

考虑运行平稳性的成品油管道调度方法

涂仁福¹, 徐宁^{1*}, 刘静², 黄晓茵², 廖绮¹, 梁永图¹

1 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室/石油工程教育部重点实验室/城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

2 国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司, 广州 510620

* 通信作者, xn11235@163.com

收稿日期: 2021-03-02

国家自然科学基金项目“成品油供应链物流系统优化及供给侧可靠性研究”(51874325)资助

摘要 成品油管道调度计划是管道完成输送任务的重要运行依据,除了要保证按时、按量地将油品输送到沿线站场外,还应尽量维持管道的平稳运行,提高管道调度整体服务质量。目前,对于采用集中分输工艺的成品油管道,已有国内外调度计划制定研究尚无法将管道运行平稳性因素纳入考虑范围。而且,部分文献证实,若仅以水力约束的方式控制管道流量,会引起管段流量在某一范围内波动频繁的问题,进而会削弱管道运行安全性,致使研究成果脱离工程实际,鲜有落地应用。本文针对单源多汇的成品油管道,在现有研究的基础上,引入了流量波动系数、操作次数上限等适应于集中分输工艺的关键参数,并基于离散时间表达方法提出优化策略。此后,对站场分输工艺、管段运行流量、批次跟踪、预估下载量、下载偏差以及流量偏差等约束进行考虑,并以下载偏差和运行流量波动最小为目标函数,结合现场在相邻站场操作时间节点上改变本站下载流量的人工编制计划经验,构建了管道调度计划自动编制模型,实现了考虑运行平稳性的成品油管道调度计划的快速制定。所建模型应用于我国包含9座站场的某实际成品油管道,在2分钟内能够准确求解出该管道月调度计划;调度计划充分考虑了该管道全分输工艺、一次性下载要求,满足通用性要求;求解结果在运行过程中的正常流量波动占比90%,油品需求偏差控制在-3.23%~3.65%以内,具有较强的工程实用性。本研究成果对于采取集中分输工艺的成品油管道运行企业,在制定调度计划时具有一定的指导意义。

关键词 成品油管道; 调度计划; 运行平稳性; 集中分输; MILP模型

A scheduling method for products pipeline considering operation stability

TU Renfu¹, XU Ning¹, LIU Jing², HUANG Xiaoyin², LIAO Qi¹, LIANG Yongtu¹

1 National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, Ministry of Education Key Laboratory of Petroleum Engineering, Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 PipeChina South China Company, Guangzhou 510620, China

Abstract The pipeline scheduling plan is an important operation basis for the multi-product pipeline to complete its transportation tasks. In addition to ensuring the delivery of products to the stations along the route on time and in the right quantity, it should also maintain the stability of the pipeline as much as possible and improve the overall service quality of the pipeline scheduling. At present, for the multi-product pipeline with centralized distribution process, the domestic and foreign studies

引用格式: 涂仁福, 徐宁, 刘静, 黄晓茵, 廖绮, 梁永图. 考虑运行平稳性的成品油管道调度方法. 石油科学通报, 2022, 03: 447-456

TU Renfu, XU Ning, LIU Jing, HUANG Xiaoyin, LIAO Qi, LIANG Yongtu. A scheduling method for products pipeline considering operation stability. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 447-456. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.039

on scheduling plan development have not been able to take the stability of pipeline operation into consideration. Moreover, some literature confirms that if the pipeline flow is only controlled by hydraulic constraints, it will cause frequent fluctuations in a certain range, which will weaken the safety of pipeline operation, resulting in the research results being detached from the engineering reality and rarely applied on the ground. In this paper, based on the existing research, the key parameters adapted to the centralized distribution process, such as flow fluctuation coefficient and upper limit of operation number, were introduced for the single-source multi-sink pipeline, and the optimization strategy was proposed based on the discrete-time expression method. Thereafter, constraints such as station delivery process, pipeline section operation flow rate, batch tracking, estimated delivery volume, delivery deviation, and flow rate deviation are considered, and the delivery deviation and operation flow fluctuation are minimized as the objective function. Combining with the field experience of manual preparation plan for changing the delivery flow rate of this station at the operation time node in adjacent stations, an automatic preparation model of pipeline scheduling plan is constructed to realize the rapid formulation of pipeline scheduling plan for multi-products considering the stable operation. The model was applied to an actual multi-product pipeline containing 9 stations in China, and the monthly scheduling plan of the pipeline could be solved accurately within 2 minutes; the scheduling plan completely considered the entire delivery process and one-time delivery requirements of the pipeline, and met the generality requirements; the solved results accounted for 90% of the normal flow fluctuation during operation, and the deviation of product demand was controlled within -3.23%~3.65%, which has strong engineering practicality. The research results have certain guiding significance for the multi-product pipeline operation enterprises adopting the centralized distribution process in formulating the scheduling plan.

Keywords multi-product pipeline; scheduling plan; operation stability; centralized distribution; MILP model

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.039

近年来,为了适应市场需求的变化,成品油管道建设向着多油源、多分支、大注入、大分输方向发展^[1-2],形成了成品油管道系统结构复杂、注入分输用户众多、注入批次排序多样等特点。对于采取集中分输工艺的成品油管道,现场会选择在本站或相邻站场有批次油头到站、批次分输量达到需求量等情况下改变操作流量,尽量减小管道沿线流量的波动,从而保证整个管道系统的平稳运行。

成品油管道调度计划编制数学模型的建立方法有2种^[3]。其一是基于连续时间表达^[4-8],该方法能加快求解速度,但模型规模结构趋于复杂,变量间的耦合关系增强。Cafaro^[9-10]等以降低能耗为目标建立了混合整数非线性规划(MINLP)模型,利用水力约束条件改善了管段流量稳定性问题,但该模型变量间非线性关系强,求解难度较大。而与之对应的离散时间表达法^[11-15],能够有效简化模型中的变量间非线性耦合关系。陈海宏^[16-18]、王涛^[19]等将流量波动作为单独考虑因素,利用基于离散时间的整体求解算法,有效控制了较小规模成品油管道的管段流量波动范围,一定程度上解决了运行平稳性问题,但均以平均流量作为比较对象,降低了模型实用性。段志刚^[20]、廖绮^[21]等分别运用不同的算法快速求解了耦合水力约束的MINLP模型,但过多关注于求解速度,未针对下载工艺作出限制,如同一批次油品下载操作次数等。从上述研究看,国内外学者总体上针对成品油管道运行流量平稳性的研究较少,且多集中于以平均流量为基准的连续

