

# 基于符号烟经济学的冷热电联供产品成本分摊

孙 锦, 张俊礼, 葛 斌

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:**以南京热电厂 600 MW 供热机组为实例, 采用热力学中的烟流与经济学中的成本相结合的符号烟经济学的理论和方法, 建立冷热电三联供计算模型, 得出热电厂的冷热电三联供的成本分摊。该模型在 3 种产品形成的过程中, 考察烟流数值的变化, 不仅考虑了 3 种产品的烟含量, 还深入分析了产品在形成的过程中各自所造成的烟损, 结合以烟定价, 确定产品的烟成本, 并与以热量法计算得出的成本进行比较。计算结果和分析表明, 符号烟经济学运用于冷热电三联供系统切实可行, 为 3 种产品的合理定价奠定了基础, 有利于冷热电三联供系统的可持续发展。

**关 键 词:**冷热电联供; 成本分摊; 符号烟经济学

中图分类号: TK123

文献标识码: A

## 引 言

冷热电三联供 (CCHP) 是在热电联产的基础上发展起来的一种新的能源供应装置, 它使燃料燃烧产生的具有较高品位的热能通过汽轮机或燃气轮机等热工转换设备发电, 同时利用做过功的低品位热能在冬季向用户供热, 利用消耗热能的制冷机组在夏季向用户供冷, 做到对能源的梯级利用, 被认为是第二代能源的重要技术之一<sup>[1~2]</sup>。

我国的冷热电三联供事业起步较晚, 发展也比较缓慢。如何合理地对冷、热、电 3 种产品进行成本分摊是促进冷热电三联供健康、快速发展的关键。目前, 我国对成本分摊的研究主要集中于热电成本的分摊, 方法主要有热量法、实际焓降法、热折扣法、烟方法等<sup>[3~7]</sup>, 但这些方法在实际运用中存在着局限性。符号烟经济学是西班牙学者 A. Valero 在烟成本理论的基础上开发出来的, 基本上包含了经济学中出现的“孤立化”模式、“代数”模式、“结构系数”模式<sup>[8]</sup>。20 世纪 90 年代初, 王加璇、杨勇平等曾将该方法运用于热电联产的成本分摊, 并对矩阵方法进行了改进<sup>[9~11]</sup>, 证实它将联产收益合理地分摊给供热和供电是一种较为合理的分摊方法, 为热电事业的发展做出了积极的贡献。但是随着社会

的发展以及对能源充分利用的要求, 冷热电三联供越来越受到人们的重视, 而如何合理分摊冷热电成本也已成为我们关注的重点。对于冷热电的成本分摊, 一些学者从经济学的角度采用“价格系数法”、“等效折算法”、“折合烟成本”和“热经济学”对微型冷热电联供系统进行了研究<sup>[12~15]</sup>, 但是微型冷热电联供系统和热电厂冷热电联供系统有着产品定位不同的本质区别, 不可将两者相互替代, 所以研究热电厂的冷热电三联供系统对于电厂的改造仍然有重要意义。

本研究工作是以前南京热电厂 600 MW 供热机组的实际运行为基础, 建立冷热电三联供系统, 并运用符号烟经济学法进行成本分摊计算, 在证明符号烟经济学适用于冷热电三联供成本分摊的同时, 也具体的给出了 3 种产品的成本分摊关系, 有助于更加合理地定价冷热电 3 种产品, 对冷热电三联供的健康、可持续发展有着积极的影响。

