

# 基于用户需求时间窗的成品油管道调度优化

廖绮, 梁永图\*, 沈允, 袁梦, 张浩然

中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, liangyt21st@163.com

收稿日期: 2017-04-10

国家自然科学基金(No.51474228)资助

**摘要** 为精准服务下游市场, 成品油管道需要采用基于用户需求时间窗的管道调度模式。目前有较多关于成品油管道调度优化的文献, 但缺少基于用户需求时间窗的优化调度研究。本文针对单源多汇成品油管道, 考虑批次运移约束、注入约束、卸油约束以及时间节点约束, 建立以实际下载时间窗与用户需求时间窗偏差最小为目标的混合整数线性规划(MILP)模型, 并采用蚁群算法和分支定界法进行求解。最后将所建立模型应用于国内某条成品油管道并求解出相应的调度计划。从应用可知, 该模型计算速度快、生成的调度计划与用户提出的需求时间窗较吻合, 因此具有较强的实用性。

**关键词** 成品油管道; 调度计划优化; 需求时间窗; MILP模型; 分支定界法; 蚁群算法

## 0 引言

成品油管道是连接上游油品资源与下游油品消费市场的桥梁, 沿线设有首站(注入站)、卸油站(中间站)及末站。管道按照顺序输送的原则对各种油品进行合理排序、依次输送, 保证准时将指定油品输送至规定的卸油站<sup>[1]</sup>。随着成品油市场的不断发展, 以市场为服务对象的成品油管道成为国内管道的发展趋势。针对此类成品油管道, 需要采用基于用户需求的管道调度模式, 即制定调度计划时, 尽可能在用户要求的时间范围内进行各站场的卸油操作, 从而最大程度地满足下游市场对油品需求的实时性<sup>[2-3]</sup>。

成品油管道的调度问题十分复杂, 目前最主要的求解方法是数学规划方法。生产调度领域中使用最广泛的是混合整数线性规划(MILP)和混合整数非线性规划(MINLP)两类<sup>[4-7]</sup>。Cafaro等<sup>[8]</sup>、Relvas等<sup>[9]</sup>、MirHassani等<sup>[10]</sup>均针对某一具体的管道系统建立MILP模型, 求解出操作时间不确定的准调度计划。虽然此

类模型能够合理有效地对复杂成品油管道调度问题进行描述, 但是大量的约束条件会给模型带来计算困难。针对这些问题, Maga<sup>[11]</sup>和Cafaro<sup>[12]</sup>将单一的大模型分解成多个小模型, 并采用分解策略求解。除此之外, Relvas<sup>[13]</sup>、Erito<sup>[14]</sup>和Boschetto<sup>[15]</sup>采用启发式算法进行求解, 在可接受的计算时间内得到较满意的调度计划。国内学者先后对成品油顺序输送模拟、调度运行管理软件开发和油品批次批量跟踪等内容展开了研究<sup>[16-18]</sup>。周雪静等人<sup>[19]</sup>结合油库库存、下游油品需求等约束条件提出一种“先满先输”的启发式规则。张浩然等人<sup>[20]</sup>针对多源单汇多批次顺序输送管道, 考虑运行成本建立MINLP模型, 选用优先级算法以较短计算时间求解长期调度问题。随后, 张浩然等<sup>[21-22]</sup>、段志刚等<sup>[23]</sup>基于连续时间表达建立了单源多汇成品油管道的MINLP模型, 可求解出详细的调度计划。以上大多数研究在建立模型时都缺乏对用户需求时间窗的考虑, 导致求解的计划可能无法满足用户的卸油时间需求。本文针对基于用户需求时间窗的成品油管道调度

引用格式: 廖绮, 梁永图, 沈允, 袁梦, 张浩然. 基于用户需求时间窗的成品油管道调度优化. 石油科学通报, 2018, 02: 205-214

LIAO Qi, LIANG Yongtu, SHEN Yun, YUAN Meng, ZHANG Haoran. Optimal scheduling of products pipelines based on demanding time-windows. Petroleum Science Bulletin, 2018, 02: 205-214. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.020

模式,以油品卸油起始时间和卸油终止时间作为时间节点,采用混合时步表达法建立MILP模型,求解出详细调度计划。

## 1 模型建立

### 1.1 模型假设

(1)管道为一条单源点、多汇点顺序输送的成品油管道,且各管段输送的油品均向单一方向流动。

(2)不考虑混油长度,将相邻批次间看作混油界面。

(3)不考虑压力和温度对油品体积造成的影响。

### 1.2 时间节点

由于计划周期内各卸油站的卸油计划为已知条件,本文以每次卸油开始和结束的时间节点将整个调度周期分为若干个不等长的时间窗,按时间早晚排序对各个时间节点依次编号,并记录各站每次卸油开始和结束的时间节点序号。但是,仅以这些固定的时间节点划分时间窗会严重影响模型的求解效果。例如,考虑到混油扩散的问题,当管段中存在批次界面时,需要保证管段流量大于混油流量下限;而当管段中不存在混油界面时,其最小流量由泵机组以及计量设备限制决定。为了更精确地描述批次在管道中的运移过程,须在已有的相邻时间节点中加入若干时间节点,将新节点重新排序编号并记录每次卸油开始和结束所对应的时间节点序号。经这样处理后,模型求解出的调度计划更符合实际情况。

