

基于热经济学结构理论的热力系统性能评价

张超, 刘黎明, 陈胜, 郑楚光

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北省武汉市 430074)

PERFORMANCE EVALUATION OF THERMAL POWER SYSTEM BASED ON THE STRUCTURE THEORY OF THERMOECONOMIC

ZHANG Chao, LIU Li-ming, CHEN Sheng, ZHENG Chu-guang

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The information provided by the conventional thermodynamic methods to evaluate the production performance of the system and devices has proved to be insufficient, which only consider the thermal performance evaluation of the system, while neglect the cost factors. In this paper, the cost analysis method based on the Structural Theory of Thermo-economic is applied to a 300MW pulverized coal-fired power plant located in Hunan Province. The thermo-economic model and the exergy cost model for the plant based on the Fuel-Product concept have been defined to quantify the productive interaction between different devices. By using a simulator, the thermodynamic process of cost formation for the plant in design and off-design conditions, and the effects of the operating parameters on the exergy cost of each component have been analyzed. The results reflect that the Structural Theory is a powerful and effective tool, which can make up the insufficiencies of the conventional thermodynamic methods and can be used for the cost-effective operation analysis and optimization in thermal power plants and other complex energy systems.

KEY WORDS: Thermo-economics; Structural theory; Thermal power system; Exergy; Exergetic cost

摘要:传统热力学分析技术由于仅考虑系统的热力学评价而忽视了生产中的成本因素,因而无法更为全面的评价系统和设备的生产性能。该文以热经济学结构理论为基础,以湖南某电厂300MW燃煤机组为对象,使用基于燃料-产品定义的热经济学模型和焓成本模型量化了设备之间的生产交互过程,利用系统仿真深入分析了系统在设计工况以及变工况

下,成本形成的热力学过程及其分布规律,并且定量研究了各种运行参数对设备焓成本的影响。结果表明热经济学结构理论弥补了传统热力学分析的不足,对电厂以及其他复杂能量转换系统的运行经济性分析和优化,提供了一套行之有效的方法。

关键词: 热经济学; 结构理论; 热力系统; 焓; 焓成本

1 引言

基于热力学第二定律的分析技术能够量化生产过程中的不可逆损失,分析导致系统性能降低的原因。然而随着热经济学的发展,人们逐渐认识到基于热力学第二定律分析技术的不足,主要表现在以下3个方面:①不是所有的不可逆都可以避免,由于受到材料以及制造水平的限制,技术上节能的可能性通常小于理论节能的限度^[1-2];②系统中不同设备所产生的不可逆存在技术上的不等价性(即局部不可逆的技术不等价原理)^[1];③由于能量系统设备之间的复杂交互作用,使得传统的第二定律分析技术只能量化不可逆在系统以及各设备中的影响结果,而无法分析系统燃料消耗增加以及各设备不可逆增加的真正原因^[3]。

一种新的分析技术——热经济学或焓经济学,通过联合热力学和经济学,解决了传统分析方法中的不足。随着热经济学的发展,很多学者都提出了各自的研究方法,大致可以分为两类:①基于成本会计的方法(包括:焓成本理论^[1],平均成本方法^[4],比成本的焓成本方法^[5],后进先出法 LIFO^[6]等);②基于优化的方法(包括:热经济学功能分析^[7],工程功能分析^[8]等)。所有的这些方法都使用线性的

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217700)。

Project Subsidized by Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217700).

焓方程来定义基于组件功能的热经济学模型。为统一以上方法, Valero 等人提出了热经济学结构理论^[9], 该理论使用一个通用的线性数学模型, 包含了以上所有的方法^[3]。多个学者将此方法应用于传统蒸汽循环^[10-13]、联合循环^[14]以及 MSF(Multi-stage Flash) 海水淡化^[3]发电系统的成本分析、故障诊断和系统优化。

考虑到中国目前的电力市场状态——厂网分开, 竞价上网, 如何有效地降低燃煤机组的发电成本, 如何采用一种更为科学的方法全面评价燃煤机组的性能, 本文将基于热经济学结构理论的焓成本分析方法应用于一个实际的 300MW 燃煤电厂, 利用焓成本的概念评价整个系统以及各主要生产设备的性能, 定量地研究并描述导致系统生产成本增长的原因。

