

热经济学研究的使命与任务

王加璇, 王清照, 宋乃辉

(华北电力大学 动力系, 北京 102206)

摘 要: 阐述了热力学分析的两类基本方法及其发展、熵的基本性质, 说明它是势参数的理由。探究热力学基础研究及与热经济学相关的问题, 提出熵定律对热经济学影响。叙述了热经济学定价法则以及热经济学今后统一方向发展问题的见解。最后简要阐述了在结合生态平衡热经济学中生态系统网络热力学建模方面进展。

关键词: 热力学分析; 热经济学; 生态系统建模

中图分类号: TK123; F407.2

文献标识码: A

1 引言

经过半个多世纪的发展、开拓和实际应用已经证明热经济学是工程的一个极有用的分支, 是分析优化工程系统的强力工具。但我们也要看到: 热经济学毕竟是一门较新的学科, 它不象热力学那样完美和封闭, 它是开放的, 开放给新的研究者来改进其基础并扩大其应用。热经济学的主要用途是紧密相关于过程和热能工程的, 特别是系统分析与优化、运行诊断、改进以及能量系统设计等。在当代复杂的能量系统中有许多问题用传统方法不能解决的而应用热经济学方法却可以迎刃而解, 如浮动价格结构下设备全寿期的经济分析与优化、

根据物理学准则给产品火用定价、系统的内部寻优和诊断等问题。

为了可持续发展, 我们必须节约地使用那些稀有的天然资源, 并保护我们的环境, 在这些努力中热经济学扮演着很关键的角色, 热经济学研究者更当明确自己在可持续发展战略中的使命和任务。

2 热力学基础的探究

热经济学是在火用分析的基础上发展起来的, 因此对热力学(包括火用分析)的研究开发迄今还是很重要的。前面说热力学是完美而封闭的, 这是相对于热经济学而言的, 并非说对热力学理论的开拓和掌握己不再重要了, 恰恰相反, 是非常必要的, 特别是对一些基本概念的理解, 譬如说火用是状态参数吗? 火用和能的关系, 我们现在只能说火用是可以用尽的, 而能却不可能用尽(按能的科学定义, 它是不生不灭的), 因而火用可以作商品, 而能却不可能作商品。这些都反映着对热力学与热经济学基本概念的理解。至于从经济学理论中提炼出一些思想, 来丰富热力学的任务尚未作更多的努力。A. Valero 的火用成本理论给了我们以启迪。他发现

火用分析是确定本原损失的必要手段但非充分手段的遗憾后, 就着力地探讨这问题。发现火用平衡是可以确定火用损在系统各部位上的分布, 但若作决策还是不够的, 因此还得分析过程与产生, 从而得到成本生成过程“因果链”和提出了火用成本理论及“火用成本会计”这个术语。指出常规火用分析必须加上这一步, 才能成为充分手段, 并确认: 重要的不是功能产品中所含的火用量 B , 而是火用成本 B^* 。它是为获得此产品所需付出火用量, 再加上过程累积的不可逆性损失。有个明显的例子说明此问题, 在火用分析刚传入我国初期就有人提出以电与热两种产品中各自所含火用量的比例来作成本分摊的依据, 号称“火用比例法”正是由于上述理由导致该法的谬误。实际上只有追踪各自成本生成过程而得出各自的成本才是正确的答案。须知 A. Valero 的火用成本是作为热力学参量而引入的, 这正是从经济学理论中引出的思想来丰富热力学的一例, 因此我们才把火用成本看作一种理论, 热力学的一些论据本可以用更好的语言来表述, 这就有待于从经济学中提炼出更准确的思维来丰富它。

火用是不是系统(体系)的状态

收稿日期: 2001-06-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000026307)

作者简介: 王加璇(1930-)男, 山东龙口人, 华北电力大学教授。

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参数呢?是也好,不是也好,都不是轻而易举作出结论的,因为热力学的突出特点之一是利用少量的定律和基本概念来演绎出大量计算式或关系式,用以解决热工计算和论证问题。因此,准确地把握这些概念是至关重要的,不能有任何的主观随意性。热经济学是在溯本求源的探讨中发展起来的,所以还须沿着热力学分析发展历史来考察此类问题。

