

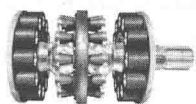
QIDONGJISHU  
RUMEN YU TIGAO

# 气动技术 入门与提高

宁辰校 主编



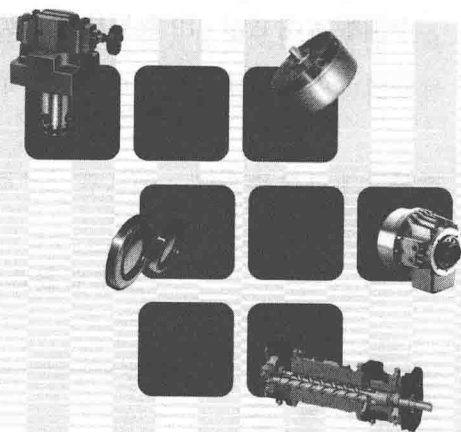
化学工业出版社



QIDONGJISHU  
RUMEN YU TIGAO

# 气动技术 入门与提高

宁辰校 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书详细介绍了气动技术的基础知识，内容涵盖基本元件、基本回路及典型系统，重点讲解气动元件、回路、系统的基本原理和应用场合，并结合生产实际进行介绍，内容丰富、实用性强。

本书特别适合气动技术的初学者学习使用，可供从事流体传动及控制技术的工程技术人员及其他相关从业人员参阅，也可作为高等职业教育、成人教育、技术培训的基础教材，同时可作为大、中专院校相关专业的教学参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

气动技术入门与提高 / 宁辰校主编.

—北京: 化学工业出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-122-30573-2

I. ①气… II. ①宁… III. ①气动技术 IV. ①TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第217426号

---

责任编辑: 黄 滢  
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 张燕文  
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 装: 三河市延风印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 10 3/4 字数 260千字 2017年11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: 45.00元

版权所有 违者必究

# 前言

气动技术广泛应用于机械制造、电子、电气、石油化工、轻工、食品、汽车、船舶、军工以及机械手和各类自动化智能装备等行业中。气动技术是当代工程技术人员所应掌握的重要基础技术之一。

本书共有 10 章。第 1、2 章为概述和气动基础知识；第 3～7 章讲述各类气动元件；第 8、9 章详细叙述了气动基本回路和典型气动系统；第 10 章简要介绍了气动系统的使用与维护。

本书在编写过程中，追求基础性、系统性、先进性和实用性的统一，充分贯彻通俗易懂、少而精、理论联系实际的原则，在较全面地阐述气压传动基本内容和基础知识的基础上，力求反映我国气动行业发展的最新情况。在全书结构上，内容完整、循序渐进。在气动基础知识部分，重点介绍基本理论和基本概念；在气动元件部分，强调对各类元件的组成、类型和基本工作原理的理解和掌握；在基本回路和典型系统部分，则尽可能使内容丰富、翔实，并结合生产实际，突出实用性。

本书是针对气动技术从业人员的实际需要组织编写的，特别适合气动技术的初学者学习使用，可供从事流体传动及控制技术的工程技术人员及其他相关从业人员参阅，也可作为高等职业教育、成人教育、技术培训的基础教材，同时可作为大、中专院校相关专业的教学参考书。

本书由宁辰校主编，张戌社、赵剑参编，郭英军、李兰、齐习娟、刘永强参与了文献资料搜集、文稿录入和部分插图制作等工作。

由于水平所限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

## 第 1 章 气压技术概述 1

- |                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| 1.1 气动系统的工作原理、组成及特点 .. 1 | 1.2 气动技术的应用和发展概况 ..... |
| 1.1.1 气动系统的工作原理 .....    | 1.2.1 气动技术的应用范围 .....  |
| 1.1.2 气动系统的组成 .....      | 1.2.2 气动技术的发展概况及发展     |
| 1.1.3 气动系统的特点 .....      | 趋势 .....               |

## 第 2 章 气压传动基础知识 6

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| 2.1 空气的特性 .....        | 2.2 气体的状态变化 .....        |
| 2.1.1 空气的组成 .....      | 2.3 气体的流动规律 .....        |
| 2.1.2 空气的湿度 .....      | 2.3.1 气体流动的基本方程 .....    |
| 2.1.3 空气的状态参数 .....    | 2.3.2 气体的通流能力 .....      |
| 2.1.4 空气的主要性能 .....    | 2.4 容器的充气 and 排气计算 ..... |
| 2.1.5 空气的污染 .....      | 2.4.1 充气温度和时间的计算 .....   |
| 2.2 气体的状态方程和状态变化 ..... | 2.4.2 放气温度和时间的计算 .....   |
| 2.2.1 气体的状态方程 .....    |                          |

