

耦合水力约束的成品油管道调度模型研究

段志刚, 梁永图*, 张浩然, 颜筱函, 廖绮

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: 2016-12-12

国家自然科学基金(No.51474228)资助

摘要 成品油管道系统能否经济、高效地运行, 关键在于运营单位编制与执行调度计划的水平。由于成品油管道是一个复杂的密闭水力系统, 仅约束流量难以保证管道总体运行达到最优。当前, 国内外学者针对成品油管道调度优化问题展开大量的研究, 但少有研究将水力约束耦合在内。本文以调度周期内体积总偏差最小为目标函数, 综合考虑了注入、分输、泵站、批次运移、水力等约束, 建立了连续时间的混合整数非线性规划(MINLP)模型, 并将其分解成整数规划(IP)问题及混合整数线性规划(MILP)问题求解。而后, 利用提出的优化模型求解出某条成品油管道的具体优化调度方案和启泵方案。调度周期为 179.7 h, 计算时间 180.32 s。调度计划满足现场需求, 结果表明模型实用、高效。

关键词 成品油管道; 水力耦合; 调度优化; 混合整数非线性规划; 启泵方案

0 引言

截止 2014 年底, 全球成品油管道里程已达 26.7×10^5 km^[1]。在如此庞大的管道规模下, 管道调度的重要性就更为凸显。成品油管道系统能否经济、高效地运行, 关键在于运营单位编制与执行调度计划的水平。多批次成品油管道调度问题是针对多批次输送的运行模式, 根据炼厂生产计划及下游市场的需求计划, 制定出管道的整体调度计划。高效确定各源点的注入计划、各下载站的下载计划、各泵站的启泵方案以及最小运行成本是管道调度优化的实质所在^[2]。

Rejowski 等^[3-4]建立了首站向 5 个分输站输送 4 种油品的离散时间 MILP 模型。由于存在大量的二进制变量, 模型求解时间较长。随后, Rejowski 等^[5]和 Cafaro 等^[6-8]分别提出了基于连续时间的 MINLP 和 MILP 模型。模型采用较少的二进制变量和约束条件, 使得求解速度大幅度提高。Cafaro 和 Cerda^[9]提出

多源单汇管网调度的 MILP 模型, 该模型考虑了多个注入站同时注入油品的情形。而后 Mirhassani 等^[10]、Cafaro^[11]等在建立多源单汇管网的模型时考虑了能耗问题。Mirhassani 和 Jahromi^[12]、Cafaro 和 Cerda^[13]对单源多汇管网提出连续时间 MILP 方法, 不同的是前者假设支线只能输送一种油品, 后者允许不同的油品进入支线。Zhang 等人^[14]提出了一种混合算法求解基于供给的单源多汇成品油管道调度优化问题, 算法可以求解出详细的调度计划。后来 Zhang 等人^[15]基于之前的研究, 考虑了多泵站工艺约束, 采用一种两阶段算法对模型进行求解。虽然前人对成品油管道调度优化进行了大量的研究, 但是很少研究对水力约束进行详细讨论, 多是把压力约束规约于流量约束进行考虑, 规约的流量范围相对保守, 不能使管道运行达到最优。本文综合考虑批次运移、注入、分输等约束建立了耦合水力的成品油管道批次调度优化 MINLP 模型。采用混合算法对模型进行求解, 得出最终注入及下载方案。

引用格式: 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. 石油科学通报, 2017, 01: 115-122

DUAN Zhi-gang, LIANG Yong-tu, ZHANG Hao-ran, YAN Xiao-han, LIAO Qi. A multi-product pipeline scheduling model coupled with hydraulic constraints. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 115-122. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.011

1 模型建立

本文设 $i \in I$ 为站场编号的集合； $j \in J$ 为批次编号的集合； $l \in L$ 为油品编号的集合； $tc \in TC$ 为时间节点编号的集合； $pa \in PA$ 为节点压力的集合。

1.1 模型假设

(1) 假设输送的油品是不可压缩流体，即体积不随温度和压力变化；

(2) 假设混油批次为一个界面。

1.2 目标函数

模型以各站的实际下载量与需求量偏差之和最小为目标函数。存在偏差时，分2种情况：下载量大于需求量或下载量小于需求量。各站的重要程度不同，产生偏差所造成的损失也不同。

$$\min F = \sum_i \sum_l dvm_{i,l} |Vs_{i,l} - Vx_{i,l}| \quad (1)$$

$$i \in I, l \in L$$

$$\begin{cases} dvm_{i,l} = dv_{i,l}^1 & \text{if } (Vs_{i,l} - Vx_{i,l}) \geq 0 \\ dvm_{i,l} = dv_{i,l}^2 & \text{if } (Vs_{i,l} - Vx_{i,l}) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$i \in I, l \in L$$

