



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等职业教育机电类规划教材

第2版

# 液压与气压传动

张群生 主编



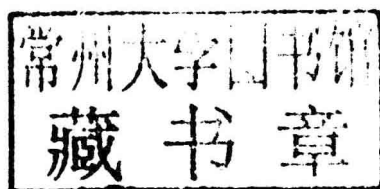
机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等职业教育机电类规划教材

# 液压与气压传动

第2版

主 编 张群生  
参 编 毛全有 于兴华 邹 俊  
主 审 任有志 李登万



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书共十一章,主要包括液压和气压传动基础知识,液压和气压元件,液压和气压基本回路,液压和气压系统的安装、使用及设备的调试和故障诊断,典型液压和气压系统的工作原理及调试和故障分析,液压伺服系统,液压系统设计。每章后均附有学习指导和习题,附录中有主要习题参考答案。教材配有多媒体课件。

本书为机电设备维修和管理专业教材,适用于高等职业院校、高等专科院校和成人高等学校机电类、机制类专业使用,也可作为中等职业学校机械类专业的教学用书,对有关工程技术人员解决一些疑难问题,也可起到重要的指导作用。

## 图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/张群生主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2008.2(2011.6重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等职业教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-09302-2

I. 液… II. 张… III. ①液压传动-高等学校:技术学校-教材②气压传动-高等学校:技术学校-教材 IV. TH137 TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第018269号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张双国 版式设计:张世琴 责任校对:李 婷

封面设计:鞠 杨 责任印制:杨 曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2011年6月第2版第6次印刷

184mm×260mm·18.25印张·452千字

22001-25000册

标准书号:ISBN 978-7-111-09302-2

ISBN 978-7-89482-659-6(光盘)

定价:38.00元(含ICD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是根据机械职业教育机电设备维修与管理专业教学指导委员会审定的高职“液压与气压传动”教学大纲和编写提纲而编写的。

全书共十一章，主要内容包括液压和气压传动基础知识，液压和气压元件，液压和气压基本回路，液压和气压系统的安装、使用及设备的调试和故障诊断，典型液压和气压系统的工作原理及调试和故障分析，液压伺服系统，液压系统设计。

本书在编写过程中，以职业岗位技能要求为出发点，以液压为主线，力求理论联系实际，着重基本概念和原理阐述，突出理论知识的应用，加强针对性和实用性，在较全面阐述液压传动与气压传动基本内容的基础上，着重分析了各类元件的工作原理、结构、常见故障和排除方法，阐明了液压和气压系统的安装、使用及设备的调试、故障诊断；有针对性地对典型液压设备的工作原理、调试及故障分析和排除进行了详细的阐述，以提高读者的液压设备调试能力和故障分析、排除能力。本书还着重反映基本原理在现代工业技术上的应用，以典型的数控机床、加工中心等机电设备为例，力求反映我国液压与气动行业的最新情况。为了便于读者加深理解和巩固所学的内容，每章后均附有学习指导和习题，其中习题包含填空、判断、选择、问答和分析计算等题型。全书采用国家最新标准。

本书在第1版的基础上经过教学实践，在保持原书内容体系特色的基础上，作出了一些具有创新意义的改进和调整。修订后力求突出以下特色：

1. 本书提供的知识面适当加宽，在教学内容的设计上，更注重技术应用能力的培养。
2. 本书在内容上作了适当的调整和补充，更加突出了综合职业能力的培养和新技术的应用，如增加了液压CAD、动压支承技术、静压支承技术、真空元件等新技术的应用内容。
3. 为了方便教学，教材配有多媒体课件，复杂的原理图用动画的形式演示，便于学生学习和理解。
4. 为了便于学生学习，教材中附有习题参考答案。

本书由广西机电职业技术学院张群生主编，参加编写的有张群生（第一、五、六、七章）、浙江机电职业技术学院毛全有（第二、八、九章）、张家界职业技术学院于兴华（第三、四章）、四川工程职业技术学院邹俊（第十、十一章）。河北科技大学任有志、四川工程职业技术学院李登万为本书主审。

本书为机电设备维修与管理专业教材，适用于高等职业院校、高等专科学校和成人高等学校机电类、机制类专业使用，也可作为中等职业学校机械类专业教学用书。本书对有关工程技术人员解决一些疑难问题，也可起到重要的指导作用。

由于编者水平有限，书中难免存在错漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

## 第1版前言

本书是根据机械职业教育机电设备维修与管理专业教学指导委员会于2000年工作会议审定的高职“液压与气压传动”教学大纲和编写提纲而编写的。

全书共十一章，主要内容包括液压和气压传动基础知识，液压和气压元件，液压和气压基本回路，液压和气压系统的安装、使用及设备的调试和故障诊断，典型液压和气压系统的工作原理及调试和故障分析，液压系统设计，液压伺服系统。

本书在编写过程中，以职业岗位技能要求为出发点，以液压为主线，力求理论联系实际，着重基本概念和原理的阐述，突出理论知识的应用，加强针对性和实用性。在较全面阐述液压传动与气压传动基本内容的基础上，着重分析了各类元件的工作原理、结构、常见故障和排除方法，阐述了液压和气压系统的安装、使用及设备的调试、故障诊断；有针对性地对典型液压设备的工作原理、调试及故障分析和排除进行了详细的阐述，以提高读者的液压设备调试能力和故障分析、排除能力。着重反映基本原理在现代工业技术上的应用，以典型的数控机床、加工中心等机电设备为实例。本书力求反映我国液压与气动行业的最新情况，如介绍了叠加阀、插装阀、电液比例阀、电液数字阀以及新型高压液压阀等。为了便于读者加深理解和巩固所学的内容，每章后均附有学习指导和习题，其中习题包含填空、判断、选择、问答和分析计算题。全书采用国家最新标准。

