

# 气动元件及 系统设计

北方工业大学流体传动与控制教研室  
济南华能气动元器件公司 编著



机械工业出版社

# 气动元件及系统设计

北方工业大学流体传动与控制教研室  
济南华能气动元器件公司 编著



0240825

机械工业出版社

本书介绍了实现气动自动化所必需的基础知识,气源及其处理方法,各种气动元件(包括比例伺服元件)及可编程程序控制器的基本原理,气动回路的设计方法及气动应用,维护检查和故障分析方法等。

本书可供气动设备的设计、生产和维修单位的工程技术人员和工人参考,也可供高校及中专学校流体传动与控制专业及相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

气动元件及系统设计/北方工业大学流体传动与控制教研室,济南华能气动元器件公司编著. —北京:机械工业出版社, 1995.9

ISBN 7-111-04591-2

I. 气… I. ①北… ②济… II. ①气动元件-基本知识②气动元件-系统设计 IV. ①TP241②TH138.5

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第14460号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)  
责任编辑:盛君豪 版式设计:王颖 责任校对:刘志文  
封面设计:姚毅 责任印制:卢子祥

三河水和印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

1996年8月第1版·第2次印刷

787mm×1092mm<sup>1/32</sup>·18印张·397千字

7 001—10 000册

定价:18.00元

## 前 言

气动自动化被称为低成本的自动化手段，得到越来越广泛的应用。随着应用的拓宽，新型气动元件不断出现，一些气动系统的设计要求和控制要求也越来越高。为了满足各类读者的不同要求，本书在侧重知识普及的同时，注意到知识的提高。本书收集了国内外有关气动元件和气动系统设计的最新资料和作者的研究成果，并注意到机、电、气知识的关联。希望本书能对气动自动化设备的设计和生产部门的工程技术人员、高校师生和现场工作人员有所帮助。

本书由北方工业大学流体传动与控制教研室和济南华能气动元器件公司共同编著。徐文灿教授编写了第一、二、三、五、六和十一章，刘汉钧教授编写了第四、八和九章，张若青讲师编写了第七章，谢富春工程师编写了第十章，涂念雅副教授编写了第十二章，周连进、王众和李萍三同志也参与了有关章节的编写工作，并对本书编写提出了许多建议。全书由徐文灿教授担任主编。

在本书编写过程中，曾得到很多同志的关心和帮助，有些同志为本书提供了资料，在此深表谢意。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，欢迎读者批评指正。

作者

1994年2月

# 目 录

## 前言

第一章 绪论 .....	1
第一节 气动技术的优缺点 .....	1
第二节 气动元件的分类 .....	4
第三节 气动技术的发展趋势和应用范围 .....	5
第二章 气动的基础知识 .....	11
第一节 空气的性质 .....	11
第二节 气体的状态变化 .....	14
第三节 湿空气 .....	20
第四节 空气在管道内的流动 .....	26
一、流体流动的一些基本概念 .....	26
二、流量及连续性方程 .....	27
三、佰努利方程 .....	29
四、不可压缩管流的压力损失 .....	31
五、可压缩管流 .....	37
第五节 压力和流量测量 .....	45
一、压力测量 .....	45
二、流量测量 .....	47
第六节 气动元件的流量特性 .....	53
第七节 气动回路的流量特性 .....	59
一、气动回路处于不可压缩流态 .....	60
二、气动回路处于壅塞流态 .....	60
第八节 充排气特性 .....	68
一、充气特性 .....	68

二、排气特性 .....	70
第九节 耗气量计算 .....	72
第三章 气源及气源处理系统 .....	74
第一节 气源系统 .....	74
一、气源系统的组成 .....	74
二、空气压缩机 .....	74
三、后冷却器 .....	80
四、油水分离器 .....	81
五、气罐 .....	81
第二节 气源处理系统 .....	83
一、概述 .....	83
二、主管道过滤器 .....	86
三、自动排水器 .....	88
四、分水滤气器 .....	89
五、其它过滤器 .....	92
六、冷冻式干燥器 .....	94
七、吸附式干燥器 .....	97
第三节 管道系统 .....	99
一、管道系统布置原则 .....	99
二、管道布置注意事项 .....	101
第四章 气动执行元件 .....	103
第一节 气缸的特点和分类 .....	103
第二节 普通气缸的运动特性和输出力的计算 .....	111
一、普通气缸的动态特性分析 .....	111
二、普通气缸输出力的计算 .....	114
第三节 部分常用气缸的结构特点、工作原理和计算 .....	115
一、单向作用气缸 .....	115
二、无缓冲双向作用气缸 (普通气缸) .....	117
三、缓冲气缸 .....	123

