

普通高等院校机械工程学科“卓越工程师教育培养计划”系列规划教材

液压传动

◎ 谢苗 毛君 主编



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等院校机械工程学科“卓越工程师教育培养计划”系列规划教材

液压传动

主 编 谢 苗 毛 君

副主编 朴明波 魏晓华

图书在版编目 (CIP) 数据

液压传动 / 谢苗, 毛君主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 2 (2016. 3 重印)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 1830 - 6

I. ①液… II. ①谢… ②毛… III. ①液压传动 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 021851 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / [http://www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 天津紫阳印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 22

字 数 / 517 千字

版 次 / 2016 年 2 月第 1 版 2016 年 3 月第 2 次印刷

定 价 / 47.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

前言

Qianyan

本书是根据教育部教高〔2011〕5号《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》文件和“卓越工程师教育培养计划”的精神要求，为全面推进高等教育理工科院校“质量工程”的实施，将教学改革的成果和教学实践的积累体现到教材建设和教学资源统合的实践工作中去，以满足不断深化的教学改革的需要，更好地为学校教学改革、人才培养与课程建设服务，特根据本科教育人才培养目标、培养方案和教学大纲的要求而编写的。

由于液压技术本身所具有的独特技术优势，使得它在航空与海洋技术、现代农业、制造业、交通运输与物流工程、采矿与冶金工程、油气探测与加工、建筑与公共工程、科学实验、军事装备、国防工程等领域获得了广泛应用，成为工、农、国防和科学技术现代化进程中不可缺少的一项基础技术，也是当代工程师所需要具备的重要基础技术知识之一。在现代科技技术日益全球化的环境下，培养高水平的液压技术人才，发展具有我国自主知识产权的液压技术，使其早日满足我国向制造业强国发展的迫切需求和适应环境保护的挑战，是对学科和行业都十分紧迫和现实的历史使命。

为了使读者能够较快地了解和掌握液压传动技术，本书贯彻少而精、理论联系实际的原则，选择液压流体力学、液压元件、液压传动系统和液压控制系统等方面的基本和核心内容进行有机整合。

在本书编者具有长期从事液压方面的教学和科研经历，按照概念准确、分析透彻、结构典型、理论联系实际的编写定位和要求，对本书进行了选定和编写。

在汲取同类教程优点的基础上，本书具有以下特点：

(1) 适用于创新型高校的教学。依据教育部教学指导委员会制定的最新专业规范和机械类课程的教学基本要求，本书结合机械类教学培养方案要求，对教材内容进行了编排和优化，以满足应用创新型高校机械专业学生的教学要求。

(2) 注重创新，理论联系实际。教材体现了液压传动领域的新知识、新技术和新应用，与工程实践联系密切。

(3) 结构新颖。教材中每章前面安排有“本章导读”“知识框架图”“本章学习目标”“本章教学要点”及“本章学习方法”，且每章以案例引入，提出引导性工程问题，使读者有针对性地进行知识点学习；每章结尾处设有“课堂讨论”“典型案例分析”“本章小结”及“思考与习题”，帮助学生归纳和总结知识，以及巩固知识要点。

本书适用于普通理工科院校机械类各专业，也适用于各类成人高校、自学考试等有关机械类学生，也可供从事流体传动与控制工程的技术人员参考。

本书编写过程中，编者参考了国内相关教材及大量文献，在此谨向有关作者表示由衷的

感谢。

参加本书编写工作的有：魏晓华（辽宁工程技术大学，第1、3、10章），谢苗（辽宁工程技术大学，第2章），朴明波（辽宁工程技术大学，第4、8、9章），卢进南（辽宁工程技术大学，第5、7章），毛君（辽宁工程技术大学）、李强（宿州学院）、潘德文（沈阳职业技术学院）合编第6章。全书由辽宁工程技术大学机械工程学院谢苗和毛君任主编并统稿，由朴明波、魏晓华任副主编。

