机械设计制造及其自动化专业系列教材

气压传动与控制

曹玉平　阎祥安　主编

天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

机械设计制造及其自动化专业系列教材

气压传动与控制

曹玉平　阎祥安　主　编

天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书以“回路”和“控制”为主，阐述了气压传动的理论基础，系统介绍了各种气动元件，将气动元件与气动回路有机结合，阐述了典型气动系统的分析方法，讨论了气压传动系统的类型及全气控系统的设计方法。

本书可作为高等工科院校的教材，也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

气压传动与控制/曹玉平，阎祥安主编. —天津：天津大学出版社，2010. 9

ISBN 978-7-5618-3642-2

Ⅰ. ①气… Ⅱ. ①曹… ②阎… Ⅲ. ①气压传动 Ⅳ. ①TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 152493 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地　　址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编：300072)
电　　话 发行部：022-27403647　邮购部：022-27402742
网　　址 www. tjup. com
印　　刷 河北省昌黎县第一印刷厂
经　　销 全国各地新华书店
开　　本 185mm×260mm
印　　张 14. 5
字　　数 362 千
版　　次 2010 年 9 月第 1 版
印　　次 2010 年 9 月第 1 次
印　　数 1-3 000
定　　价 30. 00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页等质量问题，烦请向我社发行部门联系调换

版权所有　　侵权必究

前　言

进入新世纪以来，随着国民经济的高速发展，中国的现代制造业正在迎来工业自动化迅猛发展的勃勃生机。特别是党的十七大以来，在科学发展观的指导下，坚持经济发展同生态环境友好相结合，建立节约型社会的理念深入人心。在这样的大环境下，气动技术以其洁净、低成本、易于实现自动化的显著特点更加受到工业界的青睐。

《气压传动与控制》一书正是在这样的大环境下编写的。本书在编写过程中注意到气动技术的必要基础理论的阐释，使初学者能够掌握气动技术的理论基础，熟悉气动控制系统设计计算的依据。节录了设计工作中经常使用的计算公式及相关数据，编入了反映当代气动技术新成果的新型气动阀件，供工程设计人员查阅。

编者真诚地希望本书能够成为大学本科、高职相关专业的一本现代气动技术的基础与应用教材，并成为广大工程技术人员设计气动系统、选择元件及设备维修时的参考书。

参加本书编写工作的有王国栋、徐健、肖聚亮、张承谱等同志。

本书在编写过程中曾得到许多兄弟院校和相关公司的大力支持，在此表示衷心感谢！由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，敬希读者不吝赐教。

编者

2009 年 12 月

目　　录

第 1 章　绪论 …… 1
1.1　气动技术概述 …… 1
1.2　气动技术应用现状 …… 1
1.3　气动技术的特点 …… 2
1.4　气动系统的分类及组成 …… 2
第 2 章　空气的物理性质 …… 5
2.1　空气成分及物理性质 …… 5
2.2　湿空气及含湿量 …… 7
2.3　理想气体状态方程 …… 12
第 3 章　气体流动基本理论 …… 16
3.1　基本概念 …… 16
3.2　气体流动基本方程 …… 17
3.3　气体状态参数与流速的关系 …… 21
3.4　气体通过薄壁小孔的流动 …… 26
3.5　高压气体通过收缩喷管的流动 …… 31
3.6　气动元件的流量特性 …… 32
3.7　气动回路的流量特性 …… 34
3.8　容器的充放气特性 …… 34
3.9　气阻、气容、气感 …… 37
第 4 章　气动执行元件 …… 41
4.1　气缸的分类及结构特点 …… 41
4.2　气缸的特性 …… 46
4.3　气缸结构参数的计算与选择 …… 48
4.4　几种特殊气缸的工作原理及用途 …… 56
4.5　摆动气缸 …… 66
4.6　气动马达 …… 69
第 5 章　气动控制阀 …… 73
5.1　压力控制阀 …… 73
5.2　流量控制阀 …… 81
5.3　方向控制阀 …… 85
5.4　控制阀选择与使用 …… 107
5.5　气动比例控制阀 …… 108
第 6 章　气动系统检测元件 …… 114
6.1　气测式位置传感器 …… 114
6.2　放大器 …… 129
6.3　电感式传感器 …… 130

