

高等学校教材

气压传动及控制

(修订本)

东北工学院 郑洪生 主编

GAODENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

本书常用符号表

A ——管道断面积, m^2	R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 气阻 $(\text{Pa}\cdot\text{s})/\text{kg}$
C ——流量系数	Re ——雷诺数
C_d ——流量系数; 粘性阻尼系数, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	R_v ——水蒸汽气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C_f ——弹簧刚度, N/m	S ——有效截面积, mm^2 ; 安全系数
D ——气缸内径, m	s ——行程, m
d ——质量含湿量, g/kg ; 直径, m	T ——绝对温度, K
d' ——容积含湿量, g/m^3	t ——温度, $^{\circ}\text{C}$; 时间, s
E ——能量, J	U ——滑阀的预开口量, m
F ——力, N	V ——容积, m^3
G ——重力, N ; 材料剪切模数, Pa	v ——流速, m/s ; 比容, m^3/kg
g ——重力加速度, m/s^2	W ——功, J
l ——长度, m	w ——速度, m/s ; 滑阀的面积梯度, m
M ——扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$	x ——绝对湿度, kg/m^3 ; 滑阀的移动量, m
m ——质量, kg	x_s ——饱和绝对湿度, g/m^3
n ——转数, r/min ; 多变指数	α ——角度; 断面收缩系数
P ——功率, W	ζ ——局部阻力系数, 阻尼比
p_a ——大气压, MPa	η ——效率
p_b ——饱和水蒸汽的分压力, Pa ; MPa	κ ——绝热指数
p_c ——临界压力, MPa	λ ——沿程阻力系数
p_g ——干空气的分压力, MPa	ν ——运动粘度, m^2/s ; 节流孔的面积比
p_s ——气源压力, MPa ; 水蒸汽的分压力 MPa	ρ ——密度, kg/m^3 (γ (重度) $= \rho g$)
Δp ——压力损失, MPa	φ ——相对湿度
Q ——体积流量, m^3/s ; L/min	ψ ——设备利用系数
Q_m ——质量流量, kg/s	τ ——时间常数, s
Q_s ——气缸消耗的自由空气流量, m^3/s	ω ——频率, Hz
Q_t ——气缸理论用气量, m^3/s	

前 言

本教材是在1981年出版的“气压传动”教材基础上,根据1984年12月在西安召开的机械制造(冷加工类)教材编审委员会“流体传动及控制”教材编审小组制定的教材编写大纲,及1986年10月南京教材编审小组会议的精神而编写的。本书可作为高等院校流体传动及控制专业气压传动及控制课程的教材。也可供有关工程技术人员参考。

本书共分八章。第一章阐明气压传动及控制的特点及有关基础知识;第二章介绍气源装置及气动辅助元件;第三章介绍气缸、气马达的工作原理、性能、选择、设计;第四章介绍各种控制阀的工作原理、性能及选择;第五章介绍气动逻辑元件及逻辑回路设计基础;第六章对气动基本回路和常用回路作了必要的介绍;第七章是本书的重点、阐述系统的设计方法并分析了几个典型的应用实例;第八章是新增加的气动伺服机构内容。

本教材具有以下几个特点:

1. 加强理论基础,并兼顾了对具体元件的结构分析和实际应用;
2. 贯彻少而精的原则,内容力求新颖、反应引进产品和国内外科研成果。
3. 书中配有大量例题、习题、思考题,便于学习、复习及培养学生的设计、计算能力。
4. 采用法定计量单位及新的图形符号。

《气压传动及控制》教材由东北工学院流体传动及控制教研室郑洪生主编,参加编写的有高呈瑞、李绍荣同志。第一、四、六、七章由郑洪生编写;第二、三、五章由李绍荣编写;第八章由高呈瑞编写。上海工业大学徐炳辉主审。上海工业大学徐炳辉对全书,王庆鹤对第六、七章、陆鑫盛对第三、四、五章,郇鸣阳对第一、二章初稿进行了审阅,提出许多宝贵意见。并于1987年4月召开了专门审稿会,到会代表:华南工学院李建藩、北方工业大学刘汉钧、华中工学院覃海涛、北京工业学院盛永才、上海工业大学王庆鹤、陆鑫盛、郇鸣阳,吉林工业大学纪国军及无锡气动技术研究所陈启复、吴士良对书稿内容,进行了认真地审查。还有东北工学院流体传动及控制教研室周士昌、曹鑫铭等同志也对本书的编写工作给予许多帮助和支持,在此一并致以谢意。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,欢迎读者提出批评指正。

编者

1987年9月

目 录

第一章 概论及气动技术基础知识	1	§ 5-2 基本逻辑单元及逻辑回路	102
§ 1-1 气动技术的发展、应用及优缺点	1	§ 5-3 气动逻辑元件的分类及特点	106
§ 1-2 气压传动及控制系统的组成和 分类	2	§ 5-4 高压截止式逻辑元件	106
§ 1-3 空气的性质和气体状态方程	3	§ 5-5 高压膜片式逻辑元件	114
§ 1-4 气体流动的基本方程	11	§ 5-6 其它逻辑元件	117
§ 1-5 声速与气体在管道中的流动 特性	13	§ 5-7 射流元件	120
§ 1-6 气动元件的流通能力	15	习题	126
§ 1-7 充气、放气温度与时间的计算	21	第六章 基本回路和常用回路	127
§ 1-8 气阻、气容及延时环节	23	§ 6-1 基本回路	127
习题	26	§ 6-2 常用回路	136
第二章 气源装置及气动辅件	28	习题	141
§ 2-1 气源装置	28	第七章 气动系统设计	143
§ 2-2 过滤器	32	§ 7-1 气动行程程序回路的设计概述	143
§ 2-3 油雾器	34	§ 7-2 信号—动作线图设计法	145
§ 2-4 其它辅件	39	§ 7-3 用 X-D 线图法设计多缸多往复 系统的气控回路	159
§ 2-5 系统的管道设计	44	§ 7-4 中间记忆元件数量的确定及布 置方法	163
习题	45	§ 7-5 气控逻辑回路设计的卡诺图法	165
第三章 气动执行元件	46	§ 7-6 气动系统设计的主要内容及设 计程序	174
§ 3-1 气缸的分类及特点	46	§ 7-7 气压传动应用实例分析	184
§ 3-2 常用气缸的设计计算	49	习题	193
§ 3-3 冲击气缸	56	第八章 气动伺服机构	195
§ 3-4 气缸的特性及选择使用	61	§ 8-1 气动控制阀的压力流量特性	195
§ 3-5 气马达	64	§ 8-2 气压伺服阀	207
习题	70	§ 8-3 气动伺服机构	212
第四章 控制阀	71	附表 1 管件、泵、马达等图形 符号	217
§ 4-1 压力控制阀	71	附表 2 气动逻辑元件图形符号	221
§ 4-2 流量控制阀	79	附表 3 气动膜片逻辑元件符号	221
§ 4-3 方向控制阀	83	附表 4 射流元件图形符号	222
§ 4-4 控制阀的选择	96	参考文献	224
习题	96		
第五章 逻辑设计基础及逻辑元件	98		
§ 5-1 逻辑代数	98		

