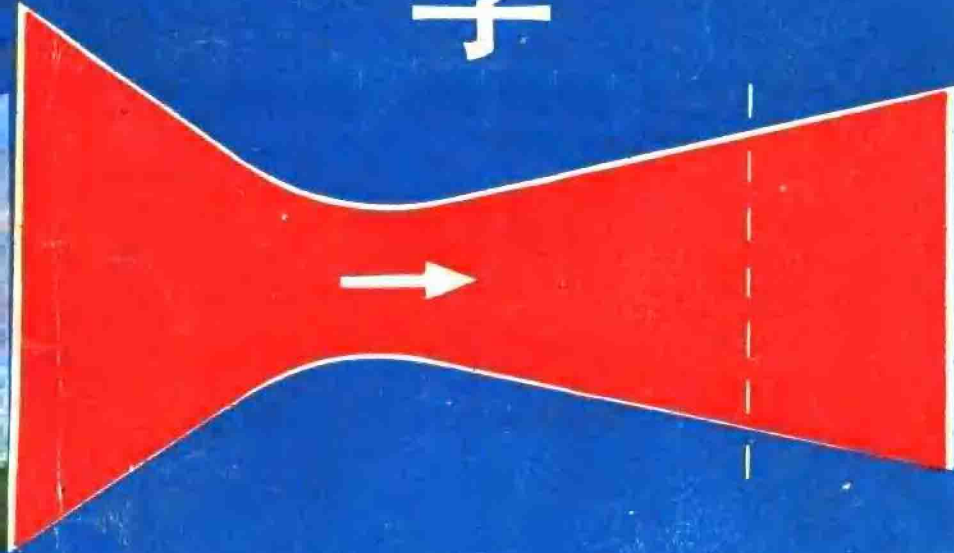


GONGCHENG REILIXUE

高等学校教材

工程热力学

【第二版】尹文海 主编



高等教育出版社

内 容 简 介

本书根据热工课程教学指导委员会制定的工程热力学课程(30~40学时)教学基本要求在原1981年版的基础上补充修改而成。

本书主要讲述热力学基本概念、基本定律,以及气体和蒸汽的性质、过程和循环。书中附有例题、思考题和习题以及必要的热工图表。全书采用我国国家法定计量单位,对工程制单位也作了适当介绍。

本书由热工课程教学指导委员会委托上海机械学院蔡祖恢教授和重庆大学雷亨顺教授主审,并经热工课程教学指导委员会工程热力学小组全体会议审订通过。

本书可作为少学时(30~40学时)工程热力学教材,亦可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

工 程 热 力 学

(第二版)

严家驛 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.125 插页 3 字数 220 000

1981年12月第1版 1989年8月第2版 1989年8月第1次印刷

印数 0001—4,090

ISBN 7-04-002284-2/TH·207

定价 3.70 元

前 言

本书根据热工课程教学指导委员会制定并于1987年秋季开始试行的工程热力学课程(30~40学时)教学基本要求,在原1981年版的基础上补充修改而成。

书中主要讲述热力学的基本概念、基本定律以及气体和蒸汽的性质、过程和循环,并有计算例题穿插配合。每章末还附有适量的思考题和习题。

全书采用国家法定计量单位。对工程单位制也作了适当介绍,以适应单位制改革过渡时期的实际需要。

作者结合本人的教学经验和研究成果,对本书在理论体系和内容上作了新的安排,并加强了热力过程、可用能和湿空气的内容。书的前半部分,即基本理论部分,有一定的深度和广度,力图使学生能较好地掌握热力学基本概念和基本定律的实质,并能灵活运用它们分析各种热力过程,以便在能源科学方面打下一定的基础。书的后半部分主要分析了各种循环,它既是前面基本理论的具体应用,又是进一步联系工程实际的桥梁,有利于培养学生解决实际问题的能力。