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

6.4 光电式传感器 …… 134
6.5 转换器 …… 136
6.6 压力传感器 …… 139
第7章 气源装置 …… 140
7.1 气源系统组成 …… 140
7.2 空气压缩机 …… 141
7.3 空气过滤器 …… 142
7.4 油雾器 …… 144
7.5 气源处理单元 …… 147
第8章 气动控制回路 …… 149
8.1 基本回路 …… 149
8.2 逻辑回路 …… 153
8.3 常用回路 …… 158
8.4 计数回路及计数器 …… 165
第9章 真空元件及真空系统 …… 168
9.1 真空技术概述 …… 168
9.2 真空获取装置 …… 170
9.3 真空吸盘及其附件 …… 176
9.4 真空系统应用实例 …… 180
第10章 气动系统设计 …… 182
10.1 全气控行程程序系统设计概述 …… 182
10.2 行程程序控制回路的X—D线图设计法 …… 184
10.3 X—D线图法设计多缸单往复行程程序控制系统 …… 184
10.4 X—D线图法设计多缸多往复行程程序控制系统 …… 198
10.5 X—D线图法设计有气动马达的系统 …… 203
10.6 基于快速步进器的多缸程序运动控制回路设计 …… 209
附录 …… 214
参考文献 …… 224

第1章 绪 论

1.1 气动技术概述

气动(pneumatic)是气动技术或气压传动与控制的简称。气压传动与控制以空气压缩机为动力装置,以压缩空气为工作介质进行能量传递或信号传递的实用工程技术,是实现动力驱动与自动控制的重要手段。广义上讲,气动技术还包括真空技术及射流技术。

气动技术由风动技术及液压技术演变发展成为独立的技术不过五十余年的历史。作为气动技术应用的雏形,开始于1776年发明的能产生约1个大气压的空气压缩机。1880年首次用气缸制成的装置成功应用于火车制动。20世纪30年代初,气动技术才开始应用于自动门的开启、闭合及各种机械的辅助动作。至20世纪60年代初,大多数气动元件是由液压元件改制或演变而来,构成了工业控制系统,自成体系。因元器件体积大,应用领域仍不广泛。20世纪70年代气动技术与电子技术结合,在自动化控制领域得以推广。20世纪末,随着科学技术的发展,促成了传统制造技术与以计算机为核心的信息技术的有机结合,气动技术突破传统阀件物理尺寸的局限,进入微型化、集成化、模块化时代,得到飞跃的发展。现在的换向阀与60年代的换向阀比较,在流量及功能相同的前提下,体积仅为后者的7%。气动技术与电气、传感、计算机、通信等技术结合,产生了比例阀、伺服阀、智能阀岛、模块化机械手等智能气动。所谓智能气动是指具有集成微处理器并具有处理指令和程序控制功能的元件或单元集合,最典型的智能气动是内置可编程控制器(PLC)的阀岛。气动伺服定位技术使3 m/s的高速运动气缸实现任意点自动定位。智能阀岛解决了整个自动生产线分散与集中控制问题。现代气动技术正迅速朝微型化、集成化、模块化、智能化发展。

1.2 气动技术应用现状

目前生产技术领域应用气动技术的实例俯首皆是,现列举如下。

1. 汽车制造业

现代汽车制造生产线几乎无一例外地采用气动技术,在焊接生产线上,车身各工序的移动,车身外壳由真空吸盘吸取与置放,定位、夹紧以及焊枪快速趋近、减速及软着陆后变压控制点焊等都采用各种特殊功能的气缸及相应的气动控制系统。

