

# 工程热力学

朱明善 林兆庄 刘颖 彭晓峰

清华大学出版社

TK123

30

# 工程热力学

4-29/24  
朱明善 刘颖

林兆庄 彭晓峰



04



C0313601

清华大学出版社

**(京)新登字 158 号**

**图书在版编目(CIP)数据**

工程热力学/朱明善等编著. —北京:清华大学出版社,1994  
ISBN7-302-01721-2

I. 工… II. 朱… III. 工程热力学 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94)第 15226 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

责任编辑: 金文织

印 刷 者: 北京昌平环球印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 15.5 字数: 404 千字

版 次: 1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01721-2/TK·18

印 数: 0001—3000

定 价: 10.60 元

# 前 言

本书是根据高等工业学校“工程热力学课程教学基本要求”并参照清华大学五年制热能工程、空调、动力工程、内燃机械及反应堆热工等专业的教学大纲,在清华大学试用教材及多年教学实践的基础上修订而成的。

本书基本反映了我们在清华大学讲授“工程热力学”课程的教学内容,并吸收了国内外同类教科书的优点与经验。

在体系编排方面,本书将气体动力循环、水蒸汽和蒸汽动力循环以及制冷循环等几章紧接在热力学第一、第二定律之后,以便加深学生对基本定律的理解,能更好地掌握与运用基本定律。

在内容方面,本书力图对基本概念和基本理论部分进行严密而深入的论述,充实热力学基本定律的本质及其数学表达式。例如开口系统能量方程、熵的性质及熵方程、焓及焓的计算、热力学微分关系式及其应用等等内容,并且突出工程观点,使理论密切联系实际,注重培养学生运用热力学理论解决工程问题的能力。为适应学科发展的需要,本书还注意引进国内外科学研究的新成果与新技术,更新与充实了内容。例如,考虑到能源合理利用和节能工作的需要,本书深化了热力学第二定律及其分析方法的叙述,加强了物理焓与化学焓,焓分析、焓损失等概念;又如,结合全球环境保护的热点——臭氧层保护,着重介绍了环保方面对制冷工质提出的要求与挑战,首次在教材中引入了作为 CFC12 最有希望的替代物 HFC134a 的基本物性及我们自行开发的 HFC134a 的  $\ln p-h$  图;再如,较为详细地介绍了一种很有前景的吸附制冷技术的基本原理等。

在编写安排方面,本书尽量避免与物理化学等课程不必要的重复,但又注意保持相应的衔接。例如对理想气体状态方程、理想气体基本热力过程、理想混合气体等部分采用总结归纳的方法加以叙述,不从头推导。化学热力学部分中,对于化学反应方程式等反映质量守恒规律的内容,融合在化学热力学的整个叙述中,而不另列一节。这样,使本书在取材方面有一定的深度,起点较高。

为了帮助学生复习以及培养学生独立思考和解决问题的能力,本书每章附有例题、思考题和习题,这些题的针对性、启发性与工程性较强,并与正文内容配合较好。全书采用我国法定计量单位。

参加清华大学试用教材《工程热力学》编写工作的有朱明善(绪论、第3章、第9章与第10章)、林兆庄(第1章,第5章,第8章与第11章)、刘颖(第4章、第6章与第7章)、陈宏芳(第12章)和邓小雪(第2章)。此次修订成本书的过程中,绪论、第1、9与10章由朱明善改编;第2、3、4、6与7章由刘颖改编;第5、8与11章由林兆庄改编;第12章由彭晓峰改编。全书由朱明善统稿。