分输工艺。

综上所述,对于集中分输工艺的成品油管道,若仅以水力约束的方式控制管输流量,会带来管段流量在某一范围内波动频繁的问题。本文针对单源多汇的成品油管道,充分考虑现场人工编制的经验,以满足需求计划和尽量保持运行流量平稳为目标,克服了分输站对集中分输工艺难以控制流量波动的缺点,保证了管段和站场下载流量的平稳性。

1 模型建立

1.1 模型假设

为了更加高效求解成品油管道批次计划问题,本文建立模型时进行了以下2点假设:①油品为不可压缩流体,不考虑沿线温度、压力的变化对油品体积的影响;②不考虑批次输送时的混油段长度。

1.2 优化策略

本文采用离散时间表达法建立优化模型,以站场油品批次到站时间或分输站下载操作时间为时间节点,将管道的运行过程划分成若干个不等长的时间窗,且每个时间窗内的管道运移过程视作一个稳态过程(图1)。一般而言,各分输站在以下3种情况会产生正常流量波动:①本站(j_c)或上一站(j_c-1)有油品批次到站的时间节点;②本站或上一站开始下载某批次油品及

下载到量的时间节点；③上游管段停输(上游某分输站全分输)。

以图 1 中 j_c 站下载流量变化为例，应优先选在图中第 3、4、5、6、7、8、9、11、12、13 时间节点，此类时间节点为上述介绍的 3 种正常流量波动情况，此时流量波动系数取值最小(可为 0)；其次选择图中

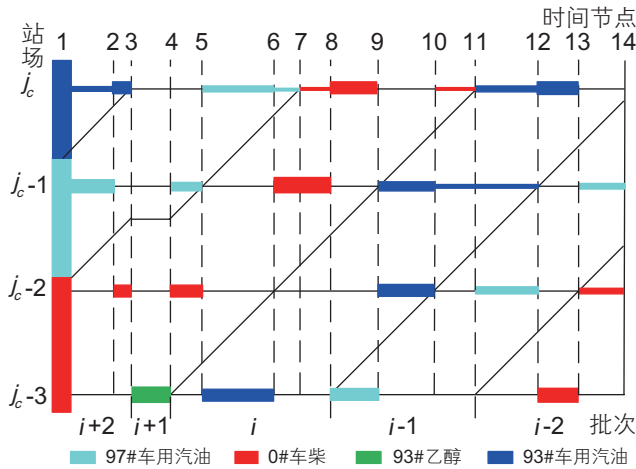


图 1 离散时间节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of discrete time nodes

第 2 时间节点，此类时间节点有 j_c-1 站停止下载操作情况，此时流量波动系数取值居中；除此之外，则选取 j_c-2 、 j_c-3 等站批次到站或停止下载操作的时间节点，此时流量波动系数取值较前文大且依次增大，如图中第 10 时间节点。

为了更快更准确地制定管道调度计划，该优化模型按照管道流向的分输站顺序，以某分输站 (j_c) 下载量偏差及流量波动最小为目标依次优化 j_c 站下载流量及其操作时间，最终制定整条管道的调度计划(图 2)。优化过程的具体步骤如下：

Step1: 输入首站 ($j_c=1$) 注入计划；

Step2: 基于 j_c 站出站流量确定各批次到达 j_c+1 站的时间节点；

Step3: $j_c = j_c + 1$ ；

Step4: 根据 $1 \sim j_c-1$ 站流量改变以及 $1 \sim j_c$ 站批次到站的时间节点划分离散时间窗；

Step5: 根据所划分的时间窗构建 MILP 模型，求解 j_c 站的操作计划和 j_c+1 站的预估操作计划(若 j_c 站为末站则计算结果不包含 j_c+1 站的预估操作计划)；

