

# 工程热力学总复习

——理论概要和习题

童钧耕 洪春华 刘冬暖 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书是工程热力学课程的教学辅导书。工程热力学是动力、能源、化工、宇航、机械等学科的技术基础课,在相关课程的教学起着重要作用。本书对工程热力学的主要内容作了简要的叙述,精选了600余道较为典型的习题,并对其中约200道提供了题解,以帮助读者较好地理解和掌握工程热力学的原理。此外,还收集了上海交通大学近年来工程热力学的各类试卷9套,包括研究生入学考题、选优考题及期末考题。

可供大专院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程热力学总复习:理论概要和习题/童钧耕,洪春华,刘冬暖编著. —上海:上海交通大学出版社,2002  
ISBN7-313-03036-3

I. 工... II. ①童... ②洪... ③刘... III. 工程热力学—高等学校—自学参考资料 IV. TK123  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 022573 号

### 工程热力学总复习

——理论概要和习题

童钧耕 洪春华 刘冬暖 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路877号 邮政编码200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市文化印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:880mm×1230mm 1/32 印张:9.625 字数:274千字

2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印数:1-3050

ISBN7-313-03036-3/TK·069 定价:14.00元

---

版权所有 侵权必究

# 前 言

工程热力学是能源、动力、化工、机械等学科的基础技术课,在相关课程的教学起着重要作用。由于工程热力学课程本身的特点,如有些概念比较抽象灵活,所以许多学生学习时感到有些困难,尤其在做习题时常常无从着手。造成这种局面很重要的一个原因是概念理解不深,练习较少。我们并不主张题海战术,但我们深信“种瓜得瓜,种豆得豆”。学好一门课程必须做一定数量的习题,在此基础上归纳、总结,提高对课程所涉及理论的理解和相关知识的掌握。一些年来,许多学生表达了希望有一本内容较简练、例题和习题较有代表性的教学辅导书,帮助学好工程热力学。作者在长期教学和教改实践的基础上,参照国家教育委员会 1995 年制定的多学时《工程热力学课程教学基本要求(修订版)》以及沈维道等编撰的面向 21 世纪课程教材——《工程热力学(第三版)》和国内外优秀教材编写了本书,希望能满足广大学生的要求。

本书对工程热力学的基本内容归纳、总结,将之分为八章,每章均含有基本理论、基本知识点、典型例题和习题等内容。考虑到工程热力学的特点,第 7 章安排综合题。为了满足学生了解上海交通大学历年来各类工程热力学考试试题的愿望,本书的第 9 章选编了近年上海交通大学本科生考试、硕士生入学考试和上海交通大学优秀生选拔考试的试卷。这些试卷可以作为学生自测的参考材料,用以测定对工程热力学掌握的程度。

本书简练、严谨,自成体系,可以与其他教材配套使用,也可单独使用。本书为大部分习题提供了参考解题过程,特别是对学生普遍感到困难的热力学一般关系及综合类习题提供参考解题过程的习题比例更高。这些解题过程不是惟一的,希望读者能找出许多其他解法,举一反三,以真正掌握所学知识。相信本书会成为帮助学生学好工程热力学、

通过工程热力学各种考试和希望自学掌握工程热力学的读者的有力工具。

为了使篇幅更为紧凑,本书没有列入各种物性参数表和线图,相信读者很容易能找到所需的图表。

本书各章的理论概要由童钧耕编写,例题和习题由童钧耕、洪春华、刘冬暖共同完成。本书在编写过程中得到了沈维道教授的指导和帮助,沈先生无私地提供了多年积累的资料,我校动力与能源工程学院的黄震教授、张维竞副教授、刘震炎教授和工程热物理研究所的同仁及上海海运学院吴孟余教授等对本书给予了大力支持,在此一并致谢。

书中若有错误和不妥之处,望能拨冗赐教。

**编著者**

**2001年11月**

**于上海交通大学**

# 主要符号表

$A$	面积, $\text{m}^2$
$c_f$	流速, $\text{m/s}$
$c$	比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 浓度, $\text{mol}/\text{m}^3$
$c_p$	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_v$	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_m$	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$d$	耗汽率, $\text{kg}/\text{J}$ ; 含湿量, $\text{kg}/\text{kg}$ 干空气
$E$	总能(储存能), $\text{J}$
$E_r$	焓, $\text{J}$
$E_{r,Q}$	热量焓, $\text{J}$
$E_{r,U}$	热力学能焓, $\text{J}$
$E_{r,H}$	焓焓, $\text{J}$
$E_k$	宏观动能, $\text{J}$
$E_p$	宏观位能, $\text{J}$
$F$	力, $\text{N}$ ; 亥姆霍兹函数, $\text{J}$
$G$	吉布斯函数, $\text{J}$
$H$	焓, $\text{J}$
$H_m$	摩尔焓, $\text{J}/\text{mol}$
$\Delta H_c^\circ$	标准燃烧焓, $\text{J}/\text{mol}$
$\Delta H_f^\circ$	标准生成焓, $\text{J}/\text{mol}$
$I$	作功能力损失(焓损失), $\text{J}$
$K_c$	以浓度表示的化学平衡常数
$K_p$	以分压力表示的化学平衡常数

