

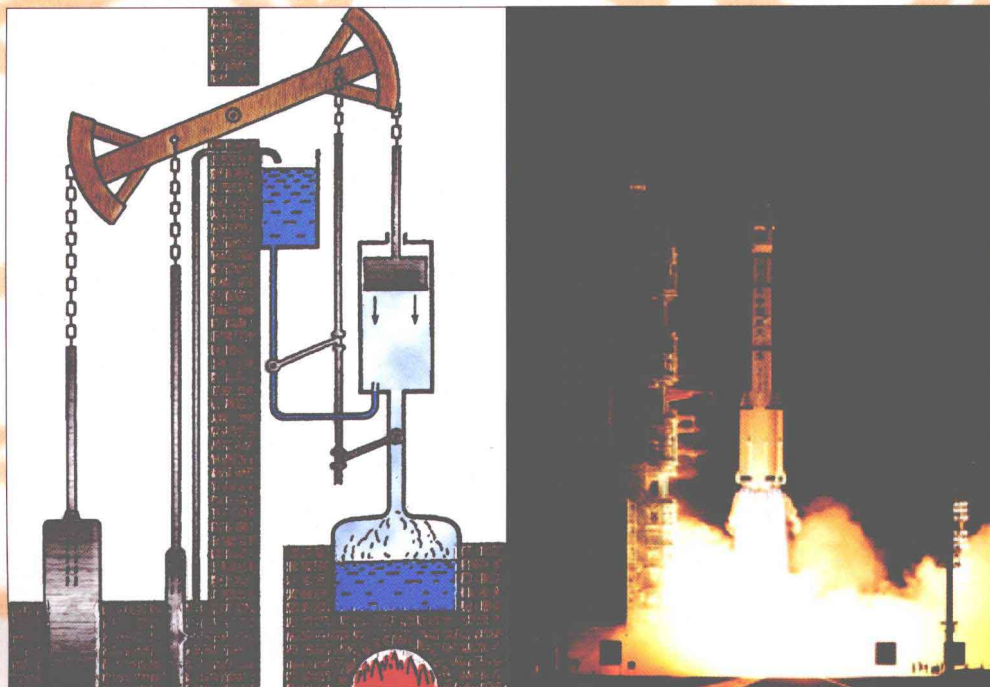


日本機械学会 JSMEテキストシリーズ 熱力学
机械工程类专业系列教材

热力学

Thermodynamics

(日) 圆山重直 主编
张信荣 王世学 等编译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

机械工程类专业系列教材

热 力 学

〔日〕圆山重直 主编
张信荣 王世学 等 编译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号 图字: 01-2009-2512 号

图书在版编目(CIP)数据

热力学 / (日) 圆山重直主编; 张信荣等编译. —北京: 北京大学出版社, 2011. 9

(机械工程类专业系列教材)

ISBN 978-7-301-19509-3

I. ①热… II. ①圆…②张… III. ①热力学—高等学校—教材 IV. ①0414.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 189548 号

©日本機械学会 2002 JSMEテキストシリーズ 熱力学

原出版社の文書による許諾なくして、本書の全部または一部を、 photocopy、イメージスキャナ等により複写・複製したり、或いはデータベースへ情報として蓄積し、検索システムを含む電氣的・機械的、その他いかなる手段・形態によっても、複製したり送信したりしてはならない。

©北京大学出版社 2011 JSME 教科书系列 热力学

本书(《JSME 教科书系列 热力学》(2002))经日本机械学会(日本·东京新宿区)的授权,由北京大学出版社编译出版。

书 名: 热力学

著作责任者: (日) 圆山重直 主编 张信荣 王世学 等 编译

策 划 编 辑: 胡伟晔

责 任 编 辑: 胡伟晔

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-19509-3/TH · 0266

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 子 信 箱: zyjy@pup.cn, huweiy73@sina.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126 出版部 62754962

