



高等专科学校教学用书

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

气压传动及控制

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

气压传动及控制

吉林电气化专科学校 陈书杰 编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 15 字数 354 千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数00,001~2,500册

ISBN 7-5024-0833-9

TK·8(课)定价3.90元

前 言

本书系根据冶金及有色金属工业系统高等专科学校流体传动与控制专业教学计划编写的专业课教材。

全书共八章。分别讲述了气动技术的基础理论；气源系统及气动辅件；气动执行元件和控制元件的工作原理、选用原则、测试方法；气动基本回路和常用回路分析；断续控制系统的综合分析及程控回路设计；连续控制元件的特性、工程整定及应用实例；气动系统的使用管理与故障分析。

本书在内容选择和编排上注意了“培养出直接服务于企业生产第一线的学有专长的工艺型高级工程技术实用人材”这一宗旨。

在讲述基础理论时，侧重理论在实践上的分析。元件的讲授注重在讲清工作原理的基础上，介绍选用原则、测试方法以及元件的调校。在系统分析方面，从实际出发结合气控、电控、混合控制系统，充分运用基础知识，从各种角度进行分析与综合，使学生从中得到启迪。

本书各章后均附有内容总结，并编入一定数量的习题，以帮助学生复习总结。

本书由吉林电气化专科学校陈书杰编写，由高级工程师秦岩审定。在编写过程中得到吉林电气化专科学校流控教研室同志的多方面支持与帮助，在此表示深切谢意。

由于编者水平有限，谬误之处殷切期望广大读者批评指正。

编 者

1989年8月

目 录

绪论.....	1
第一章 气动技术基础理论.....	2
第一节 气动系统的组成及特点.....	2
第二节 空气的基本性质及状态方程.....	3
第三节 空气在管道中流动的基本规律.....	8
第四节 气阻、气容与延时环节.....	14
第五节 逻辑代数的基本知识.....	20
本章内容总结.....	24
习题.....	24
第二章 气源系统及气动辅件.....	27
第一节 气源系统的组成和工作原理.....	27
第二节 气动辅件.....	35
本章内容总结.....	41
习题.....	42
第三章 气动执行元件.....	43
第一节 气缸的分类.....	43
第二节 气缸的工作原理和计算.....	43
第三节 气动马达的工作原理和计算.....	56
第四节 气动执行元件的应用举例.....	59
本章内容总结.....	62
习题.....	63
第四章 气动控制元件.....	64
第一节 压力控制阀.....	66
第二节 流量控制阀.....	76
第三节 方向控制阀.....	79
第四节 气动逻辑元件.....	95
第五节 射流元件简介.....	102
本章内容总结.....	104
习题.....	105
第五章 气动控制回路.....	107
第一节 基本回路.....	107
第二节 常用回路.....	112
本章内容总结.....	118

习题.....	118
第六章 气动行程程序回路设计.....	119
第一节 行程程序控制.....	119
第二节 程序控制设计的 X/D 线图法.....	120
第三节 多往复程序回路设计.....	129
第四节 程序控制设计的卡诺图法.....	132
第五节 电控气动回路设计.....	139
第六节 气动程控系统设计.....	148
第七节 气动程控系统应用举例.....	162
本章内容总结.....	173
习题.....	173
第七章 气动连续控制元件及其应用.....	176
第一节 自动控制器及其应用.....	176
第二节 气动伺服阀及其应用.....	198
第三节 气动传感器及其应用.....	203
本章内容总结.....	206
习题.....	207
第八章 气动系统的安装使用与故障分析.....	209
第一节 气动系统的安装与日常管理.....	209
第二节 常见故障的判断及排除方法.....	215
习题.....	220
附录一 常用单位换算表.....	221
附录二 气动元件图形符号.....	222
附录三 气动技术常用计算图表.....	226
符号说明.....	231
参考文献.....	232

绪 论

早年气动技术的应用主要表现在以传递功率为主要目的的气动机械在采矿、钢铁、汽车和机械工业中的使用。

在工业飞速发展的年代里，气动技术作为柔性加工系统在包装设备、自动生产线，机器人等方面得到广泛应用。它的应用领域也从重工业迅速地扩展到化工、轻工、食品、军事工业等各行各业。

