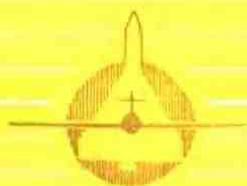


工程热力学

(修 订 本)

欧阳榭 李继坤 李汝辉 编
赵承龙 李立国



国防工业出版社

内 容 简 介

本书是在拓宽专业面向原则指导下,在三所航空工业院校所编的1982年版本的基础上修订的。

本书主要讲述工程热力学的基本概念、基本定律、工质的性质、热力过程的计算、热力循环的分析以及化学热力学基础知识等内容。此外,对气体分子运动论、经典统计力学及不可逆过程热力学也作了简要的介绍。本书既注意加强基础理论,又注意联系工程实际,每章都附有一定数量的例题和习题。计算题目主要采用国务院发布的以国际单位制单位为基础的我国法定计量单位,同时也适当介绍了目前尚在使用的工程单位制。

本书可作为高等工业院校热能动力类各专业的教科书,也可以作为工程热物理学科各专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员参考。

工 程 热 力 学

(修订本)

欧阳榘 李继坤 李汝辉 编

赵承龙 李立国

责任编辑 阎瑞琪

国防工业出版社出版

(北京市丰台区西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张17¹/₈ 449千字

1989年6月第二版 1989年6月第一次印刷 印数: 0,001—2,380册

ISBN 7-118-00486-3/TK14 定价: 5.20元



第一版前言

本书是根据高等航空院校动力类专业《工程热力学》教材会议拟订的教学大纲进行编写的。

全书在介绍了气体的性质和热力学的基本概念以后,根据热力学的两个主要定律阐述了一般原理,叙述了气体的主要过程和气体动力循环。此外,还介绍了实际气体的热力学和化学热力学的基础知识,为燃烧反应的分析 and 计算打下了基础。最后还简单地介绍了气体分子运动论和经典统计力学,以便加深理解工质的有关性质。教材内容既注意到由浅入深,讲清概念,又力求联系实际,密切结合专业,为学习本专业后继课程奠定了坚实的理论基础和必要的基本知识。为了培养分析问题和解决问题的能力,各章都编有一定数量的例题和习题。

本书由西北工业大学欧阳俊、北京航空学院董德担任主编,由南京航空学院赵承龙担任主审。书中的绪论、第一、二、三、五、九章由欧阳俊编写,第四章由赵承龙编写,第六章由李立国编写,第七、八、十、十一章由董德编写,第十二、十三章由李继坤编写。

本书曾在北京航空学院、南京航空学院和西北工业大学三院校试用,得到不少教师和学生们的宝贵意见。与此同时,并请西北工业大学王宏基教授、北京工业学院谢焕章教授、南京航空学院物理教研室对其中部分章节分头审阅,给予指导,编者谨在此一并表示谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,请读者批评指正。

编 者

一九八一年四月

第二版前言

本书第一版是根据高等航空院校动力类专业《工程热力学》教材会议拟订的教学大纲进行编写的。随着目前经济体制改革的逐步深入,促使教育体制、专业设置及教学内容必须作相应的变革,否则难以满足今后经济建设的需要。为了拓宽专业面向,我们对本书的第一版进行了修改并增添了相应的内容,使本教材不仅可以适用于热能动力类专业,而且也可以满足工程热物理学科各专业的要求。

本书保持了原教材的体系,并发扬了原书加强基础,又密切结合实际,选材简练扼要,便于自学的特色。本书删减了一些不必要的内容,并对局部内容进行了调整、修改和补充,删去了完全气体诸定律及定容加热燃气轮机装置循环,合并了混合气体与湿空气为一章,并对焦-汤系数一节作了调整,增加了蒸汽动力循环、制冷循环及不可逆过程热力学简介三方面的内容。此外,对焓的概念及其应用于蒸汽动力装置循环和燃气轮机装置循环的分析也作了一定的介绍。

本书对工程热力学的基本概念、基本定律、工质的性质、热力过程的计算和热力循环的分析等主要内容都作了较详细的阐述,并注意联系工程实际,使读者具有比较坚实的理论基础和必要的基本知识。书中还介绍了化学热力学的基础知识,为燃烧反应的分析 and 计算作准备。最后,还简单地介绍了气体分子运动论和经典统计力学以及不可逆过程热力学的概况。教材内容力求由浅入深,循序渐进,使之既便于本课程的教学,也有利于今后学习各专业的后继课程。为了培养分析问题和解决问题的能力,各章都编有一定数量的例题和习题。

