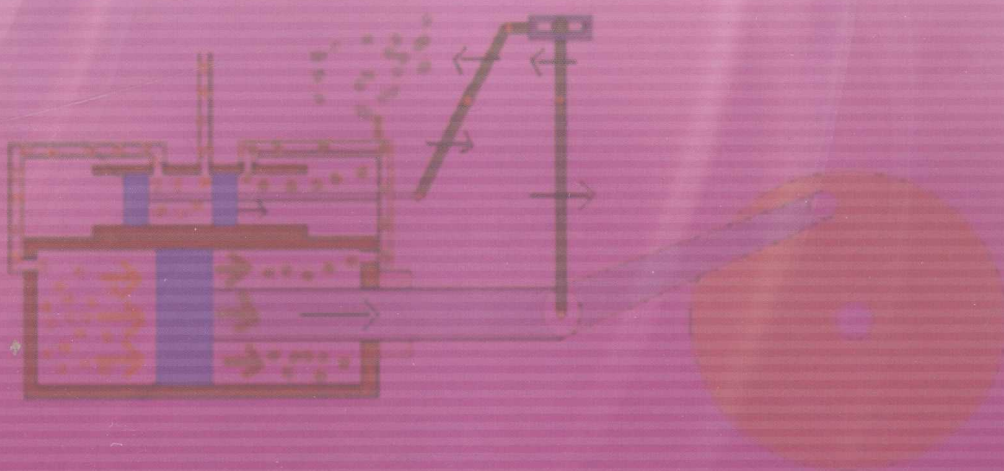




高等院校“十一·五”规划教材

工程热力学基础

战洪仁 寇丽萍 主编 张先珍 王翠华 副主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

工程热力学基础

战洪仁 寇丽萍 主 编
张先珍 王翠华 副主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要由热力学基础、工质的热力性质、热力过程及热力循环四部分组成。书中除加强热力学理论基础外,更多地注重了工程应用,使读者能运用基础理论来分析工程实践中的各种热力过程和热力循环,以达到培养读者理论与实践相结合的目的。

本书适用于能源工程、机械工程、航空航天工程、材料工程、建筑工程类等领域的短学时工程热力学的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学基础 / 战洪仁等主编. —北京: 中国石化出版社, 2008
高等院校“十一五”规划教材
ISBN 978-7-80229-817-0

I. 工… II. 战… 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 (2009) 第 009502 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京密云红光制版公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 349 千字

2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

前 言

工程热力学是研究热能与其他形式的能量(尤其是机械能)之间相互转换规律的一门学科。在现代各个生产领域中所遇到的大多数技术问题,以及自然界中的许多现象都与热能的传递与转化有关,因此工程热力学是能源工程、机械工程、航空航天工程、材料工程、化学工程、生物工程等领域的重要技术基础课。

本书编者在多年教学基础上,总结了教与学的经验,通过对国内外同类教材的对比研究,吸收其精华。针对工程热力学逻辑严密、概念众多、结论抽象且适用范围广泛,对大多数学生来说是一门难学、难懂、更难用的课程特点,在编写过程中注意了文字的表述,使概念、定律或公式的论述和推导更加严密、规范、容易理解;并编入了许多例题和应用实例,使学生对所讲解的概念、定律或公式获得更深入的理解与认识,增强了教材的实用性、趣味性,提高学生分析和解决实际问题的能力。

本书编排时,为适应科学技术的发展以及21世纪课程改革方向,通过对优秀教材的研究,除加强理论基础外,以基本知识和热力学基本定律为主,贯穿于热力过程和热力循环。削减了繁琐的公式推导,优化了教材内容。同时吸收了美国教材灵活、注重实用的特点。另外,我们在每一章后还编写了具有一定趣味性的选读材料,目的是为了进一步提高学生的学习兴趣及拓宽学生的知识面,也使得教材内容更充实。

本书第一章及选读材料由战洪仁、寇丽萍撰写;第二章由寇丽萍、张先珍撰写;第三章由张先珍、王翠华、战洪仁撰写;第四章由王翠华、战洪仁、寇丽萍撰写;第五章由张先珍、王翠华撰写;附录由战洪仁、寇丽萍、张先珍、王翠华撰写。王立鹏、曾祥福、李雅侠参加了部分章节的编写及校对工作。全书由战洪仁统稿,金志浩教授主审。

