

用于化工系统分流结构的能值代数

慕韩锋¹, 冯霄²

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安; 2. 中国石油大学化工学院, 102249, 北京)

摘要: 为了克服计算化工系统中分流结构的能量流时容易产生不遵守能值代数的全额继承问题, 将分流结构区分为分流绕行结构和含分流多产品结构, 同时分析了这两种结构容易违背全额继承特性的原因. 通过扩展对能值代数的解读, 提出分流绕行结构中的能量流在系统内部重遇时各能量流需要按照其烟值进行叠加, 含分流多产品结构中各产品的能量各不相等, 但各产品能量之和等于系统总的能量投入. 焦化废水处理工艺案例中, 分流后的两股废水(能值为 0.2×10^4 和 0.8×10^4) 在系统内交汇时需按其能值进行叠加, 处理后分别进行回用(2.1×10^4)、灌溉(1.5×10^4)和排放(2.6×10^4)的废水能量等于系统总的能量投入(6.2×10^4).

关键词: 能值代数; 化工系统; 分流绕行结构; 含分流多产品结构

中图分类号: TQ021.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0098-05

Application of Emergy Algebra to Split Structure of Chemical Engineering System

MU Hanfeng¹, FENG Xiao²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In emergy algebra, for split structures of chemical systems, values of emergy flows, which violate the total inheritance characteristic, are prone to be miscalculated. To remedy the deficiency, the split structure is divided into split bypass and split multi-product ones to extend the understanding of emergy algebra and to provide different solutions. For the split bypass structure, the energy flows can be added by their exergy when the split flows meet together again. For the split multi-product structure, although the energy of every product gets different, the sum of all products ought to be equal to the energy input of the system. In case study of the process of coking wastewater treatment, two splitted wastewater flows (their respective emergy is 0.2×10^4 and 0.8×10^4) can be added by their energy as they meet together in the system; the values in wastewater used for recycling (2.1×10^4), irrigation (1.5×10^4) and emission (2.6×10^4) are equal to the total energy input of the system (6.2×10^4).

Keywords: emergy algebra; chemical system; split bypass structure; split multi-product structure

工业发展模式的转变必然导致传统评价工业系统的方法由于评价范围过窄而无法适应可持续发展的要求. 从能量角度考虑, 基于热力学第一定律的能量分析法和基于热力学第二定律的烟分析法在宏

观系统中无法表达系统对环境的影响, 这导致了一些新的评价方法的诞生. 例如, 生命周期评价(LCA)^[1]、积累烟分析^[2]以及能值分析法^[3-4]. LCA、积累烟分析并不能对不同性质的能量做出区

收稿日期: 2012-05-23. 作者简介: 慕韩锋(1982—), 男, 博士生; 冯霄(通信作者), 女, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB720500); 国家自然科学基金资助项目(50876079).

网络出版时间: 2012-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121010.1708.004.html>

分,而能值分析法则是由于是基于物质所含太阳能的多少来表征物质的能量大小,因此避免了这样的问题.能值分析法的另一个显著优点是将环境投入纳入到了评价系统之中,而现有的评价方法却未考虑到这些因素.由于能值理论其在评价过程中将自然资源对于系统的投入也纳入了评价范畴,使得其不仅具备了评价工业系统在经济方面的表现,也包括了在环境以及社会方面的表现.复杂工业系统内部的能量流、物质流和信息流的流动状况更剧烈和复杂,能值理论对于这类系统具有更为明显的优势.

将能值理论运用于化工系统时,由于这类系统强烈的物质与能量的交汇,使得系统结构非常复杂,因此在分析系统内部能流时必须要用到能值代数.目前,能值代数的研究主要是对其规则进行解读^[5-6],还有学者运用能值代数对多种系统结构进行了相当多的研究.文献[7]将能值代数运用于一般系统的各类基本结构之中,并归纳了能值代数的规则.文献[8]将多产品结构分为不可分割联产和半独立联产两种类型,不可分割联产过程的各产品将按照能值代数规则全额继承系统的投入,半独立联产过程则需在分析系统内部结构的基础上明确主副产品各自购入能量的投入.文献[9]对环路结构进行了分析,表明如果来自同一个源的不同产品又共同进入了一个新的单元,那么这个新单元的投入是其各输入能量中的最大值,并非是各输入能量之和.

