

# 300MW 凝汽机组的热经济学成本诊断

程伟良, 王清照, 王加璇

(华北电力大学动力系, 北京市 昌平区 102206)

## THERMOECONOMIC COST DIAGNOSIS OF 300MW CONDENSING POWER PLANT

CHENG Wei-liang, WANG Qing-zhao, WANG Jia-xuan

(Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Changping District,  
Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** In order to analyze and optimize complex energy system, a physical structure diagram and a productive one are drawn by using a structural theory. Then, a group of equations for unit thermoeconomic cost model are set up in view of decomposing the system into such kinds of basic component together with two fictitious components, i.e. junction and bifurcation. After calculation, a cost distribution state is obtained for estimating and diagnosing thermal efficiency of the system. A 300MW condensing power plant unit is taken as an example to solve a compactly connected system. The cost diagnosis model covers economic factor and technical factor for analyzing system efficiency. And therefore, it provides a scientific decision-making foundation in programming, design, diagnosis, and improvement.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering; Thermoeconomics; Thermoeconomic structural theory; Component; Condensing power plant

**摘要:** 为进行复杂能量系统热经济性的诊断和评估, 建立了能量系统的物理结构图和生产结构图, 依据系统划分后的基本组元和虚拟的汇流组元及分支组元, 形成各组元相应的单位热经济学成本特性方程组, 进而取得评价和诊断能量系统热经济性优劣的相应热经济学成本, 并以 300MW 凝汽机组热力系统为例进行了 21 个实际组元的计算分析。结果表明, 成本诊断方法是经济和技术因素全面综合处理的结果, 可以达到全面地分析系统的热经济性, 揭示节能潜力部位所在, 为能量系统的规划、设计、诊断和改进提供了科学决策依据。

**关键词:** 热能动力工程; 热经济学; 结构理论; 组元; 凝汽机组

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000026307)。

Project Supported by Foundation of the National Program for Priority Basic Research' Development (G2000026307).

## 1 引言

热经济学是热力学分析和经济因素特别是成本分析的结合产物。它走出了单纯热力学分析的范畴而囊括了并在继续囊括许多因素, 如为考虑环境可持续发展的生态因素, 以期在能量系统规划和设计阶段作系统分析和计算时, 就同时进行生态平衡的优化, 因而就有了热经济学发展的技术、经济和生态的 3 个层次平行处理的新趋势<sup>[1]</sup>。热经济学形成的分析计算模式是分散的, 但有着相互继承和发展的成就。近几年热经济学在西班牙学者 A. Valero 等人的不断探索和努力下, 使得不同模式和方法论趋向于统一<sup>[2]</sup>, 在这种统一化要求的驱动下产生了热经济学的结构理论。把它以前的各种模式热经济学包容于其理论体系而成为其特例, 另外, 其应用也越来越深入。在我国, 随着市场机制的逐步建立, 企业的运营状况直接决定着其经济效益。生产产品的成本形成过程及相关的评估、能量费用(如消耗的燃料)及非能量费用(设备初投资及运行维护费用等)统一综合分析优化, 是电力企业“厂网分开, 竞价上网”市场机制形成后关注的热点<sup>[3-4]</sup>。为此, 本文提出一种基于热经济学结构理论进行经济性评价的成本诊断方法, 为火电机组的经济运行和优化提供一种新理论和新方法。

## 2 系统的功能描述和组元生产关系

本文所讨论的热经济学分析与成本评价诊断方法是以 A. Valero 等人<sup>[2]</sup>提出的热经济学结构理论为基础的, 这种方法就其本质来说, 是半图解和半解析相结合处理的。半图解是指采用物理的和生产

的结构图，物理结构图是以各热力设备的功能把整个系统划分成组元，以便绘制相应的生产结构图。生产结构图的绘制完全脱离原有的常规热力系统图，而是参照物理结构图上各组元之间在“生产过程”中的联系绘制的。绘制生产结构图时，为使系统计算简化采用了两种“虚拟组元”，即汇流组元和分支组元，前者为多输入一输出的组元，后者为一输入多输出的组元。有了这两个虚拟组元，系统中剩下可划分的组元就为“一输入一输出”的基本组元，或叫做实际组元，其特性方程都是一元齐次的，因而易于求解<sup>[5]</sup>。半图解的目的就是尽量减少系统中的复杂组元，实在减不掉的则集中引入到“虚拟组元”。其中，基本组元容易处理，而对于两种虚拟组元，则需单独列出其特性方程进行求解，这样便可将复杂系统化简而变得易于处理<sup>[6-7]</sup>。本文就是依据这一理论建立了系统的分析诊断模型。结合建立的成本诊断计算模型，通过对系统的分析可以获得产品成本的计算方程组，计算出进行热经济学分析的产品成本分布。因而，可在整个能量系统范围内依据热经济学成本分析各单元的功能、生产关系及热经济学成本，进行热经济性诊断，提出经济性改进的方向和措施。

