

# 汽车流体 传动与控制

主编 孔庆华



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 汽车流体传动与控制

主 编 孔庆华

副主编 李长威 吴柏宇

参 编 吴艳秀 李斌 毕经毅 刘颖辉



机械工业出版社

本书是根据全国普通高等教育汽车类专业（方向）教材编审委员会确定的教材规划编写的。全书共 15 章，第 1 章主要介绍了汽车流体传动与控制的概念、组成和分类，第 2 章介绍了液压传动的流体力学基础；第 3 章～第 6 章介绍了液压元件的工作原理与结构，同时讲解了液压缸和液压泵站的设计，第 7 章讲解了液压系统基本回路及应用；第 8 章介绍了汽车的典型液压系统；第 9 章介绍了气体的力学性质，第 10、11 章介绍了气动系统的基本组成和典型回路；第 12 章介绍了汽车空调与空气悬架；第 13、14 章介绍了液力传动的流体力学基础及其工作原理和应用，第 15 章介绍了汽车液力自动变速器的工作原理。

本书从一个全新的角度——流体传动与控制，全面解析了汽车的流体传动与控制技术，是一本普及液压、气压与液力传动与控制技术的典型教材。本书可作为机械电子和汽车类专业学生学习液压、气压与液力传动技术的教材，也可作为有关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

汽车流体传动与控制/孔庆华主编. —北京：机械工业出版社，2013.4  
ISBN 978-7-111-43356-9

I. ①汽… II. ①孔… III. ①汽车-液压传动-高等学校-教材②汽车-气压传动-高等学校-教材 IV. ①U463.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 158477 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）  
策划编辑：张宝珠 责任编辑：张宝珠  
版式设计：常天培 责任校对：程俊巧  
责任印制：张楠  
北京京丰印刷厂印刷  
2013 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 13 印张 · 315 千字  
0 001—1 800 册  
标准书号：ISBN 978-7-111-43356-9  
定价：39.00 元

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

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649

机工微博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

机、电、液一体化技术在汽车中的应用,使得汽车的安全、节能、舒适、快捷等性能上升到一个新的高度。所以,液压、气压及液力传动技术与机械、电子、计算机技术相结合的——流体传动与控制技术在现代汽车中得到了越来越广泛的应用。例如,汽车液力自动变速器、ABS、智能悬架、转向助力装置等。

本书全面系统地介绍了液压、气压与液力传动技术的流体力学理论基础;液压、气压与液力传动元件的工作原理、设计与应用以及流体传动与控制技术在汽车工程上的应用实例,是一本全新视角的汽车技术参考书,同时又是一本普及液压、气压与液力传动与控制技术的典型教材。

本书由哈尔滨华德学院(原哈尔滨工业大学华德应用技术学院)机电与汽车工程学院教授孔庆华任主编,吴柏宇、李长威任副主编。参加编写的有:孔庆华(第1、2章),李长威(第3、4章),刘颖辉(第5、6章),吴柏宇(第7章、第12章),吴艳秀(第8章、第15章),毕经毅(第9~11章)、李斌(第13、14章)。全书由孔庆华统稿,在编写过程中,我们得到了哈尔滨华德学院机电与汽车工程学院孙立峰、朱斌海、曾繁菊、丁娟的诸多帮助,在此一并表示感谢。特别感谢参考文献的作者们,是他们的工作和科研成果,对本书的编写给予了重要帮助。由于编者水平有限,疏漏之处在所难免,诚请广大读者提出宝贵意见。