2. 家电、电子产品制造业

彩电、冰箱等家电产品装配生产线以及大规模半导体集成电路芯片封装、印刷电路板等各种电子产品的装配流水线,不仅可以看到各种规格、形状各异的气缸、气爪,还可以看到许多灵巧的真空吸盘将气爪难以抓取的显像管轻轻抓取,然后送到指定位置。上述运动都由气动控制系统实现。

3. 包装业自动化

气动技术广泛应用于化工、化肥、粮食、食品、药品等许多加工行业,实现粉状、粒状、块状

等物料的自动计量包装，也用于液体及黏稠液体（如啤酒、牙膏、油料、油漆、油墨、化妆品等）和有毒气体（如煤气）的自动计量灌装，还将纸箱板折叠成型，用于上述产品的自动装箱等。

4. 实现生产自动化

为保证产品的均一性，减轻单调或繁重的体力劳动，提高劳动生产率，缝纫机、自行车、手表、家电等组装生产线以及零件搬运、定位、夹紧、进给、加工、转位、装卸、检测、清洗、装配等都应用气动技术。气动喷气织布机、自动清洗机、木工机械、印刷机械、制鞋机械、塑料制品生产线、玻璃制品生产线等也都使用气动技术。

总之，气动技术是实现生产过程自动化的重要手段，是一种洁净、低成本自动化技术。

1.3 气动技术的特点

要实现生产装备自动化、省力化，必须对各种传动和控制方式（机械、电气、液压、气动、电子等方式）进行比较，扬长避短，选定几种方式合理组合，使装备简单、可靠、安全、经济。

气压传动与控制同其他传动与控制方式相比的主要优缺点如下。

1. 优点

①气动控制系统以空气为工作介质，取之不尽，用之不竭，环境友好，成本低。

②气动装置结构简单、轻便、工作压力低，使用安全。

③气动执行装置输出力及工作速度易于调节，可在短时间内释放能量，间歇运动响应迅速，对冲击负载和过载有较强的适应能力。

④利用空气的可压缩性储存能量，实现集中供气，空气流动压力损失小，可以远距离输送。

⑤全气动控制系统具有防火、防爆、耐潮湿特性，可在高温、强电磁干扰环境使用。

⑥气动元器件已标准化、系列化、集成化、模块化，可靠性高，使用寿命长。

2. 缺点

①由于空气压缩性大，执行元件速度变化随负载变化。

②执行元件低速稳定性较差。

③执行元件输出力低于液压执行元件。

1.4 气动系统的分类及组成

1. 气动系统分类

气动系统包括传动系统和控制系统两部分。气动系统分类如表 1－1、表 1－2 所示。

表 1－1 气压传动系统分类

气压传动系统	按供气方式	压缩机直接供气式
		储气罐供气式
		管网供气式
	按执行元件运动特征	往复运动式
		摆动式
		旋转运动式
	按工作介质循环方式	开式循环
		闭式循环

