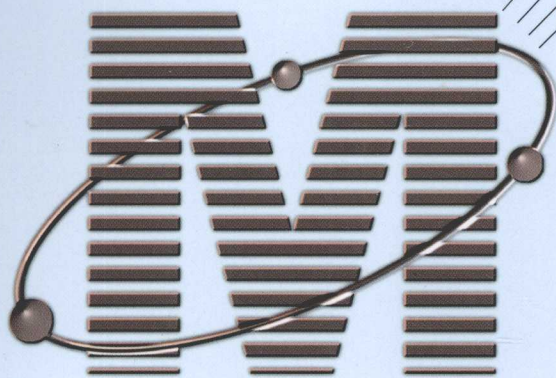




煤炭技工学校通用教材



# 采掘机械液压传动

煤炭工业出版社

煤炭技工学校通用教材

# 采掘机械液压传动

全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会 编

煤炭工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了液压传动的基础知识, 煤矿采掘机械常用液压元件(液压泵、液压马达、液压缸和液压控制阀)的类型、工作原理和结构特点, 液压传动系统的基本回路, 以及液压伺服系统的基础知识。

本书为煤炭技工学校通用教材, 也适合煤矿技术工人培训之用。

煤炭技工学校通用教材

采掘机械液压传动

全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会 编

\*

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 14

字数 327 千字 印数 55,001—60,000

2003 年 8 月第 1 版 2009 年 9 月第 7 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5020 - 2314 - 0/TD42

社内编号 5086

定价 23.50 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

# 全国职业培训教学工作指导委员会 煤炭专业委员会

主任委员 刘 富

副主任委员 仵自连 刘同良 张贵金 韩文东 范洪春 刘荣林

雷家鹏 曾宪周 夏金平 张瑞清

委 员 (按姓氏笔划为序)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 于锡昌 | 牛麦屯 | 牛宪民 | 王亚平 | 王自学 | 王朗辉 |
| 甘志国 | 石丕应 | 仵自连 | 任秀志 | 刘同良 | 刘荣林 |
| 刘振涛 | 刘 富 | 刘 鉴 | 刘鹤鸣 | 吕军昌 | 孙东翔 |
| 孙兆鹏 | 邢树生 | 齐福全 | 严世杰 | 吴庆丰 | 张久援 |
| 张 君 | 张祖文 | 张贵金 | 张瑞清 | 李 玉 | 李庆柱 |
| 李祖益 | 李家新 | 杨 华 | 辛洪波 | 陈家林 | 周锡祥 |
| 范洪春 | 赵国富 | 赵建平 | 赵新社 | 夏金平 | 高志华 |
| 冀立谦 | 储可奎 | 曾宪周 | 程光玲 | 程建亚 | 程彦涛 |
| 韩文东 | 雷家鹏 | 樊玉亭 |     |     |     |

# 前 言

为了加快煤炭技工学校的教学改革步伐，不断适应社会主义市场经济发展和劳动者就业的需要，加速煤炭工业技能型人才的培养，促进煤炭工业现代化建设和科学技术的进步，在全国职业培训教学工作指导委员会的指导下，全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会，以全国煤炭技工学校“八五”教材建设规划为基础，研究制定了全国煤炭技工学校新时期教材建设规划，并列入了国家劳动和社会保障部制定的全国技工学校教材建设规划，劳动和社会保障部以《关于印发 1999 年度全国职业培训教材修订开发计划的通知》（劳社培就司函（1999）第 15 号）下发全国。这套教材 59 种，其中技术基础课教材 43 种，实习课教材 16 种、目前正在陆续出版发行当中。

这套教材主要适用于煤矿技工学校教学，工人在职培训、就业前培训，也适合具有初中文化程度的工人自学和工程技术人员参考。

《采掘机械液压传动》是这套教材中的一种，是根据经劳动和社会保障部批准的全国煤矿技工学校统一教学计划、教学大纲的规定编写的，经全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会审定，并于 2000 年被劳动和社会保障部认定为合格教材，是全国煤炭技工学校教学，工人在职培训、就业前培训的必备的统一教材。

本教材由江苏煤电高级技工学校陈仁良同志任主编。曹丽娟、周桂荣、徐秀兰任副主编，参加编写工作的还有赵福明、冯建国。其中，绪论，第一、二章由陈仁良同志编写；第三章由赵福明同志编写；第四、六章由周桂荣同志编写；第五章由徐秀兰同志编写；第七章由冯建国、曹丽娟同志编写；第八章由曹丽娟同志编写；江苏煤电高级技工学校曾宪周、西山矿务局技工学校药红同志任主审。本教材在编写过程中，得到了学校领导、教师和煤矿有关工程技术人员的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