鉴于编者水平有限,难免疏漏与不妥之处,请读者指正。

编 者

1994 春节于清华园

# 主要符号表

## 拉丁字母

$A$	截面积
$a$	声速
$A_n, a_n$	总焓; 比焓
$C, c$	热容, 临界点; 质量比热容, 速度
$c_p, c_v$	定压比热容; 定容比热容
$C'$	容积热容
$C_m$	摩尔热容
$d$	比湿度, 汽耗率
$E, e$	总能; 比能
$E_k, E_p$	动能; 位能
$E_x, E_{xm}, e_x$	总焓; 摩尔焓; 比焓
$F, f$	亥姆霍兹函数; 比亥姆霍兹函数
$G, G_m, g$	吉布斯函数; 摩尔吉布斯函数, 比吉布斯函数
$\bar{g}_f$	标准生成吉布斯函数
$H, H_m, h$	总焓; 摩尔焓; 比焓
$\bar{h}_f$	标准生成焓
$[-\Delta H_f^l], [-\Delta H_f^g]$	低发热量; 高发热量
$i$	分子运动自由度
$K_p, K_x$	平衡常数
$k$	比热比
$M$	摩尔质量
$Ma$	马赫数
$m, \dot{m}$	质量; 质量流率
$n$	摩尔数, 准静态功的数目, 多变指数
$P$	功率

$p$	压力
$p_b, p_g, p_v$	大气压力;表压力;真空度
$Q, q$	传热量,反应热;单位质量的传热量
$Q_p, Q_v,$	定压过程传热量,定压热效应;定容过程传热量,定容热效应
$r$	汽化潜热
$R, R_m$	气体常数;摩尔气体常数
$S, S_m, s$	总熵;摩尔熵;比熵
$S_m^{\circ}, S_m^{\circ}(T)$	标准状态的绝对熵; $T/K, 101.325\text{kPa}$ 下的绝对熵
$T, t$	热力学温度;摄氏温度
$U, U_m, u$	总内能;摩尔内能;比内能
$V, V_m, v$	容积;摩尔容积;比容
$W, w$	容积变化功,闭口系统净功;比容积变化功,闭口系统比净功
$W_{\text{net}}, w_{\text{net}}$	开口系统净功;开口系统比净功
$W_s, w_s$	轴功;比轴功
$W_t, w_t$	技术功;比技术功
$x$	干度
$x_i$	摩尔成分
$Z$	压缩因子
$z$	高度

### 希腊字母

$\alpha$	抽汽量,离解度
$\alpha_v, \alpha_p$	弹性系数;定压热膨胀系数
$\beta_T, \beta_s$	定温压缩系数;绝热压缩系数
$\gamma_i$	容积成分
$\epsilon$	制冷系数,内燃机压缩比,反应度
$\epsilon'$	供热系数

$\eta, \eta_i$	效率, 热效率
$\eta_{oi}$	相对内效率
$\eta_v$	压气机容积效率
$\lambda$	内燃机定容增压比
$\mu$	化学势
$\mu_J$	焦-汤系数
$\gamma_{cr}$	临界压力比
$\pi$	作功能力损失或焓损失, 燃气轮机循环增压比
$\rho$	密度, 内燃机定压预胀比
$\sigma$	回热度, 表面张力
$\tau$	时间, 燃气轮机循环增温比
$\varphi$	相对湿度, 速度系数
$\omega$	质量成分
$\zeta$	能量损失系数

## 下 标

$a$	干空气
$c$	卡诺循环, 临界状态, 冷凝器; 压气机
$c.v$	开口系统或控制容积
$d$	露点
$ex$	焓
$f$	燃料, (焓)流
$g$	(焓)产, 气体
$i$	第 $i$ 种组元
$in$	进口条件
$iso$	孤立系统
$IR$	不可逆机
$l$	液体
$m$	混合加热内燃机循环
$max$	最大



min	最小
mix	混合
$n$	多变过程
opt	最佳
out	出口条件
$p$	定压, 定压加热内燃机循环
$P$	生成物, 水泵
$Q, q$	热量
$Q_0$	冷量
$R$	可逆循环, 朗肯循环, 反应物
$RG, RH$	回热循环; 再热循环
$r$	热源, 对比状态
rev	可逆
$s$	饱和状态, 定熵
$T$	定温
$tu$	管道
$U, u$	内能
$V, v$	定容; 水蒸汽, 定容加热内燃机循环
$w$	湿球
0	死态, 环境
1, 2	状态 1 与 2, 瞬时 1 与 2