其中： $dvm_{i,l}$ 为 i 站对 l 油品需求与实际下载偏差造成的损失单价，CNY/m³； $dv_{i,l}^1$ 为 i 站对 l 油品过量下载造成的损失单价，CNY/m³； $dv_{i,l}^2$ 为 i 站实际下载未能满足对 l 油品需求造成的损失单价，CNY/m³； $Vx_{i,l}$ 为 i 站对 l 油品需求体积，m³； $Vs_{i,l}$ 为 i 站对 l 油品实际的下载体积，m³。

1.3 约束条件

1.3.1 分输约束

各个站场下载油品的总量为实际下载量。

$$Vs_{i,l} = \sum_j \sum_{tc=\tau b_{i,j}}^{\tau b_{i,j}+1} Vu_{i,tc} ifl_{i,j} \quad (3)$$

$$j \in J, tc \in TC, i \in I, l \in L$$

其中： $\tau b_{i,j}$ 为 j 批次油头到达 i 站时间点编号； $Vu_{i,tc}$ 为 i 站在 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间的下载体积，m³； $ifl_{i,j}$ 为油品类型二元参数，若 j 批次输送 l 油品则 $fl_{i,j} = 1$ ，否则 $fl_{i,j} = 0$ 。

每个站的下载流量不能大于该时刻前一段管道内的流量，且下载不同油品的流量上限也不同。

$$Vu_{i,tc} \leq (t_{tc+1} - t_{tc}) Qda_{i,l} + (1 - ifl_{i,tc,l}) M$$

$$i \in I, l \in L, tc \in TC \quad (4)$$

其中： $Qda_{i,l}$ 为 i 站下载 l 油品的流量上限，m³/h； $ifl_{i,tc,l}$ 为下载油品二元变量，若 i 站 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间下载 l 油品则 $ifl_{i,tc,l} = 1$ ，否则 $ifl_{i,tc,l} = 0$ ； M 为极大值，其他变量同前。

过站油品是该站场需求的油品，且该批次油头已到达该站场，则站场可以下载该批次油品。

$$ifl_{i,tc,l} \geq \frac{ifl_{i,j} + \sigma d_{tc,i,j} - 1}{2} \quad (5)$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC$$

其中： $\sigma d_{tc,i,j}$ 为批次到站二元变量，若 j 批次 tc 时间点到达 i 站则 $\sigma d_{tc,i,j} = 1$ ，否则 $\sigma d_{tc,i,j} = 0$ ；其他变量同前。

一个站场在同一时间窗内最多只能下载一种油品。

$$\sum_l ifl_{i,tc,l} \leq 1 \quad i \in I, l \in L, tc \in TC \quad (6)$$

式中变量同前。

时间节点 tc 的数学表达式。

$$\sum_{tc} tc \sigma d_{tc,i,j} = \tau b_{i,j} \quad i \in I, j \in J, tc \in TC \quad (7)$$

式中变量同前。

一个时间点有且只有一个批次经过站场。

$$\sum_j \sigma d_{tc,i,j} = 1 \quad i \in I, j \in J, tc \in TC \quad (8)$$

式中变量同前。

1.3.2 批次运移约束

过站流量需大于管段内允许的最小流量。当管段中不存在混油界面时，其最小流量根据泵机组以及计量设备限制决定，称此流量约束为设备流量下限约束。考虑到混油扩散的问题，当管段中存在批次界面时，需要保证管段雷诺数大于临界雷诺数，称此流量约束为混油流量下限约束。

$$Vj_{tc} - \sum_i Vu_{i,tc} \geq (t_{tc+1} - t_{tc}) Qfi_{i,l} + (iftp_{i,tc,l} - 1) M \quad (9)$$

$$i \in I, l \in L, tc \in TC$$

$$Vj_{tc} - \sum_{i'=1}^i Vu_{i',tc} \geq (t_{tc+1} - t_{tc}) Qfin_i \quad (10)$$

$$i \in I, tc \in TC$$

其中： Vj_{tc} 为 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点首站注入体积，m³； $Qfi_{i,l}$ 为 l 油品油头在 i 站到 $i+1$ 站之间管道时的流量下限，m³； $iftp_{i,tc,l}$ 为油头运移二元变量，若在 tc 时间点与 $tc+1$ 时间点之间 i 站到 $i+1$ 站存在输送 l 油品批次油头， $iftp_{i,tc,l} = 1$ ，否则 $iftp_{i,tc,l} = 0$ ； $Qfin_i$ 为 i 站到 $i+1$ 站之间的管道流量下限，m³/h；其他变量同前。

