

面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革推荐教材

热工基础与应用

傅秦生 何雅玲 赵小明 编著

 机械工业出版社
China Machine Press

中国工程教育认证协会 中国工程教育认证中心 中国工程教育认证委员会

加工基础与应用

主编 王德成 副主编 王德成 王德成 王德成



面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革推荐教材

热工基础与应用

傅秦生 何雅玲 赵小明 编著



机械工业出版社

本书围绕热能间接和直接有效利用所涉及的“工程热力学”和“传热学”内容进行了阐述。编者在对教育部下达的“面向 21 世纪热工课程内容和体系改革的研究和实践”项目进行深入研究的基础上,结合长期的教学经验编著了本书。本书力图在内容和体系上有较大的改革和新的突破,以满足“科教兴国”战略决策对高等教育的要求和适应新世纪人才培养的需要。本书在体系上打破了把“热工基础”严格分为“工程热力学”和“传热学”两篇的作法,还将热力设备、装置和循环等实际应用内容专门设置了“热工基础的应用”一章,以增强学生的工程应用的能力。本书在篇幅允许的范围内尽量介绍热工领域的新成果、新发展,以拓宽学生视野和增强学生的创新精神。为了帮助学生理解全书内容和培养学生的各种能力,每章例题几乎均有讨论。本书各章均附有启发性较强的思考题和丰富多样的习题,以满足教学的要求。

本书是参照《热工课程教学基本要求》编写的,可作为非动力能源类各专业本科生和动力能源类各专业大专生的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工基础与应用/傅秦生等编著. —北京:机械工业出版社, 2001.9
面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革推荐教材
ISBN 7-111-09204-X

I. 热… II. 傅… III. 热工学-高等学校-教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 051741 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:钱飒飒 版式设计:张世琴 责任校对:李汝庚
封面设计:方芬 责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·18.5 印张·1 插页·457 千字
0 001—4 000 册
定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

序

热现象是自然界与科学技术领域中最普遍的物理现象，热能是人类利用自然界能源的一种最主要的能量形式。我国能源资源丰富，但是人均占有量远低于世界平均水平，而目前我国单位产值的能耗却是发达国家的数倍。工程领域的技术工作都离不开能源，并且各种形式的能量最终都是以热能的形式散失到环境与宇宙之中。要使我国国民经济走可持续发展的道路，合理使用与节约能源是当务之急。因此作为介绍热能的有效合理利用及传递与转换规律的热工基础类课程应该成为培养 21 世纪工科类学生的一门公共技术基础课，学习本课程应是培养复合型工程技术人才科学素质的一个不可缺少的环节。以上基本观点是教育部面向 21 世纪“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”项目组经过近 5 年的研究论证所得出的一个重要结论。为了巩固执行《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》所取得的成果，进一步推动我国的教育改革，教育部又在 2000 年设立了《21 世纪初高等教育教学改革项目》，其中有“能源动力类人才培养方案改革研究与实践”项目。在该项目的研究内容中也进一步提出了要编写合适的热工基础教材的任务。

为了实现上述思想，需要对不同大类的专业编写出相应的教材。对能源动力类的学生，一般都单独开设工程热力学与传热学两门课程；而对量大、面广的非能源动力类专业的学生，急需一本精练的能将工程热力学与传热学的知识有机地结合起来的教材。本书的三位作者分别是上述两个项目研究组的成员，他们多年来在非能源动力类专业的热工基础课程教学中积累了丰富的经验，通过上述两个项目的研究，编写出了这本教材，以适应教学改革的需要。这本教材是两个项目组的重要研究成果之一。

与传统的热工基础教材相比，本书有其明显的特色。在取材上，内容新颖，具有时代气息。本书首先从能源概论开始，以高屋建瓴之势给学生以世界能源及我国能源利用情况的概貌，然后把重点放在热能的利用与转换传递规律上，作者特别重视在能源利用中的环境保护问题，并注意了恰当地引入热工科学技术中最新研究成果，娓娓道来，内容朴实，顺理成章；在编排体系上，本书打破了多年来把热工基础截然分为工程热力学与传热学两大部分的传统方法，而是围绕热能合理利用这根主线来组织与编排内容，使人顿觉面貌一新。这是迄今为止我国出版过的热工基础教材中的一种创新尝试，值得称道；在每章叙述的方式上作者也有改革，每个例题都有启发学生思维的讨论，往往可以收到举一反三、画龙点睛之妙。在每章的末尾都有思考题及具有工程应用背景的习题。显然这些努力把学生的能力与素质的培养潜移默化地体现在了课程的学习过程之中。

