

# 工程热力学 和流体力学

林 麒 编著

厦门大学出版社

# 工程热力学和流体力学

林 麒 编著

厦门大学出版社

# 工程热力学和流体力学

林 麒 编著

\*

厦门大学出版社出版发行

(地址:厦门大学 邮编:361005)

厦门新嘉莹彩色印刷有限公司印刷

(地址:厦门市莲前北路 77 号 邮编:361009)

\*

开本 850×1168 1/32 11 印张 269 千字  
1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册

ISBN 7-5615-1386-0/T·37

定价:18.50 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换

# 目 录

## 上篇 工程热力学

第一章 热力学基本定义和概念 .....	1
§ 1-1 绪论 .....	1
§ 1-2 热力学系统、状态和状态参量 .....	2
§ 1-3 平衡状态、状态方程、参数坐标图 .....	9
§ 1-4 过程和循环 .....	13
§ 1-5 功和热传递 .....	15
思考题 .....	16
习题 .....	16
第二章 理想气体 .....	18
§ 2-1 理想气体和实际气体 .....	18
§ 2-2 理想气体的状态方程 .....	19
§ 2-3 比热 .....	22
§ 2-4 气体常数 .....	25
思考题 .....	31
习题 .....	31
第三章 热力学第一定律 .....	33
§ 3-1 热力学第一定律的实质 .....	33

§ 3-2 闭口和开口系统中的能量守恒 .....	34
§ 3-3 理想气体的状态变化过程 .....	39
§ 3-4 稳流能量方程及其应用 .....	60
思考题 .....	69
习题 .....	70
<b>第四章 热力学第二定律 .....</b>	<b>73</b>
§ 4-1 热力学第二定律的表述 .....	74
§ 4-2 热机和泵 .....	77
§ 4-3 循环效率 .....	78
§ 4-4 熵和可逆性的概念 .....	84
§ 4-5 温-熵图 .....	101
思考题 .....	110
习题 .....	111
<b>第五章 液体和蒸气 .....</b>	<b>114</b>
§ 5-1 物性、相图及变化 .....	114
§ 5-2 水蒸气图表 .....	125
思考题 .....	133
习题 .....	133
<b>第六章 混合物 .....</b>	<b>135</b>
§ 6-1 混合物定律 .....	136
§ 6-2 混合气体 .....	137
§ 6-3 气体和蒸汽的混合物 .....	143
§ 6-4 干湿计量法及其在空气调节中的应用 .....	151
思考题 .....	165
习题 .....	166

## 下篇 工程流体力学

<b>第七章 流体力学基本概念</b> .....	169
§ 7-1 流体力学的研究对象 .....	169
§ 7-2 流体的主要物理性质 .....	170
§ 7-3 作用在流体上的力 .....	175
习题 .....	178
<b>第八章 流体静力学</b> .....	179
§ 8-1 流体静压力的特性 .....	179
§ 8-2 流体平衡微分方程 .....	182
§ 8-3 静止流体压力的分布 .....	185
§ 8-4 流体压力计 .....	192
§ 8-5 作用在淹没表面上的力 .....	197
§ 8-6 气体静力学 .....	209
思考题 .....	215
习题 .....	217
<b>第九章 流体流动的一般描述</b> .....	221
§ 9-1 研究流体运动的两种方法 .....	221
§ 9-2 稳定流和非稳定流、匀流和非匀流 .....	223
§ 9-3 流线和迹线 .....	225
§ 9-4 层流和湍流 .....	230
§ 9-5 边界层及其分离 .....	238
§ 9-6 物体周围的流动情况 .....	243
思考题 .....	247

