



“十三五”普通高等教育本科规划教材

工程热力学

黄晓明 许国良 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

工程热力学

主编 黄晓明 许国良
编写 刘志春 范爱武 方海生
主审 邬田华



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材,是根据教育部制订的普通高等教育“工程热力学”课程(多学时)教学基本要求,同时考虑适当反映科学技术新进展以适应新世纪教学需求,并结合编者多年教学实践经验编写而成的。

本书以能量传递、转移过程中数量守恒和质量蜕变为主要线索,阐述了工程热力学的基本概念、基本定律,气体及蒸汽的热力性质,各种热力过程和循环分析方法等内容。书中附有例题、思考题、习题及必要的热工图表。

本书可作为普通高等学校能源动力类、机械类、航空航天类、交通运输类、化工与制药类、材料类专业本科教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/黄晓明,许国良主编. —北京:中国电力出版社, 2015. 8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8082-0

I. ①工… II. ①黄… ②许… III. ①工程热力学—高等学校—教材 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 169155 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 429 千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

工程热力学是从工程的观点出发,研究物质的热力性质、能量转换规律及热能利用等问题的基础学科。它是能源动力工程、机械工程、航空航天工程、材料工程、化学工程、生物工程等领域相关专业的重要技术基础课,是培养在涉及能源特别是与热能相关的各领域中具有创新能力人才的基础,也是培养 21 世纪工科学生科学素质的一门公共技术基础课。

本书以大机械类培养模式的改革为背景。书中内容既符合国家教育委员会制订的多学时《工程热力学课程教学基本要求》,也参照了教育部机械学科教学指导委员会关于工科教材编写的有关精神,并融合了编者多年来的教学实践经验。在阐述基本理论的同时,参考最新国内外技术动态资讯,力求反映工程热力学的基本知识、广泛应用领域及最新应用成果。在内容编排上,注意先进性与实用性的统一,同时注重知识面的广阔性;在文字叙述上,注意简练通俗、层次分明,并遵循由点到面、由浅入深的认识规律。

全书共分 12 章,主要包括热力学基本概念、基本定律、工质的热力性质与计算、混合气体及湿空气、气体流动、各种热力循环分析等内容。第 1~7 章是热力学基本概念和基本理论知识部分,着重介绍了热力学基本概念和基本定律的实质,以及如何灵活运用热力学基本理论对各种热力过程进行分析;第 8~12 章为热力学理论在工程实际中应用部分,既是前面基本理论的具体应用,又是联系工程实际的桥梁,本部分内容着重培养学生应用热力学知识解决实际问题的能力。

本书在章节的编排上不仅考虑了多学时教学规律的需求,还同时考虑了大机械类少学时平台课程的教学安排。少学时教学可以以第 1~5 章为主,并根据专业的不同需要,对后面热力循环部分,重点讲授其中一种或两种循环。书中带 * 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。

参加本书编写工作的有华中科技大学黄晓明(绪论,第 4、10、11 章),许国良(第 6、7 章),刘志春(第 9、12 章),范爱武(第 1、3、5 章),方海生(第 2、8 章),全书由许国良统稿。书稿承华中科技大学邬田华教授主审,感谢他对本书提出的宝贵意见。本书在编写过程中,还得到了华中科技大学精品教材立项基金的资助,在此一并表示真挚的感谢!

由于编者水平所限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请广大同行专家与读者批评、指正。

编 者

2015 年 8 月

主 要 符 号

A	面积, m^2	$R_{g,eq}$	平均气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c	比热容 (质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 浓度, mol/m^3 ; 流速, m/s	S	熵, J/K
c_f	流速, m/s	S_f	(热) 熵流, J/K
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	S_g	熵产, J/K
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	S_m	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	S_m^0	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	T	热力学温度, K
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	T_i	转变温度, K
d	含湿量, kg (水蒸气) / kg (干空气); 汽耗率, kg/J	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
E	总能 (储存能), J	t_s	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
E_x	焔, J	t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
$E_{x,Q}$	热量焔, J	U	热力学能, J
$E_{x,U}$	热力学能焔, J	U_m	摩尔热力学能, J/mol
$E_{x,H}$	焔焔, J	V_m	摩尔体积, m^3/mol
E_K	宏观动能, J	V	体积, m^3
E_p	宏观位能, J	p	绝对压力, Pa
F	力, N ; 亥姆霍兹函数, J	p_0	大气环境压力, Pa
G	吉布斯函数, J	w_i	质量分数
H	焔, J	W	膨胀功, J
H_m	摩尔焔, J/mol	W_i	内部功, J
I	做功能力损失 (焔损失), J	W_{net}	循环净功, J
M	摩尔质量, kg/mol	W_s	轴功, J
Ma	马赫数	W_t	技术功, J
M_{eq}	平均摩尔质量 (折合摩尔质量), kg/mol	W_u	有用功, J
n	多变指数, 物质的量, mol	x	干度
p_b	大气环境压力, 背压, Pa	x_i	摩尔分数
p_e	表压力, Pa	z	压缩因子
p_i	分压力, Pa	α	抽汽量, kg
p_s	饱和压力, Pa	α_V	体膨胀系数, K^{-1}
p_v	真空度, 湿空气中水蒸气的分压力, Pa	γ	汽化潜热; 比热容比
p_N	最大转变压力, Pa	ε	制冷系数; 压缩比
q_m	质量流量, kg/s	ε'	供暖系数
q_V	体积流量, m^3/s	η_c	卡诺循环热效率
Q	热量, J	$\eta_{c,s}$	压气机绝热效率
R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	η_{ex}	焔效率
R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	η_i	循环热效率
		η_T	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率
		κ	等熵指数

