

普通高等教育“十二五”规划教材

气动电子技术

陶国良 刘昊 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材



机械工业出版社

机械工业出版社

本书共分为8章,第1章对气动电子技术进行了概要说明,第2章介绍了气动基础知识,第3~6章分别讲述了空气压缩机及净化处理装置、气动执行元件、气动控制元件和真空元件等气动电子关键元件的类型、工作原理和性能特性,第7章着重讲述了气动步进控制系统与PLC电气步进控制系统,第8章介绍了气动电子技术在不同领域的应用实例。本书在较全面地阐述有关气动电子技术基础理论和原理的同时,力求反映气动电子技术领域发展的最新成就,并注重通过各种典型元件和应用系统的实例分析,使读者掌握气动电子自动化系统的分析和设计方法。

本书适合高等工科院校机械电子工程、机械工程、机械设计制造及其自动化等专业本科生的教学之用,也适用于各类成人高校、自学考试有关机械工程类专业的学生,还可供工程技术人员参考。作为研究生用书时,部分章节应适当加深。

普通高等教育“十二五”规划教材

图书在版编目(CIP)数据

气动电子技术/陶国良,刘昊编著. —北京:机械工业出版社,2014.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-45693-3

I. ①气… II. ①陶…②刘… III. ①气动技术—电子技术—高等学校—教材
IV. ①TP6②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第023201号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 孙阳 刘小慧

版式设计:常天培 责任校对:闫玥红

封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·7.75印张·183千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45693-3

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工微博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着现代装备制造工艺的提高和微电子技术的发展,气动技术已经与电子技术紧密结合,出现了大量新型气动电子一体化的自动化产品,气动电子技术也逐渐在气动系统原有特点的基础上发展成熟,并形成了自己的特点,在工业、农业、医疗救护和国防等领域都得到了广泛的应用。为了培养掌握现代气动电子技术的专业人才,满足高校机械电子工程(机电一体化)专业的教学需要,特编写本书。

本书的内容组织注重基础性、系统性和先进性,在较全面地阐述有关气动电子技术基础理论和原理的基础上,力求反映气动电子技术领域发展的最新成就,并注重通过各种典型元件和应用系统的实例分析,使读者掌握气动电子自动化系统的分析和设计方法。

使用本书,读者可以从本书的第1、2章了解气动技术的一些基本概念和理论,打好对气动系统进行理论分析和建模仿真的基础。从第3章到第6章可以见到目前气动行业各类常见的气动电子关键元件,并熟悉其工作原理和性能特性,方便读者进行元件选型或新元件的创新设计。通过第7章气动步进控制系统设计方法和第8章气动电子技术在各个领域应用实例的介绍,读者可以学习应用气动电子技术进行自动化控制系统设计的方法,获得实际气动电子自动化控制系统的设计、实施能力。

