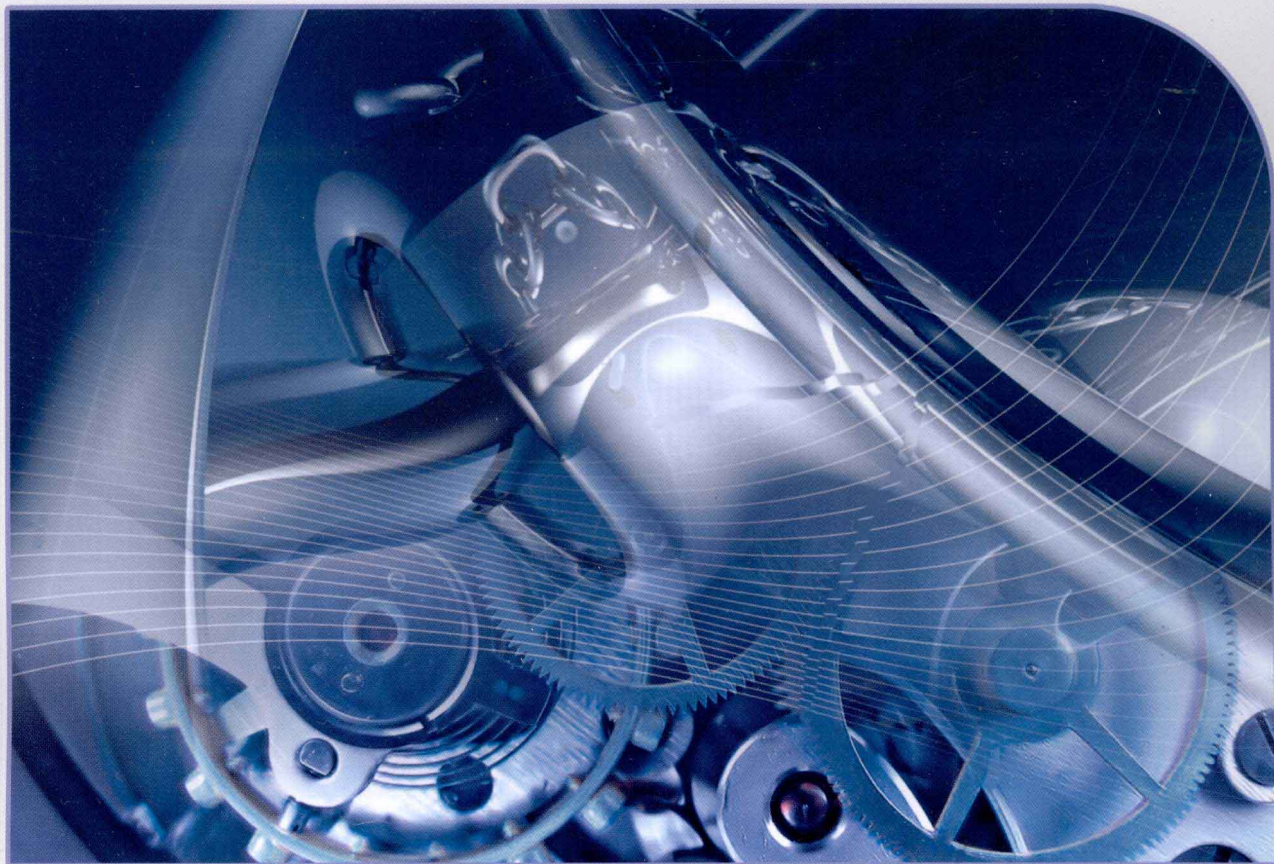




高等院校“十二五”精品课程建设成果



# 液压与气动技术

YEYA YU QIDONG JISHU

主 编 马韧宾 王鑫秀

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

# 液压与气动技术

|     |       |       |       |     |  |
|-----|-------|-------|-------|-----|--|
| 主 编 | 马 韧 宾 | 王 鑫 秀 |       |     |  |
| 副主编 | 张 艳 芳 | 牛 贵 玲 | 秦 英   | 石 岩 |  |
| 参 编 | 马 素 娟 | 田 荣   | 强 向 红 |     |  |
|     | 陈 会 莲 | 马 佳   | 闫 秀 云 |     |  |

## 内 容 简 介

本书是为了适应教材改革和高等教育的不断发展,满足机电类、机械类专业的人才培养需要,在分享普通高等院校教学改革成果和总结多年教学经验的基础上,参阅了大量相关文献编写的。

