

普通高等学校职业教育教改示范教材

# 气动技术

吴卫荣 编著

张安全 主审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气动技术/吴卫荣编著. —北京: 中国轻工业出版社,  
2005.8

普通高等学校职业教育教改示范教材

ISBN 7-5019-4994-8

I. 气... II. 吴... III. 气动技术 - 高等学校: 技  
术学校 - 教材 IV. TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 075660 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 邱亦刚

版式设计: 马金路 责任校对: 李 靖 责任监印: 胡 兵

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 15

字 数: 351 千字

书 号: ISBN 7-5019-4994-8/TP·078 定价: 23.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010—65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010—65141375 85119845

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: [club@chlip.com.cn](mailto:club@chlip.com.cn)

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

41285J4X101ZBW

# 前 言

在教育部组织制定的《高职高专教育专门课程基本要求》、《高职高专教育专业人才培养目标及规格》以及《新世纪高职高专教育人才培养模式和内容体系改革与建设项目计划》的基本精神指导下,本着以就业为导向,以企业需要什么样的技术人才为教学目标的宗旨,通过教学实践,我们编写了《气动技术》和《液压技术》两本教材。

传统的本科教材多数是把“气动”和“液压”作为一本书,因为从理论上讲,它们有许多共同的原理;从学术上讲,它们都统一定义在流体的大范畴内;从教学上讲,相似结构和特点部分可以对照论述。这样做的优点在于既减少了重复又增加了对比,同时还可减少课堂学时。但是我们在长期的职业教育中感到,将“气动”和“液压”分成两本教材更有利于实践环节的教学,更有利于学生动手能力的培养。我们把来自实际中的“气动”和“液压”素材编制成两本“校本”教材,经过毕业学生在企业实干后的信息反馈,反复修改,在兄弟院校和中国轻工业出版社的大力支持下,整理成此教材,希望同行、专家、学生能够对此教材多提宝贵意见,我们将不断修订,使此教材能够在中国高等职业教育的改革中发挥积极的作用。

本教材的编写目的就是要使学生学以致用,提高学生的动脑与动手能力,即学生在课堂上学习了基本理论知识后,能够进实验室用计算机软件进行模拟仿真设计,再到实训现场用真实的元件对自己设计的系统进行组装。我们强调学生必须有很强的动手能力,我们希望学生进入企业后,能够快速适应企业,并快速成为具有实干能力的工程技术人员。因此我们建议这门课程理论与实验的课时比为1:2。

气动技术在现代工业系统,特别是机电一体化行业中得到越来越广泛的应用。当前的传动技术一般可分为机械传动、气压传动、液压传动和电气传动。气压传动、液压传动和电气传动不能独立使用,必须与机械传动相结合;气动技术虽然是机械技术的一个分支,但其工作原理却与一般的机械不同。作者根据实践经验和理论分析,经过大量的实例对气动系统的设计和应用作出说明,目的是使读者能正确合理地对气动系统进行分析、设计、使用和一般维护。

本书可作为大专院校工业自动化、电气控制、自动控制、机电一体化等专业的教学用书;对广大技术工程人员来说,也是一本更新知识结构的参考书。

编者

2005年4月于苏州工业园区职业技术学院

## 普通高等学校职业教育教改教材编写院校

辽宁信息职业技术学院 马彪 吕众

辽阳职业技术学院 王瑞 李灵佳

辽宁机电职业技术学院 邱敏

哈尔滨职业技术学院 黄冬梅 黄英

苏州工业园区职业技术学院 魏宣燕 徐兵

苏州经贸职业技术学院 周曲珠

湖北轻工职业技术学院 张安全 李锋

三峡职业技术学院 张江城

四川绵阳职业技术学院 吕思科

陕西工业职业技术学院 刘文青

河南机电高等专科学校 姚勇刚

河南牧业高等专科学校 贾端红 齐保林

天津职业技术大学 牛玉丽

# 目 录

第一章 气动系统的基本知识.....	1
第一节 气动系统的概念.....	1
第二节 气动系统的工作原理及组成.....	1
第三节 气动系统的特点.....	4
第二章 气动系统流体力学基础.....	6
第一节 空气的基本性质.....	6
第二节 理想气体状态方程.....	9
第三节 气体流动的规律 .....	10
第四节 气体充、放的特性 .....	11
第三章 气源装置及辅助元件 .....	13
第一节 气源装置的组成 .....	13
第二节 空气压缩机 .....	14
第三节 气源的净化及净化装置 .....	17
第四节 传输压缩空气的管道系统 .....	25
第五节 辅助元件 .....	26
第四章 气压传动执行元件 .....	31
第一节 气缸 .....	31
第二节 气动马达 .....	38
第三节 气缸的工作特性 .....	39
第五章 气动控制元件 .....	43
第一节 压力控制阀 .....	43
第二节 流量控制阀 .....	50
第三节 方向控制阀 .....	53
第四节 气动逻辑元件 .....	64
第五节 气动传感器及气动仪表 .....	66
第六节 常用的传感器和压力开关 .....	70
第六章 气动图形规范 .....	73
第一节 元件的符号表示 .....	73
第二节 控制流程图的绘制 .....	76
第三节 气动回路的绘制 .....	76
第四节 气动位移-步骤图 .....	78
第七章 气动基本回路 .....	85
第一节 压力控制回路 .....	85
第二节 方向控制回路 .....	86
第三节 速度控制回路 .....	87
第四节 位置控制回路 .....	92
第五节 增压控制回路 .....	94
第六节 延时控制回路 .....	95