作为教育部及陕西省“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”项目的负

IV

责人及教育部“能源动力类人才培养方案改革研究与实践”项目的负责人，读到了项目组成员编写出来的内容新颖、富有特色的教材，非常高兴，写了以上这些话，作为对教材出版的祝贺，也以为序。

陶文铨
于西安交通大学

前 言

能源和材料、信息一样被视为现代工业和科学的三大支柱之一。能源的利用和发展关系着整个国民经济的发展，关系着整个人类的生产和生活。为了减少能源的大量消耗和能源利用工程中对环境日益严重的污染，使国民经济走可持续发展的道路，就必须合理用能和节能。节能已成为我国发展经济的一项战略方针而列入《中华人民共和国节约能源法》。

能源的开发和利用在很大程度上是热能的开发和利用。涉及热能利用的各种热力装置和热工设备不但在动力工业中，而且在几乎所有工业中都有，型式多样、五花八门。掌握一定的热工基础知识，在实际工作中采取有效的措施，节能降耗、保护环境，是每一个工程技术人员责任。尤其在科学技术突飞猛进的 21 世纪，学科交叉将不可避免，而且不断发展和深入，掌握一定的热工基础理论必然促进许多学科的发展和研究。对于从事机械、建筑、交通、电气、石油化工、经济、工业管理、力学和科技外语等方面的高级人才而言，热工领域的知识将是他们工程科学知识中不可缺少的重要组成部分，掌握合理用能的基本知识和理论是一个新世纪复合型人才所必需的重要素质。当然，对于动力能源类各专业的大专生，“热工基础与应用”是他们进一步学习专业课程的基础。这样，“热工基础与应用”类课程不单是技术基础课，而且是重要的提高素质的课程。因此，为使高等理工科学校非动力能源类各专业本科生掌握必要的热工基础知识，为使动力能源类各专业专科生具有坚实的热工理论基础，为使未来人才具有较高的素质和成为复合型人才，特编写此书。

本书是参照《热工课程教学基本要求》，在教育部下达的“面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革”计划中“热工课程教学内容和课程体系的研究与实践”项目研究的基础上，结合长期从事教学和科研的经验编写而成。编者力图使本书在内容和体系上有较大的改革和突破，以适应新世纪人才培养的需要。本书在体系上打破了把“热工基础”严格分为“工程热力学”和“传热学”两篇的作法，以热能的利用，包括直接利用和间接利用为线索，阐述热能利用中所涉及的基本概念、基本定律和基本理论。为增强学生的工程实践能力，将热力设备、装置和循环等实际应用内容专门设置了“热工基础的应用”一章。本书在篇幅允许的范围内尽量介绍热工领域的新成果、新发展，以拓宽学生视野。各章例题几乎均有讨论，以帮助学生理解所学内容和培养学生分析问题和解决问题的能力。本书中水和水蒸气热力性质部分，采用了我国学者严家驹教授等编制的《水和水蒸气热力性质图表》中的数据。

为使本书适用面广，编写中涉及内容相对较多，教师在授课时可根据不同专业的具体要求选取所需要的内容，以决定详授还是略讲。书中带有星标*的内容，可作为加深、加宽的内容。

本书由傅秦生主编，参加编写的有：傅秦生（第一章、第二章第二、三节、第三章），何雅玲（第二章第一节、第四章、第五章第七节）和赵小明（第五章第一~六及八节），最后由傅秦生统一定稿。陈钟顺教授审阅了全书，他的宝贵意见对提高本书质量起了极大的作用，编者深表谢意！编者对热工课程教学指导委员会主任陶文铨教授为本书作序表示衷心的感谢。

