

# 基于改进SPEA2的原油短期调度问题研究

王书娟, 侯艳, 滕少华, 朱清华

(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对原油短期调度多目标优化问题, 在分析已有多目标模型对原油调度过程中的供油罐个数、供油罐切换次数、原油在管道中的混合成本和供油罐罐底混合成本这4个目标优化的基础上, 本文建立的模型增加了原油在管道转运过程中的能耗成本这一优化目标, 使模型更吻合生产实际。在SPEA2算法中引入极值归档集, 结合MOGWO算法指导极值归档集更新来提高算法的全局搜索能力; 利用余弦相似度对归档集进行裁剪操作, 以保证归档集中个体的多样性。将改进算法与多个具有代表性的进化多目标优化算法进行对比实验, 结果表明, 本文所提出算法在求解原油短期调度问题时性能较优。

**关键词:** 原油调度; 多目标优化; SPEA2算法; 极值归档集

**中图分类号:** TP301

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7375(2023)03-0124-10

## Research on Short-term Crude Oil Schedule Based on Improved SPEA2

WANG Shujuan, HOU Yan, TENG Shaohua, ZHU Qinghua

(School of Computers, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To solve the multi-objective optimization problem of short-term crude oil scheduling, on the basis of four objectives in existing optimization models including the number of charging tanks, the times of charging tank switching, the mixing cost of crude oil in pipelines and the mixing cost of charging tank bottoms in a crude oil scheduling process, the model established in this paper adds an optimization objective of the energy consumption cost of crude oil transferring through pipelines, which is more coincident to real production. The extreme value archive set is introduced into Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2), while Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO) algorithm is combined to guide the update of the extreme value archive set to enhance the global search ability of the algorithm; the cosine similarity is adopted to prune the extreme value archive set to improve the diversity of individuals in the set. The modified algorithm is compared with several representative evolutionary multi-objective optimization algorithms, and the experimental results show that the proposed one has better performance in solving the short-term scheduling problem of crude oil.

**Key words:** crude oil scheduling; multi-objective optimization; SPEA2 (strength Pareto evolutionary algorithm 2); extreme value archive set

原油经过一定的炼制流程可以生成各种原油产品, 炼油生产过程具有不确定、多目标及多约束等特性, 属于NP-hard问题<sup>[1]</sup>。炼油短期生产计划一般为7~10 d生产计划, 目前缺乏成熟的软件和技术, 大多数炼油企业采用人工排产, 调度的可行性和优化性都难以得到保证。因此, 寻找短期调度的有效技术, 制定详细优化调度策略, 能减少人力消耗并

节省成本, 更好地为完成生产计划提供可行方案。

对于原油短期生产计划, 部分学者采用数学规划方法求解。混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 和混合整数非线性规划 (mixed integer non-linear programming, MINLP) 在生产调度建模中得到广泛使用。尽管线性规划在理论上能对调度问题求出最优解, 但在求解过程中计算

收稿日期: 2021-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61603100); 广东省重点领域研发计划资助项目 (2020B010166006)

作者简介: 王书娟 (1997—), 女, 河南省人, 硕士研究生, 主要研究方向为离散事件系统、生产计划与控制。

代价会随问题规模变大而急剧增加。利用连续时间表示可以大大减少模型中的离散变量, 但是会以产生非线性约束为代价, 难以保证解的可行性。众所周知, 非线性问题求解极其困难, 而且连续时间模型还需事先知道整个计划周期内事件的数量, 实际的炼油生产过程不能满足这一要求。因此, 基于数学规划的方法不能直接用于原油短期调度问题。

为此, Wu等<sup>[2-4]</sup>从控制理论角度提出一种递阶求解的新方法, 该方法利用Petri网对原油一次加工过程进行建模和可调度性分析, 将原油调度问题分为上下两个层次的子问题。在上层用基于线性规划的方法解决炼油计划的求解问题并优化相关目标。在下层则把可调度性条件当作约束, 通过递归求解的方法生成详细调度来实现上层炼油计划, 但是该方法只保证可行, 并没有考虑下层详细调度过程中的优化问题。

为优化下层详细调度, Hou等<sup>[5]</sup>将原油调度问题转换为能够用启发式和智能算法求解的资源指派问题。这样一来, 原油处理短期生产调度问题就是一个多目标组合优化问题, 可以用多目标优化算法来进行求解。文中对原油短期生产计划中的油罐使用个数、罐底原油混合成本、管道中的原油混合成本及油罐切换成本等目标运用快速非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)<sup>[6]</sup>进行优化求解, 为生产计划提供了有效的决策选择方案。

在原油调度过程中, 为最大化生产率, 管道转运原油速率一般设为最大速率, 但该方法会消耗大量能源。另外, 管道设有泵组来调节管道的转运速率, 泵组个数与能耗成正比, 但与速率呈非线性关系<sup>[7]</sup>。随着能源危机和气候变暖对世界各国经济的影响越来越大, 各国相继开始倡导和鼓励节能环保经济的推广和发展。在国家节能减排政策下, 炼油厂在生产过程中最小化转运过程中的能耗迫在眉睫。因此, 与文献<sup>[5]</sup>已有工作不同, 本文还将对原油转运过程中的能耗成本进行优化。

进化算法 (evolutionary algorithm, EA) 又称演化算法, 是模拟生物在自然界进化过程的一类算法, 常被用于多目标优化问题求解。具有代表性的算法包括: 基于支配关系的NSGA-II, 通过快速非支配排序和拥挤距离提高算法的性能; 基于强度的帕累托进化算法 (strength Pareto evolutionary algorithm 2, SPEA2)<sup>[8]</sup>, 通过密度估计和归档集截断策略提高算法的多样性和收敛性; 基于指标的多目标进化算法

(indicator-based evolutionary algorithm, IBEA)<sup>[9]</sup>和基于分解思想的多目标进化算法 (multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D)<sup>[10]</sup>等。SPEA2作为经典的遗传算法, 相比其他类型的算法具有一定优势, 但其收敛效果一般。孙宝凤等<sup>[11]</sup>设计基于两段式染色体编码的NSGAII算法, 应用于流水车间优化调度。Larraín等<sup>[12]</sup>将SPEA2算法用于连续纸浆工艺来提高生产效率。Liu等<sup>[13]</sup>对SPEA2算法进行改进来优化企业投资决策, 提高了算法的收敛性。