## 第 3 章 气源及气源处理元件 19

- |                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| 3.1 气源装置 .....    | 3.2.1 概述 .....    |
| 3.1.1 空气压缩机 ..... | 3.2.2 油水分离器 ..... |
| 3.1.2 后冷却器 .....  | 3.2.3 空气过滤器 ..... |
| 3.1.3 储气罐 .....   | 3.2.4 分水排水器 ..... |
| 3.2 气源处理元件 .....  | 3.2.5 干燥器 .....   |

## 第 4 章 气动执行元件 36

- |              |                         |
|--------------|-------------------------|
| 4.1 概述 ..... | 4.2.1 气缸的分类、原理及特点 ..... |
| 4.2 气缸 ..... | 4.2.2 单作用气缸 .....       |



4.2.3 双作用气缸 .....	40	4.3 气动马达 .....	53
4.2.4 特殊气缸 .....	40	4.3.1 摆动气动马达 .....	53
4.2.5 气缸的工作特性 .....	48	4.3.2 旋转气动马达 .....	55
4.2.6 气缸的主要尺寸及结构设计 ...	51	4.4 气动手指气缸 .....	58
4.2.7 气缸的选用 .....	52		

## 第 5 章 气动控制元件 60

5.1 概述 .....	60	5.4 流量控制阀 .....	79
5.1.1 气动控制阀的功用及类型 .....	60	5.4.1 节流阀 .....	79
5.1.2 气动控制阀的特点 .....	60	5.4.2 单向节流阀 .....	80
5.2 方向控制阀 .....	61	5.4.3 排气节流阀 .....	80
5.2.1 单向阀 .....	61	5.4.4 柔性节流阀 .....	81
5.2.2 换向阀 .....	64	5.5 气动控制阀的选用 .....	81
5.3 压力控制阀 .....	72	5.6 气动逻辑元件简介 .....	82
5.3.1 减压阀 .....	72	5.6.1 气动逻辑元件 .....	82
5.3.2 溢流阀(安全阀) .....	77	5.6.2 气动逻辑回路 .....	84
5.3.3 顺序阀 .....	77	5.6.3 逻辑元件的应用举例 .....	86
5.3.4 增压阀 .....	78		

## 第 6 章 气动辅助元件 87

6.1 润滑元件 .....	87	6.5.2 气动传感器的工作原理 .....	94
6.1.1 油雾器 .....	87	6.5.3 气动传感器的应用举例 .....	96
6.1.2 不供油润滑元件 .....	88	6.6 管道系统 .....	98
6.2 空气处理组件 .....	88	6.6.1 管道连接件 .....	98
6.3 消声器 .....	89	6.6.2 管道系统的布置原则 .....	98
6.3.1 消除噪声的措施 .....	89	6.6.3 管道布置的注意事项 .....	99
6.3.2 消声器的种类 .....	90	6.7 转换器 .....	100
6.3.3 消声器的应用 .....	90	6.7.1 气-电转换器 .....	100
6.4 气动放大器 .....	91	6.7.2 电-气转换器 .....	101
6.4.1 膜片截止式放大器 .....	92	6.7.3 气-液转换器 .....	102
6.4.2 膜片滑柱式放大器 .....	92	6.8 其他辅助元件 .....	102
6.4.3 膜片滑块式放大器 .....	93	6.8.1 缓冲器 .....	102
6.5 气动传感器 .....	93	6.8.2 气动开关 .....	103
6.5.1 气动传感器的特点及应用 .....	93	6.8.3 气动压力表 .....	105

## 第7章 真空元件 106

7.1 真空发生装置	106	7.2 真空吸盘	110
7.1.1 真空泵	106	7.3 真空用控制阀	111
7.1.2 真空发生器	107	7.4 真空压力开关	112
7.1.3 真空发生器与真空泵的特点 及应用场合	110	7.5 其他真空元件	113
		7.6 真空元件的选择使用	116