编 者

# 目 录

|                             |    |  |
|-----------------------------|----|--|
| 前言                          |    |  |
| 第1章 绪论                      | 1  |  |
| 1.1 汽车流体传动                  | 1  |  |
| 1.1.1 流体传动的概念               | 1  |  |
| 1.1.2 流体机械的分类               | 1  |  |
| 1.1.3 流体传动的分类               | 2  |  |
| 1.2 汽车流体传动与控制系统             | 2  |  |
| 1.2.1 汽车流体传动与控制系统<br>的概念    | 2  |  |
| 1.2.2 汽车流体传动与控制系统<br>的组成与分类 | 2  |  |
| 习题                          | 3  |  |
| 第2章 液压流体力学基础                | 4  |  |
| 2.1 液压油的性质与选用               | 4  |  |
| 2.1.1 液压油的主要性质              | 4  |  |
| 2.1.2 液压油的选用                | 6  |  |
| 2.2 液体静力学                   | 6  |  |
| 2.2.1 液体的静压力                | 6  |  |
| 2.2.2 液体静力学基本方程             | 7  |  |
| 2.2.3 压力的表示方法及单位            | 7  |  |
| 2.2.4 帕斯卡原理                 | 8  |  |
| 2.2.5 液体对固体壁面的作用力           | 8  |  |
| 2.2.6 液压传动的工作原理             | 9  |  |
| 2.3 液体动力学                   | 9  |  |
| 2.3.1 基本概念                  | 9  |  |
| 2.3.2 连续性方程                 | 10 |  |
| 2.3.3 伯努利方程                 | 11 |  |
| 2.3.4 动量方程                  | 12 |  |
| 2.4 液体流动中的压力损失              | 12 |  |
| 2.4.1 层流和湍流                 | 12 |  |
| 2.4.2 压力损失                  | 13 |  |
| 2.5 孔口与缝隙流动                 | 15 |  |
| 2.5.1 孔口流动特性                | 15 |  |
| 2.5.2 缝隙流动特性                | 15 |  |
| 2.6 液压冲击和气穴现象               | 16 |  |
| 2.6.1 液压冲击                  | 16 |  |
| 2.6.2 气穴现象                  | 17 |  |
| 习题                          | 17 |  |
| 第3章 液压泵与液压马达                | 19 |  |
| 3.1 概述                      | 19 |  |
| 3.1.1 液压泵的工作原理、特点<br>及分类    | 19 |  |
| 3.1.2 液压马达的工作原理、特<br>点及分类   | 19 |  |
| 3.1.3 液压泵的主要性能参数            | 20 |  |
| 3.1.4 液压马达的主要性能参数           | 22 |  |
| 3.2 齿轮泵与齿轮马达                | 24 |  |
| 3.2.1 外啮合齿轮泵                | 24 |  |
| 3.2.2 内啮合齿轮泵                | 26 |  |
| 3.2.3 齿轮马达                  | 26 |  |
| 3.3 叶片泵与叶片马达                | 27 |  |
| 3.3.1 双作用叶片泵                | 27 |  |
| 3.3.2 双联叶片泵                 | 29 |  |
| 3.3.3 单作用叶片泵                | 29 |  |
| 3.3.4 限压式变量叶片泵              | 31 |  |
| 3.3.5 叶片式液压马达               | 32 |  |
| 3.4 柱塞泵与柱塞马达                | 33 |  |
| 3.4.1 斜盘式轴向柱塞泵              | 33 |  |
| 3.4.2 斜轴式轴向柱塞泵              | 36 |  |
| 3.4.3 径向柱塞泵                 | 36 |  |
| 3.4.4 柱塞马达                  | 37 |  |
| 3.5 螺杆泵                     | 38 |  |
| 习题                          | 39 |  |
| 第4章 液压缸                     | 40 |  |
| 4.1 液压缸的分类与工作特点             | 40 |  |
| 4.1.1 液压缸的分类                | 40 |  |
| 4.1.2 液压缸的工作特点              | 41 |  |
| 4.2 液压缸的设计                  | 45 |  |
| 4.2.1 液压缸工作压力的确定            | 45 |  |
| 4.2.2 液压缸主要尺寸的确定            | 46 |  |
| 4.2.3 液压缸的校核                | 47 |  |
| 4.2.4 液压缸的结构设计              | 48 |  |
| 习题                          | 52 |  |
| 第5章 液压控制阀                   | 53 |  |

|                             |    |                              |     |
|-----------------------------|----|------------------------------|-----|
| 5.1 概述 .....                | 53 | 习题 .....                     | 85  |
| 5.1.1 液压阀的分类 .....          | 53 | <b>第7章 液压系统基本回路</b> .....    | 86  |
| 5.1.2 对液压阀的基本要求 .....       | 53 | 7.1 压力控制回路 .....             | 86  |
| 5.2 压力控制阀 .....             | 54 | 7.1.1 调压回路 .....             | 86  |
| 5.2.1 溢流阀 .....             | 54 | 7.1.2 减压回路 .....             | 87  |
| 5.2.2 减压阀 .....             | 56 | 7.1.3 卸荷回路 .....             | 88  |
| 5.2.3 顺序阀 .....             | 57 | 7.1.4 保压回路 .....             | 89  |
| 5.2.4 压力继电器 .....           | 58 | 7.1.5 平衡回路 .....             | 90  |
| 5.3 流量控制阀 .....             | 59 | 7.2 速度控制回路 .....             | 91  |
| 5.3.1 节流口的形式和流量特性 .....     | 59 | 7.2.1 节流调速回路 .....           | 91  |
| 5.3.2 节流阀 .....             | 60 | 7.2.2 容积调速回路 .....           | 96  |
| 5.3.3 调速阀 .....             | 61 | 7.2.3 调速回路的比较及选用 .....       | 99  |
| 5.4 方向控制阀 .....             | 62 | 7.3 快速运动回路 .....             | 100 |
| 5.4.1 单向阀 .....             | 62 | 7.4 速度换接回路 .....             | 101 |
| 5.4.2 换向阀 .....             | 63 | 7.5 方向控制回路 .....             | 102 |
| 5.5 其他控制阀 .....             | 69 | 7.5.1 换向回路 .....             | 102 |
| 5.5.1 叠加阀 .....             | 69 | 7.5.2 锁紧回路 .....             | 103 |
| 5.5.2 插装阀 .....             | 70 | 7.6 多缸顺序动作回路 .....           | 103 |
| 5.5.3 电-液比例控制阀 .....        | 71 | 7.6.1 顺序动作回路 .....           | 103 |
| 5.6 液压阀的选择与使用 .....         | 72 | 7.6.2 同步回路 .....             | 105 |
| 5.6.1 液压阀的选择 .....          | 72 | 7.6.3 多缸快、慢速互不干涉回路 .....     | 106 |
| 5.6.2 液压阀的安装 .....          | 73 | 习题 .....                     | 107 |
| 5.6.3 液压阀常见故障的分析和排除方法 ..... | 73 | <b>第8章 汽车液压传动系统</b> .....    | 110 |
| 习题 .....                    | 73 | 8.1 液压动力转向系统 .....           | 110 |
| <b>第6章 液压辅助元件</b> .....     | 74 | 8.2 汽车 ABS 液压控制系统 .....      | 112 |
| 6.1 液压泵站的设计 .....           | 74 | 8.2.1 ABS 的基本组成与工作原理 .....   | 112 |
| 6.1.1 油箱容量的确定 .....         | 74 | 8.2.2 制动压力调节器的工作原理 .....     | 113 |
| 6.1.2 油箱的外形尺寸 .....         | 75 | 8.3 ASR 的液压系统组成和工作原理 .....   | 117 |
| 6.1.3 油箱的结构设计 .....         | 75 | 8.3.1 ASR 的基本组成 .....        | 117 |
| 6.1.4 油箱设计的注意事项 .....       | 75 | 8.3.2 ASR 制动压力调节器的工作过程 ..... | 118 |
| 6.1.5 过滤器的选择 .....          | 76 | 8.4 汽车液压悬架系统 .....           | 119 |
| 6.1.6 液压泵的安装设计 .....        | 79 | 8.4.1 汽车电控液压悬架系统的组成 .....    | 119 |
| 6.2 蓄能器 .....               | 79 | 8.4.2 汽车电控液压悬架系统的工作原理 .....  | 119 |
| 6.2.1 蓄能器的类型、结构及特点 .....    | 79 | 8.5 汽车起重机液压系统 .....          | 121 |
| 6.2.2 蓄能器的功用 .....          | 80 | 8.6 YT4543 型动力滑台液压系统 .....   | 124 |
| 6.2.3 蓄能器的安装和使用 .....       | 80 | 8.6.1 液压动力滑台液压系统的工作原理 .....  | 124 |
| 6.3 密封装置 .....              | 81 | 8.6.2 液压动力滑台液压系统的特点 .....    | 126 |
| 6.3.1 间隙密封 .....            | 81 | 习题 .....                     | 126 |
| 6.3.2 密封圈 .....             | 81 |                              |     |
| 6.4 油管和管接头 .....            | 83 |                              |     |
| 6.4.1 油管 .....              | 83 |                              |     |
| 6.4.2 管接头 .....             | 84 |                              |     |