2 热力学建模与仿真

为了研究系统整体以及各设备在不同运行工况下的成本变化规律, 本文利用传统的热力学仿真作为研究平台, 针对湖南某电厂 N300-16.7/537/537-1 型燃煤机组开发了一套稳态仿真系统, 系统流程图如图 1 所示, BOI 为锅炉, SH 为过热器, RH 为再

热器, HP、IP 和 LP 分别为高压、中压和低压缸, FWH 为给水加热器, DTR 为除氧器, CND 和 CWP 分别为凝汽器和循环水泵, FWP 和 CP 分别为给水泵和凝结水泵, BFPT 为给水泵小汽轮机, GEN 为发电机。

汽轮机级的进汽模型采用 Cooke 和 Stodola 的椭圆模型进行计算^[3]。给水加热器的仿真模型根据机组性能试验所得到的给水端差 D_{TTD} 随机组工况变化的规律进行计算。水泵、锅炉、发电机的效率模型以及管道压损模型根据机组性能试验确定。轴封漏汽计算只考虑高压缸和中压缸的漏汽损失(如图 1 中 44 到 47 的箭头所示)。水和水蒸汽的物性参数根据 IAPWS-IF97 公式计算。由此得到的系统仿真模型由一系列的非线性方程组表示, 该方程组的数值解由 Powell 混合方法(Powell hybrid method)^[3]通过多次数值迭代得到。该系统的仿真结果与实际系统性能测试结果的相对误差不超过 2%。通过热力学仿真可获得系统在设计工况以及变工况下主要物流的热力学参数(温度、压力、焓、焓和负熵(Negentropy)^[3]), 为后续的热经济学分析提供基础数据。

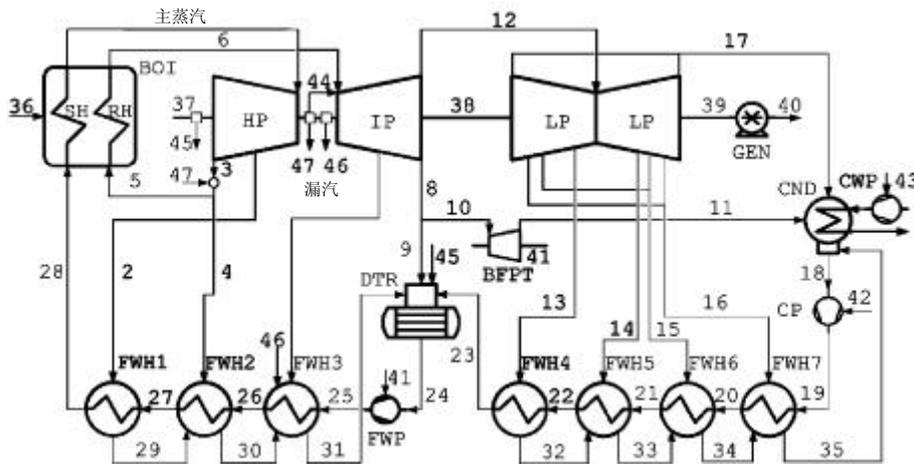


图 1 300MW 燃煤机组热力系统流程图

Fig.1 Schematic diagram of the 300MW coal-fired power plant

3 热经济学建模

为了准确的描述每一个设备的生产功能, 很多学者使用燃料-产品^[5, 8]的概念定义各设备的功能。根据各设备在全局生产中的功能, 将各设备输入输出的实际物流通过组合或者分解得到多个燃料流(F)和一个产品流(P), 由此可以将实际系统的物理流程图转化为由燃料-产品所表示的生产结构^[3](或功能图表^[7]), 该机组的生产结构如图 2 所示。图中矩形