多目标灰狼优化算法 (multi-objective grey wolf optimizer, MOGWO) 是Mirjalili等<sup>[14]</sup>提出的新型群智能优化算法, 具有较强的收敛能力, 但在更新过程中可能丢失更好的解导致求解精度差。近年来有很多学者对该算法进行研究, 并用于优化不同的问题。邢怀玺等<sup>[15]</sup>将该算法用于干扰资源调度问题的优化。李长安等<sup>[16]</sup>针对GWO算法收敛速度慢、寻优精度不足等问题改进算法, 在船舶调度优化中取得较好的应用效果。Zhang等<sup>[17]</sup>对GWO算法进行改进, 提出动态灰狼优化算法, 提高了迭代收敛速度。

本文以SPEA2为基础, 引入极值归档并借助MOGWO算法更新思想, 提出基于极值点的强度帕累托进化算法 (extreme points based SPEA2, ESPEA2), 并在文献<sup>[2-4]</sup>分层的基础上对整个原油短期调度问题建立多目标优化模型, 将提出的ESPEA2算法用于原油短期调度问题优化求解。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 问题描述

原油短期调度问题是整个炼油计划最困难的问题之一。图1描述的是原油一次加工过程, 主要包括原油卸载、原油转运和蒸馏塔炼油3个环节。原油经油轮运输到港口, 卸载到储油罐中, 然后经过输油管道转运到炼油厂内的供油罐中, 最后由供油罐提供蒸馏塔炼油。

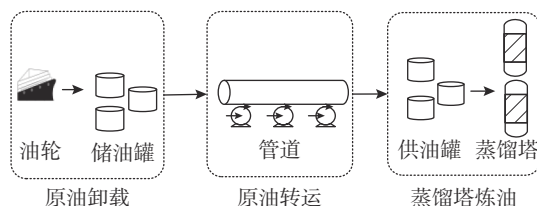


图1 原油一次加工过程

Figure 1 Crude oil operations

在实际生产过程中,原油短期调度过程存在诸多约束条件。如在整个调度周期内,无特殊情况时蒸馏塔应连续炼油不能中断;油罐不能同时充油和供油;任何时刻,管道只能被一个供油罐使用来进行原油转运等。如果某一关键约束无法满足,很可能导致短期生产计划不可行。除了约束,在原油处理制定详细计划的过程中,会产生一系列的成本。根据文献[2~4]提出的分层思想,上层涉及的优化目标在制定炼油计划时已考虑,本文主要针对下层详细调度过程产生的成本进行优化。

## 1.2 数学模型

本文研究的原油短期生产计划需要给出下层详细调度以完成给定的上层炼油计划,同时优化成本。

### 1.2.1 目标函数

1) 油罐使用成本。油罐是炼油厂非常重要的资源,在调度可行的条件下应尽可能减少油罐使用个数。在整个原油短期调度过程中,供油罐的使用成本函数为

$$J_1 = \phi \lambda. \quad (1)$$

其中, $J_1$ 为调度过程中油罐的使用成本; $\phi$ 表示单个油罐的成本系数; $\lambda$ 为整个调度周期内供油罐的使用个数。

2) 供油罐切换成本。为保证蒸馏塔的连续运行,当前油罐供油结束后会切换新的油罐,这个过程也会产生一定成本。在整个调度过程中,供油罐切换成本为

$$J_2 = \sum_{d=1}^K \rho \chi_d. \quad (2)$$

其中, $K$ 代表炼油厂内蒸馏塔的总个数; $\rho$ 表示供油罐切换一次的成本系数; $\chi_d$ 表示第 $d$ 个蒸馏塔( $D_d$ )的供油罐切换次数。

3) 原油在管道中的混合成本。当管道中转运的原油由一种类型切换到另一种类型时,会存在一部分原油混合,这将引起油品质量下降并产生一定的费用。管道中不同原油的混合成本与原油的种类及混合次数有关。 $M$ 表示调度期内所用原油的种类数,其定义为

$$J_3 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij} a_{ij}. \quad (3)$$

其中, $x_{ij}$ 表示原油 $i$ 和原油 $j$ 在管道中的混合成本系数; $M$ 为原油类型总数; $a_{ij}$ 表示原油 $i$ 和原油 $j$ 在

管道中的混合次数;当 $i=j$ 时,表示两次转运的原油类型相同,即 $x_{ij}=0$ 。

4) 罐底原油混合成本。由于生产工艺的原因,油罐供油完毕,罐底会残留一部分原油,当注入新的原油类型与上次类型不一样时,也会产生一定的混合成本。与原油在管道中的混合类似,原油在罐底的混合成本为

$$J_4 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M y_{ij} b_{ij}. \quad (4)$$

其中, $y_{ij}$ 为原油 $i$ 和原油 $j$ 的罐底混合成本系数; $b_{ij}$ 为原油 $i$ 和原油 $j$ 的罐底混合次数;当 $i=j$ 时, $y_{ij}=0$ 。

5) 管道能耗成本。管道以一定速率转运原油会产生能耗,不同的速率产生的能耗不同。管道转运原油的过程中,开启不同泵组会有不同的转运速率,从而产生不同的能耗。假设在详细调度过程中,用 $\Delta_T$ 表示原油转运操作,第 $d$ 个蒸馏塔完成炼油任务所需的原油转运操作分别为 $\Delta_{(T,1)}, \Delta_{(T,2)}, \dots, \Delta_{(T,\Pi_d)}$ ,其中,每个 $\Delta_{(T,i)}$ 可以采用不同的转运速率。那么,在整个调度周期中,通过管道转运原油所需要的能耗为

$$J_5 = \sum_{d=1}^K \sum_{i=1}^{\Pi_d} (\bar{\epsilon}_{di} - \epsilon_{di}) \times \Psi_{(i,m)}. \quad (5)$$