本书在注重理论知识的同时,力求加强针对性和实用性,突出理论联系实际,具有言简意赅、图文并茂、重点突出、实例紧贴实际、重视先进技术等特点。每章末均附有一定数量的习题,在书末的附录中附有常用液压图形符号和液压与气压传动专业常用英语词汇,以期拓宽视野,帮助学生阅读外文资料。

本书可作为高等院校机械制造、机电一体化、模具、数控、自动化等专业的教材,也可作为相关技术人员和相关技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/马韧宾,王鑫秀主编. —北京:北京理工大学出版社,2012.6  
ISBN 978-7-5640-6092-3

I. ①液… II. ①马… ②王… III. ①液压传动-高等学校-教材 ②气压传动-高等学校-教材 IV. ①TH137 ②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 128395 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京正合鼎业印刷技术有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 392 千字

版 次 / 2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

印 数 / 1~1 500 册

定 价 / 43.00 元

责任编辑 / 胡 静

王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前言

全书共 12 章, 包括液压传动和气压传动技术两部分, 第 1~第 8 章介绍液压传动技术; 第 9~第 12 章介绍气压传动技术。本书主要讲述了液压与气压传动的基础知识; 液压与气动元件的工作原理、结构特点、图形符号及应用; 液压与气压传动基本回路的组成及功能; 典型液压系统的组成与分析; 液压与气动系统常见故障诊断与排除等。

本书的内容以必需、够用为度, 既强调理论知识的讲授, 又突出其在工程实践中的应用, 做到理论讲授深入浅出、通俗易懂, 实际应用方便简单、容易上手。全书将液压传动与气动技术两部分内容有机结合, 在精简理论知识的基础上, 引入大量现代实用技术资料, 并对液压与气动系统常见故障的产生原因及排除方法进行了分析。同时, 在附录中增加了液压与气压传动专业常用英语词汇, 以期拓宽视野, 帮助学生阅读外文资料。

本书不仅可以作为高等院校相关专业的试用教材或培训资料, 还可以供教师、学生、企业技术人员课内外学习、拓展视野或进一步提高时参考。

本书由马韧宾、王鑫秀主编、统稿。张艳芳、牛贵玲、秦英、石岩为副主编。参加编写的还有马素绢、田荣、强向红、陈会莲、马佳和闫秀云。

借此, 向对本书给予帮助的同仁以及所借鉴之参考文献的作者们, 在此一并表示衷心感谢! 由于编者水平有限, 书中疏漏和错误之处难免, 恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| <b>第 1 章 液压传动概述</b> .....   | (1)  |
| 1.1 液压传动的研究内容 .....         | (1)  |
| 1.2 液压传动的工作原理及系统组成 .....    | (2)  |
| 1.3 液压传动的特点及应用 .....        | (3)  |
| 1.4 液压传动的发展 .....           | (5)  |
| 习题一.....                    | (6)  |
| <b>第 2 章 液压传动基础</b> .....   | (7)  |
| 2.1 液压油的性质与选用 .....         | (7)  |
| 2.2 液压静力学基础.....            | (13) |
| 2.3 液体动力学方程.....            | (16) |
| 2.4 液压传动的压力及流量损失.....       | (19) |
| 2.5 液体流经小孔及缝隙的流量.....       | (21) |
| 2.6 液压冲击和空穴现象.....          | (22) |
| 习题二 .....                   | (24) |
| <b>第 3 章 液压泵和液压马达</b> ..... | (25) |
| 3.1 概述.....                 | (25) |
| 3.2 齿轮泵和齿轮马达.....           | (28) |
| 3.3 叶片泵和液压马达.....           | (33) |
| 3.4 柱塞泵.....                | (38) |
| 3.5 液压泵及液压马达的选用.....        | (43) |
| 3.6 液压泵常见故障及排除方法.....       | (44) |
| 习题三 .....                   | (47) |
| <b>第 4 章 液压缸</b> .....      | (49) |
| 4.1 液压缸的类型及其特点.....         | (49) |
| 4.2 液压缸的结构.....             | (56) |
| 4.3 液压缸常见故障及排除方法.....       | (60) |
| 习题四 .....                   | (61) |
| <b>第 5 章 液压辅助装置</b> .....   | (63) |
| 5.1 油箱.....                 | (63) |
| 5.2 过滤器.....                | (65) |