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者指正。

目 录

绪论	(1)
0.1 热能及其利用	(1)
0.2 热能转换装置的工作过程	(2)
0.2.1 化学能向热能转换的装置	(2)
0.2.2 热能动力装置	(2)
0.2.3 制冷装置	(3)
0.3 工程热力学的研究对象	(4)
0.4 热力学的研究方法	(5)
0.5 法定计量单位简介	(6)
0.5.1 国际单位制的构成	(6)
0.5.2 国家选定的非国际单位制单位	(7)
0.5.3 国际单位制单位与其他单位制单位的换算	(7)
本章小结	(8)
第1章 基本概念	(13)
1.1 热力系统	(13)
1.1.1 热力系统	(13)
1.1.2 封闭系统和敞开系统	(13)
1.1.3 简单热力系统 绝热系统 孤立系统	(14)
1.1.4 单组分系统与多组分系统 均匀系统与非均匀系统	(15)
1.1.5 热源	(15)
1.2 系统的描述及其性质	(15)
1.2.1 热力系统的状态 平衡状态及状态参数	(15)
1.2.2 状态参数特性	(17)
1.2.3 强度参数 广延参数	(17)
1.3 基本状态参数	(18)
1.3.1 压力	(18)
1.3.2 温度	(20)
1.3.3 比体积	(21)
1.4 状态方程 状态参数坐标图	(21)
1.4.1 状态公理	(21)
1.4.2 状态方程	(22)
1.4.3 状态参数坐标图	(22)
1.5 热力过程	(22)
1.5.1 准静态过程	(22)
1.5.2 耗散效应	(24)

1.5.3 可逆过程	(24)
1.6 热力循环	(25)
1.6.1 循环种类	(25)
1.6.2 循环的经济指标	(25)
本章小结	(26)
第2章 热力学基本定律	(30)
2.1 热力学第一定律的实质	(30)
2.2 能量的传递形式	(30)
2.2.1 功	(31)
2.2.2 热量	(34)
2.2.3 储存能	(35)
2.3 封闭系统的能量方程	(37)
2.4 敞开系统的能量方程	(39)
2.4.1 推动功和流动功	(39)
2.4.2 敞开系统的能量方程	(40)
2.4.3 焓	(41)
2.5 稳定流动能量方程	(42)
2.5.1 稳定流动能量方程	(42)
2.5.2 能量方程的分析	(42)
2.5.3 技术功	(43)
2.5.4 机械能守恒方程	(44)
2.5.5 稳定流动能量方程式应用	(44)
2.6 热力学第二定律的实质	(46)
2.6.1 自发过程	(46)
2.6.2 热力学第二定律的表述与实质	(47)
2.7 卡诺循环	(48)
2.7.1 卡诺循环	(49)
2.7.2 极限回热循环	(50)
2.7.3 卡诺定理	(50)
2.8 多热源的可逆循环	(52)
2.9 熵与克劳修斯不等式	(53)
2.9.1 熵的导出	(53)
2.9.2 克劳修斯不等式	(55)
2.9.3 不可逆过程的熵变	(56)
2.9.4 熵流和熵产	(57)
2.9.5 熵方程	(57)
2.10 孤立系统熵增原理	(58)
本章小结	(61)
第3章 气体与蒸气的热力性质	(68)