本书适合高等工科院校机械电子工程、机械工程、机械设计制造及其自动化等专业本科生的教学之用。作为研究生用书时,部分章节应适当加深。

全书由陶国良、刘昊编著。第1章,第2章及第5章1节由刘昊编写,第3章,第4章,第5章2、3节,第6~8章由陶国良编写。徐南平为本书部分插图的绘制提供了帮助。

在编写过程中,我们参考并引用了大量有关气动电子技术相关领域的论著和资料,限于篇幅,不能在文中一一列举,在此一并对其作者致以衷心的感谢。

由于编者学识有限,书中内容难免存在不足和疏漏之处,敬请广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言	3.1.6 空压机的控制方式	23
第1章 绪论	3.2 空压机的辅助装置	24
1.1 气动电子技术的特点	3.2.1 气罐	24
1.2 气动电子控制系统的基本组成	3.2.2 吸气过滤消声器	24
第2章 气动基础知识	3.2.3 后冷却器	25
2.1 干空气与湿空气	3.2.4 干燥器	26
2.2 空气的质量等级	3.3 供气系统	27
2.3 空气的热力学性质	3.3.1 气源	27
2.3.1 功	3.3.2 供气管道布置	27
2.3.2 热量	第4章 气动执行元件	29
2.3.3 热力学第一定律	4.1 概述	29
2.4 理想气体的热力过程	4.2 气缸	29
2.4.1 理想气体的状态方程	4.2.1 气缸的分类	29
2.4.2 定容过程	4.2.2 单作用式气缸	30
2.4.3 定压过程	4.2.3 双作用式气缸	32
2.4.4 定温过程	4.2.4 无杆气缸	33
2.4.5 绝热过程	4.2.5 冲击气缸	34
2.4.6 多变过程	4.2.6 锁紧气缸	35
2.5 气动元件的流量特性	4.2.7 导向气缸	35
2.5.1 流量的表示方法	4.2.8 短行程气缸	37
2.5.2 节流小孔的流量特性	4.2.9 摆动气缸	37
2.5.3 实际气动元件的流量特性	4.2.10 气爪	37
2.5.4 管道的流量特性	4.2.11 组合气缸	39
2.6 空气的充放气过程	4.3 气马达	40
2.6.1 固定容腔的充气过程	4.3.1 齿轮式气马达	41
2.6.2 固定容腔的放气过程	4.3.2 径向活塞式气马达	41
第3章 空气压缩机及净化处理	4.3.3 轴向活塞式气马达	41
装置	4.3.4 叶片式气马达	42
3.1 空气压缩机	第5章 气动控制元件	43
3.1.1 空气压缩机的分类	5.1 压力控制阀	43
3.1.2 活塞式空压机	5.1.1 直动式减压阀	43
3.1.3 膜片式空压机	5.1.2 溢流阀	44
3.1.4 叶片式空压机	5.1.3 精密减压阀	46
3.1.5 双螺杆式空压机	5.1.4 比例减压阀	48
	5.1.5 增压器	50
	5.2 流量控制阀	51

5.2.1 节流阀	51	7.2.3 复位记忆步进模块	81
5.2.2 快排阀	52	7.2.4 条件指令信号处理模块	82
5.2.3 比例流量阀	53	7.2.5 气动步进控制系统的设计	83
5.3 方向控制阀	56	7.3 PLC 电气步进控制系统	84
5.3.1 按“位”与“通”分类	56	7.3.1 可编程序控制器	85
5.3.2 按驱动方式分类	58	7.3.2 梯形图和指令系统	86
5.3.3 转动式换向阀	59	7.3.3 程序步进模块	90
5.3.4 截止式换向阀	59	7.3.4 PLC 气动步进控制系统的 设计	93
5.3.5 滑块式换向阀	59	第8章 气动电子技术应用实例	98
5.3.6 滑阀式换向阀	60	8.1 自动调节病床	98
5.3.7 电磁阀	60	8.2 软床垫耐久性试验机	98
5.3.8 高速开关阀	61	8.3 自动传输带	100
5.3.9 阀岛	62	8.4 印花机	100
5.3.10 逻辑控制阀	64	8.5 自动钻床	102
5.3.11 换向阀的基本应用	68	8.6 插销分送机构	104
第6章 真空元件	71	8.7 气动电子自动化系统设计习题	105
6.1 概述	71	8.7.1 冲压送料系统	105
6.2 真空发生器	71	8.7.2 光盘供料系统	106
6.3 真空吸盘	72	8.7.3 自动堆料系统	107
6.4 其他真空元件	73	8.7.4 小型气动压力机	108
6.4.1 真空电磁阀	73	8.7.5 带料仓的木材加工系统	109
6.4.2 真空高效阀	73	8.7.6 罐头包装设备	110
6.4.3 真空顺序阀	74	8.7.7 底部有槽工件的供料系统	111
第7章 气动步进控制系统与 PLC 电 气步进控制系统	76	8.7.8 带中间缓冲单元的传输线	111
7.1 概述	76	8.7.9 饮料瓶换位组合设备	112
7.2 气动步进控制系统	77	8.7.10 气动压模缓冲装置	113
7.2.1 无记忆步进模块	78	8.7.11 标准元件装配线	114
7.2.2 记忆步进模块	80	参考文献	116

第1章 绪论

气动电子技术是气动技术与电子控制技术的协同结合,它是以压缩空气作为传递动力的工作介质,以气动元件作为执行机构,与机械、电气、电子控制器(包括 PLC、工控机和嵌入式系统)等部分或全部构成控制回路,使气动元件按生产工艺的要求,并按设定的顺序或条件自动工作的一种自动化技术。

1.1 气动电子技术的特点

气压传动的历史可以追溯到远古,但作为气动技术应用的雏形,大约开始于 1776 年 John Wilkinson 发明的能产生 1atm ($1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$) 左右压力的空气压缩机,此后在 18 世纪的产业革命中逐渐被应用于工业生产。20 世纪 30 年代初,气动技术成功地应用于自动门的开闭及各种机械的辅助动作上。气动技术与其他传动和控制方式相比较,有着突出的特点:

- 1) 工作介质为空气,对环境无污染,防火、防爆、排放处理简单,成本低。
- 2) 气动装置结构简单、轻便,可靠性高,使用寿命长。
- 3) 空气具有可压缩性,能量存储方便,同时具有很小的黏度,在管道中流动损失小,可以实现集中供气,远距离输送。
- 4) 气动执行器输出力和工作速度的调节非常容易,动作速度快,气缸运动速度最高可达 17m/s 。
- 5) 抗冲击负载和过载能力强,具有一定的自保持能力。
- 6) 由于空气的可压缩性,执行器的动作速度易受负载的变化而改变。
- 7) 气缸在低速运动时,受摩擦力影响较大,易出现爬行现象,低速稳定性不如液压缸或电动缸。

20 世纪 60 年代以来,随着现代微电子技术的发展,特别是计算机技术的发展和普及,气动技术开始与电子技术紧密结合,气动电子一体化的气电装置开始出现,气动电子技术逐渐发展成熟,并且在气动系统原有特点的基础上,形成了自己的特点。

1) 小型化、低功耗设计,具有高的效率和可靠性。生产现场有限的空间要求气动元件外形尺寸尽量小,在保证相同性能的条件下,小型化不仅带来体积的减小,而且有利于降低控制阀的驱动功率,在节能的同时能与微电子技术相结合,由计算机直接控制。宽度为 10mm 、功耗为 0.5W 的电磁阀早已商品化, 0.4W 、 0.3W 的气阀也已出现。

2) 集成化、智能化程度高。以阀岛为代表的新型电-气一体化控制元器件,集成了完成系统功能所需要的多种规格电磁阀、传感器和智能控制器,能够通过现场总线和上位机连接,按上位机指令自动完成控制任务。

3) 执行元件的高精度控制能力大幅度提高。新型伺服气缸在无杆气缸或有杆气缸的基础上集成了气动控制阀、传感器、电子控制器和总线接口,可以克服空气可压缩性的不利影

响，根据指令完成高精度的定位和轨迹跟踪任务。

1.2 气动电子控制系统的基本组成

应用气动电子技术完成的自动化系统称为气动电子控制系统。典型的气动电子控制系统由气源、气动执行元件、气动控制元件、气动辅助元件和电子控制元件五个部分组成，如图 1-1 所示。

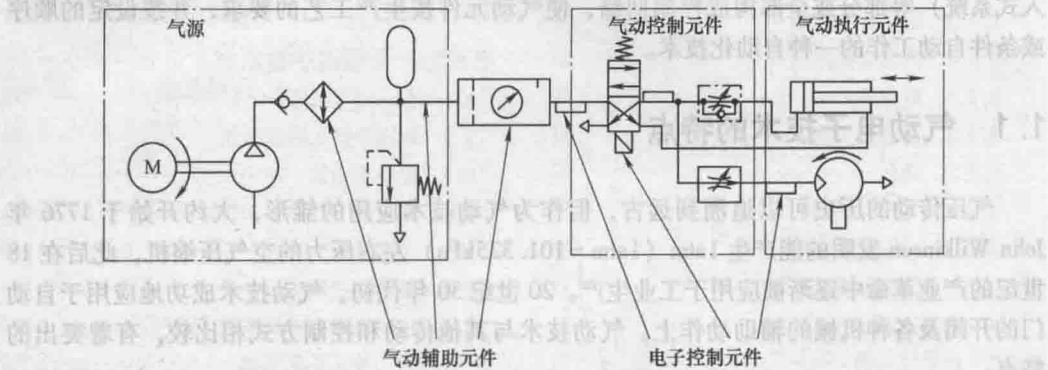


图 1-1 气动电子控制系统的基本组成

1. 气源

气源是一套压缩空气生产、处理和存储的装置，为气动装置提供满足一定要求的压缩空气。其主体部分由空气压缩机、空气净化设备和传输管道组成。

2. 气动执行元件

气动执行元件是以压缩空气为工作介质，将压缩空气的能量转化为机械能的能量转换装置，包括直线气缸实现往复运动、气马达实现连续回转运动以及摆动气缸实现不连续回转运动（摆动）。

3. 气动控制元件

气动控制元件是在气动系统中控制压缩空气气流的压力、流量和流动方向，保证气动执行机构按程序完成预定运动规律的元件。气动控制元件主要有控制和调节工作压力的压力控制阀、控制和调节压缩空气流量的流量控制阀、改变压缩空气流动方向和控制气流通断的方向控制阀。

