

高等学校规划教材

# 矿山机械液压传动

(修订版)

李昌熙 乔石 主编

煤炭工业出版社

TD401  
L-23682

高等学校规划教材

# 矿山机械液压传动

(修订版)

李昌熙 乔石 主编

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

### 内 容 提 要

本书介绍矿山机械常用的液压元件和典型液压系统的结构、工作原理、选型和设计,以及使用中的问题。书中反映了国内外矿山机械液压传动的新成果。内容比较充实,并着重加强了理论和性能分析。

本书是矿业机械类专业的技术基础课教材,也可供机械设计与制造、矿山机电、工程机械等专业师生,以及工厂、矿山工程技术人员参考。

### 高 等 学 校 规 划 教 材 矿山机械液压传动 (修订版)

李昌熙 乔 石 主编

责任编辑:刘永清

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平门北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092mm<sup>1</sup>/16,印张 20

字数 475 千字 印数 1—2,645

1995年3月第1版 1995年3月第1次印刷

ISBN 7-5020-1026-2/TD·4

书号3794A 0284 定价11.30元

## 前 言

本书是1991年10月煤炭工科高等学校“八五”教材规划中确定的修编教材，是根据矿业机械类专业的“矿山机械液压传动”教学大纲编写的。

《矿山机械液压传动》自1985年出版以来，作为煤炭工科高等学校的通用教材，得到了各院校的普遍采用，并已多次印刷。考虑到近年来液压传动学科的发展及教学改革的需要，我们对《矿山机械液压传动》进行了修编。

在修编中，除保持第一版的基本内容外，我们力求反映当前国内外液压技术的新成果，同时吸取了各院校的教学经验和改进意见，增补新内容，删节旧内容，加强基础理论分析，并着重介绍了矿山机械中常用的液压元件和液压系统的工作原理、设计、选型和使用问题。每章末还附有思考题和习题。

参加本书修编的人员有：焦作矿业学院曹慕家（第八、九两章）；阜新矿业学院林九如（第六章2~4节）；以及中国矿业大学孙执书（第三章2、3节，第五章，第七章），李吉祥（第六章5、6节），乔石（第一章，第二章，第四章）和李昌熙（第三章1、4~7节，第六章1节）等。全书由李昌熙、乔石任主编并定稿。