表 1－2 气压控制系统分类

气压控制系统	气阀控制系统
	逻辑控制系统
	射流控制系统

2. 气动系统的组成

典型气动系统组成如图 1－1 所示。该系统实现执行元件的往复运动。由该系统可知，一个完整的气动系统概括为下述几部分。

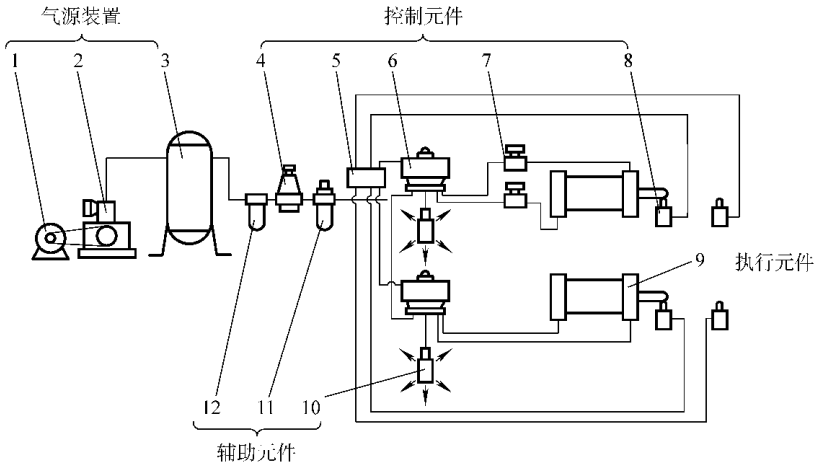

图 1－1　典型气动系统的组成

1—电动机；2—空气压缩机；3—储气罐；4—压力控制阀；5—逻辑元件；6—方向控制阀；7—流量控制阀；8—行程阀；9—气缸；10—消声器；11—油雾器；12－过滤器

1)气源装置　是获得洁净的压缩空气的装置。主体部分是空气压缩机，它将原动机的机械能转变为气体的压力能。

2)执行元件　是以压缩空气为工作介质产生机械运动，把压缩气体的压力能转变为机械能的转换装置。

3)控制元件　是控制压缩气体的压力、流量和流动方向，使执行机构按预定程序运动的元件。

4)辅助元件　包括使压缩空气净化、润滑、消声的元件及连接管件等。

3. 气动元件分类、种类及功能

气动系统元件的分类及功能如表 1－3 所列。

表 1－3　气动系统元件的分类及功能

类别	种　类		功　能
气源设备	空气压缩机		气动系统的动力源
	气罐		稳压和蓄能
	后冷却器		冷却并清除压缩空气中的固态、液态污染物
气动执行元件	气缸		实现直线运动
	摆动气缸		实现一定范围内的摆动
	气马达		实现连续回转运动
	气动机械手		抓取工件
气动控制元件	压力阀	减压阀	降压、稳压
		顺序阀	依靠压力控制执行元件顺序动作
		安全(溢流)阀	系统过载安全保护作用

续表

类别	种类		功能
气动控制元件	流量阀	节流阀	改变阀口通流面积，调节供气流量，调节执行元件速度
		单向节流阀	是单向阀和节流阀的组合，使气流正向流动节流，反向通畅流动
		排气节流阀	安装在执行元件或换向阀的排气口，调节执行元件的运动速度
	方向阀	电磁阀	改变气流通、断或流动方向的控制元件，其控制方式分为电磁控制、气压控制、人力控制和机械控制等
		气控阀	
		人控阀	
		机控阀	
		单向阀	气流只能正向流动，而不能反向流动
		梭阀	两个进气口都有输入时，只按压力高的输出
		双压阀	两个进气口都有输入时，输出压力较低者
		比例阀	输出压力（或流量）与输入信号（电压或电流）大小成比例关系变化
气动辅助元件	过滤器		清除压缩空气中的固态、液态和气态污染物，获得清洁、干燥的压缩空气
	消声器		降低排气噪声
	气动延时器		依靠气阻、气容环节实现延时输出，控制方向阀的通、断
	管道及管接头		实现各气动元件连接
真空元件	真空发生器		利用压缩空气的流动形成一定真空度的元件
	真空吸盘		利用真空直接吸取、搬运轻量物体的元件
	真空过滤器		滤除从大气中吸入的灰尘、微小固体颗粒等，保证真空系统可靠工作
	真空压力开关		检测真空度的电节点开关

第 2 章　空气的物理性质

要深入认识和正确设计气压传动与控制系统，必须了解空气的性质。本章重点介绍空气的物理性质及热力学性质。

2.1　空气成分及物理性质

2.1.1　空气成分

自然界的空气是由多种气体混合组成的。主要成分有氮气、氧气、氩气、二氧化碳、水蒸气及其他一些气体。含水蒸气的空气称为湿空气；不含水蒸气的空气称为干空气。空气有以下两种状态。

1. 标准状态

温度为 20 ℃(293.15 K)、相对湿度为 65%、绝对压力为 0.1 MPa 时，湿空气的状态称为标准状态。

2. 基准状态

温度为 0 ℃(273.15 K)、绝对压力为一个标准大气压(0.101 33 MPa)时，干空气的状态称为基准状态。基准状态下干空气的主要成分列于表 2－1 。

