

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171532

基于分片线性逼近的聚氯乙烯生产计划优化分解算法

高小永^{1,4}, 冯振辉², 王宇红², 黄德先³

(¹ 中国石油大学(北京)海洋工程研究院, 北京 102249; ² 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; ³ 清华大学自动化系, 北京 100084; ⁴ 中国石油大学(北京)自动化系, 北京 102249)

摘要: 聚氯乙烯全流程生产过程计划优化往往描述为复杂 MINLP 模型, 求解难度非常大, 为此引入分片线性技术逼近实际生产中的非线性特征, 建立基于 HH 的 MILP 模型, 进一步提出一种基于离线层级模型的分解算法来加速求解过程: 第一层在对生产设备以最优能耗点进行层级划分得到离线层级模型的基础上优化一个等价 MILP 问题, 确定表征设备操作状态的二值变量; 第二层以 HH 模型为基础, 在二值变量确定的情况下, 代入计划优化模型调整设备的工作点, 最终确定模型的最优操作决策方案。最后, 以一个实际工厂规模的案例来验证模型和算法的有效性, 结果表明本算法在基本不损失优化结果性能的前提下可以大大提高求解效率, 缩短求解时间达 99% 以上。

关键词: 系统工程; 优化; 模型简化; 分片线性; 分解算法

中图分类号: TP 29

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 03—0953—09

Decomposition algorithm for PVC plant planning optimization based on piecewise linear approximation

GAO Xiaoyong^{1,4}, FENG Zhenhui², WANG Yuhong², HUANG Dexian³

(¹Institute for Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; ²School of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; ³Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ⁴Department of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In the previous work, the multiperiod planning optimization model of the whole production process has been presented. Due to the high energy consumption characteristics of PVC produced by calcium carbide method, the piecewise linear model to approximate the nonlinear items in real process was introduced and a mixed integer linear programming (MILP) model was established. However, it is difficult to solve it due to the large scale and the complex nonconvexity. Thus, a hierarchical decomposition algorithm is proposed to accelerate the computation progress. The problem is divided into two levels, in the first level, the operating states of equipment are optimized, which would be the hard-to-solve binary variables in the plantwide planning model; in the second level, the determined binary variables are embedded into the plantwide planning model, and thus a reduced scale scheduling optimization is executed. A case study was provided to verify the effectiveness of the proposed algorithm. Computational results show that the proposed algorithm can accelerate the computation greatly and the production costs are close to or even better than those given in the previous work.

2017-11-17 收到初稿, 2017-11-20 收到修改稿。

联系人: 黄德先。第一作者: 高小永 (1985—), 男, 博士, 助理研究员。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21706282, 61673236, 61273039); 中国石油大学(北京)科研基金项目 (2462017YJRC028)。

Received date: 2017-11-17.

Corresponding author: Prof. HUANG Dexian, huangdx@tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21706282, 61673236, 61273039) and the Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (2462017YJRC028).

Key words: systems engineering; optimization; model reduction; piecewise linear; decomposition algorithm

引 言

聚氯乙烯是由氯乙烯单体(VCM)聚合而成的,是应用最为广泛的塑料品种之一,在工业、建筑、农业、日常生活、包装、电力、公用事业等领域均有广泛应用^[1]。PVC 的生产主要有两种制备工艺:一是电石法,主要的生产原料是电石、煤炭和原盐;二是乙烯法,主要原料是石油。我国主要采用电石法,此法能耗大,成本高,工艺较复杂,涉及批量过程与连续过程,对生产操作要求高。粗放式管理易造成大量的资源浪费,生产过程优化势在必行^[2]。在聚氯乙烯行业节能降耗以及优化方面,国内外学术界和工业界都做了很多有意义的工作,除了利用新技术与新工艺改造传统技术和设备等工艺方面以及改进工艺降低单耗、强化废弃物循环利用等^[3-5],还利用先进的信息技术和计算机技术,结合企业丰富的生产经验,疏通瓶颈,优化操作,革新工艺,最大可能地实现生产过程的节能降耗。北京化工大学李群生教授课题组^[6-8]针对 PVC 分离提纯单元普遍存在分离效率低、产品纯度差、能耗高、操作不稳定等问题,从工艺流程、能量集成、过程控制 3 个方面着手,在模拟分析基础上进行能量集成优化以及动态控制,得到最优工艺参数、换热网络和控制方案,取得了提高产品质量、节能增效和高附加值产品回收等显著效果。青岛科技大学郑世清教授团队^[9]利用过程技术,深入研究了电石法 PVC 生产过程的乙炔发生过程、氯乙烯合成过程和氯乙烯聚合过程,采用过程模拟和分析、操作参数优化与节能降耗的应用研究,并提出了系统集成的观点。浙江工业大学潘海天教授课题组^[10]提出混合核函数偏最小二乘法(K2PLS)与人工神经网络(ANN)相结合,构建软测量模型预测工艺变量与质量指标之间的定量关系;利用软测量技术和非线性规划方法,求解得到符合质量指标约束的最佳操作变量,并应用在氯乙烯聚合过程质量指标控制中实施质量优化控制策略,实现了聚氯乙烯质量指标的平稳控制,降低了生产消耗。所有这些研究均致力于单装置工况参数的操作优化层面,没有做到全流程工艺优化。