分流结构在化工系统中是常见的基本结构,按照分流之后汇合与否可分为分流绕行结构(分流之后汇合)和含分流多产品结构(分流之后不汇合).以往将能量流应用于不同基本结构中时虽已考虑了能量分流时如何分割的问题,但是并没有相关文献讨论分流后的能量再相遇时应该如何计算,同时也没有对分流后的能量通过各自的加工单元离开系统后所形成的多产品结构进行研究.本文通过分析能值代数在分流结构中存在的问题,对能值代数进行了新的理解,从而提出了分流结构的正确解决方案,为能值理论研究者提供更多的应用基础.

1 能值基础理论

能值理论由生态学家 Odum 于 20 世纪 80 年代创立.能值是指一流动或储存的能量所包含另一种能量的数量,即产品或劳务形成过程中直接或间接投入应用的一种有效能总量就是其所具有的能值.在实际应用过程中,以太阳能来衡量某一能量的能值,即任何流动或储存的能量所包含的太阳能的

量^[3].太阳能值与其他物质之间的联系是通过太阳能值转换率解决的,太阳能值转换率即单位能量或物质所含太阳能的量.

能值理论由于其特殊的“记忆”特性,所以其能量流的分配是通过能值代数来实现的.能值代数是 由文献[10]首先提出,文献[4]对能值代数进行了较为详细的概括.文献[7]针对一般系统的基本结构,提出了能值代数的 4 条规则,概括如下:①若一个过程仅有一个产品,则所有能量都分配给这个产品;②若一个能量流被分割成几个分支,总能量要按照焓相应地分配给各分支;③当一个过程产出多个产品时,总能量要全部分配给每一个产品;④同一个系统中的能量不能计算两次,即反馈能量不能计算两次,联产产品重遇时的能量之和不能大于产生它们的源能量.

本研究中,考虑到能值理论中能量具有累积的特性,文中能值均采用每年能量消耗的相对值.

2 分流结构存在的问题及解决方案

2.1 不同分流结构问题的描述

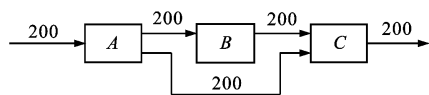
2.1.1 分流绕行结构 为了更有效地说明问题,本文将化工系统中的绕行结构分为多产品绕行结构和分流绕行结构.以图 1a 为例,从单元 A 出来两股能量流,一股进入单元 B 后又进入单元 C,而另一股则绕过单元 B 直接进入单元 C,此结构即为多产品绕行结构.根据能值代数规则 4,可对这类结构进行计算

$$U = \max\{a_1, \cdots, a_m\} \tag{1}$$

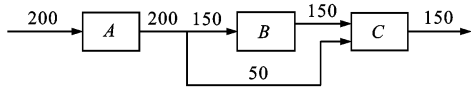
式中: U 表示进入某单元的能量; m 表示进入某单元且来自同一个源的不同性质能量流的数量; a_m 表示第 m 股能量流.图 1a 中,进入单元 C 的两股能量因为来自于单元 A,且为单元 A 产出的不同性质产品,因此需要取两股能量中的较大值作为单元 C 的输入能量,即能值为 200.

图 1b 为不考虑分流结构而导致错误计算的结果.图中仅有一股能量离开了单元 A,该能量通过分流,一股进入单元 B 后又进入单元 C,而另一股绕过单元 B 直接进入单元 C,此结构为分流绕行结构.该结构中离开单元 A 的能量分流为两股,一股通过单元 B 进入单元 C,其能值为 150,另一股绕过单元 B 进入单元 C,其能值为 50,这两股都来自同一个源.此时若不考虑系统内的分流结构而仍遵照式(1)来进行计算,那么离开单元 C 的能值应为 150,即系统的总产出为 150,系统的输入为 200,输出为 150.由于能值代数具有全额继承的特性,因此系统的总投

入应始终等于总产出^[11-12]. 图1b中系统的投入大于系统的产出,表明如果不区分系统内是否含有分流结构,那么对这类系统进行能量流分析会产生错误的计算结果.



(a)多产品绕行结构及其能值变化

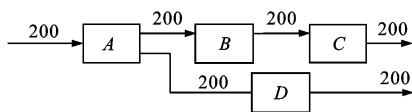


(b)分流绕行结构及其能值变化

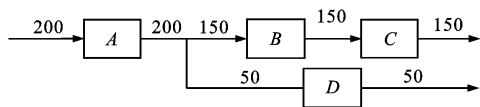
图1 不同绕行结构能流图

2.1.2 含分流多产品结构 当系统为多产品结构时,是否含有分流结构同样会使得系统的产出出现分歧. 文献[7]对一般多产品结构的能量流进行了分析,以图2a为例,这是一个标准的多产品结构,由单元A出来的两股产品各自经过加工过程最后以产品的形式离开系统. 由于是多产品结构,根据能值代数规则3,这两个产品将会全额继承系统的能量投入,因此这两个产品的产出都为200. 由于系统的两个产品都来自同一个源,因此根据式(1),整个系统的总产出仍为200.