第一章 概论及气动技术基础知识

§ 1-1 气动技术的发展、应用及优缺点

一、气动技术的发展和应用

气压传动与控制也称为气动技术，是指以压缩空气为工作介质传递动力和控制信号的系统。以空气为工作介质传递动力做功应用得很早。如利用自然风力推动风车，带动水车提水灌田，以风箱产生的压缩空气吹火炼铁等。近代也用于电、汽车的自动开关门，火车的自动抱闸，采矿用的风钻等。随着工业自动化的发展，到 50 年代气动技术已发展成为一门新兴技术。因为以空气为工作介质具有防火、防爆、防电磁干扰，抗振动、冲击、辐射，结构简单等优点，所以到近几年来气动技术发展已和电子、液压技术一样，成为实现生产过程自动化不可缺少的重要手段。

现将其主要应用介绍如下：

1. 在机械工业中，如组合机床的程序控制、轴承的加工、零件的检测、汽车、农机等生产线上已得到广泛应用。
2. 冶金工业中，金属的冶炼、烧结、冷轧、热轧及打捆、包装等已有大量应用。一个现代化钢铁厂生产中仅气缸就需 3000 个左右。
3. 在轻工、纺织、食品工业中，缝纫机、自行车、手表、电视机、纺织机械、洗衣机、食品加工等生产线上已得到广泛应用。仅上海缝纫机一厂的一条缝纫机底板加工线上就使用了 1200 多个气动元、辅件。
4. 在化工、军工工业中，对于化工原料的输送、有害液体的灌装、炸药的包装、石油钻采等设备上已有大量应用。
5. 交通运输中，列车的制动闸、车辆门窗的开闭，气垫船、鱼雷的自动控制装置等。
6. 在航空工业中，因气动除能承受辐射、高温外还能承受大的加速度，所以在近代的飞机、火箭、导弹的控制装置中逐渐已被广泛地应用。

二、气压传动及控制的优点

1. 以空气为工作介质，较容易取得，用后的空气排到大气中，处理方便，与液压传动相比不必设置回收油的油箱和管道。
2. 因空气的粘度很小（约为液压油动力粘度的万分之一），其损失也很小，所以便于集中供气、远距离输送。外泄漏不会像液压传动那样，对环境污染严重。
3. 与液压传动相比，气动动作迅速、反应快、维护简单、工作介质清洁、不存在介质变质及补充等问题。
4. 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，比液压、电子、电气控制优越。
5. 成本低、过载能自动保护。

三、气压传动及控制的缺点

1. 由于空气具有可压缩性, 因此工作速度稳定性稍差。但采用气液联动装置会得到较满意的效果。

2. 因工作压力低 (一般 $0.3 \sim 1 \text{ MPa}$), 又因结构尺寸不宜过大, 总输出力不宜大于 $10 \sim 40 \text{ kN}$ 。

3. 噪声较大, 在高速排气时要加消声器。

4. 气动装置中的气信号传递速度比电子及光速慢 (只限于声速以内), 因此, 气信号传递不适用高速传递复杂的回路。

气动控制与其它控制的性能比较见表 1-1。

表1-1 几种控制方式性能比较表

比较项目 控制方式		操作力	动 作 快 慢	环 境 要 求	构 造	负载变 化影响	远距离 操 纵	无 级 调 速	工 作 寿 命	维 护	价 格
气 压 控 制		中等	较快	适应性好	简单	较大	中距离	较好	长	一般	便宜
液 压 控 制		最大	较慢	不怕振动	复杂	有一些	短距离	良好	一般	要求高	稍贵
电控制	电气	中等	快	要求高	稍复杂	几乎没有	远距离	良好	较短	要求较高	稍贵
	电子	最小	最快	要求特高	最复杂	没有	远距离	良好	短	要求更高	最贵
机 械 控 制		较大	一般	一般	一般	没有	短距离	较困难	一般	简单	一般

§ 1-2 气压传动及控制系统的组成和分类

一、气压传动及控制系统的组成

典型的气动系统 (图 1-1) 由以下四部分组成:

1. 气压发生装置 是获得压缩空气的能源装置。其主体部分是空气压缩机。它将原动机供给的机械能转变为气体的压力能。还有贮气罐等附属设备 (见图 1-1)。应用气动设备较多的厂矿, 常将压缩空气集中于压气站内, 由压气站再统一向各用气点分配压缩空气。

2. 执行元件 是以压缩空气为工作介质产生机械运动, 并将气体的压力能转变为机械能的能量转换装置。直接作直线运动的是气缸、作回转运动的为摆动缸, 气马达等。

3. 控制元件 (操纵、运算、检测元件) 是用来控制压缩空气的压力、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。如各种压力阀、流量阀、方向阀、逻辑元件、射流元件和行程阀、传感

