

阎继厚 编著

气压控制工程

QIYA KONGZHI GONGCHENG

中国铁道出版社

新平知
PDG

气压控制工程

阎继厚 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 徐仁杰

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 23.75 字数: 576 千

1984年9月第1版第1次印刷

印数: 0001—7,500册 定价: 3.00元

知识
和
学

PDG

内 容 简 介

本书较详尽地介绍了在生产过程中，以压缩空气为介质，通过各种气动元件的组合，作为气动控制、气压传动和气动检测的手段，从而达到生产过程自动化的目的。内容包括有关基础理论、气源装置、气源净化装置、动力执行机构、控制系统、传感装置等结构原理及各种回路的设计、测试方法。本书相应地介绍了国内外行之有效的150余项设计实例和逻辑处理方法。为有关从事气压自动控制的工程技术人员、科研、教学人员提供了较全面的学习、应用参考资料。本书的选材和文字结构具有由浅入深、循序渐进的特点，特别有利于自学。

新
平
知
PDG

前 言

气压控制工程 (*Pneumatic Control Engineering*) 是以压缩空气为工作介质、以实现生产过程自动化为目的、以气压传动、气动控制和气动检测为主要内容的一项新技术。

二次世界大战以后, 美国军事当局为了解决在宇宙航行、导弹、原子能等军事技术中遇到的高温、巨震、强辐射、电、磁干扰等电子技术难于解决的困难问题, 开始了流体控制工程的研究工作。1959年末、美军科研单位Harry Diamond Laboratory首次公开了某些射流控制的技术内容。声称射流控制可以不受冲击、振动、辐射、电磁以及温度变化的影响而可靠地工作。元件本身结构简单、制造容易、成本低廉、可以实现自动控制、技术检测和数字运算。因而在国内外引起很大轰动。各国竞相研制、推广, 一时盛况空前。

射流技术的突然出现, 使理论工作落在生产实践的后边。理论工作者还不能从流体力学的理论高度掌握其动特性, 不能完善地解决元件的设计和正确处理阻抗匹配 (*Impedance matching*) 问题。由于气源处理不当, 也经常出现元件堵塞、动作失灵情况, 一时又呈现了怀疑、动摇、停滞不前的状态。

1964年法国LECO、JOUVENEL et CORDIER、CLIMAX—FRANCE、SOGEMO等公司首先研制成功了对气源要求较低的、动作灵敏可靠的、具有可动部分的第二代气动元件。继之, 美国的ARO、英国的PNEUMAID、西德的HERION、日本的全气控有限公司、小金井制作所等单位也都取得很大进展。

1975年由我国第一机械工业部组织的、由上海自动化仪表研究所、大连组合机床研究所、上海机械学院、上海长虹机械配件厂等七个单位参加的微型逻辑元件联合设计研制工作也取得了成功。洛阳轴承厂、洛阳气动控制研究室研制成功的、具有我国独特风格的膜片式气动元件已在洛阳、天津等地成功地用于单机自动化和自动、半自动生产线。

目前, 程序控制器等一代又一代的新元件正在不断地涌现, 呈现一片蓬勃发展的情况。

清华大学、上海机械学院、成都科技大学等单位在理论研究、线路设计等方面取得了可喜成就, 对推动我国气压控制技术的前进做出了贡献。

气压控制技术, 对我国来说, 起步较晚, 资料不多, 为了迅速普及这项新技术, 搜集了国内外有关资料, 写成此书, 供广大工程技术人员参考使用。内容包括基础理论、气源发生装置、气源净化处理装置、动力执行机构、控制系统、传感装置、回路设计、测试方法等。

为了节约能源、杜绝浪费、提高经济效益, 加入了空气压缩机经济性能的设计计算、空气消耗量的计算, 和元件、组成回路有效截面积的测试计算等内容。

为了便于自学, 在内容处理上, 力求做到深入浅出, 通俗易懂, 增设例题, 便于理解。

为了适应技术发展的需要, 加入了计算时间、速度、缓冲和动特性等有关内容。

为了传播具有我国独特风格的气动技术, 以一定篇幅介绍了开关线路、数理法设计、逻辑元件、固定式、浮动式正负逻辑线路设计方法。

根据洋为中用的原则, 相应地介绍了一些国外成熟经验、设计实例和科研成果。

本书共选入了行之有效的设计实例和逻辑处理方法约150例可供设计参考。

在阅读本书时希注意以下几个问题:

一、使用单位问题

我国正处于从惯用的工程单位向国际单位过渡的新旧交替的关键时刻,国际制单位已公布施行。为了适应发展的需要,书中对计算公式同时标注了两种单位。需要注意的是,不论使用哪种单位,必须前后一致,才能保证计算结果的正确性。