表 2－1　基准状态下干空气的主要成分

主要成分	氮气(N_2)	氧气(O_2)	氩气(Ar)	二氧化碳(CO_2)	其他气体
体积分数(%)	78.03	20.93	0.932	0.03	0.078
质量分数(%)	75.50	23.10	1.28	0.045	0.075

氮气和氧气是空气中含量最大的两种气体，二者的体积比近似等于 4∶1。氮气是惰性气体，稳定性好，不自燃。所以，以压缩空气为工作介质的气动系统适用于易燃、易爆的工作环境。

2.1.2　空气的物理性质

1. 密度与质量体积

1)密度　单位体积空气的质量，称为气体密度，表示为

$$\rho=\frac{M}{V} \tag{2-1}$$

式中　M——空气质量，kg；

V——空气体积，m^3。

气体密度与气体压力和温度有关，压力增加，密度增大；温度上升，密度减小。基准状态下[绝对压力为一个标准大气压(0.101 33 MPa)]不同温度时干空气的密度列于表 2－2。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

表 2－2　不同温度下干空气的密度

温度(℃)	－20	0	10	20	30	40	50	60
密度(kg/m³)	1.396	1.293	1.247	1.205	1.165	1.128	1.093	1.060

任意温度和压力下，干空气的密度用下式计算

$$\rho=1.293\times\frac{273}{273+t}\times\frac{p}{0.1013} \tag{2-2}$$

式中　t——空气温度，℃；

p——空气绝对压力，MPa。

2)质量体积　单位质量气体占有的体积称为质量体积，用 v 表示，

$$v=\frac{V}{M} \tag{2-3}$$

3)密度与质量体积的关系　表示为

$$\rho=\frac{1}{v} \tag{2-4}$$

2. 压缩性与膨胀性

(1)压缩性

气体体积随压力增加而缩小的性质称为压缩性。压缩性大小用压缩率 K 度量，即

$$K=\frac{1}{V}\cdot\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}p} \tag{2-5}$$

式中　V——空气原体积，m^3；

$\mathrm{d}V$——空气体积减小量，m^3；

$\mathrm{d}p$——压力增加量，MPa。

气体压缩率 K 与气体体积 V 随压力变化的过程有关，绝热可逆过程和定压等温过程的压缩率分别为 K_S 和 K_T。

绝热过程的压缩率

$$K_S=\frac{1}{k\cdot p} \tag{2-6}$$

式中　k——等熵指数，对于空气，$k=1.4$。

定压等温过程的压缩率

$$K_T=\frac{1}{p} \tag{2-7}$$

标准大气压下，空气压缩性是水的 19 500 倍，是液压油的 10 000 倍。空气的可压缩性给气动控制系统带来一定的困难。为使问题得以简化，有时可视其为不可压缩。(参考本书 3.3.3)

(2)膨胀性

气体体积随温度升高而增大的性质称为气体的膨胀性。膨胀性大小用体膨胀系数 α_V 度量，即

$$\alpha_V=\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \tag{2-8}$$

式中 $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$——定压条件下，气体体积 V 随温度 T 的变化率；

α_V——体膨胀系数，K^{-1}。

体膨胀系数 α_V 值随温度和压力而变化，体膨胀系数 α_V 值大，表明其膨胀性大。标准大气压下，空气的体膨胀系数 $\alpha_V=3\ 673\times10^6\ K^{-1}$。

3. 气体的黏性与黏度

气体在外力作用下流动时，由于气体相邻各层之间的相对运动会产生阻碍运动的内摩擦力，气体的这种特性称为黏性。黏性用黏度度量。气体黏度有两种度量单位，即动力黏度和运动黏度。