全国职业培训教学工作指导委员会  
煤炭专业委员会

二〇〇三年六月二十五日

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 绪 论 .....               | 1   |
| 第一节 机器的组成与传动方式 .....    | 1   |
| 第二节 液压传动在采掘机械中的应用 ..... | 1   |
| 第一章 液压传动的基础知识 .....     | 3   |
| 第一节 液压传动的基本概念 .....     | 3   |
| 第二节 液压传动的工作液体 .....     | 8   |
| 第三节 气穴现象和液压冲击 .....     | 20  |
| 复习思考题 .....             | 22  |
| 第二章 液压泵 .....           | 23  |
| 第一节 概 述 .....           | 23  |
| 第二节 齿轮泵 .....           | 26  |
| 第三节 叶片泵 .....           | 34  |
| 第四节 柱塞泵 .....           | 37  |
| 复习思考题 .....             | 53  |
| 第三章 液压马达 .....          | 55  |
| 第一节 概 述 .....           | 55  |
| 第二节 齿轮式液压马达 .....       | 59  |
| 第三节 叶片式液压马达 .....       | 64  |
| 第四节 柱塞式液压马达 .....       | 66  |
| 复习思考题 .....             | 79  |
| 第四章 液压缸 .....           | 80  |
| 第一节 液压缸的类型和特点 .....     | 80  |
| 第二节 液压缸主要尺寸的确定 .....    | 88  |
| 第三节 液压缸的结构 .....        | 89  |
| 复习思考题 .....             | 92  |
| 第五章 液压控制阀 .....         | 93  |
| 第一节 概 述 .....           | 93  |
| 第二节 方向控制阀 .....         | 94  |
| 第三节 压力控制阀 .....         | 107 |
| 第四节 流量控制阀 .....         | 119 |
| 第五节 其他液压控制阀 .....       | 125 |
| 复习思考题 .....             | 130 |
| 第六章 液压辅助元件 .....        | 132 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 第一节 管系元件.....              | 132        |
| 第二节 油箱、冷却器和加热器.....        | 136        |
| 第三节 过滤器.....               | 139        |
| 第四节 蓄能器.....               | 143        |
| 第五节 密封装置.....              | 145        |
| 第六节 流量计、压力表及表开关.....       | 150        |
| 复习思考题.....                 | 153        |
| <b>第七章 液压传动系统.....</b>     | <b>154</b> |
| 第一节 液压系统的类型.....           | 154        |
| 第二节 液压系统的基本回路.....         | 156        |
| 第三节 液压系统实例分析.....          | 179        |
| 第四节 液压系统故障的分析和排除方法.....    | 189        |
| 复习思考题.....                 | 198        |
| <b>第八章 液压伺服系统基础知识.....</b> | <b>200</b> |
| 第一节 液压伺服系统的基本知识.....       | 200        |
| 第二节 液压伺服阀.....             | 202        |
| 第三节 液压伺服系统的应用.....         | 204        |
| 复习思考题.....                 | 207        |
| 附录 常用液压与气动元(辅)件图形符号.....   | 208        |
| 参考文献.....                  | 215        |

# 绪 论

## 第一节 机器的组成与传动方式

机械是人类进行生产的工具，也是社会生产力发展水平的重要标志。早在古代，人类就知道利用杠杆、滚子等简单机械从事建筑和运输。18 世纪中期，由于蒸汽机的发明而促进了产业革命，出现了由原动机、传动机（传动装置）、工作机（工作装置）组成的近代机器。随着社会的进步和科学技术的发展，现代化的机器除了这三部分外，还包括控制装置。因此，就一部完整的机器而言，一般都是由动力源、传动装置、操作（或控制）装置及工作（或执行）机构等四个部分组成。由于动力装置的性能一般不能直接满足工作机构的各种工况的要求，因而传动装置就成为各种机器不可缺少的重要组成部分。其基本功用就是变换动力装置的性能参数，扩大性能范围，适应工作机构各种工况的要求。例如，采煤机截割部滚筒的转动，液压支架的升降和移动，组合机床的复杂运动等。目前，传动装置分为机械传动、电气传动、气压传动及液体传动。

