

热经济学的辉煌发展

(华北电力大学) 程伟良 王加璇

[摘要] 阐述了节能理论与技术中的热经济学,说明其诞生与发展,用途与用法。简介当今出现的各种不同模式。热经济学是热力学分析与经济因素结合的产物,鉴于全球性环保问题的严重性,也对其进行了深入的研究,并发现了一条难以逾越的鸿沟,这就是尚未解决的生物熵的求解问题。解不出生物熵,就别奢谈求解生物,更无法求解生态平衡。本文前半部分主要介绍热经济学,后半部分则主要叙述在越过生物熵来求解生物的路上的一些探索。
关键词 热经济学 生态系统 综述
中图分类号 TK123

1 引言

分析现代工程系统(包括一切与能量有关的系统)所用的热力学方法,可以归纳成原则上不同的两类^[1]:第一类方法是在卡诺和克劳修斯所奠定的基础上长期运用所形成的,利用系统能平衡概念来分析和完善所分析的系统,可以进行各项技术、经济指标计算并评估它们的完善程度。所用方法是把它与卡诺循环等理想循环进行比较,看它能接近的程度来评定其优劣。一部热力学发展的历史可以概括为人们对实际循环向理想循环接近的不断追求中发展起来的。因此,它深入人

心,再加上简单易行,使人们使用它形成不可轻易改变的习惯。这就是人们常把它归类为“热力学第一定律分析法”也叫“能平衡计算方法”。迄今,我国在很多领域中包括电力部门仍沿袭着使用这类方法,但需指出这类方法是有缺点的,其最突出的就是只考虑能的数量而忽视其质量,因而在系统分析中常常忽视各种不可逆性造成的损失,这种损失所造成的节能潜力绝不亚于“跑冒滴漏”捞浮财。

第二类方法是以吉布斯理论为基础,利用热力学势概念的方法,在各种系统中分析能量转换过程时,用可靠的方法选定热力学势成为关键。热力学势非常重要,它可以给出功在各种形式(机械的,电的等等)下的数值。利用这一基本特性可以评估所分析系统的任意点上的物流与能流的做功性能,只作性能分析而与系统的形式、结构以及复杂程度无关,因而利用这一性质可以计算下一步系统的或其它部分的热力学特性,得到分析所需要的全部信息基础、逻辑顺序和方法。此法在化学热力学中早就得到广泛应用,但在其他领域则仍使用第一类方法。

2 方法的基本概念

从本世纪50年代开始,以热力学势概念为基础的分析方法越来越引起人们的关注。而形成在西方国家称之为“热力学第二定律分析法”,其含义包括分析、熵分析和能级分析法。随着时间的推移,方法突出出来,许多工业技术先进的国家争相以分析代替能分析。最典型的是日本,1980年日本政府明令规定:“热工管理当用参数为有效能(即 ψ)”。随着过程的进展, ψ 的定义和概念也越来越清晰起来,起初的概念完全用一般人很难确切把握的热力学术语表述: ψ 是从平衡态中“拉出”一个系统时所需要最小功,或表述为将此系统再“放回”平衡态时所能得到的最大功^[2]。

1956年德籍南斯拉夫人对能概念进行了系统的分析,提出了能 $(En) = E + A$ 的分式,进而明确了 ψ 是能量中可以无限转换的部分,而 A 则是不可转换的部分,而且取希腊字“Ergo”(意为功或力)加上前缀“ex”(意为从其中)确定了 ψ 的名称为“Ex-ergie”(Exergy—英文),统一了全世界对此势参数的名称,在我国相

该文受国家自然科学基金资助(59476002)

收稿日期 1998-09-14 收修改稿 1998-10-24

本文联系人 程伟良 男 1965年生 讲师 100085 北京华北电力大学动力系

应译为 。

受Shanon 信息论启发,人们认识到熵乃是无序性的度量,于是把能量又分成有序能(无熵能)和无序能(有熵能)。有了有序能与无序能的概念,我们完全可以定义 就是有序能,它可以无限转换。推而广之一切宏观能,如机械能,电能等都是有序能,因此它们都是纯 。比较麻烦的是热能,但它也不是完全的无序能,既有有序能又有无序能,随着其温度的提高,有序能的份额相应提高。这与 概念完全一致,我们还可以进一步理解所谓有序能则意味着载能实体中的载能粒子的运动方向是一致的,否则就是无序能。