计划优化作为一种能够实现资源优化配置的有效方式,日益引起学术界和工业界的广泛关注。生产计划作为企业生产经营规划的重要手段,对企

业的正常运转、效益高低都有十分重要的影响。对 PVC 的优化之前主要集中于调度方面,包括聚合过程调度以及后来的全流程生产过程调度等,计划优化的成果较少^[11-13]。在之前的工作中,对 PVC 全流程生产过程计划优化已做了一定的研究,建立了全流程的集成 MINLP 模型,实现了全厂范围的多周期计划优化,并在实际仿真案例中验证了所提模型的有效性^[14-15]。然而由于规模太大,该模型不易求解。近年来,针对大规模的 MINLP 问题的研究成果越来越多。如 Jaffal 等^[16]提出的 K-best 分支定界技术,Aras 等^[17]的混合 BNB 方法,以及改进的粒子群算法^[18]。另外,外逼近算法、进化算法等也被广泛用于解决此类问题^[19-21]。尽管有很多有价值的研究成果,但在实际 PVC 流程优化中应对大规模混合整数非线性规划(MINLP)问题仍然是亟待解决的重大难题。由于规模过于庞大,现有算法的收敛速度都难以满足实际需求。考虑到分片线性技术在处理非线性问题方面的优越性,用 PWL 技术替代模型中难以解决的非线性成为解决此类问题的有效途径。PWL 技术已有很多研究成果,如链接超平面(HH)模型、广义链接超平面(GHH)模型、广义分段线性函数以及自适应链接超平面(AHH)模型等^[22-27],且在优化控制中有应用的尝试^[28]。

Tian 等^[29]在研究 PVC 生产过程调度优化时提出了一种按流程分解的三阶段分别优化算法,并针对电石生产过程大量 0-1 整型变量的情况提出了一种离线层级替代模型,取得了较好的优化求解效果。受此启发,本文引入 PWL 技术,对原始 MINLP 模型中的非线性项用 HH 模型逼近,得到改进的 MILP 模型以规避非线性模型带来的求解困难,并进一步对并行设备众多的工艺过程引入层级描述模型;在此基础上提出一种启发式分解算法,利用离线模型将集成优化问题分为两层,加速求解过程。采用实际案例以验证所提算法的有效性。

1 问题描述

电石法 PVC 生产过程的典型流程如图 1 所示,图中包含两个系统:公用工程系统与物料处理系统。在公用系统中主要考虑供电系统,电力供应来自厂内热电联产(CHP)机组及国家电网两部分。物料处理系统一般分为两部分:连续操作的氯乙烯生产过程和间歇聚合过程。在连续 VCM 生产过程中,

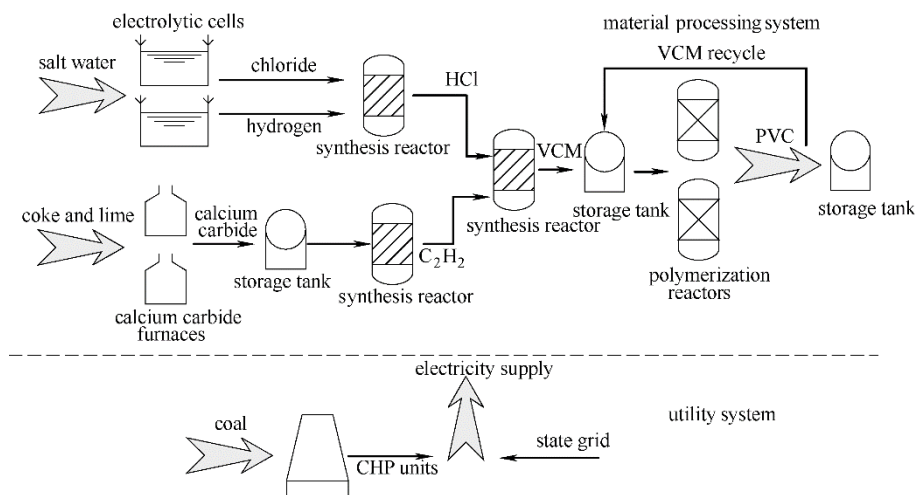


图1 电石法 PVC 的生产流程

Fig.1 Flowchart of PVC plant by calcium carbide

氯气和氢气在电解池中产生，而后燃烧合成氯化氢（HCl）。电石在电石炉中产生，并在反应釜中水解生成乙炔（ C_2H_2 ）。随后，HCl 和 C_2H_2 以一定比例反应生成 VCM 单体。最后 VCM 单体在聚合釜中聚合，在不同条件下产生不同等级的 PVC 产品。如图 2 所示，由于系统中固有的诸多非线性关系，如生产设备的能耗和供电系统的煤耗特性等，使得依照生产系统建立的计划模型是一个大规模的混合整数非线性规划问题，在之前的工作中已建立了对应的计划模型^[14-15]。然而大规模的非线性会导致此优化问题难以快速求解得到较好的决策方案，且易陷入局部极值难以摆脱，求解间隙值较大难以用于实际生产。

本文引入分片线性模型以替代模型中的各非线性项，在建模阶段直接避免非线性，建立基于 PWL 的 MILP 模型，并在此模型的基础上提出层级分解算法进一步加速求解过程。

