

工程热力学原理和应用

〔美〕莫福顺 著
谢益棠 译

电力工业出版社

工程热力学原理和应用

[美] 黄福赐 著

谢益棠 译

电力工业出版社

内 容 提 要

本书分原理和应用两部分。原理部分介绍基本概念和定义，能和热力学第一定律，焓和热力学第二定律，纯物质状态方程和理想气体的特性等。应用部分介绍各种过程，各种动力循环和耗能循环的分析计算，单纯可压缩物质热力学，以及非反应和可反应混合物热力学等。为了联系实际，全书收有例题和习题500余则。对所有例题，作者都加以注释，指出其重点和意义。这是本书不同于同类书籍的特点之一。

本书供工科大专院校师生和各工程部门的工程师、技术员学习参考。

Francis F. Haug
Engineering thermodynamics
Fundamentals and applications
Macmillan Publishing Co., Inc. New York 1976

工程热力学原理和应用

[美] 黄福赐著

谢益棠译

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 25.75印张 570千字

1982年3月第一版 1982年3月北京第一次印刷

印数 0001—7220册 定价2.65元

书号 15036·4282

作者中译本前言

感谢谢益棠先生以卓越的成就把拙著译成中文。译本中，谢君明智地采用了国际制单位，而没有沿用原著中的英制单位。

工程热力学对教育和训练未来的工程师和科学家的重要性自不待言，深望谢君的中译本对中国工业现代化能发挥显著的作用。

黄 福 赐

1980年10月于美国加利福尼亚圣何塞市

译 序

本书是美国州立圣何塞大学机械系主任黄福赐教授所编写的工程热力学教本(1976年版)。作者以一种新的体系介绍了工程热力学的内容。全书分为原理和应用两大部分。原理部分以能量方程、熵方程和气体特性方程为基础建立起整个热力学的结构。熵是采用基南(Keenan)解释不可用能的概念推演出的。第二部分为热力学原理的具体应用,占有较大的比重。除了一般工程热力学包括的内容以外,从能量分析的角度还介绍了有关气体液化、气体分离、海水淡化以及化学热力学的内容。本书在选材、体系以及侧重点上和过去的同类教材相比有其特点。此外本书例题多(140余则)、习题多(370余则),题目内容多结合工程实际。例题的末尾多有注释和讨论,通过例题对正文作了必要的引伸和补充。

原书为英制单位。为了适应我国及今后国际上统一计量单位制的要求,中译本已将原书的英制单位全部改为国际制单位。在改变过程中,如原来牛顿运动第二定律中的比例系数 g 在国际单位(SI)中其值等于1,故在中译本中不再出现。附录中的数据表除水蒸汽和压缩水的性质表(表A-1至表A-4)改取自T·F·I和J·P·H合编的《Steam and Air Tables in SI Units》(1976年版)一书以外,其余数据表则采用在原书附表有关各栏另加一换算系数的办法,来实现单位的改变。附录中线图的单位变换则采用另加一国际单位制标尺的办法来处理。例题和习题中的数据力求变换单位后成为整数,有些题目因需要查用原书所附英制图表而不便保持整数者,则在国际单位制数据后加一括号仍注明原来的英制数据以利于查表。

本书可供大专动力类及有关专业师生和有关工程技术人员参考。

限于译者水平,错译及不妥之处请批评指正。

译稿承上海同济大学蒋汉文教授、邱信立副教授校阅,在编辑加工过程中,汪汝源同志又对照原书再次对译文进行了校订工作,谨此致谢。

最后我还要对本书作者黄福赐教授给我提供的翻译机会,以及他给中译本所写的前言表示诚挚的谢意。

译 者

1981年6月于太原工学院

原 序

本书是为各类工科学生初学热力学这门课程而编写的教科书。它是根据我在大约十年期间逐步发展起来的方法编写而成的。它反映了我讲授热力学这门学科时力求结合工程实际的一种尝试。本书主要在以下两个方面不同于通常的热力学教科书。

