

节 能 原 理

宋 之 平 王 加 璇 编 著

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书是节能技术理论的基础读物，主要研究节能潜力的大小、部位、根源及节能中的经济因素等。书中科学地、系统地介绍了第二定律分析的基本内容，包括熵分析、烟分析以及热经济学分析等。在编写方法上，本书坚持理论联系实际和深入浅出的原则，力图在叙述中寓理深刻而讲解通俗，以期作到雅俗共赏。书中对气体、蒸汽能量装置，供暖与制冷，换热器系统，余热利用以及化工过程等都有分析实例。本书的读者对象是从事能源、节能和热工理论工作的研究人员、工程技术人员和大专院校师生。

节 能 原 理

宋之平 王加璇 编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 12.75印张 337千字 1插页

1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数0001—4230册 精装定价3.90元

书号 15143-5745

序

节能是能源科学与能源技术中一项非常重要的课题。节能的实施涉及到一系列的环节，包括：节能技术、节能经济、节能规划、节能政策与节能管理等。在众多的环节中，有一个环节是带有基础性的，那就是节能教育，包括节能的宣传与培训。使众多的人，特别是使各环节中的节能工作者通晓“节能原理”，是节能教育中的一项重要内容。节能原理的任务在于研究如何科学地估计节能潜力的大小，确定潜力的部位及其分布，指出潜力的限度及节能措施的指导原则，分析节能中的经济因素等，借以规划节能的近期任务与战略目标。

近一、二十年来，世界上各技术先进国家纷纷以“第二定律分析”作为节能的理论基础，但其原理、方法与分析实例多散见于杂志与文集中。本书搜集整理了国内、外典型文献资料，结合作者的研究成果与体会，科学而系统地介绍了第二定律分析的基本内容，包括熵分析法、焓分析法以及热经济学分析等。在编写方法上，本书坚持理论联系实际的原则，同时力图使所叙述的内容寓理深刻而讲解通俗，以期作到雅俗共赏。这些原则也体现到内容的取舍与章节的安排中。本书的前两章形象而直观地讲述了掌握节能原理对于指导节能实践的重要性，以加深对学习节能原理必要性的理解。第三章至第五章集中地介绍了第二定律分析本身与有关的理论基础。这部分内容虽然篇幅不大，但比较完整严密，只要具有热力学和高等数学的基础知识，就不难从中获悉第二定律分析理论的全貌与原委。着重应用的读者可以暂时绕过这几章，径直阅读本书的后继部分。在第六章至第十一章中，每章均结合一个专题讲述节能原理在节能分析中的具体运用。这些章节只涉及到理论基础中的一个侧面，而且各章均有相对的独立

性，可以根据读者的不同需要加以取舍。书的最后三章介绍了节能理论的新进展，即热经济学方面的基本内容。

本书的前十一章由宋之平编写，第十二章至第十四章由王加璇编写。南京工学院副教授钟史明等同志曾对书稿作了全面审阅并提出了不少建设性的意见，清华大学朱明善副教授、北京化工学院何耀文副教授在编写过程中也给了我们可贵的帮助，此外，西安交通大学刘咸定、江苏化工学院钱三鸿、国家经委能源研究所辛定国、上海交通大学蒋智敏等同志也都曾分别对本书提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

节能原理的编写是我们的初次尝试。限于水平，不妥和错误之处恳请读者指正。

编者著

1984年11月

目 录

序

第一章 绪论	1
1.1 我国的能源	1
1.2 节能的战略地位	2
1.3 节能原理	4
第二章 节能潜力的基本概念	8
2.1 节能潜力的第一定律分析法	8
2.2 第一定律分析法的不足之处	8
2.3 节能的可能性及其限度	17
2.4 节能潜力存在的标志	20
2.5 两个常用术语的含义	25
第三章 热力学的基础知识	28
3.1 基本概念	28
3.2 功和热量的计算	32
3.3 热力学第一定律	37
3.4 热力学第二定律	44
3.5 热力学的一般关系式	56
第四章 第二定律分析基础	63
4.1 熵平衡	65
4.2 典型不可逆过程的熵产	66
4.3 熵产与不可逆损失的关系	70
4.4 熵的数学表达式	71
4.5 太阳能的熵	77
4.6 熵平衡	79
4.7 熵效率与熵损系数	83
4.8 熵分析法的要点	87
第五章 化学熵	90