3.1	理解气体及其状态方程	(68)
3.2	理想气体的比热容、热力学能和焓	(70)
3.2.1	实际气体的热容	(70)
3.2.2	理想气体的比热容	(71)
3.2.3	理想气体的热力学能和焓	(73)
3.3	理想气体的熵	(76)
3.4	理想气体的混合物	(78)
3.4.1	理想气体混合物的性质	(78)
3.4.2	分压力定律和分容积定律	(79)
3.4.3	理想气体混合物的成分	(80)
3.4.4	理想气体混合物的平均相对分子质量和气体常数	(81)
3.4.5	理想气体混合物的比热容、热力学能、焓和熵	(81)
3.4.6	在相同参数条件下理想气体绝热混合过程的熵增	(82)
3.5	实际气体与理想气体的偏离	(84)
3.6	实际气体状态方程	(86)
3.6.1	维里方程	(86)
3.6.2	范德华方程	(86)
3.6.3	R-K 方程	(88)
3.7	对应态原理与通用压缩因子图	(89)
3.7.1	范德华对应态方程	(89)
3.7.2	对应态原理	(89)
3.7.3	通用压缩因子图	(89)
3.8	纯物质的相图与相转变	(92)
3.8.1	纯物质的相图及特点	(92)
3.8.2	湿蒸气状态参数的确定	(94)
3.9	蒸气的定压发生过程	(95)
3.10	蒸气热力性质图、表	(97)
3.10.1	蒸气热力性质表	(97)
3.10.2	蒸气热力性质图	(98)
3.11	湿空气	(101)
3.11.1	压力	(101)
3.11.2	温度	(101)
3.11.3	湿度	(102)
3.11.4	湿空气的焓	(103)
3.11.5	湿空气的熵	(104)
3.11.6	湿空气的比体积	(104)
3.12	湿空气的焓湿图	(105)
	本章小结	(107)
第 4 章	气体与蒸气的热力过程	(115)

4.1 理想气体的热力过程	(115)
4.1.1 四种典型热力过程	(115)
4.1.2 多变过程	(124)
4.2 蒸气的基本热力过程	(129)
4.2.1 定容过程	(130)
4.2.2 定压过程	(131)
4.2.3 定温过程	(132)
4.2.4 定熵(绝热可逆)过程	(133)
4.3 湿空气的基本热力过程	(134)
4.3.1 加热或冷却过程	(134)
4.3.2 绝热加湿过程	(135)
4.3.3 加热加湿过程	(136)
4.3.4 冷却去湿过程	(136)
4.3.5 增压冷凝过程	(136)
4.3.6 绝热混合过程	(136)
4.4 绝热节流过程	(139)
4.5 压气机的热力过程	(142)
4.5.1 单级活塞式压气机的热力过程	(143)
4.5.2 多级压缩和级间冷却	(145)
4.5.3 余隙容积的影响	(147)
4.5.4 压气机效率	(150)
本章小结	(150)
第5章 热力循环	(157)
5.1 蒸气动力循环	(157)
5.1.1 蒸气卡诺循环	(157)
5.1.2 朗肯循环	(158)
5.1.3 再热循环与回热循环	(165)
5.1.4 热电联产循环	(169)
5.2 气体动力循环	(171)
5.2.1 活塞式内燃机动力循环	(171)
5.2.2 燃气轮机动力循环	(175)
5.2.3 燃气-蒸汽联合循环	(180)
5.3 制冷循环	(181)
5.3.1 空气压缩制冷循环	(181)
5.3.2 蒸气压缩式制冷循环	(184)
5.3.3 吸收式制冷循环	(187)
5.3.4 蒸气喷射式制冷循环	(188)
本章小结	(188)
参考文献	(221)

绪 论

基本要求：①了解热能利用的两种主要方式及其特点；②了解能量转换的工作过程；③掌握工程热力学研究对象及主要内容；④了解工程热力学分析问题的特点、方法和步骤。

热力学是研究热能与其他形式的能量之间相互转换规律的科学。工程热力学着重研究物质的热力学性质，热能和机械能之间相互转换的规律以及有效、合理地利用热能的途径，是热力学的工程分支，是在阐述热力学普遍原理的基础上，研究这些原理的技术应用的科学。本课程的任务是使学生掌握热力学基本定律和基本理论，熟悉工质的基本性质和实际热工装置的基本原理，学会对工程实际问题进行抽象、简化和以能量方程、熵方程等为基础的分析方法。掌握工程热力学的基本原理，必将为能源、动力、化工及环境工程等领域的进一步开发和应用节能技术奠定基础。

0.1 热能及其利用

自然界能源的开发和利用是人类走向繁荣的起点，而能源的开发和利用的程度是生产发展的一个重要标志。能源是指为人类生产与日常生活提供各种能量和动力的物质资源。自然界中以自然形态存在的可资利用的能源称为一次能源，如风能、水力能、太阳能、地热能、燃料化学能、核能等等。这些能源，有些可以以机械能的形式直接被利用，有些需经过加工转化后才能利用。由一次能源加工转化后的能源称为二次能源，其中主要是热能、机械能和电能。因此，能量的利用过程，实质是能量的传递和转换过程。各种能源及其转换和利用情况大致如图 0-1 所示。