本书由张群生主编。参加编写的有广西机电职业技术学院张群生（第一、五、六、七章），浙江机电职业技术学院毛全有（第二、八、九章），张家界职业技术学院于兴华（第三、四章），四川工程职业技术学院邹俊（第十、十一章）。四川工程职业技术学院李登万为本书主审。本书于2001年3月在桂林审稿会议上进行了集体审阅和修改。

本书为机电设备维修与管理专业教材，适用于高等职业院校、高等专科学校和成人高等学校机制类专业及机电专业使用，也可作为中专机制类专业教学用书，对有关工程技术人员解决一些疑难问题，亦可起到重要的指导作用。

在本书编写过程中，浙江机电职业技术学院严鹤峰、陈晓英，四川工程职业技术学院赵长旭，山东工程技术学院苏杭，张家界职业技术学院刘坚等同志提出了许多有益的建议，曾得到柳州塑料机械总厂、秦川机械发展有限公司等有关工厂和兄弟学校的大力支持和帮助，编者在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免存在错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 主要符号表

## 1. 主要物理量符号

|                                                  |                       |
|--------------------------------------------------|-----------------------|
| $A$ ——面积                                         | $t$ ——时间              |
| $B(b)$ ——宽度                                      | $u$ ——流速              |
| $C_q$ ——流量系数                                     | $V$ ——体积；排量           |
| $D(d)$ ——直径                                      | $v$ ——平均流速            |
| $^{\circ}E$ ——恩氏粘度                               | $x$ ——湿周              |
| $e$ ——偏心距                                        | $z$ ——齿轮齿数；叶片（柱塞）数    |
| $F$ ——作用力                                        | $W$ ——重力              |
| $f$ ——摩擦系数                                       | $\alpha$ ——动能修正系数     |
| $g$ ——重力加速度                                      | $\beta$ ——动量修正系数      |
| $h$ ——深度                                         | $\Delta$ ——粗糙度        |
| $h_w$ ——单位液体的能量损失                                | $\delta$ ——厚度；节流缝隙    |
| $K$ ——液体体积模量；系数                                  | $\varepsilon$ ——相对偏心率 |
| $L(l)$ ——长度                                      | $\zeta$ ——局部阻力系数      |
| $m$ ——质量；齿轮模数；指数                                 | $\eta$ ——效率           |
| $n$ ——指数；转速                                      | $\mu$ ——动力粘度          |
| $P$ ——功率                                         | $\theta$ ——角度         |
| $p$ ——压力                                         | $\kappa$ ——压缩率        |
| $q$ ——流量（标准术语符号为体积流量 $q_v$ ，本书为使用简便，均简化为流量 $q$ ） | $\lambda$ ——沿程阻力系数    |
| $R$ ——半径；水力半径                                    | $\nu$ ——运动粘度          |
| $Re$ ——雷诺数                                       | $\rho$ ——密度           |
| $r$ ——半径                                         | $\tau$ ——切应力          |
| $T$ ——转矩                                         | $\omega$ ——角速度        |

## 2. 主要下标符号

|             |          |
|-------------|----------|
| $o$ ——液面    | $s$ ——弹簧 |
| $a$ ——大气    | $t$ ——理论 |
| $L$ ——管路；负载 | $V$ ——容积 |
| $M$ ——液压马达  | $n$ ——公称 |
| $m$ ——机械    |          |
| $y$ ——液压    |          |
| $p$ ——泵     |          |

例如： $q_t$  表示理论流量， $p_p$  表示泵的输压力， $\eta_{Mm}$  表示液压马达的机械效率。

# 常用物理量的法定计量单位及其换算

我国过去通常使用的是米制工程单位制（MKFS），现在使用法定计量单位，计量单位应按国务院 1984 年发布的《中华人民共和国法定计量单位》和 GB 3100—1993《量和单位》执行。本书采用法定计量单位。为了便于学习，现将常用物理量的法定计量单位和米制工程单位之间的换算关系列于下表。

法定计量单位和米制工程单位的换算关系表

| 物 理 量       |      |          | 法 定 计 量 单 位 |                                     | 米 制 工 程 单 位                                        |                                        | 换 算 关 系                                                                                  |
|-------------|------|----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | 名称   | 符号       | 名称          | 代号                                  | 名称                                                 | 代号                                     |                                                                                          |
| 基<br>本<br>量 | 长度   | $l, (L)$ | 米           | m                                   | 米                                                  | m                                      |                                                                                          |
|             | 时间   | $t$      | 秒           | s                                   | 秒                                                  | s                                      |                                                                                          |
|             | 质量   | $m$      | 千克(公斤)      | kg                                  |                                                    |                                        |                                                                                          |
| 导<br>出<br>量 | 千克力  | $F$      | 牛[顿]        | kgf                                 |                                                    |                                        | $1\text{ kgf} = 9.81\text{ N}$ $1\text{ N} = 0.102\text{ kgf}$                           |
|             | 压力   | $p$      | 帕[斯卡]       | $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$    | 千克力每平方厘米                                           | $\text{kgf}/\text{cm}^2$               | $1\text{ kgf}/\text{cm}^2 = 10^5\text{ Pa} = 0.1\text{ MPa}$                             |
|             | 密度   | $\rho$   | 千克每立方米      | $\text{kg}/\text{m}^3$              |                                                    |                                        |                                                                                          |
|             | 动力粘度 | $\mu$    | 帕[斯卡]秒      | $\text{Pa} \cdot \text{s}$          | 千克力秒每平方米                                           | $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ | $1\text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 9.81\text{ Pa} \cdot \text{s}$                 |
|             | 运动粘度 | $\nu$    | 二次方米每秒      | $\text{m}^2/\text{s}$               | 斯[托克斯]                                             | St                                     | $1\text{ St} = 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ $1\text{ cSt} = 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ |
|             |      |          |             |                                     |                                                    |                                        | $= 1\text{ mm}^2/\text{s}$                                                               |
|             | 能,功  | $E(W)$   | 焦[耳]        | $\text{J}(\text{N} \cdot \text{m})$ | 千克力米                                               | $\text{kgf} \cdot \text{m}$            | $1\text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.81\text{ J}$                                            |
|             | 功率   | $P$      | 瓦[特]        | $\text{W}(\text{J}/\text{s})$       | 千克力米每秒                                             | $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{s}$   | $1\text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{s} = 9.81\text{ W}$                                   |
|             | 速度   | $v$      | 米每秒         | $\text{m}/\text{s}$                 | 沿用单位 m/min 等                                       |                                        |                                                                                          |
|             | 流量   | $q$      | 立方米每秒       | $\text{m}^3/\text{s}$               | 沿用单位 L/min 等 ( $1\text{ L} = 10^{-3}\text{ m}^3$ ) |                                        |                                                                                          |

