

研究论文

汽油调合调度优化

张冰剑, 华 贲, 陈清林

(华南理工大学强化传热与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 采用连续时间建模方法, 建立了一种新的汽油非线性调合和调度集成优化的混合整数非线性规划 (MINLP) 模型, 克服了当前在油品调合调度中采用线性调合模型或者将非线性调合过程和调度分开优化的缺陷。针对建立 MINLP 模型的特点, 将原 MINLP 问题转化为求解一系列的混合整数线性规划 (MILP) 模型, 避免了直接求解 MINLP 模型的复杂性。最后以某大型炼油企业为例, 验证了模型和算法的实用性。

关键词: 调合; 调度; 混合整数非线性规划; 连续时间; 优化

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 01-0168-08

Optimization of gasoline blending and scheduling in refinery complexes

ZHANG Bingjian, HUA Ben, CHEN Qinglin

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Gasoline blending and scheduling is the last and important operation in a refinery. It is also the last chance to improve the quality of products and to reduce the production costs. Firstly, a novel mixed integer nonlinear programming (MINLP) formulation based on continuous time representation, is presented in this paper. Gasoline blending and short-term scheduling are integrated in the proposed model to optimize blending and scheduling simultaneously, and a nonlinear blending model is employed to reduce the quality excess of gasoline products. Empirical knowledge and some effective sets are added to the model to reduce the model scale and to improve the solve performance. A novel algorithm for the presented model is proposed. A series of mixed integer linear programming (MILP) model is solved instead of solving the original MINLP problem directly. Finally, a real industrial example, provided by a refinery complex, is used to demonstrate the performance of the presented model and algorithm. The model can get the optimal results in a reasonable time, which is more profitable than the conventional or other methods.

Key words: blending; scheduling; MINLP; continuous time; optimization

引 言

炼油厂汽油罐区的生产任务主要有两个: 汽油调合和罐区调度。汽油调合和调度是处于炼油企业生产活动过程的最后一个环节, 它是提高企业产品

质量和降低生产成本的最后机会。

文献 [1-2] 采用连续时间建模方法建立了产品调合和调度的数学规划 MILP 模型, 该模型假设调合是按照固定配方进行的。文中对多种订单需求进行了计算, 说明模型在一定的范围内可以作为企

2005-10-29 收到初稿, 2006-02-15 收到修改稿。

联系人及第一作者: 张冰剑 (1978—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000026308)。

Received date: 2005-10-29.

Corresponding author: ZHANG Bingjian. **E-mail:** bjzhang@scut.edu.cn

Foundation item: supported by the Advanced Scientific Problems in High Efficient Energy Saving (G2000026308).

业决策的依据。文献 [3-4] 将汽油调合和调度分为两个层次，在计划层优化调合方案，在调度层按照计划层给定的调合配方方案和产量优化罐区和运输调度。文献 [5] 建立了包括柴油非线性调合的炼油企业生产计划模型，并且采用简化梯度法对模型进行了求解。文献 [6] 针对汽油调合生产调度选取了预测汽油辛烷值和蒸汽压的合适方法，提出了基于逻辑的数学模型，采用改进的遗传算法对油品调合调度问题进行求解，但对于大规模问题仍然较困难。

在汽油调合调度的研究过程中，为了方便模型的求解，通常将调合和调度分开优化，或者集成优化，但是采用线性调合模型。分开优化的结果势必不是全局最优的。因为油品调合调度的效益不仅来自减少质量过剩和组分的优化使用，而且还包括降低成品油和组分油的库存、最低安全库存保障、组分和成品输送费用和更可靠的产品递交等。采用线性调合模型集成优化容易使调合产品质量过剩，因为汽油调合过程中一些关键性质通常不是线性变化的，如辛烷值。

1 汽油调合和调度问题描述

汽油调合就是将各种汽油组分调合成满足给定质量要求的汽油。汽油调合模型主要有线性调合，线性化调合和非线性调合。用线性调合或者线性化调合，方法简单，一般在生产计划层次应用较多，但是往往精度不够，特别是对生产调度层次。因此，调度层次采用精度较高的非线性调合模型是非常必要的。

不少学者针对某些重要的成品油质量指标（如汽油辛烷值、柴油凝点等）的非线性调合关系进行了大量的研究，提出了各种各样的预测估计模型^[7-8]。被广泛应用的汽油辛烷值调合模型主要有两种：研究法辛烷值数学模型和交互影响模型^[9]。