在本书修编过程中，我们参考了大量文献，谨向文献作者表示谢意。同时也感谢有关院校的领导和老师对修编本书的支持和帮助。

由于编者水平有限，书中肯定存在不少问题，敬希读者批评指正。

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 结 论.....                   | 1   |
| 第一章 液压传动概述 .....           | 2   |
| 第一节 液压传动的基本工作原理 .....      | 2   |
| 第二节 液压传动系统的图示方法 .....      | 6   |
| 思考题与习题 .....               | 9   |
| 第二章 工作介质 .....             | 10  |
| 第一节 液体的主要物理性质 .....        | 10  |
| 第二节 液压传动用的工作液体 .....       | 18  |
| 思考题与习题 .....               | 27  |
| 第三章 液压泵 .....              | 28  |
| 第一节 概述 .....               | 28  |
| 第二节 齿轮泵 .....              | 32  |
| 第三节 叶片泵 .....              | 48  |
| 第四节 单柱泵和卧式柱塞泵 .....        | 58  |
| 第五节 轴向柱塞泵 .....            | 61  |
| 第六节 径向柱塞泵 .....            | 87  |
| 第七节 液压泵的选型和使用 .....        | 88  |
| 思考题与习题 .....               | 91  |
| 第四章 液压马达 .....             | 93  |
| 第一节 液压马达的基本技术参数和性能指标 ..... | 94  |
| 第二节 高速液压马达 .....           | 98  |
| 第三节 行星转子式摆线马达 .....        | 106 |
| 第四节 曲轴连杆式液压马达 .....        | 110 |
| 第五节 内曲线径向柱塞式液压马达 .....     | 113 |
| 第六节 液压泵与液压马达的效率分析 .....    | 127 |
| 思考题与习题 .....               | 135 |
| 第五章 液压缸 .....              | 137 |
| 第一节 常用液压缸的结构和主要参数 .....    | 137 |
| 第二节 推力液压缸的主要零件结构和材料 .....  | 145 |
| 第三节 液压缸的设计 .....           | 150 |
| 思考题与习题 .....               | 158 |
| 第六章 液压控制阀 .....            | 159 |
| 第一节 阀元件的特性分析 .....         | 160 |
| 第二节 方向控制阀 .....            | 167 |
| 第三节 压力控制阀 .....            | 179 |
| 第四节 流量控制阀 .....            | 194 |
| 第五节 插装阀 .....              | 203 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 第六节 电液比例阀简介 .....              | 207        |
| 思考题与习题 .....                   | 210        |
| <b>第七章 液压辅件</b> .....          | <b>213</b> |
| 第一节 油箱和热交换器 .....              | 213        |
| 第二节 滤油器 .....                  | 220        |
| 第三节 蓄能器 .....                  | 228        |
| 第四节 油管和管接头 .....               | 232        |
| 第五节 密封装置 .....                 | 238        |
| 思考题与习题 .....                   | 245        |
| <b>第八章 液压传动系统</b> .....        | <b>246</b> |
| 第一节 主回路及系统分类 .....             | 246        |
| 第二节 液压系统的基本控制回路 .....          | 250        |
| 第三节 节流调速系统分析 .....             | 262        |
| 第四节 容积调速系统分析 .....             | 267        |
| 第五节 蓄能器回路 .....                | 272        |
| 第六节 典型液压系统 .....               | 275        |
| 第七节 液压系统的设计 .....              | 282        |
| 思考题与习题 .....                   | 295        |
| <b>第九章 液压系统的安装、使用和维护</b> ..... | <b>298</b> |
| 第一节 管道安装与清洗 .....              | 298        |
| 第二节 液压系统压力试验和调试 .....          | 301        |
| 第三节 液压设备的使用与维护 .....           | 302        |
| 第四节 故障诊断与排除 .....              | 303        |
| 第五节 系统污染控制 .....               | 305        |
| 第六节 液压噪声及其控制 .....             | 308        |
| 第七节 泄漏控制 .....                 | 309        |
| 思考题与习题 .....                   | 310        |
| 主要参考文献 .....                   | 312        |

## 绪 论

任何一台独立的机器都包括四个部分：原动机、传动装置、工作机构和控制装置。原动机为机器提供能量或动力。工作机构直接对工作对象进行作业。由于工作机构的输出量（力、速度、位移等）应符合一定的规律和要求，但原动机的输出特性往往不可能与机器工作机构所要求的特性相适应。因此，在原动机与工作机构之间就需要配备某种传动装置。“传动”是指能量或动力由原动机向工作机构进行传递和分配，使工作机构的性能满足机器的要求。此外，现代化的机器还应具备控制装置，以控制、调节机器的各种参数并进行保护。

目前常用的传动方式有机械传动、电力传动和流体传动。有时采用它们混合组成的复合传动。

流体传动是以流体（液体、气体）为工作介质来进行能量转换、传递、分配和控制的传动方式。以液体为工作介质时为液体传动；以气体为工作介质时为压气传动（简称气动）。液体传动又分为液压传动和液力传动。液压传动是在密闭的回路中，利用液体的压力能来进行能量的转换、传递和分配；而液力传动是通过液体的动能来进行能量的转换和传递。

本书主要介绍液压传动的基本内容。在一些机器中，液压传动在传动装置和控制装置中得到了广泛应用。因此，《液压传动》课程是机械类专业的一门主要技术基础课。

1650年帕斯卡提出的水静压力原理是液压传动的理论基础。此后，液压传动开始出现。第一台水压机于1795年在英国诞生。至19世纪中叶后，逐渐出现了工业应用的压力机、铰盘、千斤顶等装置。但是，限于当时技术条件，液压传动并没有得到发展。1900年，世界上出现了第一台轴向柱塞泵，其工作压力仅为4MPa。现代液压技术的发展开始于20世纪30年代。1930年德国人托马研制成斜轴式轴向柱塞泵，使液压泵的工作压力提高一大步。于是，液压传动开始从机床行业向其它部门发展。20世纪40年代初期，在军事工业的推动下，液压技术得到飞速发展，开始在飞机、舰艇上广泛应用。

在矿山机械中，1945年德国制成第一台液压传动的截煤机，接着美国、英国、前苏联等都在采煤机中应用液压传动。1954年英国研制成功液压自移式支架，出现了综合机械化采煤技术，从而扩大了液压传动的应用范围。目前，液压传动已广泛应用于采煤机、掘进机、支护设备、装载机、挖掘机、钻机以及其他矿山设备中。可以说液压传动与控制技术已遍布国民经济各个领域——从天空、陆地到井下、水下。

