

FPTC

先进液压气动技术丛书

现代气动元件 与系统

吴晓明 等编著

Modern Pneumatic Components
and System



化学工业出版社

FPTC 先进液压气动技术丛书

现代气动元件 与系统

吴晓明 等编著

Modern Pneumatic Components
and System

M P C S



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代气动元件与系统/吴晓明等编著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 5

(先进液压气动技术丛书)

ISBN 978-7-122-19867-9

I. ①现… II. ①吴… III. ①气动元件 IV. ①TH138.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 035056 号

责任编辑: 黄 滢
责任校对: 顾淑云 李 爽

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 王晓宇



出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 25 字数 533 千字 2014 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

《先进液压气动技术丛书》编委会

主任：孔祥东

副主任：赵静一 姜万录

委员：（按姓名汉语拼音排序）

陈东宁 高殿荣 高英杰 郭 锐 姜万录 孔祥东

刘思远 刘 涛 吕世君 王益群 吴晓明 姚 静

张立杰 张齐生 张 伟 赵静一

前言 FOREWORD

本书是先进液压与气动系统技术丛书之一。本书可供各行业从事液压、气动专业的科研设计、制造调试和使用维护部门的工程技术人员、现场工作人员学习和参考，也可作为普通高等学校工科类机械设计制造及其自动化、机械设计与制造、机械电子工程、车辆工程等专业本科生的气压传动与控制课程的教材和教学参考资料。

全书共分 12 章：第 1 章介绍气压传动的基础知识；第 2~5 章分别介绍了各类气动执行元件、气动控制阀、气动能源和气动辅助元件、气动转换元件和比例阀的工作原理、结构特征、性能特点和故障排除方法；第 6 章介绍了真空元件的结构、原理、性能和使用注意事项；第 7 章介绍了逻辑代数与逻辑控制系统，简要介绍了卡诺图法在逻辑控制系统中的应用；第 8 章介绍了行程程序控制系统的设计分析方法，着重讨论了障碍信号及其判别、消除的方法，其中包括 X-D 状态线图法、程序控制线图法等；第 9 章介绍气动伺服阀的分析方法，讨论了喷嘴-挡板阀、气动滑阀和射流管阀的压力-流量特性、阀系数和其他性能特征；第 10 章介绍了各类动力机构特别是射流管阀控制对称和非对称气缸的伺服控制基础知识；第 11 章列举了气动的基本回路、一些功能回路和应用回路；第 12 章则介绍了气动系统的设计计算方法并给出设计实例。

本书在编写过程中，立足于工程设计及应用实际，注重理论知识与实际应用相结合，在突出基本内容的基础上，反映气动技术在应用、分析及设计方法上的最新成果，突出气动系统在不同类型设备中的使用特点。在文字的表述上，准确、通俗、简洁，便于自学。本书可读性与可查性并重，书中的论述性内容有助于读者了解、掌握、利用气动技术的基本理论、分析设计方法及新动向和新成果，提高气动技术的设计使用水平与分析解决问题的能力，书中利用有限的篇幅介绍了较多的气动控制回路、电气控制回路和应用实例，有助于各行业读者从中汲取经验与方法，解决气动控制系统设计、使用工作中的各类问题，书中介绍的一些常用公式及标准资料，可供读者在设计中直接参考引用。本书也可作为各类成人高校、高职、自学考试等有关机械类和近机类学生的参考用书。

本书由吴晓明等编著，其中，第 1~8、11、12 章由燕山大学机械工程学院吴晓明编写，第 9、10 章由北京理工大学宇航学院姚晓先编写，燕山大学机械工程学院刘涛参与了第 3 章和第 6 章部分内容的编写，燕山大学机械

工程学院刘劲军参与了第 2 章部分内容的编写，全书由吴晓明统稿。

本书在编写过程中得到了化学工业出版社的大力支持与帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于编著者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