当今气动技术已不再是原有概念上的气压传动，而是发展成包含有传动、控制与检测在内的自动化技术了。由于工业自动化以及FMS的发展，要求气动技术以提高系统的可靠性、降低总的成本与电子工业相适应为目标，从系统整体出发进行综合技术与系统控制技术方面的研究与开发。下面仅就五个方面列举简例以说明其发展特点。

1. 位置控制的高精度化 锁紧气缸的定位精度可获 $\pm 0.5\text{mm}$ ，若配以控制系统可达 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

2. 小型化 低功耗电磁阀的外形尺寸仅有 $15 \times 38 \times 39\text{mm}$ ，其重量才50gf；这样的微型电磁阀可与电子元件一起安装在印刷线路板上，通过插板接通气源，构成各种功能的控制回路组件。

3. 节能化 为了与微机或程控器的直接连接，也为了节省能量，耗电仅0.5W的电磁阀现已问世了。

4. 无油化 第一阶段的无供油元件是以预加润滑剂为前提的研制已告结束，目前已进入全无油润滑元件的开发阶段。

5. 机电一体化 微电子技术 with 气动元件相结合组成PC→接口→小型阀→气缸的机电一体化的气动系统已用于生产，与此同时也诞生了与电子技术相结合的自适应元件，如各类的比例阀和电气伺服阀，从而使气动技术从以往的开关控制进入到反馈控制。

当前科学技术的发展正在打破地域界限和行业界限。气动技术也绝不只是单纯的流体技术，而是电子技术和机械技术等多方面的综合技术。只要注重基础理论的研究，新材料的开发与新技术的应用，必将迎来一个气动技术应用的崭新时代。

第一章 气动技术基础理论

第一节 气动系统的组成及特点

一、气动系统的组成

气动系统也和液压系统、电气系统、机械系统一样，包括传动和控制两部分。以传递动力为目的，由控制压力、流量、方向等一类动力控制元件和执行元件组成的系统称为气压传动系统。由传感器，逻辑运算元件、自动控制器和伺服阀等一类信号控制元件和执行元件、反馈元件构成的信号传输回路称为气压控制系统。两者存在于同一气动设备之中。

根据控制信号的形式，气动控制系统又分为连续控制系统和断续控制系统。

图1-1为工业常用程序控制气动系统。在该系统中，由压力控制阀2，方向控制阀4，流量控制阀5和气缸6组成气压传动系统；机控阀7，逻辑阀3及方向阀4和气缸共同组成

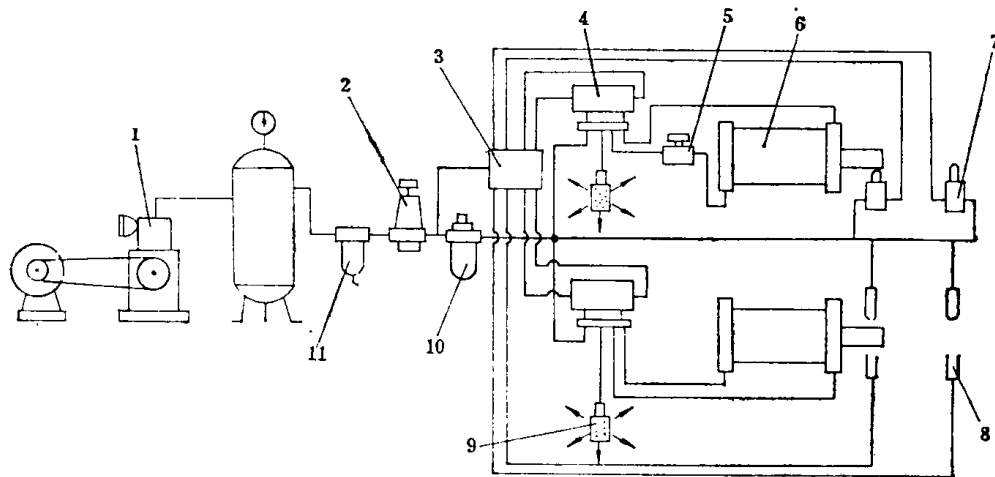


图 1-1 气压传动及控制系统的组成示意图

1—空气压缩机；2—压力控制阀；3—逻辑元件；4—方向控制阀；5—流量控制阀；6—执行元件；7—机控阀；8—传感元件；9—消声器；10—油雾器；11—过滤器

气动控制系统。系统中两只气缸按控制指令动作。气缸动作后通过相应的行程阀（传感器）为控制系统又提供了新的信息，这样经信号的发生、传送和执行使得系统按规定程序运行。

总体上说气动系统由如下四部分组成。

1. 气源

它包括有空气压缩机、储气罐、空气净化设备和输气管道等。它为气动设备提供洁净、干燥的具有稳定压力和足够流量的压缩空气，它是气动系统的能源装置。气源的核心是空气压缩机，它将原动机的机械能转换为气体的压力能。