第七节	安全启动回路 .....	95
第八节	安全保护回路 .....	98
第九节	常用的基本回路举例 .....	100
第八章	气动系统实例 .....	105
第一节	气动夹紧装置 .....	105
第二节	拉门自动开闭系统 .....	107
第三节	液位的气动控制系统 .....	107
第四节	气动计量系统 .....	108
第五节	气-液动力滑台气压传动系统 .....	110
第六节	气控机械手 .....	111
第九章	气动系统设计 .....	113
第一节	气动系统的设计过程 .....	113
第二节	设计时要考虑的安全问题 .....	114
第三节	气动回路图的设计 .....	115
第四节	单缸基本回路设计 .....	116
第五节	多缸控制回路的设计 .....	118
第六节	气动程序系统设计小结 .....	132
第十章	电子气动 .....	140
第一节	简介 .....	140
第二节	常用传感器工作原理及使用 .....	140
第三节	常用电气元件的符号及其说明 .....	152
第四节	典型电气回路及其控制 .....	156
第五节	典型气动系统及其电气控制 .....	163
第六节	综合实例 .....	168
第十一章	气动与 PLC 控制 .....	190
第一节	控制系统 .....	190
第二节	编程 .....	195
第十二章	气动机构 .....	207
第一节	气动扩力机构 .....	207
第二节	行程扩大机构 .....	209
第三节	多级行程的运动机构 .....	209
第四节	断续输送机构 .....	210
第五节	阻挡机构 .....	212
第六节	水平运动机构 .....	213
第七节	直线运动机构 .....	214
第十三章	气动系统维护 .....	216
第一节	经常性的维护工作 .....	216
第二节	定期的维护工作 .....	216
第三节	故障诊断与对策 .....	217
第四节	维修工作 .....	219
第五节	气动维护案例 .....	221

# 第一章 气动系统的基本知识

## [ 教学目标 ]

- (1) 了解气动系统的用途及其原理、组成
- (2) 了解气动系统的特点

## 第一节 气动系统的概念

### 一、何谓气动

流体动力系统是通过压力油或压缩气体来传递和控制能量的一种系统。

在气动系统中，这种能量的介质就是压缩空气。把大气中的空气的体积加以压缩，从而提高它的压力。通过对活塞或叶片做功来得到压缩空气。正确运用气动控制，要求充分熟悉气动元件及其基本回路。

本书介绍控制系统中气动元件的有关功能、元件的符号和使用方法。还介绍了空气处理过程及基本的气动回路等。

### 二、气动的用途

气动系统的用途是极其广泛的，下面简单列举气动控制工作的广泛性和多样性及连续不断地在产业中被推广应用的情况。

- ①用于化工产品的生产中；
- ②用于人不宜到达的地方如高温和危险的劳动；
- ③用于高速重复的运动机械中；
- ④农业设备、食品业、机械行业的剪、切、铆等等；
- ⑤医学领域、机器人、太空设备中等。

## 第二节 气动系统的工作原理及组成

### 一、气压传动系统的工作原理

为了对气动系统有一个概括了解，现以气动剪切机为例，介绍气动系统的工作原理。图 1-1 为气动剪切机的工作原理图，图示位置为剪切前的预备状态。

空气压缩机 1 产生的压缩空气，经过冷却器 2、油水分离器 3 进行降温及初步净化后，送入贮气罐 4 备用；压缩空气从贮气罐引出先经过分水滤气器 5 再次净化，然后经减压阀 6、油雾器 7 和气控换向阀 9 到达气缸 10。此时换向阀 A 腔的压缩空气将阀心推到上位，使气缸上腔充压，活塞处于下位，剪切机的剪口张开，处于预备工作状态。当送料机构将工料 11 送入剪切机并送到规定位置时，工料将行程阀 8 的阀心向右推动，行程阀将换向

