

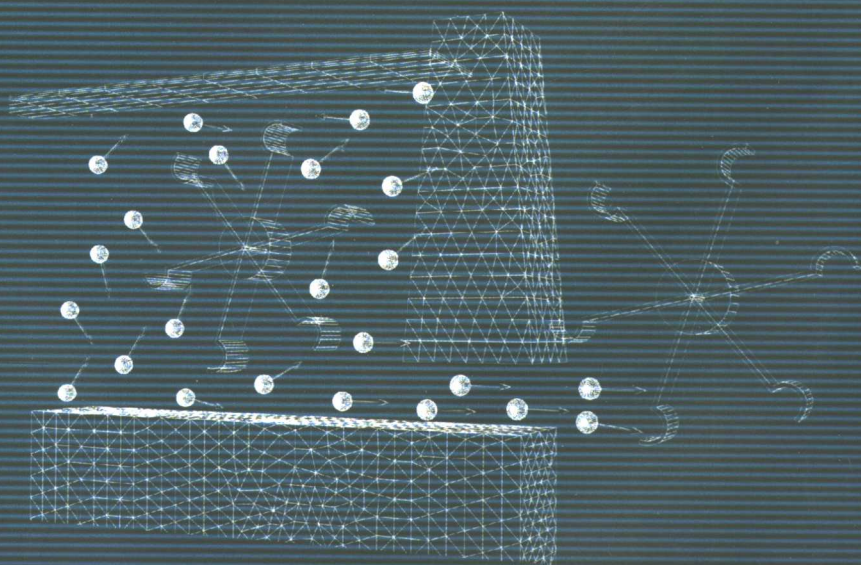
动力机械及工程热物理



国防科工委「十五」规划教材

工程热力学

●冯青 李世武 张丽 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·动力机械及工程热物理

工程热力学

冯 青 李世武 张 丽 编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是国防科工委“十五”规划教材,是根据原国家教育委员会制定的普通高等院校多学时“工程热力学课程要求”(1995 修订版)编写的,其中吸收了作者长期从事工程热力学教学与教改实践的经验和国内外同类教科书的经验与优点。对概念、定律或公式的论述和推导更加严密、规范,容易理解,在增强教材的实用性、趣味性等方面做了有益的尝试,颇有新意。

本书共 12 章,主要内容有基本概念、热力学第一定律与理想气体性质、理想气体的热力过程、热力学第二定律、气体的流动、气体动力循环、热力学普遍关系式、实际气体和水蒸气的性质、蒸汽动力循环、制冷循环、理想气体混合物及湿空气、化学热力学基础等。每章有小结、思考题、习题,书后附有常用的各种图表、工程热力学主要名词的索引及英文翻译、习题答案。

本书可作为普通高等院校热能工程、动力机械、空调制冷、供暖通风、工程热物理等专业的教科书,也可供有关工程技术人员自学或作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/冯青,李世武,张丽编著. —西安:西北工业大学出版社,2006.9

国防科工委“十五”规划教材·动力机械及工程热物理

ISBN 7-5612-2107-X

I. 工… II. ①冯… ②李… ③张… III. 工程热力学—高等学校—教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085388 号

工程热力学

冯 青 李世武 张丽 编著

责任编辑 王夏林

责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

市场部电话:029-88493844,88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:41.5 字数:890 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-2107-X 定价:55.00 元(平装) 70.00 元(精装)

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：	王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
	乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
	杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光禔
	陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祎	金鸿章
	贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
	郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

一直想写一本既通俗易懂、简单直观、方便学习,又能准确、深刻地反映工程热力学实质的工程热力学教材,因为我们在长期的教学实践中发现,对大多数学生来说,工程热力学是一门难学、难懂、更难用的课程,这是与工程热力学逻辑严密、概念众多、结论抽象且适用范围非常广泛的特点分不开的。另外,21世纪课程改革更向着缩减学时、内容浓缩和精练、信息量大、重视素质教育的方向发展。本书就是为满足上述要求而写的。“国防科工委‘十五’重点教材建设计划”给我们提供了这样一个机会。

在体系编排上,本书将理想气体的性质与热力学第一定律放在同一章,这样可以扩大热力学第一定律的习题量,并通过对有理想气体在内的热力系的计算分析加深对热力学第一定律的理解和认识。这样做还可以进一步密切能量与物质的关系,体现“能量与物质不可分割”的道理。另外,把理想气体混合物的性质放在第11章的湿空气的性质之前,可以把湿空气当做理想气体混合物的一个特例加以介绍,使学生能够马上学以致用,而将气体的混合过程放在第2章中,作为热力学第一定律的一个应用。

