



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育“十五”国家级规划教材

普通高等教育“九五”国家级重点教材



# Hydraulic and Pneumatic Transmission

# 液压与气压传动

第 5 版

左健民 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十五”国家级规划教材  
普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 液压与气压传动

第 5 版

主 编 左健民  
主 审 王积伟 韩屋谷

机械工业出版社

本书分液压传动和气压传动两篇,共十六章。第一篇为液压传动,主要讲述了液压传动基础知识、液压元件、液压基本回路、典型液压传动系统、液压伺服和电液比例控制技术及液压传动系统设计。第二篇为气压传动,主要讲述了气压传动基础知识、气源装置、气动元件、气动基本回路以及气动程序控制系统的设计方法。本书在着重基本概念与原理阐述的同时,突出其应用,旨在培养学生的工程应用和设计能力。

本书可供高等工科院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程(机电一体化)、过程装备与控制工程、车辆工程、材料成型及控制工程、自动化、交通工程等专业的学生使用,也适用于各类成人高校、自学考试有关机械工程类专业的学生,还可供工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/左健民主编. —5版. —北京:机械工业出版社, 2016.4

普通高等教育“十五”国家级规划教材 普通高等教育“九五”国家级重点教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 “十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-52968-2

I. ①液… II. ①左… III. ①液压传动-高等学校-教材②气压传动-高等学校-教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第028705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:余 皞 责任编辑:余 皞 章承林 商红云

版式设计:霍永明 责任校对:张 征

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016年7月第5版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·449千字

标准书号:ISBN 978-7-111-52968-2

定价:39.80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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

# 前言

根据“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材建设规划和机械工业出版社的安排，编者对本书第4版进行了修订。面对工业4.0和中国制造2025的发展路径安排，中国工业企业在“两化融合”和智能制造的发展过程中，迫切需要大批掌握高新技术、有工程实践经验的高层次应用型人才，高等教育也面临着新的机遇与挑战。随着现代技术的发展和教育教学改革的深入，高等学校人才培养模式的改革也成为非常紧迫的任务，我们的高等教育在规模快速发展后如何切实提高质量，培养出社会经济发展需要的高技术人才是每一个教育工作者需要思考的问题。人才培养模式的改革涉及理论教学体系和实践教学体系的构建，也就涉及课程、教学内容和教材。而教材对教与学的双方都起着重要的作用，作为教材的编者，不仅要考虑到自身教学实践中对教材内容的要求，还要考虑教材使用者的需要，因此，对教材内容的增删就需十分慎重。这不仅是保持一本成熟教材的内容应有的态度，也是对广大使用者和读者的一种尊重。

液压传动与气压传动技术是自动化和智能制造生产中的先进科学技术之一，在现代科学技术发展中占有非常重要的地位。“液压与气压传动”课程既是机械工程学科机械制造及其自动化、机械电子工程、过程装备与控制工程、车辆工程、材料成型及控制工程等专业的专业基础课程，也是自动化、轻工机械等专业的重要技术类课程。本书的配套教辅《液压与气压传动学习指导与例题集》也已由机械工业出版社出版，编者从指导读者学习的角度，对主教材中的难度和重点内容进行了分析和讲授，从教材中选择了大量的例题进行了详细的解答，旨在帮助读者掌握教材内容，提高分析问题和解决问题的能力。与教材配套的教学平台也已上线。作为教材的主编，也希望教材、配套教辅和学习资源库在人才培养、促进新技术的发展等方面发挥积极的作用。

本书第1版由左健民主编，樊瑞、陈国强任副主编，朱建新、汪虹、高佩川、韩淑英等参编。燕山大学韩屋谷教授任主审，张怀德工程师任副主审。

本书第2版获评“九五”国家级重点教材，修订工作由左健民统筹，王芙蓉、陈国强参加了修订工作。第2版由燕山大学韩屋谷教授任主审。

本书第3版获评“十五”国家级规划教材，修订工作由左健民负责，燕山大学韩屋谷教授任主审。

本书第4版获评“十一五”国家级规划教材，修订工作由左健民负责，燕山大学韩屋谷教授、东南大学王积伟教授任主审。

IV

本书此次修订由左健民统筹，东南大学王积伟教授、燕山大学韩屋谷教授任主审。在修订过程中，得到了许多同行和读者的关心和支持，王保升、孙孟辉、陈键、杨龙、贡林欢等老师和团队的研究生参加了本次修订工作，并在资源库建设、图形修改等方面给予了很大的帮助。由于编者水平所限，书中定有许多不到之处，敬请广大读者指正。

