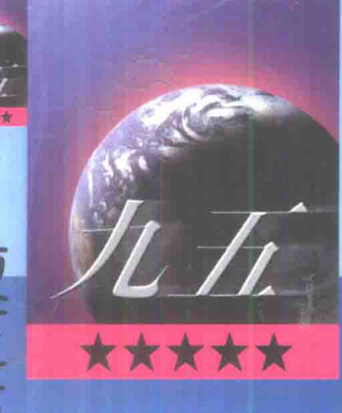




普通高等教育“九五”部级重点教材

B

普通高等教育机电类规划教材

液压与气压传动

东南大学 章宏甲
上海大学 黄 谊 主编
东南大学 王积伟



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

液 压 与 气 压 传 动

主编 章宏甲 黄 谊 王积伟

参编 (按姓氏笔划为序)

许映秋 杨林森 陆鑫盛

郁凯元 温济全

主审 林廷圻



机 械 工 业 出 版 社

本书是全国高等学校机电类专业教学指导委员会审定推荐的大学机械设计、制造及其自动化专业本科生教材,被列为“九五”原机械工业部重点教材。

全书共分八章:第一、二两章介绍流体传动的基本理论,第三章介绍能源装置及辅件,第四、五两章介绍液压与气动的执行和控制元件的作用原理、性能和用途,第六、七两章介绍液压与气动的基本回路和典型系统的应用与分析,第八章介绍液压与气动系统的设计步骤和方法。

本书的特点是:将液压部分与气动部分合在一起编写;强调理论联系实际,书中列举了大量实践的例子;除一般机械工业外,适当扩大所涉及的工业领域范围;充分考虑技术进步,在讲清系统和元件基本原理的基础上,还介绍了新技术(如数字控制系统和比例控制系统)和新结构(如新型气缸和阀岛);全书在剪裁上注意传授知识和培养能力并重。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/章宏甲等主编. —北京:机械工业出版社, 2000.5

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07611-7

I. 液… II. 章… III. ①液压传动-高等教育-教材②气压传动-高等教育-教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000)*第 10875 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:钱飒飒 王霄飞 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 6 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·23 印张·562 千字

10 001—16 000 册

定价:31.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书经全国高等学校机电类专业教学指导委员会审定推荐,确定为机械类专业本科生教材,被列为“九五”原机械工业部教材规划中的重点教材。

本书是在章宏甲、黄谊主编的《液压传动》基础上,增加气压传动的内容重新修编而成。具体内容包括:绪论、流体力学基础、能源装置及辅件、执行元件、控制元件、密封件、基本回路、系统应用与分析、系统设计与计算和附录等方面。

本书在编写过程中,贯彻少而精、系统性以及学以致用原则,着重考虑了以下几个方面:

1) 考虑到液压传动与气压传动之间有较强的共性,将液压部分与气动部分结合在一起编写,精简了内容,压缩了学时,符合新教学计划的要求,其编写思路是正确的,有新意,为同类教材所少见。但是这种“合并”不是机械的凑合,而是有机的融合,既注意到共性,又照顾到个性,有合有分,仍保持了液压、气动各自的完整性和系统性,便于学生使用。

2) 为适应加强基础、扩大专业面的需要,对于流体传动基础理论的阐述,力求准确、精练、明了;并根据新的专业目录,在大多数高校中本课程属于测控系列中技术基础课范畴,所以在内容上除一般机械外,适当扩大了涉及面,可适用于各个工业领域(机械、电子、轻工、冶金、工程机械、航空航天、采矿等等)的专业。

3) 为适应 21 世纪科技发展的需要,考虑到技术进步,在讲清系统和元件基本原理的基础上,采用新型液压与气动元件(如新型气缸、阀岛等),引入先进的回路和系统,详述新型传动介质的性能及其选用,增加电液比例控制、电液伺服控制和数字控制等新技术的内容。

4) 贯彻了理论联系实际的原则,除讲清一般的基础理论知识外,还列举了大量实践的例子,对学生借助技术手册等资料进行所需系统的设计以及元件的正确选用有较大帮助。

5) 本书以少而精原则取材和编排章节,着重讲解基本原理和基本方法,而不拘泥于具体繁杂的结构,以使学生打下扎实的理论基础,并通过给学生传授基本知识来培养他们的思维能力和创新能力。

6) 本书阐述清楚、文笔流畅、由浅入深、举一反三,有利于学生自学。书中编排了较多的例题,每章末都附有经过精选的习题,并附有参考答案。这些对于学生加深基本概念的理解,加强基本计算、分析能力的训练,学得主动、自主等都是有益的。