感谢！对北京林业大学张璧光教授和天津大学刘嘉智教授为本书提供的素材和帮助表示衷心的感谢！同时对西安交通大学热流中心的许多老师和同事在本书编写中给予的支持和帮助表示谢意！

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者不吝赐教。

编者

主要符号表

A	截面积, 表面积, (换) 传热面积	p	绝对压力
a	热扩散率 (导温系数)	p_b	大气压力, 背压
C	热容, 临界状态	p_g	表压力
C_0	黑体辐射系数	p_i	分压力
C_m	摩尔热容	p_s	饱和压力
$C_{p,m}$	摩尔定压热容	p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压力
$C_{V,m}$	摩尔定容热容	Q	热量
cop	工作性能系数	q	比热量, 热流密度
c	流速, 比热容	q_m	质量流量
c_a	声 (音) 速	q_v	体积流量
c_p	比定压热容	R	摩尔气体常数, 半径, 热阻, 电阻
c_V	比定容热容	R_g	气体常数
D	过热度	$R_{g,eq}$	折合 (平均) 气体常数
d	含湿量, 直径	r	半径, 汽化潜热, 单位面积热阻, 基本量纲数
d_e	当量直径	S	熵
d_{cr}	临界热绝缘直径	s	比熵
E	储存能 (总能量), 辐射力	T	热力学温度
$E_{n,Q}$	热量无效能	T_0, t_0	环境 (大气) 温度
$E_{x,Q}$	热量有效能	T_d, t_d	露点温度
E_λ	光谱辐射力	T_s, t_s	饱和温度
e	比储存能	t	摄氏温度
$e_{n,Q}$	比热量无效能	t_w	湿球温度
$e_{x,Q}$	比热量有效能	U	热力学能, 电位差
F	力, 作用力	u	比热力学能, 速度
G	投入辐射	V	体积
g	重力加速度	V_i	分体积
H	焓, 高度	V_m	摩尔体积
h	比焓, 表面传热系数	v	比体积
I	有效能损失 (焓损失), 电流	W	体积变化功 (膨胀功)
J	有效辐射	W_0	净功
k	传热系数, 波耳兹曼常数	W_c	压气机耗功
L	长度	W_f	流动功
l	特征长度, 长度	W_{sh}	轴功
M_{eg}	折合 (平均) 摩尔质量	W_t	技术功
M	摩尔质量, 马赫数	W_{tot}	总功
m	质量	w	比体积变化功 (比膨胀功)
n	多变指数, 物质的量		
P	功率, 周长		

w_0	比净功
w_f	比流动功
w_{sh}	比轴功
w_t	比技术功
w_{tot}	比总功
w_i	质量分数
X	角系数
x	干度, 笛卡儿坐标
x_i	摩尔分数
y	笛卡儿坐标
z	高度, 笛卡儿坐标
α	回热抽汽量, 吸收比
α_V	体积膨胀系数
α_λ	光谱吸收比
β	肋化系数
γ	比热比
δ	厚度, 绝对偏差
ϵ	制冷系数, 压缩比, 发射率 (黑度), 相对偏差
ϵ'	供热 (供暖) 系数
ζ	喷管能量损失系数
η	效率, 肋效率, (动力) 粘度
η_0	肋面总效率
η_C	卡诺循环效率, 卡诺因子
$\eta_{c,s}$	压缩机绝热效率
η_N	喷管效率
η_T	汽轮机、燃气轮机相对内效率
η_t	动力循环热效率
θ	过剩温度, 温度量纲
κ	等熵指数
λ	升压比, 热导率 (导热系数), 波长
ν	运动粘度
ν_{cr}	临界压比
ξ	能源消费弹性系数
Π	无量纲特征数
π	增压比
ρ	密度, 预胀比, 反射比
σ	斯忒藩-波耳兹曼常量
τ	时间, 粘性力, 穿透比
Φ	热流量
Φ_L	线热流量

φ	相对湿度, 喷管速度系数
φ_i	体积分
ψ	对数平均温差修正系数
Bi	毕渥数
Fo	傅里叶数
Gr	格拉晓夫数
Nu	努塞尔数
Pr	普朗特数
Re	雷诺数