书中打*号的各节,内容相对独立,可根据教学的具体情况部分或全部予以删减而不影响全书的系统性。对后面的循环部分,也可根据专业的不同需要,重点讲其中一种或两种循环。

本书由热工课程教学指导委员会委托上海机械学院蔡祖恢教授和重庆大学雷亨顺教授主审,并经1988年6月召开的热工课程教学指导委员会工程热力学小组全体会议审订通过。

作者感谢主审人和参加审稿会的全体同志对本书的仔细审阅

和提出的宝贵意见，并希望在本书出版后得到读者的批评和指正。

哈尔滨工业大学 严家驛

1988年8月

符号说明

拉丁字母

A 面积; 功的热当量
 a 音速
 B 大气压力
 C 千摩尔热容; 常数
 c 比热容; 流速
 D 过热度
 DA 干空气
 d 微增量; 含湿量
 E 总能量
 Ex 焓
 e 比总能量
 ex 比焓
 F 力
 g 质量成分; 重力加速度
 H 焓
 h 比焓
 k 玻尔兹曼常数; 定熵指数
 L 不可逆损失
 M 分子量; 千摩尔质量; 马赫数
 m 质量; (压气机)级数
 N 分子数
 n 分子浓度; 多变指数
 P 功率
 p 压力

Q 热量
 q 每千克物质的热量
 R 气体常数
 r 容积成分; 摩尔成分; 汽化潜热
 S 熵
 s 比熵
 std 标准(状况)
 T 绝对温度
 t 摄氏温度
 U 内能
 u 比内能
 V 容积
 v 比容
 W 功; 膨胀功
 w 每千克物质的功; 每千克物质的膨胀功
 X 千摩尔数
 x 干度
 y 湿度
 z 高度

希腊字母

α 抽汽率
 β 膨胀压力比
 Δ 增量

δ 微小量
 ε 压缩比; 致冷系数
 ζ 供热系数
 η 效率
 κ 比热比
 λ 压升比
 ξ 热利用系数
 π 增压比
 ρ 密度; 预胀比
 τ 时间; 升温比
 φ 相对湿度
 ψ 比相对湿度
 顶标
 · 单位时间的
 — 平均
 上角标
 * 滞止
 ' 饱和液体
 " 饱和蒸汽
 下角标
 A 三相点
 C 卡诺循环; 逆向卡诺循环;
 压气机; 临界(物质的临界
 状态)
 c 临界(流动的临界状态)
 d 露点
 f 摩擦; (熵)流
 g 表(压); (热、熵)产; 干空气
 H 供热

i 第 i 个; 内部
 j 第 j 个
 K 动能
 l (功)损
 M 每千摩尔的
 m 平均
 max 最大
 min 最小
 mix 混合
 n 多变过程
 o 循环的(功、热量)
 opt 最佳
 P 位能; 泵
 p 定压
 R 冷库
 r 相对; 回热
 s 定熵; 饱和
 sh 轴(功)
 std 标准状况
 T 定温; 透平(燃气轮机;
 蒸汽轮机; 膨胀机)
 t 热(效率); 技术(功)
 th 喉部
 v 真空(度); 定容; 水蒸气
 w 水; 湿球(温度)
 x 湿蒸汽
 0 理想气体状态
 1 初态; 进口
 2 终态; 出口

目 录

前言	1
符号说明	3
绪论	1
1. 热能的利用	1
2. 工程热力学的研究对象和研究方法	1
3. 工程热力学常用的计量单位	3
第一章 基本概念	6
1-1 热力系	6
1-2 状态和状态参数	7
1-3 平衡状态	15
1-4 状态方程和状态参数坐标图	17
1-5 过程和循环	18
1-6 功和热量	20
思考题	20
习题	21
第二章 热力学第一定律	23
2-1 热力学第一定律的实质及表达式	23
2-2 功和热量的计算及其在压容图和温熵图中的表示	30
思考题	36
习题	37
第三章 气体的热力性质和热力过程	40
3-1 实际气体和理想气体	40
3-2 理想气体状态方程和通用气体常数	41
3-3 理想混合气体	43
3-4 气体的热力性质	47
3-5 定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程	57
3-6 多变过程	71

*3-7	不作功过程和绝热过程	78
3-8	绝热自由膨胀过程和绝热节流过程	83
*3-9	定容混合过程和流动混合过程	86
*3-10	充气过程和放气过程	94
	思考题	99
	习题	100

第四章 热力学第二定律 104

4-1	热力学第二定律的任务	104
4-2	可逆过程和不可逆过程	106
4-3	状态参数熵	108
4-4	热力学第二定律的表达式——熵方程	111
4-5	热力学第二定律各种表述的等效性	116
4-6	卡诺定理和卡诺循环	119
4-7	克劳修斯积分式	123
4-8	可用能及其不可逆损失	125
*4-9	流动工质的焓和焓损	128
4-10	热力学第二定律对工程实践的指导意义	133
	思考题	137
	习题	137