首先，我相信如果学生们从一开始就注意到各部分是如何配合整个内容的，他们将会对热力学的作用和意义有较深刻的理解。为了这一目的，在本书的第一部分中我用公设的方法和对物质采用宏观观点，系统地论述了工程热力学的整个结构。然后在本书的第二部分，把包括能量方程、熵方程和特性方程的整个结构反复地应用于涉及不同物质的各种过程、装置和系统。我希望通过这种研究方法来增进学生对下列事实的认识，即在工程设计中有效地利用能量和其它自然资源时，始终会涉及两条最重要的自然规律，那就是热力学第一定律和第二定律。

本书不同于大多数热力学教科书的地方还在于本书着重介绍了工程设计时所必备的初步知识。我相信在这里把设计思想介绍给工科学生为时并不过早。所谓设计思想是指作出设计决断的过程，这一过程要求有广泛的知识（技术上的和其它方面的），实际经验，通常还要有创造性的设想。我认为应该经常提醒工科学生注意的是，一个真正可行的设计的决定只有在做出各种折衷方案（各种权衡）以后才能得出来。

原理部分的叙述尽可能地联系学生已经懂得的，或者能够直观接受的基本概念。论述足够通俗、严密。我相信本书取材全面、充分，因此它不仅适用于一次选修热力学课程的学生，而且也适用于那些打算深入学习这门具有魅力的学科的学生。

在热力学第二定律的推演上，我利用了哈特索普劳 斯（Hatsopoulos）和基南的方法，将熵的概念定义为热力系统中不可利用能。从一开始就正面地给熵以这一物理解释，为的是能在较大程度上消除对熵的概念的神秘化。

本书内容足够一学年课程之用，但内容是按下述方式组织的，即教师有很大的灵活性来根据不同的教学目的进行适当的选取。由于我已在第八章中对工程热力学的整个结构作了概括，因此只需对前面八章粗略地读一遍就能够尽快地进入应用部分。并以这些具体应用作为工具去加深学生对基本原理的理解。

我本来打算对这种方法进行更多的教学实践以后再出版，但由于我自知水平有限，因而为了能引起那些对改进本书赋有卓见的人们的关注，我毅然把它介绍出来。译成汉语就是寄希望于“抛砖引玉”。

黄 福 赐

致 读 者

你们即将开始学习最普遍和最引人入胜的学科之一——热力学。这是一门论及能量和能量与物质的关系的学科。热力学之所以最普遍，是因为每一种工艺系统都涉及能量和物质的利用问题。事实上因为工程热力学在许多设计中都起着重大作用，如设计家庭用和工业用的各种过程、装置和系统等，可以毫不夸张地说它关系到我们每天的生活。工程热力学在解决能源危机、淡水缺乏、空气污染以及城市垃圾处理等问题上也都是很重要的。简单地说，工程热力学与我们谋求较高生活水平具有非常密切的关系。

热力学之所以引人入胜，是因为它从很少的一点基本原理推导出了大量的各种各样的结论。因而它是吸引了从工程师到生物学家、数学家等各种专家的学科。热力学理论的整个结构实质上很简单，一个当代著名的热力学专家小组曾经指出，热力学中的不下数百个数学关系式这一庞大的结构，都是建立在能量、熵和特性参数这三个方程式的基础之上的。

本书分作两大部分。第一部分为热力学的整个结构，包括三个基本方程式的推导。第二部分为整个热力学结构在广泛的工程问题上的应用。第一部分最后，即第八章，为原理部分的概括，包括热力学第一定律和第二定律的运算式。浏览一下这一章，你们就会感到工程热力学的结构确实十分简单。

尽管热力学的结构很简单，但也还是相当难懂，因为构成热力学理论所依据的许多想法和概念都是抽象的和用公式表达的。因而第一部分的内容无疑不会一下子就会完全弄明白。但是在学习第二部分内容的过程中，当它们被反复加以应用的时候，其现实意义和重要性就显露出来了。如果对热力学整个结构有了理解并建立起信心，你们就在处理工程上各种过程、装置和系统的设计问题时掌握了一种强有力的工具。