|            |                     |       |
|------------|---------------------|-------|
| 5.3        | 压力表与压力表开关           | (69)  |
| 5.4        | 蓄能器                 | (70)  |
| 5.5        | 油管与管接头              | (72)  |
| 5.6        | 密封装置                | (73)  |
| 5.7        | 热交换器                | (76)  |
|            | 习题五                 | (77)  |
| <b>第6章</b> | <b>液压控制阀和液压基本回路</b> | (78)  |
| 6.1        | 方向控制阀和方向控制回路        | (78)  |
| 6.2        | 压力控制阀和压力控制回路        | (88)  |
| 6.3        | 流量控制阀和速度控制回路        | (103) |
| 6.4        | 多缸动作回路              | (114) |
| 6.5        | 新型液压元件              | (119) |
| 6.6        | 液压控制阀常见故障及排除方法      | (128) |
|            | 习题六(一)              | (132) |
|            | 习题六(二)              | (133) |
|            | 习题六(三)              | (135) |
|            | 习题六(四)              | (137) |
|            | 习题六(五)              | (137) |
| <b>第7章</b> | <b>典型液压系统</b>       | (139) |
| 7.1        | 液压系统图及阅读方法          | (139) |
| 7.2        | 组合机床动力滑台液压系统        | (140) |
| 7.3        | 数控车床液压系统            | (144) |
| 7.4        | 机械手液压系统             | (146) |
| 7.5        | 汽车起重机液压系统           | (149) |
| 7.6        | 通用压力机液压系统           | (153) |
| 7.7        | 液压系统的维护与常见故障        | (157) |
|            | 习题七                 | (161) |
| <b>第8章</b> | <b>液压伺服系统</b>       | (164) |
| 8.1        | 液压伺服系统概述            | (164) |
| 8.2        | 液压伺服阀               | (166) |
| 8.3        | 电液伺服阀               | (170) |
| 8.4        | 液压伺服系统应用            | (172) |
|            | 习题八                 | (174) |
| <b>第9章</b> | <b>气压传动基本知识</b>     | (175) |
| 9.1        | 气压传动的发展与应用          | (175) |
| 9.2        | 气压传动系统的工作原理及组成      | (176) |
| 9.3        | 气压传动的特点             | (178) |
|            | 习题九                 | (179) |

|                                                 |       |
|-------------------------------------------------|-------|
| <b>第 10 章 气动元件</b> .....                        | (180) |
| 10.1 气源装置 .....                                 | (180) |
| 10.2 气动辅助元件 .....                               | (187) |
| 10.3 气动执行元件 .....                               | (190) |
| 10.4 气动控制元件 .....                               | (200) |
| 习题十 .....                                       | (214) |
| <b>第 11 章 气动基本回路</b> .....                      | (215) |
| 11.1 方向控制回路 .....                               | (215) |
| 11.2 压力控制回路 .....                               | (217) |
| 11.3 速度控制回路 .....                               | (219) |
| 11.4 其他控制回路 .....                               | (221) |
| 习题十一 .....                                      | (226) |
| <b>第 12 章 气动系统应用实例</b> .....                    | (229) |
| 12.1 阅读气压传动系统图的一般步骤 .....                       | (229) |
| 12.2 全气动控制系统典型实例 .....                          | (229) |
| 12.3 电气控制系统典型实例 .....                           | (233) |
| 12.4 气动机械手气压传动系统 .....                          | (238) |
| 12.5 数控加工中心气动换刀系统 .....                         | (240) |
| 12.6 气动系统的使用维护和常见故障 .....                       | (241) |
| 习题十二 .....                                      | (248) |
| <b>附录 1 常用液压、气动图形符号摘自 GB/T 786.1—1993</b> ..... | (249) |
| <b>附录 2 液压与气压传动专业常用英语词汇</b> .....               | (256) |

# 第1章 液压传动概述



## 学习目标

### 知识目标

- 了解液压传动的发展及应用
- 熟悉液压传动的特点
- 掌握液压传动的工作原理及系统组成

### 能力目标

- 能区分液压传动与其他传动形式的不同之处
- 能分析液压设备的主要组成部分

## 1.1 液压传动的研究内容

液压传动和气压传动统称为流体传动，是以流体（液压油或压缩空气）作为工作介质对能量进行传递和控制的一种传动形式，相对于机械传动来说，流体传动是一门新技术。液压传动是利用各种液压元件组成能够实现特定功能的基本回路，再由若干基本回路有机组合成能完成一定控制功能的传动系统，从而进行能量的传递、转换与控制。

因此，要研究液压传动及其控制技术，就必须研究以下内容：

- ① 传动介质的物理性能及静力学、动力学特性。
- ② 各类液压元件的分类、结构、功能、工作原理、性能、图形符号、选型及应用。
- ③ 各种液压基本回路的性能、特点和应用。
- ④ 液压系统及液压元件的故障及排除方法。
- ⑤ 进行液压传动控制系统的设计。
- ⑥ 液压传动的最新技术及发展趋势。