编 者

# 目录

## 前言

绪论 .....	1
----------	---

## 第一篇 液压传动

<b>第一章 液压传动基础知识</b> .....	9
第一节 液压传动工作介质 .....	9
第二节 液体静力学 .....	18
第三节 液体动力学 .....	23
第四节 定常管流的压力损失计算 .....	32
第五节 孔口和缝隙流动 .....	37
第六节 空穴现象 .....	44
第七节 液压冲击 .....	45
习题 .....	48
<b>第二章 液压动力元件</b> .....	52
第一节 液压泵概述 .....	52
第二节 齿轮泵 .....	55
第三节 叶片泵 .....	59
第四节 柱塞泵 .....	68
第五节 液压泵的噪声 .....	73
第六节 液压泵的选用 .....	74
习题 .....	75
<b>第三章 液压执行元件</b> .....	76
第一节 液压马达 .....	76
第二节 液压缸 .....	80
习题 .....	90
<b>第四章 液压控制元件</b> .....	91
第一节 概述 .....	91
第二节 方向控制阀 .....	92
第三节 压力控制阀 .....	101
第四节 流量控制阀 .....	110
第五节 叠加式液压阀 .....	116
第六节 二通式插装阀 .....	118
第七节 液压阀的连接 .....	123
习题 .....	125
<b>第五章 液压辅助元件</b> .....	127
第一节 管路和管接头 .....	127
第二节 油箱 .....	129
第三节 过滤器 .....	130
第四节 密封装置 .....	133
第五节 蓄能器 .....	136
习题 .....	139
<b>第六章 液压基本回路</b> .....	140
第一节 压力控制回路 .....	140
第二节 速度控制回路 .....	145
第三节 多缸工作控制回路 .....	157
第四节 其他回路 .....	160
习题 .....	162
<b>第七章 典型液压传动系统</b> .....	165
第一节 组合机床动力滑台液压系统 .....	166
第二节 万能外圆磨床液压系统 .....	168
第三节 液压压力机液压系统 .....	173
第四节 装卸堆码机液压系统 .....	176
习题 .....	178
<b>第八章 液压伺服和电液比例控制技术</b> .....	180
第一节 液压伺服控制 .....	180
第二节 电液比例控制 .....	184
第三节 计算机电液控制技术 .....	186

习题	189
<b>第九章 液压系统的设计与计算</b>	<b>190</b>
第一节 明确设计要求,进行工况分析	190
第二节 拟定液压系统原理图	193
第三节 液压元件的计算和选择	194

第四节 液压系统的性能验算	196
第五节 绘制工作图和编制技术文件	197
第六节 液压系统设计计算举例	198
习题	205

## 第二篇 气压传动

<b>第十章 气压传动基础知识</b>	<b>208</b>
第一节 空气的物理性质	208
第二节 气体状态方程	210
第三节 逻辑运算简介	211
习题	213
<b>第十一章 气源装置及气动辅助元件</b>	<b>214</b>
第一节 气源装置	214
第二节 气源净化装置	216
第三节 其他辅助元件	219
第四节 供气系统的管道设计	223
习题	225
<b>第十二章 气动执行元件</b>	<b>226</b>
第一节 气缸	226
第二节 气动马达	234
习题	235
<b>第十三章 气动控制元件</b>	<b>236</b>
第一节 方向控制阀	236
第二节 压力控制阀	241
第三节 流量控制阀	243
第四节 气动逻辑元件	244
第五节 气动比例阀及气动伺服阀	248
习题	250
<b>第十四章 气动基本回路</b>	<b>251</b>

第一节 换向回路	251
第二节 速度控制回路	252
第三节 压力控制回路	254
第四节 气液联动回路	255
第五节 计数回路	256
第六节 延时回路	257
第七节 安全保护和操作回路	257
第八节 顺序动作回路	259
习题	260
<b>第十五章 气动程序系统及其设计</b>	<b>261</b>
第一节 行程程序控制系统的设计步骤	261
第二节 多缸单往复行程程序回路设计	262
第三节 多缸多往复行程程序回路设计	269
习题	272
<b>第十六章 气压传动系统实例</b>	<b>273</b>
第一节 气动机械手气压传动系统	273
第二节 气动钻床气压传动系统	275
第三节 气液动力滑台气压传动系统	277
第四节 工件夹紧气压传动系统	278
习题	279
<b>附录 常用液压与气动元件图形符号</b>	<b>280</b>
<b>参考文献</b>	<b>284</b>