热力学分析从其诞生起就走着两条不同的路线^[1]:一是在卡诺和克劳修斯所奠定的理论基础上经过长期的运用而形成,利用系统能平衡概念进行分析的方法。它可以进行各种技术经济指标计算,从而评估其完善程度。其方法论是把所分析的系统与卡诺理想循环进行比较,看它能接近的程度来评价其优劣。一部热力学发展的历史可概括为这种使实际循环向理想循环接近的不断追求中发展起来的。因此,这条路线比较深入人心,再加上简单易行,使之形成不易改变的习惯,这就是人们常说的“热力学第一定律分析法”。迄今仍在控制着相当的领域。但尽人皆知这种方法不能反映能的质方面因素是其一大缺欠。

第二类方法基本上是以吉布斯的理论为基础,利用热力学势的概念而形成的方法,吉布斯所推导出的自由焓和亥姆赫兹推导出的自由能分别成为开口系与闭口系的计算基础,进而演化成为第二定律分析中的“焓”。此焓如果一定要称它为“参数”,那么它就应该是系统与环境共有的参数,是它们之间的势参数。因为它不但取决于系统的参数,而且也取决于环境,因此用可靠的方法选定热力学势或基准就成了此

法的关键,这类方法就是人们所称道的“热力学第二定律分析法”(当然还包括熵分析和损失功分析等)。

关于 II 律分析的起源,早就有人表述了其分歧,欧洲人一直强调的是 Gouy-Stodola 所开端的。不错,他们分头推算出的公式 $D = T_0 \Delta S^{\text{cr}}$ 迄今仍为人们所重视,成为化工界常用的“损失功”分析法 (lost work analysis) 的重要基础。

焓概念很早就在欧洲以“作功能力”或“作功性能”的术语而使用。这要比 Keenan“设计”出的 Availability 函数(1932)早若干年。1986 年 El-sayed 与 Gaggioli 代表美国热经济学两大学派合著文章,希望统一一些问题的看法,但也未完全一致,指出在欧洲起源于 Maxwell,而在美国则起源于 Gibbs。本文讲 II 律分析是建立在 Gibbs 理论的基础上,并非说起源的问题,只是因为 Gibbs 导出自由焓与亥姆赫兹导出的自由能所建立的势参数的概念,这个概念一直在“可用能”与“不可用能”的术语下使用而延续着,即使在克劳修斯理论为基础的方法绝对盛行的年代在北美大陆也从未间断过。因此说焓是系统与环境共有的参数(势参数)是有根据的。

从原本意义上讲, I 律分析其实也不是一向忽略不可逆性损失,文献[1]介绍,曾使用过一种方法将这项损失之和作为能平衡分析的补充计算,即在能衡算之后,再计算过程各点上的熵增,将其和乘以环境(基准态)热力学温度,作为不可逆性总损失,从衡算结果的总收益中减去。从前有人称此法为“循环一焓”方法,但是长期以来人们习惯地忽略了这项

熵统计的计算,而只剩下现在所谓的“常规能平衡”计算。于是获得一项突出的“优点”—计算简单,但却带来了一项重大缺陷,偏离了问题的实质。

熵定律对热经济学的关系,可能是更深入一个层次的研究课题,这个领域几乎尚无人涉足。关于经济过程的熵本质 Georgescu Roegen 写过一些东西,但尚未引起人们的注意,他曾指出“熵定律本身就成为所有自然定律中,本质上是最经济的经济过程,而熵定律还只是更普遍事实的一个侧面…”^[8]这个侧面包括对这些话的理解真还值得探索,愿与有志探讨者共勉。

3 热经济学定价法则的问题

热经济学定价法则成为热经济学的中心问题,焓的价格化是焓分析走向实用化的必由之路。自从热经济学问世以来各个学派都有自己不同的定价法则^[3~4],如“孤立化”模式热经济学主张在各个子系统边界上给焓定价,并且作了论证^[4]。这种定价法则很有利于分析系统的黑箱法,虽然也是一种简化,但并不失去明显的精度。代数模式者则主张在子系统的中心点上定价,而 G. Tsatsaronis 学派则以子系统的平均焓价来定价,近年来又与 A. Valero 合作,在其平均定价的基础上建立了“AVCO”法则,而后又提出了“后进先出”(LIFO)法则。这样一个看来简单的问题却出现了众多的法则,而 1986 年 El-sayed 与 Gaggioli 合作的文章在 ASME 杂志上分两期发表标题就是“A Critical Review of Second Law Costing Method”。实际上通过定价方

法画龙点睛地回顾了热经济学从诞生到发展全过程中所遇到的问题, 可见此问题的重要性。

Valero 等人在焓定价(成本)上有其独到的见解, 他们认为热力学第二定律所提供的信息是不够的, 但“只要不走出物理学范围”就可以找到答案, 其方法也很简单, 只要求正确的定义焓效率 η 使之等于输出的有效焓除输入系统的焓, 这样定义的焓效率的倒数就是单位焓的成本。