黄 福 赐

符 号 表

A	面积	Area
a	加速度	Acceleration
a、A	比赫姆霍尔兹函数和总赫姆霍尔兹函数	Specific Helmholtz function and total Helmholtz function
AF	空气-燃料比	Air-fuel ratio
B、C、D	维里状态方程式密度级数中的第2、第3和第4项的维里系数	Second, third, and fourth virial coefficients in the density series of the virial equation of state
B'、C'、D'	维里状态方程式压力级数中的第2、第3和第4项的维里系数	Second, third, and fourth virial coefficients in the pressure series of the virial equation of state
C	组分数目	Number of components
C	任意常数	Arbitrary constant
c	音速	Velocity of sound
c_p	定压比热	Constant-pressure specific heat
c_v	定容比热	Constant-volume specific heat
e、E	比能和总能	Specific energy and total energy
E_{AV} 、 $E_{可用}$	可用能	Available energy
E_{UA} 、 $E_{不可用}$	不可用能	Unavailable energy
E_{kin} 、 $E_{动}$	动能	Kinetic energy
E_{pot} 、 $E_{势}$	势能	Potential energy
\mathcal{E}	电动势	Electromotive force
f	鼓风摩擦系数	Fanning friction factor
F	自由度	Degree of freedom
F	力	Force
F_p	由于流体压力产生的力	Force due to fluid pressure
F_f	由于侧壁摩擦力产生的力	Force due to sidewall friction
\mathcal{F}	普遍的力	Generalized force
g	重力加速度	Acceleration due to gravity
g_c	与牛顿运动第二定律中的力、质量、长度和时间有关的常数	Constant that relates force, mass, length, and time in Newton's second law of motion
g、G	比吉布斯函数和总吉布斯函数	Specific Gibbs function and total Gibbs function
G_p 、 $G_{生}$	化学反应生成物的吉布斯函数	Gibbs function of products of chemical reaction
G_R 、 $G_{反}$	反应物的吉布斯函数	Gibbs function of reactants
ΔG_c	一完整单元反应的吉布斯函数的变化	Gibbs function change for a complete unit reaction
h、H	比焓和总焓	Specific enthalpy and total enthalpy

$H_p, H_{\text{生}}$	化学反应生成物的总焓	Total enthalpy of products of chemical reaction
$H_R, H_{\text{反}}$	反应物总焓	Total enthalpy of reactants
ΔH_c	一完整单元反应的焓的变化	Enthalpy change for a complete unit reaction
\mathcal{H}	外磁场	External magnetic field
HHV	燃料的高热值	Higher heating value of a fuel
I	不可逆性	Irreversibility
i	电流	Electric current
k	波尔兹曼常数	Boltzmann constant
k	比热比, c_p/c_v	Ratio of specific heats, c_p/c_v
K_p	理想气体化学反应的平衡常数	Equilibrium constant for ideal gas reaction
L	长度	Length
lbf	磅力	Pound force
lbm	磅质量	Pound mass
lb mol	磅摩尔	Pound mole
LHV	燃料的低热值	Lower heating value of a fuel
m	质量	Mass
\dot{m}	质量流率	Mass rate of flow
M	马赫数	Mach number
M	分子量	Molecular weight
mep	平均有效压力	Mean effective pressure
n或N	摩尔数	Number of moles
p	压力	Pressure
P	相数	Number of phases
$P_c, P_{\text{临}}$	临界压力	Pressure at critical point
$P_R, P_{\text{折}}$	折合压力, p/p_c	Reduced pressure, p/p_c
P_r	用于气体表中的相对压力	Relative pressure as used in the gas tables
P_i	混合气体中第i个组成气体的分压力	Partial pressure of the <i>i</i> th component in a mixture
P_a	空气-水蒸汽混合物中干空气的分压力	Partial pressure of dry air in an air-water-vapor mixture
P_w	空气-水蒸汽混合物中水蒸汽的分压力	Partial pressure of water vapor in an air-water-vapor mixture
P_s	与空气-水蒸汽混合物温度相对应的水蒸汽饱和压力	Saturation pressure of water vapor corresponding to temperature of an air-water-vapor mixture
$P_{s,w}$	与空气-水蒸汽混合物的湿球温度相对应的水蒸汽饱和压力	Saturation pressure of water vapor corresponding to wet-bulb temperature of an air-water-vapor mixture
q, Q	单位质量传热量和总传热量	Heat transfer per unit mass and total heat transfer