在内容方面,本书从最基本的知识出发,对工程热力学的基本概念、定律、定理和公式进行了严密的推理、论证和深入的论述、分析,力图全面阐述概念、定律、定理和公式的来历、目的和用途。为此,本书采取了以下五项措施:一是对概念、定律或公式的论述和推导更加严密、规范,也更加容易理解。如对热的定义,给出了热的“热力学定义”,避免了热力学内部的逻辑矛盾。对于热力学第二定律的论述,也没有像一般热力学教材中采用的从自然过程进行的方向性来表述,而是通过对热力循环的分析,直接由热力循环得到,这样做使读者更加容易理解,降低了由于太抽象带来

的对热力学第二定律理解上的困难。而且将热力循环与热力学第二定律相联系,将热力过程与热力学第一定律相联系,符合工程热力学的内在逻辑。二是对概念、定律或公式的来历、历史进行了介绍,这在绪论及相关的各章节中都表现得很充分。对于热力学发展中遇到的矛盾和问题,如“热质说”与“热动说”,“孤立体系熵增原理”与“热寂说”,熵与信息的关系等也进行了介绍。实际上,从教育心理学的角度看,人们从反面教训中得到的东西比从正面的成功中学到的东西更多。三是对与热力学相关的历史人物、科学家进行了一些介绍,并给出了几乎所有人物的中英文名称及生卒年,使科学技术具有了历史感和真实感。四是增加了思考题、习题的数量,特别是思考题,数量多,且都针对概念上的薄弱环节。五是对概念、定律、公式应用的介绍尽可能具体化,介绍了依赖工程热力学原理建立起来的工程技术的过去、现在和未来。更多地介绍了现代科学技术特别是现代动力技术的发展,充分展示了现代动力技术的成果。如在6.3节(空气喷气发动机循环)中介绍了近年来热门的冲压发动机及超燃冲压发动机技术;在6.4节(液体火箭发动机循环)中介绍了电火箭、核火箭和太阳能火箭发动机技术;在6.5节(斯特林循环)中介绍了热气发动机的一些特殊用途,包括作为“不依赖空气推进装置(AIP)”的潜艇动力技术;0.2节和9.6节中介绍的各种热机及动力装置的联合运行技术更是目前先进动力技术的发展方向。把科学和技术置于历史发展的长河中,并将工程热力学与现代工程技术更紧密地联系在一起,更加贴近工程实际,增加了学生学习和认识的维度,使平面的知识变得立体,使生硬的知识变得鲜活,使冷漠的知识变得亲切。相信能够增加学生的学习兴趣,提高学习质量。

在教学方法上,本书也进行了一些新的探索。本书尝试着把学生的注意力吸引到科学方法上,而不是通常的那样仅仅注意对知识的学习。如在“绪论”中,不仅详细介绍了工程热力学所采用的研究方法——宏观方法和微观方法,而且还介绍了与科学方法密切相关的科学的逻辑——归纳法和演绎法,并且在后面各章节的讲解中将这些科学方法的应用贯



穿始终。比如在大部分例题中都将“建立物理模型→建立数学模型及求解(解方程)→讨论及结论”作为固定的解题模式,以期通过对科学方法的训练达到学会科学研究方法的目的。在第6章(气体动力循环)中,将比较热效率的方法归纳为温度法、热量法、循环分解法、公式法等,以方便学生掌握。实际上,本书每章后的小结,更多的是对各种研究方法和分析方法的概括与总结,而不仅仅是各知识点的总结。此外,本书还加强了各知识点之间的联系,所有的知识,不是在讲解一次就完了,而是在随后各章的内容中反复提及、强调并加以应用,同时还在括号中注明该知识点的出处。本书还建立了索引,所有书中涉及概念的文字,都加黑和加波浪线予以突出,并在书后的“工程热力学主要名词的索引及英文翻译”中标出该名词出现的章节号,这样做,一是方便学生复习和查找概念;二是有利于学生在学习过程中把所有的概念联系起来,不仅学习概念,更要应用概念,在应用中逐渐熟练。总之,书中各章节虽然相对独立,但前后照应,浑然一体,形成了一个有机的整体。

本书在“工程热力学主要名词的索引及英文翻译”中还给出了所有中文名词相应的英文名称,可以为工程热力学向双语教学过渡提供方便,同时也使学生可以有机会从另一种语言的角度学习和理解工程热力学的概念。注意,这里“相应的英文名称”是指在工程热力学的英文书籍中与中文对应使用的名称,而不一定是中文名称的直译。比如“马力”一词在英文中就是“horse power”,直译成中文应为“马功率”,“马力”实际上是个误译,但在中文中已经习惯成自然。再如“对比态”在英文中是“corresponding state”,直译成中文为“对应态”。在附录1(国家法定计量单位与英、美计量单位之间的换算关系)中也给出了各种单位的英文名称,以及各单位之间,特别是法定计量单位与非法定计量单位之间、国际单位与英、美单位之间的换算关系,以方便大家阅读英文书籍。