若不考虑图2b存在的分流结构,则会存在下面的错误计算. 图2b中,离开单元A的能量分别通过各自的加工单元,最后离开系统,且这两个产品的产出分别为150和50. 若忽视分流结构,仍按照一般的多产品结构根据式(1)计算,整个系统的总产出将为150,这显然违背了能值理论的总投入等于总产出的原则.



(a)一般多产品结构及其能值变化



(b)含分流多产品结构及其能值变化

图2 多产品结构能流图

2.2 解决方案

能值代数规则2指出,一个能量流被分割为多个分支后,总能量将按照焓相应地分配给各分支. 然而,如果分流的各能量流经过各自的加工单元在

系统中又重新相聚,那么此时应该如何计算相聚后的总能量呢? 实际上,能值代数规则2隐含地表达了对这类结构的解决方案,既然一个能量流应根据其焓值分配给各个分支,那么分支在系统内重新相遇后也应该根据其焓值进行叠加. 如图3a的超结构图所示,从单元A出来的能量被分流为多股支流,经过各自的加工单元后汇入单元B,此时进入单元B的能量应为这些支流之和

$$Y = \sum [\alpha_i (S + F_A) + F_i] \quad (2)$$

式中: Y 表示系统的总产出; α_i 表示能量分流后支流的分配系数; S 表示系统自然资源的投入,是可再生自然资源与不可再生自然资源之和; F_i 表示系统的第*i*股支流购入投入. 图3a结构定义为分流单产品结构,实际上也属于分流绕行结构,只是在绕行支流增加了处理单元. 对于同样为分流绕行结构的图1b而言,由于进入单元C的两股能量是单元A输出能量的支流,根据式(2),进入单元C的能量为二者之和,即200,而离开系统的能量同样是200,这样使得系统的产出等于投入.

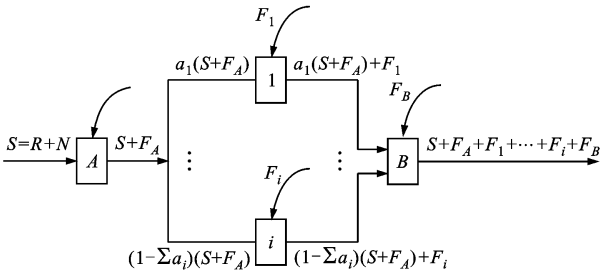
当研究对象为含分流多产品结构时,由于分流结构的存在,因此总产出应为各支流的叠加. 如图3b所示,结构为分流多产品结构,从单元1出来的能量被分为多股支流,分别进入各自的加工单元,并最终作为产品离开系统. 为遵守能值代数规则1,系统的总产出应为分流能量之和与系统购入能量之和,如式(2)所示. 另外,作为多产品系统,系统各个产品的能量为各支流与各自加工过程的购入能量之和

$$Y_i = \alpha_i (S + F_A) + F_i \quad (3)$$

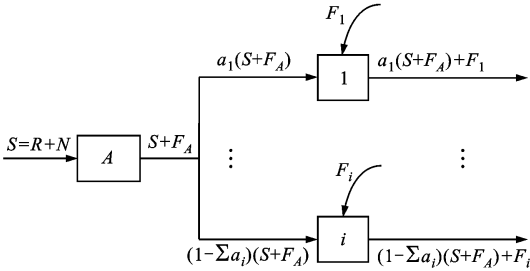
式中: Y_i 表示多产品系统第*i*个产品的产出能值. 对于图2b的含分流多产品结构而言,由于该结构中未加入购入能量这一项,因此根据式(2)可知系统的总产出为200,而两个产品的产出分别为150和50,且式(2)和式(3)存在如下关系

$$Y = \sum Y_i \quad (4)$$

从上面的分析可以看出,对不同多产品结构能量的正确计算显然是建立在对系统结构详细分析的基础之上. 对于绕行结构,需要区分是多产品绕行结构还是分流绕行结构,而对于多产品结构,需要区分是一般多产品结构还是分流多产品结构. 当研究对象为多产品绕行结构时,通过式(1)可以确定进入某一单元且来自于同一个源的多股能量的总和. 分流绕行结构中由于其能量根据其焓值进行了分割,因