2. 执行元件

它是把气体的压力能转变成机械能，实现气动系统对外作功的机械运动装置。作直线运动的是气缸，作摆动或回转运动的是气马达。

3. 控制元件

它包括有压力、流量、方向等动力控制元件和传感器、逻辑元件、伺服阀等信号转换、逻辑运算和放大的一类元件。它们决定着气动系统的运动规律。

4. 辅助元件

它们是保证气动系统正常工作不可缺少的元件。有油雾器、消声器、管接头等。

二、气动系统的特点

1. 气动系统适应性强。其工作介质是空气，取之不竭，用之不尽。它具有防火、防爆、抗干扰、耐污染的性能。在高温条件下也能够可靠地工作。

2. 设备结构简单，制造、维修方便，寿命长。

3. 易于控制，适量地调整压缩空气的流量、压力、方向，就能实现速度、力和位置的控制。

4. 自动化程度高。它可以构成各种自动控制系统，也可以和电子、机械等组成机、电、气一体化控制系统。特别是计算机的广泛普及与应用又为气动技术的发展提供了更加广阔的前景。

5. 自保能力强，即使关闭空气压缩机，靠气体的膨胀性能仍可使系统维持一个稳定的压力。

6. 气动系统工作压力低，一般只有0.8MPa左右，与液压相比，气动装置推力小、体积大。

7. 在低速变载荷条件下，工作稳定性差。

8. 排气有噪声，工作时需加消声器。

第二节 空气的基本性质及状态方程

一、空气的物理性质

1. 空气的组成

空气是多种气体的混合物，其中主要成分有氮、氧、氩、二氧化碳、水蒸气及其他一些气体。这种含水蒸气的空气称湿空气。大气中的空气基本上都是湿空气。我们把在一定的温度和压力下，含有最大限度水蒸气量的湿空气，称为饱和湿空气。而把不含水蒸气的空气叫干空气。

我们可以认为湿空气是由干空气和水蒸气组成的。

湿空气的压力 p 与干空气的分压力 p_g 和水蒸气的分压力 p_s 之间的关系是

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

2. 湿空气的密度

单位容积中所含湿空气的质量称为湿空气的密度。它也等于1m³湿空气中所含有的干空气质量和水蒸气质量之和。用符号 ρ 表示，即

$$\rho = \frac{m_g + m_s}{V} = \rho_g + \rho_s \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-2)$$

式中 m_g ——干空气的质量，kg，
 m_s ——水蒸气的质量，kg；
 V ——湿空气的体积，m³；
 ρ_g ——干空气的密度，kg/m³；

ρ_s ——水蒸气的密度, kg/m^3 。

3. 相对湿度

相对湿度表示空气含有水分的程度。它被定义为: 空气中实际所含水蒸气密度和同温下饱和水蒸气密度的百分比值, 即

$$\varphi = \frac{\rho_s}{\rho_b} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 ρ_s ——水蒸气密度, 也称绝对湿度, kg/m^3 ;

ρ_b ——饱和水蒸气密度, kg/m^3 。

由式 (1-3) 可以看出相对湿度表示了湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度, 也称饱和度和。

当 $\varphi = 0$ 时, 即 $\rho_s = 0$, 空气绝对干燥;

当 $\varphi = 100\%$ 时, 即 $\rho_s = \rho_b$, 空气中水蒸气达到饱和, 其吸收水蒸气的能力为零, 此时的温度称露点温度, 简称露点。达到露点时, 湿空气将要有水分析出。

