

# 考虑配送成本和油库利用率的成品油配送系统多目标优化

朱珠<sup>1</sup>, 张泽洲<sup>2</sup>, 邱睿<sup>1</sup>, 廖绮<sup>1</sup>, 张昊<sup>1</sup>, 梁永图<sup>1\*</sup>

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院/城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

2 中国石油天然气股份有限公司陕西销售分公司, 西安 710077

\* 通信作者 liangyt21st@163.com

收稿日期: 2022-08-19

国家自然科学基金“面向大规模成品油管网调度的数据解析与优化融合方法”(52202405)资助

**摘要** 成品油配送是指将多种油品从上游炼厂依据运输计划输送至下游销售油库的过程,除了要保障成品油配送系统的经济效益,还应尽量维持成品油配送设施的高利用效率,提高成品油配送系统的整体运行效率。目前,对于成品油配送系统优化,已有国内外成品油配送计划制定通常以配送成本最低为目标,而忽略了中转油库的利用效率。而且,作为成品油配送系统中的重要节点,中转油库的库存管理极为关键,若油库库存管理混乱无效或效率低下,不仅不利于成品油配送系统的高效运行,甚至会影响成品油的正常供应。本文针对中转油库,基于现有研究基础上,引入周转次数、人均周转量、吨油运行成本、吨油作业时间4个油库利用率评价指标,并基于此评价投入使用的中转油库是否处于高效运行状态。此后,综合考虑油品运输和中转油库运行成本以及中转油库利用效率,对炼厂供应能力、销售油库需求、运输能力、油库库存等约束进行考虑,并以成品油配送系统成本最小和中转油库周转次数最大为目标函数,构建了成品油配送系统的多目标混合整数线性规划模型,并采用增广—约束方法对模型进行求解。研究成果成功应用于我国西北地区某成品油配送系统,经过现场真实数据的验证可得:中转油库的周转次数和人均周转量最高可分别提升48.1%和54.3%,吨油运行成本和吨油作业时间最高可分别降低52.8%和58.3%。本研究成果对区域成品油供输计划、中转油库运行计划的制定具有一定的指导意义。

**关键词** 成品油配送系统; 中转油库; 利用率指标; 多目标MILP模型; 增广—约束方法

## Multi-objective optimization of refined oil distribution system considering distribution cost and oil depot utilization

ZHU Zhu<sup>1</sup>, ZHANG Zezhou<sup>2</sup>, QIU Rui<sup>1</sup>, LIAO Qi<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, LIANG Yongtu<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Urban Oil & Gas Distribution Technology, College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Petro China Pipeline Company Shaanxi Sales Branch, Xian 710077, China

**Abstract** Refined oil distribution refers to the process of transporting oil products from the upstream refinery to the downstream sales depot according to the transportation plan. In addition to guaranteeing the economic benefits of the refined oil distribution system, the high utilization efficiency of the refined oil distribution facilities should be maintained as far as possible

引用格式: 朱珠, 张泽洲, 邱睿, 廖绮, 张昊, 梁永图. 考虑配送成本和油库利用率的成品油配送系统多目标优化. 石油科学通报, 2023, 02: 204–213

ZHU Zhu, ZHANG Zezhou, QIU Rui, LIAO Qi, ZHANG Hao, LIANG Yongtu. Multi-objective optimization of refined oil distribution system considering distribution cost and oil depot utilization. Petroleum Science Bulletin, 2023, 02: 204-213. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.015

to improve the overall operating efficiency of the refined oil distribution system. At present, for the optimization of refined oil distribution system, the existing domestic and foreign refined oil distribution plans usually take the lowest distribution cost as the goal, while ignoring the utilization efficiency of transit oil depot. In addition, as an important node in the refined oil distribution system, the inventory management of the transit oil depot is extremely critical. If the inventory management of the oil depot is chaotic, ineffective or inefficient, it will not only harm the efficient operation of the refined oil distribution system, but even affect the normal supply of refined oil. In this paper, based on the existing research, four evaluation indexes of the utilization rate of oil depot were introduced, including turnover times, per capita turnover, running cost per ton of oil and working time per ton of oil, and based on these, whether the transit oil depot put into use is in a state of efficient operation. After that. The operation cost of oil product transportation and transit oil depot as well as utilization efficiency of transit oil depot were comprehensively considered, and constraints such as supply capacity of refinery, demand of selling oil depot, transportation capacity and storage of oil depot were taken into account. The multi-objective mixed integer linear programming model of the refined oil distribution system was constructed with the minimum cost of the system and the maximum turnover of the transfer terminal as the objective function, and the model was solved by the augmented  $\epsilon$ -constraint method. The research results have been successfully applied to a refined oil distribution system in northwest China. Through the verification of field real data on the spot, it can be concluded that the turnover times and per capita turnover of the transit oil depot can be increased by 48.1% and 54.3%, respectively, and the operation cost and operation time of ton oil can be decreased by 52.8% and 58.3%, respectively. The results of this study have certain guiding significance for the formulation of regional refined oil supply and transportation plan and transit oil depot operation plan.

**Keywords** refined oil distribution system; transit oil depot; utilization index; multi-objective MILP model; augmented  $\epsilon$ -constraint method

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.015

## 0 引言

成品油配送系统集成配置、运输、储存等功能于一体, 连接着炼油企业、中转油库和以销售油库为主体的销售网点<sup>[1-2]</sup>。成品油配送区域划分模式、运输结构和油库布局都制约着成品油配送系统的经济效益和运行效率<sup>[3]</sup>。作为成品油配送系统中的重要节点, 中转油库的库存管理极为关键, 若油库库存管理混乱无效或效率低下, 不仅不利于成品油配送系统的高效运行, 甚至会影响成品油的正常供应<sup>[4-5]</sup>。因此, 在实施成品油配送计划优化过程中, 需要合理发挥中转油库的调节作用, 进一步提高成品油配送系统的整体运行效率。