### 1.3 目标函数

以  $K = \{1, 2, \dots, k_{\max}\}$  表示研究时间域内所有时间节点序号的集合,时间节点序号下标用  $k$  或  $k'$  表示;以  $I = \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$  表示卸油站的编号,节点下标用  $i$  或  $i'$  表示;以  $J = \{1, 2, \dots, j_{\max}\}$  表示研究时间内所有批次编号集合,批次下标用  $j$  或  $j'$  表示;并以  $J_{\text{IN}}$  表示  $J$  中需要注入的批次编号集合,  $J_{\text{IN}} \in J$ ;以  $O = \{1, 2, \dots, o_{\max}\}$  表示油品编号的集合,油品下标用  $o$  表示;以  $N_i = \{1, 2, \dots, n_{\max,i}\}$  表示第  $i$  个卸油站卸油次数编号的集合,卸油次数编号用  $n$  表示。模型以用户需求时间窗和实际卸油时间窗的时间偏离度最小为目标,即尽可能满足用户卸油的时间需求。

$$\min \sum_{i=1}^{i_{\max}} \varepsilon_i \sum_{n=1}^{n_{\max,i}} \left( \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k - \tau_{\text{Bi},n} \right) + \left( \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Ek},i,n} t_k - \tau_{\text{Ei},n} \right) \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_i$  为第  $i$  卸油站的需求重要性系数;  $S_{\text{Bk},i,n}$  为开始卸油操作二元参数,  $S_{\text{Bk},i,n} = 1$  表示在第  $k$  个时间节点,第  $i$  卸油站开始第  $n$  次卸油操作;  $S_{\text{Ek},i,n}$  为结束卸油操作二元参数,  $S_{\text{Ek},i,n} = 1$  表示在第  $k$  个时间节点,第  $i$  卸油站结束第  $n$  次卸油操作;  $t_k$  为第  $k$  个时间节点对应的的时间, h;  $\tau_{\text{Bi},n}$  为第  $i$  卸油站提出的第  $n$  次卸油开始时间, h;  $\tau_{\text{Ei},n}$  为第  $i$  卸油站提出的第  $n$  次卸油结束时间, h。

由于该目标函数为非连续函数,模型求解难度较大,因此引入以下变量和相应约束,将目标函数线性化。

当求得  $\tau_{\text{Bi},n} - \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k \geq 0$  时,约束(4)强于约束

(3),由式(4)得  $D_{\text{Bi},n}$  最小取值为  $\tau_{\text{Bi},n} - \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k$ ; 当

求得  $\tau_{\text{Bi},n} - \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k \leq 0$  时,由式(3)得  $D_{\text{Bi},n}$  最小取值

为  $\sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k - \tau_{\text{Bi},n}$ ; 同理,  $D_{\text{Ei},n}$  也满足相应的约束。

$$\min \sum_{i=1}^{i_{\max}} \varepsilon_i \sum_{n=1}^{n_{\max,i}} (D_{\text{Bi},n} + D_{\text{Ei},n}) \quad (2)$$

$$D_{\text{Bi},n} \geq \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k - \tau_{\text{Bi},n} \quad i \in I, n \in N_i \quad (3)$$

$$D_{\text{Bi},n} \geq \tau_{\text{Bi},n} - \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Bk},i,n} t_k \quad i \in I, n \in N_i \quad (4)$$

$$D_{\text{Ei},n} \geq \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Ek},i,n} t_k - \tau_{\text{Ei},n} \quad i \in I, n \in N_i \quad (5)$$

$$D_{\text{Ei},n} \geq \tau_{\text{Ei},n} - \sum_{k=1}^{k_{\max}} S_{\text{Ek},i,n} t_k \quad i \in I, n \in N_i \quad (6)$$

式中:  $D_{\text{Bi},n}$  为第  $i$  卸油站第  $n$  次卸油操作的开始时间偏差, h;  $D_{\text{Ei},n}$  为第  $i$  卸油站第  $n$  次卸油操作的结束时间偏差, h; 其他变量和参数同前。

### 1.4 约束条件

#### 1.4.1 批次运移约束

针对初始时刻存在于管道中的批次,其油头体积坐标已知。需注入批次的初始油头体积坐标为负,可由式(7)求得初始体积坐标。

$$V_{\text{Z0},j} = - \sum_{j'=1}^{j-1} V_{\text{IN},j'} \quad j \in J_{\text{IN}} \quad (7)$$

式中:  $V_{\text{Zk},j}$  为在第  $k$  个时间节点,第  $j$  批次的油头体

积坐标,  $m^3$ ;  $V_{INj}$  为第  $j$  批次的注入体积,  $m^3$ 。

考虑到油品的不可压缩性, 各批次油头随着时间的推移在管道内的体积坐标变化可用式 (8) 表示。

$$V_{Zk,j} = V_{Z0,j} + V_{Jk} - \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j'=j}^{j_{\max}} V_{Ak,i,j'} \quad k \in K, j \in J \quad (8)$$

式中:  $V_{Jk}$  为在第  $k$  个时间节点, 首站的累积注入体积,  $m^3$ ;  $V_{Ak,i,j}$  为在第  $k$  个时间节点, 第  $i$  卸油站对第  $j$  批次的累积卸油体积,  $m^3$ ; 其他变量同前。

批次油头体积坐标的位置二元变量可根据式 (9) 和式 (10) 确定。

$$V_{Zk,j} - V_i \leq B_{Ak,i,j} M \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$(B_{Ak,i,j} - 1)M \leq V_{Zk,j} - V_i \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (10)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  卸油站的体积坐标,  $m^3$ ;  $B_{Ak,i,j}$  为批次油头体积坐标位置二元变量,  $B_{Ak,i,j} = 1$  表示在第  $k$  个时间节点, 第  $j$  批次油头体积坐标大于第  $i$  卸油站的体积坐标;  $M$  为极大值; 其他变量同前。

对于同一个站场, 前一批次油头到站时间节点应早于后一批次油头到站的时间节点。

$$B_{Ak,i,j+1} \leq B_{Ak,i,j} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (11)$$