4. 气动辅助元件

气动辅助元件是用于辅助气动系统正常工作的一些装置，包括使压缩空气净化、润滑、消声的过滤器、干燥器、油雾器、消声器以及管道和管接头等。

5. 电子控制元件

电子控制元件是保证气动电子控制系统按照预定的顺序或条件工作的元件，包括检测流量、压力、位移等参数的各类传感器和 PLC，工业用 PC 等控制器。

第2章 气动基础知识

2.1 干空气与湿空气

在气动电子技术中,工作介质是压缩空气,因此有必要首先对空气的物理性质进行了解。开放环境中的空气是由多种气体混合而成的,其中通常含有的水蒸气对气动系统的影响较大,原因在于水蒸气在一定条件下会凝结成水并聚集在个别管段或执行器内,对系统元件有一定的腐蚀作用,并且凝结水在温度较低的时候会结冰,阻塞管道,损坏运动部件,影响气动装置正常工作。因此,在有条件的情况下,应尽量降低压缩空气中水蒸气的含量。

完全不含水蒸气的空气称为干空气,含水蒸气的空气就称为湿空气。湿空气可以看成是干空气与水蒸气的混合物。如果令 p 代表湿空气的总压, p_a 和 p_w 代表干空气及水蒸气的分压,则按道尔顿分压定律有

$$p = p_a + p_w \quad (2-1)$$

式中 p ——湿空气的总压,单位为 Pa;

p_a ——干空气的分压,单位为 Pa;

p_w ——水蒸气的分压,单位为 Pa。

单位体积湿空气中含有水蒸气的质量称为空气的绝对湿度。由此定义可知,绝对湿度也就是某一空气温度下的水蒸气密度 ρ_w 。湿空气中水蒸气的含量会随着温度和压力的变化而发生改变。在一定的温度和压力下,空气中水蒸气的含量是有一定限度的,当水蒸气含量达到最大限度时,水蒸气即处于饱和状态,此时,含有最大水蒸气量的空气称为饱和湿空气。

一定容积内,湿空气中所含水蒸气密度 ρ_w 与同温度下饱和湿空气中所含水蒸气密度 ρ_b 的百分比称为相对湿度,一般以符号 φ 表示,即

$$\varphi = \frac{\rho_w}{\rho_b} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中 ρ_w ——湿空气中水蒸气密度,单位为 kg/m^3 ;

ρ_b ——饱和湿空气中水蒸气密度,单位为 kg/m^3 。

为了分析和计算的方便,工程中常常采用在空气中总质量不会随温度、压力改变的干空气质量作为计算基准,以一定容积内湿空气中的水蒸气质量 m_w 与干空气质量 m_a 之比表示,称为含湿量,记为符号 d ,即

$$d = \frac{m_w}{m_a} = \frac{\rho_w}{\rho_a} \quad (2-3)$$

式中 ρ_a ——干空气密度,单位为 kg/m^3 。

在一定压力下,降低未饱和湿空气的温度,直至其达到饱和状态时的温度称为露点。温度降到露点以下,湿空气中就会有水滴析出,因此可以采用降温法去除湿空气中的水分。

在其他条件不变的情况下，增大湿空气的压力同样可以使其达到饱和状态，此时的温度称为压力露点。

由于空气具有可压缩性，且其成分由于水蒸气的存在而受温度和压力的影响较大，为方便研究和工程应用，确定了标准状态和基准状态两个基础参考状态。

标准状态指温度为20℃、相对湿度为65%、压力为0.1MPa时的空气状态。在标准状态下，空气的密度为 $\rho = 1.185\text{kg/m}^3$ 。

基准状态指温度为0℃、压力为101.3kPa时的干空气状态。在基准状态下，空气的密度为 $\rho = 1.293\text{kg/m}^3$ 。

2.2 空气的质量等级

压缩空气在制备和使用过程中可能会混入水分、油分和固体杂质等污染物质，降低空气的洁净度，为工作带来种种不利影响。例如：污染物流经管道和元件会引起堵塞和锈蚀，杂质会加速元件的磨损，缩短元件寿命，同时可能导致元件误动作；而油气会加速密封件老化，严重时会引起燃烧和爆炸，最终影响气动系统的安全性和可靠性。因此，随着气动元件的日趋精密，对压缩空气的质量要求也越来越高，故GB/T 13277—1991标准规定了压缩空气的质量等级，见表2-1。