进行 分析的方法主要是列出 平衡求解,这点与能平衡计算一样,但 分析中的重要问题是进行 值计算,为此首先要将总 分解成热 、机械 和化学 ,分别计算后再加起来。对于热 和机械 要选定计算的基准态,即 P_0 、 T_0 等,而对于进行化学反应的化学 则要在环境中选定其准参照物(在环境中相关的稳定化合物)。

值计算公式

封闭系: $E = U - T_0 S$ (1)

流动系关系考虑有化学反应为:

$E = H - T_0 S - \sum_{i=1}^m N_i \mu_{0i}$ (2)

由此可见, 分析无非是将“循环一熵”方法中被忽视了的不可逆损失项恢复了而已。但其区别在于前者是预先将各计算点上的 (包括减掉不可逆损失)计算出来再作 平衡计算,而后者则相反,先进行能平衡计算后再补算所统计的总不可逆损失。别看这一前一小小差别,它却造

成原则上不同的两类方法。

方法可以作系统分析,又可以作优化综合,它可以很方便地进行系统优化,与经济因素结合后可以作设备全寿期成本统本,这些都是“循环一熵”方法难能为力的,展示了 方法的优越性。

3 热经济学的发展

方法进一步发展与经济因素结合,就成当代国际上极为重视的交叉学科——热()经济学,它起源于 50 年代末,60 年代中期始形成完整体系。在美国产生了若干学派,最早者要数 M. Tribus 学派,因为他首倡通过了系统逐个寻优达到全局最优的目的,为此必须具备各子系统之间在热经济上孤立化的条件才不违背“系统的各个局部全为最优意味着系统全局最优”的原则。Tribus 的学生 R. Evans 还作了热经济学孤立化原理的数学论证。因此,后人就将此第一次出现的热经济学名之为“孤立化”模式的热经济学。接踵而来的美国的另一学派为首者的 R. Gaggioli,因在 70 年代中发表论文最多而著称于世,他们所用的数学工具为基本的代数,因此也称为“代数”模式热经济学。近年来随着人们节能意识的增强,热经济学得到飞速发展,相继出现了“结构系数”模式热经济学(以德国的 Beyer 为代表)以及 成本理论指导下的符号 经济学(以西班牙的 Antonio Valero 为代表),因西方国家把矩阵分析叫做“符号数学技术”,实际上这个模式也可叫做“矩阵”模式热经济学。热经济学的分析与优化是相辅相成的,分析结果可给出在系统各部位上 流及经济

流的分布,从而我们可以发现哪些地方存在着最大的改进潜力,但它不能从系统整体分析的角度给出系统的某一局部改进或某一参数改进对全系统带来的影响,而优化方法刚好弥补了这一缺点。在进行系统寻优改进时,要确定考虑的变量及之间的关系,并选择约束条件和决策变量,最后用数学手段描述问题,即写出目标函数与约束方程求解。还有一些其它模式限于篇幅不一列

举例。
从 方法到热经济学,关键问题是 的价格比。即 的定价,这个问题很复杂,矩阵模式共有六种形式的价格,此模式以前的各种模式最少有三种形式的价格,限于篇幅自然无法展开论述这个问题,只就最简单的代数定价方法作一介绍;从热经济学创始人 Tribus 开始,就将一个复杂的能量系统划分成“区”,现在我们叫“子系统”,而且确立了子系统与子系统之间进行“交易”的基本假设^[3]。这样,对一系统而言,又分成外部价格和内部价格,系统的输入和输出 的定价是外部价格,由市场价格决定的,而子系统之间交易 的定价属内部价格,其特征是没有利润的价格,实际上是各子系统加工 所消耗的成本,这样其成本的增值可沿子系统逐级增长,像接力一样,因此这种价格也叫“传递价格”。

取一最简单的^[4],只包含两个子系统的能量系统为例进行分析。如图 1 所示。 流先进入子系统 1,然后再由子系统 1 向子系统 2 输出 流 E_{12} ,经加工后由子系统 2 输出产品 流 E_{pr} 。进入子系统 1 时的 价为市场价格,由子系统 1 输入子系统 2 的 价 C_{12} ,再由子系统 2 输出的为产