考虑到泵机组以及计量设备约束, 管段流量应小于管段允许的流量上限。式(11)为 $i \sim i+1$ 管段存在批次界面的情况; 式(12)为 $i \sim i+1$ 管段不存在批次界面的情况。

$$Vj_{tc} - \sum_i V u_{i,tc} \leq (t_{tc+1} - t_{tc}) Q f a_{i,l} + (1 - i f p_{i,tc,l}) M$$

$$i \in I, l \in L, tc \in TC \quad (11)$$

$$Vj_{tc} - \sum_{i'=1}^i V u_{i',tc} \leq (t_{tc+1} - t_{tc}) Q f a_{i,i}$$

$$i \in I, tc \in TC \quad (12)$$

其中: $Q f a_{i,l}$ 为 l 油品的批次油头在 i 站到 $i+1$ 站之间管段时的流量上限, m^3/h ; $Q f a_{i,i}$ 为 i 站到 $i+1$ 站之间管段的流量上限, m^3/h ; 其他变量同前。

如果批次界面位于管段起终点之间, 则该管段内存在批次界面。

$$i f p_{i,tc,l} \geq \frac{i f l_{i,j} + \sigma d_{tc,i,j} - 1}{2}$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (13)$$

$$i f p_{i,tc,l} \leq \frac{i f l_{i,j} + \sigma d_{tc,i,j}}{2}$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (14)$$

式中变量同前。

根据体积守恒原则, 首站注入量等于沿线所有站场下载量之和。

$$Vj_{tc} = \sum_i V u_{i,tc} \quad tc \in TC \quad (15)$$

式中变量同前。

油品在管道中的位置用体积坐标的形式表示。

$$V z_i - V b_j = \sum_{tc=1}^{\tau b_{j,j}-1} V j_{tc} - \sum_{i'=1}^i \sum_{tc=\tau b_{i,j}}^{\tau b_{i,j}-1} V u_{i',tc}$$

$$i \in I, j \in J \quad (16)$$

其中: $V z_i$ 为 i 站站场的体积坐标, m^3 ; $V b_j$ 为 j 批次注入体积, m^3 ; 其他变量同前。

1.3.3 注入约束

在一定的时间内, 首站的注入体积应小于该时段的流量上限与时长的乘积。

$$V j_{tc} \leq (t_{tc+1} - t_{tc}) Q_{\max} \quad tc \in TC \quad (17)$$

其中: Q_{\max} 为首站注入流量上限, m^3/h ; 其它变量同前。

在一定的时间内, 首站的注入体积应大于该时段的流量下限与时长的乘积。

$$V j_{tc} \geq (t_{tc+1} - t_{tc}) Q_{\min} \quad tc \in TC \quad (18)$$

其中: Q_{\min} 为首站注入流量下限, m^3/h ; 其他变量同前。

批次在首站的注入体积应等于注入该批次的时间节点到下一个注入批次油头的时间节点之间的注入总体积。

$$V b_j = \sum_{tc=\tau j b_j}^{\tau j b_j-1} V j_{tc} \quad j \in J \quad (19)$$

式中变量同前。

新批次的体积坐标等于该批次研究的开始时刻到注入该批次开始时刻之间首站注入总体积的负值。

$$V b_{\text{new}} = - \sum_{tc=1}^{\tau j b_j-1} V j_{tc} \quad j \in J, tc \in TC \quad (20)$$

其中: $V b_{\text{new}}$ 为新注入批次的体积坐标, m^3 ; 其他变量同前。

1.3.4 水力约束

泵站提供的压能要克服沿程摩阻及高程差。同时, 管道各个节点也应满足水力约束, 即油品到达泵站时, 入口压力需大于泵站的最小进站压力。式(21)为站间存在批次界面时的表达式, 式(22)为站间不存在批次界面时的表达式。

$$(t_{tc+1} - t_{tc}) P r_{\min i} + (1 - i f i p_{i,tc,l,l'}) M \leq \sum_{i'=1}^{i-1} (t_{tc+1} - t_{tc}) P a_{i',tc}$$

$$- \sum_{i'=1}^{i-1} \left[\beta_{i'} \bar{v}_{l,l'}^{0.25} \left(V j_{tc} - \sum_{i''=1}^{i'} V u_{i'',tc} \right) Q f a_{i'}^{0.75} \right] \bar{\rho}_{l,l'} -$$

$$(t_{tc+1} - t_{tc}) \sum_{i'=1}^{i-1} \bar{\rho}_{l,l'} (Z_{i'+1} - Z_{i'})$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (21)$$

$$(t_{tc+1} - t_{tc}) P r_{\min i} + (1 - i f p p_{i,tc,l}) M \leq \sum_{i'=1}^{i-1} (t_{tc+1} - t_{tc}) P a_{i',tc}$$

$$- \sum_{i'=1}^{i-1} \left[\beta_{i'} v_l^{0.25} \left(V j_{tc} - \sum_{i''=1}^{i'} V u_{i'',tc} \right) Q f a_{i'}^{0.75} \right] \rho_l -$$

$$(t_{tc+1} - t_{tc}) \sum_{i'=1}^{i-1} \rho_l (Z_{i'+1} - Z_{i'})$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (22)$$

