

文章编号: 1000-8241(2018)07-0762-06

基于离散时间的成品油管网中转油库调度优化

王莉 吴长春 左丽丽 陈海宏 黄燕菲

中国石油大学(北京)

摘要: 中转油库是成品油管网的重要组成部分,在已有文献中,关于成品油管网调度问题的研究,主要集中在各管道批次计划调度方面,未考虑中转油库的油罐收发油调度。针对中转油库的收发调度问题,在完成计划期内油库上下游的收发油任务的前提下,以油罐的切换操作次数最少为目标函数,建立了离散时间 MILP 模型。该模型最大限度地考虑了油库调度的各种约束条件,包括物料平衡约束、油罐的操作规则、油库的拓扑结构和油罐来油后静置约束等。以某油库为例对该模型进行测试,结果表明:该模型可以在较短时间内获得全局最优解,对成品油管网中转油库调度工作具有重要的指导作用。(图 2,表 3,参 20)

关键词: 成品油管网; 中转油库; 调度; MILP; 离散时间

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.07.007

Scheduling optimization of transfer terminal of product pipeline network based on discrete time

WANG Li, WU Changchun, ZUO Lili, CHEN Haihong, HUANG Yanfei

China University of Petroleum (Beijing)

Abstract: Transfer terminal is an important part of product pipeline network. The published literatures on schedule optimization of oil product pipeline network usually focus on the batch plans of each pipeline, without considering the tank loading and unloading schedule of transfer terminals. In this paper, a mixed-integer linear programming (MILP) model with discrete time was developed to deal with the loading and unloading schedule of transfer terminals. This model takes the minimization of tank switching times as the objective function on the premise that the oil loading and unloading assignments before and after the transfer terminal shall be fulfilled in the planned period. Various constraints of transfer terminal scheduling are included in this model as much as possible, e.g., the material balance, the operational rules of oil tanks, the topological structure of transfer terminals and the settling of the oil products stored in a tank. Finally, a certain terminal was taken as example to test this model. It is shown that by virtue of this model, the global optimal solution can be obtained in a shorter time. And it provides important guidance for the scheduling of transfer terminal of product pipeline network.

(2 Figures, 3 Tables, 20 References)

Key words: product pipeline network, transfer terminal, scheduling, MILP, discrete time

中转油库是成品油管网的重要组成部分,在成品油管网中起枢纽作用,油库调度计划制定不好,可能导致部分管道甚至整个管网停输,造成巨大的经济损失。从 2006 年起,逐渐有研究人员对成品油管网的油库调度优化问题进行研究。Relvas 等^[1]以一个葡萄牙分销公司的工程背景为基础,建立了成品油管道调度和中转油库库存管理系统的数学模型。该模型仅

针对油品的库容限制,未考虑每个油罐的罐容限制。Cafaro 等^[2]对 Relvas 提出的模型进行了改进,减少了变量和约束条件的数目,从而大大减少了模型的计算时间。随后,Relvas 等^[3-4]将油库调度优化问题从管道调度问题中独立出来,考虑油库接收炼厂的来油及给下游市场发油,建立了混合整数线性规划(MILP)模型。Marques 等^[5]指出 Relvas 所提出的模型具有一定

的局限性,仅考虑了批次到达油库的时间点,但并未考虑油库内的油罐收满、发空的时间点。因此,Marques在Relvas 2010年提出模型的基础上,考虑了油罐的容量限制,将连续时间变量变成离散时间变量,以8 h为一个时间步长,建立了离散时间表达方式的成品油管道调度模型,可有效缩短计算时间,并能及时更新油罐状态。