## 1.2 液压传动的工作原理及系统组成

### 1.2.1 液压传动的工作原理

图 1-1 所示为机床工作台液压系统原理图。液压泵 3 由电动机带动旋转，从油箱 1 经滤油器 2 吸油，由泵输出压力油，经换向阀 6、节流阀 5 到液压缸。当换向阀 6 处于中位时，工作台 9 停止运动；当换向阀 6 的手柄转换到左位时，压力油进入液压缸 7 左腔，推动活塞 8 并带动工作台向右运动，此时，液压缸右腔的油液经换向阀回油箱；当换向阀的手柄转换到右位时，压力油进入液压缸右腔，推动活塞并带动工作台向左运动。

工作台往复运动时，其速度是通过节流阀 5 调节的。当节流阀开大时，进入液压缸的油量增多，工作台的移动速度增大；当节流阀关小时，进入液压缸的油量减小，工作台的移动速度减小。这种现象说明了液压传动的第一个基本原理：速度取决于流量。

克服负载所需的工作压力则由溢流阀 4 控制。为了克服工作台移动时所受到的外阻力，液压缸必然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所产生的。要克服的外阻力越大，缸中的油液压力就越高；反之压力就越低。这种现象说明了液压传动的第二个基本原理：压力取决于负载。

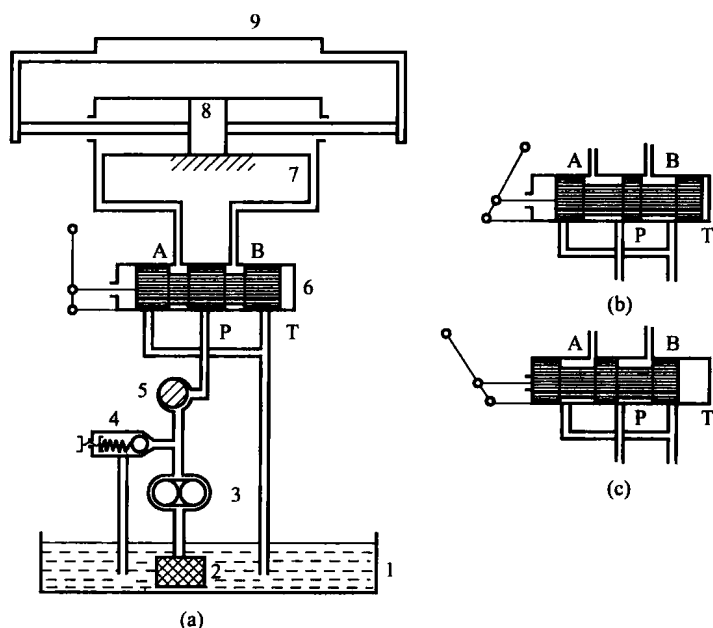


图 1-1 机床工作台液压传动系统图

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

从机床工作台的例子可以得到：在液压系统中，要发生两次能量转变，即先通过液压泵把电动机（或其他原动机）的机械能转变为液体压力能，通过管路的传递和控制元件对液体的压力和流量进行调节后，再通过液压缸（或液压马达）把液体的压力能转变为机械能以推

动负载运动。液压传动的过程就是机械能—液压能—机械能的转换过程。

1.2.2 液压传动系统的组成

由上面的例子还可以看到，液压系统不论简单还是复杂，都是由动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件和工作介质 5 部分组成的。液压系统组成如表 1—1 所示。

表 1—1 液压系统组成

| 序 号 | 组成部分 | 元 件                | 作 用                          |
|-----|------|--------------------|------------------------------|
| 1   | 动力元件 | 液压泵                | 将原动机输出的机械能转换成液体压力能           |
| 2   | 执行元件 | 液压缸、液压马达           | 将液体的压力能转换为机械能                |
| 3   | 控制元件 | 液压控制阀              | 控制和调节液流的压力、流量和流动方向           |
| 4   | 辅助元件 | 油管与管接头、油箱、过滤器、蓄能器等 | 起连接、输油、储油、过滤、储存压力能和测量等各种辅助作用 |
| 5   | 工作介质 | 液压油                | 传递运动和动力                      |