## 上 标

' , "	饱和液; 饱和气
*	滞止状态
—	平均
•	单位时间的物理量
◦	环境参数, 标准态

# 目 录

主要符号表	(IX)
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	(3)
0-3 工程热力学的研究对象及其主要内容	(7)
0-4 热力学的研究方法	(8)
第 1 章 基本概念	(10)
1-1 热力系统	(10)
1-2 状态和状态参数	(13)
1-3 基本状态参数	(16)
1-4 平衡状态	(24)
1-5 状态方程、状态参数坐标图	(26)
1-6 准静态过程与可逆过程	(28)
1-7 功量	(32)
1-8 热量与熵	(37)
<del>1-9</del> 热力循环	(39)
思考题	(41)
习题	(41)
第 2 章 热力学第一定律	(45)
2-1 热力学第一定律的实质	(45)
2-2 储存能	(46)
2-3 闭口系统的能量方程	(48)

2-4	开口系统的能量方程 .....	(50)
2-5	稳定流动能量方程 .....	(56)
2-6	稳定流动能量方程的应用 .....	(62)
	思考题 .....	(66)
	习题 .....	(67)
<b>第3章</b>	<b>理想气体的性质与过程 .....</b>	<b>(73)</b>
3-1	理想气体状态方程 .....	(73)
3-2	热容 .....	(75)
3-3	理想气体的内能、焓和比热容 .....	(78)
3-4	理想气体的熵 .....	(84)
3-5	研究热力过程的目的和方法 .....	(86)
3-6	绝热过程 .....	(87)
3-7	基本热力过程的综合分析 .....	(91)
3-8	变比热容的可逆绝热过程 .....	(99)
3-9	气体的压缩 .....	(101)
3-10	活塞式压气机的过程分析 .....	(103)
	思考题 .....	(111)
	习题 .....	(114)
<b>第4章</b>	<b>热力学第二定律与熵 .....</b>	<b>(118)</b>
4-1	自然过程的方向性 .....	(118)
4-2	热力学第二定律的实质与表述 .....	(120)
4-3	卡诺循环与卡诺定理 .....	(123)
4-4	热力学温标 .....	(129)
4-5	熵的导出 .....	(133)
4-6	克劳修斯不等式 .....	(138)
4-7	不可逆过程熵的变化 .....	(141)
4-8	孤立系统熵增原理 .....	(146)
4-9	熵方程 .....	(151)
4-10	焓及其计算 .....	(154)

思考题 .....	(163)
习题 .....	(164)
<b>第 5 章 气体动力循环 .....</b>	<b>(170)</b>
5-1 活塞式内燃机动力循环 .....	(170)
5-2 活塞式内燃机各种理想循环的比较 .....	(181)
5-3 斯特林循环 .....	(185)
5-4 勃雷登循环 .....	(188)
5-5 提高勃雷登循环热效率的其他途径 .....	(196)
5-6 喷气发动机简介 .....	(202)
思考题 .....	(203)
习题 .....	(204)
<b>第 6 章 水蒸汽 .....</b>	<b>(208)</b>
6-1 纯物质的热力学面及相图 .....	(209)
6-2 汽化与饱和 .....	(211)
6-3 水蒸汽的定压发生过程 .....	(212)
6-4 水及水蒸汽状态参数的确定及其热力性质图表 .....	(216)
6-5 水蒸汽的热力过程 .....	(224)
思考题 .....	(229)
习题 .....	(230)
<b>第 7 章 蒸汽动力循环 .....</b>	<b>(232)</b>
7-1 概述 .....	(232)
7-2 朗肯循环 .....	(233)
7-3 实际蒸汽动力循环分析 .....	(242)
7-4 蒸汽再热循环 .....	(250)
7-5 回热循环 .....	(253)
7-6 热电联产循环 .....	(260)
思考题 .....	(261)
习题 .....	(262)