Step6: 若 j_c 站为末站 (j_{max})，结束计算；否则，调

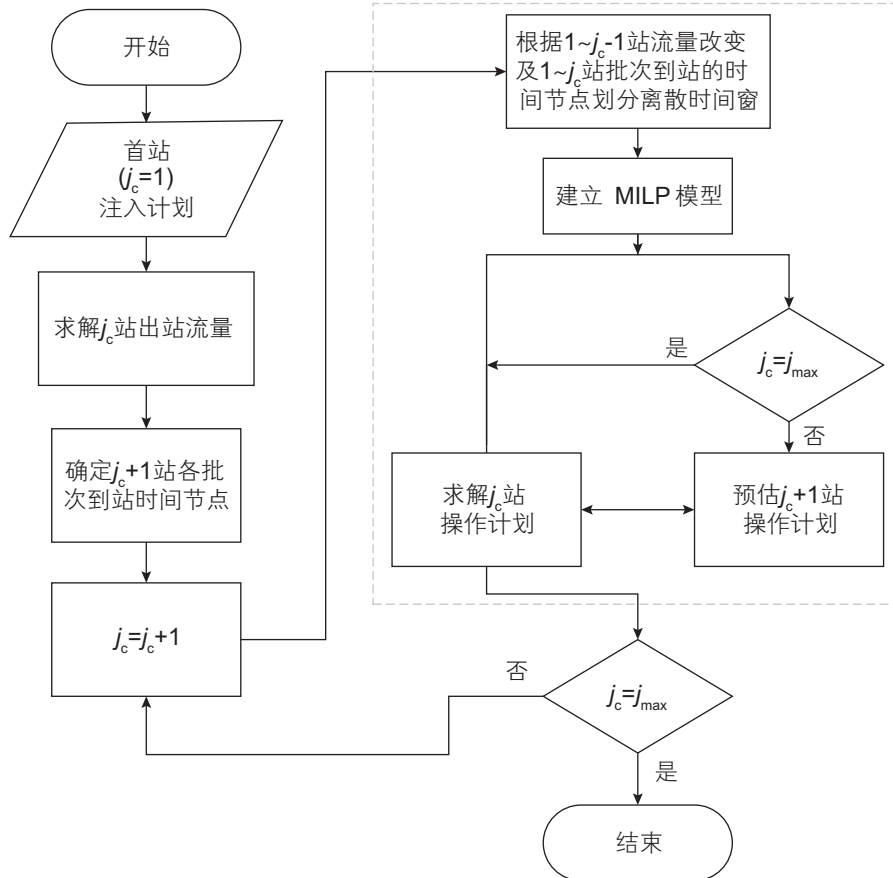


图 2 分输计划优化模型求解算法程序流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm program for solving optimization model of distribution plan

回 step3。

1.3 优化模型

1.3.1 目标函数

以 $K = \{1, 2, \dots, k_{\max}\}$ 来表示研究时间域内所有时间窗的集合, 以 $J = \{1, 2, \dots, j_{\max}\}$ 表示研究对象的所有站场集合, 其中 $j \geq 2$ 时表示分输站(包括末站), 以 $I = \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$ 表示所有输送批次的集合。考虑到“下载流量尽可能保持稳定”的现场工艺要求, 模型以下载偏差和流量波动最小为目标函数, 见式(1)。其中, 下载偏差为本站(j_c)及下一站(j_c+1 , 当 j_c 为末站时无此项)的实际下载量与需求量的偏差之和; 而流量波动为本站下载流量以及出站流量波动之和。模型在目标函数中引入流量波动系数 $\lambda_{k,j}$ (依据站场工艺需求取值, 详见 1.2 节), 用以平衡各时间节点下的流量波动和下载偏差在目标函数中的比重, 避免不必要的流量波动。

$$\min f = \sum_{j=\{j_c, j_c+1\}} \sum_{i \in I_j} V_{j,i}^{D,bias} + \sum_{k < k_{\max}} \sum_{j=j_c} \lambda_{k,j} Q_{k,j}^{D,bias} + \sum_{k < k_{\max}} \sum_{j=j_c} \lambda_{k,j} Q_{k,j}^{S,bias} \quad (1)$$

式中: $V_{j,i}^{D,bias}$ 为第 j 分输站对第 i 批次的下载量与需求量偏差, m^3 ; $\lambda_{k,j}$ 为流量波动系数, h ; $Q_{k,j}^{D,bias}$ 为第 j 分输站在第 k 个时间窗的下载流量波动, m^3/h ; $Q_{k,j}^{S,bias}$ 为第 j 分输站在第 k 个时间窗的出站流量波动, m^3/h ; j_c 为当前站场编号。

1.3.2 约束条件

(1) 流量约束

在制定分输计划时, 分输站的下载流量必须控制在一定范围内, 以满足调节阀、流量计等设备的工作流量要求:

$$X_{k,j}^D q_j^{D,\min} \leq Q_{k,j}^D \leq X_{k,j}^D q_j^{D,\max} \quad \forall j = j_c, k < k_{\max} \quad (2)$$

式中: $X_{k,j}^D$ 为在第 k 个时间窗第 j 分输站下载状态的二元变量, $X_{k,j}^D = 1$ 表示在第 k 个时间窗第 j 分输站进行下载操作, 否则不进行下载操作; $q_j^{D,\max}$ 、 $q_j^{D,\min}$ 分别为第 j 分输站的下载流量上下限, m^3/h ; $Q_{k,j}^D$ 为在第 k 个时间窗第 j 分输站的下载流量, m^3/h 。

管道运行时需满足一定经济流速。为了减小混油段长度, 运行时要求管内油品流态处于紊流:

$$X_{k,j}^S q_j^{S,\min} \leq q_{k,j-1}^S - Q_{k,j}^D \leq X_{k,j}^S q_j^{S,\max} \quad \forall j = j_c, k < k_{\max} \quad (3)$$

式中: $X_{k,j}^S$ 为在第 k 个时间窗第 j 和 $j+1$ 站间管段流动状

态的二元变量, $X_{k,j}^S = 1$ 表示在第 k 个时间窗第 j 和 $j+1$ 站间管段处于流动状态, 否则处于停输状态; $q_j^{S,\max}$ 、 $q_j^{S,\min}$ 分别为第 j 和 $j+1$ 站间管段流量上下限, m^3/h ; $q_{k,j-1}^S$ 为在第 k 个时间窗第 $j-1$ 和 j 站间管段流量, m^3/h 。

(2) 批次约束

模型采用操作约束式(4)~(5)限制分输站下载各批次的操作次数, 从而避免由频繁操作所引起安全隐患以及人力资源的浪费。另外, 由于上游分输站有全分输工艺, 管道停输所引起的下载中断不考虑在内。

$$S_{k,j}^{D,start} \geq X_{k,j}^D - X_{k-1,j}^D - ifstop_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k \in K_{j,i}^J \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_{j,i}^J} S_{k,j}^{D,start} \leq N \quad \forall j = j_c \quad (5)$$

式中: $S_{k,j}^{D,start}$ 为判断在第 k 个时间窗第 j 分输站下载操作状态变化的二元变量, 在第 j 分输站第 $k-1$ 时间窗未下载而第 k 个时间窗开始下载操作时 $S_{k,j}^{D,start} = 1$, 否则 $S_{k,j}^{D,start} = 0$; $ifstop_k$ 为第 k 个时间窗第 $j-1$ 和 j 分输站站间管段输送状态的二元变量, $ifstop_k = 1$ 表示第 k 个时间窗第 $j-1$ 和 j 分输站站间管段可以处于停输状态, 否则只能处于输送状态; $K_{j,i}^J$ 为第 j 分输站下载第 i 批次油品的时间窗集合; N 为各分输站下载各批次油品的操作次数上限。