表1-1为压力在0.1013MPa下饱和湿空气表。

表 1-1 压力为0.1013MPa下的饱和湿空气表

温 度 (°C)	饱和水蒸气分压力 p_b (MPa)	饱和气 密度 ρ_b (g/m ³)	温 度 (°C)	饱和水蒸气分压力 p_b (MPa)	饱和气 密度 ρ_b (g/m ³)	温 度 (°C)	饱和水蒸气分压力 p_b (MPa)	饱和气 密度 ρ_b (g/m ³)
100	0.1013	597.0	29	0.0040	28.7	13	0.0015	11.4
80	0.0473	292.9	28	0.0038	27.2	12	0.0014	10.7
70	0.0312	197.9	27	0.0036	25.8	11	0.0013	10.0
60	0.0201	130.1	26	0.0034	24.4	10	0.0012	9.4
50	0.0123	83.2	25	0.0032	23.0	8	0.0011	8.3
40	0.0074	51.2	24	0.0030	21.8	6	0.00093	7.3
39	0.0070	48.8	23	0.0028	20.6	4	0.00081	6.4
38	0.0066	46.3	22	0.0026	19.4	2	0.00071	5.6
37	0.0063	44.0	21	0.0025	18.3	0	0.00061	4.8
36	0.0059	41.8	20	0.0023	17.3	-2	0.00053	4.2
35	0.0056	39.6	19	0.0022	16.3	-4	0.00045	3.5
34	0.0053	37.6	18	0.0021	15.4	-6	0.00037	3.0
33	0.0050	35.7	17	0.0019	14.5	-8	0.00033	2.6
32	0.0047	33.8	16	0.0018	13.7	-10	0.00028	2.2
31	0.0044	32.0	15	0.0017	12.8	-16	0.00018	1.3
30	0.0042	30.4	14	0.0016	12.1	-20	0.00010	0.9

二、理想气体状态方程

无粘性的气体称理想气体。理想气体处于某一平衡状态时, 几个表征状态参数之间的关系为

$$p \cdot v = RT \quad (1-4)$$

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-5)$$

式中 p ——绝对压力, Pa;

v ——气体比容, m^3/kg ;

ρ ——气体密度 $\left(\rho = \frac{1}{v}\right)$, kg/m^3 ;

T ——绝对温度, K ;

R ——气体常数, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$;

干空气 $R = 287 \text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

水蒸气 $R = 462 \text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

上述式 (1-4)、(1-5) 为理想气体状态方程。

空气是有粘性的, 准确地说它是不能严格遵守理想气体法则的。实践证明, 在气动技术中, 压力在 1MPa 以下, 温度在 $-20 \sim +50^\circ\text{C}$ 之间时, 用上述方程描述它的状态变化偏差极小, 因此我们常将空气视为理想气体。

气体的密度、压力和温度以及流速的变化决定了气体的不同状态和不同的变化过程。

1. 等容变化过程

当气体的密度 (比容) 等于常数时, 式 (1-5) 变为

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (1-6)$$

它表明当气体的密度不变时, 气体的压力和温度成正比。当压力上升时, 气体的温度也随着上升。

2. 等压变化过程

当压力相等时, 气体的状态方程变为

$$T_1 \rho_1 = T_2 \rho_2 \quad (1-7)$$

它说明压力不变时, 温度升高导致气体膨胀 (密度减小), 温度下降导致气体体积减小 (密度增大) 的事实。

3. 等温变化过程

描述等温变化过程的方程式为

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-8)$$

它表明在温度不变时, 压力上升, 体积被压缩、密度增加; 压力下降, 体积就膨胀、密度减小。在气动技术中有不少工作过程可视为等温过程, 如气缸工作, 管道输送空气等。

4. 绝热变化过程

所谓绝热变化过程, 就是指在状态变化过程中, 系统与外界无热量交换。如空气压缩机压缩空气, 高速气流流过阀口等均可视为绝热变化过程。

绝热变化过程中有如下两式成立

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k} = \text{常数} \quad (1-9)$$

和

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \quad (1-10)$$

式中 k ——空气绝热指数, $k = C_p/C_v$, $k = 1.4$;

C_p ——空气的等压比热 $C_p = 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$;