## 第8章 气动基本回路 117

8.1 方向控制回路	117	8.3.3 多级压力控制回路	129
8.1.1 单作用气缸换向回路	117	8.3.4 双压驱动回路	130
8.1.2 双作用气缸换向回路	118	8.3.5 增压回路	130
8.1.3 往复运动回路	118	8.3.6 增力回路	131
8.1.4 气动马达换向回路	120	8.3.7 气动马达转矩控制回路	132
8.1.5 延时换向回路	120	8.3.8 冲击回路	132
8.2 速度控制回路	120	8.4 多缸动作回路	132
8.2.1 单作用气缸速度控制回路	120	8.4.1 多缸顺序动作回路	132
8.2.2 双作用气缸速度控制回路	121	8.4.2 延时顺序动作控制回路	133
8.2.3 差动快速回路	123	8.4.3 气动双缸同步回路	134
8.2.4 速度换接回路	124	8.5 其他基本回路	136
8.2.5 气-液联动速度控制回路	124	8.5.1 安全回路	136
8.2.6 位置控制回路	125	8.5.2 过载保护回路	137
8.2.7 缓冲回路	126	8.5.3 互锁回路	138
8.3 压力控制回路	127	8.5.4 锁紧回路	138
8.3.1 气源压力控制回路	127	8.5.5 自动和手动并用的控制回路	139
8.3.2 工作压力控制回路	128	8.5.6 计数回路	139

## 第9章 典型气动系统分析 141

9.1 工件尺寸自动分选机气动系统	141	9.7 气动机械手	148
9.2 拉门自动开闭系统	142	9.8 自动钻床气动系统	150
9.3 八轴仿形铣加工机床气动系统	142	9.9 气动计量系统	151
9.4 数控加工中心气动换刀系统	144	9.10 公共汽车车门气动系统	153
9.5 气-液动力滑台气动系统	145		
9.6 机床夹具气动系统	147		

## 第10章 气动系统的安装使用及维护 154

10.1 气动系统的安装及调试 .....	154	10.2.2 气动系统的维护 .....	155
10.1.1 气动系统的安装 .....	154	10.3 气动系统的常见故障及排除方法...	156
10.1.2 气动系统的调试 .....	154	10.3.1 气动系统的故障种类 .....	156
10.2 气动系统的使用及维护 .....	154	10.3.2 气动系统常见故障及其排除	
10.2.1 气动系统的使用 .....	155	方法 .....	157

## 参考文献 163



我们在日常工作和生活中经常见到各种机器，它们通常都是由原动机、传动装置和工作机构三部分组成的。其中传动装置最常见的类型有机械传动、电气传动、电子传动和流体传动。流体传动是以受压的流体为工作介质对能量进行转换、传递、控制和分配的。它可以分为气压传动、液压传动和液力传动。

气压传动技术简称气动技术，是以压缩空气为工作介质来进行能量与信号的传递，是实现各种生产过程机械化、自动化的一门技术。它是流体传动与控制学科的一个重要组成部分。

## 1.1 气动系统的工作原理、组成及特点

### 1.1.1 气动系统的工作原理

气压传动的工作过程是利用空气压缩机把电动机或其他原动机输出的机械能转换为空气的压力能，然后在控制元件的作用下，通过执行元件把压力能转换为直线运动或回转运动形式的机械能，从而完成各种动作，并对外做功。