由图 0-1 可见，热能是由一次能源转换成的最主要形式，而后再由热能转换成其他形式的能量而被利用。据统计，经热能这个环节而被利用的能量在世界上占 85% 以上。因此，

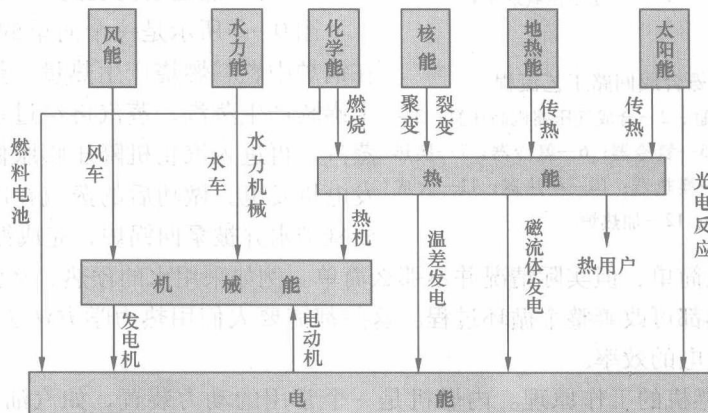


图 0-1 能量利用情况

热能的利用通常有以下两种基本形式：其一，是热能的直接利用，即直接利用热能加热物体，诸如蒸煮、烘干、采暖和冶炼等；其二，是热能的间接利用（动力利用），即通过各种热能动力装置将热能转化成机械能或电能而被利用，从而为工农业生产、交通运输以及人类日常生活等提供动力。通常我们将这种热能转化为动力的整套设备叫做**热能动力装置（热机）**。18 世纪中叶蒸汽轮机的出现，实现了热能与机械能的相互转换，为工业生产、科学技术和人们生活开辟了利用能源的新途径。然而，热能的利用率却较低，早期的蒸汽机的热效率只有 1% ~ 2%，当代各种动力装置及热电厂的热效率也只有 40% 左右。因此，深入分析、研究并掌握热能与其他形式能的高效转换对人类社会的发展具有十分重要的意义。

图 0-4 是内燃机的工作原理。内燃机是一个常用的动力装置，如汽油发动机（汽车发动机）。在科技发展史中它虽然进行了许多改革，但遵从的基本原理一直未变。燃料被燃烧，产生的能量传递给活塞，再通过曲柄连杆机构、变速器等部件传递至车轮，就可驱动汽车。这里有许多问题与热力学有关，例如汽缸中的燃烧和燃烧火焰的能量等。热力学能分析

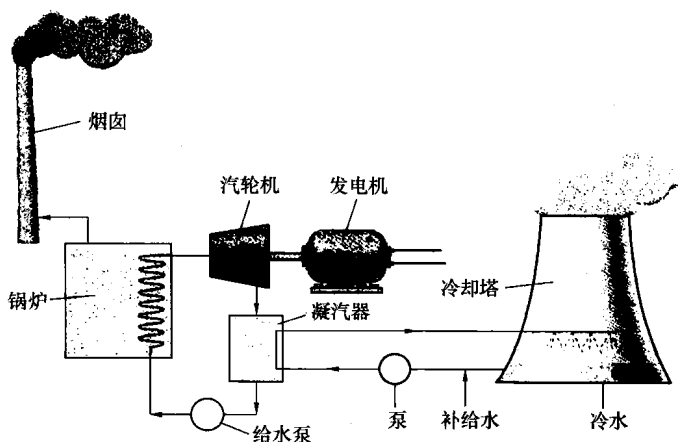


图 0-3 常规电站系统示意图

预测可从发动机得到多少功，并通过实验了解发动机如何有效地工作。这些对于降低发动机排气污染，提高发动机效率是非常重要的。

燃气轮机也是一种动力源。在发电和船舶动力方面对燃气轮机装置的研发有较大的需求。其工作原理如图 0-5 所示。空气由压气机的入口进入压气机，经过压缩提高压力后进入燃烧室，与进入燃烧室的燃料混合燃烧，燃烧产生的燃气进入透平。高温、高压的燃气在透平里膨胀，将燃气的热能和压力能先转变成燃气高速运动的动能，随后再进一步转变成机械功。对燃气轮机的热力学分析类似于大多数动力装置，分析的目的就是为了更有效地将燃料的化学能转换成机械能。