表 2-1 空气质量等级

等级	最大粒子		最高压力露点/℃	最大含油量/(mg/m³)
	尺寸/μm	浓度/(mg/m³)		
1	0.1	0.1	-70	0.01
2	1	1	-40	0.1
3	5	5	-20	1
4	40	10	3	5
5	—	—	7	25
6	—	—	10	—

净化压缩空气一般通过采用各种各样的空气净化装置进行。不同的气体装置，对压缩空气的质量要求是不同的，相应的空气净化装置也不同，应根据应用场合来合理选用和设置。

2.3 空气的热力学性质

压缩空气作为气动系统的工作介质，其热力学状态参数如压力、温度、质量、体积等在工作过程中会不断变化。空气的热力学性质对系统的性能具有重要影响。

热力学中以人为划定的几何边界所围成空间中的空气作为热力系统，对气体的热力学性质进行研究。按系统与外界是否进行质量交换，热力系统可以分为闭口系统和开口系统，如图2-1所示。

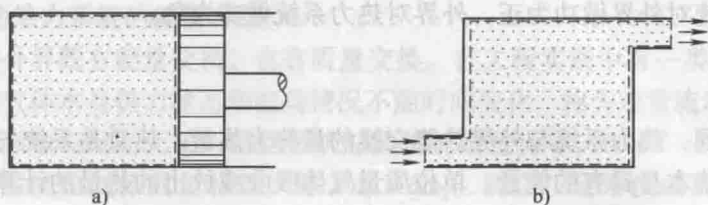


图 2-1 热力系统

a) 闭口系统 b) 开口系统

系统与外界无质量交换的系统称为闭口系统，闭口系统中的质量是保持不变的；与外界之间有质量交换的系统称为开口系统。开口系统有物质穿过边界，系统内部的质量可以变化，也可以不变化。

2.3.1 功

热力系统通过界面与外界以机械能形式进行交换的能量称为功，按照能量交换形式的不同可以分为膨胀功、流动功和技术功。

1. 膨胀功

由于热力系统的体积变化而与外界交换的机械能称为膨胀功。单位质量气体做的膨胀功的计算式为

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (2-4)$$

式中 w ——单位质量气体做的膨胀功，单位为 J/kg；

p ——气体的压力，单位为 Pa；

v ——比体积，单位质量空气具有的体积，单位为 m^3/kg 。

$$v = V/m$$

V ——气体的体积，单位为 m^3 ；

m ——气体的质量，单位为 kg。

2. 流动功

在开口系统中，外界动力源推动工质流动而传递的功称为推动功。对于单位质量工质，设在开口系统入口输入的推动功为 $p_1 v_1$ ，在出口处输出的推动功为 $p_2 v_2$ ，则进出系统的推动功之差称为流动功，也即系统为维持工质流动所消耗的功。维持单位质量气体流动所做的流动功的计算式为

$$w_f = p_2 v_2 - p_1 v_1 \quad (2-5)$$

式中 w_f ——维持单位质量气体流动所做的流动功，单位为 J/kg。

3. 技术功

不计工质的动能与位能变化时，开口系统与外界交换的机械能应为膨胀功与流动功之差，称为技术功。单位质量气体所做的技术功的计算式为

$$w_t = w - w_f = \int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_{p_1}^{p_2} v dp \quad (2-6)$$

式中 w_t ——单位质量气体所做的技术功，单位为 J/kg。

规定热力系统对外界做功为正, 外界对热力系统做功为负。

2.3.2 热量

由于温度不同, 热力系统与外界热能交换的量称为热量。热量是系统与外界之间传递的能量, 而不是系统本身具有的能量。单位质量气体吸收或放出的热量的计算式为

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T ds \quad (2-7)$$

式中 q ——单位质量气体吸收或放出的热量, 单位为 J/kg;

T ——热力学系统中空气的温度, 单位为 K;

s ——空气的比熵, 单位为 J/(kg · K)。

比熵是热交换过程的状态函数。 $ds > 0$ 表示过程中工质接受外界的热量, $ds < 0$ 表示过程中工质向外界放出热量。规定热力系统从外界吸收的热量为正, 向外界放出的热量为负。

2.3.3 热力学第一定律

人们在长期的生产实践中总结出了能量转换与守恒定律: “自然界一切物体都具有能量。能量有各种不同的形式, 它能从一种形式转换为另一种形式, 从一个物体传递到另一个物体, 但在转换和传递的过程中, 它们的总量不变。”应用能量转换与守恒定律于热力学过程, 即成为热力学第一定律, 表述为: “热能可以从一个物体传递给另一个物体, 也可以与机械能或其他能量相互转换, 在传递和转换的过程中, 能量的总量保持恒定。”表征热力系统能量的是内能, 通过做功与传热, 系统与外界交换能量, 使内能有所变化, 因此热力学第一定律可以表示为如下方程:

外界传递给热力系统的热量 - 热力系统对外界做功 = 热力系统能量的增量

即

$$\delta Q - \delta W = \delta E \quad (2-8)$$

式中 δQ ——热力系统在 δt 时间内吸收的热量, 单位为 J;

δW —— δt 时间内热力系统对外所做的功, 单位为 J;

δE —— δt 时间内热力系统总能量的增量, 单位为 J。

1. 闭口系统的能量方程

闭口系统与外界没有质量交换, 因此 $\delta m_1 = \delta m_2 = 0 \text{ kg}$, 系统对外仅做膨胀功, 即

$$\delta W = p \delta V \quad (2-9)$$

式中 p ——热力系统中空气的压力, 单位为 Pa;

δV —— δt 时间内热力系统体积的增量, 单位为 m^3 。

系统总能量的增量为内能的增量, 即

$$\delta E = \delta U \quad (2-10)$$

式中 δU ——热力系统中空气内能的增量, 单位为 J。

因此可得, 闭口系统的能量方程为

$$\delta Q = \delta U + p \delta V \quad (2-11)$$

因此, 闭口系统的热力学第一定律可表述为: 热力系统所吸收的热量等于系统内能的增量与对外膨胀功之和。

2. 定常流动热力系统的能量方程

开口系统与外界既有能量交换，也有质量交换。在工程实践中有一类常见的开口系统，其系统中流动的气体本身热力状态和流动情况不随时间变化，称为定常流动热力系统。该系统中由于气体各参数与时间无关，因此系统总能量的增量为零，即 $\delta E = 0$ ；且进入系统的气体质量与离开系统的气体质量相等，即 $\delta m_1 = \delta m_2$ 。所以，定常流动热力系统的能量方程为

$$\delta Q = (e_2 - e_1) \delta m_2 + \delta W \quad (2-12)$$

因此，定常流动热力系统的热力学第一定律可表述为：热力系统所吸收的热量等于离开与进入系统的能量之差与对外所做功之和。

2.4 理想气体的热力过程

理想气体是指没有黏性的气体。在气动系统中，虽然使用的压缩空气具有黏性，但由于气体的工作压力一般在 2.0MPa 以下，将其视为理想气体所引起的误差可以忽略不计，而对分析和计算却能带来极大的便利，因此在气动技术中一般将压缩空气视为理想气体。

气动系统中的空气作为工作介质，在工作过程中伴随着能量的传递和转换，其状态也是不断变化的。在某一热力系统中的理想气体从某一平衡状态变化到另一平衡状态的全部过程称为理想气体的热力过程。当某热力系统在进行某一热力过程时，系统会对外输出机械功，并可能与外界进行热量交换。

2.4.1 理想气体的状态方程

当理想气体处于某一平衡状态时，气体的压力、温度和体积之间存在着确定的关系，称为理想气体的状态方程。其表达式为

$$pV = mRT \quad \text{或} \quad pv = RT \quad (2-13)$$

式中 R ——气体常数，单位为 $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，干空气的气体常数为 $287.1 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

T ——气体温度，单位为 K。

2.4.2 定容过程

理想气体在保持体积不变的条件下进行的状态变化过程，称为定容过程。定容过程的 $p-V$ 图及 $T-s$ 图分别如图 2-2 及图 2-3 所示。

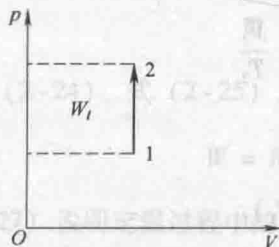


图 2-2 定容过程 $p-V$ 图

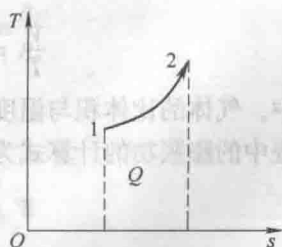


图 2-3 定容过程 $T-s$ 图

由于定容过程中单位质量气体体积 $V = \text{常数}$ ，依照理想气体状态方程，可得过程中状态

参数间的关系式为

$$\frac{p}{T} = \text{常数} \quad \text{或} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2-14)$$

