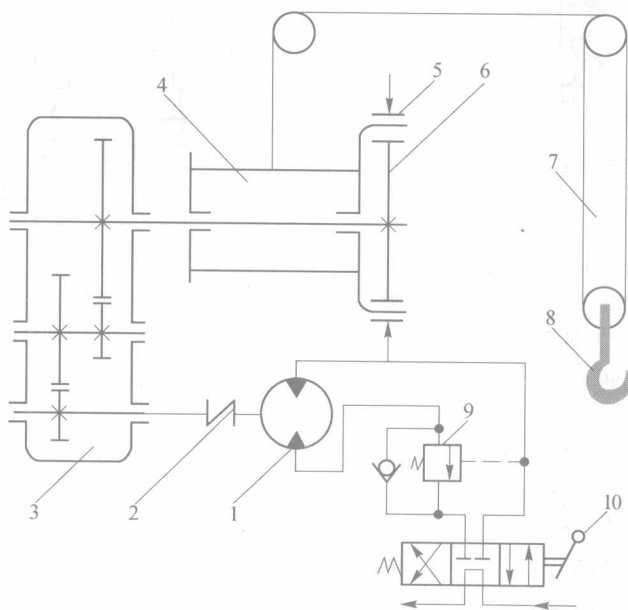


图1-8 汽车起重机起升机构液压系统图

1—液压马达; 2—联轴器; 3—减速机; 4—卷扬机;

5—制动器; 6—驱动轮; 7—钢丝绳; 8—吊钩; 9—液压平衡阀; 10—换向阀

## 第二章 车辆液压传动基础

### 第一节 液压传动基础

#### 一、静止液体的性质

静止液体的性质主要是讨论其处于静止状态或相对静止状态的液体受力平衡问题。

##### 1. 液体的压力

液体的压力是指液体在单位面积上所受的作用力。设液体在面积  $A$  ( $\text{m}^2$ ) 上所受的作用力为  $P$  ( $\text{N}$ )，则液体的压力  $p$  为：

$$p = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

如果液体中各点的压力是不均等的，则液体中某一点的压力可取该点附近的极限值表示，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta P}{\Delta A} \right) \quad (2-2)$$

由于液体不能抵抗切向力，所以液体的压力垂直于承受压力的表面，并且在静止液体中，任何一点所受的各方向的压力都相等。

##### 2. 绝对压力和相对压力

设如图 2-1 所示的容器中盛有液体，液面上的压力为大气压力  $p_0$ ，液面下深度为  $h$  处的一点  $a$  所承受的作用力，比液面处多出高度为  $h$  的液体的重力。因此  $a$  点液体所受的压力  $p_a$  为

$$p_a = p_0 + \gamma h \quad (2-3)$$

式中  $\gamma$  —— 液体的重度；

$p_a$  —— 液体的绝对压力。

如果用绝对压力  $p_a$  减去大气压力  $p_0$ ，则其剩余值称为相对压力  $p_{\text{计}}$ ，即

$$p_{\text{计}} = p_a - p_0 = \gamma h \quad (2-4)$$

因为液体的重度： $\gamma$  一般认为是常量，所以液体中某一点的相对压力与它所在位置的深度  $h$  成正比。

在一般液压传动中，通常所谓的液体压力是指相对压力，用压力表测量出的压力也是相对压力。在液压系统的压力管路中，液体所在位置的高度对于压力的影响很小时，一般可以忽略

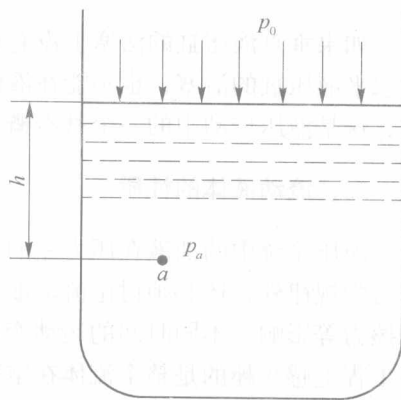


图 2-1 绝对压力和相对压力示意图

不计。在某些管路中，例如油泵的吸油管路中，就必须考虑液面距离油泵吸入口的相对高度，以免在油泵的吸油口造成过大的真空度，影响液压泵的正常工。常用的压力单位见表 2-1。

表 2-1 常用的压力单位

| 帕/Pa                 | 巴/bar                   | 千克力/厘米 <sup>2</sup><br>/(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 工程大气压<br>/at | 标准大气压<br>/atm            | 毫米水柱<br>/mmH <sub>2</sub> O | 毫米水银柱<br>/mmHg        |
|----------------------|-------------------------|------------------------------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| $9.8065 \times 10^4$ | $9.8065 \times 10^{-1}$ | 1                                              | 1            | $9.67841 \times 10^{-1}$ | $1 \times 10^4$             | $7.35559 \times 10^2$ |

### 3. 压力的传递

当盛放在密封容器内的液体，其外加压力发生变化时，只要液体仍保持其原来的静止状态不变，液体内任一点的压力，均将发生同样大小的变化：即在密封容器内，施加于静止液体上的压力将以等值同时传递到液体的各点，此即为静压传递原理，或称帕斯卡原理。

在液压系统中，通常由外力产生的压力要比液体本身重力引起的压力大得多，为此可把式 (2-3) 中的  $\gamma h$  项略去不计，而认为静止液体中的压力到处相等。