辽宁工程技术大学机械工程专业博士研究生刘治翔、谢春雪，硕士研究生董先瑞、白雅静、刘希福、闫江龙、刘川杨、赵春晓、李晨光、李翠、刘一柱、王洪涛等在本书编写过程中做了大量的工作，在此表示感谢。

由于编写水平和实践经验有限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请广大读者批评改正。联系地址：辽宁工程技术大学机械工程学院（邮编：123000）。

编 者

| | |
|---------------------------|-----|
| 第1章 绪论 | 001 |
| 1.1 液压传动系统的工作原理及组成 | 003 |
| 1.2 液压传动的特点 | 006 |
| 1.3 液压传动的应用 | 007 |
| 1.4 液压传动技术的发展 | 009 |
| 思考与习题 | 012 |
| 第2章 液压流体力学基础 | 014 |
| 2.1 液压传动工作介质 | 017 |
| 2.2 流体静力学 | 023 |
| 2.3 流体动力学 | 028 |
| 2.4 管道中的流体流动及压力损失 | 036 |
| 2.5 气穴现象 | 041 |
| 2.6 液压冲击 | 043 |
| 思考与习题 | 048 |
| 第3章 液压动力元件 | 052 |
| 3.1 概 述 | 054 |
| 3.2 齿轮泵 | 056 |
| 3.3 叶片泵 | 060 |
| 3.4 柱塞泵 | 063 |
| 3.5 螺杆泵 | 068 |
| 3.6 液压泵的选用 | 069 |
| 思考与习题 | 073 |