表示物理(生产或耗散)组件, 菱形(J)表示汇集组件, 圆形(B)表示分支组件。各物理组件的输入箭头 F 表示该单元所消耗的燃料(Fuel), 输出箭头 P 表示该组件所获得的产品(Product), 箭头 N 表示该组件所消耗的负熵。在汇集和分支组件, 入口和出口的火焓或负熵保持守恒。

系统的生产结构是热经济学模型的图形化表示, 利用该生产结构可以很容易地得到热经济学模

型的数学表达形式——特征方程^[9]。特征方程表达了在生产结构中每一个组件的入口流(B_i)作为该组件内部参数集 x_i 和所有组件输出流(B_j)的函数^[3, 9]: $B_i = g_i(B_1, \dots, B_j, x_i)$ 。通过使用一阶齐次方程的欧拉定理和燃料-产品定义, 上述特征方程转换为线性方程组的形式^[3]为

$$P_i = w_i + \sum_{j=1}^n k_{ij} P_j \quad \text{其中} \quad k_{ij} = \frac{\partial g_i}{\partial B_j} = \frac{B_{ij}}{P_j} \quad (1)$$

其中, w_i 表示第 i 个组件的产品输出到环境的最终产品; k_{ij} 为技术产品系数^[3], 用以表达为了获得第 j 个组件的单位产品所需的第 i 个组件的产品的比

例。第 j 个组件的 k_{ij} 之和表示该组件的单位能耗^[3] k_j (也就是焓效率的倒数)。

在热经济学中存在两种线性特征方程^[3], 一种是物理组件的特征方程 ($F_i = k_i P_i$), 该方程表达了第 i 个组件的燃料(F_i)与产品(P_i)以及单位能耗(k_i)之间的关系; 另一种是汇集组件 ($F_i = r_{ij} P_j$) 和分支组件 ($F_j = \sum P_i$) 的结构方程, 前者利用焓流率(r_{ij})表达第 j 个汇集组件的产品(P_j)中包含其第 i 股燃料流(F_i)的焓比例, 后者表达第 j 个分支组件的燃料(F_j)是如何被分配到系统中的其它组件。求解式(1)所表达的线性方程组, 可以得到系统中每一个组件的技术产品系数 k_{ij} (单位能耗 k_i 、焓流率 r_i)。

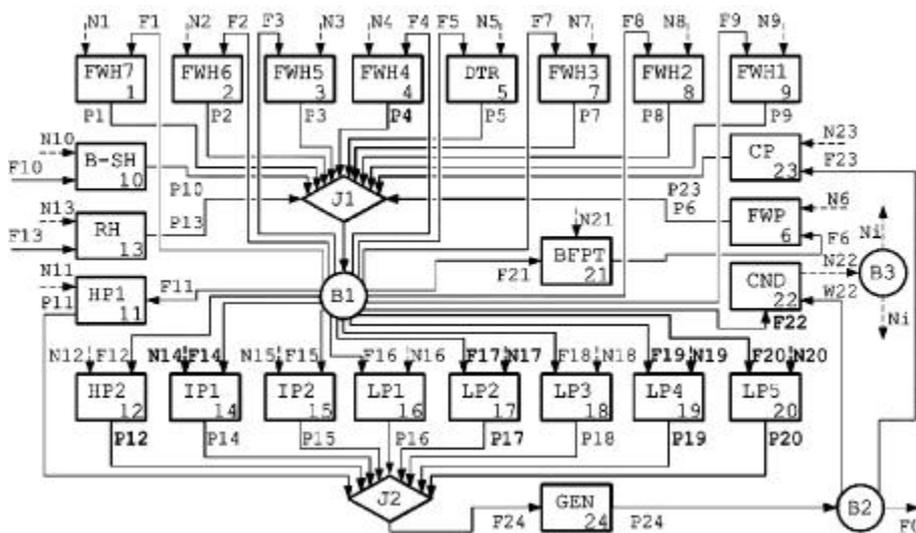


图 2 300MW 燃煤机组热力系统生产结构图

Fig. 2 Productive structure of the 300MW coal-fired power plant

4 焓成本建模

与特征方程相类似, 系统的成本方程表达了系统所消耗的资源(B_0)作为每一股流(B_i)、每个组件内部参数集(x)以及系统最终产品(w)的函数^[3]: $B_0 = B_0(B_i, x, w)$ 。成本方程的建立可以采用两种方式, 一种是根据焓成本理论的 4 条评定准则确定^[1], 另一种是采用微分链式法则对上述成本方程和特征方程求偏导得到^[9]。本文采用后者, 通过数学转换可以得到^[3]