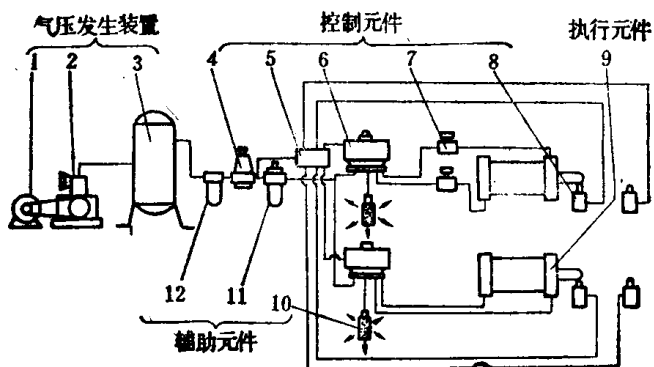


图1-1 气压传动及控制系统的组成示意图

1—电动机 2—空气压缩机 3—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—分水滤气器

器等。

4. 辅助元件 是使压缩空气净化、润滑、消声以及用于元件间连接等所需要的一些装置。如分水滤气器、油雾器、消声器及管件等。

二、气压传动及控制系统的分类

按对控制元件的选用, 气动系统有如图 1-2 的分类。

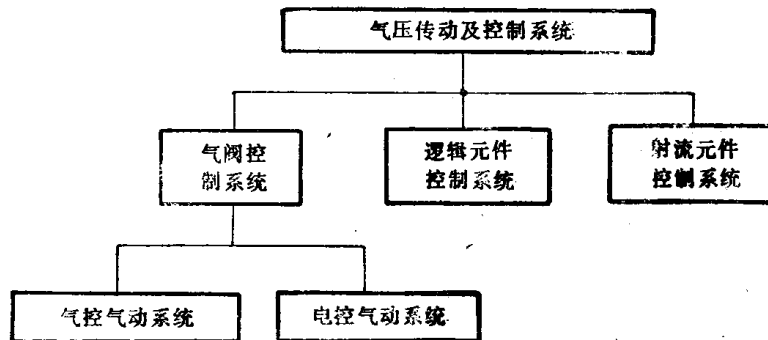


图1-2 气压传动及控制系统的分类

§ 1-3 空气的性质和气体状态方程

一、空气的性质

(一) 空气的组成 空气是由若干种气体混合组成, 其主要成分是氮 (N_2) 与氧 (O_2) 和极少量的氩 (Ar)、二氧化碳 (CO_2) 等。此外空气中常含有一定量的水蒸汽。把不含有水蒸汽的空气称之为干空气。含有水蒸汽的空气称之为湿空气。在基准状态下 (即温度 $t = 0^\circ C$ 、压力为 $0.1013 MPa$) 干空气的组成如表 1-2 所示。

表1-2 干空气的组成

成 分	氮 N_2	氧 O_2	氩 Ar	二氧化碳 CO_2	其它气体
体积 (%)	78.03	20.93	0.932	0.03	0.078
重量 (%)	75.50	23.10	1.28	0.045	0.075

(二) 空气的密度

空气具有一定质量, 质量常用密度来表示。密度是单位体积内空气的质量, 用 ρ 表示

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

$$\text{或} \quad \rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \times \frac{p}{0.1013} \quad (1-2)$$

式中 m 、 V ——分别为气体的质量和体积;

ρ ——某温度 $t^\circ C$ 与压力 p 状态下干空气的密度, $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$;

p ——绝对压力, MPa ;

$(273 + t)$ ——绝对温度, K 。

$$\rho' = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \times \frac{p - 3.78 \varphi p_s}{0.1013} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-3)$$

式中 p ——湿空气的全压力, MPa;

p_s ——某温度 t °C 时饱和空气中水蒸汽的分压力, MPa (见表 1-4);

φ ——空气的相对湿度(%).

习惯上, 有时还会用到重度, 重度用 γ 表示, 重度与密度的关系为

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1-4)$$

式中 g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

(三) 空气的粘性 空气的粘性 (即粘度) 是空气质点相对运动时产生阻力的性质。

空气粘性的变化只受温度变化的影响, 而压力变化对其影响甚微可忽略不计。空气的粘性随温度的变化如表 1-3 所示。

表1-3 空气的运动粘度与温度的关系 (压力0.1MPa)

$t / ^\circ\text{C}$	0	5	10	20	30	40	60	80	100
$\nu / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.133×10^{-4}	0.142×10^{-4}	0.147×10^{-4}	0.157×10^{-4}	0.166×10^{-4}	0.176×10^{-4}	0.196×10^{-4}	0.21×10^{-4}	0.238×10^{-4}

(四) 空气的压缩性与膨胀性 当流体压力变化时体积随之改变的性质称为流体的压缩性, 流体因温度变化体积随之改变的性质称为流体的膨胀性。空气的压缩性和膨胀性都远远大于液体的压缩性和膨胀性。例如, 液压油在温度不变的情况下, 在 0.2 MPa 压力作用下, 压力改变 0.1 MPa 体积将变化 1/20 000, 而空气压力改变 0.1 MPa 体积将变化 1/2, 即空气的压缩性约比液压油大 10 000 倍。又例如, 水在压力不变的情况下, 温度改变 1°C 时, 体积将改变近 1/20 000; 而空气每改变 1°C 时, 体积却改变 1/273, 空气的膨胀性约为水的 73 倍。

空气与液体的压缩性及膨胀性相差这样大, 主要原因在于气体分子间的吸引力小、分子间距离大、分子的平均自由路径 (分子由运动起点至碰到其它气体分子的运动距离) 大。当压力、温度变化后, 分子间引力、分子间距离、分子的平均自由路径将都发生变化。如压力降低、温度升高, 将使分子间引力减小、分子间距离和分子平均自由路径加大, 致使气体体积增大。反之亦然。气体的体积随温度和压力的变化规律服从气体状态方程。

