

化工-动力多联产产品成本分摊方法研究

郝艳红^{1 2}, 冯 杰¹, 邱丽霞²

(1. 太原理工大学 煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 山西大学 工程学院, 山西 太原 030013)

摘要: 化工-动力多联产系统是一种高效、清洁的能源系统, 建立科学合理的成本分摊方法, 为制定合理的产品价格体系提供依据, 有利于推动化工-动力多联产系统发展。在借鉴热电联产成本分摊方法研究的基础上, 提出了化工-动力多联产的产品成本分摊方法。通过分析比较, 认为考虑了调整系数的焓法能够充分调动双方的积极性, 可作为化工-动力多联产产品定价的基本依据, 推动化工-动力多联产的发展。

关键词: 化工-动力多联产; 成本分摊; 焓法; 调整系数

中图分类号: TQ013.2; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2011)05-0100-04

科学合理的成本分摊方法有利于促进多联产技术的发展, 目前热电厂普遍存在的供热亏损问题, 根本原因是实践中热电联产中 2 种不同品质能量(电能和热能)的成本分摊方法不科学^[1-2]。化工-动力多联产比热电联产更复杂, 主要原因是其产品的种类不仅涉及不同品质的能量, 还涉及能量与化工产品两大类型, 为了保证中国能源安全, 满足对液体燃料的需求, 节约煤炭资源, 保护环境, 推动化工-动力多联产的发展, 有必要建立针对化工-动力多联产的科学合理的成本分摊方法。

20 世纪 90 年代美国提出“Vision 21”计划, 此后国内外研究者针对化工-动力多联产进行了从单元技术到系统集成多个层次的研究。在对系统进行模拟评价的研究中, 也有对化工产品与电力成本的估算研究^[3-4], 但专门针对多联产产品成本分摊方法的研究却很少。有些研究者在研究中描述了产品成本分摊的计算方法, 但未明确给出成本分摊

的数学模型, 且产品成本是考虑了设备的投资、运行等费用后的综合结果, 并不能明确得出原料的消耗量等关键的技术指标^[3]。

针对化工-动力多联产系统成本分摊方法研究中存在的问题, 笔者在借鉴热电联产成本分摊方法研究的基础上, 提出了化工-动力多联产的成本分摊方法, 并对各类方法进行了分析比较, 揭示各类分摊方法的实质, 为产品的合理定价提供思路。

1 概 述

化工-动力多联产形式多样, 有并联、串联、串并联多种耦合方式; 生产的化工产品有多种液体燃料和化工原料; 合成工艺有气体一次通过和多次循环方案等多种类型。笔者选择了合成气一次通过化学品合成串联多联产流程进行研究, 因为参与了化学品合成之后的未反应气体再用于发电的合成气才属联产气流, 其成本才存在在化产和动力之间

收稿日期: 2011-05-24 责任编辑: 宫在芹

基金项目: 国家重点基础研究 973 发展计划项目(2005CB221207); 山西省自然科学基金项目(2009011021-2)

作者简介: 郝艳红(1973—), 女, 山西孝义人, 太原理工大学在读博士研究生, 山西大学工程学院副教授, 主要从事复杂系统优化与循环经济的教学与研究工作。

进行分摊的问题。图 1 为合成气一次通过化学品合成串联多联产流程。

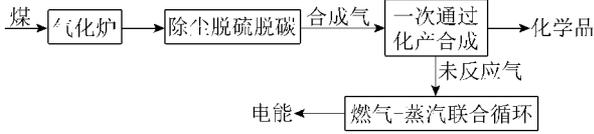


图 1 合成气一次通过化学品合成串联多联产流程

为了方便研究,流程未考虑空分单元,在产品成本分摊时也未考虑除尘脱硫脱碳(净化)单元的物质与能量变动,并假定全部合成气都参与了化学品合成,未反应气全部用于发电。

2 成本分摊方法

2.1 热量法

假定通过化学品合成反应器之前的合成气和之后的未反应气的热值是相等的,按联产发电所用未反应气的热量比例来分配联产的煤耗,分摊公式为:

$$m_{\text{coal}(e)}^t = \frac{m_{\text{sg}} LHV_{\text{sg}}}{m_{\text{sg}} LHV_{\text{sg}}} m_{\text{coal}} = \frac{m_{\text{sg}'}}{m_{\text{sg}}} m_{\text{coal}} \quad (\text{kg/h}) \quad (1)$$

$$m_{\text{coal}(cp)}^t = m_{\text{coal}} - m_{\text{coal}(e)}^t \quad (\text{kg/h}) \quad (2)$$