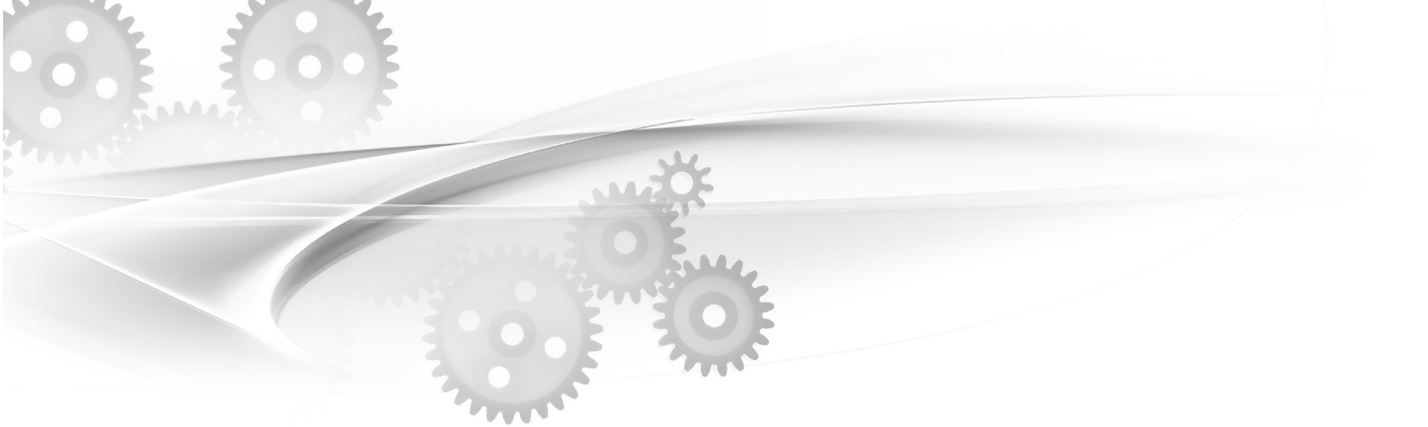


目 录

Contents

| | |
|-------------------|-----|
| 第4章 液压执行装置 | 074 |
| 4.1 液压马达 | 077 |
| 4.2 液压缸 | 087 |
| 思考与习题 | 099 |
| 第5章 液压控制阀 | 100 |
| 5.1 液压控制阀概述 | 102 |
| 5.2 液压控制阀上的共性问题 | 104 |
| 5.3 方向控制阀 | 107 |
| 5.4 压力控制阀 | 119 |
| 5.5 流量控制阀 | 128 |
| 5.6 电液伺服阀 | 136 |
| 5.7 电液比例阀 | 138 |
| 5.8 插装阀和叠加阀 | 142 |
| 5.9 电液数字阀 | 147 |
| 思考与习题 | 151 |
| 第6章 液压辅助装置 | 154 |
| 6.1 油箱 | 156 |
| 6.2 蓄能器 | 158 |
| 6.3 过滤器 | 163 |
| 6.4 热交换器 | 168 |
| 6.5 管件 | 170 |
| 6.6 密封件 | 174 |
| 思考与习题 | 186 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 第7章 液压基本回路 | 187 |
| 7.1 压力控制回路 | 190 |
| 7.2 调速回路 | 197 |
| 7.3 速度换接回路 | 214 |
| 7.4 方向控制回路 | 217 |
| 7.5 多缸动作回路 | 221 |
| 思考与习题 | 235 |
| 第8章 典型液压系统 | 238 |
| 8.1 组合机床动力滑台液压系统 | 241 |
| 8.2 万能外圆磨床液压系统 | 244 |
| 8.3 压力机液压系统 | 248 |
| 8.4 汽车起重机液压系统 | 252 |
| 8.5 注塑机液压系统 | 256 |
| 思考与习题 | 262 |
| 第9章 液压系统的设计与计算 | 265 |
| 9.1 明确系统设计的要求 | 267 |
| 9.2 工况分析 | 268 |
| 9.3 确定液压系统的主要参数 | 269 |
| 9.4 液压系统原理图的拟定 | 272 |
| 9.5 液压元件的选择与计算 | 274 |
| 9.6 液压系统性能验算 | 278 |
| 9.7 绘图及编制技术文件 | 281 |
| 9.8 液压系统设计计算实例 | 281 |



目 录

Contents

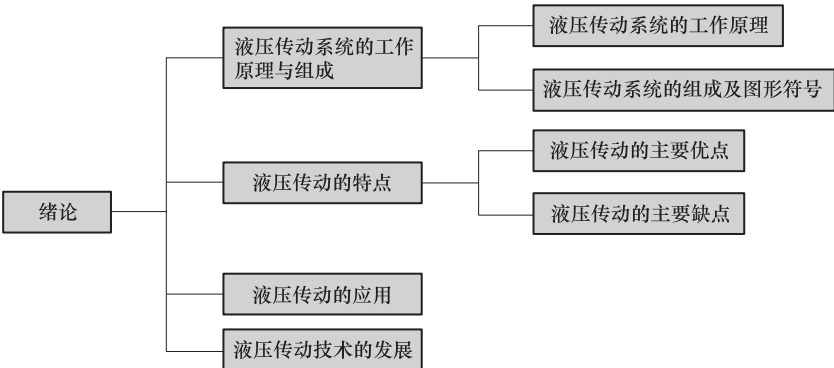
| | |
|------------------------------------|-----|
| 思考与习题 | 290 |
| 第 10 章 液压元件与系统的动态特性分析 | 291 |
| 10.1 液压元件与系统的建模与仿真 | 294 |
| 10.2 液压元件与系统 CAD 技术 | 296 |
| 10.3 液压元件的动态特性分析 | 306 |
| 10.4 液压系统的动态特性分析 | 310 |
| 思考与习题 | 319 |
| 思考与习题参考答案 | 320 |
| 参考文献 | 343 |