可以预计，随着我国改革开放和社会主义现代化的发展，液压技术将得到更广泛地应用。

# 第一章 液压传动概述

## 第一节 液压传动的基本工作原理

本节将初步介绍液压传动的基本工作原理，以及液压系统的图示方法和优缺点。

### 一、液压传动的基本工作原理

大家知道，“机械传动”主要利用齿轮、皮带、链条、螺旋或连杆机构等零部件，来传递和分配能量。这一类零部件总称为“传动件”。如常用的螺旋千斤顶（图1-1a），就是利用杠杆1转动螺杆2通过螺母3来升降重物的，这里的杠杆和螺杆、螺母都是“传动件”。

“液压传动”则利用封闭容积中的液体压力能进行能量转换、传递和分配。其中的液体称为“工作介质”或“工作液体”，相当于“机械传动”中的“传动件”。液压千斤顶是一个最简单而又比较完整的液压传动装置，应用非常普遍。其结构原理如图1-1b所示。

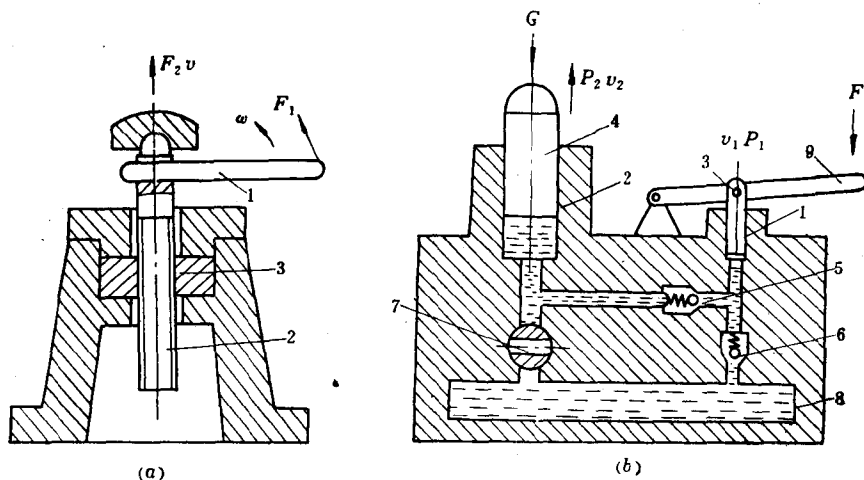


图 1-1 螺旋千斤顶与液压千斤顶的结构示意图

图1-1b中，柱塞3和柱塞孔1、柱塞4和柱塞孔2，构成两个密封而又可以变化的空间容积。当杠杆9将柱塞3向上提时，柱塞孔1中的密封容积扩大，内部压力减小而形成“真空”状态。这时，油池8中的工作液体便在大气压力作用下推开单向阀6，被吸入柱塞孔1的密封空间中，单向阀5关闭；当杠杆向下压柱塞3时，单向阀6被关死，柱塞孔1的密封容积缩小，于是工作液体便顶开单向阀5，排入柱塞孔2中的密封空间，将柱塞4推起，达到升起重物的目的。不停地摇动杠杆9，便可使工作液体源源不断地压入柱塞孔2中，使柱塞4上升到必需的高度。工作完毕后，将阀门7转到接通柱塞孔2和油池8的位置，在重物 $G$ 的作用下，柱塞4收缩，柱塞孔2的密封容积缩小，工作液体被排回油池，重物下降。

可见,在液压千斤顶提起重物过程中,柱塞孔1与2相当于一个被柱塞3和4密封的连通器,如图1-2所示。

根据帕斯卡原理,作用在小柱塞3上的主动力 $P_1$ 与作用在大柱塞4上的起重重力 $P_2$ 的关系为

$$P_2 = P_1 \frac{A}{a}$$

式中  $A$ ——柱塞4的横截面面积;

