

高等学校试用教材

工程热力学

庞麓鸣 汪孟乐 冯海仙 编

人民教育出版社

高等学校试用教材

工程热力学

庞麓鸣 汪孟乐 冯海仙 编

人民教育出版社

内 容 提 要

本书是根据一九七七年十二月高等学校工科基础课《机械零件》、《机械原理》、《工程热力学》、《传热学》教材编写会议讨论修改的《工程热力学》教材编写大纲编写的。本书共十五章,书末附有供计算用的大量图表。本书采用国际单位制(SI制),考虑目前工程实际情况也并列了公制。

本书主要适用于蒸汽动力类专业,也可供有关专业及工程技术人员参考。

高等学校试用教材

工 程 热 力 学

庞麓鸣 汪孟乐 冯海仙 编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 19.75 插页 3 字数 477,000

1980 年 1 月第 1 版 1980 年 6 月第 1 次印刷

印数 00,001—6,000

书号 15012·0233 定价 2.20 元

前 言

本书是按照一九七七年十二月高等学校工科基础课工程热力学、传热学教材会议讨论的《工程热力学》教材编写大纲编写的,供蒸汽动力类各专业使用,也可供动力类其它专业参考。

工程热力学是一门技术基础课,为蒸汽动力类各专业学生提供关于能量转换方面的理论基础知识,使学生在专业学习及将来的工作中具有热力计算和分析的能力。

在本书编写过程中,我们努力应用辩证唯物主义观点来阐明热功转换的基本规律。在教材内容上围绕热力学两个基本定律,对基本概念、基本原理、基本方法作了尽可能详尽的阐述;并力求保持学科的系统性;注意符合由浅入深、由易到难的认识规律,难点分散,便于自学。

本书中标有“*”号的内容,教师讲授时可灵活掌握,根据专业需要和实际情况决定取舍。有些内容可让学生通过自学掌握,不必全在课堂上讲授。本书各章习题略为偏多,可供教师选择。每章末备有复习思考题帮助学生复习,以巩固所学的基本内容。

本书全部采用国际单位制(SI制),但考虑到目前我国工程实际情况也并列了公制。附录中也列出了两种单位制的图表,以便参考。同时,为了今后便于阅读有关的外国书籍和资料,本书也适当介绍了英制单位。

本书由华中工学院罗干辉、王崇琦等同志主审,参加审稿会的还有:南京工学院、西安交通大学、华北电力学院、上海交通大学、山东工学院、重庆大学、清华大学、浙江大学、东北电力学院等。参加审稿会的同志对本书提出了许多宝贵的意见和建议;在编写过

程中，还得到西安交通大学苏长荪同志的帮助和指导，在此谨致谢意。

参加本书编写的有庞麓鸣、汪孟乐、冯海仙等同志。限于编者水平，且时间仓促，本书难免有不妥和错误之处，希望同志们给予批评和指正。

编 者

一九七九年六月

主要符号

A	面积	Q_0, q_0	制冷量及单位质量的制冷量
c	音速; 比热容	$\dot{Q}$	单位时间的热量; 热流率
c_p	定压比热容	R, R_m	气体常数及通用气体常数
c_v	定容比热容	r	汽化潜热
c_p'	定压容积热容	S, s	熵(总熵及比熵)
c_v'	定容容积热容	t	摄氏温度
$C_p(Mc_p)$	定压摩尔热容	t_{DP}	露点
$C_v(Mc_v)$	定容摩尔热容	t_w	湿球温度
d	汽耗率	T	热力学温度(或称绝对温度)
D	总汽耗量; 过热度	T_i	转回温度
E, e	能及单位质量的能	U, u	内能(总内能及比内能)
E_x, e_x	焵及单位质量的焵	V, v	容积及比容
F, f	力; 自由能及单位质量的自由能	$\dot{V}$	体积流量
G, g	自由焵(或称吉布斯函数)及单位质量的自由焵	$\bar{V}$	平均流速
H, h	焵(总焵及比焵)	W, w	膨胀功及单位质量工质作的膨胀功
K	热量利用系数	$W_s(W_i), w_s(w_i)$	轴功(内功)及单位质量工质作的轴功(内功)
K_c	平衡常数	x	摩尔成分或摩尔百分数; 干度
l	距离或长度	z	相对于某基准面的高度; 压缩因素; 回热级数
$m(\text{或 } M)$	质量		
$\dot{m}$	质量流量		
M	马赫数		
n	摩尔数; 多变指数		
p	压力		
P	功率		
Q, q	传热量及单位质量的传热量		