四、气-油阻尼缸 .....	129
五、回转气缸 .....	134
六、膜片气缸 .....	137
七、摆动式气缸 .....	138
第四节 组合式气缸和特殊气缸 .....	140
一、带磁性开关的气缸 .....	140
二、带阀组合气缸 .....	142
三、磁性无活塞杆气缸 .....	145
四、制动气缸 .....	147
五、薄型气缸 .....	153
六、齿轮齿条式摆动气缸 .....	154
七、冲击气缸 .....	157
八、其它气缸 .....	165
第五节 气缸的应用和使用注意事项 .....	167
一、使用注意事项 .....	167
二、气缸的应用 .....	168
第六节 气动马达 .....	175
一、叶片式气动马达的工作原理和特性 .....	176
二、气动马达的特点和应用 .....	177
第五章 气动控制元件 .....	179
第一节 压力控制阀 .....	179
一、减压阀 .....	179
二、顺序阀 .....	185
三、安全阀(溢流阀) .....	187
第二节 流量控制阀 .....	188
一、节流阀 .....	188
二、单向节流阀 .....	189
三、排气节流阀 .....	191
四、行程节流阀 .....	193

第三节	方向控制阀	194
一、	方向控制阀的分类	194
二、	气压控制换向阀	202
三、	人力控制换向阀	216
四、	机械控制换向阀	223
五、	电磁控制换向阀	224
六、	单向型方向控制阀	235
七、	方向控制阀的工作条件和性能指标	242
第四节	气动逻辑元件	250
第六章	气动辅助元件	258
第一节	润滑元件	258
一、	油雾器	258
二、	集中润滑装置	267
三、	不供油润滑元件和无油润滑元件	268
第二节	空气处理组件	270
第三节	消声器	271
第四节	气动传感器	272
第五节	气动放大器	283
第六节	缓冲器	285
第七节	真空元件	287
第八节	管道及管接头	297
第九节	转换器	306
第十节	其它辅件	311
第七章	气动比例、伺服元件及系统	313
第一节	基本节流元件	315
第二节	气动比例阀	320
第三节	气动伺服阀	328
第四节	伺服气缸	330
第五节	气动比例与伺服系统	332



第六节	新型控制	348
第八章	气动基本回路和常用回路	355
第一节	压力控制回路	355
第二节	气动换向回路	358
第三节	速度控制回路	365
第四节	电气逻辑回路	374
第五节	常用气动回路	381
一、	安全保护回路	381
二、	气缸同步动作回路	383
三、	手动-自动选用回路	385
四、	供气选择回路	386
五、	计数回路	386
六、	气动往复回路	388
第九章	气动程序控制回路的设计	393
第一节	概述	393
一、	行程程序控制和时间程序控制	393
二、	行程程序的表示方法	395
三、	行程程序回路设计中遇到的主要矛盾	398
第二节	单往复程序的回路设计方法	401
一、	绘制“信号-动作状态图”	401
二、	判别障碍信号、消除障碍、确定执行信号	406
三、	绘制逻辑原理图和控制回路图	421
四、	完善气动回路图	428
五、	等效回路的置换	432
第三节	单控主控阀的控制回路设计方法	433
一、	单控主控阀控制回路的特点和对控制信号的要求	434
二、	确定单控执行信号的方法	435
三、	绘制单控主控阀回路原理图	437
第四节	多往复程序的回路设计方法	440

一、多往复运动的特点和处理方法·····	440
二、多往复程序 X-D 图的画法·····	441
三、判别障碍, 消除障碍, 确定执行信号·····	442
四、绘制控制回路图·····	444
五、应用计数回路进行消障和回路设计·····	445
<b>第十章 可编程序控制器简介·····</b>	<b>450</b>
<b>第一节 概述·····</b>	<b>450</b>
一、通用程序控制回路简介·····	450
二、可编程序控制器结构框图·····	453
三、可编程序控制器的特点·····	456
四、可编程序控制器与继电器控制系统的比较·····	457
<b>第二节 基本指令介绍及编程方法·····</b>	<b>457</b>
一、指令介绍(一)·····	457
二、可编程序控制器 CPU 的工作方式及对内部继电器的管理·····	466
三、指令介绍(二)·····	468
<b>第三节 可编程序控制器的使用·····</b>	<b>471</b>
一、开始使用可编程序控制器·····	471
二、可编程序控制器在气动位置程序控制中的应用·····	479
三、可编程序控制器的日常维护·····	482
<b>第十一章 气动系统的设计·····</b>	<b>484</b>
<b>第一节 气动系统的设计步骤·····</b>	<b>484</b>
<b>第二节 气动系统中元件的选择·····</b>	<b>487</b>
一、执行元件的选择·····	487
二、控制元件的选择·····	491
三、气源系统及气源处理系统的选择·····	497
四、辅助元件的选择·····	498
<b>第三节 进口设备气动系统的国产化·····</b>	<b>499</b>
<b>第四节 设计举例·····</b>	<b>501</b>

