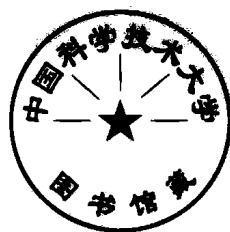


TK1
4/42

热 经 济 学

杨东华 著



华东化工学院出版社

· 内容简介

本书就热经济学结合国内外最新的研究成果,作了初步的总结和介绍。具体内容包括:绪论、统一烟损成本模式、烟经济学的代数模式、烟经济学的孤立优化模式以及过程合成的热经济学方法。

本书是新兴的交叉学科——热经济学的入门读物,可供工程热物理、化工、动力等专业的科技人员参考,也可作为有关专业本科生、研究生的教材。

责任编辑 袁明辉

责任校对 潘乃琦

热 经 济 学

re jing jixue

杨东华 著

华东理工大学出版社出版

(上海市梅陇路130号)

新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 2.375 字数 49 千字

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数 1-1,500 册

ISBN 7-5628-0082-0/Z·25 定价 0.55 元

目 录

1 绪论	1
1.1 热经济学的研究对象和内容	1
1.2 热经济学的历史发展	2
1.2.1 J.H.Keenan与热电联产装置的电和蒸汽的定价	2
1.2.2 损失功率(千瓦)法与George A.Goodenough	2
1.2.3 制造厂商中热电联产的蒸汽和电的定价	4
1.2.4 50年代末到60年代初的发展 —— 烟经济学的另一些应用	5
1.2.5 60年代末和70年代初的发展	6
1.2.6 热经济学在我国的发展	6
1.3 烟经济学的模式	7
1.3.1 统一烟损成本模式	8
1.3.2 烟经济学的代数模式	8
1.3.3 烟经济学的孤立优化模式	8
2. 统一烟损成本模式	10
2.1 系统为求方推动区时	13
2.2 系统为资源限制区时	13
2.3 讨论	14
2.4 实例——蒸汽管道管径及其热绝缘厚度的确定	16
3. 烟经济学的代数模式	20
3.1 产品烟单位成本相等规则	22
3.2 蒸汽烟单位成本相等规则	23
3.3 电作为副产品规则	25

3.4 蒸汽作为副产品规则	26
3.5 讨论	27
4 炯经济学的孤立优化模式	29
4.1 拉氏乘子法	29
4.1.1 目标函数	29
4.1.2 一般原理	30
4.1.3 讨论	34
4.2 直接法	35
5 过程合成的热经济学方法	39
5.1 换热网络的合成	40
5.1.1 热回收的热力学极限	40
5.1.2 问题表格法	43
5.1.3 热阱子系统的设计	53
5.1.4 热源子系统的设计	56
5.1.5 节能与投资的权衡——由最大热回收设计原则 到最小单元数设计原则	58
5.2 目标的超前优化	62
参考文献	71

1 绪 论

1.1 热经济学的研究对象和内容

热经济学是本世纪50年代末至60年代初兴起的一门研究热系统经济运转的应用性新兴学科,也是热力学与经济学和系统工程学结合而产生的一门交叉学科。

热经济学的研究对象是热系统的经济行为。所谓热系统,乃是指它通过能量传递-转换,能对社会提供有用商品的一个技术组合实体。因此,动力系统、化工系统均可视为这样的实体。可见,热经济学是一门微观经济学。

热经济学目前可解决下述问题:

(1) 合理确定各种商品的成本。例如,热电联产装置的电和蒸汽的合理成本的确定;又如,各种化工产品的合理成本的确定。

(2) 热系统的最优设计。例如,蒸汽管道管径及其保温层厚度的确定。

(3) 热系统的最优运行。例如,如何确定热系统的各种参数,以保证热系统的最经济运行。

(4) 热系统各种方案的可行性研究。例如,通过计算研究各种方案的商品的成本,以比较各种方案的可行性。

1.2 热经济学的历史发展

1.2.1 J.H.Keenan与热电联产装置的电和蒸汽的定价

文献中第一个应用焓*成本这一概念的应为J.H.Keenan.^[1]当时,美国东部大公司的工程师坚持按所耗的能量来定热电联产装置中热和电的价格。按这种方法定价,热电联产的电价远比电单产的电价为低。J.H.Keenan认为燃料中含有推动变化的势,这种势的一部分转移到了产品中,而另一部分则消耗于完成这种产品的生产过程中了。他认为每一种产品应按这两部分势之和来定价。他指出:蒸汽和电的价值在于“有效能(Availability)”而不在于能(Energy)。据此而得到的电价便与传统的单产电的电价一致了,而据此得到的蒸汽价却远低于电价。J.H.Keenan的建议被用户和公司双方接受,但却换了一种形式(参见1.2.2)。

1.2.2 损失功率(千瓦)法与George A. Goodenough

虽然,J.H.Keenan的建议未被广泛采纳,但却因此推动了损失功率法的发展。

按此法,热电联产的热和电的价格是这样来确定的:即假设此电乃由一凝汽式透平生产,而其余的损失功率就作为蒸汽的成本。

虽然,损失功率法从形式上不属于焓法,但本质上却确系

*关于焓及有关知识,请参阅杨东华著的《焓分析和能级分析》,此书由科学出版社1986年出版。

J.H.Keenan 建议的焓(有效能)法。因为, 损失功率除以透平效率确实等于蒸汽的焓降。

如图1所示, 损失功率为 $-\Delta H$, 而焓降为 $-\Delta H_0$ 。所以

$$-\Delta H_0 = -\Delta H / \eta. \quad (1)$$

J.H.Keenan 的建议是根据热力学第二定律和焓(有效能)的概念提出的。但在工程界, 热力学第二定律的概念不易被接受。事实上, 迄今为止, 熵、焓和热力学第二定律在工程实

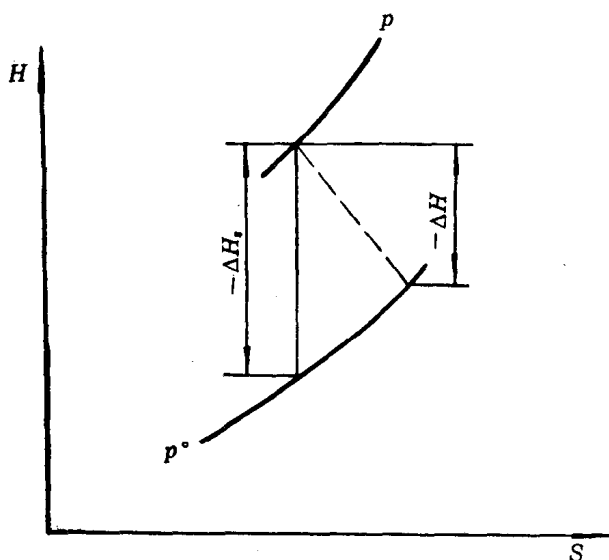


图1 焓—熵图

践上未能得到应有的重视和应用。当时, 工程界对熵、焓和热力学第二定律的应用, 仅限于一个等熵过程; 对焓的理解是狭义的, 仅作为“作功能力”来理解。由于, 当时工程界对熵、焓和热力学第二定律的有关知识如此贫乏, J.H.Keenan 的建议受阻, 这是可以理解的。

但是, 从历史上看, J.H.Keenan 的1932年发表的经典性

的论文,是提出损失功率法的一个推动力。此法后来发展成为克服电价计算不一致的一种方法。

Illinois大学教授George A. Goodenough是美国最早发展焓法的有贡献的学者之一,在其教科书中,对焓和热力学第二定律有深入的阐述。其中,有根据蒸汽和压缩空气的焓值来定价的章节。H.B.Philbrick 将发展损失功率法归功于George A. Goodenough。显然,损失功率法比较合乎工程师的思想方法。

