

林文坡 编著

气动传动及 控制

西安交通大学出版社



气动传动及控制

林文坡 编著

西安交

TH138

社

气动传动及控制

林文坡 编著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述了气动传动与控制的基本知识,介绍了气动元件的工作原理,对气动逻辑、程序控制回路和连续生产过程控制系统进行了分析,着重讲述了阻抗匹配以及部分元件和系统的动态特性及其应用。

本书可作为高等工科院校流体传动与控制专业的教材和有关专业的教学参考书,亦可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

(陕)新登字 004 号

气动传动及控制

林 文 坡 编著

责任编辑: 林全

*

西安交通大学出版社出版

邮政编码 710049

西安交通大学出版社电脑排版

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 11.375 字数 268 千字

1992 年 6 月第 1 版 1992 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—2000

ISBN7-5605-0472-8/TH·24 定价: 6.20 元

前 言

本书是在多年来我校教学使用的讲义的基础上编写而成的，汇集了国内外气动传动及控制的最新资料及个人的科研成果。全书共有四章：第一章介绍气动的特点及有关主要元件的基础知识；第二章介绍气动传动；第三章介绍气动逻辑控制；第四章介绍气动连续控制。其重点在后两章。书中对气动系统要求阻抗匹配进行了论述，对一些主要的气动元件及装置的传递函数进行了推导，对气动自动调节系统几种主要的典型回路进行了分析，并列举了一些典型应用的实例。本书旨在培养读者关于分析和设计简单可靠、调试方便的气动控制系统方面的能力。

本书在编写过程中，许多同志提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中有缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 著 1991 年 6 月

绪 言

气动传动及控制简称气动，是指以压缩空气为工作介质传递信号和动力，控制和驱动各种机械以及其它生产设备，实现生产过程机械化和自动化的一种技术。

提起生产过程自动化，人们很自然地把它与电子技术联系起来，但这仅仅是自动化的一种手段。为了逐步提高各部门生产过程自动化程度，还应当广泛地从各种动力源的自动化技术工具领域去寻找出路，其中包括气动技术工具。虽然很早就使用了以压缩空气为介质的作功机器，但是把它应用在自动化中还是 20 世纪 40 年代才发展起来的一门新技术。以空气作为介质的气动传动及控制具有防火、防爆、防电磁干扰、不受放射线的影响、无污染、结构简单、工作可靠、经济、对环境温度适应的范围广等一系列的优点。所以，在近代新兴的电子工业飞跃发展并获得广泛应用的情况下，气动自动装置及设备也同样得到迅速的发展，并在工农业及国防等各个领域中与液压、机械、电气和电子技术一起作为自动化的一种手段，互为补充，广泛应用。而且气动自动装置在将来也仍然是基本的自动化技术工具之一。

气动与液压是流体传动与控制以介质区分的两个分支。气动是以压缩空气作为传递信号和动力的介质，通过控制回路，由气缸或气马达使工作机得到所需要的直线运动或回转运动，以达到生产过程自动控制的目的。气动控制系统可以实现断续控制和模拟控制，特别适用于实现快速和驱动负荷力要求不大的各种机械运动。它已成为实现生产过程机械化和自动化不可缺少的一种重要手段。

气动能在许多工业部门及国防中得到广泛的应用，是由于它具有一些独特的优点：

① 气动传动与控制是采用以各种类型的气动元件和配套装置组成断续和连续控制的开周以及闭周的各种控制回路，以实现一般工业机械化和自动化的要求。它既可实现全气动的控制，又可以方便地实现电-气、气-液混合控制，取长补短，满足生产过程自动控制的要求。

② 由于工作介质是用空气，取之不尽，用之不竭，既不花费成本，又不会污染环境，用后可直接或通过消声器，使噪声减少到允许的范围以内排入大气中。压缩空气蓄能方便，只要设置储气罐就可以进行蓄能，所以气动控制系统能够用较小的能源设备，在一定的时间内输出较大的功，而且在压缩机短暂停机时，装置中仍然可以维持一个稳定的压力。由于空气的粘性很小，所以流动的阻力小，在管道中流动的压力损失较小，一般只有油路的千分之一，所以空气介质能够集中供应和远距离传输。空气流速大时可使系统动作迅速，反应快。气体是可压缩的，所以制动方便。