目 录

CONTENTS

Chapter 1	第 1 章 气动基础知识	1
1.1	气动技术历史发展与应用	1
1.1.1	气动技术的发展历史	1
1.1.2	气动技术的应用	1
1.2	气动技术的新发展	3
1.2.1	精确化	3
1.2.2	高速化	4
1.2.3	小型化	4
1.2.4	复合化	5
1.2.5	集成化	5
1.2.6	网络化	6
1.2.7	气动机器人和气动机械手	6
1.2.8	真空技术	6
1.2.9	节能、环保与绿色化发展	6
1.3	气动技术的特点	7
1.3.1	气动传动的优点	8
1.3.2	气动传动的缺点	9
1.4	气动技术的一些基本概念	9
1.4.1	常用压力单位	9
1.4.2	气阻及有效断面积	9
1.4.3	标准状态和标准体积	13
1.5	气动系统的基本组成	13
1.6	空气的物理性质	15
1.7	空气的热力学性质	16
1.7.1	理想气体的状态方程	16
1.7.2	热量、功	18
1.7.3	热力学过程	18
1.8	湿空气	20
1.8.1	湿空气对气动系统的影响	20
1.8.2	绝对湿度、相对湿度、露点	20
1.8.3	湿空气的密度	22
1.8.4	压缩空气	22

1.9 气体在管道中的流动特性	24
1.9.1 不可压缩流动	24
1.9.2 可压缩流动	27
1.9.3 变截面管道中的亚音速和超音速流动	30

Chapter 2

第2章 气动执行元件	34
2.1 气缸的分类和特点	34
2.2 气缸的工作原理	35
2.2.1 普通气缸	35
2.2.2 组合气缸	38
2.2.3 特殊气缸	40
2.2.4 气爪(手指气缸)	52
2.2.5 摆动气缸	53
2.3 气缸的结构和常用计算方法	56
2.3.1 气缸的主要结构	56
2.3.2 缸筒与端盖的连接方法	59
2.4 常用气缸的计算	60
2.4.1 理论输出力	60
2.4.2 实际输出力	60
2.4.3 负载率 α	61
2.4.4 缸径 D	61
2.4.5 气缸行程的选择及活塞杆的长度限制和挠度	63
2.4.6 耗气量	64
2.5 气缸的性能	65
2.5.1 气缸的技术指标	65
2.5.2 压力-位移特性	66
2.5.3 气缸的缓冲计算	67
2.6 气缸的选用、使用注意事项	68
2.6.1 气缸的选择要点	68
2.6.2 气缸使用注意事项	68
2.7 气马达	69
2.7.1 气马达的分类和特点	69
2.7.2 气马达的工作原理	70
2.7.3 气马达的特性	73
2.8 气动肌肉	76

Chapter 3

第3章 气动控制阀	78
3.1 气动控制阀的分类	78
3.2 压力控制阀	78
3.2.1 减压阀	79
3.2.2 顺序阀	85
3.2.3 溢流阀(安全阀)	85

3.3	流量控制阀	88
3.3.1	流量控制原理	88
3.3.2	普通节流阀	88
3.3.3	单向节流阀	90
3.3.4	排气节流阀	90
3.3.5	节流阀的选择与使用	90
3.4	方向控制阀	91
3.4.1	方向控制阀的分类	91
3.4.2	气动控制阀的结构特性	94
3.4.3	方向控制阀的通口数和换向机能	98
3.4.4	电磁换向阀	100
3.4.5	气控换向阀	105
3.4.6	机械控制或人力控制方向换向阀	110
3.4.7	单向型方向阀	113
3.5	阀岛	115
3.5.1	带多针接口的阀岛	116
3.5.2	带现场总线的阀岛	116
3.5.3	可编程阀岛	117
3.5.4	模块式阀岛	117

Chapter 4

第4章	气能源及气动辅助元件	119
4.1	气源装置概述	119
4.1.1	气源系统的组成	119
4.1.2	气动系统对压缩空气质量的要求	120
4.1.3	空气压缩机	120
4.1.4	气动装置的耗气量及压气机站机组容量的选择	124
4.2	空气净化设备	125
4.2.1	后冷却器	125
4.2.2	主路过滤器、油水分离器及空气过滤器	126
4.2.3	干燥器	129
4.2.4	自动排水器	132
4.3	油雾器	132
4.3.1	油雾器的工作原理	133
4.3.2	油雾器的性能指标	134
4.3.3	油雾器的选择和使用注意事项	134
4.4	储气罐	135
4.5	消声器	136
4.6	压缩空气的输送管道分类和配管方式	137
4.6.1	气动系统的管路分类	137
4.6.2	主管路配管方式	138
4.6.3	配管注意事项	139
4.7	管路、管路连接件和附件	140