2 分片线性方法及改进的 MILP 模型

为了加快求解速度，引入分片线性逼近复杂非线性项，直接在建模环节避免非线性带来的求解困难。分片线性逼近具有在保证局部线性的情况下可以以任意精度逼近任意非线性函数的优点，可以很好地应用于 PVC 的生产过程建模。在本文中，采用的分片线性技术为链接超平面模型。模型参数的训练方法采用集成算法^[30]和交叉验证相结合。替代原模型中非线性特性后将 HH 模型嵌入可得到改进的 MILP 模型，一般流程如图 3 所示。

分析 PVC 的生产过程，在之前的工作中已建立了原始 MINLP 模型，其中非线性主要集中于能量消耗阶段和电力供应阶段。而在实际系统中，电力消耗主要包括电石炉和电解槽两部分，电力消耗与氯气和电石的生产速率的关系曲线如图 2 所示，分别用函数 $f_u(P_{cl2,u,w})$ 与 $f_u(P_{cac2,u,w})$ 表示。因此，全厂的电耗 ele_w 如式(1)所示。其中 $PT_{cl2,u,w}$ 和 $PT_{cac2,u,w}$ 为氯气和电石的产量，关系可分别表述为式(2)和式(3)，且约束为式(4)和式(5)。 f_u 为非线性函数， $Z_{u,w}$ 为设备的工作状态，是二值变量，而 $T_{\{cac2,cl2\}}$ 为生产时间， $P_{\{cac2,cl2\},u,w}$ 是生产速率。

$$ele_w = \sum_{u \in E} f_u(P_{cl2,u,w}) PT_{cl2,u,w} + \sum_{u \in G} f_u(P_{cac2,u,w}) PT_{cac2,u,w} \quad (1)$$

$$\forall w \in W$$

$$P_{cl2,u,w} = Z_{u,w} P_{cl2,u,w} T_{cl2} \quad \forall u \in E, w \in W \quad (2)$$

$$PT_{cac2,u,w} = Z_{u,w} P_{cac2,u,w} T_{cac2} \quad \forall u \in G, w \in W \quad (3)$$

$$P_{cl2,u,w}^{\min} Z_{u,w} \leq P_{cl2,u,w} \leq P_{cl2,u,w}^{\max} Z_{u,w} \quad \forall u \in E, w \in W \quad (4)$$

$$P_{cac2,u,w}^{\min} Z_{u,w} \leq P_{cac2,u,w} \leq P_{cac2,u,w}^{\max} Z_{u,w} \quad \forall u \in G, w \in W \quad (5)$$

本节考虑的生产系统的非线性模型，完整的模型可参考文献[14-15]。现在，用 HH 模型对非线性进行替换。

HH 模型是一种典型的连续分片线性（CPWL）模型，其中基函数定义为： $\max(0, \mathbf{x}^T \boldsymbol{\theta})$ 且 $\mathbf{x} = [1 \ x_1 \ x_n]$ ，是基函数的参数向量，完整的 HH 模型定义为

$$f(\mathbf{x} | \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{x}^T \boldsymbol{\theta}_0 + \sum_{i=1}^M c_i \max(0, \mathbf{x}^T \boldsymbol{\theta}_i)$$

其中， M 为链接函数的个数， $\boldsymbol{\theta}_i$ 为第 i 个链接函数的参数向量，经过训练可逼近上述非线性函数 $f_u(P_{cl2,u,w})$ 、 $f_u(P_{cac2,u,w})$ 。将训练得到 HH 模型嵌入到原