其中, $\Pi_d$ 为第 $d$ 个蒸馏塔( $D_d$ )对应的原油转运操作 $\Delta_T$ 的个数; $\Psi_{(i,m)}$ 表示蒸馏塔 $d$ 的第 $i$ 个转运操作 $\Delta_{(T,i)}$ 开启 $m$ 组泵对应的能耗成本系数; $\epsilon_{di}$ 、 $\bar{\epsilon}_{di}$ 分别为蒸馏塔 $D_d$ 的第 $i$ 个转运操作的开始和结束时刻。

### 1.2.2 约束条件

除上述优化目标外,整个原油短期详细调度还需满足下列约束条件。

1) 调度期间,供油罐不能同时充油和放油。

$$Y_{in,i} + Y_{out,i} \leq 1. \quad (6)$$

其中, $Y$ 为二元变量,取值为0或1; $Y_{in,i}=0$ (或 $Y_{out,i}=1$ )表示油罐 $i$ 在放油; $Y_{in,i}=1$ (或 $Y_{out,i}=0$ )表示油罐 $i$ 在充油。

2) 除必要维修外,蒸馏塔在整个调度期内不能中断炼油。

$$\mu_{d1} = \tau_1, \bar{\mu}_{d1} = \mu_{d2}, \dots, \bar{\mu}_{di-1} = \mu_{di}, \dots, \bar{\mu}_{dn} = \tau_n, \quad \forall d \in \{1, 2, \dots, K\}. \quad (7)$$

其中, $[\tau_1, \tau_n]$ 表示整个调度周期的开始和结束时刻; $\mu_{di}$ 和 $\bar{\mu}_{di}$ 为蒸馏塔 $D_d$ 的第 $i$ 个炼油任务的开始和结束时刻。

3) 转运约束。任何时刻, 管道至多为一个供油罐转运原油。

$$\sum_{i=1}^{w_T} I_i(z) \leq 1, \forall z \in [\tau_1, \tau_n]. \quad (8)$$

式中,  $w_T$ 表示整个调度过程中原油转运决策个数;  $I_i(z)$ 表示在时刻 $z$ 管道是否在转运第 $i$ 个原油任务, 取值为0或1。

4) 驻留时间约束。当原油注入储油罐或供油罐后, 需要等待停留一段时间才能向管道输油或向蒸馏塔供油, 以分离原油中的海水, 用 $\Omega$ 表示驻留时间, 定义如下。

用 $[\gamma, \bar{\gamma}]$ 、 $[\epsilon, \bar{\epsilon}]$ 和 $[\mu, \bar{\mu}]$ 分别表示原油处理过程中原油卸载、原油转运及蒸馏塔炼油等3个环节的开始和结束时间, 则原油包 $i$ 对应的驻留时间约束计算为

$$(\epsilon_i - \bar{\gamma}_i \geq \Omega) \text{ and } (\mu_i - \bar{\epsilon}_i \geq \Omega). \quad (9)$$

其中, and表示逻辑与。

## 2 原油短期详细调度

在原油短期调度过程中, 原油操作决策定义为

$$A = \{o, \theta, \omega, \epsilon, \xi, \varpi\}. \quad (10)$$

其中,  $o$ 表示原油类型;  $\theta$ 表示不同阶段的原油处理速率;  $\omega$ 表示原油从何处运输;  $\epsilon$ 表示原油运送到何处去;  $\xi$ 表示原油体积;  $\varpi$ 表示完成决策所用时间。原油操作可以分为原油卸载、原油转运和蒸馏塔炼油三类, 分别用 $A_U$ 、 $A_T$ 和 $A_F$ 表示。

那么, 原油调度问题表示为

$$Z = \{A_{(U, 1)}, \dots, A_{(U, w_U)}, A_{(T, 1)}, \dots, A_{(T, w_T)}, A_{(F, 1)}, \dots, A_{(F, w_F)}\}. \quad (11)$$

其中,  $w_U$ 、 $w_T$ 和 $w_F$ 分别为整个调度过程中原油卸载决策个数、转运决策个数和炼油决策的个数。

即原油详细调度由一系列的决策组成, 需要决定: 1) 何时, 以何种速率运输多少量的哪种类型的原油并卸载到港口的哪个储油罐中; 2) 何时, 以何种速率以及多少量的何种原油运输到炼油厂内的哪个供油罐; 3) 何时, 蒸馏塔炼制哪个油罐中的何种类型的原油。

在实际生产过程中, 炼油企业会根据参考数据对未来一段时间市场需求的原油进行采购。本文假设港口储油罐中有足够多的原油供炼油厂使用, 因

此原油详细调度的关键就是如何产生一系列的转运决策( $A_T$ )及对应的供油决策( $A_F$ )。

用 $\Phi$ 、 $D$ 和 $V$ 分别表示空供油罐集合、未完成炼油任务的蒸馏塔集合和管道转运速率集合。基于文献[5]提出的资源指派思想, 首先从集合 $\Phi$ 中选择一个空罐, 序号记为 $c$ , 在 $D$ 中选择一个蒸馏塔, 序号用 $d$ 表示, 从给定的 $V$ 中选择管道转运速率, 序号记为 $v$ , 而转运操作对应的转运时间可由 $\xi/V$ 求出。与之对应的炼油时间可由 $\xi/h_d$ 求出,  $h_d$ 表示第 $d$ 个蒸馏塔的炼油速率。每一组空罐、蒸馏塔及管道速率称为一个指派, 每次生成一个指派直至完成上层炼油计划。接下来的关键问题就是如何确定每次指派中转运的原油体积。在转运原油时, 要考虑到供油罐容量以及驻留时间约束等因素, 具体转运体积为

$$\xi = \min\{\Lambda_c, s_{d,o}, V_v(\mu_d - \epsilon_d - \Omega)\}. \quad (12)$$

其中,  $\Lambda_c$ 表示第 $c$ 个油罐的容量;  $s_{d,o}$ 表示第 $d$ 个蒸馏塔所需原油类型 $o$ 的体积。

接下来确定一系列转运操作和炼油操作来实现给定的上层炼油计划, 同时对下层详细调度过程中涉及的多个目标进行优化。本文对SPEA2算法进行改进, 在SPEA2中引入极值归档集, 利用改进的MOGWO更新策略对其进行更新, 提出基于极值点的ESPEA2算法, 运用该算法对原油短期调度问题进行优化求解。

