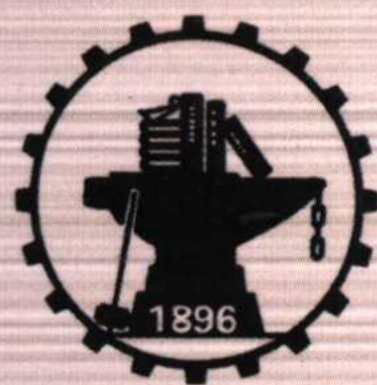




研究生教材

能量系统的热力学分析方法

傅秦生 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

研究生教材

能量系统的热力学分析方法

傅秦生 编著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书是在作者长期从事研究生“高等工程热力学”教学与科研工作基础上编著而成的。全书以能源利用和节能为主要线索,分四篇介绍也包括有限时间热力学、炯分析法、能级分析法、热经济学和夹点技术等能量系统的多种热力学分析方法,以及这些方法在工程实际中的应用。

在全书中,为加强本学科基本理论和基础知识而设立了第一篇,它包括基本概念、基本定律和热力学基本研究方法,根据知识的有机分类将有限时间热力学放在了该篇。在第二篇炯分析法的阐述中,将与炯有关的能级分析方法放在了该篇,并对不可避免的炯损失进行了较详尽的分析。第三篇不仅介绍了热经济学原理,而且针对理工科研究生的特点,对属微观经济学中的工程经济学有关内容多费了些笔墨。在第四篇中,鉴于夹点技术的内容多且实践性强,作为热力学方法仅讲述了主要的内容。

本书可以作为高等院校能源、动力和化工等专业的研究生教材,亦可供相关专业的本科高年级学生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能量系统的热力学分析方法/傅秦生编著. —西安:西安交通大学出版社,2005.7
ISBN 7-5605-1944-X

I. 能... II. 傅... III. 动力装置-热力学-分析
IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005) 第 000076 号

书 名	能量系统的热力学分析方法
编 著	傅秦生
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668315 82669096(总编办) (029)82668357 82667874(发行部)
印 刷	西安交通大学印刷厂
字 数	465 千字
开 本	787mm×1092mm 1/16
插 页	2
印 张	19.125
版 次	2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5605-1944-X/TK·89
定 价	35.00 元

版权所有 侵权必究



傅秦生，男，西安交通大学能源与动力工程学院教授，1948年7月出生。现任中国能源研究会热力学与工程应用专业委员会委员，中国电机工程学会地热发电委员会委员。1982年硕士研究生毕业并获工学硕士留校至今，一直从事“工程热力学”、“热工基础”、“传热学”和“高等工程热力学”等本科生和研究生的教学工作；长期进行焓分析、热经济学、有限时间热力学和热力循环研究。主持负责完成部委级科研项目一项，属“863”的科研项目一项，自然科学基金一项以及横向科研项目多项。目前正从事研究“973”国家重点基础科研项目“高效节能的科学关键问题”的子项目之一。主持负责完成教改项目多项，主编并出版教材三本。发表科研与教学论文共计50余篇，多篇被SCI、EI收录。曾荣获国家优秀教学成果特等奖（集体）一项，省优秀教学成果壹等奖、校优秀教学成果壹等奖及优秀教材特等奖等八项。



研究生教材

“研究生教材”总序

研究生教育是我国高等教育的最高层次,是为国家培养高层次人才。他们必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识,以及从事科学研究工作或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位课程和学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是研究生培养中的重要环节。为此,我们组织出版这套“研究生教材”,以满足当前研究生教学,主要是公共课和一批新型的学位课程的教学需要。教材作者都是多年从事研究生教学工作,有着丰富教学和科学研究经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要,充分反映国内外的最新学术动态,使研究生学习之后,能迅速接近当代科技发展的前沿,以适应“四化”建设的要求;其次,也注意到研究生公共课程和学位课程应有它最稳定、最基本的内容,是研究生掌握坚实的基础理论和系统的专门知识所必要的,因此在研究生教材中仍应强调突出重点,突出基本原理和基本内容,以保持学位课程的相对稳定性和系统性,内容有足够的深度,而且对本门课程有较大的覆盖面。