许多学者在研究成品油配送计划以及中转油库优化方面已经做了大量的工作。在成品油配送计划优化方面, 不少学者围绕系统运行经济性建立了混合整数非线性规划(Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP)模型或混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型<sup>[6-8]</sup>, 也有不少学者考虑了系统经济性以外的其它因素。WANG B H等人<sup>[9]</sup>建立了考虑运输成本和碳排放成本的成品油配送系统优化模型, 从更全面的角度优化配送计划。邱睿等人<sup>[10]</sup>通过综合考虑运行计划的经济性和安全性建立MINLP模型, 以提高运行计划的实用性。也有不少学者针对不同的成品油配送计划优化模型, 开发高效的求解算法,

以达到提高计算效率的目的<sup>[11-14]</sup>。在中转油库利用效率提升方面, 有学者开展了定性研究<sup>[15-16]</sup>。为降低油库成本, 王敦<sup>[17]</sup>通过分析油库历史数据对中转油库现有的储存以及配送设施进行流程化整合优化。此外, 部分学者开展了综合考虑中转油库调度和成品油配送计划整体优化相关研究<sup>[18-19]</sup>。ZHANG H R等人<sup>[20]</sup>在考虑油库系统的油品储存方式、操作复杂性和运输方式的基础上, 额外考虑油库的出口运输调度, 以总运行成本最低为目标函数建立了MILP模型。Yu L等人<sup>[21]</sup>提出一个在连续时间窗内同时优化管道运输和库存成本的模型。

目前还未有学者建立综合优化成品油配送计划经济性和中转油库利用效率的数学规划模型, 以进一步提高成品油配送系统的整体运行效率。本文引入中转油库利用率指标, 定量评价中转油库的利用率, 以配送系统的运行成本最低和中转油库利用率最大为目标函数, 建立多目标MILP模型, 并采用增广 $\epsilon$ -约束方法进行求解, 最终达到降低成品油配送系统整体运行成本和提高中转油库利用率的目的。

## 1 问题描述及模型建立

### 1.1 问题描述

#### 1.1.1 问题分析

炼厂炼化的成品油主要有3条运输路径(如图1

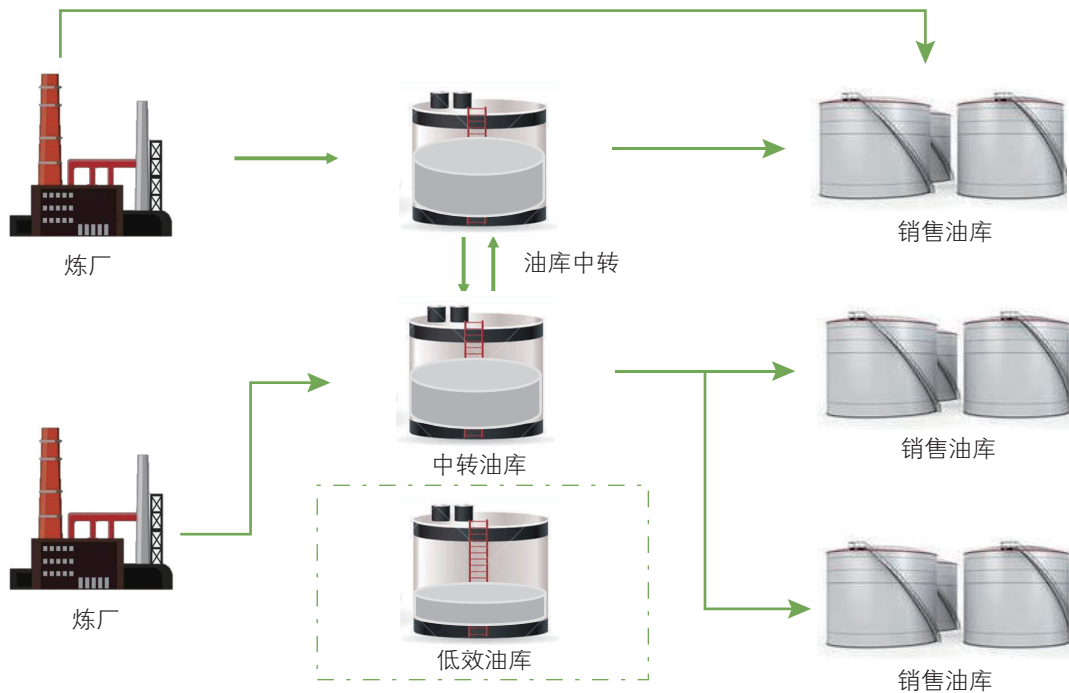


图1 成品油运输路线图

Fig. 1 Refined oil transport roadmap

所示): 成品油经中转油库运输至销售油库; 成品油从炼厂直接运输至销售油库; 成品油在中转油库之间进行运输。以上成品油运输路径的结合构成成品油运输路线图。在成品油运输过程中主要涉及一次运输成本、油库运行成本、二次运输成本、中转油库间中转成本, 另外还应考虑需求得不到满足带来的销售损失。在本文构建的考虑油库利用率的成品油配送系统多目标优化模型中, 需要在保证成品油配送系统整体运行成本最低的同时尽可能提高投入使用的油库利用效率。

### 1.1.2 油库利用率指标

中转油库的利用效率低下是制约成品油配送系统经济高效运行的关键因素之一。在成品油库全要素评价指标体系<sup>[20]</sup>的基础上, 本文提出4个油库利用率指标来评价中转油库的利用率, 包括: 周转次数、人均周转量、吨油运行成本、吨油作业时间, 并基于此评价投入使用的中转油库是否处于高效运行状态。

$$\text{周转次数} = \frac{\text{油库的周转量}}{\text{油库的安全容量}} \quad (1)$$

$$\text{人均周转量} = \frac{\text{油库的周转量}}{\text{油库的工作人员总和}} \quad (2)$$

$$\text{吨油运行成本} = \frac{\text{油库的运行费用}}{\text{油库的周转量}} \quad (3)$$

$$\text{吨油作业时间} = \frac{\text{累计作业时间 (结束时间-开始时间)}}{\text{累计发油量}} \quad (4)$$

## 1.2 模型建立

### 1.2.1 模型基本假设

成品油配送系统实际运行过程会受到诸多复杂因素的影响, 如地理因素、风险因素等。为了方便数学模型的建立与求解, 在不影响模型合理性与有效性的基础上做出如下假设: (1) 不考虑运输过程中的油品损耗; (2) 已知炼厂、中转油库和销售油库之间的单位运输成本。