4.7.1	气动管路	140
4.7.2	管路的连接方式	141
4.7.3	管路接头	141
4.7.4	软管接头	142
4.7.5	使用注意事项	144
4.7.6	压缩空气主管道尺寸的计算	144
4.7.7	螺纹连接及管路连接的选择和评定标准	144

Chapter 5

第5章	气动转换元件及比例阀	146
5.1	气动位置传感器	146
5.1.1	背压式传感器 (气障式)	146
5.1.2	反射式传感器	147
5.1.3	遮断式传感器 (气栅式传感器)	148
5.1.4	对冲式传感器	149
5.1.5	负压式传感器	150
5.1.6	涡流式探头	151
5.1.7	超声波探头	151
5.2	气动放大器	152
5.2.1	膜片式气动放大器	152
5.2.2	滑柱式气动放大器	153
5.2.3	膜片滑块式放大器	154
5.2.4	泄气型气动放大器	154
5.2.5	膜片-滑阀式气动放大器	154
5.2.6	膜片式比例放大器	154
5.2.7	对冲式放大器	155
5.3	气动测量的应用	157
5.3.1	流速式气动测量原理	157
5.3.2	流量式气动测量原理	157
5.3.3	压力式气动测量原理	158
5.3.4	滑阀叠合量 (搭接量) 测量原理	159
5.3.5	气桥法测量线径	161
5.3.6	位置伺服系统测量工件尺寸	161
5.3.7	工件尺寸分选装置	162
5.4	气-液转换器	162
5.4.1	气-液转换器的结构	162
5.4.2	气-液转换器的选择使用	162
5.5	电-气转换器	164
5.6	气-电转换器	164
5.6.1	干簧管式气-电转换器	165
5.6.2	膜片式气-电转换器	165
5.7	压力开关	166
5.7.1	高低压控制器	166

5.7.2	可调压力开关	167
5.7.3	多用途压力开关	168
5.8	气动变送器	169
5.8.1	差压变送器	169
5.8.2	比值器	171
5.8.3	压力变送器	172
5.9	气动显示器	172
5.10	气动比例阀	173
5.10.1	气动比例阀的分类	173
5.10.2	比例压力阀	174
5.10.3	比例流量阀	179
5.10.4	电/气比例阀的选择	181

Chapter 6 第 6 章 真空元件 182

6.1	概述	182
6.1.1	真空度	182
6.1.2	真空发生系统的特点及其应用	182
6.2	真空泵	184
6.3	真空发生器	185
6.3.1	普通真空发生器工作原理	185
6.3.2	真空发生器的结构	187
6.3.3	带喷射开关的真空发生器	187
6.3.4	组合真空发生器	187
6.3.5	真空发生器的性能	188
6.4	真空吸盘	189
6.4.1	真空吸盘的结构	189
6.4.2	真空吸盘的吸力计算	190
6.5	真空用气阀	191
6.5.1	真空电磁阀	191
6.5.2	减压阀	191
6.5.3	换向阀	193
6.5.4	节流阀	194
6.5.5	单向阀	194
6.5.6	真空安全阀	194
6.5.7	真空顺序阀	194
6.6	真空开关	196
6.7	真空过滤器	197
6.8	真空元件的选定	197
6.8.1	吸盘的选定	197
6.8.2	真空发生器及真空切换阀的选定	198
6.9	使用注意事项	200