$a$ ——柱塞3的横截面面积。

可见,液体在密闭容器内传递力的过程中,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”。

又根据流量连续性原理,可得小柱塞3的运动速度 $v_1$ 与大柱塞4的运动速度 $v_2$ 的关系为

$$v_2 = v_1 \frac{a}{A}$$

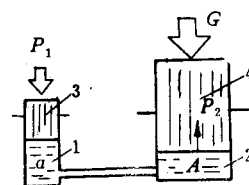


图 1-2 液压千斤顶的工作原理图

1、2—柱塞孔; 3、4—柱塞

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”。

由上述分析可知,当不考虑液压传动工作过程中的能量损失时,小柱塞输入的液压功率 $v_1 P_1$ 等于大柱塞的输出液压功率 $v_2 P_2$ ,这是符合能量守恒定律的。

## 二、液压传动系统的典型实例与基本组成

液压千斤顶虽然可以说明液压传动系统的基本工作原理,但它毕竟太简单了,缺乏典型意义。下面介绍一个机床中常用的工作台液压传动系统,进一步说明其工作特点。其结构原理与系统回路如图1-3所示。这是一个比较简单的典型液压传动系统。

工作台要求实现慢速向右进给,然后快速向左退回的动作循环。图中活塞9通过活塞杆12与工作台11固定在一起。液压缸10固定在床身上。图示电磁换向阀15处于通电状态,管道2与3连通,液压泵17排出的液体输入液压缸10的左腔,使其容积不断扩大,推动活塞和工作台向右作进给运动。这时,液压缸右腔的容积缩小回液,它排出的液体经管道4、节流阀13、管道5与6返回油箱18。调节节流阀13的阀口通流面积,便可控制液压缸右腔的回液流量,达到控制进给速度的目的。

如果令电磁阀断电,则阀芯15便在弹簧力的作用下左移,使管道2与5、3与6连通。这时液压泵排出的液体经过单向阀14输入液压缸右腔,使其容积不断扩大,推动活塞和工作台向左返回。而其左腔容积不断缩小回液,回液从管道3经6直接流回油箱。在此过程中,液体不受节流阀的控制,工作台快速返回。

溢流阀8与液压泵的排液口并联。当活塞进给速度较慢时,系统中积累多余的液体将使其压力升高。压力上升到足以克服阀芯的弹簧力作用时,就将阀芯推开,使多余的液体直接返回油箱,防止系统过载。调节弹簧的预压力,可以改变系统的工作压力。

系统中压力表16用于监测系统的工作压力;吸液口滤油器19,可以防止工作液体中的大颗粒固体杂质进入液压泵和传动系统,避免损坏液压元件。

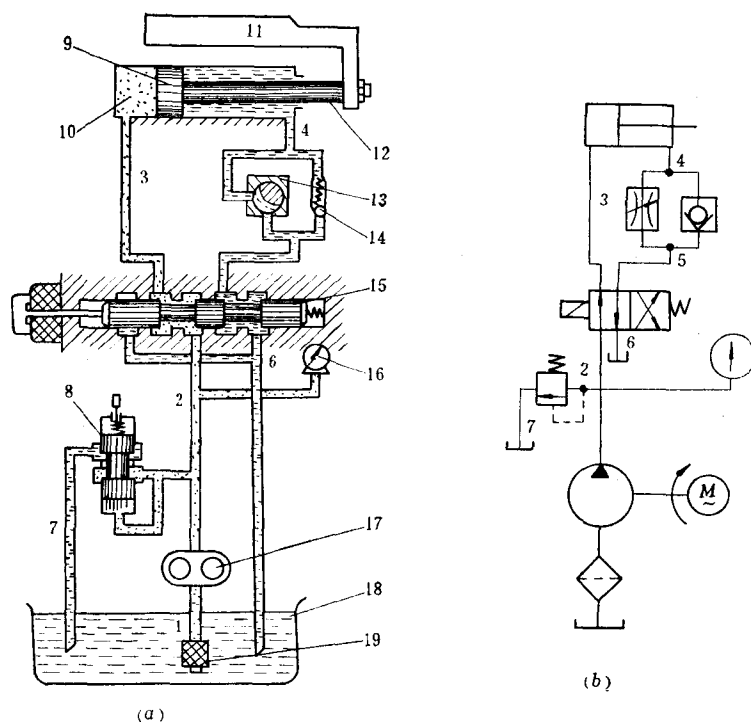


图 1-3 机床工作台液压传动系统图

1、2、3、4、5、6、7—管道；8—溢流阀；9—活塞；10—液压缸；11—工作台；12—活塞杆；13—可调节流阀；14—单向阀；15—换向阀；16—压力表；17—液压泵；18—油箱；19—滤油器

