

# 1 000 MW 燃煤机组的热经济学分析

程伟良, 季 辉, 狄 安

( 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 北京 102206)

**摘 要:** 为综合分析大型火力发电机组的技术及经济运行特性, 以 1 000 MW 大型燃煤机组为研究对象, 建立了基于矩阵模式热经济学的分析模型, 通过开发的热经济学性能计算软件实现了相应的指标计算、分析及优化, 同时提出了平均单位热经济学成本的概念。结果表明: 给水泵和锅炉的炯经济系数相对较小, 说明其炯损失所占比重相对过大; 2 号高压加热器的炯经济系数很高。随着新汽压力的增加, 平均单位热经济学成本下降缓慢; 随着新汽温度的增加, 系统单位热经济学成本下降的较快。新汽温度或再热温度为 597 ℃ 时, 平均单位热经济学成本出现极小值。

**关 键 词:** 热经济学; 评价指标; 成本分析; 平均单位热经济学成本; 炯经济系数

中图分类号: TK229; F407. 2

文献标识码: A

## 引 言

能量系统的分析方法中, 与热经济学方法相似的有能值法, 两者都是考虑能量系统中产品的成本分布状况, 但它们的目标和应用领域不同。能值法的重点是关注能量系统中有多少燃料转换成产品; 而热经济学方法则是从更广阔的生物圈范围内考虑设备、材料和能流的转换情况, 从而更能反映能源的市场经济价值, 其采用的分析方法可细化为多种, 同时还可以进行比较分析评价<sup>[1~2]</sup>。

用热经济学方法对长期运行的复杂能源系统及设备进行诊断时, 主要根据不同情况下的燃料消耗量来判断其经济运行状况<sup>[3]</sup>, 并采用量化因果分析法对系统所有的变量进行分析, 而线性回归法和神经网络法则只能对个别有影响的变量进行单独分析。

利用热经济学的分析方法, 还可研究汽轮机喷嘴面积及粗糙度变化所引起熵增的情况, 据此可评估汽机部分内在故障对炯成本的影响<sup>[4]</sup>。

在空调系统的冷凝器优化设计中<sup>[5]</sup>, 为使熵增

最小, 可以通过热经济学的孤立优化模式来实现其性能系数( COP) 最大化, 通过优化可实现 COP 增加 0. 6% ~ 1. 7% 。

在火电厂设计中, 热经济学建模可以形成兼顾效率与成本的合理性方案<sup>[6]</sup>, 对蒸汽 - 燃气联合循环机组进行热经济学优化, 可以改进设计方案。对于带有冷却塔的 地源热泵系统而言, 可以通过热经济学分析实现兼顾能源与经济的多个变量优化, 并同热力学的单一变量优化方法进行比较<sup>[7]</sup>。

本研究首次采用热经济学建模来对 1 000 MW 机组进行分析, 利用关系曲线进行优化, 分析系统中各股炯流的热经济学成本的分布规律, 为电厂机组的节能改造和经济运行提供一定的决策依据。

## 1 基于热经济学的建模及优化方法

热经济学就是把热力学分析与经济优化理论相结合而形成的一门学科, 它兼顾效率和成本, 在热力学效率最大和经济成本投入最小之间找到一个平衡点, 以实现能量系统综合效益的最大化<sup>[8]</sup>。在分析时, 可将能量系统划分成多个子系统、单元或组元, 各个子系统之间以炯流相连接, 并且以事件矩阵来表达各股炯流与子系统之间的这种联系。利用成本平衡方程求解系统中各股炯流的单位热经济学成本, 计算各个子系统的炯经济系数, 并在此基础上进行评价、分析、诊断、优化和决策等。具体的评价指标为单位热经济学成本和炯经济系数。对于参数较多的复杂能源系统, 该方法能够实现简便有效的计算处理, 并且能够客观准确地反映燃料的损耗情况<sup>[9]</sup>。

对任一子系统  $k$  而言, 成本平衡方程可描述为:

$$c_{pr} E_{pr} = c_{in} E_{in} + Z_n \quad (1)$$

式中:  $c_{pr}$  和  $E_{pr}$  一该子系统产品的炯单价和炯值;

