

YEYA CHUANDONG

液压传动

第三版

王启广 杨寅威 韩振铎 主编



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

液 压 传 动

(第三版)

王启广 杨寅威 韩振铎 主编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书结合最新的国家标准和矿山机械的发展,对原书中的旧名词、术语等进行了修正,对原书内容进行了充实、调整和补充。本次修订贯彻基础理论以必需、够用为度,注重应用性、综合性的原则,力求通俗易懂,学以致用,强调能力的培养和基本技能的训练。全书主要内容有:液压传动基础知识、工作液体、液压泵、液压马达、液压缸、液压控制阀、辅助元件、液压基本回路、液压传动系统、液压传动系统设计和计算等。

本书为机械类、采矿类等相关专业的教材,也可作为函授及开放大学相关专业的教学用书,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动/王启广,杨寅威,韩振铎主编.—3版.

徐州:中国矿业大学出版社,2015.5

ISBN 978-7-5646-2698-3

I. ①液… II. ①王…②杨…③韩… III. ①液压传动—教材 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 110931 号

书 名 液压传动
主 编 王启广 杨寅威 韩振铎
责任编辑 何晓明
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 380 千字
版次印次 2015 年 5 月第 3 版 2015 年 5 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

第三版前言

第二版出版以来,经过多年的教学实践,使用本教材的教师提出了许多宝贵的意见和建议,且随着矿山机械的发展,也有必要对教材进行修订。

修订是结合我们多年的液压传动课程教学经验和采用本书作为教材的兄弟院校的反馈意见进行的。在修订过程中,贯彻基础理论以必需、够用为度,注重应用性、综合性的原则,力求通俗易懂,学以致用,强调能力的培养和基本技能的训练。

本次修订主要进行了以下几方面的工作:

(1) 结合最新标准,对原书中过时的名词、术语等进行了修正,对液压元件的图形符号进行了更新。

(2) 结合矿山机械的发展,对原书中的内容进行了充实、调整和补充。

(3) 重新编写了第八章“液压基本回路”,修订和更新了其余各章的部分内容。

(4) 删去了第十一章“液压伺服系统”。

(5) 调整和补充了各章的复习思考题。

参加本书修订工作的有王启广(第一、二、三、四、五章及附录)、杨寅威(第六、七、八章)、韩振铎(第九、十章)。全书由王启广统稿。

在编写过程中,参考了诸多教材和著作,得到了兄弟院校和科研单位的大力支持与帮助,在此一并表示感谢。

本书得到了江苏高校优势学科建设工程资助项目的资助。

由于编者水平有限及时间仓促,书中难免有疏漏和不当之处,敬请广大读者予以批评指正。

编 者

2015 年 4 月

第二版前言

本书是根据中等专业学校“液压传动”课程教学基本要求,结合本书第一版十几年的教学体会和采用本书作为教材的兄弟院校的反馈意见进行修订的。在修订过程中,贯彻基础理论以必需、够用为度,注重应用性、综合性的原则,力求通俗易懂、学以致用,强调能力的培养和基本技能的训练。本书在修订过程中注意吸收了部分兄弟院校在教学中的教学经验和教学内容。

本次修订主要进行了以下几方面的工作:

(1) 结合国家有关最新标准,对原版中过时的名词、术语、符号、量纲和图形符号等进行了修正。

(2) 改正了原版中的插图和图形符号错误。

(3) 对原版中的内容进行了充实、调整 and 补充。

(4) 各章的小结指出学习重点,简明地归纳、总结各章主要内容,调整和补充了复习思考题。

在编写过程中,参考了诸多教材和著作,得到了兄弟院校和科研单位的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限及时间仓促,书中难免有疏漏和不当之处,敬请广大读者予以批评指正。

编 者

2006年9月

第一版前言

本书主要内容包括液压元件的原理、性能分析、设计计算、典型结构及选用,液压系统中的基本回路、典型系统及液压伺服系统等。

在编写中注意了以下要求:

1. 贯彻“少而精”原则,加强基础理论;
2. 内容力求新颖、实际,尽量反映国内外最新成就和发展趋势;
3. 每章末均有小结,指出学习重点,简明地归纳、总结本章主要内容,并附有复习题;
4. 采用国家法定计量单位;
5. 专业名词、术语和图形符号符合国家相应标准。

在编写过程中,得到兄弟院校、厂矿、科研单位的大力支持和帮助,在此一并致谢。

由于编者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,切望读者批评指正。

编 者

1990年3月

目 录

第一章 液压传动基础知识	1
第一节 液压传动工作原理及组成	1
第二节 液压传动基本参数	5
第三节 液压传动的特点	7
第二章 工作液体	10
第一节 工作液体的物理性质	10
第二节 工作液体的类型和选用	14
第三节 气穴现象和液压冲击	20
第三章 液压泵	23
第一节 概述	23
第二节 齿轮泵	27
第三节 叶片泵	33
第四节 柱塞泵	40
第四章 液压马达	62
第一节 液压马达分类及性能参数	62
第二节 高速液压马达	64
第三节 低速液压马达	70
第五章 液压缸	83
第一节 液压缸类型和工作原理	83
第二节 液压缸结构	90
第三节 液压缸设计与计算	94
第六章 液压控制阀	99
第一节 概述	99
第二节 压力控制阀	101
第三节 流量控制阀	116
第四节 方向控制阀	124
第五节 插装阀和叠加阀	135

第七章 辅助元件	141
第一节 管路和管接头	141
第二节 油箱和热交换器	145
第三节 过滤器	148
第四节 蓄能器	151
第五节 密封装置	155
第八章 液压基本回路	162
第一节 压力控制回路	162
第二节 速度控制回路	170
第三节 方向控制回路	184
第四节 多执行元件控制回路	187
第九章 液压传动系统	197
第一节 阅读液压系统图的一般步骤	197
第二节 主回路及液压系统分类	197
第三节 典型液压系统	200
第十章 液压传动系统设计和计算	210
第一节 系统工况分析	210
第二节 执行元件主要参数确定	212
第三节 液压传动系统原理图拟定	215
第四节 液压元件计算和选择	217
第五节 液压传动系统技术性能验算	219
第六节 绘制正式工作图和编制技术文件	221
第七节 液压传动系统设计计算举例	221
附录 常用液压系统及元件图形符号(摘自 GB/T 786.1—2009)	229
参考文献	235

第一章 液压传动基础知识

一部完整的机器通常由原动机、传动部分、控制部分和工作机构等组成。传动部分只是一个中间环节,其作用是把原动机(电动机、内燃机等)的输出功率传送给工作机构。传动有多种类型,如机械传动、电力传动、液体传动、气体传动以及它们的组合——复合传动,等等。

用液体作为工作介质来进行能量传递的传动方式称为液体传动。按照其工作原理不同,液体传动可分为液压传动和液力传动。液压传动利用液体的压力能来传递能量,而液力传动则利用液体的动能来传递能量。

用气体作为工作介质进行能量传递的传动方式称为气压传动。气压传动是利用压缩气体的压力能来实现能量传递的,其介质主要是空气,也包括燃气和蒸汽。

本书主要介绍以液体为工作介质的液压传动技术。

第一节 液压传动工作原理及组成

一、液压传动工作原理

图 1-1 表示一台驱动机床工作台运动的液压传动系统。这个系统可使工作台克服各种阻力做直线往复运动并调节工作台的运动速度。通过它可以进一步了解一般液压传动系统的工作原理和基本组成。

在图 1-1(a)中,液压泵 4 由电动机驱动旋转,从油箱 1 中吸油。油液经过滤器 2 进入液压泵 4,液压泵输出的压力油经压力油管 10、开停阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 左腔,推动活塞 17 和工作台 19 向右移动。这时,液压缸 18 右腔的油液经换向阀 15 和回油管 14 排回油箱。

如果将换向手柄 16 转换成图 1-1(b)所示的状态,则液压泵 4 输出的油液将经过开停阀 9、节流阀 13 和换向阀 15 进入液压缸 18 右腔,推动活塞 17 和工作台 19 向左移动,并使液压缸左腔的油液经换向阀 15 和回油管 14 排回油箱。