# 绪 论

## 一、 液压与气压传动的研究对象

液压与气压传动是研究以有压流体（压力油或压缩空气）为能源介质，来实现各种机械的传动和自动控制的学科。液压传动与气压传动实现传动和控制的方法是基本相同的，它们都是利用各种控制元件组成所需要的各种控制回路，再由若干回路有机组合成能完成一定控制功能的传动系统来进行能量的传递、转换与控制。因此，要研究液压与气压传动及其控制技术，就首先要了解传动介质的基本物理性能及其静力学、运动学和动力学特性；要了解组成系统的各类液压与气动元件的结构、工作原理、工作性能以及由这些元件所组成的各种控制回路的性能和特点，并在此基础上进行液压与气压传动控制系统的设计。

液压传动所用的工作介质为液压油或其他合成液体，气压传动所用的工作介质为空气。由于这两种流体的性质不同，所以液压传动和气压传动又各有其特点。液压传动传递动力大，运动平稳。但由于液体黏性大，在流动过程中阻力损失大，因而不宜做远距离传动和控制；而气压传动由于空气的可压缩性大，且工作压力低（通常在 1.0MPa 以下），所以传递动力不大，运动也不如液压传动平稳。但空气黏性小，传递过程中阻力小、速度快、反应灵敏，因而气压传动能用于远距离的传动和控制。

## 二、 液压与气压传动的工作原理

液压与气压传动的 basic 工作原理是相似的。现以图 0-1 所示的液压千斤顶来简述液压传动的工作原理。由图 0-1a 可知，大缸体 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。杠杆手柄 1、小缸体 2、小活塞 3、单向阀 4 和 7 组成手动液压泵。如提起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，这时单向阀 4 打开，通过吸油管 5 从油箱 12 中吸油；用力压下手柄，小活塞下移，小缸体下腔压力升高，单向阀 4 关闭，单向阀 7 打开，小缸体下腔的油液经管道 6 和单向阀 7 输入大缸体 9 的下腔，迫使大活塞 8 向上移动，顶起重物。再次提起手柄吸油时，举升缸下腔的压力油将力图倒流入手动泵内，但此时单向阀 7 自动关闭，使油液不能倒流，从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动手柄，就能不断地把油液压入举升缸下腔，使重物逐渐地升起。如果打开截止阀 11，举升缸下腔的油液通过管道 10、截止阀 11 流回油箱，大活塞在重物和自重作用下向下移动，回到原始位置。

图 0-1b 所示为液压千斤顶的简化模型，据此可分析两活塞之间的力比例关系、运动关系和功率关系。

### 1. 力比例关系

当大活塞上有重物负载  $W$  时，大活塞下腔的油液就将产生一定的压力  $p$ ， $p = W/A_2$ ，根



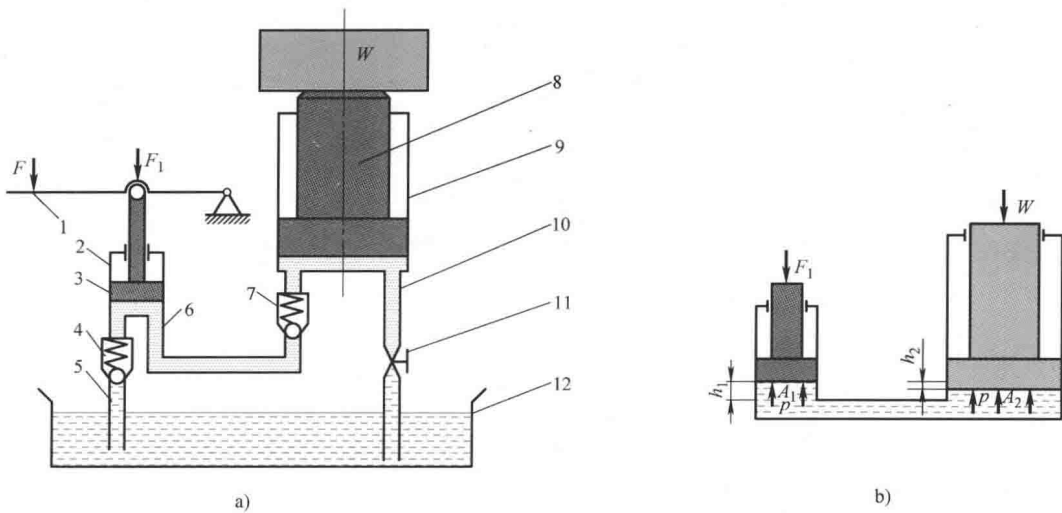


图 0-1 液压千斤顶

a) 液压千斤顶的工作原理图 b) 液压千斤顶的简化模型

 1—杠杆手柄 2—小缸体 3—小活塞 4、7—单向阀 5—吸油管 6、10—管道  
 8—大活塞 9—大缸体 11—截止阀 12—通大气式油箱

据帕斯卡原理：“在密闭容器内，施加于静止液体上的压力将以等值同时传到液体各点”。因而要顶起大活塞及其重物负载  $W$ ，在小活塞下腔就必须产生一个等值的压力  $p$ ，也就是说小活塞上必须施加力  $F_1$ ， $F_1 = pA_1$ ，因而有