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第2版前言                   |    |
| 第1版前言                   |    |
| 主要符号表                   |    |
| 常用物理量的法定计量单位及其换算        |    |
| <b>第一章 液压传动基础</b>       | 1  |
| 第一节 液压技术的应用和发展          | 1  |
| 第二节 液压传动的工作原理和系统组成      | 2  |
| 第三节 液压传动的优缺点            | 4  |
| 第四节 液压油                 | 5  |
| 第五节 液体静力学               | 11 |
| 第六节 液体动力学               | 13 |
| 第七节 液体流动中的压力损失          | 17 |
| 第八节 液体流经小孔及缝隙的流量        | 19 |
| 学习指导和习题                 | 22 |
| <b>第二章 液压泵和液压马达</b>     | 28 |
| 第一节 概述                  | 28 |
| 第二节 齿轮泵                 | 31 |
| 第三节 叶片泵                 | 38 |
| 第四节 柱塞泵                 | 45 |
| 第五节 液压泵的选用              | 49 |
| 第六节 液压马达                | 50 |
| 学习指导和习题                 | 52 |
| <b>第三章 液压缸</b>          | 55 |
| 第一节 液压缸的类型及其特点          | 55 |
| 第二节 液压缸的结构              | 61 |
| 第三节 液压缸的安装、调整、维护与常见故障分析 | 65 |
| 学习指导和习题                 | 70 |
| <b>第四章 液压辅助装置</b>       | 73 |
| 第一节 蓄能器                 | 73 |
| 第二节 过滤器                 | 75 |
| 第三节 油管与管接头              | 79 |
| 第四节 压力计与压力计开关           | 83 |
| 第五节 油箱                  | 84 |
| 第六节 液压泵站                | 85 |
| 学习指导和习题                 | 85 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第五章 液压控制阀和液压基本回路</b>          | 87  |
| 第一节 方向控制阀和方向控制回路                 | 87  |
| 第二节 压力控制阀和压力控制回路                 | 99  |
| 第三节 流量控制阀和节流调速回路                 | 113 |
| 第四节 容积调速回路和容积节流调速回路              | 122 |
| 第五节 其他控制回路                       | 126 |
| 第六节 新型液压元件及其应用                   | 136 |
| 小结                               | 144 |
| 学习指导和习题                          | 145 |
| <b>第六章 典型液压系统</b>                | 153 |
| 第一节 YT4543 型动力滑台液压系统             | 153 |
| 第二节 M1432B 型万能外圆磨床液压系统           | 159 |
| 第三节 YA32—200 型四柱万能液压机液压系统        | 168 |
| 第四节 SZ—250/160 塑料注射成型机液压系统       | 171 |
| 第五节 数控车床液压系统                     | 175 |
| 第六节 数控加工中心液压传动系统                 | 177 |
| 学习指导和习题                          | 181 |
| <b>第七章 液压系统的安装和使用及设备的调试和故障分析</b> | 183 |
| 第一节 液压系统的安装与调试                   | 183 |
| 第二节 液压系统的使用与维护                   | 187 |
| 第三节 液压系统故障诊断方法                   | 188 |
| 第四节 液压系统常见故障及排除                  | 191 |
| 学习指导和习题                          | 195 |
| <b>第八章 液压系统设计</b>                | 198 |
| 第一节 液压系统设计的步骤                    | 198 |
| 第二节 明确设计要求、进行工况分析                | 198 |
| 第三节 拟定液压系统原理图                    | 201 |
| 第四节 液压元件的计算和选择                   | 203 |
| 第五节 液压系统的性能验算                    | 204 |
| 第六节 绘制工作图和编制技术文件                 | 206 |
| 第七节 液压 CAD 简介                    | 206 |
| 第八节 液压系统设计计算举例                   | 207 |
| 学习指导和习题                          | 212 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第九章 液压伺服系统及其他液压技术的应用</b> | 215 |
| 第一节 液压仿形刀架的工作原理             | 215 |
| 第二节 液压伺服系统基本形式及实例           | 217 |
| 第三节 其他液压技术及应用               | 223 |
| 学习指导和习题                     | 228 |
| <b>第十章 气压传动</b>             | 230 |
| 第一节 气压传动基本知识                | 230 |
| 第二节 气源装置及辅助元件               | 231 |
| 第三节 气动执行元件                  | 237 |
| 第四节 气动控制元件                  | 240 |
| 第五节 真空元件及其应用                | 248 |
| 第六节 气动基本回路                  | 250 |
| 第七节 气动系统实例                  | 255 |
| 学习指导和习题                     | 257 |
| <b>第十一章 气动系统的使用、维护与故障分析</b> | 260 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 第一节 气动系统的安装与调试                            | 260 |
| 第二节 气动系统的使用与维护                            | 261 |
| 第三节 气动系统主要元件的常见故障及排除方法                    | 264 |
| 学习指导和习题                                   | 268 |
| <b>附录</b>                                 | 269 |
| 附录 A 常用液压与气动元(辅)件图形符号(摘自 GB/T 786.1—1993) | 269 |
| 附表 1 基本符号、管路及连接                           | 269 |
| 附表 2 控制机构和控制方法                            | 270 |
| 附表 3 泵、马达和缸                               | 271 |
| 附表 4 控制元件                                 | 273 |
| 附表 5 辅助元件                                 | 275 |
| 附录 B 习题(部分)参考答案                           | 277 |
| <b>参考文献</b>                               | 284 |