③ 气动执行机构与电动执行机构比较，具有连续性好、防火防爆、价格便宜等优点。所以，绝大多数具有管道生产流程的生产部门（如石油加工、化工等部门）往往采用气动执行机构。这是由于具有管道生产过程的参数调节绝大多数是用调节阀进行调节的，而调节阀都比较大，要求有较大的力才能动作，同时又要求能连续调节，在调节对象惯性较大的情况下，系统的动态误差不至于过大，所以不能动得太快，若采用鼓膜式气动调节阀，技术条件既易满足，结构又简单经济，而且本身不需要防火、防爆。在选用某种装置时，首先要考虑用什么样的执行机构。采用气动执行机构后，一个自动化系统所使用的输入、输出的工作介质和信号一致的元件越多，需用的

转换元件就越少，组成的系统也越简单。这不但能够降低成本，而且可以得到一个更可靠的系统，故从全盘考虑，中小企业采用气动控制装置的好处是显而易见的，尤其是采用真空吸盘，吹气以及气体运输等。应用气体本身作为执行器更具有独特的优越性。

④气动传感器有独特的功能，除仪表厂生产的一些气动传感器外，有许多功能其他传感器所没有的，如背压式感测器常常只在测量头或夹具上开一个小孔，就能测量尺寸，判断物体存在与否，而且这种测量是非接触式的。这种传感器的用法也是多种多样的，如图1所示印刷双张检测器。这是一种用于印刷机上防止两张纸同时进入印刷机而出现白页的装置。

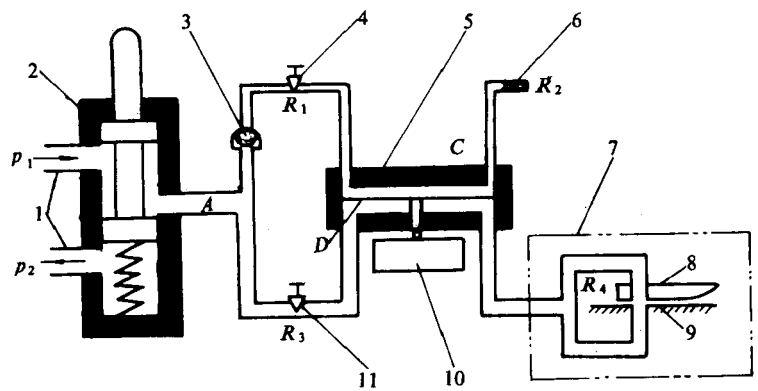


图1 气桥双张检测器

1—气源管道；2—供气阀；3—阀门；4—比较压力调节阀；5—双室气电转换器；
6—恒气阻；7—双张吸头；8—吸头；9—机器台面；10—限位开关；11—吸力调节阀；
 p_1 —吹气压力； p_2 —吸气压力

检测时，供气阀2的阀芯由机器自动压下，检测装置与吸气口（压力为 p_2 ）相通，而与压力口（压力为 p_1 ）切断。这时气流分别由恒气阻6（ R_2 ）和吸头8（ R_4 ）吸入。由 R_2 吸入的气流经过气室C，比较压力调节阀4（ R_1 ），阀门3和供气阀2，然后进入抽气泵。而吸入 R_4 的气流，经过气室D， R_3 供气阀2也进入抽气泵。当吸头中无纸或者只有一张纸时，吸头上总有一孔通大气，而气阻 R_4 比 R_2 小，所以D室内的压力要比C室的压力大，在压差的作用下，中间膜片上升。当出现双张纸进入吸头时，上下气孔同时被堵死，这时气阻 R_4 变大，D室内的压力要比C室低，膜片向下移动，限位开关10接通，发出信号，让双张纸离开印刷机。

⑤耐高温性强，能在高温的情况下可靠地进行工作。液压一般允许的工作温度在50—60℃之间，而电子元件要求在70℃以下工作。气动可以在200℃或更高的温度下工作，所以设置环境和利用条件的自由度比较大，而不需要采取复杂的绝热保护措施，因此适用于冶炼、烧结和电力等较高温度的场合。在航空工业中，由于喷气技术的发展，严重的问题不是“音障”而是“热障”。当在300—500℃高温下工作时，电子控制装置必须增设冷却装置，这就使飞机的重量加大，制造成本增加，所以现代飞机上大量采用气动控制装置。同样，在火箭和导弹中也广泛地采用气动控制装置，它除了能承受高温外，还能承受很大的加速度。