主要下角标

a	干空气参数
ad	绝热系
B	锅炉
b	大气, 黑体
C	临界状态参数
c	卡诺循环, 冷凝
cr	临界流动状况参数
f	流体, 流动, (焓) 流, 液体参数
g	气体的参数, (焓) 产
H	高温 (热源) 的
HR	热源 (高温热源)
i, j, k	序号
iso	孤立系
k	动能
L	液体, 长度, 低温 (热源) 的
LR	冷源 (高温热源)
m	平均, 机械, 中心
max	最大
min	最小
o	环境参数, 滞止参数, 初始状态参数
opt	最佳
p	势能
p	定压过程物理量
re	可逆过程
s	定熵过程物理量
s	饱和状态
T	汽轮机, 燃气轮机
T	定温过程物理量
v	真空, 湿空气中蒸汽的物理量
V	定容过程物理量
w	水, 湿球温度, 壁面

目 录

序	
前言	
主要符号表	
第一章 能源概述	1
第一节 自然界的能源及其利用	1
一、能源及其分类	1
二、能源的利用与社会历史发展	2
三、能源与国民经济和人民生活	3
四、能源与环境	5
五、能源利用与人类社会的可持续发展	7
六、我国的能源与能源事业发展	8
第二节 热能的合理利用	10
一、热能的利用	10
二、热能利用的形式和热科学发展简史	10
第三节 热工基础的研究对象、内容和方法	12
一、热工基础的研究对象	12
二、热工基础的主要内容和研究方法	12
思考题	13
第二章 热能转换的基本概念和基本定律	15
第一节 热能转换的基本概念	15
一、热力系、状态及状态参数	15
二、热力过程、功量及热量	19
第二节 热力学第一定律	23
一、热力学第一定律及其实质	23
二、热力学能	24
三、热力学第一定律的一般表达式	24
四、闭口系的能量方程——热力学第一定律基本表达式	25
五、稳定流动系统的能量方程	27
六、能量方程的应用	30
第三节 热力学第二定律	34
一、热力过程的方向性	34
二、热力学第二定律的表述	36
三、卡诺循环和卡诺定理	36
四、状态参数熵	40
五、不可逆过程的熵变和熵流及熵产	41
六、孤立系的熵增原理	43
* 七、热量有效能及有效能损失	48
八、能量的品质与能量贬值原理	49
* 九、熵的物理意义	49
思考题	50
习题	51
第三章 热能转换物质的热力性质和热力过程	56
第一节 物质的三态及相变过程	56
第二节 理想气体的热力性质和热力过程	57
一、理想气体及其状态方程	57
二、理想气体的比热容	60
三、理想气体的热力学能和焓及熵	64
四、理想气体的混合物	68
五、理想气体的基本热力过程	72
六、理想气体的多变过程	78
第三节 蒸气的热力性质和热力过程	83
一、定压下水蒸气的发生过程	84
二、蒸气热力性质图表	86
三、蒸气的热力过程	89
第四节 湿空气	90
一、湿空气的状态参数	91
二、干湿球温度计	93
三、焓湿图 ($h-d$ 图)	93
四、湿空气的基本热力过程	94
思考题	96
习题	97
第四章 热量传递的基本理论	102
第一节 热量传递的三种基本方式简介	102