# 第一章 液压传动基础

## 第一节 液压技术的应用和发展

液压传动相对机械传动来说，是一门新的技术。如果从世界上第一台水压机问世算起，至今已有 200 余年的历史，然而，液压传动直到 20 世纪 30 年代才真正推广使用。

在第二次世界大战期间，由于军事工业需要反应快、精度高、功率大的液压传动装置而推动了液压技术的发展；战后，液压技术迅速转向民用，在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步得到推广。20 世纪 60 年代以后，随着原子能技术、空间技术、计算机技术的发展，液压技术也得到了很大发展，并渗透到了各个工业领域。当前液压技术正向着高压、高速、大功率、高效率、低噪声、长寿命、高度集成化、复合化、小型化及轻量化等方向发展；同时，新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助测试（CAT）、计算机直接控制（CDC）、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术以及污染控制等方面，也是当前液压技术发展和研究的方向。

我国的液压工业开始于 20 世纪 50 年代，液压元件最初应用于机床和锻压设备，后来又用于拖拉机和工程机械。自 1964 年从国外引进一些液压元件生产技术，同时自行设计液压产品，经过 20 多年的艰苦探索和发展，特别是 20 世纪 80 年代初期引进美国、日本、德国的先进技术和设备，使我国的液压技术水平有了很大的提高。目前，我国的液压件已从低压到高压形成系列，并生产出许多新型的元件，如插装式锥阀、电液比例阀、电液伺服阀、电液数字控制阀等。液压传动在机械行业中的应用举例见表 1-1。我国机械工业在认真消化、推广国外引进的先进液压技术的同时，大力研制、开发国产液压件新产品，加强产品质量可靠性和新技术应用的研究，积极采用国际标准，合理调整产品结构，对一些性能差而且不符合国家标准的液压件产品，采用逐步淘汰的措施。随着科学技术的迅猛发展，液压技术将获得进一步发展，在各种机械设备上的应用将更加广泛。

表 1-1 液压传动在机械行业中的应用

| 行业名称   | 应用场合举例                               |
|--------|--------------------------------------|
| 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、推土机等                         |
| 汽车工业   | 自卸式汽车、平板车、高空作业车等                     |
| 农业机械   | 联合收割机的控制系统、拖拉机的悬架装置等                 |
| 轻工机械   | 打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等               |
| 冶金机械   | 电炉控制系统、轧钢机控制系统等                      |
| 起重运输机械 | 起重機、叉車、裝卸機械、液壓千斤頂等                   |
| 矿山机械   | 开采机、提升机、液壓支架等                        |
| 建筑机械   | 打桩机、平地机等                             |
| 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                       |

## 第二节 液压传动的工作原理和系统组成

### 一、液压传动的工作原理

现以液压千斤顶为例，简述液压传动的工作原理。图 1-1 所示为液压千斤顶的工作原理图，它由杠杆 1、泵体 2、活塞 3、单向阀 4 和 7 组成的手动液压泵和活塞 8、缸体 9 等组成的举升液压缸构成。其工作过程如下：提起杠杆 1，活塞 3 上升，泵体 2 下腔的工作容积增大，形成局部真空，于是油箱 12 中的油液在大气压力的作用下，推开单向阀 4 进入泵体 2 的下腔（此时单向阀 7 关闭）；当压下杠杆 1 时，活塞 3 下降，泵体 2 下腔的容积缩小，油液的压力升高，打开单向阀 7（单向阀 4 关闭）；泵体 2 下腔的油液进入缸体 9 的下腔（此时截止阀 11 关闭），使活塞 8 向上运动，把重物顶起。反复提压杠杆 1，就可以使重物不断上升，达到起重的目的。当工作完毕，打开截止阀 11，使缸体 9 下腔的油液通过管路 10 直接流回油箱，活塞 8 在外力和自重的作用下实现回程。

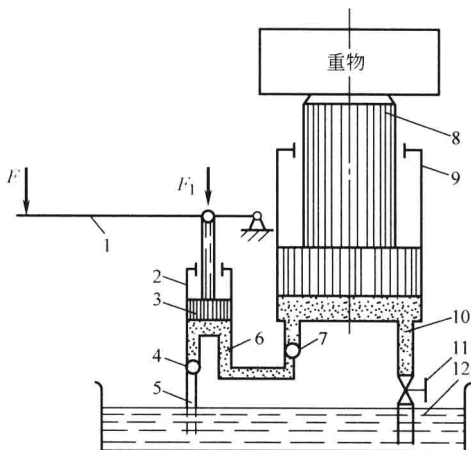


图 1-1 液压千斤顶的工作原理图

1—杠杆 2—泵体 3、8—活塞 4、7—单向阀 5—吸油管 6、10—管路 9—缸体 11—截止阀 12—油箱

由上例可见，液压传动是一种以液体为传动介质，利用液体的压力能来实现运动和力的传递的一种传动方式。它具有以下特点：

- 1) 以液体为传动介质来传递运动和动力。
- 2) 液压传动必须在密闭的容器内进行。
- 3) 依靠密封容积的变化传递运动。
- 4) 依靠液体的静压力传递动力。