7) 本书的名词术语、物理符号、单位以及液压气动图形符号等都统一采用国家最新标准。

本书适用于普通工科院校机械类各专业,也适用于其他各类成人高校、电大、自学考试有关专业,也可供从事液压与气动的工程技术人员参考。

章宏甲先生对本书的编写工作一直很关心,出国之前对如何编好教材提出了原则性意见;在国外,又对本书的编写大纲提出了指导性意见。黄谊先生在本书编写大纲的讨论与提出、征集意见、书稿的组织编写与整理等方面做了许多工作。

本书由章宏甲、黄谊、王积伟任主编。章宏甲不在国内期间,他委托王积伟全权主持。参加本书编写的有:黄谊(绪论)、王积伟(第一、五章,第七、八章的液压部分,附录)、杨林森(第二章第一~三节,第三章的液压部分)、郁凯元(第四章的液压部分)、温济全(第六章的液压部分)、陆鑫盛(第二、三、四、六、七、八章的气动部分)、许映秋(第四、七、

IV

八章的气动部分)。全书最后由黄谊、王积伟修改定稿。

本书由林廷圻主审，薛祖德也仔细审阅了书稿。参加审稿的还有：萧子渊、孙家匡、王荣耀、叶继等。在本书的编写及审稿过程中，费斯托（中国）有限公司提供了最新技术资料并与编者进行技术交流，在此一并表示衷心的感谢。

由于水平限制，书中难免存在着不少缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

编 者

1999 年 10 月

目 录

前言

绪论 1

- 第一节 液压与气压传动的工作原理 1
- 第二节 液压与气压传动系统的组成
和表示方法 3
- 第三节 液压与气压传动的优缺点 4
- 第四节 液压与气压传动的应用 5
- 第五节 液压与气动技术的进展 6

第一章 流体力学基础 9

- 第一节 工作介质 9
- 第二节 流体静力学 23
- 第三节 流体运动学和流体动力学 26
- 第四节 气体状态方程 34
- 第五节 充、放气参数的计算 37
- 第六节 管道流动 40
- 第七节 孔口流动 44
- 第八节 缝隙流动 51
- 第九节 瞬变流动 55
- 第十节 穿透多孔物质的液流 59
- 习题 61

第二章 能源装置及辅件 66

- 第一节 概述 66
- 第二节 液压泵 66
- 第三节 油箱 80
- 第四节 液压辅件 82
- 第五节 气源装置 91
- 第六节 气动辅件 105
- 习题 107

第三章 执行元件 109

- 第一节 直线往复运动执行元件 109
- 第二节 旋转运动执行元件 120
- 第三节 设计计算 124
- 习题 129

第四章 控制元件 131

- 第一节 概述 131
- 第二节 阀心的结构和性能 132
- 第三节 常用液压控制阀 138
- 第四节 常用气动控制阀 161
- 第五节 液压叠加阀、插装阀
和多路阀 172
- 第六节 液压伺服控制阀 176
- 第七节 电液比例控制阀 185
- 第八节 电液数字控制阀 191
- 第九节 气动比例/伺服、数字
控制阀 195
- 第十节 气动逻辑控制元件 199
- 第十一节 阀岛 206
- 习题 208

第五章 密封件 214

- 第一节 密封的作用与分类 214
- 第二节 密封件的材料 215
- 第三节 常用密封件 216
- 第四节 新型密封件 223
- 第五节 组合式密封件 226
- 第六节 防尘圈 229
- 第七节 旋转密封件 230
- 第八节 胶密封与带密封 232
- 习题 233

第六章 基本回路 234

- 第一节 液压基本回路 234
- 第二节 气动基本回路 256
- 习题 263

第七章 系统应用与分析 266

- 第一节 液压系统应用与分析 266
- 第二节 气动系统应用与分析 284
- 习题 295

第八章 系统设计与计算.....	300	附录	347
第一节 概述	300	附录 A 孔口流量系数	347
第二节 液压系统设计与计算	300	附录 B 液压与气压传动常用	
第三节 液压系统设计计算举例	321	图形符号	348
第四节 气动程序控制系统设计	330	附录 C 习题参考答案	354
习题	344	参考文献	360