以国产 300MW 汽轮发电机组为研究对象，该机组汽轮机型号为 N300-16.7/538/538，锅炉型号为 HG1025/18.2-YM6，属强制循环汽包锅炉，有 8 级不调整抽汽，回热系统为“三高、四低、一除氧”，采用疏水逐级自流方式。文献[8]给出了该机组的物理结构图和相应的生产结构图，并给出了各组元的含义。每一实际组元*i*都有自己的非能量费用 $Z_i$ (即运行、维护和设备折旧费和人头费)，也有能量费用(以火用为单位，即燃料和产品，具体参见文献[9])。对于换热设备及除氧器等形成的任一基本组元*i*来说，进入组元的唯一火用流为燃料流 $F_i$ ，流出组元的唯一火用流为该组元的产品 $B_i$ ；而对汽轮机各部分形成的任一基本组元*i*来说，进入的火用流为燃料流 $B_i$ ，流出组元的唯一火用流为该组元的产品 $W_i$ 。另外，增加了两种虚拟组元，即汇流组元 $J_1$ 、 $J_2$ 和分支组元 $b_1$ 。就汇流组元 $J_1$ 来说，它把各级设备水侧(包括加热器、锅炉、汽动给水泵及凝结水泵)得到的火用增即产品 $B_i$ 作为输入，从该汇流组元流出的一股火用流(其单价为 $c_a$ )再进入分支组元 $b_1$ 。然后通过该分支组元再分配给各相关的基本组元。最后经各基本组元完成热功转换后，进入汇流组元 $J_2$ ，在其中汇集成一

股火用流即汽轮机做的总功率(其单价为 $c_b$ )，也可以说是扣除机械及发电机等损失的发电功率，这就是依据物理结构图形成的相应生产结构图的过程。

### 3 成本计算及分析

以单位热经济学成本为目标的分析方法主要是围绕实际组元和虚拟组元建立的成本方程进行的。单位热经济学成本的计算方程可由实际组元的单位火用成本、组元产品流入的汇流组元定价及单位产品非能费用构成，但因方程中产品定价与流入虚拟组元(即是汇流组元)中的其它产品流有关，故需有定价方程来协助对单位热经济学成本的求解。该机组的单位热经济学成本方程和定价方程如表 1、2 所示。