例1-1 压力为 6 个基准大气压 (表压), 温度为 40°C 的空气, 求其密度。

解 根据式 (1-2) 密度

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \times \frac{p}{0.1013}$$

式中 $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$, 将给出的 6 个大气压变成绝对压力, 查表 1-7 得

$$p = (6 + 1) \times 0.1013 \text{ MPa}$$

则

$$\rho = 1.293 \times \frac{273}{273 + 40} \times \frac{(6 + 1) \times 0.1013}{0.1013} = 7.89 \text{ kg/m}^3.$$

二、理想气体状态方程

不计粘性的气体为理想气体。理想气体的状态应符合下述关系:

$$\frac{pV}{T} = \text{常数} \quad (1-5)$$

$$pv = RT \quad (1-6)$$

$$p / \rho = RT \quad (1-7)$$

或
或

式中 p ——绝对压力, Pa;

V ——气体体积, m^3 ;

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

ρ ——气体密度, kg/m^3 ;

T ——绝对温度, K;

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

干空气 $R = 287.1 \quad \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,

水蒸汽 $R = 462.05 \quad \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

式 (1-5)、(1-6)、(1-7) 为理想气体状态方程。除高压、低温状态外 (如压强不超过 20 MPa、绝对温度不低于 253 K) 对于空气、氧、氮、二氧化碳等气体, 该方程均适用。 p 、 v 、 T 的变化决定了气体的不同状态和不同过程。在状态变化过程中加上限制条件时, 理想气体状态方程将有以下几种形式:

(一) 等容过程

比容 $v = \text{常数}$ 时, 气体的状态变化过程为等容变化过程 (见图 1-3)。因状态 1、2 的比容相等, 即 $v_1 = v_2$ 所以式 (1-6) 变为

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (1-8)$$

在等容过程中, 气体对外做功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-9)$$

因 $dv = 0$, $W = 0$, 气体对外不作功, 但气体随压力的增加, 升高了温度, 增加了系统的内能。单位质量气体所增加的内能为

$$u_o = C_v(T_2 - T_1) \quad \text{J/kg} \quad (1-10)$$

式中 C_v ——定容比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 其含意为气体体积保持不变, 使单位质量的气体温度升高 1K 所需的热量。对于空气 $C_v = 718 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(二) 等压过程 压力 $p = \text{常数}$ 时, 气体状态的变化过程为等压变化过程 (见图 1-4)。因状态 1、2 的压力相等, 即 $p_1 = p_2$ 所以式 (1-6) 变为

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad (1-11)$$

式 (1-11) 说明压力不变时, 气体温度上升必然导致体积膨胀; 温度下降导致体积缩小。在等压变化过程中, 单位质量气体所得到的热量为

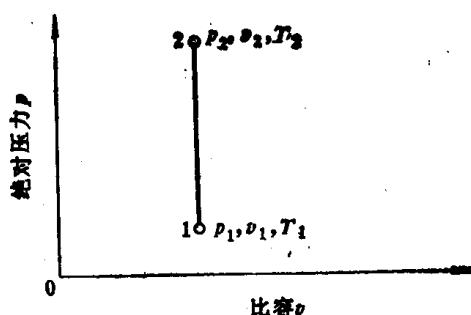


图1-3 等容过程 $p-v$ 曲线

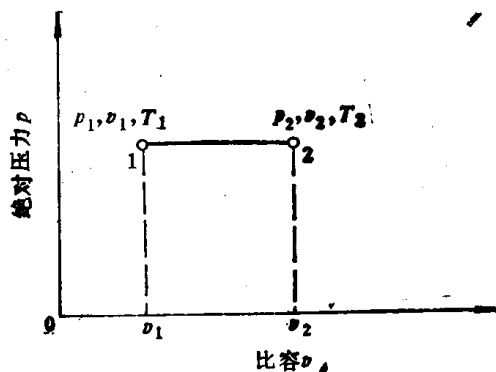


图1-4 等压过程 $p-v$ 曲线

$$u_p = C_p(T_2 - T_1) \quad (1-12)$$

式中 C_p ——定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 其含意为气体压力保持不变, 使单位质量的气体自由膨胀, 温度升高 1K 所需的热量。对于空气, $C_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

单位质量气体膨胀所作的功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1), \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-13)$$

由热力学第一定律知, 气体吸收的热量 $Q_p = C_p \Delta t$, 等于气体所增加的内能 $Q_v = C_v \Delta t$ 和气体膨胀对外所作的功 $W = R \Delta t$

$$C_p(T_2 - T_1) = C_v(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) \quad (1-14)$$

由式 (1-13) 可直接得出 C_p 、 C_v 、 R 三个常数的关系为

$$C_p - C_v = R$$

或

$$C_p \frac{k-1}{k} = C_v(k-1) = R$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (1-15)$$

式中 k ——绝热指数, 对于不同的气体有不同的值, 空气 $k = 1.4$ 。

(三) 等温过程 温度 $T = \text{常数}$ 时, 气体的状态变化过程为等温变化过程(图 1-5)。因状态 1、2 的温度相等, 即 $T_1 = T_2$, 则式 (1-6) 变为

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = RT \quad (1-16)$$

从状态 1 变化到状态 2, 气体被压缩, 单位质量气体所需的压缩功为

$$\begin{aligned} W &= \int_{v_1}^{v_2} p(-dv) = RT \int_{v_2}^{v_1} \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_1}{v_2} \\ &= p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = p_2 v_2 \ln \frac{p_1}{p_2} \end{aligned} \quad (1-17)$$

