

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181370

基于 P-graph 的乙烯裂解原料调度建模与优化

牟鹏, 顾祥柏, 朱群雄

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 乙烯工业不同的裂解装置间存在着设备、技术上的差别, 每一种原料在乙烯工厂不同炉型或工艺的裂解装置的乙烯产品收率、能耗也存在着差别。随着新的乙烯工厂的投产, 需要同时运行台数众多的差异化裂解装置, 从而为通过优化调度乙烯裂解原料实现提高物效、降低能耗提供了空间。对于此类工厂间原料调度及能耗优化问题提出了一种基于 P-graph 的建模和优化方法 (scheduling generation based on P-graph, SGBP 算法), 该算法通过 P-graph 本身提取过程结构信息的能力, 在加速求解的同时, 保留了次优解集。之后以两个实际的乙烯厂为研究实例, 采用提出的 SGBP 方法实现了原料调度的建模和优化, 该方法与 MINLP 优化算法的对比分析验证了提出方法的优势: (1) 可以同时提供较为丰富的最优解与次优解方案; (2) 提出方法的最优结果与 MINLP 的优化效果相当; (3) 优化后的整体能耗下降明显, 为生产计划人员选择可采用灵活的原料调配方案提供了多种可选择的运行方案。

关键词: 乙烯; 调度; P-graph; 优化; SGBP 算法; 系统工程; 过程系统

中图分类号: TQ 021.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 02-0556-08

Modeling and optimization of ethylene cracking feedstock scheduling based on P-graph

MU Peng, GU Xiangbai, ZHU Qunxiong

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: There are differences in equipment and technology between different cracking devices in the ethylene industry. There is also a difference in the yield and energy consumption of ethylene products from cracking devices of different furnace types or processes in each ethylene feedstock plant. With the commissioning and starting of the new ethylene plant, it is necessary to simultaneously operate a large number of differential cracking devices, thereby providing space for the optimization of ethylene cracking raw materials to achieve improved material efficiency and lower energy consumption. This paper proposes a modeling and optimization method based on P-graph for the scheduling of raw materials and energy optimization among such plants (SGBP). This algorithm extracts the structural information of the process by P-graph itself, and preserves the suboptimal solution set while accelerating the solution. Afterwards, using a certain ethylene plant as an example, the proposed method was applied to achieve the modeling and optimization of raw material scheduling. The advantages of the proposed method has been verified via comparing with MINLP and one kind of intelligent optimization algorithm. It can provide simultaneously more abundant optimal solution and suboptimal solution. The optimal result of the proposed method is equivalent to the

收稿日期: 2018-11-18 修回日期: 2018-12-11

通信作者: 朱群雄 (1960—), 男, 博士, 教授, zhuqx@mail.buct.edu.cn

第一作者: 牟鹏 (1991—), 男, 博士研究生, aileengujy@126.com

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61533003)

引用本文: 牟鹏, 顾祥柏, 朱群雄. 基于 P-graph 的乙烯裂解原料调度建模与优化[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 556–563

Citation: MU Peng, GU Xiangbai, ZHU Qunxiong. Modeling and optimization of ethylene cracking feedstock scheduling based on P-graph[J]. CIESC Journal, 2019, 70(2): 556–563

optimization effect of MINLP. The overall energy consumption after optimization is significantly reduced, and a variety of alternative operation options can be provided for the production plan personnel to choose flexible raw material deployment plans.

Key words: ethylene; scheduling; P-graph; optimization; SGBP; systems engineering; process systems

引言

乙烯是化学工业和石油工业重要的单体,是生产有机化工产品的原料基础,而热裂解是生产乙烯的重要方式之一^[1]。近年来,随着我国经济的发展和乙烯产量的逐年增加,大批新的大型乙烯装置投入生产^[2]。由于乙烯裂解是一个复杂的过程,且存在很多不同的裂解炉技术,不同乙烯生产装置对于不同原料处理的效率不尽相同^[3]。表1给出了我国主要的乙烯产能分布和部分裂解炉所使用的技术。

乙烯裂解生产过程通过加热原料促使原料热

表1 我国主要的乙烯产能介绍

Table 1 Introduction of main ethylene plants in China

编号	工厂	产量/(kt/a)	裂解炉类型
1	独山子	1308	林德技术裂解炉
2	大庆	1108	192U 裂解炉
3	吉林	807	林德技术裂解炉
4	兰州	517	SC-1 裂解炉
5	抚顺	852	USC 型管式裂解炉
6	辽宁	156	GK 裂解炉
7	四川	840	F1110-F1170 裂解炉
8	燕山	696	SRT-IV 型裂解炉
9	东方	150	—
10	天津	178	CBL 裂解炉
11	天津赛科	966	—
12	中原	166	CBL 裂解炉
13	武汉	729	CBL 裂解炉
14	茂名	1130	SL-II 型裂解炉
15	广州	221	—
16	齐鲁	871	CBL 裂解炉
17	扬子	749	GK-6 裂解炉
18	BASF-YPC	423	—
19	上海	826	SL-2 裂解炉
20	上海赛科	1268	—
21	镇海	1126	CBL 裂解炉
22	福建-REP	1101	—
23	盘锦	630	USC 176U 型管式裂解炉
24	惠州石化	950	—

