

# 碳夹点分析技术与化工园区能源规划

贾小平<sup>1,2</sup>, 刘彩洪<sup>1</sup>, 钱宇<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学炼油化工研究所, 山东 青岛 266042;

2. 华南理工大学化工学院广东省绿色化学产品技术重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 节能减排是应对能源与气候变化大挑战的有效策略。运用目标导向的碳夹点分析技术对能源系统进行系统分析, 基于累积 CO<sub>2</sub> 排放量-累积能源用量绘制组合曲线图, 并确定出最小清洁能源用量、能源需求及其对应的 CO<sub>2</sub> 排放量目标, 以期确定减排目标以及能源分配方案等, 为制定区域能源规划提供依据。以某化工园区能源规划为例, 给出了详细计算步骤和案例验证, 研究案例所得能源规划方案的 CO<sub>2</sub> 排放量比预计削减 10%。

**关键词:** 能源规划; 碳夹点分析; CO<sub>2</sub> 削减; 化工园区

中图分类号: TQ021

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)09-0081-03

## Carbon emission pinch analysis for energy planning in chemical industrial park

JIA Xiao-ping<sup>1,2</sup>, LIU Cai-hong<sup>1</sup>, QIAN Yu<sup>2</sup>

(1. Institute for Petroleum and Chemical Industry, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. Guangdong Provincial Laboratory of Green Chemical Technology, School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Energy saving and emission reduction are effective strategies against the challenge of climate changes and energy problems. To support such strategies, the target-oriented pinch analysis is a recommended approach for identifying a systematic solution to energy planning and management problems. In this paper, regional CO<sub>2</sub> emission pinch analysis (CEPA) is proposed to determine the targets of minimum clean energy usage, energy demand and the corresponding CO<sub>2</sub> emissions. Based on the diagrams of cumulative CO<sub>2</sub> emission loads versus cumulative energy demand and supply, the detailed plotting and algebraic procedures for the composite curves are presented. A case study for chemical industrial park is presented to illustrate the proposed approach. The proposed energy planning option can cause a 10% reduction of CO<sub>2</sub> emission as compared with the original one.

**Key words:** energy planning; carbon emission pinch analysis; CO<sub>2</sub> reduction; chemical industrial park

CO<sub>2</sub> 是引起全球气候变化的最主要的温室气体之一, 有效控制 CO<sub>2</sub> 排放问题受到世界各国关注。气候变化的原因除了自然因素影响外, 与人为的活动, 特别是使用化石燃料过程中排放 CO<sub>2</sub> 的程度密切相关。节能减排、减缓气候变化是我国实施可持续发展战略的重要组成部分。本文将利用过程系统工程的夹点分析方法来确定区域能源需求和 CO<sub>2</sub> 排放量, 以期为制定区域能源规划提供依据。

夹点分析方法最先应用于换热网络系统的热集成来缓解能源危机问题, 后被扩展应用于污染防治的质量集成中, 如应用于资源回收、废物减量等方面, 提出了水夹点、氧夹点、氢夹点、物性夹点、能值夹点等概念<sup>[1-7]</sup>。Linnhoff 等<sup>[8]</sup>首次利用夹点分析来确定石化企业的 CO<sub>2</sub> 排放目标。Tan 等<sup>[9]</sup>提出基

于夹点的碳约束能源规划方法, 将系统边界扩展到区域范围上。Crilly 等<sup>[10-11]</sup>正式提出了碳夹点分析方法 (Carbon Emission Pinch Analysis, CEPA), 并将该方法应用于爱尔兰的电力行业, 对能源供需状况进行预测和规划, 为进一步研究区域能源供应和 CO<sub>2</sub> 减排目标提供决策依据。基于文献<sup>[12]</sup>的前期研究成果, 本文将运用碳夹点分析方法对区域能源规划问题进行系统分析, 确定出区域能源需求及其对应的 CO<sub>2</sub> 排放量目标。

## 1 问题表述

在区域层面上, 有排放限制的能源规划问题可描述为以下 2 类问题:

(1) 在某区域内, 给定能源总量和 CO<sub>2</sub> 排放量限

制,确定清洁能源或低碳能源的最小用量。本文的清洁能源或低碳能源指核能、太阳能、风能和水力能等<sup>[8]</sup>。

(2)对于多个区域,给定每个区域的排放限制,在确定最小清洁能源消耗的基础上,确定每个区域的能源分配(种类及其用量)。

一般地,最大限度使用低碳或清洁能源,可减少 CO<sub>2</sub> 的排放。但这些能源或者昂贵,或者在应用技术上没有化石燃料成熟,或者在技术推广上存在争议。故在满足 CO<sub>2</sub> 排放限制目标的情况下,运用夹点分析方法研究如何使低碳或清洁能源用量最小化及能源分配情况是有实用价值的。

## 2 碳夹点分析步骤

如同换热网络设计一样,能源规划过程需要确定碳夹点。所不同的是,碳夹点是基于每个区域的能源需求量,而不是温度;在夹点之上的区域不需要用清洁能源,而是利用排放因子大的能源类型。

碳夹点分析可分成以下 2 个任务:

(1)根据给定的数据(如 CO<sub>2</sub> 排放因子、能源供应总量、区域能源需求量、区域 CO<sub>2</sub> 排放限制量等)绘图得到能源供应曲线与能源需求曲线,分析夹点的位置。

(2)适当调整曲线,使得每个区域能源利用和 CO<sub>2</sub> 排放量均在规定的范围内,并求出各能源的使用量和剩余量、每个区域内各能源的使用量以及 CO<sub>2</sub> 排放总量。

详细的计算步骤可参考文献[12]。其大致步骤如下:

(1)以 CO<sub>2</sub> 排放因子的递增顺序排列,分别计算累积能源用量(供给与需求)和累积 CO<sub>2</sub> 量,绘制累积 CO<sub>2</sub> 排放量-累积能源用量组合曲线图。

(2)水平移动供给曲线,直到供给曲线恰好与需求曲线最右侧的点相交,该交点为碳夹点,水平移动距离为总体最小清洁能源用量。

(3)对夹点之下,从排放因子较高的区域能源分配,水平移动该区域以下对应 CO<sub>2</sub> 排放相等的供给曲线,使得该点与需求曲线对应极限点重合,水平移动距离为该区域最小清洁用量。以此分别计算出各区域能源用量。

## 3 案例分析

### 3.1 问题描述与基础数据

为了实现工业生态化转型,某化工园区依据其

地理位置与已有产业分布情况,将总体功能进行重新划分,分为生态恢复与环境治理功能区(区域 I)、生态工业支撑产业区(区域 II)、生态工业扩展区(区域 III)和生态工业改造区(区域 IV)。依据总体产业规划,各区域的能源支撑系统将有所改变,同时各区域对应的 CO<sub>2</sub> 排放量也有所限定。各区域预计消耗能源总量及其 CO<sub>2</sub> 排放限制、该园区能源供应情况及其对应的排放因子如表 1 所示。

表 1 基础数据表

能源供给	CO <sub>2</sub> 排放因子/ t·TJ <sup>-1</sup>	能源用量/ 10 <sup>4</sup> TJ	能源需求	预计消耗能量/ 10 <sup>4</sup> TJ	预计 CO <sub>2</sub> 排放量/ 10 <sup>5</sup> t
燃料煤	95	6	区域 I	8	16
石油	75	7	区域 II	6	24
天然气	55	4	区域 III	7	42
生物质汽油	16.5	2	区域 IV	2	30
清洁能源	0	>4			
总量		23		23	112

### 3.2 绘制组合曲线图

(1)由表 1 基础数据分别计算供给能量(能源能量)和需求能量(预计消耗能量),能源供给的 CO<sub>2</sub> 排放量和各区域需求 CO<sub>2</sub> 排放量,如表 2 所示。