C_v ——空气的等容比热, $C_v = 718 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。

式 (1-9), 式 (1-10) 表示了绝热变化过程中各状态参数之间的变化关系。

5. 多变过程

不加任何限制条件的气体状态变化过程为多变过程, 变化前后状态参数之间的关系, 为

$$\frac{p_1}{\rho_1^n} = \frac{p_2}{\rho_2^n} \quad (1-11)$$

式 (1-11) 称为多变状态方程式。 n 为多变指数。 n 值不同, 变化过程也不相同, 上述四种变化过程是多变过程的特例。

当 $n=0$ 时	等压变化过程;
$n=1$ 时	等温变化过程;
$n=k=1.4$ 时	绝热变化过程;
当 $n=\infty$	等容变化过程。

在一般变化过程中, 取 $k > n > 1$ 。

图1-2示出各种变化过程曲线。

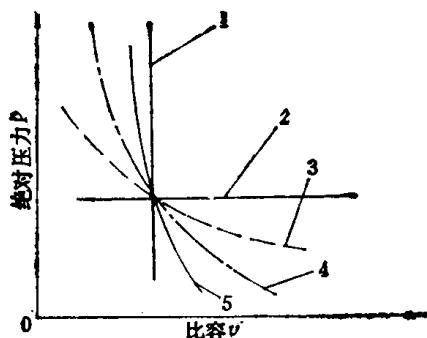


图 1-2 各种变化过程曲线

1—等容过程 $n = \infty$; 2—等压过程 $n = 0$; 3—多变过程 $n = \text{任意数}$; 4—等温过程 $n = 1$;
5—绝热过程 $n = 1.4$

例 1-1 大气压为 $p_a = 0.1013 \text{ MPa}$, 温度为 20°C , 相对湿度 $\varphi = 65\%$, 求 (1) 水蒸气的分压力 p_s , (2) 水蒸气的密度和湿空气的密度 (3) 气温降到多少度时开始凝结露水。

解 查表1-1, 在大气压 $p_a = 0.1013 \text{ MPa}$ 温度为 20°C 时, $p_b = 2300 \text{ Pa}$, $\rho_b = 17.3 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

(1) 水蒸气分压力

根据气体状态方程, 有

$$\rho_s = \frac{p_s}{R_s T}, \quad \rho_b = \frac{p_b}{R_b T}, \quad R_s = R_b$$

代入相对湿度公式, 得

$$\varphi = \frac{\rho_s}{\rho_b} = \frac{p_s / R_s T}{p_b / R_b T} = \frac{p_s}{p_b} \quad (1-12)$$

由式(1-12)得 $p_s = p_b \varphi = 2300 \times 0.65 = 1495 \text{ (Pa)}$

(2) 水蒸气的密度

$$\rho_s = \rho_b \varphi = 17.3 \times 10^{-3} \times 0.65 = 11.25 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

湿空气密度 ρ

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_s + \rho_g = \frac{p_s}{R_s T} + \frac{p_g}{R_g T} \\ &= \frac{p_g + p_s}{R_g T} - \left(\frac{1}{R_g} - \frac{1}{R_s} \right) \frac{p_s}{T} \\ &= \frac{p}{R_g T} - \left(\frac{1}{R_g} - \frac{1}{R_s} \right) \frac{\varphi p_b}{T}\end{aligned}$$

又因为

$$R_g = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}; R_s = 462 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

所以

$$\rho = \frac{p}{287T} - 0.00131 \frac{\varphi p_b}{T} \quad (1-13)$$

代入数值, 得

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{0.1013 \times 10^6}{287 \times (273 + 20)} - 0.00131 \frac{0.65 \times 2300}{(273 + 20)} \\ &= 1.198 \text{ (kg/m}^3\text{)}\end{aligned}$$

(3) 当 $\rho_b = \rho_s = 11.25 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 时, 有露水析出, 查表 1-1, 此时温度约为 13°C 。

例1-2 压缩空气站吸入的自由空气压力为 $p_1 = 0.1013 \text{ MPa}$ (绝对压力), 温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\varphi = 85\%$, 将此空气压缩到压力为 $p_2 = 0.8 \text{ MPa}$ (绝对压力), 温度 $t_2 = 40^\circ\text{C}$, 压缩空气流量 $Q_v = 8 \text{ m}^3/\text{min}$, 问每小时压缩空气中析水量为多少?