(3) 预估下载量

为了保证第 j 分输站(非末站)开始分输操作(非全分输)后, 下游站场能够正常执行分输计划, 本文所建立的模型采取预估后一分输站油品下载量的方式进而优化本站下载流量, 若第 $j+1$ 分输站要下载第 i 批次油品, 那么在第 k 个时间窗第 i 批次油品必须到达 j 分输站, 由此需要判断油头是否到达。具体约束如下:

$$\sum_{k'=SE_{j,i}}^{k-1} [(q_{k',j-1}^S - Q_{k',j}^D) \cdot d_{k'}] \leq (v_{j+1} - v_j) + B_{k,j+1,i} \cdot \left[\sum_{k'=SE_{j,i}}^{k-1} (q_{k',j-1}^S \cdot d_{k'}) - v_{j+1} + v_j \right] \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (6)$$

$$(v_{j+1} - v_j) \leq \sum_{k'=SE_{j,i}}^{k-1} [(q_{k',j-1}^S - Q_{k',j}^D) \cdot d_{k'}] + (1 - B_{k,j+1,i}) \cdot \left[\sum_{k'=SE_{j,i}}^{k-1} (q_{k',j-1}^S \cdot d_{k'}) - v_{j+1} + v_j \right] \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (7)$$

式中: $SE_{j,i}$ 为第 i 批次油品到达第 j 分输站的时间节点, h ; $d_{k'}$ 为第 k' 个时间窗步长, h ; v_j 、 v_{j+1} 分别为第 j 分输站和第 $j+1$ 分输站的体积坐标, m^3 ; $B_{k,j+1,i}$ 为表示第 k 个时间窗第 i 批次油品与第 j 分输站相对位置状态的二元变量, $B_{k,j+1,i} = 1$ 表示在第 k 个时间窗第 i 批次油品到

达第*j*分输站, 否则未到达。

当第*i*批次油品油头未到达第*j+1*分输站之前, 该站场的分输量为0:

$$\sum_i \sum_{k \leq SE_{j,i}} V_{k,j+1,i}^D = 0 \quad (8)$$

式中: $V_{k,j+1,i}^D$ 为第*k*个时间窗第*j+1*分输站对第*i*批次油品的预估下载量, m^3 。

若 $B_{k,j+1,i} = 1$, 下一步则预估第 $j_c + 1$ 分输站的累计下载量。当第 $i+1$ 批次油品未到达第 $j_c + 1$ 分输站时, 即 $(B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1} - 1) \cdot q_{k,j}^S \cdot d_k = 0$, $j_c + 1$ 站对第 i 批次油品累计下载量不超过该段时间内下载量上限且不低于下限, 其中下载量上限由 $j_c + 1$ 站最小出站流量(式 9)和最大分输流量共同决定(式 10), 下载量下限由 $j_c + 1$ 站最大出站流量决定(式 11)。

$$V_{k+1,j+1,i}^D \leq V_{k,j+1,i}^D + (q_{k,j-1}^S - Q_{k,j}^D - q_{j+1}^{S,\min}) \cdot d_k + (B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1} - 1) \cdot q_{k,j}^S \cdot d_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (9)$$

$$V_{k+1,j+1,i}^D \leq V_{k,j+1,i}^D + q_{j+1}^{D,\max} \cdot d_k + (B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1} - 1) \cdot q_{k,j}^S \cdot d_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (10)$$

$$V_{k+1,j+1,i}^D \geq V_{k,j+1,i}^D + (q_{k,j-1}^S - Q_{k,j}^D - q_{j+1}^{S,\max}) \cdot d_k - (B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1} - 1) \cdot q_{k,j-1}^S \cdot d_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (11)$$

式中: $q_{k,j-1}^S - Q_{k,j}^D - q_{j+1}^{S,\min}$ 、 $q_{k,j-1}^S - Q_{k,j}^D - q_{j+1}^{S,\max}$ 分别为第 $j+1$ 分输站的最大、最小分输流量, m^3/h 。

当第 $i+1$ 批次油品已经到达第 $j+1$ 分输站时, 即 $(B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1}) \cdot q_{k,j-1}^S \cdot d_k = 0$, 在第 $k+1$ 个时间窗停止分输第 i 批次油品, $V_{k+1,j+1,i}^D = V_{k,j+1,i}^D$ 具体约束如下:

$$V_{k+1,j+1,i}^D \leq V_{k,j+1,i}^D + (B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1}) \cdot q_{k,j-1}^S \cdot d_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (12)$$

$$V_{k+1,j+1,i}^D \geq V_{k,j+1,i}^D + (B_{k,j+1,i} - B_{k,j+1,i+1}) \cdot q_{k,j-1}^S \cdot d_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j, k > SE_{j,i} \quad (13)$$

(4) 下载量及流量偏差

各分输站的实际下载量需尽可能满足其对各批次油品的需求量, 分输站下载量与需求量的偏差约束如下(当*j*为末站时, 不需计算式 16、17):

$$V_{j,i}^{D,bias} \geq \sum_{k \in K_{j,i}^D} Q_{k,j}^D \cdot d_k - v_{j,i}^{D,end} \quad \forall j = j_c, i \in I_j \quad (14)$$

$$V_{j,i}^{D,bias} \geq v_{j,i}^{D,end} - \sum_{k \in K_{j,i}^D} Q_{k,j}^D \cdot d_k \quad \forall j = j_c, i \in I_j \quad (15)$$

$$V_{j+1,i}^{D,bias} \geq V_{k_{\max},j+1,i}^D - v_{j+1,i}^{D,end} \quad \forall j = j_c, i \in I_j \quad (16)$$

$$V_{j+1,i}^{D,bias} \geq v_{j+1,i}^{D,end} - V_{k_{\max},j+1,i}^D \quad \forall j = j_c, i \in I_j \quad (17)$$

式中: $V_{j,i}^{D,bias}$ 为第*j*分输站对第*i*批次油品下载偏差量, m^3 ; $v_{j,i}^{D,end}$ 为第*j*分输站对第*i*批次油品的需求量, m^3 。

