

朱明善 刘颖 史琳 编

工程热力学

题型分析

(第二版)

工程热力学题型分析



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

工程热力学题型分析

(第二版)

朱明善 刘颖 史琳 编

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是工程热力学的教学参考书。全书汇集了 520 道概念性与工程性较强的题例。这些题具有一定的广度、深度和难度,其中还包含了相当数量适于思考、分析、讨论的问题。本书采用整理、归纳、分类的方法,详细列举了有关题型,便于读者举一反三,全面了解。在解题过程中着重说明分析思路、解题技巧以及需要注意的问题;还介绍了不少题的多种解题方法,以便读者加深理解抽象概念与基本理论,正确掌握分析方法,提高解决问题的能力。

本书可用作热工类专业大学生与自学者的辅助教材,也可作为相应专业特别是热工教师的参考用书。

书 名: 工程热力学题型分析

作 者: 朱明善 刘颖 史琳 编

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京国马印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 14 **字数:** 352 千字

版 次: 2000 年 4 月第 2 版 2000 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01137-0/O·233

印 数: 0001~4000

定 价: 17.50 元

第二版前言

本书第一版 1989 年 9 月问世以来,由于编写体例有特色,选材较为丰富,具有一定的广度、深度和难度,有利于读者加深对抽象概念与基本理论的理解,正确掌握分析方法,培养思考和解决实际问题的能力,因而深受广大读者青睐,被一些院校相应专业选作教学参考书。为了满足广大读者的需求,加之从 1989 年出版以来的十年间科学技术的不断发展,工程热力学领域的一些新内容也需有所反映。经与清华大学出版社商定,决定在第一版的基础上,进一步对内容作适当的补充和修改后,以第二版的方式出版。

我们在本书的第二版中,从下列几方面增订和充实了相应的内容:

1. 近十年来涌现的日趋成熟的一部分新内容,如程氏循环、燃料电池、联合循环、海水淡化系统和吸收式变热器等;
2. 在第一版强调概念性内容的基础上,适当加强工程性应用方面的选材;
3. 扩充、丰富了有关题型的内容;
4. 在有些章节中增添了内容,如热力学第二定律在化学反应中的应用等;
5. 为适应计算机的应用与发展,适当补充了编写计算程序的题型;
6. 为了有利于读者检查掌握的程度,在每章后面增加了复习题;
7. 全书采用我国法定计量单位和名词术语。

第二版汇编的题例从原有的 331 道增加到 520 道。此书既可

作为清华大学出版社出版的由朱明善、刘颖、林兆庄、彭晓峰等编写的《工程热力学》一书的补充教材配合使用,也可独立地作为有关专业工程热力学课程的教学参考书。对于教师和研究生也有参考价值。

鉴于第一版作者中邓小雪老师因故无法参与此次修订工作,第二版的增订修改工作由朱明善、刘颖和史琳同志完成。第二版的第1,2和7章的增订修改由朱明善执笔,第3章由刘颖撰写,第4,5和6章由史琳撰写。全书经相互审阅,最后由朱明善统稿。编写过程中吸取了清华大学热工教研组同事们及一些兄弟院校同仁们丰富的教学经验与科研成果,并参考了90年代出版的一些国外教材的内容,在此一并致谢。

编 者

1998.12 于清华园

前 言

本书是根据作者多年来在清华大学教学的经验并参照了全国高等学校工科热工课程指导委员会拟定的热工类工程热力学的基本要求(讨论稿)编写的,可以作为“工程热力学”课程的一本参考教材。

我们编写此书的目的,在于通过有关题型的解析,帮助读者加深对抽象概念与基本理论的理解,正确掌握分析热工问题的方法,培养思考问题的灵活性以及提高解决问题的能力。

依据上述目的,在本书的编排上,采取了综合、归纳与分析的方法。鉴于大多数实际热工问题往往是综合性的,并非用一、二个概念就能解决。为此本书一反惯例,不完全拘泥于通常的章节顺序。在按基本概念与原理、工质性质与计算、循环分析方法以及化学热力学等几大部分编排时,各章既有相对的独立性,又互有呼应,相互交叉,以便既可按教学进度选取适当章节进行学习,又能满足综合分析和复习提高的需要。对于各章涉及的内容,不是简单列举一些例题,而是将有关问题采取归纳、整理与分类的方法,以便使读者做到胸有全局、举一反三,从所列举的例题中演变出更多的相应问题。对于例题的求解,则侧重说明思路、解题技巧以及需要注意的问题,着重指出容易产生错误的方面。还给出了不少题的多种解法,可使读者扩大思路。在选材方面,主要参考了十多本国内外工程热力学教材与习题集,特别是我们自身教学实践经验积累的问题以及兄弟院校的经验与部分资料。本书收集了概念性与工程性较强的 331 道具有代表性的题例,有一定的广度和深度,有的还有相当的难度,其中包含了相当数量适于思考、分析、讨论的