可见,热经济学发展的早期,只有少数几个人在从事这方面工作: J.H.Keenan在美国东部;George A. Goodenough在美国中西部。

由此看来,热经济学这一学科的起因是热电联产装置中的蒸汽和电的定价问题。这或许是在这一领域内,为何热工界从事这方面工作的人始终占有优势的原因。

1.2.3 制造厂商中热电联产的蒸汽和电的定价

以上仅限于讨论产电单位(热电厂)。对于自产电和蒸汽的制造厂商,蒸汽和电的定价问题的研究,发展缓慢。事实上,制造厂商按能量基准作为定价依据,迄今依然很普遍。

对制造厂商,一般自产蒸汽,但可自产电也可外购电,故需对是否自产电进行研究。这要根据自产电的费用与外购电的费用进行比较。

若一制造厂商经决策后自产电。不幸,在这种情形下,电往往作为副产品来定价(电价偏低),而蒸汽往往作为单产蒸汽来定价(蒸汽价偏高)。例如,有一制造厂商的热电联产装置,电自给有余,外售给居民多年。因其按能量基准且作为副

产品定价, 电价当然很便宜。在这种情况下, 若该厂中没有一个人通晓按烟定价且电可不作为副产品定价的工程师, 则厂商和居民双方可相安无事。但当电不够, 需要外购。因外购电往往按单产电定价, 价格昂贵。这样, 外购电价便高于外售电价, 但按法律, 它要继续外售电。这就有经济损失。最后, 迫使它终于懂得了用烟法定价是合理的。

但是, 有许多厂商没有发生这种事件, 它们依然按能量定价。这将导致错误结论: 关于计算不同产品或不同部门之间的相对经济效益的错误结论。最后将导致资源分配的不合理。

1.2.4 50年代末到60年代初的发展 —— 烟经济学的另一些应用

以上只限于讨论热电联产中蒸汽和电的定价问题。

1948年, M. Benedit 在麻省理工学院的一个讨论班上, 讨论了空分装置中烟耗散的成本并概略地讨论了如何用成本的概念优化各单元和全装置的参数。不幸, 此次讨论班的资料没有发表。若及时发表, 或许是对烟经济学的一个推动, 会使烟经济学更早地得到发展。

50年代末, 烟经济学在美国两处分别得到了较大的发展。

在加州大学, M. Tribus 和 R.B. Evans 研究了海水淡化过程, 从研究烟分析法到进而研究烟经济学。Tribus - Evans 方法是跟踪全厂内的现金流与烟流。现金流和烟流总是方向相对的。他们的文章发表于60年代中期。

60年代初, 在威斯康辛大学, R.A. Gaggioli 在 E.F. Obert 指导下, 进行博士学位论文的研究工作^[2]。他研究了蒸汽管道管径及其保温层厚度的优化问题。这里, 烟内外损失以发

电量损失计。

1963年, R.B. Evans 和 R.A. Gaggioli 相识, 交流了彼此的学术思想。

1.2.5 60年代末和70年代初的发展

1964年, 埃及阿苏脱(Assuit)大学教授 Y.M. El-Sayed 参加到这一领域, 并与 M. Tribus 和 R. B. Evans 合作。他们在70年代初发表的数篇论文^[3], 奠定了 Tribus-Evans 的工作的数学基础, 使之普遍化。

原先, Tribus-Evans 的方法有两个困难:

- (1) 如何从理论上保证局部优化导致总体优化。
- (2) 如何保证子系统之间的协调。

经过引入拉格朗日乘子和严格的解析方法之后, 可保证协调, 上述两个困难在一定条件下被克服了。

60年代末, 在威斯康辛大学, G. M. Reistad 从事博士学位论文的研究工作, 他用炯经济学的概念研究了总能系统, 他用 El-Sayed-Evans 优化方法同传统优化方法进行了比较。

70年代中期后, 炯经济学发展迅速。

1.2.6 热经济学在我国的发展

自1957年民主德国 N. Elsner 教授来华讲学, 将炯这个概念介绍到我国后, 引起了我国工程热物理和化学工程的科技工作者的关注, 开展了为数不少的研究工作, 而且工作越来越深入*。

*详请参阅: 杨东华, 第二定律分析法的发展与现状, 第四届《节能与第二定律分析法》学术讨论会专题讲座集(上), 1-9页。

关于热经济学在我国的进展,主要有:

王加璇^[4]系统地总结了炯经济学的理论和方法,以及他在美期间与M. Tribus、Y. M. El-Sayed 共同研究拉格朗日乘子法应用于燃气轮机系统分区优化所取得的进展。

华贲^[5]提出了工艺过程用能三环节的理论。该模式创造性地应用了R. A. Gaggioli 提出的炯经济学的代数模式,为炼油工程的建模热经济分析提供了基础。

王玲、朱克雄等^[6]运用五种不同方法对一个总能系统的电、热水和冷冻水等载能产品进行了炯成本分析,为炯经济学的实用化起了积极促进作用,并在经济边界条件的研究方面取得了进展。

冯霄、钱立伦、苏长荪^[7]以及蔡祥兴、杨东华^[8]在简单系统热经济整体优化方面做了一些工作。

李晔^[9]证明了只有当系统为线性时,孤立化原理才成立,因而,补充了Tribus-Evans-El-Sayed 提出的炯经济学的孤立优化模式。

袁一、胡德生^[10]在其专著中,结合我国国情对热经济学研究任务的提出,有精辟的阐述。

此外,朱明善等^[11]和李晔、王加璇、宋之平^[12]在这方面也有工作报导。

1.3 炯经济学的模式

炯经济学的模式,就实质而言,目前主要有三种。

1.3.1 统一焓损成本模式(Costing of Exergy Consumption and losses)

这一模式的主要思想是:在全厂或全装置范围内,用统一的(单位)成本支付焓损(包括内部焓耗散和外部焓损失)。显然,这一模式是不够合理的,因为各处(各单元或各子系统)的单位焓损,其经济价值不同,应当支付的成本也不同。

这样,就发展为按不同区(子系统)支付不同的单位焓损的模式。这就是焓经济学的代数模式。

1.3.2 焓经济学的代数模式(Algebraic Methods of Exergy Costing or Costing of Exergy Stream)

这一模式的主要思想是:对每一个区,按现金平衡(Money Balance)方程和辅助方程,求得输入、输出每一个区的焓流的传递价格。实即按此传递价格支付各区的焓损。

这一模式简单直观,易于掌握。但这一模式只能给出各区之间和系统边界上的经济状况(传递价格),而不能直接反映系统中某一部分的变动对其他部分的影响,或系统的某个参量的变动对其他参量的影响。这就是不能把系统作为一个总体来研究,以求得总体优化。

1.3.3 焓经济学的孤立优化模式(Autonomous Methods of Exergy Costing for Optimization)

与上一模式不同,用这一模式,可通过系统的目标函数优化,获得总体优化。运用这一模式,我们还可将系统分解为若

干区(子系统)并使之“孤立化”,以局部优化代替总体优化。这样,既可避免数学上的困难,又可减少计算工作量。但遗憾的是“孤立化”在实践中难于实现。故就目前发展水平而言,这一模式尚未成熟。

若后一模式能进一步完善,则后两模式可相辅相成。前者可用于方案可行性研究,后者在前者确定方案之后,可用来进一步优化该方案。

2 统一焓损成本模式

前已述及,这一模式的主要思想是在全厂或全装置范围内,用统一的成本支付焓损。但这有两种情况:当系统的输出(产品)率给定时,单位焓损成本就等于单位燃(原)料焓成本,即系统的焓损统一以燃(原)料(焓)成本支付,这个系统(区)称为“求方推动区”(Demand Driven Zone);相反,当系统的输入(燃料)率给定时,系统的焓损统一以产品(焓)成本支付,这个系统(区)称为“资源限制区”(Resource Limited Zone)。

不论上述两种情况的哪一种情况,焓损成本的计算只是一个近似值。

例如,两个单元(子系统)串联联接,后一单元的焓损成本应是前一单元焓损成本的 $(1/\eta_{n+1})$ 倍。对复杂系统,单元间相互作用更为复杂。

当我们进行设计时,要对每一单元焓损成本和固定资产折旧这两方面权衡孰重孰轻,由此对每一单元作出究竟要否增加或降低固定资产的决策。例如, Y.M.El-Sayed和M.Tribus(1983)曾用此法改进了一简单化工厂的流程和调整运行参数。