炼厂油品调度问题和中转油库调度问题有相似之处,对于炼厂油品调度问题研究活跃^[6-18];陈旋^[6]分别针对3类炼油企业原有调度问题离散和连续时间模型的应用进行了研究,通过对比内陆型炼油企业调度问题的3种现有模型,建立了适用于沿海型炼油企业原油调度问题的多操作序列模型,对多区域型炼油企业及其原油调度问题进行了完整定义,并采用分上下层的方法求解。张玉坤等^[7]提出一种基于事件树的原油混输调度建模和优化方法,采用自然语言建模,定义系统的事件和某一时刻的系统状态,建立针对每种类型事件的触发规则。周祥等^[8]采用约束规划方法建立原油混输模型,利用深度优先搜索策略对模型求解获得了可行的调度方案。周智菊等^[9-10]建立基于异步时间段表征的原油混输调度模型,结果表明虽然模型规模较大,但能在较短求解时间内获得全局最优解。周祥等^[11]针对混合原油性质计算导致原油调度优化模型中出现非线性约束并严重影响模型求解性能的情况,采用分段线性松弛法将非线性约束转化为线性形式,使模型可应对原油多次混合的复杂情况。王子豪等^[12]针对炼油厂操作过程中存在的大量操作不确定性,提出一种基于两层仿真系统的再调度方法,保证了调度指令的稳定性。Terrazas-moreno等^[13]研究了某炼厂成品油罐区调度问题,并建立了连续时间表达的MILP模型,该模型具有一定的代表性,对油库调度问题有一定借鉴意义。Stebel等^[14]研究了炼油厂罐区的短期调度和精馏过程调度问题,建立了数学规划模型并引入启发式搜索技术对模型进行求解。Chryssolouris等^[15]研究了带有储存约束的多级批处理过程调度问题,讨论了基于容量和时间约束的典型存储原则,提出了基于优先级的MILP模型。Sundaramoorthy等^[16]研究了炼油厂油库调度问题,建立了约束逻辑规划(CLP)和MILP相结合的数学模型,并得到比MILP模型更好的结果,其采用启发式搜索技术引导搜索方向,有效减少了计算时间,且模糊系统能够有效表示问题的不

确定性,不仅可以确定常规油库生产活动的调度计划,还可以检测和纠正新的操作方案。Schneider等^[17-18]针对炼油厂的油库调度优化问题,建立了连续时间表达的MILP模型,该模型考虑的计划期为一个月,整个计划期只有一种油品进出油库,油库有9个油罐,一条进油管道、两条发油管道,只给一个消费市场发油,并只接收一个炼厂的来油。

其他关于成品油调度优化问题的文献,主要集中在对成品油管网批次调度问题的研究,其对于管道节点(油库)的处理仅考虑油库的总库容,而未考虑油库内各个油罐的罐容^[19-20]。综上所述,针对成品油中转油库的调度问题,以管网的批次计划为已知条件,考虑中转油库内油罐的容量限制,采用离散时间表达方式,建立中转油库调度优化模型。

1 问题描述

中转油库的任务是将上游管道的来油分配至中转油库的各个油罐中,并发送至下游管道。研究过程中,假设与油库所连接的上游管道来油计划和下游管道发油计划均已知。调度任务是将上游的来油全部接收至各个油罐中,并指派合适的油罐给下游管道发油。要解决的问题就是如何将上游的来油分配至油罐,并且在满足油库操作约束、物料平衡约束、罐容约束、油罐静置时间约束及油库内管道的流程约束等约束条件下,如何将罐中的油品发送到下游管道。

以某中转油库为例,该油库连接多条来油管道,多条发油管道,可处理多种油品的收发操作。由于各来油和发油管道对不同种类油品是按批次顺序输送,且不同种类的油品有专用油罐储存,即不同种类油品的调度互不影响,故可将多种油品的调度问题分解成单种油品的调度问题。

1.1 已知条件

中转油库调度优化问题的已知条件包括:计划期的起止时间、各种油库的操作规则、来油管道和发油管道的输油计划、油库内的油罐信息。其中,油库的操作规则包括:①一个油罐只能接收指定的油品种类;②一个油罐同一时刻只能接收一条管道来油;③一条来油管道的油品同一时刻只能进入一个油罐;④一个油罐同一时刻只能给一条发油管道供油;⑤一条发油管道同一时刻只能由一个油罐发油;⑥油罐不可以同一