自1960年制定国际单位(The International System Unit—简称SI单位)后,各国正在陆续采用。SI单位与工程单位的主要区别在于:工程单位对质量、重量、重力、重度、压力等单位都标注为公斤(kg)。SI单位制为了彻底消除这种混淆现象,公斤(kg)只限于物质的质量,而以密度(kg/m^3)取代重度。力的单位以牛顿(Newton—N)代替公斤力(kgf)。压力单位以帕斯卡(Pascal—Pa)代替公斤力/厘米²(kgf/cm^2)。热量单位以焦耳(Joule—J)、千焦耳(kJ)代替卡(cal)、千卡(kcal)等(详见绪论表0—1)。

已习惯于使用工程单位制的工程技术人员,对初改国际单位也颇不习惯。例如谈某物体若干公斤重,空气、蒸汽压力为若干气压(kgf/cm^2),则概念十分清楚,若称之为若干牛顿、若干帕斯卡,则反而感到陌生。许多早已颁布采用国际单位制的国家,例如日本自1967年开始采用SI制,但迄今为止在图书资料上,往往仍沿用工程单位,或两者同时标注。鉴于以上情况,除在绪论中列出了两种单位及其换算关系和在公式后面同时标注了两种单位外,在作工程计算时仍以工程单位为主。对于重度(单位体积的重量)、重量流量,因其本身的定义中已清楚地表达了重量的概念,在标注单位时为简便计,有时可以节略“重”字,只标注重度(公斤/米³)、重量流量(公斤/秒)等。

二、活塞运动状态

在气压传动装置中,经常使用气缸作为能量转换、即传达动力的“执行元件”。当压缩空气自气缸的“头腔”进气时,则活塞杆伸出,压缩空气自“杆腔”进气时,则活塞杆退回。上述活塞杆的运动状态,按合乎逻辑的正常说法,应称之为“气缸活塞前进”或“气缸活塞后退”。但按国内外的习惯说法,则称之为“气缸前进”或“气缸后退”。本书已做了必要的更正,如在文献资料中遇到上述习惯说法,均应理解为气缸活塞的运动状态,而非指气缸本身。

在编写本书过程中,西安煤矿设计院张怀孟工程师给予了大力协助,洛阳轴承厂、上海机械学院有关同志提供了大量宝贵资料,中国铁道出版社给予了有力的支持,谨对以上有关同志,以及引用文献资料的原作者表示衷心感谢。

编者由于时间仓卒、水平有限,不当之处必然很多,缺点错误在所难免,衷心希望广大读者给予批评指正。

编 者

一九八二年十一月于大连

目 录

绪 论	1	第二章 空气动力学基础知识	32
第一章 工程热力学基础知识	5	第一节 粘 度	32
第一节 基本概念	5	一、动力粘度	32
一、气态物体在工程热力学中的分类	5	二、运动粘度	33
二、温度与热量	5	第二节 气体静力学	34
三、压 力	7	一、气体的静压——静压头	34
四、容积、比容、重度与密度	8	二、气体的位压——几何压头	34
第二节 热力学第一定律	9	第三节 空气流动特性	35
一、热力学第一定律	9	一、稳定流动与不稳定流动	35
二、气体不流动过程的能量方程	10	二、层流、紊流与雷诺准数	35
三、不流动过程的功、示功图和内能	11	三、均匀流动与不均匀流动	37
四、空气的焓	11	第四节 流体连续方程	37
五、空气不流动(静态)过程的典型状态变化	12	第五节 气体稳定流动状态的基础能量方程	38
第三节 理想气体特性方程	13	第六节 喷嘴射流	40
一、波义耳——马略特定律	13	一、理论流速	40
二、查理斯定律	13	二、临界条件	41
三、盖——吕萨克定律	14	第七节 节 流 孔	45
四、理想气体特性方程	14	一、理论流量	45
五、理想气体的内能、焓和基础能量方程与定容、定压比热的相互关系	18	二、实用公式	46
第四节 理想气体不流动(静态)过程的状态变化	19	第八节 非压缩性流体稳定流动过程的能量方程——伯努里方程	48
一、等容过程	19	第九节 管路中的压力损失	50
二、等压过程	20	第三章 气源系统及气源净化处理	56
三、等温过程	21	第一节 气源综合处理	56
四、绝热过程	22	一、气源净化处理概述	56
五、等温过程与绝热过程的比较	24	二、气源综合净化处理工艺流程	56
六、多变过程	25	第二节 空气压缩机	57
第五节 湿 空 气	28	一、空气压缩机热力学工作原理	57
一、空气的一般性质	28	二、空气压缩机的技术计算	58
二、道尔顿定律	29	第三节 气源净化处理装置	61
三、蒸 汽	29	一、油水分离器	61
四、湿 空 气	30	二、过 滤 器	62
		三、干燥装置	62
		四、分水滤气器	64
		第四节 气源规划及管路设计	66
		一、气动装置空气消耗量	66