工作台 19 的运动速度是由节流阀 13 来调节的。当节流阀口开大时,单位时间进入液压缸 18 的油液增多,工作台的运动速度增大;当节流阀口关小时,工作台的运动速度减小。

为了克服移动工作台所受到的各种阻力,液压缸必须产生一个足够大的推力,这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。要克服的阻力越大,液压缸中的压力越高;反之压力就越低。单位时间输入液压缸油液的多少是通过节流阀 13 来调节的,液压泵 4 输出的多余油液必须经溢流阀 7 和回油管 3 排回油箱。只有在压力支管 8 中的油液压力对溢流阀钢球 6 的作用力等于或大于溢流阀中弹簧 5 的预紧力时,油液才能顶开溢流阀中的钢球流回油箱。所以,在图 1-1 所示液压传动系统中,液压泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的,它和液

压缸中的压力不一样大。

如果将换向手柄 16 转换成图 1-1(c)所示的状态,液压泵输出中的油液全部经溢流阀 7 和回油管 3 排回油箱,不输送到液压缸中去,这时工作台停止运动,而系统保持溢流阀调定的压力。

如果将开停手柄 11 转换成图 1-1(d)所示的状态,液压泵 4 输出的油液将经开停阀 9 和回油管 12 排回油箱,这时工作台停止运动,而液压传动系统卸荷。

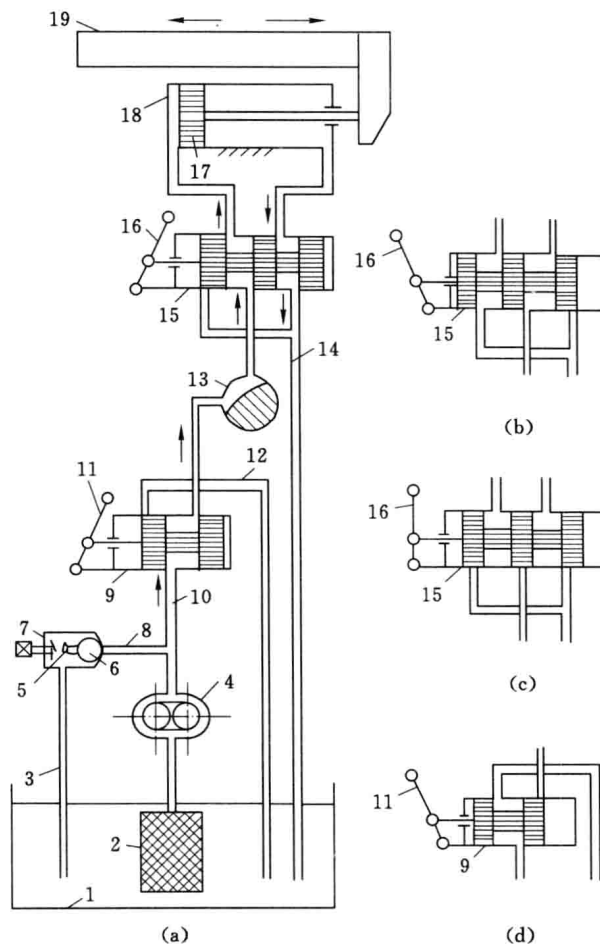


图 1-1 机床工作台液压传动系统工作原理图

- 1——油箱;2——过滤器;3,12,14——回油管;4——液压泵;5——弹簧;6——钢球;7——溢流阀;
8——压力支管;9——开停阀;10——压力油管;11——开停手柄;13——节流阀;15——换向阀;
16——换向手柄;17——活塞;18——液压缸;19——工作台

从上面的例子可以看出:

- (1) 液压传动是以液体作为工作介质来传递动力的。
- (2) 液压传动是以液体压力能来传递动力和运动的。
- (3) 液压传动中的工作介质是在受控制、受调节的状态下进行工作的。