(1)动力黏度

气体中各相邻层间相对运动而产生的阻力称为动力黏度或绝对黏度。它是气体剪切应力与剪切变形之比，用 μ 表示。计量单位为 Pa·s（帕·秒），1 Pa·s =10 P(泊)。

(2)运动黏度

动力黏度 μ 与密度 ρ 之比为运动黏度，表示为

$$\nu=\frac{\mu}{\rho} \tag{2-9}$$

压力对气体黏度的影响极小。气体黏度主要取决于气体分子间动量的交换，气体黏度随温度的升高而增大。温度升高，分子运动加速，有助于动量交换，黏度随之增大。绝对压力为一个大气压时，不同温度下空气的黏度值列于表 2-3。

表 2-3 绝对压力为一个大气压时，不同温度下空气的黏度值

温度(℃) / 名称	-20	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
动力黏度 μ(Pa·s×10^{-5})	1.61	1.71	1.76	1.81	1.860	1.90	1.95	2.00	2.04	2.10	2.13	2.175
运动黏度 ν(mm^2/s)	11.5	13.2	14.1	15.0	16.6	16.9	17.9	18.8	19.6	20.9	21.9	23.0

压力不变时，不同温度下空气的动力黏度按下式计算

$$\mu=1.71\times10^{-5}\times\frac{384}{384+t}\times\left(\frac{273+t}{273}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{2-10}$$

式中 t——空气温度，℃。

2.2 湿空气及含湿量

2.2.1 湿空气、饱和空气、露点

1. 湿空气

含有水蒸汽的空气称为湿空气。湿空气中的水蒸气在一定压力和温度条件下，达到露

点会凝结成水滴，使管路、小孔及元件锈蚀堵塞。湿空气中的水蒸气对气动系统的可靠性、稳定性都是不利的。

湿空气的总压力 p 由水蒸气分压力和干空气分压力组成，即

$$p = p_s + p_g \tag{2-11}$$

式中 p——湿空气总压力(通常等于大气压力)；

p_s——水蒸汽分压力；

p_g——干空气分压力。

2. 饱和空气

一定温度下，单位体积空气中所含水蒸气的质量达到最大限度时称为饱和空气。饱和空气中水蒸气的分压力称为饱和蒸汽分压力 p_b。由于水蒸气分压力很小，故将湿空气视为理想气体混合物。

3. 露点

在一定压力下，逐渐降低空气的温度，空气中所含水蒸气达到饱和状态并开始凝结形成水滴时的温度，称为空气在该压力下的露点。露点分为大气压露点和压力露点。

1)大气压露点　大气压力下，空气中所含水蒸气的凝结温度。

2)压力露点　某一压力下，空气中所含水蒸气开始凝结析出水滴时的温度。压力不同，压力露点也不同。

2.2.2　绝对湿度、相对湿度和含湿量

湿空气中所含水蒸气的质量用绝对湿度、相对湿度和含湿量表示。

1. 绝对湿度

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，常用 χ 表示。

1 m^3 湿空气中所含水蒸气的质量与水蒸气的密度 ρ_s 相等，即绝对湿度，表示为

$$\chi = \rho_s = \frac{p_s}{R_s T} \tag{2-12}$$

式中 ρ_s——湿空气中水蒸汽的密度，kg/m^3；

p_s——湿空气中水蒸汽分压力，Pa；

R_s——水蒸气气体常数，$R_s = 462.05\ J/(kg \cdot K)$。

T——热力学温度，K。

2. 饱和绝对湿度

在一定温度下，单位体积湿空气中所含水蒸汽的质量达到饱和时，其湿度称为该温度下的饱和绝对湿度，用χ_b表示。

1 m^3 饱和湿空气中所含水蒸气的质量与饱和水蒸气的密度 ρ_b 相等，即

$$\chi_b = \rho_b = \frac{p_b}{R_b T} \tag{2-13}$$

式中 ρ_b——饱和湿空气中水蒸气的密度，kg/m^3；

p_b——饱和湿空气中水蒸气分压力，Pa；

R_b——饱和空气中水蒸气气体常数，$R_b=R_s=462.05\ J/(kg\cdot K)$；

T——热力学温度，K。

3. 相对湿度

在相同温度和压力下，湿空气的绝对湿度与饱和绝对湿度之比称为该温度下的相对湿度，用 φ 表示，即

$$\varphi=\frac{\chi}{\chi_b}\times 100\%=\frac{\rho_s}{\rho_b}\times 100\% \tag{2-14}$$