在保证本站下载流量稳定的同时也应提高出站流量的稳定性, 从而提升下游站场的运行平稳性。某分输站对某批次油品的下载流量以及出站流量偏差的约束如下:

$$Q_{k,j}^{D,bias} \geq Q_{k,j}^D - Q_{k+1,j}^D \quad \forall j = j_c, k < k_{\max} \quad (18)$$

$$Q_{k,j}^{D,bias} \geq Q_{k+1,j}^D - Q_{k,j}^D \quad \forall j = j_c, k < k_{\max} \quad (19)$$

$$Q_{k,j}^{S,bias} \geq q_{k,j}^S - q_{k+1,j}^S \quad \forall j = j_c, k < k_{\max} \quad (20)$$

$$Q_{k,j}^{S,bias} \geq q_{k+1,j}^S - q_{k,j}^S \quad \forall j = j_c, k < k_{\max} \quad (21)$$

本文所构建的调度计划自动编制模型考虑了流量限制、批次跟踪、预估下载量、下载量及流量偏差等约束条件。在模型的目标函数中引入流量波动系数, 可根据现场工艺灵活取值, 整体上提高了模型通用性。

2 算例分析

本文以某成品油管道为例。该管道共计 9 座站场, 其中 IS 首站为注入站, N1、N2 等下游站场皆为分输站(包括 N8 末站)。批次输送 93# 乙醇、93# 车用汽油、97# 车用汽油和 0# 车柴 4 种油品, 除 93# 乙醇只有 N1 分输站需要外, 其他批次油品在各分输站均可正常下载(图 3)。现场为保证管道运行平稳, 要求各分输站对同一批次油品的下载操作尽可能一次性完成, 且下载过程流量尽可能保持稳定。

该管道的初始状态、首站 IS 的油品注入计划以及各分输站的需求计划如表 1~3 所示。本文的研究内容共包括 18 个批次油品, 其中第 6 批次油品分为 2 段, 一段在初始管存中, 另一段待注入。

基于 MATLAB R2015a 编程, 采用 Gurobi 求解 MILP 模型, 求解总耗时 95 秒。求解所得的调度计划如图 4 所示, 图中左侧纵轴为管道初始状态批次体积坐标, 横向矩形段为各分输站对各批次油品的下载操作时间, 右侧数据为各站场相对里程, 黑线为批次界

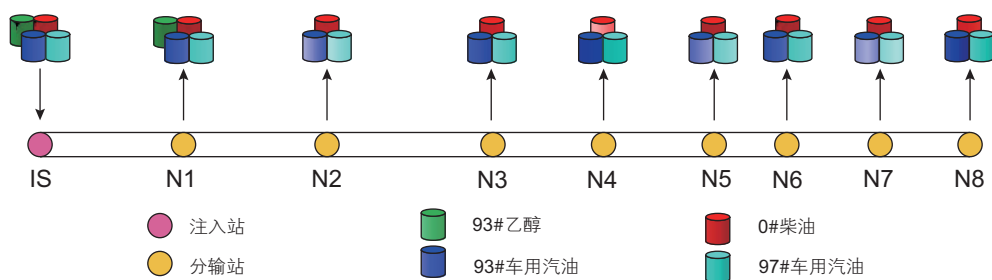


图3 某成品油管道输送示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a products pipeline transportation

面运移过程。管道各分输站的实际下载量见表4。

对求解结果中批次油尾已过分输站的有效数据进行分析：各分输站下载偏差量与需求量的比值在 $-3.23\% \sim 3.65\%$ 之间。N6站在下载第6和第10批次、N7站和N8站在下载第4和第7批次时出现下载

表1 某成品油管道的初始状态

Table 1 The initial state of a products pipeline

| 批次序号 | 油品名称 | 初始油头体积坐标/m ³ |
|------|---------|-------------------------|
| 1 | 93#车用汽油 | 214 724 |
| 2 | 97#车用汽油 | 203 166 |
| 3 | 0#车柴 | 196 886 |
| 4 | 93#车用汽油 | 145 228 |
| 5 | 97#车用汽油 | 103 887 |
| 6 | 0#车柴 | 89315 |

表2 IS首站油品注入计划

Table 2 Oil products injection plan for IS, the first station

| 批次序号 | 油品名称 | 注入量/m ³ |
|------|---------|--------------------|
| 6 | 0#车柴 | 17 590 |
| 7 | 93#乙醇 | 10 811 |
| 8 | 93#车用汽油 | 53 649 |
| 9 | 97#车用汽油 | 20 811 |
| 10 | 0#车柴 | 115 663 |
| 11 | 93#乙醇 | 14 932 |
| 12 | 93#车用汽油 | 50 000 |
| 13 | 97#车用汽油 | 20 892 |
| 14 | 0#车柴 | 115 663 |
| 15 | 93#乙醇 | 14 932 |
| 16 | 93#车用汽油 | 50 000 |
| 17 | 97#车用汽油 | 20 946 |
| 18 | 0#车柴 | 115 663 |