Valero 因其焓成本是作为热力学参量提出来的, 因此其焓成本种类较其他模式者多了一倍, 并且在代数成本与微分的两种成本各都加倍。我国学者在焓定价和焓成本理论方面所作贡献很少见, 这与我国经济正从计划经济模式走向市场经济的实际不能说没有关系。

4 热经济学今后向统一方向发展的问題

考察热经济学的近期发展, 确实有着明显地向统一方向发展的趋势, 早在 1999 年 Valer. 等人就已经提出关于热经济学理论与方法论的统一化的问题, 2000 年他与 B. Eilach 合作发表了以“结构理论”所提供的方法作“热经济学的共同标准”。这些做法都有利于推动热经济学的发展, 但是我们知道统一只是相对的, 而不统一才是绝对的。现在推出的共同标准新方法的建议, 用不了多久就会被另一种更高的新方法取代。热经济学分析所用的数学表达式基本上都是一元齐次方程, 有一些个别例外的只要稍加处理, 剩下的仍是一元齐次方程, 而把一些难以处理的难点集中于某一系数, 如结构系数模式热经

济学, 把问题留给了结构键和外部键系数的计算上^[4]。而 Eilash 的结构理论提供的方法为使各单元都能排成一进一出的子系统, 而将例外的单元虚拟成为“汇合点”和“分流点”, 单独处理, 剩下的都是以一元齐次方程所描述的单元。这也是它所以能囊括以前的各种不同模式的重要原因, 同时也是最容易将它们以对角矩阵或几乎对角矩阵来表述的原因。

在开发新的数学模式中, 一些在 I 律分析中使用过的好方法, 也不妨移植过来加以利用。因 I 律分析虽有欠缺, 但使用得年深日久相对成熟, 如美国 GE 公司培训总工程师塞利斯贝利积多年热力系统计算的经验所开发的组合结构法^[3], 颇具优点和特点, 只要换上焓做指标, I 律分析所固有的缺点也被克服了。而能起到“旧瓶装新酒”的作用, 当然更重要的借鉴应该从实质上去考虑, 而不单纯是唯象的。

以上所谈, 虽限于篇幅未能充分展开, 可能是一举之得和一孔之见的体会, 但可提供热经济学建模和使用方法论的选择作参考。

5 考虑生态平衡与生态系统建模问题

我们所居住的地球不仅渺小, 而且已经毁坏成了百孔千疮。大批热带雨林被砍伐, 温室效应年甚一年。生态平衡遭到严重破坏, 全球气候异常。许多水域出现赤潮, 厄尔尼诺和拉尼娜现象交替出现, 连年不断……

将生态平衡结合于热经济学一起优化, 可使一个工业系统在其设计甚至在规划阶段就考虑到生态环境的保护, 而避免以往常

见的“先污染后治理”的错误做法。实际上生态系统都有一个接受污染和损坏的“缓冲容量”(Buffer Capacity), 超过此量就不能自行恢复了。先污染后治理往往是超过此量很久才治理, 造成生态难以恢复的破坏。

生态学是研究在生物圈(Biosphere)内物质与能量相互作用的科学, 而生物圈是在一个绵长(> 35 亿年)的演化过程中形成的, 可以把它视为热力系统。其输入是以光合作用而吸收太阳的辐射焓, 然后在生物化学周转中将它转化为高分子焓。俄国的 H. Odum 指出^[1], 从太阳的辐射焓转化到“食物链”以至到发电, 全部能量转化都可以用焓来度量, 所获得的产品的焓值增加必然伴随所消耗“原料”的焓值减少, 其中包括生产过程的排放焓也基本上可以焓为指标, 找到生态系统中一切能流与物流转换, 包括排放的总指标皆为焓的结论, 这是进行结合的前提。

在求解生态系统的方法上, 试探了三种: 一是直接写出生态系统的焓平衡式求解, 但遇到生物焓无从求解的困难, 不知焓自然写不出焓, 又何谈焓平衡, 当然可以用近似解, 但其精度与求解都遇到复杂的后果。因此, 转用了 Prigogine 的耗散结构理论, 但又发现该耗散结构与平衡态之间的非线性关系被假定成线性的, 而 Lyapounov 含义的稳定也被简化为机械的。所以又不得不进行第三种方法的试探, 作法恢复 Prigogine 的假定与简化, 求解实际耗散结构从平衡态中“被拉出”所产生的张力梯度, 若能解出, 则它就是避开生物焓而求得的焓。可是这里就得用微分几何与张量代数, 这类数学工具, 不仅难度