下面通过一个典型气压传动系统来了解气动系统如何进行能量与信号传递，如何实现自动控制。

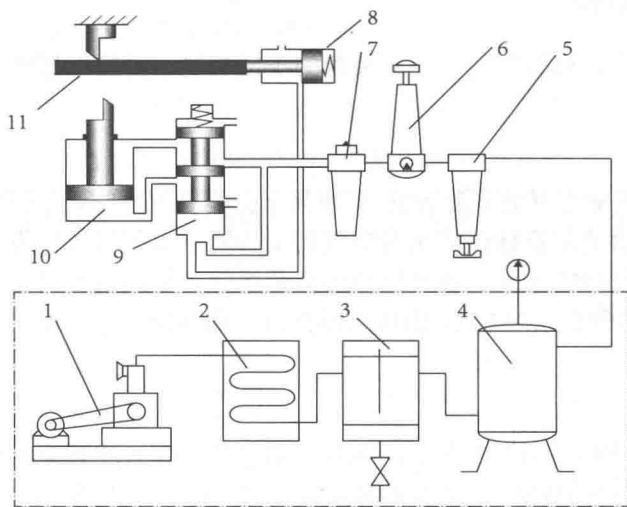


图 1-1 气动剪切机的气压传动系统

- 1—空气压缩机；2—后冷却器；3—分水排水器；4—储气罐；5—分水滤气器；  
6—减压阀；7—油雾器；8—行程阀；9—气控换向阀；10—气缸；11—工料

图 1-1 所示为气动剪切机的气压传动系统，图示位置为剪切前的情况。空气压缩机 1 产生的压缩空气经后冷却器 2、分水排水器 3、储气罐 4、分水滤气器 5、减压阀 6、油雾器 7 到达换向阀 9，部分气体经节流通路进入换向阀 9 的下腔，使上腔弹簧压缩，换向阀 9 阀芯

位于上端；大部分压缩空气经换向阀 9 后进入气缸 10 的上腔，而气缸的下腔经换向阀与大气相通，故气缸活塞处于最下端位置。当上料装置把工料 11 送入剪切机并到达规定位置时，工料压下行程阀 8，此时换向阀 9 阀芯下腔压缩空气经行程阀 8 排入大气，在弹簧的推动下，换向阀 9 阀芯向下运动至下端；压缩空气则经换向阀 9 后进入气缸的下腔，上腔经换向阀 9 与大气相通，气缸活塞向上运动，带动剪刀上行剪断工料。工料剪下后，即与行程阀 8 脱离。行程阀 8 阀芯在弹簧作用下复位、出路堵死。换向阀 9 阀芯上移，气缸活塞向下运动，又恢复到剪断前的状态。

图 1-2 所示为用图形符号绘制的剪切机气压传动系统。

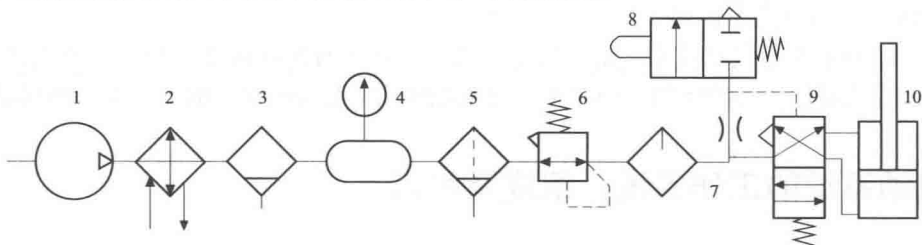


图 1-2 用图形符号绘制的剪切机气压传动系统

- 1—空气压缩机；2—后冷却器；3—分水排水器；4—储气罐；5—分水滤气器；  
6—减压阀；7—油雾器；8—行程阀；9—气控换向阀；10—气缸

气压传动的基本工作特征：系统的工作压力取决于负载；执行装置的运动速度只取决于输入流量的大小，而与外负载无关。

### 1.1.2 气动系统的组成

在气压传动系统中，根据气动元件和装置的不同功能，可将气压传动系统分成以下四个组成部分。

#### (1) 气源装置

气源装置是获得压缩空气的能源装置，其主体部分是空气压缩机，另外还有气源净化设备。空气压缩机将原动机供给的机械能转化为空气的压力能；而气源净化设备用以降低压缩空气的温度，除去压缩空气中的水分、油分以及污染杂质等。使用气动设备较多的厂矿常将气源装置集中在压气站（俗称空压站）内，由压气站再统一向各用气点（分厂、车间和用气设备等）分配供应压缩空气。

#### (2) 执行元件

执行元件是以压缩空气为工作介质，并将压缩空气的压力能转变为机械能的能量转换装置。包括作直线往复运动的气缸，作连续回转运动的气马达和作不连续回转运动的摆动马达等。

#### (3) 控制元件

控制元件又称操纵、运算、检测元件，是用来控制压缩空气流的压力、流量和流动方向等以便使执行机构完成预定运动规律的元件。包括各种压力阀、方向阀、流量阀、逻辑元件、射流元件、行程阀、转换器和传感器等。