即定容过程中, 气体的压力与温度成正比。

定容过程中热力系统的体积不发生变化, 所以膨胀功的计算式为

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = 0 \quad (2-15)$$

定容过程技术功的计算式为

$$W_t = - \int_{p_1}^{p_2} V dp = -V(p_2 - p_1) \quad (2-16)$$

定容过程中, 系统与外界交换的热量与气体内能的变化量相等, 由下式计算

$$Q = \Delta u = c_v(T_2 - T_1) \quad (2-17)$$

式中 c_v ——气体的比定容热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 表示在热力学过程中体积不变的条件
下, 改变一单位温度所需要吸收或放出的热量。

气体比定容热容的计算表达式为

$$c_v = \frac{\Delta u}{\Delta T} \quad (2-18)$$

2.4.3 定压过程

理想气体在保持压力不变的条件下进行的状态变化过程, 称为定压过程。定压过程的 $p-V$ 图及 $T-s$ 图分别如图 2-4 及图 2-5 所示。

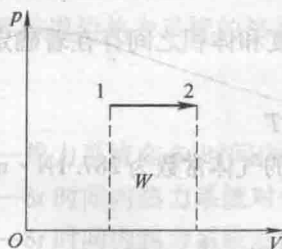


图 2-4 定压过程 $p-V$ 图

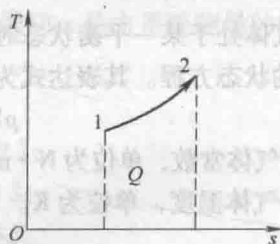


图 2-5 定压过程 $T-s$ 图

由于定压过程中气体压力 $p = \text{常数}$, 依照理想气体状态方程, 可得过程中状态参数间的关系式为

$$\frac{V}{T} = \text{常数} \quad \text{或} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2-19)$$

即定压过程中, 气体的比体积与温度成正比。

定压过程中的膨胀功的计算式为

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dv = p(V_2 - V_1) \quad (2-20)$$

由于定压过程中压力不发生变化, 其技术功为

$$W_t = - \int_{p_1}^{p_2} V dp = 0 \quad (2-21)$$

定压过程中与外界交换的热量的计算式为

$$Q = \Delta h = c_p(T_2 - T_1) \quad (2-22)$$

式中 c_p ——气体的比定压热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 表示在热力学过程中压力不变的条件
下, 改变一单位温度所需要吸收或放出的热量。

气体比定压热容的计算表达式为

$$c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (2-23)$$

式中 h ——热力系统的工质的比焓, 单位为 J/kg 。

比焓表示单位工质在某一状态下所具有的总能量, 它是内能和压力势能(流动能)之和, 是一个复合状态参数。

2.4.4 定温过程

理想气体在保持温度不变的条件下进行的状态变化过程, 称为定温过程。定温过程的 $p-V$ 图及 $T-s$ 图分别如图 2-6 及图 2-7 所示。

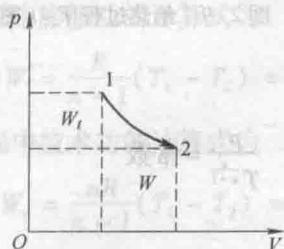


图 2-6 定温过程 $p-V$ 图

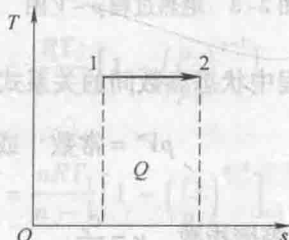


图 2-7 定温过程 $T-s$ 图

由于定温过程中气体温度 $T = \text{常数}$, 依照理想气体状态方程, 可得过程中状态参数间的关系式为

$$pV = \text{常数} \quad \text{或} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2-24)$$

定温过程中的膨胀功为

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (2-25)$$

定温过程中的技术功为

$$W_t = - \int_{p_1}^{p_2} V dp = - RT \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2-26)$$

比较式 (2-24)、式 (2-25) 和式 (2-26), 可得

$$W = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = - RT \ln \frac{p_2}{p_1} = W_t \quad (2-27)$$

式 (2-27) 说明定温过程中的膨胀功和技术功相等。

由于定温过程热力系统的温度不发生变化, 系统内能没有变化, 因此由能量守恒方程可知气体从外界吸收的热量全部转化为对外界所做的膨胀功, 而向外界放出的热量等于外界对气体所做的功。故等温过程的热量表达式为

$$Q = W = W_t = RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (2-28)$$

2.4.5 绝热过程

理想气体在与外界没有热量交换的条件下进行的状态变化过程，称为绝热过程。因为在该条件下热力系统的熵不发生改变，故也称为定熵过程。绝热过程的 $p-V$ 图及 $T-s$ 图分别如图 2-8 及图 2-9 所示。