此模式尚可用于优化焓损成本对固定资产间的权衡问题。

例如, R.A.Gaggioli (1961)用此模式优化了蒸汽管道管径及其热绝缘厚度尺寸; C.Tapia 和 M.J.Moran (1986)优化了换热器; M.Benedict 和 E.P.Gyftopoulos (1980)优化了空分厂的主换热器(M.Benedict 1948年在麻省理工学院的一个

讨论班上报告过此工作); K.F.Knoche 和 K.Hesselman (1986)对空分厂作了总体优化,求得了压缩机的最优级数、塔压、回流比和换热器的温差; E.Sciubba 等(1984)分析了热电联产厂。

这里所谓的“优化”并不严格,这是因为:(1)如上所述,焓损成本的计算是不严格的;(2)用局部优化所得参数往往不等于整体优化所得参数,即局部优化的总和往往并不等于整体优化。只有对线性系统,局部优化的总和等于总体优化(参见4)。

现举例来说明此模式及其应用。

若有如图2所示的系统,该系统有两股原料流输入,有两股产品流输出,其中产品B流有反馈,系统内部有焓耗散,对外有焓损失。

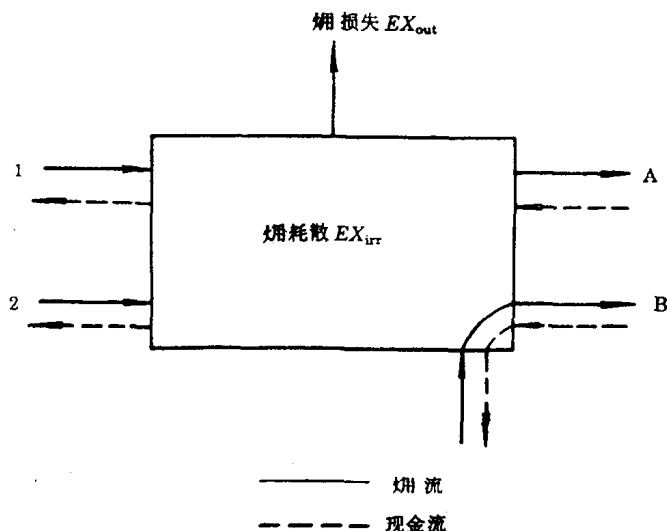


图2 两股原料流和两股产品流的热系统

对此系统,有烟平衡方程

$$EX_1 + EX_2 = EX_A + \Delta EX_B + EX_{irr} + EX_{out}. \quad (2)$$

有现金平衡方程

$$c_A EX_A + c_B \Delta EX_B = c_1 EX_1 + c_2 EX_2 + C. \quad (3)$$

式中 EX —烟流;

c —单位成本;

C —固定资产的初投资、运行、维护等费用的年度化成本。

当产品售价 π 高于产品成本 c 时,系统就获得利润

$$P = (\pi_A EX_A + \pi_B \Delta EX_B) - (c_A EX_A + c_B \Delta EX_B). \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),有

$$P = (\pi_A EX_A + \pi_B \Delta EX_B) - (c_1 EX_1 + c_2 EX_2 + C) \quad (5)$$

将式(2)代入式(5),有

$$P = (\pi_A EX_A + \pi_B \Delta EX_B) - \bar{c} (EX_A + \Delta EX_B + EX_{irr} + EX_{out}) - C. \quad (6)$$

式中

$$\bar{c} = \frac{c_1 EX_1 + c_2 EX_2}{EX_1 + EX_2}.$$

式(6)也可写成

$$P = ((\pi_A - \bar{c}) EX_A + (\pi_B - \bar{c}) \Delta EX_B) - \{\bar{c} (EX_{irr} + EX_{out}) + C\}. \quad (7)$$

式(7)是本模式结合本例的基本方程。下面分“求方推动区”和“资源限制区”两种情况,来进一步讨论本模式在两种不同情形(实为两种不同的经济边界条件)下的目标函数。