合成反应器的物料衡算式为:

$$m_{\text{sg}} = m_{\text{sg}'} + m_{\text{cp}} \quad (3)$$

则式(1)可变换为:

$$m_{\text{coal}(e)}^t = \left(1 - \frac{m_{\text{cp}}}{m_{\text{sg}}}\right) m_{\text{coal}} \quad (4)$$

其中,定义化学品的产率 $X = \frac{m_{\text{cp}}}{m_{\text{sg}}}$

则式(4)可变换为:

$$m_{\text{coal}(e)}^t = (1 - X) m_{\text{coal}} \quad (5)$$

多联产的总煤耗量为:

$$m_{\text{coal}}^t = \frac{m_{\text{sg}} LHV_{\text{sg}}}{LHV_{\text{coal}} \eta_G} \quad (\text{kg/h}) \quad (6)$$

分摊给动力部分煤耗量的计算式为:

$$m_{\text{coal}(e)}^t = \frac{3600W}{\eta_{CC} LHV_{\text{coal}} \eta_G} \quad (\text{kg/h}) \quad (7)$$

2.2 焓降法

按联产发电所用未反应气的焓降与合成气的焓降比例来分配联产的煤耗,其分摊公式为:

$$m_{\text{coal}(e)}^h = \frac{m_{\text{sg}'} \Delta h_{\text{sg}'}}{m_{\text{sg}} \Delta h_{\text{sg}}} m_{\text{coal}} = \frac{m_{\text{sg}'} (h_{\text{sg}'} - h_{\text{eg}})}{m_{\text{sg}} (h_{\text{sg}} - h_{\text{eg}})} m_{\text{coal}} \quad (8)$$

$$m_{\text{coal}(cp)}^h = m_{\text{coal}} - m_{\text{coal}(e)}^h \quad (\text{kg/h}) \quad (9)$$

2.3 焓法

焓法是按联产动力部分所用未反应气的焓 $E_{\text{sg}'}$ 和化工产品合成前合成气的焓 E_{sg} 的比例来分配联产的煤耗,分摊公式为:

$$m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}} = \frac{E_{\text{sg}'}}{E_{\text{sg}}} m_{\text{coal}} = \frac{m_{\text{sg}'} e_{\text{sg}'}}{m_{\text{sg}} e_{\text{sg}}} m_{\text{coal}} \quad (10)$$

$$m_{\text{coal}(cp)}^{\text{ex}} = m_{\text{coal}} - m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}} \quad (\text{kg/h}) \quad (11)$$

化产合成单元的焓平衡为:

$$m_{\text{sg}} e_{\text{sg}} = m_{\text{sg}'} e_{\text{sg}'} + m_{\text{cp}} e_{\text{cp}} + \Delta E \quad (12)$$

焓效率:

$$\eta_{\text{SY}}^{\text{ex}} = \frac{m_{\text{sg}'} e_{\text{sg}'} + m_{\text{cp}} e_{\text{cp}}}{m_{\text{sg}} e_{\text{sg}}} \quad (13)$$

$$\text{则: } \frac{m_{\text{sg}'} e_{\text{sg}'}}{m_{\text{sg}} e_{\text{sg}}} = \eta_{\text{SY}}^{\text{ex}} - \frac{m_{\text{cp}} e_{\text{cp}}}{m_{\text{sg}} e_{\text{sg}}} = \eta_{\text{SY}}^{\text{ex}} - X \frac{e_{\text{cp}}}{e_{\text{sg}}} \quad (14)$$

将式(14)代入式(10)可得出:

$$m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}} = \left(\eta_{\text{SY}}^{\text{ex}} - X \frac{e_{\text{cp}}}{e_{\text{sg}}} \right) m_{\text{coal}} \quad (15)$$

多联产总煤耗量的计算式为:

$$m_{\text{coal}}^{\text{ex}} = \frac{m_{\text{sg}} e_{\text{sg}}}{e_{\text{coal}} \eta_G^{\text{ex}}} \quad (\text{kg/h}) \quad (16)$$

分摊给动力部分煤耗量的计算式为:

$$m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}} = \frac{3600W}{\eta_{CC}^{\text{ex}} e_{\text{coal}} \eta_G^{\text{ex}}} \quad (\text{kg/h}) \quad (17)$$

其中 $\rho = e_{\text{phy}} + e_{\text{che}}^{[5]}$ (kJ/kg)

$$e_{\text{phy}} = (h - h_{\text{amb}}) - T_{\text{amb}}(s - s_{\text{amb}}) \quad (\text{kJ/kg})$$

$$e_{\text{che } j} = \frac{[\Delta_f G_i - \sum_j V_j e_{\text{che } j}]}{M} \quad (\text{kJ/kg})$$