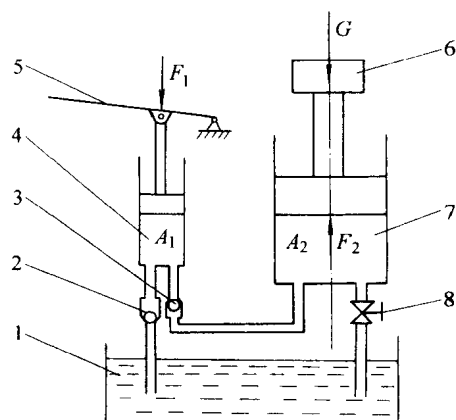
绪 论

液压与气压传动是以流体（液压液或压缩空气）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，它是一门新技术。但如从17世纪末叶巴斯卡提出静压传递原理，18世纪末英国制成世界上第一台水压机算起，也已有二三百年的历史了。而近代液压与气压传动在工业上的真正推广使用，则是在本世纪中叶以后的事。近几十年来，随着微电子技术的迅速发展，且渗透到液压与气动技术中并与之密切结合，使其应用领域遍及到各个工业部门，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。

第一节 液压与气压传动的工作原理

液压系统以液压液作为工作介质，而气动系统以空气作为工作介质。两种工作介质的不同在于液体几乎不可压缩，气体却具有较大的可压缩性。液压与气压传动在基本工作原理、元件的工作机理以及回路的构成等诸方面是极为相似的。下面以图绪1所示的原理图来讲解它们的工作原理。

图绪1所示为液压千斤顶的示意图。当向上提手柄5使小缸4内的活塞上移时，小缸下腔因容积增大而产生真空，油液从油箱1通过吸油阀2被吸入并充满小缸容积。当按压手柄使小缸活塞下移时，则刚才被吸入的油液通过压油阀3输到大缸7的下腔，油液被压缩，压力立即升高，当油液的压力升高到能克服作用在大活塞上的负载（重物）所需的压力值时，重物就随手柄的下按而同时上升，此时吸油阀是关闭的。为要把重物能从举高的位置放下，系统中专门设置了截止阀（放油螺塞）8。



图绪1 液压千斤顶示意图

- 1—油箱 2—吸油阀 3—压油阀
4—小缸 5—手柄 6—负载（重物）
7—大缸 8—截止阀（放油螺塞）

图绪1中两根通油箱的管路如通大气，则图绪1变成气动系统的原理图。这种情况下，上下按动手柄5，空气就通过阀2被吸入，经阀3输到大缸7的下腔。在这里，因气体有压缩性，不像液压系统那样，一按手柄重物立即相应上移，而是手柄需按动多次，使进入大缸7下腔中的气体逐渐增多，压力逐渐升高，一直到气体压力达到使重物上升所需的压力值时，重物便开始上升。在重物上升过程中，也不像液压系统那样，压力值基本上维持不变（因是举起重物），因气体可压缩性较大的缘故，气压值会发生波动。

图绪1所示的系统不能对重物的上升速度进行调节，也没有防止压力过高的安全措施。但就从这简单的系统，可以得出有关液压与气压传动的一些重要概念来。

设大、小活塞的面积为 A_2 、 A_1 ，当作用在大活塞上的负载和作用在小活塞上的作用力为

G 和 F_1 时, 依巴斯卡原理, 大、小活塞下腔以及连接导管构成的密闭容积内的油液具有相等的压力值, 设为 p , 则如忽略活塞运动时的摩擦阻力, 有

$$p = \frac{G}{A_2} = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1} \quad (\text{绪 } 1)$$

或

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (\text{绪 } 2)$$

式中 F_2 ——油液作用在大活塞上的作用力, $F_2 = G$ 。

式 (绪 1) 说明, 系统的压力 p 取决于作用负载的大小。这是第一个重要概念。式 (绪 2) 表明, 当 $A_2/A_1 \gg 1$ 时, 作用在小活塞上一个很小的力 F_1 , 便可在大活塞上产生一个很大的力 F_2 以举起负载 (重物)。这就是液压千斤顶的原理。

另外, 设大、小活塞移动的速度为 v_2 和 v_1 , 则在不考虑泄漏情况下稳态工作时, 有

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q \quad (\text{绪 } 3)$$

或

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = \frac{q}{A_2} \quad (\text{绪 } 4)$$