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

889 毫米×1194 毫米 16 开本 13.75 印张 411 千字

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

内 容 简 介

全书共分 10 章。第 1 章讲述学习热力学的意义、历史背景以及本书的使用方法；第 2 章是热力学基本概念和热力学第零定律；第 3 章和第 4 章分别讲述热力学第一定律和第二定律及相关内容；第 5 章讲述的是各种能源有效利用与焓之间的关系以及如何才能有效利用能源；第 6 章是热力学的一般关系式；第 7 章是从热力学的角度出发，讲述了化学反应和燃烧，包括与之相关的环境、能源问题；第 8 章是与能源转换密切相关的气体循环；第 9 章是蒸汽热力学循环；第 10 章讲述的是各种制冷热力学循环和空气调节方面的内容。全书注重启发读者对热力学及能源转换相关内容的感性认识和深入思考，有许多易于理解的图表，同时也注重新知识面的更新、拓宽。

本书适合本科生及研究生作为教材使用，也适合相关工程人员作为技术参考。

《机械工程类专业系列教材》

编译委员会

指导委员：（按姓氏音序排列）

过增元（清华大学）
何雅玲（西安交通大学）
梁新刚（清华大学）
廖 强（重庆大学）
刘 伟（武汉理工大学）
王如竹（上海交通大学）
严俊杰（西安交通大学）
张 兴（清华大学）

出版委员：（按姓氏音序排列）

白 皓（北京科技大学）
戴传山（天津大学）
李凤臣（哈尔滨工业大学）
汪双凤（华南理工大学）
王 迅（天津大学）
王世学（天津大学）
魏进家（西安交通大学）
张 鹏（上海交通大学）
张信荣（北京大学）

《JSME 机械工程类系列教材》

出版委员会

主席	宇高义郎	(横滨国立大学)		
干事	高田一	(横滨国立大学)		
顾问	铃木浩平	(首都大学东京)		
委员	石棉良三	(神奈川工科大学)	西尾茂文	(东京大学)
	远藤顺一	(神奈川工科大学)	花村克悟	(东京工业大学)
	加藤典彦	(三重大学)	原利昭	(新潟大学)
	川田宏之	(早稻田大学)	北条春夫	(东京工业大学)
	喜多村直	(九州工业大学)	松冈信一	(富山县立大学)
	木村康治	(东京工业大学)	松野文俊	(电气通信大学)
	后藤彰	(荏原综合研究所)	圆山重直	(日本东北大学)
	志泽一之	(庆应义塾大学)	三浦秀士	(九州大学)
	清水伸二	(上智大学)	三井公之	(庆应义塾大学)
	新野秀宪	(东京工业大学)	水口义久	(山梨大学)
	杉本浩一	(东京工业大学)	村田良义	(明治大学)
	武田行生	(东京工业大学)	森田信义	(静岡大学)
	陈玳珩	(东京理工大学)	森栋隆昭	(湘南工科大学)
	辻知章	(中央大学)	汤浅荣二	(武藏工业大学)
	中村元	(防卫大学校)	吉泽正绍	(庆应义塾大学)
	中村仁彦	(东京大学)		

JSME 系列教材之《热力学》和《传热学》中文版序

当今世界全球化发展极为迅猛,无论是政治与经济,还是科学技术与文化等国际间的交流日益紧密,与此相伴随的是信息、资金、技术与人才的跨国界流动。尤其是人才的国际化对提高我国的改革开放水平,提升我国的国际竞争力,促进我国国民经济和科学技术的发展无疑是至关重要的。为适应此国际化的需求,我国的一些重点高校已将人才的国际化培养作为一项重要工作列入学校的中长期发展规划。就人才的国际化培养来讲,向国外派遣留学生和接受外国留学生,或者请外籍教师来华授课和派教师到国外讲学仅仅是一种手段或曰形式,其实质是要求我们培养的学生和国际上主要国家的同类学生相比具有同等的知识水平和解决问题的能力。如何认定学生是否具备了这种水平和能力,或者是通过考试(如,美国工程基础能力检定考试(FE)等),或者是考查其所受教育的课程体系与内容。前者主要是针对作为个体的学生,而后者主要是针对作为教育机构的学校。