第五章 气体的流动和压缩 140

5-1	一元稳定流动的基本方程	140
5-2	喷管中气流参数变化和喷管截面变化的关系	143
5-3	气体流经喷管的流速和流量	147
5-4	压气机的压气过程	155
	思考题	165
	习题	166

第六章 气体动力循环 168

6-1	概说	168
6-2	活塞式内燃机的混合加热循环	169
6-3	活塞式内燃机的定容加热循环和定压加热循环	174
*6-4	活塞式内燃机各种循环的比较	176
6-5	燃气轮机装置的循环	178

思考题	187
习题	187
第七章 水蒸气性质和蒸汽动力循环	189
7-1 水蒸气的饱和状态	189
7-2 水蒸气的产生过程	192
7-3 水蒸气图表	197
7-4 水蒸气的热力过程	200
7-5 基本的蒸汽动力循环——朗肯循环	203
7-6 蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响	205
*7-7 提高蒸汽动力循环热效率的其它途径	207
思考题	212
习题	213
第八章 致冷循环	215
8-1 逆向卡诺循环	215
8-2 空气压缩致冷循环	216
8-3 蒸汽压缩致冷循环	223
8-4 致冷剂的热力性质	226
*8-5 蒸汽喷射致冷循环和吸收式致冷循环	228
思考题	232
习题	232
第九章 湿空气	234
9-1 湿空气和干空气	234
9-2 绝对湿度和相对湿度	235
9-3 露点温度和湿球温度	237
9-4 含湿量、焓和焓湿图	239
*9-5 比相对湿度和通用焓湿图	243
9-6 湿空气过程——焓湿图的应用	248
思考题	258
习题	258
附录	260
附表 1 常用气体的某些基本热力性质	260

附表 2	某些常用气体在理想气体状态下的定压比热容与温度的关系式.....	260
附表 3	某些常用气体在理想气体状态下的平均定压比热容.....	261
附表 4	某些常用气体在理想气体状态下的平均定容比热容.....	262
附表 5	空气在理想气体状态下的热力性质表.....	263
附表 6	饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按温度排列).....	267
附表 7	饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按压力排列).....	270
附表 8	未饱和水与过热水蒸气的热力性质表.....	272
附表 9	各种压力单位的换算关系.....	279
附表 10	各种能量(功、热量、能量)单位的换算关系.....	280
附表 11	各种功率单位的换算关系.....	281
附图 1	水蒸气的焓熵图	
附图 2	氨的压焓图	
附图 3	湿空气的焓湿图	
附图 4	湿空气的通用焓湿图	

有 * 号的各节, 可视具体的教学情况酌予删减。

绪 论

1. 热能的利用

现代化的工农业生产，要求充足而经济的动力供应。自然界中可大量产生动力的主要能源有：风能、水能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。目前利用得最多的仍然是燃料（石油、煤、天然气等）的化学能。但是，日益减少的地下燃料资源势必不能满足飞速发展的生产力对动力的需求。因此，目前世界各国对原子能、太阳能、地热能，乃至海洋能、生物能等各种新能源正大力开展多方面的研究工作，以期找到新的能源出路。

在上述各种能源中，除风能（空气的动能）和水能（水的位能）可以向人们直接提供机械能以外，其它各种能源往往只能直接或间接地（通过燃烧、核反应）提供热能。人们可以直接利用热能为生产和生活服务，例如用于冶炼、分馏、加热、蒸煮、烘干、采暖等方面。但更大量的还是通过热机（如蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）使这些热能部分地（只能是部分地）转变为机械能，或进一步转变为电能，以供生产和生活中的大量需要。因此，对热能性质及其转换规律的研究，显然有着十分重要的意义。

2. 工程热力学的研究对象和研究方法

热力学是研究能量（特别是热能）性质及其转换规律的科学。

热力学是在研究热机效率的基础上于19世纪中叶由于建立了热力学第一定律和第二定律而形成的。在初期，它所涉及的主要是热能和机械能的转换。以后，由于热力学在化工、冶金、致冷、空调以及近年来在低温、超导、反应堆以至气象、生物等各个方面