#### (4) 辅助元件

辅助元件是使压缩空气净化、润滑、消声以及元件间连接所需要的一些装置。包括分水滤气器、油雾器、消声器以及各种管路附件等。

### 1.1.3 气动系统的特点

#### (1) 优点

① 空气随处可取，取之不尽，节省了购买、储存、运输介质的费用；用后的空气直接排入大气，对环境无污染；处理方便，不必设置回收管路，因而也不存在介质变质、补充和更换等问题。

② 因空气黏度小（约为液压油的万分之一），在管内流动阻力小，压力损失小，便于集中供气 and 远距离输送。即使有泄漏，也不会像液压油一样污染环境。

③ 与液压传动相比，气动反应快，动作迅速，维护简单，管路不易堵塞。

④ 气动元件结构简单，制造容易，适于标准化、系列化、通用化。

⑤ 气动系统对工作环境适应性好，特别在易燃、易爆、多尘埃、强磁、辐射、振动等恶劣工作环境中工作时，安全可靠性能优于液压、电子和电气系统。

⑥ 空气具有可压缩性，使气动系统能够实现过载自动保护，也便于储气罐储存能量，以备急需。

⑦ 排气时气体因膨胀而温度降低，因而气动设备可以自动降温，长期运行也不会发生过热现象。

#### (2) 缺点

① 空气具有可压缩性，当载荷变化时，气动系统的动作稳定性差。但可以采用气液联动装置解决此问题。

② 工作压力较低（一般为0.4~0.8MPa），又因结构尺寸不宜过大，因而输出功率较小。

③ 气信号传递的速度比光、电子速度慢，故不宜用于要求高传递速度的复杂回路中。但对一般机械设备，气动信号的传递速度是能够满足要求的。

④ 排气噪声大，需加消声器。

表1-1为气压传动与其他类型传动的性能比较，供选用时参考。

表1-1 气压传动与其他类型传动的性能比较

项目	气压传动	液压传动	电气传动	电子传动	机械传动
元件结构	简单	复杂	稍复杂	最复杂	一般
输出力	中等	最大	中等	最小	较大
动作速度	较快	较慢	快	最快	一般
操作距离	中距离	短距离	远距离	远距离	短距离
信号响应	稍快	快	很快	很快	中
环境要求	适应性好	不怕振动	要求高	要求特高	一般
工作寿命	长	一般	较短	短	一般
负载变化影响	较大	有一些	几乎没有	没有	没有
无级调速	较好	良好	良好	良好	困难
体积	小	小	中	小	大
维护	一般	要求高	要求较高	要求更高	简单
价格	便宜	稍贵	稍贵	最贵	一般

## 1.2 气动技术的应用和发展概况

### 1.2.1 气动技术的应用范围

目前气压传动技术在下述几方面有普遍的应用。

- ① 机械制造业 其中包括机械加工生产线上工件的装夹与搬运, 铸造生产线上的造型、捣固、合箱等以及在汽车制造中, 汽车自动化生产线、车体部件自动搬运与固定、自动焊接等。
- ② 电子 IC 及电器行业 如用于硅片的搬运, 元器件的插装与锡焊, 家用电器的组装等。
- ③ 石油、化工业 用管道输送介质的自动化流程绝大多数采用气压传动, 如石油提炼加工、气体加工、化肥生产等。
- ④ 轻工食品包装业 其中包括各种半自动或全自动包装生产线, 如酒类、油类、煤气罐装及各种食品的包装等。
- ⑤ 机器人 如装配机器人、喷漆机器人、搬运机器人以及爬墙机器人、焊接机器人等。
- ⑥ 其他 如车辆刹车装置、车门开闭装置、颗粒物质的筛选装置、鱼雷导弹自动控制装置等。各种气动工具的广泛使用, 也是气动技术应用的一个组成部分。

### 1.2.2 气动技术的发展概况及发展趋势

#### (1) 发展概况

远在两千多年前, 人们就开始利用空气的能量完成各种工作。例如, 希腊人利用压缩空气来增大石弩的射程。但作为气动技术应用的雏形, 大约始于 1776 年, John Wilkinson 发明了空气压缩机。20 世纪 20 年代, 气动技术成功地应用于自动门的开闭以及各种机械的辅助动作上, 但这些都还是将气动技术作为传动的一种手段。进入到 20 世纪 60 年代及 70 年代, 随着工业机械化和自动化的发展, 气动技术广泛应用于生产自动化的各个领域, 形成了现代气动技术。