为应对国际标准的技术人员教育认定制度,日本在 1999 年成立了“日本技术者教育认定机构”(JABEE),其与各类科学技术协会密切合作,进行技术人员教育制度的审查和认定,通过加入华盛顿协议(Washington Accord, 1989. 11)实现了与欧美主要国家间的相互承认,为日本的人才走向世界打开了大门。为了配合技术教育认定,日本各高校在课程设置和教材选用上都作了改革。因此需要一套与国际标准接轨,有目的地对大学本科生进行专门教育的教科书。在此背景下,日本机械工程学会编辑和出版了《JSME 系列教材》。教材的编者队伍汇集了日本国内各相关领域的著名学者,实力雄厚。该系列教材可谓集大家之成,出版以来深受欢迎,其《热力学》一书销量已突破 43 000 册,在版本林立的工科专业课教材中堪称奇迹。

这样一套教科书对于正在全面进行工程教育改革,提升国际化水平的我国高等工程教育来说应是极具参考价值的。为此,北京大学出版社与 JSME 协商,组织了本系列教材的中文版出版工作。编译工作由北京大学、天津大学等高校教师完成,编译者均有长期在日工作的经历且在各自专业领域多有建树。非常高兴看到年轻的学者在引进国外优秀教材方面作出积极努力,有理由相信本系列教材中文版的出版一定会有助于我国的工程教育人才的国际化培养,促进我国的高等工程教育的国际化认证工作发展。

以上一点感想聊以为序。

过增元

2011 年 7 月

序 言

《JSME 系列教材》是针对大学本科生的,以机械工程学入门必修课内容为出发点,涵盖机械工程学的基本内容,并涉足技术人员认定制度所发行的教科书。

自 1988 年日本出版事业相关规定修改以后,日本机械工程学会得以直接编辑并出版发行教科书,但系统地囊括机械工程学各个领域的书籍至今未有出版。这是因为已有大量的同类书籍出版,如本会所出版的《机械工程学便览》、《机械实用便览》等在机械学中都可以作为教材、辅助教材来使用。然而,随着全球化的发展,技术人员认证系统的重要性愈加突出,因此与国际标准接轨,有目的地对大学本科生进行专门教育等,本科教育环境急剧变化,与此对应的各个大学进行了教育内容方面的改革,也产生了出版与之相应的教科书的需求。

在这种背景下,我们策划出版了本系列教材,其特点如下。

(1) 此系列教材是日本机械工程学会为在大学中示范机械工程学教育标准而编写的教科书。

(2) 有助于在机械工程学教育中保持从入门到作为必修科目的学习连贯性,提高大学本科生的基础知识能力。

(3) 考虑到应对国际标准的技术人员教育认定制度[日本技术人员教育认定机构(JABEE)]、技术人员认证制度[美国工程基础能力检定考试(FE),技术人员一次性考试等],在各教材中引入相关的技术英语。

此外,在编辑、执笔过程中,为实现上述特点,采取了以下措施。

(1) 采用了较多的编写者共同商议式的策划与实施。

(2) 集结了各领域的全部力量,尽可能地优质低价出版。

(3) 在页面的一侧使用图表、双色印刷等以方便阅读。

(4) 参考美国的 FE 考试[工程学基础能力检定考试(Fundamentals of Engineering Examination)]习题集,设置了英语习题。

(5) 配合各教科书出版了相应的习题集。

本出版分科委员会特别注意致力于编辑、校正工作,努力发行具有学会特色的优质书籍。具体来说,各领域的出版分科委员会以及编写小组都采用集体负责制,实施多数人商议校正制度,在最后由各领域资深校阅者负责校正工作。

经过所有同人的共同努力,本系列教材得以成功出版。在此,向为出版出谋划策的出版事业全会、编撰理事,出版分科委员会的各位委员,承担出版、策划、实施及最终定稿的各领域出版分科委员会的各位委员,特别是在短时间内按照教科书的特点在形式上进行修改直至最终定稿的各位编者,再次表达诚挚的谢意。此外,向本会出版集团积极担当出版业务的各位同人真诚致谢。