问题。它们大都选自我们自编的课堂讨论与提高性参考题集以及清华大学历年硕士生入学试题，一部分取自西安交大、天津大学、中国科技大学、华中工学院、重庆大学、北京工业学院、华北电力学院等兄弟院校近年来部分较难的硕士生入学试题。对于所选的题例，有的详细进行了分析，有的则留待读者自解。这样，既有示例，又留有一定数量的习题，以供读者练习之用。

本书可以作为热工类热能动力、空调制冷、内燃机械、工程热物理等专业大学本科生的教学辅助用书，同样也可作为上述相应专业自学进修人员的参考用书。对于有关的教师也有参考价值。

本书的第一、四、六和七章由朱明善执笔，第二与第三章分别由邓小雪与刘颖撰写，第五章由朱明善与邓小雪合写。全书经相互阅改，最后由朱明善统稿。编写过程中清华大学王补宣教授与热工教研组的其他一些同志给予了支持与关心，特此致意。对于前述一些兄弟院校的支持也一并致谢。

编 者

1986.8 于清华园

主要符号表

拉丁字母

C, c	热容; 比热容(质量热容), 速度
c_p, c_v	比定压热容; 比定容热容
$C_m, C_{p,m}, C_{v,m}$	摩尔热容; 摩尔定压热容; 摩尔定容热容
E, e	总能; 比能
E_k, E_p	动能; 位能
Ex, Ex_m, ex	总焓; 摩尔焓; 比焓
Ex_Q, Ex_U, Ex_H	热量焓; 内能焓; 焓焓
ex_q, ex_u, ex_h	比热量焓; 比内能焓; 比焓焓
F, f	亥姆霍兹函数; 比亥姆霍兹函数
G, G_m, g	吉布斯函数; 摩尔吉布斯函数; 比吉布斯函数
$\Delta G_{i,m}^\ominus$	标准生成吉布斯函数
H, H_m, h	总焓; 摩尔焓; 比焓
$\Delta H_{i,m}^\ominus$	标准生成焓
$(-\Delta H_u), (-\Delta H_{u,L}), (-\Delta H_{u,h})$	发热量(热值); 低发热量; 高发热量
K_p, K_x, K_c	化学平衡常数
M	摩尔质量
m, q_m	质量; 质量流量
n	物质的量, 多变指数
P	功率
p	压力

p_0	大气压力
p_k	表压力
Q, q	热量, 反应热; 单位质量的热量
Q_p, Q_V	定压热效应; 定容热效应
q_V	体积流量
r	汽化潜热
R, R_g	摩尔气体常数; 气体常数
S, S_m, s	总熵; 摩尔熵; 比熵
S_m^\ominus	标准状态的绝对熵
T, t	热力学温度; 温度
U, U_m, u	内能(热力学能); 摩尔内能; 比内能
V, V_m, v	体积; 摩尔体积; 比体积
W, w	膨胀功, 闭口系统净功; 比膨胀功, 闭口系统比净功
w_i	质量分数
$W_{\text{net}}, w_{\text{net}}$	开口系统净功; 开口系统比净功
W_s, w_s	轴功; 比轴功
W_t, w_t	技术功; 比技术功
$W_{R.\text{use}}$	可逆过程的最大有用功或最小有用功
x	干度
x_i	摩尔分数
Z	压缩因子
z	高度

希腊字母

α_V	体膨胀系数
γ	比热比, 理想气体的 $\gamma \equiv \kappa$

ε	制冷系数, 反应度
ε'	供热系数
η, η_t	效率; 热效率
κ	等熵指数
κ_s	等熵压缩率
κ_T	等温压缩率
μ	弹性系数
μ_j	焦汤系数
Π, π	作功能力损失或熵损失; 比作功能力损失 或比熵损失
φ	相对湿度
φ_i	容积分数
ν	化学计量系数

下 标

a	干空气, 空气
b	沸点, 表面
c	卡诺循环, 临界状态, 压气机, 压缩机, 压缩
con	冷凝器
c. v	开口系统或控制系统
DP	露点
E	工质
ex	熵
el	电
f	燃料, 终态, 焓流
g	气态, 燃气, 发电机, 焓产
H	高温热源
IR	不可逆

i	第 i 种组元
i	初态, 冰点
in	进口条件
iso	孤立系统
L	低温热源, 液态, 摩擦耗功
max	最大, 最高
mix	混合
n	多变过程
out	出口条件
P	生成物
p	过程, 泵, 热泵
R	反应物, 可逆
r	热源
s	定熵
s	饱和, 固态, 相变
tr	三相点
v	水蒸气, 蒸气
w	湿球, 水, 湿空气, 器壁
0	环境