式 (1-16) 说明等温过程无内能变化, 加入系统的热量全部变成气体所作的功。

(四) 绝热过程

当系统与外界无热量交换时, 气体的状态变化过程称为绝热变化过程。如气动系统的快速充、排气过程可视为绝热过程。绝热过程中, 系统靠消耗自身的内能对外做功, p 、 v 、 T 三个参数将均为变量。

因输入系统的热量为零, 由热力学第一定律知:

$$C_v dT + p dv = 0 \quad (1-18)$$

对
得

$$pv = RT \quad \text{式微分}$$

$$p dv + v dp = R dT$$

或

$$dT = \frac{1}{R}(p dv + v dp) \quad (1-19)$$

将 dT 代入式 (1-18), 考虑 $R = C_v(k-1)$ 经整理后得

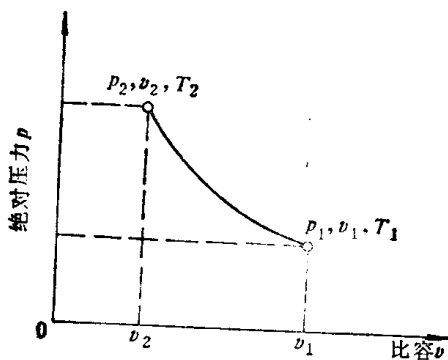


图1-5 等温过程

$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0 \quad (1-20)$$

解此微分方程得

$$\left. \begin{aligned} \ln p + k \ln v &= C \\ \text{或} \quad p v^k &= \text{常数} \\ p / \rho^k &= \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

式 (1-21) 为绝热方程式。

如图 1-6 所示, 单位质量气体的绝热压缩功或膨胀功的值, 可由式 (1-21) 得出:

$$\begin{aligned} W &= \int_{v_1}^{v_2} p (-dv) = \int_{v_2}^{v_1} \frac{p_1 v_1^k}{v^k} dv \\ &= \frac{p_1 v_1}{1-k} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] \\ &= \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} - 1 \right] \end{aligned}$$

注意到

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad (1-22)$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \\ &= \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (1-23)$$

在等压、等温、绝热过程中, 因状态变化是可逆的, 所以气体的压缩功与膨胀功的值是相等的。

(五) 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。前面介绍的四种变化过程是多变过程的特例。严格地讲气体变化的过程大多是多变过程。多变过程的状态方程为

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad (1-24)$$

式中 n —— 多变指数。如图 1-7 曲线 3 所示, 一般情况下, 多变指数 n 在下述范围内 $k > n > 1$ 。

如研究气缸的启动和活塞运动速度时, 可取 $n = 1.2 \sim 1.25$ 。

多变过程气体所作的值为

$$W = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{R}{n-1} (T_2 - T_1) \quad (1-25)$$

例1-2 由空气压缩机往气罐内充入压缩空气, 使罐内压力由 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ (绝对) 升到 $p_2 = 0.265 \text{ MPa}$ (绝对), 气罐温度从室温 $T_1 = 273 + 15 = 288 \text{ K}$ 升到 T_2 , 充气结束后, 气罐温度又逐渐降至室温, 此时罐内压力为 p'_1 , 求 T_2 及 p'_1 各值 (设气源温度 $T_s \approx 288 \text{ K}$)。

解 此过程是一个复杂的充气过程, 可暂看成为简单的绝热充气过程。

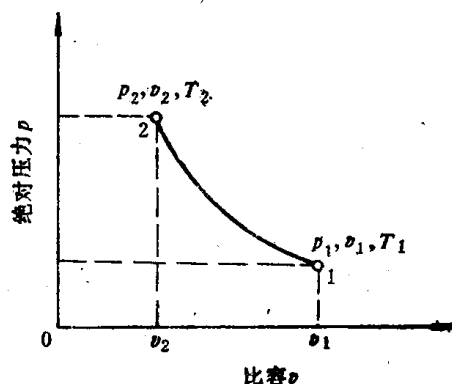


图1-6 绝热过程

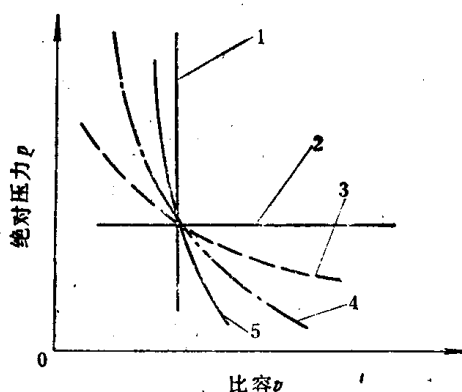


图1-7 多变过程

- 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 $n = k = 1.4$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \left(\frac{0.265}{0.1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 380.5 \text{ K}$$

当充气结束后为等容降温过程, 压力 p'_1 为

$$p'_1 = \frac{T_1}{T_2} p_2 = \frac{288}{380.5} \times 0.265 = 0.2 \text{ MPa}$$

三、湿空气

含有水蒸汽的空气称为湿空气。空气中的水蒸汽在一定条件下会凝结成水滴, 水滴不仅会腐蚀元件而且对系统的稳定性带来不良的影响。因此常采取一些措施防止水蒸汽被带入系统。湿空气中所含水蒸汽的程度用湿度和含湿量来表示。

(一) 湿度

1. 绝对湿度 1 m^3 湿空气中所含水蒸汽的质量称为湿空气的绝对湿度。常用 x 表示, 即

$$x = \frac{m_s}{V}, \text{ kg/m}^3 \quad (1-26)$$

或由式 (1-7) 气体状态方程导出

$$x = \rho_s = \frac{p_s}{R_s T}, \text{ kg/m}^3 \quad (1-27)$$

式中 m_s ——水蒸汽的质量, kg;

V ——湿空气的体积, m^3 ;

ρ_s ——水蒸汽的密度, kg/m^3 ;

p_s ——水蒸汽的分压力, Pa;

R_s ——水蒸汽的气体常数 $R_s = 462.05, \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$;