第1章 绪论

本章导读

液压传动是用液体作为工作介质来传递能量和进行控制的传动方式，它是根据17世纪帕斯卡提出的液体静压力传动原理而发展起来的一门新兴技术。如今，液压传动技术水平的高低已成为一个国家工业发展水平的重要标志之一。随着现代科技的飞速发展，液压技术的应用进入一个全新的发展阶段，并朝着集成化、智能化、模块化和网络化等方向发展。本章主要介绍液压传动的工作原理、组成、特点及其发展与应用，并引入液压系统的图形符号，为后面液压传动的学习打下基础。



本章学习目标

- (1) 掌握液压传动系统的工作原理及组成。
- (2) 理解液压传动的特点。
- (3) 了解液压传动的应用，激发学生学习该课程的兴趣。
- (4) 了解液压传动技术的进展现状及学科发展的前沿技术。

本章教学要点

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 液压传动系统的工作原理及组成 | 掌握液压传动系统的工作原理，了解液压传动系统的基本组成 | 通过磨床液压系统的工作原理图，了解液压传动系统的工作原理和组成 |
| 液压传动的特点 | 理解液压传动的特点 | 通过对液压传动和电力传动的对比分析，了解液压传动的特点 |



续表

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|-----------|-------------------------|--------------------------------------|
| 液压传动的应用 | 了解液压传动的应用 | 通过对机械设备自动化发展的介绍,了解液压传动的应用 |
| 液压传动技术的发展 | 了解液压传动技术的发展现状及学科发展的前沿技术 | 通过对各领域液压机械发展的介绍,了解液压传动发展现状及学科发展的前沿技术 |

本章学习方法

通过查阅并搜集信息资料、实验室实验和现场观察等方式,培养学生对“液压传动”课程的兴趣,激发学生自主学习的潜能。通过对液压系统主要组成部分的液压元件与实物对照及对液压机械工作过程的简单分析,能够深入了解液压传动系统的工作原理及其各组成部分、液压传动的特点。在此基础上,努力发挥学生的主观能动性,积极思考液压传动在各个领域的应用及发展状况,了解液压传动在机械行业的主要应用方式以及对于国家工业化发展的重要性。

导入案例

液压千斤顶

液压千斤顶是常用的液压设备,它可以支撑起很重的物体,其实物如图 1-1 (a) 所示。

液压千斤顶是应用较早的液压系统,一般由杠杆手柄、小缸体、小活塞、大缸体、大活塞、吸油阀、压油阀、油箱、截止阀、压油管以及吸油管和回油管等组成。

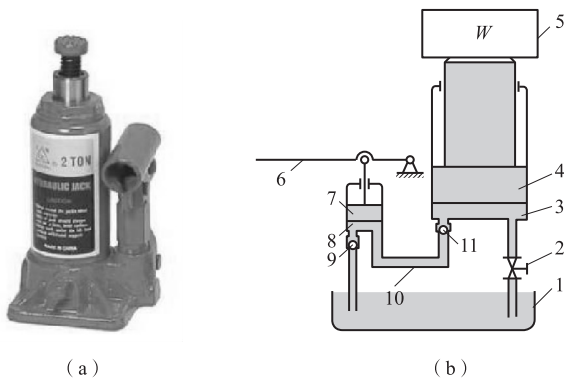


图 1-1 液压千斤顶实物和工作原理

(a) 实物; (b) 工作原理

1—油箱; 2—截止阀; 3—大缸体; 4—大活塞; 5—重物; 6—杠杆手柄;
7—小活塞; 8—小缸体; 9—吸油阀; 10—压油管; 11—压油阀

图 1-1 (b) 所示为液压千斤顶的工作原理。大缸体 3 和大活塞 4 组成举升液压缸。杠杆手柄 6、小缸体 8、小活塞 7、吸油阀 9 和压油阀 11 组成手动液压泵。提起杠杆手柄使小