其中: $P r_{\min i}$ 为 i 站最小进站压力, Pa; $i f i p_{i,tc,l,l'}$ 为混油运移二元变量, 若 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间 i 站到 $i+1$ 站之间存在 l 油品与 l' 油品混油, $i f i p_{i,tc,l,l'} = 1$, 否则 $i f i p_{i,tc,l,l'} = 0$ 。 $i f p p_{i,tc,l}$ 为站间充满单一油品的二元变量, 若 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间 i 站到 $i+1$ 站之间充满 l 油品则 $i f p p_{i,tc,l} = 1$, 否则 $i f p p_{i,tc,l} = 0$; $\beta_{i'}$ 为列宾宗摩阻计算系数; Z_i 为 i 站高程, m; $\bar{v}_{l,l'}$ 为 l 油品与 l' 油品的平均黏度, Pa·s; $\bar{\rho}_{l,l'}$ 为 l 油品与 l' 油品的平均密度, kg/m^3 ; v_l 为 l 油品的平均黏度, Pa·s; ρ_l 为 l 油品的平均密度, kg/m^3 ; $P a_{i,tc}$ 为 i 站 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间时刻提供的压力, Pa; 其它变量同

前。

站间存在批次界面时,混油运移二元变量满足如下约束。

$$ifip_{i,tc,l,l'} \geq \frac{ifl_{l,j} + ifl_{l',j+1} + \sigma p_{tc,i,j} - 2}{3}$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (23)$$

其中: $\sigma p_{tc,i,j}$ 为站间是否存在批次界面的二元变量,若在 i 站和 $i+1$ 站之间存在批次界面则 $\sigma p_{tc,i,j} = 1$, 否则 $\sigma p_{tc,i,j} = 0$; 其他变量同前。

站间不存在批次界面时,站间充满单一油品的二元变量满足如下约束。

$$ifpp_{i,tc,l} \geq \frac{ifl_{l,j} + \sigma pp_{tc,i,j} - 1}{2}$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (24)$$

$$ifpp_{i,tc,l} \leq \frac{ifl_{l,j} + \sigma pp_{tc,i,j}}{2}$$

$$i \in I, j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (25)$$

其中: $\sigma pp_{tc,i,j}$ 为站间充满单一批次的二元变量,若 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间 i 站到 $i+1$ 站之间充满 j 批次则 $\sigma pp_{tc,i,j} = 1$, 否则 $\sigma pp_{tc,i,j} = 0$; 其他变量同前。

同一时刻,站间只可能处于存在批次界面或不存在批次界面两种状态,不可同时存在。

$$\sum_l \sum_{l'} ifip_{i,tc,l,l'} + \sum_l ifpp_{i,tc,l} = 1$$

$$i \in I, l \in L, tc \in TC \quad (26)$$

式中变量同前。

站间只有一种油品时, $j+1$ 批次到达上游站场 i 的时间应大于等于时间节点 tc , j 批次达到下游站场 $i+1$ 的时间应小于等于时间节点 tc 。

$$\tau b_{i,j+1} - tc \geq (\sigma pp_{tc,i,j} - 1)M$$

$$i \in I, j \in J, tc \in TC \quad (27)$$

$$tc - \tau b_{i+1,j} \geq (\sigma pp_{tc,i,j} - 1)M$$

$$i \in I, j \in J, tc \in TC \quad (28)$$

式中变量同前。

泵站提供的压力如下式表示。

$$Pa_{i,tc} + (1 - ifl_{tc,l,i})M \geq Ha_i \rho_i g$$

$$i \in I, l \in L, tc \in TC \quad (29)$$

$$Pa_{i,tc} + (ifl_{tc,l,i} - 1)M \leq Ha_i \rho_i g$$

$$i \in I, l \in L, tc \in TC \quad (30)$$

其中: Ha_i 为 i 泵站能提供的扬程, m ; 其他变量同前。

根据批次过站二元变量定义,应该满足如下约束。

$$ifl_{tc,l,i} \geq \frac{ifl_{l,j} + \sigma j_{tc,j,i} - 1}{2}$$

$$j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (31)$$

其中: $ifl_{tc,l,i}$ 为批次过站二元变量,若 l 油品 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间正在通过 i 站则 $ifl_{tc,l,i} = 1$, 否则 $ifl_{tc,l,i} = 0$; $\sigma j_{tc,j,i}$ 为批次过站二元变量,若 j 批次 tc 时间点到 $tc+1$ 时间点之间正在通过 i 站则 $\sigma j_{tc,j,i} = 1$, 否则 $\sigma j_{tc,j,i} = 0$; 其他变量同前。