第十二章 维护检查与故障分析 .....	510
第一节 维护检查 .....	510
第二节 故障分析 .....	513
附录 .....	520
附录 A 常用气动图形符号 (摘自 GB786.1-93) .....	520
附录 B 常用电气元件图形符号 .....	541
附录 C 常用气动逻辑元件图形符号 (摘自 JB/JQ208001 -88) .....	549
附录 D 济南华能气动元器件公司产品一览表 .....	550
参考文献 .....	563

# 第一章 绪 论

“气动”（PNEUMATIC）一词来源于希腊文，原义为“风吹”。从广义来理解，“气动”是指使用任何气体介质使固体移动的一切系统。当今，“气动”仅是“气动技术”或“气压传动与控制”的简称。气压传动与控制系统是指以压缩气体为工作介质，实现动力传递和工程控制的系统。常见的压缩气体是压缩空气。

## 第一节 气动技术的优缺点

气压传动与其它传动方式的比较，见表 1-1。

表 1-1 气压传动与其它传动方式的比较

项 目	气压传动	液压传动	电气传动	机械传动
系统结构	简单	复杂	复杂	稍复杂
系统体积	与继电器控制系统相当	大	电子式最小	大
安装自由度	大	大	中	小
使用维护	简单	比气动系统复杂	需专门技术	简单
清洁度	清洁	可能有油污	清洁	较清洁
管线装拆	无困难。不需回气箱	较气动差。需回油管	容易。但绝缘不好，易出现人身、设备事故	

(续)

项 目	气压传动	液压传动	电气传动	机械传动
技术要求	较低	较高	最高	较低
能量贮存	容易(设气罐)	笨重复 杂(设蓄 能器)	较难(设蓄电 池笨重)	较难
寿命	长	较长	电器控制低于气 动控制,电子控制 最长	长
价格	便宜	较贵	电器控制便宜, 电子控制较贵	一般
传动系统的 效率	<30%	<70%	<90%	90%左右
传输时的能 量损失	较小	较大	小	小
驱动力	小~中	中~极大	小~大	小~大
驱动力调整	容易	容易	困难	困难
执行元件的 运动速度	较快(直线和回 转运动)	慢(直 线和回转 运动)	直线运动难,回 转运动快	慢(直 线和回转 运动)
速度调整	容易	很容易	稍困难	困难
速度稳定性	较差,需采取专 门措施	良好	次于液压,优于 气动	很好
行程终点的 冲击	冲击较大,一般 需考虑缓冲	较小	务必设缓冲装置	

(续)

项 目	气压传动	液压传动	电气传动	机械传动
过载保护	容易	较容易, 过载会引起油温升高, 功耗加大	长期过载会烧毁电机	稍困难
信号传递速度	<340m/s	<1000 m/s	<3×10 <sup>5</sup> m/s	
控制距离	中短	短	不限	短
控制的自由度	大	大	中	小
控制精度	较差	高	一般	一般
检测能力	一般	较差	好	较差
信号转换	容易	稍困难	很容易	困难
演算方式	数字(模拟)	模拟	数字, 模拟	模拟(数字)
防爆性	好	用非可燃油才能防火	应采取保护措施, 但成本高	好
温度影响	小	中	大	小
防潮性	应排除冷凝水	小	需特殊保护措施	小
防尘性	好	要防止油被污染	灰尘对性能有影响	
抗振性	一般	一般	差	一般
抗磁性	好	好	可能引起误动作	
抗腐蚀性	较好	好	差	较差
对环境污染	对空气污染小, 要防止噪声	要防止漏油和噪声	污染小, 要防噪声	要防噪声
停电对策	可	可	困难	稍困难

从表 1-1, 可归纳出气动的优缺点有:

1. 气动元件结构简单、紧凑、易于制造。使用维护简单。工作介质是空气, 来源方便, 使用后可直接排至大气, 不污染环境。空气在管道内的流动损失小, 可远距离输送。压缩空气便于贮存。故气动常被称为低成本自动化的最佳手段。

2. 在易燃、易爆、粉尘大、强磁、潮湿、温度变化大、存在腐蚀性气体等恶劣场合, 工作安全可靠。易于实现快速的直线往复运动、摆动和高速转动。输出力和运动速度的调节都很方便。安装和控制的自由度都大。能实现过载自动保护。故气动具有非常广泛的工作适应性。