裂解产生小分子的产物,这一过程意味着巨大的能源消耗量^[4]。随着能源形势的逐渐严峻和环保要求的逐渐提高,越来越多的研究开始关注石化工业尤其是乙烯工业的节能减排问题^[5-7]。新建的乙烯装置由于技术和设备上的优势,能效情况相对较好,这就给通过乙烯原料调度提高乙烯工业能效提供了操作空间,也使得,在现有原料供应条件下,在保证乙烯产量的前提下,优化过程的能耗和碳排放成为可能。这无论对提高企业效益,保护我国能源安全,还是为居民提供更好的空气环境都有着重要的意义。

到目前为止,为了提高乙烯过程的能效和减少污染物的排放,学者们的主要研究方向在基于投入产出的数据分析与评价^[6]及优化上。在过程的建模问题上,这种方法对于裂解过程的数学模型并没有进行较为深入的研究,主要的原因是热裂解过程是一个复杂的化工过程,包含诸多的操作单元和设备,这些操作单元和设备之间相互耦合,形成一种复杂的联动关系^[8]。直接将这一复杂的关系应用于实际生产的建模是不实际的,必须对模型进行近似简化。Liu 等^[9]提出了以 MINLP 模型解决裂解炉负荷问题,该模型在避免多个裂解炉同时关停这一不实际的操作方面给出了解决方案。Zhao 等^[10]针对之前文献中没有考虑的乙烷二次裂解问题给出了新的 MINLP 模型。商保鹏等^[11]针对乙烯生产过程中可能出现的切料问题改进了前人提出的 MINLP 模型。这些基于 MINLP 的建模和优化工作都得到了很好的结果。但 MINLP 模型无法直观地表述所求得的了解方案,并且,使用 MINLP 模型对于更加复杂的化工过程进行建模后的优化可能会造成无法得到最优解的问题^[12-13]。同时,流程工业整体有一定的波动性,仅提供单一解决方案的优化算法可能提出的优化方案在实际操作中具有很强的局限性,研究表明,单纯的最优解并不一定是工程上可用的最优解^[14]。

P-graph 算法是一类基于图论的过程合成工

具,本身可以和MINLP模型进行相互转化^[15],且已经广泛应用于包括工业领域在内的诸多领域^[16-19],Tan等^[20]综述了P-graph在各个领域的应用研究情况。同时,基于MSG^[21]算法、SSG^[22]算法结果,可以抽取过程结构信息以加速ABB^[23]算法的求解方法论可以为求解复杂化工过程提供求解加速,并且这一算法能够给出过程的一系列临近最优解集,且能加速MINLP的求解过程,得到最优调度方案。应用于乙烯工业的原料调度问题能更好地为实际生产提供操作指导^[17]。因此本文对于乙烯工厂间原料调度及能耗优化问题提出了一种基于P-graph的建模和优化方法(scheduling generation based on P-graph, SGBP算法),并以两个实际的乙烯厂为研究实例,以SGBP方法实现了原料调度的建模和优化,后将该方法与MINLP优化算法的结果进行对比以验证该方法的优势。

1 问题描述

乙烯裂解炉的原料性质对于产品的裂解收率有着显著的影响,原料按照分子质量可以分为重质原料和轻质原料。我国乙烯厂的轻质原料主要为液化石油气(liquefied petroleum gas, LPG)、轻烃、C₃等,重质原料主要为石脑油(naphtha, NAP)、常压柴油(atmospheric gasoline, AGO)、抽余油、加氢尾油(heavy vacuum gas oil, HVGO)等^[24]。轻质原料裂解所需能耗较低,且裂解炉运行周期比较长,但相对于重质原料来说,它的双烯收率偏低;重质原料裂解所需能量相对较高,由于结焦速率快,裂解炉运行周期较短,价格也便宜一些。以往对于裂解原料的分配主要遵从于经济原则,而对于裂解炉能耗和污染排放考虑相对不足,缺乏理论指导。本文应用两个实际的乙烯工厂的生产数据进行建模,通过优化调度这两个工厂油品的配置方案,在原料和产量保持不变的约束下,使得能耗和污染最小。