⑥结构简单，价格便宜。在气动装置中，即使是较复杂的调节规律或逻辑关系，其结构都是比较简单的。如在气动发讯测量中，有时只要开一个小孔即可。而在某些方面，空气用于执行机构，如吹动物件、气力运输等，系统结构都比较简单，安装的自由度也大。气动元件一般精度较低，易于加工。由于空气工作的压力较低（一般为0.5MPa），所以元件可以用有色金属或塑料

进行压制，成本较低。因此，在量大面广的技术改造中，采用气动装置投资少，见效快。

⑦安全可靠，寿命长，维修方便。气动装置能在强腐蚀、辐射、磁场、多灰尘、潮湿、冲击振动等恶劣的环境下安全地工作。它的使用寿命一般为 500 万次。维修方便，维修人员只要基本掌握气动技术就可以进行维修工作。

事物总是一分为二的。由于气动是应用压缩空气为介质的，所以信号传递的速度比较慢，仅限于声速范围，故不宜用于信号传递速度要求高的复杂线路中，但在一般工业系统中气动信号的传递速度是可以满足的。由于空气是可压缩的介质，因此当外界负载变化时，工作速度的稳定性较差，所以在要求运动速度均匀稳定时，要采用气液阻尼缸或伺服系统才能得到较好的效果。由于压缩空气的压力较低，气动元件的尺寸又不宜过大，因而总的推动力较小。

总之，由于气动传动与控制有许多优点，因此，近年来发展迅速，而且被越来越多的工业部门所采用。它除了在石油、化工、电力等连续生产过程自动调节系统中大量应用外，还常用于尺寸测量，工夹具的执行机构等。真空吸盘、气动逻辑元件等结合起来，可应用于机械制造的冷加工和热加工，以及纺织、轻工、生产装配线和机械手等。由于直接采用气动自动控制元件进行控制，推动执行机构，不必进行信号和介质的转换，设计、维修和使用都很方便，机械部分和自动控制部分的设计，可以统一考虑。气动系统的设计、制造周期短，成本低，效率高，轻便灵活，因此，气动传动及控制可作为一种廉价的技术手段，具有推广的意义。

气动控制与其它控制的性能比较列在表 1 中，供选用时参考。

表 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 (可达几十吨)	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

目 录

绪 言

第一章 气动传动与控制基础知识

§ 1-1 空气的性质	(1)
1. 空气的组成	(1)
2. 空气的压缩性和膨胀性	(1)
3. 空气的重度与密度	(2)
4. 空气的粘性	(2)
5. 空气的状态方程	(3)
6. 湿空气与压缩空气	(3)
§ 1-2 气体的状态变化过程	(4)
1. 定容变化过程	(4)
2. 等压变化过程	(4)
3. 等温变化过程	(5)
4. 绝热变化过程	(5)
5. 多变过程	(6)
§ 1-3 气体的流动	(6)
1. 连续性方程	(7)
2. 可压缩气体的能量方程式 (伯努利方程)	(7)
3. 热量形式的能量方程式	(8)
4. 空气的音速与马赫数	(8)
5. 通过节流喷嘴的流速和流量	(9)
6. 缩放形喷管 (拉伐尔喷管)	(11)
§ 1-4 气动阻容元件	(12)
1. 气阻	(12)
2. 气容	(13)
3. 阻容元件及充、放气的时间	(14)
§ 1-5 气动喷嘴挡板放大器	(21)
§ 1-6 气动功率放大器	(25)
1. 断续型的功率放大器	(25)
2. 连续型功率放大器	(26)

第二章 气动传动

§ 2-1 气动执行元件	(33)
1. 普通气缸的性能	(33)
2. 几种特殊气缸	(40)
3. 冲击气缸及其应用	(44)
4. 气液传动装置	(49)