炼油企业汽油调度过程主要工作任务包括收组分油、调合、储存和出厂。在制定调合调度方案时，调度部门需要考虑如下问题：每天的调合能力限制，操作规则，组分罐、产品罐容量限制，保证产品的市场需求，各种产品的规格要求。其优化目标通常有经济类指标和操作类指标，如最大利润、最小产品质量过剩等。系统经过优化求解提供整体和单个周期的优化数据，包括调合的时间、输入组分量、使用的产品罐、组分罐末物料性质、各产品

调合配方、产品提货时间、产品量信息。

2 调合调度数学模型

采用全局事件点的连续时间表达方法，建立汽油调合和调度集成的混合整数非线性规划模型。模型中除了目标变量 Cost 以外的所有变量都是非负的。为了避免约束的重复书写，模型中要特别提到的两个运算 ORD () 和 CARD ()。ORD () 表示集合中某元素在集合中的序次，CARD () 表示集合包含元素的个数。

为了适当缩小模型的规模，除了采用连续时间表达方法以外，还采用了集合的方式来控制变量和约束的数目。 $J_{i,g}$ 表示产品罐可以储存的产品种类， $K_{a,b}$ 表示组分罐可以储存的组分种类，用这两个集合约束了物料和储罐之间的任意组合。在油品调合过程中，根据经验知识很容易知道某些组分是不可能用来调合某些产品的。例如：MTBE 一般不会用来调合 90# 汽油。因此，在模型中写入集合 $L_{a,f}$ 表示组分 a 可以参入产品 f 的调合，不在集合之内的元素 (a, f) 不可能组成调合关系。 $M_{b,f}$ 表示罐 b 库存的组分可以参入产品 f 的调合，同样适当控制了组分与产品之间的任意组合。

2.1 目标函数

产品调合调度过程的目标函数表示为生产成本，主要包括组分成本，组分从组分罐区到调合设备的泵送费用，组分和产品的库存费用，订单供货延迟费用，组分低于给定安全库存的罚款、产品低于给定安全库存的罚款和产品收入。目标函数如式 (1) 所示。

$$\min \text{Cost} = VA + VJ + VE + VF + VM + VN - VK \quad (1)$$

调合组分成本和产品收入分别如式 (2) 和式 (3) 所示。组分从组分罐到调合设备的管道泵送费用如式 (4) 所示。

$$VA = \sum_{a=1}^I PB_a (Q \cdot PU_a + \sum_{b \in S_{a,b}} VC_b^S - \sum_{b \in S_{a,b}} VC_b^E) \quad (2)$$

$$VK = \sum_{f=1}^N PP_f (\sum_{d=1}^M PY_{d,f} + \sum_{g \in R_{f,g}} VL_g^S - \sum_{g \in R_{f,g}} VL_g^E) \quad (3)$$

$$VJ = \sum_{a=1}^I (PA_a \sum_{f=1}^N \sum_{c=1}^K VB_{a,g,c}) \quad (4)$$

式 (5) 计算组分库存费用和产品库存费用。在计算库存成本的过程中，为了避免因使用连续时间建模引起库存量乘以时间的非线性约束，根据接受订单的时间，将库存费用划分为几个已知的时间段进行计算。在式 (5) 中，当 $\text{ORD}(d+1) = 1$

时, 则使 $PO_d = 0$; 当 $ORD(d) = CARD(d)$ 时, 则使 $PO_{d+1} = Q$ 。POSE(d) 表示订单 d 开始时间对应的事件点序数。

$$VE = \sum_{b=1}^J \left(PE_b (PO_{d+1} - PO_d) \sum_{c=1}^K \frac{VC_{b,c} + VC_{b,c'}}{2} \right) + \sum_{g=1}^P (PS_g (PO_{d+1} - PO_d) \sum_{c=1}^K \frac{VL_{g,c} + VL_{g,c'}}{2}),$$

$$ORD(c') = POSE(d + 1), ORD(c) = POSE(d) \quad (5)$$

在给定的调度周期内, 根据生产计划和销售部门的安排, 会有一批订单在不同的时间开始接受供货, 并且在订单合同签订的期限之内完成, 否则就要根据订单合同作出相应的罚款额度。式 (6) 计算订单的完成时间是否超过合同签订的期限。式 (7) 计算超期引起的罚款金额。本文采用罚款的方法来控制组分和产品的库存水平。调合组分和产品低于安全库存的罚款计算分别如式 (8) 和式 (9) 所示。