对于这类调度问题,给出一个通用的描述如下。

(1)原料集 M 是给定的,对于原料集中的每一种原料 $i(i = 1, 2, \dots, M)$,单位时间段 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 内的原料的供应量 $S_{i,t}$ 也是确定的。单位时间段 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 内,每一种原料 $i(i = 1, 2, \dots, M)$ 的供应量 M_i 是确定的。则在实际生产中,在单位时间

段 t 内,每一种原料消耗量 S_i 应不高于该原料供应量 M_i 。即

$$M_i \geq S_i \quad (1)$$

(2)工厂集 N 是给定的,对于每一个工厂 $j(j = 1, 2, \dots, N)$,单位时间段 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 内的产量要求 $P_{j,t}$ 也是确定的。对于每一个工厂 $j(j = 1, 2, \dots, N)$,单位时间段 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 内的产量要求 Q_j 是确定的。则在实际生产中,在单位时间段 t 内,实际产量 P_t 一般不低于要求产量 Q_t 。即

$$P_t \geq \sum_{j=1}^N Q_{j,t} \quad (2)$$

(3)每个工厂 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 对应于每种原料 $i(i = 1, 2, \dots, M)$,在每段时间 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 内的裂解收率 $r_{i,j,t}$ 假设为恒定值。虽然实际裂解炉的收率由于裂解原料在管壁上结焦会随着时间下降,但在较长的一段时间内(以月或更长时间为单位)在较大规模的裂解装置(工厂及以上规模),这种随时间的变化会以为多台裂解炉轮换清焦而变得可以忽略不计。

则有产品总量

$$P = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M r_{i,j,t} S_{i,j,t} \quad (3)$$

同样,每个工厂 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 对应于每种原料 $i(i = 1, 2, \dots, M)$,在每段时间 $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 内的单位产品燃动能消耗量 $c_{i,j,t}$ 假设为恒定值。

则有燃动能消耗总量

$$c_{\text{sum}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M r_{i,j,t} S_{i,j,t} c_{i,j,t} \quad (4)$$

(4)决策者尝试寻找一种原料调配方案 $f_{i,j,t}$,在满足上述需要的前提下使得燃动能消耗总量 c_{sum} 最小。

(5)由于工业数据具有一定的波动和不准确特性,求得的数学上的最优方案可能并不是决策者需要的最终方案,故决策者试图寻找尽可能多的解决方案,包括最优调度方案和临近最优调度方案集。

2 SGBP 算法

上述问题是一个混合整数线性规划问题(MINLP)^[9],该问题通常基于单纯型法或分支界定法^[25]进行求解。这两种算法在处理大规模复杂问题时会出现无法求得最优解的问题,同时这两种算法仅能得到数学上的最优解,无法解决工程上对于临

近最优解集的需求。

关于生产调度在化工应用的综述高度评价了依据图论解决类似问题的思路:尽管 MINLP 的数学解法也能得到类似的解,但基于图论,过程的问题能够更加清晰、可视化的表达^[26]。现有的可以处理化工过程的图论方法主要包括 ST/SEN^[27]、R-graph、S-graph 和 P-graph^[28]。在各类图论中,S-graph 主要适用于机械加工类问题,R-graph 主要用于装置内部结构优化问题,而 P-graph 能提供大量的临近最优解,且更适合描述化工过程的调度问题。

基于 P-graph 建立超结构^[29]的 SGBP 算法需要经历两个过程,其一是超结构的结构确定,其二是超结构的参数确定。根据生产实际和化工过程知识及数据,给出流程图如图 1 所示。