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{W}{A_2}$$

或 
$$\frac{W}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad (0-1)$$

式中， $A_1$ 、 $A_2$  分别为小活塞和大活塞的作用面积； $F_1$  为杠杆手柄作用在小活塞上的力。

式 (0-1) 是液压传动和气压传动中力传递的基本公式。由于  $p = W/A_2$ ，因此，当负载  $W$  增大时，流体工作压力  $p$  也要随之增大，亦即  $F_1$  要随之增大；反之若负载  $W$  很小，流体压力就很低， $F_1$  也就很小。由此建立了一个很重要的基本概念，即在液压和气压传动中，工作压力取决于负载，而与流入的流体多少无关。

## 2. 运动关系

如果不考虑液体的可压缩性、漏损和缸体、油管的变形，则从图 0-1b 可以看出，被小活塞压出的油液的体积必然等于大活塞向上升起后大缸体下腔扩大的体积，即

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

或 
$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (0-2)$$

式中， $h_1$ 、 $h_2$  分别为小活塞和大活塞的位移。

由式 (0-2) 可知，两活塞的位移和两活塞的面积成反比。将  $A_1 h_1 = A_2 h_2$  两端同除以活

塞移动的时间  $t$  得

$$A_1 \frac{h_1}{t} = A_2 \frac{h_2}{t}$$

即

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (0-3)$$

式中,  $v_1$ 、 $v_2$  分别为小活塞和大活塞的运动速度。

由式 (0-3) 可知, 活塞的运动速度和活塞的作用面积成反比。

$Ah/t$  的物理意义是单位时间内液体流过截面积为  $A$  的某一截面的体积, 称为流量  $q$ <sup>①</sup>, 即

$$q = Av$$

因此

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (0-4)$$

如果已知进入缸体的流量  $q$ , 则活塞的运动速度为

$$v = \frac{q}{A} \quad (0-5)$$

调节进入缸体的流量  $q$ , 即可调节活塞的运动速度  $v$ , 这就是液压传动与气压传动能实现无级调速的基本原理。从式 (0-5) 可得到另一个重要的基本概念, 即活塞的运动速度取决于进入液压 (气压) 缸 (马达) 的流量, 而与流体压力大小无关。

### 3. 功率关系

由式 (0-1) 和式 (0-3) 可得

$$F_1 v_1 = W v_2 \quad (0-6)$$

式 (0-6) 左端为输入功率, 右端为输出功率。这说明在不计损失的情况下输入功率等于输出功率。由式 (0-6) 还可得出

$$P = p A_1 v_1 = p A_2 v_2 = pq \quad (0-7)$$

由式 (0-7) 可以看出, 液压与气压传动中的功率  $P$  可以用压力  $p$  和流量  $q$  的乘积来表示, 压力  $p$  和流量  $q$  是流体传动中最基本、最重要的两个参数, 它们相当于机械传动中的力  $F$  和速度  $v$ , 它们的乘积即为功率。

从以上分析可知, 液压与气压传动是以流体的压力能来传递动力的。

## 三、液压与气压传动系统的组成

图 0-2 所示为一驱动机床工作台的液压传动系统, 它由油箱 1、过滤器 2、液压泵 3、溢流阀 4、换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7、液压缸 8、工作台 9 以及连接这些元件的油管、管接头等组成。该系统的工作原理是: 液压泵由电动机带动旋转后, 从油箱中吸油, 油液经过过滤器进入液压泵的吸油腔, 当它从液压泵中输出进入压力油路后, 在图 0-2a 所示状态下, 通过换向阀 5、节流阀 6, 经换向阀 7 进入液压缸 8 的左腔, 此时液压缸右腔的油液经换向阀 7 和回油管排回油箱, 液压缸中的活塞推动工作台 9 向右移动。

如果将换向阀 7 的手柄移动成图 0-2b 所示的状态, 则经节流阀 6 的压力油将由换向阀 7

① 流量  $q$ ——全书中涉及的流量主要为体积流量, 而非质量流量。因此体积流量在书中简称为流量, 符号用  $q$ ; 而质量流量的符号用  $q_m$ , 名称不变。

