工程科学中的运筹研究：理论与应用第*3*卷，第*x*期，*2020*年，第*x-x*页
ISSN：*2820-1607* 电子国际标准连续出版物号：
数字对象标识符：*https://*

含中间事件发生的成品油管道运行调度

Seyyed Hamed Moghimi [1]*、Jafar Habibi [1]、Hamid Jahad [1]、Mohammad Amin Fazli[1]

[1] 伊朗德黑兰谢里夫理工大学计算机工程系

收稿日期：2022年12月31日 接受
日期：n x 2023年 首次在线发表：
n x 2023年

研究论文

摘要：石油产品是当今世界的主要能源来源。这些产品的配送是行业面临的主要问题之一。管道是完成这项工作的主要工具，同时也会使用铁路、航运和公路。管道的优化规划是一个决策问题，多年来一直受到众多研究人员的关注。采用混合整数线性规划（*MILP*）是解决这一问题的有效方法之一。然而，现有模型仍忽略了重要的运营挑战。应对事故的脆弱性，以及未能重视管道之外其他运输方式作为补充，都是现有模型的薄弱之处。本研究旨在为石油产品配送领域的专家简化决策过程。为此，我们需要改进现有的混合整数线性规划方法，并对其进行调整，使其能够应用于实际运行环境，从而具备足够的灵活性、应对事故的能力以及修订计划的能力。

关键词：管道网络、运营规划、事件发生、计划修订。

1. 引言

在过去两个世纪中，能源供应一直是世界面临的主要问题之一。石油及其成品油被认为是世界上最重要的燃料来源。石油产品配送也是一个重要问题。考虑到这些材料的机械和化学特性，例如流动性、密度以及易燃性，其运输更加敏感，因此相关成本也更高。如今，用于运输石油产品的主要方式有管道、车辆、铁路和船舶。在这些方式中，管道效率更高、安全性更好、价格更低，因此世界各地建造了许多管道

* 通讯作者。hmoghimi@ce.sharif.edu (S.H. Moghimi)、jhabibi@sharif.edu (J. Habibi)、hamid.jahad@ce.sharif.edu (H. Jahad)、fazli@sharif.edu (M.A. Fazli)

。例如，美国近三分之二的石油产品通过管道配送。

为了最大限度地利用管道的输送能力而进行优化规划，是该行业的主要问题之一，过去和现在都为此投入了大量研究。这个优化问题最重要的一点在于其涉及的资金周转额极高。考虑到石油产品的全球价格，若管道系统规划不合理，每天可能给系统造成数百万美元的损失。另一个原因是燃料配送具有重要的战略意义。在世界各国，能源载体都被视为战略资产，为正常使用提供所需数量并储备能源以应对关键时期，被视为各国政府的战略目标之一。

解决这一优化问题并非显而易见，也并非易事，因为石油产品配送网络包括多条管道、不同类型的储罐和储存站、炼油厂、泵站及控制中心，它们共同构成一个由不同节点和边组成的复杂图，各自具有独特的特性和规则。此外，管道中输送着各种石油产品，其体积因目的地需求而异。包括物理约束和安全原则在内的多种规则，也会影响对不同产品注入顺序和注入量的决策。因此可以得出结论，此类问题本身并不简单，其规划是一项艰巨且充满挑战的工作。

用于求解石油产品配送优化问题的主要工具是混合整数线性规划（MILP）模型。这种方法在过去二十年间不断发展，许多研究致力于解决这一领域的问题。本研究提出了一种新方法，将环境变化和事件发生纳入考虑。我们的模型能够适应新的环境并继续执行配送计划，即使发生不同类型的事故并改变周围的参数也是如此。

2. 相关研究

2.1. 早期研究

截至21世纪初，研究者开展了将线性规划模型用于多产品管道优化的研究。为此提出的第一个模型从离散的角度考察了该问题（Rejowski & Pinto, 2003年）。这意味着规划时间范围被划分为较小的区间，管道长度也被归类为较小的体积区间。这项工作使人们能够以离散方式考察问题，理解数学关系、方程和不等式；但另一方面，关系数量和模型的计算复杂度都显著增加，而且所得结果的准确性和质量不够理想。随后，其他研究（如 Neiro & Pinto, 2004）和（Rejowski & Pinto, 2004）也提出了采用相同离散方法的线性规划模型。

与这些研究稍有不同，首个采用连续视角的线性规划模型由 Cafaro 与 Cerda 于 2004 年提出。连续视角与

离散视角的区别在于：前者不将时间和位置划分为较小区间，也不根据这些区间的数值建立模型变量，而是将关键帧处批次的时间和位置视为模型变量。关键帧是指运行环境中需要发生变化的时刻，例如将新批次泵入管道，或在站点接收一个批次。采用这种观点后，变量和约束的数量显著减少，因此模型的计算性能得以提升。该模型能够降低问题维度，是因为在离散建模中，运行环境常常会在连续多个时间区间内保持正常运行；实际上，这些区间都可以视为一个关键帧。在这些早期研究之后，研究领域逐渐兴起一股趋势，旨在利用线性规划对更复杂情形下的管道进行建模，并将更多参数纳入问题，使其更贴近现实。

2.2. 拓扑结构

在（Rejowski 与 Pinto，2003年）和（Cafaro 与 Cerda，2004）中，两种方法都只考虑将一个炼油厂作为管道输入端，并将一个或多个站点作为产品储存站。此后，一些研究开始关注管道拓扑结构的变化。在（MirHassani 与 Ghorbanalizadeh，2008）、（Mostafaei 等，2015）和（Taherkhani 等，2017）中，对树形管道进行了建模。这些树形拓扑包括主管道和另一层子分支。更复杂的拓扑结构见于（Cafaro 与 Cerda，2012），该研究引入了具有网状结构的管道。

2.3. 输入和输出站

研究中考虑的参数之一是管道输入端和输出端的数量。早期模型将炼油厂视为管道的入口点，并沿管道设置若干连续的油库。许多后续研究也采用了这种方法，例如（Rejowski 与 Pinto，2004）、（Rejowski 与 Pinto，2008）、（Cafaro 与 Cerda，2008）、（MirHassani 与 Ghorbanalizadeh，2008）和（MirHassani 与 Fani Jahromi，2011）。

另一方面，一些研究简化了这一假设，仅对一个输入端和一个输出终端进行建模。这一变化降低了复杂度，因此可以对其他参数进行建模（Relvas 等，2006）、（Moradi 与 MirHassani，2014）以及（Moradi 与 MirHassani，2016）。