这套“研究生教材”虽然从选题、大纲、组织编写到编辑出版,都经过了认真的调查论证和细致的定稿工作,但毕竟是第一次编辑这样的高层次教材系列,水平和经验都感不足,缺点与错误在所难免。希望通过反复的教学实践,广泛听取校内外专家学者和使用者的意见,使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院
西安交通大学出版社

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过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,国家为此专门颁布了《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,因此节约能源在很大程度上就是节约热能。以研究热能和机械能转换基本规律为主要内容、以提高能量利用经济性为主要宗旨的“工程热力学”,在节能的研究中起着举足轻重的作用。在本科生阶段,学生通过“工程热力学”的学习,已掌握了热力学分析的基本方法——热力学第一定律的能量分析法和热力学第二定律的熵分析法。然而,随着科学技术的发展和热力学研究的不断深入,以及节能要求的不断提高,就需要进一步掌握能量系统分析研究的各种热力学方法,以解决科学研究和工程实践中的各种问题。尤其对于能源、动力和化工机械等专业的研究生和科技人员而言,掌握能量系统的各种热力学分析方法更为必要。为此,作者专门编写了作为“高等工程热力学”基本和主要内容之一的本书,希望在能量分析法和熵分析法的基础上,向研究生和广大热工研究及工程技术人员介绍焓分析法、能级分析法、热经济学、夹点技术和有限时间热力学等能量系统的各种热力学分析方法,以及这些方法在工程实践中的应用。

本书是作者在长期从事研究生“高等工程热力学”教学和科研工作的基础上编著的,凝聚了作者在“高等工程热力学教学内容体系的改革与创新”中的主要研究成果。在本书的编著过程中,得到了西安交通大学能源与动力工程学院热流中心专家、教授和同事们的支持与帮助,在此向他们表示衷心的感谢。尤其是我的导师苏长荪教授(已故)、老师谭连城教授、刘桂玉教授、赵冠春教授和钱立伦教授的著作^[1,2],对本书的编著具有极大的参考作用。在此,特向谭连城教授、刘桂玉教授、赵冠春教授和钱立伦教授表示衷心感谢,并以此书缅怀我的导师苏长荪教授。

西安交通大学能动学院化学工程系的冯霄教授审阅了全书,给予了热情真挚的帮助,提出了许多建设性的宝贵意见,这些意见对提高本书质量起了很大的作用,在此向冯霄教授表示诚挚的谢意。

最后,还要感谢我贤良的妻子在本书编著过程中对我的全力支持和帮助!