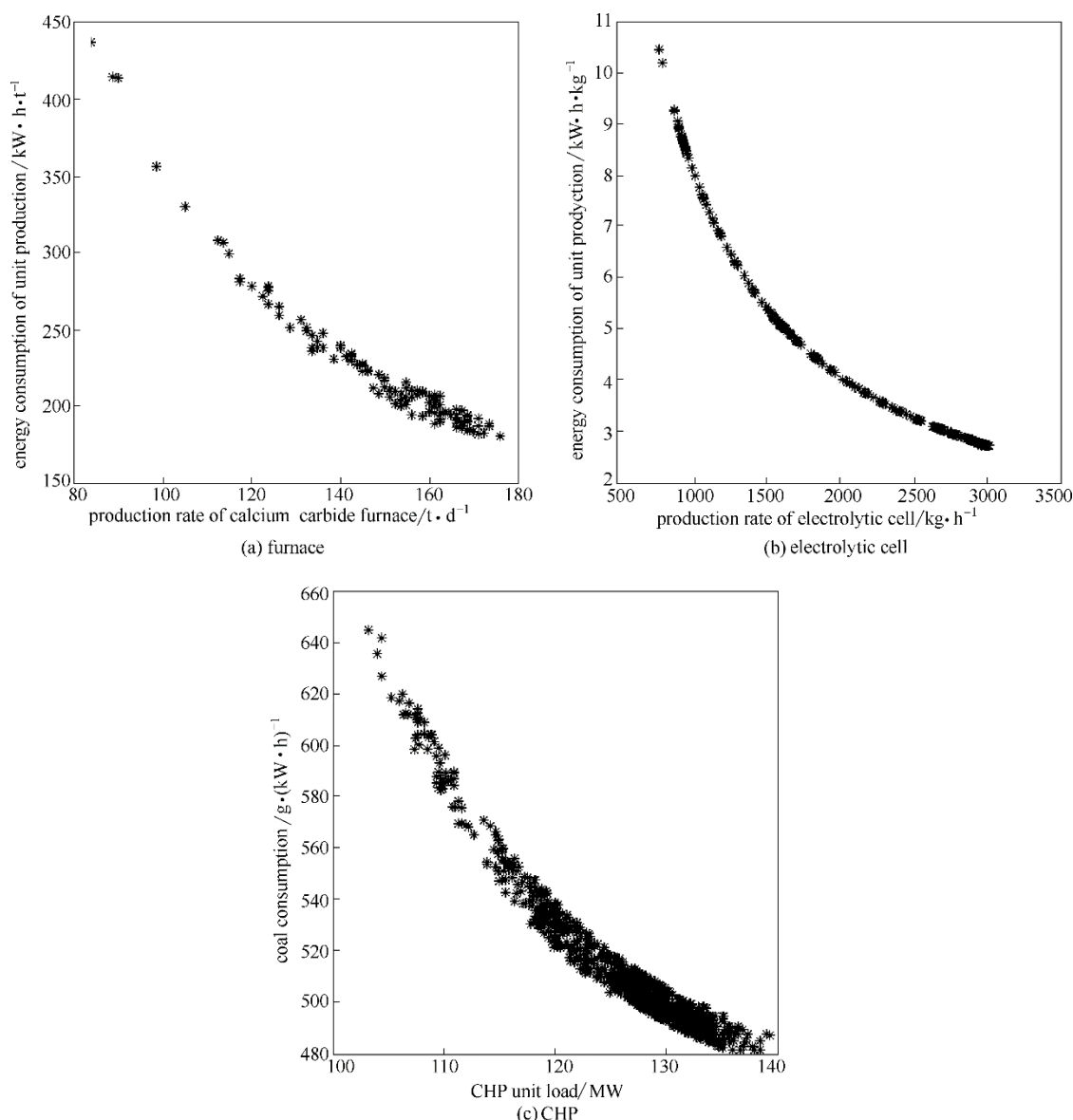


图 2 聚氯乙烯生产过程呈现出的非线性特性

Fig.2 Nonlinearities in PVC process

始 MINLP 模型中可得到一个新的 MILP 模型如下

$$ele_w = \sum_{u \in E} F_u(P_{cl2,u,w})Z_{u,w}T_{cl2} + \sum_{u \in G} F_u(P_{cac2,u,w})Z_{u,w}T_{cac2} \quad \forall w \in W \quad (6)$$

其中, F_u 是由 HH 模型近似的分片线性函数。逼近结果如图 4 和图 5 所示。电力供应系统中 CHP 机组处理方式类似, 结果如图 6 所示。

3 基于 PWL 的层级分解算法

基于第 2 节提出的 PWL 建模方法, 进一步提出层级分解算法。在之前的调度优化问题研究中对电石炉进行过层级划分^[29], 并将模型分为 3 部分依

次求解。考虑到计划问题与调度的不同, 提出一种新的分解算法。分解算法的基本思路是将复杂的优化问题, 分解为 MILP 与 LP 问题分别进行求解, 如图 7 所示。在优化中, 主要的决策变量为表征设备操作状态的二值变量与设备负荷的连续变量, 两种变量同时优化, 给模型求解带来很大的困难。因此考虑将二值变量与连续变量分开优化, 如图 7 所示将原模型分为两层, 上层为一个小规模的 MILP 模型, 对其求解后取得准确的二值变量, 代入下层的大规模 LP 模型, 即利用 MILP 模型优化得到二值变量, 再代入对原问题进行 LP 模型优化, 得到连续变量。

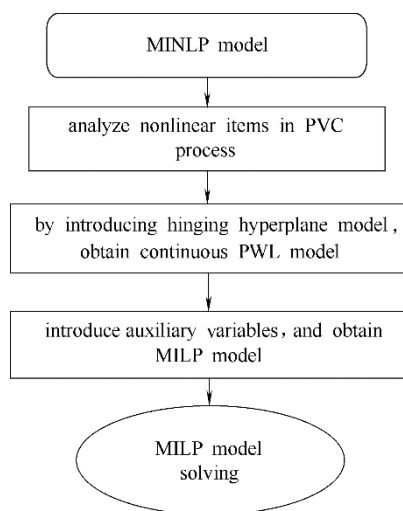


图3 基于分片线性的 MILP 模型流程

Fig.3 MILP model formulation based on piecewise linear

3.1 层级划分

按照先前研究思路^[29],在第一层中对电石炉和电解槽以最优工作点进行层级划分,利用历史收集数据建立离线模型得到准确的分层,CHP 机组则用分片线性模型进行替代以剔除非线性环节。在离线模型中,根据“优先选用能耗最低设备”的原则,对设备进行排序,选用最优速率下对应的最优能耗,确定出负荷层级与能耗层级。根据不同的负荷需求,确定出设备运行的负荷层级与能耗层级,从而得到设备的操作状态与工作负荷。

计算出电石炉、电解槽的负荷层级与能耗层级后,可以替换掉模型中电石炉、电解槽的生产速率与能耗的复杂函数关系,减小模型的规模。进行优化时,负荷层级与能耗层级是固定的参数,根据需