一个站场在同一时刻只能经过一种油品。

$$\sum_i \sum_l ifl_{tc,l,i} = 1$$

$$j \in J, l \in L, tc \in TC \quad (32)$$

式中变量同前。

j 批次流过 i 站场时, j 批次油头到达 i 站时间点编号应小于 j 批次油尾到达 i 站时间点编号, 时间节点 tc 只能介于这两者之间。

$$\tau b_{i,j} - tc \geq (\sigma j_{tc,j,i} - 1)M$$

$$i \in I, j \in J, tc \in TC \quad (33)$$

$$tc - \tau b_{i,j+1} \geq (\sigma j_{tc,j,i} - 1)M$$

$$i \in I, j \in J, tc \in TC \quad (34)$$

式中变量同前。

2 模型求解

由于本模型属于大规模复杂MINLP模型,直接求解非常困难。考虑到模型中二元变量之间的耦合性强于二元变量与连续变量的耦合性,故本文将与时间相关的二元变量从模型中抽离出来,用蚁群算法求解得到与时间相关的二元变量,将非线性约束线性化,从而求得调度方案。根据批次界面位置和管道流量计算各个时刻管段的沿程摩阻。然后综合考虑各泵机组参数、进出站压力、管段压力、泵启停时间等计算最优启泵方案。具体求解步骤如下:

Step 1 输入管道信息、初始状态管道内油品信息、首站注入需求、分输站分输需求以及泵站等信息。

Step 2 将MINLP模型中的二元变量抽离出来组合成新的IP子问题。假设所有中间站场均不进行下载操作,由此可确定一组事件发生的时间节点排序,从而求得一组二元变量的解,并将此解作为蚁群算法的初始解。

Step 3 将IP子问题的解带入原MINLP模型,即可得到原模型的一组解。

Step 4 判断原目标函数的偏差是否满意。若满意,

则开始 Step 5 计算摩阻。若不满足则返回 Step 2 调整时间节点排序。

Step 5 基于 Step 4 中求得的调度计划计算各个时刻管段的沿程摩阻。

Step 6 依据沿程摩阻和高程差以及泵站信息确定开泵方案。

Step 7 判断开泵方案是否可行。若可行，则输出调度方案及开泵方案。若不可行则返回 Step 2，重新迭代。

用蚁群算法调整二元变量的策略：将各时间节点顺序对应的目标函数值作为蚂蚁对应的信息浓度值，按浓度值对相应数量的蚂蚁进行位置更新，并解码出新的时间节点顺序，直到满足收敛条件。程序框图如图 1 所示。

3 算例

3.1 管道基础数据及工艺

本文以我国某条成品油管道为例，该管道包含 SS、SX、YW、JH、LY 五个站。各站具体信息如图 2 所示。该管道以满足市场需求为首要任务，在满足关

键节点压力的情况下，实现能耗最低。为了避免过多的节流能耗浪费，需要控制管道末站进站压力小于一允许值。各中间下载站不允许下载混油，规定在批次到站前后半小时内不允许执行下载操作。本问题的目标就是在已知各站需求量的情况下求解出满足所有约束的调度计划及开泵方案。算例周期设为 179.7 h，共输送 3 种油品，共分为 5 个批次。

泵站信息：沿线共有 2 个分输泵站，泵的扬程和流量的关系为 $H = -AQ^2 + BQ + C$ ，系数如表 1 所示。

初始时刻管道完全被 0#柴油填充，体积为管道的管存 67 139 m³。所输送的 0#柴油密度为 845 kg/m³，92#汽油密度为 740 kg/m³，95#汽油密度为 750 kg/m³。调度周期内需要输送的批次和计划输送量见表 2。

调度周期内，各个站场需求量见表 3。

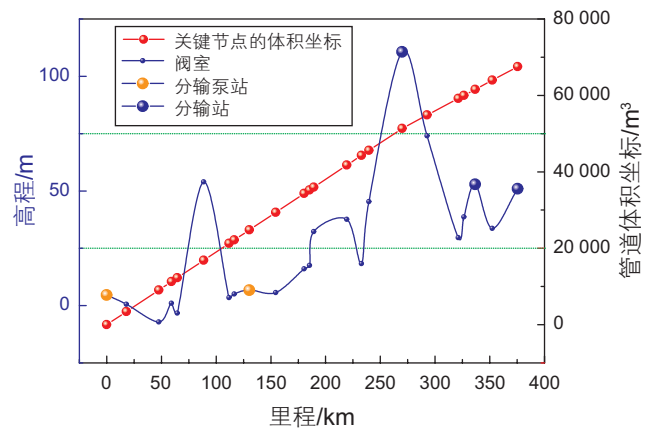


图 2 管线纵断面图

Fig. 2 The profile of the pipeline

表 1 扬程和流量系数

Table 1 Coefficient of pump head and flowrate

站场泵站	泵编号	A	B	C
SS	a	5.81×10^{-5}	2.48×10^{-2}	443.17
	b	3.59×10^{-5}	1.31×10^{-3}	211.31
	c	1.09×10^{-4}	4.11×10^{-2}	421.87
SX	d	2.29×10^{-5}	4.15×10^{-2}	244.49