收稿日期: 2012 - 07 - 25; 修订日期: 2012 - 09 - 26

基金项目: 生物质发电成套设备国家工程实验室开放基金( KZ0015)

作者简介: 程伟良( 1965 - ) 男, 陕西咸阳人, 华北电力大学教授、博士。

$c_{in}$  和  $E_{in}$ —输入该子系统燃料的焓单价和焓值;  $Z_n$  为非能量费用, 一般包括设备初投资分摊、人员工资及运行维护等。

若整个能量系统共有  $m$  个子系统时, 可列出  $m$  个成本平衡方程, 用矩阵形式可表示为:

$$A \times E_D \times C^* = 0 \tag{2}$$

式中:  $E_D$ — $E$  焓流列向量的对角阵;  $C^*$ —单位热经济学成本向量 ( $n \times 1$ )。

式(2)中, 系统有  $n$  股焓流的单位热经济学成本需要确定, 但此时系统只有  $m$  个子系统 ( $m < n$ ), 因而所形成的成本平衡方程组不封闭, 需要根据补充方程构建原则<sup>[10]</sup>, 建立 ( $n - m$ ) 个补充方程后, 方能实现求解。

热经济学中经济与效率的关系也可以用焓损费用与非能量费用之间的关系来描述, 即焓经济系数。焓经济系数可反映非能量费用占消耗费用总和的比例, 非能费用中主要是设备初投资成本, 如果系数过高, 说明设备投资过大。反之则说明焓损过大, 这时可增大投资来提高设备效率。焓经济系数的矩阵表达式为:

$$f_{ex} = Z / (C_{ir} \sum I_r + Z) \tag{3}$$

式中:  $Z$ —该子系统的非能量费用;  $C_{ir}$ —焓损的单位热经济学成本, 这里等于进入该子系统的燃料的单位热经济学成本;  $I_r$ —各子系统相应的焓损。

在热经济学成本分析的基础上, 可进一步实现系统优化, 以使系统的总成本(含能量费用和非能费用两方面)最小。由于常规优化方法对自变量在有限范围变化时无法处理, 也就是说, 在变量的指定范围, 不一定能取得极值, 在实际的能源系统运行优化中, 这种情况经常出现。因此, 利用模型计算机软件, 以单位热经济学成本为目标函数, 计算了火电厂重要参数在正常变化范围内变化时单位热经济学成本的变化情况, 并形成曲线, 以研究系统实际运行时的最佳运行参数。对系统经济性影响比较大的几个参数有新汽温度、新汽压力及再热温度等。

为从技术与经济方面综合比较不同的能源系统, 尝试采用一种全新的指标体系, 即对每一个能源系统, 计算出各自的平均单位热经济学成本, 成本最小的系统的技术经济综合性能最好, 反之则最差。还可针对不同的系统结合其特点, 寻求经济效果差的原因, 进而提出合理的改革措施和方案, 降低其平均单位热经济成本。当然, 也可以运用这个指标来评价同一系统不同时间的经济技术综合效益, 得到

其连续变化曲线, 来进一步分析其综合效益的优劣。

对于具有  $n$  股焓流的能量系统而言, 其单位热经济成本的平均值, 即为平均单位热经济学成本  $C$ :

$$C = ( \sum_{i=1}^n P_i \times C_i ) / \sum_{i=1}^n P_i \tag{4}$$

式中:  $P_i$ 、 $C_i$ —第  $i$  股焓流值和相应的单位热经济学成本。

通过分析研究热经济学模型, 可得到参数(如新汽压力、新汽温度及再热温度等)变化对单位热经济学成本的影响。而在参数连续变化时, 其计算结果也可以形成一系列的连续变化曲线, 这时就可能出现比较理想的寻优结果。

## 2 1 000 MW 火电机组的建模计算

在对能量系统进行热经济学建模时, 根据研究目的, 在不影响计算准确性的前提下, 对系统某些部分进行合理的集成, 从而简化整个分析过程。本研究把 1 000 MW 机组的热力系统划分成 16 个子系统, 如锅炉、汽轮机高压缸、中压缸、低压缸、发电机、凝汽器、低压回热部分、除氧器及高压回热部分等。这些子系统由 38 股焓流联系起来。具体情况如图 1 所示, 图中的数字为焓流。