式中变量同前。

对于同一个批次, 该批次油头到达前一站场的时刻应早于到达后一站场的时刻。

$$B_{Ak,i+1,j} \leq B_{Ak,i,j} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (12)$$

式中变量同前。

在第  $k$  时间节点, 当且仅当第  $j$  批次油头到达第  $i$  卸油站之后, 该站场才可对该批次油品进行卸油操作; 在第  $j$  批次的油尾离开该站场之前, 必须结束对该批次油品的卸油操作; 各卸油站在一个时间窗内只能下载一个批次的油品。

$$\sum_{k'=1}^k \sum_{n=1}^{n_{\max,j}} \delta_{Di,n,j} S_{Bk',i,n} \leq B_{Ak,i,j} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{k'=1}^k \sum_{n=1}^{n_{\max,j}} \delta_{Di,n,j} S_{Ek',i,n} \geq B_{Ak,i,j+1} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (14)$$

式中:  $\delta_{Di,n,j}$  为卸油对象参数,  $\delta_{Di,n,j} = 1$  表示第  $i$  卸油站第  $n$  次卸油的对象为第  $j$  批次; 其他变量和参数同前。

批次在管道中的位置二元变量可通过式 (15) 约束。

$$B_{Fk,i,j} \geq B_{Ak,i,j} - B_{Ak,i+1,j} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (15)$$

式中:  $B_{Fk,i,j}$  混油界面位置二元变量,  $B_{Fk,i,j} = 1$  表示在第  $k$  个时间节点, 第  $j-1$  批次与第  $j$  批次的混油界面存

在于第  $i$  卸油站至第  $i+1$  卸油站管段中; 其他变量同前。

#### 1.4.2 注入约束

任一时间窗内, 首站的注入体积等于各站的卸油体积之和。

$$V_{Jk} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} V_{Pk,i} \quad k \in K \quad (16)$$

式中:  $V_{Jk}$  为首站在第  $k$  个时间窗内的注入体积,  $m^3$ ;  $V_{Pk,i}$  为第  $i$  卸油站在第  $k$  个时间窗内的卸油体积,  $m^3$ 。

首站的累积注入量可用下式表示。

$$V_{Jk} = V_{Jk-1} + V_{Jk} \quad k \in K \quad (17)$$

式中变量同前。

受管道本身和设备的限制, 首站注入流量必须满足一定的流量范围要求。

$$(t_{k+1} - t_k) Q_{JIN} \leq V_{Jk} \quad k \in K \quad (18)$$

$$(t_{k+1} - t_k) Q_{JAX} \geq V_{Jk} \quad k \in K \quad (19)$$

式中:  $Q_{JIN}$  为首站的最小注入流量,  $m^3/h$ ;  $Q_{JAX}$  为首站的最大注入流量,  $m^3/h$ ; 其他变量同前。

#### 1.4.3 卸油约束

任一时间节点, 各卸油站的累积卸油量可用下式表示。

$$V_{Ak,i,j} = V_{Ak-1,i,j} + \sum_{n=1}^{n_{\max,j}} \delta_{Di,n,j} S_{Pk-1,i,n} V_{Pk-1,i} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (20)$$

式中:  $S_{Pk,i,n}$  为卸油状态二元参数,  $S_{Pk,i,n} = 1$  表示在第  $k$  个时间窗内, 第  $i$  卸油站正在执行第  $n$  次卸油操作; 其他变量同前。

为方便操作, 现场采用定流量方式进行卸油。若某一时间窗内中间某一站没有卸油操作, 则其卸油流量为零。

$$(t_{k+1} - t_k) \sum_{n=1}^{n_{\max}} S_{Pk,i,n} Q_{Pi,n} = V_{Pk,i} \quad k \in K, i \in I \quad (21)$$

式中:  $Q_{Pi,n}$  为第  $i$  卸油站第  $n$  次需求对应的卸油流量,  $m^3/h$ ; 其他变量和参数同前。

考虑到管道输送的经济性, 管段流量应处于一定范围之内。当管道存在混油界面时, 需保证管段雷诺数大于临界雷诺数, 管段流量大于混油流量下限。

$$\sum_{i'=i}^{i_{\max}} V_{Pk,i'} \leq (t_{k+1} - t_k) Q_{XAXi} \quad k \in K, i \in I \quad (22)$$

$$(B_{Fk,i,j} - 1)M + (t_{k+1} - t_k) Q_{XINi} \leq \sum_{i'=i}^{i_{\max}} V_{Pk,i'} \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad (23)$$

式中:  $Q_{XAXi}$  为第  $i$  卸油站至第  $i+1$  卸油站管段的最大



流量限制,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_{\text{XIN},j}$  为第  $i$  卸油站至第  $i+1$  卸油站管段内存在混油界面时的最小流量限制,  $\text{m}^3/\text{h}$ ; 其他变量同前。

#### 1.4.4 时间节点约束

按照时间节点早晚顺序排列, 关系式如下。

$$t_k \leq t_{k+1} \quad k \in K \quad (24)$$

$$t_1 = \tau_c \quad (25)$$

式中:  $\tau_c$  为计划开始时间,  $h$ ; 其他变量同前。

### 1.5 模型分析

由模型结构可知, 此模型为MILP模型, 可由分支定界法求得全局最优解。模型中的参数均可根据注入计划、管道参数、现场工艺以及用户给定的卸油计划等条件确定, 但若给定参数不合理, 可能会使模型的约束条件相互矛盾, 造成模型可行解域为空。为解决上述问题, 本文将模型中的参数划分为限定参数和非限定参数。其中, 限定参数为不可调整的参数; 非限定参数为当约束存在制约时可适当调整的参数。由于本模型的实质是为求解出与用户需求时间窗偏差最小的卸油计划并保证管道能安全运行, 因此依照给定卸油计划而确定的参数定义为非限定参数, 例如由卸油时间节点排序决定的各时间窗卸油状态、对象参数等, 其余参数定义为限定参数。