κ_s	等熵压缩率, Pa^{-1}	ρ	密度, kg/m^3 ; 预胀比
κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}	σ	回热度
θ	顶锥角度	φ	相对湿度; 喷管速度系数
π	压力比 (增压比)	φ_i	体积分数
ν_{cr}	临界压力比		

下脚标

α	湿空气中干空气的参数	iso	孤立系统
c	卡诺循环	m	每摩尔物质的物理量
C	压气机	out	出口参数
CM	控制质量	s	饱和参数; 相平衡参数
cr	临界点参数; 临界流动状况参数	v	湿空气中水蒸气的物理量
CV	控制体积	0	环境的参数; 滞止参数
in	进口参数		

目 录

主要符号

前言

绪论	1
0.1 热能及其利用形式	1
0.2 热力学及其发展简史	2
0.3 能量转换装置的工作过程	5
0.4 工程热力学的主要研究内容和研究方法	7
0.5 工程热力学常用的计量单位	8
第1章 基本概念	10
1.1 热力系统与工质	10
1.2 热力学平衡	11
1.3 热力学状态参数	13
1.4 状态参数坐标图	17
1.5 热力过程与准静态过程	19
1.6 热力循环	21
思考题	22
习题	23
第2章 热力学第一定律	25
2.1 热力学第一定律的实质	25
2.2 功和热量——迁移能	25
2.3 热力学能和总能	30
2.4 闭口系的能量方程	31
2.5 开口系的能量方程	34
2.6 能量方程的工程应用举例	38
思考题	43
习题	44
第3章 理想气体的热力性质	47
3.1 理想气体及其状态方程	47
3.2 气体的比热容	49
3.3 理想气体的热力学能、焓和熵	55
思考题	59
习题	60
第4章 理想气体的热力过程	62
4.1 热力过程研究方法	62
4.2 理想气体的基本热力过程	63

4.3	多变过程及基本热力过程的综合分析	71
*4.4	非稳态流动过程	77
4.5	热力过程的工程应用: 气体的压缩	81
	思考题	86
	习题	87
第5章	热力学第二定律和熵	91
5.1	热力学第二定律	91
5.2	可逆循环的热效率分析	93
5.3	卡诺定理	97
5.4	状态参数熵的导出	99
5.5	克劳修斯不等式和不可逆过程的熵变	101
5.6	熵流、熵产和熵方程	103
5.7	孤立系统熵增原理	106
5.8	烔	111
*5.9	热力学温标	117
	思考题	118
	习题	119
第6章	实际气体的性质和热力学一般关系式	123
6.1	理想气体状态方程用于实际气体的偏差	123
6.2	实际气体状态方程	124
6.3	实际气体热力性质的近似计算	128
6.4	热力学一般关系式	130
6.5	热力学能、焓和熵的一般关系式	135
6.6	比热容的一般关系式	137
*6.7	克拉贝隆方程	138
	思考题	139
	习题	140
第7章	水和水蒸气的热力过程	142
7.1	纯物质的 $p-v-T$ 关系	142
7.2	水蒸气的热力性质	145
*7.3	水和水蒸气热力性质计算程序	148
7.4	水和水蒸气热力过程计算	151
	思考题	153
	习题	153
第8章	气体混合物与湿空气	156
8.1	混合气体的成分	156
8.2	理想气体混合物的分压力定律与分体积定律	159
8.3	理想气体混合物的热力性质计算及混合熵增	160
8.4	湿空气的基本概念和状态参数	164
8.5	相对湿度的测定	168

