

微燃机冷热电联供(CCHP)系统产品焓成本分析*

杨晚生^{1,2}, 郭开华¹

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510006;
2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 微型冷热电联供系统的产品焓成本是系统运行经济性的主要影响因素, 不同的焓流成本的定价方式对产品的焓成本确定有较大的影响。在建立了微型燃气轮机关联矩阵的基础上, 利用传统的焓成本定价原则和能级分析定价原则分别计算了系统在充分补燃和完全不补燃情况下的产品焓成本, 定量地分析了两种不同定价方式对系统产品焓成本的影响。

关键词: 冷热电联供系统; 产品; 焓成本; 价格

中图分类号: TK112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)04-0063-04

Product Exergy Cost Analysis for CCHP of Based on Micro-gas Turbine

YANG Wansheng^{1,2}, GUO Kaihua¹

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510070, China;
2. Faculty of Civil & Traffic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The production exergy cost is one of main factors of influencing the running economics for CCHP system based on micro-gas turbine. Different ways of making the price can cause to different product exergy cost results. Based on the conjunction matrix for CCHP exergy flow, the product exergy cost for different running conditioning are calculated in detail by using traditional and energy grades analyzing ways. The calculated results is showed that the way of ascertain the exergy cost in accordance with the energy grades is better than the traditional ways.

Key words: CCHP; product; exergy cost; price

热经济学的焓成本定价问题是热经济学的核心问题。目前对于热力系统的成本分析中主要有两类^[1-2]: 一种是采用会计模式的平均成本进行定价, 一种是考虑系统中各股焓流的变化引起的焓耗和成本的变化问题。对于多产品的能源系统, 需要对各种产品的成本进行分摊才能求出各个产品的成本。采用不同的成本分摊方法, 会导致各个产品的成本和价格不同, 从而影响系统的投资和运行经济性能。因此寻求合理的成本分摊原则和方法是确定系统经济性的的重要因素^[3-10]。

1 矩阵模式热经济学分析方法概述

1.1 关联矩阵

表明能量利用系统中各股焓流和各子系统联系的矩阵, 通常用 A 来表示。若系统包含 m 个子系统和 n 股焓流, 则其关联矩阵表示为: $A(m \times n)$, 其元素 a_{ij} 的含义为: 当焓流 j 输入子系统 i 时, 记作 $a_{ij} = 1$; 输出子系统 i 时, 记作 $a_{ij} = -1$; 既不输入也不输出时, 记作 $a_{ij} = 0$ ^[1-2]。

1.2 产品及燃料的定义

在能量系统中, 定义单线流为一次性单纯流入

* 收稿日期: 2009-06-03

基金项目: 中山大学-BP液化天然气中心资助项目(99103-9390001); 广东省教育厅液化天然气与低温技术重点实验室资助项目(39000-3211101)

作者简介: 杨晚生(1970年生), 男, 副教授, 博士研究生; E-mail: guokaih@mail.sysu.edu.cn

或流出系统的焓流, 双线流为焓流进入系统后又流出该系统。定义产品为子系统生产目的的焓流, 燃料则指为获得产品所需要消耗的焓流^[1-2]。

1.3 焓耗系数

子系统中任一焓流的焓耗系数是指每生产 1kJ 各股焓流所需要消耗的从外部输入系统能量的焓值^[1-2]。记作 $\varepsilon_i = E'_i/E_i$ 。 (1)

1.4 焓成本单价

焓成本单价是指每单位焓值在系统中赖以形成所需要的现金值, 单位为元/GJ, 按其构成包括能量成本和非能量成本^[1-2]。

1.5 成本差和焓经济系数

成本差是指某子系统输入和输出焓流的平均价格差。成本差越大, 反映出在此子系统中焓流进行传递和转换时所付出的代价就大, 也往往是优化考虑改进的环节。

经济系数: 指系统中非能量费用占总耗费用的比值^[1-2, 11-12]。

$$f_{\text{exk}} = C_n / (C_n + c_i E_i) \quad (2)$$

式中 C_n 为系统的非能量费用; c_i 为系统的输入成本单价; E_i 为系统输入焓流。

2 计算原理与方法

对于一个能量供应系统, 设系统 k 有 e 股输入焓流和 s 股输出焓流, 其非能量费用为 C_n , c_i 和 c_j 分别表示输入和输出焓流的成本单价, E_i 和 E_j 分别表示输入和输出焓流的焓值, 那么该系统的现金平衡方程式为^[1-2, 11-12]:

$$\sum_{i=1}^e c_i E_i + C_n = \sum_{j=1}^s c_j E_j \quad (3)$$

若系统有 m 个子系统, 则可以列出 m 个现金平衡方程。以矩阵表示为^[1-2, 11-12]:

$$A \times E_D \times C + Z = 0 \quad (4)$$

式中 A 为系统的关联矩阵 (或事件矩阵); E_D 为 E 向量的对角阵; E 为焓流向量 ($n \times 1$); C ($n \times 1$) 焓成本单价向量; C_n ($m \times 1$) 为各子系统的非能量费用向量。

对于任何能量系统, 其焓流数 n 总是大于子系统数 m , 故需要增加 $n - m$ 个补充方程。这些补充方程以矩阵表示为: $a \times E_D \times C = W$

式中 a 为包含 $(n - m)$ 行、 n 列的矩阵; W 为 $(n - m)$ 维的列向量。本系统主要分析焓成本定价方式对系统产品成本的影响, 故不考虑系统非能量费用的因素, 即 $Z = 0$ 。

3 系统焓成本分析

3.1 系统数学物理模型及焓流图

根据系统的实际情况, 建立如下系统的物理模型图和焓流图。见图 1, 图 2。

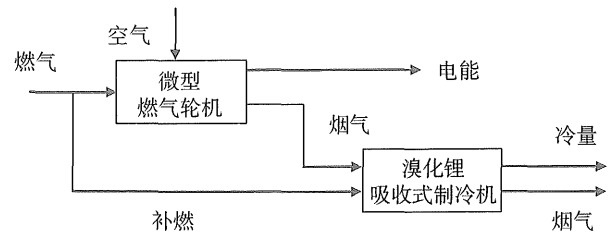


图 1 CCHP 系统的热力模型图

Fig. 1 Energy balance relationship for combined cooling heating and power system

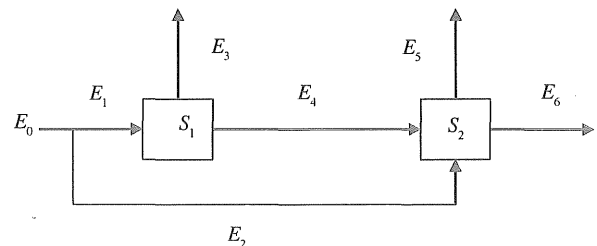


图 2 CCHP 系统的焓流图

Fig. 2 Exergy flow model for combined cooling heating and power system

S_1 为微燃机子系统; S_2 为吸收式溴化锂制冷机组子系统; E_0 为系统总天然气输入焓流; E_1 为输入微燃机的燃料流; E_2 为制冷机组补燃燃料焓流; E_3 为微燃机输出电焓流; E_4 为微燃机输出烟气焓流; E_5 为溴化锂制冷机输出冷量焓流; E_6 为溴化锂制冷机输出排烟尾气焓流。

3.2 关联矩阵的构建

关联矩阵用来描述系统各股焓流与各子系统的关系。本系统有两个子系统 S_1 和 S_2 。流出流入的流有 6 股。根据关联矩阵的构造方法和系统的焓流特性, 本系统的关联矩阵 A 如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

焓流向量 E 是按照其序号由小到大的顺序排列的 6 维列向量。

$$E = [E_1 \ E_2 \ E_3 \ E_4 \ E_5 \ E_6]^T$$

系统焓损向量为: $I_r = [I_{r1} \ I_{r2}]^T$

则存在: $A \times E = I_r$, 即:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 - E_3 - E_4 \\ E_2 + E_4 - E_5 - E_6 \end{bmatrix}$$

3.3 各子系统燃料产品的定义
系统燃料产品的定义见表 1。

表 1 系统燃料产品定义
Table 1 Define of product and fuel for system

| 子系统 | 燃料 | 产品 |
|-----|-------------|-------------|
| 1 | E_1 | $E_3 + E_4$ |
| 2 | $E_2 + E_4$ | $E_5 + E_6$ |