近几十年来, 气动技术不仅用于做功, 而且发展到检测和数据处理。传感器、过程控制器和执行器的发展导致了气动控制系统的产生。近年来, 随着电子技术、计算机与通信技术的发展及各种气动组件的性价比进一步提高, 气动控制系统的先进性与复杂性进一步发展, 在自动控制领域起着越来越重要的作用。

#### (2) 发展趋势

① 组合化、智能化 最常见的组合是带阀、带开关气缸; 在物料搬运中, 还使用了气缸、摆动气缸、气动夹头和真空吸盘的组合体, 同时配有电磁阀、程控器, 结构紧凑, 占用空间小, 行程可调。

② 小型化、集成化、精密化 除小型化外, 目前开发了非圆活塞气缸、带导杆气缸等, 可减小普通气缸活塞杆工作时的摆转; 为了使气缸精确定位, 开发了制动气缸等。为了使气缸的定位更精确, 使用了传感器、比例阀等实现反馈控制, 定位精度达 0.01mm。在精密气缸方面已开发了 0.3 mm/s 低速气缸和 0.01N 微小载荷气缸。在气源处理中, 过滤精度为 0.01mm, 过滤效率为 99.9999% 的过滤器和灵敏度为 0.001MPa 的减压阀已被开发出来。

③ 高速化 目前气缸的活塞速度范围为 50 ~ 750mm/s。为了提高生产率, 自动化的节拍正在加快。今后要求气缸的活塞速度提高到 5 ~ 9m/s。与此相应, 阀的响应速度也将加快, 要求由现在的 1/90s 级提高到 1/900s 级。

④ 无油、无味、无菌化 由于人类对环境的要求越来越高,不希望气动元件排放的废气带油雾污染环境,因此无油润滑的气动元件将会普及。有些特殊行业,如食品、饮料、制药、电子等,对空气的要求更为严格,除无油外,还要求无味、无菌等,这类特殊要求的过滤器将被不断开发出来。

⑤ 高寿命、高可靠性和智能诊断功能 气动元件大多用于自动化生产中,元件的故障往往会影响设备的运行,使生产线停止工作,造成严重的经济损失,因此,对气动元件的工程可靠性提出了更高的要求。

⑥ 节能、低功耗 气动元件的低功耗能够节约能源,并能更好地与微电子技术、计算机技术相结合。功耗 $\leq 0.5\text{W}$ 的电磁阀已被开发和商品化,可由计算机直接控制。

⑦ 机电一体化 为了精确达到预定的控制目标,应采用闭路反馈控制方式。为了实现这种控制方式要解决计算机的数字信号、传感器反馈模拟信号和气动控制气压或气流量三者之间的相互转换问题。

⑧ 应用新技术、新工艺、新材料 在气动元件制造中,型材挤压、铸件浸渗和模块拼装等技术已被广泛应用;压铸新技术(液压抽芯、真空压铸等)目前已逐步推广;压电技术、总线技术、新型软磁材料、透析滤膜等正在被应用。

# 第2章 气压传动基础知识

## 2.1 空气的特性

### 2.1.1 空气的组成

自然空气由多种气体混合而成。其主要成分是氮气和氧气，其次是氩气和少量的二氧化碳及其他气体。另外还含有一定量的水蒸气及砂土等细小固体。在城市和工厂区，由于烟雾及汽车排气，大气中还含有二氧化硫、亚硝酸、碳氢化合物等物质。

完全不含有水蒸气的空气称为干空气。干空气在基准状态（温度 0℃，压力 0.1013MPa）的体积组成和质量组成如表 2-1 所示。

表 2-1 干空气的组成

成分	氮气 (N <sub>2</sub> )	氧气 (O <sub>2</sub> )	氩 (Ar)	二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	其他气体
体积组成 / %	78.03	20.93	0.932	0.03	0.078
质量组成 / %	75.50	23.10	1.28	0.045	0.075