活塞向上移动,小活塞下端油腔容积增大,形成局部真空,这时吸油阀9打开,通过吸油管从油箱1中吸油;用力压下杠杆手柄,小活塞下移,小活塞下腔压力升高,吸油阀9关闭,压油阀11打开,下腔的油液经压油管10输入举升大缸体3的下腔,迫使大活塞4向上移动,顶起重物。再次提起杠杆手柄吸油时,压油阀11自动关闭,使油液不能倒流,从而保证了重物5不会自行下落。不断地往复扳动杠杆手柄,就能不断地把油液压入举升缸下腔,使重物逐渐升起。如果打开截止阀2,举升缸下腔的油液通过回油管、截止阀流回油箱,则重物向下移动。

由上述分析可知,液压千斤顶的传动过程是能量转换的过程,主要是靠液体的压力和流量来传递能量,即它将原动机的机械能转化为一定压力和流量的液压能,然后再将液压能转化为所需要的机械能,从而满足实际生产活动的要求。

问题:

(1) 试分析液压千斤顶工作过程中各阀的启闭状态和油液流动路径。

(2) 如果杠杆手柄外端处向下的速度为 v_1 , 请分析重物向上移动的速度 v_2 是多少。

(3) 如果液压千斤顶所顶起物体的质量为 W , 大、小缸体的面积分别为 A_2 和 A_1 , 试分析它们的压力 p_2 和 p_1 分别是多少, 及需要施加在杠杆手柄端部的力 F 是多少。

1.1 液压传动系统的工作原理及组成

1.1.1 液压传动系统的工作原理

图1-2(a)所示为平面磨床工作台往复运动的液压系统的工作原理。平面磨床工作台往复运动的液压系统是由油箱1、滤油器2、液压泵4、溢流阀8、开停阀11、节流阀13、换向阀15、液压缸17、活塞杆19、工作台21以及连接这些元件的油管组成的。

如图1-2(a)所示,磨床的液压系统工作时,液压泵4是由电动机驱动的,其作用是向系统提供一定压力和流量的液压油。该泵通过一对相互啮合的齿轮来完成吸油和排油过程,是一种齿轮泵。虽然液压泵的结构和千斤顶的手动泵不同,且动力是由电动机提供的,但它们的功能相同,都是向系统提供具有一定压力和流量的油液。由液压泵输入的压力油通过开停阀11、节流阀13、换向阀15进入液压缸17的左腔,推动活塞18和工作台21向右移动,液压缸17右腔的油液经换向阀15排回油箱。当手动换向阀15换向后,液压油进入液压缸17的右腔,推动活塞18和工作台21向左移动。

如果换向阀15转换为图1-2(b)所示的状态,则压力油经开停阀11、节流阀13和换向阀15进入液压缸17的右腔,推动活塞18和工作台21向左移动,并使液压缸左腔的油经换向阀15和回油管24排回油箱。

当节流阀开大时,进入液压缸17的油液增多,工作台的移动速度增大;当节流阀关小时,工作台的移动速度减小。如果将开停阀11转换成如图1-2(c)所示的状态,液压泵输出的油液经开停阀11流回油箱,这时工作台停止运动,液压系统处于卸荷状态。泵的供油不能进入系统,工作台停止运动,并且泵的供油直接和回油相连,泵没有负载,油液压力

为零（或接近于零）。这一状态称为卸荷。

在液压系统中工作的零部件都有一定的承载范围，当系统的工作压力超过这个承载范围时，就可能出现安全事故，如管道爆裂、电动机过热乃至烧毁等。液压系统一般采用设置安全阀的方法来限制系统的最大工作压力，以保护人身及设备的安全，例如溢流阀。滤油器用来限制油液中的杂质进入泵和液压系统，保证系统中油液的清洁度。