$$VD_c - PL_d XE_{g,d,c} - Z(1 - XE_{g,d,c}) \leq VI_d \quad (6)$$

$$VF = \sum_{d=1}^M (PM_d VI_d) \quad (7)$$

$$\sum_{a=1}^I [PC_a (PD_a - \sum_{b \in S_{a,b}} VC_b^E)] \leq VM \quad (8)$$

$$\sum_{f=1}^N [PQ_f (PR_f - \sum_{g \in R_{f,g}} VL_g^E)] \leq VN \quad (9)$$

2.2 事件点时间约束

式 (10) 表示事件点的时间顺序。当 $ORD(c) = 1$ 时, VD_c 表示起始时间, 即等于零; 当 $ORD(c) = CARD(c)$ 时, VD_c 等于调度终止时间。

$$VD_c \leq VD_{c+1} \quad (10)$$

在连续时间建模方法的事件点描述中, 通常需要规定在计划或者调度中某些外部活动发生的事件点。在油品调合调度过程中, 根据订单可以开始接受供货的时间, 估计该时间可能对应的事件点, 从而确定订单可以开始接受供货的事件点。当然, 这种提前规定的事件点可能会使优化结果不是最优的, 甚至会使模型没有可行解。所以在实际的模型求解过程中, 通过调整这些事件点进行多次求解, 比较求解的结果, 从而确定合理的事件点。POSE(d) 表示订单 d 开始时间对应的事件点序数。

$$VD_c = PO_d, \quad ORD(c) = POSE(d) \quad (11)$$

2.3 操作规则约束

操作规则约束主要规定各种活动的实际操作。例如罐不能在同一时间内既接受物流, 又输出物流。式 (12) 表示从过程装置出来的同一种组分同时只能进入一个储罐, 不能同时输入一个以上的组

分罐。式 (13) 表示一个组分罐在同一时间内只能接受组分或者输出组分。

$$\sum_{b=1}^J XB_{a,b,c} \leq 1, \quad \forall (a,b) \in S_{a,b} \quad (12)$$

$$\sum_{a=1}^I XB_{a,b,c} + XA_{b,c} \leq 1, \quad \forall (a,b) \in S_{a,b} \quad (13)$$

式 (14) 表示一个调合设备同时只能向一个成品罐输入成品油。式 (15) 表示同一个产品罐同时只能接受从调合设备输送过来的成品油或者向订单供货。

$$\sum_{g=1}^P XD_{f,g,c} \leq 1, \quad \forall (f,g) \in R_{f,g} \quad (14)$$

$$\sum_{f=1}^N XD_{f,g,c} + \sum_{d=1}^M XE_{g,d,c} \leq 1, \quad \forall (g,f) \in R_{f,g} \quad (15)$$

式 (16) 表示产品罐向订单供货和订单接受供货两个活动之间的关系。当某一个产品罐向某订单供货时, 该订单接受供货这个活动一定发生。但是当某订单接受供货时, 并不能确定有哪些产品罐向该订单供货。式 (17) 表示产品罐区同时最多只能向一个订单供货。

$$XE_{g,d,c} \leq XC_{d,c} \quad (16)$$

$$\sum_{d=1}^M XC_{d,c} \leq 1 \quad (17)$$

2.4 储罐质量平衡和库存约束

式 (18) 和式 (19) 分别表示组分罐和产品罐在各个事件点的质量平衡。当 $ORD(c) = 1$ 时, $VC_{b,c}$ 和 $VL_{g,c}$ 表示初始库存。当然, $VC_{b,c}$ 和 $VL_{g,c}$ 也受库存能力限制。

$$VC_{b,c+1} = VC_{b,c} + \sum_{a \in S_{a,b}} VO_{a,b,c} - \sum_{f \in U_{b,f}} VP_{b,f,c} \quad (18)$$

$$VL_{g,c+1} = VL_{g,c} + \sum_{f \in J_{f,g}} VQ_{f,g,c} - \sum_{c=1}^K VS_{g,d,c} \quad (19)$$

2.5 物流传输速度和调合速度约束

调合组分和产品在管道的输送速度一方面受到管道和泵等设备条件的限制, 另一方面, 要受到活动是否发生的限制。根据本文对事件点时间的定义, 可知终止事件点的所用输送速度等于零。