§ 2-2 气动控制阀	(53)
1. 压力控制阀	(53)
2. 流量控制阀	(59)
3. 方向控制阀	(60)
4. 气动辅助元件	(67)
§ 2-3 气动传动系统的举例	(72)
1. 射芯机气动系统	(72)
2. 晶体管封帽机 (P-102) 气动传动回路	(72)
第三章 气动逻辑控制	
§ 3-1 逻辑运算的基本符号和术语	(77)
§ 3-2 气动逻辑元件	(80)
1. 截止式逻辑元件	(80)
2. 射流元件	(87)
§ 3-3 逻辑代数的基本运算及在气动控制中的应用	(92)
1. 逻辑代数的基本公式	(93)
2. 逻辑表达式的变换和化简及在自动控制中的应用	(94)
3. 卡诺图及其应用	(98)
4. 最小化或非元件回路的设计	(104)
§ 3-4 位置程序控制线路的设计	(107)
1. 信号-动作的状态图	(109)
2. 单往复行程程序控制线路的设计	(111)
3. 多往复行程程序控制线路的设计	(119)
§ 3-5 脉冲随机障碍及 RC 消障	(122)
§ 3-6 通用程序控制回路	(124)
§ 3-7 一些特殊的基本回路	(126)
1. 气动放大器应用回路	(126)
2. 同步动作回路	(126)
3. 气缸在中途停止回路	(127)
4. 往复动作回路	(127)
第四章 气动连续控制	
§ 4-1 气动变送器	(130)
1. 气动差压变送器的结构和动作原理	(130)
2. 特性分析	(131)
§ 4-2 气动调节器	(133)
1. 比例调节单元	(133)
2. 积分调节单元	(138)
3. 比例积分调节单元	(139)
4. 比例微分调节单元	(145)
5. 三作用的调节单元	(149)

6. 双位调节规律.....	(155)
§ 4-3 气动调节器的应用举例	(156)
1. 被调对象的特性简述.....	(156)
2. 气动调节器在单回路自动调节系统中的应用.....	(158)
3. 气动调节器在多回路自动调节系统中的应用.....	(161)
4. 气动调节器在前馈-反馈自动调节系统中的应用	(164)
5. 气动调节器在解线性系统微分方程中的应用	(166)
参考文献	

第一章 气动传动与控制基础知识

由于气动传动与控制是直接利用具有压力的空气作为工作介质，使气动装置实现机械运动的，所以从气动元件的设计原理到管路的联结等无不涉及有关气体力学方面的问题。本章仅针对气动控制技术的要求，介绍一些气体流动的基本知识，以及气动装置中主要的基本元件。

§ 1-1 空气的性质

1. 空气的组成

自然界的空气实际上是由若干种气体混合组成的。在标准状态下测定空气成分如表 1-1 所示。

表 1-1 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(%)	78.09	20.95	0.93	0.03	约占 0.07
重量(%)	75.53	23.14	1.28	0.05	

空气里或多或少都含有一定量的水蒸汽。把不含水蒸汽的空气叫做干空气，而把含有水蒸汽的空气叫做湿空气。大气中的空气基本上都是湿空气。氮和氧是空气中含量最多的两种成分，它们的体积比约是 4:1。空气的分子量 $M = 28.962$ 。

2. 空气的压缩性和膨胀性

气体与固体和液体比较其分子间的距离相当大，空气分子间距约为分子直径 ($3.72 \times 10^{-8} \text{cm}$) 的 9 倍 (大约 $3.35 \times 10^{-7} \text{cm}$)，所以分子的运动是很自由的。把运动着的气体分子由运动的起点到与其他分子碰撞之间的运动距离叫做自由行程。其长度对每个分子都是不同的。但在气体的压力和温度确定之后，自由行程的平均值也是确定的，即所谓平均自由程。空气的平均自由程，在标准状态下为 $6.4 \times 10^{-6} \text{cm}$ ，约为空气分子直径的 170 倍。空气的压力就是由于分子运动时碰壁动量变化所产生的力。

由于空气分子间的距离大，所以分子间相互作用的内聚力小，故气体体积的变化容易实现。如在压力的作用下，气体可以被压进一个空间里，随着压进气体量的增加，压力也逐渐升高，气体被压缩了。相反，如果把一个小空间内一定量的气体，移到一个比原来大的空间里，由于气体总是能够均匀地充满整个空间，于是体积膨胀了，但是压力降低了。气体的温度变化也能改变自身的体积。

值得注意的是，流体的压缩性和膨胀性对液体和气体是大不相同的，对液体来说是很小的，但对空气来说，随着温度和压力的变化，气体的重度和体积的变化是相当大的，这也是气体和液体主要的区别之一。在实际工程中，若气体处在压力和温度不变或变化很小的状态

下, 由于气体的重度并不发生变化或变化很小, 因此, 可以把它看作一个常数。此外根据理论和实践证明, 当气体流动时, 只要流速远小于音速, 气体的重度变化也是很小的。如流速为 50m/s 以下, 密度只变化约 1% , 在这种情况下可以把气体看作不可压缩的, 这样处理将使问题大为简化。