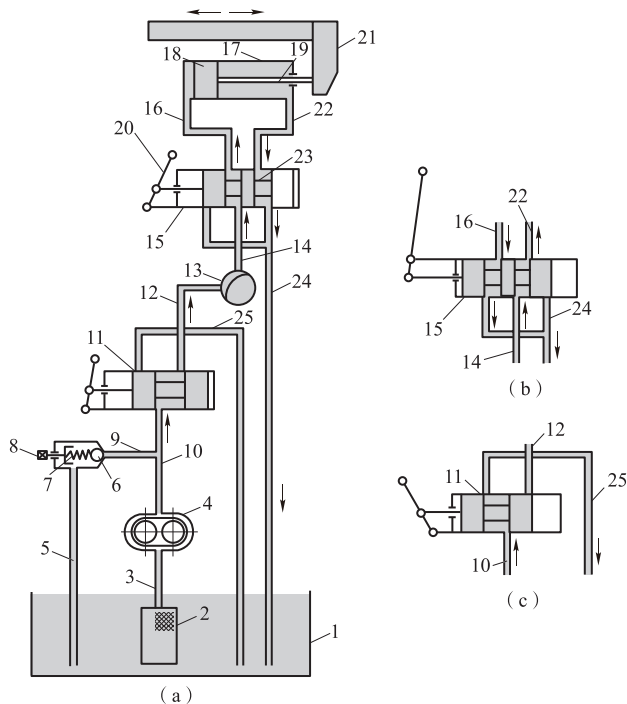


图 1-2 平面磨床工作台液压系统的工作原理

1—油箱；2—滤油器；3, 5, 9, 10, 12, 14, 16, 22, 24, 25—管道；4—液压泵；6—钢珠；
7—弹簧；8—溢流阀；11—开停阀；13—节流阀；15—换向阀；17—液压缸；18—活塞；
19—活塞杆；20—杠杆；21—工作台；23—阀芯

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) 液压传动是以液体在密闭容积内所形成的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 1-3 所示，这种能量的转换能够满足生产中的需要。

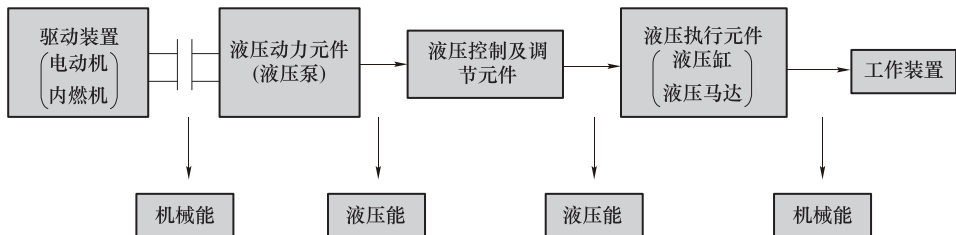


图 1-3 液压传动系统中的能量转换和传递情况



1.1.2 液压传动系统的组成及图形符号

1. 系统组成

由磨床工作台液压系统的工作原理可知，液压传动是以液体为工作介质的，无论液压系统有多复杂，通常由动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件和工作介质等几部分组成，如表 1-1 所示。

表 1-1 液压传动系统的组成

| 组成部分 | 功用 | 举例 |
|------|-------------------------------|----------------|
| 动力元件 | 将机械能转换为液体的压力能 | 液压泵 |
| 执行元件 | 将液体的压力能转化为机械能 | 液压缸、液压马达 |
| 控制元件 | 控制流体的压力、流量和方向，保证执行元件完成预期的动作要求 | 方向阀、压力阀、流量阀等 |
| 辅助元件 | 起连接、储油、过滤和测量等作用 | 油管、油箱、滤油器、压力表等 |
| 工作介质 | 传递介质、润滑元件 | 液压油 |