式中 $\Delta_f G_i$ 为物质的生成自由焓 kJ/mol; V_j 为元素 j 的化学当量数。

燃料的化学焓也可据西川式^[6]估算,对于气体燃料 $e_{\text{che}} \approx LHV$,对于液体、固体燃料 $e_{\text{che}} \approx HHV$ 。

符号说明: m 为物质的质量流量, kg/h; LHV 为燃料的低位热值, kJ/kg; HHV 为燃料的高位热值, kJ/kg; η 为能量利用效率; W 为功率, kW; E 为焓, kJ; e 为比焓, kJ/kg; h 为比焓, kJ/kg; s 为比熵, kJ/(kg · K); M 为物质的摩尔质量, kg/mol。

下标说明: sg 合成气; sg' 未反应气; cp 化学品;

coal 煤; (e) 动力方面; (cp) 化产方面; CC 联合循环发电单元; G 气化单元; eg 燃机尾气; SY 合成单元; phy 物理的; che 化学的; amb 环境状态下; i 某物质; j 某元素。

上标说明: t 热量法; h 焓降法; ex 焓法

3 计算实例

以文献[7]中的富CO气体一次通过甲醇合成串联多联产系统为例进行计算分析。实验煤种产自山东兖州煤矿,表1为煤质分析。

表1 兖州煤煤质分析

$M_{ar}/\%$	$A_d/\%$	$\omega(C_d)/\%$	$\omega(H_d)/\%$	$\omega(N_d)/\%$	$\omega(S_d)/\%$	$\omega(O_d)/\%$	$Q_{gr,ad}/(kJ \cdot kg^{-1})$
5.81	7.53	73.64	5.24	1.13	2.63	9.83	28526

系统气化选择激冷流程的德士古水煤浆气化,压力为7 MPa,温度为1300 °C。表2为甲醇合成原料气的组成。采用液相法甲醇合成技术,液相反应器设计操作温度为250 °C,压力为6.5 MPa。系统给煤量为4000 t/d,合成气中CO转化率为12%,尾气排放温度为110 °C,燃料甲醇的产量为719 t/d,发电功率为400 MW。

表2 甲醇合成原料气的组成 %

V(CO)	V(H ₂)	V(CO ₂)	V(H ₂ O)	V(N ₂ +Ar)
57.1	35.8	5.0	0.1	1.8

取环境温度298.15 K,合成气低位热值10467 kJ/m³,煤价400元/t。设定煤的费用占总费用(包括初投资费用和运行维护费用)的50%。据合成气中CO转化率为12%,得出合成气与未反应气的物质的量之比为1:0.79244,表3为未反应气和燃机尾气的组成,假设未反应气在燃气轮机中完全燃烧。

表3 未反应气和燃机尾气的组成 %

项目	V(CO)	V(H ₂)	V(CO ₂)	V(H ₂ O)	V(N ₂ +Ar)
未反应气	63.4	27.9	6.3	0.1	2.3
燃机尾气	—	—	69.7	28	2.3

表4为按照本研究提出的热量法、焓降法、焓法计算得出的结果。

表4 3种成本分摊方法计算结果比较

成本 分摊 方法	总煤耗/ (t·d ⁻¹)	发电方面		化产方面	
		煤耗/ (t·d ⁻¹)	成本/ (元·kWh ⁻¹)	煤耗/ (t·d ⁻¹)	成本/ (元·t甲醇 ⁻¹)
热量法	4000	3169.8	0.264	830.2	923.7
焓降法	4000	232.4	0.020	3767.6	4192.0
焓法	4000	2876.4	0.240	1123.6	1250.0

由表4可知,焓降法的 $m_{coal(e)}$ 、 $C_{(e)}$ 是3种分摊方法中最小的,计算所得用电成本仅为0.02元/kWh;而其相应的 $m_{coal(cp)}$ 、 C_{cp} 是3种分摊方法中最大的,计算所得甲醇的成本高达4192元/t,目前国内甲醇的售价约为2600元/t,可见该分摊方法属极端的“好处归电法”,显然不符合实际,不适合应用。热量法分摊得到的 $C_{(e)}$ 为0.264元/kWh,目前新疆的电价是全国上网电价较低的省份,故以新疆为例,目前其平均上网电价约为0.25元/kWh,可见热量法分摊给发电方面的成本偏高。原因在于联产中动力部分所用燃料是合成化工产品之后的未反应气,热量法将其全部分摊给发电部分,认为化学品的转化率为100%,假定合成反应器之后的未反应气的热值与通过化学品合成反应器之前的合成气的热值相等,动力部分只得到了联产因气化规模扩大带来的投资和运行费用的降低,而未得到联产化工产品的益处,因而属典型的“好处归化产法”。