|                               |     |                                 |     |
|-------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| <b>第9章 气压传动基础知识</b> .....     | 128 | 习题 .....                        | 161 |
| 9.1 空气的物理性质 .....             | 128 | <b>第13章 液力传动的流体力学</b>           |     |
| 9.2 理想气体的状态方程与状态变化过程 .....    | 132 | <b>基础</b> .....                 | 162 |
| 9.2.1 理想气体状态方程 .....          | 132 | 13.1 液力传动的基本原理 .....            | 162 |
| 9.2.2 气体状态变化过程 .....          | 132 | 13.2 液力传动的流体力学基础 .....          | 162 |
| 习题 .....                      | 133 | 13.2.1 液体在工作轮中的运动及速度三角形 .....   | 163 |
| <b>第10章 气源装置及气动元件</b> .....   | 134 | 13.2.2 相对运动伯努利方程 .....          | 164 |
| 10.1 气源装置 .....               | 134 | 13.2.3 欧拉方程 .....               | 165 |
| 10.1.1 空气压缩机 .....            | 135 | 13.2.4 力矩方程 .....               | 166 |
| 10.1.2 压缩空气的净化装置和设备 .....     | 135 | 13.2.5 力矩方程与欧拉方程的关系 .....       | 167 |
| 10.1.3 管道系统 .....             | 137 | 习题 .....                        | 167 |
| 10.2 气源处理装置 .....             | 138 | <b>第14章 液力变矩器与液力</b>            |     |
| 10.3 气动辅件 .....               | 140 | <b>耦合器</b> .....                | 168 |
| 10.4 气动执行元件 .....             | 141 | 14.1 液力变矩器 .....                | 168 |
| 10.4.1 气缸 .....               | 141 | 14.1.1 液力变矩器的工作原理 .....         | 168 |
| 10.4.2 气马达 .....              | 142 | 14.1.2 液力变矩器的变矩原理 .....         | 168 |
| 10.5 气动控制阀 .....              | 144 | 14.1.3 液力变矩器的相似原理 .....         | 169 |
| 习题 .....                      | 146 | 14.1.4 液力变矩器的基本特性 .....         | 172 |
| <b>第11章 气动基本回路与常用回路</b> ..... | 147 | 14.1.5 液力变矩器的内特性和功率损失 .....     | 174 |
| 11.1 气动基本回路 .....             | 147 | 14.1.6 液力变矩器的特性曲线 .....         | 175 |
| 11.1.1 压力和力控制回路 .....         | 147 | 14.1.7 液力变矩器特性的评价 .....         | 176 |
| 11.1.2 换向回路 .....             | 149 | 14.1.8 液力变矩器与发动机的匹配及其尺寸选择 ..... | 178 |
| 11.1.3 速度控制回路 .....           | 149 | 14.1.9 液力变矩器的相似设计 .....         | 180 |
| 11.1.4 位置控制回路 .....           | 151 | 14.1.10 液力变矩器的分类 .....          | 181 |
| 11.2 气动常用回路 .....             | 152 | 14.1.11 液力变矩器的补偿冷却系统 .....      | 182 |
| 11.2.1 安全保护回路 .....           | 152 | 14.2 液力耦合器 .....                |     |
| 11.2.2 同步动作回路 .....           | 152 | 14.2.1 液力耦合器的结构与工作原理 .....      | 182 |
| 11.2.3 往复动作回路 .....           | 153 | 14.2.2 液力耦合器的力矩方程 .....         | 183 |
| 习题 .....                      | 155 | 14.2.3 液力耦合器的特点 .....           | 183 |
| <b>第12章 汽车空调与空气悬架</b> .....   | 156 | 14.2.4 液力耦合器的特性曲线 .....         | 184 |
| 12.1 汽车空调制冷系统的组成与基本原理 .....   | 156 | 14.2.5 液力耦合器的分类 .....           | 185 |
| 12.1.1 汽车空调制冷系统的制冷原理 .....    | 156 | 14.2.6 液力耦合器与发动机的共同工作 .....     | 185 |
| 12.1.2 汽车空调制冷系统的组成 .....      | 156 | 14.2.7 液力耦合器的功用 .....           | 186 |
| 12.2 主动式悬架系统的结构与工作原理 .....    | 158 | 习题 .....                        | 187 |
| 12.2.1 主动式空气悬架系统 .....        | 158 | <b>第15章 汽车液力自动变速器</b> .....     | 189 |
| 12.2.2 主动式油气弹簧悬架系统 .....      | 159 |                                 |     |