希腊字母		μ	摩尔质量
α	定熵压缩系数		
β	增压比; 定压膨胀系数		下角标
ϵ	压缩比; 制冷系数	B	锅炉
ϵ'	热量利用系数	c	临界状态; 卡诺 (循环)
η	发电厂效率	CD	凝汽器
η_{ex}	焓效率	co	压气机
η_i	绝对内效率	ex	原动机
η_o	相对热效率	G	发电机
η_{oi}	相对内效率	H	热电 (循环)
η_T	热效率	n	多变过程
η_{Tc}	卡诺循环热效率	o	标准状态; 滞止状态; 周围环境状态
κ	绝热指数 (或称比热容比); 定温压缩系数	p	定压过程
λ	定容升压比	P	泵
ξ	能量损失系数	r	对比状态
ρ	密度; 定压膨胀比 (或称初胀比)	RG	回热 (循环)
τ	增温比	RH	再热 (循环)
φ	容积成分; 速度系数	s	定熵过程; 饱和状态
ϕ	相对湿度	SG	蒸汽-燃气 (联合循环)
ω	供热供电生产率; 比湿度 (含湿量); 质量成分	$stir$	史特林 (循环)
		T	定温过程; 汽轮机
		v	定容过程
		x	湿蒸汽状态

目 录

主要符号	1
绪论	1
0-1 热能与机械能的转换	1
0-2 工程热力学的研究对象及其主要内容	5
0-3 热力工程和工程热力学发展简史	7
0-4 热力学的研究方法	8
复习思考题	9
第一章 基本概念	10
1-1 热力系	10
1-2 热力状态参数	12
1-3 平衡状态、状态方程、参数坐标图	17
1-4 准静态过程、可逆过程	20
1-5 功	23
1-6 热量、熵	26
1-7 热力循环	29
*1-8 工程热力学的一些单位及其量纲	30
复习思考题	35
习题	36
第二章 热力学第一定律	39
2-1 热力学第一定律的实质	39
2-2 内能	41
2-3 热力学第一定律解析式	43
2-4 稳定流动能量方程	46
2-5 焓	53
2-6 稳定流动能量方程的应用	54
复习思考题	58
习题	59

第三章 理想气体的性质	63
3-1 理想气体与实际气体	63
3-2 理想气体状态方程	65
3-3 理想气体的比热容	69
3-4 理想气体的内能、焓的计算式	76
3-5 理想气体的熵的计算式	78
复习思考题	79
习题	80
第四章 气体的主要热力过程及气体压缩	82
4-1 分析热力过程的目的与一般方法	82
4-2 四种典型热力过程分析	83
4-3 多变过程	95
4-4 气体的理论压缩功	101
4-5 多级压缩	105
4-6 活塞式压气机余隙的影响	107
复习思考题	113
习题	114
第五章 热力学第二定律	117
5-1 自然过程的不可逆性	117
5-2 热力学第二定律的实质与表述	119
5-3 卡诺循环、卡诺定理	121
5-4 热力学绝对温标	133
5-5 熵的导出	138
5-6 孤立体系熵增原理	141
5-7 热的可用性与能量贬值	150
*5-8 状态参数焓	157
复习思考题	165
习题	166
第六章 实际气体的性质	169
6-1 概说	169
6-2 实际气体状态方程	170

6-3	对比状态定律	179
6-4	维里状态方程	187
6-5	麦克斯韦关系式	188
6-6	熵、内能、焓的普遍关系式	191
6-7	比热容的普遍关系式	194
	复习思考题	196
	习题	196
第七章	蒸气	198
7-1	一些概念、术语	198
7-2	汽化过程的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图	200
7-3	饱和液体和干饱和蒸气的性质	204
7-4	湿蒸汽及其参数计算	209
7-5	未饱和液体和过热蒸汽的性质	211
7-6	蒸汽的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上的各种线群	216
7-7	焓熵图与焓熵图	222
7-8	水蒸气图表的应用及举例	229
7-9	蒸汽的热力过程	239
7-10	$p-t$ 图	246
7-11	克拉贝龙-克劳修斯方程	248
	复习思考题	251
	习题	252
第八章	气体与蒸汽的流动	253
8-1	概说	253
8-2	稳定流动的基本方程	253
8-3	管内流动的基本特性	258
8-4	喷管的计算	264
8-5	摩阻对流动的影响	275
8-6	绝热滞止	279
8-7	绝热节流	283
	复习思考题	291
	习题	292