进入液压缸 8 的右腔，此时液压缸左腔的油经换向阀 7 和回油管排回油箱，液压缸中的活塞将推动工作台向左移动。因而换向阀 7 的主要功用就是控制液压缸及工作台的运动方向。系统中换向阀 5 若处于图 0-2c 所示的位置，则液压泵输出的压力油将经换向阀 5 直接回油箱，系统处于卸荷状态，液压油不能进入液压缸，所以换向阀 5 又称为开停阀。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀的开口大时，进入液压缸的油液流量就大，工作台移动速度就快；反之，工作台移动速度将减慢。因而节流阀 6 的主要功用是控制进入液压缸的流量，从而控制液压缸活塞的运动速度。

液压缸推动工作台移动时必须克服液压缸所受到的各种阻力，因而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。在液压缸活塞面积一定的情况下要克服的阻力越大，液压缸中的油液压力就越高；反之压力就越低。系统中输入液压缸的油液的流量由节流阀调节，液压泵所输出的多余的油液须经溢流阀和回油管排回油箱，这只有在压力管路中的油液压力对溢流阀的阀芯（图中为钢球）的作用力等于或略大于溢流阀中弹簧的预压力时，油液才能顶开溢流阀中的钢球流回油箱，所以在图示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（由负载决定的）不一样大。一般情况下，液压泵出口处的压力值应略大于液压缸中的油液压力，因而溢流阀在液压系统中的主要功用是控制和调节系统的工作压力。

图 0-3 所示为一可完成某程序动作的气压传动系统，其中的控制装置是由若干气动元件组成的气动逻辑回路。它可以根据气缸活塞杆的始末位置，由行程开关等传递信号，在做出逻辑判断后指示气缸下一步的动作，从而实现规定的自动工作循环。

由上面的例子可以看出，液压与气压传动系统主要由以下几个部分组成：

(1) 能源装置 是把机械能转换成流体的压力能的装置，一般最常见的是液压泵或空气压缩机。

(2) 执行装置 是把流体的压力能转换成机械能的装置，一般指做直线运动的液（气）压缸、做回转运动的液（气）压马达等。

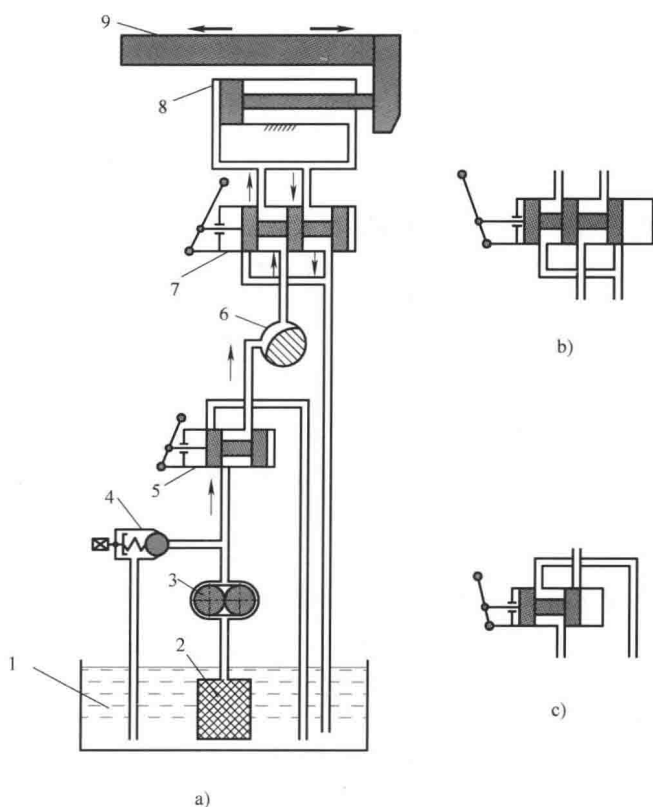


图 0-2 机床工作台的液压传动系统

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

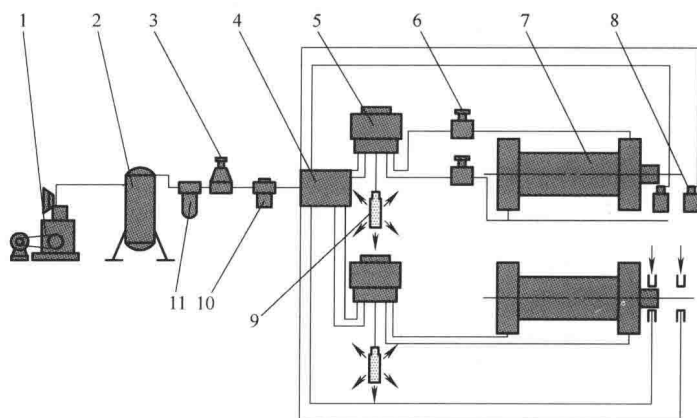


图 0-3 气压传动系统的组成

1—气压发生装置 2—储气罐 3—压力控制阀 4—逻辑元件 5—方向控制阀 6—流量控制阀  
7—气缸 8—行程开关 9—消声器 10—油雾器 11—过滤器

(3) 控制调节装置 是对液（气）压系统中流体的压力、流量和流动方向进行控制和调节的装置。例如溢流阀、节流阀、换向阀等。这些元件的不同组合组成了能完成不同功能的液（气）压系统。