$M$	摩尔质量, kg/mol
$Ma$	马赫数
$M_r$	相对分子质量
$M_{eq}$	平均摩尔质量(折合摩尔质量), kg/mol
$n$	多变指数; 物质的量, mol
$p$	绝对压力, Pa
$p_0$	大气环境压力, Pa
$p_b$	大气环境压力, 背压力, Pa
$p_e$	表压力, Pa
$p_i$	分压力, Pa
$p_s$	饱和压力, Pa
$p_v$	真空度, Pa; 湿空气中水蒸气分压力, Pa
$Q$	热量, J
$q_m$	质量流量, kg/s
$q_v$	体积流量, m <sup>3</sup> /s
$Q_p$	定压热效应, J
$Q_v$	定容热效应, J
$R$	摩尔气体常数, J/(mol · K)
$R_g$	气体常数, J/(kg · K)
$R_{g,eq}$	平均气体常数(折合气体常数), J/(kg · K)
$S$	熵, J/K
$S_g$	熵产, J/K
$S_f$	(热)熵流, J/K
$S_m$	摩尔熵, J/(mol · K)
$S_m^0$	标准摩尔绝对熵, J/(mol · K)
$T$	热力学温度, K
$T_i$	转回温度, K
$t$	国际摄氏温度, °C
$T_w$	湿球温度, °C
$U$	热力学能, J

$U_m$	摩尔热力学能, J/mol
$V$	体积, $m^3$
$V_m$	摩尔体积, $m^3/mol$
$W$	膨胀功, J
$W_{net}$	循环净功, J
$W_i$	内部功, J
$W_s$	轴功, J
$W_t$	技术功, J
$W_u$	有用功, J
$w_i$	质量分数
$x$	干度(专指湿蒸汽中干饱和蒸汽的质量分数)
$x_i$	摩尔分数
$z$	压缩因子
$\alpha$	抽汽量, kg; 定容压力温度系数; 离解度
$\alpha_v$	体膨胀系数
$\gamma$	质量比热容(比热容比); 相变潜热, J/kg
$\epsilon$	制冷系数; 压缩比
$\epsilon'$	供暖系数
$\eta_c$	卡诺循环热效率
$\eta_{cs}$	压气机绝热效率
$\eta_x$	焓效率
$\eta_T$	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率
$\eta_t$	循环热效率
$\eta_V$	容积效率
$\kappa$	等熵指数
$\kappa_T$	等温压缩率
$\lambda$	升压比
$\mu$	化学势
$\alpha_j$	焦尔-汤姆逊系数(节流微分效应)
$\pi$	压力比(增压比)

$\nu$	化学计量系数
$\nu_{cr}$	临界压力比
$\rho$	密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 预胀比
$\sigma$	回热度
$\varphi$	相对湿度; 喷管速度系数
$\varphi_i$	体积分

## 下脚标符号

a	空气中干空气的参数
c	卡诺循环; 冷库参数
C	压气机
cr	临界点参数; 临界流动状况参数
CV	控制体积
in	进口参数
iso	孤立系统
n	物质的量
s	饱和参数, 相平衡参数
out	出口参数
v	湿空气中水蒸气的参数
0	环境的参数; 滞止参数



# 目 录

主要符号表	1
-------	---

## 第 1 章 基本概念

第 1 部分 理论概要	1
1.1 热力系统	1
1.2 平衡状态和状态参数	1
1.3 温度和温标	2
1.4 压力	3
1.5 状态方程	3
1.6 准静态过程和可逆过程	4
1.7 循环	4
1.8 功和热量	5
第 2 部分 例题和习题	6
是非题	6
选择题和填空题	7
简答题	11
计算题和证明题	12

## 第 2 章 气体的性质

第 1 部分 理论概要	16
2.1 理想气体及其混合气的性质	16
2.2 水和水蒸气的性质	19

2.3 湿空气	20
<b>第 2 部分 例题和习题</b>	22
是非题	22
选择题和填空题	23
简答题	26
计算题和证明题	28

### 第 3 章 气体的热力过程

<b>第 1 部分 理论概要</b>	42
3.1 理想气体的基本热力过程	42
3.2 水蒸气的基本热力过程	44
3.3 湿空气的热力过程	45
3.4 喷管内气体的流动	45
3.5 绝热节流	47
3.6 压气机的热力过程	48
<b>第 2 部分 例题和习题</b>	50
是非题	50
选择题和填空题	51
简答题	54
计算题和证明题	55