一、热传导	102	二、叶轮式压气机的工作原理及 耗功计算	193
二、热对流	103	三、多级压缩 级间冷却	194
三、热辐射	104	第三节 内燃机的基本构造及 循环	197
第二节 导热的基本定律及 稳态导热	105	一、内燃机的基本构造	197
一、导热的基本定律	105	二、汽油机的实际工作循环与 理想循环	197
二、一维稳态导热的计算	106	三、柴油机的实际工作循环与 理想循环	199
第三节 非稳态导热	116	第四节 燃气轮机装置及循环	201
一、概述	116	一、流程与设备	201
二、导热微分方程	117	二、定压加热理想循环	202
三、非稳态导热问题的求解及 诺谟图	119	三、有摩阻的实际循环	203
四、集总参数法	128	第五节 蒸汽动力装置及循环	205
* 第四节 导热问题的数值 求解基础	131	一、蒸汽动力装置	205
一、导热问题数值求解的基本思想	131	二、朗肯循环	208
二、稳态导热问题的数值计算	132	三、有摩阻的实际循环	210
三、非稳态导热问题的数值计算	136	四、再热循环	211
第五节 对流换热	140	五、抽汽回热循环	212
一、对流换热概述	140	第六节 制冷装置及循环	212
二、强制对流换热及其实验关联式	147	一、逆卡诺循环	213
三、自然对流换热及其实验关联式	155	二、蒸气压缩制冷装置及循环	213
四、凝结和沸腾时的对流换热	157	三、热泵	217
第六节 辐射换热	160	第七节 换热器及其热计算	217
一、热辐射的基本概念	160	一、换热器的种类	217
二、热辐射定律	161	二、传热过程	219
三、黑体间的辐射换热和角系数	164	三、换热器的热计算	226
四、灰体表面间的辐射换热	168	四、传热的强化和削弱	232
思考题	174	第八节 其他应用简介	234
习题	175	一、核能发电	234
第五章 热工基础的应用	181	二、磁流体发电	235
第一节 喷管和扩压管	181	三、太阳能热利用	237
一、一维稳定流动的基本方程	182	四、除湿干燥装置	239
二、声速和马赫数	183	五、热管	239
三、气体在喷管和扩压管中的定熵 流动	183	六、燃料电池	240
四、喷管的计算	185	七、半导体制冷	241
五、喷管内有摩阻的绝热流动	189	思考题	242
六、扩压管的计算与滞止参数	190	习题	244
第二节 压气机	191	参考文献	248
一、单级活塞式压气机的工作过程 及耗功计算	191	附录 A	249
		附录 A-1 常用单位换算表	249

附录 A-2	常用气体的热力特性	250	附录 A-11	保温和建筑及其他材料的密度和热导率	271
附录 A-3	理想气体的摩尔定压热容公式	250	附录 A-12	几种保温和耐火材料的热导率与温度的关系	272
附录 A-4a	气体的平均比定压热容 $c_p _{\theta}$	251	附录 A-13	干空气的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	272
附录 A-4b	气体的平均比定容热容 $c_v _{\theta}$	252	附录 A-14	饱和水的热物理性质	273
附录 A-5	气体的平均比热容 (直线关系式)	252	附录 A-15	干饱和水蒸气的热物理性质	274
附录 A-6a	饱和水与饱和水蒸气热力性质表 (按温度排列)	253	附录 A-16	几种饱和液体的热物理性质	275
附录 A-6b	饱和水与饱和水蒸气热力性质表 (按压力排列)	255	附录 A-17	几种气体的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	277
附录 A-7	未饱和水和过热蒸汽热力性质表	257	附录 A-18	常用材料的表面 (法向) 发射率	277
附录 A-8a	氟里昂 134a 饱和性质表 (按温度排列)	264	附录 A-19	双曲函数表	278
附录 A-8b	氟里昂 134a 饱和性质表 (按压力排列)	265	附录 B		279
附录 A-9	氟里昂 134a 过热蒸气热力性质表	266	附录 B-1	湿空气焓湿图 ($p_b = 0.1 \text{MPa}$)	279
附录 A-10	金属材料的密度和比热容及热导率	269	附录 B-2	氨 (NH_3) 的压焓图	280
			附录 B-3	R134a 的压焓图	281
			附录 B-4	R12 的压焓图	282
			附录 B-5	水蒸气的焓熵图	插页

第一章 能源概述

第一节 自然界的能源及其利用

翻开人类的发展史，不难看到人类社会的发展与人类对能源的开发、利用息息相关。能源的开发和利用水平是衡量社会生产力和社会物质文明的重要标志，而且关系着社会可持续发展和社会的精神文明建设。

掌握和了解能源的基本知识，不但对能源动力类的专业人才是必需的，而且对于机械、建筑、力学、工业企业管理和科技外语等专业人才培养和未来发展也是不可缺少的。尤其在已经开始的 21 世纪，为培养和造就具有创造性的复合人才和全面提高各类人才的科学素质，掌握能源知识是十分必要的。