### 1.2.2 模型符号说明

以  $I = \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$  表示炼厂编号的集合, 炼厂编号用  $i$  表示; 以  $J = \{1, 2, \dots, j_{\max}\}$  表示中转油库编号的集合, 中转油库编号用  $j$  表示; 以  $D = \{1, 2, \dots, d_{\max}\}$  表示销售油库编号的集合, 销售油库编号用  $d$  表示; 以  $O = \{1, 2, \dots, o_{\max}\}$  表示油品编号的集合, 油品编号用  $o$  表示; 以  $K = \{1, 2, \dots, k_{\max}\}$  表示月计划内时间窗编号的集合, 时间窗编号用  $k$  表示。

### 1.2.3 多目标优化模型建立

本文提出的多目标优化模型考虑成品油配送系统成本和中转油库的利用率2个目标。其中成品油配送系统成本最低作为第一目标函数, 表达式为式(5)–(10); 从油库利用率指标(1)–(4)中选取一个作为评价中转油库利用率的指标。本文选择周转次数最大作为

第二目标函数，其表达式为式(11)。

$$\min F_1 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \quad (5)$$

$$f_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} c_{i,j}^{\text{RO}} V_{i,j,o,k}^{\text{RO}} \quad (6)$$

$$f_2 = \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} c_{j,d}^{\text{OD}} V_{j,d,o,k}^{\text{OD}} \quad (7)$$

$$f_3 = \sum_{d \in D} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} \alpha_{d,o} B_{d,o,k} \quad (8)$$

$$f_4 = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O} \times \sum_{k \in K} w_j^{\text{RUN}} (V_{i,j,o,k}^{\text{RO}} + V_{j,d,o,k}^{\text{OD}}) \quad (9)$$

$$f_5 = \sum_{j \in J} w_j^{\text{FIX}} S_j \quad (10)$$

$$\max F_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} V_{i,j,o,k}^{\text{RO}} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} V_{j,d,o,k}^{\text{OD}}}{\sum_{j \in J} \sum_{o \in O} v_{j,o}^{\text{Omax}}} \quad (11)$$

式中， $F_1$  为成品油配送系统成本，单位为CNY； $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 、 $f_5$  分别为炼厂到中转油库的运输费用、中转油库到销售油库的运输费用、未满足销售油库油品需求的惩罚费用、中转油库的运行费用、中转油库的固定建设费用，单位为CNY； $F_2$  为成品油配送系统所有中转油库的周转次数之和； $c_{i,j}^{\text{RO}}$  为第*i*炼厂运输油品至第*j*中转油库的吨油运费，CNY/t； $V_{i,j,o,k}^{\text{RO}}$  为在第*k*时间窗，第*i*炼厂运输油品*o*至第*j*中转油库运输的运输量，t； $c_{j,d}^{\text{OD}}$  为第*j*中转油库运输油品到第*d*销售油库的吨油运费，CNY/t； $V_{j,d,o,k}^{\text{OD}}$  为在第*k*时间窗，第*j*中转油库运输油品*o*至第*d*销售油库运输的运输量，t； $\alpha_{d,o}$  为未输送油品*o*到销售油库*d*的惩罚单价，CNY/t； $B_{d,o,k}$  为第*k*时间窗未满足销售油库*d*油品*o*的需求量，t； $w_j^{\text{RUN}}$  为第*j*中转油库运行成本，包括油库倒罐、进油和出油的操作费用，CNY/t； $w_j^{\text{FIX}}$  为第*j*中转油库的固定成本，包括油库员工成本、折旧折耗费用、水电费用、环保费用、维修成本，CNY； $S_j$  为表示油品是否进出中转油库*j*的二元变量， $S_j=1$  表示油品从第*j*中转油库进出， $S_j=0$  表示油品不从第*j*中转油库进出。

### 1.2.4 约束条件

#### (1) 炼厂供应能力约束

炼厂*i*向中转油库*j*运输油品*o*的重量不超过该炼厂的最大生产能力，其表达式为：

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} V_{i,j,o,k}^{\text{RO}} \leq v_{i,o}^{\text{Rmax}} \quad \forall i \in I, o \in O \quad (12)$$

式中， $v_{i,o}^{\text{Rmax}}$  为第*i*炼厂炼化油品*o*的生产能力上限，t。

#### (2) 销售油库需求约束

未满足销售油库*d*的油品需求量和从中转油库*j*接收的油品重量总和等于销售油库*d*对油品*o*的需求量，其表达式为：

$$q_{d,o} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} V_{j,d,o,k}^{\text{OD}} + \sum_{k \in K} B_{d,o,k} \quad \forall d \in D, o \in O \quad (13)$$

式中， $q_{d,o}$  为销售油库*d*对油品*o*的油品需求量，t。

#### (3) 运输约束

若中转油库*j*与销售油库*d*的运输通道打开，即 $P_{j,d}^{\text{OD}}=1$ 时，则中转油库*j*可以外输油品至销售油库*d*；若中转油库*j*与销售油库*d*的运输通道关闭，即 $P_{j,d}^{\text{OD}}=0$ 时，则中转油库*j*不可以外输油品至销售油库*d*。其表达式为：

$$B_{j,d}^{\text{ODTRA}} \leq P_{j,d}^{\text{OD}} \quad \forall j \in J, d \in D \quad (14)$$

式中， $P_{j,d}^{\text{OD}}$  为判别第*j*中转油库是否运输油品到销售油库*d*的二元参数； $B_{j,d}^{\text{ODTRA}}$  为判别第*j*中转油库是否运输油品到销售油库*d*的二元变量。

若中转油库*j*选择向销售油库*d*运输某种油品，即 $B_{j,d}^{\text{ODTRA}}=1$ 时，其外输油品的重量 $V_{j,k,o,d}^{\text{OD}}$  不受限制；若中转油库*j*不向销售油库*d*运输某种油品，即 $B_{j,d}^{\text{ODTRA}}=0$ 时，其外输油品的重量 $V_{j,k,o,d}^{\text{OD}}=0$ 。

$$\sum_{k \in K} \sum_{o \in O} V_{j,k,o,d}^{\text{OD}} \leq B_{j,d}^{\text{ODTRA}} M \quad \forall j \in J, d \in D \quad (15)$$