$$\frac{\partial B_0}{\partial B_i} = k_{0,i}^*, i=1, \dots, e \quad (2)$$

$$\frac{\partial B_0}{\partial B_i} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial B_0}{\partial B_j} \frac{\partial g_j}{\partial B_i}, i=e+1, \dots, m \quad (3)$$

其中 e 为环境输入到系统的流的数量; m 为系统所有流的数量; $\partial B_0 / \partial B_i$ 为生产 1 单位第 i 股流系

统所消耗的外部焓资源, 称作单位焓成本 (或单位边际成本)^[3], 在热经济学中使用 k_i^* 表示。 $\partial g_i / \partial B_j$ 为特征方程中的技术产品系数 k_{ij} 。由此可以得到一个使用 k_i^* 和 k_{ij} 所表示的线性方程组

$$k_{P,i}^* = k_{0,i} + \sum_{j=1}^n k_{ji} k_{P,j}^*, i=1, \dots, n \quad (4)$$

其中, $k_{P,i}^*$ 为第 i 个组件产品的单位焓成本, $k_{0,i}$ 为直接从环境获取燃料的组件的单位能耗。一旦 $k_{0,i}$ 和 k_{ji} 通过求解式(1)得到, 在生产结构中组件产品的单位焓成本 $k_{P,i}^*$ 可以通过求解线性的成本式(4)得到。

5 结果分析

利用热经济学结构理论能够分析电厂在设计工况以及变工况下的成本形成及其分布规律, 深入分析导致发电成本增长的原因。表 1 包含了在设计工

况下 (发电机净负荷为 297MW), 通过焓分析得到的各组件的不可逆(I), 由式(1)所得到的各组件的技术产品系数 (单位焓耗 k_B , 单位负熵消耗 k_S 和焓流率 r), 以及由焓成本方程(4)所得到的各组件的单位焓成本 (燃料的单位焓成本 k_F^* , 产品的单位焓成本 k_P^* 和负熵的单位焓成本 k_S^*)。由于凝汽器是耗散设备, 从热力学角度来看, 其功能是减少汽水循环中由于过程中的不可逆所增加的熵, 使工质返回到热力循环的起始状态; 从数学角度来看, 凝汽器

中熵的减少等于产生负熵, 很多学者^[7-8, 10]将负熵作为凝汽器的产品。负熵($N_i = T_0 (s_i - s_0)$)具有能量的单位, 在热经济学中其含义是将凝汽器余热排放所消耗的燃料资源按照各设备不可逆熵增的比例分摊到各个设备, 作为各设备由于不可逆熵增而额外消耗的燃料资源 (如图 2 中各组件输入箭头 N 所示)。由此得到的单位负熵消耗($k_S = N/P$) (表示生产单位产品所消耗的负熵)。如图 2 和表 1 所示, 除凝汽器 CND 和发电机 GEN 外, 所有设备都消耗负熵。

表 1 设计工况下主要组件的不可逆、单位焓耗、焓流率和单位焓成本

Tab. 1 Irreversibility, unit exergy consumption, exergy ratio and unit exergy cost for the design conditions