## 2 模型求解

### 2.1 时间节点调整

各卸油站单独提出其需求时间, 且制定计划时并未考虑管道的实际运行情况, 因此无法保证计划的合理性。例如: 按各站给定的卸油时间对时间节点进行排序求解模型, 则各站需在对应的时间窗内完成卸油操作, 若要同时满足卸油流量约束, 可能会使管段流量超出该管段的最大输送能力, 从而导致模型约束自相矛盾, 使得模型无解。当无法得到可行解时, 需调整各卸油时间节点序列, 重新求解。调整规则如下:

(1) 确定所有卸油时间节点可调整的时间范围, 若该节点为卸油开始时间节点(第  $i$  站对第  $j$  批次进行卸油), 则可调整的时间范围下限为第  $i'(i' \leq i)$  站第  $j'(j' \leq j)$  批次的卸油结束时间节点序号中的最大值, 上限为该次卸油结束的时间节点序号; 若该节点为卸油结束时间节点, 则下限为该次卸油开始的时间节点序号, 上限为第  $i'(i' \geq i)$  站第  $j'(j' > j)$  批次的卸油结

束时间节点序号中的最小值。

(2) 随机确定一个卸油时间节点  $k$ , 并在其对应的可调整时间范围内随机确定一个时间节点  $k'$ , 将  $k$  插至  $k'$  节点后。

(3) 在调整后的相邻卸油时间节点中加入若干时间节点, 对新节点重新排序编号。

### 2.2 求解方法

根据目标函数和约束条件可知, 若已知各站卸油时间点的排列顺序, 即可建立相应的MILP模型, 并采用分支定界法求解出全局最优解。分支定界法是一种以广度优先或以最小耗费为优先在空间树上搜索问题界的算法, 可在满足约束条件的解中找出使目标函数值达到极小或极大的解, 即最优解。考虑到模型约束条件较多且模型中各可行时间的排序差异不大, 因此选用收敛性较强的蚁群算法对卸油时间排序进行求解, 并将下游提出的卸油时间排列顺序作为人工蚁群的初始位置, 以MILP模型目标函数值作为蚁群算法的食物浓度函数, 按照2.1节所提的调整规则对各蚂蚁的位置进行更新, 直至目标函数小于模型允许的最大误差或达到最大计算代数。算法程序框图由图1所示。

## 3 算例

以国内某条成品油管道为研究对象, 在管道首站批次输入顺序和初始时刻管道内油品状态已知的情况下, 由中间各卸油站提出需求时间窗, 在此基础上求解出研究时间域内管道整体的调度计划。该成品油管道全长 112.0 km, 采用单管线密闭顺序输送不同批号的汽、柴油。管道全线共有 6 个站场, 包括首站、1#卸油站、2#卸油站、3#卸油站、4#卸油站和末站, 站场基本数据管道如表 1 所示。管道基本数据如表 2 所示, 当管段中存在汽柴混油界面时, 需保证该管段流量大于其最小流量限制。

初始时刻管道内的油品状态包括油品批次编号、对应油品品种以及相应的油头体积坐标, 如表 3 所示。

研究时间域长为 67.5 h, 首站的油品输入顺序依次为 92#汽油—0#柴油—92#汽油—95#汽油—92#汽油。具体的注入计划如表 4 所示。

中间各卸油站提出需求时间窗, 包括油品品种、卸油流量、卸油起止时间等。从 1#卸油站开始, 按卸油时间从早到晚的顺序对各需求时间窗进行编号。管道末站连接油库, 对到站油料品种、到站时间均无要

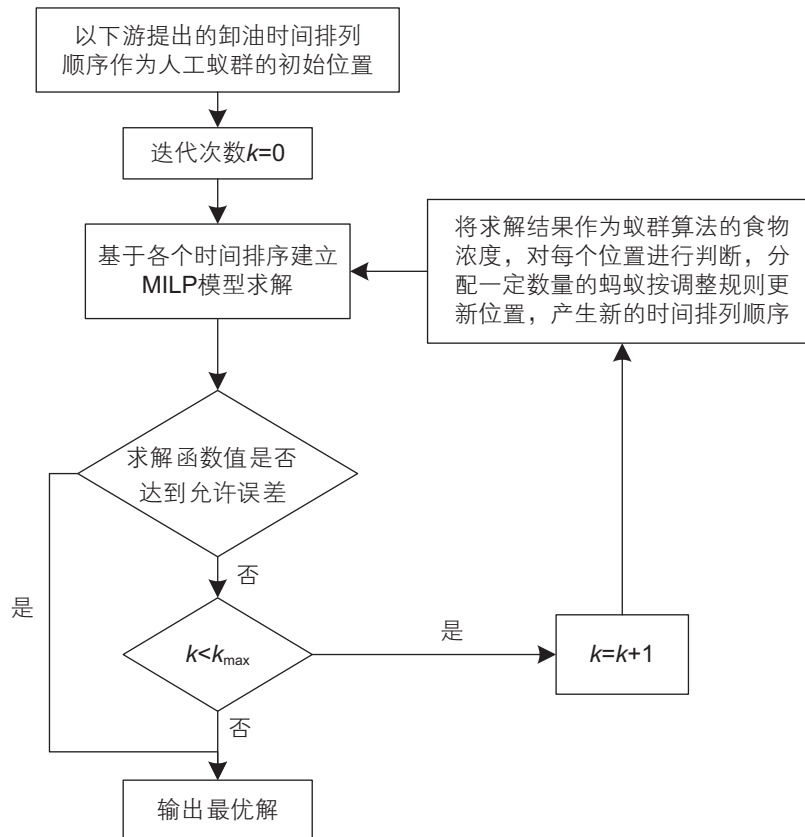


图 1 程序流程图

Fig. 1 Program flow of the scheduling optimization model

表 1 站场基本参数

Table 1 The basic data of stations

站场	类型	重要性系数	流量下限/(m <sup>3</sup> /h)	流量上限/(m <sup>3</sup> /h)
首站	注入站	/	100	500
1#卸油站	卸油站	0.9	100	200
2#卸油站	卸油站	0.8	100	200
3#卸油站	卸油站	0.9	100	200
4#卸油站	卸油站	1	150	250
末站	油库	/	50	200