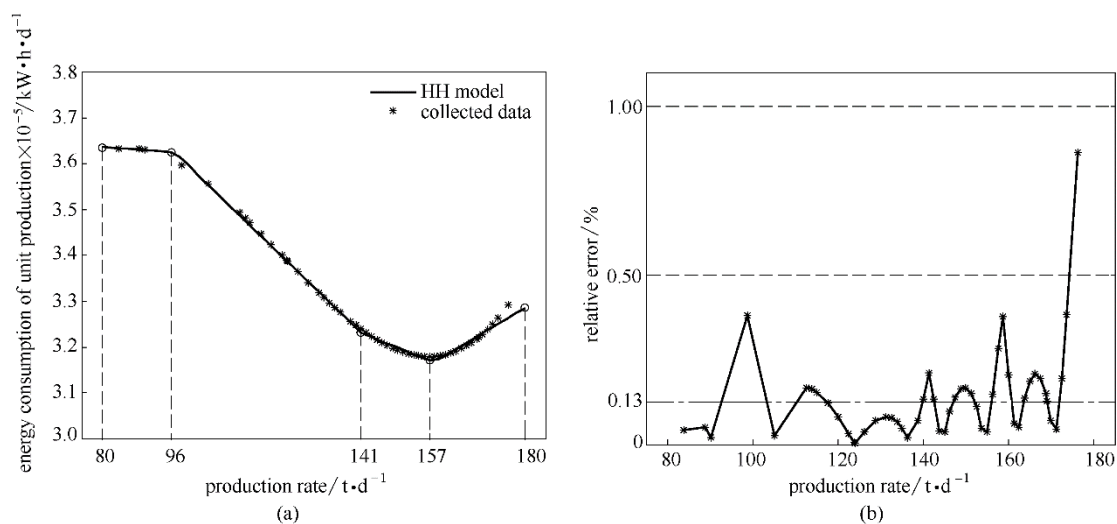


图4 电石炉电耗 PWL 逼近曲线及相对误差

Fig. 4 PWL curve and relative error for furnace electricity

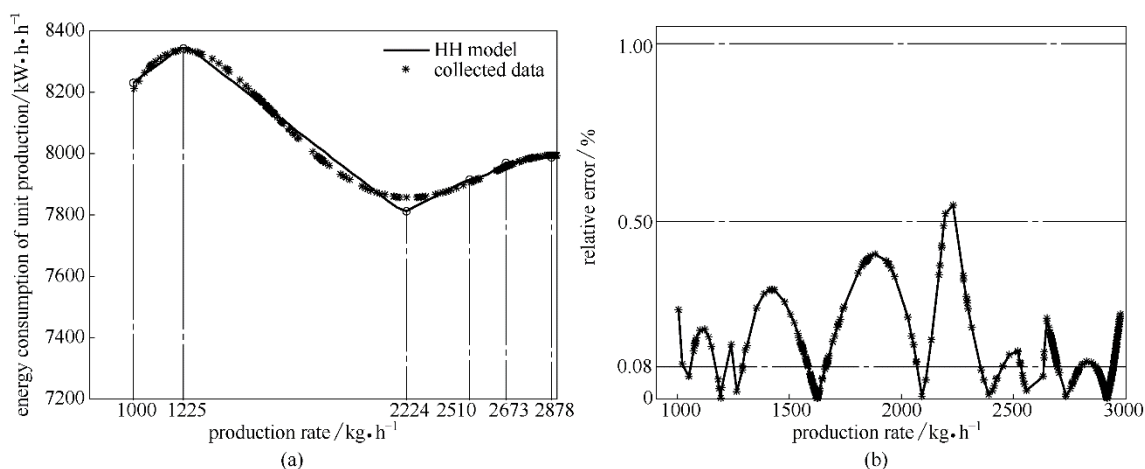


图5 电解槽电耗 PWL 逼近曲线及相对误差

Fig. 5 PWL curve and relative error for cell electricity

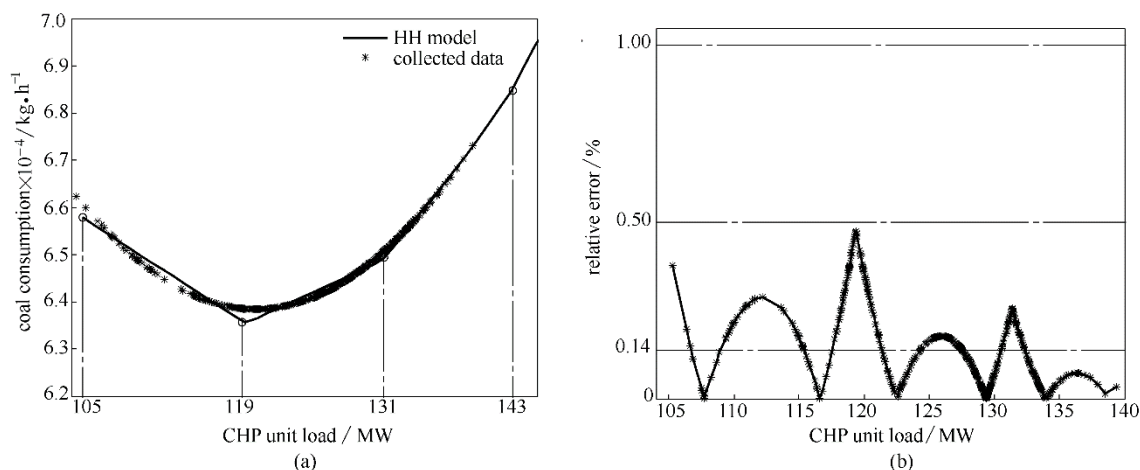


图 6 CHP 机组煤耗 PWL 逼近曲线及相对误差

Fig. 6 PWL curve and relative error for CHP's coal consumption

求优化选择电石炉、电解槽工作负荷层级与能耗层级,从而得到表征所有电石炉、电解槽工作状态的二值变量。只要设备的固有属性不变,上述层级划分就不需要改动。由于 CHP 机组设备较少,采用最优工作点进行划分时往往难以满足生产需求,故直接用 HH 模型。