大,而且难以求得数值解。但若宁肯牺牲一点精度,便可用刚臻成熟的网络热力学分析,离散求解^[6],取得一点进展。现采用 M. Kolecky 介绍其研究成果时所用过的方法^[7]:取一最简单、最普通的生物体表皮组织(图 1)为例,以示其解法。

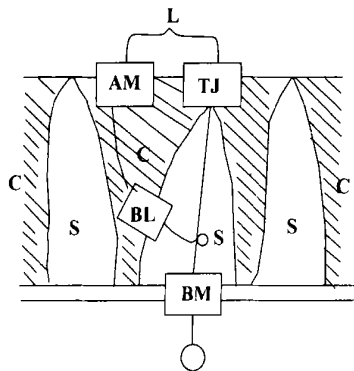


图 1 生物组织表皮膜上构成网络的示意图

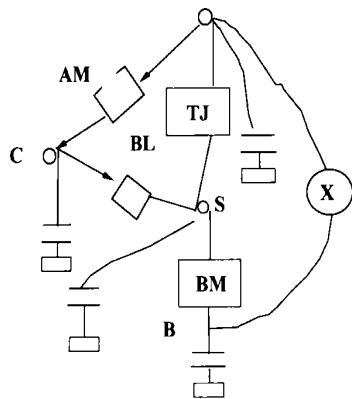


图 2 图 1 模型的网络系统图

此生物体表皮组织以生物膜(AM)与外界接触而吸收光能(L)。外皮由细胞(C)组成,细胞与细胞之间的间隙(S)中流动着某种物质,在其最外层的生物膜中有两细胞紧密联结处(TJ)穿过表皮的最底层(BM)后就与表皮下的血管相连,看来这是很复杂的系统,现用模型网络表示(图 2)却变得简单而清晰了。图中 L 表示外部光源输入, C 表示细胞, S 表示细胞之间的间隙, B 表示

血管,这些在网络中都变成了节点。而把联系个节点分支流(AM)、(BL)、(TJ)和(BM)都视为网络的边,它们都是流动着的非电解质,所消耗节点间势差而流动的。既要流动就要克服流阻、欧姆电阻或化学反应过程消耗的势差(可能是浓度差、密度差、压力差、化学势差或电位差)。其中的流为电阻电流式的流动,可以称为“耗散流”。

此外代表势的各节点还可能产生对比电流,不过在稳定状态下可以忽略。

这类线性网络的最好的数学表达式为事件(关联)矩阵,按节点 V_i 与流 e_{ij} 的关系可排列成矩阵 $A(V \times e)$, 其中 V 为节点数, e 为边数。按下列定义其元素:

- $a_{ij} = \{ +1, \text{如果 } V_i \text{ 为边 } e_{ij} \text{ 上的事件, } e_{ij} \text{ 从 } V_i \text{ 至 } V_j$
- $\{ 0, \text{如果 } V_i \text{ 不为边 } e_{ij} \text{ 上的事件, } e_{ij} \text{ 从 } V_i \text{ 至 } V_j$
- $\{ -1, \text{如果 } V_i \text{ 为边 } e_{ij} \text{ 上的事件, } e_{ij} \text{ 从 } V_j \text{ 至 } V_i$

将 $A(V \times e)$ 展开

$$A = \begin{vmatrix} 1, & 0, & 1, & 1 \\ -1, & 1, & 0, & 0 \\ 0, & -1, & -1, & 1 \end{vmatrix}$$

此外还可以建立另一矩阵,即回路关联矩阵。所谓回路系指在连接的图形中,边的顺序至少有一个为 e 与 V 子集的回路,就是说可以从一指定点出发,周而复始的回到原点。形成回路并不少见,我们更重视的是独立回路。因为这些边中常有的与原边方向相反,而相互抵消,就不能构成独立回路了。这种独立回路的数目为 $l = e - V + 1$ 。

如果是采用矩阵模式热经济学,那么这里列出生态系统的矩阵就可与其它矩阵一起运算处理了

6 结束语

上述观点都是根据平素所掌握的情况和资料,接受“973”高效节能中的关键科学研究中热经济学的任务后我们科研组进行了探讨,认为热经济学研究当前所遇到的应重点思考的问题,有的是直接写出我们的观点,如对热力分析两种方法发展的观点,这里涉及对 I 律分析 II 律分析以及焓为势参数等基本看法;有的则反映我们进行研究的基本情况,如考虑生态平衡热经济学及生态系统建模;还有些只是点出一些需进一步研究的课题,特别是关于熵定律的问题,以及进一步从经济学理论中提炼新的思维来丰富热力学等。把这些问题摆在读者面前希望共讨论,批评,指正,以达学术交流之目的。