## 3 ESPEA2算法

SPEA2是Zitzler等[8]提出的一种多目标优化算法。ESPEA2算法是对标准SPEA2算法的改进, 具体体现为极值归档集的引入, 在性能上比SPEA2有所提高。

对于极值归档集来说主要包括更新和裁剪两个部分。1) 极值归档集更新: 本文采用MOGWO算法更新策略, 对极值归档集进行更新, 并与当前种群进行合并以增强全局搜索能力。2) 极值归档集裁剪: 利用余弦相似度对归档集进行裁剪操作, 减少非支配个体的数量, 以保证归档集中个体的多样性。

### 3.1 极值归档集

极值归档集用来存放某一维上最佳的非支配解, 有助于进一步增强算法求解能力。在每次迭代过程中同步进行更新, 并与非支配归档集合并, 进行下一次迭代。

### 3.1.1 生成极值归档集

极值归档集由在某一维上具有极值的非支配解集构成, 其大小上限为 $|E|_{\max} = \bar{N}$ 。在每次迭代过程中,  $E$ 的大小随着迭代次数不断变化, 主要分为两种情况。

1) 当 $|E| \leq \bar{N}$ 时, 极值归档集生成。

2) 当 $|E| > \bar{N}$ 时, 对极值个体进行删除, 直至 $|E| = \bar{N}$ ; 具体删除机制为计算与本次迭代理想点的余弦距离来对个体进行删除。

其中, 理想点的定义为

$$f_{\text{best}} = \{f_1^{\min}, f_2^{\min}, \dots, f_n^{\min}\}. \quad (13)$$

$f_{\text{best}}$ 为当前种群中最优的理想个体对应的目标向量值;  $n$ 为优化目标的总个数; 其中第 $i$ 维目标值由所有个体对应维度的最小值 $f_i^{\min}$ 构成。

计算两个个体之间的余弦相似度公式为

$$\cos(f_p, f_q) = \frac{\sum_{i=1}^n f_{p,i} \times f_{q,i}}{|f_p| \cdot |f_q|}. \quad (14)$$

其中,  $f_{p,i}$ 和 $f_{q,i}$ 分别表示个体 $p$ 和个体 $q$ 的第 $i$ 维目标值;  $|f_p|$ 和 $|f_q|$ 分别为目标向量 $f_p$ 和 $f_q$ 的模。其值越大, 表明方向与理想点越相似。依次选择与理想点相似度小的进行淘汰, 直至极值归档集大小 $|E| = \bar{N}$ 。

### 3.1.2 极值归档集更新

MOGWO算法优化过程主要由每代种群中最好的3个头狼( $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 和 $X_\sigma$ )来引导完成。在求解原油短期调度问题中引入灰狼优化算法思想, 并且采用改进的头狼选择策略, 对极值归档集进行更新。

个体(头狼)选择: 在每次迭代过程中计算当前理想点与每个非支配个体之间的欧氏距离, 如式(15)所示, 选择距离最小的3个个体作为本代最优解(头狼)。

$$|f_p - f_{\text{best}}| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (f_p(k) - f_{\text{best}}(k))^2}. \quad (15)$$

其中,  $f_p(k)$ 表示个体 $p$ 的第 $k$ 个目标的值;  $f_{\text{best}}(k)$ 表示理想点的第 $k$ 个目标值。

极值归档集采用MOGWO算法更新策略进行更新。狼群中追踪猎物模型为

$$\begin{cases} L_\alpha = |R_1 \cdot X_\alpha - X(t)|; \\ L_\beta = |R_2 \cdot X_\beta - X(t)|; \\ L_\sigma = |R_3 \cdot X_\sigma - X(t)|. \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot L_\alpha; \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot L_\beta; \\ X_3 = X_\sigma - A_3 \cdot L_\sigma. \end{cases} \quad (17)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}. \quad (18)$$

式(16)中,  $L_\alpha$ 、 $L_\beta$ 和 $L_\sigma$ 为头狼与其他成员之间的距离。 $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 和 $X_\sigma$ 分别为头狼 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\sigma$ 的位置向量。 $X(t)$ 是当前个体位置。 $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R_3$ 为随机向量, 计算公式为 $R_i = 2r_i, i \in \{1, 2, 3\}$ , 其中 $r_i$ 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。式(17)中,  $A_1$ 、 $A_2$ 和 $A_3$ 为不同的随机向量, 其计算公式为 $A_i = 2er_i - e, i \in \{1, 2, 3\}$ ,  $r_i$ 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数, 收敛因子 $e = 2 - 2t/t_{\max}$ 从2线性减小到0,  $t$ 表示当前迭代次数,  $t_{\max}$ 表示最大迭代次数。

### 3.2 编码

在使用遗传算法求解时, 首先对种群中的染色体进行编码。在本文中, 采用实数编码。一个染色体对应一个可行详细调度, 用 $G = \{g_1, \dots, g_r\}$ ,  $g_i \in [0, 1]$ 表示,  $r$ 代表一次可行调度的染色体长度。其结构如图2所示。

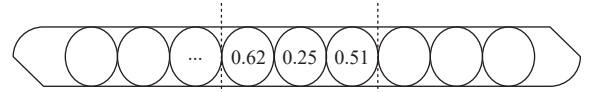


图2 染色体结构

Figure 2 Chromosome structure

其中每3项为一组指派, 分别表示选择的供油罐、蒸馏塔和管道转运速率。在调度过程中, 某个时刻管道可能处于停运状态, 为了提高效率, 每次转运尽可能多的原油, 染色体的长度计算为

$$r = 3 \sum_{d=1}^K \sum_{o=1}^M [\lceil S_{d,o} / \Lambda_{\min} \rceil] + 3l. \quad (19)$$

其中,  $\lceil * \rceil$ 表示向上取整;  $\Lambda_{\min}$ 表示供油罐的最小容量;  $l$ 是可设定整数常量, 表示调度过程中管道停运的次数。