空气绝对干燥时，$\rho_s=0$，$\varphi=0$；

空气绝对饱和时，$\rho_s=\rho_b$，$\varphi=100\%$。

气动技术中规定，通过各种气动控制阀的空气的相对湿度不得大于 90% 。

4. 含湿量

(1)质量含湿量

在含 1 kg 干燥空气的湿空气中，所含水蒸汽的质量(g)称作该湿空气的质量含湿量，用 d_m 表示，即

$$d_m=\frac{m_s}{m_g}=\frac{\rho_s}{\rho_g}=\frac{\dfrac{p_s}{R_sT}}{\dfrac{p_g}{R_gT}}=\frac{R_g}{R_s}\cdot\frac{p_s}{p_g}=\frac{287.1}{462.05}\cdot\frac{p_s}{p_g}$$

$$=0.622\times\frac{p_s}{p_g}$$

或

$$d_m=0.622\times\frac{\varphi\cdot p_b}{p-\varphi\cdot p_b} \tag{2-15}$$

式中 m_s——水蒸汽质量，g；

m_g——干燥空气质量，kg；

p_b——饱和水蒸汽分压力，MPa；

p——湿空气的全压力，MPa；

φ——相对湿度，%。

(2)容积含湿量

在含 1 m^3 干燥空气的湿空气中，所含水蒸汽的质量称作该湿空气的容积含湿量，用 d_V 表示，即

$$d_V=d_m\cdot\rho \tag{2-16}$$

式中 d_m——质量含湿量，g/kg；

ρ——干燥空气的密度，kg/m^3。

(3)饱和容积含湿量

1 m^3 饱和空气含水蒸汽的质量，用 d_{bV} 表示，计量单位为 g/m^3。

绝对压力为标准大气压，饱和空气中水蒸气分压力 p_b、饱和绝对湿度 χ_b、饱和容积含湿量 d_{bV} 与温度的关系列于表 2－4。

表 2－4　绝对压力为标准大气压下，不同温度时，饱和空气中水蒸气分压力 p_b、饱和绝对湿度 χ_b、饱和容积含湿量 d_{bV} 与温度的关系

温度（℃）	饱和水蒸气分压力 p_b（MPa）	饱和绝对湿度 χ_b（g/m³）	饱和容积含湿量 d_{bV}（g/m³）	温度（℃）	饱和水蒸气分压力 p_b（MPa）	饱和绝对湿度 χ_b（g/m³）	饱和容积含湿量 d_{bV}（g/m³）
－20	0.000 1	1.07	0.90	22	0.002 6	19.4	19.4
－16	0.000 15	1.48	1.30	23	0.002 8	20.6	60.6
－10	0.000 26	2.05	2.20	24	0.003 0	21.8	21.8
－8	0.000 3	2.73	2.60	25	0.003 2	23.0	23.0
－6	0.000 37	3.16	3.00	26	0.003 4	24.3	24.4
－4	0.000 4	3.66	3.50	27	0.003 6	25.7	25.8
－2	0.000 5	4.22	4.23	28	0.003 8	27.2	27.2
0	0.000 6	4.85	4.85	29	0.004	28.7	28.7
2	0.000 7	5.56	5.60	30	0.004 2	30.3	30.4
4	0.000 8	6.14	6.40	31	0.004 5	32.0	32.0
6	0.000 9	7.26	7.30	32	0.004 8	33.8	33.8
8	0.001 1	8.27	8.36	33	0.005 0	35.6	35.7
10	0.001 2	9.4	9.4	34	0.005 3	37.5	37.6
11	0.001 3	10.0	10.0	35	0.005 6	39.5	39.6
12	0.001 4	10.6	10.7	36	0.005 9	41.6	41.8
13	0.001 5	11.3	11.4	37	0.006 3	43.8	44.0
14	0.001 6	12.1	12.1	38	0.006 6	46.1	46.3
15	0.001 7	12.8	12.8	39	0.007 0	48.5	48.8
16	0.001 8	13.6	13.6	40	0.007 4	51.0	51.2
17	0.001 9	14.5	14.5	50	0.012 3	82.9	33.2
18	0.002 1	15.4	15.4	60	0.019 9	129.8	130.1
19	0.002 2	16.3	16.3	70	0.031 2	197.0	197.9
20	0.002 3	17.3	17.3	80	0.047 3	290.8	292.9
21	0.002 5	18.3	18.3	100	0.101 3		597.0