计算的基准值设为: 温度  $T_0 = 288.15$  K; 压力  $P_0 = 0.1$  MPa。子系统的非能费用采用匀速折旧法计算。设该机组中设备的经济寿命是 30 年, 每台机组的年运行小时数按 8 000 h 计算, 从而可求出各子系统的折旧费, 具体计算结果如表 1 所示。

表 1 系统各子系统的非能量费用  
Tab. 1 Non-energy expenditures of various subsystems of the system

子系统	折旧价格 /元·h <sup>-1</sup>	子系统	折旧价格 /元·h <sup>-1</sup>
B( 锅炉)	20208.59	FWH1( 1 号高加)	504.545
HP( 高压缸)	4014.035	FWH2( 2 号高加)	642.96
IP( 中压缸)	4165.845	FWH3( 3 号高加)	419.71
LP( 低压缸)	7666.405	DTR( 除氧器)	549.195
CND( 凝汽器)	1169.83	FWH4( 4 号低加)	459.895
GEN( 发电机)	3027.27	FWH5( 5 号低加)	299.155
BFPT( 小汽机)	647.425	FWH6( 6 号低加)	343.805
FWP( 给水泵)	98.23	FWH7( 7 号低加)	433.105

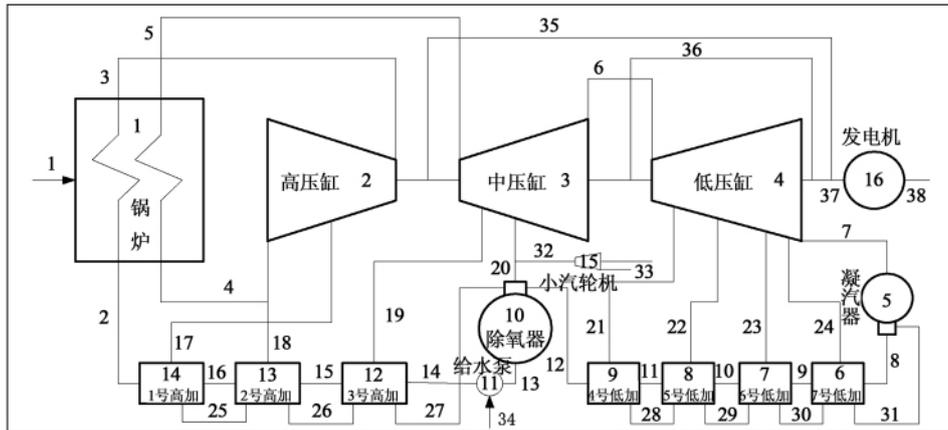


图 1 某 1000 MW 机组热力系统模型

Fig. 1 Model for the thermal system of a 1000 MW unit

### 3 计算结果及分析

若按照每吨燃料折算为标准煤后的单价为 100 元计算, 获得的结果如表 2 所示。

表 2 系统中各股烟流相应的单位热经济学成本  
Tab. 2 Unit thermo-economic costs of various strands of the exergy stream in the system

烟流	单位热经济学成本/元·GJ <sup>-1</sup>	烟流	单位热经济学成本/元·GJ <sup>-1</sup>
烟流 1	37.594	烟流 20	82.845
烟流 2	117.859	烟流 21	82.845
烟流 3	82.845	烟流 22	82.845
烟流 4	82.845	烟流 23	82.845
烟流 5	82.845	烟流 24	82.845
烟流 6	82.845	烟流 25	82.845
烟流 7	82.845	烟流 26	82.845
烟流 8	1 213.8	烟流 27	82.845
烟流 9	365.434	烟流 28	82.845
烟流 10	273.03	烟流 29	82.845
烟流 11	216.776	烟流 30	82.845
烟流 12	188.154	烟流 31	82.845
烟流 13	145.632	烟流 32	82.845
烟流 14	156.622	烟流 33	82.845
烟流 15	141.347	烟流 34	105.394
烟流 16	126.342	烟流 35	94.101
烟流 17	82.845	烟流 36	100.207
烟流 18	82.845	烟流 37	100.532
烟流 19	82.845	烟流 38	100.161