8.6 湿空气的焓湿图	169
8.7 湿空气的基本热力过程及应用	171
思考题	177
习题	177
第9章 气体和蒸汽的流动	180
9.1 一维稳态流动的基本方程	180
9.2 气体在喷管和扩压管中的定熵流动	182
9.3 气体和蒸汽在喷管中的流速和质量流量	184
9.4 具有摩擦的绝热流动	189
9.5 绝热节流	189
思考题	192
习题	193
第10章 气体动力循环	195
10.1 分析动力循环的一般方法和步骤	195
10.2 往复活塞式内燃机理想循环	198
10.3 燃气轮机装置循环	206
10.4 具有回热的燃气轮机装置循环	212
* 10.5 空气喷气发动机循环	214
* 10.6 斯特林发动机	215
思考题	218
习题	218
第11章 蒸汽动力循环	221
11.1 蒸汽动力循环简述	221
11.2 朗肯循环	222
11.3 再热循环	228
11.4 回热循环	230
11.5 提高蒸汽循环热效率的其他方式	234
思考题	237
习题	237
第12章 制冷与热泵循环	240
12.1 概述	240
12.2 压缩空气制冷循环	242
12.3 压缩蒸气制冷循环	245
12.4 制冷剂	247
12.5 热泵供热循环	249
12.6 其他形式的制冷循环	250
思考题	251
习题	251
附录	253
参考文献	272

绪 论

0.1 热能及其利用形式

1. 热能的有效利用是能源开发和利用的关键

能源是人类社会不可缺少的物质基础之一，人类社会的发展史与人类开发利用能源的广度和深度密切相连。

能源是指提供各种有效能量的物质资源。迄今为止，自然界中已被人们发现的可利用的能源主要有：风能、水能、太阳能、地热能、海洋能、核能和燃料的化学能等。在这些能源中，除风能、水能和海洋潮汐能是以机械能的形式提供给人们之外，其余各种能源都往往以热能的形式提供给人们。例如，太阳能是直接的热能；燃料（煤、石油、天然气等）的化学能，常通过燃烧将其化学能释放并转换为热能；核能通过裂变反应或聚变反应释放出高温热能。据统计，经过热能形式而被利用的能量，在我国占 90% 以上，世界其他国家平均超过 85%。因此从某种意义上讲，能源的开发和利用就是热能的开发和利用。各种能源与热能的转换以及热能的利用方式如图 0-1 所示。

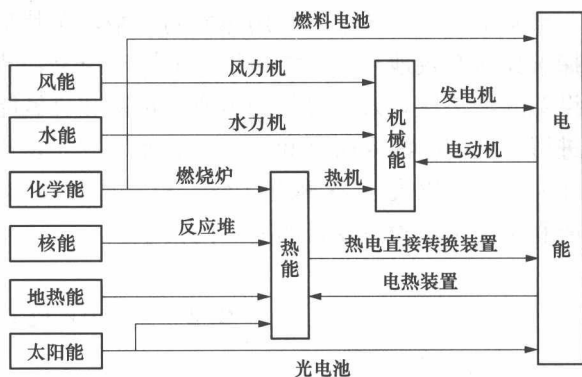


图 0-1 能量利用过程示意图

2. 能量转换是热能间接利用的核心

热能的利用，有以下两种基本方式：一种是直接利用，即将热能直接用于加热物体，热能的形式不发生变化，如烘干、采暖、熔炼及化工过程利用热能进行分解或化合等，以满足人类生产和生活的需要；另一种是间接利用，通常是指将热能转变为机械能（或进而转变为电能），以满足人类生产和生活对动力的需要，如火力发电、交通运输、石油化工、机械制造和其他各种过程中的蒸汽动力装置、燃气动力装置。在热能的间接利用中，热能的能量形式发生了转换。

直接用热能加热物体，为生产工艺或生活服务固然重要，然而间接使用热能，使之变为机械能或者电能的形式向人类提供动力或电能，其意义更为重要。特别是电能具有传输和使用方便等许多优点，一般将热能最终转变为电能的形式。人均用电水平的高低常常被用来衡量一个国家工业化的发展程度。据 2012 年统计，我国电能占人均总能消耗的比例为 30%，一般发达国家为 45% 以上。

热能转变为其他形式能量需要通过一定的能量转换设备，如内燃机、蒸汽轮机等。由于设备本身的限制，能量不可能全部转化为人们需要的能量。一个能量转换设备所输出的可利用能量，相对其输入能量的比值被定义为能量转换效率。图 0-2 给出了几种典型的能量转换装置以及它们的能量转换热效率。可以看出，热能通过热能动力装置转换为机械能的效率