表3 各分输站对油品的需求情况

Table 3 The demand for oil products at each distribution station

| 批次序号 | 油品名称 | 总需求量/m ³ | 分输站需求量/m ³ | | | | | | | |
|------|---------|---------------------|-----------------------|--------|------|------|--------|--------|------|--------|
| | | | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 |
| 1 | 93#车用汽油 | 11 554 | — | — | — | — | — | — | — | 11 554 |
| 2 | 97#车用汽油 | 6284 | — | — | — | — | — | — | 932 | 5351 |
| 3 | 0#车柴 | 51 663 | — | — | — | 2241 | 6747 | 16 289 | 6024 | 20 361 |
| 4 | 93#车用汽油 | 41 338 | — | — | — | 4378 | 6757 | 11 081 | 2703 | 16 419 |
| 5 | 97#车用汽油 | 14 554 | — | — | 1351 | 1622 | 2568 | 2405 | 1081 | 5527 |
| 6 | 0#车柴 | 106 506 | 9639 | 10 241 | 8434 | 8554 | 14 940 | 24 096 | 3012 | 27 590 |
| 7 | 93#乙醇 | 10 811 | 10 811 | — | — | — | — | — | — | — |
| 8 | 93#车用汽油 | 53 649 | 8649 | 2838 | 4054 | 4189 | 6216 | 10 541 | 2703 | 14 459 |
| 9 | 97#车用汽油 | 20 811 | 4730 | 2027 | 1351 | 1757 | 2973 | 1757 | 1081 | 5135 |
| 10 | 0#车柴 | 115 663 | 18 554 | 10 361 | 9639 | 7831 | 15 663 | 23 494 | 3614 | 26 506 |
| 11 | 93#乙醇 | 14 932 | 14 932 | — | — | — | — | — | — | — |
| 12 | 93#车用汽油 | 50 000 | 7973 | 2838 | 4054 | 4730 | 5405 | 8919 | 2162 | 13 919 |
| 13 | 97#车用汽油 | 20 892 | 4730 | 2027 | 1351 | 1703 | 2973 | 1622 | 1081 | 5405 |
| 14 | 0#车柴 | 115 663 | 18 554 | 10 361 | 9639 | 7831 | 22 289 | 20 482 | 3614 | 22 892 |
| 15 | 93#乙醇 | 14 932 | 14 932 | — | — | — | — | — | — | — |
| 16 | 93#车用汽油 | 50 000 | 7973 | 2838 | 4054 | 4730 | 5405 | 8919 | 2162 | 13 919 |
| 17 | 97#车用汽油 | 20 946 | 4730 | 2027 | 1351 | 1757 | 2973 | 1622 | 1081 | 5405 |
| 18 | 0#车柴 | 115 663 | 18 554 | 10 361 | 9639 | 7831 | 15 663 | 23 494 | 3614 | 26 506 |

