

第 19 篇 气压传动

主要撰稿 彭光正 包 钢 王雄耀 张百海
王 涛 陈金兵 陶兆荣
审 稿 吴 筠 徐文灿

第1章 基础理论

1 气动系统的特点及基本计算公式

1.1 气压传动系统原理及特点

气压传动与控制技术简称气动技术,是指以压缩空气为工作介质来进行能量与信号的传递,实现生产过程机械化、自动化的门技术,它是流体传动与控制学科的一个重要组成部分。从广义上看,气动技术范畴,除空气压缩机、空气净化器、气动马达、各类控制阀及辅助装置以外,还包括真空发生装置、真空执行元件以及各种气动工具等。

由于气动技术相对于机械传动、电传动及液压传动而言有许多突出优点,因而近年来发展十分迅速,现在气动技术结合了液压、机械、电气和电子技术的众多优点,并与它们相互补充,成为实现生产过程自动化的一个重要手段,在机械、冶金、纺织、食品、化工、交通运输、航空航天、国防建设等各个部门已得到广泛的应用。

表 19-1-1 气动技术的优缺点

优点	(1) 对于传动形式而言,气缸作为线性驱动器可在空间的任意位置构建它所需的运动轨迹,安装维护简单
	(2) 工作介质是取之不尽、用之不竭的空气,空气本身不花钱;排气处理简单,不污染环境,成本低。压力等级低,使用安全
	(3) 气缸动作速度一般为 50~500mm/s,比液压和电气方式的动作速度快,其间,通过单向节流阀,可使气缸速度无级调节。近代气动技术发展,气缸最低速度可在 3mm/s 平行运动,高速可达 3m/s,甚至高达 17m/s (具有长行程,最新展览指标可达 45m/s),对于高速气缸必须设有效缓冲
	(4) 可靠性高,使用寿命长。电器元件的有效动作次数约为数百万次,而进口的一般电磁阀的寿命大于 3000 万次,小型阀超过 1 亿次
缺点	(5) 利用空气的可压缩性,可贮存能量,实现集中供气。可短时间释放能量,以获得间歇运动中的高速响应。可实现缓冲 对冲击载荷和过载荷有较强的适应能力。在一定条件下,可使气动装置有自保护能力
	(6) 全气动控制具有防火、防爆、防潮的能力。与液压方式相比,气动方式可在高温场合使用
	(7) 由于空气损失小,压缩空气可集中供应,远距离输送
缺点	(1) 由于空气具有压缩性,气缸的动作速度易受载荷的变化而变化。采用气液联动方式可以克服这一缺陷
	(2) 气缸在低速运动时,由于摩擦力占推力的比例较大,气缸的低速稳定性不如液压缸
	(3) 虽然在许多应用场合,气缸的输出力能满足工作要求,但其输出力比液压缸小

表 19-1-2 气动和其他传动与控制方式的比较

控制方式	机械方式	电气方式	电子方式	液压方式	气动方式
驱动力	不太大	不太大	小	大(可达数百 kN 以上)	稍大(可达数十 kN)
驱动速度	小	大	大	小	大
响应速度	中	大	大	大	稍大
特性受载荷的影响	几乎没有	几乎没有	几乎没有	较小	大
构造	普通	稍复杂	复杂	稍复杂	简单
配线、配管	无	较简单	复杂	复杂	稍复杂
温度影响	普通	大	大	小于 70℃ 普通	小于 100℃ 普通
防潮性	普通	差	差	普通	注意排放冷凝水

控制方式	机械方式	电气方式	电子方式	液压方式	气动方式
防腐性	普通	差	差	普通	普通
防振性	普通	差	特差	普通	普通
定位精度	良好	良好	良好	稍良好	稍差
维护	简单	有技术要求	技术要求高	简单	简单
危险性	没有特别问题	注意漏电	没有特别问题	注意防火	几乎没有问题
信号转换	难	易	易	难	较难
远程操作	难	易	易	较易	易
动力源出现故障时	不动作	不动作	不动作	若有蓄能器， 能短时间应付	有一定应付能力
安装自由度	小	有	有	有	有
无级变速	稍困难	稍困难	良好	良好	稍良好
速度调整	稍困难	容易	容易	容易	稍困难
价格	普通	稍高	高	稍高	普通
备注	由凸轮、螺钉、 杠杆、连杆、齿 轮、棘轮、棘爪和 传动轴等机件组 成的驱动系统。 主要动力源为电 动机	驱动系统作为 动力源和其他的 电磁离合器、制 动器等机械方式 并用 控制系统是由 限位开关、继电 器、延时器等组 成	由半导体元件 等组成的控制方 式	驱动系统是由液压缸 等组成 控制系统是由各种液 压控制阀等组成	驱动系统是由气缸等 组成 控制系统是由各种气 动控制阀等组成

1.2 空气的性质

表 19-1-3

名称	符号	含义、公式、数据	符号意义
密 度	ρ	单位体积空气所具有的质量称为密度	M ——均质气体的质量, kg
		$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{v} \quad (\text{kg/m}^3)$	V ——均质气体的体积, m^3
		单位质量气体所占的体积称为比容	p ——空气的绝对压力, Pa
		$v = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$	T ——空气的绝对温度, K
		空气的密度与其所处的状态有关。	φ ——相对湿度, %
		对于干空气:	p_a ——湿度为 273K 时饱和水蒸气分压力, Pa
		$\rho = 3.482 \times 10^{-3} p / T \quad (\text{kg/m}^3)$	
		对于湿空气:	
		$\rho = 3.482 \times 10^{-3} (p - 0.378 \varphi p_a) / T \quad (\text{kg/m}^3)$	