第九章 分析动力循环的一般方法	295
9-1 概说	295
9-2 分析任意可逆循环热效率的方法	297
9-3 分析不可逆循环效率的方法	301
9-4 计算作功能力损失的熵方法	307
*9-5 计算作功能力损失的焓方法	311
复习思考题	318
习题	318
第十章 蒸汽动力循环	320
10-1 朗肯循环	320
10-2 蒸汽参数对循环效率的影响	337
10-3 再热循环	344
10-4 回热循环	347
10-5 热电循环	362
10-6 工质性质对循环热效率的影响	366
复习思考题	368
习题	369
第十一章 气体动力循环	371
11-1 活塞式内燃机工作原理及循环	371
11-2 活塞式内燃机理论循环分析	376
11-3 史特林循环	381
11-4 燃气轮装置循环	386
11-5 提高燃气轮装置热效率的途径	393
11-6 蒸汽-燃气联合循环	399
复习思考题	403
习题	403
第十二章 制冷	405
12-1 基本原理	405
12-2 空气压缩制冷	406
12-3 蒸汽压缩制冷	413
12-4 制冷剂的热力学性质	420

12-5 蒸气喷射制冷	422
12-6 吸收式制冷	425
复习思考题	427
习题	427
第十三章 气体混合物	429
13-1 道尔顿分压定律	430
13-2 混合气体成分表示法与换算	431
13-3 混合气体的比热容、内能和焓	436
13-4 混合气体的熵	438
13-5 空气与水蒸气的混合物——湿空气	440
13-6 湿空气的湿度	443
13-7 湿空气的焓和熵	447
13-8 绝热饱和过程	449
13-9 湿空气的焓-湿图	451
13-10 湿空气的应用	453
复习思考题	458
习题	459
第十四章 化学热力学基础	462
14-1 热力学第一定律应用于化学反应过程	463
14-2 热效应	464
14-3 赫斯定律	467
14-4 基尔霍夫定律——反应热效应和温度的关系	468
14-5 理论燃烧温度	470
14-6 热力学第二定律在化学反应中的应用	472
14-7 化学平衡与平衡常数	476
14-8 平衡常数与最大功的关系	481
14-9 化学平衡与温度、压力的关系	483
14-10 奈恩斯特热定理	490
复习思考题	493
习题	494
*第十五章 新动力技术与新能源简介	496
15-1 磁流体发电	496

15-2	燃料电池	501
15-3	热离子能量转换器	504
15-4	太阳电池	505
15-5	自由活塞发动机	506
15-6	喷气发动机	508
15-7	新能源	511

附 录

附表 1	工程热力学中不同单位制常用互换常数表	515
附表 2	常用能量单位的互换常数表	516
附表 3	气体的热力性质	517
附表 4	气体的真实定压摩尔热容 C_p	518
附表 5	气体的真实定容摩尔热容 C_v	520
附表 6	气体的平均定压比热容 $\bar{c}_p$	522
附表 7	气体的平均定容比热容 $\bar{c}_v$	524
附表 8	气体的平均定压容积热容 $\bar{c}'_p$	526
附表 9	气体的平均定容容积热容 $\bar{c}'_v$	528
附表 10	气体的平均定压摩尔热容 $\bar{C}_p$	530
附表 11	气体的平均定容摩尔热容 $\bar{C}_v$	532
附表 12	气体的平均比热容 (直线关系式)	534
附表 13	饱和水蒸气表 (依温度为变数排列) SI制	534
附表 14	饱和水蒸气表 (依压力为变数排列) SI制	536
附表 15	水和过热水蒸气表 SI制	540
附表 16	水和过热水蒸气的定压比热容 c_p	572
附表 17	水和水蒸气在饱和界限线上的定压比热容 c'_p 及 c''_p	577
附表 18	过热水蒸气由于饱和蒸汽至 $t^\circ\text{C}$ 之间的平均定压比热容 $\bar{c}_p$	578
附表 19	饱和水蒸气表 (依温度为变数排列) 公制	582
附表 20	饱和水蒸气表 (依压力为变数排列) 公制	584
附表 21	水和过热蒸汽表 公制	588
主要参考书		620
附图 1	水蒸气 $h-s$ 图 SI制	(插页)
附图 2	水蒸气的焓-熵图 SI制	(插页)
附图 3	水蒸气 $h-s$ 图 公制	(插页)
附图 4	氨的温-熵图	(插页)
附图 5	氨的 $\lg p-h$ 图	(插页)
附图 6	湿空气的焓-湿图 SI制	(插页)

绪 论

0-1 热能与机械能的转换

人类社会的发展,促使人们不断地开发和利用自然界的各种能源。风力、水力、燃料的化学能、太阳能、地下热能和原子核能等都是先后被人类利用来代替人力或畜力发展生产的自然界的能量资源。