一、能源及其分类

所谓能源是指可向人类提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止，由自然界提供的能源有：水力能、风能、太阳能、地热能、燃料的化学能、原子核能、海洋能以及其他一些形式的能量。能源可以根据来源、形态、使用程度和技术、污染程度以及性质等进行分类。

（一）按来源分

根据来源，能源大致可分为三类：第一类是来自地球以外的太阳辐射能。除了直接的太阳能外，煤炭、石油、天然气以及生物能、水力能、风能和海洋能也都间接地来源于太阳能。第二类是来自地球本身的能量。一种是以热能形式储存于地球内部的地热能（如地下蒸汽、热水和干热岩体）；另一种是地球上的铀、钍等核燃料所具有的能量，即原子核能。第三类则是来自月球和太阳等天体对地球的引力，而以月球引力为主，如海洋的潮汐能。

（二）按形态分

能源可按其有无加工、转换分为一次能源和二次能源。一次能源是自然界现成存在、可直接取得而未改变其基本形态的能源，如煤炭、石油、天然气、水力能、风能、海洋能、地热能和生物能等。一次能源中又可根据能否再生分为可再生能源和非再生能源：可再生能源是指那些可以连续再生，不会因使用而逐渐减少的能源。这类能源大都直接或间接来自太阳，如太阳能、水力能、风能、地热能等；非再生能源是指那些不能循环再生的能源，它们会随着人类不断地使用而逐渐减少，如煤炭、石油、天然气和核燃料等。

由一次能源经过加工转换成另一形态的能源称为二次能源，如电力、焦炭、煤气、沼气、氢气、高温蒸汽、汽油和柴油等各种石油制品等。

（三）按使用程度和技术分

在不同历史时期和不同科技水平条件下，能源使用的技术状况不同，从而可将能源分为常规能源和新能源。常规能源是指那些在现有技术条件下，人们已经大规模生产和广泛使用的能源，如煤炭、石油、天然气和水力能等。新能源是指目前科技水平条件下尚未大规模利用或尚在研究开发阶段的能源，如太阳能、地热能、潮汐能、生物能、风能和原子核能等。

常规能源与新能源的分类是相对的，例如，原子核能在我国属新能源，因为将核裂变产生的原子能作为动力（主要应用于发电）在我国还时间不长，还有一些技术是引进的，有一些新的问题尚待解决，目前还未成为成熟而常用的常规能源。但在发达的西方国家和俄罗斯应用核裂变作为动力和发电已经成为成熟技术，并得到广泛应用，因此核能即将或已成为常规能源。然而，如果考虑和平利用核聚变作为能源，则无论在我国还是在工业发达国家都有大量技术问题要解决，从这个意义上讲，核能仍被视为新能源。即使是一般意义上的常规能源，当研究利用新的技术进行开发时又可被视为新能源。如磁流体发电，利用的燃料仍是常规的煤、石油和天然气等，和常规火电厂不同的是将气体加热成高温等离子体通过强磁场而直接发电，此时的常规燃料又是新能源。又如风能和沼气亦是如此。

（四）按污染程度分

按对环境的污染程度，能源又可分为清洁能源和非清洁能源。无污染或污染很小的能源称为清洁能源，如太阳能、风能、水力能、氢能和海洋能等。对环境污染大或较大的能源称为非清洁能源，如煤炭和石油等。

（五）按性质分

能源按本身性质可分为含能体能源和过程性能源。含能体能源是指集中储存能量的含能物质，如煤炭、石油、天然气和核燃料等。而过程性能源是指物质运动过程产生和提供的能量，此种能量无法储存并随着物质运动过程结束而消失，如水力能、风能和潮汐能等。

还有一些其他分类方法和基准。但对于能源工作者而言，更多的是采用一次能源和二次能源的概念，着眼于一次能源的开发和利用，并按常规能源和新能源进行研究，这样的分类见表 1-1。