阀的 A 腔与大气连通。换向阀的阀心在弹簧的作用下移到下位，将气缸上腔与大气连通，气缸下腔与压缩空气连通。压缩空气推动活塞带动剪刀快速向上运动将工料切下。

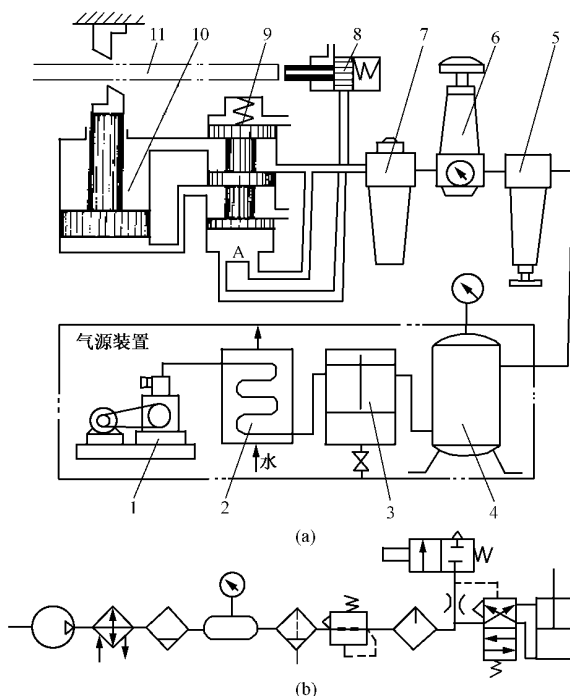


图 1-1 气动剪切机的工作原理图

(a) 结构原理图 (b) 图形符号图

- 1—空气压缩机 2—冷却器 3—油水分离器 4—贮气罐  
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

工料被切下后即与行程阀脱开，行程阀阀心在弹簧作用下复位，将换向阀 A 腔的排气通道封闭。换向阀 A 腔压力上升，阀心移至上位，使气路换向。气缸下腔排气，上腔进入压缩空气，推动活塞带动剪刀向下运动，系统又恢复到图示的预备状态，待第二次进料剪切。

气路中行程阀的安装位置可以根据工料的长度进行左右调整。换向阀是根据行程阀的指令来改变压缩空气的通道使气缸活塞实现往复运动。气缸下腔进入压缩空气时，活塞向上运动将压缩空气的压力能转换为机械能使剪切机构切断工料。此外，还可根据实际需要，在气路中加入流量控制阀，控制剪切机构的运动速度。

## 二、气压传动系统的组成

由图 1-1 和图 1-2 可见，完整的气压传动系统主要由以下四种装置组成：

(1) 气源装置 气源装置即压缩空气的发生装置，其主体部分是空气压缩机（简称空压机）。它将原动机（如电动机）的机械能转换为空气的压力能并经净化设备净化，为各

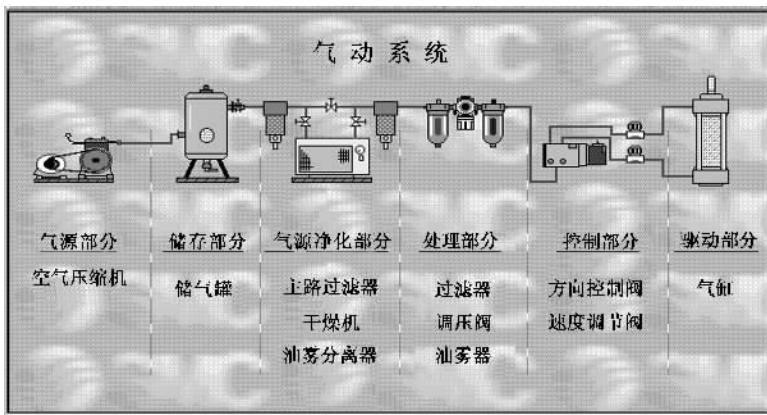


图 1-2 气动系统组成示意图

类气动设备提供洁净的压缩空气。

(2) 执行机构 执行机构是系统的能量输出装置，如气缸和气马达，它们将气体的压力能转换为机械能，并输出到工作机构上去。

(3) 控制元件 即用以控制调节压缩空气的压力、流量、流动方向以及系统执行机构的工作程序的元件，如压力阀、流量阀、方向阀和逻辑元件等。

(4) 辅助元件 系统中除上述三类元件外，其余元件称辅助元件，如各种过滤器、油雾器、消声器、散热器、传感器、放大器及管件等。它们对保持系统可靠、稳定和持久地工作起着十分重要的作用。