\dot{Q}	传热率	Rate of heat transfer
$Q_{rev}, Q_{可逆}$	可逆过程传热量	Heat transfer for a reversible process
$Q_{irr}, Q_{不可逆}$	不可逆过程传热量	Heat transfer for an irreversible process
R	某一种气体的气体常数, \bar{R}/M	Gas constant for a particular gas, \bar{R}/M
\bar{R}	通用气体常数	Universal gas constant
r_c	预胀比	Cut-off ratio
r_p	压力比	Pressure ratio
r_v	压缩比或膨胀比	Compression or expansion ratio
$(r_p)_{opt}, (V_p)_{最佳}$	最佳压力比	Optimum pressure ratio
s, S	比熵和总熵	Specific entropy and total entropy
$S_p, S_{生}$	化学反应生成物的总熵	Total entropy of products of chemical reaction
$S_R, S_{反}$	反应物总熵	Total entropy of reactants
ΔS_r	一完整单元反应的熵的变化	Entropy change for a complete unit reaction
T	绝对温度	Absolute temperature
$T_c, T_{临}$	临界温度	Temperature at critical point
$T_R, T_{折}$	折合温度, T/T_c	Reduced temperature, T/T_c
T^A	系统A的温度	Temperature of system A
$t_d, t_{干}$	干球温度	Dry-bulb temperature
$t_w, t_{湿}$	湿球温度	Wet-bulb temperature
v, V	比容和总容积	Specific volume and total volume
V_i	混合气体中第i组成气体的分容积	Partial volume of ith component in a mixture
$v_c, V_{临}$	临界比容	Specific volume at critical point
v_r	用于气体表中的相对容积	Relative volume as used in the gas tables
$v_R, v_{折}$	折合容积, v/v_c	Reduced volume, v/v_c
v_r	虚拟折合容积	Pseudo-reduced volume
\bar{V}	速度	Velocity
w, W	单位质量所传递的功和总传递功	Work transfer per unit mass and total work transfer
\dot{W}	传递功率或功率	Rate of work transfer or power
$W_{ad}, W_{绝}$	绝热过程中的传递功	Work transfer for an adiabatic process
$W_{rev}, W_{可逆}$	可逆过程中的传递功	Work transfer for a reversible process
$W_{irr}, W_{不可逆}$	不可逆过程中功的传输	Work transfer for an irreversible process
x	摩尔分数	Mole fraction
x	两相混合物的品质	Quality of a two-phase mixture
X	通用位移	Generalized displacement

y	两相混合物中的水分含量	Moisture content of a two-phase mixture
Y	杨氏等温弹性模数	Young's isothermal modulus of elasticity
Y	产液率	Liquid yield
Z	压缩因子	Compressibility factor
Z _C , Z _临	临界压缩因子	Compressibility at the critical point
Z	标高	Elevation
Z	电荷量	Quantity of electric charge
希腊字母		
α	线膨胀系数	Coefficient of linear expansion
α	等熵压缩因子	Isentropic compressibility
β	体膨胀系数	Coefficient of expansion
β _R , β _{制冷}	制冷机性能系数	Coefficient of performance of a refrigerator
β _{HP} , β _{热泵}	热泵性能系数	Coefficient of performance of a heat pump
ε	反应变量	Reaction variable
η _{th} , η _热	热效率	Thermal efficiency
η _C , η _压	绝热压缩机效率	Adiabatic compressor efficiency
η _p , η _泵	绝热泵效率	Adiabatic pump efficiency
η _T , η _{涡轮}	绝热涡轮机效率	Adiabatic turbine efficiency
η _D , η _扩	扩压管效率	Diffuser efficiency
η _N , η _喷	喷管效率	Nozzle efficiency
η _{reg} , η _回	回热器效能系数	Regenerator effectiveness
θ	理想气体经验温度	Empirical ideal-gas temperature
κ	等温压缩因子	Isothermal compressibility
μ	化学势	Chemical potential
μ	磁化量	Magnetization
μ _{JT}	焦耳-汤姆逊系数	Joule-Thomson coefficient
ν	化学计算系数	Stoichiometric coefficient
π	渗透压力	Osmotic pressure
ρ	密度	Density
σ	斯蒂芬-波尔兹曼常数	Stefan-Boltzmann constant
τ	张力	Tension
τ	时间	Time
φ	气体表格数据所定义的理想气体温度函数, $\phi \equiv \int_{T_0}^T c_p \frac{dT}{T}$	Function of temperature for an ideal gas, $\phi \equiv \int_{T_0}^T c_p \frac{dT}{T}$ as defined in the gas tables
φ	闭口系统的可用性	Availability of a closed system
φ	相对湿度	Relative humidity
ψ	稳态稳流系统的可用性	Availability of a steady-state steady-flow system
Ω	热力学或然率	Thermodynamic probability
ω	比湿度	Specific humidity