1.2.3 液压传动系统的图形符号

图 1—1 所示的液压传动系统图，是一种半结构式的工作原理图，称为结构原理图。这种原理图直观性强、容易理解，但绘制起来比较麻烦，系统中元件数量多时，绘制更加不方便。为了简化原理图的绘制，系统中各元件可用图形符号表示，这些符号只表示元件的职能、控制方式及外部连接口，不表示元件的具体结构、参数及连接口的实际位置和元件的安装位置。

国家规定 1993 年制定的液压气动图形符号 GB/T 786.1—93（代替 GB 786—76），就属于职能符号。图 1—2 所示为用图形符号表示的机床工作台液压传动系统图，这样绘制起来更方便，系统图简化，原理也简单明了。按照规定，液压元件符号均以元件的静止位置或零位表示，有些液压元件无法采用职能符号表示时，仍允许采用结构原理图表示。

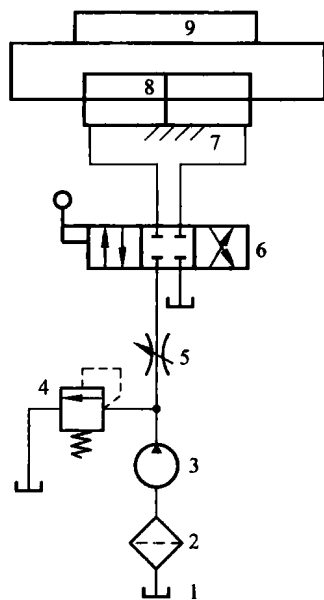


图 1—2 液压传动系统图形符号图  
1—油箱；2—滤油器；3—液压泵；4—溢流阀；  
5—节流阀；6—换向阀；7—液压缸；  
8—活塞；9—工作台

1.3 液压传动的特点及应用

1.3.1 液压传动的特点

1. 液压传动的优点

液压传动之所以能得到广泛的应用，是由于它与机械传动、电气传动相比具有以下主要

优点：

①液压传动传递的功率大，能输出大的力或力矩。在传递同等功率的情况下，液压传动装置的体积小、重量轻、结构紧凑。据统计，液压马达的重量只有同功率电动机重量的10%~20%，至于尺寸，相差更大，前者为后者的12%~13%。

②液压装置由于重量轻、惯性小、工作平稳、换向冲击小，所以易实现快速启动，制动和高频率换向。对于回转运动每分钟可达500次，直线往复运动每分钟可达400~1000次。这是其他传动控制方式无法比拟的。

③液压传动装置能在运动过程中实现无级调速，调速范围大（调速比可达1：2000）速度调整容易，而且调速性能好。

④液压传动装置易实现过载保护，能实现自润滑，故使用寿命较长。

⑤液压传动装置调节简单、操纵方便，易于实现自动化，如与电气控制相配合，可方便地实现顺序动作和远程控制。

⑥液压元件已实现标准化，系列化和通用化，便于设计、制造和推广使用。

⑦液压装置比机械装置更容易实现直线运动。

2. 液压传动的缺点

①油液的泄漏和可压缩性使传动无法保证严格的传动比。

②液压传动能量损失大（机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失等），因此传动效率低。

③液压传动对油温的变化比较敏感，油的黏度发生变化时，流量也会跟着改变，造成速度不稳定，因此不宜在温度变化较大的环境中工作。

④为了减少泄漏，液压元件在制造精度上的要求比较高，因此其造价较高。

⑤液压传动故障的原因较复杂，因此查找困难。

1.3.2 液压传动的应用

因为液压传动的显著优点，所以得到了普遍的应用。液压传动在机械工业各部门的应用情况如表1-2所示。

表 1-2 液压传动在各类机械行业中的应用实例

| 行业名称   | 应用场所举例                               |
|--------|--------------------------------------|
| 机床工业   | 磨床、铣床、刨床、拉床、压力机、自动机床、组合机床、数控机床、加工中心等 |
| 工程机械   | 挖掘机、装载机、推土机、压路机、铲运机等                 |
| 起重运输机械 | 汽车吊、港口龙门吊、叉车、装卸机械、皮带运输机等             |
| 矿山机械   | 凿岩机、开掘机、开采机、破碎机、提升机、液压支架等            |
| 建筑机械   | 打桩机、液压千斤顶、平地机等                       |
| 农业机械   | 联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等                    |
| 冶金机械   | 电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等                  |
| 轻工机械   | 打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等               |
| 汽车工业   | 自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减振器等         |

续表

| 行业名称   | 应用场所举例                        |
|--------|-------------------------------|
| 船舶港口机械 | 起货机、锚机、舵机等                    |
| 铸造机械   | 砂型压实机、加料机、压铸机等                |
| 智能机械   | 折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等 |