空气中氮气所占比例最大，由于氮气的化学性质不活泼，具有稳定性，不会自燃，所以空气作为工作介质可以用在易燃、易爆场所。

### 2.1.2 空气的湿度

#### (1) 干空气和湿空气

空气通常分为干空气和湿空气两种形态，以是否含水蒸气作为区分标志。

湿空气：把含有水蒸气的空气称为湿空气。大气中的空气基本上都是湿空气。

干空气：不含水蒸气的空气称为干空气。

空气中含有水分的多少对系统的稳定性有直接的影响，因此各种气动元件对含水量有明确的规定，并且要采取一些措施防止水分的带入。

#### (2) 湿度

湿空气中的水分（水蒸气）含量通常用湿度来表示。表示方法有绝对湿度、相对湿度以及含湿量。

① 绝对湿度 在标准状态下，单位体积湿空气中所含水蒸气的质量，称为湿空气的绝对湿度。

$$\chi = \frac{m_s}{V} \quad (2-1)$$

式中  $\chi$  —— 绝对湿度，kg/m<sup>3</sup>；

$m_s$  —— 水蒸气质量，kg；

$V$  —— 湿空气的体积，m<sup>3</sup>。



空气中的水蒸气含量是有极限的。在一定温度和压力下，空气中所含水蒸气达到最大可能的含量时，将空气称为饱和湿空气。饱和湿空气所处的状态称为饱和状态。

② 饱和和绝对湿度 是指在一定温度下，单位体积饱和湿空气所含水蒸气的质量，用  $\chi_b$  表示，其表达式为

$$\chi_b = \frac{p_b}{R_s T} \quad (2-2)$$

式中  $p_b$  —— 饱和湿空气中水蒸气的分压力；

$R_s$  —— 水蒸气的气体常数；

$T$  —— 热力学温度。

在 2MPa 压力下，可近似地认为饱和空气中水蒸气的密度与压力大小无关，只取决于温度。标准大气压下，湿空气的饱和水蒸气分压力和饱和绝对湿度列于表 2-2。

表 2-2 饱和湿空气表

温度 $t / ^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 $p_b / \text{MPa}$	饱和绝对湿度 $\chi / (\text{g}/\text{m}^3)$	温度 $t / ^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 $p_b / \text{MPa}$	饱和绝对湿度 $\chi / (\text{g}/\text{m}^3)$
100	0.10123	588.7	20	0.00233	17.28
80	0.04732	290.6	15	0.00170	12.81
70	0.03113	196.8	10	0.00123	9.39
60	0.01991	129.6	5	0.00087	6.79
50	0.01233	82.77	0	0.00061	4.85
40	0.00737	51.05	-6	0.00037	3.16
35	0.00562	39.55	-10	0.00026	2.25
30	0.00424	30.32	-16	0.00015	1.48
25	0.00316	23.04	-20	0.0001	1.07

③ 相对湿度 是指在一定温度和压力下绝对湿度和饱和绝对湿度之比，用  $\varphi$  表示：

$$\varphi = \frac{\chi}{\chi_b} \times 100\% = \frac{p_s}{p_b} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中  $\chi$ ,  $\chi_b$  —— 绝对湿度和饱和绝对湿度；

$p_s$ ,  $p_b$  —— 湿空气中水蒸气的分压力和饱和湿空气中水蒸气的分压力。

当  $p_s = 0$ 、 $\varphi = 0$  时，空气绝对干燥；当  $p_s = p_b$ 、 $\varphi = 100\%$  时，湿空气饱和，饱和空气吸收水蒸气的能力为零。温度降至此温度以下，湿空气中便有水滴析出。降温法清除湿空气中的水分，就是利用此原理。

④ 含湿量 单位质量湿空气中所含水蒸气的质量，用  $d$  表示：

$$d = \frac{m_s}{m_g} = \frac{\rho_s}{\rho_g} \quad (2-4)$$

式中  $m_s$  —— 水蒸气的质量；

$m_g$  —— 干空气的质量；

$\rho_s$  —— 水蒸气的密度；

$\rho_g$  —— 干空气的密度。

### (3) 露点

露点是指在规定的空气压力下，当温度一直下降到成为饱和状态时，水蒸气开始凝结的那一刹那的温度。如果空气继续冷却，那么它不能保留所有的水分，过量的水分则以小液滴的形式凝结出来形成冷凝水。空气中水分的含量完全取决于温度。

露点又可分为大气压露点和压力露点两种，大气压露点是指在大气压下水分的凝结温度。而压力露点是指气压系统在某一高压下的凝结温度。以空气压缩机为例，其吸入口为大气压露点，输出口为压力露点。