表 1-1 能源分类

类别	常规能源	新能源
一次能源	煤、石油、天然气、水力能等	核能、太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能等
二次能源	煤气、焦炭、汽油、柴油、液化石油气、电力、蒸汽等	沼气、氢能等

二、能源的利用与社会历史发展

从能源利用的观点看，人类社会历史发展经历了三个不同的能源时期，而这三个不同时期都与人类社会生产力的发展密切地联系在一起。这三个时期是：薪柴时期，煤炭时期和石油时期。

古代人类从“钻木取火”开始，就开始了能源利用的第一个时期——薪柴时期。在这一时期，人类以薪柴、秸秆和部分动物的排泄物作为燃料，用于熟食和取暖。恰恰是由于熟食，使人类自身进化有了长足的发展。在这个时期，人类除了利用薪柴等作为能源进行食物加工、取暖和生产（陶瓷加工和冶炼金属等）外，同时以人力、畜力和一小部分简陋的风力和水力机械作为动力，从事一些生产活动。由于以薪柴等生物燃料为主要能源，能源使用水平低下，因而社会生产力水平和人类生活水平都很低，社会发展缓慢。这一时期由于能源的结构和利用长期不能得到根本的变革，从而使薪柴时期延续了相当长的时间。在中国可以说从远古一直到清王朝的几千年都属于这一时期。

18 世纪工业革命开创了煤炭作为主要能源的第二个时期——煤炭时期。在这一时期，蒸汽机成为生产的主要动力，从而促进了工业迅速发展，劳动生产力得到了极大解放，生产

水平有了显著提高。特别是在 19 世纪后期出现了电能，由于它具有易于传输、能方便地转变为光、热和机械能的特点，使电能的应用突飞猛进，并进入到社会的各个领域。电动机代替蒸汽机成为工矿企业的基本动力，电灯代替油灯和蜡烛成为生产和生活照明的主要光源，社会生产力有了大幅度的增长。随着各种电器的出现，人们的物质和精神文明生活也有了极大提高，从根本上改变了人类社会的面貌。

石油资源的发现和开发开始了能源利用的新时代。尤其是 20 世纪 50 年代，在美国、中东和北非等地区相继发现了巨大的油田和气田后，工业发达国家很快从以煤炭作为主要能源转换到以石油、天然气作为主要能源，开始了人类能源历史的第三个时期——石油时期。到 20 世纪 50 年代中期，世界石油和天然气的消费超过了煤炭，成为世界能源的主力。这是继薪柴向煤炭转换后能源结构变化上的又一里程碑。随着石油、天然气的开发利用和内燃机械的快速发展，使汽车、飞机、内燃机车和远洋客货轮这些以石油制品为能源动力的交通工具也迅猛发展，不但缩短了地区和国家间的距离，也促进了世界经济的发展和繁荣。近 30 年来，世界上许多国家依靠石油、天然气以及蓬勃发展的电力，创造了人类历史上空前的物质文明。

进入 21 世纪，随着可控热核反应的实现，核能将成为世界能源的重要角色，同时随着煤炭清洁化技术的开发和利用，一个清洁能源的时代也将随之而来，并将迎来又一个能源变革新时代。世界将变得更加繁荣，人类生产和生活将会得到更大的提高。

从人类所经历的三个能源时期不难看出，能源和人类历史发展的密切关系。

三、能源与国民经济和人民生活

能源的开发和利用，不但推动着社会生产力发展和社会历史的进程，而且与国民经济发展的关系密切。首先，能源是现代生产的动力来源，无论是现代工业还是现代农业都离不开能源动力。现代化生产是建立在机械化、电气化和自动化基础上的高效生产，所有生产过程都与能源的消费同时进行着。例如：工业生产中，各种锅炉和窑炉要用煤、石油和天然气；钢铁和有色金属冶炼要用焦炭和电力；交通运输需要各种石油制品和电力。现代农业生产的耕种、灌溉、收获、烘干和运输、加工等都需要消耗能源。现代国防也需大量的电力和石油。其次，能源还是珍贵的化工原料。以石油为例，除了能提炼出汽油、柴油和润滑油等石油产品外，对它们进一步加工可取得五千多种有机合成原料。有机化学工业的八种基本原料：乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯、乙炔和萘，主要来自石油。这些原料经过加工，便可得到塑料、合成纤维、化肥、染料、医药、农药和香料等多种多样的工业制品。此外，煤炭、天然气等也是重要的化工原料。