(a)分流单产品结构及其能值变化



(b)分流多产品结构及其能值变化

图 3 不同分流结构的能值流图

此其支流再次进入一个新的单元时,需要对各分支能量进行叠加,最终输出系统的能量可根据式(2)进行计算,各产品的能量和可由式(3)得到. 此外,式(4)对于能值代数具有重要的意义. 一般认为,多产品系统的每种产品都将全部继承系统所有的输入能量(能值代数规则 3),而式(4)说明多产品系统各产品的产出需要在分析系统结构的基础上进行计算,不是盲目地赋予产品系统的总能量投入. 式(4)同样表明,能值理论不仅仅会表现出与其他分析方法的差异,同样可以表现出与其他方法相似的特性. 当然,这是以对系统的结构进行严谨分析为前提的.

3 案例分析

3.1 案例描述

图 4 是简化后的某焦化废水处理工艺流程图. 来自炼焦厂的废水先后进入除油池、气浮池后,除去废水中的大部分油和氰化物,然后部分进入调节池稀释氨氮浓度以适应生化处理需求,还有部分废水进入事故池用复用水稀释,以使气浮设备停工时仍可使流程正常运行. 调节好氨氮含量的废水进入好氧池、厌氧池循环以去除氨氮,再经过一系列的混凝、沉淀处理,最终排放水质达标的出水^[13].

3.2 分流绕行结构的解决方案

如图 5 所示,假定从气浮池出来的废水能量为 1.0×10^4 ,其分流进入事故池为 0.2×10^4 ,剩余 0.8×10^4 的能量绕过事故池直接进入调节池,复用水能量为 0.6×10^4 ;事故池的设备、基建以及人工的

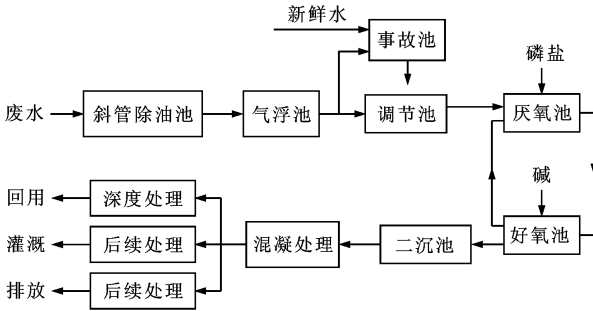


图 4 焦化废水处理工艺流程图

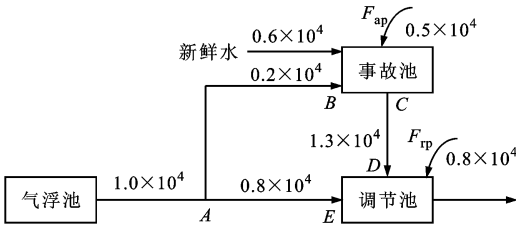


图 5 焦化废水处理工艺流程中的分流绕行结构能流图

总能量 F_{ap} 为 0.5×10^4 ,调节池的设备、基建以及人工的总能量 F_{rp} 为 0.8×10^4 .

从图 5 的部分流程可以看到,进入调节池的能量共有 3 股,且 CD 能量流中有 0.2×10^4 的能量与 AE 流能量来自于同一个源. 按照传统的计算方法,为了避免重复计算,应根据式(1)在调节池的总投入中去掉重复的部分,即 0.2×10^4 ,因此离开调节池的总能量为 2.7×10^4 ,此时图 5 分流程的总投入能量为 2.9×10^4 ,系统总产出并不等于总投入. 所以,这样的分析方法是错误的,产生这种错误的原因正是因为没有对系统中的分流情况进行考虑.

图 5 中的废水在 A 点分流,部分废水经过事故池后进入调节池,部分废水绕过事故池直接进入了调节池. 因此,本例中的工艺结构为一个典型的分流绕行结构,对于这类结构应采用式(2)求解. 虽然 AB 流能量和 AE 流能量来自于同一个源,但由于存在分流,所以汇合后,不存在重复计算问题,故不需要按照式(1)去掉较小的能量流 0.2×10^4 ,因此该部分流程总的产出为 2.9×10^4 . 这样处理使得系统的投入等于产出,符合能值代数规则,是正确的解决方案.

3.3 含分流多产品结构解决方案

如图 6 所示,假定从混凝处理过程出来的水能量增加至 4.0×10^4 ,该能量由于不同的用途被分流,最终出水用于回用、灌溉和排放的能量分别为 0.8×10^4 、 1.2×10^4 和 2.0×10^4 ,用于回用、灌溉和排放的购入能量 F_r 、 F_i 和 F_e 分别为 1.3×10^4 、 0.3×10^4 和 0.6×10^4 .