机械传动：是通过轴、齿轮、齿条、蜗轮、蜗杆、皮带、链条和杠杆等机件直接传递动力和进行控制的一种传动方式。它是发展最早而应用最为普遍的传动形式。

电气传动：是利用电力设备并通过调节电参数来传递动力和进行控制的一种传动方式。

气压传动：是以压缩空气为工作介质进行能量传递和转换的传动方式。

液体传动：是以液体为工作介质进行能量传递和转换的传动方式。在液体传动中，按其工作原理的不同又可分为液力传动和液压传动。液力传动主要是利用液体动力能进行能量传递的传动方式，如液力耦合器和液力变矩器。液压传动主要是利用液体静压能来传递能量的一种传动方式，也称为静液传动或容积式液压传动。

以上几种传动可以单独应用，也可以联合使用。

## 第二节 液压传动在采掘机械中的应用

采掘设备装机容量大，运行速度低，载荷变化剧烈，通常要求在工作过程中调速。一般机械减速和调速装置难以满足这些要求。例如采煤机牵引部的速比甚大，一般都在 200 以上。20 世纪 50 年代的采煤机曾采用间歇运动的调速机构，并利用摩擦离合器实现过载保护。这类机构结构复杂、传动路线长、传递功率小、故障多，已被淘汰。1964 年我国第一台 MLQ-64 型浅截式采煤机采用了液压传动的牵引部，利用变量泵—定量马达组成的容积调速系统，实现了无级调速。系统中设置了用于过载保护的安全阀，简单可靠。而现代采煤机装机容量达数百千瓦（电动机功率一般为 100~300kW，最大可达 1000kW），牵引力大（300~500kW），控制、调节及自动化的要求很高，一般都采用液压传动和控制

来满足这些要求。液压支架是一种液压泵—液压缸工作方式的液压系统，用高压液体驱动立柱升降，千斤顶推移，防滑、防倒和调架等；利用液体的不可压缩性，使支柱内的工作液体在顶板压力作用下迅速增压而支承顶板。不论从其运动形式或是承载能力和特性，其他传动都不能满足要求；惟有液压传动，才使自移式液压支架付诸应用。刮板输送机虽无调速要求，但满载工况下的频繁起动，使任何类型的原动机和减速装置都难以承受，惟有采用液力耦合器和液力变矩器，才能保证其平稳起动和正常运转。此外，在掘进机、钻机、提升机以及其他矿山机械中，也广泛地应用液压传动，并且出现了一些全液压传动的矿山机械设备。

液压传动在采掘机械中得到了广泛应用，显示出其强大的生命力和广阔的发展前景。

# 第一章 液压传动的基础知识

## 第一节 液压传动的基本概念

### 一、液压传动的工作原理

液压传动是依据物理学中的帕斯卡原理工作的，在密封的液压传动回路中，液面压力的任何变化，都会引起该液体内部所有液体质点压力的同样变化，也就是说，液面压力是等值地在液体内部传递的。

现以常见的液压千斤顶为例，说明液压传动的基本工作原理。液压千斤顶是一个最简单而又比较完整的液压传动装置，其结构原理如图 1-1 所示。活塞 2 与小液压缸 3、大活塞 7 与大液压缸 6 构成两个密封而又可以变化的空间容积。当杠杆 1 将活塞 2 向上提时，小液压缸 3 中的密封容积增大，内部压力减小而形成“真空”状态。这时，油箱 9 中的工作液体便在大气压力的作用下推开单向阀 4，被吸入小液压缸 3 的密封容积中；当杠杆向下压活塞 2 时，密封容积中的工作液体因受到挤压而将单向阀 4 关闭，小液压缸 3 的容积缩小，于是工作液体便顶开单向阀 5 进入大液压缸 6 中的密封容积，将大活塞 7 推起，达到升起重物的目的。不停地提压杠杆 1，便可使工作液体源源不断地压入大液压缸 6 中，使活塞 7 上升到必需的高度。工作完毕后，将阀门 8 转到接通大液压缸 6 和油箱 9 的位置，在重物  $G$  的作用下，活塞 7 下降，大液压缸 6 的密封容积缩小，工作液体被排回油箱，重物下降。