(4) 辅助装置 是指除以上三种以外的其他装置，如油箱、过滤器、空气过滤器、油雾器、蓄能器等，它们对保证液（气）压系统可靠和稳定地工作有重大作用。

(5) 传动介质 是指传递能量的流体，即液压油或压缩空气。

#### 四、液压与气压传动的优缺点

液压与气压传动同电力拖动系统、机械系统相比有许多优异的特点。下面从拖动负载能力和控制方式性能两个方面进行比较。

##### 1. 拖动负载能力

由于气压传动系统的使用压力一般在  $0.2 \sim 1.0 \text{ MPa}$  范围之内，因此它不能作为功率大的动力系统。在此只对液压传动系统与电力拖动系统做比较。从所能达到的最大功率看，液压系统不如电力拖动系统。但液压传动最突出的优点是出力大、质量小、惯性小以及输出刚度大。可用以下指标来表示：

(1) 功率-质量比大 这意味着同样功率的控制系统，液压系统体积和质量小，这是为机电元件，例如电动机由于受到磁性材料饱和作用的限制，单位质量的设备所能输出的功率比较小。液压系统可以通过提高系统的压力来提高输出功率，这时仅受到机械强度和密封技术的限制。在典型情况下，发电机和电动机的功率-质量比仅为  $165 \text{ W/kg}$  左右，而液压泵和液压马达的功率-质量比可达  $1650 \text{ W/kg}$ ，是机电元件的 10 倍。在航空、航天技术领域应用的液压马达的功率-质量比可达  $6600 \text{ W/kg}$ ；做直线运动的动力装置与液压缸相比差距将更加悬殊，从单位面积出力来看，液压缸的出力一般可达到  $(7.0 \sim 30) \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ，而直流直线式电动机为  $0.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  左右。

(2) 力-质量比 液压缸的力-质量比一般为  $13000 \text{ N/kg}$ ，而直流直线式电动机仅为  $130 \text{ N/kg}$ 。一般回转式液压马达的转矩-惯量比是同容量电动机的 10~20 倍，一般液压马达

为  $61 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$  (近年来发展的无槽电动机具有很高的转矩-惯量比,与液压马达相当)。转矩-惯量比大,意味着液压系统能够产生大的加速度,也就是说时间常数小,响应速度快,具有优良的动态品质。

## 2. 控制方式性能

液压与气压传动在组成控制系统时,与机械装置相比,其主要优点是操作方便、省力,系统结构空间的自由度大,易于实现自动化,且能在很大的范围内实现无级调速,传动比可达  $100:1$  至  $2000:1$ 。如与电气控制相配合,可较方便地实现复杂的程序动作和远程控制。此外,液压与气压传动还具有传递运动均匀平稳,反应速度快,冲击小,能高速启动、制动和换向等优点;易于实现过载保护;液压与气压控制元件标准化、系列化和通用化程度高,有利于缩短系统的设计、制造周期和降低制造成本。

当然,液压与气压传动也有一定的缺点,例如传动介质易泄漏和可压缩性会使传动比不能严格保证;由于能量传递过程中压力损失和泄漏的存在使传动效率低;液压与气压传动装置不能在高温下工作;液压与气压控制元件制造精度高以及系统工作过程中发生故障不易诊断等。

气压传动与液压传动相比,有如下优点:

1) 空气可以从大气中取之不竭,无介质费用和供应上的困难,可将用过的气体直接排入大气,处理方便。泄漏不会严重影响工作,不会污染环境。

2) 空气的黏性很小,在管路中的阻力损失远远小于液压传动系统,宜用于远程传输及控制。

3) 气压传动工作压力低,元件的材料和制造精度低。

4) 气压传动维护简单,使用安全,无油的气动控制系统特别适用于电子元器件的生产过程,也适用于食品及医药的生产过程。

5) 气动元件可以根据不同场合,采用相应材料,使元件能够在恶劣的环境(强振动、强冲击、强腐蚀和强辐射等)下进行正常工作。

气压传动与电气、液压传动相比有以下缺点:

1) 气压传动装置的信号传递速度限制在声速(约  $340 \text{ m/s}$ ) 范围内,所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置,并且信号要产生较大的失真和延滞,也不便于构成较复杂的控制系统,但这个缺点对工业生产过程不会造成困难。

2) 空气的压缩性远大于液压油的压缩性,因此在动作的响应能力、工作速度的平稳性方面不如液压传动。

3) 气压传动系统出力较小,且传动效率低。

## 五、液压与气压传动的应用及发展

在工业生产的各个部门应用液压与气压传动技术的出发点是不尽相同的。例如,工程机械、矿山机械、压力机械和航空工业中采用液压传动的主要原因是取结构简单、体积小、质量小、输出力大的特点;机床上采用液压传动是取其能在工作过程中方便地实现无级调速,易于实现频繁的换向,易于实现自动化的特点;在电子工业、包装机械、印染机械、食品机械等方面应用气压传动主要是取其操作方便,且无油、无污染的特点。表 0-1 是液压与气压传动在各类机械行业中的应用举例。

表 0-1 液压与气压传动在各类机械行业中的应用举例

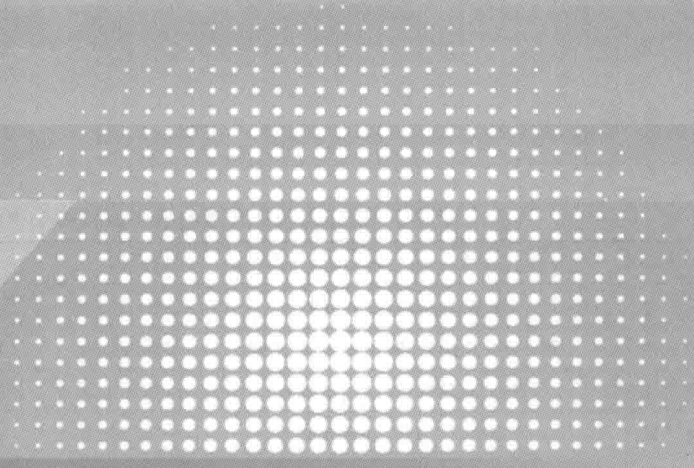
行业名称	应用举例	行业名称	应用举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机	轻工机械	打包机、注射机、包装机械
矿山机械	凿石机、开掘机、提升机、液压支架	灌装机械	食品包装机、真空镀膜机、化肥包装机
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机	汽车工业	智能生产线、自卸式汽车、汽车起重机
冶金机械	轧钢机、压力机、步进加热炉	铸造机械	砂型压实机、加料机、压铸机
锻压机械	压力机、模锻机、空气锤	纺织机械	织布机、抛砂机、印染机
机械制造	数控机床、加工中心、组合机床、压力机、自动线		

液压与气压传动发展到目前的水平主要是由于液压与气压传动本身的特点所致，随着工业的发展，液压与气压传动技术必将更加广泛地应用于各个工业领域。

液压技术自 18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起，已有 200 多年的历史了，但其真正的发展只是在第二次世界大战后 70 多年的时间内，战后液压技术迅速向民用工业转移，在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步推广。20 世纪 60 年代以来，随着原子能技术、空间技术、计算机技术的发展，液压技术得到了很大的发展，并渗透到各个工业领域中去。当前液压技术正向高压、高速、大功率、高效、低噪声、高可靠性、高度集成化的方向发展。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）、计算机实时控制技术、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术，以及污染控制技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

气压传动技术在科技飞速发展的当今世界发展将更加迅速。随着工业的发展，气动技术的应用领域已从汽车、采矿、钢铁、机械工业等行业迅速扩展到化工、轻工、食品、军事工业等各行各业。气动技术已发展成包含传动、控制与检测在内的自动化技术。由于工业自动化技术的发展，气动控制技术以提高系统可靠性，降低总成本为目标，研究和开发系统控制技术和机、电、液、气综合技术。显然，气动元件当前发展的特点和研究方向主要是节能化、小型化、轻量化、位置控制的高精度化，以及与电子学相结合的综合控制技术。

随着智能制造技术的发展，液压与气压传动技术在精益生产、智能生产线、无人化工厂等制造领域的应用也日益广泛。伴随着中国制造 2025 的发展进程，液压与气压传动技术在制造业转型升级中也将发挥越来越重要的作用。



# 第一篇

## 液压传动



# 第一章

## 液压传动基础知识

流体传动包括液体传动和气体传动。以液体的静压能传递动力的液压传动是以油液作为工作介质的，为此必须了解油液的种类、物理性质，研究油液的静力学、运动学和动力学规律。本章主要介绍这方面的内容。