习题 .....	247
<b>第十章 稳定流动 .....</b>	<b>249</b>
§ 10-1 连续性方程 .....	249
§ 10-2 欧拉运动方程 .....	255
§ 10-3 不可压缩理想流体的伯努利方程 .....	258
§ 10-4 伯努利方程的意义 .....	262
§ 10-5 实际流体的伯努利方程 .....	266
§ 10-6 伯努利方程的应用 .....	275
§ 10-7 动量定理 .....	286
§ 10-8 动量定理的应用 .....	290
思考题 .....	300
习题 .....	302
<b>附录</b>	
附表 1 常用气体的某些基本热力性质 .....	309
附表 2 某些常用气体在理想气体状态下的 平均定压比热 .....	310
附表 3 某些常用气体在理想气体状态下的 平均定容比热 .....	311
附表 4 空气在理想气体状态下的热力性质 .....	312
附表 5 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按温度排列) .....	317
附表 6 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按压力排列) .....	321
附表 7 未饱和水与过热水蒸气的热力性质 .....	325
附表 8 几种常见几何平面图形的 $S$ 、 $y_C$ 、 $J_C$ .....	332

# 第一章 热力学基本定义和概念

## § 1-1 绪论

热力学是研究热能和功相关的现象及与其有关的物质性质的科学。因此，热力学是物理学的一个分支。

涉及到热和功的现象很多。例如，自然界中常常刮风，有时形成风暴、下雨、下雪，气温变冷变暖，有时发生干旱，冬季结冰等等。这些现象都是遵循热力学的规律而发生的。

人们积极利用热功现象制造出来的机械很多。如汽车发动机、冰箱、喷气发动机、火箭以及火力发电厂设备等等，可以说这些都是应用热力学定律的产物。

一架旅客运输机，在空中飞行时，不论从头到尾，或是从外到内，无不发生热现象。首先是它的动力——航空燃气涡轮发动机，本身就是一种热机，它的工作原理包含有把机械能变成热能，加入化学能后，再将化学能转化的热能变成机械能，从而产生动力，维持飞机的飞行运动。其次，地面和高空的气温、大气压力相差很大，如何使客舱内保持适当的温度和压力，使旅客有一个舒适的乘机环境，这不但要求机身的隔热、增压性能良好，还必须对客舱进行空气调节。这些都必须根据热力学的基本定律来设计。

学习热力学的方法是通过讨论人们能直接观察到的宏观现象，从能量的观点出发，依据热力学第一定律和第二定律，通过逻辑推理，得出有关热功转换的计算公式。



本书将介绍的热力学有关知识包括：热力学的基本定义和基本概念，理想气体定律和实际气体（蒸汽、液体）的性质，热力学第一定律、第二定律，以及混合物的性质。

## § 1-2 热力学系统、状态和状态参量

### 一、热力学系统

#### 1. 热力学的概念

在研究和分析任何一个问题时，首先要确定研究的对象。在热力学中把所要研究的对象叫做热力系统，简称为系统或热力系。

外界 —— 与热力系统有关的周围物体。

界面 —— 将热力系统与外界分隔开的空间界限。

界面可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是变动的。

热力系统的变化总是存在热现象,往往伴随着热能和机械能之间的转换。热现象是一种复杂的物质运动形式，是物质中大量分子热运动的宏观表现。因此热力系统的变化是借助于某种媒介物质来实现的。

工质 —— 热力系统中实现热能和机械能相互转换的媒介物质。

#### 2. 热力系统的分类

在进行热力学分析时，既要考虑热力系统内部的变化，也要考虑热力系统通过界面和外界发生的能量交换和物质交换，但对外界的变化不必追究。

热力系统的选取，取决于所要研究的任务，它可以是一群物体，一个物体或物体的某一部分。

根据热力系统与外界发生质量和能量转换关系的特征，即热力系统和外界的联系（相互作用）情况，可以分为：

① 闭口系统 —— 系统与外界只发生能量交换，而无物质交换。

② 开口系统 —— 系统与外界不仅发生能量交换，而且有质量交换，即有物质流入和流出系统。

③ 孤立系统 —— 系统与外界既无能量交换，也无物质交换，即与外界无任何联系。

实际上，与外界绝对不发生任何联系的系统是不存在的。当实际存在的系统与外界的能量交换和物质交换少到可忽略的程度时，就可近似地当作孤立系统来处理，因此，孤立系统只是一种假设的极限情况。