就目前的技术水平,在现代以及今后相当长的时期内,主要能源将是矿物燃料(如煤、天然气、石油等)的化学能和原子能(铀核裂变),其次则是水力。地球上矿物燃料的储存量并不丰富,铀之来源亦不能满足日后(到 21 世纪)原子能反应堆的需要,水力则受地区和季节的限制。而核聚变(两个氘核,即重氢的聚融合)能产生非常巨大的能量,大海中储存的氘又极其丰富,能供人类使用上百亿年,可说是用之不尽的能源。根据现代科学技术的飞速发展,有人预计在不远的将来,可控核聚变可能成为人类利用的主要能源。

人们利用能量一般有两种方式。一种是转换为热能直接应用于生产与生活;另一种则是转换为机械能或电能用作动力。任何工业部门都需要动力,所以机械能或电能就显得特别重要。目前,机械能多半是由燃料的化学能转变为热能,再由热能转变而来。蒸汽动力装置、燃气轮动力装置和内燃机等都是实现能量转换藉以获得机械能或电能的成套设备。

图 0-1 为蒸汽动力装置的示意图。主要设备有锅炉、汽轮机、发电机、凝汽器、水泵等。图 0-2 为系统的示意图。

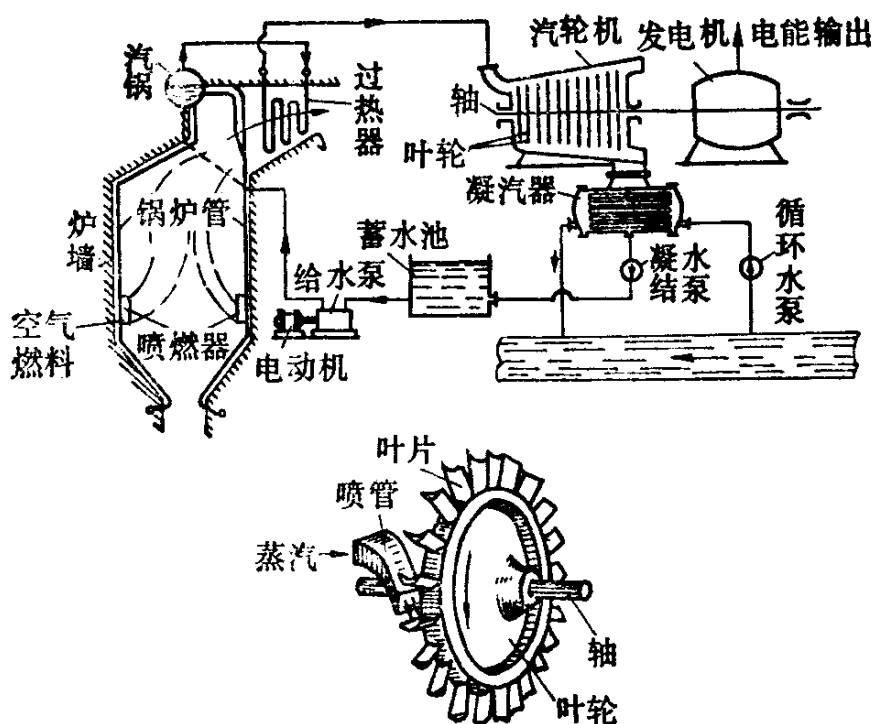


图 0-1 蒸汽动力装置流程图

燃料(煤或油)在锅炉炉膛内燃烧,生成高温烟气,使燃料的化学能转变为烟气所具有的热能。锅炉管内的水吸取烟气的热变为水蒸气。水蒸气在过热器中再次吸热进一步提高温度。由此,烟气的热能通过传热就变成水蒸气所具有的热能。这种高温高压的水蒸气进入汽轮机中,蒸汽的热能通过喷管而膨胀转变为动能,推动汽轮机转子上的叶片而做功,使汽轮机的轴转动。这种转动的机械能带动发电机而转变为电能。做功后的蒸汽在凝汽器中放热而凝结为水,再由给水泵将凝结水送回锅炉。冷却水则由循环水泵不断地送入凝汽器中吸热后排出。如此周而复始,就使燃料燃烧时放出的热能连续不断地转变为电能。显然,给水泵和循环水泵消耗了发电机发出的一部分电能。