由液压千斤顶或机床的液压传动系统都可以看出，一个完整的液压传动系统均包括以下五个基本组成部分：

#### 1. 液压动力源

它是将原动机（常用的有人力机构、电动机和内燃机等）所提供的机械能转变为工作液体的液压能的机械装置，通常称为液压泵或油泵。

#### 2. 液压执行元件

将液压泵所提供的工作液体的液压能，转变为机械能的机械装置，称为液压执行元件，或称为液动机。作直线往复运动的液动机称为液压缸或油缸；作连续旋转运动的液动机则称为液压马达或油马达。

#### 3. 液压控制元件

对液压系统中工作液体的压力、流量和流动方向进行调节控制的机械装置，称为液压控制元件，通常简称为液压阀或阀。

#### 4. 液压辅助元件

液压辅助元件包括油箱、管道、管接头、密封元件、滤油器、蓄能器、冷却器、加热器以及各种液体参数的监测仪表等。它们的功能是多方面的，各不相同。

#### 5. 工作液体

工作液体是能量的承受和传递介质，即能量的载体，也是液压传动系统中最本质的一

个组成部分。

图1-4为液压传动系统的基本组成部分与能量传递路线关系的示意图。

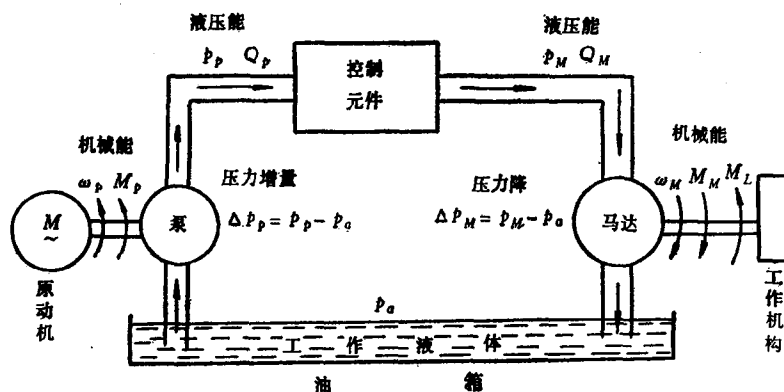


图 1-4 液压传动系统的基本组成部分示意图

### 三、液压传动的优缺点

机械传动、电力传动和液压传动是目前应用最广泛的三种传动方式。它们各有其优点和最佳应用条件。

与机械传动比较，液压传动具有以下一些优点：

1) 工作液体可以用管道方便地输送到任何位置 允许液压执行元件与液压泵保持相当远的距离，并且可以根据设备要求与环境的可能随意安排，不受限制；特别有意义的是，液压传动可以很方便地将原动机的旋转运动转变为直线运动。这些特点十分适合地下采掘设备的需要。

2) 易于实现无级调速，调速范围大 其传动比可高达1:1000；调速性能不受功率大小的限制。

3) 控制方便，易于实现自动化 不仅容易进行集中控制、遥控及程序控制，而且运动平稳，操作省力，易于实现过载保护。

4) 运动零部件具有良好的润滑条件 因此可提高系统的可靠性和元件的工作寿命。

5) 液压元件与系统易于实现标准化、系列化和通用化。

与电力传动相比，液压传动的主要优点是：

1) 质量轻、体积小 电机由于受到磁饱和的限制，其单位面积上的切向力还不到1MPa；而液压机械所能承受的液压力，则只受机械自身的强度限制，目前一般都可达到35MPa。所以液压泵和液压马达的能容量比电动机和发电机大得多。统计表明，液压机械单位功率的质量，目前仅为电机的十分之一左右。

2) 惯性小，响应速度快 由于液压马达的力矩—惯量比（即驱动力矩与转动惯量之比）较电动机的大得多，故其加速性能好。例如，加速一台中等功率的电动机需要一秒至几秒钟，而加速同等功率的液压马达只需要0.1s左右。因此，液压马达可以高频换向。这种特性对于伺服控制系统具有重大意义。