续表

名称	符号	含义、公式、数据	符号意义
比容	t	a. 空气的密度和比容	
		温度 $t/^{\circ}\text{C}$	1个大气压下
		密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	绝对粘度 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
		比容 $v/\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	运动粘度 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
		-10	1.67×10^{-5}
		-5	1.695×10^{-5}
		0	1.716×10^{-5}
		5	1.74×10^{-5}
		10	1.77×10^{-5}
		15	1.79×10^{-5}
压力 (压强)	p	20	1.82×10^{-5}
		25	1.84×10^{-5}
		30	1.86×10^{-5}
		35	1.88×10^{-5}
		40	1.91×10^{-5}
		1.278	0.8867
		0.8867	1.91 $\times 10^{-5}$
		1.91 $\times 10^{-5}$	1.69 $\times 10^{-5}$
		1.69 $\times 10^{-5}$	
		1.69 $\times 10^{-5}$	
压力 (压强)	p	b. 各种压力单位的换算关系	
		帕 /Pa	巴 /bar
		标准大气压 /atm	公斤力/厘米 ² /kgf·cm ⁻²
		毫米汞柱 /mmHg	磅力/英寸 ² /lbf·in ⁻²
		1	10^{-5}
		1	0.986
		1.013	1.033
		101325	10.33
		98070	760
		6894.8	736
温度	t 或 T	表示气体分子热运动动能的统计平均值称为气体的温度。国际上常用两种温标:	
		(1) 摄氏温度 这是热力学百分度温标, 规定在标准大气压下纯水的凝固点是 0°C, 沸点是 100°C	t——摄氏温度, °C
		(2) 绝对温度 绝对温度的间隔与摄氏温度相同	T——绝对温度, K
		$T = 273 + t(\text{K})$	
粘度	μ 或 ν	流体流动时, 在流体中产生摩擦阻力的性质称为粘度, 粘性的大小用粘度表示。根据牛顿定律, 流体流动时产生的内摩擦力或切应力 τ 与速度梯度成正比, 即	
		$\tau = \mu \frac{du}{dy}$	μ ——绝对粘度 (或动力粘度)
		气体的绝对粘度随其温度升高而增加。流体的绝对粘度 μ 与其密度 ρ 之比, 称为运动粘度 ν	$d\omega$ ——相邻两层流体间的相对滑动速度
		$\nu = \mu / \rho \quad (\text{m}^2/\text{s})$	dy ——相邻两层流体间的法向距离
			$d\omega/dy$ ——流体相对滑动的速度梯度
			绝对粘度 μ 的 SI 单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, $1\text{Pa}\cdot\text{s} = 1\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
			t——空气的温度, °C
			在标准大气压下空气的粘度见本表 a

名称	符号	含义、公式、数据					符号意义						
比热容	c	1kg 流体温度变化 1K 时与外界交换的热量,称为气体的比热容。气体的比热容与过程进行的条件有关。当过程是在容积不变条件下进行时,其比热容为比定容热容 c_v ;在定压条件下进行时,其比热容为比定压热容 c_p $\begin{cases} c_p - c_v = R \\ c_p/c_v = \gamma \end{cases}$ e. 各种气体的气体常数和比热					c ——流体的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ R ——气体常数, $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ γ ——比热容比。对完全气体 $\gamma = \kappa$ (κ 为等熵指数)其值只与气体分子的原子数有关,单原子气体为 1.66,双原子 ⁴ 气体为 1.4,三原子以上的气体常数近似为 1.33						
		气体	分子式	原子数	分子量	气体常数 $R/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	低压时的比热 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		比热容比 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$				
							c_p	c_v					
		氦	He	1	4.003	2077	5.200	3.123	1.67				
		氢	H ₂	2	2.016	4124.5	14.32	10.19	1.4				
		氮	N ₂	2	28.02	296.8	1.038	0.742	1.4				
		氧	O ₂	2	32.00	260	0.917	0.657	1.39				
		空气	—	—	28.97	287.1	1.004	0.718	1.4				
		二氧化碳	CO ₂	3	44.01	188.9	0.845	0.656	1.29				
		水蒸气	H ₂ O	3	18.016	461.4	1.867	1.406	1.33				
导热		从温度为 T_1 (K) 的部分,通过截面积 $A(\text{m}^2)$ 长 $l(\text{m})$ 的导热体向温度为 T_2 (K) 的另一部分导热时,单位时间所传递的热量为 Q $Q = \lambda A(T_1 - T_2)/l \quad (\text{kJ}/\text{h})$ d. 空气的导热系数					λ ——导热系数, $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})$						
		温度/ $^\circ\text{C}$		-50		0		20		50		100	
		导热系数/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		0.074		0.087		0.092		0.100		0.112	
气体的状态变化		用以表示气体在某一瞬间物理特性的总标志称为气体的状态。在给定状态下表示物理特性所用的参数称为状态参数,常用温度、绝对压力和比容(或密度)作为气体的基本状态参数。此外,还有内能、焓和熵也是气体的状态参数											
		(1) 基本状态和标准状态		在温度为 273K,绝对压力在标准大气压条件下,干空气的状态称为基准状态 在温度为 293K,绝对压力在标准大气压、相对湿度为 65% 条件下,空气的状态称为标准状态									
		(2) 完全气体和完全气体的状态方程		假想一种气体,它的分子是一些弹性的、不占据体积的质点,各分子之间无相互作用力,这样一种气体称为完全气体。完全气体在任一平衡状态时,各基本状态参数之间的关系为: $pv = RT$ 或 $pV = MRT$ (称为完全气体的状态方程式)									
		(3) 实际气体与完全气体的差别		上述完全气体实际上是不存在的,任何实际气体,各分子间有相互作用力,且分子占有体积,因而具有内摩擦力和粘性,实际气体的密度越大,与完全气体的差别也越大。实际气体不遵循完全气体的状态方程式,它只在温度不太低、压力不太高的条件下近似地符合完全气体的状态方程式 在上列计算中,为考虑实际气体与完全气体的差别,常引入修正系数 Z (称为压缩率),这时实际气体的状态方程式可写成 $pv = ZRT$									
		表 e 为奥托 (Otto) 等测定的空气的压缩率值。由该表可知,在气动技术所使用的压力 ($\leq 2\text{MPa}$) 范围内,压缩率值几乎等于 1。因此,在气动系统的计算中,可以把压缩空气看作完全气体											
		e. 空气的压缩率 $Z = pv/RT$ 值											
		温度 $t/^\circ\text{C}$		压力 p/MPa									
				0	1	2	3	5	10				
		0		1	0.9945	0.9895	0.9851	0.9779	0.9699				
		50		1	0.9990	0.9984	0.9981	0.9986	1.0057				
100		1	1.0012	1.0027	1.0045	1.0087	1.0235						
200		1	1.0031	1.0064	1.0097	1.0168	1.0364						