序号	组件	I/kW	k_B	k_S	r	k_F^*	k_S^*	k_P^*
0	环境	-	0.413	-	-	2.420	-	1.000
1	FWH7	888.74	1.472	0.623	0.004	2.185	0.124	3.294
2	FWH6	598.04	1.220	0.220	0.006	2.185	0.124	2.693
3	FWH5	478.42	1.147	0.147	0.007	2.185	0.124	2.526
4	FWH4	1087.28	1.166	0.166	0.015	2.185	0.124	2.570
5	DTR	2032.99	1.218	0.218	0.021	2.185	0.124	2.689
6	FWP	960.96	1.165	0.159	0.013	2.731	0.124	3.203
7	FWH3	1276.40	1.121	0.121	0.024	2.185	0.124	2.465
8	FWH2	1284.68	1.066	0.066	0.045	2.185	0.124	2.338
9	FWH1	820.86	1.050	0.050	0.038	2.185	0.124	2.301
10	B-SH	302801.44	2.009	0.850	0.691	1.000	0.124	2.114
11	HP1	6134.94	1.096	0.096	0.209	2.185	0.124	2.407
12	HP2	1524.24	1.059	0.059	0.085	2.185	0.124	2.322
13	RH	58718.53	2.009	0.813	0.134	1.000	0.124	2.110
14	IP1	2757.76	1.065	0.065	0.140	2.185	0.124	2.335
15	IP2	1260.87	1.033	0.033	0.124	2.185	0.124	2.263
16	LP1	1325.74	1.073	0.073	0.059	2.185	0.124	2.354
17	LP2	2500.72	1.071	0.071	0.116	2.185	0.124	2.348
18	LP3	1649.50	1.046	0.046	0.117	2.185	0.124	2.292
19	LP4	1872.91	1.090	0.090	0.068	2.185	0.124	2.394
20	LP5	6456.15	1.255	0.255	0.083	2.185	0.124	2.774
21	BFPT	1599.47	1.236	0.236	-	2.185	0.124	2.731
22	CND	18977.69	0.050/0.006	-	-	2.185/2.420	-	0.124
23	CP	81.72	1.242	0.236	0.001	2.420	0.124	3.035
24	GEN	5297.55	1.018	-	-	2.378	-	2.420
25	J1	-	-	-	-	-	-	2.185
26	J2	-	-	-	-	-	-	2.378
全厂		422387.57	2.420	-	-	1.000	-	2.420

注: 由于热经济学模型中的凝汽器组件 CND 还包含了循环水泵 CWP , 所以 CND 消耗两种燃料, 一种是分支组件 $B1$ 提供的燃料焓 $F22$ (其 k_B 和 k_F^* 分别对应于 0.050 和 2.185), 另外一个分支组件 $B2$ 提供的电力焓 $W22$ (其 k_B 和 k_F^* 分别对应于 0.006 和 2.420)。

由表 1 可见, 产生在不同设备中的不可逆具有不同的成本 k_F^* (当产品固定时, 设备的不可逆单位焓成本与其燃料单位焓成本相等^[5]), 沿着热力循环进行的方向, 各组件燃料和产品的单位焓成本逐级递增。对于给水加热器组, k_P^* 从高加到低加逐级增加, 在末级低加 $FWH7$ 达到最大值 3.294kW/kW。对于汽轮机级组, 高压缸调节级 $HP1$ 和低压缸末级 $LP5$ 的 k_P^* 相对于其它级组较大, 主要是由于 $HP1$ 的进汽损失和 $LP5$ 的湿蒸汽损失较大。发电机 GEN

的 k_P^* 较高, 主要是由于其 k_F^* 较高。锅炉过热器 $B-SH$ 和再热器 RH 的 k_P^* 是 k_F^* 的两倍多, 其增长的原因主要是过程内部的不可逆损失。Valero 等人^[10] 使用热经济学结构理论分析了一个 160MW 燃煤电厂也得到了与以上相类似的结果。

图 3 利用仿真手段研究了系统在 300MW 负荷下, 主蒸汽参数变化对产品单位焓成本的影响。其中图(a)和图(b)分别反映了主蒸汽压力在 $\pm 1MPa$ 之间变化 (主蒸汽温度保持不变), 以及主蒸汽温度在