第 7 章 逻辑代数与逻辑控制系统	202
7.1 概述	202
7.2 逻辑代数	202
7.2.1 基本逻辑运算及其恒等式	202
7.2.2 基本定律	203
7.2.3 形式定律	203
7.2.4 逻辑运算规则和对偶定理	204
7.3 逻辑函数、真值表和基本逻辑门	204
7.3.1 逻辑函数	204
7.3.2 真值表	204
7.3.3 基本逻辑门	205
7.4 逻辑图	206
7.5 逻辑代数法设计逻辑线路	206
7.5.1 逻辑函数的标准形式（与-或式和或-与式）	207
7.5.2 逻辑函数的公式法化简	208
7.5.3 用真值表求逻辑函数的最简式	209
7.6 卡诺图法设计逻辑线路	211
7.6.1 用卡诺图化简逻辑函数	211
7.6.2 卡诺图法在逻辑线路设计中的应用	213

第 8 章 行程程序控制系统	217
8.1 概述	217
8.2 电气-气动控制系统	218
8.2.1 是门电路 (YES)	218
8.2.2 或门电路 (OR)	218
8.2.3 与门电路 (AND)	219
8.2.4 自保持电路	219
8.2.5 互锁电路	219
8.2.6 延时电路	219
8.2.7 直接控制和间接控制电路	220
8.2.8 计数电路	220
8.3 行程程序回路设计的最主要矛盾——障碍信号	221
8.4 X - D 状态线图	223
8.4.1 X - D 状态线图图框的画法	223
8.4.2 动作状态线 (D 线) 的画法	224
8.4.3 信号线 (X 线) 的画法	224
8.5 障碍信号的判别及其消除	225
8.5.1 障碍信号的判别	225
8.5.2 障碍信号的消除	225
8.6 串级法消除障碍	229
8.7 单往复回路的设计	231
8.7.1 X - D 状态线图	232

8.7.2	电气控制线路图	235
8.7.3	单控主控阀控制回路的设计方法	236
8.7.4	程序控制线图法	240
8.8	多往复回路的设计	244
8.8.1	多往复运动的特点和处理方法	244
8.8.2	多往复程序的信号-动作状态线图的画法	244
8.9	选择行程控制回路的设计	247
8.9.1	自动选择程序	247
8.9.2	人工预选程序	249

Chapter 9

第 9 章 气动伺服阀的一般分析 252

9.1	气动伺服阀的分类	252
9.1.1	气动滑阀	252
9.1.2	喷嘴-挡板阀	254
9.1.3	射流管阀	254
9.1.4	开关阀	255
9.2	气动伺服阀压力-流量特性的一般分析	256
9.2.1	基本假设	256
9.2.2	串环节流器的无量纲流量特性	256
9.2.3	两串环节流器流动状态的可能组合	259
9.2.4	气动伺服阀压力-流量特性的一般方程	260
9.3	阀的压力特性、起始压力和压力灵敏度	263
9.3.1	压力特性	263
9.3.2	起始压力	265
9.3.3	压力灵敏度	267
9.4	阀的流量特性和流量放大系数	269
9.5	压力-流量特性的线性化、阀系数	270
9.6	阀的耗气量、输出功率及效率	272
9.7	气缸腔内工作过程的动态分析	273
9.8	三通阀的分析	275
9.8.1	压力-流量特性	276
9.8.2	阀系数	278
9.8.3	无量纲功率特性	279
9.8.4	气缸工作腔内动态过程的分析	282
9.8.5	三通阀控缸负载装置分析	282
9.9	电/气伺服阀	284
9.9.1	电/气伺服阀的分类	284
9.9.2	喷嘴-挡板型伺服阀	284
9.9.3	直动式电反馈气动伺服阀	285

Chapter 10

第 10 章 气动伺服系统 288

10.1	射流管式舵机的性能分析	288
------	-------------	-----

10.1.1	系统介绍	288
10.1.2	系统的数学模型	289
10.2	脉宽调制差动缸气动伺服系统	299
10.2.1	脉宽调制系统简介	299
10.2.2	PWM 线性化舵机系统	301
10.2.3	PWM 线性化气动舵机的数学模型	303
10.2.4	系统载波频率的选择	307
10.3	双作用气缸 PWM 线性化系统分析	309
10.3.1	控制器及开关阀的数学模型	310
10.3.2	阀缸部分数学模型	311
10.3.3	起始压力的求法	312
10.3.4	线性化模型	313
10.3.5	PWM 线性化的阀系数的求解	315