1.3 空气热力学和流体动力学规律

1.3.1 闭口系统热力学第一定律

表 19-1-4

能量	含 义	符号及单位
热力学第一定律确定了各种形式的能量(热能、功、内能)之间相互转换关系,该定律指出:“当热能与其他形式的能量进行转换时,总能量保持恒定”对于任何系统,各项能量之间的一般关系式为: 进入系统的能量 - 离开系统的能量 = 系统中储存能量的变化		
热 量	由于温度不同,在系统与外界之间穿越边界而传递的能量称为热量。热量是通过物体相互接触处的分子碰撞或热辐射方式所传递的能量,其结果是高温物体把一部分能量传给了低温物体。热量传递过程并不需要物体的宏观运动。热量是过程量,不是状态参数	Q ——热量, J 或 kJ q ——1kg 工质与外界交换的热量, J/kg 或 kJ/kg W ——功, J 或 kJ
功	系统与外界之间通过宏观运动发生相互作用而传递的能量称为功 左图所示气缸中,密闭一定质量 M 的气体,可动边界活塞的面积 A ,活塞所受外力 F 。当系统克服外力进行一个准平衡的膨胀过程,即由状态 1 变到状态 2 时,若不计摩擦,系统对外所作的功为: $W = \int_1^2 F dx = \int_1^2 p A dx = \int_1^2 p dV$ 在 p - V 图上,功是过程曲线下的面积。可见,即使始态、终态相同的两个过程,若过程曲线不同,功的大小也不同,这说明功不是状态参数而是一个过程量	
内 能	气体内部的分子、原子等微粒总在不停地运动,这种运动称为热运动。气体因热运动而具有的能量称为内能,它是储存于气体内部的能量 对于完全气体,分子间没有相互作用力,内位能为零,完全气体只有内动能。这时内能只是温度的单位函数。1kg 气体的内能称为比内能 $U = f(T)$ 在气体的状态一定时,内能也有一定值,因而内能也是气体的状态参数	u ——比内能, J/kg 或 kJ/kg U ——内能, J 或 kJ
闭口系统平衡方程式	右图所示气缸中密闭一定质量气体的系统为闭口系统。设系统由状态 1 变到状态 2 为一准平衡过程,在此过程中系统吸热量为 Q ,膨胀对外做功 W ,系统内能变化 ΔU 。对于这种闭口系统,热力学第一定律可表述为:给予系统的热量应等于系统内能增量与对外做功之和。热力学第一定律方程式的微分形式为: $dQ = dU + dW$ 对 1kg 气体而言,有 $dq = du + dw = du + p dv$	
焓	焓 H 的定义为 $H = U + pV$ 1kg 气体的比焓 h 的定义为 $h = u + pv = u + RT$ 在气动系统中,压缩空气从一处流到另一处,随着压缩空气(移动而转移的能量)就等于它的焓。当 1kg 气体流进系统时系统获得的总能量就是其内能 u 与 1kg 气体的推动功 pv 之和,即为比焓 h 在 u 、 p 、 v 为定值时, h 亦为定值,故焓为一状态参数	H ——焓 h ——比焓

1.3.2 闭口系统热力学第二定律

热力学第一定律只说明能量在传递和转换时的数量关系。热力学第二定律则解决过程进行的方向、条件和深度等问题。其中最根本的是关于过程的方向问题。

若一个系统经过一个准平衡过程，由始态变到终态，又能经过逆向过程由终态变到始态，不仅系统没有改变，环境也恢复原状态，即在系统和环境里都不留下任何影响和痕迹，这种过程在热力学中称为可逆过程。否则称为不可逆过程。

可逆过程必为准平衡过程，而准平衡过程则是可逆过程的条件之一。对于不平衡过程，因为中间状态不可能确定，当然是不可逆过程。

于是，热力学第二定律可表述为：“一切自发地实现的过程都是不可逆的”。

熵是从热力学第二定律引出的，是一个状态参数。

嫡用符号 S (s) 表示，其定义为：

$$dS = dQ/T \quad (\text{J/K}) \quad (19-1-1)$$

1kg 气体的比嫡为：

$$ds = dq/T \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (19-1-2)$$

在可逆过程中嫡的增量等于系统从外界传入的热量除以传热当时的绝对温度所得的商

嫡的作用可从传热过程和作功过程对比看出。在表 19-1-4 $p-v$ 图上，功是过程曲线下的面积。同样，可作 $T-s$ 图如图 19-1-1 所示。图中曲线 1-2 代表一个由状态 1 变到状态 2 的可逆过程，曲线上的点代表一个平衡状态。在此过程中对工质加入的热量为：

$$q = \int_1^2 T ds = \int_1^2 f(s) ds \quad (19-1-3)$$

可见，在 $T-s$ 图上，过程曲线下的面积就代表过程中加入工质的热量。 s 有无变化就标志着传热过程有无进行。

从式 19-1-2 知，当工质在可逆过程中吸热时，嫡增大；放热时，嫡减小。因此，根据工质在可逆过程中嫡是增大还是减小，就可判断工质在过程中是吸热还是放热。若系统与外界绝热， $dq=0$ ，则必有 $ds=0$ ，即嫡不变，这样一个可逆的绝热过程称为等嫡过程。