#### (4) 油库库存约束

中转油库*j*某一时间窗的库容量等于前一时间窗的中转油库容量和前一时间窗所有炼厂*i*运输油品至中转油库*j*的运输量减去前一时间窗中转油库*j*运输油品至所有销售油库*d*的运输量，其表达式为：

$$V_{j,o,k} = V_{j,o,k-1} + \sum_{i \in I} V_{i,j,o,k-1}^{\text{RO}} - \sum_{d \in D} V_{j,d,o,k-1}^{\text{OD}} \quad \forall j \in J, o \in O, k > 1 \quad (16)$$

式中： $V_{j,o,k}$  为在第*k*时间窗，第*j*油库油品*o*的库存量，t。

中转油库*j*的库容量必须满足中转油库*j*的安全库容上下限范围。

$$0.08v_{j,o}^{\text{Omax}} \leq V_{j,o,k} \leq 0.92v_{j,o}^{\text{Omax}} \quad \forall j \in J, o \in O, k \in K \quad (17)$$

式中， $v_{j,o}^{\text{Omax}}$  为第*j*中转油库油品*o*的库存上限，单位t。

中转油库*j*前一时间窗的油品库存量不小于在这一时间窗内中转油库*j*向销售油库*d*运输油品的运输量。

$$\sum_{d \in D} V_{j,d,o,k}^{\text{OD}} \leq V_{j,o,k-1} \quad \forall j \in J, o \in O, k \in K \quad (18)$$

若中转油库*j*不投入使用，即 $S_j=0$ ，中转油库*j*不接收来自上游炼厂的油品，也不向销售油库*d*外输油品*o*；若中转油库*j*投入使用，即 $S_j=1$ ，中转油库*j*接收来自炼厂的油品并向销售油库*d*外输油品。

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} V_{i,j,o,k}^{RO} + \\ & \sum_{d \in D} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} V_{j,d,o,k}^{OD} \leq S_j M \quad (19) \\ & \forall j \in J \end{aligned}$$

$k=1$  时, 中转油库  $j$  的初始容量已知, 并且  $k=30$  时中转油库  $j$  的留存库容量应不小于中转油库  $j$  的初始容量。

$$\sum_{j \in J} \sum_{o \in O} V_{j,o,1} = v_{j,o}^{INI} \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{o \in O} V_{j,o,30} \geq v_{j,o}^{INI} \quad (21)$$

式中,  $v_{j,o}^{INI}$  为第  $j$  中转油库油品  $o$  的初始库存,  $t$ ;  $V_{j,o,1}$  为  $k=1$  时第  $j$  中转油库油品  $o$  的库容量,  $t$ ;  $V_{j,o,30}$  为  $k=30$  时第  $j$  中转油库油品  $o$  的库容量,  $t$ 。

## 2 模型求解

总成本最低(式 5)和周转次数最大(式 11)是不同属性的目标函数, 而增广  $\varepsilon$ -约束方法可以解决具有不同属性目标函数的多目标优化模型。采用增广  $\varepsilon$ -约束方法进行求解时, 先将原问题转化为单目标优化问题, 然后确定每个目标函数的帕累托最优集范围<sup>[22-23]</sup>。鉴于总成本和周转次数指标具有不同的量纲, 采用正态化消除量纲, 即将各目标按  $\bar{F}_i(x) = \frac{(F_i(x) - F_i^{\min})}{(F_i^{\max} - F_i^{\min})}$ ,  $\forall i=1,2$  进行转换, 其中  $F_i^{\max}$  和  $F_i^{\min}$  分别为第  $i$  目标的最大值和最小值<sup>[24]</sup>。然后通过选择一个目标函数, 其它目标作为约束条件, 引入参数

$\mu_2$  和松弛变量  $\sigma_2$ , 得到一个新的问题:

$$\begin{aligned} \min F = & \frac{F_1(x)}{F_{1\max} - F_{1\min}} - eps \times \frac{\mu_2}{F_{2\max} - F_{2\min}} \quad (22) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} -F_2(x) - \mu_2 = \sigma_2 \\ \mu_2 \geq 2 \\ x \in X \end{cases} \end{aligned}$$

其中,  $eps$  是一个较小的数字, 通常  $eps=10^{-3} \sim 10^{-6}$ 。在这里,  $eps=10^{-6}$ ,  $\sigma_2$  为松弛变量,  $\mu_2$  为离散参数。

## 3 实际应用

以中国某地区的成品油配送系统为算例。该地区有一定规模的炼厂 5 个, 编号为  $P1 \sim P5$ , 各炼厂年产量分别为  $172 \times 10^4$  t/a、 $45 \times 10^4$  t/a、 $60 \times 10^4$  t/a、 $37 \times 10^4$  t/a、 $44 \times 10^4$  t/a; 年需求量大于  $10 \times 10^4$  t/a 的成品油需求区域共 10 个, 编号为  $D1 \sim D10$ (表 1); 某区域包含库容量、员工人数及成本费用的中转油库共 7 个, 编号为  $T1 \sim T7$ (表 2)。根据实地位置绘制了炼厂及成品油需求区域的地理位置(图 2)。

将上述已知条件带入模型, 并在 MATLAB2016 环境下编程求解, 最终可以产生不同的选择方案。求解得到该地区的成品油配送系统优化后的不同方案解集(图 3)。可见, 利用多目标模型求解在配送成本相同的情况下油库周转次数较低的解( $C$ 、 $E$ )不是帕累托最优解, 其余解( $A$ 、 $B$ 、 $D$ 、 $F$ )均为帕累托最优解。

对于非帕累托最优解( $C$ 、 $E$ ), 油库投入使用个

表 1 某地区各成品油需求区域的油品需求量

Table 1 The oil demand of each refined oil demand region in a region

需求区域编号	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
油品需求量/( $10^4$ t/a)	33.22	41.09	39.80	13.24	13.27	32.88	103.61	42.27	28.46	49.74

表 2 某区域的中转油库容量、员工人数及成本费用

Table 2 Capacity, number of employees and cost of transit oil depot in a certain region