脚标		
cv	控制体	Control volume
f	生成	Formation
f.	饱和液体特性参数	Property of saturated liquid
f _g	饱和蒸气和饱和液体特性参数之差值	Difference in property for saturated vapor and saturated liquid
g	饱和蒸气特性参数	Property of saturated vapor
i	多组分系统中第i组分的特性参数	Property of i th component in a multicomponent system
i	饱和固体的特性参数	Property of saturated solid
if	饱和液体和饱和固体特性参数之差	Difference in property for saturated liquid and saturated solid
ig	饱和蒸气和饱和固体特性参数之差	Difference in property for saturated vapor and saturated solid
0	滞止特性参数	Stagnation property
0	参考状态的特性参数	Property at reference state
上标		
-	符号上面的短横线表示以摩尔计的特性参数	Bar over symbol denotes property on a molal basis
•	理想气体状态	Ideal gas state
•	喷管喉部的特性参数	Property at the throat of a nozzle
0	标准状态下的特性参数	Property at standard-state condition
HR	热源	Heat reservoir
WR	功源	Work reservoir
特殊符号		
d	特性参数的无穷小变化	Infinitesimal change in a property
\bar{d}	过程函数的无穷小变化	Infinitesimal change in a path function
≡	用方程式定义一个量时采用的恒等号	Identity symbol, used when the equation defines a quantity
Δ	特性参数的有限差分量, $\Delta = (\text{终态}) - (\text{初态})$	Finite change in a property, $\Delta = \text{final} - \text{initial}$
$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z$	x对于y的偏导数, 变量z保持不变	Partial derivative of x with respect to y, keeping z constant
\oint	循环积分	Integration around a cycle
Q_H, Q_H	系统与高温物体之间的传热量	Heat transfer between system and high-temperature body
Q_L, Q_L	系统与低温物体之间的传热量	Heat transfer between system and low-temperature body
Q_{12}	由状态1变化到状态2时的传热量	Amount of heat transfer corresponding to a change from state 1 to state 2
W_{12}	由状态1变化到状态2时的传递功量	Amount of work transfer corresponding to a change from state 1 to state 2

目 录

作者中译本前言

译 序

原 序

致读者

符号表

第一部分 工程热力学原理

第一章 绪论	1
§ 1-1 什么是工程	1
§ 1-2 什么是热力学	2
§ 1-3 工程热力学的定义	4
§ 1-4 工程热力学的应用	4
§ 1-5 相关工程学科	4
§ 1-6 物质的宏观观点和微观观点	5
§ 1-7 数学基础	5
§ 1-8 量纲和单位	10
§ 1-9 压力	13
第二章 基本概念和定义	17
§ 2-1 热力系统	17
§ 2-2 热力特性参数	18
§ 2-3 热力平衡和平衡状态	19
§ 2-4 温度和热力学第零定律	20
§ 2-5 热力过程	21
第三章 能和热力学第一定律	24
§ 3-1 能含	24
§ 3-2 质量守恒	26
§ 3-3 热力学第一定律应用于闭口系统	26
§ 3-4 热力学第一定律应用于循环过程	28
§ 3-5 功的热力学定义	29
§ 3-6 功的习惯符号	30
§ 3-7 准静态膨胀功	30
§ 3-8 其它准静态功的形式	32
§ 3-9 功相互作用概要	33
§ 3-10 热的热力学定义	34
§ 3-11 焓——热力特性参数	34