本书第二版由欧阳榘主编。书中的绪论、第一、二、三、五、

九和十一章由欧阳榭修订和编写,第四章及附录不可逆过程热力学简介由赵承龙修订和编写,第六章由李立国修订,因董耀德病故,第一版中他所编写的第七、八、十和十一章现在第二版中改为第七、八、十二和十三章,分别由李汝辉和李继坤修订,现在的第七、八和十章由李汝辉修订和编写,第十二、十三、十四和十五章由李继坤修订。

本书自发行应用以来,承蒙各方面同行的关注和读者的大力支持,并提出不少宝贵意见和建议,促进本书的修订工作顺利完成。修改稿完成以后,又得到西安交通大学刘威定副教授认真的审阅,提出不少有益的建议,并作了修改。在此,谨对他们致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处,尚希读者批评指正。

编 者

一九八八年七月

目 录

主要符号	1
绪论	4
§ 0-1 自然界中的能源及热能的利用	4
§ 0-2 热力学及热力工程的发展简史	5
§ 0-3 动力装置的简单工作原理	6
§ 0-4 工程热力学的研究对象及其主要内容	10
§ 0-5 研究热现象的两种方法	11
第一章 基本概念及气体的基本性质	14
§ 1-1 热力学体系	14
§ 1-2 热力学状态 平衡状态	15
§ 1-3 单位制	16
§ 1-4 气体的基本状态参数	19
§ 1-5 气体状态参数的特性	28
§ 1-6 完全气体与实际气体	31
§ 1-7 完全气体状态方程式 通用气体常数	32
§ 1-8 完全气体温标	39
习题	41
第二章 热力学第一定律	44
§ 2-1 热力学第一定律 当量原理	44
§ 2-2 热力学第一定律解析式	48
§ 2-3 总能量 内能	50
§ 2-4 可逆过程和不可逆过程	52
§ 2-5 容积功(膨胀功或压缩功)	55
§ 2-6 焓	57
§ 2-7 气体的比热容 热量的计算	58
习题	68
第三章 气体的热力过程	72

§ 3-1 分析热力过程的目的、方法及内容	72
§ 3-2 熵 温熵图 焓熵图	73
§ 3-3 定容过程	78
§ 3-4 定压过程	81
§ 3-5 定温过程	84
§ 3-6 可逆绝热过程(定熵过程)	89
§ 3-7 多变过程	94
§ 3-8 活塞式压气机的工作过程	99
§ 3-9 完全气体的热力学性质表	109
习题	114
第四章 热力学第二定律	118
§ 4-1 热力循环	118
§ 4-2 热力学第二定律各种说法	124
§ 4-3 卡诺定理	128
§ 4-4 热力学温标	133
§ 4-5 两个极限温度范围内工作的循环热效率	137
§ 4-6 熵	140
§ 4-7 孤立体系熵增原理	145
§ 4-8 最大可用功 焓	152
习题	159
第五章 气体的流动	161
§ 5-1 连续方程式	161
§ 5-2 能量方程式	163
§ 5-3 伯努利方程式	166
§ 5-4 声速和马赫数	168
§ 5-5 气流的滞止参数和临界参数	171
§ 5-6 管道截面积与流速的关系	177
§ 5-7 喷管与扩压管	180
§ 5-8 绝热节流	188
§ 5-9 叶轮机	189
§ 5-10 燃烧室	197
§ 5-11 开口体系的工质焓或焓焓	199

习题	203
第六章 气体动力循环	206
§ 6-1 活塞式内燃机的理想循环	207
§ 6-2 燃气涡轮装置的理想循环	217
§ 6-3 燃气涡轮装置的实际循环	228
§ 6-4 空气喷气发动机的理想循环	233
§ 6-5 液体燃料火箭发动机的理想循环	242
习题	244
第七章 实际气体和水蒸气	247
§ 7-1 实际气体状态方程	247
§ 7-2 水蒸气的形成过程	259
§ 7-3 水和蒸汽表	261
§ 7-4 蒸汽的焓熵图	264
§ 7-5 三相点	265
§ 7-6 水蒸气的热力过程	267
§ 7-7 克拉贝隆-克劳修斯方程	270
习题	272
第八章 完全气体混合物及湿空气	275
§ 8-1 分压力和道尔顿定律	275
§ 8-2 分容积和阿麦加特定律	276
§ 8-3 混合气体的成分表示法及其换算	277
§ 8-4 混合气体的平均分子量和气体常数	279
§ 8-5 混合气体的分压力	281
§ 8-6 混合气体的比热容、内能、焓和熵	282
§ 8-7 湿空气及其湿度	286
§ 8-8 湿空气的其它参数	295
§ 8-9 湿度图	301
§ 8-10 湿空气的热力过程	304
习题	313
第九章 热力学一般关系式	317
§ 9-1 推导的基本方法	317