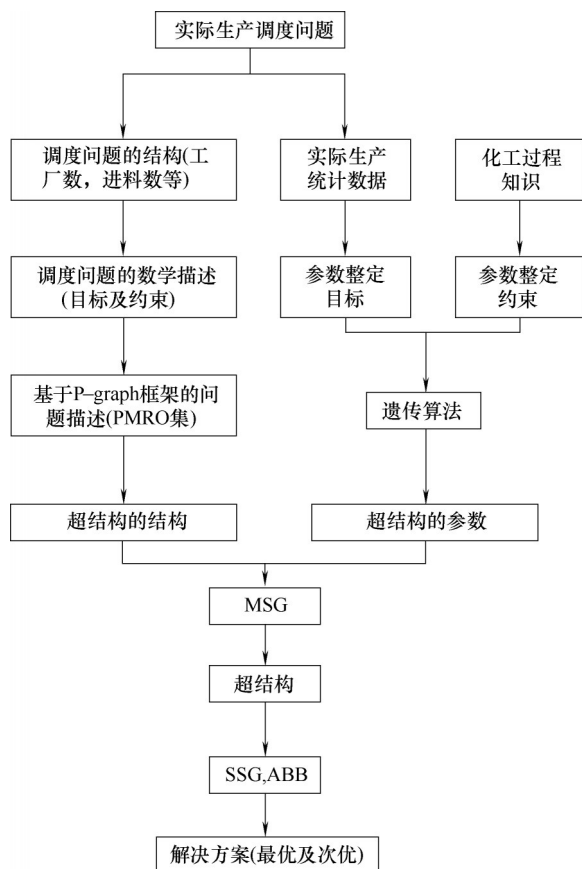


图1 SGBP算法流程

Fig.1 Flowsheet of SGBP Algorithm

超结构首先需要确定其结构,在 P-graph 中,描述一个结构需要过程的 P (产物集)、 R (原料集)、 M (物料集)和 O (操作集)。P-graph 是一种过程合成领域的方法,而对于过程调度问题,参照 García-Ojeda

等^[30]在火灾逃生领域的调度超结构生成算法,对于一个实际包含三个时间周期(月)、两个工厂以及四种不同原料的生产调度问题,根据第二节所示的问题描述,记时间段 $t(t=1,2,3)$,工厂 $j(j=1,2)$,原料 $R_i(i=1,2,3,4)$

根据给出的问题描述,生成超结构以对问题进行建模需要的 P 、 M 、 R 、 O 集合。 R 集合包括每个月 4 种原料,共计 $3 \times 4 = 12$ 个; P 集合包括 1 个产品,即乙烯; M 集合除包含 R 集合和 P 集合外,还包含 12 种中间产物,其中,4 种物料每种物料每个月的留存量为一个中间产物,共计 $3 \times 4 = 12$ 种; O 集合包含 44 个操作单元,其中,每个月、每种物料与每个工厂的匹配组成一个操作单元,共计 $4 \times 2 \times 3 = 24$ 个,每种原料的储存/下一个月的供给匹配组成一个单元,共计 $(2 + 3) \times 4 = 20$ 个,合计 44 个。

由此通过 P-graph 的 MSG 算法进行计算,可得唯一的超结构模型。

超结构模型确定后,需要对超结构模型的参数进行整定。整定过程是一个优化过程,优化目标通过实际生产过程的数据确定,整定的目标是使得整定后的参数能更加准确地描述实际生产过程,即描述的误差最小。而超结构整定的约束是由生产过程所涉及的化工知识确定,目标是保证整定所得到的参数符合实际生产的现状。

(1) 目标函数部分

从实际生产数据中可以得到单位乙烯产品燃动能消耗值,记第 t 时间段、第 j 个工厂单位乙烯燃动能消耗为 $C_{j,t}$ 。采用遗传算法(GA)模拟计算第 t 时间段、第 j 个工厂、第 i 种原料对应燃动能乙烯消耗系数 $\delta_{i,j,t}$ 。

以工厂 1, 第 1 时间段为例计算四种原料分别对应燃动能乙烯消耗系数,即 $\delta_{1,1,1}, \delta_{2,1,1}, \delta_{3,1,1}, \delta_{4,1,1}$ 。

$$B_{1,1}C_{1,1} = \sum_{i=1}^4 A_{i,1,1}\gamma_{i,1,1}\delta_{i,1,1} \quad (5)$$

同理,可以得到其他时间段、工厂的原料所对应的燃动能乙烯消耗系数。

(2) 约束部分

每个工厂的裂解炉,在裂解某种原料时的量并不是没有限制的,故该操作单元的处理能力 x_β ($\beta = 1, 2, \dots, 44$) 是有上限和下限的。下限一般设定为装置标准负荷的 60%,上限一般设定为装置负荷的 120% 左右。

$$0.6A_{i,j,t} \leq x_{\beta} \leq 1.2A_{i,j,t} \quad (6)$$

实际生产过程中由于装置和化学反应等原理的限制,原料的裂解收率也存在着不同的上下限

$$0 \leq \gamma_{i,j,t} \leq 50\% (\text{重烃原料}) \quad (7)$$

$$0 \leq \gamma_{i,j,t} \leq 90\% (\text{轻烃原料}) \quad (8)$$

根据这些目标函数和约束通过GA算法可以整定出过程建模所需要的参数。同时,在问题描述中也给出了一部分单元所需要的参数。

单位时间段 $t(t=1, 2, 3)$ 内,每一种原料 $i(i=1, 2, 3, 4)$ 的供应量 $D_{i,t}$ 是确定的,则优化中在单位时间段 t 内,每一种原料实际消耗量 $S_{i,t}$ 应不高于该原料供应量 $D_{i,t}$,即 $D_{i,t} \geq S_{i,t}$ 。