3. 空气的重度与密度

由于气体没有一定的形状, 其体积是由容器的容积决定的。因此研究与气体有关的力学问题时, 只提它的重量是不够的, 还必须提及它所占的体积为多少, 即所谓重度。空气的重度 γ 是单位体积内空气的重量, 即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-1)$$

式中 G —— 空气的重量 N

V —— 空气的体积 m^3

空气的密度是单位体积内空气的质量, 用 ρ 表示, 即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\gamma}{g} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-2)$$

式中 m —— 空气的质量 kg

g —— 重力加速度 m/s^2

气体的重度 γ 和密度 ρ 与气体的压力及温度有关, 在其他条件不变时, 压力增加, γ 与 ρ 也增加; 温度增加, γ 与 ρ 则减小。当压力为不同值时, 任意温度 t 的干空气的重度 γ 为

$$\gamma = \gamma_0 \frac{273}{273 + t} \times \frac{p}{1.013} = 3417 \frac{p}{T} \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-3)$$

式中 $T = 273 + t$ —— 绝对温度 K

γ_0 —— 温度为 273°C , 压力为 0.101MPa 时干空气的重度 ($\gamma_0 = 12.65 \text{ N/m}^3$)

当 $p = 0.101\text{MPa}$ 时, 空气的重度、密度和温度的关系列于表 1-2 中。

表 1-2 空气的密度与重度

温度 t ($^\circ\text{C}$)	-20	0	20	40	60	80	100	120
重度 γ (N/m^3)	12.73	12.65	11.77	10.99	10.40	9.81	9.32	7.32
密度 ρ (kg/m^3)	1.39	1.29	1.21	1.13	1.06	1.00	0.94	0.75

4. 空气的粘性

空气和液体一样, 由于具有流动性, 所以在流动时相邻各层次之间要作相对运动, 这就产生内摩擦切应力来阻止这种相对运动的发生, 这个特性称为空气的粘性。粘性的大小表示流动时摩擦阻力的大小及流体变形快慢的程度。粘性的大小用粘性系数或动力粘度 μ 表示。

动力粘度与密度的比值称为运动粘度, 用 ν 表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-4)$$

粘度与压力和温度有关, 当 $p = 0.101\text{MPa}$ 时, 动力粘度和运动粘度与温度的关系列于

表 1-3.

表 1-3 空气粘度

温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	动力粘度 $\mu(\text{Ns}/\text{m}^2)$	运动粘度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$
0	1.710×10^{-5}	1.322×10^{-5}
10	1.760×10^{-5}	1.410×10^{-5}
20	1.809×10^{-5}	1.501×10^{-5}
30	1.852×10^{-5}	1.594×10^{-5}
40	1.904×10^{-5}	1.689×10^{-5}
50	1.951×10^{-5}	1.786×10^{-5}
60	1.998×10^{-5}	1.885×10^{-5}
70	2.044×10^{-5}	1.986×10^{-5}
80	2.089×10^{-5}	2.089×10^{-5}

从表 1-3 可以看出, 如果空气的粘度与液体的粘度比较, 其数值要小得多。特别要注意的, 对空气来说, μ 和 ν 的值随温度增大而增大。

5. 空气的状态方程

空气是一种实际存在的气体, 是有粘性的, 严格地说, 它是不遵守理想气体法则的。但是为了研究的方便, 同时考虑到空气粘度较小, 粘性力的作用远小于压力、重力等的作用, 因此可以不计粘性力的作用, 把它看作理想气体。所以, 有如下气体状态方程成立

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

实践证明只有当气体压力高于几百个大气压, 或温度很低时, 才需要用实际气体状态方程式进行修正。如空气在 $p=20\text{MPa}$ 时, 温度在 $-20\sim+50^{\circ}\text{C}$ 之间用理想气体状态方程式计算的结果, 才与实际值有 4% 的误差。而在气动传动或控制中, 气体压力通常都在 1MPa 以下, 完全可以把它看作理想气体, 并不会引起很大的误差。

6. 湿空气与压缩空气

自然界的空气基本都是湿空气。湿空气中的水蒸汽也可以变为水滴 (液化)。当蒸发多于液化时, 空气有继续“吸收”水分的能力, 但空气中含水蒸汽的量是由压力和温度决定的。在一定的压力和温度条件下, 含有最大限度水蒸汽量的空气叫做饱和湿空气。一般的湿空气都处于未饱和状态。