研究也对更复杂的输入端和输出端进行建模。例如，（Cerda 与 Cafaro，2009）、（Cafaro 与 Cerda，2010）、（Magatao 等，2015）、（Mostafaei 等，2015）、（Mostafaei 等，2016）以及（Taherkhani，2020）考虑了多个输入节点和双用途终端；后者既可以泵送新批次，也可以从中抽取产品。

2.4. 调度时间范围

在所有关于管道调度的研究中，重要参数之一是规划时间范围，它表示规划所覆盖的整个时段的持续时间。该参数取值的重要性与模型的计算复杂度及其在现实世界中的应用之间的权衡有关。时间范围越短，参数和公式就越少，

因此，模型的复杂度也越低。另一方面，较短的时间范围会导致不考虑管道的未来状态。因此，尽管采用较短时间范围的模型执行结果在短期内表现良好，但管道网络长期来看可能无法良好运行。

研究人员将时间范围视为研究分类中的一个决定性参数。针对不同的特定应用，研究主要关注三种时间范围：短期调度，着眼于规划不足一周的时间，如 (De Souza Filho 等，2013) 和 (Zhang 等，2017)；中期调度，旨在规划一至两周的时间，如 (Liao 等，2018a)、(Liao 等，2018b) 和 (Chen 等，2017)；以及长期调度，时间范围最长可达一个月，如 (Meira 等，2018)、(Cafaro 与 Cerda，2017) 和 (Cafaro 等，2015)。

2.5. 调度修订

所提方法的主要目标是建立一个能够考虑运行环境变化的模型，并生成一份在运行过程中发生事件和事故时能够自行调整的计划。

只有少数研究尝试处理事件。几乎最早提出修订调度方案的尝试见于（Relvas 等，2007）。该研究除了针对一对一管道建立混合整数线性规划模型外，还引入了一种修订计划的机制。该机制的运作方式很简单：在计划执行期间的任何时候，如果确定需要修订初始计划，就停止执行、修改参数，然后生成一份新计划。

另一些研究，例如（Su 等，2018）和（Mostafaei 等，2016），着重研究模型参数的不确定性。为应对需求的随机性，（Taherkhani 等，2017）探讨了另一种方法，即使用随机变量进行建模并进行期望计算。

3. 所提模型

本节将介绍所提的管道规划数学模型，该模型能够感知即将发生的事件并据此进行调整。我们提出的模型基于 (Cafaro 与 Cerda, 2010) 中提出的模型。该模型包含六个主要集合：泵送作业集合 (K)、注入批次集合 (I)、石油产品集合 (P)、输入终端集合 (S) 和接收目的地集合 (J)，这些也包含在基本模型中。最后一个集合 (E) 包含规划时域内即将发生的事件，并按发生时间排序。这意味着，如果 $e < e'$，则事件 e 必须先于 e' 发生。集合 E 至少包含两个元素 e_0 和 e_{max}，分别表示规划时域的开始和结束。

表 *1*. 术语表

(a) 集合	
K	按时间顺序排列的泵送作业区块
I	产品批次 ($I = I^{\text{old}} \cup I^{\text{new}}$)
I^{new}	规划时域内待注入的新批次

I^{old}	管道初始状态中的旧批次
P	成品油
P_i	旧批次 $i \in I^{\text{old}}$ 中包含的成品油
S	管道输入端
J	管道输出端
J_p	需求产品 p的配送站
$J_{p,s}$	需求产品 p 并由某个上游源 s
E	按时间顺序排列的事件。它至少由两个成员组成，e_0 和 e_{max} 代表开始以及规划结束时刻
（b）参数	
h_{max}	规划期长度
PV	从起点到最远仓库的总管道流量
T_e	事件 e 的发生时间。（$T_{e_0} = 0$, $T_{e_{max}} = h_{max}$)
$cb_{p,j}$	输出终端 p 处产品的逾期订单单位欠交罚金
$cif_{p,p'}$	终端j 涉及产品p 和 p'
$cin_{p,s}$	输入终端 s处每单位产品 p 的泵送成本
D_{min}, D_{max}	向输出终端交付的最小/最大交付量
$DL_{p,j}$	输出终端 j处产品 p 的最低需求
$DU_{p,j}$	可交付至输出终端的产品 p 的最大数量终端 j
Q_{min}, Q_{max}	最小/最大批次注入量
$Q_{max,p}$	产品 p 的最大批次注入量
$SL_{p,s}$	从输入终端 s 运出的产品 p 的最低数量
$SU_{p,s}$	可从输入终端发运的产品 p 最大数量终端s
$vb_{min,s}, vb_{max,s}$	源s处的最小/最大产品流量
W_i^0	旧批次i的初始体积
σ_j	输出终端j 从管道起点算起的体积坐标
τ_s	输入终端的体积坐标 s 距管道起点的距离
(c) 连续变量	
BC	未能按时满足产品需求所产生的总延期交货惩罚成本
$B_{p,j}$	输出终端 j处产品 p 的延期交货量
C_k	运行区段 k 的完成时间（以时间单位计）
L_k	运行区段 k的长度
$L_{k,s}$	在源 s进行的泵送运行 k 的长度
$D_{i,j}^{(k)}$	在运行区段 k期间，转送至输出终端 j 的批次 i 的体积
$DP_{i,j\,p,}^{(k)}$	运行期间，从批次 i 转送至终端 j 的产品 p 的体积区块 k
$F_{i,k}$	时间 C时，批次 i 相对于起点的上坐标 $_k$

PC_k	区块 k期间的总泵送成本
$Q_{i,s}^{(k)}$	在运行 k期间从输入终端 s 输送的批次 i 的大小
$QP_{i,s\,p,}^{(k)}$	从输入终端 s输入的产品 p 所在批次 i 的大小
RC_i	通过运行 k 批次 i 与 后续（$i+1$）
$W_{i,k}$	运行 k结束时批次 i 的大小
(d) 二元变量	
$v_{i,s}^{(k)}$	表示批次 i 的一部分从源 s注入的变量 经过区块 k
$x_{i,j}^{(k)}$	表示批次 i 中有一部分被转运至油库 j 的变量 在区块 k 期间
$y_{i,p}$	表示批次 i 包含产品 p 的变量
$b_{k,e}$	表示泵送运行 k 完全在……内执行的变量 区间 $[T_{e-1},T_e]$ 的

3.1. 泵注作业排序

区块 $k \in K$ 必须在前一个区块（$k-1$）完成后开始。令 C_k 表示区块 k的完成时间，令 L_k 表示其持续时间。

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \forall k \in K (k > 1) \quad (1)$$