解 查表 1-1, 当 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 时, $\rho_{b1} = 17.3 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$,

$$p_{b1} = 2300 \text{ Pa}$$

因此水蒸气的密度为

$$\rho_{s1} = \varphi \rho_{b1} = 0.85 \times 17.3 \times 10^{-3} = 14.71 \text{ kg/m}^3$$

干空气的分压力为

$$\begin{aligned}p_{g1} &= p - p_{s1} = p - \varphi p_{b1} = 0.1013 \times 10^6 - 0.85 \times 2300 \\ &= 99345 \text{ Pa}\end{aligned}$$

当 $t_2 = 40^\circ\text{C}$ 时查表 1-1, $\rho_{b2} = 51.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ $p_{b2} = 7400 \text{ Pa}$, 输出饱和压缩空气的分压力为

$$p_{g2} = p_2 - p_{b2} = 0.8 \times 10^6 - 7400 = 792600 \text{ Pa}$$

体积 $V_1 = 1 \text{ m}^3$ 的自由空气, 经压缩后体积为 V_2 , 根据气体状态方程有

$$V_2 = \frac{p_{g1} V_1 T_2}{p_{g2} T_1} = \frac{99345 \times 1 \times (40 + 273)}{792600 \times (20 + 273)} = 0.134 \text{ m}^3$$

容积为 V_2 时饱和空气的含水量为

$$m_{b2} = \rho_{b2} \cdot V_2 = 51.2 \times 10^{-3} \times 0.134 = 6.86 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

所以每立方米的自由空气经过压缩后析水量为

$$m' = \rho_{s1} V_1 - m_{b2} = (14.71 \times 1 - 6.86) \times 10^{-3} = 7.85 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

测 1 小时压缩空气中析水量为

$$m = 60Q_v \cdot m' = 60 \times 8 \times 7.85 \times 10^{-3} = 3.768 \text{ kg}$$

第三节 空气在管道中流动的基本规律

一、连续性方程

根据质量守恒定律, 稳定流动时通过管道任一截面的气体质量流量相等。即

$$Q_m = A_1 u_1 \rho_1 = A_2 u_2 \rho_2 = \text{常数} \quad (1-14)$$

式中 A_1 、 A_2 ——分别为 1、2 断面的面积, m^2 ;

u_1 、 u_2 ——分别为 1、2 断面上的流速, m/s ;

ρ_1 、 ρ_2 ——分别为 1、2 断面上的密度, kg/m^3 。

二、伯努利方程

理想流体的伯努利方程为

$$\frac{u^2}{2} + gh + \int \frac{dp}{\rho} = \text{常数} \quad (1-15)$$

式中 h ——位置高度;

对于气体来说, 其位能一般忽略不计。 $h=0$, 则上式变为

$$\frac{u^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = \text{常数} \quad (1-16)$$

1. 若空气沿管道低速流动时, 可认为是不可压缩性流体 ($\rho = \text{常数}$), 式 (1-16) 积分, 并整理得

$$\frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (1-17)$$

2. 气体在绝热流动时, 不可忽略其压缩性 ($\rho \neq \text{常数}$), 将式 (1-9) 代入式 (1-16), 并积分可得

$$\frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (1-18)$$

在两个截面上列写伯努利方程 (1-18) 经整理后可以写成以下这种有用的形式

$$\begin{aligned} \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} &= \frac{k}{k-1} \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right) = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \\ &= \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \\ &= \frac{k}{k-1} R(T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中 u_1 、 u_2 ——分别为 1、2 断面上的流速, m/s ;

p_1 、 p_2 ——分别为 1、2 断面上的压力, Pa ;

ρ_1 、 ρ_2 ——分别为 1、2 断面上的密度, kg/m^3 ;

T_1 、 T_2 ——分别为 1、2 断面上的温度, K ;

k ——绝热指数, 空气 $k=1.4$;

R ——气体常数，空气 $R=287\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 。

三、音速与马赫数

流体中压力的微小变化都会产生波，波在介质中传播的速度叫音速。音速为

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad (1-20)$$

式中 p ——介质的压力，Pa；

ρ ——介质的密度， kg/m^3 ；

a ——该介质传播的音速， m/s 。

波在空气中快速传播，认为是绝热过程即 $p/\rho^k = \text{常数}$ ，微分得

$$\frac{dp}{d\rho} = k \left(\frac{p}{\rho^k} \right) \rho^{k-1} = k \cdot \frac{p}{\rho} = kRT$$

代入式 (1-20)，计算音速有

$$a = \sqrt{kRT} \approx 20\sqrt{T} \quad (\text{m/s}) \quad (1-21)$$

可见波传播的速度只与温度有关，而和压力无关。

气流的流速与音速之比，工程上称为马赫数，用符号 M 来表示。

$$M = \frac{u}{a} \quad (1-22)$$

当 $u < a$, $M < 1$, 称亚音速；

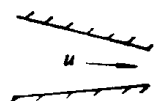
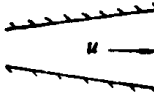
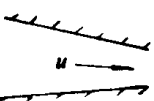
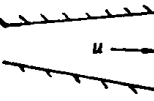
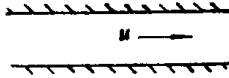
$u > a$, $M > 1$, 称超音速；