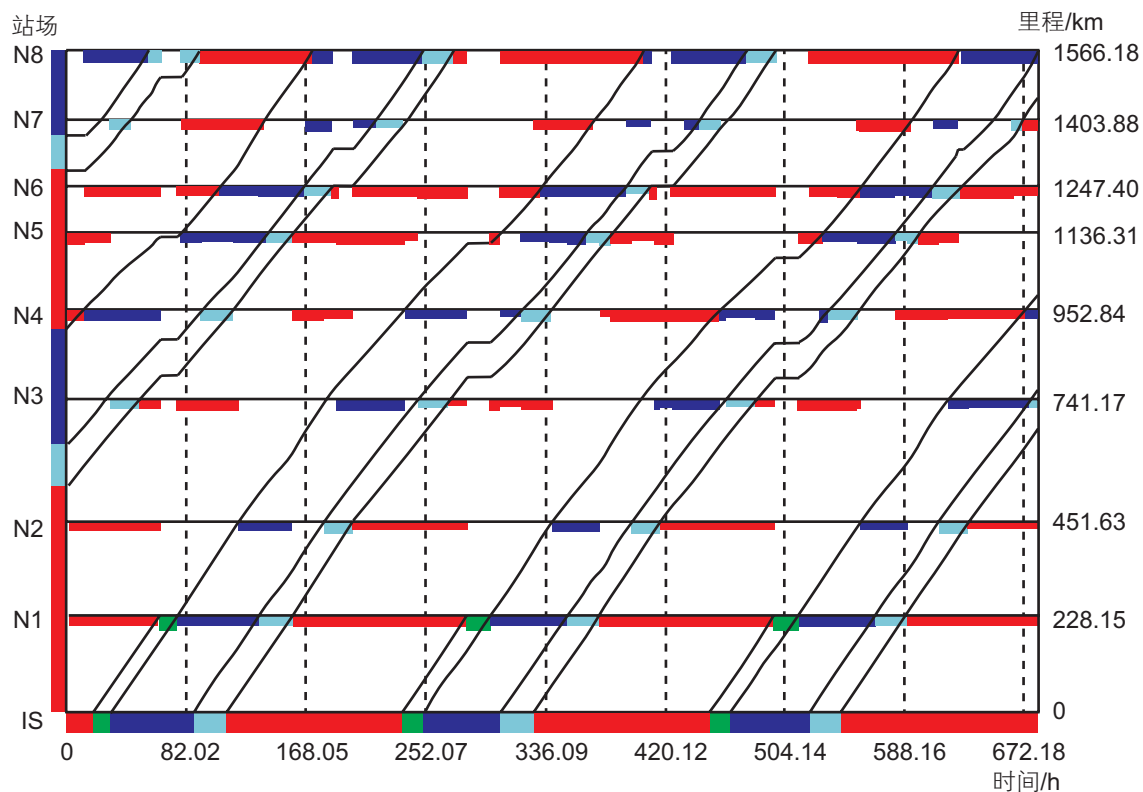


图 4 运行批次带状图

Fig. 4 A strip chart of running batch

表 4 各分输站实际下载量

Table 4 The actual distribution volume of each distribution station

| 批次序号 | 油品名称 | 实际下载总量/m ³ | 实际下载量/m ³ | | | | | | | |
|------|----------|-----------------------|----------------------|--------|------|------|--------|--------|------|--------|
| | | | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 |
| 1 | 93# 车用汽油 | 11 562 | - | - | - | - | - | - | - | 11 562 |
| 2 | 97# 车用汽油 | 6285 | - | - | - | - | - | - | 938 | 5347 |
| 3 | 0# 车柴 | 51 638 | - | - | - | 2177 | 6747 | 16 274 | 6025 | 20 415 |
| 4 | 93# 车用汽油 | 41 298 | - | - | - | 4396 | 6747 | 11 032 | 2696 | 16 427 |
| 5 | 97# 车用汽油 | 14 462 | - | - | 1344 | 1629 | 2474 | 2399 | 1081 | 5534 |
| 6 | 0# 车柴 | 106 514 | 9639 | 10 213 | 8434 | 8504 | 14 970 | 24 109 | 2997 | 27 648 |
| 7 | 93# 乙醇 | 10 807 | 10 807 | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 93# 车用汽油 | 53 989 | 8649 | 2833 | 4050 | 4157 | 6178 | 10 563 | 2694 | 14 865 |
| 9 | 97# 车用汽油 | 20 810 | 4847 | 2037 | 1349 | 1747 | 2973 | 1760 | 1087 | 5010 |
| 10 | 0# 车柴 | 115 340 | 18 554 | 10 271 | 9539 | 7848 | 15 662 | 23 273 | 3558 | 26 635 |
| 11 | 93# 乙醇 | 14 936 | 14 936 | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 93# 车用汽油 | 49 602 | 7973 | 2833 | 4045 | 4657 | 5392 | 9033 | 2106 | 13 564 |
| 13 | 97# 车用汽油 | 15 441 | 4883 | 2023 | 1305 | 1643 | 2938 | 1571 | 1079 | - |
| 14 | 0# 车柴 | 65 100 | 18 555 | 10 271 | 9563 | 7820 | 3325 | 13 620 | 1945 | - |
| 15 | 93# 乙醇 | 14 936 | 14 936 | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 93# 车用汽油 | 15 449 | 7973 | 2800 | 4034 | 643 | - | - | - | - |
| 17 | 97# 车用汽油 | 7269 | 4883 | 2037 | 349 | - | - | - | - | - |
| 18 | 0# 车柴 | 18 907 | 13 835 | 5072 | - | - | - | - | - | - |

进程意外中断,导致未能一次性完成下载油品操作,其原因在于该段时间内N5站对第6和第10批次油品需求量较大,致使下游管段停输,该情况是现场所能接受的,整体上各分输站一次性下载效果较好。在调度周期内,全线各分输站的流量波动均集中在本站或上一站场有批次到站、下载到量、上游管段停输等时间节点,属于正常流量波动,占比90%。例如,N5分输站在有效数据范围内下载流量共波动25次,其中由于本站批次到站流量波动9次,具体为第3~11批次,上一站(N4分输站)批次到站流量波动10次,具体为

第3~12批次,N1站全分输工艺导致管段启停输引起波动3次,具体为第7、11、15批次,N4站停止下载第6批次油品引起波动1次,剩余2次非正常流量波动的原因分别为N2站第9批次油品到站、N1站第12批次油品到站(图4~5、表3~4)。此外,管段流量较为集中,波动范围明显小于管段所允许的流量范围;由于下游管段受限因素较多,整体流量变化情况较上游管段复杂(图6)。

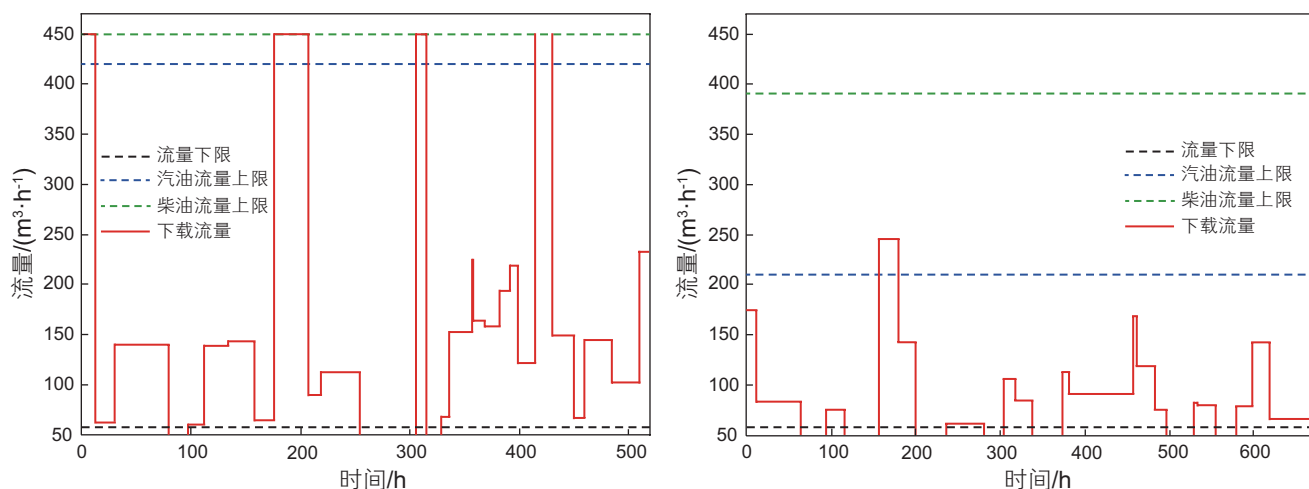


图5 分输站N5(左)、N4(右)下载流量随时间变化曲线

Fig. 5 The time curve of the distribution flow of distribution station N5 (left) and N4 (right)