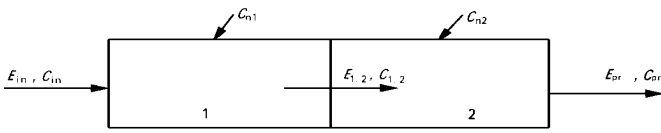


图 1 子系统之间的传递价格

品, 其价格又是由市场价格所决定。这样, 此系统的产品成本方程可写成:

$$E_{12} C_{12} = C_{in} E_{in} + C_{n1} \quad (3)$$

式中: C_{in} 与 E_{in} 为输入系统的价与值;

E_{12} 与 C_{12} 为子系统 1 输入子系统 2 的值与价;

C_{n1} 为在子系统 1 中消耗非能量费用(如设备折旧, 检修, 人员工资等消耗)。

对于子系统 2, 可写:

$$E_{pr} C_{pr} = E_{12} C_{12} + C_{n2} \quad (4)$$

合并式(3)与式(4), 我们有

$$E_{pr} C_{pr} = C_{in} E_{in} + C_{n1} + C_{n2} \quad (5)$$

还可进一步分析一个各子系统依次排列的“链”式系统(图 2)。子系统 2 输出的产品的总成

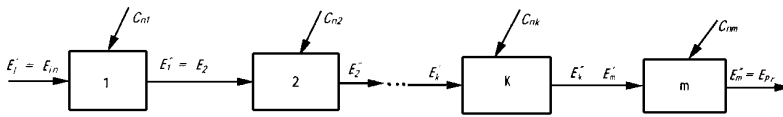


图 2 多子系统的链式系统

本为:

$$C_2 = C_1 + C_{n2} = E_{in} C_{in} + C_{n1} + C_{n2} \quad (6)$$

依次类推, 子系统 k 的总成本为

$$C_k = C_{in} E_{in} + \sum_{i=1}^k C_{ni} \quad (7)$$

$$\text{或 } C_k = \frac{C_{in} E_{in}}{\prod_{i=1}^k \eta_i} + \sum_{i=1}^k C_{ni} \quad (8)$$

子系统 k 输出的单位或成本为

$$C_k = \frac{C_k}{E''_k} = \frac{C_{in}}{\prod_{i=1}^k \eta_i} + \frac{\sum_{i=1}^k C_{ni}}{E''_k} = \frac{C_{in} + \sum_{i=1}^k C_{ni} / E_{in}}{\prod_{i=1}^k \eta_i} = \beta_k C_{in} \quad (9)$$

$$\text{上式中: } \beta_k = \frac{C_k}{C_{in}} =$$

$\frac{1 + \sum_{i=1}^k C_{ni} / (C_{in} E_{in})}{\prod_{i=1}^k \eta_i}$ 为子系统 k 的单位成本增长系数。

4 热经济学的新发展

4.1 是衡量一切能量和物质转换的总指标

生态学系研究在生物圈(Bio-

sphere)中物质和能量相互作用的科学, 生物圈是在一个漫长(> 35 亿年)的演化过程中形成的, 可视作为热力系统, 其人口是光合作用吸收太阳的辐射, 然后在生物化学周转中把它转化为高分子化合物。这种周转无非是氧化还原反应的循环。

俄国的 H. Odum 指出, 从太阳的辐射转化到食物链, 以至到发电, 全部能量转化都可以以来度量, 所希望得到的产品值的增加必然伴随着消耗“原料”

值的减少。包括生产过程的排放, 虽不能与前者用同一计量, 但最少在废弃的一阶近似值来衡量则仍可以作指标。

在一些专业研究中运用水藻生物质的浮游生物群体概念,

被视为可表征生态系统发展程度的基本指标, 甚而生态学中一个重要概念即生态缓冲容量(buffering capacity)也与有关。因此我们得出结论: 是衡量一切能流与物流转换包括过程的排放的总指标。

4.2 一种求解生态系统新方法——网络热力学

生态系统的求解总是遇到非线性问题和 Lyapounov 含义的稳定问题, 求解这类问题的正规步骤须用微分几何与张量代数, 但是不仅因为这些数学工具难度较大, 而且因为很难求得数值解。如果宁愿牺牲一点微不足道的精度, 便可运用近些年来才发展完善起来的网络热力学分析去求解。这里只举一最简单的生物体组织求解的例子, 以示其解题的一斑^[5]。