所有泵注区块也应在规划时域 h_{max}之前完成。

$$C_k \leq \mathrm{h}_{max} \forall k \in K \quad (2)$$

3.2. 泵注作业与事件对齐

模型中有一项假设：在执行泵送运行 k期间，环境条件和参数保持稳定。另一方面，几乎所有事件在发生时都会改变环境的参数。因此，应避免在泵送运行执行期间发生事件。

为此，我们定义二元变量 $b_{k,e}$，使其值等于 1，当且仅当泵送运行 k 在两个连续事件 e 和 $e-1$之间完整执行。这意味着，泵送运行 k 必须在 T_{e-1}（事件 $e-1$的发生时间）之后开始，并在 T_e（事件 e的发生时间）之前结束。图1展示了这种情况的一个示例。在所有其他情况下，$b_{k,e}$ 将为 0。

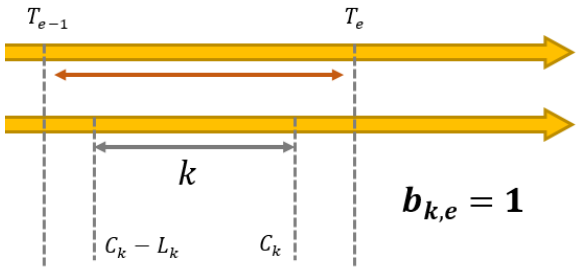


图*1.* 在两个连续事件之间完整执行一次泵送运行的示例

为确保满足上述对齐要求，我们在模型中加入以下方程。首先，每个泵送运行 k 最多只能执行一次。于是:

$$\sum_{e\in E} b_{k,e} = 1 \forall k \in K, e \in E \quad (3)$$

其次，如果一次泵送运行在两个事件之间执行，则该运行的开始时间和结束时间应位于这两个事件的发生时间之间。

$$T_{e-1} b_{k,e} \leq C_k - L_k \forall k \in K, e \in E \quad (4)$$

$$C_k \leq T_e b_{k,e} + (1 - b_{k,e}) M_T \forall k \in K, e \in E \quad (5)$$

常数M_T 的值应大于模型中的所有时间值。因此，可将其设为h_{max} 或更大。

3.3. 在不同泵送运行中注入批次

一次泵送作业由相应的泵送运行 $k \in K$ 和源端站$s \in S$确定。我们定义二元变量 $v_{i,s}^{(k)}$，用来表示批次$i \in I^{new}$ 是否在泵送运行k期间从输入终端s 注入管道。如果$v_{i,s}^{(k)} = 1$，则表示批次i 的全部或至少一部分在泵送运行 k期间从源端站s 注入。为确保每个源在每次泵送运行中向管道注入的批次不超过一个，我们有:

$$\sum_{i\in I} v_{i,s}^{(k)} \leq 1 \forall k \in K, s \in S \quad (6)$$

如果对于某个泵送运行 k，术语（$\sum_{s\in S}\sum_{i\in I} v_{i,s}^{(k)}$）为零，则表示该运行中没有注入任何批次。由于集合（K）的规模通常选择得大于最优解中的泵送运行数量，因此对于（K）的最后几个成员（称为虚拟泵送批次）而言，这种情况很可能发生。

以下方程确保：如果泵送运行 k 是虚拟运行，则所有后续运行也会变为虚拟运行。

$$\sum_{s\in S} \sum_{i\in I} v_{i,s}^{(k)} \leq M(\sum_{s'\in S} \sum_{i'\in I} v_{i',s'}^{(k-1)}) \forall k \in K (k > 1) \quad (7)$$

常数 M 是一个非常大的数，大于模型中可能生成的所有数值。我们将在模型后面的方程中继续使用它。

3.4. 批次注入与规模关系

每个批次 i 首次在源端站 s的某个泵送运行 k 中注入。也有可能在后续的另一个（或同一个）终端 s'进行的泵送运行 k'中，将 i 的某一部分追加到该批次中。我们称批次 i 在运行（k, s）和（k', s'）中均被注入。

令 $Q_{i,s}^{(k)}$ 表示在泵送运行（k, s）中注入产品批次 i 的大小。$Q_{i,s}^{(k)}$ 当且仅当在运行（k, s）中批次 i 确实发生实际注入时为正。这意味着$v_{i,s}^{(k)}$和 $Q_{i,s}^{(k)}$ 将同时为零或同时为正:

$$Q_{min}v_{i,s}^{(k)} \le Q_{i,s}^{(k)} \le Q_{max}v_{i,s}^{(k)} \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (8)$$

参数 Q_{min} 和 Q_{max} 表示在一次泵送运行期间可注入的产品体积的全局下界和上界。

3.5. 选择泵送运行时长

令 $L_{k,\ s}$ 表示运行 (k, s) 的长度，即终端 s 实际泵送产品期间的运行 k 时长。只有在其所有子运行 (k, s) 均已完成后，整个运行 k 才能完成。因此，运行 k 的长度为 $L_k = \max_{s \in S}(L_{k,\ s})$，或者：

$$L_k \ge L_{k,s} \forall k \in K, s \in S \quad (9)$$

成品油的注入体积也与泵送运行的长度以及终端执行注入的速率有关。在运行 (k, s)期间注入管道的产品总体积等于 $\sum_{i,\ i \in I} Q_{i,\ s}^{(k)}$。在 (Cafaro 与 Cerda, 2010) 的基础模型中，给出了以下方程，其中 $vb_{min,\ s}$ 和 $vb_{max,\ s}$ 分别表示终端 s 的最小和最大泵送速率。

$$vb_{min,s}L_{k,s} \le \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} \le vb_{max,s}L_{k,s} \forall k \in K, s \in S \quad (10)$$

在此模型中，我们希望将事件的影响纳入考虑。下一节将讨论这一问题，并介绍解决这一需求的所提技术。

3.6. 根据事件发生情况选择参数

事件发生时，可能会影响管道状况及其周边环境。在我们的模型中，这将通过改变参数值来实现。因此，应根据事件发生情况选择参数值（与方程 8 中的 $vb_{min,s}$ and $vb_{max,s}$ 相同）。由于求解混合整数线性规划模型时假设参数固定，我们采用的解决方法是：为每个参数建立一个向量，其中包含该参数在整个规划时域内可能取到的所有值，并在约束表达式中使用相应的值。

例如，假设终端 s 有一项预先确定的维护计划（由事件 e 表示），该计划会使终端的最大泵送速率降至原值的一半，并且这一状态将持续到维护结束（由事件 e' 表示）。在这种情况下，我们为参数 $vb_{max,s}$考虑三个值：e发生前的值、e 与 e'之间的值，以及 e'之后的值。

我们用记号 $A^{\langle e \rangle}$ 表示事件 $e-1$ 和 e 之间任意参数 A 的值。因此，前面提到的三个参数将分别记为 $vb_{max,\ s}^{\langle e \rangle}$、$vb_{max,\ s}^{\langle e' \rangle}$ 和 $vb_{max,\ s}^{\langle e_{max} \rangle}$。