### 3.3 解码

上述定义的每一个染色体对应一个指派, 解码过程为

$$\begin{cases} c = \lfloor |\Phi| \times g_{3i-2} \rfloor + 1; \\ d = \lfloor |D| \times g_{3i-1} \rfloor + 1; \\ v = \lfloor (|V| + 1) \times g_{3i} \rfloor. \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $i \in \{1, 2, \dots, (r/3)\}$ ;  $\lfloor * \rfloor$ 为向下取整;  $|*|$ 表示求集合大小。当 $V=0$ 时, 表示管道处于停运状态。假设在 $\tau$ 时刻, 炼油厂内的空罐集合 $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_6\}$ , 未完成炼油任务的蒸馏塔集合 $D = \{D_1, D_3\}$ , 管道转

运原油速率分别为 $V=\{V_1, V_2, V_3\}$ , 若第 $i$ 次指派对应的编码为 $(0.62, 0.25, 0.51)$ , 根据式 (20) 解码后,  $c=2, d=1, v=2$ , 即以速率 $V_2$ 向 $\Phi_2$ 中转运 $D_1$ 所需原油。

3.4 ESPEA2算法实现

为方便算法描述, 首先给出算法中符号的含义:  $P_t$ 表示第 $t$ 代种群,  $Q_t$ 表示第 $t$ 代非支配个体的集合;  $E_t$ 表示第 $t$ 代极值归档集。设种群 $P$ 大小为 $N$ , 最大迭代次数为 $t_{\max}$ 。ESPEA2算法具体步骤如下。

**步骤1** 初始化种群 $P_0$ 、非支配归档集 $Q_0$ 和极值归档集 $E_0$ , 进化代数 $t=0$ 。经过解码后得到 $N$ 个个体及其对应目标值。

**步骤2** 计算种群的所有个体的适应度, 与标准SPEA2算法的计算方法相同。

**步骤3** 通过环境选择构成非支配归档集 $Q_t$ ; 根据3.1.1节所述策略生成极值归档集 $E_t$ 。

**步骤4** 非支配归档集 $Q_t$ 通过交叉和变异等操作进行更新; 极值归档集 $E_t$ 根据3.1.2节的方法进行更新; 更新之后的 $Q_t$ 、 $E_t$ 经过环境选择进行合并, 生成下一代种群 $P_{t+1}$ 。

**步骤5**  $t=t+1$ ; 判断 $t > t_{\max}$ 是否成立, 若满足进行下一步, 否则转至步骤2。

**步骤6** 输出非支配归档集 $Q_t$ 中的Pareto最优解集。

ESPEA2算法的整体流程如图3所示。

4 算例分析

图4为某炼油厂的一个10 d炼油计划实例, 运用本文提出的算法对下层详细调度进行求解。本炼油厂有3个蒸馏塔 $D_1 \sim D_3$ , 炼油速率分别为333.3 t/h、291.7 t/h、625 t/h; 10个供油罐 $\Phi_1 \sim \Phi_{10}$ , 其初始信息如表1所示。管道开启一组、二组、三组泵对应的转运速率分别为840 t/h、1 250 t/h、1 370 t/h。不失一般性, 设对应原油转运的单位时间能耗 $\psi_m = \{1, 2, 3\}$ ; 原油驻留时间为6 h。

在本实例中, 除了供油罐中已有的原油供蒸馏塔使用, 为完成给定的炼油任务, 还需经过管道转运到厂内供油罐中的3种原油 (#1、#2和#3), 油量分别为25 992 t, 49 008 t和90 000 t。表1中体积最小的供油罐能够装的最大原油量为16 000 t, 则一个详细调度中的非空指派数最多为

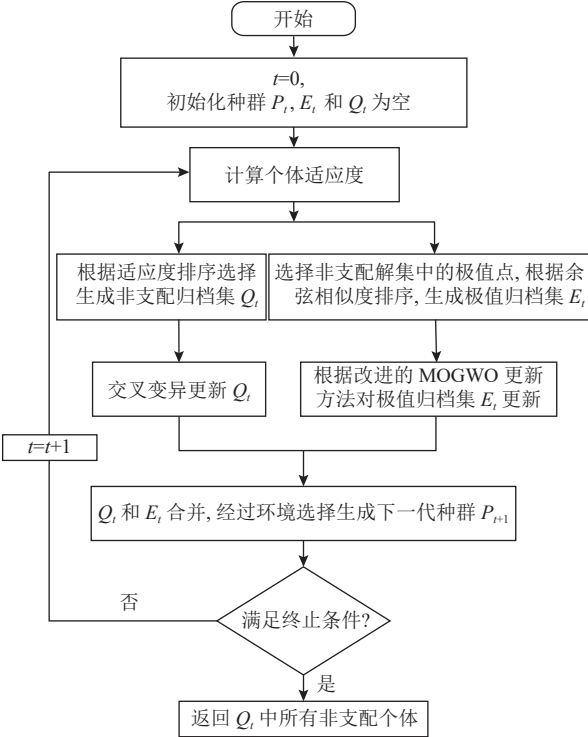


图 3 ESPEA2算法流程图  
Figure 3 Flow chart of ESPEA2 algorithm

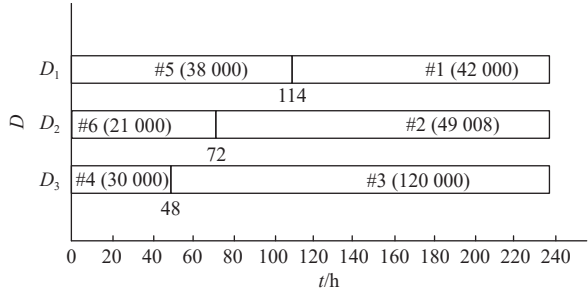


图 4 10 d炼油计划  
Figure 4 A ten-day refining plan

表 1 初始供油罐状态  
Table 1 Initial states of charging tanks

供油罐	容量/t	原油类型	油量/t
$\Phi_1$	16 000	#5	8 000
$\Phi_2$	34 000	#5	30 000
$\Phi_3$	34 000	#4	30 000
$\Phi_4$	34 000		
$\Phi_5$	34 000	#3	30 000
$\Phi_6$	16 000	#1	16 000
$\Phi_7$	20 000	#6	16 000
$\Phi_8$	16 000	#6	5 000
$\Phi_9$	16 000		
$\Phi_{10}$	30 000		

$$\lceil 25\,992/16\,000 \rceil + \lceil 49\,008/16\,000 \rceil + \lceil 90\,000/16\,000 \rceil = 12。$$