## 1 符号烟经济学的基本原理

符号烟经济学是将整个能量系统划分为  $m$  个子系统, 各系统间共用 1 股烟流连接, 再通过各系统烟平衡与烟成本平衡, 建立方程, 得到系统中各股烟流的烟成本, 最后确立系统最终产品的成本。系统有  $m$  个子系统, 因而可列出  $m$  个烟经济平衡式, 以矩阵表示为:

$$A \times E_b \times C = 0 \quad (1)$$

式中:  $A$  ( $m \times n$ ) 事件矩阵, 其元素  $a_{ij}$  以下法记之: 当烟流输入子系统时, 记作  $a_{ij} = 1$ ; 当烟流输出子系统时, 记作  $a_{ij} = -1$ ; 当烟流既不输入子系统也不输出时, 记作  $a_{ij} = 0$ ;  $E_b$ — $E$  向量的对角阵 ( $n \times n$ );  $E$ —烟流向量 ( $n \times 1$ );  $C$ —烟消耗系数向量 ( $n \times 1$ ), 定义为系统每一股烟流生产 1 k 的烟值所需消耗从外部输入系统能量的烟值。

但现在只能写出  $m$  个 ( $m < n$ ) 烟经济平衡式,

收稿日期: 2009-10-30 修订日期: 2009-12-17

作者简介: 孙 锦 (1983—), 女, 江苏南京人, 东南大学硕士研究生。

方程组不封闭,因此需要建立 (n-m)个补充方程才能求解。若以矩阵表示这些补充方程,则有:

$$\alpha \times E_b \times C = W \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ —含 (n-m)行, n列的矩阵;  $W$ —(n-m)行的列向量。如何建立补充方程在实例中说明。

联立式 (1)和式 (2),得:

$$\bar{A} \times E_b \times C = \bar{W} \quad (3)$$

即可求得焓消耗系数  $C$  式中  $\bar{A} = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix}, \bar{W} = \begin{bmatrix} 0 \\ W \end{bmatrix}$ 。

已知每股焓流的焓消耗系数  $C$ 和焓流值  $E_i$ ,即可求得该股焓流消耗的外部能量值  $E_i^*$ :

$$E_i^* = E_i \times C$$

## 2 制冷系统的联立

制冷系统采用蒸汽型溴化锂吸收式制冷系统,

利用从电厂抽得的蒸汽作为热源。一般国内标准溴化锂吸收机的入口蒸汽为不高于 0.8 MPa 的饱和蒸汽,如抽汽参数高于该标准,为了避免蒸汽热源能量的损失,则在溴化锂吸收机的前端加一热交换器,使换热器出口的蒸汽压力、温度达到制冷机的蒸汽入口设计工况。为了便于计算,换热器中减少的焓依然用于供热,并入供热焓流中。而制冷系统就仅考虑输入和输出,即蒸汽的输入和冷量的输出。制冷系统的补充方程为:

$$\alpha \times E_b \times C = 0$$

建立原则将在实例中说明。

## 3 焓经济学方法的实例计算

以南京热电厂 600 MW 机组作为实例,其系统简化如图 1 所示。

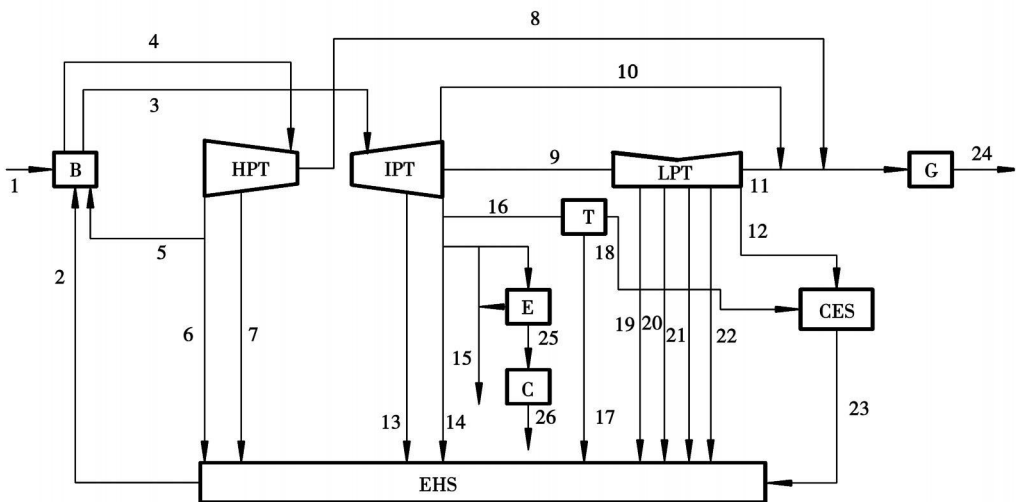


图 1 600 MW 机组系统简化图 (数字为焓流)