由表 2－4 知，空气中水蒸气含量随温度降低而减少，所以降低空气的温度是获得干燥空气的有效手段。冷冻干燥法就是利用这一原理的范例。

2.2.3　压缩空气、自由空气及析水量

1. 压缩空气与自由空气

气动技术使用的压缩空气由空气压缩机提供。未经压缩处于自由状态下的空气称为自由空气。压缩机铭牌标称的流量值是自由空气的体积流量。气动工程中，经常将压缩空气

的质量流量和体积流量换算成基准状态与标准状态下自由空气的质量流量和体积流量。因此，应按自由空气的体积流量选择空气压缩机和气动元件。

自由空气的体积流量 q_z 按下式计算

$$q_z = q_p \cdot \frac{p}{p_z} \cdot \frac{T_z}{T_p} \tag{2-17}$$

式中 q_z——自由空气的体积流量，m^3/min；

q_p——压缩空气的体积流量，m^3/min；

p——压缩空气的绝对压力，MPa；

p_z——自由空气的绝对压力，MPa；

T_p——压缩空气的热力学温度，K；

T_z——自由空气的热力学温度，K。

不考虑温度的影响，自由空气的体积流量用下述近似式表示为

$$q_z = q_p \cdot \frac{p}{p_z} \tag{2-18}$$

式中各符号的定义及单位与式(2-17)相同。

2. 额定流量、标准额定流量

在国外气动元件(如 FESTO 元件)中会遇到额定流量、标准额定流量的概念。

1)额定流量　最大工作压力状态下，供给元、辅件压缩空气的最大流量。

2)标准额定流量　标准状态下，供给元、辅件的压缩空气流量。

忽略温度的影响，标准额定流量

$$q_b = q_e \cdot \frac{p_e}{p_b} \tag{2-19}$$

式中 q_b——标准额定流量，m^3/min；

q_e——额定流量，m^3/min；

p_e——额定状态下，压缩空气的绝对压力，MPa；

p_b——标准状态下，压缩空气的绝对压力，MPa。

3. 析水量

湿空气压缩后，单位体积所含水蒸气的质量增加，温度升高。当压缩空气温度降到露点，便析出水滴。每小时从压缩空气中析出水的质量称为析水量。

析水量 q_m 按下式计算：

$$q_m = 60 q_z \cdot \left[\varphi \cdot d_{bV1} - \frac{(p_1 - \varphi \cdot p_{b1}) \cdot T_2}{(p_2 - p_{b2}) \cdot T_1} \cdot d_{bV2} \right] \tag{2-20}$$

式中 q_m——析水量，kg/h；

q_z——自由空气流量，m^3/min；

T_1——自由空气热力学温度，K；

T_2——压缩空气的热力学温度，K；

φ——自由空气的相对湿度，%；

p_1——自由空气的绝对压力，MPa；

p_2——压缩空气中的绝对压力，MPa；

p_{b1}——自由空气中饱和水蒸气绝对分压力，MPa；

p_{b2}——压缩空气中饱和水蒸气绝对分压力，MPa；

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com