油库编号	总库容/ ( $10^4$ t/a)	汽油库容/ ( $10^4$ t/a)	柴油库容/ ( $10^4$ t/a)	员工人数	运行成本费用 ( $10^4$ CNY)	固定成本费用 ( $10^4$ CNY)
T1	3.7	2.0	1.7	99	2611.67	206.60
T2	2.0	0.8	1.2	58	1157.29	93.01
T3	6.5	2.5	4.0	57	1237.25	100.72
T4	2.1	0.6	1.5	31	726.73	58.70
T5	5.5	2.0	3.5	60	1668.47	132.50
T6	5.5	2.5	3.0	60	1985.76	158.54
T7	2.9	1.7	1.2	45	980.33	100.89

数较帕累托最优解(D、F)不改变,但周转次数较帕累托最优解(D、F)低。而对于帕累托最优解(A、B、D、F),根据对比分析得到的不同方案中油库的利用率指标(图4—7)可见,方案A中优化后投入使用的中转油库(T3)的周转次数指标较优化前提升44.1%;人均周转量指标较优化前提升44.1%;吨油作业时间较优化前下降44.4%;吨油运行成本较优化前降低

44.3%。

方案B中优化后投入使用的中转油库(T3~T4)的周转次数指标较优化前分别提升了43.3%和48.1%;人均周转量指标较优化前分别提升了54.3%和45.9%;吨油作业时间较优化前分别下降了52.8%和45.6%;吨油运行成本较优化前降低了53.4%和42.0%。

方案D中优化后投入使用的中转油库(T3~T5)的周转次数指标较优化前分别提升了43.1%、48.1%和36.6%;人均周转量指标较优化前分别提升了42.3%、50.0%和38.0%;吨油作业时间较优化前分别下降了41.4%、46.6%和40.0%;吨油运行成本较优化前降低了42.9%、48.1%和58.3%。

方案F中优化后投入使用的中转油库(T2~T5)的周转次数指标较优化前分别提升了44.3%、35.6%、33.9%和44.0%;人均周转量指标较优化前分别提升了

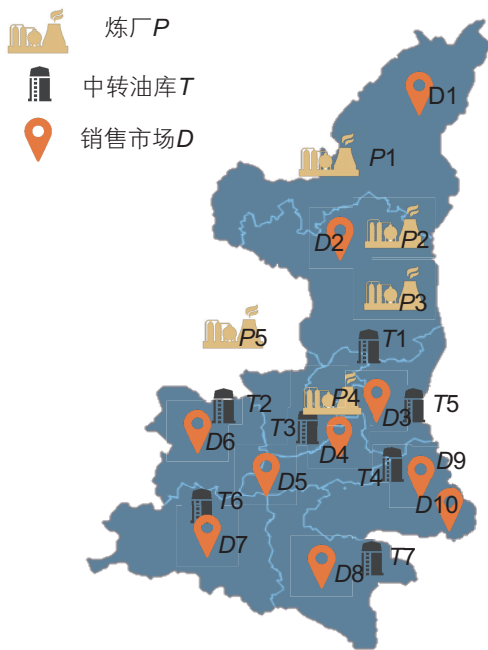


图2 炼厂和成品油需求区域的地理位置分布图  
Fig. 2 Geographical distribution map of refinery and oil product demand region

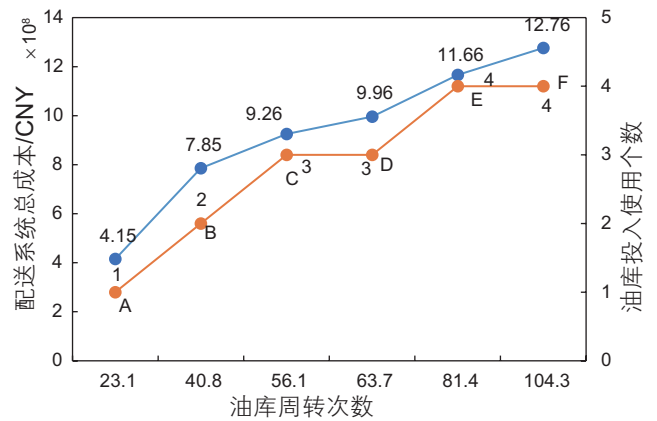


图3 经求解后的目标函数关系图  
Fig. 3 The objective function diagram after solving

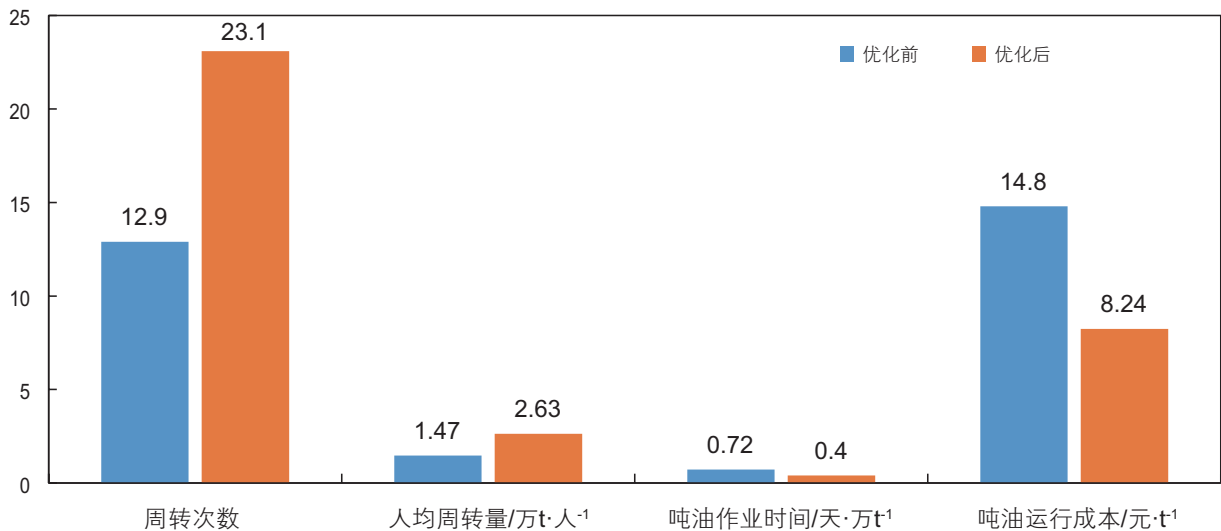


图4 方案A的利用率指标对比分析图  
Fig. 4 Comparative analysis diagram of utilization index of Plan A