上 标

°	压力为 101.325 kPa 时的参数
⊖	标准态
'	饱和液态参数
"	饱和气态参数

目 录

第二版前言	I
前言	II
主要符号表	V
第 1 章 基本概念	1
1.1 工程热力学解题的一般方法和实例	1
1.2 系统	8
1.3 状态参数	13
1.4 平衡态	16
1.5 热力学第零定律和温度	18
1.6 准静态过程与可逆过程	22
1.7 复习题	24
第 2 章 热力学第一定律	26
2.1 功的计算	26
2.2 热力学第一定律的基本能量方程式	35
2.3 稳定流动能量方程	56
2.4 非稳定流动问题	65
2.5 复习题	87
第 3 章 热力学第二定律	91
3.1 热力学第二定律表述	91
3.2 卡诺循环与卡诺定理	94
3.3 过程方向性的特征与判据	99
3.4 熵——广延性的状态参数	114
3.5 熵的计算	118
3.6 熵方程	129
3.7 最大功、最小功的计算	136
3.8 作功能力损失的计算	144

3.9	烟	153
3.10	复习题	168
第4章	均匀系的热力学一般关系式	173
4.1	数学工具	173
4.2	特征函数	175
4.3	基本方程和 Maxwell 关系	177
4.4	运算技巧	184
4.5	常用的辅助方程与热系数	192
4.6	题型一——各参数的关联	194
4.7	题型二——过程线的斜率	208
4.8	题型三——参数变化和过程方程	213
4.9	题型四——确定状态方程	221
4.10	题型五——参数计算	225
4.11	复习题	228
第5章	工质的性质及其过程	230
5.1	理想气体的性质	230
5.2	理想气体的过程	246
5.3	理想混合气体的性质及过程	252
5.4	湿空气的性质及过程	274
5.5	纯物质的性质及过程	297
5.6	复习题	317
第6章	循环分析	323
6.1	理想循环的热力学分析方法	323
6.2	实际循环的热力学分析方法	344
6.3	复习题	367
第7章	化学热力学基础	373
7.1	化学计量	373
7.2	热力学第一定律在化学反应中的应用	382
7.3	热力学第二定律在化学反应中的应用	397
7.4	化学平衡	408
7.5	热力学第三定律与绝对熵	429
7.6	复习题	434

第1章 基本概念

1.1 工程热力学解题的一般方法和实例

1.1.1 解题的一般方法

1. 仔细审题。掌握已知条件,弄清题意,并且按照题意,列出物理模型,绘出流程图。

2. 确定系统。注意区分封闭系统、开口系统或孤立系统等,弄清所确定的系统与外界之间的边界及其相互作用的内容(质量迁移、功量迁移,热量迁移等等)。

3. 区分工质。明确所研究的工质是理想气体、实际气体、理想气体混合物、湿空气;还是过热蒸气、饱和蒸气、湿蒸气;或是液体。以便针对不同工质,确定描述工质参数的方法(例如运用状态方程或图表),掌握它们各自的特点。

对于液体,尤其是水,一般可按不可压缩流体处理,过冷液体的焓值一般可用同一温度下饱和液体焓值表示。

对于气体,当 $T \geq 2T_c$ 或 $p \leq 0.1p_c$ 时,一般可按理想气体处理。

气体的比热容可以认为只是 T 的函数,一般情况下可按定比热容进行分析。

4. 画热力学图。结合题意,在热力学图($p-v$ 图、 $T-s$ 图、 $h-s$ 图等)上画出相应的状态点、过程线(可逆过程、准静态过程或非准静态过程),明确过程特征(如定温、定压、定容、定熵、定焓、定内能或

定热力学能*等过程),确定它们的参数关系或过程方程。

5. 质量守恒。考虑是否需要运用质量守恒原理,如何具体运用。

6. 能量守恒。考虑需用哪种形式的能量方程:封闭系的、开口系的或孤立系的,以及稳定的或不稳定的等等。

运用热力学第一定律分析问题时,经常用到下列假设和规律:

(1) 向真空膨胀的膨胀功为零。

(2) 流速较快的过程,可按绝热处理(如喷管)。

(3) 过程进行得很缓慢时,可以认为系统与外界随时处于热平衡。

(4) 动、位能的变化通常可忽略不计,但喷管、扩压管等设备例外。

(5) 除非管路中有阀门一类的节流元件,一般来说,作为初次近似,工质可按定压流动处理。

(6) 绝热容器的放气过程中,残留在容器内的理想气体可以按可逆绝热膨胀过程处理。

(7) 缓慢的漏气过程中,可以认为容器内的气体随时与外界处于热平衡。

(8) 势差较大或进行得十分剧烈的过程,一般不能认为是准静态过程。

掌握这些假设或规律,对于解题有很大帮助。

7. 熵方程。考虑需用哪种形式的热力学第二定律表达式:封闭系的、开口系的或孤立系的;稳流或非稳流的,克氏不等式 $\oint \frac{\delta q}{T_r} \leq 0$, 熵的定义式 $ds \geq \frac{\delta q}{T_r}$, 或孤立系统熵增公式 $\Delta S_{iso} \geq 0$ 等等。

运用热力学第二定律分析问题时,经常用到下列假设和规律。

(1) 凡求解最大功、最小功或可能达到的最高压力等问题,一

* 热力学能,也称为内能,本书沿用内能。

般需要按可逆过程进行分析,而且通常需要用到热力学第二定律的表达式。

(2) 系统是否经历了内部可逆过程,主要根据该系统内部各点参数是否在所有时刻都处于均匀状态来判断。

(3) 对于透平和压缩机械,作为初次近似可按定熵过程处理,然后再视实际情况,按其效率的高低加以修正。对于阀门、节流孔板或毛细管等不可逆性很大的元件,即使绝热时也不能按定熵过程处理。

8. 是否采用了正确的符号。如功 W [kJ], 比功 w [kJ/kg], 功率 P [kW] 等等。

9. 在运算推导过程中,经常注明数值的“量纲”。可用“量纲”检验推导过程是否正确,其作用比具体数值重要得多。

10. 不要急于在推导过程中进行数字计算。求解后注意从物理概念、量纲、以及数值的一般范围等几个方面,分析判断计算结果是否合理。

上面介绍的是一般方法和步骤,具体问题还需灵活运用,不必完全照抄照搬。

1.1.2 例题

例 1.1 两股空气在绝热流动中混合。已知第一股空气在标准状态下的体积流量 $q_{V,0,1} = 1\text{m}^3/\text{min}$, $p_1 = 0.1\text{MPa}$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$; 第二股空气的体积流量 $q_{V,0,2} = 0.12084\text{m}^3/\text{min}$, $p_2 = 0.9\text{MPa}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$ 。在忽略动、位能变化的条件下,试确定混合后在标准状态下的体积流量 $q_{V,0,3}$, 温度 t_3 和最大可能达到的压力 p_3 。

分析: 本题较为典型,下面将运用上述一般方法与步骤求解。绝热混合是典型不可逆过程。在给定了混合前的压力参数后,不可逆程度越大,则混合后的压力势必越低,只在极限情况即可逆情况下混合后的压力才能达到最高值。因此为了确定此最高压力值,必

须按可逆过程处理。

解：(1) 按题意，绘出如图 1-1 所示的流程图，并在图上注明题设条件。

(2) 按图 1-1 所取的边界(如虚线所示)，分析对象属开口系统。

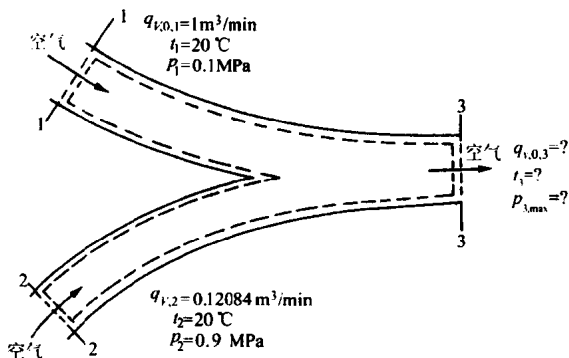


图 1-1

(3) 按题设条件，空气可按理想气体处理，而且又可按定比热容分析。因此本例属于可忽略动、位能变化的理想气体、稳定流动情况。

(4) 列出质量守恒式。由于质量流量 q_m 与标准条件 (101.325kPa, 0°C) 下的体积流量有下列关系：

$$q_{V,0} = \frac{22.4 \times 10^{-3}}{M} \times q_m$$

式中， M 为气体的摩尔质量，单位为 kg/mol。

因而本题可直接运用标准条件下体积流量列质量守恒式：

$$q_{V,0,3} = q_{V,0,1} + q_{V,0,2}$$

这里 $q_{V,1} = q_{V,0,1}$ ，但第二股空气给定的是实际体积流量 $q_{V,2}$ ，为此必须先将其换算成 $q_{V,0,2}$ 。

$$\text{即： } q_{V,0,2} = q_{V,2} \cdot \frac{p_2}{p_{2,0}} \cdot \frac{T_{2,0}}{T_2} = 0.12084 \times \frac{0.9}{0.101325} \times \frac{273}{293}$$