



TSINGHUA UNIVERSITY

能源规划与系统分析

主 编 邱大雄

副主编 孙永广 施祖麟

清华大学出版社

能源规划与系统分析

主 编 邱大雄

副主编 孙永广 施祖麟

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了能源规划与能源系统分析的理论与方法。

全书分 10 章：概论、能源研究的数据基础、能源经济分析、能源需求预测、能源供应分析、能源工程项目经济评价方法、能源系统模型、能源的环境问题、综合资源规划和需求侧管理以及综合能源规划支持系统。

读者对象：从事能源规划与管理工作的科技人员和管理人员，大专院校有关专业的师生。

图书在版编目(CIP)数据

能源规划与系统分析/邱大雄主编. —北京：清华大学出版社，1995
ISBN 7-302-01812-X

I. 能… II. 邱… III. ①能源管理②能源-系统分析 IV. F206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03641 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：刘明华

印 刷 者：通县宏飞印刷厂

发 行 者：新华书店总店北京科技发行所

开 本：787×1092 1/16 **印张：**25.25 **字数：**628 千字

版 次：1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 7-302-01812-X/F·107

印 数：0001—2000

定 价：25.00 元

光华基金会为支持学术专著和
研究生教材的出版,给予我社资助,
本书即为由光华基金会资助出版的
专著之一。

序

本书较为系统地介绍能源规划与能源系统分析的理论与方法,适宜于从事能源规划与管理工作的工程技术人员,科研人员和干部阅读参考,也可作为大专院校有关专业大学生、研究生的教学参考书。

本书共分10章。第1章概论由邱大雄执笔,第2章能源研究的数据基础由吕应运、张阿玲执笔,第3章能源经济分析由施祖麟、李子奈执笔,第4章能源需求预测,由张阿玲、孙永广、马玉清、邱大雄执笔,第5章能源供应分析由顾树华、苏明山、吕应运、晏黎执笔,第6章能源工程项目经济评价方法由顾树华、何建坤执笔,第7章能源系统模型由孙永广、郭元、何建坤、王彦佳执笔,第8章能源的环境问题由方栋、邱大雄执笔,第9章综合资源规划与需求侧管理由刘德顺执笔,第10章综合能源规划决策支持系统由王奇志、张阿玲执笔。全书由邱大雄、孙永广、施祖麟进行最后编纂和整理。

由于作者水平和工作条件所限,书中难免有不妥甚至错误之处,欢迎同行和读者批评指正。

前 言

当今环境与发展问题是国际政治和经济生活中的大事。迈向 21 世纪,人类社会的持续发展受到人们的严重关注。持续发展意味着发展不仅要满足当代人的需要,而且要考虑下代人继续发展的需要。能源是社会发展的物质基础,又是影响人类赖以生存的自然环境和生态的重要因素,因此,能源问题成为持续发展中的重点问题之一。我国要在下世纪中实现在经济上赶上中等发达国家水平的目标,需要保持国民经济持续、高速、健康发展,保证能源供应与解决能源引起的地区与全球环境问题,是我国持续发展的关键问题之一。

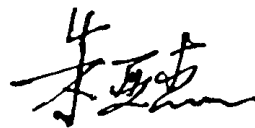
能源是一个复杂的系统问题,它涉及到能源资源、能源供应与需求、能源技术、能源政策和战略的研究。从宏观看,能源系统又是国民经济系统的一个子系统,而且与自然环境生态系统密切联系,因此,需要进行能源-经济-环境系统的综合研究。

能源规划是涉及能源系统和能源-经济-环境系统协调发展的大量变量的综合性很强的工作。运用系统工程的方法,编制数学模型,定性与定量分析相结合是研究与制订能源规划,分析与评价能源政策的有力工具之一。

清华大学核能技术设计研究院适应国民经济需要,早在 1980 年成立了能源系统分析研究室,是我国最早系统地开展能源规划与系统模型研究的单位之一。十几年来坚持这一研究方向,在国内能源规划与政策研究上作出了贡献,在国外也有相当的影响。该室 1986 年出版的《能源规划与系统模型》一书,是我国第一本系统介绍能源规划与能源系统分析的理论和方法的教学参考书,在国内得到广泛的应用,1989 年翻译出版了《综合能源规划手册》,系统介绍了适用于发展中国家的综合能源规划方法体系。1991 年又与国内有关部门的专家合作编著了《农村能源综合建设规划与实施》一书,系统地总结了农村能源建设的经验、其内容在深度和广度上有较高的学术水平和实用价值,对推动我国农村能源综合建设起到了指导作用。