2. 系统的图形符号

图 1-2 用半结构式图形绘制原理图，直观性强，容易理解，但绘制起来比较麻烦，特别是在系统中元件数量比较多时更是如此。因此，在工程实际中，除某些特殊情况外，一般用简单的图形符号来绘制液压与气压传动系统原理图。在用图形符号来绘制系统原理图时，图中的符号只表示元（辅）件的功能、操作（控制）方法及外部接口，不表示元（辅）件的具体结构和参数，也不表示接口的实际位置和元（辅）件的安装位置。在用图形符号绘图时，除非特别说明，图中所示状态均表示元（辅）件的静止位置或零位置，并且除特别注明的符号或有方向性的元（辅）件符号外，它们在图中可根据具体情况水平或垂直绘制。使用这些图形符号后，可使系统图简单明了，便于绘制。当有些元件无法用图形符号表达或在国家标准中未列入时，可根据标准中规定的符号绘制规则和所给出的符号进行派生。当无法用标准直接引用或派生时，或有必要特别说明系统中某一元（辅）件的结构和工作原理时，可采用局部结构简图或采用它们的结构或半结构示意图来表示。在用图形符号绘图时，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。

下面以磨床工作台液压系统说明以上标准，图 1-2 所示工作原理形象地表示了系统中各元件的结构原理，比较直观，易于为初学者接受。但其缺点是绘制不够方便，不简明扼要，特别是当系统比较复杂时更为突出。为此，国内外均采用元件的图形符号来绘制液压系统原理图。图形符号不再表示元件的具体结构，是一种比较抽象的、表示元件职能的符号，用它来表示系统中各元件的作用及整个系统的工作原理十分简明扼要。我国制定的液压图形符号标准为 GB/T 786.1—2001。图 1-4 所示为按该标准绘制的与图 1-2 一致的平面磨床

液压系统原理图。我国制定的液压系统图形符号标准（GB 786—1976），对于这些图形符号有以下几条基本规定。

（1）符号只表示元件的职能及连接系统的通路，不表示元件的具体结构和参数，也不表示元件在机器中的实际安装位置。

（2）元件符号内的油液流动方向用箭头表示，线段两端都有箭头的，表示流动方向可逆。

（3）符号均以元件的静止位置或中间零位置表示，当系统的动作另有说明时，可作例外。

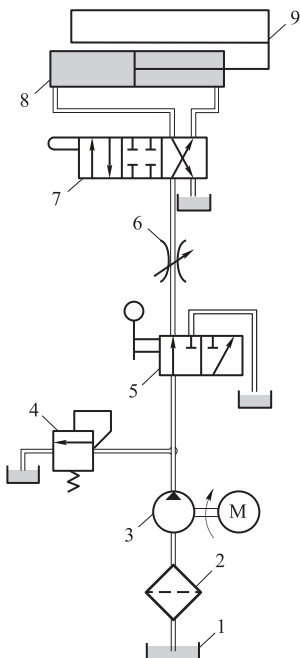


图 1-4 磨床工作台液压系统图形符号示意图

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

1.2 液压传动的特点

1. 液压传动的优点

（1）质量小，体积小，反应快。在输出相同功率的条件下，液压传动元件的体积和质量相对较小，因此惯性力小，动作灵敏。液压马达的体积和质量只有同等功率电动机的12%左右，在中、大功率以及实现直线往复运动时，这一优点尤为突出。

（2）工作装置较为平稳。由于质量和惯性小、反应快，故易于实现快速启动、制动和频繁换向。液压装置的换向频率，在实现往复回转运动时可达500次/min，实现往复直线运动时可达1 000次/min。



(3) 液压装置能在大范围内实现无级调速（调速范围可达 2 000），它还可以在运行的过程中进行调速。

(4) 液压传动易于对工作介质的压力、流量或流动方向进行调节或控制。当与电气控制、电子控制结合起来使用时，整个传动装置能实现较复杂的顺序动作，也能方便地实现远程控制 and 自动化。