二、管路设计	68
第四章 气动执行元件	72
第一节 气缸的结构和分类	73
第二节 缓冲装置与速度控制	78
一、缓冲装置的构造	79
二、气缸所作的功	80
三、缓冲行程中空气的工作状态	81
四、缓冲效果的探讨	83
五、缓冲装置设计使用注意事项	83
六、气缸的速度控制	84
第三节 气缸设计	84
一、单作用气缸的输出推力	84
二、双作用气缸的输出推力	86
三、气缸筒	86
四、活塞杆	87
五、活 塞	93
六、气缸配管	93
第四节 气 马 达	94
一、叶片式回转气马达的结构	94
二、叶片式回转气马达的工作特性	95
三、回转式气马达工作特性 与空气压力的关系	95
四、叶片式摆动气马达	97
第五章 气动控制元件	99
第一节 压力控制元件	99
一、调 压 阀	99
二、定 值 器	105
三、溢 流 阀	106
四、顺 序 阀	109
第二节 速度控制元件	110
一、针 阀	110
二、单向节流阀	110
三、快速排气阀	112
第三节 方向控制元件	113
一、换向阀类别	113
二、换向阀通路	113
三、切换位置	114
四、换向阀图形符号及其说明	114
五、主控阀与先导阀	114
六、截止阀的结构特点与 流量特性	117
七、气动先导截止式主控阀	117
八、滑阀的结构特点	119
九、直动式电磁换向阀	120

十、电磁先导式换向阀	120
十一、气动脉冲式换向阀	122
十二、可调气阻气动延时换向阀	122
十三、行程阀	123
十四、单向阀、梭阀与双压阀	124
第六章 气动传感器	126
第一节 概 述	126
第二节 传感器的构造与应用	127
一、背压式接近传感器	127
二、反射式传感器	129
三、涡流式传感器	130
四、紊流式传感器	131
五、超声波传感器	131
六、遮断式喷嘴传感器	132
七、对冲式传感器	132
八、喷嘴—接收管式传感器	133
九、传感器结构型式示例	133
第三节 其他类型传感器	133
一、双金属片温度传感器	133
二、波纹管压力传感器	134
三、浮子式液位传感器	134
第四节 超低压增压阀	136
第五节 传感器的应用	137
第七章 气动装置配套元件	139
第一节 发讯元件	139
一、气 按 钮	139
二、发讯元盘	140
第二节 信息转换元件	140
一、气—电转换器	140
二、电—气转换器	141
三、气—液转换器	141
四、液—气转换器	141
第三节 功率放大元件	142
一、单向功率放大器	142
二、滑柱式双向功率放大器	142
第四节 显示元件	143
第五节 油 雾 器	144
第六节 消 声 器	145
第八章 气压传动基本回路	147
第一节 单作用气缸基本回路	147
第二节 双作用气缸基本回路	148
一、方向控制回路	149
二、速度控制回路	151
三、差压操作回路	152

四、增压回路	153	运动线路	204
第三节 传感器基本回路	154	三、延时往复运动线路	205
第四节 基本组合回路	155	四、连续往复运动线路	205
一、启动回路	155	五、延时连续往复运动线路	207
二、两手操动回路	156	六、多缸程序控制线路设计实例	208
三、多信号先入优先回路	157	第十一章 全气动行程程序控制回路设计	213
四、计数回路	158	第一节 信号—动作线线图	213
第九章 逻辑代数与典型逻辑回路	161	一、概 述	213
第一节 逻辑代数	161	二、干扰信号检查法	216
一、基本概念	161	第二节 障碍信号排除法	225
二、基本规律与常用基本逻辑符号	162	一、脉冲信号排除法	225
三、逻辑代数的基本运算规律	163	二、中继阀排除法	226
四、逻辑函数的简化	167	三、逻辑“与门”排除法	228
第二节 基本逻辑回路	169	第三节 单往复系统典型回路设计例	231
一、是 门	169	第四节 多往复系统Ⅱ型障碍排除法	235
二、非 门	170	一、逻辑与排除法	235
三、与 门	171	二、双与门两路分配排除法	236
四、或 门	173	第五节 多往复系统典型回路设计	238
五、或非门	175	第十二章 卡诺图及数理法在回路设计中的 应用	244
六、与非门	176	第一节 卡诺图与开关函数	244
七、蕴含门	177	一、开关函数	244
八、禁 门	178	二、典型逻辑表达式	245
九、异门(异或门)	178	三、卡诺图	245
十、同门(同或门)	180	第二节 利用卡诺图简化逻辑表达式	246
第三节 时间控制回路	182	第三节 卡诺图的应用	250
一、延时回路	182	一、利用卡诺图求回路逻辑表达式	250
二、脉冲回路	184	二、卡诺图在回路校核中的应用	252
第四节 双稳回路	185	第四节 卡诺图在回路设计中的应用	254
一、常用双稳回路	186	第五节 行程程序控制数理法回路设计	257
二、限时记忆与无限记忆回路	187	一、使用符号	257
第五节 往复运动回路	188	二、判别干扰	258
一、单气缸往复运动回路	188	三、排除法	260
二、单气缸连续往复运动回路	189	第十三章 气动逻辑元件	266
三、单缸步进运动回路	190	第一节 ARO型逻辑元件	266
四、单缸二往复动作回路	191	一、或门元件	267
第十章 电—气联合程序控制回路	193	二、与门元件	267
第一节 基本概念	193	三、非门元件	267
一、常用电气元件及控制线路表示 法	193	四、记忆元件	268
二、常用门电路	198	五、脉冲元件	268
第二节 电—气联合控制典型线路设计	202	六、延时元件	268
一、单线圈电磁阀单气缸自动往复 运动线路	204	七、元件的安装	269
二、双线圈电磁阀单气缸自动往复		八、ARO型逻辑元件使用实例	270
		第二节 高压截止式微型逻辑阀	271