整个冷热电三联供系统是由原热电厂和双效溴化锂制冷机组组成,该系统是在低压供热工况下,将原来抽出的用于供热的一部分蒸汽用于制冷。

将整个系统划分为 9 个子系统,包括锅炉 (B)、高压缸 (HPT)、中压缸 (IPT)、低压缸 (LPT)、发电机 (G)、冷端系统 (CES)、等效回热系统 (EHS)、小型蒸汽机 (T) 和一个制冷系统 (C) 等。全系统共有 26 股焓流,只有焓流 1 是从外部输入系统的,而输出焓流为 15、24、26 分别为供热、供电、供冷。其中焓流 15 一部分来自原供热蒸汽,一部分来自换热器的热量。

焓流 1 是从外部输入的燃料焓,采用计算式

为<sup>[16]</sup>:

$$E_f = Q_l (1.0064 + 0.152 \frac{H}{C} + 0.0616 \frac{O}{C} + 0.0429 \frac{N}{C})$$

式中:  $C, H, O, N$ —燃料中碳、氢、氧、氮的质量成分;  $Q_l$ —燃料的低位发热量。

设环境的压力和温度分别为  $10^5$  Pa 和  $27^\circ\text{C}$ ,其余各股焓流值根据已知参数及计算式为:

$$e = h - h_0 - T_0 (s - s_0)$$

式中:  $h, T_0, s$ —环境下的比焓、温度、比熵。

对于制冷系统,是从中压缸抽出 20 000 kg/h 的蒸汽用于制冷,选定双良蒸汽型双效溴化锂吸收式



由表 4 可以看出,第 15 股供热 $\dot{E}_{15}$ 的 $\dot{E}_{15}$ 耗系数为 2.1567,第 26 股供冷 $\dot{E}_{26}$ 的 $\dot{E}_{26}$ 耗系数为 11.051,要得到 1 k 的热 $\dot{E}_{15}$ 和冷 $\dot{E}_{26}$ 分别要消耗外部 2.1567 和 11.051 k 的 $\dot{E}_{15}$ ,这说明获得等值冷 $\dot{E}_{26}$ 的代价要比热 $\dot{E}_{15}$ 的代价大的多。这一点从制冷系统可以看出,进入制冷系统的 $\dot{E}_{26}$ 值为 15.5 GJ/h 而获得的冷 $\dot{E}_{26}$ 值仅为 3.025 GJ/h 制冷 $\dot{E}_{26}$ 效率仅为 19.5%, $\dot{E}_{26}$ 损是非常大的,这说明制冷要比供热困难的多。

计算发电所消耗的 $\dot{E}_{15}$ 、供热所消耗的 $\dot{E}_{15}$ 以及供冷所消耗的 $\dot{E}_{26}$ ,并按其能级换算成热量单位,得出各煤耗量。以发电为例,发电 $\dot{E}_{15}$ 流为 2183.93 GJ/h 换算成发电量为 606.647.22 kW·h/h 该股 $\dot{E}_{15}$ 流消耗的外部能量为 2183.93×2.3537=5140.316 GJ/h 对应的煤耗为 175.617.22 kg/h 故可以求得发电煤耗率为 289.49 g/(kW·h),供热、供冷煤耗依此计算。将此方法计算的指标和以“热量法”计算的指标进行比较,如表 5 所示。