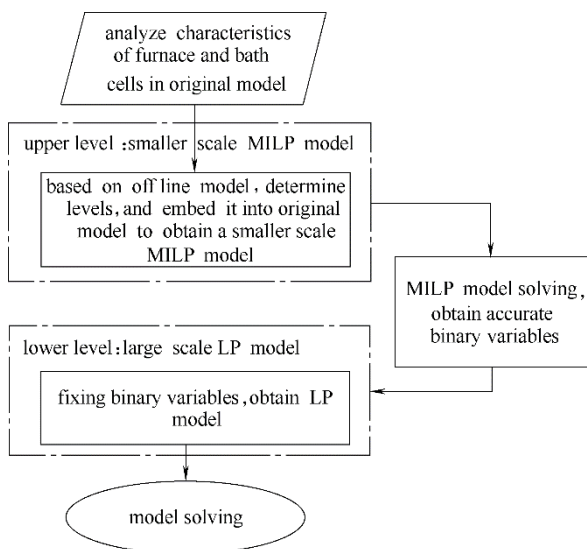


图 7 分解算法基本思路

Fig. 7 Basic idea of decomposition algorithm

3.2 模型求解

针对电石炉、电解槽分别进行了层级划分,因此原来模型中两种设备的生产约束与能耗约束均需要进行修正,下述约束中电石炉与电解槽简称为设备。各层级的负荷与能耗分别如式(7)、式(8)所示。

其中, fc 是层级的编号, PT_u^{optimal} 为设备 u 一周

内最优能耗下的生产量, $Lc_{fc,u}$ 表示层级 fc 对应设备 u 的负荷,即为此层级所有设备一周内的最优生产量之和。 EC_u^{optimal} 为设备 u 一周内最优能耗, $ECT_{fc,u}$ 表示层级 fc 对应设备 u 的能耗,即为此层级所有设备一周内的最优能耗之和。引入二值变量 $bc_{fc,u,w}$, 值为 1 表示设备工作在 fc 层级上,约束如式(9)所示。则每个计划周期内的生产量如式(10)所示,能耗如式(11)所示。

$$Lc_{fc,u} = \sum_{u \in FA_{fc}} PT_u^{\text{optimal}} \quad (7)$$

$$ECP_{fc,u} = \sum_{u \in FA_{fc}} EC_u^{\text{optimal}} \quad (8)$$

$$\sum_{fc} bc_{fc,u,w} \leq 1 \quad \forall w \in W, u \in G \quad (9)$$

$$PT_{u,w} = \sum_{fc} bc_{fc,u,w} Lc_{fc,u} \quad \forall w \in W, u \in G \quad (10)$$

$$EC_{u,w} = \sum_{fc} bc_{fc,u,w} ECP_{fc,u} \quad \forall w \in W, u \in G \quad (11)$$

基于层级划分对 MILP 模型进行优化,得到设备的启停工作状态,即得到表征每台设备操作状态的二值变量;基于之前的 PWL 模型,嵌入二值变量将 MILP 问题转化为 LP 问题进行再次求解,调整设备的最终工作负荷。综上所述,将分片线性逼近与分层求解模型算法相结合所得的启发式优化方法能够较好地解决工业生产中的全厂范围大规模计划问题,总结其流程如图 8 所示。

4 案例分析

考虑案例工厂包括 20 个聚合釜, 20 个电石炉, 24 组电解槽, 计划周期长度为 12 周, 5 种不同类型的 PVC 产品需求量如表 1 所示。

运用 GAMS win 32 24.0.2 平台求解, 利用 CPLEX

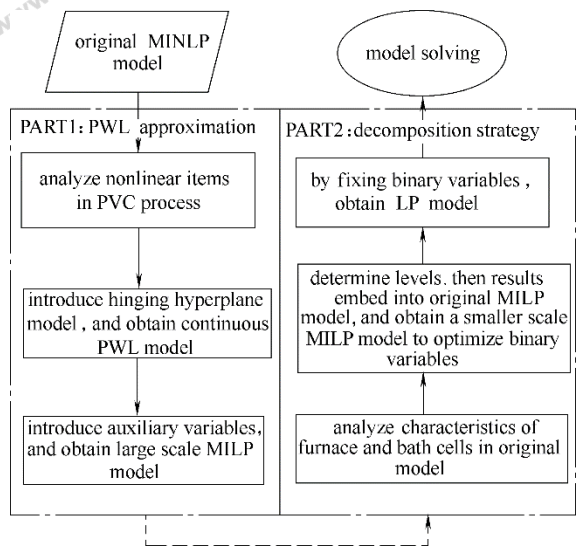


图 8 基于 PWL 的分解算法流程
Fig.8 PWL based decomposition algorithm

求解器。计算机配置为 Intel Xeon CPU, 3.5 GHz, 内存 64 GB。算法设置的终止准则为: MILP 模型求解时间限制为 1000 s, 求解间隙为 6%; NLP 模型求解时间为 10 s, 求解间隙为 0.1%。表 2 为两层算法的模型统计。由表 2 可知, 第一层 MILP 模型规模较小, 便于求解; 第二层 LP 模型规模较大, 但由于 LP 问题易于求解, 所以求解时间远少于第一层。