T ——绝对温度, 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量达到最大限度时, 称此湿空气为饱和湿空气。 1 m^3 饱和湿空气中, 所含水蒸汽的质量称为饱和湿空气的绝对湿度。

$$x_s = \rho_s = \frac{p_s}{R_s T} \quad (1-28)$$

式中 x_s ——饱和绝对湿度, g/m^3 (x_s 值见表 1-4);

ρ_s ——饱和湿空气中水蒸汽的密度, g/m^3 ;

p_s ——饱和湿空气中水蒸汽的分压力, Pa。

3. 相对湿度 在同温度和同压力下, 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,

$$\varphi = \frac{x}{x_s} \times 100\% = \frac{p_s}{p_s} \times 100\% \quad (1-29)$$

或

$$x = \varphi x_s$$

式中 x, x_s ——分别为绝对湿度和饱和绝对湿度, g/m^3 ;

p_s, p_s ——分别为水蒸汽的分压力与饱和水蒸汽的分压力, Pa (或 MPa)。

当空气为绝对干燥时: $p_s = 0$ 则 $\varphi = 0$, 当空气达到饱和时: $p_s = p_s$ 则 $\varphi = 100\%$ 。湿空气的 φ 值在 $0 \sim 100\%$ 之间变化。通常情况下, 空气的相对湿度在 $60 \sim 70\%$ 范围内人体感觉舒适。气动技术中规定各种阀的相对湿度不得大于 90% 。

(二) 含湿量

1. 质量含湿量 1 kg 质量的干空气中所混合的水蒸汽质量。用 d 表示,

$$\begin{aligned} d &= \frac{m_s}{m_g} = \frac{\rho_s}{\rho_g} = \frac{p_s/R_s T}{p_g/R_g T} = \frac{R_g}{R_s} \frac{p_s}{p_g} \\ &= \frac{287.1}{462.05} \frac{p_s}{p_g} = 0.622 \frac{p_s}{p_g} \quad \text{kg/kg} \\ d &= 622 \frac{p_s}{p_g} = 622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad \text{g/kg} \end{aligned} \quad (1-30)$$

式中 m_s ——水蒸汽的质量, g;
 m_g ——干空气的质量, kg;
 p_s ——水蒸汽的分压力, MPa;
 p_g ——干空气的分压力, MPa;
 p ——湿空气的全压力, MPa;
 $p = p_s + p_g$

φ ——相对湿度。

2. 容积含湿量 1 m³ 干空气中所混合的水蒸汽质量。用 d' 表示,

$$d' = d \rho \quad \text{g/m}^3 \quad (1-31)$$

式中 ρ ——干空气的密度, kg/m³。

表 1-4 为绝对压力在 0.1013 MPa (760 mmHg) 下, 饱和空气中水蒸汽的分压力、饱和和绝对湿度、容积含湿量和温度的关系。

表1-4 饱和空气中水蒸汽的分压力、饱和和绝对湿度、容积含湿量和温度的关系

温度 °C	饱和水蒸汽分压力 p_b MPa	饱和绝对湿度 x_b (g·m ⁻³)	饱和容积含湿量 d_b (g·m ⁻³)	温度 °C	饱和水蒸汽分压力 p_b MPa	饱和绝对湿度 x_b (g·m ⁻³)	饱和容积含湿量 d_b (g·m ⁻³)	温度 °C	饱和水蒸汽分压力 p_b MPa	饱和绝对湿度 x_b (g·m ⁻³)	饱和容积含湿量 d_b (g·m ⁻³)
100	0.1013		597.0	29	0.004	28.7	28.7	13	0.0015	11.3	11.4
80	0.0473	290.8	292.9	28	0.0038	27.2	27.2	12	0.0014	10.6	10.7
70	0.0312	197.0	197.9	27	0.0036	25.7	25.8	11	0.0013	10.0	10.0
60	0.0199	129.8	130.1	26	0.0034	24.3	24.4	10	0.0012	9.4	9.4
50	0.0123	82.9	83.2	25	0.0032	23.0	23.0	8	0.0011	8.27	8.37
40	0.0074	51.0	51.2	24	0.0030	21.8	21.8	6	0.0009	7.26	7.30
39	0.0070	48.5	48.8	23	0.0028	20.6	20.6	4	0.0008	6.14	6.40
38	0.0066	46.1	46.3	22	0.0026	19.4	19.4	2	0.0007	5.56	5.60
37	0.0063	43.8	44.0	21	0.0025	18.3	18.3	0	0.0006	4.85	4.85
36	0.0059	41.6	41.8	20	0.0023	17.3	17.3	-2	0.0005	4.22	4.23
35	0.0056	39.5	39.6	19	0.0022	16.3	16.3	-4	0.0004	3.66	3.50
34	0.0053	37.5	37.6	18	0.0021	15.4	15.4	-6	0.00037	3.16	3.00
33	0.0050	35.6	35.7	17	0.0019	14.5	14.5	-8	0.0003	2.73	2.60
32	0.0048	33.8	33.8	16	0.0018	13.6	16.7	-10	0.00026	2.25	2.20
31	0.0045	32.0	32.0	15	0.0017	12.8	12.8	-16	0.00015	1.48	1.30
30	0.0042	30.3	30.4	14	0.0016	12.1	12.1	-20	0.0001	1.07	0.90

由表 1-4 看出, 当温度下降时空气中水蒸汽的含量是降低的, 如果从减少空气中所含水角度要求, 降低进入空气设备的空气温度对除水是有利的。

四、自由空气流量及析水量

(一) 自由空气流量 气压传动及控制中所用的压缩空气是由空压机获得的, 经压缩机压缩后的空气称为压缩空气, 没经压缩处于自由状态 (一个大气压状态下) 的空气称为自由空气。空气压缩机铭牌上注明的流量就是自由空气流量, 按此流量选择空压机。自由空气流量为

$$\left. \begin{aligned} Q_z &= Q \frac{p}{p_z} \frac{T_z}{T} \\ Q_z &= Q \frac{p}{p_z} \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$