是较低的。在动力需求日益增长的今天,如何开发新的能源,如何更有效地实现能量转换,这是摆在能量转换学科及动力工程工作者面前的一个十分迫切而又重要的课题。

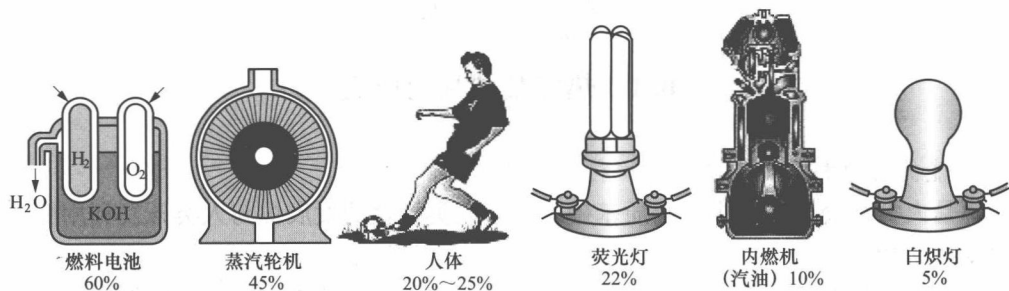


图 0-2 各种能量转换装置及其能量转换效率

3. 工程热力学是研究热能与机械能及其转换规律的一门工程科学

事实上,人类从学会利用热能的开始,尤其是自瓦特发明蒸汽机后,就一直在孜孜不倦地探求如何有效地利用热能以提高能量利用率,节约有限的资源。为了提高各种热能转换利用设备的经济性,人们对热的本质、热能和机械能之间转换的基本规律及各种工质的热力性质进行了不懈的深入研究和探讨,从而导致涉及热能间接利用的“工程热力学”的出现、发展和完善。可以说,“工程热力学”就是研究热能和机械能转换的基本原理和规律,以提高热能利用经济性为主要目的的一门科学。

0.2 热力学及其发展简史

1. 蒸汽机的出现和第一次工业革命推动了热力学理论的研究

生产的发展是科学发展的动力。18 世纪初,在欧洲,由于航海事业、钢铁冶炼、煤矿开采等方面的迅速发展,在生产上出现了热机,同时,生产的发展也为热机的制造和改进提供了条件。最早使用的热机是蒸汽机。它最早出现于煤矿,用以带动水泵从煤井中抽水。后来,英国人瓦特 (James Watt, 1736—1819 年) 在 1763—1784 年间对这种原始的蒸汽机作了一些重大改进,制造成配有独立凝汽器的单缸蒸汽机,提高了蒸汽机的热效率,使它的应用逐步推广到纺织、冶金等其他部门。瓦特改良后的蒸汽机和示意图见图 0-3。此后,蒸汽机经过不断改进,热效率得以逐步提高,应用领域也日益广泛。到 19 世纪初期造出了用于船舶 (1807) 和铁路机车 (1825) 的蒸汽机。随着蒸汽机的不断改进和广泛应用,怎样进一步提高蒸汽机热效率的问题就变得日益重要。这样,就促使人们对热功转换的规律以及水和水蒸气的热力性质计算等问题进行深入研究,从而推动了热力学的发展。

2. 热力学第一定律宣告了第一类永动机幻想的破灭

在热力学第一定律提出之前,人们一直围绕着制造永动机的可能性问题展开激烈的讨论,尤其是到了 19 世纪早期,不少人沉迷于一种神秘机械——第一类永动机的制造,因为这种设想中的机械只需要一个初始的力量就可使其运转起来,之后不再需要任何动力和燃料,却能自动不断地做功。直至热力学第一定律发现后,第一类永动机的神话才不攻自破。

热力学第一定律,即能量守恒及转换定律的建立,主要应归功于迈耶 (Julius Robert Mayer, 1814—1878 年) 和焦耳 (James Joule, 1818—1889 年)。迈耶于 1842 年首先发表