一、是 门	272
二、非 门	272
三、或 门	273
四、与 门	273
五、禁 门	273
六、双稳记忆元件	274
七、单稳记忆元件	274
八、或非元件	275
九、或—或—双稳元件	276
十、其它配套元件	276
第三节 洛阳型高压膜片式逻辑元件	276
一、三 门	279
二、四 门	280
三、非 门	280
四、或 门	281
五、与 门	282
六、双 稳	283
七、触发器	284
八、双控单向输出阀	284
九、双控双向输出阀	285
十、四控双向输出阀	285
十一、三稳输出阀	285
十二、单向节流阀	286
十三、进气调速阀	286
十四、延时 阀	286
十五、脉 冲 阀	287
十六、或 双 稳	288
十七、消 障 器	288
十八、发 讯 器	288
第四节 洛阳型高压膜片式逻辑元件控制回路设计	289
一、双稳逻辑回路	289
二、喷嘴发讯器逻辑回路	290
三、联锁回路	290
四、单稳换向回路	291
五、双稳换向回路	291
六、三稳换向回路	291
七、振荡回路	292
八、单缸机动循环回路	292
九、双缸连续往复运动之(一)方形循环	293
十、双缸连续往复运动之(二)L形循环	293
十一、双缸交替往复运动	294

第五节 其它逻辑元件	294
一、滑阀式逻辑元件	294
二、双膜片通用逻辑元件	295
三、具有记忆性能的中继阀	295
第十四章 通用程序控制回路与气动程序	
控制器	297
第一节 通用程序控制回路	297
一、通用程序控制回路的特点	297
二、气动信号分配回路的工作原理	297
三、气动信号分配回路的组成	299
四、气动通用行程程序控制回路的程序编排法	300
第二节 步进式程序控制器	304
第十五章 射流控制	307
第一节 附壁式射流元件及其逻辑职能	307
一、非 门	310
二、或 门	310
三、或 非	310
四、与 非	311
五、或 双 稳	312
六、计数触发器	312
第二节 动量互作用式射流元件	313
一、与门(单输出与门)	313
二、禁门(三输出与门)	313
第三节 紊流式射流元件	314
第四节 逻辑线路	315
一、记忆线路	316
二、三稳态线路	316
三、互锁保护线路	317
四、优先置“1”、置“0”回路	318
五、振荡线路	319
六、延时线路	320
第五节 计数线路	320
一、计 数 制	320
二、十进制与二进制	321
三、十进制数与二进制数的换算	321
四、十进制环型计数器	322
五、二进制计数线路	323
六、译 码 器	324
第六节 射流控制的一般应用	325
第七节 行程程序控制	332
一、行程程序控制基本线路	332
二、障碍信号的判断和排除	334
三、多缸多往复系统Ⅱ型障碍排除	

法	338
第八节 时间程序控制及其应用	341
第十六章 空气技术参数的测定	343
第一节 空气压力的测定	343
第二节 空气温度的测定	344
第三节 空气湿度的测定	345
第四节 空气流速测定法	345
第五节 空气流量测定法	347

第六节 气动元件及其组成回路有效截	
面积的测定	350
附 录	
一、气动系统基本参数与图形符号	354
二、美国 ARO 公司逻辑回路设计法介绍	354
三、气缸动特性的探讨	360
主要参考文献	367

绪 论

气动控制，是以各种类型的气动元件和配套装置，组成所需要的控制回路，来实现自动控制的。

气压控制过程既包括开环控制，也包括闭环控制。

根据DIN19226⁽¹⁾（联邦德国标准，1968年5月修订版），开环控制的特征是：

“在某一系统的控制过程中，一个或若干个输入变量，经过本系统的处理（运算）结果，改变其输出变量，通过单一传递元件或控制链的动作，使受控系统的输出用于控制某一能量流动或质量流动⁽²⁾。”