根据这些假设和符号，我们重写方程 10：

$$vb_{min,s}^{<e>}L_{k,s} - M(1 - b_{k,e}) \le \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} \le vb_{max,s}^{<e>}L_{k,s} + M(1 - b_{k,e}) \forall k \in K, s \in S, e \in E(e > 0) \quad (11)$$

项 $M(1 - b_{k,e})$ 称为 事件守卫，此后记作 $EG_{k,e}$ 。它用于确保当泵送运行 k 在事件 $e-1$ 和 e之间执行时（即 $b_{k,e}$），只有对应的方程（包含参数 $A^{(e)}$）生效，而其他方程均变为平凡式。这是通过在不等式较大的一侧加上无穷大项来实现的。

3.7. 跟踪批次大小随时间的变化

设 $W_{i,\ k}$ 表示时间 C_k时批次 i 的大小。如果批次体积 i 在运行 k期间发生变化，则必定是从源 s 注入，或交付至油库 $j \in J$。

$$W_{i,k} = W_{i,k-1} + \sum_{s \in S} \quad Q_{i,s}^{(k)} - \sum_{j \in J} \quad D_{i,j}^{(k)} \forall i \in I, k \in K \tag{12}$$

只有在上游源进行的注入才能使较早的批次向前移动。因此，可交付至油库 j 的产品量最多等于在上游源进行的注入量（$\tau_s < \sigma_j$）。

$$D_{i,j}^{(k)} \leq \sum_{s \in S: \tau_s < \sigma_j} \quad \sum_{i' \in I} \quad Q_{i',s}^{(k)} \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{13}$$

3.8. 跟踪批次位置随时间的变化

设 $F_{i,\ k}$ 表示时间 C_k时批次 i 的上部体积坐标。因此，$F_{i+1,\ k}$ 也表示批次（$i+1$）的上坐标，该坐标等于同一时间批次 i 的下部坐标。由于在运行 k 结束时，批次 i 的下坐标与上坐标之差等于其大小 $W_{i,\ k}$，因此有：

$$F_{i,k} - W_{i,k} = F_{i+1,k} \forall i \in I, k \in K \tag{14}$$

为防止批次在此时间段内反向移动：

$$F_{i,k-1} \leq F_{i,k} \forall i \in I, k \in K \tag{15}$$

最后，为确保所有批次都处于管道内，且绝不会有批次位于管道坐标范围之外，令 PV 表示总管道流量，则任何批次 i 的上坐标都不得大于 PV，且其下部坐标必须为非负值。

$$F_{i,k} \leq PV \forall i \in I, k \in K \tag{16}$$

$$F_{i,k} - W_{i,k} \geq 0 \forall i \in I, k \in K \tag{17}$$

3.9. 防止空隙和溢出

在整个规划时域内，管道必须始终充满产品。因此，管道中所有批次的体积之和必须等于 PV：

$$\sum_{i \in I} \quad W_{i,k} = PV \forall k \in K \tag{18}$$

此外，在任一运行 k结束时，注入的产品量与交付产品量必须相等：

$$\sum_{i \in I} \quad \sum_{s \in S} \quad Q_{i,s}^{(k)} = \sum_{i \in I} \quad \sum_{j \in J} \quad D_{i,j}^{(k)} \forall k \in K \tag{19}$$

3.10. 注入与交付可行性

只有满足以下两个条件，成品油才能在泵送运行（k， s）期间注入批次 i：

(a) 批次 i 在运行 k 开始前已到达源 s (τ_s)的位置：

$$F_{i,k-1} \geq \tau_s v_{i,s}^{(k)} \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (20)$$

(b) 此外，批次 i 在运行 k之前尚未完全通过源 s 的位置：

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s + M(1 - v_{i,s}^{(k)}) \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (21)$$

3.11. 从批次向油库交付

与上一节相同，只有在以下情况下，才可以将产品从批次 i 交付至油库 j：

(a) 批次 i 在运行 k 结束前到达油库 j 的位置（记为 σ_j），即 $F_{i,\ k} \geq \sigma_j$

(b) 批次 i 在运行 k 开始前尚未经过油库 j 的位置。这意味着批次的下限协调位置不得超过油库的位置，即 $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j$

为满足这些条件，令 $x_{i,\ j}^{(k)}$ 为一个二元变量，用来表示在运行 k 期间是否有产品从批次 i 输送到油库 j。当 $x_{i,\ j}^{(k)} = 0$ 时，不应将任何产品从批次 i 输送到油库 j。这意味着 $D_{i,\ j}^{(k)} = 0$。

$$D_{min,j}^{<e>} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq D_{max,j}^{<e>} x_{i,j}^{(k)} \forall i \in I, j \in J, k \in K, e \in E(e > 0) \quad (22)$$

其中，$D_{min,\ j}^{\langle e \rangle}$ 和 $D_{max,\ j}^{\langle e \rangle}$ 是时间跨度 $[T_{e-1}, T_e]$ 内可输送至油库 j 的产品数量上下限。

以下两个约束条件分别用于满足本节前面提到的两个条件。

$$F_{i,k} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (23)$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j + M(1 - x_{i,j}^{(k)}) \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (24)$$

如前所述，在运行 k 时将产品从批次 i 交付到油库 j 的前提是以下不等式成立：

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} < \sigma_j \leq F_{i,k} \quad (25)$$

在这种情况下，可交付产品体积的上限为 $\sigma_j - (F_{i,\ k-1} - W_{i,\ k-1})$，除非在交付进行的同时，有更多产品从上游来源注入批次 i。

另一方面，产品可以在运行期间与批次接触的任何油库进行交付。因此，从起点到油库 j 的所有油库对批次 i 的交付总量，不得超过批次的初始可用体积

(i （$\sigma_j -$（$F_{i,\ k-1} - W_{i,\ k-1}$））加上从上游来源注入批次 i 的注入总量。于是：

$$\sum_{j'=1}^{j} D_{i,j'}^{(k)} \le \sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1}) + \sum_{\substack{s\in S \\ \tau_s<\sigma_j}} Q_{i,s}^{(k)} + (PV - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{26}$$

3.12. 将产品分配给批次

每个批次 i 最多只能分配一种产品。令 $y_{i,\ p}$ 为一个二元变量，表示批次 i 包含产品 p，当且仅当 $y_{i,\ p} = 1$。则：

$$\sum_{p\in P} y_{i,p} \le 1 \forall i \in I \tag{27}$$

如果没有产品分配给批次 i，那么我们称 i 为虚拟批次，在实际运行中不会将其注入管道。这意味着不存在泵送运行 (k, s) 将任何产品注入批次 i。于是，对于所有泵送运行，有 $v_{i,\ s}^{(k)} = 0$。