本系列教材若能有助于提高机械工程类学生的基础知识与能力,同时被更多的大学作为教材使用,为技术人员教育贡献绵薄之力,将会是我们的荣幸。

社团法人:日本机械工程学会

JSME 系列教材出版分科会

主任:宇高义郎

2002 年 6 月

前 言

热力学不仅是描述自然界中物理现象的一门重要的基础科学,也是多数工科院校本科生尤其是机械类学生必修的一门基础课。

日本机械工程学会(JSME)为了提高机械类高校学生的基础知识水平,考虑到国际标准的技术工作者教育认定制度(日本 JABEE、美国 FE)的要求,并从学会的角度展示一个机械工程类的大学教育标准,成立了一个由横滨国立大学 Utaka Yoshio 教授为主任的教科书出版委员会,负责组织编写和出版机械工程类本科生用系列教科书,并于 2002 年开始陆续出版了《热力学》《传热学》《流体力学》等。该系列教材的主要特点是:

- (1) 编者众多且皆为在各自研究领域有所成就的专家;
- (2) 内容为众多编者反复讨论而最终成稿;
- (3) 图表配置在相应页的边缘部分并采用双色印刷以便于阅读;
- (4) 主要专业术语均有英文注解并配有颜色突出显示,从而重点突出,易于学习;
- (5) 参考美国的 FE 考试(Fundamentals of Engineering Examination),采用了部分英语习题。

该系列已出版的各教材在日本国内广受欢迎,其中《热力学》一书已 6 次印刷,累计发行 43 000 册。

2007 年该系列教科书《热力学》和《传热学》的主编日本东北大学 Shigenao Maruyama 教授同北京大学教授张信荣博士讨论了将《热力学》一书编译成中文版的问题。另外,2008 年年初 Yoshio Utaka 教授又向天津大学教授王世学博士建议将该系列教材介绍给中国读者。其后经各方协商决定成立一个编委会编译该系列教材并由北京大学出版社统一予以出版。由于原教材是面向日本国内的,为适应中国高校的教学特点和方便中国读者的学习和理解,编译器征得 JSME 的同意在编译过程中对原书的部分内容略做了修订。

本书由张信荣和王世学组织编译及校订。第 1 章和第 8 章由天津大学王世学,第 2 章和第 6 章由上海交通大学张鹏,第 3 章由天津大学戴传山,第 4 章由天津大学王迅,第 5 章由哈尔滨工业大学李凤臣,第 7 章由北京科技大学白皓,第 9 章由西安交通大学魏进家,第 10 章由华南理工大学汪双凤等编译。全书由张信荣校对。

在本书的编译过程中,日本机械工程学会教科书出版委员会及 Shigenao Maruyama 教授、Yoshio Utaka 教授给予了大力支持和帮助,在此我们表示衷心的感谢。

另外,我们还要感谢北京大学出版社的大力支持和帮助。

编译委员会
2010 年 10 月

《热力学》前言

热力学不仅仅是讲述自然界物理现象的一门重要的基础科学,同时也是机械工程专业的大学生进入机械工程领域的一门必修课程。本书是针对机械工程相关学生入门提高以及作为培养将来的技术专家和研究者而编写的。因此本书较多地采用了便于理解的图表,以简洁明了的机械示意图、模式图等来展示机械工程中热机的设计、运行的原理及其在热力学学习中的重要性,从而进一步使学生带着目的意识来学习。

迄今为止在机械工程的热力学中较少触及的方面,如通过热的分子运动理论理解热力学第二定律、化学反应与燃烧理论、实用机械介绍等内容也在本书中进行了说明和讨论。面对当前考试中越来越多采用英文的命题,本书也采用了一些英文的比较新的题目作为习题。本书日文版的出版社团法人是日本机械工程学会(JSME)。因为是首次出版相关教材,所以我们尽量参考了其他常用教材的编写和出版规范。编写者在编写过程中即按照学会教材讨论会的建议不断进行了修正和调整。本书原稿编写者不仅根据综合校阅者校阅的意见,还特别针对热力学方面著名的研究者的建议进行了修订。

另外,本书出版使用后发现的勘误列表在网页 <http://www.jsme.or.jp/txt-errata.htm> 中可以查看,我们将尽力为读者使用提供更好的支持。如果对本书中的内容等有意见或者建议,也敬请给我们发送邮件至 textseries@jsme.or.jp 进行说明。