§ 9-2 热性系数	318
§ 9-3 麦克斯韦关系式	321
§ 9-4 比热容的关系式	325
§ 9-5 内能的关系式	329
§ 9-6 焓和熵的关系式	332
§ 9-7 焦耳-汤姆逊系数	336
习题	340
第十章 蒸汽动力循环	342
§ 10-1 蒸汽卡诺循环	342
§ 10-2 简单蒸汽动力循环——朗肯循环	343
§ 10-3 再热循环	348
§ 10-4 回热循环	352
§ 10-5 热电循环	358
§ 10-6 超临界朗肯循环	362
§ 10-7 两汽循环	363
§ 10-8 蒸汽动力装置循环的焓分析	370
习题	382
第十一章 制冷循环	385
§ 11-1 制冷装置的理想循环——逆向卡诺循环	385
§ 11-2 空气压缩制冷循环	387
§ 11-3 蒸汽压缩制冷循环	393
§ 11-4 制冷剂的热力性质	398
§ 11-5 蒸汽喷射制冷循环	401
§ 11-6 吸收式制冷循环	404
习题	405
第十二章 热化学	407
§ 12-1 基本概念	407
§ 12-2 热力学第一定律在化学反应中的应用	408
§ 12-3 化学反应热效应	409
§ 12-4 燃料的燃烧和热值	412
§ 12-5 赫斯定律	415
§ 12-6 标准生成焓	417

§ 12-7	化学反应热效应的计算	419
§ 12-8	温度对热效应的影响	421
§ 12-9	理论燃烧温度和爆炸压力	425
习题		429
第十三章	化学平衡	432
§ 13-1	自由能和自由焓	432
§ 13-2	化学平衡和平衡常数	435
§ 13-3	压力和温度对化学平衡的影响	441
§ 13-4	标准生成自由焓	445
§ 13-5	热力学第三定律	447
§ 13-6	离解和离解度	449
§ 13-7	实际燃烧温度	453
习题		456
第十四章	气体分子运动论简介	459
§ 14-1	基本假设	459
§ 14-2	气体的压力	462
§ 14-3	麦克斯韦速度分布率	467
§ 14-4	分子的平均自由程	473
§ 14-5	粘性系数	477
§ 14-6	导热系数	481
§ 14-7	扩散系数	484
习题		487
第十五章	统计力学浅说	488
§ 15-1	相空间	488
§ 15-2	热力学几率	491
§ 15-3	最可几状态	494
§ 15-4	热力学几率与熵	499
§ 15-5	热力学函数与单原子气体的热力学性质	503
§ 15-6	能量均分定理与气体的比热容	507
习题		511
附录	不可逆过程热力学简介	512
附表 1	SI 制与工程制的压力	

单位换算表	516
附表 2 气体常数 R 的数值表	517
附表 3 SI制与工程制的能量单位换算表	517
附表 4 完全气体的定压比热容方程式中的系数	518
附表 5 空气的热力学性质表	519
附表 6 气体的平均定压比热容表	522
附表 7 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力排列)	524
附表 8 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度排列)	526
附表 9 未饱和水与过热蒸汽表	528
附表 10 某些物质的标准生成焓, 标准生成自由焓, 标准 绝对熵数据表	532
附表 11 某些燃烧产物的焓温表	533
附表 12 某些化学反应的平衡常数 K_p 表	534
附表 13 某些定积分公式表	535
附 图 水蒸汽焓平熵图	536

主 要 符 号

A	面积, 功热当量	k	比热比
a	加速度	k_0	一个气体分子的气体常数 (即玻耳兹曼常数)
B	大气压力		
C	比例系数, 积分常数		
c	比热容 (即单位质量物质的热容量), 声速	L	长度, 升, 汽化潜热
c_v	定容比热容	l	分子的平均自由程
c_p	定压比热容	M	千摩尔数
D	扩散系数	Ma	马赫数
d	直径, 含湿量, 汽耗率	m	质量
E	总能量	m_0	每一个分子的质量
E_k	动能	$\dot{m}$	质量流率或流量
E_p	位能	N	分子数
e	比能量	N'	1 千克气体的分子数
ex	比焓, 工质焓	N_0	1 千摩尔气体中所含的分子数 (通常称阿佛加德罗常数)
F	自由能, 作用力		
f	比自由能	n	多变指数, 单位体积的分子数或分子浓度
G	重量流率		
g	重力加速度, 质量成分	p	压力或压强
H	焓	Q	吸热量或放热量
	比焓 (即单位质量物质的焓)	q	单位质量物质的吸热量或放热量
K	平衡常数, 热量利用系数	$\dot{Q}$	单位时间的吸热量 (即热流率)
		R	1 千克气体的气体常