本书以各章为模块,可以根据需要组合使用。如第1~3章组成工程热力学的“热力学第一定律模块”,是工程热力学的“基础模块”;第1~4



章则组成了工程热力学的“理论核心模块”；第1~6章(第5章和第6章也可以只选一个)组成了工程热力学的“理论+基本应用模块”，是工程热力学从理论到应用的最小模块；第1~9章(其中第7章也可以根据需要取舍)则组成了工程热力学的“理论+基本应用+实际气体模块”，是工程热力学涉及实际工质(水蒸气)应用的模块；第1~10章组成了工程热力学的“理论+基本应用+实际气体+制冷模块”，是工程热力学涉及逆向循环应用的模块；第1~11章组成了工程热力学的“理论+基本应用+实际气体+制冷+湿空气模块”，是工程热力学涉及制冷与空气调节应用及混合气体物性的模块；第1~12章组成了工程热力学的“理论+基本应用+实际气体+制冷+湿空气+化学热力学模块”，是工程热力学涉及化学反应(主要是燃烧)应用的模块，也是工程热力学理论与应用的完整模块，其中第7~12章都可以根据需要取舍。因此，通过选取不同的模块实施教学，本书可以适用于15~70学时的多种教学计划。

本书中“绪论”篇幅较长，主要目的是希望读者在学习工程热力学之前能够对热能使用的历史和工程热力学的发展史有一个大致的了解，并对目前热能动力技术的发展现状有一个较为完整的概览，以获得具体的印象和引起一定的兴趣。但由于“绪论”内容丰富，信息量大，涉及的概念和理论多，读者可能也不够熟悉，阅读起来会有一定的困难。若如此，不妨先跳过“绪论”，待有了一定的理论基础后再回头来阅读，效果可能更好。或者也可以直接把“绪论”当做学习过程中的参考资料，边学边读，与各章内容互相补充。我们坚信：历史是一面镜子。以铜为鉴，可以正衣冠；以人为鉴，可以知得失；以史为鉴，可以知兴替。社会发展如此，科学技术的发展也是如此。要想赶超世界科技的先进水平，就必须“鉴前世之兴衰，考当今之得失”“关国家之盛衰，系生民之休戚。”^①

本书由西北工业大学动力与能源学院冯青(绪论、第1~7章，第11

^①引自宋朝著名史学家司马光所著《资治通鉴》。



章和第 12 章)、李世武(第 8 章和第 9 章)、张丽(第 10 章)根据原国家教育委员会制定的多学时“工程热力学课程要求”(1995 修订版)编写,全书由冯青完成最后的统稿。

本书承蒙西安交通大学何雅玲教授、北京航空航天大学徐国强教授审阅,在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限,书中不妥之处,恳请读者和同行专家不吝指正。

编著者

2006 年 5 月

主要符号表

英文字母

A	面积, m^2 ; 热功当量, 指前因子
A_n	焓, J
c	质量热容, 比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 声速, 热力系宏观速度, m/s ; 常数
C	常数
c_f	流体速度, m/s
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_V	体积热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
C_D	流量因数
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
d	状态参数的全微分, 微分量
d	汽耗率, $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
d (水蒸气质量 / 干空气质量)	湿空气比湿度
e	比储存能, J/kg
E	总储存能, J
E_a	活化能, J
E_k	宏观动能, J
E_p	宏观位能, J
e_x	比焓, J/kg
E_x	焓, J
f	摩擦力, N; 单位质量推力, N/kg ; 比自由能, 比亥姆霍兹函数, J/kg
F	力, 推力 N; 自由能, 亥姆霍兹函数, J
g	重力加速度, m/s^2 ; 比自由焓, 比吉布斯函数, J/kg
G	自由焓, 吉布斯函数, J; 单位质量干沸石吸附的水蒸气质量
h	比焓, 质量焓, J/kg
H	焓, J
H_m	摩尔焓, J/mol
h_v	热值, J/kg