对于完全气体，比嫡变化只与始态和终态参数有关，与过程性质无关，故完全气体的嫡是一个状态参数。

在不可逆过程，总的比嫡的变化应等于系统从外界传入的热量以及摩擦损失转化成的热量之和除以传热当时的绝对温度所得的嫡。由于存在摩擦损失转换的热量，不可逆的绝热过程是增嫡过程，即 $ds > 0$ 。

1.3.3 空气的热力过程

表 19-1-5

典型过程	含 义
	在气动技术中，为简化分析，假定压缩空气为完全气体，实际过程为准平衡过程或近似可逆过程，且在过程中工质的比热保持不变。根据环境条件和过程延续时间不同，将过程简化为参数变化，具有简单规律的一些典型过程，即定容过程、定压过程、等温过程、绝热过程和多变过程，这些典型过程称为基本热力过程
定容过程	定质量的气体，若其状态变化是在体积不变的条件下进行的，则称为定容过程。由完全气体的状态方程式 $pV = MRT$，可得定容过程的方程为： $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
定压过程	定质量的气体，若其状态变化是在压力不变的条件下进行的，则称为定压过程。由 $pV = MRT$，可得定压过程的方程为： $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$

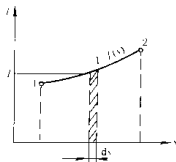


图 19-1-1 $T-s$ 图

典型过程	含 义
等温过程	一定质量的气体, 若其状态变化是在温度不变的条件下进行的, 则称为等温过程。由式 $pV = MRT$, 可得等温过程的方程为: $p_1 V_1 = p_2 V_2$
绝热过程	一定质量的气体, 若其状态变化是在与外界无热交换的条件下进行的, 则称为绝热过程。由热力学第一定律式 $dq = du + pds$ 和完全气体的状态方程 $pe = RT$ 整理可得绝热过程的方程为: $pV^\gamma = \text{常数}$ 或 $p/\rho^\gamma = \text{常数}$ $p/T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \text{常数} \quad \gamma \text{——比热比}$
多变过程	一定质量的气体, 若基本状态参数 p、v 和 T 都在变化, 与外界也不是绝热的, 这种变化过程称为多变过程。由热力学第一定律式 $dq = du + pds$ 和完全气体的状态方程 $pe = RT$ 整理可得多变过程的方程为: $pV^n = \text{常数}$ 式中 n 称为多变指数 当多变指数值为 $\pm\infty$、0、1、k 时, 则多变过程分别为定容、定压、定温和绝热过程。将这些过程曲线作在右图所示同 p-v 和 T-s 图上, 可以看出 n 值的变化趋势 各基本热力过程曲线对比

1.3.4 开口系统能量平衡方程式

对图 19-1-2 所示的开口系统, 取控制体如图中虚线所示。设过程开始前, 气缸内无工质, 初始储存能量为零, 状态为 p_1 、 v_1 、 T_1 的 1kg 工质流入气缸时, 带入系统的总能量为 $h_1 = u_1 + p_1 v_1$ 。工质在气缸内状态变化后终态参数 p_2 、 v_2 、 T_2 。排出气缸时带出系统总能量为 $h_2 = u_2 + p_2 v_2$ 。流经气缸时从热源获得热量 q , 并对机器作功 w_1 。设过程结束时, 工质全部从气缸排出, 系统最终储存能量又为零。于是由热力学第一定律得:

$$w_1 = (q - \Delta u) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) = w + (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (19-1-4)$$

式中 w_1 是工质流经开口系统时, 工质对机器所作的功, 即机器获得的机械能, 称为技术功。若过程是可逆的, 则过程可用连续曲线 1-2 示于图 19-1-2 上, 式 (19-1-4) 可化成:

$$w_1 = p_1 v_1 + \int_1^2 p dv - p_2 v_2 = - \int_1^2 v dp = \text{面积 51265} \quad (19-1-5)$$

可逆过程的技术功可用式 (19-1-5) 计算, 即是 p - v 图上过程曲线左方的面积, 若 dp 为负, 过程中工质的压力下降, 则技术功 w_1 为正, 此时工质对机器作功, 如蒸汽机、汽轮机、气缸和汽马达等是这种情况; 反之, 若 dp 为正, 过程中工质的压力升高, 则 w_1 为负, 这时机器对工质作功, 如空气压缩机等是这种情况。