若忽略温度变化的影响

式中 Q 、 Q_z ——分别为压缩空气和自由空气流量, m^3/min ;

p 、 p_z ——分别为压缩空气和自由空气的压力 (绝对), MPa ;

T 、 T_z ——分别为压缩空气和自由空气的温度 (绝对), K 。

(二) 析水量 湿空气被压缩后, 单位容积中所含水蒸汽的量增加, 同时温度也上升。当压缩空气冷却时, 其相对湿度增加, 当温度降到露点后便会有水滴析出。压缩空气中析出的水量可由下式计算

$$Q_m = 60 Q_z \left[\varphi d'_{1s} - \frac{(p_1 - \varphi p_{s1}) T_2}{(p_2 - p_{s2}) T_1} d'_{2s} \right] \quad (1-33)$$

式中 Q_m ——每小时的析水量, kg/h ;

φ ——空气没经压缩时的相对湿度;

d'_{1s} ——温度为 T_1 时饱和容积含湿量, kg/m^3 ;

d'_{2s} ——温度为 T_2 时饱和容积含湿量, kg/m^3 ;

T_1 ——压缩前空气的温度, K ;

T_2 ——压缩后空气的温度, K ;

p_{s1} ——温度为 T_1 时饱和空气中水蒸汽的分压力 (绝对), MPa ;

p_{s2} ——温度为 T_2 时饱和空气中水蒸汽的分压力 (绝对), MPa 。

例 1-3 已知湿空气的压力为 0.1 MPa , 温度为 20°C , 相对湿度是 75% , 向湿空气的绝对湿度及质量含湿量各为若干?

解 根据表 1-4 可查得 20°C 时湿空气的饱和绝对湿度 $x_s = 17.3 \text{ g/m}^3$, 饱和水蒸汽的分压力 $p_s = 0.0023 \text{ MPa}$, 由式 (1-29) 可得

$$x = \varphi x_s = 75\% \times 17.3 = 12.98 \text{ g/m}^3$$

由式 (1-30), 得

$$d = 622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} = 622 \frac{0.75 \times 0.0023}{0.1 - 0.75 \times 0.0023} = 10.9 \text{ g/kg}.$$

例 1-4 将 15°C 的空气压缩至 0.7 MPa (绝对), 压缩后的空气温度为 40°C , 已知空气压缩机的流量为 $6 \text{ m}^3/\text{min}$ 相对湿度 $\varphi = 0.85$ 。求空压机每小时的析水量。

解 由表 1-4 可查得, 15°C 时 $d'_{1s} = 12.8 \text{ g/m}^3$, $p_{s1} = 0.0017 \text{ MPa}$; 40°C 时 $d'_{2s} = 51.2 \text{ g/m}^3$,

$$p_{b2} = 0.0074 \text{ MPa}.$$

已知: $Q_z = 6 \text{ m}^3/\text{min}$, $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.7 \text{ MPa}$ 。由式 (1-33)

$$\begin{aligned} Q_m &= 60Q_z \left[\varphi d_{1b} - \frac{(p_1 - \varphi p_{b1})T_2}{(p_2 - p_{b2})T_1} d_{2b} \right] \\ &= 60 \times 6 \times \left[0.085 \times 0.0128 - \frac{(0.1 - 0.85 \times 0.0017)}{(0.7 - 0.0074)} \times \frac{273 + 40}{273 + 15} \times 0.0512 \right] \\ &= 1.066 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

§ 1-4 气体流动的基本方程

在流体力学课程, 已介绍了反映流体运动规律的基本方程有连续性方程、能量方程等。

一、连续性方程

连续性方程实际是质量守恒原理在流体力学中的具体体现。流体在管道中作稳定流动时, 同一时间内流过管道每一截面的质量流量相等。即

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = Q_m = \text{常数} \quad (1-34)$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 ——分别为 1、2 截面上流体的密度, kg/m^3 ;

A_1 、 A_2 ——分别为 1、2 处的截面积, m^2 ;

v_1 、 v_2 ——分别为 1、2 截面上流体运动速度, m/s ;

Q_m ——质量流量, kg/s 。

如果气体运动速度很低可视为不可压缩的, 即 $\rho_1 = \rho_2 = \text{常数}$ 式 (1-34) 变为

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = Q = \text{常数} \quad (1-35)$$

式中 Q ——体积流量, m^3/s 。

二、能量方程

如果流体作稳定流流动, 由能量守恒关系可求得下述几种形式的能量方程:

(一) 流管柏努里方程

$$gh + \left[\frac{dp}{\rho} + \frac{v^2}{2} \right] = \text{常数} \quad (1-36)$$

式中 h 、 dp 、 ρ 、 v ——分别为流管任一截面的位置高度、微压力、密度、速度;

g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

(二) 不可压缩流体柏努里方程

$$\left. \begin{aligned} h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} &= h_2 + \frac{p_2}{g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \\ gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} &= gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_w \end{aligned} \right\} \quad (1-37)$$

式中 h_1 、 h_2 ——分别为 1、2 截面处的位置高度, m ;

p_1 、 p_2 ——分别为 1、2 截面处的压力, Pa ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

v_1 、 v_2 ——分别为 1、2 截面处的平均流速, m/s ;

h_w ——1 至 2 截面间损失掉的水头, m 。

如果忽略位置高度 h 的影响, 将式 (1-37) 的第二个式子乘以 ρ 可得:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Sigma \gamma h_w \quad (1-38)$$

$$\Sigma \gamma h_w = \Sigma \Delta p_i + \Sigma \Delta p_s \quad (1-39)$$

式中 $\Sigma \gamma h_w$ ——1 至 2 截面间所有的压力损失, Pa;

$\Sigma \Delta p_i$ ——1 至 2 截面间所有沿程压力损失, Pa;