式 (20) 和式 (21) 是对组分从过程生产装置输送到组分罐的量的限制。式 (22) 和式 (23) 是对组分从组分罐输送到调合设备的量的限制。BN 是一个足够大的常数, 其必须大于或者等于 VO 的最大值。

$$VO_{a,b,c} \leq Z \cdot XB_{a,b,c}, \quad \forall (a,b) \in S_{a,b} \quad (20)$$

$$VO_{a,b,c} \leq PU_a (VD_{c+1} - VD_c), \quad \forall (a,b) \in S_{a,b} \quad (21)$$

$$VP_{f,g,c} \leq Z \cdot XA_{b,f}, \quad \forall (b,f) \in U_{b,f} \quad (22)$$

$$VP_{f,g,c} \leq PT_f (VD_{c+1} - VD_c), \quad \forall (b,f) \in U_{b,f} \quad (23)$$

式 (24) 和式 (25) 表示从调合设备输送到产品罐的产品量不仅受到传送速度的限制, 而且由于调合设备不存在库存, 所以进入调合的组分总质量与输出调合设备的产品总质量在同两个事件点之间的时间段必须相等。

$$VQ_{f,g,c} \leq Z \cdot XD_{f,g,c}, \quad \forall (f,g) \in R_{f,g} \quad (24)$$

$$\sum_{g \in J_{f,g}} VQ_{f,g,c} = \sum_{b \in M_{b,f}} VP_{b,f,c}, \quad \forall f \in F \quad (25)$$

式 (26) 和式 (27) 是对产品从产品罐向订单供货速度的限制。式 (28) 表示所有产品罐在调度周期向订单的供货量必须等于订单的订货量。式 (29) 表示从产品罐向订单的供货量在订单可以开始接受供货的事件点之前是等于零的。

$$VS_{g,d,c} \leq Z \cdot XE_{g,d,c}, \text{ORD}(c) \geq \text{POSE}(d) \quad (26)$$

$$\sum_{g=1}^P VS_{g,d,c} \leq Y \cdot (VD_{c+1} - VD_c),$$

$$\text{ORD}(c) \geq \text{POSE}(d) \quad (27)$$

$$\sum_{g=1}^P \sum_{c=1}^K VS_{g,d,c} = PY_{d,f},$$

$$\forall (f,g) \in R_{f,g}, \text{ORD}(c) \geq \text{POSE}(d) \quad (28)$$

$$VS_{g,d,c} = 0, \text{ORD}(c) < \text{POSE}(d) \quad (29)$$

2.6 调合质量守恒和性质约束

本文采用非线性调合模型来同时优化汽油的调合和调度过程。式 (30) ~ 式 (32) 表示调合的质量守恒。式 (30) 表示组分参与的调合量等于储存该组分各个组分罐参与的调合量之和。式 (31) 和式 (32) 表示参与调合某种产品的组分总质量等于该产品量。

$$VB_{a,f,c} = \sum_{b \in K_{a,b}} VP_{b,f,c}, \quad \forall (a,f) \in T_{a,f} \quad (30)$$

$$\sum_{a \in T_{a,f}} VB_{a,f,c} = \sum_{g \in R_{g,f}} VQ_{f,g,c}, \quad \forall f \in F \quad (31)$$

$$\sum_{a \in T_{a,f}} VB_{a,f,c} = VR_{f,c}, \quad \forall f \in F \quad (32)$$

调合性质约束分为两类：第一类是调合性质的变化符合线性加和关系, 如汽油调合的烯烃含量, 氧含量和苯含量等；第二类是调合性质的变化是非线性的, 如辛烷值。式 (33) 表示在调合过程中符合线性加和关系的性质约束。式 (34) 表示在调合过程中性质变化是非线性的。其中函数 $f()$ 通常是用试验数据进行回归得到的。这里以汽油辛烷值为例, 采用交互影响模型^[9], 如式 (35) 和式 (36) 表示, 通过试验测定调组合组的交互参数 $PW_{a,a'}$, 从而确定函数 $f()$ 。

$$PZ_{f,e} VR_{f,c} \geq \sum_{a \in T_{a,f}} (PV_{a,e} VB_{a,f,c}),$$

$$\forall (a,f) \in T_{a,f}, \forall e \in H \quad (33)$$

$$VR_{f,c} \leq f(VT_{a,f,c}),$$

$$\forall (a,f) \in T_{a,f} \quad (34)$$

$$VT_{a,f,c} VR_{f,c} = VB_{a,f,c},$$

$$\forall (a,f) \in T_{a,f} \quad (35)$$

$$PZ_{f,e} \leq \sum_{a \in T_{a,f}} (PV_{a,e} VT_{a,f,c}) +$$

$$\sum_{a \in T_{a,f}} \sum_{a' > a} (PW_{a,a'} VT_{a,f,c} VT_{a',f,c}), \quad \forall e \in L \quad (36)$$