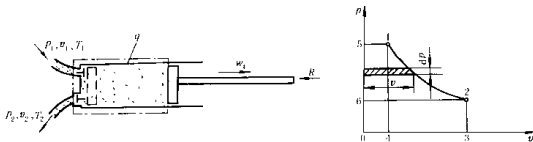


图 19-1-2 开口系统 w_1 计算图

1.3.5 可压缩气体的定常管内流动

表 19-1-6

(1) 基 本 方 程	
描述	气体在管内作一维定常流动的特性可由四个基本方程即连续性方程、能量方程(伯努利方程)、状态方程和动量方程来描述
连续性方程	连续性方程是质量守恒定律在流体流动中的应用,即 $\left. \begin{aligned} Q_m &= \rho u A = \text{常数} \\ d(\rho u A) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$ Q_m —— 流动每个截面的气体质量流量 ρ, u —— 气体的密度和平均流速 A —— 管道的截面积
动量方程	气体在管内作定常流动时,各能量头之间遵循如下方程 $d\left(\frac{u^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} + \lambda \frac{dx}{d} \times \frac{u^2}{2} = 0 \quad (2)$ 上式进行积分时,得 $\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} + \frac{\lambda l u^2}{2d} = \text{常数} \quad (3)$ λ —— 管道中的摩擦因数 d, l —— 管道内径和计算长度
能量方程	气体在管内流动时除了与外界交换热量 dq 之外,还应该考虑气体摩擦所产生的热量 dq_T。假定气体分子以热能的形式全部吸收了摩擦损失的能量,可得能量方程式 $dq = dh + d\left(\frac{u^2}{2}\right) \quad (4)$
(2) 热 力 学 过 程 性 质	
当将气体从外界吸收的热量写成 $dq = c_p dT$	将 $dq = c_p dT$ 代入式(4)积分,并考虑 $T = p/\rho R, c_p - c_v = R$,可得 $\frac{p}{\rho} + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (5)$ 从式(5)可得结论,当气体管流速度 u 越低时,其状态变化过程就越接近等温过程
当气体与外界无热交换时 $dq = 0$	当 $dq = 0$,由式(4)可得 $h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2} = \text{常数} \quad (6)$ 对于完全气体,应有 $\frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} = \text{常数} \quad (7)$ 式(7)直接由能量方程(5)推出,与过程是否可逆无关。既适用于可逆绝热过程也适用于不可逆绝热过程 由于声波在空气中的传播速度 $a = \sqrt{\gamma p / \rho} = \sqrt{\gamma R T} = 20 \sqrt{T} \quad (8)$ 流场中某点的瞬时声速,称为当地声速,只与当地的参数有关,当 $T = 293\text{K}$ 时, $a = 343\text{m/s}$ 将式(8)代入式(7)得 $\frac{p}{\rho} + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{u^2}{2} = \frac{a^2}{\gamma} + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (9)$ 上式说明:当与外界无热交换时,若管内空气流速 u 比声速 a 小得多,则可看作等温流动过程。例如,当 $u = 0.3a$ 时,式中第二项不到第一项的2%,只在 u 较大时,温度才会升高而偏离等温过程
在工厂条件下,空气都是在非绝热管道中流动,且流速较低($u \leq 0.1a$)。因此,在长的输气管道系统中,均可把空气的定常管内流动看作等温流动	

1.3.6 气体通过收缩喷嘴或小孔的流动

在气动技术中,往往将气流所通过的各种气动元件抽象成一个收缩喷嘴或节流小孔来计算,然后再作修正。

在计算时,假定气体为完全气体,收缩喷嘴中气流的速度远大于与外界进行热交换的速度,且可忽略摩擦损失。因此,可将喷嘴中的流动视为等熵流动。

图 19-1-3 为空气从大容器(或大截面管道)Ⅰ经收缩喷嘴流向腔室Ⅱ。相比之下容器Ⅰ中的流速远小于喷嘴中的流速,可视容器Ⅰ中的流速 $u_0=0$ 。设容器Ⅰ中气体的滞止参数 p_0 、 ρ_0 、 T_0 保持不变,腔室Ⅱ中参数为 p 、 ρ 、 T ,喷嘴出口截面积为 A ,出口截面的气体参数为 p_e 、 ρ_e 、 T_e 。改变 p 时,喷嘴中的流动状态将发生变化。

当 $p = p_0$ 时,喷嘴中气体不流动。

当 $p/p_0 > 0.528$ 时,喷嘴中气流为亚声速流,这种流动状态称为亚临界状态。这时室Ⅱ中的压力扰动波将以声速传到喷嘴出口,

使出口截面的压力 $p_e = p$, 这时改变压力 p 即改变了 p_e , 影响整个喷嘴中的流动。在这种情况下,由能量方程式(表 19-1-6 中式 (5)) 得出口截面的流速为:

$$u_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} R(T_0 - T)} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (\text{m/s}) \quad (19-1-6)$$

由连续性方程和关系式 $\rho_e = \rho_0 \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$ 可得流过喷嘴的质量流量计算公式

$$Q_m = S p_0 \sqrt{\frac{2\gamma}{RT_0(\gamma-1)}} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right] \quad (\text{kg/s}) \quad (19-1-7)$$

式中 S ——喷嘴有效面积, m^2 , $S = \mu A$;

μ ——流量系数, $\mu < 1$, 由实验确定;

p_0 、 p_e 、 p ——分别为喷嘴前, 喷嘴出口截面和室Ⅱ中的绝对压力, Pa, 对丁亚声速流, $p_e = p$;

T_0 ——喷嘴前的滞止温度, K。

式 (19-1-7) 中可变部分

$$\varphi\left(\frac{p}{p_0}\right) = \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad (19-1-8)$$

称为流量函数。它与压力比 (p/p_0) 的关系曲线如图 19-1-4 所示, 其中 p/p_0 在 0-1 范围内变化, 当流量达到最大值时, 记为 Q_m^* , 此时临界压力比为 σ_* 。

$$\sigma_* = \frac{p_*}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (19-1-9)$$