表 2 能源供需与 CO<sub>2</sub> 排放情况

能源供给	CO <sub>2</sub> 排放因子/ t·TJ <sup>-1</sup>	能源用量/ 10 <sup>4</sup> TJ	累积能量/ 10 <sup>4</sup> TJ	CO <sub>2</sub> 排放量/ 10 <sup>5</sup> t	累积 CO <sub>2</sub> 排放量/ 10 <sup>5</sup> t
清洁能源	0	0	0	0	0
生物质汽油	16.5	2	2	3.3	3.3
天然气	55	4	6	22	25.3
石油	75	7	13	52.5	77.8
燃料煤	95	6	19	57	134.8
能源需求					
区域 I	20	8	8	16	16
区域 II	40	6	14	24	40
区域 III	60	7	21	42	82
区域 IV	150	2	23	30	112

(2)将表 1 的第 2 列所示能源供给类型的 CO<sub>2</sub> 排放因子以递增顺序排列。

(3)分别计算供给和需求的累积能源用量和累积 CO<sub>2</sub> 排放量,如表 2 的第 4、6 列所示。

(4)依据能源供给和区域能源需求以及 CO<sub>2</sub> 排放量,分别绘制累积 CO<sub>2</sub> 排放量-累积能源用量组合曲线图,如图 1 所示。

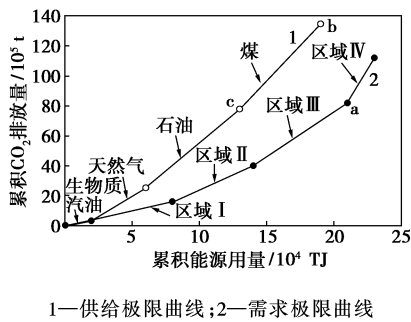


图1 累积CO<sub>2</sub>排放量-累积能源用量组合曲线

### 3.3 确定总体最小清洁能源使用量

从图1中可知,在满足相同的累积能源能量情况下,供给能源的CO<sub>2</sub>排放量总是大于所要求的极限CO<sub>2</sub>排放量。为了达到限制要求,在同一能量情况下,供给的CO<sub>2</sub>排放量应该小于等于需求的CO<sub>2</sub>排放量。水平移动供给曲线,直到供给曲线恰好与需求曲线的最右侧的点相交,使得供给曲线在需求曲线之下,得到碳夹点,夹点位于供给或需求极限曲线的某个极限点上,并将供给与需求曲线均分成在夹点之上和在夹点之下2个部分,如图2所示。水平移动供给曲线意味着在累积CO<sub>2</sub>排放量不变的情况下,累积能源用量增加。此时只增加清洁能源的用量。移动的最小距离即所需的最小清洁能源用量。

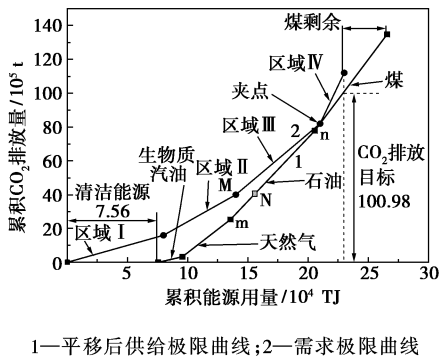


图2 碳夹点组合曲线

图2的夹点对应于图1的a点,相应的在需求曲线上bc直线段之间。图1中a、b、c点的坐标分别为(21, 82)、(19, 134.8)与(13, 77.8)。故直线bc的方程为:  $Y = 9.5(X - 13) + 77.8$ 。当  $Y = 82$  时,得到  $X = 13.44$ 。对应2点的距离:  $21 - 13.44 = 7.56$ ,即为总体最小清洁能源用量。进一步可得到煤剩余量  $3.56 \times 10^4$  TJ(即两曲线末端的距离),总体CO<sub>2</sub>排放量目标  $100.98 \times 10^5$  t。

### 3.4 确定各区域能源分配方案

从图2可知,清洁能源仅供给夹点之下部分(区

域I、区域II和区域III),但是不能得到各区域的清洁能源用量。如果将全部的清洁能源用于区域I,那么在满足区域I的CO<sub>2</sub>排放量限制( $16 \times 10^5$  t)时,对应的总供给能源能量必大于区域I所预计需求量。其他能源也是如此。故需要对各区域进行能源分配。