### 二、液压传动系统的组成

图 1-2 所示为简化了的机床工作台的液压传动系统图。液压泵 3 由电动机带动从油箱 1 中吸油，并将油液送往系统，经节流阀 6 至换向阀 7，当换向阀两端的电磁铁均不通电而使阀芯处于中间位置时，如图 1-2a 所示，管路  $P$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $T$  均不相通，使液压缸左、右两腔均不通压力油，工作台停止运动。若换向阀 7 左端电磁铁通电，其阀芯被推至右侧处于图 1-2b 所示位置，此时管路  $P$  和  $A$  相通、 $B$  和  $T$  相通，压力油经管路  $P$ 、换向阀 7、管路  $A$  流入液压缸 8 的左腔；由于液压缸的缸体固定，活塞 9 在压力油推动下，通过活塞杆带动工作台向右运动，同时，液压缸 8 右腔的油液经管路  $B$ 、换向阀 7、管路  $T$  流回油箱 1。当换向阀 7 右侧电磁铁通电时，其阀芯被推至左侧处于图 1-2c 所示位置，这时压力油经管路  $P$ 、换向阀 7、管路  $B$  流入液压缸 8 的右腔，推动工作台向左移动，此时，液压缸 8 左腔的油液经管路  $A$ 、换向阀 7、管路  $T$  流回油箱。若分别控制换向阀 7 左、右两端的电磁铁，可以使换向阀 7 的阀芯左、右移动，从而改变压力油的通路，使工作台按所需要的方向运动。

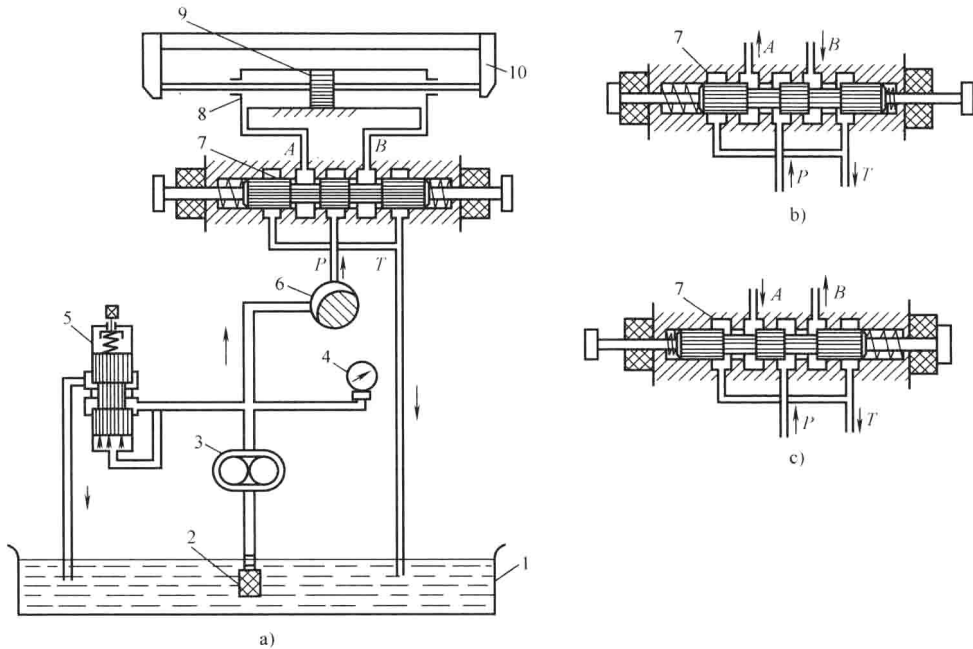


图 1-2 简化了的机床工作台的液压传动系统图

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

工作台工作时，运动速度必须根据需要进行调整。调节工作台的运动速度是由节流阀 6 和溢流阀 5 配合实现的。节流阀就像自来水龙头一样，可以开大，也可以关小。当它开大时，经节流阀 6 进入系统的油液增多，工作台运动速度就加快，同时经溢流阀 5 流回油箱的油液就相应减少；当它关小时，运动速度就减慢，同时经溢流阀 5 溢回油箱的油液就相应地增加，从而控制工作台的速度。工作台运动时，还要克服一定的阻力，如切削阻力和摩擦阻力等，这些阻力由液压泵输出油液的压力来克服。根据工作时阻力的不同，要求液压泵输出的油液压力应能进行调节，这个功能是由溢流阀 5 来完成的。当油液压力对溢流阀的阀芯作用力略大于溢流阀中弹簧对阀芯的作用力时，阀芯才能移动，使阀口打开，油液经溢流阀溢流回油箱，压力不再升高，此时，泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的。

由以上例子可以看出，液压传动系统由以下几个部分组成：

(1) 动力元件 液压泵，是系统的能量输入装置，它将原动机输入的机械能转换成液体的压力能，向液压系统提供压力油。

(2) 执行元件 液压缸或液压马达，是系统的能量输出装置，它把液体的压力能转换为机械能，克服负载，带动机械完成所需的动作。

(3) 控制元件 各种控制阀，如压力阀、流量阀、方向阀等，用来控制液压系统所需的压力、流量、方向和工作性能，以保证执行元件实现各种不同的工作要求。

(4) 辅助元件 指各种管接头、油管、油箱、过滤器、蓄能器、压力计等，起连接、输油、储油、过滤、储存压力能、测量等作用，它们对保证液压系统可靠和稳定地工作，具有非常重要的作用。