由于作者水平有限,加之写作时间仓促,因而书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

编著者

2005年6月于西安交通大学

主要符号表

A	面积;等额年金;等额支付额	e_x	比有效能,比炯
A_n	无效能,熵	$e_{x,D}$	比扩散炯
a_n	比无效能,比熵	$e_{x,H}$	比焓炯
$A_{n,Q}$	热量无效能,热熵	$e_{x,L}$	比有效能损失,比炯损失
$a_{n,Q}$	比热量无效能,比热熵	$e_{x,M}$	比机械能炯
C	热容;成本	$e_{x,R}$	比反应炯
C_m	摩尔热容	$e_{x,Q}$	比热量有效能,比热炯
$C_{p,m}$	摩尔定压热容	$e_{x,U}$	比热力学能炯
$C_{V,m}$	摩尔定容热容	$e_{x,W}$	比机械功炯
C_T	投资总额、总成本	F	亥姆霍兹函数(自由能);作用力;费用;未来值
C_F	固定资产投资、固定成本	F_f	残值
C_V	可变投资、可变成本	F_Y	年度化费用,年度化成本
C_0	初投资	F_G	总本利和
cop	工作性能系数	f	阻力系数
c	流速;比热容	G	吉布斯函数(自由焓);总成本
c_p	比定压热容	G_m	摩尔吉布斯函数(自由焓)
c_V	比定容热容	g	重力加速度;比吉布斯函数(自由焓)
D	产量;壳径	H	焓;高度
d	直径	h	比焓;表面传热系数
E	储存能(总能量)	I	有效能损失,炯损失
E_x	有效能,炯	i	比炯损失;利息,利率
$E_{x,D}$	扩散炯	K	化学反应平衡常数
$E_{x,H}$	焓炯	k	传热系数;波耳兹曼常数
$E_{x,L}$	有效能损失,炯损失	L	长度
$E_{x,M}$	机械能炯	M	摩尔质量
E_{xm}	摩尔炯	m	质量
$E_{xm,L}$	摩尔炯损失	n	物质的量(摩尔数);使用年限
$E_{x,R}$	反应炯	P	功率;资金现值
$E_{x,Q}$	热量有效能,热炯	P_N	无因次功率
$E_{x,U}$	热力学能炯	p	绝对压力
$E_{x,W}$	机械功炯	p_0	大气(环境)压力
e	比储存能		

p_b	背压	W_{sh}	轴功
p_i	分压力	W_t	技术功
p_r	相对压力	W_{tot}	总功
p_s	饱和压力	w	比体积变化功(比膨胀功)
p_v	真空度;湿空气中水蒸气分压力	w_A	比有用功
Q	热量,反应热	W_O	比净功
Q_h	高热值	w_{sh}	比轴功
Q_l	低热值	w_t	比技术功
Q_p	定压热效应	w_{tot}	比总功
Q_v	定容热效应	w_i	质量分数
q	比热量	x_i	摩尔分数
q_m	质量流量	z	高度
q_v	体积流量		
R	摩尔气体常数	Nu	努塞尔数
R_g	气体常数	Pr	普朗特数
R_Q	无因次制冷率	Re	雷诺数
r	理论折旧率;折旧率		
S	熵	ΔH_c^0	标准燃烧焓
S_m	摩尔熵	ΔH_f^0	标准生成焓
S^0	绝对熵	ΔG	生成吉布斯函数(自由焓)
S_0^T	温度熵	ΔG_f^0	标准生成吉布斯函数(自由焓)
s	比熵	ΔG_T^0	标准化学势差
T	热力学(绝对、开尔文)温度	ΔT_m	对数平均温差
T_0, t_0	环境(大气)温度	γ	比热容比
T_s, t_s	饱和温度	δ	厚度;绝对偏差
$\bar{T}$	平均温度	ε	制冷系数;相对偏差;环境温度修正系数
t	摄氏温度	ε'	供热(供暖)系数
U	热力学能;换热单元数	η	效率
u	比热力学能;速度	η_c	卡诺循环效率;卡诺系数
V	体积	$\eta_{c,s}$	压缩机绝热效率
V_f	流速;迎面风速	η_{e_x}	炯效率
V_w	水速	η_T	汽轮机、燃气轮机相对内效率
V_i	分体积	η_t	动力循环热效率
V_m	摩尔体积	κ	等熵指数
v	比体积	λ	热导率(导热系数)
W	体积变化功(膨胀功)	μ	化学势
W_A	有用功	ν	运动粘度
W_O	循环净功	ζ	能源消费弹性系数,炯损失系数
W_C	压气机耗功		

ζ_{Ω}	能级系数
σ	表面张力;回热度
σ_s	无因次熵产率
ρ	密度
τ	时间;投资回收期
Φ	热流率(量)
Ω	能级

主要下角标

a	干空气参数;空气参数
ad	绝热系
B	锅炉;燃烧室
c	卡诺循环
C	压缩机
en	环境
f	流体;流动;(熵)流
g	气体的参数;(熵)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(低温热源)
M	机械
max	最大
min	最小
O	循环
opt	最佳
p	势能;水泵
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	定容过程物理量
v	真空;蒸汽的物理量
0	环境参数