时刻既来油又发油;⑦油罐来油作业完成后,应静置一段时间(静置时长应不少于最短静置时长),一方面沉降油品以保证油品质量,另一方面供技术人员检验油品品质。来油和发油管道的输油计划包括各批次油品到达或离开油库的开始、结束时刻及流量。油库内的油罐信息包括油罐的初始罐容、罐容上下限,来油时不得超过罐容上限,发油时不得低于罐容下限。

1.2 待求变量

待求变量为油库内所有油罐在计划期内的收发油调度计划,具体包括:各油罐收发油作业的开始、结束时间;各油罐收发油作业的流量、体积;任一时刻所有油罐所处的状态(来油状态、发油状态、静置状态);任一时刻(包括计划期结束时刻)各个油罐的储量。

2 模型建立

2.1 物料平衡约束

在油库调度过程中,每个油罐在当前时段末的储油量,为该油罐上一时段末的储量加上当前时段的来油体积再减去当前时段的发油体积,表达式为:

$$v_i^t = v_i^{t-1} + \sum_{k \in K} X_{i,k}^t RQ_k^t \Delta t - \sum_{m \in M} Y_{i,m}^t SQ_m^t \Delta t \quad (i \in I, t \geq 1) \quad (1)$$

式中: v_i^t 为在时段 t 末油罐 i 的油品储量, v_i^0 为计划期起始时刻油罐 i 的初始罐容, m^3 ; $X_{i,k}^t$ 为油罐 i 在时段 t 上是否接收来油管道 k 的来油,且 $X_{i,k}^t$ 只能取 1 或 0, $X_{i,k}^t = 1$ 表示接收, $X_{i,k}^t = 0$ 表示未接收; $Y_{i,m}^t$ 为油罐 i 在时段 t 上是否给发油管道 m 发油,且 $Y_{i,m}^t$ 只能取 1 或 0, $Y_{i,m}^t = 1$ 表示发油, $Y_{i,m}^t = 0$ 表示未发油; RQ_k^t 为来油管道 k 在时间段 t 内的来油流量, m^3/h ; SQ_m^t 为发油管道 m 在时间段 t 内的发油流量, m^3/h ; Δt 为时间步长,取 5 h; K 、 M 、 I 分别为来油管道集合、发油管道集合以及油罐集合。

2.2 罐容约束

任意时段末油罐的储量应保持在油罐罐容的上下限之间,表达式为:

$$V_i^{\min} \leq V_i^t \leq V_i^{\max} \quad (i \in I, t \in T) \quad (2)$$

式中: V_i^{\min} 、 V_i^{\max} 分别为油罐 i 的罐容上限、下限, m^3 ; T 为时间段的集合。

2.3 操作规则约束

(1) 同一时段一个油源的来油只能由一个油罐接收,如果某一个来油管道在某一时段有来油计划,那么

将有一个油罐接收该管道的来油,即 $\sum_{i \in I} X_{i,k}^t = 1$, 否则没有油罐接收该管道的来油,即 $\sum_{i \in I} X_{i,k}^t = 0$ 。

$$\sum_{i \in I} X_{i,k}^t = Xr_k^t \quad (k \in K, t \in T) \quad (3)$$

式中: Xr_k^t 为在时段 t 内是否有油品经来油管道 k 到达油库,为已知参数。

(2) 一个油罐同一时段只能接收一条管道的来油,表达式为:

$$\sum_{k \in K} X_{i,k}^t \leq 1 \quad (i \in I, t \in T) \quad (4)$$

(3) 一条发油管道同一时段只能由同一个油罐供油,如果某一条发油管道在某一时段有发油计划,那么

将有一个油罐给该管道发油,即 $\sum_{i \in I} Y_{i,m}^t = 1$, 否则没有油罐给该管道发油,即 $\sum_{i \in I} Y_{i,m}^t = 0$ 。