另一方面，如果有产品分配给批次 i，这意味着该批次是真实批次，并且至少有一次泵送运行必须向其中注入一些产品。该条件可以用数学方式表示如下：

$$\sum_{p\in P} y_{i,p} \le \sum_{s\in S} \sum_{k\in K} v_{i,s}^{(k)} \le M \sum_{p\in P} y_{i,p} \forall i \in I^{new} \tag{28}$$

由于污染，某些产品不应相邻注入。假设 (p, p') 表示一组禁配产品序列。那么：

$$y_{i-1,p} + y_{i,p'} \le 1 \forall i \in I^{new} (i > 1) \tag{29}$$

3.13. 产品注入

在所有泵送作业中注入批次 i 的产品总量必须来自单一产品类型 p，使得 $y_{i,\ p} = 1$。

$$QP_{i,s,p}^{(k)} \le Q_{max} y_{i,p} \forall i \in I, s \in S, k \in K, p \in P \tag{30}$$

$$\sum_{p\in P} QP_{i,s,p}^{(k)} = Q_{i,s}^{(k)} \forall i \in I, s \in S, k \in K \tag{31}$$

3.14. 产品交付

与上一节相同，从批次 i 向不同油库交付的材料总量必须来自单一产品类型 p，使得 $y_{i,\ p} = 1$。

$$DP_{i,j,p}^{(k)} \le D_{max} y_{i,p} \forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P \tag{32}$$

$$\sum_{p\in P} DP_{i,j,p}^{(k)} = D_{i,j}^{(k)} \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{33}$$

3.15. 满足产品需求

模型应为所有储存站提供产品需求量。假设油库 j 所需的产品总量为 $DL_{p,\ j}$。为了让模型继续运行并保持可行，即使它无法满足需求 $DL_{p,\ j}$，我们

引入变量 $B_{p,\ j}$ 作为产品短缺量。稍后将在成本函数中使用它。

最后，为考虑油库 j中产品 p 的储存容量上限，我们使用参数 $DU_{p,\ j}$。因此，交付至油库 j 的产品 p 总量必须低于此上限。

$$DL_{p,j} - B_{p,j} \leq \sum_{k\in K} \quad \sum_{i\in I} \quad DP_{i,j,p}^{(k)} \leq DU_{p,j} \forall p \in P, j \in J \tag{34}$$

3.16. 问题初始状态

为确定管道中批次的起始位置和顺序，设 W_i^0 为旧批次 $i \in I^{old}$的体积。那么，批次 $i \in I^{old}$ 的上坐标等于所有后续批次 $i' \in I^{old}$ （$i' > i$）的初始体积之和加上其自身的体积：

$$F_{i,0} = \sum_{i'\in I^{old}(i'\geq i)} \quad W_{i'}^0 \forall i \in I^{old} \tag{35}$$

此外，我们还知道每个旧批次 $i \in I^{old}$中所含的产品 P_i

$$y_{i,\ P_i} = 1 \forall i \in I^{old} \tag{36}$$

3.17. 目标函数

所提方法的主要目标是提高模型对运行环境变化的适应能力。因此，该方法不仅要制定一个以最低泵送成本（PC）和界面物料再处理成本（RC）满足储存站需求的计划，还必须尽可能降低产品需求的短缺成本（BC）。

$$minz = \sum_{i\in I} \quad RC_i + \sum_{k\in K} \quad PC_k + BC \tag{37}$$

以下三个方程给出了目标函数中的各项：

$$RC_i \geq \text{cif}_{p,p'}(y_{i,p} + y_{i+1,p'} - 1) \forall i \in I; p, p' \in P \tag{38}$$

变量 RC_i 表示批次 i 与$i+1$ 之间界面物料再处理的总成本，参数 $cif_{p,\ p'}$ 表示产品 p 与p'混合所产生的界面物料的再处理成本。

$$PC_k = \sum_{i\in I} \quad \sum_{s\in S} \quad \sum_{p\in P} \quad \text{cin}_{p,s} QP_{i,s,p}^{(k)} \forall k \in K \tag{39}$$

变量 PC_k 表示运行 k 的总泵送成本，系数 $\text{cin}_{p,\ s}$ 表示在源 s中泵送单位体积产品 p 的成本。

$$BC = \sum_{p\in P} \quad \sum_{j\in J} \quad \text{cb}_{p,j} B_{p,j} \tag{40}$$

参数 $\text{cb}_{p,j}$ 表示未能按时在油库 j 提供一单位产品 p 所产生的成本，而 $B_{p,j}$ （如公式 34 所述）表示油库 j中产品 p 的延期交货量。

4. 结果与讨论

本节报告所提模型的实现结果，并将其性能与先前方法进行比较。本次比较所采用的研究案例基于 (Cafaro 与 Cerda, 2010) 中提到的一个示例，并已对其进行修改，以满足本次比较的要求。

4.1. 算例配置

本算例对管道网络进行运营规划，其中包括两个源站 $S1$ 和 $S2$ 以及三个油库 $D1$、$D2$ 和 $D3$。该管道将三种成品油 A、B 和 C 从源站输送至油库。站点 $S1$ 和 $S2$ 分别位于距管道起点体积坐标为0和40的位置。站点 $D1$、$D2$和 $D3$ 也分别位于距管道起点体积坐标为20、60和80的位置。每两个相邻站点之间都有一段体积为20个单位的管道。