本书是在上述著作的基础上,结合作者们近几年在本领域的科研成果以及参阅国内外其它有关文献编写而成的。着重增加了市场经济下的能源经济分析,能源环境,综合资源规划与需求侧管理等,这些都是当前能源界注意的关键问题。

希望本书在推动我国能源建设,在迈向 21 世纪持续发展的道路上作出贡献。



目 录

1 概论	1
1.1 能源的基本概念	1
1.1.1 能的形态和性质	1
1.1.2 能分析与焓分析	3
1.1.3 能量资源	6
1.1.4 能源的定义和分类	6
1.2 世界能源形势	7
1.2.1 持续发展与环境保护	7
1.2.2 世界能源系统的历史演变	9
1.2.3 影响世界未来能源系统的因素	11
1.2.4 未来世界的能源系统	17
1.3 中国能源形势	19
1.3.1 中国的能源生产和消费特点	19
1.3.2 中国的温室气体与未来能源系统	22
1.3.3 中国的能源发展战略和环境对策	23
1.4 能源系统简介	24
1.4.1 能源系统的构成和分类	24
1.4.2 能源系统的特点	25
1.4.3 节能的系统分析	27
1.5 能源规划	28
1.5.1 能源规划的概念和发展	28
1.5.2 综合能源规划的内容和方法	29
1.5.3 需求端管理和综合资源规划	31
参考文献	33
2 能源研究的数据基础	35
2.1 能源统计简介	35
2.1.1 能源统计的特点	35
2.1.2 能源统计中应用的计量单位	36
2.1.3 我国的能源统计工作	40
2.2 能源平衡表的编制	41
2.2.1 能源平衡表的作用	41
2.2.2 能源平衡表的种类	42
2.2.3 能源平衡表编制的基本特点	48
2.2.4 能源平衡表主要指标说明	49

2.2.5	能源平衡表编制中若干问题的探讨	51
2.3	能源系统能流网络图的编制	54
2.3.1	能源系统能流网络图的结构	54
2.3.2	能源系统能流网络图内过程的效率	59
2.3.3	能源系统能量利用效率的估计	61
2.3.4	能源系统能流网络图在系统分析中的应用——能流平衡分析	62
2.3.5	能源平衡分析的计算机算法	66
	参考文献	68
3	能源经济分析	69
3.1	能源经济分析基础	69
3.1.1	供求理论	69
3.1.2	生产理论	78
3.1.3	市场理论	85
3.2	能源投入产出分析	92
3.2.1	投入产出法的基本原理	92
3.2.2	投入产出法在能源规划和系统分析中的应用	98
3.2.3	能源投入产出表	102
3.3	能源价格问题	105
3.3.1	投入产出价格模型的应用	106
3.3.2	计量经济学价格模型	108
3.3.3	不同能源品种价格确定中的特殊问题	108
	参考文献	110
4	能源需求预测	111
4.1	能源需求预测的意义和内容	111
4.1.1	能源需求预测的意义	111
4.1.2	能源需求预测的特点	111
4.1.3	能源需求预测的分类及内容	112
4.2	影响能源需求的因素	112
4.2.1	人口和城市化	113
4.2.2	经济增长和发展阶段	114
4.2.3	生活方式与消费结构	115
4.2.4	产业结构	115
4.2.5	技术进步	116
4.2.6	价格	117
4.3	能源需求预测方法	119
4.3.1	方法概述	119
4.3.2	弹性系数预测模型	121
4.3.3	部门活动分析模型	123
4.3.4	居民能源消费流模型	129