可见，在液压千斤顶提起重物的过程中，小液压缸 3 与大液压缸 6 相当于一个被活塞 2 和 7 密封的连通器，如图 1-2 所示。

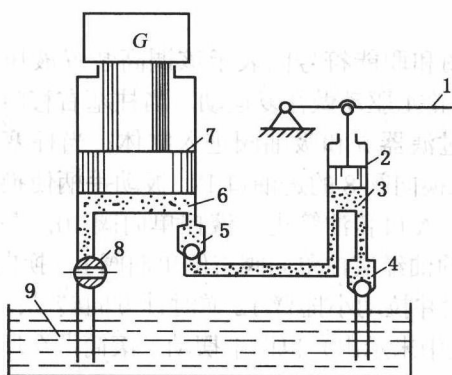


图 1-1 液压千斤顶的结构示意图

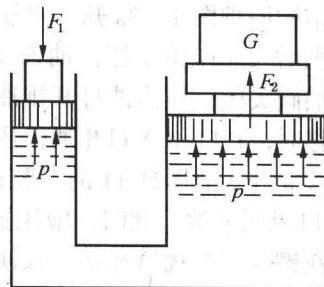


图 1-2 液压千斤顶的工作原理图

根据帕斯卡原理，作用在小活塞上的主动力  $F_1$  与作用于在大活塞上的起重力  $F_2$  的关系为：

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-1)$$

式中  $A_1$  和  $A_2$  分别为小活塞和大活塞的横截面面积。

可见，液体在密闭容器内传递力的过程中，通过作用面积的不同，可以实现力的放大或缩小。由于液压传动是利用液体静压力来传力的，故又称为“静压传动”。

另外，由于液体几乎不可压缩，若小活塞在  $t$  时间内向下移动一段距离  $h_1$ （图中未注出），小液压缸排出液体的体积为  $A_1 h_1$ ，而大活塞一定要上升一段距离  $h_2$ ，并且  $A_2 h_2 = A_1 h_1$ ，即小液压缸排出液体的体积等于进入大液压缸液体的体积。将此式两端同除以时间  $t$ ，整理之后得：

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (1-2)$$

式中  $v_1$ ——小活塞的运动速度；

$v_2$ ——大活塞的运动速度。

因此，液体在密封容器内传递运动的过程中，又可以实现减速或增速功能，而且各速度之间的关系只取决于密封容积的变化量，与所传递力的大小无关。所以液压传动也称为“容积式液压传动”。

综上所述，液压传动的基本特点是：

- (1) 以液体为传动介质；
- (2) 由于液体没有固定形状，但有一定体积，所以这种传动必须在密封容器（缸或管道等）内进行；
- (3) 液体只能受压力，不能受其他应力，所以这种传动是靠受静压力的液体进行的。

## 二、液压系统的组成

图 1-3 为某采煤机滚筒调高装置液压系统图。为适应煤层厚度的变化，采煤机应随煤层厚度变化调整滚筒的位置，调高装置由液压缸推动滚筒摇臂上、下摆动完成调高作用。

为便于初学者识图，我们同时用结构原理图和职能符号图表示该调高装置液压系统图。由结构原理图 1-3a 知，单柱塞泵 3 由偏心轮 1 驱动做往复运动。当柱塞右移时，柱塞缸容积增大而产生负压，油池 4 内的油液经过滤器 5 和吸油阀进入缸体；当柱塞左移时，吸油阀关闭，压力油打开排油阀经油管进入换向阀 8 的进油口 P。扳动手柄使换向阀阀芯右移时，P 口和 A 口相通，压力油由 P 口经 A 口和油管进入液控单向阀 10，并经左侧单向阀 a 进入液压缸 11 的左腔；液压缸右腔的油经液控单向阀右侧单向阀 b、换向阀 B 口和 O 口流回油池。此时，液压缸的活塞杆回缩并拉动小摇臂 12 逆时针方向转动，小摇臂通过花键与滚筒摇臂相连，致使滚筒摇臂（图中未示出）也向下摆动。滚筒调至所需位置后，松开换向手柄，换向阀阀芯回到中位，液压泵排出的油直接由 P 口经 O 口回到油池，液控单向阀中的两个单向阀借弹簧力作用自动关闭，从而将液压缸两腔中的油液封住，以达到固定滚筒位置的目的。当推动换向手柄使阀芯左移时，滚筒将上调。在调高过