<b>第 8 章 制冷循环</b> .....	(264)
8-1 空气压缩制冷循环 .....	(265)
8-2 蒸气压缩制冷循环 .....	(270)
8-3 制冷剂 .....	(274)
8-4 吸收式制冷循环 .....	(278)
8-5 吸附式制冷循环 .....	(280)
8-6 热泵循环 .....	(283)
思考题 .....	(284)
习题 .....	(284)
<b>第 9 章 理想混合气体和湿空气</b> .....	(287)
9-1 混合气体的成分 .....	(287)
9-2 分压定律与分容积定律 .....	(290)
9-3 混合气体的参数计算 .....	(293)
9-4 在相同参数条件下理想气体绝热混合过程的熵增 .....	(297)
9-5 湿空气的性质 .....	(301)
9-6 湿空气的焓、熵与容积 .....	(305)
9-7 比湿度的确定和湿球温度 .....	(309)
9-8 湿空气的焓湿图与热湿比 .....	(313)
9-9 湿空气的基本热力过程 .....	(317)
思考题 .....	(324)
习题 .....	(325)
<b>第 10 章 热力学微分关系式及实际气体的性质</b> .....	(330)
10-1 研究热力学微分关系式的目的 .....	(330)
10-2 特征函数 .....	(331)
10-3 数学基础 .....	(334)
10-4 热系数 .....	(337)
10-5 熵、内能和焓的微分关系式 .....	(339)
10-6 比热容的微分方程 .....	(343)

10-7	克拉贝龙方程和焦-汤系数 .....	(347)
10-8	实际气体对理想气体性质的偏离 .....	(352)
10-9	维里方程 .....	(353)
10-10	经验性状态方程 .....	(355)
10-11	普遍化状态方程与对比态原理 .....	(359)
	思考题 .....	(368)
	习题 .....	(369)
<b>第 11 章</b>	<b>气体在喷管中的流动</b> .....	<b>(372)</b>
11-1	稳定流动基本方程式 .....	(372)
11-2	声速 .....	(375)
11-3	促进速度变化的条件 .....	(378)
11-4	喷管的计算 .....	(382)
11-5	有摩擦阻力的绝热流动 .....	(392)
11-6	定熵滞止参数 .....	(395)
	思考题 .....	(398)
	习题 .....	(399)
<b>第 12 章</b>	<b>化学热力学基础</b> .....	<b>(403)</b>
12-1	概述 .....	(403)
12-2	热力学第一定律在反应系统中的应用 .....	(405)
12-3	化学反应过程的热力学第一定律分析 .....	(415)
12-4	化学反应过程的热力学第二定律分析 .....	(424)
12-5	化学平衡 .....	(432)
12-6	热力学第三定律 .....	(444)
12-7	绝对熵及其应用 .....	(446)
	思考题 .....	(448)
	习题 .....	(449)
<b>习题答案</b>	.....	<b>(451)</b>

附录 .....	(462)
附表 1 各种单位制常用单位换算表 .....	(462)
附表 2 空气的热力性质表 .....	(464)
附表 3 气体的平均定压比热容 .....	(468)
附表 4 气体的平均定容比热容 .....	(469)
附表 5 气体的平均定压容积热容 .....	(470)
附表 6 气体的平均定容容积热容 .....	(471)
附表 7 某些理想气体的标准生成焓、焓和 101.325kPa 下的绝对熵 .....	(472)
附表 8 平衡常数的对数值( $\ln K_p$ ) .....	(476)
附图 1 HFC134a $\ln p-h$ 图	
附图 2 湿空气的 $h-d$ 图	
参考文献 .....	(477)

# 绪 论

## 0-1 热能及其利用

人类在生产和日常生活中,需要各种形式的能量。自然能源的开发和利用是人类社会进步的起点,而能源开发和利用的程度又是社会生产发展的一个重要标志。

所谓能源,是指提供各种能量的物质资源。自然界以自然形态存在的、可资利用的能源称为**一次能源**,主要有风能、水力能、太阳能、地热能、化学能和核能等,其中有些可直接加以利用,但通常需要经过适当加工转换后才能利用。由一次能源加工转换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,实质上是能量的传递和转换过程,大致如图 0-1 所示。

由图可见,在能量转换过程中,热能不仅是最常见的形式,而且具有特殊重要的作用。一次能源中除太阳能通过光电反应,化学能通过燃料电池直接提供电能以及风能、水力能直接提供机械能外,其余各种一次能源都往往要转换成热能的形式。据统计,经过热能形式而被利用的能量,在我国占 90%以上,世界其它各国平均超过 85%。因此,热能的开发利用对于人类社会的发展有着重要意义。

热能的利用,有以下两种基本方式:一种是热利用,即将热能直接用于加热物体,以满足烘干、采暖、熔炼等需要。这种方式的利用可追溯到几千年以前。另一种是动力利用,通常是指通过各种热能动力装置将热能转换成机械能或者再转换成电能加以利用,为人类的日常生活和工农业及交通运输提供动力。自从 18 世纪中叶