液压传动系统中的能量转换和传递情况如图 1-2 所示,这种能量的转换能够满足生产中的需要。

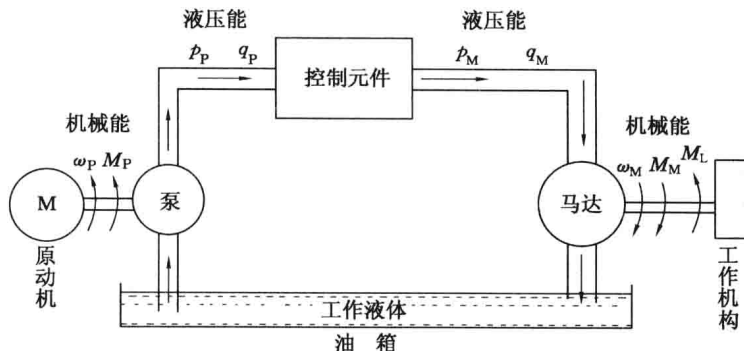


图 1-2 液压传动系统中的能量传递和转换图

二、液压传动系统的组成

从液压传动系统工作原理图 1-1 和液压传动系统中的能量转换图 1-2 中可以看出, 液压传动系统由以下几部分组成:

(1) 液压动力元件。液压动力元件指液压泵, 它是将原动机的机械能转换成为液压能的装置, 其作用是为液压传动系统提供压力油, 是液压传动系统的动力源。

(2) 液压执行元件。液压执行元件指液压马达或液压缸, 它是将液压能转换为机械能的装置, 其作用是在压力油的推动下输出转矩和转速或力和速度, 以驱动工作机构。

(3) 液压控制元件。液压控制元件包括各种阀类元件, 其作用是用来控制液压传动系统中油液流动方向、压力和流量, 以保证液压执行元件和工作机构完成指定工作。

(4) 液压辅助元件。液压辅助元件指上述三类元件之外的其他元件, 如油箱、管路、过滤器等, 它们对保证液压传动系统正常工作有着重要的作用。

(5) 液压工作介质。液压工作介质指传动液体, 既是转换、传递能量的介质, 也起着润滑运动零件和冷却传动系统的作用。

三、液压传动系统的图形表示方法

液压系统及其组成元件可用装配图、结构原理图和图形符号三种方式表示。

1. 装配图

装配图是依据工程制图的标准绘制的, 它能准确地表示系统和元件的结构形状、几何尺寸和装配关系, 但绘制复杂且不能直观地表达各元件在系统中的功能。装配图主要用于施工设计、制造、安装和维修等场合。

2. 结构原理图

结构原理图是一种简化了的装配图, 可较直观地表示出各元件的工作原理及在系统中的功能, 容易理解, 如图 1-1 所示机床工作台的工作原理。但图形仍较复杂又难于标准化, 系统中元件数量多时更是如此。由于对元件的结构、几何尺寸和装配关系表示不准确, 不能用于施工设计。

3. 图形符号

在液压系统中, 凡功能相同(尽管结构和工作原理不同)的液压元件均可用相同的符号

表示,这种符号称为液压元件的图形符号。对图 1-1 所示的液压传动系统,其系统原理图如果用国家标准 GB/T 786.1—2009 所规定的液压图形符号绘制时,如图 1-3 所示。在这里,图形符号只表示元(辅)件的功能、操作(控制)方法及外部连接口,不表示元(辅)件的具体结构和参数,也不表示连接口的实际位置和元(辅)件的安装位置。

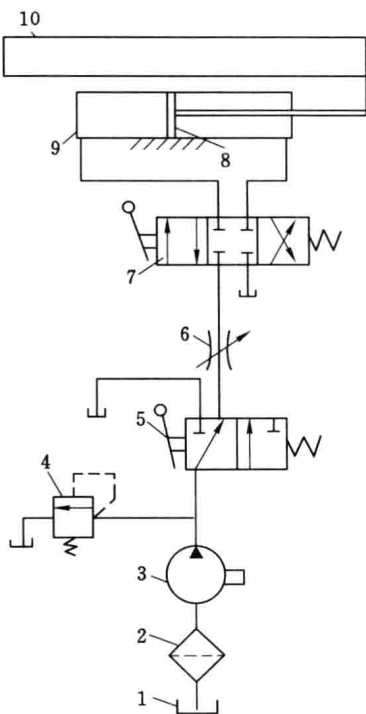


图 1-3 用图形符号绘制的机床工作台液压传动系统工作原理图

1——油箱;2——过滤器;3——液压泵;4——溢流阀;5——开停阀;6——节流阀;
7——换向阀;8——活塞;9——液压缸;10——工作台

在绘制和阅读用图形符号表示的液压系统时,应注意以下几点:

- (1) 元件的名称、型号和参数,应标注在系统图的明细表中。
- (2) 系统中元件图形符号,如元件在工作中可能处于不同的状态时,均以元件处于静止状态或零位表示。
- (3) 液压系统中的图形符号应按水平或垂直方向绘制,不得倾斜。
- (4) 凡标准中未规定的图形符号,可根据绘制标准元件的原则和图例进行派生。在需要说明某种元件在液压系统中的结构或动作原理时,允许局部采用结构原理图。
- (5) 用图形符号来绘制液压系统原理图时,符号的大小应以清晰美观为原则,绘制时可根据图纸幅面的大小酌情处理,但应保持图形本身的适当比例。

第二节 液压传动基本参数

一、液压传动的基本特点

通过对机床工作台的分析,可知工作台之所以能够往复运动,是由液压传动的特征所决定的。

1. 液压系统中力的传递

液压系统中力的传递依靠液体压力来实现,系统内液体压力的大小与外载有关。在工作台往复运动时,液压泵和液压缸之间相当于一个密封的连通器,如图 1-4 所示。由帕斯卡静压传递原理知,作用在小活塞 A_1 (A_1 为小活塞面积) 上的力 F 所产生的液压力 p 以等值同时传递到密封连通器各处,因而大活塞 A_2 底面也受到 p 的作用,产生向上的推力 pA_2 (A_2 为大活塞面积) 举起重物 W 。重物缓慢上升时,若略去摩擦阻力,则推力 pA_2 与重物 W 的重力相等,即

$$pA_2 = W \quad (1-1)$$

则有

$$p = \frac{W}{A_2} \quad (1-2)$$

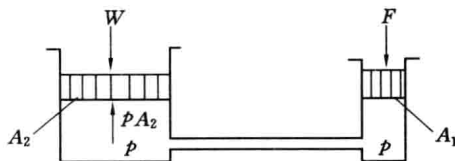


图 1-4 连通器示意图

可见,封闭容器内的压力大小与外载(重物 W 的重力)的大小有关。但系统的压力也不是可以无限制地随着外载的增大而增大的,它受到封闭容器和管路等强度的限制。为使系统工作可靠,往往在系统内设置安全阀来保护系统。

系统液体的压力来源于液压泵,能否产生足够的压力举起重物,取决于作用力 F 的大小。与式(1-2)相比较,有

$$\frac{W}{A_2} = \frac{F}{A_1}$$

即

$$\frac{W}{F} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知,当 $A_2 > A_1$ 时,有 $W > F$ 。可见液压传动还具有力(或转矩)的放大作用。液压千斤顶和油压机就是利用这个原理进行工作的。

2. 液压系统中运动速度的传递

液压系统中运动速度的传递按容积变化相等的规律进行。如果不考虑液体的可压缩

性、泄漏和缸体、管路的变形,活塞 A_1 向下运动排出的液体体积应该等于使活塞 A_2 向上运动进入工作缸的液体体积(图 1-4),即容积变化相等,故有

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

式中 h_1, h_2 ——活塞的行程。

将上式两端同除以时间 t ,可得关系

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad (1-4)$$

式中 v_1, v_2 ——两活塞的运动速度。

由于 $A_2 > A_1$, 则 $v_1 > v_2$, 可见这是一个速度变换机构,其速度的变换和传递是依靠液体容积变化相等的原则进行的。

由式(1-4)得

$$q_2 = A_2 v_2 = A_1 v_1 = q_1 \quad (1-5)$$

式中 q_1, q_2 ——小液压缸输出的流量和大液压缸输入的流量。

式(1-4)表明,大液压缸活塞的运动速度只取决于输入流量的大小,而与负载无关。如能改变流量,就可以使液压缸活塞的运动速度发生变化。液压传动中的调速就是基于这种关系实现的。