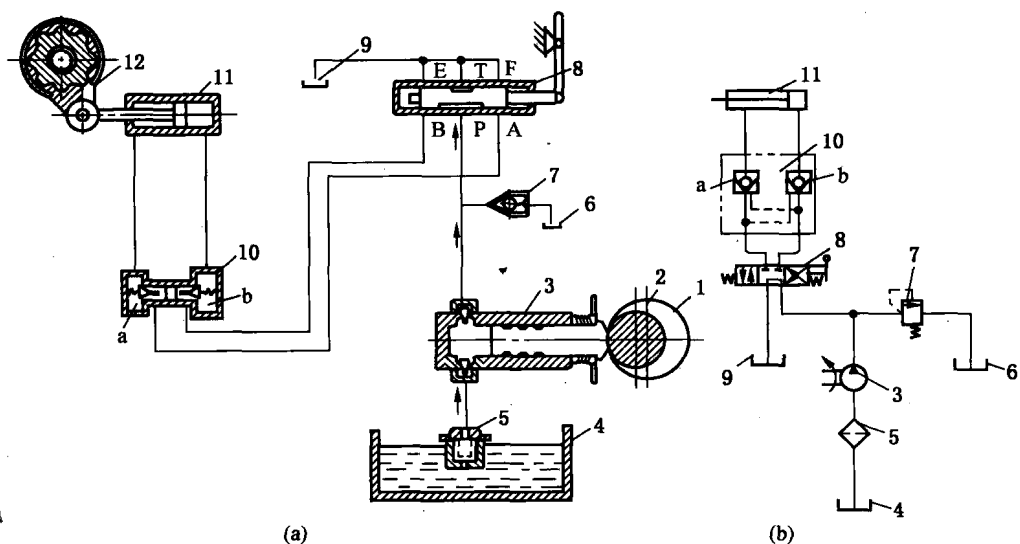


图 1-3 采煤机滚筒调高装置液压系统图

1—偏心轮；2—传动轴；3—柱塞泵；4、6、9—油池；5—过滤器；  
7—溢流阀；8—换向阀；10—液控单向阀；11—液压缸；12—小摇臂

程中，如滚筒受阻过大而使系统压力过高时，为保护系统元件不致损坏而装有溢流阀 7，给系统限压，在此，溢流阀起到安全保护的作用，故又称安全阀。

综上所述，一个完整的液压系统应包括以下 5 个基本组成部分：

(1) 动力元件，即液压泵。液压泵是液压系统的动力源，是将原动机（电动机或内燃机等）所提供的机械能转变为工作液体的液压能的能量转换装置。

(2) 执行元件，即液动机。它是将液压泵提供的工作液体的液压能转换为驱动负载的机械能的换能装置。做直线往复运动的液动机称为液压缸；做连续旋转运动的液动机称为液压马达。

(3) 控制元件，指各种液压控制阀。它们的作用是控制工作液体的压力、流量和流动方向，相应地称为压力阀、流量阀和方向阀。

(4) 辅助元件，包括油箱、管道、过滤器、蓄能器、冷却器、加热器及监测仪表等。它们的功能是多方面的，各不相同。

(5) 工作液体，指液压油和乳化液等。它是液压系统中传递力和运动的介质，即能量的载体；同时又是液压系统的状态监测与故障诊断的信息载体，所以它是液压系统中最本质的一个组成部分。

液压系统中各元件的相互关系及传递、转换能量的方式如图 1-4 所示。

### 三、液压传动系统的图示方法

液压传动系统及其组成元件可以用装配结构图、结构原理图或职能符号图三种图形表示。这三种图示方法各有其特点和应用条件。

#### 1. 装配结构图

装配结构图是依据工程制图的标准绘制的，它能准确地表达系统和元件的结构形状、

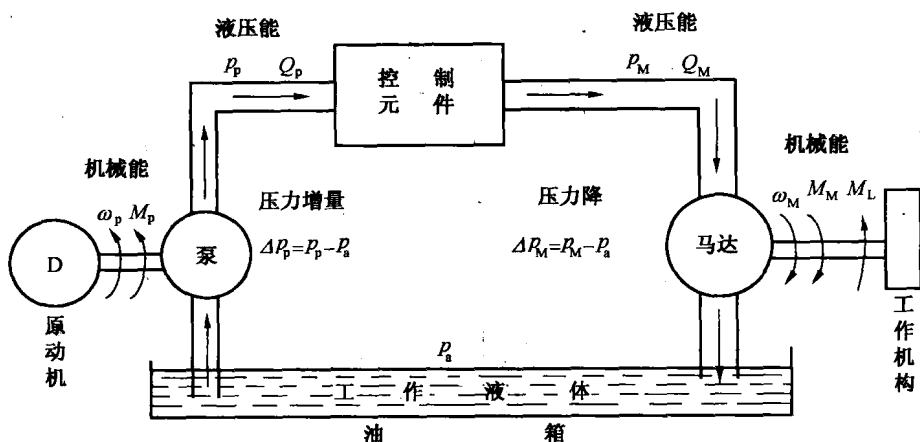


图 1-4 液压传动系统的基本组成

几何尺寸和装配关系，但是绘制复杂，不能简明、直观地表示各种元件在传动系统中的功能。它主要用于施工设计、制造安装和拆卸维修等场合，而在分析系统性能和讨论方案设计时不宜采用。