3) 低速液压马达的低速稳定性好 例如，内曲线径向柱塞式马达的最低稳定转速可

小于 $1\text{r/min}$ , 这是任何电动机都不能达到的。

4) 可以简化机器设备的电气系统 这一点对于有爆炸危险的工作环境(如煤矿井下等)很有好处, 可以简化在这些环境中工作的机器设备上的防爆装置, 提高工作安全性。

但是, 液压传动也存在一些缺点, 例如:

1) 效率较低 由于液压传动系统同时存在压力损失、容积损失和机械摩擦损失, 其总效率通常仅为 $0.75\sim 0.8$ 左右。

2) 适用的温度范围较小 液压传动系统的工作性能与效率受温度变化的影响很大, 不适于高温或低温的工作环境。

3) 液压元件对工作液体的污染很敏感 因此液压传动系统要求较严格的维护工作。此外, 工作液体泄漏会污染环境, 石油类工作液体还有发生火灾的危险。对此必须特别注意。

4) 系统的刚性较差 这是由于工作液体泄漏和可压缩性造成的。故液体传动不适于定比传动系统应用, 其振动和噪声也较严重。

5) 液压元件的制造工艺要求较高 故其成本较高。

6) 系统的故障诊断比较困难 要求操作和维修人员具有较高的技术水平和专业知识。

虽然液压传动具有这些缺点, 但许多都是非本质性的。随着生产水平提高和科学技术发展, 它们必将逐步得到克服与改善。

## 第二节 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采用装配结构图、结构原理图或职能符号图表示。这三种图示方法各有其特点和应用条件。

### 一、装配结构图

装配结构图能准确地表达系统和元件的结构形状、几何尺寸和装配关系。但绘制复杂, 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。

### 二、结构原理图

结构原理图可以很直观地表示各种液压元件的工作原理及其在系统中的功能, 而且比较接近于元件的实际结构, 故易于理解。但其图形绘制仍然比较复杂, 难于实现标准化, 又不能准确表达元件的结构形状、几何尺寸和装配关系。因此, 这种图形既不能用于施工设计、制造安装和拆卸维修, 对系统性能分析又过于复杂, 已逐渐被淘汰。

### 三、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。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真实安装位置。

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。它适用于分析系统和元件的功能, 简化了方案设计过程中的绘图工作, 但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GB 786—76由八个基本部分和两个附录组

表 1-1 GB 786—76与GB 786.1—93常用液压图形符号对照表

| 项目                              | 名称         | 符号对照      |             | 项目                    | 名称            | 符号对照      |                    |
|---------------------------------|------------|-----------|-------------|-----------------------|---------------|-----------|--------------------|
|                                 |            | GB 786—76 | GB 786.1—93 |                       |               | GB 786—76 | GB 786.1—93        |
| 泵<br>马<br>达<br>和<br>液<br>压<br>缸 | 单向定量泵      |           |             | 控制<br>方式              | 机械控制          |           | 顶杆式<br><br>滚轮式<br> |
|                                 | 双向变量泵      |           |             |                       | 单、双作用电磁铁控制    |           |                    |
|                                 | 双向定量马达     |           |             |                       | 液压先导加压控制      |           | 外部先导<br>           |
|                                 | 手动变量泵(马达)  |           |             |                       | 液压先导卸压控制      |           | 内部先导带遥控泄油口<br>     |
|                                 | 压力补偿变量泵    |           |             | 压<br>力<br>控<br>制<br>阀 | 溢流阀<br>(或安全阀) |           | 一般符号或直动型<br>       |
|                                 | 液控变量泵(马达)  |           |             |                       |               |           | 先导型<br>            |
|                                 | 双作用单活塞杆液压缸 |           |             |                       |               |           | 简化符号<br>           |
|                                 | 双作用伸缩液压缸   |           |             |                       |               |           | 一般符号或直动型<br>       |
| 控制<br>方式                        | 人工手柄式      |           |             | 顺序阀                   |               |           | 一般符号或直动型<br>       |
|                                 | 人工按钮式      |           |             |                       |               |           | 先导型<br>            |