### (一) 压缩空气产生系统

(1) 压缩机 常压下的空气被压缩并以较高的压力输送给气动系统。这样就把机械能转变为气压能。

(2) 电动机 给压缩机提供机械能，它是把电能转变成机械能。

(3) 压力开关 将储气罐内的压力信号用来控制电动机，它被设定一个压力范围，达到压力上限就停止电动机，储气罐内压力跌到压力下限就重新启动电动机。

(4) 单向阀 让压缩空气从压缩机进入气罐，当压缩机关闭时，阻止压缩空气反方向流动。

(5) 储气罐 贮存压缩空气。它的尺寸大小由压缩机的容量来决定，储气罐的容积愈大，压缩机运行时间间隔就愈长。

(6) 压力表 显示储气罐内的压力。

(7) 自动排水器 无需人手操作，排掉凝结在储气罐下部的水。

(8) 安全阀 当储气罐内的压力超过允许限度，可将压缩空气排出，起保护作用。

(9) 冷冻式空气干燥器 将压缩空气制冷到零上若干度，使大部分空气中的湿气凝结。这就免除了后面系统中的水分。

(10) 主管道过滤器 在主要管路中，主管道过滤器必须具有最小的压力降和油雾分离能力。它能滤除管道内的灰尘、水分和油污。

### (二) 压缩空气消耗系统

(1) 压缩空气的输出 压缩空气要从主管道顶部输出，以便残留的凝结水仍留在主管

道里，当压缩空气达到低处时，水流到管子的下部，流入自动排水器内，将凝结水去除。

(2) 自动排水器 每一根下接管的末端都应有一个排水器，最有效的方法是用一个自动排水器，将留在管道里要用人工排掉的水自动排掉。

(3) 空气处理元件 使压缩空气保持清洁和合适压力，以及加润滑油到需要润滑的零件中以延长这些气动元件的使用寿命。

(4) 方向控制阀 通过对气缸两个接口交替地加压和排气，来控制气缸运动的方向。

(5) 执行元件 把压缩空气的压力能转变为机械能，可以是直线气缸，也可以是回转执行元件或气动马达等。

(6) 速度控制阀 能简便实现执行元件的无级调速。

### 第三节 气动系统的特点

#### 一、气动系统的优点

(1) 适用性 大多数工厂和车间在作业区备有压缩空气源，移动式压缩机可用在更远的场合。

(2) 贮存 按需要容易地贮存大容量的压缩空气。

(3) 设计和控制简单 使用气动元件属于简单设计，因而容易适合控制较简单的自动系统。与液压传动相比，气压传动反应快，动作迅速，一般只需  $0.02 \sim 0.03\text{s}$  就可建立起需要的压力和速度；因此，它特别适用于实现系统的自动控制。调节控制方便，既可组成全气动控制回路，也可与电气、液压结合实现混合控制。

(4) 运动的选择 气动元件易于实现无级调速的直线和回转运动。

(5) 经济 由于气动元件价格合适，整套装置费用较低，而且气动元件寿命长，不需要维修，所以维护费用较低。

(6) 可靠性 气动元件有很长的工作寿命，所以系统有很高的可靠性。

(7) 恶劣环境适应性 压缩空气很大程度上不受高温、灰尘、腐蚀的影响，这一点是别的系统所不能及的。

(8) 环境干净 气动元件是清洁的，并有特殊的排出空气处理方法，可装入标准的洁净车间内。

(9) 安全性 在危险场所不会引起火灾，若系统过载则执行元件只会停止或打滑。气动执行元件不会发热。

#### 二、气动系统的缺点

(1) 由于空气具有可压缩性，载荷变化时运动平稳性稍差。

(2) 因工作压力低，不易获得较大的输出力或转矩；因此，气压传动不适于重载系统。

(3) 有较大的排气噪声。

(4) 因空气无润滑性能，故在气路中有时应设置给油润滑装置。

(5) 气动装置中的信号传递速度仅限于声速范围内，比光、电信号慢，故不宜用于信

号传递速度要求十分高的场合。同时，实现生产过程的遥控也较困难。

(6) 气动系统有泄漏，这是能量的损失。一定量的外泄漏也是允许的。但应尽可能减少泄漏。

#### [ 思考与练习题 ]

1. 气动系统是如何实现“能量”转换的？
2. 气动系统主要由哪几个部分组成，举例说明？
3. 简述气动系统的主要特点。
4. 观察你周围的事物，举例说明气动系统的工作原理。

#### [ 本章小结 ]

本章主要介绍了机电一体化系统中传动系统之一：气压传动。重点是要学员了解气动系统的组成、工作原理、特点及其应用场合。

一般而言，气动系统主要由两大部分组成：“压缩空气产生系统”和“压缩空气消耗系统”。前者主要指气源装置（如压缩机、电动机、压力开关、储气罐、压力表、自动排水器、安全阀等）及部分辅助元件（如压力表、过滤器、干燥器、主管道过滤器等）。后者主要指执行机构（如气缸和气马达）、控制元件（如压力阀、流量阀、方向阀和逻辑元件等）及部分辅助元件（如各种过滤器、油雾器、消声器、散热器、传感器、放大器及管件等）。

由于气动系统具有防火、防电（静电）、容易取得、洁净、对周围环境影响较小等特点，所以在很多场合（尤其是“无尘室”、“防静电室”）应用很多。同时，在自动化工业生产系统中，气压传动应用越来越普遍。