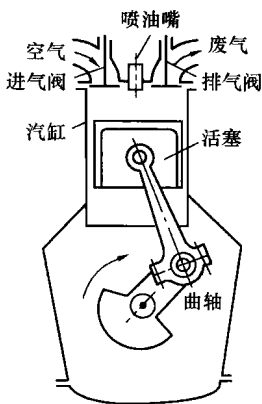


图 0-4 内燃机的工作原理

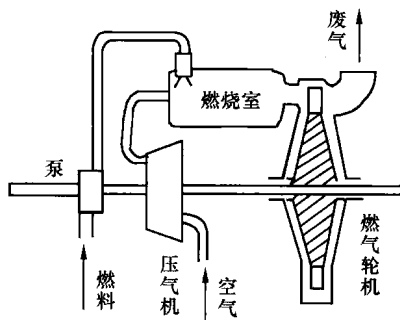


图 0-5 燃气轮机工作原理示意图

0.2.3 制冷装置

以上讲的热能动力装置，其目的是将热能转换成机械能。下面举例说明消耗机械能实现热能由低温物体向高温物体转移的装置，这类装置通常被称为制冷装置或热泵，如压缩制冷设备。

图 0-6 是以氟里昂蒸汽压缩制冷装置为例说明其工作原理。当低温低压的氟里昂蒸气从蒸发器被吸入压缩机后，经压缩变为高温高压的过热蒸气，送至冷凝器冷凝为高压液态氟

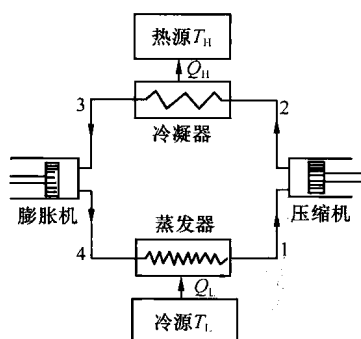


图 0-6 蒸气制冷循环
工作原理图

里昂，再经膨胀机绝热膨胀，降温降压后送回蒸发器，吸收热量而汽化，这时在冷藏室内形成低温制冷的条件。

上述几种能量转换装置的结构与工作方式虽各不相同，但通过分析不难发现它们的共性。

首先，实现能量转换时，均需要某些物质作为实现能量转换的媒介，称之为工质。例如水蒸气、空气、燃气以及氟里昂等等。

其次，能量转换是在工质状态连续变化的情况下实现的。热能动力装置一般都经历升压、吸热、膨胀和放热等过程。

此外，供给热能动力装置的热能，只有一部分转变为机械能，其余的部分排给大气或冷却水。

以上是通过初步的观察和分析得到的寓于各装置个性中的共性。通过上述分析，不禁会提出一些值得研究的问题，例如：

①为了获得一定数量的机械功是否必须投入热量？反之，为了使热量能从低温物体传给高温物体，是否一定要消耗功或热等作为代价？

②为什么在各动力装置中既要吸热又要放热？这是不是热功转换的必要条件？为什么都要先升压，再吸热，能否先吸热，再升压？

③不同的工质对热功转换的程度是否影响？

④影响能量转换效果的因素有哪些？如何提高其转换效果？

所有这些，正是工程热力学这门课程中所要讨论的问题。

0.3 工程热力学的研究对象

由上所述，工程热力学主要研究热能和其他形式能之间的相互转换规律和方法，以及提高转化效率的途径。热力学涉及所有与能有关的问题，掌握热力学原理对开发利用能源十分重要。热力学的研究对象主要包括以下几个方面：

①研究能量转换的客观规律，即热力学第一定律与热力学第二定律。这是分析问题的依据和基础。

②研究工质的基本热力性质。工质是能量的载体，必须对其相关性质有充分了解，才能对利用工质实施的能量转换效果过程进行分析研究。

③研究各种热工设备中的工作过程。即应用热力学基本定律及工质的性质，对常见的热能动力设备和制冷装置的工作过程和循环进行具体的分析，探讨影响能量转换效果的因素及提高转换效果的途径。