(5) 工作介质 液压油，是传递能量的介质，它直接影响着液压系统的性能和可靠性。

### 三、液压传动系统的图形符号

图 1-2 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，系统中各元件可用符号表示，这些符号只表示元件的职能（即功能）、控制方式及外部连接口，不表示元件的具体结构和参数及连接口的实际位置和元件的安装位置。我国 1993 年制订的液压气动图形符号 GB/T 786.1—1993 就属于职能符号。各类元件的职能符号在后面介绍元件时再作介绍。图 1-2 所示的液压系统用职能符号表示时（图 1-3），可使系统图绘制起来更加方便，更加简单明了。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。

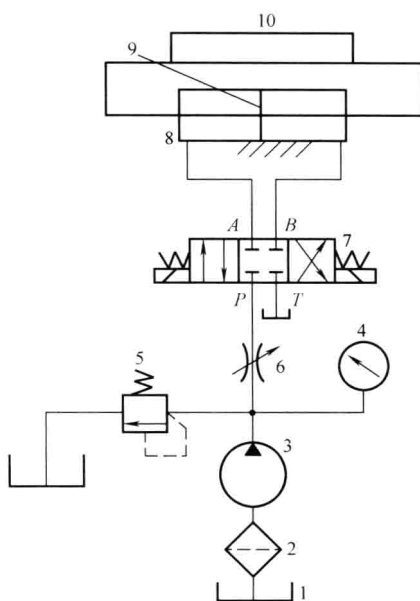


图 1-3 简单机床的液压传动系统图  
(用图形符号绘制)

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

## 第三节 液压传动的优缺点

液压传动能得到如此迅速的发展和广泛的应用，是由于它与机械传动、电气传动、气压传动相比具有以下优点：

- 1) 单位功率的重量轻，即在输出同等功率的条件下，体积小、重量轻、惯性小、结构紧凑、动态特性好等。如轴向柱塞泵的重量只是同功率直流发电机重量的 10% ~ 20%，前者的外形尺寸只有后者的 12% ~ 13%。
- 2) 液压传动能方便地实现无级调速，并且调速范围大。
- 3) 液压传动装置工作平稳、反应快、冲击小，能快速起动、制动和频繁换向。
- 4) 液压传动装置的控制、调节比较简单，操纵比较方便、省力，易于实现自动化。当机、电、液配合使用时，易实现较复杂的自动工作循环。
- 5) 液压传动易获得很大的力和力矩，可以使传动结构简单。
- 6) 液压系统易于实现过载保护，同时，因采用油液作为传动介质，相对运动表面间能自行润滑，故元件的使用寿命长。
- 7) 由于液压元件已实现了标准化、系列化和通用化，所以液压系统的设计、制造和使用都比较方便。液压元件的排列布置也具有较大的机动性。

液压传动的主要缺点：

- 1) 液压传动是以液体为工作介质的，在相对运动表面间不可避免地要有泄漏，同时，

液体又是可压缩的，因此不宜在传动比要求严格的场合采用，例如螺纹和齿轮加工机床的内传动链系统。

2) 液压传动在工作过程中有较多的能量损失，如摩擦损失、泄漏损失等，故不宜于远距离传动。

3) 液压传动对油温的变化比较敏感，油温变化会影响运动的稳定性。因此，在低温和高温条件下，采用液压传动有一定的困难。

4) 为了减少泄漏，液压元件的制造精度要求较高，因此，液压元件的制造成本较高，而且对油液的污染比较敏感。

5) 液压系统故障的诊断比较困难，因此对维修人员提出了更高的要求，既需要系统地掌握液压传动的理论知识，又要具有一定的实践经验。

6) 随着高压、高速、高效率和大流量化，液压元件和系统的噪声日益增大，这也是需要解决的问题。

总而言之，液压传动的优点是突出的，随着科学技术的进步，液压传动的缺点将得到克服，液压传动将日臻完善，液压技术与电子技术及其他传动方式的结合更是前途无量。

## 第四节 液 压 油

### 一、液压油的性质

#### (一) 液体的粘度

当液体在外力作用下流动时，由于液体与固体壁面的附着力及液体本身分子之间内聚力的存在，使液体内部各处的速度产生差异。如图 1-4 所示，液体在管路中流动时的速度并不相等，紧贴管壁的液体速度为零，管路中心处的速度最大。我们可将管中液体的流动看成是许多无限薄的同心圆筒形的液体层的运动，运动较慢的液体层阻滞运动较快的液体层，而运动较快的液体层又带动运动较慢的液体层，这种液体层之间的作用类似于固体之间的摩擦，因而在液体之间产生摩擦力。由于这种摩擦力发生在液体内部，所以称为内摩擦力。液体在外力作用下流动时，在其内部产生内摩擦力的性质，就称为液体的粘性。粘性所起的作用只能延缓液体内部相互滑动的过程，而不能消除这种滑动。液体只有流动时，才会呈现粘性，而静止的液体不呈现粘性。粘性是液体一个非常重要的特性，其大小可用粘度来衡量。

#### 1. 动力粘度 $\mu$

实验表明（牛顿内摩擦定律），液体流动时相邻液层间的内摩擦力  $F_f$  与液层接触面积  $A$ 、液层间的速度梯度  $du/dy$  成正比，如图 1-5 所示，可用下式表示

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

若用单位面积上的摩擦力（切应力）来表示，则式（1-1）可改写成

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

式中， $\mu$  为比例系数，称为动力粘度。动力粘度  $\mu$  的单位是  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒）。以前（CGS 制中）使用的单位是  $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ （达因·秒每二次方厘米），又称为 P（泊）。 $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3 \text{cP}$ （厘泊）。