表 2 首站输送任务

Table 2 Transportation task at the initial station

批次编号	油品标号	计划输送量/t
1	92#汽油	13 500
2	95#汽油	18 000
3	92#汽油	26 500
4	0#柴油	63 000

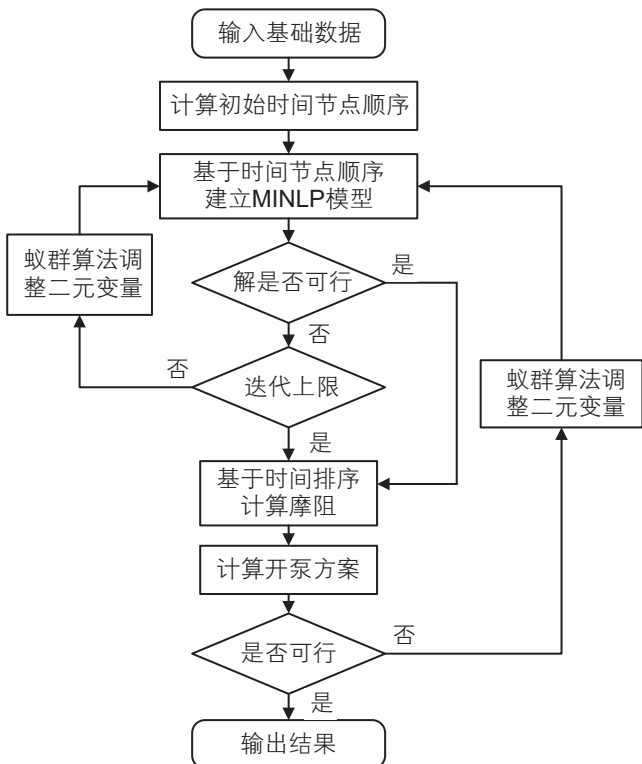


图 1 算法程序框图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

表3 分输站需求

Table 3 Demand at delivery stations

站场	92#汽油/t	95#汽油/t	0#汽油/t
SX	11 000	5 500	11 000
YW	15 000	6 000	17 000
JH	9 000	3 000	13 000
LY	5 000	3 500	22 000

3.2 结果输出

本模型IP子模型采用MATLAB编程求解，MILP子模型采用Gurobi线性求解器进行求解。总计算时间为180.32 s。各站详细的分输、注入计划如图3所示。图中纵轴表示体积坐标，横轴表示时间。黑色实线表示混油界面运移过程，其斜率表示混油界面流量。图中处于首站体积坐标处的矩形表示注入操作，处于分输站体积坐标处的矩形表示该分输站的下载操作。左