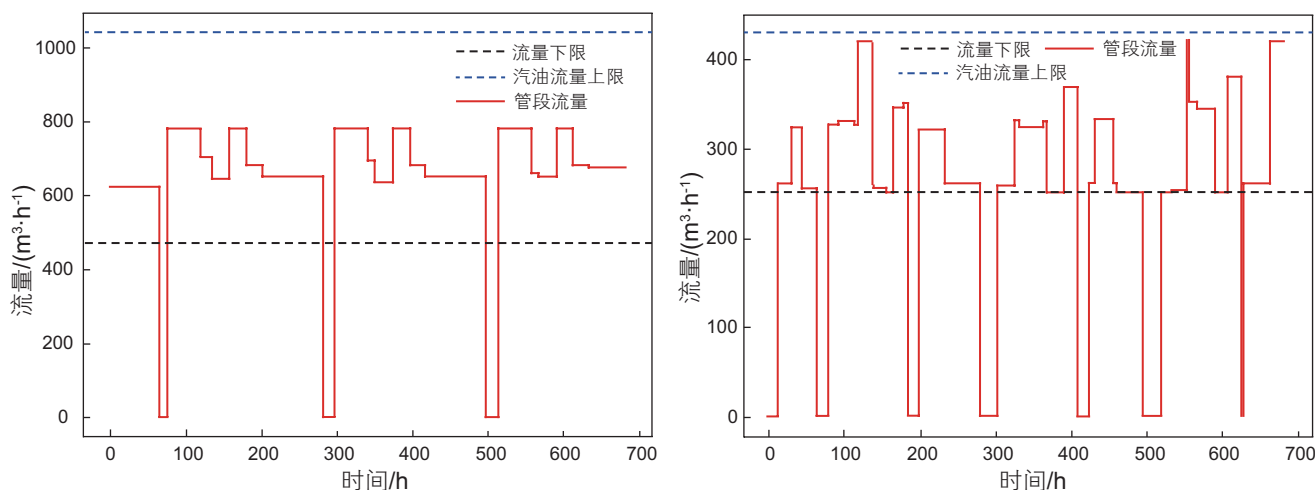


图6 管段N2-N3(左)、N6-N7(右)流量随时间变化曲线

Fig. 6 The time curve of the flow of pipe section N2-N3 (left) and N6-N7 (right)

3 结论

结合现场在相邻站场操作时间节点上改变本站下

载流量的人工编制计划经验,并考虑现场对同一批次油品下载次数的需求,实现了在尽量保持成品油管道运行平稳性的前提下快速制定调度计划。通过算例分析可知,较现场人工编制需要花费1至2天时间而言,

该模型的求解速度较快, 求解结果与分输站实际需求量的偏差范围在 -3.23% ~ 3.65% 之间, 能够较好满足分输站对批次油品一次性下载的工艺要求, 且下载过程流量较为平稳, 正常流量波动占比 90% , 模型适用性较强。此外, 该模型可根据现场具体要求进行调整, 如调整流量波动系数的取值可平衡下载偏差与流量波动之间的关系(式 1)、调整操作次数上限取值可限制同一批次下载操作次数(式 5)等, 具有较强通用性。

参考文献

- [1] 邵奇, 闫亚敏, 黄晓茵, 等. 国内外成品油管道调度研究进展[J]. 油气储运, 2018, 37(05): 481-485. [SHAO Q, YAN Y M, HUANG X Y, et al. Research progress on products pipeline scheduling at home and abroad[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(05): 481-485.]
- [2] 于达, 谢萍, 黄忠胜, 等. 对我国成品油管道建设的几点思考[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 1-4. [YU D, XIE P, HUANG Z S, et al. Several considerations on products pipeline construction in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 1-4.]
- [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, 34(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, 34(07): 685-688.]
- [4] CAFARO D C, CERDÁ J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(10): 2053-2068.
- [5] CAFARO D C, CERDÁ J. Multiperiod planning of multiproduct pipelines[J]. Computer & Chemical Engineering, 2005, 20: 1453-1458.
- [6] CAFARO D C, CERDÁ J. Rigorous formulation for the scheduling of reversible-flow multiproduct pipelines[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 61: 59-76.
- [7] MOSTAFAEI H, CASTRO P M, ALIREZA G H. Short-term scheduling of multiple source pipelines with simultaneous injections and deliveries[J]. Computers & Operations Research, 2016, 73: 27-42.
- [8] MIRHASSANI S A, GHORBANALIZADEH M. The multi-product pipeline scheduling system[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2008, 56(4): 891-897.
- [9] CAFARO V G, CAFARO D C, MÉNDEZ 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.
- [10] 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.
- [11] HREEÁN A, De La CRUZ J M, De ANDRÉS B. A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system[J]. Computers & Chemical Engineering, 2010, 34(3): 401-413.
- [12] REJOWSKI R, PINTO J M. Scheduling of a multiproduct pipeline system[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(1-2): 171-185.
- [13] ZYNGIER D, KELLY J D. Multi-product inventory logistics modeling in the process industries[J]. Optimization & Logistics Challenges in the Enterprise, 2009, 30(5): 61-95.
- [14] 张浩然, 梁永图, 王宁, 等. 多源单汇多批次顺序输送管道调度优化[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1148-1155. [ZHANG H R, LIANG Y T, WANG N, et al. Optimal scheduling of multi-source single-distribution pipeline with multi-batch sequential transportation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1148-1155.]
- [15] 廖绮, 梁永图, 张浩然, 等. 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, et al. An automatic scheduling method for product pipelines based on depth first search method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12): 1391-1400.]
- [16] 陈海宏, 左丽丽, 吴长春, 等. 油品需求型成品油管道分输计划优化[J]. 石油学报, 2019, 40(08): 990-996. [CHEN H H, ZUO L L, WU C C, et al. Optimization on delivery schedules of a multiproduct pipeline based on the oil-demand mode[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(08): 990-996.]
- [17] 陈海宏, 左丽丽, 吴长春, 等. 批次需求型成品油管道的批次计划优化模型[J]. 油气储运, 2018, 37(09): 1000-1004+1012. [CHEN H H, ZUO L L, WU C C, et al. A model for optimizing batch schedules of a products pipeline based on the batch-demand mode[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(09): 1000-1004+1012.]
- [18] CHEN H H, ZUO L L, WU C C, et al. An MILP formulation for optimizing detailed schedules of a multiproduct pipeline network[J]. Transportation Research Part E, 2019, 123: 142-164.
- [19] 王涛. 成品油管道批次顺序输送调度优化研究[D]. 陕西: 西安石油大学, 2016. [WANG T. The Investigation of Batch Transportation

- Scheduling Optimization for Products Pipeline[D]. Shaanxi: Xi'an Shiyu University, 2016]
- [20] 段志刚, 梁永图, 张浩然, 等. 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, 2(1): 115-122. [DUAN Z G, LIANG Y T, ZHANG H R, et al. A multi-product pipeline scheduling model coupled with hydraulic constraints[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(1): 115-122.]
- [21] LIAO Q, ZHANG H R, WANG Y F, et al. Heuristic method for detailed scheduling of branched multiproduct pipeline networks[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 140: 82-101.

(责任编辑 王雨墨 编辑 马桂霞)