随着科技进步与生产发展，工程热力学的研究与应用范围已不局限于只是作为建立热机（或制冷机）理论的基础，已经扩展到许多工程领域中，如高能激光、热泵、空气分离、空气调节、海水淡化、化学精炼、生物工程等等，都需要应用工程热力学的基础理论和基本知识。因此，工程热力学已成为许多有关专业所必修的一门技术基础课。

0.4 热力学研究方法

原则上,热力学有两种不同的研究方法,即宏观研究方法(经典热力学)和微观研究方法(统计热力学)。宏观研究方法是把组成物质的大量粒子作为一个整体,用宏观物理量描述物质的状态及物质间的相互作用,也称为**经典热力学**。热力学基本定律就是通过对大量宏观现象的直接观察与实验总结出来的普遍适用的规律。热力学的一切结论也是从热力学的基本定律出发,通过严密的逻辑推理而得到的,因而这些结论也具有高度的普遍性和可靠性。这些结论为工业实践提出了努力方向。

当然,在处理实际问题时,必须采用抽象、概括、简化及理想化等方法,抽出问题的共性及主要矛盾,而略去细节及次要矛盾。例如将高温气体视为理想气体,将高温烟气及大气环境视为恒温热源,既可使计算大为简化而又可保证工程上必要的准确性;在分析各种循环时,把实际上都是不可逆的过程理想化为可逆过程,突出问题的本质,而后再按实际中的不可逆程度予以校正,同时也提出了实际过程中需改进的关键及目标。究竟哪些分析与计算可采用简化与抽象,简化到什么程度,需依所涉及问题的具体情况而定。

热力学的宏观研究方法,由于不涉及物质的微观结构和微粒的运动规律,所以建立起来的热力学理论不能解释现象的本质及其发生的内部原因。另外,宏观热力学给出的结果都是必要条件,而非充分条件。例如,由氢和氮合成氨时,按宏观热力学,在低温下有最大的平衡产量。但在低温下,反应速率极慢,工业中无法实现,而必须在较小平衡产量的高温下进行。当然,这个热力学结果为人们寻求使反应在低温下进行的催化剂指出了方向。宏观热力学中的可逆过程功也只是给出了一个功的极限值,不能给出做功的速率。

热力学的**微观研究方法**认为大量粒子群的运动服从统计法则和或然率法则。这种方法的热力学称为**统计热力学**或**分子热力学**。它从物质的微观结构出发,从根本上观察和分析问题,预测和解释热现象的本质及其内在原因。因而微观研究方法正好弥补宏观研究方法的不足。

热力学的微观研究方法对物质结构必须采用一些假设模型,这些假设的模型只是物质实际结构的近似描写,因此其很多结论与实际还相差较大,这是统计热力学的局限性。

目前,在大多数工程领域,实际应用的仍是经典热力学。因此,本书主要介绍经典热力学,仅在个别场合辅以必要的统计解释。

了解了热力学的研究方法,也就相应地确定了本课程的学习方法。学习经典热力学应注意以下几方面:

① 本课程的主线是研究热能与机械能之间相互转换的规律、方法以及提高转化效率和热能利用经济性的途径,各基本概念、理论、方法都是为这条主线服务的。学习时必须时刻抓住这条主线。

② 注意掌握应用基本概念和基本理论分析处理实际问题的基本方法,学会利用“抽象”和“简化”实际问题的方法。

③ 提高工程意识。处理工程实际问题的方法是多种多样的,其答案也只有更好,没有最佳。学习本课程,在基本概念扎实的基础上,要开动脑筋,从不同角度出发去处理各个具体问题。

④ 注意弄清各参量的物理意义,不要被眼花缭乱的公式所吓倒。依靠套用数学公式的方法来处理热力学问题难免会出错的。

0.5 法定计量单位简介

“中华人民共和国法定计量单位”(简称法定单位)已由国务院于 1984 年 2 月 27 日颁布执行。它是以国际单位制为基础,同时选用了一些非国际单位制的单位构成的。

0.5.1 国际单位制的构成

国际单位制(Le Svsystème International d'Unitès)简称 SI,其构成如下:

国际单位制(SI) { SI 单位 { SI 基本单位
SI 导出单位 { 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位
组合形式的 SI 导出单位
SI 单位的倍数单位