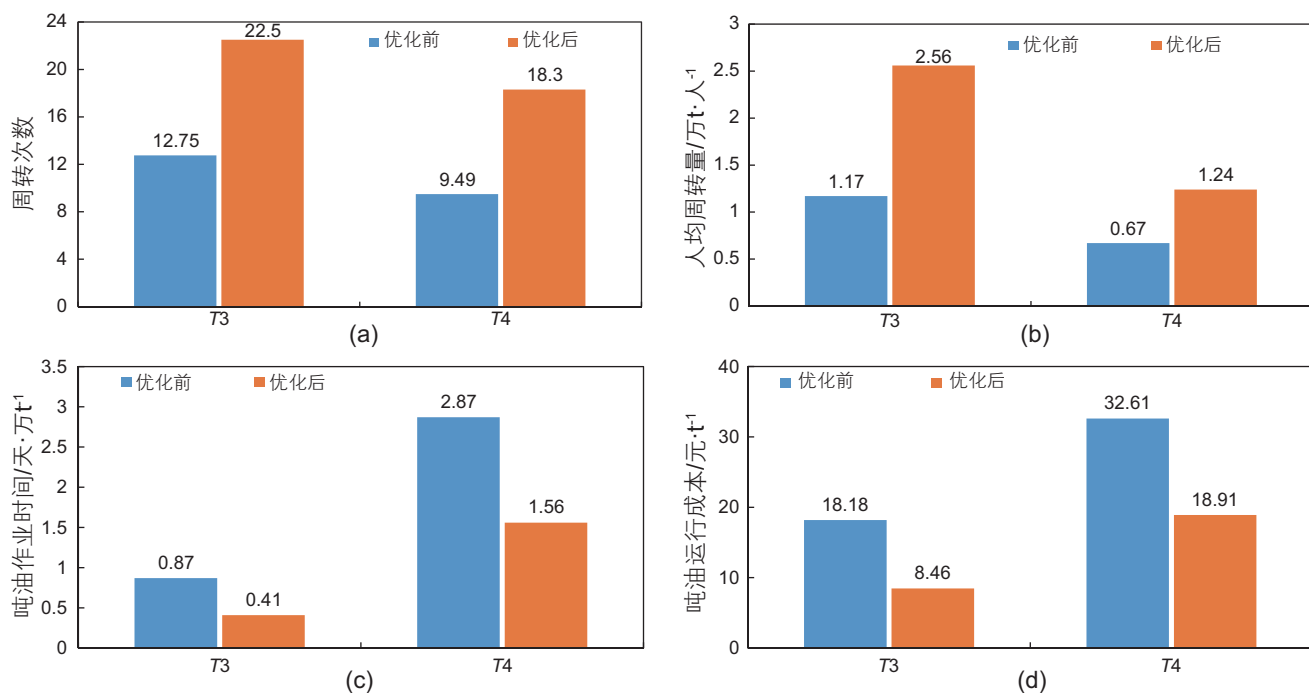


图5 方案B的利用率指标对比分析图(a)周转次数对比分析图, (b)人均周转量对比分析图, (c)吨油作业时间对比分析图, (d)吨油运行成本对比分析图

Fig. 5 Comparative analysis diagram of utilization index of Plan B (a) comparative analysis diagram of turnover times, (b) comparative analysis diagram of per capita turnover, (c) comparative analysis diagram of operation time of tons of oil, (d) comparative analysis diagram of operation cost of tons of oil

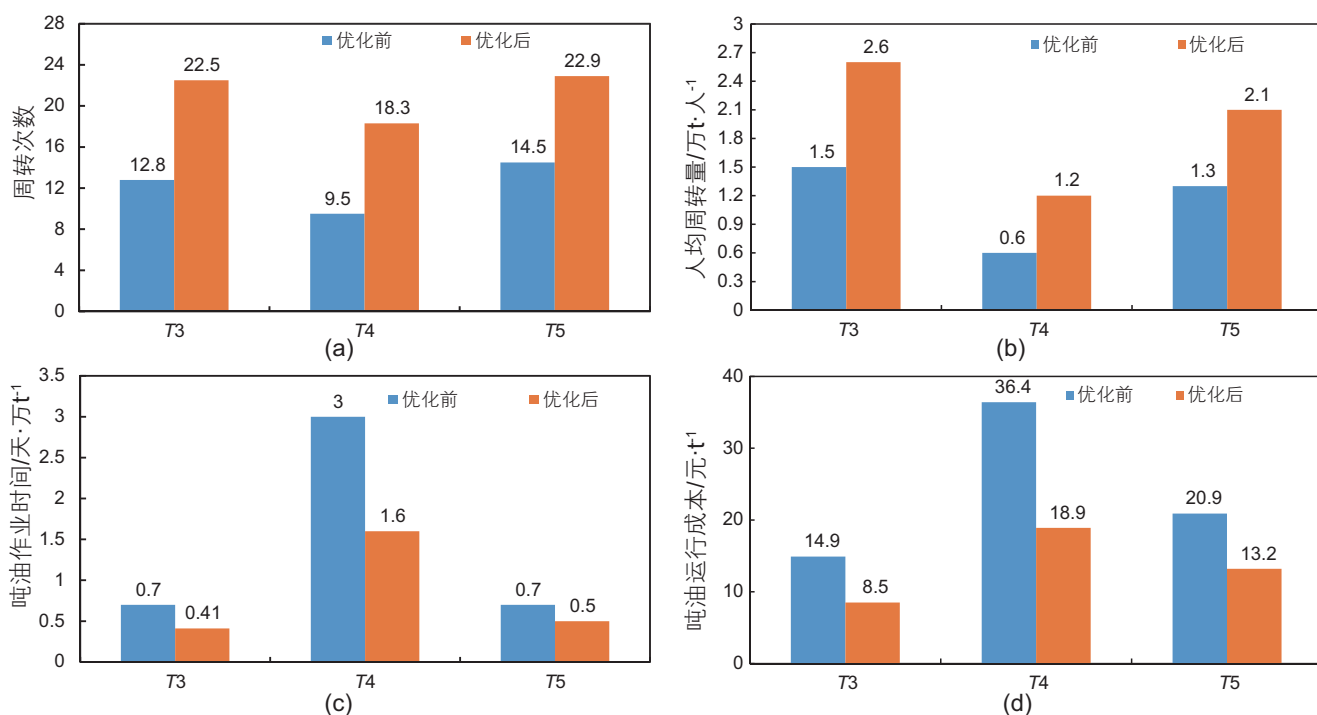


图6 方案D的利用率指标对比分析图(a)周转次数对比分析图, (b)人均周转量对比分析图, (c)吨油作业时间对比分析图, (d)吨油运行成本对比分析图

Fig. 6 Comparative analysis diagram of utilization index of Plan D (a) comparative analysis diagram of turnover times, (b) comparative analysis diagram of per capita turnover, (c) comparative analysis diagram of operation time of tons of oil, (d) comparative analysis diagram of operation cost of tons of oil