对于空气, $\gamma = 1.4$, $\sigma_* = 0.528$ 。

当 $p/p_0 \leq \sigma_*$ 时, 由于 p 减小产生的扰动是以声速传播的, 但出口截面上的流速也是以声速向外流动, 故扰动无法影响到喷嘴内。这就是说, p 不断下降, 但喷嘴内流动并不发生变化, 则 Q_m^* 也不变, 这时的流量也称为临界流量 Q_m^* 。当 $p/p_0 = \sigma_*$ 时的流动状态为临界状态。临界流量 Q_m^* 为:

$$Q_m^* = S p_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (\text{kg/s})$$

声速流的临界流量 Q_m^* 只与进口参数有关。 (19-1-10)

若考虑空气的 $\gamma = 1.4$, $R = 287.1 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 则在亚声速流 ($p/p_0 > 0.528$) 时的质量流量为:

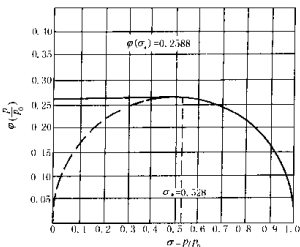


图 19-1-4 函数

$$Q_m = 0.156 S p_0 \varphi \sqrt{p/p_0} / \sqrt{T} \quad (\text{kg/s}) \quad (19-1-11)$$

在 $p/p_0 \leq 0.528$, 即声速流的质量流量为:

$$Q_m = 4.04 \times 10^{-2} S p_0 / \sqrt{T} \quad (\text{kg/s}) \quad (19-1-12)$$

在工程计算中, 有时用体积流量, 其值因状态不同而异。为此, 均应化成标准状态下的体积流量:

当 $p/p_0 > 0.528$ 时, 标准状态下的体积流量为:

$$Q_1 = 454 S p_0 \varphi \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{293}{T_0}} \quad (\text{L/min}) \quad (19-1-13)$$

当 $p/p_0 \leq 0.528$ 时, 标准状态下的体积流量为:

$$Q_1' = 454 S p_0 \sqrt{\frac{293}{T_0}} \quad (\text{L/min}) \quad (19-1-14)$$

各式中符号的意义和单位与式(19-1-7)相同。

1.3.7 充、放气系统的热力学过程

表 19-1-7

充放气系统模型	(a) 变质量系统模型	图 a 为充放气系统模型, 设从具有恒定参数的气源向腔室充气, 同时又有气体从腔室排出, 腔室中参数为 p、ρ、T, 由热力学第一定律可写出 $dQ + h_s dM_s = dU + dW + h dM \quad (1)$ 式中 h_s、h ——分别为流入、流出腔室 1kg 气体所带进、带出的能量 (即比焓) dM_s ——比气源流进腔室的气体质量 dM ——从腔室流出的气体质量 dU ——室内气体内能增量 dW ——室内气体所作的膨胀功 dQ ——室内气体与外界交换的热量
	(b) 定容积 (容) 放气	在气动系统中, 有容积可变的变质量气容, 如活塞运动时的气缸腔室、波纹管腔室等; 也有容积不变的定质量气容, 如贮气罐、活塞不动时的气缸腔室等 图 b 所示为容积 $V (\text{m}^3)$ 的容器向大气放气过程。设放气开始前容器已充满, 其初始气体参数 p_s、ρ_s、T_s, 放气孔口的有效面积 $S = \mu A$ (m^2), 放气过程中容器内气体状态参数用 p、ρ、T 表示

若放气时间很短, 室内气体来不及与外界进行热交换, 这种放气过程称为绝热放气。对于绝热放气, $dQ = 0$, 若只充气无充 h_s , 则 $dM_s = 0$, 由式 (1) 可得:

$$- \gamma R T dM = \gamma p dV + V dp \quad (2)$$

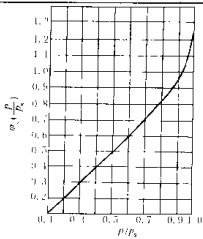
此式即为有限容积 (包括定积和变积) 气容的绝热放气能量方程式

在放气过程中, 气体流经放气孔口的时间很短, 且不计其中的摩擦损失, 可认为放气孔口中的流动为等熵流动, 故容器内气体温度为:

$$T = T_s \left(\frac{p}{p_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3)$$