---

|                          |     |                  |     |
|--------------------------|-----|------------------|-----|
| 15.1 电控自动变速器的组成及特点 ..... | 189 | 15.3.2 液压控制系统的工作 |     |
| 15.2 行星齿轮机构换挡原理 .....    | 190 | 原理 .....         | 192 |
| 15.3 自动变速器液压控制系统 .....   | 191 | 习题 .....         | 196 |
| 15.3.1 液压控制系统的组成 .....   | 191 | 参考文献 .....       | 197 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 汽车流体传动

### 1.1.1 流体传动的概念

凡是以流体为介质来传递动力和运动的，就称为流体传动。它包括液压传动、气压传动和液力传动，还包括风车、水泵、水轮机、压缩机、通风机等流体机械所进行的机械能量的变换与传递。

流体机械则是指那些以液体或气体为工作介质的机械设备。但是不包括以热能与机械能的转换为主的汽轮机、燃气轮机、内燃机等热力发动机。

随着汽车行业的飞速发展，流体传动在汽车工程中也得到了越来越广泛的应用。使得现代汽车成为机、电、液、计算机一体化的高新技术产品。

### 1.1.2 流体机械的分类

根据不同的分类原则，流体机械可以有不同的分类方式。

#### 1. 按不同的作用机理分类

1) 叶片式（也称动力式）流体机械。包括离心泵、轴流泵、通风机、压缩机等，也包括液力变矩器、液力耦合器等。其基本特点是工作过程借助于叶轮的作用来实现。

2) 容积式流体机械。包括各类以液、气为介质的往复式泵和转子泵、液压或气动马达、压缩机、液压缸、气缸等。它们的工作过程是通过工作容积的变化来实现的。

3) 其他流体机械。如射流泵、液环泵、旋涡泵、冲击式水轮机等。

叶片式和容积式是两类最基本的流体机械，它们共同的工作特点是具有既可以作为工作机械，也可以作为动力机械的工作可逆性，即如同电动机与发电机那样。而其他作用机理的流体机械则一般不具有这种可逆性。当然，作用机理的可逆性并不等于实际工程装置都可以可逆使用。

#### 2. 按不同的流体形态分类

按所用流体形态的不同可分为液体介质和气体介质两类流体机械。这两类机械由于介质密度相差悬殊，因此在单位功率体积比上相差很大，同时在介质密封的方法和具体结构上也有较大差别。

#### 3. 按工作中是否考虑流体的可压缩性分类

1) 流体介质可近似按密度为常数考虑的为不可压缩介质流体机械，各种液体介质机械和工作压力较低的通风机均属此类。这类流体机械经常被称为“水力机械”，因为水是最常见的不可压缩流体。

2) 必须考虑流体可压缩性的流体机械则称为可压缩流体机械，工作压力较高的鼓风

机、压缩机等气体介质机械，包括叶片式和容积式的，均属此类；它们的工作过程必须计及流体密度的变化因素和相应产生的热力过程。

#### 4. 按工作中流体是否有压力分类

1) 有压流动类。绝大多数流体机械在工作过程中流体是在封闭流道中运动的，相对压力一般不等于零，流动属有压流动。

2) 无压流动类。这类流体机械工作时流体运动有一个相对压力为零的自由表面，因此称无压流动。但液体内部各处相对压力也不一定完全为零。冲击式水轮机与无内环的液力偶合器等就属于这类流体机械。

#### 5. 按机械的作用功能分类

1) 动力机械类。它包括叶片式和容积式的泵、风机、压缩机等，其特点是吸收原动机提供的机械能，转换成流体的压力能或流体的动能输出。

2) 工作机械类。包括水轮机、液压或气动马达、液压缸，以及涡轮动力机，乃至风力发电的风车均属此类机械。其特点是将输入的流体的位能、压力能或动能，转换成机械能而输出（多数以转速和转矩形式输出）。