若以方框代表此系统， x_e 代表输入变量， x_a 代表输出变量，则其相互间的函数关系如图0—1所示。

图0—2为开环控制系统示意图。

“在开环控制系统中，干扰因素可以通过本系统。”

闭环系统的特征是：

“在某一系统的控制过程中，受控变量将继续被测量，并与指令变量相比较，根据比较的结果修正过程，使与指令变量相配合。由此产生的动作顺序，是在一个封闭的控制环内进行。闭环控制的目的是：即使在不能获得完全平衡的不利条件下，亦可使受控变量的数值达到指定变量所规定的数值。”

图0—3为闭环控制系统的示意图。

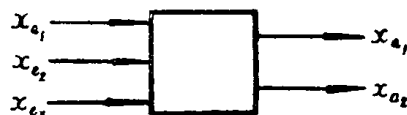


图0—1 一般函数式： $x_a = f(x_e)$

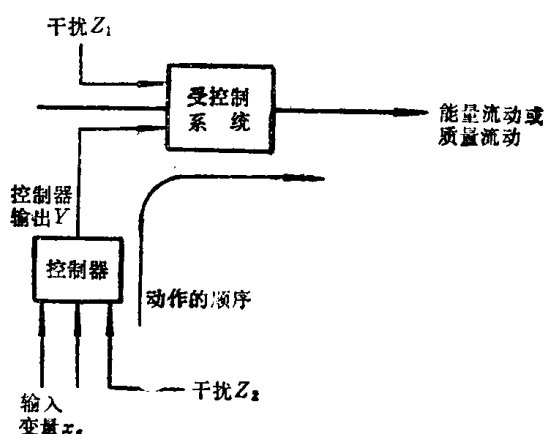


图0—2 开环控制系统示意图

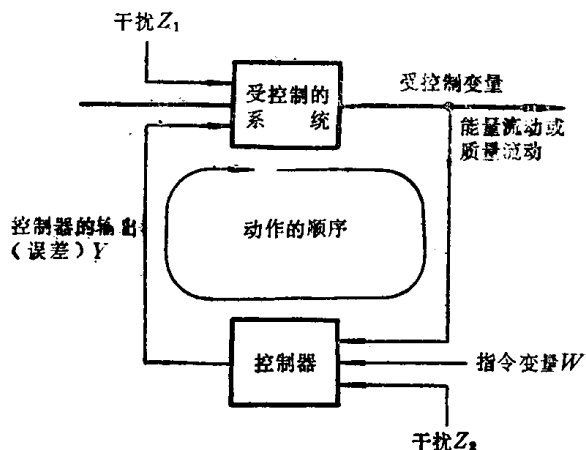


图0—3 闭环控制系统示意图

“在闭环系统中，干扰因素均将被消除”。

上述技术定义将在继续学习过程中逐步获得理解，此处不更加详述。

气压控制系统中所使用的射流元件，和微型气动逻辑元件，则是以电子技术为模拟对象

而发展起来的。它们也具有类似电子技术那样的某些逻辑功能。

在电子技术已高度发展并广为利用的今天，气动技术之所以仍能被广泛利用和获得持续发展的主要原因，是它本身具有独特的优点。

气压控制与电气控制相比较，其优点为：

1. 以空气为工作介质，取之不尽，用之不竭；
2. 能源可以贮存，在突然停电时，工艺流程不致突然中断；
3. 不会发生漏电、感电事故；
4. 用于石油、化工、火药等易燃、易爆场所绝对安全；
5. 对过载敏感性小，适应范围大。电气元件容许电源的变动范围一般为（+）10%~（-）15%，而气动元件假定标准压力为表压4公斤力/厘米²时，可以在表压2.5~7公斤力/厘米²范围内正常工作；
6. 耐高温性强。电子元件一般要求在70℃以下进行工作，超过120℃即须采取复杂的绝热保护措施。气动元件可在高温环境中进行正常工作。因而适用于炼钢、轧钢、铸造、锻造等高温车间和轮船、机车发动机的自动控制；
7. 使用寿命长。气动逻辑元件一般使用寿命可达 $10^7 \sim 10^8$ 次；
8. 制造成本低。约为有触点继电器的1/10；
9. 对恶劣环境的适应性强（如冲击、震动、粉尘、腐蚀、温差和电磁变化大等）；
10. 以气体为介质，其动作可由人的感官直接觉察，使用维护均较方便；
11. 可用其检测任何工业参数；
12. 气动逻辑元件与气动执行元件，可以使用同一压力的气源，从而实现能源的单一化。