表 2 管段基本参数

Table 2 The basic data of pipe sections

管段	管容/m <sup>3</sup>	混油流量下限/(m <sup>3</sup> /h)	流量上限/(m <sup>3</sup> /h)
首站—1#卸油站	1402	200	500
1#卸油站—2#卸油站	2452	200	400
2#卸油站—3#卸油站	1395	200	400
3#卸油站—4#卸油站	1456	150	300
4#卸油站—末站	795	150	200

表 3 管道初始状况

Table 3 The initial state of pipeline

批次编号	油品种类	油头体积坐标/m <sup>3</sup>
G95-001	95#汽油	7500
G92-002	92#汽油	1402

求, 只对到站流量范围有限制, 因此提出需求时间窗的站场不包括末站。各卸油站的卸油计划如表 5 所示。本次计划的需求时间总和为 117.5 h, 模型误差取需求

时间总和的 5%, 即 5.88 h。

基于 Matlab R2015a 编程, 分别采用粒子群 (PSO) 算法和本文提出的混合算法对此问题进行求解, 求解结

表 4 注入计划

Table 4 Injection plan

批次编号	油品种类	注入体积/m <sup>3</sup>
G92-002	92#汽油	3500
D00-003	0#柴油	8200
G92-004	92#汽油	1800
G95-005	95#汽油	2300
G92-006	92#汽油	5600

表 5 卸油计划

Table 5 Delivery plan

编号	卸油站	批次编号	开始时间/h	结束时间/h	卸油流量/(m <sup>3</sup> /h)
1	1#卸油站	G92-002	0	10	150
2	1#卸油站	D00-003	22	28	200
3	1#卸油站	G92-006	56	67.5	120
4	2#卸油站	G92-002	9	22	150
5	2#卸油站	D00-003	22	47	100
6	2#卸油站	G92-004	54	58	100
7	2#卸油站	G95-005	58	63	150
8	2#卸油站	G92-006	63	67.5	150
9	3#卸油站	G95-001	4.5	15	200
10	3#卸油站	D00-003	45.5	50	100
11	3#卸油站	G92-004	55	59	100
12	4#卸油站	G95-001	0	4.5	210
13	4#卸油站	D00-003	40	55	150

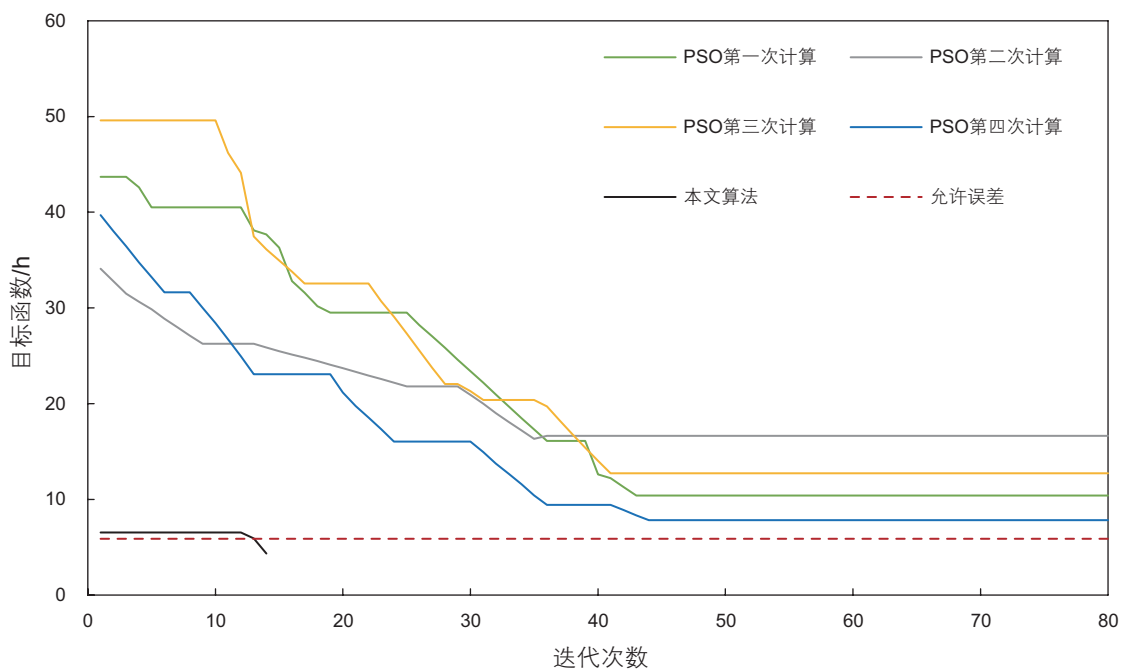


图 2 计算结果对比

Fig. 2 Comparison of calculation results

果如图 2 所示。从结果可以看出，本文算法的收敛速度和效果均优于 PSO 算法。该方法的求解耗时为 29.04 s。

求解出的调度计划如图 3 所示。其中，0#柴油以黄色表示，92#汽油以蓝色表示，95#汽油以绿色表示。图中左侧纵轴表示管道批次初始状态，横向矩形段表示注入(卸油)站的注入(卸油)操作，起、终点对应到横轴时间轴分别代表操作的开始、结束时刻，矩形段宽度代表注入(卸油)流量大小，黑线表示各个混