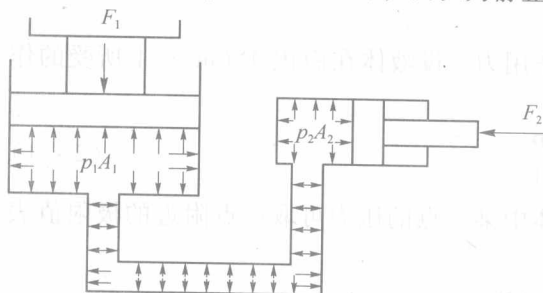


图 2-2 帕斯卡原理应用实例

图 2-2 所示为运用帕斯卡原理寻找推力和负载间关系的实例。图中垂直液压缸的截面积为  $A_1$ ，其活塞上作用一个负载  $F_1$ ，缸内液体压力为  $p_1 = F_1/A_1$ ；水平液压缸的截面积为  $A_2$ ，其活塞上作用一个推力  $F_2$ ，缸内液体压力为  $p_2 = F_2/A_2$ 。由于两缸互相连通，构成一个密封容器，因此按帕斯卡原理有

$$p_1 = p_2$$

或

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 \quad (2-5)$$

如果垂直液压缸的活塞上没有负载，则当略去活塞重力及其他阻力不计时，不论怎样推动水平液压缸的活塞，也不能在液体中形成压力，说明液压系统中的压力是由外界负载决定的，这是液压传动中的一个基本概念。

## 二、流动液体的性质

液压系统中的油液在压力差的作用下，不断流动着，因此，我们除了研究静止油液的基本力学规律外，还必须讨论流动油液的力学规律。另外，流动液体由于重力、惯性力、黏性摩擦力等影响，不同时间的运动变化除了对液体的能量损耗有所影响外，并无现实意义，而在工程上感兴趣的是整个流体在空间某特定点或特定区域内的平均运动情况。此外，流动液体的状态还与温度、黏度参数有关，为了简化条件便于分析起见，一般都在等温的条件下讨论液体的流动情况，因而可把黏度看作是常量，密度只与压力有关。

### 1. 理想液体和恒定流动

液体是有黏性的，而且黏性要在液体流动时才会表现出来，因此研究液体流动时必须考虑黏性的影响。由于液体中的黏性阻力是一个非常复杂的问题，所以开始分析时可以假设液

体没有黏性，然后再考虑黏性的作用并通过实验验证的办法对理想结论进行补充或修正。利用这种办法同样可以处理液体的可压缩性的问题。一般把既无黏性也无可压缩性的假想液体称为理想液体，而把事实上既有黏性又有可压缩性的液体称为实际液体。

液体流动时，如液体中任何点处的压力、速度和密度都不随时间变化，就称为液体作恒定流动（定常流动或非时变流动）；反之如压力、速度或密度中有一个随时间变化时，就称为非恒定流动（非定常流动或时变流动）。研究液压系统静态性能时，可认为液体作恒定流动，研究其动态性能时则必须按非恒定流动来考虑。

## 2. 液流连续性原理

当理想液体在管中稳定流动时，根据物质不灭定律，液体在管内既不能增多，也不能减少，因此在单位时间内流过管子每一横截面的液体质量一定是相等的。这就是液流的连续性原理。如图 2-3 所示，液体在不等截面中的流动，设截面 1 和截面 2 的面积分别为  $A_1$  和  $A_2$ ，在这两个截面中液体平均流速分别为  $v_1$  和  $v_2$ ，同时理想液体是不可压缩的，即在两个截面处液体的密度都是  $\rho$ ，根据液流的连续性原理，流经两截面 1 和截面 2 的液体质量应当相等，即

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v A = \text{常量} \quad (2-6)$$

式 (2-6) 称为液流的连续方程式。

将式 (2-6) 除以  $\rho$  得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = v A = \text{常量} \quad (2-7)$$

或

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (2-8)$$

式 (2-7) 说明，通过管内不同截面的液流速度与其截面积的大小成反比，即管子细的地方流速大，管子粗的地方流速小。

式 (2-6) 中流速  $v$  和截面积  $A$  的乘积表示单位时间内流经管路液体的容积称为流量。一般流量用  $Q$  表示，即

$$Q = vA \quad (2-9)$$

流量  $Q$  的单位常用“L/min”表示，在式 (2-9) 中代入常用单位后，可得流量  $Q$  的计算公式为

$$Q = \frac{vA}{10} \quad (2-10)$$

式中  $v$  —— 液体的流速 (m/min)；

$A$  —— 液流通过的面积 (cm<sup>2</sup>)。

式 (2-10) 常用来计算管道或油缸中的流速，亦可用来计算所需的面积、流量。

## 3. 伯努利方程

在液压传动系统中是利用有压力的流体来传递能量的（见图 2-4）。

如图 2-4 所示，为液体流经管道的一部分，

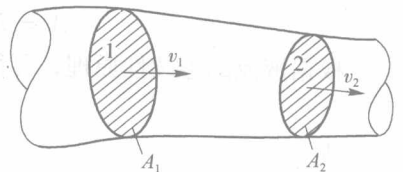


图 2-3 液流连续简图

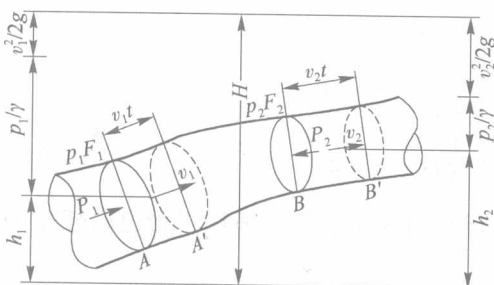


图 2-4 伯努利方程示意图