## 2. 结构原理图

结构原理图是一种简化了的装配结构图，可以很直观地表示各种液压元件的工作原理及在系统中的功能，而且比较接近于元件的实际结构，如图 1-3a 所示。但其图形绘制仍然比较复杂，难于实现标准化，并且它对于元件的结构形状、几何尺寸和装配关系的表达不准确。因此，这种图形不能用于施工设计、制造安装和拆卸维修，用于对系统性能分析又过于复杂，故已逐渐被淘汰。

## 3. 职能符号图

在液压系统中，凡是功能相同的元件，尽管其结构和工作原理不同，均可用同一种符号表示，这种图形符号便称为液压元件的职能符号，如图 1-3b 所示。因此，用职能符号绘制的液压传动系统图，只表示系统和各个元件的功能，而不表示这些元件的具体结构和参数，以及它们在系统中的具体安装位置。

液压系统的职能符号图图形简洁标准、绘制方便、功能清晰、阅读容易，非常适用于分析系统工作性能和元件功能，大大简化了方案设计过程中的绘图工作，但是它不能代替装配结构图。

我国现行的液压及气动图形符号国家标准是 GB/T786.1—1993。常用的液压元件的职能符号见附录。该国家标准与国际标准和多数发达国家的标准都十分接近，是一种通用的国际化工程语言。

在绘制和阅读用职能符号表示的液压系统图时，应注意以下几点：

- (1) 元件的名称、型号和参数（压力、流量、管径等），一般在系统图的明细表中注明，必要时可标注在元件职能符号旁边。
- (2) 图中元件职能符号，如不特别说明，均以元件处于静止状态或零位置表示。
- (3) 符号在系统图中的布置，除有方向性的元件符号（如油箱和监测仪表等）以外，

均可根据具体情况水平或垂直绘制，不得任意倾斜。

(4) 凡标准未规定的图形符号，可以根据绘制标准元件符号的基本原则和图例进行派生。当必须特别说明某元件在系统中的动作原理或结构时，允许局部采用结构原理图表示。

#### 四、液压传动的优缺点

液压传动与电力传动和机械传动比较，具有以下优点：

(1) 易于实现直线往复和旋转运动，在高压下可获得很大的力和力矩。

(2) 液压元件体积小，质量轻。在相同的输出功率条件下，液压马达的体积仅是电动机体积的 12%~13%；在转速相同的条件下，液压泵质量仅为电机的 10%~12%。

(3) 能在较大范围内方便地实现无级调速。

(4) 运转平稳，耐冲击，低速稳定性好。液压传动可以实现无间隙传动，工作液体具有吸振能力，液压元件受冲击力小，传动平稳。这对于运动均匀性要求很高的设备尤其重要。

(5) 惯性小，响应速度快。液压马达的力矩与转动惯量之比较电动机大得多，所以其加速性能好。加速中等功率电机需要 1~2s，而加速同等功率的液压马达只需 0.1s 左右。