从表 2 可看出, 在设计工况时, 发电机的输出烟流的单位热经济学成本为 100.161 元/GJ, 折算出每度电的成本为 0.36 元。热经济学中随着过程的进行, 产品的单位烟价格是逐渐增加的。汽轮机乏汽经凝汽器后, 由于冷却水带走了相应的凝汽烟, 因而烟值大大减小, 从而造成烟流 8 的单位热经济学成本最大。

表 3 烟经济系数的计算结果

Tab. 3 Calculated results of the exergy-based economic coefficients

子系统	$f_{ex}$	子系统	$f_{ex}$
B(锅炉)	0.17	FWH4(4号低加)	0.44
HP(高压缸)	0.30	DTR(除氧器)	0.30
IP(中压缸)	0.28	FWP(给水泵)	0.01
LP(低压缸)	0.29	FWH3(3号高加)	0.28
CND(凝汽器)	0.05	FWH2(2号高加)	0.82
FWH7(7号低加)	0.16	FWH1(1号高加)	0.33
FWH6(6号低加)	0.41	BFPT(小汽机)	0.28
FWH5(5号低加)	0.32	GEN(发电机)	0.47

从表 3 中可以看到, 给水泵的烟经济系数最小, 只有 0.01, 这是由于高品质的机械能转换为低品质的热能造成的。

该机组中锅炉烟经济系数为 0.17, 低于最低值 0.3, 因此要采取技改措施尽量降低锅炉烟损失。而汽轮机的烟经济系数处在 0.3 左右, 说明其热力学性能比较完善, 综合效益好。

在该机组的回热系统中, 2 号高压加热器的烟经济系数为 0.87, 高于允许的最高值 0.7, 这主要是

2号加热器非能费用的消耗很大,应提高运行人员的素质,减少维护费用,并设法降低设备初投资等。

### 4 关键参数的热经济学影响分析

在计算出各股焓流的单位热经济学成本和焓经济系数后,可进一步结合模型计算其平均单位热经济学成本,并求出平均单位热经济学成本和系统单位热经济学成本随某些关键参数的变化曲线。具体如图2和图3所示。

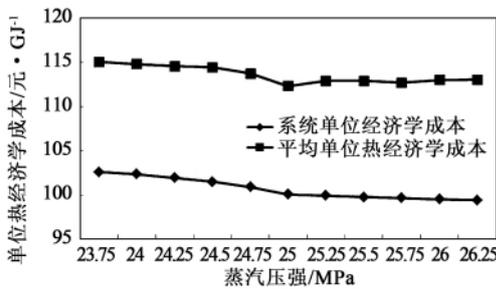


图2 系统单位热经济学成本和平均单位热经济学成本与新汽压力间的变化关系

Fig. 2 Unit thermo-economic cost and average unit thermo-economic cost of the system vs. live steam pressure

从图2可以看出,平均单位热经济学成本始终大于系统单位热经济学成本,这是因为系统单位热经济学成本中采用的燃料是真实的机组燃料,而不是热经济学各子系统中虚拟的“燃料”。系统单位热经济学成本用到的焓单价低于经过多个转换环节后的平均单位热经济学成本用到的焓单价。还可以看到,在新汽压力为25 MPa时,这两种热经济学成本突然下降,随后平均单位热经济学成本略有增长,说明压力25 MPa时综合效益最好。

在图3中4条曲线中的关键点都是在温度为597℃的地方。在系统单位热经济学成本曲线中,该点为两条曲线的重合点。温度升高时,系统单位热经济学成本随新汽温度的升高,下降地较快,相比再热汽温而言,系统单位热经济学成本对新汽温度变化更敏感。

而对于两条平均单位热经济学成本曲线而言,则出现了在这个关键点的极值现象。说明在这个温度附近,系统的综合效益最好。新汽温度的平均单位热经济学成本始终要大于再热汽温的相应值,并且随温度的提升,它们之间的差距越来越小。