# 第二章 气动系统流体力学基础

## [ 教学目标 ]

- (1) 了解气动系统的能源——空气的一些基本性质
- (2) 了解空气变化的一些基本原理（状态方程）
- (3) 了解气体流动的一些基本特点

## 第一节 空气的基本性质

气压传动中所用的工作介质是自然界的空气，因此要正确设计、使用气压传动系统，首先必须了解空气的性质及其基本的规律。

### 一、空气的组成

自然界的空气是由若干种气体混合而成的。理论上讲完全不含有蒸汽的空气称为干空气。而大气中的空气常含有一定量的水蒸气，这种由干空气和水蒸气组成的气体就是湿空气。在基准状态下（即温度为 273.15K、压力为 0.1013MPa）干空气的组成见表 2-1。

表 2-1 干空气的组成

成 分	氮 N <sub>2</sub>	氧 O <sub>2</sub>	氩 Ar	二氧化碳 CO <sub>2</sub>	其它气体
体积百分比	78.03	20.93	0.932	0.03	0.078
重量百分比	75.5	23.1	1.23	0.015	0.075

### 二、空气的压力

根据道尔顿定律，湿空气的压力应为干空气的分压力与水蒸气的分压力之和，即：

$$p = p_g + p_s \quad (2-1)$$

式中  $p$  为湿空气的压力，单位为 Pa； $p_g$  为湿空气中所含干空气的分压力，单位为 Pa； $p_s$  为湿空气中所含水蒸气的分压力，单位为 Pa。

### 三、空气的密度

空气的密度是指单位体积内空气的质量，用  $\rho$  表示，即

$$\rho = m/V \quad (2-2)$$

式中  $\rho$  为空气的密度，单位为 kg/m<sup>3</sup>； $m$  为空气的质量，单位为 kg； $V$  为空气的体积，单位为 m<sup>3</sup>。

在基准状态下干空气的密度为  $\rho_0 = 1.293\text{kg/m}^3$ 。一般状态下，干空气的密度可由下式

计算：

$$\rho_g = \rho_0 p_g / p_0 T_0 / T_g \quad (2-3)$$

式中  $\rho_g$  为一般状态下干空气的密度，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $\rho_0$  为基准状态下干空气的密度，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $p_g$  为一般状态下干空气的绝对压力，单位为 Pa； $p_0$  为基准状态下干空气的绝对压力，单位为 Pa； $T_g$  为一般状态下干空气的热力学温度，单位为 K； $T_0$  为基准状态下干空气的热力学温度，单位为 K。

#### 四、空气的黏性

气体在流动过程中产生内摩擦力的性质称为黏性，表示黏性大小的量称为黏度。空气黏度随温度的变化而变化，温度越高黏度越大。

#### 五、空气的湿度

(1) 湿空气对气压传动系统的影响 前面已述，凡含有水蒸气的空气都为湿空气。

在一定温度下，含水蒸气越多，空气就越潮湿，水蒸气的分压力也越大。当空气中水蒸气的含量超过某一限量时，空气中就有水滴析出。这就表明湿空气中能容纳水蒸气的数量是有一定限度的。我们把这种极限状态（或称水蒸气处于饱和状态）的湿空气称为饱和湿空气；饱和湿空气中水蒸气的分压力称饱和水蒸气分压力，用  $p_b$  表示。表 2-2 为绝对压力在 0.1013MPa 下，饱和空气中水蒸气的分压力、饱和绝对湿度和温度的关系。

表 2-2 饱和空气中水蒸气的分压力、饱和绝对湿度和温度的关系

温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 $p_b/\text{MPa}$	饱和绝对湿度 $X_b/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 $p_b/\text{MPa}$	饱和绝对湿度 $X_b/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 $p_b/\text{MPa}$	饱和绝对湿度 $X_b/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$
100	0.1013	—	29	0.004	28.7	13	0.0015	11.3
80	0.0473	290.8	28	0.0038	27.2	12	0.0014	10.6
70	0.0312	197.0	27	0.0036	25.7	11	0.0013	10.0
60	0.0199	129.8	26	0.0034	24.3	10	0.0012	9.4
50	0.0123	82.9	25	0.0032	23.0	8	0.0011	8.27
40	0.0074	51.0	24	0.0030	21.8	6	0.0009	7.26
39	0.0070	48.5	23	0.0028	20.6	4	0.0008	6.14
38	0.0066	46.1	22	0.0026	19.4	2	0.0007	5.56
37	0.0063	43.8	21	0.0025	18.3	0	0.0006	4.85
36	0.0059	41.6	20	0.0023	17.3	-2	0.0005	4.22
35	0.0056	39.5	19	0.0022	16.3	-4	0.0004	3.66
34	0.0053	37.5	18	0.0021	15.4	-6	0.00037	3.16
33	0.0050	25.6	17	0.0019	14.5	-8	0.0003	2.73
32	0.0048	33.8	16	0.0018	13.6	-10	0.00026	2.25
31	0.0045	32.0	15	0.0017	12.8	-16	0.00015	1.48
30	0.0042	30.3	14	0.0016	12.1	-20	0.0001	1.07