式中 q ——流量, 定义为单位时间内输出 (或输入) 的液体体积。

式 (绪 4) 表明, 大缸活塞运动的速度, 在缸的结构尺寸一定时, 取决于输入的流量。这是第二个重要概念。

使大活塞上的负载上升所需的功率为

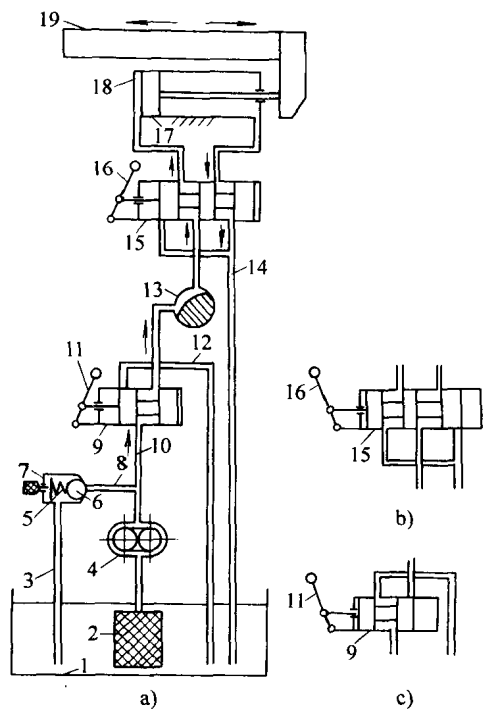
$$P = F_2 v_2 = p A_2 \frac{q}{A_2} = p q \quad (\text{绪 } 5)$$

式中, p 的单位为 Pa, q 的单位为 m^3/s , 则 P 的单位为 W。由此可见, 液压系统的压力和流量之积就是功率, 称之为液压功率。

由这个例子也可清楚地看到, 在小缸中, 手按动小活塞所作的机械能变成了排出流体的压力能; 而在大缸中, 进入大缸的流体压力能能通过大活塞转变成为驱动负载所需的机械能。所以, 在液压与气动系统中, 要发生两次能量的转变, 把机械能转变为流体压力能的元件或装置称为泵或能源装置, 而把流体压力能转变为机械能的元件称为执行元件。

比较完善的系统是如图绪 2 所示的驱动机床工作台的液压系统。

它的工作原理如下: 电动机带动液压泵 4 旋转, 经过滤器 2 从油箱 1 中吸油。油液经液压泵输出进入压力管 10 后, 在图绪 2a 所示的状态下, 通



图绪 2 机床工作台液压系统的工作原理图

- 1—油箱 2—过滤器 3、12、14—回油管
- 4—液压泵 5—弹簧 6—钢球 7—溢流阀
- 8—压力支管 9—开停阀 10—压力管
- 11—开停手柄 13—节流阀 15—换向阀
- 16—换向阀手柄 17—活塞
- 18—液压缸 19—工作台

过开停阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 左腔，推动活塞 17 和工作台 19 向右移动，而液压缸右腔的油经换向阀和回油管 14 排回油箱。

如果将换向阀手柄 16 转换成图绪 2b 所示的状态，则压力管中的油将经过开停阀、节流阀和换向阀进入液压缸右腔，推动活塞和工作台向左移动，并使液压缸左腔的油经换向阀和回油管排回油箱。

工作台的移动速度是由节流阀来调节的。开大节流阀，进入液压缸的油液增多，工作台的移动速度增大；反之，工作台的移动速度减小。

为了克服移动工作台时所受到的各种阻力，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。要克服的阻力越大，液压缸中的油液压力越高；反之压力就越低。输入液压缸的油液是通过节流阀调节的，液压泵输出的多余的油液须经溢流阀 7 和回油管 3 排回油箱，这只有在压力支管 8 中的油液压力对溢流阀钢球 6 的作用力等于或略大于溢流阀中弹簧 5 的预紧力时，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，它和液压缸中的油液压力不同。

如果将开停手柄 11 转换成图绪 2c 所示的状态，压力管中的油液将经开停阀和回油管 12 排回油箱，不输到液压缸中去，液压泵出口处的压力就降为零，这时工作台就停止运动。

第二节 液压与气压传动系统的组成和表示方法

一、系统的组成

由图绪 2 可知，液压系统主要由以下四部分组成：

1) 能源装置——把机械能转换成油液液压能的装置。最常见的形式就是液压泵，它给液压系统提供压力油。

2) 执行元件——把油液的液压能转换成机械能的元件。有作直线运动的液压缸，或作回转运动的液压马达。

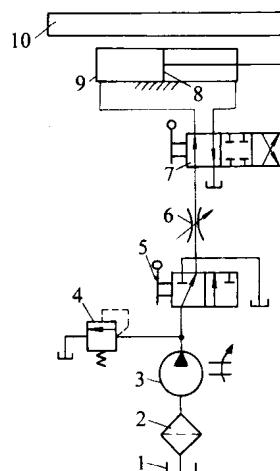
3) 控制调节元件——对系统中油液压力、流量或油液流动方向进行控制或调节的元件。例如图绪 2 中的溢流阀、节流阀、换向阀、开停阀等。这些元件的不同组合形成了不同功能的液压系统。