### 第 4 章 热力学第一定律和第二定律

<b>第 1 部分 理论概要</b>	82
4.1 热力学第一定律的实质	82
4.2 膨胀功、技术功和流动功	82
4.3 热力学第一定律表达式	83
4.4 热力学第二定律的两种表述	84
4.5 卡诺循环和卡诺定理	84

4.6	平均吸(放)热温度和多热源热机的热效率	86
4.7	热力学第二定律的数学表达式	86
4.8	熵和熵方程	87
4.9	作功能力损失与熵产	88
<b>第2部分</b>	<b>例题和习题</b>	89
	是非题	89
	选择题和填空题	91
	简答题	97
	计算题和证明题	100

## 第5章 热力学一般关系式及实际气体性质

<b>第1部分</b>	<b>理论概要</b>	136
5.1	亥姆霍兹函数和吉布斯函数	136
5.2	特征函数	136
5.3	麦克斯韦关系	137
5.4	常用热系数	137
5.5	熵、热力学能、焓及比热容的一般表达式	138
5.6	普遍化状态方程和通用压缩因子图	139
<b>第2部分</b>	<b>例题和习题</b>	140
	计算题和证明题	140

## 第6章 热力循环

<b>第1部分</b>	<b>理论概要</b>	159
6.1	循环分析的目的和方法	159
6.2	活塞式内燃机循环	160
6.3	燃气轮机装置循环	163
6.4	蒸汽动力装置循环	166
6.5	制冷装置循环	170

<b>第 2 部分 例题和习题</b> .....	174
是非题.....	174
简答题.....	176
计算题和证明题.....	177

## 第 7 章 综合题

是非题.....	193
简答题.....	193
计算题和证明题.....	194

## 第 8 章 化学热力学

<b>第 1 部分 理论概要</b> .....	229
8.1 基本概念 .....	229
8.2 热力学第一定律在化学反应中的应用 .....	231
8.3 化学反应的方向和化学平衡判据 .....	235
8.4 熵的绝对值 .....	238
<b>第 2 部分 例题和习题</b> .....	238
简答题.....	238
计算题和证明题.....	239

## 第 9 章 精选考题

精选考题 1 1998 年工程热力学考题.....	255
精选考题 2 1999 年工程热力学考题.....	258
精选考题 3 2001 年工程热力学考题.....	260
精选考题 4 1998 年工程热力学研究生入学考题.....	262
精选考题 5 2000 年工程热力学研究生入学考题.....	266
精选考题 6 2001 年工程热力学研究生入学考题.....	272

精选题 7	1999 年工程热力学选优考题·····	281
精选题 8	2000 年工程热力学选优考题·····	283
精选题 9	2001 年工程热力学选优考题·····	285
<b>参考文献</b>	·····	290

# 第 1 章 基本概念

## 第 1 部分 理论概要

### 1.1 热力系统

热力学中作为研究对象的人为划定的有限物质系统,简称系统。与系统发生质能交换的物质系统称为外界;两者之分界称为边界,通常边界是固定的、刚性的实体,但也可以是移动的、弹性的、虚构的。

系统根据其与其外界有无质量交换可分为开口系(控制容积)和闭口系(控制质量);若系统与外界无热交换则为绝热系;系统与外界若无任何质、能交换,则为孤立系,孤立系是人为抽象的概念,现实中并不存在孤立系。

工程热力学研究的主要是所谓的简单可压缩系——与外界仅有容积功交换,无化学反应的,由可压缩物质构成的有限物质系统。

### 1.2 平衡状态和状态参数

在没有外界影响(与外界既没有能量交换也没有质量交换,但恒力场如重力场的影响除外)的条件下,系统参数不随时间变化的状态称作平衡状态。若系统处于平衡状态,则其内部无压力差及温度差;系统与外界也无压力差及温度差。在无化学反应的系统中,达到平衡状态的充要条件是同时达到力和热的平衡。系统处于平衡状态则其必定稳定,反之不然;平衡态并不要求系统均匀,由饱和水和饱和蒸汽构成的系统可以是平衡的,但显然其密度不均匀。

处于平衡状态的系统可由各种宏观物理量描述,这些宏观物理量称作状态参数,所有状态参数的综合确定了系统的状态。一般地说,当系统所有状态参数一一对应相等时,系统两状态相同;反之,若系统两状态相同,则其所有状态参数对应相等。简单可压缩系只有两个独立的状态参数,余则均可表示为此两状态参数的函数,故简单可压缩系只要两个独立状态参数相等,两状态也就相同。

状态参数的特征是它仅取决于系统的状态,而与系统如何达到该状态无关。在数学上表现为:

$$\int_{1-2} dZ = Z_2 - Z_1 \quad \oint dZ = 0 \quad dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_x dy$$