对于每一个工厂 $(j=1, 2)$,单位时间段 $t(t=1, 2, 3)$ 内的产量要求 $Q_{j,t}$ 是确定的。优化中,在单位时间段 t 内,实际产量 $P_{j,t}$ 一般不低于要求产量 $Q_{j,t}$,即 $P_{j,t} \geq Q_{j,t}$ 。

优化结果中,产品总量 P

$$P = \sum_{t=1}^3 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^4 r_{i,j,t} S_{i,j,t} \quad (9)$$

燃动能消耗总量

$$c_{\text{sum}} = \sum_{t=1}^3 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^4 S_{i,j,t} c_{i,j,t} \quad (10)$$

(3)操作单元约束

每个工厂的裂解炉,在裂解某种原料时的量并不是没有限制的,故该操作单元的处理能力 $x_{\beta}(\beta=1, 2, \dots, 44)$ 是有上限和下限的。上限一般定为基础数据的120%左右。

$$0 \leq x_{\beta} \leq 1.2A_{i,j,t} \quad (11)$$

根据上述 P 、 M 、 R 和 O 集合的定义并结合式(6)

到式(11)所给出的超结构参数求取约束,利用P-graph studio平台,建立超结构调度模型,可以得到如图2所示的超结构。

3 实验结果说明与讨论

在保证3个月总产量恒定的目标下,对于两个乙烯工厂的总能耗最低问题建立调度超结构模型,并应用提出的SGBP调度算法与常见的MINLP理论分别对于该调度问题进行建模,可以得到两者的计算结果如表2、表3及图3所示。

由表2和表3可以看出,SGBP调度算法与MINLP所得到的解的效果具有一致性,这一结果证明了SGBP算法解决该问题的可行性。从单厂每月的原料调度结果来看,无论在何种方案下,工厂1都不会使用第二种原料,这是由工厂1所使用的SRT裂解炉对于原料的选择性较窄所决定的。

基于两厂合并的计算结果可以分析得到,为了降低能耗,11月的第二种原料被储存到了12月使用,而12月的3原料被提前到了11月使用。这是由于,第一、第二种原料为重质原料,第三种、第四种为轻质原料。而为了减少结焦带来的影响,工业上推荐先使用轻质原料再使用重质原料的切料顺序^[11],这在提高裂解炉传热效率的同时也降低了裂解设施的总能耗。

基于两厂的月度分析可以知道,为了降低能耗,1厂的1原料被调动到了2厂,3原料从1厂调动到了2厂,而4原料由2厂调动到了1厂。这说明,SRT裂解炉更适合处理轻质原料,且在轻质原料中