为了尽量缩短出版时间并降低本书价格,书中图表等都是原稿编写者所完成。因此,本书是编写者在较短时间里付出了极大的努力和辛苦才完成的。另外我们不得不提到本书编写者的研究室里的助手们付出的努力。没有他们的帮助,这本书的出版会艰难得多。这里我们再次对为本书的编写校正出版付出努力的同人们表示深深的谢意。我们希望这本书能够促进学生对于热力学的深入理解。最后,如果本书能够对于推动机械工程科学和技术的发展做出一份贡献的话,我们就感到荣幸之至了。

JSME 系列教材出版分科委员会

热力学教材

主编: 圆山重直

2002 年 6 月

热力学 编者、出版分科会委员

编者	井上刚良 (东京工业大学)	第 2 章
编者	盐路昌宏 (京都大学)	第 8 章
编者	长坂雄次 (庆应义塾大学)	第 4 章, 第 5 章
编者、委员	花村克悟 (东京工业大学)	第 1 章, 索引
编者	飞原英治 (东京大学)	第 9 章, 第 10 章
编者	平井秀一郎 (东京工业大学)	第 7 章
编者、委员	圆山重直 (日本东北大学)	第 1 章, 第 2 章, 第 3 章
编者、委员	森栋隆昭 (湘南工科大学)	第 6 章
综合校阅者	伊藤猛宏 (九州大学)	

目 录

第 1 章 概论 (Introduction)	1
1.1 热力学的意义 (significance of thermodynamics)	1
1.2 热与热力学 (heat and thermodynamics)	2
*1.3 热力学的历史背景 (historical background of thermodynamics)	3
1.4 本书的使用方法 (how to use this book)	5
第 2 章 基本概念及热力学第零定律 (Basic Concepts and the Zeroth Law of Thermodynamics)	7
2.1 系统、物质、能量 (system, matter and energy)	7
2.1.1 系统 (system)	7
2.1.2 闭口系统和开口系统 (closed and open systems)	7
2.1.3 能量的形态 (forms of energy)	8
2.1.4 能量的宏观及微观形态 (macroscopic and microscopic forms of energy)	8
2.1.5 内能 (internal energy)	9
*2.2 热力学的微观解释 (microscopic understanding of thermodynamics)	9
2.2.1 质点系统的内能 (internal energy of point-mass system)	9
2.2.2 分子运动和物质的状态及相变 (molecular motions, states of matter and phase changes)	10
2.3 温度与热平衡 (热力学第零定律) (temperature and thermal equilibrium (the zeroth law of thermodynamics))	12
2.3.1 热平衡 (热力学第零定律) (thermal equilibrium, the zeroth law of thermodynamics)	12
2.3.2 温度 (temperature)	13
2.4 热量和比热 (heat and specific heat)	13
2.5 状态量 (quantity of state)	14
2.6 单位制和单位 (system unit, unit)	14
2.6.1 SI (the international system of units)	14
2.6.2 SI 以外的单位制和单位 (other system of units)	16
第 3 章 热力学第一定律 (The First Law of Thermodynamics)	19
3.1 热与功 (heat and work)	19
3.1.1 热 (heat)	19