油界面在管道中的运移过程，斜率代表运移的速度。首站与末站的流量变化如图 4 所示，各管道的流量变化如图 5 所示。

由结果可知，与用户提出的需求时间窗相比，有 3 个时间窗在卸油时间上有一定偏离。其中，2#、6#、11#时间窗的卸油结束时间分别提前了 1.50 h、1.84 h 和 1.00 h，由式(1)可知目标偏离度为 4.34 h。由图 3 可知，当 1#卸油站开始下载 D00-003 批次时，汽柴

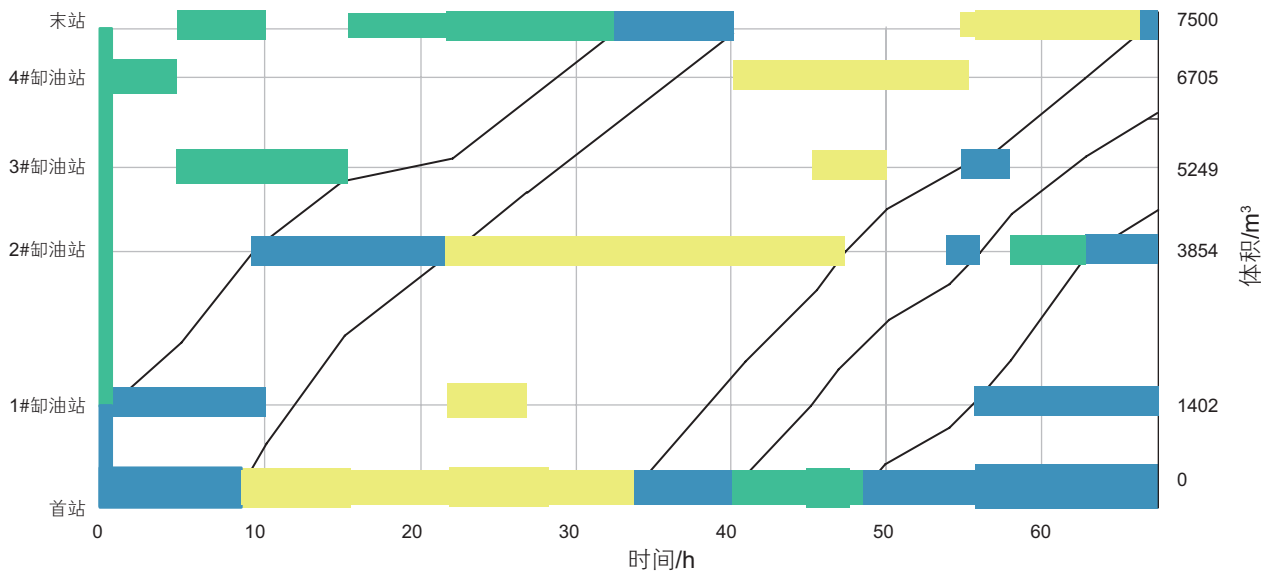


图 3 批次运移图

Fig. 3 Batch transportation diagram

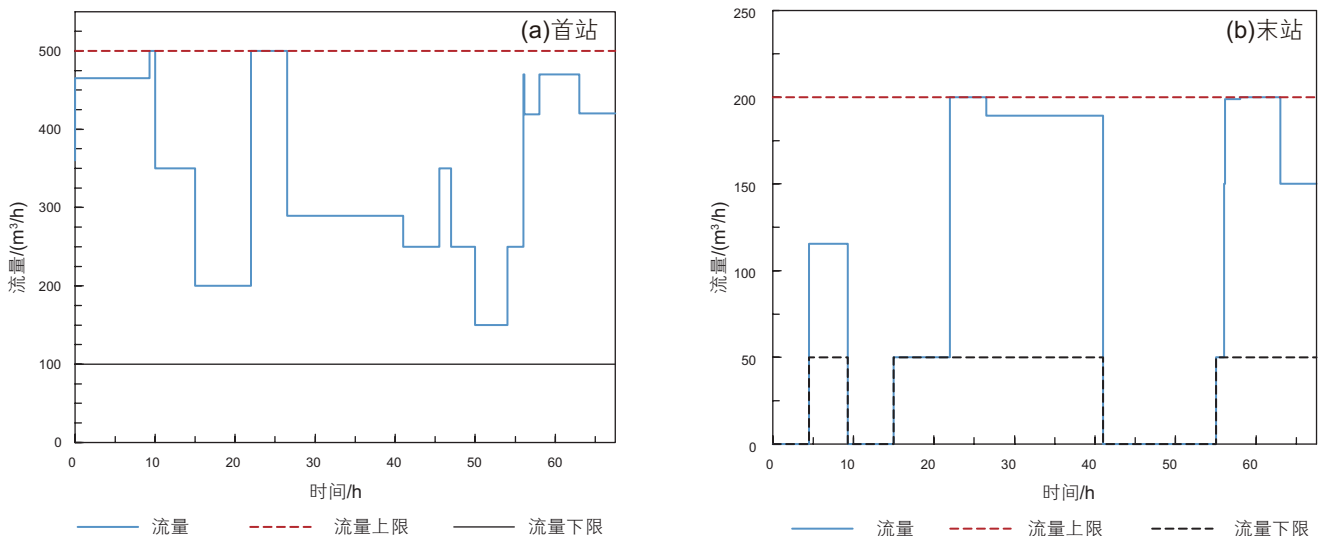


图 4 站场流量变化图

Fig. 4 Fluctuation of flow rates in stations

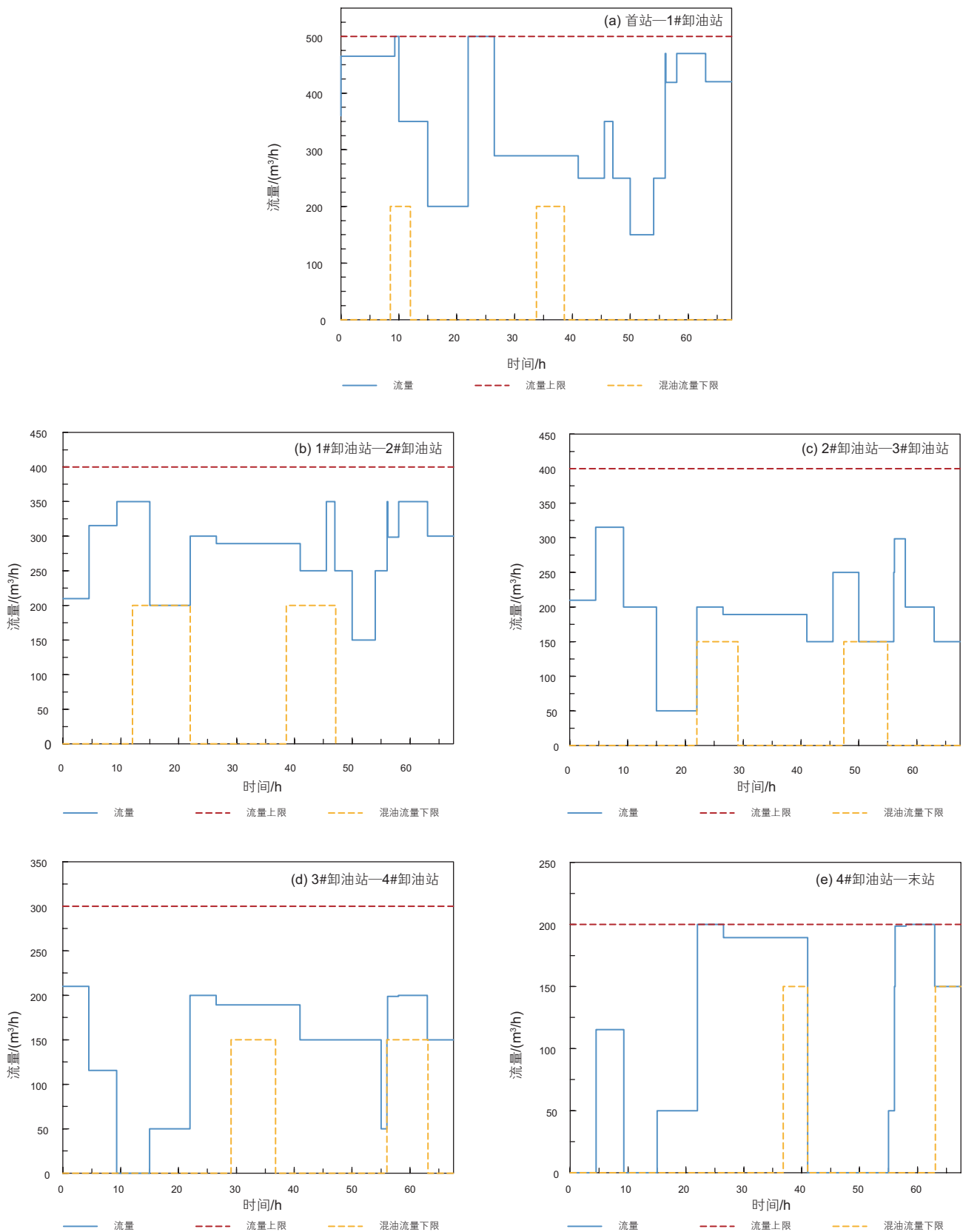


图5 管段流量变化图

Fig. 5 Fluctuation of flow rates in pipeline segments