取一生物体最普通的表皮组织(图 3), 它以生物膜(AM)与外界接触并从外界吸收光能(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, 在最外层的生物膜中有两细胞紧密连接处(TJ), 穿过表皮的最底层(BM)后就与表皮下的血管相连。这种似乎很复杂的系统, 以模型网络表示(图 4)却变得清晰而简单了。图中 L 表示外部光源, C 表示细胞, S 表示细胞间隙, B 表示血管, 这些在网络中都变成节点, 而把联系各节点的分支流(AM)、(BL)、(TJ)和(BM)作为网络的边, 它们是流动着的非电解质。其流动是以消耗两节

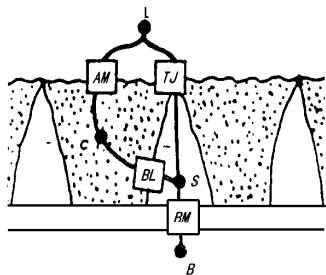


图3 生物组织表皮膜上构成网络流的示意图

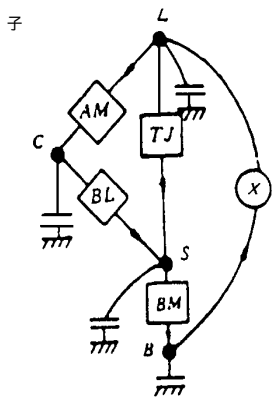


图4 图3的模型网络系统图

点间势差为代价的,流动中要克服流阻,这些势差可能是浓度差、密度差、压力差、化学势差或电位差,要克服的阻力,如流体流阻、欧姆电阻、化学反应过程,其中的流为电阻电流式的流动,概而言之“耗散流”。此外,代表势能的各节点还可能产生对地电容电流,不过在稳态下可忽略。

这类有线性网络的最好的数

学表达式为关联矩阵^[6]。即根据节点 V_i 与流 e_{ij} 的关系可以排列关联矩阵。以 V 代表节点数, e 为边数,矩阵为 $A(V \times e)$ 其元素定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{如果 } V_i \text{ 为边 } e_{ij} \text{ 上的事件,} \\ & e_{ij} \text{ 从 } V_i \text{ 至 } V_{ij} \\ 0 & \text{如果 } V_i \text{ 非边 } e_{ij} \text{ 上的事件,} \\ -1 & \text{如果 } V_i \text{ 是边 } e_{ij} \text{ 上的事件,} \\ & \text{而 } e_{ij} \text{ 从 } V_{ij} \text{ 至 } V_i \end{cases}$$

此矩阵展开为:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

第二个矩阵为回路关联,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 的子集的回路,即从一个给定点周而复始到原点。我们更注重的是独立回路,形成回路并不难,但其中的边常与原边方向相反而相互抵消,就不能成为独立回路,其数目为 $L = e - V + 1$ 。

此外还有“树”的概念,这是从某一节点依次向其他节点引出的边,其特点为:所有图形都是开放的,但没有一个节点是孤立的。

5 结束语

本文介绍了 方法热经济学

及其进一步发展与生态平衡相结合,虽然尚未完善,但可见其前景是很有希望的。在解复杂的生态系统时引出网络热力学分析法,这是近几年才发展成熟起来的,其前景也是非常光明的。但还要指出,当代科学技术的发展出现了形形色色的“网络”理论,我们这里所指的网络是以服从 Kirchhoff 电流、电压两定律为前提与它们相区别的。

参考文献

- 1 王加璇编译. 方法及其应用. 北京: 中国电力出版社, 1997年.
- 2 王加璇, 张树芳合编. 方法及其火电厂中的应用. 北京: 水利电力出版社, 1993年.
- 3 王加璇, 张恒良合编. 动力工程热经济学. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- 4 Valero A, et al. A general theory of thermoeconomics. Proceedings of Ecos 1992, 92: 137~154.
- 5 Peusner L. Studies in network thermodynamics. Elsevier Amsterdam, 1986.
- 6 M Kulecky D C. Network thermodynamics; A simulation and modeling method based on the extension of thermodynamic thinking into the realm of highly organized systems. Mathematical biosciences, 72 (1984). Elsevier Science Publishing Co. Inc. New York.