烟单价向量：

$$C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]^T$$

则系统的现金平衡方程的矩阵形式表达式为：

$$A \times E_D \times C = 0 \quad (5)$$

式中 E_D 为烟向量的对角矩阵。

3.4 补充方程的确定

根据文献 [11 - 12] 所确定的补充方程的构造方法，对系统建立补充方程：

1) 外部输入系统的燃料价格为已知，即 $c_1 = c_2 = c_f$ (燃料单价) 已知。

2) 对 S_1 系统，可以把燃气轮机输出的烟气烟单价 $c_4 = c_1 = c_f$ ，也可以把燃气轮机输出的电烟单价看作与烟气烟单价相等，即 $c_4 = c_3$ 。本系统中将 $c_4 = c_1 = c_f$ 。

3) 对于子系统 S_2 ，可以认为 $c_5 = c_6$ 。

3.5 烟流成本计算及分析

不考虑系统的非能量费用对成本的影响，只考虑燃料成本即能量费用对结果的影响，那么可以得到本系统的单位烟成本如下：

取天然气的价格为： $c_f = 3.0$ 元/ Nm^3 ，天然气的低位热值为 $Q_{dw} = 35\ 169$ kJ/Nm^3 。则 $c_f = 0.085$ 元/MJ。

当燃气轮机在额定工况下运行，溴化锂吸收式制冷机组满足额定输出冷量 120 kW (即需要补燃时) 各股烟流及其单位成本价格计算见表 2 (由于吸收式制冷机组尾气直接排放到大气中，不考虑它的烟成本)。

表 2 充分补燃情况下系统各股烟流及其单位成本价格

Table 2 Product exergy cost for system exergy flow on refuel condition

| 烟流序号 | 烟值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) | 烟流序号 | 烟值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) |
|------|------------------------------|--------------------------------|------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 440.0 | 0.085 | 4 | 305.0 | 0.085 |
| 2 | 30 256.8 | 0.085 | 5 | 432.0 | 6.013 |
| 3 | 100.8 | 0.113 | 6 | - | - |

当吸收式制冷机组不考虑补燃，即只利用燃气轮机的烟气余热进行制冷时，燃气轮机仍为额定工作状态时，各各股烟流及其单位成本价格计算见表 3。

表 3 不补燃情况下系统各股烟流及其单位成本价格

Table 3 Product exergy cost for system exergy flow on no refuel condition

| 烟流序号 | 烟值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) | 烟流序号 | 烟值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) |
|------|------------------------------|--------------------------------|------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 440.0 | 0.085 | 4 | 305.0 | 0.085 |
| 2 | 0 | 0.085 | 5 | 4.311 | 6.013 |
| 3 | 100.8 | 0.113 | 6 | - | - |

从上述计算结果可以看出：当溴化锂吸收式制冷机组充分补燃和完全不补燃情况下，制冷机组的制冷量烟成本单价基本一样，这主要是由于燃气轮机的烟气烟单价是按照燃气成本单价确定的，即 $c_4 = c_1 = c_f$ ，导致制冷机组充分补燃和完全不补燃所产生的冷量单价基本一致。

事实上，进入吸收式制冷机组的烟气的烟单价应该低于燃气烟流单价才合理。因为进入制冷机组的烟气能级显然要低于进入系统的燃气的能级。根据按照能级定价的基本原理^[1-2,11-12]，存在如下计算公式： $\lambda_1/\lambda_4 = c_1/c_4$ ，即由于 E_1 和 E_4 的能级不同，即 $\lambda_1 > \lambda_4$ ，使得 $c_4 = (\lambda_4/\lambda_1)c_1$ 。

如果取环境温度 $t_0 = 25^\circ\text{C}$ ，1 个大气压作为计算基准。

溴化锂吸收式制冷机组的烟气进口温度为 270°C ， $T_4 = 543.15\text{K}$ 则其能级为^[13]：

$$\lambda_4 = \left(1 - \frac{T_0}{T_4 - T_0} \ln \frac{T_4}{T_0}\right) =$$

$$1 - \frac{298.15}{543.15 - 298.15} \ln \frac{543.15}{298.15} = 0.27 ;$$

微型燃气轮机的理论燃烧绝热温度取为： $T_{ad} = 1\ 113.15\text{K}$ ，则其能级为：

$$\lambda_1 = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ad} - T_0} \ln \frac{T_{ad}}{T_0}\right) =$$

$$1 - \frac{298.15}{1113.15 - 298.15} \ln \frac{1113.15}{298.15} = 0.52$$

$$\text{则 } c_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_1} c_1 = \frac{0.27}{0.52} \times 0.085 = 0.044 \text{ 元/MJ};$$