混油界面已存在于2#卸油站之后的管段内,为尽量减少混油,2#卸油站之后的管段至少以 $150\text{ m}^3/\text{h}$ 的流速运行,而此时2#卸油站也需定流量下载D00-003批次油品,因此首站需以大流量注入D00-003批次。若1#卸油站在28 h才结束卸油操作,则G92-004批次油头会早于47 h到达2#卸油站,2#卸油站将提前结束卸油,同时也会使6#需求时间窗的卸油结束时间提前,从而增加时间窗的总偏差。为了尽量减少整体的时间窗偏移,只能提前2#需求时间窗的卸油结束时间。当计划运行至58 h时,1#、2#、3#卸油站本应同时进行卸油操作,但考虑到混油最小管段流量约束和最大注入流量约束,需提前结束3#卸油站(即11#需求时间窗)的卸油操作。综上所述,本模型求得的调度计划能够在保证管道正常运行的前提下,最大程度地满足用户的需求时间窗。

## 4 结论

(1)本文针对以下游市场为服务对象的商业性成品油管道,考虑了流量约束、批次约束及需求时间窗约束等约束条件,建立以最小需求时间窗偏差为目标的管道调度优化模型,可在需求时间窗和管道初始状况已知的基础上,利用蚁群算法和分支定界法求解出最优的调度计划。