4) 辅助元件——上述三部分以外的其他元件，例如油箱、过滤器、油管等。它们对保证系统正常工作有重要作用。

气压传动系统，则除了能源装置—气源装置，执行元件—气缸、气马达，控制元件—气动阀，辅助元件—管道、接头、消声器外，常常还装有一些完成逻辑功能的逻辑元件等。

二、系统的图形符号表示

图绪 2a 所示的液压系统图是一种半结构式的工作原理图，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更是如此。图绪 3 所示是上述液压系统用液压图形符号绘制成的工作原理图。使用这些图形符号可使



图绪 3 机床工作台液压系统的图形符号图

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

液压系统图简单明了，便于绘制。

我国制定的“液压与气动”图形符号（GB/T786.1—93）可参见附录 B。

第三节 液压与气压传动的优缺点

液压传动有以下一些优点：

1) 在同等的体积下，液压装置能比电气装置产生出更多的动力。在同等的功率下，液压装置的体积小，重量轻，功率密度大，结构紧凑。液压马达的体积和重量只有同等功率电动机的 12% 左右。

2) 液压装置工作比较平稳。由于重量轻、惯性小、反应快，液压装置易于实现快速启动、制动和频繁的换向。

3) 液压装置能在大范围内实现无级调速（调速范围可达 2000），它还可以在运行的过程中进行调速。

4) 液压传动易于自动化，它对液体压力、流量或流动方向易于进行调节或控制。当将液压控制和电气控制、电子控制或气动控制结合起来使用时，整个传动装置能实现很复杂的顺序动作，也能方便地实现远程控制。

5) 液压装置易于实现过载保护。液压缸和液压马达都能长期在堵转状态下工作而不会过热，这是电气传动装置和机械传动装置无法办到的。

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) 用液压传动实现直线运动远比用机械传动简单。

液压传动的缺点是：

1) 液压传动在工作过程中常有较多的能量损失（摩擦损失、泄漏损失等），长距离传动时更是如此。

2) 液压传动对油温变化比较敏感，它的工作稳定性很易受到温度的影响，因此它不宜在很高或很低的温度条件下工作。

3) 为了减少泄漏，液压元件在制造精度上的要求较高，因此它的造价较贵，而且对工作介质的污染比较敏感。

4) 液压传动出现故障时不易找出原因。

气压传动具有一些独特的优点，主要有如下几点：

1) 空气可以从大气中取得，同时，用过的空气可直接排放到大气中去，处理方便，万一空气管路有泄漏，除引起部分功率损失外，不致产生不利于工作的严重影响，也不会污染环境。

2) 空气的粘度很小，在管道中的压力损失较小，因此压缩空气便于集中供应（空压站）和远距离输送。

3) 因压缩空气的工作压力较低（一般为 0.3~0.8MPa），因此，对气动元件的材料和制造精度上的要求较低。

4) 气动系统维护简单，管道不易堵塞，也不存在介质变质、补充、更换等问题。

5) 使用安全，没有防爆的问题，并且便于实现过载自动保护。

6) 气动元件采用相应的材料后，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。

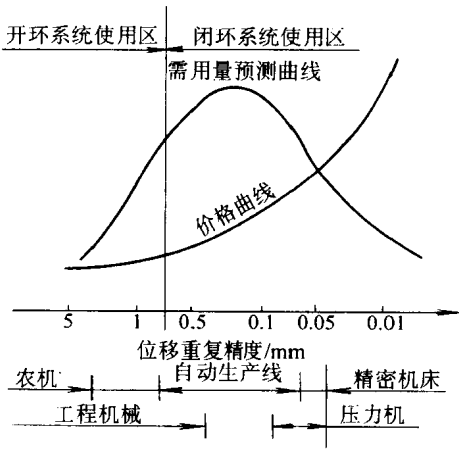
气压传动也存在以下的一些缺点：

- 1) 气动装置中的信号传递速度较慢，仅限于声速的范围内。所以气动技术不宜用于信号传递速度要求十分高的复杂线路中，同时，实现生产过程的远距离控制也比较困难。
- 2) 由于空气具有可压缩的特性，因而运动速度的稳定性较差。
- 3) 因为工作压力较低，又因结构尺寸不宜过大，因而气压传动装置的总推力一般不可能很大。
- 4) 目前气压传动的传动效率较低。