(复 编)

· 简讯 ·

海南岛将建造 700 M W 联合循环电站

“Gas Turbine World”1998年9—10月号报道, 中国和美国公司合作计划在海南岛建造一座700MW功率、烧天然气的联合循环电站。

该项目的主管是洋浦经济开发公司, 电站建在海南岛洋浦自由贸易区。其它参加者是GE投资公

司和Hawkins国际石油和天然气公司。该联合循环装置被设计成燃烧海上开采的天然气的燃料。

整个项目的金额为15亿美元, 包括整个站的设备和服务以及海上天然气开发、生产和输送系统的费用。

(思 娟 供稿)

热经济学的辉煌发展= **Impressive Developments in Thermoconomics** [刊, 中] /Cheng Weiliang, Wang Jiakuan (North China Electrical Power University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 79~82

A new approach in energy-saving theory and technology, i. e., thermoconomics, is expounded in this paper. In narrating its origin, evolution, intended uses and applications, the authors give a brief description of its currently emerging variegated patterns. Thermoconomics can be viewed as a product, resulting from a combination of thermodynamic analysis and economic factors. In the light of the grim situation of environmental protection on a global scale the authors have made an in-depth study of the thermoconomics, discovering the existence of an impassable chasm. The latter finds its expression in the absence to date of a method for solving the biomass entropy. Without such a method for solving the biomass entropy it is virtually impossible to secure a solution for the biomass exergy, let alone a method for solving an ecosystem balance. The first half of this paper mainly describes the thermoconomics while the remaining half focuses on some tentative efforts for solving biomass exergy without resorting to a determination for the biomass entropy. **Key words:** thermoconomics, ecosystem, information roundup

煤中碱金属及其在燃烧中的行为= **Various Forms of Alkali Metal in Coal and Its Behavior During Coal Combustion** [刊, 中] /Zhang Jun, Han Chunli, Liu Kunlei, et al (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 83~85

A summarizing was conducted of the forms of alkali metal in coal, and its release and reaction during coal combustion studied. With the existing issues in current research being pinpointed the authors emphasize the necessity for their in-depth research in the future. **Key words:** coal, alkali metal, release, reaction

钙基脱硫剂掺加粉煤灰在 450 °C~850 °C 下的脱硫研究= **A Study on the Effect of Desulphurization of Calcium Sorbent by the Adding of Pulverized-coal Ash** [刊, 中] /Pang Yajun (Beijing Electrical Power College), Xu Xuchang (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 86~88

By mixing pulverized-coal ash with caustic lime in a drop-tube furnace tests were conducted for enhancing SO₂ removal rate. The test results show that the mixing of caustic lime with the pulverized-coal can result in an enhancement of the SO₂ removal rate and the calcium utilization rate of the calcium-based sorbent. This effect is dependent on the reaction temperature. An optimum effect can be achieved when the reaction temperature ranges from 550 °C to 700 °C. Also studied was the effect of the mixing mode of pulverized-coal ash with the caustic lime on the SO₂ removal rate and the calcium utilization rate of the calcium-based sorbent. **Key words:** drop-tube furnace, caustic lime, pulverized-coal ash, desulphurization, reaction temperature, mixing mode

垂直向上气液两向流中 T 形柱体两相斯托拉赫数的研究= **A Study of T-shaped Cylinder Gas-liquid Two-phase Strouhal Number in a Vertically Upward Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 中] /Li Yongguang (Shanghai Electrical Power Institute), Lin Zonghu (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 89~91

Tested and studied in this paper is the variation relationship of gas-liquid two-phase Strouhal number when a gas-liquid two-phase vortex street occurs for two types of T-shaped cylinder in a vertically upward gas-liquid flow. On the basis of a huge quantity of measured data obtained is a universal relation of the gas-liquid Strouhal number for the above-cited case. The study results indicate that the gas-liquid two-phase Strouhal number under the two-phase operating conditions is a variable. The magnitude of this variable depends on such factors as the incident flow void fraction, vortex street generating body shape, characteristic dimensions and the incident flow direction, etc. On the basis of the measured two-phase vortex street frequency and by the use of the above-mentioned relation the vortex street generating body may serve as an element for measuring the two-phase flow rate and components. **Key words:** gas-liquid mixture, Karman vortex, Strouhal Number, column

直接蓄冰系统蓄冷过程动态模型研究= **A Study of the cold storage Process Dynamic model for an Ice Direct**