表 1 实际组元的成本分析模型方程

Tab.1 Equations of cost analysis model of real components

单元	单位热经济学成本方程	单位产品火用成本	单位产品非能费用
1(BOI)	$K_1^{**}=K_1 \times c_f + K^{*}_{z1}$	$K_1^*=F_1/B_1$	$K^{*}_{z1}=\phi \times Z_1/B_1$
2(HPT <sub>1</sub> )	$K_2^{**}=K_2 \times c_a + K^{*}_{z2}$	$K_2^*=B_2/W_2$	$K^{*}_{z2}=\phi \times Z_2/W_2$
3(HPT <sub>2</sub> )	$K_3^{**}=K_3 \times c_a + K^{*}_{z3}$	$K_3^*=B_3/W_3$	$K^{*}_{z3}=\phi \times Z_3/W_3$
4(MPT <sub>1</sub> )	$K_4^{**}=K_4 \times c_a + K^{*}_{z4}$	$K_4^*=B_4/W_4$	$K^{*}_{z4}=\phi \times Z_4/W_4$
5(MPT <sub>2</sub> )	$K_5^{**}=K_5 \times c_a + K^{*}_{z5}$	$K_5^*=B_5/W_5$	$K^{*}_{z5}=\phi \times Z_5/W_5$
6(MPT <sub>3</sub> )	$K_6^{**}=K_6 \times c_a + K^{*}_{z6}$	$K_6^*=B_6/W_6$	$K^{*}_{z6}=\phi \times Z_6/W_6$
7(MPT <sub>4</sub> )	$K_7^{**}=K_7 \times c_a + K^{*}_{z7}$	$K_7^*=B_7/W_7$	$K^{*}_{z7}=\phi \times Z_7/W_7$
8(LPT <sub>1</sub> )	$K_8^{**}=K_8 \times c_a + K^{*}_{z8}$	$K_8^*=B_8/W_8$	$K^{*}_{z8}=\phi \times Z_8/W_8$
9(LPT <sub>2</sub> )	$K_9^{**}=K_9 \times c_a + K^{*}_{z9}$	$K_9^*=B_9/W_9$	$K^{*}_{z9}=\phi \times Z_9/W_9$
10(LPT <sub>2</sub> )	$K_{10}^{**}=K_{10} \times c_a + K^{*}_{z10}$	$K_{10}^*=B_{10}/W_{10}$	$K^{*}_{z10}=\phi \times Z_{10}/W_{10}$
11(C)	$K_{11}^{**}=K_{11} \times c_a + K^{*}_{z11}$	$K_{11}^*=B_{11}/W_{11}$	$K^{*}_{z11}=\phi \times Z_{11}/W_{11}$
12(CP)	$K_{12}^{**}=K_{12} \times c_b + K^{*}_{z12}$	$K_{12}^*=W_{12}/B_{12}$	$K^{*}_{z12}=\phi \times Z_{12}/W_{12}$
13(h <sub>8</sub> )	$K_{13}^{**}=K_{13} \times c_a + K^{*}_{z13}$	$K_{13}^*=F_{13}/B_{13}$	$K^{*}_{z13}=\phi \times Z_{13}/W_{13}$
14(h <sub>7</sub> )	$K_{14}^{**}=K_{14} \times c_a + K^{*}_{z14}$	$K_{14}^*=F_{14}/B_{14}$	$K^{*}_{z14}=\phi \times Z_{14}/W_{14}$
15(h <sub>6</sub> )	$K_{15}^{**}=K_{15} \times c_a + K^{*}_{z15}$	$K_{15}^*=F_{15}/B_{15}$	$K^{*}_{z15}=\phi \times Z_{15}/W_{15}$
16(h <sub>5</sub> )	$K_{16}^{**}=K_{16} \times c_a + K^{*}_{z16}$	$K_{16}^*=F_{16}/B_{16}$	$K^{*}_{z16}=\phi \times Z_{16}/W_{16}$
17(h <sub>4</sub> )	$K_{17}^{**}=K_{17} \times c_a + K^{*}_{z17}$	$K_{17}^*=F_{17}/B_{17}$	$K^{*}_{z17}=\phi \times Z_{17}/W_{17}$
18(TD+FP)	$K_{18}^{**}=K_{18} \times c_a + K^{*}_{z18}$	$K_{18}^*=F_{18}/B_{18}$	$K^{*}_{z18}=\phi \times Z_{18}/W_{18}$
19(h <sub>3</sub> )	$K_{19}^{**}=K_{19} \times c_a + K^{*}_{z19}$	$K_{19}^*=F_{19}/B_{19}$	$K^{*}_{z19}=\phi \times Z_{19}/W_{19}$
20(h <sub>2</sub> )	$K_{20}^{**}=K_{20} \times c_a + K^{*}_{z20}$	$K_{20}^*=F_{20}/B_{20}$	$K^{*}_{z20}=\phi \times Z_{20}/W_{20}$
21(h <sub>1</sub> )	$K_{21}^{**}=K_{21} \times c_a + K^{*}_{z21}$	$K_{21}^*=F_{21}/B_{21}$	$K^{*}_{z21}=\phi \times Z_{21}/W_{21}$

表 2 虚拟组元的模型方程

Tab.2 Model equations of fictitious components

组元	定价模型方程
22 ( $J_1$ )	$c_a = (B_1 \times k_1^{**} + \sum_{i=12}^{21} B_i \times k_i^{**}) / (B_1 + \sum_{i=12}^{21} B_i)$
23 ( $J_2$ )	$c_b = (\sum_{i=2}^{10} W_i \times k_i^{**}) / \sum_{i=2}^{10} W_i$

在表 1 和表 2 中， $\phi$ 为一次投资和维护费用因子，按安装和维修所占费用比例取值，是经验系数，可参照同类电厂确定<sup>[10]</sup>，这里取值为  $6.7 \times 10^{-9}$