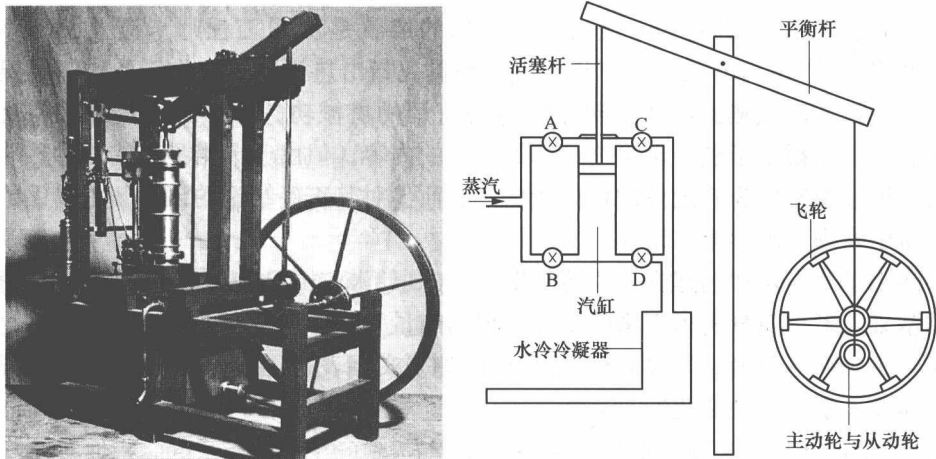


图 0-3 瓦特改良后的蒸汽机外形和示意

论文全面阐明了这一定律，但当时尚缺乏实验支持，没有得到公认。焦耳在与迈耶的理论研究没有联系的情况下，在这方面进行了全面的实验研究。他第一篇证明热功当量的实验研究论文发表于 1843 年。到 1850 年，在焦耳发表的关于热功当量实验的总结论文中，以各种精确的实验结果使热力学第一定律得到了充分的证实，从而获得了物理学界的公认。焦耳及他的热功当量实验装置如图 0-4 所示。

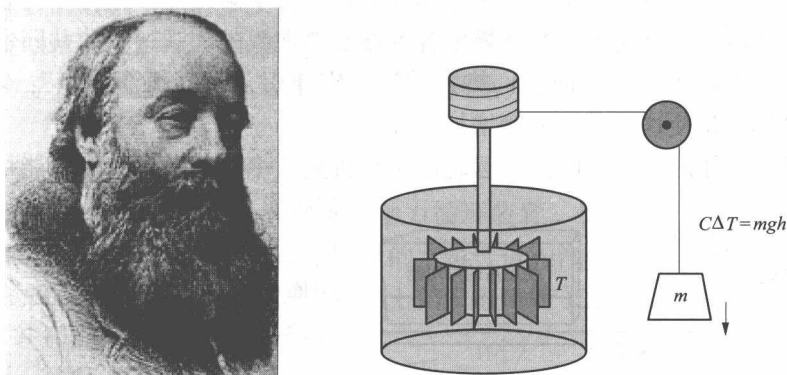


图 0-4 焦耳和他的热功当量实验装置

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学上的具体表现，它指明：热是物质运动的一种形式，外界传给物质系统的能量（热量），等于系统内部能量（热力学能）的增加和系统对外做功的综合。它否认了能量的无中生有，因此这一定律也被表示为：第一类永动机（不消耗任何形式的能量而能对外做功的机械）是不可能制作出来的。

能量守恒及转换定律是 19 世纪物理学最重要的发现，它用定量的规律将各种物理现象联系起来，求得了一个可以量度各种现象的物理量，即能量。能量这一概念是由汤姆逊（William Thomson，后名开尔文 Lord Kelvin，1824—1907 年）于 1851 年引入热力学的，之后，能量的转化与守恒成为分析解决问题的一个极为重要的方法。

3. 热力学第二定律的发现更深刻地揭示了热的本质

在热功转换规律的研究上,最早、最卓越的成就是法国工程师卡诺(Saudi Carnot, 1796—1832年)在1824年发表的卡诺定理。他首先指出热机必须工作于两个不同温度的热源之间,才能将从高温热源吸入的热量转变为有用的机械功。并提出了热机最高效率的概念。这在实质上已揭示了热力学第二定律最基本的内容。但由于卡诺是用错误的热质说(当时流行的一种学说)作为其定理的理论依据,因而他对其正确结论的证明却是错误的,而且使他不能从中发现热力学第二定律。

随着热力学第一定律的建立,克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888年)在迈耶和焦耳工作的基础上,重新分析了卡诺的工作,根据热量传递总是从高温物体传向低温物体这一客观事实,于1850年提出了热力学第二定律的如下文字表述:“不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化”。

在1851年,开尔文也独立地从卡诺的工作中发现了热力学第二定律,他对第二定律的表述为:“不可能从单一热源吸取热量使之完全转变为功而不产生其他影响”。

从单一热源(如大气)吸取热量完全转变为功而不产生其他影响的机器是不违背能量守恒定律的,但这种机器可从大气或海洋中吸取热量使之完全转变为功,因而可以说不需任何代价,是完全免费的,所以实质上这也是一种永动机(称第二类永动机)。第二类永动机是非常吸引人的,曾使许多人浪费了大量的精力。热力学第二定律的建立,宣告了第二类永动机和第一类永动机一样,也是不可能实现的。

热力学第二定律的两种表述(前两种)看上去似乎没什么关系,然而实际上它们是等效的,即由其中一个,可以推导出另一个。实际上,热力学第二定律还有多种表述,这些表述的等效性并非偶然,而是揭示了自然界中各种涉及热现象的宏观过程的共同本质:过程的进行具有方向性。为说明这一方向性,热力学第二定律引入了新概念“熵”:在孤立系统中,实际发生的过程总是使这个系统的熵增加。