5.1	概述	90
5.2	多元体系	91
✓ 5.3	环境的概念与基准物系	101
5.4	化学反应	107
5.5	化学焓	112
第六章	气体能量装置	123
✓ 6.1	理想气体的参数计算	123
6.2	气体的压缩与膨胀过程	132
6.3	气体过程第二定律分析法的其它应用	143
6.4	燃气轮机装置的分析	148
第七章	蒸汽能量装置	164
7.1	液体与蒸汽的参数计算	164
7.2	蒸汽锅炉	180
7.3	蒸汽轮机	188
7.4	凝汽器与蒸汽喷射泵	191
7.5	蒸汽动力装置的效率研究	195
第八章	供暖与制冷	204
✓ 8.1	供暖方案	205
8.2	供暖系统的能量评价指标——供热指数	206
8.3	供暖系统的供热指数与能耗	207
8.4	热电合产供暖系统	215
8.5	热泵供暖系统	220
8.6	制冷设备	230
第九章	换热器与换热器系统	236
✓ 9.1	评价换热器内过程性能的指标	236
9.2	影响换热器内过程性能的因素	238
9.3	换热器的焓优化	243
9.4	示焓图	249
9.5	换热器系统的分析与改进	254
第十章	余热的动力利用	266
✓ 10.1	概述	266
10.2	余热动力装置的参数选择与容量估算	268

10.3	余热装置发电出力的季节浮动	277
10.4	余热动力装置的其它设计考虑	282
第十一章 燃料、燃烧和化工过程		288
✓ 11.1	燃料的烟	288
11.2	燃烧室分析	292
11.3	水煤气发生炉的烟分析	296
11.4	燃料电池	301
11.5	化工过程	304
11.6	海水淡化	310
第十二章 热经济学引论		312
12.1	第二定律分析法的一个重要发展	312
12.2	热经济学的发生与发展	315
12.3	热经济学在方法论上的特点	317
第十三章 热经济学会计统计		326
13.1	工程经济学的一般概念	326
13.2	经济分析与会计统计	327
13.3	热经济学会计统计	330
13.4	热经济学会计统计的计算实例	340
第十四章 热经济学优化		361
14.1	数学模型的建立	361
14.2	热经济学系统分析和设计的正规步骤	366
14.3	拉格朗日法	368
14.4	用正规步骤求解简单燃气轮机循环	373
14.5	热经济学优化计算机程序框图和程序	382
参考文献		391
索引		396
附录 水蒸汽焓熵图		

第一章 绪 论

1.1 我国的能源

自然界赋存有各种资源，其中有的可用来获取人们所需要的各种能量（如电能、热能、机械能、光能等），我们把这种自然资源称为一次能源，简称能源；而把由一次能源加工转换而成的能源产品（如电力，焦炭，汽油、柴油和其它石油制品以及蒸汽等）称为二次能源。

能源与人类的文明和社会的发展一直紧密地联系在一起，是社会发展的物质基础。在当今的世界上，能源问题更是渗透到社会生活的各个方面，直接关系到整个社会经济的发展 and 人们物质文化生活水平的提高。对于正在致力于现代化建设的我国来说，能源问题的重要性也是不言而喻的。

就蕴藏量而言，我国是世界上能源最丰富的国家之一，煤炭储量仅次于苏联和美国，居世界第三；水力资源的储量居世界首位，石油和天然气资源也显示了良好的前景。但是，从另一方面讲，由于我国人口众多，因此人均可采储量并不很高，低于世界平均水平。

在能源生产方面，建国以来我们已取得了伟大的成就。在从1952年到1981年不到三十年的时间里，煤炭产量增长八倍多，电力达四十倍，原油达二百四十倍，并已基本建成了独立完整的能源工业体系。尽管如此，直至1978年我国的人均能耗依然只有614kg标准煤，这相当于世界平均水平的28%，日本的14%，苏联的10%，美国的5%，加以能源利用水平较低，设备落后，使能源供应与需求的矛盾相当尖锐。当前，能源问题已成为制约我国经济发展的一个非常重要的因素，解决能源问题已成为我国现代化经济建设的战略重点之一。

解决能源问题的途径不外两条，一是开发，二是节约。我国能源资源丰富，既是能源生产的大国，也是能源消费的大国，针对这一具体情况，我们的方针显然应是开发与节约并重。开发是能源建设的基础，只有在实现现代化的整个进程中十分重视能源的开发，保证能源基地的建设，才能满足能源消费持续增长的需要。能源节约的问题，近年来已为越来越多的人所注意。然而，究竟节能在解决能源问题中占有什么样的地位，并不是每个人都已深切了解的。当前的主要问题依然是对节能的重要性估计不足，对节能在解决能源问题中的战略地位认识不足，因而有必要对此作进一步的分析与讨论。