总的说来，液压与气压传动的优点是主要的，而它们的缺点通过技术进步和多年的不懈努力，已得到克服或得到了很大的改善。

第四节 液压与气压传动的应用

工业各部门使用液压与气压传动的出发点是不尽相同的：有的是利用它们在传递动力上的长处，如工程机械、压力机械和航空工业采用液压传动的主要原因是取其结构简单、体积小、重量轻，输出功率大；有的是利用它们在操纵控制上的优点，如机床上采用液压传动是取其能在工作过程中实现无级变速，易于实现频繁的换向，易于实现自动化；在采矿、钢铁和化工等部门采用气压传动是取其空气工作介质具有防爆、防火等特点；等等。此外，不同精度要求的主机也会选用不同控制型式的液压或气压传动。如图绪 4 所示为不同精度的液压传动装置应用场合的概况。



图绪 4 不同精度的液压传动装置的应用场合

液压传动在某些机械工业部门的应用情况如表绪 1 所示。

表绪 1 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
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
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

第五节 液压与气动技术的进展

近代液压与气动技术在工业中的应用还是本世纪中叶以后的事，时间还不很长。

由于要使用原油炼制品来作为传动介质，近代液压传动是由 19 世纪崛起并蓬勃发展的石油工业推动起来的。最早实践成功的液压传动装置是舰艇上的炮塔转位器，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订和完善，各类元件的标准化、规格化、系列化而在机械制造、工程机械、农业机械、汽车制造等行业中推广开来。本世纪的 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推向前进，使它在国民经济的各方面都得到了应用。液压传动在某些领域内甚至已占有压倒性的优势。

我国的液压工业开始于本世纪 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，同时进行自行设计液压产品以来，我国的液压件生产已从低压到高压形成系列，并在各种机械设备上得到了广泛的使用。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，日益显示出显著的成绩。

原先气压传动与控制系统一般应用在复杂程度较低和中等的机器上，这是由它的价格因素所决定的。但是一些较为复杂的机器也能应用气压传动与控制系统，这决定于环境条件的因素，诸如易爆、腐蚀、水冲洗、粉尘、污物等一些环境，应用气动系统更为合理和安全。

在 60 年代末，气动元件得到发展，控制方式有创新，从而使气动系统在很多工业领域得到了广泛应用。因为气动元件兼有通用性和灵活性的特点，所以使它在现代系统的集成化和完整性方面发挥了决定性的作用，气动元件本身也得到了飞跃的发展。但是，一般认为，现代气动技术从开始发展到现在还不足 50 年时间。

因而，近年来气动技术的应用领域已从机械（机床、汽车、轴承、农机等）、冶金（铸造、锻造、轧钢等）、采矿、交通运输等工业扩展到轻工（纺织、自行车、手表、缝纫机等）、食品、化工、物料搬运以及军事等工业部门，它对于实现生产过程的自动控制、改善劳动条件、减轻劳动强度、降低成本、提高产品质量发挥了很大的作用。

微电子技术的进展，渗透到液压与气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，为液压气动技术在工业各部门中的应用开辟了更为广泛的前景。

今天，为了和最新技术的发展保持同步，液压与气动技术必须不断创新，不断地提高和改进元件和系统的性能，以满足日益变化的市场需求。这是液压与气动系统的创新特征。液压与气动技术的持续发展体现在如下一些比较重要的特征上：

- 1) 提高元件性能，创制新型元件，体积不断缩小。为了能在尽可能小的空间内传递尽可

能大的功率，液压元件的结构不断地在向小型化方向发展。气动方面的进展更快，高速气缸的速度可达 17m/s，低速气缸的最小速度可达 5mm/s，不产生爬行，而高精度定位气缸的定位精度可达 0.01mm。最近，市场上出现了一种新型的被称为“肌腱”的执行元件（FESTO 公司）。它的形状像一根两端有接头的软管，把它接入系统，并向其内部充气压和卸压时，它在径向和轴向都会发生伸缩。轴向的伸缩量可达其总长的 15%~30%，在相同条件下，它的作用力是普通气缸的 10 倍。这种元件抗污染，运动时不会产生抖动，在有些场合还可使用它的径向膨胀去夹持工件等，是一种极有应用前景的元件。而微型元件也得到发展，如活塞直径小到 2.5mm（或宽度为 1.6mm 的矩形活塞）的气缸，10mm 宽的气阀以及相关的辅助元件已成为系列化产品。由于这些元件能在 0.2~0.7MPa 压力下工作，所以可被方便地集成到标准的气动系统中。新型的小型阀，在流量相同时，它的体积仅是过去的 7%。这些小、微型的元件已被应用于精密机械加工、电子工业、制药工业、食品加工和包装技术等场合。