目 录

前言

主要符号表

绪论——能源、节能与工程热力学

1 能源及其分类	(1)
2 能源与社会发展、国民经济和人民生活的关系	(2)
3 能源与环境	(4)
4 能源利用与人类社会的可持续发展	(6)
5 我国的能源与能源事业发展	(7)
6 热能的利用	(9)
7 热能的利用与工程热力学	(10)
8 热力学的分析方法	(10)

第 1 篇 热力学的基础知识和基本分析方法

第 1 章 基本概念	(15)
1.1 热力系统及其描述	(15)
1.2 平衡状态及稳定平衡状态	(22)
1.3 准平衡过程和可逆过程	(27)
第 2 章 热力学第一定律	(31)
2.1 热力学第一定律的一般关系式	(31)
2.2 热力学第一定律的一般表达式和基本表达式	(31)
2.3 开口系统能量方程的一般表达式	(32)
第 3 章 热力学第二定律和熵	(42)
3.1 热力学第二定律与热力学发展史	(42)
3.2 卡诺循环与卡诺定理	(45)
3.3 熵参数	(46)
3.4 熵产与不可逆损失计算	(48)
3.5 能量贬值原理和熵方程的一般关系式	(50)
3.6 熵的宏观物理意义	(51)
第 4 章 化学热力学	(57)
4.1 化学反应的热力学第一定律分析	(57)
4.2 热力学第二定律的分析	(61)

4.3	化学反应的平衡常数	(66)
4.4	热力学第三定律	(69)
第5章	有限时间热力学简介	(72)
5.1	概述	(72)
5.2	内可逆卡诺循环的效率	(72)
5.3	内可逆卡诺热机工质与热源间的最佳温差	(74)
5.4	内可逆逆循环工质与热源间的最佳温差	(78)
第1篇习题		(82)

第2篇 能量系统的熵分析方法

第6章	物理熵	(87)
6.1	能量和熵	(87)
6.2	自然环境和环境状态	(88)
6.3	机械熵	(89)
6.4	热量熵和冷量熵	(90)
6.5	闭口系统工质的熵——热力学能(内能)熵	(93)
6.6	稳定流动系统工质的熵(焓熵)	(98)
6.7	理想气体的焓熵	(104)
6.8	工质的熵-焓图和熵-焓图	(107)
第7章	化学熵	(112)
7.1	化学熵与基准物体系	(112)
7.2	化学反应的最大有用功及其计算	(113)
7.3	气体的扩散熵	(114)
7.4	化学反应熵的计算模型	(115)
7.5	燃料的化学熵	(116)
7.6	元素和化合物的化学熵	(118)
7.7	混合气体的熵	(122)
7.8	燃气的熵	(124)
7.9	湿空气的熵	(125)
第8章	熵损失和熵平衡方程式	(127)
8.1	不可逆过程和熵损失	(127)
8.2	熵平衡方程与熵损失	(127)
8.3	几种典型的不可逆熵损失	(128)
8.4	闭口系统的熵平衡方程与熵损失	(129)
8.5	稳定流动系统的熵平衡方程与熵损失	(131)
8.6	循环系统的熵平衡方程式与熵损失分析	(135)
8.7	换热器的熵损失	(137)
8.8	气体混合过程的熵损失	(140)

8.9	燃烧过程的烟损失	(141)
8.10	化学反应的烟损失	(146)
8.11	几个问题的讨论	(149)
第9章	能量系统的烟效率	(154)
9.1	烟效率的一般定义	(154)
9.2	烟效率的不同形式	(155)
9.3	常用热工设备或装置的烟效率	(156)
第10章	不可避免的烟损失	(160)
10.1	概述	(160)
10.2	动力循环的不可避免烟损失	(161)
10.3	制冷循环的不可避免烟损失	(163)
10.4	换热器的可避免和不可避免烟损失	(165)
* 第11章	能量系统的烟分析模型	(169)
11.1	能量系统烟分析的基本模型	(169)
11.2	能量系统的灰箱烟分析模型	(172)
** 11.3	能量关联系统模型简介	(180)
第12章	能量系统烟分析的实际应用	(182)
12.1	蒸汽动力循环装置的烟分析	(182)
12.2	燃汽轮机装置的烟分析	(186)
12.3	蒸气压缩制冷循环的烟分析	(189)
* 第13章	能级分析方法简介	(194)
13.1	概述	(194)
13.2	大系统的能级分析法	(194)
13.3	孤立系统的能级分析法	(197)
第2篇习题		(200)