源站的产品可用量以及油库对这些产品的需求量如表2所示。此外，表3列出了每对产品之间界面的回收成本。

表*2.* 产品供应量与需求量

	供应量		需求		
	S1	S2	D1	D2	D3
A	50	20	60	60	-
B	80	60	-	-	100
C	30	80	-	60	-

表*3.* 接口成本（以*100*美元为单位）

前驱	后继		
	A	B	C
A	-	22	23
B	24	-	21
C	30	32	-

表4列出了各源中泵送每种产品一个体积单位所需的成本。所有源中所有产品的泵送速率可行范围均设为1.2单位/小时。

表*4.* 各源的泵送成本（每体积单位，单位为*100*美元）

产品	源	
	S1	S2
A	29	14.5
B	34	17.0
C	24.5	49.0

管道的初始状态包括四个批次 $B1$、$B2$、$B4$ 和 $B5$。这些批次的产品和初始体积显示在图2的顶行中。

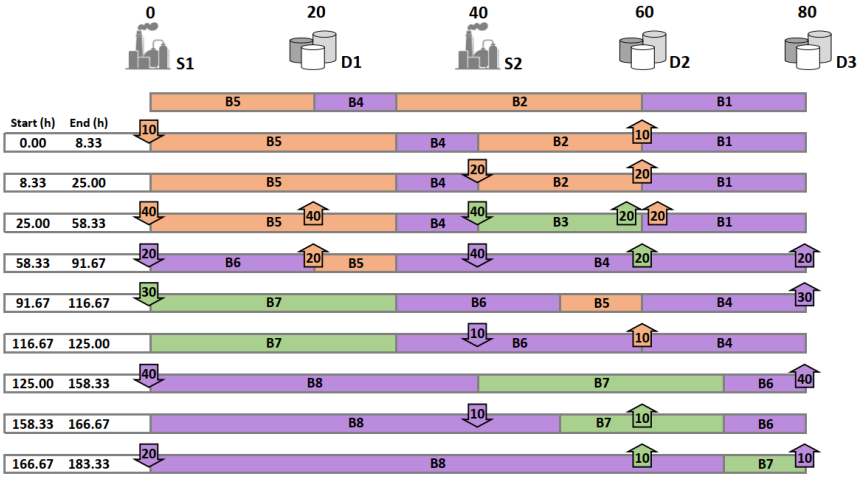


图*2.* 无事件发生时该示例的最优管道调度计划

4.2. 无事故时的最优解

当规划时域内未发生任何事件时，运输产品并满足各储存站需求的最优计划如图2所示。在此情况下，将有 9 次泵送作业 $k1-k9$。图2中为每次泵送作业绘制了一行。每次运行的开始时间、完成时间和持续时间显示在相应行的左侧，泵送运行期间注入管道或从管道中接收的产品体积也以箭头表示。每个批次的颜色图案表示与其相关的产品，具体定义见图例。

可以看出，执行最优调度计划所需的时间为 183.33 小时。计划如下：

在第一次运行（$k1$）中，运行从时间 0 开始，持续 8.33 小时，将 10 单位产品 A 从站点 $S1$ 注入批次 $B5$。随着各批次沿管道向前移动，油库 $D2$ 从批次 $B2$中提取 10 单位产品 A。第二次运行（$k2$）持续 16.67 小时，站点 $S2$ 执行泵送作业，将 20 单位产品 A 注入批次 $B2$，油库 $D2$随后从同一批次接收完全相同数量的产品。运行 $k3$ 持续 33.33 小时，在此期间，站点 $S1$ 将 40 单位产品 A 注入批次 $B5$，油库 $D1$接收相同数量的产品。由于此次运行中不存在泵送交互和批次重叠，站点 $S2$ 还可以同时以新批次 $B3$ 的形式泵送 40 单位产品 C。这次注入使油库 $D2$ 完全接收批次 $B2$ 中剩余的 20 单位产品 A，此外还从批次 $B3$中提取 20 单位产品 C。泵送运行 $k4$在 91.67 小时结束，其中包括两次产品 B注入：从站点 $S1$ 向新批次 $B6$ 注入 20 单位，以及从站点 $S2$ 向已在前一次运行结束时到达该站点的批次 $B4$ 注入 40 单位。由于这两次注入，批次 $B5$ 中的 20 单位产品 A 进入油库 $D1$，批次 $B3$ 中剩余的 20 单位产品 C 由油库 $D2$接收，同时向油库 $D3$的库存中加入 20 单位产品 B。

如图2所示，在运行 $k5$ 至 $k8$期间，每次运行中仅发生一次注入和一次交付。在最后一次泵送运行（$k9$）中，站点 $S1$ 注入了 20 个单位的产品

B 进入批次 $B8$，因此，储存站 $D2$ 和 $D3$ 分别接收了 10 个单位来自批次 $B7$ 的产品 C，以及 10 个单位来自批次 $B6$的产品 B。程序开始 183.33 小时后，管道的最终状态如下：包含产品 B 的批次 $B8$ 从管道起点延伸至体积坐标 70，批次 $B7$ 位于坐标 70 至 80 之间，其中包含 10 个单位的产品 C。

4.3. 在示例中加入事故

前文提到，事故通常会导致调度计划发生不必要的变化，因此，计划的时间和成本会根据事故的严重程度而增加。在本例中，我们考虑这样一种情况：在规划时域开始 100 小时后，将对 $S1$ 与 $D1$ 之间的管道进行维护作业。因此，在作业期间，无法从源 $S1$注入任何产品。我们还假设维护将在 30 小时内完成。

以往的管道规划方法都没有考虑事故以及运行环境的变化，因此无法在旧模型中添加事件。在现实中使用这些模型时，一旦发生事故，唯一的办法就是停止执行计划，根据环境的新状态更新模型中的数值和参数，然后重新运行模型。如果幸运的话，模型或许能生成一份新计划，但其成本肯定会高于之前的计划。然而，在许多情况下，由于模型的约束，无法得到任何计划；实际上，事件发生前运行良好的模型，在事件发生后只会报告不可行结果。

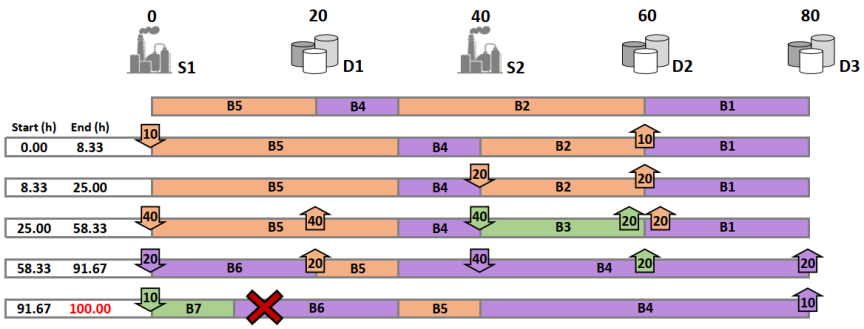


图 *3.* 时间 t=100h 时的运行环境状态

然而，在本示例中，我们按照上述方法进行。从 $t = 0$ 到 $t = 100$ 小时，将按照之前的计划执行，批次将以完全相同的数量并按相同的顺序注入。因此，在 $t = 100$ 小时、维护作业开始时，情况如图 3 所示。此后，由于管道中的最大注入速率降为零，无法再向管道中注入任何新批次；实际上，管道的状态在接下来的30小时内保持不变（这清楚地表明了时间和资源的浪费）。从 $t = 130$ 小时起，计划程序继续执行，其余步骤和泵送作业均按照计划中的设定完成。