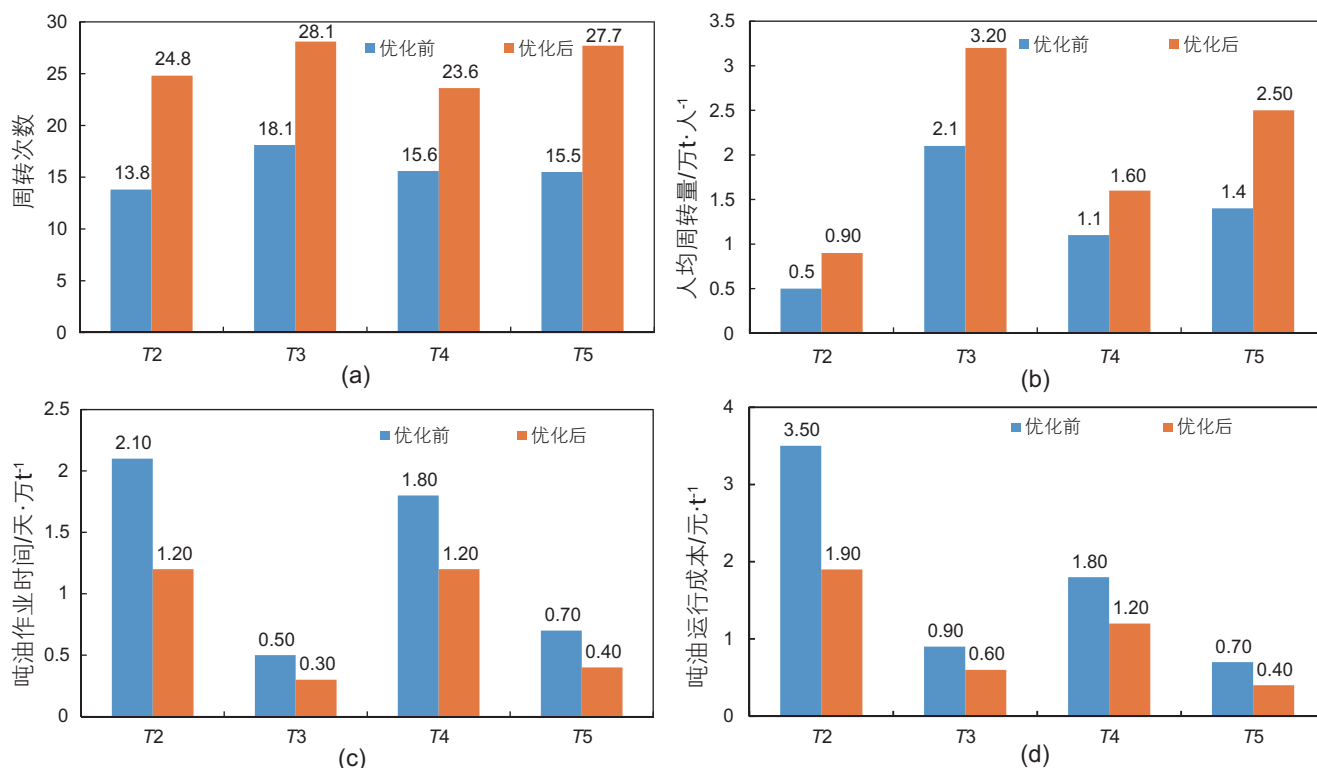


图7 方案F的油库利用率指标对比分析图。(a)周转次数对比分析图,(b)人均周转量对比分析图,(c)吨油作业时间对比分析图,(d)吨油运行成本对比分析图

Fig. 7 Comparative analysis diagram of utilization index of Plan F. (a) comparative analysis diagram of turnover times, (b) comparative analysis diagram of per capita turnover, (c) comparative analysis diagram of operation time of tons of oil, (d) comparative analysis diagram of operation cost of tons of oil

44.4%、34.4%、31.2%和44.0%；吨油作业时间较优化前分别下降了42.9%、40.0%、33.3%和42.8%；吨油运行成本较优化前降低了44.3%、35.5%、33.9%和44.1%。

综上，该成品油配送系统综合考虑了输配成本、油库运行成本，一定程度上降低了资源消耗，提升了供应链收益，实现了整个配送系统的高效运作，可为现场运行管理者提供有力的辅助决策手段。

## 4 结论

(1)基于供应链管理思想建立了成品油配送系统整体优化的多目标MILP模型，以配送系统的运行成本

最低和周转次数最大为目标，考虑了炼厂供应、运输、油库运行以及销售需求等相关约束条件。

(2)将研究成果应用于中国某地区的成品油配送系统，经过现场真实数据对比，求得的成品油配送系统方案具有一定经济性的同时，中转油库的周转次数和人均周转量指标最高可分别提高48.1%和54.3%，吨油作业时间和吨油运行成本指标最高可分别降低52.8%和58.3%，对该地区的成品油供输计划、中转油库运行计划的确定具有较强的指导意义。

(3)所建模型未局限于某一具体地区的成品油配送系统，对其他能源配送系统的优化也具有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 张立峰, 易万里, 刘晓兰. 基于两阶段算法的大规模成品油二次配送优化[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2951-2963. [ZHANG L F, YI W L, LIU X L. Two-stage optimization algorithm for large scale secondary petroleum product delivery planning [J]. System Engineering Theory and Practice, 2016, 36(11): 2951-2963.]
- [2] 文彬. G石油公司成品油物流配送优化及实施研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019. [WEN B. Optimize the refined oil logistics and