由上述分析可知，气压传动系统中应用的工作介质，它的干湿程度对整个系统的工作稳定性和使用寿命都将产生一定的影响。若空气的湿度较大，即空气中所含的水蒸气较多，则此湿空气在一定温度和压力条件下，能在系统中的局部管道和气动元件中凝结水滴，使气动管道和气动元件锈蚀，严重时还可导致整个系统工作失灵。因此必须采取有效措施，减少压缩空气中所含的水分（见图 2-1）。

(2) 绝对湿度与相对湿度 湿空气的绝对湿度是指单位湿空气中所含的水蒸气质量，用  $X$  表示，即

$$X = m_s / V \quad (2-4)$$

式中  $X$  为绝对湿度，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $m_s$  为水蒸气质量，单位为  $\text{kg}$ ； $V$  为湿空气体积，单位为  $\text{m}^3$ 。

若在一定温度下，湿空气中所含水蒸气的量达到最大限度时，则称此条件下的绝对湿度为饱和绝对湿度，用  $X_b$  表示，其值见表 2-2。

绝对湿度表明了湿空气中所含水蒸气的多少，但它还不能说明湿空气所具有的吸收水蒸气的能力大小。因此要了解湿空气的吸湿能力以及它离开饱和状态的程度，就需引入相对湿度的概念。

相对湿度是指在温度和总压力不变的条件下，其绝对湿度与饱和绝对湿度的比值，用  $\phi$  表示，即

$$\phi = X / X_b \times 100\% = p_s / p_b \times 100\% \quad (2-5)$$

式中  $X$  为绝对湿度，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $X_b$  为饱和绝对湿度，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $p_s$  为水蒸气的分压力，单位为  $\text{Pa}$ ； $p_b$  为饱和水蒸气的分压力，单位为  $\text{Pa}$ 。

相对湿度反映了湿空气达到饱和的程度，即反映了湿空气的潮湿度。当空气绝对干燥时： $p_s = 0$  则  $\phi = 0$ ，当湿空气达到饱和时：

$$p_s = p_b \quad \text{则} \quad \phi = 100\%$$

通常情况下，空气的相对湿度在 60% ~ 70% 范围内时人体感觉舒适。气动技术条件中规定各种阀工作介质的相对湿度不得大于 90%。

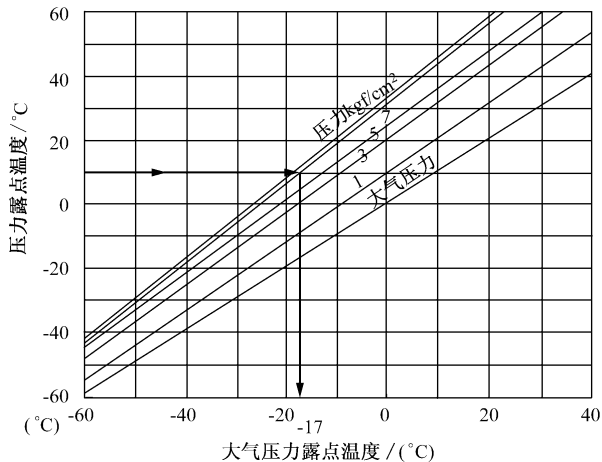


图 2-2 大气压力露点湿度特性图

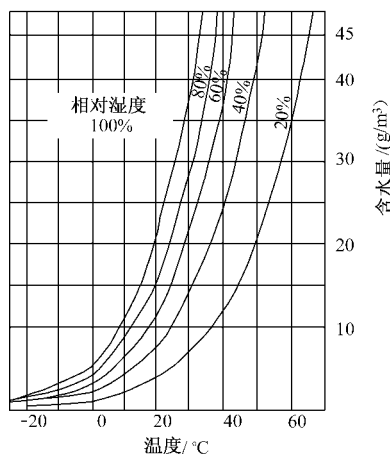


图 2-1 大气湿度、温度特性图

必须指出，当温度下降时，空气中水蒸气的含量是降低的，因此为了减少空气中所含水分，降低进入气动设备的空气温度是十分有利的。当大气冷却时，随着温度的下降大气将在某一点时水分达到饱和，这一点称为露点。如果空气继续冷却，那么它不能保留所有的水分，过量的水分以小液滴的形式凝结出来形成冷凝水（见图 2-2）。

水分的实际数量完全取决于温度， $1\text{m}^3$  压缩空气只能包含  $1\text{m}^3$  大气

所能含有的相同量的水蒸气。实际水分含量和露点时水分含量的比值叫做相对湿度，以百分数表示。

例 1：温度为 25℃，相对湿度 (r.h.) 为 65%，1m<sup>3</sup> 大气中含有多少水分？

解：露点 25℃(在 25℃时，饱和绝对湿度查表 2-2 为 23g/m<sup>3</sup>)， $23 \times 0.65 = 14.95$  (g/m<sup>3</sup>)