§ 3-12	热力学第一定律应用于开口系统	35
§ 3-13	质量守恒应用于开口系统	37
§ 3-14	各种热力源	37
第四章	熵和热力学第二定律	41
§ 4-1	熵和能的品质	41
§ 4-2	功源中熵的变化	42
§ 4-3	热源中熵的变化	42
§ 4-4	两个热源之间的传热	43
§ 4-5	热机的效率	43
§ 4-6	制冷机和热泵的效能	46
§ 4-7	不可逆过程举例	47
§ 4-8	热力学第二定律应用于闭口系统	49
§ 4-9	热力学第二定律应用于开口系统	50
§ 4-10	熵、平衡和变化的方向	51
第五章	状态公设和热力学普遍关系式	57
§ 5-1	状态公设	57
§ 5-2	焓、赫姆霍兹函数和吉布斯函数	59
§ 5-3	闭口系统的准静态传热	61
§ 5-4	热源熵变的另一解释	62
§ 5-5	卡诺循环和热力学温标	63
§ 5-6	绝对零度、绝对熵和热力学第三定律	64
§ 5-7	化学势和吉布斯函数	65
§ 5-8	温度是传热的驱动力	66
§ 5-9	压力是容积变化的驱动力	67
§ 5-10	化学势是物质流动的驱动力	68
§ 5-11	吉布斯相律应用于非反应系统	69
第六章	纯物质状态方程的图和表	73
§ 6-1	纯物质的定义	73
§ 6-2	单纯可压缩物质状态公设	74
§ 6-3	单纯可压缩物质的一些重要而又普遍的热力学关系式	75
§ 6-4	单纯可压缩物质的 $p-v-T$ 曲面	75
§ 6-5	单纯可压缩物质的各种热力图线	77
§ 6-6	定容比热和定压比热	83
§ 6-7	单纯可压缩物质的热力特性参数表	84
§ 6-8	由于状态变化而引起的特性参数变化的计算举例	86
第七章	理想气体的性质和热力特性参数	95
§ 7-1	理想气体的定义	95
§ 7-2	理想气体模型的重要结论	98
§ 7-3	理想气体内能的变化	98
§ 7-4	理想气体焓的变化	99

§ 7-5	理想气体的比热	99
§ 7-6	理想气体熵的变化	100
§ 7-7	理想气体各特性参数关系式汇总	101
§ 7-8	理想气体的热力图线	103
§ 7-9	理想气体热力特性参数的表格数据	105
§ 7-10	理想气体的等熵过程	107
§ 7-11	理想气体的可逆多变过程	108
§ 7-12	以理想气体作为工作流体的卡诺循环	110
§ 7-13	热力学温度和理想气体经验温度的等值性	111
第八章 工程热力学原理提要		114
§ 8-1	热力学的三原理结构	114
§ 8-2	系统、外界和边界	114
§ 8-3	特性参数、状态和过程	115
§ 8-4	热力平衡、热平衡和温度	116
§ 8-5	热和热源	116
§ 8-6	功和功源	116
§ 8-7	能的基本性质	117
§ 8-8	熵的基本性质	117
§ 8-9	质量守恒原理	118
§ 8-10	热力学第一定律的运算式	118
§ 8-11	热力学第二定律的运算式	119
§ 8-12	状态公设和特性参数关系式	120
§ 8-13	单纯可压缩物质的热力学关系式	121
§ 8-14	工程热力学中解题的一般方法	121
第二部分 工程热力学应用		
第九章 闭口系统过程的工程分析		123
§ 9-1	等容过程	123
§ 9-2	等压过程	126
§ 9-3	等温过程	128
§ 9-4	绝热过程	130
§ 9-5	等内能过程	131
§ 9-6	闭口系统的吉布斯函数和最大有用功	133
§ 9-7	闭口系统的赫姆霍尔兹函数和最大有用功	135
第十章 开口系统过程的工程分析		139
§ 10-1	稳定状态稳定流动开口系统的特征	139
§ 10-2	按功能分类的稳态稳流装置	139
§ 10-3	稳态稳流装置的理想轴功	140
§ 10-4	泵和压缩机	140
§ 10-5	涡轮机	143
§ 10-6	节流装置	145