### 1.1.3 流体传动的分类

凡是以流体为介质来传递动力和运动的，就称为流体传动。流体分为液体和气体；属于液体传动的有液压传动和液力传动，属于气体传动的就是气压传动。本书所涉及的流体传动基本上分为三大类：

1) 液压传动。在密闭的容器内，依靠液体的压力能来传递动力和运动的，称为液压传动。

2) 液力传动。依靠液体的动能来传递动力和运动的，称为液力传动。

3) 气压传动。依靠压缩空气来传递动力和运动的，称为气压传动。

上述三类传动的共同特点就是在一个密封的系统中，由一种流体动力机械和一种流体工作机械有机组合而成为动力的传输、变换装置（系统）。如果密封不良就会导致效率下降，甚至丧失工作能力。至于它们的工作原理和组成，本书将在介绍了它们各自所依托的流体力学原理之后加以说明。

汽车流体传动就是介绍和研究流体传动在汽车上的应用与设计。

## 1.2 汽车流体传动与控制系统

### 1.2.1 汽车流体传动与控制系统的概念

汽车流体传动与控制系统是将传感检测技术、计算机控制技术和流体传动与控制技术有机结合的控制技术。

### 1.2.2 汽车流体传动与控制系统的组成与分类

#### 1. 汽车流体传动与控制系统的组成

汽车流体传动与控制系统是由传感器、ECU（计算机控制单元）控制器（如电磁阀）、

执行器（如液压缸）及动力元件（液压泵）五个部分所组成。其结构框图如图 1-1 所示。显然这是一个有反馈的闭环控制系统。同时也是一个需要对系统的实时状态进行检测，并反馈到 ECU（计算机控制单元）和控制器选择适当的控制策略，以保持各个时段始终处于期望的最佳状态的动态控制系统。

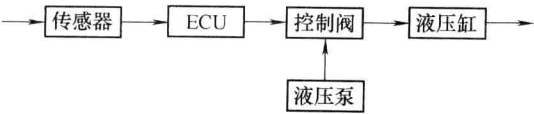


图 1-1 汽车流体传动与控制系统结构框图

2. 汽车常用传感器

汽车常用传感器见表 1-1。

表 1-1 汽车常用传感器

| 项 目    | 检测量、检测对象                                                        |
|--------|-----------------------------------------------------------------|
| 温度     | 冷却水，排出气体（催化剂）、吸入空气、发动机油、室外（内）空气                                 |
| 压力     | 吸气压（计示压力、绝对压力）、大气压、燃烧压、发动机油压、制动压、各种泵压、轮胎压                       |
| 转数     | 曲柄转角、曲柄转数、车轮速度、发动机转速                                            |
| 速度、加速度 | 车速（绝对）、角加速度                                                     |
| 流量     | 吸入空气量、燃料流量、废气再循环量、二次空气量                                         |
| 液量     | 燃料、冷却水、电池液、洗窗器液、发动机油、制动油                                        |
| 位移方位   | 节流阀开度、废气再循环阀升降量，车高（悬置、位移）、行驶距离、行驶方位                             |
| 排出气体   | O <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 、CO、NO <sub>x</sub> 、碳氢化合物、柴油烟  |
| 其他     | 转矩、爆震、燃料酒精成分、湿度、玻璃结露、鉴别饮酒、睡眠状态、电池电压、电池储能多少、灯泡断线、荷重、冲击物、轮胎失效率、液位 |

3. 汽车流体传动与控制系统的分类

汽车流体传动与控制系统按照所应用的流体传动方式不同分为：液压、液力和气压三种类型。这正是本书所要研究的内容。

习 题

- 1. 传动和传动机械是如何分类的？
- 2. 机、电、液一体化的含义是什么？为什么要研究汽车流体传动与控制技术？

## 第2章 液压流体力学基础

### 2.1 液压油的性质与选用

#### 2.1.1 液压油的主要性质

液压传动是以液体作为工作介质来传递能量的，最常见的工作介质是液压油。液压油的主要性质如下。

##### 1. 密度

单位体积的质量称为密度，通常用  $\rho$  来表示，一般液压油  $\rho$  的取值为  $900\text{kg/m}^3$ 。

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

式中  $m$ ——液体的质量 (kg)；

$V$ ——液体的体积 ( $\text{m}^3$ )。

液压油的密度随液体压力的升高而增大，随温度的升高而减小，但这种变化量通常不大，可以忽略不计。

##### 2. 可压缩性

液体的体积受压力作用而缩小的性质称为液体的可压缩性。可压缩性用体积压缩系数  $\alpha$  表示，设体积为  $V$  的液体，其压力变化量为  $\Delta p$ ，液体体积减小  $\Delta V$ ，则

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

由于压力增大时液体的体积减小，因此上式加负号，体积压缩系数  $k$  为正值。液体的可压缩性很小，在很多情况下可以忽略不计。当受压液体体积较大或进行液压系统的动态分析时，必须考虑液体的可压缩性。常用液压油的体积压缩系数  $\alpha = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

##### 3. 粘性

液体在外力作用下流动时，分子间的内聚力会阻止分子相对运动，因而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的粘性。液体只有在流动（或有流动趋势）时才会呈现出粘性，静止液体是不呈现粘性的。粘性是液体重要的物理性质，也是选择液压油的主要依据之一。