④ 绝热系统 —— 系统与外界不发生热交换。

## 二、状态和状态参数

### 1. 状态

状态 —— 热力系统全部宏观物理特性的综合，即工质所处的某种宏观状况称为工质的热力状态。

### 2. 状态参数

状态参数 —— 从各个不同方面描写工质所处宏观状态的物理量。

热力学的状态参数很多，工程热力学常用的状态参数有六个，这六个状态参数是压力、比容、温度、内能、焓和熵。

在这六个状态参数中压力、比容、温度是基本状态参数。这几个状态参数可以直接测量，较直观，其它状态参数可以根据基本状态参数进行计算间接得到。

下面分别介绍这六个常用的状态参数。

### ① 压力

压力 —— 单位面积上承受的垂直作用力（即压强），用符号  $p$  表示：

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2, \text{Pa}, \text{帕}) \quad (1-1)$$

式中  $F$  —— 垂直作用力的合力，单位：牛顿，N；

$A$  —— 作用面积，单位：米<sup>2</sup>，m<sup>2</sup>。

气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁碰撞的结果。根据 (1-1) 计算的压力是工质的真正压力，称为“绝对压力”。工质的压力可由压力计测量而得。工程上常用的压力计有两种：测量显著压差的压力计和测量微小压差的压力计。U形管压力计是一种典型的压力计，用于测量微小压力差，其测压原理如图 1-1。

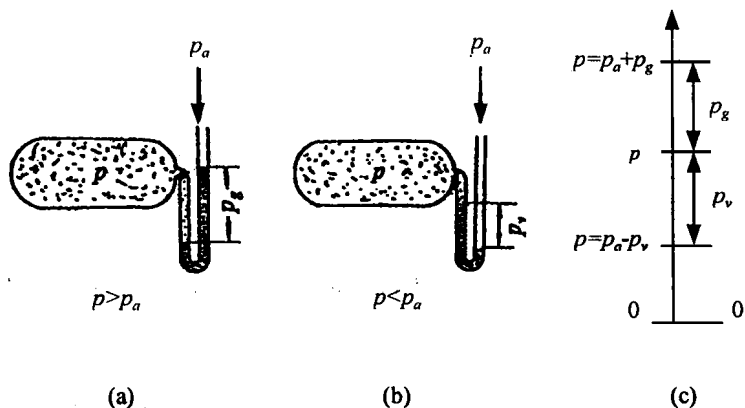


图 1-1

由于压力计本身总是处在某种环境（如大气）中，因而压力计测得的压力读数所代表的不是工质的绝对压力，而是被测工质的绝对压力与当时当地的环境压力的差值。

表压力 —— 当工质的绝对压力  $p$  大于大气压力  $p_a$  时，压力计所指示的数值称为表压力，用  $p_g$  表示：

$$\left. \begin{aligned} p_g &= p - p_a \\ p &= p_a + p_g \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

真空度 —— 当工质的绝对压力低于大气压力时，压力计所指示的读数称为真空度，用  $p_v$  表示：

$$\left. \begin{aligned} p_v &= p_a - p \\ p &= p_a - p_v \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

这时的压力计称为真空计。

显然，当工质的绝对压力保持不变时，大气压力发生变化，压力计指示的压力也会发生变化，所以在测量工质的绝对压力前，必须先测大气压力，大气压力可以用气压计测得。在工程计算中，如果被测工质的压力值较高时，可把大气压力看成常数，取  $p_a = 10^5 \text{ Pa}$ ，或取  $p_a = 1 \text{ atm}$ 。如果被测工质的压力较小，与大气压力相差不多时，必须按当时当地大气压力的具体数值来计算。

压力单位的表示方法比较多，常见的压力单位除了国际单位制（SI 制）的 Pa 外，还有 atm（标准大气压），mmHg（毫米汞柱），mmH<sub>2</sub>O（毫米水柱）。另外，欧美国家还习惯用 psi（磅 / 平方英寸）。它们之间的换算关系如下：

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ mmHg} &= 133.3224 \text{ Pa} \\ 1 \text{ mmH}_2\text{O} &= 9.806375 \text{ Pa} \\ 1 \text{ psi} &= 6.8947 \times 10^3 \text{ Pa} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