3.1.2 功(work)	19
3.2 闭口系统的热力学第一定律 (the first law applied to closed system)	20
3.3 热力学平衡与准静态过程 (thermodynamic equilibrium and quasi-static process)	23
3.3.1 热力学平衡(thermodynamical equilibrium)	23
3.3.2 准静态过程(quasi-static process)	23
*3.3.3 可逆过程与不可逆过程(reversible and irreversible processes)	24
3.4 闭口系统准静态过程的热力学第一定律 (the first law applied to quasi-static process of closed system)	25
3.4.1 热力学第一定律(the first law of thermodynamics)	25
3.4.2 准静态循环过程的净功 (net work during quasi-static process of cycle)	25
3.4.3 定容过程与定压过程 (specific heats at constant volume and constant pressure)	26
3.5 开口系统的热力学第一定律 (the first law applied to open system)	27
3.5.1 定常流动系统的质量守恒定律 (steady flow system and conservation of mass)	27
3.5.2 流动功与焓(flow work and enthalpy)	27
3.5.3 定常流动系统的能量守恒定律 (energy conservation of steady flow system)	28
3.5.4 各种机械设备中的定常流动系统 (steady flow system in machinery)	29
3.6 理想气体的热力学第一定律 (the first law applied to ideal gas)	32
3.6.1 理想气体与内能(ideal gas and internal energy)	32
*3.6.2 理想气体的比热(specific heat of ideal gas)	33
3.6.3 理想气体的准静态过程(quasi-static processes of ideal gas)	35
*3.6.4 混合理想气体(ideal gas mixture)	39
第4章 热力学第二定律(The Second Law of Thermodynamics)	43
4.1 热功转换效率: 卡诺的功绩 (conversion efficiency from heat to work: Carnot's achievement)	43
4.1.1 热效率有上限吗?(upper limit of thermal efficiency?)	43
4.1.2 卡诺的思考(Carnot's reflections)	44
4.2 热机的模型化(thermodynamic modeling of heat engine)	46
4.2.1 循环(cycle)	46
4.2.2 可逆过程与不可逆过程(reversible and irreversible processes)	48
*4.2.3 内部可逆过程(internally reversible processes)	49

4.3	卡诺循环的性质(characteristics of Carnot cycle)	50
4.4	闭口系统的第二定律(the second law for closed systems)	53
4.4.1	与单一热源作用的循环:第二定律的语言表述(cycle in contact with one heat reservoir—the second law by statements)	54
4.4.2	与两个热源作用的循环(cycle in contact with two heat reservoirs)	55
4.4.3	与 n 个热源作用的循环(cycle in contact with n heat reservoirs)	55
4.5	熵(Entropy)	57
4.5.1	状态参数熵的定义(entropy as thermodynamic property)	57
4.5.2	闭口系统的熵平衡(不可逆过程的熵产)(entropy balance for closed systems:entropy generation by irreversible processes)	58
4.5.3	开口系统的熵平衡:开口系统的第二定律(entropy balance for open systems; the second law for open systems)	60
4.5.4	第二定律、熵以及熵产的总结(some remarks about the second law, entropy and entropy generation)	60
4.6	熵的工程应用(use of entropy for engineering applications)	61
4.6.1	熵变的关系式: TdS 关系式 (equations for entropy change: TdS equations)	61
4.6.2	理想气体的熵变(entropy change of ideal gases)	62
4.6.3	液体、固体的熵变(entropy change of liquids and solids)	63
4.6.4	用蒸汽表计算熵变 (calculation of entropy change using steam tables)	63
*4.6.5	熵产的计算(calculation of entropy generation)	64
4.6.6	含有熵参数的图,熵的图解利用 (property diagram involving entropy, graphical utilization of entropy)	67
第5章	能源的有效利用及㶲 (Effective Utilization of Energy Resource and Exergy)	69
5.1	㶲分析的必要性(background of exergy analysis) 从热力学第二定律到㶲(from the second law to exergy)	69
5.2	做功的潜在能力:最大功(ability to generate work; maximum work)	70
5.2.1	最大功(maximum work)	70
5.2.2	周围环境对㶲(最大功)的影响(effects of surroundings on exergy)	72
5.2.3	㶲的基础知识小结(some remarks about basis of exergy)	75
5.2.4	㶲效率(exergetic efficiency)	75
5.3	各种系统的㶲(exergy of important systems)	77
5.3.1	热源利用系统(system utilizing heat from heat reservoir)	77
5.3.2	闭口系统(非流动过程)(closed system, nonflow process)	77