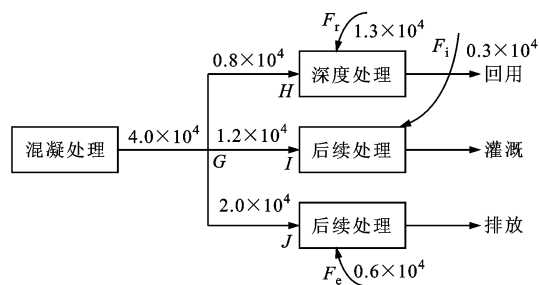


图6 焦化废水处理工艺流程中的含分流多产品结构能流图

若按照传统的能值分析方法不考虑系统内部结构,则图6为标准的多产品结构,系统的总产出为进入该结构的能量与该结构中投入的总能量之和,即 6.2×10^4 ,根据能值代数规则3,该结构3个产品的能量也分别为 6.2×10^4 。

通过分析系统内部结构可以看到,经过混凝处理的出水在G点分流为3股支流,分别经过不同的处理用于不同的目的,因此该部分结构为典型的分流多产品结构。对于这类结构,系统的总产出 Y_t 应该用式(2)进行计算,而分别用于回用、灌溉和排放的3股处理后废水的 Y_r 、 Y_{ir} 和 Y_e 则应该根据式(3)计算求得,即流股GH、GI和GJ由于存在分流过程,因此各产品的输出能量应是各支流与相应处理单元购入能量之和。通过计算可得

$$Y_t = 6.2 \times 10^4; \quad Y_r = 2.1 \times 10^4$$

$$Y_{ir} = 1.5 \times 10^4; \quad Y_e = 2.6 \times 10^4$$

计算结果表明,系统的总能量投入等于总产出,且系统总产出与各产品的能量同样满足式(4),而不是按照式(1)选择各产品中所含能量最大作为系统的总产出。

4 结论

对能值代数不正确的理解将会错误计算含分流结构化工系统的能量产出。分流结构可分为分流绕行结构和分流多产品结构,不同结构的产品能量的计算方法并不相同。本研究通过对能值代数规则的延伸理解合理解决了这两类分流结构中能量流的计算问题。本文提出的方法在焦化废水处理工艺流程中得到了证实。对系统内部结构不正确的理解将会影响到系统的能量产出,进而严重影响能值理论对系统的整体评价。因此,在对系统进行能值评价之前必须运用能值代数对系统内部的结构进行正确的分析。

参考文献:

[1] HEIJUNGS R. Environmental life cycle assessment of

products[M]. Leiden, Holland: University of Leiden Press, 1992: 5-18.

- [2] SZARGUT J, MORRIS D R, STEWARD F R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes[M]. New York, USA: Hemisphere Publishing, 1988: 2-5.
- [3] ODUM H T. Self-organization, transformity and information[J]. Science, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [4] ODUM H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York, USA: Wiley, 1996: 72-88.
- [5] BASTIANONI S, MORANDI F, FLAMINIO T, et al. Emergy and emergy algebra explained by means of ingenious set theory[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2903-2907.
- [6] LI L J, LU H F, CAMPBELL D E, et al. Emergy algebra: improving matrix methods for calculating transformities[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(3): 411-422.
- [7] BROWN M T, HERENDEEN R A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view[J]. Ecological Economics, 1996, 19(3): 219-235.
- [8] CAO K, FENG X. The emergy analysis of multi-product systems[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2007, 85(5): 494-500.
- [9] CAO K, FENG X. The emergy analysis of loop circuit [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 147(1/3): 243-251.
- [10] SCIENCEMAN D M. Energy and emergy [C]// Environmental Economics: The Analysis of a Major Interface. Geneva, Switzerland: Roland Leimgruber, 1987: 257-276.
- [11] BAKSHI B R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering [J]. Computers and Chemical Engineering, 2002, 26(2): 269-282.
- [12] LAZZARETTO A. A critical comparison between thermoeconomic and emergy analyses algebra[J]. Emergy, 2009, 34(12): 2196-2205.
- [13] 杨平,王彬,石炎福,等. 生物流化床 A-A-O 工艺处理焦化废水中试研究[J]. 化工学报, 2002, 53(10): 1085-1088.

YANG Ping, WANG Bin, SHI Yanfu, et al. Pilot study on treatment of coking plant waste-water in bio-fluidized-bed reactors and A-A-O system[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(10): 1085-1088.

(编辑 杜秀杰)