3 模型求解策略和算法

非线性整数规划模型目前还缺少真正有效的算法, 多是针对具体问题发展一些特殊的算法^[10]。目前常用的优化算法有分支界定法^[11]、外近似法、广义 Bender 函数法^[12]、罚函数法、 α BB 算法、符号重建法、遗传算法、模拟退火算法^[13-14]。

上述模型非线性约束仅仅是用来表达汽油调合辛烷值的变化, 而且汽油调合辛烷值变化的非线性很接近线性。本文根据模型这一特点给出了一种新的求解算法, 通过求解一系列的混合 MILP 问题来代替求解原来的 MINLP 模型, 求解过程如图 1 所示, 避免直接求解 MINLP 模型的复杂性。

第 1 步: 将汽油调合辛烷值的非线性函数改为线性加和的函数, 如式 (37) 所示, 用式 (37) 替换汽油调合调度 MINLP 模型中的式 (35) 和式 (36)。这样原来的 MINLP 模型就转变为 MILP 模型。

$$PZ_{f,e} VR_{f,c} \leq \sum_{a \in T_{a,f}} (PV_{a,e} VB_{a,f,c}),$$

$$\forall (a,f) \in T_{a,f}, \forall e \in H_e \quad (37)$$

第 2 步: 对形成新的 MILP 模型进行求解。

第 3 步: 把第 2 步求解的结果代入式 (35) 计算 $VT_{a,f,c}$, 再将 $VT_{a,f,c}$ 代入式 (36), 并且将式 (36) 的不等号改为等号, 左边项改为 $PZ_{f,e}^w$, 其中 w 表示求解循环次数, $w=1, 2, \dots, n$ 。修改之后如式 (38)。这样就求得调合汽油产品的实际辛烷值 $PZ_{f,e}^w$ 。

$$PZ_{f,e}^w = \sum_{a \in T_{a,f}} (PV_{a,e} VT_{a,f,c}) +$$

$$\sum_{a \in T_{a,f}} \sum_{a' > a} (PW_{a,a'} VT_{a,f,c} VT_{a',f,c}),$$

$$\forall (a,f) \in T_{a,f}, \forall e \in L_e \quad (38)$$

第 4 步: 把计算出来的辛烷值 $PZ_{f,e}^w$ 和 $PZ_{f,e}$ 进行比较, 如果 $PZ_{f,e}^w \leq PZ_{f,e}$, 则式 (37) 不变, 如果 $PZ_{f,e}^w > PZ_{f,e}$, 则将式 (37) 的左边 $PZ_{f,e}$ 改

为 $PZ_{f,e} - (PZ_{f,e,c}^w - PZ_{f,e})$ ，式 (37) 就变为式 (39)，从而产生新的 MILP 问题。这样做的目的是减掉调合质量过剩的部分。

$$[PZ_{f,e} - (PZ_{f,e,c}^w - PZ_{f,e})]VR_{f,c} \leq \sum_{a \in T_{a,f}} (PV_{a,e} VB_{a,f,c}), \quad \forall (a, f) \in T_{a,f}, \forall e \in L_e \quad (39)$$

第 5 步：重复第 2 步和第 3 步，将新的 $PZ_{f,e,c}^w$ 与 $PZ_{f,e}$ 进行比较，如果 $PZ_{f,e,c}^w > PZ_{f,e}$ 而且 $PZ_{f,e,c}^w - PZ_{f,e} \leq \lambda$ ，则终止循环，输出求解结果，否则重复第四步，直到满足终止条件为止。 λ 表示允许的调合质量过剩量。在实际生产过程中，为了避免过多回调或者产品不合格，总是会允许调合的产品质量合理的微小过剩。