第3篇 热经济学基础

第14章	热经济学导论	(207)
14.1	烟分析与经济	(207)
14.2	热经济学的形成与发展	(208)
14.3	热经济学的主要研究内容	(208)
第15章	工程经济分析的基本原理	(210)
15.1	工程经济分析中的基本要素	(210)
15.2	资金的时间价值	(213)
15.3	热经济学评价指标与方法	(216)
15.4	成本分摊方法	(219)
第16章	热经济学的工程应用	(222)
16.1	能量系统的优化设计——热经济学应用之一	(222)

16.2 能量系统的参数优化——热经济学应用之二	(225)
16.3 成本计算——热经济学应用之三	(227)
第3篇习题	(230)

第4篇 过程系统节能的热力学分析方法——夹点技术

第17章 概述	(235)
17.1 过程系统的节能	(235)
17.2 夹点技术的应用范围及其发展	(237)
第18章 夹点的形成	(239)
18.1 温-焓图和复合曲线	(239)
18.2 夹点的形成	(240)
18.3 问题表法	(241)
18.4 夹点的意义	(244)
第19章 换热网络的优化综合	(245)
19.1 换热网络的设计目标	(245)
19.2 最佳夹点温差的确定	(247)
19.3 夹点技术设计准则	(248)
19.4 物流股的分支	(250)
19.5 热负荷回路的断开与换热单元的合并	(253)
19.6 阈值问题	(257)
19.7 换热网络改造综合	(258)
第4篇习题	(262)

附录

附表1 龟山-吉田体系的标准化学焓
附表2 有机物质的标准热力学数据表
附表3 无机物质的标准热力学数据表
附表4 化学焓的温度校正系数
附图1 水蒸气的焓(焓)-熵图
附图2 水和水蒸气的焓-焓图
附图3 正丁烷的焓-焓图

索引

主要参考文献

绪论——能源、节能与工程热力学

1 能源及其分类

人类的生产和生活与能源息息相关。如果没有能源,不但没有人类的现代文明,而且人类的古文明史也不复存在。

所谓能源是指自然界中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^[3]。

能源按其来源一般可分为三类:第一类是来自太阳的辐射能。除直接的太阳能外,燃料(煤、石油和天然气等)的化学能、生物能、水力能、风能和部分海洋能都是间接来自太阳能的能源。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(如地下热水、地下蒸汽和干热岩体等),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。第三类是月球和太阳等外星天体对地球的万有引力而产生的能量,尤以月球引力为主,如海洋的潮汐能。

能源按其是否是原始基本形态可分为一次能源和二次能源。一次能源是从自然界直接取得而又不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。一次能源又可根据其能否再生而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并不断得到补充的能源,它们大都直接或间接来自太阳,如太阳能、水力能、风能和海洋能等;非再生能源是指那些不能循环再生的能源,它们随着人类大规模地开采、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、高温蒸汽、汽油和柴油等。

能源按使用程度和使用的水平可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。新能源是指在目前的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、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,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,并得到了广泛应用,因此在这些国家核能即将或已经成为常规能源。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的问题要解决,从这个意义上讲,核能仍被视为新能源。

还有一些其他分类方法和基准,例如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等。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。

表 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

2 能源与社会发展、国民经济和人民生活的关系

从能源利用的观点,人类社会发展经历了三个不同的能源时期: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,同时以人力、畜力以及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。在以薪柴等生物质燃料为主要能源的时代,能源使用水平低下,社会生产力水平和人的生活水平极低,社会发展缓慢。在中国,可以说从远古一直到清王朝覆灭的几千年都属于这一时期。