	数	希腊字母	
r	容积成分, 半径	α	压力的温度系数或弹性系数, 离解度
S	熵	β	体积的温度系数或热膨胀系数
s	比熵 (即单位质量物质的熵)	γ	重度
T	热力学温度	ϵ	压缩比, 制冷系数或取暖系数
t	摄氏温度	η	效率
U	内能	η_r	热效率
u	比内能 (即单位质量物质的内能)	θ	经验温度
V	容积	λ	定容增压比, 导热系数
$\mathcal{V}$	速度	μ	分子量, 定温压缩系数或压缩系数, 粘性系数
v	比容 (即单位质量物质的容积)	μ_j	焦-汤系数
W	功, 热力学几率	π	增压比
$\dot{W}$	功率	ρ	密度, 预胀比
w	比功 (即单位质量物质的功)	σ	回热度, 分子的直径, 熵产率
x	距离, 湿蒸汽的干度	τ	时间
Z	自由焓, 压缩性因子, 配分函数	φ	速度系数, 相对湿度
z	高度, 比自由焓 (即单位质量物质的自由焓)	ω	分子的移动速度
(μR)	通用气体常数	下脚注	
(μc_p)	定压千摩尔比热容	abs	绝对的
(μc_v)	定容千摩尔比热容	av	有用的
(μu)	千摩尔内能	C	压气机的, 冷源的
(μh)	千摩尔焓	c	卡诺机的, 制冷的, 压缩的
(μz)	千摩尔自由焓		

<i>cl</i>	闭口的	<i>out</i>	出口的, 输出的
<i>cr</i>	临界状态的	<i>R</i>	可逆机的, 对比态的
<i>e</i>	膨胀的	<i>re</i>	可逆的
<i>f</i>	摩擦的	<i>s</i>	定熵过程的, 饱和的
<i>g_a</i>	表的	<i>T</i>	定温过程的, 涡轮的
<i>H</i>	热源的, 任何热机的	<i>tr</i>	三相点的
<i>H.V.</i>	高热值	<i>v</i>	定容过程的
<i>i</i>	第 <i>i</i> 种的	<i>va</i>	真空的
<i>ir</i>	不可逆的	0	标准状态的
<i>in</i>	进口的, 输入的	1	起始状态的
<i>iso</i>	孤立体系的	2	终了状态的
<i>L.V.</i>	低热值	上脚注	
<i>l</i>	损失的	<i>'</i>	实际的, 饱和水的
<i>max</i>	最大的	<i>"</i>	干饱和蒸汽的
<i>min</i>	最小的	<i>*</i>	滞止状态的
<i>n</i>	多变过程的, 喷管的	0	标准状态的
<i>o</i>	循环的	上横线	
<i>p</i>	定压过程的	—	平均的, 相对变化率
<i>op</i>	最佳的, 开口的		的, 化学反应热效应

绪 论

§ 0-1 自然界中的能源及热能的利用

自然界中可以供人们生活上和生产上使用的能源有风能、水能、太阳能、地热能、燃料的化学能及原子核能等。在这些能源中，除风能和水能是以机械能的形式（指空气的动能和水的位能）直接被人们利用以外，其它各种能源，或是直接以热能的形式存在（太阳能、地热能），或是经过燃烧反应、原子核反应，使能量转化为热能的形式，然后再予以利用。所以，人们从自然界获得的能源，其主要形式是热能。

热能的利用，通常有下述的两种基本方式：一种是直接利用，将热能直接用于冶炼、化工等生产过程中的加热，如熔化、烘干、蒸煮、采暖等；另一种是间接利用，通常是指将热能通过动力装置转换为机械能或电能的形式而加以利用，例如飞机、船舶、火车、汽车以及大型热力发电厂等都是以燃料燃烧所产生的热能作为动力源，其中所采用的热能动力装置或热力发动机目前在动力工业中仍然占据着主要地位。

在热能的间接利用中，能量的转换往往是能量利用的前提，各种热动力装置将热能转化为机械能，通过动力机带动发电机，最后转换成电能的形式使用。电能具有输送和使用方便等优点。