由式（1-2）可知，液体动力粘度  $\mu$  的物理意义是：当速度梯度等于 1 时，接触液体层

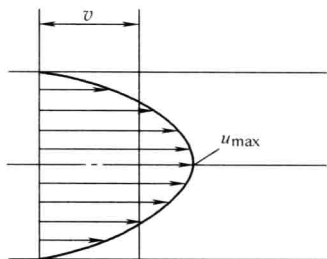


图 1-4 液体在管路内的速度分布

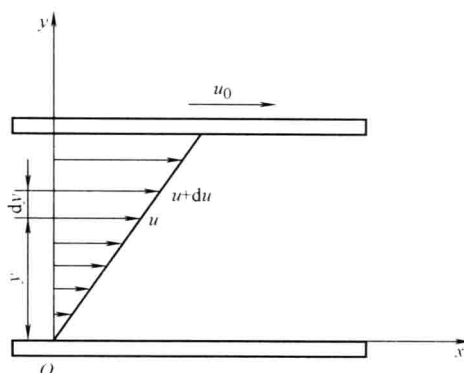


图 1-5 液体粘性示意图

间单位面积上的内摩擦力为  $\tau$ 。

## 2. 运动粘度

动力粘度  $\mu$  和液体密度  $\rho$  的比值称为液体的运动粘度  $\nu$ 。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-3)$$

运动粘度的单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ ，工程单位制使用的单位还有  $\text{cm}^2/\text{s}$ ，通常称为 St（斯），工程中常用 cSt（厘斯）来表示， $1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$ 。运动粘度  $\nu$  虽没有明确的物理意义，但习惯上常用它来标志液体的粘度，例如各种矿物油的牌号就是该种油液在  $40^\circ\text{C}$  时的运动粘度  $\nu$ （单位为（cSt））的平均值。

## 3. 相对粘度

相对粘度又称条件粘度，它是采用特定的粘度计在规定的条件下测出的液体粘度。我国、德国、前苏联等国家采用恩氏粘度  $^\circ\text{E}$ ，美国用赛氏粘度 SSU，英国则用雷氏粘度 RS。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定：将 200mL 温度为  $t$ （单位为  $^\circ\text{C}$ ）的被测液体装入恩氏粘度计的容器内，由其下部直径为 2.8mm 的小孔流出，测出液体流尽所需的时间  $t_1$ （s），再测出 200mL 温度为  $20^\circ\text{C}$  的蒸馏水在同一粘度计中流尽所需的时间  $t_2$ （标定值，一般  $t_2 = 50 \sim 52\text{s}$ ）。这两个时间的比值便是该液体在温度为  $t$  时的恩氏粘度： $^\circ\text{E} = t_1/t_2$ 。一般以  $20^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$  及  $100^\circ\text{C}$  作为测定液体粘度的标准温度，由此而得到的恩氏粘度分别用  $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{40}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$  和  $^\circ\text{E}_{100}$  来标记。

液体粘度的测定可用旋转粘度计或运动粘度测定器直接测定，也可以先测出液体的相对粘度，然后再根据关系式换算出动力粘度或运动粘度。恩氏粘度与运动粘度  $\nu$  间的换算关系式为

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

液体粘度随液体压力和温度的变化而变化。对液压油而言，压力增大，粘度增大，但其变化量很小，在一般的中、低压系统中可以忽略不计。液压油的粘度对温度的变化十分敏感，温度升高，则液体中分子间的内聚力减小，粘度降低。液压油的粘度随温度变化的关系称为液压油的粘温特性。液压油粘度的变化直接影响液压系统的性能和泄漏量。因此，希望粘度随温度的变化越小越好，即粘温特性要好。粘温特性可用粘度指数 V·I 表示。粘度指

数  $V \cdot I$  是用被测油液粘度随温度变化的程度同标准油液粘度变化程度比较的相对值。 $V \cdot I$  值越高, 表示液压油粘度随温度变化越小, 即粘温特性越好。对于普通的液压传动系统, 一般要求  $V \cdot I \geq 90$ 。

## (二) 液体的可压缩性

液体受压力作用发生体积变化的性质称为液体的可压缩性。压力为  $p_0$  时体积为  $V_0$  的液体, 当压力增大  $\Delta p$  时, 由于液体的可压缩性, 体积要减小  $\Delta V$ 。液体的可压缩性用压缩率  $\kappa$  表示

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-4)$$

液体压缩率  $\kappa$  的物理意义是: 单位压力变化下的体积相对变化率。常用液压油的  $\kappa = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。液体压缩率的倒数称为液体的体积弹性模量, 简称体积模量, 用  $K$  来表示, 其值为

$$K = \frac{1}{\kappa}$$

一般液压油的体积模量为  $(1.4 \sim 1.9) \times 10^3 \text{ MPa}$ , 而钢的体积模量为  $(2 \sim 2.1) \times 10^5 \text{ MPa}$ , 可见液压油的可压缩性是钢的 100 ~ 150 倍。在一般情况下, 由于压力变化引起液体体积的变化很小, 液压油的可压缩性对液压系统性能的影响不大, 所以一般可认为液体是不可压缩的。在压力变化较大或有动态特性要求的高压系统中, 应考虑液体压缩性对系统的影响。当液体中混入空气时, 其压缩性将显著增加, 并严重影响液压系统的性能, 故应将液压系统中油液中的空气含量减少到最低限量。

## (三) 其他性质

作为传动介质的液压油还需要有其他一些性质, 如热安定性、氧化安定性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性以及相容性 (标志它和密封材料、涂料等起作用的程度) 等。这些性质都对液压油的选择和使用有重要的影响, 需在精炼的矿物油中加入各种添加剂来获得。

## 二、液压油的分类

在 GB/T 498—1987 中将“润滑剂和有关产品”规定为 L 类产品。在 GB/T 7631.1—1987 中, 又将 L 类产品按应用场合分为 19 个组, H 组用于液压系统 (表 1-2)。GB/T 3141—1994 将工业液体润滑剂按 40℃ 时的运动粘度的中心值分为 20 个粘度等级 (表 1-3)。