2) 高度的组合化、集成化和模块化。液压系统由管式配置经板式配置、箱式配置、集成块式配置发展到叠加式配置、插装式配置，使连接的通道越来越短。也出现了一些组合集成件，如把液压泵和压力阀做成一体，把压力阀插装在液压泵的壳体内；把液压缸和换向阀做成一体，只需接一条高压管与液压泵相连，一条回油管与油箱相连，就可以构成一个液压系统。这种组合件不但结构紧凑，工作可靠，而且使用简便，也容易维护保养。

气动元件的最大优点就在于其单独元件的可组合性，无论是各种不同大小的控制器，或是不同功率的功能控制元件，在一定的应用条件下，都具有或多或少的随意组合性。直线和旋转运动组合气缸、带滑动或滚动轴承的和直线导轨组合在一起的组合气缸都是成功的例子。另外，有一种集成气缸，它将一个四通阀、三个传感器、进气节流阀和排气节流阀、不同动态特性的调节装置、控制用的小型电子控制器、防转动活塞以及电子/气动接口集成于一体，集成化程度极高。

模块化发展亦是非常重要的方面，完整的模块以及独立的功能单元，对用户而言，只需简单地进行组装即可投入使用，这样不仅可大大节约用户的装配时间，同时用户也无须配备各种经专门培训的技术人员。

3) 和微电子结合，走向智能化。液压技术从本世纪 70 年代中期起就开始和微电子工业接触，并相互结合。在迄今不到 20 年的时间内，结合层次不断提高，由简单拼装、分散混合到总体组合，出现了多种形式的独立产品如数字液压泵、数字阀、数字液压缸等。其中的高级形式已发展到把编了程的芯片和液压控制元件、液压执行元件或能源装置、检测反馈装置、数模转换装置、集成电路等汇成一体。这种汇在一起的联结体只要一收到微处理机或微型计算机处送来的信息，就能实现预先规定的任务。

液压技术的智能化阶段虽然才刚刚开始，但是从它星星点点实践成功的事例来看，成果已非常诱人。例如，折臂式小汽车装卸器能把小汽车吊起来，拖入集装箱内，按最紧凑的排列位置堆放好，最多时能装入 8 辆。装卸器内装有微型计算机，它能按预定程序操纵 8 个液压缸，在传感器的配合下协调连杆机构的动作，完成堆装任务。卸车时的操作按相反的顺序进行。又如，驾驶舱模拟器能通过微型计算机控制 6 个液压缸，实现快速的（每秒钟 20 次）协调动作，以使受训练的波音民航喷气客机驾驶员不用上天就可以经历 6 个自由度的颠簸摇摆、座椅振动、着陆弹跳等项的运动感觉，并能对驾驶员的操作作出拟真的响应。

气动技术的智能化指的是具有集成微处理器，并具有处理指令和程序控制功能的单元或

元件。市场上出现的内置可编程序控制器的阀岛 (FESTO 公司), 它是新一代的电/气一体化的控制元器件, 由多个电控气阀构成, 集成了信号的输入/输出以及信号的控制。它已从最初带多针接口的型式发展成为带现场总线的型式, 继而发展了可编程阀岛和智能模块阀岛。它特别适用于分散加工模块 (工位) 以及集中控制为模式的自动加工线中, 安装简单, 接管少, 信号传输快, 而且工作可靠。

用气动元件、可编程控制器、传感器等制成的机器人也不乏成功的例子, 有一种电子气动机器人 (Tron-X 机器人) 能弯腰, 与人握手且向人致意。它采用了闭环控制的气动伺服系统, 可保证在任意位置上精确地停下来, 定位精度可达 $\pm 0.1 \sim \pm 0.2\text{mm}$, 它的结构简单, 速度高 (最大移动速度 5m/s), 抗污染和抗干扰性强, 价格低。

总之, 液压气动技术与微电子技术紧密结合后, 在微型计算机或微处理机的控制下, 可以进一步拓宽它的应用领域, 形形色色机器人和智能元件的使用不过是它最常见的例子而已。现在国外已在着手开发多种行业能通用的智能组合硬件, 它们只需配上适当的软件就可以在不同的行业中完成不同的任务。这样一来, 用户的主要技术工作将只是挑选、改编或自编计算程序了。