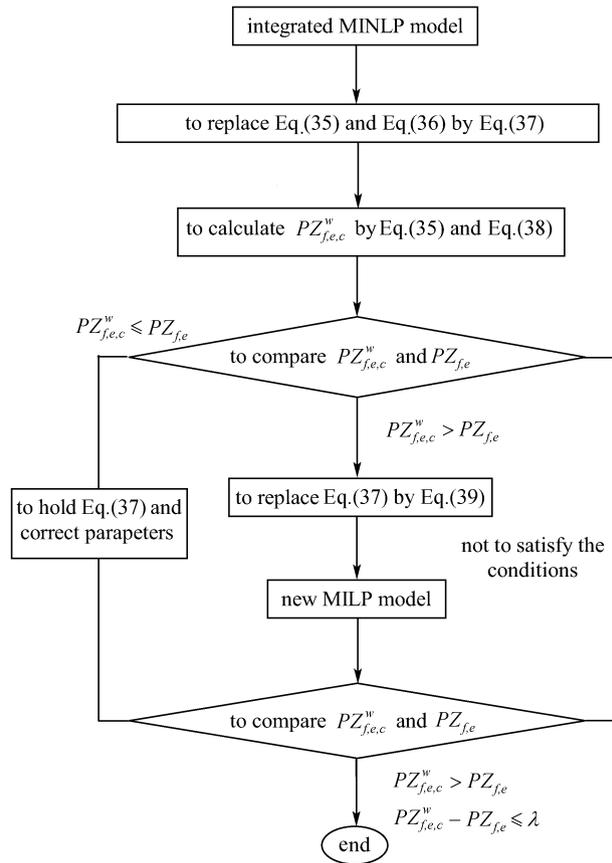


图 1 模型求解算法框图

Fig. 1 Procedure of new algorithm to solve MINLP model

4 案例应用

某炼油企业的汽油调合和罐区如图 2 所示，有 3 套调合设备。在汽油调合的过程中，根据该企业的历史生产数据和经验，辛烷值是该企业汽油调合的关键参数。本文采用经典的交互影响模型来预测调合的汽油辛烷值^[9]，其中组分辛烷值的调合交互

参数是通过试验得到的，如表 1 所示。

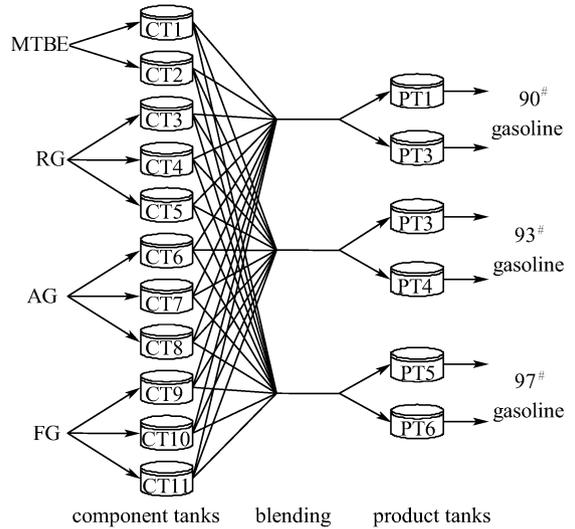


图 2 汽油调合和调度示意图

Fig. 2 Gasoline blending and scheduling process in refinery complex

表 1 汽油调合组分的交互参数

Table 1 Interactive parameter between components

Components	MTBE	RG	AG	FG
MTBE		0	0.3	0
RG			0.8	1.8
AG				0.7

调度时界是 160 h，根据经验本文在调度周期内设定 11 个事件点。在调度时界内有 4 个订单，假设 4 个订单对应的开始事件点依次假设为 2，4，7，9。结束事件点依次为 4，7，9，10。采用本文建立的模型和算法对上述案例进行优化求解，使用 GAMS20.2 中的 CPLEX7.5 求解器^[15]，循环求解 4 次即可以达到允许的质量过剩值 λ ，在本案例中 $\lambda = 0.01$ 。每次循环迭代求解的目标值如表 2 所示。从表 2 可以知道，模型总求解时间为 9.7 s，说明本文建立的模型中虽然采用非线性调合模型，但是仍然具有很好的可求解性。

表 2 模型循环求解结果和求解时间

Table 2 Objective and solve time of iterative operation

Iterations	Objective/Yuan	Solve time/s
1	-9871322	3.2
2	-10012449	2.1
3	-10095901	2.3
4	-10157948	2.1