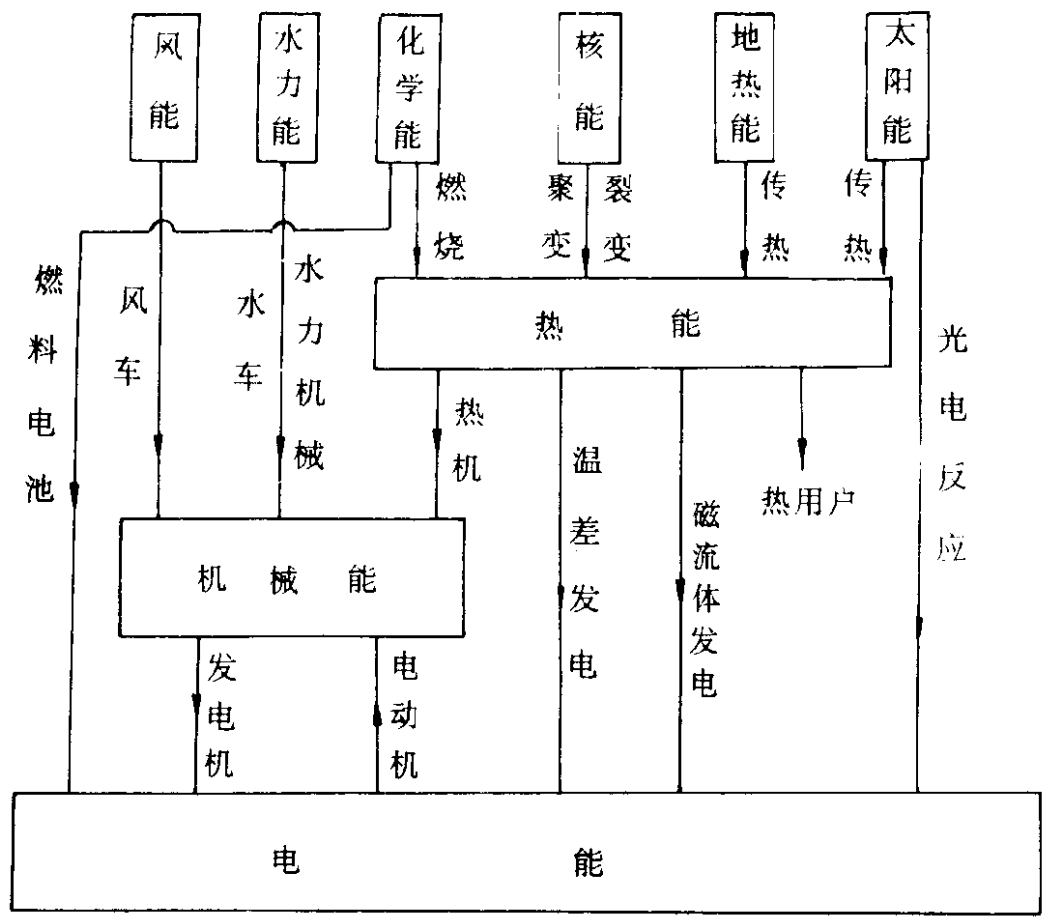


图 0-1

发明蒸汽机以来,至今仅 200 多年的历史,但却开创了热能动力利用的新纪元,使人类社会生产力和科学技术突飞猛进。由此可见热能动力利用的重要性。然而,热能通过各种热能动力装置转换为机械能的有效利用程度较低。早期蒸汽机的热效率只有 1%—2%。目前,燃气轮机装置的热效率大约只有 20%—30%,内燃机的为 25%—35%,蒸汽电站的也只有 40%左右。如何更有效地实现热能转换,是一个十分迫切而又重要的课题。尽管我国解放以来能源生产发展迅速,已成为世界第三能源大国,而且燃料资源比较丰富,但按人口占有量来说并不富足,特别是我国目前利用热能的技术水平,与世界上发达国家相比,还有很大差距。为了更加有效、更加经济地利用热能,促进国民经济的发展,需要掌握有关能量转换