下面根据本课程的内容和需要,将以上有关内容摘要介绍如下:

(1) SI 基本单位

基本单位共七个,如表 0-1 所列:

表 0-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质量	千克(公斤)	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s	发光强度	坎[德拉]	cd
电流	安培	A			

(2) SI 导出单位

导出单位是用基本单位以代数形式表示的单位。这种单位符号中的乘和除采用数学符号。例如速度的 SI 单位为米每秒(m/s)。属于这种形式的单位称为组合单位。表 0-2 列出了与本书有关的一些主要导出单位。

表 0-2 SI 导出单位示例

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
力	牛[顿]	N	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$
功率,辐射[能]通量	瓦[特]	W	$1\text{W} = 1\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
表面张力	牛[顿]每米	N/m	$1\text{N/m} = 1\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热流密度	瓦[特]每平方米	W/m^2	$1\text{W/m}^2 = 1\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热容,熵	焦[耳]每开[尔文]	J/K	$1\text{J/K} = 1\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比热容,比焓	焦[耳]每千克开[尔文]	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$1\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 1\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比能[量],比焓	焦[耳]每千克	J/kg	$1\text{J/kg} = 1\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
摩尔容积	立方米每摩[尔]	m^3/mol	
摩尔热力学能,摩尔焓	焦[耳]每摩[尔]	J/mol	$1\text{J/mol} = 1\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
摩尔热容,摩尔熵	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$1\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 1\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

(3) SI 单位的倍数单位

表 0-3 给出了常用 SI 词头的名称、简称及符号(词头的简称为词头的中文符号)。词头用于构成倍数单位(十进倍数单位与分数单位),但不得单独使用。

表 0-3 常用 SI 词头

因 数	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文	
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p

0.5.2 国家选定的非国际单位制单位

表 0-4 列出了国家选定的可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位。

表 0-4 国家选定的非国际单位制单位

量 的 名 称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时 间	分	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	[小]时	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$
	日(天)	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$
[平面]角	度	$^{\circ}$	$1^{\circ} = (\pi/180) \text{ rad}$
	[角]分	'	$1' = (1/60)^{\circ} = (\pi/10800) \text{ rad}$
	[角]秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$

0.5.3 国际单位制单位与其他单位制单位的换算

表 0-5 列出了国际单位制单位与本书有关的主要物理量单位间的换算关系。

表 0-5 主要单位换算表

压 力	1 MPa = 1 at = 1 lbf/in ² =	MPa (兆帕)	at (工程大气压)	lbf/in ² (磅力/英寸 ²)
		1 0.0980665 0.0068947	10.1972 1 0.070307	145.038 14.2233 1

续表

比体积	$1 \text{ m}^3/\text{kg} =$ $1 \text{ ft}^3/\text{lb} =$	m^3/kg (米 ³ /千克)	ft^3/lb (英尺 ³ /磅)	
		1 0.062428	16.0185 1	
比 焓	$1 \text{ kJ}/\text{kg} =$ $1 \text{ cal}/\text{kg} =$ $1 \text{ Btu}/\text{lb} =$	kJ/kg (千焦/千克)	kcal/kg (千卡/千克)	Btu/lb (英热单位/磅)
		1 4.1868 2.326	0.238846 1 0.555556	0.429923 1.80 1
比 熵	$1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) =$	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [千焦/(千克·开)]	$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [千卡/(千克·开)]	$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R})$ [英热单位/(磅·度)]
		1 4.1868 4.1868	0.238846 1 1	0.238846 1 1
比热容	$1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) =$	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [千焦/(千克·开)]	$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [千卡/(千克·开)]	$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R})$ [英热单位/(磅·度)]
		1 4.1868 4.1868	0.238846 1 1	0.238846 1 1
能 量	$1 \text{ kJ} =$ $1 \text{ kcal} =$ $1 \text{ Btu} =$	kJ (千焦)	kcal (千卡)	Btu (英热单位)
		1 4.1868 1.0550	0.2388 1 0.2520	0.9478 3.9682 1
功 率	$1 \text{ kW} =$ $1 \text{ 马力} =$ $1 \text{ Btu}/\text{h} =$	kW (千瓦)	马 力	Btu/h (英热单位/时)
		1 0.73549 2.93071×10^{-4}	1.3596 1 3.98467×10^{-4}	3.4121×10^3 2.5096×10^3 1