答：1m<sup>3</sup> 大气中含有 14.95g 水分。

当空气被压缩时，它能含有水分的容量只是体积减少后的容量。因此，除了温度升高之外，水分将大量地凝结出来。

例 2：10 m<sup>3</sup> 的大气，温度为 15℃时，相对湿度 (r.h.) 为 65%，被压缩为  $6 \times 10^5$  Pa 表压力，温度允许升高到 25℃，问将有多少水凝结出来？

解：

15℃ (在 15℃时，饱和绝对湿度查表 2.2 为 12.8g/m<sup>3</sup>) 10 m<sup>3</sup> 空气最多含水分， $12.8 \times 10 = 128$  (g)

在 65% (r.h.) 空气的含水量为： $128 \times 0.65 = 83.2$ g (a)

压缩到  $6 \times 10^5$  Pa 时减少后的体积为：

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$\frac{p_1}{p_2} V_1 = V_2$$

$$1.013 \times 10^5 \text{ Pa} / (6 + 1.013) \times 10^5 \text{ Pa} \times 10 \text{ m}^3 = 1.44 \text{ m}^3$$

1.44 m<sup>3</sup> 空气在 25℃时最大含水量为： $23.76 \text{ g} \times 1.44 = 34.2$ g (b)

从空气中水分的总量减去压缩空气所吸收的。即

$$(a) - (b) = 83.2 - 34.2 = 49 \text{ (g)}$$

所以，将有 49g 水被凝结出来。

## 第二节 理想气体状态方程

理想气体是指没有黏性的气体，理想气体的状态请见表 2-3。

表 2-3 理想气体状态

名称	适用条件	数学表达式	说明
理想气体状态方程	一定质量的理想气体在状态变化的某一稳定瞬时，压力和体积的乘积与其绝对温度之比不变	$\frac{pV}{T} = \text{常数}$ $pv = RT$ $\frac{p}{\rho} = RT$	<p><math>p</math> 为绝对压力 (N/m<sup>2</sup>)</p> <p><math>V</math> 为气体体积 (m<sup>3</sup>)</p> <p><math>v</math> 为质量体积 (m<sup>3</sup>/kg)</p> <p><math>\rho</math> 为气体密度 (kg/m<sup>3</sup>)</p> <p><math>T</math> 为热力学温度 (K)</p> <p><math>R</math> 为气体常数</p> <p>干空气 <math>R = 287.1 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})</math></p>
等容过程	容积不变	$\frac{p}{T} = \text{常数}$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	气体状态变化时，其压力 $p$ 与热力学温度 $T$ 成正比
等压过程	压力不变	$\frac{V}{T} = \text{常数}$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	气体状态变化时，其体积 $V$ 与热力学温度 $T$ 成正比

续表

名称	适用条件	数学表达式	说明
等温过程	温度不变	$pV = \text{常数}$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$	气体状态变化时, 其压力 $p$ 与体积 $V$ 成正比
绝热过程	与外界无热交换	$\frac{p}{\rho^k} = \text{常数}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^k$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{k-1}}$	$k$ 为绝热指数 对干空气 $k = 1.4$
多变过程	气体按其中间过程变化	$\frac{p}{p^n} = \text{常数}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}}$ $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$	$n$ 为多变指数 绝热过程 $n = k$ 等温过程 $n = 1$ 等压过程 $n = 0$ 等容过程 $n = \infty$

例 3: 把绝对压力为  $p = 0.1\text{MPa}$ , 温度为  $10^\circ\text{C}$  的某容积  $V$  干空气压缩  $1/5V$ , 计算等温过程中压缩后的压力。

解: 由题意可知,  $\Delta V = 0.2V$

等温过程  $p_1 V_1 = p_2 V_2$  即  $0.1 V_1 = p_2 V_2$ ,  $T_2 = T_1 = 273 + 10 = 283\text{K}$ ;

$$p_2 = \frac{0.1 V_1}{0.8 V_2} = 0.125 \text{ (MPa)}$$

答: 压缩后的压力为  $0.125\text{MPa}$ 。

### 第三节 气体流动的规律

#### 一、气体流动的基本方程

##### (一) 连续性方程

根据质量守恒定律, 气体在管道内作定常流动时, 通过流管任意截面的气体质量流量都相等, 即

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (2-6)$$

式中  $\rho$  为气体密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  为气体运动速度 ( $\text{m/s}$ );  $A$  为流管的截面积 ( $\text{m}^2$ )。