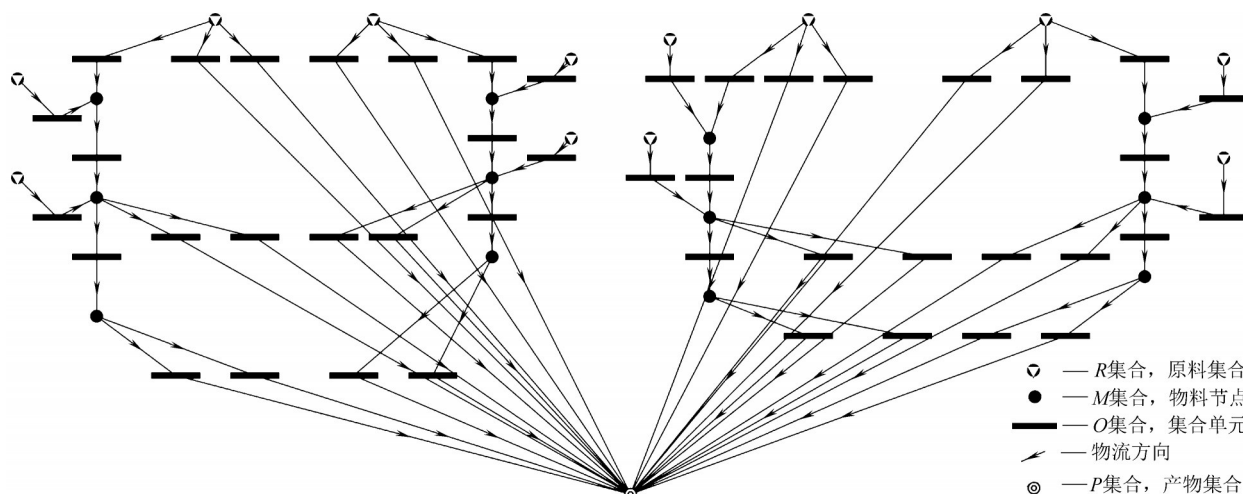


图2 超结构模型

Fig.2 Superstructure model of ethylene scheduling

更适合4原料,而2厂对于各类原料加工都有着较好的能效。

图3中的横坐标为图2和上文中叙述的44个操作单元,纵坐标为这44个操作单元的处理量。

由图3可以得到,非线性数学规划算法和基于图的超结构算法在求解时结果很相近,仅在第15单元存在误差,这种误差是由于基于P-graph的调度算法是从产物反向推算整个过程,而数学规划是从原料向后推算,向前推算主要考虑满足产量需求,而向后推算主要考虑优先满足原料供应,由此造成不同结果。并且,第15个单元为物料储存单元,没有能量消耗,两种求解方案所得最优解并无优劣。SGBP调度优化算法得到了大量的最优解和临近最优解。如图4和表4所示。

由图4可知,整个最优解及次优解分布呈明显的3段,即第1到第4个方案,第5到第29个方案,和第30到第36个方案。若其他条件无限制,最优方案为第1方案,这时系统在第1到第4个方

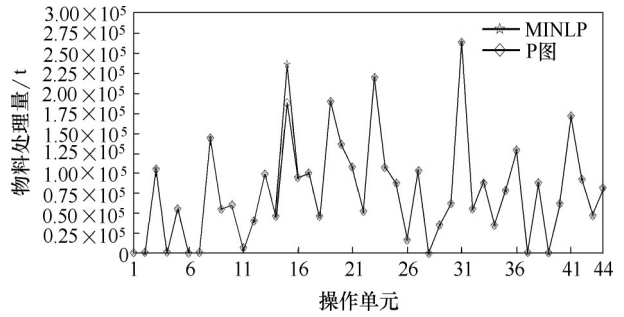


图3 具体优化方案对比

Fig.3 Comparison of optimization results

案的范围内具有稳定性。若其他条件限制使得最优且可行方案取在第二段,则系统在第5到第29个方案的范围内具有稳定性。若其他条件限制使得最优且可行方案取在第三段,则系统在第30到第36个方案范围内具有稳定性。

由表4知,SGBP调度优化算法得到了大量位于最优方案附近的可行次优方案,这些方案可以方便生产者在各种条件发生变化的情况下进行选择,从

表2 SGBP和MINLP的优化调度结果

Table 2 Different optimization results of SGBP and MINLP

工厂和原料		10月			11月			12月		
		未优化前	MINLP	SGBP最优	未优化前	MINLP	SGBP最优	未优化前	MINLP	SGBP最优
工厂1(696 kt/a, SRT—IV裂解炉)	原料1/t	16916	0	0	14414	17297	17297	17345	0	0
	原料2/t	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	原料3/t	120641	144769	144769	161343	47768	47768	142594	171113	171113
	原料4/t	50620	60744	60744	29572	35486	35486	39865	47838	47838
	能耗/GJ	14915967	1772060	1772060	1634138	611868	611868	1634138	611868	611868
工厂2(1126 kt/a, CBL裂解炉裂解炉)	原料1/t	89209	106125	106125	85620	82737	82737	90224	107569	107569
	原料2/t	55420	55420	55420	46383	35980	35980	52014	62417	62417
	原料3/t	79907	55778.8	55779	75379	90456	90456	77224	92669	92669
	原料4/t	55820	5160	5160	65564	78677	78677	67679	81215	81215
	能耗/GJ	1996976	1719402	1719402	1946995	1992970	1992970	1946995	1992970	1992970
两工厂总计 (1818 kt/a)	原料1/t	106125	106125	106125	100034	100034	100034	107569	107569	107569
	原料2/t	55420	55420	55420	46383	35980	35980	52014	62417	62417
	原料3/t	200548	200548	200548	236722	138224	138224	219818	263782	263782
	原料4/t	106440	65904	65904	95136	114163	114163	107544	129053	129053
	能耗/GJ	16912943	3491462	3491462	3581133	2604838	2604838	3581133	2604838	2604838

表3 SGBP和MINLP的月度合计优化调度结果

Table 3 Different optimization monthly total results of SGBP and MINLP

算法	工厂1					工厂2				
	原料1/t	原料2/t	原料3/t	原料4/t	能耗/GJ	原料1/t	原料2/t	原料3/t	原料4/t	能耗/GJ
未优化前	48675	0	424578	120057	18184243	265053	153817	232510	189063	5890966
MINLP	17297	0	363650	144068	2995796	296431	153817	238904	165052	5705342
SGBP	17297	0	363650	144068	2995796	296431	153817	238904	165052	5705342