热力学第二定律的意义实际上远远超出了热机热效率的范畴,它指出能量不仅有数量的

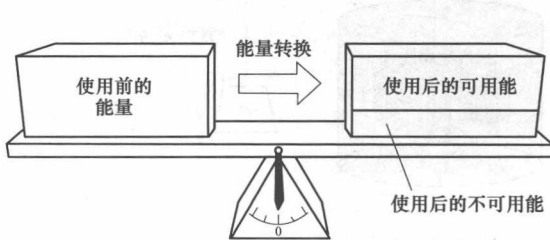


图 0-5 用能过程中的能量品质变化

属性,还有品质的高低。为什么机械功可以完全转换为热,但散失的热却不能完全转换为机械功;为什么热量可以从高温自发传向低温,却不能直接从低温传向高温。在这些自发过程中,虽然能量守恒,但却逐步丢失了它的有用价值,也就是能量的品质下降了(见图0-5)。如果说,热力学第一定律只是对能量的数量进行计算

的话,热力学第二定律就是用来计算能量的品质的。人们常说:数量好算,方向难辨,品质更难评。因此,从这个意义上讲,热力学第二定律比第一定律更重要。实际上,正是有了热力学第二定律,热力学才成为一门独立的学科。

在热力学第一定律和第二定律的基础上,1868年英国的泰特(P. G. Tait, 1831—1901年)第一次提出了能量可用性的概念,后来经过麦克斯韦、吉布斯(J. W. Gibbs, 1839—1901年)等的工作,终于在1942年,由美国的基南(J. H. Keenan, 1900—1977年)全面建立了可用能的概念和方法。1953年,南斯拉夫学者朗特(Z. Rant, 1904—1972年)又进一步提出了

烟的概念, 1962 年, 又提出了熵的概念。可用能或熵分析技术的发展为提高热能利用效率提供了有效的方法。

4. 热力学第三定律的发现给出了最低温度的极限

在这两个基本定律建立以后, 热力学理论在将它们应用于分析各种具体问题的过程中, 得到了进一步的发展。如应用两个基本定律, 导出了反映物质各种性质的相应的热力学函数以及各热力学函数之间的普遍关系, 求得了各种物质在相变过程和化学反应中的各种规律等。

在将热力学原理应用于低温现象的研究中, 能斯特 (Walther Nernst, 1864—1941 年) 在 1906 年得到了一个称为能氏定理的新规律, 并于 1912 年将这一规律表述为: 绝对零度不能达到原理, 这就是热力学第三定律。经典热力学的理论基础就是由上面三个热力学基本定律构成的。

如上所述, 热机的发明、应用和发展不断促进热力学理论的研究, 使热力学理论逐步完善, 而热力学理论又有力地指导了热机的改进和发展。由于热力学理论所揭示的是能量转换过程的普遍规律, 因此它不仅能指导热机的发展, 而且在化工、冶金、制冷、空调以及低温、超导、反应堆、气象、生物等多个科技领域中, 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。

0.3 能量转换装置的工作过程

在学习本课程的过程中, 会涉及各种能量转换装置, 如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置、喷气发动机以及制冷装置等。为了从这些装置中总结出能量转换的基本规律, 更好地了解工程热力学所研究的内容, 在本节中将简要地介绍一些主要热力设备的实际工作过程。

1. 蒸汽动力发电装置

图 0-6 是近代热力发电厂中采用的蒸汽动力循环装置。煤在锅炉中燃烧, 产生大量的热能, 使锅炉管中的水变成水蒸气。高温高压的水蒸气进入汽轮机中推动叶轮转动并利用转轴输出机械功。所产生的机械功带动同一转轴上的发电机转子, 使之产生旋转运动, 从而使

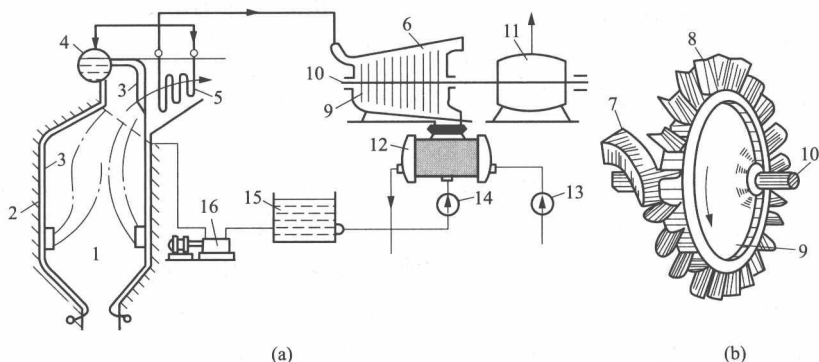


图 0-6 蒸汽动力循环装置工作示意

1—锅炉; 2—炉墙; 3—水冷壁; 4—汽包; 5—过热器; 6—汽轮机; 7—喷嘴; 8—叶片;
9—转轮; 10—轴; 11—发电机; 12—凝汽器; 13、14、16—泵; 15—水箱