焓法分摊的 $m_{coal(e)}$ 、 $C_{(e)}$ 、 $m_{coal(cp)}$ 和 C_{cp} 值均居中,分摊给发电的成本为0.240元/kWh,甲醇的成本1250元/t,双方基本可接受,但当上网电价低于0.341元/kWh时,焓法依然属好处归化产法。以目前山西省的平均上网电价0.33元/kWh,甲醇售价2600元/t,系统年运行时间6500 h计算,得到的电能年收益为甲醇的89%。因而考虑可在式(10)前乘以小于1的系数,降低发电煤耗,进而降低发电成本。通过计算,欲使甲醇与电能获得相同的收益,针对本实例该系数为0.977。针对不同对象可根据实际提出不同调整系数,以使分摊趋于公平。

分析式(15)可知:①由于在合成气组成、数量相等,合成单元的操作条件一定的情况下,化学品的产率与合成单元的物质转化率成正相关关系,随

着合成单元物质转化率的增大 $m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}}$ 减小,解释了化工-动力多联产较 IGCC 发电成本降低的原因;
②随着 $\eta_{\text{SY}}^{\text{ex}}$ 的增大, $m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}}$ 增大,在总煤耗量一定时, $m_{\text{coal}(ep)}^{\text{ex}}$ 减小,可见焓法可促进化产在合成过程中提高能量的利用效率,而非单纯追求化学品的高产出率。

在化学品合成单元达到平衡的状态下,进入合成单元的合成气的量越大,会使进入联合循环发电单元的未反应气的量增大,从而增大 $m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}}$,但分析式(13)可知,这时 $\eta_{\text{SY}}^{\text{ex}}$ 会减小,从而减小 $m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}}$,焓法解决了化产一方为追求高物质转化率盲目增大进气量带给动力一方成本增加的矛盾。

4 结 论

焓法以热力学第二定律为依据,考虑了未反应气和合成气的最大作功能力的差别,克服了以热力学第一定律为依据的“热量法”分摊给动力部分的成本偏高的问题,能促进化产部分在提高物质转化率的同时提高能量的利用效率,同时化工产品产率的提高也有助于降低动力部分的分摊成本,有利于促进动力与化学品的联产和化产节能,是化产和动力双方都能接受的比较合理、适用的方法。因焓法

在网上电价低于 0.341 元/kWh 时,依然属好处归化产法,可通过对分摊给动力部分煤耗量 $m_{\text{coal}(e)}^{\text{ex}}$ 乘以小于 1 的调整系数降低发电煤耗与成本,实现公平分摊。调整系数的数值依实际确定。

参考文献:

- [1] 李慧君,池冉,范伟,等. 热电成本分摊之乏热分配法的研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(1): 67-68.
- [2] 田枫,杨忠全. 热电厂煤耗成本分摊的新方法——热电联合法[J]. 四川电力技术, 2007, 30(5): 79-80.
- [3] 麻林巍,倪维斗,李政,等. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统分析(下)[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 606-608.
- [4] 林湖,金红光,高林,等. 煤基多联产系统热力与经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 3-4.
- [5] A. P. Hinderink, F. P. J. M. Kerkhof, A. B. K. Lie, et al. Exergy analysis with a flowsheeting simulator—I. theory; calculating exergies of material streams[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(20): 4693-4700.
- [6] 朱明善. 能量系统的焓分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 122.
- [7] 麻林巍,倪维斗,李政,等. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统分析(上)[J]. 动力工程, 2004, 24(3): 451-456.

Cost allocation of chemical and dynamic poly-generation products

HAO Yan-hong^{1,2}, FENG Jie¹, QIU Li-xia²

(1. Key Laboratory of Coal Science and Technology, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Engineering College, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: Chemical and dynamic poly-generation system is regarded as one of the high efficiency and green utilization of fossil fuel system. Establishing scientific and reasonable cost allocation method is of vital importance to develop chemical and dynamic poly-generation system. Cost allocation method on chemical and dynamic co-production is proposed on the basis of cost allocation method on heat and power co-production. The results show that “Exergy method being added up the adjustment coefficient” is more reasonable on cost allocation on chemical product and power. It can arouse fully both enthusiasm and give reasonable basis for drawing up price, it would can promote the developing of poly-generation system for chemical and power production.

Key words: chemical and power co-production; cost allocation; exergy method; adjustment coefficient