考虑管道可能停运的情况,取 $l=4$ ;则由式(19)可知,染色体长度 $\Gamma=48$ 。

用 $y$ 和 $x$ 分别表示原油 $i$ 和原油 $j$ 在供油罐和管道中发生一次混合产生的成本系数矩阵;设单个油罐成本系数及其切换成本系数分别为 $\phi=\rho=1$ 。

$$y = \begin{pmatrix} & o_1 & o_2 & o_3 & o_4 & o_5 & o_6 \\ o_1 & 0 & 11 & 12 & 13 & 10 & 15 \\ o_2 & 11 & 0 & 11 & 12 & 13 & 10 \\ o_3 & 12 & 11 & 0 & 10 & 12 & 13 \\ o_4 & 13 & 12 & 10 & 0 & 11 & 12 \\ o_5 & 10 & 13 & 12 & 11 & 0 & 11 \\ o_6 & 15 & 10 & 13 & 12 & 11 & 0 \end{pmatrix}; \quad (21)$$

$$x = \begin{pmatrix} & o_1 & o_2 & o_3 & o_4 & o_5 & o_6 \\ o_1 & 0 & 11 & 12 & 13 & 7 & 15 \\ o_2 & 10 & 0 & 9 & 12 & 13 & 7 \\ o_3 & 13 & 8 & 0 & 7 & 12 & 13 \\ o_4 & 13 & 12 & 7 & 0 & 11 & 12 \\ o_5 & 7 & 13 & 12 & 11 & 0 & 11 \\ o_6 & 15 & 7 & 13 & 12 & 11 & 0 \end{pmatrix}。 \quad (22)$$

为验证算法的性能,本文将ESPEA2算法与标准SPAE2、IBEA、NSGAI、NSGAIII和MOEA/D进行实验对比。为比较算法求解的多样性和收敛性,本文采用C指标和IGD指标对算法进行评价。

#### 1) C指标 (convergence-metric)。

该指标通过计算两个解集之间的覆盖率来衡量所对应的Pareto最优解的质量。定义为

$$C(A, B) = \frac{| \{ q \in B | \exists p \in A : p \text{ dominates } q \} |}{|B|}。 \quad (23)$$

其中, $A$ 、 $B$ 表示两个算法所求得的Pareto最优解集。 $C(A, B)$ 表示解集 $A$ 支配解集 $B$ 的比率。当 $C(A, B) > C(B, A)$ 时,表示解集 $A$ 的质量高于 $B$ 。特别地,当 $C(A, B) = 1$ 表示 $B$ 中所有解被 $A$ 中的某些解支配;当 $C(A, B) = 0$ 表示 $B$ 中没有解被 $A$ 中的解支配。

对于原油短期调度问题,算法采用不同种群规模和迭代次数进行实验对比。本文采用模拟二进制交叉和多项式变异,交叉和变异算子分布指数分别为 $\eta_1 = \eta_2 = 20$ ;交叉概率为0.9,变异概率为 $1/48 \approx 0.02$ ;实验环境为Intel (R) Core (TM) CPU 2.56GHZ 16.00RAM, Windows10。对于每组实验独立运行

30次求平均值。

5种算法的C指标如图5所示,黑色区域表示 $C(A, B)$ 的值,白色区域表示 $C(B, A)$ 的值,其中 $A$ 表示ESPEA2算法, $B$ 表示与之对比的算法。综合来看,ESPEA2求得的最优解集质量更高。

#### 2) IGD (inverted generational distance)。

反世代距离 (IGD) 通过计算真实Pareto面上的点到算法求得的个体之间的距离,对算法的收敛性和分布性进行评价。其值越小,算法的综合性能越好。该指标定义为

$$IGD(S, Q) = \frac{\sum_{s \in S} \theta(s, Q)}{|S|}。 \quad (24)$$

其中, $S$ 为均匀分布在真实Pareto面上的解集, $Q$ 是算法求得的解集。但是由于该问题真实Pareto前沿未知,因此在计算IGD指标时将所有实验运行得到的非支配解集作为近似Pareto前沿。 $\theta(s, Q)$ 为 $S$ 中个体 $s$ 到解集 $Q$ 的最小欧氏距离。

EPSEA2算法与其他5种算法的IGD指标对比结果如图6所示。从中可以看出,本文提出的ESPEA2的IGD指标较好,即算法的综合性能更优。因此,对于原油短期调度问题来说,该算法的多样性和收敛性也优于其他算法。

图7为种群规模为200,迭代次数为1 000的帕累托最优解集,其中圆圈大小表示能耗成本,颜色表示罐底原油混合成本,从中选取代表解与文献[5]的结果对比,如表2所示。其中H表示文献[5]获得的详细调度,H表示ESPEA2算法求得的可行调度,括号里面数值表示该目标优化的百分比。从表2可以看出,调度H0比文献[5]的结果更优,在其他性能指标不变的情况下,能耗成本有显著的改善,降低了 $(264-232)/264 \approx 12\%$ 。当厂内油罐充足时,可以选择调度H0使得其他成本尽可能小。图8为调度H0的详细调度甘特图,其中 $\Phi_1 \sim \Phi_{10}$ 表示供油罐, $V_1$ 和 $V_2$ 为管道转运原油速率。

在实际的炼油生产中,需要根据炼油厂具体情况选择合适的炼油计划。例如,当厂内油罐需要维护时,可以选择用罐少的调度策略以保证生产的持续进行。当对能耗要求较高时,则应优先从能耗少的调度策略中进行选择。