±10℃之间变化,主要组件产品单位焓成本 k_p^* 的变化率。从图中可以看出受影响最大的是高压缸调节级HP1,其次是发电机GEN和低压缸。HP1和GEN的 k_p^* 同向变化,当主蒸汽压力变化时,其 k_p^* 随压力的增加而增加;当主蒸汽温度变化时,其 k_p^* 随温度的增加而减少。其主要原因为,当进汽压力增加或温度降低时,进汽比容降低,导致HP1内部损失增加(例如叶轮摩擦损失与蒸汽比容成反比),因而为生产1单位产品焓需要消耗更多的外部资源焓。因此可以看出主蒸汽温度和压力的变化对机组主要设备的生产性能产生相反方向的影响。

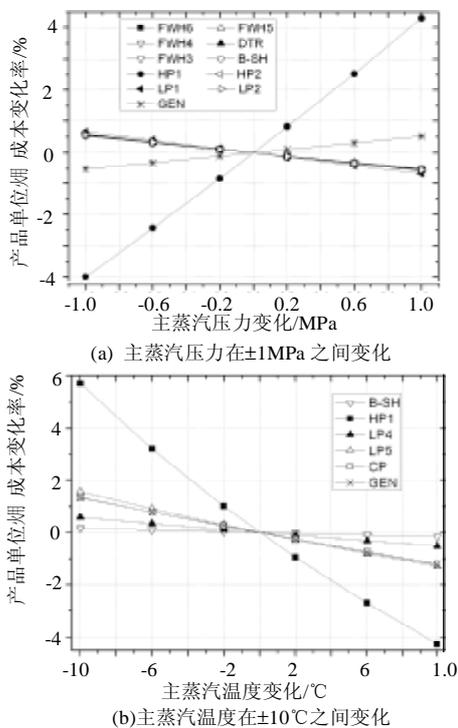


图3 主蒸汽参数变化对各组件产品单位焓成本的影响
Fig. 3 Effects of variations in the live steam pressure and temperature on the unit exergy cost of product in each component

图4反映了机组负荷从180MW逐渐增加到330MW,回热加热器组(见图5(a))和汽轮机级组(见图5(b))的产品单位焓成本 k_p^* 变化规律。如图所示,除末级低加FWH7外,其他加热器随负荷的增加其 k_p^* 逐渐减小,表明在高负荷下大部分加热器具有较高的生产性能,即生产1单位产品焓所需的外部资源焓随负荷增加而逐渐减少。FWH7的 k_p^* 随负荷增加主要由于FWH7入口给水温度随负荷变化不大(仿真设定凝汽器真空不变),而抽汽温度随负荷增加而增大,导致换热温差损失随负荷增加而增大。由此,当机组负荷逐渐增加时,FWH7为生产1单

位产品焓需要消耗更多的外部资源焓。高压缸调节级HP1随负荷增加其 k_p^* 逐渐减小,主要是因为低负荷时部分进汽损失较大,导致HP1的 k_p^* 较高。低压缸末两级级组LP4和LP5随负荷增加其 k_p^* 先减小后增加,主要是由于在高负荷下末两级级组湿蒸汽损失增大,导致级组生产性能降低。汽轮机其它级组的 k_p^* 随负荷变化波动不大。利用上述方法能够分析在不同负荷下各种运行参数对组件 k_p^* 的影响。

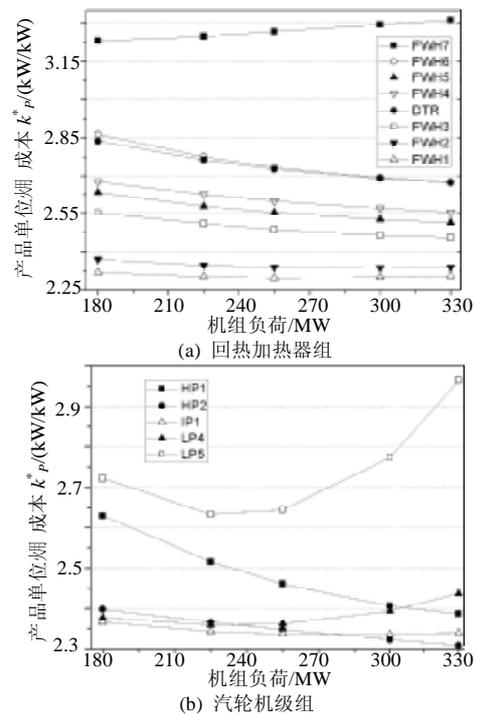


图4 不同负荷下回热加热器和汽轮机级组的产品单位焓成本变化仿真

Fig. 4 Unit exergy costs of products in heaters and turbine sections for various load conditions