本 章 小 结

(1) 热能利用的两种主要方式及其特点

热能的利用通常有以下两种基本形式：热能的直接利用、热能的间接利用。

直接利用的特点：即直接利用热能加热物体，诸如蒸煮、烘干、采暖、冶炼等。

间接利用的特点：即通过各种热能动力装置将热能转化成机械能或电能而被利用，从而为工农业生产、交通运输、人类日常生活等提供动力。

(2) 能量转换的工作过程

热能动力装置(热机)：通常我们将这种热能转化为动力的整套设备叫做热能动力装置(热机)。无论是内燃机还是蒸汽动力装置，都是工作工质经过压缩、吸热、膨胀、放热四个过程，周而复始，不断循环，连续不断地将热量转换为机械能。

制冷装置：消耗机械能实现热能由低温物体向高温物体转移的装置，这类装置通常被称为制冷装置或热泵。其工作过程正好与热动力装置的工作过程相反，即工作工质经过压缩、放热、膨胀、吸热四个过程。循环结果是：不断消耗外部机械功，将热能由冷藏室中的低温物体转移到高温物体，同时将消耗的机械能转变为热能一起输送给高温物体。

(3) 工程热力学研究对象

工程热力学主要研究热能和其他形式能间的相互转换规律和方法，以及提高转化效率的途径。主要包括以下几个方面：

① 研究能量转换的客观规律，即热力学第一定律与热力学第二定律。这是分析问题的依据和基础。

② 研究工质的基本热力性质。工质是能量的载体，必须对其相关性质有充分了解，才能对利用工质实施的能量转换效果过程进行分析研究。

③ 研究各种热工设备中的工作过程。即应用热力学基本定律及工质的性质，对常见的热动力设备和制冷装置的工作过程和循环进行具体的分析，探讨影响能量转换效果的因素及提高转换效果的途径。

(4) 热力学的研究方法

热力学有两种不同的研究方法，即宏观研究方法和微观研究方法。

经典热力学采用宏观研究方法，把组成物质的大量粒子作为一个整体，用宏观物理量描述物质的状态及物质间的相互作用。通过对大量宏观现象的直接观察与实验总结出来的普遍适用的规律。热力学的一切结论也是从热力学的基本定律出发，通过严密的逻辑推理而得到的，因而这些结论也具有高度的普遍性和可靠性。但由于不涉及物质的微观结构和微粒的运动规律，所以建立起来的热力学理论不能解释现象的本质及其发生的内部原因。

热力学的微观研究方法，认为大量粒子群的运动服从统计法则和或然率法则。这种方法的热力学称为统计热力学或分子热力学。它从物质的微观结构出发，从根本上观察和分析问题，预测和解释热现象的本质及其内在原因。

选读材料：热力学发展简史

瓦特



人类的生产实践和探索未知事物的欲望是科学技术发展的动力。热现象是人类最广泛接触到的自然现象之一。

詹姆斯·瓦特 (James Watt, 1736 年 1 月 19 日 ~ 1819 年 8 月 25 日)。瓦特出生于英国的格林诺克，由于家境贫穷没机会上学，先是到一家钟表店当学徒，后又到格拉斯哥大学去当仪器修理工。瓦特聪明好学，他常抽空旁听教授们讲课，再加上他整日亲手摆弄那些仪器，学识也就积累得不浅了。

1763 ~ 1784 年间，瓦特对原始的蒸汽机作了重大改进。

瓦特的蒸汽机装上曲轴、飞轮，活塞可以靠从两边进来的蒸汽连续推动，而不需要用人力去调节活门，这样世界上第一台真正的蒸汽机诞生了。工作原理如图 0-7 所示。

18 世纪从英国发起的技术革命是技术发展史上的一次巨大革命，它开创了以机器代替手工工具的时代。这场革命是以工作机的诞生开始的，以蒸汽机作为动力机被广泛使用为标志的。在第一次工业革命中，蒸汽机的发明、改进和应用，极大地推动了社会的发展。同时，蒸汽机的使用引起人们对热现象的广泛兴趣，推动了人们对热学、热力学和能量转化方