续表

| 项目      | 名称            | 符 号 对 照   |             | 项目      | 名称      | 符 号 对 照   |             |
|---------|---------------|-----------|-------------|---------|---------|-----------|-------------|
|         |               | GB 786—76 | GB 786.1—93 |         |         | GB 786—76 | GB 786.1—93 |
| 流量控制阀   | 可调节流阀一般符号     |           |             | 辅件及其它装置 | 过滤器     | 粗         |             |
|         | 调速阀           |           | 简化符号        |         | 精       |           |             |
|         | 旁通型调速阀(溢流节流阀) |           | 简化符号        |         | 加热器     |           |             |
|         | 分流阀           |           |             |         | 冷却器     |           |             |
| 方向控制阀   | 常闭式二位二通阀      |           |             |         | 压力继电器   |           |             |
|         | 二位四通阀         |           |             |         | 交流电动机   |           |             |
|         | 三位四通阀         |           |             |         | 直流变速电动机 |           |             |
|         | 单向阀           |           |             |         | 指针式压力表  |           |             |
|         | 液控单向阀         |           |             |         | 压力源     |           |             |
| 辅件及其它装置 | 气体隔离式蓄能器      |           |             | 管路连接    | 连通管路    |           |             |
|         |               |           |             |         | 交叉管路    |           |             |

续表

| 项目               | 名称        | 符 号 对 照                                                                           |            | 项目               | 名 称         | 符 号 对 照                                                                            |             |
|------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                  |           | GB 786—76                                                                         | GB786.1—93 |                  |             | GB 786—76                                                                          | GB 786.1—93 |
| 管<br>路<br>连<br>接 | 软管连接      |  |            | 管<br>路<br>连<br>接 | 开关<br>(截止阀) |  |             |
|                  | 通油箱<br>管路 |  |            |                  |             |                                                                                    |             |

成。这个标准与国际标准 (ISO) 十分接近, 但还不等同。为与国际标准接轨, 我国重新修订了这个标准, 定名为 GB 786.1—93, 现已上报国家技术监督局审批, 不久可望颁布实行。新标准按元件的职能分类更加确切、详细, 将原标准的八个基本部分分解为十六个部分, 而且各个符号所表达的工作原理也更清晰、准确。表1-1例举了新、旧标准中常用的液压图形符号。本书中的其它图形仍根据 GB 786—76 绘制。

在绘制和阅读液压系统的图形符号时, 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图形符号旁边;
- 2) 图中元件图形符号, 如不特别说明, 均指元件处于静止状态或零位置;
- 3) 符号在系统中的布置, 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, 但不得随意倾斜;
- 4) 凡标准中未规定的图形符号, 可以根据绘制元件符号的基本原则和图例进行派生, 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。

### 思考题与习题

- 1-1 试以液压千斤顶为例, 说明液压传动的基本工作原理, 并解释: 为什么“液压传动”又称为“静压传动”或“容积式液压传动”?
- 1-2 液压传动系统由哪几个基本部分组成? 它们的基本功能是什么? 试用示意图说明。
- 1-3 说明液压系统图形符号的特点和功能, 在绘制和阅读这种图形时应注意什么问题?
- 1-4 试比较液压传动与机械传动和电力传动的主要优缺点。
- 1-5 用表1-1液压系统图形符号表示图1-1b的液压千斤顶原理图。
- 1-6 说明图1-3所示的机床工作台传动系统, 若用机械传动来实现同样功能, 至少应由哪些部分和零件组成, 试用简图表示之。

## 第二章 工 作 介 质

工作介质是液压能的载体，其基本功能是进行能量的转换和传递。此外，它还对液压元件和系统进行润滑和冷却。工作介质又称为工作液体或液压油。

本章将讨论工作介质的主要物理性质、液压传动对工作介质的要求，以及常用工作介质的类型和选用原则。

### 第一节 液体的主要物理性质

液体的物理性质对液压传动的工作性能有很大的影响，它们在流体力学中都已介绍过。下面仅对液压传动工作性能有直接影响的一些物理性质，作进一步讨论。

#### 一、密度和重度

密度定义：单位体积液体的质量称为密度，常用符号 $\rho$ 表示，其单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

重度定义：地球对于单位体积液体质量的引力（重力）称为重度，常用符号 $\gamma$ 表示，其单位为 $\text{N}/\text{m}^3$ 。

显然，重度与密度的关系式为

$$\gamma = \rho g \quad (2-1)$$

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

试验证明，液体密度随其温度或压力的变化有微小的改变。但在液压传动中，通常将工作介质的密度视为常数。

国标GB 1884规定了液体石油产品密度的测定方法。

#### 二、粘度

在外力作用下，液体内某一部分与其相邻部分间产生相对运动时，沿其界面产生内摩擦阻力的性质称为粘性。描述液体粘性大小的指标称为粘度。液体粘度分绝对粘度和相对粘度两类。