1/s。进入系统的燃料单价 $c_f$ 是电厂燃用的折合标准煤市场价与其化学焓之比,燃料化学焓可以近似按煤低位发热量的 1.4 倍计算,计算后的值为 $16.544 \times 10^{-6}$ 元/kJ。第 1 组元是锅炉,其方程较简单,可直接计算出其单位热经济学成本 $k_1^{**}$ ;第 2~10 组元是分段的汽轮机计算方程,不能直接计算,因里面含有焓平均单价 $c_a$ ,可认为是热交换设备及为实现热交换的相关设备的所有产品的平均单价,由基于汇流组元 $J_1$ 结合表 3 计算获得;第 11 组元凝汽器有点特殊,其产品是被循环水带走的部分。第 12 组元是凝结水泵,其燃料是输入电功率,即来自电厂的产品——电能 $W$ ,因这里牵扯到其电平均单价 $c_b$ ,与焓平均单价计算类似,是基于汇流组元 $J_2$ 的。对于各级加热器及除氧器来说,其燃料都是来自分支组元 $b_1$ ,其产品流都是进入汇流组元 $J_1$ 。最后是第 18 组元凝汽式小汽机及其驱动的给水泵,蒸汽进入小汽机做功直接用于给水泵产生焓增,因此可把这一组元看作一加热器来处理<sup>[11-12]</sup>。这样精度差一点,但计算简单。生产结构图中的汇流组元一般只起到补充作用<sup>[13-14]</sup>。

综上所述,系统共有 21 个单位热经济学成本方程,及汇流组元 $J_1$ 的焓平均单价 $c_a$ 和汇流组元 $J_2$ 的电平均单价 $c_b$ 共 23 个未知数,同时也有 23 个方程,方程组封闭,有唯一解。21 个组元的单位热经济学成本计算结果如图 1 所示,可对其结果进行分析,追踪组元产品的成本形成过程,分析影响热经济性的因素,进而提出为提高热经济性改进的方向。

这种热经济学的分析方法,不但考虑了能的数量和质量,而且考虑了热功转换过程中设备的非能量因素影响,能量费用和非能费用都是在能的定价和设备一次投资及维修费用统一的基础上,以经济学成本方法进行的分析,因而是全面、客观和准确的<sup>[15-16]</sup>,相对于热力学第二定律分析其优越性是不言而喻的。热力学第二定律分析只能给出热力学量纲的结果,只有焓及焓损在系统中的分布,只能作为人们决策的参考,而热经济学分析给出的结果是以经济学量纲为量纲的,可直接根据它做决定。同热经济学分析的其它模式相比,成本诊断分析方法描述简洁清晰,具有计算简单,易于进行成本分析诊断的优点。由 300MW 凝汽机组的计算分析可看出,第 1 组元锅炉的单位热经济学成本最高,经济性较差,是挖掘节能潜力的重点,需进一步改进工艺流程,采用新方法新技术降低其经济成本,进而

提高整个系统的效率。

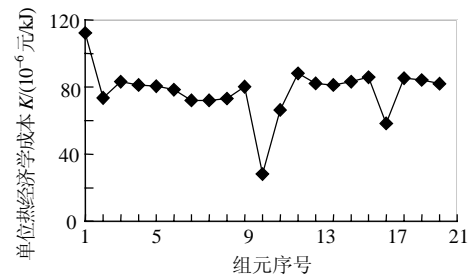


图 1 各组元的单位热经济学成本曲线

Fig. 1 The curve of the unit thermo-economic cost with every component

## 4 结论

为进行复杂能量系统热经济性简便高效的分析和优化,依据系统划分后的基本组元和虚拟的汇流组元及分支组元,形成各组元相应的单位热经济学成本特性方程组,通过单位热经济学成本计算,可进行经济性分析和诊断。以 300MW 凝汽机组热力系统为例进行计算的结果,结合所形成的 21 个实际组元成本分布状况,实现系统的热经济性评价和诊断。结果表明,它可非常方便地进行成本计算,分析各种指标、故障诊断和参数优化,便于进行热力系统的规划、设计及评估。实践证明其有一定的准确性和有效性,有着广阔的发展前景和应用价值。