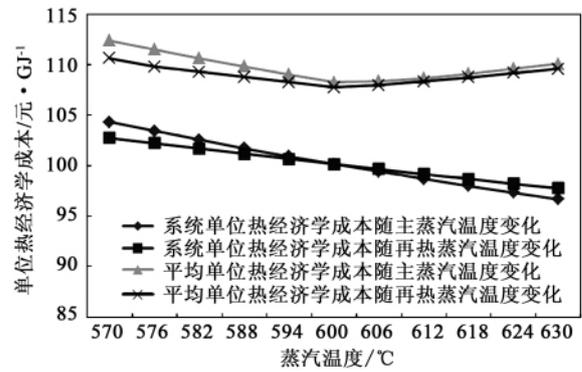


图3 系统单位热经济学成本及平均单位热经济学成本与新汽温度和再热汽度的关系

Fig. 3 Unit thermo-economic cost and average unit thermo-economic cost of the system vs. live steam and reheat steam temperature

### 5 结 论

为满足对大型火电机组实际运行的综合效益分析、优化、诊断和评估需要,建立了相应的热经济学分析指标模型,并研发了相关实用指标的模型计算软件,得出了一些有益的结论。

锅炉的焓经济系数较低,可以适当地增加投资,提高其焓效率,使其焓经济系数趋于一个合理值;汽轮机的焓经济系数处在合理值范围,说明其热力学性能比较完善;2号高压加热器的焓经济系数很高,应提高运行人员素质,减少维护费用,并设法降低后续的设备投资等。

在对整个能量系统的技术及经济综合分析优化时,提出了衡量整个系统的综合效益评价指标,即平均单位热经济学成本。

随着新汽温度的变化,系统单位热经济学成本下降地较快,说明系统单位热经济学成本对新汽温度变化更敏感。平均单位热经济学成本在温度为597℃的时候出现极小值,说明在这个温度附近,系统的综合效益最好。

#### 参考文献:

[1] 陆延昌,姜绍俊. 21世纪初期中国电力工业展望[J]. 中国电力 2000, 33(7): 1-8.  
 LU Yan-chang, JIANG Shao-jun. Prospects of China electric power industry in the early 21st century [J]. China Electric Power 2000, 33(7): 1-8.

[2] Andrea Lazaretto. A critical comparison between thermo-economic and exergy analyses algebra [J]. Energy 2009, 34: 2196-2205.

- [3] Uson S, Valero A. Thermo-economic diagnosis for improving the operation of energy intensive systems: Comparison of methods [J]. Applied Energy 2011 88: 699 - 711.
- [4] Zaleta-Aguilar A, Correas-Uson L, Kubiak-Szyska J, et al. Concept on thermo-economic evaluation of steam turbines [J]. Applied Thermal Engineering 2007 27: 457 - 466.
- [5] Stewart S W, Shelton S V. Finned-tube condenser design optimization using thermo-economic isolation [J]. Applied Thermal Engineering 2010: 30: 2096 - 2102.
- [6] Rovira A, Sanchez C, Munoz M, et al. Thermo-economic optimization of heat recovery steam generators of combined cycle gas turbine power plants considering off-design operation [J]. Energy Conversion and Management 2011 52: 1840 - 1849.
- [7] Hoseyn Sayyadi, Mostafa Nejatollahi. Thermodynamic and thermo-economic optimization of a cooling tower-assisted ground source heat pump [J]. Geothermics 2011 40: 221 - 232.
- [8] 彭启珍 张树芳 郭江龙. 热经济学成本分析中补充方程的合理构造 [J]. 热力发电 2003(10): 29 - 31.
- PENG Qi-zhen, ZHANG Shu-fang, GUO Jiang-long. Reasonable structure of the supplementary equation for thermo-economic cost analysis [J]. Thermal Power Generation 2003(10): 29 - 31.
- [9] Bilgen E. Exegetic and engineering analysis of gas turbine based cogeneration systems [J]. Energy 2000 25(7): 1215 - 1229.
- [10] Andrea Lazaretto, George Tsatsaronis. On the quest for objective equations in energy costing [J]. Advanced Energy Systems Division, 1997 13(7): 197 - 210.