Chapter 11	第 11 章 气动回路	317
11.1	概述	317
11.2	基本回路	317
11.2.1	供给回路	317
11.2.2	排出回路	318
11.2.3	气动换向回路	319
11.2.4	差动回路	320
11.2.5	气马达回路	321
11.3	功能回路	321
11.3.1	力控制回路	321
11.3.2	转矩控制回路	322
11.3.3	速度控制回路	325
11.3.4	间接控制	328
11.3.5	气液联动速度控制回路	328
11.3.6	变速回路	329
11.3.7	缓冲回路	329
11.3.8	位置 (角度) 控制回路	331
11.4	气动逻辑回路	336
11.5	应用回路	337
11.5.1	增压回路	337
11.5.2	冲压回路	338
11.5.3	往复回路	339
11.5.4	气缸同步动作回路	341
11.5.5	张力控制回路	342
11.5.6	平衡回路	343
11.5.7	节能回路	344
11.5.8	往复 (振荡) 回路	345

11.5.9	安全保护回路	345
11.5.10	真空回路	351
11.5.11	特殊回路	353
11.6	其他回路	353
11.6.1	气动放大器应用回路	353
11.6.2	自保持控制回路	353
11.6.3	中途停止回路	353

Chapter 12	第 12 章 气动系统的设计	355
12.1	设计概述	355
12.2	气动断续控制系统的设计	358
12.2.1	气动断续控制系统的设计步骤	358
12.2.2	设计举例	362
12.3	电气-气动程序回路设计	371
12.3.1	用直觉法(经验法)设计电气回路图	371
12.3.2	用串联法设计电气回路图	376
	参考文献	385

第1章

气动基础知识

1.1 气动技术历史发展与应用

1.1.1 气动技术的发展历史

气压传动与控制简称“气动技术”，它是以空气压缩机为动力源，以压缩空气为工作介质进行能量传递或信号传递的工程技术，即以气体为介质，在密闭容器里进行能量的传递，描述的是压缩空气应用在传动和控制技术领域的情况。它是实现各种生产控制、自动化作业的重要手段之一。广义地说，除了空气压缩机、空气净化器、气动缸、气动马达、各类气动控制阀以及辅助装置外，真空发生装置和真空执行元件以及历史悠久的气动工具等，都包括在气动技术的范畴之内。

人们利用空气的能量完成各种工作的历史可以追溯到远古时代，很早以前，人们就已开始使用风箱，它也是压缩空气实际应用的一种形式，后来人们又将其用于管风琴的制作、采矿和冶金行业。尽管如此，到了19世纪中叶，压缩空气的应用才形成了一定的体系，气动工具、风镐、管道传递邮件系统、蒸汽机车以及其他辅助系统在实际生活中的使用也充分说明了这一点。大约于1776年人们发明了能产生1个大气压左右压力的空气压缩机。1880年，人们第一次利用气缸做成气动刹车装置，将它成功地应用到火车的制动上。气动技术应用在机械化和自动化领域开始于20世纪中期，在20世纪30年代初，气动技术成功地应用于自动门的开闭及各种机械的辅助动作上。进入20世纪70年代，随着工业机械化和自动化的发展，气动技术越来越广泛地应用于各个领域。例如汽车制造业、气动机器人、医用研磨机、电子焊接自动化、家用充气筒、喷漆气泵等，特别是成本低廉、结构简单的气动自动装置已得到了广泛的普及与应用，在工业企业自动化中位于重要的地位。

1.1.2 气动技术的应用

(1) 在汽车制造业中的应用

现代汽车制造工厂的生产线，尤其是主要工艺的焊接生产线，几乎无一例外地采用了气动技术。如车身在每个工序的移动、车身外壳被真空吸盘吸起和放下、在指定工位的夹紧和定位、点焊机焊头的快速接近、减速软着陆后的变压控制点焊，都采用了各种特殊功能的气缸及相应的气动控制系统。高频的点焊、力控的准确性及完成整个工序过程的高度自动化，堪称最有代表性的气动技术应用之一。另外，搬运装置中使用的高速气缸（最大速度达3m/s）、复合控制阀的比例控制技术都代表了当今气动技术的新发展。