最后，在 $t = 213.33$ 小时，即比最优计划晚30小时，产品配送完成。该计划的逐步执行过程如图4所示。

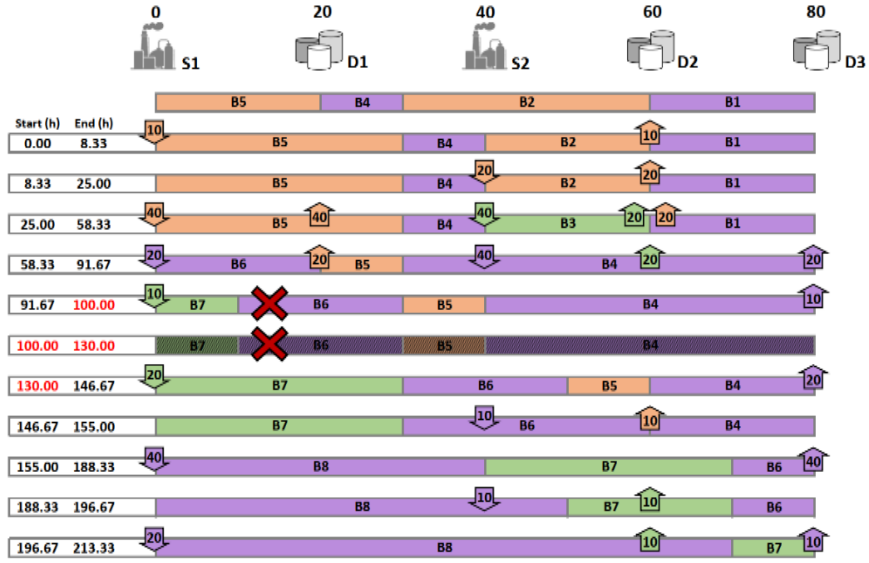


图4. 事件发生时旧方法的输出方案

4.4. 所提方法应对事件的性能

所提方法的优势在于，规划过程中会关注环境未来的变化，并能考虑参数的不同取值。此外，还可以从一开始就考虑可预测事件（例如本例中提到的维护计划）。

在所提方法中，与以往方法相比，我们在建模过程中进行了两项改动。首先，我们将事件集定义如下：

$$E = \{e_0, e_1 \text{ (Maintenance starts)}, e_2 \text{ (Maintenance ends)}, e_{max}\} \tag{41}$$

如前所述，该集合包含两个事件 e_0 和 e_{max}，分别表示时间范围的开始和结束。事件 e_1 和 e_2 则表示维护计划的开始和结束。因此，参数 T_{e_1} 和 T_{e_2} 的值分别取为 100h 和 130h。

第二项变更是为参数 $vb_{min,\ s_1}$ 和 $vb_{max,\ s_1}$定义一个值向量。该向量中的值如下（单位为每小时的数量）：

$$\begin{aligned} &vb_{min,s_1}^{\langle e_1 \rangle} = 1.0 \quad vb_{min,s_1}^{\langle e_2 \rangle} = 0.0 \quad vb_{min,s_1}^{\langle e_{max} \rangle} = 1.0 \\ &vb_{max,s_1}^{\langle e_1 \rangle} = 1.2 \quad vb_{max,s_1}^{\langle e_2 \rangle} = 0.0 \quad vb_{max,s_1}^{\langle e_{max} \rangle} = 1.2 \end{aligned} \tag{42}$$

这样，模型便能识别出在区间 $[T_{e_1}, T_{e_2}]$内，不应从站点 $S1$进行泵送。其他参数也应使用长度为 $|E| - 1$ 的向量，但其中的所有值都相同，因为在此示例中，随时间变化的参数只有 $vb_{min,\ s_1}$ 和 $vb_{max,\ s_1}$

我们所提模型的结果远优于旧方法。如图5所示，该方法会提前规划站点 $S1$ 停止泵送时的安排，从而确保其他站点继续配送产品。

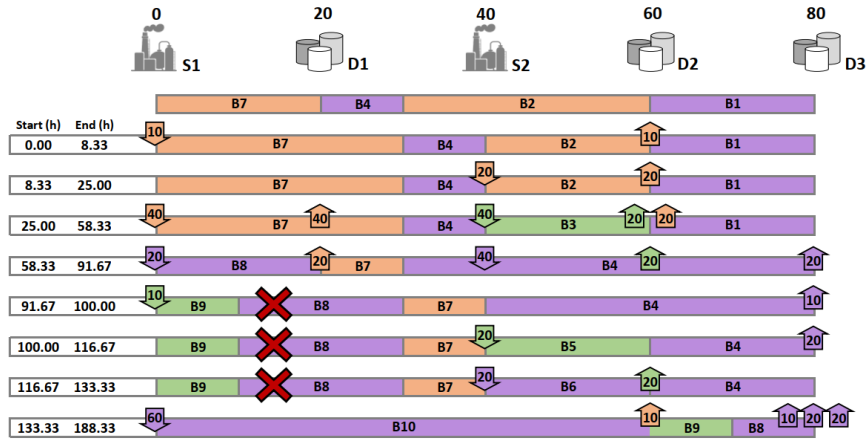


图5。所提模型的输出方案

我们的方法与之前的方法得到的输出相同，直至$t = 100$小时。在此期间，管道按相同顺序泵送不同产品的批次，且泵送量相同。但从时间T_{e_1}起，两者开始出现差异。考虑到从这一时刻到T_{e_2} 期间，站点$S1$ 的泵送速率为零，管道的前一段（从起点到体积坐标40个单位处）保持不变。但在同一时段内，站点 $S2$ 开始泵送产品，以满足储存站$D2$ 和$D3$的部分需求。因此，当T_{e_2} （即30小时后）站点$S1$ 重新开始泵送时，满足$D2$ 和$D3$ 所需的剩余产品量，相较于维护作业开始时有所减少。由此，继续泵送后续批次，便能更快达到预期状态，从而降低成本。

更准确地说，我们模型的输出由 8 次泵送运行（$k1 - k8$）组成，其中从 $k1$ 到 $k4$ 的运行与正常情况完全相同。唯一的区别是，正常情况下的批次 $B5$ 在此处编号为 $B7$ ，因为未来的运行中将有两个中间批次注入管道中段。

第五次运行（$k5$）在先前的方法中被迫以未完成状态结束，而在此模型中则会在时间 T_{e_1} 主动结束。运行 $k6$ 恰好在事件 e_1 发生时开始，因此站点 $S1$ 在这次运行中不进行泵送。在运行 $k6$的 16.67 小时内，站点 $S2$ 泵送 20 个单位的产品 C ，形成一个名为 $B5$ 的新批次；另一方面，油库 $D3$ 从批次 $B4$中提取 20 个单位的产品 B 。在运行 $k7$中，站点 $S1$ 仍处于非活动状态，因此站点 $S2$ 再次注入一个名为 $B6$ 、含有 20 个单位产品 B 的新批次进入管道，批次 $B5$ 则全部输送至油库 $D2$。