侧纵向的矩形表示管道初始状态。横向矩形的颜色表示油品的种类，矩形的宽度表示操作流量。其中，红色表示0#柴油，蓝色表示92#汽油，橙色表示95#汽油。

详细开泵方案如图4所示，图中实线表示泵处于开启状态。

在SX站处，进、出口均满足管道压力约束。YW站场位于高点处，该点压力始终大于油品的饱和蒸汽压。调度周期内SX站和YW站压力变化如图5所示。

各站完成输送任务明细见表4。偏差占输送任务的0.5%。

4 结论

本文介绍了一种耦合水力的成品油调度方法。该模型考虑了注入、分输、批次运移以及水力约束。模型求解时，将复杂的MINLP模型分解成较为容易的

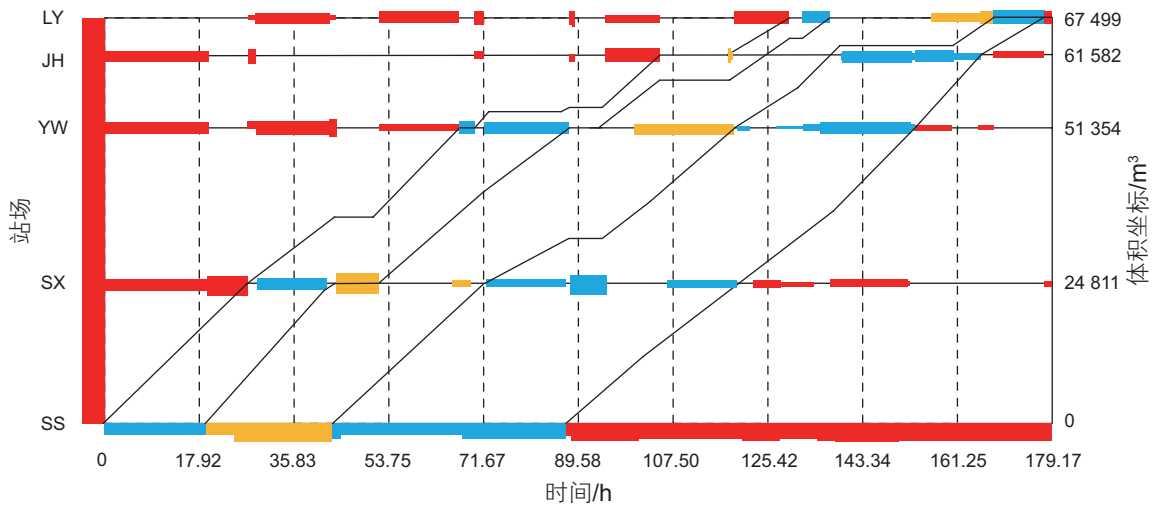


图3 批次运移图

Fig. 3 Batch migration

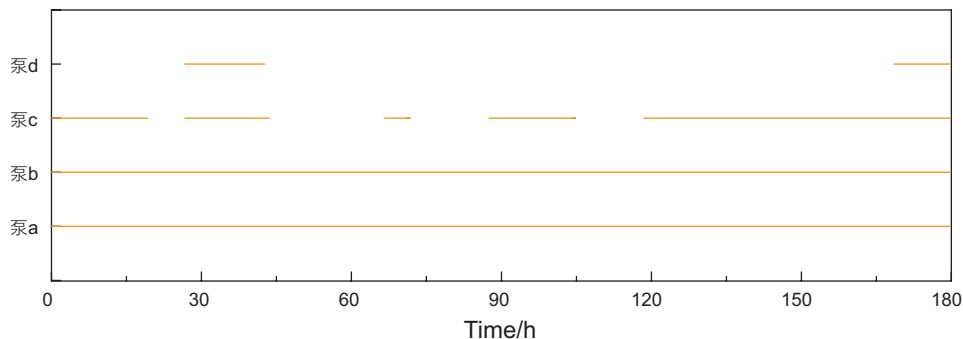
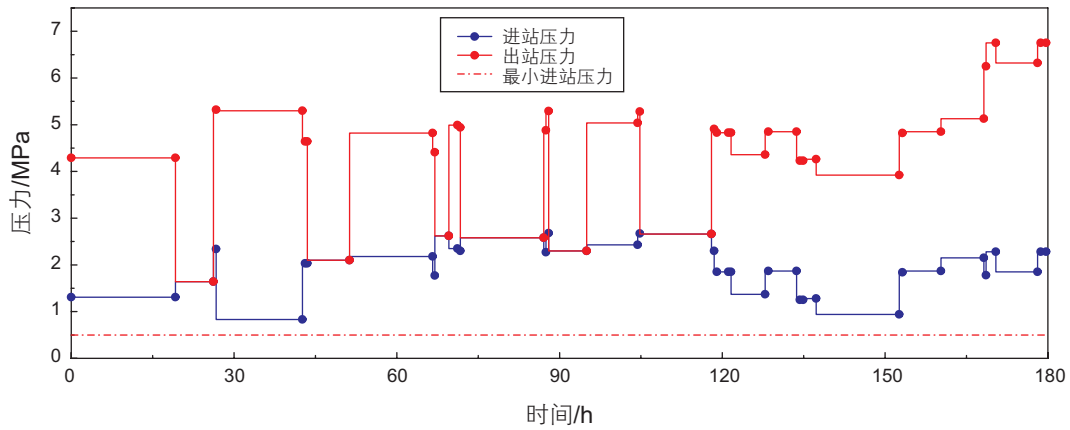
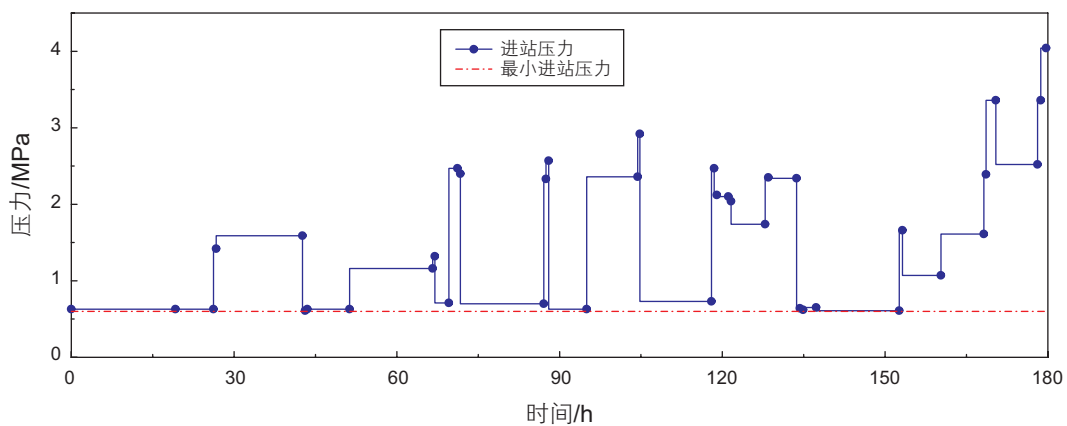