5.3.3	定常流动系统(steady flow system)	80
*5.3.4	开口系统(open system)	81
5.4	自由能(free energy)	81
5.4.1	吉布斯自由能(Gibbs free energy)	81
5.4.2	亥姆霍兹自由能(Helmholtz free energy)	83
*5.4.3	平衡条件与自由能(化学反应的进行方向) (equilibrium conditions and free energy)	84
*5.5	㶲损失(lost exergy)	85
	不可逆过程及㶲损失(irreversible processes and lost exergy)	86
第6章	热力学一般关系式(General Thermodynamic Relation)	89
6.1	热力学一般关系式(general thermodynamic relation)	89
6.2	从能量关系式导出一般关系式(general relations from energy equation)	91
6.3	比热的一般关系式(general relations from specific heat)	93
6.4	内能和焓的一般关系式 (general relations from internal energy and enthalpy changes)	96
6.5	焦耳-汤姆逊效应(Joule-Thomson effect)	98
6.6	相平衡和克拉珀龙-克劳修斯方程 (phase equilibrium and Clapeyron-Clausius equation)	99
第7章	化学反应和燃烧(Chemical Reaction and Combustion)	103
7.1	化学反应、燃烧及环境问题 (chemical reaction, combustion and environmental problems)	103
7.2	化学反应和能量转换(chemical reaction and energy conversion)	105
7.2.1	反应热和标准生成焓 (heat of reaction and standard enthalpy of formation)	105
7.2.2	化学反应中吉布斯自由能的变化 (Gibbs free energy change in chemical reaction)	107
7.2.3	标准生成吉布斯自由能和能量转换 (standard Gibbs free energy of formation and energy conversion)	109
7.3	化学平衡(chemical equilibrium)	111
*7.3.1	反应速率(reaction rate)	111
7.3.2	反应速度和化学平衡(reaction rate and chemical equilibrium)	112
7.3.3	化学平衡的条件(condition of chemical equilibrium)	112
7.3.4	平衡常数(equilibrium constant)	113
7.3.5	温度和压力对化学平衡的影响 (effects of temperature and pressure on chemical equilibrium)	115

7.3.6 一般情况下的化学平衡组成求解方法 (chemical equilibrium in general cases)	117
7.3.7 平衡常数的注意事项(rules of equilibrium constant)	119
7.4 燃烧(combustion)	119
7.4.1 燃料(fuel)	120
7.4.2 燃烧的形式(combustion forms)	120
*7.4.3 燃烧的反应机理(reaction mechanism of combustion)	120
7.4.4 空燃比、燃空比、空气比、当量比 (air-fuel ratio, fuel-air ratio, air ratio, equivalence ratio)	122
7.4.5 燃烧的能量平衡(Energy balance in combustion)	123
7.4.6 理论火焰温度(theoretical flame temperature)	124
7.4.7 燃烧和能量交换(combustion and energy conversion)	126
第8章 气体循环(Gas Cycle)	131
8.1 热机与循环(heat engine and cycle)	131
8.2 活塞式发动机的循环(piston-engine cycle)	134
8.2.1 奥托循环(Otto cycle)	134
8.2.2 狄塞尔循环(Diesel cycle)	136
8.2.3 萨巴特循环(Sabathé cycle)	137
*8.2.4 活塞式发动机的燃烧分析(combustion analysis in piston engines)	138
8.2.5 斯特林循环(Stirling cycle)	139
8.3 燃气轮机发动机的循环(gas-turbine engine cycle)	139
8.3.1 布雷顿循环(Brayton cycle)	140
8.3.2 布雷顿回热循环(regenerative Brayton cycle)	141
8.3.3 埃里克森循环(Ericsson cycle)	142
8.3.4 喷气式发动机循环(jet-engine cycle)	142
8.4 气体制冷循环(gas refrigeration cycle)	142
第9章 蒸汽循环(Vapor Cycle)	147
9.1 蒸汽的物性(properties of vapor)	147
9.1.1 相平衡与状态变化(phase equilibrium and transition)	147
9.1.2 湿蒸汽性质(properties of wet vapor)	148
9.2 相平衡和克拉珀龙-克劳修斯方程 (phase equilibrium and Clapeyron-Clausius equation)	149
9.2.1 相平衡的条件(conditions for phase equilibrium)	149
*9.2.2 多组分混合物的两相平衡 (two-phase equilibrium of multi-component mixtures)	150
9.2.3 克拉珀龙-克劳修斯方程(Clapeyron-Clausius equation)	151