参考文献:

- [1] 布罗章斯基. 焓方法及其应用[M]. 王加璇编译. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [2] 王加璇. 热力发电厂一系统设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [3] 王加璇, 张树芳. 焓方法及其在火电厂中的应用[M]. 北京: 水电出版社, 1993.
- [4] 王加璇, 张恒良. 动力工程热经济学[M]. 北京: 水电出版社, 1995.
- [5] VALERO A. A general theory of thermoeconomic[J]. Proceedings of ECOS' 92, 1992. 137-154.
- [6] PEUSNER L. Studies in network thermodynamics[M]. Elsevier Amsterdam, 1986.
- [7] M Kolecky D C Network Thermodynamics a simulation and modeling method[M]. New York Elsevier Science Pub Co INC 72 1984.
- [8] GEDRGESU-REOGEN N. Entropy and economic Process[M]. USA: Harvard University Press, 1971.

(辉 编辑)

热经济学研究的使命与任务 = **Mission and Assignments of Thermoconomics Research** [刊, 汉] / WANG Jia-xuan, WANG Qing-zhao, SONG Nai-hui (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 111 ~ 114

Two basic methods of thermodynamics analysis and its development are expounded along with a description of the fundamental character of exergy, explaining why the latter serves as the parameters of potential. The thermoconomics-related thermodynamics basic research issues are explored, enunciating the influence of exergy law on thermoconomics. The value-setting law of the thermoconomics is described and some observations on its unified-direction development problems are presented. In conclusion, a brief account is given of some advances in the model building of ecological system network thermodynamics in connection with the ecology-balanced thermoconomics. **Key words:** thermodynamics analysis, thermoconomics, ecology system, model building

WNS 型燃油、燃气锅炉技术现状与发展方向 = **Present Situation and Direction of Development of Model WNS Oil/Gas-fired Boiler Technology** [刊, 汉] / WANG Huai-bin, MENG Li-li (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 115 ~ 117

An analysis and comparison is conducted of the construction of existing model WNS oil-fired and gas-fired boiler proper. On this basis the authors point out that the elimination of its back-burning furnace represents an improvement in the right direction for three-pass wetback boilers. On the other hand, central return-burning type of oil and gas-fired boilers pertain to a type of small and medium-sized oil and gas boilers worthy of popularization in the process of their development. Also discussed is the control system of the model WNS oil and gas-fired boilers. In the light of their specific features it is noted that a fully intellectualized control and remote-operated technical service system is their trend of future development. **Key words:** oil-fired boiler, gas-fired boiler, central return burning, direction of development

高温燃料电池—燃气轮机混合发电系统性能分析 = **Performance Analysis of a High-temperature Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid Power Generation System** [刊, 汉] / ZHANG Hui-sheng, LIU Yong-wen, SU Ming, WENG Shi-lie (Power and Energy Source Engineering Institute under the Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 118 ~ 121

High-temperature fuel cell system features high-efficiency, environmental friendliness and enormous potential of exhaust gas waste-heat utilization. The combination of this system with a gas turbine to form a hybrid power plant can well be regarded as a very promising scheme of future distributed power generation. A brief description is given of the high-temperature fuel cell and the hybrid cycle system consisting of the fuel cell and a gas turbine. This is followed by a performance analysis of two typical hybrid systems (topping cycle and bottoming one). The above work can provide some informative materials and data for the development of the high-temperature fuel cell and gas turbine hybrid cycle system in China. **Key words:** molten carbonate fuel cell, solid oxide fuel cell, gas turbine, hybrid plant, distributed power generation

环境温度对湿空气透平(HAT)循环性能的影响 = **The Effect of Ambient Temperature on the Performance of a Humid Air Turbine (HAT) Cycle Performance** [刊, 汉] / ZHAO Li-feng, XIAO Yun-han, ZHANG Shi-zheng (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 122 ~ 125

Based on the building of an off-design performance model for the various components in a humid air turbine (HAT) cycle the authors have analyzed the off-design performance of a HAT cycle, which was compared with that of a simple intercooling cycle. The results of the comparison show that the HAT cycle enjoys a good off-design performance. **Key words:** hu-