参考文献	135
5 能源供应分析	136
5.1 综述	136
5.1.1 供应分析目的及其在能源规划中的地位	136
5.1.2 能源供应系统	136
5.1.3 能源供应分析的内容	136
5.2 能源资源评价	137
5.2.1 资源评价分类及信息	137
5.2.2 不可再生能源	137
5.2.3 可再生能源	141
5.2.4 进口能源	143
5.3 能源的技术评价	143
5.3.1 不可再生能源技术	144
5.3.2 可再生能源技术	144
5.3.3 电力系统技术	145
5.4 我国不可再生能源	145
5.4.1 原油	145
5.4.2 天然气	150
5.4.3 煤碳	152
5.4.4 铀	159
5.5 可再生能源	164
5.5.1 水能	164
5.5.2 生物质能	167
5.5.3 太阳能	170
5.5.4 风能	172
5.5.5 地热能	175
5.5.6 海洋能	177
参考文献	177
6 能源工程项目经济评价方法	179
6.1 项目经济评价的基本概念	179
6.1.1 现金流量图	179
6.1.2 货币的时间价值与资金成本	179
6.1.3 现值因子及其计算公式	180
6.1.4 名义利率和实际利率	187
6.1.5 投资的回收与固定资产折旧	187
6.1.6 各种折旧方法的比较	190
6.2 能源工程项目的成本与效益分析	191
6.2.1 财务评价和国民经济评价中成本与效益的差别	191
6.2.2 能源项目成本与效益的划分和计算	192

6.2.3	成本和效益计算中几个值得注意的问题	193
6.3	能源工程项目的经济评价方法	195
6.3.1	项目的可比较性	195
6.3.2	最小成本分析	196
6.3.3	单位产出成本分析	199
6.3.4	成本-效益方法	200
6.3.5	投资回收期方法	202
6.4	建设项目的投资分析	204
6.4.1	财务计划表的编制	204
6.4.2	利润表	206
6.4.3	现金流量表	207
6.5	不确定性分析	210
6.5.1	敏感性分析	210
6.5.2	转换值分析	211
6.5.3	盈亏平衡分析	212
6.6	经济评价方法在能源系统模型中的应用	212
6.6.1	经济评价方法在静态能源系统模型中的应用	213
6.6.2	经济评价方法在动态能源系统模型中的应用	214
6.7	项目综合评价	215
6.7.1	综合评价意义	215
6.7.2	综合评价方法	216
6.7.3	计算实例	219
6.7.4	层次分析法及其应用	222
	参考文献	229
7	能源系统模型	230
7.1	系统分析概论	230
7.1.1	系统与模型	230
7.1.2	系统、模型与决策	231
7.1.3	系统分析与决策支持系统	232
7.1.4	想定预测	233
7.1.5	不确定性	233
7.1.6	敏感性分析	234
7.2	电力系统规划模型	235
7.2.1	电力负荷曲线	236
7.2.2	Screen Curve 法	237
7.2.3	电源规划数学模型的投资部分	238
7.2.4	发电可靠性及随机生产模拟	242
7.2.5	确定性生产模拟	246
7.3	石油炼制工艺优化模型	248

7.3.1	石油炼制概述	248
7.3.2	与常压蒸馏有关的约束方程	250
7.3.3	与减压蒸馏有关的约束方程	251
7.3.4	与减粘裂化有关的约束方程	251
7.3.5	与催化裂化有关的约束方程	251
7.3.6	与催化重整有关的约束方程	252
7.3.7	与调合有关的约束方程	252
7.3.8	其他约束方程及目标函数	254
7.3.9	小结	256
7.4	煤炭开发模型	256
7.4.1	煤炭系统的结构	256
7.4.2	外层模型的内生变量	261
7.4.3	生产能力的表达式	262
7.4.4	修正描写系统运行的技术经济系数	262
7.4.5	内层模型	263
7.4.6	开发投资的表达式	266
7.4.7	残值的表达式	266
7.4.8	外层模型的目标函数	266
7.4.9	外层模型小结	267
7.5	农村能源系统模型	268
7.5.1	农村能源系统概述	268
7.5.2	模型的数学描述	270
7.5.3	模型的参数选择	275
7.5.4	模型的输出及分析	278
7.6	能源系统减排 CO ₂ 技术选择模型	279
7.6.1	我国能源消费的 CO ₂ 排放	279
7.6.2	模型建立的基本思路	280
7.6.3	模型的数学描述	282
7.6.4	模型的外生想定条件	286
7.6.5	模型主要计算结果分析	287
7.7	能源系统线性规划模型对偶解的经济学意义	289
7.7.1	线性规划模型对偶解的数学性质	289
7.7.2	一个非常简单的能源系统线性规划模型	291
7.7.3	S 量与价格参数无关的完全自由竞争市场	293
7.7.4	S 量与价格参数有关的完全自由竞争市场	296
7.7.5	典型计划经济中国家计划工作者的理想	297
7.7.6	企业经营者的行为	299
7.7.7	几点讨论	303
7.8	系统动力学模型及其在能源系统分析中的应用	304