与电气控制相比较，气动控制有下列缺点：

1. 反应速度慢。电子移动速度每秒约30万公里，相当于光速，而空气的流速最高只能接近音速，即每秒约300米，相差近100倍。电子计算机的运算速度可达几亿次，而气动运算最高只能达1万次。因此在反映速度方面，不可能与电子技术相比拟；
2. 在微型化方面不如电子技术。气动元件的体积越小，通路越细，流动阻力随通路的缩小而增大，因而影响气体的反应速度。而且由于体积小、通路细，对气源净化程度的要求也随之增高。这种对气源净化程度的过高要求，将成为气动技术发展的障碍。因而气动元件在微型化方面，将受到条件的限制；
3. 在气动技术中，压缩空气的工作压力一般不超过表压8公斤力/厘米²。线路越复杂，压力损失越大，信号传递速度越慢。因而不适于遥控和在十分复杂的控制线路中使用；
4. 气动装置的配管接装较电线连接麻烦；
5. 电气控制元件可成套购买，组成控制线路比较方便。气动元件在国内当前还处于研制阶段，特别是精密的传感器尚无定型产品，组成控制系统困难较多。

气动技术与液压技术虽同属流体控制系统，但由于所用工作介质不同，其理论基础亦不完全相同。

液压技术所使用的油，属于非压缩性流体。液压技术的理论基础是流体力学。在分析研究液压传动过程时，主要考虑力的平衡，即以液体所表现出的宏观的力学特征为依据，去分析研究液体在运动时的质量、动量和能量的迁移及转换的力学平衡问题。

气动技术所使用的压缩空气，是弹性流体。它的体积、压强和温度三个状态参量之间，

国际制 (SI) 单位摘要

表 0—1

物 理 量	名 称	符 号	单 位 及 换 算
长 度		L、l	m
质 量		M、m	kg
时 间		t、τ	s
热力学温度	绝对温度		K
物 质 量	克分子、摩尔		mol、kmol
密 度		ρ	kg/m ³
比 容		v	m ³ /kg
力	牛 顿	N	1 N = 1 kg·m/s ² 1 kgf = 9.80665 N
压力、应力	帕 斯 卡	Pa	1 Pa = 1 N/m ² 1 Pa = 1.02 × 10 ⁻⁵ kgf/cm ² 1 kgf/cm ² = 9.80665 × 10 ⁴ Pa
热 量	焦耳、千焦耳	J、kJ	1 J = 1 N·m = 1 W·s 1 kJ = 1000 J 1 kJ = 0.239 kcal 1 kcal = 4.1861 kJ
功、能			
内 能		U	J、kJ
焓		H、I	J、kJ
比 内 能		u	J/kg
比 焓		h、i	J/kg
比 热		c	J/(kg·K)、kJ/(kg·K) 1 J/(kg·K) = 1 N·m/(kg·K) 1 kcal/(kgf·K) = 4.1861 kJ/(kg·K)
热 容		C	J/K 1 kcal/K = 4.1861 kJ/K
气体常数		R	J/(kg·K ⁴)、N·m/(kg·K ⁴) 1 kgf·m/(kg·K) = 0.98665 J/(kg·K ⁴)
动力粘度		μ、η	Pa·s、N·s/m ² 1 N·s/m ² = 0.102 kgf·s/m ² 1 kgf·s/m ² = 9.81 N·s/m ²
运动粘度		ν	m ² /s
体积流量		$\dot{V}$	m ³ /s
质量流量		$\dot{m}$	kg/s〔注 (2)〕
质量流速		$\dot{G}$	kg/(m ² ·s)

1 kgf/cm² = 9.80665 × 10⁴ Pa = 0.980665 bar = 10⁴ mmH₂O = 735.5593 mmHg = 0.967841 atm

1 atm = 1.01325 × 10⁵ Pa = 1.01325 bar = 1.033227 × 10⁴ mmH₂O = 760 mmHg

1 kWh = 859.8454 kcal = 3600 kJ

1 kcal = 1.163 × 10⁻³ kWh = 4.1861 kJ

1 kgf·m/s = 175 PS = 9.80665 W

1 PS = 75 kgf·m/s = 735.4988 W

〔注〕：(1) 本表摘自 Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Begriffe und Benennungen (自动控制工程及控制工程技术术语名词)；

(2) 指单位时间通过的质量 (公斤/秒)，这里的“公斤”指物质的质量，而非重量。

有互为函数的关系。在气压传动过程中，不仅要考虑力学的平衡，而且要考虑热力学的平衡。在分析研究气动过程时，要根据热力学的基本规律去区分该过程是可逆过程 (Reversible Process) 还是非可逆过程 (Irreversible Process)；气体的运动是属于不流动

(*Non-flow*) 过程, 还是稳定流动 (*Steady-flow*) 过程。不同的过程将产生不同的结果。因而掌握工程热力学的基础知识是十分必要的。例如:

在计算压缩 1 米³空气所需的理论功时, 若将该空气自 1 (绝对大气压) 压缩至 1.1 (绝对大气压) 和压缩至 5 (绝对大气压), 分别用热力学公式和流体力学公式进行计算时, 可以看出: 当压缩比为 $P_2/P_1=1.1$ 时, 两种计算结果的误差约为 3 %。而在压缩比 $P_2/P_1=5$ 时, 两种计算结果的误差竟达 100 %。所以在计算空气压缩机的理论功时, 必须使用热力学公式 (参看本书第三章 [例题 3-1])。

在作工程计算时, 应注意使用单位的一致性。自 1960 年制定国际单位以后, 各国正在陆续采用。在热力学中使用 SI 单位的优点在于利用热力学第一定律进行热 $\rightleftharpoons$ 功计算时, 因“热的功当量” $J=427$ (公斤力·米/千卡) $=1$ (牛顿·米/焦耳) 和“功的热当量” $A=\frac{1}{427}$ (千卡/公斤力·米) $=1$ (焦耳/牛顿·米) 而使数学运算简单化 (参阅第一章第二节)。国际单位与工程单位的换算关系如表 0-1 [注 (1)] 所示。

第一章 工程热力学基础知识

工程热力学作为一门独立的学科出现，还是最近一个世纪以内的事。它是研究能量科学的一部分，主要研究热能转变为机械能时的工作情况。气动技术的工作介质——压缩空气正是靠这种转换来做功的。掌握工程热力学有关基础知识，对研究和应用现代化气动技术是十分必要的。

第一节 基本概念

一、气态物体在工程热力学中的分类

气态物体在热力学中分为三类：

1. 理想气体 是假想的处于理想状态的一种气态物体。这种气体其分子本身的体积与分子间的距离相较，微不足道，因而假想其分子本身所占的体积为零，并且认为分子之间没有吸引力（应该注意的是气体体积是气体分子所能达到的空间，而不是气体分子本身体积的总和）。

2. 实际气体 是指所有距液化点较远的实际存在的气态物体而言。在常温、常压下，氧、氮、一氧化碳等都是实际气体。但在低压力（不足一个大气压）或高温度（约 500°C 以上）下，水蒸汽和二氧化碳也属于这种气体。

3. 蒸汽 指距液化点不远，与产生这种蒸汽的液体很接近的气态物体而言。蒸汽锅炉中的水蒸汽即属于此类。

在工业中实际应用的气体，多数是各种气体的混合物，称为“混合气体”。空气本来是氧、氮、氢、氦等的混合气体，但通常是做为一种单独的气体来处理的。经过干燥处理的空气称为“干燥空气”或“干空气”。在实际生活环境中的空气，是干空气和未饱和的水蒸汽的混合物，通常称为“湿空气”。

混合气体和湿空气，在工程热力学中不作为基本气态物体看待。

二、温度与热量

1. 温 度

从分子运动论的观点来说，温度是物体分子运动平均动能的标志（分子热运动是不规则的，各个分子的运动速度不一定相等。因而各个分子的动能也不一定相等。物体分子动能的平均值，称为分子平均动能）。物体的温度升高，标志着分子平均动能在增大。物体温度的降低，则标志着分子平均动能的减小。

2. 热 量

从物理学的观点来说，物体的内能主要包括两个方面：

(1) 因物体分子运动而具有的动能,

(2) 因物体分子间相互作用而具有的势能。

当物体从某一状态过渡到另一状态时, 其内能也必然相应地发生变化——增加或减少。

物体内能的变化, 是通过传递热量和作机械功两种方式来实现的。例如, 我们可以用加热的办法使水的温度升高, 也可以用强烈搅拌的办法使水温升高。前者是用传递热量的办法增加水的内能; 后者是用机械功的办法增加水的内能。两者所达成的效应虽然相同, 但在达成效应的具体过程方面, 则不相同。作机械功, 是在外力的作用下, 通过物体的宏观运动来达成效应; 传递热量, 则是在分子相互作用下, 通过分子的微观运动来达成效应。两者必须明白区分, 不可混淆。

物体内能的增减, 如单纯是由于作机械功所致, 则内能的增减就可以用功量来度量。如果单纯是由于传递热量所致, 则内能的增减就必须用另一种物理量来度量。因此可以说: 热量是度量物体内能的一个物理量。

当传递的热量, 仅仅用于分子运动的增加并伴有温度上升, 这种热量称为“显热”。若所传递的热量仅仅用于改变分子聚合状态, 例如使固体液化、液体蒸发等, 这种热量称为“潜热”。在后者的变化过程中, 分子动能没有变化, 不伴随温度的变化。因此可以说: 热量表示物体内分子能的全部, 而温度只表示分子运动的强弱。