## 1.4 液压传动的发展

自18世纪末英国制成世界上第一台水压机起,液压传动技术至今已有二三百年的历史。然而,直到20世纪30年代它才真正地推广使用。

1650年帕斯卡提出静压传递原理,1850年英国将帕斯卡原理先后应用于液压起重机、压力机,1795年英国约瑟夫·布拉曼(Joseph Braman)在伦敦用水作为工作介质,以水压机的形式将其应用于工业上,诞生了世界上第一台水压机;1905年工作介质由水改为油,使液压传动效果进一步得到改善。第二次世界大战期间,在一些兵器上用上了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置,大大提高了兵器的性能,也大大促进了液压技术的发展。战后,液压技术迅速转向民用,并随着各种标准的不断制定和完善,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。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再次将液压技术向前推进,使它在国民经济的各方面都得到了应用,已成为实现生产过程自动化、提高劳动生产率等必不可少的重要手段之一。

我国的液压工业开始于20世纪50年代,其产品最初只用于机床和锻压设备,后来才用到拖拉机和工程机械上。自从1964年从国外引进一些液压元件生产技术,并自行设计液压产品以来,我国的液压件已在各种机械设备上得到了广泛的使用。20世纪80年代起更加速了对国外先进液压产品和技术有计划引进、消化、吸收和国产化工作,以确保我国的液压技术能在产品质量、经济效益、研究开发等各个方面全方位地赶上世界水平。

当前,液压技术在实现高压、高速、大功率、高效率、低噪声、经久耐用、高度集成化等各项要求方面都取得了重大的进展,在完善比例控制、伺服控制、数字控制等技术上也有许多新成就。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微机控制等开发性工作方面,日益显示出显著的优势。

微电子技术的进展,渗透到液压传动技术中并与之相结合,创造出了很多高可靠性、低成本的微型节能元件,为液压传动技术在工业各部门中的应用开辟了更为广阔的前景。随着科学技术的发展,液压传动技术得以不断创新和提高,通过改进元件和系统的性能,以满足日益变化的市场需求。液压传动技术的持续发展体现在如下重要特征上。

- ①提高元件性能,创制新型元件,使其不断小型化和微型化。
- ②高度的组合化、集成化和模块化。
- ③和微电子技术相结合,走向智能化。
- ④研发特殊传动介质,推进工作介质多元化。

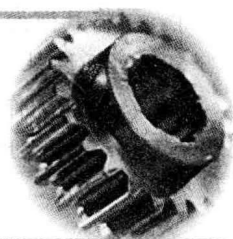
## 习 题 一

1. 什么是液压传动？液压传动的基本原理是什么？
2. 液压传动系统由哪几部分组成？各组成部分的主要作用是什么？
3. 绘制液压系统图时，为什么要采用图形符号？
4. 简述液压传动的主要优缺点？

### 知识链接

相对于“液压”或“液压技术”的英语单词是“hydraulics”，此单词原意为水力学，因为液压与水压有很深的关系。液压机构的原形是帕斯卡实验用的水压机，用液压油替代水作为工作介质仅是 100 多年前的事。从 19 世纪初到后半叶，开发出了各种机床，也制造出了相当完美的水压机械，但用水作为介质有限制，如存在生锈和腐蚀问题，润滑性不好，而且使用温度必须限制在  $0^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$  等，这些限制让人很伤脑筋。随着高强度钢的生产工艺简化，常用设备进一步普及，出现了用石油精制润滑油的方法，工作介质也一下子从水过渡到液压油。

## 第2章 液压传动基础



### 学习目标

#### 知识目标

- 掌握液压系统中工作介质的主要性质；了解液压油的选用及污染与控制
- 理解压力的基本概念、液压系统中压力是如何建立的；熟悉液体作用于固体壁面上的力的计算方法
- 理解液体动力学三个基本方程，熟悉压力、流量损失的原因及估算方法
- 了解液体流经小孔和缝隙的流量及液压冲击和空穴现象的原因及改善措施

#### 能力目标

- 能正确地选择液压油的品种和牌号
- 能运用液体动力学和静力学方程进行相关计算

### 2.1 液压油的性质与选用

液压传动中的工作介质在液压传动中不仅起传动的作用，还起润滑、冷却、密封和防锈的作用。工作介质性能的好坏，选择是否得当，对液压系统能否有效、可靠地工作影响很大。因此，在掌握液压系统之前必须对工作介质有一定基本认知。