绝 热 放 气 过 程	定 积 气 容 绝 热 放 气 时 间 计 算	从压力 p_1 到压力 p_2 为止的放气时间 $t = \dots 0.431V \left[\varphi_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \varphi_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right] \quad (4)$ $S \sqrt{T_*} \left(\frac{p_1}{p_*} \right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}}$ 式中 S——放气孔口有效面积, m^2; T_*——容器中空气的初始温度, K; V——定积气容的容积, m^3; p_*/p——孔口下游与上游的绝对压力比 当 $0 < p_*/p \leq 0.528$ 时, $\varphi_1(p_*/p) = (p_*/p)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}}$ 当 $0.528 < p_*/p < 1$ 时, $\varphi_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = \sigma^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} + 0.037 \left[\frac{p_*/p}{p_2/p_*} \cdot (p_*/p)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \varphi(p_*/p) \right]$ 与计时起点和终点压力比对应的值, 均可由图 c 直接得出; 若 $p_*/p_* < 0.528$, 式中分母 $(p_*/p_2)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} = \varphi_1(p_*/p_2)$ 亦可由图 c 确定 (c) 定积气容放气时间计算 用曲线 $\varphi_1(p_2/p_1)$ 和 $\varphi_2(p_2/p_1)$
气 容 的 放 气 过 程	定 积 气 容 等 温 放 气 时 间 计 算	当气容放气很慢, 持续时间很长, 室内气体通过器壁能与外界进行充分的热交换, 使得容器内气体温度保持不变, 即 $T = T_*$, 这种放气过程称为等温放气过程。在等温放气条件下, 气流通过放气孔口的时间很短, 来不及热交换, 且不计摩擦损失, 仍可视作等熵流动 在等温条件下, 从压力 p_1 到压力 p_2 为止的等温放气时间为: $t = \frac{0.08619V}{S \sqrt{T_*}} \left[\varphi_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \varphi_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right] \quad (5)$ 式中 V、S、T_*、p_*/p 的意义和单位同式 (4) 当 $0 < p_*/p < 0.528$ 时, $\varphi_2(p_*/p) = \ln(p_*/p)$ 当 $0.528 < p_*/p < 1$ 时, $\varphi_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = \ln \frac{p_2}{p_*} + 0.2588 \int_{p_2/p_*}^{p_*/p} \frac{d(p_*/p)}{(p_*/p)^2 \varphi(p_*/p)}$ 与计时起点和终点压力比对应的 $\varphi_2(p_*/p)$ 值均可由图 c 直接确定
气 容 的 充 气 过 程	绝 热 充 气 过 程	(d) 定积气容充气 图 d 所示容积的容器, 由具有恒定参数 p_0、ρ_0、T_0 的气源, 经过有效面积 S 的进气孔口向容器充气, 充气过程中容器内气体状态参数用 p、ρ、T 表示 假定容器的充气过程进行得很快, 室内气体来不及与外界进行热交换, 这样的充气过程称为绝热充气过程 对绝热充气, $dQ=0$, 若只充气无放气, 则 $dM=0$, 由式 (1) 可得 $\gamma RT_* dM_* = \gamma dp + \gamma \rho dV \quad (6)$ 此式即为恒定气源向有限容积 (包括定积和变积) 气容绝热充气的能量方程。此式与式 (2) 有重大区别, 由此式不能得出充气过程为等熵过程的结论 绝热充气过程中, 多变指数 $n = \gamma T_*/T$。当充气开始时, 容器内气体和气流温度均为 T_*, 多变指数 $n = \gamma$, 接近于等熵过程; 随着充气的继续进行, 容器内压力和温度升高, n 减小, 当压力和温度足够高时, $n \rightarrow 1$, 接近等温过程 对于定积过程, 若容器内初始压力 p_0, 初始温度 T_0, 则绝热充气至压力 p 时容器内的温度为: $T = \gamma T_* / \left[1 + \frac{p_0}{p} (\gamma - 1) \right] \quad (7)$

续表

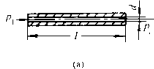
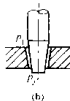
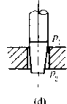
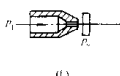
气容的充气过程	绝热充气	对于定积气容，在充气过程中，气体流经气孔口的时间很短，且不计摩擦影响，可认为气体在进气孔口中的流动为等熵流动。可得从压力 p_1 到压力 p_2 为止得绝热充气时间为： $t = \frac{6.156 \times 10^{-2} V}{\sqrt{T_1} S} \left[\varphi_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \varphi_1 \left(\frac{p_1}{p_1} \right) \right] \quad (\text{s}) \quad (8)$ 当 $0 < p/p_1 < 0.528$ 时，$\varphi_1(p/p_1) = p/p_1$ 当 $0.528 < p/p_1 < 1$ 时， $\varphi_1 \left(\frac{p}{p_1} \right) = 0.528 + 1.8116 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}} - \sqrt{1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right]$ 函数 $\varphi_1(p/p_1)$ 的值可由图 9 直接确定 式中 V——定积气容的容积，m^3 S——进气孔口有效面积，m^2 T_1——充气气源的温度，K p/p_1——进气孔口下游与上游的绝对压力比	 (c) 定积气容充气时间 计算用曲线 $\varphi_1(p/p_1)$
		当充气过程持续时间很长，腔内气体可与外界进行充分的热交换，使腔内气体温度保持不变，$T = T_1$ 时，这种充气过程称为等温充气过程。在等温充气过程中，气流通过进气孔口时间很短，来不及热交换，且不计摩擦影响，仍可视作等熵流动 定积气容等温充气过程可得从压力 p_1 至压力 p_2 为止的等温充气时间 $t = \frac{0.08619 V}{\sqrt{T_1} S} \left[\varphi_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \varphi_1 \left(\frac{p_1}{p_1} \right) \right] \quad (\text{s}) \quad (9)$ 式中各符号的意义和单位与式 (8) 同，函数值 $\varphi_2(p/p_1)$ 亦可由图 (c) 直接确定	

1.3.8 气阻和气容

在气动技术中，有时用分析电路的方法分析气动回路，于是引进了气阻和气容的概念。

表 19-18

气阻和气容的特性及计算

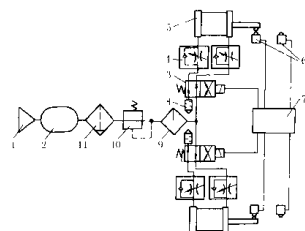
分 类		特 性 及 计 算 公 式		符 号 意 义			
气阻	按结构型式	恒定	如毛细管、薄壁孔	  	(a)	(b)	(c)
	按流量特征	可变	喷嘴-挡板阀、球阀				
	按结构型式	可调	针阀	  	(d)	(e)	(f)
	按流量特征	非线性	流动状态为层流，其流量与压力降成正比，因而气阻 $R = \Delta p / Q_m$ 为常数				
		非线性	流动状态为紊流，其流量与压力降的关系是非线性的	常用气阻型式 (a) 毛细管；(b) 圆锥-圆锥形针阀；(c) 薄壁孔； (d) 圆锥-圆柱形针阀；(e) 球阀；(f) 喷嘴-挡板阀			