## ② 比容

比容 —— 单位质量的物质所占有的容积，用符号  $v$  表示：

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{或} \quad V = mv \quad (1-5)$$

式中  $v$  —— 比容，单位： $\text{m}^3/\text{kg}$ ；

$m$  —— 质量，单位： $\text{kg}$ ；

$V$  —— 容积，单位： $\text{m}^3$ 。

$v$  的倒数是  $\rho$ 。

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

式中  $\rho$  —— 密度，单位容积内物质所具有的质量，单位： $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## ③ 温度

温度 —— 物体的冷热程度。

温度作为表示物体冷暖程度的量，在日常生活中是经常能感受到的。但是，仅以感觉是难以做出准确判断的。比如说，长时间置于同一房间里的金属和棉花，其温度应是相同的。此时与它们接触却感到两者凉暖有别，若因此而判定两者的温度不同，则是错误的，所以必须正确地定义温度。

对于气体，温度可以用分子平均平动动能的大小来表示，即

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{2}{3} kT \quad (1-7)$$

式中  $m$  —— 分子的平均质量；

$v$  —— 分子的均方根平动速度；

$\frac{mv^2}{2}$  —— 分子的平均平动动能；

$k$  —— 波尔兹曼常数 ( $k = 1.380\ 662 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )；

$T$  —— 热力学绝对温度。

温标 —— 温度的数值表示方法。

国际单位制中采用热力学温标作为基本温标。用这种温标确定的温度称为热力学温度或绝对温度、开尔文温度，用符号  $T$  表示，单位为开尔文，K。热力学温标以水的三相点（水的固、液、气三相平衡共存的状态点）为基准点，并规定该点的温度为 273.16K。与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标。摄氏温标将基准点（即水的三相点）的温度规定为  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，并选用纯水在 1 个标准大气压下的冰点 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) 和沸点 ( $100^{\circ}\text{C}$ ) 之间划分 100 等份，每等份即  $1^{\circ}\text{C}$ 。如此确定的温度称为摄氏温度，用符号  $t$  表示，单位为摄氏度  $^{\circ}\text{C}$ 。它与热力学温标之间具有如下的换算关系

$$T (\text{K}) = t (^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-8)$$

这就是说，规定热力学温度 273.15K 为摄氏温度的零点 ( $t=0^{\circ}\text{C}$ )，同时也规定了两种温度的单位 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 和 (K) 所代表的温度间隔相等，因此两种温度只是起点不同，用 K 表示的温度差也可以用  $^{\circ}\text{C}$  表示，即  $\Delta t = \Delta T$ 。

在欧美国家，习惯上使用华氏温标 ( $^{\circ}\text{F}$ )，规定在一个标准大气压下纯水的熔点和沸点分别为  $32^{\circ}\text{F}$  和  $212^{\circ}\text{F}$ 。华氏温标与摄氏温标之间的换算关系为

$$t (^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} t (^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1-9)$$

#### ④ 内能

内能 —— 系统（物体）的内能指的是其内部所有分子的热运动的动能与分子势能的总和，用符号  $U$  表示。

由于组成物质的分子在不停地无规则地运动着，因而分子具有动能。另外，在分子力作用范围内，分子之间的相互位置决定了分子势能。如上所述，分子的热运动与温度有关，即 (1-7) 所表示的系统内部的分子运动动能只是温度的函数。但是分子势

能则随着分子间的距离改变而改变，这和地面上物体的重力势能随其高度改变而改变的情况相似。分子间的距离与容积有关，对气体而言，就是与比容有关，因此，内能是温度和比容的函数。由于温度和比容是状态参数，所以内能也是状态参数。

$$U = mu \quad (1-10)$$

式中  $U$ ——内能，单位：焦耳，J；  
 $u$ ——比内能，单位：焦耳/千克，J/kg；  
 $m$ ——物质的质量，单位：kg。

$U$  表示  $m$  kg 物质具有的总内能， $u$  则表示单位质量的物质所具有的内能。在本书中  $u$  比  $U$  用得更多，为简便，称  $u$  为内能， $U$  为总内能。