6 结论

本文将热经济学结构理论应用于湖南某电厂300MW机组,分析并量化了系统在设计工况以及变工况下成本形成及其分布规律,研究了各设备成本增长的原因以及运行参数对主要设备生产性能的影响。通过分析发现热经济学结构理论具有以下特点:

- (1) 使用燃料-产品的概念能够准确的定义各个设备的生产功能(目的);
- (2) 利用生产结构和特征方程可描述不同设备之间的生产关系(资源分布);
- (3) 引入焓成本的概念解决了局部不可逆的不等价性问题(焓成本相当于局部不可逆对全局燃料

影响的权值);

(4) 使用相对较少的参数集(例如单位焓耗和单位焓成本)包含了较多的热力学和经济学信息, 可用来描述设备的生产性能;

利用该方法能够有效地分析电厂及其它能量转换装置的性能, 为系统的经济性运行、故障诊断和优化改造提供了有力的工具。然而, 该方法的唯一不足就是, 一旦系统增加或者减少一个或多个设备, 整个热经济学模型就要重新构造, 这将增加建模的工作量。

致 谢

衷心感谢美国康奈提格州 ALSTOM 电站实验室的娄新生博士对本文的学术指导, 以及西班牙 Zaragoza 大学机械工程系 Luis M. Serra 博士提供的热经济学相关资料。

参考文献

- [1] Lozano M A, Valero A. Theory of the exergetic cost [J]. *Energy*, 1993, 18(9): 939-960.
- [2] Tsatsaronis G, Park M H. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(9-12): 1259-1270.
- [3] Uche J. Thermoeconomic Analysis and Simulation of a Combined Power and Desalination Plant[D]. Department of Mechanical Engineering: University of Zaragoza; 2000.
- [4] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M J. Thermal design and optimization[M]. New York: Wiley; 1996.
- [5] Tsatsaronis G, Pisa J. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems-Application to the CGAM problem [J]. *Energy*, 1994, 19(3): 287-321.
- [6] 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 Jia-xuan. Research on the application of structure theory and LIFO costing for a power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(6): 185-189.
- [7] Frangopoulos C A. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem[J]. *Energy*, 1994, 19(3): 323-342.
- [8] von Spakovsky M R. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem [J]. *Energy*, 1994, 19(3): 343-364.
- [9] Valero A, Serra L, Lozano M A. Structural theory of thermoeconomics[C]. In: Richter HJ, editor. *International Symposium on Thermodynamics and the Design, Analysis and Improvement of Energy Systems*, ASME Winter Annual Meeting: ASME Book no. H00874; 1993.
- [10] Valero A, Lerch F, Serra L *et al.* Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part II: Application to an actual power plant [J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(9-12): 1519-1535.
- [11] 王清照, 肖卫杰, 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 Qing-zhao, Xiao Wei-Jie, Wang Jia-xuan. An inquire into the application of the structural theory for diagnosing malfunction in a thermal system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(9): 178-181.
- [12] 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 the thermoeconomic marginal costs of steam turbo-generator unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(5): 140-144.
- [13] 程伟良, 王清照, 王加璇. 分析能耗的边际焓 成本模型[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(10): 179-182.
Cheng Weiliang, Wang Qingzhao, Wang Jiakuan. Energy consumption analysis for a marginal exergy cost model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(10): 179-182.
- [14] Valero A, Correas L, Zaleta A *et al.* On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions: Part 1: the TADEUS problem, Part 2: Malfunction definitions and assessment [J]. *Energy*, 2004, 29(12-15): 1875-1907.

收稿日期: 2005-08-16。

作者简介:

张 超(1977-), 男, 博士研究生, 主要从事电站热经济学的仿真、性能评价、故障诊断和系统优化的研究。