(2)由算例可知,该模型计算速度较快,求解的结果与用户提出的需求时间窗较吻合,符合现场工艺要求。

(3)此模型具有通用性,不局限于某条具体的成品油管道,对现场制定成品油管道调度计划具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 初飞雪,吴长春.成品油管道工艺方案优化设计研究[J].石油学报,2006,02:116-120,124.[CHU F X, WU C C. Optimal design of pipeline for transmitting petroleum products[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 02: 116-120, 124.]
- [2] DUAN Z G, LIANG Y T, GUO Q, et al. An automatic detailed scheduling method of refined products pipeline[C]// IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, 2016: 816-823.
- [3] 梁永图,张浩然,邵奇.成品油管网调度优化研究进展[J].油气储运,2015,07:685-688.[LIANG Y T, ZHANG H R, SHAO Q. Progress in the study on scheduling optimization of products pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 07: 685-688.]
- [4] NEIRO S S, PINTO J M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(6): 871-896.
- [5] REJOWSKI R, PINTO J M. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints[J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(4-5): 1042-1066.
- [6] CAFARO D C, CERDA J. Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections[J]. Computers & Chemical Engineering, 2010, 34(10): 1687-1704.
- [7] CAFARO V G, CAFARO D C, MENDEZ C A, et al. MINLP model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs[J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 72: 210-221.
- [8] CAFARO D C, CERDA J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation [J]. Computers & chemical engineering, 2004, 28(10): 2053-2068.
- [9] REJOWSKI R, PINTO J M. Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(8): 1511-1528.
- [10] MENDEZ C A, HENNING G P, CERDA J. Optimal scheduling of batch plants satisfying multiple product orders with different due-dates[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 24(9-10): 2223-2245.
- [11] MAGATAO L, ARRUDA L V R, JR F N. A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(1): 171-185.
- [12] CAFARO V G, CAFARO D C, MENDEZ C A, et al. Detailed scheduling of single-source pipelines with simultaneous deliveries to multiple offtake stations[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(17): 6145-6165.
- [13] RELVAS S, BARBOSA-POVOA A P F D, MATOS H A. Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(3): 712-730.
- [14] FILHO E M D S, BAHIANSE L. Scheduling a multi-product pipeline network[J]. Computers & Chemical Engineering, 2013, 53: 55-69.
- [15] BOSCHETTO S N, MAGATAO L, BRONDANI W M, et al. An operational scheduling model to product distribution through a pipeline

- network[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(12): 5661–5682.
- [16] 刘增哲, 梁永图, 于达. 洛郑驻成品油管道仿真软件设计[J]. *油气储运*, 2009, 04: 34–37. [LIU Z Z, LIANG Y T, YU D. Design of simulation software for Luoyang-Zhengzhou-Zhumadian oil product pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2009, 04: 34–37.]
- [17] 刘学志, 吴明, 王维强, 王冬冬, 蔡娜. 抚顺-鲅鱼圈成品油管道调度运行管理系统[J]. *油气储运*, 2010, 12: 954–956. [LIU X Z, WU M, WANG W Q, WANG D D, CAI N. Scheduling operating management system for Fushun-Bayuquan products pipeling[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2010, 12: 954–956.]
- [18] 刘静, 郭强, 姜夏雪, 梁永图. 新运行模式下的大西南管道调度计划编制软件[J]. *油气储运*, 2013, 09: 986–989. [LIU J, GUO Q, JIANG X X, LIANG Y T. Scheduling software for Great Southwest Pipeline under new operation mode[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 09: 986–989.]
- [19] 廖绮, 梁永图, 张浩然, 邵奇, 张贺. 基于深度搜索法的成品油管道调度计划自动编制[J]. *油气储运*, 2017, 36(12): 1391–1400. [LIAO Q, LIANG Y T, ZHANG H R, SHAO Q, ZHANG H. An automatic scheduling method for multiproduct pipeline based on depth search [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(12): 1391–1400.]
- [20] 张浩然, 梁永图, 王宁, 任玉鸿, 邵奇. 多源单汇多批次顺序输送管道调度优化[J]. *石油学报*, 2015, 09: 1148–1155. [ZHANG H R, LIANG Y T, WANG N, REN Y H, SHAO Qi. Optimal scheduling of multi-source single-distribution pipeline with multi-batch sequential transportation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 09: 1148–1155.]
- [21] ZHANG H R, LIANG Y, LIAO Q, et al. A hybrid computational approach for detailed scheduling of products in a pipeline with multiple pump stations[J]. *Energy*, 2016, 119: 612–628.
- [22] ZHANG H R, LIANG Y T, XIAO Q, et al. Supply-based optimal scheduling of oil product pipelines[J]. *Petroleum Science*, 2016, 13(2): 355–367.
- [23] 段志刚, 梁永图, 张浩然, 颜筱函, 廖绮. 耦合水力约束的成品油管道调度模型研究[J]. *石油科学通报*, 2017, 01: 115–122[DUAN Z G, LIANG Y T, ZHANG H R, YAN X H, LIAO Q. A multi-product pipeline scheduling model coupled with hydraulic constraints[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 01: 115–122.]

## Optimal scheduling of product pipelines based on demanding time-windows

LIAO Qi, LIANG Yongtu, SHEN Yun, YUAN Meng, ZHANG Haoran

*Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** Product pipelines, serving downstream markets, need to adopt a scheduling mode based on users' demand. So far, some research has focused on the optimization of product pipeline scheduling, but little has considered the demanding time-windows, which often lead to the dissatisfaction of users. Aiming at single-source and multi-distribution product pipelines, this paper sets the minimum deviation between the actual delivery time-windows and users' required time-windows as an objective function and proposed a MILP model solved through the ant colony algorithm and the branch and bound algorithm, which take the constraints of batches, injection, delivery and time nodes into consideration. Then the paper chose one of product pipelines in China as an example, then modeled and solved the detailed scheduling plan. The results demonstrate the strong efficiency and practicability of the model in solving the detailed scheduling plan with only a small deviation.

**Keywords** product pipelines; optimization of scheduling plan; demanding time-window; MILP model; branch and bound; ant colony optimization algorithm

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.020

(编辑 马桂霞)