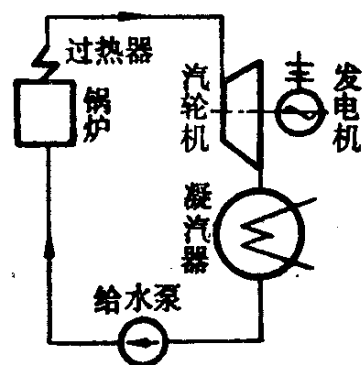


图 0-2 蒸汽动力装置流程示意图

内燃机也是使用最广泛，为人们所熟悉的一种动力装置。内燃机又有汽油机与柴油机之分。现以汽油机为例进行讨论，其主要组成部分如图 0-3 所示。燃料（油）和空气在气缸中混合，点火燃烧。由燃料的化学能转变而来的热能使燃气的温度和压力在瞬

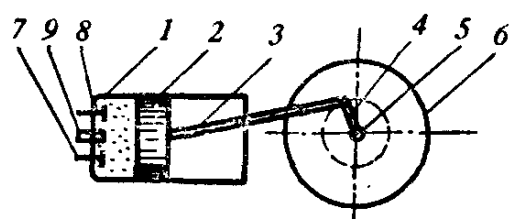


图 0-3 内燃机示意图

1—气缸；2—活塞；3—连杆；4—曲柄；
5—机轴；6—飞轮；7—进气阀；
8—排气阀；9—火花塞。

时急剧上升，大大高于周围环境的温度和压力。于是，燃气就膨胀推动活塞做功，通过连杆，曲柄机构使由热能转变而来的机械能储存于飞轮、并由飞轮所储存能量的一小部分使活塞逆行，将做功后的燃气排至大气环境。储存能量的大部分通过各种方式，或以机械能，或由机械能转变成电能传递出去。燃料和空气又重新进入气缸，这样循环不息地将燃料燃烧时放出的热能转变为机械能。

分析上述两种典型的不同的工作方式的动力装置，可归纳出如下一些普遍规律。

首先，在实现热能转变为机械能的过程中，蒸汽动力以蒸汽、内燃动力以燃气作为媒介。虽然用以实现热能转变为机械能的方式并不限于以上两种，但概括来看，无论何种动力装置，都必须借助一定的媒介物质才能实现能量转换，这是各种动力装置的共同之处。能量转换之所以必须以物质为媒介，其实质是由于运动和物质两者是不可分割的。运动是物质存在的一种形式，没有不运动的物质，也没有无物质的运动。而能量则是物质运动的量度，它表明物质运动的形式和运动强烈的程度，所以能量和物质也是不可分离的。上述所谓的热能是组成物质（以上两例中的蒸汽、燃气）的大量分子作杂乱而不规则运动所具有的能量，而机械能则是物质整体作规则（同向）运动所具有的能量。因此，能量转换就必须

以物质为媒介,工程上将实现能量转换的媒介物称之为工质。

其次,就我们所研究的动力装置的范围而言,欲使热能转变为机械能,必须通过工质的膨胀才能实现。如上述的内燃机中,具有大量热能的高温高压燃气,它的为数众多的分子作杂乱而不规则的运动,在空间各个方向具有相同的运动机会。但当在气缸内膨胀时,使这些分子在活塞的移动方向产生一个同向的规则运动,推动活塞而使部分热能转变为机械能,由活塞传出。至于蒸汽轮机中,蒸汽膨胀则在喷管内进行(见图 0-1)。高温高压蒸汽流经喷管时,压力及温度降低,流速增加,也即蒸汽的部分热能转变为高速汽流的动能(机械能)。高速汽流流出喷管后冲击叶片,转动叶轮而对外作功。此处虽和内燃机的工作方式有所不同,工质膨胀不是直接推动活塞,而是先将本身热能通过膨胀转变为动能,然后再传给叶片而作功,但就热能转变为机械能而言,仍然是通过工质的体积膨胀来实现的。正因为如此,所以一般的热力机械(或简称热机)都以气态物质为工质,如上述的蒸汽和燃气。这是由于在相同的压力及温度变化下,与固态、液态相比,气态物质的体积变化最大之故。

此外,如前所述,在蒸汽动力装置中,燃料在炉膛内燃烧,将化学能转变为烟气的热能。水从烟气中吸取热能变为高温高压的蒸汽,推动蒸汽轮机而作功,然后排入大气或凝汽器被冷却;在内燃机气缸内,则是燃料燃烧产生的热能使燃气温度及压力升高而推动活塞作功,然后排入大气被冷却。虽然两种热机使用的工质不同,燃料燃烧的处所也不同,但实现将热能不断地转变为机械能的经历却相同,即工质经历吸热、膨胀作功、放热、压缩等一系列变化。至于燃料的燃烧,推究其作用,无非是产生热能。对于工质而言,所吸取的热能由何而来并无关系,或从燃烧,或从其它物体传入,效果相同,故完全可用一个温度恒定的高温物体代替燃烧对