$$\sum_{i \in I} Y_{i,m}^t = Xs_m^t \quad (m \in M, t \in T) \quad (5)$$

式中: Xs_m^t 为在时段 t 内油库是否给发油管道 m 发油,为已知参数。

(4) 一个油罐同一时段只能给一条管道发油,表达式为:

$$\sum_{m \in M} Y_{i,m}^t \leq 1 \quad (i \in I, m \in M, t \in T) \quad (6)$$

(5) 油罐之间不可以同时收发油,不等式(4)、(6)可以用式(7)代替,其表达式为:

$$\sum_{k \in K} X_{i,k}^t + \sum_{m \in M} Y_{i,m}^t \leq 1 \quad (i \in I, t \in T) \quad (7)$$

2.4 静置时间约束

一个刚刚完成来油的油罐,需要沉降一段时间,以达到油品的合格标准并给检验人员足够的时间检验油品的品质。对于沉降时间的处理,由于建立的数学模型是基于离散时间的表达方式,所以当油罐来油作业后的最短静置时长 T_{BS} 不大于 Δt 时,某一油罐在前一个时段 t 来油,则不允许该油罐在相邻的后一个时段 ($t+1$ 时段)发油,表达式如下:

$$\sum_{k \in K} X_{i,k}^t + \sum_{m \in M} Y_{i,k}^{t+1} \leq 1 \quad (i \in I, t \in T, T_{BS} \leq \Delta t) \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} X_{i,k}^t + \sum_{m \in M} Y_{i,k}^{t + \lceil \frac{T_{BS}}{\Delta t} \rceil + 1} \leq 1 \quad (i \in I, t \in T, T_{BS} > \Delta t) \quad (9)$$

式中: $\lceil \frac{T_{BS}}{\Delta t} \rceil$ 为取整函数。

2.5 目标函数

由于收发油流量大,在较短时间内油罐就能被收满或发空,所以油罐切换操作频繁,不仅会增加现场操作人员的工作量,而且大大降低了油罐库容的利用率。因此,针对油库调度问题,调度员更关注调度计划的可用性而非经济性。故该模型选取的目标函数是使油库内的油罐切换操作最少。

在模型中,批次界面到达油库或者离开油库的时刻意味着油罐切换,但是这种切换的次数是常数,并不会影响最优值。可以借助油罐是否接收发送油品的变量 $X_{i,k}^t, Y_{i,m}^t$ 计算切罐的次数,若时段相邻的 $X_{i,k}^t, Y_{i,m}^t$ 从0变到1或者从1变到0就意味着一次切罐,其表达式如下:

$$Zt_i^t \geq X_{i,k}^t - X_{i,k}^{t-1} \quad (i \in I, k \in K, t \in T, t \geq 2) \quad (10)$$

$$Zt_i^t \geq X_{i,k}^{t-1} - X_{i,k}^t \quad (i \in I, k \in K, t \in T, t \geq 2) \quad (11)$$

$$Zt_i^t \geq Y_{i,m}^t - Y_{i,m}^{t-1} \quad (i \in I, m \in M, t \in T, t \geq 2) \quad (12)$$

$$Zt_i^t \geq Y_{i,m}^{t-1} - Y_{i,m}^t \quad (i \in I, m \in M, t \in T, t \geq 2) \quad (13)$$

式中: Zt_i^t 为油罐*i*在时段*t*是否有切罐操作。

综上,成品油管网中转油库调度优化模型的目标函数为:

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Zt_i^t \quad (14)$$

3 算例

选取某油库为研究对象,该油库连接1条来油管道和2条发油管道,有7个大小规格不同的油罐,可以存放2种油品(图1)。对其中一种油品的调度进行测试,所有油罐都能储存该种油品,计划期为350 h。在这段调度期内,有2个批次到达油库,3个批次离开油库。油库内存放该油品的7个油罐的罐容上下限及计划初期的初始罐容均已知(表1),同时各批次的开始、结束时间及流量均已知(表2)。