##### 1. 绝对粘度

在牛顿内摩擦定律  $\tau = \mu \frac{dv}{dz}$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) 中，比例常数 $\mu$ 就是液体的动力粘度。其物理意义是，单位速度梯度 ( $dv/dz$ ) 时，相邻液层间单位面积上内摩擦力的大小，表征液体抵抗剪切变形的能力。

动力粘度值不随速度梯度变化而改变的液体称为牛顿液体；而随速度梯度变化而改变的液体，则称为非牛顿液体。今后我们所讨论的工作介质，如不特别说明，均认为是牛顿液体。

动力粘度的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。实用中这个单位太大，一般常用 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

动力粘度与密度的比值称为运动粘度，常用符号 $\nu$ 表示，即

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

显然,运动粘度的单位为 $\text{m}^2/\text{s}$ 。实用中这个单位也太大,故常采用 $\text{mm}^2/\text{s}$ 。

$1\text{mm}^2/\text{s} = 1\text{cSt}$ (厘斯),常用来表示油液粘度牌号的单位。

运动粘度没有具体的物理意义。只是因为在学习流体力学的理论计算中,常出现 $\mu/\rho$ 项,而其单位仅有长度和时间因次,所以就采用一个系数 $\nu$ 来代替这个比值,并命名为运动粘度。

动力粘度和运动粘度均包含着液体流动时的内摩擦力,可以直接表征液体粘性的大小,故统称绝对粘度。国标GB 265规定了石油产品运动粘度的测定方法和动力粘度的计算方法。

粘度是工作介质的一个十分重要的性能指标。液压液和其它液体润滑剂就是用它们在 $40^\circ\text{C}$ 时的运动粘度数值,作为它们的牌号。关于这一点,后面将详细介绍。

## 2. 相对粘度

相对粘度亦称条件粘度。它们都是用一定量的液体,在一定条件下流过测量仪器的时间长短,来间接表示该液体的粘性大小。这样做不需测定液体的内摩擦力,因而简便实用。相对粘度根据其测量仪器和条件不同,分为许多种,常用的有恩氏粘度、通用赛氏粘度和雷氏一号粘度等。

1) 恩氏粘度 这是我国、德国、和前苏联通用的一种相对粘度。根据国标GB 266—88规定,将200mL的被试液体在一定温度下流过恩氏粘度计的时间,与200mL蒸馏水在 $20^\circ\text{C}$ 时流过恩氏粘度计的时间之比,称为试液在该温度下的恩氏粘度,用符号 $^\circ\text{E}$ 表示,其单位称作条件度。已知恩氏粘度求运动粘度的经验公式为

$$\nu = 7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}} \quad (2-3)$$

单位为 $\text{mm}^2/\text{s}$ 。

2) 通用赛氏粘度 60mL被试液体在一定温度下流过赛氏粘度计的时间,称为通用赛氏粘度,其单位为通用赛氏秒(SSU)。这是美国通用的一种相对粘度,它与运动粘度的关系为

$$\nu = 0.22\text{SSU} - \frac{180}{\text{SSU}} \quad (2-4)$$

3) 雷氏一号粘度 50mL被试液体在一定温度下,流过雷氏一号粘度计的时间,称为雷氏一号粘度或商用雷氏粘度,其单位为雷氏一号秒("R)。这种相对粘度在英国通用,它与运动粘度的关系为

$$\nu = 0.26''\text{R} - \frac{172}{''\text{R}} \quad (2-5)$$

## 3. 粘度与温度的关系

温度对液体粘度的影响十分显著。液体的粘度随其温度升高而减小。不同的液体,其粘度的减小程度各不相同。一般可用粘度温度计算图、经验公式或粘度指数来描述粘度与温度的关系(简称粘温特性)。石油型工作介质的粘度温度计算图可按国标GB 8023—87规定的方法绘制。下面介绍一个实用的经验公式和粘度指数的概念。

1) 经验公式 对于 $40^\circ\text{C}$ 时的运动粘度小于 $135\text{mm}^2/\text{s}$ 的石油型工作液体,在 $30\sim 150^\circ\text{C}$ 的范围内的粘度温度计算公式为