$\Sigma \Delta p_s$ ——1 至 2 截面间所有局部压力损失, Pa。

$$\Sigma \Delta p_i = \Sigma \gamma \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1-40)$$

式中 l 、 d ——分别为管路长度和管内径, m;

v ——管中流速, m/s;

λ ——管路沿程阻力系数, λ 值与流体的流动状态和管壁的相对粗糙度 $\frac{\epsilon}{d}$ 有关。

对于层流流动状态的空气和水: $\lambda = \frac{64}{Re}$, 式中 Re ——雷诺数, $Re = \frac{vd}{\nu}$, ν ——气体的运动粘度, m^2/s 。

当气体为紊流流动状态时, $\lambda = f\left(Re, \frac{\epsilon}{d}\right)$ 的值可根据 Re 和 $\frac{\epsilon}{d}$ 的值查有关手册确定。

$$\Sigma \Delta p_s = \Sigma \gamma \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1-41)$$

式中 ζ ——局部阻力系数, ζ 值可查有关手册确定。

(三) 可压缩气体绝热流动柏努里方程 如果忽略气体流动时的能量损失和位能变化则得到下式

$$\left. \begin{aligned} \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} &= \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \\ \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} &= \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} \end{aligned} \right\} \quad (1-42)$$

式中 k ——绝热指数。

(四) 有机械功的压缩性气体能量方程 若在所研究的管道两截面 1—1 与 2—2 之间有流体机械 (如压气机、鼓风机或动活塞) 对单位质量气体做功, 则绝热过程能量方程为

$$\frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + L = \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1-43)$$

由此式可得

绝热过程

多变过程

$$\left. \begin{aligned} L_k &= \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \\ L_n &= \frac{n}{n-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-44)$$

如果忽略速度 v 的影响, 则得
绝热过程

$$\left. \begin{aligned} L_k &= \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \\ L_n &= \frac{n}{n-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-45)$$

式中 L_k 、 L_n ——分别为绝热、多变过程流体机械对单位质量气体所作的全功, J/kg;
 L_k 、 L_n ——分别为绝热、多变过程流体机械对单位质量气体所作的压缩功, J/kg。
式 (1-45) 可作为气缸缓冲设计计算的基础。

§ 1-5 声速与气体在管道中的流动特性

一、声速 (音速)

声速 (音速) 是指声波在空气介质中传播的速度。声波是一种微弱的扰动波。通常将一切微弱扰动波的传播速度都叫声速。为求空气中的声速作如下分析。

如图 1-8 a 所示, 在静止充满气体的管道一端有一面积为 A 的活塞, 管中气体压力、密度分别为 p 、 ρ 。当 $t_1 = 0$ 时活塞以微小速度 u 向前运动时, 依次压缩其前部的流体, 使活塞右端的气体压力增加为 $p + dp$, 密度增加为 $\rho + d\rho$ 。在 t 时间后 (见图 1-8 b) 这种压缩波的传播在管道中形成扰动面 $m-m$, 其传播速度就是 a 。再经过 dt 时间后, 活塞又向前移动 $u dt$, $m-m$ 面则移动 $a dt$, 如图 1-8 c 的 $m'-m'$ 所示。显然, 在 dt 时间中 $m-m$ 所掠过的流体质量为 $\Delta M_1 = \rho A a dt$ 。在 dt 时间后这部分质量被压缩, 其密度为 $\rho + d\rho$, 其体积变为 $(a - u) A dt$, 所以质量变为 $\Delta M_2 = (\rho + d\rho) A (a - u) dt$ 。根据质量守恒定理 $\Delta M_1 = \Delta M_2$, 由此可得

$$u = \frac{a d\rho}{\rho + d\rho} \quad (1-46)$$

质量 ΔM_1 在 t 时是静止的, 因 $u = 0$ 其动量也为 0, 在 $t + dt$ 时, 变为与活塞相同运

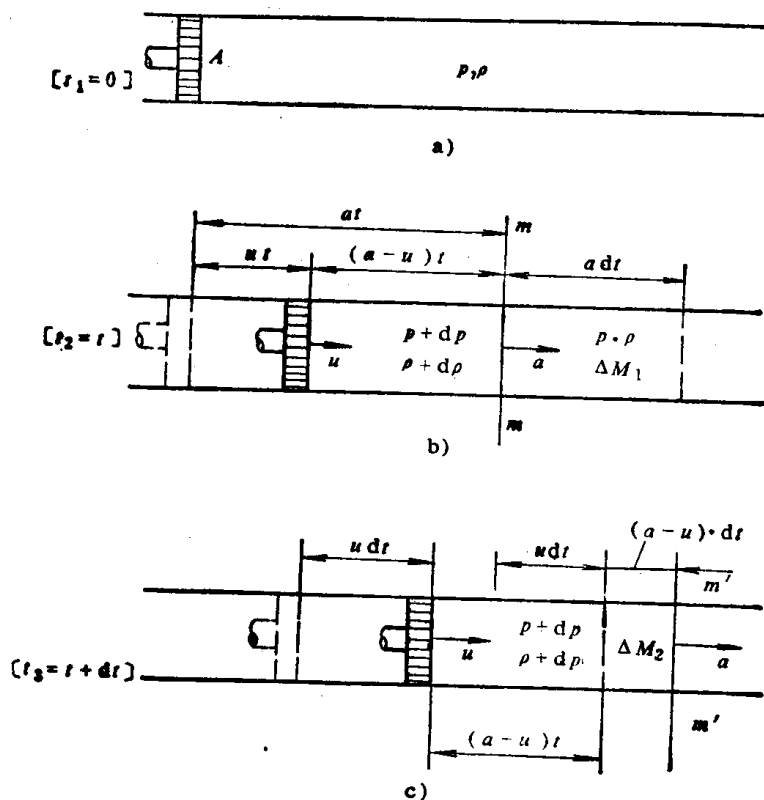


图1-8 压缩扰动面推进示意图