当吸收式制冷机组不考虑补燃,即只利用燃气轮机的烟气余热进行制冷,燃气轮机仍为额定工作状态时,各股(由于吸收式制冷机组尾气直接排放到大气中,不考虑它的焓成本)焓流及其单位成本价格见表4。

表4 充分补燃情况下考虑产品能级系统各股焓流及其单位成本价格

Table 4 Product exergy cost for system on refuel condition according to the product exergy grades

| 焓流 序号 | 焓值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) | 焓流 序号 | 焓值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 440.0 | 0.085 | 4 | 305.0 | 0.085 |
| 2 | 30256.8 | 0.085 | 5 | 432.0 | 3.113 |
| 3 | 100.8 | 0.238 | 6 | - | - |

当吸收式制冷机组不考虑补燃,即只利用燃气轮机的烟气余热进行制冷,燃气轮机仍为额定工作状态时,各股焓流及其单位成本价格见表5(由于吸收式制冷机组尾气直接排放到大气中,不考虑它的焓成本)。

表5 不补燃情况下考虑产品能级系统各股焓流及其单位成本价格

Table 5 Product exergy cost for system on no refuel condition according to the product exergy grades

| 焓流 序号 | 焓值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) | 焓流 序号 | 焓值/ (MJ·h ⁻¹) | 单位成本/ (元·MJ ⁻¹) |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 440.0 | 0.085 | 4 | 305.0 | 0.044 |
| 2 | 0 | 0.085 | 5 | 4.311 | 3.113 |
| 3 | 100.8 | 0.238 | 6 | - | - |

从计算结果可以分析得出:当采用能级分析法对进入微型燃气轮机的燃料和进入吸收式制冷机组的烟气进行定价时,所得出的制冷量单位焓成本价格约为按照燃料定价的0.52左右,反映出不同的焓成本定价方式对系统产品的焓单价有较大的影响。

4 结 语

本文对基于微型燃气轮机冷热电联供系统的成本问题进行了分析,建立了所研究系统的关联矩阵模型,并对其成本补充方程进行了相关分析,计算结果表明不同的定价方式对系统产品的单位焓价格有较大的影响。

参考文献:

- [1] 王加璇,张恒良. 动力工程热经济学[M]. 北京:水利水电出版社,1995.
- [2] 杨勇平,王加璇. 确定热电厂供热成本的热经济学方法[J]. 热能动力工程,1995,10(2):73-77.
- [3] 孔祥强,王如竹,李瑛,等. 基于热机分布式冷热电联供效益分析[J]. 中国建设信息,2005(4):24-28.
- [4] 杜建一,王云,徐建中. 分布式能源系统与微型燃气轮机的发展与应用[J]. 工程热物理学报,2004,25(5):786-788.
- [5] 蔡睿贤,张娜. 关于分布式能源系统的思考[J]. 科技导报,2005,23(9):7-8.
- [6] MARTENS A. The energetic feasibility of CHP compared to the separate production of heat and power[J]. Applied Thermal Engineering,1998(11):935-946.
- [7] MAIDMENT G G, TOZER R M. Combined cooling heat and power in supermarkets[J]. Applied Thermal Engineering,2002(22):653-665.
- [8] KONG X Q, WANG R Z, HUANG X H. Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines[J]. Applied Thermal Engineering,2005,25:377-391.
- [9] LI Hui, FU Lin, GENG Kecheng, et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems[J]. Energy and Building,2006,38:253-257.
- [10] KONG X Q, WANG R Z, WU J Y, et al. Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine[J]. Refrigeration,2005,28:977-987.
- [11] 方国元,彭启珍,张树芳. 联合循环电厂成本的热经济学分析[J]. 燃气轮机技术,2003,16(3):18-22.
- [12] 彭启珍,张树芳,郭江龙. 热经济学成本分析中的补充方程的合理构造[J]. 热力发电,2003(10):29-34.
- [13] 栋树屏,李天铎. 热能转换与利用[M]. 北京:机械工业出版社,1985.