求解得到的每个事件点对应的的时间如表3所示,结果表明总共选定11个事件点基本是合理的。其中第5个事件点和第6个事件点的时间是一样的,表明这两个事件点之间没有发生任何活动,也说明实际上只要选择10个事件点就可以了。在计算过程中,为了避免因为在订单供货期间给定的事件点不够而引起模型求解没有达到最优,本文又两次更改了订单可以开始接受供货的事件点,第1组是(2, 5, 7, 9),第2组是(2, 4, 6, 9)。求解结果表明目标值没有任何变化,第1组求解结果的第3事件点和第4个事件点的时间是一样的,第2组求解结果的第7个事件点和第8个事件点的时间是一样的。这也说明,订单可以开始接受供货的事件点的确定是合理的。

表3 求解的事件点时间
Table 3 Time of event points

Event points	time/h
SEP1	0.00
SEP2	10.00
SEP3	36.67
SEP4	60.00
SEP5	76.67
SEP6	76.67
SEP7	95.00
SEP8	119.17
SEP9	135.00
SEP10	146.67
SEP11	160.00

为了进一步说明模型求解结果的合理性,本文将求解结果和线性调合调度模型优化求解的结果进行比较。线性调合优化模型就是式(37)替换本文建立的MINLP模型中的式(35)和式(36),就可以得到通常所用的线性调合与调度集成的模型,也就是求解过程的第1次循环,其求解目标值和求解时间如表2的第2列所示。很显然,采用本文非线性调合调度模型方法在160h生产周期内可以使调合和油品调度过程多获得利润286626元,即表5第2行的第5列和第2列的差值。

表4和表5分别是该企业在采用本优化操作之前和之后的汽油产品辛烷值,由其数值可知,采用本文的模型和算法能够显著降低产品的质量过剩,而且同时优化了调合罐区调度。

表4 当前线形调合模型求解的辛烷值

Table 4 Octane number of blending at event points by linear model

	SEP1	SEP2	SEP3	SEP4	SEP6	SEP8	SEP10
90#	90.173		90.173	90.173	90.173	90.173	90.173
93#		93.038				93.038	93.038
95#		95.052			95.052		

表5 优化后汽油调和的辛烷值

Table 5 Octane number of blending at event points

	SEP1	SEP2	SEP3	SEP4	SEP6	SEP8	SEP10
90#	90.001		90.001	90.001	90.001	90.001	90.001
93#		93.000					93.000
95#		95.000			95.000		

5 结论

建立了汽油调合和调度集成优化的混合整数非线性规划模型,克服了将汽油调合和调度分开优化,或者将二者同时进行优化,但优化时采用汽油线性调合模型的缺点。针对本文建立的模型特点,将原MINLP模型分解为求解一系列的MILP模型,避免了直接求解MINLP模型的复杂性。通过实际应用,表明模型对于大规模的汽油调合调度过程在合理的时间内能获得最优解,求解结果与实际生产数据吻合,为企业增加了经济效益,说明了上述模型和算法具有很好的实用性。

符号说明

- Cost——总成本,目标值, Yuan
 PA——组分泵送费用, Yuan · kbbl⁻¹
 PB——组分价格, Yuan · kbbl⁻¹
 PC——组分低于安全库存罚款, Yuan · kbbl⁻¹
 PD——组分安全库存, kbbl
 PE——组分罐库存费用, Yuan · kbbl⁻¹
 PF——组分罐初始库存, kbbl
 PG——产品罐初始库存, kbb
 PH——组分罐最大库存, kbbl
 PI——产品罐最大库存, kbbl
 PJ——产品罐最小库存, kbbl
 PK——订单结束事件点
 PL——订单结束时间, h
 PM——订单超时罚款, Yuan · kbbl⁻¹
 PN——订单开始事件点
 PO——订单开始时间, h