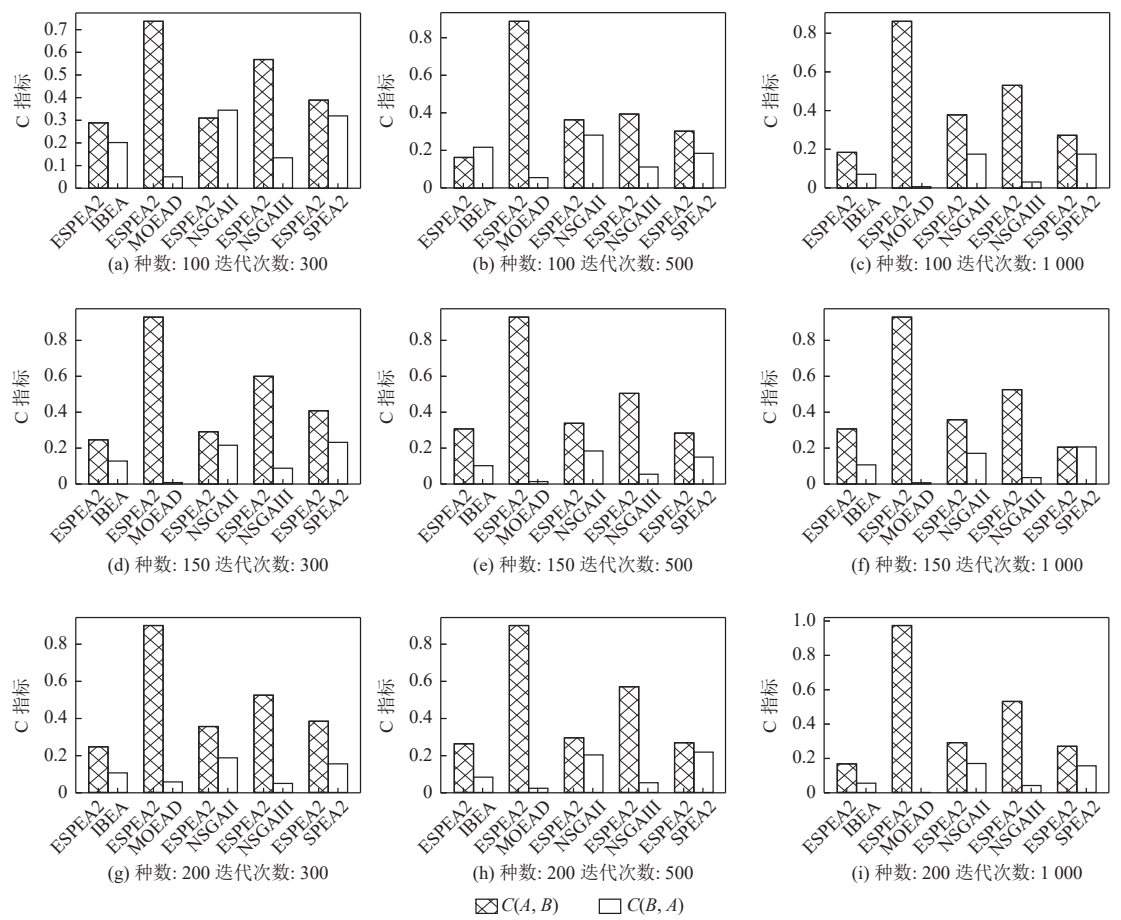


图5 ESPEA2与另外5种算法的C指标对比图

Figure 5 Comparison of C indicators among ESPEA2 and other five algorithms

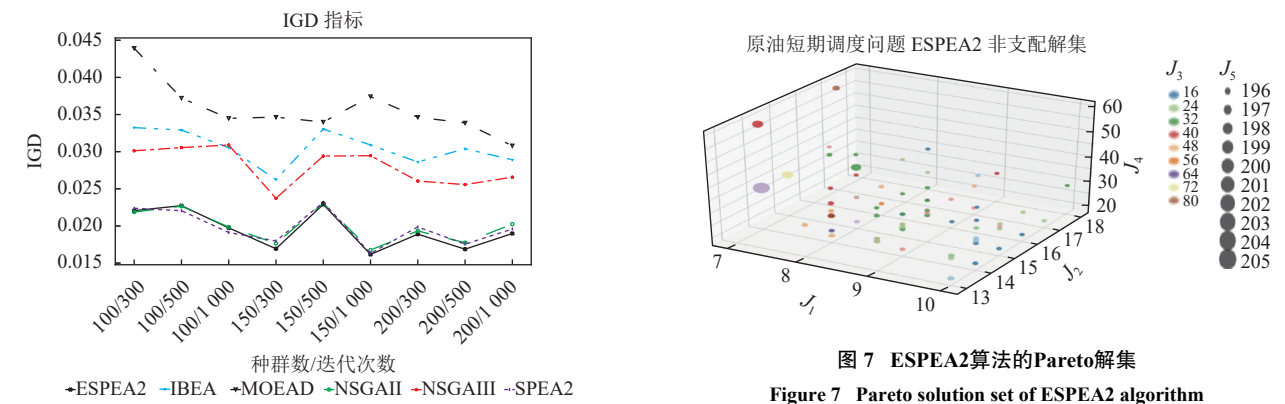


图6 不同算法IGD指标对比

Figure 6 Comparison of IGD indicators using different algorithm

表2 与文献[5]优化结果对比

Table 2 Comparison of optimization results with literature [5]

成本	$\bar{H}_0$	H0	$\bar{H}_1$	H1	$\bar{H}_2$	H2	$\bar{H}_3$	H3	$\bar{H}_4$	H4	$\bar{H}_5$	H5
$J_1$	10	10 (0%)	9	9 (0%)	9	9 (0%)	8	8 (0%)	8	8 (0%)	7	7 (0%)
$J_2$	13	13 (0%)	13	13 (0%)	13	15 (-13%)	13	13 (0%)	13	15 (-13%)	15	15 (0%)
$J_3$	20	20 (0%)	20	34 (-41%)	34	34 (0%)	51	42 (18%)	34	29 (15%)	59	34 (42%)
$J_4$	10	10 (0%)	35	20 (43%)	20	32 (-38%)	30	35 (-14%)	33	34 (-3%)	92	72 (22%)
$J_5$	264	232 (12%)	264	216 (18%)	264	196 (26%)	264	210 (20%)	264	262 (0.7%)	264	276 (-4%)