7.8.1	系统动力学基本原理	304
7.8.2	系统动力学在能源系统分析中的应用	308
	参考文献	312
8	能源的环境问题	314
8.1	环境的基本知识	314
8.1.1	生态系统与生态平衡	314
8.1.2	水体污染	317
8.1.3	大气污染	320
8.1.4	固体废物	324
8.1.5	放射性与放射性对人体的危害	325
8.2	能源生产和使用对环境的影响	326
8.2.1	化石燃料的生产与使用	326
8.2.2	核能生产与利用	328
8.2.3	可再生能源的开发利用	329
8.3	我国的环境政策	330
8.3.1	环境法规体系	330
8.3.2	环境政策	331
8.4	环境影响评价	333
8.4.1	环境影响评价分类	333
8.4.2	环境影响评价的原则和内容	333
8.4.3	环境影响评价方法	336
8.5	环境与健康风险评价与管理	340
8.5.1	风险评价与判断	340
8.5.2	风险的鉴别与确定	342
8.5.3	风险的分析	343
8.5.4	风险管理	344
	参考文献	344
9	综合资源规划和需求侧管理	345
9.1	综合资源规划和需求侧管理的发展背景	345
9.2	综合资源规划和需求侧管理的基本概念	345
9.2.1	基本概念	345
9.2.2	传统电力规划和综合资源规划方法的区别	346
9.3	DSM 基本要素	347
9.3.1	用户最终用途	347
9.3.2	负荷调整目标	347
9.3.3	技术措施选择	348
9.3.4	市场实施策略	349
9.4	DSM 计划的规划,实施步骤及工具	350
9.4.1	DSM 规划及实施的流程框架	350

9.4.2	DSM 计划的分析过程	351
9.4.3	DSM 模型与软件	352
9.5	DSM 计划的成本-效益评价准则	353
9.5.1	避免成本的计算原则	353
9.5.2	DSM 计划的成本-效益评价	354
9.5.3	电力公司投资于 DSM 计划的合理性讨论	360
9.5.4	DSM 的成本-效益评价的外部条件	361
9.6	IRP 的基本要素及分析实施步骤	362
9.6.1	IRP 的技术要素	362
9.6.2	IRP 的过程要素	366
9.7	IRP/DSM 推广应用效果与经验	367
9.7.1	美国电力公司需求侧管理的效果	367
9.7.2	IRP/DSM 的发展前景	368
9.7.3	电力公司 DSM 实践的经验总结	369
	参考文献	372
10	综合能源规划决策支持系统	373
10.1	计算机在综合能源规划中的应用	373
10.2	综合能源规划决策支持系统概述	373
10.3	数据库子系统	375
10.3.1	能源规划中使用的数据库	375
10.3.2	数据库的设计与建立	376
10.3.3	数据库管理系统的设计与实现	376
10.3.4	数据库子系统的形成	377
10.4	方法库子系统	379
10.4.1	方法库在 DSS 中的作用	379
10.4.2	能源规划中使用的方法	380
10.4.3	方法库子系统的结构	380
10.5	模型库子系统	382
10.5.1	模型库在 DSS 中的作用	382
10.5.2	模型库子系统的特点和功能	382
10.5.3	能源规划中使用的模型	383
10.5.4	模型库子系统的结构	384
10.6	对话子系统	386
10.6.1	对话子系统的功能	386
10.6.2	对话子系统的结构	387
	缩略语索引	389

4. 电磁能, 主要指由电压与电荷移动量的乘积所具有的电能, 包括静电能、电磁能、磁能等。

5. 辐射能, 如太阳辐射、电磁波、声波、核放射线等。

当物质运动形式发生转变时, 能的形态同时发生转变, 不同能量形态之间是可以相互转换的, 如图 1.1 所示(其中只有机械能直接转换为化学能和核能的方法, 迄今尚未发现, 故用虚线表示), 说明能量具有转换性。在转换时, 能的总量守恒不变, 既不创造, 也不消失, 在数量上服从能量守恒定律。换言之, 在一定体系内, 各种形式的能的总和是一个常数, 能量不能产生, 也不能消失, 只能从一种形式转换成另一种形式。