表 4 临近最优解

Table 4 Near-best results

编号	单位产量能耗/ (GJ/t)	节能效果/%	编号	单位产量能耗/ (GJ/t)	节能效果/%	编号	单位产量能耗/ (GJ/t)	节能效果/%
1	21.13627	5.334107	13	21.18763	5.104044	25	21.20864	5.009969
2	21.13855	5.323861	14	21.19096	5.089141	26	21.20926	5.007175
3	21.13959	5.319204	15	21.19491	5.071444	27	21.21176	4.995998
4	21.14188	5.308958	16	21.20115	5.043501	28	21.213	4.990409
5	21.1554	5.248415	17	21.20302	5.035118	29	21.21425	4.984821
6	21.16788	5.19253	18	21.20344	5.033255	30	21.23068	4.911238
7	21.1712	5.177627	19	21.20448	5.028598	31	21.23401	4.896335
8	21.17474	5.161792	20	21.20552	5.023941	32	21.23692	4.883295
9	21.17807	5.146889	21	21.20614	5.021146	33	21.2442	4.850695
10	21.18368	5.121741	22	21.20635	5.020215	34	21.24877	4.830203
11	21.18389	5.120809	23	21.20676	5.018352	35	21.25064	4.82182
12	21.16788	5.19253	24	21.20843	5.010901	36	21.25356	4.80878

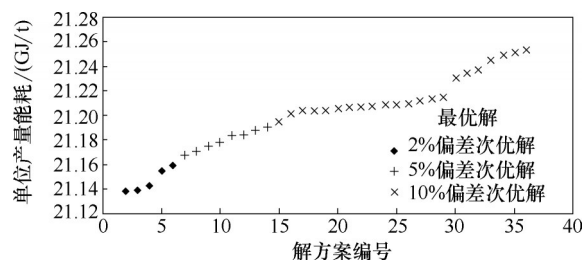


图 4 SGBP算法得到的最优解与次优解集

Fig.4 Best and near-best result obtained from SGBP algorithm

而更好地指导生产。其中,以与最优解优化效果的相对偏差计算,最优解 2% 偏差内的临近最优解有 5 个,5% 偏差内的临近最优解 8 个,10% 偏差内的临近最优解 22 个。

4 结 论

在化工生产过程中,原料的优化配置是实现生产高效率、高效益、低能耗排放的源头。现有生产的原料配置基本根据工厂附近能源运输及生产情况确定,远未达到优化排产。为此,提出以乙烯裂解过程为对象,对具有多种进料的多工厂组合的原料调度问题进行了建模研究,通过提出的 SGBP 调度算法进行了建模和优化,模型充分考虑到了以往模型的关键因素和生产实际,优化方法既得到了最优方案,又得到了大量次优方案,可以为指导生产提供具有实际可操作性的灵活的最优与次优方案集。

参考文献

- [1] Sadrameli S M. Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: a state-of-the-art review(I): Thermal cracking review[J]. Fuel, 2015, **140**: 102-115.
- [2] Zhang L, Liu J. Review of PetroChina's ethylene production in 2012[J]. Ethylene Industry, 2013, **25**: 7-10.
- [3] 周书恒, 杜文莉. 基于迁移学习的裂解炉产率建模[J]. 化工学报, 2014, **65**(12): 4921-4928.
Zhou S H, Du S L. Modeling of ethylene cracking furnace yields based on transfer learning[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(12): 4921-4928.
- [4] Nakamura D. Ethylene capacity rising, margins continue to suffer [J]. Oil & Gas Journal, 2012, **100**: 66-66.
- [5] Han Y M, Geng Z Q, Zhu Q X. Energy optimization and prediction of complex petrochemical industries using an improved artificial neural network approach integrating data envelopment analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2016, **124**: 73-83.
- [6] Geng Z, Yang X, Han Y, et al. Energy optimization and analysis modeling based on extreme learning machine integrated index decomposition analysis: application to complex chemical processes [J]. Energy, 2017, **120**: 67-78.
- [7] Geng Z, Qin L, Han Y, et al. Energy saving and prediction modeling of petrochemical industries: a novel ELM based on FAHP[J]. Energy, 2017, **122**: 350-362.
- [8] 刘时涛, 王宏刚, 钱锋, 等. SL- II 型工业乙烯裂解炉内燃烧传热与裂解反应的耦合模拟[J]. 化工学报, 2011, **62**(5): 1308-1317.
Liu S T, Wang H G, Qian F, et al. Coupled simulation of combustion with heat transfer and cracking reaction in SL- II industrial ethylene pyrolyzer[J]. CIESC Journal, 2011, **62**(5): 1308-1317.