h_{LV}	低热值, J/kg
h_{HV}	高热值, J/kg
i	独立自变量个数, 自由度; 分子运动的自由度; 抽汽级数; 化学反应反应物编号
I	信息量, bit
j	功形式的数目; 化学反应生成物编号
k	玻耳兹曼常数; 组元数; 化学反应速度系数; 弹簧刚性系数, N/m
K	能量利用因数
K_c	用物质的量浓度表示的化学平衡常数
K_{COP}	性能因数
K_p	用分压力表示的化学平衡常数
K_x	用摩尔分数表示的化学平衡常数
L	压气机级数; 比潜热或气化焓, J/kg
L_0	理论空气量(空气量(kg)/燃料量(kg))
$L_{m,0}$	理论空气量(空气量(mol)/燃料量(mol))
M	摩尔质量, kg/mol
m	质量, kg
Ma	马赫数
M_r	相对分子质量
N_A	阿伏加德罗常数, 1/mol
n	物质的量, mol; 多变指数
p	压力, Pa
p_0, p_b	大气压, 背压, 反压, Pa
p_g	表压, Pa
p_v	真空度, 水蒸气分压, Pa
p_N	最大转变压力, Pa
q	比热, J/kg
Q	热量, J
q_m	质量流量, kg/s
q_V	体积流量 m^3/s ; 单位容积制冷量, J/m ³
Q_p	定压热效应, J
Q_V	定容热效应, J
r	半径, m
r_{AF}	空气量, kg/燃料量, kg
$r_{m,AF}$	空气量, mol/燃料量, mol



r_p	压力恢复因数
R_g	气体常数, J/(kg · K)
R	摩尔气体常数, J/(mol · K)
s	比熵, 质量熵, J/(kg · K)
S	熵, J/K
S_m	摩尔熵, J/(mol · K)
s_f	比熵流, J/(kg · K)
S_f	熵流, J/K
s_g	比熵产, J/(kg · K)
S_g	熵产, J/K
t	摄氏温度, °C
T	热力学绝对温度, K
u	比热力学能, 比内能, J/kg
U	热力学能, 内能, J
U_m	摩尔热力学能, 摩尔内能, J/mol
v	比体积, 质量体积, m ³ /kg
V	体积, 容积, m ³
w	比功, 比体积功, J/kg
W	功, 体积功, 容积功, J
w_f	比流动功, J/kg
W_f	流动功, J
W_l	功损, J
w_s	比轴功, J/kg
W_s	轴功, J
w_t	比技术功, J/kg
W_t	技术功, J
w_0	比循环功, J/kg
W_0	循环功, J
x	干度; 摩尔分数; 通用变量
y	通用变量; 联合循环中蒸汽与燃气的流量比; 汞气-水蒸气流量比
Y	通用变量
z	通用变量; 高度值, m
Z	压缩因子



希腊字母

α	抽汽因数;离解度或分解度
α_p	相对压力系数或弹性系数, 1/K 或 1/°C
α_v	体[膨]胀系数或定压热膨胀系数, 1/K 或 1/°C
β	过量空气因数
γ	比热比或质量热容比
δ	过程量的微元增量
Δ	增量
Φ	相数;热力学势
ε	压缩比;热湿比;误差;因数
ε_c	制冷因数
ε_w	供暖因数或供热因数
ε_0	分子最大吸引势能, J
ζ_c	制冷循环的热力因数
η	热力完善度
η_N	喷管效率
η_c	压气机绝热效率, 压气机效率
η_D	扩压管效率
η_P	推进效率
η_S	定熵效率, 绝热效率
η_t	热效率
η_T	涡轮绝热效率, 涡轮效率
η_V	容积效率
θ	温标
κ	定熵指数
κ_T	等温压缩率或等温压缩系数, 1/Pa
κ_S	等熵压缩率或等熵压缩系数, 1/Pa
μ_{JT}	焦-汤系数, 绝热节流系数, 微分节流效应, K/Pa
λ	定容增压比
ξ	反应进度
π	压力比(增压比或降压比)
ρ	密度, kg/m ³ ;预胀比
ρ_v	湿空气绝对湿度(水空气质量 / 湿空气体积), kg/m ³



σ	回热度;零势能时分子间距, m
τ	时间, s
φ	速度因数;体积分数;湿空气相对湿度
ω	热电比;偏心因子
Ω	热力学概率

下标

a	干空气的;空气的;放热的
C	压气机的
c	卡诺的;余隙容积的;气体的临界状态的;制冷的
ch	化学的
cr	气体临界流动的
CM	控制质量的,闭口系的
CV	控制容积的,开口系的
D	露点的
e	有用的,有效的;出口的;膨胀机的
f	流体的;熵流的;燃料的;生成焓的
g	燃气的,熵产的,驱动热源的
h	焓的
h	热泵的
i	组元号;抽汽级数;化学反应中反应物编号
I	间冷的
id	理想气体的
in	进口的
ir	不可逆的
IR	不可逆机的;间冷+回热循环的
iso	孤立体系的
j	化学反应产物编号
k	组元数的
l	损失的
L	液体的
m	摩尔量的;平均的;金属耐温极限的
max	最大的
min	最小的