除此之外, 各种形态的能量在相互转换时, 还具有明显的方向性, 即它们的转换效率是不同的, 如表 1.1 所示。有的接近 100% (表 1.1 中有“○”号的), 有的随转换条件而有所不同 (表 1.1 中有“△”号的), 有的转换时伴有能量“损耗” (表 1.1 中有“×”号的)。转换效率的不同, 体现了各种形态的能量有质的差异性。

表 1.1 不同形态能量的相互转换^[2]

转换后的能 转换前的能	储存能	不规则能	机械能	电磁能	辐射能
储存能	化学反应	燃烧 核聚变 核裂变 放热反应 ○	体力劳动 渗透压 ×	电池 燃料电池 ○	核蜕变 △
不规则能	吸热反应 ×	高温→低温的传热 相变 △	热机 ×	热电偶 ×	热辐射 白炽灯 ×
机械能		摩擦 热泵 ○	传动 位能⇌动能 ○	发电机 压电效应 ○	音响 超声波发生器 △
电磁能	电解 充电 ○	电热器 高频加热 ○	电动机 ○	变压 ○	电波 粒子加速器 △
辐射能	光合作用 ×	太阳能热水器 ○	超声波加工 ×	太阳电池 光电池 ×	电子→X线 △

注: 表中“○”代表转换效率接近 100%, “△”代表转换效率随条件不同而不同, “×”代表转换时有能量损耗。

量的守恒性和质的差异性能量在转换时所具有的两重性。

根据能量转换时是否受热力学第二定律的制约, 可以将其划分为三种不同质的能量。

1. 可无限转换的能量, 如表 1.1 中的电磁能和机械能, 包括水能、风能等, 它们在转换时不受热力学第二定律的约束, 因而可以直接用它的数量反映其本身的“质”。它们的“质”与“量”是完全统一的。人们用“烟”(exergy)这个概念来表示这种“可无限转换”的能量。

2. 可有限转换的能量, 如表 1.1 的不规则能。它们在转换成机械能或电磁能等其他形

态能量时,受热力学第二定律的约束。它们在给定的环境基准下,在极限情况下,也只能部分转换,并非全部都是“烟”,那些无法转换的部分能量,人们用“炆”(axergy)这个概念来表示。因此可有限转换的能量由“烟”和“炆”组成。“烟”的比例愈高,说明其“质”愈高。

3. 不可转换的能量,如环境介质的内能,受热力学第二定律的制约在环境条件下无法转换为其它形态的能量,即这类能量全部都是“炆”。

根据对烟和炆的理解,可以将各种能量 E_n 看成是由烟 E 与炆 A 组成,即

$$E_n = E + A$$

上述第一种能量 $E_n = E$, 第二种能量 $E_n = E + A$, 第三种能量 $E_n = A$ 。

能的“质”可以定量地用下式表示:

$$\lambda \equiv \frac{E}{E_n}$$

式中 λ 为能质系数。表 1.2 给出几种主要能量形态的 E, A 和 λ , 供参考。

表 1.2 几种能量的 E, A 和 λ [2]

能量形态	能的数量 E/kJ	烟 E/kJ	炆 A/kJ	能质系数 λ
机械能、电能、风能和水能	E_n	$E = E_n$	$A = 0$	$\lambda = 100\%$
恒温下放出或得到的热量	$Q = E_n$	$E_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q$	$A_Q = \frac{T_0}{T} Q = T_0 \Delta S$	$\lambda_Q = 1 - \frac{T_0}{T}$
变温下放出或得到的热量	$Q = E_n$	$E_Q = \int_0^Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$	$A_Q = T_0 \int_0^Q \frac{\delta Q}{T}$	$\lambda_Q = \frac{E_Q}{Q}$
介质的内能	$U - U_0$	$E_{(U-U_0)} = U - U_0 - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0)$	$A_{(U-U_0)} = T_0(S - S_0) - p_0(V - V_0)$	$\lambda_{(U-U_0)} = \frac{E_{(U-U_0)}}{U - U_0}$
稳定流动介质的焓 (忽略动能的变化)	$H - H_0$	$E_{(H-H_0)} = H - H_0 - T_0(S - S_0)$	$A_{(H-H_0)} = T_0(S - S_0)$	$\lambda_{(H-H_0)} = \frac{E_{(H-H_0)}}{H - H_0}$
气体燃料的化学能 (1 大气压, 25℃)	ΔH_h	$E = 0.950 \Delta H_h$ (Rant 近似式)	$A = 0.050 \Delta H_h$	$\lambda = 95\%$
液体燃料的化学能 (1 大气压, 25℃)	ΔH_h	$E = 0.975 \Delta H_h$ (Rant 近似式)	$A = 0.025 \Delta H_h$	$\lambda = 97.5\%$
固体燃料的化学能 (1 大气压, 25℃)	ΔH_h	$E = \Delta H_L + r\omega$ (Rant 近似式)	$A = \Delta H_h - \Delta H_L - r\omega$	$\lambda = \frac{E}{\Delta H_h}$