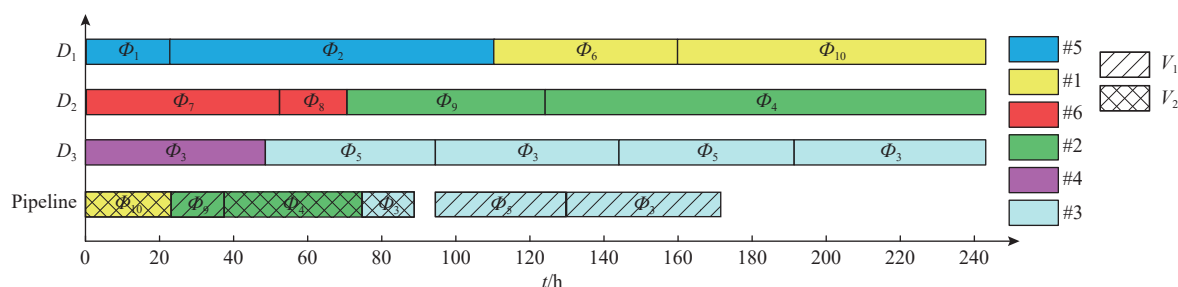


图 8 调度H0的甘特图

Figure 8 Gantt chart of schedule H0

## 5 结束语

针对原油短期调度问题, 本文基于已有文献提出的两层框架结构, 在上层炼油计划已知的情况下, 对下层详细调度中的多个目标进行优化。通过引入极值归档集并结合灰狼优化思想提出了基于极值点的强度帕累托算法 (ESPEA2), 提高了算法的收敛性和多样性。实验结果表明, 该算法在求解原油短期调度问题时表现良好, 能够获得更好的可行详细调度方案, 对炼油厂提高产能及降低能耗具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] FLOUDAS C A, LIN X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(11): 2109-2129.
- [2] WU N, CHU F, CHU C, et al. Short-term schedulability analysis of crude oil operations in refinery with oil residency time constraint using Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2008, 38(6): 765-778.
- [3] WU N, CHU C, CHU F, et al. Schedulability analysis of short-term scheduling for crude oil operations in refinery with oil residency time and charging-tank-switch-overlap constraints[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 8(1): 190-204.
- [4] WU N, CHU F, CHU C, et al. Short-term schedulability analysis of multiple distiller crude oil operations in refinery with oil residency time constraint[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2008, 39(1): 1-16.
- [5] HOU Y, WU N, ZHOU M, et al. Pareto-optimization for scheduling of crude oil operations in refinery via genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(3): 517-530.
- [6] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transac-*

tions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

- [7] WU N, LI Z, QU T. Energy efficiency optimization in scheduling crude oil operations of refinery based on linear programming[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 49-57.
- [8] ZITZLER E, LAUMANN S M, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm[R/OL]. TIK-report, 2001, 103: (2001-05).<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029>.
- [9] ZITZLER E, KÜNZLI S. Indicator-based selection in multiobjective search[C]// *Proceedings of the 8th International Conference On Parallel Problem Solving from Nature*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 832-842.
- [10] ZHANG Q, LI H. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(6): 712-731.
- [11] 孙宝凤, 任欣欣, 郑再思, 等. 考虑工人负荷的多目标流水线车间优化调度[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(3): 900-909. SUN Baofeng, REN Xinxin, ZHENG Zaisi, et al. Multi-objective flow shop optimal scheduling considering worker's load[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(3): 900-909.
- [12] LARRAÍN S, PRADENAS L, PULKKINEN I, et al. Multiobjective optimization of a continuous kraft pulp digester using SPEA2[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 143: 107086.
- [13] LIU X, ZHANG D. An improved SPEA2 algorithm with local search for multi-objective investment decision-making[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1675.
- [14] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 47: 106-119.
- [15] 邢怀玺, 吴华, 陈游, 等. 基于多目标灰狼算法的干扰资源多效能优化方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(10): 1990-1998. XING Huaixi, WU Hua, CHEN You, et al. Multi-efficiency optimization method of jamming resource based on multi-objective grey wolf optimizer[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(10): 1990-1998.

- [16] 李长安, 谢宗奎, 吴忠强, 等. 改进灰狼算法及其在港口泊位调度中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(1): 101-108.  
LI Chang'an, XIE Zongkui, WU Zhongqiang et al. Improved grey wolf algorithm and its application in port berth scheduling[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021,

53(1): 101-108.

- [17] ZHANG X, ZHANG Y, MING Z. Improved dynamic grey wolf optimizer[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(6): 877-890.

(责任编辑: 郑穗华)

(上接第115页)

- [10] ANDREA T, MANFRED G, PATRICK H. Securing home health care in times of natural disasters[J]. *Operations Research Spektrum*, 2011, 33(3): 787-813.  
[11] HIERMANN G, PRANDTSTETTER M, RENDL A, et al. Metaheuristics for solving a multimodal home-healthcare scheduling problem[J]. *Central European Journal of Operations Research*, 2015, 23(1): 89-113.  
[12] BERTELS S, FAHLE T. A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(10): 2866-2890.  
[13] DANTZIG G B, WOLFE P. Decomposition principle for linear programs[J]. *Operations Research*, 1960, 8(1): 101-111.  
[14] FEILLET D. A tutorial on column generation and branch-and-price for vehicle routing problems[J]. *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research*, 2010, 8(4): 407-424.  
[15] FEILLET D, DEJAX P, GENDREAU M, et al. An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints: application to some vehicle routing problems[J].

*Networks*, 2004, 44(3): 216-229.

- [16] LOACHIM I, GELINAS S, SOUMIS F, et al. A dynamic programming algorithm for the shortest path problem with time windows and linear node costs[J]. *Networks*, 1998, 31(3): 193-204.  
[17] LI J L, QIN H, BALDACCIO R, et al. Branch-and-price-and-cut for the synchronized vehicle routing problem with split delivery, proportional service time and multiple time windows[J]. *Transportation Research:Part E*, 2020, 140: 1-22.  
[18] BARNHART C, JOHNSON E L, NEMHAUSER G L, et al. Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs[J]. *Operations Research*, 1998, 46(3): 316-329.  
[19] ZHANG Z Z, LUO Z X, QIN H, et al. Exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows and combinatorial auction[J]. *Transportation Science*, 2019, 53(2): 427-441.  
[20] SOLOMON M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. *Operations Research*, 1987, 35(2): 254-265.

(责任编辑: 郑穗华)