(5) 工作装置易于实现过载保护。

(6) 由于液压元件已实现了标准化、系列化和通用化，液压系统的设计、制造和使用都比较方便。

(7) 用液压传动来实现直线运动远比用机械传动简单。

(8) 液压传动可输出较大的推力和转矩，传动平稳；液压系统能够自润滑，因此液压元件使用寿命长。

2. 液压传动的缺点

(1) 液压传动系统中存在泄漏及油液的压缩性，影响了传动的准确性，不易实现定比传动。

(2) 由于油液黏度随温度变化，容易引起工作性能的变化，因此液压传动不宜在温度变化范围较大的场合工作。

(3) 由于受液体流动阻力和泄漏的影响，液压传动的效率不够高。

(4) 液压传动系统对油液的污染比较敏感，必须具有良好的防护和过滤措施。

总的说来，由于液压传动具有诸多优点，液压元件已标准化、系列化和通用化，便于系统的设计、制造和推广应用。因此，液压传动在现代化生产中有着广阔的发展和应用前景。

1.3 液压传动的应用

相对于机械传动来说，液压传动是一门新技术，它应用于各种设备，并通过与微电子和计算机技术密切结合，使其得到广泛的发展。

液压传动技术主要是由武器装备对高质量控制装置的需要而发展起来的。随着控制理论的出现和控制系统的发展，液压技术与电子技术的结合日臻完善，电液控制系统具有高响应、高精度、高功率/质量比和大功率等特点，从而广泛运用于武器装备及其他技术领域，如图 1-5、图 1-6 所示。随着液压传动技术逐渐转为民用，制定和完善了各种标准，使得各类元件的标准化、规格化、系列化在机械制造、工程机械、农业机械、汽车制造等行业中推广开来，如图 1-7、图 1-8 所示。20 世纪 60 年代后，原子能技术、空间技术、计算机技术、微电子技术等的发展推动液压传动技术的发展，使它成为包括传动、控制、检测在内的一门完整的自动化技术，并在国民经济的各方面都得到广泛应用。

液压传动在某些领域内甚至已占有压倒性的优势，例如，国外生产的 95% 的工程机械、90% 的数控加工件、95% 以上的自动线都采用了液压传动技术，如图 1-9、图 1-10 所示。因此，采用液压传动技术的程度已成为衡量一个国家工业化水平的重要标志之一。



图 1-5 液压传动在飞机起落架上的应用



图 1-6 液压传动在航母上的应用



图 1-7 液压传动在起重机上的应用

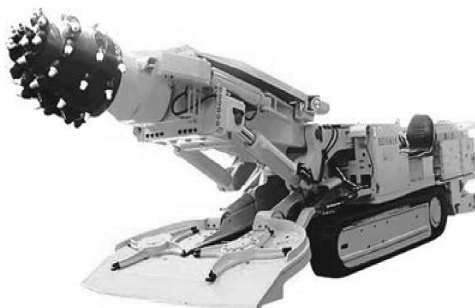


图 1-8 液压传动在掘进机上的应用

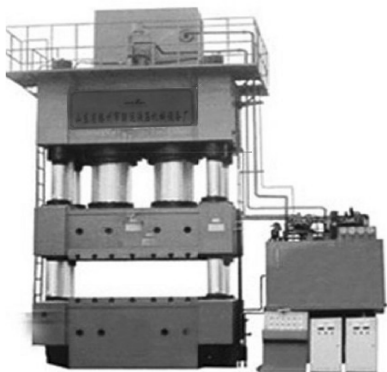


图 1-9 液压传动在锻压机械中的应用



图 1-10 液压传动在数控机床中的应用

当前，液压传动技术在实现大功率、高效率、低噪声、高压、高速、经久耐用、高度集成化、微型化、智能化等方面都取得了重大进展，在完善比例控制、伺服控制、数字控制等技术方面也有许多新成就。此外，在液压元件和液压系统的计算机辅助设计、计算机仿真和优化以及计算机控制等开发性研究方面，也取得了显著成绩。

机械工业各部门运用液压传动的出发点不尽相同：有的是利用它在操纵控制下的优点，如机床上采用液压传动是取其在工作过程中能实现无级变速、易于实现频繁的换向、易于实现自动化的特点；有的是利用它在传递动力上的优势，如工程机械、压力机械和航空工业采