注: 表中 T 为热源或介质温度; $T_0, p_0, H_0, S_0, U_0, V_0$ 分别为环境条件下介质的温度、压力、焓、熵、内能和容积; H, S, U, V 分别为介质的焓、熵、内能和容积; ΔH_h 和 ΔH_L 分别为燃料的高热值和低热值, r 为水的汽化热, ω 为燃料中水的质量成分。

1.1.2 能分析与烟分析

能分析是在热力学第一定律基础上分析和揭示出能量在数量上转换、传递、利用和损失的情况, 确定能量损失的性质、大小与分布, 指明提高能量利用率的方向, 确定出某个系统或装置的能量利用或转换效率, 由此而得出的效率是基于热力学第一定律基础之上的, 故称为

“能效率”(或称“第一种效率”) η_1 。

焓分析是在热力学第一和第二定律基础上分析能量中焓的平衡关系。通过分析,揭示出能量中焓的转换、传递、利用和损失情况,确定出该系统装置的焓利用效率,由此得出的效率是基于热力学第一和第二定律基础之上的,故称为“焓效率”(或称“第二种效率”) η_2 。

为了便于说明问题,下面以一个能流情况比较简单的任意系统为例,讨论它的能分析与焓分析。

如图 1.2(a)所示,进入该系统的能量 E_{n1} 应等于离开系统的各种形式能量之总和 (W_s , E_{n2} 和 Q) 加上系统内部的能量积累。如果整个系统是稳定的,则系统内部的能量不发生变化,此时,

$$E_{n1} = W_s + E_{n2} + Q$$

式中, W_s 代表系统对外所做的轴功,属于有用的“收益”。 E_{n2} 代表工质(如物料或排烟等)离开系统时带走的能量,如果这部分能量不再回收利用,就以外部损失的形式排离系统。 Q 代表系统向周围环境散放的热量,同样也以外部损失的形式排离系统。根据能效率的定义即作为收益的能与作为代价的能之比值是,

$$\eta_1 = \frac{\text{作为收益的能}}{\text{作为代价的能}}$$

$$\eta_1 = \frac{W_s}{E_{n1}} = 1 - \frac{Q}{E_{n1}} - \frac{E_{n2}}{E_{n1}}$$

类似地,该系统的焓分析如图 1.2(b)所示。由于系统内部各个环节在实际过程中不可避免地将有部分焓退化为熵,因此,根据焓平衡的要求,进入该系统的焓 E_1 应等于离开系统的各种焓 (W_s , E_2 和 E_Q)、系统内部焓量的积累加上各种内部的焓损失。如果系统是稳定的,系统内部的焓量不发生变化,则

$$E_1 = W_s + E_2 + E_Q + \Sigma \pi_i$$

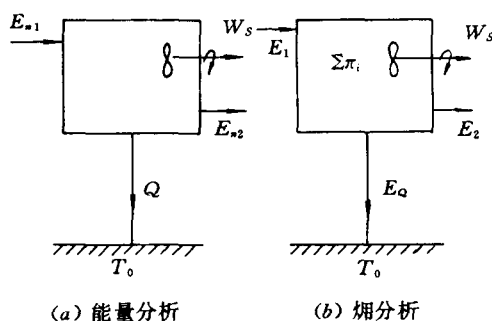


图 1.2 一个简单系统的能分析与焓分析^[2]

式中 W_s 仍为系统对外所做的轴功,由于机械功本身就是焓,所以它也就是所要获得的有用的“收益”焓, E_2 代表工质离开系统时所带走的能量 E_{n2} 中的焓,如同 E_{n2} 一样, E_2 也以外部焓损失的形式排离系统。 E_Q 代表系统向周围环境散放的热量 Q 中的焓,同样也以外部焓损失的形式排离系统。 $\Sigma \pi_i$ 是系统内部的焓损失。根据焓效率的定义,即作为收益的焓与作为代价的焓之比值