获得了越来越广泛的应用,因而它的研究范围已扩大到了化学、物理化学、电、磁、辐射等现象。

工程热力学着重研究热能和机械能的转换规律。从理论上阐明提高热机效率(使热能以更大的百分率转变为机械能)的途径仍然是工程热力学的一项主要任务。

热能转变为机械能必需借助一套设备和某种载能物质。这设备就是通常所说的热机,而载能物质便是工质。热机对外做功时,要求工质有良好的膨胀性,这样才能方便地做功;而要热机不断地做功,则必须不断地将新鲜工质引入气缸,并将工作完了的工质排出,这就要求工质有良好的流动性。同时具备良好膨胀性和流动性的,不是固体,也不是液体,而是气体(如空气、水蒸气等)。因此,热机中的工质一般都是气态物质。但在应用蒸汽作为工质时也会涉及到液体。

因此,工程热力学的主要内容包括下列三部分:

(1) 介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。

(2) 介绍常用工质的热力学性质。

(3) 根据热力学基本定律,结合工质的热力学性质,分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环,阐明提高转换效率的正确途径。

工程热力学的研究方法也就是热力学的宏观研究方法。这种宏观研究方法的特点是:根据热力学的两个基本定律,运用严密的逻辑推理,对物体的宏观性质和宏观现象进行分析研究,而不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。所以,热力学是热学的宏观理论。与此对照,热学的微观理论是统计物理学。统计物理学从物质的微观结构出发,依据微观粒子的力学规律,应用概率理论和统计平均的方法,研究大量微观粒子(它们构成宏观物体)的

运动表现出来的宏观性质。

热力学和统计物理学在对热现象的研究上相辅相成。热力学经常利用从微观理论得到的知识（例如对工质热物理性质的研究成果以及对一些热现象和经验定律的微观实质的解释）。由于热力学研究方法所依据的两个基本定律不需要任何假设，因而能给出普遍而可靠的结果，可以用来检验微观理论的正确性。但是由于热力学不涉及物质的微观结构，因而用热力学方法无法获得物质的具体性质。统计物理学则由于深入了热现象的本质，可使热力学理论获得微观机理上的说明，并可揭示宏观性质的微观决定因素，从而在理论上起到指导作用。统计物理学还能通过计算求得物质的性质，但推导比较复杂，不像热力学那样简单、直观，而且由于不可避免地要对物质结构模型作一些简化或假设，因此所得结果和实际情况往往有差异。

像其它学科一样，在工程热力学中也普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。这种略去细节、抽出共性、抓主要矛盾的处理问题的方法，在进行理论分析时特别有用。这种科学的抽象，不但不脱离实际，而且总是更深刻地反映了事物的本质。

3. 工程热力学常用的计量单位

在工程热力学中涉及到比较多的物理量。这就有一个对这些物理量采用什么单位的问题。解放后，我国出版的工程热力学书籍一般都采用工程单位制。近年来，世界各国逐步采用统一的国际单位制（简称SI），以避免由于单位制不同而引起的混乱现象和烦琐的换算。我国也以国际单位制为基础制定了“中华人民共和国法定计量单位”，于1984年颁布执行。因此，本教材采用我国法定计量单位。考虑到目前实际情况，对工程单位制也作了适当的介绍。

国家法定计量单位中给出了长度、质量、时间、电流、热力学温

度、物质的量和光强度共七个基本单位。工程热力学中各常用物理量牵涉到的基本单位有五个,即长度、质量、时间、热力学温度和物质的量。

国家法定计量单位比较科学合理,各导出单位和基本单位的关系式中的系数都等于1,因此换算简单。表1和表2分别给出了工程热力学中常用的国家法定计量单位的基本单位和导出单位。

表1 国家法定计量单位的基本单位(部分)

量	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)*	kg
时间	秒	s
热力学温度	开[尔文]**	K
物质的量	摩[尔]	mol

* 圆括号中的名称与它前面的名称是同义词。

** 去掉方括号时为单位名称的全称;去掉方括号中的字时,即成为单位名称的简称。下同。

表2 国家法定计量单位的导出单位(部分)

量	单位名称	单位符号	其它 SI 单位的表示式
力	牛[顿]	N	
功、热量、能量	焦[耳]	J	N·m
压力	帕[斯卡]	Pa	N/m ²
功率	瓦[特]	W	J/s
比内能、比焓	焦[耳]每千克		J/kg
比热容、比熵	焦[耳]每千克开[尔文]		J/(kg·K)

在工程单位制的基本单位中，长度用米(m)；时间用秒或小时(s 或 h)；力用公斤力(kgf)。质量则是导出单位。根据牛顿第二定律($m = F/a$)，质量单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 。