- distribution for G petroleum company [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.]
- [3] 耿相海. GD石油公司成品油库存优化研究[D]. 华南理工大学, 2011. [GENG X H. The study on oil inventory optimization of GD petroleum company[D]. South China University of Technology, 2011.]
- [4] 赵振学, 朱海龙, 徐敬波. 西部地区成品油合理库存探讨[J]. 国际石油经济, 2012, 20(08): 86-90+110. [ZHAO Z X, ZHU H L, XU J B. Discussion on reasonable inventory of refined oil in western region[J]. International Petroleum Economics, 2012, 20(08): 86-90+110.]
- [5] 刘妮, 邓宴邴, 薛旭东, 等. 陕西省成品油供应链现状及优化建议[J]. 能源环境保护, 2020, 34(02): 78-81. [LIU N, DENG Y L, et al. Status and improvement suggestions of refined oil supply chain-taking Shaanxi province as an example[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(02): 78-81.]
- [6] 梁永图, 周星远, 邱睿, 等. 大型环枝状油田注水管网系统运行优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(06): 121-132. [LIANG Y T, ZHOU X Y, QIU R, et al. Optimal operation study on the large-scale looped and branched waterflooding pipeline network system of oilfields[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(06): 121-132.]
- [7] MIRHASSANI S A, ABBASI M, MORADI S. Operational scheduling of refined product pipeline with dual purpose depots[J]. Applied Mathematical Modelling, 37, 8, 2013, 5723-5742.
- [8] 邱睿, 梁永图, 段志刚, 等. 煤制油供应链整体优化[J]. 油气储运, 2020, 39(04): 412-417. [QIU R, LIANG Y T, DUAN Z G, et al. Integrated optimization of supply chains for coal-to-oil production[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(04): 412-417.]
- [9] WANG B H, YEE VAN FAN, HON HUIN CHIN, et al. Emission-cost nexus optimization and performance analysis of downstream oil supply chains[J]. Journal of Cleaner Production, Volume 266, 2020, 121831.
- [10] 邱睿, 周星远, 王凯琪, 等. 多源单汇液态轻烃管网系统运行优化MINLP模型[J]. 油气储运, 2020, 39(09): 1012-1020. [QIU R, ZHOU X Y, WANG K Q, et al. MINLP model for operation optimization of multi-source single-sink liquid light hydrocarbon pipeline network system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(09): 1012-1020.]
- [11] 王博弘, 梁永图, 张浩然, 等. 成品油二次配送路径优化模型及混合求解算法[J]. 油气储运, 2019, 38(11): 1251-1256. [WANG B H, LIANG Y T, ZHANG H R, et al. Optimization model and hybrid solution algorithm for the secondary distribution route of products oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(11): 1251-1256.]
- [12] LIAO Q, ZHANG H R, XIA T Q, et al. A data-driven method for pipeline scheduling optimization[J]. Chemical Engineering Research and Design, 144, 2019, 79-94.
- [13] ZHANG H R, LIANG Y T, LIAO Q, et al. A self-learning approach for optimal detailed scheduling of multi-product pipeline[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 327, 2018, 41-63.
- [14] LIAO Q, PEDRO M, CASTRO, et al. New batch-centric model for detailed scheduling and inventory management of mesh pipeline networks[J]. Computers & Chemical Engineering, 130, 2019, 106568.
- [15] 赵振学, 康必勇, 李天生, 等. 油库运营综合评价体系实证研究[Z]. 2015. [ZHAO Z X, KANG B Y, LI T S, et al. An empirical study on comprehensive Evaluation System of oil depot operation[Z]. 2015.]
- [16] 李天峰, 王广利, 徐敬波, 等. 构建世界一流成品油库全要素评价指标体系——中国石油西北销售分公司的实践[J]. 国际石油经济, 2020, 28(07): 94-99+105. [LI T F, WANG G L, XU J B, et al. A total factor evaluation index system for world class oil depots —A case study of PetroChina Northwest Marketing Company[J]. International Petroleum Economics, 2020, 28(07): 94-99+105.]
- [17] 王敦, 李倩冬, 孙国瑞, 等. 中转油库储运物流系统优化研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(03): 51-56. [WANG Y, LI Q D, SUN G R, et al. Study on the optimization of storage and transportation logistics system for transfer oil terminal[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2018, 38(03): 51-56.]
- [18] 廖绮, 徐宁, 娄玉华, 等. 大型成品油中转油库调度优化[J]. 油气储运, 2019, 38(05): 528-534. [LIAO Q, XU N, LOU Y H, et al. Optimal scheduling of large-scale transfer depot of products pipeline system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(05): 528-534.]
- [19] 王莉, 吴长春, 左丽丽, 等. 基于离散时间的成品油管网中转油库调度优化[J]. 油气储运, 2018, 37(07): 762-767. [WANG L, WU C C, ZUO L L, et al. Scheduling optimization of transfer terminal of product pipeline network based on discrete time[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(07): 762-767.]
- [20] ZHANG H R, LIANG Y T, LIAO Q, et al. Mixed-time mixed-integer linear programming for optimal detailed scheduling of a crude oil port depot[J]. Chemical Engineering Research and Design, 137, 2018, 434-451, 0263-8762.
- [21] YU L, CHEN M, XU Q. Simultaneous scheduling of multi-product pipeline distribution and depot inventory management for petroleum refineries[J]. Chemical Engineering Science, 220, 2020, 115618, 0009-2509.
- [22] GEORGE MAVROTAS. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 213, 2009, 455-465, 0096-3003.

- [23] XING X K, YAN Y M, ZHANG H R, et al. Optimal design of distributed energy systems for industrial parks under gas shortage based on augmented  $\varepsilon$ -constraint method[J]. Journal of Cleaner Production, 218, 2019, 782–795, 0959–6526.
- [24] 黄丽霞, 赵军. 危险货物铁公联运办理站选址问题多目标优化[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(01): 235–246. [HUANG L X, ZHAO J. Multi-objective optimization for transfer station location problem in rail-road intermodal transportation of hazardous materials[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(01): 235–246.]

(编辑 马桂霞)