由于以上两个基本特点,常常把液压传动叫作“静压传动”或“容积式液压传动”。

二、液压传动的的基本参数

液压传动是以液体的压力能来传递动力的,液压功率是压力和流量之积,压力和流量是液压传动中最基本的两个参数。

液压传动系统的压力指液压泵出口的液体压力,其大小取决于外载,但一般都由溢流阀调定。压力通常用小写字母 p 表示,其常用单位是 MPa。

在液压传动中,通常将压力分为五级:低压($p \leq 2.5$ MPa),中压(2.5 MPa $< p \leq 8$ MPa),中高压(8 MPa $< p \leq 16$ MPa),高压(16 MPa $< p \leq 32$ MPa)和超高压(> 32 MPa)。

压力液体流经管路或液压元件时要受到阻力,引起压力损失(即压降),液体流经等径直管的压力损失称为沿程损失;流经管路接头、弯管和阀门等局部障碍时,由于产生撞击和旋涡等现象而造成的压力损失,称为局部损失。由理论分析和实验可知,沿程压力损失和局部压力损失都和液体流速的平方成正比。因此,为了有足够的压力来驱动执行元件工作,液压泵的出口压力应高于执行元件所需的压力。而且为了减少压力损失,应尽量缩短管道,减少管路的截面变化和弯曲,管道内壁力求光滑。此外,应将液体的流速加以限制,通常推荐的管道流速为:吸油管道 $v \leq 1 \sim 2$ m/s;压力油管道 $v \leq 3 \sim 6$ m/s(压力高、管路短、黏度小取大值);回油管道 $v \leq 1.5 \sim 2$ m/s。

流量指单位时间内流过的液体体积,常以字母 q 表示,单位是 m^3/s ,工程上常用 L/min 作为流量的单位,它们之间的换算关系是

$$1 \text{ m}^3/\text{s} = 10^3 \text{ L}/\text{s} = 6 \times 10^4 \text{ L}/\text{min}$$

第三节 液压传动的特点

20 世纪 40 年代,液压传动技术开始应用于矿山机械。1945 年,德国制造了第一台液压传动的截煤机,实现了牵引速度的无级调速和过载保护。接着,美国、英国等国家在采煤机上应用了液压传动。1954 年,英国研制成功了液压支架,出现了综合机械化采煤技术,从而扩大了液压传动在矿山机械中的应用。

由于液压传动容易实现往复运动,并且可以保持恒定的输出力和转矩,因此采煤机的滚筒调高,液压支架的升降、推移、防倒、防滑,单体液压支柱的升降都唯一地采用了液压传动技术。

一、液压传动的优点

与机械传动比较,液压传动具有以下主要优点:

(1) 由于一般采用油液作为传动介质,因此液压元件具有良好的润滑条件;工作液体可以用管路输送到任何位置,允许液压执行元件和液压泵保持一定距离;液压传动能方便地将原动机的旋转运动变为直线运动。这些特点十分适合各种工程机械、采矿设备的需要,其典型应用实例就是煤矿井下使用的单体液压支柱和液压支架。

(2) 可以在运行过程中实现大范围的无级调速,其传动比可高达 $1:1\,000$,且调速性能不受功率大小的限制。

(3) 易于实现载荷控制、速度控制和方向控制,可以进行集中控制、遥控和实现自动控制。

(4) 液压传动可以实现无间隙传动,因此传动平稳,操作省力,反应快,并能高速启动和频繁换向。

(5) 液压元件都是标准化、系列化和通用化产品,便于设计、制造和推广应用。

与电力传动相比,液压传动的主要优点有以下几点:

(1) 质量小,体积小。这是由于电动机受到磁饱和的限制,其单位面积上的切向力与液压机械所能承受的液压力相差数十倍。统计表明,在输出功率相同的情况下,液压机械单位功率的质量,目前仅为电动机的十分之一左右。