### ⑤ 焓

焓是一个组合的状态参数，用符号  $H$  表示，单位质量物质所具有的焓叫比焓，用符号  $h$  表示。

焓的定义式为

$$H = U + pV \quad (1-11)$$

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \quad (1-12)$$

$$H = mh \quad (1-13)$$

式中  $H$ ——焓，单位：焦耳、J；  
 $h$ ——比焓，单位：焦耳/千克、J/kg；  
 $U$ ——总内能，单位：焦耳、J；  
 $p$ ——压力，单位：N/m<sup>2</sup>、帕、Pa；  
 $m$ ——物质的质量，单位：kg；  
 $V$ ——容积，单位：m<sup>3</sup>；  
 $u$ ——内能，单位：焦耳/千克、J/kg。

$H$  表示  $m$  kg 物质所具有的焓， $h$  则表示单位质量的物质具有的焓。 $h$  也比  $H$  用得更多，常简称为焓， $H$  称为总焓。 $H$ 、 $h$  的

单位分别与  $U$ 、 $u$  相同。

### ⑥ 熵

熵是一个导出的状态参数，用符号  $S$  表示，单位质量物质所具有的熵叫比熵，用符号  $s$  表示。

熵的定义式为

$$\left. \begin{aligned} ds &= \frac{dq}{T} \\ \Delta s &= \int_1^2 \frac{dq}{T} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

$$S = ms \quad (1-15)$$

式中  $S$  —— 熵，单位：J/K；

$s$  —— 比熵，单位：J/(kg·K)；

$m$  —— 工质的质量，单位：kg；

$q$  —— 热量，工质获得（或放出）的热量，单位：焦耳 / 千克，J/kg；

$T$  —— 工质在获得（或放出）热量时的热力学温度，单位：开尔文，K。

$S$  表示  $m$  kg 物质所具有的熵， $s$  则表示单位质量的物质具有的熵。 $s$  也比  $S$  用得更多，常简称为熵， $S$  称为总熵。

以上简单地介绍了六个常用的状态参数，它们从不同角度描述系统所处的状态。

## § 1-3 平衡状态、状态方程、参数坐标图

### 一、平衡状态

平衡状态 —— 热力系在没有外界作用的情况下可以长久保持的状态。

这里的外界作用是指热力系与外界的能量交换和物质交换，



不指恒定的外场（如重力场、电磁场）的作用。

平衡状态是宏观状态中一种重要的特殊情况。热力学通常研究处于平衡状态的热力学系统。

工质在平衡状态下，各部分的性质都均匀一致。每个状态参数只有一个值。一个系统，里面有工质，如果它的压力到处相同，则称它处于压力平衡或机械平衡；如果它的温度到处相同，则称它处于温度平衡。如果一个系统同时处于压力平衡和温度平衡，则该系统就处于热力学平衡状态，简称平衡状态。

平衡状态的特点：平衡不会自动被破坏。一个平衡的热力学系统，只要不受外界的影响，它的状态就不会随时间而改变，将一直保持原有的平衡状态。如果这个热力系原来处于非平衡状态（如内部存在温差、压差等），只要不受外界的影响，那么它的内部必然会自发地进行一个变化过程，经过一段时间，当不平衡逐渐消失而内部不再发生变化时，热力系也就达到了平衡状态。如果没有外界的作用，它也将一直保持这种平衡状态。

下面是三个从非平衡状态达到平衡状态的例子：

例 1-1. A、B 两个温度不同的物体，设  $T_A > T_B$ ，相互接触后， $T_A$  下降，而  $T_B$  上升，最终  $T_A = T_B$ 。

例 1-2. 一封闭容器，隔成 A、B 两部分，设  $p_A > p_B$ ，隔板抽去，A 部分的气体向 B 部分运动，最终  $p_A = p_B$ 。

例 1-3. 一封闭容器，装一半水，抽去空气，水将由水面向上蒸发，水面上将充满水气，最后，水不再蒸发，水、汽处于平衡。

## 二、状态方程

由上述可知，处于一定的平衡状态的系统，其各个状态参数