表 3 为不同方法模型求解结果比较。从表中可以看出所提出的基于 PWL 的层级分解算法在运行时间上要比原 MINLP 模型缩短 99%以上, 总成本也低于原模型直接求解得到的成本。而与基于 PWL 的 MILP 模型整体优化求解方法相比, 分解后的算法求解速度显然更快, 求解时间由 2000 s 降至 104.6 s, 求解结果相差基本不大, 总成本分别为 156796000 元和 159958100 元。虽然得到的计划优化的结果不是全局最优的, 但是在更小的时间尺度内, 得到了优于直接求解 MINLP 的解, 此外, 混合整数规划采用稳定性好的成熟算法求解器, 考虑该

算法的稳定性, 可以调整订单需求及原料价格等参数重复求解, 进一步验证了其有效性和优越性。综上所述, 基于 PWL 的计划优化分解算法在实际工程应用中具有参考价值。

表 2 模型统计
Table 2 Model statistics

Level	Formula number	Discrete variables	Continuous variables	CPU time/s	GAP
1	2657	1944	1897	100	0.061
2	11202	3960	7014	4.6	0.001

表 3 结果比较
Table 3 Result comparison

Model	Cost/CNY	Absolute difference/CNY	Relative value	CPU time/s	Relative CPU time
MINLP	166392500	—	—	14400	—
PWL based MILP	156796000	9596500↓	5.76%↓	2000	86.1%↓
method in this paper	159958100	6435400↓	3.87%↓	104.6	99.3%↓

5 结 论

聚氯乙烯全流程计划优化是一个具有实际意义的大规模优化问题, 优化求解困难使之难以应用于工业实际。本文首先对实际生产过程在固有非线性环节进行 PWL 处理, 直接在建模阶段避免非线性, 基于 HH 模型建立了 MILP 的计划优化模型。并在此基础上提出了一种启发式分解算法, 将全流程计划优化为两层: 第一层优化设备的工作状态, 即模型中的二值变量; 在第二层, 将二值变量代入基于 PWL 的 MILP 模型, 得到 LP 模型, 然后再进行优化得到设备的具体操作负荷。通过相同的案例进行分析比较, 可以看出提出的分解算法在求解速度上大幅提高, 求解时间平均降低 99%。

符 号 说 明

E ——电解槽集合

表 1 案例需求
Table 1 Demands in cases

Item	PVC future demands in weeks/t											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	2100	1500	5500	2700	1500	4500	2500	2500	4000	3000	2700	1500
B	3500	2800	3000	1500	4900	1500	1500	3800	1500	2400	2500	3300
C	3200	2700	1500	6200	3700	1500	3900	2700	1500	4000	2200	3500
D	2700	2000	6000	4500	1500	1500	5800	1500	6500	1500	4400	5950
E	2700	3400	1500	2600	5000	6200	1500	3700	2000	2900	3400	1500