运行 $k8$ 在维护作业完成后开始，因此，站点 $S1$ 在此次运行中重新启用。站点 $S1$ 开始泵送一个包含大量新批次 $B10$ 的

体积为 60 个单位的产品 B。这样，油库 $D2$ 从批次 $B7$中取得其需求的最后一部分，即 10 个单位的产品 A，而油库 $D3$ 进行三次连续提取。批次 $B4$ 和 $B6$ 的剩余体积，加上批次 $B8$ 的一部分——总计相当于 50 个单位的产品 B ——被输送至油库 $D3$。管道的最终状态与正常情况下的最终状态非常相似。管道中有 70 个单位的产品 B 和 10 个单位的产品 C 。

4.5. 结论

所提模型输出方案的执行时间出人意料地与正常情况下所需的时间相等。这意味着，有时即使是管道停输这类严重事件，也能够以最低的间接成本轻松加以处理。

由于在维护作业期间管道并未完全停运，所提模型生成的方案比采用旧方法执行该程序所需的时间缩短了30小时。所有储存站的总需求仅需183.33小时即可满足，比旧方法的输出方案快16\%，尽管在许多其他情况下，旧方法可能完全无法行得通。

参考文献

D. C. Cafaro, J. Cerda，采用非离散混合整数线性规划公式对多产品管道系统进行最优调度，《计算机与化学工程》28 (10) (2004) 2053–2068。D. C. Cafaro, J. Cerda，考虑多个交付截止日期的多产品管道动态调度，《计算机与化学工程》32 (4-5) (2008) 728–753。D. C. Cafaro, J. Cerda，同时进行批次注入的成品油管道网络运行调度，《计算机与化学工程》34 (10) (2010) 1687–1704。D. C. Cafaro, J. Cerda，网状结构成品油管道网络的精确调度，《计算机与化学工程》38 (2012) 185–203。D. C. Cafaro, J. Cerda，成品油管道短期运行规划，《优化与工程》18 (1) (2017) 241–268。V. G. Cafaro, D. C. Cafaro, C. A. Mendez, J. Cerda，多源管道详细调度的优化模型，《计算机与工业工程》88 (2015) 395–409。J. Cerda, D. C. Cafaro，多源成品油管道的最优调度，《工业与工程化学研究》48 (14) (2009) 6675–6689。H. Chen, L. Zuo, C. Wu, L. Wang, F. Diao, J. Chen, Y. Huang，采用整体式混合整数线性规划公式优化多产品管道的详细调度计划，《石油科学与工程学报》159 (September) (2017) 148–163。E. M. De Souza Filho, L. Bahiense, V. J. M. Ferreira Filho，多产品管道网络调度，《计算机与化学工程》53 (2013) 55–69。Q. Liao, H. Zhang, N. Xu, Y. Liang, J. Wang，基于流量数据库的多泵站多产品管道详细调度混合整数线性规划模型，《计算机与化学工程》117 (2018) 63–81。

Q. Liao, Y. Liang, N. Xu, H. Zhang, J. Wang, X. Zhou，压力控制模式下多产品管道详细调度的混合整数线性规划方法，《化学工程研究与设计》136 (2018) 620–637。S. N. Magat˜ao, L. Magat˜ao, F. Neves，通过管道网络进行产品配送调度的新型混合整数线性规划分解方法，《工业与工程化学研究》54 (18) (2015) 5077–5095。W. H. T. Meira, L. Magat˜ao, S. Relvas, A. P. F. D. Barbosa Povoa, F. Neves Junior，单源多产品管道网络长期调度的分解方法，载于：《Springer 数学与统计学会议论文集》，第223卷，2018，235 248页。–。S. A. MirHassani, H. Fani Jahromi，多产品树状结构管道调度，《计算机与化学工程》35 (1) (2011) 165–176。S. A. MirHassani, M. Ghorbanalizadeh，多产品管道调度系统，《计算机与应用数学》56 (4) (2008) 891–897。S. Moradi, S. A. MirHassani，石油产品运输规划与集成库存管理，《应用数学建模》39 (23-24) (2014) 7630–7642。S. Moradi, S. A. MirHassani，需求不确定条件下多产品管道的鲁棒调度，《国际先进制造技术杂志》87 (9-12) (2016) 2541–2549。H. Mostafaei, P. M. Castro, A. Ghaffari-Hadigheh，多产品树状管道网络批量规模确定与调度的新型整体式混合整数线性规划框架，《工业与工程化学研究》54 (37) (2015) 9202–9221。H. Mostafaei, P. M. Castro, A. Ghaffari-Hadigheh，同时进行注入与交付的多源管道短期调度，《计算机与运筹学》73 (2016) 27–42。S. M. Neiro, J. M. Pinto，石油供应链运营规划的通用建模框架，《计算机与化学工程》28 (6-7) (2004) 871– 896。R. Rejowski, J. M. Pinto，多产品管道系统调度，《计算机与化学工程》27 (8-9) (2003) 1229–1246。R. Rejowski, J. M. Pinto，多产品管道调度的高效混合整数线性规划公式与有效割平面，《计算机与化学工程》28 (8) (2004) 1511–1528。R. Rejowski, J. M. Pinto，具有泵送产率约束的管道系统调度连续时间表示，《计算机与化学工程》32 (4-5) (2008) 1042–1066。S. Relvas, H. A. Matos, A. P. F. Barbosa-Povoa, J. Fialho, A. S. Pinheiro，多产品油品配送系统的管道调度与库存管理，《工业与工程化学研究》45 (23) (2006) 7841–7855。S. Relvas, H. A. Matos, A. P. F. Barbosa-Povoa, J. Fialho，具有库存管理功能的多产品管道反应式调度框架，《工业与工程化学研究》46 (17) (2007) 5659–5672。L. Su, L. Tang, D. E. Bernal, I. E. Grossmann, B. Wang，炼油厂运行中石油产品在线调和与配送的集成调度，载于：《计算机辅助化学工程》，第44卷，Elsevier，2018，第1213–1218页。

M. Taherkhani, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Seifbarghy, P. Fattahi, 《多座炼油厂树状管道网络的详细调度》, 《国际工程杂志》, B辑：应用 30 (12)（2017）1870–1878。M. Taherkhani, 《一种采用混合整数线性规划的方法：具有双用途终端的树状管道调度》, 《运筹学》20 (4)（2020年）2133–2161。H. Zhang, Y. Liang, Q. Liao, M. Wu, X. Yan, 《一种针对设有多个泵站的管道内产品详细调度的混合计算方法》, 《能源》119（2017）612–628。© 2022年作者所有。提交以供依据知识共享署名许可的条款和条件进行可能的开放获取出版



）许可协议（http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）。知识共享署名（CC BY）