发电机发出电能。汽轮机排出的乏汽经凝汽器冷却成液体后再送回锅炉内重新加热汽化，完成一个循环。这样就可以连续地将燃料燃烧产生的热能部分地转变为电能供给用户使用。

核电蒸汽动力装置的构成和工作过程与上述普通的热力发电厂动力装置比较，主要区别在于用反应堆代替了蒸汽锅炉，如图 0-7 所示。目前的反应堆多用浓缩铀作燃料，而用载热质（如水、重水或某些碱金属蒸气）将反应堆中的大量热能携出，并在热交换器中将热能传递给水和水蒸气。水蒸气的循环则与蒸汽动力循环完全相向。

2. 内燃机

图 0-8 是燃烧汽油的内燃机示意图，其主要部分为气缸和活塞。内部的能量转换过程简述如下：当活塞下行时，进气阀打开，排气阀关闭。雾化的汽油与空气混合物通过进气阀吸入气缸内。然后活塞上行，进气阀关闭，缸内气体受到压缩。电火花将燃料点燃后，燃烧过程产生的热量使缸内气体的压力和温度迅速升高。高温高压的气体推动活塞向下运动，通过连杆机构将机械能传出去。活塞再次上行，排气阀打开，进气阀关闭，将做功后的废气排出气缸，活塞回到初始状态，整个装置完成一个循环。之后，新循环又重新开始。气缸内这种周而复始的循环过程，不断地将热能转换成机械能。

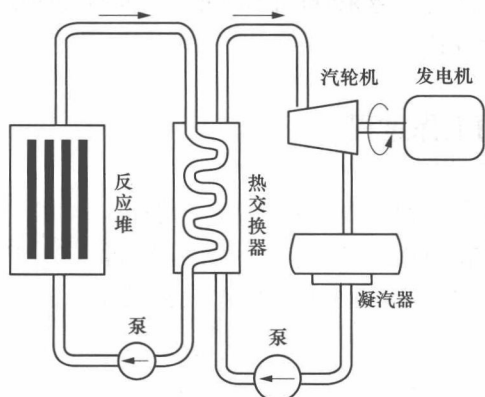


图 0-7 核电厂蒸汽动力装置工作示意

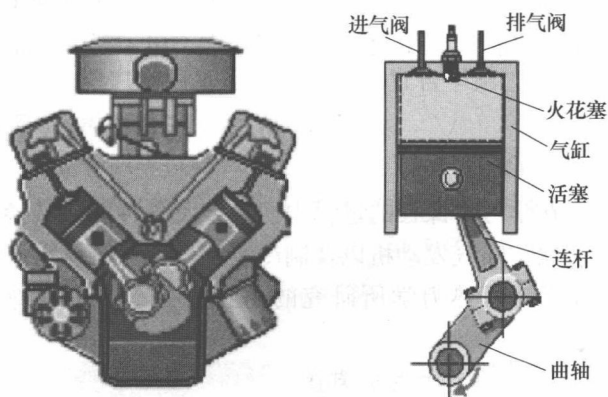


图 0-8 内燃机工作示意

3. 制冷机和热泵

以上介绍的都是热能动力装置，它们的目的是将热能转换为机械能。在工程上还有另一类作用与之相反的能量转换装置，它们消耗外部机械功（或热能）来实现热能从低温物体到高温物体的转移，这类装置通常称为制冷装置，在以供热为目的时称为热泵。下面以压缩蒸汽制冷装置为例介绍。

图 0-9 是以室内空调、电冰箱为代表的压缩蒸汽制冷装置工作原理示意图。由电动机带动的压缩机把在冷库（室内）吸热汽化的制冷剂压缩，使其温度、压力升高，然后进入冷凝器向环境介质放热，并冷凝成液体，再在膨胀（节流）阀内降压、降温到冷库温度，进入冷库蒸发器，汽化吸热完成循环。所以制冷机消耗外功，通过制冷剂吸热、压缩、放热、膨胀，实现把热能从低温物体（室内环境）向高温物体（室外环境）输送。