(2) 在一般机械工业生产过程中的应用

例如在金属切削加工中，一般机床可以采用气动卡盘、气动虎钳和夹具，既快速又省力；高效专用机床可以安装各种形式的气动机械手，实现工件自动上料、定位、夹紧、清洗等动作，在小型零件加工中，车床、钻床、铣床进给运动也可以用气缸或气-液缸来驱动；在数控机床上，可用气压传动的机械手，实现自动更换刀具或主传动的变速、转台的分度和定位等。因此在大批量的小型零件加工中，气动技术可以发挥很好的效用。

利用空气射流的场合很多。例如：喷砂、喷漆、精选米粒、谷物装卸、啤酒、饮料、粉料、有毒物料、水泥等气力运输等。

利用真空系统（或称为负压系统）可完成工件的吸附、固定、夹紧、拾取、搬运等。如堆叠放置的板材，无法直接用机械手抓取，只能用真空吸盘吸附。但仅用真空吸盘不能保证定位精度，因此将机械手和真空吸盘结合使用。

真空元件及其系统还应用于各种生产线和设备上，如电视机、冰箱、纸箱、玻璃、印刷等生产线。纺织上用的自动加捻器也有用喷气真空发生器的。

(3) 在冶金机械中的应用

在轧钢和有色金属设备上，采用气动装置完成各种辅助动作。一般一条轧钢自动线，需要 200 余套气阀和相应数目的气缸，便于实现远距离自动控制。

(4) 在电子、半导体制造行业的应用

在彩电、冰箱等家用电器产品的装配生产线上，在半导体芯片、印制电路等各种电子产品的装配流水线上，不仅可以看到各种大小不一、形状不同的气缸、气爪，还可以看到许多灵巧的真空吸盘将一般气爪很难抓起的显像管、纸箱等物品轻轻吸住，运送到指定位置上。对加速度限制十分严格的芯片搬运系统，采用了平稳加速的正弦气缸。这种气缸具有特殊的加减速机构，可以平稳地将盛满水的水杯从 A 点送到 B 点，并保证水不溢出。

非接触搬运主要用于半导体芯片、CD 等物件的搬运，确保物件除污后的清洁状态。非接触搬运使用了一种 NCT 系列气动执行器。洁净压缩空气从装置在元件本体底部部位的环形喷嘴沿本体表面喷出，从而在元件下方部位产生负压，吸附物件。喷出的空气通过元件本体与物件之间的间隙，沿元件本体外周向外流出。一旦物件靠近，该喷出空气层在反弹力作用下阻止接触物件，因此保持非接触的悬浮状态。NCT 元件与真空吸盘不同，并非依靠吸入空气来固持物体，而正好相反，它是通过喷出空气来固持物体的装置。但是为了能自由地横向移动，有必要设置与物件侧面接触的导向装置，与物件侧面接触则无法避免。

(5) 在运输工具上的应用

火车、地铁、汽车、飞机等交通运输工具上广泛使用气动技术。例如地铁、汽车的开关门，汽车的制动系统，高速列车轮轨间喷脂润滑系统，电力机车受电弓气控系统，高速列车主动悬挂系统，缆车弯道倾斜装置，轿车后盖支撑杆，螺旋桨由顶部空气喷嘴驱动的直升飞机等。

(6) 在矿山机械上的应用

矿山机械中，广泛应用气动马达。气动马达适用于需要无级变速、经常改变旋转方向、启动频繁以及防爆、负载启动的场合，在空气潮湿、高温以及不便于直接操作的地方（如小型装岩机、气翻矿车等），适合采用气动马达。因此在矿山、井下作业中，气动马达需求量很大。

(7) 在农牧业上的应用

气动萝卜收割机，可以完成拔萝卜，对萝卜分类、计数和捆扎等作业。在种植蔬菜等的