目前世界各国所使用的能源，主要是煤、石油和天然气等燃料，根据有限的地下燃料资源，很难满足动力工业飞速发展的需要，所以从技术上改造原有设备，节约能源消耗，提高热能利用率，是人们长期的战斗任务。此外，就是开发新能源，例如地热能、太阳能和原子核能等，使之更加有效地进行能量转换。因为

太阳能是一个取之不尽的能源，而进行热核反应的物质在地球上的储存量也是极大的。最近我国已确定了“实行开发和节约并重，近期要把节流放在优先地位”的总方针，正是解决我国能源供应紧张的局面。这就要求从事能量转换学科及力能工作者必须掌握有关能量及其相互转换规律的知识——即工程热力学的知识。

§ 0-2 热力学及热力工程的发展简史

热现象是人类生活中最早接触到的自然现象之一。相传远古时代的钻木取火，使木头温度升高而发生燃烧，这是机械能转换为热能的例子。随着人类在生活上和生产上的需要，对热的利用和认识，经历了漫长的岁月，从取暖、熟食到制作金属工具，有过不少发明创造。我国在 12~13 世纪就有用火力来产生旋转运动的走马灯和使用火药燃烧向后喷气加速箭的飞行记载，这与现代燃气轮机和火箭等喷气推进原理是一致的。可是，由于历代王朝的封建统治，劳动人民的创造发明得不到重视，更谈不到总结经验，形成一整套的理论，来促进生产力的发展和人民生活的改善。

人类对热的本质的认识并逐渐形成热力学这门学科，只是近 300 年的事。18 世纪以前，动力的来源主要是人力、畜力以及风力、水力等自然动力。随着人类社会的发展，人们迫切地要求解决生产上动力不足的问题，因此在 18 世纪发明了蒸汽机，实现了热能向机械能的转换。蒸汽机在工业上的广泛使用，促进了工业的迅速发展。但是，由于蒸汽机笨重、效率不高等缺点，因而促使人们对于水和蒸汽以及其它物质的热力性质进行研究；与此同时，卡诺对如何提高热效率，迈耶、焦耳等人对热与功的转换规律进行了大量实验，从而建立了热力学两个基本定律，大大地促进了热力学这门学科的形成和发展，促使热力发动机不断地发展与改进以及新型动力机的创造与发明。由于蒸汽机不宜用于运输工具上，而且也不能满足由于工业生产的不断发展与高度集中所需要的巨

大动力，因此在热力学有关理论的指导下，于 19 世纪末期，遂发明了内燃机及蒸汽轮机。内燃机具有效率高、重量轻的优点，蒸汽轮机则具有效率高及功率大的优点。内燃机及蒸汽轮机的出现，极大地促进并发展了热力学中热力过程和热力循环的研究，而蒸汽轮机又推动了高参数蒸汽性质及高速气流等问题的研究，使热力学两个定律应用于工程实际中去，形成了工程热力学学科。

第二次世界大战期间出现的喷气式飞机和远射程火箭所用的喷气发动机，由于能产生巨大的动力等优点，所以能满足高速高空飞行的要求，目前已成为进入宇宙空间的主要动力。对航空燃气轮机作部分改造，即成为地面上所用的燃气轮机，在发电站、机车和船舶中已广泛使用，并在工程热力学中也发展了相应的研究内容。

近年来原子能动力装置的利用，为人类开辟了利用能源的新纪元。此外，还出现了能量直接转换的新技术，它既可提高转换的效率，又可免去庞大的热力机械，例如化学能直接转化成为电能的燃料电池，热能直接转化为电能的温差电池和磁流体发电等。这在热力学中也出现了相应的研究课题。

§ 0-3 动力装置的简单工作原理

动力装置乃是将燃料燃烧所得到的热能，以及将热能转换为机械能的整套设备。由于燃料性质、燃烧设备的不同以及其它因素的影响，可分为蒸汽动力装置及燃气动力装置两大类。蒸汽动力装置利用的热力发动机（简称热机）有蒸汽机、蒸汽轮机，而燃气动力装置则有内燃机、燃气轮机及喷气发动机。下面将介绍它们的简单工作原理。

（一）蒸汽动力装置

图 0-1 表示简单蒸汽动力装置的示意图。它由锅炉、汽轮机、发电机、冷凝器及水泵组成。燃料（煤或石油）在锅炉中燃烧，产生大量的热能，通过传热，使锅炉中的水沸腾并变为蒸汽，在