(2) 运动惯性小,响应速度快。液压马达的力矩—惯量比(即驱动力矩与转动惯量之比)较电动机大得多,故其加速性能好。例如,加速一台中等功率的电动机通常需要一秒至几秒钟,而加速同样功率的液压马达只需要 0.1 s 左右。这种良好的动态特性,对液压控制系统更有其重要意义。

(3) 低速液压马达的低速稳定性要比电动机好得多。

(4) 液压传动的应用,可以简化机器设备的电气系统。这对于具有爆炸危险的煤矿井下工作大有好处。

二、液压传动的缺点

(1) 在传动过程中,由于能量需要经过两次转换,存在压力损失、容积损失和机械摩擦损失,因此总效率通常仅为 $0.75\sim 0.8$ 。

(2) 传动系统的工作性能和效率受温度的影响较大,一般的液压传动,在高温或低温环境下工作,存在一定困难。

(3) 液体具有一定的可压缩性,配合表面也不可避免地有泄漏存在,因此液压传动无法保证严格的传动比。

(4) 工作液体对污染很敏感,污染后的工作液体对液压元件的危害很大,因此液压系统的故障比较难查找,对操作、维修人员的技术水平有较高要求。

(5) 液压元件的制造精度、表面粗糙度以及材料的材质和热处理要求都比较高,因而其成本较高。

总的说来,液压传动的优点是主要的。它的某些缺点随着生产技术的发展,正在逐步得到克服。如果进一步吸取其他传动方式的优点,采用电—液、气—液等联合传动,更能充分发挥其特点。因此,液压传动在矿山机械及现代化生产中有着广阔的发展前景。

本章小结

本章叙述液压传动的基本原理、特性、组成、图形符号以及优缺点等内容。通过本章学习,要求掌握:在液压传动中,液体是在什么条件下,利用流体力学的哪些规律来传递力和运动的;液压传动的基本参数以及它们和机械运动参数间的关系;与压力、流量有关的两个重要概念;液压系统的基本组成及每个组成部分的作用;与其他传动相比,液压传动的主要优缺点。

(1) 传动是能量或动力由原动机向工作装置的传递,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。

(2) 液压传动中采用液体作为传动介质来传递力和运动的。在传递力时,应用了流体力学中的帕斯卡原理;而在传递运动时,则应用了密封容积中主动件(泵)排出的液体体积与从动件(液压缸)接受的液体体积相等的原理,即质量守恒定律。

(3) 液压传动中压力和流量是两个最重要的参数。其中,压力决定于负载;流量决定于液压缸所需的运动速度。压力与机械传动中的力相当,流量与机械传动中的速度相当。

(4) 液压传动中必须含有动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件以及工作液体等五部分。其中液压泵是将原动机所提供的机械能转变为工作液体的液压能的换能装置;执行元件(液压马达和液压缸)是将液压泵所提供的工作液体的液压能转变为机械能的换能装置。

(5) 液压传动的优缺点是相对于其他传动进行比较而得出的。

(6) 液压系统的图示方法,按其特点和应用条件不同可以有三种形式。熟悉图形符号十分重要,在绘制和阅读液压系统的图形符号图时,应注意遵守原则。

复习思考题

1. 何谓液压传动?它是怎样实现能量传递的?
2. 液压传动的基本组成部分有哪些?各组成部分的作用是什么?
3. 液压传动的工作特点如何?基本参数有哪些?

4. 液压传动与其他传动相比有哪些优缺点?
5. 举例说明液压传动在生产实际中的应用。
6. 如图 1-5 所示的液压千斤顶,小柱塞直径 $d=10\text{ mm}$,行程 $S=25\text{ mm}$,大柱塞直径 $D=50\text{ mm}$,重物产生的力 $F_2=50\text{ kN}$,手压杠杆比 $L:l=500:25$ 。

- (1) 此时密封容积中的液体压力是多少?
- (2) 杠杆端施加力 F_1 为多少时,才能举起重物?
- (3) 杠杆上下动作一次,重物的上升高度是多少?

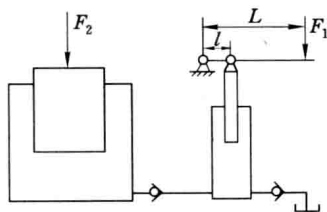


图 1-5