#### 2.1.1 液压油的性质

##### 1. 密度

单位体积液体所具有的质量即为该液体的密度，用公式表示为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

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

$m$ ——液体的质量， $\text{kg}$ ；

$V$ ——液体的体积， $\text{m}^3$ 。

液体的密度会随着压力或温度的变化而发生变化：压力越大，密度也就越大；温度越

高, 密度就越小。但因液体的密度随压力、温度的变化量很小, 所以, 一般在工程计算中忽略不计, 可将其视为常量。在进行液压系统的相关计算时, 通常取液压油的密度为  $900 \text{ kg/m}^3$ 。

## 2. 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。若压力为  $p_0$  时液体的体积为  $V_0$ , 当压力增加  $\Delta p$ , 液体的体积减小  $\Delta V$ , 则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2-2)$$

式中  $\kappa$ ——液体的压缩率。由于压力增加时液体的体积减小, 两者变化方向相反, 为使  $\kappa$  成为正值, 在上式右边须加一负号。

液体压缩率  $\kappa$  的倒数, 称为液体体积模量, 即

$$K = \frac{1}{\kappa} \quad (2-3)$$

液压油的体积模量  $K$  值反映液体抵抗压缩能力的大小, 它和温度、压力以及含在油液中的空气有关。液压油体积弹性模量  $K = (1.2 \sim 2) \times 10^9 \text{ Pa}$ , 数值很大。一般中、低压液压系统, 液体的可压缩性很小, 可以认为液体是不可压缩的。而在压力变化很大的高压系统中, 就需要考虑液体可压缩性的影响。当液体中混入空气时,  $K$  值将大大减小, 可压缩性将显著增加, 并将严重影响液压系统的工作性能, 因而在液压系统中应使油液中的空气含量减少到最低限度。

## 3. 黏性

### (1) 黏性的定义

液体在外力作用下流动时, 分子间的内聚力会阻碍分子间的相对运动而产生一种内摩擦力, 液体流动时具有内摩擦力的性质称为黏性。

液体只有在流动 (或有流动趋势) 时才会呈现黏性, 液体静止时是不呈现黏性的。黏性是液体重要物理特性, 是选择液压油的主要依据。

### (2) 黏度

度量黏性大小的物理量称为黏度。常用的黏度有 3 种: 动力黏度、运动黏度、相对黏度。

①动力黏度: 动力黏度的物理意义就是液体在单位速度梯度下, 单位面积上的内摩擦力大小。

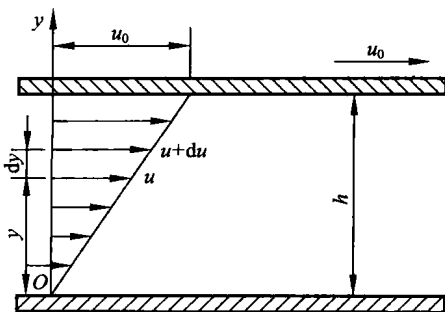


图 2-1 液体的黏性示意图

当液体流动时, 由于液体与固体壁面的附着力及液体本身的黏性使液体各处的速度大小不等。如图 2-1 所示, 液体在平行平板间流动, 设上平板以速度  $u_0$  向右运动, 下平板固定不动。紧贴于上平板上的液体黏附于上平板上, 其速度与上平板运动速度  $u_0$  相同; 紧贴于下平板上的液体黏附于下平板, 其速度为零; 中间液体的速度按线性分布。可以把这种流动看成是许多无限薄的液体层在运动, 当运动较快的液体层在运动较慢的液体层上滑过时, 两液体层之间由于

黏性就产生内摩擦力。根据实际测定的数据所知,液体层间的内摩擦力  $F$  与液体层的接触面积  $A$  及液体层的相对流速  $du$  成正比,而与此二液体层间的距离  $dy$  成反比,即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

以  $\tau = F/A$  表示切应力,即单位面积上的内摩擦力,则有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

式中  $\mu$ ——衡量流体黏性的比例系数,称为绝对黏度或动力黏度;

$du/dy$ ——流体层间速度差异的程度,称为速度梯度。

在国际单位制和我国的法定计量单位中,动力黏度的单位为帕·秒 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) 或牛顿·秒/米<sup>2</sup> ( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )。

②运动黏度:运动黏度是液体绝对黏度  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

式中  $\nu$ ——液体的运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\mu$ ——液体的绝对黏度(动力黏度),  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

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

运动黏度的国际单位制的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ , 工程单位制中使用的单位为:斯 (St), 斯的单位太大,应用不便,常用斯的 1%, 即厘斯 (cSt) 来表示,故