由此可以看到一个国家的国民经济发展与能源开发和利用的依存关系，可以说没有能源就不可能有国民经济的发展。对世界各国经济发展的考察表明，在经济正常发展情况下，一个国家的国民经济发展与能源消耗增长率之间存在正比例关系。这个比例关系通常用能源消费弹性系数 ξ 表示：

$$\xi = \frac{\text{能源消费的年增长率}}{\text{国民经济生产总值的年增长率}}$$

表面上看该系数关系简单，其值越小越好。但实际上影响弹性系数的因素较多，较复杂。一个国家的能源消费弹性系数与该国的国民经济结构、国民经济政策、生产模式，能源利用率、产品质量，原材料消耗、运输以及人民生活需求等诸多因素有关。尽管各国实际情况不

同，但只要处于类似的经济发展阶段，就具有相近的能源消费弹性系数。一般而言，发展中国家的该值大于1，工业发达国家的该值小于1。表1-2列出了包括我国在内的世界几个主要国家的能源消费和经济发展概况。

能源消费弹性系数不但反映了能源与国民经济发展之间的关系，而且利用它可以预测未来国民经济发展中能源需求和供应之间的关系，以便在制定国民经济发展规划时进行综合平衡。

表 1-2 世界主要国家能源消费概况

序号	国家	1993年 GDP ^① /亿美元	1980~1993 年GDP年 增率(%)	1980~1993年 能源消耗年 增率(%)	1980~1993年 能源消费 弹性系数	1993年 人口 /万人	1993年人均 能源消费 /kg
1	美国	62599	2.7	1.4	0.52	25780	7918
2	德国	19108	2.6	—	—	8070	4170
3	法国	12517	2.1	2.0	0.95	5750	4031
4	英国	8190	2.5	1.0	0.40	5790	3718
5	加拿大	4775	2.6	1.5	0.58	2880	7821
6	俄罗斯	3294	-0.5	—	—	14870	4438
7	日本	42142	4.0	2.7	0.68	12450	3642
8	韩国	3308	9.1	9.5	1.04	4410	2863
9	中国	4256	9.6	5.1	0.53	117840	623
10	巴西	4442	2.1	3.7	1.76	15650	666
11	墨西哥	3435	1.6	3.1	1.94	9000	1439
12	阿根廷	2556	0.8	1.1	1.38	3380	1351
13	印度	2254	5.2	6.7	1.29	89820	242
全世界		231126	2.9	—	—	550150	1421

① GDP为国民生产总值。

发展生产和国民经济需要能源，其重要目的是不断改善人民生活。在某种程度上可以说是用能源换取粮食和其他农作物，用能源直接或间接地保证人民的生活质量。在人们的生活中，不仅衣、食、住和行需要能源，而且文教卫生、各种文化娱乐等都离不开能源。随着人们生活水平的不断提高，所需的能源数量、形式和质量愈来愈多和愈高。一般而言，从一个国家的能源消耗状况可以看出一个国家人民的生活水平。例如：生活富裕的北美地区的年人均能耗比贫穷的南亚地区要高出55倍。根据不同的发展水平，现代社会生活需要消耗的能源大致有三种：

(1) 维持生存所必需的能源消费量，每人每年约400kg标准煤(1kg标准煤等于 29.3×10^6 J)。这是以人体的需要和生存可能性为依据得到的，这个量只能维持最低生活的需要。

(2) 现代化生产和生活最低限度的能源消费量，每人每年约1200~1600kg标准煤。这是保证人们能够丰衣足食，满足最起码的

表 1-3 现代化生活最低的能源消费量 (单位: kg 标准煤/人·年)

项目	国外提出的现代化最低标准	中国式现代化的标准
衣	108	70~80
食	323	300~320
住	323	320~340
行	215	100~120
其他	646	440~460
合计	1615	1230~1320