1.2 节能的战略地位

1.2.1 节能的重要性

节能的任务就是提高能源的利用效率，用同样多的能源生产出更多的产品，创造出更多的产值，更好地满足人类社会生活的需要。节能从来都是能源科学中的一项基本课题，特别是从1973年资本主义世界能源危机以来，节能已成为一项世界性的课题，受到普遍的重视。

对于我国，节能具有特殊的重要性。在进行现代化经济建设的进程中，我们的目标是在从1981年至本世纪末的二十年的时间里，在不断提高经济效益的前提下，力争使全国工农业年总产值翻两番。1980年我国一次能源生产总量为六亿多吨标准煤，据专家估计，到本世纪末，我国能源的年生产总量约为十二至十四亿吨标准煤，即在同一时期内，能源的产量只能翻一番左右。这就规定了我们的节能目标：与1980年单位产值的能耗相比，至本世纪末我国的年节能量应达到十几亿吨标准煤！这相当于1980年我国全年能源生产总量的两倍。由此可见，节能对于我国，绝非无足轻重的一环，从保证工农业产值的增长和解决能源供应的意义上讲，它和能源开发，建设能源基地，有着同样重要的作用。

1.2.2 节能的可能性

我国的节能任务虽大，但节能潜力也大。把任务和潜力联系起来，可以有根据地认为，经过努力，实现我们上面所提出的节能目标是完全可能的。

为了说明我国的节能潜力，可以把我国当前的能源利用情况同世界上经济发达国家的能源利用情况作一个粗略的对比。现今世界上能源利用综合效率的先进指标已经超过50%，而我国的全国能源利用效率，据估计不过是26%。按一定量能源所创造的产值来比，八十年代初的日本为我国的四倍有余。在我国，许多重要产品的单位能耗比国外先进水平要高出不少，如钢、合成氨、水泥、平板玻璃和机制纸等，其单位能耗均高出国际先进水平的能耗一倍，甚至一倍以上。当然，中国和外国的情況和条件不同，并非完全可比，但上述粗略数字也足以启示我们，在节能方面我们是有潜力的，我们的节能目标经过努力是可以实现的。

1.2.3 节能的长期性

前一个时期，我国对能源开发项目安排较少，由于投资量和建设周期的实际限制，近期能源产量不可能有大幅度的增长。因此，在最近几年要保证国民经济的发展速度，节能的作用就显得更为重要。所以，近期把节能放在优先地位的方针，是完全适合我国的实际情况的。不过这一方针绝不意味着节能仅是短期的权宜之计。

节能任务不是几年就能够完成的，也不是一、二十年就能够完成的，它是一项长期的战略任务。事实上，即使完成我们上面拟定的节能目标，在用能水平上也只达到了七十年代或八十年代初的世界先进水平。显然，这一水平远非节能目标的终点。节能原理告诉我们，即使对于当今能源利用比较先进的国家，节能潜力也没有现实的限制。正因为如此，现今居于能源利用效率最前列的日本对节能依然异常重视，节能实施的效果依然很显著，1980-1981年的年节能率还高达4.7%。其它如西德、法国以及美国 and 苏联，无不对节能给予高度重视，并不断取得新的进展。我国的节能工作，尚处于初期阶段，对于节能更应有长期的思想，作长

远的安排。

1.2.4 节能与现代化

节能的意义不仅仅在于减少单位能源消耗，增加单位能源产值。事实上，社会性节能工作的开展，要求对落后设备、落后工艺进行改造，要求提高生产技术、改善经营管理、传播科技知识、健全体制与法律、加强环境保护等等，而这些也正是现代化建设所要求的内容。由此可见，节能与现代化建设是密切相关的。如从更高的角度去理解节能的战略地位就会发现，节能促进着现代化建设的进展，同时，也只有成功地进行现代化建设，才能使节能步步深入。

1.3 节 能 原 理

1.3.1 节能的环节

节能既是技术性、经济性很强的任务，又是跨越时间、跨越地区、跨越部门和行业的具有很强综合性的工作，因此要实现节能，就要涉及到一系列的环节。对节能任务的这一双重特点不认识或认识不足，对节能各个环节的重要作用没有充分估计，就很难全面地实现节能的目标。

产品单位能耗的高低，往往直接标志着技术水平的高低。所以，技术进步与节能的进程，常是相伴进行的。具体地实现某种产品的节能生产或节能使用，需要对所论产品的生产工艺或使用过程的个性有针对性地进行深刻的研究。节能的技术性与经济性是不可分割的矛盾统一体。为创造经济而有效的节能技术，这种针对过程的个性所进行的研究常常要花费很大力气，越是节能的高级阶段，节能的难度也越大。当代高水平的节能工艺与节能产品，常常是世界上为数众多的科研机关和工厂企业耗用大量资金经过长年累月的努力所取得成果的结晶。