$u = a$, $M = 1$, 气流流动临界状态。

马赫数 M 集中反映了气流的可压缩性。

表1-2列出气体不同的流动状态，表现出不同的流动特性。气体在亚音速区流动时，它的流动特性和不可压缩流体相同。即流体通过小截面，流速增大，压力变小；通过大截面流速减小，压力增大。

表 1-2 流速与截面变化的关系

马 赫 数	管 道 轴 向 剖 面		结 论
	渐 缩 管	渐 扩 管	
$M < 1$			横截面 A 减小，流速 u 增大，压力 p 减小 横截面 A 增大，流速 u 减小，压力 p 增大
$M > 1$			横截面 A 减小，流速 u 减小，压力 p 增大 横截面 A 增大，流速 u 增大，压力 p 减小
$M = 1$			横截面 A 不变，流速 u 不变，压力 p 不变

流体在超音速区流动时,气体的流动特性和不可压缩流体的流动特性相反。即气流流过大截面,流速增加,压力减小;流过小截面,速度降低,压力增大。

四、气流达音速的临界压力比

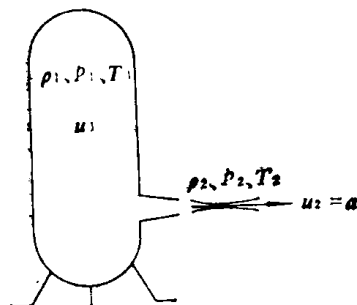


图 1-3 气体经喷嘴的加速流动

如图1-3所示,容器内的气体压力 p_1 ,经收缩截面管道排气,出口流速 u_2 增大,压力 p_2 下降。设 $u_1=0$, u_2 =音速 a ,代入式(1-19)中,可得

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 1.893 \quad (1-23)$$

或

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.528 \quad (1-24)$$

两式中 p_1/p_2 或 p_2/p_1 之值称临界压力比,它是判定气流流动状态的依据。

当 $p_2/p_1 > 0.528$ 或 $p_1 < 1.893 p_2$ 时,气流在亚音速区流动。

当 $p_2/p_1 < 0.528$ 或 $p_1 > 1.893 p_2$ 时,气流在音速区流动。

五、气体从节流孔流出的流量

由于气体流经节流孔的速度不同,气体状态的变化过程也不相同。节流孔前后压力的变化,直接影响着气体的流动特性,因此气体从节流孔流出的流量,要根据以下几种情况,分别讨论计算。

1. 当节流孔前后压差较小气体低速流经节流孔时,可以忽略其压缩性($\rho = \text{常数}$),根据不可压缩流体的伯努利方程和连续性方程可得到质量流量公式为

$$Q_m = C \cdot A \sqrt{2(p_1 - p_2)\rho} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-25)$$

式中 A ——节流小孔面积, m^2 ;

C ——流量系数,一般取 $(0.60 \sim 0.62)$;

p_1 ——节流孔前压力, Pa ;

p_2 ——节流孔后压力, Pa ;

ρ ——气体密度, kg/m^3 。

2. 当节流孔前后的压差足够大,气体高速度流经节流孔口时,我们可以认为是绝热变化过程,此时气体的密度不再等于常数。设容器内气体的压力、密度、温度分别为 p_1 、 ρ_1 、 T_1 ,气体流经节流孔的压力、密度、温度分别为 p_2 、 ρ_2 、 T_2 ,容器内某截面面积

为 A_1 ，节流孔最小过流面积为 A_2 （参看图1-4a），由式（1-14）和式（1-19）可得出气体流经节流孔时气流速度 u_2 。

$$u_2 = \left\{ \frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{1}{1 - \left(\frac{A_2 \rho_2}{A_1 \rho_1} \right)^2} \right\}^{1/2}$$