18 世纪的工业革命开创了以煤炭作为主要能源的第二个时期——煤炭时期。这一时期蒸汽机成为生产的主要动力,工业得到了迅速发展,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,电力工业的发展使电能的应用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主要动力,电灯代替油灯和蜡烛成为主要光源,社会生产力有了大幅度提高。随着各种电器的出现,人们的物质和精神生活也有了极大提高,从根本上改变了人类社会的面貌。

石油资源的开发开始了能源利用的又一新时代。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和天然气作为主要能源,开始了第三个能源时期——石油时期。随着石油、天然气的开发利用和内燃机械的快速发展,汽车、飞机、内燃机车和远洋轮船这些以石油制品为动力能源的交通工具也迅猛发展,从而缩短了地区间和国家间的距离,也促进了世界经济的繁荣和发展。

进入 21 世纪后,随着可控热核反应的实现,核能将充当世界能源的重要角色。同时,随着洁净煤技术的开发和利用,一个清洁能源的时代将随之而来,并将迎来又一个能源变革的新时代。

能源的开发和利用,不但推动着社会历史的进程,而且与国民经济发展的关系密切。从某种意义上说,能源是国民经济的支柱。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。在工业生产中,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,机械加工生产离不开电力,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、运输和加工等均离不开能源,现代国防建设也需要大量电力和各种石油制品。其次,能源还是重要的化工原料,以石油为例,除了能提炼出汽油、柴油和润滑油外,对它们进一步加工可获得5 000多种有机合成原料;有机化学工业的8种基本原料——乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯、乙炔和萘,它们主要来自石油。

由此可以看到国民经济和能源利用的依存关系,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,在经济正常发展的情况下,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 ζ 表示:

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

从表面上看, ζ 值越小越好。实际上,影响弹性系数的因素较多,较复杂,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 ζ 值大于1,工业发达国家的 ζ 值小于1。表2^[3]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。

表2 世界主要国家能源消费概况

序号	国 家	1993 年 GDP ^① /10 ⁸ 美元	1980~1993 年 GDP 年 增长率/%	1980~1993 年 能源消耗年 增长率/%	1980~1993 年 能源消费 弹性系数	1993 年 人口 /10 ⁴ 人	1993 年人均 能源消费 /kg
1	美 国	62 599	2.7	1.4	0.52	25 780	7 918
2	德 国	19 108	2.6	—	—	8 070	4 170
3	法 国	12 517	2.1	2.0	0.95	5 750	4 031
4	英 国	8 190	2.5	1.0	0.40	5 790	3 718
5	加拿大	4 775	2.6	1.5	0.58	2 880	7 821
6	俄罗斯	3 294	-0.5	—	—	14 870	4 438
7	日 本	42 142	4.0	2.7	0.68	12 450	3 642
8	韩 国	3 308	9.1	9.5	1.04	4 410	2 863
9	中 国	4 256	9.6	5.1	0.53	117 840	623
10	巴 西	4 442	2.1	3.7	1.76	15 650	666
11	墨西哥	3 435	1.6	3.1	1.94	9 000	1 439
12	阿根廷	2 556	0.8	1.1	1.38	3 380	1 351
13	印 度	2 254	5.2	6.7	1.29	89 820	242
全 世 界		231 126	2.9	—	—	550 150	1 421

① GDP 为国民生产总值。

发展国民经济需要能源,其重要目的之一是不断改善人民生活。在人们的日常生活中,不仅衣、食、住、行需要能源,而且文教卫生、文化娱乐等都离不开能源。随着人们生活水平的不断提高,各种家用电器如微波炉、电视机、个人电脑、冰箱和空调等的不断增加,新的社会公益福设施的不断兴建,所需能源的数量、形式愈来愈多,质量要求愈来愈高。一般而言,从一个国