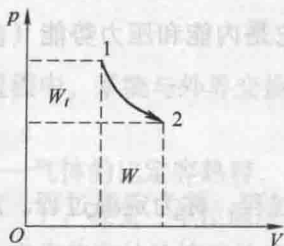


图 2-8 绝热过程 $p-V$ 图

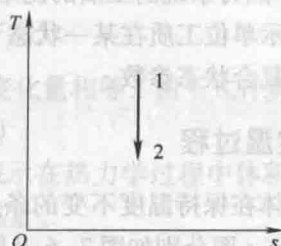


图 2-9 绝热过程 $T-s$ 图

绝热过程中状态参数间的关系式如下

$$pV^\kappa = \text{常数} \quad \text{或} \quad TV^{\kappa-1} = \text{常数} \quad \text{或} \quad \frac{p}{T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} = \text{常数} \quad (2-29)$$

式中 κ ——等熵指数， $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ 。

绝热过程中的膨胀功为

$$W = \int_1^2 p dV = \int_1^2 p_1 v_1^\kappa \frac{dV}{v^\kappa} = \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (2-30)$$

或

$$W = \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right] = \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (2-31)$$

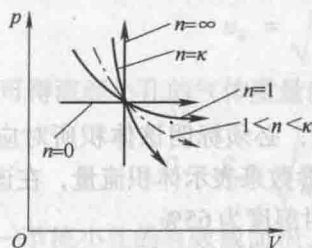
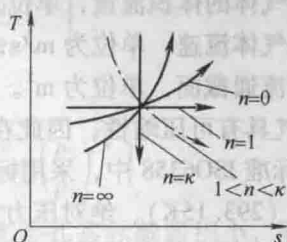
绝热过程中的技术功为

$$\begin{aligned} W_t &= - \int_{p_1}^{p_2} V dp = - \int_{p_1}^{p_2} V_1 p_1^{\frac{1}{\kappa}} \frac{dp}{p^{\frac{1}{\kappa}}} = \frac{\kappa RT_1}{\kappa - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \\ &= \kappa \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \kappa W \end{aligned} \quad (2-32)$$

绝热过程中与外界无热交换，因此热量为 $Q=0$ 。

2.4.6 多变过程

定容、定压、定温和绝热过程是热力过程中的基本过程，实际的热力过程千变万化，远不止以上几种，因此人们利用多变过程来对此进行描述。多变过程的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图分别如图 2-10 及图 2-11 所示。

图 2-10 多变过程 $p-V$ 图图 2-11 多变过程 $T-s$ 图

多变过程中, 热力系统各状态参数间的基本关系满足以下方程

$$pV^n = \text{常数} \quad \text{或} \quad TV^{n-1} = \text{常数} \quad \text{或} \quad \frac{p}{T^{\frac{n}{n-1}}} = \text{常数} \quad (2-33)$$

式中 n ——多变指数。

当 $n = \pm \infty$ 、 0 、 1 、 κ 时, 多变过程分别表示了定容过程、定压过程、定温过程和绝热过程。

多变过程中膨胀功的计算式为

$$W = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (2-34)$$

多变过程中技术功的计算式为

$$W_t = \frac{nR}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{nRT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] = \frac{nRT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (2-35)$$

绝热过程中交换热量的计算式为

$$Q = c_n(T_2 - T_1) \quad (2-36)$$

式中 c_n ——多变比热容。其计算式为

$$c_n = \frac{n-\kappa}{n-1}c_v = \frac{nc_v - c_p}{n-1} \quad (2-37)$$

2.5 气动元件的流量特性

压缩空气在气动系统工作过程中需要流经管道和各种气动元件, 在这个过程中会受到不同的局部阻力, 其流量会发生变化。气动技术中使用流量来衡量气动元件的空气流通能力, 并用气动元件的流量特性来表示。在元件选型时, 如果流量特性选择不当, 将可能导致气动执行元件达不到预期的输出力或输出速度。

2.5.1 流量的表示方法

空气的流量有质量流量和体积流量两种。相对于质量流量, 体积流量具有直观易懂的特点, 所以在工程应用中表示管道流量和设备耗气量时都是采用体积流量。

1. 体积流量

体积流量是指单位时间内通过管道流通截面的空气的体积, 其计算式为

$$q = vA \quad (2-38)$$