工程单位制中的公斤力(kgf) 和国际单位制中的牛顿(N) 之间的关系如下($F = ma$)：

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \times 9.80665 \text{ m/s}^2 = 9.80665 \text{ N}$$

9.80665 m/s^2 是标准重力加速度。所以，在标准重力场中，重量为 1 kgf 的物质，其质量正好是 1kg。

关于压力、能量和功率的各种单位之间的换算关系可查阅本书附表 9、附表 10 和附表 11。

第一章 基本概念

1-1 热力系

作任何分析研究，首先必需明确研究对象。热力系就是具体指定的热力学研究对象。与热力系有相互作用的周围物体统称为外界。为了避免把热力系和外界混淆起来，设想有界面将它们分开。这界面可以是真实的(如图 1-1和图 1-2 中取气体工质为热力系时，气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面)，也可以是假想的(如图 1-2 中进口截面和出口截面便是假想的界面)；可以是固定的，也可以是变动的(如图 1-1 中当活塞移动时界面发生变化)。

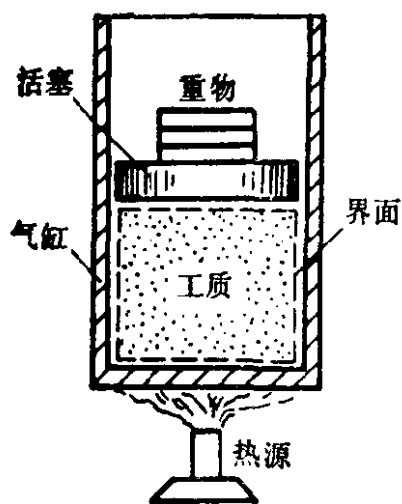


图 1-1

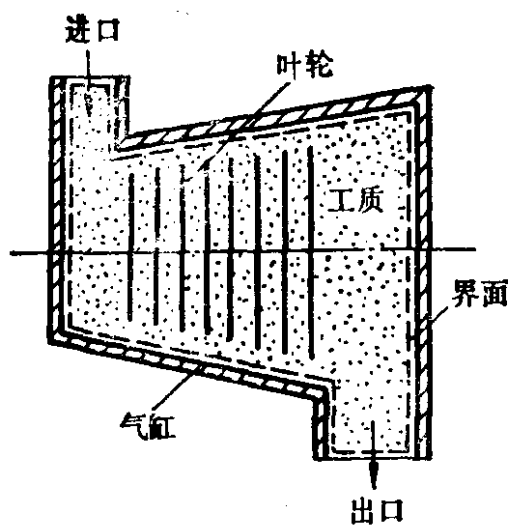


图 1-2

热力系的选取，决定于所提出的研究任务。它可以是一群物体、一个物体或物体的某一部分。它可以很大，也可以很小，但是不能小到只包含少量的分子，以至不能遵守统计平均规律(热力学理

论的正确性有赖于分子运动的统计平均规律, 而这一规律只存在于大量现象)。

在作热力学分析时, 既要考虑热力系内部的变化, 也要考虑热力系通过界面和外界发生的能量交换和物质交换。

根据热力系内部情况的不同, 热力系可以分为:

单元系——由单一的化学成分组成;

多元系——由多种化学成分组成;

单相系——由单一的相(如气相或液相)组成;

复相系——由多种相(如气-液两相或气-液-固三相)组成;

均匀系——各部分性质均匀一致;

非均匀系——各部分性质不均匀。

根据热力系和外界相互作用情况的不同, 热力系又可以分为:

闭口系——和外界无物质交换;

开口系——和外界有物质交换;

绝热系——和外界无热量交换;

孤立系——和外界无任何相互作用。

例如取图 1-1 中的气体工质(比如说氮气)为热力系, 那么它是单元、单相、均匀的闭口系。如果取图 1-2 中的气体为热力系并忽略和外界的热量交换, 那么它是单元、单相、绝热的开口系。

1-2 状态和状态参数

状态是热力系在指定瞬间所呈现的全部宏观性质的总称。从各个不同方面描写这种宏观状态的物理量便是各个状态参数。

在工程热力学中常用的状态参数有六个, 即压力、比容、温度、内能、焓和熵。其中压力、比容和温度可以直接测量, 也比较直观, 称为基本状态参数。下面逐一介绍这六个状态参数。

1. 压力