分 类		特 性 及 计 算 公 式								符 号 意 义				
毛细管 恒节流孔 线性气阻		压缩空气流经毛细管时为层流流动, 其质量流量 Q_m , 体积气阻 R_V 和质量气阻 R_m 为:								Δp —— 气阻前后压力降, Pa, $\Delta p = p_1 - p_2$ d, l —— 气阻直径和长度, m ϵ —— 修正系数, 其值见下表				
		$Q_m = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \mu l} \Delta p \quad (\text{kg/s})$												
		$R_V = \frac{128 \mu l}{\pi d^4} \quad (\text{N} \cdot \text{s/m}^5) \quad R_m = \frac{128 \mu l}{\pi d^4 \rho} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s/kg})$												
毛细管气阻修正系数 ϵ														
l/d			500	400	300	200	100	80	60	40	30	20	15	10
ϵ		1	1.03	1.05	1.06	1.09	1.16	1.25	1.31	1.47	1.59	1.86	2.13	2.73
气阻 薄壁孔 恒节流孔 非线性气阻		长径比 l/d 很小的恒节流孔称为薄壁孔, 压缩空气流过薄壁孔时为紊流流动, 其质量流量 Q_m , 体积气阻 R_V 和质量气阻 R_m 为:								ω —— 薄壁孔中的平均流速, m/s A —— 薄壁孔流通面积, m ² μ —— 流量系数, 由实验确定。在一般估算时, 若取 p_1 为上游压力, p_2 为节流孔下游较远处的压力, 可取 $\mu = 0.6$				
		$Q_m = \mu A \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (\text{kg/s})$ $R_V = \rho \omega / [2 \mu A] \quad (\text{N} \cdot \text{s/m}^5)$ $R_m = \omega / [2 \mu A] \quad (\text{Pa} \cdot \text{s/kg})$												
气阻 环形缝隙式 可调线性 气阻		图 b 所示圆锥-圆锥形针阀的流通通道为一环形缝隙, 流体在其中的流动状态为层流, 其质量流量、体积气阻和质量气阻为:								ϵ —— 偏心修正系数, $\epsilon = 1 + 1.5e/\delta$ e —— 阀芯与阀孔的偏心量, m δ —— 缝隙的平均径向间隙, m d, l —— 缝隙的平均直径和长度, m μ —— 空气的绝对粘度, Pa·s				
		$Q_m = \frac{\pi d \delta^3 \rho}{12 \mu l} \Delta p \quad (\text{kg/s})$ $R_V = \frac{128 \mu l}{\pi d \delta^3 \epsilon} \quad (\text{N} \cdot \text{s/m}^5)$ $R_m = \frac{128 \mu l}{\pi d \delta^3 \rho \epsilon} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s/kg})$ 质量流量 Q_m 计算式也适用于气缸与活塞、滑阀等环形缝隙的泄漏量计算												
气容 容		由于气体可压缩, 在一定容积腔室中所容的气体体积将因压力不同而异。因而在气动系统中, 凡能储存或放出气体的空间 (各种腔室、容器和管道) 均有气容的性质。有定积气容和可调气容之分。而可调气容在调定后的工作过程中, 其容积也是不变的 一气室的气容在数量上就等于气室内发生单位压力变化所允许的气量变化值								V —— 气室的容积, m ³ n —— 多变指数。多变指数依压力变化快慢而定。如变化很慢, 能充分热交换时, 视为等温过程 $n=1$; 当变化很快, 来不及进行热交换时, 视为绝热过程 $n=\gamma=1.4$ 。实际气容的在 1~1.4 之间, 低频信号可取 $n=1$, 高频信号可取 $n=1.4$				
		$C_m = \frac{\int Q_m dt}{\Delta p} = \frac{dM}{dp}$ 工作过程中容积不变的多变质量气容和体积气容为: $C_m = \frac{V}{\gamma R T} \quad (\text{s}^2 \cdot \text{m})$ $C_V = \frac{V}{\rho \alpha R T} \quad (\text{m}^3/\text{N})$												

2 气动元件的选型计算

表 19-1-9

典型气动系统

典型气动系统图	组成基本元件	元件功能
一个气动系统往往包括气压传动系统和气动控制系统两部分  1—气压发生装置；2—贮气罐；3—方向控制阀；4—调速阀； 5—气动执行元件；6—传感元件；7—逻辑控制元件；8—消声器； 9—油雾器；10—减压阀；11—过滤器	(1) 气源设备	用于产生具有一定能量的压缩空气及管道气体处理的装置，如空气压缩机、冷却器及气罐等
	(2) 气动执行元件	用于能量转换的元件，如气缸、气马达等
	(3) 气动控制元件	用于控制工作介质的压力、流量和流动方向使执行元件完成所需运动规律的元件，如压力、流量和方向控制阀以及各种逻辑元件等
	(4) 传感元件和转换元件	将被控参数检测出来并变成气压信号的(气动传感元件(如各种传感器和行程阀等)以及将气信号与电、液等信号互相转换的元件
	(5) 气动辅件	包括气源净化、元件润滑、元件间连接和消声等元件

2.1 气源设备

产生、处理和储存压缩空气的设备称为气源设备，由气源设备组成的系统称为气源系统。典型的气源系统如图 19-1-5 所示。

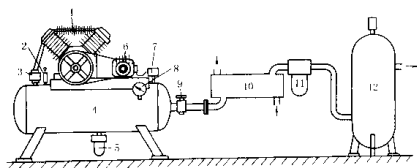


图 19-1-5 气源系统的组成

1—空气压缩机；2—安全阀；3—单向阀；4—小气罐；5—自动排水器；6—电动机；7—压力开关；8—压力表；
9—截止阀；10—后冷却器；11—油水分离器；12—气罐