在气动控制或传动中所用的空气是通过压缩机把自由状态的空气压缩为具有一定压力的压缩空气, 供气动装置作为能源。自由状态的空气经过压缩后, 其体积必然减小, 使原来在较大体积内含有的水蒸汽要被挤压到小的体积里, 单位体积里所含的水蒸汽量增大。虽然这时压力上升,

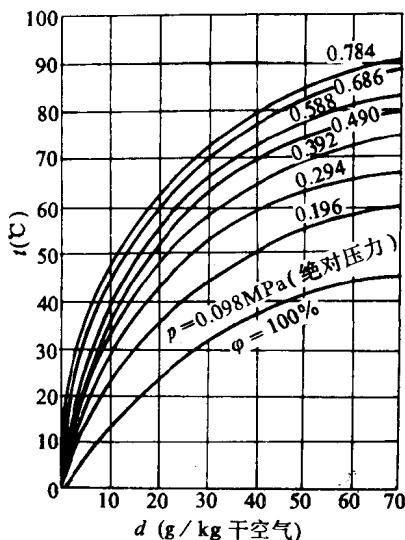


图 1-1 压缩空气饱和含湿量

伴随着温度也上升,但其中超过饱和部分的水蒸汽将在压缩后的冷却器中析出,因此总的水蒸汽含量是减少了,但这时的空气应是饱和的压缩湿空气。由于湿度大的压缩空气会使气动元件腐蚀生锈,而且在温度下降时会析出水分阻塞管道。这对气动控制系统的稳定性和寿命有很大的影响。所以,在贮气罐的后面要装分离器,对要求较高的气动仪表所用的压缩空气还要进行烘干和吸收等处理,以降低其含水蒸汽的量。

为了知道压缩空气中所含水蒸汽的量,工程技术中已制定出不同温度和压力下压缩空气饱和含湿量的值。根据气动控制技术的要求,在图 1-1 中绘出不同温度和压力 $p \leq 0.784\text{MPa}$ 时,压缩空气的饱和含湿量。

§ 1-2 气体的状态变化过程

对一定质量的气体,从开始的状态 p_1, v_1, T_1 变化到状态 p_2, v_2, T_2 叫气体状态变化。在变化过程中不加任何条件限制,且接近实际过程的变化过程称多变过程。在变化过程中,如加以条件限制则有下列几种情况:

1. 定容变化过程

对质量为 1kg 的气体,当容积不变时,温度由 T_1 变化到 T_2 ,压力由 p_1 变化到 p_2 的过程称为定容变化。如气罐中的气体,由于外界加热或冷却引起的状态变化,可以看成定容变化过程。定容变化 $p-v$ 曲线如图 1-2 所示。

因为定容 $v_1 = v_2$, 所以由式 (1-5) p, v, T 间的关系可变为

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots = \frac{R}{T} = \text{常数} \quad (1-6)$$

式中 p —— 绝对压力 N/m^2

T —— 绝对温度 K

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

v —— 比容 m^3/kg

从式 (1-6) 中看出,压力和绝对温度成正比。因为容积不变 $dv=0$, 所以气体对外不作功,但是气体随压力增加温度要上升。质量 1kg 的气体由 T_1 升到 T_2 需要的热量为

$$q_v = c_v(T_2 - T_1) \quad (1-7)$$

式中 c_v —— 定容比热,是质量为 1kg 的气体,当体积不变,温度升高 1°C 所需的热量。

2. 等压变化过程

对质量为 1kg 的气体,当压力保持不变,温度由 T_1 变到 T_2 ,比容由 v_1 变到 v_2 称为等压变化过程。如气体由于加热而自由膨胀的过程。等压变化过程的 $p-v$ 曲线如图 1-3 所示。

由于等压变化 $p_1 = p_2$, 所以由式 (1-5) p, v, T 间的关系可变为

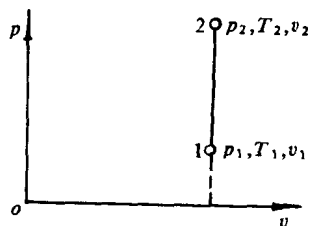


图 1-2 定容变化 $p-v$ 曲线

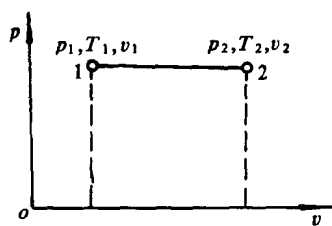


图 1-3 等压变化 $p-v$ 曲线

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \dots = \frac{R}{T} = \text{常数} \quad (1-8)$$