首先对区域III能源进行分配。在图2中,在供给曲线上绘出点N,该点的CO<sub>2</sub>排放量与需求曲线极限点M点相等。通过平移N点以下的供给曲线,恰好使得N点与需求曲线的M点重合,如图3所示。如此所移动的距离即为区域III中清洁能源用量。

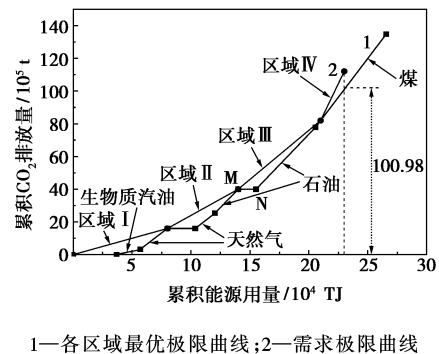


图3 各区域能源分配曲线

图3中的N点必在图2中的mn直线段上,由m、n的坐标(13.56, 25.3)、(20.56, 77.8)确定mn直线方程:  $Y = 7.5(X - 13.56) + 25.3$ ,由于M、N的CO<sub>2</sub>相等,可得到N点  $X = 15.52$ ,得到N(15.52, 40)。M、N两点的距离为:  $15.52 - 14 = 1.52$ ,即为区域III的清洁能源用量。在图3中可以看出,区域III和供给曲线的一部分构成一个封闭多边形,根据各点的值可以读出区域III所需的各种能源用量。利用同样的方法,计算得到区域I和区域II的能源分配方案及其CO<sub>2</sub>排放量,结果如表3所示。

表3 能源分配与CO<sub>2</sub>排放量最终结果

	能量分配/10 <sup>4</sup> TJ					CO <sub>2</sub> 排放量/10 <sup>5</sup> t
	清洁能源	生物质汽油	天然气	石油	燃料煤	
区域 I	3.69	2	2.31	0	0	16
区域 II	2.35	0	1.69	1.96	0	24
区域 III	1.52	0	0	5.04	0.44	42
区域 IV	0	0	0	0	2	18.98
总量	7.56	2	4	7	2.44	100.98
排放削减量(112 - 100.98)/112 = 10%						

世界农药的年平均增长率为3%~4%。印度是个农药低成本生产基地,由于当地原材料便宜,吸引了国际上20多家大型农药生产企业在这里投资建设生产企业。

(3)印度的医药、石化工业发展迅速。占印度全部化学工业产值20%的印度石化工业,目前正以年均14%左右的速度增长。2007年5月,印度政府宣布将建设一批石化、化工和石油投资区(PCPIR),并确定每个PCPIR占地250 km<sup>2</sup>,为石油、化工和石化生产厂提供所需的基础设施和公共工程。据称,目前印度政府已经接到来自安得拉邦(Andhra Pradesh)、古吉拉特邦(Gujarat)、卡纳塔卡邦(Karnataka)、奥利沙邦(Orissa)、西孟加拉邦(West Bengal)关于建设PCPIR的申请。建设PCPIR仅仅是印度发展化学工业的一个开始。印度石化工业的主要产品有通用树脂、合成纤维、合成橡胶和石化表面活性剂。印度石油公司(IOC)计划在2011年至2012年期间投资75亿美元扩展其石化业务。信赖工业公司(RPL)、印度石化公司(IPCL)和印度燃气公司(GAIL)目前都在扩大各自的乙烯生产能力。2007年9月,印度化学品和化肥部宣布,未来5年将投资90亿美元把印度乙烯生产能力从270万t/a增至690万t/a,从而实现国内人均聚合物消费量达到

12 kg/a。医药化工是印度化学工业增长最快的行业。印度医药化工每年销售收入约为140亿美元,其中50亿美元来自出口业务。印度生物科技产业也发展迅速,有数家公司正在建设生物化工生产厂。