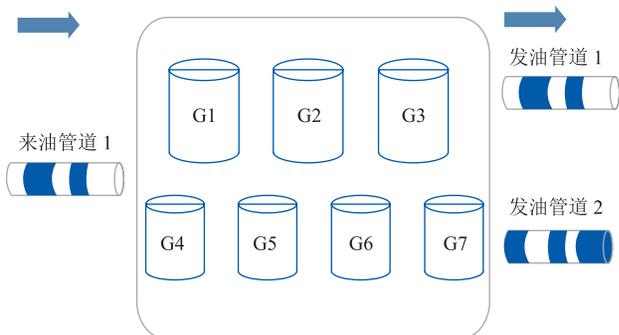


图1 某油库内油罐及管道分布示意图

表1 油罐罐容上下限及初始罐容

油罐编号	容量上限/m ³	容量下限/m ³	初始罐容/m ³
G1	21 186	2 054.4	21 157.0
G2	21 186	2 054.4	21 000.0
G3	21 186	2 054.4	2 054.4
G4	49 455	4 521.6	4 521.6
G5	49 455	4 521.6	49 455.0
G6	49 455	4 521.6	49 455.0
G7	49 455	4 521.6	4 521.6

表2 油库收发油计划

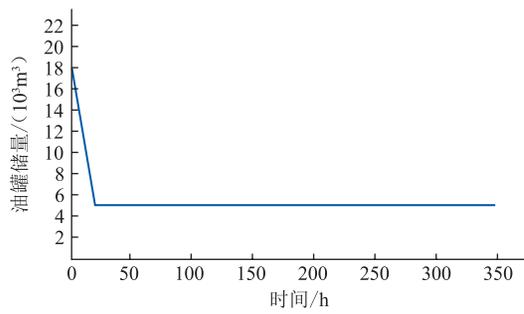
开始时间/h	结束时间/h	来油管道1流量/(m ³ ·h ⁻¹)	发油管道1流量/(m ³ ·h ⁻¹)	发油管道2流量/(m ³ ·h ⁻¹)
0	75	0	0	800
75	135	800	0	800
135	155	650	0	800
155	180	650	0	0
185	270	0	700	0
325	350	0	700	0

采用上述数学模型对该算例进行建模,时间步长设为5 h,将计划期划分成70个时段。该MILP模型具有6 041个约束条件,1 470个二进制变量和490个连续变量。用商业求解器CPLEX 12.3.6对数学模型进行求解,在258 s内可得到最优解,最终得到各油罐的调度计划(表3)及计划期内每个油罐的储量随时间的变化曲线(图2)。结果表明,用商业求解器求解上述数学模型,可在较短时间内求出满足现场调度需求的最优解,同时表明该MILP模型能够完整、准确的描述成品油中转油库的调度优化问题。

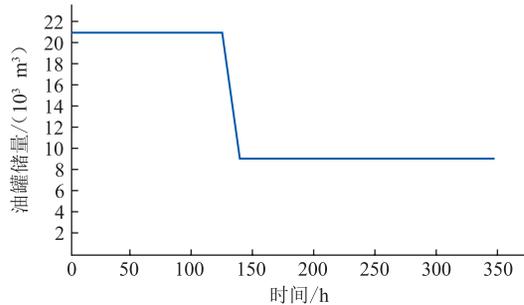
表3 计划期内进行收发操作的油罐调度计划表

油罐编号	开始时间/h	结束时间/h	来发油流量/(m ³ ·h ⁻¹)	所连接管道
G1	0	20	-800	发油管道2
G2	125	140	-800	发油管道2
G3	325	350	650	来油管道1
G5	75	125	-800	发油管道2
	125	135	800	来油管道1
	135	180	650	来油管道1
G6	210	270	-700	发油管道1
	20	75	-800	发油管道2
	75	125	800	来油管道1
G7	140	155	-800	发油管道2
	180	210	-700	发油管道1