等压变化时，比容和绝对温度成正比，气体对外所做的功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \quad (1-9)$$

这时所需要的热量为

$$q_p = c_p(T_2 - T_1) \quad (1-10)$$

式中 C_p 是使 1kg 的气体在等压下自由膨胀，温度升高 1℃ 所需要的热量，称为定压比热。等压变化的气体热量除内能变化外，还要对外做功，所以

$$q_p = c_v(T_2 - T_1) + AW \quad (1-11)$$

式中 A —— 热功当量

由式(1-9), (1-10), (1-11)解得

$$c_p = c_v + RA$$

设 $K = \frac{c_p}{c_v}$

$$c_p - c_v = AR = c_v(K - 1) = c_p\left(\frac{K - 1}{K}\right) \quad (1-12)$$

K 也称绝热指数，对于空气 $K = 1.4$ 。

3. 等温变化过程

对质量为 1kg 的气体，在温度不变的条件下，压力由 p_1 变到 p_2 ，比容由 v_1 变化到 v_2 称等温变化过程，如图 1-4 所示。在工程中一般气体状态变化很缓慢进行的过程，如经过小孔的充气或放气的过程，可以看作等温过程。

由于等温变化 $T_1 = T_2$ 则气体状态方程为

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \dots = RT = \text{常数} \quad (1-13)$$

在等温变化时，气体压力与比容成反比。这样的变化过程中没有内能的变化，所加入的热量全部变成气体对外所做的功。等温过程气体所做的功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv = RT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1-14)$$

4. 绝热变化过程

上面几种状态的变化过程都伴随着热量的吸入或放出，即与外界进行热量交换。如定容和等压变化过程，加热则吸热，冷却则散热。等温变化过程，压缩时要放出热量，膨胀时要吸入热量。一定质量的气体与外界没有热量交换所进行的状态变化过程，称绝热变化过程。在工程技术中，如空压机的气缸里，活塞在气缸里很快地运动，气体中的热量来不及与外界进行热交换（散热或吸热），这样的过程可以看作是绝热过程。

由于绝热过程 $dq = 0$ ，所以

$$dq = c_v dT + A p dv = 0 \quad (1-15)$$

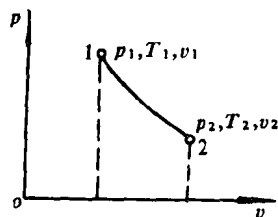


图 1-4 等温变化 $p-v$ 曲线

在绝热过程中气体状态参数 p, v, T 都是变量。气体状态方程的微分式为 $RdT = pdv + vdp$ 代入式 (1-15) 得

$$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} + \frac{AR}{c_v} \frac{dv}{v} = 0$$

由于 $\frac{AR}{c_v} = K - 1$, 积分得

$$pv^k = C \quad (1-16)$$

式 (1-16) 表示在绝热过程中气体压力和容积之间的关系式, 称为绝热方程式。p-v 曲线如图 1-5 所示。

在绝热过程中, 气体所作的功

$$W = \int_{v_1}^{v_2} pdv = C \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^k} = \frac{p_1 v_1}{1-k} \left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-17)$$

5. 多变过程

要实现绝热过程, 气体应当放在完全热绝缘的容器中, 自然界中是不存在的, 所以实现完全理想的绝热过程是不可能的, 当然也不可能是完全等温的。因此, 需要有一个包括各种状态变化的一般公式。这种变化过程称多变过程, 可以用下式表示

$$pv^n = \text{常数}$$

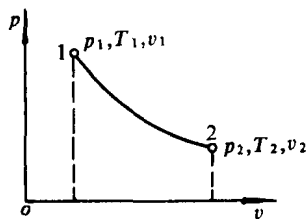


图 1-5 绝热变化 p-v 曲线

式中, n 为多变指数, 它是一个任意的常数。前四种变化过程是多变过程的特例, 表现在指数 n 不同。严格地说气体变化过程多属多变过程。但在工程实际中, 只要过程变化进行比较缓慢, 如通过小孔充放气, 我们认为气体与外界充分地进行热量交换, 也就认为是等温的。如果过程进行得非常迅速, 以至于来不及与周围介质进行热交换, 这样的过程认为是绝热过程。