牛顿在研究液体运动规律时发现，液体流动时，粘性会使液体内部各层间的速度不等。如图 2-1 所示，设两平行平板间充满液体，下平板不动，上平板以速度  $u_0$  向右平移。由于液体的粘性作用，紧贴下平板的液体层速度为零，紧贴上平板的液体层速度为

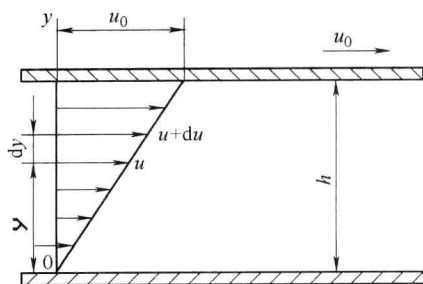


图 2-1 液体的粘性

$u_0$ ，而中间各层液体的速度近似呈线性规律分布。

实验测定结果指出，液体流动时相邻液层间的内摩擦力  $F$  与液层接触面积  $A$ 、液层间的相对速度  $du$  成正比，与层间距离  $dy$  成反比，即

$$F_f = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-3)$$

式中  $\mu$ ——比例常数，称为动力粘度。

若以  $\tau$  表示切应力（单位面积上的内摩擦力），则

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

这就是牛顿液体内摩擦定律。

液体粘性的大小用粘度来表示。常用的粘度有动力粘度和运动粘度。

1) 动力粘度  $\mu$ ，动力粘度又称绝对粘度，由式 (2-3) 可得

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

动力粘度的物理意义是：液体在单位速度梯度下流动时，接触液层间单位面积上产生的内摩擦力。动力粘度的法定计量单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，它与以前常用的非法定计量单位  $\text{P}$ （泊）（ $1\text{P} = 1\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ）之间的关系是

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP} \text{（厘泊）}$$

2) 运动粘度  $\nu$ ，动力粘度与液体密度的比值称为运动粘度，以  $\nu$  表示，即

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

运动粘度的法定计量单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

我国液压油采用  $40^\circ\text{C}$  时的运动粘度值（单位为  $\text{mm}^2/\text{s}$ ）作为其粘度等级标号，即油的牌号。例如牌号为 L-HL22 的普通液压油，就是指这种油液在  $40^\circ\text{C}$  时运动粘度平均值为  $22\text{mm}^2/\text{s}$ 。

液体的粘度随液体的压力和温度而变化。当液体压力增大时，分子间内聚力会增大，其粘度也增大。但增大的数值很小，可以忽略不计。

温度变化对液体的粘度影响较大，液体的温度升高其粘度显著下降，液体粘度随温度变化的性质称为粘温特性。几种典型液压油的粘温特性曲线如图 2-2 所示。

#### 4. 其他性质

液压油还有其他一些物理化学性质，如抗燃性、抗凝性、抗氧化性、抗泡沫性、抗乳化性、抗腐蚀性、防锈性、润滑性、导热性、相容性（主要是指对密封材料不侵蚀、不

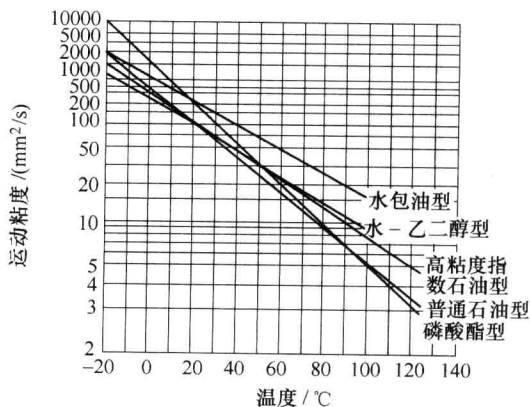


图 2-2 典型液压油的粘温特性曲线

溶胀的性质)以及纯净性等,都对液压系统工作性能有重要影响。对于不同品种的液压油,这些性质的指标也有所不同,具体可查阅油类产品手册。

### 2.1.2 液压油的选用

#### 1. 液压油的分类

液压油的品种很多,主要分为矿油型、乳化型和合成型三大类。

1) 矿油型。包括普通液压油、抗磨液压油、低温液压油、高粘度液压油、液压导轨油、其他专用液压油等。按照 ISO 规定,采用 40℃ 时油液的运动粘度值(单位为  $\text{mm}^2/\text{s}$ )作为油液粘度牌号,共分为 10、15、22、32、46、68、100、150 8 个等级。

2) 乳化型。包括水包油乳化液和油包水乳化液两类。

3) 合成型。包括水-乙二醇液、磷酸酯液两种。

常用的普通液压油代号为 L-HL<sup>\*</sup>,其他液压油的具体代号及其特性和用途,可查阅相关油类产品手册。

#### 2. 液压油的使用要求

1) 合适的粘度和良好的粘温特性。一般液压系统用油粘度  $\nu_{40} = (15 \sim 68) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。

2) 润滑性能好。

3) 纯净度好,杂质少。

4) 对热、氧化、水解都有良好的化学稳定性,使用寿命长。

5) 对金属及密封件材料等有良好的相容性。

6) 抗泡沫性、抗乳化性和缓蚀性好,腐蚀性小。

7) 比热容和传热系数大,体积膨胀系数小。

8) 闪点和燃点高,流动点和凝固点低。

#### 3. 液压油的选用

选用液压油时,一般要根据液压系统的使用性能和工作环境等因素来确定液压油的品种。品种确定之后,就要选择其粘度等级。在液压系统中选择油液粘度是关键,选择时应注意以下几个方面:

1) 工作压力。工作压力较高的系统宜选用粘度较大的液压油,以减少泄漏。

2) 运动速度。当液压系统的工作部件运动速度较高时,宜选用粘度较小的液压油,以减轻液流的摩擦损失。

3) 环境温度。环境温度较高时,宜选用粘度较大的液压油。

在液压系统的所有元件中,以液压泵对液压油的性能最为敏感。它温升高,工作压力也最高,因此,通常根据液压泵的类型及其要求来选择液压油的粘度。

## 2.2 液体静力学

### 2.2.1 液体的静压力

液体单位面积上所受的法向力在物理学上称为压强。在液压传动中习惯称为压力,用  $p$

(单位为 Pa) 表示。

液体静压力的特性:

- 1) 液体静压力垂直于受压表面, 且方向与该面的内法线方向一致。
- 2) 静止液体内任意一点的压力在各个方向上都相等。

### 2.2.2 液体静力学基本方程

如图 2-3a 所示, 密度为  $\rho$  的液体在容器内处于静止状态。为求任意深度  $h$  处的压力  $p$ , 可以假想从液面往下切取一个垂直小液柱作为研究体, 设液柱的面积为  $\Delta A$ , 高为  $h$ , 如图 2-3b 所示。由于液体静止, 则平衡方程为

$$p\Delta A = p_0\Delta A + \rho gh\Delta A$$

因此得

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2-7)$$

式 (2-7) 称为液体静力学基本方程。由式 (2-7) 可知, 静止液体内任意点的压力由两部分组成, 即液面上压力  $p_0$  和液体自重对该点的压力  $\rho gh$ 。静止液体内的压力随液体的深度呈线性规律分布。静止液体内同一深度的各点压力相等, 构成等压面。在重力作用下静止液体的等压面是一个水平面。

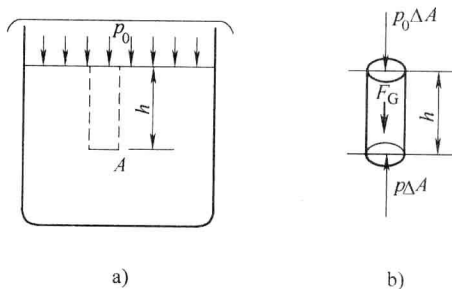


图 2-3 重力作用下的静止液体  
a) 容器内的液体 b) 假想的小液柱

### 2.2.3 压力的表示方法及单位

#### 1. 压力的表示方法

压力的表示方法有绝对压力和相对压力两种。绝对压力以绝对真空为基准来进行度量。相对压力以大气压力  $p_a$  为基准进行度量。由于大多数测压仪表所测得的压力都是相对压力, 所以相对压力也称为表压力。当液体中某点处的绝对压力  $p$  小于大气压力时, 就会产生真空, 并将绝对压力小于大气压力的数值称为该点的真空度。如图 2-4 所示, 绝对压力、相对压力、真空度的关系是:

$$\text{绝对压力} = \text{相对压力} + \text{大气压力}$$

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

绝对压力、相对压力和真空度的相互关系如图 2-4 所示。

#### 2. 压力单位

压力的法定计量单位为帕斯卡, 简称帕, 符号为 Pa。1Pa = 1N/m<sup>2</sup>。由于此单位很小, 因此常采用兆帕, 符号为 MPa, 1MPa = 10<sup>6</sup>Pa。

【例 2-1】如图 2-5 所示, 容器内盛有油液。已知油的密度  $\rho = 900\text{kg/m}^3$ , 活塞上的作用力  $F = 1000\text{N}$ , 活塞的面积  $A = 1 \times 10^{-3}\text{m}^2$ , 假设活塞的重量忽略不计。试问: 活塞下方深度  $h = 0.5\text{m}$  处的压力等于多少?

解: 活塞与液体接触面上的压力为

$$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{1000\text{N}}{1 \times 10^{-3}\text{m}^2} = 10^6\text{N/m}^2 \quad (2-8)$$

深度为  $h$  处的液体的压力为

$$p = p_0 + \rho gh = (10^6 + 900 \times 9.8 \times 0.5) \text{ Pa} = 1.0044 \times 10^6 \text{ Pa} \approx 1 \text{ MPa} \quad (2-9)$$

由此可以看出, 液体在受外界压力作用的情况下, 由液体自重所形成的那部分压力  $\rho gh$  相对较小, 在液压系统中常可忽略不计。

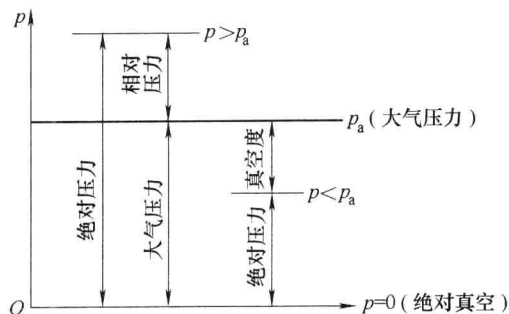


图 2-4 绝对压力、相对压力和真空度的相互关系

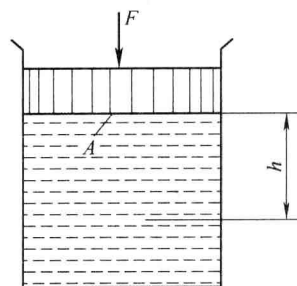


图 2-5 静止液体内的压力

## 2.2.4 帕斯卡原理

1650 年法国科学家帕斯卡在研究中发现, 在图 2-5 所示密闭容器内的液体, 当外力  $F$  发生变化时, 只要液体仍保持原来的静止状态不变, 则液体内任一点的压力将发生同样大小变化。就是说, 在密闭容器内的平衡液体中, 施加于静止液体的压力可以等值地传递到液体所有各点。这就是帕斯卡原理, 或称静压传递原理。根据帕斯卡原理, 容器内液体的压力  $p$  与负载  $F$  之间总是保持着正比关系, 即