##### (二) 伯努利方程

水平流动的流体流过管径不同的管道时, 在点 1 和点 2 的总能量相同 (见图 2-3)。

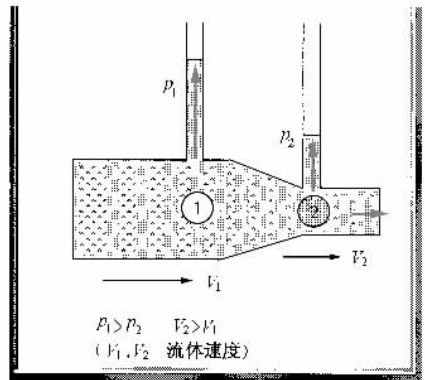


图 2-3 流体伯努利方程工作原理图

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2-7)$$

若流速不超过 330m/s 左右时，则此方程对气体也适用。

## 二、声速与马赫数

### 1. 声速

$$c = \sqrt{kgRT} \approx 20 \sqrt{T} = 20 \sqrt{273 + t} \quad (2-8)$$

式中  $c$  为声速 (m/s)

### 2. 马赫数

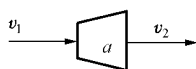
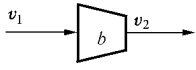
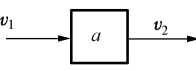
$$Ma = \frac{v}{c} \quad (2-9)$$

当  $v < c$ ， $Ma < 1$  时为亚声速流动；当  $v > c$ ， $Ma > 1$  时为超声速流动；当  $v = c$ ， $Ma = 1$  时为声速流动，即临界状态流动。

## 三、气体在管道中的流动速度

气体在管道中的流动速度见表 2-4。

表 2-4 气体在管道中的流动速度

状 态	管 道 示 意	流 动 情 况
亚声速 ( $Ma < 1$ )		$v_2 < v_1$ ，情况 a
		$v_2 > v_1$ ，情况 b
超声速 ( $Ma > 1$ )		$v_2 > v_1$ ，情况 a
		$v_2 < v_1$ ，情况 b
声速 ( $Ma = 1$ )		$v_2 = v_1$

## 第四节 气体充、放的特性

### 充气、放气温度与时间

(1) 绝热充气 充气过程进行较快，热量来不及通过气罐与外界交换，这种充气过程称为绝热充气。

气罐充气时，气罐内压力从  $p_1$  升高到  $p_2$ ，温度由原来的室温  $T_1$  升高到  $T_2$ 。充气结束后，由于气罐壁散热，使罐内气体温度下降至室温，压力也随之下降，降低后的压力值由等容状态方程有：

$$p = p_2 (T_1 / T_2) \quad (2-10)$$

气罐充气到气源压力时，所需时间为：

$$t = [1.285 - (p_1 / p_2)] \tau \quad (2-11)$$

$\tau$ ：充气与放气时间常数 (s) (可查手册，计算)

(2) 绝热放气气罐内气体初始压力 初始压力为  $p_1$ , 温度为室温  $T_1$ , 气罐中的气体通过小孔向外放气。

绝热过程快速放气后, 气体压力降为  $p_2$ , 温度降到  $T_2$ ; 关闭气阀, 停止放气, 气罐内温度上升到室温, 此时, 气罐内压力会上升到  $p$ 。

### [ 思考与练习题 ]

1. 绝对湿度、饱和绝对湿度分别表示湿空气中的水蒸气含量, 它们有何不同? 为何要引入相对湿度的概念?

2. 空压机将一个大气压的空气压缩到原体积的  $1/7$ , 假设是等温过程, 那么压力表上这些空气的压力为多少?

3. 等温过程与绝热过程有何区别?

4. 把绝对压力为  $p = 0.1 \text{ MPa}$ , 温度为  $20^\circ\text{C}$  的某容积  $V$  的干空气压缩到  $1/10V$ , 试分别按等温、绝热过程计算压缩后的压力和温度。

5. 在常温  $t = 20^\circ\text{C}$  时, 将空气从  $0.1 \text{ MPa}$  (绝对压力) 压缩到  $0.7 \text{ MPa}$  (绝对压力), 求温升  $\Delta t$  为多少?

6. 空气压缩机向容积为  $40\text{L}$  的气罐充气直至  $p_1 = 0.8 \text{ MPa}$  时停止, 此时气罐内温度  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ , 又经过若干小时气罐内温度降至室温  $t = 10^\circ\text{C}$ , 问: 此时罐内表压力为多少? 此时罐内压缩了多少室温为  $10^\circ\text{C}$  的自由空气 (设大气压力近似为  $0.1 \text{ MPa}$ )。

7. 当要求向气罐充气或放气达到某一个压力值时, 应注意什么?

### [ 本章小结 ]

本章介绍了气压传动能源的一些基本特性。主要有以下几个方面:

1. 空气的性质: 空气的组成、空气的压力、空气的密度、空气的黏性、空气的湿度。

2. 空气变化性质: 理想气体状态方程、等容过程、等压过程、等温过程、绝热过程、多变过程。

3. 充气、放气温度与时间。

4. 流体运动性质: 气体流动的规律 (气体流动的基本方程、连续性方程、伯努利方程)。

5. 空气的流速: 声速与马赫数、气体在管道中的流动速度。