§ 1-3 气体的流动

在液压传动中, 把流体看作是不可压缩的。而气体运动时总会伴随着压力的变化。由于这种压力变化而引起气体密度的变化是不可忽略的。当气流运动速度比较大时 (接近音速), 这种效应尤为显著, 这与不可压缩流体运动规律完全不同。但是当气体在管道中以低速运动, 而且温度和周围温度接近时, 它的运动规律和液体一样, 可以把气体当作不可压缩的流体来看待。一般, 流动着的气体, 在没有其它外界原因使其压力变化的条件下, 当其速度小于 70 m/s 时, 因速度变化而引起的重度 γ 变化很小, 经常可当作不可压缩流体来处理。而空气在管道中输送时, 其速度一般小于 30 m/s , 温度也和环境温度差不多, 因此可以当作不可压缩流体来处理。

气体的流动状态, 一般说来是时刻发生变化的。但研究一定的管路, 气流的方向、压力、速度、流动状态不随时间而变化时, 这种流动状态就叫做稳定流动。反之, 则叫做不稳定流动。例如气缸在一定的压力、负载的作用下, 活塞以一定的速度运动, 这时的空气流动

状态可以看作是稳定流动。但在活塞刚起动，或即将停止的过渡阶段，也是不稳定流动。又如贮气罐充气、放气，罐内的压力时刻在发生变化，属于不稳定流动状态。而自一定压力的贮气罐向大气中徐徐放气时，罐内可认为是稳定流动状态。

在管道中流动的流体，在某一截面上，各点的压力、速度等物理量均相同，这种流动状态叫做均匀流动。反之，为不均匀流动。如在等截面的长直管内做稳定流动时，可以认为是均匀流动。而在弯头、变径管、阀门等产生局部阻力之处的流动都属于不均匀流动。

1. 连续性方程

气体流动同样遵守物质不灭定律。气体在流线管内做稳定流动时，在单位时间内流过任一截面的气体质量应是相等的，即

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dots = \text{常数} \quad (1-18)$$

式中 A_1, A_2 —— 任意两截面1, 2处的截面积

u_1, u_2 —— 通过截面1, 2时的流速

ρ_1, ρ_2 —— 通进截面1, 2时气体的密度

这个方程称流量方程，也称连续性方程。它的微分形式

$$d(\rho u A) = 0 \quad (1-19a)$$

或

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (1-19b)$$

如果气体流速较低，则密度变化可以忽略，这时可把气体流动看作不可压缩流体流动，即速度与流通截面积成反比。如果流速大，则密度的变化也大，这时与不可压缩的流体相差很大，特别是到了音速以后，气体流动的性质与不可压缩流体完全不同了。一般， $u > 100 \text{ m/s}$ 时，还按不可压缩流体处理，其计算误差就比较大了。

2. 可压缩气体的能量方程式（伯努利方程）

把气体看作理想气体，在稳定流动的情况下，如果忽略其重力的作用，在流管中取流体微元体如图 1-6 所示，微元体沿运动方向所受的力，当忽略高阶小量时为

$$pA - (p + dp)(A + dA) = -d(pA)$$

动量的改变率

$$\begin{aligned} \frac{d(mu)}{dt} &= (\rho + d\rho)(A + dA)(u + du)^2 - \rho Au^2 \\ &= Au^2 d\rho + 2Aupdu + \rho u^2 dA = d(\rho Au^2) \\ &= ud(\rho Au) + \rho Audu = \rho Audu \end{aligned}$$

根据动量定理，当 A 为常数时

$$\begin{aligned} -d(pA) &= \frac{d(mu)}{dt} = \rho Audu \\ udu + \frac{dp}{\rho} &= 0 \end{aligned}$$

积分得

$$\frac{1}{2}u^2 + \int \frac{dp}{\rho} = \text{常数} \quad (1-20)$$

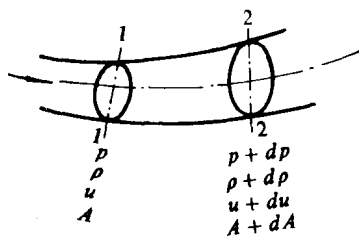


图 1-6 流体微元体