具体的节能技术终究带有局部性质，它只有与全局性的环节结合起来，才能在实现全面的节能目标中发挥其应有的作用。譬如一个国家或一个地区，尽管节能技术先进，但产品结构不合

理，高耗能产品过多，那么从大局上就决定了单位能耗的产值不可能很高。能源使用的定额管理制度、能源的价格政策、信贷税收政策、奖惩政策等有关节能的方针、政策、规章制度，也属于大局性的，解决好了就能极大的调动各方面的积极因素，为实现节能目标，持久地开展节能工作而发挥作用。为了实施有关的方针政策，执行有关的规章制度，一个由相对稳定的专业人员组成的、从中央到企业具有统一性的、跨越地区与行业具有整体性的节能管理组织，也是实现节能的至为关键的一环。这表明节能的推进除了涉及节能技术与节能经济以外，还涉及节能规划、节能政策、节能立法、节能管理等许多环节。

在众多的环节中，有一个环节是带有基础性的，那就是节能教育，包括节能的宣传与培训。科技教育是一种效应滞后作用长期的潜在生产力，是意义深远的智力建设。节能是和每个人都有关的事。通过教育，使广大群众特别是能源工作者及各级能源规划管理人员领悟节能的战略重要性，通晓节能的基本知识，就会为节能工作持久扎实的发展奠定基础。

1.3.2 节能原理的任务与对象

使更多的人通晓“节能原理”是节能教育的一项重要内容。节能原理的依据是“能”的科学，是能及能的转换的客观规律性，它的任务在于科学地估计节能潜力的大小，确定潜力的部位及其分布，指出潜力的限度及节能措施的指导原则，藉以规定节能的近期任务与战略目标。

上面已经谈到，节能的推进要涉及到许多环节，每一环节都有其自身的丰富而具体的内容，对这些内容一知半解缺乏实际的体验，就做不好那一环节的工作。节能原理并不能为节能技术、节能规划、节能政策等等环节提供具体的答案。然而由于节能原理所探讨的是能的本性，是关于节能的一些大原则问题，因此它的重要性是不容低估的。在节能实践的历史和现实中，由于不掌握节能原理而走弯路、浪费资金、贻误时间的事例，是屡见不鲜的。由于不掌握节能原理，就有可能提出不恰当的节能指标，作

出不恰当的节能战略决策，批准不恰当的节能技术方案。可见，在一定深度及广度上掌握节能原理对节能技术工作者是异常重要的，对能源经济、能源管理等领域的工作者，对所有热心于节能的人，也是必须的。

1.3.3 现代节能原理

节能原理的依据是能及能的转换的客观规律性，即对能的本性的认识。对于能的本性认识的当代水平，早在上世纪的中叶就已达到，其标志就是热力学第一定律与热力学第二定律的建立。

热力学第一定律即能量守恒定律。这一定律指出：能是物质运动的量度，能有各种不同的形式，当任何一种形式的能量被转移或转化为另一种形式的能量时，能的量不发生变化。根据这一定律可知，自然界的能量在任何情况下，既不能被创造，也不能被消灭。热力学第一定律具有原则的普遍的重要性，是人类认识自然与改造自然的有力武器。正是由于这一定律的指导，使人们解决了并正解决大量的科学与技术问题。第一定律的思想已经深入人心，成为一切能的计量、能的定量计算以及分析研究有关能的各种问题的理论基础。节能问题的研究与分析由来已久，其传统的方法主要是以热力学第一定律为依据，并沿用至今，称为第一定律分析法。热力学第二定律的理论在节能研究中广泛的自觉的运用，是在本世纪五十年代以后的事。

如果说热力学第一定律所涉及的是关于能在“量”的方面的本性，说明能在量上的守恒性，那么热力学第二定律所涉及的就是能在“质”的方面的本性。所谓能的质就是能的品位，或能的可用性。当任何一种形式的能量被转移或转化为另一种形式的能量时，其品位常发生变化，但只可能降低或不变，绝不可能提高。根据这一定律，能具有丧失其可用性的特性，或者说，能在质上具有贬值的特性。在量上的守恒性和在质上的贬值性，就构成了能的全面本性。