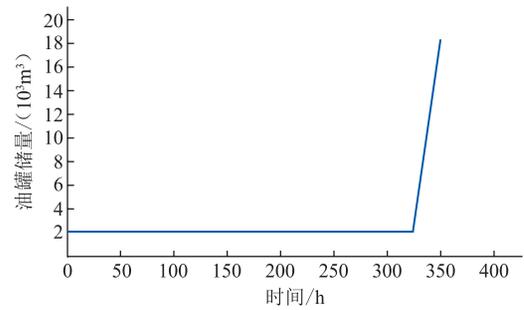
注: 来油流量为正值,发油流量为负值。



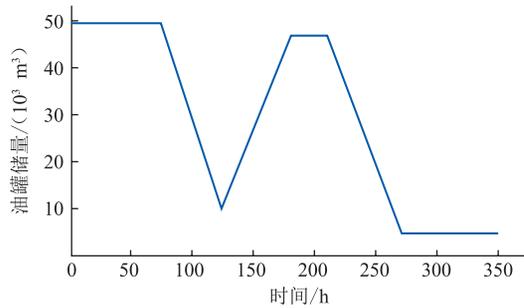
(a)G1 油罐



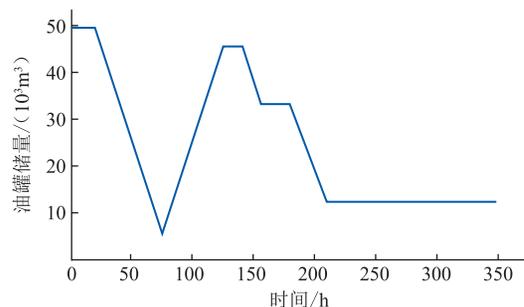
(b)G2 油罐



(c)G3 油罐



(d)G5 油罐



(e)G6 油罐

图2 计划期内各油罐储量随时间变化曲线

4 结论

研究了成品油管网中转油库调度优化问题,针对油库内油罐的收发油调度问题建立了完整的离散时间MILP数学模型,并考虑了符合实际情况的约束和调度要求,包括物料平衡约束、操作规则、油罐来油结束后静置约束等。以某中转油库为研究对象,对该模型进行测试,并用商业求解器求解上述数学模型,在较短时间内求出了满足现场调度需求的最优解,同时表明该MILP模型能够完整、准确地描述成品油中转油库的调度优化问题。

参考文献:

- [1] RELVAS S, BARBOSA-PÓVOA A P F D, MATOS H A, et al. Pipeline scheduling and distribution centre management-A real-world scenario at CLC[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2006, 21(6): 2135-2140.
- [2] CAFARO D C, CERDÁ J. Efficient tool for the scheduling of multiproduct pipelines and terminal operations[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(24): 1733-1742.
- [3] RELVAS S, BARBOSA-PÓVOA A P F D, MATOS H A. Inventory management MILP modeling for tank farm systems[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2010, 28(10): 727-732.
- [4] BOSCHETTO S N, RELVAS S, BARBOSA-PÓVOA A P F D, et al. A decomposition approach for the operational scheduling of a multiproduct pipeline[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2010, 28(10): 1207-1212.
- [5] MARQUES N, MATOS H A, RELVAS S. Inventory management for multi-product tank farm systems using a MILP model with rolling horizon[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2012, 30(4): 472-476.
- [6] 陈旋. 离散和连续时间模型在原油调度问题中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2012: 35-76.
CHEN X. Research of discrete and continuous time models for the crude oil scheduling problem[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012: 35-76.
- [7] 张玉坤, 李初福, 邹来禧, 等. 基于事件树的原油调度建模方法的研究[J]. *石油炼制与化工*, 2009, 40(3): 47-51.
ZHANG Y K, LI C F, ZOU L X, et al. Research of an event tree-