( 辉 编辑)



## Flex Efficiency 60 联合循环发电装置

据《Diesel & Gas Turbine World》2012 年 11 月刊报道,继 2011 年推出 Flex Efficiency 50 装置后,GE 公司于 2012 年继续推出用于 60 Hz 电力生产的 Flex Efficiency 60 联合循环发电装置。这是因为世界的电网被分成两个频率: 50 Hz(欧洲、亚洲和非洲的大部分国家)和 60 Hz(北美洲、南美洲的大部分国家、沙特阿拉伯、日本南部、韩国和台湾)。研制 Flex Efficiency 60 装置是满足后者的市场需要。

Flex Efficiency 60 将包括 4 台 7F-7 型燃气轮机、2 台三压余热锅炉、1 台增强的 D-47 汽轮机、1 台 H26 氢冷发电机和 Mark\* V1e 集成控制系统,它们可被配置成 Flex Efficiency 60 联合循环电站。

Flex Efficiency 60 的技术数据:

### 总的装置

净输出功率	750 MW
联合循环效率	大于 61%
NO <sub>x</sub> 排放(在 15% O <sub>2</sub> 下)	2 mg/kg
CO 排放	2 mg/kg
燃料	天然气和馏出油
<b>燃气轮机</b>	
型号	7F7 型
简单循环净输出功率	250 MW
排气能量	大于 1.319 MM kJ/h
燃烧室类型	DLN2.5 + AFS(轴向燃料分级)
<b>汽轮机</b>	
型号	D-47 三压再热、三缸汽轮机
高压汽轮机入口蒸汽的压力/温度	16.55 MPa/600°C
<b>发电机</b>	
型号	H26
额定功率	在 0.85 PF(功率因数)下,270 MW
电压	19.5 kV
<b>余热锅炉</b>	
类型	三压,再热锅筒式
<b>控制系统</b>	
型号	具有 Op Flex* 软件的 Mark* V1e 电站控制器

( 吉桂明 摘译)

The magnitude of the flammable content of fly ash represents one of the important factors influencing the efficiency of a boiler and plays an important role in economic operation of the boiler. The authors optimized the linking weight value and threshold one between the nodes of a BP neural network by using the PSO (particle swarm optimization) algorithm and established a BP neural network-based model optimized by using the PSO algorithm (called as a PSO-BP model for short). The model can thoroughly give a full play of both overall optimization searching ability of the particle swarm optimization algorithm and the local searching edge of the BP algorithm. The operating parameters of a 670 t/h boiler were used to predict the flammable content of the flying ash. It has been found that compared with the BP neural network based model, the PSO-BP model is more precise and faster to come to a converging point, thus offering a feasible method for analyzing and predicting the flammable content of fly ash in large-sized utility boilers. **Key words:** BP neural network, flammable in fly ash, optimization, modeling

1 000 MW 燃煤机组的热经济学分析 = **Thermoeconomic Analysis of a 1 000 MW Coal-fired Power Generation Unit** [刊, 汉] CHENG Wei-liang, JI Hui, DI An (College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(2). - 187 ~ 191

To analyze in a comprehensive way the technical and economic operation characteristics of a large-sized thermal power generation unit, established was an analytic model based on the matrix mode thermoeconomics with a 1000 MW large-sized coal-fired unit serving as the object of study. By employing a thermoeconomic performance calculation software developed, to calculate, analyze and optimize the corresponding indexes were realized and at the meantime, a concept of average thermoeconomic unit cost was presented. It has been found that the exergy economic coefficients of the feedwater pumps and boilers are relatively small, indicating that their exergy losses take up relatively big proportions. The exergy economic coefficient of No. 2 high pressure heater is very high. With an increase of the live steam pressure, the average thermoeconomic unit cost will gradually decrease. With a rise of the live steam temperature, such a cost will decrease relatively quickly. When the live steam temperature or reheat temperature is 597 °C, such a cost will be down to its minimum value. **Key words:** thermoeconomics, evaluation index, cost analysis, average unit thermoeconomic cost, exergy economic coefficient

600 MW 燃煤机组锅炉大比例掺烧褐煤的设备改造 = **Equipment Modification of a 600 MW Coal-fired Boiler Mixing-dilution Burning With Lignite at a Large Proportion** [刊, 汉] WANG Liu-hu, WANG Rong, WANG Xiao-feng, et al (Inner Mongolia Jinglong Power Generation Co. Ltd., Fengzhen, China, Post Code: 012100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(2). - 192 ~ 195

Due to a big water content and low heating value of lignite, its mixing-dilution combustion in a large amount may e-