4. 能量转换装置的共性

工程热力学并不深入研究各种能量转换装置的具体结构和各自的特性，而是采用抽象、概括的方法对所有能量转换装置的共同问题进行探讨。

以热机为例。从前面介绍的两种热机的工作情况来看,它们的构造和工作特性有很大不同。例如蒸汽动力装置中工作物质的吸热、膨胀、冷凝等过程分别发生在不同的设备里,而活塞式内燃机的燃烧、膨胀、压缩和排气都发生在气缸内。其他型式的热机可能还有另外的方式和特性。但是从能量转换的本质来看,无论哪一种热机,总是用某种媒介物质从某个能源获取热能,从而具备做功能力并对机器做功,

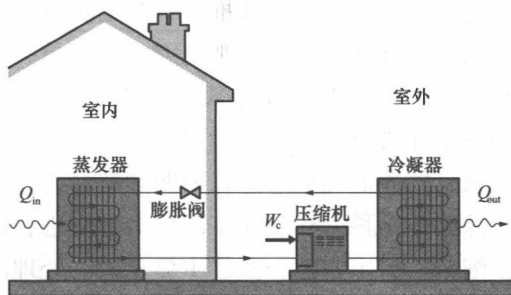


图 0-9 压缩蒸汽制冷装置工作示意

最后又把余下的热能排向环境。我们把实现热能和机械能相互转化的媒介物质叫做工质;把工质从中吸取热能的物系叫做热源,或称高温热源;把接受工质排出热能的物质叫做冷源,或称低温热源。热能动力装置的工作过程可以概括成:工质自高温热源吸热,将其中一部分转化为机械能而做功,并把余下部分传给低温热源。

0.4 工程热力学的主要研究内容和研究方法

1. 工程热力学的主要研究内容

工程热力学的研究对象就是各种能量转换装置,具体来说就是各种热力发动机,以及制冷、热泵装置。前面所介绍的各种热能动力装置和制冷装置,尽管其工作目的、设备结构与装置系统很不相同,但它们实现能量转换的过程有许多共同的特性,可以概括如下:

(1) 能量转换装置在工作中都需要有工质,如内燃机中的燃气、蒸汽轮机中的水蒸气、制冷机中的制冷剂。

(2) 能量转换是在工质状态不断地变化中实现的。各种能量转换装置中的工质都必须经历压缩、吸热、膨胀、放热等状态变化过程,对外发生热和功的交换。因此,各种装置工作效率的高低及其结构与组成都与所采用工质的性质密切相关。

(3) 能量的连续转换是在周而复始的循环中实现的。动力循环中将吸热量中的一部分转换为机械能,剩余的部分排向冷却水或环境;制冷循环则消耗机械能,将热量由低温物体排向高温物体。

因此,工程热力学的主要内容包括以下三部分:

(1) 能量转换的基本概念和基本定律。热能和其他形式的能量(主要是机械能)之间相互转换的客观规律,即热力学第一和第二定律。这是分析问题的依据和基础。

(2) 工质的热力性质。工质是能量的载体,必须对其相关性质有充分的了解,才能对利用工质实施的能量转换过程进行分析研究。

(3) 各种热力装置循环性质的分析。主要是应用热力学原理结合工质性质对工程上常见的热能动力装置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。

2. 工程热力学的研究方法

工程热力学主要采用经典热力学的研究方法,即宏观和唯象的研究方法。这种方法把物质看成连续的整体,并用宏观物理量描述其状态,以根据大量的观察和实验所总结出的基本

定律为依据，进行演绎和推理，得出具有可靠性的和普遍适用的结论、公式，以解决热力工程中的能量转换问题。宏观研究方法简单、可靠，但由于这种方法不考虑物质的微观结构和运动规律，故对于许多物理现象及其本质，以及物质的一些性质等不能解释说明。为此，工程热力学在必要时引用微观的气体分子运动论和统计热力学的方法、观点和理论对一些物理现象、物质的性质等进行说明和解释。

像其他学科一样，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、抓住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，而且能深刻地反映事物的本质，是科学研究的重要方法。

0.5 工程热力学常用的计量单位

在工程热力学中有比较多的物理量，因此会涉及对这些物理量采用什么单位的问题。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。考虑到目前的实际情况，本书中对早期我国所采用的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，表 0-1 列出了它们的符号与单位名称。

表 0-1 国家法定计量单位的基本单位（部分）

量	单位名称	单位符号	量	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开 [尔文] ^①	K
质量	千克（公斤）	kg	物质的量	摩 [尔] ^①	mol
时间	秒	s			

①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。

除了 SI 基本单位外，国际单位制中还包括 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，在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 列出了工程热力学中常用的导出单位。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。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。

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	1N=1kg·m/s ²
压力、压强、应力	帕 [斯卡]	Pa	1Pa=1N/m ²
能 [量]、功、热量	焦 [耳]	J	1J=1N·m