- [9] Liu C, Zhang J, Xu Q, et al. Cyclic scheduling for best profitability of industrial cracking furnace system[J]. Computers & Chemical Engineering, 2011, **34**: 544–554.
- [10] Zhao C, Liu C, Qiang X. Cyclic scheduling for ethylene cracking furnace system with consideration of secondary ethane cracking[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2010, **49**: 5765–5774.
- [11] 商保鹏, 杜文莉, 金阳坤, 等. 考虑切料过程的乙烯裂解炉炉群调度建模与优化[J]. 化工学报, 2013, **64**(12): 4304–4312.
- Shang B P, Du W L, Jin Y K, et al. Modeling and optimization for ethylene cracking furnace systems scheduling with consideration of changing feedstock[J]. CIESC Journal, 2013, **64**(12): 4304–4312.
- [12] 康丽霞, 张燕蓉, 唐亚哲, 等. 基于GPU加速求解MINLP问题的SQP并行算法[J]. 化工学报, 2012, **63**(11): 3597–3601.
- Kang L X, Zhang Y R, Tang Y Z, et al. Paralleled SQP algorithm for solution of MINLP problems based on GPU acceleration[J]. CIESC Journal, 2012, **63**(11): 3597–3601.
- [13] Chen Q, Grossmann I E. Recent developments and challenges in optimization-based process synthesis[J]. Annual Review of Chemical & Biomolecular Engineering, 2017, **8**: 249–249.
- [14] Tan R R, Aviso K B, Foo D C Y. P-graph and Monte Carlo simulation approach to planning carbon management networks[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, **106**: 872–882.
- [15] 许晓慧, 宋海华, 于兰平, 等. 加速分支定界算法在化工过程合成中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2011, **28**(4): 451–457.
- Xu X H, Song H H, Yu L P, et al. Application of accelerated branch and bound algorithm in chemical process synthesis[J]. Computer and Applied Chemistry, 2011, **28**(4): 421–457.
- [16] Díaz-Alvarado F A, Miranda-Pérez J, Grossmann I E. Search for reaction pathways with P-graphs and reaction blocks: methanation of carbon dioxide with hydrogen[J]. Journal of Mathematical Chemistry, 2017, **56**: 1011–1102.
- [17] Aviso K B, Lee J Y, Dulatre J C, et al. A P-graph model for multi-period optimization of sustainable energy systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **161**: 1338–1351.
- [18] Lam H L. Extended P-graph applications in supply chain and process network synthesis[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2013, **2**: 475–486.
- [19] Voll P, Jennings M, Hennen M, et al. The optimum is not enough: a near-optimal solution paradigm for energy systems synthesis[J]. Energy, 2015, **82**: 446–456.
- [20] Tan R R, Benjamin M F D, Cayamanda C D, et al. P-graph approach to optimizing crisis operations in an industrial complex[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, **55**: 3467–3477.
- [21] Friedler F, Tarján K, Huang Y W, et al. Graph-theoretic approach to process synthesis: axioms and theorems[J]. Chemical Engineering Science, 1992, **47**: 1973–1988.
- [22] Friedler F, Tarjan K, Huang Y W, et al. Graph-theoretic approach to process synthesis: polynomial algorithm for maximal structure generation[J]. Computers & Chemical Engineering, 1993, **17**: 929–942.
- [23] Strouvalis A M, Heckl I, Friedler F, et al. An accelerated branch-and-bound algorithm for assignment problems of utility systems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2002, **26**: 617–630.
- [24] 王松汉, 何细藕. 乙烯工艺与技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- Wang S H, He X O. Ethylene Process and Technology[M]. China. China Petrochemical Press, 2012.
- [25] Gnanalingam. Studies in process synthesis(I): Branch and bound strategy with list techniques for the synthesis of separation schemes[J]. Chemical Engineering Science, 2015, **30**: 963–972.
- [26] Harjunkoski I, Maravelias C T, Bongers P, et al. Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, **62**: 161–193.
- [27] Andrecovich M J, Westerberg A W. An MILP formulation for heat-integrated distillation sequence synthesis[J]. AIChE Journal, 2010, **31**: 1461–1474.
- [28] Wu W, Henao C A, Maravelias C T. A superstructure representation, generation, and modeling framework for chemical process synthesis[J]. AIChE Journal, 2016, **62**: 3199–3214.
- [29] 曹健, 牟鹏, 耿志强, 等. 工业系统超结构模型应用研究进展[J]. 化工学报, 2017, **68**(3): 801–810.
- Cao J, Mou P, Geng Z Q, et al. Research progress and application of superstructure model for industrial systems[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(3): 801–810.
- [30] García-Ojeda J C, Bertok B, Friedler F, et al. Building-evacuation-route planning *via* time-expanded process-network synthesis[J]. Fire Safety Journal, 2013, **61**: 338–347.