(4)印度化工并购风潮迭起。近年来印度化工涌起并购风潮。2006年10月,吉友联(Jubilant)公司斥资3350万美元收购了美国临床研究组织——目标研究联合公司(Target)。这是印度公司首次收购美国的临床研究组织,反应了Jubilant公司在临床研究组织服务方面进行全球拓展的目标;与此同时,Nicholas Piramal公司耗资1680万美元收购了英国药品定制生产公司阿维希亚医药(Avecia)公司;2006年10月,沙森化学药品公司(Shasun)收购罗地亚定制化学部;2006年5月,印度Dishman制药及化学公司收购瑞士精细化工企业CarbonGen AG和AMCIS公司,加强了高效原料药的生产能力。

但要看到,印度化学工业前进的道路并非坦途,目前印度化学工业发展也遇到了一些亟待解决的问题。

(1)金融危机对印度化学工业的影响日益加剧。2008年2月,印度工业生产指数(IIP)增长8.6%,比2007年同期印度工业总体增长下降,印度化学工业目前受到的影响也是非常大的。由于受金融危机的

(上接第83页)

从表3可知,能源规划方案中燃料煤用量同供热量相比大幅度减少,从 $6 \times 10^4$  TJ减小到 $2.44 \times 10^4$  TJ,CO<sub>2</sub>排放量削减约10%,应用夹点分析合理地进行区域内的能源规划,初步起到了减排的效果。

## 4 结论

(1)基于夹点分析,对区域能源规划问题进行描述;并提出进行碳夹点分析的一般步骤。用实例说明碳夹点分析方法作为初步能源规划的工具,按照该步骤可得到一种可行的能源规划方案。

(2)运用累积CO<sub>2</sub>排放量-累积能源用量组合曲线图确定最小清洁能源目标、能源需求结构及其对应的CO<sub>2</sub>排放量。研究案例所得方案的CO<sub>2</sub>排放量比预计削减10%,达到节能减排的限制目标。

## 参考文献

- [1] El-Halwagi M M, Manousiouthakis V. Synthesis of mass exchange networks[J]. *AIChE Journal*, 1989, 35: 1233 - 1244.
- [2] Wang Y P, Smith R. Wastewater minimisation[J]. *Chemical Engineering Science*, 1994, 49(7): 981 - 1006.
- [3] Zhelev T K, Bhaw N. Combined water-oxygen pinch analysis for better wastewater treatment[J]. *Waste Management*, 2000, 20: 665 - 670.
- [4] Bealing C, Hutton D. Hydrogen-pinch analysis[J]. *Chemical Engineering*, 2002, 109(5): 56 - 61.
- [5] Zhelev T K, Ridolfi R. Energy recovery and environmental concerns addressed through energy-pinch analysis[J]. *Energy*, 2006, 31: 2150 - 2162.
- [6] Kazantzi V, El-Halwagi M M. Targeting material reuse via property integration[J]. *Chemical Engineering Progress*, 2005, 8: 28 - 37.
- [7] 杨友麒. 质量交换网络[J]. *化工进展*, 2007, 26(2): 284 - 288.
- [8] Linnhoff B, Dhole V R. Targeting for CO<sub>2</sub> emissions for total sites[J]. *Chemical Engineering Technology*, 1993, 16: 252 - 259.
- [9] Tan R R, Foo D C Y. Pinch analysis approach to carbon-constrained energy sector planning[J]. *Energy*, 2007, 32: 1422 - 1429.
- [10] Grilly D, Zhelev T K. Current trends in emissions targeting and planning [C]//2007 PRES conference. Naples, Italy, vol. 1. Milan: AIDIC, *Chemical Engineering Transactions*, 2007: 91 - 97.
- [11] Grilly D, Zhelev T. 2008, Emissions targeting and planning: An application of CO<sub>2</sub> emissions pinch analysis (CEPA) to the Irish electricity generation sector[J]. *Energy*, 2008, 33: 1498 - 1507.
- [12] 刘彩洪, 贾小平, 项曙光, 等[J]. 应用夹点技术确定再生水用水量[J]. *化工进展*, 2009, 28(5): 774 - 787. ■