表 5 符号 $\dot{E}$ 经济学法、热量法计算结果比较

	符号法	热量法
发电煤耗率 /g·(kW·h) <sup>-1</sup>	289.49	173.92
供热煤耗率 /kg·GJ <sup>-1</sup>	22.98	29.82
供冷煤耗率 /kg·GJ <sup>-1</sup>	21.82	31.36

由上面的比较可以看出,由于热量法把热电联产的收益全归于发电,因此发电煤耗率非常低,供热煤耗率和供冷煤耗率较高,这对于电厂来说是非常有益的,由于电价受到国家的调控,不得随意提高,而热价、冷价逐步开放市场化营运。热量法的计算结果恰恰给电厂制定偏高的热价、冷价很好的理由,这样电厂把在发电上的经济损失转嫁到供热、供冷上来弥补。但是 600 MW 这样的大型机组是以发电为主,供热供冷是辅助产品,电价低,热价和冷价高,不仅不符合实际情况,而且有损冷、热用户侧的利益,打击其采暖、用冷的积极性,不利于冷热电三联供健康、可持续的发展。符号 $\dot{E}$ 经济学修正了这一偏差,它从各子系统着眼,追踪能量生产过程与成本形成过程,将联产的收益合理地分摊给供冷、供热和供电。从表中还可以看出,供热煤耗率和供冷煤耗率相差不大,也充分验证了作为相同品位的冷、热两种能源在煤耗上的要求相同。

#### 4 结 论

(1) 将符号 $\dot{E}$ 经济学方法首次运用于 600 MW 热电大型机组,以发电作为主要产品,和小机组的“以热定电”有所区别。

(2) 由计算可知,虽然得到冷 $\dot{E}_{26}$ 的代价要比热 $\dot{E}_{15}$ 大,但是供冷是由低品位的热能转换而来的,这样不仅节约了这部分的能量,而且生产新的产品,更符合用户的需求。

(3) 运用符号 $\dot{E}$ 经济学方法对冷、热、电 3 种产品的成本模拟计算,分别给出了电、热、冷的煤耗率,为它们的合理定价提供了理论依据。本文仅仅对能量费用对成本分摊做了分析,而非能量费用没有考虑,这些将在今后做进一步的探讨。

#### 参考文献:

- [1] 李 华,李惠强,帅小根,等.冷热电三联供绿色能源项目的经济分析[J].华中科技大学学报,2006 23(2):49-52
- [2] WUD W,WANG R.Z. Combined cooling heating and power: a review[J]. Progress in Energy and Combustion Science 2006 32:459-495
- [3] 张利平,张永华,唐德善.热电联产热电分摊方法的研究[J].华北水利水电学院学报,2004 25(1):36-37
- [4] 于淑梅,张树芳.热电联产的多样性与热电成本分摊方法适应性的探讨[J].电站系统工程,2002 18(5):45-46
- [5] 张春发,张 宝,张德成.热电厂三种典型热、电分摊方法的内在联系及其应用[J].电力情报,2001(2):28-30
- [6] 叶学民,阎维平,高正阳.合理确定热电联产机组中热、电分摊比的折合 $\dot{E}$ 分摊模型[J].中国电机工程学报,2003 23(2):168-171
- [7] SENGUPTA S,DATTA A,DUTTAGUPTA S. Exergy analysis of a coal-based 210 MW thermal power plant[J]. Int J Energy Res 2007 31(1):14-28
- [8] VALERO A,LOZANO M A,MUNOZ M. A general theory of exergy saving on the exergetic cost[J]. Computer aided Engineering and Energy Systems 1986 2-3:1-8
- [9] 王加璇,杨勇平.我国热价设计理论方法的研究(II)—热、电成本分摊的符号 $\dot{E}$ 经济学方法[J].北京动力经济学院报,1995 12(2):74-79
- [10] 郭民臣,王清照,魏 楠,等.电厂热力系统矩阵分析法的改进[J].热能动力工程,1997 12(2):103-106
- [11] ZHANG CHAO,WANG YAN. Exergy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of the thermoeconomics[J]. Energy Conversion and Management 2006 47(7-8):817-843
- [12] 刘凤强,曹家枞,秦志红,等.楼宇冷热电联供系统的产品成本分摊[J].燃气轮机技术,2004 17(2):50-54
- [13] 刘凤强,曹家枞,曹双华.楼宇冷热电联供系统成本分摊方法研究[J].东华大学学报(自然科学版),2005 31(3):46-50
- [14] 荆有印,王江江,张春发.冷热电联供系统成本分摊法研究[J].暖通空调 2008 38(12):61-64
- [15] 邓 建,吴静怡,王如竹,等.基于热经济学结构理论的微型冷热电联供系统性能评价[J].工程热物理学报,2008 29(5):731-736
- [16] 赵冠春,钱立伦. $\dot{E}$ 分析及其应用[M].北京:高等教育出版社,1984
- [17] 戴永庆,耿惠彬.溴化锂吸收式制冷技术及应用[M].北京:机械工业出版社,1996
- [18] 彭启珍.基于矩阵模式热经济学的热电产品成本分析方法研究[D].华北电力大学,2003