9.3 实际气体状态方程(equation of state)	152
9.3.1 范德华方程(Van der Waals equation)	152
*9.3.2 实用状态方程式(practical equation of state)	154
9.4 蒸汽动力循环(vapor power cycles)	154
9.4.1 朗肯循环(Rankine cycle)	155
9.4.2 再热循环(reheat cycle)	157
9.4.3 再生循环(regenerative cycle)	158
9.4.4 联合循环(combined cycle)	159
第10章 制冷循环与空调(Refrigeration Cycle and Air Conditioning)	163
10.1 制冷原理(principle of refrigeration)	163
10.1.1 可逆绝热膨胀(reversible adiabatic expansion)	163
10.1.2 节流膨胀(throttle expansion)	163
10.2 工作性能系数(coefficient of performance)	164
10.3 各种制冷循环(refrigeration cycle)	165
10.3.1 逆卡诺循环(inverse Carnot cycle)	165
10.3.2 蒸汽压缩式制冷循环(vapor compression refrigeration cycle)	165
*10.3.3 吸收式制冷循环(absorption refrigeration cycle)	168
*10.3.4 空气制冷循环(air refrigeration cycle)	170
*10.3.5 液化循环(liquefaction cycle)	170
10.4 空气调节(air conditioning)	171
10.4.1 湿空气的性质(properties of moist air)	171
10.4.2 湿空气温湿图(psychrometric chart)	173
附录1	179
附录2	187
附录3	193

第 1 章

概 论

Introduction

1.1 热力学的意义 (significance of thermodynamics)

热力学 (thermodynamics) 是随着将热能 (heat) 转换成机械能 (mechanical work) 的学问而发展起来的, 并形成一门完整地论述自然界本身伴随着能量转换变化过程的科学。热力学是关于能量及其转换的基础科学, 是工科学生的必修科目。对于汽车和飞机等运输工具、发电站等动力工厂的能量转换机械系统而言, 在热与流体机械的设计中, 热力学是不可或缺的。本书主要是以机械工程及其相关专业的本科生为对象编写的, 从机械工程的立场出发论述工程热力学 (engineering thermodynamics)。学习了本书的学生不仅应能够理解与能量相关的各种现象, 还应能够定量地分析机械系统的能量转换。

热是能量的一种形态, 可以转化成其他形态的能量。人类文明就是利用热转换成其他形态的能量而发展起来的。但是, 如热力学第一定律 (the first law of thermodynamics) 所述, 在能量形态转换过程中其总量守恒, 而如何将其作为对人类有用的能量高效地加以利用则是工程热力学所赋予的使命。图 1.1 表示中国的能量供给与消费的情况^①。燃烧之类化学反应等获得的能量中, 被有效利用的占总量的 $1/3$, 其余的 $2/3$ 没有被利用。而被有效利用了的能量最后也变成常温状态下的热量排放到环境中。热力学第二定律 (the second law of thermodynamics) 叙述了将热转换成机械功时转换效率 (efficiency) 的上限。热力学还告诉我们发动机一类的实际机械如何将热转换成有用能。此外, 在解释燃烧以及燃料电池中发生的化学变化时, 热力学也是不可或缺的。

近年来, 人类活动排出的热量迅速增加, 导致了局部的气候变化如“热岛”等^[2], 以及全球变暖等环境问题。但是, 由于从太阳传到地球的能量十分巨大, 因此人类活动的热排放量即使增加 1 倍, 地球整体平均温度也只上升 $6/1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]。因而倒不如说, 自从开始使用化石燃料 (fossil fuel) 以获得动力的工业革命以来, 二氧化碳等温室气体 (greenhouse gas) 的排放迅速增加导致了全球的急剧暖化如图 1.2 所示。据预测, 如果大气中的二氧化碳浓度达到现在的 2 倍, 地球的平均温度将增加 2 K ^[4]。今后如何有效地利用能量、降低环境负荷也是热力学学习者所面临的课题。



图 1.1 中国的能量供给与消费情况

^① 原日文版教材使用了日本的能量流数据, 参见本章参考文献[1]。