## 2.1.3 空气的状态参数

### (1) 压力及其表示方法

① 空气的压力 是由于气体分子热运动而相互碰撞，从而在容器的单位面积上产生的力的统计平均值，用  $p$  表示。

空气总压力是干空气的分压力和其中的水蒸气分压力之和，即

$$p = p_a + p_s \tag{2-5}$$

式中  $p_a$  —— 空气中所含干空气分压力，Pa；

$p_s$  —— 空气中所含水蒸气分压力，Pa。

湿度为  $\varphi$  的湿空气，其分压力

$$p_s = \varphi p_b \tag{2-6}$$

式中  $p_b$  —— 同温度下饱和水蒸气分压力，Pa。

② 压力表示方法 空气压力可用绝对压力、表压力和真空度等来度量，绝对压力、表压力和真空度之间的关系如图 2-1 所示。

绝对压力：以绝对真空作为计算压力的起点。

表压力：高出当地大气压的压力值。压力表测得的值为表压力。

真空度：低于当地大气压的压力值。

由图 2-1 可知：

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{当地大气压}$$

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

在工程计算中，常将当地大气压用标准大气压代替。

国际单位制中，压力的单位为 Pa ( $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ )，这也是我国的法定压力单位。较大的压力单位还有 kPa ( $1\text{kPa} = 1 \times 10^3\text{Pa}$ ) 或 MPa ( $1\text{MPa} = 1 \times 10^6\text{Pa}$ )。Pa 与其他压力单位的换算见表 2-3。

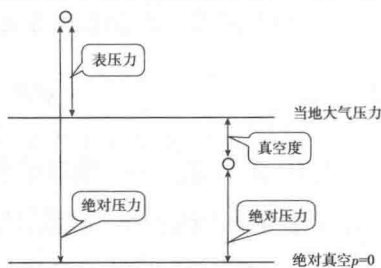


图 2-1 绝对压力、表压力和真空度之间的关系

表 2-3 各种压力单位的换算

Pa	atm	bar	kgf/cm <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>	mmHg	mmH <sub>2</sub> O
1	$9.87 \times 10^{-6}$	$10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-3}$	0.102

### (2) 空气的温度

温度是指空气的冷热程度，它常用以下三种形式表达。

绝对温度：以气体分子停止运动时的最低极限温度为起点测量的温度，用  $T$  表示。其单位为开尔文，单位符号为 K。

摄氏温度：用符号  $t$  表示，其单位为摄氏度，单位符号为  $^{\circ}\text{C}$ 。

华氏温度：用符号  $t_{\text{F}}$  表示，其单位为华氏度，单位符号为  $^{\circ}\text{F}$ 。

三者之间的关系是：

$$T = t + 273.1$$

$$t_{\text{F}} = 1.8t + 32$$

### (3) 空气的密度

气体与固体不同，它既无一定的体积，也无一定的形状，要说明气体的质量是多少，必须说明质量占有多大容积。单位体积的空气质量称为空气密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (2-7)$$

单位质量的空气体积称为空气比体积。

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2-8)$$

干空气密度

$$\rho_{\text{a}} = 3.484 \times 10^{-3} p / T \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (2-9)$$

式中  $p$  —— 空气的绝对压力，Pa；

$T$  —— 空气的热力学温度，K。

对于水蒸气

$$\rho_{\text{s}} = \varphi \rho_{\text{b}} = 2.165 \times 10^{-3} \varphi p_{\text{b}} / T \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (2-10)$$

式中  $\varphi$  —— 相对湿度，%；

$T$  —— 空气的热力学温度，K；

$p_{\text{b}}$  —— 温度  $t$  下的饱和水蒸气分压力，Pa。

对于湿空气

$$\rho = \rho_{\text{a}} + \rho_{\text{s}} = 3.84 \times 10^{-3} (p - 0.379 \varphi p_{\text{b}} / T) \quad (2-11)$$

式中  $p$  —— 空气的绝对压力，Pa；

$\varphi$  —— 相对湿度，%；

$T$  —— 空气的热力学温度，K；

$p_{\text{b}}$  —— 温度  $t$  下的饱和水蒸气分压力，Pa。

## 2.1.4 空气的主要性能

### (1) 空气的压缩性和膨胀性

气体在压力变化时，其体积随之改变的性质称为气体的压缩性。气体因温度变化，体积随之改变的性质称为气体的膨胀性。气体的压缩性和膨胀性都远远大于液体的压缩性和膨胀