表 1-2 GB/T 7631.1—1987 润滑剂和有关产品 (L) 的分类——第 2 部分: H 组 (液压系统)

| 组别<br>符号 | 总应<br>用          | 特殊<br>应用                   | 更具体<br>的应用                 | 组成和特性                | 产品符<br>号 L— | 典 型 应 用      | 备 注             |
|----------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|--------------|-----------------|
| H        | 液<br>压<br>系<br>统 | 流<br>体<br>静<br>压<br>系<br>统 | 液<br>压<br>导<br>轨<br>系<br>统 | 无抗氧剂的精制矿油            | HH          |              | 比全损耗系统用油质<br>量高 |
|          |                  |                            |                            | 精制矿油, 并改善其防锈<br>和抗氧性 | HL          |              | 通用机床工业润滑油       |
|          |                  |                            |                            | HL 油, 并改善其抗磨性        | HM          | 高负荷部件的一般液压系统 | 抗磨液压油           |
|          |                  |                            |                            | HL 油, 并改善其粘温性        | HR          |              |                 |
|          |                  |                            |                            | HM 油, 并改善其粘温性        | HV          | 机械和船用设备      | 低温液压油           |
|          |                  |                            |                            | 无特定难燃性的合成液           | HS          |              | 合成低温液压油         |

(续)

| 组别<br>符号 | 总应用  | 特殊应用   | 更具体的应用   | 组成和特性                 | 产品符<br>号 L— | 典型应用                                     | 备 注                   |
|----------|------|--------|----------|-----------------------|-------------|------------------------------------------|-----------------------|
| H        | 液压系统 | 流体静压系统 | 液压导轨系统   | HM 油,并具有粘-滑性好的特点      | HC          | 液压和滑动轴承导轨润滑系统合用的机床,在低速下使振动或间断滑动(粘-滑)减为最小 | 液压-导轨油                |
|          |      |        | 需要难燃液的情况 | 水包油乳化液                | HFAE        |                                          | 含水大于 80%              |
|          |      |        |          | 水的化学溶液                | HFAS        |                                          | 含水大于 80%              |
|          |      |        |          | 油包水乳化液                | HFB         |                                          | 含水小于 80%              |
|          |      |        |          | 含聚合物水溶液               | HFC         |                                          |                       |
|          |      |        |          | 磷酸酯无水合成液              | HFDR        |                                          | 选择本产品时应小心,因可能对环境与健康有害 |
|          |      |        |          | 氯化烃无水合成液              | HFDS        |                                          |                       |
|          |      |        |          | HFDR 和 HFDS 液混合的无水合成液 | HFDT        |                                          |                       |
|          |      |        |          | 其他成分的无水合成液            | HFDU        |                                          |                       |

注:在本分类标准中,各产品名称是采用统一的方法命名的。例如

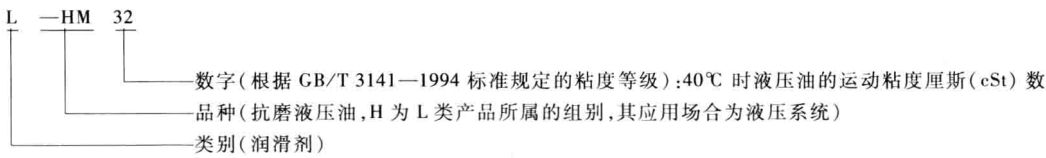


表 1-3 工业液体润滑剂的粘度等级与旧牌号的对照

| 粘度等级<br>(GB/T 3141—1994) | 中间点运动粘度(40℃)         | 运动粘度范围(40℃)          | 按 50℃ 运动粘度划分的旧牌号 | 按 100℃ 运动粘度划分的旧牌号 |
|--------------------------|----------------------|----------------------|------------------|-------------------|
|                          | (mm <sup>2</sup> /s) | (mm <sup>2</sup> /s) |                  |                   |
| 2                        | 2.2                  | 1.98 ~ 2.42          | 2 *              |                   |
| 3                        | 3.2                  | 2.88 ~ 3.52          |                  |                   |
| 5                        | 4.6                  | 4.14 ~ 5.06          | 4 *, 5 *         |                   |
| 7                        | 6.8                  | 6.12 ~ 7.48          | 5 *, 6 *         |                   |
| 10                       | 10                   | 9.00 ~ 11.0          | 7 *, 10 *        |                   |
| 15                       | 15                   | 13.5 ~ 16.5          | 10 *             |                   |
| 22                       | 22                   | 19.8 ~ 24.2          |                  |                   |
| 32                       | 32                   | 28.8 ~ 35.2          | 20 *             | 5 *, 6 *          |
| 46                       | 46                   | 41.4 ~ 50.6          | 30 *             |                   |
| 68                       | 68                   | 61.2 ~ 74.8          | 40 *, 50 *       | 9 *               |
| 100                      | 100                  | 90.0 ~ 110           | 60 *, 70 *       | 13 *              |
| 150                      | 150                  | 135 ~ 165            | 80 *, 90 *       | 19 *              |
| 220                      | 220                  | 198 ~ 242            | 100 *, 150 *     | 19 *              |
| 320                      | 320                  | 288 ~ 352            | 200 *            | 24 *              |
| 460                      | 460                  | 414 ~ 506            | 250 *, 300 *     | 24 *              |
| 680                      | 680                  | 612 ~ 748            | 400 *            | 38 *              |
| 1000                     | 1000                 | 900 ~ 1100           | 500 *            | 52 *              |
| 1500                     | 1500                 | 1350 ~ 1650          | 600 *, 700 *     | 65 *              |
| 2200                     | 2200                 | 1980 ~ 2420          |                  |                   |
| 3200                     | 3200                 | 2880 ~ 3520          |                  |                   |