3. 温度与热量的单位

(1) 温度单位

目前在国际上常用的温度单位有以下三种:

a. 摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$) 国际通用。

在标准大气压下, 取水的冰点为 0°C , 沸点为 100°C 。

b. 华氏温度 ($^{\circ}\text{F}$) 主要用于美、英。

在标准大气压下, 取水的冰点为 32°F , 沸点为 212°F 。

c. 绝对温度 (K) 国际通用。

以 -273.2°C 为绝对零度 (0K), 即 $0\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$, 这一温度称为绝对零度, 是气体温度计所能达到的最低温度。从绝对零度开始计算的温度称为绝对温度。以 273.2°C 为水的冰点, 373.2°C 为沸点。

三种温度的换算关系如下:

$$\left. \begin{aligned} n^{\circ}\text{C} &= \left(\frac{9}{5} n + 32 \right)^{\circ}\text{F} = (n + 273.2) \text{K} \\ n^{\circ}\text{F} &= \frac{5}{9} (n - 32) \text{C} = \left[\frac{5}{9} (n - 32) + 273.2 \right] \text{K} \\ n\text{K} &= (n - 273.2)^{\circ}\text{C} = \left[\frac{9}{5} (n - 273.2) + 32 \right]^{\circ}\text{F} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

(2) 热量单位

将 1 克或 1 公斤纯水的温度升高 1°C 所需要的热量作为热量的单位, 前者称为 1 卡, 后者称为 1 千卡, 或 1 大卡。显然, 后者为前者的 1000 倍。在工程计算中通常使用后者。

确切来说, 使定量的水温度升高 1°C 所需的热量并不一定, 因为它随着开始升温时的温度和压力而变化。因此, 在精确地确定热量单位时, 必须首先确定温度和压力。

在标准大气压 (760 毫米汞柱) 下, 使 1 公斤纯水的温度, 从 14.5°C 上升到 15.5°C 所需

要的热量作为热量单位时称为“15°C卡”。通常为方便计算，把从0°C上升到100°C所需热量的1/100取做热量单位，称为“平均卡”。平均卡与15°C卡之间的差异很小，在工程计算上常不加以区别。

在英国和美国还习惯采用英国热量单位 (British Thermal Unit) 简称B.T.U.，是使1磅的水温度升高1°F所需的热量。

4. 比 热

使单位重量的物质温度上升1°C所需的热量称为该物质的比热。但对气体而言，同是升温1°C，所需的热量并不相同，要受到温度和压力的影响。为了正确地反映出真正的比热值，我们假定使单位重量气体的温度上升 dt 时所需的热量为 dq ，则

$$c = \frac{dq}{dt} = \text{给定状态下的比热}$$

比热的物理量是“千卡/公斤·°C” (千焦耳/公斤K)。为了和上述的平均比热相区别，这种比热称为“真比热”。因此，使 G 公斤物质温度上升 dt 时所需的热量 dQ 为：

$$dQ = Gcdt \quad (\text{千卡}) \quad (\text{千焦耳}) \quad (1-2)$$

如上所述，气体的比热随状态而变化，若以 $|c_m|_{t_1}^{t_2}$ 表示气体在温度 t_1 、 t_2 之间的平均比热，则 G 公斤的气体从温度 t_1 上升到 t_2 所需的热量为：

$$Q = G \int_{t_1}^{t_2} c dt = G |c_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$$

因之，平均比热就可以用下式来表示：

$$|c_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c dt \quad (1-3)$$

在体积保持不变的情况下加热，或压力保持不变的情况下加热，对固体和液体来说，其比热之值基本相等。但对气体来说就相差很大。因此，在谈气体比热时，经常使用定容比热 c_v 和定压比热 c_p 加以区别。

三、压 力

1. 气体产生压力的原因

从气体分子运动论的观点来看，气体都是由分子所组成的。这些气体分子在空间不停地做不规则的自由运动，或与器壁相冲撞，或分子彼此之间互相碰撞。分子运动速度大小不等，分子的动能（实质上就是热能）的大小也不等。

容器中的空气，由于分子做自由运动，分子将与器壁发生冲撞，因而即有力作用于器壁。一个分子与器壁冲撞时的力很小，且运动是不规则的，只是在冲撞的瞬间才有极微弱的力作用于器壁。但实际上气体分子数很多（0°C，1个大气压，22.4升的容积中，约有 6×10^{23} 个气体分子）连续向器壁冲撞，就有一定的力作用于器壁。作用于器壁单位面积上的力称为压强。在工程热力学和流体力学中，习惯上常把压强叫做压力。

一定容器中的空气，若以某种方法使其温度升高，则压强随之增高。这是因为温度升高时分子运动加剧，对器壁冲撞次数增加的结果。

空气在压气机中容积被压缩，压力也因之而增高，这是因为单位体积中的分子数增加了，分子冲撞次数增加了的结果。