G ——电石炉集合
 u ——设备
 W ——计划时域
 w ——周次

References

- [1] 范红波, 刘东升. 浅谈电石法氯乙烯合成工艺水平对单体质量的影响[J]. 中国氯碱, 2012, (5): 1-3.
 FAN H B, LIU D S. Overview of influence of VCM synthesis process by calcium carbide method on monomer quality[J]. China Chlor-Alkali, 2012, (5): 1-3.
- [2] 展前唐. 电石法生产聚氯乙烯的安全研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, (22): 26.
 ZHAN Q T. Safety study of PVC by calcium carbide method[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, (22): 26.
- [3] 魏东, 李全胜. 电石法 PVC 清洁生产中的节能降耗[J]. 中国氯碱, 2007, (6): 36-38.
 WEI D, LI Q S. Energy efficiency and consumption decrease in PVC cleaning production by calcium carbide method[J]. China Chlor-Alkali, 2007, (6): 36-38.
- [4] 张新力, 宋晓玲, 刘中海, 等. 烧碱及电石法聚氯乙烯生产的工艺改进[J]. 中国氯碱, 2005, (10): 22-24.
 ZHANG X L, SONG X L, LIU Z H, *et al.* Development of production process of caustic soda and polyvinyl chloride by calcium carbide process[J]. China Chlor-Alkali, 2005, (10): 22-24.
- [5] 冯文军, 赵爱民, 王振方. 通过工艺改进降低电石单耗[J]. 聚氯乙烯, 2016, (10): 7-11.
 FENG W J, ZHAO A M, WANG Z F. Reduced consumption of calcium carbide through process improvement[J]. Polyvinyl Chloride, 2016, (10): 7-11.
- [6] 李玥, 李群生, 李春江, 等. 氯乙烯精馏过程模拟优化与节能降耗的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 19-23.
 LI Y, LI Q S, LI C J, *et al.* Simulation optimization and energy conservation in vinyl chloride distillation[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition), 2015, 42(5): 19-23.
- [7] 李群生, 于颖, 郭增昌. 氯乙烯精馏工艺流程的模拟计算及技术改造[J]. 石油化工, 2012, 41(7): 820-824.
 LI Q S, YU Y, GUO Z C. Simulation and revamp of vinyl chloride distillation process[J]. Petrochemical Technology, 2012, 41(7): 820-824.
- [8] 李群生, 郭凡, 任钟旗, 等. PVC 生产中氯乙烯精馏系统的研究及工业优化[J]. 现代化工, 2016, 36(12): 129-131.
 LI Q S, GUO F, REN Z Q, *et al.* Optimal design of vinyl chloride distillation system in PVC production[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(12): 129-131.
- [9] 杨霞, 罗代晏, 秦利涛, 等. 过程技术在全面提升电石法 PVC 工艺装置中的应用[J]. 中国氯碱, 2014, (7): 9-12.
 YANG X, LUO D Y, QIN L T, *et al.* Application of process technology on the overall promotion of the polyvinyl chloride industries by calcium carbide method[J]. China Chlor-Alkali, 2014, (7): 9-12.
- [10] 朱鹏飞, 夏陆岳, 潘海天. 基于软测量技术的间歇聚合过程质量控制[J]. 计算机与应用化学, 2015, (8): 959-963.
 ZHU P F, XIA L Y, PAN H T. Quality control for batch polymerization process based on soft sensor technology[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, (8): 959-963.
- [11] KANG M, KANG S, PARK S, *et al.* Integrated scheduling for polyvinyl chloride processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(16): 5729-5737.
- [12] 田妙苗, 江永亨, 黄德先. 聚氯乙烯生产过程全流程调度[J]. 化工学报, 2015, 66(1): 251-258.
 TIAN M M, JIANG Y H, HUANG D X. Integrated scheduling for polyvinyl chloride productive processes[J]. CIESC Journal, 2015, 66(1): 251-258.
- [13] TIAN M M, GAO X Y, JIANG Y H, *et al.* Plant-wide scheduling model for the typical PVC production by calcium carbide method[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(21): 6161-6174.
- [14] WANG Y, LIAN X, GAO X, *et al.* Multiperiod planning of a PVC plant for the optimization of process operation and energy consumption: an MINLP approach[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(48): 12430-12443.
- [15] 王宇红, 连雪, 高小永, 等. 基于离散时间描述的电石法聚氯乙烯生产的计划优化[J]. 化工进展, 2017, 36(5): 1597-1604.
 WANG Y H, LIAN X, GAO X Y, *et al.* Planning optimization of PVC production by calcium carbide method based on discrete time representation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(5): 1597-1604.
- [16] JAFFAL Y, NASSER Y, CORRE Y, *et al.* K-best branch and bound technique for the MINLP resource allocation in multi-user OFDM systems[C]//IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2015: 161-165.
- [17] ARAS Ö, BAYRAMOĞLU M. A MINLP study on shell and tube heat exchanger: hybrid branch and bound/meta-heuristics approaches[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(43): 14158-14170.
- [18] LUO Y, YUAN X, LIU Y. An improved PSO algorithm for solving non-convex NLP/MINLP problems with equality constraints[J]. Computers & Chemical Engineering, 2007, 31(3): 153-162.
- [19] COSTA L, OLIVEIRA P. Evolutionary algorithms approach to the solution of mixed integer non-linear programming problems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2001, 25(2/3): 257-266.
- [20] BERGAMINI M L, GROSSMANN I, SCENNA N, *et al.* An improved piecewise outer-approximation algorithm for the global optimization of MINLP models involving concave and bilinear terms[J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(3): 477-493.
- [21] DURAN M A, GROSSMAN I. An Outer-Approximation Algorithm for a Class of Mixed-Integer Nonlinear Programs[M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [22] BREIMAN L. Hinging hyperplanes for regression, classification and function approximation[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1993, 39(3): 999-1013.
- [23] LIN J N, XU H Q, UNBEHAUEN R. A generalization of canonical piecewise-linear functions[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Fundamental Theory & Applications, 1994, 41(4): 345-347.
- [24] WANG S, SUN X. Generalization of hinging hyperplanes[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2005, 51(12): 4425-4431.
- [25] XU J, HUANG X, WANG S. Adaptive hinging hyperplanes and its applications in dynamic system identification[J]. Automatica, 2009, 45(10): 2325-2332.
- [26] XU J, VAN DEN BOOM T J J, SCHUTTER B, *et al.* Irredundant

- lattice representations of continuous piecewise affine functions[J]. Automatica, 2016, **70**(8): 109-120.
- [27] XU J, VAN DEN BOOM T J J, SCHUTTER B, *et al.* Minimal conjunctive normal expression of continuous piecewise affine functions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, **61**(5): 1340-1345.
- [28] XU J, HUANG X, MU X, *et al.* Model predictive control based on adaptive hinging hyperplanes model[J]. Journal of Process Control, 2012, **22**(10): 1821-1931.
- [29] TIAN M M, GAO X Y, JIANG Y H, *et al.* A decomposition algorithm for the scheduling of typical polyvinyl chloride production by calcium carbide method[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, **55**(47): 12256-12267.
- [30] GAO X Y, JIANG Y H, HUANG D X. An integrated algorithm for hinging hyperplanes and its application in distillation process[C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, 2011: 5294-5298.