3. 压缩空气工作压力一般在  $0.4 \sim 0.6 \text{MPa}$ , 故输出力和力矩不太大。传动效率较低。空气有压缩性, 故运动速度的稳定性较差, 实现精密控制较难。信号传递速度比液压、电气小。因空气无润滑性, 且含有水蒸气等, 排气噪声较大, 故需供油润滑、排除冷凝水和消声。

各种传动方式都有自己的优缺点, 在选择传动和控制方式时, 应扬长避短。对某个工程对象, 最理想的传动和控制方式, 可以是单一式, 也可以是混合式。如气液混合控制, 可克服气压传动的运动不够平稳和输出力小的缺陷。电控气动容易实现复杂控制和遥控等。

## 第二节 气动元件的分类

气动元件按功能可分成以下几类:

1. 气压发生装置 由空气压缩机(或真空泵)及其附件(后冷却器、油水分离器和气罐等)所组成。它将原动机供给的机械能转换成气体的压力能, 作为传动与控制的动力源。

2. 气源处理元件 清除压缩空气中的水分、灰尘和油

污，以输出干燥洁净的空气供后续元件使用。如各种过滤器和干燥器等。

3. 执行元件 它把空气的压力能转化为机械能，以驱动执行机构作往复运动（如气缸）或旋转运动（如气马达）。

4. 控制元件 是控制和调节压缩空气的压力、流量和流动方向，以保证气动执行元件按预定的程序正常地进行工作。如压力阀、流量阀、方向阀和比例阀等。

5. 辅助元件 是解决元件内部润滑、排气噪声、元件间的连接以及信号转换、显示、放大、检测等所需要的各种气动元件。如油雾器、消声器、管接头及连接管、转换器、显示器、传感器、放大器和程序器等。

过去，气源处理元件包括在辅助元件中。现在，为了强调气源处理元件的重要性，已将它从辅助元件中独立出来。

### 第三节 气动技术的发展趋势和应用范围

#### 1. 气动技术的发展趋势

60年代，气动主要用于比较繁重的作业领域，作为辅助传动。如用于矿山、钢铁、机床和汽车制造等行业。70年代后期，开始用于自动装配、包装、检测等轻巧的作业领域，以减轻繁重的体力劳动。80年代以来，随着与电子技术的结合，气动技术的应用领域得到迅速拓宽，尤其是在各种自动化生产线上得到广泛的应用。电气可编程序控制系统的发展，使整个系统的自动化程度更高，控制方式更灵活，性能更加可靠。气动机械手、柔性自动生产线的迅速发展，对气动技术提出了更多更高的要求。微电子技术、现代控制理论与气动技术相结合，促进了电-气比例伺服技术的发展，使气动技术从开关控制进入闭环比例伺服控制，以不断提高控制精度。由



于气动脉宽调制技术这种控制方式具有结构简单、抗污染能力强和成本低廉等特点，国内外都在大力开发研究。气动技术已成为实现现代传动与控制的关键技术之一。

1988年世界气动产品销售额为36.9亿美元，比1981年增长2.2倍。1991年销售额约为65亿美元，又比1988年增长1.76倍。日本气动产品销售额，1988年比1978年增加5倍。液压与气动产品销售额之比也在发生明显变化。如日本1978年为3:1，1985年为2:1，1991年为1.33:1。

当今，气动元件的发展动向是：

1) 电/气一体化 一方面，微电子技术与气动元件相结合，组成了PC机-接口-小型阀-气缸的电/气一体化的气动系统。另一方面，与电子技术相结合的自适应控制气动元件已经问世，如压力比例阀、流量比例阀、数字控制气缸，使气动技术从以往的“开关控制”进入到高精度的“反馈控制”，使定位精度提高到 $\pm 0.1 \sim 0.01\text{mm}$ 。电/气一体化已不单用于机械手和机器人这样一些典型产品上，而且渗透到工厂本身的加工、装配、检测这些生产领域。最近，国外又出现了省配线的时间分割多重通信系统，它将计算机技术与信号传输技术应用于气动系统中，不仅使配线大大减少，而且大大提高了系统的可靠性。

2) 小型化和轻量化 为了让气动元件与电子元件一起安装在印刷线路板上，构成各种功能的控制回路组件，气动元件必须小型化和轻量化。气动技术应用于半导体工业、工业机械手和机器人等方面，也要求气动元件应实现轻、薄、短、小。现在已有缸径2.5mm的单作用气缸，缸径6mm的双作用气缸，外径28mm的摆动缸，宽5mm的速度控制阀，厚10mm重30g的低功率电磁阀，M3的管接头和外径3.5mm