PP ——产品价格, Yuan \cdot kbbbl $^{-1}$
 PQ ——产品低于安全库存的罚款, Yuan \cdot kbbbl $^{-1}$
 PR ——产品安全库存, kbbbl
 PS ——产品罐库存费用, Yuan \cdot kbbbl $^{-1}$
 PT ——各种产品最大调合速度, kbbbl \cdot h $^{-1}$
 PU ——组分生产速度, kbbbl \cdot h $^{-1}$
 PV ——组分性质
 PW ——调合交互参数
 PX ——各个订单的产品价格, Yuan \cdot kbbbl $^{-1}$
 PY ——每个订单的定购量, kbbbl
 PZ ——产品性质
 Q ——调度时界, h
 $R_{f,g}$ ——产品储罐可以储存的产品种类
 $S_{a,b}$ ——组分储罐可以储存的组分种类
 $T_{a,f}$ ——表示组分 a 可以参入产品 f 的调合
 $U_{b,f}$ ——表示罐 b 库存的组分可以参入产品 f 的调合
 VA ——总组分成本, Yuan
 VB ——组分调入产品的量, kbbbl
 VC ——组分罐在每个事件点的库存水平, kbbbl
 VD ——事件点的时间, h
 VE ——总库存费用, Yuan
 VF ——订单延迟罚款, Yuan
 VG ——订单供货结束时间, h
 VH ——订单开始供货时间, h
 VI ——订单延迟时间, h
 VJ ——总泵送费用, Yuan
 VK ——总产品收益, Yuan
 VL ——成品罐在每个事件点的库存水平, kbbbl
 VM ——总组分安全库存不足罚款, Yuan
 VN ——总产品安全库存不足罚款, Yuan
 VO ——组分从生产过程输入组分罐的量, kbbbl
 VP ——组分罐向产品罐输入的量, kbbbl
 VQ ——产品从调合向产品罐输入的量, kbbbl
 VR ——产品的产品量, kbbbl
 VS ——产品罐输入订单的量, kbbbl
 VT ——组分在调合产品中的百分比
 W ——求解循环次数
 XA ——0, 1 变量, 组分罐是否参入调合
 XB ——0, 1 变量, 组分罐是否接受组分
 XC ——0, 1 变量, 订单是否正在接受供货
 XD ——0, 1 变量, 产品是否从调合管道输入产品罐
 XE ——0, 1 变量, 产品罐是否为订单供货
 Y ——产品最大输出速度, kbbbl \cdot h $^{-1}$

Z ——大数

上角标

S ——开始事件点

E ——结束事件点

下角标

a ——组分, 长度为 I

b ——组分储罐, 长度为 J

c ——事件点, 长度为 K

d ——订单, 长度为 M

e ——组分和产品的性质

f ——产品, 长度为 N

g ——产品储罐, 长度为 P

h ——调合性质变化是线性加和的那些性质

l ——调合性质变化是非线性变化的那些性质

References

- [1] Jia Zhenya, Marianthi Ierapetritou. Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, **42**: 825-835
- [2] Jia Zhenya, Marianthi Ierapetritou. Effective short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. *Comput. Chem. Eng.*, 2004, **28**: 1001-1019
- [3] Klaus Glismann, Günter Gruhn. Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes. *Comput. Chem. Eng.* 2001, **25**: 627-634
- [4] Glismann K, Gruhn G. Short-term planning of blending processes: scheduling and nonlinear optimization of recipes. *Chem. Eng. Technol.*, 2001, **24**: 246-253
- [5] Moro L F L, Zanin A C, Pinto J M. A planning model for refinery diesel production. *Comput. Chem. Eng.*, 1998, **22**: S1039-1042
- [6] Wang Jidong (王继东), Wang Wanliang (王万良). Research of gasoline blending optimization based on genetic algorithm. *Control and Instruments in Chemical Industry* (化工自动化及仪表), 2005, **32** (1): 6-9
- [7] Chen Xinshi (陈新志). Establishment of a model for calculating the blending octane numbers of blended. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 1997, **28** (1): 52-55
- [8] Liu Xiantao (刘先涛). Stem method for gasoline blending. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 1997, **28** (8): 51-55
- [9] Zahed A H, Mullah S A, Bashir M D. Predict octane number for gasoline blends. *Hydrocarbon Processing*, 1993, **72** (3): 21-25
- [10] Xu Yifang. Practical Methods of Optimization in

- Petrochemical Industry. Dongying: Petroleum University Press, 1990
- [11] Quesada I, Grossmann I E. An LP/NLP based branch and bound algorithm for convex MINLP optimization problems. *Comput. Chem. Eng.*, 1992, **16** (10-11): 937-947
- [12] Frederick S Hillier, Gerald J Lieberman. Introduction to Operations Research. Beijing: China Machine Press, 1999
- [13] He Y H, Yang D H, Hua B, Li Z H. Integrated Optimization for Systems Based on Integrated Computer Intelligence//Proceedings of The Third International Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT'98). Berlin, 1998: 141-147
- [14] Zhang Jian (张健), Chen Bingzhen (陈丙珍), Hu Shanying (胡山鹰). New logic and heuristic knowledge based MILP approach to process synthesis. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53** (2): 177-183
- [15] Brooke A, Kendrick D, Meeraus A. GAMS A User's Guide (Release 2.25). San Francisco, CA: The Scientific Press, 1992