从微观的观点来看，油液与其他流体相同，也是由一个一个的、不断做不规则运动的分子组成的。分子之间存在着间隙，它们是不连续的。但是由于分子之间的间隙是极其微小的，因而在研究宏观的机械运动时可以认为它是一种连续介质，这样就可以把油液的运动参数看作是时间和空间的连续函数，并有可能利用数学语言来描述它的运动规律。

另一方面，由于油液分子与分子间的内聚力极小，几乎不能抵抗任何拉力而只能承受较大的压应力；不能抵抗剪切变形而只能对变形速度呈现阻力。不管作用的剪力怎样微小，油液总会发生连续的变形，这就是油液的易流动性，它使得油液本身不能保持一定的形状，只能呈现所处容器的形状。

### 第一节 液压传动工作介质

液体是液压传动的工作介质。最常用的工作介质是液压油。此外，还有乳化型传动液和合成型传动液。

#### 一、液压传动工作介质的性质

##### 1. 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度。体积为  $V$ 、质量为  $m$  的液体的密度  $\rho$  为

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

矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减小，随压力的提高而稍有增加，但变动值很小，可以认为是常值。我国采用  $20^{\circ}\text{C}$  时的密度作为油液的标准密度，以  $\rho_{20}$  表示。常用液压油和传动液的密度见表 1-1。

表 1-1 常用液压油和传动液的密度

(单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

种 类	$\rho_{20}$	种 类	$\rho_{20}$
石油基液压油	850~900	增黏型高水基液	1003
水包油乳化液	998	水-乙二醇液	1060
油包水乳化液	932	磷酸酯液	1150

##### 2. 可压缩性

压力为  $p_0$ 、体积为  $V_0$  的液体，如压力增大  $\Delta p$  时，体积减小  $\Delta V$ ，则此液体的可压缩性



可用体积压缩系数  $\kappa$ ，即单位压力变化下的体积相对变化量来表示

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

由于压力增大时液体的体积减小，因此上式右边须加一负号，以使  $\kappa$  成为正值。液体体积压缩系数的倒数，称为体积弹性模量  $K$ ，简称体积模量。即  $K=1/\kappa$ 。表 1-2 为各种液压传动工作介质的体积模量。由表中石油型液压油的体积模量可知，它的可压缩性是普通钢材的 100~150 倍。

液压传动工作介质的体积模量和温度、压力有关：温度增加时， $K$  值减小。在液压传动工作介质正常的工作范围内， $K$  值的变化为 5%~25%；压力增大时， $K$  值增大。但这种变化不呈线性关系，当  $p \geq 3\text{MPa}$  时， $K$  值基本上不再增大。液压传动工作介质中如混有气泡时， $K$  值将大大减小。

封闭在容器内的液体在外力作用下的情况极像一个弹簧：外力增大，体积减小；外力减小，体积增大。这种弹簧的刚度  $k_h$ ，在液体承压面积  $A$  不变时（图 1-1），可以通过压力变化  $\Delta p = \Delta F/A$ 、体积变化  $\Delta V = A\Delta l$ （ $\Delta l$  为液柱长度变化量）和式（1-2）求出，即

$$k_h = \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{A^2 K}{V} \quad (1-3)$$

表 1-2 各种液压传动工作介质的体积模量（20℃，大气压）

液压传动工作介质种类	$K/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$
石油型	$(1.4 \sim 2.0) \times 10^9$
水包油乳化液(W/O型)	$1.95 \times 10^9$
水-乙二醇液	$3.15 \times 10^9$
磷酸酯液	$2.65 \times 10^9$

液压传动工作介质的可压缩性对在液压系统的动态性能影响较大；但对于对动态性能要求不高、仅考虑静态（稳态）下工作的液压系统，一般可以不予考虑。

### 3. 黏性

液体在外力作用下流动时，分子间的内聚力要阻止分子相对运动而产生的一种内摩擦力，这种现象称为液体的黏性。液体只有在流动（或有流动趋势）时才会呈现出黏性，静止液体是不呈现黏性的。

黏性使流动液体内部各处的速度不相等。以图 1-2 为例，若两平行平板间充满液体，下平板不动，而上平板以速度  $u_0$  向右平动。由于液体的黏性，紧靠下平板和上平板的液体层速度分别为零和  $u_0$ ，而中间各液层的速度则视它距下平板的距离按曲线规律或线性规律变化。

根据试验测定，液体流动时相邻液层间的内摩擦力  $F_t$  与液层接触面积  $A$ 、液层间的速度梯度  $du/dy$  成正比，即

$$F_t = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中， $\mu$  为比例常数，称为黏性系数或黏度。如以  $\tau$  表示切应力，即单位面积上的内摩擦