(编辑 伟)

基于符号焓经济学的冷热电联供产品成本分摊 = Cost Amortization of Combined Cooling Heating and Power Supply Products Based on Symbolic Exergoeconomics [刊, 汉] / SUN Jinq ZHANG Jun-li GE Bin (College of Energy Source and Environment Southeast University Nanjing China PostCode: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 501 ~ 504

With a 600 MW heat supply unit in Nanjing Thermal Power Plant serving as an example, the symbolic exergoeconomic theory and method combining the exergy flux in the thermodynamics with the cost in economics were used to establish a model for calculating cooling-heating-power cogeneration systems and obtain the cost amortization of the cogeneration in the thermal power plant. During the formation of the three kinds of products, the model in question was used to examine the change in the value of exergy flux, not only taking into account the exergy content of the three products, but analyzing in depth the exergy loss caused by them during the formation of the products. The exergy costs of the products were determined in combination with the pricing according to the exergy and compared with the costs calculated by using the heat quantity method. The calculation and analytic results show that the application of the symbolic exergoeconomics for a combined cooling-heating-power cogeneration system is practical and feasible, thus providing a basis for rationally pricing the three products and contributing to the sustainable development of the combined cooling-heating-power cogeneration systems. Key words: combined cooling heating and power supply; cost amortization; symbolic exergoeconomics

具有自由表面的固-液相变的数值模拟与实验研究 = Numerical Simulation and Experimental Study of the Solid-Liquid Phase Change on Free Surfaces [刊, 汉] / XIA Li ZHANG Peng WANG Ru-zhu (Refrigeration and Cryogenics Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, PostCode: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 505 ~ 509

Through an analysis of the phase change phenomena, established was a coupled calculation model of a VOF (volume of fluid) sub-model with an enthalpy-porous medium one. By utilizing the model in question, simulated were several kinds of physical phenomena correlated during the phase change of paraffin, including heat transfer in the solid paraffin, that in the liquid paraffin, natural convection in the liquid paraffin, phase interface shift and change in the volume of the phase change material during its phase change etc. The calculation results show that the natural convection inside the paraffin plays a very important role in the melting process of the paraffin. During the high-tide of the natural convection, the maximum melting speed of the paraffin can reach 0.002 005% per second. In the meantime, the melting process also affects the natural convection. The flow speed in the liquid paraffin can reach its maximum value ( $6.08 \times 10^{-3}$  m/s) when the melting process lasts around 150 seconds. During the whole melting process, the paraffin expands approximately by 10% in volume. By making use of a visual test of the phase change of the paraffin, the accuracy of the numerical simulation was verified. The research results show that the mathematical model in question can comparatively realistically and completely reflect the characteristics of the paraffin in various aspects during its phase change. Key words: phase change; VOF (volume of fluid) model; enthalpy-porous medium model; numerical simulation