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-10)$$

可见, 液体内的压力是由外界负载作用所形成的, 即压力决定于外负载, 这是液压传动的一个重要的基本概念。

## 2.2.5 液体对固体壁面的作用力

在液压传动计算中, 由于液体自重压力  $\rho gh$  可以忽略, 静压力处处相等, 所以可认为作用于固体壁面上的压力是均匀分布的。

如图 2-6a 所示, 当固体壁面是一个平面时, 压力  $p$  作用在活塞上的力  $F$  为

$$F = pA = p\pi D^2/4 \quad (2-11)$$

当固体壁面是一个曲面时, 作用在曲面各点的液体静压力是不平行的, 但是静压力的大小是相等的。图 2-7b、c 所示的球面和圆锥面, 液体静压力  $p$  沿垂直方向作用在球面和圆锥面上的力  $F$ , 就等于作用于该部分曲面在垂直方向的投影面积  $A$  与压力  $p$  的乘积, 即

$$F = pA = p\pi d^2/4 \quad (2-12)$$

式中  $d$ ——承压部分曲面投影圆的直径。

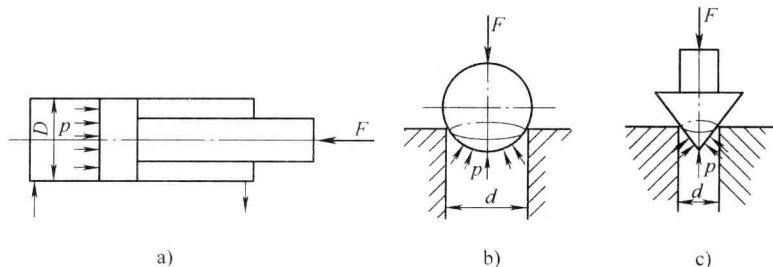


图 2-6 液压力作用在固体壁面上的力

a) 活塞平面 b) 球面 c) 圆锥面

### 2.2.6 液压传动的工作原理

图 2-7 所示为液压千斤顶的工作原理。当手提起杠杆 1 时，小活塞 2 下腔密封容积增大，腔内压力下降，形成部分真空，油箱 10 中的油液就在大气压力的作用下推开钢球 4 进入小缸 2 的下腔 3，完成一次吸油动作。压下杠杆 1，小活塞下移，下腔密封容积减小，腔内压力升高，这样就完成了机械能向压力能的转换。这时钢球 4 自动关闭了油液流回油箱的通路，油液就推开钢球 5 挤入大活塞 7 的下腔 6，推动大活塞将重物 8 向上顶起。这样就完成了压力能向机械能的转换。如此反复地提压杠杆 1，就可以使重物不断升起，达到起重的目的。将放油阀 9 旋转 90°，则在重物 8 的自重作用下，大缸内的油液流回油箱，活塞下降到原位。

通过上述例子，可以看到小活塞 2 与小缸 3 的组合是一个动力元件，它将机械能转换成液体的压力能输出——通常称为泵。大活塞 7 与大缸 6 的组合是一个工作元件，它将液体的压力能重新转换成机械能输出——通常称为缸。这种在密闭系统中，以液体（液压油）为工作介质，依靠液体压力能进行的动力传递就称为液压传动。液压传动的工作原理就是帕斯卡原理。

液压传动系统的组成除了上述的动力元件（泵）与工作元件（缸）以外，还有控制元件（阀）和辅助元件等。辅助元件是指除泵、缸和阀三种元件以外的其他装置，如油管、接头、油箱等，如图 2-7 所示。

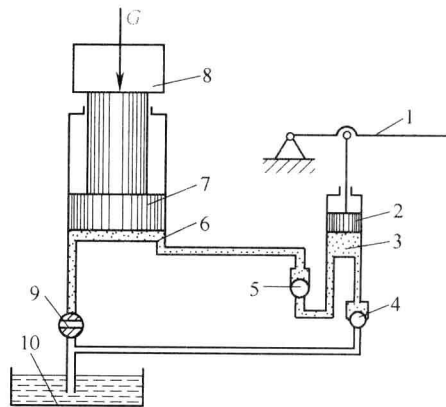


图 2-7 液压千斤顶的工作原理

1—杠杆 2—小活塞 3—小缸 4、5—钢球  
6—大缸 7—大活塞 8—重物  
9—放油阀 10—油箱

## 2.3 液体动力学

### 2.3.1 基本概念

#### 1. 理想液体和恒定流动

1) 理想液体。理想液体是一种假想的无粘性、不可压缩的液体。而实际液体是既有粘