状态参数  $Z$  可分为强度量与广延量两类,强度量与系统物质的量无关,如压力  $p$ 、温度  $T$ ;广延量与系统物质的量成正比,如体积  $V$ 、热力学能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$  等,广延量的比参量即比体积  $v$ 、比焓  $h$ 、比熵  $s$  等具有强度量的性质。

简单可压缩系任一平衡状态可用状态参数图上一点表示;反之,状态参数图上每一点与一确定的平衡状态相对应。

### 1.3 温度和温标

如果两个系统同时与第三个系统处于热平衡,则它们彼此也处于热平衡,这称为热力学零定律,它是温度测量的基础。

温度差是驱使热量传递的推动力(势),温度是描述和判断系统是否与其他系统处于热平衡状态的状态参数。一切处于热平衡的系统都具有相同的温度;系统之间有热量传递,则必存在温差。

温标是温度的数值表示法。根据热力学第二定律建立起来的温标称为热力学温标,它与经验温标的不同之处在于热力学温标是不依赖物质随温度变化的性质建立起来的。热力学温标采用“开[尔文]”(K)作为度量温度的单位,其取值为水的三相点的热力学温度的  $1/273.16$ ,该温标的零点在水的三相点以下  $273.16\text{ K}$  处。

利用测温物质的某种特性,如定容下气体的压力、定压下气体的体

积、金属丝的电阻等并采用特定的温度标定规则所得到的温标称为经验温标。若采用水的三相点为唯一固定点,定为 273.16,则理想气体温标与热力学温标完全一致,因此热力学温标可以由理想气体温标体现。

工程上除热力学温标外,目前还通用国际摄氏温标,它与热力学温标的关系为:

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

## 1.4 压力

压力即物理学中的压强。通常仪表测量的是表压力或真空度,等于系统压力  $p$  与仪表所在的环境压力——当场大气压  $p_b$  的差,故系统的压力应为:

$$p = p_b + p_e \quad (p > p_b \text{ 时}) \quad p = p_b - p_v \quad (p < p_b \text{ 时})$$

其中: $p_e$  和  $p_v$  分别是表压力和真空度。需要注意的是当场大气压是仪表所在地的压力,未必与环境大气压力一致。

压力的单位是“帕”(Pa),工程上常用千帕(kPa)、兆帕(MPa)。

## 1.5 状态方程

基本状态参数  $p$ 、 $T$ 、 $v$  之间的函数关系称为状态方程。

理想气体的状态方程是:

$$pv = R_g T \quad pV = mR_g T \quad pV = nRT$$

其中: $R_g$ (J/(kg·K))是气体常数,仅与气体种类有关而与气体的状态无关; $R$ 是通用气体常数,不仅与气体状态无关,也与气体的种类无关, $R=8.3145$  J/(mol·K),若气体相对分子质量为  $M$ ,则  $R=MR_g$ ;  $n$  是工质的物质的量。需强调的是状态方程式中压力  $p$  的单位是 Pa;温度  $T$  的单位是 K;比体积  $v$  的单位是  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,体积  $V$  的单位是  $\text{m}^3$ ;质量  $m$  的单位是 kg。

实际气体的状态方程式有许多形式,最早提出的实际气体状态方



程是范德瓦尔方程:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

其中:  $a$  和  $b$  是物性常数。

20 世纪初提出的维里型方程为:

$$Z = 1 + B'p + C'p^2 + \dots$$

$$Z = 1 + B/v + C/v^2 + \dots$$

式中:  $B$ 、 $B'$  称为第二维里系数;  $C$ 、 $C'$  称为第三维里系数; 等等。第二维里系数、第三维里系数等在一些假设条件下可由统计物理方法求出, 但通常由实验测定。原则上维里方程描述的  $p$ 、 $v$ 、 $T$  关系可提供所需的精度, 但迄今工程上很少应用。

## 1.6 准静态过程和可逆过程

准静态过程(或准平衡过程)是系统经历的一系列无限小偏离平衡状态并随时迅速恢复平衡状态的过程。准静态过程进行的条件是驱使过程进行的不平衡势无限小, 进行时间无限长。它是实际过程的理想化。

系统经历某一过程后, 如能在过程逆向进行后使外界和系统同时回复到初始状态而不留下任何变化, 则该过程称为可逆过程。可逆过程是无耗散效应(如摩擦、电阻、磁滞等等)的准静态过程。

可逆过程和准静态过程可由状态参数图上的实线表示。

## 1.7 循环

循环是封闭的热力过程。循环可分为正向循环(动力循环)和逆向循环(制冷循环和热泵循环)两类, 前者输出循环净功, 后者把热量从低温热源传向高温热源。循环中所有过程都可逆的循环称为可逆循环。不论经历什么循环, 系统各状态参数均恢复原值。

循环的经济性指标一般用收益与代价之比来表示。动力循环的经