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

运动黏度  $\nu$  没有什么明确的物理意义,习惯上常用它来标志液体黏度,国际标准化组织 ISO 规定统一采用运动黏度表示油液的黏度等级。我国的液压油以  $40^\circ\text{C}$  时运动黏度的平均值(单位为  $\text{mm}^2/\text{s}$ ) 为黏度等级符号,即牌号。例如,牌号为 L—HL22 的普通液压油,表示这种液压油在  $40^\circ\text{C}$  时运动黏度的平均值为  $22 \text{ mm}^2/\text{s}$  (前 L 表示润滑剂类, H 表示液压油,后 L 表示防锈抗氧化型)。

③相对黏度:相对黏度是在特定测量条件下制定的,故又称为条件黏度。动力黏度和运动黏度是理论分析和推导中常使用的黏度单位,但它们难以直接测量,实际中,要先求出相对黏度,然后再换算成动力黏度和运动黏度。根据测量条件不同,各国采用的相对黏度单位也不同。如中国、德国、俄罗斯用恩氏黏度 ( $^\circ\text{E}$ ); 美国、英国采用通用赛氏秒 (SSU) 或商用雷氏秒 ( $\text{R}_1\text{S}$ ); 法国采用巴氏度 ( $^\circ\text{B}$ ) 等。

恩氏黏度由恩氏黏度计测定,即将 200 mL 的被测液体装入底部有直径为 2.8 mm 小孔的恩氏黏度计的容器中,在某一特定温度时,测定全部液体在自重作用下流过小孔所需的时间  $t_1$  与同体积的蒸馏水在  $20^\circ\text{C}$  时流过同一小孔所需的时间  $t_2$  之比值,便是该液体在此温度的恩氏黏度,用  $^\circ\text{E}$  表示。被测液体在某一温度时的恩氏黏度即

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-7)$$

工业上一般以  $20^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$  作为测定恩氏黏度的标准温度,并相应地以符号  $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$  和  $^\circ\text{E}_{100}$  来表示。

知道恩氏黏度以后,利用下列的经验公式,将恩氏黏度换算成运动黏度。

$$\nu = (7.31^\circ\text{E} - 6.31/^\circ\text{E}) \times 10^{-6} \quad (2-8)$$

### (3) 影响黏度的主要因素

①温度对黏度的影响：液压油黏度对温度的变化是十分敏感的，当温度升高时，其分子之间的内聚力减小，黏度就随之降低。油液黏度随温度变化而变化的特性称为油液的黏温特性，它直接影响液压系统的性能和泄漏量，因此希望油液的黏度随温度的变化越小越好。

②压力对黏度的影响：当液体所受的压力增加时，其分子间的距离将减小，于是内摩擦力将增加，即黏度也将随之增大，但由于一般在中、低压液压系统中压力变化很小，因而通常压力对黏度的影响忽略不计。

### 4. 其他性质

除了上述主要性质以外，液压油还有一些其他的物理化学性质，如抗燃性、抗氧化性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性、抗凝性以及相容性（对所接触的金属、密封材料、添加料等的作用程度）等，都对它的选择和使用有重要影响。这些性质需要在精炼的矿物油中加入各种添加剂来获得。

## 2.1.2 液压油的选用

因为液压传动系统的压力、温度和流速在很大的范围内变化，液压油的质量优劣直接影响液压系统的工作性能，所以，合理的选用液压油尤为重要。

### 1. 液压油的使用要求

为使液压系统长期保持正常的工作性能，其工作介质应满足以下基本要求：

- ①对人体无害且成本低廉。
- ②黏度适当，黏温特性好。
- ③润滑性能好，防锈能力强。
- ④质地纯净。
- ⑤对金属和非金属材料的相容性好。
- ⑥抗泡沫性和抗乳化性好。
- ⑦体积膨胀系数较小。
- ⑧燃点高，凝点低。
- ⑨氧化稳定性好，不变质。

### 2. 液压油的种类和选用

#### (1) 液压油的种类

液压油的主要品种及其特性和用途见表 2-1。液压油牌号以其代号和后面的数字表示，代号中 L 表示润滑剂类别，H 表示液压系统用的工作介质，数字表示液压油的黏度等级。

目前 90% 以上的液压设备采用矿物型液压油，其基油为精制的石油润滑油馏分。为了改善液压油液的性能，以满足液压设备的不同要求，往往在基油中加入各种添加剂。添加剂有两类：一类是改善油液化学性能的，如抗氧化剂、防腐剂、防锈剂等；另一类是改善油液物理性能的，如增黏剂、抗磨剂、防爬剂等。