## 参考文献

- [1] Cheng Weiliang, Wang Xiuyan, Wang Jiakuan. A review of thermo-economic optimization methodology of energy systems. part II: A study on application of the methodology of the theory of structure[C]. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004, 1327-1333.
- [2] 王清照, 肖卫洁, 王加璇. 运用热经济学结构理论进行故障诊断的探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 178-181.  
Wang Qingzhao, Xiao Weijie, Wang Jiakuan. An inquiry into the application of the structural theory for diagnosing malfunction in a thermal system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 178-181.
- [3] 李秀云, 严峻杰, 林万超. 火电厂冷端系统评价指标及诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 2(9): 94-98.  
Li Xiuyun, Yan Junjie, Lin Wanchao. Study on thermo-economics diagnosis method and index evaluation system for the cold-end system in steam power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 2(9): 94-98.
- [4] Erlach B, Serra L, Valero A. Structural theory as standard for thermo-economics[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40: 1627-1649.
- [5] 王加璇, 王清照, 张晓东. 热经济学的近期发展及其结构理论[J]. 华北电力大学学报, 2000, 27(增刊): 11-14.  
Wang Jiakuan, Wang Qingzhao, Zhang Xiaodong. The recent develop-

- ment of thermoeconomic and structural theory[J]. Journal of North China Electric Power University, 2000, 27(S): 11-14.
- [6] Valero A, Serra L, Uche J. Fundamentals of thermoeconomics [C]. Summer Course on Sustainable Assessment of Clean Air Technologies. Zaragoza: EURO, 2001.1-39.
- [7] Uche J, Serra L, Valero A. Thermoeconomic optimization of a dual-purpose and desalination plant[J]. Desalination, 2001,136: 147-158.
- [8] 程伟良, 王清照, 王加璇. 基于热经济学分析的凝结水泵运行调节方式选择[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(10): 196-200.  
Cheng Weiliang, Wang Qingzhao, Wang Jiakuan. Optimization of operation governing mode of condensation pump based on thermoeconomic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(10): 196-200.
- [9] 王加璇. 动力工程热经济学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [10] Lozano M A, Valero A, Serra L. Local optimization of energy systems [C]. Proceedings of the ASME Advanced Energy System Division. New York, ASME, 1996,36: 241-250.
- [11] Valero A, Serra L, Lozano M A. Structural thermoeconomics [C]. Richer Symposium on Thermodynamics and the Design, Analysis and Improvement of Energy Systems. New York: ASME, 1993,189-198.
- [12] Torres C, Serra L, Valero A, Lozano M A. The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization[C]. Advanced Energy System Division. New York:ASME,1996, 36: 429-436.
- [13] 张晓东, 王加璇, 高波. 关于汽轮发电机组热经济学边际成本的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 140-144.  
Zhang Xiaodong, Wang Jiakuan, Gao Bo. A study on thermoeconomic marginal costs of steam turbo-generation unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 140-144.
- [14] 张晓东, 高波, 王加璇. 热经济学结构理论与 LIFO 法则应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 185-189.  
Zhang Xiaodong, Gao Bo, Wang Jiakuan. Research on the application of structure theory and LIFO costing for a power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 185-189.
- [15] Valero A, Lozano M A, Serra L. Application of the exergy cost theory to the CGAM problem [J]. Energy, 1994, 19(13): 365-381.
- [16] Lozano M A, Valero A. Theory of exergy cost[J]. Energy, 1993,18(3): 939-960.
- 
- 收稿日期: 2004-09-18.  
作者简介:  
程伟良(1965-), 男, 硕士, 副教授, 陕西咸阳人, 主要研究方向为热力设备的经济运行及优化。

(上接第 120 页 Continued from page 120)

- [17] 高翔, 骆仲泮, 倪明江, 等. 喷钙脱硫系统中增湿活化装置的脱硫性能研究—模型的建立[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 26-30.  
Gao Xiang, Luo Zhongyang, Ni Mingjiang *et al.* Study on desulfurization characteristic in CaO activation reactor of limestone injection FGD system – mathematical model[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 26-30
- [18] 高翔, 骆仲泮, 陈亚非, 等. 喷钙脱硫系统中增湿活化装置的脱硫性能研究——实验结果及分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(2): 10-14.  
Gao Xiang, Luo Zhongyang, Chen Yafei *et al.* Study on desulfurization characteristic in CaO activation reactor of limestone injection FGD system\_experimental results and discussion[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2): 10-14.
- [19] 郝吉明, 马广大, 俞珂, 等. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 301-312.
- 
- 收稿日期: 2004-09-20.  
作者简介:  
赵毅(1955-), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 长期从事大气污染控制方面的研究。