§ 10-7	热交换器	146
§ 10-8	由一个以上稳态稳流装置组成的各种稳定流动开口系统	150
§ 10-9	稳态稳流开口系统的吉布斯函数和最大有用功	155
§ 10-10	非稳态稳流开口系统	157
第十一章 流体的一维稳定流动热力学		164
§ 11-1	无传递功的一维稳定流动能量方程式	164
§ 11-2	不可压缩流体的伯努利方程式	166
§ 11-3	根据动量原理推导伯努利方程式	167
§ 11-4	音速和马赫数	170
§ 11-5	滞止特性参数	173
§ 11-6	变截面通道中绝热流动的速度变化和压力变化	174
§ 11-7	喷管和扩压管效率	175
§ 11-8	通过渐缩喷管的质流量	178
§ 11-9	等截面管道内的绝热流动	180
第十二章 具有热源和功源的动力系统设计		185
§ 12-1	动力装置设计方案的拟定	185
§ 12-2	卡诺蒸汽循环	186
§ 12-3	简单朗肯循环	188
§ 12-4	具有过热的朗肯循环	192
§ 12-5	具有再热的朗肯循环	195
§ 12-6	具有给水回热的朗肯循环	197
§ 12-7	蒸汽动力循环中工作流体的选择	205
§ 12-8	空气标准循环	205
§ 12-9	卡诺气体循环	206
§ 12-10	奥托循环	209
§ 12-11	笛塞尔循环	212
§ 12-12	双燃(限压)循环	214
§ 12-13	汪克尔转子式内燃机	216
§ 12-14	斯特林循环	218
§ 12-15	布雷顿循环	219
§ 12-16	具有实际压缩机和涡轮机的简单燃气轮机动力装置	222
§ 12-17	具有回热的布雷顿循环	223
§ 12-18	联合动力装置的热效率	226
第十三章 具有热源和功源的制冷系统设计		232
§ 13-1	制冷系统设计方案的拟定	232
§ 13-2	逆卡诺循环	233
§ 13-3	压缩蒸气制冷循环	234
§ 13-4	气体制冷循环	236
§ 13-5	回热式逆布雷顿循环	237
§ 13-6	利用热代替功产生制冷效应	239

§ 13-7	吸收式制冷系统	240
§ 13-8	用热机-热泵系统产生低温用热	241
第十四章 具有热源、功源和质源的系统设计		246
§ 14-1	理想液化系统所需的功	246
§ 14-2	可逆气体液化系统	247
§ 14-3	简单林德-汉普森气体液化系统	248
§ 14-4	理想气体分离系统所需的功	250
§ 14-5	可逆气体分离系统	253
§ 14-6	双组分流体的相图	254
§ 14-7	简单林德单塔式空气分离系统	254
§ 14-8	脱盐所需的最小能量	256
§ 14-9	逆向渗透过程	258
§ 14-10	多效蒸馏系统	259
§ 14-11	压缩蒸汽蒸馏法	260
第十五章 单纯可压缩物质热力学		265
§ 15-1	重要数学关系式	265
§ 15-2	马克斯韦尔关系式	265
§ 15-3	p-V-T的某些导出量	266
§ 15-4	包含比热的某些热力学关系式	268
§ 15-5	压力和容积的变化对比热的影响	271
§ 15-6	熵、内能和焓的变化的热力学关系式	272
§ 15-7	焦耳-汤姆逊系数	273
§ 15-8	克拉贝隆方程式	275
§ 15-9	实际气体和压缩因子	277
§ 15-10	实际气体的通用焓图	279
§ 15-11	实际气体的通用熵图	281
§ 15-12	维里状态方程式	282
第十六章 非反应气体和蒸气混合物热力学		286
§ 16-1	混合气体的摩尔分数、质量分数和分子量	286
§ 16-2	道尔顿分压定律	287
§ 16-3	阿马盖特-勒迪克分容积定律	288
§ 16-4	理想气体混合物的内能、焓和比热	290
§ 16-5	理想气体混合物的熵	292
§ 16-6	理想气体与可凝蒸气的混合物	295
§ 16-7	空气-水蒸汽混合物的焓和熵	298
§ 16-8	绝热饱和过程	299
§ 16-9	湿度图	301
§ 16-10	有关空气-水蒸汽混合物的各种过程	302
第十七章 反应混合物热力学		312
§ 17-1	化学计算法和化学方程式	312