图4 开泵方案示意图

Fig. 4 Pumping plan



(a)SX站压力图



(b)YW站压力图

图 5 关键站场压力变化示意图

Fig. 5 Pressure fluctuation at each stations

表 4 输送任务完成表

Table 4 Execution results of the transportation task

站场	92#汽油/t	95#汽油/t	0#汽油/t
SS	39 995	18 007	62 998
SX	10 996	5 499	11 004
YW	15 009	6 000	16 994
JH	8 997	2 998	13 007
LY	5 002	3 501	21 992

IP规划和MILP规划,较大地提高了求解速度。本文以某条成品油管道为研究对象,调度周期为179.7 h。计算出的调度计划、开泵方案、以及工况改变时各站的压力满足现场需求。手工编制该调度计划通常需要4~5 h,偏差为5%左右。本方法仅用时180.32 s,可将偏差控制在0.5‰左右。本模型从全局角度权衡各分输站的油品需求,制定的调度计划实际下载量与计划量偏差较小。

参考文献

- [1] 赵忠德,焦中良,田瑛,等.国外成品油管道发展现状、发展趋势及启示[J].石油规划设计,2016,27(4):7-9.[ZHAO Z D, JIAO Z L, TIAN Y, et al. Development situation, development trend and enlightenment of foreign product oil pipelines[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2016, 27(4): 7-9.]
- [2] 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(7):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(7): 685-688.]
- [3] JR R R, PINTO J M. Scheduling of a multiproduct pipeline system[J]. Computers & Chemical Engineering, 2003, 27(8): 1229-1246.
- [4] JR R R, PINTO J M. Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling[J]. Computers & Chemical

- Engineering, 2004, 28(8): 1511–1528.
- [5] JR R 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): 1042–1066.
- [6] 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.
- [7] CAFARO D C, CERDÁ J. Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates[J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(4): 728–753.
- [8] CAFARO D C, CERDÁ J. Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(14): 6675–6689.
- [9] CAFARO D C, CERDÁ J. Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections[J]. Computers & Chemical Engineering, 2010, 34(10): 1687–1704.
- [10] MIRHASSANI S A, ABBASI M, MORADI S. Operational scheduling of refined product pipeline with dual purpose depots[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(8): 5723–5742.
- [11] CAFARO D C, CERDÁ J. Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks[J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 38(5): 185–203.
- [12] MIRHASSANI S A, FANI JAHROMI H. Scheduling multi-product tree-structure pipelines[J]. Computers & Chemical Engineering, 2011, 35(1): 165–176.
- [13] CAFARO D C, CERDÁ J. A rigorous mathematical formulation for the scheduling of tree-structure pipeline networks[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 50(9): 5064–5085.
- [14] ZHANG H R, LIANG Y T, XIAO Q, et al. Supply-based optimal scheduling of oil product pipelines[J]. Petroleum Science, 2016, 13(2): 355–67.
- [15] ZHANG H R, LIANG Y T, LIAO Q, et al. A hybrid computational approach for detailed scheduling of products in a pipeline with multiple pump stations[J]. Energy, 2016.

A multi-product pipeline scheduling model coupled with hydraulic constraints

DUAN Zhigang, LIANG Yongtu, ZHANG Haoran, YAN Xiaohan, LIAO Qi

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

Abstract The economic and efficient operation of multi-product pipelines is crucially determined by preparing and implementing scheduling plans in operating units. Considering the multi-product pipeline is a complicated closed hydraulic system, the flowrate constraints alone cannot guarantee the optimization for overall pipeline operation. At present, domestic and foreign scholars are undertaking a lot of research into scheduling optimization for multi-product pipelines while mostly neglecting hydraulic constraints. In this paper, an objective function is established to minimize the total volume deviation in scheduling periods, comprehensively considering the injection, delivery, pump stations, batch migration and hydraulic constraints. A continuous-time mixed integer nonlinear programming (MINLP) model is put forward and solved by decomposing the model into integer programming (IP) and mixed integer linear programming (MILP) issues. Moreover, the proposed optimization model is put into practice for a real-world multi-product pipeline and works out the detailed optimal scheduling plan and pumping plan accordingly. Results show that the scheduling period is 179.7 hours and the calculation time is 180.32 seconds. The scheduling plan can be compliant with field requirements, which indicates the efficiency and reliability of the model.

Keywords multi-product pipeline; hydraulic coupling; scheduling optimization; MINLP; pumping plan

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.011

(编辑 马桂霞)