由绝热方程式（1-9）有

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k}$$

从而得出计算可压缩性气体在绝热状态下的质量流量的基本方程式为

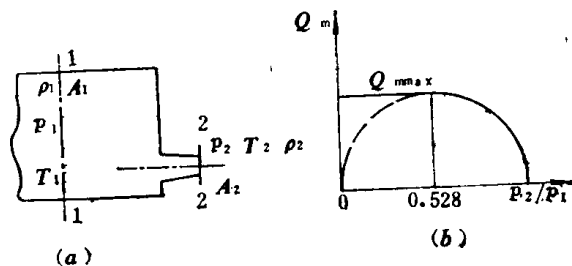


图 1-4 可压缩性气体流经小孔的质量流量

(a) 可压缩性气体流经小孔；(b) 压力比与流量的关系

$$Q_m = A_2 u_2 \rho_2 = \frac{A_2 p_1}{\sqrt{T_1}} \left\{ \frac{2k \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}{(k-1) \cdot R \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \right]} \right\}^{1/2} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-26)$$

(1) 在 $p_2/p_1 < 0.528$ 或 $p_1 > 1.893 p_2$ ，即气体在音速区流动时，考虑到临界压力比 $p_2/p_1 = 0.528$ ，和 $(A_2/A_1)^2 \approx 0$ ，并将其代入式（1-26）可得

$$Q_m = 0.04 \frac{A_2 \cdot p_1}{\sqrt{T_1}} \quad (1-27)$$

式中 Q_m ——气体质量流量，kg/s；

A_2 ——节流孔最小截面积， m^2 ；

p_1 ——容器内绝对压力，Pa；

T_1 ——容器内气体绝对温度，K。

由式（1-27）可看出，流速达到音速后，若容器内压力 p_1 保持不变，无论出口压力怎样降低，排气的质量流量都保持在临界状态的质量流量 Q_m 值上。节流孔前后压力比与流量的关系可见图1-4b。

(2) 在 $p_2/p_1 > 0.528$ 或 $p_1 < 1.893 p_2$ 时，气流在亚音速区流动，考虑到 $a_1 = \sqrt{kRT_1}$ 和 $(A_2/A_1)^2 \approx 0$ 两个条件，代入到式（1-26）则得到流动在亚音速区的可压缩性气体的质量流量为

$$Q_m = A_2 \rho_1 a_1 \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-28)$$

式中 A_2 ——节流孔最小截面积， m^2 ；

p_2 ——节流孔出口处绝对压力, Pa;

a_1 ——音速, m/s;

ρ_1 ——容器内气体密度, kg/m³。

在工程上常用到自由状态下 ($T_0 = 273\text{K}$, $p_a = 0.1013\text{MPa}$) 的体积流量, 可按式 (1-27) 和式 (1-28) 的质量流量代入下式, 可得到相应的体积流量

$$Q_z = \frac{273}{T_1} \cdot \frac{p_1}{0.1013} \cdot \frac{Q_m}{\rho_1} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1-29)$$

式中 Q_z ——自由状态下的体积流量, m³/s;

p_1 ——容器内压力 (绝对压力), MPa;

T_1 ——容器内气温, K;

Q_m ——质量流量, kg/s;

ρ_1 ——容器内气体密度, kg/m³。

以上流量公式均未考虑到气体的粘性阻力的作用, 实际上气体流经节流孔时, 其流束在出口处要收缩, 因此以上流量公式中, 孔口面积 A_2 应采用较孔实际面积小的有效截面积 S 代入到相应公式计算。

六、压缩空气流经管路的能量损失

压缩空气在低速流动时, 可以认为是不可压缩的流体, 总的能量损失含沿程损失和局部损失两项。

沿程损失的理论计算公式为

$$\Delta p_{\text{沿}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Pa}) \quad (1-30)$$

式中 λ ——沿程损失摩擦系数, 查阅有关资料;

l ——管道长, m;

d ——管道内径, m;

u ——流速, m/s;

ρ ——气体密度, kg/m³。

在工程上用下式计算沿程损失较为方便

$$\Delta p_{\text{沿}} = \frac{0.8\nu Q_v l}{d^4} \cdot K \quad (\text{MPa}) \quad (1-31)$$

式中 Q_v ——体积流量, l/min;

ν ——运动粘度, cst;

l ——管长, m;

d ——管径, mm;

K ——修正系数, 层流 $K=1$, 紊流 $K=6.8\left(\frac{Q_v}{\nu d}\right)^{3/4}$ 。

局部损失计算公式为

$$\Delta p_{\text{局}} = \xi \frac{u^2}{2} \rho \quad (\text{Pa}) \quad (1-32)$$

式中 ξ ——局部阻力系数, 查有关资料;