(6) 操纵方便，易于控制。

(7) 易于实现过载保护。

(8) 工作液体一般都是液压油，液压元件都在油中工作，具有良好的润滑条件，因此有利于提高液压元件工作的可靠性和使用寿命。

(9) 液压元件易于实现标准化、系列化、通用化，便于批量生产和推广使用，提高产品质量和生产效率。

液压传动的主要缺点是：

(1) 由于工作液体的泄漏和可压缩性，液压系统的刚性较差，因此液压传动无法保证严格的传动比。

(2) 由于液体流动的阻力损失，油液的泄漏及机械摩擦的存在，液压传动的效率较低（一般为 0.75~0.80 左右），且不宜用于远距离传动。

(3) 温度的变化对系统工作性能影响较大，所以一般的液压系统不适合在高温或低温的环境中工作。

(4) 液压元件对工作液体的污染很敏感。污染的液压油会使液压元件磨损、堵塞、性能变坏、寿命缩短。因此，液压系统对工作液体的使用维护要求十分严格。

(5) 液压元件的制造精度要求高。

(6) 液压系统的故障判断和处理比较困难，因此要求使用和维护人员有较高的技术水平和专业知识。

随着科学技术的进步，设计水平和制造工艺的提高，这些缺点会被逐渐克服，液压传动的应用范围将越来越广。

## 第二节 液压传动的工作液体

### 一、工作液体的主要物理性质

工作液体的物理性质对液压传动系统的工作性能有很大的影响。以下仅就对液压传动系统的工作性能有关的液压油的一些物理性质作必要的介绍。

#### (一) 密度和重度

(1) 密度：单位体积液体的质量称为液体的密度，常用符号  $\rho$  表示，其单位为  $\text{kg/m}^3$ 。

(2) 重度：单位体积液体所受到的重力称为液体的重度，常用符号  $\gamma$  表示，其单位为  $\text{N/m}^3$ 。

重度与密度的关系为：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中  $g$ ——重力加速度，一般取  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

试验证明，液体密度随温度或压力的变化而有微小的变化，随压力的增加而增大，随温度的升高而减小。在一般情况下，由于压力和温度引起的变化都较小，在实际使用中，油液的密度和重度可近似地视为常数。

#### (二) 可压缩性

液体受压力作用而发生体积变化的性质，称为液体的可压缩性。研究表明，液体本身的压缩性很小，因而在很多场合下是可以忽略不计的。但是，在液压传动系统中的实际工作液体内，常常由于存在着压缩性很大的游离气泡，以及在液压力作用下容器和管道的变形，使得工作液体的压缩性显著增加。因此，当受压体积较大、工作压力很高或对液压系统进行动态分析时，就要考虑液体的可压缩性。

液体体积的压缩系数  $\beta_p$ ，定义为单位压力的变化所引起的液体单位体积的相对变化，即：

$$\beta_p = \frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (1-4)$$

式中  $\Delta p$ ——压力的变化量， $\text{Pa}$ ；

$V$ ——增压前的液体体积， $\text{m}^3$ ；

$\Delta V$ ——压力增加  $\Delta p$  时的体积变化量， $\text{m}^3$ 。

在工程上通常用液体体积弹性模量  $K$  来表示压缩性：

$$K = \frac{1}{\beta_p} \quad (\text{Pa}) \quad (1-5)$$

显然， $K$  值越大，说明液体的压缩性越小，其刚度就越大；反之，液体易被压缩，刚度较小。液压传动用的矿物油的体积弹性模量值约为  $(1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{ Pa}$ ，是钢的 100~150 倍。

#### (三) 粘度

液体流动时，由于液体与固体壁面间的附着力及液体分子间内聚力的存在，将导致分

子间产生相对运动，从而在液体中产生内摩擦力。液体流动时产生内摩擦力的这种性质称为粘性。表示粘性大小的物理量称为粘度。液体的粘度通常有动力粘度、运动粘度和相对粘度三种表示方法。

### 1. 动力粘度

如图 1-5 所示，假设两平行平板间充满液体，上平板以速度  $u_0$  相对于下平板运动，则液体各层间的速度按线性规律分布。根据牛顿内摩擦力定律，相邻两层液体间的内摩擦力  $T$  与液层间的相对速度  $du$  和接触面积  $A$  成正比，而与液层间的距离  $dy$  成反比，即：

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中  $T$  ——相邻两层液体间的内摩擦力；  
 $A$  ——相邻两层液体间的接触面积；  
 $du$  ——相邻两层液体的相对速度；  
 $dy$  ——相邻液层间的距离；  
 $\mu$  ——动力粘度系数，或称动力粘度。

式 (1-6) 等号两边除以  $A$ ，则得：

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中  $\tau$  ——液层单位面积上的内摩擦力， $\text{N/m}^2$ ；

$\frac{du}{dy}$  ——速度梯度，即液层间相对速度对液层距离的变化率。

所以由式 (1-7) 可知，当流动液体过流断面上的速度梯度  $du/dy$  一定时， $\mu$  值越大，液层间单位面积上的内摩擦力  $\tau$  就越大，这说明液体抵抗剪切变形的能力越强，即其粘性越大；反之， $\mu$  值越小，液体的粘性越小。由此可见，动力粘度的物理意义是，单位速度梯度时，相邻液层间单位面积上内摩擦力的大小。

$$\mu = \tau \frac{dy}{du} \quad (1-8)$$

液体处于静止状态时，速度梯度为零，液体的内摩擦力为零，因此静止的液体不呈现粘性。动力粘度的法定计量单位是  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ （帕秒）。以前沿用的动力粘度单位是  $\text{P}$ （泊）和  $\text{cP}$ （厘泊），三种动力粘度的换算关系是：

$$1\text{cP} = 10^{-2}\text{P} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$$