- based approach for crude oil scheduling[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2009, 40(3): 47-51.
- [8] 周祥, 郭锦标, 周涵, 等. 原油混输调度的模型法研究[J]. *石油炼制与化工*, 2008, 39(1): 49-52.
ZHOU X, GUO J B, ZHOU H, et al. Study on modeling method for crude feeding scheduling[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2008, 39(1): 49-52.
- [9] 周智菊, 周祥, 郭锦标, 等. 基于异步时间段的连续时间原油混输调度模型[J]. *石油炼制与化工*, 2015, 46(6): 95-100.
ZHOU Z J, ZHOU X, GUO J B, et al. An asynchronous time slot-based continuous time formulation for scheduling crude oil operations[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2015, 46(6): 95-100.
- [10] 胡益炯. 原油混输调度的建模与优化[D]. 北京: 清华大学, 2007: 1-70.
HU Y J. Modeling and optimization for crude oil scheduling[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007: 1-70.
- [11] 周祥, 周智菊, 吕宁, 等. 原油调度优化中的分段线性松弛研究[J]. *石油炼制与化工*, 2016, 47(8): 93-97.
ZHOU X, ZHOU Z J, LV N, et al. Study on piecewise linear relaxation for crude scheduling optimization[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2016, 47(8): 93-97.
- [12] 王子豪, 荣冈, 冯毅萍. 基于仿真的炼油厂罐区操作再调度策略[J]. *化工学报*, 2012, 63(9): 2755-2765.
WANG Z H, RONG G, FENG Y P. Simulation-based rescheduling strategy of tank farm operations in refinery[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(9): 2755-2765.
- [13] TERRAZAS-MORENO S, GROSSMANN I E, WASSICK J M. A Mixed-Integer linear programming model for optimizing the scheduling and assignment of tank farm operations[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(18): 6441-6454.
- [14] STEBELS L, JR F N, ARRUDA L. A hybrid approach using CLP and MILP applied to tank farm operation scheduling[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2006, 21(6): 2213-2218.
- [15] CHRYSOLOURIS G, PAPAKOSTAS N, MOURTZIS D. Refinery short-term scheduling with tank farm, inventory and distillation management: An integrated simulation-based approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 166(3): 812-827.
- [16] SUNDARAMOORTHY A, MARAVELIAS C T. Modeling of storage in batching and scheduling of multistage processes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(17): 6648-6660.
- [17] SCHNEIDER G A, JR F F, ARRUDA L. An optimization MILP model to integrate tank usage in refinery and pipeline network scheduling[C]. Natal: XLVBPO, 2013: 1420-1431.
- [18] SCHNEIDER G A, NEVES F, MAGATÃO L, et al. A MILP model for the tank farm operation problem of finished products in refineries[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(44): 11542-11565.
- [19] 段志刚. 成品油调度计划编制研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2013: 40-80.
DUAN Z G. Study on the oil product scheduling plan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013: 40-80.
- [20] 梁永图, 鲁岑, 方涛. 成品油管道运行调度研究综述[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(5): 355-359.
LIANG Y T, LU C, FANG T. The overview of scheduling for products pipeline operation[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(5): 355-359.

(收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2018-05-21; 编辑: 张雪琴)

作者简介: 王莉, 女, 1992年生, 在读博士生, 2014年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要成品油管道及油库调度优化技术的研究工作。地址: 北京昌平区府学路18号中国石油大学(北京), 102249。电话: 15201208662, Email: mxdsjyd@163.com

通讯作者: 吴长春, 男, 1962年生, 教授, 1985年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气长距离管输技术的研究工作。地址: 北京昌平区府学路18号中国石油大学(北京), 102249。电话: 18911226218, Email: wucc@cup.edu.cn