综上所述可以看到, 液压气动工业在国民经济中的作用实在是很大的, 它常常可以用来作为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。与世界上主要的工业国家相比, 我国的液压气动工业还是相当落后的, 标准化的工作有待于继续做好, 优质化的工作须形成声势, 智能化的工作则刚刚在准备起步, 为此必须急起直追, 才能迎头赶上。

第一章 流体力学基础

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门学科。本章主要阐述与液压及气动技术有关的流体力学基本内容，为本课程的后续学习打下必要的理论基础。

第一节 工作介质

工作介质在传动及控制中起传递能量和信号的作用。流体传动及控制（包括液压与气动），它在工作、性能特点上和机械、电气传动之间的差异主要取决于载体的不同，前者采用工作介质。因此，掌握液压与气动技术之前，必须先对其工作介质有一清晰的了解。

一、液压传动介质

（一）基本要求与种类

液压传动及控制所用的工作介质为液压油液或其他合成液体，其应具备的功能如下：

- （1）传动 把由液压泵所赋予的能量传递给执行元件。
- （2）润滑 润滑液压泵、液压阀、液压执行元件等运动件。
- （3）冷却 吸收并带出液压装置所产生的热量。
- （4）防锈 防止液压元件所用各种金属的锈蚀。

为使液压系统长期保持正常的工作性能，对其工作介质提出的要求是：

- （1）可压缩性 可压缩性尽可能小，响应性好。
- （2）粘性 温度及压力对粘度影响小，具有适当的粘度，粘温特性好。
- （3）润滑性 能对液压元件滑动部位充分润滑。
- （4）安定性 不因热、氧化或水解而变质，剪切稳定性好，使用寿命长。
- （5）防锈和抗腐蚀性 对铁及非铁金属的锈蚀性小。
- （6）抗泡沫性 介质中的气泡容易逸出并消除。
- （7）抗乳化性 除含水液压液外的油液，油水分离要容易。
- （8）洁净性 质地要纯净，尽可能不含污染物，当污染物从外部侵入时能迅速分离。
- （9）相容性 对金属、密封件、橡胶软管、涂料等有良好的相容性。
- （10）阻燃性 燃点高，挥发性小，最好具有阻燃性。

（11）其他 对工作介质的其他要求还有：无毒性 and 臭味；比热容和热导率要大；体胀系数要小等。

其实，能够同时满足上述各项要求的理想的工作介质是不存在的。液压系统中使用的工作介质按国际标准组织（ISO）的分类如表 1-1 所示。目前 90% 以上的液压设备采用石油基液压油液。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，如增粘剂、抗磨剂、防爬剂等。

（二）物理性质

表 1-1 液压传动工作介质的种类

工 作 介 质	类 别		组成与特性		代 号	
	石油基液压液		无添加剂的石油基液压液		L-HH	
			HH+抗氧化剂、防锈剂		L-HL	
			HL+抗磨剂		L-HM	
			HL+增粘剂		L-HR	
			HM+增粘剂		L-HV	
			HM+防爬剂		L-HG	
	难燃液压液	含水液压液	高含水液压液	水包油乳化液	L-HFA	L-HFAE
				水的化学溶液		L-HFAS
			油包水乳化液		L-HFB	
		合成液压液	水-乙二醇		L-HFC	
			磷酸酯		L-HFDR	
			氯化烃		L-HFDS	
			HFDR+HFDS		L-HFDT	
			其他合成液压液		L-HFDU	

工作介质的基本性质有多项，现择其与液压传动性能密切相关的三项作一介绍。

1. 密度

单位体积液体所具有的质量称为该液体的密度，即

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中 ρ ——液体的密度；
 V ——液体的体积；
 m ——液体的质量。

常用液压传动工作介质的密度值见表 1-2。

表 1-2 液压传动工作介质的密度

工作介质	密度/ (kg · m ⁻³)	工作介质	密度/ (kg · m ⁻³)
L-HM32 液压液	0.87	水-乙二醇	1.06
L-HM46 液压液	0.875	通用磷酸酯	1.15
油包水乳化液	0.932	飞机用磷酸酯	1.05
水包油乳化液	0.9977		

液体的密度随着压力或温度的变化而发生变化，但其变化量一般很小，在工程计算中可以忽略不计。

2. 可压缩性

液体因所受压力增高而发生体积缩小的性质称为可压缩性。若压力为 p_0 时液体的体积为 V_0 ，当压力增加 Δp ，液体的体积减小 ΔV ，则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

$$k = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \tag{1-2}$$

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

液体压缩率 k 的倒数，称为液体体积模量，即