### 2. 运动粘度

液体的动力粘度  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值，称为运动粘度，用符号  $\nu$  表示，即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中  $\nu$  ——运动粘度， $\text{m}^2/\text{s}$ ；

$\mu$  ——动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

$\rho$  ——液体的密度； $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

运动粘度没有明确的物理意义，只是在理论分析中常出现  $\mu/\rho$  的比值项，因此引入

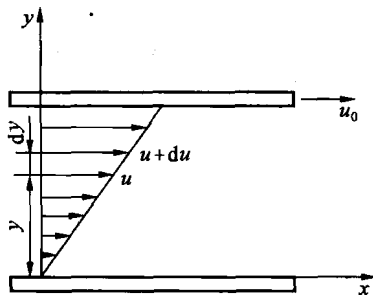


图 1-5 流动液体的内摩擦力示意图

$\nu$  代替  $\mu/\rho$ 。它的计量单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ ，其因次具有运动学中的长度和时间要素，故称为运动粘度。由于  $\text{m}^2/\text{s}$  单位太大，实际应用中常用  $\text{mm}^2/\text{s}$ 。以前沿用的运动粘度单位是 St (斯) 和 cSt (厘斯)，其换算关系是：

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

液压油的牌号是以  $40^\circ\text{C}$  时运动粘度的  $\text{mm}^2/\text{s}$  数值命名的。例如，68 号液压油，即表示其  $40^\circ\text{C}$  时的运动粘度为  $68\text{mm}^2/\text{s}$  左右。

动力粘度和运动粘度都包含着液体流动时内摩擦力的数值，可以直接表示液体粘性大小，故统称为绝对粘度。

### 3. 相对粘度

相对粘度又称条件粘度，它们都是用一定量的液体，在一定条件下通过测量仪器的时间来间接表示液体的粘性。根据测试条件与测量方法的不同，相对粘度有许多种。常用的有恩氏粘度、赛氏粘度和雷氏粘度，单位分别为恩氏度  $^\circ\text{E}$ 、赛氏秒和雷氏秒。我国采用恩氏粘度。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定，即将 200mL 的被测液体装入底部有  $\phi 2.8\text{mm}$  小孔的恩氏粘度计中，测出某一温度下流过恩氏粘度计的时间  $t_1$ ，然后测出同体积的蒸馏水在  $20^\circ\text{C}$  时流过恩氏粘度计的时间  $t_2$ ， $t_1$  与  $t_2$  的比值称为该温度下液体的恩氏粘度，即：

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-10)$$

恩氏粘度与运动粘度的换算经验公式为：

$$\nu = \left( 7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad (1-11)$$

式中  $\nu$  ——运动粘度， $\text{m}^2/\text{s}$ ；

$^\circ\text{E}$  ——恩氏粘度。

### 4. 粘度与温度的关系

液体的粘度随温度的变化而变化。温度升高时，油液的粘度将减小。油液的粘度与温度之间的关系称为粘温特性。不同的油液，粘温特性不同。粘温特性可用粘温曲线、经验公式或粘度指数表示。粘度随温度的变化越小，则称粘温特性好，对液压系统性能的影响也越小。例如，46 号 L—HH 油，在  $40^\circ\text{C}$  时运动粘度  $\nu_{40} \approx 46\text{mm}^2/\text{s}$ ， $50^\circ\text{C}$  时  $\nu_{50} \approx 30\text{mm}^2/\text{s}$ ， $60^\circ\text{C}$  时  $\nu_{60} \approx 20\text{mm}^2/\text{s}$ 。

用经验公式可以在一定范围内 ( $30 \sim 150^\circ\text{C}$ ) 获得液体粘度与温度的关系式，即：

$$\nu_t = \nu_{50} \left( \frac{50}{t} \right)^n \quad (1-12)$$

式中  $\nu_t$  ——温度  $t^\circ\text{C}$  时液体的运动粘度；

$\nu_{50}$  ——温度  $50^\circ\text{C}$  时液体的运动粘度；

$n$  ——指数，按表 1-1 选用。

用粘度指数 (VI) 来表示粘温特性的好坏。粘度指数是被试液体的粘度随温度变化的程度与标准液体粘度变化程度比较的相对值。粘度指数 VI 大，表示粘温曲线平缓，说明液体的粘度随温度变化的程度小，即粘温性能好。液压传动中通常要求液压油的粘度指数在 90 以上。