现代节能原理与传统的节能原理不同，它所依据的不仅是热力学第一定律，而是同时依据第一、第二两大定律，并通过最直

观最实用的方式，体现能的全面本性，而由此建立的节能原理的理论和方法，称为第二定律分析法。热力学参数“炯”（音 yòng）^① 是第二定律分析法的产物，又是第二定律分析法的有力工具。主要借助炯来进行节能分析的方法叫炯分析法，属于第二定律分析法的范畴。近年来在节能原理领域中又出现了一种新的发展，把炯分析法与经济因素以及优化理论有机地结合起来，称为热经济学。本书正是企图按照现代观点对节能原理进行阐述的一种初步尝试。

① 炯，原文 *exergie*，是 1956 年 Rant 建议命名的。1957 年民主德国学者 N·Elsner 来华讲学时把该参数介绍给我国，由南京工学院夏彦儒、王守泰教授等译为“炯”。详见第四章。

第二章 节能潜力的基本概念

2.1 节能潜力的第一定律分析法

节能潜力是否存在以及节能潜力的大小，是节能工作中首先要回答的问题。传统的和习用的方法是用热效率的高低来估计节能潜力，热效率越低就说明节能潜力越大。另一种方法就是用能量平衡或热平衡的方法估计节能潜力，把能量的来龙去脉绘成能流图，从中可以清楚地看出有多少能量被损失，多少能量体现到终端应用中去。不论热效率的方法还是能流图的方法，其依据都是热力学第一定律，属于第一定律分析法。

第一定律分析法是迄今人们最习用人因而也是应用最广泛的分析节能问题的方法。这种方法的优点在于符合人们的传统概念，容易理解和掌握，如果运用得当，在不少场合可以得出正确的结论，特别是在节能的初级阶段，可对节能实践起到很好的指导作用。然而，应当意识到，第一定律分析法有很大的片面性和局限性，因为它所依据的仅仅是能的本性的一个侧面，即能在量上的守恒性，而不是能的全面本性，这就不可避免地使得单纯从这一分析法得出的结论带有不科学的成分。有经验的能源工作者在运用第一定律分析法时，总是自觉不自觉地同时运用着第二定律的概念，因而才能成功地解决一系列的能源课题。如果完全忽视热力学第二定律，单单从能量平衡或热效率的角度去考察问题，就会使我们对“能”这样一个基本的问题产生不少模糊的认识，提出一些似是而非的说法。请看以下实例。

2.2 第一定律分析法的不足之处

2.2.1 对节能潜力的战略估计

就世界范围来说，在十九世纪以前，人类对于能源的利用效

率长时期地保持在低水平上。这时，不论用第一定律分析法还是第二定律分析法，都会得出节能潜力很大的结论。从十九世纪晚期到二十世纪的五十年代是能源利用效率大提高的时期，在这一时期内各种不同动力装置或用能设备的效率大约提高了五倍至十倍。在这之后的二、三十年以来，能源利用效率的增长速度呈现了平坦的趋势，而在同一时期内能源的需求量却迅猛增长，使得能源的供需矛盾变得日益尖锐。在这种局势下，一个很现实很迫切的问题就是对节能潜力的战略估计：究竟进一步地大幅度地提高能源利用效率的可能性还存在不存在？如果存在的话，节能的潜力在哪里？对这一问题的回答，第一定律分析法与第二定律分析法得出了很不相同的结论。

1970年美国全年的能源消耗量为 $64.7 \times 10^{15} \text{Btu}$ ，折合标准煤 $23.3 \times 10^8 \text{t}$ ，其中有效利用部分为 $32.6 \times 10^{15} \text{Btu}$ ，相应的能源利用效率达到50.4%。这是如图2.1所示的1970年美国全国的能流图显示的结果。从这一结果可以看出，美国的能源利用效率是相当高的，在每使用一个单位的有效能量中，只伴随着大约一个单位能量的损失，说明节能潜力虽有，但是也不大了。这是第一定律分析法的结论。Reistad, G.M.[49]对同一年度相同的原始数据用第二定律分析法进行了分析，分析的结果以焓流图的形式示于图2.2。因为焓流图是依据热力学两大定律绘制的，所以它比图2.1更科学、更可信。从图2.2的分析中所得出的结论与第一定律分析法的结论有相当大的差异，该图显示：在每使用一个单位的有效能量中伴随着大约三个多单位能量的损失，说明节能潜力还相当大，因而能源利用效率的大幅度提高，在原则上是完全可能的。

关于节能潜力的宏观分布情况，两种分析方法所得出的结论也不相同。针对美国1970年的情况按第二定律分析法可以算出，电力部门的能源利用效率为36%，工业部门为36%，交通运输业为20%，民用和商业则为13.7%。据此可以断言，节能潜力主要存在于后两个部门。这一断言与第一定律分析法的结论不相吻